

## 量研高崎研 TIARA 施設の現状報告 2023

### 2023 STATUS REPORT OF TIARA FACILITY AT QST TAKASAKI

倉島 俊#, 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, 宮脇信正, 柏木啓次,  
百合庸介, 石堀郁夫, 奈良孝幸, 居城 悟, 高野圭介, 金井信二, 青木勇希, 橋爪将司

Satoshi Kurashima#, Atsuya Chiba, Ken-ich Yoshida, Tomohisa Ishizaka, Keisuke Yamada, Takahiro Yuyama,  
Yoshimi Hirano, Seiji Hosoya, Nobumasa Miyawaki, Hirotsugu Kashiwagi, Yosuke Yuri, Ikuo Ishibori,  
Takayuki Nara, Satoshi Ishiro, Keisuke Takano, Shinji Kanai, Yuuki Aoki and Masashi Hashizume

Takasaki Institute for Advanced Quantum Research, 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 2022 were 1268.7h, 1134.4h, 1297.2h and 894.5h, respectively. There was no cancellation of the experiments due to machine troubles 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)高崎量子応用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 つの照射ポートへと輸送して同時に照射できるトリプルビーム照射

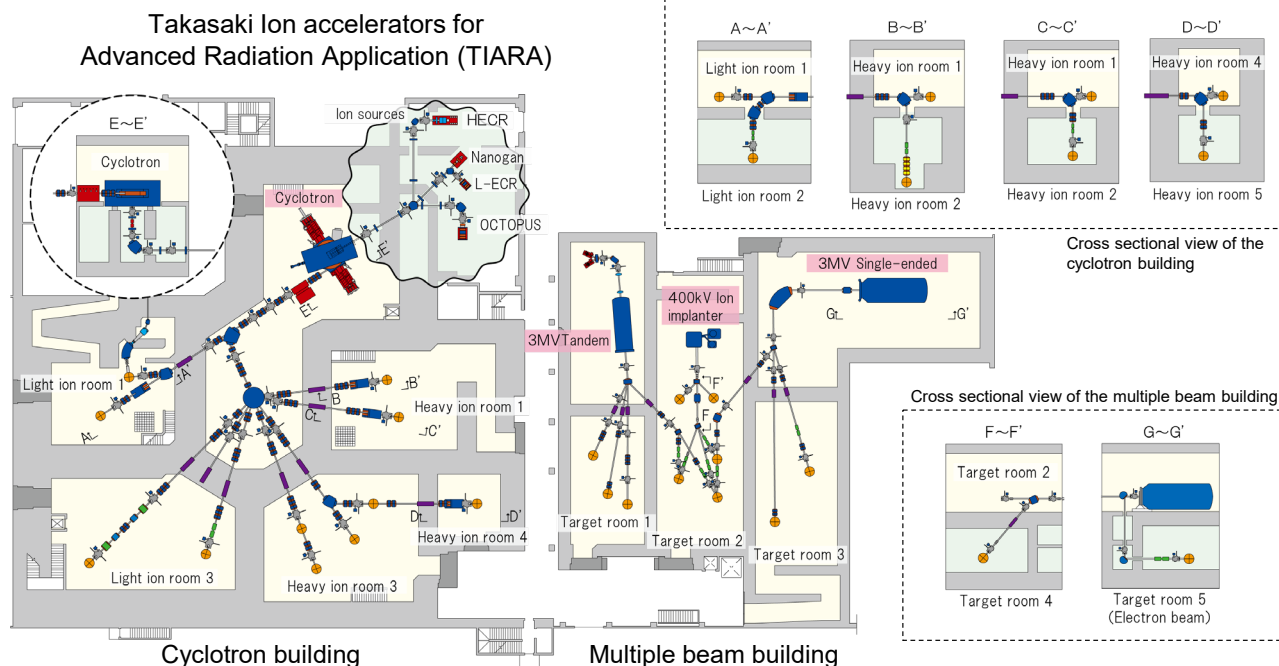


Figure 1: Layout of the accelerators and beam lines of the TIARA facility.

