

物質分析用静電加速装置

1994



奈良女子大学理学部物理学科

目次

はじめに

[I] 物質分析用静電加速装置

- 1 概要
- 2 加速装置の構成
 - ① 負イオン源・入射系
 - ② 加速器本体
 - ③ 加速イオンの分析・輸送
 - ④ ビームコースと散乱槽
 - ⑤ その他

[II] 加速装置の利用

- 1 阻止能関係
- 2 原子衝突関係
- 3 分析関係
- 4 その他

経過

文部省特別設備費により以下の年次計画に従って設置した。

1991年度（平成3年度）

- | | |
|----------------------|----|
| ・負イオン源及び負イオン入射システム装置 | 一式 |
| ・コンピュータ・コントロール・システム | 一式 |
| ・チャネリング用ビームライン | 一式 |

1992年度（平成4年度）

- | | |
|-------------------------|----|
| ・加速器本体 | 一式 |
| ・SF ₆ ガス回収装置 | 一式 |
| ・90°分析電磁石 | 一式 |
| ・チラーユニット、コンプレッサー | 一式 |

1993年度（平成5年度）

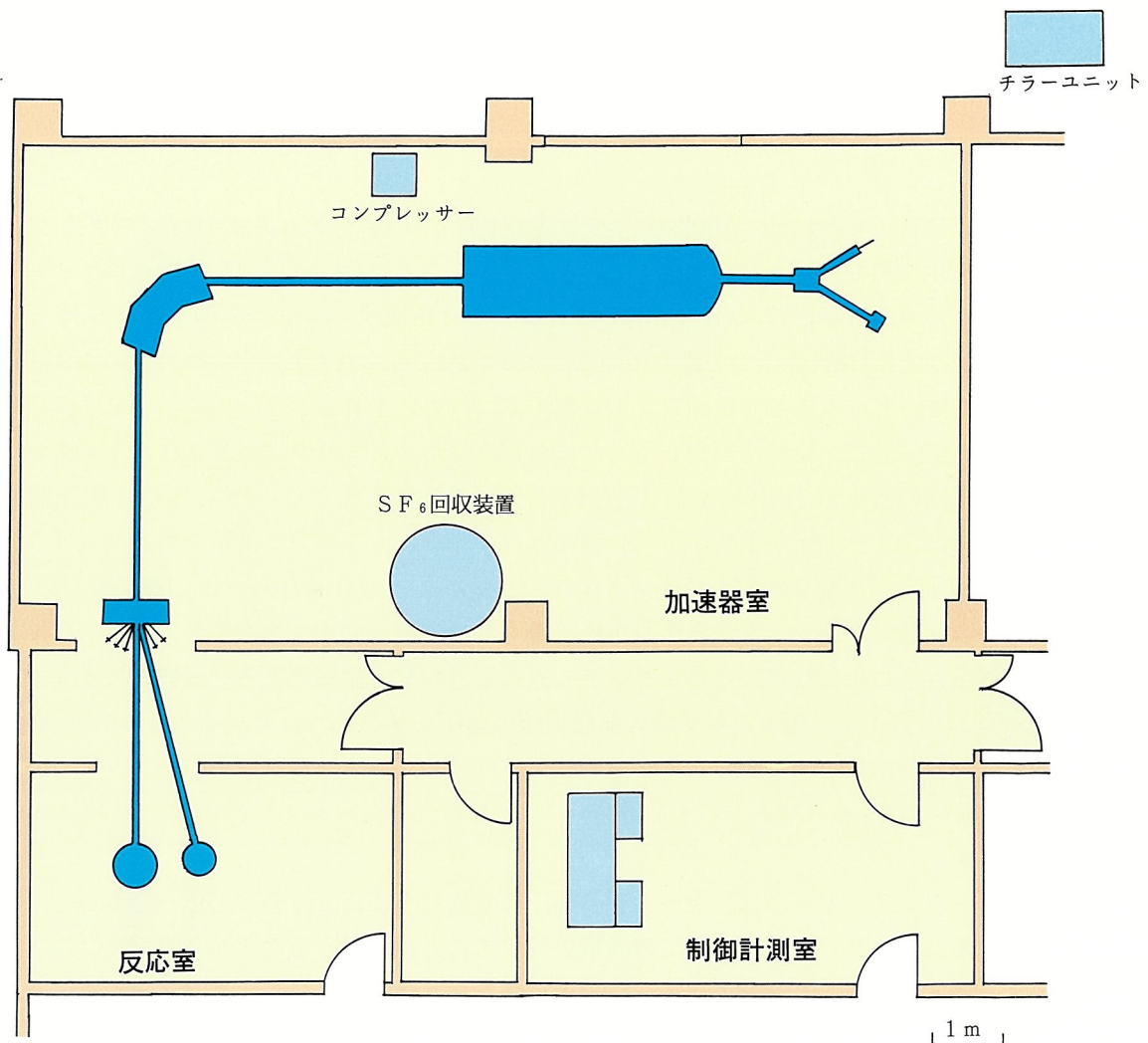
- | | |
|--------------------|----|
| ・振分電磁石（含む分析ビームライン） | 一式 |
| ・PIXE分析用ビームライン | 一式 |
| ・PIXE分析用散乱槽 | 一式 |
| ・物質分析用散乱槽 | 一式 |

