

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 22 日現在

機関番号：82502

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2013～2014

課題番号：25871148

研究課題名(和文)熱ルミネッセンス線量計を用いた粒子線治療場の線量測定技術とその応用に関する研究

研究課題名(英文) Study on dosimetric technique using thermoluminescence dosimeter and its application in the particle beam therapy

研究代表者

古場 裕介 (Koba, Yusuke)

独立行政法人放射線医学総合研究所・医療被ばく研究プロジェクト・研究員

研究者番号：10583073

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,100,000円

研究成果の概要(和文)：粒子線治療における線量分布検証に利用できる検出器として様々な形状に成形可能である熱ルミネッセンス線量計(TLD)の利用を検討した。本研究ではTLDのグロー曲線に着目し、その精密測定が可能な読取システムの開発とグロー曲線の精密解析による粒子線の線量測定時の補正法に関する研究を行った。様々なTLDに対して粒子線に対する応答を測定し、そのグロー曲線解析を行った。本研究で使用した組織等価なTLDではグロー曲線による補正を行うことで陽子線に対して数%の誤差で測定することができ、炭素線に対しては発光量低下による誤差の軽減が可能であることを示した。

研究成果の概要(英文)：We studied the use of thermoluminescence dosimeter (TLD) as a dose-distribution verification tool in the particle beam therapy. In this study, we focused on glow curve of TLD and we developed the precise thermoluminescence reading system. We studied on the correction method in dose measurements of the particle beam using precision analysis of the glow curve of TLD. We measured the response of several TLD to the particle beam, and made the glow curve analysis. We showed that it can be measured by several% errors to the proton beam by performing the glow-curve-correction method for a tissue equivalent TLD in this study. And we showed the possibility of reduction of error caused by the luminescence saturation in carbon-beam measurements using the TLD.

研究分野：医学物理、粒子線治療、線量測定、医療被ばく

キーワード：熱ルミネッセンス線量計 粒子線治療 グロー曲線 LET依存性

1. 研究開始当初の背景

(1) 近年、強度変調放射線治療 IMRT や粒子線治療など高度化する外部放射線治療では複雑な線量分布を実現できるようになった。特に陽子線や重粒子線を用いる粒子線治療は線量集中性が良く、周辺重要臓器への付与線量を大幅に低減できることから高度放射線治療の一つとして広く普及しつつある。しかし、複雑な形状かつ急勾配な線量分布を形成させることから、線量分布検証では照射野内の高空間分解能な3次元測定が求められ、QA (Quality Assurance)の重要性が増している。また、十分な線量分布検証が行われても、実際の治療照射による体内線量は測定することはできず、その精度は治療計画や照射時の患者セットアップの誤差に大きく依存する。治療計画通りの線量が付与されているか知るためには小型の線量計を体内に挿入するインビボ測定を行う必要がある。インビボ測定のための小型の検出器が提案され開発が進んでいるが、まだ光子線治療分野の一部の限定的な利用にとどまっており、インビボ測定に適した線量測定技術の開発は十分でないと言える。このように、空間的な線量測定が可能な検出器や小型の検出器開発は高度化する外部放射線治療において必要不可欠なものとなっている。このような背景から分布測定や小型化に対応するため電離箱線量計だけでなく半導体や蛍光体など様々な媒体を利用した検出器開発が試みられており、光子線治療の分野では既に治療現場での利用が試みられている。しかしながら、電離箱線量計以外のほとんどの媒体は電離密度が非常に高い領域(高LET領域)の測定において線量応答の線形性がなくなる現象(LET依存性)が発生することからLETが大きく変化する粒子線治療の分野での利用が難しく、依然として課題が多い。

