ガンマ線に対するコンクリート遮蔽体中の中空2回屈曲ダクト遮蔽計算

山　路　昭　雄*・Reinhard FIEBIG**

Shielding Calculation for a Doubly Bent Duct in a Concrete Slab Shield for Gamma Radiation

By
Akio YAMAJI, Reinhard FIEBIG

Abstract

Shielding calculations are made to obtain a standard of the effective shield design for a concrete slab shield with a doubly bent duct for gamma radiation. In order to have the same shield effect behind the shielding wall with the duct as the one without the duct, slabs of iron or lead are inserted in the wall to attenuate the gamma-ray leakage. Calculations were made with the ray analysis method for determination of the lengths, widths and heights of the additional slab shields.

1. 諸　　言

原子力施設では，放射線遮蔽壁中にダクトを組み込む配置が，しばしば用いられる。遮蔽体中のダクトに関する研究については，現在まで種々の計算法ならびに実験結果が発表されているが[1)~3)]，まだ残された問題も多い。特に，遮蔽体中のダクトに対する効果的な遮蔽に関する研究は少なく，ダクト出口面での放射線束に寄与する遮蔽体中の領域に関する研究が行われたのみである[4)]。

実際の遮蔽設計では，原子力施設全体の設計上の観点から，遮蔽壁の厚さをダクトが無い時の壁厚と等しくし，かつダクトが無い時と同じ遮蔽効果を要求される場合がある。このような場合は，ダクトによる遮蔽効果の減少を相殺するため，遮蔽壁中の遮蔽効果の弱い箇所に，遮蔽効果の大きな附加遮蔽体を挿入する必要がある。しかし，ダクトによる遮蔽効果の減少を相殺するための附加遮蔽体の形状に関する研究は今まで行われておらず，ダクトを含む遮蔽壁設計の際の問題として残されている。特に，ホットラボラトリーでは，遮蔽壁中にダクトを組み込む配置が用いられる場合が多く，そのための効果的な遮蔽設計法の確立が望まれている。

ここでは上記の問題を取り上げ，遮蔽材としてホットラボラトリーの遮蔽壁に多く用いられるコンクリートを選び，対象とする放射線をガンマ線として，厚さと遮蔽効果を与えられている遮蔽壁中にダクトを組み込む際に必要な附加遮蔽体の厚さ，長さ，幅の計算を行う。

2. 条件および適用範囲

実際の遮蔽設計の観点から，ガンマ線に対する遮蔽効果が 10^{-3} から 10^{-13} の範囲にあるようなコンクリート遮蔽壁の厚さを選び，ダクトを組み込む際に必要な附加遮蔽体の寸法を計算する。**Fig. 1** に概念図を示す。

この問題に対する条件ならびに適用範囲は次のとおりである。

（1） コンクリート遮蔽壁の厚さおよびその遮蔽効果は与えられているものとする。

* 東海支所　　** GKSS　原稿受付：昭和49年1月5日

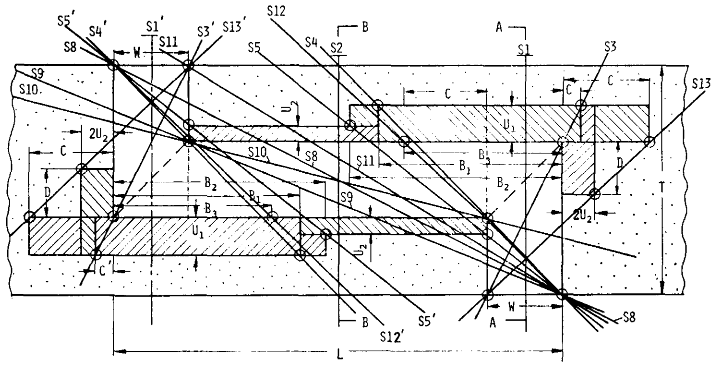

Fig. 1 Schematic of duct configuration with critical lines

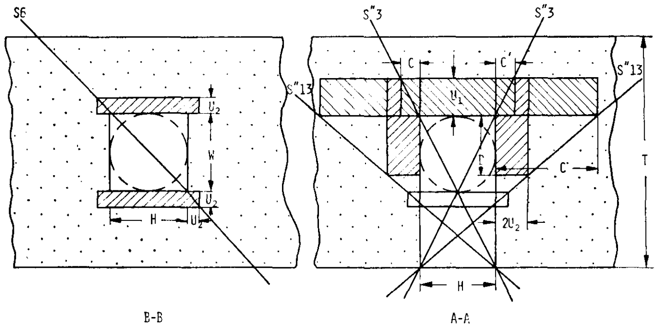

Fig. 2 Schematic of duct configuration, section A-A and B-B

(2) 対象とする放射線としてはガンマ線を考える。

(3) ダクトの断面は円または矩形とし，その径または辺の長さは与えられているものとする。

(4) ダクトは中空であるとする。

(5) ダクトは遮蔽壁の中央で屈曲する2回屈曲ダクトとする。

(6) 附加遮蔽体は鉄板または鉛板とする。

(7) ダクトの径（または辺）は，0から，附加遮蔽によってダクトが無い場合と同じ遮蔽効果を得ることが可能となる最大限の径（または辺）までを扱う。

(8) 入射ガンマ線束の角度分布としては，遮蔽壁に一方方向入射の場合と，等方分布入射の場合を扱う。

挿入しなければならない附加遮蔽体の厚さ，長さ，幅，壁の表面に平行な部分のダクトの長さは入射ガンマ線束の角度分布に著しく依存する。また，入射ガンマ線束の角度分布によって，附加遮蔽が用いられることのできる限界も異なる。特に，小さな体積の線源が遮蔽壁から遠く離れて置かれた場合のように，放射線が一方方向にのみ入射するとき，附加遮蔽には厳しい条件が生じる。また，等方分布のガンマ線束は，点線源が非常に遮蔽壁近くに置かれた場合や，コサイン分布の表面線源や，自己吸収のある等方分布放射の体積線源から生じたガンマ線束に対する標準的な線束として考えることができ，実際上，最も多く扱われるものである。したがってここでは，入射ガンマ線束の状態として，附加遮蔽を考える際に最も厳しい条件となる角度分布が一方方向のみである場合と，実際上最も多く扱われる等方分布である場合とを取り上げた。

3. 計算方法

すべての入射方向に対し，実効的な壁厚が完全に保たれることを条件として，レイアナリシス法により計算を行う。レイアナリシス法では，放射線強度は場所の関数で，近似的に指数関数で表されることができると仮定する。

