

ガフクロミックフィルムの低エネルギーイオンビーム強度分布計測への適用 APPLICATION OF A GAFCHROMIC FILM TO THE INTENSITY DISTRIBUTION MEASUREMENT OF LOW-ENERGY ION BEAMS

百合庸介, 鳴海一雅, 湯山貴裕

Yosuke Yuri, Kazumasa Narumi, Takahiro Yuyama

Department of Advanced Radiation Technology, Takasaki Advanced Radiation Research Institute,
National Institutes for Quantum and Radiological Science and Technology

Abstract

The feasibility of the transverse intensity distribution measurement of low-energy (keV/u-range) ion beams using radiochromic films is explored experimentally. For this purpose, we employ a Gafchromic radiochromic film, HD-V2, which has no surface-protecting layers for the active layer. The coloration response of the films irradiated with ion beams at a wide kinetic energy (1.5 keV/u ~ 27 MeV/u) is characterized in terms of the optical density by reading the films with a general-purpose image scanner. The dependences of the optical-density response on beam energy and ion species are discussed. It has been found that the optical density of HD-V2 is sufficiently increased by irradiation with ion beams on the order of 10 keV/u, whose range is much shorter than the thickness of the film's active layer. We have demonstrated that the Gafchromic film is useful for the measurement of the intensity distribution of such low-energy ion beams.

1. はじめに

荷電粒子ビームの横方向強度分布やフルエンス分布は、ビーム特性や試料の照射効果の評価に係る重要な情報である。これらを計測する手法としては、ビーム照射により誘起される発光をカメラで読み取る方式や金属ワイヤで電流を読み取る方式等がよく知られているが、利用可能なイオン種や電流密度、ビームサイズ、空間分解能等が制限される場合がある。そこで我々は、そのようなビーム強度分布を高い空間分解能で簡便に計測する手法として、放射線への暴露により着色するラジオクロミックフィルム的一种である、ガフクロミックフィルム(Ashland Inc.)[1]に着目している。このフィルムは、元来 X 線や γ 線による放射線治療の線量分布計測のために開発されたものであるが、数 100MeV/u の高エネルギー粒子線治療において利用されるとともに[2-4]、数~数 10MeV/u のイオンビームの分布計測、評価、解析等[5-8]にも用いられており、加速器技術として利用が拡大しつつある。

線量や用途に応じて、現在は EBT3、MD-V3、HD-V2 等いくつかのモデルが入手可能である。線量範囲が比較的低い EBT3 や MD-V3 は、感受層の両面が 120 μ m の厚い保護層で覆われているため、イオンビームで利用する場合、それを透過できる数 MeV/u 以上の運動エネルギーが必要である[9]。これに対して、HD-V2 は、表面保護膜がなく感受層が剥き出しであるため、エネルギーの低いビームの照射であってもフィルムに着色が生じると期待される。そこで、本研究では、HD-V2 を、より低い keV/u 級のイオンビームへ適用する可能性を探った。2次元強度分布計測に利用可能なビームエネルギーの下限を明らかにするため、量子科学技術研究開発機構(量研機構)高崎量子応用研究所(高崎研)のイオン照射研究施設 TIARA において、HD-V2 フィルムの着色応答特性の入射ビームエネルギー依存性等を系統的に調べた[10]。

2. ガフクロミックフィルム HD-V2

ガフクロミックフィルム HD-V2 は、厚さ約 100 μ m のポリエステル基材上に、ラジオクロミックモノマーを含む厚さ 12 μ m の感受層が成膜されたものである。仕様上の線量範囲は、X 線や γ 線に対して 10~1000Gy とされる。

