資 料

1 センチメートル線量当量透過率[†]

一宮 勉

(社)日本アイソトープ協会技術課

113 東京都文京区本駒込2-28-45

Key Words: photon, 1 cm dose equivalent, absorbed dose in air, exposure dose, iron, lead, concrete, shielding, transmission

1. はじめに

放射線障害防止法の改正に伴い、外部被曝線量は線量当量で評価することが義務づけられることになった。昭和63年5月18日に告示が公布されてから、すでに1年半を経過した。それに伴い、田中ら¹⁾は線量当量に対応した光子の遮蔽計算の方法および核種と遮蔽材別に1cm線量当量透過率表を示した。またその中で、遮蔽材を通過後の光子のエネルギー分布に基づく空気吸収線量から線量当量への実効換算係数の概念を確立し、そのデータを提示した。実効換算係数の値を用いることにより、照射線量から比較的簡単に線量当量へ移行することができる。さらに現在まで蓄積された膨大な量の遮蔽計算のデータも充分活用可能であることを具体的な計算例をもって示した。

田中らは、核種と遮蔽材別の透過率を計算するさいに、計算の簡略化のために近いエネルギーの光子のグループ化を行っている。グループ内での最も高いエネルギーを代表とし、放出率については加算して透過率表を作成している。この方法によると、計算された透過率はエネルギーのまとめ方にもよるが、一般に安全側に過大評価した値となる傾向にある。さらに、アイソトープ手帳に記載されている1cm線量当量率定数²⁾と異なる定数を使用することになり、実用上いささか矛盾する。また、使用している照射線量ビルドアップのデータは点線源ジオメトリと遮蔽材が無限厚のものであり、垂直入射ジオメトリで遮蔽材が有限厚の場合のデータに比べ、すでに安全側の結果となるデータで

ある。アイソトープの貯蔵能力・管理区域の設定等の遮蔽計算において、安全側の遮蔽計算は必要ではあるが、過度の安全側の遮蔽計算をすることは有益とはならない。

したがって、本稿ではエネルギーによる光子線のグループ化を行うことなく、なるべく核データに忠実に透過率を計算した。本稿で使用した核データは、米国の評価済み核構造データファイル ENSDF から引き出したものである。ただし、X線のエネルギーと放出率は日本原子力研究所の山口勇吉氏が作成したプログラム RADCAL による。光子線の減衰係数はアイソトープ手帳のデータ³⁾を採用した。表1に元の質量減衰係数から線減衰係数に換算した値を示す。光子が遮蔽材を通過した後の空気吸収線量から線量当量に換算する実効換算係数は田中らの文献¹⁾のデータを使用した。照射線量ビルドアップデータの算出は GP(geometric progression) 法⁴⁾を採用した。GP 法は精度よく元のビルドアップを再現でき、任意の透過距離のビルドアップ係数ばかりでなく、各パラメータを Akima 法⁵⁾で補間することにより任意のエネルギーのビルドアップを再現できる。最新の GP パラメータと計算コードは日本原子力研究所むつ事業所の坂本幸夫氏から提供を受けた計算コード QAD-CGGP 2 と G 33-GP 2 から抽出し、透過率の計算コードを独自に開発して計算に当たった。

2. 計 算 方 法

以下に、透過率の計算方法を簡単に述べる。

単一のエネルギーの光子については、遮蔽材がない場合の線量当量 $H_0(\text{Sv})$ は、空気吸収線量 $D_0(\text{Gy})$ と換算係数 f_x から次式により計算できる。

$$H_0 = f_x \cdot D_0 \quad (1)$$

[†] Transmission of 1 cm Dose Equivalent. Tsutumu ICHIMIYA: The Japan Radioisotope Association, 28-45, Honkomagome 2-chome, Bunkyo-ku, Tokyo 113, Japan.