表紙：加速器本体の高電圧発生部が内部に配置されている加速部高圧タンク

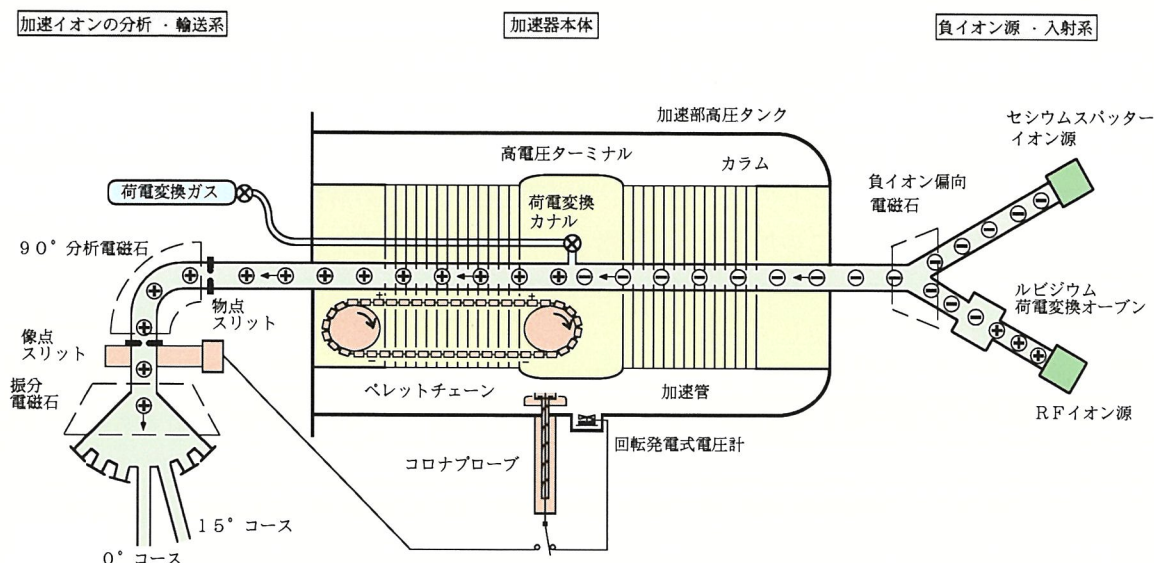
はじめに

長年の夢と願いがかなって、3ヶ年計画に基づき本年3月、奈良女子大学理学部物理学科に物質分析用静電加速装置（米国NEC社ペレトロン5SDH-2型）を設置することができた。本装置の設置にあたっては、既存の教官及び学生実験室の床の補強、壁の撤去等の改修工事が必要であった。この加速装置は我々が行ってきた MeV/amu 領域における軽及び重イオンに対する阻止能関連の研究を、より低いエネルギー領域に拡張することを主な目的としているが、固体表面及びその近傍の解析、微量分析、新物質の開発等の研究に使用することができる。この加速装置の特徴はエネルギー分解能1/10000の分析電磁石を用いて、種々の加速イオンのエネルギーを高い精度で決定できることである。本装置が多くの方々の幅広い研究、教育に有効に利用されることを希望している。

本加速装置の設置に当たり、長年にわたって文部省、大学当局、及び関係各位から頂いたご協力とご支援に対して、厚く御礼を申し述べるとともに、なお一層のご指導ご鞭撻をお願いする次第である。



[I] 物質分析用静電加速装置



1. 概要

ペレトロン (5SDH-2型) は、最高ターミナル電圧1.7MVのタンデム方式のバンデグラフ型静電加速器である。まずイオン源で負イオンを生成する。イオン源としては、固体状の物質から負イオンを作るためのSNICSIIイオン源 (H、C、O、Si等さまざま) と、気体状の原子から負イオンを作るためのRF荷電変換イオン源 (主にHe) の2つを備えている。イオン源で作られた負イオンは、偏向電磁石で30°曲げられ、低エネルギービームラインを通して加速器本体に打ち込まれる。

加速器本体の高電圧部分は、絶縁性の良いSF₆ガスを充填したタンクの中に配置され、タンクの中央に位置するターミナル電極の電圧を、0.15MVから1.7MVまで連続的に変えることができる。加速器本体に打ち込まれた負イオンは、ターミナル電極の方向へ加速され、ターミナル部分へ供給されるストリッパガス (N₂) と衝突して電子をはぎ取られて正イオンとなり、さらにタンク出口方向へと加速を受ける。すなわち、まず負イオンの状態で加速し、ターミナル電極で電子をはぎ取って正イオンにしてもう一度加速するので、2段階の加速を行うことになる。これがタンデム方式と言われる由縁である。最終的にイオンの得るエネルギー E [eV] は、負イオン源・入射系での前段加速の電圧を V_N [V]、ターミナル電圧を V_T [V]、正イオンになった時の荷電数を q とすると

