

STATUS OF ACCELERATORS AND TECHNICAL DEVELOPMENT AT TIARA

Watalu Yokota¹, Takayuki Nara, Ikuo Ishibori, Satoshi Kurashima, Ken-ichi Yoshida, Takahiro Yuyama,
Tomohisa Ishizaka, Takashi Agematsu, Sadanori Uno, Atsuya Chiba, Keisuke Yamada, Akihito Yokoyama,
Kiyoshi Mizuhashi, Susumu Okumura, Nobumasa Miyawaki, Hirotsugu Kashiwagi, Yosuke Yuri, Yuichi Saitoh,
Yasuyuki Ishii, Takahiro Satoh, Takeru Ohkubo, Tomihiro Kamiya
Takasaki Advanced Radiation Research Institute, Japan Atomic Energy Research Agency
1233 Watanuki, Takasaki, Gunma 370-1292

Abstract

The accelerators at TIARA of Japan Atomic Energy Agency are dedicated to researches in the field of biotechnology and materials science. The researches require beams of various ion species in a wide range of energy and a number of different methods of irradiation. In order to meet the requirements, characteristic technologies such as microbeam formation or wide-area high-uniformity irradiation have been developed as well as accelerator technologies to enable those irradiations. The paper describes the operational status of the accelerators and the major technical developments done in recent years.

原子力機構・TIARAにおける加速器と技術開発の現状

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はAVFサイクロトロン(K110)、タンデム加速器(3MV)、シングルエンド加速器(3MV)、イオン注入装置(400kV)を擁し、1993年に完成した。材料科学及びバイオ技術の研究開発専用イオンビームを提供することを目的とした世界でもユニークな加速器施設である。イオンビームを利用する研究分野が多岐に亘るために幅広いLET(Linear Energy Transfer:線エネルギー付与)が用いられることから、様々なイオン種やエネルギーのビームが必要とされるだけでなく、照射形態も多様である。通常のスポットビーム照射の他に、ラスタースキャン方式により10cm×10cmの領域を5%の均一度で照射する大面積均一照射、直径1μm以下のマイクロビームや1個のイオンを1μmの精度で狙い撃ちするシングルイオンヒットなどが用いられている。またサイクロトロンでは、各照射実験の時間が短く頻りにビームのイオン種やエネルギーを変更しており、原子核物理実験や医療などの利と大きく異なる形態で運転されている。これらの特徴ある照射形態及び運転形態に適合するために、TIARAではサイクロトロンにおけるカクテルビーム加速技術の他、独自の加速器技術及び照射技術を開発している。本報告では、材料科学及びバイオ技術専用の加速器として特有の運転・照射の現状、及び最近の加速器を中心とした技術開発の状況や結果を解説する。

2. 加速器の運転保守の状況

サイクロトロンは一般的な週においては月曜午後から金曜夕刻まで連続的に運転するが、1回の実験時間が短いために週のうちに10回程度のイオン種、エネルギーまたはビームコースの変更を行う。静電加速器は毎日9時頃に運転を開始し、23時まで停止・点検を完了する。2007年度の各加速器の運転時間は、サイクロトロン:3318時間、タンデム加速器:1949時間、シングルエンド加速器:2437時間、イオン注入装置:1900時間で、ほぼ平年並みであった。近年は修理に数日を要する大きな故障が無く、計画外停止はいずれも1%未満である。冷却水系、真空系を中心に計画的な保守を進めているが、完成から15年以上が経過しているために、今後は故障の予測が難しい箇所において高経年化によるトラブルが増加することが予想される。例えば、人の管理区域への入退を管理するシステムと加速器のインターロックシステムを結ぶデジタル回線の故障により静電加速器が運転できなくなる2件のトラブルが初めて発生したが、高経年化による可能性があると考えている。

