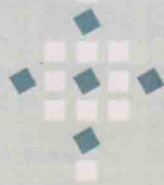
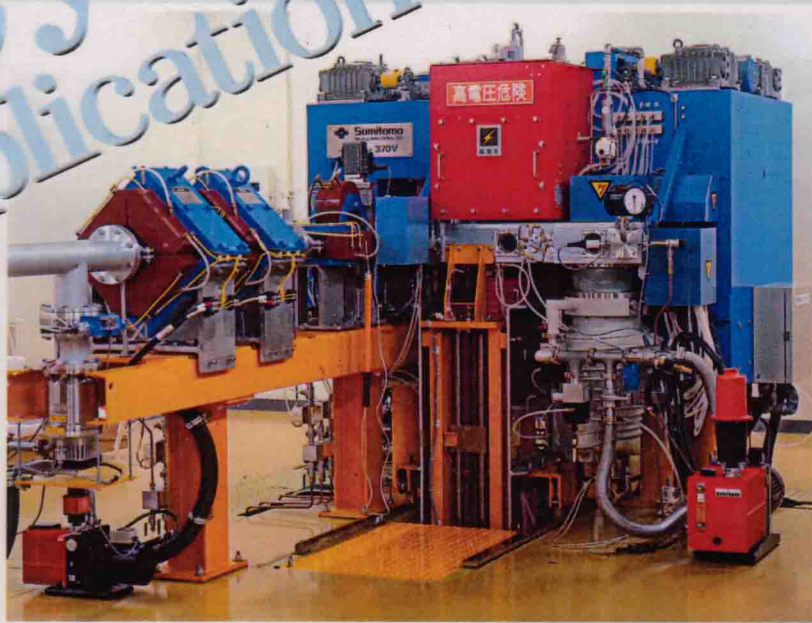


サイクロトロン利用技術サービス

- Cyclotron Application Technology -



Cyclotron Application Technology



中性子ラジオグラフィ撮影
荷電粒子放射化分析
薄層放射化摩耗測定
半導体へのイオン照射
半導体ウェーハの欠陥・汚染分析
陽電子利用

放射線利用に関連する各種試験装置の製造・販売

高エネルギーイオンビームによる照射効果

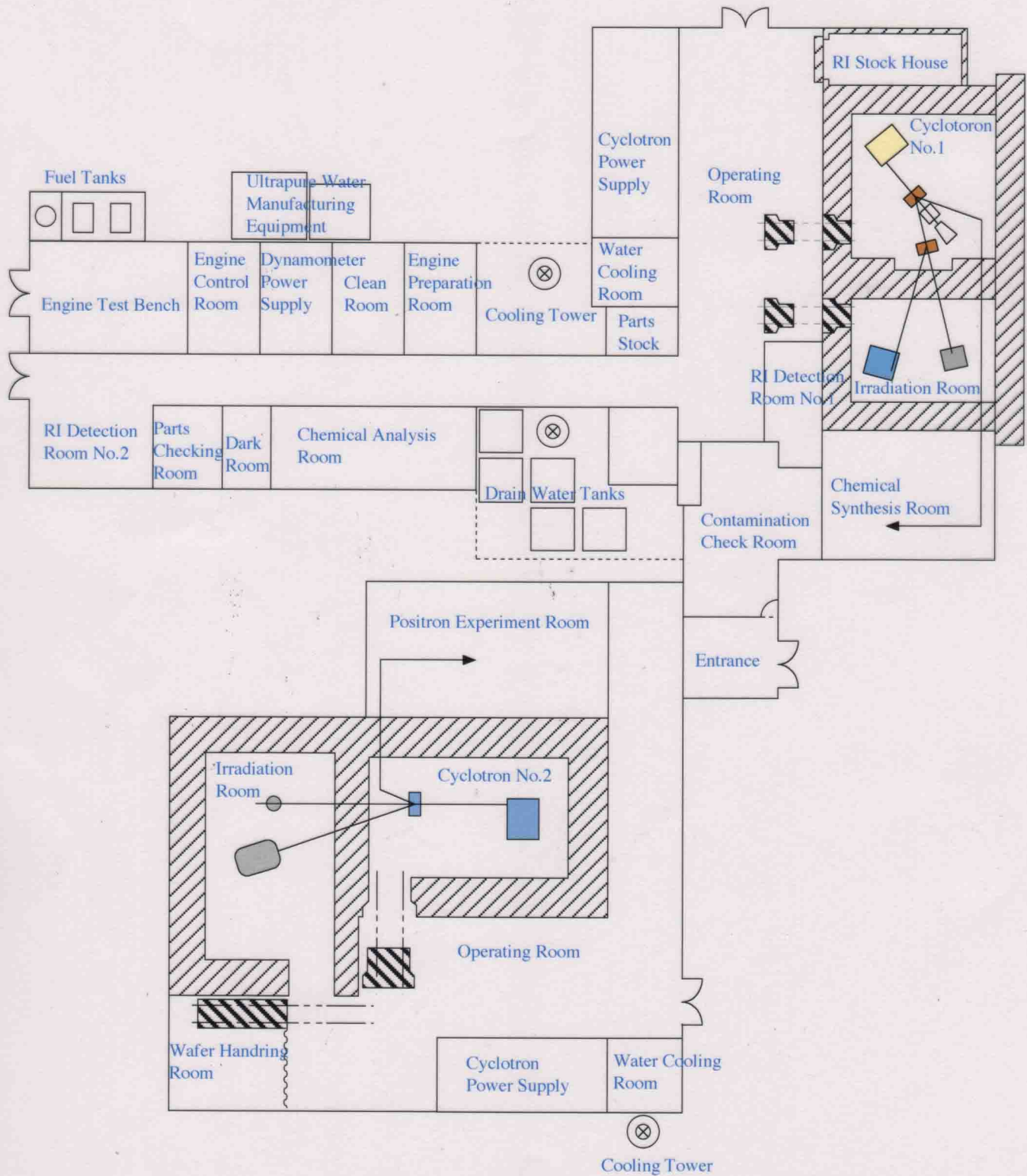
放射性同位元素の製造・販売

放射線による高感度分析

研究開発援助

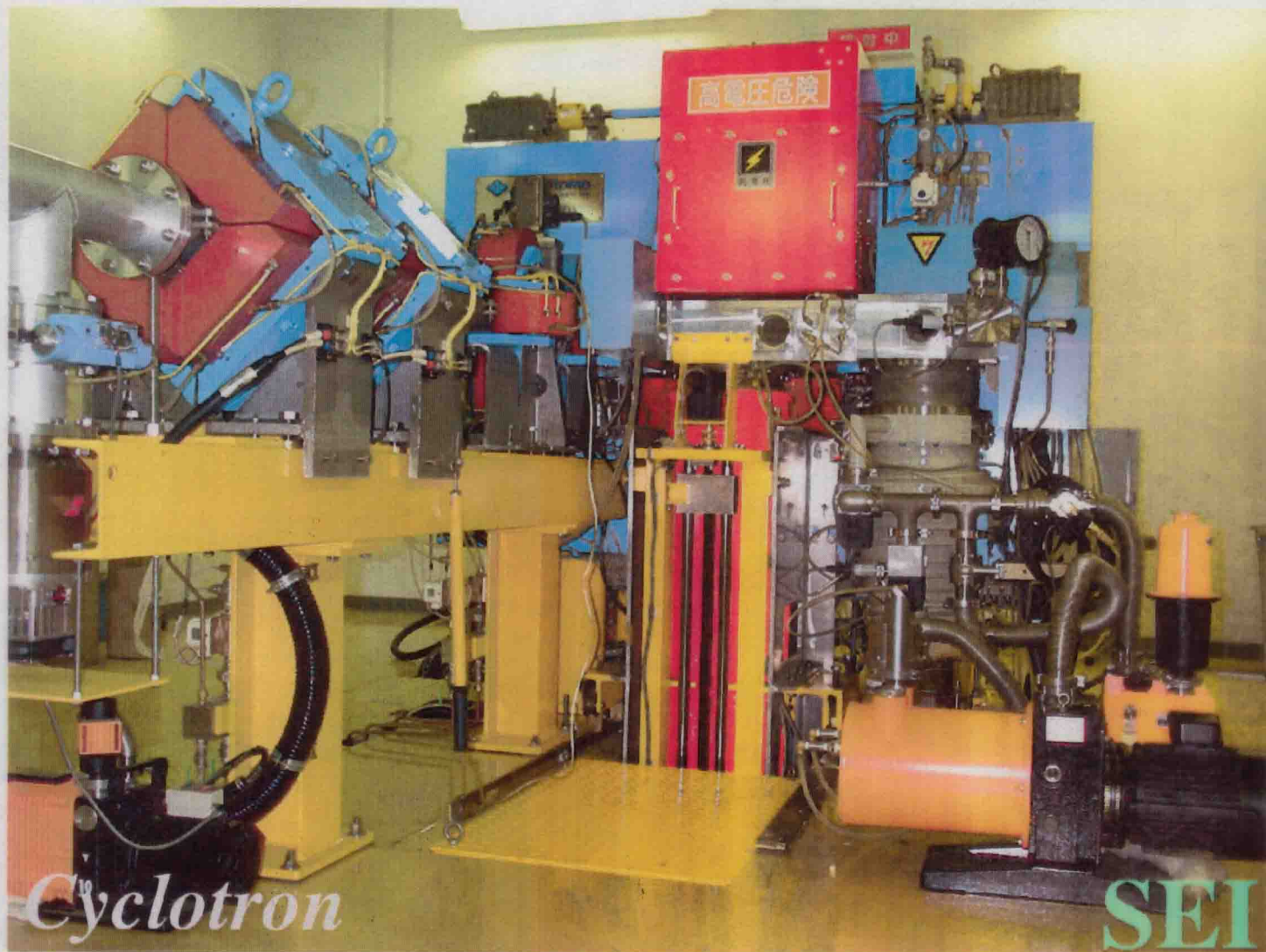
住友重機械工業株式会社
住重試験検査株式会社

Layout of SEI Cyclotron Facility



住重試験検査株式会社
サイクロトロン利用技術部

SEI



Proton : 17MeV, 8MeV, 4.5MeV, 2MeV

Deuteron : 9MeV

Helium-3 : 23MeV

Helium-4 : 17MeV

中性子ラジオグラフィ撮影

荷電粒子放射化分析

薄層放射化摩耗測定

半導体へのイオン照射

半導体ウェーハの欠陥・汚染分析

陽電子利用

中性子ラジオグラフィ撮影試験

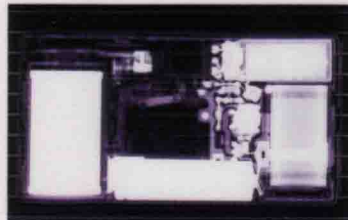
NRT(Neutron Radiography Testing)

中性子ラジオグラフィはX線やγ線のかわりに中性子線を用いた放射線透過試験方法で、X線やγ線写真法とは違った対象物の撮影ができるという利点があります。

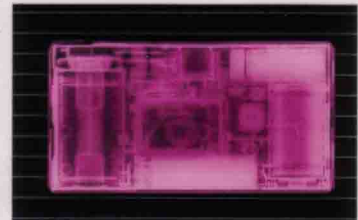
■ X線透過写真との比較写真



写真(外観)



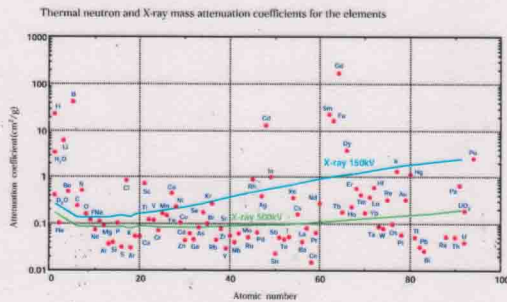
X線透過写真



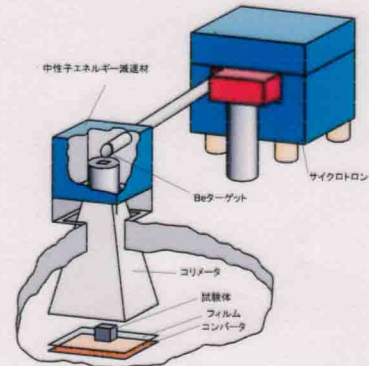
中性子透過写真

中性子は水素や特殊な元素により散乱や吸収を受けやすく、一般の金属には吸収されにくいという性質を生かし、金属に囲まれた水、火薬、高分子材料等の物質の透視において、コントラストの良い写真が撮影できるという特徴を持った試験方法です。

熱中性子とX線の元素に対する減衰係数



中性子ラジオグラフィ設備模式図



■ 原理

サイクロロンで加速した陽子を、Beのターゲットに衝突させると、 ${}^9\text{Be}(p,n){}^9\text{B}$ 反応により速中性子が発生します。速中性子をエネルギー減速材によって熱中性子にした後、コリメータを用いてビームの平行度を向上させます。GdやLiFのコンバータに中性子が入射すると、 ${}^{157}\text{Gd}+n\rightarrow{}^{158}\text{Gd}+e$ や ${}^6\text{Li}+n\rightarrow\text{T}+\alpha+4.97\text{Mev}$ 等の反応によって間接的にフィルムを感光させます。またこの他にも、イメージングプレートを用いた試験方法や、テレビモニターを用いたリアルタイムテレビモニター法などがあります。



