

2次元ビームスキャンニングのためのリアルタイム線量分布蛍光モニターの開発

DEVELOPMENT OF A REAL-TIME DOSE-DISTRIBUTION FLUORESCENCE MONITOR FOR TWO-DIMENSIONAL BEAM SCANNING

山野下莉那^{A)}, 福田光宏^{A)}, 小泉雅彦^{B)}, 高階正彰^{B)}, 依田哲彦^{A)}, 神田浩樹^{A)}, 中尾政夫^{A)},
原周平^{A)}, 岸上裕加子^{B)}, 佐川友啓^{B)}, Huiwen Koay^{A)}, 安田裕介^{A)}, 鎌倉恵太^{A)}
Rina Yamanoshita^{A)}, Mitsuhiro Fukuda^{A)}, Masahiko Koizumi^{B)}, Masaaki Takashina^{B)},
Tetsuhiko Yorita^{A)}, Hiroki Kanda^{A)}, Masao Nakao^{A)}, Shuhei Hara^{A)}, Yukako Kishigami^{B)},
Tomohiro Sagawa^{B)}, Huiwen Koay^{A)}, Yuusuke Yasuda^{A)}, Keita Kamakura^{A)}

^{A)} RCNP, Osaka University

^{B)} Department of Medical Physics & Engineering, Graduate School of Medicine and Health Science, Osaka University

Abstract

We have been developing a new beam scanning system for particle therapy which was named “Spiral Beam Scanning”. In this system, we need to know how precisely a lateral two-dimensional particle density distribution is formed in every layer according to the treatment protocol. In general, an ionization chamber or a secondary electron emission monitor is used to measure uniformity of a particle density distribution required for particle therapy. In our study, we evaluated lateral flatness and penumbra by offline analysis of a particle density distribution using a GAFCHROMIC film. With this method, however, we have to wait about 24 hours after irradiation to stabilize the darkness of the film, which is unsuitable for immediate evaluation of uniformity of the particle density distribution. In order to improve the rapidity of the analysis, we got started developing a real-time fluorescence monitor for quick optimization of the scanning system parameters to form the particle density distribution with high flatness and small penumbra.

1. はじめに

大阪大学核物理研究センター(RCNP)では、粒子線治療における正常組織への照射を軽減するための次世代型のビームスキャンニング法 “スパイラルビームスキャンニング”の開発を行っている[1][2]。この開発を行うにあたり、これまで、詳細な粒子密度分布の評価にはGAFCHROMIC フィルムを用いてオフラインで解析していたが、この方法ではフィルムの黒化度が安定するまで、照射後数十時間待つ必要があり、ビームスキャンニングシステムのパラメータを変えた時の粒子密度分布の均一性を評価するには不向きであった。そこで、我々は、均一な粒子密度分布形成の迅速化のために、その場でスキャンニングシステムの最適化調整を行い、形成された粒子密度分布の均一性や照射野辺縁部のはみ出し精度をリアルタイムで把握することのできる蛍光モニターの開発を行っている。この蛍光モニターは、ハイスピードカメラを用いてビームスポットの変位を画像で記録し、粒子密度分布に比例した蛍光量を逐次積分していくことによって2次元的な粒子密度分布の評価を可能とするものである[3]。今回の照射試験では、1nA以下の微小ビーム電流においても感度の高いDRZ 蛍光板(三菱ケミカル社製)を用いて粒子密度分布を得るためのハイスピードカメラの撮影条件や、蛍光板の種類に応じた最適なビーム強度などを探るとともに、実際にスパイラルビームスキャンニング照射を行い、本システムの粒子密度分布評価への適合性と有用性を検討した。

2. 実験装置及び実験方法

Figure 1に蛍光モニター試験用ビーム照射システムの概念図を示す。今回の照射では、RCNP 加速器施設のAVFサイクロトロンで加速された53 MeVの陽子ビームを用いた。減速体にはポリエチレン板と、水と同等の密度を持つタフウォーターを用い、ブラッグピークの立ち上がり部分が、ガフクロミックフィルムとDRZ 蛍光板の位置になるようにポリエチレン板とタフウォーターの厚さをそれぞれ15mmと2mmに決めた。その下流側に詳細な粒子密度分布を評価するためのGAFCHROMIC フィルム(ASHLAND社製EBT-3)と、DRZ 蛍光板を重ねて設置した(Figure1)。GAFCHROMIC フィルムは、吸収線量に応じて黒化度が変化する。ハイスピードカメラ(nac IMAGE TECHNOLOGY社製MEMRECAM Q1v)はビームラインの下流側斜め方向400mの位置に設置し、望遠レンズを用いて蛍光板からの発光を撮影した。

