



タンデム静電加速器施設の学術・産業利用



この冊子は筑波大学タンデム静電加速器施設UTTACにおける各種実験装置・計測技術の学術・産業利用(施設共用)のための参考資料です。

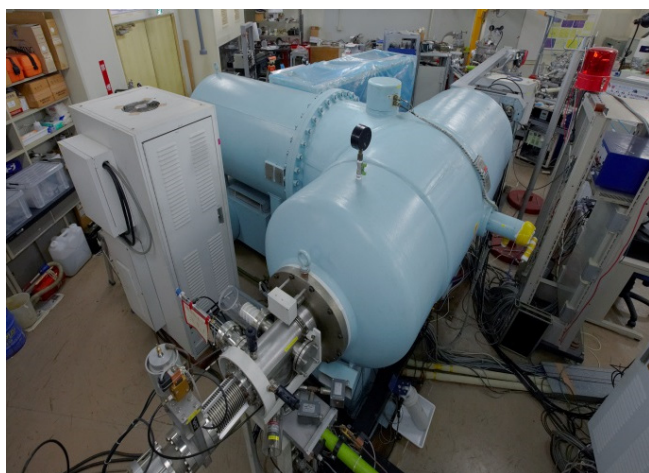
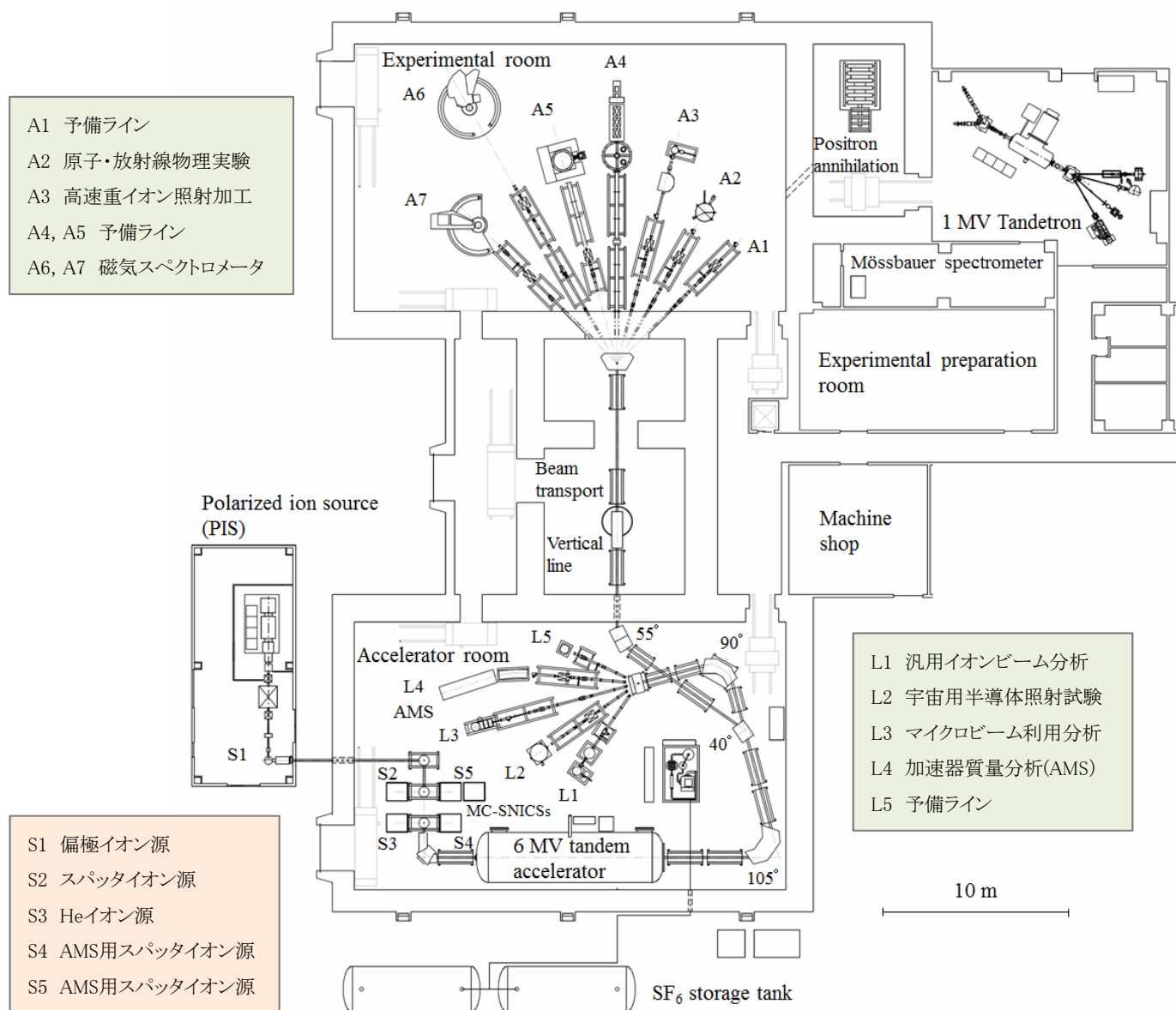
表紙写真:2015年度に稼働を開始した筑波大学6MVタンデム静電加速器とビーム輸送系。青色横型タンク(全長10.5m、直径2.74m)内で最大端子電圧6MV(600万ボルト)を発生し、これによる静電加速で周期律表のほとんどの原子種のイオンビームを広いエネルギー範囲で提供可能です。加速器質量分析(AMS)、物質の照射加工、イオンビーム分析、放射線耐性試験などに利用されます。



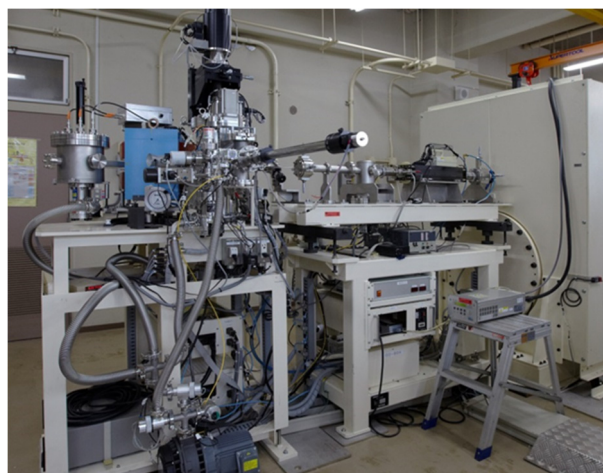
タンデム静電加速器施設

Tandem Electrostatic Accelerator Facilities

筑波大学タンデム静電加速器施設には、3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。



1MVタンデトロン加速器



高分解能イオン散乱分析装置(1MVコッククロフト型)

静電加速器

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が、安定な加速エネルギー領域は加速器ごとに限定されます。加速器は「大は小を兼ねない」のです。UTTACでは2台のタンデム型静電加速器、および1MVコッククロフト型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。加速可能なイオン種とエネルギー範囲をそれぞれ図1、2に示します。ビーム照射は真空中のみならず、カプトンフィルム等を通してることにより、大気中でも行うことができます。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。

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						

1 μA以上

0.1 μA以上

0.01 μA以上

図1: タンデム型静電加速器で利用できるイオン種

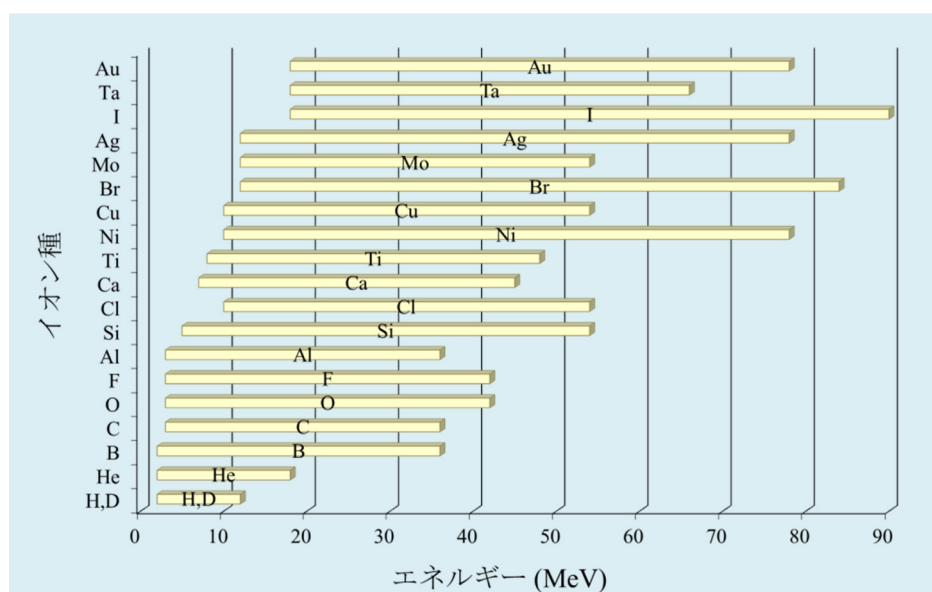
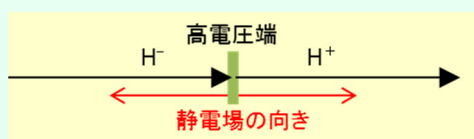


