

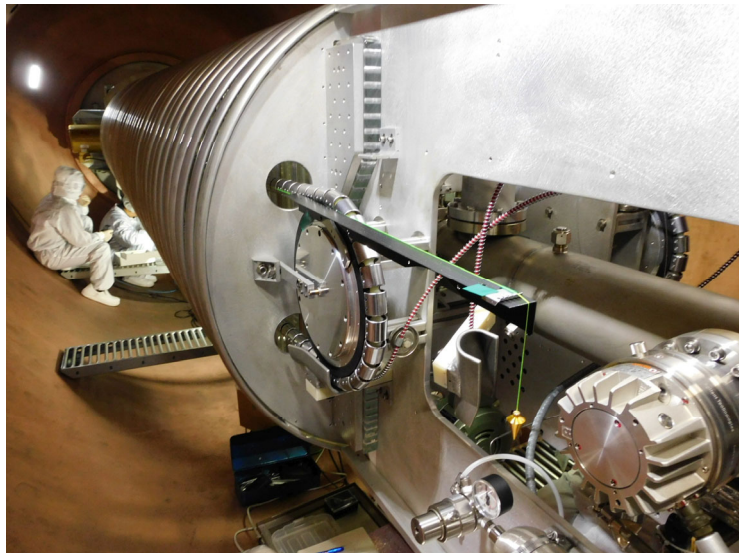
タンデム静電加速器施設における研究と技術開発



この冊子では筑波大学タンデム静電加速器施設UTTACにおける最近の主な研究成果とともに各種実験装置と計測技術を紹介しています。産業あるいは学術目的の外部利用(施設共用)の参考資料としてもご利用いただけます。

施設の整備・改良から実験研究まで

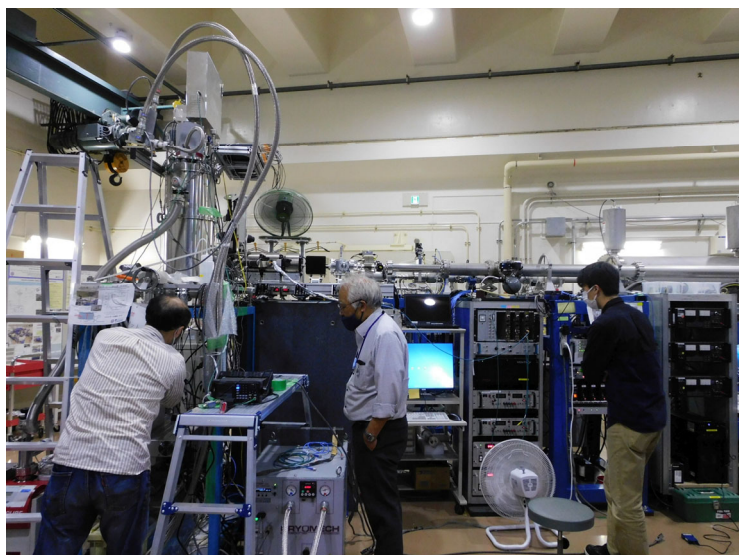
▼6MVタンデム加速器本体の整備・高度化



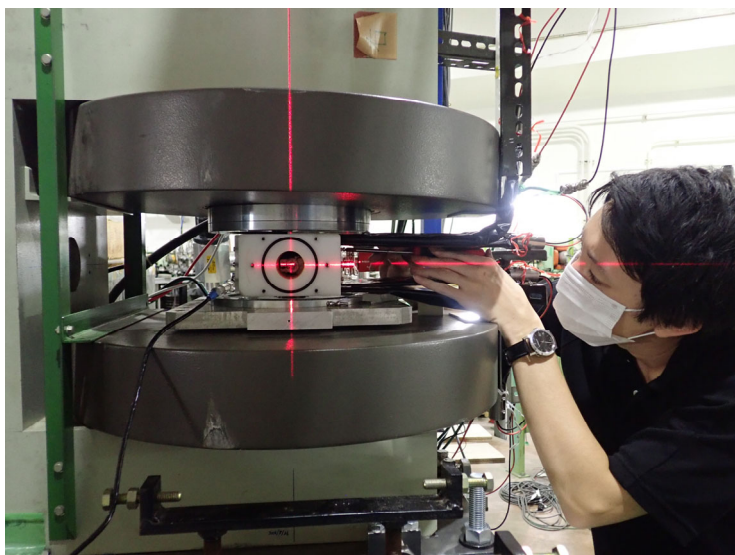
▼加速器イオン源の整備・改良



▼実験準備



▼実験準備



表紙写真:2015年度に稼働を開始した筑波大学6MVタンデム静電加速器とビーム輸送系
 後方の青色横型タンク(全長10.5 m、直径2.74 m)内で最大端子電圧 6 MV(600万ボルト)を発生し、
 これによる静電加速で周期律表のほとんどの原子種のイオンビームを広いエネルギー範囲で提供
 可能です。加速器質量分析(AMS)、物質のイオンビーム分析、放射線耐性試験などに利用されます。

施設の整備・改良から実験研究まで(続)



◀ 物質中のH,D分析実験

▼ 実験データを集める



▼ 他大学との共同実験



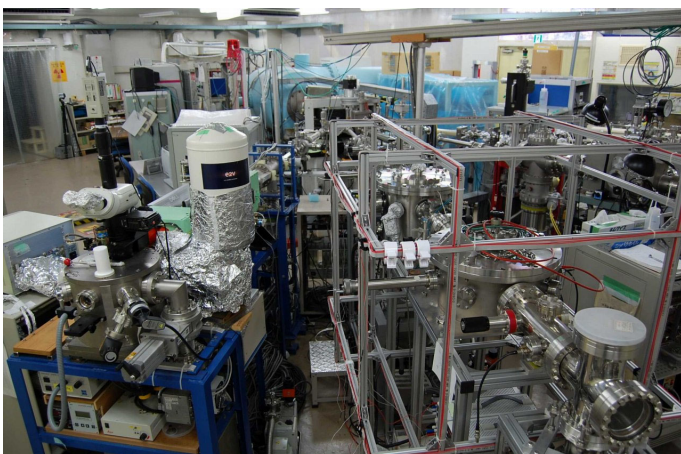
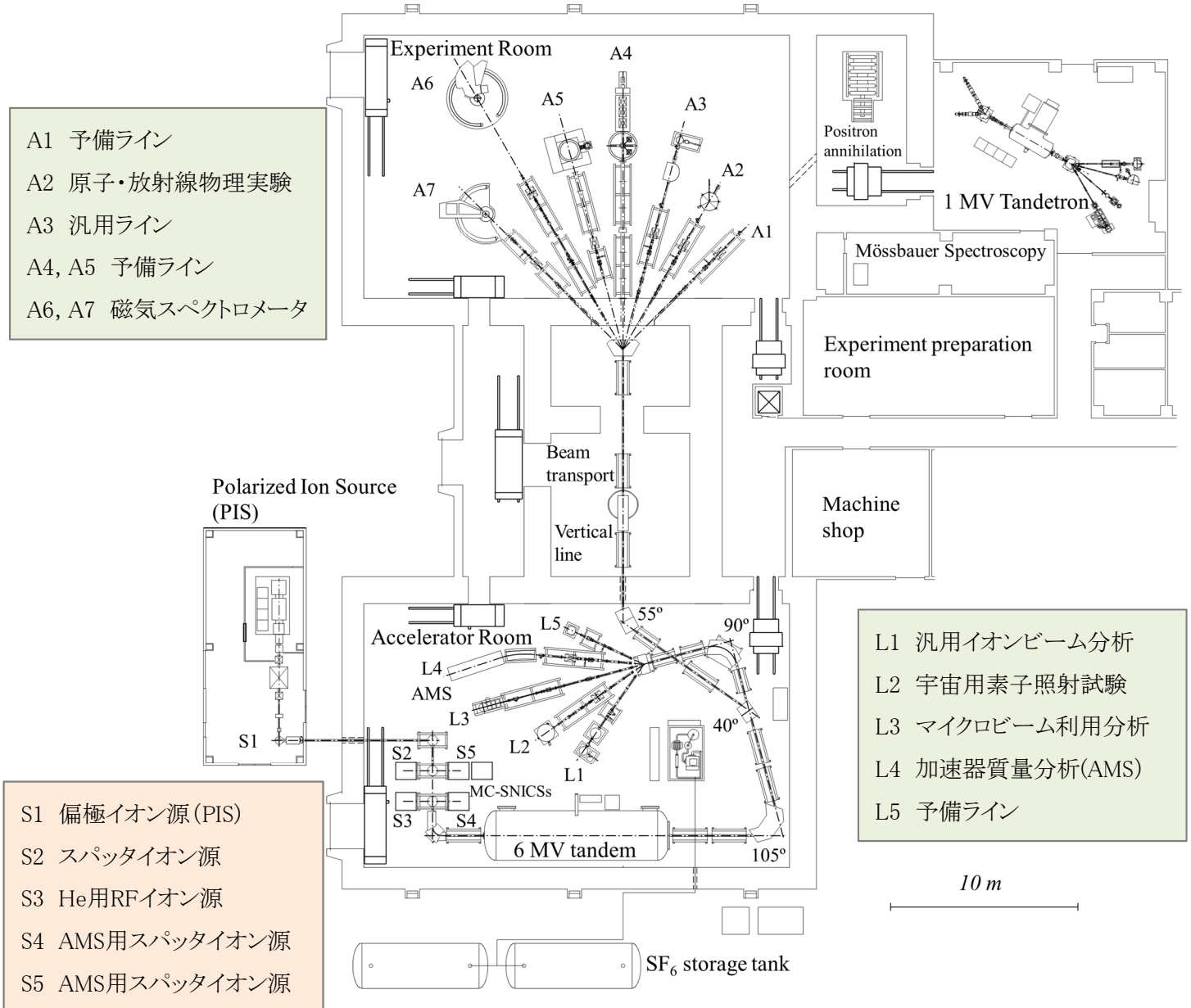
▼ 加速器質量分析実験



