

STATUS OF 1.7MV TANDEM ACCELERATOR, THE UNIVERSITY OF TOKYO

Seiji Ito, Hiroyuki Matsuzaki, Akira Morita, Chuichiro Nakano, Yoko Sunohara Tsuchiya, Takeyasu Yamagata
 Department of Nuclear Engineering and Management School of Engineering, the University of Tokyo
 7-3-1 Hongo, Bunkyo-ku, Tokyo, 113-8656

Abstract

The 1.7MV tandem accelerator RAPID (Rutherford Backscattering Spectroscopic Analyzer with Particle Induced X-ray Emission and Ion Implantation Devices), the University of Tokyo is a beam analysis and ion implantation system. Since its installed in 1994, total accelerator operation time by now amounts 11,882 hours, RAPID has been used for various application studies and educational studies. Several innovative detection systems and irradiation apparatuses have been developed for the specific purpose for research projects. A recent development, as an example, is a special irradiation chamber system which enables controlled low level irradiation (less than 10^3 ions/cm²s) in which back scattering ions are utilized. On the other hand educational programs were also designed and performed. PIXE analysis of environmental samples, pond sediments and atmospheric SPM (Suspended Particulate Matter) is performed since 2007. A specific chamber for low energy NRA has been developed and tested for the other educational program which will newly start at the fall of 2011

東京大学 1.7MV タンデム型加速器(RAPID)の現状

1. はじめに

東京大学にある 1.7MV タンデム型加速器(RAPID)は、原子力の教育・研究の総合的な推進を目的として設立された原子力研究総合センター(1972年に創設、初代センター長 故野上耀三理学部教授)の学内共同利用設備として 1994年に導入され、1995年より共同利用を開始した。2004年4月には発足した国立大学法人化、及び翌2005年には改組があり、工学系研究科、原子力国際専攻・加速器管理部の所属になる。この改組以後、従来の研究技術開発に加えて学生の教育が本加速器の重要な使命となった。これらについて以下に報告する。

3系のビームラインのうち RBS ラインでは、2008年以降、ERDA, NRA 実験を開始した。また、イオン注入ラインでは後方散乱の原理を用いた微量照射実験を行い、さらに、2011年度秋から、原子力人材育成プログラムとして NRA 実験をイオン注入ラインで開始する。

表1に装置の仕様を示す。イオン種は、これまでに、デュオプラズマトロンイオン源では主に H, He スパッタ型イオン源では H をはじめとする元素から Pt, Au に至るまでの重元素、合計 24 種のイオンを引き出している。

表 1 装置の性能

2. 加速器の概要

加速器のシステム構成を図1に示す。構成は、イオン源部、加速部、分析電磁石及び3系のビームライン(RBS, PIXE, イオン注入)からなるオランダの HVEE 社製(4117HC型)装置である。加速方式はシェンケル型、発生電圧は 0.1~1.7MV である。イオン源は、固体試料用のスパッタ型と気体試料用のデュオプラズマトロン型イオン源からなる。

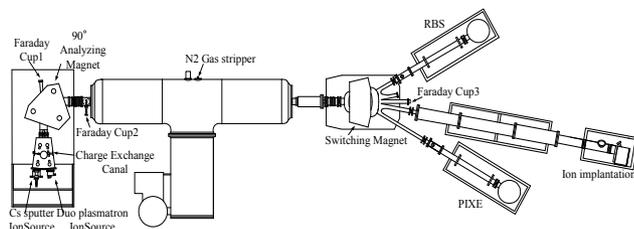


図 1 1.7 MV タンデム型加速器(RAPID)の構成

Negative ion Sources	
Cs sputtering Type	
Extraction Voltage	20kV
Duoplasmatron Type	
Extraction Voltage	20kV
Top Accelerator	
Available voltage range	0.1-1.7MV
Stability	< 80 Vrms
Ripple	< 30 Vrms
Produced beam current	
H ⁺	25 μA (3.4 MeV)
He ²⁺	2 μA (5.1 MeV)
Si ²⁺	140μA (5.1 MeV)
Au ²⁺	60 μA (5.1 MeV)
Cu ²⁺	20 μA (5.1MeV)
N ²⁺	19μA (5.1 MeV)

