

# 医療用放射線発生装置の安全管理に 関する研究(Ⅱ)

— 医用中性子線の種々物質による遮蔽効果について —

川崎医療短期大学 放射線技術科

西村 明久 板谷 道信 紺野 勝信  
井上 博和 日地 啓夫 梶原 康正  
西下 創一

(昭和57年10月30日受理)

Health Physics of Medical Generator

— On the Neutron Shielding —

Akihisa NISHIMURA, Michinobu ITAYA, Katsunobu KONNO,  
Hirokazu INOUE, Hiroo HIJI, Yasumasa KAJIHARA,  
Soichi NISHISHITA

Department of Radiological Technology, Kawasaki College  
of Allied Health Professions

Kurashiki 701-01, Japan

(Received on Oct. 30, 1982)

## Key words :

医療用加速器, 中性子の遮蔽, 減弱曲線

## 概 要

物理工学のみならず医学, 生物学においても速中性子を利用した研究が盛んになりつつある。これ等の目的のため, D-T中性子発生装置, バン・デ・グラーフ, サイクロトロン等の加速器が中性子源として使用されている。これらの装置を使用している施設の遮蔽設計, 照射用コリメーターの設計等のために速中性子に対する種々物質の遮蔽効果を知る必要がある。

すでに, 15MeV単色中性子に対する多重層の減弱特性は, 丸山等<sup>1)</sup>が報告しているが, 本実験ではバン・デ・グラーフ加速器を用いた ${}^3\text{T}(d, n){}^4\text{He}$ 反応による18MeVの単色中性子と $\text{Be}(d, n)\text{B}$ 反応からの平均

2 MeV の中性子に対する種々物質の単一層、および多重層の減弱特性を調べた。

## § 1. はじめに

中性子発生装置の遮蔽に関する研究は、現在までのところ原子炉のそれに比べて非常に少ない。本研究は、中性子発生装置のために要求される遮蔽の最小厚さを決めるため種々の物質について中性子減弱特性を  $T(d, n)^4\text{He}$ ,  $D(d, n)^3\text{He}$ ,  $T(p, n)\text{He}$ , および  $\text{Be}(d, n)\text{B}$  反応から発生する中性子について測定したものである。遮蔽は中性子発生装置のまわりで働く作業員や周辺住民のために要求されるので、問題となる中性子線の量は線量当量である。

## § 2. 減弱の測定

単色中性子源として Van de Graaff 加速器 (High Voltage Engineering, type AN 400) を用い、重陽子イオンを 2 MeV ( $5 \mu\text{A}$ ) で加速して、これをトリチウム・ターゲットにあてた時、 ${}^3\text{T}(d, n){}^4\text{He}$  反応で発生する 18 MeV の単色中性子を用いた。また、重陽子イオンを 2.8 MeV ( $150 \mu\text{A}$ ) で加速し、これを厚いベリリウム・ターゲットにあてた時、 $\text{Be}(d, n)\text{B}$  反応から発生する平均 2 MeV 中性子を用いた。中性子のエネルギーは A. O. Hansen ら (A. O. Hansen, J. L. Fowler and J. E. Brolley, Rev. Mod. Phys. 28, 1976) のデータをもとにして算出されたものである。これらのターゲットから放出される中性子のエネルギーと生成量は重陽子や陽子のビームと中性子の放出される方向とのなす角度に依存する<sup>2)</sup>。また、単色中性子源ではないがエネルギー・スペクトルがわかっている  $\text{Be}(d, n)\text{B}$  反応から発生する中性子発生装置による 14.1 MeV の単色中性子を利用した。これは、 $E_d = 250 \text{ KeV}$  とし、 ${}^3\text{T}(d, n){}^4\text{He}$  反応から発生する中性子である。

減弱の測定に際しては、18 MeV 単色中性子にはポリエチレン-エチレンガス電離箱 (10 cm  $\phi$  球状、壁厚 0.3 cm) を、平均 2 MeV 中性子には組織等価電離箱 (2 cm  $\phi \times 4$  cm, 壁厚 0.3 cm) を使用した。上記、二つの電離箱は中性子とガンマ線の両方にレスポンスをもっている<sup>3)</sup>ので、ここでの測定値は中性子、およびガンマ線による線量成分の和、即ち total dose である<sup>3)</sup>。

