

JAERI - M
85-110

化学反应用 100kV イオン照射装置

1985年8月

古川 勝敏・大野 新一

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, 1985

編集兼発行 日本原子力研究所
印刷 いばらき印刷(株)

JAERI-M 85-110

化学反応用 100 kV イオン照射装置

日本原子力研究所東海研究所化学部

古川勝敏・大野新一

(1985年7月5日受理)

放射線損傷における化学効果の研究を推進させるために、東海研究所化学部固体化学研究室において、種々のイオンを0-100 kV 範囲に加速できる低エネルギーイオン照射装置を設置した。本報告書は、装置の設置計画、構成、性能、運転試験結果および附属測定装置の概要を説明するものである。

100 kV-Ion Accelerator for Study of Chemical Reactions

Katsutoshi FURUKAWA and Shin-ichi OHNO

Department of Chemistry, Tokai Research
Establishment, JAERI

(Received July 5, 1985)

To study chemical effects in radiation damage, a low-energy ion accelerator which produces a beam of various ions of the energy up to 100 kV has been constructed in Solid State Chemistry Laboratory, Department of Chemistry, Tokai Research Establishment. In this report are described objectives of the research, needs for an ion accelerator, system design considerations, accelerator components, results of the performance test, and apparatus enabling some ion-beam experiments.

Keywords: Energetic Particle, Chemical Reaction, Ion Source, Ion Accelerator, Duoplasmatron, RF Source, Beam Chopper, Quadrapole Lens, Electron Emission, SIMS, TOF, Ionization, Chemical Radiation Effects Performance Test

目 次

1. 設置計画	1
1.1 放射線損傷における化学効果の研究	1
1.2 研究方針	2
1.3 装置に要求される性能：考察	3
2. 装置の概要	6
3. 各部の詳細	9
3.1 イオン源	9
3.2 ビーム引出部	14
3.3 加速管	15
3.4 静電型四極子レンズ	16
3.5 イオン選別電磁石	17
3.6 静電偏向系	19
3.7 ビームチョッパー	20
3.8 試料チェンバー	21
3.9 安全対策	23
4. 運転試験結果	24
4.1 イオン源	24
4.2 ビーム引出部および加速管のレンズ特性	27
4.3 静電型四極子レンズの集束効果	29
4.4 イオン選別電磁石の特性	30
5. 附属測定機器	32
5.1 照射チェンバー	32
5.2 電子放出率及び電子エネルギー分布の測定	32
5.3 二次イオン質量分析及びイオンエネルギーの測定	37
5.4 発光スペクトルの測定	41
5.5 気体イオン化の測定	41
謝 辞	43
参考文献	44

CONTENTS

1. Needs for Ion Accelerator	1
1.1 Chemical Effects in Radiation Damage	1
1.2 Objectives of Ion-beam Experiments	2
1.3 Design Considerations for the System	3
2. Outline of the System	6
3. Description of Apparatus	9
3.1 Ion Sources	9
3.2 Beam Extractor	14
3.3 Accelerating Tube	15
3.4 Quadrapole Lens	16
3.5 Magnetic Mass Separator	17
3.6 Electrostatic Beam Deflector	19
3.7 Beam Chopper	20
3.8 Target Chambers	21
3.9 Safeguard	23
4. Performance Test	24
4.1 Ion Sources	24
4.2 Lens Characteristics of the Focusing System	27
4.3 Quadrapole Lens	29
4.4 Mass Separation	30
5. Ion-beam Experiment	32
5.1 Irradiating Samples	32
5.2 Secondary Electron Emission	32
5.3 Mass Spectrometer for Secondary Ions	37
5.4 Optical Emission Spectrum	41
5.5 Ionization Measurement in Gas	41
References	44

1. 設置計画

1.1 放射線損傷における化学効果の研究

放射線損傷の従来の研究では、原子炉構造材料（主として金属）における原子変位などの物理的効果に基づく損傷が主な研究対象であった。しかしながらセラミックスのような化合物（金属表面の酸化物を含む）においては、構成原子間の化学結合の変化に基づく損傷の研究が重要になるものと予想される。たとえば、低エネルギー粒子によるスパッタ（表面損傷）が化学反応のために異常に進むこと¹⁾、 ~ 100 MeV イオン衝撃では金属のスパッタはほとんど起こらないのに化合物のスパッタが効率良く起きること²⁾、壊れ易い巨大分子がそのまま分解しないでスパッタされること^{3,4)}などを例として挙げる事ができる。すなわち金属でない化合物に対する損傷の起こり方については、従来の知見の延長では直ちには理解できない。

つぎに高速中性子の場合を例に放射線損傷の起こる過程を考察しよう（Fig. 1.1 参照）。高速中性子は物質中の原子と非弾性衝突ならびに弾性衝突を繰返してそのエネルギーを失う。非弾性衝突によってはアルファ線、プロトン線、ガンマ線（いずれも電離作用の大きい放射線である）を発生する。また弾性衝突によっては、原子核の反跳およびそれに引続く反跳原子（ないしイオン）と周辺原子との間のカスケード衝突をもたらす。この際の衝突エネルギーは構成原子の質量に応じて、 100 keV 以下が主であることは容易に理解できる。

したがって高速中性子による物質の放射線損傷は、(i)アルファ線、プロトン線、ガンマ線などの電離作用と、(ii) keV 領域の原子衝突による作用の重なった結果であるとみなすことができる。前者、すなわち電離放射線の物質に対する作用は従来の放射線化学の知見からかなりの程度にまで推定できる。後者、すなわち keV 領域の原子衝突（エネルギーが大きいときはイオン衝突）では、原子の内殻軌道の電子が励起されたり（内殻励起）、いくつかの電子が同時に励起されたり（多重励起）する。またイオン（ないし原子）のもつ大きな運動量による物質内原子のはじき出し現象も頻ぱんに起こる。これらのイオン-原子衝突では、衝突現象そのものは良く理解されてきたが⁵⁾、その衝突がどのような化学反応を誘起するかについては全くと言っていい程に未知の領域である。⁶⁻⁸⁾

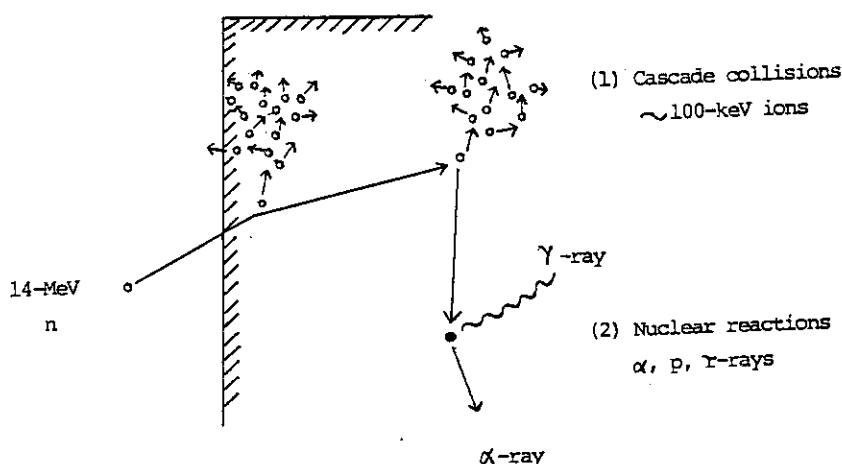


Fig. 1.1 A fast neutron loses energy in matter by elastic scatterings producing recoiled atoms and ions of the energy of about 100 keV which in turn result in a collision cascade and/or by inelastic scatterings (nuclear reactions) producing α -, p-, or γ -rays.

1.2 研究方針

以上の議論により、化学反応の観点から放射線損傷を研究するに際してもっとも不足している情報は、keV領域のイオン衝突による化学反応に関するものであることがわかる。すなわち反応の種類、収量、エネルギー効率（衝突エネルギーのうち化学反応にあずかる割合）、またいかなる衝突素過程がいかなる反応を誘発するかに関する知見である。われわれは研究目標をここに設定した。すなわち、化合物を対象とし、低エネルギーイオン照射法により衝突素過程と化学反応の関連を追究することである。

つぎに低エネルギーイオンの衝突実験の特徴（利点のみ）を挙げておく：

- (i) 反応領域を固体と真空の界面でつくり、真空中に飛び出す生成物（中性フラグメント、正・負のイオン種、電子、光）を直接に検出できる。さらにそれらの生成物の放出エネルギー分布を測定することもできる（Fig. 1.2）。
- (ii) 方向、エネルギー、イオン種がはっきり定まった反応を高い密度で行わせることができる。
- (iii) 衝突イオンビームに周期性をもたせて同期測定を行うことにより、精度の高い測定ができる。

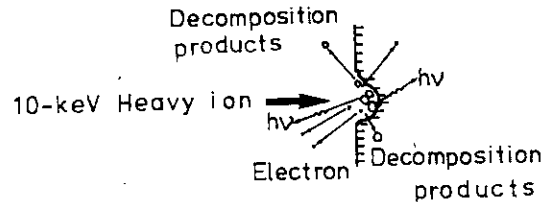
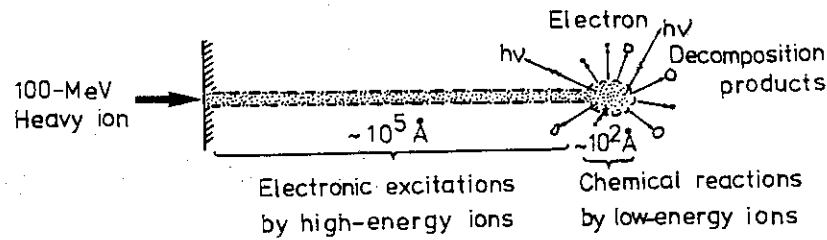


Fig. 1.2 A schematic illustration of the solid surface bombarded by 100-MeV and 10-keV ion.

1.3 装置に要求される性能；考察

ビーム実験の利点を生かしつつ、イオン照射による化学反応の研究を行うために、つぎの性能を備えた装置の建設を計画した。

(i) 加速イオン種： He^+ , Ar^+ , Xe^+ , H^+ , D^+ , C^+ , N^+ , O^+

希ガスの加速により衝撃イオン種の質量のちがいによる効果を調べることができる。その他のイオン種については、それぞれの化学反応性に顕著な差異がある。いずれも常温で気体であるため放電によるイオン化が容易である。

現在、広く使用されている各種の型のイオン源⁹⁻¹¹⁾を検討した結果、デュオプラズマトロンとRF型の二種類を採用することにした。デュオプラズマトロンは、中間電極と強い軸方向磁場によってアーク放電のプラズマを閉じこめ、 $10^{13}-10^{14} \text{ cm}^{-3}$ の高密度にし得る。構造が複雑であり、ホットフィラメントを使用するなど操作も単純ではないが、加速エネルギーの分散度が小さく高い電流密度のイオンビームが得られる。また多価イオンの生成も期待できる。

他方、RF型イオン源は、構造が簡単で動作が安定かつ長寿命であり、化学的に活性な気体のイオン生成に適している。欠点としては、エネルギー幅が大きいことである。通常使用されている軽イオン発生用のRF型イオン源のイオン取出し口（チャンネル）はアルミニウムで製作されており、重イオン発生用として使用した場合にはげしい損耗が予想されるので、この部分を他の材質で製作することを試みる。

また、2つのイオン源で生成したイオンビームはイオン引出し、集束、加速されるが、装置製作にあたってはできる限り共通の電極と電源が使えるよう留意するものとする。

(ii) 加速エネルギー：0 - 100 keV

14 MeV 中性子がたとえば酸化鉄の中で弾性散乱を起こすとき、反跳核 Fe および O の平均エネ

ルギーは 500 keV および 1.5 MeV である。しかしながら 14 MeV 中性子が Fe および O 原子中でエネルギーを失う (10 eV) までに繰返さなければならない弾性衝突の回数 400 および 110 から得られる平均反跳エネルギーは、35 および 120 keV である。高電圧に対する実験室設備と予算も考慮して 100 kV トランス整流方式の電源を加速電圧用に採用することにした。デュオプラズマトロンによる多価電荷イオン種 (たとえば Ar^{2+}) を加速するならば、加速エネルギーは最大 200 keV となる。

(iii) ビームトランスポート系：

たとえば酸素ガスを放電イオン化して加速すると、 O^+ 、 O_2^+ 、 O_3^+ などのイオン種が加速される。それぞれのイオンが物質内でエネルギーを付与する際の局所エネルギー密度は異なる。また軽い H^+ イオン衝撃による固体のスパッタ率を測定しようというときに、イオン源の電極や残留気体に含まれる不純物からのイオン (C^+ 、 O^+ など) も同時に試料に照射されるようでは、正しいデータは得られない。

以上の理由により、イオン種選別電磁石、さらにその機能を十分に発揮させて同時にビーム強度の低下を防ぐために、ビーム集束レンズの設置を計画した。

100 keV の Xe^+ ビームを 30 度だけ曲げる場合を考える。磁束密度 H (ガウス) と加速電圧 V (V) で加速された質量数 M、荷電数 n のイオンが曲げられる曲率半径 R (cm) の関係式¹²⁾

$$R = \frac{143.95}{H} \left(\frac{MV}{n} \right)^{1/2}$$

から、 $RH = 5.2 \times 10^5$ ガウス・cm を得る。有効磁場の長さを 30 cm としてビーム偏向 30 度を得る (すなわち $R = 60$ cm) ためには、 $H = 8700$ ガウスあればよい。またここから試料位置までを 500 cm、試料位置におけるビーム位置変動を ± 0.5 mm とするためには、電磁石電源の安定性 10^{-4} が要求される。

また、イオン源からイオンを引出した後の広がったビームを加速管に導入するためにアインツェルレンズを、さらにビームを選別電磁石に導き、試料に高い密度のビームを送るために四極子型静電レンズおよびビーム偏向器 (XY 方向) を設ける。

(iv) ビームチョッパー：

これはビームに周期性をもたせ、これと同期させて測定を行う、いわゆる位相検知方式によって SN 比を向上させるためのものである。孔付きの回転羽根によって機械的にビームを断続させることとし、真空系内の回転子と外側のモータの間の軸シールの問題と同期信号の取出しを検討する。

(v) 排気系：真空度 10^{-7} Torr

気体中を走る数 10 keV の粒子が 10 m 以上の平均自由行程を得るためには、気体密度が 10^{12} cm^{-3} 以下、つまり 3×10^{-5} Torr 以下であることが必要である。一方、イオン源から発生したイオンが走る空間 (アインツェルレンズ、加速管、集束レンズ、選別電磁石、ビーム偏向板など) の容積約 20 l、測定部分の容積約 100 l と見積る。他方、イオン源 (RF 型・デュオプラズマ型) の放電ガス消費量として最大 $10^{-3} \text{ l} \cdot \text{Torr} \cdot \text{S}^{-1}$ と見積り、このガス放出量に比べれば容器のリーク量は無視できるとすれば、到達圧力 P_{eq} は

$$P_{\text{eq}} = \frac{10^{-3}}{S_v} + P_0$$

但し、 S_v はポンプの有効排気速度 ($\ell \cdot \text{S}^{-1}$), P_0 はポンプ自体の到達真空度 (Torr) である。よって到達真空度を 10^{-5} Torr 以下に保つためには、 $S_v = 100 \ell \cdot \text{S}^{-1}$ 以上、 $P_0 = 10^{-6}$ Torr 以下のポンプが必要となる。

他方、数 10keV イオンの固体中の飛程が、10~1000 nm であるから、イオン照射による反応はすべて試料表面に起こると言うてよく、そのため残留気体の吸着による試料表面の汚れをできるだけ抑える必要がある。すなわちイオンポンプを用いて清浄高真空に保つことを考える。

2. 装置の概要

装置の主な構成と電気系・排気系の概要を示す。

- (i) デュオプラズマイオン源：気体アーク放電によって生成されるプラズマ球を磁場によって安定化し、静電場により陽イオンを細孔を通して引出し、アインツェルレンズにより集束、加速管により加速する。
- (ii) RF イオン源：ガラス容器内に気体を満たし、外側にある高周波リングを通して誘導的にエネルギーを供給し、気体をイオン化する。陽イオンの引出し、集束、加速は(i)の場合と同じものを用いる。
- (iii) ビームトランスポート系：アルミナ製加速管を用いて0 - 100 keVに加速されたイオンは、ビームトランスポート系を経て測定チェンバーに導かれる。ビームトランスポート系には、四極子レンズ、イオン選別電磁石、四極子レンズ、ビーム偏向板、ビームチョッパーなどが含まれる。
- (iv) ターゲットチェンバー：試料を六個取り付けられる照射用チェンバーと種々の測定器を取り付け、照射しながら測定のできる測定用チェンバーの二種類を用いる。排気は、油拡散ポンプとイオンポンプを用いる。
- (v) 測定機器：固体試料からの二次電子放出率の測定、二次電子エネルギー測定、二次イオンの質量スペクトル及び放出エネルギー測定、二次放出粒子の飛行時間測定、照射試料からの発光測定、及び気体中のイオン化の測定などが可能である。
- (vi) 装置各部の設置経過（設置又は測定開始年次）
 - 1977：イオン源設置計画
 - 1978：デュオプラズマイオン源、加速管
 - 1979：二次電子測定、ビーム偏向・集束系
 - 1980：イオン選別電磁石、RFイオン源
 - 1982：ビームチョッパー、二次イオン測定
 - 1984：衝突励起光分析装置、高速時間分解測光器
 - 1985：気体イオン化測定
- (vii) 電源系統：本装置の稼動に必要な主な電源の電圧または電力値を Fig. 2.1 に模式的に示す。
- (viii) 排気系統：本装置は、3台の油拡散ポンプと2台のイオンポンプを使用している。その排気系を Fig. 2.2 に示す。

