



Title	事故時における被曝線量の推定 : 2. ファントムによる中性子捕獲確率の測定
Author(s)	丸山, 隆司
Citation	日本医学放射線学会雑誌. 1968, 27(10), p. 1347-1353
Version Type	VoR
URL	https://hdl.handle.net/11094/16322
rights	
Note	

The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA

<https://ir.library.osaka-u.ac.jp/>

The University of Osaka

事故時における被曝線量の推定

2. ファントムによる中性子捕獲確率の測定

放射線医学総合研究所
物理研究部 (部長 橋詰雅博士)
丸 山 隆 司

(昭和42年4月4日受付)

Radiation Dose Estimation in Criticality Accident

2. Neutron Capture Probability of Phantoms

by

Takashi Maruyama

Physics Division, National Institute of Radiological Sciences
(Chief, Dr. Tadashi Hashizume)

Measurements of the neutron capture probability were made for various shapes of phantoms in order to estimate the fast neutron dose after a criticality accident. All the phantoms used were polythene containers filled with a physiological salt solution. Neutrons used for the sodium activation were obtained from a Van de Graaff accelerator using the thick Be target.

Using man shaped phantom it was found that differences in orientation may cause variations in the neutron capture probability up to 60% for the same incident neutron fluence.

The variation of the capture probability with neutron energy was determined for the man shaped phantom.

1. 緒 言

速中性子が人体に入射したとき、これらの大部分は組織中で減速し熱エネルギーとなつて人体に捕獲される。人体中には ^{23}Na がほとんど一様に分布しており、これらは熱中性子を吸収して $^{23}\text{Na} (n, \gamma) ^{24}\text{Na}$ 反応をおこなう。この反応で生成した ^{24}Na は半減期15時間で、1.37, 2.76MeVの γ 線と1.39MeVの β 線を放出する。 ^{24}Na の放射能は $\Sigma_{\text{Na}}/\Sigma_{\text{T}}$ の比によつて人体内で捕獲された全中性子数と直接関係つけられる。(ここで Σ_{Na} は ^{24}Na の巨視的吸収断面積、 Σ_{T} は組織の全巨視的断面積である。)

もし入射中性子のエネルギー・スペクトルおよび入射中性子のエネルギーと人体中に生成される ^{24}Na の放射能との関係が知られているならば、

中性子線量は ^{24}Na の放射能から容易に推定できる。この方法はHurst and Rstchie¹⁾²⁾³⁾らにより臨界事故時の線量推定に用いられた。

この線量推定法において重要な役割をはたす捕獲確率として、彼等は円柱ファントムについて算出した値を用いた。すなわち、HurstらはSnyderとNeufeld⁴⁾がモンテカルロ法を用いて計算した厚さ30cmの板状ファントム中の熱中性子束分布から、板状ファントムおよび円柱ファントムの捕獲確率を算定した⁵⁾。

Smith⁶⁾は単一エネルギー中性子を用いて板状および円柱ファントムの捕獲確率を測定し、Hurstらの計算結果とよく一致することを確めた。捕獲確率はファントムの形に依存するので、人体を円柱とみなす彼等の方法には問題がある

う。われわれは人体は楕円柱に近いと仮定して、楕円ファントムを用いて入射中性子のエネルギーと捕獲確率との関係、ファントムへの中性子の入射角と捕獲確率との関係について実験的に検討した。

2. Na の放射化を利用した中性子線量の推定方法

1) ^{23}Na (n, γ) ^{24}Na の反応断面積は熱エネルギー領域から 300eV の範囲にわたって $1/V$ 法則に従う。2) 人体は速中性子の平均自由行路の数倍に匹敵する大きさをもつ。これらのことを考え合わせれば、人体は Na を中性子検出器とし組織を減速材とする一種の long counter と見做される。従つて、速中性子が人体中で減速し Na に捕獲される確率は入射中性子のエネルギーにあまり大きくは依存しないと考えられる。

いま、エネルギー E の速中性子が人体胸面に垂直に入射したとし、人体が中性子線に垂直な面上に投影する面積を S (cm^2)、単位 energy interval 当りの neutron fluence を $f(E)$ (n/cm^2 per MeV) とすれば、エネルギー ($E, E+dE$) の中性子により放射化された ^{24}Na の原子数 $A(E)dE$ は次式で与えられる。

$$A(E)dE = S \cdot \frac{\Sigma_{\text{Na}}}{\Sigma_T} \cdot f(E) \cdot \xi(E) dE \quad (1)$$

