

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[#], 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,
細谷 青児, 柏木啓次, 百合庸介, 石堀郁夫, 奥村進, 倉島俊

Nobumasa Miyawaki [#], Atsuya Chiba, Ken-ichi Yoshida, Keisuke Yamada, Takahiro Yuyama, Tomohisa Ishizaka,
Akihito Yokoyama, Yoshimi Hirano, Seiji Hosoya, Hirotsugu Kashiwagi, Yosuke Yuri, Ikuo Ishibori,
Susumu Okumura, Satoshi Kurashima

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

Abstract

The facility of Takasaki Ion-accelerators for Advanced Radiation Application (TIARA) consists of AVF cyclotron with K-value of 110, 3-MV tandem accelerator, 3-MV single-ended accelerator and 400 keV ion implanter. Using these accelerators, ion beams with wide energy ranges and various ion species are provided for many research fields in material and biotechnology sciences. The accelerators' recent operational status, major technical developments, and maintenances are described in this paper. In particular, the following two researches are reported in detail. A set of main coil of the cyclotron was renewed in a year earlier for fixing the broken one side of the coil. After renewing the coil, the magnetic field to accelerate the ions was adjusted by the exciting current of the coil under using a nuclear magnetic resonance probe in the cyclotron. On the other hand, in the 3-MV tandem accelerator, a dedicated ion source were installed in a low energy beam line beam for the acceleration of high-intensity C₆₀ beams.

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)[1]では、材料・バイオ技術の研究開発で必要とする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するため、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いる。

サイクロトロンは、10MeV H⁺イオンから 27.5MeV/u までの重イオンを、11~22MHzのRF加速周波数で3つの加速ハーモニックモード(H=1,2,3)を用いて加速する。加速したビームは、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。加速ビームの主な利用は、放射線科学や中性子標準場等の基礎実験、宇宙半導体材料の耐放射線評価、材料改質、生物細胞応答、RI製造等である。これらの実験の要求に応えるため、以下の技術開発を行ってきた。放射線科学や中性子標準場等の基礎実験では、通常加速によって100 ns以下の間隔の連続したパルスビームとなるが、有効なデータ取得に必要な1μs以上の間隔に拡大するためのシングルパルスビーム形成[2]の技術開発を行った。宇宙半導体材料の耐放射線評価では、複数のイオン種を入射し、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[3]とこれを可能とするための磁場の高安定化技術[4]を行ってきた。材料改質では、照射試料に低フルエンスで大面積に均一照射を実施するため、多重極電磁石を用いた大面積均一照射[5]の技術開発を行った。生物細胞応答では、照射精度1μmの重イオンマイクロビーム形成技術の

開発を行い、1分当たり600個以上のイオンを照射するシングルイオンヒット技術とともに用いられている[6]。RI製造では、生成率向上に必要なビーム強度の増強のため、低エネルギービーム輸送系の高効率化のための検討を行っている[7,8]。これらのように、イオン1個からμA以上のビーム強度の制御、最小1μmのビーム径マイクロビーム照射から最大数cm以上の均一同時照射等の照射範囲の選択、数分程度の短時間での複数のイオン種とエネルギーの変更等が可能など、多彩な照射をすることで各種の照射実験に利用されている。

3つの静電加速器では、それぞれの加速器で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(C₆₀)等のクラスターイオンが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[9]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⁺ビームを加速した後、磁気レンズで1μm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[10]やPBW(Proton Beam Writing)[11]に用いられている。400kVイオン注入装置では、加速可能なイオン種の拡大を図っている。特にフリーマンイオン源において、3量子ビット以上のNVセンターを生成する研究[12]のために必要な窒素を多く含むアデニン(C₅N₅H₅)イオンを発生させ、これまでタンデム加速器のSNICS II(Csスパッター法)イオン源で生成したときより、約1000倍生成できることを確認した。

