

量研高崎研 TIARA 施設の現状報告 2024

2024 STATUS REPORT OF TIARA FACILITY AT QST TAKASAKI

菅沼瑠里[#], 千葉敦也, 吉田健一, 石坂知久, 山田圭介, 湯山貴裕, 平野貴美, 細谷青児, 倉島 俊,
宮脇信正, 柏木啓次, 百合庸介, 石堀郁夫, 高野圭介, 齊藤宏行, 金井信二, 青木勇希, 橋爪将司
Ruri Suganuma[#], Atsuya Chiba, Ken-ich Yoshida, Tomohisa Ishizaka, Keisuke Yamada, Takahiro Yuyama,
Yoshimi Hirano, Seiji Hosoya, Satoshi Kurashima, Nobumasa Miyawaki, Hirotsugu Kashiwagi, Yosuke Yuri,
Ikuo Ishibori, Keisuke Takano, Hiroyuki Saito, Shinji Kanai, Yuuki Aoki and Masashi Hashizume

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 2023 were 655.6 h, 1012.1 h, 1088.4 h and 853.5 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[1-6]。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ミウム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、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 2023 年度における TIARA

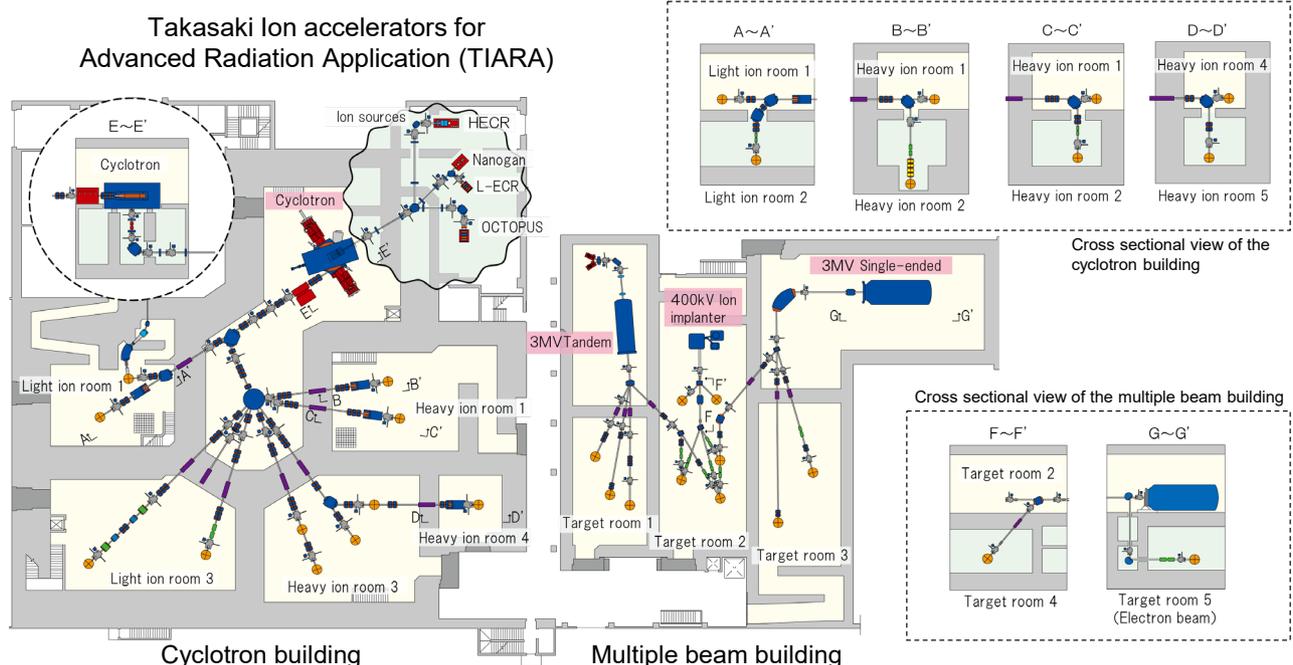


Figure 1: Layout of the accelerators and beam lines of the TIARA facility.