図2: 6MVタンデム加速器で利用できる代表的なイオンのエネルギー範囲

タンデム(tandem)とは馬が2頭縦並びで引く馬車のことです。下の図(Hの場合)のように、タンデム加速器では最初に負イオンを高電圧端(緑色)に向かって加速します。次に、高電圧端で薄膜または気体を



通過させて電子をはぎ取り、正イオンに変換します。図の右半分では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。高電圧端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。前者では、金属と絶縁物を交互に接続し、一つの環にした「ペレットチェーン」が通常使われます(ペレットロンタンデム型加速器)。高電圧による放電を防ぐために、加速管全体は6気圧の六フッ化硫黄ガスで満たした鉄製タンクに入っています。

高速イオンや放射性同位元素で物質を見る、変える

Analysis and Modification of Materials with Swift Ions and Radioisotopes

加速器あるいは放射性同位元素から得られる高速イオン、陽電子、 γ 線は物質の分析、加工に利用されます。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0.1~10MeV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現象とその応用の概略を図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目的に合わせて選択することができます。図2は ^{22}Na 、 ^{57}Co 等の放射性同位元素からの陽電子、 γ 線を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、多様な実験に対応できる支援体制が整っています。

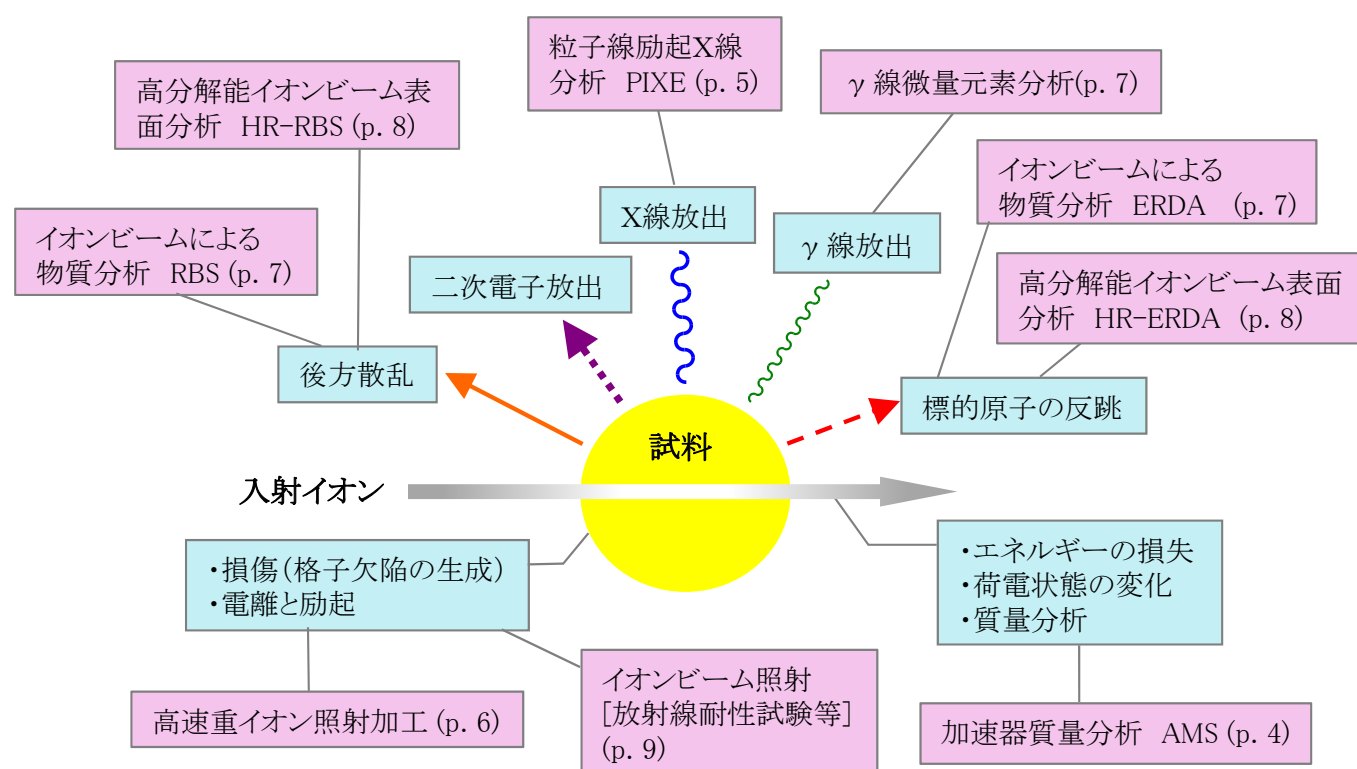


図1: UTTACの静電加速器における高速イオンの利用

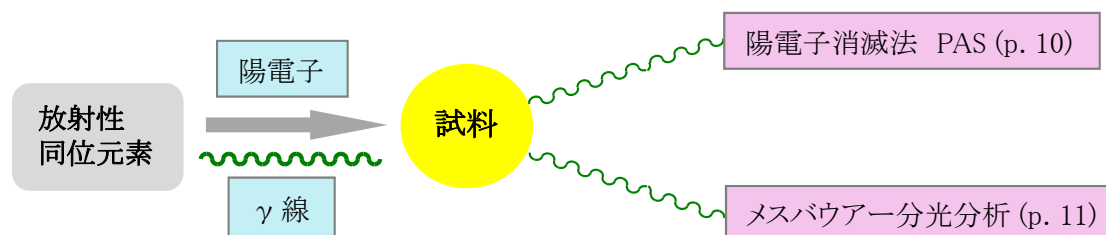


図2: UTTACにおける放射性同位元素の利用

利用設備：
6MVタンデム

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。高エネルギー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、物質中の極微量同位元素を検出することができます。

【何がわかる?】 6MVタンデム加速器によるAMSシステム(図1)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 等の同位体比を 10^{-15} レベルで検知できます。そのため、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2)。例えば、 $^{14}\text{C}^{4+}$ を加速電圧5MVで高エネルギーに加速した ^{14}C の高感度AMS測定(図2)では、0.4%の測定精度と約60,000年のマシンバックグラウンド(0.04pMC)を達成しており、創薬研究開発やトレーサー研究への応用が可能です。

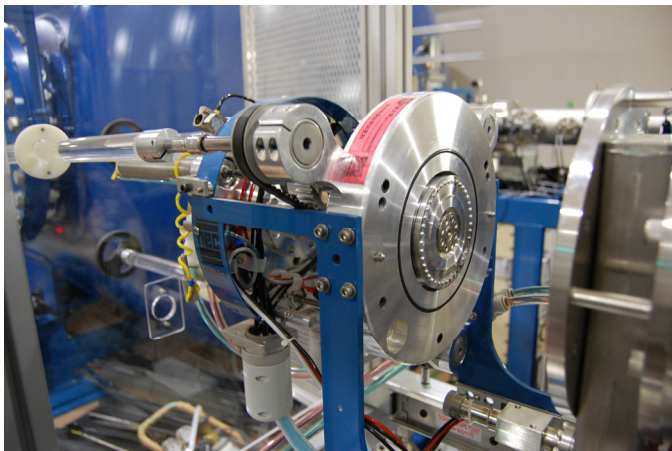


図1: 試料40個を装填可能なAMS用負イオン源装置

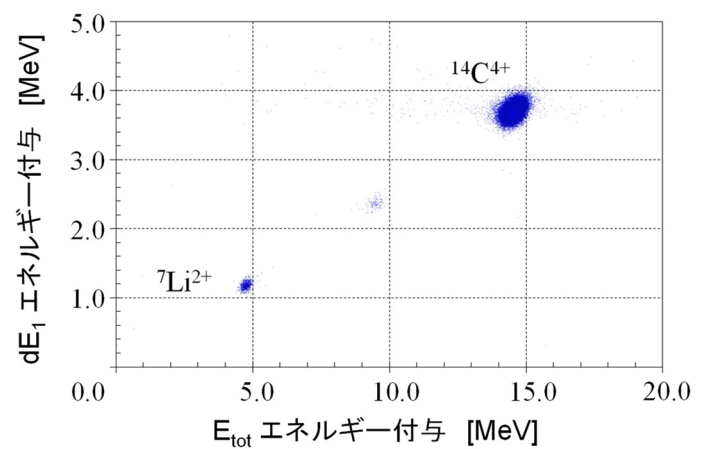


図2: 多電極ガス検出器による ^{14}C の検出例
(NIST標準試料SRM4990Cを180秒間測定)