(2) 熱ルミネッセンス線量計(TLD)は吸収線量に応じた発光応答を示すことから積算線量計として利用でき、個人被ばく線量計などに広く利用されている。熱ルミネッセンス線量計は蛍光体素子の焼結粉末をガラス封入したり、耐熱樹脂と混合成形したりすることにより、棒状、薄膜状、板状と様々な形状にすることが可能であり、その大きさも1mm程度から数十cmまで作成可能である。これにより熱ルミネッセンス線量計の応用は分布測定からインビボ測定など幅広い応用が行われている。しかし、熱ルミネッセンス線量計についても前述のLET依存性が発生することが明らかにされており、これまで荷電粒子の線量測定への利用は難しいとされてきた。しかし近年、代表的な熱ルミネッセンス線量計の熱蛍光読み出し時の温度と光出力の関係曲線(グロー曲線)のLET依存性が多く報告され、この関係性からLETに依存した光量補正ができる可能性が示唆されている[1, 2]。我々はこの熱ルミネッセンス線量計

のグロー曲線とLETの関係性に着目し、粒子線治療の分野におけるQAのための線量測定に応用することを目指している。

2. 研究の目的

熱ルミネッセンス線量計のグロー曲線とLETの関係を精密に調べ、粒子線治療分野での熱ルミネッセンス線量計を用いた線量測定への応用を目指す。本研究は数種の熱ルミネッセンス素子のグロー曲線とLETの関係を非常に遅い昇温速度により精密に測定し、粒子線治療におけるLET領域の線質・線量測定に利用できる素子の候補を選定し、その測定方法の確立を行う。

3. 研究の方法

(1) サンプルの熱ルミネッセンス線量計の熱蛍光を精密に測定するための装置開発を行った。既に首都大学眞正氏の協力により、熱蛍光読み取り装置のプロトタイプは既に製作済みであったため、そのプロトタイプの問題点を考慮し、集光効率・温度制御を改良した装置の開発を行った。

(2) 放射線医学総合研究所の医療用重粒子線がん治療装置 HIMAC を利用し、治療エネルギー領域の粒子線の照射実験を行った。実験に使用した照射室は、治療照射条件に近い条件で照射を行える生物照射室を利用した(図1)。広いLET領域に対する応答を得るため、複数の各種のビームを用いた。表1に本研究で使用したビームの種類を示す。H, He, Cビームの実験ではPMMA製のパイナリーフィルタを用いて照射深度を変えることにより複数のLET条件の照射を行った。



図1. HIMAC 生物照射室

表1. 実験に使用したビーム

核種	エネルギー	LET
H	160 MeV	0.5-3.2 keV/μm
He	150 MeV/u	2-37 keV/μm
C	290 MeV/u	13-217 keV/μm
Ne	400 MeV/u	29 keV/μm
Ar	500 MeV/u	86 keV/μm
Fe	500 MeV/u	197 keV/μm

(3) 照射対象とする熱ルミネッセンス素子の種類としてこれまで LET 依存性が報告されている BeO や LiF などと首都大学東京で開発された組織等価型熱蛍光スラブ線量計を用いた[2-4,6]。本研究では測定精度を向上させるため遅い昇温速度でのグロー曲線取得を行った。取得したグロー曲線の LET 依存性を評価する手法として、これまでに報告されているグロー曲線のメインピーク対高温領域面積比を利用する HTR (High Temperature peak Raito)法を用いた[4]。

4. 研究成果

(1) 精密グロー曲線読取システムの開発

図 1 に開発した精密グロー曲線読取システムを示す。このシステムは暗箱 (サイエントックス BOX-U2)、温度コントローラ (坂口電熱 SCR-SHQ-A)、ヒーター (坂口電熱 SAJ0983)、光子カウンティングユニット (浜松フォトニクス H11890-110) と独自に設計を行った光学レンズユニットを用いて作成した。このシステムを用いることにより 1 度未満の精度で非常に遅い昇温速度による熱蛍光を測定することが可能となった。

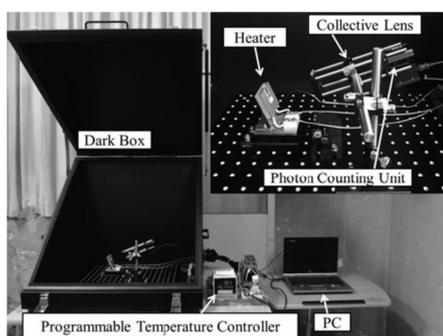


図 2.精密グロー曲線読取システム[7]

