

京都大学重イオン加速器と MeV イオン衝突研究

伊藤 秋男*¹, 土田 秀次*²

Collision Researches Using MeV Energy Heavy Ion Accelerators of Kyoto University

Akio ITOH*¹ and Hidetsugu TSUCHIDA*²

Abstract

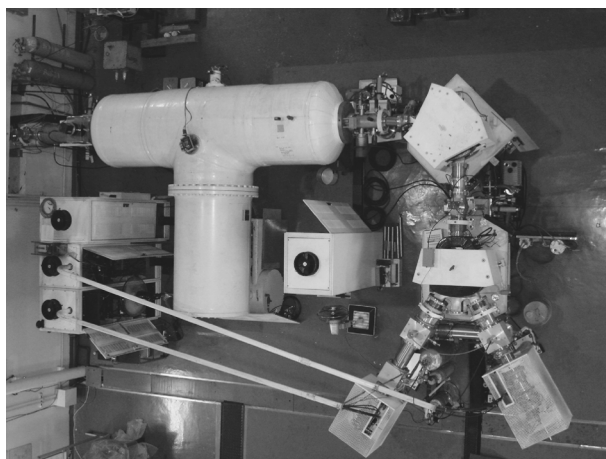
Current status of MeV energy heavy ion accelerators of Kyoto university (Faculty of Engineering) is reported. Two types of ion accelerators with terminal voltages 2.5 MV (VdG) and 1.7 MV (Tandem) are utilized for both fundamental and application researches covering atomic collision physics, materials science and element analysis. A brief introduction is given of experimental techniques, developed in our laboratory, concerning multi-coincidence for 3D-imaging of molecular fragmentation, liquid-in-vacuum for ion interactions with liquid targets and positron annihilation for in-situ observation of ion-irradiated materials.

1. はじめに

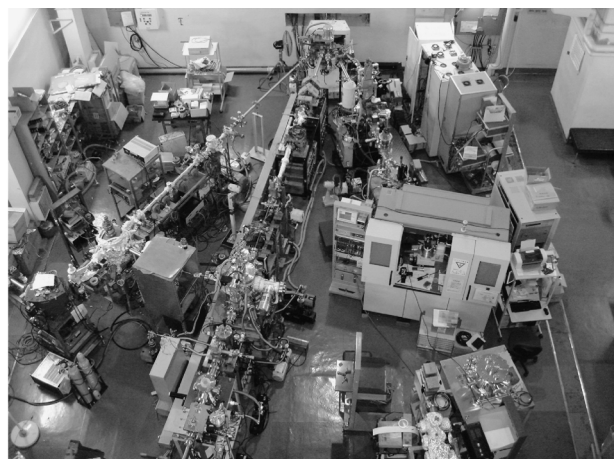
本誌¹⁾に掲載のように、京都大学大学院工学研究科原子核工学専攻・量子理工学研究実験センターの加速器実験施設（宇治キャンパス，放射実験室）には2機の重イオン加速器（2.5 MV バンデグラフ加速器，1.7 MV タンデトロン加速器）が設置され，学内共同利用装置として長年にわたって稼働している（図1a), b)）。装置スペック的な意味での斬新性は無い

が，長時間にわたって安定したビームが得られることから多数の学内研究者が利用している．ビームラインには汎用と各種専用の分析装置が設置されており，多分野に対応した分析支援と応用研究を推進している．分析支援を行うにあたっては，PIXE と RBS それぞれについて分析結果を解析するための世界標準 software を備えている．

以下では，ビーム利用の立場から筆者らのグループが行っている研究を中心に，MeV 領域のイオンビー



(a)



(b)

図1 (a) 1.7 MV タンデトロン加速器，(b) ビームライン全景

*1 京都大学大学院工学研究科原子核工学専攻 (E-mail: itoh@nucleng.kyoto-u.ac.jp)

*2 京都大学大学院工学研究科附属量子理工学研究実験センター

ム研究の現状や関連の計測技術並びに分析支援ビームライン機能等について述べる。

2. MeV イオンビーム衝突相互作用に関する研究

2.1 MeV エネルギー加速器の重要性

粒子加速器から得られるイオンや電子などの荷電粒子ビームの利用は理系のみならず文系を含む広範囲の分野に広がっており、基礎・応用ともに様々な研究が展開している。

衝突相互作用の解明や個々の原子・分子の本質を探る基礎研究（原子衝突物理学）では基本的に単純かつ well-defined な衝突系が研究対象となり、標的物質は主として気体の原子・分子が用いられる。一方、固体や凝縮体を対象とする放射線物理学（及び化学、生物学）などでは、入射粒子が物質に与えるエネルギー量（阻止能、線エネルギー付与 LET）や、それが費やされるエネルギー緩和のメカニズムが重要な研究課題となる。荷電粒子が物質と衝突する際には、弾性散乱による軌道偏向、電離・励起、あるいは二次粒子放出やイオン性分子解離などの様々な衝突過程が重畳して起こる。それぞれの衝突過程の相対的重要性は、荷電粒子の種類や速度に依存すると共に、標的物質の物性や構成元素の種類にも依存して大きく異なる。これらの衝突過程について様々な物質に対して系統的に探求し衝突反応データベースとすることは基礎学問的に価値あるだけでなく、放射線・粒子線医療などに代表される社会生活に直結した様々な応用分野で大きな波及効果をもたらすものであり非常に重要な研究課題である。