表1: 6MVタンデムAMSにより同位体比の測定が可能となる微量核種

AMS測定対象核種	^{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 / CaH_2	AgI
入射イオン	BeO^-	C^-	Al^-	Cl^-	CaF_3^- / CaH_3^-	I^-
入射イオン電流 (μA)	5	5 (CO_2) - 50	1	30	0.3 / 1	20
試料量 (mg)	0.5	0.01 - 1	2	1	5	2
検出感度 (atom ratio)	2×10^{-15}	1×10^{-15}	1×10^{-15}	1×10^{-15}	5×10^{-14}	2×10^{-14}

表2: AMSの研究例

- | | |
|-----------------------|--------------------|
| ■ 年代測定(文化財科学・考古学) | ■ 地球環境科学研究 |
| ■ 創薬研究開発: マイクロドーズ臨床試験 | ■ 原子力関連施設のクリアランス調査 |
| ■ 食品等の産地同定 | ■ 大気汚染物質の起源探査 |

利用設備:
1MVタンデトロン
6MVタンデム

粒子線励起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して測定します。不均質試料の場合は、ビーム径を10～20μm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。

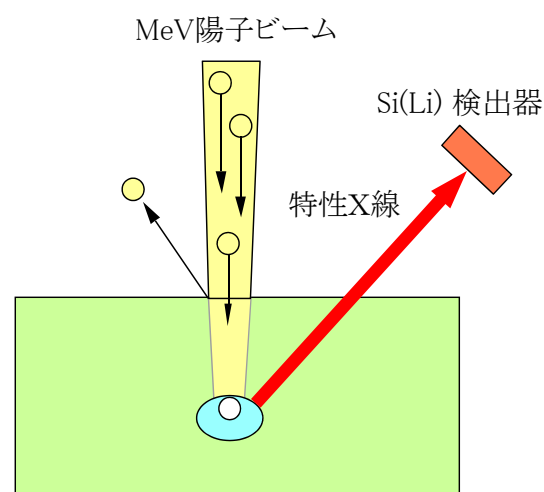


図1: PIXEの測定原理

【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、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。図2は鉱物の割れ目や隙間に捕獲された「流体包有物」で、そのPIXE分析から、地下深部での流体挙動の追跡を行うことができます。図3は、流体包有物(試料表面からの深さ～10μm)のPIXE測定データで、そこに含まれる様々な元素の種類と濃度を知ることができます。

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
- 岩石中の貴金属分析
- 書物のインク分析
- 鉱物中の流体包有物分析

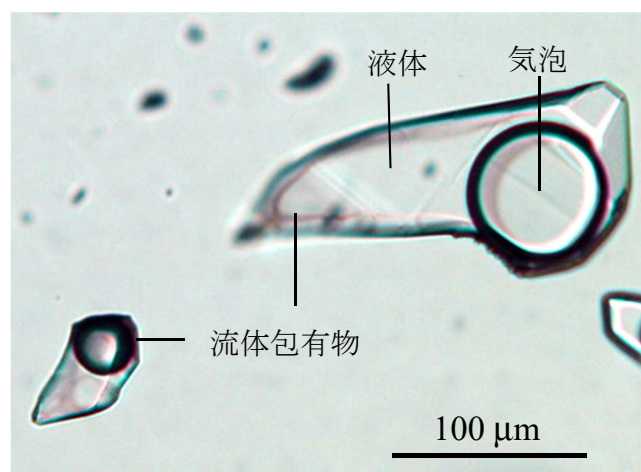


図2: 石英中の流体包有物

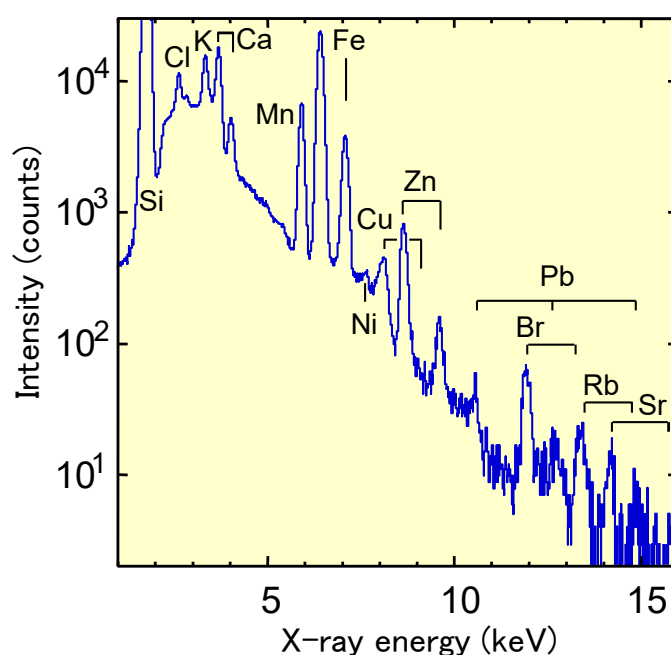


図3: 石英中の流体包有物のPIXEスペクトル(1.92MeV陽子ビームによる)

利用設備：
6MVタンデム

高速重イオン照射加工 3D Fabrications with Swift Heavy Ions

[原理] イオンによる物質中の損傷過程は、一般にイオンの速度と原子番号(質量数)で決まります。タンデム加速器からの高速イオンが入射する場合には物質内電子の励起・電離を通じた物質損傷過程が主なものです。このためイオン照射部分の化学エッチングの速度は大きくなります。これを利用すると、マスクによるパターンエッチングが可能になります。

[何ができる?] 図1は酸化チタン単結晶表面の微細加工例で、直径400nmのロッドが形成できました。図2(a)は非晶質シリカに形成した高アスペクト比の微小な穴です。(b)は断面観察をしたもので、直径30nm、深さは2 μm に達し、かつ穴の形状はほぼ均一なものが得られました。実験条件により穴の直径は数10nmから数10 μm までの範囲で制御できます(図3)。

入射イオンのエネルギーが表面近傍よりも深部で大きく損失する条件を利用することにより、表面を変化させることなく、内部のみを削り貫くように加工することも可能です。図4は、酸化チタン単結晶の加工例で、ビームは表面から照射しているのですが、表面より4~8 μm の深さの部分に穴があいていることがわかります。表面の結晶構造には欠陥は生じていません。