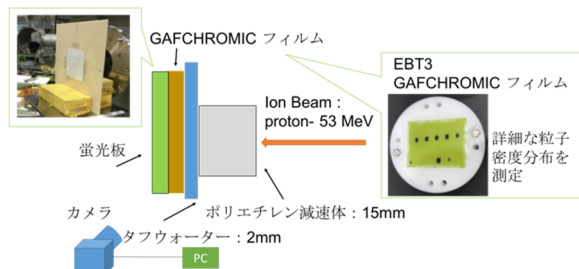


Figure 1: Schematic drawing of the irradiation system.

rina.yamanoshita@rcnp.osaka-u.ac.jp

2.1 蛍光板

蛍光板は、三菱ケミカル社製 DRZ-High, DRZ-Plus, PI200 ($Gd_2O_2S:Tb$)を用いた。Table 1に今回用いた蛍光板の一覧を示す。使用する蛍光体の感度の差により、発光量とビーム電流値の関係の違いを調べるため、蛍光体層の厚さの異なるものを照射試料とした。 $Gd_2O_2S:Tb$ は、イオンビーム用の蛍光体として多く利用されているアルミナ蛍光板と比較して、残光が数 ms と短く、また発光感度が高く、 $1\text{pA}/\text{cm}^2$ オーダーの低強度ビームで発光するため、粒子線治療における実ビームをそのまま用いて測定することが可能であることから、リアルタイム計測には最適であると考えられる。

Table 1: Type of Fluorescent Screen

蛍光板の種類	DRZ-Plus	DRZ-High	PI200
Relative Brightness	100%	132%	162%
MTF	0.36	0.16	0.11
蛍光体層の厚さ (mg/cm ²)	100	145	200

2.2 ハイスピードカメラ

カメラは、ナックイメージテクノロジー社製の超高感度ハイスピードカメラ Q1V を用いた。特徴としては、高感度であること、超小型であること、撮影速度が速いこと(1 秒 1000 コマ以上)などが挙げられる。今回の実験では、感度の高さを重視するため、モノクロ撮影を行った (ISO 160,000)。粒子密度分布を取得するため、陽子ビームを蛍光板に照射し、その発光をハイスピードカメラにて、10bit のモノクロ画像として連続的に撮影した。

2.3 ビーム照射条件の変更

DRZ 蛍光板を用いて粒子密度分布を得るための適切なカメラの撮影条件、蛍光板の種類に応じた最適なビーム強度の条件を取得するために、様々なパラメータの組み合わせの条件で照射を行った。カメラにおいては、しぼりの F 値と撮影のフレームレート fps(1 秒あたりのコマ数)を変えながら照射を行った。一方で、AVF から輸送されるビーム電流は 70nA ほどであったが、ビーム強度を桁で変更するために beam attenuator (多孔金属シート)を AVF サイクロトロンの入射ラインに挿入し、さらに平行平板電極に印加する電圧を変化させて入射ビームを偏向させる beam kicker を用いて、蛍光板の発光量が適切になるようにビーム強度の調節を行った。ビーム電流は、ターゲットの上流にあるファラデーカップで測定した。照射時間は、20 秒間隔の kicker 電圧パルスの Duty を変えることによって変更した。

Table 2: Parameters of the Irradiation

F 値(カメラのしぼり)	F8, F16
フレームレート fps(1 秒あたりのコマ数)	100, 250, 500, 1000, 2000
Beam attenuator の減弱率	1/100, 1/100, 1/1000
Beam kicker 電極の印加電圧	0V, 10V, 20V, 30V, 40V
ビーム照射時間	0.12~5 秒
蛍光板の種類	DRZ-High, DRZ-Plus, PI200(三菱ケミカル社製)

3. 照射結果

3.1 ビームスポット

Figure 2 は PI200 蛍光板に照射したビームスポットを撮影した画像と、X 方向の断面図と Y 方向の断面図をガウス分布でフィッティングしたグラフである。照射条件は、attenuator 1/1000、Beam kicker 電圧 10V(50pA)、fps100、しぼり F8 である。分散値 σ の値はそれぞれ $\sigma_x = 1.2\text{mm}$ 、 $\sigma_y = 0.86\text{mm}$ であり、X 方向に長い楕円のビームスポットである。GAFCHROMIC フィルムに照射して得られた黒化度分布の分散値はそれぞれ $\sigma_x = 1.38\text{mm}$ 、 $\sigma_y = 0.78\text{mm}$ であり、蛍光板に照射したビームをカメラで撮ったものと GAFCHROMIC フィルムに照射したビームスポットはほとんど一致している。

