研究論文

220. ^{60}Co γ 線による有限多重層透過に関する実験的研究, (I)

望月博治*, 田中義久*, 東原義治*, 長渡甲太郎*, 頼久勝明*

*Experimental Study on the Penetration of ^{60}Co γ -ray
Through Finite Heterogeneous Media, (I)*

By Hiroji MOCHIZUKI, Yoshihisa TANAKA,

Yoshiharu HIGASHIHARA, Kohtaro NAGATO and Katsu-aki YORIHISA

In the present work, we obtained buildup factors experimentally for heterogeneous media, composed of various combinations of materials (H_2O , Fe and Pb), for ^{60}Co γ -rays. On the basis of the results, we obtained an empirical formula which is acceptable physically and capable of quick and easy calculation of buildup factors for heterogeneous media, composed of arbitrary combinations of materials, by using known buildup factors for the finite homogeneous media of the materials included in the compound. Experimental buildup factors are not intrinsically different over 10% from the calculated values from the formula for the shield thickness of 0~6mfp and for ^{60}Co γ -ray source. The experimental results obtained indicate that the buildup factors agree well with the theoretical values for iron, lead, and multilayers of materials investigated here in the case of relatively small thickness of lead slabs, but not for water and multilayers in the case of large thickness of lead slabs. The effect of heterogeneity of compounds on buildup factors was also investigated.

I. 緒 言

現在多くの物質について均質無限媒質中の γ 線透過のビルドアップ・ファクタは極めて高精度で計算により求められており⁽¹⁾, 実験的にも確かめられている⁽²⁾。しかし実際に γ 線の透過を防ぐために遮蔽を行なう時その遮蔽は有限厚であり, 多くの場合中性子遮蔽とも関連して非均質多重層である。このような有限層あるいは多重層の取扱い方は計算面からも実験面からも充分明確でない。有限層については Berger & Duggett がモンテカルロ計算によって有限層の無限媒質に対する補正係数を求めているが⁽³⁾, 実験的に確かめている報告は少ない。また多重層についても水と鉛の2層の場合について Kalos⁽⁴⁾ や Auslander⁽⁵⁾ がモンテカルロ法によって計算し, その結果から半経験式を導出している。実験的にも最近ソビエト等で2層およびそれ以上の多重層の実験をしているが^(6,7), その実験結果については物理的に考えてかなり疑問点がある。

このように有限層効果を実験的に求め計算値との比較を行なうこと, また多重層効果を実験的に求めその遮蔽効果と取扱い方を確立することが今日まだ必要で

ある。われわれは ^{60}Co γ 線による有限層, 多重層の透過ビルドアップ・ファクタを実験的に求め, 上記事項を明確にすることとした。特に多重層については非均質から平均質, 均質へ変わっていく時の遮蔽効果を明らかにすることを目的とした。

実験方法は垂直シート状ラインビームと水平ライン長円筒型特殊電離箱を使用する Kimura の方法⁽⁸⁾で行なった。

最初に実験方法と装置について説明し, ついで実験結果を有限単一層, 有限多重層について報告する。最後に結論として, この実験で明らかになった点と残された問題点がまとめられる。この中で実験結果が理論計算値と合致する場合もあるが合致しない場合もあり, また他で行なわれた実験と比較してかなり違った点のあることも指摘されるであろう。

II. 実験方法と装置

無限平面からの完全な平行ビームが遮蔽体を透過し

* 川崎重工業(株) 技術研究所 (Tech. Res. Lab., Kawasaki Dockyard Co. Ltd.)

た背後の1点で検出した線量と、無限の垂直シート状ラインビームが遮蔽体を透過した背後でこれに垂直な水平ライン状の無限長さ検出器による線量と等価である、という事実に基づくKimらの方法⁽⁸⁾で実験を実施した。またビルドアップ・ファクタのベースになる遮蔽体素通りの線量は既知の吸収係数を用いて計算で求めることもできるが、吸収係数そのものが文献によって異なること⁽⁹⁾⁽¹⁰⁾および使用材料の材質、厚さ等不確定な要素があるので計算と実験の両者から検討した。この測定は50ccの球型電離箱を用い、遮蔽体から充分離れた点で行なった。

