

QST 高崎研 TIARA 施設の現状報告 2025

2025 STATUS REPORT OF TIARA FACILITY AT QST TAKASAKI

山田圭介#, 千葉敦也, 吉田健一, 石坂知久, 湯山貴裕, 平野貴美, 細谷青児, 菅沼瑠里,
宮脇信正, 柏木啓次, 高野圭介, 齊藤宏行, 金井信二, 青木勇希, 橋爪将司, 倉島俊
Keisuke Yamada#, Atsuya Chiba, Ken-ichi Yoshida, Tomohisa Ishizaka, Takahiro Yuyama, Yoshimi Hirano,
Seiji Hosoya, Ruri Suganuma, Nobumasa Miyawaki, Hirotsugu Kashiwagi, Keisuke Takano, Hiroyuki Saito,
Shinji Kanai, Yuuki Aoki, Masashi Hashizume, Satoshi Kurashima

Takasaki Institute for Advanced Quantum Science, National Institutes for Quantum Science and Technology (QST)

Abstract

The Takasaki Ion accelerators for Advanced Radiation Application (TIARA) facility consists of four ion accelerators (the AVF cyclotron with a K value of 110 MeV, the 3 MV tandem accelerator, the 3 MV single-ended accelerator and the 400 kV ion implanter) and these accelerators have been providing ion beams with wide energy range and various ion species for many researchers mainly in materials science and biotechnology fields. The annual operation times of each accelerator in FY 2024 were 966.1 h, 1111.3 h, 1115.7 h and 815.5 h, respectively. There was no cancellation of the experiments about the four accelerators. This paper describes the recent operational status, maintenance of the accelerators and major technical developments.

1. はじめに

量子科学技術研究開発機構(QST)高崎量子技術基盤研究所のイオン照射研究施設 TIARA (Takasaki Ion accelerators for Advanced Radiation Application) は、Fig. 1 に示す通り K110 AVF サイクロトロン、3 MV タンデム加速器、3 MV シングルエンド加速器、400 kV イオン注入装置の 4 台の加速器とビームラインから構成され、幅広いエネルギー範囲 (20 keV ~ 数百 MeV) で多

様なイオンビームを提供し、また、様々な技術開発を行っている[1-7]。サイクロトロンでは 4 台の ECR イオン源を用いて水素からオスmiumまでのイオンを加速し、利用目的に応じて水平方向に 10、垂直方向に 4 つ用意された照射ポートに輸送される。重イオンマイクロビーム用垂直照射ラインは 2 つ備わっている。静電加速器では、軽イオン及び重イオン用水平マイクロビームラインの他、3 台それぞれの加速器で加速されたビームを 1 つの照射ポートに輸送して同時に照射できるトリプルビーム照射や、

