

Fig.6.2 (e),(f)

Ratio of dose rates behind shield wall with and without straight duct calculated by G33-GP code using gamma-rays issuing from the experimental hole of JRR4 and from the PWR spent fuel in remote process cell of Barnwell reprocessing plant.

## 6.2 直スリット付き遮蔽壁

計算形状はFig.6.1の直ダクト付き遮蔽壁を直スリット付き遮蔽壁に置き換えたものである。遮蔽性能計算は入射角 $\theta$ が、(1)15°と30°、(2)許容最小入射角に近い角度、に分けて行った。

入射角 $\theta = 15^\circ$ 、 $30^\circ$ の計算は、入射ガンマ線が単色エネルギーと連続エネルギーの場合について、遮蔽壁厚 $T = 75$ 、 $100$ 、 $150\text{cm}$ として行った。連続エネルギーは、①JRR4実験孔からのスペクトル、②Barnwell再処理工場遠隔プロセスセルでのPWR使用済燃料を線源とするスペクトルを用いた。スリット幅は、単色エネルギーについてはTable3.4に示す許容最大スリット幅を用い、連続エネルギーについてはバルク遮蔽壁での線量率の減衰率からTable3.4に基づいて許容最大スリット幅を定めて使用した。単色エネルギーについての結果をFig.6.3(a)~(f)に示し、連続エネルギーについての結果をFig.6.3(g)~(j)に示す。補償遮蔽を有する直スリット付き遮蔽壁とバルク遮蔽壁の線量率の比は一部の計算点で1.0~1.2を示したが、大部分の点では1以下となった。

次に、許容最小入射角に近い角度でガンマ線が遮蔽壁に入射するケースの遮蔽計算を示す。遮蔽壁厚は $T = 75$ 、 $150\text{cm}$ の2種類、入射ガンマ線は単色エネルギーとして0.8MeVと2MeVの2種類、スリット幅 $W$ はTable3.4に基づいて5mmとした。スリット幅5mmの場合の許容最小入射角 $\theta$ は(3.22)式から、遮蔽壁厚 $T = 75\text{cm}$ で $0.6^\circ$ 、 $T = 150\text{cm}$ で $0.3^\circ$ である。本計算では、入射角 $\theta$ を $T = 75\text{cm}$ の場合 $1^\circ$ 、 $T = 150\text{cm}$ の場合 $1^\circ$ と $5^\circ$ の2種類とした。計算結果をFig.6.4(a)~(c)に示す。同図から明らかなように、線量率の比は1以下で分布した。

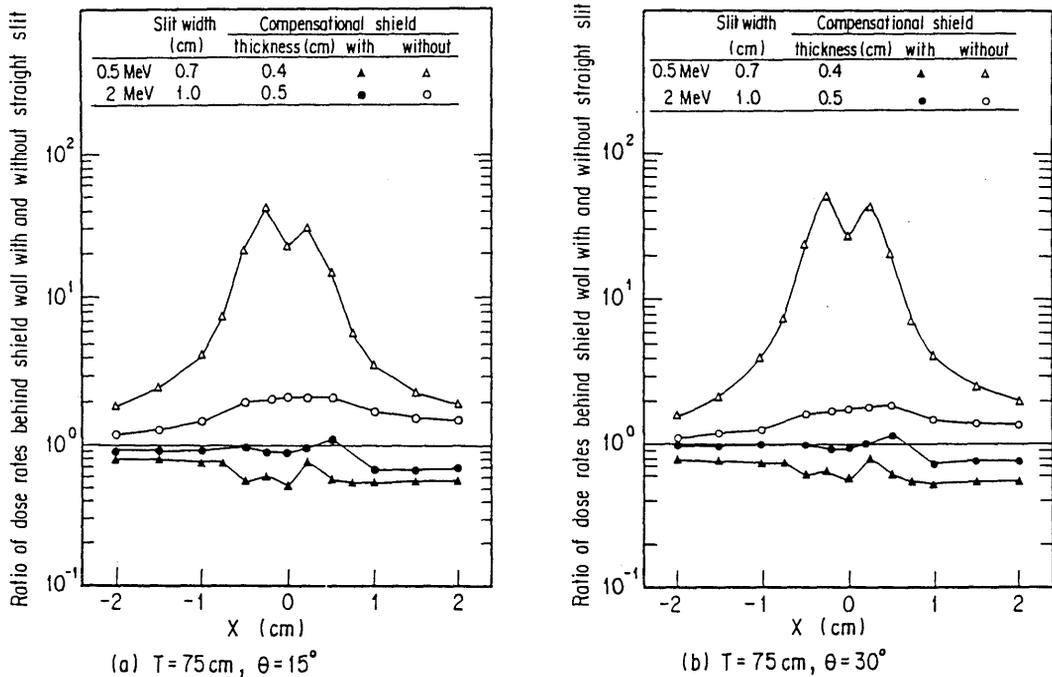
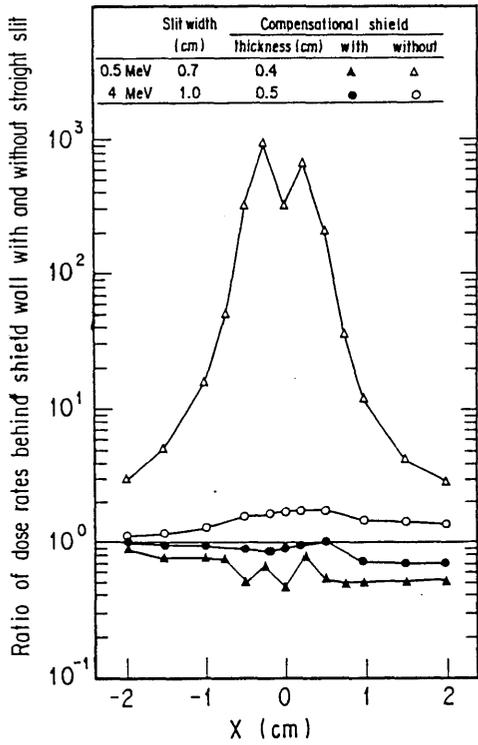
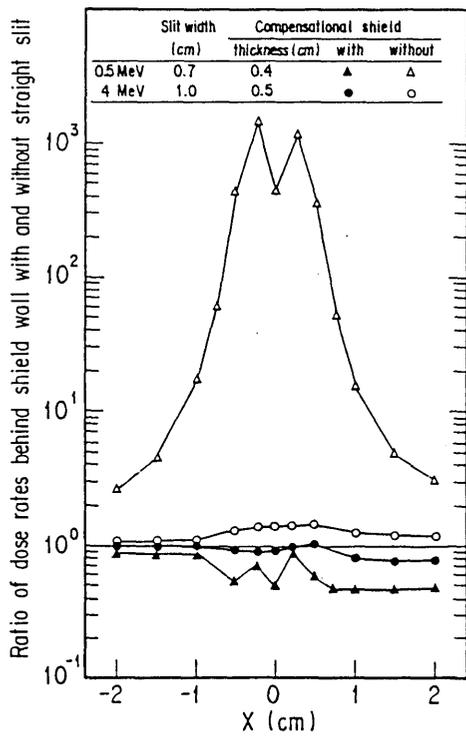


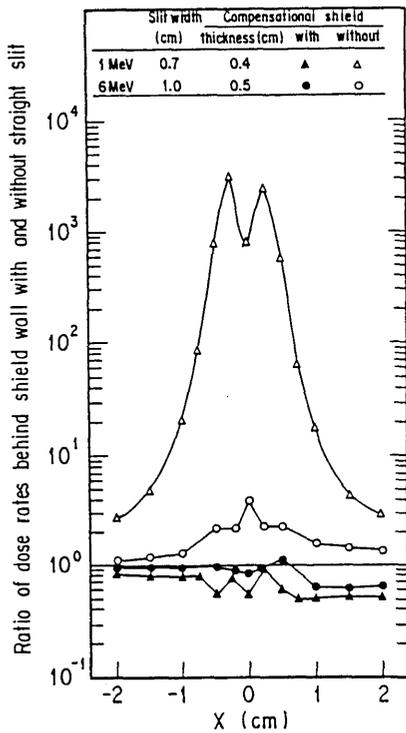
Fig.6.3(a)~(f) Ratio of dose rates behind shield wall with and without straight slit calculated by G33-GP code for mono energy gamma-ray source



