

## STATUS OF TIARA FACILITY

Keisuke Yamada<sup>#</sup>, Takayuki Nara, Ikuro Ishibori, Satoshi Kurashima, Ken-ichi Yoshida, Takahiro Yuyama, Tomohisa Ishizaka, Takashi Agematsu, Sadanori Uno, Atsuya Chiba, Akihito Yokoyama, Susumu Okumura, Nobumasa Miyawaki, Hirotsugu Kashiwagi, Yosuke Yuri, Yuichi Saitoh, Yasuyuki Ishii, Takahiro Satoh, Takeru Ohkubo, Watalu Yokota

Takasaki Advanced Radiation Research Institute, Japan Atomic Energy Agency  
1233 Watanuki-machi, Takasaki-shi, Gunma 370-1292

### Abstract

Four ion accelerators at TIARA of JAEA are dedicated to researches in the fields of biotechnology and materials science. Beams of various ion species are provided with a wide range of energy and number of different methods of irradiation. In order to meet users' requirements, unique irradiation technologies such as wide-area high-uniform beams and microbeams have been developed as well as the accelerator technologies. This paper describes the operational status of the accelerators and the major technical developments.

## 原子力機構 TIARA 施設の現状

### 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研究施設 TIARA は AVF サイクロトロン (K110) 及び 3 台の静電加速器 (3MV タンデム加速器、3MV シングルエンド加速器、400kV イオン注入装置) を有し、材料科学及びバイオ技術の開発を柱とした量子ビーム応用研究にイオンビームを提供している。利用分野が多岐に亘るため、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、様々なイオン種及びエネルギーが必要とされる。TIARA では H から Bi までの様々な元素のイオンが利用可能であり、数十 keV から数百 MeV のエネルギー範囲で加速することが可能である。照射形態も多様であり、AVF サイクロトロンでは、通常のスポートビーム照射の他に、ラスターキャン方式による 10cm×10cm、±5% の均一度の大面积照射が可能であり、さらに広い照射野全体を多重極磁場により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中である<sup>[1]</sup>。また、直径 1µm 以下のマイクロビーム形成技術<sup>[2]</sup>を有する。さらに、高安定イオン源の開発<sup>[3]</sup>、ビーム位相幅のパンチング効果を持つサイクロトロン中心領域の開発<sup>[4]</sup>など、これら照射技術の向上に必要な技術開発を進めている<sup>[5]</sup>。静電加速器では 3MV タンデム加速器で直径 1µm 以下の重イオンマイクロビーム、3 MV シングルエンド加速器で直径 0.25µm の軽イオンマイクロビーム形成技術を有し、大気マイクロ PIXE (Particle Induced X-ray Emission)<sup>[6]</sup> や PBW (Proton Beam Writing)<sup>[7]</sup> 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有する。本報告では、各加速器の運転・保守状況及び加速器の整備・技術開発の概要について報告する。

<sup>#</sup> yamada.keisuke@jaea.go.jp

### 2. 加速器の運転・保守状況

#### 2.1 運転状況

2010 年度の各加速器の運転時間を表 1 に示す。

表 1: 各加速器の 2010 年度の運転状況  
C: サイクロトロン, T: タンデム,  
S: シングルエンド, I: イオン注入器

	C	T	S	I
運転時間(h)	3343	2115	2367	1800
ビーム提供時間	2712	1939	2143	1618
新ビーム開発時間	59.7	1.4	0	17.2
実験件数	594	173	168	149
実験中止件数 (加速器故障)	0	0	3	2
実験中止件数 (東日本大震災)	3	9	9	6

サイクロトロンは月曜日から金曜夕刻まで連続運転するが、原子核物理実験や医療照射と異なり 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の変更を行う。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。昨年度は大きな故障等が無く、東日本大震災の影響を除き計画された実験の殆どが実施された。加速器の故障による実験中止は静電加速器の 5 件で、サイクロトロンでは 1 件もなかった。中止した実験は 1 件を除き、実験日の振替により実施した。

運転時間はサイクロトロン 3343 時間、タンデム加速器 2115 時間、シングルエンド加速器 2367 時間、イオン注入装置 1800 時間であった。3 月 11 日の地震以降の運転を中止したが、下半期には高稼働化運転として、これまで運転の無かった土曜日にサイク