われわれの用いた実験装置は線源、遮蔽体、検出器から構成されている。

線源としては約1cの⁶⁰Coを用い、その大きさは1.6 mm×1.6 mmφで、厚さ15 cmの鉛の容器に納められている。これはさらに厚さ20 cmの重コンクリートで遮蔽して表面線量率を0.3 mr/hr以下にした。γ線ビームは3 mm×70 mm×150 mmおよび6 mm×130 mm×50 mmの2つのPbコリメータでシート状ラインビームとした。線源と検出器との距離は約1.7 mであり、ビームの拡がりは垂直方向約75 cm、水平方向約4 cmであった。

遮蔽体は水、鉄、鉛が選ばれた。鉄は1,300 mm×1,200 mm×9 mmの平板12枚、鉛は1,200 mm×1,000 mm×3 mmの平板8枚、水層は1,400 mm×1,200 mm×1,200 mm(最大)の水槽を作り、厚さが10 cmごとに変えられるようにし、γ線の透過面には12 mm厚のポリエチレン壁をもうけた。

検出器としては特殊な長円筒型電離箱を試作した。その長さを決めるために50 ccの球型電離箱を用いて

図中破線は水(5.45 mfp)の後における強度分布であり、実線は鉄(3.80 mfp)、一点鎖線は鉛(1.58 mfp)の場合に相当する。いずれも中心点で規格化している。

第1図 遮蔽体後の線量強度分布(水平方向)

水、鉄、鉛の各遮蔽体背後のγ線強度分布を測定した。その代表的な結果が第1図に示されている。これからわかるように最も拡がりをもった場合として水80 cmの場合をとり、その散乱γ線の大半を検出できる長さとして有効長約93 cmのものを作った。検出器はコネクタの部分で直接前置増幅器に接続し、そこから約2 mのリード線で主増幅器につないだ。

特殊電離箱の特性について述べる。印加電圧は+90 Vで使用した。逆二乗特性、検出器の局部毎検出特性とも大変良好であった。エネルギー感度特性は低エネルギー部分(30~200 keV)で悪くなるが、実験上特に問題になることはなかった。

II. 実験結果

長円筒型特殊電離箱および50cc球型電離箱の測定結果よりビルドアップ・ファクタを求め、単一層と多重層の理論計算値との比較を行ない、同時に遮蔽効果を明らかにする。最初に測定値からのビルドアップ・ファクタの計算法、つぎに単一層のビルドアップ・ファクタ、最後に多重層のビルドアップ・ファクタについて述べる。

1. ビルドアップ・ファクタ(B_r)

著者らの実験は線量ビルドアップ・ファクタの測定を目的としている。線量ビルドアップ・ファクタはS. T.P.のdry airに吸収される一次γ線および一次γ線+二次γ線の比として定義される⁽¹¹⁾⁽¹²⁾。つまり

$$I_0(\mu x, E): \mu x \text{ における一次 } \gamma \text{ 線のエネルギー・スペクトル}$$

$$I(\mu x, E): \mu x \text{ における一次 } \gamma \text{ 線+二次 } \gamma \text{ 線のエネルギー・スペクトル}$$

第2図 線量測定実験配置図

$\mu_a^{\text{air}}(E)$: エネルギー E の γ 線に対する S.T.P. dry air の吸収断面積

とすると,

$$B_r(\mu x) = \frac{\int \mu_a^{\text{air}}(E) \cdot I(\mu x, E) dE}{\int \mu_a^{\text{air}}(E) \cdot I_0(\mu x, E) dE} \quad (1)$$

である。

第2図(a)および(b)に一次 γ 線および全 γ 線の線量測定実験配置の略図が示されている。第2図(a)において遮蔽体のない時および厚さ x の遮蔽体のある時の50cc球型電離箱の電離電流を $I(x=0)$ および $I(x=x)$ とする。またコリメータを閉じた時の電離電流を $B.G$ とすると一次 γ 線の透過確率は次式で表わされる。

$$e^{-\mu x} = \frac{I(x=x) - B.G}{I(x=0) - B.G} \quad (2)$$

同様に第2図(b)において遮蔽体のない時および厚さ x の遮蔽体のある時の特殊電離箱の電離電流をそれぞれ $I^*(x=0)$, $I^*(x=x)$ とする。またこの時のコリメータ

