

研究論文

001 UTR-Bの放射線遮蔽計算

小久保定次郎

Radiation Shielding Calculation of UTR-B

Sadajiro KOKUBO

(昭和37年8月25日 受理)

UTR-B, university training reactor, designed by American-Standard Co., has the two-slab fuel arrangement in the core. The thermal neutron flux is $10^6 \text{n/cm}^2 \cdot \text{sec}$ in the experimental region between the slabs. The reactor has the light water as moderator and the graphite as reflector. There are 12 fuel elements, each containing aluminum-clad fuel plates with 90% enriched U-235. Total U-235 content in the core is approximately 3 Kg with the excess reactivity of 0.12%. The shielding calculation is based on two group diffusion theory.

1. 緒言

近畿大学に設置した教育訓練用の軽水減速黒鉛反射濃縮ウラン非均質型熱出力 0.1 W 原子炉 UTR-B の放射線遮蔽の方法の略図を Fig 1 及び 2 に示す。

111.76×124.24×121.92高(cm)の黒鉛反射体のまわりを直径 396.2 cmの鋼板製タンクでかこみ、この中に約21%の水分を含んだ砂をつめる。タンクの外側の鋼板の厚さは 6.0 mm, 黒鉛反射体に接近

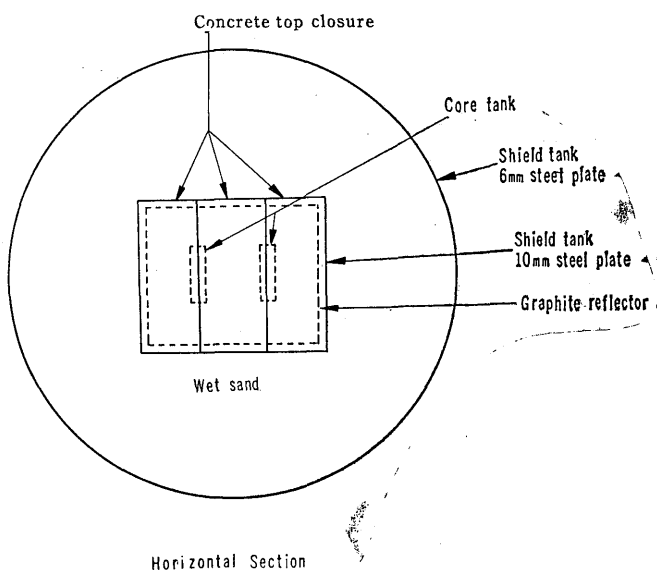
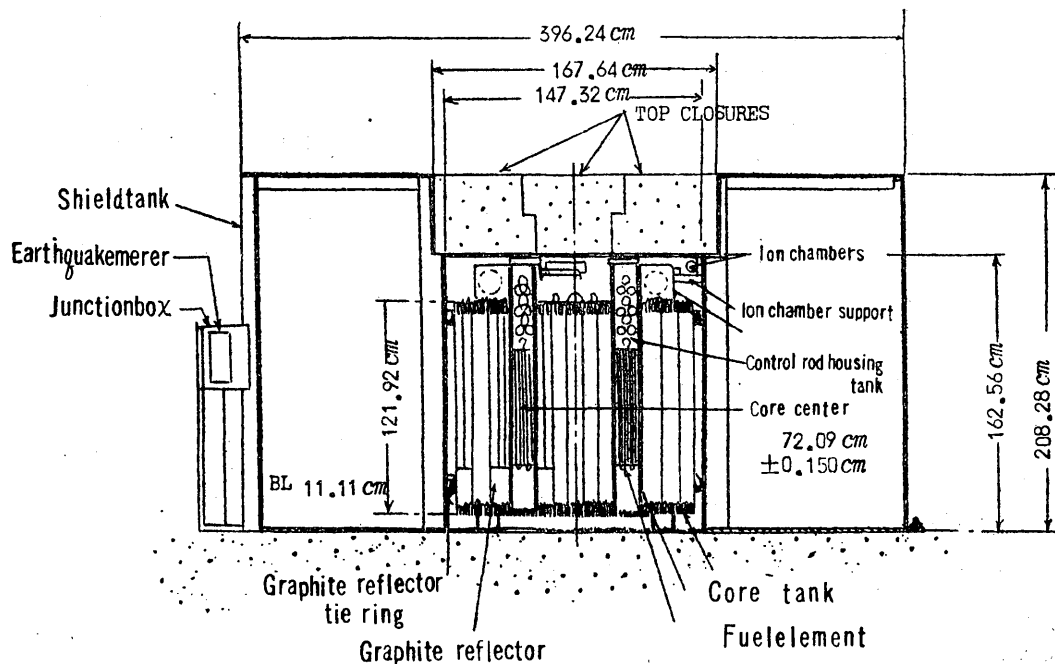
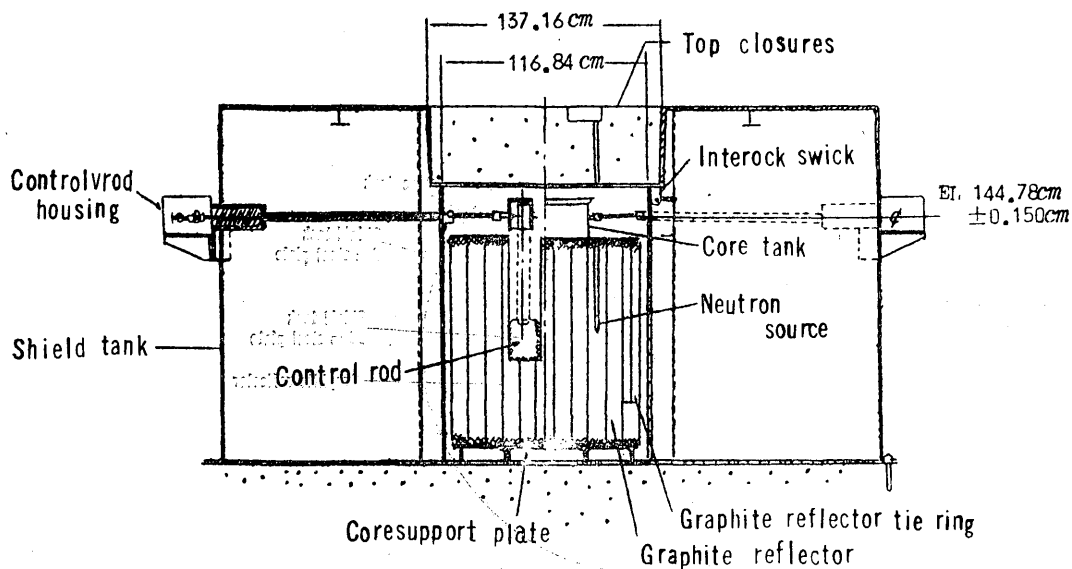


