

氏 名	ベングア ジェラード Bengua Gerard
学位(専攻分野)	博 士 (工 学)
学 位 記 番 号	工 博 第 2797 号
学位授与の日付	平 成 19 年 3 月 23 日
学位授与の要件	学 位 規 則 第 4 条 第 1 項 該 当
研 究 科 ・ 専 攻	工 学 研 究 科 原 子 核 工 学 専 攻
学位論文題目	Evaluation of the near threshold ${}^7\text{Li}(p, n){}^7\text{Be}$ accelerator-based irradiation system for BNCT-A treatable protocol depth (TPD)-based characterization of neutron fields- (加速器を用いた ${}^7\text{Li}(p, n){}^7\text{Be}$ 反応のしきい値近傍中性子のホウ素中性子捕捉療法用照射システムの評価—治療プロトコルによる治療深さを指標にした中性子照射場の特性評価—)
論文調査委員	(主 査) 教 授 丸 橋 晃 教 授 伊 藤 秋 男 助 教 授 古 林 徹

論 文 内 容 の 要 旨

本論文は、加速器を用いた中性子捕捉療法用中性子照射システム（発生中性子を減速して利用するタイプと直接利用するタイプがある）の内、 ${}^7\text{Li}(p, n){}^7\text{Be}$ 反応のしきい値（1.881MeV）近傍で発生する中性子を用いた直接利用タイプについて、その照射場特性を評価する方法を提案し、それを用いて中性子捕捉療法用照射場の照射特性を評価したものであって、5 章からなっている。

第 1 章は序論であり、中性子捕捉療法の主に医学物理学に関係する歴史や現状に関する説明を通じて本研究の背景や意義を説明した上で、本論文の位置付け、目的を明確にしている。

第 2 章では、 ${}^7\text{Li}(p, n){}^7\text{Be}$ 反応のしきい値近傍で発生する中性子を中性子捕捉療法に直接利用する方法の一つである Boron Dose Enhancer (BDE) について、候補となる BDE 物質 $(\text{C}_2\text{H}_4)_n$, $(\text{C}_2\text{H}_3\text{F})_n$, $(\text{C}_2\text{H}_2\text{F}_2)_n$, $(\text{C}_2\text{HF}_3)_n$, $(\text{C}_2\text{D}_4)_n$, $(\text{C}_2\text{F}_4)_n$, Beryllium, Graphite, D_2O と ${}^7\text{LiF}$ を 1.900 MeV の単色の陽子入射の場合を取り上げて系統的に検討している。この検討を行うために、中性子捕捉療法用中性子照射場の特性を評価する指標として TPD (Treatable Protocol Depth: 治療の線量プロトコルに対応した治療できる深さ) を提案し導入している。この TPD 評価方法を実用的に用いる具体的な一例として、BDE 物質とその厚みの関係、TPD が最大となる条件における利用できる中性子強度と陽子電流の関係など、実用的な観点からの検討を加えた結果、BDE 物質として、Beryllium 金属と $(\text{C}_2\text{D}_4)_n$ が優れていることを示している。次に、中性子捕捉療法時の線量評価に関するプロトコル（腫瘍部の治療線量、正常部位の耐用線量）に対応して導入した TPD の有用性について、(1)中性子照射場の性能を治療できる深さという定量化して評価できること、(2)治療に即した状態の指標で評価が出来き、線量プロトコルの変化の影響を予測できること、（従来は基準となる線量プロトコルが変化した場合の相互の比較をすることに困難があった）など、極めて実用的な観点の中性子捕捉療法用中性子照射場の評価法になりえることを示している。