表1 光子の減衰係数

Fe ($\rho=7.86$)		Pb ($\rho=11.34$)		コンクリート ($\rho=2.30$)	
光子のエネルギー (MeV)	線減衰係数 (cm^{-1})	光子のエネルギー (MeV)	線減衰係数 (cm^{-1})	光子のエネルギー (MeV)	線減衰係数 (cm^{-1})
0.010	1.333 E +3	0.010	1.425 E +3	0.010	6.017 E +1
0.015	4.434 E +2	0.0130351	7.173 E +2	0.015	1.857 E +1
0.020	1.982 E +2	0.0130352	1.795 E +3	0.020	8.073 E +0
0.030	6.233 E +1	0.0150	1.229 E +3	0.030	2.627 E +0
0.040	2.734 E +1	0.0151999	1.186 E +3	0.040	1.307 E +0
0.050	1.457 E +1	0.0152	1.648 E +3	0.050	8.393 E -1
0.060	8.890 E +0	0.0158607	1.490 E +3	0.060	6.316 E -1
0.080	4.331 E +0	0.0158608	1.721 E +3	0.080	4.602 E -1
0.10	2.692 E +0	0.020	9.538 E +2	0.10	3.915 E -1
0.15	1.438 E +0	0.03	3.289 E +2	0.15	3.213 E -1
0.20	1.087 E +0	0.04	1.530 E +2	0.20	2.873 E -1
0.30	8.363 E -1	0.05	8.421 E +1	0.30	2.466 E -1
0.40	7.231 E -1	0.06	5.174 E +1	0.40	2.202 E -1
0.50	6.510 E -1	0.08	2.421 E +1	0.50	2.007 E -1
0.60	5.982 E -1	0.0880044	1.892 E +1	0.60	1.856 E -1
0.80	5.222 E -1	0.0880045	8.439 E +1	0.80	1.630 E -1
1.00	4.682 E -1	0.100	6.073 E +1	1.00	1.465 E -1
1.50	3.822 E -1	0.150	2.178 E +1	1.50	1.193 E -1
2.00	3.341 E -1	0.20	1.070 E +1	2.00	1.029 E -1
3.00	2.838 E -1	0.30	4.277 E +0	3.00	8.386 E -2
4.00	2.596 E -1	0.40	2.463 E +0	4.00	7.319 E -2
5.00	2.467 E -1	0.50	1.717 E +0	5.00	6.642 E -2
6.00	2.397 E -1	0.60	1.336 E +0	6.00	6.185 E -2
8.00	2.346 E -1	0.80	9.607 E -1	8.00	5.621 E -2
10.00	2.349 E -1	1.00	7.761 E -1	10.00	5.304 E -2
		1.50	5.786 E -1		
		2.00	5.144 E -1		
		3.00	4.762 E -1		
		4.00	4.734 E -1		
		5.00	4.827 E -1		
		6.00	4.966 E -1		
		8.00	5.292 E -1		
		10.00	5.630 E -1		

厚さ $t(\text{cm})$ の遮蔽材通過後の線量当量 $H(\text{Sv})$ は空気吸収線量を $D(\text{Gy})$ とし実効換算係数を mf_x とすると、式(1)と同様の関係にある。

$$H = mf_x \cdot D \quad (2)$$

ここで、線量当量ビルドアップを B_H とすると、式(1)と式(2)から式(3)を導くことができる。

$$\begin{aligned} B_H &= H/H_0 \cdot \exp(\mu t) \\ &= (mf_x/f_x) \cdot (D/D_0) \cdot \exp(\mu t) \end{aligned} \quad (3)$$

空気吸収線量ビルドアップを B_D とすると、

$$B_D = D/D_0 \cdot \exp(\mu t) \quad (4)$$

と定義される。

空気吸収線量ビルドアップ B_D は照射線量ビルドアップ B_x と同等と考えて差し支えないので、式(3)の線量当量ビルドアップは次式となる。

$$B_H = (mf_x/f_x) \cdot B_x \quad (5)$$

線量当量ビルドアップについては文献⁹⁾を参照願

たい。

実際の核種は複数の光子を放出することが一般的であるので、光子成分 i の放出比を P_i 、線減衰係数 μ_i 、遮蔽材の厚さを $t(\text{cm})$ 、単位フルエンス当たりの線量当量を $(H_0/\phi)_i$ とすれば、1 cm 線量当量透過率 F_a は次式となる。

$$F_a = \frac{\sum \{ (mf_x/f_x)_i \cdot B_x \cdot (H_0/\phi)_i \cdot P_i \cdot \exp(-\mu_i t) \}}{\sum \{ (H_0/\phi)_i \cdot P_i \}} \quad (6)$$

ただし、 Σ は光子放出体の光子成分に対する総和を表す。

当然のことながら、式(6)の分母は $(H_0/\phi)_i$ を単位フルエンス当たりの1 cm 線量当量⁷⁾、放射能を1 MBq、距離を1 mとした場合のフルエンス ϕ を乗じると1 cm 線量当量率定数⁸⁾となる。任意の光子エネルギーに対する $(H_0/\phi)_i$ の補間は log-log の値を Akima 法⁹⁾ により補間した。表2に本稿で計算した核種について1 cm 線量当量率定数とアイソトープ手帳の値を併記する。アイソトープ手帳の1 cm 線量当量率定数との違いはごくわずかであり、アイソトープ手帳の1 cm 線量当量率定数をそのまま使用してなら不都合はない。その違

表2 1 cm 線量当量率定数の計算値およびアイソトープ手帳の値

核 種 名	計 算 値	アイソトープ手帳
^{24}Na	0.486	0.486
^{57}Co	0.0206	0.0205
^{60}Co	0.347	0.347
^{67}Ga	0.0259	0.0259
$^{81}\text{Rb}/^{81\text{m}}\text{Kr}^*$	0.105	0.105
$^{99}\text{Mo}/^{99\text{m}}\text{Tc}^*$	0.0442	0.0441
$^{99\text{m}}\text{Tc}$	0.0213	0.0213
^{125}I	0.0344	0.0345
^{131}I	0.0648	0.0648
^{133}Xe	0.0166	0.0166
$^{137}\text{Cs}^*$	0.0910	0.0910
^{192}Ir	0.138	0.138
^{198}Au	0.0683	0.0683
^{201}Tl	0.0179	0.0179
$^{226}\text{Ra}^*$	0.251	0.252
^{241}Am	0.00524	0.00524

注1) 核種名の右肩に * のある核種は放射平衡にある娘核種の影響を含む。

注2) 1 cm 線量当量率定数の単位は $\mu\text{Sv} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{MBq}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$ である。