3. 静電加速器に関する技術開発

3.1 シングルエンド加速器の放電耐性の強化

シングルエンド加速器の高電圧ターミナルは直列に接続された220個の精密抵抗(抵抗値:120MΩ、温度係数:50ppm/°C)により接地され、分圧及び電

¹ E-mail: yokota.wataru@jaea.go.jp

圧検出を行ってフィードバック制御がなされている。従来の抵抗は螺旋状の厚膜型で、ターミナル電圧の放電時のサージ電流により誘導される急峻な電位勾配で損傷を受け易く、3MVの安定な電圧維持が困難なことがあった。そこで、抵抗経路がジグザグ状の無誘導型のパターンをセラミック絶縁基板に形成した抵抗を開発した。従来の抵抗では両端が損傷し易かったことから、無誘導型抵抗では両端における線幅及びジグザグの間隔を他より広げることで単位長さの抵抗値を下げ、サージによる急峻な電位勾配の発生を抑制するように工夫した。従来抵抗と無誘導型抵抗を同時に加速器に実装して3MVでの放電試験を行ったところ、従来抵抗はほぼ全数が最大で50%以上抵抗値が低下したが、無誘導型抵抗では抵抗値の低下は無かった。また、3カ月間の実用において約20回の放電を受けた後も抵抗値の変化は平均0.003%であり、無誘導型抵抗の放電への耐性が極めて高いことが実証された。難放電対策を進めたことによる放電の低減と相俟って、現在では3MVでの安定な運転が実現されている。



図1：従来型抵抗(上)、無誘導型抵抗(中)及びそのパターン(下)。

3.2 マイクロビーム技術

TIARAではタンデム加速器で直径 $1\mu\text{m}$ 以下の重イオンマイクロビーム形成が、シングルエンド加速器で $0.25\mu\text{m}$ の軽イオンマイクロビーム形成が、更に各直径の精度でシングルイオン(1個のイオン)を照準する技術が1990年代前半に実現した。軽イオンマイクロビームはPIXE(Particle Induced X-ray Emission)分析に応用され、静電スキャナでマイクロビームをターゲット上で走査することにより、X線の発生箇所を $1\mu\text{m}$ の分解能で検出できる。生きた状態に近い細胞中の2次元微量元素分布を測定するために、 $4\mu\text{m}$ 厚のマイラー膜を通してマイクロビームを大気中に取り出す大気マイクロPIXE分析が実用化されている。更に現在、CT(Computer Tomography)の原理を応用して3次元の元素分布を測定する技術の開発を進めている。

マイクロビームは微細加工にも利用される。PBW(Proton Beam Writing)技術は、水素イオンビームの照射位置を制御して主に高分子膜に照射(露光)

し、照射部または非照射部分を高分子溶解液で溶解(現像)することで、サブミクロンサイズ・精度の微細加工を行うものである。ビームエネルギーを変えることで高分子膜中でのビームの到達深度を制御し、3次元構造体を製作することが可能になった^[1]。

3.3 クラスターイオンの生成・加速

タンデム加速器で加速した高速クラスターイオンビーム強度は世界トップレベルにあり、クラスターと物質の相互作用の解明、照射効果の解明及び表面分析への応用に関する研究に利用されている。実験効率の向上や研究領域の拡大のために更なるビーム強度の強化を目指した開発を行っている。セシウムスパッタ型負イオン源では、単原子イオンとともにクラスターイオンが同時に生成され、その生成比はスパッタカソードの温度や試料密度などで変わり、炭素クラスターの場合、低温で高密度の方がクラスターイオンが生成されやすい傾向にある。一方、クラスター負イオンはタンデム加速器ターミナル内の荷電変換セクションで荷電変換ガスである窒素との衝突で多くが解離するが、一部は解離せずに正イオンに荷電変換される。目的の構成原子数のクラスター正イオンビーム量を高める調整を現在は荷電変換ガスの圧力の制御のみで行っている。荷電変換効率を高く、解離率を低くする制御が行えれば更にビーム量が増大できると考え、両者の計測方法の開発及び荷電変換ガスの種類の依存性を調べている。