タンデム静電加速器施設

Tandem Electrostatic Accelerator Facilities

筑波大学タンデム静電加速器施設には、2台の静電加速器および放射性同位元素を利用する物理計測のための機器類が整備されています。



1 MVタンデトロン加速器

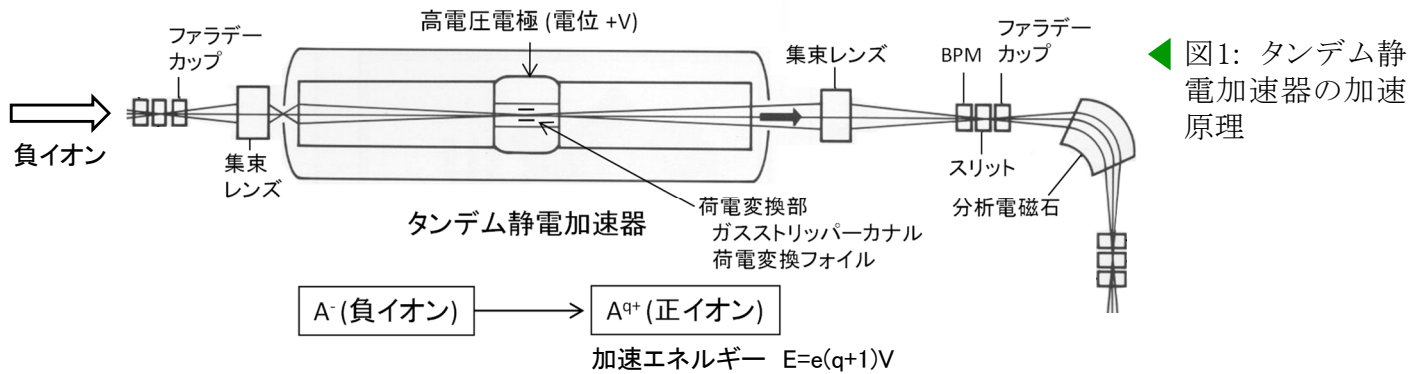


6 MVタンデム静電加速器の制御コンソール

タンデム静電加速器

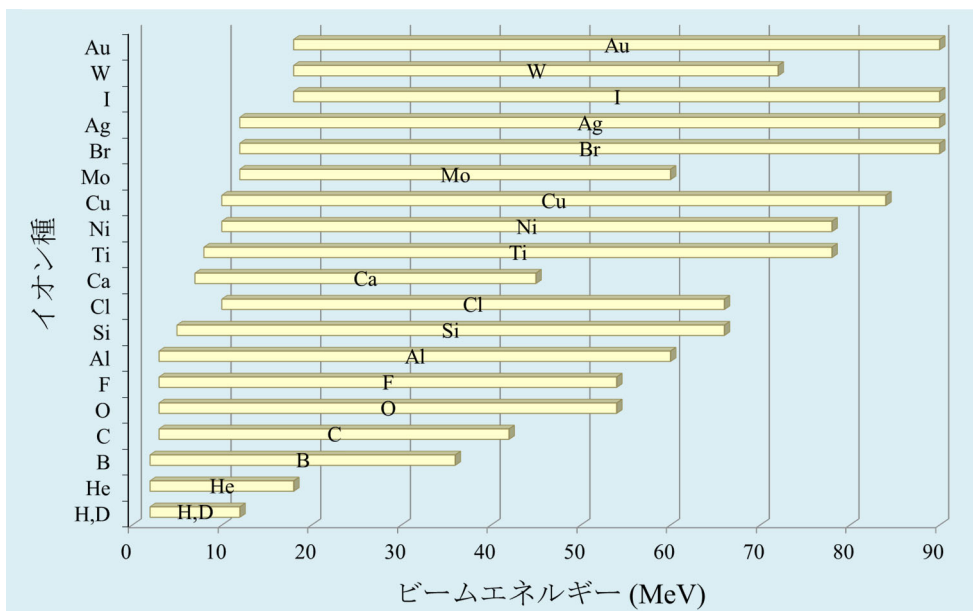
Tandem Electrostatic Accelerator

静電加速器は正または負イオンを静電場で加速し、直流イオンビームを得る装置です。UTTACでは2台のタンデム静電加速器を稼働させ、多様なビーム実験に使用しています。タンデム静電加速器の加速原理を図1に示します。タンデム静電加速器では、最初に負イオンを高電圧電極に向かって加速します。次に、高電圧電極で気体または薄膜を通過させて電子をはぎ取り、正イオンに変換します。静電場が逆向きになるため正イオンは引き続き同方向に加速されます。因みに、タンデム(tandem)とは馬が2頭縦並びで引く馬車のことです。高電圧電極の直流高電圧はバンデグラーフ(Van de Graaff)発電機あるいはコッククロフト・ウォルトン型整流回路により発生させます。6MVタンデム静電加速器で加速可能なイオン種とエネルギー範囲を図2、3に示します。各イオン種の利用可能条件(エネルギー、電流値、大気中照射など)は実験内容あるいはビームコースに依存します。



1 μA以上																0.1 μA以上						0.01 μA以上					
H																						He					
Li	Be															B	C	N	O	F	Ne						
Na	Mg															Al	Si	P	S	Cl	Ar						
K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr										
Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe										
Cs	Ba	ランタノイド	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi													
		La	Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu											

図2: 6MVタンデム静電加速器で利用できるイオン種



高速イオンや放射性同位元素で物質を見る、変える

加速器からは質量の異なる同位体までを選別した高速イオンビームが得られます。それらは物質、機能性材料の分析あるいは改質に利用可能です。筑波大学の静電加速器から得られる速度領域(核子あたり 0.1~10 MeV領域に対応)のイオンビームを物質に入射させたときに起きる多様な物理現象のうち、物質の分析や改質等に利用されるイオン衝突および誘起現象を図式化して図1に示します。UTTACでは、イオン種と加速エネルギーを広い範囲から利用目的に合わせて選択することができます。一方、放射性同位元素から放出される陽電子や γ 線も物質の分析に有効です。図2は ^{22}Na 、 ^{57}Co 等の放射性同位元素からの陽電子、 γ 線のエネルギーを制御して利用する物質分析の概念図です。UTTACでは、これらの現象の観測と利用のための検出器系と解析システムが整備されています。さらに、専門の研究者によってこれまでに開発された計測技術と得られた基礎データが蓄積され、多様な実験のニーズに対応できる支援体制が整っています。

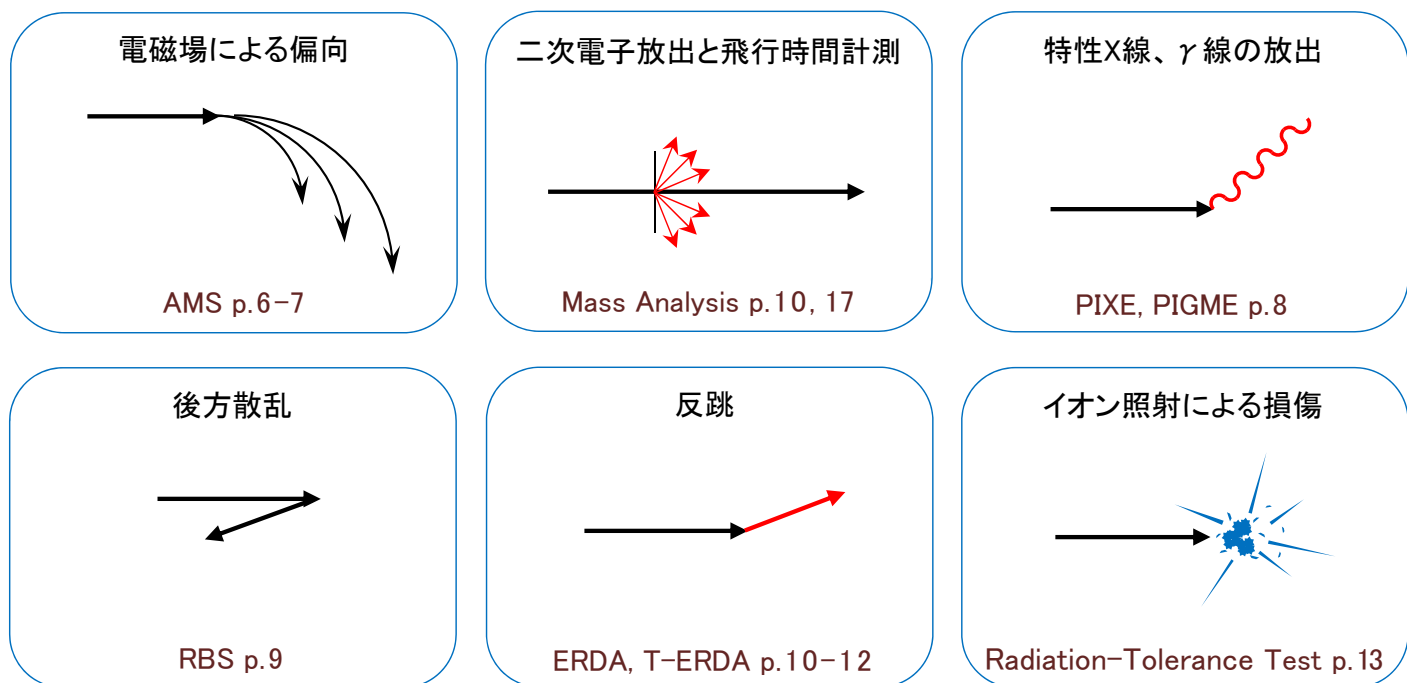


図1: 分析や改質等に利用される物理現象および物質内イオン衝突と誘起現象の概念図

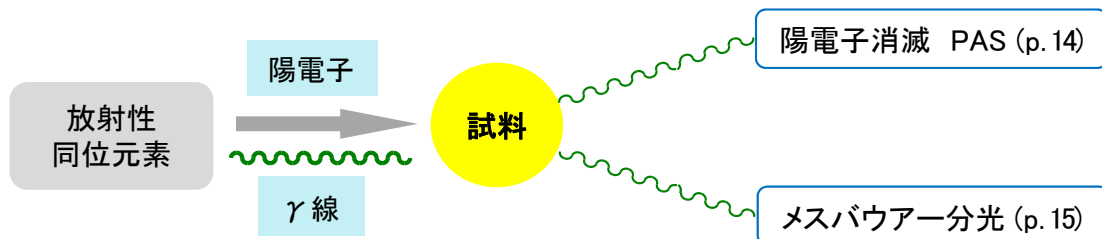


図2: 放射性同位元素からの放射線をエネルギー制御して利用

利用設備:
6MVタンデム加速器

加速器質量分析 AMS

Accelerator Mass Spectrometry

[原理] 静電加速器は高質量分解能の電磁石で必要なイオンを選別しています。核子当たりMeVエネルギー領域までに加速されたイオンを粒子検出器で計数する加速器質量分析(AMS)システムを利用して、物質中の極微量放射性核種を検出することができます(図1, 2, 3)。

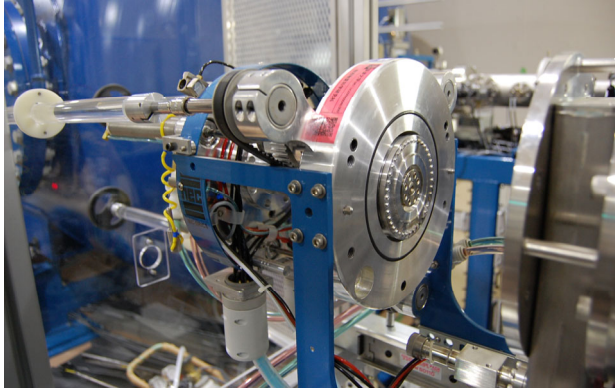


図1: 試料40個を装填可能なAMS用負イオン源



図2: AMS用極微量放射性核種検出ライン

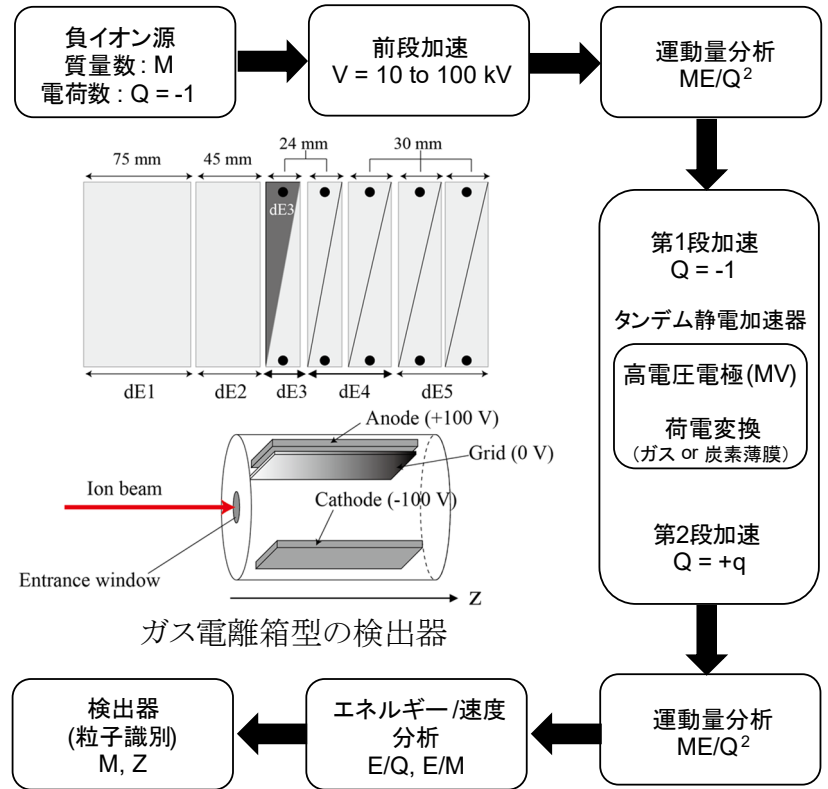


図3: AMSシステム構成図

[何がわかる?] 6MVタンデム加速器によるAMSは、最新鋭の計測系により、表1に示した極微量の放射性核種である ^{10}Be , ^{14}C , ^{26}Al , ^{36}Cl , ^{41}Ca , ^{129}I 等について同位体比 10^{-14} レベルで検知できます。地球環境科学、年代測定、産業応用等の研究への高度利用が期待されます。

