



TOKYO
METROPOLITAN
UNIVERSITY

電子線FLASH照射場におけるCr, Si, Mg 共添加Al₂O₃セラミックス板の熱蛍光特性

○栗林花風¹、大久保綾乃¹、田中浩基²、松林錦²、眞正浄光¹

東京都立大学¹、京都大学複合原子力科学研究所²

Introduction

近年、極めて高い線量率（一般に40 Gy・s⁻¹以上）で短時間に照射するFLASH照射が注目されている。本技術は従来の放射線治療と比べて正常組織への損傷低減が示唆され、臨床応用への期待が高まっている。一方で、線量率依存性の影響により、FLASH照射場での線量測定は従来法では困難である。現在の標準線量計として、カロリメータやアラニン線量計が使用され、線量率非依存性という利点を有する一方、装置規模や事後読み出しのためリアルタイム測定や二次元分布の取得には適さない。また、Ferrariらによって、蛍光ガラス線量計はX線では約2.14 Gy・s⁻¹まで線量率依存性がほぼなく、陽子線でもLET補正により実用性が示されている。^[1]一方、電子線FLASHでの体系的検証はまだ不足している。ラジオクロミックフィルムは広い範囲(電子線2×10⁷ Gy・s⁻¹まで)で線量率非依存性と高い空間分解能を示し^[2]、基準・検証に有用であるものの、繰り返し使用できずコストがかかる。したがって、高線量率場でも線量率依存性が小さく、二次元線量分布を定量的に、かつ繰り返し取得できる新たな線量測定法の開発が求められている。

本研究では独自に開発した、光子線および陽子線での放射線治療領域において、LET依存性が小さく^[3]、繰り返し線量分布測定が可能なCr, Si, Mg共添加Al₂O₃セラミックス板を用い、電子線FLASH照射場での測定を実施し、超高線量率場(1.6×10⁷ Gy・s⁻¹まで)での特性を調査した。

Materials&Methods

Al₂O₃: Cr, Si, Mgセラミックス板

- 組成: Al₂O₃: 97.95 wt%, 実効原子番号: 11.15
- MgO: 1.00 wt%, 大きさ: 10 mm×10 mm,
- SiO₂: 1.00 wt%, 200 mm×200 mm
- Cr₂O₃: 0.05 wt%, 厚さ: 0.7 mm

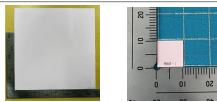


図1 Al₂O₃: Cr, Si, Mgセラミックス板

実験項目

1.線量変換テーブルの作成

リニアック (Elekta Versa HDTM) を用いてTL量-線量変換テーブルを作成した。

2.点線量測定

電子線FLASH照射場において、照射ポートからの距離を変え、線量および平均線量率を変化させ、本TL素子、蛍光ガラス線量計、ラジオクロミックフィルムの点線量を比較した。

3.線量分布測定

距離が475 mm(線量率10⁸ Gy・s⁻¹)における、200×200×0.7 mm³の本TL素子とラジオクロミックフィルムの横方向線量分布の比較を行った。

照射体系・照射条件

<通常線量率照射>

- 照射装置: Elekta Versa HDTM
- 電子線エネルギー: 9 MeV
- 最大線量率: 6 Gy・min⁻¹
- SSD: 100 cm
- 校正深: 2 cm
- 5 cm厚の水等価ファントムの上にセラミックス板を設置し、その上に1 cm厚の水等価ファントムを2枚重ねた。

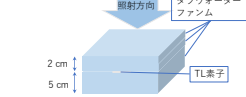


図2 通常線量率場での照射体系

<超高線量率照射, FLASH照射>

- 照射装置: KURNS-LINAC
- 電子線エネルギー: 8 MeV
- パルス幅: 5 μs
- 照射ポートからの距離変化させながら、1パルスずつ照射した。

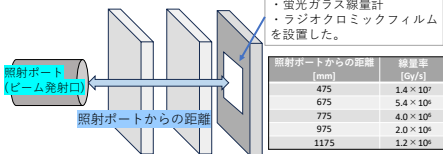


図3 超高線量率場での照射体系

TL測定

<点線量測定>

- 温度調節器: SCR-SHQ-A(坂口電熱)
- 光子カウンティングヘッド: H11890-210 (浜松ホトニクス)
- 昇温速度: 400°C/50 min (0.133 °C/s)
- 測定温度: 室温から400 °Cまで

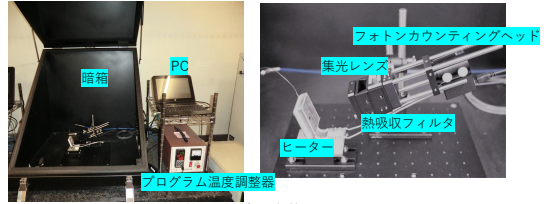


図4 グロー曲線測定装置

<線量分布測定>

- 2次元TL測定装置は、暗箱、CMOSカメラ(ORCA®-Flash4.0 V2, C13440-20CU, 浜松ホトニクス)、ビン、加熱用のヒーター(E.H VOC, 坂口電熱)、操作用PCで構成されている。
- ビン上部にセラミックス板を設置し、400°Cに加熱したヒーターを密着させることで、放出されたTLをCMOSカメラで撮影した。
- CMOSカメラは有効画素数 2048×2048 の 16 bit 画像を出力することができ、サンプリング間隔は50 μm/pixelである。

