

原子力機構 AVF サイクロトロンにおける大面積イオンビームの リアルタイム横方向強度分布計測のための蛍光体の探索 INVESTIGATION OF PHOSPHOR MATERIALS FOR THE REAL-TIME MEASUREMENT OF THE TRANSVERSE INTENSITY DISTRIBUTION OF LARGE- AREA ION BEAMS AT THE JAEA AVF CYCLOTRON FACILITY

百合庸介, 湯山貴裕, 石坂知久, 江夏昌志, 山田尚人

Yosuke Yuri, Takahiro Yuyama, Tomohisa Ishizaka, Masashi Koka, and Naoto Yamada

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 developed at the AVF cyclotron of the ion accelerator complex TIARA in Japan Atomic Energy Agency. In order to adjust the on-target uniform beam profile at high beam current densities in real-time, several phosphor materials were investigated using proton and heavy-ion beams extracted from the cyclotron. As a result, we have found that real-time beam tuning can be performed in a wide current-density range over three orders of magnitude properly using DRZ-High, $\text{CaF}_2:\text{Eu}$, and polyethylene naphthalate (PEN) films for 10-MeV protons and that PEN films are useful at relatively high intensity for light ion beams, such as proton, helium, and carbon ion beams.

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、AVF サイクロトロン (K 値 110MeV)、3MV タンデム加速器、3MV シングルエンド加速器及び 400kV イオン注入装置の計 4 台の加速器からなる、先端機能材料創製、バイオ・医療応用等の量子ビーム応用研究やそれら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^[1]。

AVF サイクロトロンでは、新たな拡大均一照射の手法として、多重極電磁石を用いて大面積で均一な横方向強度分布を有するイオンビームを形成する技術開発を進めている^[2-4]。これは、多重極電磁石がビームに及ぼす非線形力によってその強度分布が変換されることに基づいている^[5]。すなわち、ビーム輸送系において、4 極電磁石に加え、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を内側に折り畳み、最終的に実空間強度分布を大面積均一化することが可能である。これまでに、陽子、ヘリウム、アルゴン、キセノン等のイオンビーム (4~27MeV/u) で 100cm^2 を超える大面積の均一照射野を 10%程度以内の均一度で形成することを実現した^[6]。この大面積均一ビームによって、照射野全体を瞬時かつ同時に照射できることから、従来のビーム走査方式による均一照射では困難または非効率であった、試料の局所的な加熱の抑制、超低フルエンス照射、短時間照射という特長的な照射が容易に行える。既に、量子ビーム応用研究の新たなツールとしてビーム提供を開始している。

大面積均一ビームの横方向の 2 次元強度分布の調整は、ターゲット位置に設置した蛍光板 DRZ-High ($\text{Gd}_2\text{O}_2\text{S:Tb}$ 、三菱化学) からの発光をカメラでモニタしながらリアルタイムに行う^[7]。この蛍光板は、イオンビーム用の発光体として広く利用されているアルミナ板に比べて、感度が高い、残光が短い、照

射による劣化が小さい、必要な大きさにハサミで容易にカットできる、安価であるといった特長があり、大変使い勝手が良い。低いビーム強度で発光するため、ビーム調整中の周辺機器の放射化や照射室内の放射線レベルの不要な上昇を抑えることにも有用である。その一方で、高感度であるために、蛍光板の利用可能な電流密度領域に合うよう、サイクロトロンへの入射ラインに設置したアテネータ (多孔金属シート)^[8]を挿入してビーム強度を大幅に下げる必要がある。このため、調整完了後にアテネータを抜くと、形成した均一ビームの強度分布が変化し、照射利用時の分布が調整時とは異なる場合があった。これは、イオン源で生成された低エネルギー (~1keV/u) ビームの空間電荷効果やアテネータでの散乱による位相空間分布の変化に起因すると考えられる。アテネータの改造^[8]により、開口率の異なるシートの差し替えや複数のシートの挿入による分布変化は大幅に抑制されているものの、アテネータ使用の有無によってビーム強度分布が変化することがあることが分かった。通常直径 1cm 程度のスポットビームを形成する場合とは異なり、ターゲットでビームを拡大・均一化する本手法では、最終的なビーム形状が輸送途中のわずかなビーム特性の変化の影響を受けやすいと考えられる。