3. 稼働・利用状況

3.1 年度別稼働状況

図 2 に共同利用開始から現在までの稼働状況を示す。2002 年の制御用コンピュータ電源の故障、及び 2004 年の国立大学法人化及び翌年の組織改組時期

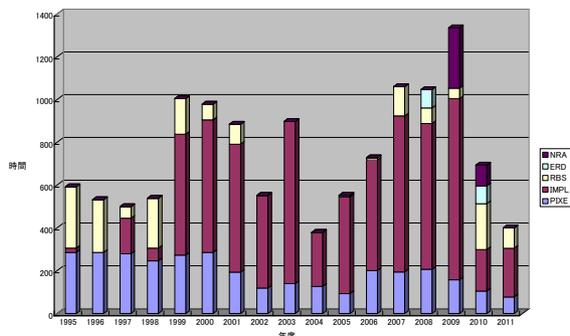


図 2 年度別稼働状況 (2011 年 7 月迄)

には、一時減少したが、センター発足当初の「サービスの推進」に立ち返り、その後徐々に回復し、2008 年度には NRA 実験を開始して年間過去最高 (1316 時間) となった。2010 年度にはオペレーション中のトラブルにより制御用コンピュータが故障、動作不能になり、HVEE 社に送り修理を行ったが、2011 年 7 月迄の総時間は 11,882 時間である。

ビームラインと実験の内容については、2008 年度から後方散乱法による微量照射を行ったり、2011 年からイオン注入ラインでも NRA 実験をおこなったりして必ずしも対応してはなくなっている。

3.2 研究分野別利用状況

図 3 に分野別に示す。共同利用開始当初から材料工学分野での利用が過半数を超えている。最近では、2008 年度から薄膜試料中の軽元素の核反応分析 (NRA) を開始したこと、薄膜試料内の軽元素の定量や組成を分析する実験が多く行われている。

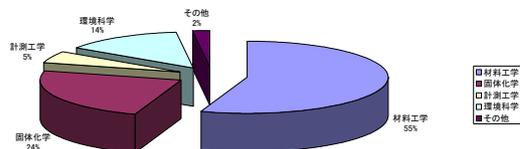


図 3 利用研究分野 (2009 年 4 月—2011 年 7 月)

3.3 東日本大震災の影響

本加速器は、3 月 11 日以降の震災では、ビームラインのターボポンプが 4 月 16 日の余震で故障したのみであった。しかし、原子力専攻の 1MV タンデム型加速器が大きな損傷を受けたため、本 1.7MV 加速器を用いて 2011 年 6 月から Zr-Nb, Fe 及び Fe の合金の照射実験と圧力容器鋼の照射脆化の研究実験を代行することになった。

4. アプリケーション

本加速器では、一方では、研究を目的とし、これに対応するための装置の改造や開発を行っている。最近の研究要請に応えるため、任意のビーム分布を可能にする後方散乱を用いて、必要なイオン照射を 10^3 (ions/cm²) 台で可能な微量イオン注入システムの開発がある。他方では、原子力研究総合センターから工学系原子力国際専攻への組織移行に伴い、学生の教育に力点が置かれるようになり、加速器でなければ出来ない高感度な分析手法を教育の分野で発揮できる学生実習を行っている。ひとつは高感度で多元素の同時計測が可能な粒子線励起 X 線分析 (PIXE) 法を用いた学生実習がある。また、薄膜内物質の深さ分布を高分解能で得られる核共鳴反応分析実験で、これは、文部科学省原子力人材育成プログラムのひとつとして核共鳴から定量に至る迄のプロセスの理解を深めることを目指して 2011 年の後期から実施する予定である。

