

話 題

イオンビーム多目的利用研究のための 筑波大学 6 MV タンデム型静電加速器

笹 公和*

The 6 MV Tandem Electrostatic Accelerator for Multipurpose Ion Beam Applications at the University of Tsukuba

Kimikazu SASA*

Abstract

A new horizontal-type 6 MV Pelletron tandem accelerator was designed and developed by the National Electrostatics Corp., USA in collaboration with the University of Tsukuba as part of the post-quake reconstruction project. The main accelerator (model 18SDH-2 Pelletron) is a dual acceleration electrostatic accelerator. The accelerator tank is 2.74 m in diameter and 10.5 m long. The generator operates reliably to terminal voltages as high as 6.5 MV. Stability is estimated to be better than 1 kV at a 6.0 MV terminal voltage. Maximum beam currents are predicted to be up to 3 μ A for proton and 50 μ A for heavy ions. It was installed at the University of Tsukuba in March 2014. We started routine experiments on ion beam applications by means of the new system since March 2016. The 6 MV Pelletron tandem accelerator will be used for various ion-beam research projects, such as AMS, IBA, ion irradiation, and nuclear physics.

1. はじめに

筑波大学研究基盤総合センター応用加速器部門 (UTTAC) では、1975 年に国内最初のペレトロン型タンデムである 12UD ペレトロンタンデム加速器 (最大端子電圧 12 MV) を導入して、加速器の維持管理と共同研究の利用支援をおこなってきた。しかし、2011 年に発生した東日本大震災により、縦型の加速器本体やイオン源装置等の実験設備が損傷した¹⁾。使用不能となった 12UD ペレトロンタンデム加速器は 2012 年に廃止して、2016 年 3 月に廃止措置報告を原子力規制委員会へ提出している。この廃止措置は、平成 24 年施行の放射線障害防止法の改正後において、静電加速器では最初の廃止事例となった。

12UD ペレトロンタンデム加速器の更新加速器として、震災復興計画により開発整備をおこなった 6 MV タンデム型静電加速器は、国内では約 20 年振りの建設となる大型静電加速器である²⁾。

2016 年 1 月に放射線発生装置としての施設検査に合格して、2016 年 3 月より本格的な運用を開始している。加速器システムとして、5 台の負イオン源と 12 本のビームラインを有しており、イオンビームの多目的利用研究の新たな展開が期待される³⁾。稼働を開始した最新鋭の 6 MV タンデム型静電加速器の開発状況及びイオンビーム利用研究の展望について紹介する。

2. 6 MV タンデム型静電加速器の開発

2.1 加速器システムの全体設計

6 MV タンデム型静電加速器のシステム設計では、既存の 12UD ペレトロンタンデム加速器の施設 1 階をそのまま使用する形とした。更新する加速器は、耐震性を考慮して横置き型の 6 MV タンデム型静電加速器とした。2011 年 8 月初旬の第 3 次震災復興予算の申請に間に合わせる必要があり、加速器システムの設計は、震災から 5 か月の間でおこなった。図 1 に加速器システムの配

* 筑波大学研究基盤総合センター応用加速器部門
Tandem Accelerator Complex, Research Facility Center for Science and Technology, University of Tsukuba
(E-mail: ksasa@tac.tsukuba.ac.jp)