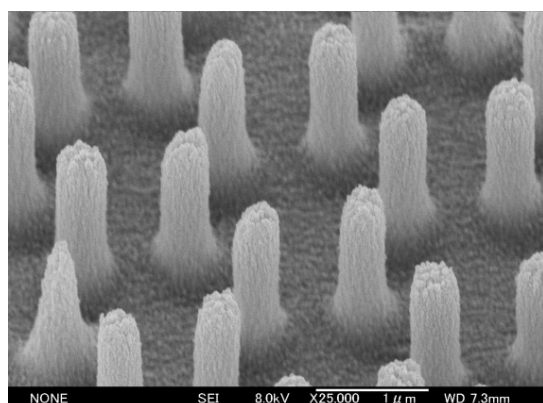


図1: 高速重イオン照射と化学エッチングにより得られた酸化チタン単結晶表面の周期構造。ロッドの直径は400nm。

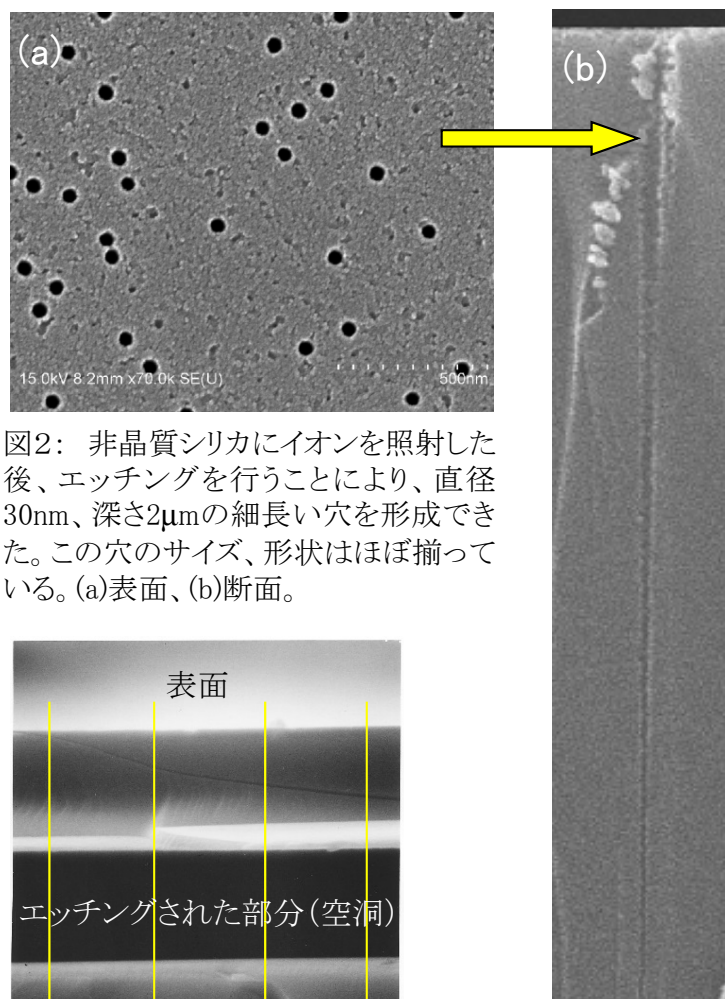


図2: 非晶質シリカにイオンを照射した後、エッチングを行うことにより、直径30nm、深さ2 μm の細長い穴を形成できた。この穴のサイズ、形状はほぼ揃っている。(a)表面、(b)断面。

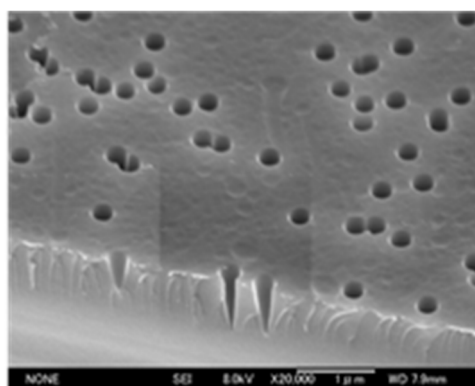


図3: エッチング条件を変えることにより、非晶質シリカに円錐状の穴を形成できる。このSEM像は斜め45度より断面を観察したもので、直径200nm、深さ800nmの円錐状の穴が確認できる。

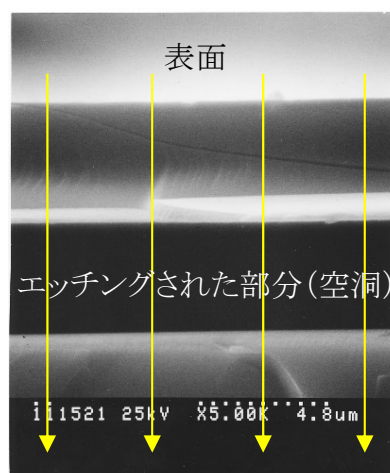


図4: 酸化チタン単結晶に対して、表面近傍よりも深部でエネルギーを損失するビームの照射により、内部のみを選択的にエッチングすることができた。

利用設備:
1MVタンデトロン
6MVタンデム

イオンビームによる物質分析

Materials Analysis with Ion Beams: RBS, ERDA

[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H-C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。

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10ppm)
- 試料サイズは約5×5mm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

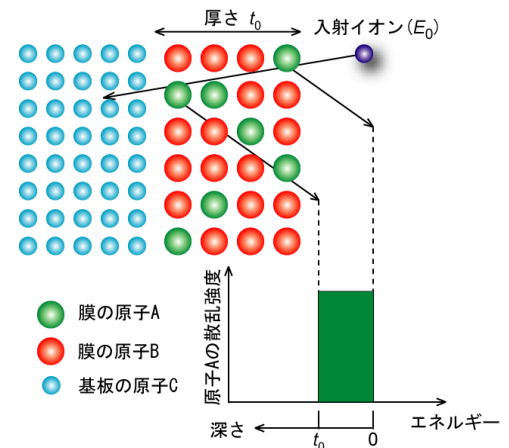


図1: RBSの原理

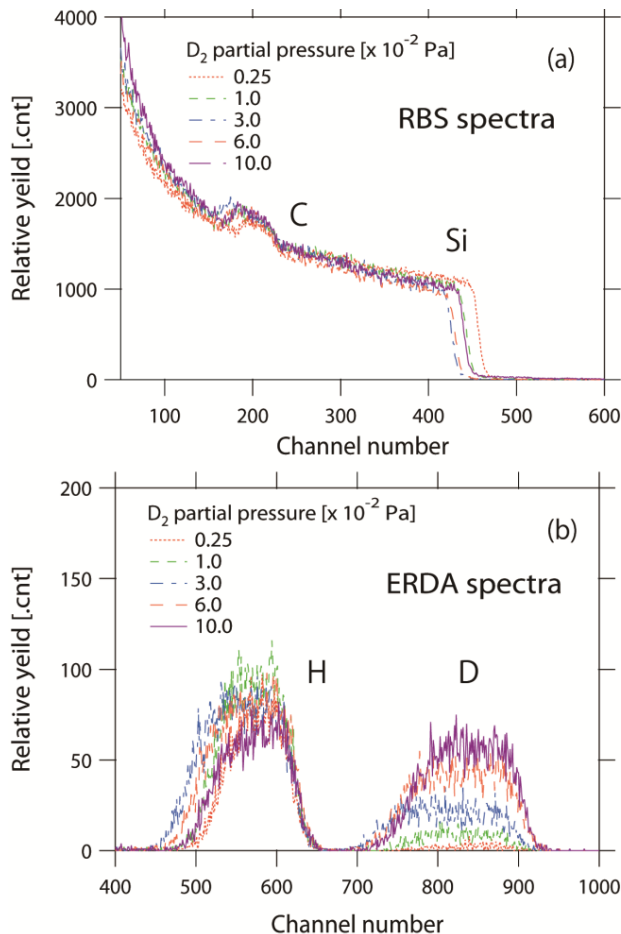


図2: 2.5MeVの ^4He によるRBS(a)/ERDA(b)同時測定の結果の例[D. Sekiba et al., Diamond Relat. Mater. 27-28 (2012) 60-63]

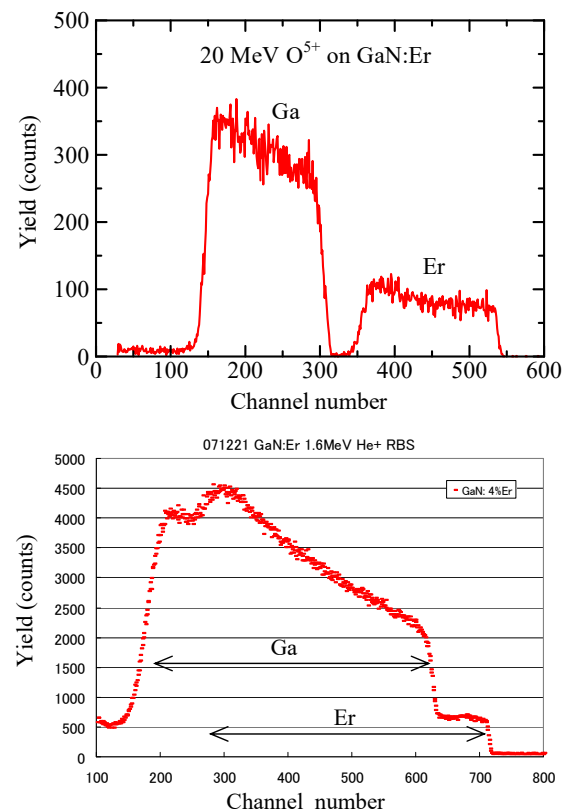


図3: GaN:ErのRBSスペクトル。重イオンRBS(上)ではGaとErを分離できるが、軽イオンRBS(下)では両者は重なっている。

利用設備:
高分解能イオン散
乱分析装置、
1MVタンデトロン

高分解能イオンビーム表面分析 High-Resolution Ion Beam Surface Analysis

【原理】 固体表面で散乱されたイオンを磁場偏向型分析器により測定することで深さ方向の分析感度が向上します。この分析法では、表面中性化率が低いイオン種、阻止能の大きいエネルギー領域の選択が必要であり、主に数100keV領域の ^4He イオンを利用します。チャネリングやブロッキング現象と組合せると、表面近傍の異種元素の結晶学的位置決定、歪分布評価などが可能です(HR-RBS)。この分析システムは反跳イオンの測定にも応用することができ、高分解能弾性反跳粒子検出法(HR-ERDA)として、試料表面近傍に分布するH、Dなどの解析に用いられます。