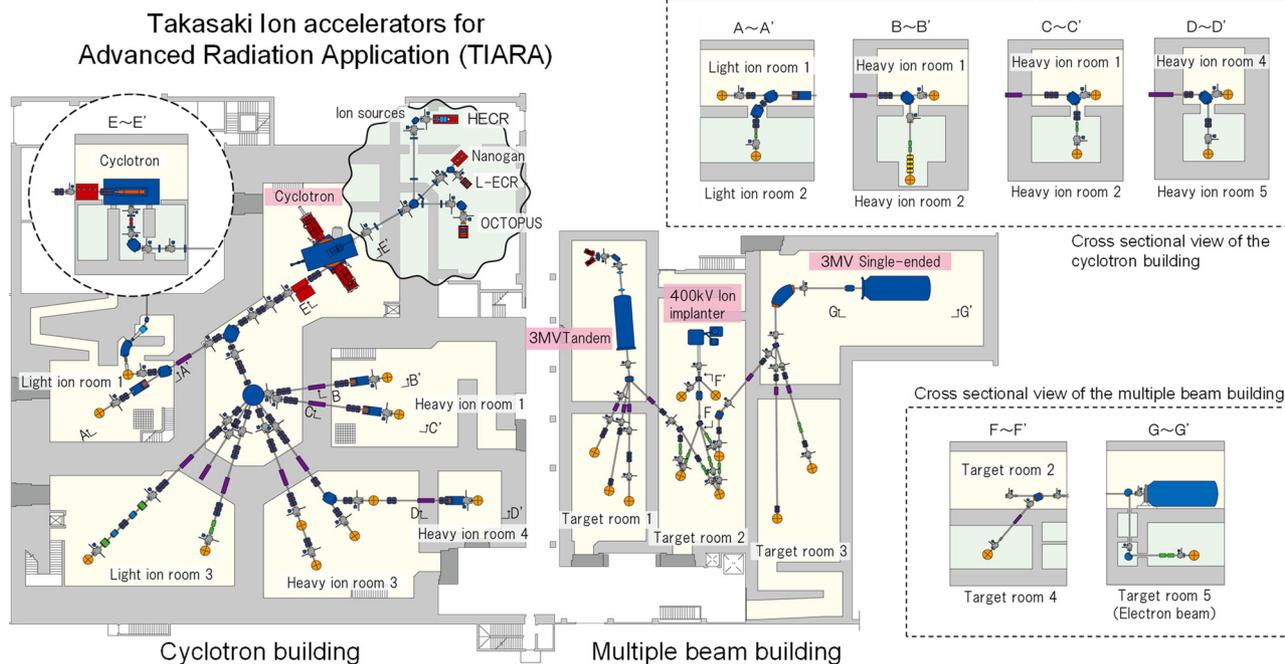


Figure 1: Layout of the accelerators and beam lines of the TIARA facility.

yamada.keisuke@qst.go.jp

同じく 2 台を用いたデュアルビーム照射の利用が大きな特徴である。本報告では 2024 年度における TIARA 加速器の運転状況や保守・整備及び技術開発について報告する。

2. 運転状況

4 台の加速器の 2024 年度における運転状況を Table 1 に示す。装置不良による実験延期対応が 2 件あったが、ユーザー都合によるキャンセルを除けば 100% の利用率を達成した。サイクロトロンは電気料金の高騰により引き続き厳しい状況が続いているが、2024 年度の運転時間は 2023 年度と比べ 47% 増加した。

Table 1: Operational Status of Each Accelerator at TIARA in Fiscal 2024

	Cyclotron	Tandem	Single-ended	Implanter
Operation time [h]	966.1	1111.3	1115.7	815.5
Number of experiments	108	147	85	119

TIARA では QST 研究員による利用(他機関との共同研究を含む)の他に、有償の施設供用制度が設けられており、研究成果の公開/非公開により利用料金は異なるが、大学や企業などにも広く利用されている。Table 2 は 2024 年度における施設供用の申込件数を示す。

Table 2: Number of Experiment Offers Under the Facility Use Program in Fiscal 2024

	University	Public Institute	Private Company	Total
Cyclotron	9	3	6	18
Tandem	30	11	4	45
Single-ended	10	15	0	25
Implanter	20	5	0	25

Figure 2 はサイクロトロンで利用されたイオン種の内訳を示す。RI 製造では水素やヘリウムなどの軽イオンが利用される。アルファ線による標的アイソトープ治療での利用が注目される ^{211}At を製造するためにヘリウムビームが頻繁に使われる。宇宙半導体素子の耐放射線評価では、線エネルギー付与の異なる複数のイオンビームを同一のマシントイム中に照射したいとの要望があり、カクテルビーム加速(質量電荷比 = 5, 3.75 MeV/u)によるイオン種の短時間切り替えが行われる[1]。その他、炭素や希ガスなどの重イオンが生物照射効果研究や半導体照射に利用される。