表1: 6MVタンデム加速器のAMSにより同位体比の測定が可能な極微量放射性核種

測定核種	^{10}Be	^{14}C	^{26}Al	^{36}Cl	^{41}Ca	^{129}I
半減期 (yr)	1.36×10^6	5,730	7.17×10^5	3.01×10^5	1.03×10^5	1.57×10^7
安定同位体	^9Be	^{12}C , ^{13}C	^{27}Al	^{35}Cl , ^{37}Cl	^{40}Ca , ^{42}Ca , ^{43}Ca , ^{44}Ca	^{127}I
同重体/同重分子	^{10}B	$^7\text{Li}_2$, $^{12}\text{CH}_2$, ^{13}CH , ^{14}N	^{26}Mg	^{36}Ar , ^{36}S	^{41}K	^{129}Xe
試料化学形	BeO	Graphite, CO_2	Al_2O_3	AgCl	CaF_2	AgI
入射イオン	BeO^-	C^-	Al^-	Cl^-	CaF_3^-	I^-
検出イオン	$^{10}\text{Be}^{3+}$	$^{14}\text{C}^{4+}$	$^{26}\text{Al}^{5+}$	$^{36}\text{Cl}^{7+}$	$^{41}\text{Ca}^{5+}$	$^{129}\text{I}^{5+}$
加速電圧 (MV)	6.0	5.0	6.0	6.0	6.0	5.0
加速エネルギー (MeV)	20.3	25.0	36.0	48.0	32.5	30.0
入射イオン電流 (μA)	5	5 (CO_2) - 50	1	30	0.5	20
試料量 (mg)	0.5	0.01 - 1	2	1	5	2
測定精度 (%)	2	0.2	3	3	3	1
検出感度 (atomic ratio)	1×10^{-15}	1×10^{-15}	6×10^{-15}	3×10^{-15}	3×10^{-15}	2×10^{-14}

利用設備:
6MVタンデム加速器

加速器質量分析 AMS [続] Accelerator Mass Spectrometry

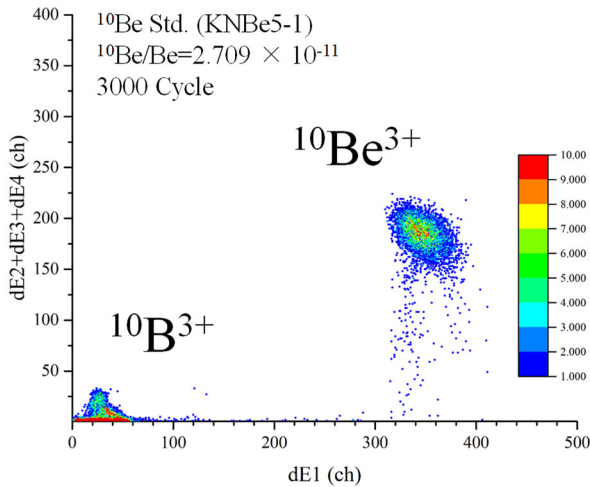


図4: 極微量放射性核種 ^{10}Be について、標準試料 ($^{10}\text{Be}/\text{Be} = 2.709 \times 10^{-11}$) の5分間測定による検出スペクトル [Sasa *et al.*, NIMB **437** (2018) 98]

図4は、6MVタンデム加速器のAMSで測定した極微量放射性核種 ^{10}Be (半減期136万年) の検出スペクトルです。加速電圧6MVで、 Be^{3+} を20.3 MeVまで加速して、図3に示したガス電離箱型の検出器で測定しました。 ^{10}Be は宇宙線生成核種として、表面照射年代法や過去の宇宙線強度変動の研究に利用されています。

[研究成果例]

AMSで測定可能な極微量放射性核種は、年代測定だけではなく、地球環境科学、環境同位体トレーサー、産業応用等の研究への利用が期待されます(表2)。 ^{14}C と ^{129}I を用いた環境同位体トレーサー研究の成果を以下に示します。

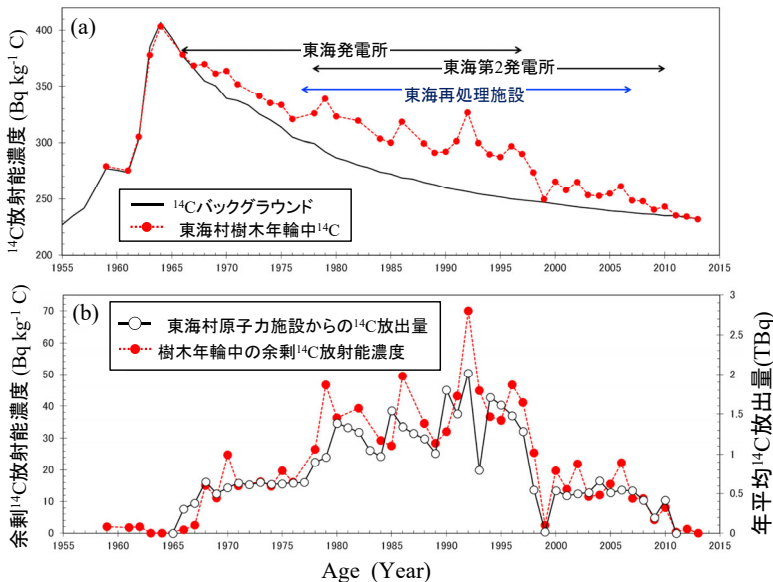


図5: 茨城県東海村の樹木年輪中の ^{14}C 濃度変動 [Matsunaka *et al.*, Radiocarbon **61** (2019) 1633]

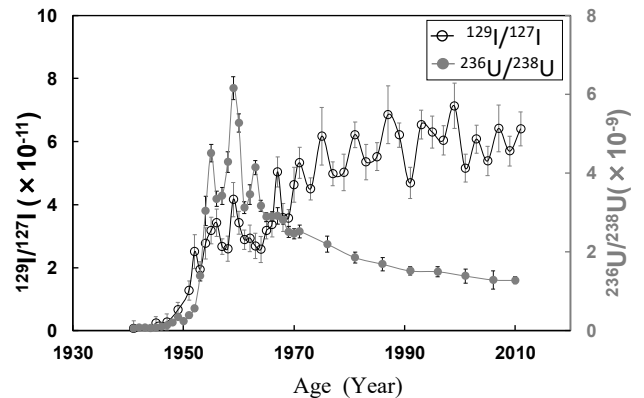


図6: 壱岐島沖サンゴの年輪中の $^{129}\text{I}/^{127}\text{I}$ と $^{236}\text{U}/^{238}\text{U}$ の経時変化 [Sakaguchi *et al.*, MAR ENVIRON RES **142** (2018) 91]

図5(a)は、茨城県東海村の樹木年輪に含まれる ^{14}C 放射能濃度変化です。1950年代の大気圏核実験の影響で、 ^{14}C 放射能濃度が増大(核実験起源ピーク)しています。年輪中の ^{14}C 放射能濃度は ^{14}C バックグラウンドより高い値を示しました。

図5(b)に示すように、年輪中の余剰の ^{14}C 放射能濃度は、東海村の原子力施設からの年平均 ^{14}C 放出量の変動と一致しました。図6は、日本海の壱岐島沖で採取されたサンゴの年輪に含まれるヨウ素とウランの同位体比の経時変化を示しています。1950年代の大気圏核実験の影響で、 ^{129}I 同位体比と ^{236}U 同位体比は増大しました。その後、核実験にかかわる ^{236}U 同位体比は減少傾向にあります。しかし、 ^{129}I 同位体比は減少していません。欧州などの核燃料再処理施設からの ^{129}I 放出の影響があることを示しています。

表2: AMSによる研究例

■ 年代測定(文化財科学・考古学)	■ 地球環境科学研究
■ 宇宙線照射年代測定	■ 宇宙線強度変動研究
■ 創薬研究開発: マイクロドーズ臨床試験	■ 原子力関連施設の微量核種分析
■ 炭素14によるバイオマス度評価	■ 環境同位体トレーサー研究

利用設備:
1MVタンデトロン
6MVタンデム加速器

粒子線誘起X線分析 PIXE Particle Induced X-Ray Emission

[原理] PIXEはイオンビームを物質に照射した際に放出される特性X線を測定する非破壊の元素分析法です(図1)。電子ビームに比べて、イオンビームは制動放射による連続エネルギーX線の放出が極めて少ないので、原子の特性X線スペクトルピークを検出しやすくなります。そのため、PIXEは物質中の微量元素の分析に向いています。

PIXEではNa~Uまでのppmレベルの元素が検出可能で、液体・気体・粉体などの試料も分析できます。固体試料の場合は、試料片をスライドガラス上に固定し、液体試料は薄膜上で蒸発乾固させて測定します。不均質試料の場合は、ビーム径を10~20 μm まで絞り、顕微鏡で観察しながら微小領域を分析します。また、カプトンフィルム等を通させたビームにより、大気中の試料を分析することもできます。

[何がわかる?] 表1は応用例の一覧で、PIXEは理工学分野のみならず、医学・生物学、環境科学、地球科学、文化財調査、考古学に関連する広範な分野で利用されていることがわかります。特に、半導体や生体試料など軽元素を主体とするマトリックスに含まれる微量の重元素検出に優れています。もちろん重元素のマトリックスでも分析は可能です。図2は天然の方鉛鉱(PbS)の結晶です。PIXEで測定すると、主成分のS, Pbの他に、Fe(9274 wt.ppm), Ni(175 wt.ppm), Cu(8041 wt.ppm), Zn(692 wt.ppm), さらにAg(3809 wt.ppm)も含まれているのがわかります(図3)。こうした特性を生かして、PIXEは、レアメタルの資源探査にも利用されています。