例えば医療の分野では、核子あたり数百 MeV 以上の高エネルギー陽子線や炭素ビームによる粒子線がん治療が我が国を初め世界的に増加している。然しながら、学問的には未開拓な領域とあってよく、DNA 損傷や細胞死滅過程などはまだ殆ど解明されていないのが現状で、今後の重要な学術分野の一つに位置づけることができる。これは、高速イオンによる直接的な損傷過程以外に、イオン軌跡に沿って生成される無数の二次粒子（電子、イオン、ラジカル、光子）も非常に大きな役割を果たしていることに起因している。二次粒子の重要性を示す一例として、DNA 損傷を引き起こす主要な粒子は高速一次イオンではなく、僅か数 eV の二次電子であることが報告されている²⁾。現状では、この研究例のような原子レベルでの照射効果に関する研究自体が殆どないことも解明を遅らせている主要因のひとつになっていると思われる。

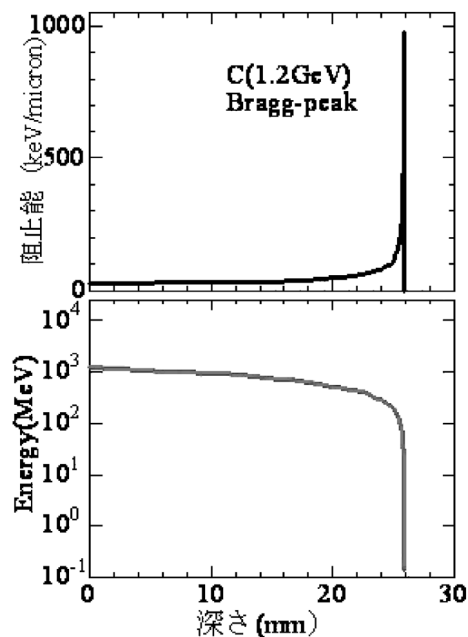


図2 水中における 1.2 GeV 炭素イオンの阻止能とイオンエネルギーの深さ方向分布

物質中を通過する際に入射荷電粒子が失うエネルギー量を深さ方向に図示すると、ある地点で著しく大きな阻止能のピークが現れることが知られており、放射線物理学ではブラッグピーク (BP) と呼ばれる。例として 1.2 GeV 炭素イオンの水中におけるエネルギー損失量とイオンのエネルギーの計算値を図 2 に示す。粒子線治療の優れた点は、粒子線の持つこの特異な性質を利用していることにあり、正常組織の損傷が少なくがん組織 (BP 領域とする) のみが死滅する原理がこれである。イオンのエネルギーを見ると、この BP 領域までは緩やかに減少し、BP 領域で一気に減速している。言い換えると、がん組織の破壊を引き起こすイオンのエネルギーは keV~数十 MeV であることが解る。従ってこのエネルギー領域におけるイオン衝突過程を調べるのが重要となり、特に MeV 級の比較的小型の粒子線加速器が有力な研究手段となる。

2.2 気体分子の衝突過程を探る同時計測法

以上のような背景のもとに我々は気体標的を用いた衝突研究を行っており、原子や分子および生体分子であるアミノ酸を気体標的としてそれらの電離過程や解離過程、二次電子・二次イオンの生成メカニズム等を研究している。この種の測定では、衝突に伴って起こる幾つかのイベントを同時に測定することが重要で、それにより従来の古典的測定法では捉えることのできない衝突の詳細な描像を実験的に解明することができる。ここでは、二原子分子の CO を標的とした実験方

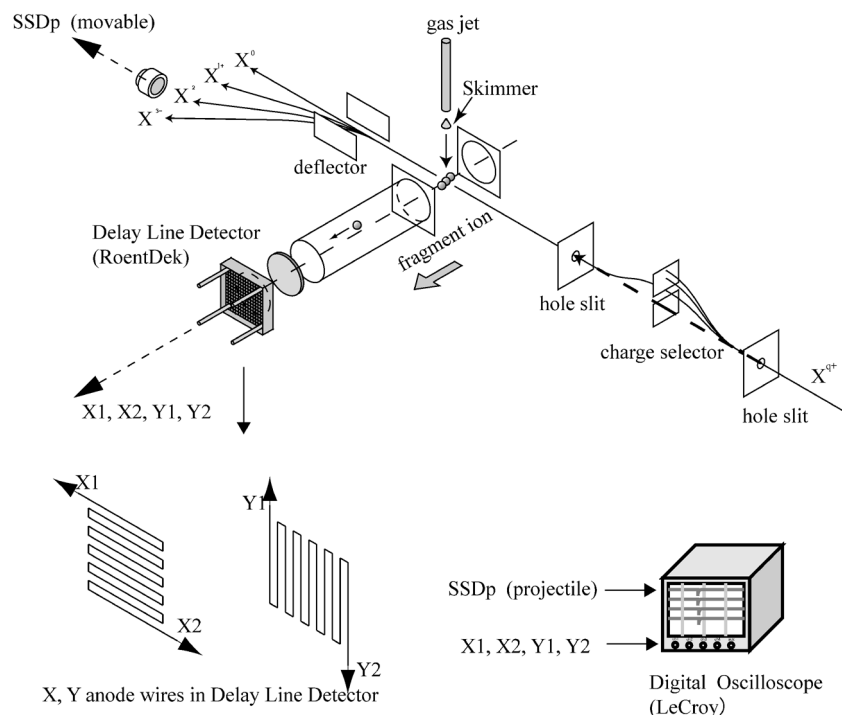
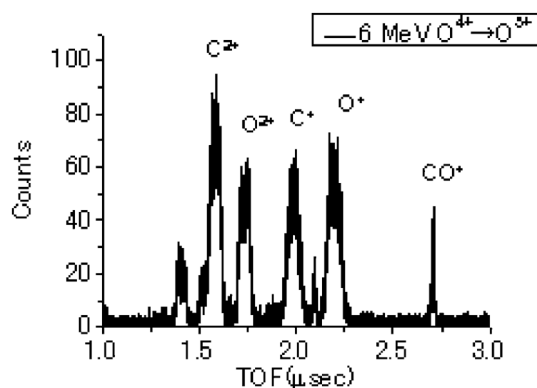