$$E = [V_N + (q + 1) \cdot V_T] \cdot e$$

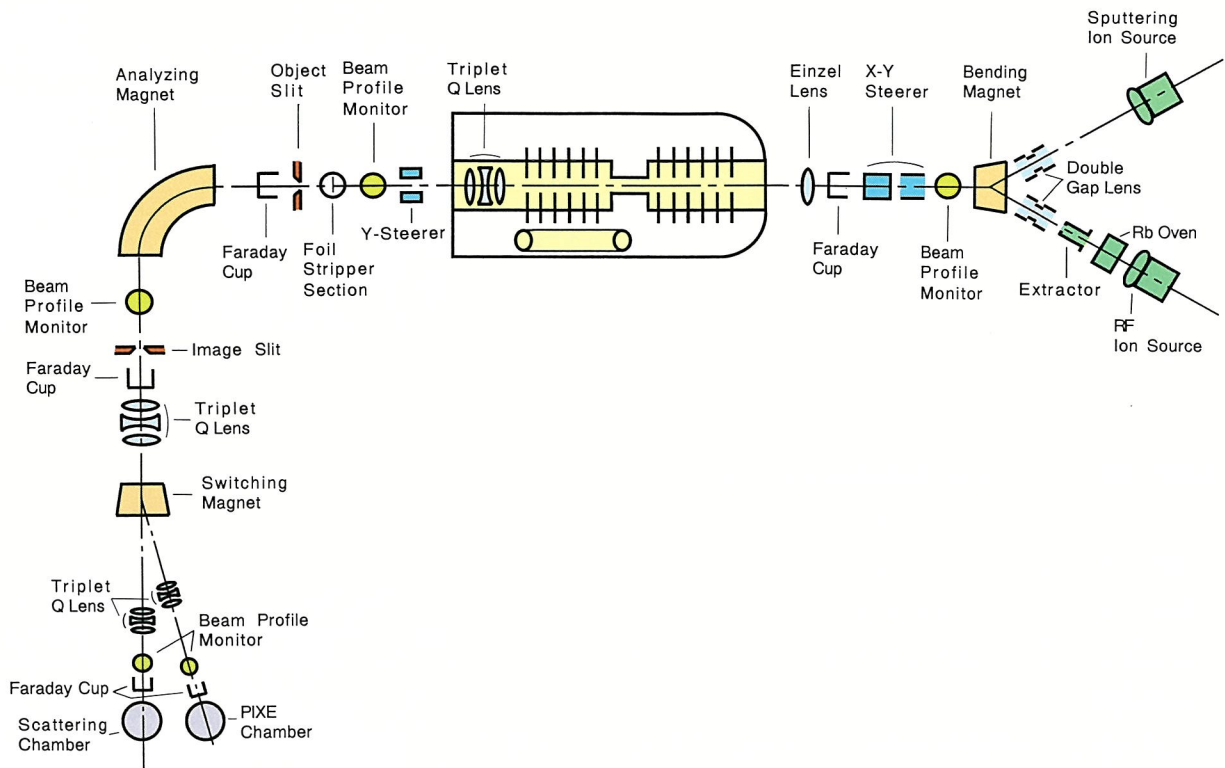
となる。

加速されたイオンのエネルギーには、ターミナル電圧の変動などによって多少の広がりがあるが、90°分析電磁石の物点と像点のスリットを狭くして運動量分析することにより、その広がりを抑え、1/10000程度の精度でエネルギーを決めることができる。このようにしてエネルギー分析されたイオンは、分析ビームラインを通して振分電磁石で、各ビームコースに振り分けられる。

現在、振分電磁石にはチャネリング用ビームラインとPIXE分析用ビームラインの2本のビームコースが接続されており、ビームコースを選択して物質分析用散乱槽またはPIXE分析用散乱槽へとビームを導く。

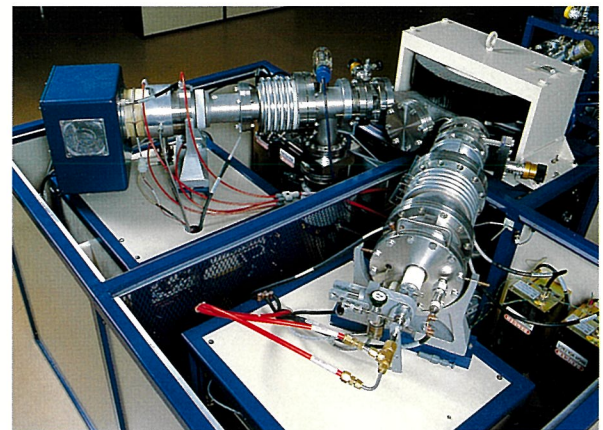
加速器の立ち上げ・運転・停止に関わる操作はすべてコンピュータ・コントロール・システムを使って行う。

2. 加速装置の構成



①負イオン源・入射系

水素から重元素まで種々のイオンをつくることのできるセシウムスプッター固体用イオン源 (S N I C S II) と、主にHeイオンをつくるためのRF荷電変換イオン源 (アルファトロス) の2種類のイオン源を持つ。作られた負イオンを約30 keVで前段加速し、偏向電磁石で30°偏向して加速器本体に打ち込む。電磁石の質量・エネルギー積は $M E / Z_1^2 = 4.8 \text{ amu} \cdot \text{MeV}$ であり、質量分解能は $M / \Delta M = 20$ である。偏向後のイオンの軌道は、アインツェルレンズ (-30kV) と静電 X-Y 偏向板 ($\pm 750 \text{ V}$) により調整する。



負イオン源
手前：S N I C S II
後方：アルファトロス

○セシウムスプッター固体用イオン源 (S N I C S II)

セシウムオープンにより作られるセシウム蒸気は加熱したフィラメントに吹き付けられて Cs^+ イオンになり、10keV程度に加速されて固体試料を叩く。その結果スパッタリングにより、試料内の元素が飛び出し負イオンが生成される。このイオン源で得られる代表的な負イオン電流値は以下の通りである。

$${}^1\text{H}^- : 40 \mu\text{A}$$

$${}^{12}\text{C}^- : 200 \mu\text{A}$$

$$\text{Si}^- : 150 \mu\text{A}$$

○RF荷電変換イオン源（アルファトロス）

RF加熱によりHeなどの気体元素を正イオンにした後、ルビジウム金属蒸気と衝突させて荷電変換により負イオンをつくる。これにより2~4 μA の He^- イオンが容易に得られる。