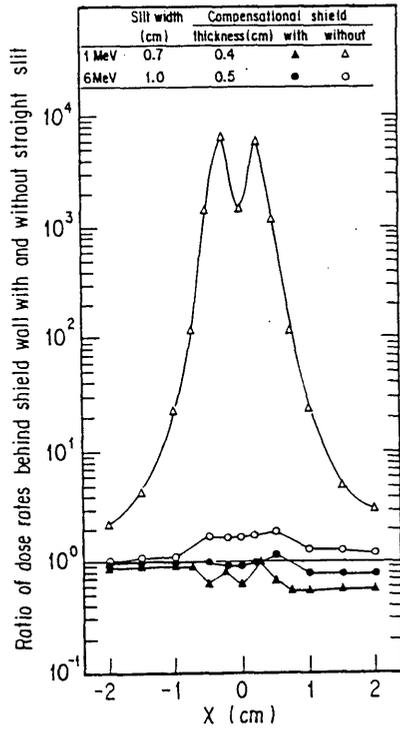
(c)  $T=100\text{ cm}, \theta=15^\circ$



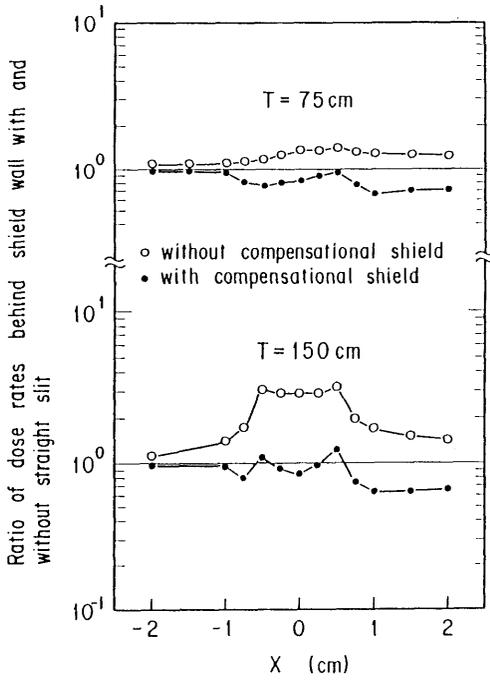
(d)  $T=100\text{ cm}, \theta=30^\circ$



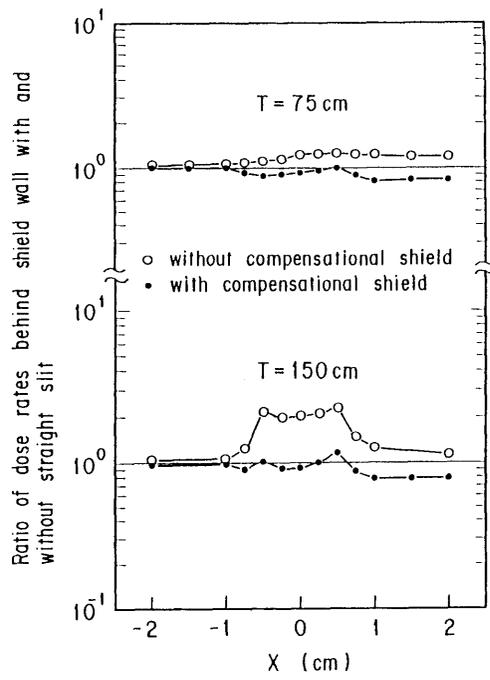
(e)  $T=150\text{ cm}, \theta=15^\circ$



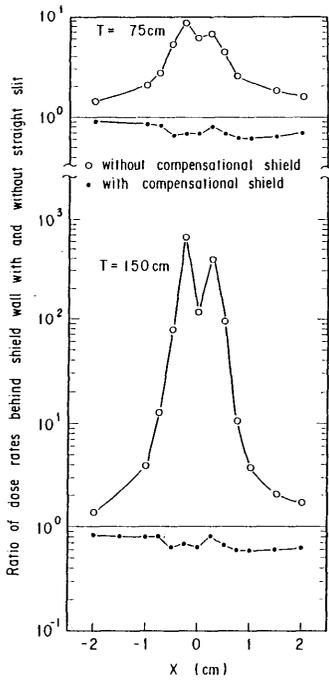
(f)  $T=150\text{ cm}, \theta=30^\circ$



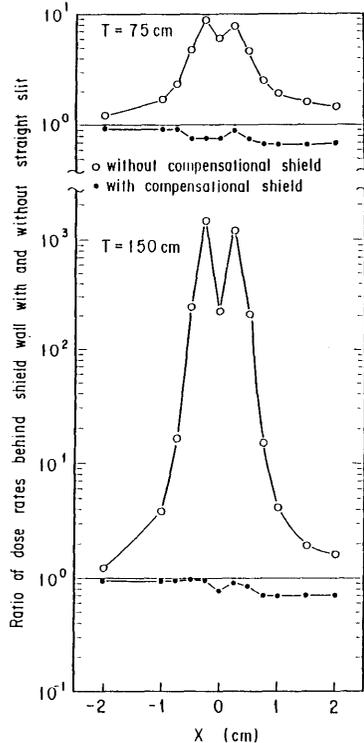
(g) JRR 4,  $\theta = 15^\circ$



(h) JRR 4,  $\theta = 30^\circ$



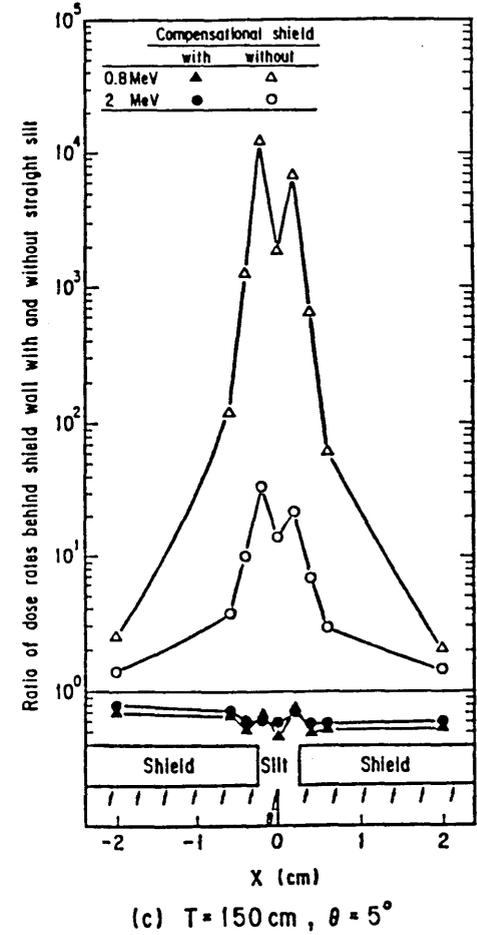
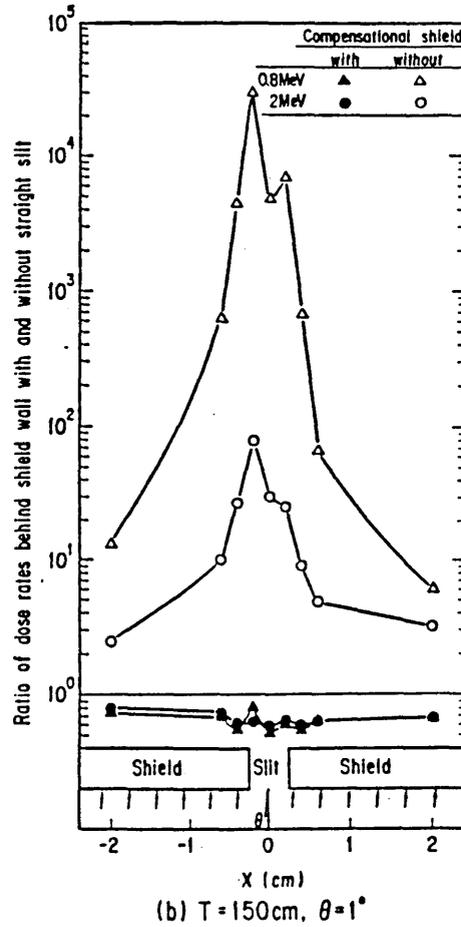
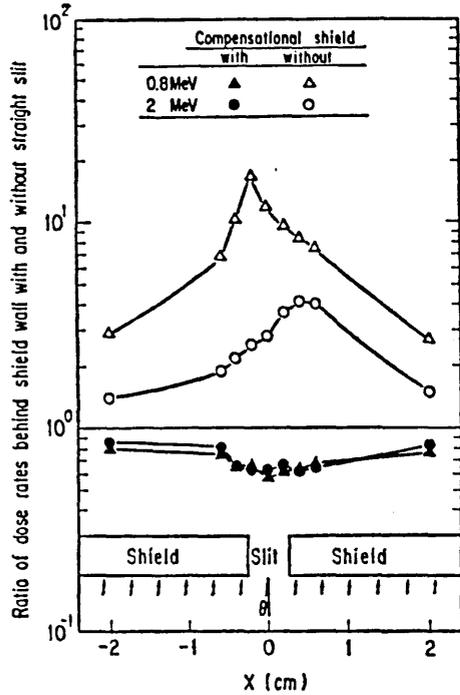
(i) Barnwell,  $\theta = 15^\circ$



(j) Barnwell,  $\theta = 30^\circ$

Fig.6.3 (g)-(j)

Ratio of dose rates behind shield wall with and without straight slit calculated by G33-GP code using gamma rays issuing from the experimental hole of JRR4 and from the PWR spent fuel in remote process cell of Barnwell reprocessing plant. Here, slit width  $\Psi=7\text{mm}$  and compensational shield thickness  $U=4\text{mm}$ .



The air gap width  $W$  of the straight slit is 0.5 cm, and the compensational shield thickness  $U$  is 0.3 cm.

Fig. 6.4 (a)~(c) Comparisons of G 33-GP calculational dose rate distributions behind shield wall with straight slit with and without compensational shield <sup>(21)</sup>

### 6.3 斜ダクト付き遮蔽壁

計算形状をFig.6.5に示す。Table3.5に示すアルベド法に基づく許容最大ダクト直径およびそれに近い直径についての遮蔽性能計算を、遮蔽壁厚 $T=75$ 、 $150$ cm、斜ダクトの角度 $\theta=15^\circ$ 、 $30^\circ$ について行い、結果をFig.6.6(a)~(d)に示す。計算は6.1に示した理由により、許容最大ダクト直径が $1$ cm以上のものを対象とした。計算点は遮蔽壁背面から $40$ cm離れた $X$ 軸上に設けた。線量率の比は最高 $1.3$ を示したが、大部分の計算点では $1$ 以下となった。

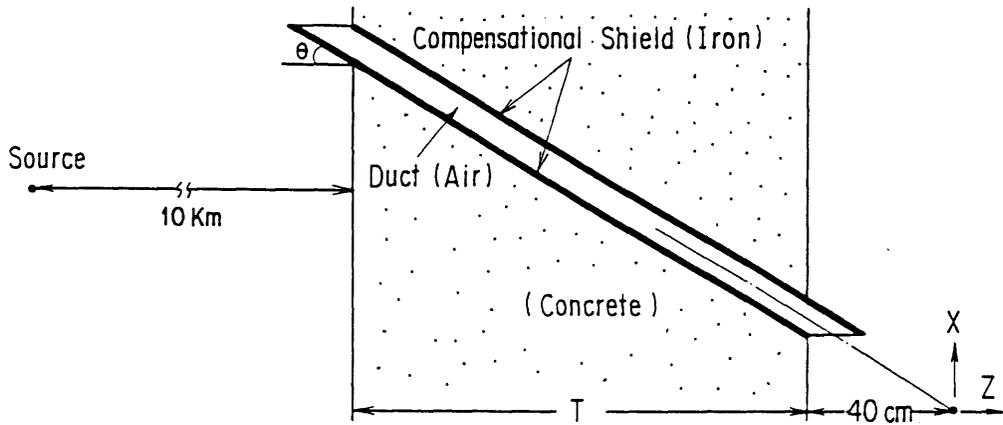
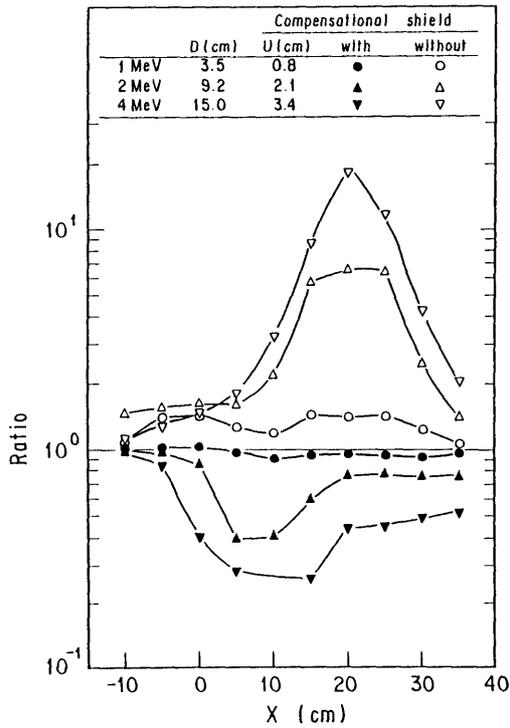
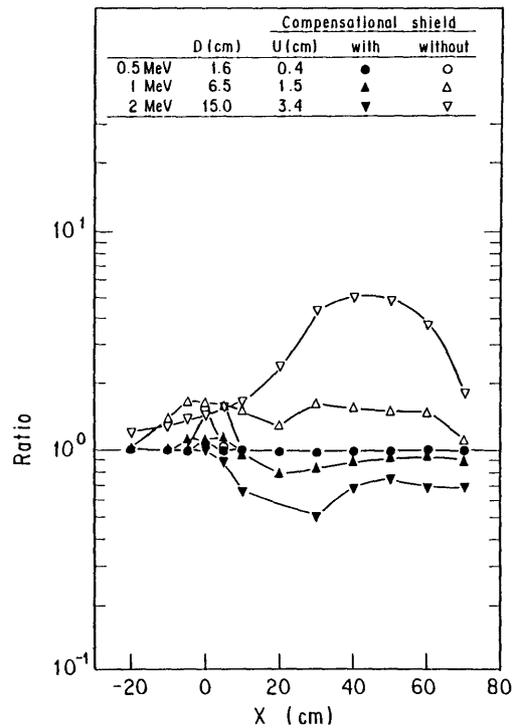


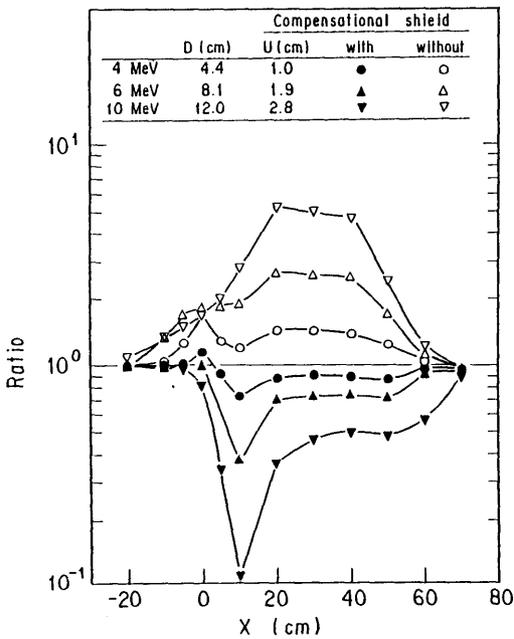
Fig.6.5 G33-GP calculational geometry of concrete wall with compensational shield for slant duct



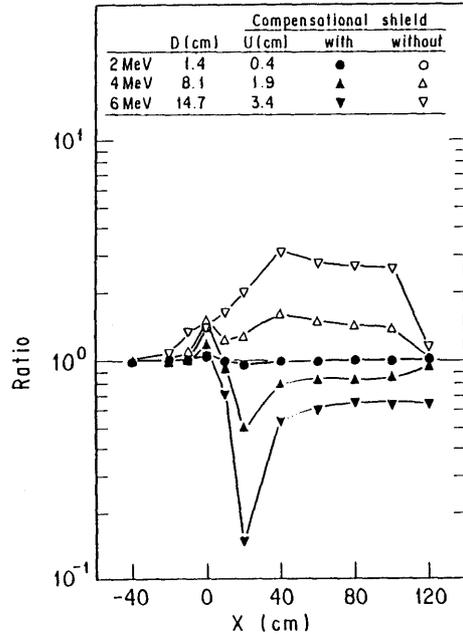
(a)  $T = 75 \text{ cm}, \theta = 15^\circ$



(b)  $T = 75 \text{ cm}, \theta = 30^\circ$



(c)  $T = 150 \text{ cm}, \theta = 15^\circ$



(d)  $T = 150 \text{ cm}, \theta = 30^\circ$

Fig.6.6(a)~(d) Ratio of dose rates behind shield wall with and without slant duct calculated by G33-GP code for mono energy gamma-ray source.

