

## QST 高崎イオン照射研究施設(TIARA)の現状報告

### PRESENT STATUS OF TIARA AT QST

湯山貴裕<sup>#</sup>, 倉島俊, 千葉敦也, 吉田健一, 山田圭介, 石坂知久, 横山彰人, 平野貴美, 細谷青児,  
宮脇信正, 柏木啓次, 百合庸介, 佐藤隆博, 大久保猛, 石堀郁夫, 奥村進, 奈良孝幸  
Takahiro Yuyama<sup>#</sup>, Satoshi Kurashima, Atsuya Chiba, Ken-ichi Yoshida, Keisuke Yamada, Tomohisa Ishizaka,  
Akihito Yokoyama, Yoshimi Hirano, Seiji Hosoya, Nobumasa Miyawaki, Hirotsugu Kashiwagi, Yosuke Yuri,  
Takahiro Satoh, Takeru Ohkubo, Ikuo Ishibori, Susumu Okumura, Takayuki Nara  
Takasaki Advanced Radiation Research Institute, National Institutes for Quantum and Radiological Science and  
Technology

#### Abstract

Four ion accelerators at TIARA of QST 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 were developed to meet needs of these researchers. This paper describes the operational status of the accelerators, major technical developments and maintenance.

#### 1. はじめに

量子科学技術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で多様なイオン種のビームを提供している。その利用分野は多岐にわたり、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、多くの材料・生物応用分野に関して、イオンビームを用いた研究開発が進められている。

TIARA では、様々な研究開発に効果的なイオン照射を行うため、マイクロビーム形成技術[1]や、多重極電磁石を用いた大面積均一ビーム形成技術[2]、C<sub>60</sub> クラスターイオン源開発及び、それを用いたクラスタービームの照射技術[3]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2017年度におけるTIARAの稼働状況、保守・整備状況及び技術開発に関して説明するとともに、サイクロトロンのメインコイル更新作業の現状について報告する。

#### 2. 加速器の運転及び整備状況

TIARA における2017年度の運転状況を Table 1 に、各加速器における月ごとの運転時間を Figure 1 にそれぞれ示す。調整運転、新ビーム開発を含めた加速器の総利用時間はサイクロトロンが2219時間、3台の静電加速器ではタンデム加速器が1981時間、シングルエンド加速器が2388時間、イオン注入装置が1751時間であった。

静電加速器では、イオン注入装置のフリーマンイオン源で使われているフィラメント電源のトラブルにより2日間停止した。しかし、それ以外は大きなトラブルもなく順調

に稼働し、タンデム加速器とシングルエンド加速器においては稼働率100%運転を達成した。8月及び12月は長期定期整備期間が含まれており、全体を通して利用時間、実験課題数ともに例年並みであった。近年技術開発に成功し、ビーム電流が飛躍的に増大したC<sub>60</sub>イオンは、タンデム加速器及びイオン注入装置において、最も利用率が高く、MeV級クラスターイオン利用への関心が大きく高まっていることが確認できる。

サイクロトロンでは2016年12月に発生したメインコイルのレイヤショートに対して、ショート箇所からの発熱、火

Table 1: Operational Status of Each Accelerator at TIARA in 2017 FY

	Cyclotron	Tandem	Single-ended	Implanter
Operation time [h]	2219	1981	2388	1751
Number of experiments	206	165	165	144

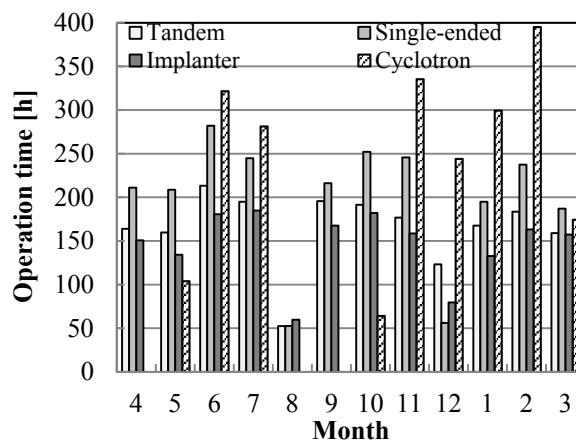


Figure 1: Operation time of each accelerator at TIARA in 2017 FY.

災発生等を防ぐため、通電経路変更による応急処置を実施した。メインコイルの経路変更によりコイル使用可能範囲が総巻数の 6 割に減少したため、該当範囲でイオン加速を可能とするべく、パラメーターの再調整もしくは新規作成を行った。この経路変更作業を 2017 年 4 月に、経路変更後のパラメーター調整を 5 月に実施した。これにより、最大  $^{129}\text{Xe}^{26+}$  350 MeV のエネルギーで加速器の利用を再開した。8 月～10 月上旬にかけて、省エネ休止兼、装置の長期定期整備期間を設けたが、予定外停止を抑え、冷却水系の工事を実施していた 2016 年度と同程度の運転時間を確保する事ができた。

