

3.3 斜ダクト付き遮蔽壁

補償遮蔽体はダクトの管として遮蔽壁に組み込む。補償遮蔽体を有する斜ダクト付き遮蔽壁の形状をFig.3.12に示す。ダクトの中心軸と遮蔽壁の法線との間の角度は θ で表示する。 θ は 15° と 30° を対象とする。ガンマ線は遮蔽壁に垂直入射する。

(1) 補償遮蔽体の厚さの決定

補償遮蔽体の厚さ U は、Fig.3.12のライン①において、

$$\exp(-\bar{\mu}_{\text{con}}T) \geq \exp\left\{-\bar{\mu}_{\text{Fe}} \frac{2U}{\sin\theta} - \bar{\mu}_{\text{con}}\left(T - \frac{2U+D}{\sin\theta}\right)\right\} \quad (3.24)$$

の条件から求める。(3.24)式に $\bar{\mu}_{\text{Fe}}$ の最小値である(3.8)式を代入し、 U について解くと、

$$U \geq \frac{\rho_{\text{con}} D}{2(0.94\rho_{\text{Fe}} - \rho_{\text{con}})} \quad (3.25)$$

が得られる。補償遮蔽体の厚さはコンクリートと鉄の密度およびダクト直径のみに依存する。斜ダクトと直ダクトの直径を同じとすると、斜ダクト付き遮蔽壁の補償遮蔽体の最小厚さは直ダクト付き遮蔽壁のその1/2となる。

(2) 許容最大ダクト直径の決定

コンクリート遮蔽壁から突出している補償遮蔽体の部分を無視し、コンクリート遮蔽壁を透過せずにダクト内に入射するガンマ線がダクト壁面で散乱し、ダクト出口に到達することによる線量率の増加を考える。ガンマ線のダクト壁面への入射面積を f 、許容最大ダクト直径を d_s 、微分線量アルベドを α_{D1} とし、ダクト壁面での散乱点を遮蔽壁内に

$$\frac{d_s}{2\cos\theta \sin\theta} \quad \text{だけ入った点と仮定し(Fig.3.13参照)、ダクト壁面で散乱しダクト}$$

内を透過してダクト出口に到達するガンマ線の線量率とダクト入口における線量率の比を

$$\frac{f \alpha_{D1}}{\left(\frac{T}{\cos\theta} - \frac{d_s}{2\cos\theta \cdot \sin\theta}\right)^2} \quad \text{で表わし、この値がバルク壁におけるガンマ線量率の減衰率} A \text{より}$$

も小さくなるように d_s を定める。すなわち、

$$\frac{f \alpha_{D1}}{\left(\frac{T}{\cos\theta} - \frac{d_s}{2\cos\theta \cdot \sin\theta}\right)^2} \leq A \quad (3.27)$$

とする。ここで $f = \frac{3\pi d_s^2}{8\cos\theta \cdot \sin\theta}$ である(Fig.3.13参照)。

(3.27)式を d_s について解き、最大値を求めると、

$$d_s = \frac{2T \sin\theta (-2A + \sqrt{6\pi A \alpha_{D1} \sin\theta \cos\theta})}{3\pi \alpha_{D1} \sin\theta \cos\theta - 2A} \quad (3.28)$$

が得られる。

コンクリート遮蔽壁厚 $T=75, 100, 150\text{cm}$ 、入射ガンマ線エネルギー $E_0=0.5, 1, 2, 4, 6, 8, 10\text{MeV}$ 、ダクト中心軸と遮蔽壁の法線との間の角度 $\theta=15^\circ, 30^\circ$ について、許容最大ダクト直径を Table 3.5 に示す。ここで、アルベド α_{D1} は $\theta=15^\circ$ の場合 0.03、 $\theta=30^\circ$ の場合 0.02 とし⁽²⁴⁾、バルク遮蔽壁におけるガンマ線量率の減衰率 A は G33-GP コードにより求めた。同表は便宜上、入射エネルギーごとに許容最大ダクト直径を表示しているが、(3.28)式から明らかなように許容最大ダクト直径はダクト中心軸と遮蔽壁の法線との間の角度 θ 、アルベド α_{D1} およびバルク遮蔽壁でのガンマ線量率の減衰率 A に基づいて定められる。

また、G33-GP コードを用いて求めた許容最大ダクト直径を Table 3.6 に示す。同表の値は、線源エネルギー $E_0=0.5, 1, 2, 4, 6, 8, 10\text{MeV}$ の点等方線源をダクト入口から 10km 離れた点に置き、平行ビームのガンマ線を遮蔽壁に垂直入射させ、ダクト直径 $D=1, 3, 5, 10, 15\text{cm}$ についてダクト出口中心の線量率を求め、同上の線源によるバルク遮蔽壁背面での線量率 (G33-GP 計算値) との比から求めた。ここで、補償遮蔽体の厚さ U は (3.25) 式に基づいて、ダクト直径 $D=1, 3, 5, 10, 15\text{cm}$ に対してそれぞれ 0.23, 0.68, 1.13, 2.26, 3.39 cm とした。

Table 3.5, 3.6 から明らかなように、上記のアルベド法による許容最大ダクト直径は G33 計算による値に近い。

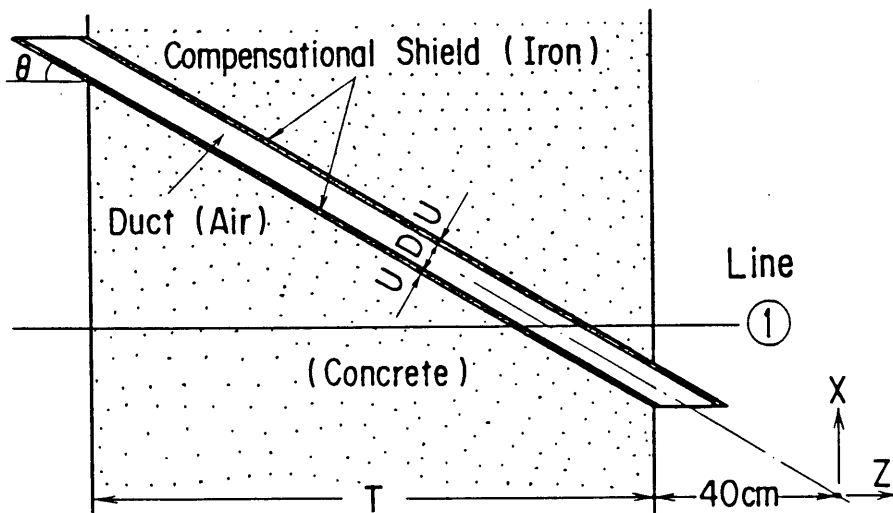


Fig.3.12 Concrete shield wall with slant duct

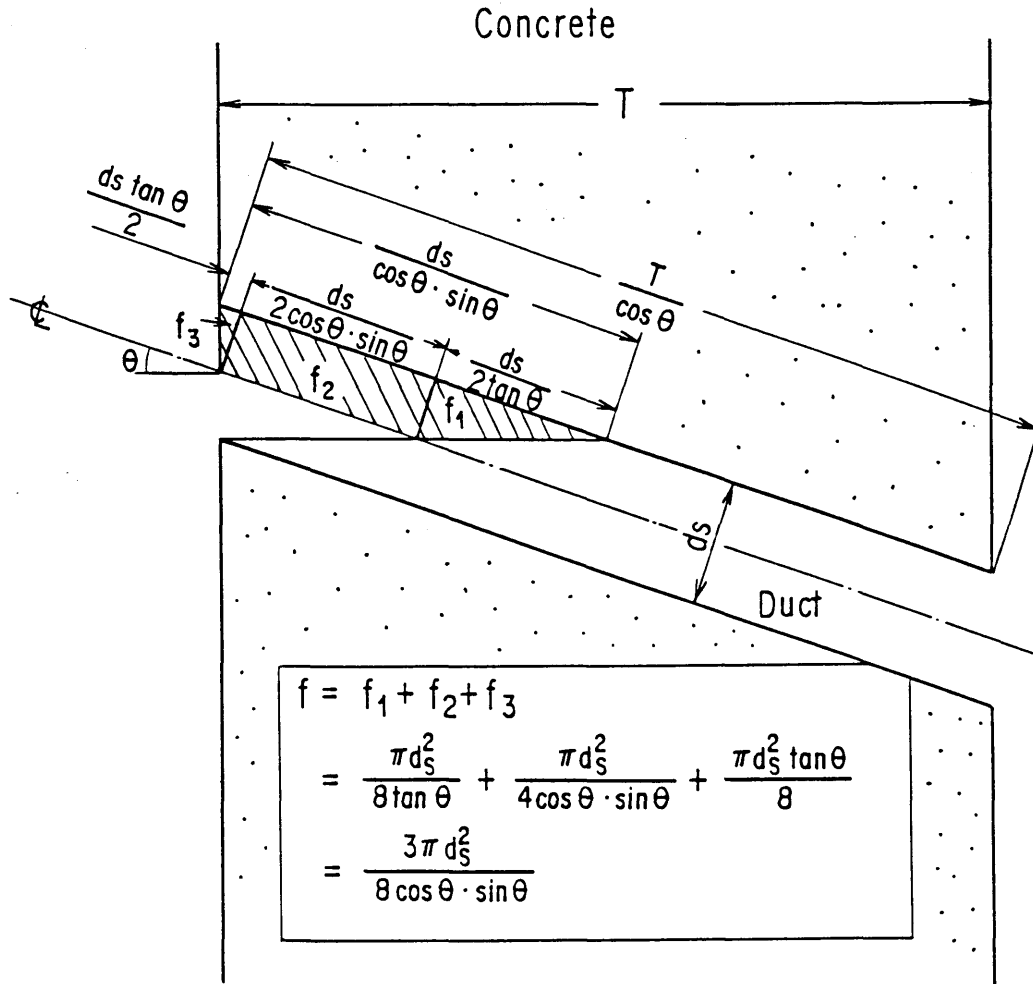


Fig.3.13 Visible area of slant duct surface

Table 3.5 Dose attenuation between front and rear surface of concrete shield wall,
and allowable maximum diameter of slant duct

| Incident gamma-ray energy (MeV) | Dose attenuation in concrete shield wall, where incident angle equal to 0° | | | Maximum duct diameter (cm) | | | | | |
|--|--|-------|--------|--------------------------------|------|-------|------|-------|-------|
| | | | | Concrete shield wall thickness | | | | | |
| | | | | 75cm | | 100cm | | 150cm | |
| | Concrete shield wall thickness | | | slant angle | | | | | |
| 75cm | 100cm | 150cm | 15° | 30° | 15° | 30° | 15° | 30° | |
| 0.5 | 1.4-5* | 1.6-7 | 1.6-11 | 0.76 | 1.4 | 0.11 | 0.20 | <0.01 | <0.01 |
| 1 | 3.1-4 | 1.2-5 | 1.5-8 | 3.3 | 6.0 | 0.94 | 1.7 | 0.05 | 0.09 |
| 2 | 3.3-3 | 3.4-4 | 3.3-6 | 9.1 | 15.0 | 4.6 | 8.4 | 0.74 | 1.3 |
| 4 | 1.5-2 | 3.1-3 | 1.2-4 | 15.0 | 15.0 | 11.8 | 15.0 | 4.3 | 7.7 |
| 6 | 2.6-2 | 6.7-3 | 4.4-4 | 15.0 | 15.0 | 15.0 | 15.0 | 7.8 | 14.1 |
| 8 | 3.2-2 | 9.4-3 | 8.1-4 | 15.0 | 15.0 | 15.0 | 15.0 | 10.2 | 15.0 |
| 10 | 3.5-2 | 1.1-2 | 1.1-3 | 15.0 | 15.0 | 15.0 | 15.0 | 11.6 | 15.0 |

* Read as 1.4×10^{-5}

Table 3.6 Allowable maximum diameter of slant duct calculated
by G33-GP code

| Incident gamma-ray energy (MeV) | Maximum duct diameter (cm) | | | | | |
|--|--------------------------------|-----|-------|-----|-------|-----|
| | Concrete shield wall thickness | | | | | |
| | 75cm | | 100cm | | 150cm | |
| | slant angle | | | | | |
| | 15° | 30° | 15° | 30° | 15° | 30° |
| 0.5 | <1 | 1 | <1 | <1 | <1 | <1 |
| 1 | 3 | 5 | 1 | 1 | <1 | <1 |
| 2 | 10 | 15 | 4 | 8 | <1 | 1 |
| 4 | 15 | 15 | 12 | 15 | 3 | 7 |
| 6 | 15 | 15 | 15 | 15 | 8 | 14 |
| 8 | 15 | 15 | 15 | 15 | 10 | 15 |
| 10 | 15 | 15 | 15 | 15 | 12 | 15 |

3.4 斜スリット付き遮蔽壁

補償遮蔽体はスリット壁としてスリットの両側に設ける。補償遮蔽体を有する斜スリット付き遮蔽壁の形状をFig.3.14に示す。スリットを中心線と遮蔽壁との法線との間の角度は θ で表示する。 θ は 15° と 30° を対象とする。ガンマ線は遮蔽壁に垂直入射する。