②加速器本体

電荷搬送にはペレットチェーンを2本使用する。これにより高電圧ターミナルへ300 μA の電流を運ぶことができる。この方式は安定度が良く、容量結合式電圧計で測定したターミナル電圧のリップルは、500 V P-Pである。ターミナル電圧の安定化は、ターミナル部に面してタンク壁から突き出したコロナニードルから微少電流をターミナルに直接コロナ放電で流すことで行う。電圧補正には、2つのフィードバックのモードがある。90°分析電磁石の像点スリット上のビーム電流信号を使った方法、及び回転発電式電圧計（GVM）で測定したターミナル電圧を使った方法である。これらの方法によりターミナル電圧の安定度は、 $\pm 1\text{ kV}$ 以下にできる。

○加速管

加速管は、有機材料を使用しない超高真空設計で、高電位勾配に耐えられるようになっている。また、加速ビームが加速管に衝突することにより発生する電子のエネルギーを制限する構造になっている。またビームと残留ガスとの衝突でできる高エネルギー電子がX線の発生源となるが、このX線の強度を制限するため、加速管に沿って小さな永久磁石が取り付けられている。

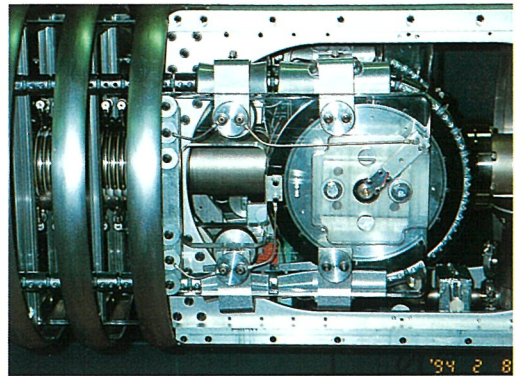
○加速部高圧タンク

絶縁ガスとして SF_6 を5.6 kg/cm^3 充填し、循環システムでガスを冷却吸着乾燥させている。加速器本体を保守する場合は、タンク内の SF_6 ガスを回収装置を使って貯蔵タンクに移すことで、 SF_6 ガスの損失や大気中への放出を防ぐ。またタンク外壁でのX線の強度を300 $\mu\text{Sv}/\text{week}$ 以下にするため、タンクの内側に鉛遮蔽が施されている。

③加速イオンの分析・輸送

加速されたイオンは、90°分析電磁石で運動量分析された後、振分電磁石でビームコースを選択して散乱槽へトランスポートされる。この時、ビームの集束と上下方向の調整をそれぞれタンク出口直前の静電四重極トリプレットレンズと出口直後のYステアラー（電磁石）を使って行う。

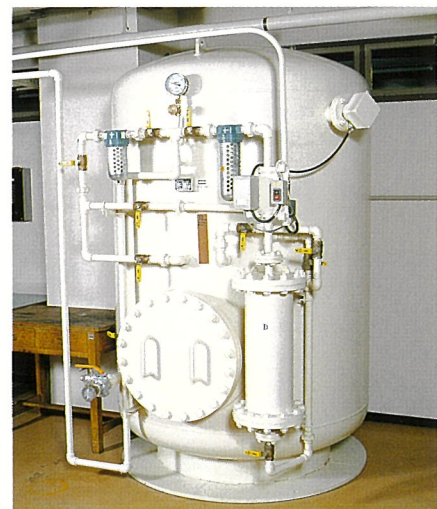
90°分析電磁石の物点スリット直前のフォイル・ストリッパ・セクションに炭素などの薄膜を入れることにより、加速後の重イオンに対して、同じエネルギーでより荷電状態の高いイオンを作ることができる。



ペレットチェーン



加速部高圧タンク



SF_6 回収装置

○90°分析電磁石

曲率半径 1 m、質量・エネルギー積 $ME/Z_1^2 = 75 \text{ amu} \cdot \text{MeV}$ の二重集束の電磁石で、 $5 \times 10^{-4} \%$ の超高安定の定電流電源により励磁される。物点スリットと像点スリットの距離は 3 m で、運動量分解能は 10^{-4} 以下である。磁場の測定は NMR ガウスメータで行う。

○振分電磁石

0° 、 $\pm 15^\circ$ 、 $\pm 30^\circ$ 、 $\pm 45^\circ$ の 7 個のビームポートを有し、各ポートでの最大質量・エネルギー積は以下の通りである。

150 amu · MeV at $\pm 15^\circ$

38 amu · MeV at $\pm 30^\circ$

17 amu · MeV at $\pm 45^\circ$

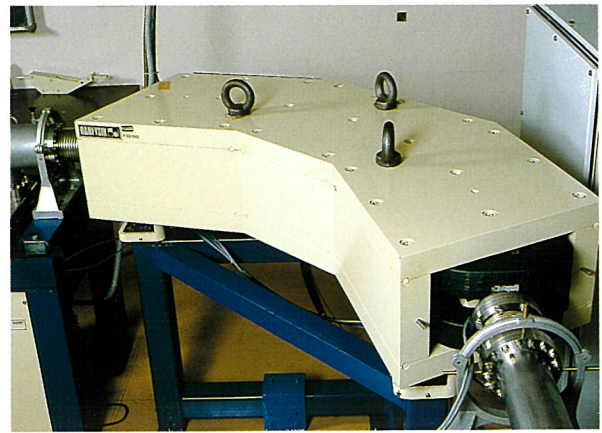
④ビームコースと散乱槽

振分電磁石には、現在 2 本のビームライン（チャネリング用及び PIXE 分析用）とそれぞれの散乱槽が接続されている。ビームの集束は、90° 分析電磁石の物点スリット直後と各ビームラインに装備された静電四重極トリプレットレンズを使って行う。また、必要に応じて角度と位置の広がりの小さなビームを作るため、チャネリング用ビームラインには 1 m 離れて X（水平）、Y（垂直）のダブルスリットが装備されている。