照射により生じる着色の度合いを吸光度の変化として高い空間分解能で定量的に評価するため、汎用のイメージスキャナ ES-10000G (ESPON)を用いて透過モードでフィルムを読み取った。数 mm のビームサイズを十分に分解できるよう、読み取り解像度は 508dpi (50 μ m)とした。得られた 48bit の RGB 値のうち、着色感度が最も高い R 色成分の強度 I について、吸光度 OD を以下の式により算出した:

$$OD = -\log_{10} (I/65535) \quad (1)$$

照射直後の急激な吸光度変化を避けるため、フィルムの読み取りは照射後 1日以上経過してから行った。

3. イオンビーム照射

HD-V2フィルムへのイオンビーム照射は、量研機構高崎研の TIARA のサイクロトロン(K 値 110MeV)[11]、タンデム加速器 (3MV) およびイオン注入装置 (400kV) [12]で実施した。入射ビームの運動エネルギー依存性を系統的に調べるため、27、1.0MeV/u、100、30、13、10、3.0、1.5keV/u の異なる8点のエネルギーの ^{12}C イオンビームを照射した。さらに、keV/u 級エネルギーでのイオン種依存性を調べるため、30keV/u で ^1H および ^{197}Au の照射も行った。サイクロトロン の 27MeV/u 炭素ビームは、多重極電磁石を用いた非線形ビーム集束[13]により 50cm² 程度に拡大均一化した。他方、その他の静電加速器からのビームは、0.5~1cm² 程度の領域にラスタースキャンを行った。

keV/u 級のビームを照射すると、フィルムは容易に帯電し、それに伴う放電の際にフィルムが不意に着色した。

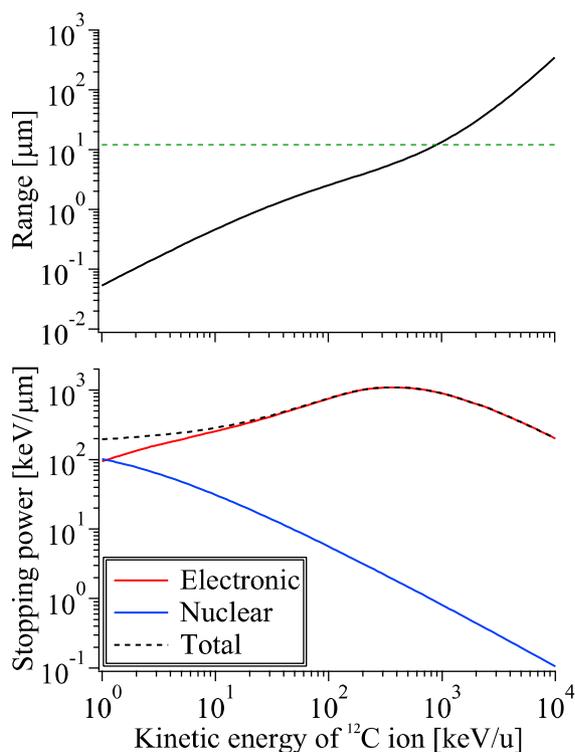


Figure 1: SRIM simulation results of the range and stopping power of the ^{12}C ion beam in the HD-V2 active layer. The green dashed line in the upper graph indicates the nominal thickness of the active layer (12 μm).

そこで、フィルム上に金属ワイヤ(直径 30 μm のタンゲステン)を数本張り、電荷を逃がすことで、これを防ぐこととした。

上記のエネルギーのビームについて、HD-V2 の感受層における飛程および阻止能を SRIM コード[14]により見積もった。炭素ビームについての結果を Figure 1 に示す。900keV/u 未満の入射エネルギーで、ビームは感受層内で停止する。また、阻止能は 400keV/u 付近で最大値 1.1MeV/ μm のブラッグピークを持つ。

4. イオンビーム照射応答

4.1 入射ビームエネルギー依存性

HD-V2 フィルムの炭素イオン照射による着色応答の入射エネルギー依存性を Figure 2 にまとめる。縦軸の吸光度は、照射フィルムの吸光度と未照射フィルムの吸光度の差を示す。Figure 2 より、吸光度変化の①線形応答領域、②感度、③最大値がエネルギーに強く依存していることが明らかに分かる。

①吸光度変化の線形応答領域: 27、1.0MeV/u では、OD \sim 0.3 程度までの比較的広い範囲で吸光度がフルエンスによく比例して増加している。他方、低エネルギーほど、この比例範囲は狭まり、10keV/u では、OD \sim 0.04 程度までである。それ以下のエネルギーでは、吸光度変化はかなり小さく、応答は非線形である。

