

# 原子炉しゃへいにおけるガンマ線多重層透過の ビルドアップ係数

Build-up Factors of Gamma Ray Penetration for Multiple Layers in Reactor Shielding

北 爪 光 幸\* 大 串 明\*  
Mitsuyuki Kitazume Akira Ōgushi

## 要 旨

ガンマ線のしゃへい設計に有用な線量ビルドアップ係数の計算法を検討するために 10 Ci  $^{60}\text{Co}$  による平面一方向の線源を用いて多重層透過の実験を行ない、Kalos の式、Broder の式および北爪の式の各経験式の精度を調べた。しゃへい物質は水、鉄および鉛でこれらを組み合わせて四重層までの平板しゃへい体とし、その厚さは最大 8 mfp までとった。単層ビルドアップ係数として実験値を用いた場合には軽-重二重層では北爪の式で数 % の範囲内で一致する。また重-軽二重層では Broder の式が数 % から 20% 小さい値を与え、Broder の式と北爪の式の組合せでだいたい 5~15% である。全般的には Broder の式と Kalos の式の近似はよくない。単層のビルドアップ係数として計算値を用いた場合、北爪の式では実験値よりも 5~15% 大きい値を与える。以上から、実際のしゃへい設計への適用として、多重層ビルドアップ係数の計算は Broder の式と北爪の式を組み合わせることにより、精度 15% 以内で可能である。

## 1. 緒 言

原子炉炉心からはガンマ線と中性子が放出されるが、これを防ぐために炉心周囲にしゃへい体を設けなければならない。そのしゃへい体を設計する場合に両放射線に関して種々の計算法が提案されている。特に、ガンマ線の評価では点状核法が使用されるが、これを行なうのにビルドアップ係数を知らなければならない。

一般に、ガンマ線が物質内を透過する場合に、物質内電子とまったく衝突しないで透過する、いわゆる非散乱線と、電子と 1 回以上衝突しながら透過する、いわゆる散乱線とが存在するが、ビルドアップ係数とは全透過線（非散乱線と散乱線）が非散乱線の何倍になっているかを示す量であって、個数ビルドアップ係数  $B_N$ 、エネルギービルドアップ係数  $B_E$  および線量ビルドアップ係数  $B_D$  などがあり、特に許容線量を求めるのによく使用されるのは線量ビルドアップ係数である。

ビルドアップ係数は均質無限媒質に関してはモーメント法によって詳細に求められている。しかし、実際の原子炉しゃへい設計で問題となるのは有限の多重層であり、この場合に対してはモーメント法は適用できない。このためモンテカルロ法その他による理論計算とともに実験的な研究も多く試みられているが、多重層物質を透過するガンマ線のふるまいはかなり複雑であり、今日でもなお明確な解答は得られていない。しかし、比較的簡単な経験式によって、この多重層のビルドアップ係数を記述しようとする試みがあり、すでに幾つかの式が提案されている。

ここで取り上げた研究はしゃへい設計に有用な線量ビルドアップ係数の計算法を検討する目的で実験を行ない、すでに提案されている二、三の経験式の精度を調べたものである。実験は  $^{60}\text{Co}$  (1.17 MeV と 1.33 MeV の 2 種のガンマ線を放出) を線源とし、線源の幾何学的条件として最も基本的で、実際にも重要な平面一方向線源を採用した。このために Kirn 氏ら<sup>(2)</sup> の用いた特殊な方法によって実験を行なった。しゃへい物質としては水、鉄および鉛を取り上げ、これらを組み合わせて四重層までの平板しゃへい体とした。それらの厚さは最大 8 mfp である。

これらの実験結果は単層に関してはすでに発表されている実験値と比較しながら検討し、二重層以上に関してはすでに提案されている Kalos の式<sup>(3)</sup>、Broder 氏らの式<sup>(4)</sup>および Broder 氏らの式を修

\* 日立製作所中央研究所

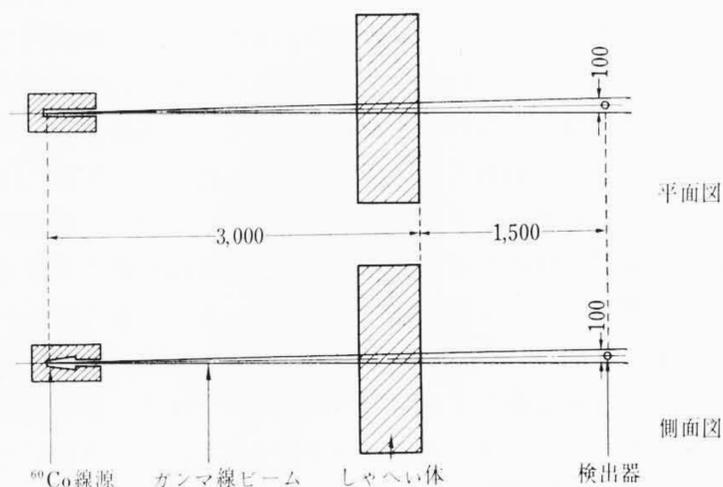


図 1 (a) 非散乱ガンマ線量の測定

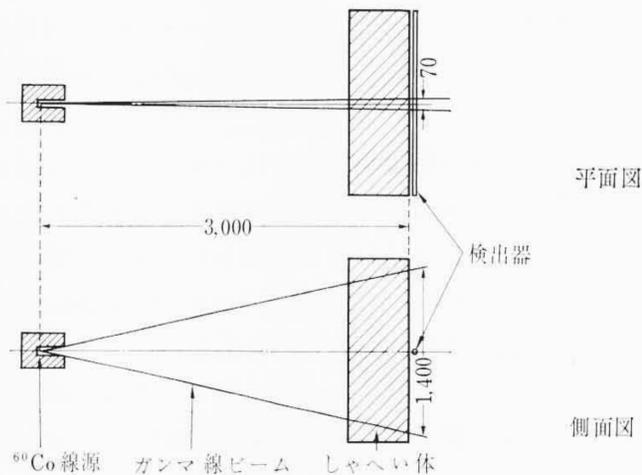


図 1 (b) 全ガンマ線量の測定

正した北爪の式<sup>(5)</sup>の各経験式に適用してその精度を調べ、しゃへい設計への適用性を検討した。

## 2. 実験方法と装置

### 2.1 実験の方法

線量ビルドアップ係数はしゃへい体透過線の全ガンマ線量、非散乱ガンマ線量との比として定義される。よってこれを求めるには両者の線量を実測しなければならないが、多重層しゃへい体の非散乱ガンマ線量は実測でなく単層の測定結果を基にして計算によって求めた。

非散乱ガンマ線量と全ガンマ線量の測定法を説明する。

#### (1) 非散乱ガンマ線量の測定

図 1 (a) に非散乱ガンマ線量の測定条件を示した。ガンマ線ビ

ームはこれを細いビームとし、広がりには検出器位置でほしい100 mm角である。

## (2) 全ガンマ線量の測定

線源の幾何学的条件として、平面一方向線源を実現させるために、Kirn氏らの用いた特殊な方法によった。

平面一方向線源では、ガンマ線は平行平板しゃへい体の全面にわたり、それに垂直に平行ビームとなって入射し、透過ガンマ線量はしゃへい体背後に密着しておかれた点状検出器で測定される。Kirn氏らの方法ではガンマ線は平行平板しゃへい体に垂直な一平面内に限られ、この平面内を平行ビームとなってしゃへい体に垂直に入射する。検出器には線状の長い検出部分を有するものを使用し、しゃへい体背後に密着し、ガンマ線ビームの存在する平面に垂直になるようにおかれる。ガンマ線の進行方向に見て平面一方向線源では線源が二次元的な広がりを持ち、検出器が点状であるのに対し、Kirn氏らの方法では、線源、検出器ともに一次元的な広がりを持っており、結果的には両者は等価になるのである。その説明図は図1(b)である。

実験上の制約として(a)ガンマ線ビームの広がり、(b)検出器の大きさ、(c)しゃへい体の大きさがある。(a)では水平方向の広がりには多少あっても差しつかえない。また広がり範囲内で強度分布が一様でなくてもよい。ただし、これはしゃへい体、検出器がその広がりを問題にしないだけ十分大きいという条件で言えることである。この場合、斜め入射は誤差の原因になるが、実際には斜め入射の角度はきわめて小さくて問題にならない。(b)の検出器では理想的には線状でなければならないが、実際には有限の大きさを有している。使用したのは外径30 mmであり、ガンマ線の広がりと比較して問題はない。(c)のしゃへい体ではガンマ線が散乱によって広がる範囲以上を必要とする。この点については別に測定を行ない実際に使ったしゃへい体の大きさで十分であることを確認した。

