

QST 高崎イオン照射研究施設(TIARA)の現状報告

PRESENT STATUS OF TIARA AT QST

細谷 青児[#], 倉島 俊, 千葉 敦也, 吉田 健一, 山田 圭介, 湯山 貴裕, 石坂 知久, 横山 彰人, 平野 貴美,
宮脇 信正, 柏木 啓次, 百合 庸介, 佐藤 隆博, 石堀 郁夫, 奥村 進, 奈良 孝幸

Seiji Hosoya[#], Satoshi Kurashima, Atsuya Chiba, Ken-ich Yoshida, Keisuke Yamada, Takahiro Yuyama,
Tomohisa Ishizaka, Akihito Yokoyama, Yoshimi Hirano, Nobumasa Miyawaki, Hirotsugu Kashiwagi, Yosuke Yuri,
Takahiro Satoh, 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, the 400 kV ion implanter). These accelerators have been providing ion beams with wide energy range and various ion species for many researchers in materials science and biotechnology fields. Regarding the cyclotron, a layer short of the upper main coil occurred in 2016. In order to continue the operation, two pairs of upper and lower layers including the shorted layer were bypassed even though maximum magnetic field decreased by 20 %. After that two main coils have been renewed to complete the restoration, and it took nine months. For the electrostatics accelerators, the high-intensity C₆₀ negative ion source has been developed, and it was found that simultaneous sublimation of C₆₀ and cesium iodide improves the amount of beam current and its stability. This paper describes the recent operational status of the accelerators, 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高崎量子応用研究所のイオン照射研究施設 TIARA 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 台の加速器を有し、主に材料・バイオ技術の研究開発に利用されている。利用される研究分野が多岐にわたるため、幅広いエネルギー範囲(20 keV ~ 数百 MeV)で多様なイオン種を様々な照射技術を用いて提供している。これらの多様なイオンビームを用いて宇宙用半導体材料の耐放射線性評価、高分子材料のイオン照射効果の研究、イオン照射による植物育種や生物細胞の放射線照射応答の研究、RI の生成及び RI 薬剤の評価など研究開発が進められている。

サイクロトロンは 10 MeV の H⁺から 27.5 MeV/u の重イオンまで加速することができ、計 14 の照射ポートが設置されている。これまでに、十分程度でイオン種の迅速な切換が可能でカクテルビーム加速技術[1]やサイクロトロン磁場高安定化技術[2]が開発されている。近年では多重極電磁石を用いた大面積均一イオンビーム[3]や ϕ 1 μ m 以下の重イオンマイクロビーム[4]、シングルパルスビーム[5]などの開発も行われており、照射利用を通して様々な研究分野の発展に貢献している。

3 台の静電加速器では、それぞれの加速器から出た異なるイオンビームを 1 つの照射ポートで同時に照射することが可能である。3MV タンデム加速器では Cs スパッタ負イオン源によって単原子負イオンを加速しているが、近年では高強度の C₆₀ イオンを生成可能な電子付着方

式を採用したイオン源の開発と、これを用いた高強度クラスタービーム照射技術の開発[6]が行われている。3 MV シングルエンド加速器では ϕ 1 μ m 以下の軽イオンマイクロビームを用いて PBW (Proton Beam Writing) [7] や大気マイクロ PIXE (Particle Induced X-ray Emission) [8]に利用されている。400 kV イオン注入装置はフリーマンイオン源と ECR イオン源によって多様なイオン生成法を開発しているが、より高強度で多様な金属イオン種が生成できるレーザーイオン源の開発[9]も進められている。

2. 加速器の運転状況

TIARA における 2018 年度の運転状況を Table 1 に示す。サイクロトロンでは、レイヤショートを生じたメインコイルの更新作業を 2018 年 6 月から 2019 年 3 月まで行ったため、例年の約 30%以下の運転時間であった。3 台の静電加速器についてはほぼ例年通りの運転時間であったが、シングルエンド加速器については、イオン源 RF 発振回路と加速器昇圧回路前段のインダクタンス調整機構の不具合により 2 日の実験利用が中止になった。タンデム加速器、イオン注入装置については 100 %の稼働

Table 1: Operational Status of Each Accelerators at TIARA in 2018 FY

	Cyclotron	Tandem	Single-ended	Implanter
Operation time [h]	786	1876	2333	1719
Number of experiments	102	159	154	140