Fig. 1



Vertical Section



Vertical Section

Fig. 2

した側の鋼板の厚さは10.0 mmである。この遮蔽壁の外側における放射線量が最大許容週線量の1/10以下になる。

上蓋は厚さ3.2 mmのSS41鋼とコンクリートで造られた3個の厚さ45.72 cmのブロックで取り去ることができる。

UTR-Bの遮蔽体外に放出される放射線は種々のエネルギーをもつ中性子と一次及び二次ガンマ線を考えればよい。

反射体と遮蔽体の内側面との境界面における中性子束の値は、原子炉設置許可申請書に添附提出した説明書1の原子炉の動特性(80頁)のところに記載した結果を採用して、境界面の速中性子束は $9.5 \times 10^4 n/cm^2 \cdot sec$ 、熱中性子束は $9 \times 10^4 n/cm^2 \cdot sec$ とした。また速中性子のエネルギーの平均値は3 Mevとした。この値は核分裂中性子スペクトルの頂点の値よりも大きい。

ガンマ線は一次、二次の2群に分けられる。一次ガンマ線は即発と核分裂片の壊変及び U^{235} の中性子捕獲によるガンマ線で、二次ガンマ線は燃料板及び炉心タンクのアルミニウム、減速材の軽水、反射体の黒鉛、遮蔽体の湿砂及び鋼板などが中性子を捕獲して放出するガンマ線である。ガンマ線の減衰状況はそのエネルギーによって著しく異なるので、一次ガンマ線はエネルギーの範囲を5つのグループに分けて計算した。

2. 遮 蔽 材

遮蔽材としては約21重量%の水分を含んだ湿砂を用いる。使用する砂の化学成分としてはクラーク数3.39までの O_2 , Si, Al, Fe, およびCaを考える。これらの元素の砂中の組成比は火成岩の平均化学成分として Table 1 の値をとる。

Table 1. Chemical Composition of Igneous Rock (%)

SiO_2	68.40	O	48.57
Al_2O_3	17.77	Si	31.92
Fe_2O_3	3.56	Al	9.41
FeO	4.40	Fe	5.91
CaO	5.87	Ca	4.19

この組成の砂の見かけの比重を2.0とし、この砂1 ccに対し38.7%容積の水を加えて湿砂とする。この湿砂1 cc中の各要素の量は Table 2 の通りとなる。

Table 2. Composition of Wet-Sand (gr/cm³)

H_2O	0.387	H	0.04
SiO_2	1.36	O	1.37
Al_2O_3	0.36	Si	0.64
FeO	0.07	Al	0.19
	0.09	Fe	0.15*
CaO	0.12	Ca	0.08

*Corrected with steel plate

1 ccの容積中にこれだけの元素が一様に混合しているものとして計算を進める。

3. 速中性子の拡散

中性子の散乱断面積は Table 3 の通りである。

Table 3. Scattering-and Slowing down-Cross Sections of Shielding Material.

Target element	Mean scattering Cross section ($\bar{\sigma}_s \times 10^{24}$)	No. of atoms/cm ³ ($N \times 10^{-23}$)	$\bar{\Sigma}_s$ cm ⁻¹	ξ	$\Sigma_s l$ cm ⁻¹
H	5.2	0.241	0.1253	1.000	0.00741
O	3.2	0.516	0.1651	0.120	0.00117
Si	3.1	0.138	0.0428	0.070	0.00016
Al	3.3	0.042	0.0139	0.072	0.00005
Fe	2.8	0.016	0.0045	0.035	0.00001
Ca	2.5	0.013	0.0032	0.050	0.00001
Total $\bar{\Sigma}_s = 0.355$				Total $\Sigma_s l = 0.0088$	

$\Sigma_s l$ と ξ とは

$$\Sigma_s l = \frac{\Sigma_s}{\frac{1}{\xi} l_n \frac{E_o}{E_{th}}} \quad \xi = \frac{2}{A + \frac{2}{3}}$$

の式を用いて計算した値である。また E_o は反射体表面の中性子の energy の平均値 $E_o = 3 \times 10^6 \text{ ev}$ 。
 E_{th} は熱中性子の energy で $E_{th} = 1/40 \text{ ev}$ とした。A は考えておる各票的元素の原子量である。