指数関数表示からのずれは次の原因によって生ずる。

(1) 広がったエネルギースペクトルを有するガンマ

線の存在

（2） 広がったガンマ線角度分布の存在

（3） 再生係数

以下の節では，まず，レイアナリシス法の適用の可能性を，コンクリート中に部分的に挿入された附加遮蔽体に対して，上記の指数関数からのずれを考慮して記述する。次に，幾何学的減衰の効果を調べる。さらに，ダクト壁で散乱し，ダクト内を透過してダクト出口へ到達する散乱線の評価を行う。ダクト壁で散乱し，ダクト内を透過してダクト出口へ到達する散乱線の影響を無視できる場合は，レイアナリシス法により，コンクリート遮蔽壁に平行な横方向のダクトに対する幾何学的条件を与える。

3.1 線減衰係数の平均化

実効的な壁厚として，平均自由行程当たりの値を用いることとする。すなわち，以下に記述する平均化された線減衰係数 $\bar{\mu}$ を用い，すべての入射方向に対し，平均自由行程当たりの値がダクトが無い場合での値以上有することを条件に，附加遮蔽体の厚さ，長さ，幅およびコンクリート壁に平行な横ダクトの長さを定めることにする。

ダクトが無い場合のコンクリート壁に対する，平均化された線減衰係数 $\bar{\mu}_{\mathrm{CON}}$ を，

$$\bar{\mu}_{\mathrm{CON}}=\frac{1}{T}\ln A \qquad (1)$$

とする。ここで T は遮蔽壁の厚さ，$A=\phi_0/\phi_1$ である。（ϕ_0, ϕ_1 はそれぞれ，ダクトが無い場合の遮蔽壁前後での線量率である。）

以下，附加遮蔽体を鉄板として記述する。鉄に対する平均化された線減衰係数 $\bar{\mu}_{\mathrm{Fe}}$ が既知であるとすると，

$$\bar{\mu}_{\mathrm{CON}}T=\bar{\mu}_{\mathrm{CON}}(T-t)+(\bar{\mu}_{\mathrm{Fe}}-\bar{\mu}_{\mathrm{CON}})U \qquad (2)$$

の関係があるものとする。ここで，t はダクトの深さ，U は鉄板の厚さであり，$U<T-t$ の条件がある。

$\bar{\mu}_{\mathrm{Fe}}$ の値は鉄板の厚さ $T'=0.3T$（鉛：$T'=0.22T$）として減衰ファクター A' を計算するものとして求める。

$$\bar{\mu}_{\mathrm{Fe}}=\frac{1}{T'}\ln A' \qquad (1')$$

この方法で，例えば **Fig. 1** の $S1$ 方向に入射するガンマ線に対する附加遮蔽体の厚さは，

$$U_1=\frac{\bar{\mu}_{\mathrm{CON}}t}{\bar{\mu}_{\mathrm{Fe}}-\bar{\mu}_{\mathrm{CON}}} \qquad (3)$$

で計算される。

この $S1$ に対する取り扱いから，この方法の適合性を検討することにする。

ここで，

$\bar{\mu}'_{\mathrm{CON}}$: 実際の厚さ $(T-t-U_1)$ のコンクリートに対する平均化された線減衰係数。

$\bar{\mu}'_{\mathrm{Fe}}$: 実際の厚さ U_1 の鉄に対する平均化された線減衰係数。

とする。$\bar{\mu}'_{\mathrm{CON}}$，$\bar{\mu}'_{\mathrm{Fe}}$ には $\bar{\mu}_{\mathrm{CON}}$，$\bar{\mu}_{\mathrm{Fe}}$ と同様に再生係数に対する考慮等がなされているものとする。$\bar{\mu}_{\mathrm{CON}}$，$\bar{\mu}'_{\mathrm{CON}}$，$\bar{\mu}'_{\mathrm{Fe}}$ には次の関係が成り立たねばならない。

$$\bar{\mu}'_{\mathrm{CON}}(T-t-U_1)+\bar{\mu}'_{\mathrm{Fe}}U_1\geqq\bar{\mu}_{\mathrm{CON}}T \qquad (4)$$

U_1 に(3)式を代入すると，

$$(\bar{\mu}'_{\mathrm{Fe}}-\bar{\mu}'_{\mathrm{CON}}-\bar{\mu}_{\mathrm{Fe}}+\bar{\mu}_{\mathrm{CON}})\bar{\mu}_{\mathrm{CON}}T+(\bar{\mu}_{\mathrm{Fe}}\bar{\mu}'_{\mathrm{CON}}-\bar{\mu}'_{\mathrm{Fe}}\bar{\mu}_{\mathrm{CON}})(T-t)\geqq 0 \qquad (4')$$

ここで，

$$\frac{\bar{\mu}'_{\mathrm{Fe}}}{\bar{\mu}_{\mathrm{Fe}}}=\alpha,\quad \frac{\bar{\mu}'_{\mathrm{CON}}}{\bar{\mu}_{\mathrm{CON}}}=\beta$$

と置き，(4′)式を β について解く。

$$\beta\geqq\frac{T-\alpha(T-t)-\frac{\bar{\mu}_{\mathrm{CON}}}{\bar{\mu}_{\mathrm{Fe}}}(1-\alpha)T}{t}$$

$$=1-\frac{T-t-\frac{\bar{\mu}_{\mathrm{CON}}}{\bar{\mu}_{\mathrm{Fe}}}T}{t}(\alpha-1) \qquad (5)$$

$U_1\leqq T-t$ より，

$$\frac{\bar{\mu}_{\mathrm{CON}}t}{\bar{\mu}_{\mathrm{Fe}}-\bar{\mu}_{\mathrm{CON}}}\leqq T-t \qquad (6)$$

$$\frac{T-t-\frac{\bar{\mu}_{\mathrm{CON}}}{\bar{\mu}_{\mathrm{Fe}}}T}{t}\geqq 0 \qquad (7)$$

となる。したがって，$\alpha\geqq 1$，$\beta\geqq 1$ ならば (5) 式は常に成り立つ。条件，$\alpha\geqq 1$，$\beta\geqq 1$ は薄い層での減衰率は厚い層でのそれに比べ大であることを示し，等方分布入射または連続スペクトルを有する場合に成り立ち，ダクトが無い場合のコンクリート壁に対する平均化された線減衰係数 $\bar{\mu}_{\mathrm{CON}}$ と厚さ T' の附加遮蔽体に対する $\bar{\mu}_{\mathrm{Fe}}$（または $\bar{\mu}_{\mathrm{Pb}}$）を用いて計算を行うことの妥当性が確認される。単一エネルギー，一方方向入射のガンマ線に対しては検証が必要である。多重層の再生係数はその層全体を各々の要素でそれぞれ満たした時の再生係数の最大値より常に小であること，コンクリートの再生係数は 4 MeV 以上のエネルギーのガンマ線で減衰が10平均自由行程以上である場合を除き鉄や鉛のそれよりも高いことを考慮し，ガンマ線のエネルギー 10 MeV，$\mu T=20$ として一方方向入射ガンマ線

