

JAERI - M  
89-016

簡易イオンビーム発生器  
— 運転とイオン照射実験 —

1989年2月

青木 康・永井 士郎

JAERI-Mレポートは、日本原子力研究所が不定期に公刊している研究報告書です。  
入手の間合わせは、日本原子力研究所技術情報部情報資料課（〒319-11茨城県那珂郡東海村）あて、お申しこしてください。なお、このほかに財団法人原子力弘済会資料センター（〒319-11茨城県那珂郡東海村日本原子力研究所内）で複写による実費頒布をおこなっております。

JAERI-M reports are issued irregularly.

Inquiries about availability of the reports should be addressed to Information Division, Department of Technical Information, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-11, Japan.

© Japan Atomic Energy Research Institute, 1989

---

編集兼発行 日本原子力研究所  
印刷 (株)原子力資料サービス

簡易イオンビーム発生器

— 運転とイオン照射実験 —

日本原子力研究所高崎研究所研究部

青木 康・永井 士郎

(1989年1月27日受理)

簡易イオンビーム発生器 (TIBI, Takasaki Ion Beam Implanter) は、現在高崎研究所で進められている放射線高度利用研究の先行研究を行うために、昭和62年10月に設置したものである。気体及び固体からのイオンの発生および200 keVまでのイオンの加速が可能であり、 $-196^{\circ}\text{C}$ および室温から $1250^{\circ}\text{C}$ までの範囲の温度でイオン注入できる試料チェンバーを付属している。

本報告書は、簡易イオンビーム発生器の設置までの経緯、装置の概要、運転要領および安全対策、種々のイオン発生と加速試験の結果、本装置を用いた注入実験の予備的な実験結果、さらに、今後の研究課題をまとめたものである。

Takasaki Ion Beam Implanter (TIBI)

- Operation and Experiments -

Yasushi AOKI and Siro NAGAI

Department of Research

Takasaki Radiation Chemistry Research Establishment

Japan Atomic Energy Research Institute

Watanuki-cho, Takasaki-shi, Gunma-ken

(Received January 27, 1989)

TIBI (Takasaki Ion Beam Implanter) was installed at Takasaki Radiation Chemistry Research Establishment of JAERI in October 1987 with principal purpose to carry out preliminary studies preceding to the research program for Advanced Radiation Technology (ART) which is now in progress. This implanter can generate various ions from both gaseous and solid materials and accelerate them up to 200 keV. In the irradiation chamber attached to it, samples can be ion-implanted in high vacuum at  $-196^{\circ}\text{C}$  and at different temperatures from room temperature to  $1250^{\circ}\text{C}$ .

This report describes in the first place the circumstances until the installation, the outline, the operational procedure, and the safety systems of TIBI and then our results of test for production and acceleration of ions and of preliminary experiments using this implanter. Finally, a view is given of ion implantation to organic polymers.

Keywords: Ion implanter, Ion Implantation, Molecular Ion, Silicon, Aluminium, Depth Profile, Organic Compound

## 目 次

1. 設置の経緯	1
2. 概 要	2
2.1 概 要	2
2.2 構 成	2
3. 運転要領	5
3.1 操 作	5
3.2 異常時の対策	10
3.2.1 非常停止	10
3.2.2 ポンプの自動停止	10
3.2.3 イオン源の交換	10
4. 安全対策	11
4.1 X線シールドキャビネット	11
4.2 X線遮蔽	11
4.2.1 X線発生機構	11
4.2.2 X線発生強度	12
4.2.3 X線遮蔽計算	12
4.3 インターロック	14
4.4 有害なイオン化物質	14
4.5 装置運転上の対策	15
5. 性能試験結果	15
5.1 イオンビーム発生試験	15
5.2 オープン温度測定	15
6. イオン照射実験	16
6.1 概 要	16
6.2 分子イオン注入効果の研究	16
7. 今後の課題 ～有機ポリマーへのイオン注入効果に関する研究～	18
7.1 有機ポリマーへのイオン注入における問題点	18
7.2 イオンのエネルギー損失機構と有機分子に対する効果	19
7.3 有機ポリマーへのイオン注入の研究課題	22
8. おわりに	23
謝 辞	24
参考文献	25

## Contents

1. Circumstances until installation .....	1
2. Outline .....	2
2.1 Outline .....	2
2.2 Structure and components .....	2
3. Operational procedure .....	5
3.1 Operation manual .....	5
3.2 Procedures on accidents .....	10
3.2.1 Emergency stop .....	10
3.2.2 Automatic stop of pump unit .....	10
3.2.3 Reset of ion source .....	10
4. Safety systems .....	11
4.1 X-ray shield cabinet .....	11
4.2 Shielding of X-ray .....	11
4.2.1 Production mechanism of X-ray .....	11
4.2.2 Intensity of X-ray to be produced .....	12
4.2.3 Calculation of shielding .....	12
4.3 Interlock .....	14
4.4 Hazardous materials as ion source .....	14
4.5 Other remarks .....	15
5. Results of performance tests .....	15
5.1 Ion beam generation .....	15
5.2 Temperature of oven .....	15
6. Ion irradiation experiments .....	16
6.1 Outline .....	16
6.2 Study on implantation effect of molecular ions .....	16
7. A view of ion implantation to organic polymers .....	18
7.1 Problems .....	18
7.2 Ion degradation mechanism and ion irradiation effects .....	19
7.3 Future .....	22
8. Postscript .....	23
Acknowledgement .....	24
References .....	25

## 1. 設 置 の 経 緯

わが国における放射線照射利用の研究は、原研・高崎研究所（以下高崎研）を中心にして進められ、 $\gamma$ 線と電子線の利用については、すでに多くの基礎的知見が蓄積され、実用化も進められてきた。この一方で、これら放射線の照射利用の限界が明確になり、今後の高度先端科学技術の一環として照射利用を推進するためには、この分野においても新たな展開を図ることが必要となってきた。このような観点から、高崎研では、イオンビームを用いる放射線高度利用研究計画が立案され、昭和61年度からスタートした。この高度利用研究においては、サクロトロンを含む4基のイオン照射装置を用いて、宇宙、核融合、バイオ技術、新機能材料等幅広い分野にわたる研究開発が進められる予定であり、現在、研究計画、研究体制、照射装置の製作、建屋建設等、計画実現のための準備が着実に進められている。

簡易イオンビーム発生器は、このような放射線高度利用研究のための一環として、現在計画されているそれぞれの分野の研究推進のために必要な基礎データの蓄積および本格研究に至るまでの先行的な研究を行うことを目的にして高崎研に設置された最初のイオン照射装置である。本装置の導入にあたっては、予算的な制約から、当初からリース加速器を前提にして、放射線高度利用研究推進室（当時ハイテック準備室）において準備が進められたが、松下電子工業（株）半導体事業本部の好意により、イオン注入装置が無償で原研に譲渡されることになった。この装置は、昭和49年に松下技研（株）（現在、松下電子工業（株）半導体事業本部東京研究所）に納入されたデンマーク Danfysik 社製の 350 keV イオン注入装置であり、松下電子工業では半導体へのイオン注入に使用されてきた。研究部では、この装置導入作業を推進室から引き継いだ後、移設作業や設置室の準備等受け入れに必要な作業を進めた。昭和62年9月には本体装置と付属品が搬入された後、日新電機（株）により据え付け・調整が行われた。昭和62年10月には、高崎研安全審査委員会で本装置運転に係わる安全性が確保できることが承認され、労働基準監督局への設置届提出後、昭和62年12月から利用を開始した。

その後研究部では、本簡易イオンビーム発生器による種々のイオンの発生テストを行いながら、運転のノウハウを取得するとともに、イオン注入実験を進めた。また、本装置設置の目的から、広く所内の利用に供することが重要と考えられたため、利用者に対する積極的な協力を行ってきた。昭和62年末には、本装置の愛称を所内から募集し、応募の中から、TIBI (Takasaki Ion Beam Implanter) を採用した。本簡易イオンビーム発生器とその運転に必要な付属品は松下電子工業（株）から譲渡されたが、X線シールドキャビネットおよび高電圧電源冷却用チラーは据え付け時に新設した。また、照射チェンバーには、当初は譲渡されたウエハー照射用容器を使用した。低温および高温での照射可能な超高真空排気装置付チェンバーを製作し、昭和63年9月には、イオン注入時の真空度向上を図るために、イオン源部ターボ分子ポンプを更新し、照射チェンバー直前の短管に液体窒素シュラウドを設置した。

## 2. 概 要

### 2.1 概 要

本簡易イオンビーム発生器は、Danfysik社製の350keVイオン注入装置を最大定格エネルギー200keVに改造した後設置したものである。

イオン源で生成したイオンを10kVあるいは20kVの電圧で引出し、90度偏向のマグネットで質量分離した後、必要とするイオンを最大200keVのエネルギーまで加速し、四極子レンズにより集束して真空容器内の試料に照射する。Fig.1に本装置の主要構成機器の配置を示す。主要構成機器は、イオン源、分析用電磁石、加速管、収束レンズ、走査管、ターゲットチェンバーおよび真空排気系であり、イオン源から集束レンズまでの部分はX線シールドキャビネット内に設置されている。

本装置の主要な性能と仕様は次の通りである。

(1) ビームエネルギー

引出電圧： 10,20kV  
トータルエネルギー： 10~200keV

(2) ビーム電流

$Ar^+$  >10  $\mu A$  (at 100keV)  
他のイオンについても  $\mu A$  オーダー

(3) ビームスキャン巾

10 cm max (X, Y)

(4) 最大照射野

2 cm  $\phi$

(5) イオン化合物質

気体、固体 (oven, 1700  $^{\circ}C$  max)

(6) 質量分析能力

1~250 AMU,  $M/\Delta M=500$

(7) 真空度

イオン源, ビームライン, ターゲットチェンバーとも  $1 \times 10^{-6}$  Torr 以下

(8) 電動発電機

誘導電動機： 3  $\phi$  4 W, 50/60Hz, 380/220V, 7.5kW 1台  
交流発電機： 3  $\phi$  4 W, 50/60Hz, 380/220V, 5kW 1台

### 2.2 構 成

本装置は、次の各機構成部品及び機器から構成される。高電圧部および大地部の一部はX線シ



ールドキャビネット内に設置されている。

(1) X線シールドキャビネット

X線遮蔽と高電圧に対する安全を図るためのキャビネットである。床面は鉄板（6 mm 厚）、壁と天井は鉄板（3.9 mm 厚）と鉛板（2 mm 厚）の合板である。天井に蛍光灯4基、室内に本体装置の他、室内空調器が設置されている。

(2) 電動発電機

接地側の電動機と高電位側の発電機を絶縁棒で接続して、15 kVAの電力をイオン源、イオン引出部、分析用電磁石および加速管の高電圧部各装置に供給する。

(3) イオン源

熱陰極ホローカソード型であり、固体用オープンを内蔵している。

(4) 質量分析器

二重焦点型90度偏向、半径500 mm電磁石で、電源とコイルは接地側のオイル循環ポンプによる絶縁オイルにより冷却される。

(5) 加速管

絶縁ガラス管とアルミニウム製電極を多段に接続した構造を持ち、各電極には0～180 kVの電圧が均等に印加される。イオンビームは引出し電圧最大20 kVと合わせて最大200 kVの電圧で加速される。

(6) 集速レンズ（静電三重四極子レンズ）

四個組の円筒状電極（四極子）3組から構成され、各四極子には対称モード高電圧が印加される。

(7) エレクトロニクス・電源用ラック

データ伝送・受信を行うテレメータ部、加速電源、三重四極子レンズ電源およびビーム走査電源よりなる。

(8) ビーム走査レンズ

水平(X)および垂直(Y)走査用の平行偏向板をイオンビームの方向に対して互いに直角になるよう配置、構成されている。高電圧の印加は、1台の共通電源とX及びY走査用の独立した2台の対称高電圧増幅器による。

(9) ターゲットチェンバー

照射室と予備排気室により構成され、照射室内の低温および高温試料台で、液体窒素温度および室温から1250℃までの任意の温度でイオンの照射を行うことが可能である。

(10) 真空排気装置

本装置の排気系は、次の4系統の真空排気ポンプとこれらに必要なゲートバルブから構成されている。

イオン源部：ターボ分子ポンプ（330 l/s）+ ロータリーポンプ 1組

ビームライン部：ターボ分子ポンプ（170 l/s）+ ロータリーポンプ 1組

ターボ分子ポンプ（270 l/s）+ ロータリーポンプ 1組

ターゲットチェンバー：ターボ分子ポンプ（280 l/s）+ ロータリーポンプ 1組

このうちイオン源用のターボ分子ポンプは油冷式であり、電磁石電源およびコイルとともに

循環絶縁オイルにより冷却される。ビームライン部の2台のターボ分子ポンプは水冷式であり、市水の循環により冷却される。ターゲットチェンバーのターボ分子ポンプは空冷式である。

#### (1) 液体窒素シュラウド

イオン注入時にターゲットチェンバー内の高真空度を維持するために、イオン源から流れてくる中性のイオン源ガスをトラップする目的で、ビームドリフトチューブとターゲットチェンバーの間の短管に液体窒素シュラウドが取り付けられている。

#### (2) 制御盤

制御盤は、主および補助電源ブレーカーと、本体装置各構成機器のコントロール部より構成される。制御盤の構成をFig. 2に示す。

##### 1) イオン源制御 (Ion Source Control)

イオン源へのガス導入、イオン源フィラメント電圧および電流、アノード電圧および電流、磁場電流およびオープン温度の制御を行う。これらの信号はX線シールドキャビネット内のエレクトロニクス・電源用ラックのテレメータ装置を通して各部へ伝送される。

##### 2) アインツェルレンズ (Einzel Lens)

イオン源から引き出されたビームを収束するレンズの電圧を制御する。

##### 3) 分析電磁石 (Analysing Magnet)

分析電磁石に供給される電流を制御する。この電流と引き出し電圧 (10kVあるいは20kV) をもとにして、分析後の加速管中央におけるイオンの質量数が質量計算機 (Mass Calculator) により積算され、制御盤のマスメータに表示される。

##### 4) プローブエレクトロニクス (Probe Scope)

加速管に入るビームのプロファイルをモニターする。

##### 5) 加速電圧 (Acceleration Supply)

質量分析されたイオンの加速管内における電圧の制御を行う。加速電圧の最大値は引出し電圧が20kVの時180kV、また引き出し電圧が10kVの時190kVである。加速電圧は接点つき200kVフルスケールのメータに表示される。

##### 6) 三重四極子電圧 (Quadrupole Supply)

ビーム収束用の四極子レンズへ印加する電圧を制御する。

##### 7) ビーム走査増幅器 (Beam Sweep Amplifier)

XおよびY方向走査用の2組の静電平行板に印加する電圧を制御する。走査振幅と直流オフセット電圧 (中性粒子トラップ用バイアス電圧) を制御する。

##### 8) 電流積算器 (Current Integrator)

ビーム電流をA単位で表示する。注入電荷量を設定するための手動設定器は現在使用していない。

### 3. 運 転 要 領

#### 3.1 操 作

##### (1) 照射準備

◦ 装置設置室（以下設置室という）へ入室の際は、上履きに履き替え（土足厳禁）、入室記録簿に記帳し、個人被曝線量計着用を確認する。

◦ 運転主任者へ連絡し、運転記録用紙と終了チェックリストを受け取る。

◦ イオン化物質を接続（或は装着）するか、またはそれが接続されていることを確認する。

◦ 照射用試料をターゲットチェンバーにセットするか、または試料がセットされていることを確認する。

##### (2) 初期状態の確認

◦ 運転操作を始める前に、各種電源、冷却系およびエレクトロニクス類のスイッチ等に対して、以下の項目の確認を行う。

- ① 設置室壁にある電源ボックス内のブレーカーのうち、本体装置、チラー、空調器およびターゲットチェンバー用のブレーカーがONとなっていること。
- ② ターボ分子ポンプ冷却用市水配管のバルブが、開であること。
- ③ 冷却用絶縁油のガラス製タンク内のオイルの量が適量であること。
- ④ エレクトロニクス類のスイッチが、制御盤上は全OFF、電源ラック（シールドキャビネット内）は全ON、高電圧（HV）ケージ電源パネル上、全OFFであること。
- ⑤ アース棒がHVケージのシールドケースに掛かっていること。
- ⑥ ビームライン部およびターゲットチェンバー部の真空ポンプが正常に動作していること。
- ⑦ ベビコンの圧が5～7 kg/cm<sup>2</sup>であること。
- ⑧ シールドキャビネット内の室内空調器の運転ランプが点灯していること。

◦ 復帰できない異常の認められた場合には運転主任者へ連絡する。

##### (3) 電動発電機の始動

◦ 冷水ポンプスイッチ（窓側東壁）をONとする。この時、チラー貯水槽の下にある水圧計で水圧が2 kg/cm<sup>2</sup>であることを確認する。

◦ 制御盤の油循環ポンプ（Circ.Pump）スイッチ、キースイッチ、電動発電機（Motor Gen.）スイッチおよびエレクトロニクス（Electronics）スイッチをONにする。

##### \*注意

(i) 油タンクを見て冷却油が循環していることを確認する。

(ii) 冷却水を流さずに油循環ポンプを運転すると、油温が上昇し、イオン源ターボ分子ポンプが停止する。また、分析電磁石電源およびコイルを焼損する原因となる。

(iii) キースイッチをONにしなければ、電動発電機スイッチはONにすることはできない。

##### (4) イオン源排気および真空チェック

◦ HVケージ電源パネルのVac.PumpsスイッチをONにする。

○数分後にイオン源ターボ分子ポンプ (TMP1) の回転が100%であることをポンプ電源のメータで確かめる。

○イオン源ポンプバルブ (PV1) をOPENにする。

○イオン源部の真空計をONにする。

○HVケージ電源パネルのTelemeterスイッチをONにする。

○制御盤右上にあるビームライン部の2つの真空計 (ペニング真空計および電離真空計) をONにする。

○しばらくして (通常, 30分~1時間後) イオン源部およびビームライン部の真空度が $1 \times 10^{-6}$  Torrになっていることを確認した後, ゲートバルブ (GV1, GV2) をOPENにし, 各部の真空度が $1 \times 10^{-6}$  Torr以上に保たれていることを確認する。

○ターゲットチェンバー内にあるファラデーカップをアパーチャーの後ろにセットする。

○ターゲットチェンバーの真空度 $1 \times 10^{-6}$  Torr以上であることを確認した後, ゲートバルブ (GV3) をOPENにし, 各部の真空度を確認する。

#### (5) イオン源の始動

○イオン源部, ビームライン部 (2カ所) およびターゲットチェンバー部の真空計の読みを運転記録用紙に記録する。

○制御盤左にあるIon Source Control Panel (イオン源制御盤) の全てのボリュームが反時計回り一杯であることを確認した後, X線シールドキャビネット内のHVケージ電源パネルのFan, Electronics, MPSおよびIon SourceスイッチをONにする。

○イオン化ガス用のポンベの元栓をOPENにし, その減圧弁の2次圧メータが約 $1 \text{ kgf/cm}^2$ であることを確かめる。

○イオン源制御盤のFilament電流計を見ながらFilament電流が約10AになるまでFilamentボリュームを回し, 15~20分間のウォームアップを行う。また, MagnetおよびAnodeボリュームにより, イオン源部のMagnet電流を約10mA, Anode電圧を250Vに設定する。

○Filament電流を上げ電流が安定するまで待つ。同時にイオン源部の真空計の読みが一定になるまで待つ。この操作を繰り返して最終的に28A程度とする。

#### \*注意

イオン源によっては28Aまで上がらない場合があるが, そのときは最大電流で以下の操作を行う。

○Gas Inletボリュームを回し, Anode電圧が下がりAnode電流が上昇してくるのを確認する (イオン源点灯)。Anodeボリュームを最大にし, イオン源点灯状態を保ちつつ, Gas InletボリュームでVacuumメータの読みが60以下になるように調節する。

#### \*注意

このVacuumメータの表示には絶えず注意する。真空度が低下した場合にはイオン源ターボ分子ポンプが停止している可能性がある。

○固体イオン源からイオンを発生させる場合には, Ovenボリュームを操作する (Fig. 6 参照)

○ イオン源制御系の各パラメータおよび各真空計の読みを運転記録用紙に記録する。

(6) イオンの引出・分析

○ 制御盤左のMass Calculator 582, Oscilloscope (S54AR) の電源スイッチおよびControl PanelのProbe AスイッチをONにする。