図3 気体標的実験の装置配置図

法についてやや詳細に述べる³⁾。

図3に実験ビームラインの概念図を示す。加速器から引き出されたイオン (6 MeV O^{4+}) は衝突チャンバーに入るまでに複数のアパーチャや二次元スリットで整形され、更にビームライン残留ガスとの荷電変換衝突で作られる不用な価数のイオンは2対の電磁石により価数選別し取り除かれる。ジェット状に吹き出された気体標的との衝突後は幾つかの価数に変化するため、これらも電場によって価数ごとに偏向度を変えそれぞれ独立に検出できるようにする。イオンビームの検出は半導体検出器 (SSD) で行う。衝突後のCO分子からは幾つかのイオン片が生成され、それらは電場で引き出され飛行時間法 (Time-of-Flight) によって質量選別し、マルチチャンネルプレート (MCP) で検出する。質量分布としては図4のようなスペクトルが得られる。スタート信号としては幾つかの方法を選ぶことができるが、この測定では衝突で変化した或る特定の価数状態の酸素イオンの信号をトリガーとしている。

図4から解るようにCO分子からの分解イオン片は幾種類もあり、ピークの幅もそれぞれ異なっている。これはそれぞれのイオン片が生成される時に持つ運動エネルギーが異なることに対応しており、分解する直前のCO分子の価数や励起状態に関する情報を含んでいる。このような量子状態の情報をより詳細に理解す

図4 $6 \text{ MeV O}^{4+} + \text{CO}$ 衝突におけるイオン片飛行時間スペクトル

るために、実験では2次元位置検出器を用いてイオン片を測定している。2次元位置検出器であるDelay Line Detector (DLD, RoentDek社製) はMCPで増幅された二次電子をDelay Lineアノードで受け取る仕組みである。図3のようにx方向とy方向にジグザグに走るワイヤーから構成され、それぞれの両端から得られる信号から位置を割り出すものである。 $x1$ と $x2$ の時間差が検出位置 (x) に、 $y1$ と $y2$ の時間差が検出位置 (y) に比例することを利用して検出位置が導出され、検出時間 t は4本の信号の平均から得られる。 C を比例定数として、次のようになる。

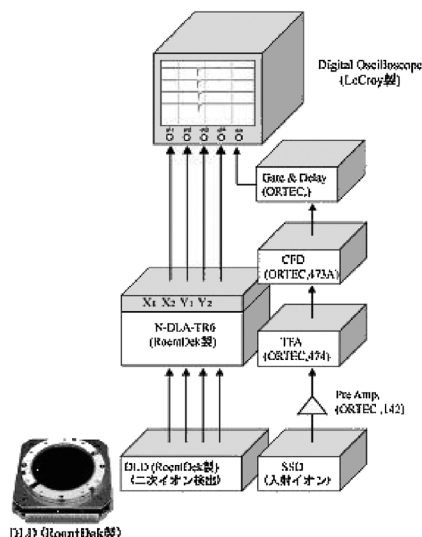


図5 二次元 DLD とデジタルオシロスコープによる同時測定回路図

$$x = C(x1 - x2)$$

$$y = C(y1 - y2)$$

$$t = (x1 + x2 + y1 + y2) / 4$$

本研究の場合、1 mm の位置の違いが 0.73 ns の時間差に対応する。このことから DLD は単に位置情報が得られるだけでなく 1 ns 以下の時間精度で高速現象も知ることができるため様々な方面で使用されている。

図5のように、DLD からの信号処理としては N-DLA-TR6 (RoentDek 社製) に 4 本の信号を通して増幅し CFD (constant fraction discriminator) を通して出力される信号をデジタルオシロスコープ (WavePro7000, LeCroy 社製) で波形保存する。このとき SSD から入射イオンの検出信号をトリガーとしてその波形も同時に取り込み、event 毎に入射イオンと分解イオン片の同時測定を行っている。

図4の質量分布スペクトルの飛行時間は DLD の検出時間 t とトリガー信号の時間差に対応している。次に一回の衝突において二つの分解イオン片が検出された場合の質量相関を図6に示す。横軸 (TOF_1) は最初に検出されたイオン片の飛行時間、縦軸 (TOF_2) は二個目のイオン片の飛行時間である。このような二次元マップから CO 分子のイオン対解離過程の相関を正確に読み取ることができる。例えば $(CO)^{3+}$ のイオン対解離は $C^{2+} + O^+$ と $C^+ + O^{2+}$ の二通り考えられるが、前者の方が強度 (図では濃淡に対応) が大きいことが解る。このことは炭素イオンに比べ酸素イオンの方が電子の結合エネルギーが大きいことから理解できる。図6の右上に見える島、 $(CO)^{2+} \rightarrow C^+ +$