[#] hosoya.seiji@qst.go.jp

率を達成した。また、タンデム加速器は2019年1月に総積算運転時間 50000 時間を達成した。

3. 静電加速器の整備・開発状況

3.1 フラーレン用イオン源の増設準備

MeV 級のフルラーレン(C_{60})イオンビームは、従来の単原子イオンビームでは実現が困難な照射効果を得ることができる。このクラスターイオンビームは基礎科学、機能性材料研究及び新たな分析技術開発等の進展等に貢献することが期待されている。高崎量子応用研究所ではクラスターイオンビームについて技術開発を行っており、Cs スパッタ負イオン源(SNICS II)を用いて C_{60} 負イオンの生成、タンデム加速器での加速に成功している。しかし、SNICS II では C_{60} 負イオン強度が平均約 50 pA と低い問題があった。そこで SNICS II に代わり、電子付着方式の負イオン源を開発した[10]。オープンによって昇華させた C_{60} をフィラメントから放出される熱電子に付着させることによって、従来の約 1000 倍のビーム強度を得ることに成功している。また、 C_{60} とヨウ化セシウムを同時に昇華させることによってビーム電流値の増加と安定性の向上に成功した。現在はタンデム加速器への C_{60} 専用イオン源の増設と C_{60} イオンビームのマイクロビーム化を目指している。

静電四重極レンズを搭載したマイクロビームラインの設置は既に完了しており、 C_{60} 専用イオン源の設置を現在進めている。タンデム加速器には 3 台のイオン源が設置されており、90 度分析電磁石を用いてタンデム加速器に入射される。 C_{60} 専用イオン源は 90 度分析電磁石より下流に設置予定であり、デフレクターで質量分析したタンデム加速器へ入射する設計となっている。しかし、既存のイオン源のビームラインに新たに設置するデフレクターが干渉するため、直線導入機によってデフレクターをチャンバー内で移動させることができる設計にした。これによって、デフレクターを既存のビームライン上から退避させて、既存のイオン源も使用が可能になっている。今後はデフレクターとそのチャンバーをタンデム加速器上流に据え付ける予定である(Fig. 1 参照)。また、 C_{60} 専用イオン源の設置予定の場所には 90 度分析電磁石電源が既設されているため、移動させた。

3.2 シングルエンド加速器リップル調整器内コイルのローラー脱線

シングルエンド加速器の高電圧発生回路は、直流電源、RF トランス、加速器タンクの内壁に取り付けられた上下 2 枚の RF 電極と、これに相対したシールド電極、およ

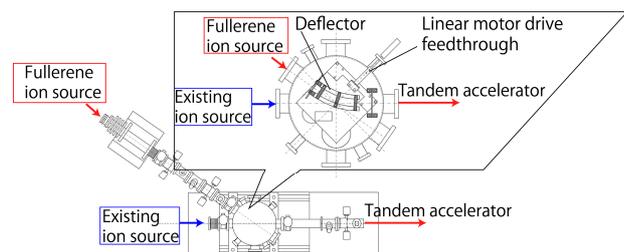


Figure 1: The injection beam line of new fullerene ion source.

びダイオードにより構成されている。定格電圧 3MV での運転時には ± 200 V の 42 kHz の電圧が RF 電極に供給される。しかし、上下の RF 電極とシールド電極間隔の違いによって電圧差が生じ、加速電圧にリップルが発生する。この電圧差を補正するために、インダクタンスを制御室から遠隔で調整できるリップル調整器が、RF トランスに直列接続されており、コイル内をローラーが移動することでインダクタンスが調整される(Fig. 2 参照)。

今回、リップル調整器の下限リミット検出機構の故障により、ローラーが下限に到達した信号が出力されなかった。これによって、コイルからローラーが脱落して RF トランスが断線状態となり、加速電圧が正常に昇圧されなくなった。原因調査や修理対応により利用運転が 1 日キャンセルとなった。