中性子ラジオグラフィ設備



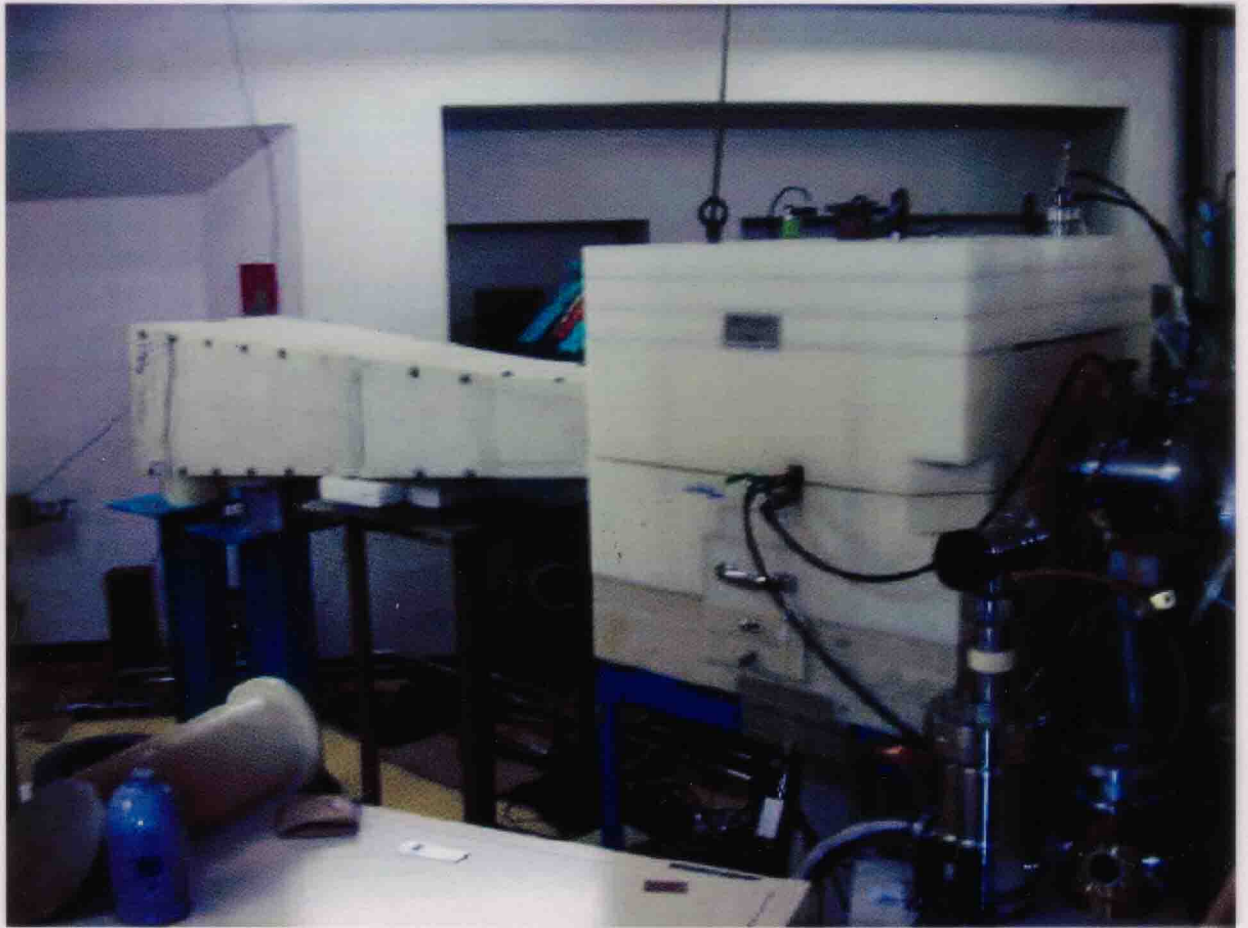
垂直方向試験体支持台(地下室)

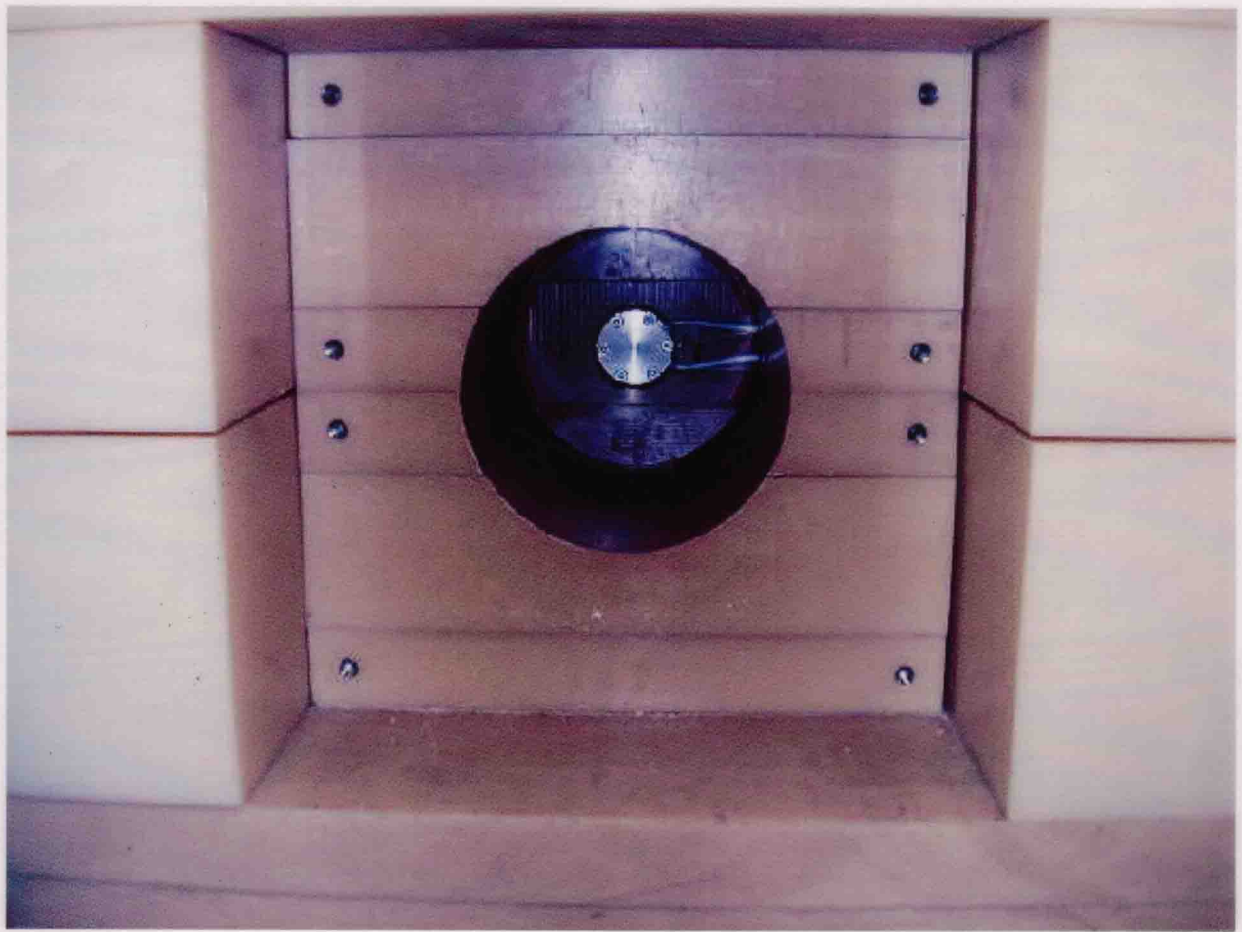
■ 利用例

- 宇宙、航空機関係
 - ロケット燃料導爆装置(火薬)
 - ミサイル導爆線(火薬)
 - 航空機緊急脱出装置(火薬)
 - ジェットエンジン中空タービンブレード(セラミック中性子の残りの有無)
 - 航空機機体部材(CFRP等の複合材料、Al合金の腐食の有無)
- 自動車関係
 - 燃料噴射ポンプ(ガソリンの噴射挙動:リアルタイム撮影)
 - ショックアブソーバ(オイルの流動挙動:リアルタイム撮影)
- その他
 - プラスチックの成形プロセス(流動挙動:リアルタイム撮影)
 - 古文化財(仏像、刀剣、鏡)の内部構造