(1) 補償遮蔽体の厚さの決定

補償遮蔽体の厚さ U は、Fig.3.14のライン①において、

$$\exp(-\bar{\mu}_{\text{con}} T) \geq \exp\left\{-\bar{\mu}_{\text{Fe}} \frac{2U}{\sin \theta} - \bar{\mu}_{\text{con}} \left(T - \frac{2U+W}{\sin \theta}\right)\right\} \quad (3.29)$$

の条件から求める。(3.29)式に $\bar{\mu}_{\text{Fe}}$ の最小値である(3.8)式を代入し、 U について解くと

$$U \geq \frac{\rho_{\text{con}} W}{2(0.94 \rho_{\text{Fe}} - \rho_{\text{con}})} \quad (3.30)$$

が得られる。

(2) 許容最大スリット幅の決定

許容最大スリット幅は、入射エネルギー $E_0=0.5, 1, 2, 4, 6, 8, 10\text{MeV}$ 、遮蔽壁厚 $T=75, 100, 125\text{cm}, 150\text{cm}$ 、遮蔽壁の高さ 100cm 、斜スリットの角度 $\theta=15^\circ, 30^\circ$ 、スリット幅は許容幅が 10mm を超えないとして、 $W=3, 5, 7, 10\text{mm}$ について、スリット入口から 10km 離れた点に点等方線源を置き、平行ビームのガンマ線を垂直入射させたG33-GP計算により求め、Table3.7に示す。同表には、G33-GP計算によるバルク遮蔽壁での線量率の減衰率も示す。遮蔽壁に連続エネルギーあるいはエネルギーの不明なガンマ線が入射する場合は、この放射線のバルク遮蔽における線量率の減衰率から内挿により許容スリット幅を求める。

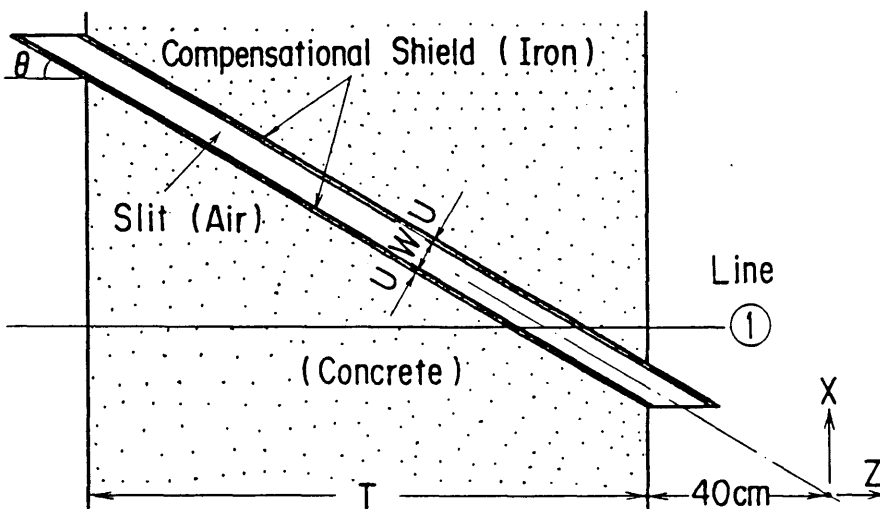


Fig.3.14 Concrete shield wall with slant slit

Table 3.7 Dose attenuation between front and rear surface of concrete shield wall,
and allowable maximum width of slant slit

| Incident gamma-ray energy (MeV) | Dose attenuation in bulk wall, where incident angle equal to 0° | | | | Maximum width (mm) | | | | | | | |
|--|---|-------|-------|--------|---------------------|-----|-------|-----|-------|-----|-------|-----|
| | | | | | Bulk wall thickness | | | | | | | |
| | | | | | 75cm | | 100cm | | 125cm | | 150cm | |
| | Bulk wall thickness | | | | Slant angle | | | | | | | |
| | 75cm | 100cm | 125cm | 150cm | 15° | 30° | 15° | 30° | 15° | 30° | 15° | 30° |
| 0.5 | 1.4-5* | 1.6-7 | 1.7-9 | 1.6-11 | 5 | 7 | 5 | 5 | 3 | 3 | 3 | 3 |
| 1 | 3.1-4 | 1.2-5 | 4.5-7 | 1.5-8 | 7 | 7 | 5 | 5 | 3 | 5 | 3 | 5 |
| 2 | 3.3-3 | 3.4-4 | 3.6-5 | 3.3-6 | 10 | 10 | 7 | 7 | 5 | 7 | 5 | 5 |
| 4 | 1.5-2 | 3.1-3 | 6.4-4 | 1.2-4 | 10 | 10 | 10 | 10 | 7 | 10 | 5 | 7 |
| 6 | 2.6-2 | 6.7-3 | 1.8-3 | 4.4-4 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 7 | 7 |
| 8 | 3.2-2 | 9.4-3 | 2.9-3 | 8.1-4 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 |
| 10 | 3.5-2 | 1.1-2 | 3.7-3 | 1.1-3 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 |

* Read as 1.4×10^{-5}

3.5 オフセットスリット付き遮蔽壁

補償遮蔽体はスリットの周囲に設ける。補償遮蔽体を有するオフセットスリット付き遮蔽壁の形状をFig.3.15に示す。スリット幅は線源側と検出器側のスリットで等しいとし、 W で表示する。

(1) 補償遮蔽体の厚さの決定

(i) U_1 の決定

補償遮蔽体の厚さ U_1 は、Fig.3.15のライン①において、

$$\exp(-\bar{\mu}_{\text{con}}T) \geq \exp\left\{-\bar{\mu}_{\text{con}}\left(\frac{T}{2}-U_1\right)-\bar{\mu}_{\text{Fe}}U_1\right\} \quad (3.32)$$

の条件から求める。(3.32)式に(3.8)式を代入して、 U_1 について解くと、

$$U_1 \geq \frac{\rho_{\text{con}}T}{2(0.94\rho_{\text{Fe}}-\rho_{\text{con}})} \quad (3.33)$$

が得られる。

(ii) U_2 の決定

Fig.3.15のライン②において、

$$\exp\left(\frac{-\bar{\mu}_{\text{con}}T}{\cos\theta_1}\right) \geq \exp\left\{\frac{-\bar{\mu}_{\text{Fe}}U_2}{\sin\theta_1}-\bar{\mu}_{\text{con}}\left(\frac{T}{\cos\theta_1}-\frac{W+U_2}{\sin\theta_1}\right)\right\} \quad (3.34)$$

の条件から求める。(3.34)式は直スリット付き遮蔽壁における(3.18)式と同じであり、

$$U_2 \geq \frac{\rho_{\text{con}}W}{0.94\rho_{\text{Fe}}-\rho_{\text{con}}} \quad (3.35)$$

が得られる。

(iii) U_3 の決定

Fig.3.15のライン③において、

$$\exp(-\bar{\mu}_{\text{con}}T) \geq \exp\left\{\frac{-\bar{\mu}_{\text{Fe}}U_3}{\sin\theta_2}-\bar{\mu}_{\text{con}}\left(\frac{T}{2\cos\theta_2}-\frac{U_3}{\sin\theta_2}\right)\right\} \quad (3.36)$$

の条件から求める。(3.36)式に(3.8)式を代入して、 U_3 について解くと、

$$U_3 \geq \frac{\rho_{\text{con}}T}{0.94\rho_{\text{Fe}}-\rho_{\text{con}}}\left(\sin\theta_2-\frac{1}{2}\tan\theta_2\right) \quad (3.37)$$

となる。 $(\sin\theta_2-\frac{1}{2}\tan\theta_2)$ は $\theta_2 = \cos^{-1}\frac{1}{\sqrt{2}}$ で最大値0.23をとる。この値を用いて、

$$U_3 \geq \frac{0.23\rho_{\text{con}}T}{0.94\rho_{\text{Fe}}-\rho_{\text{con}}} \quad (3.38)$$

とする。

(iv) U_4 の決定

Fig.3.15のライン④において、

$$\exp(-\bar{\mu}_{\text{con}} T) \geq \exp\left\{-\bar{\mu}_{\text{Fe}} \frac{(U_4+U_2)}{\sin \theta_3} - \bar{\mu}_{\text{con}} \left(\frac{T}{2\cos \theta_3} - \frac{U_4+W+U_2}{\sin \theta_3}\right)\right\} \quad (3.39)$$

の条件から求める。(3.39)式に(3.8)式を代入して、 U_4 について解くと、

$$U_4 \geq \frac{1}{0.94\rho_{\text{Fe}} - \rho_{\text{con}}} \left\{ \rho_{\text{con}} T (\sin \theta_3 - \frac{1}{2} \tan \theta_3) + \rho_{\text{con}} W - U_2 (0.94\rho_{\text{Fe}} - \rho_{\text{con}}) \right\} \quad (3.40)$$

となる。 U_2 は(3.35)式から $\rho_{\text{con}} W / (0.94\rho_{\text{Fe}} - \rho_{\text{con}})$ とし、 $(\sin \theta_2 - \frac{1}{2} \tan \theta_2)$ は、 U_3 の決定で示したように0.23として、これらを(3.40)式に代入すると、

$$U_4 \geq \frac{0.23 \rho_{\text{con}} T}{0.94 \rho_{\text{Fe}} - \rho_{\text{con}}} \quad (3.41)$$

が得られる。

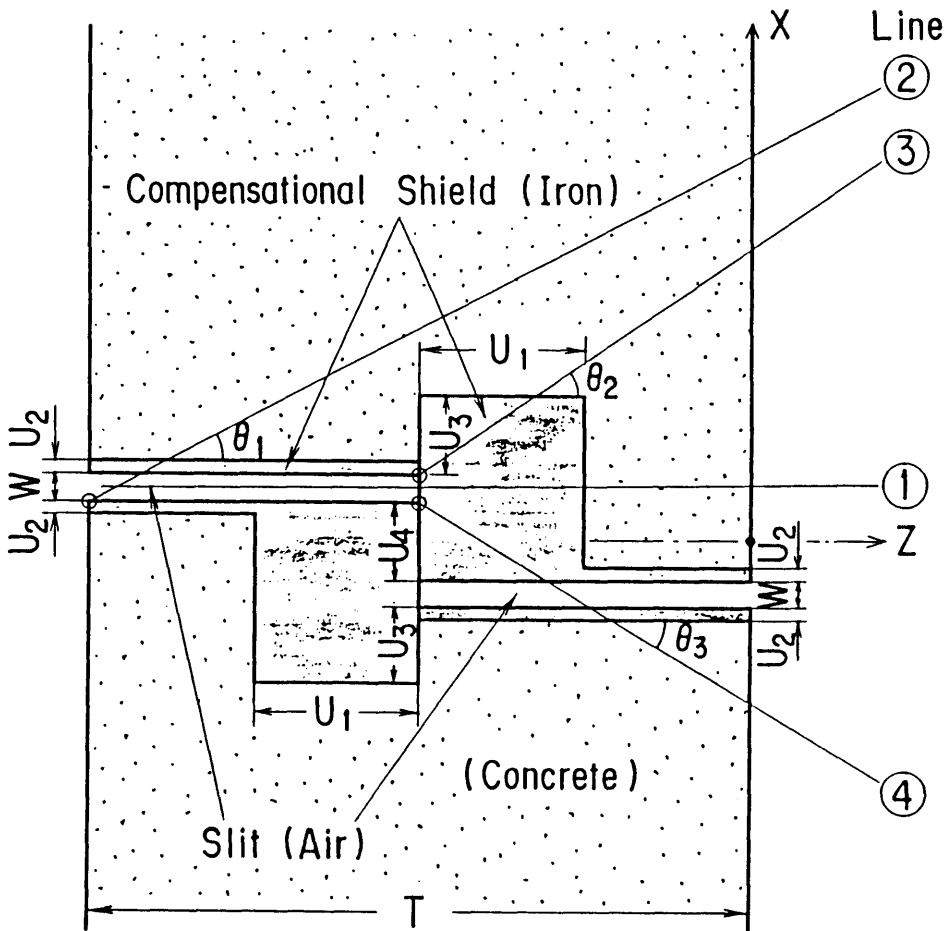


Fig.3.15 Concrete shield wall with offset slit

3.6 段付き円柱プラグ付き遮蔽壁

段付き円柱プラグおよび補償遮蔽体の形状をFig.3.16に示す。間隙幅は場所によらず一定で W とする。補償遮蔽体の厚さ $U_1 \sim U_4$ は前節のオフセットスリット付き遮蔽壁における手法を用い、 U_1 は(3.33)式で、 U_2 は(3.35)式で、 U_3 は(3.38)式で、 U_4 は(3.41)式でそれぞれ求める。