ここで、 $\xi(E)$ はエネルギー E をもつて人体に入射した中性子数に対する人体に捕獲された中性子数の比、すなわち捕獲確率である。

人体中の単位体積当りに含まれる ^{23}Na の質量を ρ (mg/ml)、人体の全容積を V (ml)、 ^{24}Na の崩壊定数を λ ($1/\text{sec}$) とすれば、人体中の Na の比放射能 a ($\mu\text{Ci } ^{24}\text{Na}/\text{mg } ^{23}\text{Na}$) は次式の如くなる。

$$a = \frac{S}{V \cdot \rho} \cdot \frac{\lambda}{3.0 \times 10^4} \cdot \frac{\Sigma_{\text{Na}}}{\Sigma_T} \int_0^{\infty} f(E) \xi(E) dE \quad (2)$$

中性子線量の表示方法として 'first collision dose' か 'surface absorbed dose' のいずれかが用いられる。neutron fluence 当り first collision dose⁷⁾ を $D_f(E)$ とすれば、全中性子線量 D_n は次式で与えられる。

$$D_n = \int_0^{\infty} f(E) D_f(E) dE \quad (3)$$

したがつて、単位の Na 比放射能当り人体の受けた線量 D_n/a [$\text{rad}/\mu\text{Ci } ^{24}\text{Na}/\text{mg } ^{23}\text{Na}$] は次のようになる。

$$\frac{D_n}{a} = \frac{3.7 \times 10^4 \cdot V \cdot \rho}{S \cdot \lambda} \cdot \frac{\Sigma_T}{\Sigma_{\text{Na}}} \cdot \frac{\int_0^{\infty} D_f(E) \cdot f(E) dE}{\int_0^{\infty} \xi(E) \cdot f(E) dE} \quad (4)$$

人体を長径 30cm、短径 20cm の楕円柱とすれば、 $V/S = 5\pi$ (cm) である。 ^{23}Na の微視的吸収断面積を 0.536barn とし、標準人の元素組成表⁸⁾を用いれば $\Sigma_{\text{Na}} = 0.00211$ (cm^{-1})、 $\Sigma_T = 0.0234$ (cm^{-1})、また $\rho = 1.66$ (mg/ml)、 $\lambda = 1.28 \times 10^{-5}$ ($1/\text{sec}$) であるから、(4) 式は次式になる。

$$\frac{D_n}{a} = 8.35 \times 10^{11} \frac{\int_0^{\infty} D_f(E) \cdot f(E) dE}{\int_0^{\infty} \xi(E) \cdot f(E) dE} \quad (5)$$

$$\text{または } \frac{D_n}{a} = 8.35 \times 10^{11} \frac{D_{f,av.}}{\xi_{av.}} \quad (5')$$

$$\text{但し } D_{f,av.} = \frac{\int_0^{\infty} D_f(E) f(E) dE}{\int_0^{\infty} f(E) dE},$$

$$\xi_{av.} = \frac{\int_0^{\infty} \xi(E) f(E) dE}{\int_0^{\infty} f(E) dE}.$$

もし、捕獲確率と入射中性子のエネルギーとの関係が知られており、入射中性子のエネルギー・スペクトルも既知ならば、(5)式から容易に被曝中性子線量が推定できる。また入射中性子と等価なエネルギー・スペクトルをもつ中性子源、例えば臨界集合体等を用いて線量推定を行なう場合には、それらの中性子源に対する平均の捕獲確率 (ξ) と平均の first collision dose を算出すれば (5)式が利用できる。

連続エネルギー・スペクトルをもつた中性子源に対する平均の捕獲確率は (2)式から次式の如く与えられる。

$$\xi = \frac{3.7 \times 10^4 \cdot V \cdot \rho}{S \cdot \lambda} \cdot \frac{a}{F} \cdot \frac{\Sigma_T}{\Sigma_{\text{Na}}} \quad (6)$$