②吸光度変化の感度: ここで感度とは、単位フルエンスあたりの吸光度増加量を指す。Figure 3 に感度の入射エネルギー依存性を示す。飛程中にブラッグピークを有

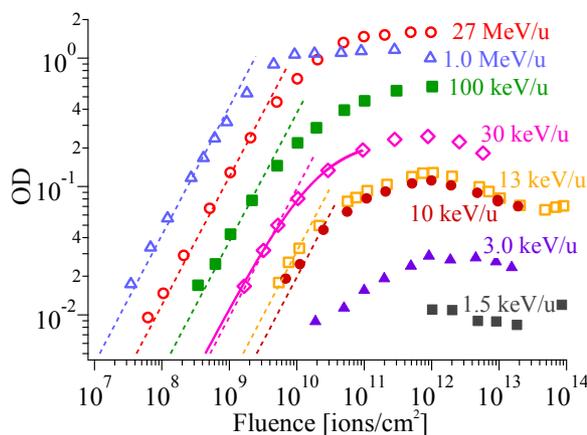


Figure 2: Coloration response of HD-V2 to C-ion irradiation at eight different kinetic energies. The net ODs are plotted as a function of the fluence of the beam. The dashed lines are the linear fitting results in a low fluence region for each energy. The solid curve is a response curve Eq. (2) fitted using the first six data points for 30 keV/u (see Sec. 5).

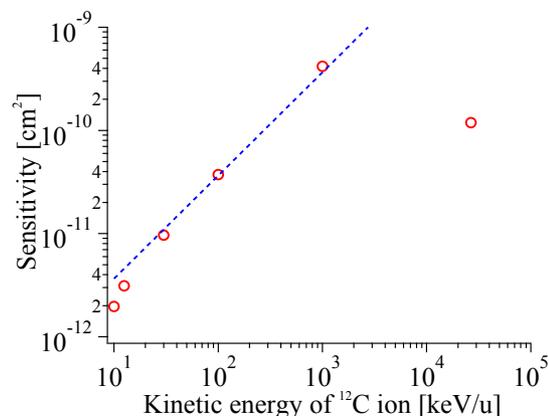


Figure 3: Sensitivity of HD-V2 to C-ion irradiation. The gradient of the linear fitting function in Fig. 2 is plotted as a function of the incident C beam energy. The dashed line is the linear fitting result except for the 27-MeV/u data.

する 1.0MeV/u の場合に感度が最大となった。より低いエネルギーでは、飛程が短くなるために感度が低下し、図に示されるように、入射エネルギーにほぼ比例する。27MeV/u のビームは感受層を十分に透過するものの、阻止能が 1.0MeV/u の場合に比べて小さくなるために、感度が低下したと考えられる。

③吸光度変化の最大値: 入射エネルギーが低くなるほど、最大値は低下した。感受層内でビームが停止する場合、飛程よりも深い部分は着色しないためである。Figure 4 に吸光度の最大値を、SRIM から求めた飛程 (Figure 1) の関数としてプロットした。(後述する 30keV/u 金イオンを除いて、) 吸光度の最大値は飛程によく比例する。

1keV/u オーダーでは、照射による吸光度変化は非常に小さかった。また、金属ワイヤを張ったものの、頻発す

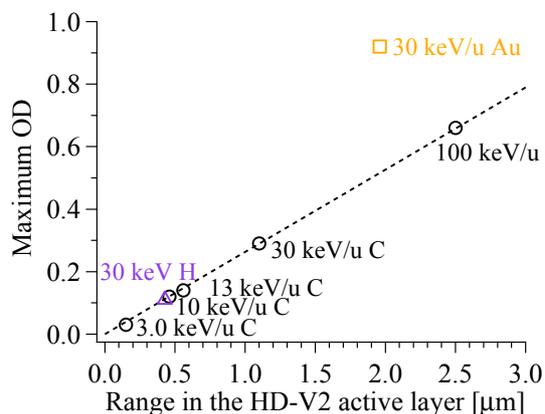


Figure 4: Maximum OD plotted as a function of the ion range estimated using the SRIM code. A triangle, circles, and a square show the data on H, C, and Au ion beams, respectively. The dashed line is a linear function obtained by fitting the C-ion data.