に対する検証計算を行った結果，$\bar{\mu}_{\rm CON}$，$\bar{\mu}_{\rm Fe}$，$\bar{\mu}_{\rm Pb}$ を用いることによる遮蔽壁後での線量の過小評価の最大値，すなわちダクトがある場合と無い場合での線量の比の最大値は鉄の場合 1.33，鉛の場合 1.72 であった。(附録 1)

より安全側に計算を行う場合は，鉄とコンクリートの密度の比と $\bar{\mu}_{\rm CON}$ を用い，

$$\bar{\mu}_{\rm Fe}=\bar{\mu}_{\rm CON}\frac{\rho_{\rm Fe}}{\rho_{\rm CON}} \tag{8}$$

とする。しかし，4 MeV 以上と 1 MeV 以下のガンマ線に対しては，(8)式で計算した値は過大評価となる。

これまでに説明した方法により，平均化された線減衰係数の決定が行われ，常に U_1 を計算することができる。U_2 についても同様に，(2)式に基づいて計算される。

コンクリート壁に平行な横ダクトは壁の中央に据え付けられ，その径はダクトの入口・出口部分の径と等しく W であるから，入口・出口部分のダクトの深さ t は (9) 式で表される。

$$t=\frac{T+W}{2} \tag{9}$$

(9)式を(3)式に代入して，

$$U_1=\frac{\bar{\mu}_{\rm CON}(T+W)}{2(\bar{\mu}_{\rm Fe}-\bar{\mu}_{\rm CON})} \tag{10}$$

となる。

条件　$U_1<T-t=\dfrac{T-W}{2}$ から，

$$T-W\geqq\frac{\bar{\mu}_{\rm CON}(T+W)}{\bar{\mu}_{\rm Fe}-\bar{\mu}_{\rm CON}}$$

または，

$$X=\frac{W}{T}\leqq 1-2\frac{\bar{\mu}_{\rm CON}}{\bar{\mu}_{\rm Fe}} \tag{11}$$

を得る。

(11)式から明らかなように，ダクトの径と壁の厚さとの間には制限がある。

3.2　幾何学的減衰の考慮

入射ガンマ線束の角度分布が等方の場合は一方方向入射ガンマ線束の場合に比べ，角度分布の拡がりにより，附加遮蔽体の厚さ，長さ，幅に節約ができる。

半立体角上で角度分布が等方であるガンマ線束のスカラー束 ϕ_0 と角度束 φ との関係は，

$$\varphi d\Omega=\frac{\phi_0}{2\pi}d\Omega \tag{12}$$

である。

ダクト断面が直径 W の円の場合，入口部のダクトの底でのスカラー束 ϕ_e は(13)式で求められるとする。

$$\phi_e=\frac{\phi_0}{2\pi}\cdot\frac{\pi W^2}{4t^2} \tag{13}$$

ダクトの底では入射ガンマ線束の角度分布は等方でなく前方ピークとなる。安全側から入射線を一方方向(垂直方向) 入射と見なし，減衰係数 μ には再生係数に対する考慮がなされているとすると，線源と反対側の遮蔽壁面でのスカラー束 ϕ_1 は，

$$\phi_1=\frac{\phi_0 W^2}{8t^2}\exp\{-\mu_{\rm CON}(T-t)-(\mu_{\rm Fe}-\mu_{\rm CON})U_1\} \tag{14}$$

となる。

ダクト断面が辺の長さ W と H の矩形である場合は，

$$\phi_1=\frac{\phi_0\cdot W\cdot H}{2\pi t^2}\exp\{-\mu_{\rm CON}(T-t)-(\mu_{\rm Fe}-\mu_{\rm CON})U_1\} \tag{15}$$

となる。$t=(W+t)/2$ と置き換えると，

$$\phi_1=\frac{2\phi_0\cdot W\cdot H}{\pi(W+T)^2}\times\exp\left\{-\mu_{\rm CON}\left(\frac{T-W}{2}\right)-(\mu_{\rm Fe}-\mu_{\rm CON})U_1\right\} \tag{16}$$

が得られる。

以下，ダクト断面が矩形の場合について記述する。ここで扱っている減衰係数 μ には再生係数に対する考慮がなされているが，ガンマ線の幾何学的な拡がりに対しては考慮されていない。したがって，遮蔽壁前後での減衰率 A^{-1} と $\mu_{\rm CON}$ との間には次式の関係がある。

$$A^{-1}=E_2(\mu_{\rm CON}T)\fallingdotseq\frac{\exp(-\mu_{\rm CON}T)}{(1+\mu_{\rm CON}T)} \tag{17}$$

(15)式から，

$$\frac{\exp(-\mu_{\rm CON}T)}{1+\mu_{\rm CON}T}=\frac{W\cdot H}{2\pi t^2}\exp\{-\mu_{\rm CON}(T-t)-(\mu_{\rm Fe}-\mu_{\rm CON})U_1\} \tag{18}$$

となる。(18)式を書き換えると，

$$(\mu_{\rm Fe}-\mu_{\rm CON})U_1=\mu_{\rm CON}t-\ln\left(\frac{2\pi t^2}{W\cdot H}\right)+\ln(1+\mu_{\rm CON}T) \tag{19}$$

となる。次に，平均化された線減衰係数 $\bar{\mu}_{\rm CON}$ を用い (1) 式の定義どおり $\bar{\mu}_{\rm CON}$ には幾何学的効果に対する考慮もなされているとすると，(17)式から

$$\frac{\exp(-\mu_{\rm CON}T)}{1+\mu_{\rm CON}T}=\exp(-\bar{\mu}_{\rm CON}T) \tag{20}$$

となり，書き直すと，

$$\bar{\mu}_{\mathrm{CON}}T=\mu_{\mathrm{CON}}T+\ln(1+\mu_{\mathrm{CON}}T) \qquad (21)$$

が得られ，さらに，$\bar{\mu}_{\mathrm{CON}}T$ と $\mu_{\mathrm{CON}}T$ との差が $\bar{\mu}_{\mathrm{CON}}T$ に比べ小さいと

$$\bar{\mu}_{\mathrm{CON}}T\doteqdot\bar{\mu}_{\mathrm{CON}}T-\ln(1+\bar{\mu}_{\mathrm{CON}}T) \qquad (22)$$

となる。

次の近似を利用する。

$$t\doteqdot\frac{T}{2},\quad \bar{\mu}_{\mathrm{Fe}}=\frac{1}{T'}\ln A' \text{ から } \frac{T}{T'}\doteqdot\frac{\bar{\mu}_{\mathrm{Fe}}}{\bar{\mu}_{\mathrm{CON}}} \qquad (23)$$