○ HVケージ内電源パネルのScanner およびH.V. SuppliesスイッチをONにする。

＊注意

アース棒がHVケージのシールドケースに掛かっていることを確認する。また、引出し電圧をかけたときに、イオン源周囲には高電圧がかかるので感電しないよう十分に注意すること。

○ 引出し電圧を10kVあるいは20kVに上げる。

○ Mass Calculator 582の質量数表示用デジタルメータを見ながらAnalysing Magnet電流をCoarseボタンで調整する。

○ 次いで、Einzel Lensポリューム (<27KV) とAnalysing MagnetのFineポリュームにより、ビームプロファイルがオシロスコープ画面のほぼ中央部に現れるようにする。

○ ビームプロファイルが画面上で強度・位置ともに安定したところで、ビームパラメータを運転記録用紙に記録する。

(7) イオンの加速およびビーム調整

アース棒をシールドキャビネット壁のアース棒用フックに掛け、シールドキャビネットから出て扉を閉め、シールドキャビネット内蛍光灯のスイッチをOFFにする。

＊注意

アース棒、扉、蛍光灯は、いずれもインターロック系に含まれているので、上記の操作を行わなければイオンは加速できない。

○ 制御盤右のAcceleration Supply, Current Integrator 552 A, Beam Sweep Amplifier 561 およびQuadrupole Supply 720の電源スイッチをONにする。

＊注意

Acceleration SupplyのスイッチをONする前にビームライン部の真空度が $1 \times 10^{-6}$  Torr以上であることを確かめる。真空度が低い場合には後段加速電圧は昇圧できるが、加速管内で放電短絡し電源を損傷させる原因となる。

○ Current Integrator 552 Aのカウンターのプリセットを10000.0に合わせ、その下にある黒のリセットボタンを押し、START/STOPスイッチをSTARTにする。

○ Acceleration Supplyの電圧計を見ながらVoltageポリュームを回して電圧を設定する。この後段加速電圧とイオンが最終的にもつエネルギーは次の関係にある。

$$\text{イオンエネルギー} = \{ (\text{引出し電圧}) + (\text{後段加速電圧}) \} \times (\text{電荷})$$

○ 制御盤の右横にある定電圧電源により、ファラデーカップのサプレッサー電極にD.C. 100Vを印加する。

○ Current Integratorの電流計を見ながら、

a. Beam Sweep Amplifier 561のHorizontal (H.) およびVertical (V.) のDeflectionの2つのOFFSETポテンショダイヤル

- b. Quadrupole SupplyのLens 1の2つのポテンショダイヤル (Focus, Astigmatism)
- c. Analysing MagnetのFine ボリューム

を調整して電流が最大でかつ安定に得られるようにする。

＊注意

これらのビームパラメータはイオンの質量に依らず、同じ電荷で同じエネルギーなら殆ど同じと考えてよいので、対応する過去の記録を参照して、イオンビームをターゲット位置に導くとよい。

- 運転記録用紙にビームパラメータおよび真空度を記録する。

(8) 照射時間の設定

◦ Beam Sweep Amplifier 561のAmpl.ポテンショダイヤル (Horizontal および Vertical) を設定する。このときCurrent Integratorの電流計の読みとファラデーカップの口径10mm  $\phi$  から電流密度 (Coulomb/cm<sup>2</sup>・sec) を見積る。

＊注意

10mm  $\phi$  の面積は0.785 cm<sup>2</sup>である。

- 希望照射量と電流密度から照射時間を決める。
- Current Integrator 552AのSTRT/STOPスイッチをSTOPにする。

(9) 照 射

- ファラデーカップを動かしてイオンビームが試料に当たるようにする。
- Current Integrator 552AのSTAR/STOPスイッチをSTARTにする。(照射開始)
- 照射中は、Oscilloscope S54ARで見られるビームプロファイルが画面上で同じ位置同じ強度で観測されていることを頻繁に確認し、もしずれているようなら、Einzel LensおよびAnalysing MagnetのFineボリュームを調整する。
- 制御盤右にある照射時間のデジタル表示が照射終了予定時間になったら、Current Integrator 552AのSTRT/STOPスイッチをSTOPにする。(照射終了)

＊注意

照射中、何らかの原因で照射を中断するときには、Current IntegratorのスイッチをSTOPにする前に、必ずそれまでの照射時間をチェックする。

(10) 装置停止

- ファラデーカップを動かしてイオンビームの電流値を測定できる位置に持ってくる。
- Current Integrator 552AのSTART/STOPスイッチをSTARTにする。ビーム電流、ビームパラメータおよび真空度を運転記録用紙に記録する。
- START/STOPスイッチをSTOPにする。
- Acceleration Supplyの電圧を徐々に0まで下げ、電源をOFFにする。
- Current Integrator 552AのMAINスイッチをOFFにする。
- Beam Sweep Amplifier 561のH. およびV.のAmpl.ダイヤルをそれぞれ0および5にし、またOFFSETダイヤルを0にして、電源をOFFにする。
- Quadrupole Supply 720のLens 1のFocusおよびAstigmatismダイヤルをそれぞれ、0および5にして、電源をOFFにする。

- 制御盤左のイオン源制御盤の Gas Inlet ポテンショダイヤルを 0 にし, Magnet ボリュームおよび Anode ボリュームを反時計方向に一杯に回す。
- Oscilloscope S54AR の画面からビームプロファイルが消えてから, Analysing Magnet の Coarse DOWN ボタンを押し, 電流計の読みが 0 で, 質量数表示が最低になるようにする。
- Einzel Lens ボリュームを 0 にする。
- Filament ボリュームをゆっくりと 0 まで下げる。
- Mass Calculator 582, Oscilloscope S54AR および Control Panel の Probe A スイッチを OFF とする。
- シールドキャビネットの蛍光灯を ON として扉を開け, アース棒を HV ケージのシールドケースに掛ける。
- HV ケージ電源パネルの引出し電圧を 0 とし, H.V. Supplies スイッチおよび Scanner スイッチを OFF にする。
- イオン源制御電源用のスライダックが 0 になっていることを確認する。もしなっていない場合には, 手で制御棒を軽く回してスライダックを 0 にする。
- HV ケージ電源パネルの Ion Source スイッチ, MPS スイッチおよび Electronics スイッチ, MPS スイッチおよび Electronics スイッチを OFF にする。
- ゲートバルブ GV1 を CLOSE にする。

(1) 運転終了

- ゲートバルブ GV2, GV3 を CLOSE にする。
- イオン源が十分に冷却されたことを確認した後, HV ケージ電源パネルの Fan スイッチを OFF にする。
- イオン源部の真空度が  $1 \times 10^{-6}$  Torr 以上であることを確認した後, イオン源部真空計 (HV ケージ内) を OFF にし, ポンプバルブ PV1 (HV ケージ内) をしめ, Vac. Pump および Telemeter スイッチを OFF にする。

\*注意

- イオン源部の真空度が上がっていない場合は, イオン化ガス導入用ニードルバルブが閉まっていないことがある。その場合には, ニードルバルブ用制御棒を手で軽く回してニードルパイプを閉める。
- HV ケージ電源パネルのスイッチが全て OFF であることを確認する。
- 制御盤左にある Electronics スイッチ, Motor Gen. スイッチ, Circ. Pump スイッチおよびキースイッチを OFF にする。
- 制御盤上のスイッチが真空計を除いて全て OFF であり, 全てのボリュームが 0 または 5 であることを確認する。
- 冷水ポンプのスイッチおよびブレーカー (窓側東壁) を OFF にする。
- イオン源部のターボ分子ポンプ (TMP1) のクイックカップリングを外してポンプのリークを行う。
- 終了チェックリストを作成する。

## (12) 運転主任者へ連絡

- 運転主任者へ連絡し運転記録用紙と終了操作チェックリストを運転主任者へ提出する。また、運転中に気付いた点等を報告する。
- 運転主任者は最終真空度を記録し真空計をOFFにする。

## 3.2 異常時の対策

## 3.2.1 非常停止

火災、地震、装置の暴走などの理由で、装置を緊急に停止する必要があるときは、制御盤あるいはシールドキャビネット内の非常停止ボタンを押す。MAINのブレーカーがOFFになり装置は停止する。次いで運転主任者へ連絡し、運転記録用紙にその旨を記録する。運転主任者は区域管理者へ連絡し、区域管理者は必要に応じて研究部長に報告する。

## 3.2.2 ポンプの自動停止

本装置に取り付けられた3台のターボ分子ポンプ(TMP 1, 2, 3)には、冷却水、冷却油に対して温度スイッチが設けてあり、一定の温度(24℃)以上になるとポンプは自動的に止まり、十分に冷えない限り再度ONにすることはできない。

真空度が異常に悪くなった場合にはターボ分子ポンプが自動停止した恐れがある。以下の手順でチェックする。まず、照射中であるときには、『3.1 操作』の照射終了、装置停止の項にしたがって、装置を停止する。次に、停止したポンプの位置に応じてGV1, GV2, GV3を閉めて真空度の悪い領域を隔離し、次の項目の確認を行う。

- ① 冷却水、冷却油が流れていること。
- ② チャラー貯水槽およびその出口の温度が15℃以下であること。
- ③ キャビネット内の空調器が動作していること。

以上の確認をし、異常の認められた項目に対処した結果、復帰できた場合には運転記録用紙にその旨を記録し、また復帰できない場合には運転主任者に連絡する。

## 3.2.3 イオン源の交換

例えば、フィラメント電圧が十分に(～4V)あるのに拘らず、フィラメント電流が上がらない場合には、フィラメントの交換が必要である。この場合、フィラメントだけを交換するのではなく、イオン源を交換することになる。また、フィラメントに限らず、イオン源の他の部分の動作が異常である場合にも、イオン源の交換が必要である。

その場合には、まず照射中であるときには、『3.1 操作』の照射終了、装置停止の項にしたがって、装置を停止する。次にゲートバルブGV1をCLOSEする。また、異常の内容を運転記録用紙に記録する。その後イオン源が十分に冷えたことを確認し、イオン源部の真空計をOFFにし、ポンプバルブPV1をCLOSEにし、Vac. PumpスイッチをOFFにする。次に、ターボ分子ポンプ(TMP1)をリークし、さらにイオン源部およびレンズチェンバー内をリークする。

リークが済んだら、イオン源を装置から取り外して、予備のイオン源を取り付ける。イオン源



の3つの電極間の導通およびこれらの電極とイオン源本体との間の絶縁をテスターでチェックする。また、新しく取付けたイオン源の番号を運転記録用紙に記録する。

取り付けた後は、チャンバーのリークバルブを閉め、ポンプバルブPV1を開き、Vac.PumpスイッチをONにする。新イオン源はフィラメントのエージングが必要であり、真空度が $1 \times 10^{-6}$  Torr 以上になったらエージングを行う。要領としては、まず、Filament電流を6Aにして、再度真空度が $1 \times 10^{-6}$  Torr になるまで待ち、 $1 \times 10^{-6}$  Torr になったら、Filament電流を10Aにして、また $1 \times 10^{-6}$  Torr の真空度が得られるまで待つ。最後に、13~15Aでもう一度同じ操作を行う。

## 4. 安全対策

この簡易イオンビーム発生器は、イオン源からターゲットチャンバーに至るまでが密閉構造になっているためイオンが外部に漏れることはない。従って、本装置に関わる安全対策として考慮すべき対象は、主としてイオンの加速にともなって発生する高エネルギー電子に基づく2次X線と、イオンの発生および加速・制御に必要な高電圧である。

### 4.1 X線シールドキャビネット

X線と高電圧に対する対策として、高電圧部、加速管部および加速管下流の電子学電源用ラックを含む120cmの大地部ビームラインはX線シールドキャビネット内に設置されている。また、加速電源がONの場合には、このシールドキャビネット出入口上にある表示灯が加速電源印加中であることを示す。

一方、X線シールドキャビネットおよびシールドキャビネット外に設置されている装置構成部品は全て第一種アースに接続されておりアース電位にあるのでこれらに対しては特別の安全対策は要しない。

### 4.2 X線遮蔽

本装置の設置室を電離放射線障害防止規則の第15条に規定する放射線照射室に相当するものとみなし、この部屋は管理区域に設定されている。従って、X線シールドキャビネット外部における漏洩X線の線量率は、同条で規定する $2 \text{ mrem/h}$ に対応する、 $2 \text{ mR/h}$ の $1/10$ 以下とすることとし、この基準に対して以下のような遮蔽計算を行い、さらに、装置運転中にGMサーベイメータにより外部放射線の線量率の測定も行った。

#### 4.2.1 X線発生機構

装置運転時に発生する放射線には重荷電粒子（イオンビーム）、電子線（熱電子、二次電子な

の3つの電極間の導通およびこれらの電極とイオン源本体との間の絶縁をテスターでチェックする。また、新しく取付けたイオン源の番号を運転記録用紙に記録する。

取り付けた後は、チェンバーのリークバルブを閉め、ポンプバルブPV1を開き、Vac.PumpスイッチをONにする。新イオン源はフィラメントのエージングが必要であり、真空度が $1 \times 10^{-6}$  Torr 以上になったらエージングを行う。要領としては、まず、Filament電流を6 Aにして、再度真空度が $1 \times 10^{-6}$  Torr になるまで待ち、 $1 \times 10^{-6}$  Torr になったら、Filament電流を10 Aにして、また $1 \times 10^{-6}$  Torr の真空度が得られるまで待つ。最後に、13~15 Aでもう一度同じ操作を行う。

## 4. 安全対策

この簡易イオンビーム発生器は、イオン源からターゲットチェンバーに至るまでが密閉構造になっているためイオンが外部に漏れることはない。従って、本装置に関わる安全対策として考慮すべき対象は、主としてイオンの加速にともなって発生する高エネルギー電子に基づく2次X線と、イオンの発生および加速・制御に必要な高電圧である。

### 4.1 X線シールドキャビネット

X線と高電圧に対する対策として、高電圧部、加速管部および加速管下流のエレクトロニクス電源用ラックを含む120 cmの大地部ビームラインはX線シールドキャビネット内に設置されている。また、加速電源がONの場合には、このシールドキャビネット出入口上にある表示灯が加速電源印加中である事を示す。

一方、X線シールドキャビネットおよびシールドキャビネット外に設置されている装置構成部品は全て第一種アースに接続されておりアース電位にあるのでこれらに対しては特別の安全対策は要しない。

### 4.2 X線遮蔽

本装置の設置室を電離放射線障害防止規則の第15条に規定する放射線照射室に相当するものとみなし、この部屋は管理区域に設定されている。従って、X線シールドキャビネット外部における漏洩X線の線量率は、同条で規定する2 mrem/hに対応する、2 mR/hの1/10以下とすることとし、この基準に対して以下のような遮蔽計算を行い、さらに、装置運転中にGMサーベイメータにより外部放射線の線量率の測定も行った。

#### 4.2.1 X線発生機構

装置運転時に発生する放射線には重荷電粒子（イオンビーム）、電子線（熱電子、二次電子な

ど) および重荷電粒子や電子線が物質に衝突して発生する X 線がある。この内、重荷電粒子や電子線は、装置が密閉構造であるため漏れ出すことがない。また一般に、重荷電粒子による X 線発生は極めて微弱であり無視できる。従って漏洩放射線の遮蔽はもっぱら高速電子により発生する X 線に対して行うことになる。

装置運転中に発生する電子としては、次に示す 4 種類の電子が考えられる。

- ① イオン源部でイオンを作るために発生させる熱電子
- ② イオン源部で発生したイオン (+ に荷電) の相手として生じる一次電子
- ③ イオンが加速されてターゲット物質に衝突する際に発生する二次電子
- ④ イオンが加速の途中で加速管内壁等に衝突して発生する二次電子

電子の数は多い順に①, ②, ③, ④であるが、①および②は高電圧陽極内部で発生するため加速されることはなく X 線発生源とはならない。また、③は大地部に捕捉されるため陽極へ加速されることはない。従って、X 線源となりうる電子は④のみであり、その個数はイオン電流値に対し比較にならないほど小さい値になる。またその X 線発生機構は、イオンビームが加速管内を通過するとき、イオンの一部が加速管内壁に衝突して発生した二次電子が、加速管内の陽極方向に加速され高速電子となり、この高速電子が加速管内壁や分析スリット等の陽極物質と衝突して制動 X 線を発生することによる。

#### 4.2.2 X 線発生強度<sup>1)</sup>

一般に、X 線発生量はビームエネルギーおよびビーム電流に対して次のような関係がある。

$$R \propto V^{3.4} \times I$$

ここで、R は X 線線量率 (R/h), V はビームエネルギー (V), I はビーム電流 (A) である。

本装置と同様のイオンビーム発生器を用いて、200 kV, 1150  $\mu$ A で運転した場合に測定された、X 線発生源から 1 m の位置での X 線線量率は、0.05 ~ 7.76 mR/h の範囲に分布した。従って、このイオンビーム発生器の最大 X 線線量率は、8.0 mR/h と評価することができる。この値と上式とから、200 kV, 10  $\mu$ A が定常運転定格である本装置の最大能力を 200 kV, 50  $\mu$ A とした場合の、本装置の最大 X 線線量率は、発生源から 1 m の距離で、0.35 mR/h と評価できる。

また、X 線シールドキャビネットを構成する遮蔽材である鉛 (Pb) および鉄 (Fe) の 200 kV イオンビーム発生器からの X 線に対する半価層 T については、X 線強度の実測値から、それぞれ、

$$T (\text{Pb}) = 0.2 \text{ mm}$$

$$T (\text{Fe}) = 1.1 \text{ mm}$$

の値が得られた。

#### 4.2.3 X 線遮蔽計算

X 線遮蔽計算は、次式に基づいて行った。

$$I = I_0 (1/L)^2 \times (1/1000)^N \times B \times \exp(-\mu T)$$

ここで、I は遮蔽後の X 線線量率、 $I_0$  は線源から 1 m 離れた位置での X 線線量率 (mR/h), L は線源から測定点までの距離 (m), N は反射回数, B はビルドアップファクターで  $(1 + \mu T)$  として計算したもの、 $\mu$  は線吸収係数 ( $\text{cm}^{-1}$ ), T は遮蔽材の厚み (cm) である。

イオンを最大加速電圧 200kV で加速した場合、発生する高速二次電子のエネルギーは加速管内での発生部位に依存するため、その平均エネルギーは 200kV より小さくなる。しかしながら、その平均エネルギーを実験で確かめることは困難である。従って、線吸収係数の値を計算するのに際し二次電子はすべて 200kV であると安全サイドに仮定した。線吸収係数は、質量吸収係数と密度との積で計算でき、鉛および鉄の質量係数はそれぞれ、 $1.70 \text{ cm}^2/\text{g}$  および  $0.17 \text{ cm}^2/\text{g}$ 、また密度はそれぞれ  $11.3 \text{ g/cm}^3$  および  $7.8 \text{ g/cm}^3$  であるから、線吸収係数はそれぞれ  $19.20 \text{ cm}^{-1}$  および  $1.32 \text{ cm}^{-1}$  となる。

以上の値を用いて、X線発生源から最も近く、かつ実測においてもX線線量率の最も高かったシールドキャビネットの表面でのX線線量率を、直接到達するX線、ビームダクト内で一回散乱したX線および他の3側面と天井および床で反射したX線の和として計算した結果、約  $5.0 \times 10^{-3} \text{ mR/h}$  となった。

ここで、上記遮蔽計算に関して、以下の検討を行った。

- ① 用いた最大線量率  $0.35 \text{ mR/h}$  という値は最大定格  $10 \mu\text{A}$  に対して  $50 \mu\text{A}$  の値を用いており、5倍の安全係数を見込んでいる。
- ② 散乱に対する減衰係数 ( $1/1000$ ) は NBS Handbook 76 NCRP 26 を根拠にしており、 $500 \text{ keV}$  以下のX線に適応でき、妥当な値である。
- ③ NBS Handbook NCRP 49の、 $200 \text{ kV}$  の電子線加速器から発生するX線の遮蔽データから、 $2 \text{ mm}$  の鉛の線吸収係数が約  $32 \text{ cm}^{-1}$  であり、これが、X線の実効エネルギー  $140 \text{ keV}$  に対応するものである事がわかる。