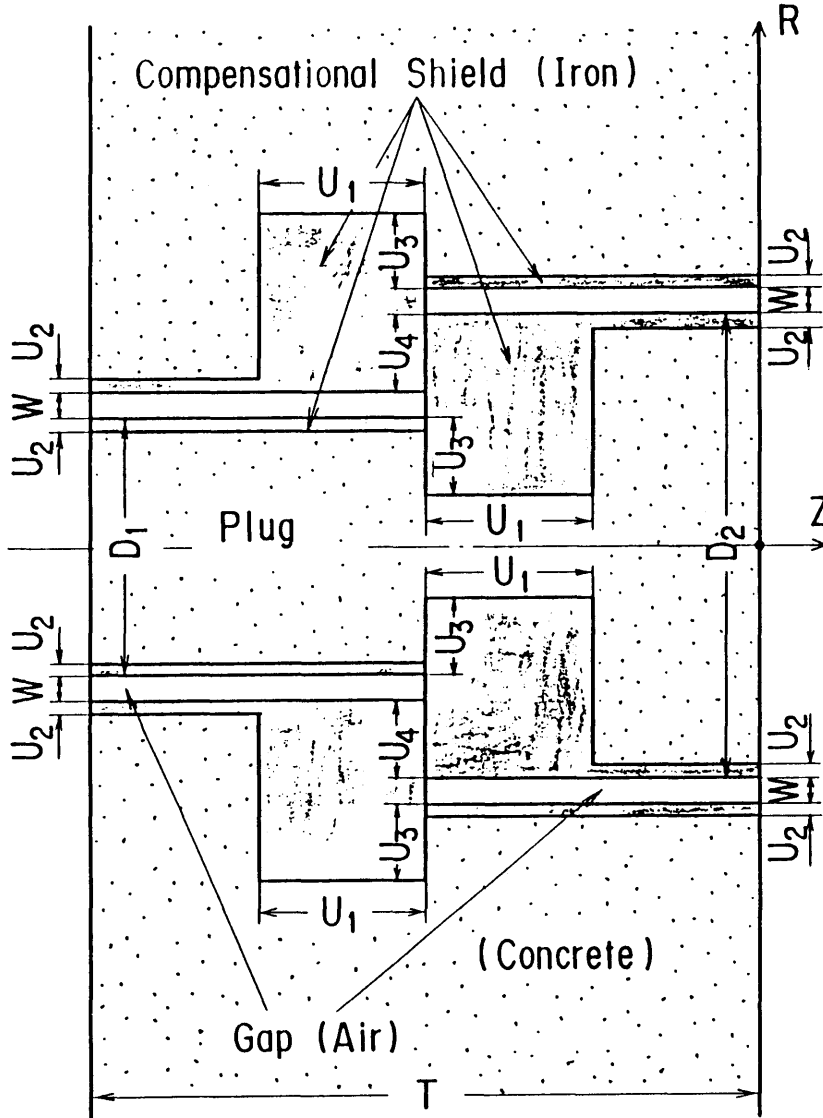


Fig.3.16 Concrete shield wall with cylindrical offset plug

3.7 セル壁で散乱するガンマ線

直ダクト付き遮蔽壁、直スリット付き遮蔽壁、斜ダクト付き遮蔽壁、斜スリット付き遮蔽壁では、大きい体積の線源の場合を除いて、線源からの放射線はこれらの不規則形状部出口を直視しないとした。しかし、不規則形状部出口を直視しない位置に線源が置かれても、ホットラボ施設のようにセル壁で散乱したガンマ線には、不規則形状部出口を直視するものも生じる。このため、直ダクト付き遮蔽壁について、セル壁で散乱したガンマ線によるダクト出口の線量率をG33-GPコードで計算し、バルク遮蔽壁背面での線量率と比較し、線量率の増加の程度を明らかにする。計算形状をFig.3.17に示す。コンクリート遮蔽壁の厚さTは75cmと150cmの2種類である。ダクト出口と線源とを結ぶ線と遮蔽壁の法線とのなす角度を θ とする。線源は点等方の単色エネルギーとして、 $\theta = 15^\circ$ 、 30° のライン上に置いた。ダクト直径は、この角度の平行ビームガンマ線が遮蔽壁に入射するとしてアルベド法で求めた許容最大ダクト直径(Table3.1参照)内のうち直径が1cm以上のものを選んだ。セル空間の幅は多くの実施設で用いられている $3\text{m}^{(2)}$ とした。

計算は、

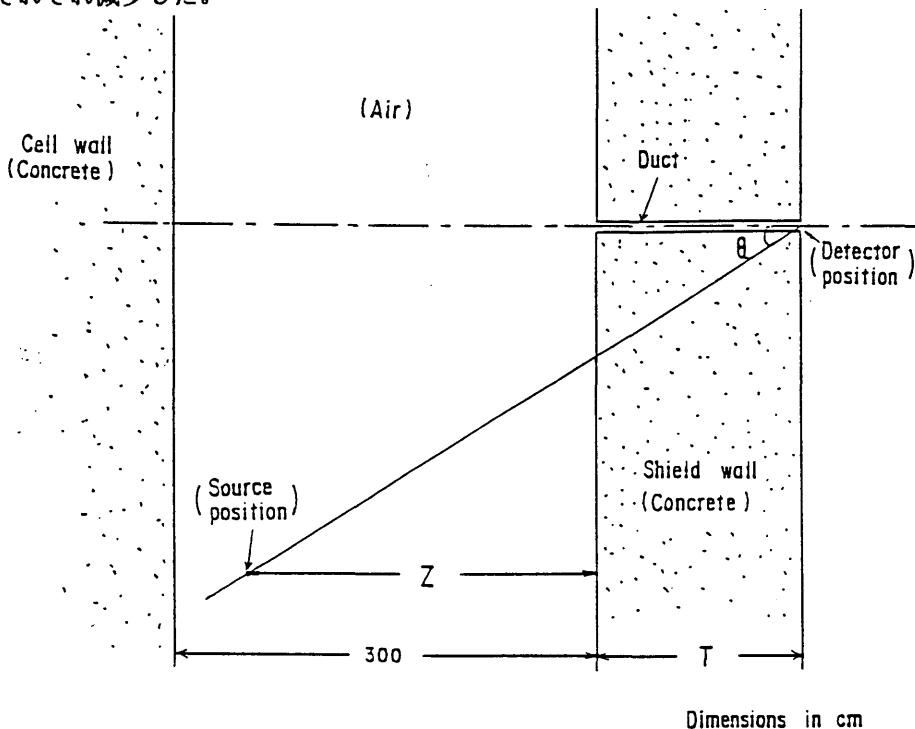
- ①点線源からダクト付き遮蔽壁に直接入射するガンマ線によるダクト出口の線量率、
- ②点線源からコンクリートセル壁に入射し、セル壁で散乱後にダクト付き遮蔽壁に入射するガンマ線によるダクト出口の線量率(1回散乱領域をセル壁に設け、1回散乱後のガンマ線の減衰を、散乱点を線源点として再生係数を用いた通常の点減衰核計算にて行う)、
- ③点線源からバルク遮蔽壁に直接入射するガンマ線によるバルク遮蔽壁背面の最大線量率、

について行い、①と②の線量率は③のバルク遮蔽壁での線量率との比でその量を表示する。まず、線源位置とセル壁散乱ガンマ線によるダクト出口の線量率との関係を求めるため、線源点と遮蔽壁との距離Zを変えた計算を直ダクト付き遮蔽壁について行い、セル壁で散乱後に直ダクト付き遮蔽壁に入射しダクト出口に到達するガンマ線による線量率と線源からバルク遮蔽壁に直接入射するガンマ線による壁背面の最大線量率との比を求め、Fig.3.18に示す。ここで、計算は遮蔽壁厚 $T = 75\text{cm}$ 、入射角 $\theta = 15^\circ$ 、入射ガンマ線エネルギー $E = 1\text{MeV}$ 、ダクト直径 $D = 2.1\text{cm}$ 、補償遮蔽体厚さ $U = 0.95\text{cm}$ 、セル空間の幅 3m として行った。同図から明らかなように、線量率の比は $Z = 250\text{cm}$ 附近で最大となる。この結果に基づき、本計算での線源位置を $Z = 250\text{cm}$ (セル壁と線源との距離 50cm)とする。計算結果をTable3.8に示す。同表には比較のため平行ビームでダクト付き遮蔽壁に入射するガンマ線によるダクト出口の線量率とバルク遮蔽壁背面での線量率との比のG33-GP計算値も示す。同表によると、点線源によるダクト出口の線量率はセル壁散乱ガンマ線による値を加えてもバルク遮蔽壁背面の最大線量率以下で、且つ線量率の比は平行ビームによる値に比べて低い。したがって、平行ビームに基づいて定めた許容最大ダクト直径以内であれば、セル内の点等方線源およびこれの集合の体積線源に本設計手法が適用できると考えられる。ただし、セル壁散乱ガンマ線による影響は、直ダクト付き遮蔽壁の代表例について計算したものであり、実際の設計に当っては、G33-GPコード等によりセル壁散乱ガンマ線による不規則形状部出口の線量率を明らかにしておく必要がある。

なお、セル壁散乱ガンマ線による不規則形状部出口の線量率を減少させるには、(i)セル壁に鉛のライニングを施す、(ii)不規則形状部出口からセル壁を直視できる領域(ヴィジブルエリア)の近くに「つい立て」を設ける、ことが考えられる。この効果を直ダクト付き遮蔽壁と直スリット付き遮蔽壁についてG33-GPコードにより調べた。計算形状をFig.3.19に示す。ここで、コンクリート遮蔽壁の厚さは150cm、ダクト直径は3cm、スリット幅は7mmとし、補償遮蔽体厚さは直ダクト付き遮蔽壁の場合(3.11)式から1.36cm、直スリット付き遮蔽壁の場合(3.20)式から0.32cmとした。セル空間は3m幅とし、その高さは線源を中心として±3mとした。線源は点等方とし、その位置は $\theta = 30^\circ$ のライン上で $Z = 250\text{cm}$ の点とした。線源のエネルギーは2MeVとした。計算形状は次の3通りとした。

- ①：ダクト(スリット)付き遮蔽壁に向い合ったコンクリートセル壁を1回散乱領域とした線量率計算。
- ②：セル壁に鉛のライニングを施し、ライニング部を散乱領域とした線量率計算。一般に2mfpの厚さで無限媒質のアルベドと2%以内で一致する⁽²⁴⁾ため、鉛のライニングの厚さは約2mfpの4cmとした。
- ③：鉛のライニングに加えてダクト(スリット)出口からセル壁を直視できる領域(ヴィジブルエリア)の近くに鉛の「つい立て」を設け、ライニング部を1回散乱領域とした線量率計算。

同計算によると、セル壁に鉛のライニングを施すことにより、セル壁散乱ガンマ線によるダクト(スリット)出口の線量率はコンクリートセル壁形状の約1/2に、鉛のライニングおよび厚さ $t = 3.7\text{cm}$ の「つい立て」を設けた形状ではコンクリートセル壁形状の約1/10にそれぞれ減少した。



(438) Fig.3.17 Calculational geometry for gamma rays scattered in cell wall

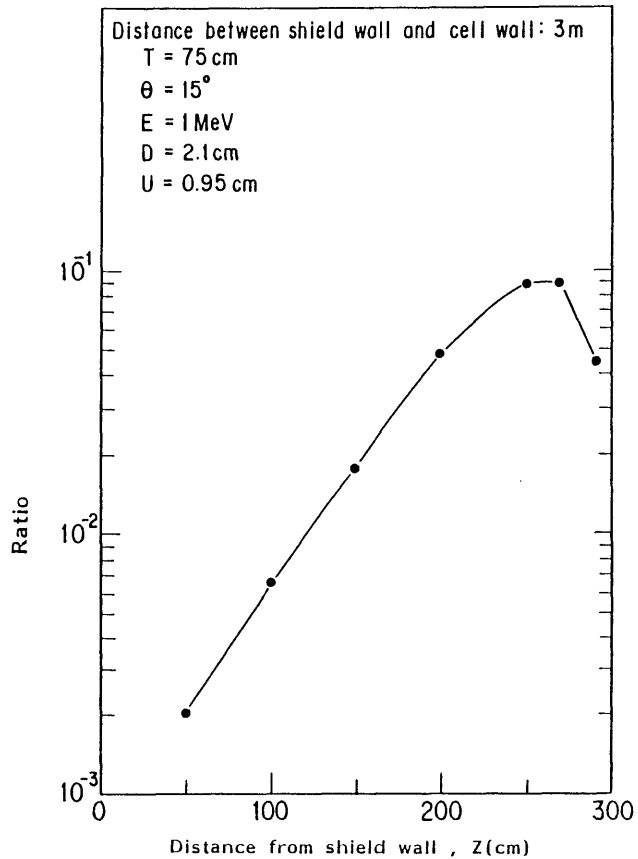


Fig.3.18

Ratio of dose rate at straight duct exit of gamma rays scattered in cell wall and then entered to shield wall with straight duct and the maximum dose rate behind bulk shield wall of gamma rays entered directly from source to bulk shield wall.