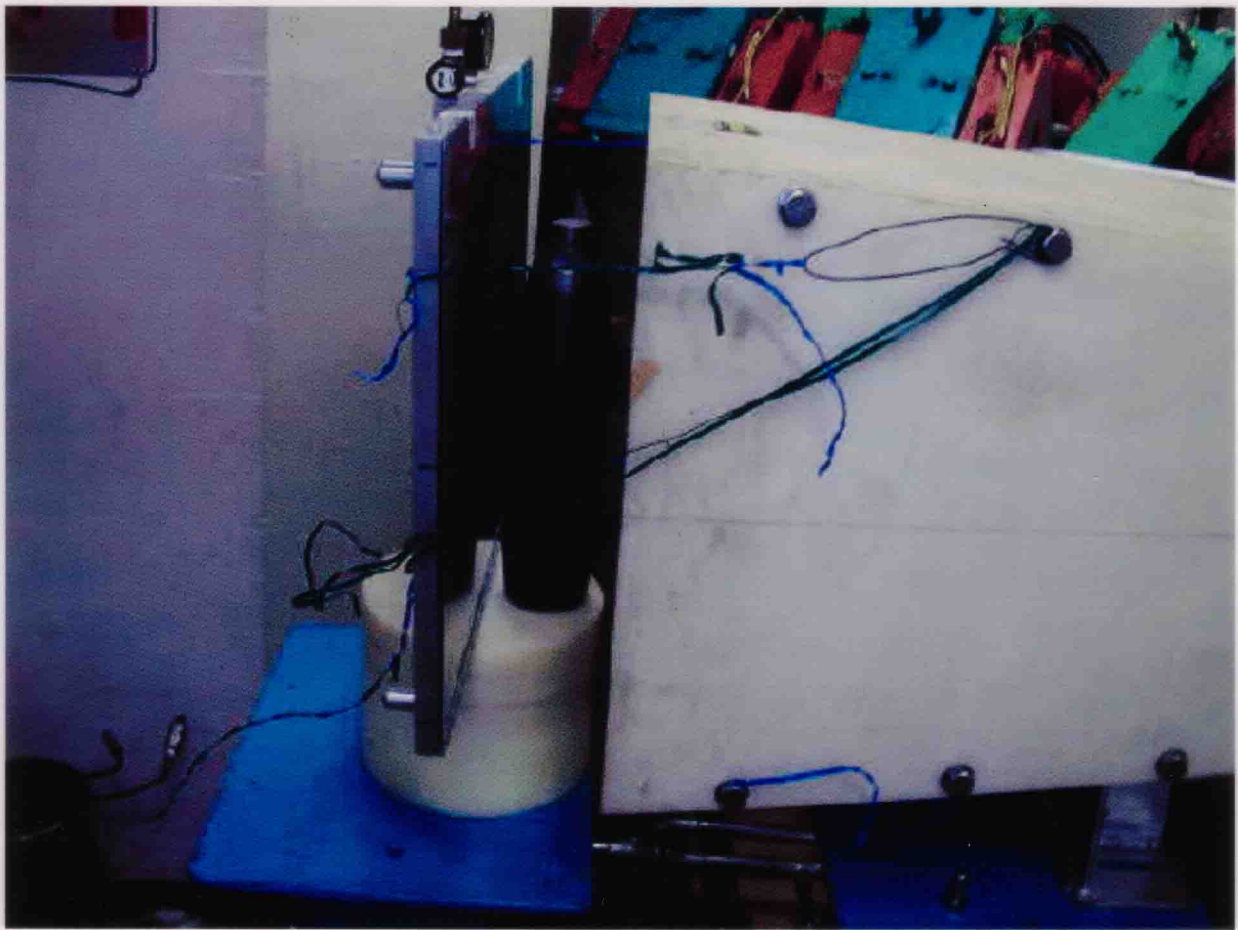


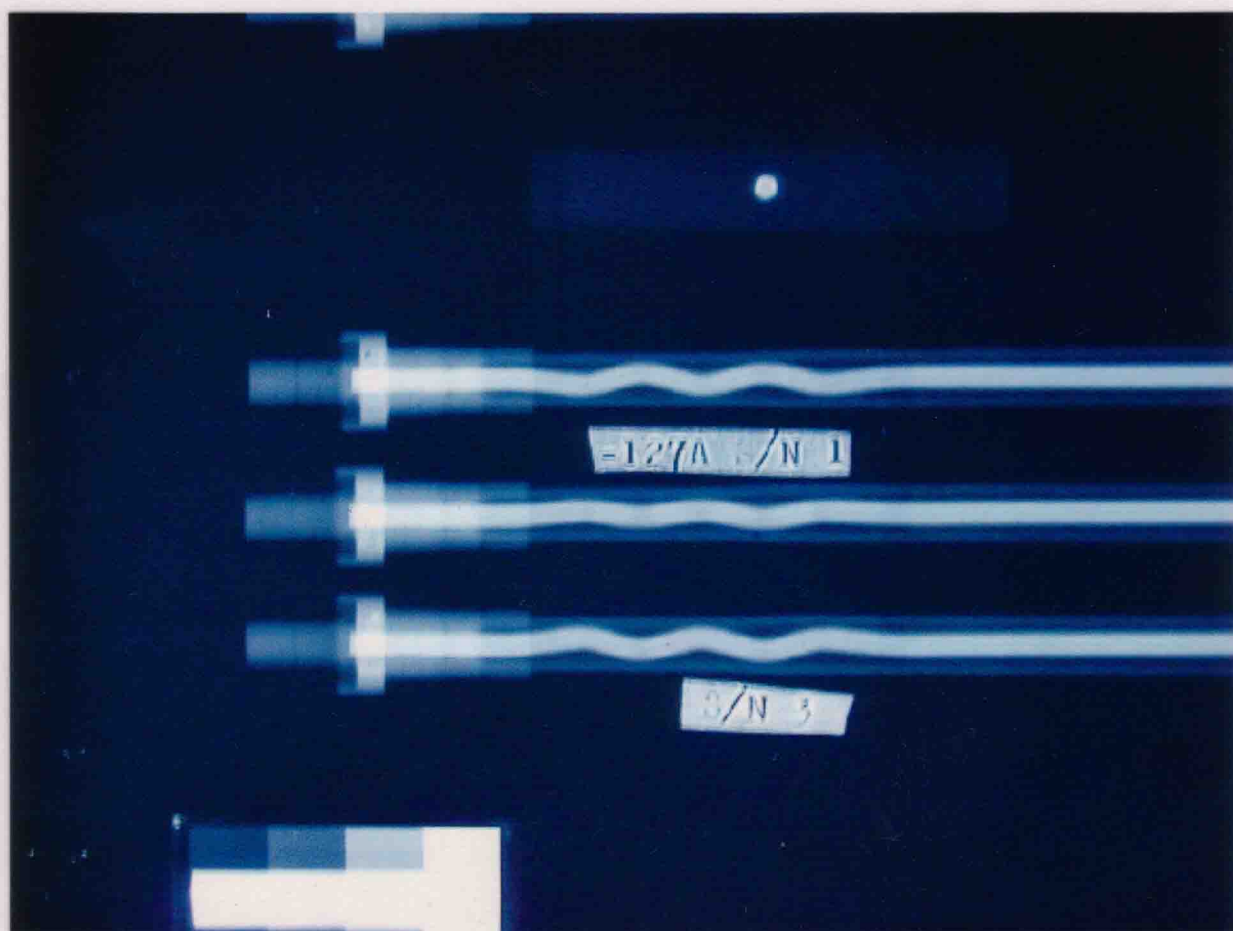
Beターゲット

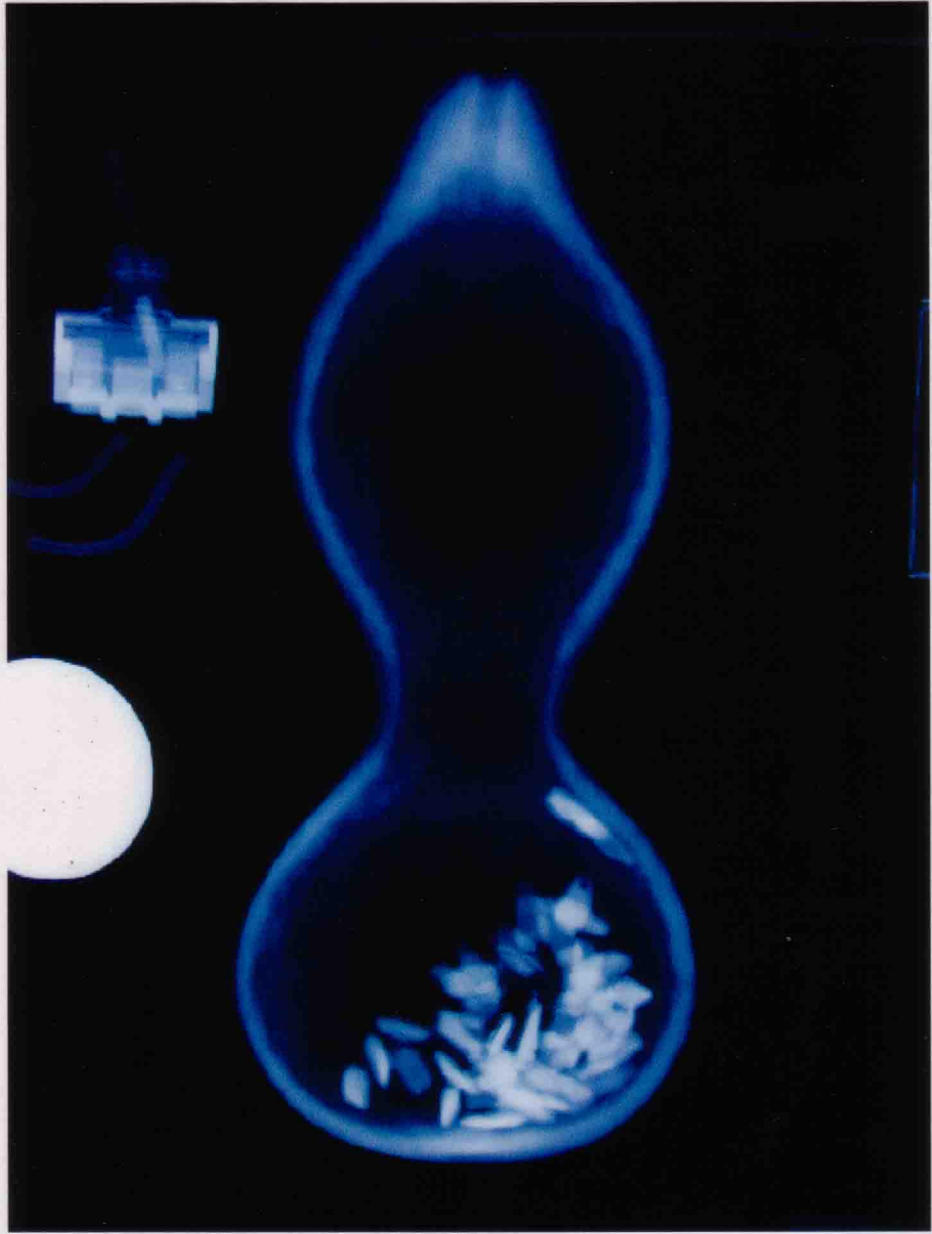










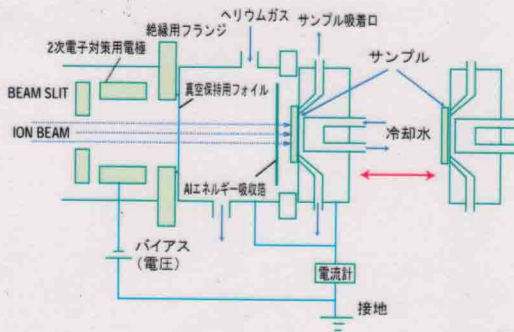


荷電粒子放射化分析

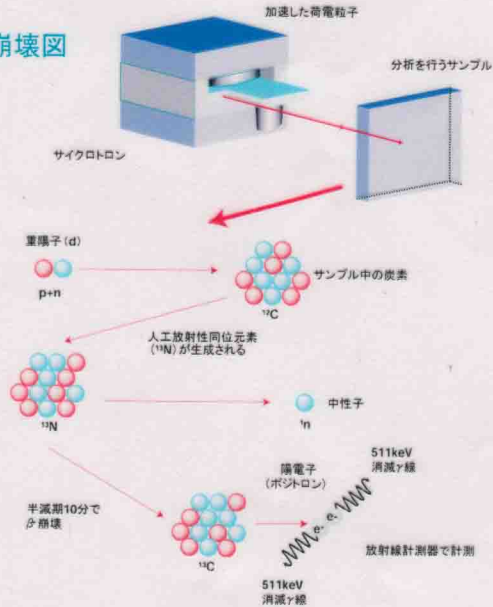
CPAA (Charged Particle Activation Analysis)

CPAAは、サイクロトロンで加速された荷電粒子を用いて、分析対象元素を放射化（人工放射性同位元素を生成）し、その時生成した短寿命放射性同位元素の量を計測することにより分析を行います。CPAAの代表的な適用材料は、微量の不純物により特性が変化することが多く、その制御が極めて重要です。特に近年は材料中の軽元素の存在量がクローズアップされており、その正確な分析が不可欠となっているだけに、この分析方法の有効性が增大しています。また最近はこの手法を応用し、Si表面に付着した炭素量の測定方法も開発しました。この方法は、ウェハー自身の汚染のみならず半導体製造ラインや環境の炭素汚染測定などに有用だと考えています。

照射装置



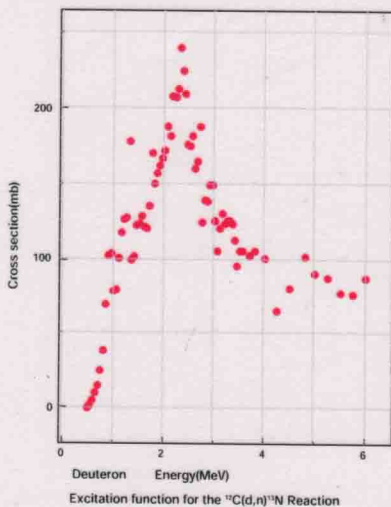
崩壊図



■原理

炭素分析の例 [核反応: $^{12}\text{C}(d,n)^{13}\text{N}$]

デューテロン(重陽子)の照射により ^{12}C から ^{13}N を生成します、この ^{13}N が崩壊の際に出す陽電子の消滅に伴う γ 線(511keV)を計測します。このとき、マトリックスとデューテロンの反応によっても放射性同位元素が生成されており ^{13}N の計測を妨害するため、照射後の分析試料を化学分離した後に計測します。定量は、サンプルと同様の方法によって放射化した、標準試料の測定値との比較により実施します。表面分析においては、エネルギー減速材料を通過後のエネルギーが断面積(核反応の起こりやすさ)の最も高いエネルギーになるようコントロールし、表面に存在する炭素だけを選択的に放射化し、測定します。

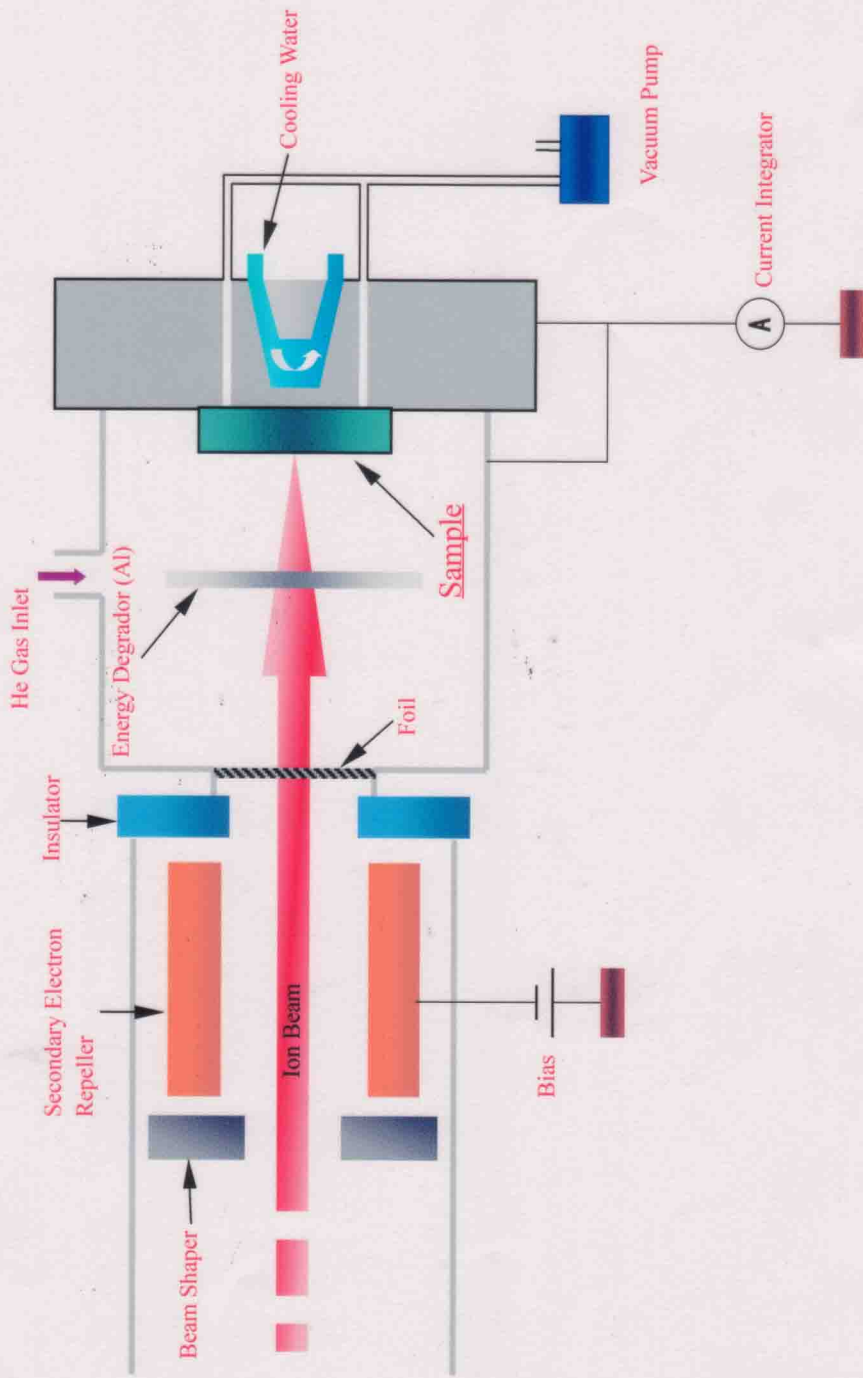


分析元素	加速粒子			
	陽子(p)	重陽子(d)	^3He	α
^9Be	—	—	$(^3\text{He},n)^{11}\text{C}$	—
^{10}B	—	$(d,n)^{11}\text{C}$	$(^3\text{He},d)^{11}\text{C}$	—
^{11}B	$(p,n)^{11}\text{C}$	—	—	—
^{12}C	—	$(d,n)^{13}\text{N}$	$(^3\text{He},\alpha)^{11}\text{C}$	—
^{14}N	$(p,\alpha)^{11}\text{C}$	$(d,n)^{15}\text{O}$	$(^3\text{He},\alpha p n)^{11}\text{C}$	—
^{15}N	—	—	—	$(\alpha,n)^{18}\text{F}$
^{16}O	$(p,\alpha)^{13}\text{N}$	—	$(^3\text{He},p)^{14}\text{F}$	—
^{18}O	$(p,n)^{18}\text{F}$	—	—	—

