

表-13 多官能基モノマーによるゲル化物作成結果

実験番号	モノマー* (1モル)	混合材 (モル数)	UV照射時間	結果
D-01	J	鉛 (4.8) 硼酸 (9.7)	3分	黒色で硬い硬化物が得られた。
D-02	K	鉛 (6.2) 硼酸 (12.4)	12秒	黒色で硬い硬化物が得られたが、全面に大きな割れを生じた。
D-03	L	鉛 (6.2) 硼酸 (12.4)	30秒	黒色で硬い硬化物が得られたが、全面に大きな割れを生じた。
D-04	M	鉛 (5.7) 硼酸 (11.5)	9分	黒色で硬い硬化物が得られた。しかし、表面が多少ねばついている。

*本欄のモノマーは表12に示すものである。

4.5 積層化

紫外線は透過距離が短いため一回の紫外線照射で作成できるゲル化物の厚さは1~2mm程度のものである。しかし、実用的な遮蔽材としてはある程度厚い材料が必要である。紫外線硬化法を用いて厚い材料を作成するには、薄いゲル化物を積層化する方法が考えられる。すなわち、遮蔽材料、紫外線硬化モノマー及び光開始剤の混合分散液をビニールシート上にコーティングしたものに紫外線照射を行い、さらに、できあがったシート状のゲル状材料の上に混合分散液をコーティングし紫外線照射する行程を繰り返す。この方法でいくつかの材料の配合に対して紫外線硬化実験を行った。結果を表-14に示す。単官能基モノマーとの組み合わせでは、硝酸鉛と硼酸を混合した場合良い結果が得られている。鉛と硼酸を混合した場合は組み合わせるモノマーにより結果が異なり、ステアリルアクリレートとの組み合わせでは比較的良い結果が得られたが、その他の場合は必ずしも良い結果ではない。これらについては照射条件等の改善を図る等の検討が必要がある。多官能基モノマーの場合は実験番号E-15の場合良い結果が得られたが、その他の場合はいずれも収縮が大きいため良い結果は得られていない。E-16とE-17では単官能基モノマーの場合に比べ反応速度が早く、これが割れの原因ともなっている。従って、紫外線照射率を少なくすることなどにより反応速度を小さくして作成することを試みることも必要である。

4.6 高密度化

以上の遮蔽材は密度2.2となるよう作成した。しかし、中性子とガンマ線の混在場で使用する場合、ガンマ線の中性子に対する割合が大きな場合、密度のより大きなものが求められることが考えられる。そこで、密度が3程度になるように遮蔽材料と紫外線硬化モノマーの割合を変えてゲル化物の作成を行った。この場合、モノマーの割合が減るため硬化が難しくなる。従って、これまでの実験結果から、比較的硬化しやすい単官能基モノマーを使用した。結果を表-15に示すが、今回の

表-14 ゲル化物積層化実験結果

実験番号	モノマー* (モル数)	混合材 (モル数)	UV照射時間	結果
E-01	E(1.0)	鉛 (3.3) 硼酸 (6.6)	18分	黒色で柔軟性のあるゲル化物を得たが、適正な紫外線の照射率の範囲が狭い。
E-02	E(1.0)	鉛 (2.9) 硼酸 (4.4)	18分	混合材の量を減らすことにより、硬化特性の改善を試みたが、良い結果は得られなかった。
E-03	E(1.0)	硝酸鉛 (3.2) 硼酸 (6.4)	18分	淡黄色で密着性の良い柔軟性のあるゲル化物を得た。
E-04	E(1.0)	硝酸鉛 (2.8) 硼酸 (4.3)	18分	淡黄色で密着性の良い柔軟性のあるゲル化物を得た。
E-05	G(1.0)	鉛 (3.3) 硼酸 (6.6)	30分	黒色で表面が僅かに白色の極めて柔らかいゲル化物を得た。しかし、適正な紫外線照射率の範囲が狭い。
E-06	G(1.0)	鉛 (2.9) 硼酸 (4.4)	30分	混合材の量を減らすことにより、硬化特性の改善を試みたが、良い結果は得られなかった。
E-07	G(1.0)	硝酸鉛 (3.2) 硼酸 (6.4)	18分	黄白色で密着性が良好な柔軟性のあるゲル化物を得た。
E-08	G(1.0)	硝酸鉛 (2.9) 硼酸 (4.3)	18分	黄白色で密着性が良好な柔軟性のあるゲル化物を得た。
E-09	H(1.0)	鉛 (4.7) 硼酸 (9.4)	24分	表面が黄白色で全体が黒色の室温では硬く、また40℃では柔らかく弾力性のあるゲル化物が得られた。
E-10	H(1.0)	鉛 (4.0) 硼酸 (6.1)	24分	表面がごく一部白色で全体が黒色の室温では硬い固体を得たが、30℃以上では脆くなり、内部が一部未硬化であると推定される。
E-11	H(1.0)	硝酸鉛 (4.5) 硼酸 (9.0)	25分	淡黄色で硬く密着性の良いゲル化物が得られた。
E-12	H(1.0)	硝酸鉛 (3.9) 硼酸 (5.9)	25分	淡黄色で硬く密着性の良いゲル化物が得られた。
E-13	I(1.0)	鉛 (4.7) 硼酸 (9.4)	30分	黒色で硬い硬化物が得られた。ただし、一部は熱により硬化した可能性がある。

表-14 ゲル化物積層化実験結果 (続き)

実験番号	モノマー* (モル数)	混合材 (モル数)	UV照射時間	結果
E-14	I(1.0)	硝酸鉛 (4.6) 硼酸 (9.2)	30分	淡黄白色の硬い硬化物が得られた。ただし、一部は熱により硬化した可能性がある。塗布は80℃で行った。
E-15	J(1.0)	鉛 (4.8) 硼酸 (9.7)	18分	黒色で硬い硬化物が得られた。
E-16	K(1.0)	鉛 (6.2) 硼酸 (12.4)	1分	黒色で硬い硬化物が得られたが、紫外線照射による収縮が大きく全面に大きな割れを生じた。
E-17	L(1.0)	鉛 (6.2) 硼酸 (12.4)	3分	黒色で硬い硬化物が得られたが、紫外線照射による収縮が大きく全面に大きな割れを生じた。
E-18	M(1.0)	鉛 (5.7) 硼酸 (11.5)	45分	やや表面がねばねばした黒色で硬い硬化物が得られた。

*本欄のモノマーは表10、表12及び表13に示すものである。

実験では満足する結果は得られなかった。しかし、F-03~F-06の場合は反応が不均一に起こったことが不完全な硬化の原因と考えられるので、これらについて改良することにより密度3程度の遮蔽材作成の可能性は大きいと考えられる。

表-15 高密度遮蔽材作成結果

実験番号	モノマー* (モル数)	混合材 (モル数)	UV照射時間	結果
F-01	C (1.0)	硼酸鉛 (2.0)	10分	粉末状の硼酸鉛の割合が多いため、コーティングが難しく、硬化物は得られなかった。
F-02	C (0.18)	硝酸鉛 (1.0) 硼酸 (1.0)	10分	粉末状の硼酸鉛の割合が多いため、コーティングが難しく、硬化物は得られなかった。
F-03	D (0.26)	鉛 (1.0) 硼酸 (1.0)	65秒 (5分)**	黒色の柔軟性のあるゲル化物が得られた。しかし、積層化を試みると、各層の密着性が良くなかった。
F-04	E (1.0)	鉛 (6.4) 硼酸 (6.4)	3分 (18分)	未硬化物が多く、硬化物は脆く、膨れが見られた。
F-05	G (1.0)	鉛 (6.5) 硼酸 (6.5)	3分 (24分)	黒色で表面が一部白色の極めて柔らかいゲル化物を得た。しかし、ひび割れや膨れが認められることから、内部に未硬化部分が存在すると考えられる。
F-06	H (1.0)	鉛 (8.8) 硼酸 (8.8)	4分 (24分)	表面がごく一部白色で全体が黒色の室温では硬い固体が得られたが、モノマーの融点(30℃)以上では弾性はあるものの脆く内部は一部未硬化と考えられる。