注3) エネルギーが30 keV未満の光子および放出率が0.01%未満の光子の寄与を含まない。ただし、 ^{125}I はエネルギーが10 keV 以上の光子の寄与を含む。

いの理由は補間方法の違いによるものと考えられる。透過率の計算結果の一部を表3から表5に掲げる。図1から図9は透過率の計算結果を図示したものである。

3. 結果と考察

田中らが公表済みの透過率表を再検討した結果は、田中らと同一の核データを使用した場合、最も使用頻度が高いと思われる透過率 $1-1 \times 10^{-7}$ の範囲で $\pm 20\%$ 程度で一致している。今回使用した核データに基づく計算値によると、遮蔽材が薄いところでは本稿の値は少し大きい値となっている。これは照射線量ビルドアップを計算するうえで遮蔽材の無限厚を田中らは45 mfp としたデータを用い、本稿では60 mfp としたデータを使用したためと思われる。遮蔽材の厚さが増すとともに透過率の値は、一部の核種を除いて、比較的近い値となる。透過率が 1×10^{-7} 以下となる遮蔽材の厚さを超えると、違いは $\pm 50\%$ を超える核種が多くなる。その違いは主として、使用した核データの違いによる。しかしながら、透過率 1×10^{-7} を超えるような厚さの遮蔽材の使用は、一般の RI 事業所ではまれなこともあり、さして問題とならないであろう。

図1 鉄中における γ 線の1 cm 線量当量透過率 (1)

図2 鉄中における γ 線の1cm線量当量透過率(2) 図3 鉄中における γ 線の1cm線量当量透過率(3) 図4 鉛中における γ 線の1cm線量当量透過率(1) 図5 鉛中における γ 線の1cm線量当量透過率(2)

図6 鉛中における γ 線の1cm線量当量透過率(3) 図7 コンクリート中における γ 線の1cm線量当量透過率(1) 図8 コンクリート中における γ 線の1cm線量当量透過率(2) 図9 コンクリート中における γ 線の1cm線量当量透過率(3)

表3 鉄中における γ 線の1cm線量当量透過率(1)

^{24}Na (cm) 透過率	^{57}Co (cm) 透過率	^{60}Co (cm) 透過率	^{67}Ga (cm) 透過率	$^{81}\text{Rb}/^{81m}\text{Kr}$ (cm) 透過率	$^{99}\text{Mo}/^{99m}\text{Tc}$ (cm) 透過率
0.0 1.00E+0	0.0 1.00E+0	0.0 1.00E+0	0.0 1.00E+0	0.0 1.00E+0	0.0 1.00E+0
0.5 9.40E-1	0.2 8.53E-1	1.0 8.71E-1	0.5 7.50E-1	0.5 9.17E-1	0.5 8.10E-1
5.0 4.22E-1	0.5 5.80E-1	5.0 3.56E-1	1.0 5.70E-1	1.0 8.03E-1	1.0 6.15E-1
10.0 1.33E-1	1.0 2.71E-1	10.0 7.99E-2	2.0 3.32E-1	2.0 5.72E-1	2.0 3.79E-1
15.0 3.82E-2	3.0 1.26E-2	12.0 4.17E-2	3.0 1.87E-1	3.0 3.88E-1	3.0 2.55E-1
20.0 1.05E-2	4.0 4.66E-3	15.0 1.51E-2	4.0 1.03E-1	5.0 1.66E-1	5.0 1.24E-1
25.0 2.85E-3	5.0 2.55E-3	18.0 5.31E-3	5.0 5.64E-2	7.0 6.65E-2	7.0 5.79E-2
30.0 7.62E-4	7.0 1.07E-3	20.0 2.60E-3	6.0 3.06E-2	10.0 1.60E-2	10.0 1.71E-2
32.0 4.49E-4	10.0 2.96E-4	22.0 1.26E-3	7.0 1.66E-2	12.0 6.15E-3	12.0 7.28E-3
35.0 2.02E-4	12.0 1.21E-4	25.0 4.22E-4	8.0 9.02E-3	15.0 1.49E-3	15.0 1.93E-3
40.0 5.29E-5	14.0 4.80E-5	27.0 2.02E-4	10.0 2.68E-3	17.0 5.91E-4	17.0 7.80E-4
42.0 3.09E-5	15.0 3.00E-5	30.0 6.59E-5	12.0 8.14E-4	20.0 1.56E-4	20.0 1.95E-4
45.0 1.37E-5	16.0 1.87E-5	32.0 3.11E-5	15.0 1.46E-4	22.0 6.66E-5	22.0 7.62E-5
47.0 8.00E-6	18.0 7.15E-6	35.0 1.00E-5	17.0 4.94E-5	25.0 1.95E-5	25.0 1.83E-5
50.0 3.54E-6	20.0 2.70E-6	37.0 4.68E-6	20.0 1.06E-5	27.0 8.82E-6	30.0 1.65E-6
52.0 2.06E-6	22.0 1.01E-6	40.0 1.49E-6	22.0 3.95E-6	30.0 2.75E-6	32.0 6.23E-7
55.0 9.06E-7	23.0 6.13E-7	42.0 6.90E-7	25.0 9.49E-7	32.0 1.28E-6	35.0 1.43E-7
57.0 5.24E-7	25.0 2.26E-7	45.0 2.17E-7	27.0 3.73E-7	35.0 4.12E-7	36.0 8.76E-8
60.0 2.30E-7	26.0 1.36E-7	47.0 1.00E-7	30.0 9.33E-8	37.0 1.94E-7	
64.0 7.65E-8	27.0 8.24E-8	48.0 6.80E-8		39.0 9.18E-8	