ロトロンで 12 日、静電加速器で各 10 日の実験が実施されたため、年間運転時間は昨年度と比較してサイクロトロンで 200 時間の増加、静電加速器ではほぼ例年通りであった。サイクロトロンのイオン種・エネルギー変更回数は 234 回、ビームコース切替回数は 283 回、加速モード変更回数は 55 回とほぼ例年通りであった。新ビーム開発については、サイクロトロンで  $190\text{MeV-}^{14}\text{N}^{5+}$ 、 $490\text{MeV-}^{129}\text{Xe}^{24+}$  を新たに加速した。3MV タンデム加速器では、Cs スパッタイオン源より  $11.5\text{MeV In}^{3+}$  を  $500\text{nA}$  生成・加速することに成功した。400kV イオン注入装置では、フリーマンイオン源より  $200\text{keV Gd}^{+}$  及び  $120\text{keV C}_{70}^{+}$  をそれぞれ数百 nA 生成して加速した。

## 2.2 東日本大震災の影響

2011 年 3 月 11 日に発生した東北地方太平洋沖地震により群馬県高崎市では震度 5 強の揺れを記録した。地震発生時は 4 台の加速器は全て実験利用のため運転中で、タンデム加速器及びイオン注入装置はオペレーターによる緊急停止ボタン操作により運転を停止した。サイクロトロン及びシングルエンド加速器は、地震により遮蔽扉のインターロック回路が働き、加速器は自動的に停止した。地震により、サイクロトロンでは遮蔽扉を固定するロックピンの破損及び入射系のターボ分子ポンプの故障が生じた。また、3 台の静電加速器では損傷はなかった。余震、点検及び東京電力の計画停電の影響により、地震発生以降の年度内の運転を中止した。中止した実験の件数はサイクロトロン 3 件(16.2h)、タンデム加速器 9 件、シングルエンド加速器 9 件、イオン注入装置 6 件であった。破損箇所を修理を行った後、加速器の点検、調整運転を行った結果、全加速器についてビーム加速・輸送に問題はなかった。また、地震等の振動に弱いと考えられていたマイクロビーム形成装置も従来通りの性能を維持していることを確認した。定期整備を行った後、2011 年 5 月より実験利用を再開した。

## 2.3 保守状況

サイクロトロンでは、ビームプローブ位置の確認、RF 発振回路の点検及び性能評価及び約 50 台のロータリーポンプのオイル交換など例年行っている整備に加え、インフレクタ駆動装置及び純水 1 次冷却系のシーケンサーを更新した。

静電加速器では約 2 週間の定期整備を年 3 回行っている。主な保守作業として、タンデム加速器ではペレットチェーンのシーブとベアリング及び消耗品を交換した。シングルエンド加速器では、RF 電極固定用パーツのキャップが脱落したことにより、高電圧が印加できないトラブルが発生した。また、高電圧ターミナルに設置された発電機の故障があり、交換により修理した。イオン注入装置では、イオン源のオーバーホール及び経年劣化した電源のファンを交換した。

## 3. サイクロトロンの技術開発・整備状況

### 3.1 アクセプタンス計測装置の開発

イオン源で生成・輸送されたビームを最小限のロスで加速・輸送するためには、サイクロトロンへのビーム入射において、入射ビームエミッタンスと加速器のアクセプタンスを整合させることが必要である。この整合の程度を評価するため、横方向アクセプタンス計測装置の開発を行っている。昨年度は計測試験を行い、本装置でアクセプタンスが測定可能であることを確認した<sup>[8]</sup>。しかし、現在は入射ビームエミッタンスの領域内でのみアクセプタンスが計測可能であるため、部分的な計測であった。今後は、本装置にステアリングマグネットを組み込み、入射ビームを位相平面内でスキャンすることにより計測範囲を広げ、全アクセプタンスの計測実証を行う。