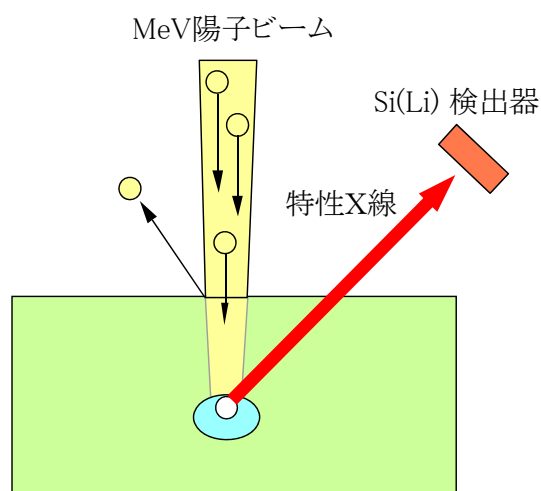


図1: PIXEの測定原理

表1: PIXEの応用例

- 薄膜の組成分析
- 血液・脳・毛髪微量元素分析
- エアロゾル分析
- 絵画・コインの非破壊分析
- 岩石中の希少金属分析
- 書物のインク分析
- 鉱物中の流体包有物分析

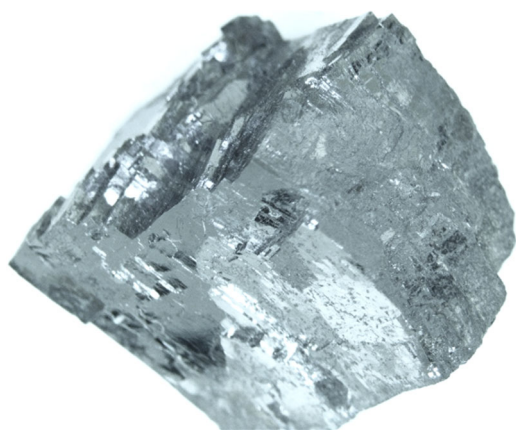


図2: 方鉛鉱(PbS)の結晶

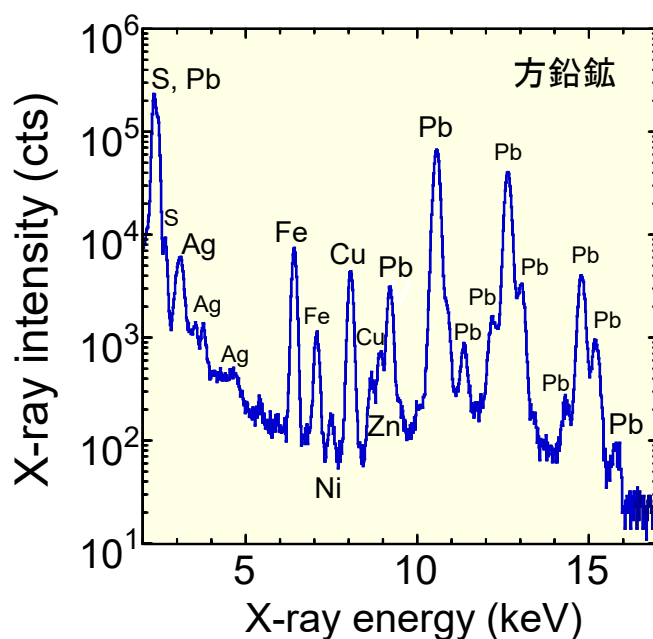


図3: 方鉛鉱のPIXEスペクトル
(1.92 MeV陽子ビームによる)

利用設備:
1MVタンデトロン
6MVタンデム加速器

イオンのエネルギー測定による物質分析

Ion Beam Materials Analysis by Energy Measurements

[原理] 高速イオンを物質に入射させると、物質内の原子核とのクーロン衝突により一部が後方に散乱されます。この現象は物質内の元素分析に利用されます(ラザフォード後方散乱法:RBS、図1)。イオンを試料表面へ斜め入射させ、前方に反跳される粒子を表面障壁型の半導体検出器で計測すれば、水素等の軽元素の検出が可能です(弾性反跳粒子検出法:ERDA)。また、低エネルギー原子核反応を利用すれば、核反応分析法(NRA)として、RBSでは検出できない物質中の軽元素の振る舞いを調べることができます。

[何がわかる?] 図2はSi基板上に堆積させた非晶質炭素中の水素の分析のために、重水素をトレーサーとして加えた試料のRBS/ERDAの同時測定の結果です(channel numberはHeイオンの散乱エネルギーに対応)。これにより試料中のC-H結合の詳細が明らかになりました。図3はErを添加したGaNを、UTTACの高質量分解能の重イオンRBSにより測定した結果です。このように、GaとErからの寄与を明確に分離することは、Heのような軽イオンのRBSでは不可能です。

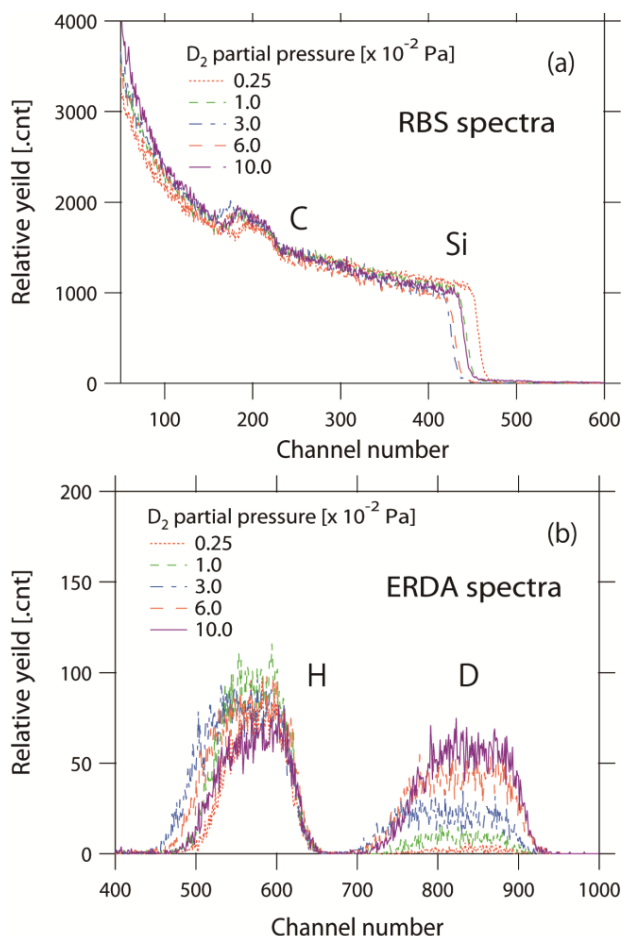


図2: 2.5 MeVの⁴HeによるRBS(a)/ERDA(b)同時測定の結果 [Sekiba *et al.*, Diamond Relat. Mater. 27-28 (2012) 60]

表1: RBSの特徴

- 非破壊測定
- 薄膜の深さ依存組成評価
- 絶対組成の定量評価
- 重元素ほど高感度検出(数10 ppm)
- 試料サイズは約5×5 mm²から
- 単結晶試料では入射方位依存性の測定から結晶品質、欠陥の深さ分布、異種原子の結晶格子内位置の決定が可能

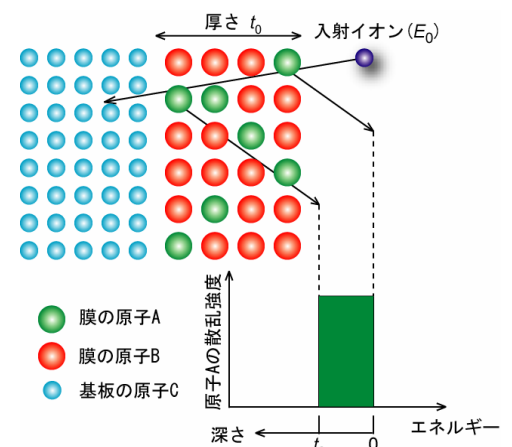


図1: RBSの原理

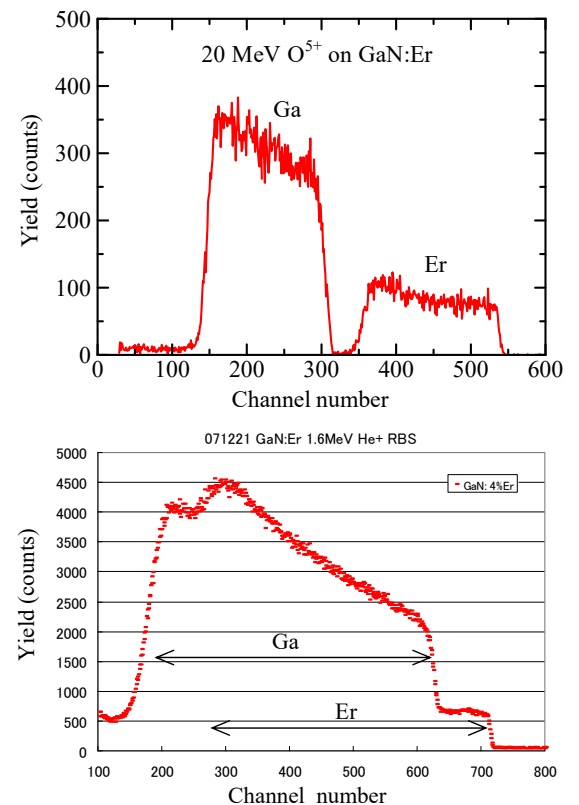


図3: GaN:ErのRBSスペクトル [重イオンRBS(上)ではGaとErを分離できるが、軽イオンRBS(下)では両者は重なっている]

利用設備:
1MVタンデロン

イオンの速度・エネルギー測定による物質分析 Ion Beam Materials Analysis by ν -E Measurements

[原理] イオンを試料に斜め入射させると、斜め前方には散乱されたイオン以外に表面近傍に存在する原子の一部が反跳原子(イオン)として放出されます。図1のように、実験では放出粒子が2か所(T1, T2)のC薄膜を通過する際に生成される二次電子をスタートおよびストップ信号として飛行時間を測り、粒子検出器(SSD)でエネルギーを測ります。その結果、表面から放出された粒子の速度 ν と運動エネルギー $M\nu^2/2$ が決定されるので、粒子の質量 M とその深さ分布が分かります。これは飛行時間反跳検出分析法(TOF-ERDA)と呼ばれています。

[何がわかる?] 機能性薄膜の創製・デザインの研究において、ナノメートルオーダーの分解能での分析・評価が求められています。TOF-ERDAにより、固体の表面近傍の原子組成、不純物や添加元素の深さ方向分布を数nmの深さ分解能で測定できます。図2は赤外線反射用の被覆膜として工業的に利用される多層薄膜SiAlN/TiN/SiAlN(ガラス基板上に成膜)のTOF-ERDA測定結果で、表面近傍の元素構成が図2(b)のように決定されました。このときの深さ分解能は約2.1 nmです。