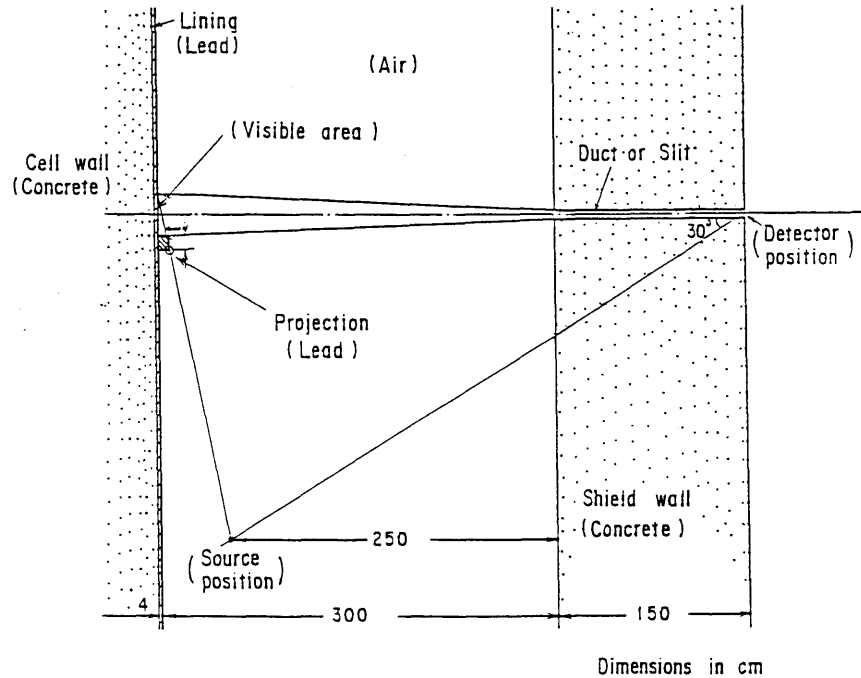


Fig.3.19

Calculational geometry for gamma rays scattered in cell wall with lead lining and projection

Table3.8 Ratio of dose rate at straight duct exit and the maximum dose rate behind bulk shield wall

| Concrete shield wall thickness T(cm) | Source energy (MeV) | $\theta = 15^\circ$ | | | | | | $\theta = 30^\circ$ | | | | | |
|--------------------------------------|---------------------|---------------------|---------------------------------------|-----------------|-------|------|---------------|---------------------|---------------------------------------|-----------------|-------|------|---------------|
| | | Duct diameter D(cm) | Compensational shield thickness U(cm) | Point source*** | | | Parallel beam | Duct diameter D(cm) | Compensational shield thickness U(cm) | Point source*** | | | Parallel beam |
| | | | | ①* | ②** | ①+② | | | | ①* | ②** | ①+② | |
| 75 | 1 | 2.1 | 0.95 | 0.65 | 0.090 | 0.74 | 0.89 | 3.1 | 1.4 | 0.27 | 0.034 | 0.30 | 1.2 |
| | 4 | 13.8 | 6.3 | 0.57 | 0.021 | 0.59 | 0.82 | 15.0 | 6.8 | 0.16 | 0.006 | 0.17 | 0.49 |
| | 10 | 13.8 | 6.3 | 0.16 | 0.002 | 0.16 | 0.21 | 15.0 | 6.8 | 0.11 | 0.001 | 0.11 | 0.27 |
| 150 | 4 | 3.2 | 1.5 | 0.62 | 0.033 | 0.65 | 0.91 | 3.6 | 1.7 | 0.16 | 0.012 | 0.17 | 1.0 |
| | 10 | 10.2 | 4.7 | 0.24 | 0.013 | 0.25 | 0.42 | 13.2 | 6.0 | 0.089 | 0.001 | 0.09 | 0.40 |

* ① : Ratio of dose rates of gamma rays entered directly from source to shield wall with straight duct and bulk shield wall

** ② : Ratio of dose rates of gamma rays scattered in cell wall and then entered to shield wall with straight duct and gamma rays entered directly from source to bulk shield wall

*** Source position : Z=250cm

第4章 原子炉を用いた実験による本設計手法の検証

4.1 概要

実験は全て日本原子力研究所 J R R 4 散乱実験室にて行った。検証に用いたコンクリート遮蔽壁は、本設計手法に基づく補償遮蔽を有する直スリット、斜ダクト、斜スリットおよびオフセットスリット付きの各遮蔽壁であり、それぞれの実験配置を Fig.4.1 に示す。

実験孔の中心軸は炉心中心を通る水平線上にあり、炉心で発生した1次ガンマ線と炉心および炉心周囲で発生した2次ガンマ線が長さ3mの実験孔を通じて床面積14m×14mの散乱実験室に導びかれる。J R R 4 実験設備の詳細は文献(26), (27)に示されている。

本設計手法の検証は、これらの不規則形状部付き遮蔽壁背面のガンマ線照射線量率(以下、線量率)とバルク遮蔽壁背面の線量率とを比較することによって示す。線量率の測定には、松下電器産業(株)製CaSO₄熱蛍光線量計素子UD200Sを使用した。遮蔽壁に入射するガンマ線のエネルギースペクトルは実験孔軸上にてNE213有機液体シンチレーション検出器を用いて測定した⁽²⁸⁾。

本実験を行う前に、実験孔出口における中性子の線量当量率(mrem/h)とガンマ線の線量率(mR/h)を測定し、その比 3×10^{-5} を得た。中性子線量率がガンマ線量率に比べて極めて低いことから、実験孔を通過した中性子により遮蔽壁内で発生する2次ガンマ線は無視しうる。

J R R 4 は火曜から金曜の間、1日6時間利用運転される。火曜から金曜の間における同一点、同一定格原子炉出力中のガンマ線量率を、ビクトリーン社製デジタル線量計を用いて測定し、測定値の最大値の最小値の比1.03を得た。したがって、不規則形状部付き遮蔽壁背面の線量率とバルク遮蔽壁背面の線量率との比には、上記の変動により最大3%の系統誤差が含まれると考えられる。

実験に使用したコンクリート遮蔽壁の原子数密度はテストピースを分析して求めた。これをTable4.1に示す。

Table 4.1 Elemental composition
of concrete(g/cm³)

| | |
|---------|--------|
| H | 0.0088 |
| O | 1.1739 |
| Na | 0.0393 |
| Mg | 0.0113 |
| Al | 0.1241 |
| Si | 0.6908 |
| K | 0.0373 |
| Ca | 0.1603 |
| Ti | 0.0046 |
| Fe | 0.0497 |
| Density | 2.30 |

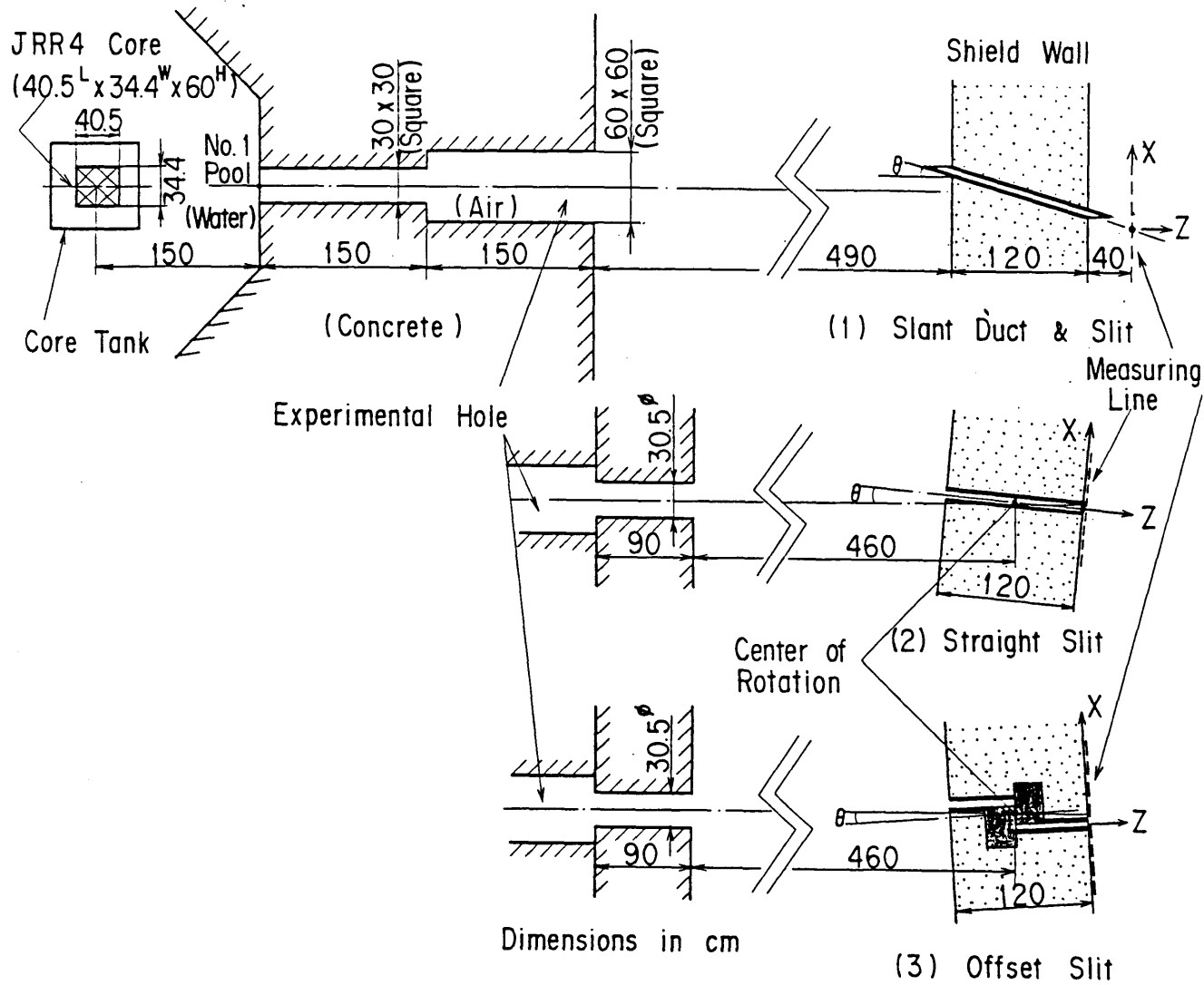


Fig.4.1 Arrangement for compensational shield experiment (Plan view)

4.2 エネルギースペクトルの測定

遮蔽壁のない配置において、実験孔出口から590cm離れた実験孔軸上での点におけるガンマ線のエネルギースペクトルをNE213有機液体シンチレーション検出器を用いて測定した⁽²⁹⁾。Fig.4.2に測定のプロックダイアグラムを示す。波高分布からガンマ線のエネルギースペクトルを求めるためのアンフォルディングにはFERDOコード⁽²⁹⁾,⁽³⁰⁾を用い、レスポンス関数には秦らがモンテカルロ計算で求めた値⁽³¹⁾を使用した。得られたガンマ線エネルギースペクトルをTable4.2に示す。統計誤差は5%以内である。JRR4散乱実験室におけるガンマ線のエネルギースペクトルは、過去においてNaI(Tl)検出器を用いて測定されているが⁽³²⁾,⁽³³⁾、NE213有機液体シンチレーション検出器を用い、中性子とガンマ線を併別して測定した例はなく、本測定が初めてである。本スペクトルと三浦らがNaI(Tl)検出器を用いて測定した実験孔軸上でのスペクトル⁽³²⁾との比較をFig.4.3に示す。ここで、 Z' は実験孔出口からの距離である。両方のスペクトルとも水素の補獲ガンマ線(2.23MeV)と思われる2MeV近傍のピークと鉄の補獲ガンマ線(7.64MeV)と思われる7.5MeV近傍のピークが見られ、且つスペクトルの形が両者でほぼ等しいことから、NE213シンチレーション検出器を用いた本測定の信頼性は高いと考えられる。

