

源面とし、これを3つの小領域(小領域1~3と呼ぶ)に分け、各小領域の線源を点線源で代表させる計算形状とした。線源強度は実験孔入口面の位置によらず一定とした。これを計算形状2としてFig.5.9に示す。

計算形状1、2とも座標軸の原点はダクト入口中心とし、この点を通る遮蔽壁前面の水平線をX軸(遮蔽壁の背面に向かって左方向を正)、垂直線をY軸(上方向を正)、ダクト中心軸をZ軸(ダクト出口方向を正)とした。

計算形状2の小領域1は遮蔽壁背面のダクト中心軸上の検出点から直視できる実験孔入口面とした。この小領域は円板形状であり、円板の半径をRとすると、実験1-75-0では $R=10.4\text{cm}$ 、2-150-0では $R=12.0\text{cm}$ である。小領域1の点線源の位置は円板の中心とした。小領域2は小領域1の外側の $X \geq 0\text{cm}$ の部分とし、点線源の位置は $X \geq 0\text{cm}$ における $Y=0\text{cm}$ の線と、小領域1の境界の交わる点および実験孔入口面の外縁($X=15\text{cm}$)の交わる点の2点を結ぶ線分の midpoint とした。小領域の形状をFig.5.9に、線源位置をTable 5.2に示す。

計算では線源と遮蔽壁の間を空気とし、鉛フィルタ等を省略した。この理由は、計算では遮蔽壁に入射するガンマ線のエネルギースペクトルを線源として入力していることによる。なお、計算形状では実験孔の形状を省略したが、後述の1回散乱領域は実験孔の出口形状に基づいて定めた。

b. エネルギー群構造

エネルギー別の線源強度はFig.5.2の0~8MeVのスペクトルを0.8MeV幅で10群に縮約して求め、その代表エネルギーは上限と下限のエネルギーの平均値とした。1回散乱線のエネルギー群数は20で、各群のエネルギー幅は0.4MeVとした。

c. 1回散乱領域

1回散乱領域は遮蔽壁内に設けた。その領域はダクト中心軸を軸とする円筒で、円筒の長さは遮蔽壁の前面から背面までとした。円筒の内径はダクトの径に等しくし、外径は1辺が60cmの正方形の実験孔出口面と等価の断面積を有する円の直径に等しくした。散乱点は円柱(R, θ, Z)座標で入力した。その数は R, θ, Z の各方向とも20とした。

d. 遮蔽定数

線減衰係数はコード内蔵のデータを使用した。再生係数は水の点等方線源に対する線量再生係数のみがG33コード(オリジナル版)に内蔵されており、これを用いた。コンクリートと水の再生係数の比は、コンクリート150cm透過に相当するmfpにおいて、ガンマ線エネルギーが1MeVでは0.82であるが、2、4、6、10MeVではそれぞれ1.01、1.03、1.02、1.00である⁽⁴⁰⁾。本実験の入射ガンマ線エネルギースペクトルはFig.5.7に示すように2MeV以上が主であり、再生係数に水のデータを用いたことによる線量率の変化はコンクリート75cm透過で1%以下、コンクリート150cmで2%以下と評価した。

(3) 実験値と計算値の比較および考察

実験値と計算値の比較は、遮蔽壁背面から5cm後方の $Y=0\text{cm}$ の水平線上で行われた。Table5.1に挙げたすべての形状についての実験値と計算値の比較をFig.5.10(a)、(b)、5.11、5.12(a)、(b)に示す。

a. (i)の配置

線量率のピークはダクト中心軸上にある。遮蔽壁の厚さごとに実験値と計算値の比較および考察を示す。

(a) $L = 75\text{cm}$

解析した形状は実験 2-75-0 と 4-75-0 である。ダクト中心軸上における C/E は、実験 2-75-0 で 1.16、4-75-0 で 0.95 である。 $X = 0\text{cm}$ の計算における線量率の約 99% は直接線によるものであり、実験値との不一致の主な原因は、計算における線源の形状を点で近似したことによると考えられる。

計算値は遮蔽壁の背面のダクト中心軸からダクト壁までほぼ一定の値を示し、鋼管およびその外周部の背面において急激に減衰して実験値に比べ低い値を示し、この領域の外側の遮蔽壁背面ではダクトから離れるにつれて緩やかに増加して実験値より高い値を示す。計算値が鋼管およびその外周部の背面で急激に減衰する理由は、計算では炉心中心の位置に点線源があることから、鋼管を透過せずにこの領域に到達するガンマ線が少ないことによる。この領域の外側で、検出点が $|X|$ の増大する方向に移動するに伴い計算値が緩やかに増大する理由は、ダクトから離れるにつれて鋼管を透過して検出点に到達するガンマ線が少なくなり、逆にバルク部コンクリートを透過・散乱して検出点に到達するガンマ線が多くなるためである。また $X = 20\text{cm}$ の近傍における実験値と計算値は 2 in. と 4 in. の 2 つのダクト直径に依存しない。すなわち、この領域における線量率は遮蔽壁のバルク部を透過したガンマ線によるものである。