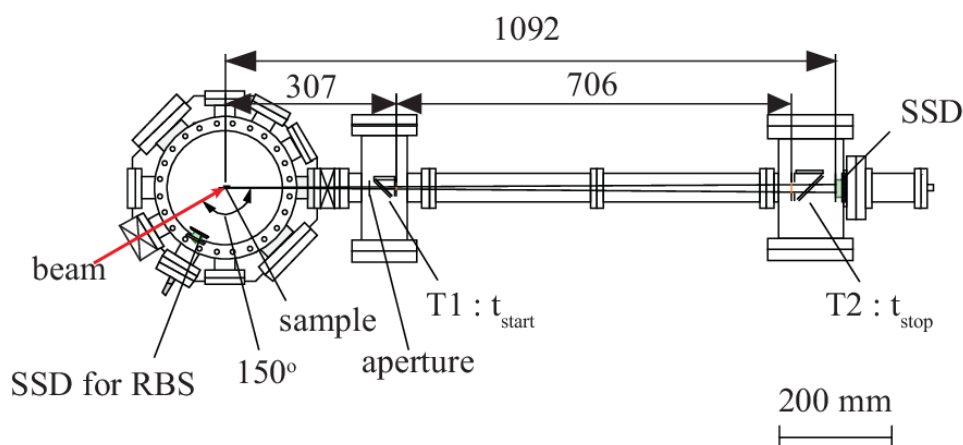


図1: UTTACにおけるTOF-ERDAの実験配置図

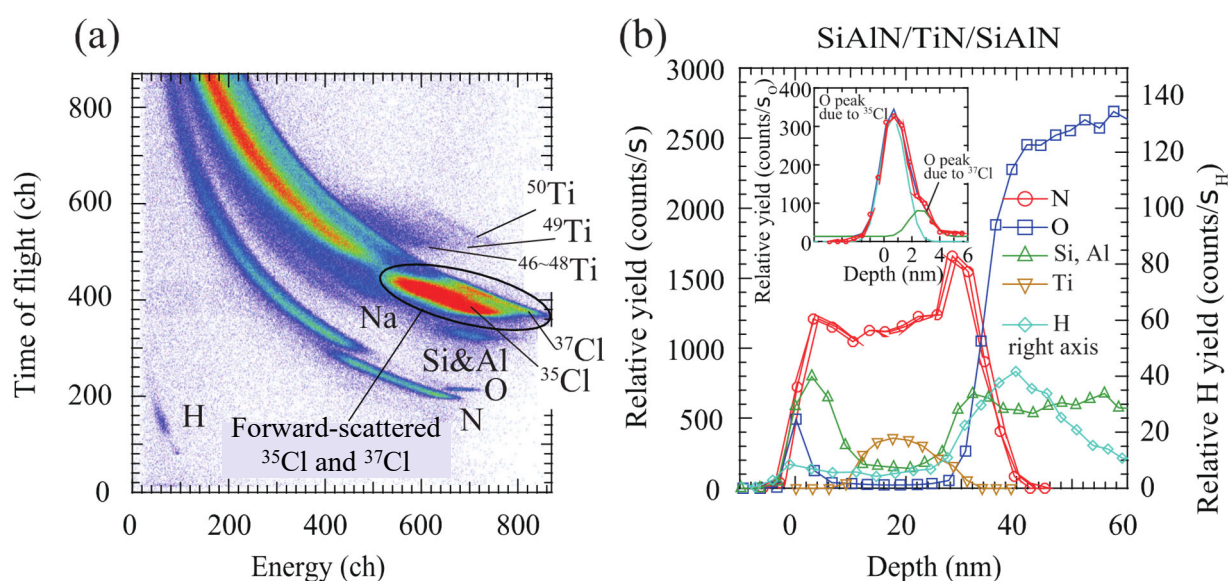


図2: (a)ガラス基板上の多層薄膜SiAlN/TiN/SiAlNの2次元 ν -Eスペクトル、及び(b)それから得られたH, N, O, Al, Si, Ti原子の深さ分布 [Sugisawa *et al.*, NIMB **503** (2021) 68]

利用設備:
6MVタンデム加速器

透過型ERDAで見る物質内の水素と重水素

H and D in Materials Observed by Transmission ERDA

[原理] 水素(H)、重水素(D)は内殻電子を持たないので物質内のH、Dの分析には分光学的な原子検出法、例えば特性X線分析やオージェ電子分光法などは利用できません。これに対し、加速器から得られる高速イオンを試料に入射させて原子衝突により物質から弾き出される(“反跳”により放出される)軽原子を検出する反跳粒子分析(ERDA)はH、Dを非破壊的に直接検出できる有用な手段です。UTTACの透過型ERDA(T-ERDA)では反跳によるH、Dのエネルギースペクトルを図1に示す実験条件で測定します。特に入射 ^4He イオンのエネルギーが8~10 MeVであれば前方0度付近(図1では0~3.78度)には核力による共鳴的な強い反跳が起きるため試料内のH、Dを高感度で検出することができます。

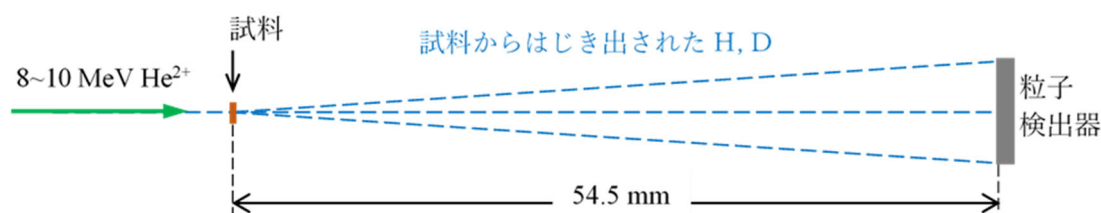


図1: T-ERDAによるH、D検出。試料の裏側に金属薄膜を置くことで入射Heを止めてH、Dのみが粒子検出器に入るように設定する。

[何がわかる?] 物質中のH分布の研究は将来の水素利用技術につながります。また惑星起源の鉱物中の H_2O 、OHの判別とそれらの分布は地球の成り立ちを明らかにするための貴重な知見となります。さらには冷えたマグマに閉じ込められた水の定量は火山の噴火予知に有効と期待されています。その一方でDの分析は物質特に隕石中のD/H比が太陽系の形成過程に関する情報をもたらすため、天体物理学や地球科学において特に重要です。地上においてもDを希釈あるいは濃縮する自然または人工のプロセスが働いている場合、D/H比には平均値 1.557×10^{-4} からのずれが生じます。D/H比の変化は、地球上で化学的に合成されたH含有物質でも起きると予想されるのでD/H比を合成材料の特性評価に利用できる可能性があります。

[測定例1] 図2は福島県産の白雲母試料(厚さ12 μm)に含まれるHのT-ERDAスペクトル(左図)とそれから得られたH濃度の分析結果(右図)です。右図中の2本の鎖線のうち下の鎖線は白雲母自身を構成する結合水のH密度の計算値を示しますが、実験値の平均(上の鎖線)は計算値よりも約10%高くなっています。その理由は2本の鎖線幅の半分である約 $4 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ の吸着水分子が試料中に存在するため、これは灼熱減量による重量分析(試料は破壊)の結果と良く合っています。本測定はT-ERDAによる非破壊分析の好例です。

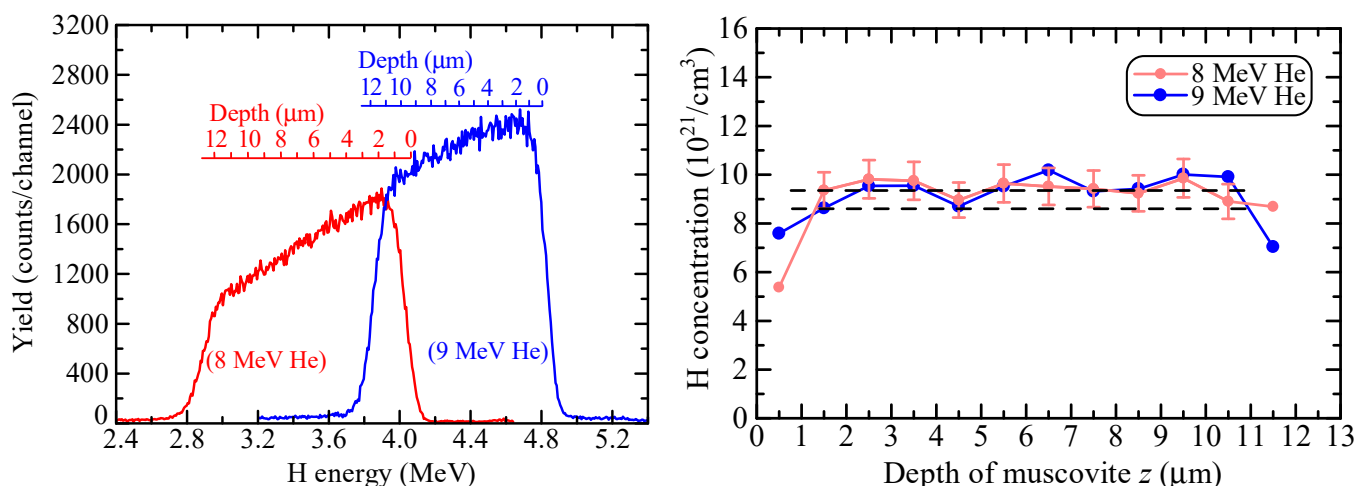


図2: T-ERDAによる白雲母中の水の分析 [Kudo et al., J. Phys.: Condens. Matter **34** (2022) 435902]

利用設備:
6MVタンデム加速器

透過型ERDAで見る物質内の水素と重水素[続]

H and D in Materials Observed by Transmission ERDA

[測定例2] Heビームを数 μm サイズに絞り、試料の表面を走査することでHの横方向分布、さらには測定されたHのエネルギーを試料深さに変換することで試料中のHの3次元分布が得られます。図3は、Hをプラズマ添加したAl中のHの3D分布を観測した結果で、導入されたHはAl中で特徴的な集合体(気泡)として存在することがわかります。

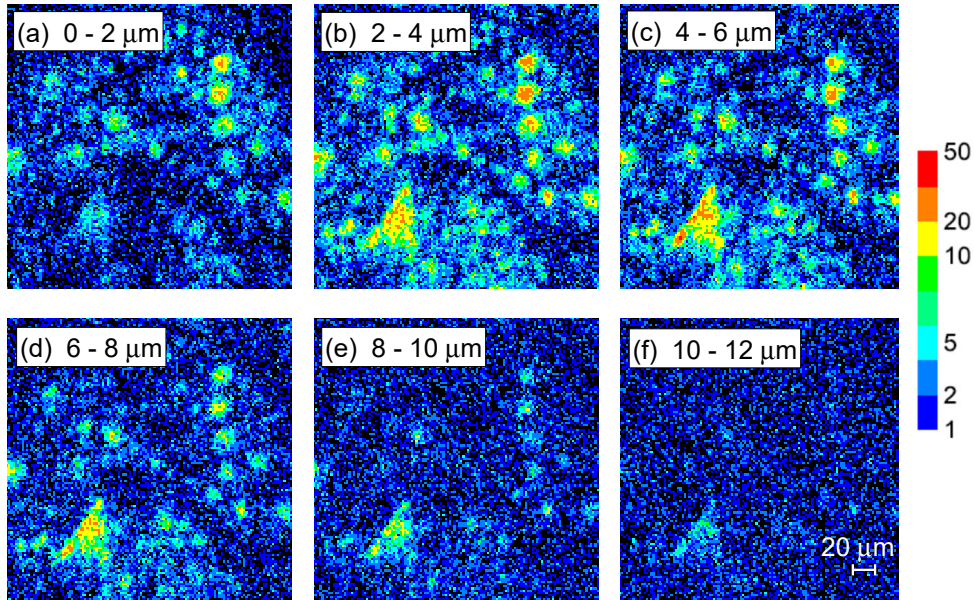


図3: 8MeV ^4He のT-ERDAにより観測されたAl中のHの3D分布 [Yamazaki *et al.*, AIP Advances **9** (2019) 105111]