【何がわかる?】 機能性薄膜の創製・デザインの研究においても、原子層レベルの分解能での分析・評価が求められています。以下に本手法で可能な分析対象項目を挙げます。

- ①主成分の深さ方向分布
- ②不純物や添加元素の深さ方向分布
- ③目的元素の面密度
- ④格子不整
- ⑤歪分布
- ⑥水素同位体の深さ方向分布

表1: 高分解能イオンビーム表面分析の特徴

- エネルギー分解能: 入射エネルギーの0.4%以下 (300keV $^4\text{He}^+$ で1.2keV以下)
- 深さ分解能: 1.2keVのエネルギー分解能は、Siを基準にすると約0.2nmに相当
- 定量精度: 国際組織で評価した散乱断面積やエネルギー損失データを利用、精度 $\pm 3\%$ 以内で定量可能
- 水素の定量: ^4He イオンを入射すれば、H及びDともに検出可能。定量下限は0.1-0.5at%程度。 ^{16}O 等のイオンなどを用いれば更なる高感度化も可能

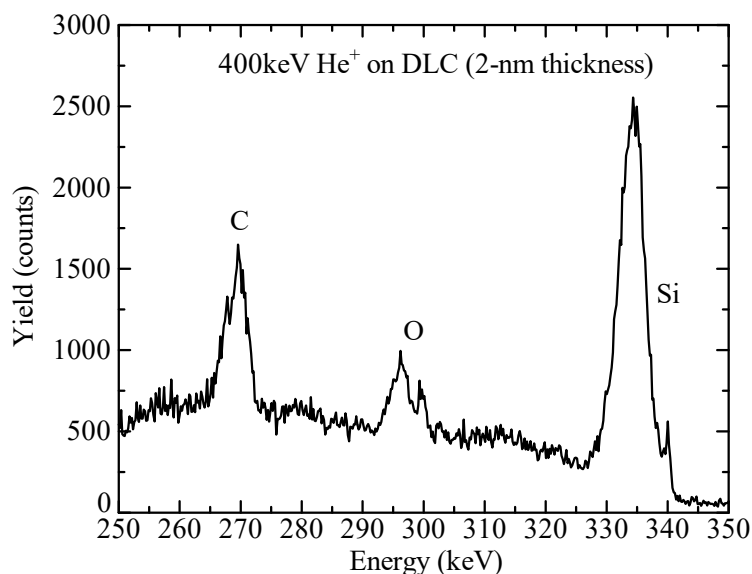


図1: DLC(2nm)/Si(100)の<110>チャネリング入射条件で測定したRBSスペクトル(散乱角64.3度)

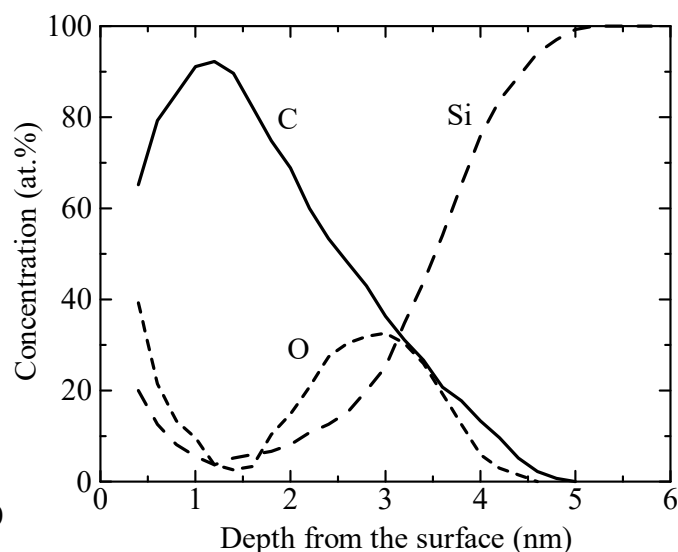


図2: DLC膜中のSi、OおよびCの深さ分布(図1のスペクトルの解析結果)

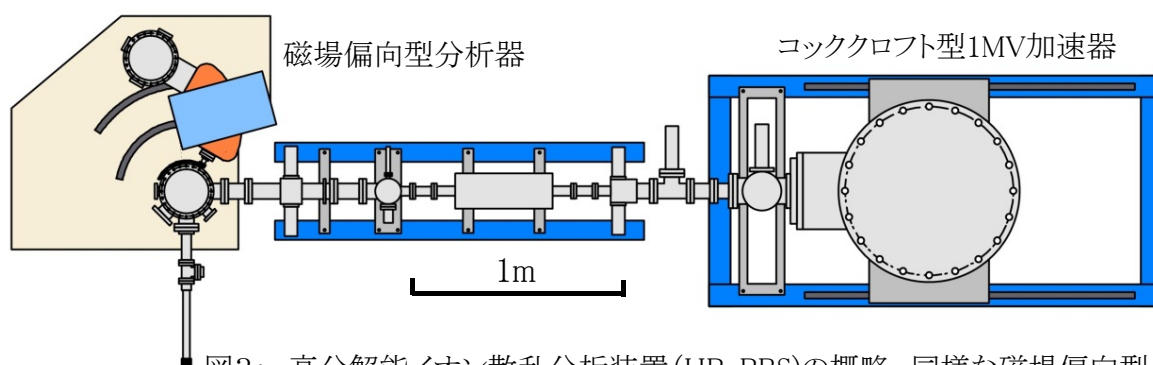


図3: 高分解能イオン散乱分析装置(HR-RBS)の概略。同様な磁場偏向型分析器は1MVタンデトロンにも接続されていて、HR-ERDA法として利用可能。

利用設備：
6MVタンデム
1MVタンデトロン

イオンビーム照射(放射線耐性試験、計測器校正)

Ion Beam Irradiation (Radiation-Tolerance Test, Detector Calibration)

【原理】 現代の高度に制御された静電加速器を用いれば、標的物質の特定の横位置及び深さに指定され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電子機器やエネルギー発生機器などに対して、放射線耐性試験(事前安全確認テスト)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新規機能性付与のために必須の手段となっています。

【何ができる?】

- 1. 放射線耐性試験:** 航空・宇宙機器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、地上での宇宙環境利用機器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。半導体素子は日々進歩して新しい素子が生まれて来ますが、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航空・宇宙機器の開発につながります。
- 2. 計測器の校正:** UTTACのタンデム加速器で加速された10MeV領域の陽子ビーム等が人工衛星搭載放射線観測装置のエネルギー校正に使用されています。図2は校正後の計測器によって測られた宇宙線の空間分布の測定例を示します。そのほかにも放射線検出器の校正のためにUTTACの施設は企業の研究者に利用されています。
- 3. 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、例えば電子スピンを利用した新規機能素子の実現に向けて利用されています。また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による損傷効果を利用して光ファイバーの屈折率などを制御することで、新規デバイスの開発を目指す研究が行われています。



図1: 宇宙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1m、高さ0.7m)。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。

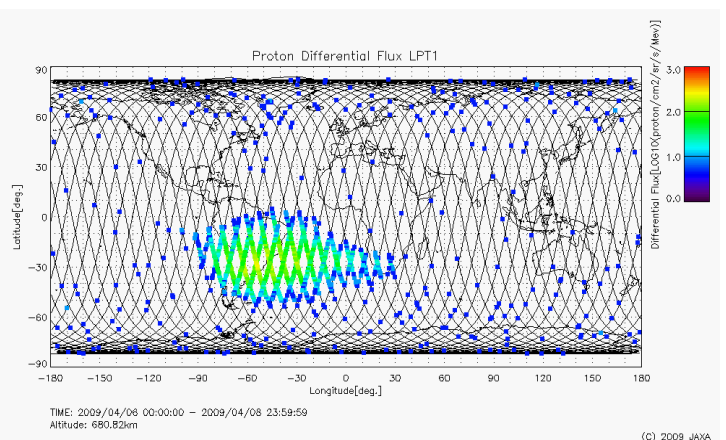


図2: UTTACのイオンビームで校正した検出器で測定された地球上空680kmにおける14~18MeVの陽子微分線束の分布[UTTAC施設利用成果報告書より引用]。