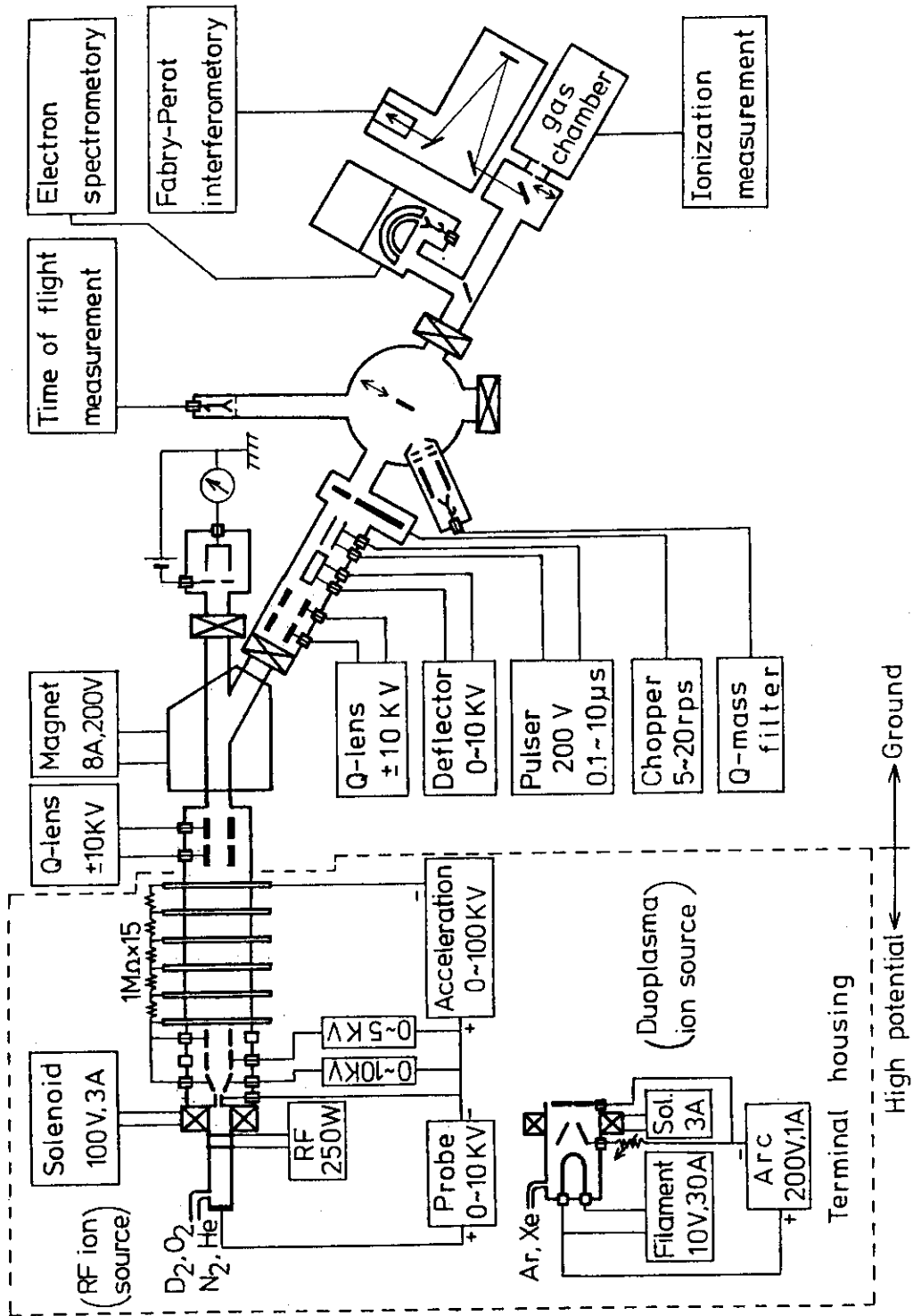


Fig. 2.1 Power supplies for the 100-kV ion accelerator.

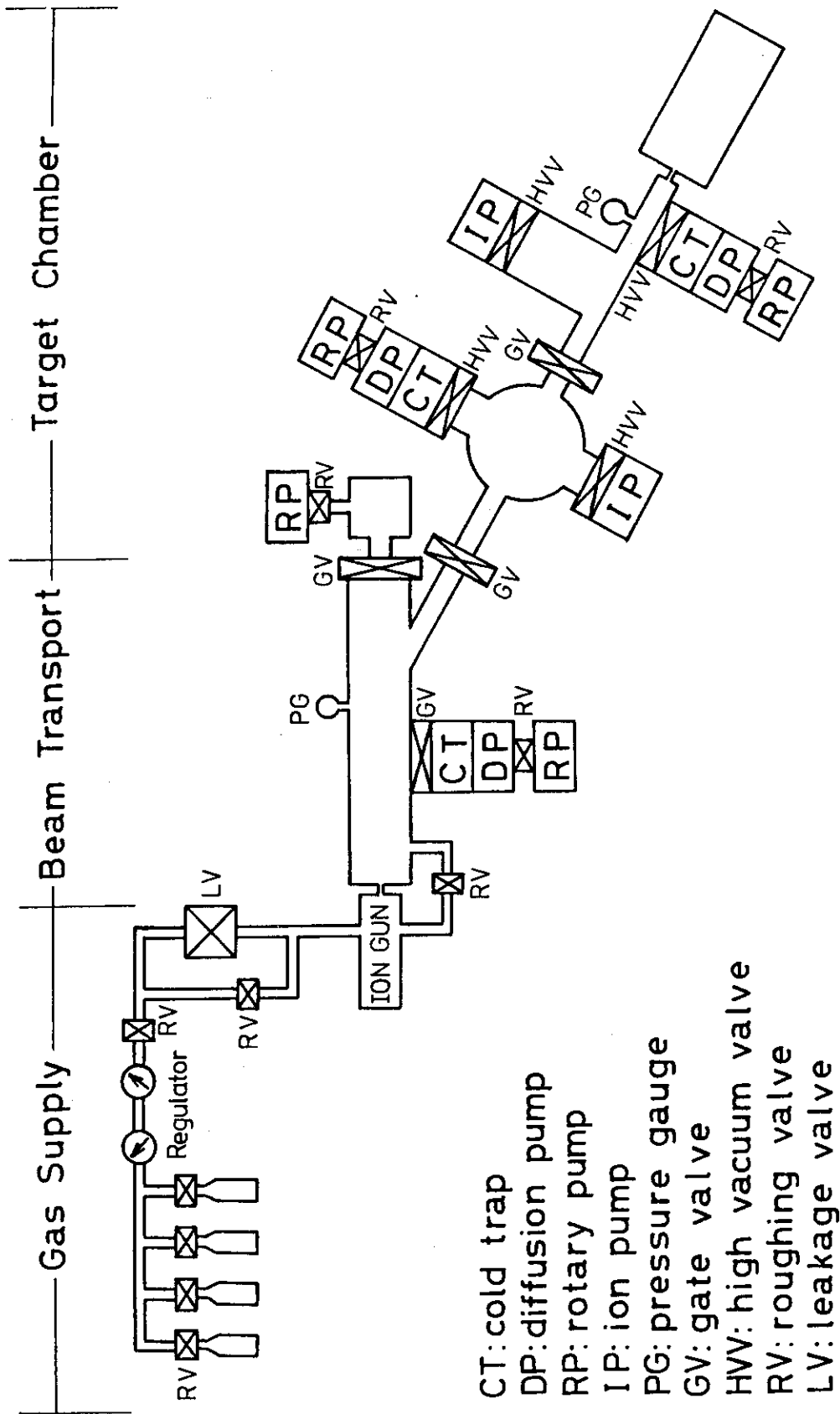


Fig. 2.2 Schematic layout of the vacuum system for the 100-kV ion accelerator.

3. 各部の詳細

3.1 イオン源

(i) デュオプラズマ型イオン源

デュオプラズマ型イオン源は、アーク放電により気体をイオン化し、この際カソード（熱フィラメント）とアノードの間に設けた電極と磁界によりプラズマを安定化し、アノードに設けた細孔を通してイオンを引出す形式のイオン銃である。Fig. 3.1 にデュオプラズマ型イオン源の構造を示す。

気体導入口よりイオン化すべき気体を導き、イオン源内の気体圧力を約0.05 Torr に保つ。フィラメントに約15 Aの電流（2 V）を流し、熱電子を放出させる。フィラメント（カソード）とアノード間の電圧を序々に大きくし数十Vにしてアーク放電を起こす。フィラメントからの熱電子とイオン源内の気体分子の衝突により生成したプラズマは、中間電極（軟鉄）と磁場（ソレノイドを用いて発生させる）の作用により中間電極先端部からアノード（軟鉄）の細孔部（タングステン製）に集束され、陽イオンはこの細孔（直径0.2 mm）を通してイオン源から引き出される。Fig. 3.2 にデュオプラズマ型イオン源の電源系統の図を示す。

このイオン源の寿命は、フィラメントによってきまる。フィラメントとして各種の材質及び形状のものを試験してきた結果、現在は直径0.1 mmのニッケル線金網（100メッシュ）から15 mm × 80 mmの大きさを切りとり、それを細長く折りたたみさらにU字型に曲げたものを使用する。これを20%硝酸で洗浄し、真空中で加熱処理を行った後、ストロンチウムを含む炭酸バリウム懸濁液（米国 J. T. Baker Chemical 社製 R-500）に2, 3回浸し、それを真空中で加熱分解したいわゆるオキサイドフィラメントを使用することにしてている。このフィラメントの寿命は、通常の運転条件下において百時間以上である。

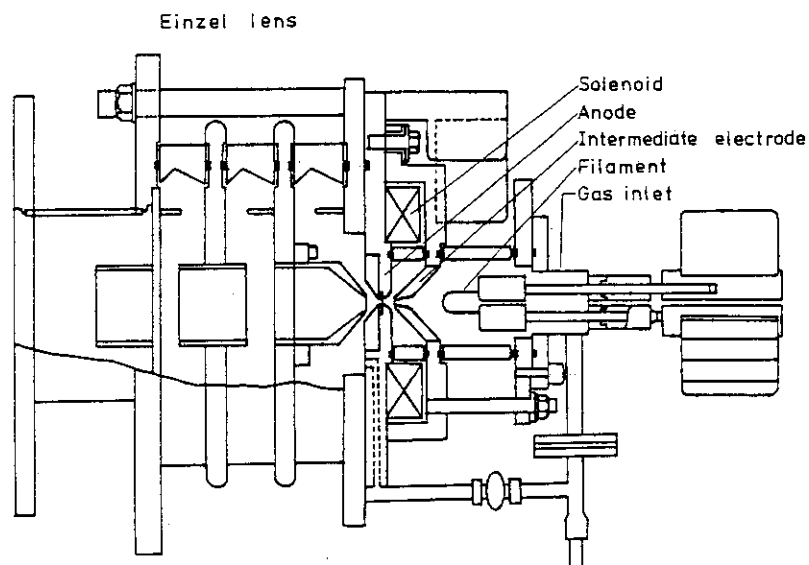


Fig. 3.1 Duoplasmatron ion source and extraction system.

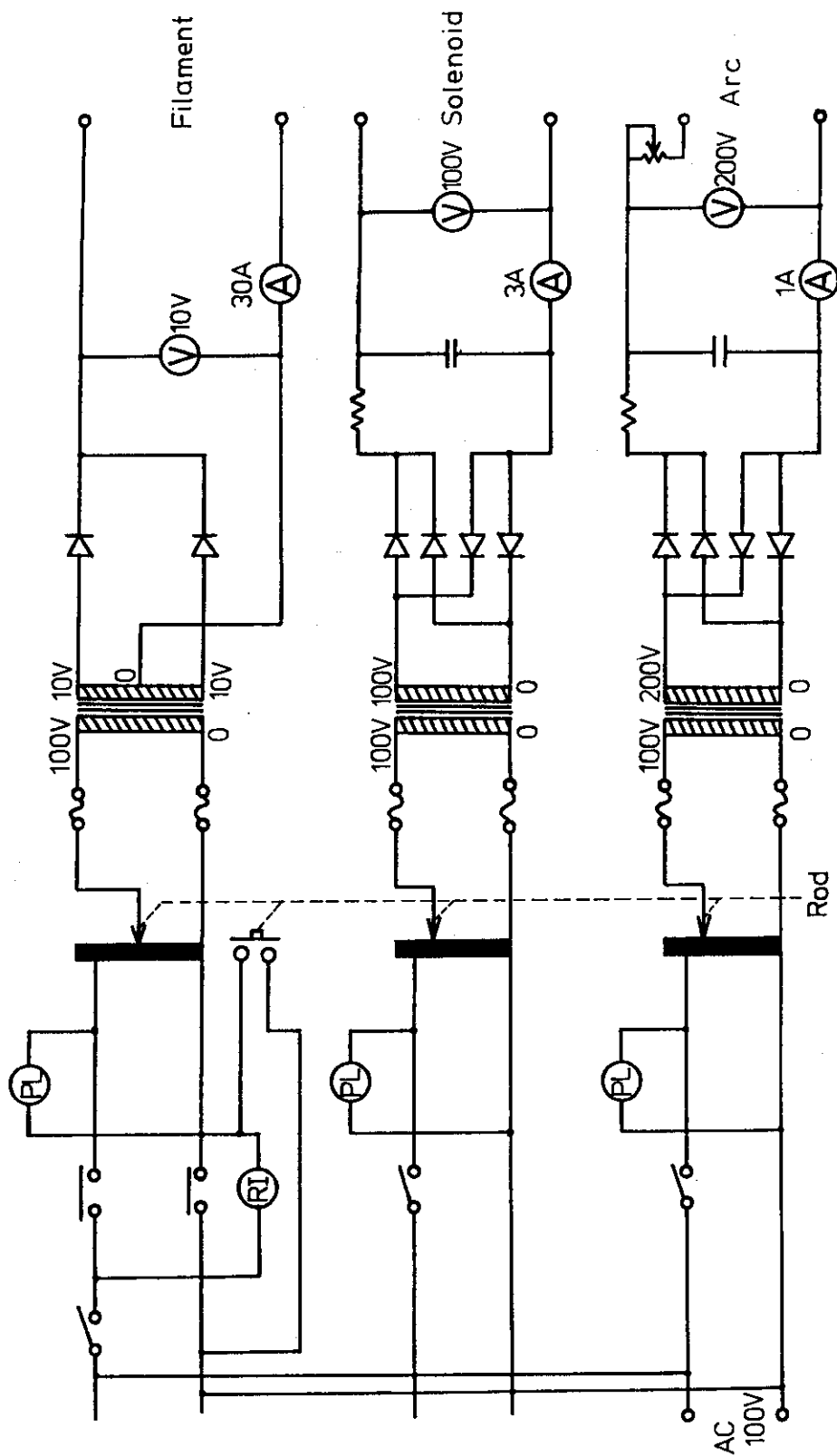


Fig. 3.2 Power supplies for the Duoplasmatron source.

