

原子力機構 TIARA サイクロトロンにおける 大面積均一イオンビーム利用のための技術開発

TECHNICAL DEVELOPMENT FOR THE UTILIZATION OF LARGE-AREA UNIFORM ION BEAMS AT THE JAEA TIARA CYCLOTRON

百合庸介, 湯山貴裕, 石坂知久, 石堀郁夫, 奥村進

Yosuke Yuri, Takahiro Yuyama, Tomohisa Ishizaka, Ikuro Ishibori, and Susumu Okumura

Takasaki Advanced Radiation Research Institute, Japan Atomic Energy Agency

Abstract

A formation/irradiation system of large-area uniform ion beams based on nonlinear focusing has been continuously developed at the ion accelerator complex TIARA in Japan Atomic Energy Agency. A beam with a uniform transverse intensity distribution is formed by nonlinearly focusing a Gaussian-like beam with multipole magnets in a properly-designed beam line. An efficient beam tuning procedure in the high-energy beam transport line of the TIARA AVF cyclotron has been established toward the smooth utilization of the uniform beam. Applying the last doublet quadrupole and two octupole magnets, we can diversely change the on-target uniform beam profile at a typical uniformity below 10% from a square-like area over 200 cm² to a ribbon-like one with a high aspect ratio over 15. Such uniform beams of several ion species of 3~13 MeV/u are now ready for the utilization.

1. はじめに

原子力機構高崎量子応用研究所のイオン照射研究施設 TIARA は、材料科学・バイオ技術分野の先端科学研究やその産業応用を主目的として整備された加速器施設である。AVF サイクロトロンと3台の静電加速器からなり、原子力機構の量子ビーム応用研究の拠点のひとつである^[1]。

AVF サイクロトロンでは、新たな拡大ビーム照射法として、多重極電磁石を用いてイオンビームの横方向強度分布を大面積均一化する技術開発を進めている^[2-5]。この照射法は、多重極電磁石がビームに及ぼす非線形集束力によって強度分布が変換されることに基づいている^[6]。適切に設計されたビーム輸送系において、主として8極電磁石を用いてビームを集束することにより、ビーム強度分布の裾野が内側に折りたたまれ、最終的にターゲットにおいて実空間強度分布を均一化することが可能である。

材料科学やバイオ技術分野の照射利用に有用な、均一度 10%以内で 100cm² 程度の面積の照射野を実現することを目標として開発を進めてきた。本稿では、開発したシステムの概要に加え、確立した均一ビーム形成手順及びそれに基づいて形成した均一ビームの特性等、利用に向けた最近の開発結果を報告する。

2. 均一ビーム形成システム

TIARA のサイクロトロン加速器施設のレイアウトを Figure 1 に示す。均一ビーム形成のための主要要素は、薄膜散乱体、多重極電磁石及びターゲットチャンバーである。

多重極電磁石を用いてビームの横方向強度分布を均一化するには、その初期分布がガウス分布であることが前提条件として必要である^[2,3]。しかしながら、

実際には TIARA サイクロトロンから引き出され、拡大されたビームのプロファイルは実空間・位相空間とも通常複雑でガウス分布ではないため、単に多重極電磁石でビームを集束しても均一性の良いビームを形成することはできない。そこで、薄膜散乱体にイオンビームを透過させ、多重クーロン散乱によって、横方向強度分布をガウス分布に近づけた。薄膜位置における Twiss パラメータ及び薄膜からターゲットまでのベータatron位相進度を適切に設

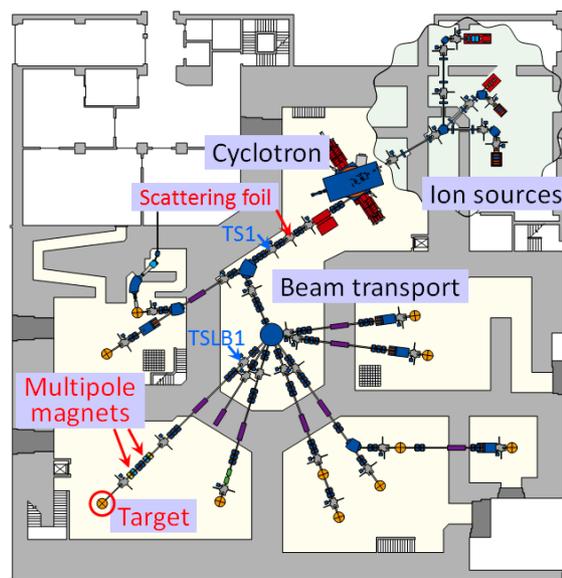


Figure 1: Schematic layout of the JAEA AVF cyclotron facility. The gray squares on the beam lines correspond to the beam diagnostic stations (labelled as TS1 and TSLB1) equipped with a silt, a wire profile monitor, a phosphor screen, and a Faraday cup. Multipole magnets have been installed in one of the beam lines for the formation of a uniform beam.