#### 6.4 斜スリット付き遮蔽壁

計算形状をFig.6.7に示す。Table3.7に示す許容最大スリット幅についての遮蔽性能計算を遮蔽壁厚 $T=150\text{cm}$ 、斜スリットの角度 $\theta=15^\circ$ 、 $30^\circ$ 、遮蔽壁に入射するガンマ線のエネルギー $E_0=0.5$ 、 $2$ 、 $6\text{MeV}$ について行い、結果をFig.6.8(a)、(b)に示す。計算点は遮蔽壁背面から $40\text{cm}$ 離れたX軸上に設けた。補償遮蔽体を有する斜スリット付き遮蔽壁とバルク遮蔽壁との線量率の比は $0.7\sim 1.0$ の間に分布した。

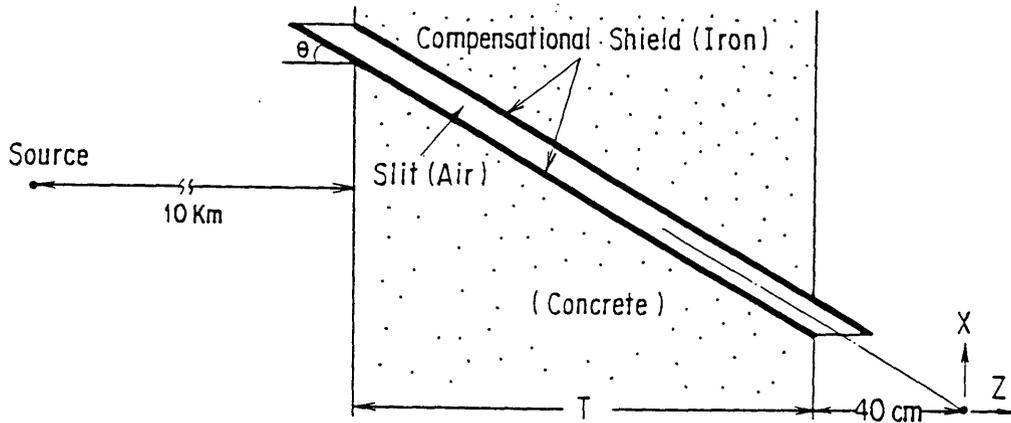
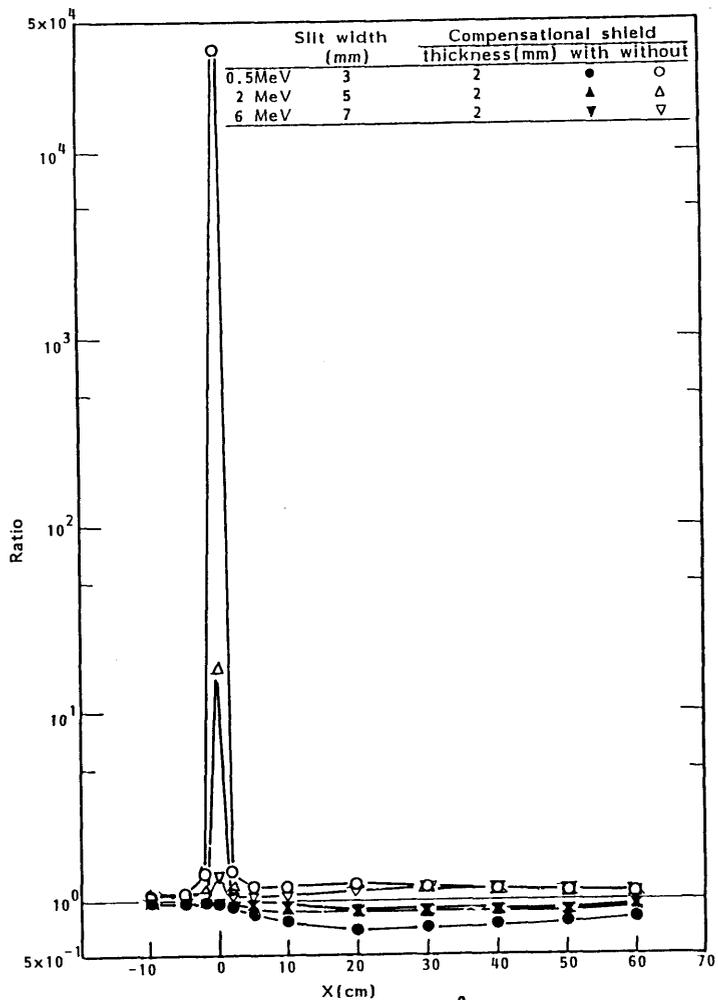
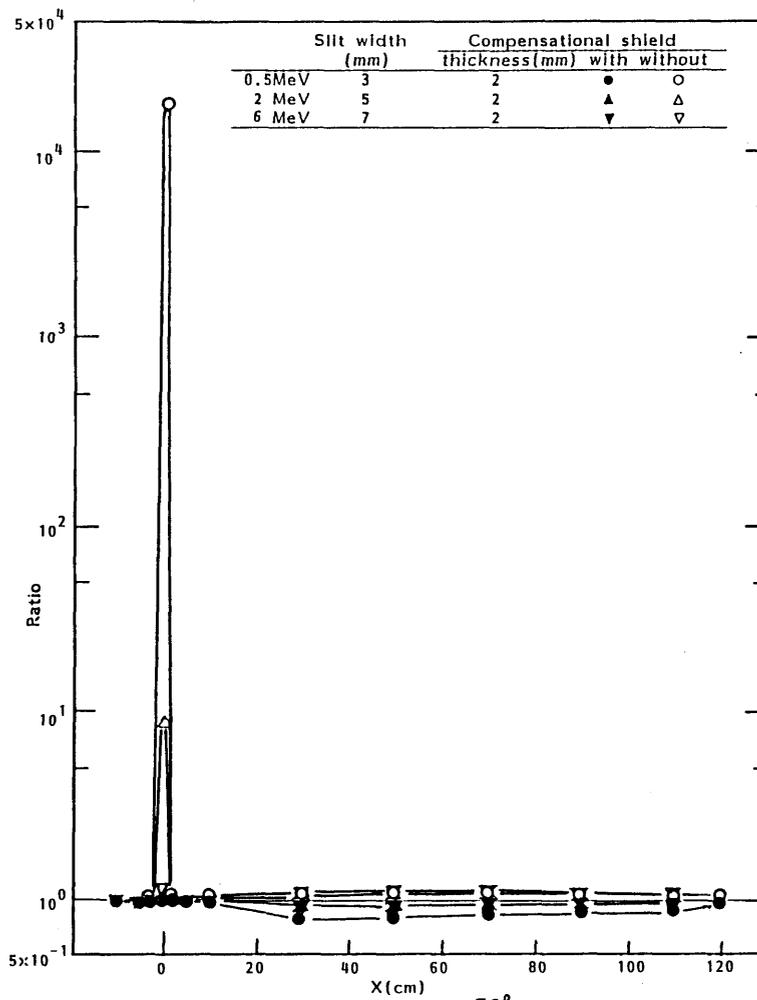


Fig.6.7 G33-GP calculational geometry of concrete wall with compensational shield for slant slit.



(a)  $T=150\text{cm}, \theta=15^\circ$



(b)  $T=150\text{cm}, \theta=30^\circ$

Fig.6.8(a), (b) Ratio of dose rates behind shield wall with and without slant slit calculated by G33-GP code for mono energy gamma-ray source.

### 6.5 オフセットスリット付き遮蔽壁・段付き円柱プラグ付き遮蔽壁

計算形状をオフセットスリット付き遮蔽壁についてFig.6.9に示す。計算は、間隙幅  $W = 3 \text{ cm}$ 、遮蔽壁厚  $T = 75, 150 \text{ cm}$ 、入射エネルギー  $E_0 = 0.8, 2 \text{ MeV}$ 、段付き円柱プラグ付き遮蔽壁のプラグ直径  $D_1 = 50 \text{ cm}$ 、ガンマ線ビームの入射角を  $T = 75 \text{ cm}$  の場合  $\theta = 0^\circ$  と  $-10^\circ$ 、 $T = 150 \text{ cm}$  の場合  $\theta = 0^\circ$  と  $-8^\circ$  として行なった<sup>(2)</sup>。ここで  $\theta = -10^\circ$  と  $-8^\circ$  は、それぞれの遮蔽壁厚において、壁前面の間隙入口と壁背面の間隙出口を結ぶ線と遮蔽壁の法線とのなす角度である。Fig.6.10(a)~(d)にオフセットスリット付き遮蔽壁における計算結果を示し、Fig.6.11(a)~(d)に段付き円柱プラグ付き遮蔽壁の結果を示す。これらの図から明らかなように、補償遮蔽体付き遮蔽壁の遮蔽性能はバルク遮蔽壁のそれより優る。しかし、線量率がバルク遮蔽壁の値の1/10以下となる箇所もあり、補償遮蔽体の大きさは過大であると言える。この原因として、第3章で求めた(3.8)式  $\bar{\mu}_{Fe} = 0.94 \frac{\bar{\mu}_{con}}{\rho_{con}} \rho_{Fe}$  は

鉄、コンクリートとも点等方線源の再生係数を用いていることが考えられる。即ち、本形状では、線源側スリット(スリットA)の出口部に設けた補償遮蔽体Aには狭い間隙を透過したガンマ線が主として入射し、補償遮蔽体Bを透過し検出器側スリット(スリットB)に入射するガンマ線は主としてスリットに平行なものがスリットB出口に到達するため、点等方線源の再生係数は過大であると考えられる。補償遮蔽体A、Bの厚さ  $U_1$  をより適切にするため、遮蔽壁厚  $T = 150 \text{ cm}$ 、間隔幅  $W = 5 \text{ cm}$  のオフセットスリット付き遮蔽壁にガンマ線ビームを垂直に入射させ、スリットA透過後に補償遮蔽体Aに入射するガンマ線の鉄中での線量率をG33-GPコードで計算し、コンクリート厚75~150cmに相当するmfpについて、補償遮蔽体Aの平均減弱係数  $\bar{\mu}_{Fe, U_1}$  と再生係数を求めた。鉄の再生係数にこの値を用い、コンクリートの再生係数に第3章と同じく点等方線源に対する値を用い、ガンマ線の壁入射エネルギー0.5~10MeVについて、コンクリート厚75~150cmに相当する平均自由行程での  $\frac{\bar{\mu}_{Fe, U_1}}{\rho_{Fe}} / \frac{\bar{\mu}_{con}}{\rho_{con}}$  を(3.7)式から求め、Fig.6.12に示す。上記の入射エネルギーおよび平均自由行程の範囲において、 $\frac{\bar{\mu}_{Fe, U_1}}{\rho_{Fe}} / \frac{\bar{\mu}_{con}}{\rho_{con}}$  は1.03~1.36の範囲にある。

本形状では、補償遮蔽体A、Bの厚さ  $U_1$  の決定にFig.6.12から求められる  $\bar{\mu}_{Fe, U_1}$  の最小値

$$\bar{\mu}_{Fe, U_1} = 1.03 \frac{\bar{\mu}_{con}}{\rho_{con}} \rho_{Fe} \quad (6.1)$$

を用いることにする。

また、Fig.3.9の③、④方向に向かうガンマ線の減衰は①の方向よりも急であると考えられる。補償遮蔽体A、Bの横方向の寸法  $U_3$ 、 $U_4$  は(3.37)式から  $\theta_2 = \cos^{-1} \frac{1}{\sqrt{2}}$  方向で最大値となるので、この方向におけるガンマ線量率の減衰を上記  $U_1$  を求めたときと同じ遮蔽壁形状にてG33-GPコードで計算し、平均減弱係数  $\bar{\mu}_{Fe, U_{3,4}}$  を求め、

$$\bar{\mu}_{\text{Fe}, U_{3,4}} = 1.60 \frac{\bar{\mu}_{\text{con}}}{\rho_{\text{con}}} \rho_{\text{Fe}} \quad (6.2)$$

とする。

したがって、

$$U_1 \geq \frac{\rho_{\text{con}} T}{2(1.03 \rho_{\text{Fe}} - \rho_{\text{con}})} \quad (6.3)$$

$$U_2 \geq \frac{\rho_{\text{con}} W}{0.94 \rho_{\text{Fe}} - \rho_{\text{con}}} \quad (6.4)$$

$$U_3 = U_4 \geq \frac{0.23 \rho_{\text{con}} T}{1.60 \rho_{\text{Fe}} - \rho_{\text{con}}} \quad (6.5)$$

となる。

Fig.6.13(a)、(b)に、間隙幅Wを許容最大幅である5cmとしたオフセットスリット付き遮蔽壁に(6.3)~(6.5)式で求められる補償遮蔽体を設けた形状について、入射ガンマ線エネルギー $E_0=0.5、1、2、6、10\text{MeV}$ 、遮蔽壁厚 $T=75、150\text{cm}$ 、入射角 $\theta=0^\circ$ とした計算の結果を示す。同図から明らかなように、補償遮蔽体付き遮蔽壁とバルク遮蔽壁との線量率の比は、入射エネルギー0.5MeVの一部で1.1となり、6、10MeVの1部で0.1以下となる箇所が見られるが、概ね0.1~1.0の間に分布し、補償遮蔽体付き遮蔽壁の遮蔽性能はバルク遮蔽壁と同等あるいは優れていると言える。

Fig.6.14(a)~(c)には、段付き円柱プラグ付き遮蔽壁について、プラグ直径 $D_1=30、50\text{cm}$ とし、オフセットスリット付き遮蔽壁の場合と同じスリット幅、入射エネルギーおよび遮蔽壁厚とした計算の結果を示す。線量率の比はオフセットスリット付き遮蔽壁の場合と同様に概ね0.1~1.0の間に分布している。

もし、入射エネルギーが明らかな場合は、より適切な平均減弱係数を用いることも可能である。例として、入射エネルギーの最低値を6MeVとした場合のオフセットスリット付き遮蔽壁の線量率比をFig.6.15に示す。計算は、入射ガンマ線エネルギー $E_0=6、10\text{MeV}$ 、遮蔽壁厚 $T=150\text{cm}$ 、間隙幅 $W=5\text{cm}$ 、入射角 $\theta=0^\circ$ とし、 $U_1$ はFig.6.12の6MeVの値から、 $U_1 \geq \rho_{\text{con}} T / 2 (1.17 \rho_{\text{Fe}} - \rho_{\text{con}})$ として $U_1=25\text{cm}$ 、 $U_2$ はFig.3.1の6MeVの値から $U_2 \geq \rho_{\text{con}} W / (1.11 \rho_{\text{Fe}} - \rho_{\text{con}})$ として $U_2=1.79\text{cm}$ 、 $U_3$ と $U_4$ については6MeVに対するこれらの値が $U_2$ よりも小さくなったが、Fig.3.15のオフセットスリット構造を参考にして、 $U_3=U_2=1.79\text{cm}$ 、 $U_4=2U_2=3.58\text{cm}$ とした。Fig.6.15から、入射エネルギーに依存した補償遮蔽寸法を有する遮蔽壁の遮蔽性能は入射エネルギーに依存しない補償遮蔽体形状の場合よりもバルク遮蔽壁での値に近くなることがわかる。