4.1 技術開発—微量イオン照射システム

2008 年度より、高エネルギー中性子線量測定用、固体飛跡検出器 (CR-39) の高エネルギー中性子によって生じる Proton Recoil を模擬したプロトンの微量照射要望に応えるため、イオン注入ビームラインに微量イオン照射システムを開発した。このシステムにおいて、同時に照射量をモニターできるように工夫した。これまでは、イオン注入ビームラインのイオン照射率の下限は 6×10^7 (ions/cm²·s) 台であった。しかし、本システムの開発により、5 桁以上イオン照射率を下げ、 10^4 (ions/cm²) 台のイオン注入量を安定して得ることができるようになった。図 4 に微量イオン照射システム構成を示す。微量イオン照射率は、イオンビームを金属薄膜で 45° 方向に散乱させて得ている。ドーナツ状被照射面外径は 45 (mm)、散乱膜照射位置から 160 (mm) の位置にある。この照射面中央に内径 8 (mm) の既知面積の開口スリットを設け、この開口スリットを通過するイオンを SSB 検出器で全数検出するように配置し、単位面積当たりの照射率をモニター測定できるようにした。照射面の散乱膜入射イオンビーム照射位置からの立体角は 0.063 (sr) であり、被照射面、開口ス

リットいずれも同一面で、均一と考えることができる。被照射面はアルミ製で電位はチェンバーと同一電位にしてある。背後の検出器との間にサプレッサー電極を配置し検出器からの二次電子を抑制している。

同一方向に試料照射面とモニター検出系を配置しエネルギーと微量照射率を同時測定する構成にした。

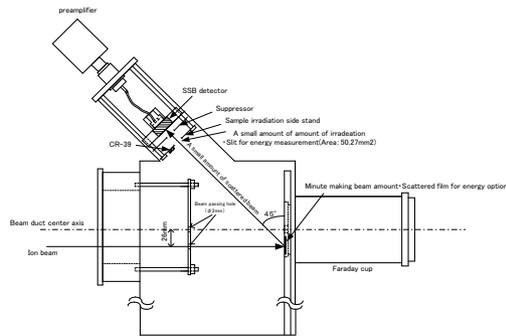


図4 微量照射システム構成図。

測定に用いている SSB 検出器は Si 半導体の固体電離箱の一種である。入射荷電粒子エネルギー3.62 eV (at 300K) あたり 1 イオン電子対 ($1.602 \times 10^{-19} \text{C}$) を生成する。従ってエネルギーに比例する電荷量のパルスを取り出すことができる。微小照射線量の上限は計数損失が無視可能な計数率までになる。下限は統計精度をどの程度まで許容するかによって決まることになる。

図5に各エネルギー注入 H^+ 粒子の表面からの深さとエネルギー損失の軌跡図, 図6に本システムを固体飛跡検出器 (CR39) 実験に適用した観測結果を示す。このシステムの開発は、いろいろな応用実験

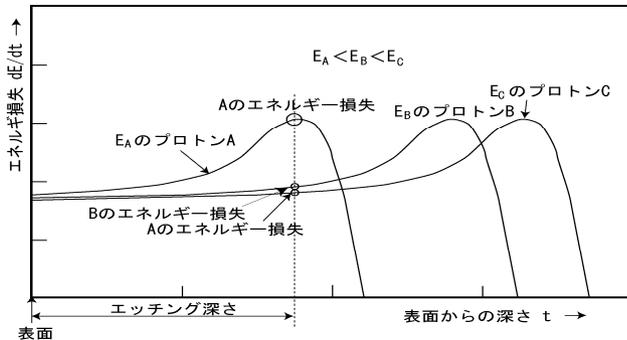
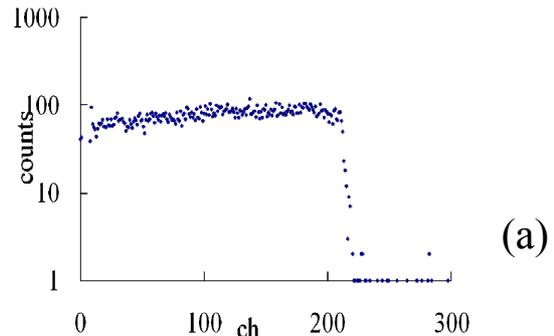


