

# 複合イオンビーム利用研究の展開を目指した 6 MV タンデム型静電加速器の開発

## DEVELOPMENT OF THE 6 MV TANDEM ELECTROSTATIC ACCELERATOR FOR NEW PROSPECTS OF MULTIPLE ION BEAM APPLICATIONS

笹 公和<sup>#,A)</sup>, Mark Stodola<sup>B)</sup>, Mark Sundquist<sup>B)</sup>  
Kimikazu Sasa<sup>#,A)</sup>, Mark Stodola<sup>B)</sup>, Mark Sundquist<sup>B)</sup>  
A) UTTAC, Univ. of Tsukuba  
B) National Electrostatics Corp.

### Abstract

The 12UD Pelletron tandem accelerator at the University of Tsukuba was destroyed by the Great East Japan Earthquake in 2011. 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. 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  $\mu\text{A}$  for proton and 50  $\mu\text{A}$  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

筑波大学では、2011 年から米国の National Electrostatics Corp.と共同で 6 MV タンデム型静電加速器の開発と建設を行ってきた。東日本大震災で損壊した 12UD ペレトロン型タンデム加速器[1, 2]の更新加速器として、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。加速器システムとしては、5 台の負イオン源と 12 本のビームラインを有しており[3]、複合的なイオンビーム利用研究の新たな展開が期待される。2016 年 3 月より稼働を開始した最新鋭の 6 MV タンデム型静電加速器の設計と開発状況及びイオンビーム利用研究の展開について報告する。

### 2. 6MV タンデム型静電加速器の設計と開発

6 MV タンデム型静電加速器は、全長 10.5 m、直径 2.74 m の加速タンク内に強化アクリルパネルで製作された支柱に保持されたコンプレスト型加速管を設置しており、最高到達電圧として 6.5 MV を達成している。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加速管を各々 12 本組み込んだ形式となっている。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  $\mu\text{A}$  となっている。電荷変換機構は、80 枚の電荷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。ターミナルに設置されたターボ分子ポンプや電荷ピックアップ用の電力は、絶縁シャフトにより回転する発

電機モータにより供給される。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電荷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仕組みである。加速電圧の計測は、非接触型の回転発電電圧計 (Generating Volt Meter: GVM)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、 $\Delta V/V=10^{-4}$  以下の電圧安定性を得ている。Figure1 に開発をおこなった 6MV タンデム型静電加速器(18SDH-2 Pelletron)の断面図を示す。また、Figure2 に加速器内部の写真を示す。

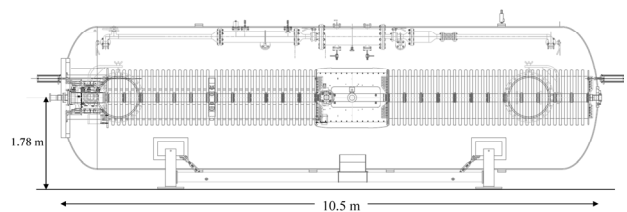


Figure 1: Cross-section Drawing of the Accelerator Tank (18SDH-2 Pelletron).

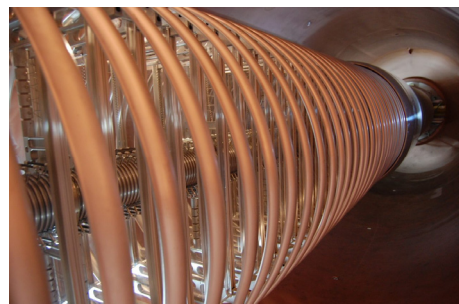


Figure 2: Inside of the Accelerator Tank.

