

## PRESENT STATUS OF AVF CYCLOTRON AT JAEA

Takahiro Yuyama<sup>A)</sup>, Takayuki Nara<sup>A)</sup>, Ikuo Ishibori<sup>A)</sup>, Satoshi Kurashima<sup>A)</sup>, Ken-ichi Yoshida<sup>A)</sup>,  
Tomohisa Ishizaka<sup>A)</sup>, Susumu Okumura<sup>A)</sup>, Nobumasa Miyawaki<sup>A)</sup>, Hirotsugu Kashiwagi<sup>A)</sup>, Yosuke Yuri<sup>A)</sup>,  
Watalu Yokota<sup>A)</sup>, Toshihiro Yoshida<sup>B)</sup>, Katsuhiro Akaiwa<sup>B)</sup>, Satoshi Ishiro<sup>B)</sup>, Tsuyoshi Yoshida<sup>B)</sup>,  
Satoshi Kano<sup>B)</sup>, Akira Ihara<sup>B)</sup>, Keisuke Takano<sup>B)</sup>, Seigo Mochizuki<sup>B)</sup>

<sup>A)</sup>Takasaki Advanced Radiation Research Institute, Japan Atomic Energy Agency  
1233 Watanuki-machi, Takasaki-shi, Gunma, 370-1291, Japan

<sup>B)</sup>Beam Operation Service, Co., Ltd.

1233 Watanuki-machi, Takasaki-shi, Gunma, 370-1207, Japan

### Abstract

The JAEA AVF cyclotron ( $K=110$  MeV) provides high energy ion beams mainly for research in materials science, biotechnology. Beam users require a variety of ion species, energies and irradiation techniques. Therefore, developments such as microbeam formation, cocktail beam acceleration, and beam uniformization using multipole magnets are in progress. In addition, maintenance and repair of the cyclotron components have been regularly carried out to provide the ion beams stably. The scheduled beam time for beam irradiation was completely accomplished in FY 2006, and an integrated operation time of the cyclotron reached 50,000 hours in FY 2007. A flat-top acceleration system and a main probe with a plastic scintillator for measurement of beam-phase were introduced in order to reduce chromatic aberrations in a focusing lens of a heavy-ion microbeam formation system. As a result, a microbeam with a spot size of 0.6 mm in diameter was successfully formed with a 260 MeV  $^{20}\text{Ne}^{7+}$ . A multipole-magnet system was developed for uniform-beam irradiation and a beam attenuation system was improved for a precise control of beam intensity.

## 原子力機構 AVF サイクロトロン の 現 状

### 1. はじめに

日本原子力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 のAVFサイクロトロン( $K$ 値110)は、宇宙用半導体の耐放射線評価や生物細胞への低線量照射の影響など、材料・バイオ技術の研究のために、高エネルギーのイオンビームを提供している<sup>[1]</sup>。ユーザーが要望する様々なイオン種・エネルギーに対応するために、3台の外部イオン源を用いて $\text{H}^+$ 、 $\text{D}^+$ などの軽イオンから $^{197}\text{Au}^{31+}$ に至るまで多くのイオン種が、 $10\sim 90\text{MeV}(\text{H}^+)$ 、 $2.5\sim 27\text{MeV/u}$ (重イオン)の様々なエネルギーで加速されている。一般的なサイクロトロンは核物理研究に使用されてきているが、TIARAでは材料・バイオ技術の研究に用いるために、カクテルビーム加速技術、マイクロビーム照射技術、大面積均一照射技術などの高度な加速技術及び照射技術開発を進めている。これらを安定に実現するため、サイクロトロン電磁石の磁場安定化や冷却水の温度安定化など各種機器の安定化技術を開発している。また、装置の保守管理を定期的に行うことで、上記の照射技術に必要な基本性能を維持すると共に、安定なビーム提供を実現している。

### 2. 利用運転及び定期整備

TIARAでは原子力機構外の多くのユーザーにビーム提供を行い、ユーザーの要求に応えるために高い

頻度で各種電磁石電流やイオン源切り替えなど多くの照射パラメータを変更し運転している。2007年度においては689件の実験に利用されており、イオン種及びエネルギー変更を270回、照射コース切り替えを343回行い、運転時間は3318時間である。図1に2007年度の月ごとの運転状況の内訳を示す。研究利用に約2400時間利用(全体の約72%)されているのに対し、そのための調整運転に約700時間(全体の約21%)を費やしている。数多くのイオン種・エネルギー変更やコース変更回数と考慮すると、短時間の調整でユーザーへビームを提供していることが分かる。また2007年度7月より文部科学省の『先端研究施設共用イノベーション創出事業』を受託して、民間企業への利用が促進されている。