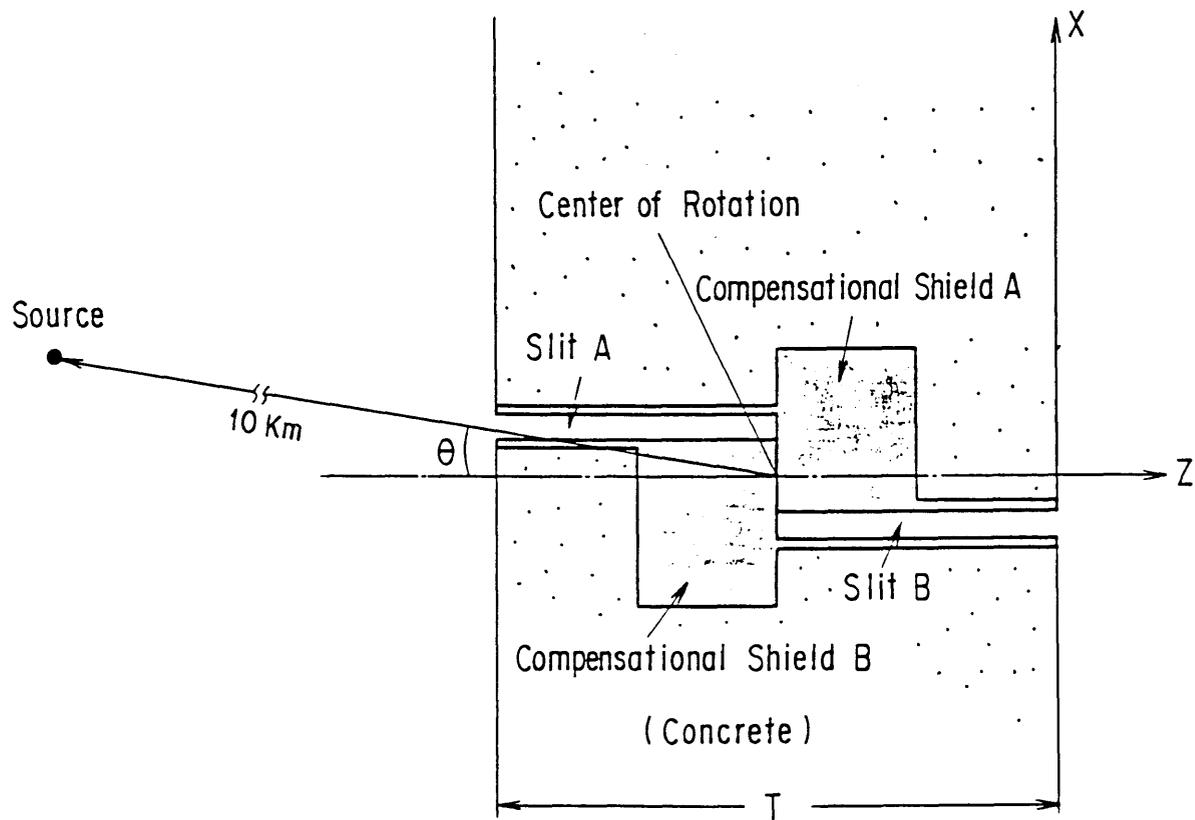
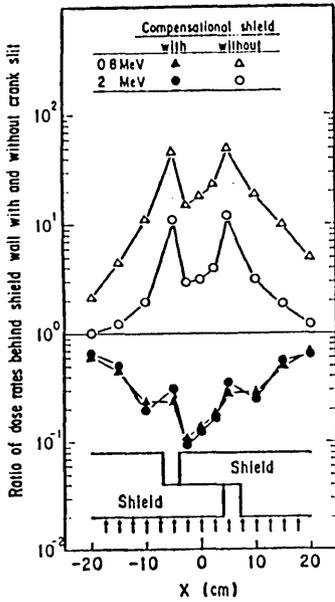
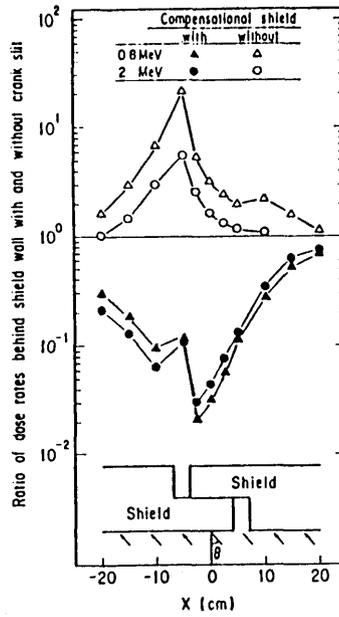


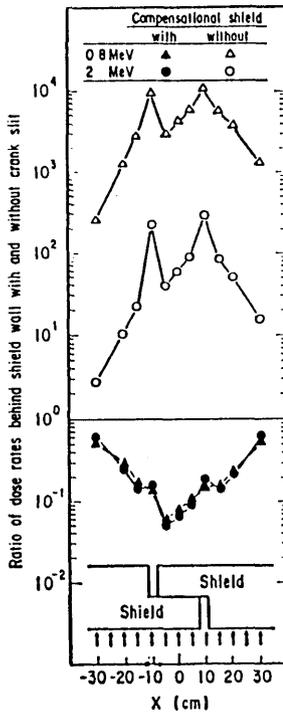
Fig.6.9 G33-GP calculational geometry of concrete wall with compensational shield for offset slit.



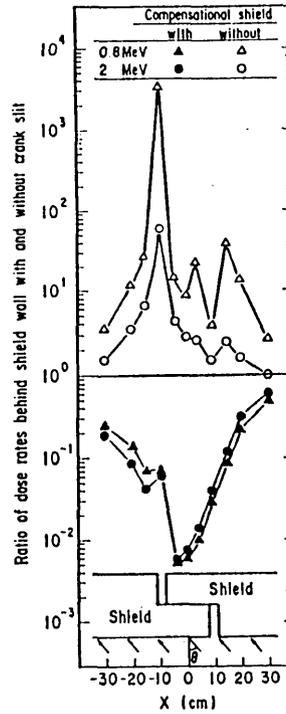
(a)  $T = 75 \text{ cm}, \theta = 0^\circ$



(b)  $T = 75 \text{ cm}, \theta = -10^\circ$



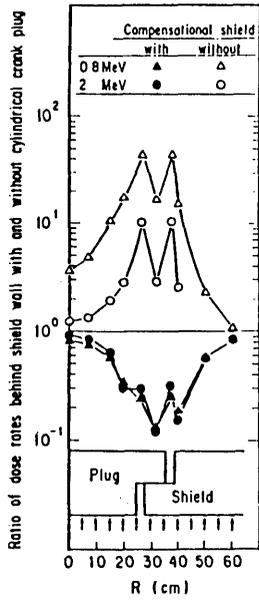
(c)  $T = 150 \text{ cm}, \theta = 0^\circ$



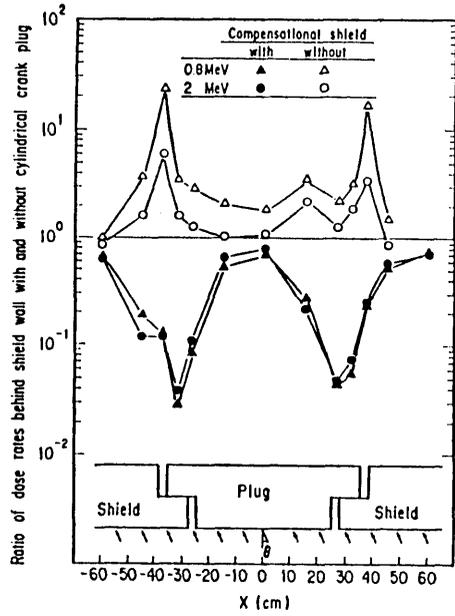
(d)  $T = 150 \text{ cm}, \theta = -8^\circ$

The air gap width  $W=3\text{cm}$ , and the dimensions of the compensational shield are  $U_1=17\text{cm}$ ,  $U_2=1.4\text{cm}$  and  $U_3=U_4=7.8\text{cm}$  for the concrete wall thickness  $T=75\text{cm}$ , and  $U_1=34\text{cm}$ ,  $U_2=1.4\text{cm}$  and  $U_3=U_4=15.6\text{cm}$  for  $T=150\text{cm}$ .

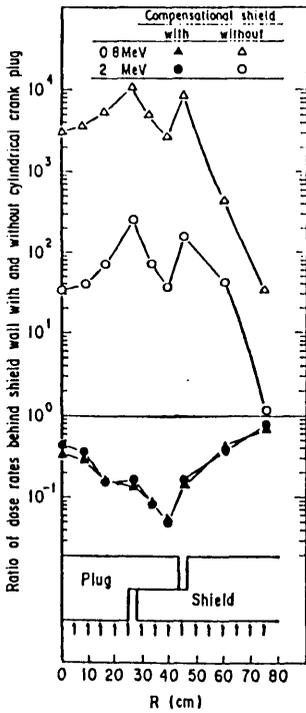
Fig.6.10(a)~(d) Ratio of dose rates behind shield wall with and without offset slit calculated by G33-GP code for mono energy gamma-ray source.<sup>(21)</sup>



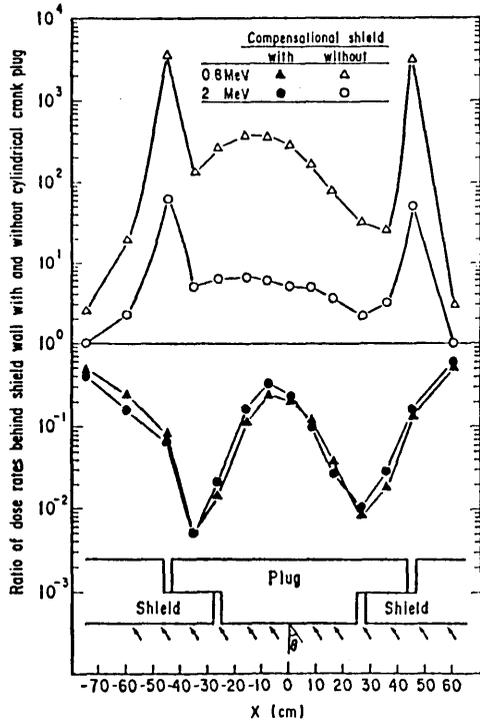
(a)  $T = 75 \text{ cm}, \theta = 0^\circ$



(b)  $T = 75 \text{ cm}, \theta = -10^\circ$



(c)  $T = 150 \text{ cm}, \theta = 0^\circ$



(d)  $T = 150 \text{ cm}, \theta = -8^\circ$

The diameters  $D_1$  and  $D_2$  of the crank plug are 50 and 87.2 cm, respectively, and the dimensions of the compensational shield are  $U_1=17 \text{ cm}, U_2=1.4 \text{ cm}$  and  $U_3=U_4=7.8 \text{ cm}$  for the concrete wall thickness  $T=75 \text{ cm}$ , and  $U_1=34 \text{ cm}, U_2=1.4 \text{ cm}$  and  $U_3=U_4=15.6 \text{ cm}$  for  $T=150 \text{ cm}$ .

Fig.6.11 Ratio of dose rates behind shield wall with and without cylindrical offset plug calculated by G33-GP code for mono energy gamma-ray source. (21)

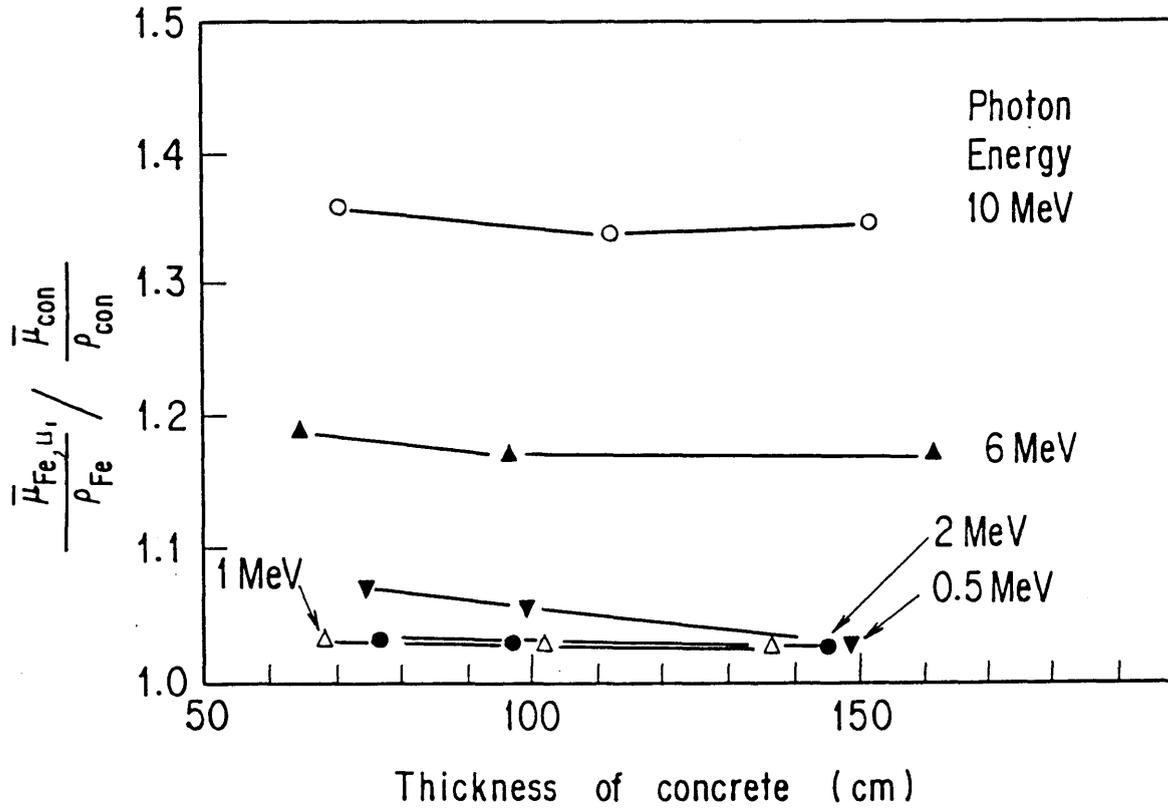


Fig.6.12 Ratio of  $\bar{\mu}_{Fe,U_1} / \rho_{Fe}$  to  $\bar{\mu}_{con} / \rho_{con}$  as a function of concrete thickness for shield wall with offset slit and cylindrical offset plug.