[測定例3] 共鳴的な強い反跳を利用するT-ERDAでは物質中のH濃度の一万分の一 (10^{-4})の濃度のDを検出することができます。図4は汎用の樹脂であるPET(ポリエチレンテレフタレート $\text{C}_{10}\text{H}_8\text{O}_4$)中のHとDの観測例で、両者のピーク面積から求めたD/H比は $(1.09 \pm 0.08) \times 10^{-4}$ 、すなわち海水の平均的なD/H比より30%低いことが示されました。

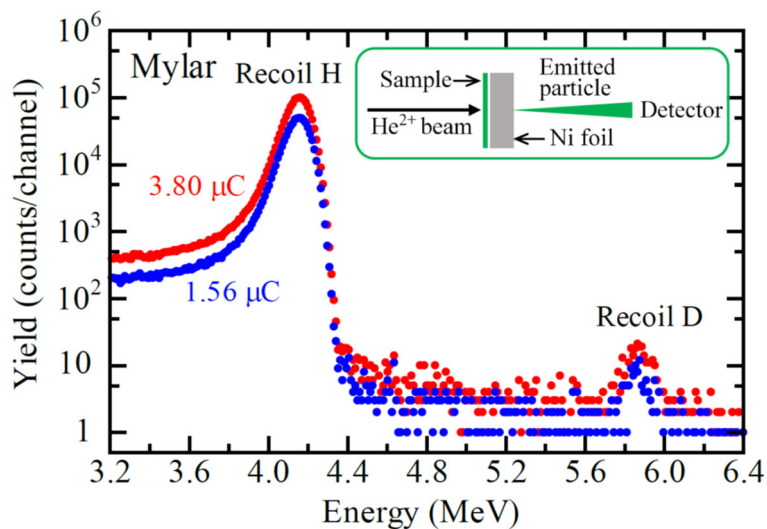


図4: 8MeV ^4He のT-ERDAにより観測されたマイラー(PET膜)中のHとD [Kudo *et al.*, Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. B **554** (2024) 165404]

利用設備:
6MVタンデム加速器
1MVタンデトロン

イオンビーム照射(耐放射線性試験、物質改質)

Ion Beam Irradiation (Radiation-Tolerance Test, Modification of Materials)

[原理] 現代の高度に制御された静電加速器を用いれば、標的物質の特定の位置及び深さに、指定した原子種を一個ずつ目的量だけ照射・注入することができます。こうした高度な放射線の利用は物質科学のみならず生物学にまで及んでいます。イオン種と加速エネルギーを広い範囲で利用できる加速器は放射線環境下での利用が想定される宇宙利用半導体デバイスの耐放射線性試験(事前の安全確認テスト)などに有用です。加速器から得られる荷電粒子のエネルギーは標的物質の結合エネルギーを遙かに超えているため、照射に伴う現象(電子励起と構成原子の変位、異種核種導入効果など)は非平衡な物質処理に相当します。そのため、イオンビーム照射はナノ技術分野での物性制御や物質材料への新規機能性付与のために重要な手段です。

[何ができる?]

1. 耐放射線性試験: 宇宙利用半導体デバイスの開発には地球を取り囲む宇宙の放射線環境の正確な把握と、地上での宇宙利用デバイスの耐放射線性の評価が重要になります。そのため加速器による高速イオンビームの照射実験が必要ですが、利用可能な施設は限られており、そのひとつがUTTACの施設(図1)です。半導体デバイスは日々進歩していますが、宇宙での放射線環境を模擬した極微量のイオン照射による地上実験により問題点を的確かつ迅速に把握し、解決することが将来の高機能で安全な宇宙機器の開発につながります。図2はUTTAC(●)および量研機構高崎TIARA(●)で得られた実験データで、エラー断面積(デバイスの動作エラーの発生頻度に対応)とLET(単位長さあたりのエネルギー付与)の関係を示しています。

2. 物質の改質・機能性付与: イオンビーム照射は、標的物質の環境条件(温度、印加外部場)を適切に制御すれば、意図したタイプの格子欠陥を形成したり、異種元素を目的の格子位置や深さに導入できるナノ技術に必須の手段です。これらの特性を利用して、例えば微量のイオン照射を利用した新規機能素子の実現が可能です。また数10 nA程度のイオン照射による巨視的な物性制御の例では、イオンビーム照射時の電子励起効果を利用した基礎研究や新規デバイスの開発を目指す研究が行われています。必要があれば、ビーム集束システムを用いて得られるマイクロビーム照射の利用も可能です。

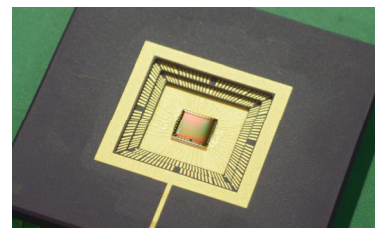


図1: 宇宙利用半導体素子等のイオンビーム照射実験用の真空散乱槽(直径1 m、高さ0.7 m)。内部にはA5判の面積を走査できるターゲット駆動機構、ターンテーブル、スリットなどが取付けられている。

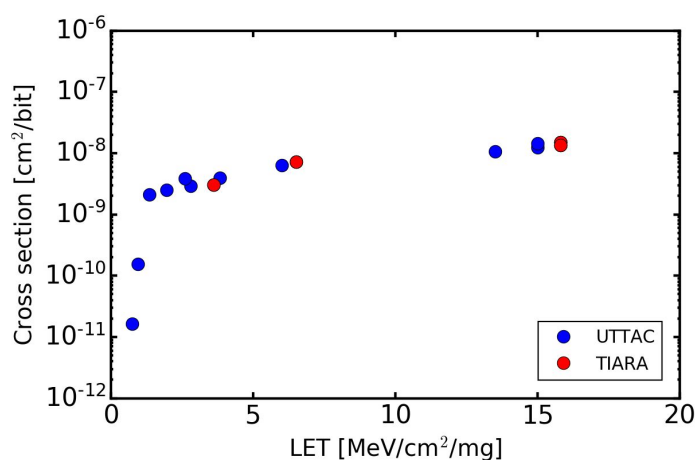


図2: 宇宙利用半導体デバイスのエラー断面積のLET依存性 (JAXA作成)

利用設備:
RI 線源

陽電子消滅法 PAS Positron Annihilation Spectroscopy

[原理] 陽電子は電子の反粒子で、物質中に入射すると電子と対消滅し γ 線を放出します。消滅するまでの陽電子の寿命や消滅 γ 線のエネルギー分布を測定することにより、物質中の点欠陥(原子空孔)や微小空隙を検出することができます(表1、表2)。図1は ^{22}Na 等の放射性同位元素を線源として使用する低速陽電子ビーム解析装置の写真です。

[何がわかる?] 格子欠陥解析法におけるPASのポジションマップを図2に示します。横軸には欠陥の深さ方向精度が高い測定手法を、縦軸上方および下方には、それぞれ空孔型欠陥と格子間原子型欠陥に敏感な手法を示します。電子顕微鏡法(SEMやTEM)は中央右に、半導体検出器によるラザフォード後方散乱分光法(RBS)は下方右に位置しますが、PASは上方右に位置し、他の手法と組み合わせることにより、相補的な情報が得られます。PASの実験結果は第一原理計算により理解が深まります。図3はInGaN/GaNの計算結果で、スーパーセルの原子配置:(a)欠陥が無い場合(DF)、(b)現実の構造と想定されるGa空孔が有る場合(V_{Ga})、及び(a)、(b)に対応した面平均化陽電子密度の深さ分布(c)を示します。

表1: 陽電子消滅法の特徴

- 検出できる欠陥: 単一原子空孔~空隙 (ポア、数 10 nm^3)
- 高感度 ($>10^{15}\text{ cm}^{-3}$) かつ非破壊
- 試料の温度、導電性等の制限なし
- 試料表面から数 μm までの欠陥深さ分布の検出が可能

表2: 陽電子消滅法の応用例

- 半導体基板、単結晶薄膜の点欠陥評価
- 金属表面近傍の点欠陥検出
- アモルファス膜の空隙のサイズ分布、深さ分布評価
- 高分子等の自由体積のサイズ分布評価

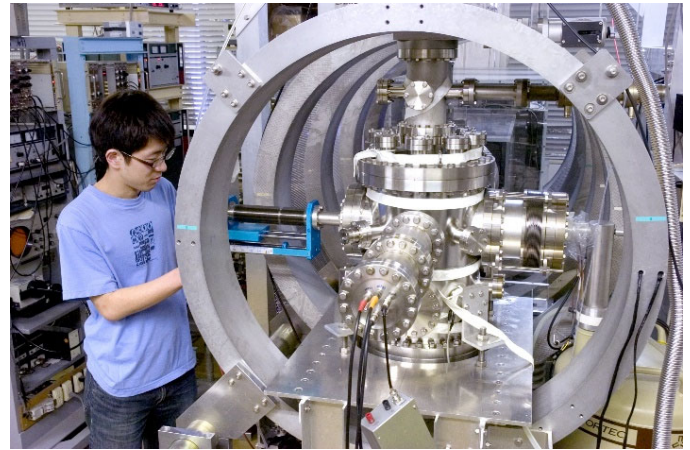


図1: 低速陽電子ビーム解析装置

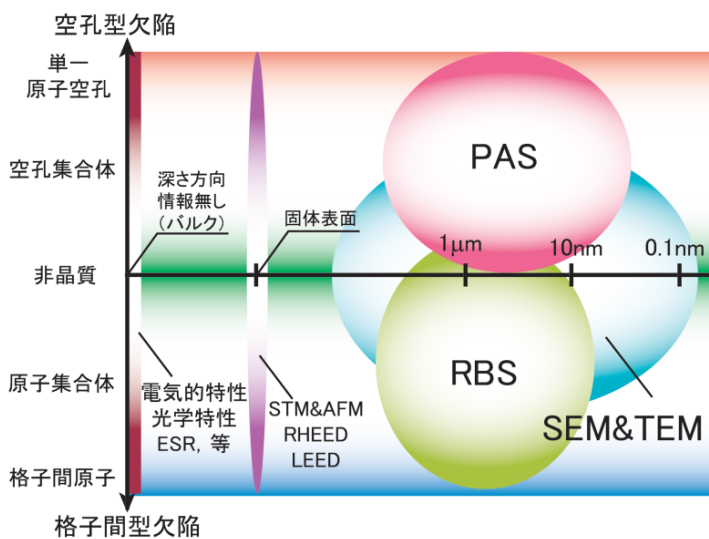


図2: 陽電子消滅法(PAS)のポジションマップ

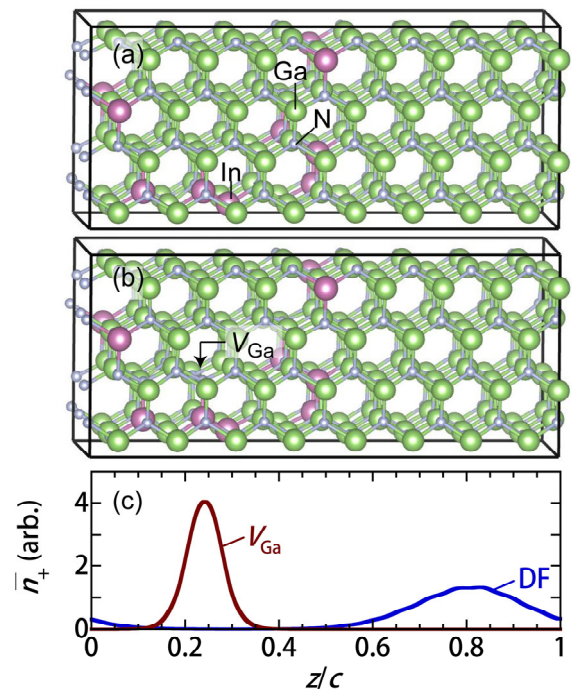


図3: 第一原理計算の結果。InGaN/GaNスーパーセル中の陽電子分布(横軸は表面からの深さで、点欠陥の導入により陽電子は青色から茶色の分布へと欠陥周囲に局在化する)