(ii) RF型イオン源

RF (高周波) 型イオン源は、ガラス容器中気体を満たし、外側から誘導的に高周波エネルギーを供給 (カップル) させる方式である。Fig. 3.3 にその構造を示す。

気体導入口からイオン化すべき気体を導入し、パイレックスガラス製の放電容器内の気体圧力を $10^{-1} \sim 10^{-2}$ Torr 位に保ち、容器外壁に固定した高周波リングを通して 100 MHz の高周波を供給して容器内の気体に放電を起こす。この状態でアパーチャ電極 (カソード) に対してプローブ電極 (アノード) に十数 kV 印加するとアパーチャ電極と同電位のチャンネル (プラズマの通路) を通してイオンビームを引き出すことができる。さらに励磁ソレノイドを用いてイオン銃軸方向に直流磁界を重畳し、放電管内のプラズマ密度を高めることができる。Fig. 3.4 に RF 型イオン源の電源系統の図を示す。

RF 型イオン源の寿命を大きく左右するのは、チャンネルの寿命である。放電容器内のイオンは、数 kV のプローブ電圧により加速されてチャンネルを衝撃し、チャンネル先端部分を損傷させる。チャンネルの損傷が進むと、ビームがふらつき、ビーム電流も減少する。また、チャンネルからスパッタされた金属粒子が放電容器の内壁に付着し、高周波エネルギーの損失をもたらす、ついには放電が起こらなくなる。放電気体の種類に応じてチャンネルの材質とその寿命の関係の試験を行った結果、現在、水素、ヘリウムなどの軽元素用にはアルミニウム製のチャンネルを、またアルゴン、キセノンなどの重元素用にはタンタルないしはモリブデン製のチャンネルを使用している。寿命は、いずれも百時間以上である。

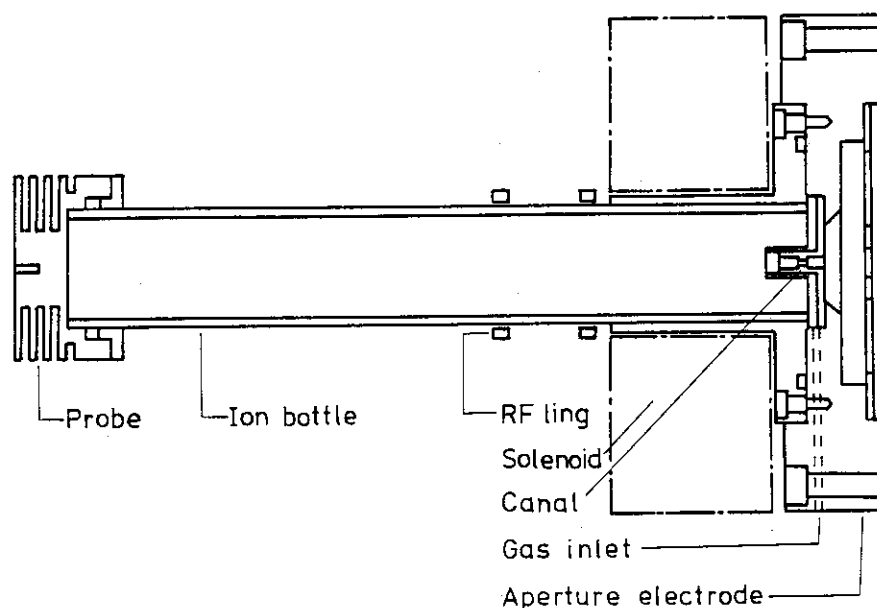


Fig. 3.3 RF ion source.

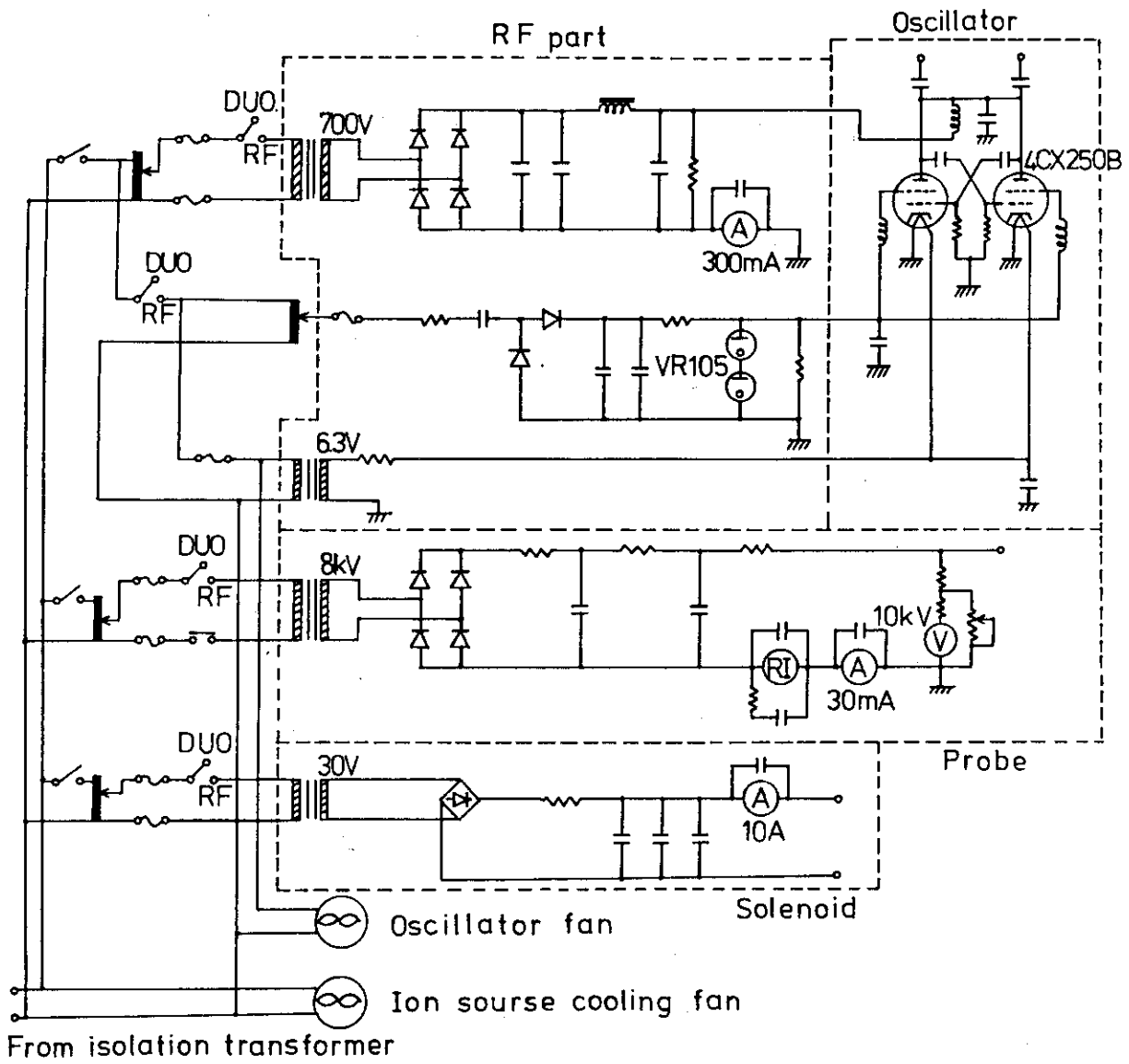


Fig. 3.4 Power supplies for the RF ion source.

(iii) イオン源用気体供給系

イオン源用気体の供給システムを Fig. 3.5 に示す。気体充填容器は 75 ml 容量のサンプルシリンダーである。バイパスバルブを開け、イオン源排気装置を用いて気体供給系の排気を行う。またバイパスバルブを閉じ、サンプルシリンダーの元栓を開き、減圧弁 (Regulator) の二次圧力をほぼ 0.5 kg/cm^2 に調整した後、可変型リークバルブを通してイオン源への気体の供給を行う。供給系の配管はすべて (1/4) inch ステンレス製、その接続には、スウェージロック方式を用いた。

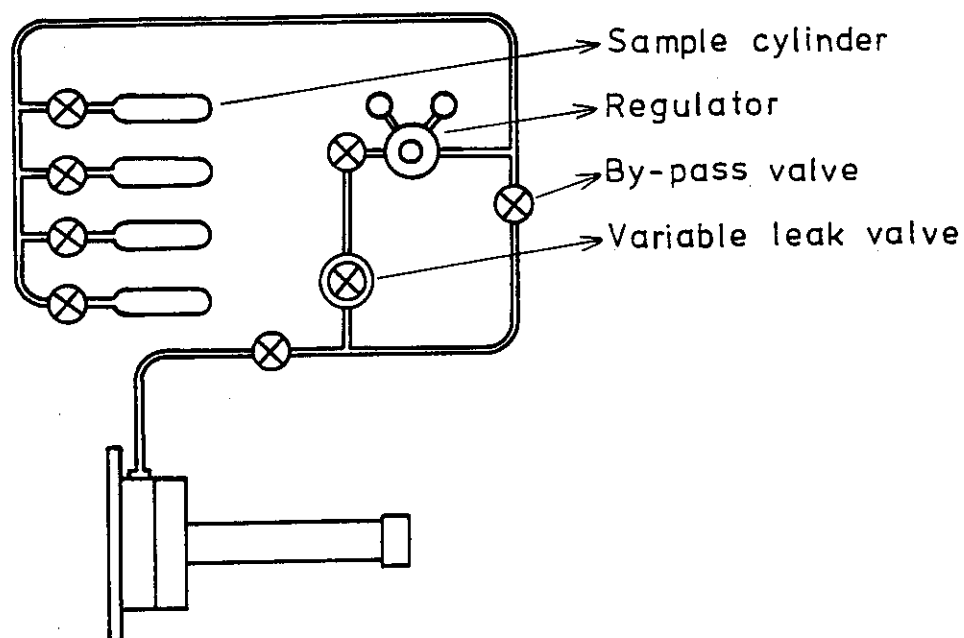


Fig. 3.5 Gas supply system capable of furnishing any of several gases to the ion source.

3.2 ビーム引出部

イオン源内のプラズマから実験に必要な陽イオンを引出すと同時に加速管に導くために陽イオンビームを集束する部分である。陽イオンの引出口は、デュオプラズマ型イオン源の場合ではタングステン板（アノード）に設けられた直径0.2mmの細孔であり（Fig. 3.1）、またRF型イオン源の場合ではアパーチャ電極に設けられた直径8mmの孔である（Fig. 3.3）。デュオプラズマ型イオン源の場合、磁界と電界の両方の作用により、中間電極先端部に発生した密度の高いプラズマが引出口を通して引出電極側に拡散していく。さらに磁界の強度はアノードの外側で急激に減少しているために、プラズマを押し出すような力が生じる。そのため比較的小さな穴径の細孔を用いても、イオン放出面には十分なプラズマが供給される。RF型イオン源の場合、アパーチャ電極に対してプローブ電極に十数kVを印加することにより、カナルを通してアパーチャ電極の孔部にプラズマが供給される。さらに外部からの磁界の作用により引出されるイオン電流は増加する。

イオン源引出口から陽イオンを引き出し、陽イオンビームとして集束させる静電集束レンズ系は、Fig. 3.1に示されている。この型のレンズ系は、Alvager と Uhler¹³⁾によるもので、全体で3個の電極から成る。イオン引出口から最初の電極は引出し電極（Extractor）と呼ばれ、イオン引出口（アノードまたはアパーチャ電極）に対して $-V_E$ の電位（ $-V_E$ ）をかけて陽イオンを引出す。また同時に、3個の電極はいわゆるアインツェルレンズを構成し、両端の同電位の電極に対して中央の電極（Lens）にはレンズ電位（ $-V_L$, $V_E \gg V_L$ ）を印加する。アインツェルレンズの働きは、イオンビームのエネルギーを変えずに、加速管入射前の対物面（レンズの像面）を移動させ、20-100kVの範囲のイオン加速の場合で所定のターゲット位置にイオンビームを集束させることである。

この型のアインツェルレンズに近い条件下における静電型三枚電極レンズの投射特性の計算結果が清水により報告されている。¹⁴⁾ Fig. 3.1のアインツェルレンズの寸法を用いて焦点距離を求めると、イオン加速が20kVおよび100kVの場合でそれぞれ40および49.5mmであった。ただし、いずれの場合もレンズ電圧 V_L を1kVとした。

3.3 加速管

アインツェルレンズ系を出たイオンビームは加速管により 20-100 kV に加速される。加速管の構造を Fig. 3.6 に示す。15枚の電極（ステンレス）をそれぞれアルミナ製円筒ではさんだもので、将来の加速エネルギー増加の場合を考慮して全体で 300 kV 耐圧に製作されている。電極と電極の間は 100 Mオームの抵抗で接続されており（全抵抗は 1.5×10^9 オーム）、高圧印加のさいにこのデバイス抵抗を流れる電流を読みとることができる。またアルミナ製絶縁部分が高速イオンによって衝撃されたり汚染されたりするのを防ぐために、各電極は皿状の形状をしている。高圧電源の仕様を Table 3.1 に示す。

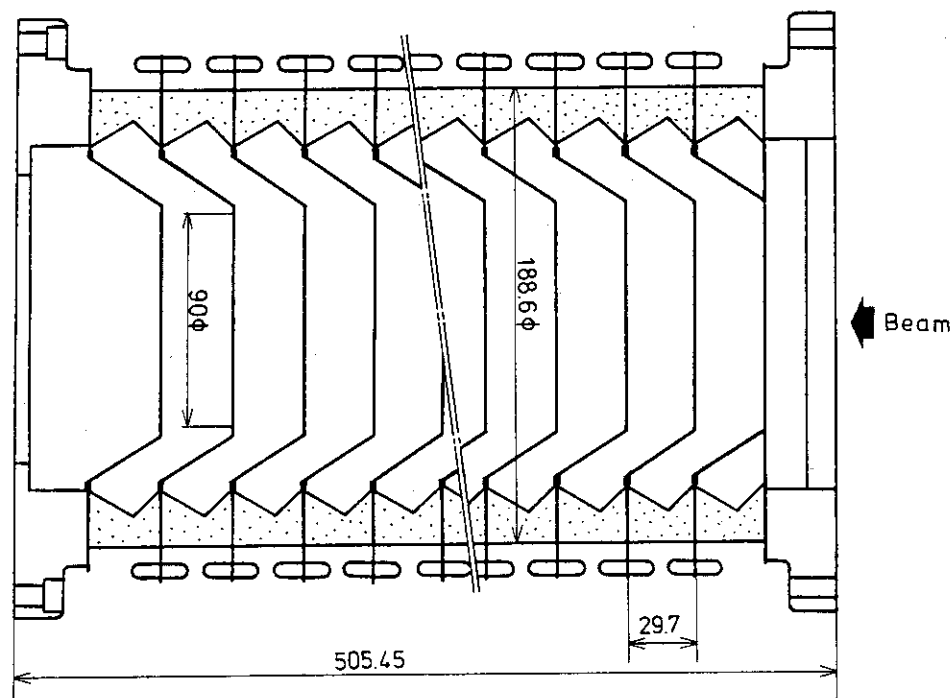


Fig. 3.6 Constant-gradient accelerator.

Table 3.1 High-voltage power supply.¹⁾

Output voltage	100 kV DC (max)
Output current	1 mA
Stability	1×10^{-4}
Ripple (peak-to-peak)	100 V
Drift	5×10^{-4}
Polarity	plus

1) HDV-100 K-1S, Pulse Electronic Engineering, Co.

3.4 静電型四極子レンズ

20-100 kV に加速されたイオンビームは、静電型四極子レンズで集束された後、イオン選別され、さらに再び静電型四極子レンズで集束される。四極子レンズの構造を Fig. 3.7 に示す。

四極子レンズは比較的弱い電場でレンズ作用を示す。XZ 面で集束レンズとして、YZ 面では発散レンズとして働くという極端な非対称性があるため、本装置では 2 組の四極子レンズを用いて対称性を保持する。四極子ロッド断面の形状は、双曲線ではなく曲率半径 12.5 mm の半円である。高圧印加試験結果によれば、印加電圧 0.5-7 kV において電源を流れる電流 25-360 mA、リップルは 1 mV 以下である。

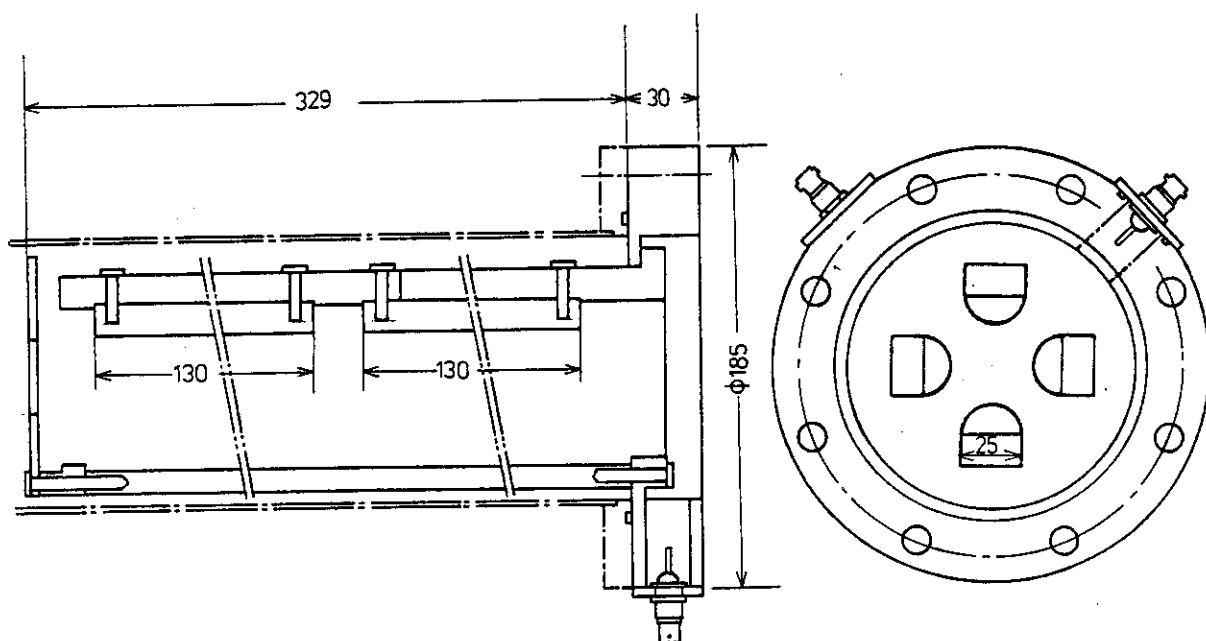


Fig. 3.7 Quadrupole lens system.