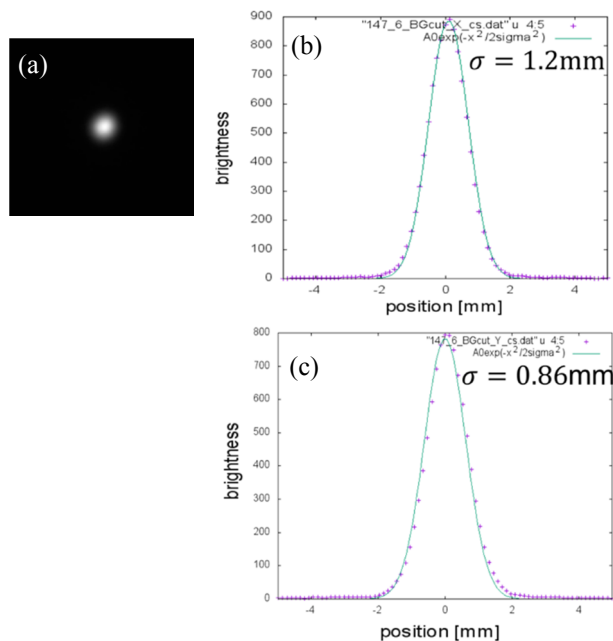


Figure 2: (a) Beam spot on a PI200 fluorescent screen irradiated with a 53 MeV proton beam. The image was obtained by a high speed camera Q1v. The cross-sectional view of the particle density distribution along the X axis (b) and Y axis (c). The solid lines show Gaussian fitting results.

3.2 照射条件の変更による輝度の変化

Figure 3 はカメラの fps を変更したときの DRZ-High 蛍光板での輝度の変化を示したものである。この時、1/100 attenuator を用い、電流値は 0.72nA に固定した。しぼりは F8 と F16 の二種類を用いた。グラフでプロットした輝度の値は、それぞれの画像で輝度が最大の座標を平均して求め、その座標の周り 9 点のピクセル値を平均して最大輝度を簡易的に算出したものである。

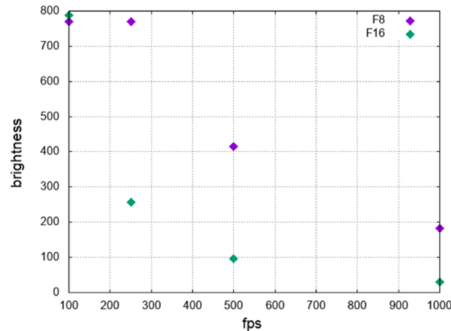


Figure 3: Dependence of the brightness on FPS for the DRZ-High Fluorescent screen.

fps が大きくなると、一枚あたりの露光時間が減るため、輝度は fps に反比例する。また、しぼりを大きくすると取り込む光の量が減るため、輝度は小さくなる。

Figure 4, 5 は DRZ 蛍光板と PI200 蛍光板での、Attenuator や Beam kicker によりビームの強度を変更したときの輝度の変化を示したものである。ビーム強度が大きくなると輝度は飽和してくるため、正確に粒子密度分布を測定するためには、輝度が飽和しない領域のビーム強度を用いる必要がある。また、今回の実験で使用した三種類の蛍光板のうち、最も感度の高い PI200 蛍光板では数十 pA の電流でも測定可能であることが確認できた。さらに、高強度のビームを当て過ぎると、蛍光板の劣化による発光量の減衰が見られたため、感度の良い蛍光板を用いる際には注意が必要である。

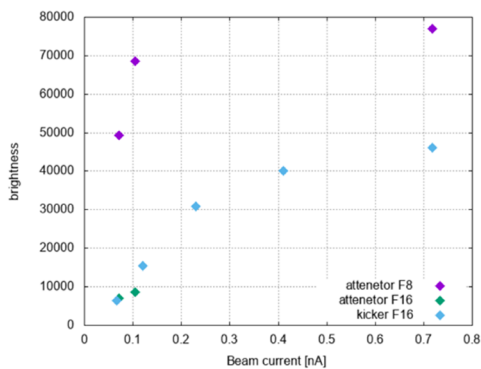


Figure 4: Dependence of the brightness on a beam current for DRZ-High Fluorescent screens.