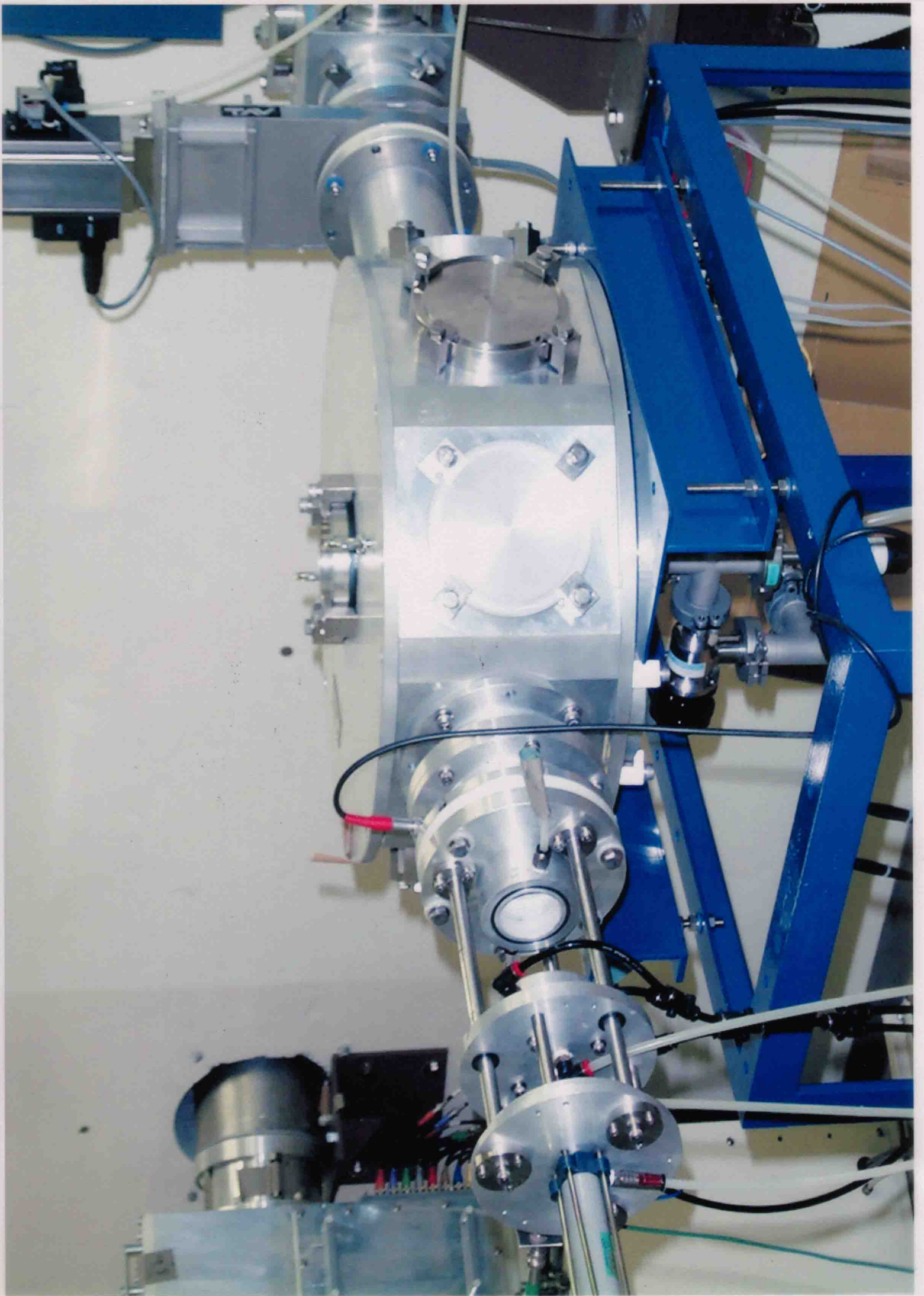
CPAAIに使用する軽元素の核反応(赤字は主に使用する反応)

■特徴

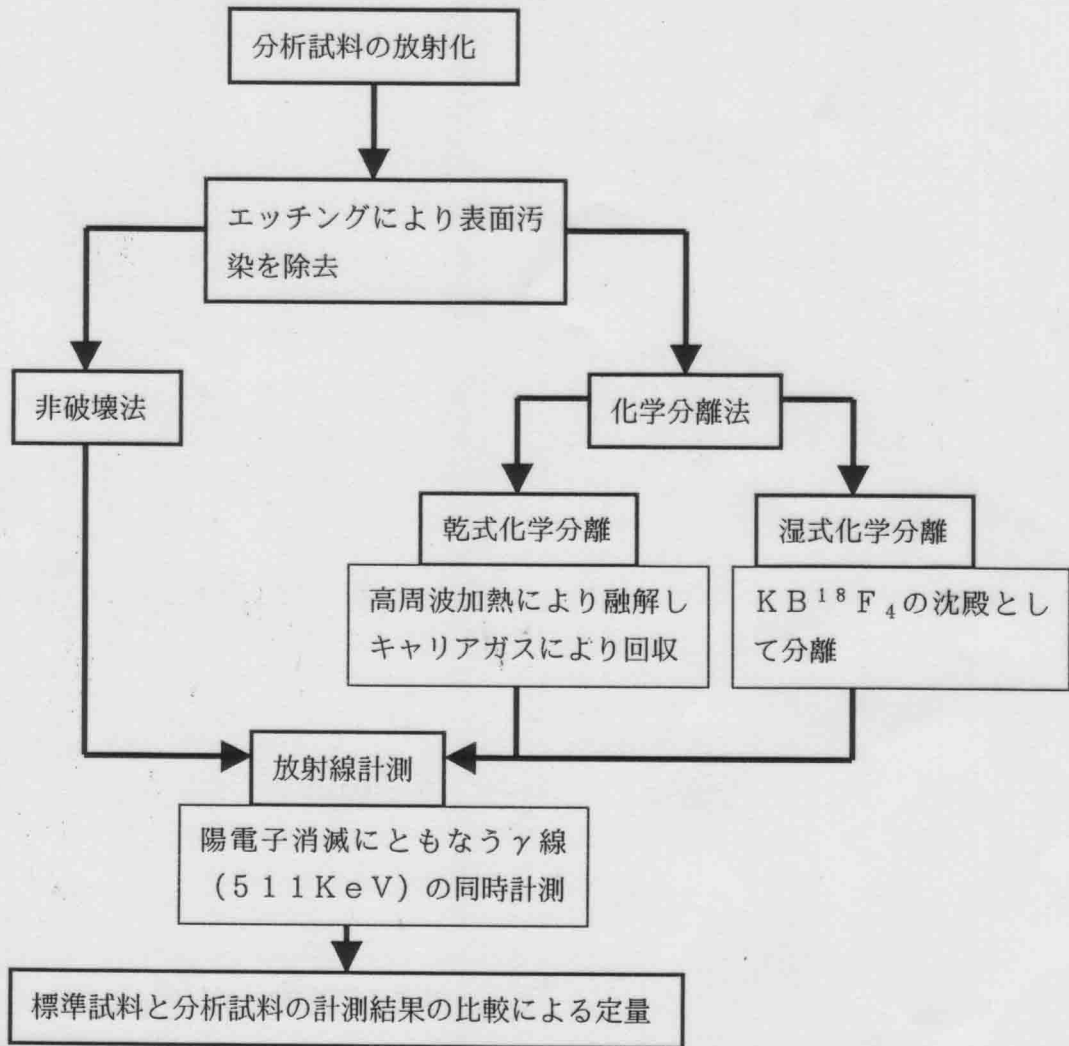
- ①短寿命放射性同位元素を使用するため、酸素、炭素、窒素等の軽元素の微量分析に適しています。
- ②実際の分析では、核反応で生じた放射性同位元素を計測するため、エッチング等により環境からの汚染を容易に除去できます。
- ③放射線計測を行うため、バルクの測定では1ppb、表面分析では 2×10^{12} atoms/cm²程度の高感度の分析が可能となります。また、組成の明らかな標準物質と比較するため、高精度の分析結果が得られます。
- ④表面分析では、大気中で分析を行うため、他の分析方法とは異なり、表面状態を維持したまま測定が可能です。



Target Assembly And Bombardment



荷電粒子放射化分析の処理フロー



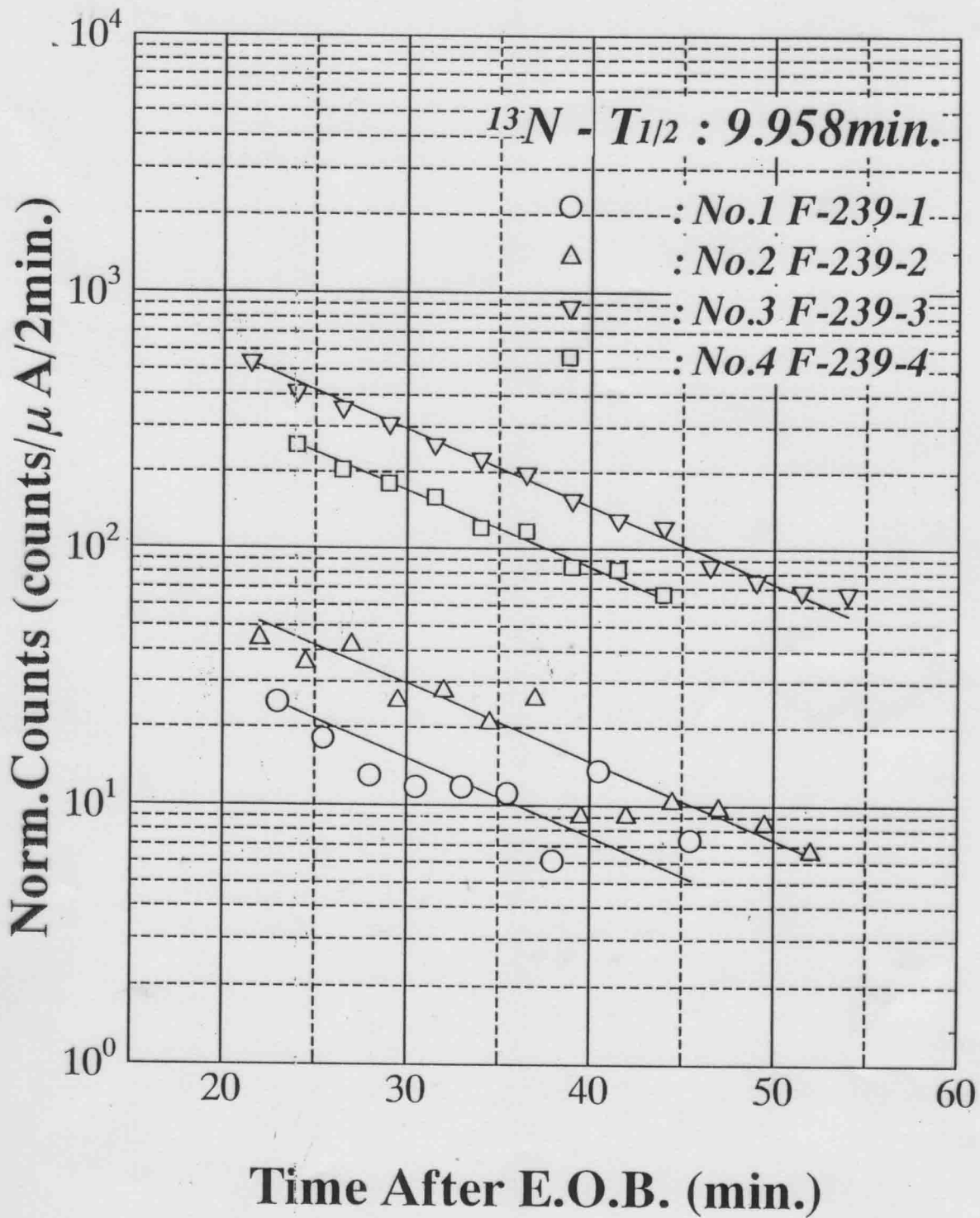


Fig. 1. Decay Curves of Si Samples (Carbon Analysis)

薄層放射化法による摩耗測定

RTM (Radionuclide Technique in Mechanical-Engineering)

■薄層放射化法による摩耗測定 (RTM) とは

- ①組立前の機械部品の摩耗試験したい部所に、サイクロトロンで加速した粒子を照射し、表面層 200 μm までの深さを均一に放射化 (放射性同位元素を生成) し、トレーサとします。
- ②得られる放射能強度は、0.04~4.0 MBqで、摩耗試験をする時の室内の汚染等を心配する必要がない量であり、また運転条件や機械部品の物性・強度にも影響はありません。
- ③この部品を組立てた後、動作試験・負荷試験 (エンジンテスト等) を行い、この時生じる摩耗の量を同時計測します。計測結果をもとに、1 $\mu\text{g/hr}$ または0.1 $\mu\text{m/hr}$ の精度で摩耗速度のデータが得られます。