定することにより、可能な限り薄い散乱体で十分にガウス様分布化し、散乱による重イオンビームのエネルギー損失を抑えた^[3,7]。

多くの場合、多重散乱されたイオンの価数は変化し、ある分布を持つが、ビームは散乱体の下流にある2台の偏向電磁石によって分析され、特定の価数のイオンのみがターゲットへ導かれる。

ガウス様分布化されたビームは、多重極電磁石により集束されるが、その非線形集束によって生じる横方向2自由度間のベータatron振動の結合は均一ビーム形成の妨げとなる。この結合を弱めるため、Figure 2 に示すように、多重極電磁石位置では、水平・鉛直いずれかの方向のビームサイズがもう1方向のそれよりも十分大きくなるようにビーム光学系を設計した。これにより、水平・鉛直方向の均一化を独立に調整することができ実用的である。均一化に必要な8極磁場強度 K_{OCT} 及びターゲットにおいて形成される均一分布の全幅 W は以下のとおりである^[2]：

$$K_{OCT}L_{OCT} \approx \frac{1}{\varepsilon\beta_0^2 \tan \phi}, \quad (1)$$

$$W \approx \sqrt{2\pi} \sqrt{\varepsilon\beta_1} |\cos \phi|, \quad (2)$$

ここで、 L_{OCT} は8極電磁石の磁極長、 ε はビームの二乗平均 (rms) エミッタンス、 β_0 及び β_1 は8極電磁石の位置及びターゲット位置におけるベータ関数、 ϕ は8極電磁石からターゲットまでのベータatron位相進度である。

なお、Figure 2 に示すように、ビームラインには6極電磁石も設置されている。8極電磁石を用いた均一化の際にビーム軌道のずれに伴う分布変形を補正するとともに均一領域を拡大する効果があること^[3]や6極電磁石のみを用いた均一化が可能であることを明らかにした^[4]。

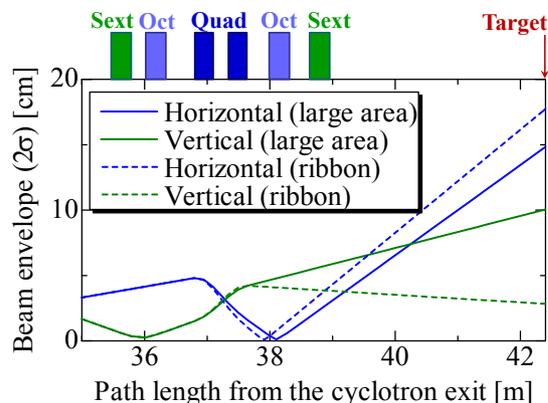


Figure 2: Transverse beam envelope around the multipole magnets and target. The blue and green lines are the horizontal and vertical envelopes, respectively. The solid lines correspond to the case of a two-dimensional large-area beam, and the dashed lines correspond to the case of a horizontally-elongated ribbon beam. An rms emittance of $10 \pi \text{mm} \cdot \text{mrad}$ has been assumed.

ターゲットには、様々な形態での均一ビームの計測や照射利用が行えるよう、多数のフランジポートを備えた汎用的な真空チェンバーを設置した。20cm角の大面积の薄い試料を最大22枚搭載することができ、効率的な利用を可能とした。運動エネルギーが 10MeV/u 程度以上のビームについては、大口径の薄膜窓を設置して、大気中にビームを取り出して均一照射することも可能である。

3. 均一ビーム形成手順の確立

Figure 1 に示すように、サイクロトロンからターゲットまでのビームライン上には、25台の四重極電磁石が設置されているが、限られたマシンタイム内で、多重極電磁石や偏向・ステアリング電磁石に加えて、これら25台全ての電磁石を細かく調整することは現実的でない。そこで、効率的なビーム調整のために、ビーム光学系設計、粒子トラッキングシミュレーション及び実験での検証を経て、以下のように調整手順を確立した。

まず、サイクロトロン直後の3連四重極電磁石を用いて、その直後に設置されている薄膜散乱体 (直径 30mm) でのビーム形状の調整及び最初のビーム診断ステーション (TS1) でのビームウエスト形成を行う。

