

# 原子力機構 TIARA 施設の現状報告

## STATUS REPORT OF TIARA FACILITY

石坂知久  
Tomohisa Ishizaka  
Japan Atomic Energy Agency

### Abstract

Four ion accelerators (AVF Cyclotron, 3MV Tandem Accelerator, 3MV Single-ended Accelerator and Ion Implanter) at TIARA of JAEA are dedicated to researches in the fields of biotechnology and materials science. This paper describes the operational status of the accelerators and the major technical developments in the 2013 fiscal year.

### 1. はじめに

日本原子力研究開発機構高崎量子応用研究所のイオン照射施設 TIARA では、AVF サイクロトロン (K=110) 及び 3 台の静電加速器 (3 MV タンデム加速器、3 MV シングルエンド加速器、400 kV イオン注入装置) を有し、材料科学及びバイオ技術を柱とした研究開発にイオンビームを提供している。利用分野が多岐にわたるため、幅広い LET (Linear Energy Transfer : 線エネルギー付与) が用いられることから、TIARA では H から Bi まで様々な元素のイオンを、20 keV から 660 MeV のエネルギー範囲で加速している。

照射形態も多様であり、AVF サイクロトロンでは、通常のスポットビーム照射の他に、ラスタースキャン方式による 10 cm×10 cm、±5%の均一度の大面积照射が可能であり、加えて、多重極電磁石を用いて広い照射野全体を同時に一定のフルエンス率で照射できる大面积均一照射システムを開発している。また、直径が約 1 µm のマイクロビーム形成技術を有している。更に、高安定のイオン源の開発、ビーム位相幅のバンチング効果を持つサイクロトロン中心領域の開発、アクセプタンスモニタ開発など、照射技術の向上に必要な技術開発を進めている。

静電加速器では、直径 1 µm 以下の重イオンマイクロビーム (3 MV タンデム加速器) 及び直径 0.25 µm の軽イオンマイクロビーム (3MV シングルエンド加速器) が、大気マイクロ PIXE (Particle Induced X-ray Emission) や PBW (Proton Beam Writing) に利用されている。また、3 台の静電加速器からのイオンビームを同時に照射することが可能なビームラインを備えている。更に、C<sub>60</sub> イオンの生成・輸送技術を開発している。

本報告では、各加速器の 2013 年度の運転状況、保守・整備及び技術開発の概要を報告する。

### 2. 加速器の運転、保守・整備状況

#### 2.1 運転状況

加速器の運転状況を Table 1 に示す。

サイクロトロンは月曜日の昼から金曜日の夕刻まで連続運転をするが、1 回の実験時間が短いため、週に 10 回程度のイオン種、エネルギーまたはビームコースを変更し、2013 年度は、イオン種・エネルギー変更回数は 251 回、ビームコース切替回数は 267 回、加速モード変更回数は 76 回とほぼ例年通りであった。静電加速器では、1 日単位で実験が割り振られ、各日 9 時頃に運転を開始し 23 時まで停止、点検を完了する。加速器及び付帯設備の故障による実験中止は、サイクロトロンについて、ビーム輸送ライン上の高速シャッター弁 (FCV) が動作しなくなった 1 件のみであった。Figure 1 に TIARA の加速器及び照射ポートの配置図と FCV トラブル及び保守整備箇所等を示す。静電加速器では 1 件もなく 3 台とも運転計画に対して 100%の稼働率を達成した。

Table 1: Statistics for Each Accelerator Operation in Fiscal 2013

C: AVF Cyclotron, T: 3MV Tandem Accelerator  
S: 3MV Single-ended Accelerator, I: Ion Implanter

	C	T	S	I
Beam service time (h)	2282.7	1830.1	2088.0	1603.9
Machine tuning (h)	674.5	218.3	231.5	243.2
Beam development (h)	48.4	13.6	0	18.4
Total operation time (h)	3005.6	2062.0	2319.5	1865.5
The number of experiments	548	162	161	141
Experiment canceled due to machine trouble	1	0	0	0