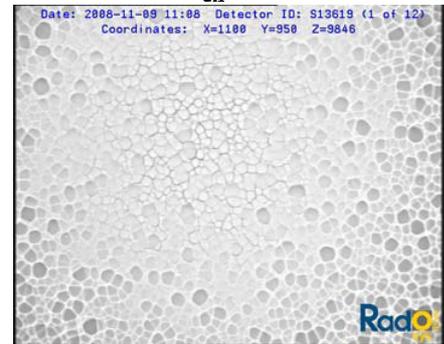
図5 各エネルギー注入 H^+ 粒子の表面からの深さとエネルギー損失の軌跡

の可能性を含んでいる。たとえば、散乱膜の原子の種類と組成をかえることにより、散乱粒子のエネルギー特性(分布)をかえることができ汎用性のあるシステムになっている。すなわち、プロトン (H^+) 以外のイオンを散乱イオンとして用いることができ、散乱膜の組成構成、厚み等を変えれば、ゼロから最大散乱エネルギーまでの任意のエネルギースペクト

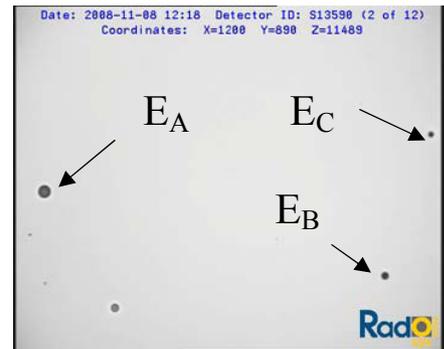
ルを有する散乱イオンを得ることができる。



(a)



(b)



(c)

図6 (a) Al 膜 ($12.5 \mu\text{m}$) のエネルギースペクトラム(1.5MeV)
(b) CR-39 にプロトンを直接照射した時の観測結果
(c) 図4のエネルギースペクトラム照射時の観測結果 CR-39 にプロトンを直接照射した時の観測結果

4.2 教育への応用(基礎加速器分析実験)

2007 年度より工学部システム創成学科の環境・エネルギーシステムコース (E&E) 3 年生を対象とした環境分析の実験実習(基礎プロジェクト 1: 必修科目)を開始した。本学科・E&E のコース理念は「21 世紀に私達が直面している最も大きな問題のひとつ」である「環境・エネルギー問題」

を「先進的な科学技術の手法を駆使してこれらの課題を解決」できる人材を育成することである。

実習は、担当教員と各々の技術職員が持つ専門技術を活かした役割分担を行い実施した。これらの実習を通して学生たちが広い視野で環境問題を考えていく契機のひとつになることを期待して行った。課題の「基礎加速器分析実験」では環境試料の微量多元素分析手法の習得のため、2007年度からは三四郎池、など大学周辺の底質、2009年度と2011年度は自主製作した可搬型大気集塵器を用いて地上面からの影響の少ないタンデム加速器研究棟屋上にて大気浮遊粒子状物質 (Suspended Particulate Matter ; SPM) を集塵し、PIXE分析を行った。

大気浮遊粒子状物質の測定結果の一例を図7に示す。これまで採取した三四郎池との上野不忍池の底質からは、Al, Si, K, S, Ca, Ti, Cr, Mn, Fe, Cu, Znなどが観測された、大気浮遊粒子状物質の測定でもほぼ同様の元素が観測され、その他に海塩粒子であるNaとClが観測されている。また、人為起源として知られているCr, Znなども観測された。

