

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成24年 5月 2日現在

機関番号：22101

研究種目：若手研究（B）

研究期間：2010～2011

課題番号：22791209

研究課題名（和文）陽子線治療における装置および患者から発生する中性子線量の弁別

研究課題名（英文）Distinction of neutron dose generated from equipment and patient in proton radiation therapy

研究代表者

藤淵 俊王（FUJIBUCHI TOSHIOH）

茨城県立医療大学保健医療学部・助教

研究者番号：20375843

研究成果の概要（和文）：2重散乱体式の陽子線治療装置から発生する2次中性子の線量を評価するため、高感度熱中性子検出器を開発した。さらにモンテカルロ計算により患者を想定した水ファントム中の中性子分布とエネルギースペクトルを評価した。評価の結果、ビーム軸中心から12 cmの距離での陽子線治療線量に対する中性子線量の比は3.6 mSv/Gyであった。陽子線治療における中性子被ばくは、装置からの中性子だけでなく、陽子線が人体に衝突することによることが確認された。

研究成果の概要（英文）：To evaluate of the neutron dose generated from the proton radiation therapy equipment of the double scattered type, the high sensitivity thermal neutron detector was developed. In addition, the neutron distribution and the energy spectrum were evaluated in the water phantom that assumed the patient by Monte Carlo calculation. As a result of the evaluation, the ratio of the neutron dose to the proton dose at isocenter in the distance from a beam axis center to 12 cm was 3.6 mSv/Gy. The neutron exposure in the proton radiation therapy depended on not only the neutron from the equipment but also the proton's colliding with the patient was confirmed.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	2,300,000	690,000	2,990,000
2011年度	900,000	270,000	1,170,000
年度			
年度			
年度			
総計	3,200,000	960,000	4,160,000

研究分野：医歯薬学

科研費の分科・細目：内科系臨床医学・放射線科学

キーワード：陽子線治療、中性子、線量分布

## 1. 研究開始当初の背景

がんはわが国の死亡原因の第1位を占め、

ほぼ3人に1人が癌で死亡している。がんの治療法として、機能・形態の温存ができ、侵

襲が少なく切らずに治せる放射線治療への期待がここ数年で明らかに高まっており、放射線治療患者数の増加は著しいものがある。そのような中、腫瘍にのみ投与線量を集中させ、かつ正常組織への線量を可能な限り減らす手法が求められ、深部線量に対し良好な線量分布を形成できる陽子線、重粒子線を用いた治療施設が年々増加している。

陽子線治療において、陽子線と装置ビームライン上の部品や患者との相互作用により二次的に中性子が発生する。中性子はエネルギーによりその生物効果比が異なり、患者の中性子被曝による障害や二次発がんのリスクが懸念される。特に小児腫瘍の根治を目的とした治療では余命が長いことからそのリスク評価は重要となる。IECなどで照射野内外の漏洩線・散乱線の許容値についてガイドラインが作成され、放射線防護上の観点からも中性子線量の把握は大きな意義をもつ。

陽子線治療において2次中性子の発生源は、加速された陽子線と装置の照射野整形部との衝突による核反応および、陽子線が患者に衝突することにより体内で核反応を起こし生じるものの2種類に大別される。陽子線治療装置は、加速器から送られてきた細いビームを腫瘍形状に合わせて拡張させるため、二重散乱体法、ワブリング法、スキャン走査法といった方式により整形する。この中で二重散乱体法が最も直接陽子線と衝突するため2次中性子の発生が多いとされているが、他の方式に比べどの程度中性子線量が異なるか、また患者自身からどの程度中性子が発生しているかというのは明確にされていない。

## 2. 研究の目的

本研究では、陽子線治療において患者に寄与する2次中性子のうち、装置および患者(ファントム)自身から発生する中性子フルエンスの分布およびエネルギースペクトルを評価し、中性子の発生源ごとに弁別したファントム内の中性子線量分布を解析する。この結果により、照射野整形方式による患者への中性子線量の違い、および陽子線治療により避けることのできない患者自身から発生する中性子線量がどの程度の割合を占めるかを明らかにする。

