



タングステンによる ^{192}Ir の遮蔽計算

深野 重男
Fukano Shigeo

光子の遮蔽計算に用いられている遮蔽体は、従来、鉄・鉛・コンクリートに水であった。(公財)原子力安全技術センターから、「放射線施設の遮蔽計算実務(放射線)データ集(2012)」¹⁾(以下「データ集」と記す。)が2012年8月に出版され、新たに遮蔽体としてパイレックスガラスとアクリル樹脂が追加され、2013年8月には光子の遮蔽に多く使われているタングステンのデータが追加された²⁾。このタングステンを遮蔽体に用いている機器の中で代表的なものとして、非破壊検査装置がある。使用核種は ^{192}Ir が多く、光子の放出数が比較的多いので ^{192}Ir のタングステンによる遮蔽計算を行った。計算に必要な、質量減衰係数・密度・実効線量ビルドアップ係数などはこの追加データ²⁾ を使用し、比較のために必要なデータは、前記のデータ集を使用した。 ^{192}Ir の光子データは、「アイソトープ手帳 11 版」³⁾ 作成時に参照した ICRP Publication 107⁴⁾ のデータを使用した。遮蔽計算方法は、以下の式により求めた。

$$\dot{E} = E_0 \times \exp(-\mu \times x) \times B \quad (1)$$

\dot{E} : 遮蔽体透過後の実効線量 (Sv)

E_0 : 遮蔽体なしの実効線量 (Sv)

μ : 線減衰係数 (cm^{-1})

x : 遮蔽体の厚さ (cm)

B : 実効線量ビルドアップ係数

^{192}Ir の実効線量透過率は、表 1 と図 1 に示す。タングステンと鉛のデータを併せて載せた。

表 2 に ^{192}Ir の光子データを示す。

表 1 から遮蔽効果を比較すると、厚さが 0.3 cm までは鉛の遮蔽効果が大きく、0.3 cm 厚を超えるとタングステンの遮蔽効果が大きくなっている。遮蔽体の厚さにより遮蔽効果が変わる

表 1 ^{192}Ir のタングステンと鉛の実効線量透過率

遮蔽体の厚さ (cm)	タングステン (密度 19.1 g/cm^3)	鉛 (密度 11.34 g/cm^3)
0	1.00	1.00
0.2	6.654×10^{-1}	6.19×10^{-1}
0.3	4.938×10^{-1}	4.90×10^{-1}
0.4	3.697×10^{-1}	3.92×10^{-1}
0.5	2.753×10^{-1}	3.16×10^{-1}
1	7.602×10^{-2}	1.23×10^{-1}
2	8.473×10^{-3}	2.64×10^{-2}
3	1.180×10^{-3}	6.57×10^{-3}
4	2.024×10^{-4}	1.78×10^{-3}
5	4.238×10^{-5}	5.21×10^{-4}
6	1.034×10^{-5}	1.64×10^{-4}
7	2.807×10^{-6}	5.61×10^{-5}
8	8.138×10^{-7}	2.07×10^{-5}
9	2.459×10^{-7}	8.17×10^{-6}
10	7.642×10^{-8}	3.42×10^{-6}
11	2.439×10^{-8}	1.50×10^{-6}
12	7.914×10^{-9}	6.77×10^{-7}
13	2.616×10^{-9}	3.13×10^{-7}
14	8.711×10^{-10}	1.47×10^{-7}
15	2.962×10^{-10}	7.02×10^{-8}