を閉じた時の電離電流を $B.G^*$ とすると、全線量の透過確率は次式で表わされる。

$$B_r(\mu x) e^{-\mu x} = \frac{I^*(x=x) - B.G^*}{I^*(x=0) - B.G^*} \quad (3)$$

したがって、線量ビルドアップ・ファクタは次式で与えられる。

$$B_r(\mu x) = \frac{I^*(x=x) - B.G^*}{I^*(x=0) - B.G^*} \cdot \frac{I(x=0) - B.G}{I(x=x) - B.G} \quad (4)$$

2. 単一層のビルドアップ・ファクタ

水、鉄、鉛の単一層に対する一次 γ 線および全 γ 線量の測定値から(4)式によって $B_r(\mu x)$ を計算した。

われわれはこれと理論計算値とを比較した。理論計算値は無限媒質中の平面平行ビーム線源による線量ビルドアップ・ファクタ⁽¹⁾をNYO-3075⁽¹⁾よりとり、有限媒質に対する補正係数 κ ⁽²⁾を用い、⁶⁰Co γ 線エネルギーに対するものに内挿して求めた。実際には⁶⁰Coの γ 線は1.17 MeVと1.33 MeVの2つがあるので、⁶⁰Co γ 線に対する線量ビルドアップ・ファクタは次式で定義し、この値を実験値と比較した。

$$B_r(\mu x) = \frac{B_r\{\mu(1.17)x\}e^{-\mu(1.17)x} + B_r\{\mu(1.33)x\}e^{-\mu(1.33)x}}{e^{-\mu(1.17)x} + e^{-\mu(1.33)x}} \quad (5)$$

第3図には水、鉄、鉛のビルドアップ・ファクタの実験値および理論計算値が示されている。

第3図からわかることは、鉄および鉛については両方の値が実験精度内でかなり一致しているが、水につ

いてはあまりよく一致していないことである。この問題については結論で検討することにする。また水、鉄、鉛とも測定範囲内でかなり線型ビルドアップに近いこともわかる。

実験から求めた全吸収係数は水が $0.063 \pm 0.001 \text{ cm}^{-1}$ 、鉄が $0.42 \pm 0.01 \text{ cm}^{-1}$ 、鉛が $0.65 \pm 0.01 \text{ cm}^{-1}$ であった。

3. 多重層のビルドアップ・ファクタ

水-鉄多重層、水-鉛多重層、鉄-鉛多重層について実験によるビルドアップ・ファクタを(4)式により求めた。

現在多重層のビルドアップ・ファクタについては極めて大雑把な議論がなされている⁽¹²⁾⁽¹³⁾だけで詳細に取り扱うことが必要である。われわれは実験による多重層のビルドアップ・ファクタの変化を統一的に理解するため、水、鉛の2層についてのモンテカルロ計算の結果から半経験的に出したKalosの式⁽¹³⁾およびその考え方に基づいて実験結果を解析することにした。

まず、Kalosの半経験式は次式で表わされる。

Pb-H₂Oの場合 ($0.5 \leq E_0 \leq 10 \text{ MeV}$)

$$B(x_1, x_2) = B_2(x_2) + \frac{B_1(x_1) - 1}{B_2(x_1) - 1} \times [B_2(x_1 + x_2) - B_2(x_2)] \quad (6)$$

図中実線はNYO-3075の結果にBerger & Doggettの有限効果補正を施したものであり、実験結果と比較している。

第3図 有限単一層(水、鉄、鉛)のビルドアップ・ファクタ

H₂O-Pbの場合 ($0.5 \leq E_0 \leq 10$ MeV)

$$B(x_1, x_2) = B_2(x_2) + \left[\frac{B_1(x_1) - 1}{B_2(x_1) - 1} e^{-1.7x_2} + \frac{(\mu_s/\mu_t)_1}{(\mu_s/\mu_t)_2} (1 - e^{-x_2}) \right] \times [B_2(x_1 + x_2) - B_2(x_2)] \quad (7)$$

ここで E_0 は入射 γ 線のエネルギー, B は有限ビルドアップ・ファクタ, x は平均自由行程, μ_s は散乱係数, μ_t は全吸収係数, 添字 1 は線源側の物質, 添字 2 は検出器側の物質である。