いま黒鉛反射体の表面を速中性子源と考え、この面に垂直方向に X 軸をとる。簡単のため、Y 及び Z 軸方向には中性子源も遮蔽体も無限にのびていると仮定すれば遮蔽体中で成り立つ拡散方程式は

$$D_1 \frac{d^2 \phi_1}{dx^2} - \Sigma_{st} \phi_1 = 0 \quad \sum_{st} \quad (1)$$

である。 D_1 は遮蔽体の拡散係数、 Σ_{st} は先に求めた Total sam の値を用いる。
これを解けば

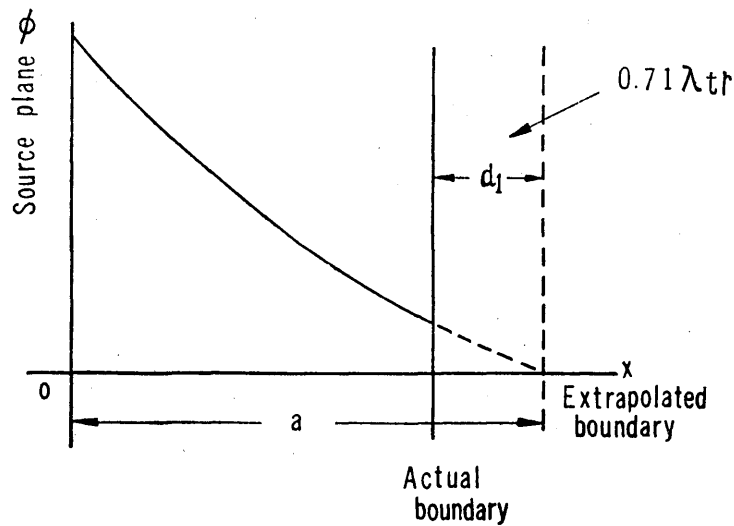
$$\phi_1 = A e^{-x/L_1} + B e^{x/L_1}, \quad L_1^2 \equiv D_1 / \Sigma_{st}$$

を得る。積分定数の A と B とは境界条件から決定する。

境界条件の一つは外挿境界 ($x=a$) で $\phi_1 = 0$ とおく。他の一つの条件は $x=0$ すなわち中性子源に接するところで立てる。中性子源の強さすなわち 1 cm^2 当り毎秒放出される中性子数を S_1 とすれば x の正方向に向う中性子数は $S_1/2$ である。

この二つの境界条件から

$$\phi_1 = \frac{S_1 \sin h [(a-x)/L_1]}{2 (D_1/L_1) \cos h (a/L_1)} = \frac{S_1}{2(D_1/L_1)} (e^{-x/L_1} - e^{-(2a-x)/L_1}) \quad (2)$$



拡散係数 D_1 、拡散距離 L_1 及び減速断面積 Σ_{st} の間には

$$D_1 = \frac{1}{3}\Sigma_s, \lambda_s = \frac{1}{\Sigma_s}, L_1^2 = D_1 / \Sigma_{st}$$

の関係があるから輸送平均自由行程 λ_{tr} 及び外挿距離 d_1 は

$$\lambda_{tr} = \frac{\lambda_s}{1 - \frac{2}{3A}} = 2.90 \text{ cm}$$

$$\text{外挿距離 } d_1 = 0.71 \times \lambda_{tr} = 2.06 \text{ cm}$$

但し、ここに用いた A は各票的元素の原子量の比例平均値 $A = 22.75$ とした。

$$D_1 = \frac{1}{3\Sigma_s} = 0.93 \text{ cm} \quad L_1^2 = 0.93 / 0.0088 = 105.68$$

$$D_1 / L_1 = 0.09 \quad L_1 = 10.3$$

$$x = 121.92 \text{ cm} \quad a - x = 2.06 \text{ cm}, a = 123.98 \text{ cm}$$

$$\begin{aligned} \phi_1 &= \frac{9.5 \times 10^4}{2 \times 0.083} (e^{-121.92 / 10.3} - e^{-(247.96 - 121.92) / 10.3}) \\ &= 0.634 n / \text{cm}^2 \cdot \text{sec} \end{aligned}$$

遮蔽外に出てくる速中性子はこの値の半分 $0.32 n / \text{cm}^2 \cdot \text{sec}$ であって許容線束密度より小さい。

4. 熱中性子の拡散方程式

速中性子の遮蔽計算のところで仮定はこの場合にも適用する。熱中性子の拡散方程式は

$$D_2 \frac{d^2 \phi_2}{dx^2} - \Sigma_2 \phi_2 + \Sigma_{sl} \phi_1 = 0. \quad (3)$$

添字の 1, 2 は速中性子と熱中性子に対するものを表わす。 Σ_{sl} は前記の Table 3 に与えた値を採用する。

遮蔽材の各成分元素の σ_a (註 1) と Σ_a は Table 4 の通りである。

Table 4.