[#]miyawaki.nobumasa@qst.go.jp

本報告では2019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. 運転状況

TIARAにおける2019年度の運転状況をTable. 1に示す。サイクロトロンでは、2016年度に層間短絡が生じたメインコイルを2018年度に約9か月かけて更新したため、この年度の運転時間は786時間まで減少したが、更新完了後の2019年度は約3倍に増加した。この運転時間の増加は、コイル更新に伴う磁場強度の微小な変化に対応するためにほぼすべての加速条件に対しての再調整を実施した約1か月間が含まれていることも関係している。そのため、このビーム調整時間は実験利用のためビーム提供時間とほぼ等しくなった。

3台の静電加速器は、全ての利用運転を年間運転計画通り実施し、100%の稼働率を達成した。また、1991年から利用運転を開始したシングルエンド加速器は、2020年3月に総積算運転時間が60000時間に達した。

Table 1: Operation Time of Accelerators in TIARA

	Cyclotron	Tandem	Single-ended	Implanter
Operation time [h]	2422	1752	2057	1686
Experiment cancelled	0 (hour)	0	0	0
Number of experiment	246	160	151	141

3. 静電加速器の整備・開発状況

高速 C_{60} イオンビームは、2次イオン質量分光法の高感度な分析を可能にし、特に単原子イオンビームでは測定困難な高分子材料や生体分子といった試料の分析に最適である。TIARAのタンデム加速器では、高速 C_{60} イオンビームの照射効果に関する研究を拡大していくためにMeV級 C_{60} イオンビームのビーム量の大幅強化を行っている。これまで新しい技術開発によって、既存のイオン源から μA オーダーの C_{60} 負イオンを生成した[13]。一方でMeV級 C_{60} マイクロイオンビームを用いた微細分析のための分子マッピング技術の開発も進めており、2018年度に静電四重極レンズを搭載したマイクロビーム

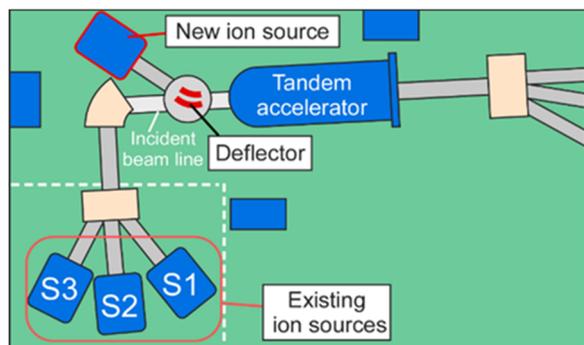


Figure 1: Place of the new ion source.

ラインを設置した。しかし、レンズを通過させるためのビームの発散を抑えるスリットによってビーム電流が減少するため、微細分析するにはまだビーム量不足であった。

2019年度は、イオン源から加速器までのビームの透過効率向上によるビーム量増大を見越して、Fig. 1のように新しいイオン源の設置を行った。イオン源から生成した C_{60} 負イオンを、入射ビームライン上に設置した静電デフレクターで加速器方向に偏向させることで、より高いエネルギーのビームを加速器に入射できるようになり、高い透過効率が期待される。Figure 2は、ビームがデフレクターを経由して加速器前の既設のファラデーカップへ集束される軌道シミュレーション結果を示す。デフレクター前後のアパーチャー電極によって、ビームは集束される。デフレクターはFig. 3のように可動ステージによって、任意のイオン源に応じて場所を切り替えられる。

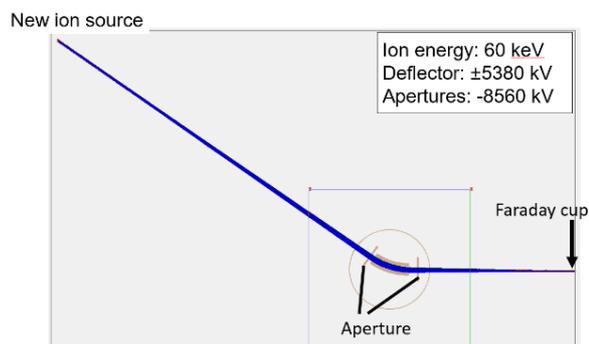


Figure 2: The result of a trajectory simulation of the C_{60} negative ion beams passing.

