

TIARA における蛍光体を用いた リアルタイムビーム分布計測システムの実験評価 CHARACTERIZATION OF THE REAL-TIME BEAM PROFILE MEASUREMENT SYSTEM USING FLUORESCENT SHEETS AT TIARA FACILITY

湯山貴裕[#], 百合庸介, 石坂知久, 石堀郁夫, 奥村進

Takahiro Yuyama[#], Yosuke Yuri, Tomohisa Ishizaka, Ikuko Ishibori, Susumu Okumura

Takasaki Advanced Radiation Research Institute,

National Institutes for Quantum and Radiological Science and Technology

Abstract

A real-time beam profile measurement system for large-area uniform ion beam using multiple magnets in TIARA is used for quickly and efficiently uniform beam formation. The $Gd_2O_3:S:Tb$, $Al_2O_3:Cr$, and other some fluorescent screens are available for this system. An irradiation response of some fluorescent screens ($Gd_2O_3:S:Tb$) using the system was estimated about 10 MeV proton beam and 520 MeV argon beam. As a result, the fluorescence characteristics dependent on an energy loss were obtained with each screen in 10 MeV proton beam. However, the fluorescence characteristics with 520 MeV argon beam was the similar about some screens. In addition, the linear response could be confirmed both conditions.

1. はじめに

量子科学技術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 では、AVF サイクロトロン (K110)、3MV タンデム加速器、3MV シングルエンド加速器、400kV イオン注入装置の 4 台の加速器を有し、広範囲のエネルギーおよび多様なイオン種のビームを提供している。その利用は幅広く、植物育種や細胞の照射応答の研究、宇宙用半導体材料の耐放射線性評価、高分子材料のイオン照射効果の研究など、バイオ、医療、材料分野等に利用されている。この幅広いユーザーニーズに応えるため、多様な照射技術を開発し、照射利用されている[1]。

近年開発された AVF サイクロトロン照射技術として、多重極電磁石を用いた大面積均一照射技術がある。これは、多重極電磁石が作る非線形磁場による集束効果を利用して、事前にガウス分布状に成形されたビームの裾を折り返し、照射位置における横方向分布を均一にすることで、単位時間において空間的に均一な照射野を形成する技術である。そのため、従来の走査方式の均一照射と比較して、照射試料の局所的かつ瞬間的な加熱や損傷を抑え、全照射野に同時に均一な照射ができることから、超低フルエンス照射や、短時間照射なども可能である[2]- [4]。

多重極電磁石を用いた大面積均一照射技術では、ビーム形成の特徴から、照射位置におけるビーム形状の確認および均一性の評価が必要になる。そのため、照射位置に置いた蛍光板の発光をもとにビーム形成を行い、その形状や均一性の詳細な評価にはラジオクロミックフィルムを用いている[5]。

このラジオクロミックフィルムによる均一照射の評価は、フィルムの特性から、照射後にビーム分布を評価するも

ので有り、均一ビーム形成の円滑化にはリアルタイムでビーム形状を確認できる必要がある。そのため、蛍光体の発光をカメラで取得し画像解析することで、リアルタイムにビーム形状および均一性評価が可能な、リアルタイムビーム分布計測システムを開発し、ビーム形成に利用している[6]。

同システムの蛍光体には DRZ 蛍光体($Gd_2O_3:S:Tb$)を用いているが、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、残光が短く、発光感度が良いため、多重極電磁石を用いた均一ビーム形成において、非常に有用である。また同システムを用いて、10MeV 陽子ビームおよび 520MeV アルゴンビームの計測を DRZ-High 蛍光体($Gd_2O_3:S:Tb$, 三菱化学)と、AF995R デマルケスト蛍光体($Al_2O_3:Cr$, デマルケスト)用いて実施しており、DRZ 蛍光体がデマルケスト蛍光体と同様に、フルエンスに対する線形性を持ち、リアルタイム分布計測用の蛍光体として利用可能なことを示している[7]。

その上で、発光強度の異なる DRZ 蛍光体においても同様に、リアルタイムビーム分布計測システムが計測に利用可能な線形性を示すか、10MeV 陽子ビームおよび 520MeV アルゴンビームに対するイオンビーム照射応答を確認した。また、陽子ビームに関して、光学フィルタを用いることにより、現在計測している範囲より、高いビーム電流においても、計測の可能性を示すことができたので、これらを報告する。