ここで $F = \int_0^{\infty} f(E) dE$ 。すなわち total neutron fluence である。

3. 捕獲確率の測定

a. 捕獲確率と入射中性子のエネルギーとの関

係

(i) 実験装置

ファントムはすべて生理的食塩水を満たした壁厚さ 0.5cmのポリエチレン容器であつた。

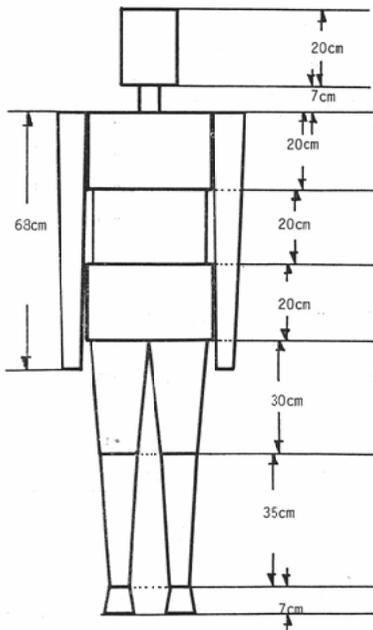
円柱ファントムは直径30cm, 高さ60cmであつた。板状ファントムとして 100cm×100cm×30cmのものをを用いた。楕円ファントムとしてはFig. 1に示すマネキン・ファントムの胸腹部を用いた。

中性子源として Van de Graaff 加速器を利用して $^9\text{Be} (d, n)^{10}\text{B}$ 応から得られる中性子を用いた。この中性子のエネルギー・スペクトルはTime of flight 法で測定された結果⁹⁾を使用した。Fig. 2は重陽子のエネルギーが 2.3MeV で、中性子の放出角度 θ が 0° の場合のスペクトルである。

ファントム中の ^{24}Na の放射能の測定には whole body animal counter¹⁰⁾ を用いた。この測定器の較正は一定量の ^{24}Na を含む生理的食塩水を満たしたマネキン・ファントムの各部分について行なつた。

ファントム表面への入射中性子の fluence の測定には比較較正された long counter を用いた。

Fig. 1 Man shaped phantom composed of polythene containers.



(ii) 実験方法

Fig. 2のエネルギー・スペクトルは 250keV から10MeV までのエネルギーについて測定されたものであるが、このスペクトルから計算した平均エネルギーをそのまま中性子源の平均エネルギー E とした。 E は中性子の放出角度 θ と重陽子のエネルギー E_d によつて異なる。 θ と E_d を適当に選び $E = 2.0, 2.5, 3.0\text{MeV}$ の場合について各種のファントムに中性子を照射した。このように target から放出角度により中性子のエネルギー・スペクトルと中性子の fluence が異なるので、中性子照射にあつては target がファントムに張る立体角をできるだけ小さくすることが必要であつた。そのため target とファントムの中心との距離を 1.5m とした。また target で long counter に張る立体角はファントムの場合と同一とみなした。

中性子照射におけるモニターとしてイオウ片、金を用いた。ファントムへの散乱線を除去するため、まわりのかべ等散乱体からファントムへの距離を 3m 以上にした。

熱中性子に対する捕獲確率を測定するため target のまわりに減速材としてパラフィンを15cmの厚さに積み熱中性子源とした。熱中性子の fluence は金箔とカドミウム箔につつんだ金箔を用いて測定した。金箔は純度99.9%, 厚さ $39.0 \pm 0.1 (\text{mg}/\text{cm}^2)$, $10\text{mm} \times 10\text{mm}$ であつた。

照射後各ファントムから10 l の溶液試料を採り、whole body animal counter で γ 線のエネルギー・スペクトルを測定した。 ^{24}Na の放射能の測定にはこのスペクトルをもとにして、2.75MeV の photopeak を中心とした2.53MeV~3.30MeV のエネルギー・バンドの計数を用いた。

このバンドに及ぼす ^{38}Cl の影響を除去するのに前報¹⁰⁾と同様の方法を用いた。

(iii) 実験結果と考察

人体組織中の平均の ^{23}Na の含有量は 1.5 (mg $^{23}\text{Na}/\text{cc}$ tissue), 全血で 1.9 (mg $^{23}\text{Na}/\text{cc}$ blood), 血清で3.17 (mg $^{23}\text{Na}/\text{cc}$ serum) であるが⁵, ここで用いた生理的食塩水では3.34 (mg $^{23}\text{Na}/\text{cc}$ solu-

Fig. 2 Typical neutron energy spectrum.