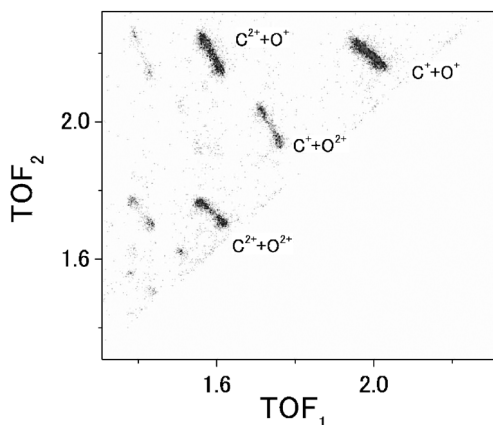


図6 分解イオン片の質量相関スペクトル (6 MeV $O^{4+} + CO$)

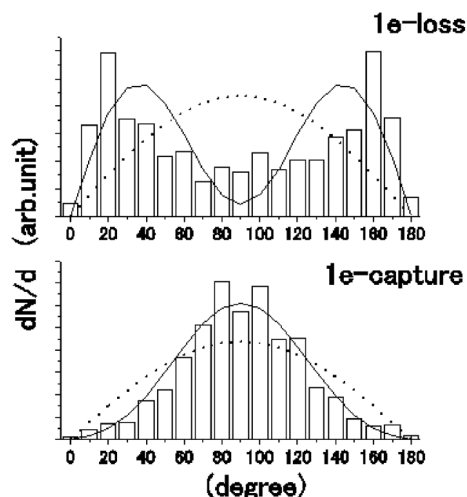


図7 $(CO)^{3+} \rightarrow C^{2+} + O^+$ の分解における分子配向依存

O^+ のように相関図の傾きは 45 度であるが、これは、 C^+ と O^+ のイオンは反対向きの運動量ベクトルを持って分解することを意味し、運動量保存則に従っていることが解る。

次に高速現象測定の一例として、衝突時における分子の向きについての実験結果を述べる。これは、高速イオン衝突では分子の回転周期 ($\sim ns$) に比べて充分早く分解が起こるため、衝突時の分子配向を保ったままの状態を分解することを利用して、従って分解イオン片の運動量ベクトルの方向は衝突時の分子軸と一致している。分解イオン片の運動量ベクトルは検出位置と検出時間を解析することによって決定される。図7に三重電離状態からの分解過程、 $(CO)^{3+} \rightarrow C^{2+} + O^+$ 、での分子軸と入射イオンのなす角 θ の分布を示す³⁾。上図は 1 電子損失 (入射イオンの電離 $O^{4+} \rightarrow O^{5+}$)、下図は 1 電子捕獲 ($O^{4+} \rightarrow O^{3+}$) 過程を表す。

1 電子捕獲の場合は $\theta = 90$ 度を中心とするほぼ $\sin \theta$ (点線) の分布を示し, 分子配向はほぼランダムな分布であることを意味している. これに対して 1 電子損失過程では, 20 度と 160 度をピークとするダブルピーク構造を示し, 分子軸がビーム軸と平行な場合に入射イオンの電離と同時に 3 重電離が起こっていることが解る. 中性の標的粒子による高速イオン (O^{4+}) の電離は容易に予想されるように, 遠い衝突では起こらず標的粒子の内部を通過するような場合に限定されると考えてよい. 更に, ビーム軸と平行ということは入射イオンが炭素と酸素の 2 原子と相互作用し得ることを意味しており, 遠い衝突でも起こり得る電子捕獲過程とは本質的に異なることを示唆している. このように, DLD と高速デジタルオシロスコープの組み合わせにより高速現象の測定, 例えば上記した分解イオン片運動量画像観測などをはじめイオン-分子反応過程の様々な詳細が明らかになると期待できる.

2.3 液体標的実験

上記したようなイオン衝突実験で使用される粒子検出器が正常に動作するためには高真空が必要となるため, これまでの殆どの実験では気体か固体標的が用いられ, 液体を対象とした研究は殆ど無かったと言って過言ではない. これは液体の蒸気圧が高く (水は 20 度で 25 Torr) 真空実験を行うことが困難となることが最大の理由である. しかしながら, 例えば生体細胞の約 80% は水であることから解るように, 液体に対する衝突基礎データの必要性は粒子線治療分野に限らず高まっており当該分野の大きな課題の一つになっている. 我々のグループでは, 液体に数十気圧の圧力をかけ, 数十 μm 径の噴出孔から真空中に押し出す方法 (液体分子線法) を導入することにより, 液体のままの状態の標的を真空中に作ることに成功し, 液体標的を対象としたビーム衝突研究を立ち上げ, 液体物質との衝突相互作用の解明に取り組んでいる. 特に, 真空環境でなければ行うことが困難な二次電子や二次イオンの検出および入射イオンに対する液体物質の阻止能測定を中心とした研究を行っている. ここではその測定法について述べる^{4,5)}.