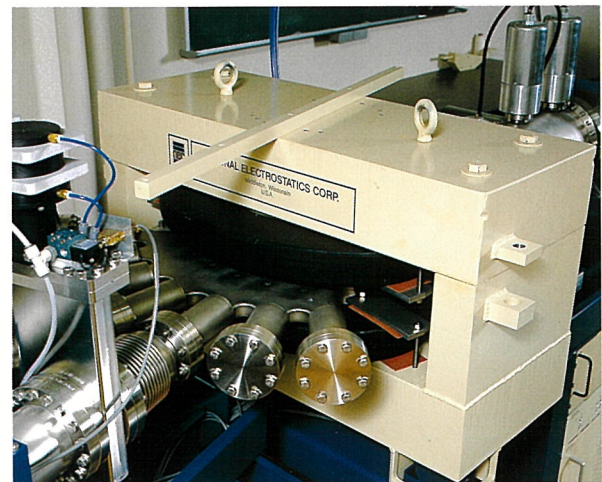
○物質分析用散乱槽

内径 60cm のステンレス製散乱槽で以下のものを装備している。

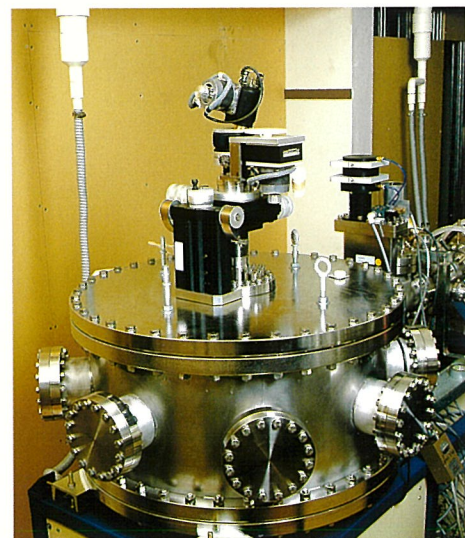
- 標的支持用 2 軸手動マニピュレータ
(散乱槽底蓋に取り付け)
上下の動作範囲 $\pm 50 \text{ mm}$ 、分解能 $5 \mu \text{ m}$ 、回転範囲 360° 、分解能 0.01°
- 独立に回転出来る検出器支持台 2 系統
回転範囲 360° 、角度設定精度 0.1°
- 5 軸手動マニピュレータ
(散乱槽上蓋に取り付け)
X (水平) : $\pm 125 \text{ mm}$ 、精度 $5 \mu \text{ m}$
Y (垂直) : $\pm 25 \text{ mm}$ 、精度 $5 \mu \text{ m}$
Z (ビーム軸方向) : $\pm 125 \text{ mm}$ 、精度 $5 \mu \text{ m}$
 θ (Y 軸方向) : 180° 、精度 0.01°
 ϕ (Z 軸方向) : 100° 、精度 0.01°



90° 分析電磁石



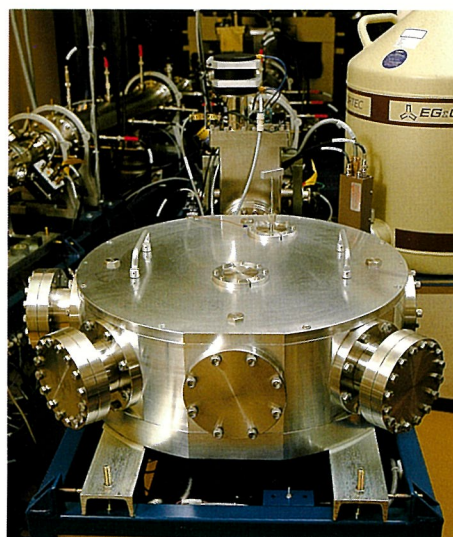
振分電磁石



物質分析用散乱槽

○PIXE分析用散乱槽

内径 51cm のアルミニウム製散乱槽で、最大 40個の試料がマウントできるサンプルホルダーを装備している。ORTEC社のSi (Li) 型X線検出器 (SLP-16220-P) がX線フィルターホルダーと共に装備されている。サンプルの交換及びデータ収集はパーソナルコンピュータを使って行うことができる。



PIXE分析用散乱槽

⑤その他

○ビーム調整

ビームの量と形状をチェックするために、低エネルギー、高エネルギー、分析、チャネリング用及びPIXE分析用のそれぞれのビームラインにファラデー・カップとビーム・プロファイル・モニターが装備されており、ビームトランスポートが能率良く行える。

○コンピュータコントロール

パーソナルコンピュータ (DECpc433dxMT) により、制御計測室から負イオン源・入射系、加速器本体及び 90°分析・振分電磁石を含む各ビームラインのエレメントを遠隔操作で調整する。また、各エレメントのパラメータ値をデータ・ログ・ファイルとしてセーブし、同じビーム条件での運転の時にそのファイルを呼び出して、各エレメントを同じ値に設定できる。