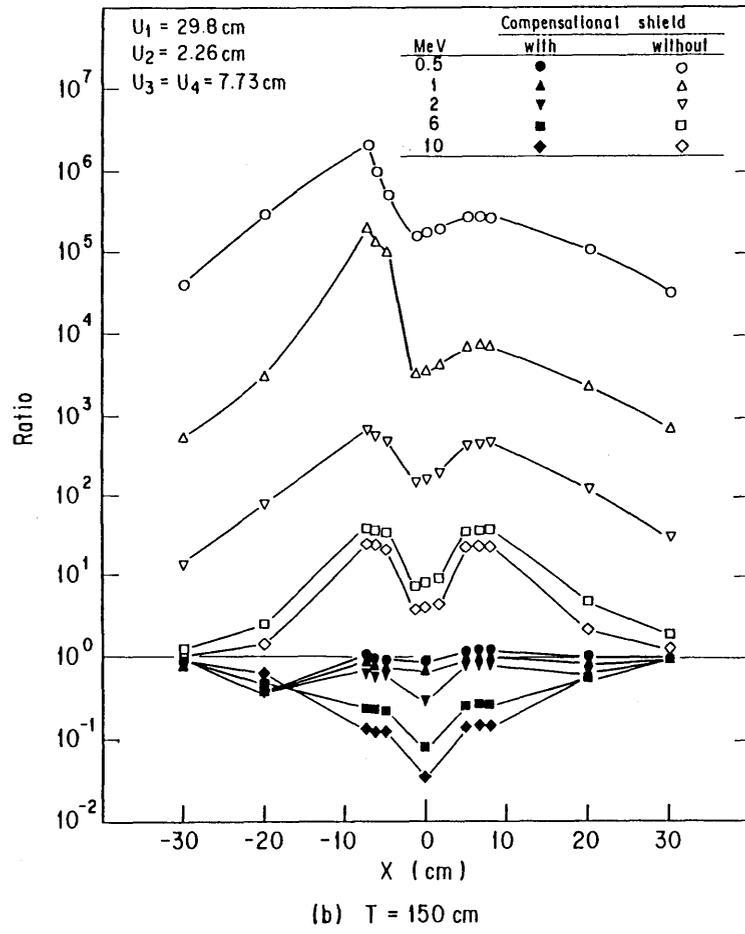
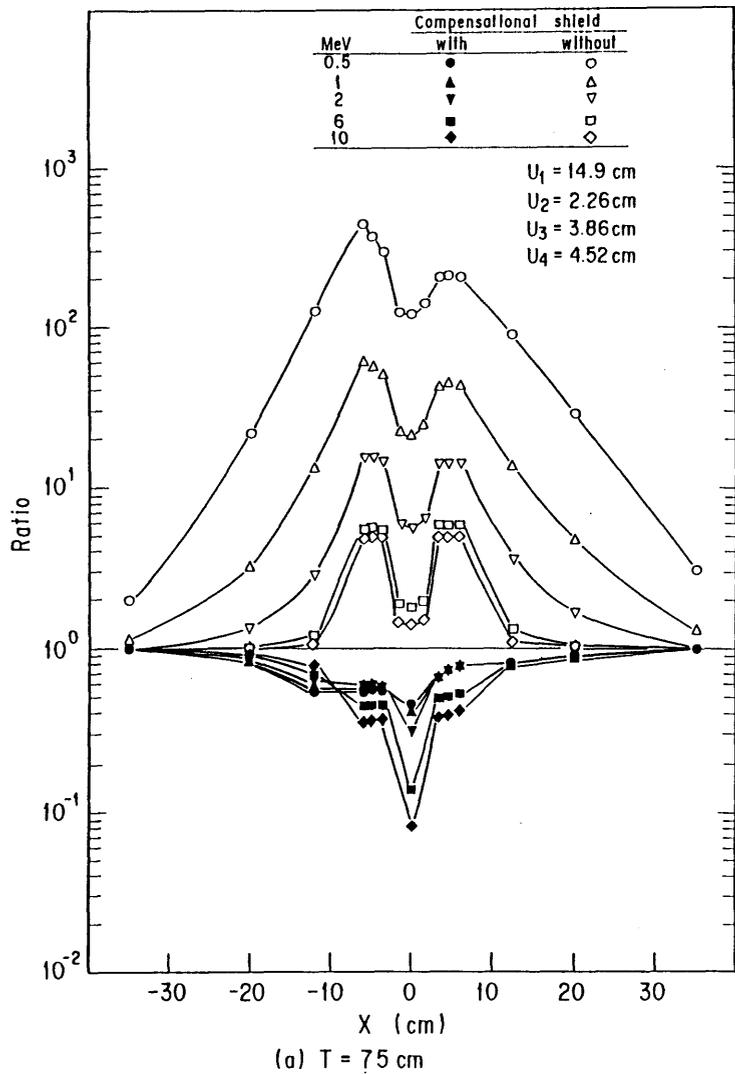
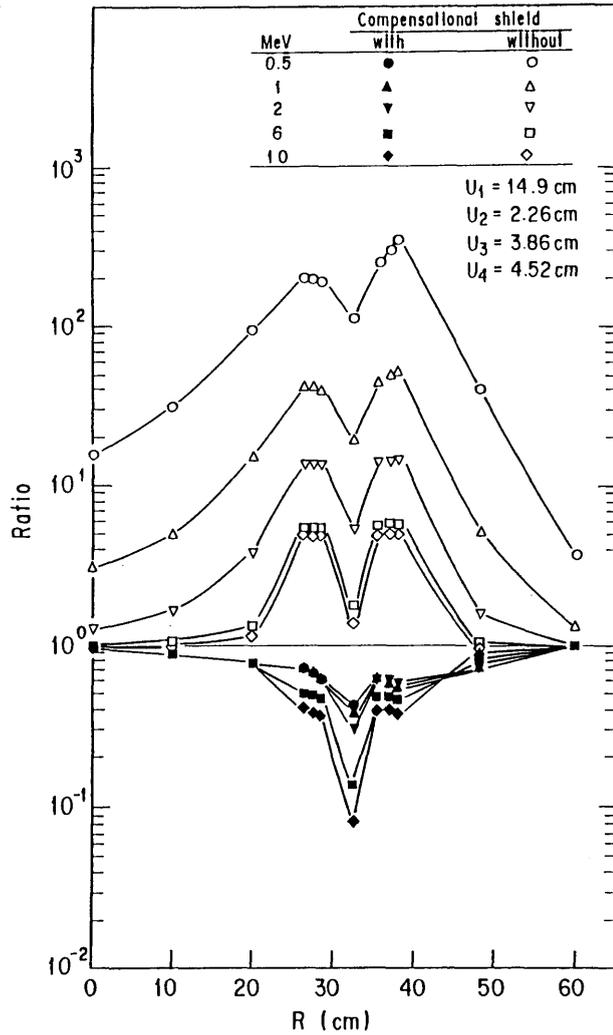


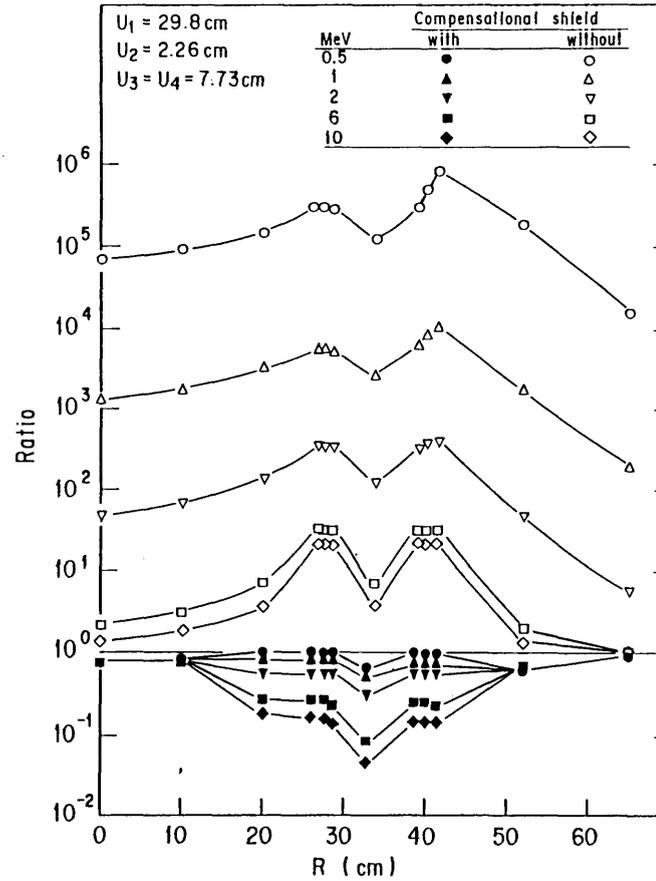
Fig.6.13(a), (b)

Ratio of dose rates behind shield wall with and without offset slit calculated by G33-GP code for mono energy gamma-ray source. Here,  $W=5$ cm and  $\theta=0^\circ$ .



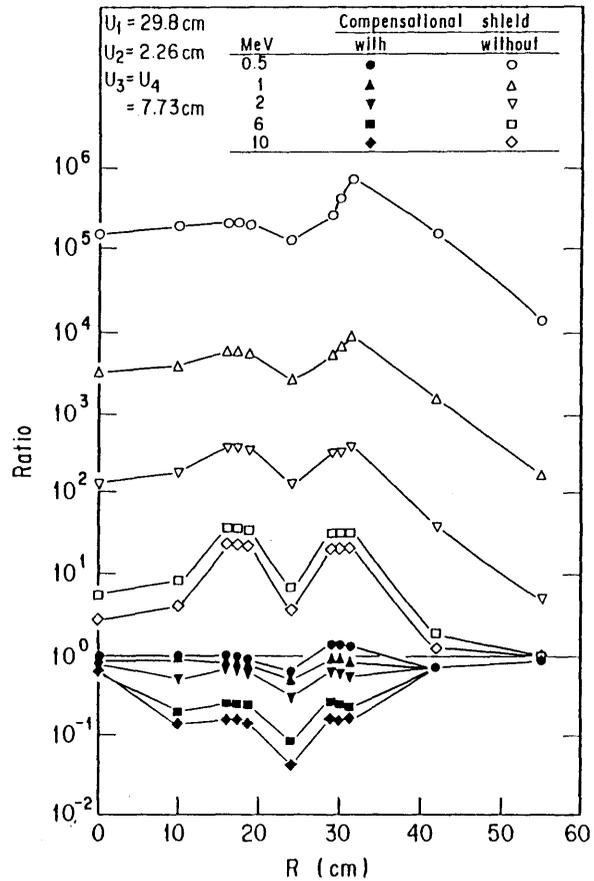
(a)  $T = 75 \text{ cm}$ ,  $D_1 = 50 \text{ cm}$  and  $D_2 = 69 \text{ cm}$

Fig.6.14  
(a)~(c)



(b)  $T = 150 \text{ cm}$ ,  $D_1 = 50 \text{ cm}$  and  $D_2 = 75.5 \text{ cm}$

Ratio of dose rates behind shield wall with and without cylindrical offset plug calculated by G33-GP code for mono energy gamma-ray source. Here,  $W=5 \text{ cm}$  and  $\theta=0^\circ$ .



(c)  $T = 150$  cm,  $D_1 = 30$  cm and  $D_2 = 55$  cm

Fig. 6.14 (Continued)

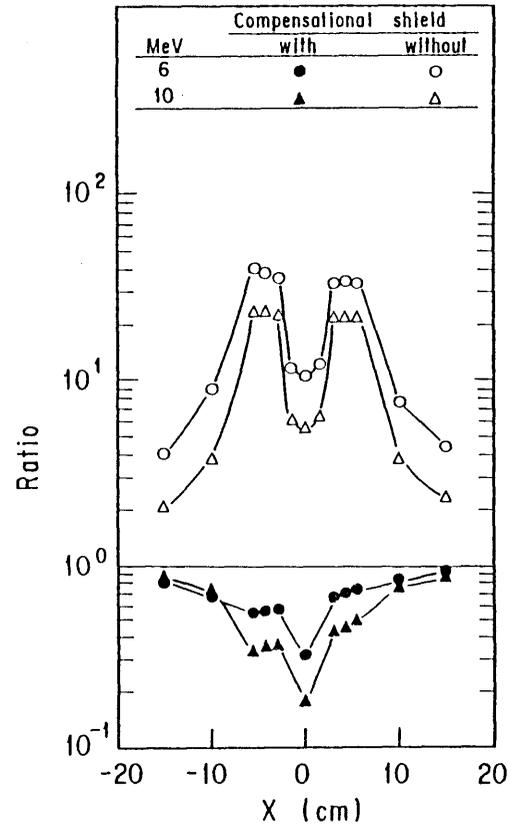


Fig. 6.15 Ratio of dose rates behind shield wall with and without offset slit calculated by G33-GP code for mono energy gamma-ray source. Here,  $T=150$  cm,  $W=5$  cm,  $\theta=0^\circ$ ,  $U_1=25$  cm,  $U_2=U_3=1.79$  cm and  $U_4=3.58$  cm.

