

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 2 年 6 月 11 日現在

機関番号：82502

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2017～2019

課題番号：17K18374

研究課題名(和文) エネルギースペクトル可変中性子照射場の開発に関する研究

研究課題名(英文) Development of a radiation field with variable neutron energy spectrum

研究代表者

米内 俊祐 (Yonai, Shunsuke)

国立研究開発法人量子科学技術研究開発機構・放射線医学総合研究所 物理工学部・グループリーダー(非常)

研究者番号：00415431

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,400,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は、炭素線治療を受けた患者の医療被ばくの原因となる二次中性子に着目したものである。特に、2次がんリスクを予測するためのモデル構築に不可欠な生物実験を実現するため、エネルギースペクトル(エネルギー分布)可変中性子照射場の概念設計と実験的検証を行うことを目的とした。本研究により、炭素線治療室内の位置により異なるエネルギースペクトルを模擬する照射場を大掛かりで複雑な照射装置を用いることなく構築可能であることをシミュレーション計算で明らかにすることができた。また、実験的検証により、シミュレーション計算の妥当性を示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

中性子による生物影響は中性子エネルギーに大きく依存するため非常に複雑である。本研究により今後、炭素線治療における二次中性子による生物影響を明らかにするための実験を実現する照射場を構築できることが明らかになった。本研究では炭素線治療をターゲットとして研究を進めたが、同じ手法を用いることで他への応用も期待できる。

また、国内では、MeVからGeVオーダーに及びエネルギーの高い中性子について照射場や校正場が整備されておらず、この研究成果を用いて高エネルギー中性子に対する照射場、校正場を構築することにより、検出器開発研究等の様々な物理研究の発展を促進することが期待できる。

研究成果の概要(英文)：This study focused on the secondary neutrons that cause medical exposure of patients received carbon ion radiotherapy. In particular, in order to realize biological experiments that are essential for establishing a model for predicting secondary cancer risk, we aimed to perform conceptual design including the feasibility study and its experimental verification of a radiation field with a variable neutron energy spectrum. Our simulation study showed that it is feasible to construct a radiation field that simulates different energy spectra depending on the position in the treatment room for carbon ion radiotherapy without using large-scale and complicated irradiation devices. Moreover, the validity of the simulations was shown by the experimental verification.

研究分野：医学物理学

キーワード：neutron radiation field secondary neutron Monte Carlo Bonner sphere system WENDI-II

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

放射線治療では潜在的に治療部位以外にも放射線が照射されるため、治療後の晩発影響リスク、特に二次がんリスクが存在する。光子線治療については、生物実験や治療患者データを用いた疫学研究を基に線量と二次がんリスクの関係を示唆する研究結果が発表されている。[1,2] 一方、近年、普及が進んでいる陽子線や炭素線を用いた粒子線治療では、患者の被ばく線量評価は行われているものの、二次がんリスクの定量的評価は行われていない。これは、粒子線治療が比較的新しい治療であるため、疫学的なアプローチが困難であること、また、晩発影響リスクに関する生物実験が十分な行われていないためである。特に、治療ビームである荷電粒子と照射機器との相互作用で生成する二次中性子に起因する二次がんリスクの評価は複雑である。この理由は、中性子はエネルギーによって人体影響が異なることにある。[3]つまり、広いエネルギー分布を有する実際の治療場で評価を行う際には、各エネルギーに対応した線量-リスクモデルや生物学的効果比(RBE)が必要になる。中性子に対するリスク評価やRBE評価のための生物実験はこれまでも多くの発表がなされている。しかし、そのほとんどすべては数 MeV 以下の中性子に対するものであり、数百 MeV まで生成する粒子線治療場では不十分である。このような現状において、一つの解決法は評価対象の中性子場で直接、生物実験を行うことであるが、実際の治療室で生物実験を行うことは時間の制約等により難しく、また、現在まで、模擬照射場は存在していない。

2. 研究の目的

本研究の最終的な目的は、炭素線治療場で生成される二次中性子のエネルギースペクトルを模擬するためのエネルギースペクトル可変中性子照射場を開発することである。本研究では、モンテカルロ計算を用いた概念設計(1)とその実験的検証(2)を目的とした。