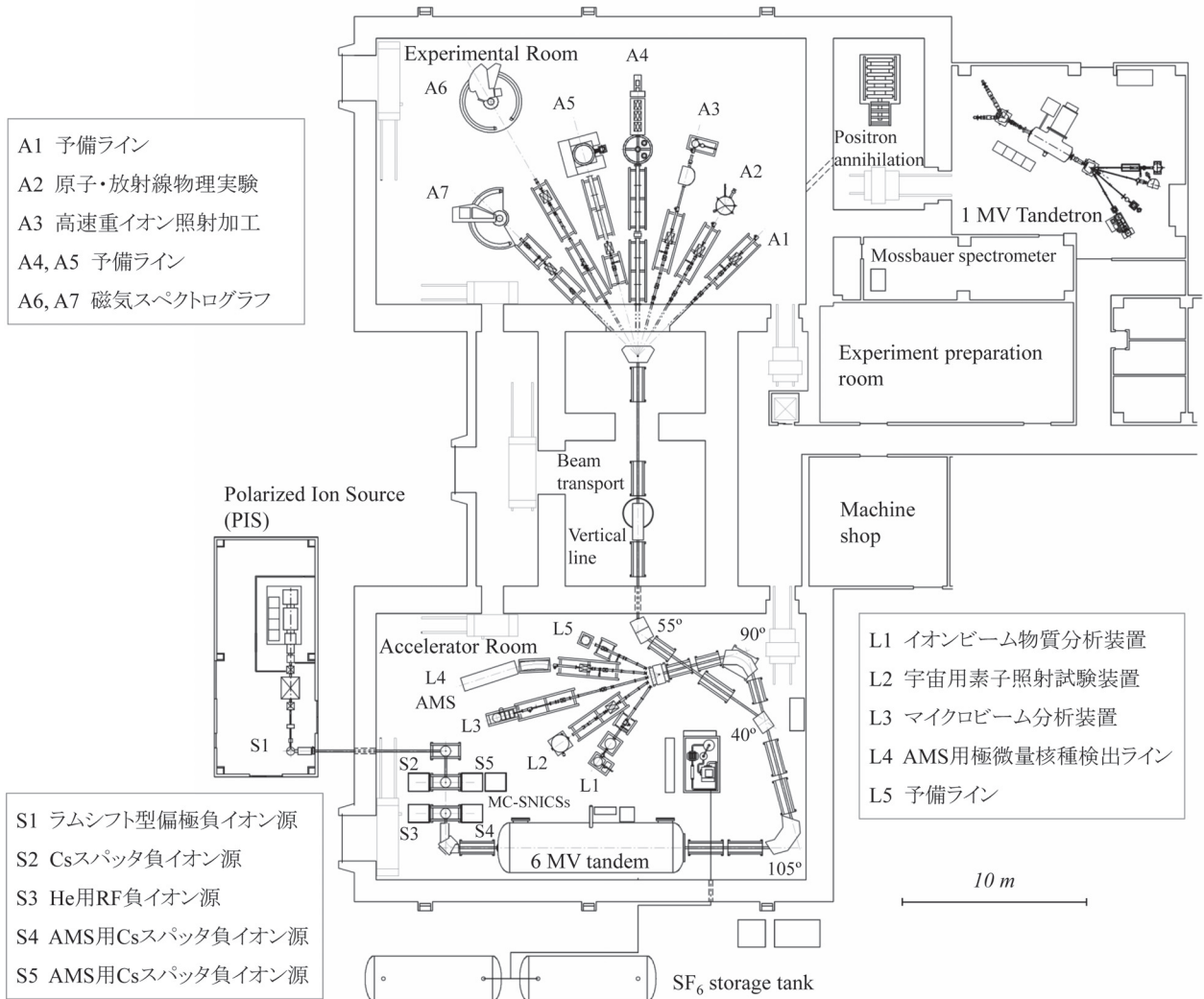


図1 筑波大学6 MV タンデム型静電加速器システムの配置図

置図を示す。施設1階には14.6 m × 23.6 mの実験室が2室あり、このうち1室の既存ビームラインを全て撤去して加速器室とし、4台のイオン源（図1：S2～S5）と加速器本体、5本のビームライン（図1：L1～L5）を新設した。施設9階において損壊したラムシフト型偏極負イオン源（図1：S1）は、偏極イオン源実験棟（12 m × 5 m）を新たに建設して移設した。残りの測定室については、既存実験装置の7本のビームライン（図1：A1～A7）の継続利用を図り、6 MV タンデム型静電加速器からのビーム輸送ラインを接続した。測定室間にある12UDペレトロンタンデム加速器用の90°分析電磁石（ME/q²=200 MeV amu）は、高精度な垂直ビーム輸送が可能であり、生物細胞照射実験用に残留させている。図2に加速器

室の全景写真を示す。震災復興計画では、既存実験装置を活用することが求められており、ビームライン高さを12UDペレトロンタンデム加速器と同じ1.78 mに統一している。