われわれは (6) および (7) 式の右側の有限ビルドアップ・ファクタは単一層の実験値から採用し, 実験値にないところは理論計算値^(IX)の上昇率で外挿することにより求めた。さらに (7) 式中の経験係数 1.7 は後記の実験結果から新しく決定した。

つぎに 3 層以上の場合にはこの 2 層の場合の考え方をそのまま拡張して適用してみることにした。この時 n 層の遮蔽体透過後のビルドアップ・ファクタ B_n は次式で表わすことができる。

$$B_n = \sum_{i=1}^n \frac{\prod_{k=1}^i K_t}{\prod_{k=1}^i K_b} F_i \quad (8)$$

ここで,

$$F_n = B_n(t_n) + \left[-\frac{\alpha_n}{B_n(z_{n-1}) - 1} + \beta_n \right] \times [B_n(z_n) - B_n(t_n)]$$

$$K_n = \frac{\alpha_n}{B_n(z_{n-1}) - 1} [B_n(z_n) - B_n(t_n)]$$

n が鉛の時: $\alpha_n = e^{-a_n t_n}$,

$$\beta_n = \frac{(\mu_s/\mu_t)_{n-1}}{(\mu_s/\mu_t)_n} (1 - e^{-t_n})$$

n が水または鉄の時: $\alpha_n = 1$, $\beta_n = 0$

$$K_{n+1} = 1, F_1 = B_1(t_1), z_n = \sum_{i=1}^n t_i$$

t_i : i 層の厚さ (mfp 単位)

である。

(8) 式は整った形にまとまっているが, 内容の見通しと計算が比較的面倒なので, 水, 鉄, 鉛のある程度の線型ビルドアップを仮定して次式に変換することができる。

$$B_{2n} = \left[\text{Kalos} \right]_{\text{ユニット } n} + \Delta_{2n} \quad (9)$$

ここで,

$$\left[\text{Kalos} \right]_{\text{ユニット } n} = B_{2n}(t_{2n}) + \left[\frac{B_{2n-1}(z_{2n-1}) - 1}{B_{2n}(t_{2n-1}) - 1} \times e^{-a_{2n} t_{2n}} + \frac{(\mu_s/\mu_t)_{2n-1}}{(\mu_s/\mu_t)_{2n}} (1 - e^{-t_{2n}}) \right] \times [B_{2n}(t_{2n-1} + t_{2n}) - B_{2n}(t_{2n})]$$

$$\Delta_{2n} = [B_{2n-2} - 1] e^{-a_{2n} t_{2n}} + \frac{(\mu_s/\mu_t)_{2n-1}}{(\mu_s/\mu_t)_{2n}} \times (1 - e^{-t_{2n}}) [B_{2n}(z_{2n-1}) - B_{2n}(t_{2n-1} + t_{2n})]$$

一般に t_{2n} (鉛) が薄い時は (9) 式はもっと簡単になって次式になる。

$$B_n = \sum_{i=1}^n \left[\left(\left[\text{Kalos} \right]_{\text{ユニット } i} \right) - 1 \right] + 1 \quad (10)$$

(10) 式は鉄-鉛が 1 つのユニットとなり, そのユニットの散乱 γ 線によるビルドアップが直接加算されていく形になっている。鉛層, 水層, 鉄層がともにあまり厚くない場合には, この式がかなりよく実験結果と一致することが示される。

(1) 水-鉄多重層のビルドアップ・ファクタ

水-鉄層の多重層の場合に, われわれの行なった厚さの範囲内では多重層による効果を発見することができなかった。すなわち, 水層中の鉄板の配置をどう変化させても測定誤差以上にビルドアップの変化を確認できなかった。結果が第 1 表に示されている。