Figure 3 は 3 台の静電加速器で利用されたイオン種の内訳を示す。タンデム加速器では軽イオンの利用はそれほど多くなく、核融合中性子照射模擬やセラミック材

料改質に Fe や Au 等の金属イオンが用いられる。その他、フラーレン C_{60} に代表されるクラスタービームによる照射効果の研究や重イオンの打ち込みによる半導体の欠陥エンジニアリングの研究なども行われている。シングルエンド加速器は軽イオンと、昇圧回路の極性を切り替えることにより電子を加速できる。プロトン・マイクロビームを用いた物質表面の微細領域の元素分析やプロトン・ビーム・ライティング(PBW)による微細加工の実験等が行われる他、地下の第 5 ターゲット室(Fig. 1 中の Target room 5)では電子ビームの照射が可能であるが 2024 年度は電子ビームの利用は無かった。イオン注入装置については、重イオンの利用が多く、近年では、ダイヤモンド中に窒素-空孔(NV)センターを近接距離に複数形成するためにアデニン($\text{C}_5\text{H}_5\text{N}_5$)やフタロシアニン($\text{C}_{32}\text{H}_{18}\text{N}_8$)等の有機化合物イオンを用いた実験も行われている[8, 9]。

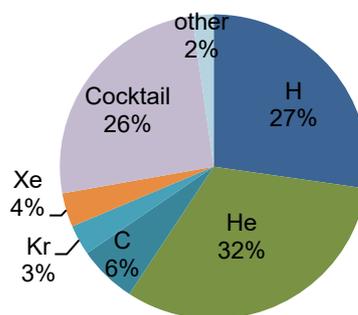


Figure 2: Utilization rates of ion species for cyclotron in fiscal 2024.

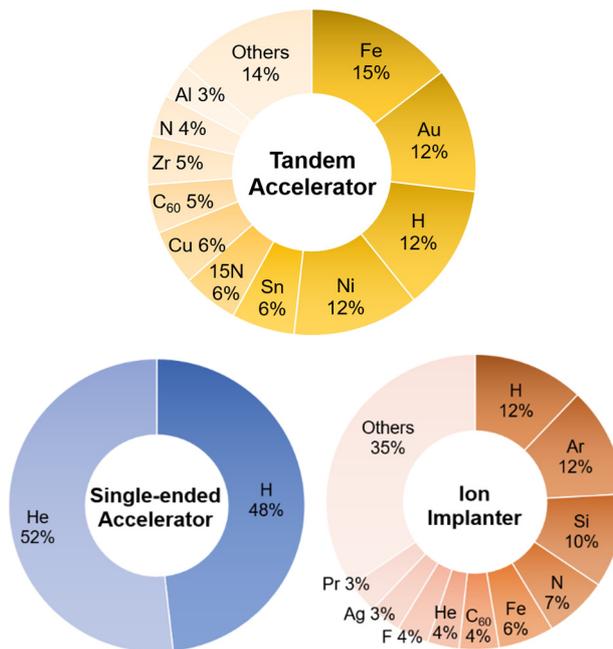


Figure 3: Utilization rates of ion species for each electrostatic accelerator in fiscal 2024.

3. 静電加速器の整備状況

タンデム加速器では、ターミナル電圧をGVMにより測定している。近年 3 MV 付近の高いターミナル電圧では GVM 測定値が時間とともに増加してしまうという現象が発生していた。初め GVM アンプの交換を実施したが、状況は改善しなかったため、GVM モーターを交換した所、正常に動作したためモーターの劣化によるものと考えている。その他、冷却水チラー及びマグネット電源の故障、制御系アサイナブルコントローラの不調など、2024 年度は故障・不調が頻発したがいずれも早期の修理・交換によって全てのマシンタイムを実施できた。