## 2.2 実験装置

実験装置は線源、しゃへい体および検出器から構成されている。線源は約10 Ciの<sup>60</sup>Coで、大きさは10 mmφ×2 mmで円筒形のカプセルにはいっている。これはさらに厚さ15~20 cmの鉛の容器に納められている。

ガンマ線ビームは非散乱線量の測定ではスリットとシャッタにあけた200×10×15 mmの長方形孔を通過するものを使用した。全線量の測定ではシャッタをスリットの前面からはずして使用した。スリットは鉛を入口幅20 mm、出口幅100 mm、長さ206 mm、厚さ5 mmの台形に切り取った形をしたものである。

ガンマ線ビームの広がりにはスリット系に対して非散乱線と全ガンマ線のおのおの測定位置を線源から4.5, 3.0 mとしてビームの上下方向、水平方向の広がりを計算すると図1(a)(b)に示すような結果となる。すなわち、4.5 mの非散乱線の場合には100×100 mm、3 mの全ガンマ線の場合には70×1,400 mmである。

しゃへい体には水、鉄および鉛を選んだ。鉄はSS41の材料で1,550×1,200 mmの大きさ、厚さ19 mmのものを10枚、厚さ10 mmと5 mmのものそれぞれを1枚ずつ使用した。鉛は4.1%のアンチモン入りのもの、その強度を増して使用した。比重は11.05 (g/cm<sup>3</sup>)、大きさは1,280×1,000 mmである。厚さは30 mmのものと10 mmのものがあり、前者を3枚と後者を2枚使用した。水層は大きさ1.5×1.5×1.5 mで、下部と側面には鉄板を張り、ガンマ線の透過面には25 mm厚さのメタクリル樹脂板を使った。水の厚みを7通り、すなわち79, 229, 429, 529, 729, 929 mmおよび1,129 mmに変えて使用した。

検出器としては球形の電離箱と長円筒状電離箱を用い、いずれも振動容量電位計で出力電流を測定した。球形の電離箱は非散乱ガン

マ線量の測定用で、有効容積は50 ccである。全ガンマ線量測定には長円筒状電離箱を使用した。この電離箱の感度特性を調べたところ、電離箱の中央部約1.3 mにわたり、一様な感度を持つことがわかった。また線質特性および温度特性を調べたが、これらによる測定誤差は±3%以内であることがわかった。

実験装置の配置では<sup>60</sup>Co線源を床上1.05 mの位置におき、ビームの中心を壁から3 mはなした。また装置全体は壁から十分はなれているのでガンマ線ビームの後方散乱の影響はない。

## 3. 単層しゃへい体の線量ビルドアップ係数の実験結果とその検討

### 3.1 非散乱ガンマ線量と線量ビルドアップ係数の計算

準備として単層しゃへい体の<sup>60</sup>Coガンマ線に対する非散乱ガンマ線量と線量ビルドアップ係数の計算式を導いておく。

平板の単層物質からなるしゃへい体にガンマ線が入射するとき、非散乱ガンマ線量 $D(t)$ と線量ビルドアップ係数 $\bar{B}_D(t)$ はそれぞれ次のように表わされる。

$$D(t) = K \int_0^{h\nu_{\max}} \mu_a^{\text{air}}(h\nu) I_0(h\nu) e^{-\mu(h\nu)t} d(h\nu) \dots\dots (1)$$

$$\bar{B}_D(t) = \frac{\int_0^{h\nu_{\max}} \mu_a^{\text{air}}(h\nu) I_0(h\nu) B_D(h\nu) d(h\nu)}{\int_0^{h\nu_{\max}} \mu_a^{\text{air}}(h\nu) I_0(h\nu) e^{-\mu(h\nu)t} d(h\nu)} \dots (2)$$

ここに

$I_0(h\nu)$ : ガンマ線のエネルギー束 (MeV/cm<sup>2</sup>)

$\mu(h\nu)$ : エネルギー $h\nu$ のガンマ線の吸収係数 (cm<sup>-1</sup>)

$t$ : しゃへい体の厚さ (cm)

$B_D(h\nu, t)$ : エネルギー $h\nu$ 、しゃへい体の厚さ $t$ の線量ビルドアップ係数

$h\nu_{\max}$ : 入射ガンマ線の最大エネルギー (MeV)

$\mu_a^{\text{air}}(h\nu)$ :  $h\nu$ のエネルギーのガンマ線に対する空気のエネルギー吸収 (cm<sup>-1</sup>)

$K$ : 空気中でのエネルギー損失量をレントゲン単位の線量に換算する係数で  $K=1.48 \times 10^{-5}$  (r/MeV/cm<sup>3</sup>)

ここでの実験では線源は<sup>60</sup>Coであるから、1.17 MeVと1.33 MeVのガンマ線が強度比1:1で放出される。そこで1.17 MeVと1.33 MeVを添字1, 2で区別すれば(1), (2)両式はそれぞれ次のように表わされる。

$$\frac{\bar{D}(t)}{D(0)} = \frac{\mu_a^{\text{air}}(h\nu_1) h\nu_1 e^{-\mu(h\nu_1)t} + \mu_a^{\text{air}}(h\nu_2) h\nu_2 e^{-\mu(h\nu_2)t}}{\mu_a^{\text{air}}(h\nu_1) h\nu_1 + \mu_a^{\text{air}}(h\nu_2) h\nu_2} \dots (3)$$

$$\bar{B}_D(t) = \frac{\mu_a^{\text{air}}(h\nu_1) h\nu_1 e^{-\mu(h\nu_1)t} B_D(h\nu_1, t) + \mu_a^{\text{air}}(h\nu_2) h\nu_2 e^{-\mu(h\nu_2)t} B_D(h\nu_2, t)}{\mu_a^{\text{air}}(h\nu_1) h\nu_1 e^{-\mu(h\nu_1)t} + \mu_a^{\text{air}}(h\nu_2) h\nu_2 e^{-\mu(h\nu_2)t}} \dots\dots\dots (4)$$

ただし、 $D(t)$ の式は $t=0$ の値 $D(0)$ を基準としている。

ここで次の置換をする。

$\mu(h\nu_1) > \mu(h\nu_2)$ であることを考えに入れて、

$$\bar{\mu} = \frac{\mu(h\nu_1) + \mu(h\nu_2)}{2}$$

$$\Delta\mu = \frac{\mu(h\nu_1) - \mu(h\nu_2)}{\mu(h\nu_1) + \mu(h\nu_2)}$$

$$\Delta W = \frac{\mu_a^{\text{air}}(h\nu_1) h\nu_1 - \mu_a^{\text{air}}(h\nu_2) h\nu_2}{\mu_a^{\text{air}}(h\nu_1) h\nu_1 + \mu_a^{\text{air}}(h\nu_2) h\nu_2}$$

$$\gamma(t) = \frac{\mu_a^{\text{air}}(h\nu_1) h\nu_1 e^{-\Delta\mu \cdot L}}{\mu_a^{\text{air}}(h\nu_2) h\nu_2} = \frac{1 - \Delta W}{1 + \Delta W} e^{-\Delta\mu \cdot L}$$

$$L = \bar{\mu} \cdot t$$

表1  $\bar{\mu}$ ,  $\Delta\mu$  の値

物質	比重	吸収係数 $\mu(h\nu)$ ( $\text{cm}^2/\text{g}$ )		$\bar{\mu}(\text{cm}^{-1})$	$\Delta\mu$
		1.17 MeV	1.33 MeV		
水	1.00	0.06521	0.06105	0.06313	0.03296
メタアクリル樹脂板	1.185	0.06332	0.05930	0.07503	—
鉄板	7.852	0.05492	0.05143	0.4164	0.03559
鉛板	11.05	0.05957	0.05431	0.6292	0.04620

表2 線量ビルドアップ係数(平面一方向線源, 有限層)

物質の種類	ガンマ線エネルギー	しゃへい体厚さ (mfp)					
		1	2	4	7	10	15
水	1.17	1.80	2.69	4.91	8.45	12.56	19.58
	1.33	1.77	2.60	4.59	7.66	10.87	15.64
	$^{60}\text{Co}$	1.78	2.64	4.71	7.92	11.31	—
鉄	1.17	1.70	2.43	4.07	6.87	10.15	16.37
	1.33	1.67	2.38	3.96	6.65	9.77	15.67
	$^{60}\text{Co}$	1.68	2.40	3.99	6.68	9.77	—
鉛	1.17	1.38	1.71	2.25	2.95	3.64	4.46
	1.33	1.39	1.74	2.32	3.08	3.85	4.75
	$^{60}\text{Co}$	1.38	1.72	2.28	3.01	3.72	—