第 1 表 水-鉄層 (2 層) のビルドアップ・ファクタ

厚 さ (mfp)		B_r (2 層)			単 一 層	
x_1 (H ₂ O)	x_2 (Fe)	計 算 値 (H ₂ O-Fe)	計 算 値 (Fe-H ₂ O)	実 験 値	B_r (H ₂ O)	B_r (Fe)
2.08	0.27	2.4	2.4	2.4	2.4	2.4
2.02	0.65	2.6	2.6	2.6	2.6	2.6
1.97	1.03	2.8	2.9	2.8	2.9	2.8
1.91	1.41	3.0	3.1	3.1	3.1	3.0
1.85	1.79	3.2	3.3	3.2	3.3	3.2
1.80	2.17	3.4	3.6	3.3	3.6	3.4
1.74	2.55	3.6	3.8	3.6	3.8	3.6
1.68	2.92	3.8	4.0	3.8	4.0	3.8
1.63	3.30	4.0	4.2	4.1	4.3	4.0

3.34	0.27	3.3	3.3	3.3	3.3	3.2
3.29	0.65	3.5	3.6	3.5	3.6	3.4
3.23	1.03	3.7	3.8	3.7	3.8	3.6
3.17	1.41	3.9	4.0	3.9	4.0	3.8
3.12	1.79	4.1	4.3	4.0	4.3	4.0
3.06	2.17	4.3	4.5	4.3	4.5	4.2
3.00	2.55	4.5	4.7	4.5	4.7	4.4
2.95	2.92	4.6	4.9	4.6	5.0	4.6
5.45	0	-	-	4.4	-	-
5.40	0.38	-	-	4.6	-	-
5.34	0.76	-	-	4.8	-	-
5.28	1.14	-	-	4.9	-	-
5.23	1.52	-	-	5.2	-	-
5.17	1.90	-	-	5.4	-	-
5.11	2.28	-	-	5.6	-	-
5.06	2.65	-	-	5.8	-	-

第2表 水-鉛層(2層)のビルドアップ・ファクタ

厚 さ (mfp)		$B_r(x_1, x_2)$			$B_r(x_2, x_1)$	
x_1 (H ₂ O)	x_2 (Pb)	計 算 値 ($\alpha=1.2$)	計 算 値 ($\alpha=1.7$)	実 験 値	計 算 値	実 験 値
2.28	0.20	2.3	2.2	2.2	2.5	2.5
2.26	0.40	2.2	2.1	2.2	2.5	2.6
2.22	0.80	2.2	2.1	2.3	2.7	2.8
2.18	1.20	2.2	2.1	2.3	2.8	2.8
2.15	1.58	2.3	2.2	2.4	2.9	3.0
2.00	3.16	2.7	2.6	-	3.3	-
4.17	0.20	3.4	3.2	3.3	3.8	3.9
4.15	0.40	3.3	3.0	3.2	3.9	4.0
4.12	0.80	3.1	2.8	3.2	4.1	4.2
4.08	1.20	3.0	2.7	3.1	4.2	4.4
4.04	1.58	3.0	2.8	3.4	4.3	4.5
3.89	3.16	3.3	3.2	-	4.7	-
5.44	0.20	4.2	4.0	3.8	4.8	4.8
5.42	0.40	4.0	3.6	3.6	4.8	4.7
5.40	0.60	3.7	3.3	-	4.9	-
5.38	0.80	3.7	3.2	3.6	5.0	5.0
5.34	1.20	3.5	3.1	3.3	5.1	4.9
5.30	1.58	3.5	3.2	3.3	5.2	4.9
5.15	3.16	3.7	3.6	-	5.6	-

これからわかるように Kalos の式((8)式で $\alpha_n=1$, $\beta_n=0$ として計算している。)で H_2O-Fe および $Fe-H_2O$ の両極端の場合でも 5% の精度内で一致しており、実験値はこの中間にあり、しかもこの測定上の読みの幅が 5~10% 存在するので多重層効果が発見できなくとも不思議でない。

(2) 水-鉛多重層のビルドアップ・ファクタ

水-鉛多重層については 2 層および水-鉛-水の 3 層について測定した。2 層の場合の結果が第 2 表に示されている。

これからわかることは最初に鉛がある時には測定値は Kalos の式の値よりやや大きくなっている。最後に鉛のある時は鉛の薄い間 (0.5 mfp 程度) は Kalos の式の値によく一致するが、鉛が厚くなるにつれて指数減衰項の経験常数 1.7 よりも 1.2 とした方がよく合致する。しかし、ビルドアップ・ファクタに 10% 程度の違いを容認すれば、これらは実験範囲内でよく合っているといえることができる。ただし、この場合も水の単一層ビルドアップ・ファクタまで理論計算値を用いると合わなくなる。