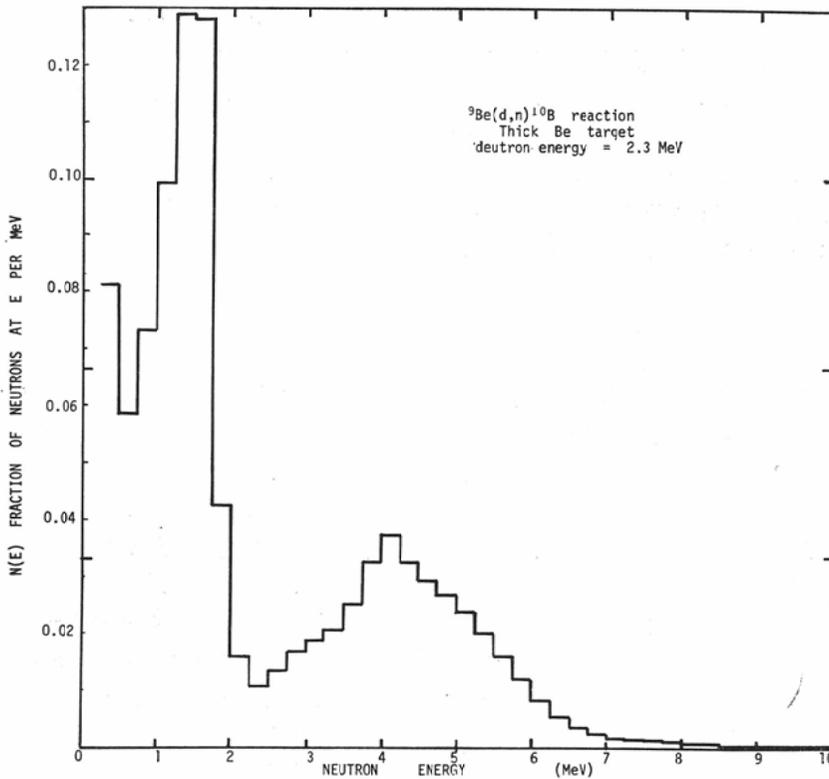


Table 1. Sodium activation in various phantoms by neutrons from a Van de Graaff accelerator using thick target Be (d, n) reactions.

Average energy (MeV)	Incident neutrons/cm ² (F)	Phantom	Na specific activity (²⁴ Na μCi/ ²³ Na mg)	²⁴ Na μCi/ ²³ Na mg per neutrons/cm ²
2.0	3.10 × 10 ⁹	slab	1.33 × 10 ⁻⁵	4.11 × 10 ⁻¹¹
		cylinder	1.26 × 10 ⁻⁵	4.06 × 10 ⁻¹⁵
		ellipse	1.43 × 10 ⁻⁵	4.61 × 10 ⁻¹⁵
2.5	2.54 × 10 ⁹	slab	9.95 × 10 ⁻⁶	3.92 × 10 ⁻¹⁵
		cylinder	9.55 × 10 ⁻⁶	3.76 × 10 ⁻¹⁵
		ellipse	1.06 × 10 ⁻⁵	4.17 × 10 ⁻¹⁵
3.0	2.10 × 10 ⁹	slab	7.46 × 10 ⁻⁶	3.55 × 10 ⁻¹⁵
		cylinder	7.40 × 10 ⁻⁶	3.52 × 10 ⁻¹⁵
		ellipse	8.49 × 10 ⁻⁶	4.04 × 10 ⁻¹⁵
Thermal	3.37 × 10 ⁹	slab	4.28 × 10 ⁻⁶	1.27 × 10 ⁻¹⁵
		cylinder	4.79 × 10 ⁻⁶	1.42 × 10 ⁻¹⁵
		ellipse	4.62 × 10 ⁻⁶	1.37 × 10 ⁻¹⁵

tion) である。

実験の結果、各ファントム中につくられた²⁴Naの比放射能 a(μCi ²⁴Na/mg ²³Na), total neutron

fluence F (n/cm²), さらに a/F 比は第一表の如くであつた。

生理的食塩水では ρ = 3.34 mg/cc, Σ_T/Σ_{Na} = 530

Table 2. Neutron capture probability of phantomes.