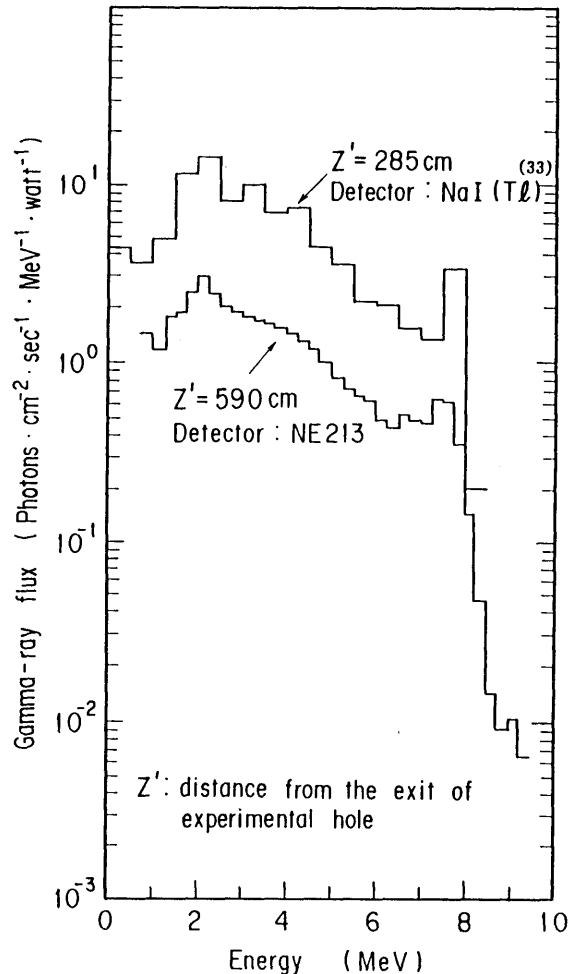
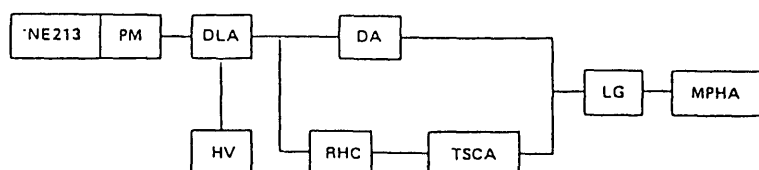


Fig.4.3 Energy spectra of gamma rays on axis of the experimental hole



PM : Photomultiplier
 HV : High voltage power supply
 DLA : Delay line amplifier
 DA : Delay amplifier
 RHC : Rise time to pulse height converter
 TSCA : Timing single channel analyzer
 LG : Linear gate
 MPHA : Multichannel pulse height analyzer

Fig.4. 2 Block diagram of γ -ray energy spectrum measurement

Table 4.2 Energy spectrum of gamma rays on the experimental hole ($Z=590\text{cm}$)

| Energy range (MeV) | Flux (photons· $\text{cm}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{MeV}^{-1}\cdot\text{W}^{-1}$) | Energy range (MeV) | Flux (photons· $\text{cm}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{MeV}^{-1}\cdot\text{W}^{-1}$) |
|--------------------|---|--------------------|---|
| 0.75~1.00 | 1.44+0 [†] | 5.25~5.50 | 7.07-1 |
| 1.00~1.25 | 1.19+0 | 5.50~5.75 | 6.67-1 |
| 1.25~1.50 | 1.80+0 | 5.75~6.00 | 6.33-1 |
| 1.50~1.75 | 1.88+0 | 6.00~6.25 | 4.87-1 |
| 1.75~2.00 | 2.45+0 | 6.25~6.50 | 4.57-1 |
| 2.00~2.25 | 2.95+0 | 6.50~6.75 | 5.34-1 |
| 2.25~2.50 | 2.38+0 | 6.75~7.00 | 4.90-1 |
| 2.50~2.75 | 2.03+0 | 7.00~7.25 | 4.72-1 |
| 2.75~3.00 | 1.89+0 | 7.25~7.50 | 6.24-1 |
| 3.00~3.25 | 1.78+0 | 7.50~7.75 | 6.10-1 |
| 3.25~3.50 | 1.70+0 | 7.75~8.00 | 3.60-1 |
| 3.50~3.75 | 1.65+0 | 8.00~8.25 | 1.42-1 |
| 3.75~4.00 | 1.53+0 | 8.25~8.50 | 4.63-2 |
| 4.00~4.25 | 1.43+0 | 8.50~8.75 | 1.43-2 |
| 4.25~4.50 | 1.31+0 | 8.75~9.00 | 9.26-3 |
| 4.50~4.75 | 1.19+0 | 9.00~9.25 | 1.05-2 |
| 4.75~5.00 | 1.00+0 | 9.25~9.50 | 6.47-3 |
| 5.00~5.25 | 8.39-1 | | |

† Read $1.44 \times 10^0 \gamma/(\text{cm}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{MeV} \cdot \text{W})$

4.3 実験形状および実験結果⁽³⁴⁾

コンクリート遮蔽壁の厚さは全て120cmとした。ダクトの中心軸は実験孔軸と同一水平面に設け、スリットの壁は垂直に設けた。

斜ダクト付き遮蔽壁と斜スリット付き遮蔽壁では、遮蔽壁面が実験孔軸に対して垂直となるように設置し、ダクト又はスリットの中心線と遮蔽壁の法線との間の角度を θ で表わす。実験は $\theta = 15^\circ$ と 30° にて行った。直スリット付き遮蔽壁とオフセットスリット付き遮蔽壁では、Fig.4.1に示すように遮蔽壁の中央を通る鉛直線を軸として上から見て右廻りを正方向として回転させ、実験孔からのガンマ線ビームの遮蔽壁への入射角度を変化させた。

遮蔽性能の評価は、直スリット付き遮蔽壁とオフセットスリット付き遮蔽壁では壁背面にて実験孔軸と同一高さの水平線上における線量率を測定し、同一点におけるバルク遮蔽壁での線量率と比較することによって行い、斜ダクト付き遮蔽壁と斜スリット付き遮蔽壁では補償遮蔽体が遮蔽壁の外側に伸びていることから壁背面から40cm離れた水平線上における線量率を測定し、バルク遮蔽壁でのそれと比較することによって行う。ここで、X軸を測定ライン上の水平線とし、X軸とダクト又はスリットの中心線との交点を $X = 0$ cmとし、炉心から見て左手方向を正とする。

斜ダクト付き遮蔽壁に盲栓をしバルク遮蔽壁とした形状における壁前面と壁背面から40cm離れた水平線上での線量率分布をFig.4.4に示す。

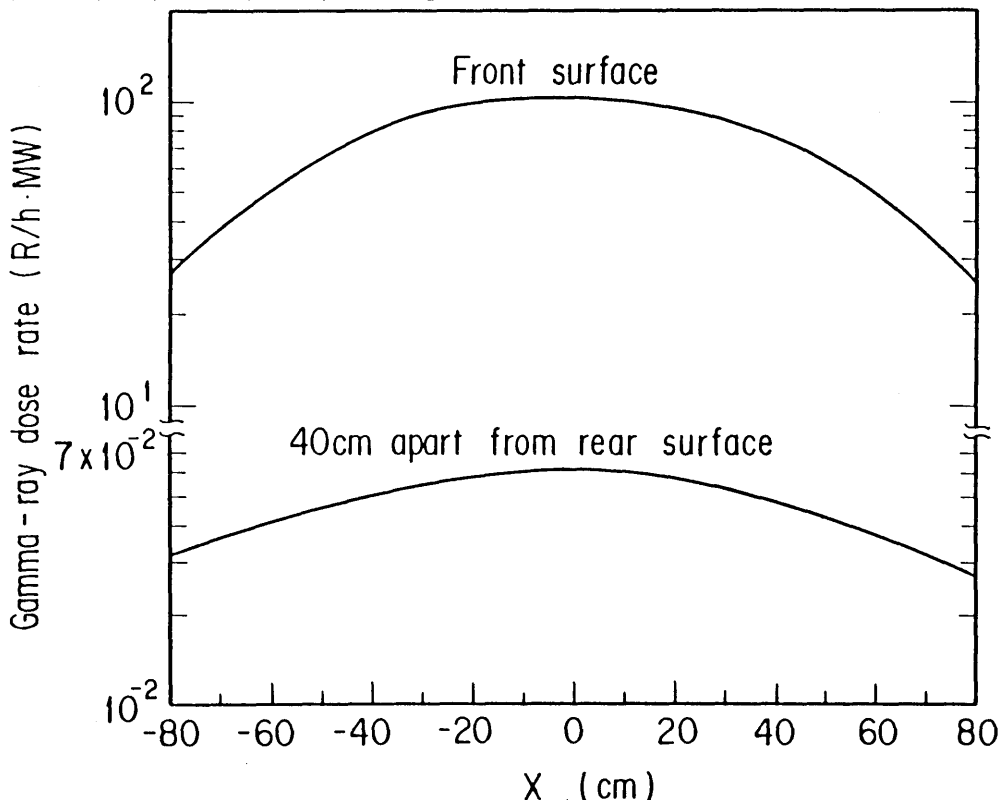


Fig.4.4 Gamma-ray dose rates on the horizontal line of the front surface and 40cm apart from the rear surface of bulk concrete wall with thickness 120cm

4.3.1 補償遮蔽を有する斜ダクト付き遮蔽壁

Fig.4.4から、バルク遮蔽壁の $X = 0$ cmにおけるガンマ線量率の減衰率 A は 6.07×10^{-4} であり、(3.28)式から、許容最大ダクト直径 d は、 $\theta = 15^\circ$ の場合7.2cm、 $\theta = 30^\circ$ の場合13cmである。ここで、アルベド α_{D_1} は $\theta = 15^\circ$ の場合0.03、 $\theta = 30^\circ$ の場合0.02⁽²⁴⁾とした。実験ではダクト直径 D を3.5cmと6.2cmとし、補償遮蔽体の厚さ U の最小値は、(3.25)式から、 $D = 3.5$ cmでは0.79cm、 $D = 6.2$ cmでは1.40cmであるので、 $D = 3.5$ cmに対しては $U = 0.8$ cm、 $D = 6.2$ cmに対しては $U = 1.40$ cmの補償遮蔽体をそれぞれ製作し、斜ダクトの管として遮蔽壁に設置した。

実験結果をFig.4.5に示す。補償遮蔽を有する斜ダクト付き遮蔽壁とバルク遮蔽壁との線量率の比は0.7~1.0の間に分布し、斜ダクト付き遮蔽壁に対する本設計手法の妥当性が示された。

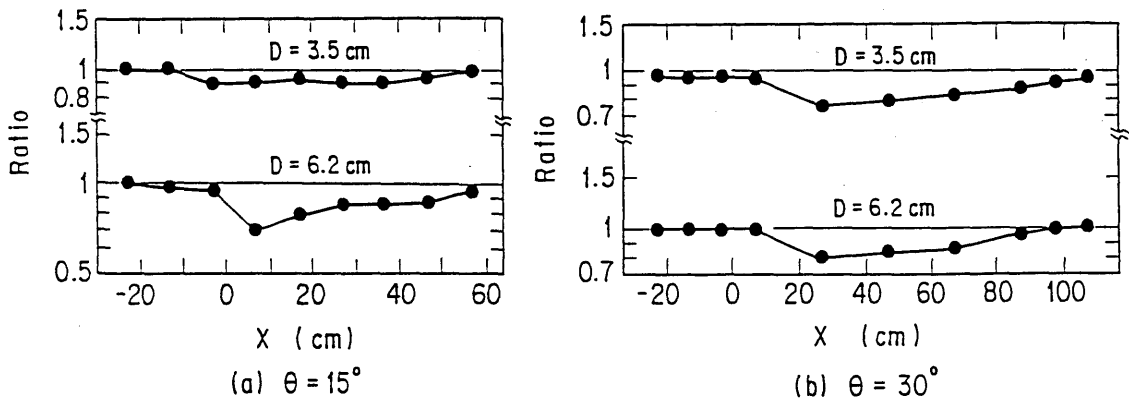


Fig.4.5

Ratio of dose rates with and without slant duct, on the measuring line behind the wall. Here $T=120$ cm, $U=0.8$ cm for $D=3.5$ cm and $U=1.4$ cm for $D=6.2$ cm.