表3  $\bar{\mu}$  の実験値と計算値の比較

物質	$\bar{\mu}$ (計算値) $\text{cm}^{-1}$	$\bar{\mu}$ (実験値) $\text{cm}^{-1}$
水	0.06313	0.0643
鉄	0.4164	0.423
鉛	0.6292	0.633

この結果式(3), (4)は

$$\frac{D(t)}{D(0)} = e^{-L} \cosh(\Delta\mu \cdot L) \{1 + \Delta W \tanh(\Delta\mu \cdot L)\}$$

$$\approx e^{-L} \left(1 + \frac{1}{2} \Delta\mu^2 \cdot L^2\right) (1 + \Delta W \cdot \Delta\mu \cdot L) \dots\dots\dots (5)$$

$$\bar{B}_D(t) = \frac{\gamma(t) B_D(h\nu_1, (1 + \Delta\mu)L) + B_D(h\nu_2, (1 - \Delta\mu)L)}{\gamma(t) + 1}$$

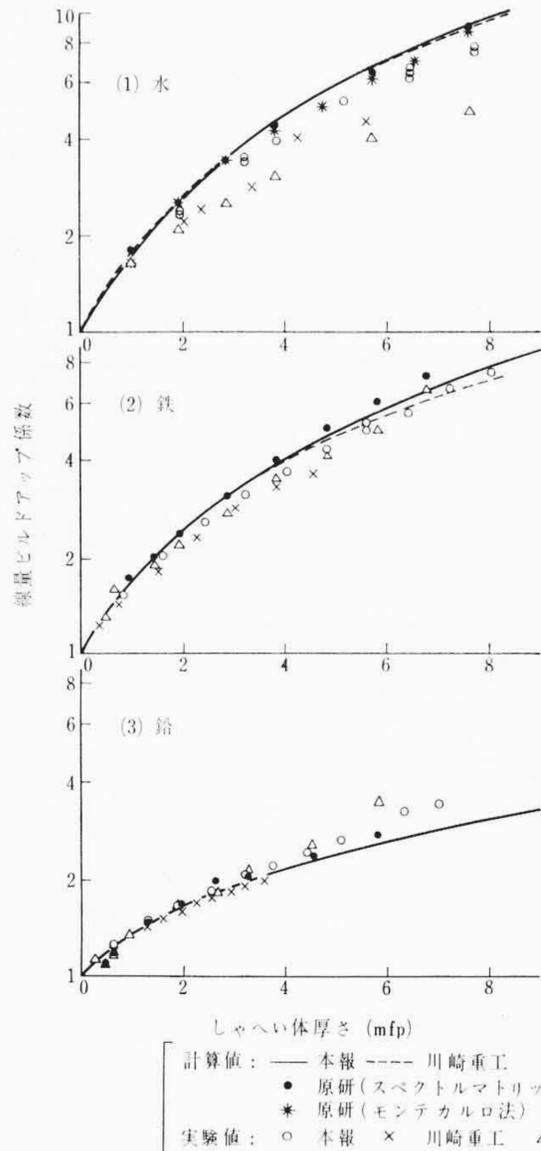
$$\dots\dots\dots (6)$$

ここでの実験に供したしゃへい体の場合に  $\mu(h\nu_1)$ ,  $\mu(h\nu_2)$  を計算し,  $\bar{\mu}$ ,  $\Delta\mu$  を求めると表1のようになる。また  $\Delta W = 0.04716$  である。表1からわかるように  $\Delta\mu$ ,  $\Delta W$  はいずれも1に比べて小さいので,  $L$  が大きくないときは非散乱ガンマ線量は  $e^{-L}$  で表わされる。以上の結果, 非散乱ガンマ線量については表1と式(5)とから計算できる。

線量ビルドアップ係数は  $B_D(h\nu, t)$  の値がわかれば式(6)から計算できるが,  $B_D(h\nu, t)$  は有限板状の線量ビルドアップ係数であるので, モーメント法による均質無限大媒質中の線量ビルドアップ係数  $B_D^\infty(h\nu, t)$  とエネルギービルドアップ係数  $B_E^\infty(h\nu, t)$  との比を用いて次式で計算しなければならない。

$$B_D(h\nu, t) = \frac{B_D^\infty(h\nu, t)}{B_E^\infty(h\nu, t)} \{1 + K(B_E^\infty(h\nu, t) - 1)\} \dots (7)$$

ここに  $K$  はガンマ線のエネルギービルドアップ係数の補正係数で, Berger氏ら<sup>(6)</sup>がモンテカルロ法計算で算出したものである。 $B_D(h\nu, t)$  の値は文献<sup>(12)</sup>に出ており, 直接利用することができる。ここではエネルギー1.17 MeVと1.33 MeVに対応するものを内そうによって求め, その結果と式(6)とにより厚さ  $t$  における有限板状の単層しゃへい体の線量ビルドアップ係数を計算した。鉛試料についてはアンチモンがはいっていることを考慮して計算した。純粋の



(計算値と実験値の比較)  
図2 単一層の線量ビルドアップ係数

鉛の場合より1~2%大きい値が得られた。その結果を表2に示す。

### 3.2 線量ビルドアップ係数の実験結果

水, 鉄および鉛の単層の非散乱線のガンマ線量の測定では  $e^{-L}$  ( $L = \bar{\mu}t$ ) の減衰曲線がほぼなりたつ。ただし,  $L$  が小さいところでは傾斜が急であり,  $L$  が大きいところではわずかに,  $e^{-L}$  から大きいほうへずれる傾向がある。実験結果から,  $e^{-L}$  を仮定して  $\bar{\mu}$  を最小2乗法で求めたところ, 表3となる。表3には計算値の  $\bar{\mu}$  の値も示してあるが, これは試料の化学組成と密度とから算出したものである。実験値と計算値との一致はほぼ満足すべきものであるけれども, 実験値が計算値よりもわずかに大きめに出ているのは  $L$  が小さいところでの急激な減衰によるものと思われる。

水の場合にはメタアクリル樹脂板の補正は板の実際の厚さに  $^{60}\text{Co}$  ガンマ線に対して評価した  $\bar{\mu}$  と水のそれとの比を掛けて等価な水の厚さとした。

次に, これら3物質の全ガンマ線量の測定ではビームの広がりとしゃへい体の大きさによる誤差を検討し, 実験の条件は十分満足すべきものであることを確かめた。

これらの実験から単層の線量ビルドアップ係数を計算し, 図2に示した。図2には表2の結果も示した。また, ここで行なったような実験は日本原子力研究所<sup>(7)(8)</sup>と川崎重工業株式会社<sup>(9)(10)</sup>でも行なっているので, これらの実験結果と計算結果とをあわせて図2に示した。

水に関しては3者の計算値は一致している。日本原子力研究所のモンテカルロ法による計算値は他の計算値と比べて4~7 mfpの範囲で10%程度低い値を示している。実験値は計算値よりすべて小さい。特に日本原子力研究所と川崎重工業株式会社の実験値は2~8 mfpで20~40%ほど低い。ここでの実験値は計算値と比較して4~20%小さい。

鉄に関しては3者の計算値は4 mfp以上で差が出ている。8

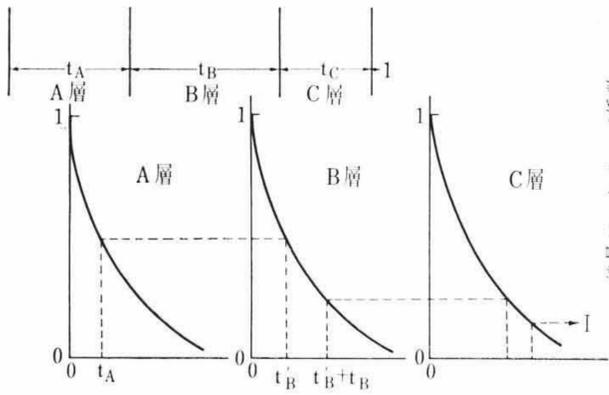


図3 多重層しゃへい体の非散乱ガンマ線量の計算

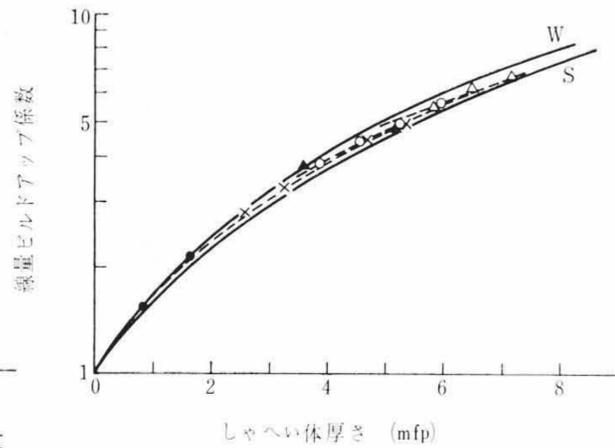


図4 線量ビルドアップ係数 (水-鉄層)  
(W: 水, S: 鉄各単層の線量ビルドアップ係数)

