

論文 / 著書情報  
Article / Book Information

題目(和文)	前立腺がん治療用注射針型陽子線励起X線源の線量分布の評価方法の開発
Title(English)	Development of evaluation method of the dose distribution of a syringe-needle type proton-induced X-ray source for prostate cancer brachytherapy
著者(和文)	胡宇超
Author(English)	Yuchao Hu
出典(和文)	学位:博士(工学), 学位授与機関:東京工業大学, 報告番号:甲第10648号, 授与年月日:2017年9月20日, 学位の種別:課程博士, 審査員:小栗 慶之,千葉 敏,松本 義久,片淵 竜也,林崎 規託
Citation(English)	Degree:Doctor (Engineering), Conferring organization: Tokyo Institute of Technology, Report number:甲第10648号, Conferred date:2017/9/20, Degree Type:Course doctor, Examiner:,,,,
学位種別(和文)	博士論文
Category(English)	Doctoral Thesis
種別(和文)	要約
Type(English)	Outline

## 論文要旨

本論文は「Development of evaluation method of the dose distribution of a syringe-needle type proton-induced X-ray source for prostate cancer brachytherapy」と題し、以下の四章より構成されている。

第一章「Introduction」は、本研究に関連する背景及び工学的な問題点、及びその解決策として提案された新しい手法の概要を説明した。まず、前立腺がんについて、その診断方法である Prostate Specific Antigen (PSA) の血清検査とがん細胞の組織学的評価方法“Gleason score” の現状を紹介した。次に前立腺がんの治療方法として、ホルモン療法、外科的手術、外部照射と組織内照射を含む放射線療法の三つについて述べ、それぞれの特長と欠点を説明した。その中で、小線源の永久挿入法は、前立腺がん治療によく使われている方法の中でも、線量を腫瘍内部に集中し、周辺組織への影響を最小限に抑えることができるという最大な利点を持っている。しかし、線源の紛失や挿入施術者に対する被ばくのリスクが欠点となっている。一方、遠隔操作による高線量率小線源の一時挿入法はこれらの欠点を排除できるものの、ガンマ線エネルギーの高い線源の使用に限られているため、サイズの小さい腫瘍を照射する場合は、周辺組織に対する被ばくのリスクが増大する。結果的に、一時挿入法は永久挿入法の代替になることはできない。この現状を踏まえ、組織内照射の利点を継承しつつ、放射性同位元素を使用する小線源による腫瘍サイズの選択制限を克服するため、本研究では陽子線加速器を用いた注射針型 X 線源を提案した。加速器からの MeV 陽子線を注射針を通し、その先端にある金属標的に照射して特性 X 線を励起する。この注射針を腫瘍内に挿入することで、放出された特性 X 線を治療に使用できる。この線源で発生した X 線のエネルギーは金属標的の種類に依存するため、放射性同位元素を使用する小線源と比べてより多様なエネルギーを選択できる。また、同じ金属標的に対して、入射陽子ビームの強度を調整することで X 線の放出強度を変更できるため、サイズの小さい腫瘍に適応できる低エネルギーかつ高線量率の線源が原理的に可能となる。この方法との比較のために、電子線加速器を用いた肺がん治療用術中照射装置の例を紹介した。電子線と比べて、陽子線を一次励起線源として発生した X 線が高い単色性を持つことがこの装置のもう一つの特長である。一方、この方法の問題点の一つとして、線源の周りの線量分布が不明確であることを指摘した。そこで、この X 線源としての線量分布を正確にかつ定量的に評価する方法の確立を本研究の目的とした。

第二章「Experimental and calculational methods」では、本研究で行われた実験及び計算に関連する方法、原理、装置と設備について説明した。まず全ての実験の共通の基盤である東京工業大学先導原子力研究所のタンデム加速器の主要部分を紹介し

た。陽子ビームの発生からの順番に、スパッタイオン源、加速器本体、及び二種類の電磁石について、それぞれの構造と原理を説明した。次に本研究に使用されたモンテカルロシミュレーションツールである PHITS と Geant4 について、それぞれの機能や特徴を説明した。特に陽子線励起 X 線 (PIXE) の取り扱いにおいて両者の異なる点を比較した。第三節からは実際に行われた四つの研究の詳細を説明した。まず X 線検出器を注射針線源近辺の異なる位置に設置し、測定した X 線強度により線源の放出角度分布を求める実験について述べた。並行して PHITS シミュレーションにより実験同様な体系を作成し、X 線の角度分布を求める方法について説明した。次に X 線の空間的な分布を観測するため、液体シンチレーターと高感度 CCD カメラを用いて X 線照射による発光模様を撮影する実験について説明した。次に実験と計算を併用した手法として、“Pepper-pot”法による陽子ビームのエミッタンスを測定し、その結果を Geant4 プログラムに導入して注射針周辺の線量分布を計算する方法について述べた。最後にこれらの改良として線量率の絶対評価を目的とし、第二と第三の実験を組み合わせ、更に陽子ビーム電流の測定を追加した方法を説明した。この測定結果に基づいた Geant4 シミュレーション計算により実験条件下の線量率分布を正しく評価することができた。

第三章「Results and discussion」では前章で説明した四つの実験と計算の結果を示した。第一節では検出器で測定した X 線のスペクトル、規格化された X 線強度で表した角度分布、そして PHITS 計算による X 線の角度分布を示した。第二節では高感度 CCD カメラで撮影したシンチレーターの発光画像等を示した。バックグラウンドやノイズを考慮した画像処理や画像上の位置特定方法についても述べた。第三節ではビームエミッタンス測定の結果とそれを入力した Geant4 シミュレーション計算による注射針周辺の線量分布の計算結果を示した。第四節ではエミッタンス測定、液体シンチレーター撮影と Geant4 シミュレーションの結果に加え、陽子ビーム電流測定に基づいた線量率の定量評価も示した。

第四章「Conclusions」は、本研究で得られた結論及び今後の見通しについてまとめた。結果として四つの実験・計算より、この X 線源が高い単色性を持つことが確認できた。そして、陽子ビームのエミッタンスと電流の実験的測定を Geant4 シミュレーション計算と併用する手法は線量分布の定量評価において有効であることが分かった。更に、線量率は治療に十分なレベルにまで増強することを今後の主な課題として指摘し、その解決策についても議論した。