つぎに水-鉛-水の 3 層の場合の結果が第 4 図に示されている。

水の層が 2~3 mfp 以内あるいは鉛の層が薄い場合には Kalos の式を拡張した (9), (10) 式の計算値とかなり一致するが、水の層が厚くなり鉛の層も厚くなるにつれてこれらの式による計算値と傾向が極めて合わなくなる。実験値のビルドアップ・ファクタを落す効果は鉛が後に来るほど急激に大きくなっていくことがわかる。

(3) 鉄-鉛多重層のビルドアップ・ファクタ

鉄-鉛の単一層のビルドアップ・ファクタが理論計算とよく一致すること、および鉄が水より取り扱いやすいという点でかなり高い実験精度のデータが得られるので最も数多くの測定を行なった。

2 層の Fe-Pb の場合の代表的な結果が第 5 図に示されている。

この場合われわれは Kalos の式中の指数減衰項の経験常数 1.7 の代わりに 1.2 にすることによりかなりの精度でよく一致することがわかった。第 5 図からわかることは水-鉛 2 層の場合と同様、最後の 0.5 mfp の鉛でビルドアップ・ファクタの低下が大きく、それ以上の厚さではその効果があまり期待できないことがわかる。

第 6 図には 2 層の Pb-Fe の場合の代表例が示されている。この結果は Kalos の式による計算値とかなり

よく一致している。

3 層の場合の代表的な結果が第 7 図に示されている。

図中に示された曲線はそれぞれ遮蔽体の全厚さ (T) を一定にして、鉛の層の位置をいろいろ変えた時のビルドアップ・ファクタを示している。また破線は半経験式を使って得た計算結果を示している。

第 4 図 水-鉛層のビルドアップ・ファクタ (鉛層の位置の変化による影響)

線源側に鉄がそれぞれ 1.5, 3.0, 4.55 mfp あり、その後鉛がある場合のビルドアップ・ファクタを示してあり、点は実測値である。また実線は Kalos の式 ($\alpha=1.2$)、破線は Broder の式を使って計算したものであり、一点鎖線は Kimel の実験結果 (鉄: 3 mfp) を示している。

第 5 図 鉄-鉛層 (2 層) のビルドアップ・ファクタ

鉛 1.58 mfp の後に鉄の層を変えていった場合のビルドアップ・ファクタの変化を示す図であり、点は実測値を示す。また実線は Kalos の式および Brodeur の式を使って計算したもの、破線は Kimel' の実験結果 (鉛: 2 mfp) を示している。

第 6 図 鉛-鉄層 (2 層) のビルドアップ・ファクタ

鉄、鉛の各層はそれぞれ 2.26, 1.2 mfp であり、点は実測値を示している。

第 7 図 鉄-鉛多重層のビルドアップ・ファクタ (3 層)

る。鉄の層がそれほど厚くないこの場合には Kalos の半経験式を直接拡張した (8) 式とかなり一致していることがわかる。

第 8 図には鉛が鉄層中を移動する時の代表結果が示されている。水の場合と同様、鉄の層がそれほど厚くない場合や鉛の層が薄い場合には (9) 式や (10) 式の計算結果とかなり一致する。しかし鉄層が厚くなり鉛層も厚くなるにつれて合わなくなる。後に鉛が来るほどビルドアップ・ファクタを強く落すことがわかる。

4 層以上の場合には全く実験的な式として次式を導出した。

図中に示された曲線はそれぞれ遮蔽体の全厚さ (T) を一定にして、鉛の層の位置をいろいろ変えた時のビルドアップ・ファクタを示している。また破線は半経験式を使って得た計算結果を示している。

第 8 図 鉄-鉛層のビルドアップ・ファクタ (鉛層の位置の変化による影響)

$$B_{2n} = B_{Fe}(T) - \sum_{j=1}^n \left[B_{Fe}(x_{1j} + x_{2j}) - B_{Pb}(x_{2j}) \right] - \left\{ \frac{B_{Fe}(x_{1j}) - 1}{B_{Pb}(x_{2j}) - 1} e^{-1.2x_{2j}} + \frac{(\mu_s/\mu_i)_{Fe}}{(\mu_s/\mu_i)_{Pb}} \right\} \times (1 - e^{-x_{2j}}) \left\{ B_{Pb}(x_{1j} + x_{2j}) - B_{Pb}(x_{2j}) \right\} \quad (11)$$