次に、ガウス様分布化のための薄膜をビームラインに導入する。必要な散乱角の大きさは $0.7 \sim 2 \text{mrad}$ であり^[8]、イオン種や運動エネルギーに応じて、アルミニウム ($\rho=2.7 \text{g/cm}^3$, $t1.5 \mu\text{m}$)、銅 ($\rho=9.0 \text{g/cm}^3$, $t2 \mu\text{m}$)、タンタル ($\rho=16.7 \text{g/cm}^3$, $t1 \mu\text{m}$) 等を使い分けている。散乱により、rms エミッタンスは $0.5 \sim 5 \pi \text{mm} \cdot \text{mrad}$ から $10 \sim 10$ 数 $\pi \text{mm} \cdot \text{mrad}$ へと増大する。エミッタンス増大に伴うビーム損失を低減するため、ビームサイズが大きくなる一部の四重極電磁石では、内部の真空ダクトを断面形状が円形のものから正方形のものへと変更し、実効アパーチャを拡大した。

2台の偏向電磁石の $5 \sim 7 \text{cm}$ ほどの狭いギャップを通し、かつ多重極電磁石による水平・鉛直結合を抑える Figure 2 のような光学系を実現するため、3連四重極電磁石に続く20台の四重極電磁石は、通常は設計値で固定し、調整パラメータ数を減らすこととした。2台目の偏向電磁石直後の診断ステーション (TSLB1) では、設計ビームエンベロップがウエストになっており、TS1 で計測されたプロファイルと相似の形状が再現されること、さらに水平方向を均一化する1台目の8極電磁石の直後では、水平方向ビームサイズが鉛直方向のそれよりも十分大きいことを、ワイヤ型のプロファイルモニタによってそれぞれ確認する。

ターゲット上でのビーム形状や照射野面積及びその均一度の調整は、主としてターゲットの数メートル手前にある最終の2連四重極電磁石とその前後の2台の8極電磁石を用いて行う (Figure 2 参照)。その際、8極電磁石内でのビーム軌道のずれがビーム形状に大きく影響し、強度分布の均一性を低下させる。ビーム軌道のアライメントが最も重要である

ことがこれまでの開発を通じて分かっている。これらの調整は、ターゲット上に設置した大面積の蛍光スクリーンモニタ（三菱化学製 DRZ-High）からの発光を複数のカメラで観測しながらリアルタイムに行う^[9]。必要に応じて、ビームラインに設置されたスリットを閉じることで、最終的な均一ビーム形状を調整する。以上の一連のビーム調整は1時間程度で完了する。

4. 均一ビーム

上述の調整手順によって形成した大面積均一ビームは、放射線への曝露によって着色するラジオクロミックフィルム（Ashland Inc. 製 HD-810）^[10]に照射し、その特性（形状、面積、均一度）を評価した。照射したフィルムは、汎用のフラットベッドスキャナ（EPSON 製 ES-10000G 等）を用いて読み取った。16ビットのRGB値から、数100cm²の広い面積にわたる2次元の吸光度分布が1mm以下の高い空間分解能で簡便に得られる。照射による吸光度の増加は、吸光度が小さい低フルエンス領域では、フルエンスに対して十分に線形であることから、吸光度からビームの相対強度分布が直接求められ、面積や均一度の評価が可能である^[5]。

形成した大面積均一ビームの2次元相対強度分布の計測例を Figure 3 に示す。ガウス様ビームを8極磁場で集束すると、その裾野がオーバーシュートされ均一領域の周囲に高強度部分が形成されるが、それは上流の診断ステーションに設置されたスリットを用いて除去してある。形成された均一照射野は17cm×13cmであり、その均一度（rms値）は7%であった。

また、最終の2連四重極電磁石を調整することに

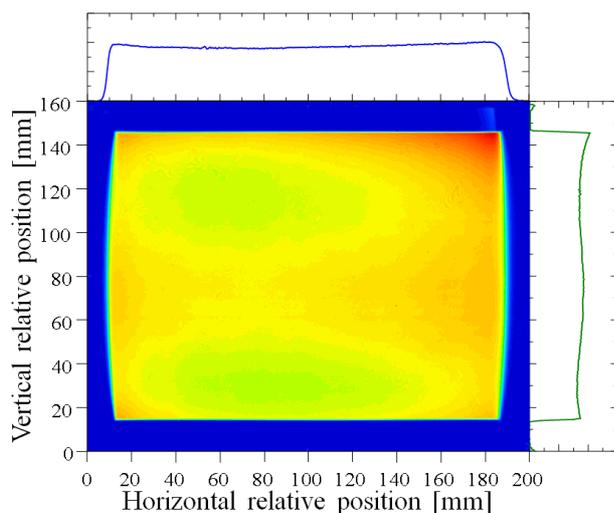


Figure 3: Relative transverse intensity distribution obtained from the optical density distribution of a Gafchromic film, HD-810. The film was irradiated with a 4.1-MeV/u Xe beam of 5 nA for 10 s. The horizontal and vertical cross-sectional distributions are shown in the upper and right sides, respectively.