(b) $L = 150\text{cm}$

解析した形状は実験 4-150-0 である。ダクト中心軸上における C/E は 1.02 であり、計算値は実験値と測定誤差の範囲内で一致している。しかし、ダクト半径より大きい領域での計算値は実験値に比べて低い。Fig. 5.10(b) から、実験 4-150-0 の $X = 20\text{cm}$ における実験値と 2-150-0 の $X = 20\text{cm}$ における実験値との比は約 3 であり、本形状の $X = 20\text{cm}$ における線量率には、遮蔽壁のバルク部のみを透過したガンマ線よりもダクト部を漏洩し、かつバルク部を透過したガンマ線が主に寄与していることがわかる。計算ではガンマ線の進行方向およびエネルギーを変化させる散乱を 1 回扱い、1 回散乱後は再生係数を用いて散乱の効果を表わすため、ダクト壁で 2 回以上散乱した後にバルク部を透過して遮蔽壁の背面に到達するガンマ線を考慮していない。ダクト半径より大きい領域で計算値が実験値に比べて低い理由として、ダクト壁で 2 回以上散乱したガンマ線を計算では考慮していないことが考えられる。

b. (ii) の配置

解析した形状は実験 1-75-0 と 2-150-0 である。線量率のピークはダクト中心軸上にあり、この点における C/E は実験 1-75-0 で 0.81、2-150-0 で 0.82 である。

実験 1-75-0 の計算値は、鋼管およびその外周部の背面では実験値に比べて低いが、この領域の外側では検出点が $|X|$ の増大する方向に移動するとともに実験値に近づき、 $X = 11 \sim 15\text{cm}$ では実験値の測定誤差の範囲内にある。

実験 2-150-0 の計算値は、鋼管およびその外周部の背面において急激に減衰し、 $X = 4\text{cm}$ での C/E は 0.1~0.2 となる。しかし、 $X > 4\text{cm}$ の領域では、 X の増加に伴う計算値の減衰が実験値に比べて緩やかであり、 $X = 10\text{cm}$ での C/E は 0.37、 $X = 20\text{cm}$ での

C/Eは0.74となる。Xがダクトの径より大きい領域で計算値が実験値に比べて低い理由は、(i)の配置のL=150cmの実験4-150-0と同じく、ダクト壁で2回以上散乱した後にバルク部を透過して遮蔽壁の背面に到達するガンマ線を計算では考慮していないことが考えられる。また、検出点が|X|の増大する方向に移動するに伴いバルク部のみを透過するガンマ線の割合が増すため、X>4cmの領域ではダクトから離れるにつれて計算値は実験値に近づくと考えられる。

実験1-75-0、2-150-0とも、ダクト出口中心軸上の線量率の計算値には、検出点から直視可能な小領域1からのガンマ線によるものが約99%を占める。この(ii)の配置を炉心中心の位置にのみ点線源があるとした計算形状1で計算を行い、ダクト出口中心軸上の線量率を求めると、C/Eは実験1-75-0で2.1、2-150-0で1.8となり、計算形状2での値に比べて計算精度は悪い。しかし、計算形状1で求めたダクト中心軸上の線量率に、検出点から直視可能な実験孔入口面積と全入口面積との比を乗じて線源面積の補正を行い、これを計算値とすると、C/Eは実験1-75-0で0.81、2-150-0で0.89となり、計算精度は向上する。したがって、ダクト中心軸上の線量率は、点線源で求めた値に、検出点から直視可能な実験孔入口面積と全入口面積との比を乗じて補正を行えば、面線源で求めた計算値とほぼ等しい値が得られる。

c. (iii)の配置

(a) L=75cm

$\alpha = 15^\circ$: 解析した形状は実験1-75-15、2-75-15および4-75-15である。ダクト中心軸上におけるC/Eは、実験1-75-15が1.09、2-75-15が0.88、4-75-15が0.69であり、ダクトの径が大きくなるにつれてC/Eは小さくなる。線量率のピークは実験値・計算値ともダクト中心軸上から外れる。線量率のピークにおけるC/Eは、実験1-75-15が1.20、2-75-15が0.98、4-75-15が0.82であり、計算値は実験値と20%以内で一致する。

|X| ≤ 20cmの領域において、計算値は実験値に比べて、実験1-75-15では過大評価であり、2-75-15ではほぼ等しく、4-75-15では一部を除いて過小評価である。したがって、計算値はダクトの径が小さく透過成分の割合の多い形状では過大評価し、ダクトの径が大きくストリーミング成分の割合の多い形状では過小評価となる。透過成分の計算値が過大評価となる理由として、計算では点等方線源の再生係数を用いていることが挙げられる。ストリーミング成分の計算値が過小評価となる理由として(i)、(ii)の配置のL=150cmと同じく、ダクト壁で2回以上散乱してストリーミングする成分を、計算では考慮していないことが考えられる。