	$\sigma_a \times 10^{24}$	$\Sigma_a \text{ cm}^{-1}$
H	0.332	8.00×10^{-3}
O	$< 0.2 \times 10^{-3}$	0.103×10^{-3}
Si	0.16	0.221×10^{-2}
Al	0.23	0.966×10^{-3}
Fe	2.53	0.405×10^{-2}
C _a	0.44	0.572×10^{-3}
Total $\Sigma_a = 15.7 \times 10^{-3}$		

式(3)の Σ_2 の値としては Table ~~4~~⁴ の Total $\Sigma_a = \frac{15.7}{87.89} \times 10^{-3}$ を用いる。

$$\phi_2 = A e^{-x/L_2} + B e^{x/L_2} + \Sigma_{sl} \phi_1 \quad (4)$$

とにおいて積分定数の A と B とを境界条件から決定する。条件の一つは $x = b$ で $\phi_2 = 0$ とし、

他の一つは $x = 0$ で $\frac{S_2}{2} = -D_2 \frac{b\phi_2}{dx}$ の条件からきめる。

$$\phi_2 = \frac{S_2 \sin h \left[(b-x) / L_2 \right]}{2 (D_2 / L_2) \cos h (b / L_2)} + \Sigma_{sl} \phi_1 = 0 \quad (5)$$

を得る。ここで前と同様に

$$D_2 \equiv \frac{1}{3\Sigma_a}, \quad L_2 \equiv D_2 / \Sigma_a$$

を用いて書替えると

$$\phi_2 = \frac{\sqrt{3} S_2}{2} \frac{\sin h \left[\sqrt{3} \Sigma_a (b-x) \right]}{\cos h (\sqrt{3} \Sigma_a b)} + \Sigma_{sl} \phi_1$$

遮蔽体の表面のところでは $x = 121.92 \text{ cm}$

$$b-x = \frac{2}{3\Sigma_a} = 42.46 \text{ cm}, \quad b = 164.38 \text{ cm} \quad (6)$$

Σ_{sl} , ϕ_1 は前に求めた値を用いる。また S_2 は黒鉛反射体の表面での熱中性子束の値 $9 \times 10^4 \text{ n/cm}^2 \cdot \text{sec}$ を用いて計算すると

$$\phi_2 = 0.69 + 0 \text{ n/cm}^2 \cdot \text{sec} = 0.69 \text{ n/cm}^2 \cdot \text{sec}$$

となる。遮蔽体から外に放出される熱中性子束は上記の値の半分である。すなわち 約 $0.4 \text{ n/cm}^2 \cdot \text{sec}$ となる。

許容線量の $1/100$ よりも小さい。

5. 炉上面の中性子遮蔽

1回の核分裂で放出される中性子の平均数を 2.5 個とし、それらの中性子の energy スペクトル (註2) は Table 5 に示す。

Table 5.

Energy range (Mev)	No. of neutrons emitted per fission	No. of neutrons emitted per second
0 ~ 2	1.5050	4.66×10^9
2 ~ 4	0.7225	2.24×10^9
4 ~ 6	0.2075	6.43×10^8
6 ~ 8	0.0506	1.57×10^8
8 ~ 10	0.0114	3.53×10^7
> 10	0.0030	9.30×10^6
	2.5	7.75×10^9

放出される中性子の総数 $No = (3.1 \times 10^{10}) \times (0.1) \times (2.5) = 7.75 \times 10^9 \text{ n/sec}$ 。

中性子は点線源から放出されるものとみなし、その $1/4$ が速中性子として逸出するものとするれば、線源から r の距離における中性子の線量は

$$N = \frac{No}{4} \frac{e^{-\Sigma r}}{4\pi r^2} \quad (7)$$

で与えられる。式中 r は遮蔽体の厚さ、 Σ は遮蔽体の吸収断面積の総和である。

コンクリートは比重 2.32 で成分の約50%は酸素で、Ca が19% Si が 18%とその他少量の Mg, C, Fe などを含むものであるが、酸素, Ca, Si のほかはすべて Fe であるとして、コンクリートの組成を計算すると Table 6 のようになる。

Table 6.

Target element	Abundance (%)	Weight in 2.32'gr	No. of atoms in 1 cm ³
O	50	1.16	4.37×10^{22}
Ca	19	0.44	6.63×10^{21}
Si	18	0.42	9.04×10^{21}
Fe	13	0.30	3.21×10^{21}

この組成のコンクリートの厚さは 45.72 cm で、黒鉛の厚さは 60.96 cm である。黒鉛の比重は 1.65にとる。遮蔽体の吸収断面積は Table 7 のように計算される。(註3)

Table 7.

Average Energy (Mev)	Graphite		Concrete							
	σ_a barn	Σ_a cm ⁻¹	O		Ca		Si		Fe	
			σ_a	Σ_a	σ_a	Σ_a	σ_a	Σ_a	σ_a	Σ_a
1	3.4	0.282	3.0	0.131	2.0	0.013	3.0	0.027	2.5	0.008
3	2.0	0.166	2.5	0.109	2.0	0.013	2.5	0.023	3.2	0.010
5	1.3	0.108	1.3	0.057	2.0	0.013	2.5	0.023	3.6	0.012
7	1.0	0.083	1.3	0.057	2.0	0.013	1.8	0.016	3.5	0.011
9	1.0	0.083	1.3	0.057	2.0	0.013	1.8	0.016	3.0	0.010
> 10	1.0	0.083	1.3	0.057	2.0	0.013	1.8	0.016	2.5	0.008

表中Ca については中性子 energy 0.8~7 Mev の間に実測値が見当たらないので、この両端の実測値から $\sigma = 2.0$ barn とした。

Table 6 と 7 の値を式(7)に入れて計算すると Table 8 のようになる。

Table 8.