(2) 様々な TLD のグロー曲線と発光効率の LET 依存性

実験では様々な TLD に対して照射実験を行い、そのグロー曲線の変化を読み取った。TLD の種類は LiF 系 (TLD600, TLD700, UD-137N, GR200)、BeO (UD170A)、CaSO₄ 系 (UD-110S, CaSO₄:Dy, CaSO₄:Sm, CaSO₄:Tm)、及び TEP-TLD を使用した。TEP-TLD は連携研究者の眞正氏の開発した組織等価型の TLD で広い板状に形成でき 2 次元的な線量分布測定が可能で TLD である [3]。取得したグロー曲線の例として図 3, 4 に TLD600, TEP-TLD の様々な LET のビームに対する同線量あたりのグロー曲線を示す。これらの結果から LET の違いによってグロー曲線の形状が変化していることが分かる。また LET が増加するほど全体の発光量が低下していることも分かる。図 5 に治療エネルギー領域の陽子線を照射した際の様々な水等価深さにおける TEP-TLD の発光量の応答を示す。治療エネルギーの陽子線の LET 領域では発光効率の低下は小さく、数%程度あるこ

とが分かった。このことから TEP-TLD は治療用陽子線の線量場の評価に利用できる可能性があることが示された[7]。また図 6 に治療エネルギー領域の炭素線を照射した際の様々な水等価深さにおける TEP-TLD の発光量の応答を示す。炭素線の飛程終端の Bragg Peak に近づくにつれて LET が大きくなるため TEP-TLD の発光量が低下し発光効率が低下していることが分かる。Bragg Peak 付近では電離箱線量計の応答に比べて約 2 割程度の応答しか示さないことが分かった[8]。

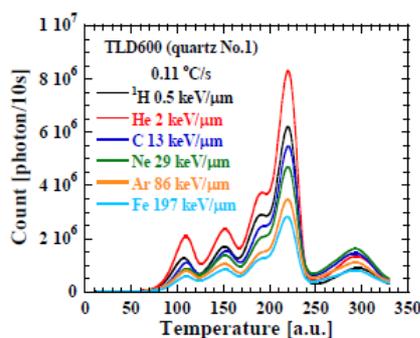


図 3. TLD600 のグロー曲線の LET 依存性

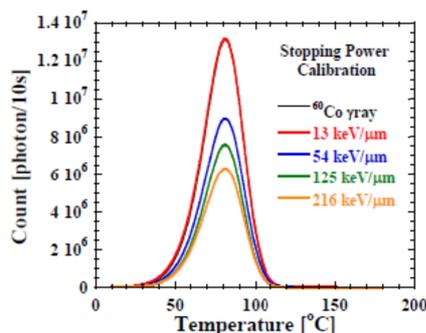


図 4. TEP-TLD のグロー曲線の LET 依存性

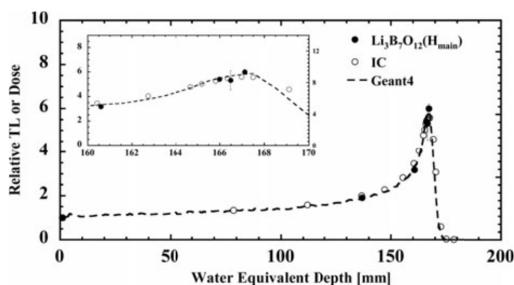


図 5. 陽子線に対する TEP-TLD の応答[7]

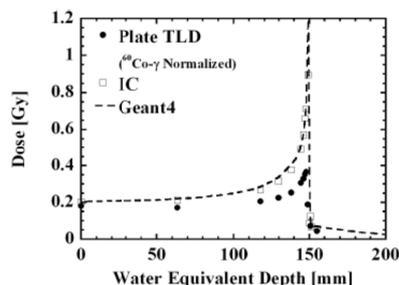


図 5. 炭素線に対する TEP-TLD の応答[8]