$\alpha = 30^\circ$: 解析した形状は実験1-75-30、2-75-30および4-75-30である。実験では、実験孔入口面から遮蔽壁背面の検出点領域に到達する非散乱線のうちの一部は実験孔壁を透過する。しかし、計算形状では実験孔壁を省略しており、実験孔壁によるガンマ線の減衰が考慮されていない。したがって、直接線の計算値は過大値である。この理由により、Fig.5.12(a)の計算値には、直接線と散乱線を合わせた線量率と、直接線を含まない散乱線のみによる線量率との両方の値を示し、それぞれを計算における上限値および下限値とした。

実験1-75-30では、実験値・計算値とも線量率のピークは見られない。実験2-75-30と4-75-30では、線量率のピークはダクト中心軸以外の点にある。ダクト中心軸上において直接線と散乱線を合わせた線量率に対するC/Eは、実験1-75-30で1.35、2-75-30で1.07、4-75-30で0.91であり、散乱線のみによる線量率についてのC/Eは、実験1-75-30で0.99、2-75-30で0.83、4-75-30で0.73である。

|X| ≤ 20cmの領域において、実験1-75-30と2-75-30の実験値は計算における上限・下限値間にある。実験4-75-30の実験値は、-6cm < X < 2cmの領域において計算における上限値より30%以内の範囲で高いが、その他の領域では計算における上限・下限値間にある。

(b) L = 150cm

解析した形状は実験2-150-15、4-150-15および4-150-30である。実験値と計算値のピークはダクト出口部にある。計算におけるダクト中心軸上の線量率の93~97%は散乱線によるものである。Fig.5.12(b)には散乱線のみによる線量率の計算値も示す。ダクト中心軸上における直接線と散乱線を合わせた線量率についてのC/Eは3種類の形状とも約1/2である。計算値が実験値に比べて低い理由として、ダクト壁で2回以上散乱しダクト出口にストリーミングするガンマ線を計算では考慮していないことが挙げられる。

(4)まとめ

75cm厚さの遮蔽壁の背面では、線量率のピークが(i)、(ii)の配置ではダクト中心軸上にあり、(iii)の配置ではダクト中心軸以外の点にある。線量率のピークにおけるC/Eは、(i)の配置では0.95~1.16の範囲にあり、(ii)の配置では0.81、(iii)の配置の $\alpha = 15^\circ$ では0.82~1.20の範囲にある。したがって、これらの配置の線量率のピークにおける計算値は実験値と20%以内で一致する。(iii)の配置の $\alpha = 30^\circ$ における実験値のピークは、計算の上限・下限値間にある。(i)~(iii)の配置の遮蔽壁背面の|X| ≤ 20cmの全領域において、計算値は実験値とファクタ2以内で一致する。

150cm厚さの遮蔽壁の背面では、線量率のピークが(i)、(ii)の配置ではダクト中心軸上にあり、(iii)の配置ではダクト出口部にある。線量率のピークにおけるC/Eは、(i)の配置では1.02、(ii)の配置では0.82、(iii)の配置では約1/2である。線量率のピークにおける計算値は、(i)、(ii)の配置では直接線による線量率が全線量率の99%以上を占めるが、(iii)の配置では散乱線による線量率が全線量率の93%以上を占める。(i)、(ii)の配置のダクト外周部で、Xがダクト半径の4倍以内の領域におけるC/Eは1/2以下であり、計算値には散乱線による線量率が全線量率の90%以上を占める。(iii)の配置のダクト出口部と、(i)、(ii)の配置のダクト外周部とで計算値が実験値に比べて低い理由として、ダクト壁で2回以上散乱するガンマ線を計算では考慮していないことが挙げられる。

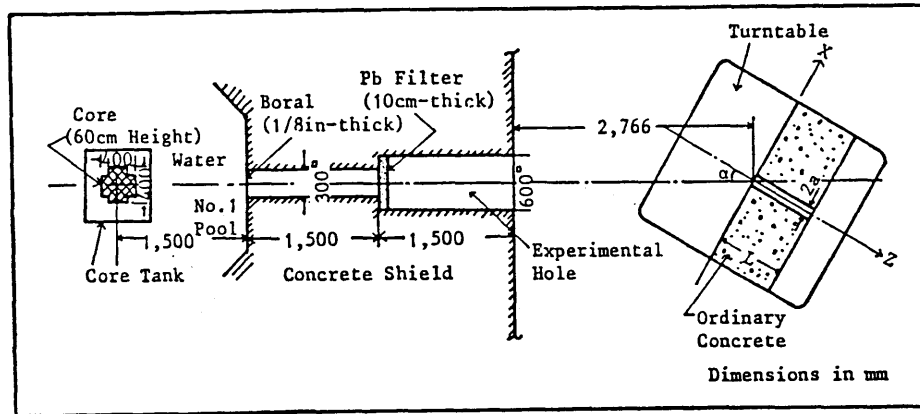


Fig.5.6 Arrangement of straight duct experiment (Plan view)

