

# (1) 中性子照射による体内挙動を可視化させるための寒天ファントム 基礎実験

東海大学工学部

吉田 茂生

大阪大学大学院工学研究科

村田 勲

近畿大学原子力研究所

堀口 哲男

## 1. はじめに

中性子は原子核との相互作用において、そのエネルギーに応じて、弾性散乱、非弾性散乱、 $(n, \gamma)$ 反応の放射捕獲反応、 $(n, p)$ 反応や $(n, \alpha)$ 反応の粒子放出反応、さらに核分裂や核反応と散乱・吸収の反応が大きく異なってくるのが特徴的である。一般的に高エネルギー領域での $(n, \alpha)$ 、 $(n, p)$ 反応などのしきい値反応、また、減速され熱中性子領域となると弾性散乱や $(n, \gamma)$ 反応が支配的となってくる。特に水素(H)との散乱による反跳陽子の放出はエネルギーの広領域において顕著な断面積を有している。

表1に人体主要元素のうちの最も存在度の高い核種に対する熱中性子( $E_n=0.025\text{eV}$ )における主な相互作用となる弾性散乱と $(n, \gamma)$ 反応の核反応断面積を示した。軽元素においては、圧倒的に弾性散乱の反応断面積が高く、 $(n, \gamma)$ 反応はミリバーンのオーダーに留まっている。しかし、 $(n, p)$ 反応や $(n, \alpha)$ 反応の荷電粒子を放出する断面積は、熱中性子に比べると、keV~MeVの極めて高いしきい値エネルギーを有する反応が一般的でありながら、窒素のように熱中性子でも非常に高い $(n, p)$ 反応断面積を有する特異な元素も見受けられる。

表1 人体主要元素と熱中性子との主な核反応断面積

元素	体内存在量 (%)	核種	存在度 (%)	熱中性子( $E_n=0.025\text{eV}$ )にける主な核反応断面積				
				elastic	capture	(n,p)	(n, $\alpha$ )	
酸素	O	65.0	$^{16}\text{O}$	99.757	3.965(b)	189.9( $\mu\text{b}$ )	E-thr = 10.24 MeV	E-thr = 2.355 MeV
炭素	C	18.0	$^{12}\text{C}$	98.93	4.950(b)	3.530(mb)	E-thr = 13.64 MeV	E-thr = 6.181 MeV
水素	H	10.0	$^1\text{H}$	99.989	30.27(b)	332.0(mb)		
窒素	N	3.0	$^{14}\text{N}$	99.632	10.37(b)	75.00(mb)	1.930(b)	
カルシウム	Ca	1.5	$^{40}\text{Ca}$	96.941	3.061(b)	407.6(mb)	E-thr = 542.4 keV	0.000 (b)
リン	P	1.0	$^{31}\text{P}$	100	3.186(b)	166.2(mb)	E-thr = 732.3 keV	E-thr = 2.007 MeV

※核データ研究グループHP ([https://www.ndc.jaea.go.jp/NuC/index\\_J.html](https://www.ndc.jaea.go.jp/NuC/index_J.html))より

このように中性子照射による人体影響を評価する上で、人体中の中性子の挙動を解析する必要があり、特に中性子エネルギーごとに体内にどのように分布するのかを視覚的に明確化できれば、医療等への応用にも重要な働きを示すものと考えている。これを今日のシミュレーション解析によるものだけではなく、実際の中性子挙動を可視化できる手法のアプローチから、より正確な中性子の人体影響への評価を可能とするものと考えている。

さて、今日のイメージング技術の主流はイメージングプレート(IP)によるラジオグラフィと考えられる。これは、輝尽性発光体をプラスチックフィルム上に添付したもので、照射後レー

ザーを照射すると発光する性質を有している。これまでのフィルム感光を利用したアナログ的な取り扱いでなく、デジタルデータとして取得でき、繰り返し利用も可能とすることが特長となっている。しかも、これまでのフィルムに比べても格段に高感度な検出を、2次元画像として得られる利点も有している。

そこで本研究では、熱中性子に対して高感度な核反応を示すターゲット物質(熱中性子核反応断面積の高い核種)を均一に溶かした寒天培地中に、近大炉の熱中性子を照射し、ターゲット物質の放射化にて誘発された $\gamma$ 線強度を、IP で寒天を測定することにより、放射化量の強度分布状態から、熱中性子の分布状態を可視化させる手法の研究・開発を目的として、可能性並びにそのための条件等を追求するための試行実験を行なった。