### 3.2 大面積均一照射用チェンバーの設置

広い面積の全域を同時照射する手法として、多重極電磁石を用いた大面積均一照射システム(MuPUS: Multipole magnet beam profile uniformization system)の開発を進めている。これまでに  $10\text{MeV}$  の  $\text{H}^{+}$  ビームを用いて 6% の均一度で  $6\text{cm}\times 6\text{cm}$  の均一照射野を形成し、宇宙用太陽電池の耐放射線性評価試験に提供した<sup>[9]</sup>。重イオンビームでのビーム形成技術の開発や照射利用を効率的に行うため、図 1 に示す専用の照射チェンバーを製作・設置した。チェンバーは、ビーム軸上に設置されたメインチェンバーと 22 枚のシート状サンプルを交換できるカートリッジを搭載したカートリッジチェンバーの 2 つの部分から構成される。チェンバー全体がビーム軸に沿って移動可能であり、大気中照射への切り替え及び診断機器の増設を容易に行える構造とした。

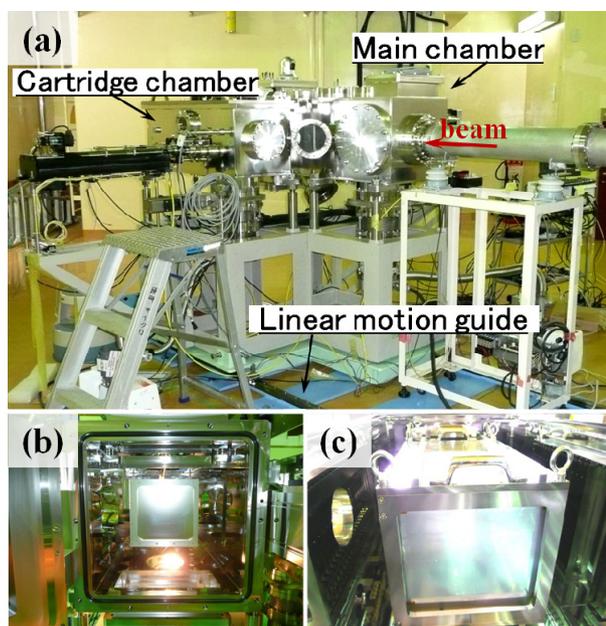


図 1: LB ラインに設置された照射チェンバー (a) 外観 (b) メインチェンバー内部 (c) カートリッジチェンバー内部のサンプルカートリッジ

### 3.3 サイクロトロン主磁場迅速切り換え技術

マシンの利用効率を向上するために、高頻度で実施されるビーム切換の時間短縮を目指している。ビーム切換で最も時間を費やしているサイクロトロン磁場形成を短時間で実現するために、磁場立ち上げ直後に発生する磁場の過渡的変動を抑制し、安定な磁場を迅速に形成する、磁場補正システムの構築を行った<sup>[10]</sup>。これは、主コイルの外周に巻いた補正コイルによって主磁場の微調整を行うもので、PID制御によって短時間での磁場収束が可能である。

## 4. 静電加速器の技術開発・整備状況

### 4.1 タンデム加速器におけるクラスターイオン用荷電変換ガスの探索

TIARA ではタンデム加速器を用いて、クラスターイオンの生成・加速及び照射効果に関する研究が早くから行われている<sup>[11]</sup>。タンデム加速器で加速されるクラスターイオンのビーム電流を増やすためには、タンデム加速器に入射する負クラスターイオンと出射する正クラスターイオンの比で定義される透過効率の向上が必要である。クラスターイオンは加速器に入射する負イオンのほとんどが荷電変換ガスとの衝突により解離し、単原子イオンと比べ透過率が大きく下がる。そこで、MeV エネルギークラスターイオンの荷電変換及び解離のメカニズムを研究することにより、解離断面積が小さく荷電変換断面積が大きい荷電変換ガスの探索を行っている<sup>[12]</sup>。昨年度は荷電変換ガスとして Ne ガスを使用し、2.5MeV 炭素クラスターイオン  $C_n^-$  ( $n=2,4,8,10$ )の透過率より解離断面積を導出した。結果を図2に示す。解離断面積は  $10^{-15} \text{ cm}^2$  台で、クラスターイオンのサイズに比例した値であった。図2中の破線は炭素クラスターイオンの構造が直線鎖状で Ne ガスとランダムな方向で衝突したと仮定して計算した結果であり、ほぼ実験値を再現する。これは解離断面積がクラスターイオンのサイズに強く影響を受けることを示している。今後、荷電変換ガス依存性を明らかにする予定である。