^{99m}Tc (cm) 透過率	^{125}I (cm) 透過率	^{131}I (cm) 透過率	^{133}Xe (cm) 透過率	^{137}Cs (cm) 透過率	^{192}Ir (cm) 透過率
0.0 1.00E+0	0.00 1.00E+0	0.0 1.00E+0	0.0 1.00E+0	0.0 1.00E+0	0.0 1.00E+0
0.1 9.75E-1	0.01 4.65E-1	0.5 9.35E-1	0.1 2.70E-1	0.5 9.24E-1	0.5 9.25E-1
0.5 6.94E-1	0.03 1.07E-1	1.0 8.29E-1	0.5 6.19E-2	1.0 8.46E-1	1.0 8.14E-1
1.0 3.91E-1	0.04 5.30E-2	2.0 5.85E-1	1.0 8.85E-3	2.0 6.68E-1	2.0 5.68E-1
2.0 1.04E-1	0.05 2.71E-2	3.0 3.81E-1	1.4 2.00E-3	5.0 2.44E-1	3.0 3.68E-1
3.0 2.50E-2	0.06 1.43E-2	5.0 1.43E-1	2.0 3.36E-4	8.0 7.16E-2	4.0 2.28E-1
4.0 5.73E-3	0.08 4.35E-3	6.0 8.48E-2	2.4 1.53E-4	10.0 2.97E-2	5.0 1.38E-1
4.4 3.15E-3	0.10 1.48E-3	8.0 2.90E-2	3.0 6.59E-5	12.0 1.19E-2	8.0 2.82E-2
5.0 1.28E-3	0.12 5.48E-4	10.0 9.71E-3	3.4 4.02E-5	14.0 4.65E-3	10.0 9.52E-3
5.4 6.98E-4	0.14 2.15E-4	12.0 3.25E-3	4.0 1.95E-5	16.0 1.78E-3	12.0 3.18E-3
6.0 2.81E-4	0.16 8.83E-5	14.0 1.10E-3	4.4 1.20E-5	18.0 6.67E-4	14.0 1.06E-3
6.4 1.52E-4	0.18 3.72E-5	16.0 3.73E-4	5.0 5.77E-6	20.0 2.47E-4	16.0 3.52E-4
7.0 6.09E-5	0.20 1.60E-5	18.0 1.28E-4	5.4 3.53E-6	22.0 9.04E-5	18.0 1.17E-4
7.4 3.30E-5	0.22 7.00E-6	20.0 4.43E-5	6.0 1.68E-6	24.0 3.27E-5	20.0 3.91E-5
8.0 1.31E-5	0.24 3.09E-6	22.0 1.54E-5	6.4 1.02E-6	26.0 1.18E-5	22.0 1.31E-5
8.4 7.08E-6	0.26 1.38E-6	24.0 5.40E-6	7.0 4.79E-7	28.0 4.19E-6	24.0 4.41E-6
9.0 2.80E-6	0.28 6.16E-7	26.0 1.89E-6	7.4 2.90E-7	30.0 1.49E-6	26.0 1.50E-6
9.4 1.51E-6	0.30 2.76E-7	28.0 6.65E-7	8.0 1.36E-7	32.0 5.23E-7	28.0 5.11E-7
10.0 5.95E-7	0.32 1.25E-7	30.0 2.34E-7	8.4 8.18E-8	34.0 1.83E-7	30.0 1.76E-7
12.0 2.64E-8	0.34 5.62E-8	32.0 8.19E-8		36.0 6.38E-8	32.0 6.14E-8

表3 鉄中における γ 線の1cm線量当量透過率(2)

¹⁹⁸ Au		²⁰¹ Tl		²²⁶ Ra		²⁴¹ Am	
(cm)	透過率	(cm)	透過率	(cm)	透過率	(cm)	透過率
0.0	1.00E+0	0.0	1.00E+0	0.0	1.00E+0	0.00	1.00E+0
0.5	9.38E-1	0.5	2.28E-1	0.5	9.24E-1	0.05	6.80E-1
1.0	8.40E-1	1.0	1.11E-1	1.0	8.45E-1	0.10	4.52E-1
2.0	6.07E-1	2.0	3.80E-2	5.0	3.02E-1	0.20	1.93E-1
3.0	4.04E-1	3.0	1.26E-2	10.0	6.78E-2	0.30	8.09E-2
4.0	2.55E-1	4.0	4.00E-3	15.0	1.48E-2	0.40	3.37E-2
6.0	9.27E-2	5.0	1.24E-3	20.0	3.18E-3	0.50	1.41E-2
8.0	3.12E-2	6.0	3.79E-4	22.0	1.71E-3	0.60	5.98E-3
10.0	1.00E-2	7.0	1.14E-4	25.0	6.78E-4	0.70	2.61E-3
12.0	3.14E-3	8.0	3.41E-5	27.0	3.65E-4	0.80	1.19E-3
14.0	9.69E-4	9.0	1.01E-5	30.0	1.44E-4	0.90	5.87E-4
16.0	2.98E-4	10.0	2.98E-6	32.0	7.76E-5	1.00	3.19E-4
18.0	9.22E-5	11.0	8.74E-7	35.0	3.06E-5	1.50	5.05E-5
20.0	2.91E-5	12.0	2.55E-7	37.0	1.65E-5	2.00	1.40E-5
22.0	9.48E-6	13.0	7.40E-8	40.0	6.50E-6	2.50	3.96E-6
24.0	3.22E-6			42.0	3.50E-6	3.00	1.11E-6
26.0	1.14E-6			45.0	1.38E-6	3.50	3.11E-7
28.0	4.23E-7			47.0	7.45E-7	4.00	8.66E-8
30.0	1.63E-7			50.0	2.95E-7		
32.0	6.53E-8			54.0	8.57E-8		