## 3. 研究の方法

### (1) 高感度熱中性子検出器の開発

陽子線治療において、陽子線とビームラインや患者との相互作用によって生じる2次中性子の患者体内での分布や挙動の評価は、治療精度および放射線誘発がんのリスク評価の観点から注目されている。患者に寄与する中性子は、陽子線と装置本体の相互作用によるものと、陽子線が患者に衝突することに

より体内で発生するものの2種類が考えられる。

$\beta$ 、 $\gamma$ 線用のIP (BAS-MS) とガドリニウムを塗布した中性子IP (BAS-ND) を用意し、一部をカドミウムで遮蔽することにより、熱中性子成分のPSL強度を換算式により弁別した。換算に当たり、各IPのフェーディング特性曲線を取得し補正した。測定精度の検証を行うため、産総研の熱中性子標準場 (Am-Be 黒鉛パイプ) で  $1.2 \times 10^6$  / $\text{cm}^2$  照射した後、2、4 mGy の光子 (6 MeV) を追加照射し、各照射条件での中性子PSL強度を比較した。

### (2) 陽子線治療場での中性子分布の評価

陽子線治療場で、人体を想定した水槽 ( $24 \times 24 \times 24$  cm<sup>3</sup>) に1 Gy照射した際の水槽周囲の熱中性子フルエンスをIP検出器で測定した。さらにモンテカルロ計算による装置および陽子線を照射した水ファントムからの中性子エネルギースペクトルや中性子線量の評価を行った。シミュレーションはファントムが水の場合および空気の場合で比較した。

## 4. 研究成果

### (1) 高感度熱中性子検出器の開発

中性子- $\gamma$ 線混合場で照射したIPに対し、フェーディング補正したPSL値を式によって中性子と光子に弁別した(図1)。

この結果から中性子- $\gamma$ 線混合場で中性子成分を精度よく弁別できることが確認できた。IPの読取値の変動係数は、 $\pm 5.7\%$ であった。

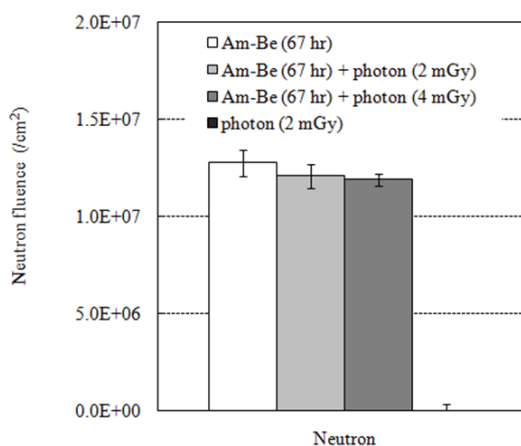


図1 中性子- $\gamma$ 線混合照射におけるIP中性子検出器による熱中性子フルエンス評価結果。

### (2) 陽子線治療場での中性子分布の評価

#### ① IP 中性子検出器位置での中性子エネルギースペクトル

IP 検出器位置における中性子スペクトルを図2に示す。中性子のエネルギーは、加速

した陽子と同じ 200 MeV から熱中性子までの連続スペクトルであることが確認できた。また、水との非弾性散乱により、熱中性子にピークを持つことが確認できた。

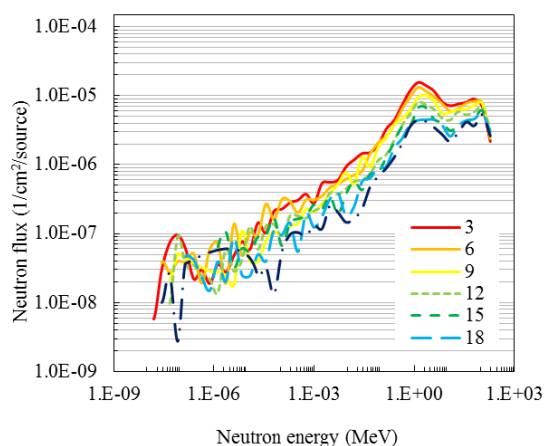
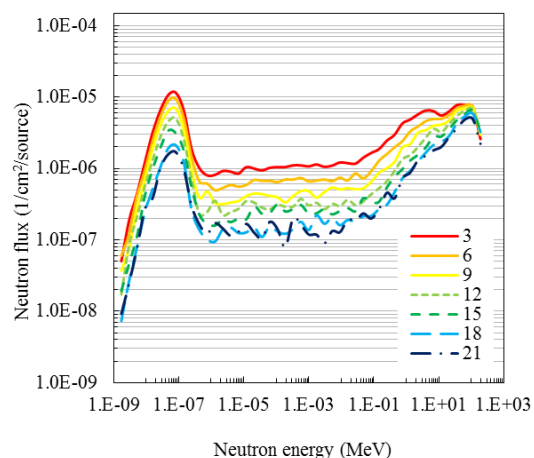