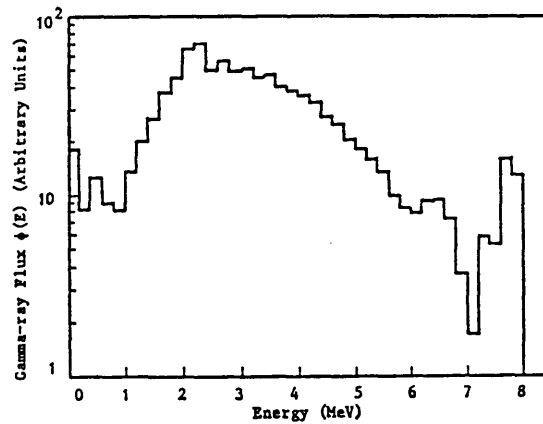


Fig.5.7 Energy spectrum of incident gamma rays

Table 5.1 Identification of straight duct experiment

Duct diameter (in.)	Shield thickness (cm)	Incident angle (deg)	Experiment number
1	75	0	1-75-0
		15	1-75-15
		30	1-75-30
2	75	0	2-75-0
		15	2-75-15
		30	2-75-30
2	150	0	2-150-0
		15	2-150-15
4	75	0	4-75-0
		15	4-75-15
		30	4-75-30
4	150	0	4-150-0
		15	4-150-15
		30	4-150-30

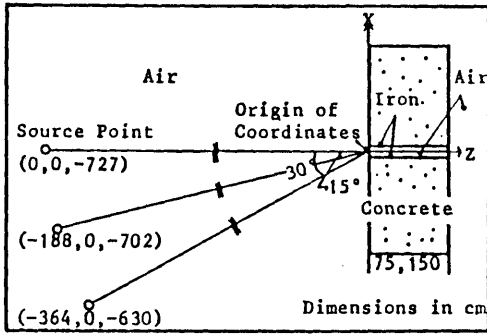


Fig. 5.8 G33 calculational geometry 1 for configuration (i) and (iii) of straight duct experiment.

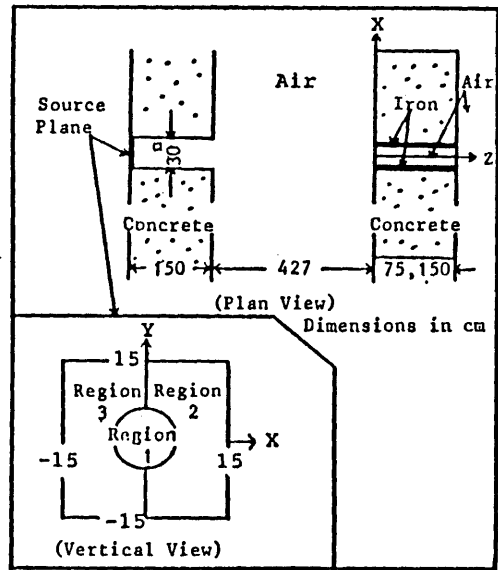


Fig. 5.9 G33 calculational geometry 2 for configuration (ii) of straight duct experiment.

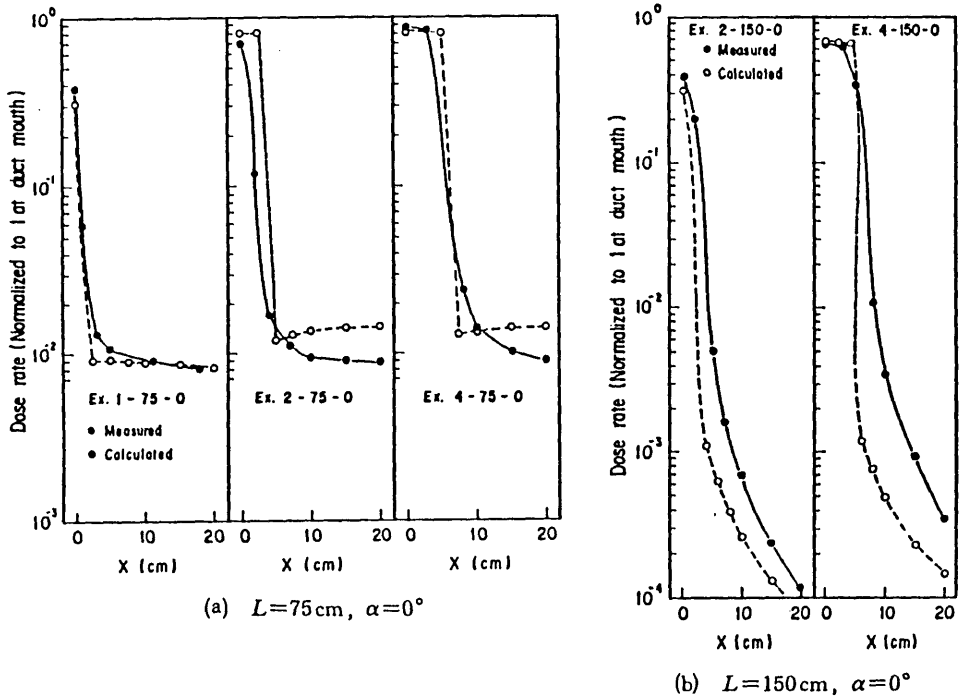


Fig. 5.10(a), (b) Comparison of G33 calculations with measurements of gamma-ray dose rates behind shield wall with straight duct

