

京都大学	博士 ( 工 学)	氏名	呼 尚 徳
論文題目	Establishment of quality assurance and quality control measures for Boron Neutron Capture Therapy using microdosimetry (マイクロドジメトリを利用したホウ素中性子捕捉療法のための品質保証・品質管理手法の確立)		
(論文内容の要旨)			
<p>本論文は、粒子線治療の一種である「ホウ素中性子捕捉療法(BNCT)」に関する物理学・医学物理学の中で、中性子照射場の品質保証・品質管理(QA/QC)、特に線質評価に着目したものである。3種類の検出器を用いたマイクロドジメトリ線質評価手法について検討を行い、その成果をまとめたものであり、6章からなっている。</p> <p>第1章は緒論であり、がんの放射線治療における BNCT の位置づけ、BNCT の原理および歴史的背景、原子炉および加速器ベース BNCT の現状、マイクロドジメトリおよび放射線生物学モデル、BNCT における QA/QC のための最近の試み、BNCT における線量計算手法、等について解説するとともに、本研究の目的を提示している。特に、BNCT へのマイクロドジメトリ線質評価手法の適用に関する現状および改善点について詳細に記述し、本研究の重要性を明確にしている。</p> <p>第2章は、マイクロドジメトリに関する詳説である。本研究の第3章および第4章で使用する2種類の検出器、組織等価比例計数管(TEPC)および Silicon-on-insulator (SOI) microdosimeter の詳細とともに、第5章で使用する検出器、3D mushroom microdosimeter の根幹技術である三次元検出技術について記述している。</p> <p>第3章では、「TEPC を用いた BNCT マイクロドジメトリ線質評価手法に関する検討」について報告している。TEPC は、生体組織に等価な壁材およびガスを用いた比例計数管であり、粒子線治療におけるマイクロドシメトリに用いられている。</p> <p>本章では、TEPC の BNCT への適用可能性について、京都大学複合原子力科学研究所(KURNS)の原子炉ベース照射場および青森県量子科学センター(QSC)の加速器ベース照射場という線質の異なる2つの BNCT 研究用照射場において行った実験的評価およびその結果について記述している。ミクロなエネルギー付与の観点から照射場間の違いを明確にできることを示している。また、解析シミュレーションとの組み合わせにより、生物学的効果比(RBE)の評価にも有効であることを明らかにしている。</p> <p>第4章では、「SOI microdosimeter を用いた BNCT マイクロドジメトリ線質評価手法に関する検討」について報告している。SOI microdosimeter は、豪州 University of Wollongong (UOW)のグループが開発している特殊な検出器である。薄いシリコン半導体上に細胞サイズの直方体型の領域を多数有する構造をしており、細胞レベルでの線量付与を評価できる。炭化ホウ素(B<sub>4</sub>C)コンバーターと組み合わせることにより、BNCT において重要な B-10(n, α)li-7 反応に関する線質評価も期待できる。</p> <p>本章では、SOI の BNCT への適用可能性について、シミュレーション計算を主体に行った検討およびイオンビームを用いた基礎実験ならびにそれらの結果について記述している。BNCT におけるマイクロドシメトリのためには、シリコン半導体の厚さは現行</p>			

京都大学	博士 (工学)	氏名	呼 尚 徳
------	---------	----	-------

の  $10\ \mu\text{m}$  から、 $2\ \mu\text{m}$  程度に薄くする方が有効であること等を明らかにしている。

第 5 章では、「3D mushroom microdosimeter を用いた BNCT マイクロドジメトリ線質評価手法に関する検討」について報告している。3D mushroom microdosimeter は、上記の第 4 章で使用した SOI microdosimeter の直方体型の増感領域を円柱型に改良したものであり、形状的により正確な 3D でのマイクロドシメトリが期待できる。

本章では、3D mushroom microdosimeter の BNCT への適用可能性について、シミュレーション計算を主体に行った検討およびその結果について記述している。本検出器によるマイクロドシメトリの有効性を明らかにするとともに、増感領域にホウ素をドーピングした検出器を用いることでホウ素薬物によるミクロなエネルギー付与の効果を評価できる可能性も示している。

第 6 章は総括であり、本論文で得られた成果について要約している。本論文の成果を踏まえて、BNCT における QA/QC へのマイクロドジメトリに関して、以下の 3 点を強調している。

- (1) TEPC により吸収線量、線質係数、RBE 等の定量評価が可能である。
- (2) TEPC による中性子照射場の線質評価は可能であるが、長時間の測定を要することから日常的 QA には向かない。
- (3) SOI microdosimeter は、TEPC よりも感度が良く、日常的 QA により向いている。

## (論文審査の結果の要旨)

本論文は、粒子線治療の一種である「硼素中性子捕捉療法(BNCT)」に関する物理工学・医学物理研究の一環として、中性子照射場の品質保証・品質管理(QA/QC)、特に線質評価に着目し、3種類の検出器を用いたマイクロドジメトリ線質評価に関する検討を行い、その成果をまとめたものである。得られた主な成果は次のとおりである。

1. 陽子線や炭素イオン線等を用いた粒子線治療においては、組織等価比例計数管(TEPC)によるマイクロドジメトリ線質評価が行われている。本論文では、BNCTにおけるマイクロドジメトリ線質評価にもTEPCが適用可能であり、生物学的効果比(RBE)の評価に有効であることを明らかにした。原子炉ベースおよび加速器ベース、2つのタイプのBNCT照射場においてTEPCを用いた実験を行い、ミクロなエネルギー付与の観点から照射場間の違いを明確にできた。
2. 上述のTEPCによりホウ素を含まない細胞に付与される線量評価は可能であるが、BNCTで重要となる $B-10(n, \alpha)Li-7$ 反応に関する線量評価はできない。本論文では、豪州 University of Wollongong (UOW)のグループが開発している特殊なマイクロドジメトリ検出器である Silicon-on-insulator (SOI) microdosimeter と炭化ホウ素( $B_4C$ )コンバーターを組み合わせることにより、 $B-10(n, \alpha)Li-7$ 反応による寄与も含めた線量・線質評価が可能となることを明らかにした。シミュレーション計算およびイオンビームを用いた基礎実験により、SOI microdosimeter で用いられているシリコン半導体の厚さの最適化を行い、BNCTにおけるマイクロドシメトリのためには $2\mu m$ 程度のものが有効であることを示した。
3. 3D mushroom microdosimeter は、上述のSOI microdosimeter を改良したものであり、三次元的なマイクロドジメトリが期待できるものである。本論文では、シミュレーション計算を主体にした検討により、3D mushroom microdosimeter がBNCTにおけるマイクロドジメトリ線質評価に有効であることを明らかにした。3D mushroom microdosimeter の増感領域にホウ素をドーピングすることで、 $B-10(n, \alpha)Li-7$ 反応によるミクロなエネルギー付与による効果を評価できることを示した。

本論文は、BNCTに関するマイクロドジメトリ線質評価について詳細に検討したものであり、学術上、実際上寄与するところが少なくない。よって、本論文は博士(工学)の学位論文として価値あるものと認める。また、令和2年2月20日、論文内容とそれに関連した事項について試問を行った結果、合格と認めた。

要旨公開可能日： \_\_\_\_\_ 年 \_\_\_\_\_ 月 \_\_\_\_\_ 日以降