(22)，(23)式を用いると次式が得られる。

$$\begin{aligned}\bar{\mu}_{\mathrm{Fe}}-\bar{\mu}_{\mathrm{CON}}&\doteqdot\mu_{\mathrm{Fe}}-\mu_{\mathrm{CON}}+\frac{1}{T'}\ln(1+\bar{\mu}_{\mathrm{Fe}}T')\\&\quad-\frac{1}{T}\ln(1+\bar{\mu}_{\mathrm{CON}}T)\\&\doteqdot\mu_{\mathrm{Fe}}-\mu_{\mathrm{CON}}+\left(\frac{1}{T'}-\frac{1}{T}\right)\\&\quad\times\ln(1+\bar{\mu}_{\mathrm{CON}}T)\end{aligned} \qquad (24)$$

(19)，(21)，(22)，(23) 式から，

$$\begin{aligned}&(\bar{\mu}_{\mathrm{Fe}}-\bar{\mu}_{\mathrm{CON}})U_1\\&=\left\{\mu_{\mathrm{CON}}t-\ln\left(\frac{2\pi t^2}{W\cdot H}\right)+\ln(1+\mu_{\mathrm{CON}}T)\right\}\\&\quad\times\frac{\bar{\mu}_{\mathrm{Fe}}-\bar{\mu}_{\mathrm{CON}}}{\mu_{\mathrm{Fe}}-\mu_{\mathrm{CON}}}\\&=\left\{\mu_{\mathrm{CON}}t+\bar{\mu}_{\mathrm{CON}}T-\mu_{\mathrm{CON}}T-\ln\left(\frac{2\pi t^2}{W\cdot H}\right)\right\}\\&\quad\times\frac{\bar{\mu}_{\mathrm{Fe}}-\bar{\mu}_{\mathrm{CON}}}{\mu_{\mathrm{Fe}}-\mu_{\mathrm{CON}}}\doteqdot\left\{\bar{\mu}_{\mathrm{CON}}t-\ln\left(\frac{2\pi t^2}{W\cdot H}\right)\right.\\&\quad\left.+\frac{1}{2}\ln(1+\bar{\mu}_{\mathrm{CON}}T)\right\}\frac{\bar{\mu}_{\mathrm{Fe}}-\bar{\mu}_{\mathrm{CON}}}{\mu_{\mathrm{Fe}}-\mu_{\mathrm{CON}}}\end{aligned} \qquad (25)$$

ここで，(23)，(24) 式を用いると，

$$\begin{aligned}\frac{\bar{\mu}_{\mathrm{Fe}}-\bar{\mu}_{\mathrm{CON}}}{\mu_{\mathrm{Fe}}-\mu_{\mathrm{CON}}}&\doteqdot1+\frac{\left(\frac{1}{T'}-\frac{1}{T}\right)\ln(1+\bar{\mu}_{\mathrm{CON}}T)}{\mu_{\mathrm{Fe}}-\mu_{\mathrm{CON}}}\\&\doteqdot1+\frac{1}{\bar{\mu}_{\mathrm{CON}}T}\left(\frac{\bar{\mu}_{\mathrm{Fe}}-\bar{\mu}_{\mathrm{CON}}}{\mu_{\mathrm{Fe}}-\mu_{\mathrm{CON}}}\right)\\&\quad\times\ln(1+\bar{\mu}_{\mathrm{CON}}T)\end{aligned} \qquad (26)$$

$\dfrac{\bar{\mu}_{\mathrm{Fe}}-\bar{\mu}_{\mathrm{CON}}}{\mu_{\mathrm{Fe}}-\mu_{\mathrm{CON}}}$ について解くと，

$$\begin{aligned}\frac{\bar{\mu}_{\mathrm{Fe}}-\bar{\mu}_{\mathrm{CON}}}{\mu_{\mathrm{Fe}}-\mu_{\mathrm{CON}}}&\doteqdot\frac{1}{1-\dfrac{\ln(1+\bar{\mu}_{\mathrm{CON}}T)}{\bar{\mu}_{\mathrm{CON}}T}}\\&\doteqdot1+\frac{\ln(1+\bar{\mu}_{\mathrm{CON}}T)}{\bar{\mu}_{\mathrm{CON}}T}\end{aligned} \qquad (27)$$

となる。したがって(25)式は，

$$\begin{aligned}(\bar{\mu}_{\mathrm{Fe}}-\bar{\mu}_{\mathrm{CON}})U_1&\doteqdot\left\{\bar{\mu}_{\mathrm{CON}}t-\ln\left(\frac{2\pi t^2}{W\cdot H}\right)\right.\\&\quad\left.+\frac{1}{2}\ln(1+\bar{\mu}_{\mathrm{CON}}T)\right\}\left\{1+\frac{\ln(1+\bar{\mu}_{\mathrm{CON}}T)}{\bar{\mu}_{\mathrm{CON}}T}\right\}\end{aligned} \qquad (28)$$

となる。さらに $t=\dfrac{W+T}{2}$ と置くと，

$$\begin{aligned}U_1&\doteqdot\frac{1}{(\bar{\mu}_{\mathrm{Fe}}-\bar{\mu}_{\mathrm{CON}})}\left\{\bar{\mu}_{\mathrm{CON}}\frac{W+T}{2}-\ln\frac{\pi(W+T)^2}{2W\cdot H}\right.\\&\quad\left.+\frac{1}{2}\ln(1+\bar{\mu}_{\mathrm{CON}}T)\right\}\left\{1+\frac{\ln(1+\bar{\mu}_{\mathrm{CON}}T)}{\bar{\mu}_{\mathrm{CON}}T}\right\}\end{aligned} \qquad (29)$$

が得られる。

ダクト断面が直径 W の円の場合は，

$$\begin{aligned}U_1&\doteqdot\frac{1}{(\bar{\mu}_{\mathrm{Fe}}-\bar{\mu}_{\mathrm{CON}})}\left[\bar{\mu}_{\mathrm{CON}}\frac{W+T}{2}\right.\\&\quad\left.-\ln\left\{2\left(\frac{W+T}{W}\right)^2\right\}+\frac{1}{2}\ln(1+\bar{\mu}_{\mathrm{CON}}T)\right]\\&\quad\times\left\{1+\frac{\ln(1+\bar{\mu}_{\mathrm{CON}}T)}{\bar{\mu}_{\mathrm{CON}}T}\right\}\end{aligned} \qquad (30)$$

となる。

上記の取り扱いは入口部分のダクトに対するものであるが，出口部分のダクトに対する値としても安全側にある。

3.3 ダクト内を透過し，ダクト出口に達する散乱線の評価

ダクト面で散乱し，ダクト内を透過してダクト出口に達する散乱線の影響を無視できるならば，遮蔽壁に平行な部分のダクトの長さは幾何学的条件のみによって決定することができる。安全側から，ダクト面で散乱し，ダクト内を透過してダクト出口に達する散乱線を過大評価する式を使用する。