一方、実測値から求めた半価層  $T(\text{Pb}) = 0.20 \text{ mm}$  および  $T(\text{Fe}) = 1.10 \text{ mm}$  は、実効エネルギー  $75 \text{ keV}$  および  $73 \text{ keV}$  に対応する。

従って、X線の実効エネルギーを  $75 \text{ keV}$  とすれば、そのエネルギーでの線吸収係数は、それぞれ、 $\mu(\text{Pb}) = 34.8 \text{ cm}^{-1}$ 、 $\mu(\text{Fe}) = 5.85 \text{ cm}^{-1}$  となり、これら、ビルドアップ係数を含んだ遮蔽係数  $(1 + \mu) \exp(-\mu T)$  を計算すると、上記遮蔽計算で用いた遮蔽係数は鉛に対しては 13.8 倍の、また、鉄に対しては 2.7 倍の安全係数が見込まれていることになる。しかし、一般には、遮蔽厚が増加するのに従いX線のエネルギーが相対的に高エネルギー側にシフトすることから、この安全係数は最大安全係数であると思ふべきである。

また、全二次電子が  $200 \text{ kV}$  とした場合の実効エネルギー  $140 \text{ keV}$  について計算すると安全係数はそれぞれ、鉛に対して 8.5 倍、鉄に対しては 1.1 倍となり、これらの値は、最小安全係数を与えることになる。

以上の検討結果から、この遮蔽計算では、10倍～30倍程度の安全係数が確保されていると考えられる。従って、X線シールドキャビネットの外部の全ての点について、X線の線量率は、放射線障害防止法に「放射線発生装置」として取り扱う事を定めている外部放射線の線量率の下限值  $0.06 \text{ mR/h}$  以下であると考えられる。

また、実際にGMサーベイメータにて、本装置でアルゴンイオン  $200 \text{ keV}$ 、 $17 \mu\text{A}$  の出力時に、シールドキャビネット外周のX線測定を行ったところ、いずれの位置においてもX線の線量率がバックグラウンド値 ( $0.025 \text{ mR/h}$ ) 以下である事が確認された。

### 4.3 インターロック

本装置は最大200kVの高電圧を発生し、また、イオンビームの加速にともなってX線を発生するので、安全確保のため以下のインターロックが設けられている。なお、インターロック配線図はFig.3に示す。

#### (1) 非常停止

制御盤左上の非常停止押しボタンまたはシールドキャビネット内出入口左上の非常停止押しボタンを押すことにより、制御盤の主(MAIN)ブレーカーがトリップする。これにより、電動発電機は停止し、高電圧部(HVケージ)電源、後段加速電源、油サーキュレーションポンプがOFFとなる。但し、制御盤の補助(AUX)ブレーカーはトリップしないので、ビームラインおよびターゲットチェンバーの真空ポンプセットは運転が持続される。

#### (2) 後段加速電源インターロック(I)

後段加速電源は、(イ)シールドキャビネット出入口ドアが開いている、または(ロ)アース棒がキャビネット内の所定の位置に掛かっていない、あるいは(ハ)キャビネット内蛍光灯が点灯している、のいずれかであるとONにすることができない。また、後段加速電源運転出力中に上記(イ)、(ロ)、(ハ)が発生すると、この電源はトリップする。

#### (3) 後段加速電源インターロック(II)

制御盤右のAcceleration Supplyのパネル上の後段加速電圧計にはメーターリレーがついており、出力電圧が設定電圧(赤針により設定し、引出し電圧が10kV、20kVに対応して設定電圧をそれぞれ190kV、180kVにする)を越えると後段加速電圧はトリップする。同加速電源出力中にトリップした場合には、一旦ダイヤルを0に戻してからでなければ電磁接触器が回復しないので、出力することはできない。

#### (4) キースイッチ

制御盤左上のキースイッチは、その接点を加速電源の電磁開閉器の励磁コイル回路および電動発電機の電源投入回路にシリーズに挿入し、このスイッチをOFFにすると、(イ)電動発電機、(ロ)後段加速電源はいずれもONにすることができない。また、運転中にキースイッチをOFFにすると、上記(イ)(ロ)、はいずれも停止する。

### 4.4 有害なイオン化物質

発生イオンの種類によっては有害物質をイオン化物質として用いる可能性があるため、真空ポンプからの排気ガスに対する配慮が必要である。このため、第1に、4台のロータリーポンプの排気口にビニールホースを接続して設置室窓下に設けた排気口から排気ガスを室外に放出する。第2に、あるイオンに対して複数のイオン化物質が考えられる場合には、無害で安全なイオン化物質の使用を優先する。例えば、 $B^+$ イオン発生用のイオン化物質には、固体のBおよび $B_2O_3$ (無害)、気体の $BCl_3$ および $BF_3$ (有害)等があるが、この場合には、より安全な固体を優先して用いることとする。やむを得ず、有害物質を使用する場合には、予め十分な安全対策を講ずることとする。

#### 4.5 装置運転上の対策

装置室への入室に際しては、個人被曝線量計の着用を義務づけ、室内にはGMサーベイメータを常備する。また、本装置のユーザーは、予め運転管理担当者から運転訓練を受け、運転要領に従って利用することとする。

本装置の管理は、労働安全衛生法（電離放射線障害防止規則）に定められるエックス線作業主任者の資格を有する者が行う。

### 5. 性能試験結果

本簡易イオンビーム発生器を運転活用していく上で必要である2種の性能試験を行った。第1は、イオンビームの発生試験であり、種々のイオンについてターゲット上で得られるイオンビーム電流の測定を行った。また、第2は、イオン源のオープン温度の測定である。

#### 5.1 イオンビーム発生試験

現在までに発生試験を行ったイオンは $\text{He}^+$ 、 $\text{Ar}^+$ 、 $\text{N}^+$ 、 $\text{N}_2^+$ 、 $\text{C}^+$ 、 $\text{O}^+$ 、 $\text{CO}^+$ 、 $\text{F}^+$ 、 $\text{Fe}^+$ 、 $\text{Ni}^+$  および $\text{Al}^+$  イオンであり、これまでに本簡易イオンビーム発生器で発生実績のある各イオンの最大電流値をTable 1に示す。また、Fig. 4にはアルゴンおよび鉄イオンについて調べたイオンビーム電流値の加速電圧（引出し電圧20kVを含む）依存性について示している。図からわかるように、ターゲット上で得られるイオンビーム電流は、加速エネルギー100keV以上では、おおむねTable 1に示した最大電流値が得られるが、それ以下では加速電圧の減少にともなってビーム電流も減少する。この傾向は他のイオンについても全く同じである。

#### 5.2 オープン温度測定

本簡易イオンビーム発生器で用いられている911A型イオン源の構成図をFig. 5に示す。固体イオン化物質を用いてイオンを発生するためにオープンが組み込まれているが、本簡易イオンビーム発生器は運転中にオープン温度を直接モニターすることができない。しかしながら、オープン加熱のために流す電流（オープン電流）値はモニターできるので、オープン電流を変化させながらクロメル-アルメル熱電対を用いてオープン内温度の測定を行った。なお、測定はイオン源ガスを導入しない場合について行った。得られた結果をFig. 6に示す。オープンの温度は、オープン電流30Aで約1200℃迄上昇させることができ、電流に対して、ほぼ直線的に増加することが分かった。また、電流設定後、オープン内の温度が一定値を示すまでに、最低30~40分かかることも確かめることができた。

#### 4.5 装置運転上の対策

装置室への入室に際しては、個人被曝線量計の着用を義務づけ、室内にはGMサーベイメータを常備する。また、本装置のユーザーは、予め運転管理担当者から運転訓練を受け、運転要領に従って利用することとする。

本装置の管理は、労働安全衛生法（電離放射線障害防止規則）に定められるエックス線作業主任者の資格を有する者が行う。

### 5. 性能試験結果

本簡易イオンビーム発生器を運転活用していく上で必要である2種の性能試験を行った。第1は、イオンビームの発生試験であり、種々のイオンについてターゲット上で得られるイオンビーム電流の測定を行った。また、第2は、イオン源のオープン温度の測定である。

#### 5.1 イオンビーム発生試験

現在までに発生試験を行ったイオンは $\text{He}^+$ 、 $\text{Ar}^+$ 、 $\text{N}^+$ 、 $\text{N}_2^+$ 、 $\text{C}^+$ 、 $\text{O}^+$ 、 $\text{CO}^+$ 、 $\text{F}^+$ 、 $\text{Fe}^+$ 、 $\text{Ni}^+$  および $\text{Al}^+$  イオンであり、これまでに本簡易イオンビーム発生器で発生実績のある各イオンの最大電流値をTable 1に示す。また、Fig. 4にはアルゴンおよび鉄イオンについて調べたイオンビーム電流値の加速電圧（引出し電圧20kVを含む）依存性について示している。図からわかるように、ターゲット上で得られるイオンビーム電流は、加速エネルギー100 keV以上では、おおむねTable 1に示した最大電流値が得られるが、それ以下では加速電圧の減少にともなってビーム電流も減少する。この傾向は他のイオンについても全く同じである。

#### 5.2 オープン温度測定

本簡易イオンビーム発生器で用いられている911A型イオン源の構成図をFig. 5に示す。固体イオン化物質を用いてイオンを発生するためにオープンが組み込まれているが、本簡易イオンビーム発生器は運転中にオープン温度を直接モニターすることができない。しかしながら、オープン加熱のために流す電流（オープン電流）値はモニターできるので、オープン電流を変化させながらクロメル-アルメル熱電対を用いてオープン内温度の測定を行った。なお、測定はイオン源ガスを導入しない場合について行った。得られた結果をFig. 6に示す。オープンの温度は、オープン電流30Aで約1200℃迄上昇させることができ、電流に対して、ほぼ直線的に増加することが分かった。また、電流設定後、オープン内の温度が一定値を示すまでに、最低30~40分かかることも確かめることができた。

## 6. イオン照射実験

### 6.1 概要

現在この簡易イオンビーム発生器を用いて次の3テーマの研究が進行中である。

- 1) 分子イオン注入効果の研究
- 2) 高温超電導材料へのイオン照射効果
- 3) 薄膜材料へのイオン注入効果

1)は、 $N_2^+$ 、 $CO^+$ 等の分子イオンの注入による表面構造の変化を原子イオンの注入による変化と比較することを目的とした研究であり、シリコン、アルミニウムなど固体へのイオン注入実験と注入表面のオージェ電子分光法による研究を進めている。2)では、高温超電導材料として $Ba_2YCu_3O_7$ を取り上げ、現在高温超電導材料で問題とされている電流密度向上を目的として、種々のイオンを照射した試料の電気抵抗の温度変化の測定が行われている。また、3)は広く薄膜材料へのイオン注入効果を調べることを目的とした研究であり、現在はラングミュアー・プロジェクト(LB)膜へのイオン照射効果についての実験が行われている。このうち、1)の研究は、イオンビーム物理・化学過程の研究として研究部で、また、2)と3)の研究はそれぞれ、開発部・技術開発課、第2開発室で進められている。

### 6.2 分子イオン注入効果の研究

イオン注入とは、原子や分子をイオン化して加速し、固体表面に照射することにより、固体中に原子を注入する方法をいう。注入イオンとしては多くの場合、正の1価のイオンが用いられている。この理由は、イオン発生の容易さによるものであるが、他に、負イオン、多価イオンおよび分子イオンも注入イオンとして利用が可能である。しかしながら現状では、これら負イオン、多価イオンや分子イオンと固体表面との相互作用に関する知識は十分でなく、この相互作用に関して調べていくことは、これらのイオンの発生・制御技術とともに、今後の重要な研究課題であると思われる。このうち、分子イオン、とくに化学反応性をもつ分子イオンの利用は、固体表面との反応により固体表面を機能化することを図る上で将来重要になるものと予測される。

前述のように、簡易イオンビーム発生器を用いれば、 $N_2^+$ 、 $CO^+$ 等の分子イオンの発生は容易であり、また、これらのイオンの注入実験も可能である。この様な観点から、分子イオン注入効果の研究の一環として、簡易イオンビーム発生器を用いた $N_2^+$ 、 $CO^+$ 等分子イオンの注入実験を開始した。固体表面との化学反応を研究する目的には、より低エネルギーの分子イオンが有利と考えられるので、SIMS用イオン銃を用いた低エネルギー(0.5~5keV)イオンの注入実験を並行して進めることとした。ここでは、簡易イオンビーム発生器を用いて、 $N_2^+$ 、 $CO^+$ および対応する原子イオンをシリコンおよびアルミニウムに注入して、注入原子の分布を比較した予備的な結果を述べる。



固体試料として、シリコンウエハー（CZ-N型～0.5mm厚，＜100＞，S.E.H.製），アルミナ結晶（サファイア，15mm径，0.5mm厚，信光社製）および金属アルミニウム箔（純度99.999%，0.1mm厚）を用い， $N^+$ および $N_2^+$ ， $C^+$ ， $O^+$ および $CO^+$ をそれぞれ注入した。

実験手法は次の通りである。まず，簡易イオンビーム発生器からの質量分析されたイオンビーム（電流0.5～3.0  $\mu A$ ）を用いて，真空チェンバー（真空度 $<10^{-6}$  Torr）内に置いた試料にフルエンス約 $10^{17}$  Particles/cm<sup>2</sup>のイオン注入を室温で行った。分子イオン $N_2^+$ および $CO^+$ の加速エネルギーは200 keVとし，また，原子イオンの加速エネルギーは $N^+$  100 keV， $C^+$  85 keV， $O^+$  115 keVとした。注入試料をオージェ電子分光/2次イオン質量分析装置（AES-350S，ANELVA）を用いて，3 kVまたは4 kVの $Ar^+$ ビームでスパッターしながら，表面の元素濃度を3 keVの電子線によるオージェ電子分光法から求めた。なお，分析中の真空度は $1\sim 4\times 10^{-8}$  Torrであった。測定結果と比較するため，E-DEP-1コード<sup>2)</sup>を用いてLSS理論に基づく注入分布の計算を行った。

Fig. 7に，200 keVの $N_2^+$ イオンを注入したシリコンウエハーから観測したオージェ電子スペクトルの $Ar^+$ イオンによるスパッタリング時間に伴う変化を示す。スパッタリング初期にみられるスペクトル変化は， $Ar^+$ イオンにより表面が清浄化されることを意味している。スパッタリングの進行と共に注入されたN原子による信号強度は最大値を経て次第に減少する。このようなスペクトルからもとめた各元素のスパッタリング時間依存性をFig. 8に示す。横軸のスパッタリング時間は， $Ar^+$ イオンのビーム電流を一定に保っていることから試料の深さに対応すると考えてよい。この図から，注入されたN原子はシリコンウエハー中に，ある深さで最大濃度をもって分布していることが分かる。

Fig. 9には，200 keVの $N_2^+$ イオンを注入したシリコンウエハーおよびアルミナ単結晶中の注入N原子の深さ分布についての実験結果と計算値との比較を示した。比較に際して，分布の最大値を1に規格化し，最大値を示す深さが一致すると仮定した。これは，用いた $Ar^+$ イオンによる各固体表面の正確なスパッター速度が未知であるためである。従って，Fig. 9では注入原子の分布の広がりについてのだけの比較になるが，シリコンウエハーについては計算結果が比較的良好に実験結果を再現している。一方，実験で求めたアルミナ単結晶中のN原子の分布は，データのばらつきは大きいですが，計算値より多少広がった分布を示している事がわかる。このことから，アルミナ中に注入されたN原子の分布は理論計算において考慮されている物理的な過程だけでは決まらず，N原子のアルミナ中での拡散やAlまたはOとの化学反応を反映していることが考えられる。したがって，この分布の広がりの原因を明らかにするためには，今後イオン種や加速エネルギー等を変えて注入した試料についてのオージェ電子スペクトルの詳しい解析が必要である。

LSS理論に基づく計算では，200 keVの $N_2^+$ イオンは2個の100 keVの $N^+$ イオンと等価として取り扱っている。前述のように，シリコンウエハー中では実験と計算とが比較的良好に一致した。また，Fig. 10に示すように金属Al箔についての測定結果は，注入N原子の深度分布を見る限りにおいては， $N_2^+$ および $N^+$ イオンの注入は同じ結果を与える。このように，分子イオンを用いて原子イオンと同等な照射効果が得られるならば，分子イオンを用いることにより照射時間を半減させることができ，また装置の最低加速エネルギーを装置が本来持つ値の2分の1に

まで拡張することが可能である。しかしながら、多原子分子イオンの照射は原子イオンに比べてシリコン中により大きな損傷を引き起こすという報告<sup>3)</sup>や、試料によっては分子イオンを照射することにより、試料中でのボイドの生成が促進され、被照射試料に大きなスエリングが引き起こされるという報告<sup>4)</sup>もあり、分子イオンと原子イオンの照射は等価ではなく、むしろ両者の相違を明らかにすることが重要と思われる。

Fig. 11に、200 keVのCO<sup>+</sup>イオン、115 keVのO<sup>+</sup>イオンおよび85 keVのC<sup>+</sup>イオンをそれぞれ注入したシリコンウェハール中における元素濃度の深度分布を示す。まず、CO<sup>+</sup>イオンを注入したシリコンウェハール中では、C原子の分布とO原子の分布とが大きく異なることがわかる。すなわち、C原子の分布がはっきりとしたピークを示すのに対して、O原子の分布は広がっており、また、C原子とO原子とは等量注入されたはずであるのに、測定結果はO原子の注入量がC原子に比べ極端に小さいことを示している。次に、CとOをそれぞれ単独で注入した時の分布と比べると、CO<sup>+</sup>イオンを注入した場合には、C原子の分布もO原子の分布も広がっており、ピークの深さも単独照射の場合に比べて浅いところにある。これらの結果は、CO<sup>+</sup>分子イオン照射効果が深度分布に反映されることを示している。CO<sup>+</sup>イオンを照射したときのC原子およびO原子の深度分布の違いについては、Fig. 12に示すようにKangら<sup>5)</sup>によっても報告されている。その原因について、彼らは、注入原子の化学的性質の違いによる、と暫定的に理由付けをしているが、詳細については更に実験を積み重ねて行くことが必要である。

以上、N<sub>2</sub><sup>+</sup>およびCO<sup>+</sup>分子イオン注入実験からこれまでに得られた結果を述べた。CO<sup>+</sup>イオンの実験については、C<sup>+</sup>とO<sup>+</sup>イオンの逐次注入効果の実験がCO<sup>+</sup>分子イオンの注入効果の詳細を明らかにする上で重要であると思われる。

## 7. 今後の課題 ～有機ポリマーへのイオン注入効果に関する研究～

### 7.1 有機ポリマーへのイオン注入における問題点

イオン注入技術は、半導体への不純物ドーピングに代表されるように、加速イオンビームによる材料改質技術として認められてきている。その中で、これまでに有機ポリマーに対するイオン注入効果に関する研究も試みられてきているが<sup>6)</sup>現在のところ、成功例は数少ない。その理由として次のような要因が考えられる。

イオン注入を行った場合、一般に注入された材料中には表面から損傷領域-注入領域-元来の特性を持つ領域という3層構造が形成される。すなわち、イオンビーム照射により注入効果と同時に損傷効果が材料にもたらされる。従って、損傷効果が大きい材料では、注入効果は活きてこない。そこで、不純物を注入された半導体では、高温(数100-1200℃)熱処理により損傷領域の回復を行っている。しかしながら、有機ポリマーは、一般に耐熱性に問題があり、さらには損傷領域で起こる現象が化学結合の変化に基づく低分子化合物生成およびそれらの放出等といった回復不可能な不可逆的变化であるため、半導体の場合と同様な手法では、イオン注入技術

まで拡張することが可能である。しかしながら、多原子分子イオンの照射は原子イオンに比べてシリコン中により大きな損傷を引き起こすという報告<sup>3)</sup>や、試料によっては分子イオンを照射することにより、試料中でのボイドの生成が促進され、被照射試料に大きなスエリングが引き起こされるという報告<sup>4)</sup>もあり、分子イオンと原子イオンの照射は等価ではなく、むしろ両者の相違を明らかにすることが重要と思われる。