### 第7章 1回屈曲ダクト付き遮蔽壁における補償遮蔽体の効果

1回屈曲ダクト付きコンクリート遮蔽壁のダクト周囲に鉄製遮蔽体(以下、補償遮蔽体)を設けることによる遮蔽性能の向上を原子炉を用いた実験によって明らかにする。実験はJRR4 散乱実験室にて行なった。実験配置をFig.7.1に示す。1回屈曲ダクトの入口中心を実験孔出口から550cm離れた実験孔中心軸上の点に固定し、この点を座標軸の原点として実験孔からコンクリート遮蔽壁に向って左方向をX軸の正方向、上方向をY軸の正方向、ダクトの第1脚中心軸に沿った線をZ軸で表示する。遮蔽壁は原点を通る垂直線を中心軸として回転させ、実験孔の中心線とZ軸とのなす角度をFig.7.2に示すように $0^\circ$ 、 $\pm 20^\circ$ の3種類とした。実験はコリメータのある配置とない配置について行い、コリメータのある配置をNarrow beam 実験、コリメータのない配置をBroad beam 実験と呼ぶ。Fig.7.3にNarrow beam 実験とBroad beam 実験の遮蔽壁前面における線量率分布を示す。ダクトの断面は20cm×20cmの矩形で、第1、2脚の長さ、遮蔽壁厚、補償遮蔽体の寸法等はFig.7.2に示す通りである。補償遮蔽体は同図に示すようにA、B、C、Dのブロックに分けた。各補償遮蔽体の効果は第2脚内の線量率を比較することにより行うとし、次に示す6種類の補償遮蔽体配置および補償遮蔽体のない形状について、第2脚ダクト中心軸上の照射線量率をCaSO<sub>4</sub>熱蛍光線量計(松下電器(株)製UD200S)を用いて測定した。

(1)形状A:

Aブロック:鉄

B、C、Dブロック:コンクリート

(2)形状B:

Bブロック:鉄

A、C、Dブロック:コンクリート

(3)形状C:

Cブロック:鉄

A、B、Dブロック:コンクリート

(4)形状D:

Dブロック:鉄

A、B、Cブロック:コンクリート

(5)形状BC:

B、Cブロック:鉄

A、Dブロック:コンクリート

(6)形状ABCD:

A、B、C、Dブロック:鉄

(7)形状N:

A、B、C、Dブロック:コンクリート

Fig.7.3に第2脚内ダクト中心軸上の $X=45$ 、 $60$ 、 $75$ cmにおける線量率分布を示す。

Table7.1には第2脚内、 $X=75$ cm、 $Y=0$ cm、 $Z=75$ cmでの補償遮蔽付き遮蔽壁と補償遮蔽体なし遮蔽壁における線量率の比を示す。

各補償遮蔽体の遮蔽効果は次の通りである。

## 1) Narrow beam 実験

- (1) 形状Aは $\pm 20^\circ$  配置において遮蔽性能の向上が見られる。しかし、 $0^\circ$  配置における効果は僅かである。
- (2) 形状Bでは遮蔽性能は低下する。ただし、遮蔽壁背面に透過するガンマ線に対しては第4章のオフセットスリット付き遮蔽壁の実験で明らかなように有効である。
- (3) 形状Cは $0^\circ$ 、 $\pm 20^\circ$  の全ての配置において遮蔽性能の向上が見られる。
- (4) 形状Dは $0^\circ$ 、 $-20^\circ$  配置に対して有効である。
- (5) 形状A B C Dは $\pm 20^\circ$  配置に対して有効である。

## 2) Broad beam 実験

ダクトまわりの遮蔽体透過成分が第2脚内の線量率に大きく寄与し、形状A B C Dと形状Dでは全ての角度配置で補償遮蔽体の効果がNarrow beam 実験に比べて顕著に現われている。

これらの実験結果から、1回屈曲ダクト周囲、特に屈曲部のインナーコーナー部に補償遮蔽体を設けることにより遮蔽性能を効果的に向上させることができることが明らかになった。

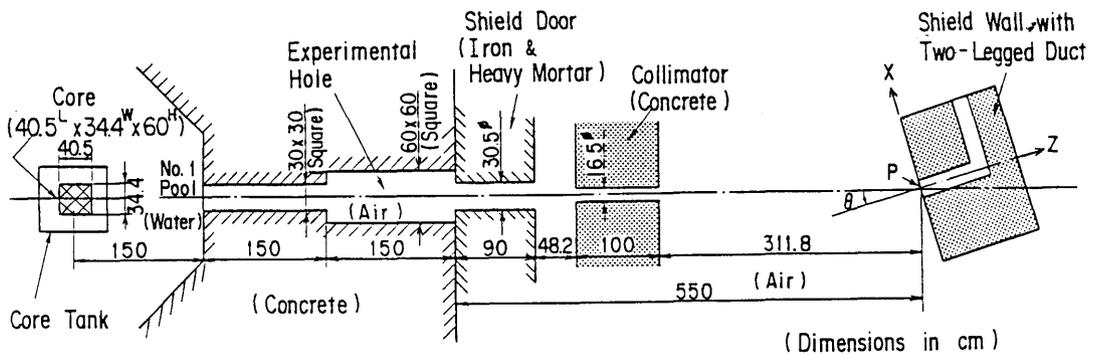
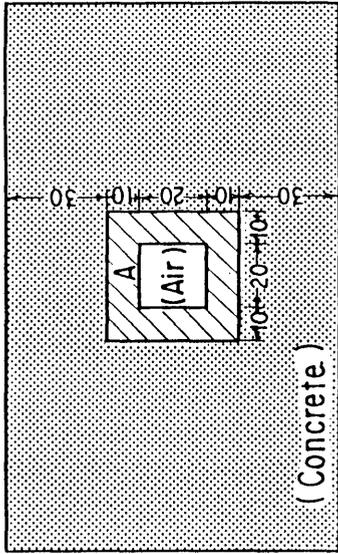
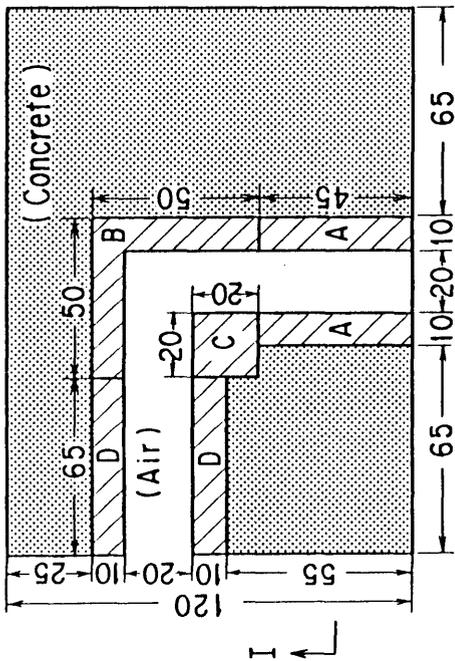


Fig.7.1 Experimental arrangement for gamma-ray streaming through two-legged duct

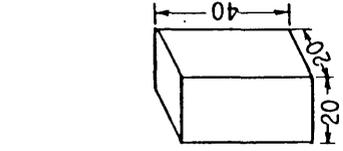


(Section I - I')

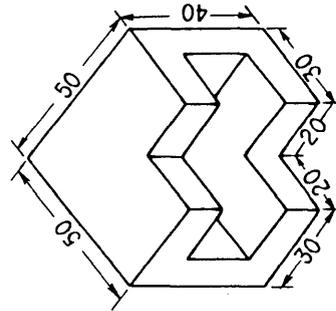
(Dimensions in cm)



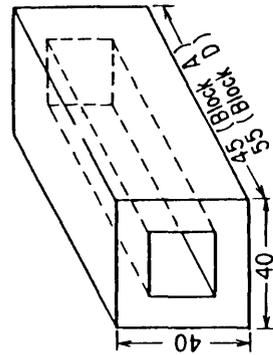
(Plan View)



(Block C)



(Block B)



(Blocks A and D)

Fig.7.2 Shield blocks around two-legged duct

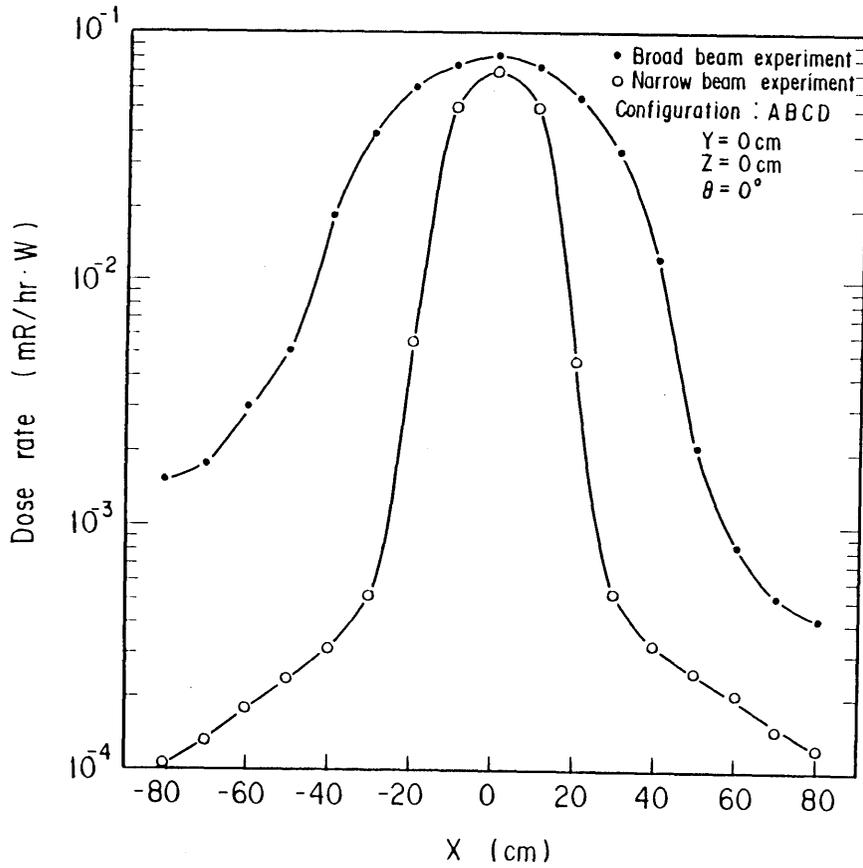


Fig.7.3 Dose rate distribution in front surface of shield wall with two-legged duct

Table7.1 Ratio of dose rate in second leg at X=75cm, Y=0cm, Z=75cm with and without compensational shield

1. Narrow beam experiment

$\theta$	Configuration					
	A	B	C	D	BC	ABCD
0°	0.946	1.45	0.881	0.832	1.43	1.42
20°	0.679	1.02	0.906	0.933	0.910	0.516
-20°	0.477	0.987	0.338	0.645	0.388	0.131

2. Broad beam experiment

$\theta$	Configuration			
	A	D	BC	ABCD
0°	0.885	0.659	1.07	0.839
20°	0.612	0.839	0.940	0.355
-20°	0.789	0.293	0.814	0.167