*本欄のモノマーは表6、表10に示すものである。
**括弧内の時間は約1cmの厚さに積層化するため必要な照射時間

4.7 中性子吸収材の検討

本研究においては、これまで中性子吸収材として硼素を用いてきた。硼素の長所は放射化に関する問題が少ないことにある。しかし、中性子との反応によりヘリウムを発生するのでヘリウムガスがたまることにより物性的に問題が起こる可能性がある。そこで、水素と鉛の量に影響を与えず硼素の量を変化させやすい物質として炭化硼素、また他の中性子吸収材としてカドミウムの適用性を調べた。実験結果を表-16に示す。これについては表-14の多官能基モノマーの場合と同様に、反応速度をもう少し遅くすることを検討する必要がある。

4.8 高性能遮蔽材の元素密度

以上の実験において試作したいいくつかの遮蔽材につ

表-16 中性子吸収材の材料適合性実験結果

実験番号	モノマー* (モル数)	混合材 (モル数)	UV照射時間	結果
G-01	C (1.0)	鉛 (0.87) カドミウム (0.25)	26秒 (2分)**	黒色の硬化物が得られたが、ゲル化物の伸縮性が大きく、硬化皮膜にしわが多く発生したため、積層化が難しい。
G-02	C (1.0)	鉛 (1.0) 炭化硼素 (0.25)	26秒 (2分)	黒色の硬化物が得られたが、ゲル化物の伸縮性が大きく、硬化皮膜にしわが多く発生したため、積層化が難しい。
G-03	D (1.0)	鉛 (1.0) カドミウム (0.3)	26秒 (2分)	黒色の硬化物が得られたが、ゲル化物の伸縮性が大きく、硬化皮膜にしわが多く発生したため、積層化が難しい。
G-04	D (1.0)	鉛 (1.2) 炭化硼素 (0.3)	26秒 (2分)	黒色の硬化物が得られたが、ゲル化物の伸縮性が大きく、硬化皮膜にしわが多く発生したため、積層化が難しい。

*本欄のモノマーは表6に示したものである。
**括弧内の時間は約1cmの厚さに積層化するため必要な照射時間

いて、その遮蔽性能を調べるため元素密度を測定した。元素密度を決定する最もよい方法は化学的に組成分析を行うことであるが、ここでは試料の密度を測定し、試料の構成分子比率を用いて決定した。試料は吸水性があるので、空気置換体積を測定するのが望ましいが、今回は水中で体積測定を行った。すなわち、試料の表面に薄く油を塗布し、水中に設けた天秤の皿にのせ重量が安定したところで重量を測定し体積を求めた。このようにしていくつかの高性能遮蔽材に対して求めた元素組成と密度を表-17に示す。また、同表には参考のため水の元素組成と水の元素密度に対する各遮蔽材の元素密度の比も併せて示す。組成元素としては遮蔽性能の観点から意図した元素である水素、硼素及び鉛以外に炭素、酸素及び窒素を含む。ただし、窒素は原材料として硝酸鉛を用いた場合にのみ含まれる。密度に関しては、A-11とA-13の場合予定の密度よりやや小さいが、その他のものはいずれも2.18~2.31の範囲にある。水素密度は鉛と硼酸を原材料に用いた場合比較的高く、水の水素密度の70%以上になる。これに対して硝酸鉛を使用した場合は水素密度が相対的に低い。

4.9 温度特性

遮蔽材は周辺の温度が変化した場合、構成分子の分解や構造の変化等を起こし、その物性を変化させる可能性がある。遮蔽性能のみを考慮すれば、遮蔽材の元素組成に変化がなければ問題は無いが、化学変化が起これば通常組成元素が失われ、それは遮蔽性能の低下を意味するので重要な問題である。このような温度変化に伴う物性の変化は、例えば熱重量測定、ガスクロマトグラフィー、質量分析等により、材料の重量変化、発生するガスの成分、反応の種類等を分析することが

試料番号	元 素 名							密度 (g/cm ³)	水に対する水素密度比
	H	B	Pb	C	O	N	S		
A-04	4.85+22	4.73+21	2.37+21	2.97+22	2.29+22	-	-	2.18	0.72
A-09	4.25+22	4.37+21	2.19+21	2.01+22	3.37+22	4.37+21	-	2.30	0.63
A-11	4.14+22	4.98+21	2.49+21	2.08+22	2.22+22	-	-	2.02	0.62
A-13	3.95+22	4.81+21	2.40+21	2.18+22	2.17+22	-	-	1.99	0.59
E-01	5.02+22	6.79+21	3.40+21	1.67+22	2.27+22	-	-	2.31	0.75
E-03	3.70+22	4.93+21	2.46+21	1.24+22	3.13+22	4.93+21	-	2.19	0.55
E-05	4.87+22	6.60+21	3.30+21	1.61+22	2.20+22	-	-	2.24	0.73
E-07	3.66+22	4.85+21	2.42+21	1.23+22	3.08+22	4.85+21	-	2.16	0.55
E-09	5.07+22	6.89+21	3.45+21	1.62+22	2.23+22	-	-	2.31	0.76
E-11	3.84+22	5.07+21	2.54+21	1.27+22	3.17+22	5.07+21	-	2.24	0.57
E-13	6.25+22	8.18+21	4.09+21	2.04+22	2.64+22	4.87+19	4.87+19	2.77	0.93
E-14	3.80+22	4.99+21	2.50+21	1.22+22	3.12+22	4.99+21	-	2.20	0.57
H ₂ O	6.70+22	-	-	-	3.35+22	-	-	1.00	-

* 4.85×10⁻²² と読む。

表-17 高性能遮蔽材の元素組成

表-18 高性能遮蔽材の温度特性

試料番号	80℃		100℃		150℃		200℃	
	Δw (%)	外観変化	Δw (%)	外観変化	Δw (%)	外観変化	Δw (%)	外観変化
E-01	-0.01	なし	-0.02	なし	-0.20	表面に白粒	-1.00	周辺僅かに黄色化、発煙
E-02	0.00	なし	-0.18	なし	-1.50	表面に白粒	-6.12	周辺茶色化
E-03	0.00	なし	-0.04	なし	-0.20	表面に白粒	-0.85	周辺僅かに黄色化
E-04	0.00	なし	-0.12	なし	-0.48	表面に白粒	-1.25	周辺僅かに黄色化
E-05	0.00	なし	-0.06	なし	-0.23	表面に白粒	-1.01	周辺僅かに黄色化、発煙
E-06	0.00	なし	-0.12	なし	-0.79	表面全体白色化	-2.55	周辺黄色化、発煙
E-07	0.00	なし	-0.05	なし	-0.42	表面に白粒	-0.54	周辺僅かに黄色化
E-08	0.00	なし	-0.05	なし	-0.42	表面に白粒、周辺黄色化	-1.43	周辺強く茶色化
E-09	0.00	なし	-0.03	なし	-0.08	表面に白粒	-0.41	周辺黄色化
E-10	0.00	なし	0.00	なし	-0.33	中央部白色化	-2.13	周辺黄色化、発煙
E-11	0.00	なし	-0.02	なし	-0.04	周辺少し茶色化	-1.18	周辺強く茶色化
E-12	0.00	なし	-0.02	なし	-0.28	表面に白粒	-1.20	周辺僅かに黄色化
E-15	0.00	なし	0.00	なし	-0.19	表面僅かに白化	-1.15	表面僅かに白化
E-16	0.00	なし	-0.18	なし	-1.21	表面強く白色化	-2.93	周辺黄色化、発煙
E-17	0.02	なし	-0.10	なし	-0.46	白色化	-2.06	周辺茶色化、焦げる
E-18	0.00	なし	-0.07	なし	-1.69	表面少し黄色化	-4.13	表面茶色化