Energy (Mev)	Source strength	$\Sigma_1 x_1 + \Sigma_2 x_2$	$e^{-(\Sigma_1 x_1 + \Sigma_2 x_2)}$	Neutrons, out of shield (n/cm ² -sec)	m rem/hr
1	4.66×10^9	25.4	9.31×10^{-12}	7.75×10^{-8}	0.14×10^{-8}
3	2.24×10^9	17.2	3.39×10^{-8}	2.82×10^{-5}	0.54×10^{-4}
5	6.43×10^8	11.4	1.12×10^{-5}	9.32×10^{-2}	0.17×10^{-2}
7	1.57×10^8	9.49	7.56×10^{-5}	6.29×10^{-1}	0.12×10^{-1}
9	3.53×10^7	9.44	7.95×10^{-5}	6.61×10^{-1}	0.12×10^{-1}
> 10	9.30×10^6	9.36	8.61×10^{-5}	7.16×10^{-1}	0.13×10^{-1}

表中 Σ_1 と Σ_2 は黒鉛とコンクリートとの積分吸収断面積, x_1 と x_2 とは両者の厚さを表わす。

$$4\pi r^2 = 4\pi (136.21)^2 = 2.33 \times 10^5$$

$$\frac{No}{4} \frac{1}{4\pi r^2} = 8.32 \times 10^3$$

Table 9 の最後の欄の数値は $4017 n / \text{cm}^2 \cdot \text{sec}$ の中性束を 7.5 mrem/hr に相当するとして計算したもので、炉上面の中性子線量は 0.04 mrem/hr の程度となる。コンクリート上蓋の下面には厚さ 3.2 mm の鋼板を用いてあるが上の計算ではこれを無視した。

6. 炉側面の遮蔽外の一次 γ 線量

一次 γ 線スペクトル (註 4) は Table 9 に示す。

Table 9. Primary γ -ray spectrum

Energy range (Mev)	Mean energy of photons (Mev)	No. of photons emied per fission	Total energy (Mev)
0 ~ 2	1	9.31	9.31
2 ~ 4	3	0.75	2.25
4 ~ 6	5	0.099	0.495
6 ~ 8	7	0.0154	0.1078
8 ~ 10	9	0.0029	0.0261

表示の γ 量子数は即発 γ , 核分裂片の壊変 γ , および U^{235} の中性子吸収による γ の和である。核分裂回数が $3.1 \times 10^{10} \times 0.1 = 3.1 \times 10^9 / \text{sec}$ である場合に毎秒放出される γ 量子数 n は下のようになる。

Energy (Mev)	n / sec
1	2.89×10^{10}
3	2.32×10^9
5	3.07×10^8
7	4.77×10^7
9	8.99×10^6

この一次 γ 線が点線源から放出されるものとする。遮蔽体は 15.24 cm の水, 厚さ 58.42 cm の黒鉛, 124.46 cm の湿砂, および 1.6 cm の鋼から成っておる。2 個の炉心タンクの厚さは 30.48 cm に相当するがアルミニウムの γ 線吸収は省略して計算する。

遮蔽体の線吸収係数は (註 5) Table 10 に記す。

Table 10.

Energy (Mev)	Water		Graphite		Iron		Wet sand		$\Sigma\mu x$
	μ	μx	μ	μx	μ	μx	μ	μx	
1	0.094	1.43	0.146	8.53	0.47	0.749	0.149	18.54	29.23
3	0.053	0.81	0.082	4.79	0.28	0.454	0.085	10.58	16.63
5	0.042	0.64	0.062	3.62	0.25	0.394	0.067	8.34	12.99
7	0.036	0.55	0.053	3.10	0.24	0.378	0.059	7.34	11.37
9	0.030	0.46	0.047	2.74	0.23	0.371	0.054	6.72	10.29

表中に湿砂の線吸収係数は普通コンクリート（比重 2.30）の μ の値をとった。
この値を用いて線量を計算すると Table 11 のようになる。

Table 11.

Energy (Mev)	No. of γ photons (n/sec)	Buildup factor ($\Sigma\mu x$)	$e^{-\Sigma\mu x}$	$\frac{\Sigma\mu x e^{-\Sigma\mu x}}{4\pi r^2}$	γ ray inte- nsity out of shield	mrem/hr
1	2.89×10^{10}	29.23	2.02×10^{-13}	1.48×10^{-16}	4.28×10^{-6}	7.13×10^{-3}
3	2.32×10^9	16.63	5.99×10^{-8}	2.49×10^{-11}	5.78×10^{-2}	9.63×10^{-1}
5	3.07×10^8	12.99	2.28×10^{-6}	7.41×10^{-10}	2.27×10^{-1}	3.78×10^{-1}
7	4.77×10^7	11.37	1.15×10^{-5}	3.27×10^{-10}	1.56×10^{-2}	2.60×10^{-2}
9	8.99×10^6	10.29	3.40×10^{-5}	8.74×10^{-9}	7.86×10^{-2}	1.31×10^{-2}

Total 6.31×10^{-1}

$$\frac{1}{4\pi r^2} = \frac{1}{4\pi (15.24 + 58.42 + 124.46 + 1.6)^2} = 25 \times 10^{-6}$$

表11の最後の数値は $600 \text{ Mev/cm}^2 \cdot \text{sec} = 1 \text{ mrem/hr}$ として計算した。
遮蔽外の一次 γ 線量は $6.31 \times 10^{-4} \text{ mrem/hr}$ となる。

7. 炉上面の一次 γ 線量

炉上面の遮蔽体の厚さは水 75.25 cm, 鉄 0.32 cm, コンクリート 45.25 cm である。水とコンクリートの γ 線吸収係数は Table 12 のようになる。

Table 12.

Energy (Mev)	Absorption coefficient μ	
	water*	Concrete
1	0.094	0.149
3	0.053	0.085
5	0.042	0.067
7	0.036	0.058
9	0.030	0.055

* Calculated with the assumption
that 40 l of aluminium dissolved
uniformly in the 120 l of water

計算の結果を Table 13 にまとめてある。すなわち遮蔽の上部外側の γ 線量は 0.2 mrem/hr の程度である。

Table 13.