### 3. 各加速器の保守整備及び技術開発

#### 3.1 サイクロトロン共振器内部のエアリーク修理

サイクロトロンの加速箱中の真空度は、停止状態において通常  $6 \times 10^{-5} \text{Pa}$  程度であるが、2017 年 6 月頃、 $1.5 \times 10^{-4} \text{Pa}$  程度まで真空度が悪化する現象が発生した。原因を追及したところ、高周波電圧を発生させる共振器内部において、圧縮空気ラインからエアリークが起きていることが判明した。該当の圧縮空気ラインは、共振器の内筒及び外筒を導通させるショート板の接触子駆動に用いられている。接触子駆動のための圧縮空気供給に同期して真空度が悪化することから、圧縮空気ラインからのエアリークが原因であることが分かった。そのため圧縮空気ラインに使用されている O リングを全数交換した。Figure 2 に O リング交換時の共振器内部を示す。本作業の際、共振器外筒側接触子に焼損が起きていることが新たに判明した。そのため、放電箇所を研磨清掃、焼損した接触子の交換を併せて実施した。これらの作業後は、真空度が従来程度に向上し正常に運転を継続している。

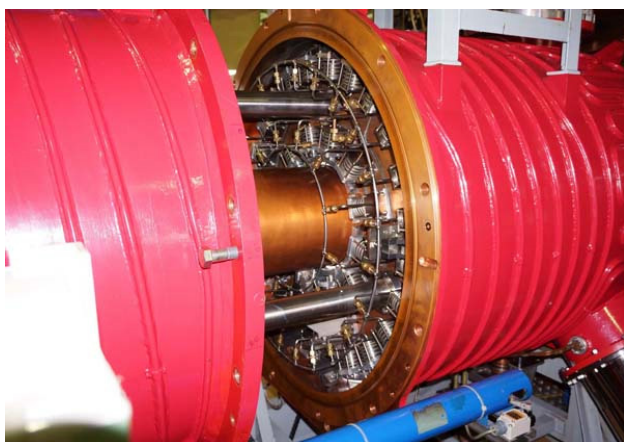


Figure 2: The compressed air cylinder in resonator with O-ring replaced.

#### 3.2 照射室遮蔽扉のメンテナンス

TIARA では安全な利用運転のため、照射室の扉閉閉状態をインターロックに含めている。しかし、2016 年 11 月にサイクロトロンの第 5 重イオン室の遮蔽扉が完全に動作不可となり、修理が完了するまで同照射室における照射実験利用ができなくなった。そのため、2017 年 1 月

と 3 月に遮蔽扉の修理を行った。その結果、遮蔽扉の動作不良の原因は、車輪軸等のベアリング故障であることがわかった。TIARA には同型の扉が第 1 重イオン室、第 3 重イオン室、シングルエンド本体室、第 1 ターゲット室に使用されているが、いずれの遮蔽扉も車軸のメンテナンスはしていない。そのため同様の不具合発生を防止するため、上記 4 台の遮蔽扉に関してベアリング交換による車軸の整備を実施した。Figure 3 に遮蔽扉のベアリング交換作業の様子を示す。本メンテナンス実施後、該当扉は順調に駆動している。



Figure 3: Replacement of a bearing used in a shielding door.

#### 3.3 静電加速器のビーム開発

400kV イオン注入装置では、新ビーム開発としてネオジウム( $\text{Nd}^+$ )ビームの開発を行った。試料として粉末の塩化ネオジウム( $\text{NdCl}_3$ )を用い、フリーマンイオン源のオープンに装着し、イオン生成及び加速に成功し、利用を開始した。なお、オープンの温度  $670^\circ\text{C}$  で約 180nA のビーム電流を計測している。これにより、ワイドバンドギャップを持つ半導体生成に関する研究において、新たな条件での実験可能となった。

#### 3.4 シングルエンド加速器のビームエネルギー安定性の評価

シングルエンド加速器では、2016 年 12 月に RF タンク内電磁シールド損傷が発生し、4 ヶ月間定格で運転ができなかったが、シールドを補修することで定格運転が可能となった。ここでビームエネルギー安定性についてシールド損傷の影響を調査するため、共鳴核反応を用いたエネルギー測定を行った。利用するのは  $^{27}\text{Al}(\text{p},\gamma)^{28}\text{Si}$  の共鳴核反応であり、Al ターゲットに約 1MeV の陽子ビームを照射し、発生した  $\gamma$  線の収量を測定して共鳴点を求めた。このとき、最大の共鳴核反応を得るため、ターゲットに三角波電圧 (0.07Hz, 0~5kV) を印加することで、Al ターゲットへの入射エネルギーを変調している。ビームエネルギーの測定に併せて、以前よりエネルギー変動の要因と想定されている受電元の商用 AC 電源の電圧測定を行い、両者を比較した。商用 AC 電源との比較のため、加速電圧のフィードバック制御回路は外してエネルギーを計測し、商用 AC 電源はテスターにより電圧を測定した。

Figure 4 に核共鳴反応により得られたビームエネルギーと商用 AC 電源電圧の時間変動に関する測定結果を示す。計測の結果、ビームエネルギーは 1002.2 keV、安定度は  $5.8 \times 10^{-4}$  であった。商用 AC 電源は 201~204V の範囲で変動したが、ビームエネルギーとの相関はみられなかった。