2.2 加速器本体

2011年から米国のNational Electrostatics Corp.⁴⁾と共同で6 MV タンデム型静電加速器（18SDH-2 Pelletron）の設計と開発をおこなった。これまでNational Electrostatics Corp.のペレトロン型加速器は、端子電圧6 MV以上ではユニット構造の加速器であった。今回、大型タンデム加速器として初めて、強化アクリルパネルで製作された支柱によりコンプレスト型加速管を一体で保持する形状の加速器を製作した。加速器タンクは、直径2.74 m、全長10.5 mの大きさであり、コン



図2 6 MV タンデム型静電加速器を設置した加速器室の全景写真

パクト化を実現している。ターミナル部を挟んで低エネルギー側と高エネルギー側にコンプレスト型加速管を各々 12 本組み込んだ形式となっており、最高到達電圧として 6.5 MV を達成している。通常運用での静電場による加速勾配は、最大で 1.7 MV/m に達する。

6 MV タンデム型静電加速器はバンデ・グラーフ型であり、ペレットチェーンを 2 本用いて電荷をターミナル部に運搬して正の高電圧を得ている。最大の電荷運搬量は、ペレットチェーン 2 本で $300 \mu\text{A}$ である。タンデム型静電加速器では、ターミナルの正の高電圧により、低エネルギー側では負イオンを加速する構造となっている。ターミナルに設置された荷電変換装置により正イオンに変換されて、2 段階加速をおこなう。荷電変換機構は、80 枚の荷電変換用フォイルユニットと Ar ガスストリッパ・チャンネルを併用している。ストリッパ・チャンネルは直径 10 mm、全長 950 mm であり、Ar ガスはターミナルに設置されたターボ分子ポンプ 2 台で回収・循環される。ターボ分子ポンプや電荷ピックアップ用の電源電力は、絶縁シャフトにより回転する発電機モーターから供給される。加速電圧の計測は、非接触型の回転発電電圧計 (GVM: Generating Volt Meter) を用いている。電圧制御は、GVM 制御とスリット電流負帰還制御の 2 方式を採用でき、 $\Delta V/V=10^{-4}$ 以

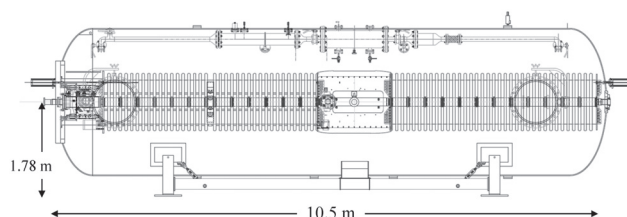


図3 加速器タンク (18SDH-2 Pelletron) の断面図

下の電圧安定性を得ている。

加速器本体は 2014 年 1 月に米国ウィスコンシン州の National Electrostatics Corp. において組み立てをおこない、2 週間の調整期間で 6 MV の昇圧試験に成功した。筑波大学には、2014 年 3 月に加速器本体を搬入設置した。また、2014 年 3 月から 9 月に掛けて建設作業が実施された。図 3 に開発をおこなった 6 MV タンデム型静電加速器の断面図を示す。支持脚には、耐震用ダンパーを取り付けている。また、図 4 に加速器内部の写真を示す。

2015 年 9 月に原子力規制委員会から承認された放射線発生装置の許可の条件は、最大加速電圧 6.5 MV、加速器使用時間は週 144 時間となっている。また、粒子最大エネルギー 91.0 MeV (原子番号 2, 質量数 3 以上)、粒子最大出力は $50.0 \mu\text{A}$ である。陽子及び重陽子線に関しては、最大エネルギーは 13.0 MeV、陽子線の最大出力