図 8 は衝突チャンバー内部の写真を示す. 液体分子線はジェット状で真空中に噴出させるもので, 送液ポンプは液体クロマトグラフ装置で 사용되는ものを使い約 30 気圧, 流量 0.3~0.8 ml/min で押し出している. 噴出孔は 20~50 μm の径のものでインクジェット用のものを使用している. チャンバー内の真空を保つために液体ジェットはバケツ状の液体窒素トラップで受けて直ちに凍らせている. 標的サイズが微小な

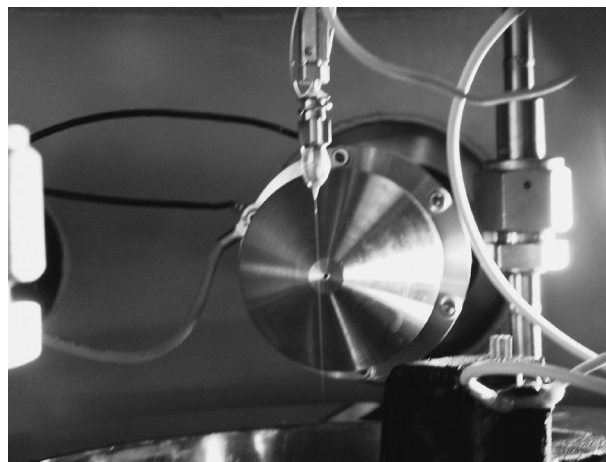


図 8 液体分子線真空チャンバー

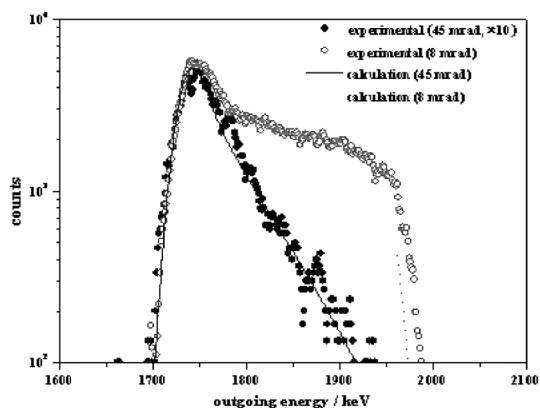


図 9 エタノール液体を透過した 2 MeV H^+ ビームのエネルギースペクトル

め入射イオンビームのサイズもそれに合わせて小さく整形することが重要で, 1 μm の精度で制御できる二次元スリット 2 個を約 1 m の間隔でビームラインに設置している. 液体透過後のイオンは下流の SSD でエネルギー検出され, エネルギー損失量を決定している. 写真の真ん中奥に見えるのは二次イオン測定用の飛行時間分光器で中心の 1 mm サイズの孔から二次イオンを引き込む構造になっている (写真は引き出し用の電極 2 枚をはずした状態). 実験時のチャンバー内の真空度は 10^{-4} Torr 程度であり測定には十分に耐えられる真空度である.

結果の一例として, エタノール分子線 (20 μm 径) を透過した 2.0 MeV H^+ ビームのエネルギースペクトルを図 9 に示す. 測定は散乱角度 8 mrad と 45 mrad で行ったものである. ジェット標的の断面は直径 20 μm の円形であり, 入射ビームのサイズはこれより大きいため H^+ ビームの液体中での通過距離は

ゼロ（液体表面）から最大値（液体の中心部透過）まで分布する．そのためエネルギー損失量は最大値まで広く分布することになる．図の場合，1.75 MeV のピークが中心部を透過したビームに対応する．散乱角にも大きく依存し，大角散乱では表面散乱の寄与が激減していることが解る．このような測定スペクトルに対してシミュレーション計算で再現性を試みることで，液体の阻止能を導出することができる⁵⁾．また，噴出孔から出た液柱の径はビームが当たる位置では不明であるが，この液柱径もシミュレーションにより求めることができるという利点がある．計算では液体内部でのビームの多重散乱を考慮した逐次計算を行っている．計算スペクトルを実線と点線で表しているが，実験値をほぼ正確に再現していることが解る．この結果では，液柱径は $17.3 \mu\text{m}$ となり噴出孔 $20 \mu\text{m}$ よりも小さい値になっている．また，液体エタノールの H^+ に対する阻止能は簡便なデータベースプログラムコード SRIM2003⁶⁾ の推奨値よりも約 10% 大きいことも解った．なお，これらシミュレーション再現法により得られるデータの信頼性については現在検討中である．

液体分子線法による液体標的に対する実験の概略を述べたが，新規な実験の可能性の一つを紹介する．噴出孔から真空中に出る液体ジェットは気化熱を奪われるために液体温度は孔からの距離と共に急激に減少することが解っている．言い換えれば孔の近くでは液体のままであるが，それより下の位置では氷に，更に下では気相に変化している可能性がある．従ってイオンビームの照射位置を変えることで相の違う標的を同時に研究対象とすることができる，というものである．いずれにしても，これまで例の無かった液体標的に対する実験方法が確立されたことで今後の物性研究の有力な一手法として今後の発展を期している．

2.4 陽電子消滅法による材料照射効果の同時観察

MeV エネルギーのイオンビームは照射材料科学における照射損傷の基礎研究に古くから利用されてきた．ここでは，材料照射研究として筆者らが最近取り組んでいる陽電子をプローブとした「ビーム照射下欠陥挙動のその場計測」について紹介する．

材料照射に関するこれまでの研究において，損傷を引き起こす trigger は弾き出し衝突による格子欠陥（空孔と格子間原子）の生成であり，その欠陥の拡散や集積等によって欠陥が成長し安定化することで損傷の最終状態が決まることが解っている．このような欠陥挙動の大まかな道筋は解明されているが，依然として未解決な課題は照射下における欠陥成長過程の解明である．これは，例えば，原子炉・核融合炉材料や宇