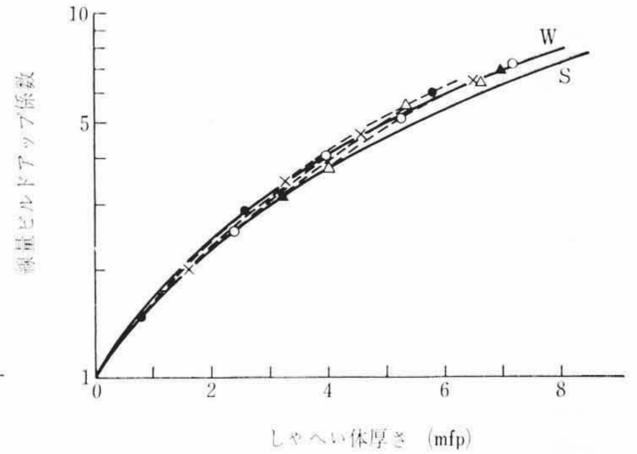
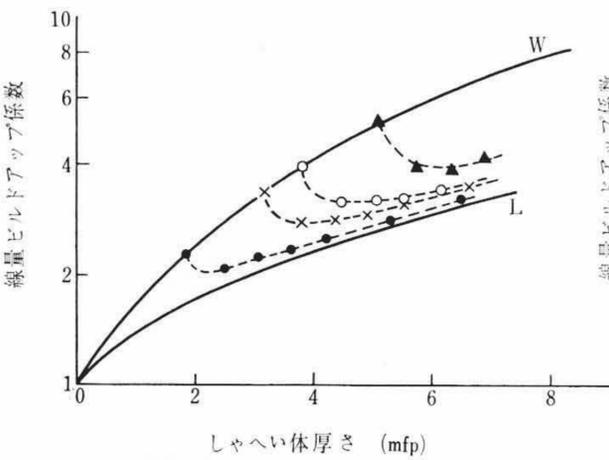


図5 線量ビルドアップ係数 (鉄-水層)



(L: 鉛単層線量ビルドアップ係数)

図6 線量ビルドアップ係数 (水-鉛層)

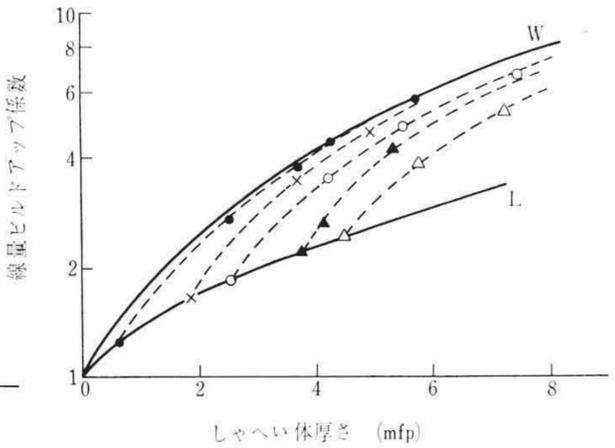


図7 線量ビルドアップ係数 (鉛-水層)

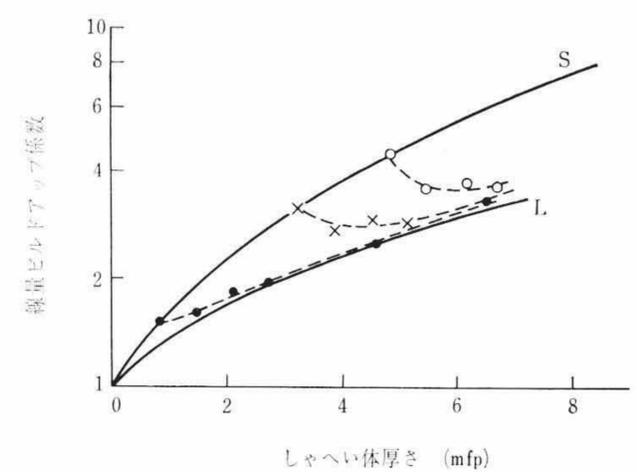


図8 線量ビルドアップ係数 (鉄-鉛層)

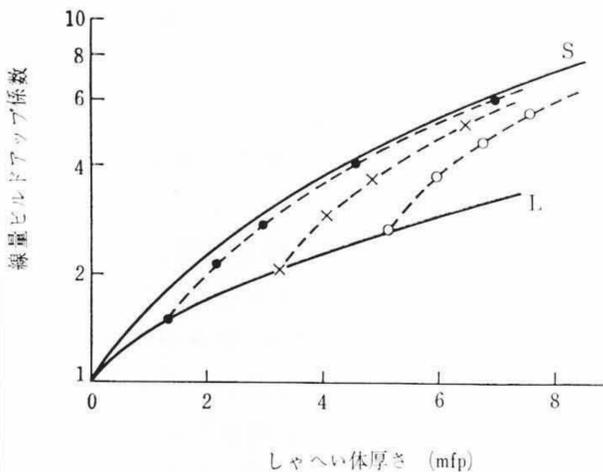


図9 線量ビルドアップ係数 (鉛-鉄層)

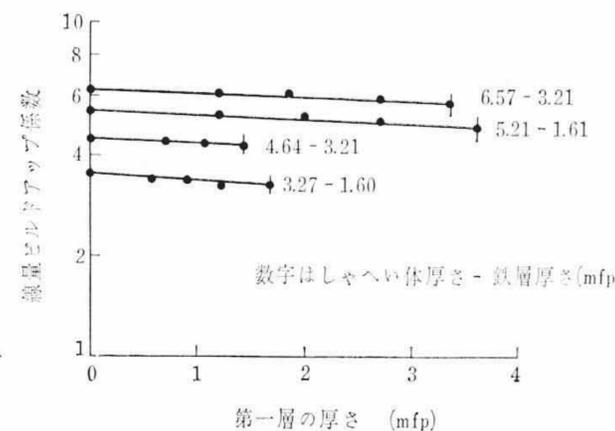


図10 線量ビルドアップ係数 (水-鉄-水層)

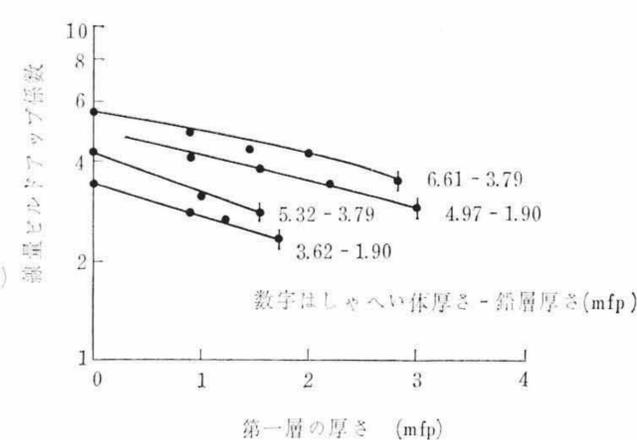


図11 線量ビルドアップ係数 (水-鉛-水層)

mfp付近でここでの計算値に対して前後10%くらいの値となっている。実験値は全体としてやや小さめではあるが、だいたい一致している。

鉛に関しては計算値は4 mfp以下で一致がよい。実験値も同じ傾向をみせている。

#### 4. 多重層しゃへい体の線量ビルドアップ係数の実験結果とその検討

##### 4.1 非散乱ガンマ線量の評価

多重層しゃへい体における非散乱ガンマ線量は測定を行わずに単一層の結果を組み合わせて計算で求めた。計算方法は図3に例として三重層の場合を示した。まず、第一のA層の透過率を次式で近似する。

$$\frac{D(t_A)}{D(0)} = e^{-p_A t_A + q_A t_A^2} \dots\dots\dots (8)$$

ここに  $p_A$ ,  $q_A$  はA層内の実測の減衰曲線にあるように最小2乗法で決定されるパラメータである。近似の精度は±2%である。

次にB層ではA層でうけた減衰をB層での厚さに換算する。これには式(8)の形の式を逆にといて、

$$t'_B = \frac{p_B - \sqrt{p_B^2 + 4q_B \cdot \log e D(t_A)}}{2q_B}$$

と求める。B層までを透過したガンマ線の透過率は

$$D(t'_B + t_B) = e^{-p_B(t'_B + t_B) + q_B(t'_B + t_B)^2}$$

となる。これをC層にも繰り返していく。

この方法の正しさを確認するために種々の多重層しゃへい体について非散乱ガンマ線量の測定を行ない、比較したところ、偏差は±3%以内に収まった。

##### 4.2 線量ビルドアップ係数の実験結果

上の方法による非散乱ガンマ線量と実測した全ガンマ線量とから多重層の線量ビルドアップ係数を計算した。その結果を図4から14までに示す。図4は水-鉄層の線量ビルドアップ係数で、実線は単層の線量ビルドアップ係数で、Wは水を、Sは鉄を表わす。水と鉄の線量ビルドアップ係数は差があまりないので、多重層効果は現われにくい。水層の後の鉄層が1 mfp以上のところでは鉄単層の曲線に近い値を示す。図5は鉄-水層の場合で第二層の水層の厚さが2 mfpを越えると水単層の値にほとんど一致する。