2. 実験装置および実験方法

本実験は AVF サイクロトロン施設内に設置されている、大面積均一照射ラインを用いて実施した。同ライン最下流には Figure1 に示す様な大面積均一照射用の真空チェンバーが設置されており、内部には照射試料台が設

置できる。この試料台は最大 20cm 角のシート状試料を固定させることができ、チャンバー内に 22 枚の交換用試

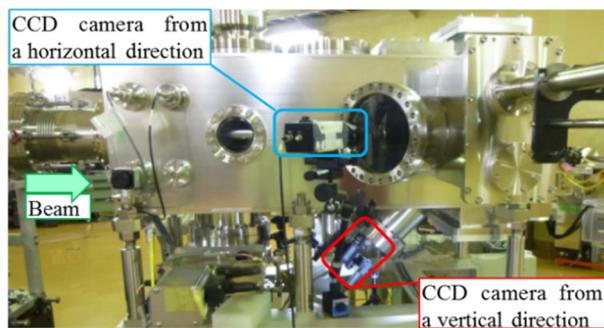


Figure 1: Photograph of the vacuum chamber for the large-area uniform beam at the TIARA AVF cyclotron facility.

料台が搭載されている。これに DRZ 蛍光体を固定し、その発光を水平方向および鉛直方向 2 方向からの CCD カメラによって観測することでビーム分布解析を行いながら均一ビームを形成する。試料台は真空中で任意に入れ替えが可能となっている。

Table 1 に今回用いた蛍光体の一覧を示す。使用するイオン種による感度の変化、蛍光体感度の差による特性の変化を調べるため、条件の異なる Gd₂O₂S:Tb 蛍光体を照射試料とした。

イオンビーム照射応答の評価には 6x6 cm² などの適切なサイズに成形した均一ビームを蛍光体に照射し、その発光を CCD カメラにて、8bit のモノクロ画像として取得する。得られた発光画像から照射野の面積[Pixel]、同面積内の輝度値を求める。これを実面積[cm²]に対応させることで、蛍光体毎のフルエンス率に対する輝度値の特性を明らかにする。今回の実験にはチャンバー下部に設置してある CCD カメラ[BASLER SCA1390-17GC]を用いた。

このとき、フルエンス率は直前のファラデーカップで計測した照射電流値と、照射したラジオクロミックフィルムより解析したビーム面積から求めている。またサイクロトロンイオン入射系に設置してある、パルス波ビームチョッパーを用いることで、ビーム電流を任意に変更可能であり、これにより、フルエンス率を調整している。

Table 1: Main Specifications of Fluorescent Screen Samples, The Parameters were Sited from X-ray Scintillator Screen “DRZ™” Characteristics. [http://www.m-kagaku.co.jp/english/products/business/electron/ddm/detaails/1195241_3373.html?category=electro]

Model	Phosphor Layer		Relative Brightness (X-ray evaluation)
	Density	Thickness	
DRZ-STD	4.85 g/cm ³	140 μm	100%
DRZ-PLUS	4.81 g/cm ³	208 μm	119%
DRZ-HIGH	4.68 g/cm ³	310 μm	158%
PI-200	4.59 g/cm ³	436 μm	192%

3. 蛍光体のイオンビーム照射応答

3.1 陽子ビームの照射応答

各蛍光板へ 10MeV 陽子ビームを照射したときの、照射応答を Figure2 に示す。横軸は照射ビームのフルエンス率を、縦軸には蛍光画像より得られた平均輝度値をそれぞれ対数表記で表してある。グラフ中の破線は、蛍光体の照射応答に関して、線形性を確認するために、1次の近似曲線でフィッティングしたグラフである。これから、Gd₂O₂S:Tb 蛍光体のイオンビーム応答は、輝度値 150 以下の領域においてフルエンス率と線形の関係を持つことがわかる。輝度値 150 を超えると、いずれの蛍光板においても、照射量に対する発光量の上昇が緩やかになる傾向を見せた。そのため、輝度値 150 以下の領域