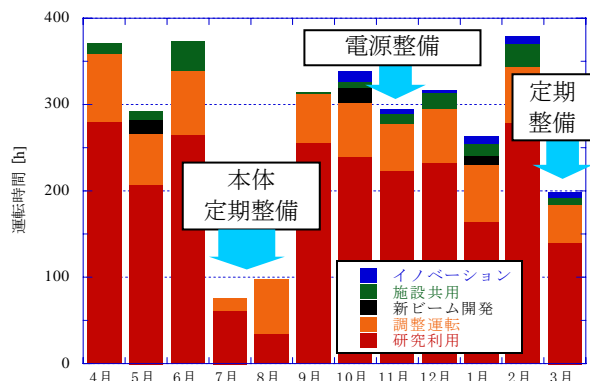


図1：2007年度サイクロトロン利用運転内訳

TIARAではユーザーへ安定な装置提供を行うため、定期的な装置の保守・整備に力を入れることで装置の故障防止に努めている。特に毎年7、8月に約6週間のサイクロトロン定期整備、11月に1週間の電磁石電源定期整備、3月に2週間その他の機器整備を実施している。最近の代表的な整備として、硬化したサイクロトロン本体の冷却水配管用ゴムホースの全数交換を始め、共振器の分解清掃及び劣化部品の交換作業や、位相計測プローブ及びケーブルの修理、毎年行っているデフレクタの電極磨き及び電極交換などを行った。電磁石電源に関しては、経年劣化が懸念されていた電流フィードバック回路を全数更新するなど、大規模な整備を実施した。

定期整備以外では装置が故障した場合、迅速に装置を復旧させるため故障箇所を特定し早急に修理している。2006年の一例を挙げると、ECRイオン源内部真空度に急激な低下が発生した際、イオン源を切り替えてユーザーにビーム提供を続ける一方で、ECRイオン源の分解・内部の清掃作業を行い、劣化していたOリングを発見・交換することで迅速に装置の復旧を行っている。

これら迅速な対応によって、2006年度は実験の中止が無く年間運転利用率100%で運転した。また2007年度にサイクロトロン通算運転時間50000時間を達成した。

### 3. サイクロトロンの技術開発

#### 3.1 重イオンマイクロビーム形成のためのフラットトップ加速技術の開発

TIARAでは四連四重極レンズを用いた集束方式による重イオンマイクロビーム形成技術を開発している。集束レンズにおけるマイクロビーム形成では、色収差の影響を少なくするためにビームエネルギー幅を $10^{-4}$ 台に縮小する必要がある<sup>[2]</sup>。しかしながら、サイクロトロンは数十MHzの正弦波電圧によって粒子を加速するため、全ての粒子において加速電圧が一定ではない。そのため、一般的にそのエネルギー幅は $10^{-3}$ 台である<sup>[3]</sup>。そこで、基本波の加速電圧に第5高調波を重畳することにより電圧波形を平坦化するフラットトップ加速技術を導入した<sup>[4]</sup>。また、サイクロトロン中心領域の改造を行い、ビーム位相幅計測用のプラスチックシンチレータヘッドを備えたメインプローブを用いて位相スリットによるビーム位相幅の制御を行っている。これによりビームの位相幅はフラットトップ加速により平坦化された加速電圧の位相内(約14度)に制限される<sup>[5]</sup>。以上の技術開発の結果、260MeV  $^{20}\text{Ne}^{7+}$ のビームエネルギー幅は $\Delta E/E = 5 \times 10^{-4}$ まで縮小し、スポット径約0.6  $\mu\text{m}$ のマイクロビームを形成することに成功した<sup>[6]</sup>。

#### 3.2 サイクロトロンの安定化

マイクロビームはきわめて微小な磁場変動の影響を受ける。そのため電磁石の温度変化による磁場変動を抑えるため、サイクロトロン電磁石ヨーク及び

磁場調整用サーキュラーコイルの温度制御を行っている<sup>[7]</sup>。加えて、主電磁石電源の電流フィードバック回路に用いている電流測定用シャント抵抗を、より測定精度の高いDCCT (DC Current Transformer)に変更することで電流の安定化を図った。更に主電磁石電源の電流フィードバック回路安定化のため、回路の温度制御方式をヒーター加熱恒温槽からペルチェ素子を用いた高安定の恒温槽に変更した。この恒温槽の改良はサーキュラーコイル及びビーム集束用電磁石等その他の電磁石電源に関しても同様に行っている。以上の磁場安定化により $\Delta I/I = \pm 2 \times 10^{-6}$ 以下の主電磁石の電流安定度を得ることができ、これにより $\Delta B/B = \pm 5 \times 10^{-6}$ 以下の非常に高い磁場安定化が可能となった。図2にサイクロトロン電磁石の安定磁場の例を示す。