原因は、質量減衰係数と実効線量ビルドアップ係数の2つであることが考えられる。

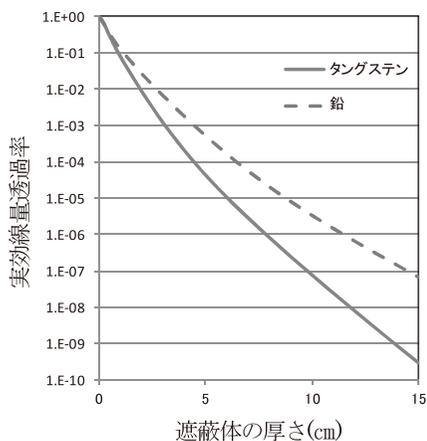


図1 ^{192}Ir のタングステンと鉛の実効線量透過率

まず、質量減衰係数について検討した。質量減衰係数のままでは比較しにくいので、タングステンと鉛の線減衰係数を表3と図2に示す。この線減衰係数には、LとK吸収端がありこの部分では不連続なデータになっている。タングステンは10.207 keV, 11.544 keV, 12.100 keVと69.525 keVに、鉛はタングステンのエネルギーよりも少し高い13.035 keV, 15.200 keV, 15.861 keVと88.004 keVにLとK吸収端がある。線減衰係数は全てのエネルギーでタングステンが鉛よりも大きい。 ^{192}Ir から放出されるLX線の11.39 keVと10.68 keVは、タングステンの場合L吸収端による影響を受けて線減衰係数が大きくなり、鉛に比べると大きく減衰する。同様に $K_{\beta}X$ 線で、71.28~78.61 keVもタングステンのK吸収端の影響により線減衰係数

表2 ^{192}Ir の光子エネルギーと放出割合

光子エネルギー (keV)	光子放出割合 (%)	光子エネルギー (keV)	光子放出割合 (%)	光子エネルギー (keV)	光子放出割合 (%)
110.40	1.22×10^{-2}	599.41	3.90×10^{-3}	73.78 $K\beta$	1.64×10^{-3}
136.34	1.99×10^{-1}	604.40	8.20	74.00 $K\beta$	1.22×10^{-2}
176.98	4.30×10^{-3}	612.46	5.34	74.01 $K\beta$	2.46×10^{-2}
201.31	4.73×10^{-1}	703.87	5.30×10^{-3}	74.06 $K\beta$	1.52×10^{-4}
205.79	3.34	765.80	1.30×10^{-3}	75.59 $K\beta$	5.02×10^{-1}
280.27	9.00×10^{-3}	884.54	2.91×10^{-1}	75.98 $K\beta$	9.70×10^{-1}
283.27	2.66×10^{-1}	1,061.48	5.30×10^{-2}	76.40 $K\beta$	1.22×10^{-2}
295.96	28.72	1,089.90	1.20×10^{-3}	76.49 $K\beta$	1.51×10^{-2}
308.46	29.68	1,378.20	1.20×10^{-3}	78.01 $K\beta$	1.17×10^{-1}
316.51	82.71	61.64 $K\alpha$	1.24	78.10 $K\beta$	2.28×10^{-1}
329.17	1.74×10^{-2}	63.19 $K\alpha$	2.13	78.28 $K\beta$	3.10×10^{-3}
374.49	7.26×10^{-1}	65.30 $K\alpha$	2.68	78.30 $K\beta$	3.82×10^{-3}
416.47	6.69×10^{-1}	67.05 $K\alpha$	4.58	78.54 $K\beta$	2.68×10^{-2}
420.52	6.90×10^{-2}	71.28 $K\beta$	2.32×10^{-1}	78.56 $K\beta$	5.34×10^{-2}
468.07	47.81	71.61 $K\beta$	4.48×10^{-1}	78.60 $K\beta$	2.49×10^{-4}
484.58	3.19	72.02 $K\beta$	5.33×10^{-3}	78.61 $K\beta$	2.95×10^{-4}
485.30	2.30×10^{-3}	72.10 $K\beta$	6.65×10^{-3}	11.39 L	2.18
489.06	4.38×10^{-1}	73.52 $K\beta$	5.34×10^{-2}	10.68 L	7.61×10^{-1}
588.58	4.52	73.60 $K\beta$	1.04×10^{-1}		
593.49	4.21×10^{-2}	73.77 $K\beta$	1.32×10^{-3}		