宙材料など照射環境下で用いられる材料の開発において重要になる．欠陥成長は欠陥濃度や欠陥周辺の格子構造に依存するため，照射環境下のようなそれらが時々刻々と変化する状況では非常に複雑になる．このような複合的過程が重畳する照射環境下の材料物性変化を調べるには，照射環境下に置かれた状態で材料を“その場観察する”ことが不可欠となる．照射欠陥を調べる方法には様々あるが，その場観察が最も精力的に行われているのは電子顕微鏡観察法である⁷⁾．ここで紹介する研究では atomic size の欠陥観察を目的とし，その観察の有力な手段となる陽電子消滅法を選択している．陽電子は，それが持つ正の電荷や物質中での拡散特性のため，原子空乏を自己探査する特長がある．物質中での陽電子は原子空乏に捉えられ，その周辺の電子と対消滅して消滅 γ 線を放出する．消滅 γ 線の詳細なエネルギー分析によって消滅相手の電子の運動量の情報が得られ，また消滅場所での電子密度に依存した陽電子消滅寿命を調べることで，原子空乏の種類（原子空孔，ボイドなど），その大きさや密度などに関する情報が得られる．このように，陽電子は極微欠陥をプローブするのに非常に優れた性質を持つ．以上に述べた陽電子消滅法と MeV イオンビーム照射装置を組み合わせることで，照射中の微視的欠陥の観察が可能になる．

その場観察を行う際に注意を払う点として，非接触法で探査することが挙げられる．陽電子を用いた非接触探査法には，陽電子ビーム法があるが，その装置の大きさ，陽電子源の強度等から考えると簡便さに欠ける問題点がある．この問題を解決するために，最近アバランシェフォトダイオードを用いた $\beta^+ - \gamma$ 計測による陽電子寿命測定法が開発された⁸⁾．この方法の装置は非常にコンパクトであり，装置の構成も単純で 1 MBq 程度の比較的弱い陽電子密封線源（代表的には， ^{22}Na や ^{68}Ge など）と透過型のアバランシェフォトダイオード（フォトダイオードの厚みは $100 \sim 150 \mu\text{m}$ 程度）から成る．陽電子寿命計測の構成は図 10 のように，線源から出た陽電子をアバランシェフォトダイオードに透過させ，透過した陽電子が試料内部で消滅した際に放出される消滅 γ 線をシンチレータで検出し，フォトダイオード通過時を起点として消滅 γ 線が検出されるまでの時間を計測することで陽電子寿命計測を行うものである．フォトダイオードを調べたい試料に接触することなく設置できるため，非接触計測が実現される．本研究の装置では，図 10 のように各パーツを配置し，イオンビームで試料全体を均一に照射し，尚かつ，イオンビームがフォトダイオードに入

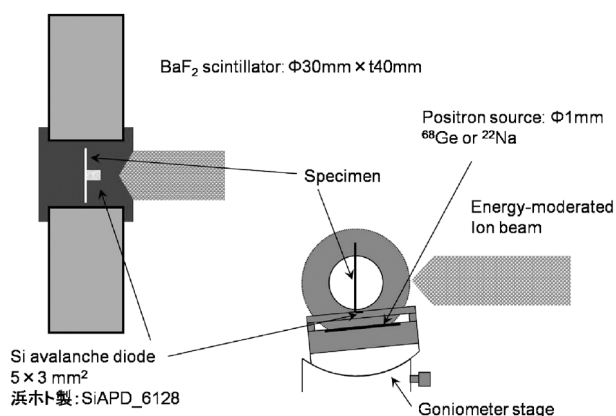


図10 MeV イオン照射下陽電子寿命計測の概念図

射しないように工夫している（例えば、試料を透過したイオンビームや後方散乱粒子がフォトダイオードに入射しないように考慮して各パーツの配置を決める）。この装置により、ビームを照射しながら試料中に生じた欠陥を調べることができる。

このような MeV イオンビーム照射下で陽電子消滅測定ができる装置は、国内外で殆どなく、茨城県東海村にある東京大学工学系研究科重照射施設（HIT）だけである。以下、この施設を利用した研究成果を簡単に紹介する。この施設では、低速陽電子ビーム装置を備えたイオン照射チェンバーがあり、陽電子消滅法のうち消滅 γ 線ドップラー拡がりのその場計測ができる。この消滅 γ 線ドップラー拡がり法は、陽電子と電子との対消滅において、消滅 γ 線のエネルギーが電子の持つ運動量に応じてドップラー拡がりを起こすことを利用し、原子空乏状態を探索する方法である。図11に、2.5 MeV の炭素イオン照射による Ni 箔材料の欠陥挙動を調べた結果を示す⁹⁾。ここで、陽電子ビームのエネルギーは 15 keV である。ビーム照射中、照射をしない条件（照射前後）において陽電子消滅 γ 線スペクトルのドップラー拡がり具合を示すパラメータ S (shape parameter と呼ぶ) を交互に約 10 分間毎に計測し、その変化を調べた結果、照射中に S パラメータの値が上昇することが解った。この結果は、照射中の欠陥量はその照射の前後に比べ多いことを意味しており、更なるその空孔の一部は照射中にのみ存在する transient な空孔であることを示している（照射を止めると消えてしまう）。この結果は照射欠陥の成長過程を考える際非常に重要であり、つまり、欠陥の発達過程（消滅、集結など）は欠陥濃度に依存するので、照射中に欠陥濃度が上昇しているのであれば、それを考慮した欠陥成長過程を考える必要があることを示唆