ECRイオン源やビーム集束用電磁石に関しては、冷却塔ファンモータの制御をインバータ化することで温度制御の高精度化を図った。外気温変化に起因する冷却水の温度変化を $\pm 0.2^\circ\text{C}$ に抑制し、ECRイオン源出力及び各種電磁石電流を安定動作が可能となった。これらの技術開発の結果、長時間照射におけるビーム変動を抑えることが可能となり、各種照射技術開発の不安定要素を減らすことができた。

#### 3.3 マイクロビームの短時間切り替え技術の開発

マイクロビーム形成ではフラットトップ加速やマイクロビーム形成装置の四重極電磁石の調整など、様々なパラメータの調整が必要であるため、約1  $\mu\text{m}$ のビームスポット径を得るまで約8時間を要し、異なるイオン種、エネルギーのビームをマイクロビームとして同一の実験で用いることは困難であった。そこで、カクテルビーム加速技術を導入することでイオン種の切り替えを迅速に行う技術開発を行った。カクテルビーム加速技術とは、サイクロトロン周波数がイオンの荷数Qと質量Mの比(Q/M)に比例しイオン種ごとに質量Mがわずかに異なることを利用して、Q/Mがほぼ等しいイオンをサイクロトロンに同時に入射し、加速周波数とサイクロトロン周波数が一致するイオンのみを取り出す手法である。この手法では加速周波数をQ/Mの差だけわずかに調整することによって、イオン種・エネルギーの異なるビームを数分間の切り替え時間で、サイクロトロンより引き出すことができる。ビームの磁気剛性は

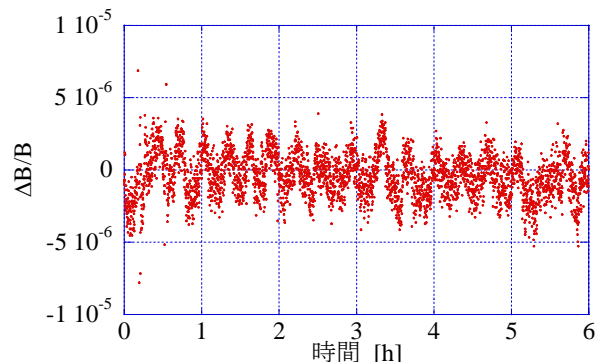


図2：サイクロトロン電磁石磁場安定度  
主磁場：B=1.94T、100MeV  $^{16}\text{O}^{4+}$ ビーム照射時。

ほぼ等しいので、イオン種を切り替えてもビーム輸送系や末端のマイクロビーム形成装置のレンズパラメータは基本的に調整不要である。この特徴を応用し、加速周波数を変更してサイクロトンから引き出すビームを短時間切り替えした後、ステアリング電磁石等をそれぞれ微調整することで、260MeV  $^{20}\text{Ne}^{7+}$  のマイクロビームを520MeV  $^{40}\text{Ar}^{14+}$  のマイクロビームへ約30分で切り替えることに成功した。

### 3.4 多重極電磁石による大面積均一照射技術の開発

TIARAでは、双極磁場を用いたラスタースキャン方式によってビームの拡大均一照射が行われているが、この方式では低フルエンスの照射が容易でないことや局所的なフルエンス率が一定でないことなど、より高度な均一照射に対応できない場合がある。そのため、大面積の照射野全体を一定の粒子フルエンス率で照射可能な八極及び六極の多重極電磁石による均一ビーム形成システムMuPUS (Multipole-magnet beam profile uniformization system)の開発を行っている。図3に均一ビーム形成のための六極、八極電磁石を示す。多重極電磁石を用いた拡大均一照射にはガウス分布のビームが必要であるため、サイクロトンから引き出されたビームを薄い金属薄膜の散乱体に透過させガウス分布を持つビームに変換した。ガウスビームのテイルを多重極磁場で折りたたむことにより、6cm×6cmの均一照射野を形成し、中心領域で約2%の均一度を確認している<sup>[8]</sup>。