# kurashima.satoshi@qst.go.jp

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 2022 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 2022 年度における運転状況を Table 1 に示す。装置の故障等による実験のキャンセルはなく、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 2022

	Cyclotron	Tandem	Single-ended	Implanter
Operation time [h]	1268.7	1134.4	1297.2	894.5
Number of experiments	169	146	123	122

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、有償の施設共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、2022 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 2022

	University	Public Institute	Private Company	Total
Cyclotron	17	3	9	29
Tandem	28	12	6	46
Single-ended	11	9	0	20
Implanter	16	6	0	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  $^{211}\text{At}$  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]。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、フラウレン C<sub>60</sub> 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、重イオンやフラウレンの利用が多く、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]のためにアデニン(C<sub>5</sub>H<sub>5</sub>N<sub>5</sub>)やフタロシアニン(C<sub>32</sub>H<sub>18</sub>N<sub>8</sub>)を用いた実験も行われている。

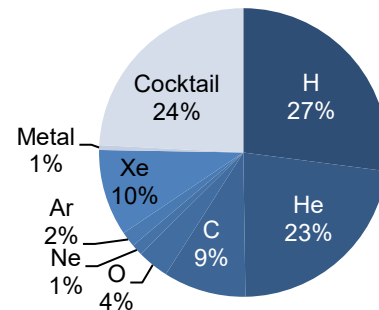


Figure 2: Ion species used for cyclotron experiments in fiscal 2022.

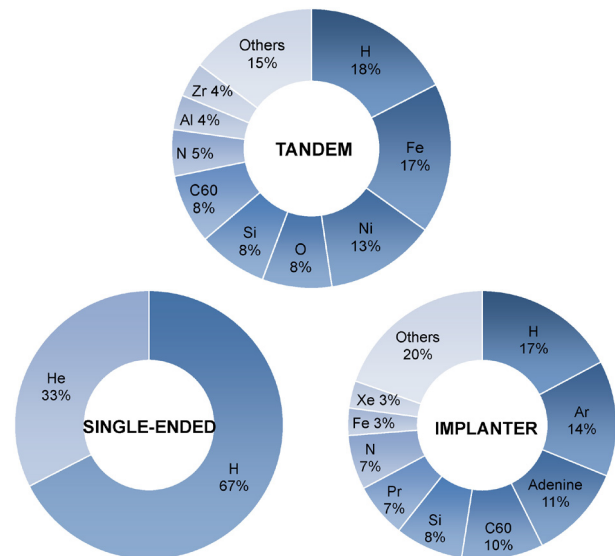


Figure 3: Utilization rates of ion species for each electrostatic accelerator in fiscal 2022.

## 3. 静電加速器の整備・開発状況

前年度末に 3 台の静電加速器の制御系を更新したことで、2022 年度の制御系に関するトラブルは大幅に減少した。特にタンデム加速器では、IO モジュールを CAMAC から ACT(米国 NEC 製)に切り替える、国内では例のない大規模な更新を行い、堅牢性が著しく向上したことで制御系のトラブルは発生しなかった。一方、シングルエンド加速器とイオン注入装置は、10 年以上使用してきたシーケンサーなどのモジュールを継続利用する条

件で、最新の PC や OS に適応させるためにアプリケーションを新規で設計し、システム全体を再構築したこともあり、通信系に起因すると考えられる不具合が何度か発生した。そのため、2022 年度はバグ修正も含めアプリケーションの改修を行った。その他の整備としては、タンデム加速器のペレットチェーンのクリーニングやイオン源引出電源の更新、汎用実験チャンバーの半自動操作システムの構築、シングルエンド加速器のイオン源発振管交換や分析電磁石用 NMR プローブの更新、イオン注入装置の各種オーバーホールなどを行った。

タンデム加速器では、MeV 級の高速  $C_{60}$  をマイクロビーム化して 1 次イオンとした飛行時間型 2 次イオン質量分析技術の開発を進めている。高速  $C_{60}$  クラスタービームの特異な照射効果を利用することで、未知の分子の同定が可能で、全分子マッピング技術の実現を目指している。ビームラインに新たに構築した分子マッピング装置 (Fig. 4) で草本植物の茎の断面を試料とした測定実験を行ったところ、複雑な試料でありながら種々の分子を高感度で検出し、質量数 600 を超える分子までマッピングできることを確認した。