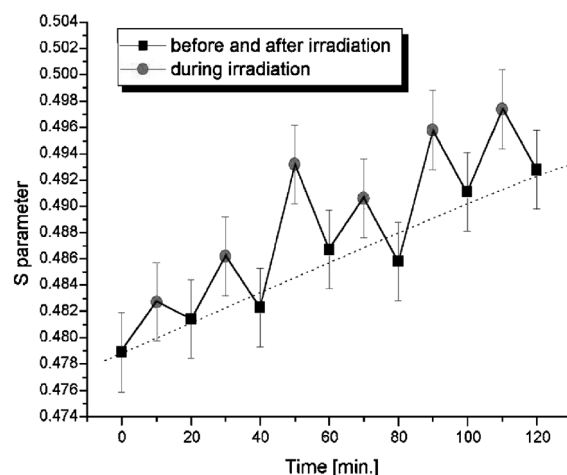


図11 ビーム照射中(●), 未照射時(■)の S パラメータの変化。点線は、残留空孔の蓄積量

している。

以上のように、照射環境下の材料を調べることで新しい知見が得られたが、このような観察は、例えばイオンビーム注入や材料改質における欠陥制御技術に役立つ基礎研究として位置づけられると考える。

3. 分析支援ビームライン

当加速器施設には、先に述べた 2 機の重イオン加速器に加え 2 MV 電子加速器 1 台がある。電子線加速器装置は、主として材料への強力 X 線照射や電子線照射による改質等に用いられている。重イオン加速器のうち 1.7 MV タンデトロン加速器には、粒子線励起 X 線分光法 (Particle-induced X-ray emission: PIXE) とラザフォード後方散乱分光法 (Rutherford backscattering Spectrometry: RBS) (channeling 法も含む) それぞれ専用の分析ビームラインが設置されており、学内共同利用のイオンビーム分析支援を約 20 年間行ってきた。この分析装置を用いて、大気環境科学分野に関連して PIXE 法によるエアロゾルや魚の耳石の元素分析、RBS 法による薄膜材料の組成や結晶性の評価などが行われ、多数の学術的成果を配信している。これに加えて最近、2.5 MV 重イオンバンデグラフ加速器に新たな専用分析装置を開発している。この装置の活用として、理工学分野のみならず考古学、環境科学、食品化学、医学・生物学、宇宙科学など幅広い分野との融合研究を目指している。以下に現在開発中のビーム分析装置を紹介する。

先に挙げた融合分野に活用するには、あらゆるタイプの試料（例えば、水分を含んだ試料（生物試料や細胞など）や分析チェンバーに収まらない大きさや不定



図12 PIXE 分析での不定形試料の配置 (試料は高杯)。

形の試料 (文化財試料など)) に対して分析できること、更に、大気圧下分析、すなわち、分析ビームを大気中に引き出す技術が必要になる。このような要請に応じた分析装置を簡単に紹介する。液体試料に対する PIXE 分析装置の場合は、分析イオンビームを電磁石によって水平から 30° 下向きに偏向させ、液体試料に照射する。試料を囲む容器内には 1 気圧の He ガスで満たし、ビームのエネルギーロスや特性 X 線の吸収を低減した雰囲気で行っている。壺や皿、額縁のような文化財試料に代表される不定形試料に対する PIXE 分析方法を図 12 に示す。これを用いた文化財試料の分析について一つ紹介する。図 13 の試料は石釧 (いしくしろ) と呼ばれる腕輪の一種で (作られたのは古墳時代前期 (4 世紀)、材質は軟質の碧玉で、京都南部ないし奈良北部の大型古墳から出土したと言われている)、その表面には、所々に赤色顔料が付着した部分がある。その赤色部分を PIXE 分析すると硫化水銀であることが解った。つまり、辰砂 (しんしゃ) という鉱物の顔料が付着していた。今回の試料は碧玉という貴重素材を用いた腕輪であり、あえて赤色顔料を塗布する必要はない。付着していた顔料は、それが置かれていた環境すなわち古墳の内部に塗られた朱に起源すると考えられ、貴重な水銀朱で彩られた埋葬施設をもっていたことがほぼ確実となったという結果である。この分析では、分析チェンバーに