そこで本研究では、アテネータを用いない高強度及び様々なビーム強度においてリアルタイムでの 2 次元強度分布の調整を可能にするため、数 10~数 100cm^2 の大面積での利用が可能な蛍光体を探索し、様々なイオンビームに対する適用可能性を調べた。

2. 照射実験の手順

蛍光体へのイオン照射は、AVF サイクロトロン施設内の大面積均一照射ラインにおいて実施した。そのターゲット近傍の写真を Figure 1 に示す。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、

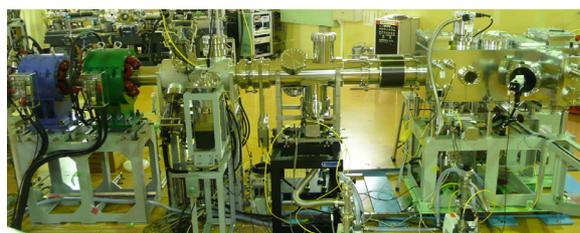


Figure 1: Photograph of the beam line and vacuum chamber for the large-area uniform beam at the JAEA AVF cyclotron facility. CCD cameras have been set at viewing ports of the vacuum chamber for monitoring the light emitted from phosphor samples.

Table 1: Main Specifications of Phosphor Samples Examined in the Present Study

Material	Density [g/cm ³]	Thickness	Range of 10-MeV proton
DRZ-High (Gd ₂ O ₂ S:Tb)	4.7	0.31 mm	0.3 mm
AF995R (Al ₂ O ₃ :Cr)	4.0	1 mm	0.4 mm
CaF ₂ :Eu	3.2	0.5 mm	0.5 mm
PEN	1.4	14-250 μm	0.95 mm

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が設置されている。最大 20cm 角の大面积の薄い試料を 22 枚搭載することができる。

蛍光体試料は、DRZ-High に加えて、AF995R (Al₂O₃:Cr, Desmarquest)、フッ化カルシウム結晶 (CaF₂:Eu)、厚さの異なるポリエチレンナフタレート (PEN) フィルムを用いた。Table 1 に用いた試料のパラメータをまとめた。10MeV 陽子等のイオンで、4 極電磁石及び 8 極電磁石を組み合わせ、60cm² 程度の大面积均一ビームを形成し、照射による試料からの発光を、真空チェンバーのビューポートに取り付けた CCD カメラ (Basler, scA1390-17gc) を用いて観測し、8bit の輝度として記録した。電流密度 (フルエンス率) は、アテネータと静電チョッパーを組み合わせ、広い範囲で変更し (ビーム強度分布が変化した場合、ステアリング電磁石等を用いて微調整した)、ビーム電流はターゲットの手前にあるファラデーカップで測定した。

3. 蛍光体のイオンビーム照射応答

Table 1 に挙げた蛍光体の 10MeV 陽子ビームに対する照射応答を Figure 2 に示す。横軸はビームの電流密度及びフルエンス率で、縦軸はビームの均一領域における輝度の平均値である。DRZ-High が最も感度が高く、1pA/cm² オーダーの低強度ビームで発光した。電流密度に対する発光強度の線形性も高い。続いて、AF995R とフッ化カルシウム結晶が同程度の感度であったが、線形応答する範囲が比較的狭い。AF995R は、ビーム照射を停止して発光が減衰する残光時間が数秒と長い、リアルタイムでのビーム調整には不向きであった。その他の蛍光体については、減衰時間は長くても DRZ-High の数ミリ秒であり、利用上の問題はない。

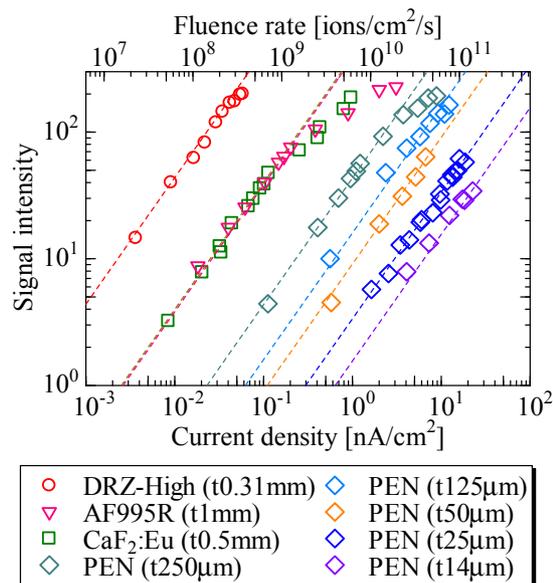


Figure 2: Signal intensity of DRZ-High, AF995R, CaF₂:Eu, and PEN films irradiated with 10-MeV proton beams. Dashed lines are the linear fitting results for each sample.