<sup>#</sup> ksasa@tac.tsukuba.ac.jp

Table 1 に 6MV タンデム型静電加速器システムの性能を示す。2015 年 9 月に原子力規制委員会から承認された放射線施設の使用許可では、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  $\mu\text{A}$  としている。陽子・重陽子線に関しては、最大エネルギーは 13.0 MeV、陽子線の最大出力として 3.0  $\mu\text{A}$ 、重陽子線の最大出力は 0.30  $\mu\text{A}$  で使用許可を得ている。

2016 年 1 月に実施した施設検査では、加速器電圧 6.0 MV で陽子を 1.5  $\mu\text{A}$  まで加速した。また、2016 年 6 月に実施した加速試験では、加速電圧 6.0 MV により、 $^{127}\text{I}^{14+}$  を 90 MeV まで加速することに成功した。

Table 1: Specifications of the 6 MV Tandem Accelerator

- 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  $\mu\text{A}$   
Heavy ions:  $\sim 50$   $\mu\text{A}$
- Terminal Stripper: Gas (Ar or N<sub>2</sub>)  
Foil Unit (80 Foil Holders)
- Insulation Gas: SF<sub>6</sub> (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<sub>2</sub> Gas Type MC-SNICS
  - RF Ion Source (NEC Alphasross)
  - Lamb-shift Polarized Negative Ion Source
- Mass Energy Product (ME/Z<sup>2</sup>): 15 amu MeV (LEBT)  
176 amu MeV (HEBT)

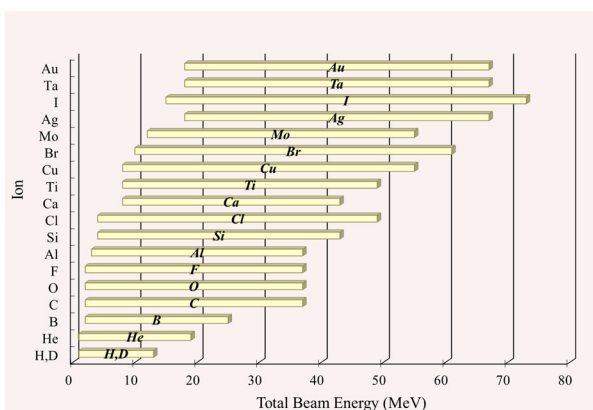


Figure 3: Total Energy Range of Ion Beams for the 6 MV Tandem Accelerator.

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 He 以外の希ガス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を加速可能である。また、ラムシフト型偏極負イオン源(PIS)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。Figure 3 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、Au 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、宇宙放射線環境用半導体のイオン照射実験などに適用可能である。

### 3. 加速器の構成

#### 3.1 イオン源システム

6 MV タンデム型静電加速器システムには、Table 1 に示すように計 5 台のイオン源が備わっている。偏極陽子・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 ペレ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、損壊及び旧くなった部品を更新して、施設 1 階に新たに偏極イオン源実験棟(12 × 5 m<sup>2</sup>)を建設して、6MV タンデム型静電加速器に接続した。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、DC の偏極負陽子を最大 500 nA まで生成可能である。2015 年に偏極負陽子の生成試験に成功しており、2016 年には偏極陽子の加速を確認している。

その他、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(SNICS II)、He イオン用の RF イオン源(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(MC-SNICS)及び CO<sub>2</sub> ガスからの <sup>14</sup>C 測定に対応した固体/ガスハイブリット型の Cs スパッタ負イオン源(CO<sub>2</sub> Gas Type MC-SNICS)の計 5 台のイオン源を設置している。CO<sub>2</sub> 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 CO<sub>2</sub> ガス導入型であり、<sup>14</sup>C を CO<sub>2</sub> ガス試料から直接測定可能なシステムとなっている。Figure 4 にイオン源システムと低エネルギービーム輸送ラインの図を示す。Figure 5 に CO<sub>2</sub> Gas Type MC-SNICS、また Figure 6 にラムシフト型偏極負イオン源(PIS) の写真を示す。

#### 3.2 低エネルギービーム輸送系

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 である。6 MV タンデム型静電加速器の低エネルギー側の磁場強度は、ME/q<sup>2</sup> = 15 amu MeV である。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)が設置されている。この ESA は、筑波大学のイオン源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  $90^\circ$  偏向電磁石は、最大 15 kV のパルス電圧を印可して加速器質量分析に対応した逐次入射法が行える。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。