*減量重量パーセント

できる。しかし、これらの分析を行うには測定装置の準備等が必要であるため、これは今後行うこととして、比較的簡単な方法であるが4.4の積層化実験で作成した遮蔽材の温度変化に伴う重量と外観変化を調べた。重量変化に関しては試料を恒温乾燥器にいれ、室温から80℃に加熱し、そこで10分保持した後重量を測定した。同じ試料に対し同様の操作を100℃、150℃、200℃まで加熱して行った。結果を表-18に示す。同表に示すように試料はいずれも100℃までは外観の変化はなく、減量重量もごく僅かである。100℃での減量は試料の表面に付着した物質、例えば未反応の紫外線硬化モノマー等、による可能性が高い。150℃になると明らかに外観が変化し、減量の大きさも100℃の場合に比べると大きくなっている。従って、100℃から150℃の間で何らかの化学変化が起きていることが予想される。200℃になるとさらに激しく化学変化が起きている。今回は離脱する物質や減量の時間的な変化等に関する詳細な測定は行っていないが、試作した遮蔽材は100℃までは温度変化に伴う元素組成の変化はなく、それ以上の温度では使用時間の制限が必要があると予想される。

5. 遮蔽材E-01の遮蔽性能と放射化

これまで試作した遮蔽材に対しては、その遮蔽性能や物性をより良いものとするため、物質の選択や硬化手法に関して最適化を行う必要がある。従って、試作した遮蔽材はまだ最終的なものではない。しかし、今後の研究のため、その遮蔽と放射化に関する性能を明らかにしておく必要がある。そこで、これまで試作品

表-19 遮蔽材の元素組成

核種名	E-01	普通コンクリート	鉄	水	ポリエチレン
H-1	5.02 +22 *	6.43 +21	—	6.692+22	7.90 +22
B-10	1.46 +21	—	—	—	—
B-11	5.33 +21	—	—	—	—
C-12	1.67 +22	—	—	—	3.95 +22
O-16	2.26 +22	3.95 +22	—	3.346+22	—
Na-23	—	1.13 +21	—	—	—
Mg-nat	—	8.40 +20	—	—	—
Al-27	—	3.23 +21	—	—	—
Si-nat	—	1.27 +22	—	—	—
K-nat	—	5.40 +20	—	—	—
Ca-nat	—	2.96 +21	—	—	—
Ti-nat	—	7.00 +19	—	—	—
Fe-nat	—	9.20 +20	8.466+22	—	—
Pb-nat	3.40 +21	—	—	—	—

* 5.02×10⁻²²と読む。

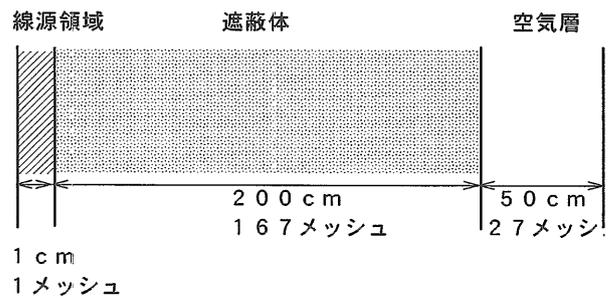


図-6 ANISN一次元計算モデル

のうち代表的なものとして表-17の番号E-01に対して遮蔽性能及び放射化の解析を行った。また、比較のため、普通コンクリート、鉄、水及びポリエチレンに対しても試料E-01と同じ条件で計算を行った。表-19に各遮蔽材に対して計算で使用した元素組成を示す。放射線輸送計算では中性子と一次及び二次ガンマ線を扱った。遮蔽計算は一次元Sn輸送計算コードANISN⁽⁵⁾で、また放射化計算はACT-4コードで行った。これらの計算コードはTHIDA-2コードシステム⁽⁶⁾に含まれているものを使用した。

5.1 遮蔽計算

遮蔽計算で使用した核データはTHIDA-2コード付属のGICX-40ライブラリー⁽⁷⁾(中性子42群、ガンマ線21

群)及びGROUPINライブラリー⁽⁶⁾(ガンマ線54群)である。図-6に計算体系を示す。体系は一次元平板形状である。線源領域は厚さ1cmの空気層とし、その中で線源の空間分布は一様である。図-6の左端では反射境界条件を指定した。線源は核分裂による中性子またはガンマ線である。核分裂当たりの中性子またはガンマ線の発生率は中性子が2.5個、ガンマ線が7.4個とした。中性子のエネルギースペクトル $N(E)$ は

$$N(E) = 0.453 \times \exp(-1.036E) \times \sinh(2.29E)^{1/2} \quad (10)$$

で与えた。また、一次ガンマ線のスペクトル $G(E)$ は即発ガンマ線を $8.0 \times \exp(-1.10E)$ で与え、また、短寿命核分裂生成物からのガンマ線を $6.0 \times \exp(-1.10E)$ で与えたので、合計で

$$G(E) = 14.0 \times \exp(-1.10E) \quad (11)$$

となる。図-6に示すように遮蔽体の厚さは200cmで、その後に50cmの空気層を設定した。計算は角度分点をS16、散乱断面積の近似をP5で実施し、フラックスの収束判定基準は 1.0×10^{-4} とした。空間メッシュは遮蔽体中で167メッシュ、空気層で27メッシュとした。線量当量率への変換係数はICRP51⁽⁸⁾に与えられている1cm深度線量当量率変換係数を使用した。ACT-4によ

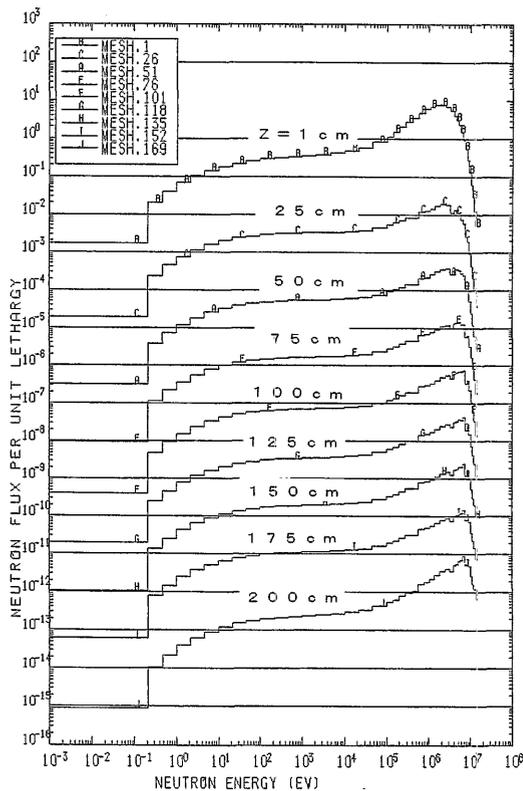


図-7 高性能遮蔽材E-01透過中性子スペクトル

る放射化計算ではTHIDA-2に組み込まれているデータライブラリーであるCHAINLIB⁽⁹⁾、CROSSLIB⁽⁹⁾及びGAMMALIB⁽⁹⁾を使用した。

5.2 計算結果と検討

(1) 中性子遮蔽性能

図-7～図-11に高性能遮蔽材E-01、コンクリート、ポリエチレン、水及び鉄の中での中性子エネルギースペクトルを示す。スペクトルの表示位置は線源領域に1点(図中MESH.1で示す)、遮蔽体前面から25cm間隔で2mまで8点(図中MESH.26からMESH.168または169で示す。)で合計9点である。まず、水素含有量の多いE-01,ポリエチレン、水のスペクトルを比較する。E-01のスペクトルで特徴的なのは低エネルギー部の値が極めて小さくなっている点である。これは硼素の吸収効果による。これに対してポリエチレン、水では熱群を除くとほぼ $1/E$ スペクトルであり、熱中性子の割合が大きい。10keV以上の領域ではE-01とポリエチレンのスペクトルがよく似ている。ただし、約8MeV以上でE-01の方がスペクトルが柔らかくなっている。これは鉛の非弾性散乱効果によるものであろう。水の場合はこれらのものに比べると $1/E$ 領域に対する高速領域の割合が高くなっている。この違いは炭素と酸