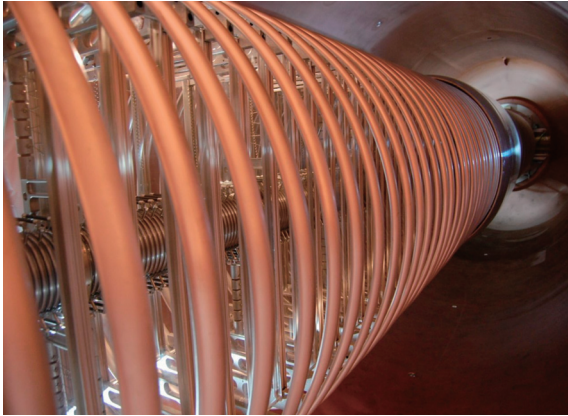


図4 加速器タンクの内部写真

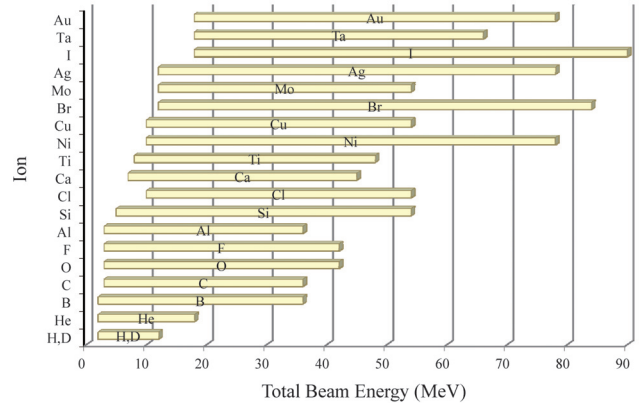


図5 6 MV タンデム型静電加速器によるイオン種の加速エネルギー範囲

表1 6 MV タンデム型静電加速器の性能表

| |
|---|
| • Model: 6 MV Pelletron Tandem (18SDH-2, National Electrostatics Corp., USA) |
| • Accelerator Tank Size: Length: 10.5 m Diameter: 2.74 m Line Height: 1.78 m Weight: 20,865 kg |
| • Terminal Voltage: 1.0-6.5 MV |
| • Voltage Ripple: $\leq 750 V_{p-p}$ at 6.0 MV |
| • Voltage Control: GVM & Slit Current Feedback System |
| • Maximum Beam Current: H: $3 \mu A$ Heavy ions: $\sim 50 \mu A$ |
| • Terminal Stripper: Gas (Ar or N ₂) Foil Unit (80 Foil Holders) |
| • Insulation Gas: SF ₆ (0.6 MPa) |
| • Beam Courses: 12 Lines and Vertical Transport Line |
| • Ion Sources: Cs Sputtering Negative Ion Sources NEC SNICS II NEC MC-SNICS NEC CO ₂ Gas Type MC-SNICS RF Ion Source (NEC Alphasross) Lamb-shift Polarized Negative Ion Source |
| • Mass Energy Product (ME/q ²): 15 MeV amu (LEBT) 176 MeV amu (HEBT) |

として $3.0 \mu A$, 重陽子線は $0.30 \mu A$ で使用許可を得ている。表1に6 MV タンデム型静電加速器システムの性能を示す。

加速器の加速電圧制御は 1 kV 単位で可能であり、毒性元素と希ガス (He 以外) を除いた負イオン及び負分子イオンの形成が可能な全ての元素が加速可能である。また、ラムシフト型偏極負イオン源 (PIS)⁵⁾ による偏極陽子と重陽子の加速も可能な設定となっている。図5に主な加速粒子のエネルギー範囲を示す。加速エネルギー範囲は、2 keV 分解能で陽子は 2.0 MeV から 13.0 MeV まで、ヨウ素イオン等では 91.0 MeV までとなっている。高度に制御されたイオンビームは、イオンビーム物質分析法や加速器質量分析法、宇宙用半導体素子のイオン照射実験などに適用可能である。

2.3 イオン源と低エネルギービーム輸送系

6 MV タンデム型静電加速器には、計5台の負イオン源が備わっている。このうち、H から Au までの多種のイオンを加速可能な Cs スパッタ負イオン源 (S2: SNICS II), He イオン用の RF 負イオン源 (S3: Alphasross), 加速器質量分析用で試料カソード40個を装填可能な Cs スパッタ負イオン源 (S4: MC-SNICS) 及び CO₂ ガスからの ¹⁴C 測定に対応した固体/ガスハイブリッド型の Cs スパッタ負イオン源 (S5: CO₂ Gas Type MC-SNICS) の4台は、新規に導入したイオン源である。図6にイオン源配置図と低エネルギービーム輸送ラインの図を示す。