3.5 イオン選別電磁石

イオン源内でアーク放電（デュオプラズマ型イオン銃）または高周波放電（RFイオン銃）により気体をイオン化すると一般には数種類のイオンが生成する。これは気体分子の直接電離以外に高い電子励起を受けた分子またはイオンの解離反応によるものやイオン分子反応に基くものが含まれるからである。イオン分子反応は特にイオン源内の気体圧力に依存する。さらに放電しようとする気体中の不純物、イオン源内電極表面に吸着している不純物（水、二酸化炭素、酸素等）も同様にイオン化、あるいはスパッタによるイオン化をうける。

使用を予定している放電気体について、生成が予想されるイオン種を Table 3.2 にまとめる。

またイオン選別用に設置した電磁石とその電源の性能を Table 3.3 に示す。また電磁石の構造を示す概略図を Fig. 3.8 に示す。

Table 3.2 Ionic species expected to be produced from discharge of the gases.

Gas	Ionic species
D ₂	D ⁺ , D ₂ ⁺ , D ₃ ⁺
O ₂	O ²⁺ , O ⁺ , O ₂ ⁺ , O ₃ ⁺
N ₂	N ⁺ , N ₂ ²⁺ , N ₂ ⁺ , N ₄ ⁺
CH ₄	C ⁺ , CH ⁺ , CH ₂ ⁺ , CH ₃ ⁺ , CH ₄ ⁺ , C ₂ ⁺ , C ₂ H ⁺ , C ₂ H ₂ ⁺ , C ₂ H ₃ ⁺ , C ₂ H ₄ ⁺ ,
Ar	Ar ²⁺ , Ar ⁺

Table 3.3 Characteristics of the magnet for mass separation.

Deflecting angle	30°
Pole gap	30 mm ± 0.1 mm
Magnetic flux density	max 10 kG ¹⁾
Orbital radius	800 mm
Pole width	60 mm at the edges 80 mm at the center
Pole length	365 mm
Material	SS 41
Weight	750 kg
Power supply	Voltage: 0 - 200 V Current: 0.5 - 8 A Load stability: 0.05%±1 mA Ripple: 0.02%±1 mA

1) 10.93 kG at 8 A, 9.25 kG at 6 A, and 6.46 kG at 4 A.

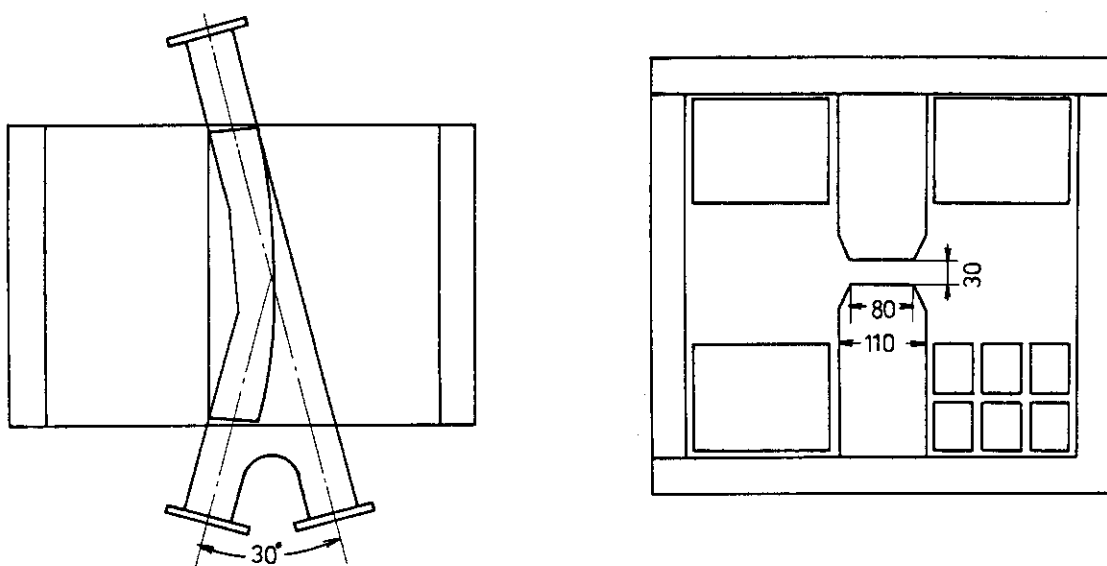


Fig. 3.8 Magnetic mass separator; top view (left) and cross-sectional view (right).

3.6 静電偏向系

イオン選別された後のイオンビームは、再び3.4のものと同じ型の四極子型静電レンズで集束され、つぎに静電偏向系 (Fig 3.9) に導かれる。この偏向系は、ビーム軸合せ用として用いられるとともに、パルス照射実験の場合には、偏向板にパルス電圧を加えてイオンビームをパルス化するのに用いられる。

いま、偏向板の長さを ℓ (cm)、2枚の偏向板の間隔を d (cm)、印加電圧を V (V)、イオン加速エネルギーを E (eV)、イオン価数を q とし、ビームを測定する位置を偏向板中心から L (cm) としてビームの中心軸からの偏向距離 y (cm) を求めると、

$$y = \ell \cdot L \cdot V \cdot q / 2d \cdot E$$

である。¹⁵⁾ $E = 100 \text{ keV}$, $\ell = 17 \text{ cm}$, $L = 60 \text{ cm}$, $d = 3 \text{ cm}$, $q = 1$ として、偏向 $y = 0.5 \text{ cm}$ を得るに必要な偏向板印加電圧を求めると 294 V となる。

またビームパルス化に使用する電源の仕様を Table 3.4 に示す。

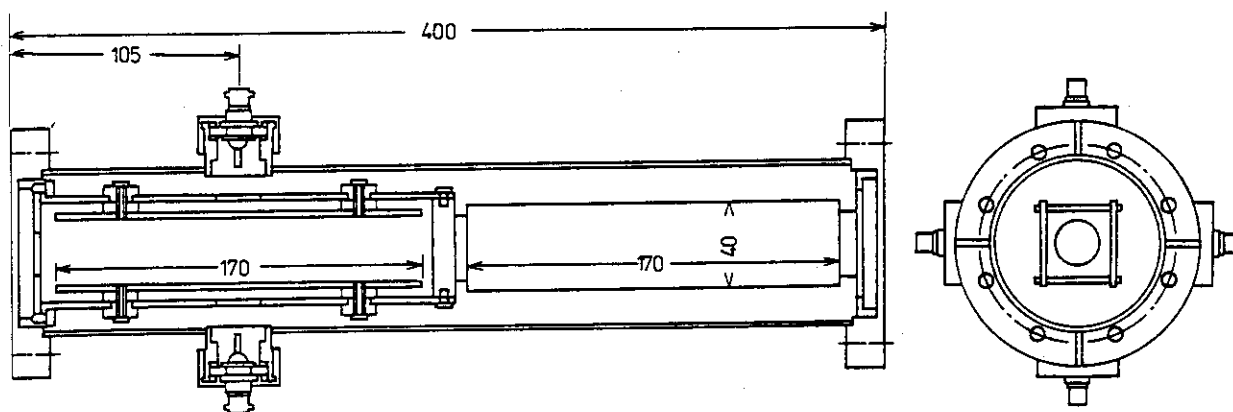


Fig. 3.9 XY-Beam deflector.

Table 3.4 Characteristics of the power supply for pulsed-beam production.

Output pulse	Negative
Pulse height	100 - 300 V
Pulse width	0.1 - 110 μs
Pulse rate	0.1 - 110 ms
Rise time	< 50 ns
Fall time	< 50 ns

3.7 ビームチョッパー

本装置は、真空中で回転する窓付き円板によりイオンビームをパルス化し、それに同期させたロックインアンプ測定を行って検出感度 (S/N 比) を高めることを目的とする。

窓付き円板の回転は真空容器の外にあるモータの回転による。真空シールは磁性流体 (Ferrofluidics) を用いた (回転速度: 5-20 rps)。またビームの ON-OFF 信号はビーム通過用窓と円板中心に対して対称位置にある窓を通過する光の検知 (光ダイオード) を利用して取り出す。ビームチョッパーの構造を Fig. 3.10 に示す。

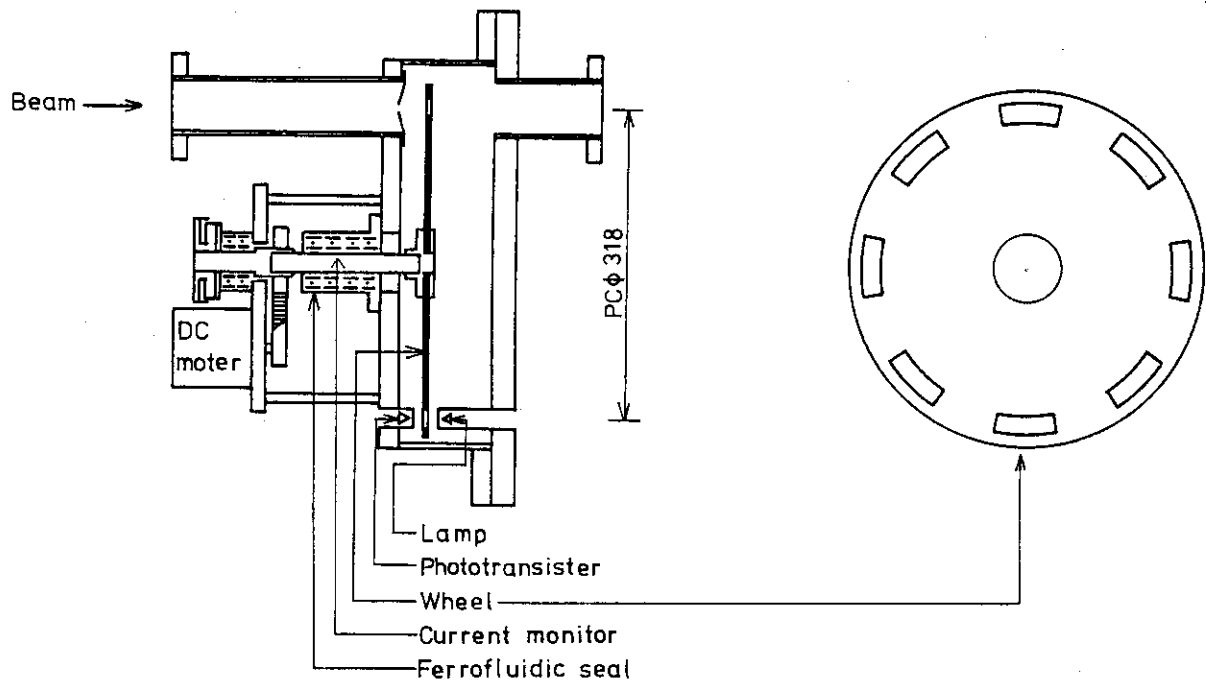


Fig. 3.10 Beam chopper and its wheel (right).

3.8 試料チェンバー

(i) 照射用チェンバー：大気にさらすことなく数個の試料を順次照射することを目的としたチェンバーであり、その構造を Fig. 3.11 に示す。

6個の直径10mmの試料保持台が等間隔に回転軸に固定されている。試料の回転はチェンバーの外にある回転導入機を用いて手動で行う。回転角60度ごとに溝をきったボールベアリングにより試料の回転は簡単に行える。直径8mmの窓をもつ試料押えにより試料が保持されるため、円形以外の試料も取付けることができる。粉末試料はペレット状に加圧成形して使用する。

またこの試料台は、ターゲット電流を測定できるようにチェンバー本体とは電氣的に絶縁されている。照射中のターゲット電流の測定は、イオン照射による試料からの二次電子放出による効果を除くため、約-150Vの電位をサプレッサー電極に印加しながら行う。試料台を取りはずし、ビーム軸上の窓の位置に金網付き石英円板を置くことにより、ビームの形状を直接観察することができる。

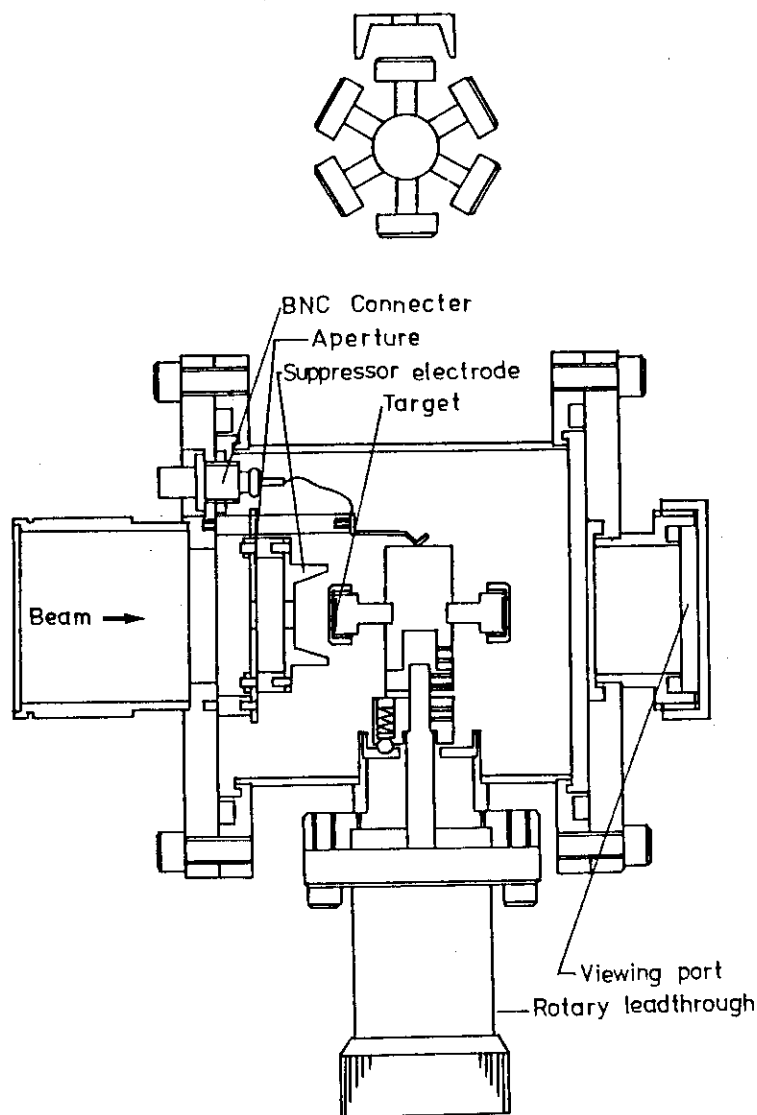


Fig. 3.11 Target chamber for irradiating 6 samples.