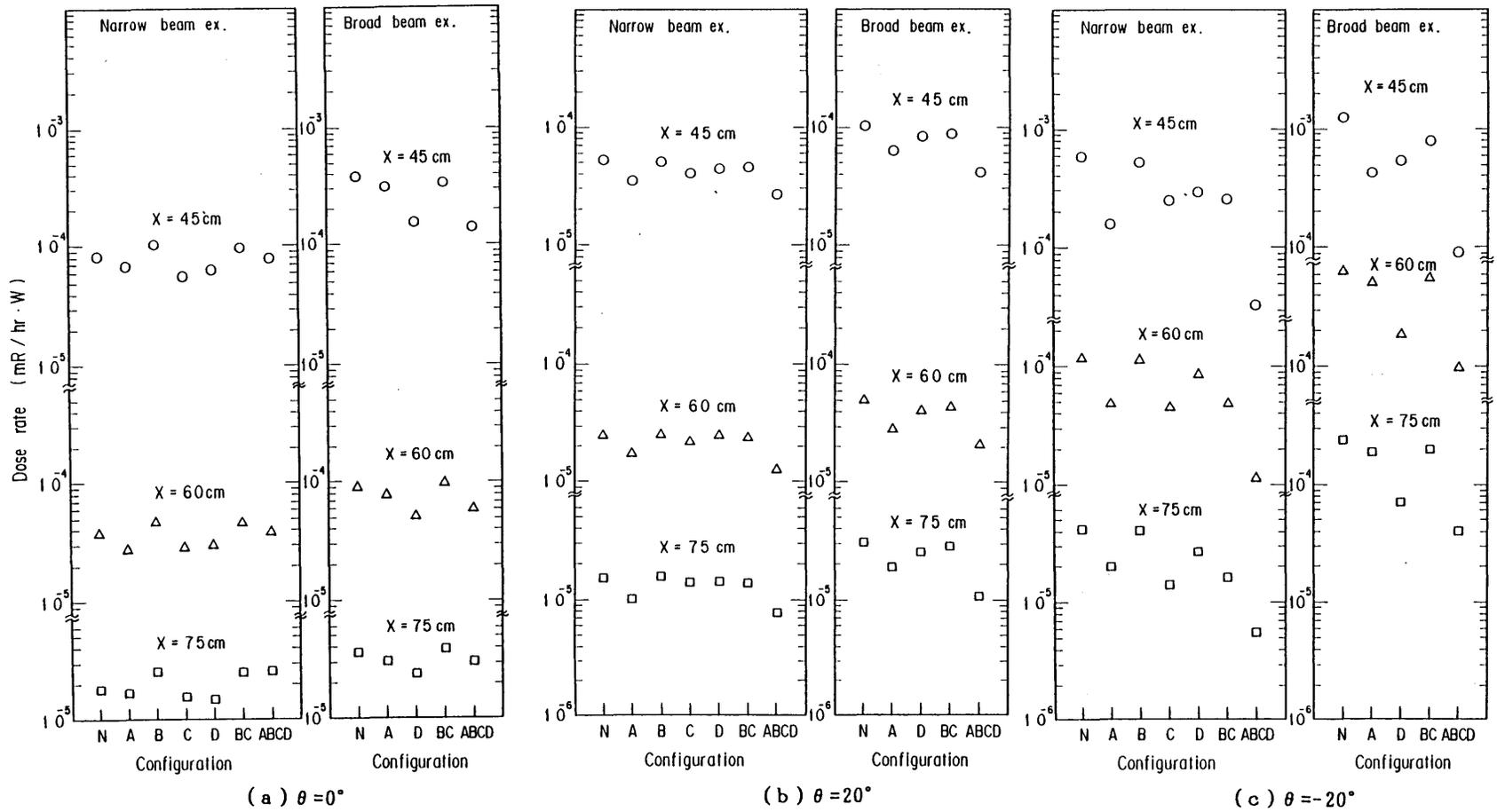


Fig.7.4(a)~(c) Dose rate in second leg

### 第8章 他の補償遮蔽形状例<sup>(30)</sup>

補償遮蔽は前述以外の形状も考えられる。本章では直ダクト付き遮蔽壁にガンマ線が一定角度で入射する場合の補償遮蔽をFig.8.1に示すように遮蔽壁の前面部と背面部に対称に設ける設計手法を示し、原子炉からのガンマ線を用いた実験により遮蔽性能を確認する。

#### (1) 設計手法

遮蔽壁厚を $T$ 、ダクト直径を $d$ 、遮蔽壁へのガンマ線入射角を $\theta$ 、補償遮蔽体の厚さを $U$ として、Fig.8.1ライン $L_3$ に沿ったガンマ線の減衰を、 $\bar{\mu}_{con}$ と $\bar{\mu}_{Fe}$ およびガンマ線の

コンクリートと鉄の透過距離  $\left( \frac{T}{\cos \theta} - \frac{d}{\sin \theta} - \frac{U}{\cos \theta} \right)$  と  $\frac{U}{\cos \theta}$  とを用いて、

$$\exp \left\{ -\bar{\mu}_{con} \left( \frac{T}{\cos \theta} - \frac{d}{\sin \theta} - \frac{U}{\cos \theta} \right) - \bar{\mu}_{Fe} \frac{U}{\cos \theta} \right\}$$

で表わす。この値がバルク遮蔽壁に垂直入射するガンマ線の減衰に等しいとして(8.1)式を満足するように厚さ $U$ を定める。すなわち、

$$e^{-\bar{\mu}_{con} T} = e^{-\left\{ \bar{\mu}_{con} \left( \frac{T}{\cos \theta} - \frac{d}{\sin \theta} - \frac{U}{\cos \theta} \right) + \bar{\mu}_{Fe} \frac{U}{\cos \theta} \right\}} \quad (8.1)$$

(8.1)式は、第3章に示した手法を用いて、コンクリートと鉄の密度 $\rho_{con}$ 、 $\rho_{Fe}$ 、遮蔽壁厚 $T$ 、ダクト付き遮蔽壁に入射するガンマ線の入射角 $\theta$ で表わすと、

$$U = \frac{\rho_{con} \{ d / \tan \theta - (1 - \cos \theta) T \}}{0.94 \rho_{Fe} - \rho_{con}} \quad (8.2)$$

となる。

次に、補償遮蔽形状を、ダクトを横切るガンマ線はすべて厚さ $U$ の補償遮蔽体を透過するとして定める。本設計では、補償遮蔽体をFig.8.1に示すように、線源側の遮蔽壁面部(以下、遮蔽壁前面部)と、線源と反対側の遮蔽壁面部(以下、遮蔽壁背面部)とに2分割して組み込む。さらに、遮蔽壁前面部に組み込む補償遮蔽体を $A_1$ 、 $A_2$ に、遮蔽壁背面部に組み込む補償遮蔽体を $A_3$ 、 $A_4$ に区分けする。補償遮蔽体 $A_1 \sim A_4$ はダクト中心軸を軸とする円板形状で、その厚さは $U/2$ である。各補償遮蔽体はFig.8.1に示すガンマ線が以下の条件を満足するように配置する。

- (i)ダクト入口部に入射するライン $L_1$ 、 $L_4$ 、 $L_{13}$ 、 $L_{16}$ 上のガンマ線とダクト出口部を透過するライン $L_5$ 、 $L_7$ 、 $L_{10}$ 、 $L_{12}$ 上のガンマ線は、遮蔽壁前面部に組み込まれた補償遮蔽体 $A_1$ と遮蔽壁背面部に組み込まれた補償遮蔽体 $A_4$ を透過する。
  - (ii)ダクト入口部に入射するライン $L_2$ 、 $L_3$ 、 $L_{14}$ 、 $L_{15}$ 上のガンマ線は、遮蔽壁背面部に組み込まれた補償遮蔽体 $A_3$ および $A_4$ を透過する。
  - (iii)ダクト出口部を透過するライン $L_6$ 、 $L_8$ 、 $L_9$ 、 $L_{11}$ 上のガンマ線は、遮蔽壁前面部に組み込まれた補償遮蔽体 $A_1$ および $A_2$ を透過する。
- 上記の条件に基づき、補償遮蔽体 $A_1 \sim A_4$ の外径・内径を定める。

補償遮蔽体  $A_1$ 、 $A_4$  の外径および内径

外径  $D_1$  は、ライン  $L_7$ 、 $L_{10}$  が遮蔽壁前面を横切る点およびライン  $L_1$ 、 $L_{16}$  が遮蔽壁背面を横切る点から求め、

$$D_1 = 2 T \tan \theta + d \quad (8.3)$$

とする。内径はダクト直径  $d$  に等しくとる。

補償遮蔽体  $A_2$ 、 $A_3$  の外径  $D_2$  および内径  $D_3$

外径  $D_2$  は、遮蔽壁前面から壁内に距離  $U$  入った面をライン  $L_7$ 、 $L_{10}$  が横切る点および遮蔽壁背面から壁内に距離  $U$  入った面をライン  $L_1$ 、 $L_{16}$  が横切る点から求め、

$$D_2 = 2 (T - U) \tan \theta + d \quad (8.4)$$

とする。

内径  $D_3$  は、遮蔽壁前面から壁内に距離  $U$  入った面をライン  $L_8$ 、 $L_{11}$  が横切る点および遮蔽壁背面から壁内に距離  $U$  入った面をライン  $L_3$ 、 $L_{14}$  が横切る点から求め、

$$D_3 = 2 (T - U) \tan \theta - d \quad (8.5)$$

とする。ただし、 $D_3 \geq d$  の条件から  $\theta$  の適用範囲は、

$$\theta \geq \tan^{-1} \left( \frac{d}{T - U} \right) \quad (8.6)$$

とする。

(2) 実験

実験は JRR-4 散乱実験室で行った。実験配置を Fig.8.2 に示す。実験には、補償遮蔽体のある直ダクト付き遮蔽壁(以下、補償遮蔽体あり遮蔽壁)、補償遮蔽体のない直ダクト付き遮蔽壁(以下、補償遮蔽体なし遮蔽壁)およびバルク遮蔽壁を使用した。ダクト付き遮蔽壁においては、直径 8.9cm の直ダクトを遮蔽壁の前面・後面の中央で壁に垂直に貫通させた。遮蔽壁厚さ  $T$  は原子力施設の遮蔽壁厚としてよく用いられる  $100\text{cm}^{(2)}$  を選んだ。遮蔽壁に使用したコンクリートの原子組成と密度は Table8.1 に示す。

遮蔽壁はその中心  $C$  (Fig.8.2 参照) を実験孔出口から 640cm 離れた実験孔中心軸上に設置し、同点を通る鉛直線を中心軸として、上から見て右廻りに回転させた。ここで、中心  $C$  を通る遮蔽壁前面・背面の垂線と実験孔中心軸とのなす角度を  $\theta$  とする。したがって、 $\theta = 0^\circ$  配置のダクト付き遮蔽壁では、実験孔中心軸とダクト軸とが一致する。以下、座標軸の原点を遮蔽壁背面中心(ダクト付き遮蔽壁ではダクト出口中心に相当する)とし、この点を通る遮蔽壁背面の水平線を  $X$  軸(遮蔽壁の前面に向かって右方向を正とする)、鉛直線を  $Y$  軸(上方向を正とする)、壁背面の垂線を  $Z$  軸(壁前面方向を負とする)。ダクト付き遮蔽壁では  $Z$  軸はダクト軸に等しい)として記述する。

JRR4 実験孔からのガンマ線エネルギースペクトルは、第 4 章に示すように 2MeV 以上が主であるので、本実験においては  $\bar{\mu}_{Fe} / \rho_{Fe}$  と  $\bar{\mu}_{con} / \rho_{con}$  との関係を図 3.1 に基づいて  $\bar{\mu}_{Fe} = (\rho_{Fe} / \rho_{con}) \bar{\mu}_{con}$  とし、(8.2) 式を次式

$$U = \frac{\rho_{con} \{ d / \tan \theta - (1 - \cos \theta) T \}}{\rho_{Fe} - \rho_{con}} \quad (8.7)$$

で置き換え、 $\theta = 7^\circ$ 、 $14^\circ$ 、 $20^\circ$  に対する補償遮蔽体あり遮蔽壁を製作した。補償遮蔽体ありとなしの遮蔽壁の遮蔽性能は、これらの遮蔽壁背面から20cm後方の水平線上 ( $0\text{ cm} \leq X \leq 30\text{ cm}$ 、 $Y = 0\text{ cm}$ 、 $Z = 20\text{ cm}$ ) における照射線量率(以下、線量率)と  $\theta = 0^\circ$  配置のバルク遮蔽壁背面から20cm後方の点  $P_2$  ( $X = 0\text{ cm}$ 、 $Y = 0\text{ cm}$ 、 $Z = 20\text{ cm}$ ) における線量率との比で求めた。

補償遮蔽体ありとなしの遮蔽壁の背面から20cm後方の水平線上における線量率の測定には、Victreen社製660-5型デジタル線量計を使用した。同線量計は円板形で、検出器窓面積は100 $\text{cm}^2$ である。 $0^\circ$  配置のバルク遮蔽壁前面の点  $P_1$  における線量率測定には、松下電器産業(株)製CaSO<sub>4</sub>熱蛍光線量計素子UD-200Sを使用した。同背面の点  $P_2$  における線量率測定には、660-5型デジタル線量計とUD-200Sを使用し、この点において両検出器の値を規格化した。

$\theta = 7^\circ$ 、 $14^\circ$ 、 $20^\circ$  配置における、補償遮蔽体ありとなしの遮蔽壁の背面から20cm後方の水平線上における線量率と、 $0^\circ$  配置のバルク遮蔽壁背面から20cm後方の点  $P_2$  における線量率との比(以下、線量率比)をFig.8.3(a)~(c)に示す。

$\theta = 7^\circ$  配置では、補償遮蔽体なし遮蔽壁での線量率比のピークは  $X = 4\text{ cm}$  の点にあり、ピーク値は6.17であるのに対し、補償遮蔽体あり遮蔽壁におけるピークはダクト軸上にあり、ピーク値は2.36に減少する。

$\theta = 14^\circ$ 、 $20^\circ$  配置では、補償遮蔽体ありおよびなしの遮蔽壁とも、線量率のピークはダクト軸上にある。補償遮蔽体なし遮蔽壁におけるピーク値は、 $\theta = 14^\circ$  配置で1.30、 $\theta = 20^\circ$  配置で1.17に減少する。

線量率比が1以上の領域は、補償遮蔽体なし遮蔽壁におけるすべての測定点が含まれるが、補償遮蔽体あり遮蔽壁では、 $\theta = 7^\circ$  配置で  $X < 8\text{ cm}$ 、 $\theta = 14^\circ$  で  $X < 5\text{ cm}$ 、 $\theta = 20^\circ$  で  $X < 4\text{ cm}$  の領域に限られる。

また、 $\theta = 7^\circ$ 、 $14^\circ$ 、 $20^\circ$  配置の補償遮蔽体あり遮蔽壁背面から20cm後方の  $Y = 0\text{ cm}$  の水平線上における  $X = 0$  から18cm(ダクト半径の約4倍)までの線量率の平均値と、 $0^\circ$  配置のバルク遮蔽壁背面の点  $P_2$  における線量率との比は、それぞれ1.1、0.89、0.79であり、1に近い。