Table 5.2 G-33 source positions for configuration (ii)

Experiment number	Source region	Source position (cm)	
		X	Y
1-75-0	1	0.0	0.0
	2	12.7	0.0
	3	-12.7	0.0
2-150-0	1	0.0	0.0
	2	13.5	0.0
	3	-13.5	0.0

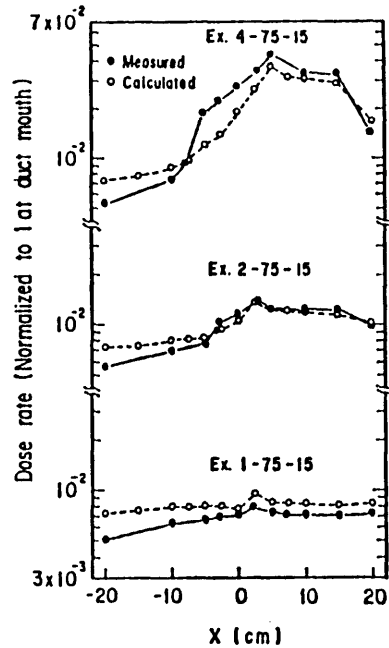
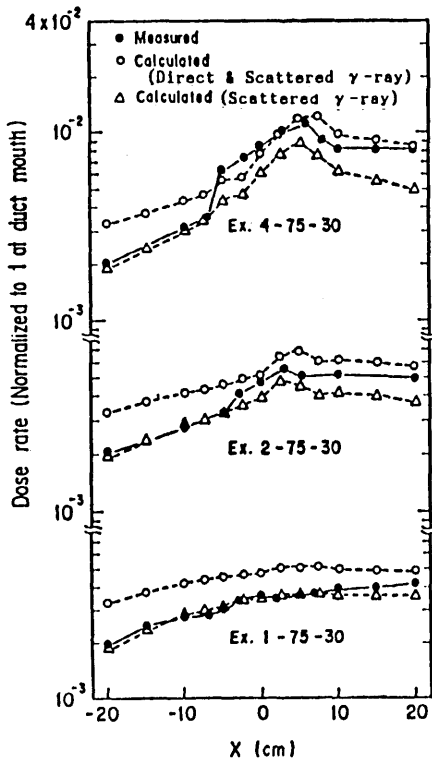
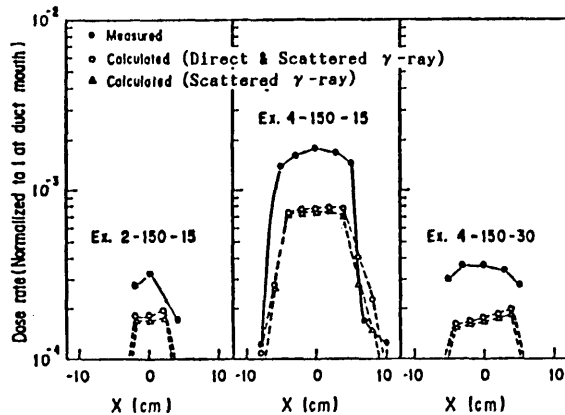


Fig.5.11 Comparison of G-33 calculations with measurements of γ -ray dose rates behind shield wall ($L=75\text{cm}$, $\alpha=15^\circ$)



(a) $L=75\text{cm}$, $\alpha=30^\circ$



(b) $L=150\text{cm}$, $\alpha=15^\circ$ and 30°

Fig.5.12(a), (b) Comparison of G33 calculations with measurements of gamma-ray dose rates behind shield wall with straight duct

5.6 複数の直ダクト付き遮蔽壁⁽³⁷⁾

原子炉等の遮蔽壁においては、多数の直円筒ダクトが壁に埋め込まれる⁽¹²⁾。これらの直円筒ダクトは、遮蔽上の観点から、線源から離れかつダクト出口からは線源を直視できない位置に配置することが望ましい。一方上記の領域は限られることから、この領域に多数のダクトを集中させ、ダクトを相互に近接して配置する例が見られる⁽³⁾、⁽³²⁾。この配置においては、個々のダクトが遮蔽壁に単独に存在するとしてそれぞれの放射線漏洩量を求め、これを加え合わせて複数のダクトによる漏洩量とするのではなく複数のダクトを横切るガンマ線、複数のダクト壁で散乱するガンマ線等の効果(以下、複数ダクト近接効果)を含めてその遮蔽性能を評価する必要がある。

しかし、遮蔽壁に埋め込まれた直円筒ダクトの内部およびその周囲の放射線挙動に関する研究は、単一のダクトについては数多く発表されているが⁽⁶⁾、複数のダクトについては実験および計算ともに発表例はない。また、現在種々の遮蔽計算に広く利用されている2次元S_nコードでは、複数の直円筒ダクトの埋め込まれた遮蔽壁の形状を正確に模擬できない。