(ii) 測定用チェンバー：試料を照射しながら同時に種々の測定を行うことを目的としたチェンバーであり、その構造を Fig. 3.12 に示す。

チェンバー中心（試料位置）に対して等角度に付いているポートに測定用機器を取付けることができる。例えば試料からの二次電子のエネルギー分布、種々の質量をもつ二次イオンのエネルギー分布、放出粒子の飛行時間などの測定ができる。またリークバルブを通したノズルから気体を導入することにより、気体試料についての測定も行うことができる。

測定中の排気は、油拡散ポンプとイオンポンプを用いており、真空度は 10^{-7} Torr 台である。

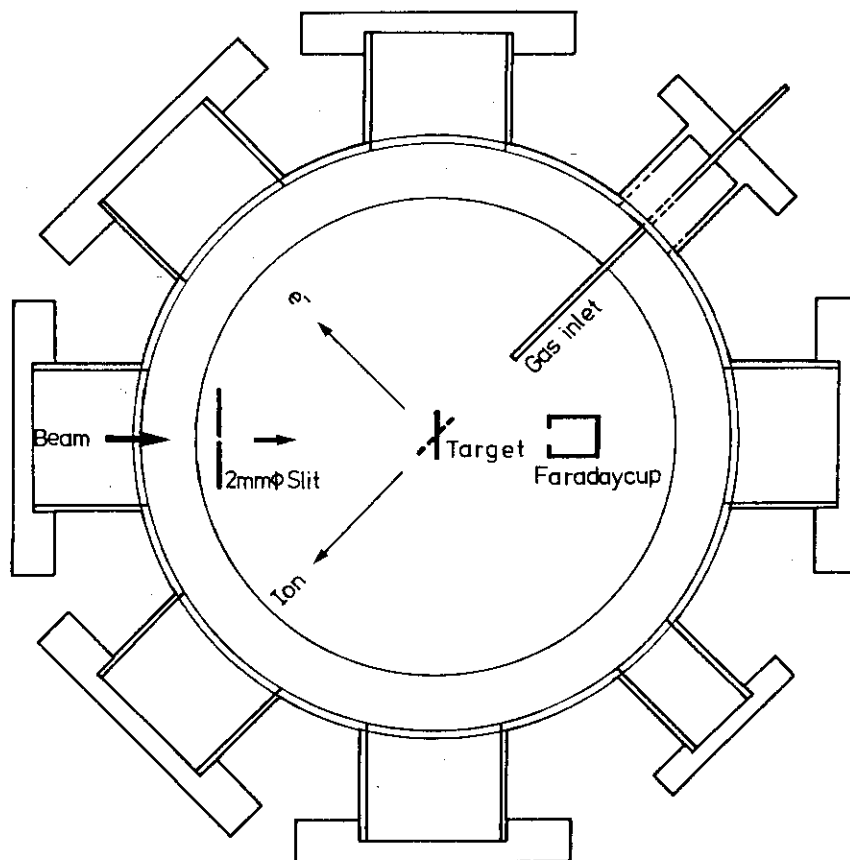


Fig. 3.12 Target chamber for measuring during bombardment.

3.9 安全対策

(i) 高電圧に対する安全対策

本装置運転中は、高電圧保護金網により、作業者はイオン源及び高電圧印加部分へ接近することができない。イオン源の操作は、すべて保護金網の外から、約1mの長さのテフロン棒を通して行う。なお、イオン源室出入のための金網の扉の開閉部分及び出入口通路にアース（接地）棒を取付ける部分の2箇所が高電圧印加に対するインターロックが設置されている。また操作パネル盤に異常時に電源を切るための非常用押ボタンが設けられている。さらに室内運転表示灯が設けてあり、運転中は自動的に回転赤色ランプが点灯する。装置のうちで高電圧金網の外側に配置されているもの及び金網自体は、すべて第1種規格のアース電位に接地されている。高電圧に対する安全対策を示す電気系統図を Fig. 3.13 に示す。

(ii) 放射線に対する安全対策

本装置で使用されるエネルギー範囲のイオン照射により起こる反応は、低エネルギー電子及び紫外線の発生が主なものである。しかもこれらの反応は肉厚5mmのSUS製容器内で起こるので、放射線障害の危険性は極めて低い。事実、サーベイメータ（Victreen電離箱）を用いた測定結果によれば、アルゴン加速（73 keV, 1.0 μ A）の場合で、装置周辺部の線量率はいずれも0.1 mR/h以下であった。

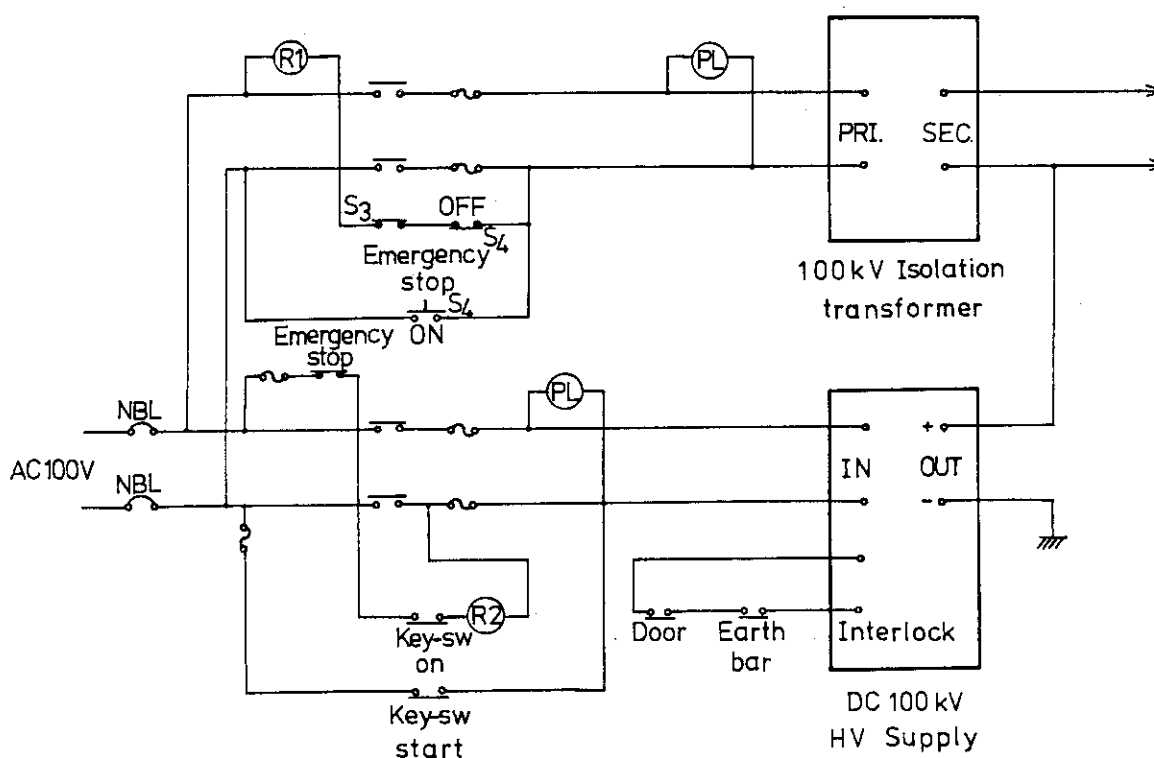


Fig. 3.13 Electric circuit for safeguard.

4. 運転試験結果

4.1 イオン源

(i) デュオプラズマ型イオン源によるアルゴン (Ar) 加速の場合の運転条件とビーム電流の関係を Table 4.1 に示す。

Table 4.1 Operating conditions for acceleration of Ar-ions by Duoplasmatron source.

Ion source	
Gas pressure	2×10^{-5} Torr
Filament current	20 A (2.8 V)
Arc current	0.4 A (80 V)
Solenoid current	0.35 A (14 V)

Effect of Extractor potential on beam current (Lens potential at 1.7 kV; Acceleration at 40 kV)	
0 kV	0 μ A
1.0	8
1.5	28
2.0	77
2.5	119
3.0	106

Effect of Lens potential on beam current (Extractor potential at 2.5 kV; Acceleration at 40 kV)	
0 kV	36 μ A
0.5	89
1.0	114
1.5	120
2.0	120

(ii) RF イオン源によるアルゴン (Ar) 加速の場合のイオン加速エネルギー、プローブ電極電位、ビーム引出部 (引出電位) の変化によるビーム電流 (イオン源から約 3 m の直線位置において 8 mm ϕ アパーチャを通過したイオン電流) の変化をそれぞれ Fig. 4.1 - 4.3 に示す。0 - 8 kV の引出電圧でビーム引出し部から引出されるビーム電流および 20 - 100 kV 加速領域の全イオンビーム電流は、それぞれ引出電位と加速電圧の $3/2$ 乗におおむね比例している (Fig. 4.1, Fig. 4.3)。

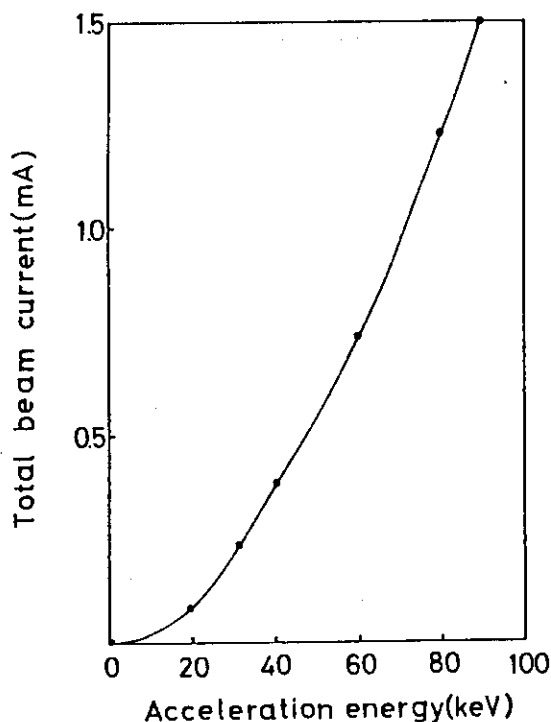


Fig. 4.1 Maximum Ar⁺-beam current obtained from RF ion source at varying acceleration energy. The relation between total beam current I (mA) and acceleration energy E (keV) is roughly expressed by: $I = 0.00165E^{3/2}$.

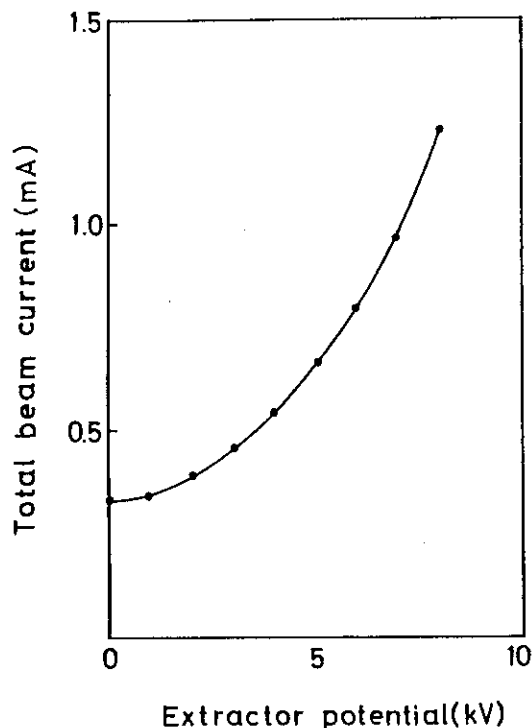


Fig. 4.2 Effect of the extractor potential on the total beam current. Acceleration of Ar⁺-ions from RF source at 100 kV, while other parameters of the source and the lens system being maintained constant during the measurement.

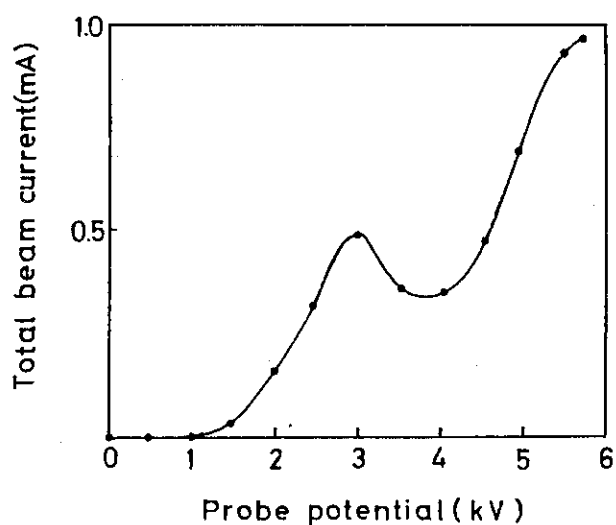


Fig. 4.3 Effect of the probe electrode potential on total beam current. Ar^+ -ions from RF source, accelerated at 100 kV.

また重水素 (D_2) 加速の場合の運転条件によるビーム電流の変化を Table 4.2 に示す。これらの条件以外にもビーム電流の大きさを支配する因子があり、たとえばオシレーター電流を 100 から 160 mA に変化させることによりビーム電流は約 10 倍に増加すること、さらにソレノイド電流を 1 から 8.5 A に変化させることによりビーム電流は約 16 倍に増加するなどである。

Table 4.2 Operating conditions of RF ion source for D_2 . Acceleration at 80 kV.

Gas pressure	1.2×10^{-5} Torr
Oscillator current	150 mA
Solenoid current	5 A
Probe potential	2.4 kV (2 mA)
Extractor potential	3.4 kV (0.5 mA)
Lens potential	0.35 kV (0.3 mA)
Q-lens potential	± 0.6 kV
Beam current	0.62 mA

4.2 ビーム引出部および加速管のレンズ特性

イオン源、集束レンズ系、加速管およびターゲットの各配置が与えられた時に、加速エネルギーの広い範囲（20-100 keV）のイオンビームに対して、ターゲット位置に焦点が結ぶようにビーム引出部の調整ができることが望ましい。本装置の実際の配置とその距離の関係を Fig. 4.4 に示す。

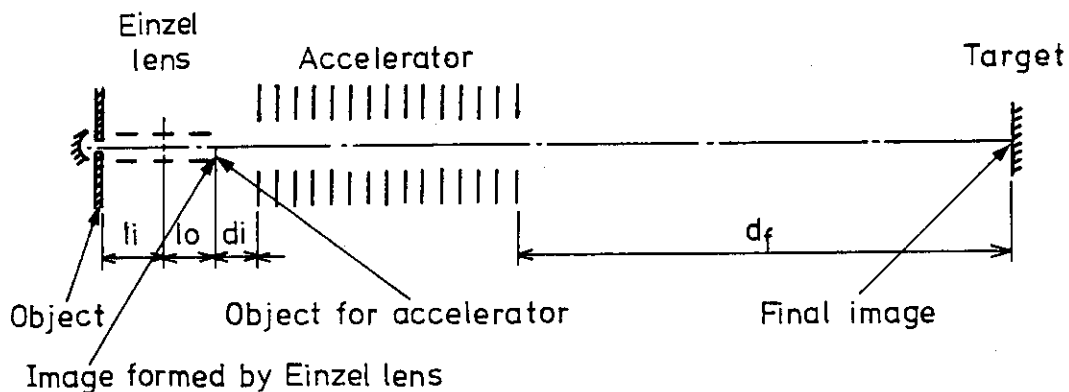


Fig. 4.4 Illustration of an image forming system, showing distances between its components.

アパーチャからアインツェルレンズ主面までの距離 (l_i) 8.3 cm, アインツェルレンズ主面から加速管入口までの距離 ($l_o + d_i$) 13.2 cm, 加速管出口からターゲットまでの距離 (d_f) 1280 cm である。

まずビーム引出部のレンズ特性を調べる。アインツェルレンズの結像を求めるためのグラフを Fig. 4.5 に示す。これは計算結果であり、Wilson と Brewer により与えられているものである。¹⁵⁾ なお図中で、 R は加速管電極の内径 ($R = 45$ mm) である。

この図を用いて、本装置の条件 $l_i/R = 1.85$ の場合では、レンズ焦点距離を 2-5 cm の範囲で変化させることにより、 l_o/R の値が 1-7 すなわち $l_o = 45 - 315$ mm であることがわかる。3.2 の終りで示したように、本装置ビーム引出部の焦点距離は約 50 mm である。この場合の l_o の値 225 mm は、本装置の $l_o + d_i$ の実際の値 132 mm が明らかに短かすぎることを示している。

つぎに、一定電位勾配をもつ加速管についての物体位置と像位置の関係を検討する。Wilson と Brewer による加速電圧と引出電圧の比 Q に対する加速管の結像条件を求めるためのグラフを Fig. 4.6 に示す。図中 (b) は (a) の加速管を入射側から短くした時の変化を示している。この図によると与えられた d_f/R (本装置の場合では、 $128/4.5 = 28.5$) に対して Q が 20 から 7.5 に低下する時、物体位置 d_i/R が急激に増加すること、また短い対物距離で Q の広い領域にわたって結像条件を得るためにはより短い加速管が望ましいことがわかる。20-100 kV の加速の場合、いま引出電圧を 5 kV とすると、 $4 < Q < 20$ となる。

以上の考察から、300 kV 加速用に設計された本加速管を 20-100 kV 加速領域で使用して結像

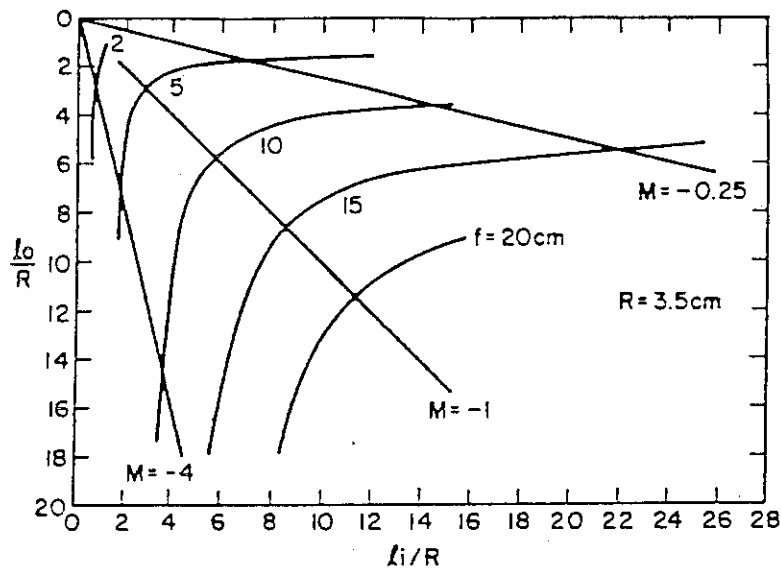


Fig. 4.5 Relation between object (l_o) and image (l_i) distances from an einzel lens, with focal length (f) and magnification as parameters. From Ref.11.