Energy Mev	μx			$\Sigma \mu x$	$\frac{\Sigma \mu x e^{-\Sigma \mu x} - \Sigma \mu x}{4\pi r^2}$	γ ray intensity on the shield	$mrem/hr$
	water*	Iron	Concrete				
1	7.07	0.15	6.81	14.03	2.80×10^{-11}	0.809	0.0014
3	3.99	0.09	3.89	7.97	0.68×10^{-8}	15.776	0.0788
5	3.16	0.08	3.11	6.35	0.28×10^{-7}	8.596	0.0716
7	2.71	0.08	2.65	5.44	0.58×10^{-7}	2.767	0.0323
9	2.25	0.07	2.51	4.83	0.95×10^{-7}	0.854	0.0128

Total 0.1969

*Calculated with the assumption that 40 l of aluminium dissolved in the 120 l of water.

炉上面の一次ガンマ線量は 0.2 mrem/hr 程度である。

8. 中性子捕獲による二次 γ 線の計算

捕獲 γ 線は燃料板および炉心タンクのアリミニウム、減速材の水、反射体の黒鉛、遮蔽体の湿砂および鉄板から放出される。

9. 水による捕獲 γ 線

H₂O は速または熱中性子の照射によってきわめてわずかに γ 放射性になるが問題とする程度でない。軽水中の H¹ は中性子を捕獲 ($\sigma_a = 0.333$ barns) して H² となり、これがまた中性子を捕獲 ($\sigma_a = 0.0006$ barns) して H³ となり、 γ 線を放出するが、その量はきわめて微量である。軽水中に天然に存在する H² も微量 ($\sim \frac{1}{7000}$) である。

H₂O 中の O¹⁶ (存在比 99.8%) は中性子を捕獲して O¹⁶ (n, p) N¹⁶ となり, N¹⁶ が半減期 7.4 秒 で 6~7 Mev の γ 線を放出するが, 9 Mev 以上の energy の中生子でないといこの反応を起さない。9 Mev 以上の energy をもつ核分裂中性子の割合は甚だ少なく, しかも水素核とただ一回の衝突で 9 Mev 以下になり易いから, O¹⁶ に捕獲されて γ 放射性になし得る処女中性子束を ϕv とすればこれは次式で与えられる。

$$\phi v = \frac{n}{\Sigma_{in}} = \frac{(3.1 \times 10^{10}) (2.5) p}{N_H \sigma_H}$$

式中 n は炉心の 1 cm³ から毎秒放出される中性子の数, Σ_{in} は 9 Mev 以上の核分裂中性子に対する水素核の全散乱断面積, p は炉心 1 cm³ 当りの出力 $= \frac{0.1}{128 \times 10^3}$ (燃料は 120 l の水中に一樣に分散しておるものと仮定する。燃料要素 8 l), N は 1 cm 当りの水素核の数 $[(120/128) 6.6 \times 10^{22}]$, σ_H は 9 Mev 以上の中性子に対する水素核の散乱断面積 ≈ 1 barn。

上の値を入れて計算すると $\phi v \approx 9.8 \times 10^5$

従って N¹⁶ の放射能の飽和値は

$$\phi v N \sigma = (9.8 \times 10^5) (3.3 \times 10^{22}) (4 \times 10^{-29}) = 1.3 \text{ 壊変 / sec} \cdot \text{cm}^3$$

天然に存在する O¹⁸ は熱中性子を捕獲して O¹⁸ (n, γ) O¹⁹ 反応を起すが, O¹⁸ の存在率は 0.2 % でその断面積も約 $2.1 \times 10^{-28} \text{cm}^2$ であるから, 燃料領域の $\bar{\phi}_h = 9.5 \times 10^5$ での壊変回数は $(9 \times 10^5) (3.3 \times 10^{23}) (2.0 \times 10^{-3}) (2.8 \times 10^{-28}) \approx 1.7 \times 10^{-2} \text{ 壊変 / sec} \cdot \text{cm}^3$ となる。

10. アルミニウムによる二次 γ 線

燃料要素と炉心タンクに用いられておるアルミニウムの量は約 108 kg (40 l) である。アルミニウムの熱中性子に対する励起断面積を $0.2 \times 10^{-24} \text{cm}^2$ とする。108 kg のアルミニウムが燃料領域 (160 l) に一樣に分散しておると仮定する。1 cm³ 内にあるアルミニウム核の数 N は $(108000 / 27) (6.02 \times 10^{23}) / 160 \times 10^3 = 1.5 \times 10^{23}$

壊変回数は

$$\phi N \sigma = (9.8 \times 10^5) (1.5 \times 10^{23}) (0.21 \times 10^{-24}) \approx 3.1 \times 10^4 \text{ 壊変 / sec} \cdot \text{cm}^3$$

全壊変回数は $(3.1 \times 10^4) (1.6 \times 10^5) = 4.96 \times 10^9 = 4.96 \times 10^9$ となる。

この壊変に伴う二次 γ 線が点線源から放出されるものと仮定して計算を進める。

この二次 γ 線のスペクトルは Table 14 に示す。

Table 14. Secondary γ ray spectrum of aluminium

Energy range (Mev)	Mean energy of γ ray (Mev)	No. of photons per disintegration	Total energy (Mev)
1 ~ 3	2	> 0.13	> 0.26
3 ~ 5	4	0.77	3.08
5 ~ 7	6	0.21	1.26
> 7	7	0.35	2.45

壊変回数が $4.96 \times 10^7/\text{sec}$ であるから放出される γ 量子数は下のようになる。

Energy (Mev)	n / sec
2	$> 6.45 \times 18^8$
4	3.82×19^9
6	1.04×10^7
7	1.74×10^7

イ. 炉側面の遮蔽外の二次 γ 線量

遮蔽体の線吸収係数及び再生係数は Table 15 のようになる。但し炉心タンクの厚さ 15.24 cm, 黒鉛58.42 cm, 湿砂 124.46 cm, 鋼 1.6 cm とする。

Table 15.