[#] suganuma.ruri@qst.go.jp

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 2023 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 1 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。

Table 1: Operational Status of Each Accelerator at TIARA in Fiscal 2023

	Cyclotron	Tandem	Single-ended	Implanter
Operation time [h]	655.6	1012.1	1088.4	853.5
Number of experiments	86	138	84	109

TIARA では量研研究員による利用（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、2023 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 2023

	University	Public Institute	Private Company	Total
Cyclotron	8	3	5	16
Tandem	20	6	6	32
Single-ended	13	8	0	21
Implanter	17	4	1	22

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 の製造ではヘリウムビームが重点的に使われる。宇宙半導体素子の耐放射線性評価では、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]。金属イオンとしては、オスmiumなどの重イオンがナノファイバー形成の実験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、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が行われる。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。イオン注入装置については、重イオンやフラーレンの利用が多く、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[7,8]のためにアデニン ($\text{C}_5\text{H}_5\text{N}_5$) やフタロシアニン ($\text{C}_{32}\text{H}_{18}\text{N}_8$) を用いた実験も行われている。

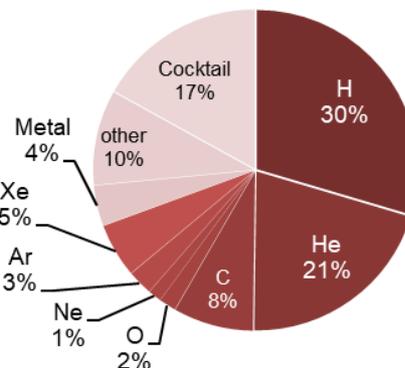


Figure 2: Ion species used for cyclotron experiments in fiscal 2023.

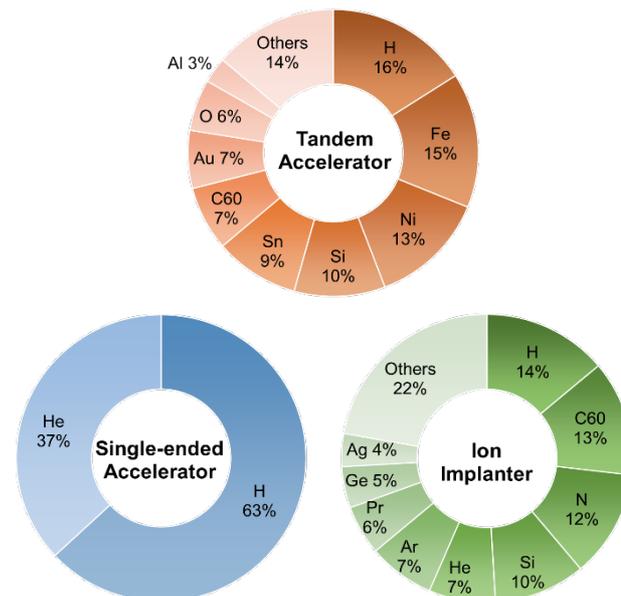


Figure 3: Utilization rates of ion species for each electrostatic accelerator in fiscal 2023.

3. 静電加速器の整備・開発状況

タンデム加速器では、12 月に本体室の冷却水用チラーの更新を行った。また、新ビームとしてプラセオジウム (Pr) ビームの開発を行った。ターゲットコーンの試料には酸化プラセオジウム (Pr_6O_{11}) を使用した。ビーム量は末端ファラデーカップで最大 20 nA 程度であったが、ビーム量は不安定であり、現在調整中である。

シングルエンド加速器では 3 月に電圧測定抵抗の更

新を行った。Figure 4 に旧型、新型の電圧測定抵抗の写真を示す。旧型の使用後には各抵抗の高電圧側に多く放電痕がみられたため、新型では寸法を 10 mm 大きくし、かつ抵抗器の向きを決め、高電圧側の抵抗パターンの間隔を広くとるように改良した。また、発電機用の 3 本の絶縁シャフトを接続するためのトリボールジョイントに放電痕からの油漏れが見られたため、トリボールジョイント及びベアリングの交換も併せて実施した。

イオン注入装置では 4 月に累計運転 50,000 時間を達成した。3 月にはアインツェル電源の更新を行い、現時点で不具合等は発生していない。トラブルとして、ターボ分子ポンプコントローラーの経年劣化による故障が発生した。

新規イオン源開発として、N クラスターイオン源の技術開発に着手している。

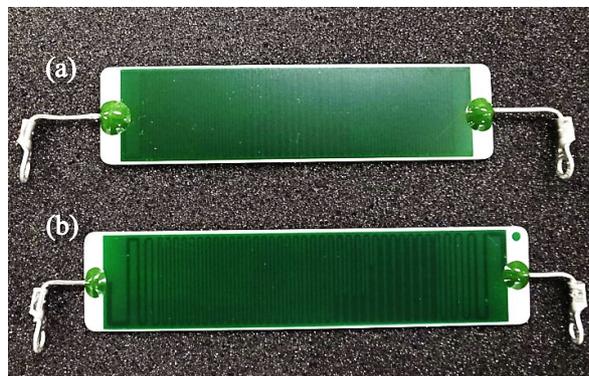


Figure 4: Voltage measurement resistor used within Single-ended Accelerator: (a) old type, and (b) new type.