第 3 章では、しきい値近傍の発生中性子の入射陽子エネルギーの依存性を 1.885 MeV から 1.920 MeV までの陽子について検討している。2 章ではターゲットに入射する陽子のエネルギーを 1.900 MeV（単色）と固定していたが、しきい値近傍で発生する中性子は前方方向に強く、また、その発生数も入射陽子のエネルギーに大きく依存することから、そのエネルギーを変化させた場合の検討を行っている。検討結果は、腫瘍の表面からの深さや腫瘍のホウ素濃度に依存した最適な条件が存在することを示しており、しきい値近傍の入射陽子エネルギーの最適化に対して一つの実用的な評価基準を示している。すなわち、加速器に求められる必要な陽子電流との関係から、実的に最適な陽子エネルギーが選択できること、またその最適な条件の求め方が治療条件に依存して決められることについて例を挙げて示している。

第 4 章では、TPD 評価法を用いて、実用的な観点から次の 2 つを検討している。①入射陽子エネルギーを 1.900 MeV と

固定した時の Li ターゲット厚さに関する検討, ② Li ターゲット厚さを2.33マイクロメートルに固定し, 入射陽子エネルギーの平均エネルギーは1.900 MeV でガウス分布をしている場合の検討, である。①は, しきい値近傍の中性子の直接利用で重要となる, ${}^7\text{Li}(\text{p}, \text{p}\gamma){}^7\text{Li}$ 反応のガンマ線の影響を小さくするためターゲットの厚みを薄くすることと, ターゲットの寿命を長くするため厚いターゲットにするという, 2つの相反する条件の中での許容条件を明らかにしている。②は, 実在する加速器からの陽子エネルギーにはエネルギーの広がりがあることに対応して, 実用的な観点から検討している。検討の結果, 現実的な加速器の性能を想定したしきい値近傍で発生する中性子の有用性と実現性があることを明らかにしている。論文では検討条件の一例についてのみ示しているが, 個別の設計検討条件に対応する評価を実施することによって, この手法が加速器を用いた中性子捕捉療法用照射システムの検討に有用であることを提案している。

第5章は結論であり, 本論文で得られた成果について要約している。

論文審査の結果の要旨

本論文は, 加速器を用いた中性子捕捉療法用照射システムとして検討されている発生中性子を直接利用するタイプと減速体系を利用するタイプの前者に関し, システム構成要素を因子として変化する照射場の照射特性を線量プロトコールに基づき統一的に評価する方法を提案し, ${}^7\text{Li}(\text{p}, \text{n}){}^7\text{Be}$ 反応のしきい値 (1.881 MeV) 近傍で発生する中性子を用いた中性子捕捉療法用中性子照射場の照射特性を実際的に評価したものである。得られた結果の概要は, 以下の通りである。

1. 中性子捕捉療法の治療時の線量プロトコールに対応する荷電粒子とガンマ線及び腫瘍と正常組織についてのプロトコール深度 (PD) から中性子照射場の評価法指標である TPD を提案しこれを用いる評価法の有効性を検証した。この方法により, 線量プロトコールが変化しても統一した基準で中性子照射場の評価が行えるようになった。

2. 上記の評価法を用いて, 1.900 MeV 単色陽子の ${}^7\text{Li}(\text{p}, \text{n}){}^7\text{Be}$ 中性子に対する各種のホウ素線量分布を改善するために使用する物質 (BDE 物質) の特性について検討し, 深在性腫瘍治療にはベリリウム金属などの水素を含まない軽元素物質が, 浅在性腫瘍治療にはポリエチレンなどの水素を多く含む物質が, 効果的なことを示した。

3. TPD とその深さでの線量率の関係から, しきい値近傍の入射陽子エネルギーの効果的な範囲を評価した。この方法により, 異なる治療条件に応じた最適な照射場の設定の可能性とその方法を示した。

4. 現実的な加速器からの陽子エネルギーの広がりについてガウス分布を仮定し 10keV 程度のエネルギーの広がりまで許容できることを示した。また, 中性子発生ターゲットの Li 金属の実用的な厚みについて検討し, 中性子捕捉療法に有効な厚みの範囲を示した。

本論文は, 加速器を用いた中性子捕捉療法用照射システムの照射特性を評価する場合において, 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, 平成19年2月1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。