表4 鉛中における γ 線の1cm線量当量透過率(1)

²⁴ Na		⁵⁷ Co		⁶⁰ Co		⁶⁷ Ga		⁸¹ Rb/ ^{81m} Kr		⁹⁹ Mo/ ^{99m} Tc	
(cm)	透過率	(cm)	透過率	(cm)	透過率	(cm)	透過率	(cm)	透過率	(cm)	透過率
0.0	1.00E+0	0.0	1.00E+0	0.0	1.00E+0	0.0	1.00E+0	0.0	1.00E+0	0.0	1.00E+0
0.2	9.36E-1	0.1	1.09E-1	0.1	9.65E-1	0.1	4.53E-1	0.2	6.50E-1	0.2	4.10E-1
0.3	9.05E-1	0.2	1.64E-2	0.2	9.27E-1	0.3	1.95E-1	0.3	5.57E-1	0.5	3.18E-1
0.5	8.44E-1	0.3	8.23E-3	0.3	8.88E-1	0.5	1.01E-1	0.4	4.83E-1	1.0	2.12E-1
0.7	7.86E-1	0.4	6.84E-3	0.4	8.51E-1	0.7	5.56E-2	0.5	4.21E-1	1.5	1.38E-1
1.0	7.05E-1	0.5	6.18E-3	0.5	8.15E-1	1.0	2.52E-2	0.7	3.19E-1	2.0	8.86E-2
1.5	5.85E-1	0.7	5.15E-3	0.7	7.45E-1	2.0	4.00E-3	1.0	2.11E-1	3.0	3.57E-2
2.0	4.82E-1	1.0	3.89E-3	1.0	6.49E-1	3.0	1.36E-3	1.5	1.07E-1	4.0	1.40E-2
3.0	3.23E-1	1.5	2.39E-3	2.0	3.96E-1	4.0	5.77E-4	2.0	5.63E-2	5.0	5.44E-3
4.0	2.14E-1	2.0	1.45E-3	3.0	2.34E-1	5.0	2.55E-4	3.0	1.83E-2	6.0	2.09E-3
5.0	1.41E-1	3.0	5.15E-4	4.0	1.35E-1	6.0	1.13E-4	4.0	7.40E-3	7.0	7.97E-4
6.0	9.21E-2	4.0	1.79E-4	5.0	7.71E-2	7.0	4.95E-5	5.0	3.49E-3	8.0	3.03E-4
8.0	3.90E-2	5.0	6.14E-5	6.0	4.36E-2	8.0	2.17E-5	6.0	1.79E-3	9.0	1.15E-4
10.0	1.64E-2	6.0	2.08E-5	8.0	1.36E-2	9.0	9.42E-6	7.0	9.49E-4	10.0	4.34E-5
15.0	1.86E-3	7.0	7.00E-6	9.0	7.53E-3	10.0	4.09E-6	8.0	5.14E-4	11.0	1.65E-5
20.0	2.07E-4	8.0	2.34E-6	10.0	4.15E-3	11.0	1.77E-6	9.0	2.81E-4	12.0	6.26E-6
25.0	2.27E-5	10.0	2.58E-7	15.0	2.03E-4	12.0	7.63E-7	10.0	1.54E-4	13.0	2.39E-6
30.0	2.46E-6	11.0	8.52E-8	20.0	9.62E-6	13.0	3.29E-7	15.0	8.13E-6	15.0	3.53E-7
35.0	2.62E-7			25.0	4.46E-7	14.0	1.41E-7	20.0	4.47E-7	16.0	1.37E-7
40.0	2.74E-8			30.0	2.05E-8	15.0	6.07E-8	25.0	2.52E-8	17.0	5.35E-8

表4 鉛中における γ 線の1cm線量当量透過率(2)