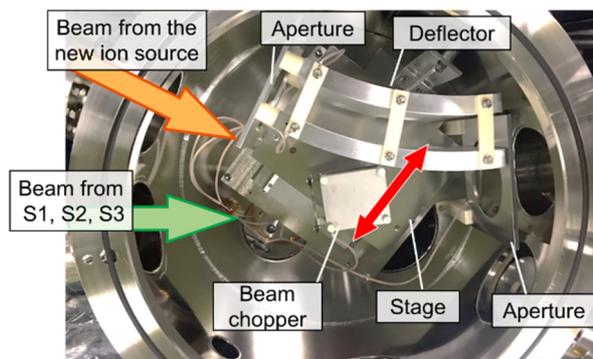


Figure 3: Photo image of the electrostatic deflector in the chamber.

今後は、新しいイオン源で生成したビームと既存のイオン源で生成したビームの透過効率を比較する予定である。

4. サイクロトロンの磁場補正

2018年度に約10ヶ月の期間をかけて層間短絡が生じたメインコイルを更新し、2019年5月から利用運転を再開した。新メインコイルの起磁力は以前と同じであるが、寸法や上下コイル間の距離が若干異なるため、以前と同じ励磁電流でも加速平面における磁場強度がわずかに異なることが予想された。そこで、コイル更新前に主な加

速条件での磁場強度を核磁気共鳴プローブによって計測し、更新後も同じ磁場強度が得られるように励磁電流の補正を行った。

Figure 4 に更新後のメインマグネット及び磁場解析に関する概略図を示す。新メインコイルは層間短絡を発生させた旧コイルの経年劣化に伴う絶縁性能低下を鑑み、コイルの剛性と絶縁性能を向上させている。仕様としては、旧コイルは数 m のホローコンダクタを銀ロウ溶接で継ぎ、ガラステープで巻いた物をコイル状にした後、エポキシ樹脂を含浸モールドさせることでコイルを形成しているが、新コイルは継ぎ目無しの長尺ホローコンダクタにエポキシ含浸済みのセミキュアテープを巻き付けコイル状にした後に、成型型を用いたエポキシ樹脂の型モールドによりコイルを形成している。これにより新コイルの剛性及び絶縁性能を向上したが、コイル表面のモールド層は厚くなっており、旧コイル表面厚さ約 0.75mm に対し、新コイルの上面及び下面の厚さはそれぞれ約 2mm である。

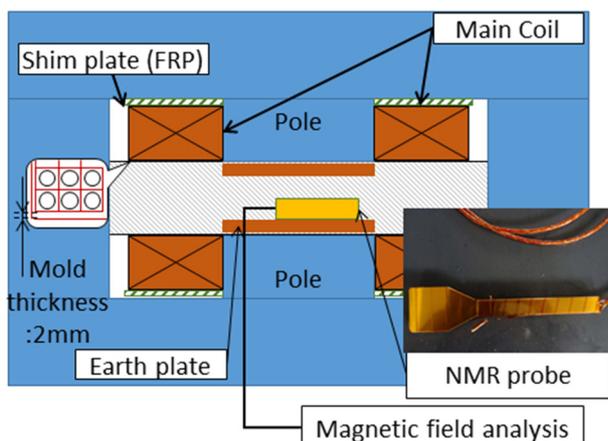


Figure 4: Schematic of replaced main coil and magnetic field analysis.

コイルの設置位置は真空チェンバー側のコイル表面が旧コイルと同じ値になるよう、FRP 製のシム板などを用い調整されているが、前述の通りモールド厚みの差があるため、完全に同条件にすることは困難である。この構造上免れない設置誤差により生じる median plane 付近の磁場強度の変化に対し、QST 高崎の AVF サイクロトロンに設置されている磁場測定用の核磁気共鳴プローブ（以下、NMR プローブ）を用いることで磁場補正を高精度で行い、効率的な加速パラメータの再調整を行った。