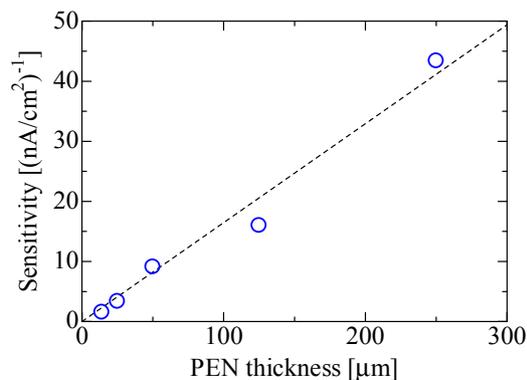


Figure 3: Thickness dependence of the sensitivity of PEN films to the 10-MeV proton beam. A thick line is the linear fitting result.

PEN フィルムについては、厚さの異なる 5 種類を調べた。Figure 2 に示されているように、発光の感度 (単位電流密度あたりの輝度) はフィルムの厚さに依存し、DRZ-High に比べて 2~3 桁の高い電流密度において利用可能であることが分かった。Figure 3 に PEN フィルムの感度の厚さ依存性をプロットした。感度が厚さによく比例している。数分間の照射であったが、実験終了後に試料を目視で確認したところ、厚さ 125μm 及び 250μm のフィルムは薄い黄色へ変色していた。しかし、変形や溶融の跡は見られず、有意な加熱の影響はなかったと考えられる。ただし、さらなる長時間の使用によって発光強度が弱まるおそれがある。一方で、さらに薄い膜を用いれば、より高強度のビームにも適用できるかもしれない。

さらに、PEN フィルムの他のイオン種に対する適用可能性を調べた。100nA/cm² 程度の高強度の

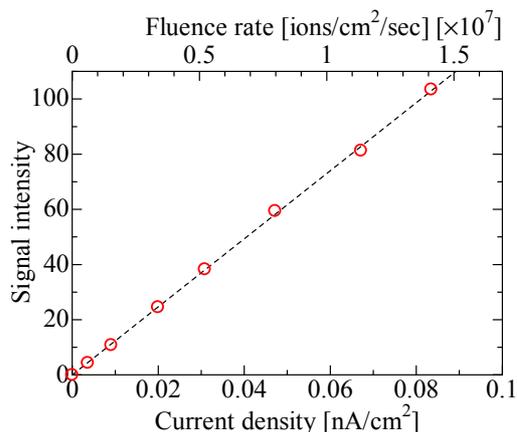


Figure 4: Signal intensity of DRZ-High irradiated with 4.1-MeV/u Xe beams. A dashed line is the linear fitting result.

27MeV/u のヘリウムビームに対しては、厚さ 25 μ m のフィルムが有効であった。数 10 分間照射したがわずかに変色しただけであった。27MeV/u の炭素ビームでは、0.1nA/cm² オーダーの電流密度において、厚さ 250 μ m の PEN フィルムが有効であった。他方、質量数のより大きい Ar ビームに対しては、照射によって数 10 秒程度の短時間で発光が弱まり、リアルタイム調整のための発光体としては使用できないことが分かった。試料でのビームエネルギー損失 (阻止能) が大きいと、高分子の結合状態が変化し、フィルムは茶色へ変色したものと考えられる。

次に、DRZ-High の 4.1MeV/u のキセノンイオンビーム照射応答の測定結果を Figure 4 に示す。フルエンス率に対する感度は、Figure 2 の 10MeV 陽子ビームの場合に比べて 11 倍高かった。イオン照射後の試料は少し黒っぽく変色するものの、PEN フィルムのような短時間での発光感度の劣化はなく、リアルタイムでのビーム調整に十分使用できることが分かった。

4. ビーム強度分布計測例

蛍光体を用いて形成した大面積均一ビームの 2 次元強度分布の計測例を Figure 5 に示す。Figure 5(a) は、10MeV 陽子ビーム照射による PEN フィルム (厚さ 50 μ m) からの発光の輝度の 2 次元分布を示したものである。比較のために、放射線への暴露によって着色するガフクロミックフィルムを用いて計測した同一ビームの強度分布を Figure 5(b) に並べて示す。フィルムの着色を吸光度の変化として定量化したものである^[9]。異なる手法で計測した相対強度分布が互いによく一致することを確認した。