# ishizaka.tomohisa@jaea.go.jp

運転時間はサイクロトロン 3005.6 時間、タンデム加速器 2062 時間、シングルエンド加速器 2319.5 時間、イオン注入装置 1865.5 時間であった。補正予算による施設整備の工事のため、サイクロトロンでは 2 月 1 日以降、静電加速器では 3 月 1 日以降の利用運転を停止したが、土曜日を利用するなど年間運転計画を前倒ししてほぼ例年通りの実験利用時間を確保した。新ビーム開発については、サイクロトロンで 40 MeV  $D^+$  及び 385 MeV  $^{40}Ar^{12+}$  を加速した。タンデム加速器では、既設の Cs スパッター負イオン源を用いた電子付着方式による  $C_{60}$  負イオン生成技術を開発し、ビーム強度を従来技術の千倍程度 (30 nA) まで増強することに成功した。

## 2.2 定期整備による保守

サイクロトロンでは、7 月中旬から 8 月下旬にかけての定期整備で、サイクロトロン本体のメンテナンス、入射系のクライオポンプの点検、電源冷却ファンの更新を行った。また、ショート板を駆動する際に発生していた真空リークに対処するために、真空を保持したままショート板の駆動ができる差動排気用のポートを設置した。多重極電磁石を用いた大面積均一照射コース (LB コース) では、より大面積なビームを形成するためビームラインを一部角ダクト化した (Figure 1 参照)。11 月には 1 週間かけてサイクロトロン電源の定期点検を実施した。

静電加速器では約 2 週間の定期整備を 3 回行った。主な保守内容は、タンデム加速器では、コロナニードルの交換、ペレットチェーンの軸調整、タンクベースの各種フィードスルーの交換、シングルエンド加速器では、RF イオン源の交換、シーケンサ用電源の交換、分析電磁石電源の交換、イオン注入装置では、イオン源のオーバーホール、静電レンズの清掃である。整備中に制御 PC とシーケンサ間の通信不良や放電による分割抵抗の破損など、比較的軽微なトラブルが発生したが、通常運転への影響はなかった。

## 2.3 その他の施設整備

平成 24 年度補正予算により、次の整備を実施した。

TIARA 全域の放射線モニタを更新した。これに伴い、照射室入室のためのインターロック機能を新たに設定する必要があり、安全監視盤 PLC に追加した。

サイクロトロンでは、HC コースのロータリシャッター (Figure 1 参照)、真空制御機器の一部、サイクロトロン棟の照射室等の監視カメラをそれぞれ更新した。ロータリシャッターは、サイクロトロン本体室と各照射室の遮蔽壁中に設置されており、ビーム輸送と放射線遮蔽の役割がある。特に利用頻度の多い HC コースでは設計寿命を超えて使用しており、動作不良を起こす前に更新した。真空制御機器の一部更新では、住友重機械工業社製の UDC 基板等用いた制御から、PLC 機器を用いた制御に変更した。

静電加速器では、複合ビーム棟の照射室等の監視カメラを更新した。タンデム加速器では、設置から

23 年が経過してコンプレッサーや真空ポンプの老朽化によるガスの回収能力の低下や配管接続部シール材の劣化によるガス漏洩が懸念されていた  $SF_6$  ガス回収装置を更新した。 $SF_6$  ガスの純度を高く維持して長期間の安定度を確保するために、オイルを使用しない型とした。シングルエンド加速器では、加速管と制御シーケンサ及び  $SF_6$  ガス回収装置のコンプレッサー、電磁バルブ、ロータリーポンプ、制御盤等を交換した。イオン注入装置では、加速電源と加速管及び制御シーケンサを更新した。

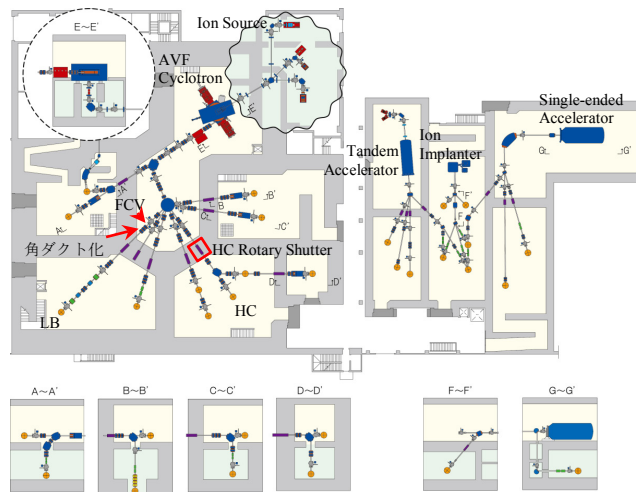


Figure 1: Layout drawing of the accelerators and irradiation ports of TIARA.