イオン源からの低エネルギービーム輸送ラインの入射エネルギーは 65 keV であり、磁場強度は、 $ME/q^2=15 \text{ MeV amu}$ となっている。180°回転が可能な曲率半径 200 mm, 電極間隙 35 mm の3台の 90° ESA (Electrostatic Spherical Analyzer)

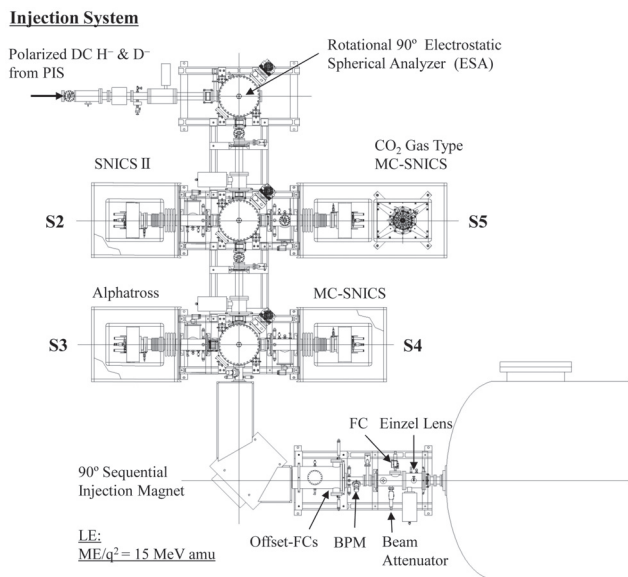


図6 負イオン源の配置図と低エネルギービーム輸送系

が設置されている。このESAは、筑波大学の加速器入射器用に開発されたものであり、多くのイオン源をコンパクトに配置でき、かつ負イオンビームの物理的研究が可能な構成となっている。

低エネルギービーム輸送系における90°偏向電磁石は、最大15 kVのパルス電圧(時間幅20 μs ~ 4 s)を印可して、加速器質量分析に対応した逐次入射法がおこなえる。また、加速器入射前に、ビーム電流値を1/100に減衰するビーム減衰器を設置している。

CO₂ Gas Type MC-SNICSは、極少量の試料からの炭素14年代測定研究に対応可能なCO₂ガス導入型であり、国内で初めて導入されたイオン源である。CO₂ガス試料をCsイオンで直接的にスパッタリングして、¹²C⁻を最大で12 μA引き出すことに成功している。試料量は200 μg C程度でよく、微量の試料をグラフィット化することなく、迅速に炭素14年代測定が可能である。図7にCO₂ Gas Type MC-SNICSの写真を示す。Csスパッタ負イオン源のカソードに10個のCO₂ガス試料を供給可能なシステムが搭載されている。

偏極陽子及び重陽子の負イオンを生成可能なラムシフト型偏極負イオン源(PIS)は、12UDペルトロンタンデム加速器用として、施設9階に設置されていたが、震災による損壊で使用不能となった。今回、損壊した装置部品を更新して、偏



図7 CO₂ Gas Type MC-SNICSの写真。左側のゲージがCO₂ガス試料の供給システムとなっている



図8 ラムシフト型偏極負イオン源(PIS)

極イオン源実験棟に移設した。新たに設置されたラムシフト型偏極負イオン源(PIS)からは、直流の偏極負陽子ビームを最大500 nAまで生成可能である。図1のA6, A7ラインに設置されたスペクトログラフで、低エネルギー原子核反応実験を実施する予定である。図8に偏極イオン源実験棟に設置されたラムシフト型偏極負イオン源(PIS)の写真を示す。

2.4 高エネルギービーム輸送系

加速器出射後の高エネルギービーム輸送系における磁場強度は、ME/q²=176 MeV amuである。105°分析電磁石と90°分析電磁石の軌道半径は1.27 mであり、M/ΔM=725の質量分解能を有している。105°分析電磁石の入射側には、第2荷電変換フォイルユニットが設置されている。第