本実習での学生の反応は、微量な試料を測る為

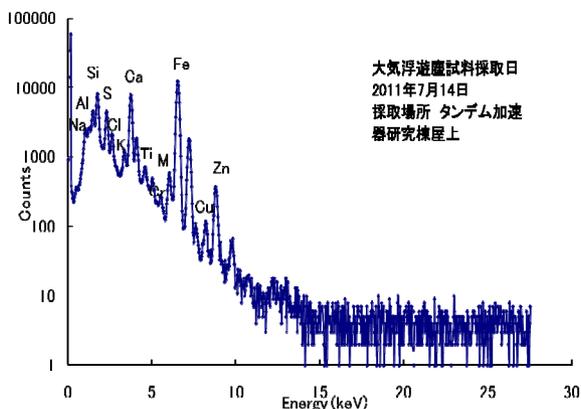


図7 測定結果の一例

に大きな加速器を用いて測定と元素分析を行うことに新鮮な興味を持ち PIXE法による環境分析を実感することができたという感想が多く寄せられている。この演習を通じて、E&Eコースの教育理念にある‘環境・エネルギー問題’を「先進的な科学技術の手法を駆使してこれらの課題を解決」できる人材の育成という理念の実現のため、大学における先端装置・技術に触れさせて行う本実習の意義は高いといえよう。

4.3 教育への応用(原子力人材育成プログラム)

原子力国際専攻では、大学院生が国際舞台で活躍できる原子力グローバルリーダーに求められる能力を涵養するために、新しい教育プログラムの確立を目的とし、その一環として、加速器を用いた学際の実習基盤の構築を行う。具体的には、イオンビームを用いて試料の核反応分析を行い、マイクロスケールで

の薄膜試料内の微量元素の分析、定量評価を体験させる実習を2011年度後期より行う。これを受けて本年3月に核反応分析実験システムをイオン注入ラインに構築した(図8に示す)。

薄膜試料中の弗素の定量の予備実験として、反応断面積が大きい $^{19}\text{F}(p, \alpha \gamma)^{16}\text{O}$ 共鳴核反応の γ 線をBG0($\text{Bi}_{12}\text{GeO}_{20}$)検出器($\phi 4$ インチ)を用いて測定した。

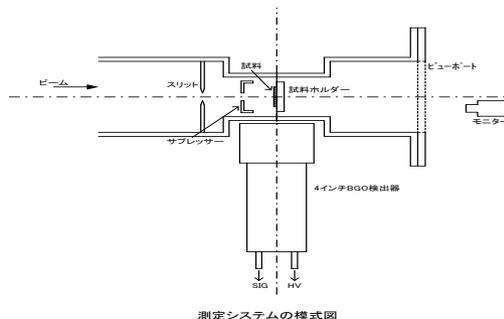


図8 NRA実験システムチャンバー

検出器は、チャンバー側面より凹型フランジを挿入することで立体角を大きくした。試料-検出器間距離 $\sim 80\text{mm}$ 、検出角度は 90° である。測定を行うにあたり、事前にプロトンビームにより標準試料(CeF_3)を用いて信号強度と加速電圧の関係の評価、エネルギー較正を行った。表2のデータに基づいて測定した結果を図9に示す。

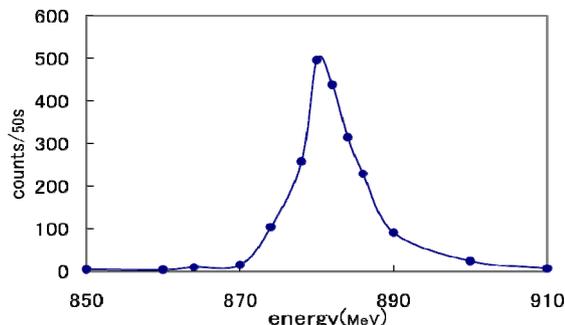


図9 フッ素の共鳴スペクトラム

表2 測定したフッ素の核共鳴反応断面積データ

Proton energy (keV)	核反応 Reaction	Gamma-ray energy (MeV)	Cross section (mb)
872	$\text{F}^{19}(p, \alpha \gamma)\text{O}^{16}$	7.12, 6.92, 6.13	540

5. おわりに

本加速器は導入してから17年が経過している。1995年に共同利用を開始してから東日本大震災を経た現在に至るまで、コンピュータ制御系等の多少トラブルはあったが多少の致命的なトラブルは生じていない。しかし、全学的な予算減少状況の中で、装置の経年劣化や設置場所に掛る費用の問題、技術者の高齢化等の大きな問題を抱えて、加速器の保守、維持が極めて困難になってきているのが現状である。