図2 モンテカルロ計算による IP 中性子検出器位置での中性子エネルギースペクトル。上段：ファントムを水として計算、下段：ファントムを空気として計算。

②IP 中性子検出器位置におけるエネルギー領域ごとの中性子フルエンス分布

ファントムを水および空気とした場合の IP 中性子検出器位置におけるエネルギー領域ごとの中性子フルエンス分布を図 3 にまとめた。0.5 eV 未満の低速中性子領域、0.5 eV から 0.5 MeV の中速中性子領域に、0.5 MeV 以上の高速中性子領域の 3 領域に区分した。この結果より、ファントムを空気にした場合で低速中性子のフルエンスが大きく減少していることが確認できた。また検出器位置による中性子フルエンスの減少は 2 から 3 倍程度であった。

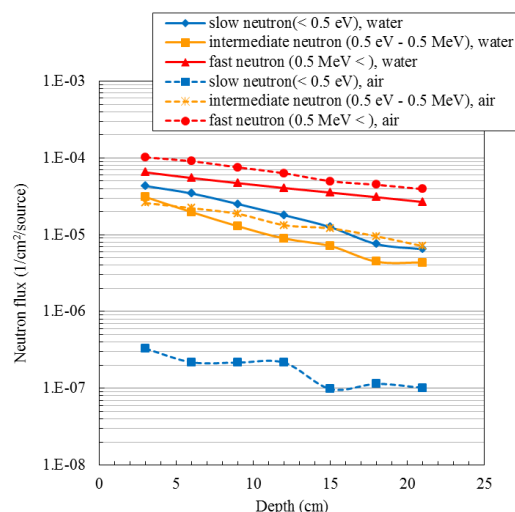


図3 IP 中性子検出器位置におけるエネルギー領域ごとの中性子フルエンス分布。到達した中性子のエネルギーを低速中性子領域 (0.5 eV 未満)、中速中性子領域 (0.5 eV から 0.5 MeV)、高速中性子領域 (0.5 MeV 以上) の 3 領域に区分している。

③深さ 3 cm の中性子検出器位置での中性子、光子、陽子のエネルギースペクトル

ファントム側面でビーム入射面から Z 方向へ 3 cm の位置での中性子検出器の中性子、光子、陽子のエネルギースペクトルを、図 4 に示す。ファントム組成が水の場合と空気の場合で比較した。陽子についてはほぼ同じスペクトルを示し、中性子、光子については組成が空気の場合で到達するそれぞれのフルエンスが減少していることが確認された。また、中性子、光子に比べ、陽子のフルエンスは約 2 桁値が小さいことが確認された。

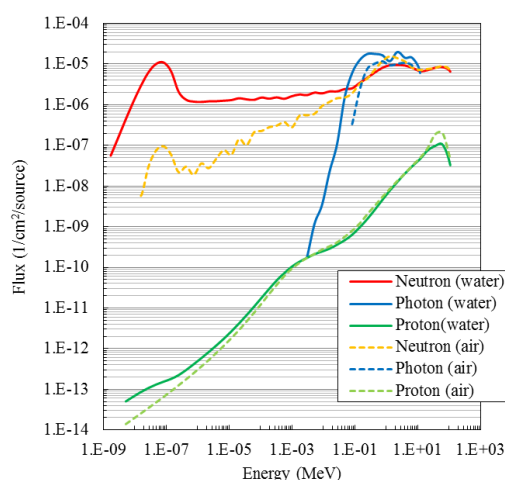


図4 深さ 3 cm の中性子検出器位置での中性子、光子、陽子のエネルギースペクトル。ファントムの材質が水の場合 (実線) と空気の場合 (破線) での比較。

④陽子線 1 Gy あたりのファントム表面での深さ方向の中性子線量

中性子スペクトルの計算結果と中性子線量当量換算係数を掛け合わせることで評価した、各検出器位置での深さ方向の中性子線量分布を図5に示す。横軸はファントム表面からの深さを示し、縦軸は陽子線の腫瘍へ与える線量 1 Gy あたりの各検出器位置での中性子線量当量を示す。陽子線治療装置のガントリに近いファントム表面が最も線量が高く、ビーム下流側に行くほど値は低くなることが確認された。