シングルエンド加速器では 7 月の定期整備で RF イオン源用発振管とガス流量を制御するためのサーモメカニカルリークバルブの交換、2 月の定期整備でイオン源コルツ及び RF フィーダー線及び RF 電極の交換を行った。2 月の定期整備以降、ビーム電流量が約半分程度に減少しており RF 電極位置の再調整を行ったが、状況は変化しなかった。そのため 2025 年度の定期整備において再度イオン源周りの点検・交換を実施する予定である。また 1 月に SB ラインの冷却水用ウレタンチューブが破断・水漏れし、チラーを共有するイオン注入装置のマシンタイムを 1 日延期した。冷却水用チューブに劣化が見られたため、3 月にシングルエンド加速器の冷却水チューブを全面的な更新を行った。

イオン注入装置では 6 月に放電により架台分割抵抗が損傷したため交換を行った。9 月にイオン源の不調によりマシンタイムを 1 日延期した。使用しているフリーマンイオン源ガス導入配管の劣化により、試料ガスがプラズマ室へ十分に導入できなかったことが原因と判明し、ガス配管の交換を行った。新ビーム開発では、ビーム電流が不安定であった Er イオンについて、新たに塩化エルビウム(ErCl_3)を用いてイオン生成試験を行い、200 nA の Er^+ を安定に生成することに成功した。

また静電加速器全体として、故障や劣化の進んでいた監視カメラの更新を行った。本体室及び照射室等に 12 台の PTZ ネットワークカメラを設置し、汎用用途の 3 台を加え計 15 台のカメラ画像を制御室モニタ及び居室 PC のブラウザで監視できるようにした (Fig. 4)。さらに 2025 年度は静電加速器のインターロックを構成する PLC やモニタ等の安全監視システムの更新、及びタンデム加速器ビームライン BPM の更新を予定している。



Figure 4: Update of surveillance camera system. Picture of updated camera monitor in the operation room.

4. サイクロトロン of 整備状況

サイクロトロンでは、4 月の運転開始前の整備として、かすかに異音が生じていた冷温水ユニットの冷却水ポンプを更新し、利用運転に備えた。しかし、運転開始とともに 2009 年から使用していた加速用 RF のシンセサイザーが故障した。幸い 2009 年まで使用していたシンセサイザー (1993 年製) を修理・保管していたため長期の運転停止を避けることができた。その後、10 月にシンセサイザーを新品に更新した。

サイクロトロンは夏季に定期整備を実施しており、2024 年度はマグネティックチャンネルの冷却用シンプレックスチューブの交換とデフレクター (2 号機) の整備を行った。高線量であるデフレクターの電極は、10 年以上前に取り外して線量が下がった電極を使用して整備した (Fig. 5)。その他整備としては、制御盤等に搭載されている 24 V 電源や冷却用ファンの交換、冷温水ユニットの純水器、ロータリーポンプなどの油脂類の交換、圧空レギュレーターの交換、電磁石電源の点検保守などを行った。



Figure 5: Picture of maintaining the deflector electrode.

参考文献

- [1] S. Kurashima *et al.*, Quantum Beam Sci. 1, 2 (2017).
- [2] S. Kurashima *et al.*, Rev. Sci. Instrum. 92, 013303 (2020).
- [3] A. Chiba *et al.*, Quantum Beam Sci., 4(1), 13, (2020).
- [4] R. Suganuma *et al.*, “2024 Status report of TIARA facility at QST Takasaki”, Proc. PASJ2024, Yamagata, Japan, Jul.-Aug. 2024, pp. 1156-1158.
- [5] H. Kashiwagi *et al.*, “Study of four-dimensional acceptance measurement method at the TIARA cyclotron”, Proc. PASJ2022, Online, Oct. 2022, pp. 748-750.
- [6] N. Miyawaki *et al.*, “Measurement of beam energy width using beam energy position monitor”, Proc. PASJ2024, Yamagata, Japan, Jul.-Aug. 2024, pp. 868-870.
- [7] Y. Ishii *et al.*, Nucl. Instr. Meth. B 557, 165539 (2024).
- [8] M. Haruyama *et al.*, Nature communications, 10, 2664 (2019).
- [9] K. Kimura *et al.*, Appl. Phys. Express 15, 066501 (2022).