(3) グロー曲線解析を用いた線量計算手法

(2)までの結果から炭素線治療における LET 範囲では発光効率の低下が大きいことから、本研究で使用した全ての TLD において光量だけで線量を評価することができないことが示された。この問題を解決するために LET に応じた補正手法としてグロー曲線のメインピーク対高温領域面積比を利用する HTR (High Temperature peak Ratio) 法を TEP-TLD に適用し、その有用性を検証した。

TEP-TLD は図 6 のように 80 付近のメインピークと高温の 200 付近の小さなピークを示した。そこで図 7 のようにメインピークの光量 I_M と高温領域のピークの光量 I_S の比を $HTR = I_S/I_M$ と定義し、この値の LET 依存性を解析し、発光効率との関係性を求めた。図 8 に LET と線照射した際の HTR と粒子線を照射した際の HTR の値の比 HTR_k/HTR_y の関係性を示す。図 8 の関係を用いることで TEP-TLD のグロー曲線解析から照射したビームの LET を推測することができることが示された。また図 9 に HTR_k/HTR_y と発光効率の関係性を示す。図 7 から HTR_k/HTR_y と発光効率は一意な関係性を示すことから、グロー曲線解析を行うことで、炭素線治療における線量分布測定の際の発光量低下を補正できる可能性があることが示された。

(4) 治療用炭素線ビームの線量測定への応用検討

(3)までの結果から TEP-TLD を利用した線量測定ではグロー曲線解析を行うことにより、発光効率を補正できる可能性があることが示され、図 9 のような関係も HTR_k/HTR_y と発光効率の関係も明らかとなった。これらの結果を利用し、実際に治療に利用される炭素線ビームである拡大 Bragg Peak のビーム (SOBP ビーム) の線量分布測定を TEP-TLD を用いて行った。図 10 に TEP-TLD と(3)までの結果を利用した場合の SOBP ビームの線量測定結果を示す。グロー曲線解析による HTR 法を適用し、発光効率を補正することによって、電離箱線量計の応答に近づいたが、十分な補正を行えず、最大 20% 程度の差異が残った。この原因として LET スペクトルの違いが感られる。図 9 の関係はモノエネルギービームを利用して求めた関係であるが、SOBP ビームでは LET がスペクトル状に広い範囲で分布を持っており、これらの違いにより補正が十分に行えなかったと考えることができる。

本研究によって TLD のグロー曲線を精密に取得するためのシステムが開発され、様々な TLD グロー曲線の LET 依存性を測定することができた。また、粒子線治療における線量分布測定では発光効率の LET 依存性が問題であることが示し、その補正法としてグロ

ー曲線を解析する HTR 法を適用するためのデータ取得を行った。TEP-TLD と HTR 法を利用して治療用炭素線の SOBP ビームの線量測定を行った際、補正により 20% 程度まで差異が小さくなったものの線量検証に適用するためには十分でないことが分かった。本研究内では TEP-TLD の 2 つのピークの解析しか行っていないが、複雑なピークを示す TLD を解析することでさらに有用な補正手法が得られると期待できる。