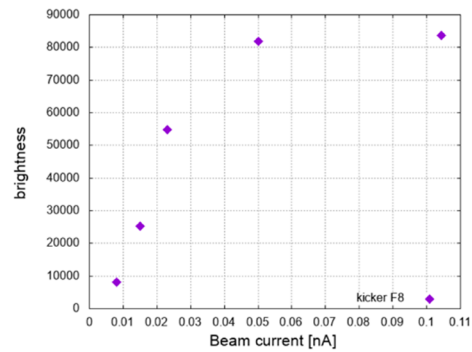


Figure 5: Dependence of the brightness on a beam current for PI200 Fluorescent screens.

Figure 6 は DRZ 蛍光板(a)と PI200 蛍光板(b)での照射時間を変更したときの輝度の変化を示したグラフである。DRZ 蛍光板での照射条件は attenuator 1/1000、(87pA)、fps100、しぼり F16 である。一方で、PI200 蛍光板での照射条件は attenuator 1/1000 と 1/10 (6pA)、fps100、しぼり F8 である。DRZ 蛍光板と PI200 蛍光板のどちらにおいても照射時間と輝度は比例することを確認できた。

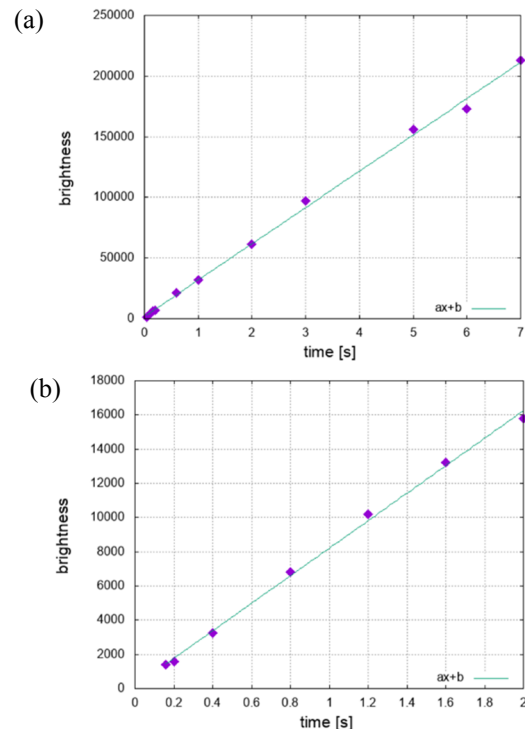


Figure 6: Dependence of the brightness on irradiation time for DRZ-High (a) and PI200 (b) Fluorescent screens. Green lines show the linear fitting result.

3.3 スパイラルビームスキニング照射

蛍光板の利用可能な電流強度領域にあるビーム強度、また飽和しないカメラの条件で真円形状のスパイラルビームスキニング照射を行った。最も感度の高い PI200 蛍光板を用い、ビームやカメラの照射条件は、fps 100、F8、Attenuator 1/1000 と 1/10 (6nA)とした。また、スキヤニ

ングの照射条件は、最大周波数 $f_{max} = 30\text{Hz}$ 、回転数 $N = 50$ 、最大半径 $r_{max} = 30\text{mm}$ 、最小半径 $r_{min} = 0.3\text{mm}$ 、走査速度 $v = 56.5\text{mm/s}$ であった。但し、走査軌道間隔と走査速度は常に一定である。

Figure 7 に蛍光板を用いて測定した粒子密度分布の解析結果と、同時にビームを照射した GAFCHROMIC フィルムの解析結果を示す。蛍光板では、ビームスポットの変位をハイスピードカメラの画像で記録し、粒子密度分布に比例した蛍光量を逐次積分していくことにより分布を形成した。

GAFCHROMIC フィルムで測定した粒子密度分布を、蛍光板で再現できることを確認した。Figure 8 にはそれぞれの分布の X 方向の断面図を示す。均一度は、GAFCHROMIC フィルムでは $\pm 5.0\%$ であるのに対して、蛍光板では断面以外の点での輝度のばらつきがあるため、 $\pm 13.9\%$ と高くなった。均一度の計算範囲は 50%線量の位置において、 $2 \times penumbra$ の内側の領域とした。