## 3. サイクロトロンの技術開発

### 3.1 アクセプタンス計測のためのエミッタンスの実効拡大

サイクロトロンへのビーム入射調整の最適化を図るため、入射ビームエミッタンスとサイクロトロンのアクセプタンスを計測する装置を開発している<sup>[1]</sup>。アクセプタンスは、ビームを位相平面上の微小な領域に区切ってサイクロトロンに入射し、引出部直前の電流モニタで検出することで測定される。この微小なビームは、2 組のスリットによって入射ビームの位置と角度範囲を制限して形成される。しかし、入射ビームのエミッタンスはアクセプタンス全体の領域をカバーしていないため、これまで計測できたアクセプタンスは一部のみであった。そこで、アクセプタンス全体を計測するため、ビームのエミッタンスを実効的に拡大して計測範囲を広げる方法を開発した。本方法ではソレノイドレンズを用いてビームを位相平面上で位置方向に広げ、ステアリング電磁石によってそのビームを角度方向に走査することによりエミッタンスを実効的に拡大する。様々な形状のエミッタンスに対応した走査を行うために、ステアリング電磁石のビーム偏向角は、実測したエミッタンス形状を基に算出する方法を採用した。本方法の実証試験の結果、エミッタンスを拡大し、アクセプタンスの計測範囲を約 12 倍に広げることに成功した。

### 3.2 ビーム位相分布測定システムの時間分解能

サイクロトロン中心領域で生じる位相バンチング効果の大きさを調べるため、プラスチックシンチレータを用いたビーム位相分布測定システムを開発し、その測定システムの時間分解能を評価した<sup>[2]</sup>。シンチレーション光を模擬したパルスレーザーを長さ 6 mm のシンチレータ先端の中心から軸方向に入射し、他端に接着した直径約 5 mm の光ケーブルを介して信号処理モジュールに送り、その出力信号とレーザーのトリガー信号の間の時間差を測定した。また、シンチレータ中の光路差による時間差を計算により見積った。これらから評価した当システムの時間分解能は 44.3 ps FWHM 以下と、位相バンチングを評価するために必要な性能である最高加速周波数 22 MHz の 1 RF 度に相当する 126 ps より十分小さいことを確認した。また、パルスレーザーの入射角を軸に対して数度ずらした測定では、光ケーブル内の光路差によって時間差の幅が 1.5 倍に広がって時間分解能が低下することから、シンチレーション光の光ケーブルへの入射角度が小さくなるように光ケーブルと同径のシンチレータを使用することが妥当であることが分かった。

### 3.3 大面積均一イオンビーム利用のための技術開発

多重極電磁石を用いた非線形集束によって形成した均一ビームを照射利用に供するための技術開発を進めている<sup>[3]</sup>。主としてターゲット直前の 2 連四重極電磁石と多重極電磁石を調整することにより、100 cm<sup>2</sup> を超える四角形の均一照射野だけでなく、細長いリボン状のものを効率的に形成する手法を確立した。照射チャンバーは様々な利用形態に対応しており、一部のビームは大気中に取り出して照射できる。従来のスキャン方式では実現困難な、照射野全体を瞬時に均一照射できるという本ビームの特長を最大限に活かした照射利用が可能となった。

## 4. 静電加速器の技術開発

### 4.1 スパッターイオン源を用いた電子付着による C<sub>60</sub> 負イオン生成法の開発

TIARA では、MeV エネルギーの高速クラスターイオンビームの照射効果に関する研究を行っている。近年、タンデム加速器による高速フラレン (C<sub>60</sub>) ビームの提供を開始したが、従来のセシウムスパッター方式による C<sub>60</sub> イオンの生成量は数 pA と極めて少なく、実験の効率化を図る上で、ビーム強度の増加が急務であった。