ガンマ線がコンクリート遮蔽壁に対し垂直方向にのみ入射する場合，ダクト面で散乱し，ダクト出口に達するガンマ線量を，

$$\phi_s=\left(\frac{\alpha}{4\pi}\right)^2\frac{F^2}{L^2t^2}\phi_0 \qquad (31)$$

とする。ここで F はダクト断面積，L は遮蔽壁に平行な部分のダクトの長さである。

ダクト内を透過し，ダクト出口に達する散乱線の影響が無視でき，レイアナリシス法による附加遮蔽の取り扱いが適用できるためには，ダクト内を透過しダクト出口に達する散乱線の減衰率を一般に A^{-1} 以上にする必要がある。したがって，ここでの取り扱いが可能となる遮蔽壁に平行な部分のダクトの最小許容長さ L_0 は，

$$L_0=\sqrt{A}\frac{F}{t}\cdot\frac{\alpha}{4\pi} \qquad (32)$$

となる。入射ガンマ線束の角度分布が等方の場合は入口部分での減衰を考慮して，

Table 1 Maximum value of the ratio of the duct diameter W to the shield wall thickness T at $L_0=2T$

A	W/T	
	monodirectional	isotropic
10^4	0.5	0.65
10^8	0.05	0.14
10^{12}	0.005	0.03

$$L_0=\sqrt{A}\frac{F}{t}\cdot\frac{\alpha}{4\pi}\cdot\frac{\sqrt{F}}{2t} \tag{33}$$

とする。

アルベド $\alpha=1/2$ と過大評価[5]し，ダクト面で散乱しダクト内を透過してダクト出口に達する散乱線を無視できる適用領域を定める。(32)式で $t=T/2, \alpha=1/2$, ダクト断面を直径 W の円，または一辺が W の正方形とし，$X=W/T$ と置くと，

$$\frac{L_0}{T}=\sqrt{A}\frac{F}{T^2}\cdot\frac{1}{4\pi}=\frac{\sqrt{A}}{4\pi}X^2 \tag{32$'$}$$

が得られる。入射ガンマ線束の角度分布が等方の場合は，(33)式から次式が得られる。

$$\frac{L_0}{T}=\frac{\sqrt{A}}{4\pi}X^3 \tag{33$'$}$$

(32′), (33′) 式から，遮蔽設計で L_0 が定められている場合，ダクト面で散乱しダクト内を透過してダクト出口に達する散乱線の影響を無視することのできる $X=W/T$ の上限が求められる。

垂直方向にのみ入射する場合，(32′)式から近似的に，

$$X\leqq\frac{5}{\sqrt[4]{A}} \tag{32$''$}$$

等方分布で入射する場合，(33′) 式から近似的に，

$$X\leqq\frac{3}{\sqrt[6]{A}} \tag{33$''$}$$

である。**Table 1** に，$L_0=2T$ とした場合の種々の減衰ファクターでの W/T の上限を示す。実際の値に近い α を使用するならば，さらに大きな $X=W/T$ を選ぶことが可能である。

3.4 遮蔽壁に平行なダクトの必要最小長さ

レイアナリシス法が適用できるためには，ダクト面で散乱しダクト出口に達する散乱線の影響が無視できなければならない。前の節で，ダクト面で散乱しダクト内を透過してダクト出口に達する散乱線の影響を無視できる遮蔽壁に平行なダクトの長さが求められたので，次にこの散乱線の影響が無視できる範囲で，遮蔽壁に平行なダクトの必要最小長さの計算を行う。

この場合，ある特別な方向 (**Fig. 1**, $S8$, $S9$, $S10$, $S11$) に沿ったガンマ線の減衰のみを考慮すればよく，これらの方向での平均自由行程当たりの値が $\bar{\mu}_{\text{CON}}T$ 以上であることを条件に計算を行った。

計算方法をまず $S8$ について記述する。附加遮蔽体がなく，ダクトの径または辺の長さを W とすると，コンクリート中での $S8$ に沿った長さは，

$$S'=\sqrt{L^2+T^2} \tag{34}$$

である。ここで，ダクトの入口・出口部分のコンクリートを取り去ると，

$$S''=\sqrt{L^2+T^2}\left(1-\frac{2W}{L}\right) \tag{35}$$

となる。次に横ダクト内のコンクリートを取り去ると，

$$S'''=\sqrt{L^2+T^2}\left(1-\frac{2W}{L}-\frac{W}{T}\right) \tag{36}$$

となる。さらに，横ダクトによる遮蔽効果の減少を補強するために挿入された厚さ U_2 の附加遮蔽体の効果を考慮に入れ，S を T で置き換え，L を L_8 とすると，

$$T=\sqrt{L_8^2+T^2}\left(1-\frac{2W}{L_8}\right) \tag{37}$$

が得られる。無次元数 $X=W/T$, $Y=L_8/T$ を用いると，(37)式は，

$$1=\sqrt{1+Y^2}\left(1-\frac{2X}{Y}\right) \tag{38}$$

となる。(38)式は Y について解けないので，

$$1=\sqrt{1+Y^2}\left(1-\frac{\gamma X}{Y}\right) \tag{39}$$

と置き，近似解を求めることにすると，

$$Y=\sqrt[3]{2\gamma X}+\frac{\gamma X}{2},\quad \gamma X\leqq 0.2 \tag{40}$$

$$Y=1+\gamma X-\frac{1}{2(1+\gamma X)^2},\quad \gamma X\geqq 0.2 \tag{40$'$}$$

となる。

$S9$ は **Fig. 1** から明らかなように，横ダクトに対する附加遮蔽体の半分を通る。$S9$ がコンクリート遮蔽壁両面を横切る点をどちらかの遮蔽壁上へ投影した場合の距離を M_9 とすると，

$$\frac{M_9}{T}=\frac{2(L_9-W)}{W+T} \tag{41}$$

すなわち，

$$L_9=\frac{M_9}{T}\cdot\frac{W+T}{2}+W \tag{42}$$

となる。したがって，次の方程式を解くことになる。

$$T=\sqrt{M_9^2+T^2}\left(1-\frac{2W}{M_9}-\frac{W}{2T}\right) \quad (43)$$

$S10$ は **Fig. 1** から明らかなように，横方向ダクトの一方の端と他方の端を通る。$S10$ に対しては，次の関係が成り立つ。

$$\frac{M_{10}}{T}=\frac{L_{10}-2W}{W} \quad (44)$$

すなわち，

$$L_{10}=\frac{M_{10}}{T}W+2W \quad (45)$$

したがって，次の方程式を解くことになる。

$$T=\sqrt{M_{10}^2+T^2}\left(1-\frac{2W}{M_{10}}-\frac{W}{T}\right) \quad (46)$$

$S11$ はダクト入口・出口部と交わり，横方向ダクトに対する附加遮蔽体を通る。
それゆえ，

$$L_{11}=M_{11}+W \quad (47)$$

したがって，次の方程式を解くことになる。

$$T=\sqrt{M_{11}^2+T^2}\left(1-\frac{W}{M_{11}}\right) \quad (48)$$

無次元数 $X=W/T$, $Y=L/T$ で上記の $S8$, $S9$, $S10$, $S11$ に対する方程式を表し，**Fig. 3** に Y を X の関数として図示する。図から明らかなように，$X=0.3$ までは $S8$ によって，$X=0.3$ から 0.38 までは $S9$ によって，さらに $X>0.38$ では $S10$ によって横方向ダクトの最小長さが定められる。しかし，附加