(1) モンテカルロ計算を用いた概念設計

モンテカルロシミュレーションを用いて様々なターゲットから生成する中性子エネルギースペクトルの特徴を明らかにし、それらの特徴の組み合わせやフィルターを組み合わせることにより様々な形状のエネルギースペクトルが構築可能であることを明らかにすること。また、量子科学技術研究開発機構、放射線医学総合研究所(放医研)の拡大ビーム法を用いた炭素線治療場を例として、中性子エネルギースペクトルを再現するターゲットの組み合わせやフィルターを設計することを目的とする。

(2) 実験的検証

設計したターゲットやフィルターを試作し、構築した中性子照射場でエネルギースペクトル等の物理量を測定し、設計値と実験値を比較することで実験的検証を行うことを目的とする。

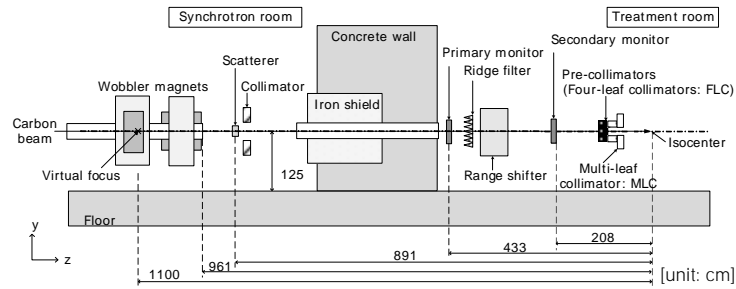
3. 研究の方法

(1) モンテカルロ計算を用いた概念設計

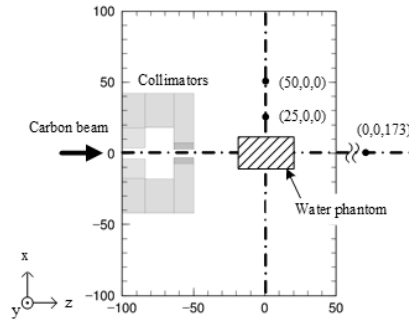
本研究はモンテカルロコード、PHITS[4]を用いて行った。炭素線入射により生成される二次中性子は角度依存性、ターゲット依存性を持つため、[5]数種類のターゲット材質から生成する中性子エネルギースペクトルの角度依存性を調査した。ターゲット候補として、二次中性子放出の角度依存性が原子番号(Z)に依存することを考慮して、PMMA、炭素、アルミニウム、鉄、タンタル、鉛を選択した。次に、ターゲットから生成された中性子を減速材等のフィルターに通過させることにより、模擬する炭素線治療場の中性子エネルギースペクトルを再現できるかどうか検討した。フィルターの候補として、低エネルギー中性子、高エネルギー中性子それぞれについて、それぞれ水素を含む低 Z フィルターと高 Z フィルターを候補とした。本研究では、前者についてはポリエチレンを仮定した。後者については、前述の中性子生成ターゲット選択において、最終的に Z ターゲットを選択したため、ターゲットの大きさを変えることでターゲット自身の減速効果を利用することとした。最終的に候補としたターゲット材、フィルター厚さ、ビーム軸からの角度毎に計算した中性子エネルギースペクトルのデータセットを作成し、放医研、HIMAC 治療室内(Fig.1)の中性子エネルギースペクトルの再現性を平方平均二乗誤差率(RMSPE)、平均絶対誤差率(MAPE)を用いて評価することにより、最も再現性の高いターゲット材、フィルター厚さ、ビーム軸からの角度の組み合わせを選択した。

