

QST 高崎イオン照射施設 (TIARA)の現状報告

PRESENT STATUS 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, 奥村 進, 奈良 孝幸

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,
Susumu Okumura, Takayuki Nara

Takasaki Advanced Radiation Research Institute, National Institutes for Quantum and Radiological Science and
Technology

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). 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 operation time of each accelerator was decreased compared with the previous year because of the facility shut down due to the COVID-19 state of emergency. There was no cancellation of the experiments due to machine troubles about the four accelerators. This paper describes the recent operational status, major technical developments and maintenance of the accelerators.

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、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 10 MeV H⁺ から 27.5 MeV/u までの重イオンを加速し、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。静電加速器では、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

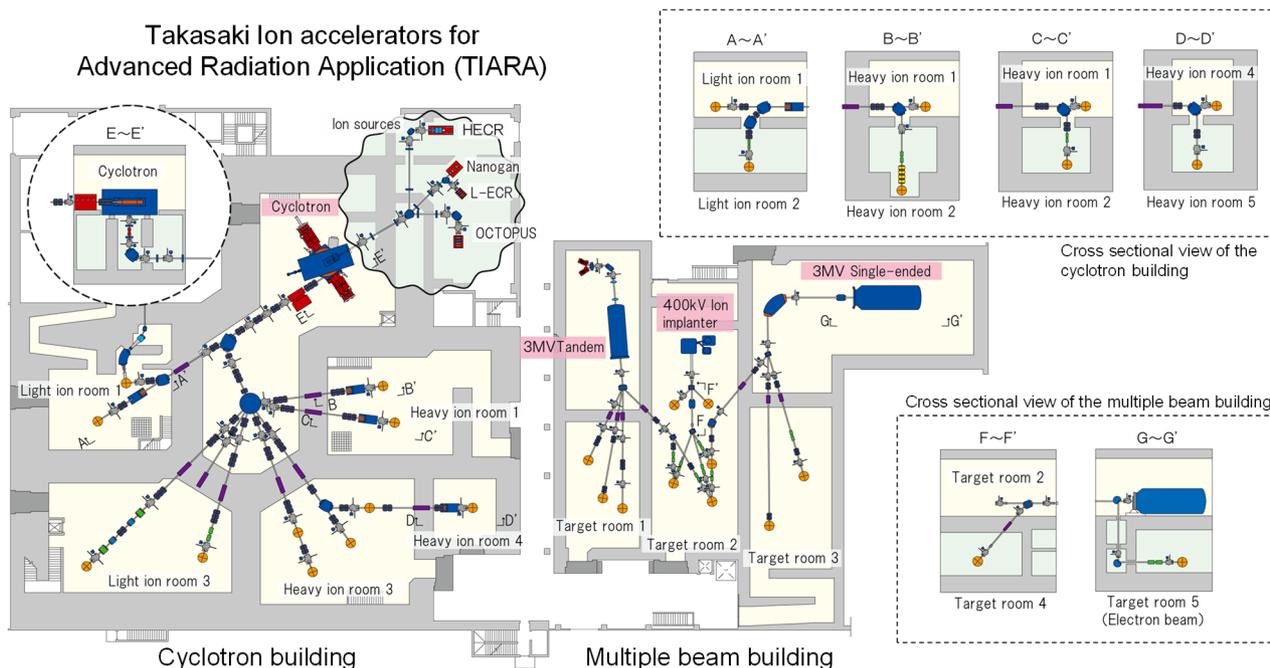


Figure 1: Layout of the accelerators and beam lines of the TIARA facility.

[#] kurashima.satoshi@qst.go.jp

ム照射の利用が大きな特徴である (Fig. 1 中の Target room 2)。本報告では 2020 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

TIARA における 2020 年度の運転状況を Table. 1 に示す。サイクロトロンは月曜日から金曜日の夕方まで昼夜連続運転を、静電加速器は 9 時～23 時までのデイリー運転を行っている。新型コロナウイルス感染症緊急事態宣言による施設の利用停止措置のため、4 台の加速器ともに運転時間や実験数は前年度に比べて減少した。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 2020

	Cyclotron	Tandem	Single-ended	Implanter
Operation time [h]	1880	1629	1637	1555
Number of experiments	194	110	82	101

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、2020 年度における施設供用の利用件数を示す。

Table 2: Number of Irradiation Experiments under the Facility Use Program in Fiscal 2020

	University	Public Institute	Private Company	Total
Cyclotron	14	2	4	20
Tandem	19	6	4	29
Single-ended	0	6	0	6
Implanter	7	12	1	20

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タイム中に照射する必要があり、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

少なく、フラーレン C_{60} に代表されるクラスタービームの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専用であり、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が行われる。2020 年度については、地下の第 5 ターゲット室における電子ビームの利用はなかった。イオン注入装置については、プロト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] 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。

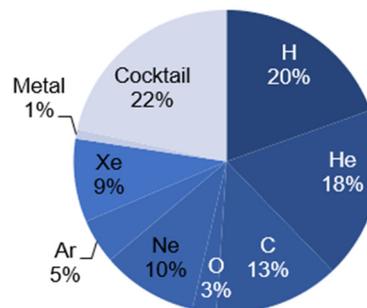


Figure 2: Ion species used for cyclotron experiments in fiscal 2020.