## 2. 実験の原理と方法

### 1) 熱中性子に対する寒天ファントム中のターゲット物質

$\gamma$ 線同様、非電荷放射線である中性子の検出は直接的には不可能であり、ターゲット元素(物質)の相互作用から放出される荷電粒子を測定するか、中性子によって放射化された物質からの誘発 $\gamma$ 線を測定するかで、具体的な物理量として検出が可能となってくる。そのため、人体中の中性子挙動を模擬するために、人体の組成をほとんど水として考えられる寒天にて模擬し、熱中性子の存在強度(中性子フラックス)をターゲット物質中の放射化核種からの放射線強度を測定し、両者を関係付けようとするものである。全ての元素の熱中性子核反応断面積を調査し、最も核反応断面積が高く、ポピュラな物質(分子形態)として、NaCl(塩)を選択し、それらの評価の基準となる諸データを表2中に示す。安定核種に対する存在度(%)と熱中性子に対する核反応断面積として高い(n,  $\gamma$ )反応と(n,p)反応断面積を抽出してまとめた。上段より、核反応断面積の数値、生成放射性核種、その半減期を示している。

表2 ターゲット物質の諸データ

nuclide	abundance ratio (%)	nuclear reaction cross section	
		0.025eV	
		(n, $\gamma$ )	(n,p)
<sup>23</sup> Na	100	531.4 mb <sup>24</sup> Na 14.997 h	-
<sup>35</sup> Cl	75.78	43.6 b <sup>36</sup> Cl 3.01E+5 y	489.3 mb <sup>35</sup> S 87.51 d
<sup>37</sup> Cl	24.22	432.9 mb <sup>38</sup> Cl 37.230 m	-

上段より、核反応断面積の数値、生成放射性核種、その半減期を示している。

<sup>35</sup>Cl は(n,  $\gamma$ )反応断面積が極めて高いが、それに反して生成核種の半減期が極めて長いため、近大炉の照射時間(最大7時間)では放射化できないことがわかる。また、(n,p)反応についても同様な点が評価できる。<sup>37</sup>Cl は(n,  $\gamma$ )反応断面積が比較的高いが、半減期が30分程と短いため、照射後数時間クーリングの後、IP強度測定を行うことで、<sup>37</sup>Cl核種からの放射線放出強度を無視できる強度と考えられ、結果、<sup>23</sup>Naの放射化による<sup>24</sup>Naからの $\gamma$ 線のみを有効に測定することができるとして、NaClをターゲット物質として選出した。

### 2) 照射用簡易寒天ファントムの製作と照射条件

寒天ファントムは、直径9cm高さ2cmのポリスチレン製シャーレ1皿に、水100g+寒天粉3.5gで調整した寒天培地(以下、これをプレーンタイプと呼ぶ)と、このプレーンタイプに1シャーレ当たりNaClを25g添加させた寒天培地(以下、これをターゲットタイプと呼ぶ)とを

それぞれ複数ずつ製作した。そして、両タイプそれぞれ 8 皿ずつを積層させ、照射用簡易寒天ファントムとして使用した。ただし、照射時は蓋面が下方に来るように、8 皿全てひっくり返した状態にて積層して、設置した。

図1に照射用簡易寒天ファントムの設置状態を示した。ターゲットタイプの寒天ファントムは炉頂部分に配置し、中央ストリンガーの小径プラグを開放し、炉心からの中性子を簡易ファントムの下方から照射した。照射時間は炉出力1Wにて、6.5時間の照射を行った。照射後 3 時間経過の後、中性子照射強度が最も高いことが推定される第 1 皿目の蓋を取り、寒天面と IP との接地面の間にはラップを施し、IP への直接設置による汚染を回避するとともに、寒天ファントムからの放射化核種からの放射線強度分布を 12 時間露光させ測定した。以降、同様操作にて露光時間を調整し、測定を行なうこととしている。今回は検出の可能性を確認のみのため、第 1 皿目のみを実施した。