(2) 実験的検証

概念設計で得た中性子生成ターゲット、フィルターを用いて構築した中性子照射場で高エネルギー中性子用レムカウンター:WENDI-II 検出器、Bonner sphere 検出器、及び組織等価型比例計数管を用いて、中性子エネルギースペクトルの可変性の確認及び設計値と実験値を比較することによる実験的検証を行った。図2に実験体系を示す。後述のように、概念設計においては最適化を行うパラメータを最小化するため、中性子生成ターゲット、高エネルギー中性子減速フィルターを半球型としたが、本実験においては加工性及び設置の容易さから円筒形及び直方体とした。



a) 照射機器配置図



b) アイソセンター周辺の計算体系

($(0,0,173)$, $(25,0,0)$, $(50,0,0)$)は本研究で中性子エネルギースペクトルを模擬する位置を示しており、それぞれ図に示す座標 (x,y,z) に対応している。 $y=0$ はビーム高さであり、床から125cmである。)

図1：放医研、拡大ビーム法を用いた治療室内の概略図



a) ターゲット及び減速フィルター

b) Bonner Sphere 検出器を用いた実験

図2：実験体系

4. 研究成果

(1) モンテカルロ計算を用いた概念設計

検討の結果、図3に示すように高エネルギー中性子減速フィルターを兼ねた中性子生成ターゲットを半球とし、その半径(R)と低エネルギー整形フィルターの厚さ(t)及びビーム軸との角度(ϕ)を最適化することで中性子エネルギースペクトル形状を可変にできることを明らかにした。最終的に、中性子生成ターゲットとして鉄を低エネルギー整形フィルターとしてポリエチレンを用いることにより、炭素線治療場内の中性子エネルギースペクトルを模擬することが可能という結論を得た。研究成果の例として、図1、b)に示す位置のモンテカルロシミュレーション計算による中性子エネルギースペクトルとそれを模擬した中性子エネルギースペクトル計算値の比較を図4に示す。また、表1に炭素線治療室内及び模擬した照射場内における中性子の放射線加重係数を示す。これらの結果から、模擬照射場が治療場内の中性子エネルギースペクトルを再現可能であることが明らかになった。

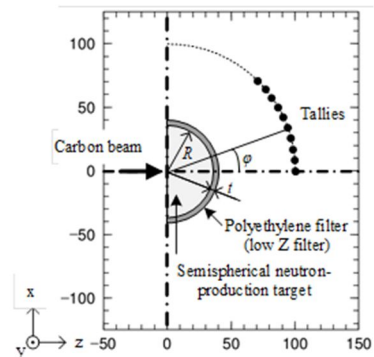


図3：中性子エネルギースペクトルの最適化を検討するための計算体系

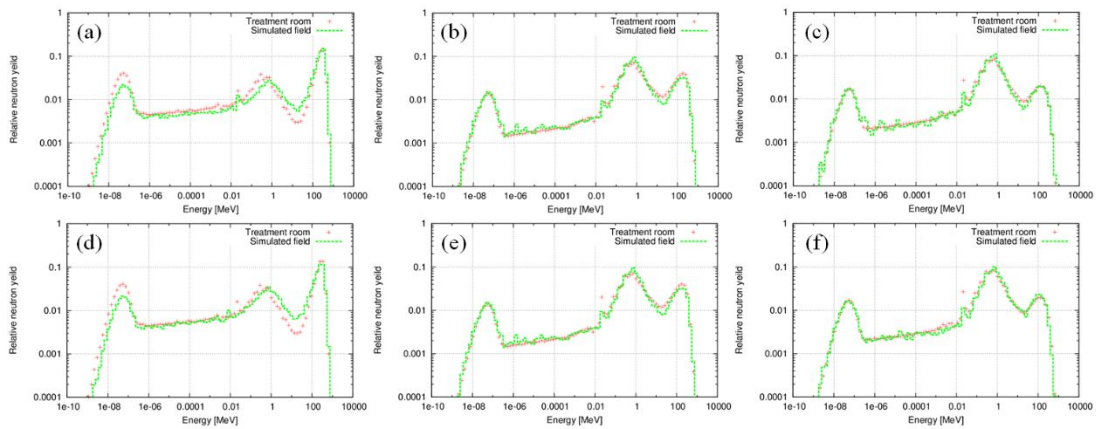


図 4: モンテカルロシミュレーション計算による中性子エネルギースペクトルとそれを模擬した中性子エネルギースペクトル計算値の比較 ((a), (b), (c)は RMSPE、(d), (e),(f)は MAPE によって得られた結果である。(a)と(d)、(b)と(e)、(c)と(f)はそれぞれ図 1、b)の (0, 0, 173), (0, 0, 25), (0, 0, 50) の位置に対応している。)