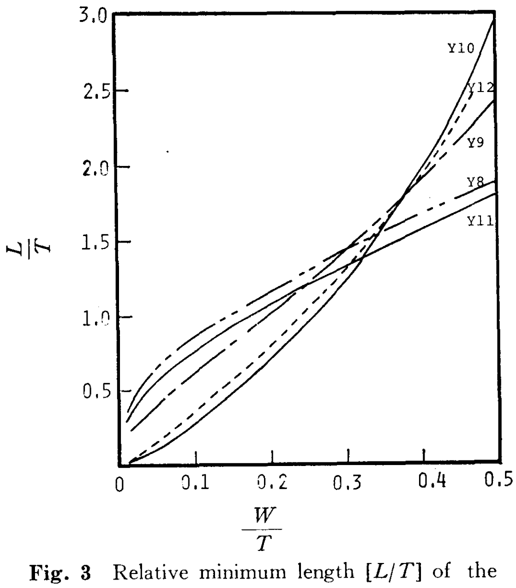

Fig. 3 Relative minimum length $[L/T]$ of the transverse duct

遮蔽体として鉄板を選んだ場合は(11)式より $X<1-\frac{2\bar{\mu}_{CON}}{\bar{\mu}_{Fe}}$ の条件があり，$X>0.3$ での遮蔽設計は実際上用いられる範囲がせばめられる。L_{11} は常に L_8 より小である。したがって，$S11$ 方向に入射したガンマ線に対しては常に壁内で実効的な壁厚 $\bar{\mu}_{CON}T$ となる点がある。次に，$S8$ から $S10$ に対する式の適合性を保証するため，$S8$ が附加遮蔽体（鉄板）のみを透過する場合を考察する。この場合の遮蔽壁に平行なダクトの長さの可能な最小値を L_{12} とすると，

$$\bar{\mu}_{CON}T=\bar{\mu}_{Fe}\sqrt{L_{12}^2+T^2}\left(1-\frac{2W}{L_{12}}-\frac{W}{T}\right) \quad (49)$$

となる。(49)式は $S10$ に対する(46)式と類似しており，$S10$ の場合と同様に解ける。しかし，$\frac{\bar{\mu}_{CON}}{\bar{\mu}_{Fe}}\leqq 0.4$ に対しては，**Fig. 3** から明らかなように，L_8, L_9, L_{10} によって遮蔽壁に平行な横方向ダクトの長さは定められることになる。

3.5 附加遮蔽体の長さの決定

3.5.1 コリメートされたガンマ線が入射する場合

横方向ダクトと反対方向の附加遮蔽の長さ C は $S13$ により，(48)式の M_{11} を用いて，

$$C=\frac{W+T}{2T}M_{11}-W \quad (50)$$

とする。この突き出し部の附加遮蔽の長さ C が非常に長くなる場合は，ダクト入口・出口側面での附加遮蔽で置き換えることを考慮すると，その高さは，

$$D=\frac{W+T}{2}\cdot\frac{C-2U_2}{W+C} \quad (51)$$

で計算される。

厚さ U_1 の附加遮蔽体の横ダクト方向への長さは，**Fig. 1** での B_1, B_2, B_3 の最大値によって定められる。

まず，出入口を通過する直接線は必ず厚さ U_1 の附加遮蔽体を透過するものとし，$S4$ から，

$$B_1=\frac{W}{T-W}(T+W+2U_1) \quad (52)$$

となる。

横ダクトを通過するガンマ線は必ず横ダクトによる遮蔽効果の減少を相殺するための厚さ U_2 の附加遮蔽体を透過するものとし，$S5$ から，

$$B_2=\frac{T+W+2U_2}{T-W-2U_2}W \quad (53)$$

となる。

さらに，横ダクトと反対側の突き出し部附加遮蔽の長さ C 以上は横ダクト方向においても必要であるとし，(50)式から，

$$B_3=\frac{W+T}{2T}M_{11} \qquad (54)$$

となる。

これら B_1, B_2, B_3 の最大値によって厚さ U_1 の附加遮蔽体の横ダクト方向への長さを定める。

3.5.2 等方な角度分布を有するガンマ線が入射する場合

等方な角度分布でガンマ線束がコンクリート遮蔽壁に入射する場合の附加遮蔽体の厚さ U_1 については(29), (30) 式で求められ，一方方向入射の場合の附加遮蔽体の厚さに比べ，厚さの節約が可能となった。次に，等方な角度分布でガンマ線束が入射する場合の附加遮蔽体の長さについて考察する。

ここで，ダクト入口・出口部を **Fig. 4** に示したダクトで置き換え，ダクトの深さ t と壁厚 T, ダクトの直径 W との間には中空2回屈曲ダクトの場合と同様に，

$$t=\frac{T+W}{2}$$

の関係があるものとする。

附加遮蔽体を取り付けない状態では，ダクトの口が線源側にある場合と線源と反対側にある場合とでは遮蔽壁後の遮蔽壁に沿った線量分布は異なり，ダクトの口が線源側にある場合の線量の最大値は反対側の場合に比べ小である[5]。しかし，線源と反対側の遮蔽壁に沿った線量率の積分値はダクトの口の方向には依存しないので[6]，ダクトの口が線源と反対側にある場合の線量分布は，ダクトの口が線源側にある場合よりもダクト中心軸上に集中していることになる。

附加遮蔽体の突き出し部の長さは，線源と反対側のダクト周囲の遮蔽壁面での線量率分布の拡がりによって決められるので，ガンマ線量の幅広い分布を有する形状を選んで計算を行えば，他の状態に対しても安全側の結果となる。