る放電によりフィルムは着色した。このようなことから、10keV/u 未満で HD-V2 を利用するのは困難である。実用上、10keV/u オーダーがビームエネルギーの下限であると言える。

4.2 イオン種依存性

30keV/u の陽子、炭素、金イオンビームの照射による HD-V2 の吸光度変化を Figure 5 に示す。線形応答範囲、感度および最大吸光度が明らかにイオン種に依存している。すなわち、重イオンほど、線形応答範囲が広く、感度が高く、最大吸光度が大きい。これらは、同速度の3種類のイオンの中で、金が最も阻止能が大きく、飛程も長いことに起因する。

最大吸光度について、Figure 4 に、炭素の結果と併せて、陽子および金イオンビームの結果をプロットした。陽子ビームは炭素の結果(破線)によく一致したが、金イオンビームについては、SRIM で見積もられた飛程(2.0μm)に対して、実測された吸光度の最大値は大きくなった。SRIM の計算によれば、陽子や炭素イオン照射の場合に比べて、金イオンの核的阻止能が大きいため、金イオン照射により感受層内の水素や炭素等の原子が反跳を受け、感受層のより深部(3.4μm)へ到達する。これにより、フィルムに付加的な着色が生じ、吸光度が大きくなったものと考えられる。

5. ビーム強度分布計測例

吸光度増加がフルエンスに比例する領域では、吸光度から相対強度分布が容易に求められるが、Figure 2 や 5 に示されるように、その範囲は狭く、エネルギーやイオン種に依存する。そこで、非線形応答領域も含めてより広いフルエンス範囲で強度分布を求められるよう、以下の関数を用いて吸光度をフルエンス F [cm^{-2}] の関数としてフィッティングした:

$$\text{OD}(F) = -\log_{10} \left(\frac{a + bF}{a + F} \right) \quad (2)$$

ただし、 a および b はフィッティング係数である。例えば、

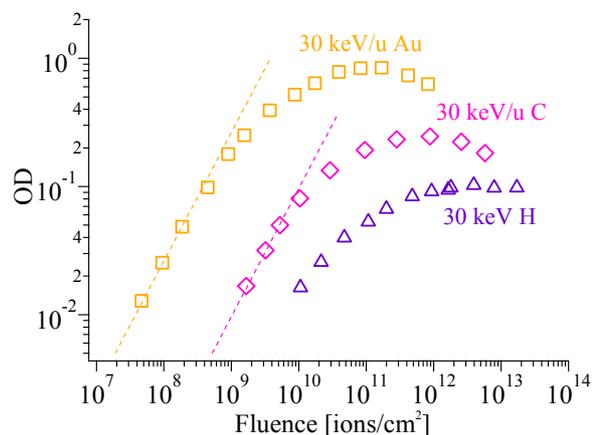


Figure 5: Coloration response of HD-V2 to 30-keV/u H, C, and Au ion irradiation. The net ODs are plotted as a function of the fluence of the beam. The dashed lines are the linear fitting results in a low fluence region.