図6,7は水-鉛層と鉛-水層の場合を示す。水-鉛層のときは鉛層の付加による線量ビルドアップ係数の急激な減少が目立つ。なお、記

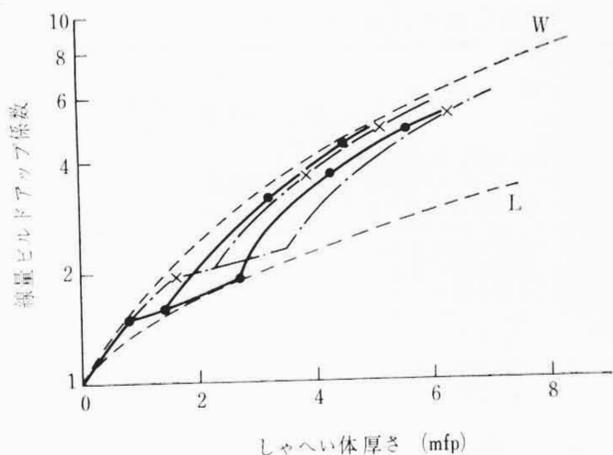


図12 線量ビルドアップ係数 (鉄-鉛-水層)

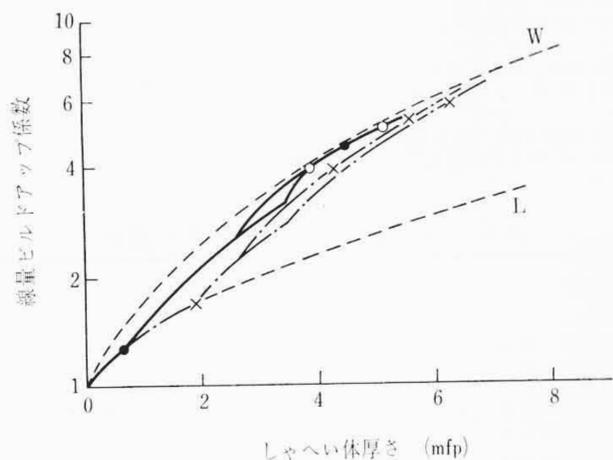


図13 線量ビルドアップ係数 (鉛-鉄-水層)

号Lは鉛単層のビルドアップ係数を意味する。

図8, 9は鉄-鉛, 鉛-鉄の場合で同様の結果を示している。図10, 11は水-鉄-水三重層, 水-鉛-水三重層の結果を示す。二つの水層の厚みの和と中間にはいる鉄または鉛層の厚さが一定のときに, 第一層の水の厚さを横軸にとって曲線を示したものである。重い物質が後へくるほど線量ビルドアップ係数は小さくなる。

図12, 13は鉄-鉛-水, 鉛-鉄-水の三重層の結果で, すでに示した単一層, 二重層の結果から予想される変化を示している。

図14は水-鉄-水-鉄四重層, 鉄-水-鉄-水四重層の結果でしゃへい体全体の中で鉄が後方であればそれだけ線量ビルドアップ係数は減少することを示している。

### 4.3 線量ビルドアップ係数の経験式

多重層しゃへい体の線量ビルドアップ係数の計算は種々の方法が提案されている。古くは加算法, 乗積法, 平均 mfp 法などがあり, また Broder の式<sup>(4)</sup>, Kalos の式<sup>(3)</sup>, Broder の式を修正した北爪の式<sup>(5)</sup>などの経験式が提案されている。加算法や乗積法などについてはすでに北爪<sup>(5)</sup>が検討して一般に精度のよくないことが明らかであるので, Kalos の式, Broder の式とこれを修正した北爪の式について検討する。

以下, 経験式について示すが, 二重層の場合に関するものである。ここで,  $B_1(X)$ ,  $B_2(X)$ をそれぞれ第一層の物質, 第二層の物質の厚さ  $X$ (mfp 単位)に対する線量ビルドアップ係数と,  $B_{1+2}(X, Y)$ を二重層全体の線量ビルドアップ係数とし,  $X, Y$ はおのおの第一層, 第二層の厚さを示すものとする。

#### (1) Kalos の式

Kalos の式はモーメント法による計算結果をまとめたもので, 3 mfp 以下の水と鉛とからなる二重層しゃへい体にだけ適用できるもので, 線源の幾何学的条件は平面一方向線源である。

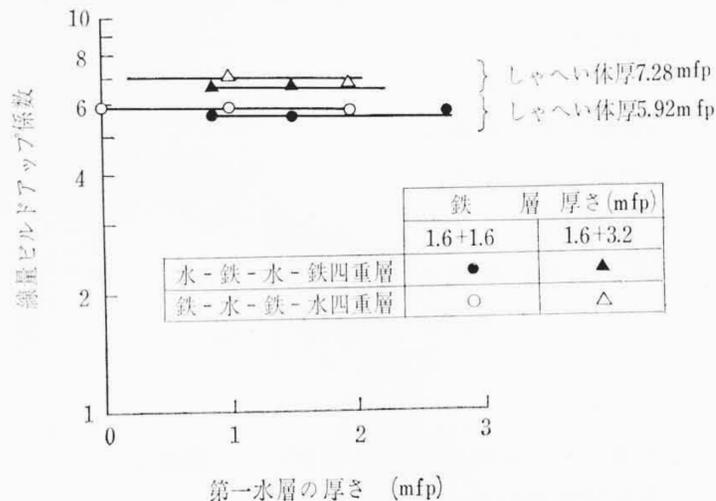


図14 水-鉄四重層の線量ビルドアップ係数

(a) 鉛-水層 エネルギー 0.5~10 MeV

$$B_{1+2}(X_1, X_2) = B_2(X_2) + \frac{B_1(X_1) - 1}{B_2(X_1) - 1} \times \{B_2(X_1 + X_2) - B_2(X_2)\} \dots \dots \dots (9)$$

(b) 水-鉛層 エネルギー 0.5~10 MeV

$$B_{1+2}(X_1, X_2) = B_2(X_2) + \left\{ \frac{B_1(X_1) - 1}{B_2(X_1) - 1} e^{-1.7X_2} + \frac{\left(\frac{\mu_c}{\mu_t}\right)_1}{\left(\frac{\mu_t}{\mu_t}\right)_2} (1 - e^{-X_2}) \right\} \times \{B_2(X_1 + X_2) - B_2(X_2)\} \dots \dots \dots (10)$$

ここに,  $(\mu_c/\mu_t)_i$ は第  $i$  層物質に対するコンプトン散乱による吸収係数と全吸収係数との比で, 入射ガンマ線のエネルギーに対するものを使用する。

これら (a), (b) は水と鉛の二層のみしか使用できない式であるが, 水と鉄, 鉄と鉛に関しても適用することにする。またこれら (a), (b) の両式は Bowman 氏ら<sup>(11)</sup>のモンテカルロ法の計算によると各 3 mfp までの水と鉛層に対して 10% 以内の誤差で一致した結果を与えることが判明している。Kalos の式を 6 mfp 以上に拡張して適用することを試みた。