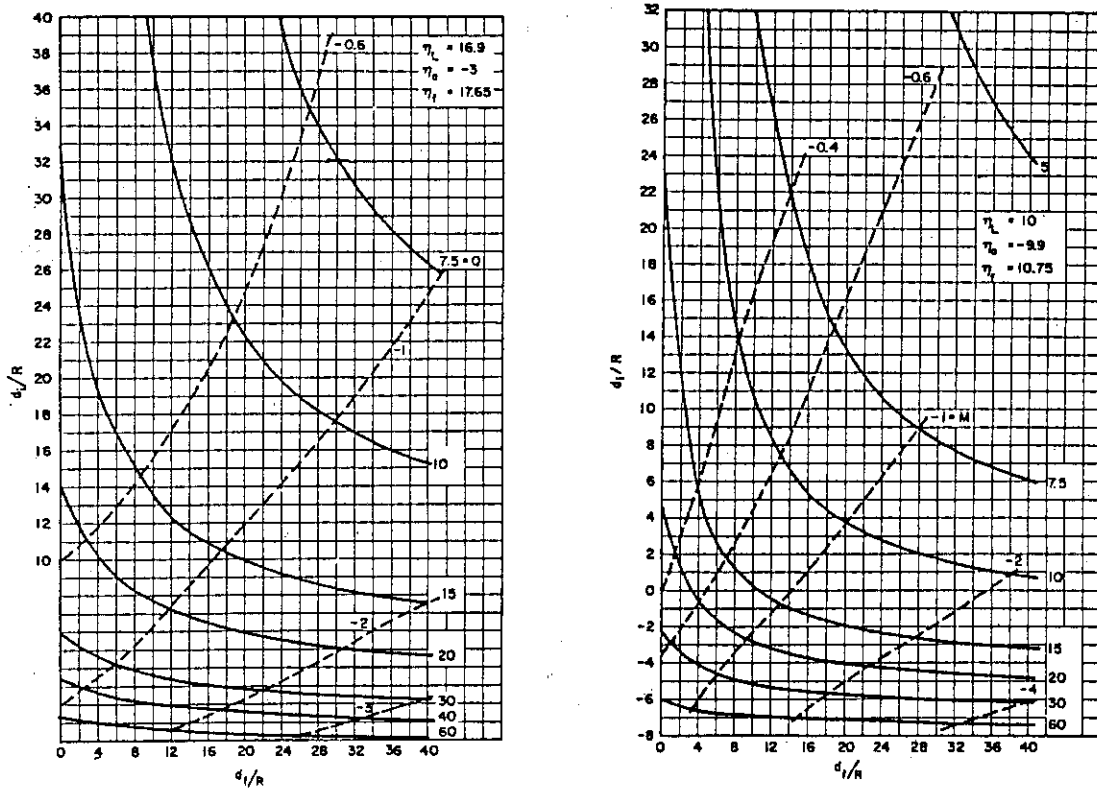


Fig. 4.6 Image and object distances which form a stigmatic image and the resultant magnification (dashed lines) in the accelerator with characteristics shown in the figure. From Ref.11.

条件を得るためには、イオン源側のいくつかの加速電極を短絡 (l_0 および d_i を大きくし、加速管を短くすることに相当する) する必要があることがわかる。この考察結果の正しさを裏づけるために、加速管の電極をイオン源側から2枚ずつ順次短絡して加速管の長さを短くした場合のターゲット位置におけるビーム電流の測定結果 (酸素イオン加速) を Table 4.3 に示す。

Table 4.3 Beam current (10^{-6} A) at the target as a function of the number of accelerating electrodes used (cf. the text). Acceleration of oxygen ions with RF gun.

Accelerating voltage (kV)	Number of accelerating electrode			
	14	12	10	8
100	7.4	22	20	40
60	1.9	2.6	4.0	13.3
20	0.37	0.38	0.42	0.40

加速電圧が 100 kV と 60 kV の場合でビーム電流はそれぞれ 5.4 倍と 7 倍に増加し、考察が正しいことを示すものと考えられる。20 kV 加速の場合では Q の値 (= 4) が小さいことから、さらに短い加速管でなければその効果が現われないことを示している。

4.3 静電型四極子レンズの集束効果

アルゴンイオンを 100 kV で加速した場合のビーム電流に対する静電型四重極レンズ電位の効果を Fig. 4.7 に示す。

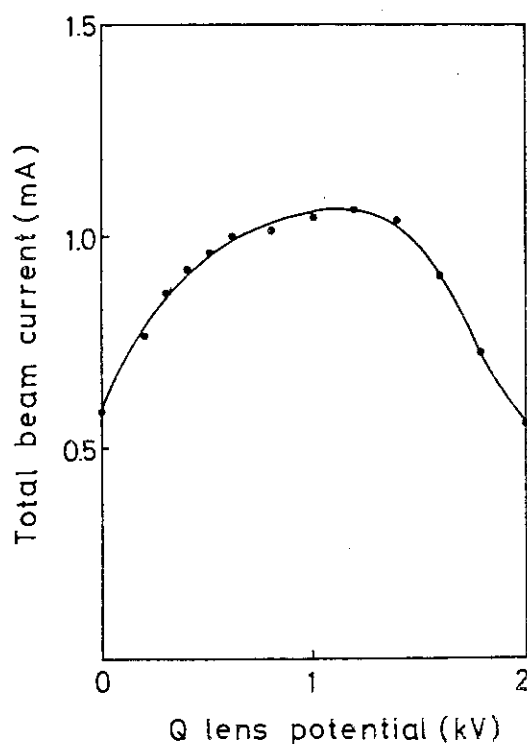


Fig. 4.7 Effect of Quadrupole (Q)-lens potential on total beam current. Acceleration of Ar^+ -ions at 100 kV; Extractor potential at 7 kV; Lens potential at 0 kV.

4.4 イオン選別電磁石の特性

酸素ガスをRF型イオン源によりイオン化し、加速するとき得られる種々のイオン種を選別電磁石で分離し、直径2mmのアパーチャを通過したものの電流を測定することによりイオン種を検出する。このとき各イオン種について、加速電圧と電磁石電流の関係、およびイオン種の質量と電荷の比と電磁石電流の関係をFig.4.8およびFig.4.9に示す。この図の結果から、電磁石電流(I)は、(1)加速電圧(kV)の平方根、および(2)、質量数(M)と電荷(Z)の比(M/Z)の平方根に比例することがわかる：

$$I = 0.036 (\text{kV})^{\frac{1}{2}} \cdot \left(\frac{M}{Z}\right)^{\frac{1}{2}}$$

この式を用いることによって、加速電圧と電磁石電流の値から30度だけ偏向されているイオン種を知ることができる。

Fig.4.10には、アルゴン(Ar)、窒素(N₂)、酸素(O₂)、重水素(D₂)、メタン(CH₄)を加速して得られるイオン種とその強度を示す。

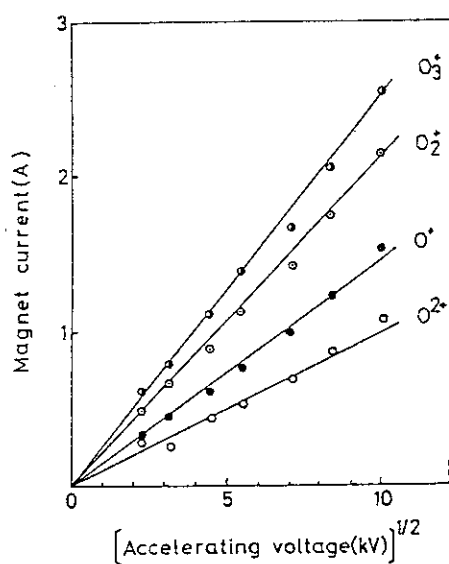


Fig. 4.8 Magnet current vs. the root of accelerating voltage for various oxygen ions to be deflected by 30°.

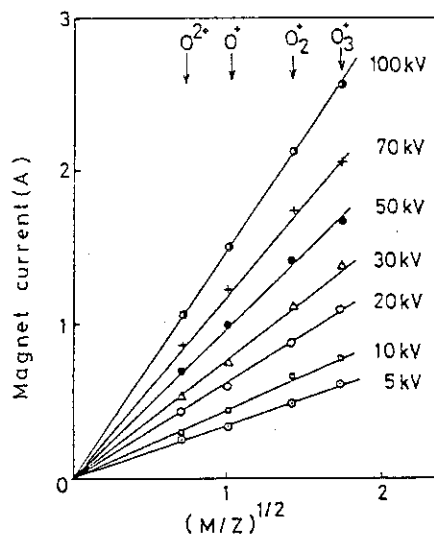


Fig. 4.9 Magnet current vs. the root of mass/e ratio for oxygen ions of the energy of 5 to 100 kV to be deflected by 30°.

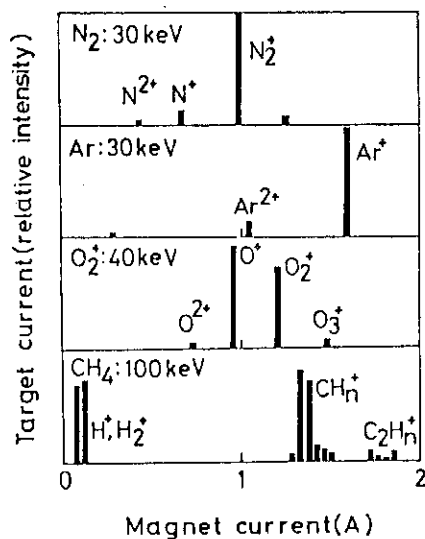


Fig. 4.10 Target current vs. magnet current showing mass spectrum of a deflected (30°) ion beam generated from N₂, Ar, O₂, and CH₄ using RF ion source.

5. 附属測定機器

5.1 照射チェンバー（3.8を参照）

10 mmφ のペレットを6個とりつけ、回転導入端子を通して真空外からつぎつぎと6個のペレットを照射することができる。照射終了後、照射チェンバーの真空を破り、ペレットをとり出しそれぞれ化学分析に供する。

例として、 $10 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ のイオン電流密度で 100 keV の D_2 、 He 、 N_2 、 O_2 からのイオンを 5-120 秒間照射した KNO_3 表面で生成した KNO_2 をナフチルアミン及びスルファニル酸発色法 (520 nm , $\epsilon = 35,000 \text{ mol}^{-1} \cdot \text{l} \cdot \text{cm}^{-1}$) を用いて定量した結果を Fig. 5.1 に示す。¹⁶⁾

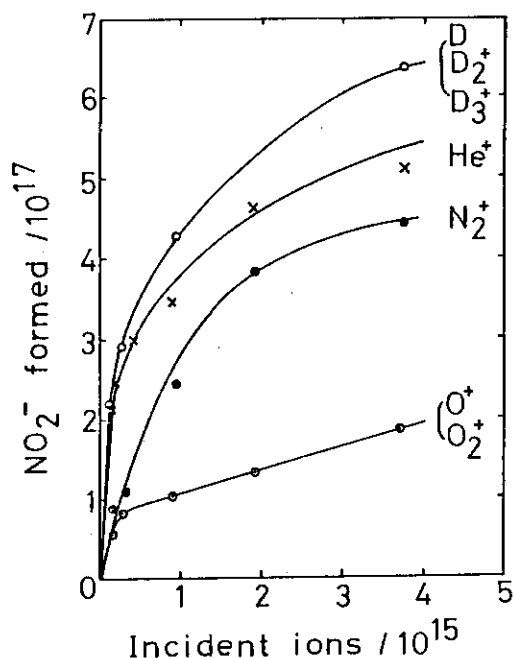


Fig. 5.1 Yield-dose curve for various 100 keV ions incident on potassium nitrate. Current density: $5 \mu\text{A}/0.5 \text{ cm}^2$.

5.2 電子放出率及び電子エネルギー分布の測定

高エネルギーの粒子や電子の衝撃をうけた固体表面から放出される二次電子の研究は、(i)真空放電機構の解明、(ii)粒子線検出器の開発、とくに質量分析計におけるイオン検知器、原子衝突実験におけるビーム強度の測定や高速時間分解測定など、さらに近年では、(iii)固体表面の電子状態の研究や、(iv)核融合技術との関連により古くから研究されている。¹⁷⁾ 電子放出が起こるために必要

なエネルギーの供給源として、入射イオン中和のさいの放出エネルギーと入射イオンの運動エネルギーの2つに大別されているが、ここでは後者の機構による電子放出の研究を行う。

Fig. 5.2 に示す装置により、入射粒子あたりの放出電子の個数（電子放出率）を測定する。またこの方法を用いた測定結果の一部を Fig. 5.3 に示す。

放出される二次電子には、オージェ電子やイオン-原子衝突により生成される電子及びそれらが固体中でのエネルギー損失を行ったものなどが含まれる。放出電子のエネルギースペクトルを得ることは、二次電子の生成機構を考えるにあたり重要である。¹⁸⁾ Fig. 5.4 にわれわれの電子エネルギー分析器の概念図を示す。すなわち 2 mmφ のイオンビームで照射されている試料表面からの放出電子は長さ 300 mm の銅製シリンダー（アース電位）の内部を通過した後、スリット（1 × 5 mm²）により減速または加速されて半球型静電分析器に導かれる。静電分析器の電極面の曲率半径は 44 mm と 56 mm でそれぞれにスリット電位に対して +5 V および -5 V を印加する。分解能 $E/\Delta E = 2 \times (\text{軌道半径}) / (\text{スリット幅}) = 2 \times (50/1) = 100$ の条件であるから、スリットにより加速または減速されてちょうど 20.6 eV のエネルギーで入射した電子が半径 50 mm の半円を描いて検出器（チャンネルトロン：Mullard BL-018）にはいる。パルス増幅され、レートメータを経て、X 軸にスリットのスキャン電位、Y 軸に計数率が XY レコーダで記録される。

この電子エネルギー分析器の性能を試験するために、タングステンフィラメントからの熱電子を電位差をもたせて加速させて調べた結果を Fig. 5.5 及び 5.6 に示す。すなわちレンズ電位をアースに保ったままスリット電位スキャンを用いる場合でも、またスリット電位をアース電位に固定したまま熱電子放出用フィラメント及びレンズ系の電位を同時にスキャンして熱電子を加速した場合でも同じようにエネルギー測定が可能であることがわかる。

この電子エネルギー分析器を用いた測定結果を示す。Ar⁺ イオン照射中の金属銅表面からの 0-1000 eV にわたる二次電子エネルギースペクトルを Fig. 5.7 に示す。さらに、容器の外部からリークバルブにより試料気体をイオンビーム部分に導くことにより、試料気体からの放出電子スペクトルを得ることができる。Fig. 5.8 に Ar⁺-Ar 衝突による LMM オージェ電子のスペクトルを示す。また Fig. 5.9 には低エネルギー電子の微細構造を示す。

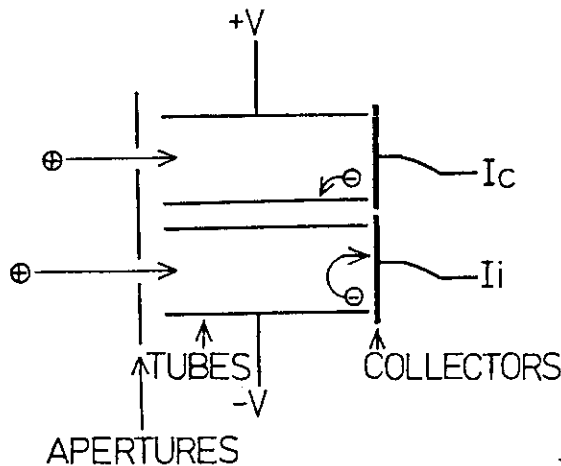


Fig. 5.2 Schematic diagram of the experimental arrangement for measuring secondary electron emission yield.