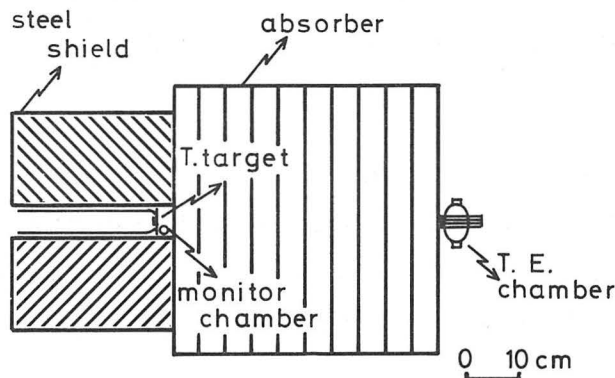


Fig-1 Schematic diagram of attenuation experiments for 18 MeV neutrons.

これらの電離箱はガス封入式になっているが、測定日ごとに封入ガスを入れかえて用いた。

Fig-1に測定配置図を示す。電離箱はビームの中心線上に置いた。また、バックグラウンドを減らすためにターゲットの周りを鉄で遮蔽した。遮蔽物質の表面は鉄シールド面に密着させた。減弱測定中のモニターには、炭素-炭酸ガス電離箱を使用し、図の位置に置いた。また、ターゲット・電離箱中心間の距離は70 cmであった。

遮蔽材として、鉛、鉄、重コンクリート、普通コンクリート、水、パラフィン、ボロン入パラフィン、そして炭酸リッチム入りパラフィン等の物質を用いた。鉛、鉄は厚さ5～10 mm、大きさ60 cm×60 cmで密度がそれぞれ11.4(g/cm<sup>3</sup>), 7.8(g/cm<sup>3</sup>)であった。重コンクリートは密度3.84(g/cm<sup>3</sup>)で厚さ5 cm、大きさ60 cm×60 cmであった。普通コンクリートは密度2.35(g/cm<sup>3</sup>)で厚さ5～10 cm、大きさ60 cm×60 cmであった。水は厚さ1 cmのルサイトで作られた容器(60 cm×60 cm×15 cm, 60 cm×60 cm×30 cm, 50 cm×50 cm×5 cm)に満したものをを使用した。パラフィンとボロン入パラフィンは10 cm×20 cm×5 cmのブロックを積み重ねて大きさが60 cm×60 cmになるようにした。パラフィン系の特性は、JIS-K 8754に従ったものである。

中性子と物質との相互作用を考えると、物質を構成する原子の原子核による弾性散乱、捕獲あるいは荷電粒子を放出する核反応等による吸収等がある。水素原子核は中性子の質量にはほぼ等しい質量をもつ陽子から構成されているため、陽子と衝突した中性子は一回の衝突で、そのエネルギーを平均  $\frac{1}{2}$  だけ失う<sup>4)5)</sup> このことから水素含有量の高い物質は中性子の減速に対して最も効果的である。一般に中性子のエネルギーが高くなるにつれて弾性散乱の断面積は減少し、非弾性散乱が重要になる。検出器の前増幅器から比例増幅器までの距離を長くすると、

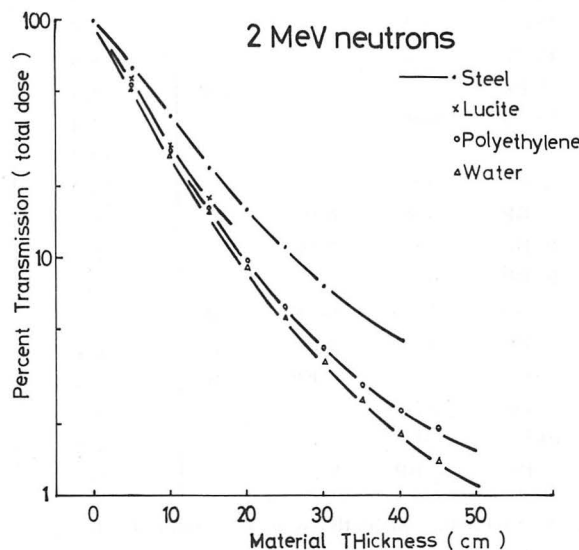


Fig-2 Attenuation curves of 2 MeV·Be(d,n) neutrons in several materials.