2 荷電変換フォイルユニットには、荷電変換用炭素フォイルの他に、ビーム減衰用のメッシュが装填されている。減衰率 1/20 まで段階的にビーム出力を調整することが可能である。また、105° 分析電磁石の出射側には、加速器質量分析において同位体ビーム電流値を計測するための 3 台の可動式ファラデーカップが設置されている。加速器室内において、ビームラインは 40° 偏向電磁石により 2 本に分離される。途中でビームラインが交差して、1 本は既存の実験室に垂直照射室を通過して接続されている。

3. イオンビーム利用研究の展望

6 MV タンデム型静電加速器は、高精度な MeV 級エネルギーのイオンビームによる、様々な研究分野への利用が期待されている。ここでは、ビーム物質分析とビーム照射研究において開発を進めている実験装置について、利用研究の展望を示す。

3.1 イオンビーム物質分析装置

図 1 の L1 コースにイオンビーム物質分析用装置を設置している。5 軸ゴニオメーターを持つ試料台を有しており、ラザフォード後方散乱 (RBS) 分析や重イオン反跳原子検出法 (ERDA) による水素・軽元素分析とチャネリング測定が可能なシステムとなっている。半導体デバイスや新機能素材の構造解析及び微量元素分析研究が計画されている。

3.2 宇宙用素子照射試験装置

宇宙放射線環境におけるデバイスのシングルイベント発生頻度は、LET の低い数 10 MeV/(mg/cm²) 以下の領域に閾値があり、タンデム加速器による加速粒子エネルギー範囲と一致する。最近、宇宙用機器や原子力施設及び原発の廃炉作業等で使用する機器に搭載する半導体素子について、より安価な民生用部品の使用が望まれている。しかし、民生用半導体素子の放射線耐性試験が実施できる機関は限られており、特に宇宙関連企業と研究機関が集積しているつくば地区において、宇宙用素子照射試験装置の開発要請が高まっていた。筑波大学 6 MV タンデム型静電加速器は、このエネルギー領域の荷電粒子を提供できる加速器装置であり、宇宙用機器に搭載する半導体素子の放射線耐性試験に適している。

文科省「先端研究基盤共用・プラットフォーム

形成事業」での高度化設備として開発をおこなった宇宙用素子照射試験装置は、加速器室 L2 コースに設置されており、ビーム拡散用の散乱体を導入可能な微弱ビーム形成部と直径 1 m の真空槽からなる照射試験部、集中制御・計測部と真空排気系システム部から形成されている。照射試験部には、遠隔操作により 4 軸が駆動する A5 判サイズ (148 mm × 210 mm) の試料ホルダーが設置されている (図 9)。半導体素子への照射では、照射粒子を均一に分散させる必要がある。また、照射量としては微弱な 10² ~ 10⁴ ions/cm²/s 程度であり、JAXA との共同研究により、大面積の均一照射野を形成するイオン照射技術の開発をおこなっている。図 10 には、JAXA との共同研究により実施した、ガフクロミックフィルムを用いたビーム照射面内形状の測定結果を示す。25 MeV の炭素ビームを推定で 9 × 10⁷ ions/cm² 照射した。拡散均一ビームの形状として、ほぼ正

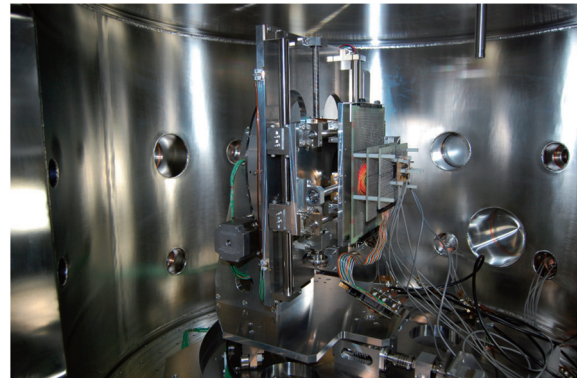


図 9 宇宙用素子照射試験装置の照射台

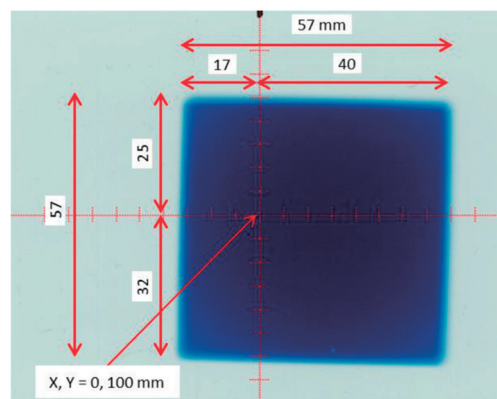


図 10 ガフクロミックフィルムを用いたビーム照射面内形状の測定 (JAXA 共同研究)