鉄、鉛の各層はそれぞれ 1.5, 0.8 mfp であり、点は実測値を示している。

第 9 図 鉄-鉛多重層のビルドアップ・ファクタ (4 層)

ここで、 $T = \sum_{j=1}^n (x_{1j} + x_{2j})$ 、鉄-鉛の2層をユニットと考え、鉄の厚さを添字1とし鉛の厚さを添字2で示す。この式は Kalos の拡張式で鉛の薄い場合の近似式(10)とよく一致する。これらの式からわかるように鉄-鉛のユニットがそれぞれ独立していることである。

第9図には4層の場合の代表例が示されており、第10図には8層の場合の代表例が示されている。(11)式でよく一致していることがわかる。半均質的な鉄-鉛遮蔽ではこのような半経験式でかなりの程度表わすことができることがわかった。

鉄、鉛の各層はそれぞれ 0.75, 0.4 mfp であり、点 は実測値を示している。

第10図 鉄-鉛多重層のビルドアップ・ファクタ (8層)

遮蔽体の全厚さを一定 (鉄: 3.00 mfp + 鉛: 1.58 mfp) にして、各ユニットの層の厚さを変えた場合のビルドアップ・ファクタであり、(a)は線源側にまず鉛がある場合(一番最後は鉄層)、(b)は線源側にまず鉄がある場合(一番最後は鉛層)を示している。 x_1 は鉛層のユニットの厚さであり、図中横軸にはその逆数 $1/x_1$ をとって均質度を示している。

第11図 鉄-鉛層における非均質効果

鉄-鉛層が非均質から半均質、均質へと変化していく時のビルドアップ・ファクタが第11図に示されている。遮蔽体の全厚 4.58 mfp (鉛 1.58 mfp, 鉄 3.00 mfp) が一定で鉄、鉛の層数が変わった時の代表例である。

これからわかることは、均質の場合のビルドアップ・ファクタは2層の両極端の場合のほぼ中間値になり、鉛を鉄層の中央に置く場合より小さくなっている。

IV. 結 論

水、鉄、鉛の有限単一層および有限多重層の $^{60}\text{Co}\gamma$ 線に対する線量ビルドアップ・ファクタを実験により求めた。その結果と理論計算値との比較を行ない、またそれぞれの遮蔽効果を明らかにした。この中で明らかになったことはつぎのとおりである。

- (1) 有限単一層で鉛、鉄については実験精度内で理論計算値とよく一致する。
- (2) 有限多重層で鉄層がそれほど厚くない場合および鉛がかなり薄い場合には10%の誤差内で Kalos の考え方をそのまま拡張して計算してよい。
- (3) 水の有限単一層のビルドアップ・ファクタは理論計算値と一致しない。

第3図に水、鉄、鉛のビルドアップ・ファクタが一緒に書かれているが、2~3 mfp まで水、鉄のビルドアップ・ファクタはほとんど一致している。水の層が厚くない場合には、その層を透過する際の高エネルギー線が水と鉄でそれほど大きく違って来ることは考えられないことである。したがって、この不一致は実験上だけでなく、有限層効果のモンテカルロ計算値の再検討を必要としていると考えられる。

- (4) 水-鉛層でその配置によるビルドアップ・ファクタの差を発見できなかった。

実験当初は水の単一層のビルドアップ・ファクタ(理論計算値)が鉄のものとかかなり違っていたのでこの多重層効果を期待したが、実験では水、鉄の有限層ビルドアップ・ファクタ自身が 5 mfp 前後で10%程度の差であり、このように厚くなると測定精度がまた10%程度あるので、実験的に正しく測定することができなかったと考えられる。もしわれわれがこの差を見出そうとすれば遮蔽体の厚さをもっと厚くし、線源強度を強めて実験の精度を上げる必要があると考えられる。