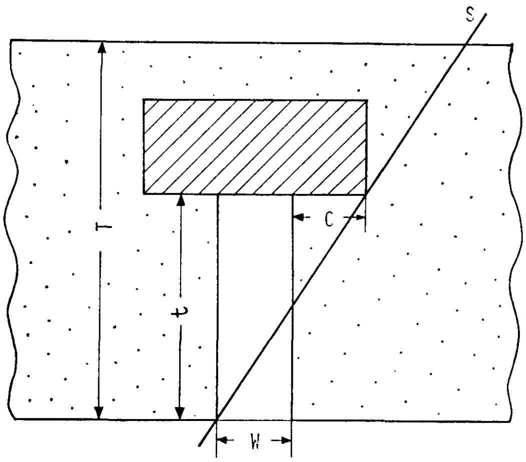

Fig. 4 Schematic of duct partially penetrating a concrete shield

したがって，ダクトの口が線源側にある場合についてのみ計算を行うこととし，ダクトの口が反対側にある場合については検証計算のみを行うこととする。

レイアナリシス法による計算コード LGH-G[7] を用いて計算を行った。すなわち，(11)式で与えられた X についての条件の下に，種々の壁厚とダクトの径および 10^{-3} から 10^{-13} までのコンクリート壁の減衰率で，線源と反対側の遮蔽壁面でのガンマ線量がダクトが無い場合の線量より 50% 大きな点を求め，**Fig. 4** の線 S により附加遮蔽の長さ C を定めた。結果を無

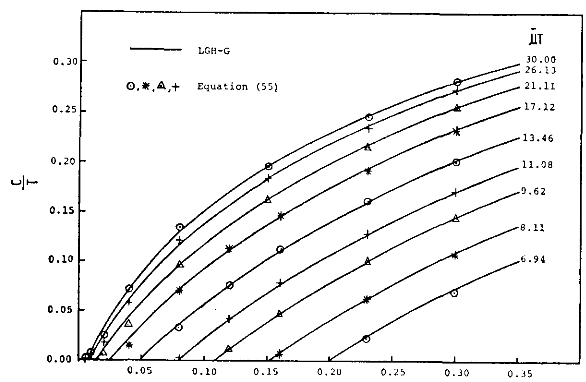

Fig. 5 Ratio of the additional shield length C to the shield wall thichness T

次元数 $X=W/T$, $Y=C/T$ を用いて **Fig. 5** に示す。

実際の遮蔽設計に際しては，結果を数式化しておくと便利である。数式化を行った結果を(55)式に示す。

$$\frac{C}{W}=\frac{k_1}{X}\ln\frac{k_2+X}{k_3} \qquad (55)$$

ここで，

$$k_1=\frac{6.6}{\bar{\mu}_{\mathrm{CON}}T+13.7}$$

$$k_2=0.1473\sqrt{\bar{\mu}_{\mathrm{CON}}T}\exp(-0.103\bar{\mu}_{\mathrm{CON}}T)+0.01$$

$$k_3=\frac{1.595}{\sqrt{\bar{\mu}_{\mathrm{CON}}T}\exp(0.06447\bar{\mu}_{\mathrm{CON}}T)}+0.012$$

である。**Fig. 5** に(55)式の結果もあげる。(55)式による値は LGH-G コードによる結果と全体に良く一致している。(55)式は複雑であるから，**Fig. 6** に C/W の値をグラフとして表示しておく。

ダクトの口が線源と反対側にある場合，(55)式で計算し，線 S により求めた線源と反対側の遮蔽壁面での点の線量はダクトが無い場合の線量の 1.5 倍より常に小であった。

(55) 式で計算される C はガンマ線が一方方向に入射する場合に比べ充分小さな値となるが，C は $S3$ 方向によって定められる C' より大きくなければならない。

C' は(56)式で計算される。

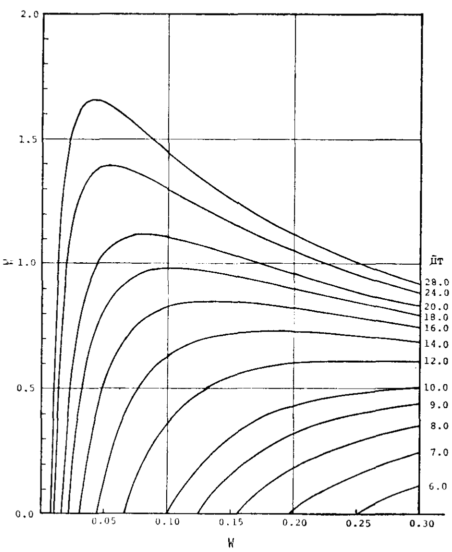

Fig. 6 Ratio of the additional shield length C to the duct diameter W

$$C'=\frac{2W}{W+T}U_1 \qquad (56)$$

厚さ U_1 の附加遮蔽体の横ダクト方向への長さは，B_1, B_2, B_3 の最大値によって定められる。この場合での B_3 は(57)式となる。

$$B_3=(C+W)\frac{W+T+2U_2}{W+T} \qquad (57)$$

3.6 附加遮蔽体の構成

上記の計算により，中空2回屈曲ダクトに対する附加遮蔽体の断面方向での厚さ，長さの決定がすべて行われたことになる。**Fig. 2** に側面図を示すが，附加遮蔽体の幅についても特別な計算はなく，上記の計算結果を用いてすべての寸法が定められる。**Fig. 2** に示すように，ダクト断面が直径 W の円の場合も，ダクト断面が一辺の長さ W の正方形の場合と同じ幅の附加遮蔽体を用いることとする。A―A 面での厚さ $2U_2$, 長さ D の附加遮蔽カプセル部は，突き出し部の長さ C が非常に大きくなった場合に，突き出し部の代わりとして用いるものとする。

ダクト断面が $W\times H$ の矩形で，附加遮蔽カプセルを用いない場合，附加遮蔽体の構成は縦・横・高さが

(1) $(2C+H)\times(B+C)\times U_1$

(2) $(2U_2+H)\times(L-W-B)\times U_2$

である直方体の附加遮蔽体をそれぞれ2枚用意すればよいことになる。ダクト断面が直径 W の円の場合は H を W で置き換えればよい。

4. 結　　言

コンクリート遮蔽壁の中央で屈曲する中空2回屈曲ダクトに対する附加遮蔽を，実際の設計で考えられる範囲にわたってレイアナリシス法により考察し必要な附加遮蔽の条件を示した。これらの結果は中空2回屈曲ダクトに対するばかりでなく，他のダクト配置に対しても適用可能である。

実際の遮蔽設計では，ダクト面で散乱し，ダクト内を透過してダクト出口へ達する散乱線を無視できる場合が多い。この場合，考えられる多くのガンマ線透過方向のうち，2, 3 の方向のみが横方向ダクトの長さを決定する因子となる。