ケーブルで種々の雑音を拾うので電子回路をできるだけ前置増幅器のそばにおき波高選別器を通して形成されたパルスを測定系から 20 m 離れた操作室にあるスケーラで計数した。この測定で用いられた電離箱の読みの再現性は 3% 以内であった。

### § 3. 結果と考察

平均 2 MeV 中性子での鉄, ルサイト, ポリエチレン, 水の各単一層による減弱曲線を Fig-2 に示す。これらの物質中では, 水がもっとも良い遮蔽材であることがわかった。また, 水素含有量の多いポリエチレン, ルサイトは, ほぼ水と同じ遮蔽効果をもつことを示している。一方, 鉄は低エネルギー中性子には, あまり良い遮蔽材ではないことがわかった。

多重層による減弱特性は, 平均 2 MeV 中性子では長さ 20 cm について検討した。Table-1 に鉄, ポリエチレン, 水, 鉛, ボロン入り物質による平均 2 MeV 中性子の単一層, 多重層についての全透過率 (total transmission) をまとめた。その結果, ポリエチレン (5 cm) + ボロン入りパラフィン (10 cm) + 鉛 (5 cm) を順次ならべた遮蔽構造がもっとも効果的であった。

一方,  ${}^3\text{T}(d, n){}^4\text{He}$  反応による 18 MeV 単色中性子での水, 普通コンクリート, ポリエチレン,

Table-1 Transmission in terms of total dose of Be(d, n)-neutrons in single-layer and multilayer shields.

1	2	3	4	total transmission %
20-LiP				13.3
20-Po				12.0
15-Po	5-W			10.5
15-Po	5-S			8.6
5-Po	5-S	5-Po	5-S	8.3
10-Po	10-S			7.4
20-BP				12.2
15-BP	5-S			10.2
10-BP	5-S	5-W		9.3
10-BP	5-S	5-Po		9.2
10-BP	10-S			9.0
5-BP	5-S	5-BP	5-Po	8.5
5-BP	5-S	5-BP	5-S	8.1
5-Po	5-S	5-BP	5-S	7.4
15-Po	5-L			6.9
10-Po	5-BP	5-L		6.6
5-Po	10-BP	5-L		6.5

S= steel, Po=polyethylene, W=water, L=lead,  
BP= borated paraffin, LiP=  $\text{LiCO}_3$ paraffin  
The adjoining numbers indicate the thickness of the specific materials in cm.

鉄の単一層による減弱曲線を Fig-3 に示す。比較のため、丸山等<sup>1)</sup>のデータの 15 MeV 単色中性子の鉄，ポリエチレンによる減弱曲線を点線で示した。鉄，ポリエチレンについては、水や普通コンクリートより有効な遮蔽材であることがわかった。