^{99m}Tc (cm) 透過率	^{131}I (cm) 透過率	^{133}Xe (cm) 透過率	^{137}Cs (cm) 透過率	^{192}Ir (cm) 透過率	^{198}Au (cm) 透過率
0.00 1.00E+0	0.0 1.00E+0	0.00 1.00E+0	0.0 1.00E+0	0.0 1.00E+0	0.0 1.00E+0
0.01 9.24E-1	0.1 8.05E-1	0.01 3.23E-1	0.2 8.43E-1	0.2 6.16E-1	0.2 6.96E-1
0.02 7.87E-1	0.2 6.42E-1	0.02 2.33E-1	0.3 7.73E-1	0.3 4.86E-1	0.3 5.73E-1
0.03 6.54E-1	0.3 5.11E-1	0.03 1.85E-1	0.4 7.07E-1	0.4 3.87E-1	0.4 4.70E-1
0.04 5.35E-1	0.5 3.25E-1	0.04 1.48E-1	0.5 6.46E-1	0.5 3.11E-1	0.5 3.83E-1
0.05 4.32E-1	1.0 1.15E-1	0.05 1.18E-1	1.0 3.99E-1	1.0 1.19E-1	0.7 2.53E-1
0.06 3.47E-1	1.5 4.91E-2	0.07 7.48E-2	2.0 1.41E-1	2.0 2.52E-2	1.0 1.34E-1
0.07 2.77E-1	2.0 2.43E-2	0.10 3.76E-2	3.0 4.78E-2	3.0 6.22E-3	2.0 1.67E-2
0.10 1.38E-1	3.0 7.29E-3	0.15 1.18E-2	4.0 1.57E-2	4.0 1.68E-3	3.0 2.76E-3
0.20 1.23E-2	4.0 2.36E-3	0.20 3.71E-3	5.0 5.09E-3	5.0 4.87E-4	4.0 7.44E-4
0.25 3.59E-3	5.0 7.69E-4	0.25 1.16E-3	6.0 1.63E-3	6.0 1.52E-4	5.0 2.90E-4
0.30 1.04E-3	6.0 2.50E-4	0.30 3.64E-4	7.0 5.17E-4	7.0 5.10E-5	6.0 1.31E-4
0.35 3.03E-4	7.0 8.14E-5	0.35 1.14E-4	8.0 1.63E-4	8.0 1.84E-5	7.0 6.24E-5
0.40 8.79E-5	8.0 2.65E-5	0.40 3.57E-5	9.0 5.10E-5	9.0 7.08E-6	8.0 3.04E-5
0.45 2.56E-5	9.0 8.63E-6	0.45 1.12E-5	10.0 1.59E-5	10.0 2.89E-6	9.0 1.50E-5
0.50 7.48E-6	10.0 2.82E-6	0.50 3.53E-6	11.0 4.96E-6	11.0 1.23E-6	10.0 7.45E-6
0.55 2.19E-6	11.0 9.26E-7	0.55 1.11E-6	12.0 1.54E-6	12.0 5.41E-7	12.0 1.85E-6
0.60 6.48E-7	12.0 3.05E-7	0.60 3.52E-7	13.0 4.77E-7	13.0 2.43E-7	14.0 4.60E-7
0.65 1.93E-7	13.0 1.01E-7	0.65 1.12E-7	14.0 1.47E-7	14.0 1.11E-7	16.0 1.14E-7
0.70 5.79E-8	14.0 3.35E-8	0.70 3.57E-8	15.0 4.54E-8	15.0 5.11E-8	17.0 5.65E-8

^{201}Tl (cm) 透過率	^{226}Ra (cm) 透過率	^{241}Am (cm) 透過率
0.00 1.00E+0	0.0 1.00E+0	0.00 1.00E+0
0.01 7.70E-1	0.2 8.36E-1	0.01 5.95E-1
0.02 5.95E-1	0.4 7.23E-1	0.02 3.54E-1
0.03 4.61E-1	0.7 5.97E-1	0.03 2.10E-1
0.04 3.58E-1	1.0 5.01E-1	0.04 1.24E-1
0.05 2.79E-1	1.5 3.81E-1	0.05 7.37E-2
0.07 1.72E-1	2.0 2.93E-1	0.07 2.58E-2
0.10 8.64E-2	3.0 1.76E-1	0.10 5.36E-3
0.15 3.01E-2	4.0 1.07E-1	0.15 4.05E-4
0.20 1.14E-2	5.0 6.59E-2	0.20 3.59E-5
0.25 4.53E-3	6.0 4.05E-2	0.25 4.89E-6
0.30 1.86E-3	7.0 2.50E-2	0.30 1.17E-6
0.35 7.75E-4	8.0 1.54E-2	0.35 3.85E-7
0.40 3.27E-4	9.0 9.46E-3	0.40 1.42E-7
0.50 5.93E-5	10.0 5.82E-3	0.45 5.47E-8
0.60 1.09E-5	15.0 5.11E-4	
0.70 2.01E-6	20.0 4.48E-5	
0.80 3.73E-7	25.0 3.91E-6	
0.90 6.93E-8	30.0 3.41E-7	
	35.0 2.97E-8	

表5 コンクリート中における γ 線の1cm線量当量透過率(1)