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。

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 10nm^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

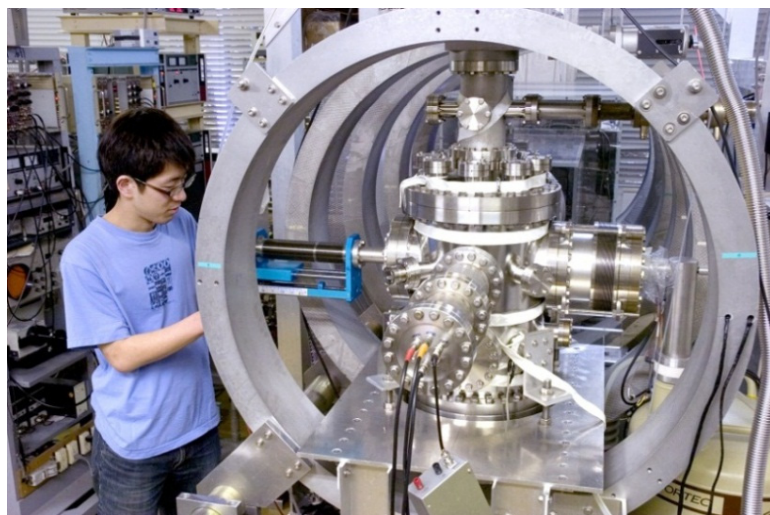


図1：低速陽電子ビーム解析装置

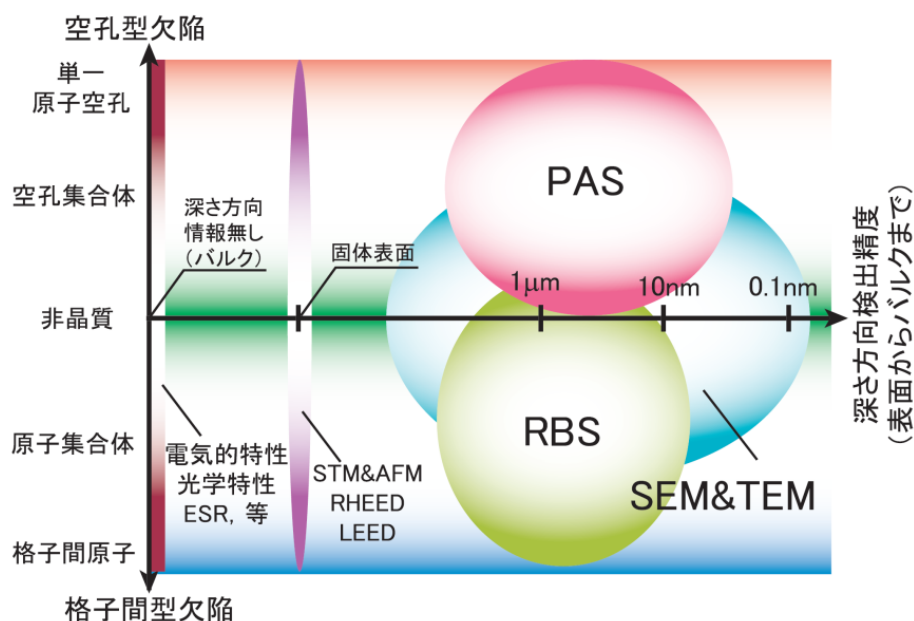


図2：陽電子消滅法 (PAS) のポジションマップ

利用設備：
RI 線源

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

[原理] メスバウアー効果とは、固体中の原子核が反跳に伴うエネルギーの損失なしに γ 線を放出・吸収する現象であり、特定の原子核について観測されています。計測方法は、 γ 線源(Source)を数mm/s程度で振動させることによりドップラー効果で γ 線エネルギーを微小に増減させ、試料(Absorber)に照射します。透過型の測定では、試料を透過した γ 線を計数して試料内原子の電子状態を反映した吸収スペクトルを得ます(図1、図2)。また γ 線を吸収した原子核は、脱励起時に γ 線とともに内部転換電子も放出します。この電子を計数する手法(CEMS)で基板上的薄膜など γ 線が透過しない試料の計測が可能です。

[何がわかる?] ^{57}Fe メスバウアー分光分析では、 ^{57}Co を線源として用いることで鉄原子核(^{57}Fe)の置かれた電磁気的環境(内部磁場、イオンの価数、原子の環境、対称性など)に関わるデータが得られ、合金・化合物・酸化物の相の同定、磁気モーメントの大きさ、磁化の容易軸方向の推定が可能となります。

鉄窒化物ナノ粒子の測定例を図3に示します。横軸はドップラー速度で γ 線のエネルギー変化量に相当します。強磁性成分を示す6本の吸収線から生成物が Fe_{16}N_2 であると同定できます。また室温で常磁性を示す鉄化合物が、4.2Kでは磁気秩序を示すことなどから、3価の酸化物も混在しているものと推定できます。

表1: ^{57}Fe メスバウアー分光分析の特徴

- 化合物、酸化物内の鉄原子の価数状態
- 物質の磁性状態(常磁性、強磁性)
- 試料温度は室温、77K、4.2K
- 薄膜、ナノ粒子が測定可能
- 試料厚みは数10 μm まで
- 内部転換電子法で表面敏感な計測