4.3.2 補償遮蔽を有する斜スリット付き遮蔽壁

本実験のスリット幅の誤差が±1mmあるため、スリット幅を数mmに設定した場合は実験上の不確かさが大となる。バルク遮蔽壁におけるガンマ線量率の減衰率 $A=6.07 \times 10^{-4}$ とTable3.7から、許容最大スリット幅は7~10mmであるが、上記の誤差を考慮して実験ではスリット幅 W をほぼ許容値に等しい1.1cmと許容スリット幅を超えた3.8cmとした。補償遮蔽体 U の最小値は(3.30)式から、 $W=1.1\text{cm}$ で2.49mm、 $W=3.8\text{cm}$ では8.59mmであるが、実験では $W=1.1\text{cm}$ で $U=2.3\text{mm}$ 、 $W=3.8\text{cm}$ で8.0mmとした。したがって、実験に用いた補償遮蔽体の厚さは、 $W=1.1\text{cm}$ 形状で0.19mm、 $W=3.8\text{cm}$ 形状で0.59mmそれぞれ薄い。

実験結果をFig.4.6に示す。

(1) 許容最大スリット幅にほぼ等しい形状

① $\theta = 15^\circ$ 、 $W = 1.1\text{cm}$ ：スリット中心線上で線量率の比は1.1を示し、中心線から離れた点における線量率の比は0.9~1.0の範囲に分布した。

② $\theta = 30^\circ$ 、 $W = 1.1\text{cm}$ ：スリット中心線上を含む全ての点で線量率の比は0.9~1.0の範囲に分布した。

(2) 許容最大スリット幅を超えた形状

① $\theta = 15^\circ$ 、 $W = 3.8\text{cm}$ ：スリット中心線上およびその近傍で線量率の比は1を超え、最大値2.3を示したが、中心線から離れると比は1.0以下となった。

② $\theta = 30^\circ$ 、 $W = 3.8\text{cm}$ ：スリット中心線上およびその近傍で線量率の比は最大値1.7で分布し、中心線から離れると比は1.0以下となった。

これらの実験結果から、許容最大スリット幅を有する遮蔽壁の遮蔽性能はバルク壁のそれと同等であると考えられる。

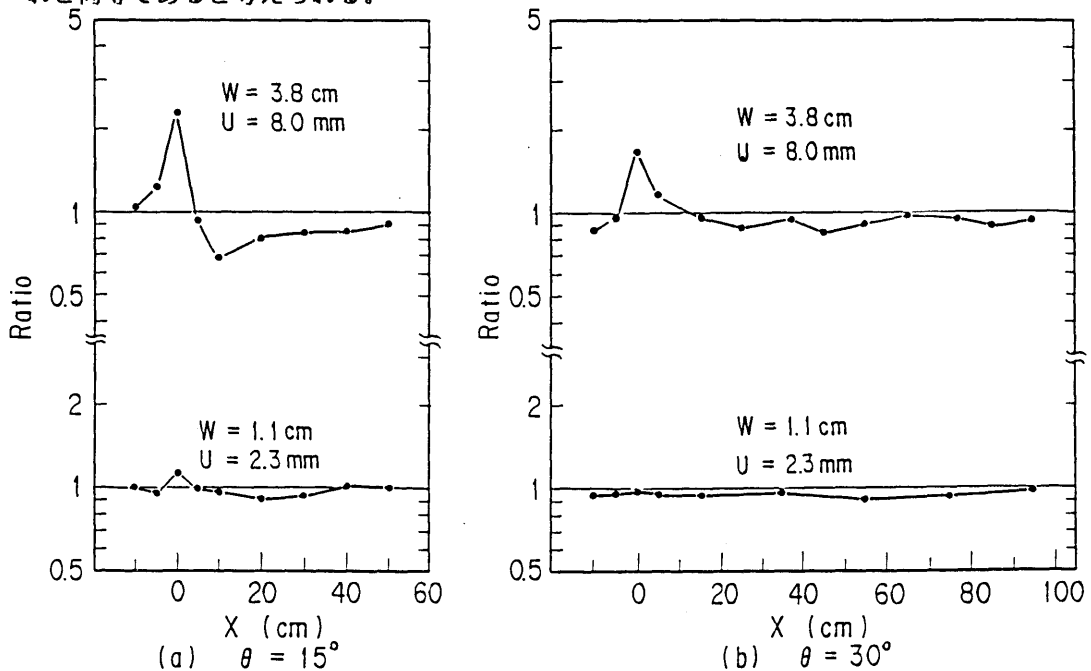


Fig.4.6 Ratio of dose rates with and without slant slit, on the measuring line behind the wall. Here, $T=120\text{cm}$.

4.3.3 補償遮蔽を有する直スリット付き遮蔽壁

スリット幅 W は9mmと18mmの2種類とした。スリット幅の誤差は ± 1 mmである。許容最小入射角は(3.22)式から、 $W=9$ mmの場合 0.7° 、 $W=18$ mmの場合 1.3° である。実験は $\theta=2^\circ$ と 5° について行った。この角度における許容最大スリット幅は、(3.23)式のレイアナリシス法に基づく許容最大スリット幅とTable3.4に示すG33-GP計算による許容最大スリット幅およびバルク遮蔽壁でのガンマ線量率の減衰率から、 $\theta=2^\circ$ と 5° の場合とも9mmである。したがって、スリット幅 $W=9$ mmの形状は許容最大スリット幅に関する実験であり、スリット幅 $W=18$ mmの形状は許容最大スリット幅を超えた配置に関する実験である。(3.20)式で計算される補償遮蔽体の厚さ U の最小値は、スリット幅 $W=9$ mm形状で4.1mm、 $W=18$ mm形状で8.2mmであるが、実験での補償遮蔽体厚さは $W=9$ mm形状で4.5mm、 $W=18$ mm形状で9mmとした。したがって、実験に用いた補償遮蔽体の厚さは、 $W=9$ mm形状で0.4mm、 $W=18$ mm形状で0.8mmそれぞれ厚い。

実験結果をFig.4.7に示す。許容最大スリット幅の実験である $W=9$ mm形状の線量率の比は、1箇所を1.07を示したが、その他の点では1以下の値となり、補償遮蔽を有する直スリット付き遮蔽壁の遮蔽性能はバルク遮蔽壁と同程度かあるいは優れていると言える。許容スリット幅を超えた $W=18$ mm形状の実験のうち、 $\theta=2^\circ$ 配置での線量率の比の最大値は4.4、 $\theta=5^\circ$ 配置における線量率の比の最大値は1.4を示し、スリット出口近傍を離れると線量率の比はそれぞれ1に近い値となる。

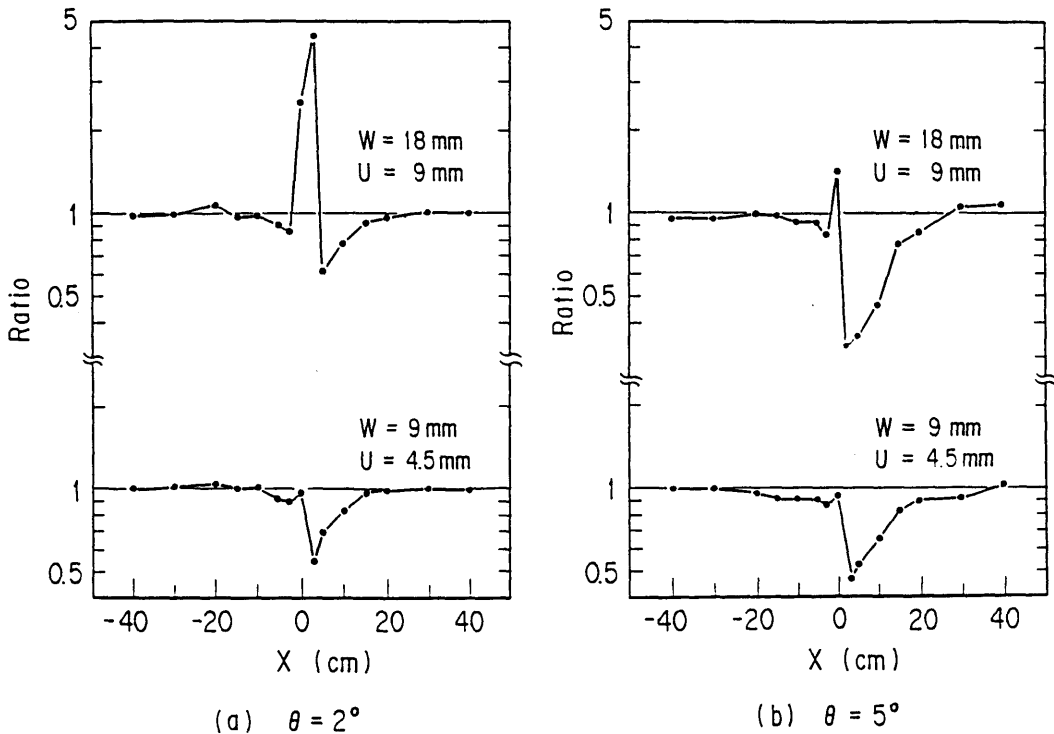


Fig.4.7 Ratio of dose rates with and without straight slit on the measuring line behind the wall. Here, $T=120$ cm.

4.3.4 オフセットスリット付き遮蔽壁

スリット幅 W は2.7cmとする。補償遮蔽体の厚さは、 $U_1=28\text{cm}$ 、 $U_2=1.35\text{cm}$ 、 $U_3=U_4=12.8\text{cm}$ とした。ただし、第3章で示した式から得られる補償遮蔽体の最小厚さは、 $U_1=27.2\text{cm}$ 、 $U_2=1.22\text{cm}$ 、 $U_3=U_4=12.5\text{cm}$ であり、実験に用いた補償遮蔽体は U_1 で8mm、 U_2 で1.3mm、 U_3 、 U_4 で3mmそれぞれ厚い。実験は $\theta=0^\circ$ と -7° について行い、結果をFig.4.8に示す。線量率の比は1以下であり、オフセットスリット付き遮蔽壁に対する本設計手法の妥当性が確認された。しかし、一方で補償遮蔽体の厚さが十分すぎることも実験から明らかになった。補償遮蔽体の厚さに関する議論は第8章にて行う。

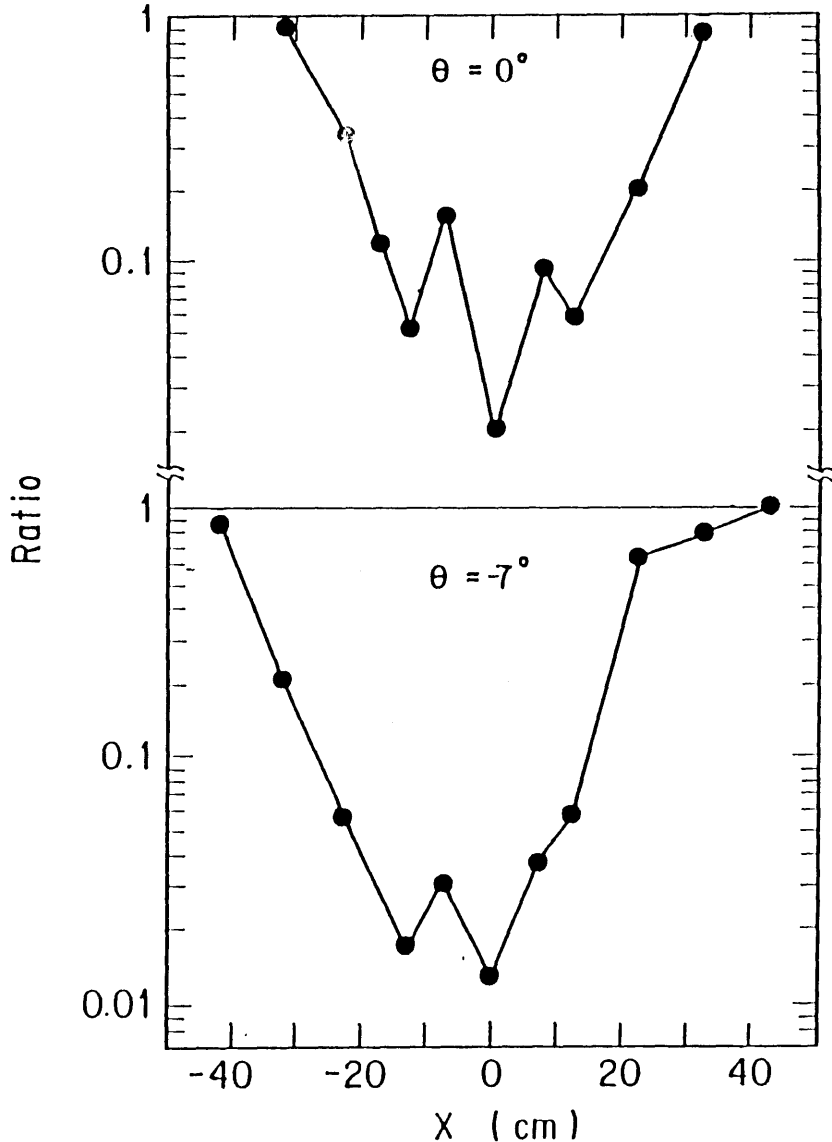


Fig.4.8 Ratio of dose rates with and without offset slit, on the measuring line behind the wall. Here $T=120\text{cm}$, $W=2.7\text{cm}$, $U_1=28\text{cm}$, $U_2=1.35\text{cm}$ and $U_3=U_4=12.8\text{cm}$.