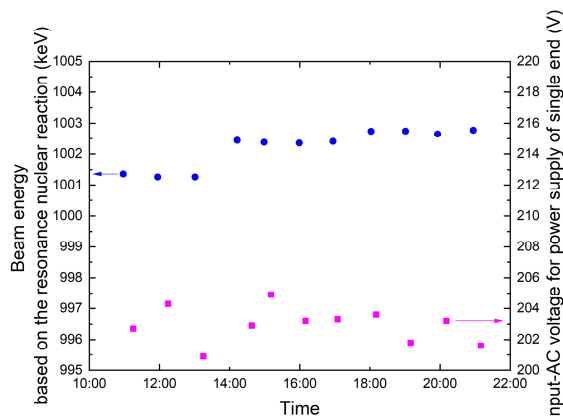


Figure 4: Comparison of time fluctuation of proton beam energy and AC power supply. The beam energy was measured by resonance nuclear reaction.

## 4. サイクロトロンメインコイルの故障と更新

### 4.1 メインコイルのレイヤショートと応急処置

サイクロトロンは 2014 年頃より、主磁場の変動が生じており、原因究明及び変動原因と想定された電磁石電源の部品交換や補正磁場のフィードバック制御の適用などの対策を講じていたが、2016 年 12 月にコイル電源の電圧降下を伴うレイヤショートが発生し、加速器の正常運転が困難となった。そこで前述の通り通電経路変更処置を施すことで、メインコイルの使用を 6 割に制限して利用運転を継続している[4]。サイクロトロンの性能が低下したことにより、TIARA においてこれまで加速していた  $^{192}\text{Os}^{30+}$  490 MeV などの高エネルギー重イオンの照射が実施できなくなっている。しかしながら、重イオン照射を利用する研究分野において上記イオン種などの再利用への要求は強く、メインコイルの更新に関する検討を進めることとなった。

### 4.2 サイクロトロン本体室遮蔽壁の放射化評価

メインコイル更新を進めるにあたり、メインコイル故障原因の調査、新規コイル仕様、コイル交換手順、コイル搬入経路、コイル更新作業期間等の検討を行った。コイル搬入経路の検討の結果、既存の搬入口及び搬入経路では直径が 3m を超えるメインコイルの搬入が不可能であることが分かった。そこで、サイクロトロン建設時に搬入口が設けられていた本体室北側の遮蔽壁を再度開口し、コイルの搬入口を確保することにした。

本体室内側の壁については、Figure 5 に示すようにコンクリートのコア抜きを事前に行い、放射化の調査を行った。その結果、表面から深さ約 20cm の部分については極微量の  $^{152}\text{Eu}$  等が検出された(トリチウムについても含

有調査を行ったが未検出であった)ため、この部分に関してはコア抜き作業により取り除き、残りのコンクリート壁に関してはダイヤモンド・ワイヤーソーによる切削・開口工事を予定している。



Figure 5: Concrete core of the shielding wall in the cyclotron main room.

### 4.3 メインコイルの取り外し

検討したメインコイルの更新計画をもとに、現在メインコイルの更新作業を実施している。TIARA サイクロトロンは 1993 年のファーストビーム以来、はじめてメインコイルの取り外しを行う。そのため解体手順、各機器の取り外し方法、保管場所の確保など、解体作業から復旧作業に至るまで入念に検討を進めた。

正常に復旧させるため、取り外すサイクロトロン本体構成機器全ての据付位置を確認した後、デフレクター、共振器、メインプローブ等、加速箱に設置されている構成機器を取り外し、移動した。その後、加速箱、電磁石の中心にあるポール(約 9t)、メインコイル(約 5t)を取り外すため、既存の天井クレーン(定格 2.8t)に加え、天井に新たにギアードトルジョイント結合式チェーンブロック(定格 10t)を設置した。また、サイクロトロン内部から、加速箱、ポール、メインコイルをチェーンブロックの吊上げ位置まで引き抜くための、昇降装置及び引き出し治具を取り付け、安全且つ円滑に各機器の取り出しを実施している。Figure 6 に加速箱、ポールを取り外した後に、引き出し治具によりメインコイルを引き出している様子を示す。



Figure 6: Removing the main coil of the cyclotron.

## 5. まとめ

2017年度のTIARA施設において、3台の静電加速器は順調に稼働し、運転状況は例年通りであった。新ビームの開発及び利用、またクラスターイオン照射の利用率向上など、今後も更なる利用が期待される。サイクロトロンに関しては、メインコイルのレイヤショートへの対策、出力制限における調整運転などに時間を費やした以外は順調であり、冷却水系工事があった2016年度と同程度の運転時間を達成している。2018年度に入り、サイクロトロン復旧の要求に応え、2019年度からの定格出力による利用運転を可能とするべく、日々、メインコイル更新完遂に向けて各種作業を進めている。

## 参考文献

- [1] M. Oikawa *et al.*, Nucl. Instrum. Methods B 260 (2007) 85.
- [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] N. Miyawaki *et al.*, Proc. 14th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Sapporo, Japan, 2017, p. 1409.