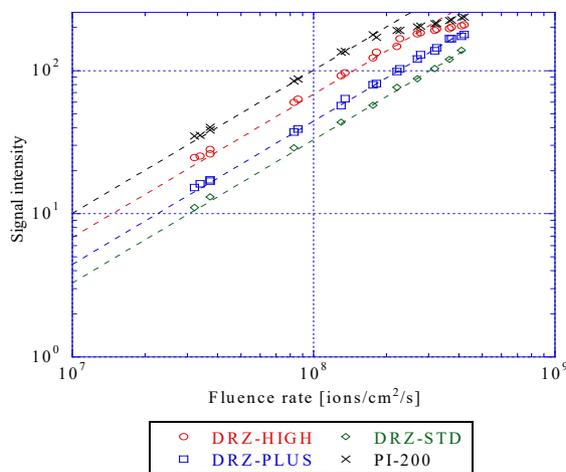


Figure 2: Signal intensity of DRZ-HIGH, DRZ-PLUS, DRZ-STD, and PI-200 fluorescence screen irradiated with 10-MeV proton beam. Dashed lines are the linear fitting results for each sample.

においては輝度値から相対値のフルエンス率を導出することも可能といえる。

各蛍光体において、Table1 の DRZ-STD を基準とした相対輝度の順に、フルエンス率に対する輝度値が高くなる傾向がみられる。ここで比較のために、Figure2 の近似式の係数比を Table2 に示す。Table1 における各蛍光体の相対輝度の増加に対して、Table2 の増加比率の方が高くなっているのがわかる。これは 10MeV 陽子ビーム照射からのエネルギー付与が、蛍光層の増加に伴いブラッグピークにかかることにより、蛍光体中でのエネルギーロスが増えているからと考えられる。

Table 2: The Coefficient Rate of the Linear Approximate Equation about Fluorescent Screen with 10-MeV Proton Beam

Model	Coefficient rate
DRZ-STD	1.00
DRZ-PLUS	1.35
DRZ-HIGH	2.08
PI-200	3.06

3.2 アルゴンビームの照射応答

Figure3 は重イオンのイオンビーム照射応答の評価を目的として、520MeV アルゴンビームを各蛍光体へ照射し、それを解析した結果である。Figure2 と同様に、横軸は照射ビームのフルエンス率を、縦軸には蛍光画像より得られた平均輝度値をそれぞれ対数表記で表してある。また、フィッティングにより得られたグラフについても同様である。

グラフから、陽子ビームの結果と同様に、輝度値 150 までの領域において線形性を示した。また、輝度値 150 前後で輝度値の上昇が緩やかになることを確認した。また、照射応答は陽子ビームの結果に比べて 2 桁ほど小さく、より高感度に反応していることがわかる。しかし、陽子ビームの結果と比較して、アルゴンビームの結果では、各蛍光体の輝度の差がほぼ見られない。これは 4 つの蛍光体の蛍光層が同程度の密度を持ち、520MeV アルゴンビームが各蛍光層内部において、同程度の飛程で停止したためだと考えられる。

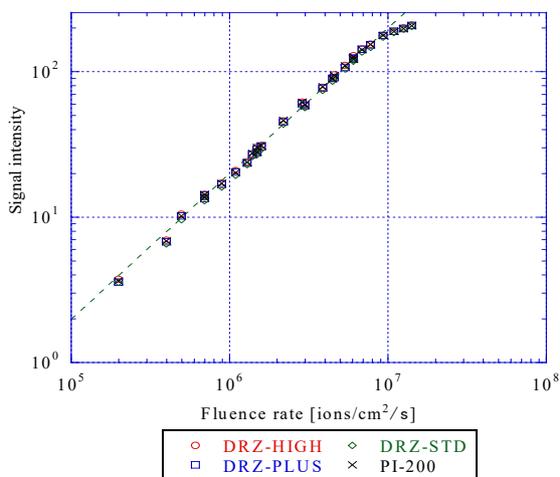


Figure 3: Signal intensity of DRZ-HIGH, DRZ-PLUS, DRZ-STD, and PI-200 fluorescence sheets irradiated with 520-MeV argon beam. Dashed lines are the linear fitting results for each sample.