4. サイクロトロン の 整備・開発状況

サイクロトロンは夏に定期整備を実施している。今年度は 2 台ある共振器のうち 1 台のコンタクトフィンガーの交換を実施した。また、起動時間が最も長い真空系冷却水ポンプのベアリング部から異音が発生していたため、ポンプの更新作業を行った。Figure 5 に旧ポンプの新日本造機製の横型ポンプ、新ポンプの荏原製作所の汎用縦型ポンプの写真を示す。新ポンプは旧ポンプを比較してメカニカルシール交換時の部品調達や整備が容易である。また吐き出し量(55 l/min)などのスペックは旧ポンプと同様であるが、消費電力は約 1/3 になり省エネルギーも実現した。

その他整備としては、本体系冷却水ポンプの整備や診断ステーションに設置してある圧空減圧弁および圧力計の交換、ロータリーポンプなどの油脂類の交換、高速シャッター弁 (FCV) 用コントローラーの修理、電磁石電源の点検保守などを行った。FCV は、弁本体とコントローラーで成り立っている。FCV は各ビームラインとサイクロの出口付近に 8 台設置されており、真空が悪化した際 0.6 秒程度で閉まる。FCV は設置から 30 年が経過し、経年劣化と思われる症状でコントローラーの不具合が発生している。そのため不具合が発生した際は、予備品と交換し順次修理を行っている。

3 月末から装置を停止していた影響からか、定期整備後に復旧作業を始めた 9 月下旬から実験利用再開まで

の 9 日間だけで故障等が 20 件程度発生した。特にスキャナー電源の不具合については、内部の PLC 故障が原因と判明したが、設置後 20 年以上経過しているため修理対応が難しいと考えられたが、設置時に購入していた予備品があったこと、また PLC のプログラムが ROM タイプでプログラムの移植が容易であったことから修理することができた。

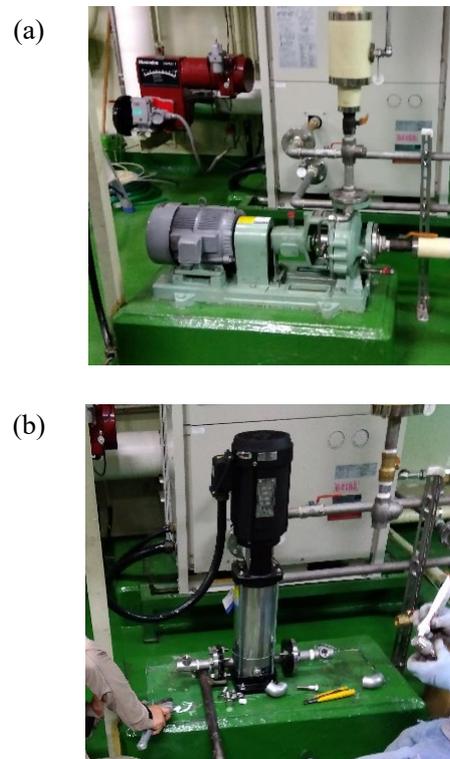


Figure 5: Cooling water pump: (a) old type, and (b) new type.

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] S. Kurashima *et al.*, “量研高崎研 TIARA 施設の現状報告 2023”, Proceedings of the 20th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Funabashi, Japan, Aug.-Sep. 2023, pp. 1041-1043.
- [5] H. Kashiwagi *et al.*, “TIARA AVF サイクロトロンにおける 4 次元アクセプタンス測定方法の検討”, Proceedings of the 19th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Kitakyushu (Online meeting), Japan, Oct. 2022, pp. 748-750.
- [6] N. Miyawaki *et al.*, “At-211 製造のためのビームエネルギー制御におけるサイクロトロン の パラメータの影響”, Proceedings of the 20th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Funabashi, Japan, Aug.-Sep. 2023, pp. 680-682.
- [7] M. Haruyama *et al.*, Nature communications, 10, 2664 (2019).
- [8] K. Kimura *et al.*, Appl. Phys. Express 15, 066501 (2022).