本節では、複数の直円筒ダクトの埋め込まれたガンマ線遮蔽用コンクリート壁背面の線量率を実験により求めて、複数ダクト近接効果を明らかにするとともに、複数の直円筒ダクトの形状表示が行える1回散乱コードG33YSNで実験を解析し、同コードの検証を行う。G33YSNは、G33コードに体積線源と面線源を扱える機能を付加し、PALLASコードで計算された点等方線源に対する、水、コンクリート、鉄、鉛の照射再生係数⁽²³⁾を内蔵したコードである。実験は、1個、3個、5個の直円筒ダクトの埋め込まれた遮蔽壁およびダクトのない遮蔽壁に、原子炉からの平行ビームガンマ線を種々の角度にて入射させ、それぞれの入射角度について遮蔽壁背面の線量率分布を測定した。

(1) 実験

実験配置をFig.5.13に示す。実験に使用したコンクリート遮蔽壁(100×100×100cm³)は、その中心点P₀(Fig.5.13参照)を通る鉛直線を軸として、上から見て右回りに回転させて、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。P₀は実験孔の中心軸上で、実験孔出口から640cm離れた点に固定した。ここで、P₀を通る遮蔽壁前面・背面の垂線と実験孔の中心軸とのなす角度を θ とする。測定は $\theta = 0^\circ$ 、 7° 、 14° 、 20° の配置について行なった。遮蔽壁の厚さは100cmである。遮蔽壁に使用したコンクリートの原子密度はテストピースを分析して求め、これをTable5.3に示す。以下、P₀を座標軸の原点とし、原点を通り遮蔽壁面に平行な水平線をX軸(原点から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)、遮蔽壁面に垂直な水平線をZ軸(遮蔽壁前方向を負とする)として記述する。

コンクリート遮蔽壁の形状は、遮蔽壁にダクトが5個埋め込まれた形状(5ダクト形状という。遮蔽壁の形状をFig.5.14に示す。同図に示す5つのダクトのうち、ダクトaはその中心軸がZ軸に等しく、ダクトb、cの中心軸はX軸上にあり、ダクトd、eの中心軸はY軸上にある。各ダクト中心軸の座標をTable5.4に示す。)、ダクトが3個埋め込まれた形状(ダクトa、b、cのみがある形状であり、3ダクト形状と言う。)、ダクトが1個埋め込まれた形状(ダクトaのみがある形状であり、単一ダクト形状と言う。)、ダクトの

ない形状(以下、バルク形状)の4種類とした。各ダクトは水平で、遮蔽壁の前面・背面を垂直に貫通している。ダクトの直径はすべて8.9cmとした。

ダクトによる遮蔽性能の低下は、ダクトのある形状とバルク形状との遮蔽壁背面の同一点における照射線量率(以下、線量率)の比で表示するとし、各遮蔽壁について壁背面から20cm後方の水平線上(検出器中心を $Y = 0$ cm、 $Z = 70$ cmのX線上にて、 -30 cm $\leq X \leq 30$ cmの領域を2 cm間隔で移動)の線量率をJRR-4の最大熱出力である3.5 MWにて測定した。測定にはVictreen社製660-4型および5型デジタル線量計(以下、4型および5型線量計)を用いた。同線量計は円板形で、検出器窓面積は4型線量計が10cm²(半径1.78 cm)、5型線量計が100cm²(半径5.64 cm)である。

4型線量計(線量率測定可能範囲0.06~6,000R/h)は小型であり、5型線量計(線量率測定可能範囲0.1mR/h~9.99R/h)に比べて、位置の違いによる線量率の変化をより正確に表示できる。しかし、測定ライン上での線量率は0.7~80R/hであるのに対し、使用した4型線量計のバックグラウンドの読み値が0.96R/hあり、低線量率場での測定には5型線量計(バックグラウンドの読み値0.0mR/h)の方が適している。一方、5型線量計では、一部の測定においてその線量率測定可能範囲を越える。これらの理由により、位置の違いによる線量率の変化が大きく、かつ高線量率場のある、0°配置のダクトのある形状と7°配置の5ダクト形状の測定には4型線量計を用い、その他の形状については5型線量計を用いた。4型と5型の線量計による線量率は、同一点において、バックグラウンドの読み値を差し引いて規格化した。ダクトあり形状とバルク形状との壁背面の同一点における線量率の比には、前述の実験と同様に最大3%の系統誤差が含まれると考えられる。

遮蔽壁の前方には、ガンマ線が遮蔽壁周囲から壁背面にまわり込むことを防ぐ目的でコリメータを設置した。したがって、本実験配置では、コリメータ内壁で散乱し、その後ダクト内をストリーミングするガンマ線があると考えられる。この効果は、単一と3ダクトの形状について、コリメータのある配置とない配置のダクト出口線量率を、 $\theta = 7^\circ$ 、 14° 、 20° 配置において測定することにより検討した。ただし、コリメータのない配置では、ガンマ線の壁背面へのまわり込みを防ぐ目的で、実験孔から遮蔽壁に向かって右側の遮蔽壁側面に新たにコンクリートの遮蔽体を追加した。ダクトa、bの中心軸上の点 P_1 、 P_2 (Fig.5.13参照)において、コリメータのある配置とない配置での線量率の比は、単一ダクト形状における点 P_1 で1.04($\theta = 14^\circ$)~1.11($\theta = 7^\circ$)、3ダクト形状における点 P_1 で1.08($\theta = 7^\circ$)~1.10($\theta = 20^\circ$)、点 P_2 で1.06($\theta = 14^\circ$)~1.08($\theta = 20^\circ$)であった。したがって、ダクト出口(点 P_1 、 P_2)の実験値には、コリメータ内壁で散乱しダクト内をストリーミングするガンマ線が4~11%程度含まれると考えられる。