3.3 光学フィルタを用いた、高フルエンス率領域の計測

Figure 4 にカメラレンズ開口部に減衰比 0.1 の減光フィルタ(以下 ND フィルタ)を設置して、10MeV 陽子ビームを各蛍光体へ照射した結果を示す。このグラフは、Figure2 の結果から、発光が飽和した状態から曲線が描かれ始めると想像されていたが、1 桁フルエンス率を増加させても、発光の傾向は変わらないことが確認できた。また、ND フィルタ使用前に見られた、輝度値 150 前後で輝度の上昇が緩やかになる傾向が、ND フィルタ使用後も見られた。これらのことから、本システムにおいて輝度値 150 以降に発光特性の傾きが緩やかになるのは、蛍光体の特性では無く、カメラ自体がもつ特性であることが明らかになった。

前節までと同様に、線形応答が見られる範囲におい

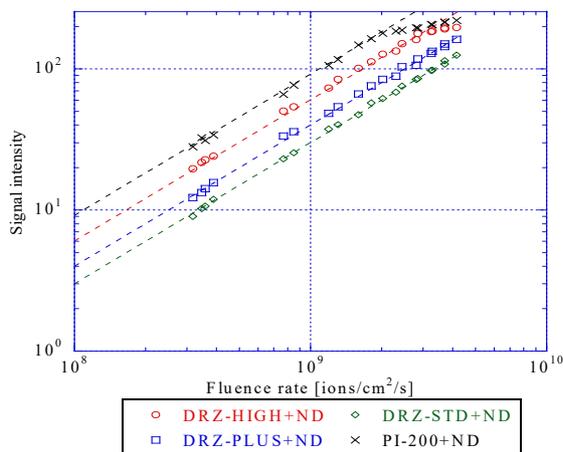


Figure 4: Estimation of using ND filter [decay ratio 0.1], about signal intensity of DRZ-HIGH, DRZ-PLUS, DRZ-STD, and PI-200 fluorescence sheets irradiated with 10-MeV proton beam. Dashed lines are the linear fitting results for each sample.

て、線形近似による近似式を求めた結果、その傾きを比較すると、それぞれ約 11 倍の比率を示し、ND フィルタの利用による効果が表れていることが確認できた。

このことから、減光フィルタを用いて計測を行うことで、これまで DRZ を用いて行われて来なかった高フルエンス率におけるビーム解析が可能であることを示した。

加えて、Figure4 の結果においてみられたのは、前述の通りカメラによる飽和特性であり、蛍光体の飽和特性が確認できなかったことから、更に高いフルエンス率における計測の可能性があることが明らかとなった。

4. まとめ

TIARA サイクロトロン施設における、大面積均一照射に利用される、リアルタイムビーム分布計測システムにおいて、蛍光体のイオン照射応答を評価した。蛍光体は $Gd_2O_2S:Tb$ 蛍光体を 4 種使用し、陽子ビームおよびアルゴンビームを照射した際の発光を、CCD カメラで観測し、フルエンス率の変化に対する輝度値の変化を計測した。結果として、輝度値 150 程度までの領域において、線形応答が確認でき、計測システムとしての特性を明らかにすることができた。

10MeV 陽子ビームは厚さの異なる蛍光体に対して、ビームのエネルギーロスの変化に起因した発光の変化が確認できた。それに対し、飛程が短い 520MeV アルゴンビームでは、蛍光体の種類によらず同様の発光を示した。

また、ND フィルタを用いることで、フィルタ未使用に比べ 1 桁高いフルエンス率における計測の可能性を示すことができた。

参考文献

- [1] T. Yuyama *et al.*, Proc. 12th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Tsuruga, Japan, 2015, p. 302.
- [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] Y. Yuri, K. Narumi, T. Yuyama, Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A 828 (2016) 21.
- [6] T. Yuyama, Y. Yuri, T. Ishizaka, I. Ishibori, and S. Okumura, Proc. 8th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Tsukuba, Japan, 2011, p. 478.
- [7] T. Yuyama, Y. Yuri, T. Ishizaka, I. Ishibori, and S. Okumura, Proc. 1st International Beam Instrumentation Conference, IBIC2012, Tsukuba, Japan, 2012, p. 246.