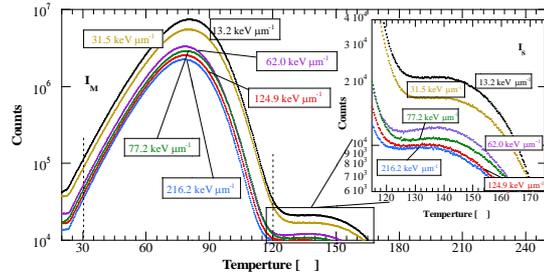


図 6. TEP-TLD のグロー曲線の 2 つのピーク

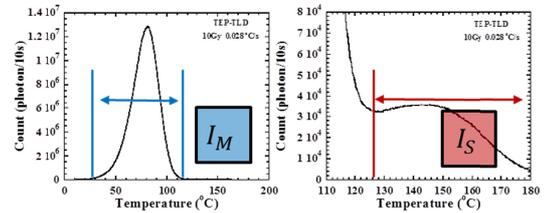


図 7. メインピークの光量 I_M と高温領域のピークの光量 I_S

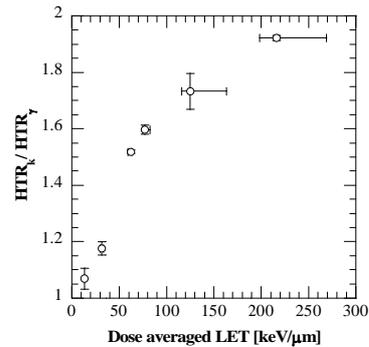


図 8. TEP-TLD の LET と HTR_k/HTR_y の関係

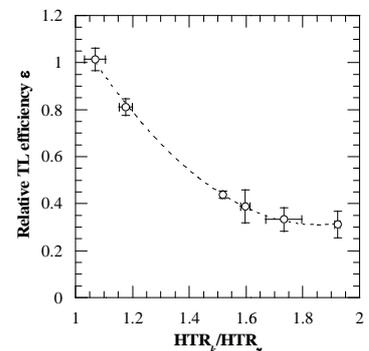


図 9. TEP-TLD の HTR_k/HTR_y と発光効率の関係

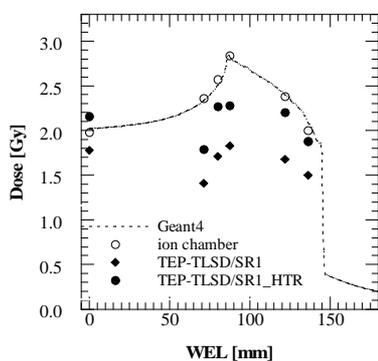


図 10. TEP-TLD を用いた炭素線 SOBP ビームの線量分布測定結果 (白丸印：電離箱線量計の結果、黒ダイヤ印：補正無しの TEP-TLD の応答、黒丸印：HTR 法で補正した TEP-TLD の応答)

<引用文献>

- [1] Y. S. Horowitz et al., INVESTIGATION OF THE IONISATION DENSITY DEPENDENCE OF THE GLOW CURVE CHARACTERISTICS OF LiFMg,Ti (TLD-100), Radiat. Prot. Dosim. Vol. 131, pp 406-413 (2008).
- [2] P. Bilski, On the correctness of the thermoluminescent high-temperature ratio (HTR) method for estimating ionization density effects in mixed radiation fields, Radiat. Meas. 45, pp. 42-50 (2010).
- [3] K. Shinsho et al., Basic characteristic of a prototype tissue equivalent phantom thermoluminescence dosimeter (TEP-TLD), Radiat. Meas. 46, pp1912-1915 (2011).
- [4] H. Yasuda, K. Fujitaka, Non-linearity of the high temperature peak area ratio of 6LiF(Mg,Ti) (TLD-600), Radiat. Meas. 32, pp. 355-360 (2000).
- [5] K. Shinsho, The thermoluminescence activation energy and frequency factor of the main glow of CaSO₄Tm phosphor determined by heating rate method including very slow rate of heating, J. Appl. Phys. 97, 123523 (2005).
- [6] Y. S. Horowitz (2003) ON THE USE OF LiFMg,Ti THERMOLUMINESCENCE DOSEMETERS IN SPACE—A CRITICAL REVIEW, Radit. Prot. Dosim.106 pp. 7-24 (2003)
- [7] Y. Koba, K. Shinsho, S. Tamatsu, S. Fukuda, G. Wakabayashi, Thermoluminescent Responses of Li₃B₇O₁₂:Cu to proton beam, Radiation Protection Dosimetry, Vol. 161, No. 1-4, pp. 437-440 (2014).
- [8] Yusuke Koba, Shigekazu Fukuda, Kiyomitsu Shinsho, Genichiro Wakabayashi,

Satoshi Tamatsu, Response of Plate-type Thermoluminescence Dosimeter to Therapeutic Carbon Beam, Journal of the Korean Physical Society, Vol. 63 No. 7, pp.1432-1436 (2013).