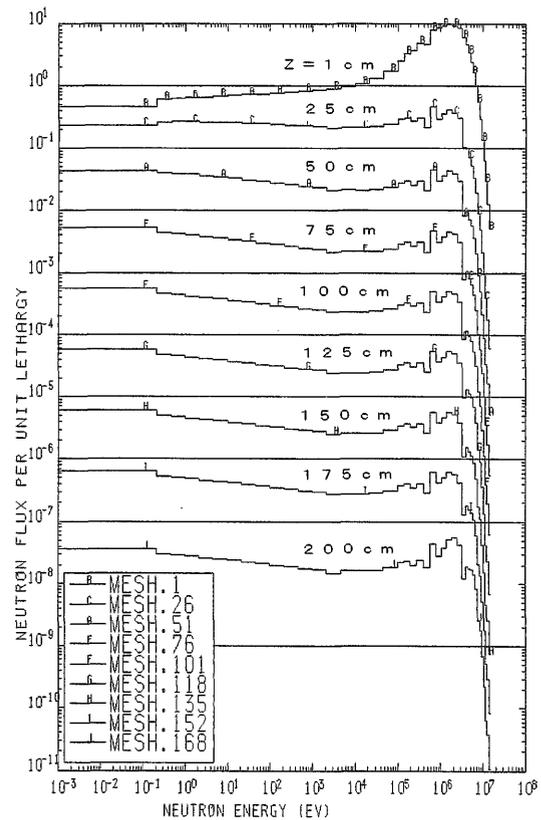


図-8 普通コンクリート透過中性子スペクトル

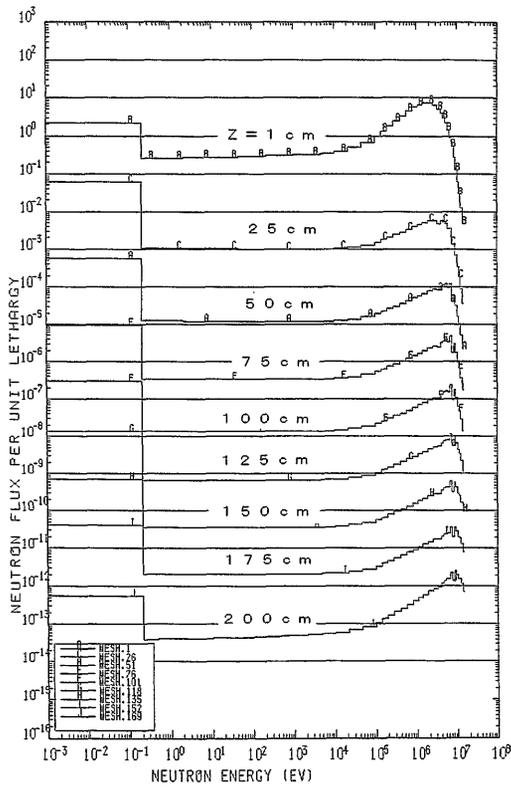


図-9 ポリエチレン透過中性子スペクトル

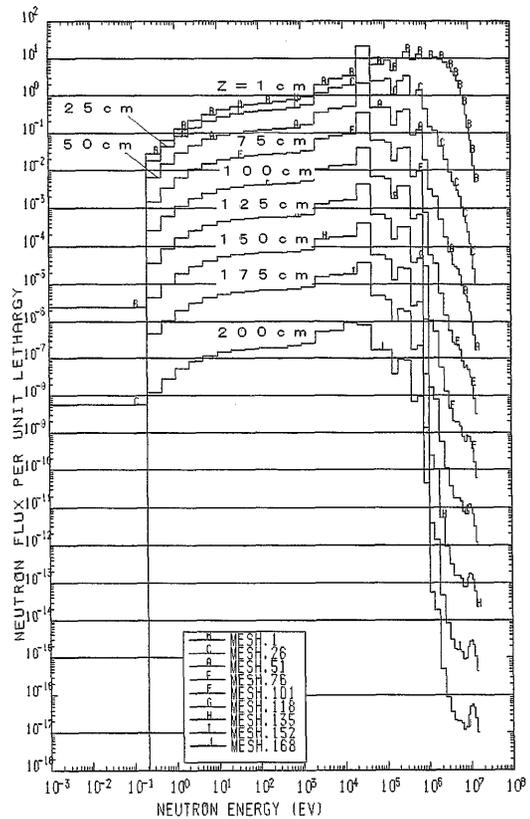


図-11 鉄遮蔽体透過中性子スペクトル

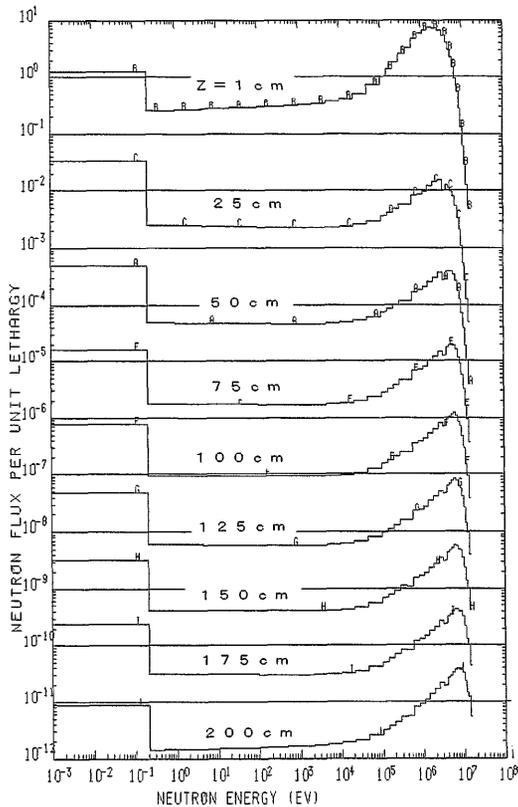


図-10 水遮蔽体透過中性子スペクトル

素の含有量の差によると考えられる。これらに比べるとコンクリートのスペクトルはかなり異なっている。E-01、ポリエチレン、水の場合、ある程度遮蔽体を透過すると高速領域のピークは約6MeVの辺りになるが、コンクリートではピークは約2MeV程度に下がる。また、コンクリートの場合は $1/E$ よりも低エネルギー側が高くなったスペクトルである。コンクリートは前3者に比べて水素量が桁違いに少ないこと、表-19に示されているように種々の核種が含まれていること等がこれらの差の原因となっている。一方、鉄のスペクトルは他の場合に比べ大幅に異なっている。スペクトルのピークは30keV辺りにあり、全体にスペクトルは低いエネルギー領域に寄っている。鉄の場合は熱中性子はほぼ吸収されているが、熱群から10keVの領域のスペクトルの形はE-01に似ている。鉄の場合、1MeV以下の減衰が少なくこのエネルギー領域で遮蔽性能が良くないことを示しているが、数MeV以上では減衰が極めて急であり、非弾性散乱が極めて効果的に働いていることが特徴的である。以上から明らかなことはE-01はそのスペクトルが低エネルギー領域で小さく、同領域の中性子を吸収することにより発生する二次ガンマ線並びに放射化の発生量を効果的に押さえる形をしており、遮蔽材として望ましい性質を持っていることである。