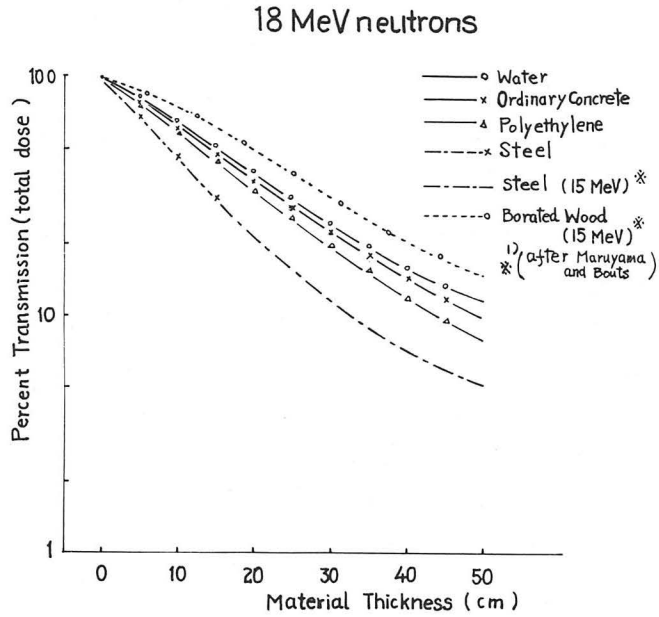


Fig-3 Attenuation curves of 18 MeV · T(d, n) neutrons in several materials.

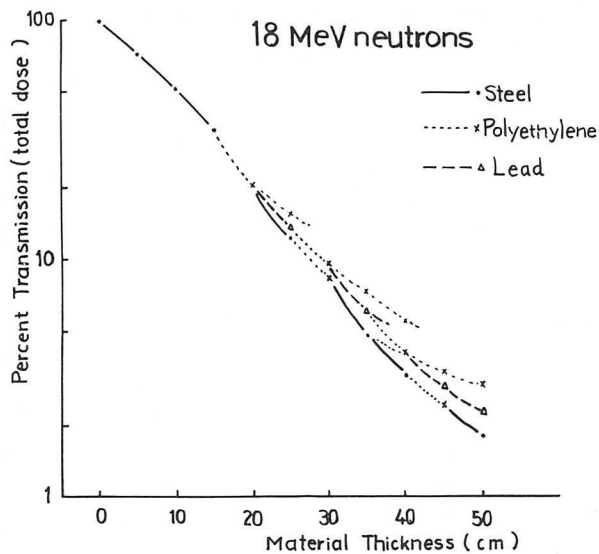


Fig-4 Attenuation curves of 18 MeV · T(d, n) neutrons in multilayer shields composed of steel, lead and polyethylene.

Fig-4 に鉄、鉛およびポリエチレンによる多重層の減弱曲線を示す。また、Table-2 に鉄、ポリエチレン、鉛、水および普通コンクリートによる 18 MeV 単色中性子の単一層、および多重層における全透過率 (total transmission) を示す。これらの結果によると、鉄 15 cm の後に、5 cm のポリエチレンと 5 cm の鉄を交互に重ねた遮蔽構造が 1.8% という透過率を示し、もっとも効果的であることがわかった。このことは、おそらく次のように説明されよう。

最初の 15 cm の鉄が中性子との非弾性散乱により中性子のエネルギーを低下させ、次の層であるポリエチレンで、低エネルギーの中性子を吸収するとともに、 $H(n, \gamma)D$  反応によりガンマ線を発生する。さらに、次の層の鉄が、前に置かれた遮蔽体からのガンマ線を減弱させるとともに、高エネルギー成分をもつ中性子のエネルギーを低下させる。以下、順次このような経過でくり返されるであろう。

ボロンは低エネルギー中性子に対する遮蔽体としてすぐれていることが報告されている<sup>2)</sup>。丸山等<sup>1)</sup>によって報告された鉄とボロン木材からなる多重層では、30 cm あるいは、それ以上の鉄によって中性子のエネルギーを低下させた後にボロン入り木材を用いるのが効果的であることを示している。このことは、おそらく 18 MeV 単色中性子に対しても期待されよう。これらの実験では検出器を最大中性子線束と最大中性子エネルギーの得られる  $0^\circ$  方向、すなわち、加速粒子の進行方向に置いた。各カウンターからの計数率を各吸収体の後方で測定し、中性子の出力を  $BF_3$  計数管あるいは電離箱でモニターした。減弱曲線から明らかなる如く、大部分の物質では吸収体の厚さが 10~20 cm 以上での減弱はほぼ指数関数的であることを示している。

吸収体がないときの測定点での線量当量を ( $DE$ )、厚さ  $x$  cm の吸収体があるときの測定点

Table-2 Transmission in terms of total dose of 18 MeV (T(d, n))-neutrons in single-layer and multi-layer shields.