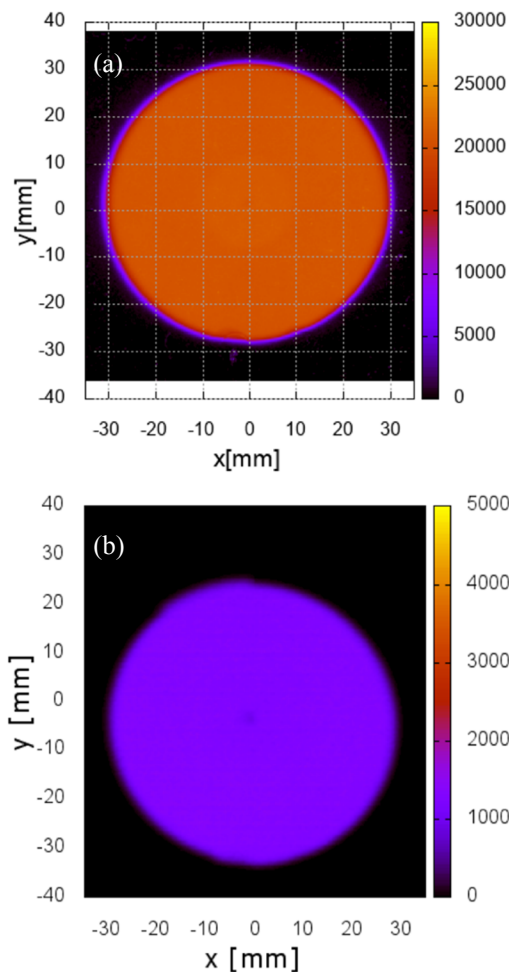


Figure 7: Two-dimensional particle density distribution obtained by the spiral scanning of a 53-MeV proton beam. (a) A darkness distribution on a GAFCHROMIC film. (b) A particle density distribution obtained from a Fluorescent screen and a high speed camera.

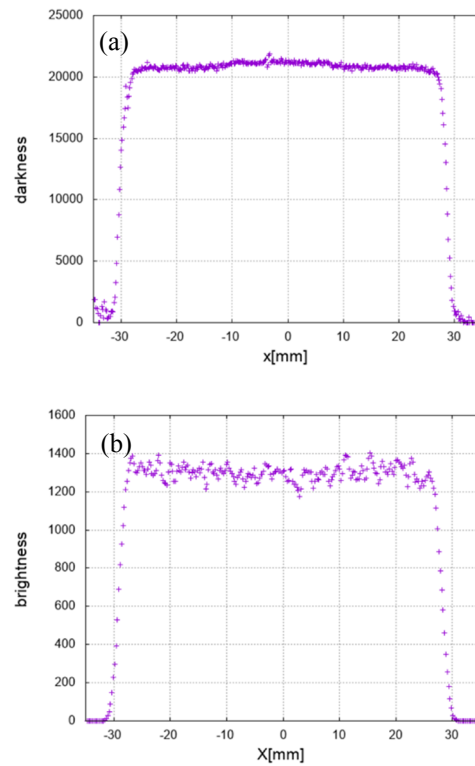


Figure 8: The cross-sectional view of the particle density distributions along an X axis obtained from a GAFCHROMIC film(a) and a Fluorescent screen(b).

4. まとめ

DRZ 蛍光板と超高感度ハイスピードカメラを用いてリアルタイムに粒子密度分布を得るための蛍光モニターの開発を行った。

ビームスポットの変位をハイスピードカメラの画像で連続的に記録し、粒子密度分布に比例した蛍光量を逐次積分していくことにより、GAFCHROMIC フィルムで測定した粒子密度分布を蛍光モニターでも再現することができた。また、DRZ 蛍光板を用いて粒子密度分布を得るための適切なカメラの撮影条件、蛍光板の種類に応じた最適なビーム強度の条件を明らかにした。

今後は、画像処理の迅速化と測定精度の向上を両立させ、さらなるリアルタイム化を目指すことが必要である。また、蛍光板が劣化しないように、撮影条件とビームの照射条件を最適化することが求められる。さらに、深さ方向の線量分布も考慮し、レイヤー毎のビームスキニングの最適化に活用していく。

参考文献

- [1] M. Fukuda *et al.*, "Simulation of Spiral Beam Scanning for Uniform Irradiation on a Large Target", NIM A396(1997)45.
- [2] S. Hara, 修士論文 "粒子線システムのための Spiral Beam Scanning システムの開発研究".
- [3] Y. Yuri *et al.*, "Investigation of phosphor materials for the real-time measurement of the transverse intensity

PASJ2017 TUP080

distribution of large-area ion beams at the JAEA AVF cyclotron facility”, Proceedings of the 12th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, August 5-7,2015, Tsuruga, Japan.