3.3 NV センター多量子ビット化へ向けた新ビーム開発

近年、量子情報処理に関する研究が盛んに行われており、その固体量子情報デバイスとして超伝導量子ビット、半導体スピン量子ビットが挙げられる。これらの固体量子情報デバイスは多量子ビット化に有利、非常に長いコヒーレンス時間を持つというメリットがあるが、動作温度が約 10 mK と低温であるという欠点がある。そこで室温で動作し、比較的長い量子コヒーレンス時間を持つダイヤモンド中の窒素-空孔(NV)センターが注目を集めている。NV センターとはダイヤモンド結晶中の炭素を置換した窒素(Nitrogen)と隣接位置の空孔(Vacancy)との複合欠陥のことである。この NV センターを用いた量子コンピュータ、nm スケールの分解能を持つ磁気・温度・電場のセンサー等に関する研究が盛んになっている。

量子科学技術研究開発機構でも NV センターに関する研究が進められており、TIARA の加速器を用いてダイヤモンドにイオンビームを打ち込むことによって NV センターを作り出すことが可能である。しかし、NV センターの多量子化には、近接した位置に NV センターを作る必要がある。nm スケールで窒素イオンの注入を制御する必要がある。そこで、窒素分子(N_2)をダイヤモンドに打ち込む手法が考案され、2 量子ビット NV センターの生成が実証された。[11]。窒素分子の場合、ダイヤモンド表面に入射した位置は同じであり、入射後に 2 つの原子に解離しストラグリングによってランダムに分布するため、非常に

近接した NV-NV を生成することが可能である。しかし、窒素分子イオン注入法を拡張した、窒素クラスターイオンを用いた 3 量子ビット化は、窒素クラスターの個数や電

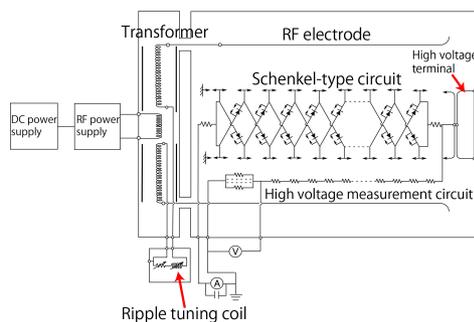


Figure 2: A Schenkel-type circuit of the single-ended accelerator.

荷を制御してビームを形成することが困難であるため実現されてこなかった。

そこで、3量子ビット以上の NV センターを生成する研究のために窒素を多く含む分子に着目し、アデニン ($C_5N_5H_5$)イオンビームを生成することを目指した。SNICS II を用いてアデニン粉末に Cs をスパッタさせアデニンビームの生成を試みたところ、引き出し電圧 19 kV, カソード電圧-0.02 kV, Cs ヒーター温度 142 度のパラメータでアデニンビームの生成に成功した。多量子ビット化のためには窒素を多く含む $C_5N_5H_5$ ビームが望ましいが、スパッタの衝撃によってアデニンが解離してしまい、ビーム強度が低くなる問題があった。そこで、比較的ビーム強度の高い 65 keV- $C_5N_4H_n$ ビーム(約 50 pA)を用いて NV センターの作成を試みた。その結果、NV センターの 3量子ビット化に世界で初めて成功した[12]。また、Fig. 3 に示すようにイオン注入装置のフリーマンイオン源を用いて強度の高い $C_5N_5H_5$ ビーム生成を試みた。フリーマンイオン源は試料をオープンで昇華させ、熱電子を用いてイオン化するため、スパッタ法とは異なりアデニンの解離が少ない利点がある。これによって SNICS II の約 1000 倍の $C_5N_5H_5$ ビームを生成することができた。今後はイオン注入装置を用いてより多量子ビットの NV センターの生成が期待される。

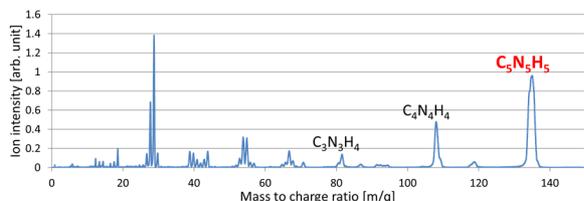


Figure 3: The mass spectrum of the Freeman ion source.

