

量研高崎研 TIARA 施設の現状報告 2022

2022 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 Advanced Radiation Research Institute, National Institutes for Quantum 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 to about 60% compared to the usual year because of major change of the operational plan. 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。垂直照射用の重イオンマイクロビームラインが 2 つ備わっている。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ム照射の利用が

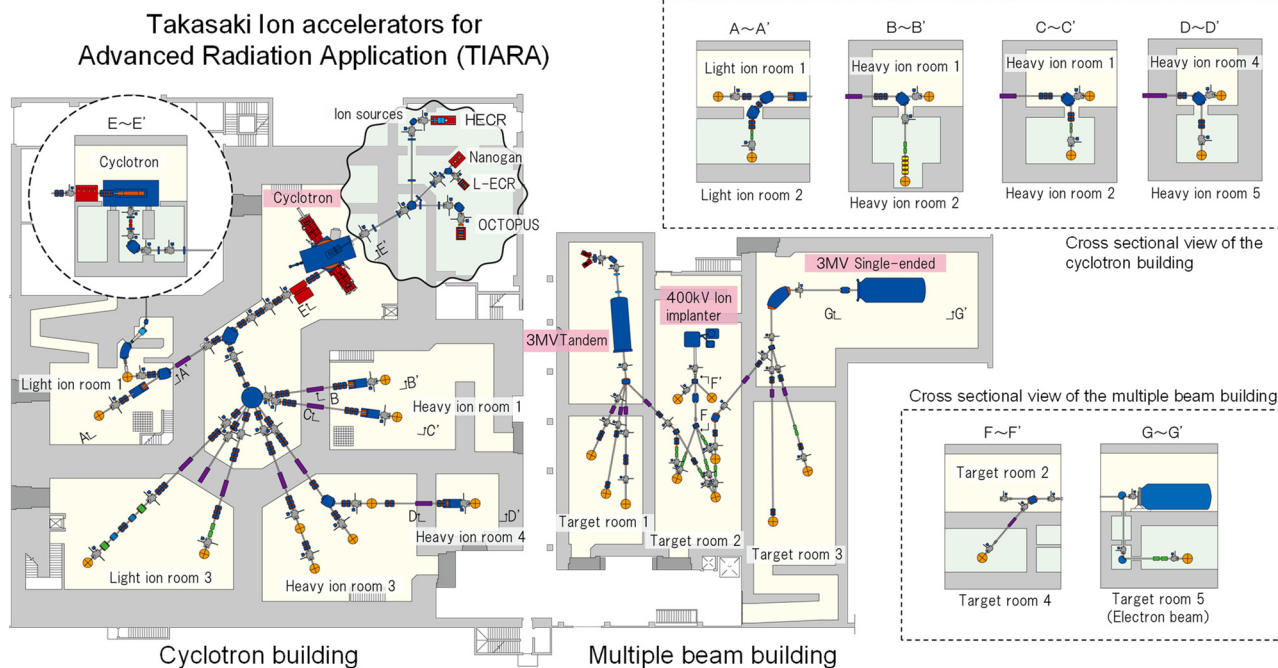


Figure 1: Layout of the accelerators and beam lines of the TIARA facility.

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

大きな特徴である (Fig. 1 中の Target room 2)。本報告では 2021 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 2021 年度の運転状況を Table. 1 に示す。2020 年度までは、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、静電加速器は 9 時～22 時までのデイリー運転を行っていたが、2021 年度からはサイクロトロンは 22 時まで、静電加速器は 17 時までのデイリー運転へと運転計画を大幅に変更した。新型コロナウイルス関連による実験のキャンセルも含めると、それぞれの加速器の運転時間はこれまでの 6 割程度にまで減少した。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 2021

	Cyclotron	Tandem	Single-ended	Implanter
Operation time [h]	1367	1021	1227	918
Number of experiments	189	140	130	120

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、2021 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 2021

	University	Public Institute	Private Company	Total
Cyclotron	13	4	7	24
Tandem	28	9	4	41
Single-ended	9	6	7	22
Implanter	16	12	0	28

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。地下の第 5 ターゲット室では電子ビームの照射も可能であるが、2021 年度の利用はなかった。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] 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。

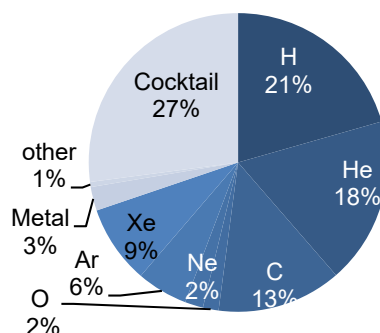


Figure 2: Ion species used for cyclotron experiments in fiscal 2021.