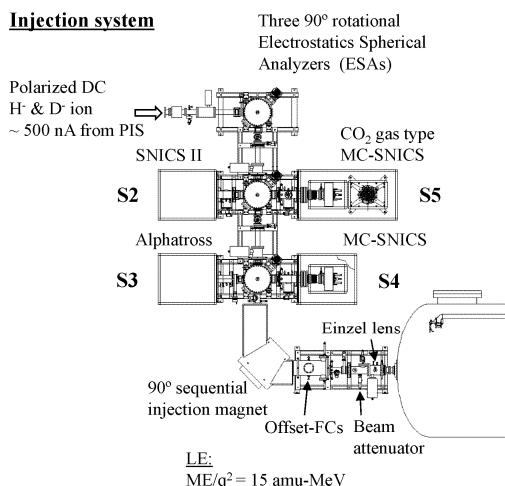


Figure 4: Injection System of the 6 MV Tandem Accelerator.



Figure 5: Photograph of the CO<sub>2</sub> Gas Type MC-SNICS and the Injection System.



Figure 6: Photograph of the Lamb-shift Type Polarized Ion Source (PIS).

### 3.3 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、 $ME/Z^2 = 176 \text{ amu MeV}$  である。 $105^\circ$  分析電磁石と  $90^\circ$  分析電磁石の軌道半径は 1.27 m であり、 $M/\Delta M = 725$  の質量分解能を有している。 $105^\circ$  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。また、 $105^\circ$  分析電磁石の出射側には、加速器質量分析用の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  $40^\circ$  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。もう 1 本のビームラインは、加速器室内において 5 本のビームポートを有する振分電磁石に接続される。

### 3.4 6 MV タンデム型静電加速器システムの構成

加速器システムの構成図を Figure 7 に示す。6 MV タンデム型静電加速器には、4 台の負イオン源とラムシフト型偏極負イオン源、5 本の新設ビームラインと既存の 7 本のビームライン及び垂直照射ラインが設置される。

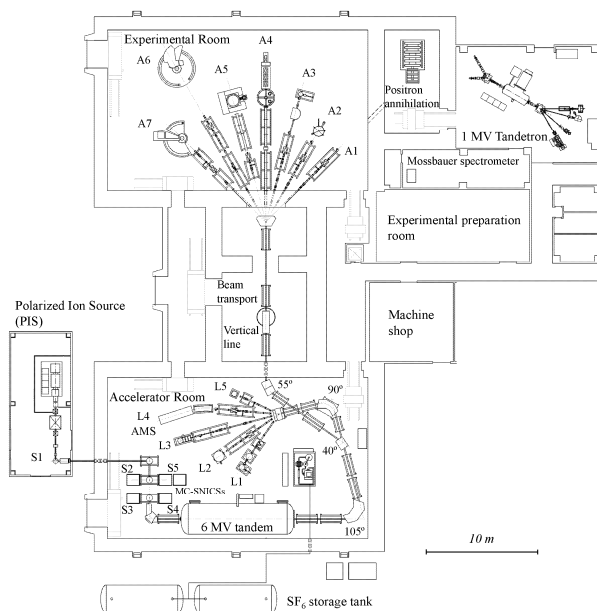


Figure 7: Overall View of the 6 MV Tandem Accelerator System.

### 3.5 6 MV タンデム型静電加速器システムの建設

6 MV タンデム型静電加速器は、米国 National Electrostatics Corp. (NEC) 製のペレット型であり、2014 年 1 月に米国において 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。筑波大学における電圧試験では、6.5 MV までの昇圧に成功している。加速器用冷却水循環装置は、

2015年1月に設置が完了し、米国製のSF<sub>6</sub>貯蔵タンクは2015年5月に第二種圧力容器の検定に合格している。その他に加速器本体遮へい体の設置とモニタリングポスト及び放射線量中央監視盤の更新を進めた。

本加速器システムについては、2015年9月に原子力規制委員会に提出した放射線発生装置の変更承認が受理されており、施設検査は2016年1月20日付けで合格した。加速器システムの正式運用は、2016年3月1日に開始している。Figure 8に加速器室内に設置された6 MV タンデム型静電加速器システムの全景写真を示す。



Figure 8: Photograph of the 6 MV Tandem Accelerator System at the University of Tsukuba.