Energy (Mev)	Water*		Graphite		Iron		wet sand		$\Sigma\mu x$
	μ	μx	μ	μx	μ	μx	μ	μx	
2	0.066	1.006	0.102	5.959	0.334	0.560	0.102	12.69	20.22
4	0.046	0.701	0.070	4.091	0.260	0.400	0.073	9.09	14.28
6	0.038	0.579	0.056	3.272	0.239	0.382	0.061	7.59	11.82
7	0.036	0.549	0.053	3.096	0.236	0.378	0.058	7.22	11.24

* Calculated with the assumption that 40 l of aluminium dissolved in the 120 l of water.

この値を用いて遮蔽側面の線量を計算すると Table 16 のようになる。すなわち炉側面外に出てくるアルミニウムからの二次 γ 線量は約 0.04 mrem/hr である。

Table 16.

Energy (Mev)	$e^{-\Sigma\mu x}$	$\frac{\Sigma\mu x e^{-\mu x}}{4\pi r^2}$	Intencity of γ ray out of the shield	mrem/hr
2	1.65×10^{-9}	6.67×10^{-14}	3.80×10^{-5}	1.23×10^{-7}
4	6.28×10^{-7}	1.79×10^{-11}	6.84×10^{-2}	4.56×10^{-4}
6	7.36×10^{-6}	1.74×10^{-10}	1.81×10^{-1}	1.81×10^{-3}
7	1.31×10^{-5}	2.94×10^{-10}	5.12×10^{-1}	5.97×10^{-3}

Total 8.24×10^{-3}

アルミニウムの二次 γ 線の炉側面における線量は許容量の約 1/100 以下である。

ロ. アルミニウムからくる炉上面の二次 γ 線量

前と同様にして計算すると Table 17 のようになる。

Table 17

Energy (Mev)	water		Iron		Concrete		$\Sigma\mu x$	$\frac{\Sigma\mu x e^{-\mu x}}{4\pi r^2}$	Intensity of γ ray on the shield	mrem/hr
	μ	μx	μ	μx	μ	μx				
2	0.066	4.97	0.334	0.107	0.110	5.04	10.12	1.01×10^{-9}	0.651	0.0022
4	0.046	3.46	0.260	0.083	0.073	3.34	6.88	0.02×10^{-7}	7.64	0.0509
6	0.038	2.86	0.239	0.076	0.062	2.83	5.77	0.46×10^{-7}	4.78×10^1	0.478
7	0.036	2.71	0.236	0.075	0.058	2.65	5.44	0.58×10^{-7}	1.01×10^2	1.18

Total 1.71

11. グラハイトからくる側面の二次 γ 線

グラハイトの熱中中性子に対する (n, γ) 断面積は 0.0045 barns で, ($\Sigma a = 0.00037 \text{ cm}^{-1}$), 放出される γ 量子の約80%は 3~5 Mev (最大 energy 4.95 Mev) であって, 約20%は 3 Mev 以下の energy であるから, ここでは1回の壊変で4 Mev の量子を 1.3個 放出するものとして計算する。

グラハイトからくる二次 γ 線の炉側面の線量

$$T_G = \int_0^T G \cdot \frac{\Sigma a \bar{\phi}_{th}}{2} \cdot F e^{-\mu(G)x} dx \cdot e^{-[\mu(c)T_c + \mu(s)T_s]} \mu(c)T_c \cdot \mu(s)T_s$$

式中

Σa はグラハイトの熱中中性子に対する積分吸収断面積 = 0.0037 cm^{-1} , $\bar{\phi}_{th}$ はグラハイト領域の熱中中性子の平均線束 = 4.98×10^4 , F は1回の壊変で放出される γ 量子数 = 1.3

$\mu(G)$, $\mu(c)$, $\mu(s)$ はそれぞれグラハイト, コンクリート, 鉄の γ 線吸収係数; $\mu(G) = 0.070$, $\mu(c) = 0.0745$, $\mu(s) = 0.260$; $T(G)$, $T(c)$, $T(s)$ はそれぞれグラハイト, コンクリート, 鉄の厚さである。

$$T(G) = 58.42 \text{ cm} \quad T(c) = 124.46 \text{ cm} \quad T(s) = 1.6 \text{ cm} \text{ として}$$

上式を積分すると

$$\begin{aligned} TG &= \frac{\Sigma a \bar{\phi}_{th}}{2} F (1 - e^{-\mu(G)T_G}) e^{-[\mu(c)T_c + \mu(s)T_s]} \frac{\mu(c)T_c \mu(s)T_s}{\mu(G)} \\ &= (9.21) (0.983) (1.3) (6.20 \times 10^{-5}) (55.6) \\ &= 0.04/\text{cm}^2 \cdot \text{sec} = 2.7 \times 10^{-4} \text{ mrem/hr} \end{aligned}$$

この最後の数値は $600 \text{ Mev/cm}^2 \cdot \text{sec} = 1 \text{ mrem/hr}$ とした。

12. 湿砂からくる側面の二次 γ 線

湿砂中の水による捕獲 γ 線は問題にならないほど微弱であるから計算を省き、他の成分について計算する。

Table 18.