これらの実験結果から、補償遮蔽体あり遮蔽壁の遮蔽性能は、バルク遮蔽壁のそれに近いと考えられる。

次に、 $\theta = 7^\circ$  用の補償遮蔽体あり遮蔽壁を用い、遮蔽壁を  $\theta = 14^\circ$  および  $20^\circ$  に回転させて測定した線量率比をFig.8.4に示す。線量率比のピーク値は、 $\theta = 14^\circ$  で1.13、 $\theta = 20^\circ$  で1.03であり、いずれもFig.8.3(a)の  $\theta = 7^\circ$  配置における値に比べて低い。また、 $14^\circ$  用の補償遮蔽体あり遮蔽壁を用いて測定した  $\theta = 20^\circ$  における線量率比のピーク値は1.06であり、Fig.8.3(b)の  $\theta = 14^\circ$  配置における値に比べて低い。これらの実験結果から、ガンマ線の最小入射角を定めて設計した補償遮蔽体あり遮蔽壁は、他の入射角のガンマ線に対しても、バルク遮蔽壁と同程度の遮蔽性能を有することがわかる。

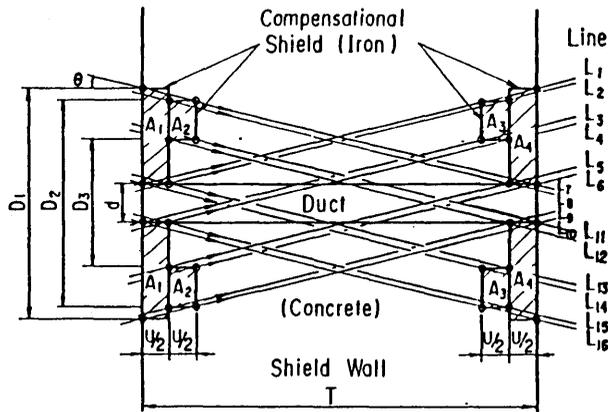


Fig.8.1 Example of compensational shield for straight duct and critical directions of incident gamma rays

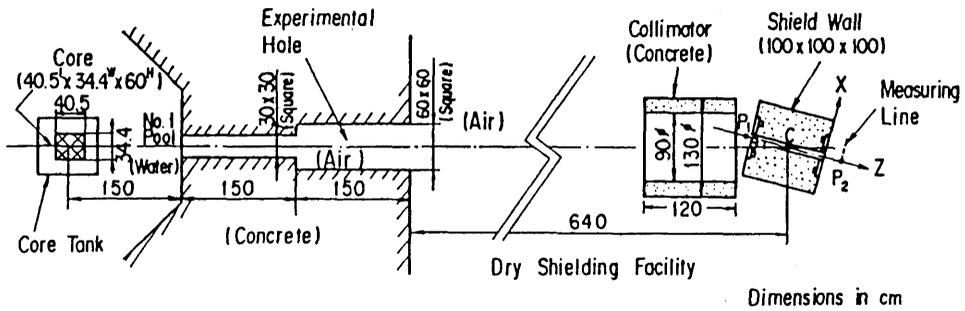


Fig.8.2 Experimental arrangement of straight duct with compensational shield

Table 8.1 Elemental composition of concrete (g/cm<sup>3</sup>)

H	0.015	S	0.0020
C	0.0083	K	0.038
O	1.199	Ca	0.154
Na	0.039	Ti	0.0045
Mg	0.014	Mn	0.0012
Al	0.129	Fe	0.052
Si	0.714	Ba	0.0026
P	0.0014	Density	2.374

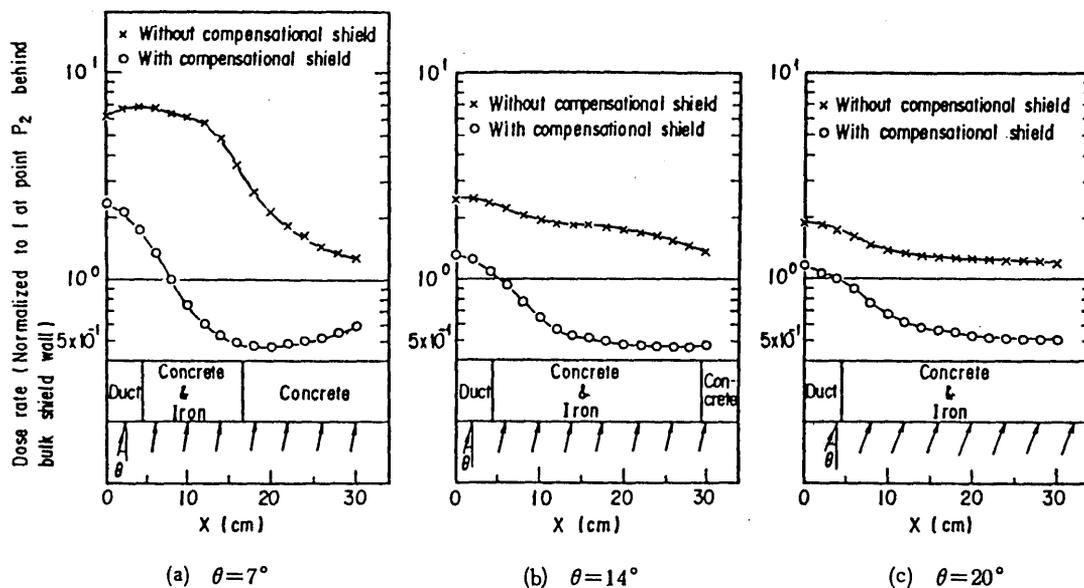


Fig.8.3 Measured dose rates behind shield wall with straight duct with and without compensational shield

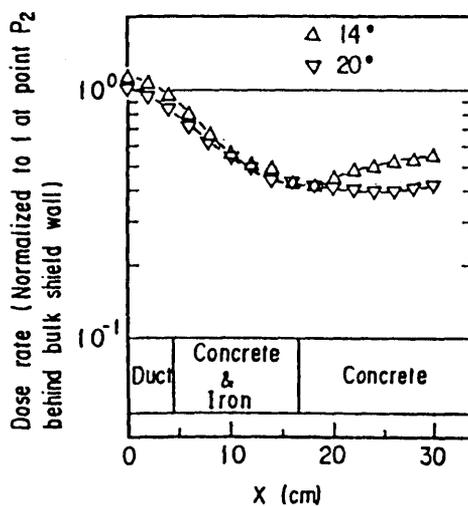


Fig.8.4 Measured dose rates behind shield wall with straight duct with compensational shield designed for  $\theta=7^\circ$

### 第9章 中性子遮蔽壁に対する本設計手法の適用性

中性子用コンクリート遮蔽壁に対する鉄製補償遮蔽体の適用性をオフセットスリット付き遮蔽壁について述べる。線源は14MeVの中性子とし、コンクリート遮蔽壁の厚さは80cm、オフセットは遮蔽壁の中央に設け、スリット幅は1cm、スリット内は空気とした。コンクリートと鉄の原子数密度はTable 9.1に示すAllenらのデータ<sup>(43)</sup>,<sup>(44)</sup>を使用した。遮蔽壁の形状をFig. 9.1に示す。遮蔽壁の高さは150cmである。線源は、同図に示すように、No.1スリット入口面とNo.2スリットの線源側遮蔽壁面への延長面に、垂直入射の面線源として設けた。各線源の面積はスリットの断面積に等しい1cm幅×150cm高さとした。遮蔽性能の検証および補償遮蔽体の寸法決定にはMORSE-GGコード<sup>(45)</sup>を用いた。使用した群定数はGICX40<sup>(46)</sup>である。遮蔽性能の評価は0.2MeV以上の速中性子による線量率にて行った。

補償遮蔽体の寸法 $U_1$ 、 $U_2$ 、 $U_3$ 、 $U_4$ は第3章で示したオフセット付き遮蔽壁の設計手法に基づき次式で求める。鉄の平均減弱係数は、Fig. 3.15のライン①、②方向は $\bar{\mu}_{Fe}$ で、ライン③、④は $\bar{\mu}'_{Fe}$ でそれぞれ表示する。

$$U_1 = \frac{\bar{\mu}_{con} T}{2(\bar{\mu}_{Fe} - \bar{\mu}_{con})} \quad (9.1)$$

$$U_2 = \frac{\bar{\mu}_{con} W}{(\bar{\mu}_{Fe} - \bar{\mu}_{con})} \quad (9.2)$$

$$U_3 = \frac{0.23 \bar{\mu}_{con} T}{(\bar{\mu}'_{Fe} - \bar{\mu}_{con})} \quad (9.3)$$

$$U_4 = \frac{0.23 \bar{\mu}_{con} T}{(\bar{\mu}'_{Fe} - \bar{\mu}_{con})} \quad (9.4)$$

本計算では、1cm幅×150cm高さの面線源からの14MeV中性子がコンクリートに垂直入射した場合の0.2MeV以上の速中性子線量率の減衰(注：線源面の中心を通る線上での減衰)をMORSE-GGコードで計算し、本計算の遮蔽壁厚に相当するコンクリート80cm透過における速中性子線量率の減衰から、コンクリートの平均減弱係数 $\bar{\mu}_{con} = 0.0691\text{cm}^{-1}$ とした。

鉄の平均減弱係数 $\bar{\mu}_{Fe}$ は、種々の鉄厚 $T'$ での速中性子線量率の減衰から $\bar{\mu}_{Fe}(T')$ を求めて $U_1$ を(9.1)式で計算し、 $T' \approx U_1$ となる $\bar{\mu}_{Fe}(T')$ を用いることにする。ここで、 $\bar{\mu}_{Fe}(T')$ は上述の面線源を用い遮蔽体を鉄としたMORSE-GG計算による0.2MeV以上の速中性子線量率の減衰(注：線源面の中心を通る線上での減衰)から求め、 $\bar{\mu}_{Fe}$ を鉄25cm透過での $\bar{\mu}_{Fe}(T')$ の値 $0.1829\text{cm}^{-1}$ とし、 $U_1$ を24.3cmとした。 $U_2$ は(9.2)式から0.7cmとした。 $U_3$ 、 $U_4$ の決定では、上記計算における $\theta_2 = \cos^{-1} \frac{1}{\sqrt{2}}$ 方向の速中性子線量率の減衰から、 $\bar{\mu}_{Fe}$ と同様の方法で $\bar{\mu}'_{Fe}$ を求めて $\bar{\mu}'_{Fe} = 0.290\text{cm}^{-1}$ とし、 $U_3$ と $U_4$ を6cm

とした。

遮蔽壁背面におけるオフセットスリット付き遮蔽壁(上記寸法の補償遮蔽を有する形状と補償遮蔽のない形状)の線量率とバルク遮蔽壁の線量率の比をFig.9.2に示す。補償遮蔽のないオフセットスリット付き遮蔽壁背面の線量率はバルク遮蔽壁のそれに比べて約1桁高い値を示したが、補償遮蔽を有する場合の線量率とバルク遮蔽壁の線量率の比は0.5~1.0の間に分布し、中性子遮蔽壁に対する補償遮蔽体の適用性が示された。

鉄の非弾性散乱のしきいエネルギー(約0.8MeV<sup>(47)</sup>)以下の中性子に対する補償遮蔽には水素含有量の多い物質が有効で、熱中性子に対する補償遮蔽には吸収断面積が大きく且つアルベドの小さな物質が有効であると推定される。Table9.2にはポリエチレンと水素化ジルコニウムの水素含有量をコンクリートと水のそれと比較して示す。ポリエチレンと水素化ジルコニウムの水素含有量はコンクリートのそれに比べて大である。このうち、水素化ジルコニウムは除去断面積が大きく<sup>(48)</sup>、MeV領域の速中性子に対する補償遮蔽材としても有効であると推定される。また、水素化ジルコニウムの密度はTable9.2に示すようにコンクリートの約2倍であることから、ガンマ線に対する補償遮蔽材としても有効であると考えられる。なお、原子力船「むつ」では、圧力容器と一次遮蔽体との間の円環間隙をストリーミングする放射線の遮蔽用として、厚さ約34cmの水素化ジルコニウムが圧力容器蓋の上部に用いられている<sup>(4)</sup>。また、鉄は熱中性子に対する吸収断面積が大きく、熱中性子に対する遮蔽材の1つとして挙げられる<sup>(48)</sup>。Table4.1に示すコンクリートの構成元素(H,O,Na,Mg,Al,Si,K,Ca,Ti,Fe)の中で、鉄は、熱中性子に対する吸収断面積が大きく、且つ熱中性子領域での散乱断面積と吸収断面積との比が小さいことから、コンクリート遮蔽壁中の不規則形状部の熱中性子に対する補償遮蔽材としても有効であると推定される。この他、補償遮蔽材として、ホウ素入りポリエチレンを用いる、あるいはダクトやスリットの壁にボラルのライニングを施すことにより、熱中性子、捕獲ガンマ線および遮蔽体の放射化を少なくすることが可能であると考えられる。

Table 9.1 Compositions of materials used in Monte Carlo Calculations

Material	Density (g/cm <sup>3</sup> )	Element	Composition (in units of 10 <sup>21</sup> atoms/cm <sup>3</sup> )
Concrete <sup>(43)</sup>	2.26	H	13.75
		O	45.87
		Al	1.743
		Si	20.15
Iron <sup>(44)</sup>	7.88	Fe	84.9