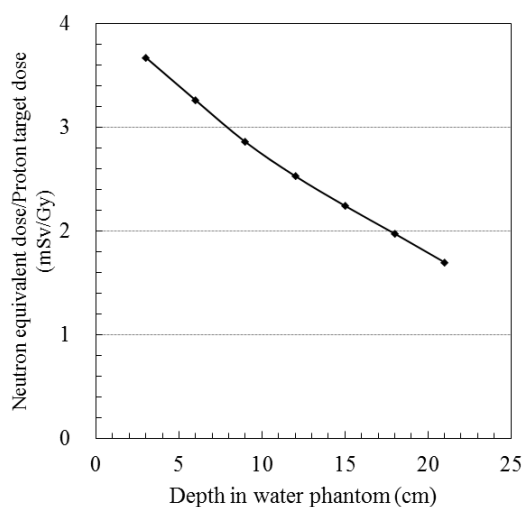


図5 陽子線 1 Gy あたりのファントム表面での深さ方向の中性子線量。

評価の結果、ビーム軸中心から 12 cm の距離での陽子線治療線量に対する中性子線量の比は 3.6 mSv/Gy となった。1 連の陽子線治療を想定し、60 Gy を患者に照射したと仮定した場合、中性子による被ばくはその位置において 216 mSv になる。ICRP 2007 年勧告で示されている発がんリスクである 0.05 /Sv を直線仮説に当てはめると、1.1%のリスク増加ということになるが、全身の平均線量はより低くなり、リスクも 1%以下であるといえる。

本研究において、小型で高感度な熱中性子検出器を開発することにより、陽子線治療時に場を乱すことなく中性子分布をモニタリングすることを可能とした。ファントム実験ではあるものの IP 熱中性子検出器は中性子分布の評価に臨床応用可能なことが示された。中性子線量の評価については、今後モンテカルロ計算により個別の患者の陽子線治療計画が行えるようになれば、治療計画の計算結果と実測値を相互に利用することで、実測値を加味した精度の高い中性子線量の評

価やリスク評価が可能となり、陽子線治療の品質管理水準のさらなる向上が期待できる。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 1 件)

- ① Toshioh Fujibuchi, Yu Tanabe, Takeji Sakae, Toshiyuki Terunuma, Tomonori Isoe, Hiraku Kawamura, Kiyoshi Yasuoka, Tetsuro Matsumoto, Hideki Harano, Jun Nishiyama, Akihiko Masuda, Akihiro Nohtomi, Feasibility study on using imaging plates to estimate thermal neutron fluence in neutron-gamma mixed fields, Radiation Protection Dosimetry, 査読有, 147, 2011, 394-400

[学会発表] (計 2 件)

- ① 藤淵俊王, 榮武二, 磯辺智範, 熊田博明, 照沼利之, 川村拓, 安岡聖, 松本哲郎, 原野英樹, 西山潤, 増田明彦, 納富昭宏, 陽子線治療におけるイメージングプレートを利用した中性子フルエンス簡易評価法, 第 71 回応用物理学会学術講演会, 2010 年 9 月 16 日, 長崎
- ② 藤淵俊王, 榮武二, 磯辺智範, 熊田博明, 照沼利之, 川村拓, 安岡聖, 松本哲郎, 原野英樹, 西山潤, 増田明彦, 納富昭弘, 粒子線治療におけるイメージングプレートを利用した中性子フルエンス簡易評価法, 第 25 回放射線検出器とその応用研究会, 2011 年 2 月 3 日, 筑波

6. 研究組織

(1) 研究代表者

藤淵 俊王 (FUJIBUCHI TOSHIOH)  
茨城県立医療大学保健医療学部・助教  
研究者番号: 20375843