第5章 実験値との比較によるG33コードの検証

前章で示した実験は、補償遮蔽を有する直スリット、斜ダクト、斜スリット、およびオフセットスリット付き遮蔽壁の代表例について行なったものであり、実験によって本設計手法は部分的に検証されたと言える。このため、本設計手法の検証を計算コードを用いてさらに行う。まず本章で計算コードの検証を不規則形状部付き遮蔽壁の実験と計算との比較によって示す。

計算コードは、これらの不規則形状を正確に表示でき、計算時間がモンテカルロコードに比べて短かく、且つ設計計算にしばしば利用される1回散乱コードG33およびそのversionを用いた。G33コードは1回散乱領域を遮蔽体内に設けて散乱計算を行い、1回散乱後は再生係数を用いた通常の点減衰計算を行う。再生係数はSPAN、QAD等の他の点減衰核コードと同じく点等方線源・無限単一媒質の値を扱う。補償遮蔽付き遮蔽壁の場合、遮蔽壁にはコンクリートと鉄が存在する。再生係数をコンクリートと鉄とした場合の遮蔽壁背面の線量率の違いを調べる目的で、それぞれの再生係数を用いたG33-GP計算を直スリット付き遮蔽壁について行った。線源は、①JRR4実験孔からのスペクトル、②Table5.1に示すBarnwell再処理工場遠隔プロセスセルでのPWR使用済燃料、の2種類とし、遮蔽壁表面から10km離れた点に点等方線源として設けた。線源スペクトルは、Fig.4.3、Table5.1から明らかなように、JRR4の場合は1~8MeVに、Barnwellの場合は2MeV以下に主として分布する。遮蔽壁の厚さは75cm、入射角は15°とした。まず、①と②の線源についてバルク遮蔽壁での線量率の減衰をG33-GPコードで計算し、Table3.4に示す線量率の減衰とスリット幅との関係から、JRR4の場合 $W=10\text{mm}$ 、Barnwellの場合 $W=7\text{mm}$ とした。直スリット付き遮蔽壁とバルク遮蔽壁の背面における線量率の比をFig.5.1(a)に示す。Barnwellの場合はコンクリートの再生係数による線量率の方が鉄での値より高くなり、JRR4の場合はコンクリートと鉄の再生係数で線量率の違いは見られない。以下に示す計算では、再生係数にコンクリートの値を使用する。

実験は、前章で示した(i)補償遮蔽を有する直スリット付き遮蔽壁、(ii)補償遮蔽を有する斜ダクト付き遮蔽壁、(iii)補償遮蔽を有する斜スリット付き遮蔽壁、(iv)補償遮蔽を有するオフセットスリット付き遮蔽壁、および実施で多く見られる(v)直ダクト付き遮蔽壁、(vi)複数の直ダクト付き遮蔽壁、(vii)1回屈曲ダクト付き遮蔽壁を用いた。これらの実験は全てJRR4散乱実験室にて行われた。補償遮蔽を有する直スリット付き遮蔽壁、補償遮蔽を有する斜ダクト付き遮蔽壁、補償遮蔽を有する斜スリット付き遮蔽壁および補償遮蔽を有するオフセットスリット付き遮蔽壁の解析⁽³⁴⁾には、G33-GPコード(G33コードにGP法⁽³⁵⁾に基づく再生係数を組み込み、1986年に公開。)を使用した。直ダクト付き遮蔽壁と1回屈曲ダクト付き遮蔽壁の解析^{(36),(28)}にはオリジナルのG33コードを使用した。複数の直ダクト付き遮蔽壁の解析⁽³⁷⁾には、G33コードに体積線源の機能を付加したG33-YSNコード⁽³⁸⁾を使用した。

実験値と計算値の比較は、(i)補償遮蔽を有する直スリット付き遮蔽壁、(ii)補償遮蔽を有する斜ダクト付き遮蔽壁、(iii)補償遮蔽を有する斜スリット付き遮蔽壁、(iv)補償遮蔽を有するオフセットスリット付き遮蔽壁、および(v)複数の直ダクト付き遮蔽壁については、不規則形状付き遮蔽壁背面の線量率と同一点におけるバルク遮蔽壁背面での線量率

との比で行い、以下に示すように、計算値は実験値と、直スリット付き遮蔽壁、斜ダクト付き遮蔽壁、斜スリット付き遮蔽壁では一部の点を除いて10%以内で、オフセットスリット付き遮蔽壁と複数の直ダクト付き遮蔽壁ではファクター2以内でそれぞれ一致した。また、(vi)直ダクト付き遮蔽壁、(vii)1回屈曲ダクト付き遮蔽壁では、実験と計算のダクト入口での線量率をそれぞれ1に規格化して、直ダクト付き遮蔽壁については遮蔽壁背面で、1回屈曲ダクト付き遮蔽壁では第2脚内でそれぞれ実験と計算の線量率の比較を行い、以下に示すように、計算値は実験値と、直ダクト付き遮蔽壁ではファクター2以内で、1回屈曲ダクト付き遮蔽壁では75%以内でそれぞれ一致した。

これらの計算精度は、他の計算コードと比較して同程度かあるいは優れている^{(7),(12)}。遮蔽計算にしばしば用いられるDOT等のSnコードを不規則形状部付き遮蔽壁の解析に適用する場合は、Sn分点数の設定に細心の注意と工夫が必要であり⁽⁹⁾、かつSnコードでは斜ダクト付き遮蔽壁、斜スリット付き遮蔽壁、複数の直ダクト付き遮蔽壁の形状を正確には表示できない。また、モンテカルロ計算では、計算精度を上げるためには膨大な計算時間が必要である。以上の観点から、1回散乱法は不規則形状部付きガンマ線遮蔽壁の解析において有力な手法であると考えられる。

Table5.1 Gamma-ray source intensity of PWR spent fuel in remote process cell of Barnwell reprocessing plant⁽¹²⁾

| Energy group | Energy range (MeV) | Mean energy (MeV) | Photons/cm ² /sec |
|--------------|--------------------|-------------------|------------------------------|
| 1 | 0 -0.5 | 0.3 | 3.08×10^{10} |
| 2 | 0.5 -0.9 | 0.63 | 1.86×10^{11} |
| 3 | 0.9 -1.35 | 1.1 | 2.01×10^9 |
| 4 | 1.35-1.8 | 1.55 | 1.79×10^9 |
| 5 | 1.8 -2.2 | 1.99 | 4.70×10^9 |
| 6 | 2.2 -5.0 | 2.38 | 8.91×10^5 |

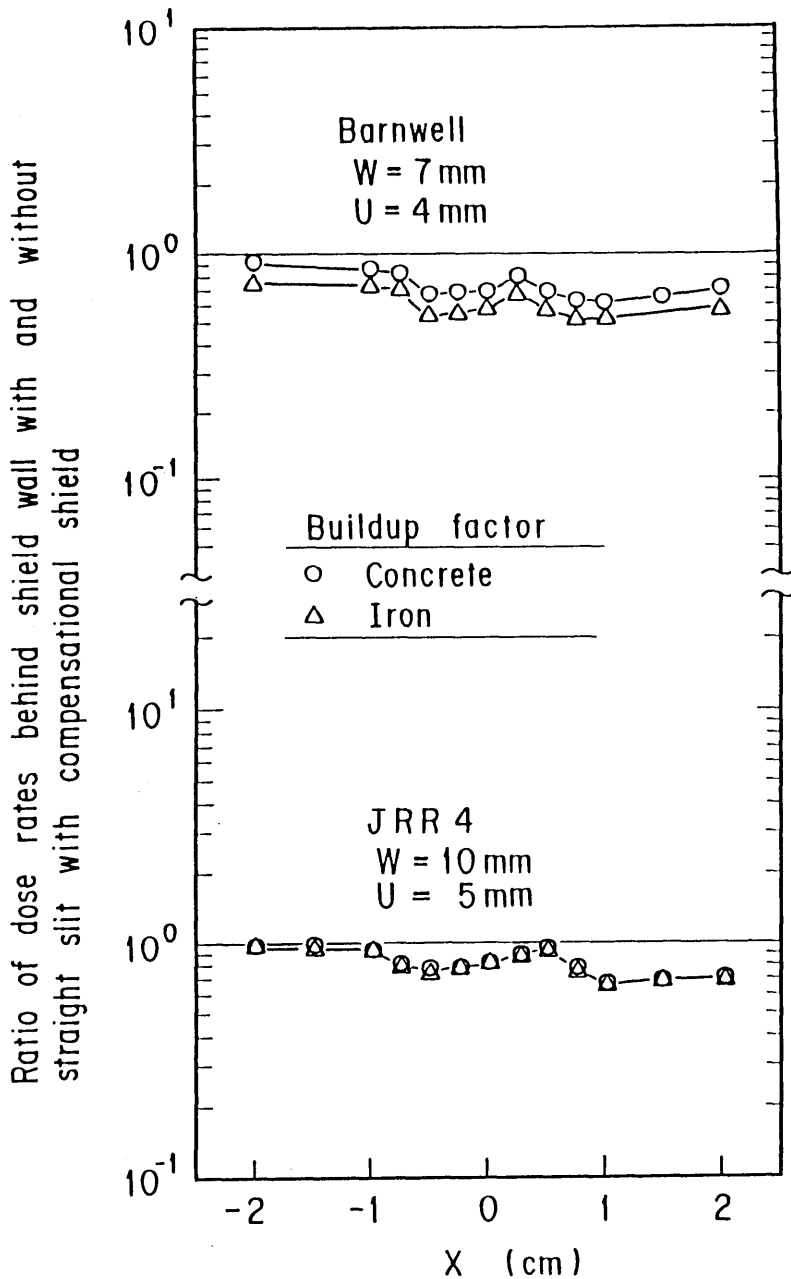


Fig.5.1(a) Ratio of dose rates behind shield wall with and without straight slit with compensational shield calculated by G33-GP code using buildup factors of concrete and iron. Here, shield wall thickness $T=75\text{cm}$ and incident angle $\theta=15^\circ$.

5.1 補償遮蔽を有する直スリット付き遮蔽壁(a*)

実験は第4章で述べた通りである。計算形状をFig.5.1(b)に示す。座標軸の原点は炉心中心と同一水平面にあるスリット出口中心点 P_0 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、壁背面の垂線をZ軸とする。

G33-GPコードで扱える線源の形状は点のみであるので、線源は点等方として炉心中心に設けた。Fig.5.1(b)に示すように、線源と P_1 とを結ぶ線と遮蔽壁の法線とのなす角度を入射角 θ とし、上から見て左回りを正方向とする。1回散乱領域は遮蔽壁内に設けた。そのZ方向の範囲は遮蔽壁の前面から背面までとし、X、Y方向は、1回散乱領域の外側のコンクリートで散乱したガンマ線による間隙部出口での線量率が、領域内で散乱したガンマ線によるそれに比べて無視できる程度となる範囲から定め、 $-50\text{cm} \leq X \leq 50\text{cm}$ 、 $-50\text{cm} \leq Y \leq 50\text{cm}$ 、 $-T \leq Z \leq 0\text{cm}$ 、の直方体形状とした。X、Y方向の散乱領域をそれぞれ10cm増加させて $-60\text{cm} \leq X \leq 60\text{cm}$ 、 $-60\text{cm} \leq Y \leq 60\text{cm}$ とした場合、間隙部出口における線量率の変化は、1%以下であった。散乱点の数は同コードで扱える最大数の8,000とした。^(注) コンクリートの原子密度は分析で得たTable4.1に示す値を用い、鉄の密度は7.86 g/cm³とし、空気は真空として扱った。遮蔽壁に入射するガンマ線は実験孔軸上でのエネルギースペクトルの測定値を縮約して1 MeV間隔の8群構造とし、1回散乱線は0.05 MeVから8 MeVまでを19に群分けした。

遮蔽壁背面($Y = 0\text{cm}$ 、 $Z = 0\text{cm}$)における実験値と計算値の比較をFig.5.2に示す。比較を行った全ての点で計算値は実験値と10%以内で一致した。

(注)計算形状は $Y = 0\text{cm}$ の線に対して対称であり、計算は $0 \leq Y \leq 50\text{cm}$ の領域について行い、計算結果を2倍して線量率を求めている。したがって、1回散乱領域全域における散乱点は16,000である。

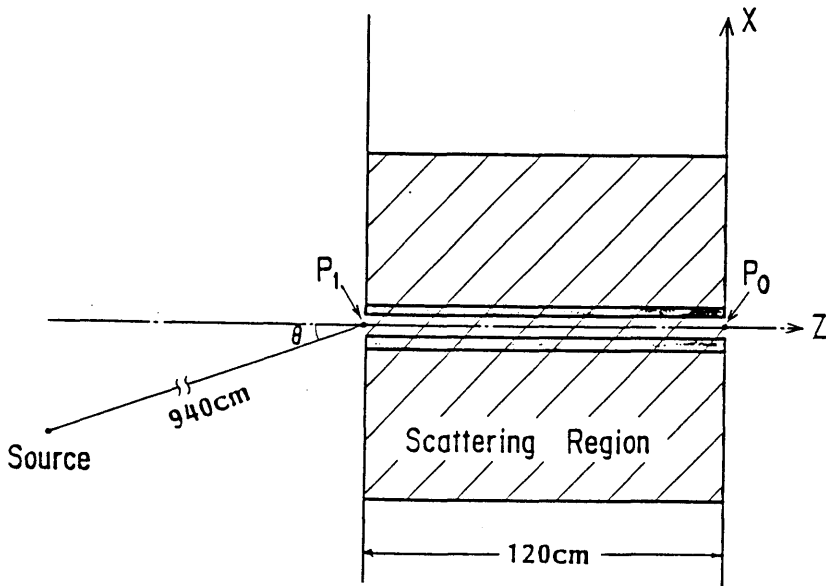


Fig.5.1(b) G33-GP calculational geometry of concrete wall with compensational shield for straight slit.

