

# QST 高崎イオン照射施設 (TIARA) の現状報告

## PRESENT STATUS OF TIARA AT QST

宮脇信正<sup>#</sup>, 倉島俊, 千葉敦也, 吉田健一, 湯山貴裕, 石坂知久, 山田圭介, 横山彰人, 平野貴美, 佐藤隆博, 柏木啓次, 百合庸介, 大久保猛, 石堀郁夫, 奥村進, 奈良孝幸

Nobumasa Miyawaki<sup>#</sup>, Satoshi Kurashima, Atsuya Chiba, Ken-ichi Yoshida, Takahiro Yuyama, Tomohisa Ishizaka, Keisuke Yamada, Akihito Yokoyama, Yoshimi Hirano, Takahiro Satoh, Hirotsugu Kashiwagi, Yosuke Yuri, Takeru Ohkubo, 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 an AVF cyclotron with a K-value of 110, the 3-MV tandem accelerator, the 3-MV single-ended accelerator and the 400 keV ion implanter. These accelerators have been providing ion beams with wide energy range and various ion species for many researchers in material science and biotechnology fields. This paper described operational status and some developments in the TIARA facility.

### 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施設 (TIARA) には、AVF サイクロトロン (K110)、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 台の加速器が設置されており、主に材料・バイオ技術の研究開発への利用のために、広範囲のエネルギー及び多様なイオン種のビームを提供している。

サイクロトロンは、10MeV の H<sup>+</sup>イオンから 27.5MeV/u までの重イオンを加速することができ、加速されたビームは利用目的に応じて水平方向に 10、垂直方向に 4 つの照射ポートのいずれかに輸送される。照射利用の例として、宇宙半導体材料の耐放射線評価では短時間で多様なイオン種とエネルギーが要求され、RI 生成では軽イオンの大電流ビームを必要とするなど、多種多様な要求に応じるとともに、施設の利用効率を高めることも課題である。そこで、4 つのイオン源の整備や複数のイオン種を注入し、加速周波数の変更によって短時間でイオン種を切り替えるカクテルビーム加速技術[1]、磁場の高安定化技術[2]によるビーム強度の安定化等の開発をこれまで行ってきた。近年、照射精度 1 $\mu$ m の重イオンマイクロビーム形成[3]や多重極電磁石を用いた大面積均一照射[4]、シングルパルスビーム形成[5]等の開発を行い、実験に利用されている。

3 つの静電加速器は、それぞれ加速されたビームが 1 つの照射ポートで同時に照射できるトリプルビーム照射や 2 つを用いたデュアルビーム照射が可能である。個々の加速器では、3MV タンデム加速器は、単原子イオンの他に分子イオンの加速により、材料・バイオ技術の研究開発や分析に用いられてきたが、近年炭素原子 60 個がサッカーボール状に結合したフラレン (C<sub>60</sub>) 等のクラスターイオンを生成可能なイオン源とそれを用いた高輝度クラスタービームの照射技術[6]が開発され、これを利

用した実験が行われている。3MV シングルエンド加速器は、主に H<sup>+</sup>ビームを加速した後、磁気レンズで 1 $\mu$ m 以下に集束したマイクロビームで、大気マイクロ PIXE (Particle Induced X-ray Emission) 分析 [7] や PBW (Proton Beam Writing) [8] に用いられている。400kV イオン注入装置は、加速可能なイオン種の拡大を図っており、材料の改質等に用いられている。

本報告では 2016 年度の TIARA の運転状況、代表的な保守・整備及び技術開発について報告する。

### 2. TIARA 加速器の運転状況

2016 年度における TIARA 加速器の運転状況を Table 1 に示す。

Table 1: Operation Time of Accelerators in TIARA

	Cyclotron	Tandem	Single-ended	Implanter
Operation time [h]	1952.6	1971.1	2068.0	1817.3
Experiment cancelled	61.5 (hour)	0	28 (day)	0
Number of experiment	339	167	139	146

サイクロトロンは冷却水設備の一部更新による 3.6 か月の運転休止期間を設けたため、2015 年度に比べて運転時間は 1136 時間少ない 1952.6 時間であった。また、この休止期間直前に発生したメインコイルの短絡により、11 件の実験利用 (61.5 時間) が中止となった。