方形 (57 mm × 57 mm) の照射野を得ており、現在のところ照射均一度は 90% 以上となっている。

3.3 マイクロビーム分析装置

航空機等で使用される構造材料の革新的開発推進において、未活用情報を明らかにする先端計測技術の開発が求められている。筑波大学では、SIP「革新的構造材料」⁶⁾において、先端計測拠点の形成を進めている。先端計測装置として構造材料計測用マイクロビーム分析装置⁷⁾を L3 コースに整備している。

マイクロビーム形成レンズは、Oxford Microbeams 製 OM-2000⁸⁾を用いており、サブミクロンの MeV 級イオンビームの形成を目指している。マイクロビーム分析装置では、BGO 検出器を用いた NRA 法による水素分析の他に、PIXE 法を用いた軽元素と微量添加元素の分析を実施する。軽元素の特性 X 線を計測できる検出器として、シリコンドリフト型検出器 (SDD) を導入している。また、より高い検出効率を目指して、産業技術総合研究所との共同研究により、超伝導トンネル接合型 (STJ) 検出器⁹⁾の開発も進めている。2 keV 以下の軟 X 線に対して、STJ 検出器は 10 eV 程度の実用的な分解能を有している。図 11 にマイクロビーム分析装置の収束レンズと STJ 検出器の写真を示す。除振のために、収束レンズは重さ 3 トンの花崗岩で製作した架台に設置している。

構造材料計測用マイクロビーム分析装置では、PIXE 法による 2 次元の元素分布イメージング図の作製も可能である。例として図 12 に、スキャン照射によって得られた銅メッシュの特性 X 線

PIXE 画像を示す。使用した銅メッシュは 200 メッシュ/インチで線径は 12 μm である。マイクロビーム収束では、現在数 μm 径までの収束ができており、サブミクロンの MeV 級イオンビームの形成に向けて調整を進めている。

3.4 加速器質量分析 (AMS) 装置

国内で最大となる加速器質量分析装置¹⁰⁾であり、コンピュータ制御により自動計測化されている。L4 コースに設置した AMS 用極微量核種検出ライン (図 13) には、22.5° 球面電極型静電分析器が設置されており、末端の 5 枚電極型ガス $\Delta E-E$ 検出器により測定対象となる長半減期核種を 1 個単位で検出する。検出器ガスの種類や圧力、検出器の窓材を変えることで、1 台の検出器により多核種 AMS 測定に対応可能である。

筑波大学の AMS 装置では、 ^{14}C ($T_{1/2}=5,730$ yr) の他に、長半減期核種である ^{10}Be (1.36×10^6 yr), ^{26}Al (7.17×10^5 yr), ^{36}Cl (3.01×10^5 yr), ^{41}Ca (1.03×10^5 yr), ^{129}I (1.57×10^7 yr) などについて