4. サイクロトロンメインコイルの更新

4.1 メインコイルの故障

サイクロトロンは2014年頃から主磁場の不安定性が生じており、電磁石電源の部品交換や補正コイルによる磁場フィードバック制御を取り入れるなどの対策を講じていた。しかし、2016年12月にコイル電源の電圧降下を伴うレイヤショートが上メインコイルにおいて発生し、加速器の正常運転を行うことができなくなった。そこで、2017年4月に通電経路変更による応急処置を実施した。上下対称磁場を得るためにショートした上メインコイルだけでなく下メインコイルも同様にバイパスし、最大平均磁場 1.64 T まで励磁可能であった性能が約 20%低下した。磁場の低下によって加速可能なエネルギーの最大値(K 値)は約 40%低下したため、490 MeV $^{192}Os^{30+}$ などの高エネルギー重イオンの照射が実施できなくなった。しかし、重イオン照射を利用する研究分野の再利用の要望が強かったためメインコイル更新を行うことになった。

4.2 メインコイルの更新作業

メインコイル更新作業は2018年6月から2019年3月の9ヶ月間で実施された。メインコイルの諸元を Table 2 に示す。メインコイルの外径は 3 m を超えており、既存の

Table 2: A Property of the Main Coil of the Cyclotron

Conductor structure	Hollow conductor 2 × 24 column × 5 pan cake
Material	Oxygen-free copper
Winding numbers	480 turns / 2 coils
Maximum current	900 A
Outer diameter	3060 mm
Weight	About 9 ton / 2 coils

搬入経路では搬入出が不可能であった。その為、サイクロトロン本体室北側の遮蔽壁(厚さ約 4 m)を開口し、コイルの搬入出経路を確保した。

TIARA サイクロトロンは 1991 年のファーストビーム以来、初めてメインコイルの取り外しを行うため、解体手順、各機器の取り外し方法、保管場所の確保など、解体から復旧までの作業内容を入念に検討して行われた。

4.2.1 サイクロトロン、メインコイル及び周辺機器の解体 (作業期間:約 2ヶ月半)

サイクロトロンを正常に復旧させるために、取り外すサイクロトロン本体構成機器全ての据え付け位置の測定を行った。その後、デフレクター、共振器、メインプローブ等の加速箱(真空チェンバー)に設置されている構成機器を取り外し、移動した。加速箱、電磁石の中心にあるポール(約 9 t)、メインコイル(約 4.5 t)を取り外すため、既設の天井クレーン(定格 2.8 t)に加え、天井にギアードトロッコ結合式チェーンブロック(定格 10 t)を新たに設置した。また、サイクロトロン内部から加速箱、ポール、メインコイルをチェーンブロックの吊上げ位置まで引き抜くための、昇降装置及び引き出し治具を取り付け、安全且つ円滑に各機器の取り出しを実施した。Figure 4 に加速箱、ポールを取り外した後に、引き出し治具によりメインコイルを引き出している様子を示す。



Figure 4: Removing the main coil of the cyclotron.

4.2.2 メインコイル搬入出用の壁穴開口作業 (作業期間:約 2ヶ月)

サイクロトロン本体室のコンクリート製の遮蔽壁について、幅 3.4 m、高さ 1.6 m で外周を $\phi 150$ mm コアにて連続貫通削孔した。残ったコンクリート塊を同様に連続貫通削孔にて幅 1.7 m に 2 等分し、重機を用いてコンクリー

ト塊を引き出した。引き出された 2 つのコンクリート塊はコンクリートブレーカーによって破碎した。以上の作業によって幅 3.4 m×高さ 1.6 m×奥行 4.0 m の搬入出口を確保した。

4.2.3 新旧メインコイル搬入出及び加速器一部組立作業 (作業期間:約 1 ヶ月)

前述した搬入出口から新旧メインコイルの搬入出を行った。新メインコイルの搬入の様子を Fig. 5 に示す。メインコイルの搬入出完了後は開口部を建築用合板で養生し、サイクロtron本体室内への粉塵等の侵入を防止した。新メインコイルの据付作業は、取り外し時と同様に昇降装置及び引き出し治具を用いて行い、中心磁極、加速箱の据付・アライメントまで行った。この状態で He ガスリークテストを行い大きな真空漏れがないことを確認している。



Figure 5: Carrying work of the new main coil.

