

STATUS OF TIARA FACILITY

Ken-ichi Yoshida, Takayuki Nara, Ikuo Ishibori, Satoshi Kurashima, Takahiro Yuyama, Tomohisa Ishizaka, Takashi Agematsu, Sadanori Uno, Atsuya Chiba, Keisuke Yamada, Akihito Yokoyama, Susumu Okumura, Nobumasa Miyawaki, Hirotsugu Kashiwagi, Yosuke Yuri, Yuichi Saito, Yasuyuki Ishii, Takahiro Satoh, Takeru Ohkubo, Watalu Yokota

Takasaki Advanced Radiation Research Institute, Japan Atomic Energy Agency
1233 Watanuki-machi, Takasaki-shi, Gunma 370-1292

Abstract

The ion accelerators at TIARA (Takasaki Ion accelerators for Advanced Radiation Application) of Japan Atomic Energy Agency are dedicated mainly for studies of the field of biotechnology and materials science. The researches require beams of various ion species with a wide range of energy from several tens of keV to hundreds of MeV and a number of different methods of irradiation. In order to meet the requirements, unique irradiation technologies such as formation of microbeam and wide-area high-uniformity beam have been developed as well as the accelerator technologies. This paper describes the operational status of the four accelerators and the major technical developments carried out in recent years.

原子力機構TIARA施設の現状

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)と3台の静電加速器(400kVイオン注入装置, 3MVタンデム加速器, 3MVシングルエンド加速器)を有し、材料科学及びバイオ技術の研究開発を中心にイオンビームを提供している。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イオン種、エネルギー、LET (Linear Energy Transfer: 線エネルギー付与)を提供するとともに、様々な照射形態に対応しなければならない。

サイクロトロンでは、通常のスポットビーム照射の他に、10cm×10cm、±5%の均一度のラスタースキャン方式による大面積照射が可能であり、さらに広い照射野全体を多重極磁場により同時に一定のフルエンス率で照射できる大面積均一照射システムを開発中である^[1]。また、直径1μm以下のマイクロビーム形成^[2]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の照射技術を有している。サイクロトロンは月曜日から金曜日夕刻まで連続的に運転されるが、1回の実験が短いため週に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なっている。また、1996年よりカクテルビーム加速技術を取り入れ、1回のビームタイム内で数種類のイオンの照射を可能にしている。このように原子核物理実験や医療用などのサイクロトロンとは大きく異なる運用を行なっている。

静電加速器では、3MVタンデム加速器で直径1μm以下の重イオンマイクロビームが、3MVシングルエンド加速器で0.25μmの軽イオンマイクロビームが利用可能であり、このマイクロビームを静電スキャナ

で走査することにより1μmの分解能で2次元微量元素分布を得るPIXE (Particle Induced X-ray Emission) 分析と、4μm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^[3]。また、マイクロビームのエネルギーを変えて深さ方向の照射位置を精密に制御することで、主に高分子膜にサブミクロン精度の3次元微細加工を行うPBW (Proton Beam Writing) 技術が近年可能になっている^[4]。この他、3台の静電加速器からのビームを同時に照射するトリプルビーム照射が可能である。各静電加速器は月曜日から金曜日の各日9時から23時まで運転される。

本報告では、各加速器の運転・保守の状況、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. 加速器の運転状況

2.1 各加速器の運転統計

表1 各加速器の2009年度の運転状況

	C	T	S	I
運転時間(h)	3148	2100	2416	1866
ビーム提供時間	3082	2086	2416	1847
新ビーム開発時間	66	14	0	19
実験数	633	168	161	143
マシントラブルによる実験中止件数	2	0	2	1

yoshida.kennichi71@jaea.go.jp

2009年度の各加速器の運転時間を表1に示す。近年は大きな故障等が無く、当年度も計画された実験のほとんどを実施し、加速器のトラブルによる実験の中止はサイクロトロンで2件、静電加速器では3件であった。またサイクロトロンのイオン種・エネルギー変更回数は238回、ビームコース切替回数309回、加速モード変更回数56回、とほぼ例年どおりであった。

新ビーム開発については、サイクロトロンでは、25MeV H^+ 、12MeV D^+ 、98MeV $^{28}Si^{5+}$ 、490MeV $^{192}Os^{30+}$ を新たに加速した。このうちOsイオンはMIVOC法を用いてイオン源で発生させるため、オープン方式のような時間を要する準備が必要なくイオン種の切替えが多い当サイクロトロンには有効である。3MVタンデム加速器では、Moイオンの他、Ybイオンを加速した。イオン注入装置ではイオンの生成が難しくビーム電流が少ないPtの代替としてPdイオンの加速を行った。