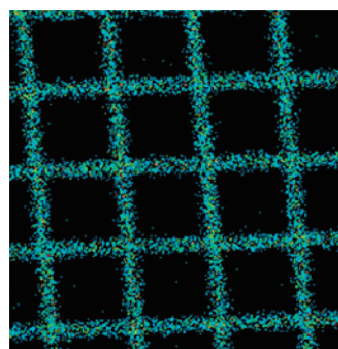


図 12 銅メッシュ (200 メッシュ/インチ, 線径 12 μm) の特性 X 線 PIXE 画像

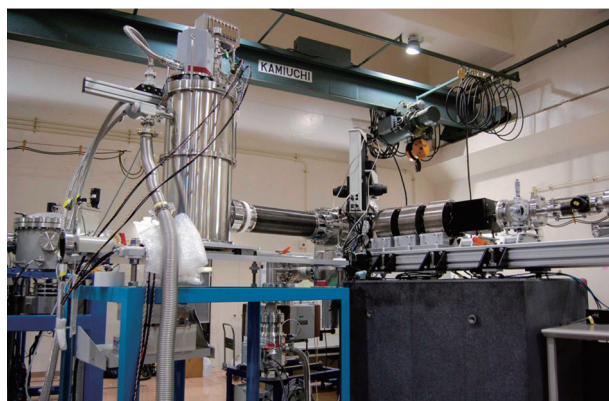


図 11 マイクロビーム分析装置と STJ 検出器



図 13 L4 コースの AMS 用極微量核種検出ライン

て、同位体比 10^{-10} から 10^{-15} レベルでの検出が可能である。特に ^{41}Ca については、国内で初めて筑波大学において高感度検出が可能となった核種である¹¹⁾。また、大型 AMS 装置の特徴を活かして、 $^{14}\text{C}^{4+}$ を 25 MeV まで高エネルギーに加速しておこなう ^{14}C 測定では、0.2%の測定精度と国内最高の検出感度となる約 60,000 年のマシンバックグラウンド (0.04 pMC) を達成している。

4. おわりに

筑波大学と米国の National Electrostatics Corp. とで共同研究開発と建設をおこなった 6 MV タンデム型静電加速器は、2016 年 3 月から正式運用を開始している。加速電圧は 1.0 MV から 6.5 MV の範囲で 1 kV 単位で可変であり、多種のイオンを精密なエネルギーで提供可能なシステムとなっている。現在、複合的なイオンビーム利用研究の展開を目指して、新規の研究実験装置を開発整備している。加速器の安定的な運用を図りながら、施設共用により学外機関及び産業界とも共同利用研究を積極的に推進する予定である。

謝 辞

6 MV タンデム型静電加速器の導入に関して、National Electrostatics Corp. 及び伯東株式会社より多大なご支援とご協力をいただいた。特に、National Electrostatics Corp. の Mark Sundquist 氏、伯東株式会社の村田宏司氏に厚く御礼を申し上げる。加速器更新導入は、筑波大学 UTTAC の喜多英治教授、森口哲朗助教、田島義一氏、大島弘行氏、石井聰氏、高橋努氏、大和良広氏らの献身的な働きにより成し遂げられた。ここに記して感謝の意を表す。

参考文献

- 1) 笹 公和, “筑波大学タンデム加速器施設の震災被害と復興計画”, 「加速器」, Vol. 9 (1), 14-21, 2012.
- 2) K. Sasa, “The 6 MV tandem accelerator project for nuclear physics and ion beam applications at the University of Tsukuba”, AIP Conf. Proc. 1533, 184-188, 2013.
- 3) K. Sasa et al., “Construction of the 6 MV Tandem Accelerator System for Various Ion Beam Applications at the University of Tsukuba”, Proceedings of the 13th International Conference on Heavy Ion Accelerator Technology, 285-287, Yokohama, Sep. 7-11, 2015, URL: <http://www.nishina.riken.jp/hiat2015>.
- 4) National Electrostatics Corp., URL: <http://www.pelletron.com/>.
- 5) 三雲 昂 他, “偏極イオン源”, 日本物理学会誌, 27(1), 30-43, 1972.
- 6) SIP 革新的構造材料, URL: <http://www.jst.go.jp/sip/k03.html>.
- 7) A. Yamazaki et al., “Development of the microbeam PIXE system for additive light elements in structural materials”, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B, 2017, in press.
- 8) G. W. Grime et al., “The Oxford submicron nuclear microscopy facility”, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B 54, 52-63, 1991.
- 9) S. Shiki et al., “X-ray Detection Performance of 100-pixel Superconducting Tunnel Junction Array Detector in the Soft X-ray Region”, Journal of Low Temperature Physics, 167 (5), 748-753, 2012.
- 10) K. Sasa et al., “The new 6 MV multi-nuclide AMS facility at the University of Tsukuba”, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B 361, 124-128, 2015.
- 11) H. Hosoya et al., “Optimization of a Delta E-E detector for ^{41}Ca AMS”, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B, 2017, in press.