1	2	3	4	5	6	7	8	total transmission %
W-50								10.6
OC-50								9.4
Po-50								8.2
S-50								6.9
S-15	P-35							6.0
S-15	W-35							4.9
S-15	Po-5	L-5	Po-25					4.0
S-15	Po-5	S-5	Po-25					3.3
S-15	Po-5	S-5	Po-5	S-5	Po-15			2.9
S-15	Po-5	L-5	Po-5	L-5	Po-5	L-10		2.3
S-15	Po-5	S-5	Po-5	S-5	Po-5	S-5	Po-5	2.2
S-15	Po-5	S-5	Po-5	S-10	Po-5	S-5		1.8

S = steel, Po = polyethylene, L = lead, W = water, OC = ordinary concrete  
The adjoining numbers indicate the thickness of the specific materials in cm.

での線量当量を  $(DE)_x$  とすれば、減弱曲線から次式が成り立つ。

$$(DE)_x = (DE)_0 S \exp(-\mu x)$$

ここで、 $S$  は減弱曲線で直線部分  $\exp(-\mu x)$  で与えられる部分を外挿したとき、 $x=0$  での  $(DE)_x/(DE)_0$  の比である。 $\mu$  は一種の減弱係数である。 $S$  は中性子のエネルギーが低い場合は 1 以下であり、エネルギーが高くなると 1 以上である。

中性子のエネルギーが 10 MeV 以上では、例えば、レム・カウンターの感度が ICRP 勧告の曲線に比べて 10～15% 低下する<sup>6)</sup>。そのため、14.1 MeV と 18 MeV の中性子に対する減弱曲線から得られた遮蔽データは 20% 程度の誤差をもつことが予想される<sup>7)</sup>。今回の実験では鉄コリメーターを用いているが、水コリメーターを用いている実験もある。5 MeV 以上の中性子に対しては水があまり良い遮蔽体ではないことから、このエネルギー以上の中性子に対してはあまりよいコリメーターではない。5 MeV の中性子でコリメーターの水槽中で減速された中性子も吸収体に入射するし、またこれが Stray radiation となって検出器のバックグラウンドを増加させる<sup>8)</sup>。このため、5 MeV 以上の中性子に対する検出器のバックグラウンドは主ビームの線量当量の 2% に相当した。今回の報告には省いたが、照射野が増すにつれて、種々物質の  $\frac{1}{10}$  価層は増加することがコンクリートによる実験で明らかになっている。これは、 $x$ 、 $\gamma$  線と同様の現象であり、原因は中性子の散乱によるものであろう。等方的に中性子を発生する線源の遮蔽を考える場合には、もっと大きな照射野が必要であらう。1 MeV の中性子に対するコンクリートの減弱データでは照射野を 100 cm  $\phi$  としたときの  $\frac{1}{10}$  価層は 60 cm  $\phi$  のその約 1.2 倍となる。

加速器を利用した中性子線源では発生する中性子のエネルギーとその出力は  $0^\circ$  方向で最大となり、中性子の放出角度が増すにつれて減少する傾向がある<sup>9)</sup>。第一近似として、中性子発生装置使用施設のようにターゲットから 2～3 m のところに遮蔽壁をつくる場合には照射野 60 cm  $\phi$  のデータを使用することができるであらう。

Be(d, n)B 反応からの中性子のように、複雑なスペクトルをもった中性子源に対する種々物質の減弱はその平均エネルギーと等しい単色中性子のそれとほぼ同じであることが分かった。レム・カウンターの場合、18 MeV の中性子に対してはあまり感度が良くないことや、バックグラウンドが高いことなどから、この測定結果の信頼性は低い。しかし、中性子と物質との相互作用が 10 MeV 以上では相当複雑であるため、低いエネルギーの中性子の減弱とはその様子はかなり異なるであらう。