パラメータ再調整は 2019 年に利用が予定されているすべての運転条件に対して行われ、メインコイル更新作業終了後の 2019 年 3 月から開始された。本体磁場のパラメータに関しては、更新前に NMR プローブで計測していた値を参考に、更新後の値をプローブにて計測しつつ全体磁場を微調整することで、メインコイル更新に起因する磁場変化への対策を行った。調整中の磁場計測結果と全体磁場を調整するための Circular coil の電流値を Fig. 5 に示す。グラフが示すようにここでは数 Gauss 台の磁場変化について変化量を確認しながら調整が可能となっていることがわかる。パラメータの再調整は多い時で週に 10 条件程のパラメータを更新し、その後再調

整したパラメータの再現性についても確認を進めた。限られた期間であったが、NMR プローブを用いた磁場補正を取り入れる事で効率的に更新後の調整を進めることができ、利用運転が問題なく開始できた。

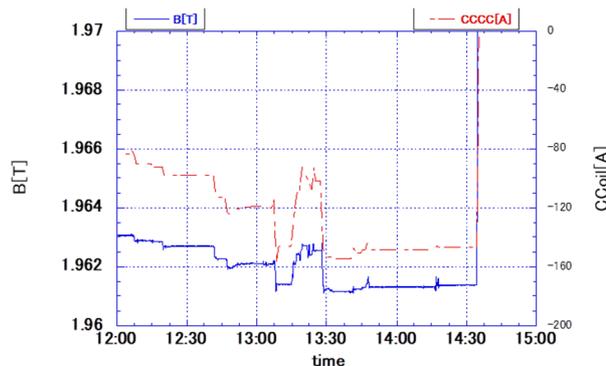


Figure 5: Main magnetic field of cyclotron using NMR Probe and current of circular coil in the readjustment.

5. まとめ

サイクロトロンメインコイルの更新が無事終了し、更新に伴った微小な磁場変化を核磁気共鳴プローブによる計測を基に磁場を補正することで、問題なくビームを取り出すことができた。一方で、このメインコイルの層間短絡によって 2017 年度は最大起磁力を 60% まで減少した状態で運転しなければならなかったため、これまで最大起磁力付近で加速したビームを用いて実験していたユーザーはこの期間中に他の施設で実験を実施することになったが、メインコイルの更新後も戻らない場合もあり、ユーザー数が約 73% に減少してしまった。そのため、今後ユーザー数の回復が今後の課題である。

3 台の静電加速器については、概ね例年通りの稼働状況であった。また、シングルエンド加速器については総積算運転時間 60000 時間を達成した。技術開発では、高強度 C₆₀ イオンビーム生成のための専用イオン源及びビームラインの整備を今後も進めて行く予定である。

参考文献

- [1] S. Kurashima *et al.*, Quantum Beam Sci. 1, 2 (2017).
- [2] S. Kurashima *et al.*, Rev. Sci. Instrum. 86 (2015) 073311.
- [3] S. Kurashima *et al.*, Nucl. Instrum. Methods B 267 (2009) 2024.
- [4] S. Okumura *et al.*, Rev. Sci. Instrum. 76, 033301 (2005).
- [5] Y. Yuri *et al.*, Phys. Rev. ST Accel. Beams 10 (2007) 104001.
- [6] M. Oikawa *et al.*, Nucl. Instrum. Methods B 260 (2007) 85.
- [7] H. Kashiwagi *et al.*, “スリットハープ装置による 4 次元エミッタンス評価の試験”, Proceedings of the 15th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Nagaoka, Japan, Aug. 7-10, 2018, pp. 566-568.
- [8] N. Miyawaki *et al.*, “TIARA AVF サイクロトロンのペーパーボット型エミッタンス測定装置の開発”, Proceedings of the 16th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Kyoto, Japan, Jul. 31 – Aug. 3, 2019, pp. 810-813.
- [9] A. Chiba *et al.*, Nucl. Instrum. Methods B, 269 (2011) 824.
- [10] N. Uchiya, *et al.*, Nucl. Instrum. Methods B, 260 (2007) 405.
- [11] T. Sakai *et al.*, Nucl. Instrum. Methods B, 190 (2002) 271.
- [12] M. Haruyama *et al.*, Nature communications, 10 (2019) 2664.
- [13] A. Chiba *et al.*, Quantum Beam Sci., 4(1), 13, (2020).