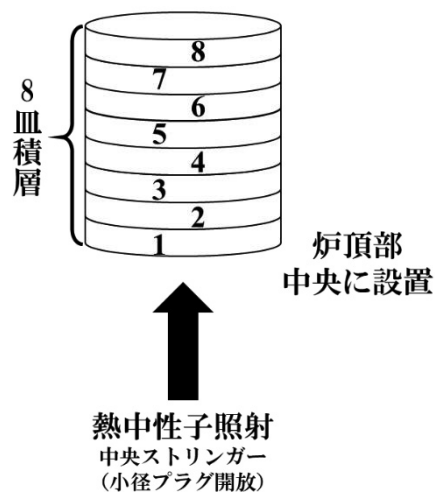
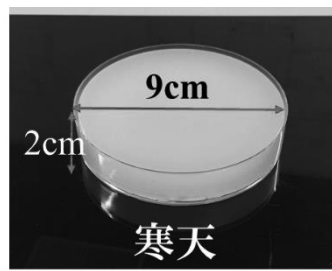


図1 簡易寒天ファントムと照射体系

### 3) 使用 IP 装置

イメージングプレート：Fuji BAS-MS(X線用)，BAS-ND(中性子線用)

IPリーダー：Amersham Typhoon

### 4) 中性子量のモニタ測定(相対値)

中性子量のモニタのため、図2の適当な位置に金箔(Au)を装着し、その放射化量にて熱中性子量を相対的にモニタした。また、NaClを含有させたターゲットタイプの簡易寒天ファントムとプレーンタイプのものとの中性子挙動の相違を確認するため、図2の第1皿・第2皿をターゲットタイプの寒天ファントムとした場合の、中性子量の変化も金箔測定から確認した。

さらに、開放プラグ孔からの照射中性子の広がり程度を確認するため、中性子線用イメージングプレート BAS-ND を、IP カセット内に格納したままで中性子線を照射させ、その広がりを確認した。設置した IP カセット位置も同様に図2に示した。ここで、最下段並びに最上段を除き、IP カセットは上下のプレーンタイプの寒天ファントム間に挟み込むように挿入し、上下のずれに注意しセットし、1つの照射体系にて 15 分間の照射を行い、IP の読取から熱中性子照射ビームの広がり程度を確認した。

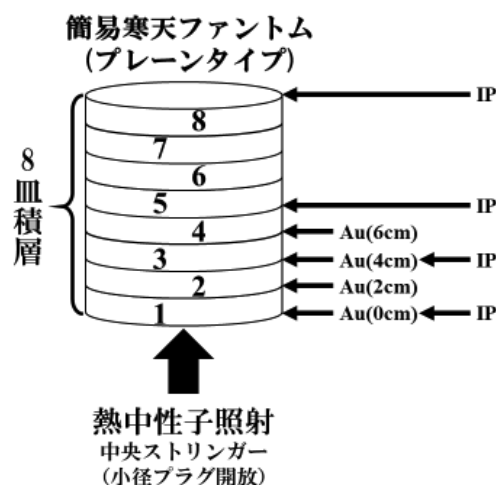


図2 中性子量のモニタ位置

### 3. 実験結果

今回の実験において、ターゲットタイプの寒天ファントムに中性子を照射し、NaCl のターゲット物質の放射化による放射線測定 (IP) から、熱中性子の分布状態を、2 次的に分析すること、特に今回はこちらの計画した条件 (照射時間と露光時間等) にて、検出が可能であるかを明確にする点が最大の目的であったが、結果として検出の可能性は確認できたが、画像としての取得はできなかった。(この対策は既に解決済み。)

図3に炉内熱中性子の照射によるプレーンタイプ寒天ファントム内の熱中性子分布を、表面から深層に向かって、中性子線用 IP による測定結果を示した。これによって、ある深さ面での熱中性子の分布状態が定性的ではあるが、明確とすることができた。このようにイメージングプレートにあっては、ある面 (中性子照射方向に対する垂直面) での連続的な分布測定が可能となるが、当研究においては、熱中性子照射方向での連続的な分布の可視化であり、IP の存在を考慮せず評価できることを検討している。

図3中の IP 画像中の入射表面とファントム中央部での平面的な熱中性子強度 (相対値) の分布状態を、それぞれ AB の直径軸にて分析した結果を図4に示す。ここで明確の通り、中性子入射する寒天ファントム表面では、中心軸が最も強く、両脇に広がるに従って強度が下がる分布となっているが、ファントムの中央部分 (表面から 8cm 深部) においては、既に平面的に熱中性子の強度がほぼ一様となることが、推定できる。