Fig. 11に、200 keVのCO<sup>+</sup>イオン、115 keVのO<sup>+</sup>イオンおよび85 keVのC<sup>+</sup>イオンをそれぞれ注入したシリコンウェハ中における元素濃度の深度分布を示す。まず、CO<sup>+</sup>イオンを注入したシリコンウェハ中では、C原子の分布とO原子の分布とが大きく異なることがわかる。すなわち、C原子の分布がはっきりとしたピークを示すのに対して、O原子の分布は広がっており、また、C原子とO原子とは等量注入されたはずであるのに、測定結果はO原子の注入量がC原子に比べ極端に小さいことを示している。次に、CとOをそれぞれ単独で注入した時の分布と比べると、CO<sup>+</sup>イオンを注入した場合には、C原子の分布もO原子の分布も広がっており、ピークの深さも単独照射の場合に比べて浅いところにある。これらの結果は、CO<sup>+</sup>分子イオン照射効果が深度分布に反映されることを示している。CO<sup>+</sup>イオンを照射したときのC原子およびO原子の深度分布の違いについては、Fig. 12に示すようにKangら<sup>5)</sup>によっても報告されている。その原因について、彼らは、注入原子の化学的性質の違いによる、と暫定的に理由付けをしているが、詳細については更に実験を積み重ねて行くことが必要である。

以上、N<sub>2</sub><sup>+</sup>およびCO<sup>+</sup>分子イオン注入実験からこれまでに得られた結果を述べた。CO<sup>+</sup>イオンの実験については、C<sup>+</sup>とO<sup>+</sup>イオンの逐次注入効果の実験がCO<sup>+</sup>分子イオンの注入効果の詳細を明らかにする上で重要であると思われる。

## 7. 今後の課題 ～有機ポリマーへのイオン注入効果に関する研究～

### 7.1 有機ポリマーへのイオン注入における問題点

イオン注入技術は、半導体への不純物ドーピングに代表されるように、加速イオンビームによる材料改質技術として認められてきている。その中で、これまでに有機ポリマーに対するイオン注入効果に関する研究も試みられてきているが<sup>6)</sup>現在のところ、成功例は数少ない。その理由として次のような要因が考えられる。

イオン注入を行った場合、一般に注入された材料中には表面から損傷領域-注入領域-元来の特性を持つ領域という3層構造が形成される。すなわち、イオンビーム照射により注入効果と同時に損傷効果が材料にもたらされる。従って、損傷効果が大きい材料では、注入効果は活きてこない。そこで、不純物を注入された半導体では、高温(数100-1200℃)熱処理により損傷領域の回復を行っている。しかしながら、有機ポリマーは、一般に耐熱性に問題があり、さらには損傷領域で起こる現象が化学結合の変化に基づく低分子化合物生成およびそれらの放出等といった回復不可能な不可逆的变化であるため、半導体の場合と同様な手法では、イオン注入技術

の展開を望むことはできない。

また、有機ポリマーにイオン注入を行った場合、実際に何等かの注入効果が得られるのか否か、また、もし注入効果があるとすれば、どのような形で得られ、どのような期待ができるのかということが体系的に明確にされていない。一つには、従来の研究においてイオンビームの有機物に与える効果をイオンの飛跡に沿った円筒状の高密度電子励起現象に基づくものであると考えてきたところにその根本的な原因があると思われる。確かにイオンビーム照射効果においては、高密度電子励起現象は最重要研究課題であるが、イオン注入を考えた場合には物質中でのイオンの減速過程におけるエネルギー損失機構の変化も考慮することが重要であると考えられる。

## 7.2 イオンのエネルギー損失機構と有機分子に対する効果

Fig. 13に、Northcliffeら<sup>7)</sup>の計算によるアルミニウムを標的にした場合の種々のイオンのエネルギー損失量 (MeV/(mg/cm<sup>2</sup>) 単位) をイオンのエネルギー (MeV/amu 単位) の関数として表したものを示す。Fig. 13は、イオンが減速していく過程におけるエネルギー損失率の変化、つまり堆積エネルギー量の変化のみを示しているが、従来の阻止能理論に基づけばその機構、即ちエネルギー移行の形態はイオンのエネルギーと共に次のように変化する<sup>8)</sup>。

荷電粒子が物質中を光速に近い速度で進んでいく場合には、イオンは標的核との相互作用により電磁波を放出 (いわゆる制動放射) してエネルギーを損失していく過程が主要な過程である。その後減速し、イオンの速度がほぼ  $0.99c$  ( $c$ : 光速) 以下になると、標的原子中の電子との衝突による電子系へのエネルギー付与が主過程となり、この過程はイオンの速度が標的原子のもっとも結合の弱い電子の速度になるまで続く。比較的イオンのエネルギーが低いところでは、入射粒子が重いか軽いかによって電子系とのエネルギーの受渡しの状況が若干異なってくる。つまり重荷電粒子の場合には、電子系にエネルギーを受け渡す最終段辺りで荷電交換の過程が重要になってくる。また、この電荷交換相互作用により、イオンは物質内を進行する速度に応じた平衡電荷を帯び、速度が減少するのにしたがって平衡電荷は徐々に中性化に向かうと考えられている。更に速度が減少し、イオンが物質内で停止する直前では、入射イオン (または中性化された粒子) と物質との相互作用はラザフォード型またはビリヤード・ボール型の弾性衝突過程が重要となり、やがてイオンは初期に有した運動エネルギーを全て失って物質内で停止する。以上がイオンの減速過程におけるエネルギー損失機構の変化を定性的に簡単に説明したものである。

次に、これまでに実験的に調べられてきた有機物に対するイオン照射効果について、いくつかの例を述べる。Fig. 14に、LaverneとSchuler<sup>9)</sup>によりベンゼン溶媒から放射線分解生成物として発生する水素分子の収量をイオンのエネルギーを変化させて調べられた結果について示す。収量は、通常放射線化学で用いられているG-値 (この場合100 eV吸収当りの生成水素分子数) で表されている。彼らは、種々のイオンについて、イオンのエネルギーを変えて得られる水素の収量の変化から、あるエネルギー減少 ( $E, E - \Delta E$ ) 間で起こる水素発生収量をその微分値として求め、各エネルギー  $E$  に対してプロットしている。図からわかるように、従来より放射線分解の生じ難いと考えられていたベンゼン溶媒から高速電子照射で得られる値よりも1オーダー高い水素の収量がイオン照射により得られている。しかしながら、イオンの速度がかなり高いと

ころでは高速電子による値に漸近している。ここで用いられているイオンのエネルギーから考えて、これらの結果はベンゼン溶媒中の電子系へのエネルギー付与が主となる領域の化学変化であり、前者の結果はイオンのつくる高密度電子励起現象によるものと考えられ、後者は、イオンの速度が非常に高い場合には電子励起の空間密度は高速電子照射の場合と余り変わらないことを示していると解釈できる。

この事は、さらに LaVerne ら<sup>10)</sup> により行われた水中での  $\text{HO}_2 \cdot$  ラジカル生成に関する実験でより明確になる。水中における  $\text{HO}_2 \cdot$  ラジカルの生成収量は電子線あるいは  $\gamma$  線では殆ど無視できる程度に小さく、このラジカルは高密度励起効果により初めて生成すると考えてよい。この事をもちいて、彼らは  $\text{HO}_2 \cdot$  ラジカルの微分収量を測定し、この収量をエネルギー付与量のうち高密度励起領域（トラックコア部）に付与する分だけを考慮して算出した単位長さ当りのエネルギー付与量 ( $\text{LET}_c$ ) に対してプロットした (Fig. 15)。Fig. 15 より、イオンの種類に依らずトラックコア部へのエネルギー付与量だけで、即ち電子励起の高密度状態だけにより、 $\text{HO}_2 \cdot$  ラジカルの収量は  $\text{LET}_c$  の増加とともに大きくなるのがわかる。

Burns ら<sup>11)</sup> は、シクロヘキサン溶媒に種々のイオンを照射したときに得られる水素、シクロヘキセン（2重結合生成）、ビスシクロヘキシル（2量体生成）等の主生成物の収量を線エネルギー付与 ( $\text{LET}$ ) の関数として測定し、各生成物の収量の変化を拡散動力学モデルで説明することを試みた。Fig. 16 にその結果を示す。彼らは、得られた生成物の収量の変化を十分に説明することはできなかったが、ホットアトムを経由する過程と励起分子を経由する過程との比較から、励起分子を経る過程がイオン照射により起こる化学反応の主要な過程であることを示唆した。Fig. 16 中の破線で示された曲線が励起分子モデルによる収量変化の計算値である。その他、青木ら<sup>12)</sup> により、固体ポリスチレンレジスト膜のイオンビームに対する感度曲線の測定から固体ポリスチレン内で起こる架橋反応の高い効率が電子励起密度に関連していることを示唆するデータが報告されている (Fig. 17)。Fig. 17 は、固体ポリスチレン中で起る架橋反応の収量は一般に阻止能の増加にともなって増加するが、必ずしも阻止能が最大の所では収量は最大値を示さないことを表している ( $\text{He}^+$  の曲線)。

イオントラック内での付与エネルギーの空間密度を考えた場合、トラックを2つの領域に分けて考える方法が従来よりなされてきている。一方は、イオンの飛跡のごく近傍に形成される高密度領域で、コア部と呼ばれ、いま一つは、高エネルギーの二次電子により生ずるペナンブラ部である。各々のエネルギー付与領域の半径方向の広がりに関する評価式として、コア部については、Brandt・Ritchie の式<sup>13, 14)</sup>、 $r_c = \beta / \Omega$  ( $\beta$ : 高速を単位としたイオンの速度、 $\Omega$ : プラズマ振動数)、ペナンブラ部では Chatterjee らの式<sup>13, 15)</sup>、 $r_p = 396 \cdot v^{2.7}$  ( $v$ :  $10^9$  cm/s を単位としたイオンの速度) を用いると、トラックの半径はイオンの速度の減少に従って小さくなるのがわかる。従って、イオントラックの構造は単純な円筒形ではなくイオンの速度により変化するので、電子系へのエネルギー付与の高密度現象を考察する場合には、Fig. 13 に示したエネルギー付与量の変化をこのトラック半径の変化で割った値で励起密度を考える必要がある。最近になってこの様な取扱が前述の LaVerne-Schuler<sup>10)</sup>、などにより為されており、木村<sup>13)</sup>、青木ら<sup>12)</sup> によっても指摘されている。

最近イオン注入技術の応用を目的とした keV イオンの有機物への照射効果の研究が数多く報告

されているが、このエネルギー領域ではターゲット核との弾性散乱の効果が無視できなくなる。Fig. 13の曲線群で低エネルギー側にみられる凸部はこの弾性散乱による寄与分に対応し、この領域での電子系へのエネルギー付与分は破線で示されている。この図から重イオンになるほど、弾性散乱の効果が大きくなることが予想できる。しかしながら、これまでのkeV領域のイオンを用いた研究でも、照射効果を電子衝突領域の場合と同様に線エネルギー付与量(LET)の関数として整理した例が多く、それ故、議論に混乱を招いてきたように思われる。ここでは弾性散乱が関与すると考えられるイオン照射効果についていくつかの実験例を示す。

まず、Fotiら<sup>16)</sup>は、液体窒素温度で固化したベンゼンおよびシクロヘキサンに希ガスイオンを照射して、分解生成物の分析をガスクロマトグラフィーを用いて行った。その結果、Fig. 18に示されるように、28keVの $Kr^+$ イオンを照射した場合には80keVの $He^+$ イオンを照射した場合に比べ、 $C_{13}$ 化合物の生成収量が大きくなる事を示した。 $He^+$ イオンの場合には、付与エネルギーのほとんどが電子に付与されるのに対して、 $Kr^+$ ではエネルギーの約90%が核衝突機構を経由することから、この結果は核衝突により $C_{13}$ 化合物が生成し易くなることを示していると考えられる。更に彼らはベンゼンの場合、芳香7員環構造を持つ $C_{13}$ 化合物の生成量が大きいと記述している。また、Rössler<sup>17)</sup>も、絶縁体へのイオン注入に関する総説の中で、挿入反応について触れており、数keVのイオンの照射により数種の挿入反応生成物が表面から放出される例を示している。Table 2にそのいくつかの例を示す。この様にイオン照射実験により化学結合の間に他の原子が入り込んだ生成物が測定されていることから考えれば、弾性散乱領域では、初めに存在した化学結合が、従来より耐放射線性に優れていると考えられていた芳香環であっても、かなりばらばらの状態に切断されていることがうかがえる。更に重要な実験結果として、大野ら<sup>18)</sup>は、硝酸カリウム固体に20-100keVの希ガスイオンを照射して、硝酸イオン( $NO_3^-$ )が亜硝酸イオン( $NO_2^-$ )に分解する収量を測定し、電子衝突と弾性核衝突とのエネルギー分配を考慮して実験結果を整理することにより、この化学反応に弾性衝突過程が明らかに関与していることを示している。

ポリマーへの効果を取り扱った例として、Guzman<sup>19)</sup>らはイオン注入を行ったフッ化ポリビニリデンの水素原子の濃度の深度分布の測定結果(Fig. 19)から、丁度イオンの飛程に対応する深さで水素原子の濃度が半減している事を見だしている。このことは、弾性散乱領域で元素の組成が大きく変化していることを示しているものと考えられる。また、Fink<sup>20)</sup>らは、100keVの $Ne^+$ イオンをカプトンに照射して、試料の黒化の深度分布を測定し(Fig. 20)、TRIMコードを用いた計算結果との比較から、試料の黒化が弾性散乱の深度分布に類似していることを見出している。

以上、示したように、イオン照射をした有機分子中でおこる入射粒子と標的原子との間の弾性散乱は化学反応を引き起こすか、もしくはその領域で起こる化学反応に大きく寄与していることが予想できる。また、そこでは電子衝突領域に比べてかなり特異な反応が引き起こされている事が知られている。

### 7.3 有機ポリマーへのイオン注入の研究課題

7.2で述べたように、イオン照射が従来の放射線（電子線や $\gamma$ 線など）と比較して特徴的なことは、高密度電子励起を引き起こすこと、イオンの持つ質量のため標的原子と弾性散乱を起こすこと、また、入射した粒子が物質内に残ること（注入効果）である。高密度電子励起は、広いエネルギー範囲にわたって起こる現象であるから高エネルギーイオンビームを用いれば必ずこの効果は重要となる。一方、弾性散乱及び注入効果はイオントラックの末端での効果であるから、低エネルギーイオンに対して重要となるはずである。

高エネルギーイオンビームの照射効果を研究する場合にもっとも重要なことは、電子励起の空間的な分布を知ること、即ちイオントラックの構造を知り、その時間的な変化を正確におさえることである。この現象は最終的なイオン照射効果を決定する意味で非常に重要な過程である。これに対するアプローチとして、電子衝突現象を統計的に取り扱うモンテカルロ法を用いた計算機シミュレーションを行う方法、電子励起の1つのプローブとしてイオン化の量を実験的に調べる方法と、LaVerneらが行ったように高密度で初めて生成する化学種の収量を測定する方法などがあり、この分野の研究をマイクロドシメトリーと呼んでいる。また、高密度電子励起から起こる化学反応は、イオン化及び電子励起状態から開始するので、従来の放射線化学の知識で推論することができるものが多く、また近来発展してきたレーザー光やシンクロトロン放射光を用いた光化学の実験から得られる知見も高エネルギーイオンの照射効果の解釈に有用となるものと考えられる。

一方、低エネルギーイオンで問題となる弾性散乱や注入効果については、まだ有機化合物に対しては確立した研究方法がなく、しかもイオントラックの末端では電子励起、核衝突、注入が同時に起こり、研究対象としてはかなり複雑である。従って、有機ポリマーにイオン注入技術を十分に制御した形で適用できるまでにはかなり時間がかかるものと思われる。従って現状では7.1で問題提起したように、注入効果があるのか否かをまず調べる必要がある。実際にポリマーの表面電導度に対する注入効果が、イオン種によって異なる事が最近報告<sup>21)</sup>されているが、まだポリマーに対するイオン注入効果の報告は極めて少ない。また、7.2で述べたように、イオンのトラックの末端に於ける弾性散乱領域では特異な化学反応が起こり、これは注入イオンの環境を決める上で非常に重要な現象である。また、この反応自身を磁場もしくは単色性・コヒーレンス性をもったレーザービームで制御することにより、化学反応だけによりポリマーに機能性を持たせうる可能性も考えられる。その場合、Fig. 21<sup>22)</sup>に示すように弾性散乱の効果はある程度空間的な広がりを持つので、注入効果を狙う場合に比べてより低いフルエンスで照射効果が期待できるという利点がある。以上の事から考えれば、今後ポリマーへのイオン注入効果を研究していく上で、弾性散乱領域で起こる化学反応過程の研究が非常に重要となる。更に、この研究は広く有機材料のイオン照射効果やイオンビームによる細胞損傷の研究に対しても有用な知見を与えるものと考えられる。

Fig. 22に、E-DEP-1コードによる $\text{He}^+$ イオンおよび $\text{Ar}^+$ イオンがポリエチレン中で示す線エネルギー付与の変化を示す。図中白丸はトータルエネルギーを表し、黒丸は弾性散乱の寄与を示す。この図よりイオン種をいくつか選択すること、またエネルギーを変化させることに

より、これまでに不明確であったkeVイオン衝撃により起こる化学反応への弾性散乱の寄与に関して、詳細な知見を得ることができることがわかる。

弾性散乱領域は、極めて狭い空間であるので効率よく生成物を得るためには、薄膜試料を用意し、数多く照射することが必要である。分析法としては、微量分析の行える質量分析法、さらに化学結合状態を調べるうえで赤外吸収法、X線光電子分光法、核磁気共鳴法等が考えられる。また、イオン照射を行ったポリエチレン中で安定なラジカルが存在するという報告<sup>23)</sup>もあり、電子スピン共鳴法も1つの分析手段として考えられる。さらに、これらの安定な生成物の分析と共にイオンビーム照射中の試料について真空紫外から可視領域における光吸収スペクトルを調べることで不安定ラジカルの挙動を、また試料からの発光を測定することにより励起状態分子の挙動を調べることは、これら不安定活性種が放射線により誘起される化学反応過程において極めて重要な役割を果している事から考えて、この弾性散乱領域で起こる化学反応過程を調べる上で非常に重要な実験であると考えられる。これらの実験の結果から、弾性衝突領域で起こる化学反応過程について、不安定な励起種やラジカルなどから最終生成物に至るまでの反応機構の解明から、反応の選択性・特異性および弾性衝突とその化学反応機構との関係について詳細な知見が得られるものと考えられる。

## 8. お わ り に

簡易イオンビーム発生器の運転を開始してから1年余り経過した。すでに述べたように、これまで、種々のイオンの発生テストを行いながら、シリコン、アルミニウムおよびアルミナに対する $N_2^+$ 、 $C^+$ イオンの注入実験を進めてきた。また、高温超電導体の $Ba_2YCu_3O_7$ 、LB膜等へのイオン注入実験に対する協力を行った。シリコンやアルミニウムに $N_2^+$ 、 $N^+$ イオンを注入した試料のオージェ電子分光による測定から、表面近傍にはC、O等の不純物原子も注入されることが見いだされ、これら不純物は試料表面に吸着した分子や注入雰囲気中の残留ガスに起因すると考えられた。したがって、不純物の注入を抑制するためには照射容器内の真空度を上げることが有用と考えられたので、照射容器直前の短管に液体窒素シュラウドを設け、イオン源のターボ分子ポンプを更新した。この結果、イオン注入時における照射容器内の真空度は以前の $\sim 3 \times 10^{-7}$  Torrから $\sim 1 \times 10^{-7}$  Torrに向上した。現在のところ、この真空度向上により不純物注入がどの程度抑えられるようになったかは明かではないが、近い将来に、この測定を行いたいと考えている。

本簡易イオンビーム発生器は中古の装置であるため、設置当初から、不意の故障が心配された。昭和63年11月と12月には電動発電機の制御回路、高電圧発生回路が引き続いて故障した。このような電源、制御回路の故障は今後も起こり得ると予想されるので、近い将来にオーバーホールを行って対策を講じる予定である。老朽化に起因する故障が起こる心配はあるものの、本装置を用いれば、ほとんど全てのイオンの発生と注入を比較的容易に行うことができる。本装置は、少なくとも、放射線高度利用研究のための照射装置が設置されるまでの期間は、重要な使命を持った