利用設備:
RI 線源

^{57}Fe メスバウアー分光法 ^{57}Fe Mössbauer Spectroscopy

[原理] メスバウアー効果とは、固体中の原子核がエネルギーの損失なしに γ 線を放出・吸収する現象を指し、自然鉄の2.3%を占める ^{57}Fe 核において観測されています。図1に示すように線源から放出される γ 線をドップラー効果を利用してエネルギーを少し変えて照射すると、試料中の ^{57}Fe 原子核のエネルギー状態に依存して吸収されます。透過法では透過する γ 線の計数によりスペクトルが得られます。また核の脱励起時には γ 線または内部転換電子を放出するので、これらの計測により、 γ 線が透過しない試料でも測定可能です(図1、図3)。

[何がわかる?] ^{57}Fe メスバウアー分光分析: 鉄はメスバウアー効果を示す典型的な元素で、構造材料から永久磁石等の磁性材料として大変有用な物質です。鉄を含む新材料開発において、メスバウアー分光は磁性や構造に対する情報を与えてくれます。

メスバウアー分光から得られる情報は、鉄原子核(^{57}Fe)の位置する電磁気的環境(内部磁場、価数、原子の環境・対称性など)であり、合金・化合物・酸化物の相同定、磁化の大きさや容易軸方向の推定が可能となります。図2は FeF_2 粉末の透過法での測定例で、温度変化により78K付近の常磁性-反強磁性転移を観測しています。

γ 線が透過しない試料(基板上に成長した薄膜やバルク表面)などについては、内部転換電子法(CEMS法)で測定が可能です。試料表面から放出される内部転換電子を計測するため、約100nmの深さの情報が得られます。図3は自然鉄ターゲットを用いた反応性スパッタ法で作製した Fe_3O_4 薄膜(MgO基板)の測定例です。

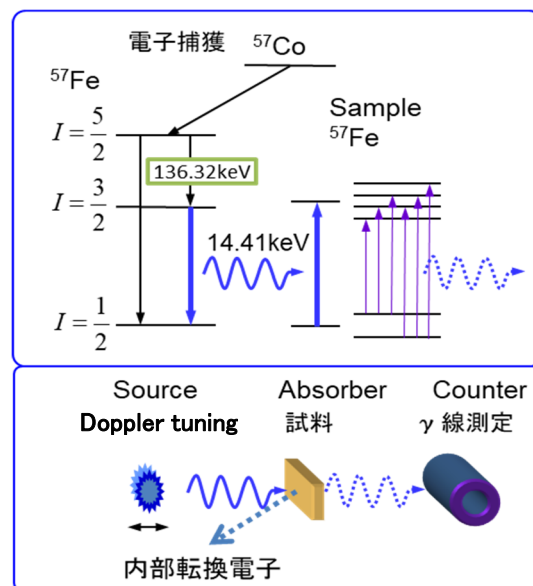


図1: ^{57}Fe メスバウアー効果の原理(上)と測定方法(下)

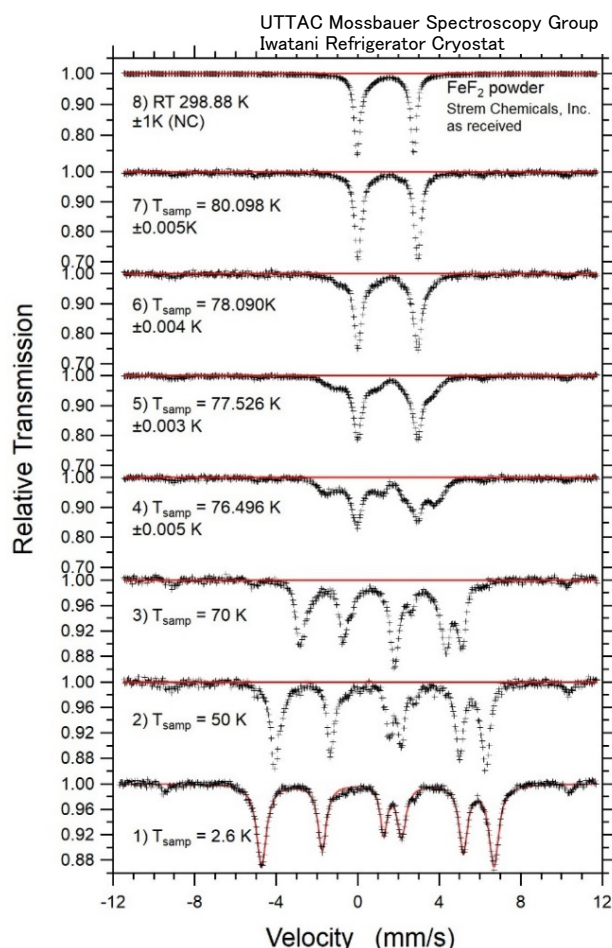


図2: FeF_2 の ^{57}Fe メスバウアー分光(温度範囲 2.6~300K)

^{57}Fe メスバウアー分光の測定環境・条件

■ 透過法

粉末・ナノ粒子、薄帯(厚さ50 μm 以下)が対象
測定温度範囲(2.6K~500K)
寒剤冷却(4.2K、77K)、冷凍機 2.6K~室温
高温: RT~500K

■ CEMS(内部転換電子法)

表面100nmの情報が得られる
 γ 線が透過しない試料が対象
測定温度は常温に限られる

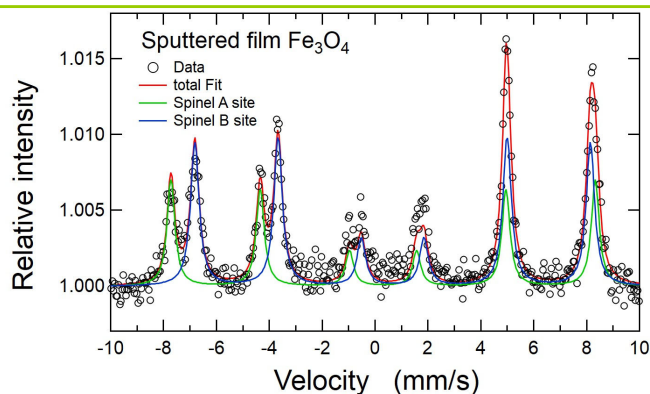


図3: MgO基板上に成長した酸化鉄スパッタ薄膜のCEMS(自然鉄使用)。膜厚は約50nm。

メスバウアー分光の詳細はUTTACウェブへ:
<https://www.tac.tsukuba.ac.jp/tac/moss/>

利用設備:
6MVタンデム加速器

原子核物理実験 Experimental Nuclear Physics

UTTACでは、不安定核の核構造の研究をはじめ、宇宙元素合成に関連する原子核反応の実験研究や不安定核検出のための検出器開発などを行っています。Lambシフト型偏極イオン源 (Polarized Ion Source, PIS) (図1) はスピンの向きが揃った偏極陽子及び偏極重陽子ビームを生成することができます。図2の偏極度測定より、12MeVの陽子の偏極度が約60%であることがわかります。図3(左)は、核モーメント測定のセットアップです。静磁場中に置いた標的に偏極ビームを照射することでスピンの揃った不安定核を生成させ、崩壊の際に発生するベータ線を標的の上下に設置した検出器でカウントします。ベータ線の非対称度を指標とした核磁気共鳴 (NMR) により、核モーメントを測定します。図3(右)は核モーメントの測定結果で、RF周波数を4.75-5.25 MHzに設定し、ベータ線の非対称度を静磁場の電流値の関数としてプロットしたものです。不安定核 ^{29}P (半減期4.1秒) と ^{25}Al (半減期7.2秒) の共鳴が確認できます。また、図4に示す磁気分析器により原子核反応によって生成／散乱される粒子の運動量、角度分布、さらに偏極ビームを用いることによりスピン偏極分解能を測定することができます。

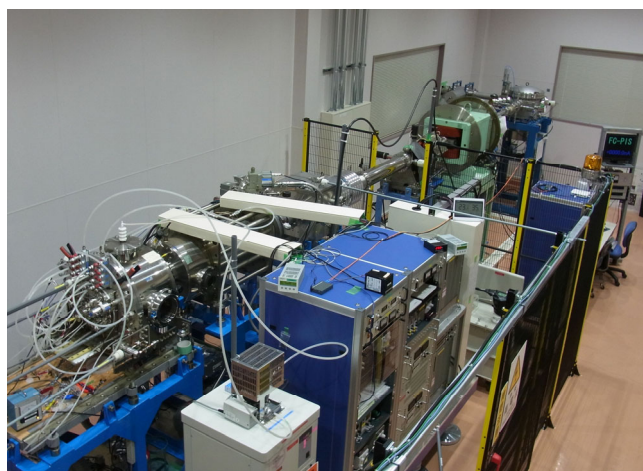


図1: Lambシフト型偏極イオン源 (PIS)

偏極陽子ビームの偏極度

陽子 (p) をヘリウム核 (^4He) に照射し、左右の弾性散乱イベント数の比から、陽子の偏極度を求めることができます。

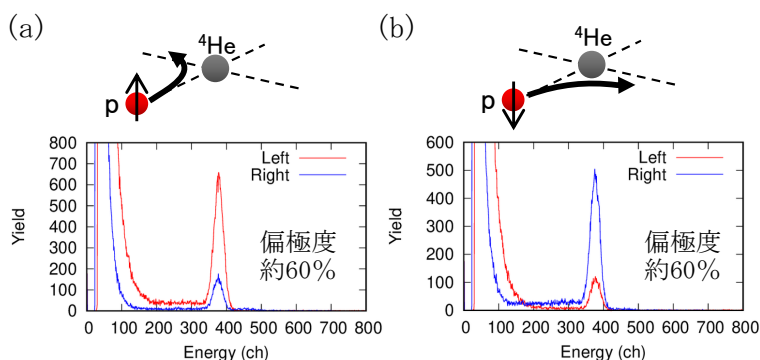


図2: 散乱後の陽子のエネルギースペクトル [陽子のスピンの向きは(a)上、(b)下。メインピークは弾性散乱イベントを示す]