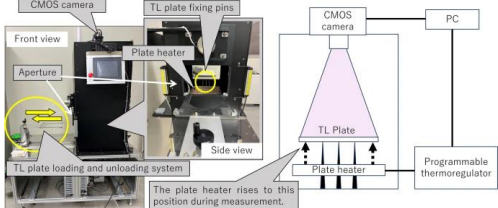


図5 2次元 TL 測定装置^[4]

Results&Discussion

点線量測定

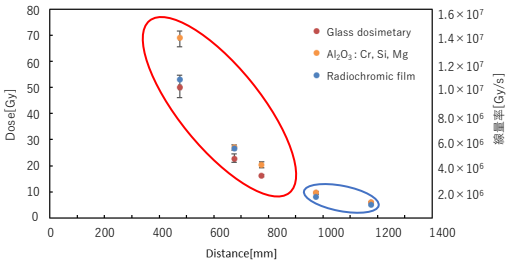


図6 照射ポートからの距離と線量の関係

先行研究

Favaudonらによって、以下のことが報告されている。^{[1][2]}

- ・ラジオクロミックフィルム:
電子線では線量40 Gyまで、2×10⁷ Gy・s⁻¹までで線量率非依存性と高い空間分解能を示す。
- ・蛍光ガラス線量計:
X線では約2.14 Gy・s⁻¹まで線量率非依存性で、陽子線でもLET補正により実用性が示されている。

- ・照射ポートからの距離が短くなるほど線量率は高くなる。
- ・距離が1000 mm以上(線量率2×10⁶ Gy・s⁻¹以下)では、3者の線量値は良好に一致した。
- 先行研究でラジオクロミックフィルムの線量率依存が小さいと示されていることから、本TL素子の線量率依存性も小さいと言える。

- ・距離が1000 mm(線量率2×10⁶ Gy・s⁻¹)より短くなるにつれ、本TL素子と他の線量計との差は徐々に増大した。
- 他の線量計では線量率依存性のため線量値が低下したが、本TL素子の線量率依存は相対的に小さいと考えられる。

<本TL素子は線量率依存性が小さいと考えられる理由>

- ①リニアックの電子線照射(線量率6 Gy・min⁻¹)では、総線量100 Gyまでの範囲で直線性が確認できている。
- ②線量率が高くなることで、電子と正孔の再結合確率が高くなるとTL効率は低下する。
- ③TL効率が上昇する現象やメカニズムはこれまで報告されていない。

線量分布測定



図8 TL分布画像

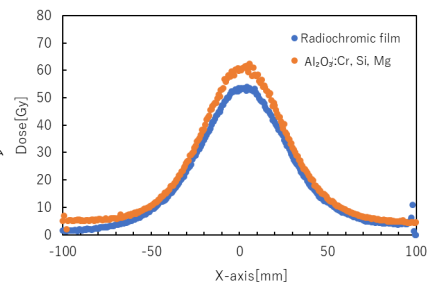


図9 距離475 mm(線量率1.4×10⁷ Gy・s⁻¹)における横方向線量分布

- ・図8に超高線量率電子線照射時のTL分布画像を示す。
- ・両者の線量分布形状は概ね一致した。
- ・線量率の高い中心軸近傍は、本TL素子がラジオクロミックフィルムより約8 Gy高い値を示した。
- ・線量率が低い外縁へ行くほど、両者の差は縮小した。
- この傾向は、図6に示した同一線量率での点線量測定の結果と整合する。

本TL素子は電子線FLASH照射場において線量率依存性の影響を大きく受けることなく、二次元での線量分布を繰り返し測定できる可能性が示唆された。

Conclusion

- ・本研究では、独自に開発したCr, Si, Mg共添加Al₂O₃セラミックス板を用い、電子線FLASH照射場での測定を実施した。
- ・蛍光ガラス線量計とラジオクロミックフィルムとの比較を行い、本TL素子の特性を調査した。
- ・高線量率条件下において、点線量測定および線量分布測定の双方で、線量率依存性の影響が小さいことが示唆された。
- ・本TL素子は、これまで課題であった繰り返し測定や分布測定が可能であり、高空間分解能を有するため、電子線FLASH照射領域の線量計としての有用性が高いと言える。

[1] Ferrari, M., et al. "Characterization of Radiophotoluminescence Dosimeters Under X-Ray Irradiation at High Doses." *IEEE Transactions on Nuclear Science* 71(8), 1821–1828 (2024)

[2] V. Favaudon et al., "Time-resolved dosimetry of pulsed electron beams in very high dose-rate, FLASH irradiation for radiotherapy preclinical studies," *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A*, vol. 944, p. 162537(2019)

[3] Okubo, A. Thermoluminescence properties of Cr, Si, and Mg co-doped Al₂O₃ ceramics plates under proton beam (2025)

[4] Shinohe, K., et al. Thermoluminescence properties of Cr, Si, and Mg co-doped Al₂O₃ ceramics plates under X-ray irradiation. *J Mater Sci: Mater Electron* 36, 125 (2025)