より、これまでに不明確であったkeVイオン衝撃により起こる化学反応への弾性散乱の寄与に関して、詳細な知見を得ることができることがわかる。

弾性散乱領域は、極めて狭い空間であるので効率よく生成物を得るためには、薄膜試料を用意し、数多く照射することが必要である。分析法としては、微量分析の行える質量分析法、さらに化学結合状態を調べるうえで赤外吸収法、X線光電子分光法、核磁気共鳴法等が考えられる。また、イオン照射を行ったポリエチレン中で安定なラジカルが存在するという報告<sup>23)</sup>もあり、電子スピン共鳴法も1つの分析手段として考えられる。さらに、これらの安定な生成物の分析と共にイオンビーム照射中の試料について真空紫外から可視領域における光吸収スペクトルを調べることにより不安定ラジカルの挙動を、また試料からの発光を測定することにより励起状態分子の挙動を調べることは、これら不安定活性種が放射線により誘起される化学反応過程において極めて重要な役割を果している事から考えて、この弾性散乱領域で起こる化学反応過程を調べる上で非常に重要な実験であると考えられる。これらの実験の結果から、弾性衝突領域で起こる化学反応過程について、不安定な励起種やラジカルなどから最終生成物に至るまでの反応機構の解明から、反応の選択性・特異性および弾性衝突とその化学反応機構との関係について詳細な知見が得られるものと考えられる。

## 8. お わ り に

簡易イオンビーム発生器の運転を開始してから1年余り経過した。すでに述べたように、これまで、種々のイオンの発生テストを行いながら、シリコン、アルミニウムおよびアルミナに対する $N_2^+$ 、 $C^+$ イオンの注入実験を進めてきた。また、高温超電導体の $Ba_2YCu_3O_7$ 、LB膜等へのイオン注入実験に対する協力を行った。シリコンやアルミニウムに $N_2^+$ 、 $N^+$ イオンを注入した試料のオージェ電子分光による測定から、表面近傍にはC、O等の不純物原子も注入されることが見いだされ、これら不純物は試料表面に吸着した分子や注入雰囲気中の残留ガスに起因すると考えられた。したがって、不純物の注入を抑制するためには照射容器内の真空度を上げることが有用と考えられたので、照射容器直前の短管に液体窒素シュラウドを設け、イオン源のターボ分子ポンプを更新した。この結果、イオン注入時における照射容器内の真空度は以前の $\sim 3 \times 10^{-7}$  Torr から $\sim 1 \times 10^{-7}$  Torr に向上了。現在のところ、この真空度向上により不純物注入がどの程度抑えられるようになったかは明かではないが、近い将来に、この測定を行いたいと考えている。

本簡易イオンビーム発生器は中古の装置であるため、設置当初から、不意の故障が心配された。昭和63年11月と12月には電動発電機の制御回路、高電圧発生回路が引き続いて故障した。このような電源、制御回路の故障は今後も起こり得ると予想されるので、近い将来にオーバーホールを行って対策を講じる予定である。老朽化に起因する故障が起こる心配はあるものの、本装置を用いれば、ほとんど全てのイオンの発生と注入を比較的容易に行うことができる。本装置は、少なくとも、放射線高度利用研究のための照射装置が設置されるまでの期間は、重要な使命を持った

装置であると考え。それまで、本装置の特徴を生かして、分子イオンの注入実験や第7章で問題提起した高分子への注入実験等に十分に利用していきたいと考えている。

## 謝 辞

本簡易イオンビーム発生器を快く譲渡して頂いた松下電子工業（株）半導体事業本部に深く感謝いたします。また、譲渡にあたりお世話頂いた松下電子工業（株）の林猛、大崎道夫、志村康夫の諸氏に感謝いたします。さらに、設置に際しては、高崎研究所町末男所長はじめ多数の方々の御理解と御協力を頂きました。とくに放射線高度利用研究推進室、経理課、工務課、安全管理課の方々からは多大の御指導と御協力を頂きました。また、研究部南波秀樹氏には、X線遮蔽計算において御協力を頂きました。ここに感謝いたします。

装置であると考え。それまで、本装置の特徴を生かして、分子イオンの注入実験や第7章で問題提起した高分子への注入実験等に十分に利用していきたいと考えている。

## 謝 辞

本簡易イオンビーム発生器を快く譲渡して頂いた松下電子工業（株）半導体事業本部に深く感謝いたします。また、譲渡にあたりお世話頂いた松下電子工業（株）の林猛、大崎道夫、志村康夫の諸氏に感謝いたします。さらに、設置に際しては、高崎研究所町末男所長はじめ多数の方々の御理解と御協力を頂きました。とくに放射線高度利用研究推進室、経理課、工務課、安全管理課の方々からは多大の御指導と御協力を頂きました。また、研究部南波秀樹氏には、X線遮蔽計算において御協力を頂きました。ここに感謝いたします。

## 参 考 文 献

- 1) 日新電機資料
- 2) (a) Manning I. and Mueller G.P.: *Comp. Phys. Commun.*, 7, 85 (1973).  
(b) Davisson C.M. and Manning I.: *Comp. Phys. Commun.*, 42, 13 (1986).
- 3) Davies J.A., Foti G., Howe L.M., Michell J.B., and Winterbon K.B.: *Phys. Rev. Lett.*, 34, 144 (1975).
- 4) Destefanis G.L., Bellè J.P., Ogier-Collin J.M., and J.P. Gailliard: *Nucl. Instrum. Methods*, 182/183, 637 (1981).
- 5) Kang H., Kasi S., and Rabalais J.W.: *Nucl. Instrum. Methods*, B33, 438 (1988).
- 6) Venkatesan T., Calcagno L., Elman B.S. and Foti G.: "Ion beam in organic molecular solids and polymers" in "Ion Beam Modification of Insulators" ed. by Mazzoldi P. and Arnold G.W., Elsevier (1987).
- 7) Northcliffe L.C. and Schilling R.E.: *Nuclear Data Tables*, A7, 233 (1980).
- 8) Mozumder A.: "Charged particle track and their structure" in "Advances in radiation chemistry" ed. by Burton M. and Magee J.L., Vol. 1, Wiley, New York, pp.1-102 (1969).
- 9) Laverne J.A. and Schuler R.H.: *J. Phys. Chem.*, 88, 1200 (1984).
- 10) Laverne J.A., Schuler R.H., and Burns W.G.: *J. Phys. Chem.*, 90, 3238 (1986).
- 11) Burns W.G. and Reed C.R.V.: *Trans. Faraday Soc.*, 66, 2159 (1970).
- 12) Aoki Y., Kouchi N., Shibata H., Tagawa S., Tabata Y., and Imamura S.: *Nucl. Instrum. Methods*, B33, 799 (1988).
- 13) Kimura K.: *Radiation Chemistry*, 42, 2 (1986).
- 14) Brandt W. and Richie R.H.: "Physical mechanism in radiation biology" ed. by Copper R.D. and Wood R.W., pp.20-50, U.S. Atomic Energy Commission. CONF-721001, Washington D.C.
- 15) Chatterjee A., Maccabee H.D., and Tobias C.A.: *Radiat. Res.*, 54, 4779 (1973).
- 16) Foti G., Calcagno L., and Puglisi O.: *Nucl. Instrum. Methods*, 209/210, 87 (1983).

- 17) Rössler K.: Radiat. Effect, 99, 21 (1986).
- 18) Ohno S., Furukawa K., and Soga T.: Bull. Chem. Soc. Jpn., 59, 1947 (1986).
- 19) Guzman A.M., Carlson J.P., Bares J.E., and Pronko P.P.: Nucl. Instrum. Methods, B7/8, 468 (1985).
- 20) Fink D., Muller M., Chadderton L.T., Channington P.H., Elliman R.G., and McDonld D.C.: Nucl. Instrum. Methods, B32, 125 (1988).
- 21) Davenas J., Xu X.L., Maitrot M., Mathis C., and B. Francois: Nucl. Instrum. Methods, B32, 166 (1988).
- 22) Shimizu R.: Proc. 7th Int. Vac. Congr. and 3rd Int. Conf. Solid Surfaces, ed. by Dobrozemsky R., Rüdenanuer F., Viehböck E.P., and Breth A., Berger and Söhne, Vienna, 1417 (1977).
- 23) Schaible M., Hayden H., and Tanaka J.: IEEE Trans. on Electr. Insul., E1-22, 699 (1987).

Table 1 Maximum current values for several ions  
at 200 keV acceleration

Ion	Ionizing Material	Maximum Current ( $\mu\text{A}$ )
<sup>4</sup> He	He gas	2.15
<sup>40</sup> Ar	Ar gas	40
<sup>14</sup> N	N <sub>2</sub> gas	15
<sup>28</sup> N <sub>2</sub>	N <sub>2</sub> gas	20
<sup>12</sup> C	CO <sub>2</sub> gas	4.0
<sup>16</sup> O	CO <sub>2</sub> gas	8.5
<sup>28</sup> CO	CO <sub>2</sub> gas	17
<sup>19</sup> F	SF <sub>6</sub> gas	1.0
<sup>27</sup> Al	Al solid	13
<sup>56</sup> Fe	Fe solid	6.0
<sup>58</sup> Ni	Ni solid	0.3

Table 2 New products emitting from target surfaces as a result of projectile-target interaction (Ref. 17)

Target	Temperature ( K )	Projectile	Energy ( keV )	Measurement	New products
Minerals, lunar material	298	C <sup>+</sup>	15	desorption	simple organic
C, graphite	298-1000	H <sup>+</sup> , H <sub>2</sub> <sup>+</sup> , H <sup>0</sup> /e <sup>-</sup> , H <sup>0</sup> /Ar <sup>+</sup>	< 5	desorption	CH <sub>3</sub> , CH <sub>4</sub> , C <sub>2</sub>
C, graphite	298-1000	O <sup>+</sup> , O <sub>2</sub> <sup>+</sup> , O <sub>2</sub> /Ar <sup>+</sup>	< 5	desorption	CO, CO <sub>2</sub>
SiC, B <sub>4</sub> C, TiC	298-1000	H <sup>+</sup> , H <sub>2</sub> <sup>+</sup> , H <sup>0</sup> /Ar <sup>+</sup>	< 20	desorption	CH <sub>4</sub>
Oxides	298	H <sup>+</sup> , etc.	< 5	desorption	H <sub>2</sub> O
SiO <sub>2</sub>	298	CF <sub>3</sub>	0.5	desorption	COF, SiF <sub>x</sub>
CO	15	noble gas ions	0.5-4.5	SIMS	C <sub>2</sub> O <sup>+</sup> , C <sub>2</sub> <sup>+</sup>
CO	20	H <sub>2</sub> <sup>+</sup> , He <sup>+</sup> , Ar <sup>+</sup>	3-6	sputtering	CO <sub>2</sub> , C <sub>2</sub> <sup>+</sup> , O <sub>2</sub> <sup>+</sup> , C <sub>2</sub> O <sup>+</sup> , C <sub>2</sub> O <sub>2</sub> <sup>+</sup>
NO	15	noble gas ions	0.5-4.5	SIMS	N <sub>2</sub> O <sub>3</sub> <sup>+</sup> , etc.
CO <sub>2</sub>	15	noble gas ions	0.5-4.5	SIMS	C <sub>2</sub> O <sup>+</sup> , C <sub>4</sub> O <sup>+</sup> , C <sub>2</sub> O <sub>2</sub> <sup>+</sup> , etc.
H <sub>2</sub> O	20-77	H <sup>+</sup> , H <sub>2</sub> <sup>+</sup> , He <sup>+</sup> , Ar <sup>+</sup>	3-100	desorption and sputtering	O <sub>2</sub> , H <sub>2</sub>
H <sub>2</sub> O/CO	20	H <sub>2</sub> <sup>+</sup> , He <sup>+</sup> , Ar <sup>+</sup>	3-6	sputtering	C <sub>2</sub> , O <sub>2</sub> , HCO, HCOH, CH <sub>2</sub> O, NO <sup>+</sup> , N <sub>2</sub> O <sup>+</sup> , CH <sub>4</sub> , CH <sub>3</sub> , etc.
NH <sub>3</sub>	20	H <sub>2</sub> <sup>+</sup> , He <sup>+</sup> , Ar <sup>+</sup>	3-6	sputtering	N <sub>2</sub> , N <sub>2</sub> H <sub>4</sub>
NH <sub>3</sub> /CO <sub>2</sub>	20	Ar <sup>+</sup>	6	sputtering	N <sub>2</sub> , HCN, N <sub>2</sub> H
D <sub>2</sub> <sup>16</sup> O/ <sup>13</sup> CO <sup>16</sup> O <sub>2</sub>	9	Ar <sup>+</sup>	1.5x10 <sup>3</sup>	desorption	D <sub>2</sub> <sup>13</sup> C <sup>16</sup> O
CH <sub>4</sub>	15	H <sub>2</sub> <sup>+</sup>	6	sputtering	hydrocarbons up to C <sub>13</sub>
SO <sub>2</sub>	25	Ar <sup>+</sup>	45	sputtering	SO <sub>3</sub> (S <sub>2</sub> O)
SF <sub>6</sub>	77	e <sup>-</sup>	0.75	sputtering	SF <sub>5</sub> <sup>+</sup> , SF <sub>x</sub> <sup>+</sup> , F <sub>2</sub> <sup>+</sup>

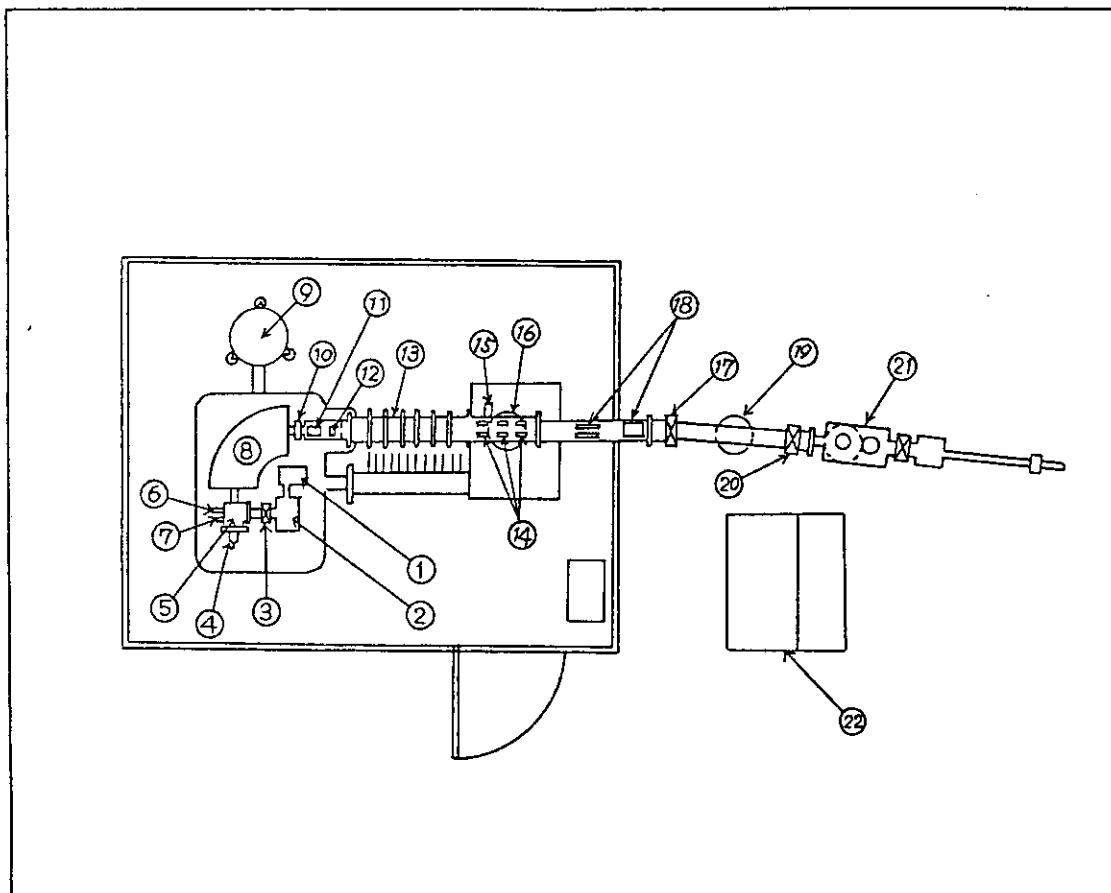


Fig. 1 Takasaki ion beam implanter (TIBI).  
 (1) Rotary pump (RP1) (2) Turbo molecular pump (TMP1) (3) Gate valve (PV1) (4) Ion source, model 911A (5) Lens chamber (6) Vacuum guage (PG1) (7) Vent valve (8) Analysing magnet (9) Motor generator (10) Gate valve (GV1) (11) Steering electrodes (12) Beam profile monitor (13) Accelerator tube (14) Electrostatic triplet quadrupole lens (15) Vacuum guage (PG2) (16) Turbo molecular pump (TMP2) and rotary pump (RP2) (17) Gate valve (GV2) (18) Parallel deflection plates (19) Turbo molecular pump (TMP3) and rotary pump (RP3) (20) Gate valve (GV3) (21) Irradiation chamber (22) Control cabinet.



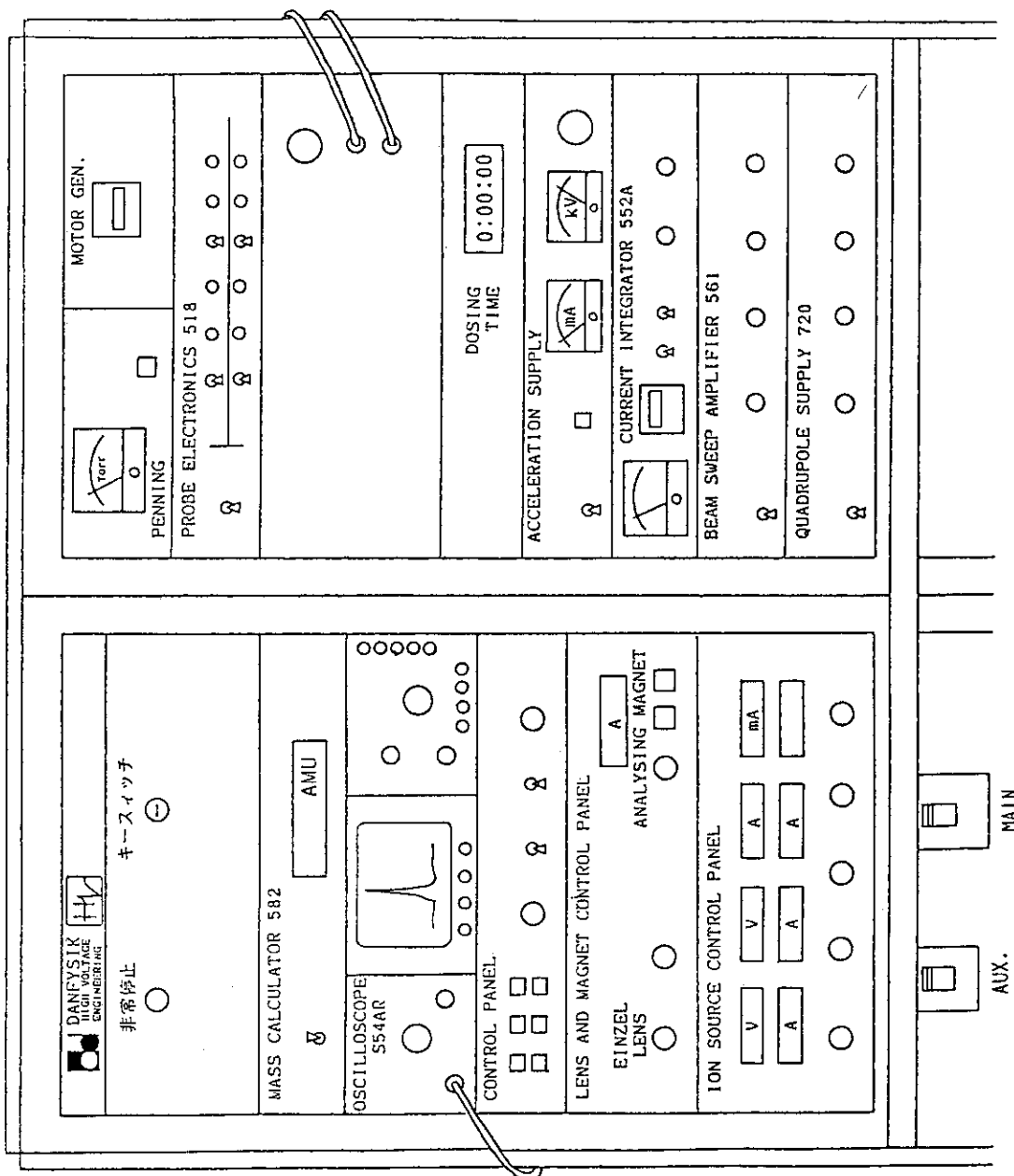


Fig. 2 The front view of the control cabinet.