よってターゲット上でのビーム形状を大きく変換することができる（Figure 2 参照）。Figure 4 に示すようにアスペクト比が15以上ある、水平方向に扁平なリボン状均一ビームを形成することができた^[11]。このようなビームを用いて、シート状試料を鉛直方向に roll-to-roll 搬送させることで、長尺の試料の連続的な均一照射が可能である。

5. 利用展開

開発した大面積均一ビームは、すでに宇宙や材料科学分野の量子ビーム応用研究に提供している。

陽子ビームは、宇宙航空研究開発機構が行う宇宙用太陽電池の耐放射線性評価試験に利用されている。従来のビーム走査方式による均一照射では、フルエンス率が高くなるとともに試料の劣化度合いが大きくなる場合があり、実宇宙環境により近い一定フルエンス率の放射線場を模擬できる本技術は新たな評価試験手段となっている^[12]。

高機能材料開発に関する研究では、重イオンビームの短時間照射や大気中での均一照射を利用して、高性能の燃料電池膜材料として有望なフッ素系高分子フィルムの穿孔化等に関する研究が開始されたところである^[13]。

6. まとめ

原子力機構高崎量子応用研究所の TIARA では、AVF サイクロトロンイオンビームを、多重極電磁石の非線形集束に基づいて大面積均一化する技術を確認した。薄膜を用いた多重クーロン散乱によるガウス様分布化の条件や効率的な調整手順の確立により、これまでに、陽子、ヘリウム、アルゴン、キセノン等の運動エネルギーが3~13MeV/uのイオンで100cm²ないし200cm²を超える大面積均一ビームを10%程度以下の均一度で形成することが可能となった。本ビームは、照射野全体を瞬時かつ同時に照射できるという、従来のビーム走査方式では困難であった特長を持つ。この特長を最大限に活用して、量子ビーム応用研究の新たなツールとして利用を展開している。

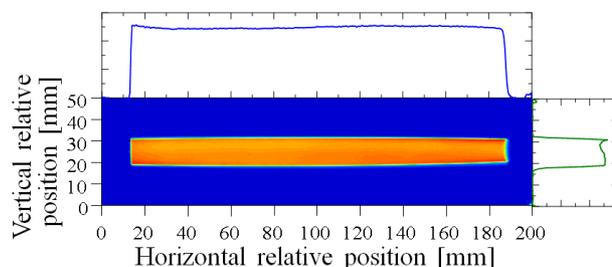


Figure 4: Relative transverse intensity distribution obtained from the optical density distribution of Gafchromic film, HD-810. The film was irradiated with a 4.1-MeV/u Xe beam of 1.7 nA for 5 s. The horizontal and vertical cross-sectional distributions are shown in the upper and right sides, respectively.

参考文献

- [1] T. Ishizaka, in these proceedings, FSP017.
- [2] Y. Yuri, N. Miyawaki, T. Kamiya, W. Yokota, K. Arakawa, and M. Fukuda, Phys. Rev. ST Accel. Beams **10** (2007) 104001.
- [3] Y. Yuri, T. Ishizaka, T. Yuyama, I. Ishibori, S. Okumura and K. Yoshida, Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A **642** (2011) 10.
- [4] Y. Yuri, T. Yuyama, T. Ishizaka, I. Ishibori, and S. Okumura, J. Phys. Soc. Jpn. **81** (2012) 064501.
- [5] Y. Yuri, T. Ishizaka, T. Yuyama, I. Ishibori, and S. Okumura, Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A **727** (2013) 40.
- [6] P.F. Meads, Jr., IEEE Trans. Nucl. Sci. 30 (1983) 2838.
- [7] Y. Yuri, J. Phys. Soc. Jpn. **79** (2010) 125002.
- [8] Y. Yuri, T. Ishizaka, T. Yuyama, K. Yoshida I. Ishibori, and S. Okumura, proc. 10th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, 2013, p. 138.
- [9] T. Yuyama, Y. Yuri, T. Ishizaka, I. Ishibori, and S. Okumura, Proc. 1st International Beam Instrumentation Conference, IBIC2012, Tsukuba, Japan, 2012, p. 246.
- [10] <http://gafchromic.com/>
- [11] Y. Yuri, T. Yuyama, T. Ishizaka, I. Ishibori, and S. Okumura, Plasma Fusion Res. **9** (2014) 4406106.
- [12] M. Imaizumi, Y. Yuri, P. R. Bolton, S. Sato, and T. Ohshima, Proc. 38th IEEE Photovoltaic Specialists Conference (2012) 2831.
- [13] A. Kitamura, T. Yamaki, Y. Yuri, H. Koshikawa, S. Sawada, T. Yuyama and T. Ishizaka, to be published in JAEA Takasaki Annual Report 2013.