4.2.4 搬入出用壁穴閉塞作業 (作業期間:約 2 ヶ月)

搬入出用壁穴閉塞作業については、開口作業で壁の内外側の鉄筋ごと削孔したため、鉄筋を新たに敷設した。鉄筋の敷設後に 3 回に分けてコンクリート打設を行い、最後のコンクリート打設ではコンクリート収縮による気密漏れを防ぐために無収縮モルタルを用いた。コンクリート打設後は漏れ検出液を用いて気密試験を行い、気密性に問題がないことを確認した。

4.2.5 加速器本体及び周辺機器復旧と動作試験 (作業期間:約 1 ヶ月半)

搬入出口の閉塞作業完了後に再び加速器本体及び周辺機器の復旧を再開した。主な作業内容は 2 台の RF 共振器及びディー電極の据付、各種ビーム引き出し機器、診断機器の据付・アライメント等である。これらの機器は取り外し前に測定した位置を再現するように精密に据付された。サイクロtronに付帯する装置の据付が完了した後、作業箇所の真空リーク試験、各駆動機器の駆動試験、各種インターロック試験、冷却水配管加圧及び通水試験、RF 電圧印加試験、メインコイル絶縁性確認試験を行った。これらの試験検査を全て終えた後に、メインコイルに定格電流 900 A を通電し、問題が無いことを確認した。

以上の更新作業を終え、サイクロtronの試験運転及び調整運転を行った。メインコイル更新後初のビームは 10 MeV の H⁺であり、加速直後で約 5 μA のビーム電流を確認した。その他に利用予定のある 490 MeV ¹⁹²Os³⁰⁺

を含めた 10 種類のイオンの加速・引き出しに成功し、メインコイル故障前の性能が完全に復旧したことを確認した。

4.3 新メインコイルの仕様

新メインコイルの仕様は従来のメインコイルと基本的には性能は同等のものであるが、経年劣化によるレイヤショートを防ぐために製作方法を以下のように改善した。

導体としては、継ぎ手無しのシームレスホローコンダクターを採用した。従来は導体間絶縁として生ガラス繊維テープをコイル素線に巻き付け、その後にエポキシ樹脂を含浸モールドしたが、新メインコイルでは絶縁性能を高めるために、エポキシ樹脂を予め含浸させたガラス繊維テープ(セミキュアテープ)を絶縁材として使用した。セミキュアテープの適用によって層間のエポキシ樹脂の充填度合が向上するため層間絶縁が強化される。セミキュアテープによる導体間絶縁を採用する場合、型モールドを省略する場合もあるが、絶縁性能や機械強化を増すために型モールドも実施した。

また Table 2 で示すように、冷却性能強化のためにメインコイルは、1 パンケーキのコイルの巻が 1 条巻ではなく 2 条巻となっている。旧メインコイルは 2 条のコイル同士の接続は端末をブスバーでろう付けしていたが、新メインコイルでは各コイルの接続をボルト接続方式に変更した。これによって各コイル単体での抵抗測定、端子電圧測定、インダクタンス測定などが可能となり、層間短絡の発見の精度を上げることができる。

5. まとめ

3 台の静電加速器については、シングルエンド加速器で 2 日の実験利用中止があったものの例年通りの稼働状況であった。また、タンデム加速器については総積算運転時間 50000 時間を達成した。また、技術開発においても、高強度 C₆₀ イオンビーム生成のための専用イオン源の設置に向けて準備を進めていることに加えて、新ビーム開発も積極的に行っている。サイクロtronについてはメインコイルレイヤショートによる更新作業のため例年の 30 %以下の運転状況であったが、9 ヶ月間の更新作業を予定通り完遂し、2019 年 5 月より定格出力での実験利用運転を再開した。

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 (2005) 033301.
- [3] Y. Yuri *et al.*, Phys. Rev. ST Accel. Beams, 10 (2007) 104001.
- [4] M. Oikawa *et al.*, Nucl. Instrum. Methods B, 260 (2007) 85.
- [5] S. Kurashima *et al.*, Rev. Sci. Instrum., 86 (2015) 073311.
- [6] A. Chiba *et al.*, Nucl. Instrum. Methods B, 269 (2011) 824.
- [7] N. Uchiya, *et al.*, Nucl. Instrum. Methods B, 260 (2007) 405.
- [8] T. Sakai *et al.*, Nucl. Instrum. Methods B, 190 (2002) 271.
- [9] H. Kashiwagi *et al.*, Nucl. Instrum. Methods B, 406 (2017).
- [10] K. Yamada *et al.*, AIP Conference Proceedings, 2011 (2018) 050020.
- [11] T. Yamamoto *et al.*, Phys. Rev. B, 88 (2013) 201201.
- [12] M. Haruyama *et al.*, Nature communications, 10 (2019) 2664.