(2)実験結果

各遮蔽壁について、円板型線量計の中心を壁背面から20cm後方の $Y = 0$ cmの水平線上にて移動させて線量率を測定した。ダクトあり遮蔽壁(単一、3、5ダクト形状の遮蔽壁)とバルク遮蔽壁との線量率の比(以下、線量率比)を $\theta = 0^\circ$ 、 7° 、 14° 、 20° 配置についてFig.5.15(a)~(d)に示す。

(i) $\theta = 0^\circ$ 配置

ダクトaの中心軸上において、3ダクトと単一ダクト形状との線量率の比は1.04であり、

5ダクトと単一ダクト形状との線量率の比は1.08である。この結果から、3ダクトと5ダクト形状のダクトa出口の線量率には、a以外のダクトによる寄与が、ダクト1個当たり2%程度あることがわかる。Fig.5.15(a)から明らかなように、複数ダクト近接効果は僅かである。

(ii) $\theta = 7^\circ$ 配置

単一と3ダクト形状の測定には5型線量計を用い、5ダクト形状の測定には4型線量計を用いた。5ダクト形状では小型の検出器を用いていることから、線量率の山と谷が顕著に現われており、単一および3ダクト形状では大型の検出器を用いていることから、線量率比はなだらかな分布を示している。

単一および5ダクト形状における線量率比のピークは、各ダクトの中心軸ではなく、中心軸からXの正方向に4cm程度移動した点にある。この理由として、 $\theta \cong 7^\circ$ の角度でダクトを横切る非散乱ガンマ線の寄与が考えられる。5ダクト形状における線量率比のピークは、中心軸が $X = -17.8\text{cm}$ のダクトc出口部が最も高く、続いて中心軸が $X = 0\text{cm}$ のダクトa出口部、中心軸が $X = 17.8\text{cm}$ のダクトb出口部の順となる。3ダクト形状においても、ダクトc出口部の線量率比は、他のダクト出口部のそれに比べて高い値を示している。この理由として、 $\theta = 7^\circ$ 配置では複数のダクトを横切って検出点に到達する非散乱ガンマ線はなく、各出口部のピーク点と実験孔入口中心(Fig.5.13の P_0)とを結ぶ線上でのコンクリートの透過距離は、ダクトc、a、b出口部の順に38、49、57cmであり(同線と遮蔽壁の法線とのなす角度は、ダクトc、a、b出口部の順に 5.73° 、 6.74° 、 7.76° である)、このため各ピーク点に到達する非散乱ガンマ線の線量率はダクトc、a、b出口部の順に小さくなることが考えられる。

(iii) $\theta = 14^\circ$ 、 20° 配置

単一ダクト形状における線量率比のピークは、 $\theta = 7^\circ$ 配置のそれとは違ってダクトaの中心軸上にある。

複数ダクト形状では、Xが負の領域よりも正の領域の方が線量率比は高い。Xが正の領域では、ダクト内をストリーミングするガンマ線に加えて、2~3個のダクトを横切る非散乱ガンマ線が線量率比に寄与していると考えられる。

単一ダクトとバルク形状における線量率の比は、入射角が 7° 、 14° 、 20° に対して、それぞれ1.2~7.1、1.1~2.7、1.0~1.9であるのに対し、3ダクト形状とバルク形状における比は、複数ダクト近接効果のため3.6~12、1.3~5.0、1.1~4.3と高い値となる。

5ダクトと3ダクト形状における線量率の比は、ダクトaの中心軸上において、 $\theta = 14^\circ$ 配置で1.10、 $\theta = 20^\circ$ 配置で1.06、 $Y = 0\text{cm}$ 上の $-30\text{cm} \leq X \leq 30\text{cm}$ の全測定領域におけるそれぞれの線量率平均値の比では、 $\theta = 14^\circ$ 配置で1.07、 $\theta = 20^\circ$ 配置で1.05である。

(3) 実験の解析

1回散乱コードG33YSNで実験の解析を行ない、複数の直円筒ダクト付きガンマ線遮蔽用コンクリート壁に対する同コードの計算精度を明らかにする。ただし、遮蔽壁後方の測定ライン上では、① $\theta = 0^\circ$ 配置では複数ダクト近接効果は僅かである。、②同一検出器による3ダクトと5ダクト形状との線量率比の違いは僅かであることが前節で得られているので、実験の解析は5型線量計を用いた $\theta = 7^\circ$ 、 14° 、 $\theta = 20^\circ$ 配置の3ダク