図-12～図-16に高性能遮蔽材E-01、コンクリート、ポリエチレン、水、鉄の中での中性子線量当量率分布を示す。この中で核分裂中性子に対して最も遮蔽性能

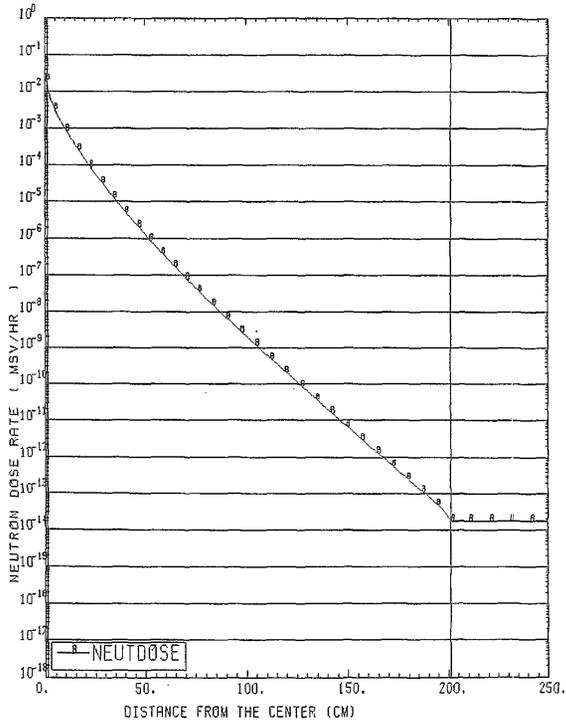


図-12 高性能遮蔽材E-01透過中性子線量当量率分布

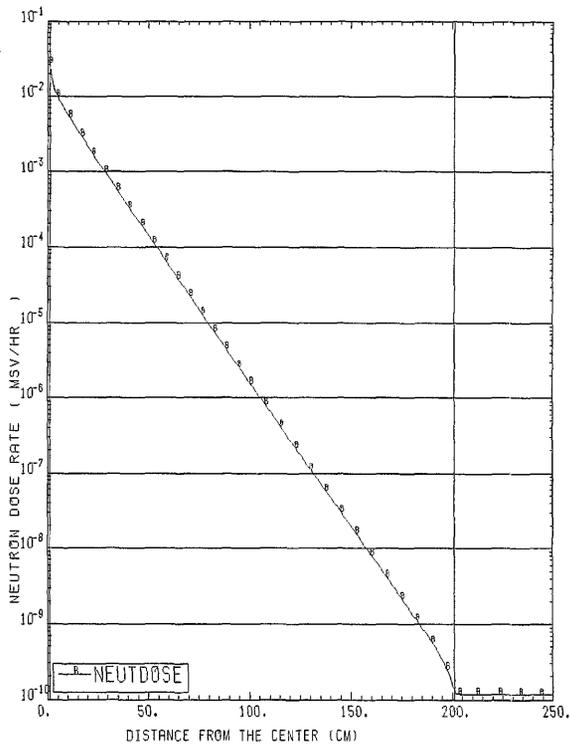


図-13 普通コンクリート透過中性子線量当量率分布

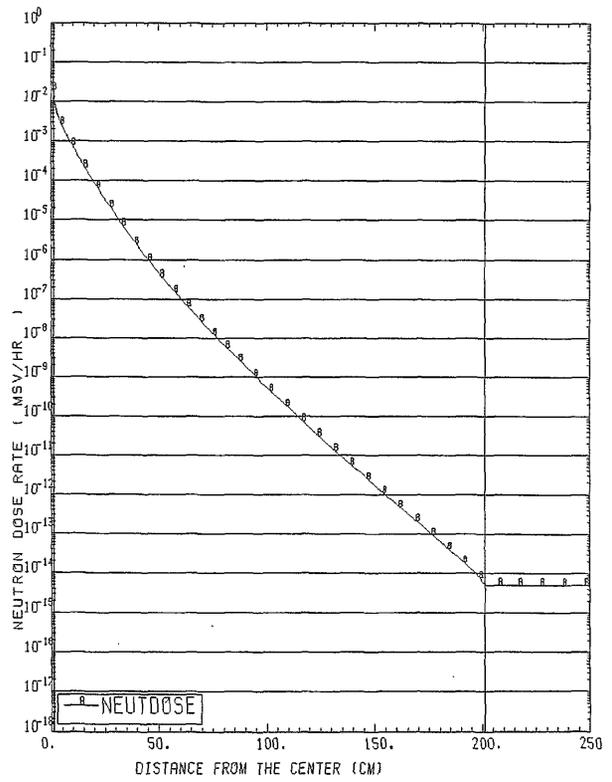


図-14 ポリエチレン透過中性子線量当量率分布

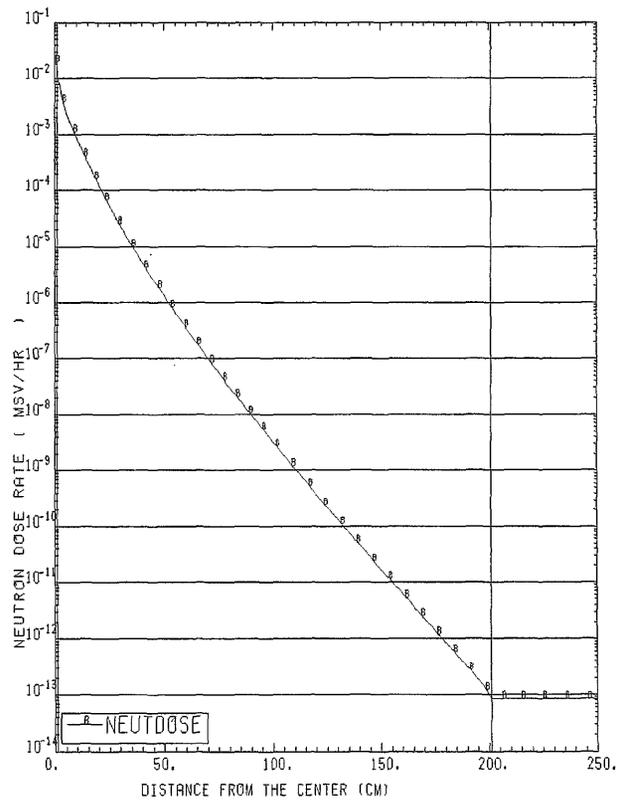


図-15 水遮蔽体透過中性子線量当量率分布

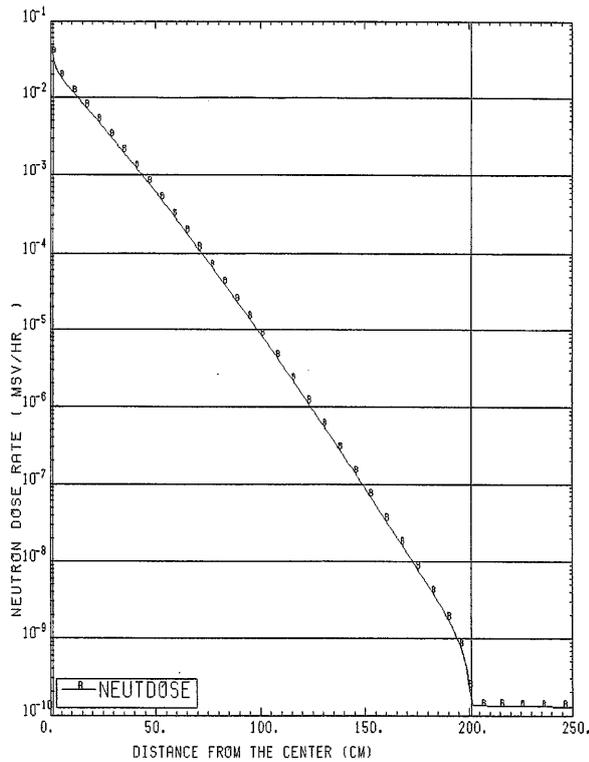


図-16 鉄遮蔽体透過中性子線量当量率分布

が良いのはポリエチレンで次いでE-01、水、コンクリート、鉄の順になる。2mの厚さでのE-01の線量当量率を1とすると、ポリエチレンは約0.3、水は4、コンクリートは 6.6×10^3 、鉄は 7.2×10^3 となる。高性能遮蔽材は単に中性子だけでなくガンマ線の遮蔽も考慮して作成した。このため、表-19に示されるように水素の含有量はポリエチレンや水に比べてかなり少ない。それにもかかわらず、水よりも遮蔽性能がよく、また、最も中性子遮蔽効果の大きな物質とされているポリエチレンに近い遮蔽性能を持っている。これは高エネルギーでは水素と鉛がまた低エネルギーでは水素と硼素が効果的に機能した結果である。

(2) 二次ガンマ線の発生と遮蔽性能

高性能遮蔽材E-01、コンクリート、ポリエチレン、水、鉄の中での二次ガンマ線のエネルギースペクトルを図-17～図-21に、また、これらの物質中の二次ガンマ線の線量当量率分布をまとめて図-22に示す。スペクトルの表示位置は中性子エネルギースペクトルの場合と同様に線源領域に1点、遮蔽体前面から25cm間隔で2mまで8点で合計9点である。二次ガンマ線は一般的にエネルギーが高いため透過力が強く問題となる。二次ガンマ線は遮蔽体の中で主に低速中性子が吸収されて発生し、透過していくのであるが、発生に関して重要なのはそのエネルギーと発生量であり、透過に関しては物質の遮蔽性能である。透過の観点からスペクトルとしては1MeV以上のものが重要である。各物質の