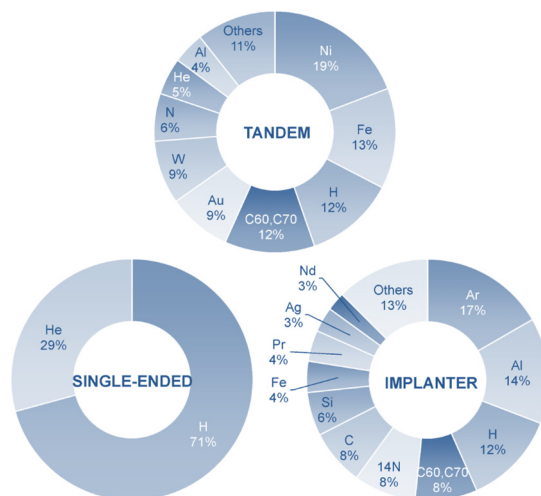


Figure 3: Utilization rates of ion species for each electrostatic accelerator in fiscal 2021.

3. 静電加速器の整備・開発状況

制御系 PC や遠隔制御機器の老朽化は、3 台の加速器に共通する問題であった。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 約 30 年使用した 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 2022 年の 2 月から 3 月にかけて更新した。タンデム加速器については、イオン源やビーム輸送ラインの分析電磁石電源の更新も行い (Fig. 4), CAMAC モジュールを最新の制御機器に置き換えたこともあり、ビーム電流の安定性が向上した。また同時に、軽イオン及び重イオンマイクロビームラインの電磁石や制御プログラムなどの更新も行い、より高度な照射を行うための開発を継続していく。

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、シングルエンド加速器のイオン源引き出し電極のアライメントや RF 発信回路の真空管交換、各種イオン源のオーバーホールなどを行った。

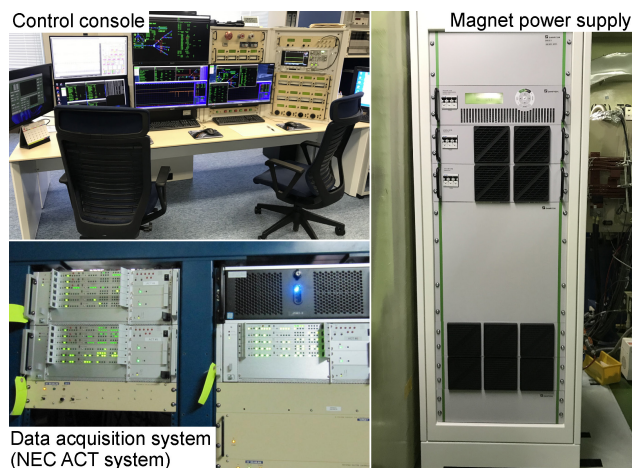


Figure 4: Upgraded control system and power supplies.

4. サイクロトロン of の整備・開発状況

サイクロトロン本体に関しては、2018 年に行ったメインコイル更新時に一部の冷却水ホースを交換しているが、前回の全数交換から 10 年以上経過しており、ゴムホースに硬化の兆候が見られていたため、夏のメンテナンスで交換した (Fig. 5)。トリムコイルやその他の冷却水ホースは、2022 年度のメンテナンスで交換する予定である。マグネティックチャンネルの入口電流プローブは、低放射化のためにカーボン製ブロックのヘッドを使用しているが、間接水冷であるため徐熱が不十分な箇所があり、部品の一部が溶けるなどの問題があった。そこで、プローブヘッドと水冷部分の熱伝導性を高めたものに交換した。

その他整備としては、電磁石電源の点検保守、本体クライオポンプのメンテナンス、イオン源ガス検知器の交換冷却水ポンプのメカニカルシールの交換などを行った。

研究開発としては、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}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し、微調整する装置や、入射ビームのエミッタンスと加速器のアクセプタンスのマッチングを取るための装置開発を引き続き行っている。

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

は現在でも行えない状況である。量研高崎研では、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 [8]。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。



Figure 5: Picture of replacing the water-cooling hoses of the cyclotron main coil.

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.*, “QST 高崎イオン照射施設 (TIARA) の現状報告”, Proceedings of the 18th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Online, Oct. 9-12, 2021, pp. 771-773.
- [5] H. Kashiwagi *et al.*, “非線形集束におけるビームロス低減に向けたビーム入射・加速方法の検討”, Proceedings of the 18th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Online, Oct. 9-12, 2021, pp. 88-91.
- [6] N. Miyawaki *et al.*, “TIARA AVF サイクロトロンにおける RI 製造用ビームラインのビームエネルギー位置モニターの開発”, Proceedings of the 18th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Online, Oct. 9-12, 2021, pp. 302-305.
- [7] M. Haruyama *et al.*, Nature communications, 10, 2664 (2019).
- [8] <https://www.qst.go.jp/site/taka-shisetsubu/49717.html>