○真空排気系

真空排気は、以下に示すように各部に備え付けられた空冷式ターボ分子ポンプシステムを用いて行う。ビーム・オフ時の到達真空度は、加速装置各部で 1×10^{-7} Torr 以下である。

負イオン源・入射系	ターボ分子ポンプ	220 l / s	1 台
	ターボ分子ポンプ	300 l / s	1 台
加速器タンク出口	ターボ分子ポンプ	500 l / s	1 台
90°分析電磁石	ターボ分子ポンプ	500 l / s	1 台
チャネリング用ビームライン	ターボ分子ポンプ	300 l / s	1 台
PIXE分析用ビームライン	ターボ分子ポンプ	300 l / s	1 台
物質分析用散乱槽	ターボ分子ポンプ	500 l / s	1 台
PIXE分析用散乱槽	ターボ分子ポンプ	500 l / s	1 台



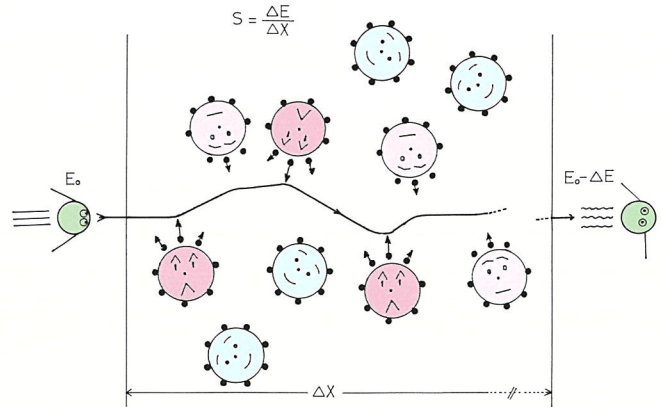
制御計測室

[II] 加速装置の利用

1. 阻止能関係

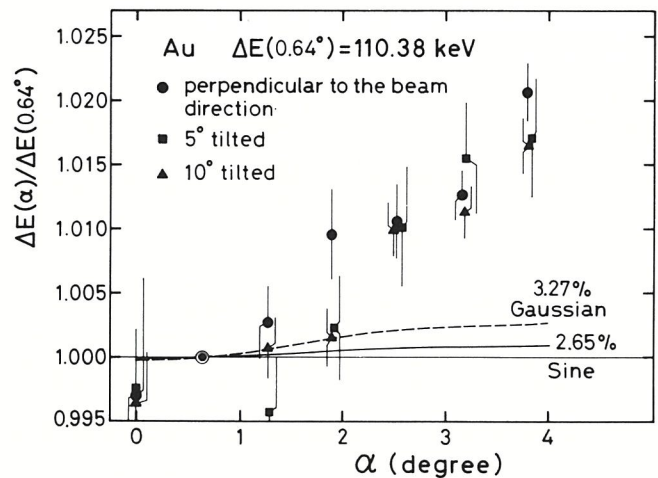
① 軽・重イオン阻止能の精密測定

入射イオンが物質を通過する際に、物質が単位長さ当りにそのイオンのエネルギーをどれだけ失わせるかで定義される量をその物質の阻止能という。従来本学で行ってきたMeV/amu 領域での種々のイオンに対する阻止能測定を、本加速装置で得られるエネルギー領域に拡張することができる。



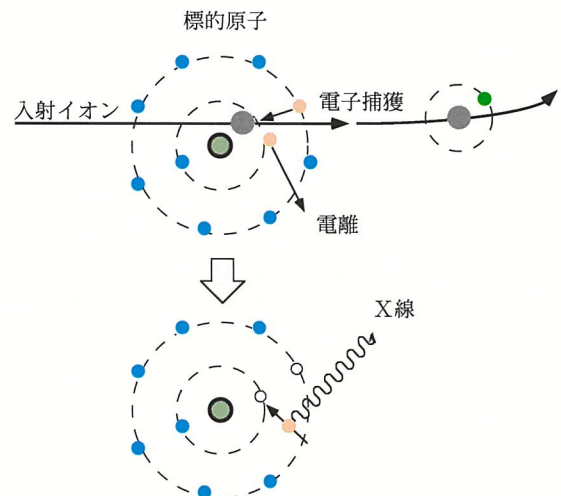
② 幾何学的効果

阻止物質を通過する入射イオンのエネルギー損失がその出射角の増加と共に増加する現象が、本学が行った数MeVの陽子を使った実験によって見出された。これを幾何学的効果という。このエネルギー損失の角度依存性が、一回衝突における衝突径数に依存したエネルギー損失と深く関係していることが分かっているが、定量的にこの現象を解明するために、入射エネルギー依存性、阻止物質の原子番号依存性、さらには重イオンを使った時の入射や出射の荷電状態との関係などを系統的に調べる。



2. 原子衝突関係

イオン-原子衝突における入射粒子や標的原子の励起・電離また荷電変換等の研究は、今でも盛んに行われている。衝突後の入射イオンのエネルギー損失、入射粒子や標的原子の荷電状態、さらには衝突で発生する X 線などをこれらの相関も含めて測定することで、イオン-原子衝突の素過程に対する理解が深められる。