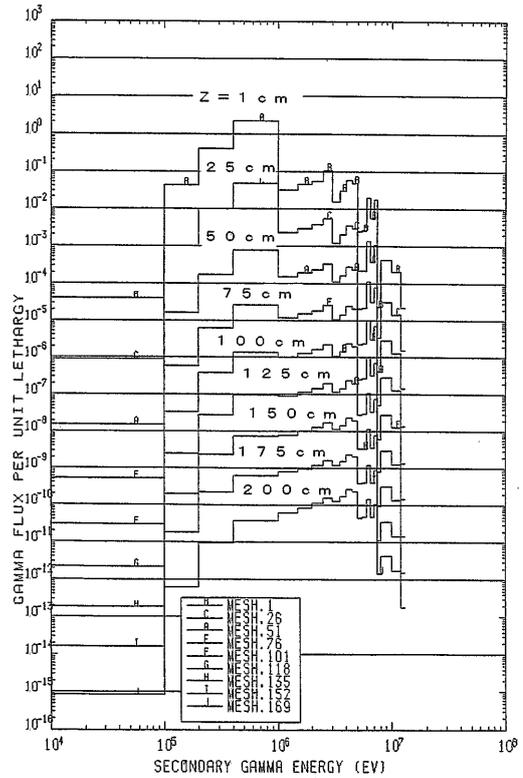


図-17 高性能遮蔽材E-01における二次ガンマ線エネルギースペクトル

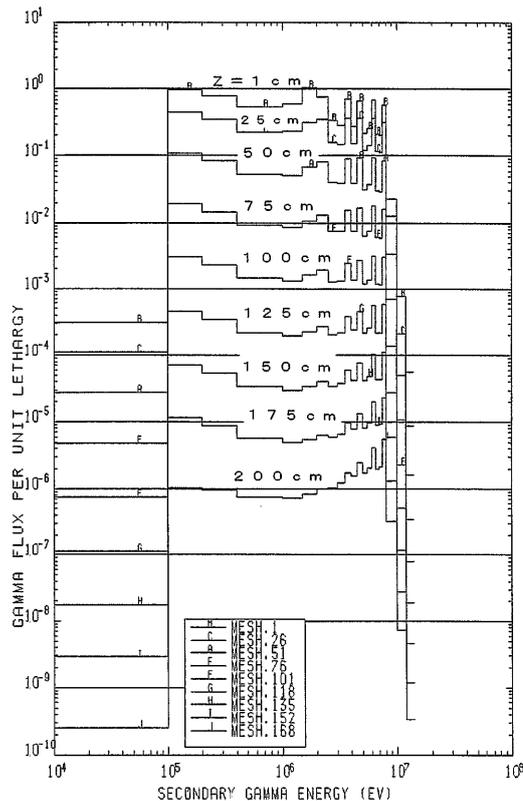


図-18 普通コンクリートにおける二次ガンマ線エネルギースペクトル

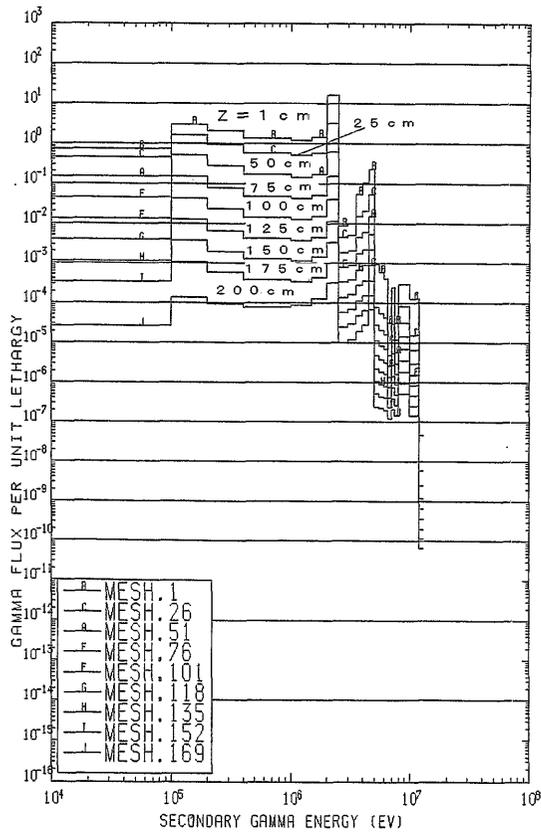


図-19 ポリエチレンにおける二次ガンマ線エネルギースペクトル

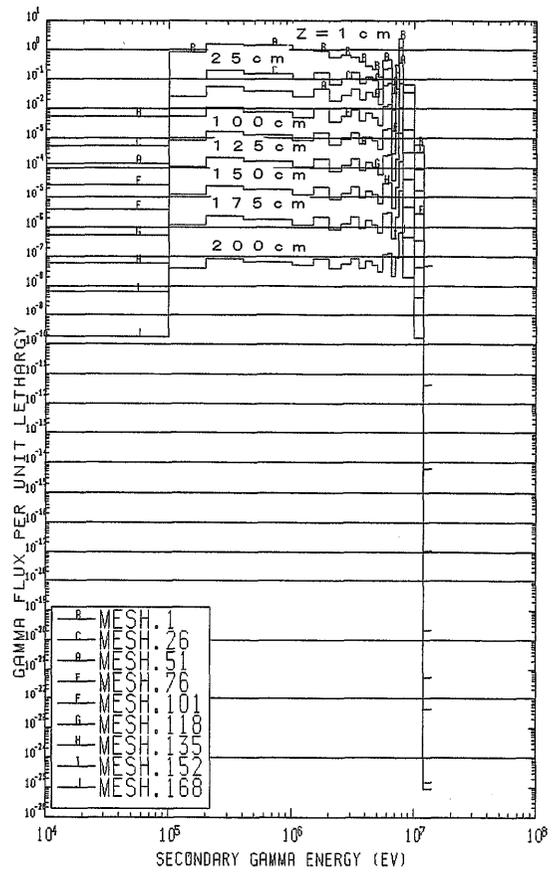


図-21 鉄遮蔽体における二次ガンマ線エネルギースペクトル

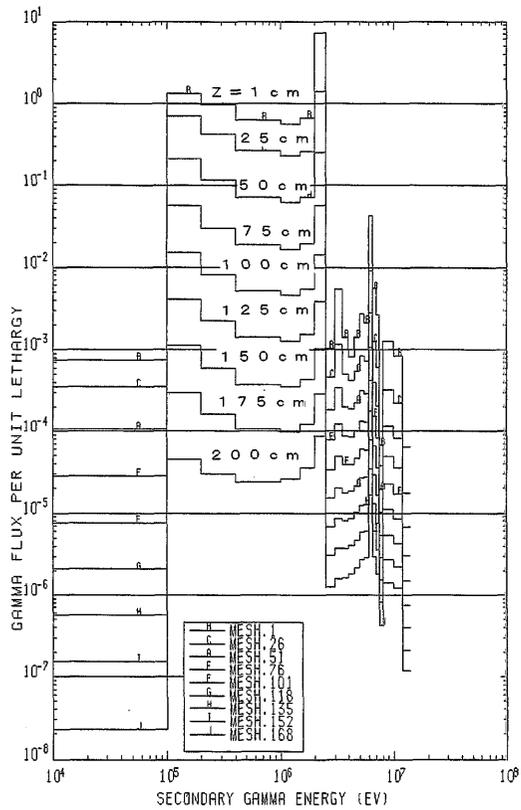


図-20 水遮蔽体における二次ガンマ線エネルギースペクトル

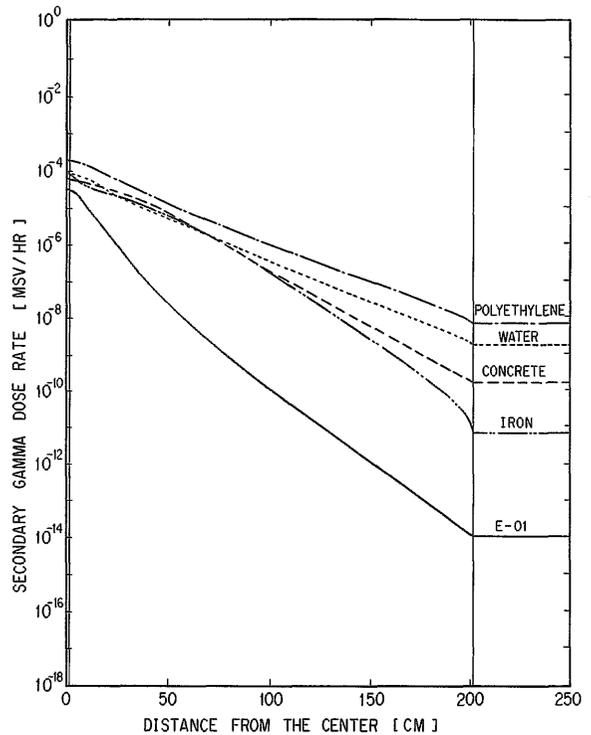


図-22 二次ガンマ線線量当量率分布の比較

第一メッシュのエネルギースペクトルを見れば、発生するガンマ線のエネルギーと発生量がおおよそわかる。5つの物質ではコンクリートと鉄が8MeV近辺の高いエネルギーのガンマ線を発生し、その量も多いことがわかる。水素を多く含む物質は2.2MeVの水素の捕獲ガンマ線を多く放出する。水素の捕獲ガンマ線はエネルギーがそれほど高くないのでコンクリートや鉄の二次ガンマ線に比べると問題は多少緩和されるが明らかにポリエチレンと水の場合はこのエネルギーでのガンマ線が突出している。しかし、同じように水素を多く含むE-01ではこのガンマ線は顕著に現れていない。これはE-01の中では硼素の吸収効果のため低エネルギー中性子が少なく、水素の捕獲反応量が少ないことによる。図-22の線量当量率分布には分布がE-01のものとの他の物質のものとの2つのグループに分かれていることが示されている。遮蔽体入口の線量当量率からE-01では二次ガンマ線の発生量そのものが他の物質に比べて低いことがわかる。また、線量当量率の減衰率がE-01の場合、他と比較して圧倒的に大きいことが示されている。ポリエチレンと水の場合、減衰率は小さく2mで4桁程度しか減衰していない。これらの物質ではガンマ線発生の原因となる中性子の減衰率は極めて大きいことから主に遮蔽体入口部で発生したガンマ線が透過してきたと考えられる。この場合、発生するガンマ線のエネルギーはそれほど高くないが、材料の密度が小さいため減衰が小さいと考えられる。すなわち、減衰傾向は二次ガンマ線に対する遮蔽材料の遮蔽性能から決定されている。