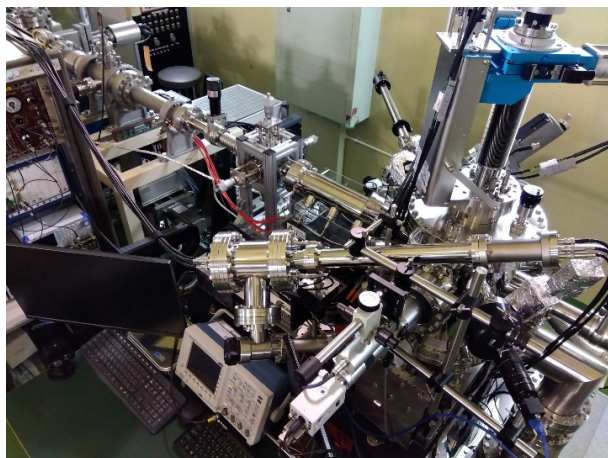


Figure 4: Molecular mapping system using the  $C_{60}$  micro beam.

#### 4. サイクロトロン整備・開発状況

夏のメンテナンスにおいては、前年度に行ったサイクロトロン本体メインコイルの冷却水ホース交換に引き続き、トリムコイルやマグネティックチャンネル等その他の本体機器の冷却水ホースを交換した。その他整備としては、煙感知器の交換を含む電磁石電源の点検保守、クライオポンプのメンテナンス、ロータリーポンプなどの油脂類の交換などを行った。トラブルとして、真空機器の制御基板の故障、ファラデーカップの故障、真空ポンプの故障等があったが、装置停止につながる重大なものではなく安定な運転を継続できた。2023 年 3 月 1 日には、1991 年度の運用開始から累積して運転 9 万時間を達成した (Fig. 5)。

研究開発として、アルファ線による標的アイソトープ治療で用いられる  $^{211}\text{At}$  を効率的に製造するため、加速後のビームエネルギーをリアルタイムで測定・微調整する技術を開発しており、ビーム電流量や軌道の大きな変化

を抑えてエネルギーを微調整するには、取り出し側のハーモニックコイルの調整が有効であることが分かってきた。

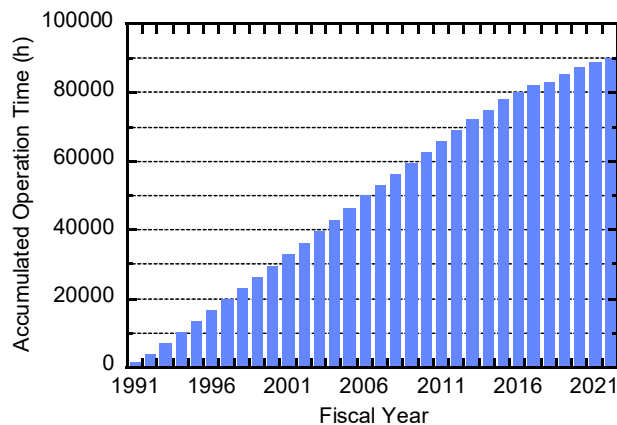


Figure 5: Accumulated operation time of the cyclotron since FY 1991.

#### 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 2022”, Proceedings of the 19th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Online, Oct. 18-21, 2022, pp. 1161-1163.
- [5] H. Kashiwagi *et al.*, “TIARA AVF サイクロトロンにおける 4 次元アクセプトランス測定方法の検討”, Proceedings of the 19th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Online, Oct. 18-21, 2022, pp. 748-750.
- [6] N. Miyawaki *et al.*, “TIARA AVF サイクロトロンの高精度ビームエネルギー制御の検討”, Proceedings of the 19th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Online, Oct. 18-21, 2022, pp. 889-892.
- [7] M. Haruyama *et al.*, Nature communications, 10, 2664 (2019).