静電加速器では、シングルエンド加速器が故障による 2 週間の利用休止など、計 28 日間の実験利用が中止となった。一方、タンデム加速器とイオン注入器はほぼ運転計画通り稼働し例年通りであった。

<sup>#</sup> miyawaki.nobumasa@qst.go.jp

### 3. サイクロトロン of 整備・保守状況

#### 3.1 冷却設備の一部更新

サイクロトロンは 1991 年の運転開始から 25 年経過し、電磁石コイルや RF アンプ及びこれらの電源に冷却水を供給する冷却設備も老朽化により水漏れの頻度が増加してきた。また、サイクロトロン本体系および BT 系の各機器と異なる部屋に設置された電源に対して同じ冷却水を使用する構造であったため、軽イオンを大電流で加速した場合に、放射化された冷却水が電源を循環し、一時的に線量が増加することがあった。そこで、電源を循環する冷却水配管を更新するとともに、放射化の可能性のないイオン源用冷却水の系統に接続した。Figure 1 は、今回の更新箇所の 1 つである本体系および BT 系の電源とイオン源に供給する冷却水の熱を排出するためにサイクロトロン棟屋上に設置された冷却塔である。これ以外にも、建屋地下に設置された熱交換器や循環ポンプ、各機器への配管の更新も完了し、順調に稼働している。

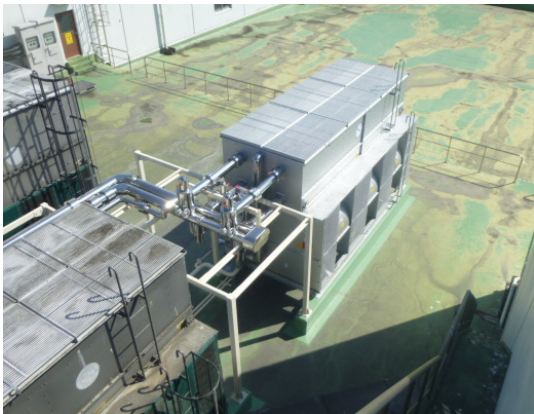


Figure 1: New cooling tower.

#### 3.2 メインコイルの短絡

サイクロトロン of 磁場の変動幅は、この数年間で  $10^{-6}$  台から  $10^{-4}$  台近くまで増加したが、原因の特定まで至らなかった。一方、この磁場変動に対応するため NMR と補助コイルを用いたフィードバックシステムを開発し、大きな支障はなく運転が行えた。しかし、冷却設備の更新に伴う運転休止前の利用運転立ち上げ時に、サイクロトロン of メインコイル of 電源の電圧値が通常よりも 5% 低い状態となり、ビームを取出せなかった。この時、NMR により測定された磁場も 5% 減少していたため、メインコイル of 短絡が明らかになった。場所の特定や原因の調査は、冷却設備 of 更新のため運転ができないとともに、空調設備 of 停止も重なったため、2017 年 3 月まで時間を要した。調査の結果、目視では Figure 2 のとおり、マグネチックチャンネル出口付近の上コイル of 側面と磁極の隙間にコイルからの噴出物が付着し、さらに下の加速箱上面にも付着していた。コイル内 of 場所の特定を行うため、精密抵抗測定器を用いた測定の結果、5 層からなる上コイル of 上部 2 層間で複数個所 of 短絡が判明した。コイル内部 of 短絡 of 修復が難しく、修復後の健全性も問題があり、断念する一方で、交換する場合、建屋の構造上、コイル of 搬入と搬出が容易にできない。そこで、準備が整うま

での間、短絡部をバイパスし、減少した起磁力で運転を行うこととした。

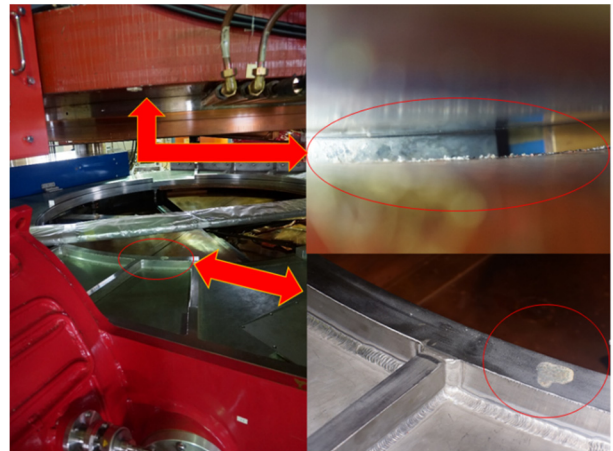


Figure 2: Ejected debris by the short circuit condition in the main coil.