これに対して鉄の場合はその遮蔽性能を考えるとかなり緩やかに減衰している。中性子の減衰率と比較すると2mで約2桁程度減衰が少ないだけである。従って、鉄の場合は各評価点の線量当量率は評価点のかなり近傍で発生したガンマ線により決定されるといえる。コンクリートの場合も減衰は緩やかである。現象としては上記の2つの現象の中間的なことが推定される。これらに比べると高性能遮蔽材E-01の場合は二次ガンマの減衰率は大きく、2mのところでの線量当量率は中性子によるものより小さい。2mの点での中性子線量当量率に対する二次ガンマ線のその比はE-01が約0.5であるのに対しコンクリートは約1.4、ポリエチレンは約 1.4×10^6 、水は約 2.2×10^4 、鉄は約 5.8×10^2 である。中性子及び二次ガンマ線の絶対量と減衰率を考えると、通常の場合ではポリエチレンと水では二次ガンマ線が線量率を決定する。高性能遮蔽材やコンクリートの場合は二次ガンマ線の全体の線量当量率に占める割合は大きくないが、その存在については一応考慮する必要がある。鉄の場合は熱中性子が吸収される結果、発生量自体が少なく、二次ガンマ線は問題にならない。

(3) 核分裂ガンマ線に対する遮蔽効果

高性能遮蔽材E-01、コンクリート、ポリエチレンの

中の核分裂ガンマ線透過エネルギースペクトルを図-23～図-25に、また、透過ガンマ線線量当量率分布を図-26に示す。スペクトルの表示位置については二次ガンマ線の場合と同様である。核分裂により放出されるガンマ線は5.1の式(11)で表されるエネルギースペクトルを持つが、透過エネルギースペクトルで見ると、透過とともにスペクトルにピークが現れ、そのピークが少しずつ高エネルギー側にずれていくのがわかる。E-01とコンクリートを比べるとコンクリートの方がより高エネルギー側にピークがずれていく。例えば200cmの点ではE-01の場合約3.5MeVに、コンクリートの場合約5MeVにそれぞれピークがある。このように実効エネルギーが高くなるので図-26に示されるようにコンクリートの方が減衰が緩やかとなる。1MeV以下の低エネルギー側では物質によりスペクトルが大きく異なる。コンクリートやポリエチレンでは低エネルギー側が $1/E$ に近いスペクトルとなっているが、硼素を含むE-01では硼素により低エネルギー成分が吸収され少ない。高性能遮蔽材E-01とコンクリートは同じ密度であるが、以上の理由により2mの点でE-01の線量当量率はコンクリートの約 $1/50$ となる。ポリエチレンの場合は密度が小さいので遮蔽効果は小さい。