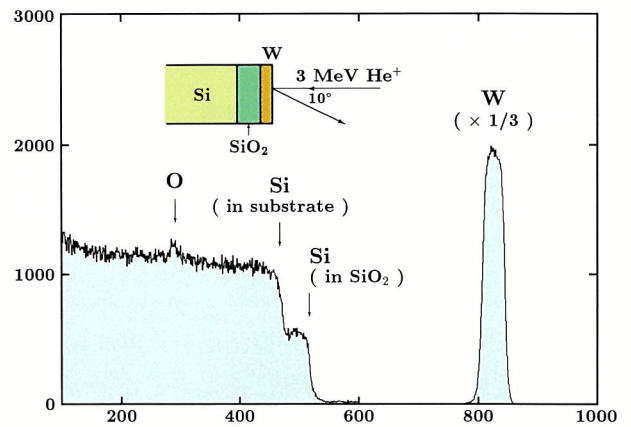


3. 分析関係

高速のイオンビームによる原子衝突や核反応を利用して、結晶や固体物質等の表面やバルクの性質を調べることができる。また、試料中に含まれる微量元素の分析等も可能である。

①ラザフォード後方散乱 (RBS)

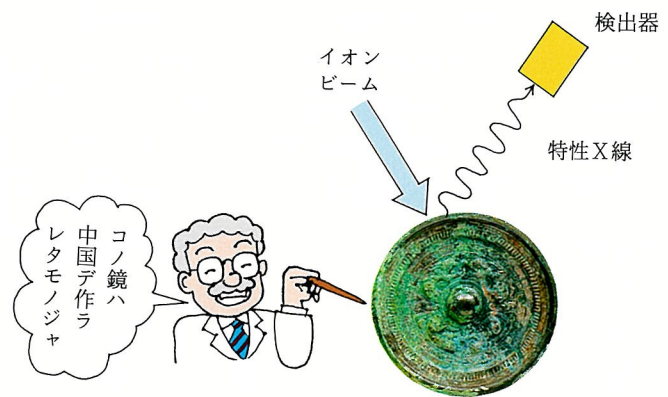
イオンが標的の原子核によって後方散乱を受けるとき、散乱イオンのエネルギーが標的原子核の質量に依存することを利用して元素分析を行う方法である。Si基盤中の重い不純物元素の分析等に適した方法である。



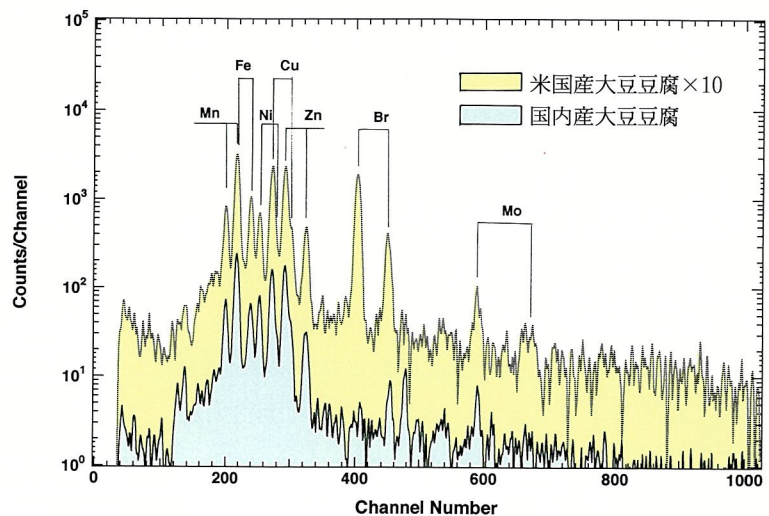
②粒子励起X線分析 (PIXE)

標的原子にイオンを衝突させて励起し、放出される特性X線を測定することによって標的中に存在する微量元素を分析する方法である。非破壊分析の代表的なものとして現在では広く利用されている。RBSを用いた分析とは相補的な関係にある。

(右下のPIXEのスペクトルは、京都府立大学・生活科学の富田グループから提供して頂いた。)

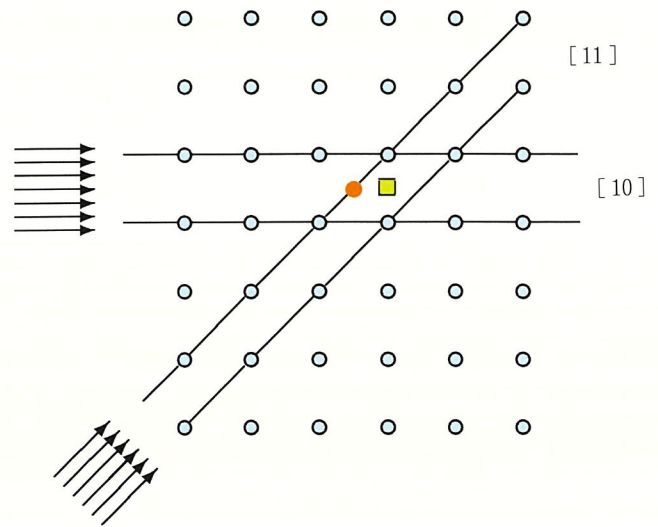


写真提供：京都府福知山市教育委員会



③チャネリング

単結晶の軸方向や面方向に平行に近い角度でイオンが入射すると、イオンはほとんど原子と衝突することがなくなり、結晶の深部にまで到達することができる。この現象を用いてドーピングされた不純物原子が結晶中に占めるサイトを決定したり格子欠陥の種類等を定量的に調べることができる。