^{24}Na (cm) 透過率		^{57}Co (cm) 透過率		^{60}Co (cm) 透過率		^{67}Ga (cm) 透過率		$^{81}\text{Rb}/^{81\text{m}}\text{Kr}$ (cm) 透過率		$^{99}\text{Mo}/^{99\text{m}}\text{Tc}$ (cm) 透過率	
0.0	1.00E+0	0.0	1.00E+0	0.0	1.00E+0	0.0	1.00E+0	0.0	1.00E+0	0.0	1.00E+0
10.0	6.55E-1	5.0	7.88E-1	5.0	8.27E-1	5.0	8.23E-1	10.0	5.50E-1	5.0	8.46E-1
15.0	4.90E-1	10.0	2.71E-1	10.0	6.17E-1	10.0	4.10E-1	15.0	3.03E-1	10.0	4.54E-1
20.0	3.56E-1	15.0	7.64E-2	15.0	4.29E-1	15.0	1.82E-1	20.0	1.56E-1	15.0	2.30E-1
25.0	2.53E-1	20.0	2.01E-2	20.0	2.85E-1	20.0	7.69E-2	25.0	7.79E-2	20.0	1.18E-1
30.0	1.78E-1	25.0	5.31E-3	25.0	1.82E-1	25.0	3.14E-2	30.0	3.80E-2	25.0	6.14E-2
35.0	1.24E-1	30.0	1.52E-3	30.0	1.14E-1	30.0	1.26E-2	35.0	1.83E-2	30.0	3.21E-2
40.0	8.54E-2	35.0	5.02E-4	40.0	4.20E-2	35.0	5.00E-3	40.0	8.71E-3	35.0	1.67E-2
50.0	4.00E-2	40.0	1.93E-4	50.0	1.47E-2	40.0	1.97E-3	45.0	4.14E-3	40.0	8.64E-3
60.0	1.85E-2	45.0	8.33E-5	60.0	4.98E-3	45.0	7.81E-4	50.0	1.97E-3	45.0	4.41E-3
70.0	8.51E-3	50.0	3.82E-5	70.0	1.64E-3	50.0	3.11E-4	55.0	9.44E-4	50.0	2.22E-3
80.0	3.89E-3	55.0	1.80E-5	80.0	5.26E-4	55.0	1.26E-4	60.0	4.57E-4	55.0	1.11E-3
90.0	1.77E-3	60.0	8.50E-6	90.0	1.66E-4	60.0	5.17E-5	65.0	2.24E-4	60.0	5.47E-4
100.0	7.98E-4	65.0	4.01E-6	100.0	5.20E-5	65.0	2.17E-5	70.0	1.11E-4	65.0	2.68E-4
120.0	1.61E-4	70.0	1.89E-6	110.0	1.60E-5	70.0	9.29E-6	80.0	2.89E-5	70.0	1.30E-4
140.0	3.21E-5	75.0	8.82E-7	120.0	4.90E-6	75.0	4.07E-6	90.0	7.96E-6	80.0	3.03E-5
160.0	6.30E-6	80.0	4.10E-7	130.0	1.49E-6	80.0	1.83E-6	100.0	2.29E-6	90.0	6.88E-6
180.0	1.22E-6	85.0	1.89E-7	140.0	4.49E-7	85.0	8.34E-7	110.0	6.83E-7	100.0	1.54E-6
200.0	2.36E-7	90.0	8.70E-8	150.0	1.35E-7	90.0	3.87E-7	120.0	2.08E-7	110.0	3.38E-7
220.0	4.50E-8			155.0	7.37E-8	100.0	8.65E-8	130.0	6.41E-8	120.0	7.35E-8

$^{99\text{m}}\text{Tc}$ (cm) 透過率		^{125}I (cm) 透過率		^{131}I (cm) 透過率		^{133}Xe (cm) 透過率		^{137}Cs (cm) 透過率		^{192}Ir (cm) 透過率	
0.0	1.00E+0	0.0	1.00E+0	0.0	1.00E+0	0.0	1.00E+0	0.0	1.00E+0	0.0	1.00E+0
5.0	8.50E-1	0.5	2.44E-1	5.0	8.79E-1	1.0	4.77E-1	5.0	8.35E-1	5.0	8.78E-1
10.0	3.31E-1	1.0	5.83E-2	10.0	5.51E-1	2.0	3.58E-1	10.0	5.81E-1	7.5	7.11E-1
15.0	1.04E-1	1.5	1.53E-2	15.0	2.94E-1	3.0	2.82E-1	15.0	3.57E-1	10.0	5.46E-1
20.0	2.92E-2	2.0	4.48E-3	20.0	1.45E-1	4.0	2.16E-1	20.0	2.04E-1	15.0	2.89E-1
25.0	7.71E-3	2.5	1.45E-3	25.0	6.76E-2	5.0	1.60E-1	25.0	1.11E-1	20.0	1.41E-1
30.0	1.95E-3	3.0	5.03E-4	30.0	3.05E-2	7.0	8.33E-2	30.0	5.84E-2	25.0	6.57E-2
35.0	4.76E-4	3.5	1.84E-4	35.0	1.35E-2	8.0	5.88E-2	35.0	2.99E-2	30.0	2.96E-2
40.0	1.13E-4	4.0	6.99E-5	40.0	5.86E-3	9.0	4.11E-2	40.0	1.50E-2	35.0	1.31E-2
45.0	2.65E-5	4.5	2.72E-5	45.0	2.53E-3	10.0	2.85E-2	45.0	7.37E-3	40.0	5.68E-3
50.0	6.06E-6	5.0	1.08E-5	50.0	1.09E-3	15.0	4.26E-3	50.0	3.57E-3	45.0	2.45E-3
55.0	1.37E-6	5.5	4.32E-6	55.0	4.67E-4	20.0	6.01E-4	55.0	1.71E-3	50.0	1.05E-3
60.0	3.04E-7	6.0	1.75E-6	60.0	2.01E-4	25.0	8.51E-5	60.0	8.07E-4	55.0	4.47E-4
65.0	6.69E-8	6.5	7.12E-7	65.0	8.65E-5	30.0	1.28E-5	65.0	3.79E-4	60.0	1.90E-4
		7.0	2.92E-7	70.0	3.74E-5	35.0	2.16E-6	70.0	1.76E-4	65.0	8.11E-5
		7.5	1.20E-7	75.0	1.62E-5	40.0	4.17E-7	80.0	3.73E-5	70.0	3.45E-5
		8.0	4.94E-8	80.0	7.06E-6	45.0	9.01E-8	90.0	7.70E-6	80.0	6.27E-6
				90.0	1.35E-6			100.0	1.56E-6	90.0	1.15E-6
				100.0	2.59E-7			110.0	3.10E-7	100.0	2.13E-7
				110.0	5.02E-8			120.0	6.08E-8	105.0	9.20E-8