■特徴

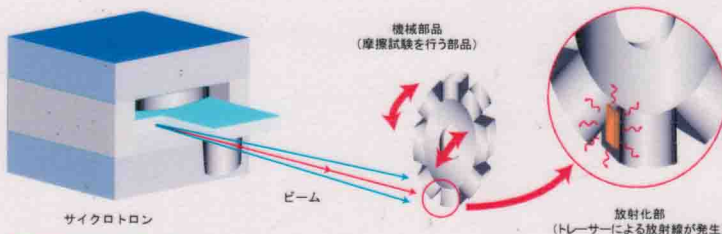
- ①実際の運転条件で運転しながら、非接触で、連続的に摩耗量が計測できます。
- ②測定感度・精度が高いため、測定時間が短くて済みます。(1 μg または0.1 μm の摩耗量を数分の測定時間で計測することが可能です)
- ③運転モード (負荷、速度、圧力、温度、潤滑油) を変えて、その影響・効果に対応した摩耗量の変化が計測・記録できます。
- ④放射化面の範囲を制御することで、0.1~数10 cm^2 の関心領域のみの摩耗量を測定できます。
- ⑤放射化する際に、加速粒子・エネルギーを変えることによりトレーサ核種を変え、複数箇所、例えば摺動しあう双方の部品の摩耗量を、それぞれ同時に計測することもできます。
- ⑥このような特徴を生かした摩耗量測定・解析を行うことにより、機械 (例えばエンジン) の開発時間を大幅に短縮でき、開発費のコストダウンに大きく寄与します。また、短時間の実験で重要部品の寿命の推定も可能で、潤滑油、フィルター、冷却効果等についても知見が得られます。

■摩耗試験の適用対象

- ①自動車エンジン (乗用車用、トラック用ディーゼル)・船用エンジン部品
シリンダーライナー、エンジンブロック、ピストンリング、ピストンリング溝、バルブシート、バルブロッカー、ドラッグレバー、バルブステムガイド、ロータリーエンジン用トコイド、シーリングスリーブ
- ②自動車用部品
カムシャフト、クランクシャフト、シャフトベアリング、スラストベアリング、ボールベアリング、燃料噴射ポンプ、ギアホイール、スプラインステアリングシャフト、ボール、ソケットジョイント、カルダンシャフト
- ③その他の機械部品
ペーンポンプ (ブレード、ホイール、ベアリング)、タービン (ブレード、ディスタンスピン)、鉄道 (車輪、ブレーキシュー、ブレーキディスク)、プラスチック機械 (射出スクリュー、スクリードライバー)
- ④潤滑油の特性試験
エンジンオイル、代替フロンでの冷凍機コンプレッサー用有機潤滑油、一般機械油
- ⑤プラスチック電子部品
計算機磁気メモリ、光ディスクメモリ、磁気テープ

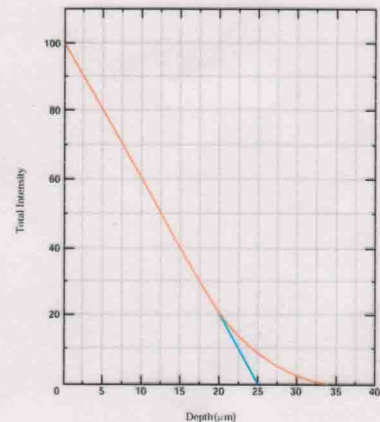
■小型サイクロトロンを用いた放射化設備

- ①小型サイクロトロン/住友重機械製 CYPRIS-370型
- ②加速粒子/陽子 (18MeV)、重陽子 (10MeV)、 ^3He (24MeV)
- ③ビーム形状/1mm ϕ ~3mm \times 20mm
- ④放射化面積/上記のビーム形状と、サンプルポジショナーのオシレータあるいは回転治具との組み合わせにより、1mm ϕ ~数10 cm^2 が可能。
- ⑤対象部品重量/静止照射の場合200kgまで。
- ⑥照射の例/ギアホイールの放射化 (模式図)



■放射化のキャリブレーション

- ①深さ方向に均一な放射化
右図に示すように、照射表面からの深さ方向に対して、均一に放射化されます。
 - ②薄層分離法のキャリブレーション
試験品の材質・照射条件により右図のカーブの形状 (Depth Profile) が異なるので、薄層分離法では同材質のサンプルを同一条件で照射し、キャリブレーションカーブを求めます。
 - ③濃縮法のキャリブレーション
濃縮法では単位重量あたりの放射能を求めます。
- ここでも、深さ方向の放射化が均一であることが、キャリブレーションの前提となります。



キャリブレーションカーブの例

■放射化の対象元素

対象元素	^{56}Fe	^{27}Al	^{65}Cu	^{52}Cr	^{48}Ti	^{120}Sn
生成同位元素	^{56}Co	^{22}Na	^{65}Zn	^{51}Cr	^{48}V	^{120}mSb
半減期	78.8 d	2.6 y	244.1 d	27.7 d	16.0 d	5.8 d

上記の元素が最も多く使われるものですが、 ^{12}C ・ ^{25}Mg ・ ^{58}Ni ・ ^{95}Mo ・ ^{206}Pb 等も放射化の対象として摩耗試験に活用されます

■サービスの範囲

- ①部品の放射化
摩耗試験をしたい部品の、目的部所の必要な面積・深さに対して、試験目的に必要な強さの放射化を行います。放射化依頼に先立って、これらの点および部品の寸法形状・材質・元素についての情報が必要です。また、部品の放射化に際しては、摩耗計測時に必要なキャリブレーション用の同材質のサンプルを準備頂く場合があります。なお、当社の施設で対応できない場合、カールスルーエ研究所に放射化を外注することがあります。
- ②エンジンテストベンチのレンタル
放射化された部品を組み込んだるの負荷試験・エンジンテストは、許可された放射線管理区域施設内で行わねばならず、当社では自動車エンジンテストを主対象に施設を用意し、お客様にご利用頂けるよう準備しております。ただし、部品の組み込み・エンジンのセッティング・運転はお客様ご自身で実施頂いております。
- ③摩耗量測定と報告
エンジンテストと並行して、摩耗量の計測を行います。運転条件のパラメータと対応させた摩耗量のデータをまとめ、報告書を提出します。
- ④放射化部品の保管廃棄
摩耗試験に用いた使用済みの放射化部品は、当社の放射性廃棄物保管庫に保管し、後日、日本アイソトープ協会を通じて廃棄処理の手続きを致します。放射化部品以外の部材については、当社で除染洗浄後、お持ち帰り頂きます。

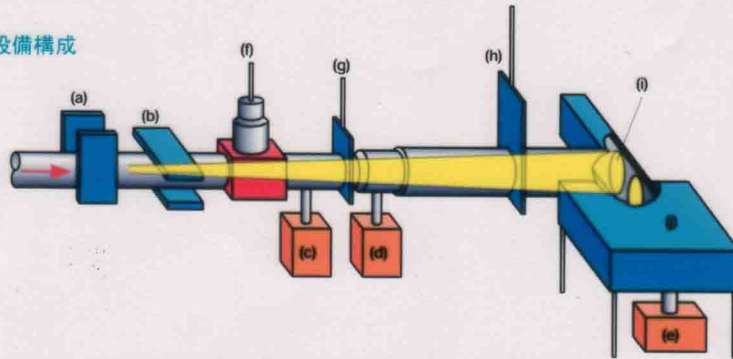
半導体へのイオン照射

IIS (Ion Irradiation on Semiconductors)

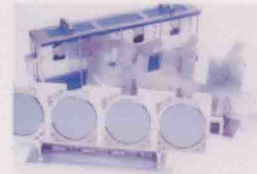
IISは、軽イオン照射によって半導体中に格子欠陥を生成することを目的としています。シリコン等の半導体内に入射された数MeV以上の軽イオンは、表面より数百 μm の位置で停止し、その近傍に格子欠陥層を形成します。この格子欠陥層は、半導体物質内の電子-正孔キャリアを再結合させる機能を持つため、キャリアの局所的ライフタイム制御を可能にします。

このように注入深さを制御できるための点で、IISによる方法は電子線照射、中性子照射、重金属拡散より有効な手段と言えます。

■設備構成



(a),(b):Vertically/Horizontally Scanning Magnet (c),(d),(e):Turbomolecular Pumps (f):Beam Shutter (g),(h):Gate Valves (i):Wafer (j):Automatic Wafer Handling Device



Wafer Setting Plates for Automatic Irradiation

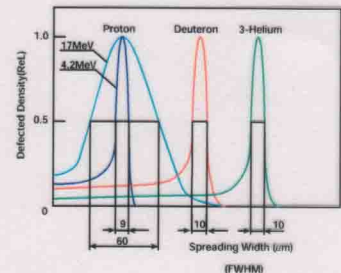
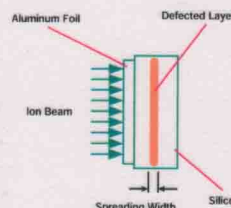
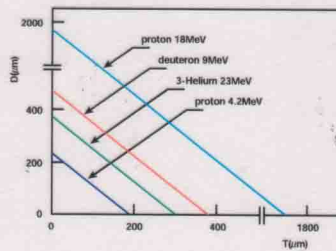
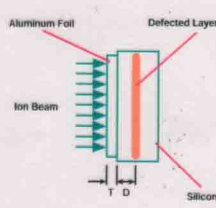


Wafer Handling Device



Vacuum Chamber for Automatic irradiation

■原理



格子欠陥層の位置制御

イオンの加速エネルギーは固定式のため、エネルギー吸収材(アルミニウムフォイル)により深さ位置を制御します。よって簡単かつ正確に欠陥層の位置を再現することが可能です。

格子欠陥層の深さ分布

シリコン中にイオンが生成する格子欠陥層の厚さ(深さ方向の広がり幅)は、アルミニウムフォイル厚さに関係せず、打ち込まれる加速イオンの種類とそのエネルギーによりほぼ一義的に決まります。

■仕様

1号機および2号機サイクロトロンにて加速されるイオン種および特性

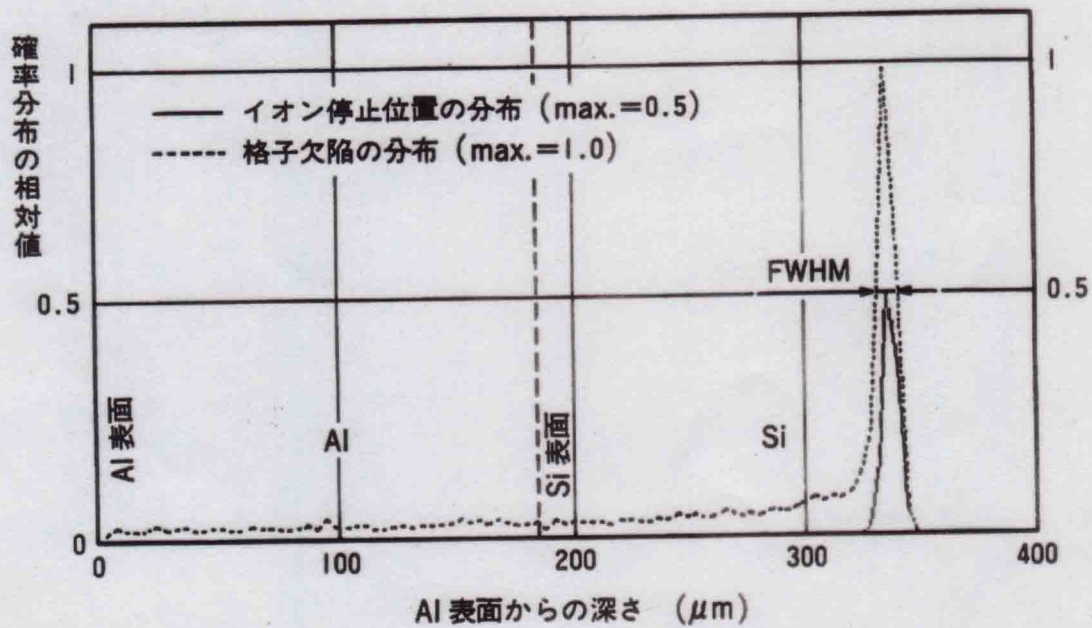
機種名	加速イオン	エネルギー (MeV)	AI中での飛程値 (μm)	AI中での半値幅 (μm)
1号機	陽子 ($^1\text{H}^+$)	17.7	1680	70
	陽子 ($^1\text{H}^+$)	4.6	166	8
	3ヘリウム ($^3\text{He}^{2+}$)	23.7	311	11
	重陽子 ($^2\text{H}^+$)	9.0	—	—
2号機	陽子 ($^1\text{H}^+$)	17.3	1637	60
	陽子 ($^1\text{H}^+$)	7.9	418	20
	陽子 ($^1\text{H}^+$)	4.2	143	9
	陽子 ($^1\text{H}^+$)	1.9	38	3
	3ヘリウム ($^3\text{He}^{2+}$)	23.1	297	10
	アルファ ($^4\text{He}^{2+}$)	17.0	146	6
重陽子 ($^2\text{H}^+$)	8.9	320	10	