そこで、タンデム加速器で多く使用されるセシウムスパッター型負イオン源を用いて、C<sub>60</sub> の比較的低い昇華温度と高い電子親和力<sup>[4,5]</sup>に着目した斬新な負イオン生成方法を開発した。これは、イオンチャンバー内で昇華した C<sub>60</sub> に、1,200°C 以上に熱せられたアイオナイザーの表面から放出する熱電子を付着させ負イオン化したものを電場で引出すものであり、極めてシンプルな負イオン生成方法である。

この技術により、昇華温度を一定に保つことで、従来方法よりも千倍程度のビーム強度を長時間安定に維持することが可能となった (Figure 2 参照)。また、本技術は一般的な負イオン源をベースとしているため、既存装置への導入が容易である。

### 4.2 タンデム加速器における C<sub>60</sub> クラスターイオンの輸送効率の向上

負イオンのクラスターは、タンデム加速器の高電圧ターミナルにある荷電変換ガスとの衝突でその多くが解離して失われるため、輸送効率は単原子イオンのそれと比べて極めて低い。輸送効率は荷電変換ガス圧に強く依存するため、より高い電流量のクラスターイオンビームを得るには、荷電変換ガス圧と輸送効率の関係を正確に調べる必要がある。そこで、荷電変換ガス圧に対する C<sub>60</sub> イオンの輸送効率をターミナル電圧 2.5 MV において測定した。ガス圧は加速器の出口付近に設置されたコールドカソードゲージでモニタした。その結果、Figure 3 に示すように、C<sub>60</sub><sup>1+</sup> と C<sub>60</sub><sup>2+</sup> に対する輸送効率はそれぞれ 2.6% と 1.4% であった。また、C<sub>60</sub> の輸送効率に対するガス圧の最適値 (C<sub>60</sub><sup>1+</sup>: 1.2 × 10<sup>-6</sup> Pa、C<sub>60</sub><sup>2+</sup>: 1.1 × 10<sup>-6</sup> Pa) は炭素クラスターのそれよりも低いことが分かった。知見を基に、ターゲットにおいて数十 pA の C<sub>60</sub><sup>+</sup> ビームが利用可能となった。

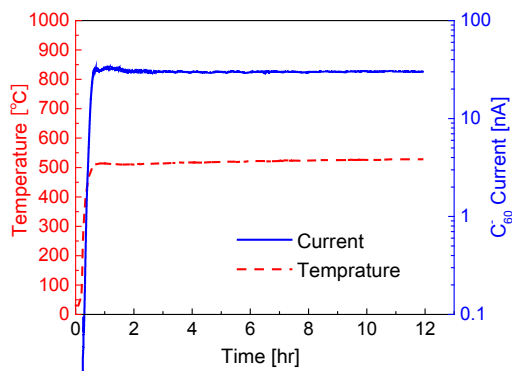


Figure 2: C<sub>60</sub> ion generation and Sublimation temperature.

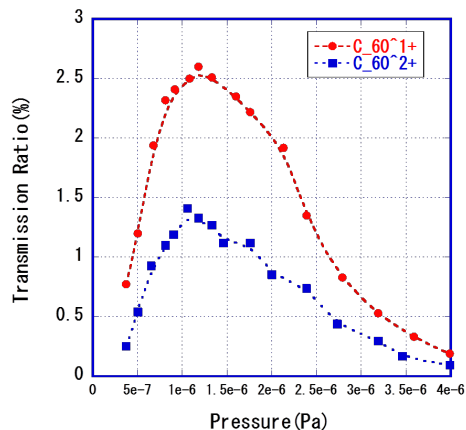


Figure 3: Transport efficiency of C<sub>60</sub> ions on the charge exchange gas pressure.

## 参考文献

- [1] H. Kashiwagi, et al., in these proceedings, SUP070.
- [2] N. Miyawaki, et al., in these proceedings, SUP072.
- [3] Y. Yuri, et al., in these proceedings, SAP119.
- [4] H.S. Chen, et al., J. phys. Chem. 96 (1992) 1016-1018.
- [5] M. Lezius, et al., Chem. Phys. Letters 203 (1993) 232-236.