

# ホウ素中性子捕捉療法における 深部がん治療のための中性子ビーム特性評価

環境エネルギー工学専攻 エネルギー量子工学コース  
量子反応工学領域 村田研究室 守實 友梨

## 1. 背景

近年がんの治療成績は向上しつつあるが、深部がんにおける治療成績は未だ低迷している。ホウ素中性子捕捉療法(Boron Neutron Capture Therapy, BNCT)はホウ素と中性子による核反応を用いた低侵襲かつ腫瘍細胞選択性を持つがん治療法<sup>1</sup>であり、深部がんへの応用が期待されている。一方で、中性子の減衰や治療基準の不明瞭さにより、BNCTにおける治療可能深さは6 cm程度が限界である。BNCTにおける深部腫瘍治療の実現のために、中性子源や照射条件の観点から照射プロトコルの開発を行う。本研究ではその第一段階として、中性子ビームの特性の評価及び治療線量計算体系の確立を行った。

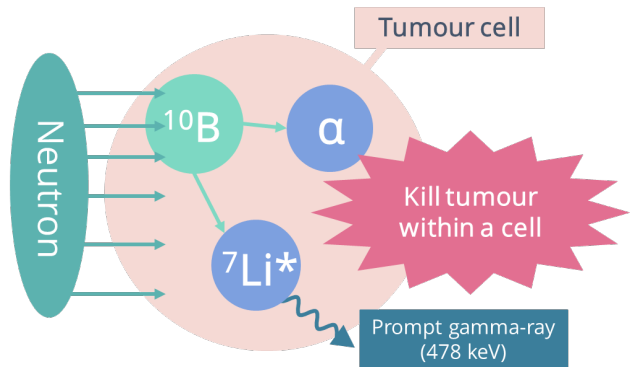


図1：ホウ素中性子捕捉療法  
(Boron Neutron Capture Therapy: BNCT)  
の概要

## 2. 実験方法

### 2.1 数値計算手法

頭部腫瘍における治療線量の傾向を調査するために、Snyder Head Phantomと呼ばれる人体頭部ファントムモデルを使用し、中性子ビームの3つの要素である(1) ビーム半径 (2) エネルギー (3)カレントフラックス比(CF)を変えた際の線量効果について計算・評価した。腫瘍は直径1 cmのものを想定し、頭部表面から深部まで移動した時の腫瘍線量の傾向についても調査した。計算ソフトウェアにはモンテカルロ法を用いたMCNPを使用した。また、深部腫瘍への治療案の一つである多門照射についても検討した。

### 2.2 実験検証手法

2.1節で述べた数値計算の結果を検証するために、中性子照射実験およびクロスチェックを行った。照射実験は東北大学高速中性子照射室(FNL)にて行った。FNLの所有する加速器は4.5MVで運転するダイナミトロンであり、使用したビームラインでは最大3MeV・7 $\mu$ Aの陽子線ビームが生成される。ターゲットにはリチウムを使用し、中性子を発生させた。FNLの中性子スペクトルは高速中性子が優位であるため、図2に示すように減速材(Beam Shaping Assembly; BSA)を設計し、BNCTの実際の治療に近い熱外中性子場を作成した。ファントムは直径20 cmのアクリルボックスを水で満たすことで人体頭部を模擬し、そこに計測素子を沈めて中性子照射を行った。金箔を用いた中性子束、ガラス線量計を用いたガンマ線量の測定を行い、計算値との比較を行った。クロスチェックにはPHITSと呼ばれるMCNPと同様のモンテカルロ法による線量計算ツールを使用した。