#### (2) 北爪の式

Broder 氏らが等方線源に対する実験結果を整理して出した式を修正拡張したものである。

(a) 重-軽物質二重層  $B_1(X_1) < B_2(X_1)$  のときは Broder の式そのままであって,

$$B_{1+2}(X_1, X_2) = B_2(X_1 + X_2) + B_2(X_1) - B_1(X_1) \dots \dots (11)$$

(b) 軽-重物質二重層  $B_1(X_1) > B_2(X_1)$  のとき

$$B_{1+2}(X_1, X_2) = B_2(X_1 + X_2) + \{B_1(X_1) - B_2(X_1)\} e^{-\alpha X_2} \dots \dots \dots (12)$$

この式(12)は低エネルギー(1~2 MeV)ではよいが, 高エネルギーに対しては

$$B_{1+2}(X_1, X_2) = B_1(X_1 + X_2) + \{B_1(X_1) - B_2(X_1)\} e^{-\alpha X_2} + A \{B_2(X_1 + X_2) - B_2(X_2)\} e^{-\beta/X_2} \dots \dots \dots (12')$$

がよりよい結果を与える。

ここに  $A, \alpha$  および  $\beta$  はパラメータで,  $A$  としては入射ガンマ線のエネルギーの 1/4 をとる。

三重層以上の取扱いではまずはじめの二重層について  $B_{1+2}(X_1, X_2)$  を計算し, この厚さ  $(X_1 + X_2)$  を単一層のものと考え, 第三層を第二層に入れて取り扱えばよい。四重層は以下この方法を順次くり返せばよい。

4.4 線量ビルドアップ係数の測定結果と経験式との比較

以上の経験式を検討する場合に、単層しゃへい体の線量ビルドアップ係数として、2種類

- (a) 実験値を用いる場合
- (b) 計算値を用いる場合

を行なった。

以下の比較で、表に偏差とあるのは

$$\text{偏差}(\%) = \left( \frac{\text{実験値} - \text{計算値}}{\text{計算値}} \right) \times 100$$

で計算したものである。

4.4.1 単層しゃへい体の線量ビルドアップ係数に実験値を用いるとき

軽-重二重層、重-軽二重層のおのおの場合の結果を表4, 5に示す。図15はそれらを図示したものである。これらの表と図とから重-軽二重層の場合の Broder の式では計算値が小さく出ていて、その差は数%から20%であることがわかる。

軽-重二重層では式(12)では  $\alpha=1.0$  として、数%の範囲で一致した結果になる。式(12')での  $\alpha=\beta=1.0$  ではすこし結果が悪い。Kalos の式では全般的に計算値が小さく0~30%の範囲にあり、近似はよくない。

式(12')で、 $\alpha, \beta$  を変化させた場合の結果を示したのが表6である。 $\alpha, \beta$  の値として1.0, 1.2, 1.5および1.7の4種をとっている。この結果から水-鉛、鉄-鉛二重層では  $\alpha=\beta=1.2$  とおくのが最もよい。この  $\alpha=\beta=1.2$  とした場合の式(12') と実験との比較は図16に示すとおりである。

三、四重層しゃへい体については比較の結果を表7に示す。式

表4 軽-重二重層しゃへい体の経験式と実験結果の比較(単一層のデータ: 実験値)

しゃへい体の構成	一般的傾向	偏差の範囲		
		式(12) $\alpha=1.0$	式(12') $\alpha=\beta=1.0$	Kalos の式
水-鉄層	式(12)では $\pm 3\%$ 以内でよい一致を示す。式(12')では2~8%で計算値大。	-1.5~5.5%	-12.4~0.6%	1.4~16.7%
水-鉛層	式(12)では数%計算値小。ただし、鉛層の薄い領域で計算値大となる傾向がある。式(12')もよく一致する。	-5.8~12.5%	-8.2~3.7%	0.3~27.4%
鉄-鉛層	式(12)で十分よく一致する。	-5.5~5.0%	-9.2~0.9%	-0.3~21.1%

表5 重-軽二重層しゃへい体の経験式と実験結果の比較(単一層データ: 実験値)

しゃへい体の構成	一般的傾向	偏差の範囲	
		Broder の式	Kalos の式
鉄-水層	Broder の式で数%計算値小。Kalos の式では数%計算値小。	1.0~12.3%	1.8~15.0%
鉛-水層	Broder, Kalos の式ともに数%から20%程度計算小。	1.1~18.2%	2.2~22.0%
鉛-鉄層	Broder の式では数%から10%程度、Kalos の式では数%から20%程度計算値小	-0.1~12.0%	2.7~21.0%

表6 式(12')のパラメータの選択

しゃへい体の構成	結果	$\alpha$	$\beta$
水-鉄層	式(12')は式(12)よりわずかながらよい。	大きいほどよい。	—
水-鉛層	式(12')が式(12)よりよい結果を与える。	1.0または1.2が1.5よりかなりよい。1.7はよくない。	1.0または1.2が1.5または1.7より若干よい。
鉄-鉛層	式(12')は式(12)より若干よい結果を与える。	1.0または1.2が1.5または1.7より若干よい。	1.0~1.7の範囲で同じ程度。

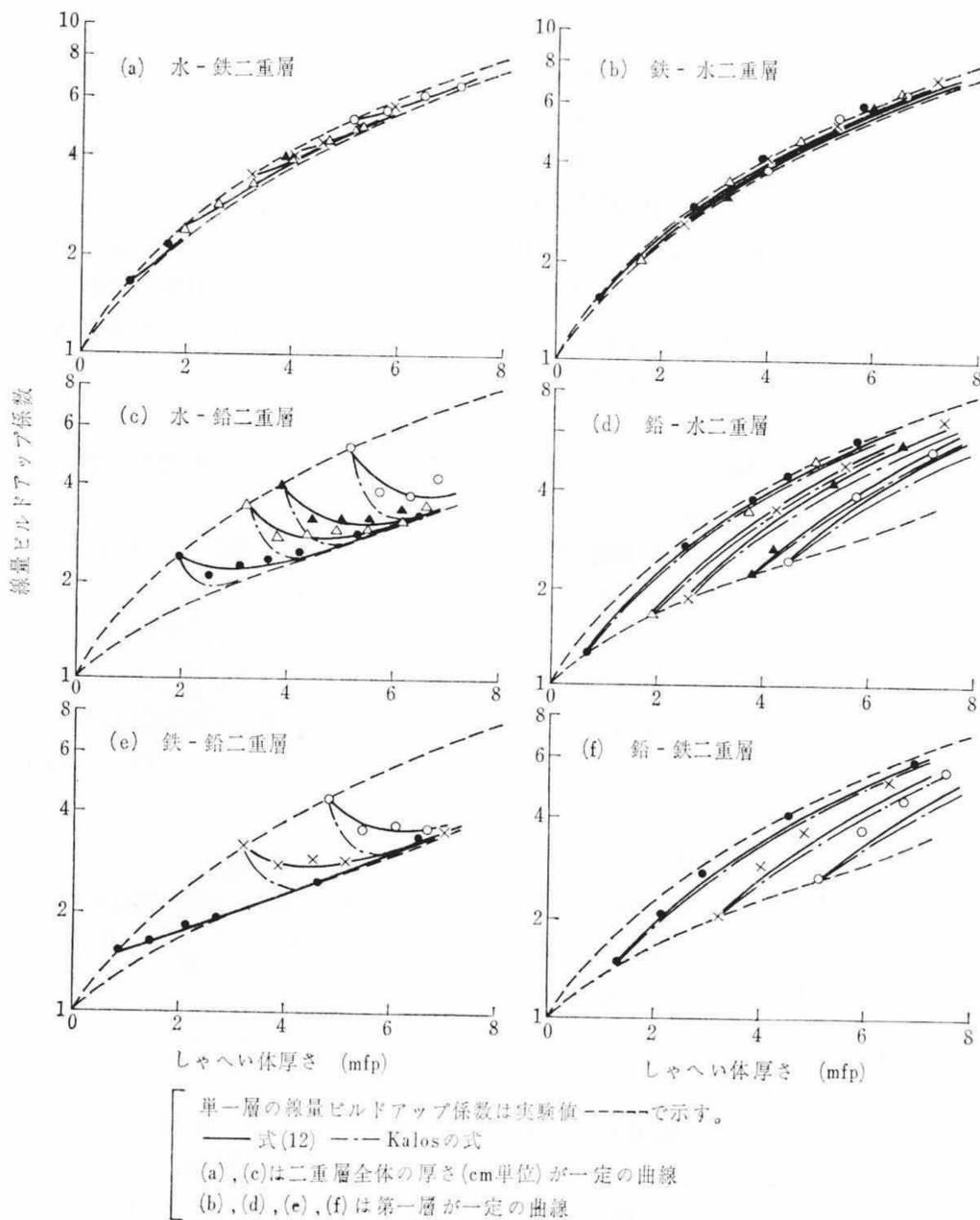


図15 二重層しゃへい体の線量ビルドアップ係数 (実験値と計算値の比較)