## 4. 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、MeV 級のイオンビームを用いたさまざまな研究分野への応用が期待されている。以下にその利用研究の展望を示す。

### 4.1 加速器質量分析(AMS)研究

L4 コース(Figure 7)に設置した極微量核種検出ラインにより、測定対象核種を1個単位で検出する。<sup>14</sup>C (T<sub>1/2</sub> = 5,730 yr)の他に、長半減期核種である<sup>10</sup>Be (1.36 × 10<sup>6</sup> yr)、<sup>26</sup>Al (7.17 × 10<sup>5</sup> yr)、<sup>36</sup>Cl (3.01 × 10<sup>5</sup> yr)、<sup>41</sup>Ca (1.03 × 10<sup>5</sup> yr)、<sup>129</sup>I (1.57 × 10<sup>7</sup> yr)などについて、同位体比 10<sup>-15</sup> レベルの超高感度分析が可能である[4]。Figure 9に<sup>36</sup>Cl-AMSの検出スペクトル例を示す。

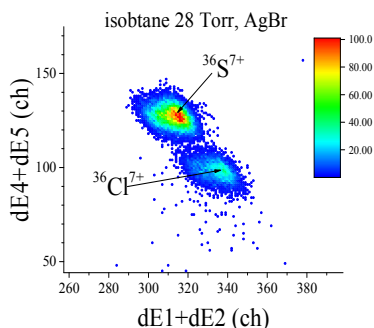


Figure 9: <sup>36</sup>Cl-AMS Measurement for the <sup>36</sup>Cl Standard Sample of <sup>36</sup>Cl/Cl = 1.00 × 10<sup>-11</sup>.

AMS 研究では、以下の利用分野が想定されている。

- ① 宇宙線生成核種による地球環境年代測定。
- ② 原子力施設環境モニタリング。
- ③ 文化財・考古学分野の年代測定。
- ④ <sup>14</sup>C-AMS による創薬試験、食品産地同定、大気汚染エアロゾルの起源解明。

### 4.2 イオンビーム物質分析研究

L1 コースに専用のイオンビーム物質分析用装置を設置している。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をおこなう予定である。

- ① 半導体デバイスの構造解析と特性改善。
- ② GaN パワーデバイスの構造解析及び水素分析。
- ③ 新機能素材の構造解析。

### 4.3 宇宙放射線環境実験

宇宙放射線環境を模擬する実験が可能な直径 1 m の真空実験槽を L2 コースに備えている。現在、JAXA と共同研究契約を締結して、宇宙用素子の放射線耐性試験の準備を進めている。

- ① 人工衛星用半導体素子の放射線耐性試験。
- ② 宇宙線観測衛星の検出器校正試験。

### 4.4 マイクロビーム装置

内閣府 SIP「革新的構造材料」[5]における先端計測拠点として、マイクロビーム装置をL3コースに整備している。超伝導検出器と組み合わせ、構造材料中の元素分析を実施予定である。

### 4.5 原子核実験

測定室のA6及びA7コースに計2台のスペクトログラフを備えている。ラムシフト型偏極負イオン源と組み合わせた低エネルギー原子核反応実験に対応可能である。

## 5. まとめ

米国の National Electrostatics Corp.と筑波大学で開発と建設をおこなった 6 MV タンデム型静電加速器システムが、2016年3月から運用を開始した。加速電圧は1.0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、新規の実験装置を整備している。加速器の安定的な運用を図りながら、施設共用事業により学外機関及び産業界との加速器利用共同研究を積極的に推進する予定である。

## 参考文献

- [1] 笹 公和, 「加速器」, Vol.9(1), 2012, pp.14-21.
- [2] K. SASA, AIP Conf. Proc.1533, 2013, pp.184-188.
- [3] K. Sasa *et al.*, JACoW, Proceedings of the 13th International Conference on Heavy Ion Accelerator Technology, 2015, pp.285-287.
- [4] K. Sasa *et al.*, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B 361, 2015, pp.124-128.
- [5] SIP 革新的構造材料; <http://www.jst.go.jp/sip/k03.html>