$$\gamma = [(I_c/I_i) - 1]$$

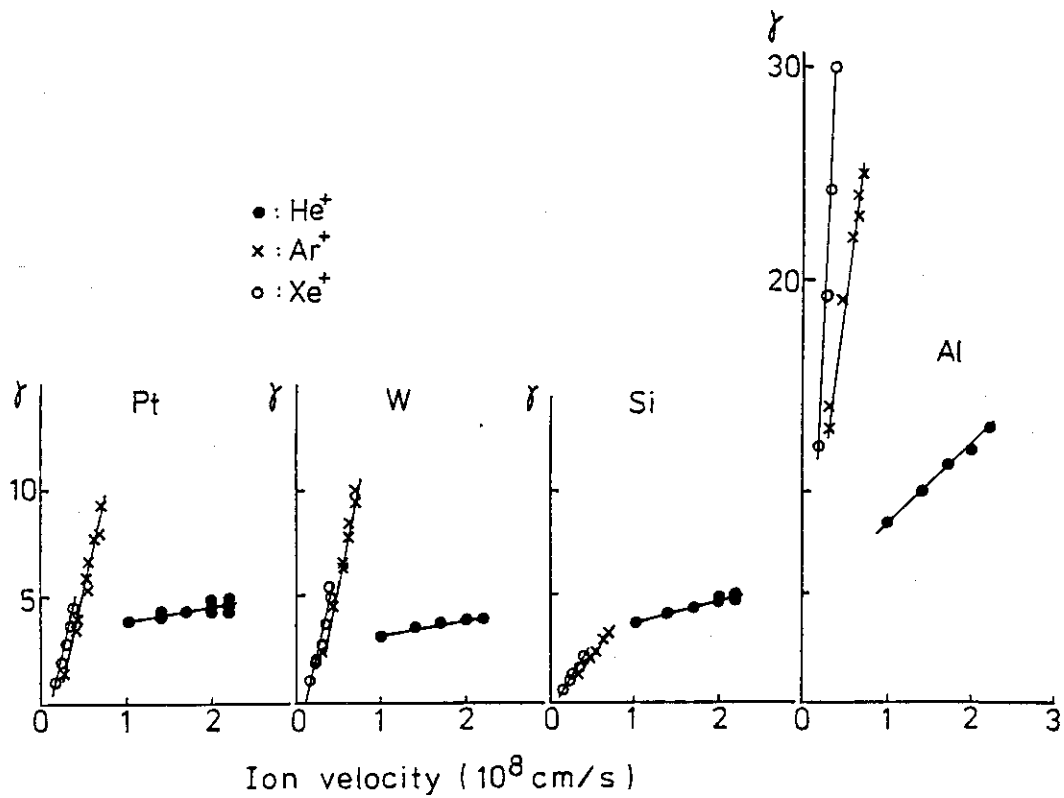


Fig. 5.3 Secondary electron emission yield from different materials vs. velocity of bombarding ion.

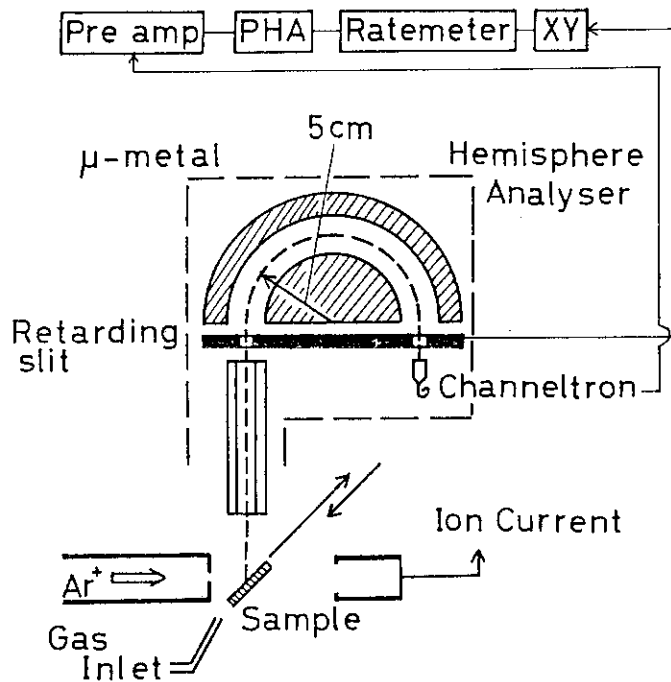


Fig. 5.4 Hemi-spherical electron energy analyser.

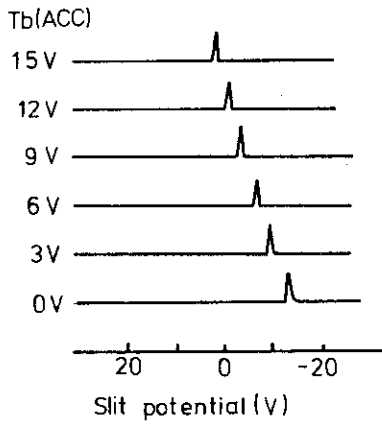
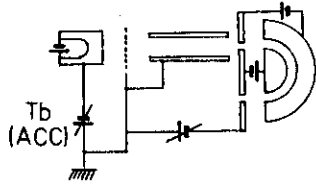


Fig. 5.5 Test of the electron energy analyser (1). Thermal energy electrons are accelerated to T_b and retarded by applied slit potential before entering the detector.

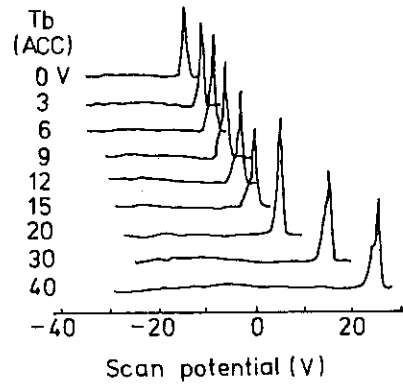
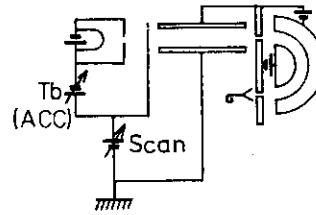


Fig. 5.6 Test of the electron energy analyser (2). Thermal energy electrons are accelerated to T_b and enter the analyser system with varying potential difference.

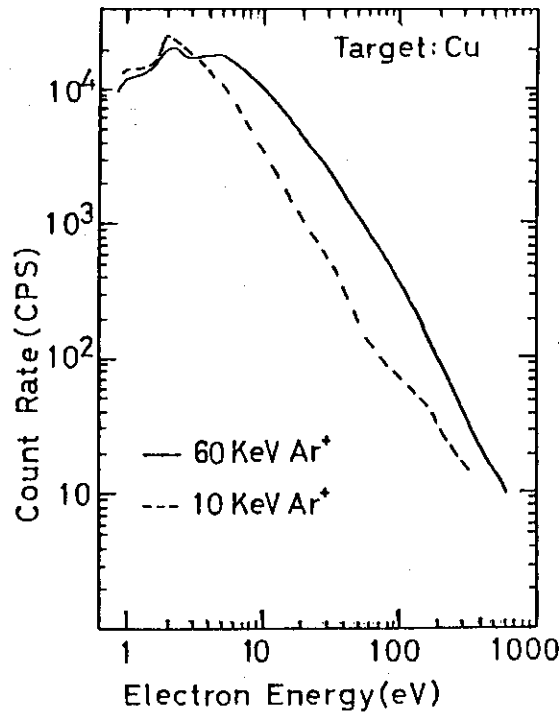


Fig. 5.7 Energy spectrum of emitted electrons from Cu bombarded with 10- and 60-keV Ar^+ ions.

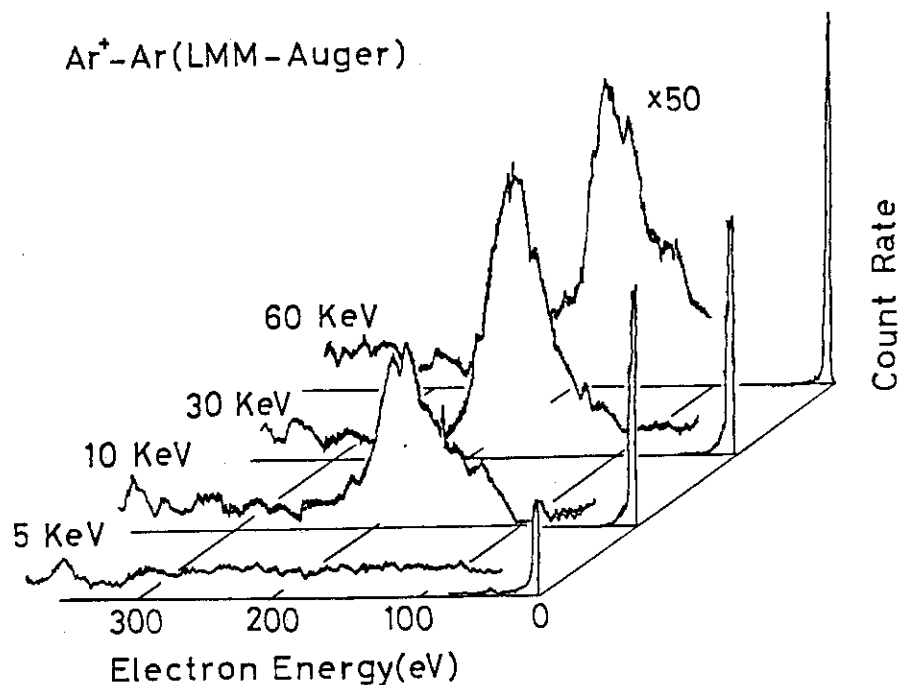


Fig. 5.8 Energy spectrum of emitted electrons from collisions of Ar⁺-Ar with energy at 5 - 60 keV. Broad peak (150 - 200 eV) of Ar-Auger and low energy peak are seen.

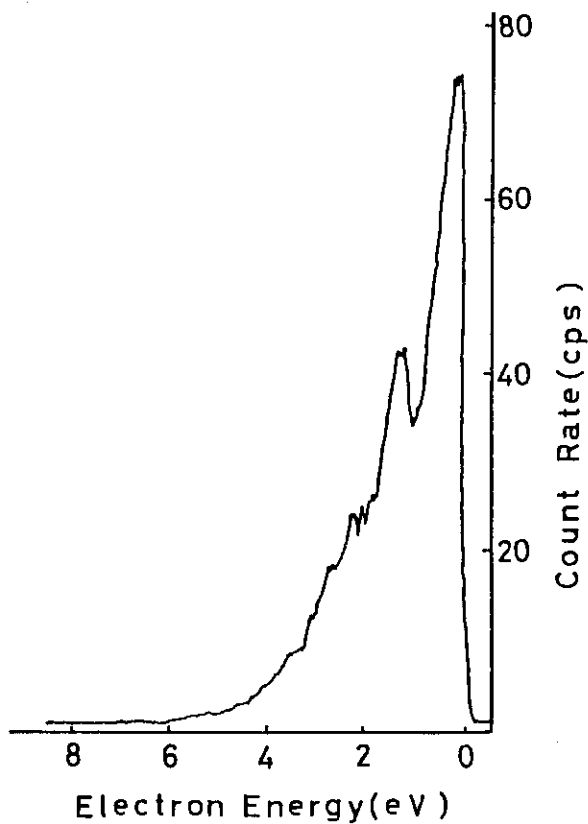


Fig. 5.9 Spectrum of low energy secondary electrons produced from 10 keV Ar⁺-Ar collisions.

5.3 二次イオン質量分析及びイオンエネルギーの測定

イオン衝撃による固体からの二次イオン放出に関する研究は、(i)材料のクリーニング、(ii)固体表面における元素分析、(iii)プラズマ-壁相互作用及び(iv)イオン衝撃による化学反応生成物の同定などの観点から関心がもたれている。生成のメカニズムについては、はじき出されるさいの原子が固体表面で自動イオン化をうける、高温プラズマによるイオン化、同時に近くを通過するオージェ電子によるイオン化、内殻軌道電子のイオン化、はじき出しによる2個の原子による分子形成とその解離など多くの説が提案されている。⁴⁾

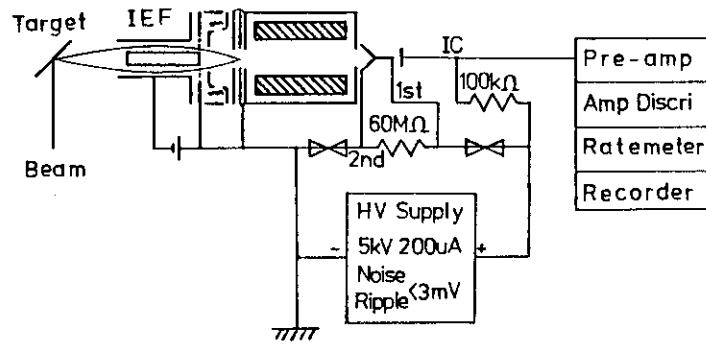
われわれは日本真空製製の残留気体分析用四重極質量分析計(QMS-300)を用い、これに(i)エネルギーフィルターを取付ける、(ii)アナログ測定からパルス計測に切替えるの2点を改造することにより、正イオン及び負イオン検出用の二次イオン質量分析計を設置した。¹⁸⁾その模式図をFig. 5.10に示す。また実際にイオンビーム照射により得られる質量スペクトルをFig. 5.11, 5.12に示す。^{19,20)}

つぎに二次イオンのエネルギー測定について記述する。Fig. 5.13に示すような円筒状エネルギーフィルターを付けた四重極質量分析計を使用する。一次イオン衝撃により発生する種々エネルギーの二次イオンを測定する。エネルギーフィルターは高エネルギー成分をカットするので、さらにその直前に阻止グリッドをもうけて低エネルギー成分のカットを行う。さらにFig. 5.14には、フェリシアン化カリウム加熱による K^+ 及び他の少量のイオンを加速し、エネルギー分析器のレンズとスリットをアース電位に固定したままターゲット側電位スキャンによる半球型エネルギー分析の測定結果を示す。この手法は発生イオン種が1種類に限られる場合に有効である。

Fig. 5.15に円筒型エネルギーフィルターを用いて測定した結果を示す。

また二次イオンのエネルギーは、静電方式によらなくても、飛行時間測定によって求めることもできる。この方法は、適当な検出器さえあれば中性粒子の飛行エネルギーの測定にも適用できる。また一次イオン衝撃から時間おくれを経て二次粒子が放出される場合では、その時間おくれの情報を得ることもできる。Fig. 5.16にブロック図を示し、測定結果をFig. 5.17に示す。

(a) Negative ion measurement



(b) Positive ion measurement

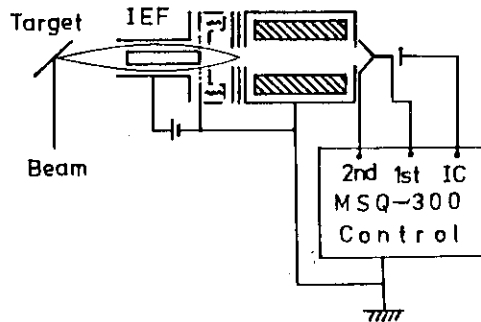


Fig. 5.10 Schematic diagram of a mass spectrometer for measuring secondary ions, (a) For negative ion and (b) for positive ion detection.

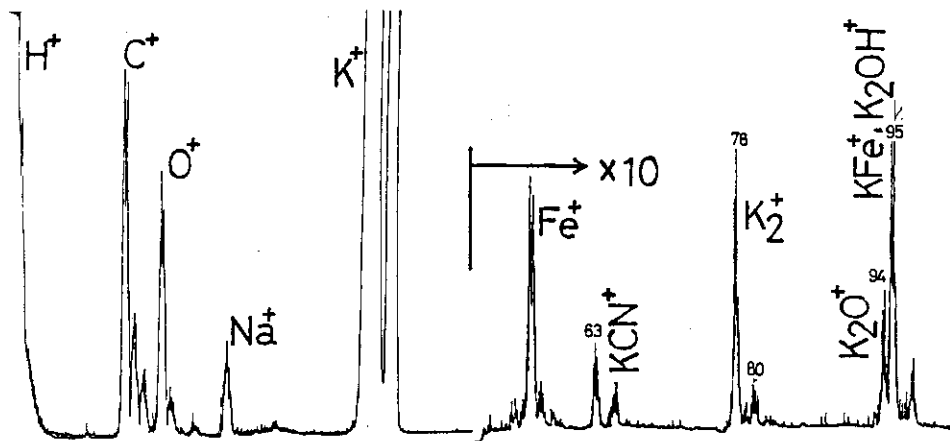


Fig. 5.11 Mass spectrum of emitted positive ion from $\text{K}_4[\text{Fe}(\text{CN})_6] \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ bombarded with 30 keV Ar^+ ion.