不純物原子●は[10]方向からは見えるが[11]方向からは見えない。不純物原子■はどちらの方向からも見える。

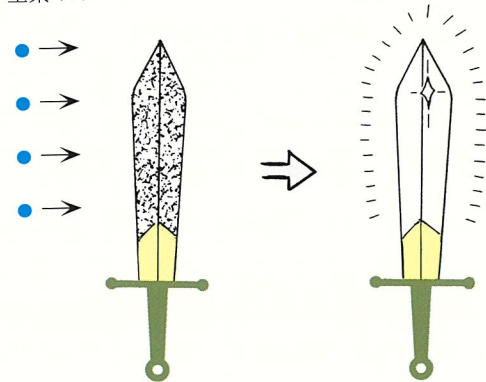
4. その他

高速のイオンビームを物質に入射すると、イオンはそのエネルギーに依存した距離だけ物質中を走り、最終的にはエネルギーを全て失って止まる。このことを利用すると、固体中の計画した深さに不純物元素を添加することができる。また、表面層の物理的または化学的性質を変化させることも可能である。生物に照射してその影響を調べることができる。

①物質の改質

高速のイオン注入の方法によれば、母相と不純物元素との相性等に無関係に不純物原子を母相中に強制的に注入することができる。この方法を半導体、金属及び高分子材料等に適用することにより性能を改善することができたり、全く新しい材料を開発することができる。

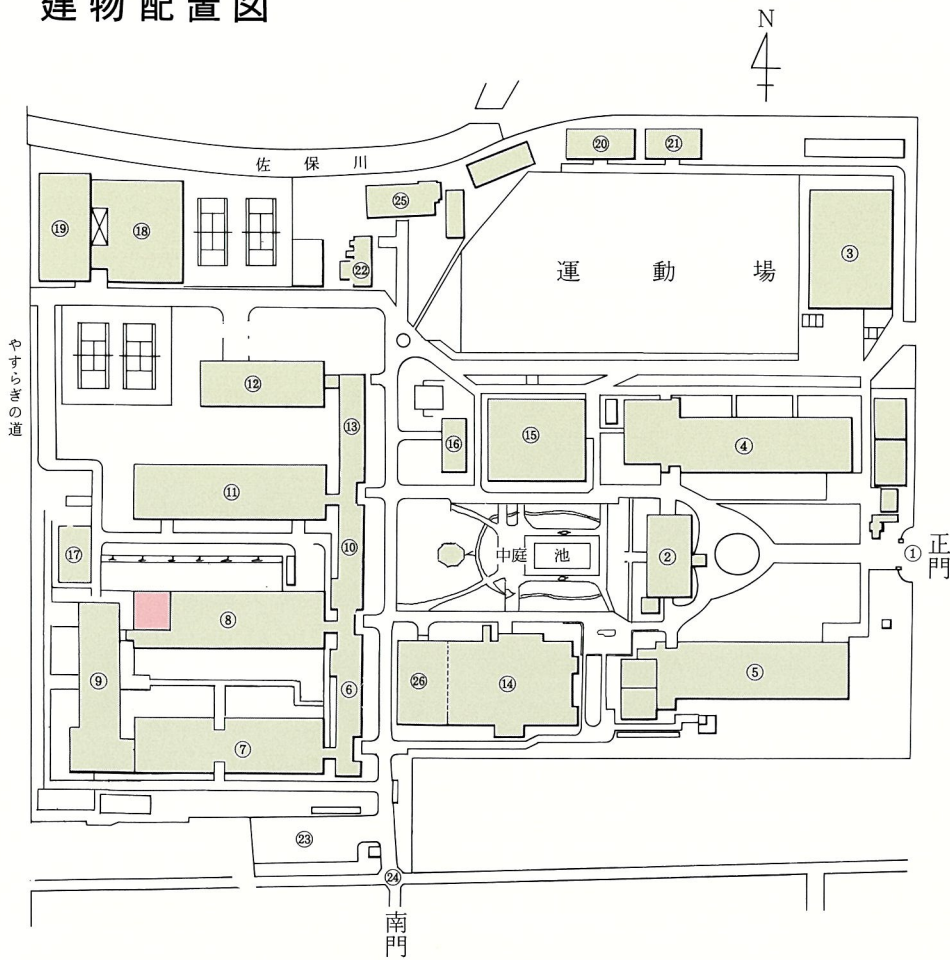
窒素イオン



②照射効果

単細胞生物や細菌にイオンビームを照射することにより、形態形成に及ぼす影響や突然変異の誘発と修復機能に関する研究などを行うことができる。

建物配置図



- ① 正門
- ② 記念館
- ③ 講堂
- ④ 文学部・一般教養等北棟
- ⑤ 文学部・一般教養等南棟
- ⑥ 理学部管理棟
- ⑦ 理学部B棟
- ⑧ **理学部C棟：一階
物質分析用静電加速装置**
- ⑨ 理学部G棟
- ⑩ 生活環境学部管理棟
- ⑪ 生活環境学部
・一般教養等D棟
- ⑫ 生活環境学部
・一般教養等E棟
- ⑬ 大学院F棟
- ⑭ 附属図書館
- ⑮ 大学会館
- ⑯ 保健管理センター
- ⑰ R・I総合実験室
- ⑱ 第1体育館
- ⑲ 第2体育館
- ⑳ 文化系サークル共用施設
- ㉑ 音楽棟
- ㉒ 合宿所
- ㉓ 駐車場
- ㉔ 南門
- ㉕ 佐保会館（同窓会）
- ㉖ 情報処理センター

付近案内図

