

## 原子力機構 TIARA 施設の現状

### PRESENT STATUS OF TIARA AT JAEA

○ 湯山貴裕, 石堀郁夫, 倉島俊, 吉田健一, 石坂知久, 千葉敦也, 山田圭介, 横山彰人, 薄井絢, 宮脇信正, 柏木啓次, 百合庸介, 鳴海一雅, 石井保行, 佐藤隆博, 大久保猛, 喜多村茜, 奥村進, 奈良孝幸  
Takahiro Yuyama #, Ikuo Ishibori, Satoshi Kurashima, Ken-ichi Yoshida, Tomohisa Ishizaka, Atsuya Chiba, Keisuke Yamada, Akihito Yokoyama, Aya Usui, Nobumasa Miyawaki, Hirotsugu Kashiwagi, Yosuke Yuri, Kazumasa Narumi, Yasuyuki Ishii, Takahiro Satoh, Takeru Ohkubo, Akane Kitamura, Susumu Okumura, Takayuki Nara,  
Takasaki Advanced Radiation Research Institute, Japan Atomic Energy Agency

#### Abstract

Four ion accelerators at TIARA of JAEA have been providing ion beams with wide energy range and various ion species for many researchers in material science and biotechnology fields. In addition, some unique irradiation techniques, such as micro-beam irradiation and large-area uniform beam irradiation techniques were developed to meet needs of these researchers. Therewith, we do our best for smooth-operation of accelerators with systematic maintenance and rapid recovery from machine trouble. This paper describes the operational status of the accelerators and the major technical developments.

#### 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 では AVF サイクロトロン (K110)、3MV タンデム加速器、3MV シングルエンド加速器、400kV イオン注入装置の 4 台の加速器を有し、広範囲のエネルギー及び多様なイオン種のビームを提供している。その照射利用には宇宙用半導体材料の耐放射線性評価、高分子材料のイオン照射効果の研究、イオン照射による植物育種や生物細胞の照射応答の研究、RI の生成及び RI 薬剤の評価など、材料・バイオ技術の研究開発への利用を主とし、幅広い分野で利用されている。利用者の多くは既に研究を進めている機関等が主であるが、文部科学省の先端研究基盤共用・プラットフォーム形成事業の対象施設であり、産業界をはじめとする産学官の研究者等への利用を促進し、新しいニーズを浮き彫りにすることにも力を入れている。TIARA では、これら様々な研究開発に効果的なイオン照射を行うため、よりユニークなイオン照射技術を開発してきた。

近年では、マイクロビーム形成技術<sup>[1]</sup>や、多重極電磁石を用いた大面積均一ビーム形成技術<sup>[2]</sup>、C<sub>60</sub> クラスタイオンを生成可能なイオン源開発及び、それを用いた高輝度クラスタビームの照射技術<sup>[3]</sup>など様々な照射技術を開発しており、実際に照射利用を進め、新たな研究への取り組みに貢献している。本報告では 2014 年度における TIARA の稼働状況、保守・整備及び技術開発に関する代表的なトピックスについて説明する。

# yuyama.takahiro@jaea.go.jp

#### 2. 加速器の運転及び整備状況

##### 2.1 TIARA 加速器の運転状況

TIARA における 2014 年の運転状況について、Table 1 に示す。サイクロトロンでは調整運転、新ビーム開発を含めた加速器の利用時間は 2977 時間であった。3 台の静電加速器ではタンデム加速器が 1938 時間、シングルエンド加速器が 2360 時間、イオン注入装置が 1697 時間であった。実験課題数は前年度並みであるが、サイクロトロンでは 2 次冷却系のポンプ異常のため 2.5 時間の実験中止、シングルエンド加速器では、加速管への SF<sub>6</sub> ガスのリーク発生に伴った内部イオン源の交換により 2 日間の実験中止があった。Figure 1 に各研究分野における加速器ごとの利用状況を示す。2014 年度の利用分野別に比較すると、サイクロトロン、静電加速器共に、材料分野への利用が多く、サイクロトロンでは大気中照射が可能な長飛程ビームを利用した細胞照射及び植物育種、20MeV 陽子を利用したポジトロンイメージングなど医療・バイオ応用分野への利用が多い。静電加速器では、3 台の加速器からイオン同時照射が可能であることから、原子炉内部状況を模擬した原子力材料の評価に用いられている。加えて、安定な加速エネルギーによるマイクロビーム形成技