Target element	No. of atoms in the wet sand $\text{N/cm}^3 \times 10^{-23}$	σ_a (barn)	$\Sigma a \text{ cm}^{-1}$	No. of γ photons produced per disintegration			
				1~3 Mev	3~5 Mev	5~7 Mev	> 7 Mev
Si	0.138	0.16	0.22×10^{-2}	1	2.29	0.41	0.16
Al	0.042	0.23	0.966×10^{-3}	0.13	0.77	0.21	0.35
Fe	0.014	2.53	0.354×10^{-2}	0.10	0.24	0.22	0.50
Ca	0.013	0.44	0.572×10^{-3}	0.50	0.60	1.01	0.02

湿砂の吸収係数 μ の値としてはコンクリートのそれを採用する。

$$\Gamma_{\gamma} = \int_0^{Tc} \frac{\Sigma at \bar{\phi}_2}{2} F e^{-\mu(c)x} dx \cdot e^{-\mu(s)Ts}$$

$\bar{\phi}_2$ の値としては黒鉛反射体の表面の熱中性子束 ϕ_2 と遮蔽外側面の ϕ_2 との平均値として 4.5×10^2 をとる。

Σat はTable 18の Σa の総和である。すなわち $\Sigma at = 0.0073 \cdot F$ 及び $\mu(c)$ は下のようにとる。

Table 19.

Energy (Mev)	F	$\mu(c)$	$\mu(c)Tc$	$e^{-\mu(c)Tc}$	$\frac{\Sigma at \bar{\phi}_2}{2\mu(c)}$	$\mu(s)Ts$
2	1.73	0.105	13.07	2.11×10^{-6}	15.64	2.00
4	3.90	0.074	9.21	1.00×10^{-6}	22.20	1.56
6	1.85	0.063	7.84	3.94×10^{-4}	26.07	1.43
> 7	1.03	0.057	7.09	8.33×10^{-4}	28.82	1.42

Table 20.

Energy (Mev)	$\frac{\Sigma at \bar{\phi}_2 F}{2}$	$\frac{e^{-\mu(s)Tc}}{\mu(c)}$	$1 - e^{-\mu(c)Tc}$	$\phi(r)$	mrem / hr
2	2.88	1.29	1.000	3.71	1.24×10^{-2}
4	6.40	2.84	0.999	3.98	2.65×10^{-2}
6	3.04	3.79	0.999	11.51	3.53×10^{-2}
7	1.69	4.25	0.999	7.16	8.63×10^{-2}

Total 0.16 mrem/hr

$$\Gamma_c = \frac{\Sigma_{nt} \bar{\phi}_2 F}{2} \frac{e^{\mu(s) T_s}}{\mu(c)} (1 - e^{-\mu(c) T_c}) \approx 0.2 \text{ mrem/hr}$$

13. 鉄からくる側面の二次 γ 線

鉄板は湿砂の内側に 10 mm 厚，湿砂の外側に 6 mm 厚であるから両者をともに面線源とみなして計算する。遮蔽外の γ 線束を Γ_s で表わすと Γ_s は次の式で計算される。

$$\Gamma_s = \Sigma_{as} \phi_{21} F e^{[\mu(c) T_c + \mu(s) T_s]} + \Sigma_{as} \phi_{22} F = \Gamma_{1s} + \Gamma_{2s}$$

式中 Σ_{as} は鉄板の熱中性子に対する積分吸収係数， ϕ_{21} ， ϕ_{22} は内側及び外側の鉄板中の熱中性子束 $\Sigma_{as} = 0.214$

$$\phi_{21} = 9 \times 10^4, \phi_{22} = 0.054 \text{ (n/cm}^2 \cdot \text{sec)}$$

Table 21.

Energy (Mev)	F	$\mu(c) T_c$	$\mu(s) T_s$	$\frac{e^{-\mu(c) T_c}}{\times e^{-\mu(s) T_s}}$	$\Sigma_{as} \phi_{21} F$	Γ_{2s}	Γ_{1s}	$\Gamma_{1s} + \Gamma_{2s}$
2	0.1	13.07	0.200	7.03×10^{-7}	1.93×10^3	0.001	1.36×10^{-3}	2.36×10^{-3}
4	0.24	9.21	0.156	2.09×10^{-7}	4.62×10^3	0.003	9.66×10^{-4}	3.97×10^{-3}
6	0.22	7.84	0.143	9.42×10^{-5}	4.24×10^3	0.002	3.99×10^{-1}	4.01×10^{-1}
7	0.50	7.09	0.142	2.02×10^{-4}	9.63×10^3	0.006	1.94	1.95

Total 2.36 n/cm²·se

$$\Gamma_s = 2.36 \text{ n/cm}^2 \cdot \text{sec} = 16.1 \text{ Mev/cm}^2 \cdot \text{sec} \approx 0.027 \text{ mrem/hr}$$

炉側面の全二次 γ 線量は

$$\Gamma = \Gamma_{Al} + \Gamma_G + \Gamma_c + \Gamma_s \approx 0.2 \text{ mrem/hr}$$

となり，許容最大線量よりも小さい

炉上面の二次 γ 線量はアルミニウムのみで 1.7 mrem/hr となる。

文 献

1. Donald J. Hughes and Robert B. Schwarts, Neutron Cross Sections, 2nd Ed. (1958)
2. Richard Stephenson, Introduction to Nuclear Engineering. p.209.
3. Donald J. Hughes and Robert B. Schwarts, Neutron Cross Sections, 2nd Ed. (1958)
4. J. W. Motz, Gamma-ray spectra of the Los Alamos Reactors AECD-3286 (1951).
5. 文部省大学々術研究助成課ガンマ線照射施設調査委員会編，ガンマ線照射施設。