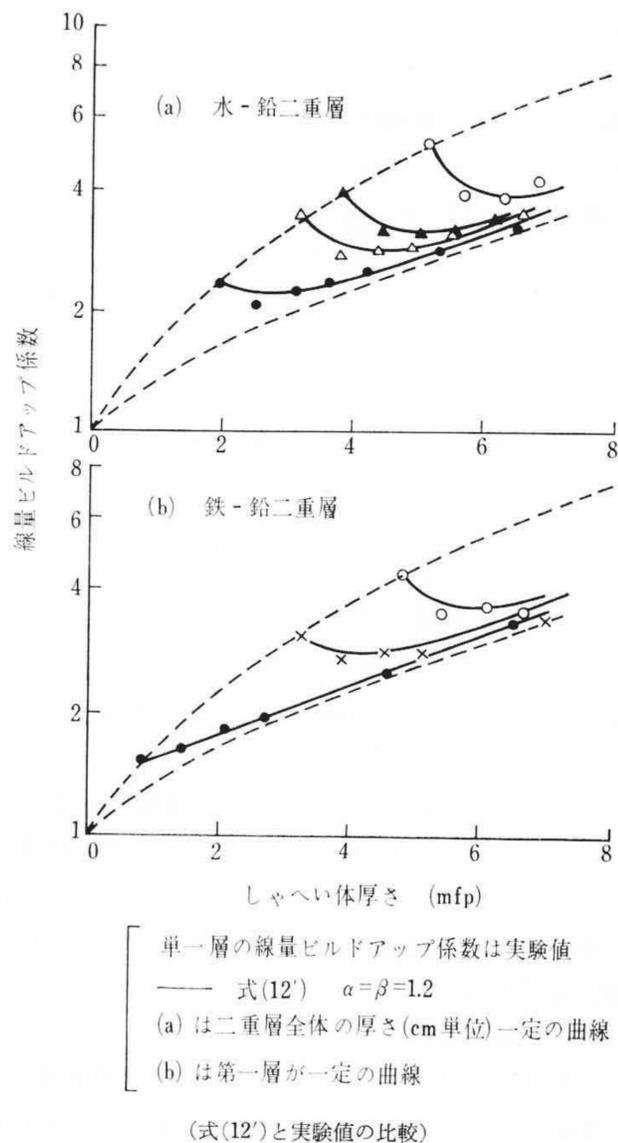


図16 軽-重物質二重層の線量ビルドアップ係数

表7 三、四重層しゃへい体の経験式と実験結果の比較  
(単一層のデータ：実験値)

しゃへい体の構成	偏差の範囲		
	式(11), (12)による場合	式(11), (12')による場合	Kalosの式の適用
水-鉄-水三重層	-1.2~6.0%	-8.4~3.5%	0.5~12.5%
水-鉛-水三重層	5.5~13.8%	3.1~2.1%	8.2~20.3%
鉄-鉛-水三重層	6.5~14.2%	6.4~2.9%	12.6~23.2%
鉛-鉄-水三重層	5.6~11.1%	5.6~11.1%	7.1~15.4%
水-鉄-水-鉄四重層	-2.4~4.0%	-11.9~-4.7%	-11.3~20.7%
鉄-水-鉄-水四重層	0.3~5.9%	-10.1~0.8%	-2.1~34.7%

(12)を使う場合には  $\alpha=1.0$  とし、式(12')を使う場合には  $\alpha=\beta=1.2$  としている。図17は水と鉄とからなる四重層について式(12)と式(12')による計算と実測との比較である。表9によると式(11)と式(12)による場合には計算値が実験値よりも小さく出る傾向があり、鉛-水の組合せで著しい。これは鉛-水の場合の Broder の式が問題であることを示している。式(11)と式(12')による場合は式(11)と式(12)による場合よりも全般的にやや悪い。Kalos の式ではさらに悪い。

以上から多重層ビルドアップ係数の計算は Broder の式と北爪の式(式(12)では  $\alpha=1.0$ , 式(12')では  $\alpha=\beta=1.2$  とする)を組み合わせることによって15%以内の精度が可能である。

4.4.2 単層しゃへい体の線量ビルドアップ係数に計算値を用いるとき

実験値を用いたときと同様にして、計算値を用いたときの、二重層の線量ビルドアップ係数の結果を表8と表9に、また図18に示す。

水と鉄の二重層では単層から予想されるように10数%計算値が大きくなる。水と鉛、鉄と鉛の組合せでは全体の傾向は合致しない。第二層の厚さの大きいところではいずれも計算値が小さくなる。三、四重層の結果を表10に示す。前の場合と同様、式(12)では  $\alpha=1.0$ , 式(12')では  $\alpha=\beta=1.2$  とおいている。表10の結果によれば式(11), 式

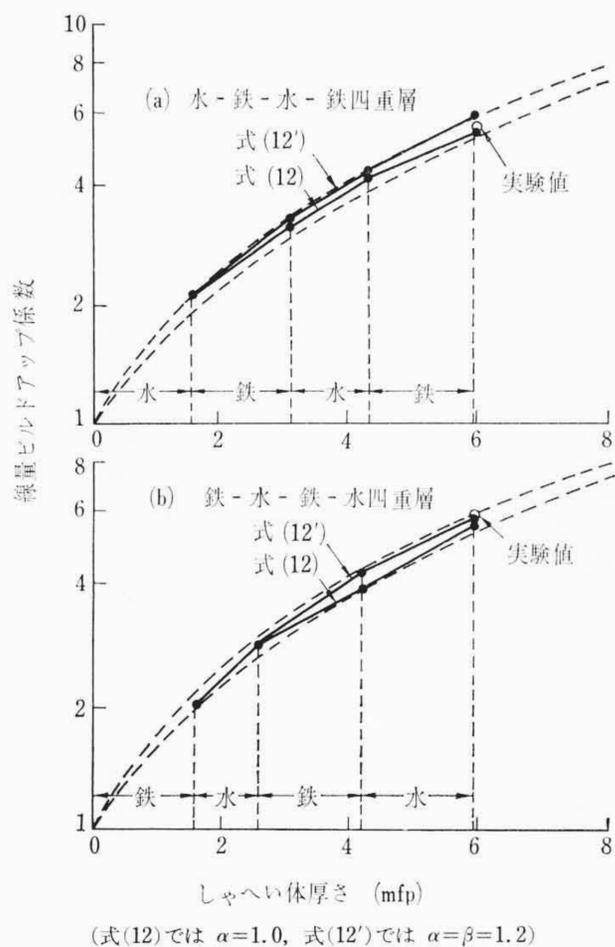


表8 軽-重二重層しゃへい体の経験式と実験結果の比較  
(単一層のデータ：計算値)

しゃへい体の構成	一般的傾向	偏差の範囲		
		式(12) $\alpha=1.0$	式(12') $\alpha=\beta=1.0$	Kalosの式
水-鉄層	式(12)では0~10%計算値大。式(12')ではさらに計算値大。Kalosの式では数%の範囲内。	-10.1~-1.0%	-16.8~-4.4%	-5.3~6.7%
水-鉛層	式(12), (12')では第二層が薄いとき計算値大。厚いとき計算値小で傾向が合わない。Kalosの式は第二層による減衰が大き過ぎる。	-11.6~25.4%	-13.3~17.8%	6.6~48.8%
鉄-鉛層	式(12), (12')では第二層が薄いとき計算値大。厚いとき計算値小で傾向が合わない。Kalosの式は第二層による減衰が大き過ぎる。	-5.4~21.2%	-7.5~19.1%	5.6~34.6%

表9 重-軽二重層しゃへい体の経験式と実験結果の比較  
(単一層のデータ：計算値)

しゃへい体の構成	一般的傾向	偏差の範囲	
		Broderの式	Kalosの式
鉄-水層	Broder, Kalosの式ともに計算値大。最大10数%。	-13.4~-0.9%	-12.6~0.9%
鉛-水層	第一層の薄いところでは計算値大、または一致し、厚いところでは計算値小。	-12.3~7.4%	-10.1~19.3%
鉛-鉄層	第一層の薄いところでは計算値大、または一致し、厚いところでは計算値小。	-3.6~18.1%	-1.4~25.8%