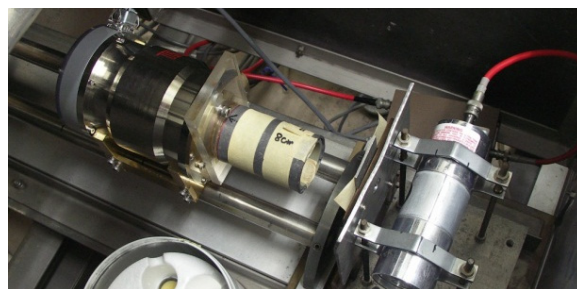


図2: ^{57}Fe メスバウアー効果測定装置の概観

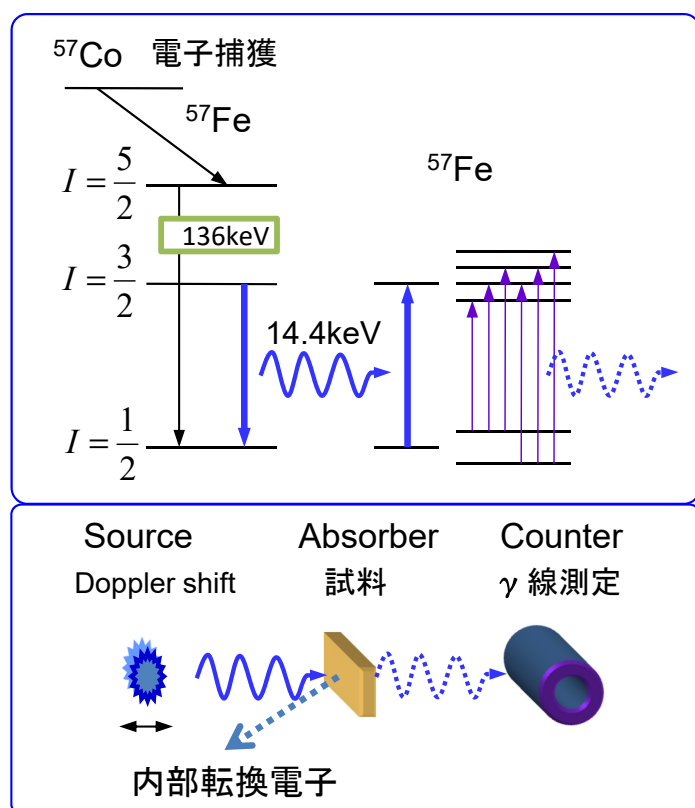


図1: ^{57}Fe メスバウアー効果の測定原理

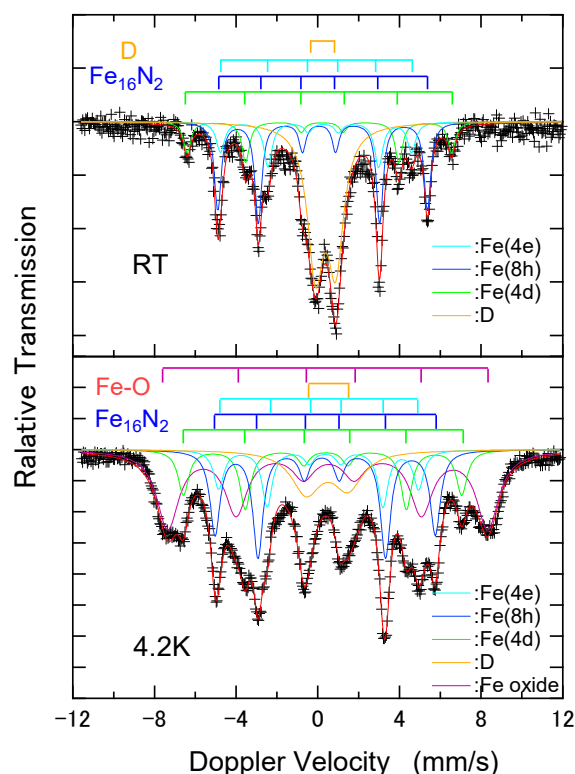


図3: Fe_{16}N_2 ナノ粒子のメスバウースペクトル。横軸は γ 線エネルギー変化量に相当。

利用設備：
6MVタンデム
1MVタンデトロン

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。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。さらに、UTTACには、図2と図3に示す2台の磁気分析器があり、この装置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。偏極ビームを用いることによって、不安定核の電磁氣的性質を示す核モーメントの測定も可能になります。図4は、核モーメント測定のためのセットアップです。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が揃った不安定核を生成し、崩壊の際に発生するベータ線を指標とした核磁気共鳴により、核モーメントを測定します。



図1: 偏極イオン源(PIS)

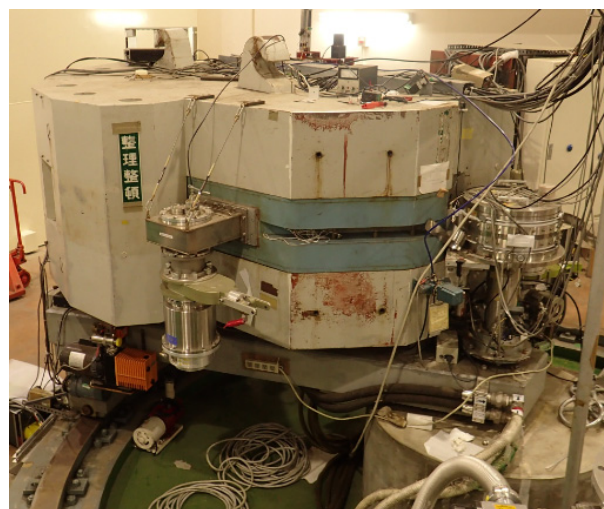


図2: 測定室のA6コースに設置されているEnge型Split Pole磁気分析器(ESP90)

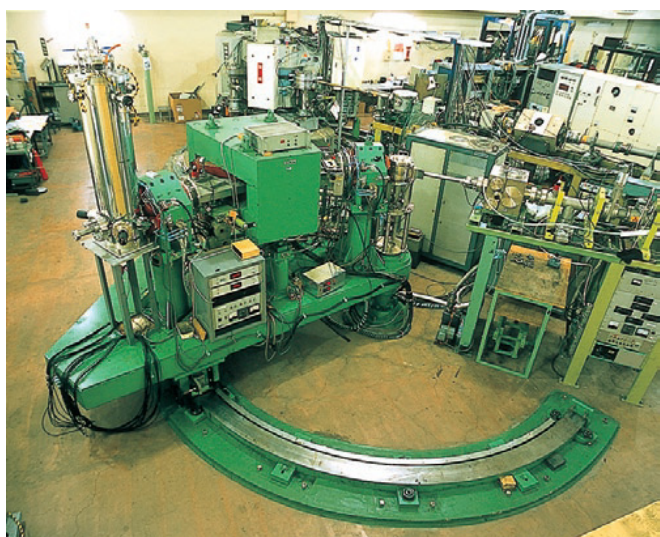


図3: 測定室A7コースに設置されている四重極-四重極電磁石(QDQ)磁気分析器

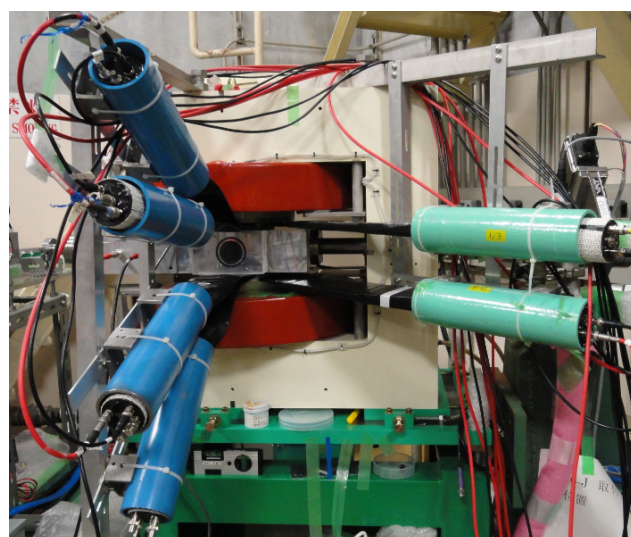


図4: 核モーメント測定のセットアップ

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

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、応用へと役立てる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、および宇宙線の実験室シミュレーション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タンデトロンの加速器は、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物質分析技術の提案、開発を行っています。



図1: 1MVタンデトロンの加速器
の高速クラスタービームライン

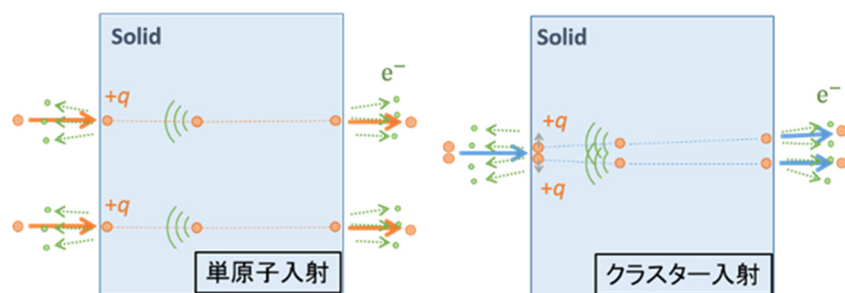


図2: クラスター入射の模式図(単原子入射との比較)

[宇宙線シミュレーション] 地球上には常に超新星や太陽を起源とする宇宙線が降り注いでいます。これらの宇宙線は主に大気と反応し、大気中で様々な化学反応を誘起しています。我々は宇宙線による大気中の SO_2 の酸化過程に注目し、宇宙線によって酸化された SO_2 が引き起こす大気中の微粒子形成過程について加速器を用いた実験的シミュレーション研究を行っています。図3に SO_2 100ppmを含む湿度30%の窒素ガスに陽子線を照射した際に生成される帯電粒子の粒径分布を示しています。陽子線照射によって、 SO_2 が酸化され、液滴が生成されている様子が示されています。実験室でのシミュレーションは実験条件のコントロールが可能なことから、現象の解明に有用であり、フィールドワークによる観測と相補的で欠かすことのできないものです。

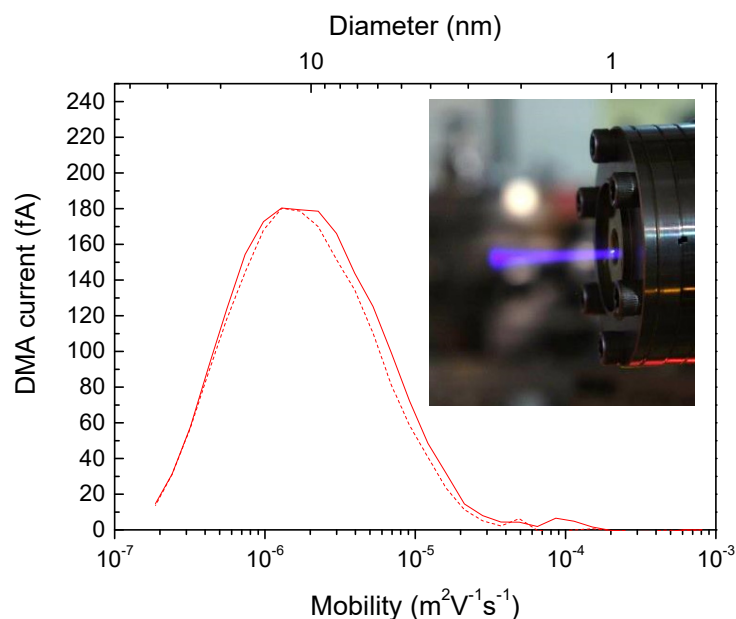


図3: 陽子線照射によって生成された液滴のサイズ分布、実線(破線)は正電荷(負電荷)の帯電粒子を示す。写真は実験の様子で、中央の帯状の紫色は陽子線照射時の大気の発光。