Table 1: Operational Status of Each Accelerator at TIARA in 2014

	Cyclotron	Tandem	Single-ended	Implanter
Operation time [h]	2977	1938	2360	1697
Experiment cancelled	2.5[h]	-	2[d]	-
Number of experiments	502	157	150	137

術を利用した大気マイクロ PIXE(Particle Induced X-ray Emission)<sup>[4]</sup>やPBW(Proton Beam Writing)<sup>[5]</sup>へ応用されている。

## 2.2 サイクロトロン の 保守・整備

2014 年度、サイクロトロンでは 7~8 月に夏期整備期間、11 月に電源整備期間、2 月~3 月上旬にその他の整備期間を設けている。本体整備期間ではサイクロトロンの RF テスト中に予定外の過電流が発生し、共振器内筒のコンタクトフィンガーが焼損するトラブルが発生した。機械的に接触が不均一になったためと考えられ、放電部の研磨及びコンタクトフィンガーの交換により、正常に RF 電圧を印加する事が可能となった。

サイクロトロンは 4 種類の外部イオン源を有しているが、そのうち HECR イオン源の冷却性能を上げるために設置してある、昇圧ポンプのメカニカルシールから水漏れが発生していた。利用運転期間のため、仮設の排水経路を作り、水漏れの影響を抑えつつ運転を継続し、夏期整備期間においてシールの交換修理を行った。

多重極電磁石を用いた大面積均一照射に関する技術開発の一環で、第 3 軽イオン室にあるビームダクトを円形から矩形のものに変更し、ビームの輸送効率を向上させる作業を実施した。該当の交換箇所は建屋クレーンが届かない位置であったため、仮設の門型クレーンを組み立て、それを使用することで四重極マグネットの上ヨークの取り外し及びダクトの

交換作業を行った。

サイクロトロンから引き出されるビームが時間に伴い揺れる現象が発生していた。これはメイン電磁石電源の DAC 基板出力の変動が影響しているものと考え、同基板を交換した。この交換に伴い、DAC 基板上の調整素子では微調整しきれないオフセット成分が残り、従来のパラメータではビームが正常に引き出されなくなってしまった。そこで、磁場調整用の最外周のサーキュラーコイルにより、変動した磁場を補正する事で、正常にビームを引き出している。また、DAC 基板の交換によって、電源の安定度自体は向上している。

## 2.3 静電加速器の保守・整備

静電加速器は 8 月、12 月、3 月にそれぞれ約 2 週間のメンテナンス期間を設けている。

タンデム加速器において、断続的に加速部のターミナル電圧の安定度が低下するトラブルが発生していた。その原因を追究すべく、電源の交換、フィードバック系の機器交換、各種ケーブルの交換等を進めた。これらの調査の結果、電源由来の 100Hz の高調波ノイズが、出力安定器の Terminal Potential Stabilizer の reference 信号に、コモンモードノイズとして乗ることが原因であることが分かった。そこで、電源管体を電氣的に絶縁させることで、reference 信号に乗るノイズを低減させることができ、ターミナル電圧を安定にすることができた。

## 3. サイクロトロンに関する装置改造および技術開発

### 3.1 サイクロトロン制御系更新

サイクロトロンは各種電磁石、RF、ビーム診断機器等様々な制御対象に関して、制御室において制御及び監視を行う集中制御型の制御システムを採用している。そのコンソールには Windows OS の PC を使用し、ユーザーインターフェース(以下: UI)は Wonderware 社製の監視制御ツールである Intouch を用いて構築されている。UI は GCU(Group Control Unit)と SCU(System Control Unit)に分かれており、GCU は数百枚に及ぶ住友重機械工業社製の制御基板である UDC(Universal Device Controller)と光通信によりリンクしており、すべてをほぼ同時に監視及び制御している。GCU の操作及び GCU からのデータ収集を、SCU を用いて行う事により、サイクロトロンの各パラメータを管理している。