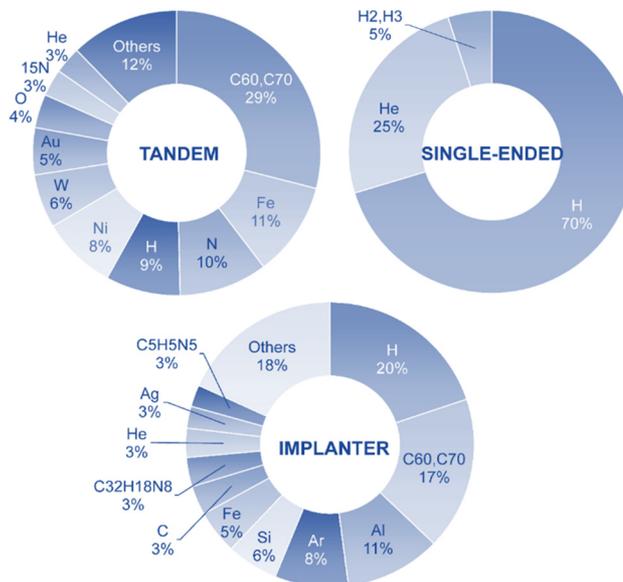


Figure 3: Utilization rates of ion species for each electrostatic accelerator in fiscal 2020.

3. 静電加速器の整備・開発状況

タンデム加速器では、フラーレンビームの電流増強や高安定化を目的として新しいイオン源ラインを整備し [8]、2020 年度から実際の実験で使用している。同じくタンデム加速器では、有機・無機複合材や生体高分子などの

構成分子を高感度に分析するため、Fig. 4 に示すようにフラーレン・マイクロビームを用いた顕微分子マッピング装置の開発を進めており、現在までに約 $1 \mu\text{m}$ のビーム径を達成した。整備としては、タンデム加速器のペレットチェーンを駆動するモータ、シングルエンド加速器のエネルギー分析電磁石で使用する核磁気共鳴プローブ、イオン注入装置のステアラー電磁石の電源の交換などを行った。

3 台の加速器の共通する問題として、制御系 PC やシーケンサ装置の老朽化が挙げられる。PC はしばしばハングアップするため、その都度再起動の必要があり、ロスタイムの原因となっていた。そこで、タンデム加速器については制御系 PC と CAMAC モジュールを、シングルエンド加速器とイオン注入装置については制御系 PC を 2021 年度中に更新する予定である。

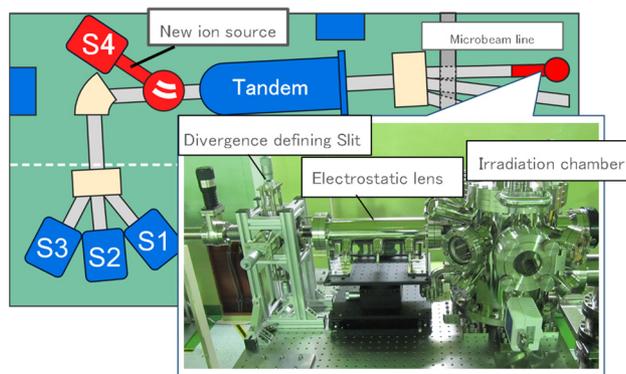


Figure 4: Newly installed fullerene microbeam formation system using electrostatic lens.

4. サイクロトロン整備・開発状況

サイクロトロンの RF システムでは、プリアンプ用に 800 W、メインアンプ用に 50 kW の真空管を約 30 年使用してきた。しかし、プリアンプで使用する真空管 (CPI 社製 4CW800B) が製造中止になったため、1 kW のトランジスタアンプへ置換することにした。プリアンプ及びメインアンプは一体物のボックスとして 2 台の共振器にそれぞれ取り付けられており、今回はプリアンプ回路の周辺を改造した。プリアンプからは真空管が撤去され、代わりとなるトランジスタアンプは Fig. 5 に示すように本体室地下 1 階に設置され (1 筐体に共振器 2 台分のトランジスタアンプが組み込まれている)、高周波ケーブルによりメインアンプ回路へ給電する。この改造作業においては、50 kW メイン真空管の空冷用ファンを大型のプロアへと変更し、冷却能力を増強している。インターロックの配線や、制御系プログラムも変更し、プリアンプ更新後は大きなトラブルなく運転を続けている。

その他整備としては、サイクロトロン共振器のコンタクトフィンガー及びメイン真空管の交換、入射系クライオポンプのメンテナンス、本体室遮蔽扉の駆動装置の修理、加速器冷却水ポンプのメカニカルシールの交換などを行った。



Figure 5: Picture of the newly installed 1 kW transistor amplifier for the cyclotron RF system.

5. バーチャル・リアリティ施設公開

コロナ禍と言うことで、大人数での加速器施設の見学はなかなか行えない状況である。そこで量研高崎では、一般社団法人 VR 革新機構の協力を得て、TAIRA の加速器や照射室の高精細バーチャル・リアリティ 3D View を作成し、ホームページで公開している[9]。PC やスマートフォンのブラウザから簡単に見ることができるので、多くの方々にご覧いただきたい。

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] T. Yuyama *et al.*, “多重極電磁石を用いた大面積均一ビームと中空ビームの形成”, Proceedings of the 17th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Online, Sep. 2-4, 2020, pp. 449-452.
- [5] H. Kashiwagi *et al.*, “サイクロトロン位相プローブを用いたビーム強度測定”, Proceedings of the 17th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Online, Sep. 2-4, 2020, pp. 707-709.
- [6] N. Miyawaki *et al.*, “TIARA AVF サイクロトロン低エネルギービーム輸送系におけるビーム輸送効率改善の検討”, Proceedings of the 17th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Online, Sep. 2-4, 2020, pp. 710-713.
- [7] M. Haruyama *et al.*, Nature communications, 10, 2664 (2019).
- [8] N. Miyawaki *et al.*, “QST 高崎イオン照射施設 (TIARA) の現状報告”, Proceedings of the 17th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Online, Sep. 2-4, 2020, pp. 890-892.
- [9] <https://www.qst.go.jp/site/taka-shisetsubu/49717.html>