上コイルのみをバイパスした場合、上下 of 起磁力が非対称になり、鉄 of 飽和磁束密度を超えた運転では、半径方向に漏れる磁束密度が高まり、ビームが上方向にシフトすることが予想された。実際に上コイルのみをバイパスした状態で最も高い磁場条件の 150MeV  $^{40}\text{Ar}^{8+}$  ビームを加速し、鉛直方向に 3 枚並べた測定板と全ビームを測定するブロックから成るメインプローブによって、半径方向に駆動しながらビーム電流を測定した。その結果、Figure 3 に示すように、923mm の取出し半径の半分も届かないうちにビームが上方向にシフトして無くなった。この結果から、起磁力 of 上下対称性の必要性を再認識し、下コイル of 下部 2 層もバイパスして、最大起磁力を 60% まで減少した状態で運転することとし、これまで提供していたイオン種に対してエネルギーを下げた新たなパラメーターでのビーム加速を行い、提供する予定である。

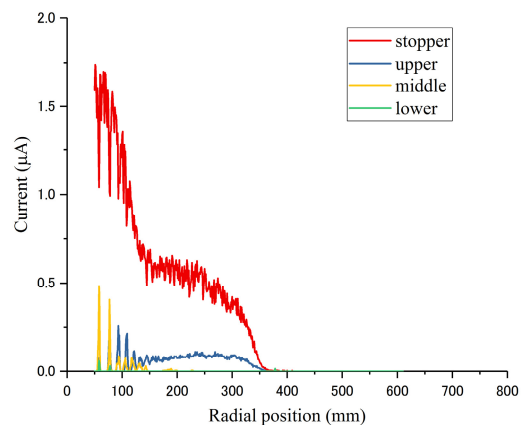


Figure 3: Measured current distribution by the main probe.

### 4. 静電加速器 of 整備・保守と技術開発

#### 4.1 シングルエンド加速器で生じたトラブルとその対策

シングルエンド加速器は、マイクロビームに必要な高い安定度を必要とされてきたが、2016 年 12 月から加速器 of 負荷電流 of 変化が通常時の 10 倍以上に増加し、

マイクロビームの軌道が不安定になり、実験ができなくなった。この原因の調査を行ったところ、シェンケル昇圧回路前段のRFタンク内の電磁シールド接合面の接触不良による発熱現象が観測された。Figure 4 は熱により変色した電磁シールドを示す。これによって電源の負荷が増大し、負荷電流の変化が増大するとともに定格までの昇圧が困難となった。そこで、接合面の接着を強化するためにネジ止め箇所を増やし、さらにネジの材質をステンレス製から抵抗の小さい真鍮製に変更した。この結果、発熱現象はなくなり、定格まで問題なく昇圧でき、順調に運転が行われている。

#### 4.2 タンデム加速器における C<sub>60</sub> イオンビームの増強



Figure 4: RF shielding cover before an improvement.