5. まとめ

原子力機構 TIARA サイクロトロンでは、数~数 10 MeV/u 級イオンビームの大面積均一化における横方向強度分布のリアルタイム調整のため、いくつかの蛍光体について利用可能なビーム電流密度範囲を調べた。10MeV 陽子ビームを用いた照射実験により、

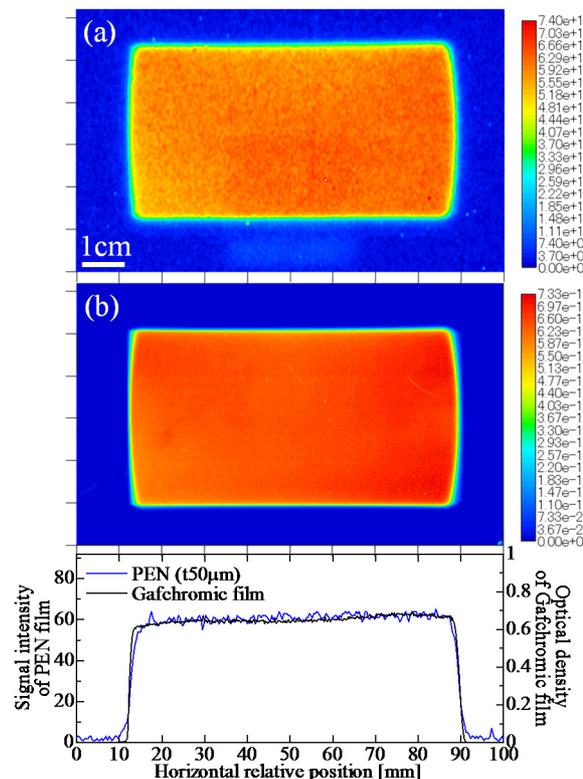


Figure 5: Two-dimensional intensity distributions of the 10-MeV proton beam. (a) The brightness distribution from a PEN film (t50 μ m). The current density of the beam was 7 nA/cm². (b) The optical density distribution obtained from a Gafchromic film HD-810 irradiated with the proton beam. The one-dimensional profile along the horizontal axis is shown in the bottom.

DRZ-High に比べて、フッ化カルシウム結晶や PEN フィルムがより電流密度の高いビームで使用可能であることが分かった。これによって、宇宙用太陽電池の耐放射線性試験^[10]等において要求される、10nA/cm² オーダーの高強度の大面積均一ビームの効率的な調整が可能となった。また、これら 3 種類の蛍光体を使い分けることによって、10⁻³~10¹nA/cm² の広範な電流密度においてリアルタイムでのビーム調整を実現した。PEN フィルムはヘリウムや炭素ビームのリアルタイム調整にも有用であり、DRZ-High はさらに阻止能の高いキセノンビームでも利用可能であった。このようにして、様々なイオン種で、より効率的で精密な均一ビームの調整と利用が可能となった。

参考文献

- [1] T. Yuyama, in these proceedings, FSP010.
- [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, Plasma Fusion Res. **9** (2014) 4406106.
- [5] P.F. Meads, Jr., IEEE Trans. Nucl. Sci. **30** (1983) 2838.
- [6] Y. Yuri, T. Yuyama, T. Ishizaka, I. Ishibori, and S. Okumura, Proc. 11th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Aomori, Japan, 2014, p. 862.
- [7] T. Yuyama, Y. Yuri, T. Ishizaka, I. Ishibori, and S. Okumura, Proc. 1st International Beam Instrumentation Conference, IBIC2012, Tsukuba, Japan, 2012, p. 246.
- [8] T. Ishizaka, T. Agematsu, Y. Yuri, T. Yuyama, I. Ishibori, and S. Okumura, Proc. 7th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Himeji, Japan, 2010, p. 642.
- [9] Y. Yuri, T. Ishizaka, T. Yuyama, I. Ishibori, and S. Okumura, Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A **727** (2013) 40.
- [10] M. Imaizumi, Y. Yuri, P. R. Bolton, S. Sato, and T. Ohshima, Proc. 38th IEEE Photovoltaic Specialists Conference (2012) 2831.