1号機および2号機ウェーハハンドリング装置の仕様

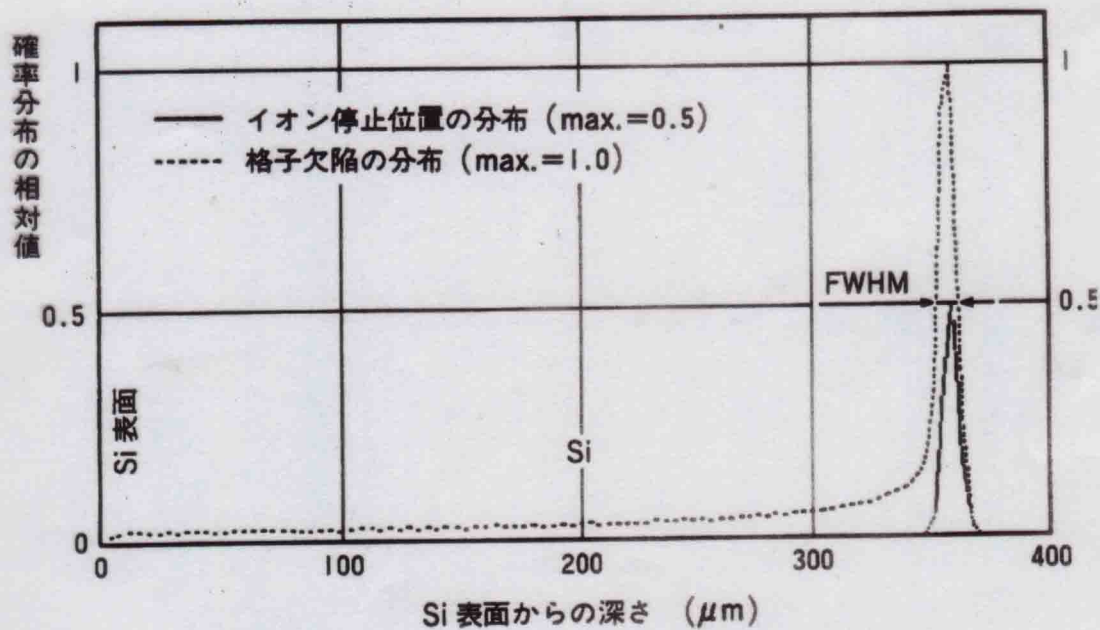
機種名	処理能力(枚/日)		最大照射野 (インチ)	エネルギー吸収材入射時 (%)
	フランジ手動交換式	ウェーハ自動搬送式		
1号機	50~60	500~600	6	±5
2号機	50~60	500~600	8	±5

■適応対象例

GTO(Gate Turn-Off)等のサイリスタ素子
IGBT(Insulated Gate Bipolar Transistor)等のパワートランジスタ
ダイオード素子



$^3\text{He}^{2+}$ イオンをアルミニウム箔を通し、シリコン中へ入射した時の
飛程及び格子欠陥位置分布のシミュレーション

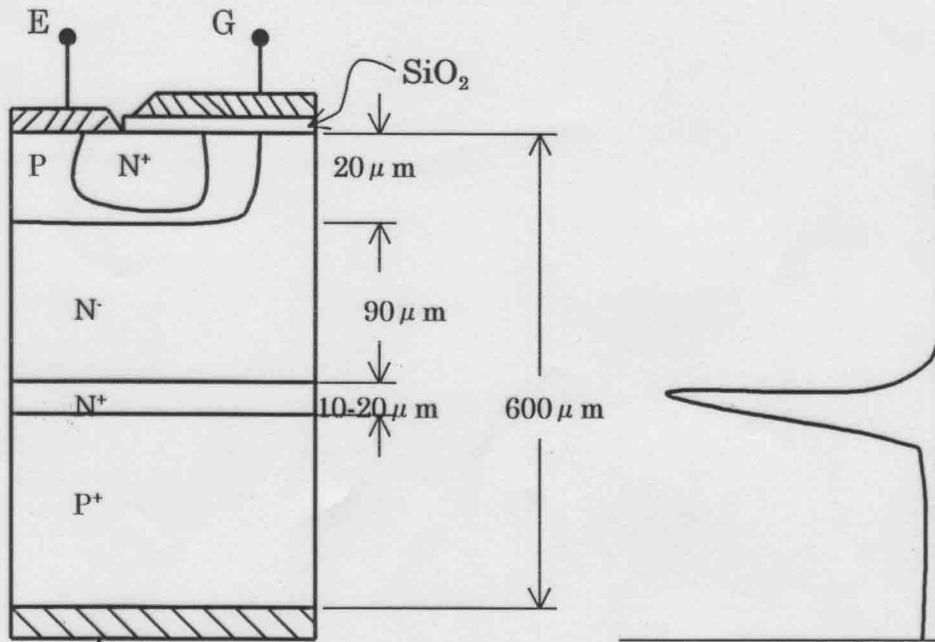


$^3\text{He}^{2+}$ イオンをシリコン中へ入射した時の飛程及び
格子欠陥位置分布のシミュレーション

住重試験検査株式会社
サイクロトロン利用技術部

SEI

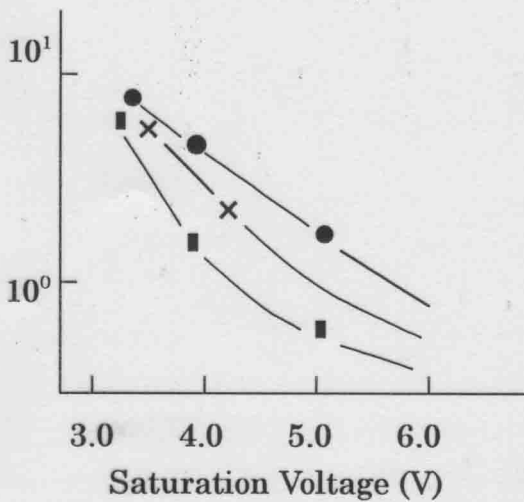
Example of Life Time Control (IGBT)