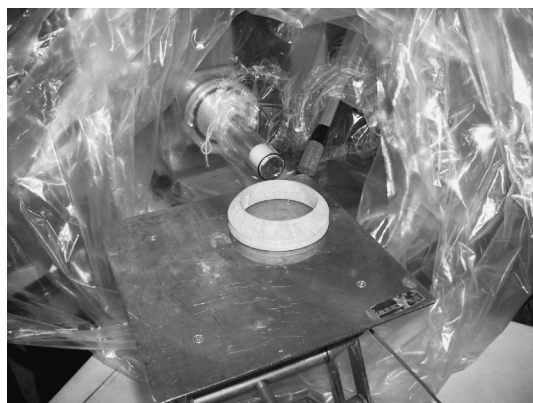


図13 石釧 (いしくしろ) の PIXE 分析

収まらない不定形の試料であった事と、ある特定の領域部分 (ここでは赤塗り部分) の分析をしたいという要望があり、それに応じた試料設置部を製作した。

文化財試料には線状の模様が描かれているものや表面に凸凹があるものなどがあり、そのような試料の場合、局所部のみを分析したいという要望がある。これを行うには、大気圧下のマイクロイオンビーム照射技術が必要となる。加速器からのイオンビームの大気取り出しは、差動排気系のビームラインを用意し、薄膜から成る真空窓を通じてビームを取り出す方法が一般的である。真空窓材には、カプトン、マイラー、窒化シリコン膜などが主として用いられる。これらの固体から成る窓材を用いると、それを透過したイオンビームはその膜の厚さに応じて多重散乱により空間的な広がりを持つため、ビームスポットサイズの局所性が失われる要因となる。この窓材の選択は最近のマイクロビーム発生技術を確立する上で重要になっている。最近、窓材を使わずにビームを大気に取り出す方法が開発された¹⁰⁾。この方法はテーパーを付けたガラスキャピラリーを用いるもので、ここでのポイントはコンダクタンスが非常に悪いテーパー状の管をビーム取り出し口に用いることで真空窓無しでビームを大気中に取り出すことが可能になることである。図 14 に、ガラスキャピラリーの実物を示す。細くなった部分の先端は μm オーダーの穴が開いている。このキャピラリーを図 15 のように取り付けただのものを用いると大気圧下マイクロイオンビームが発生できる (キャピラリー先端直後でキャピラリー出口径とほぼ同じビームスポットが得られる)。この装置を使って、MeV エネルギー領域のプロトンや He ビームの大気取り出しに成功している。今後この方法が、高エネルギー重イオンにも適応できると、ビーム分析のみならず物質照射研究に関連した応用研究が可能になると思われる。分

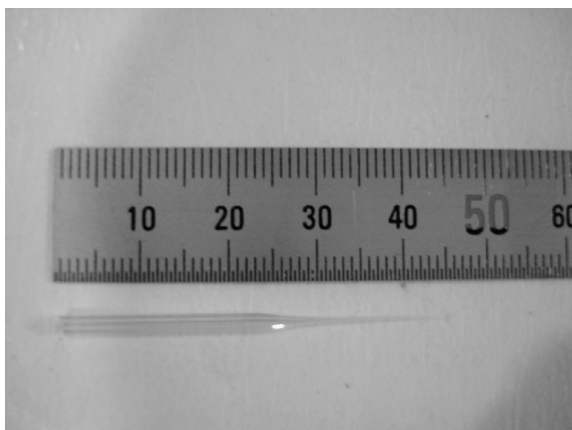


図14 ガラスキャピラリーの実物．先端出口径は10 μm ，ビーム入射側の径は0.8 mm．

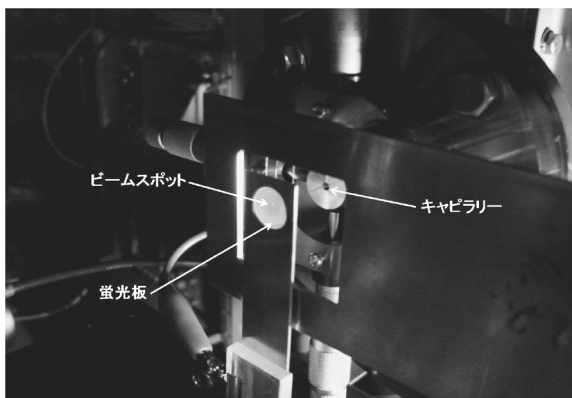


図15 ガラスキャピラリーによるビームの大気取り出しと確認用の蛍光板 (ZnS)．

析 software として、PIXE 分析では Gupix, RBS 分析は RBX を用いている．この種の解析ソフトは世界的に多数あり、国際原子力機構 (IAEA) が比較評価しているのを参照されたい^{11,12)}．

4. おわりに

本誌が扱う加速器科学の分野では、加速器そのもの

に関する装置開発・技術開発が中心的な研究テーマと思われるが、本稿ではビーム利用の立場から当加速器施設で進行中の研究内容を概述した．MeV エネルギー領域のイオンビームは衝突相互作用の断面積が最も大きいことから広い分野で有力な研究手段となっており、今後さらに重要視されるものと思われる．ユーザーとしてはこのエネルギー領域でより一層高機性能性が加わった conventional 加速器を切望している．

当加速器施設の維持運営にあたっては原子核工学専攻・量子理工学研究実験センターをはじめとする学内諸専攻の関連教職員のご協力ご援助を頂いており、ここに感謝の意を表します．大気圧 PIXE 分析を紹介するにあたり、貴重な考古学試料をご提供いただきました奈良国立博物館の内藤栄博士、吉澤悟氏に感謝いたします．

参考文献

- 1) 伊藤秋男, 加速器, **1**, p. 295 (2004).
- 2) Badia Boudaiffa, *et al.*, *Science*, **287**, p. 1658 (2000).
- 3) T. Mizuno, T. Majima, H. Tsuchida, Y. Nakai and A. Itoh, *J. Phys. Conf. Ser.*, **58**, p. 173 (2007).
- 4) A. Itoh, M. Kaneda, S. Satoh, K. Ishii and H. Tsuchida, *Nucl. Instr. and Meth. B*, **245**, p. 76 (2006).
- 5) M. Kaneda, *et al.*, *Nucl. Instr. and Meth. B*, **256**, p. 97 (2007).
- 6) J. F. Ziegler, SRIM2003, available from (<http://www.srim.org>).
- 7) R. C. Birtcher *et al.*, *J. Mater. Res.*, **20**, p. 1655 (2005).
- 8) P. Chalermkarnnon *et al.*, *Radioisotopes*, **50**, p. 576 (2001).
- 9) H. Tsuchida, *et al.*, *J. Phys. Condens. Matter*, **19**, p. 136205 (2007).
- 10) T. Nebiki, *et al.*, *J. Vacuum Sci. Tech.*, **21**, p. 1671 (2003).
- 11) N. P. Barradas, *et al.*, *Nucl. Instr. and Meth. B*, **262**, p. 281 (2007).
- 12) M. Blaauw *et al.*, *Nucl. Instr. and Meth. B*, **189**, p. 113 (2002).