遮蔽すべきガンマ線束の角度分布を知ることは遮蔽設計上重要であり，等方分布で入射するガンマ線束に対しては，一方方向ガンマ線束が入射する場合に比べ，附加遮蔽体の厚さ，長さ，幅に充分な節約が可能となった。特に，横ダクトと反対方向の突き出し部附加遮

蔽体の長さについては，$W/T \leqq 0.1$ で一方方向入射の場合 $C/W>2.5$ であるのに対し，等方分布で入射する場合 Fig. 6 から $C/W<1.7$ であり，W/T が小さくなるにつれて C/W は0に近づく。

入射ガンマ線束の角度分布が不明の場合は，安全側の判断に基づき，一方方向入射あるいは等方分布入射での計算結果を用いることが可能である。

ここで得られた結果はドイツ工業規格 DIN としてまとめられる予定である。

参 考 文 献

1) Jaeger, R.G., Ed., Engineering Compendium on Radiation Shielding, Vol. 1, Springer-Verlag, (1968)
2) Selph, W.E., Claiborne, H.C., ORNL-RSIC-20, (1968)
3) Schaeffer, N. M., Ed., Reactor Shielding for Nuclear Engineers, USAEC Technical Information Center, (1973)
4) 伊藤泰義他，昭和47年度秋季船舶技術研究所研究発表会　講演概要，(1972)，p. 92
5) Berger, M.J., Raso, D., Radiation Research 12, (1960), p. 20
6) Blizard, E.P., Ed., Reactorhandbook Vol. III, Part B, Interscience Publishers, (1962)
7) Fiebig, R., Rybaczok, P., Programm zur Berechnung von teilweise abgeschirmten Gamma-Strahlen-Quellen, Externer Bericht der GKSS, 73/E/17, (1973)

附録 1　平均化された線減衰係数を一方方向入射ガンマ線に対して適用することへの検討

再生係数を有する，一方方向，単一エネルギーのガンマ線を扱う。(1) 式により，平均化された線減衰係数 $\bar{\mu}_{\mathrm{CON}}$ は次式で与えられる。

$$\bar{\mu}_{\mathrm{CON}}=\frac{1}{T}\ln A \qquad \text{(A1)}$$

ここで T はコンクリート壁の厚さ，A は減衰ファクター $(A=\phi_0/\phi_1)$ である。

壁の中のダクト周囲に鉄板または鉛板を挿入することにより，遮蔽効果の減少を相殺するものとする。Fig. 1 の $S1$, $S1'$ について考察することにし，まず平均化された線減衰係数 $\bar{\mu}_{\mathrm{Fe}}$, $\bar{\mu}_{\mathrm{Pb}}$ を定める。そのための基準となる鉄板または鉛板の厚さとして，鉄板に対しては $T'=0.3T$, 鉛板に対しては $T'=0.22T$ を用い，$A'=\phi_0/\phi_1$ を求め，(A1)式により $\bar{\mu}_{\mathrm{Fe}}$, $\bar{\mu}_{\mathrm{Pb}}$ を定めるものとする。

上記の方法を，一方方向，単一エネルギーガンマ線に適用することえの是非を検討するため，(3) 式 $U_1=\dfrac{\bar{\mu}_{\mathrm{CON}}t}{\bar{\mu}_{\mathrm{Fe}}-\bar{\mu}_{\mathrm{CON}}}$ を用いて，ダクト軸上，線源と反対側のコンクリート遮蔽壁面での線量を計算し，ダクトが無い場合の，線源と反対側の壁面での線量との比較を行った。

計算条件は次のとおりである。

(1) $\mu T=20$ までの遮蔽範囲では，ガンマ線のエネルギー 10MeV, $\mu T=20$ で，鉄または鉛のコンクリートに対する再生係数の比が最大となる。したがって，最も安全側の評価を行うため，入射ガンマ線のエネルギーとして 10 MeV, 遮蔽壁の遮蔽能力として $\mu T=20$ を選ぶ。

(2) 10mfp 以上では，等方分布の点線源に対する再生係数は一方方向の平面線源に対する再生係数より大であり，かつ，一方方向の平面線源に対する線量再生係数についてのテイラー近似の係数が手元にないため，等方分布の点線源に対するテイラー近似の線量再生係数を用いることにする。

(3) 多重層透過後のガンマ線量の評価を Broder の式[1]による再生係数を用いて行う。

(4) 多重層の配列は，鉄-コンクリート，コンクリート-鉄，鉛-コンクリート，コンクリート-鉛である。

(5) ダクトの深さ t は，ダクトが無い場合のコンクリート壁の半分 $(T/2)$ から，コンクリート層が無くなるまでの深さ $\left\{t=\left(1-\dfrac{\bar{\mu}_{\mathrm{CON}}}{\bar{\mu}_{\mathrm{Fe}}}\right)T,\right.$ または，$\left.t=\left(1-\dfrac{\bar{\mu}_{\mathrm{CON}}}{\bar{\mu}_{\mathrm{Pb}}}\right)T\right\}$ までを考慮する。

多重層の再生係数は，多重層を構成している個々の層で多重層をそれぞれ置き換えた場合の再生係数の最大値より常に小である。そこで，過小評価の最大値を調べる目的で，多重層を構成している個々の層で，多重層での平均自由行程当たりの値における再生係数の最大値を用い，線源と反対側の遮蔽壁面での線量の取り得る最大値として計算を行った。

Table 1 に線源と反対側の遮蔽壁面での，ダクトがある場合と無い場合の線量の比を示す。ダクトの深さ $t=\dfrac{T}{2}$ と $t=\left(1-\dfrac{\bar{\mu}_{\mathrm{CON}}}{\bar{\mu}_{\mathrm{Fe}}}\right)T$, または，$t=\left(1-\dfrac{\bar{\mu}_{\mathrm{CON}}}{\bar{\mu}_{\mathrm{Pb}}}\right)T$ の間には最大値が存在しない。10^{-7} の遮蔽に際し，ファクター 1.72 の最大過小評価は実際の遮蔽設計では

許容された誤差範囲内にある。

附録参考文献

1) Broder, D.L., et. al., Atomnaya Énergiya, Vol. 12, No. 1, (1962), p. 30

(附録 1)

Table 1 Ratio of the dose rate behind the shield with the duct to the one without the duct.

t	Broder's formula		maximum under-valuation
	Concrete-Iron	Iron-Concrete	
$\frac{T}{2}$	1.31	0.883	1.33
$\left(1-\frac{\bar{\mu}_{CON}}{\bar{\mu}_{Fe}}\right)T$	1.11	1.11	1.11

t	Broder's formula		maximum under-valuation
	Concrete-Lead	Lead-Concrete	
$\frac{T}{2}$	1.71	0.373	1.72
$\left(1-\frac{\bar{\mu}_{CON}}{\bar{\mu}_{Pb}}\right)T$	0.707	0.707	0.707