水素含有物質（水、パラフィン、ポリエチレン等では）1～2 MeV の中性子に対して  $\frac{1}{10}$  価層が小さくよい遮蔽体である (Fig-5)。しかし、エネルギーが増加するにつれて、 $\frac{1}{10}$  価層は急激に増加する。それに反して、水素を含まない物質（鉛、鉄等）では中性子のエネルギーの変化に対して、 $\frac{1}{10}$  価層はあまり変わらない。鉄の場合、2 MeV 近辺に  $\frac{1}{10}$  価層の低下が認められるが、これはこのエネルギー近辺にある鉄の複雑な反応によるものと思われる。

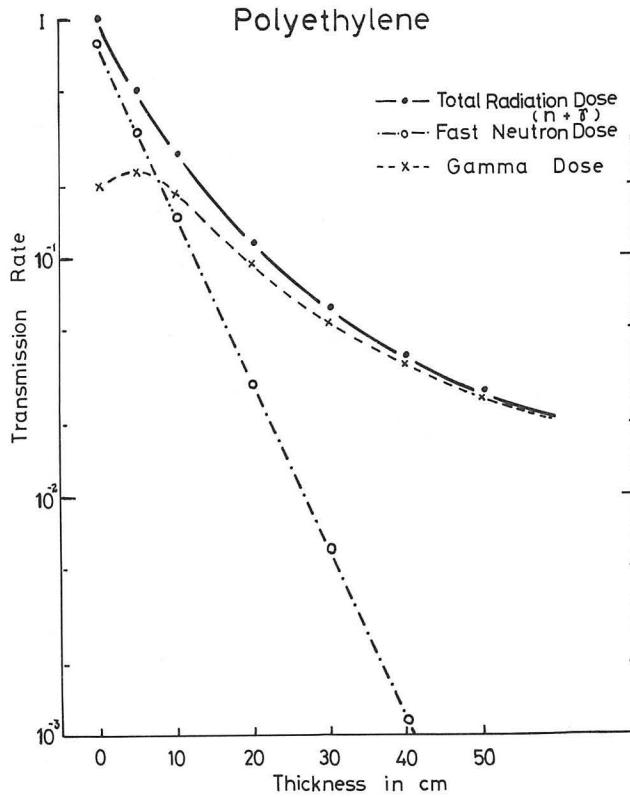


Fig-5 Attenuation curves of 2 MeV · Be (d, n) neutrons in Polyethylene.

謝 辞

稿を終わるに臨み、有益なる御助言を頂いた、織田暢夫教授（東工大大学院・放射線物理講座）、線量計の試作および計測実験に終始御指導、御協力頂いた、丸山隆司室長（科学技術庁・放射線医学総合研究所）に深謝の意を表します。

文 献

- 1) Maruyama, T. and Bouts, C. J.; Dosimetry of D-T neutrons for radio-therapeutic applications, Phys. Med. Biol. 17, 420 (1972)
- 2) ICRU Report (NBS Handb. 85); Physical Aspects of Irradiation, 26 (1964)
- 3) NCRP Report (NBS Handb. 75); Measurement of absorbed dose of neutrons and of mixtures of neutrons and gamma rays, 82 (1961)
- 4) Slater, M., Bunyard, G. B. and Randolph, M. L.; Combination ion chamber-proportional counter dosimeter for measuring gamma-ray contamination of neutron fields, Rev. Sci. Instr. 29, 601 (1968)
- 5) Wagner, E. B. and Hurst, G. S.; Gamma response and energy losses in the absolute fast neutron dosimeter, Health Phys. 2, 57 (1959)



- 6) ICRU Report 19 ; Radiation Quantities and Units, 15 (1971)
- 7) Rossi, H. H., and Failla, G. ; Tissue equivalent ionization chambers, *Nucleonics* 14, No. 2, 32 (1966)
- 8) 西村明久・丸山隆司 ; 特別研究「医用サイクロトロン of 安全管理に関する研究」NIRS report 2, 97 (1975)
- 9) Wagner, E. B., and Hurst, G. S. ; G-M tube  $\gamma$ -rays dosimeter with low neutron sensitivity, *Health Phys.* 5, 20 (1961)