表 1: RMSPE 及び MAPE で得られた中性子生成ターゲット兼高エネルギー減速フィルターの半径 (R, t, φ は図 3 を参照)

HIMAC treatment room		RMSPE				MAPE			
Position (図 1 b))	W_R	R	t	φ	W_R	R	t	φ	W_R
		[cm]	[cm]	[deg]		[cm]	[cm]	[deg]	
(0, 0, 173)	6.4	25	3.0	0	6.5	25	3.0	5	7.1
(25, 0, 0)	11.1	25	0	20	11.0	25	0	20	11.0
(50, 0, 0)	11.8	30	0	30	12.5	25	0	35	12.4

(2) 実験的検証

結果の一例として、図 5 に高エネルギー中性子用減速フィルター:20cm 厚を用いた場合の Bonner Sphere 検出器及び WENDI-II 検出器の計数率を示す。この図では、左から右に行くほど高エネルギー中性子にレスポンスが高く、低エネルギー中性子用フィルターの厚さおよびビーム軸との角度を変えることで中性子エネルギースペクトル形状を調整できることを実験的に確認した。また、図 6, 7 にこれらの計数率及び Gravel コード[6]を用いてアンフォールディングした実験値とモンテカルロコード PHITS の計算値の比較を示す。これらの結果から、シミュレーション計算で確認した高エネルギー中性子フィルター、低エネルギー中性子フィルターの組み合わせ及びビーム軸からの角度を変更することで 1MeV 付近、100MeV 付近のピークを変化させることが可能なことを実験的に示し、中性子エネルギースペクトルの可変性を実証した。また、計算値は実験値を過大評価する傾向が観察され、これは、熱中性子領域など低エネルギーになるほど顕著であり、シミュレーション計算における室内散乱の模擬に改善が必要であることを示唆した。しかしながら、これは本研究の目的である中性子エネルギースペクトルの可変性には影響しない。

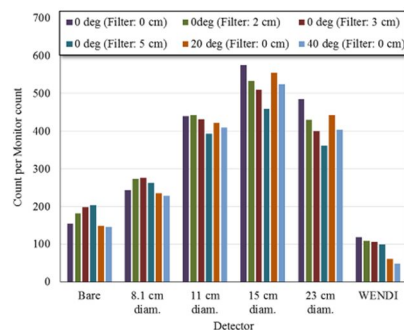


図 5: 高エネルギー中性子用減速フィルター:20cm 厚を用いた場合の Bonner Sphere 検出器及び WENDI-II 検出器の計数率 (凡例はビーム軸との角度及び低エネルギー中性子用フィルターの厚さを示す。)

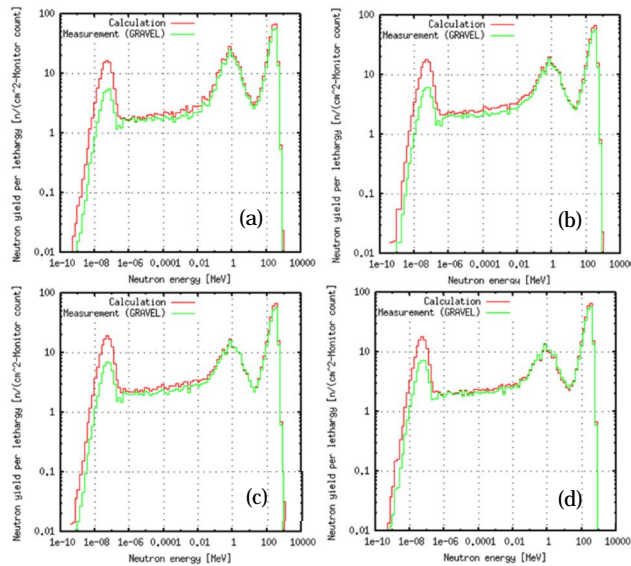


図6：ビーム軸からの角度0度における実験値とモンテカルロコード PHITS の計算値の比較 ((a), (b), (c), (d)はそれぞれ低エネルギー整形フィルター厚さ：0,2,3,5cm に対応する。)