- (5) 水-鉛、鉄-鉛層で2層の場合、鉛が厚くなっていくにつれて実験値は Kalos の式からずれていく傾向にある。

(7)式で $x_2 \gg 1$ の時漸近式はつぎのようになる。

$$B(x_1, x_2) = B_2(x_2) + \frac{(\mu_2/\mu_1)_1}{(\mu_2/\mu_1)_2} \\ \times [B_2(x_1 + x_2) - B_2(x_2)] \quad (12)$$

右辺の第2項の係数が一定であり、 B_2 の値は鉛だけのビルドアップ・ファクタより x_1 に比例した値だけ大きくなることを示す。物理的に考えて x_2 にももっと関係した量になることが考えられる。鉄-鉛層の場合にはソビエト等で行なわれた実験値⁶⁾もあり、第5, 6図にわれわれの実験値と一緒に示してあるが、これらの傾向は x_2 が増えるに従ってますます鉛のビルドアップ・ファクタとの差が大きくなる傾向にあり理解できない。Broderの論文⁷⁾に至ってはそれだけでなく鉛によるビルドアップ・ファクタの低下さえ見ることができず、その結果についてあまり信頼できないと考えられる。われわれは鉛の量が約1.6 mfp しかなかったので、この厚さでは以上の点をはっきり確認できなかった。近い内に確認したいと考えている。

- (6) 水-鉛-水、鉄-鉛-鉄の3層の場合にも水、鉄の厚さが厚い時、鉛が0.5 mfp 以上になるとその位置の変化によるビルドアップ・ファクタの変化は後に来るほど急激に低下し、Kalosの式をそのまま拡張した(8)式での計算値と合致しない。このことが第4, 8図に示されている。(8)式では鉛の位置によるビルドアップ・ファクタの変化はほとんど線型である。すなわち、鉛の層を出た散乱 γ 線はつぎの水または鉄の層で素通りにする形になっており、このことは当然物理的に考えて一般に妥当であるとは考えられない。なんらかの補正を加える必要がある。このためには鉛の後の水または鉄の層の変化に対してビルドアップがどのように変化していくか詳しく調べる必要がある。われわれはこの点も近い内に実験的に調べたいと考えている。

- (7) 最後に0.5 mfp 程度でも鉛があれば、そのビル

ドアップ・ファクタは鉛が最後にある場合に近くなっている。このことはそれ以前の多重層の内部構造の影響が少なくなっているように思われる。

- (8) 最後に多重層の遮蔽効果として、非均質から半均質、均質へと変化する場合には2層の両極端の場合のほぼ中間の値に近づいていく。

以上われわれは現在の知識から理解できる点とできない点とを明らかにした。この中で(3), (5), (6), (7)については現在さらに実験と検討を続けており、その遮蔽効果をさらに詳細に調べてその取扱ひ方を確立したいと考えている。これらの結果はつぎの機会に報告したいと思う。

本実験を実施するにつき、多大の関心と便宜とを与えて下さった当社産業機械事業部田中副事業部長、技術部大島次長、原子力研究室浜口課長、堀部掛長および室員の方々に深く感謝します。

(1962年 4月25日 受理)

— 参 考 文 献 —

- (1) H. GOLDSTEIN, *et al.*: NYO-3075, (1954).
- (2) G. R. WHITE: *Phys. Rev.*, **80**, 154 (1950).
- (3) M. J. BERGER, J. DOGGETT: *J. Res. Nat. Bur. Stand.*, **56**, 2653 (1956).
- (4) M. H. KALOS: NDA-56-7, (1956).
- (5) S. AUSLENDER: ORNL-2310, (1958).
- (6) L. R. KIMEL', *et al.*: *Atomnaya Energiya*, **10**, 173 (1961).
- (7) D. L. BRODER, *et al.*: *ibid.*, **12**, 30 (1962).
- (8) F. S. KIRN, *et al.*: *Radiology*, **63**, 94 (1954).
- (9) G. R. WHITE: NBS-1003, (1952).
- (10) G. W. GRODSTEIN: NBS-Circular-583, (1957).
- (11) U. FANO: *Nucleonics*, **11**, No. 8, 8 (1953).
- (12) T. ROCKWELL: "Reactor Shielding Design Manual", (1956), D. Van Nostrand Co., Inc., Princeton.
- (13) H. GOLDSTEIN: "Fundamental Aspects of Reactor Shielding", (1959), Addison-Wesley Publ. Co., Inc., Massachusetts.