2.2 保守状況

サイクロトロンは完成から19年以上が経過しているために、今後は高経年化によるトラブルが増加することが予想される。このため、電源系、冷却水系、真空系を中心に毎年計画的に機器の更新・整備を行っている。2009年度は各種制御盤内の24V電源や、電磁石電源内のリレーの全数交換を行なった。また、加速後のビームを正弦波で間引くS型ビームチョッパーでは、トランジスタアンプおよび制御用シーケンサの更新などを行なった。3MVシングルエンド加速器では、直流高压電源のコンデンサーなど主要部品の交換を行なった。3MVタンデム加速器では、従来3ヶ月ごとに交換しているプローブニードル用の針をスチール製からタングステン製に換えたところ、500時間経過しても針先端部の溶融が少なく電圧安定度はスチール針より改善され $\Delta V/V=0.8 \times 10^{-4}$ と良好であった。

3. サイクロトロンに関する技術開発

3.1 加速位相制御によるビーム引出効率の向上

これまでのサイクロトロンのビーム調整では、加速中のビームバンチにより静電誘導される電荷を位相プローブでピックアップし、そのタイミングをオシロスコープで観察しながらトリムコイル電流を調整することで等時性磁場を形成していた。しかしこの方法では、ビームバンチの高周波加速電圧に対する加速位相の絶対値 θ が測定できないため、ビームバンチのエネルギーゲインが最大になる位相にあるかどうかは分からなかった。

θ が0度から大きくずれるとエネルギーゲインは小さくなるため引出し半径におけるターンセパレーション（隣り合う軌道のビームバンチ同士の間隙）は狭くなる。さらに、エネルギー幅が増大するためにビームバンチは半径方向に広がり、マルチターン

引出しの回数は増える。この結果、デフレクタにおける透過効率は低下し、ビーム電流は減少する。 θ を簡便に計測する手法はこれまで無かったため、その制御は事実上不可能であった。そこで次の簡便な計測方法を開発した。サイクロトロンから引出す前のビーム電流を、その値がゼロになるまで加速周波数 f を高低両方向にスキャンして($\Delta f/f \approx \pm 5 \times 10^{-4}$ 程度)計測すると、台形状の電流パターンが得られる。等時性磁場が形成され、かつ $\theta=0$ の場合において、ビーム電流がゼロになる2点の $\Delta f/f$ の絶対値は等しくなる。逆に言えば、これら2点の絶対値が異なる場合は、 $\theta=0$ から離れている。この原理を利用して、電流パターンの対称性（偏り具合）から θ を簡便に算出できる。さらに中心バンブ磁場を調整することで $\theta=0$ に調整する。

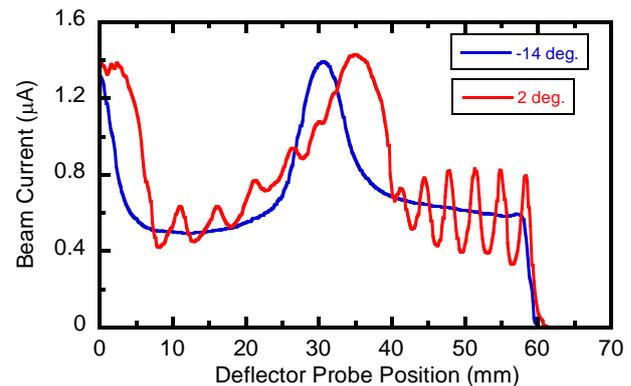


図1： θ を変えた場合の引出し半径付近における微分電流分布（160 MeV $^{16}O^{6+}$ ）

図1は、 θ を変えた場合のデフレクタ付近の微分電流分布を示す。 θ を調整する前（-14deg.）は個々のビーム軌道を識別することはできない。しかし、調整後（2deg.）はエネルギー幅が縮小化してビームバンチの半径方向への広がりが抑制された結果、はっきりと識別することができる。右端（60mm付近）のビームバンチがデフレクタを通過して引出される。この調整の結果、デフレクタの透過効率は60%から77%まで改善された^[5]。