SCU は 1 台の操作システムと 2 台の監視用システムに分かれており、操作システムはロータリーエンコーダーによる電磁石電流などの連続的な制御や、ゲートバルブなどの開閉制御が可能であり、加速器運転におけるメインシステムである。監視用システムはファラデーカップによるビーム電流モニターや、エミッタンスモニター、ビームプロファイルモニター等を対象とし、測定値を含む各パラメータのトレンドグラフを表示する機能を備えている。

これらの UI では、近年の Windows XP OS のメー

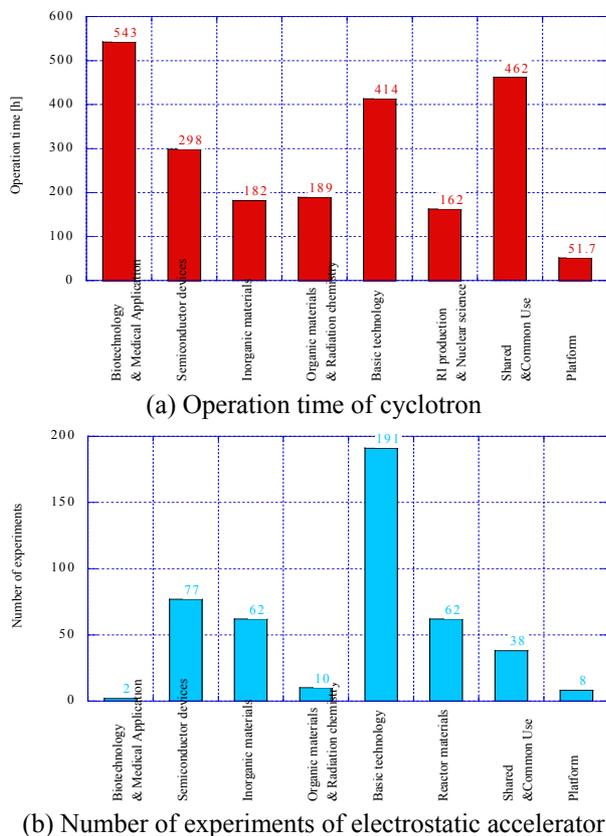


Figure 1: Detail of operation at TIARA for each research field in 2014.

カーサポート終了に伴い、同 OS の PC を入手する事が困難となり、XP OS を用いていた、TIARA の制御系においても対策を施す必要があった。そのため、PC の安定的な確保を可能とし、且つ制御システムの機能向上を図るため、Windows 7 OS の PC を使用した制御システムへと更新を行った。

全体的なシステムはこれまでのものを踏襲し、操作作用及び監視用システムそれぞれに機能を追加した。主な追加項目を以下に記す。

- 調整用ロータリーエンコーダーの増加。  
エンコーダーの数を増加すると共に、操作作用 PC において同時に調整可能な数も同様に増加させ、操作性を向上させた。(6 個→8 個)
- 各エンコーダーに一括で複数の制御対象を割り振るためのコマンドを増加。  
操作作用 PC において電磁石ペアごとの一括選択はこれまでであったが、入射系電磁石機器、サイクロトロン引き出し磁場関連機器、HECR イオン源各種パラメータ等に関して、調整時に必ず使用する項目を、一括で選択操作可能とした。
- トレンドグラフの保存ページの増加。  
(最大 10 ページ→最大 120 ページ)
- トレンドグラフのログデータを保存可能にした。  
(画像保存のみ→画像保存+CSV 形式のデータ保存可能)
- トレンドグラフの表示データ数を増加。  
(8 データ×4 画面→8 データ×6 画面)  
各トレンドグラフの機能を表記の通り向上させ、プロット間隔がこれまで最小 1 秒であったのに対し、0.3 秒間隔でデータを収録する事が可能となった。加えて、トレンドデータの CSV 保存は、保存時間を設定する自動保存機能と、任意のタイミングで保存可能な手動保存共に使用可能にした。
- 各種運転パラメータ(ダイナミックパラメータ)のログデータを CSV 形式のデータとして保存可能にした。
- 操作画面の変更