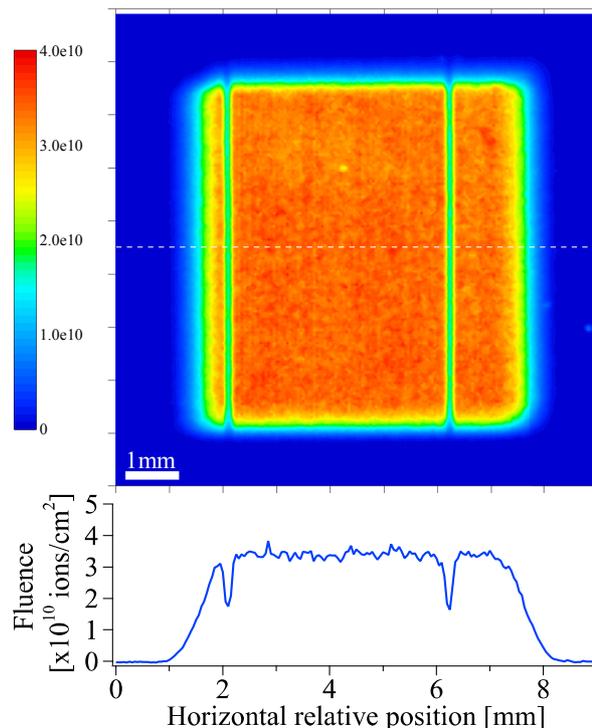


Figure 6: 2D fluence distribution determined from the response curve Eq. (2). The lower panel depicts the 1D distribution along the horizontal dashed line in the upper panel. Two linear streaks along the vertical direction are induced by the tungsten wires for preventing charging. An HD-V2 film was raster-scanned with the 30-keV/u C beam of 0.7 nA for 3 s.

Figure 2 の 30keV/u 炭素イオンビームの場合、吸光度が最大値に達する手前の $F < 1 \times 10^{11} \text{ ions/cm}^2$ の6点のデータから、 $a = 1.55 \times 10^{10} \text{ cm}^2$ 、 $b = 0.586$ となる。その曲線を Figure 2 に実線で示した。この応答関数を用いて照射野分布を解析した例を Figure 6 に示す。HD-V2 フィルムを 30keV/u の炭素ビームでラスタースキャン照射し、得られた吸光度分布を式(2)により2次元フルエンス分布に変換

した。ラスタースキャンにより、約 5mm 角の領域において均一な照射が行われたことが分かる。

照射野形状を確認する手法として、従来から、ポリエチレンテレフタレート (PET) やポリアミド等の高分子フィルムを照射により着色させる方法がある。ガフクロミックフィルムとの比較のために、30keV/u 炭素ビームを PET フィルムに照射した。PET フィルムは、Figure 6 の場合に比べて3桁も高い 10^{13} ions/cm² オーダーのフルエンスで、薄く茶色に変色した程度であった。このことは、ガフクロミックフィルムが照射野の計測や評価に極めて有用であることを示している。

6. まとめ

ガフクロミックフィルム HD-V2 の着色応答特性のビームエネルギー依存性を系統的に明らかにした。HD-V2 は、感受層の保護層がないため、従来よりも低い keV/u 級エネルギーのビームで着色する。吸光度変化の振る舞いは、エネルギーに強く依存し、入射エネルギーの低下とともに、吸光度変化の線形応答領域は狭まり、感度および最大値は低下することが分かった。HD-V2 フィルムは、10keV/u オーダーまでのビームで、高い空間分解能での強度分布計測に利用可能である。

参考文献

- [1] A. Niroomand-Rad *et al.*, *Med. Phys.*, 25 (1998) 2093.
- [2] M. Martišíková and O. Jäkel, *Phys. Med. Biol.* 55 (2010) 3741.
- [3] S. Reinhardt *et al.*, *Med. Phys.* 39 (2012) 5257.
- [4] J. Sorriaux *et al.*, *Physica Medica* 29 (2013) 599.
- [5] A. E. Buenfil *et al.*, *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. Sect. B* 197 (2002) 317.
- [6] D. S. Hey *et al.*, *Rev. Sci. Instrum.* 79 (2008) 053501.
- [7] F. Nürnberg *et al.*, *Rev. Sci. Instrum.* 80 (2009) 033301.
- [8] Y. Yuri, T. Ishizaka, T. Yuyama, I. Ishibori, and S. Okumura, *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. Sect. A* 727 (2013) 40.
- [9] Y. Yuri *et al.*, in *Proceedings of the 7th International Particle Accelerator Conference*, Busan, Korea, 2016, p. 130.
- [10] Y. Yuri, K. Narumi, and T. Yuyama, *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. Sect. A* 828 (2016) 15.
- [11] K. Arakawa *et al.*, in *Proceedings of the 13th International Conference on Cyclotrons and their Applications*, Vancouver, Canada, 1992, p. 119.
- [12] Y. Saitoh *et al.*, *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. Sect. B* 89 (1994) 23.
- [13] Y. Yuri *et al.*, *Phys. Rev. ST Accel. Beams* 10 (2007) 104001.
- [14] J. F. Ziegler, *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. Sect. B* 219-220 (2004) 1027.