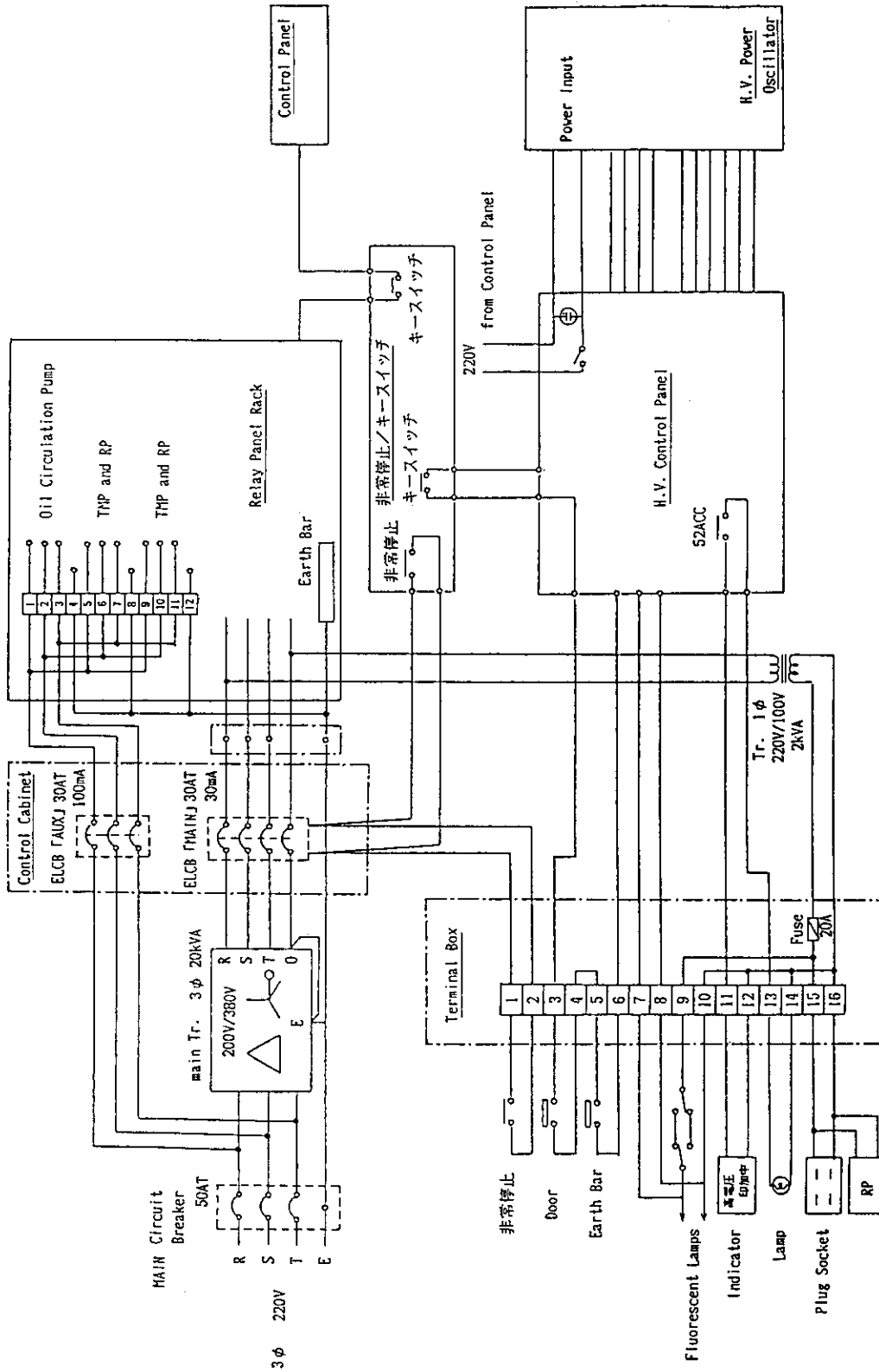


Fig. 3 The wiring diagram of the interlock system for TIBI.

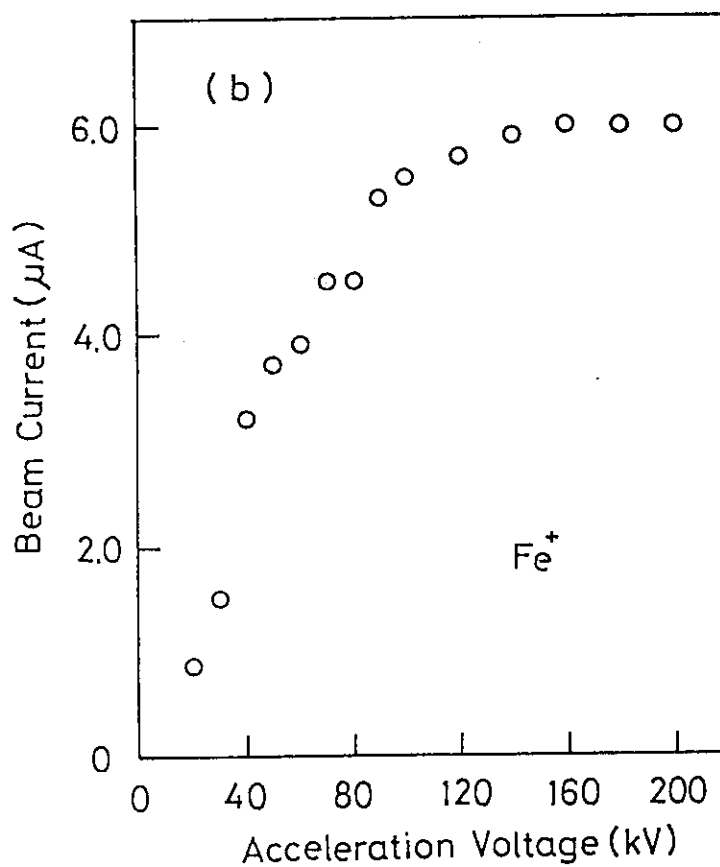
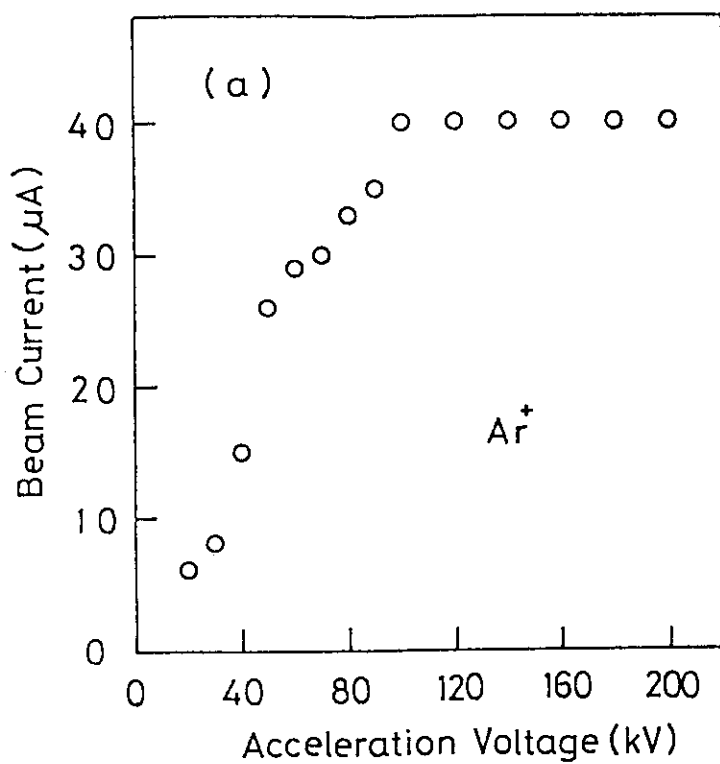


Fig. 4 The acceleration-voltage dependence of the ion beam current for (a)  $\text{Ar}^+$  and (b)  $\text{Fe}^+$  ions, in the case of the extraction voltage of 20 kV.

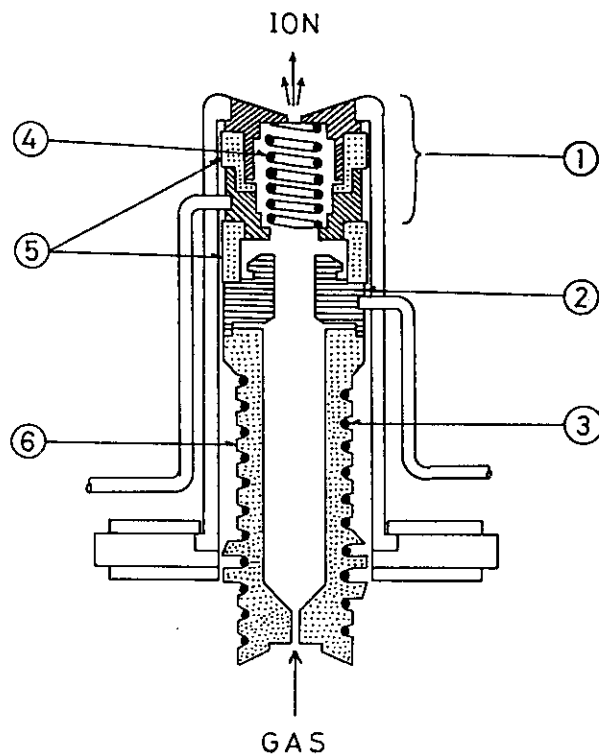


Fig. 5 The cross-sectional view of the model 911A ion source. (1) Cathode (2) Anode (3) Heater (4) Filament (5) Insulator (6) Oven.

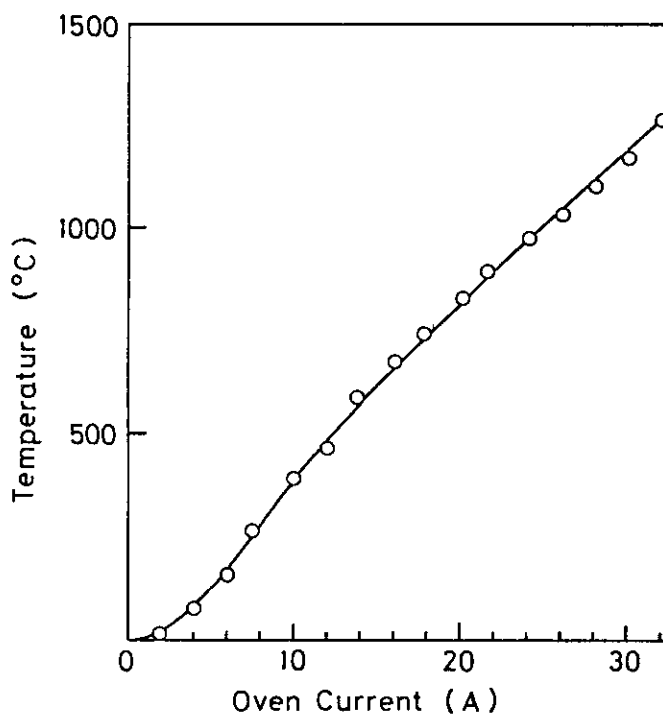


Fig. 6 The relationship between the temperature of the oven and the oven current. The temperature was measured with a C-A thermo-couple under the condition of no source gas flowing.

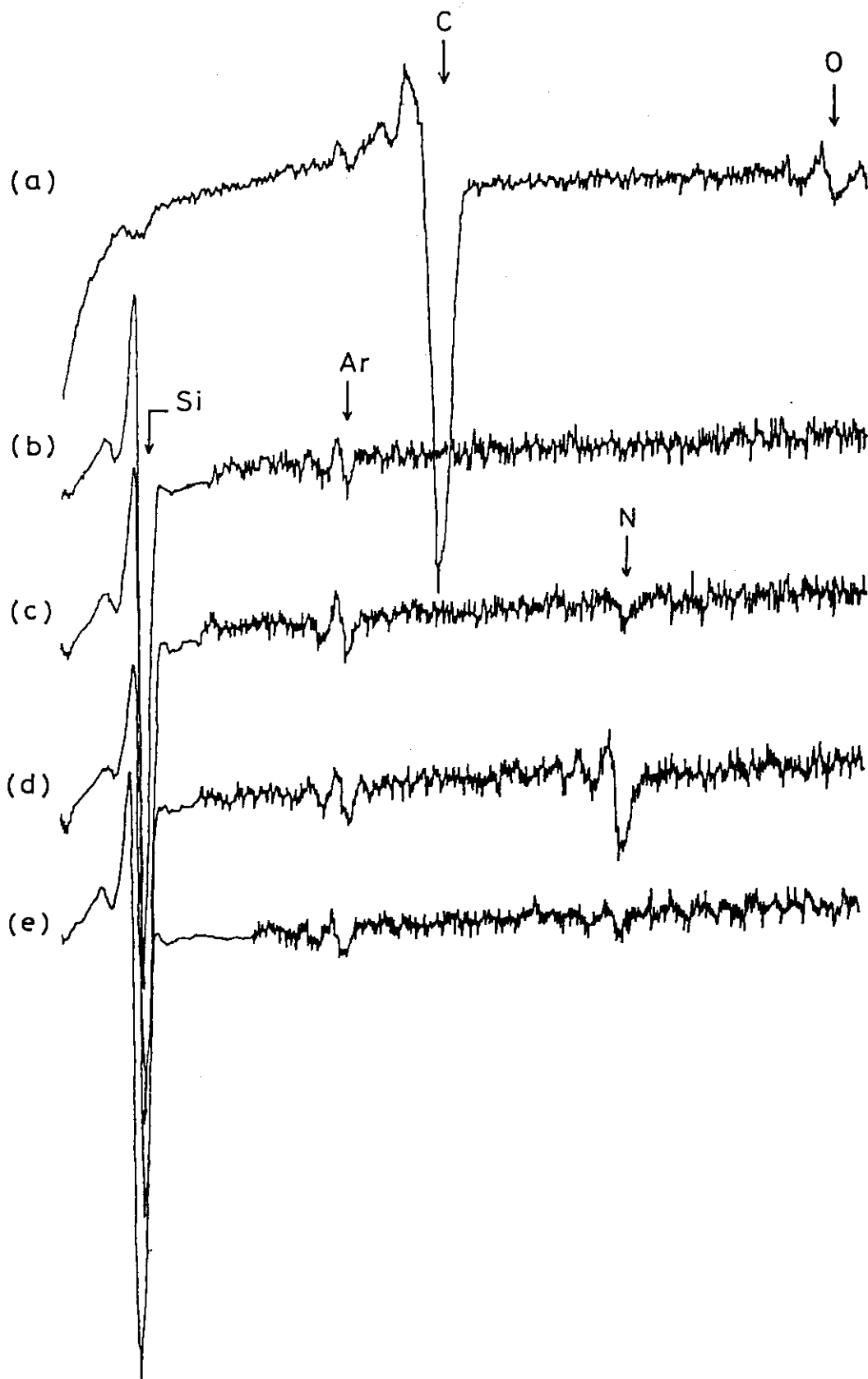


Fig. 7 The change of Auger electron spectrum of 200 keV  $N_2^+$  implanted silicon water with  $Ar^+$  sputtering time. (a) 0 min (b) 14 min (c) 30 min (d) 62 min (e) 80 min.

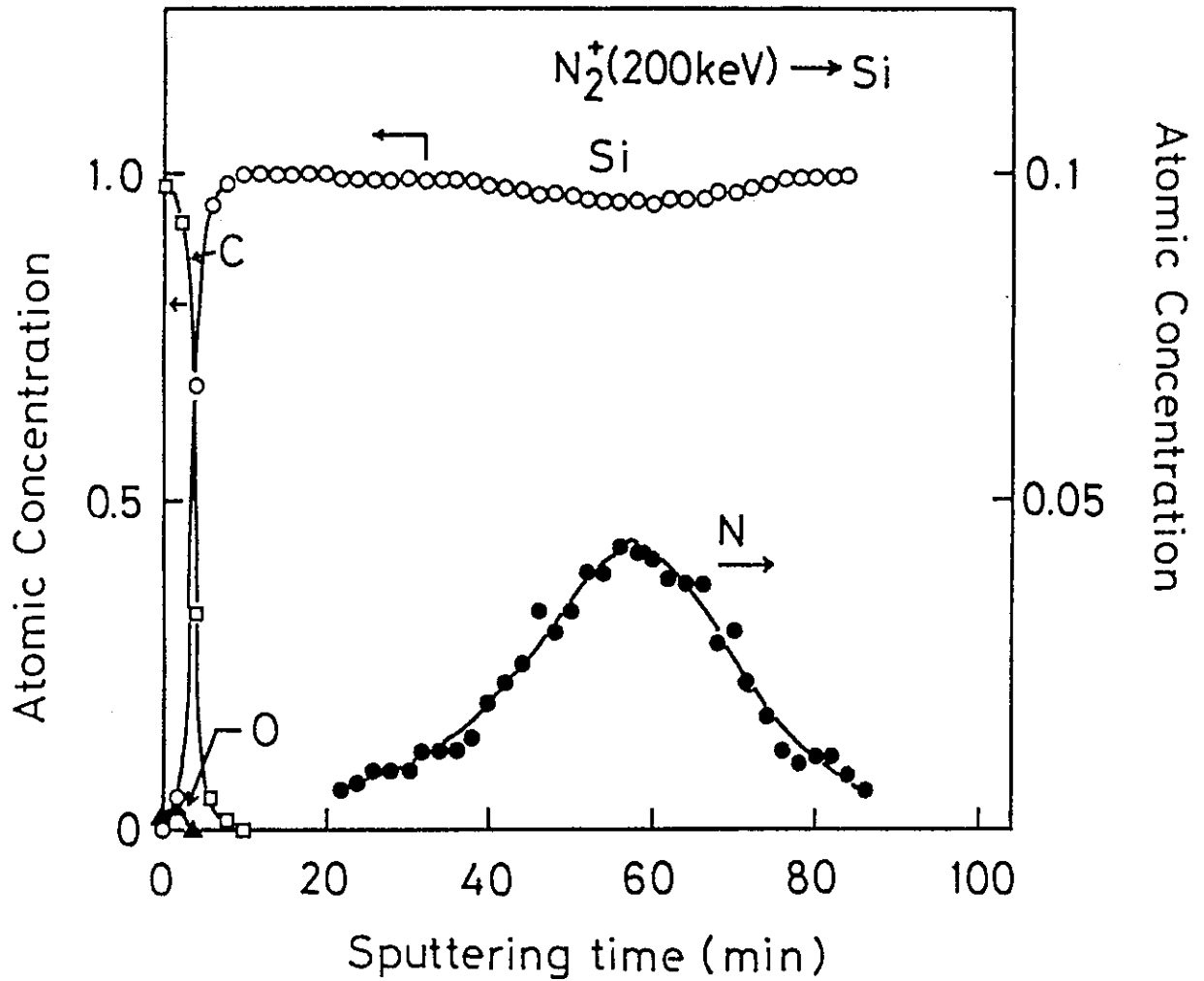


Fig. 8 The depth-profiles of elements in silicon water implanted with 200 keV  $N_2^+$  ions, obtained by means of Auger Electron Spectroscopy (AES) combined with 4 keV  $Ar^+$  ion sputtering. The depth is given by the  $Ar^+$  ion sputtering time.