表5 コンクリート中における γ 線の1cm線量当量透過率(2)

^{198}Au		^{201}Tl		^{226}Ra		^{241}Am	
(cm)	透過率	(cm)	透過率	(cm)	透過率	(cm)	透過率
0.0	1.00E+0	0.0	1.00E+0	0.0	1.00E+0	0.0	1.00E+0
5.0	8.75E-1	2.5	8.19E-1	5.0	8.37E-1	1.0	9.15E-1
7.5	7.19E-1	5.0	4.33E-1	10.0	5.98E-1	2.0	6.37E-1
10.0	5.60E-1	7.5	2.19E-1	20.0	2.53E-1	3.0	4.05E-1
15.0	3.05E-1	10.0	1.13E-1	30.0	9.93E-2	4.0	2.46E-1
20.0	1.52E-1	15.0	3.20E-2	40.0	3.83E-2	5.0	1.46E-1
25.0	7.18E-2	20.0	9.41E-3	50.0	1.47E-2	6.0	8.48E-2
30.0	3.25E-2	25.0	2.73E-3	60.0	5.68E-3	7.0	4.88E-2
35.0	1.43E-2	30.0	7.74E-4	70.0	2.19E-3	8.0	2.79E-2
40.0	6.12E-3	35.0	2.14E-4	80.0	8.43E-4	9.0	1.58E-2
45.0	2.58E-3	40.0	5.78E-5	90.0	3.25E-4	10.0	8.93E-3
50.0	1.07E-3	45.0	1.54E-5	100.0	1.25E-4	12.5	2.12E-3
55.0	4.42E-4	50.0	4.01E-6	110.0	4.83E-5	15.0	5.09E-4
60.0	1.81E-4	55.0	1.03E-6	120.0	1.86E-5	17.5	1.26E-4
65.0	7.42E-5	60.0	2.63E-7	130.0	7.20E-6	20.0	3.34E-5
70.0	3.04E-5	65.0	6.64E-8	140.0	2.79E-6	22.5	9.65E-6
80.0	5.21E-6			150.0	1.08E-6	25.0	3.10E-6
90.0	9.43E-7			160.0	4.21E-7	30.0	4.15E-7
100.0	1.85E-7			170.0	1.64E-7	35.0	6.68E-8
105.0	8.48E-8			180.0	6.43E-8		

4. 謝 辞

本稿で引用させていただいた田中俊一氏には多岐にわたって助言をいただいた。また、核データに忠実な透過率表を完成するようにと激励を受け、GP法に関する著書を頂戴した。本稿で使用したGP法のパラメータと計算コードは坂本幸夫氏に教えていただいた。とくに名前を挙げないが、助言と激励を受けた諸兄は多い。本稿を終えるに当たり、謝意を表する次第である。

文 献

- (財)原子力安全技術センター編：“放射線施設の γ (X)線しゃへい計算 実務マニュアル”，pp.1-13, pp.87-132, (財)原子力安全技術センター，東京(1989)
- 日本アイソトープ協会編：“アイソトープ手帳(改訂7版2刷)”，pp.22-24, (社)日本アイソ

トープ協会，東京(1989)

- 日本アイソトープ協会編：同上，pp.100-107, (社)日本アイソトープ協会，東京(1989)
- 坂本幸夫，田中俊一，播磨良子：“Interpolation of gamma-ray buildup factors in atomic number, using the geometrical progression (G-P) parameters, JAERI-M 88-198 (1988)
- Akima, H.: “Algorithm 433, Interpolation and Smooth Curve Fitting Based on Local Procedures”, Comm. ACM, 914 (1972)
- 日本アイソトープ協会技術課: *Isotope News*, No. 422, pp.41-46 (1989)
- “Data for Use in Protection against External Radiation” (日本アイソトープ協会訳), ICRP Publication 51, pp.48, (社)日本アイソトープ協会，東京(1989)
- 喜多尾憲助: *Isotope News*, No. 424, pp.37-38 (1989)