UTTACの施設共用制度

外部利用者による実験課題の応募

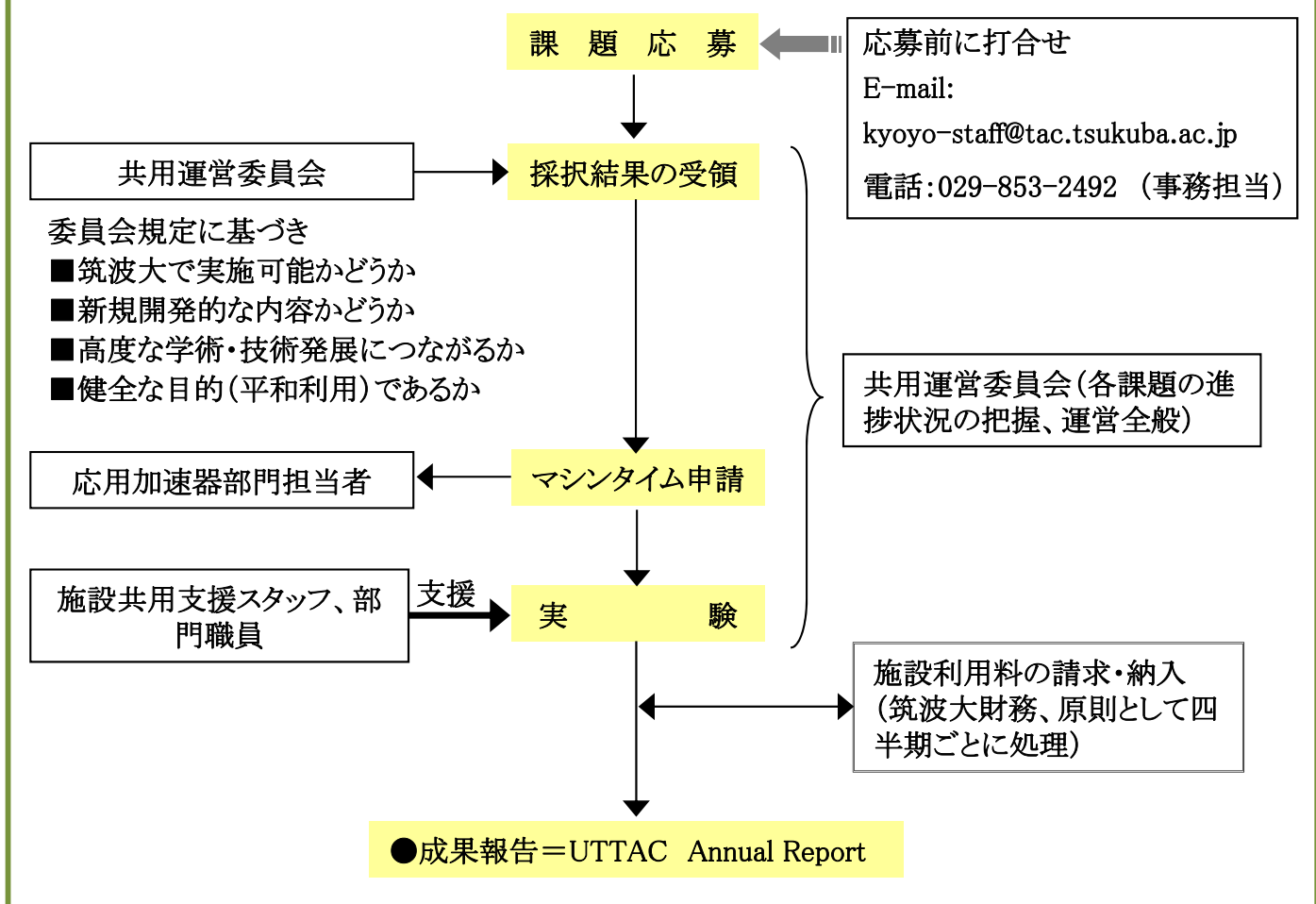
UTTACの外部利用をご希望の場合、応募方法の詳細は、<http://web2.tac.tsukuba.ac.jp/kyoyo/>をご覧ください。応募利用課題につきましては、応用加速器部門共用運営委員会での審議を経て採択された後は

- 主に光熱水料および支援経費に基づく施設利用料での実験実施(トライアル課題は無料)
- 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



参考資料1：施設の外部利用における筑波大施設利用細則(抜粋)

(成果の利用等)

第18条 利用者は、共用施設の利用により得られた成果等を公開するときは、「国立大学法人筑波大学研究基盤総合センター応用加速器部門共用事業利用」によるものであることを明記しなければならない。

(秘密保持)

第15条 本学及び利用者は、共用施設の利用によって知り得た情報のうち相手方より秘密の取扱いの下に開示された情報は、相手方の書面による事前の同意なしに、それらを第三者に開示しないものとする。ただし、それらの情報が次の各号のいずれかに該当する場合は、この限りでない。

- (1) 既に公知であったもの
- (2) 自己の責めによらず公知となったもの
- (3) 第三者から秘密保持義務を負うことなく正当に入手したもの
- (4) 既に自己が所有していたもの
- (5) 相手方から知り得た情報によらず独自に創出又は発見したことが書面等により立証できるもの
- (6) 公的機関に報告する法的義務があるもの及び公的機関により開示を命じられたもの

(知的財産権の管理)

第20条 共有に係る知的財産権のうち本学の持分に係る知的財産権の管理については、本学の定めるところによる。

参考資料2：タンデム静電加速器施設利用料

利用課題の種類	分類	区分	利用単位と利用料金(円)	
成果占有	6MVタンデム加速器	宇宙用半導体照射	1日あたり	280,000
		加速器質量分析AMS	1日あたり	225,000
		マイクロビーム	1日あたり	310,000
		その他(6MVタンデム)	1日あたり	160,000
	1MVタンデトロン加速器	タンデトロン高度化イオン源	1日あたり	82,000
		その他(タンデトロン)	1日あたり	66,000
	高分解能イオン散乱装置	高分解能イオン散乱	1日あたり	72,000
	放射性同位元素利用実験	陽電子消滅	1日あたり	82,000
		メスバウアー分光	1測定あたり	34,000
		超伝導磁石(メスバウアー分光オプション)	1日あたり	73,000
		低温測定(メスバウアー分光オプション)	1日あたり	20,000
		線源利用	1日あたり	28,000
	質量分析試料処理	AMS-炭素試料処理	1日あたり	84,000
成果公開	6MVタンデム加速器	宇宙用半導体照射	1日あたり	76,000
		加速器質量分析AMS	1試料あたり	2,000
		マイクロビーム	1日あたり	76,000
		その他(6MVタンデム)	1日あたり	76,000
	1MVタンデトロン加速器	タンデトロン高度化イオン源	1日あたり	29,000
		その他(タンデトロン)	1日あたり	29,000
	高分解能イオン散乱装置	高分解能イオン散乱	1日あたり	29,000
	放射性同位元素利用実験	陽電子消滅	1日あたり	23,500
		メスバウアー分光	1測定あたり	13,000
		超伝導磁石(メスバウアー分光オプション)	1日あたり	36,500
		低温測定(メスバウアー分光オプション)	1日あたり	10,000
		線源利用	1日あたり	10,000
	質量分析試料処理	AMS-炭素試料処理	1日あたり	10,000
トライアル	高精度放射線検出	高度化放射線計測	1日あたり	10,000
		産業利用および産学連携利用を対象、期間1年、1利用単位は原則2日、成果等は公開(特許取得等の理由により2年延期可能)。	無料	

(注1) 利用料金には別途消費税が加算されます。(注2) 成果公開とは、秘密保持義務が生じない利用形態で、UTTAC年報における成果・進捗報告が義務付けられます。(注3) 加速器質量分析およびメスバウアー分光では、1日に処理できる平均試料数をもとに利用料金を設定しています。(注4) 加速器質量分析等において試料処理をUTTACで行う場合、これに要する消耗品の持ち込み、または相当分の経費負担をお願いします。

2020年10月28日改訂版発行。筑波大学研究基盤総合センター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 筑波大学研究基盤総合センター応用加速器部門
 電話番号: 029-853-2492 (応用加速器部門事務担当)、029-853-4341 (外部利用技術相談窓口)
 e-mail: kyoyo-staff@tac.tsukuba.ac.jp web: <https://www.tac.tsukuba.ac.jp/kyoyo/>