4. サイクロトロンに関する技術開発

4.1 サイクロトロン磁場の高安定化

サイクロトロンの磁場は2000年頃に高安定化したことが、他の技術への波及効果が大きいので概要をまとめたい。

当初の磁場安定度は 4×10^{-4} 程度であったためにビーム電流が約5時間で半減し、その都度、最外周のトリムコイル等で磁場を調整する必要があった。これを改善して、更に高度な加速技術開発に対応できるようにするために、磁場の高安定化技術の開発を行った。磁場変動の主な原因が、メインコイルの発熱がヨークに伝導することによるヨーク温度の変化にあることを突止め、メインコイルとヨーク間に水冷式の遮熱銅板を挿入し、更にトリムコイル冷却水温度の定温化を併せることで、 1×10^{-5} の安定度を実現した^[2]。この高安定化が後述するフラットトップ加速やマイクロビーム形成に不可欠であることは勿論だが、サイクロトロンの建設時に設置したビームチョッピングシステムによるシングルパルスビームの形成・維持に役立つことが最近明らかになった。本チョッピングシステムは、サイクロトロンにビームを入射する直前に設置したパルス型チョッパー(P-チョッパー)とビームを引出した直後の正弦波型チョッパー(S-チョッパー)より成り、どちらも平行平板電極の静電デフレクターである。システムの詳細は文献[3]に譲り、ここではS-チョッパーが間

引くべきパルスの個数がマルチターン引出しの数に依存することのみを指摘する。磁場の高安定化を行う前は、2時間程度かけて形成したシングルパルスが、磁場の僅かな変動とともにS-チョッパーで間引ききれないほどにマルチターン数が増加したため、20分程度しか持続しなかった。このため、シングルパルスビームは1996年以降は殆ど用いられなかった。しかし、磁場の高安定化とフラットトップ加速導入に伴う中心領域の改良でビーム位相制御が確実にできるようになったことからマルチターン数の増加が抑制された。これによりシングルパルス形成が短時間ででき、3時間以上安定に維持することが確認された。

4.2 マイクロビーム形成に関する加速器技術

サイクロトロンビームのマイクロビーム化はバイオ研究におけるバイスタンダー効果や宇宙用半導体耐放射線性評価研究におけるSEU (Single Event Upset) 研究で強い要求があり、2001年に技術開発が開始された。マイクロビーム形成技術の基礎は既に静電加速器において確立されていたが、サイクロトロンビームでは、エネルギー幅 $\Delta E/E$ が一般に 10^{-3} 台と静電加速器に比べて10倍も広いために、マイクロビームへの集束時に色収差が問題になる。TIARAのサイクロトロン用マイクロビーム形成装置では、色収差によるビームの広がりを $1\mu\text{m}$ 以下に抑えるために $\Delta E/E \sim 0.02\%$ とすることが設計上の条件である。これを実現するために、加速電圧が正弦波であることから生じるイオンのエネルギー利得のばらつきを低減する目的で、加速電圧を平坦化するフラットトップ (FT) 加速を導入した^[4]。基本波に重畳する電圧波には共振器の小型化や省電力の観点から5倍波を選択した。また、これによる加速電圧の平坦部分の位相幅 (14°RF) にビームを制限するために中心領域のインフレクター、プラー及び2組の位相スリットを改造した。これらの効果を260MeV-Neビームで評価した結果、 $\Delta E/E \sim 0.05\%$ と有効に狭まっていることが確認された。このビームを用いて、最小で直径 $0.6\mu\text{m}$ のマクロビーム形成に成功した^[5]。