また、図5に示すように NaCl を含有するターゲットタイプ寒天ファントムにおいては、比較的核反応断面積の高い核種を含む物質を含有するため、熱中性子場を乱す環境となり、プレーンタイプと比較し、2分の1減にて減弱をすることが推定できる。さらに、中性子入射

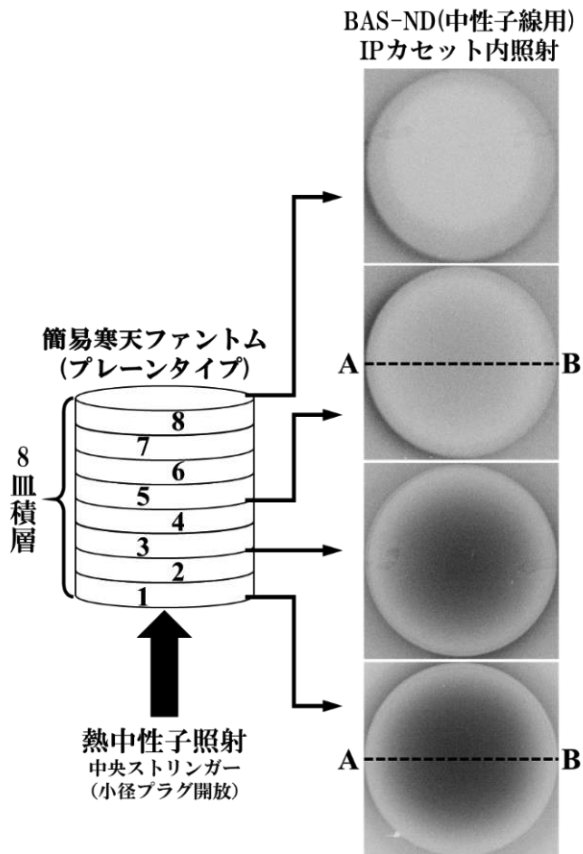


図3 熱中性子のファントム内分布

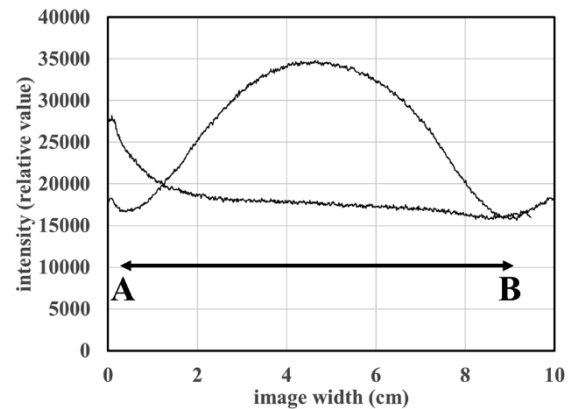


図4 直径軸 AB の強度分布

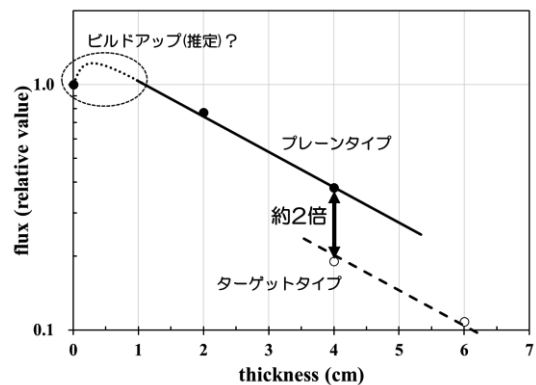


図5 ファントムによる相違

面の極深部ではビルドアップ現象にて熱中性子量も多少増加することも予想される。

次年度においては、このような熱中性子入射方向での人体内での熱中性子分布について連続的な分布変化として可視化できるように、IP の利用方法を検討し、人体内熱中性子の挙動を表現できるように研究を進めていく。

謝辞 最後にあたり、今年度炉実習にご指導・ご協力をいただきました近畿大学原子力研究所の堀口哲男先生をはじめ、近大原研のスタッフの皆様に深く感謝いたします。