3.2 高安定イオン源の開発

サイクロトロンに設置されているイオン源は、 H^+ 及び D^+ 用のMulticuspイオン源、He-Xe $^{25+}$ 及びカクテルビーム用のOCTOPUS(ECRイオン源)、 Ar^{14+} より重いイオン及びMIVOC法用のHyperNanogan(ECRイオン源)の3台である。Multicuspイオン源とOCTOPUSはサイクロトロン建設当時から使用しているため、永久磁石の減磁等に起因するイオン生成能力の低下が近年顕著になっている。またマイクロビーム等の実験利用ではこれらのイオン源より高い長時間のビーム電流安定度が要求されている。そこでビーム電流安定化及び経年劣化対策として高安定イオン源の開発を行っている。このイオン源は安定化を主眼としていることから電磁石や電源の発熱によるビーム電流の変動がない永久磁石型を採用した

(図2参照)。このイオン源の特徴は、従来の永久磁石型ECRイオン源では困難であったミラー磁場強度の調整を容易にしたことにある。このため、永久磁石型でありながら8~12GHzのマイクロ波に対応可能である。このイオン源の主なイオンの生成量を表2に示す。現在、運転開始2時間後から8時間のビーム安定度は3.2%である^[6]。今後は更なる安定度の向上のために、真空度やマイクロ波源の安定化を図る予定である。



図2：高安定軽イオン源

表2 主な生成イオン種とビーム電流値

イオン種	電流(μA)	イオン種	電流(μA)
H ⁺	1000	O ⁵⁺	102
He ²⁺	450	O ⁶⁺	42
C ⁴⁺	53	O ⁷⁺	3
C ⁵⁺	8	Ne ⁶⁺	26
O ⁴⁺	162	Ne ⁷⁺	5

4. 静電加速器における技術開発

4.1 3MVタンデム加速器における技術開発

2007年より3MVタンデム加速器ではMeVクラスターイオンの加速及びその照射技術の開発を行っている。

タンデム加速器で加速後の目的とする価数の正イオンのビーム電流を最大にするためには、加速器内の荷電変換ガスの圧力を調整する。クラスターイオンが荷電変換ガスとの衝突で解離せずに荷電変換する割合(透過率)もまた、このガス圧力に依存する。さらに、荷電変換ガス圧と透過率の関係から、クラスターイオンの解離断面積や荷電変換断面積など重要な物理量を導出することができる。このように、荷電変換ガス圧は、イオンの効率的な加速やクラスターイオンの解離・荷電変換メカニズムの解明のために重要なパラメータであるが、荷電変換部が高電圧ターミナル内にあるため、加速器直近のビーム輸送ダクトの真空度測定による間接的なモニターしか行われていない。そこで、モニター値から実際の加速器内部のガス圧を導出する方法を確立した。

荷電変換ガスの圧力とタンデム加速器の透過率Fの関係は、イオンの荷電変換断面積を用いて、

$$F = \frac{I}{I_0} = \alpha \exp(-\sigma_d \pi) \quad (1)$$

と表すことができる^[7]。ここで、IとI₀はそれぞれ、加速器入射前と出射後のイオンビームの電流値、αは加速器の光学的透過率、σ_dは荷電変換断面積、πは荷電変換ガスの面密度である。荷電変換断面積が既知のイオンを用いればπが得られ、その時のモニター値との関係から、加速器内の荷電変換ガス圧(P_{in})を、モニター値(P_{ccg})を用いて表すことができる。以下に実験方法を示す。

3MVタンデム加速器では通常窒素ガスを荷電変換に用いている。そこで、窒素ガスとの衝突による負イオンから正イオンに荷電変換される断面積が既知のイオンとして0.5MeV水素負イオンを利用した^[8]。荷電変換部でのエネルギーが0.5 MeVとなるように加速電圧を調整して、タンデム加速器入射直前の水素負イオンビーム量(I_{in})と加速器透過後の負イオンビーム電流量(I_{out})をガスの圧力を変化させて測定した。横軸をモニター値(P_{ccg})、縦軸をF(=I_{out}/I_{in})でプロットした結果を図3に示す。

Fは、式(1)と荷電変換の文献値^[8]を用い、さらにπを圧力に変換すると^[7]、

$$F = \alpha \exp(-8.38 \times 10^2 \gamma P_{ccg}) \quad (2)$$

と表すことができる。ここでγは、モニター値から加速器内部の荷電変換ガス圧への変換係数である(P_{in}=γP_{ccg})。式(2)を用いて図3の測定値を最小二乗法でフィッティングすることにより(図3点線)γを得た。これにより、