表3 タングステンと鉛に対する線減衰係数

光子エネルギー (MeV)	タングステンの線減衰係数 (cm ⁻¹)	鉛の線減衰係数 (cm ⁻¹)	
0.01	1767.896	1426.572	
0.010207	1675.834		
0.010207	74L ₃	4375.81	
0.011544	3153.41		
0.011544	74L ₂	4343.34	
0.012100	3875.39		
0.012100	74L ₁	4480.86	
0.013035		716.9715	
0.013035		82L ₃	1795.122
0.01500	2599.51	1229.256	
0.01520		1186.164	
0.01520		82L ₂	1648.836
0.015527		1568.322	
0.015861		1488.942	
0.015861		82L ₁	1721.412
0.02	1217.816	953.694	
0.03	412.178	328.86	
0.04	189.4911	157.626	
0.05	103.6366	84.21084	
0.06	63.4693	51.73308	
0.069525	42.8986		
0.069525	74K	208.763	
0.08	144.5297	24.22224	
0.088004		18.91512	
0.088004		82K	84.39228
0.1	81.6143	60.7257	
0.15	28.7073	21.7728	
0.2	14.09962	10.69589	
0.3	5.77393	4.277448	
0.4	3.438	2.463048	
0.5	2.47727	1.71801	
0.6	1.97876	1.335852	
0.8	1.477958	0.960725	
1	1.222973	0.775996	
1.022	1.201772	0.761254	
1.25	1.038276	0.646947	
1.5	0.936282	0.578567	
2	0.835243	0.514382	
2.044	0.830277	0.51098	
3	0.772595	0.476167	
4	0.767438	0.473558	
5	0.78119	0.48263	
6	0.8022	0.496579	
7	0.826648	0.512341	
8	0.852624	0.529124	
9	0.879173	0.546021	
10	0.905531	0.563031	

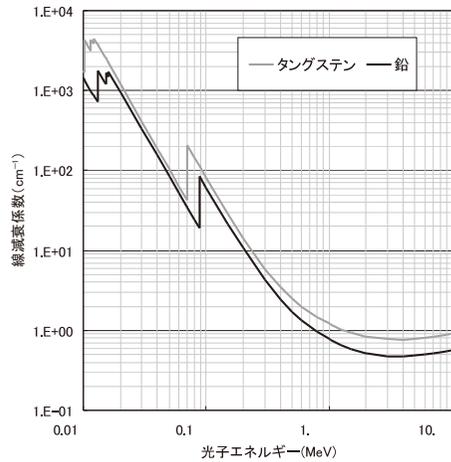


図2 タングステンと鉛の光子に対する線減衰係数 (cm⁻¹)

が大きくなる。鉛の場合は¹⁹²IrのLX線、KX線のいずれもタングステンのように吸収端の影響を受けない。このことから、線減衰係数による減衰は遮蔽体の厚さの増加に従い減衰率も大きくなり、タングステンは鉛よりも減衰率が大きい。また、今回の計算の最小厚である0.2 cmでは¹⁹²Irから放出される全てのX線は、減衰が大きく実効線量透過率には寄与していない。残るγ線のエネルギーは110.40 keV以上であり、タングステンと鉛のK吸収端エネルギーより大きく、吸収端の影響は受けずエネルギーが高くなるに従い、線減衰係数は小さくなっている。このことから、遮蔽体厚が0.3 cmにおいて、実効線量透過率の差がタングステンと鉛の遮蔽効果が異なる原因ではないことが分かる。したがって、実効線量ビルドアップ係数が寄与していることが考えられる。

遮蔽計算式(1)を使用し、光子エネルギー0.4 MeVについての計算値を表4に示す。遮蔽体はタングステンと鉛で厚さは0.2 cmと2 cmである。質量減衰係数・線減衰係数・ $t(\text{mfp})$ ・減衰率 ($\exp(-\mu \times t)$)・実効線量ビルドアップ係数・減衰率×実効線量ビルドアップ係数値を表5に示す。表の中の t は平均自由行程(1/線減衰係数)単位の遮蔽厚を示す。表から、減衰