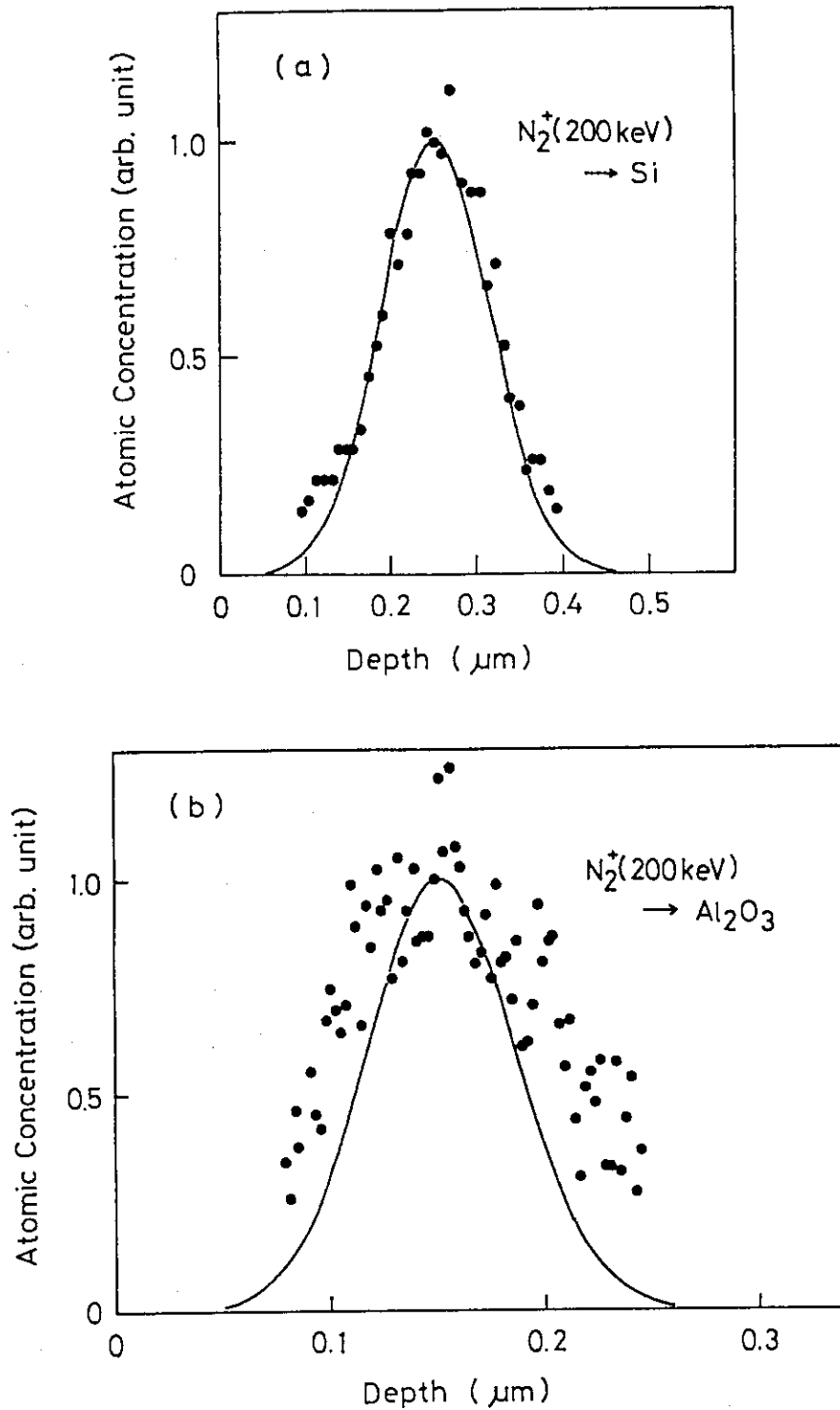


Fig. 9 The depth-profiles of the implanted N atoms in (a) silicon wafer and (b) single crystal alumina. Closed circles are experimental data, obtained by implantation with 200 keV  $\text{N}_2^+$  ions and the AES measurement, and solid line is theoretical curve calculated for 100 keV  $\text{N}^+$  ions by using the E-DEP-1 code. In order to compare the experimental and theoretical results, the depths of peaks are assumed to be identical and each profile is normalised by the maximum value.

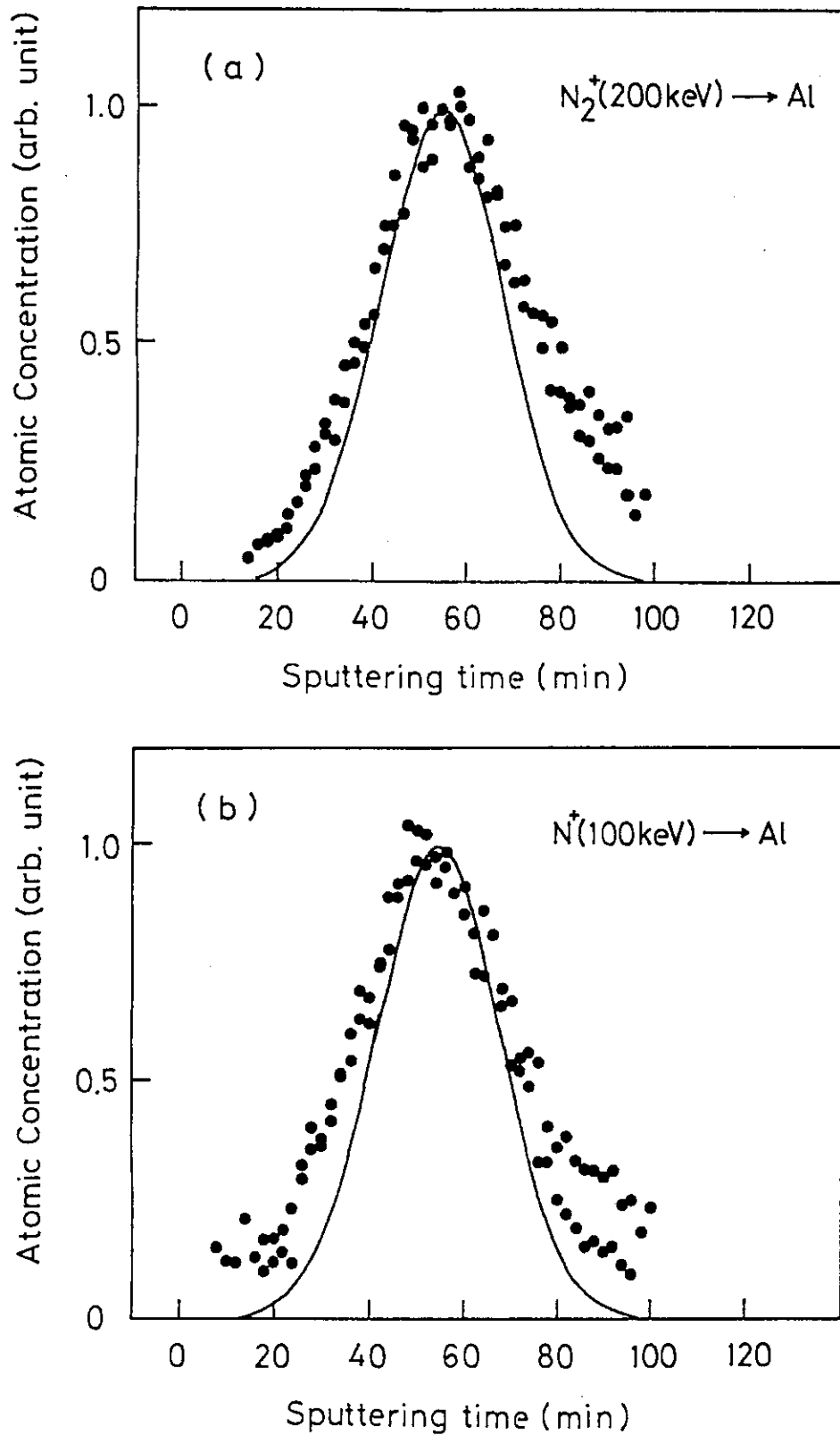


Fig. 10 The depth-profiles of the implanted N atoms in aluminium foils implanted with (a) 200 keV  $N_2^+$  ions and (b) 100 keV  $N^+$  ions. Closed circles are experimental data and solid lines are theoretical curves calculated for 100 keV  $N^+$  ions.



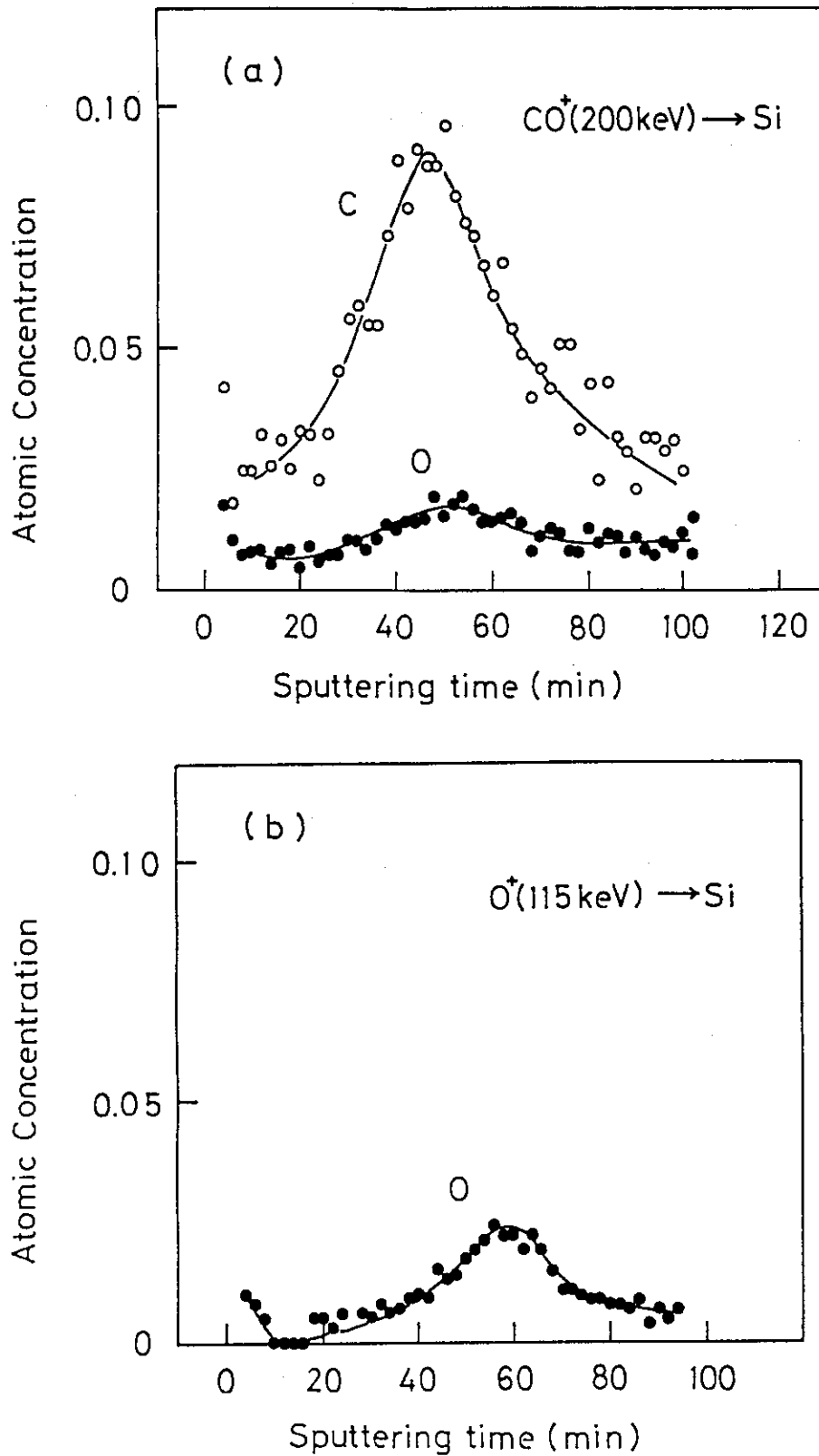


Fig. 11 The depth-profiles of the implanted C and/or O atoms in silicon wafers implanted with (a) 200 keV  $\text{CO}^+$ , (b) 115 keV  $\text{O}^+$ , and (c) 85 keV  $\text{C}^+$  ions. 200 keV  $\text{CO}^+$ , 115 keV  $\text{O}^+$ , and 85 keV  $\text{C}^+$  ions have approximately the same velocity.

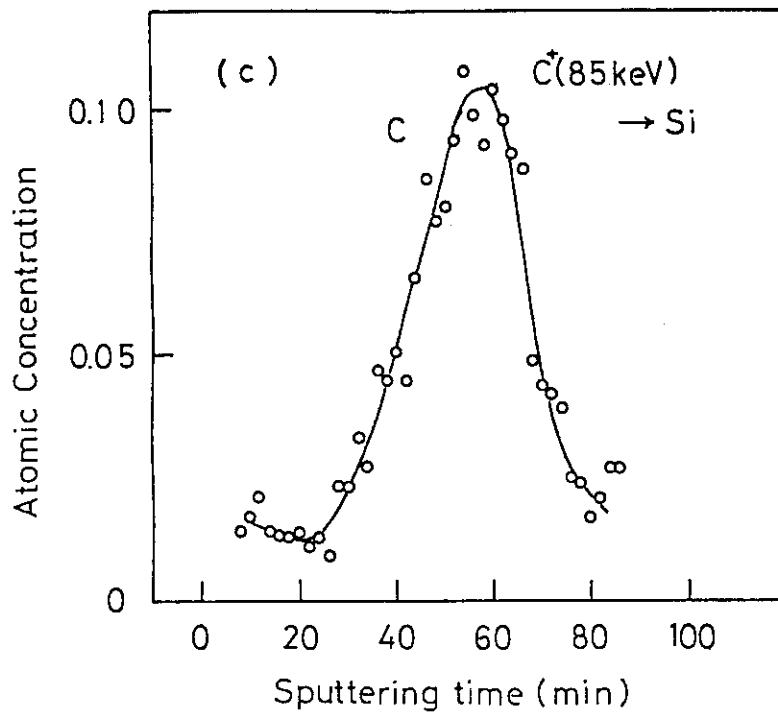


Fig. 11 (Continued)

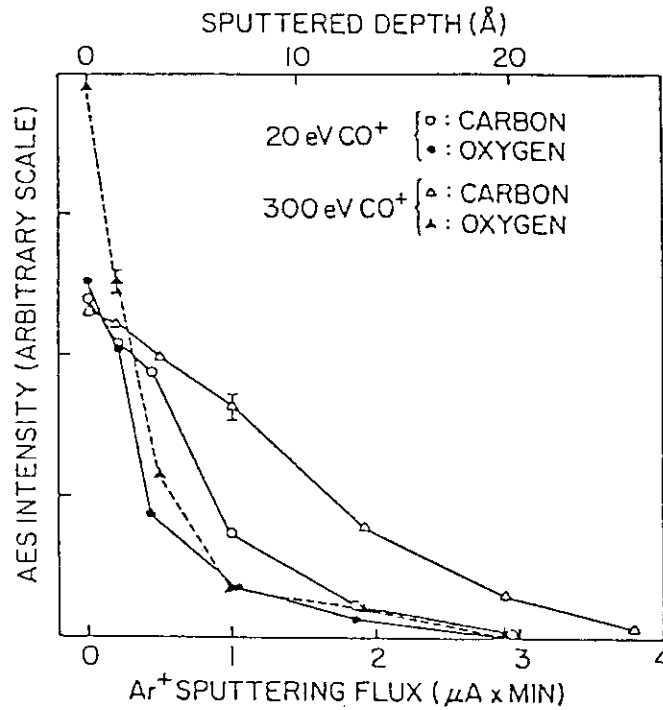


Fig. 12 The depth-profiles of the implanted C and O atoms in Ni surfaces implanted with 20 and 300 eV CO<sup>+</sup> ions. (Ref. 5)

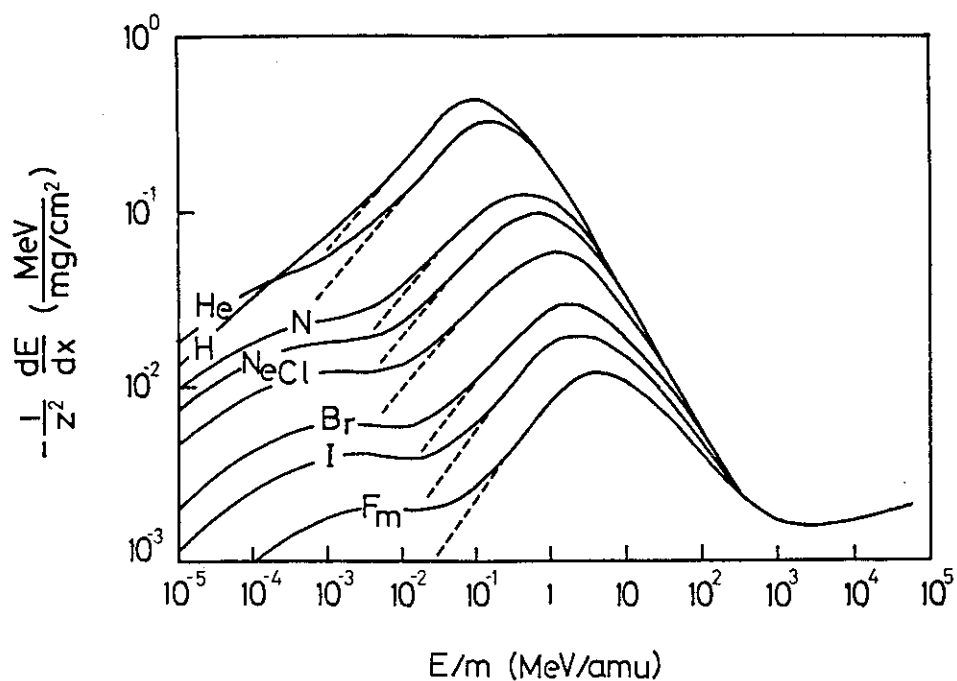


Fig. 13 Variation of stopping power with ion energy for heavy ions in aluminium. Solid lines are derived from semiempirical fit to available data. Dashed lines are semitheoretical electronic stopping power at low energy region. Multiply  $(-1/z^2) (dE/dx)$  by 26.9 for unit:  $\text{eV/\AA}$ . (Ref. 7)

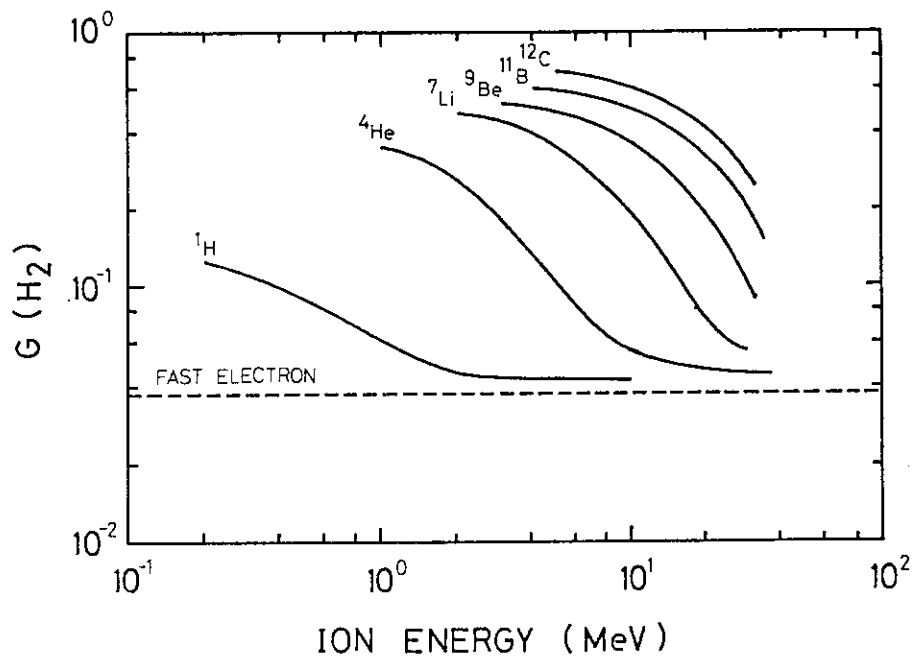


Fig. 14 Differential molecular hydrogen yield,  $G(\text{H}_2)$ , in liquid benzene for various ions as a function of ion energy. The dashed line is the yield obtained with fast electrons (0.038). (Ref. 9)