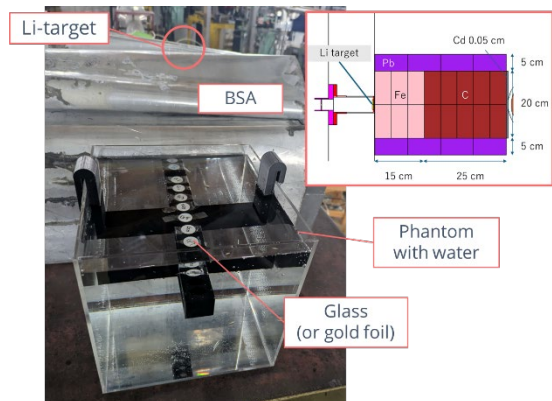


図2:東北大学高速中性子照射室(FNL)における  
中性子照射実験の体系

### 3. 実験結果

CF 比とビーム半径を増加させると、どの腫瘍位置においても平均腫瘍線量は線形的に向上した。エネルギーを変えた際には腫瘍位置によって腫瘍線量を最大化するような線量値は異なり、浅在腫瘍では低いエネルギー、深部腫瘍では高いエネルギーが治療に効果的であることが分かった。(図3)一方で、深部腫瘍に対してエネルギーを向上させると必ずしも治療効率が向上するわけではないことがわかった。10 keV以上のエネルギーになると、腫瘍における最小線量と正常組織における最大線量の比は減少した。また、多門照射を活用することでより深部の腫瘍においても照射条件を満たすことができた。

東北大FNLにおける中性子照射実験では、図4に示すように、ファントム内5 cm以後の深部では、実験結果と計算結果は概ね一致した。一方で、表面における線量は実験値が計算値を大きく上回った。PHITSを用いたクロスチェックでは、MCNPによる計算値と概ね一致したものの、表面線量においてはMCNPが過大評価された。

### 4. 考察

数値計算の結果では、低いエネルギーが浅在腫瘍、高いエネルギーが深部腫瘍において効果的であるとわかったが、100 keV以上の中性子エネルギーでは正常細胞へのダメージが強く、治療に効果的ではなかった。これは、中性子カーマ値の影響で説明が可能である。中性子カーマは中性子が物質と反応した際に付与されるエネルギーである。ホウ素の中性子カーマは中性子エネルギーの増加とともに減少し、一方で水素と窒素はエネルギーが高い部分ではホウ素のカーマ値を上回る。従って、BNCTのホウ素によるダメージよりも、その他の原子が与える線量が

大きくなり、正常細胞と腫瘍に与えるダメージがほぼ変わらなくなったためだと考える。特に100 keVの領域では水素のカーマ値が優位であり、頭部表面での線量値が大幅に増大したと考えられる。なお、実験では表面値において計測値との乖離が見られた。これは周囲の構造物に由来する二次散乱中性子によるものであり、特に表面近傍ではシミュレーションでは想定されていない挙動が検出されたと考えられる。

### 5. 結論

BNCTにおける深部照射プロトコル開発のために、本研究では中性子ビーム特性を評価し、線量計算の検証を行った。さらに、多門照射の検討により、深部にある腫瘍に対してBNCTにおける治療可能性が見出された。今後は照射計画最適化アルゴリズムの開発や、それぞれの線量寄与の測定装置の開発を行う。

### 6. 参考文献

- INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. Advances in Boron Neutron Capture Therapy. In: *Advances in Boron Neutron Capture Therapy*. 2023:1-416.

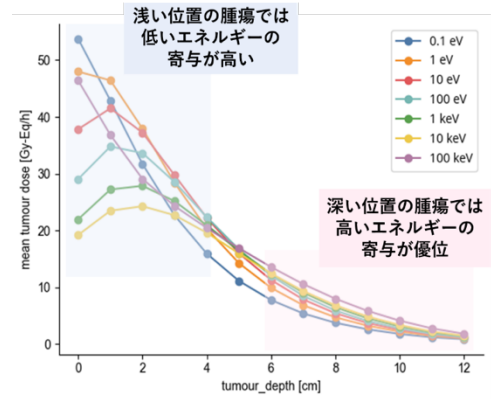


図3: エネルギー毎の腫瘍深さと平均腫瘍線量の関係 (CF=0.7, beam radius=6 cm)

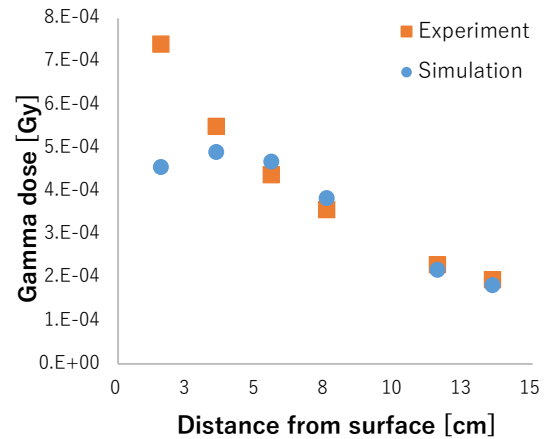


図4: FNLにおけるガラス線量計の中性子照射実験結果