5 . 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 5 件)

- Y. Koba, K. Shinsho, S. Tamatsu, S. Fukuda, G. Wakabayashi, Thermoluminescent Responses of Li₃B₇O₁₂:Cu to proton beam, Radiation Protection Dosimetry, Vol. 161, No. 1-4, pp. 437-440 (2014). 査読有
DOI: 10.1093/rpd/ncu140
- Yusuke Koba, Shigekazu Fukuda, Kiyomitsu Shinsho, Genichiro Wakabayashi, Satoshi Tamatsu, Response of Plate-type Thermoluminescence Dosimeter to Therapeutic Carbon Beam, Journal of the Korean Physical Society, Vol. 63 No. 7, pp.1432-1436 (2013). 査読有
DOI: 10.3938/jkps.63.1432
- Kiyomitsu Shinsho, Yusuke Koba, Genichiro Wakabayashi, Satoshi Tamatsu, Shigekazu Fukuda, Ryo Morimoto, Daiki Maruyama, Hidetoshi Saitoh and Noboru Sakurai, Basic Characteristics of Tissue Equivalent Phantom Thermoluminescence Slab Dosimeter using New TL phosphor Li₃B₇O₁₂:Cu, Radiation Measurement 62C, pp. 15-21 (2014). 査読有
DOI:10.1016/j.radmeas.2014.01.001
- Yusuke KOBA, Kiyomitsu SHINSHO, Satoshi TAMATSU, Shigekazu FUKUDA and Genichiro WAKABAYASHI, Evaluation of base materials of TL slab dosimeter for heavy-ion radiotherapy, Journal of Radiation Reserch, 55 Supp 1, i109-i110 (2014). 査読無
DOI: 10.1093/jrr/rrt186
- W. Chang, Y. Koba, S. Fukuda, G. Wakabayashi, H. Saitoh and K. Shinsho, Absorbed Dose Estimation using LET Dependence in Glow Curve of TEP-TLSD/SR1, Radiation Protection Dosimetry, under review. 査読有

〔学会発表〕(計 16 件)

- Yusuke Koba, Kiyomitsu Shinsho, Chie Koyama, Wakabayashi Genichiro, Shigekazu Fukuda, The Thermoluminescence Efficiency of Alumina-Based Ceramic Plate Dosimeter to Carbon-Ion Beams, The 7th Korea-Japan Joint Meeting on Medical Physics, Busan, Korea, 2014.09.
- 大島梨奈, 眞正浄光, 古場裕介, 若林源

一郎, 松本和樹, 牛場洋明, Al₂O₃ セラミックス板の熱蛍光潜像現象, 第 75 回応用物理学会秋季学術講演会, 北海道大学, 2014 年 9 月

齋藤雄介, 眞正浄光, 古場裕介, 若林源一郎, 松本和樹, 牛場洋明, 線に対する Al₂O₃ セラミックス板の熱蛍光特性, 第 75 回応用物理学会秋季学術講演会, 北海道大学, 2014 年 9 月.

柳澤伸, 眞正浄光, 古場裕介, 原田和正, 軽量セラミックス基盤組織等価型熱蛍光スラブ線量計の画像特性の向上, 第 75 回応用物理学会秋季学術講演会, 北海道大学, 2014 年 9 月.

大坪圭介, 眞正浄光, 古場裕介, 福田茂一, 若林源一郎, 熱蛍光素子 BeO (UD-170A) のグロー曲線の線量依存性と成分解析, 第 75 回応用物理学会秋季学術講演会, 北海道大学, 2014 年 9 月.