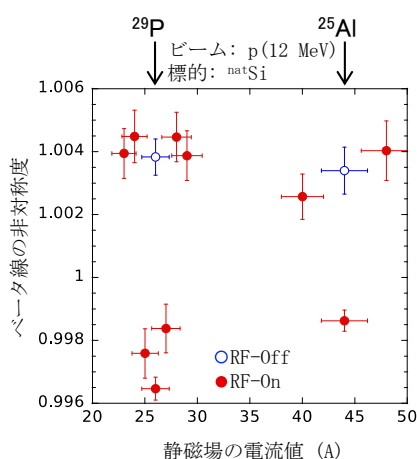


図3: (左)核モーメント測定のセットアップと(右)測定結果 (矢印は ^{29}P と ^{25}Al の磁気双極子モーメントに対応する)

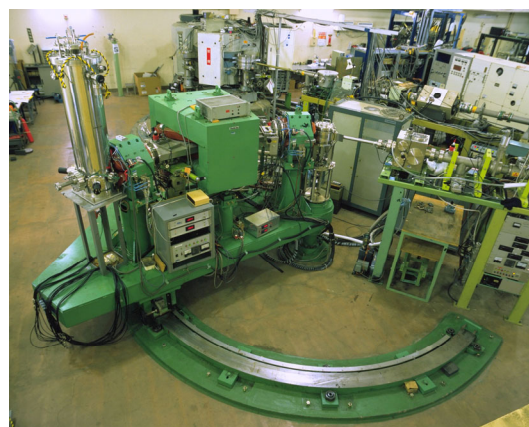


図4: 測定室A7コースの四重極-双極-四重極電磁石 (QDQ) 磁気分析器

不安定核: 原子核は約1万種類あることが予想されていますが、そのほとんどは短い時間で安定な原子核に崩壊する不安定核です。これまでに不安定核には半径の増大、変形、魔法数の消滅、新しい魔法数の出現など安定核にはない変わった性質があることがわかっています。しかし、多くの不安定核は実験的にはその存在すら確認されておらず、その性質はまだ良くわかっていないのが現状です。

利用設備:
1MVタンデトロン
6MVタンデム加速器

イオンビーム応用物理 Ion Beam Based Applied Physics

イオンビームを固体、もしくは気体に照射した際に引き起こされる種々の複雑な現象に対し、散乱の基礎課程の知識に基づいて本質を理解し、応用へと役立つ研究を行っています。現在、以下にあげる高速クラスタービーム照射による非線形効果、および超伝導検出器による低速粒子のエネルギー検出を中心に研究を推進しています。

[高速クラスタービーム] UTTACの1MVタンデトロン加速器は、国内でも数少ない高速クラスタービーム実験の可能な施設です(図1)。物質に高速クラスタービームを照射すると、クラスターを構成するイオンは物質内の近距離をほぼ同時に進み、原子および電子と衝突しながら、物質あるいはクラスター自身の電子・格子系

を励起します。複数の原子が近距離をほぼ同時に進む結果、物質表面から放出される2次粒子(原子・分子、電子および光子)にクラスター入射特有な現象が起きます(図2)。我々はクラスター入射による二次粒子生成のメカニズム、特に固体内電子の応答に関する研究を行い、これを応用した高速クラスターによる照射技術の提案、開発を行っています。



図1: 1MVタンデトロン加速器の高速クラスタービームライン

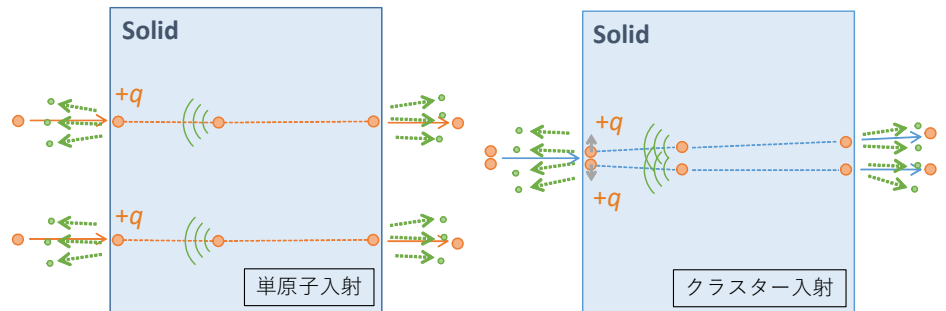


図2: クラスター入射の模式図(単原子入射との比較)

[超伝導検出器による粒子検出] MeVエネルギー領域での粒子の運動エネルギー測定には半導体検出器が広く利用されています。しかし、半導体検出器ではkeVエネルギー領域の粒子の運動エネルギー測定はできません。これは半導体検出器前面に存在する不感層でのエネルギー損失のためです。そこで、超伝導体によって薄い絶縁体を挟んだ構造を持つ超伝導トンネル接合検出器を用いれば、不感層がなくなるので低エネルギー領域での測定が可能になります。

図3は超伝導検出器による測定例で、生理活性物質ブラジキニンの多量体の分析結果です。このように、従来の質量分析装置に超伝導検出器を用いた運動エネルギー測定を加えることにより、質量電荷比(m/q)だけではなく、電荷を分離した質量スペクトルの取得が可能になり、多価の多量体を識別できるようになります。

超伝導検出器の粒子に対する応答メカニズムの研究を行うことにより、粒子の高分解能エネルギー測定および物質分析技術への応用を目指しています。

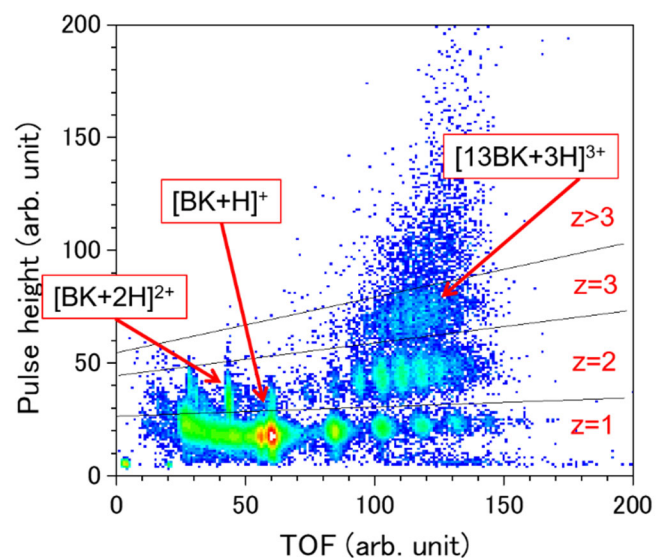


図3: 飛行時間測定型質量分析器に超伝導検出器を用いた測定例 [エレクトロスプレー法によって生成されたブラジキニン(BK)多量体の2次元スペクトル]

UTTACの施設共用制度

外部利用者による実験課題の応募

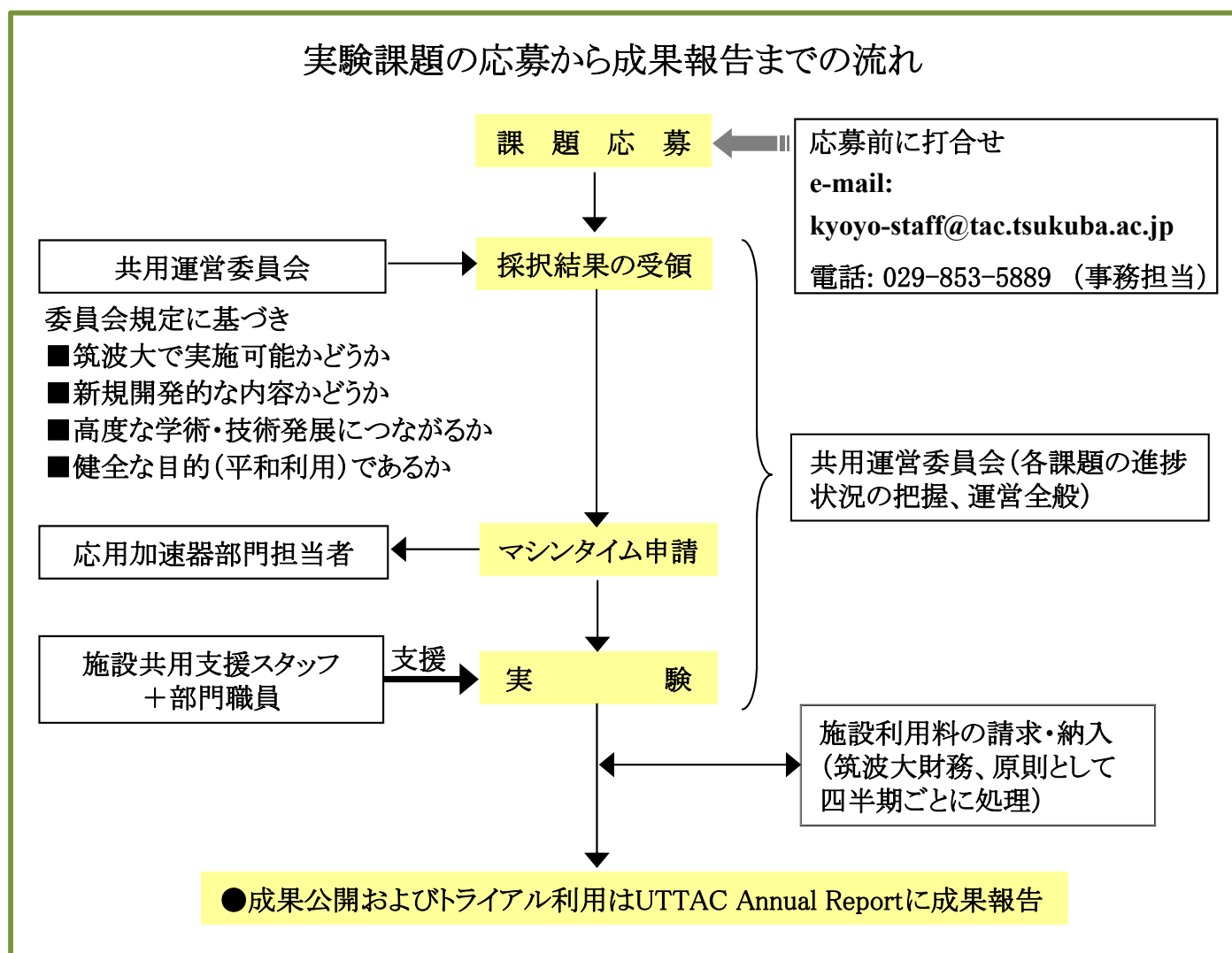
UTTACの外部利用をご希望の場合、応募方法の詳細は、web(”UTTACの外部利用”で検索)をご覧ください。応募利用課題につきましては、応用加速器部門共用運営委員会での審議を経て採択された後は

- 有償利用による実験実施(トライアル利用課題は無料)
- 施設共用支援スタッフおよび部門職員の支援のもとでの研究・技術開発
- 成果公開課題の研究成果は、特許取得等の理由がある場合は2年間の公開延期

等が可能になります。なお、UTTACでは委託分析・委託実験は原則として受け入れていません。

実験終了後に、実験結果の解析に関する支援をご希望の場合には、共用運営委員会の判断のうえで実験支援者との共同研究へ移行していただくことが望ましいと考えます。

実験課題の応募から成果報告までの流れ



2024年7月1日改訂版発行。筑波大学CRiES応用加速器部門共用運営委員会
連絡先: 〒305-8577 茨城県つくば市天王台1-1-1 筑波大学CRiES応用加速器部門
外部利用の応募に関して: **web:** “UTTACの外部利用”で検索