(4) 放射化

放射化は遮蔽材を構成する核種が主に低エネルギー

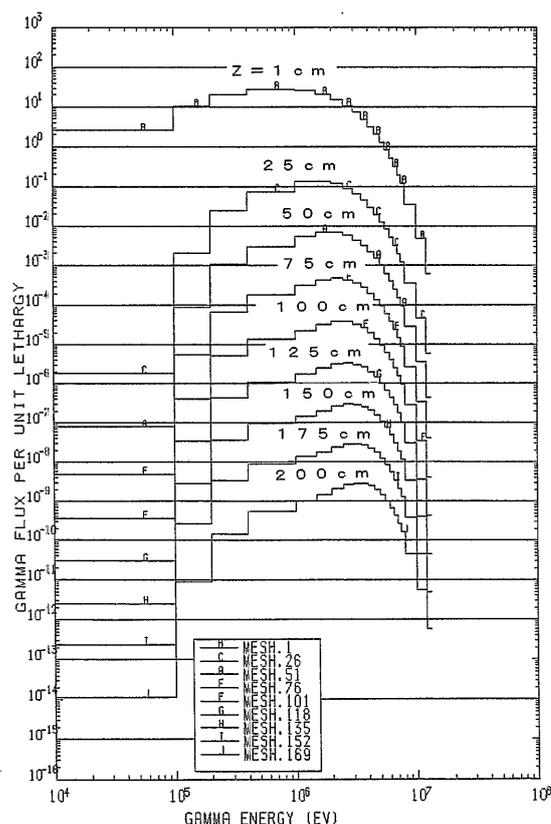


図-23 高性能遮蔽材E-01透過一次ガンマ線エネルギースペクトル

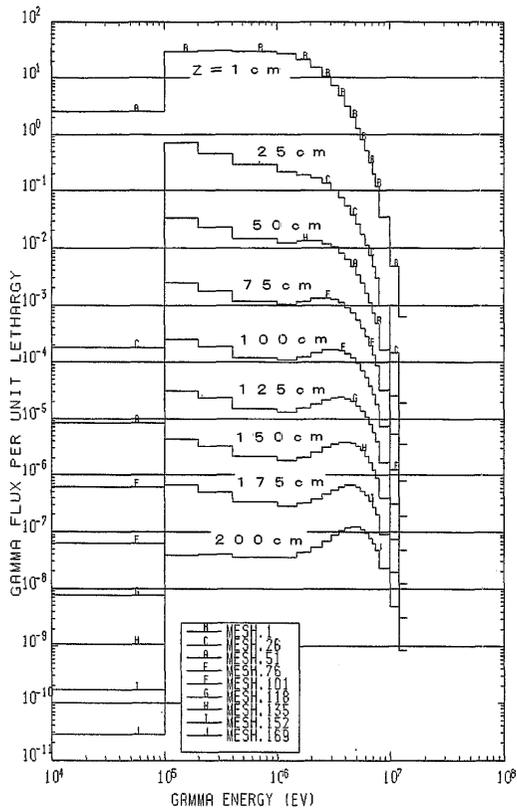


図-24 普通コンクリート透過一次ガンマ線エネルギースペクトル

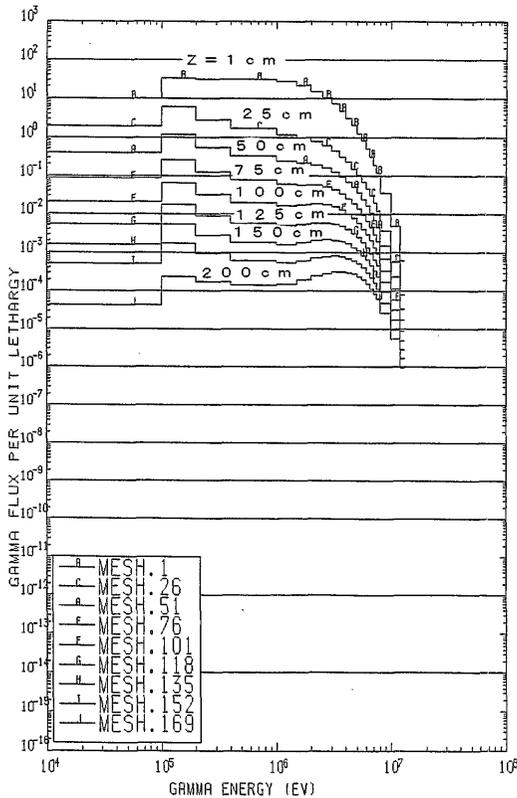


図-25 ポリエチレン透過一次ガンマ線エネルギースペクトル

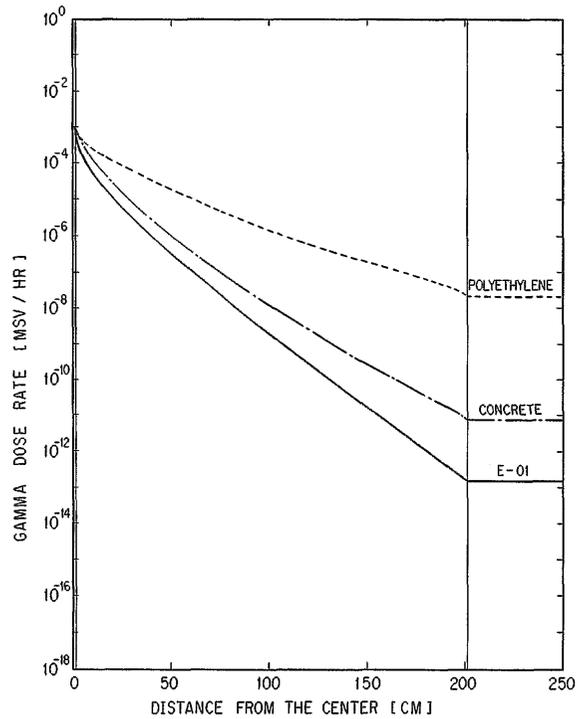


図-26 一次ガンマ線線量当量率分布の比較

の中子線を捕獲反応により吸収することにより不安定な放射性同位元素に変換されることにより生じる。放射化に関する評価で重要なのは原子炉停止後等の作業の際の被曝の線源としての強度であり、また、遮蔽材の処理処分の際の全放射線量である。前者に関しては中性子照射後一定の時間を経過した後（作業時）におけるガンマ線を放出する核種が重要となる。また、後者に関しては照射後ある程度長時間冷却した後の全放射線量が重要である。各放射化核種の発生量は中性子スペクトルに依存するので、遮蔽内の位置によって放射線の相対強度は変化する。従って、放射能の評価は遮蔽体の各位置で詳細に行う必要があるが、ここでは放射化の定性的な傾向を調べるため遮蔽体入口からある程度内側の中性子スペクトルが安定した位置で検討を行う。

核分裂中性子線源を高性能遮蔽材E-01、コンクリート、ポリエチレン、水、鉄遮蔽体前面に置き1年間照射した後、照射後時間依存の放射能を図-27～図-31に示す。放射能計算位置は遮蔽体入口から約50cmの点である。図-27のE-01の場合、放射能として主に寄与するのは²⁰⁹Pb、²⁰³Pb、²⁰³Hg、¹⁰Be、¹⁴Cである。このうち²⁰⁹Pb、¹⁰Be、¹⁴Cは崩壊の際ガンマ線を放出しない、いわゆるベータ崩壊のみをおこす。通常被曝に係わるものは²⁰³Pbと²⁰³Hgである。これらはいずれも崩壊毎に0.28MeVと遮蔽の観点からは低めのエネルギーのガンマ線を放出する。²⁰³Pbは半減期が52時間で照射後2週間程度の期間においてガンマ線源として重要である。