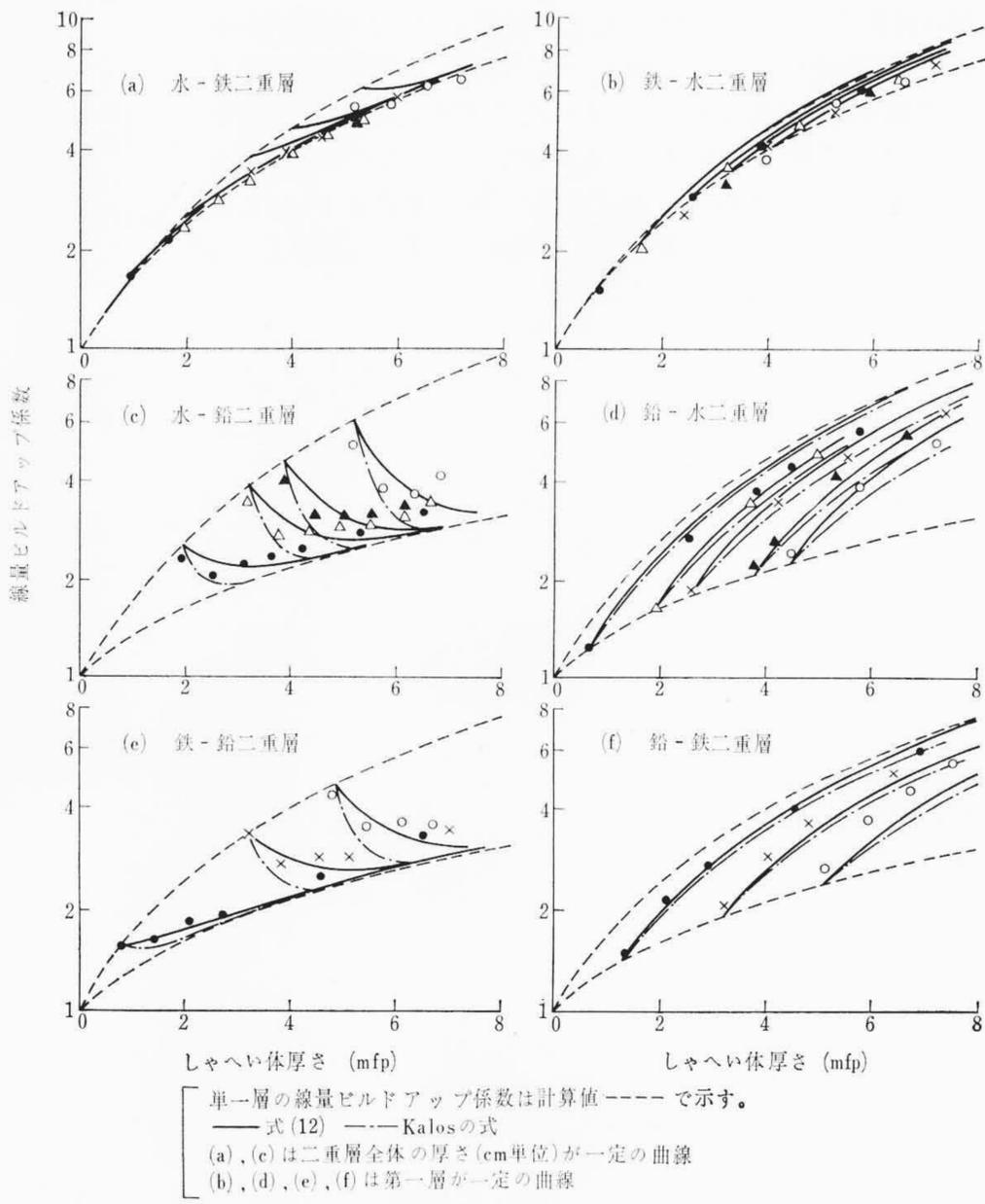


表10 三, 四重層しゃへい体の経験式と実験結果の比較  
(単一層のデータ: 計算値)

しゃへい体の構成	偏差の範囲		
	式(11), (12)による場合	式(11), (12')による場合	Kalosの式の適用
水-鉄-水三重層	-9.2~ 6.1%	-16.2~-10.0%	-7.5~ 1.9%
水-鉛-水三重層	-0.2~ 6.6%	-5.0~ 4.9%	10.3~18.9%
鉄-鉛-水三重層	-7.7~ 0.0%	-7.7~ -0.7%	-0.1~14.1%
鉛-鉄-水三重層	-9.5~-2.7%	-9.5~ -2.7%	-6.6~ 4.1%
水-鉄-水-鉄四重層	-7.5~-2.5%	-16.2~-12.1%	-16.5~45.7%
鉄-水-鉄-水四重層	-8.9~-5.6%	-16.2~-11.2%	-14.1~-7.9%

(12)で十分な結果を与え、水と鉄から成る多重層では数%程度大きな値となる。鉛-水の組合せを含むものでは数%~10%の範囲内にある値を与える。式(11), 式(12')では式(11), 式(12)の場合より全体的に計算値が小さくなる。Kalosの式の適用は軽物質の多重層でよい結果とならない。

## 5. 結 言

ガンマ線のしゃへい設計に有用な線量ビルドアップ係数の計算法を検討するために<sup>60</sup>Coガンマ線に対する多重層しゃへい体の線量ビルドアップ係数の測定を行なった。

測定された線量ビルドアップ係数を単層に関しては日本原子力研究所や川崎重工業株式会社の計算ならびに実験結果と比較した。実験値は計算値に対して、水で-4~-20%, 鉄で-2~9%, 鉛で+1~+20%の範囲内にあることがわかった。

多重層に関しては単層の線量ビルドアップ係数として実験値を用いた場合と計算値を用いた場合にKalosの式, Broderの式およびBroderの式を修正した北爪の式の精度を調べた。

単層の線量ビルドアップ係数として実験値を用いた場合は軽-重二重層で式(12)または式(12') (北爪の式)で数%の範囲内で一致する。この場合式(12)では $\alpha=1.0$ , 式(12')では $\alpha=\beta=1.2$ ととるとよい。重-軽二重層ではBroderの式が数%から20%小さい値を与える。三重層以上ではBroderの式と北爪の式の組合せでだいたい5~15%の誤差範囲となる。全般的にBroderの式の近似がよくなく, Kalosの式もよい結果を与えない。

単層のビルドアップ係数として計算値を使った場合, 北爪の式では実験値よりも5~15%大きい値を与える。

以上のことから, 実際のしゃへい設計への適用として, 平面一方向線源の多重層透過ガンマ線のビルドアップ係数の計算は1~2 MeVのガンマ線エネルギーで, Broderの式と北爪の式(この場合式(12)では $\alpha=1.0$ , 式(12')では $\alpha=\beta=1.2$ とおく)とを組み合わせることによって精度を15%以内で求めることができる。

今後残された問題としては実際の炉のしゃへい体のように十分厚い多重層に関してこれらの経験式の適用性を調べる必要がある。それにはここで使用した線源強度よりもさらに大きいものが要求される。

また, <sup>60</sup>Coは1.0 MeV程度のガンマ線であるが, 実際炉から放出されるガンマ線は1~10 MeVの範囲に及ぶので, 高エネルギーの線源に対しての実験, そしてそれらの結果による経験式の検討が必要である。

終わりに, 日立製作所中央研究所王禅寺支所谷口主任研究員, 井上, 前田両ユニットリーダーに種々ご指導をいただいた。また同所畔野, 北口両君に実験を担当していただいた。ここに感謝の意を表す。

## 参 考 文 献

- (1) H. Goldstein, J. Wilkins, Jr: NYO-3075 (1954)
- (2) F. S. Kirn, R. J. Kennedy, H. O. Wyckoff: Radiology 63, 94 (Jan.-1954)
- (3) Kalos: H. Goldstein: "Fundamental Aspects of Reactor Shielding" p. 225~226 (1959, Addison Wesley Publishing Co. Inc.) に掲載されている。
- (4) D. Broder et al: Soviet J. Atomic Energy 12, 26 (1962)
- (5) 北爪: 日本原子力学会誌 7, 496 (1965)
- (6) M. H. Berger et al: J. Res. Nat. Bur. Standards 56, 2653 (1956)
- (7) 宮坂ほか: 第4回日本アイソトープ会議報文集 Sa-2 p. 649~653 (1961)
- (8) Y. Furuta et al: Nucl. Sci. Eng. 25, 85 (1966)
- (9) 望月ほか: 日本原子力学会誌 4, 448 (1962)
- (10) 望月ほか: 日本原子力学会誌 4, 703 (1962)
- (11) L. A. Bowman et al: ORNL-2606 (1958)
- (12) E. P. Blizard et al: Reactor Handbook 2nd ed Vol III Part B Shielding p. 119 (1962, Interscience Publishers)