### 3.5 ビーム形状変化を伴わないビーム強度制御技術の開発

ビーム入射系ではビーム強度減衰器(以下ATT)として、等間隔に微小な穴の開いた $10^1\sim 10^3$ のビーム強度減衰率を持つ複数の金属メッシュが設置されている。このATTの使用下では特定のメッシュの組み合わせにおいて、末端のビーム形状が変化し、実際の減衰率よりも大きくビーム強度が減衰される、などの現象が確認されている。そこで、ATTを使用した場合のビーム形状を、GAFCHROMICフィルムを用いて測定する<sup>[9]</sup>ことでビーム減衰率と形状が変化する原因を追究した。その結果、 $10^2$ 、 $10^3$ などの高い減衰率を持つメッシュを含んだ複数枚を数cmの短い挿入間隔で使用した場合に大きなビーム形状変化が起こることを見出した。穴間隔が広い高減衰率メッシュを使用する場合、ビーム径が小さなビ-

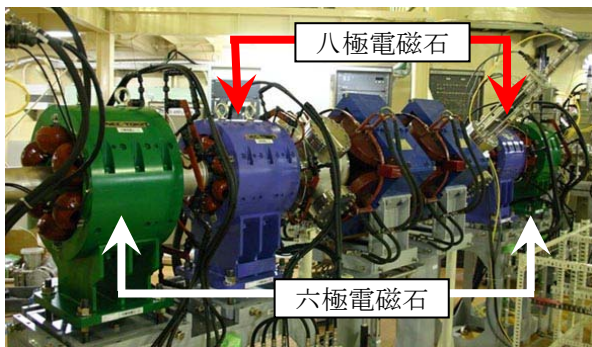


図3：均一ビーム形成のための六極・八極電磁石

表1：新メッシュ及び旧メッシュの仕様

	旧メッシュ		新メッシュ	
材質	SUS 304		Copper	
膜厚	0.076mm		0.03mm	
穴直径	0.1mm $\phi$		0.01mm $\phi$	
穴間隔	2.8mm	0.89mm	0.28mm	0.089mm
減衰率	$10^{-3}$	$10^{-2}$	$10^{-3}$	$10^{-2}$

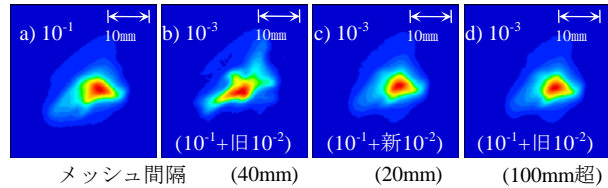


図4：GAFCHROMICフィルムを用いて計測した、新旧メッシュ使用下における260MeVの $^{20}\text{Ne}^{7+}$ ビーム強度分布。a)は単体使用である。

ムあるいは理想的なガウス分布で無いビームが二次元的に不均一に切り取られ、このビームが十分に広がる前に近距離に配置された次のメッシュに到達し、再度不均一に切り取られるため起こっていると考えられる。そのため、メッシュによる不均一な減衰を起こさない様、穴径を小さくすることで間隔が密になった新しい $10^2$ と $10^3$ の高減衰率メッシュを製作した。表1に新旧のメッシュの仕様を示す。また、以前よりもATTの設置間隔を十分設けられるような新しいチャンバーを製作した。これらを使用しメッシュの設置間隔と組み合わせを変化させながらビーム形状変化を測定することで、その評価を行っている。図4に一例として新旧メッシュを用いたビーム形状の観測結果を示す。旧 $10^2$ を近距離で使用した場合はビーム形状が大きく変化し、新 $10^2$ を使用した場合と旧 $10^2$ 遠距離の場合ではビーム形状は $10^1$ とさほど変わらないことを確認した。まだ、これ以外にも様々な組み合わせにおいて検証を行っている。

### 参考文献

- [1] K. Arakawa, et al., Proceedings of the 13th International Conference on Cyclotrons and their Applications, Vancouver, Canada, pp 119, 1992
- [2] M. Oikawa, et al., Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. B 210, 54, 2003
- [3] M.M. Gordon, Particle Accelerators 2, 203, 1971.
- [4] S. Kurashima, et al., Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. B, 260, 65, 2007.
- [5] M. Miyawaki, et al, Proceedings of the 5th Particle Accelerator Society of Japan, Higashihiroshima, WP055, Aug. 6-8, 2008
- [6] M. Oikawa, et al., Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. B 260, 85, 2007
- [7] S. Okumura, et al., Rev. Sci. Instrum. 76, 033301, 2005
- [8] Y. Yuri, et al, Proceedings of the 5th Particle Accelerator Society of Japan, Higashihiroshima, WP054, Aug. 6-8, 2008
- [9] T. Agematsu et al., Radioisotopes, 57, 87 (2008).