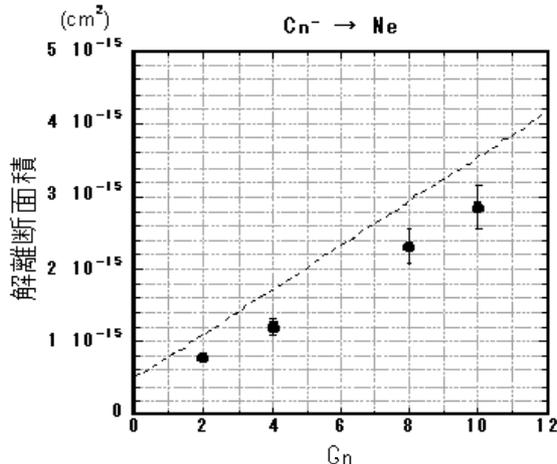


図2: Ne ガスによる  $C_n$  ( $n=2, 4, 8, 10$ )の解離断面積  
破線は計算により導出した解離断面積

### 4.2 イオン注入装置ビームラインの増設

イオン注入装置ではクラスターイオンとしてフラーレン( $C_{60}$ )イオンの実験利用を開始している。近年では材料への照射実験の他、飛行時間二次イオン質量分析にも応用されている。これまでは汎用照射ラインを使用して行われていたが、実験機器のセットアップに時間を要し、効率的に実験を行うことができなかった。そこでクラスターイオン利用のための専用ビームライン増設を決定した。増設するビームラインは設置場所の関係から、図3に示すような位置とし、既存の  $0^\circ$ 及び  $45^\circ$ の出射ポートを有した偏向電磁石をさらに  $-45^\circ$ の出射ポートを追加した振分電磁石と入れ替えを行った。最大磁場は 1.4T であり、120keV- $C_{60}^+$ 、540keV- $C_{60}^{2+}$ までのビーム利用が可能である。ビームラインの組み立て後、実験利用を開始する。

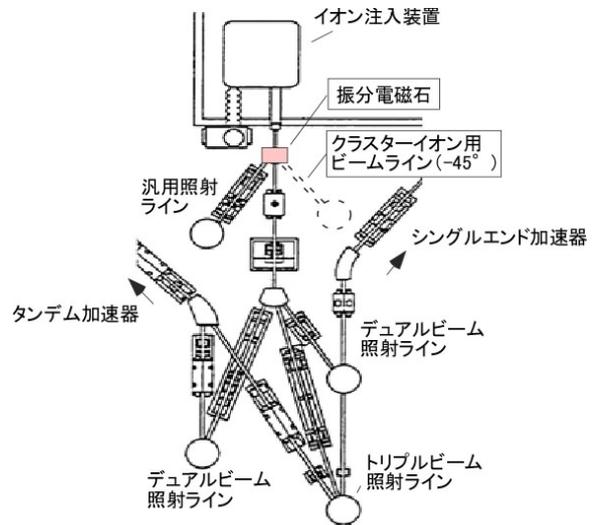


図3: イオン注入装置ビームラインのレイアウト

## 参考文献

- [1] Y. Yuri et al., Phys. Rev. ST Accel. Beams 10 (2007) 104001.
- [2] M. Oikawa et al., Nucl. Instrum. Methods B 260 (2007) 85.
- [3] K. Yoshida et al., Rev. Sci. Instrum. 81 (2010) 02A312.
- [4] N. Miyawaki et al., Nucl. Instrum. Methods A 636 (2011) 41.
- [5] T. Yuyama et al., Proceedings of the 19th International Conference on Cyclotrons and their Applications (2010) MOPCP019.
- [6] T. Sakai et al., Nucl. Instrum. Methods B 190 (2002) 271.
- [7] N. Uchiya, et al., Nucl. Instrum. Methods B 260 (2007) 405.
- [8] H. Kashiwagi, et al., in these proceedings, MOPS079.
- [9] Y. Yuri et al., Nucl. Instrum. Methods A 642 (2011) 10.
- [10] S. Okumura et al., in these proceedings, MOPS044.
- [11] A. Chiba et al., Nucl. Instrum. Methods B 269 (2011) 824.
- [12] Y. Saitoh et al., Rev. Sci. Instrum. 80 (2009) 106104.