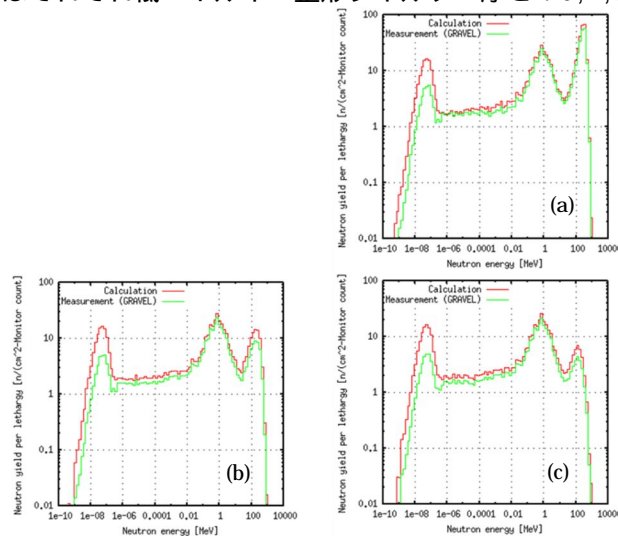


図7：低エネルギー整形フィルター厚さ0cmにおける実験値とモンテカルロコード PHITS の計算値の比較 ((a), (b), (c)はそれぞれビーム軸との角度：0, 20, 40度に対応する。)

<参考文献>

- [1] National Council on Radiation Protection and Measurements (NCRP). Report 170. 2011.
- [2] Diallo I, et al.: Frequency distribution of second solid cancer locations in relation to the irradiated volume among 115 patients treated for childhood, Int. J. Radiation Oncology Biol. Phys. 74(3), 876-883, 2009.
- [3] Hall E, et al.: RBE as a function of neutron energy, I. Experimental observations, Radiat. Res. 255, 245-255, 1975.
- [4] Sato T, et al.: Particle and Heavy Ion Transport code System, PHITS, version 2.52, J. Nucl. Sci. Technol. 50, 913-23, 2013.
- [5] Kurosawa, T, et al.: Measurements of secondary neutrons produced from thick targets bombarded by high-energy helium and carbon ions. Nucl. Sci. Eng. 132, 30-57, 1999.
- [6] Reginatto, M., The "Few-channel" Unfolding Programs in the UMG Package: MXDFC33, GRVFC33 and IQUFC33, UMG Package. Version 3.3, Release Date 1 March 2004.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件／うち国際共著 0件／うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Yonai Shunsuke, Matsumoto Shinnosuke	4. 巻 172
2. 論文標題 Monte Carlo study toward the development of a radiation field to simulate secondary neutrons produced in carbon-ion radiotherapy	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Radiation Physics and Chemistry	6. 最初と最後の頁 108787
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.radphyschem.2020.108787	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

〔学会発表〕 計3件（うち招待講演 0件／うち国際学会 2件）

1. 発表者名 Shunsuke Yonai
2. 発表標題 Conceptual design of reference radiation field simulating secondary neutrons during carbon-ion radiotherapy
3. 学会等名 World Congress on Medical Physics & Biomedical Engineering（国際学会）
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 米内俊祐
2. 発表標題 Feasibility study on the development of neutron field simulating neutron energy spectra in the CIRT treatment room
3. 学会等名 第118回日本医学物理学学会学術大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Shunsuke Yonai
2. 発表標題 Monte Carlo study for development of a radiation field simulating secondary neutrons produced in carbon-ion radiotherapy
3. 学会等名 3rd International Conference on Dosimetry and Applications（国際学会）
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
--	---------------------------	-----------------------	----