表4 タングステンと鉛の点等方線源に対する光子エネルギー0.4 MeVの実効線量ビルドアップ係数

厚さ	タングステン	鉛
t (mfp)	0.4 MeV	0.4 MeV
0	1.00	1.00
0.5	1.49	1.12
1	1.67	1.20
2	1.91	1.31
3	2.09	1.40
4	2.23	1.47
5	2.35	1.53
6	2.47	1.59
7	2.58	1.64
8	2.67	1.68
10	2.86	1.77
15	3.26	1.95
20	3.58	2.10
25	3.85	2.22
30	4.07	2.32
35	4.27	2.40
40	4.45	2.48

率はいずれもタングステンの方が大きいので、遮蔽効果は減衰率のみで考えるとタングステンの方が大きい。次に、ビルドアップ係数を見るとタングステンが大きく、遮蔽体厚が0.2 cmでは、ビルドアップを加えるとタングステンと鉛の値が逆転し鉛の方が、全体として遮蔽効果が大きくなっている。表の一番下の $\exp(-\mu \times t) \times B$ にある数値である。遮蔽体厚が2 cmでは、減衰率がタングステンと鉛では約7倍違い、ビルドアップ係数は1.5倍程度なので、0.2 cm厚の場合のようにならずタングステンの方が遮蔽効果が大きい。

計算から分かったことは、従来タングステンのデータがなかったことから、タングステンを鉛に置き換えて計算した場合では、計算の結果から0.3 cm厚までは鉛で評価した方が実効線量は小さくなり、安全側の評価ではないといえ

表5 光子エネルギー0.4 MeVのタングステンと鉛の遮蔽計算に用いた各係数

光子エネルギー 0.4 MeV	タングステン		鉛	
	0.2 cm	2 cm	0.2 cm	2 cm
遮蔽体厚 x (cm)				
質量減衰係数 (cm^2/g)	0.1800 cm^2/g		0.2172 cm^2/g	
線減衰係数 μ (cm^{-1})	3.438 cm^{-1}		2.463 cm^{-1}	
t (mfp)	0.688	6.88	0.493	4.93
減衰率 ($\exp(-\mu \times t)$)	0.503	1.03×10^{-3}	0.611	7.25×10^{-3}
ビルドアップ 係数 B	1.57	2.57	1.14	1.71
$\exp(-\mu \times t) \times B$	0.790	2.65×10^{-3}	0.670	1.24×10^{-2}

るが、非破壊検査装置では、一般にはこのような薄いタングステンは使用されないので特段問題とならない。また、これよりも厚い場合は、遮蔽上は安全側の遮蔽計算であることになる。

今回の計算は、 ^{192}Ir について計算したが、タングステンの遮蔽体に対して、従来の鉛で代用する場合には、光子のエネルギーや遮蔽体の厚さも考慮しないと、タングステンは密度が大きいからといって、必ずしも鉛で評価した方が遮蔽効果が小さいわけではない。特に遮蔽体が薄い場合には、注意が必要である。また、 ^{192}Ir のX線は10 keVまでを含めた実効線量であるが、全てのX線が実効線量に寄与する割合は、1.46%でありLX線のみは0.005277%である。

参考文献

- 1) 放射線施設の遮蔽計算実務(放射線)データ集2012, (公財)原子力安全技術センター(2012)
- 2) 放射線施設の遮蔽計算実務(放射線)データ集2012に関する追補データ, (公財)原子力安全技術センター(2013)
- 3) アイソトープ手帳 11版, (公社)日本アイソトープ協会(2011)
- 4) ICRP Publication 107: Nuclear Data for Dosimetric Calculations, *Ann. ICRP*, **38**(3), (2008)
(日本アイソトープ協会)