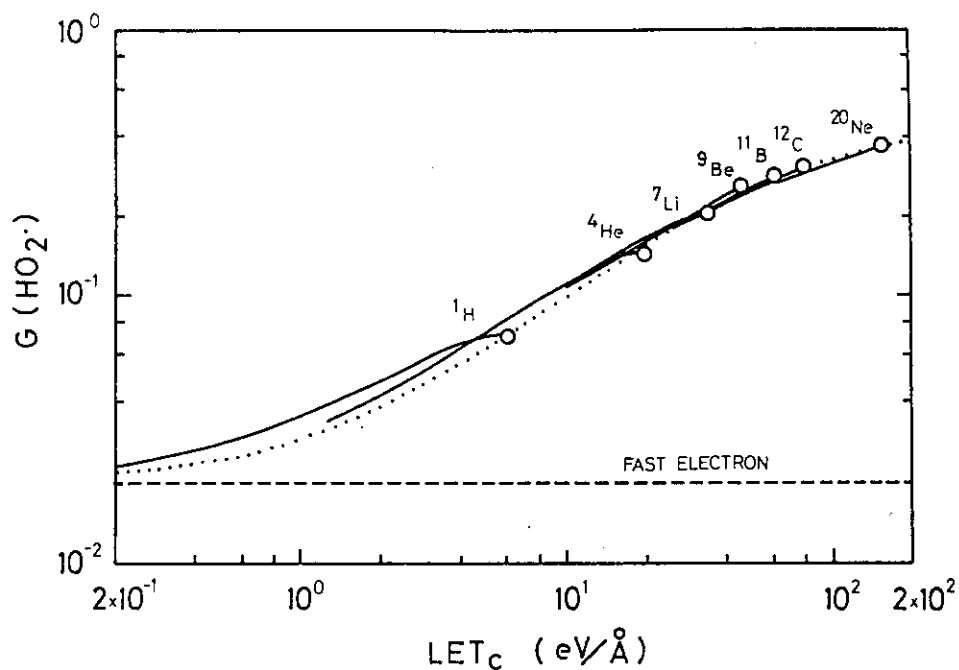


Fig. 15 Differential  $\text{HO}_2$  yield within the track core,  $G(\text{HO}_2)_{\text{core}}$ , in liquid water as a function of the energy deposited in the track core,  $\text{LET}_c$ . The dashed line is the yield obtained with fast electrons (0.020). The dotted line is a simulation curve for the dependence of  $G(\text{HO}_2)_{\text{core}}$  on  $\text{LET}_c$ . (Ref. 10)

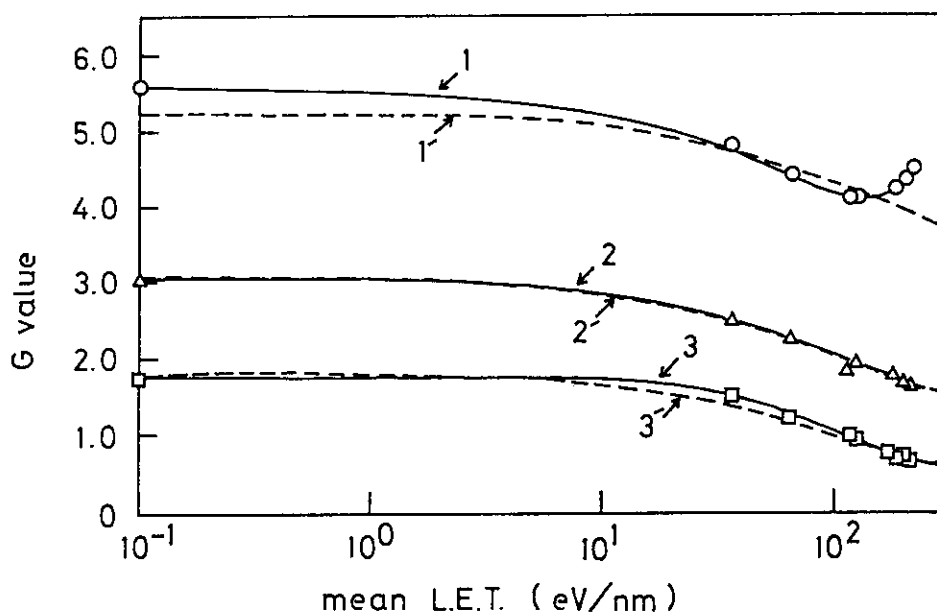


Fig. 16 The yields of principal products in liquid cyclohexane irradiated with  $\gamma$ -rays and  $^4\text{He}$  ions as a function of the mean LET. Experimental results are shown as circles and curve 1 for  $G(\text{H}_2)$ , as triangles and curve 2 for  $G(\text{cyclohexene})$ , and as squares and curve 3 for  $G(\text{bicyclohexyl})$ . Calculated values, based on the excited molecular model, are shown as curves 1', 2', 3' for  $\text{H}_2$ , cyclohexene, and bicyclohexyl, respectively. (Ref. 11)

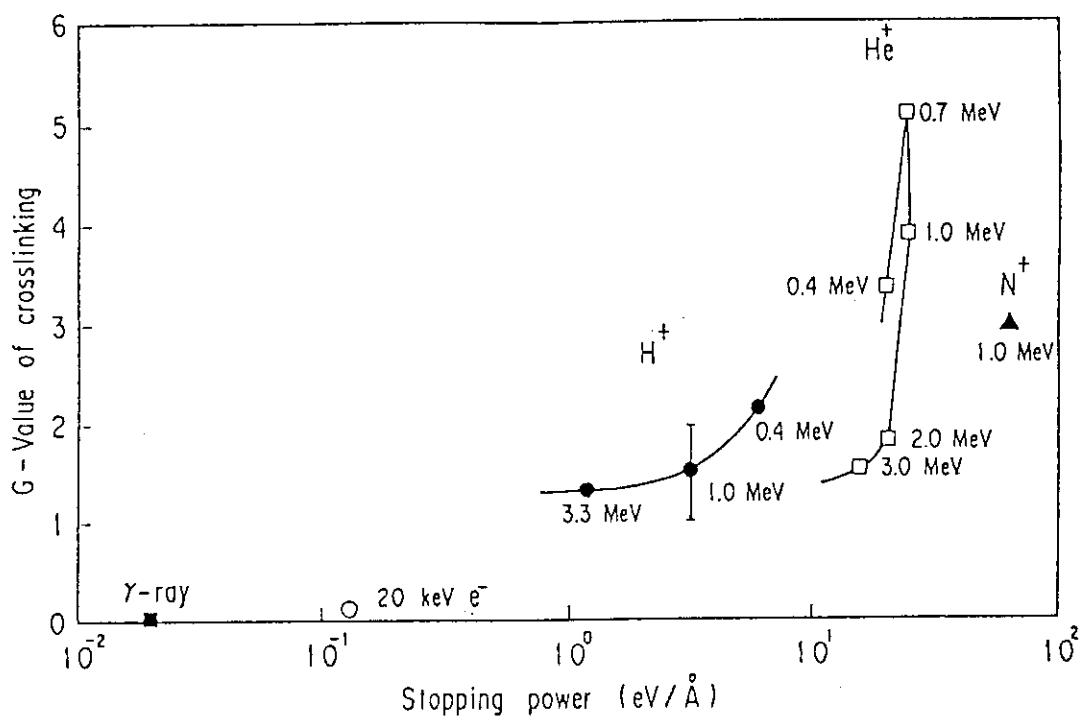


Fig. 17 The relation between differential crosslinking yield in polystyrene resist films and stopping power. (Ref. 12)

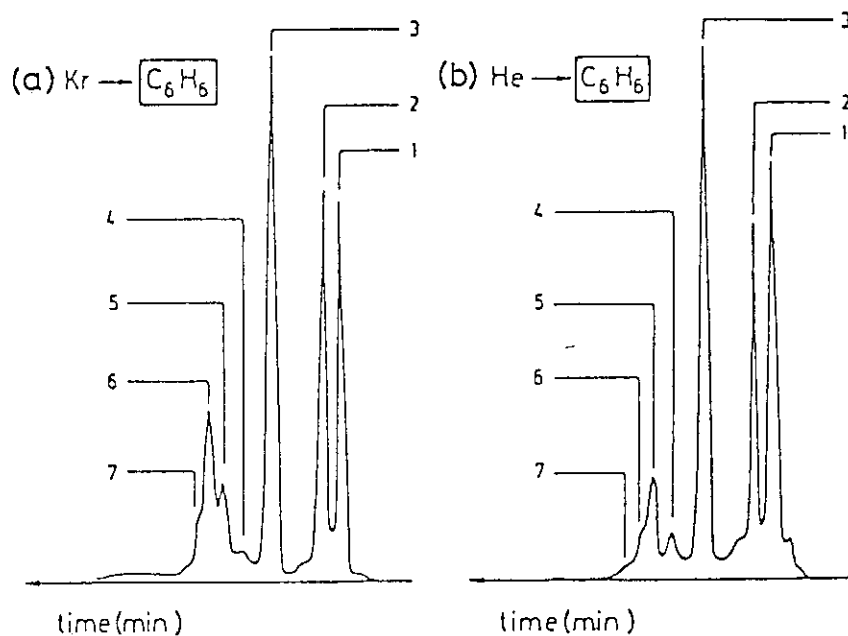


Fig. 18 The gas chromatograms of non-volatile products in solid benzene bombarded with (a) 28 keV Kr<sup>+</sup> and (b) 80 keV He<sup>+</sup> ions. The peaks 5, 6, 7 are assigned as aromatic C<sub>13</sub> compounds whose molecular weight is 168. (Ref. 16)

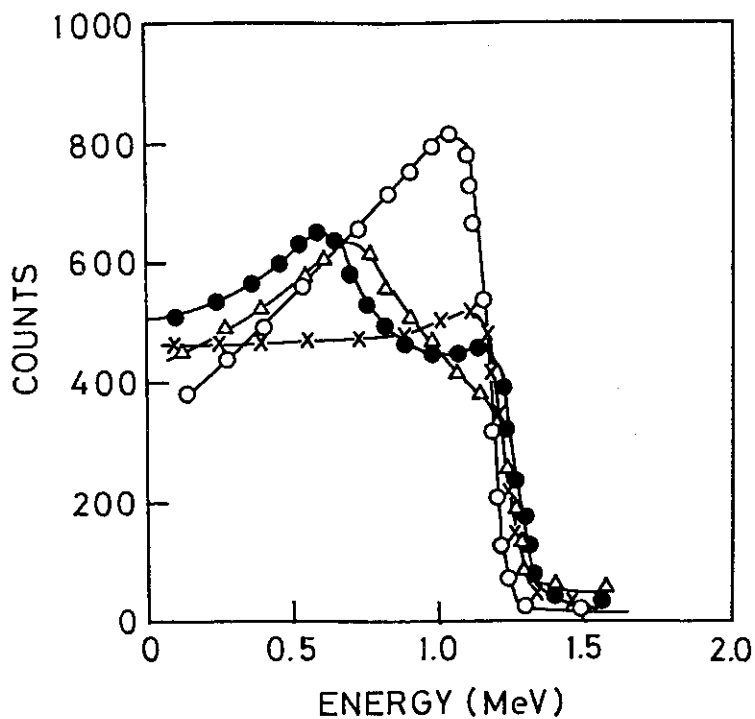


Fig. 19 Helium-induced proton recoil energy spectra for polyvinylidene fluoride (PVDF). (○) unimplanted PVDF and (×), (●), and (△) PVDF implanted with 6 MeV C<sup>+</sup>, O<sup>+</sup>, and Ni<sup>+</sup> ions, respectively. (Ref. 19)

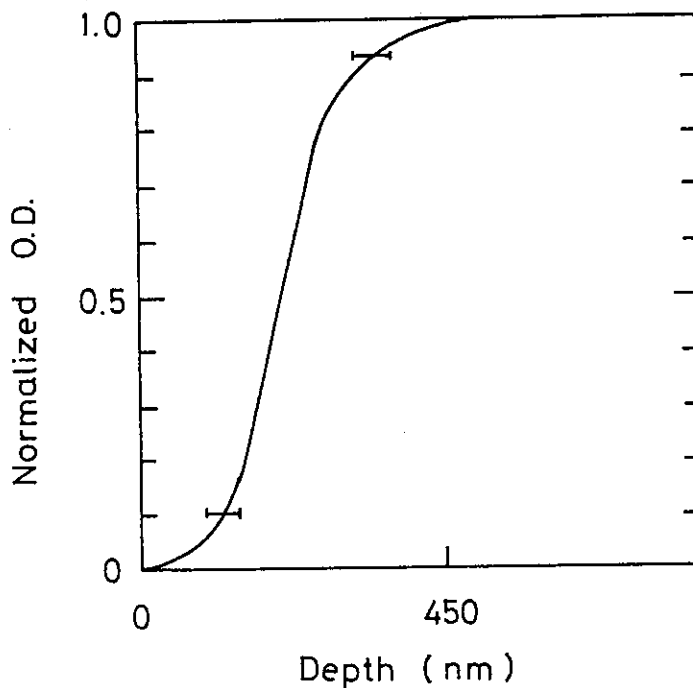


Fig. 20 The depth-profile of normalised optical density in Kapton implanted with 100 keV Ne<sup>+</sup> ions, measured by microdensitometer. (Ref. 20)

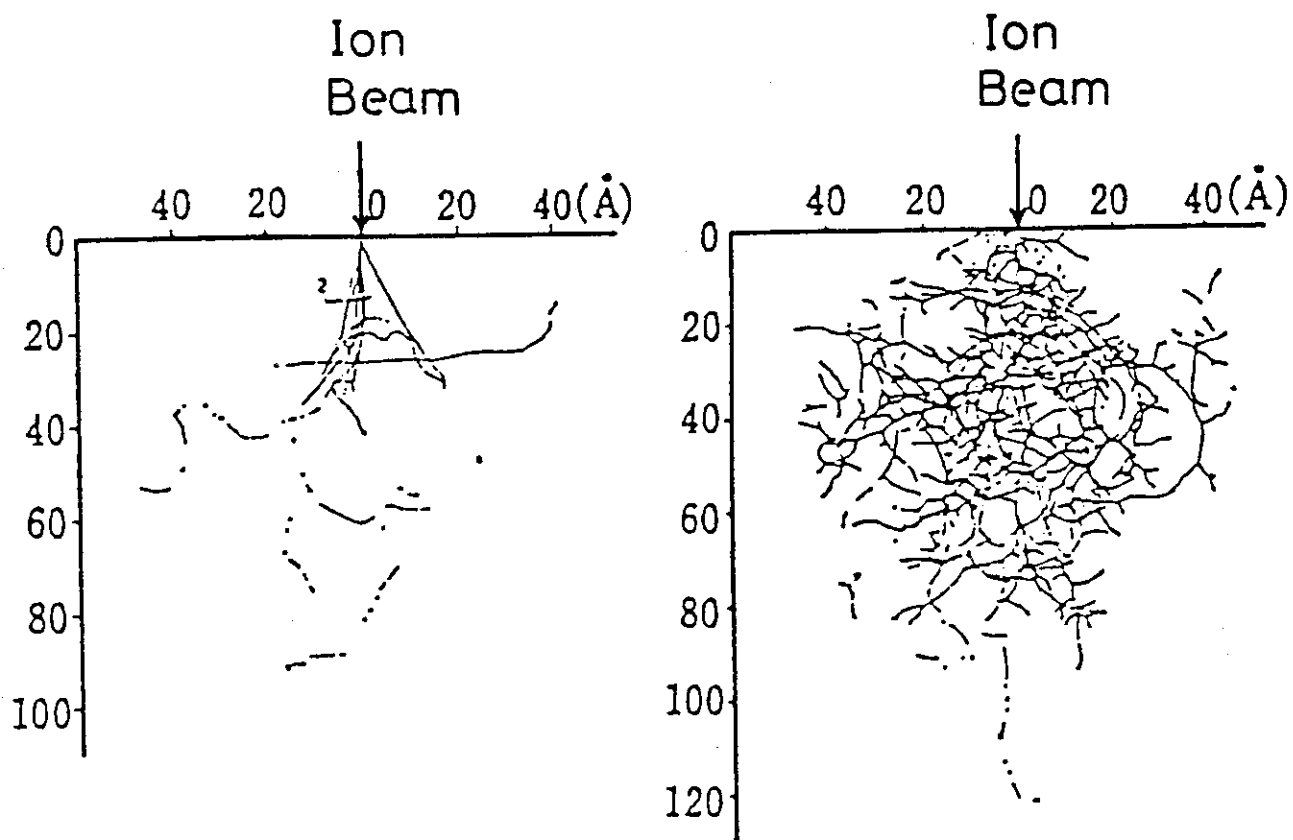


Fig. 21 Monte Carlo simulation of the behavior of incident ions and recoiled target atoms in 5 keV  $\text{Ar}^+$  ion bombarded Cu, (a) Ar incidents, and (b) recoiled Cu atoms. (Ref. 22)

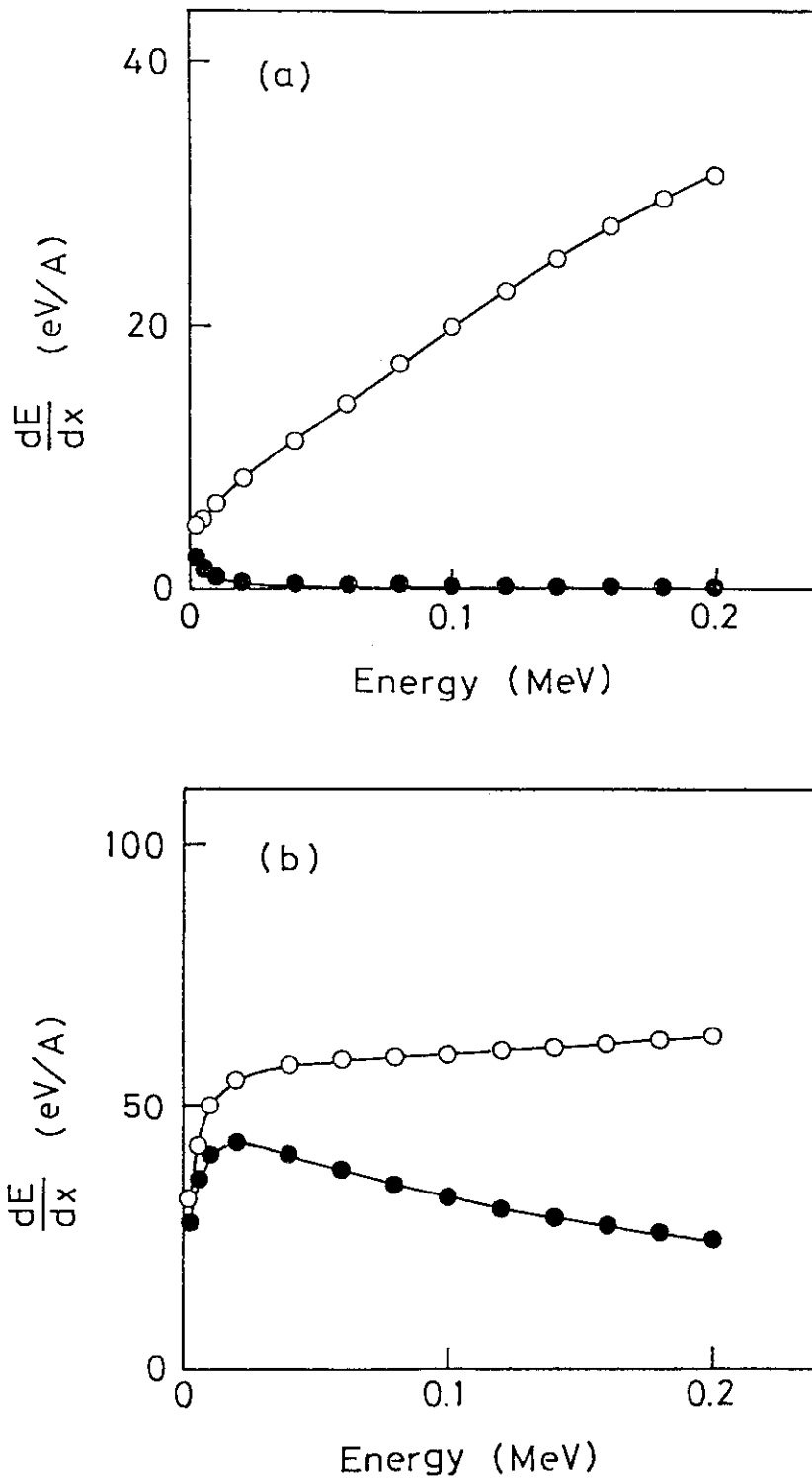


Fig. 22 Stopping powers in polyethylene as a function of ion energy for (a)  $\text{He}^+$  and (b)  $\text{Ar}^+$ . Open circles are total stopping power values, and closed circles are the nuclear stopping parts.