Proton irradiation into N⁺ buffer layer

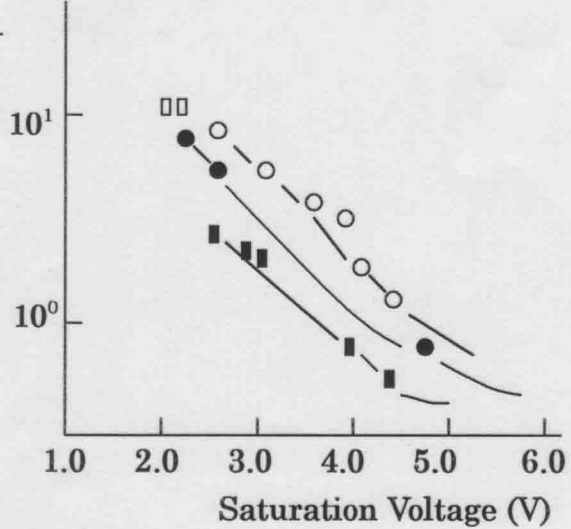
$T_{off}(\mu s)$

C

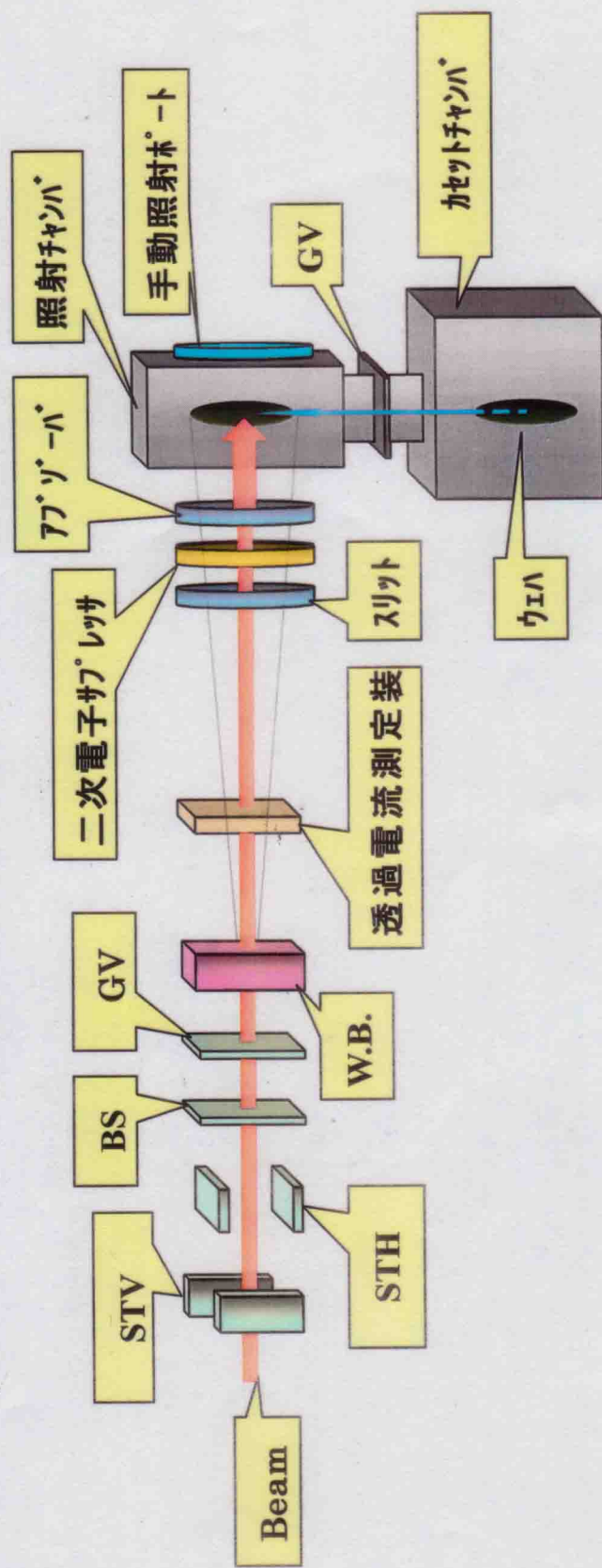


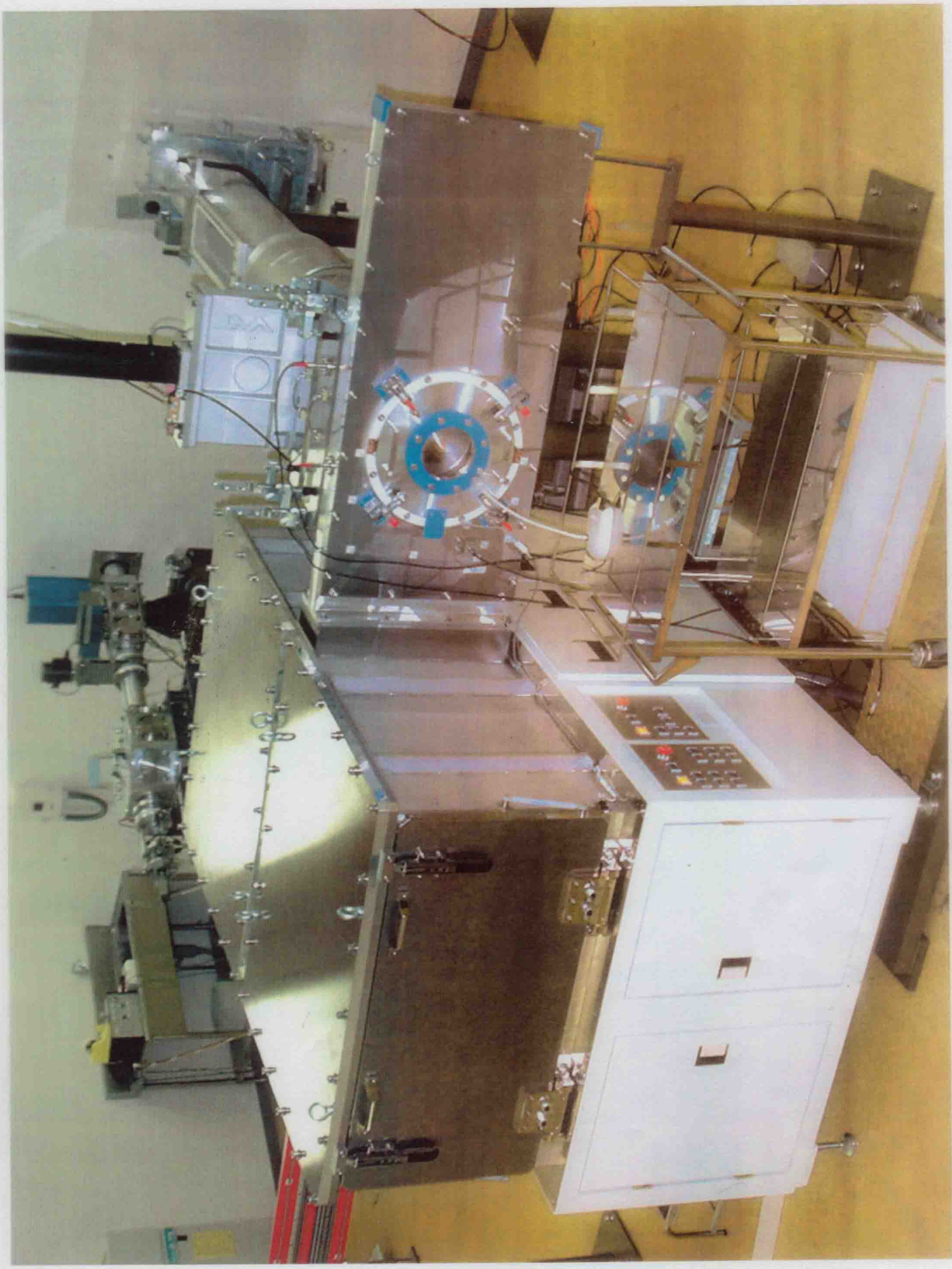
d: Distance from the surface

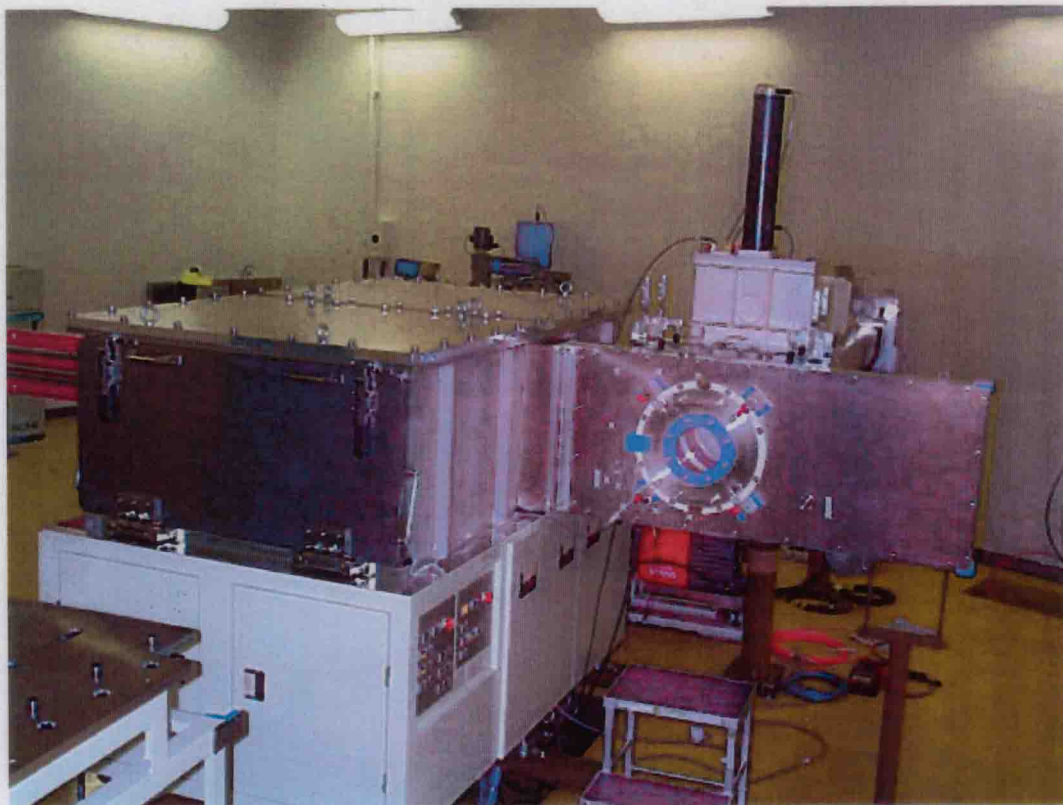
$T_{off}(\mu s)$



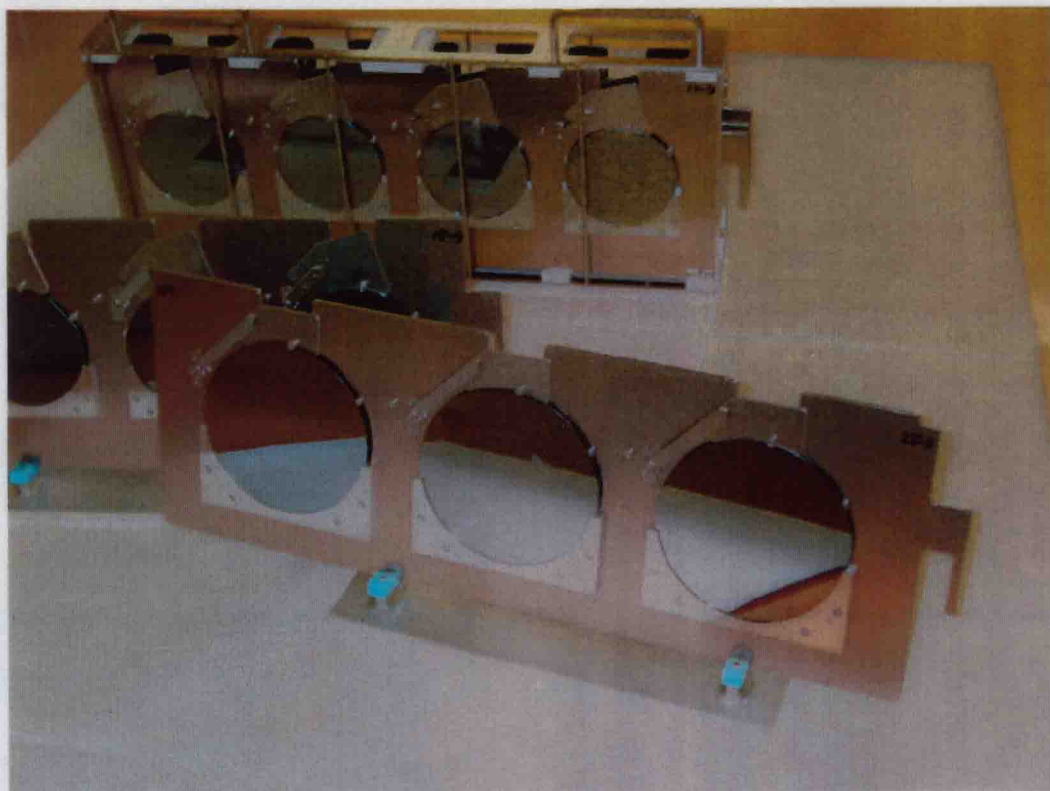
ビームライン構成図







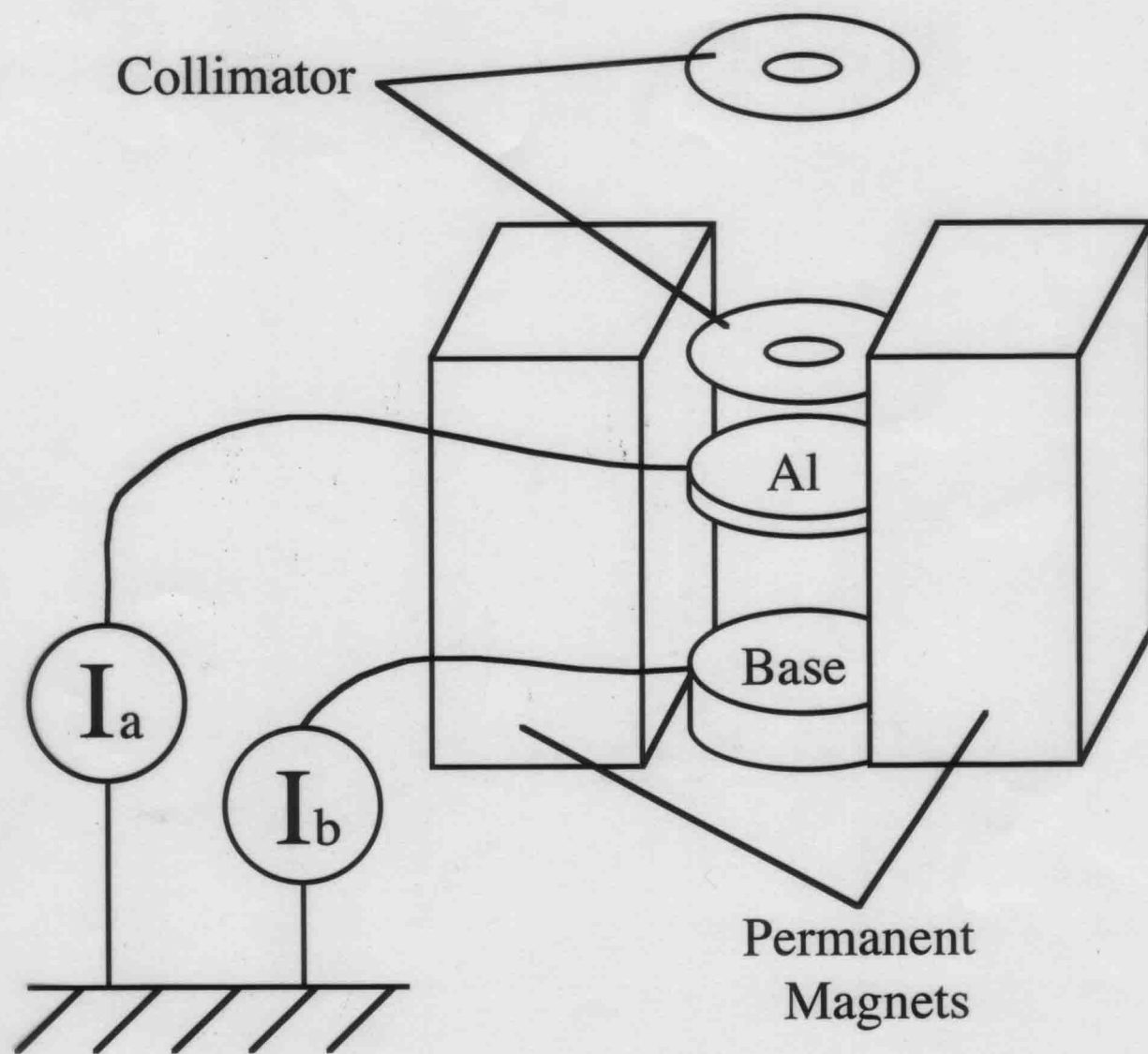
第2エンドステーション



ウェーハ搬送用カセット

住重試験検査株式会社
サイクロトロン利用技術部

SEI



測定装置の簡略図

住重試験検査株式会社
サイクロトロン利用技術部

SEI

ラジオルミノグラフィ

RLG(Radioluminography)

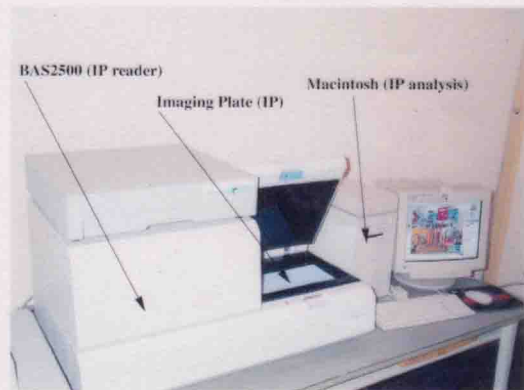
ラジオルミノグラフィはイメージングプレートを用いた欠陥・汚染の検出方法です。イメージングプレートは従来のフィルムに比べて数百倍の感度を持ち、ダイナミックレンジも4~5桁と広く、幅広いレンジにおいて発光量(PSL)が放射線量に比例しており、読み込んだ画像はデジタル信号に置き換えられます。イメージングプレートは積分型検出器ですので、他の放射線検出器のような数え落としが無く、定量性にも優れております。

■原理

重金属の放射性同位元素(^{64}Cu , ^{57}Ni , ^{59}Fe)をウェーハ中の欠陥に析出させ、これを $\text{HF}+\text{HNO}_3$ 混合溶液によるエッチングをします。このエッチング溶液をNaIシンチレーターによる同時計数法により、ウェーハ中における深さ方向の欠陥の分布を調べることを可能としました。欠陥分布以外にも、ゲッターリング能力の評価、イメージングプレートによる汚染金属となる放射性同位元素を、故意に汚染させたウェーハ中の重金属の挙動測定も可能です。また、洗浄効果の評価にも応用が可能です。