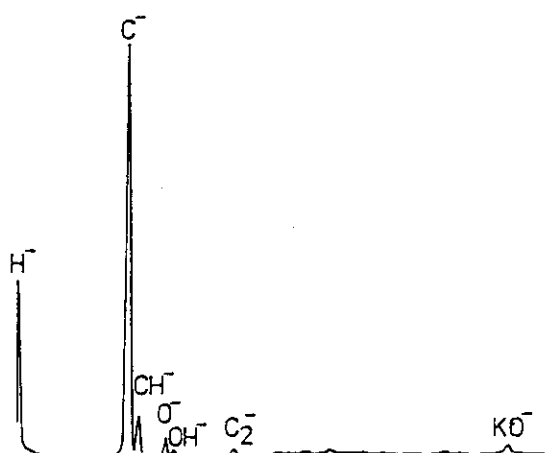


Fig. 5.12 Mass spectrum of emitted negative ion from $K_4[Fe(CN)_6] \cdot 3H_2O$ bombarded with 80 keV N_2^+ ion.

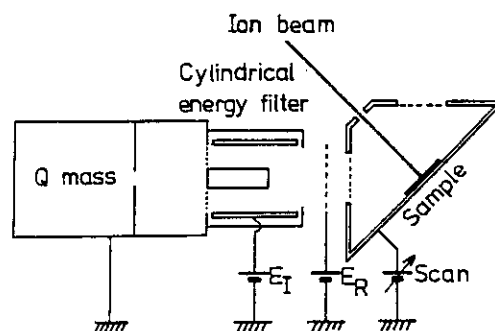


Fig. 5.13 Measurement of the kinetic energy of emitted secondary ion from solid sample with use of an electrostatic energy filter and a retarding grid.

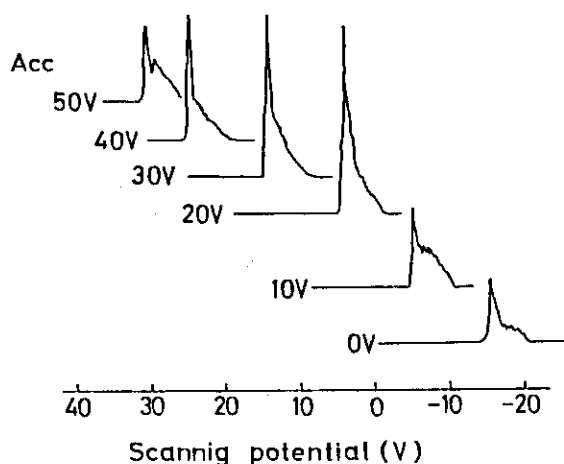
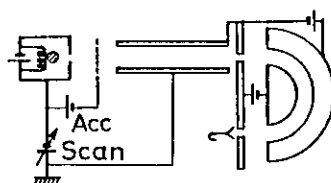


Fig. 5.14 Test of the ion energy analyser system. Energy of K^+ ions, produced from heated potassium hexacyanoferrate(III) and accelerated to Acc, is measured by scanning the potential difference with respect to the detector.

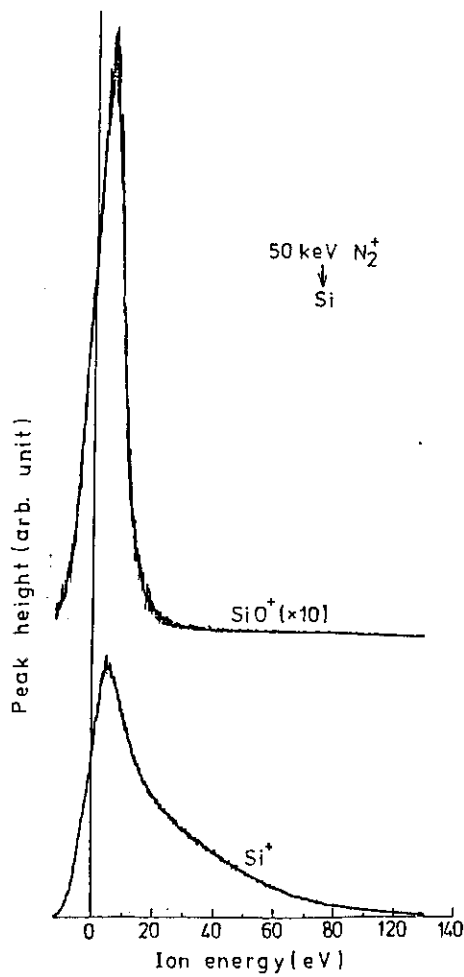


Fig. 5.15 Energy spectrum of Si^+ and SiO^+ emitted from Si bombarded with 50 keV N_2^+ ions. Measurements by the technique shown in Fig. 5.13.

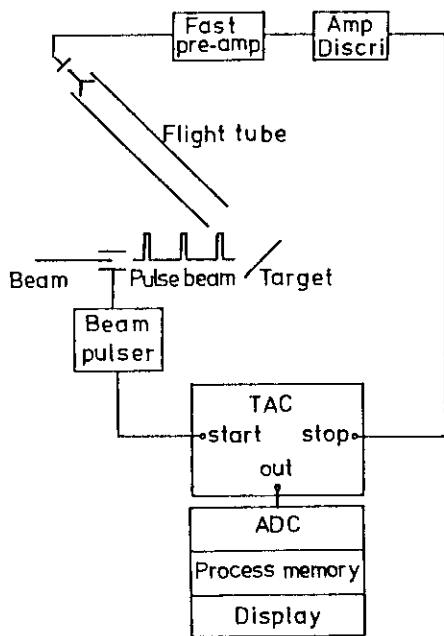


Fig. 5.16 Experimental arrangement for time-of-flight measurement.

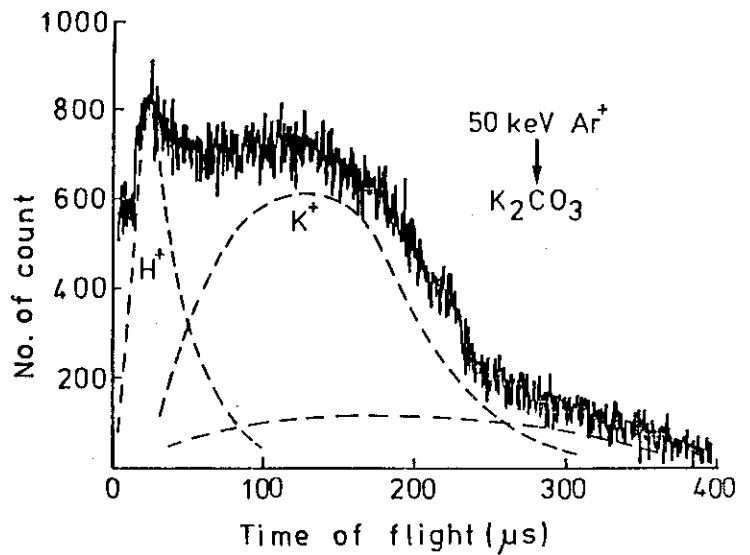


Fig. 5.17 Time-of-flight spectrum from K_2CO_3 bombarded with 50 keV Ar^+ ion. The spectrum consists of H^+ , K^+ , and other components.

5.4 発光スペクトル測定

イオンビームを固体表面に照射するさいにみられる発光は、(i)スパッタされる粒子（原子、イオン、クラスター）からの発光、(ii)衝撃イオンからの発光、および(iii)固体励起、とくに空孔-電子対再結合による発光などが知られている。固体励起に基く発光の解析からは励起密度に関する知見が得られ、またスパッター原子からの発光の線幅の解析からは、スパッター粒子の飛行方向とエネルギー、ないしは励起領域の温度の情報が得られる。

Fig. 5.18 に発光スペクトル測定結果の例を示す。

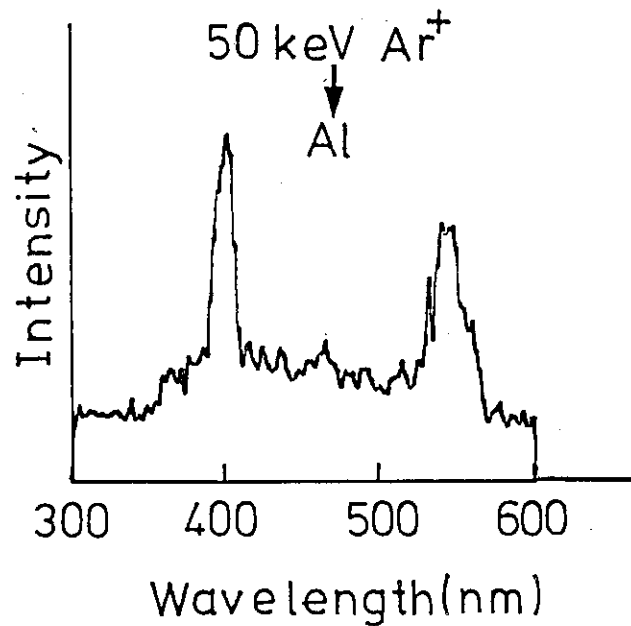


Fig. 5.18 Emission spectrum observed during 50 keV Ar^+ ion bombardment of Al.

5.5 気体イオン化の測定

気体中に入射したイオンは、その飛程に沿って気体分子をイオン化する。生成イオン対の数を求め、別に消費したエネルギー量を知ることができれば、1イオン対生成に要するエネルギー（W値）がわかる。生成イオン対数を電離箱により、また入射イオン数をパルス計測により求める装置を Fig. 5.19 に示す。またこの装置の電離箱としての性能（電離電流の飽和特性）を示す図を Fig. 5.20 に示す。

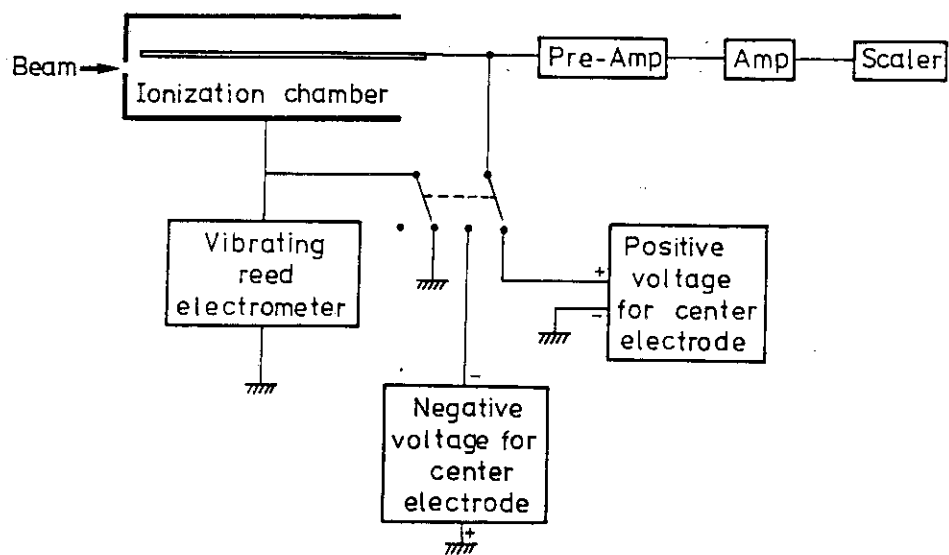


Fig. 5.19 Block diagram of apparatus for ionization-yield measurements.

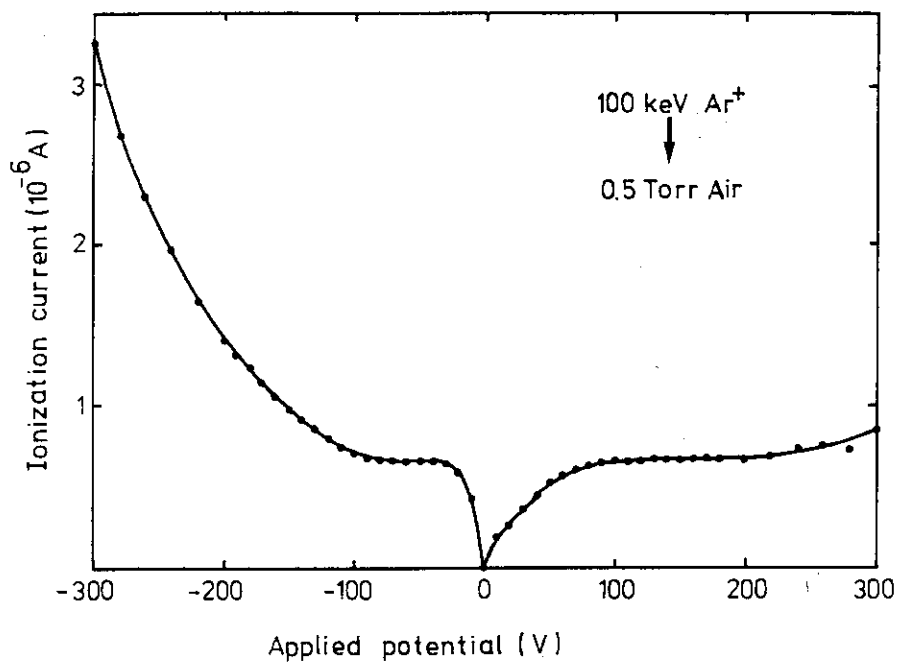


Fig. 5.20 Saturation curve for 100 keV Ar⁺ ion in 0.5 Torr air.

謝 辞

100 kV イオン照射装置の組立に際しては、固体化学研究室長出井数彦氏をはじめ研究室の皆様のご多大のご援助とご協力を受けた。またイオン源の製作にあたっては物理部の小林千明・神田将の両氏、ビームトランスポート系に関しては物理部吉田忠氏、質量分析計に関しては化学部田村修三氏、そしてビームパルサー及び電子アナライザーの製作ではエレクトロニクス課 深沢政夫氏のご教示を得ることができた。予定した本装置の完成をみたのは、以上の方々に負うところが大きく、ここに感謝の意を表する。

REFERENCES

- 1) Y.Y. Tu, T.J. Chuang, and H.F. Winters, Proc. Symposium on Sputtering, ed by P. Varga et al., Wien, 1980, p.337.
- 2) a) D.A. Thompson, in Ref.1, p.62.
b) "Sputtering by Particle Bombardment II," ed by R. Behrisch, Topics in Applied Physics 52, Springer-Verlag, Berlin, 1983.
- 3) B. Sundqvist, Nucl. Instr. Meth., 218, 267 (1983).
- 4) 大野, JAERI-M-83-235, 1983, p.73.
- 5) For example, Q.C. Kessel and B. Fastrup, "Case Studies in Atomic Physics III," ed by E.W. McDaniel et al., North-Holland Pub., Amsterdam, 1974, p.140.
- 6) 大野, Radioisotopes, 29, 401 (1980).
- 7) S. Ohno, "Hot Atom Chemistry," ed by T. Matsuura, Kodansha-Elsevier Pub., Tokyo, 1984, p.512.
- 8) 大野, 「放射線」, 11, 75 (1985).
- 9) 菅田編, 「電子・イオンビームハンドブック」, 日刊工業新聞社, 東京, 1973.
- 10) J.H. Freeman, "Ion Implantation," ed by G. Dearnaley et al., North-Holland Pub., Amsterdam, 1973.
- 11) R.G. Wilson and G.R. Brewer, "Ion Beams," John Wiley, New York, 1973, p.255.
- 12) Ref.10, p.387.
- 13) T. Alvager and J. Uhler, Prog. Nucl. Tech. Instr., 3, 159 (1968), cited in Ref.10, p.313.
- 14) 清水, 電総研報告書 748, 1974.
- 15) Ref.11, p.436.
- 16) K. Furukawa and S. Ohno, Bull. Chem. Soc. Japan, 58, 1831 (1985).
- 17) 大野, JAERI-M-9775, 1981, p.75.
- 18) K. Furukawa and S. Ohno, Proc. 3rd Symp. Accelerator Science Technology, ed by M. Fujiwara et al., RCNP, Osaka, 1980, p.269.
- 19) S. Ohno and K. Furukawa, "Proc. 7th Intern. Congr. Radiat. Res., ed by J.J. Broerse et al., Martinus Nijhoff Pub., Amsterdam, 1983, p.A2-23.
- 20) S. Ohno and K. Furukawa, Bull. Chem. Soc. Japan, 58, 1101 (1985).