Average neutron energy (MeV)	Cylinder		Ellipse
	Hurst	Experiment	
2.0	0.80	0.78	0.59
2.5	0.79	0.75	0.55
3.0	0.77	0.78	0.59
Thermal	0.86	0.85	0.56

Table 3. Capture probability ratio to slab poantom.

Average neutron energy (MeV)	Phantom		
	Slab	Cylinder	Ellipse
2.0	0.63	0.49	0.37
2.5	0.60	0.45	0.33
3.0	0.54	0.42	0.32
Thermal	0.20	0.17	0.11

(但し $\Sigma_{Na}=4.68 \times 10^{-5}$, $\Sigma_T=2.48 \times 10^{-2}$) である。V/S 比はファントムの形状に関係するだけであり、板状ファントムで30cm, 円柱で 7.5π cm, 楕円柱で 5π cmである。したがって、第一表のa/F比と上記の各定数を(6)式に代入すれば、各ファントムについて平均の捕獲確率 ξ は第二表のようになる。

Fig. 3は Hurst らが計算した板状ファントムおよび円柱ファントムの捕獲確率 $\xi(E)$ を示したも

のである。捕獲確率は入射中性子のエネルギーに対して比較的スムーズな曲線で与えられる。Fig. 3から明らかな如く、板状ファントムに対する円柱ファントムの捕獲確率の比 R_c は中性子のエネルギーに無関係に一定である。

平均エネルギーEを単一エネルギーEに対応させ、第二表の ξ をHurstらの結果と比較すればFig. 3の如くである。第二表から板状ファントムに対する円柱および楕円柱ファントムの捕獲確

Fig. 3. Neutron capture probability in various phantoms.

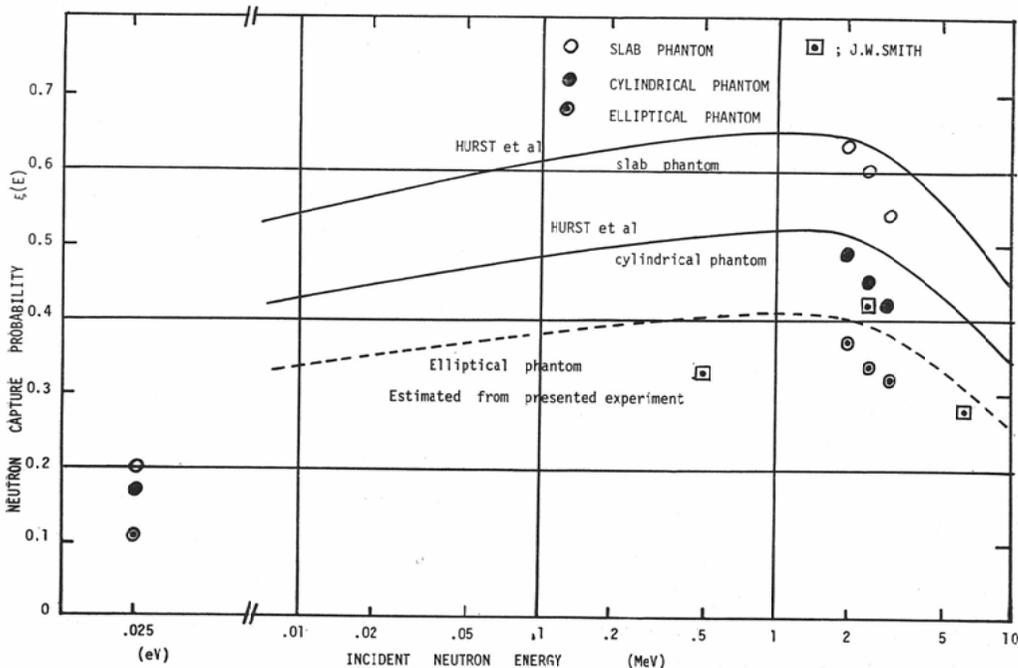


Fig. 4. Experimental arrangement.