Figure 2 に SCU の旧レイアウトと新レイアウトを示す。これまで制御用画面は最大化で表示され、ビームモニタとトレンドグラフを同時に見るためには監視用 PC のどちらかをトレンドグラフ、他方をビームモニタにする必要があったが、更新後は画面レイアウトの拡張が可能になったため、各種制御用画面をウィンドウ化してトレンドグラフとビームモニタ等を 1 つの画面で同時に観測できるようになった。これにより、調整時の煩雑さが低減し、操作性が向上した。

以上の更新によって、制御システムの継続使用環境を整えると共に、操作性を大きく向上させること

が出来た。

### 3.2 軽イオン用イオン源更新

サイクロトロンの中イオン用イオン源として使用していたマルチカスプ型イオン源は、設置から 20 年以上が経過しており、フィラメント寿命がこれまでに比べ極端に短くなっていた。そのため、サイクロトロンにおいて利用頻度の高い軽イオンビームを安定に供給するため、永久磁石型 ECR イオン源である PANTECHNIK 社製 NANOGAN を後継機に採用した。

マイクロ波源の増幅方式は整備性の向上のため SSPA (Solid State Power Amplifier) とした。またマイクロ波出力の安定化を図るため水冷式とし、ALC (Automatic Level Control) を搭載させた。

本装置の設置により、H 及び He に関してこれまで使用していたマルチカスプ型イオン源の後継機として十分なビーム電流が確認出来ている。今後、サイクロトロンにおける軽イオンビーム生成に使用していく。

### 3.3 C<sub>60</sub> フラワーレンビーム計測用 FC の開発

数十～数百 keV のフラワーレンイオンは単原子イオンと比較して、照射に伴い多くの二次イオンが発生する。そのため、イオンビーム電流の測定にはファラデーカップ(FC)のアスペクト比を高くするなど、二次電子及び二次イオンを閉じ込める構造とすることが必要である。しかし、正確なイオン電流を測定するために、どの程度のアスペクト比が必要であるか知見が得られていない。そこで、アスペクト比が 5、10、15 及び 20 と異なる 4 種類の FC を用いて、400keV イオン注入装置で生成・加速した Ar<sup>+</sup>、Ar<sup>2+</sup>、C<sub>60</sub><sup>+</sup>、及び C<sub>60</sub><sup>2+</sup> のイオン電流を測定し比較した。測定の結果、すべてのイオンについてアスペクト比 10、15 及び 20 の FC で得られたイオン電流値はほぼ一定であり、アスペクト比 5 の FC で得られた電流値よりも低い値であった。本実験で行った 100 - 540 keV のエネルギー範囲では、フラワーレンイオン電流を測定するためにはアスペクト比 10 以上の FC が必要であることが分かった。

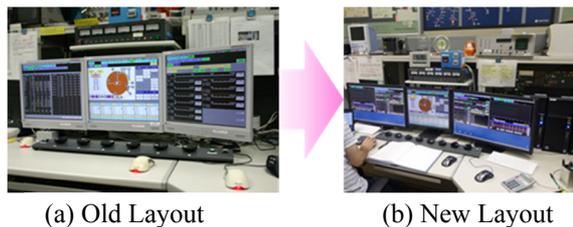


Figure 2: Layout of Cyclotron control console.

## 参考文献

- [1] M. Oikawa, et al., Nucl. Instrum. Methods B 260 (2007).
- [2] Y. Yuri, N. Miyawaki, T. Kamiya, W. Yokota, K. Arakawa, and M. Fukuda, Phys. Rev. ST Accel. Beams 10 (2007) 104001.
- [3] A. Chiba et. al., Nucl. Instrum. Methods B 269 (2011) 824.
- [4] T. Sakai et. al., Nucl. Instrum. Methods B 190 (2002) 271.
- [5] N. Uchiya, et al., Nucl. Instrum. Methods B 260 (2007) 405.