$$P_{in} = 2.54 \times 10^4 P_{ccg} \quad (3)$$

と表すことができ、モニター値から加速器内部のガス圧を導出することができた。

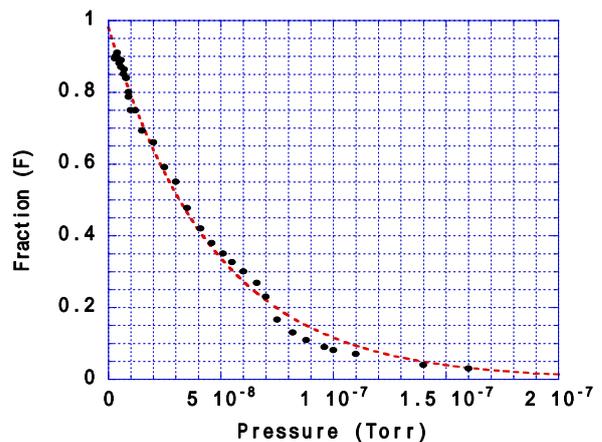


図3：水素負イオンの透過率とガス圧の関(破線は計算値)

4.2 3MVシングルエンド加速器における技術開発

3MVシングルエンド加速器を利用したPIXEやPBWの時間短縮や空間分解能の向上のために、十分なビーム電流を有するナノビーム形成が望まれている。このためには加速器のビームの高輝度化が必要である。そこでこの実現の第一段階として、MeV領域のビームを0.02mradの高角度分解能を有し、約3分の短時間計測が可能なシンチレータの発光を用いたエミッタンスモニターを開発した。

このエミッタンスモニターは図4のように、ビームプロファイルを多孔スリット通過後のA点及びB点の2点で撮影し、発光模様の大さの違からエミッタンスを算出する。発光体にはYAG:Ceを使用しているため、SiO₂のようなビーム照射によるダメージに伴う照射位置の変更が不要である。今後は一般的なワイヤー式のエミッタンスモニターとの比較を行う予定である^[9]。

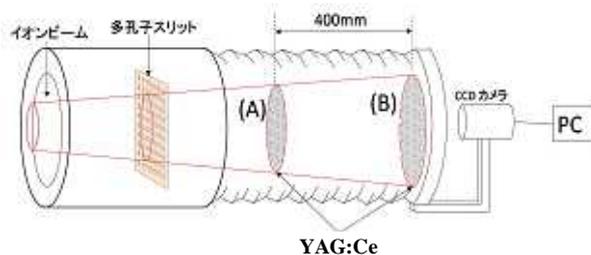


図4：エミッタンスモニター

4.3 400kVイオン注入装置における技術開発

イオンビームの位置及び形状の確認にはアルミナ等の蛍光体が広く使用されているが、400kVイオン注入装置のような低エネルギー重イオンおよびクラスターイオンビームでは発光が微弱でリアルタイムでのビーム形状の確認が困難である。そこで、エネルギー及びイオン種によらずビーム形状を測定する装置として、マルチファラデーカップ (MFC) の開発を行っている^[10]。電流測定においてC₆₀等のクラスターイオンをファラデーカップ (FC) で測定する際に電子抑制用サプレッサを使用すると大量の正二次イオンを引き出してしまい、正確な計測ができないため、MFCを構成する個々のFCはサプレッサを使用せず高アスペクト比 (3mm、長さ15mm) な形状とした。MFCの構造は図5に示すように33個のFCをセラミック基板上に配置した。現状では測定時間は約7秒で強度分布測定が可能である。



図5：マルチファラデーカップ

参考文献

- [1] Y. Yuri et. al., Phys. Rev. ST Accel. Beams 10 (2007) 104001.
- [2] M. Oikawa et. al., Nucl. Instrum. Methods B 260 (2007) 85-90.
- [3] T. Sakai et. al., Nucl. Instrum. Methods B 190 (2002) 271.
- [4] N. Uchiya, et al., Nucl. Instrum. Methods B 260 (2007) 405.
- [5] S. Kurashima, et al., Rev. Sci. Instrum. 81 (2010) 033306.
- [6] K. Yoshida, et al., Rev. Sci. Instrum. 81 (2010) 02A312.
- [7] J. C. Acquadro et. al., Nucl. Instrum. Methods B 171 (2000) 373.
- [8] J. Heinemeier et. al., J. Phys. B 9 (1976) 2669.
- [9] A. Yokoyama, et al., Proceedings of the 22st Meeting for Tandem Accelerators and their Associated Technologies in Japan, Tsukuba, Jul. 31- Aug. 1, (2009)136.
- [10] K. Yamada, et al., Proceedings of the 21st Meeting for Tandem Accelerators and their Associated Technologies in Japan, Tsukuba, Jul. 16-17, (2008)134.