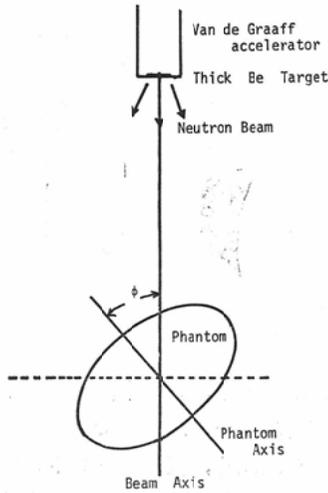
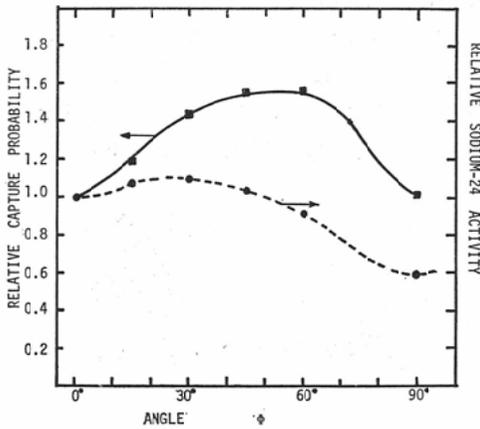


Fig. 5. Neutron capture probability



率比を求め、Hurst らの結果と比較したところ第三表の如くよく一致した。

捕獲確率はファントムの形状によつて異なるが、これはファントム中での熱中性子束分布、表面から中性子のもれに基因するものと考えられる。単一エネルギー中性子を照射してファントム中の熱中性子束分布を測定した結果¹¹⁾から考察して、捕獲確率比 R_ξ は入射中性子のエネルギーに関係なくファントムの形状によつてきまる定数であると考えられる。板状ファントムに対する楕円ファントムの捕獲確率比は第三表から $R_\xi = 0.60$ である。この値を Hurst らの板状ファントムの捕獲確率に乗じて、楕円ファントムの捕獲確率を算

出した。Fig. 3 の点線はこの方法で推定した楕円ファントムの捕獲確率と入射中性子エネルギーの関係を示したものである。Smith が単一エネルギー中性子で測定した楕円ファントムの捕獲確率はこの曲線によくあてはまる。

b. 中性子の入射角と捕獲確率の関係

人体は幾何学的に複雑な形状をもつので、中性子の入射角度により捕獲確率が異なるであろう。生理的食塩水をみたしたマネキン・ファントムに Fig. 4 のような条件で中性子を照射し、a の場合と同様にして入射角 ϕ と捕獲確率との関係を調べた。

Fig. 5 は入射角 $\phi = 0^\circ$ のときの値を 1 とした相対的捕獲確率と ^{24}Na の生成量を示したものである。捕獲確率が中性子の入射角に対して強力な関数であるから、(5)式を用いて中性子線量を推定する場合には $\xi(E)$ に角度の補正が必要である。もし事故の際に被曝条件が不明であれば、Fig. 5 から明らかな如く捕獲確率に最大60%の不正確さが生ずることになろう。同一線量の中性子に被曝したとき、入射角の相異により ^{24}Na の生成量に最大40%のちがいを生ずる。

捕獲確率の測定に伴う誤差として、1) 照射時のファントム面上での中性子束の不均一性によるもの、2) 種々の測定器による測定誤差等があり、総合して誤差は16%と推定される。

4. 線量推定

3 - (a) で算出した楕円ファントムの捕獲確率を用いて中性子線量を推定し、電離箱で測定した結果と比較した。

生理的食塩水をみたしたマネキン・ファントムに Van de Graaff 加速器を用いた $^9\text{Be}(d,n)^{10}\text{B}$ 反応から発生する中性子を照射し、ファントムの胴部から10l の溶液試料をとり ^{24}Na の放射能を whole body animal counter で測定した。

この中性子源に対する平均の捕獲確率 ξ_{ar} と単位 neutron fluence 当りの first collision dose D_{fav} (rad/n/cm²) の算出には Fig. 2 のエネルギー・スペクトルを用いた。250keV 以下の部分は金箔の放射化法で測定した neutron fluence から推

Table 4. Total neutron dose based on sodium activation.