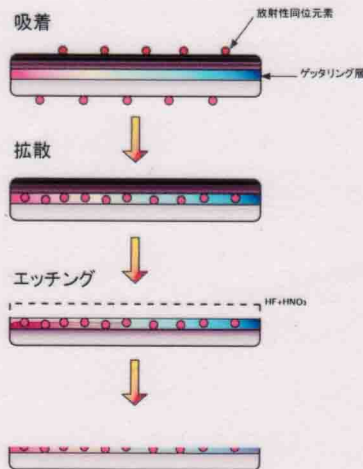
クリーンルーム



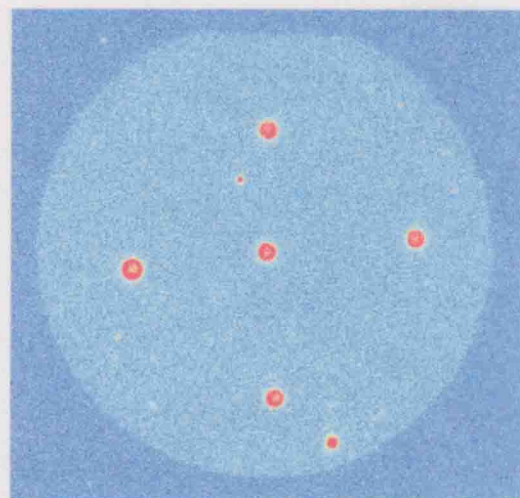
イメージングプレート解析システム

■特徴

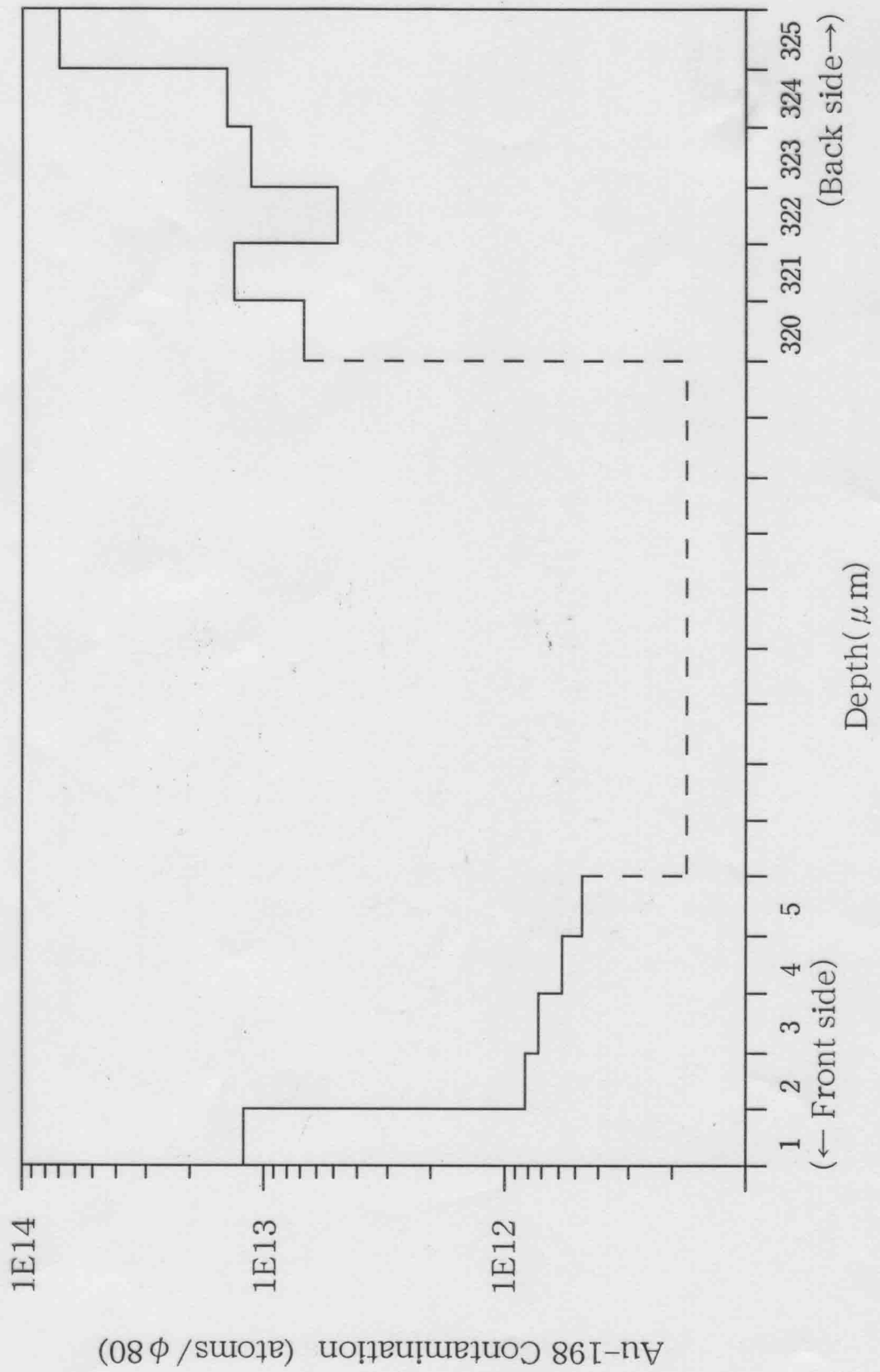
- ①ウェーハのサイズは5"~8"まで対応しております。
- ②主要な評価は、クラス100のクリーンルーム(酸イオン・アンモニウムイオンが0.1ppb以下)にて行います。
- ③イメージングプレートにより、ウェーハ表面の2次元分布の画像が得られます。
- ④ $1\mu\text{m}\sim 5\mu\text{m}$ ステップでの均一なエッチングが可能です。
- ⑤放射性同位元素を用いますので、測定に関しては環境からの影響を受けません。
- ⑥Cu, Ni, Feの重金属の評価が可能です。
- ⑦洗浄・エッチング等の治具は全て石英・テフロン製を使用しております。



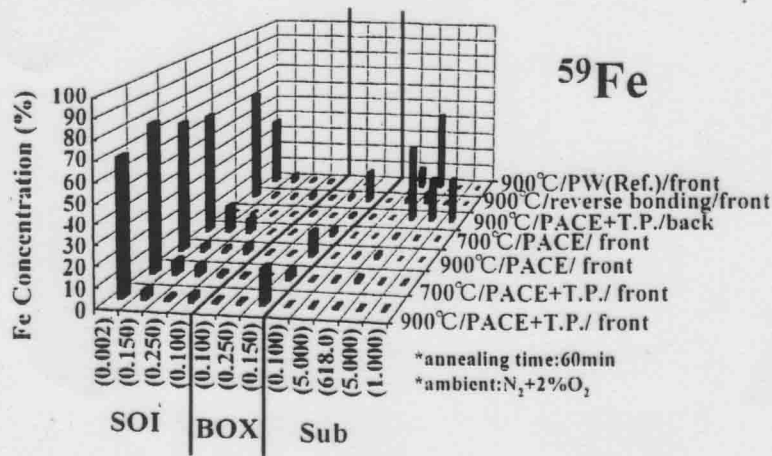
ゲッターリング層の評価



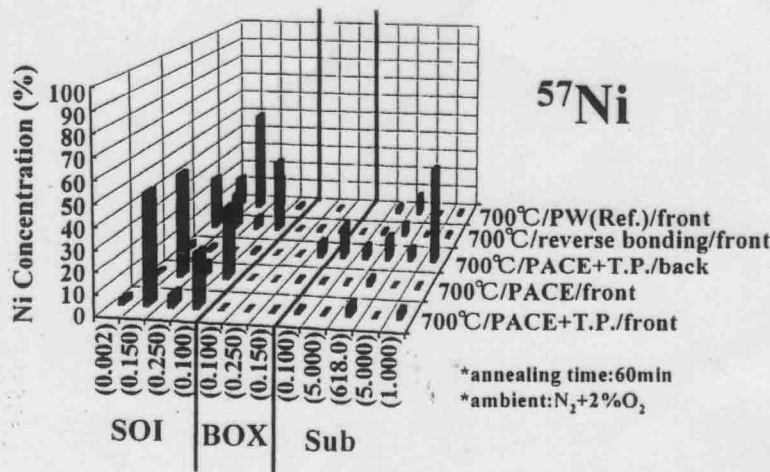
イメージングプレート画像($\text{Cu}: 5 \times 10^{18}$ atoms/cm²汚染例)



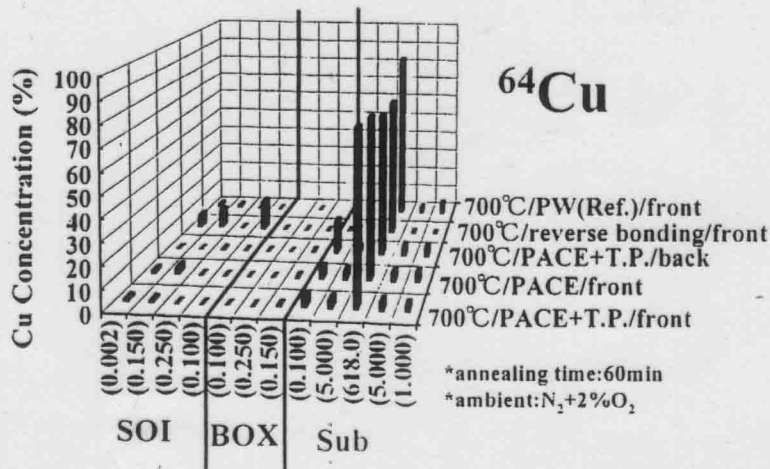
Au-198 Contamination Depth Profile (4" wafer)



(a)



(b)



(c)

Fig. 2. Depth profiles of (a) ⁵⁹Fe, (b) ⁵⁷Ni, (c) ⁶⁴Cu area concentrations for which 100% is $\sim 10^{12}$ atoms/cm² as analyzed using radioactive isotope tracers and the step etching method. Values in parentheses show etching removal or the remaining thickness of the base wafers with unit of μm . 'Front and Back' indicate contamination from the front surface and back surface, respectively.

process that Ni, which has the same diffusivity in Si as Cu, cannot diffuse into base wafers through the BOX layer, it is necessary to design a suitable gettering site in the SOI layer or base wafers for Ni and Fe.

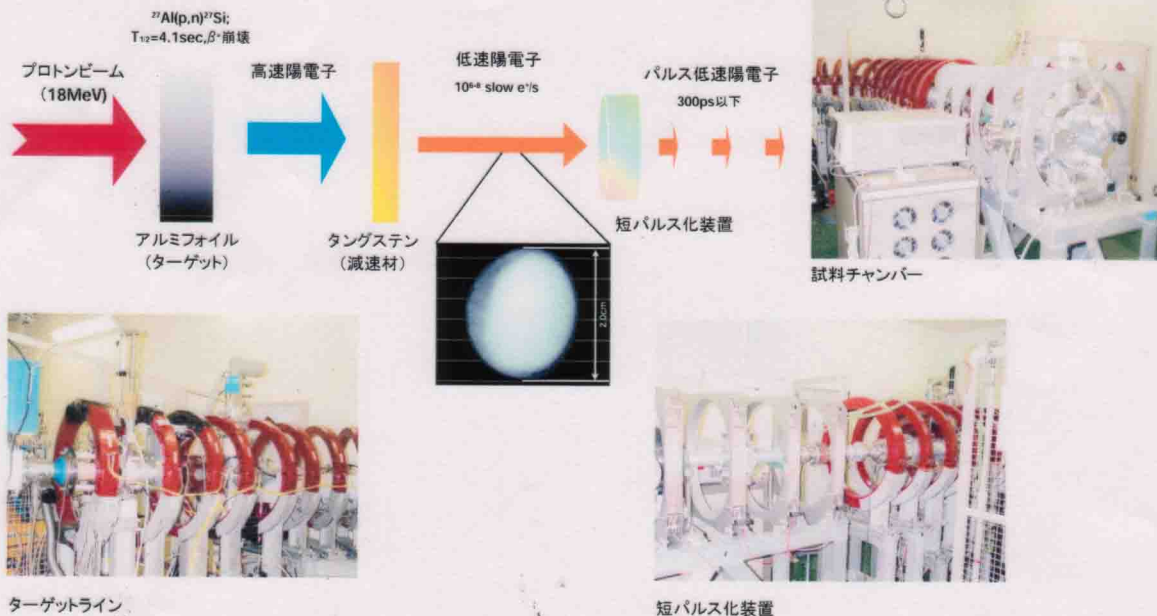
Ni was captured under the surface oxide and on the SOI side of the SOI/BOX interface. In other words, almost no Ni was detected on the surface, and the buried oxide layer, except for the sample bonding interface, was SOI/BOX, while

陽電子線利用

PBA (Positron Beam Application)

■陽電子(ポジトロン)とは?

陽電子は(陰)電子の反物質であり、電子と同じ質量を持ち電荷だけがプラスになっている素粒子です。陽電子は電子と結合すると、2本の γ (511keV)を放出して消滅します。エネルギーの低い低速陽電子は、物質の表面に当たって反射したり、物質中の格子欠陥にはまりやすい性質があります。この性質を利用して物質表面の性質を知る重要な手段となります。陽電子は陽電子顕微鏡や陽電子線回折の他にも格子欠陥の種類や大きさ、密度などの非破壊測定などの応用に期待されております。



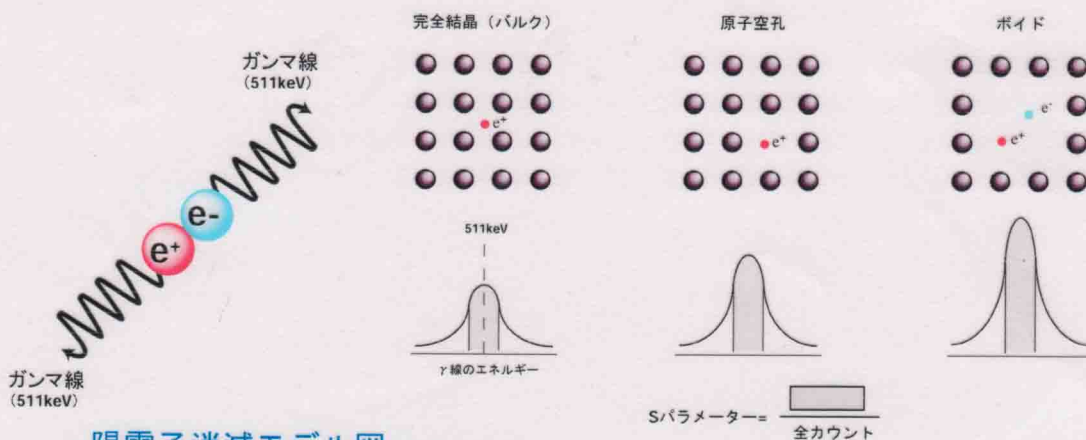
■原理

①Sパラメーター測定

陽電子が欠陥のある結晶に進入した場合、完全結晶に進入した場合と比べて内殻電子との消滅確率は減少し、伝導電子との消滅確率が上昇します。伝導電子の運動量分布は狭いのでドブブラ拡がり、完全結晶に比べて尖鋭化します。従って、陽電子が欠陥に捕獲され消滅するとSパラメーターは増大します。

②陽電子寿命測定

原子空孔等の欠陥は、完全結晶と比較して電子密度が低いので陽電子が電子と消滅するには時間がかかります。すなわち陽電子の寿命(τ)は、欠陥が存在すると長くなります。この陽電子寿命を測定することにより、欠陥の種類・密度等の情報が得られます。



■特徴

- ①非破壊での測定が可能です。
- ②ポジトロンエネルギーを変えることにより、深さ方向の欠陥の測定が可能です。
- ③原子空孔レベルの格子欠陥の検出が可能です。
- ④サイクロトロンを使った陽電子ビームは、陽電子放出アイソトープ(²²Na)よりも高強度のビームを得ることが可能です。
- ⑤半導体(Si)では最表面層の酸化膜層の解析にも利用可能です。