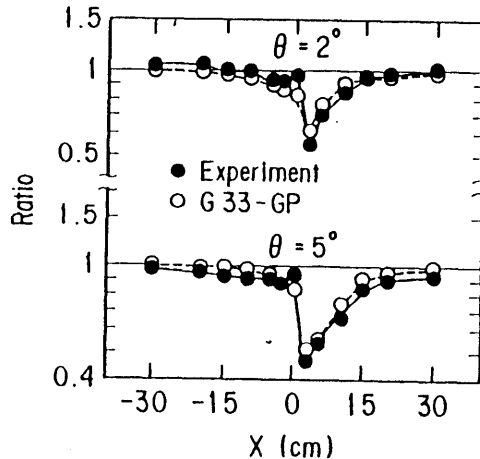


Fig.5.2 Ratio of dose rates with and without straight slit, on the measuring line behind the wall. Here $T=120\text{cm}$, $W=0.9\text{cm}$ and $U=0.45\text{cm}$.

5.2 補償遮蔽を有する斜ダクト付き遮蔽壁^(3*)

実験は第4章で述べた通りである。ダクト中心軸は炉心中心と同一の水平面上にあり、計算形状はFig.5.1(b)の直スリット付き遮蔽壁を斜ダクト付き遮蔽壁に置き換え、垂直入射としたものである。計算におけるエネルギー群数、線源位置は直スリット付き遮蔽壁の場合と同じである。座標原点はFig.4.1に示すように斜ダクトの延長線上で遮蔽壁背面から40cm離れた点とし、実験値と計算値の比較はX軸上にて行なった。1回散乱領域は測定線の線量率に大きく寄与する領域とし、斜ダクトの角度 $\theta = 15^\circ$ 配置ではダクト軸を中心軸とする半径75cmの円柱領域、斜ダクトの角度 $\theta = 30^\circ$ 配置ではダクト軸を中心軸とする半径130cmの円柱領域とした。実験値と計算値との比較をFig.5.3に示す。計算値は一部の点を除いて実験値と10%以内で一致している。

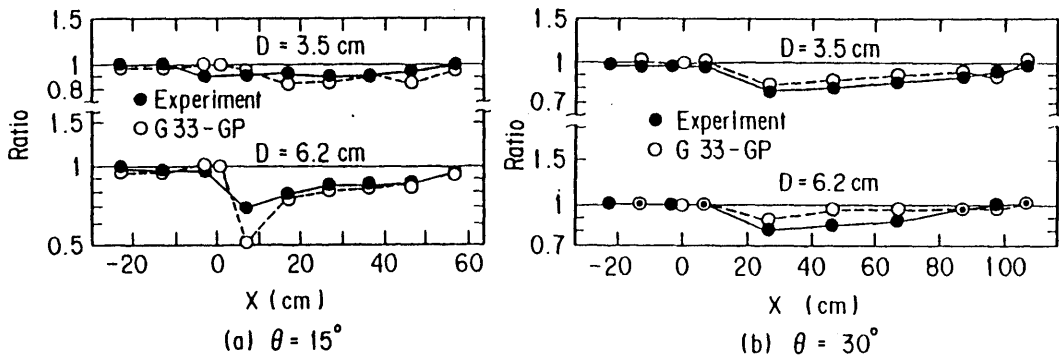


Fig.5.3 Ratio of dose rates with and without slant duct, on the measuring line behind the wall. Here $T=120\text{cm}$, $U=0.8\text{cm}$ for $D=3.5\text{cm}$ and $U=1.4\text{cm}$ for $D=6.2\text{cm}$.

5.3 補償遮蔽を有する斜スリット付き遮蔽壁^(3,4)

実験は第4章で述べた通りである。計算におけるエネルギー群数、線源位置は斜ダクト付き遮蔽壁の場合と同じであり、計算形状はFig.5.1(b)の直スリット付き遮蔽壁を斜スリット付き遮蔽壁に置き換え、垂直入射としたものである。座標原点はFig.4.1に示すように炉心中心と同一の水平面で、遮蔽壁背面から40cm離れたスリット出口延長線上の点とし、実験値と計算値の比較はX軸上にて行なった。1回散乱領域は遮蔽壁内に設けた。その大きさは、測定点での線量率に大きく寄与する領域とし、Z方向は遮蔽壁前面から背面まで、X方向の領域幅は170cm、Y方向の領域幅は100cmとした。実験値と計算値との比較をFig.5.4に示す。計算値は斜スリットの角度 $\theta = 15^\circ$ 配置のスリット出口延長線上での値を除いて実験値と10%以内で一致している。

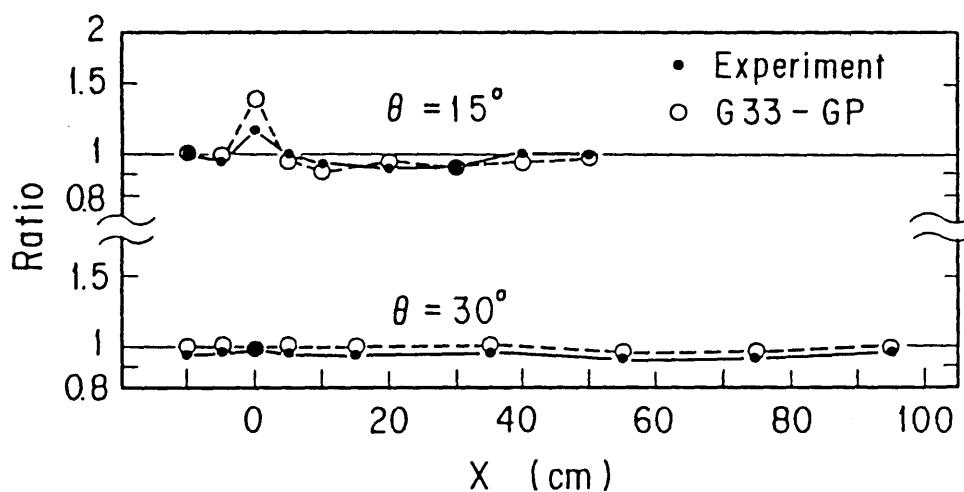


Fig.5.4 Ratio of dose rates with and without slant slit, on the measuring line behind the wall. Here $T=120\text{cm}$, $W=1.1\text{cm}$ and $U=0.25\text{cm}$.

5.4 補償遮蔽を有するオフセットスリット付き遮蔽壁⁽³⁴⁾

実験は第4章で述べた通りである。計算における線源位置、エネルギー群数、および1回散乱領域設定の考え方は前述の不規則形状付き遮蔽壁の場合と同じであり、計算形状はFig.5.1(b)の直スリット付き遮蔽壁をオフセットスリット付き遮蔽壁に置き換えたものである。座標原点は遮蔽壁背面のプラグ中心に設け、実験値と計算値の比較はX軸上にて行ない、これをFig.5.5に示す。計算値は実験値とファクター2以内で一致している。

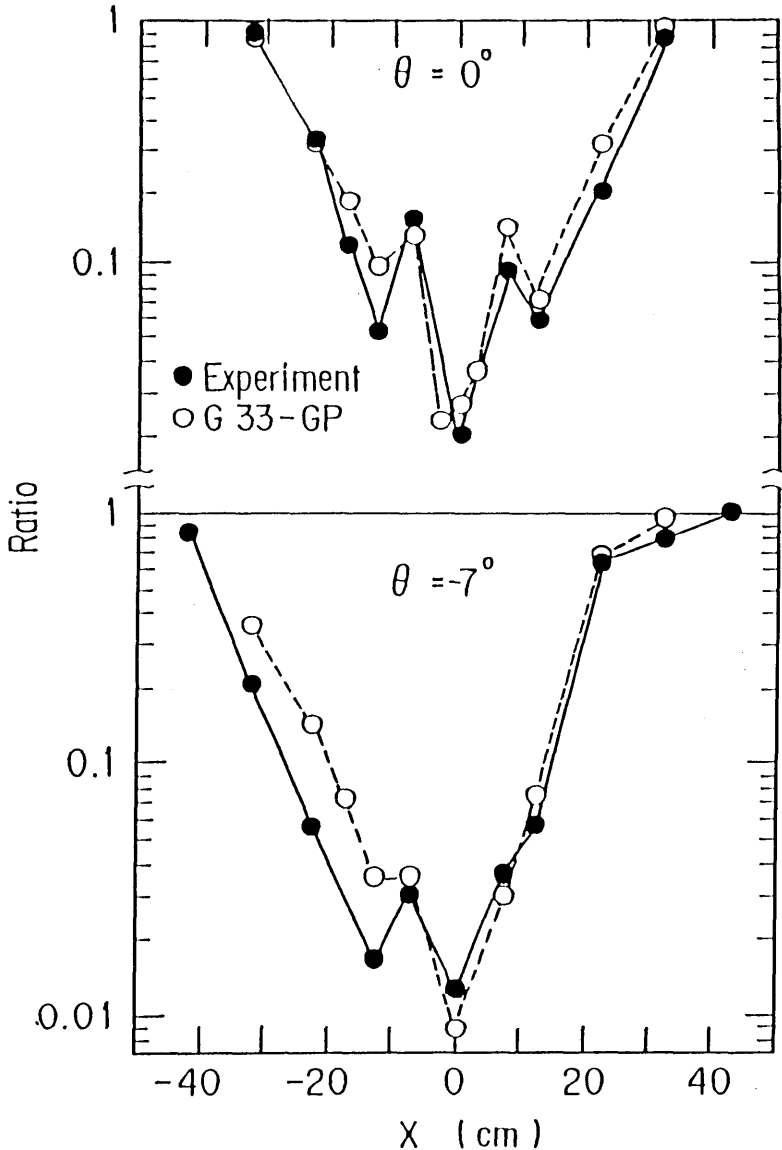


Fig.5.5 Ratio of dose rates with and without offset slit, on the measuring line behind the wall. Here $T=120\text{cm}$, $W=2.7\text{cm}$, $U_1=28\text{cm}$, $U_2=1.35\text{cm}$ and $U_3=U_4=12.8\text{cm}$.

5.5 直ダクト付き遮蔽壁⁽³⁶⁾

(1) 実験の概要

計算コードの検証に使用した実験は、原子力第1船遮蔽効果確認実験⁽³²⁾として、JRR4 散乱実験室で行われたものである。実験配置をFig.5.6に示す。本実験は炉心および実験孔が前述のFig.4.1に示した配置と異なる。散乱実験室内の実験孔軸上におけるガンマ線のエネルギースペクトルはNaI(Tl)検出器で測定されており、これをFig.5.7に示す。遮蔽壁は密度2.45g/cm³の普通コンクリートからなり、その組成は文献(32)に示されている。遮蔽壁の厚さLは75と150cmの2種類である。ダクトは遮蔽壁に直円筒の鋼管を垂直に貫通させて形成している。ダクト内は空気である。ダクト(鋼管)の直径は1、2、4 in. の3種類である。鋼管の肉厚は、1 in. 直径鋼管が3.5mm、2 in. 直径鋼管が3.8mm、4 in. 直径鋼管が6mmである。ガンマ線のダクト入口入射角 α (ダクト中心軸とガンマ線ビームとの間の角度)は0°、15°、30°の3種類である。実験は上記の遮蔽壁厚さ、ダクト直径およびダクト入口入射角 α を組み合わせて行われ、それぞれの形状に対して、遮蔽壁背面における照射線量率(以下、線量率)とダクト入口における線量率の比が求められている。

文献(32)には測定値に含まれる誤差の記載がない。しかし、前述のように同一定格出力、同一点における線量率測定値の最大値と最小値との比は1.03であることから、遮蔽壁背面とダクト入口における線量率の比には、上記の変動により最大3%の系統誤差が含まれると考えられる。

Table5.1に実験形状の種類とその名称を示す。実験はダクト出口と線源との位置の關係に注目して、ダクト出口から、

- (i) 線源を完全に直視できる、
- (ii) 線源の一部のみを直視できる、
- (iii) 線源を直視できない、

の3通りの配置に分類できる。同表に示す $\alpha = 0^\circ$ の実験形状のうち、実験1-75-0、4-75-0および4-150-0は、実験孔内の鉛のフィルタがないと仮定すると、遮蔽壁背面のダクト中心軸上の検出点から実験孔入口面(実験孔の炉心側の面)のすべてを直視でき(i)の配置に相当する。 $\alpha = 0^\circ$ の残りの実験形状である実験1-75-0および2-150-0は、遮蔽壁背面のダクト中心軸上の検出点から実験孔入口面の一部のみを直視でき、(ii)の配置に相当する。 $\alpha \neq 0^\circ$ のすべての実験形状は(iii)の配置に相当する。

(2) 計算方法

計算はG33コードで行った。計算形状および計算に使用したエネルギー群構造、1回散乱領域、遮蔽定数を以下に示す。

a. 計算形状

(i)および(ii)の配置に相当する実験形状に対しては、G33コードで扱える線源形状が点であることから、炉心中心の位置に点線源のある計算形状とした。これを計算形状1としてFig.5.8に示す。(ii)の配置に相当する実験形状に対しては、炉心中心の位置に点線源があるとした計算形状ではダクト出口から線源を完全に直視することになり、適切な形状近似にならない。この実験形状に対しては、1辺が30cmの正方形の実験孔入口面を線