タンデム加速器での C<sub>60</sub> イオンの加速は、通常 Cs スパッター負イオン源が用いられてきた。このイオン源では、オープンで気化された Cs 蒸気を約 1000°C に熱した金属プレートであるアイオナイザーで熱電離させて正の電荷の Cs イオンを生成し、これを負電位のカソードロッドへ加速、衝突することでカソード表面のイオンはスパッターされ、Cs との反応によって負イオン化される。その後、引き出し電極の電場で加速され、分析電磁石によって目的のイオンに選別し、タンデム加速器に入射される。しかし、C<sub>60</sub> の多くは Cs イオンによるスパッターによって壊れ、生成された C<sub>60</sub> 負イオンは得られた全イオンの 1% 未満であった。そこで、C<sub>60</sub> 負イオンの生成量の増加と長時間の安定化を実現するため、電子付着方式による C<sub>60</sub> 負イオン生成技術を開発した。これは、C<sub>60</sub> が 300~900°C の比較的低い温度で構造的に安定に昇華することと数 eV 程度の電子に対して大きな付着断面積を有する特徴から、カソードロッドから新たに開発したオープンを用意したオープンロッドに変更し、Cs 蒸気を用いずに直接 C<sub>60</sub> 蒸気を作ってアイオナイザーに送り込み、アイオナイザーから放出される数 eV の熱電子を付着させることで、従来方式の 1000 倍以上のビーム電流 (30nA) で 12 時間安定に供給することが可能となった。更に、オープンロッドに熱電子源であるフィラメントを内蔵したフィラメント内蔵型オープンロッドを開発した。Figure 5 はオープンロッドとフィラメント内蔵型オープンロッドである。フィラメント内蔵型オープンロッドは、オープンで昇華したフラージェンがロッドを通る際に、フィラメントからの熱電子を高効率で付着して負イオン化することができ、負イオン化後、直ちに引き出し電場で加速されるため、ビームの広がりが抑えられ、ビーム

輸送効率の改善及びビーム電流の増加が期待された。この結果、スパッター方式の約 7 千倍の 120nA の C<sub>60</sub> 負イオンを 8 時間連続で安定に生成することができた。また、昇華した C<sub>60</sub> をロッド内でほとんど負イオン化できるため、チェンバー内への付着が無くなり、メンテナンス性の向上にも寄与した。

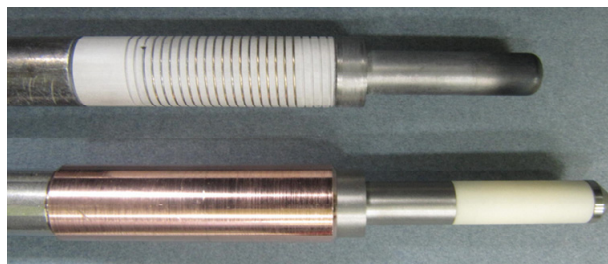


Figure 5: Oven rod and oven rod with built-in a filament.

#### 4.3 400keV イオン注入装置の新ビーム開発

半導体材料中の単一光子源作製に関する研究では、希土類元素のイオン注入が用いられている。400keV イオン注入装置では、新たに要望のあったプラセオジウム(Pr)イオンについて、イオン生成・加速試験を行った。塩化プラセオジウム(PrCl<sub>3</sub>)試料をフリーマンイオン源のオープンに装填し、650~700°C に加熱することでイオンを生成した。その結果、エネルギー 350keV において、約 900nA(Pr<sup>+</sup>)のビーム電流が得られ、今年度よりビームの提供を開始した。

### 5. まとめ

これまで施設の老朽化によるトラブルを未然に防ぐ努力を行ってきたが、昨年度はサイクロトロンメインコイルの短絡やシングルエンド加速器の電磁シールド接合面の接触不良など想定外のトラブルが生じ、その対応に追われた。今後はサイクロトロンメインコイルの交換に向けた準備を行うとともに、起磁力が低下した状態で加速可能なイオン種及びエネルギーのイオンビームを提供するため、順次新ビーム開発を行う予定である。

### 参考文献

- [1] S. Kurashima *et al.*, Nucl. Instrum. Methods B 267 (2009) 2024.
- [2] S. Okumura *et al.*, Rev. Sci. Instrum. 76, 033301 (2005).
- [3] M. Oikawa *et al.*, Nucl. Instrum. Methods B 260 (2007) 85.
- [4] Y. Yuri *et al.*, Phys. Rev. ST Accel. Beams 10 (2007) 104001.
- [5] S. Kurashima *et al.*, Rev. Sci. Instrum. 86 (2015) 073311.
- [6] A. Chiba *et al.*, Nucl. Instrum. Methods B 269 (2011) 824.
- [7] T. Sakai *et al.*, Nucl. Instrum. Methods B 190 (2002) 271.
- [8] N. Uchiya, *et al.*, Nucl. Instrum. Methods B 260 (2007) 405.