Exposure number	Phantom volume	^{24}Na $\mu\text{Ci}/$ ^{23}Na mg	Estimated total 1neutron dose	Neutron dose (twin chamber)
1	24150ml	7.26×10^{-6}	5.6	4.5
2	24150	8.63×10^{-6}	5.1	4.5
3	8300	1.92×10^{-5}	14.9	13.5
4	9500	2.04×10^{-5}	15.8	13.5
5	8300	2.46×10^{-5}	19.0	18.0
6	9500	3.02×10^{-5}	23.1	18.0

定し、 $\int_0^{10\text{MeV}} f(E)dE = 1$ に正規化して ξ_{av} , D_{fav} を求めた。その結果 $\xi_{av} = 0.31$, $D_{fav} = 3.0 \times 10^{-9}$ であった。

ここで用いた中性子源では D_n/a 比は (5') 式より次式の如くなる。

$$D_n/a = 7.74 \times 10^5 \quad (7)$$

ファントムを用いて測定した a (^{24}Na $\mu\text{Ci}/^{23}\text{Na}$ mg) と (7) 式から推定される線量と電離箱¹²⁾で測定した線量とを比較すれば第四表の如くである。両者は15%以内でよく一致した。

臨界事故の場合でも中性子のエネルギー・スペクトルが既知ならば、楕円ファントムの捕獲確率を人体に応用してもファントムの場合と同程度の線量推定ができるであろう。

5. 結 言

人体中の Na の放射化を利用して、速中性子線量を推定するために楕円ファントムの中性子捕獲確率を測定した。

1) 板状、円柱、楕円柱ファントムについて、単位 neutron fluence 当りファントム中に生成される ^{24}Na の比放射能、さらに中性子の捕獲確率を測定した。

2) 板状ファントムに状する円柱、楕円柱ファントムの捕獲確率比は入射中性子のエネルギーによらず、ファントムの形状によつて相異するとし、Hurst らが算出した板状ファントムの捕獲確率から楕円ファントムのそれを推定した。

3) 中性子の入射角の相異により、楕円ファントムの捕獲確率は最大60%も異なり、同一中性子束によつて生成される ^{24}Na の放射能は最大40%も相違する。

4) 楕円ファントムについて推定した捕獲確率を用いて中性子線量を推定したところ、電離箱で測定した線量と15%以内で一致した。

本稿を終るに当り、種々御指導、御校閲いたゞきました本研究所橋詰雅部長をはじめ、御協力いたゞきました岩橋七郎技官、ヴァン・デ・グラーフのスタッフ山崎、三輪技官に深甚の謝意を表します。

参考文献

- 1) G.S. Hurst, R.H. Ritchie, F.W. Sander, P.W. Reinhardt, J.A. Auxier, E.B. Wagner, A.D. Callihan and K. Z. Morgan: Dosimetric investigation of YUGOSLAV radiation accident. Health Physics. 5 pp. 179-202, 1961.
- 2) The Vinca dosimetry experiment: I.A.E.A. Technical Report Series No. 6 1962.
- 3) Hanford Report, Dosimetry investigation of the recuplex criticality accident Health Physics. 9 pp. 757-768, 1963.
- 4) W.S. Snyder and J. Neufeld: Calculated depth dose curves in tissue for broad beams of fast neutrons: Brit. J. Radiol. 28, pp. 342-350, 1955.
- 5) G.S. Hurst, R.H. Ritchie and L.C. Emerson: Accident radiation excursion at the Oak Ridge Y-12 plant III: Health Physics 2. pp. 121-133, 1959.
- 6) J. W. Smith: Sodium activation by fast neutrons in man phantoms: Phy. Med. Biol. 7. pp. 341-351, 1962.
- 7) I.C.R.U. Repor 10e: Radiological dosimetry 1962.
- 8) N.B.S. Handbook 63.
- 9) T. Inada, K. Kawachi and T. Hiramoto: Neutrons from thick target Berllium (d, n) reactions at 1.0- to 3.0-MeV. to be published
- 10) 丸山隆司, 飯沼武: 事故時における被曝線量の推定, 第1報医学放射線学会誌, vol 26 No 11, 1967.
- 11) 丸山隆司, 喜多尾憲助, 河内清光: 橋詰雅ファントム中の熱中性子束分布, 医学放射線学会, 物理部会研究発表会, 1966.
- 12) 松沢秀夫, 川島勝弘, 平岡武: 速中性子の吸収線量放射研年報, 39, 40年度.