数百MeV重イオンのマイクロビーム形成は世界で唯一だが、サイクロトロンの起動からマイクロビーム形成の完了まで、従来は8時間程度を要しており、実験効率が悪い。そこでTIARAでは、カクテルビーム加速技術を用いてマイクロビームのイオン種を迅速に変更する技術：カクテル・マイクロビームの開発を行った。M/Q \square 2.8 (M=イオンの質量 (原子質量単位)、Q=イオンの価数) である260MeV- $^{20}\text{Ne}^{7+}$ と520MeV- $^{40}\text{Ar}^{14+}$ を用い、まず前者を加速、マイクロビーム形成を確認した後に、後者を加速周波数の微調整のみでカクテル加速し、ビーム輸送で偏向電磁石及びステアリング電磁石を中心に微調整をすることで、約30分で後者のマイクロビーム形成を確認できることが分かった。ビームの順序を逆にしても同様の時間で変更できる。これらのカクテル・マイクロビームは既にSEUの実験に提供されている。今後M/Q \square 2.8である $^{11}\text{B}^{4+}$ 、 $^{14}\text{N}^{5+}$ 、 $^{28}\text{Si}^{10+}$ にも適用して、

幅広いLETの複数のマイクロビームを時間の限られた照射実験の中で利用可能にする計画である^[6]。

4.3 多極磁場による均一拡大照射技術

TIARAでは当初からラスタースキャンによる $10\text{cm} \times 10\text{cm}$ の大面积均一照射が行える。この照射は各瞬間ではスポット照射であり、試料の全照射野を走査するには数秒の時間を要する。宇宙用半導体研究ではこの時間差が評価の障害になるために、全面積の同時照射が求められていた。多極磁場による均一照射は8極磁場によるものが知られているが、TIARAでは無限大次数の磁場を扱った理論^[7]を構築して、ガウス分布のプロファイルを持つビームを均一照射場にするのに必要な磁場強度を解析的に求めた。また、一般的に知られているのは12極までの奇数次磁場であるが、偶数次磁場が光学軸からずれたビームを均一化するのに役立つことを見出した。これを基に、2台の8極電磁石と2台の6極電磁石を組合わせて、照射野 $10\text{cm} \times 10\text{cm}$ 、均一度2%を目標とした均一照射場形成システムを製作した。サイクロトロンビームのプロファイルは一般的にガウス分布ではないことから、散乱体を用いてガウス分布に近づける方式を現在は用いている。これまでに10MeV- H^+ ビームで $6\text{cm} \times 6\text{cm}$ 、均一度6%を得た^[8]。

参考文献

- [1] N. Uchiya, et al., "Micro-machining of resists on silicon by proton beam writing", Nucl. Instrum. and Methods in Physics Section B 260 (2007) 405.
- [2] S. Okumura, et al., "Magnetic field stabilization by temperature control of an azimuthally varying field cyclotron magnet", Rev. Sci. Instrum. 76 (2005) 033301.
- [3] W. Yokota, et al., "Performance and operation of a beam chopping system for a cyclotron with multiturn extraction", Rev. Sci. Instrum. 68 (1997) 1714.
- [4] S. Kurashima, et al., "Improvement in beam quality of the JAEA AVF cyclotron for focusing heavy-ion beams with energies of hundreds of MeV", Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. B 260 (2007) 65.
- [5] M. Oikawa, et al., "Focusing high-energy heavy ion microbeam system at the JAEA AVF cyclotron", Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. B 260 (2007) 85.
- [6] S. Kurashima, et al., "Quick change of ion species of heavy-ion microbeam by cocktail beam acceleration technique in the JAEA AVF Cyclotron", 11th Int. Conf. on Nuclear Microprobe Technology and Applications, July 21-25, Hungary, to be published in Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. B.
- [7] Y. Yuri et al., "Uniformization of the transverse beam profile by means of nonlinear focusing method", Phys. Rev. ST Accel. Beams 10 (2007) 104001.
- [8] Y. Yuri et al., "Formation of a uniform beam profile using multipole magnets", in these proceedings, WP054.