小山千絵, 眞正浄光, 大坪圭介, 古場裕介, 福田茂一, 若林源一郎, 松本和樹, 牛場洋明, Al₂O₃ セラミックス板の X 線と Ne 線に対する熱蛍光の線量応答性, 第 75 回応用物理学会秋季学術講演会, 札幌, 2014 年 9 月.

Kiyomitsu Shinsho, Yasuyuki Kawaji, Yusuke Koba, Genichiro Wakabayashi, Kazuki Matsumoto, Hiroaki Ushiba, Masahiro Fukushi, X-ray large area detector using thermoluminescence properties of commercial ceramics, 2014 Symposium on Radiation Measurements and Applications, Ann Arbor, Michigan, USA, 2014 June 9-12.

玉津早駿, 古場裕介, 眞正浄光, 福田茂一, 組織等価ファントム熱蛍光スラブ線量計 (TEP-TLSD) を用いた治療用炭素線の線量分布測定法に関する研究, 第 107 回日本医学物理学会学術大会, 横浜, 2014 年 4 月.

大坪圭介, 眞正浄光, 古場裕介, 玉津早駿, 若林源一郎, 福田茂一, 川路康之, 齋藤秀敏, TL 線量計グロー曲線の LET および線量依存性, 第 107 回日本医学物理学会学術大会, 横浜, 2014 年 4 月.

古場裕介, 熱蛍光体の LET 効果, 2014 年第 2 回放射線物理学研究会, 東京大学, 2014 年 3 月.

古場裕介, 藤原健, 眞正浄光, 重粒子線治療における線量分布測定のための検出器開発について, 第 28 回研究会「放射線検出器とその応用」, 高エネルギー加速器研究機構小林ホール, 2014 年 1 月.

玉津早駿, 古場裕介, 眞正浄光, 福田茂一, 組織等価ファントム熱蛍光線量計 (TEP-TLD) のグロー曲線の LET 依存性, 第 106 回日本医学物理学会, 大阪, 2013 年 9 月.

玉津早駿, 古場裕介, 眞正浄光, 福田茂一, 組織等価ファントム熱蛍光線量計

のグロー曲線の LET 依存性, 第 74 回応用物理学会秋季学術講演会, 京都, 2013 年 9 月.

Y. Koba, K. Shinsho, S. Tamatsu, S. Fukuda, G. Wakabayashi, LET Dependence of Glow Curve of TL phosphor Li₃B₇O₁₂:Cu, Neutron and Ion Dosimetry Symposium (NEUDOS12), Aix-en-Provence, France, 2013.07.

Yusuke Koba, Kiyomitsu Shinsho, Satoshi Tamatsu, Shigekazu Fukuda, Genichiro Wakabayashi, Evaluation of base materials of TL slab Dosimeter for heavy-ion radiotherapy, Heavy Ion in Therapy and Space Radiation Symposium 2013 (HITSRS2013), Chiba, Japan, 2013.05.

玉津早駿, 古場裕介, 眞正浄光, 福田茂一, 組織等価ファントム熱蛍光線量計のグロー曲線の LET 依存性, 第 105 回日本医学物理学会, 横浜, 2013 年 4 月.

〔産業財産権〕
出願状況 (計 1 件)

名称: LET 非依存性ピーク検出法、線量分布測定法、並びに、熱蛍光特性の判定法

発明者: 眞正浄光, 古場裕介

権利者: 公立大学法人首都大学東京, 株式会社千代田テクノロ

種類: 特許

番号: 特願 2014-176380

出願年月日: 平成 26 年 8 月 29 日

国内外の別: 国内

6. 研究組織

(1) 研究代表者

古場 裕介 (Koba, Yusuke)

国立研究開発法人放射線医学総合研究所・医療被ばく研究プロジェクト・研究員
研究者番号: 10583073

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

眞正 浄光 (Shinsho, Kiyomitsu)

首都大学東京・健康福祉学部 放射線学科・准教授

研究者番号: 20449309

若林 源一郎 (Wakabayashi, Genichiro)

近畿大学・原子力研究所・准教授

研究者番号: 20449309