ト形状と4型線量計を用いた $\theta = 7^\circ$ 配置の5ダクト形状について行った。検出点は遮蔽壁背面から20cm後方の水平線上に設け、解析結果は、実験と同じく、複数ダクト形状とバルク形状の遮蔽壁背面の同一検出点における線量率の比で表示する。

計算形状Fig.5.16に示す。複数の直円筒ダクトは実験形状を正確に模擬した。遮蔽壁のコンクリートの密度はTable5.3に示す値を用いた。線源面は実験孔入口面(実験孔の炉心側の面)とし、これを等面積の円で近似した。線源面における単位面積当りの線源強度は一定とし、同面をFig.5.16に示す6つの小領域に分け、各小領域における線源を点線源で代表させた。ただし、検出点に到達する非散乱ガンマ線の計算については、同線源面を225分割して行なった。線源のエネルギースペクトルは測定値^(a)を8群に縮約して用いた。本スペクトルは、散乱実験室内にて実験孔軸の延長線上で測定された値であり、実験孔内壁で散乱したガンマ線も含まれている。計算では実験孔および遮蔽壁前方のコリメータを省略したことから、遮蔽壁側面に入射するガンマ線を防ぐため、遮蔽壁の横方向長さを実験形状より長い200cmとした。

また実験では実験孔およびコリメータにより放射線の拡がりを限定している。計算では1回散乱領域をコリメータの形状に基づいて定め、ガンマ線の拡がりを限定した。すなわち、1回散乱領域の形状を、ダクトaの中心軸と同心の円筒で、その直径は遮蔽壁の前方に置かれたコリメータの内径に等しい90cmとし、円筒の長さは遮蔽壁の前面から背面までとした。散乱点は円柱(R、 θ 、Z)座標で入力し、R、 θ 、Z方向についてその数はそれぞれ20、20、19として微小散乱領域を定めた。1回散乱領域のエネルギー群数は8とした。ただし、一部の微小散乱領域にはダクト内物質である空気と、遮蔽壁物質であるコンクリートとが混在しているが、G33YSNコードは微小散乱領域の中心における物質で同領域が満たされると仮定して散乱計算を行う。なお、同コードでは、微小散乱領域の表示方法として上記の円柱座標表示のほかに、(X、Y、Z)と(R、 θ 、 ϕ)の座標表示がある。もし、これらの座標表示を本散乱計算に用いたとしても、空気とコンクリートの混在する微小散乱領域が生じることになる。

(i) 3ダクト形状における実験値と計算値との比較

(a) Y方向の線量率分布

実験における線量率は、半径5.64cmの円板型線量計の中心をY=0cm上にて移動して測定された値であり、この窓面積内における線量率の平均値を表わしている。3ダクトとバルク形状とも、その遮蔽壁背面の任意のX座標値における上下方向の線量率分布は、Y=0cmに対して対称でY=0cmにピークを有し、Yの絶対値が増加するにつれて単調に減少すると考えられる。G33YSNコードでは円板型検出器の線量率ではなく、点状の検出器による線量率が得られる。このため、計算点のY座標値を変えた計算を最初に行ない、Y方向における線量率の違いを調べた。

Fig.5.17(a)~(c)に、 $\theta = 7^\circ$ 、 14° 、 20° 配置について、Y=0、2、4cmの線上における3ダクトとバルク形状の線量率比を示す。Y方向における線量率比の違いは、 $\theta = 7^\circ$ 、 14° 配置では線量率比のピークにおいて、 $\theta = 20^\circ$ 配置ではX>0cmの領域において、それぞれ顕著である。

次に、3ダクト形状における線量率を非散乱ガンマ線と散乱ガンマ線によるものに分け

て検討する。Fig.5.18(a)～(c)に、 $Y = 0$ 、 4 cm の線上について、3ダクト形状の非散乱ガンマ線の線量率、散乱ガンマ線の線量率と、バルク形状の線量率(非散乱ガンマ線と散乱ガンマ線を合わせた線量率)との比を示す。同図から、 $\theta = 7^\circ$ 、 14° 、 20° の各角度配置に共通に指摘できる点は次の通りである。

- ① $X > -20\text{ cm}$ の領域において、非散乱ガンマ線の線量率は $Y = 0\text{ cm}$ と 4 cm とで大きく異なる。
- ② 散乱ガンマ線の $Y = 0\text{ cm}$ と 4 cm における線量率の違いは小さい。
- ③ 同一水平面における非散乱ガンマ線の線量率の変動は、散乱ガンマ線のそれに比べて大きい。
- ④ $Y = 4\text{ cm}$ の線上では、散乱ガンマ線の線量率の方が非散乱ガンマ線のそれよりも大きく、同線上での非散乱ガンマ線の変動は $Y = 0\text{ cm}$ の場合に比べて小さい。

各角度配置についての考察は次の通りである。

- ① $\theta = 7^\circ$ 配置： Fig.17(a)の $Y = 0\text{ cm}$ の線上における線量率のピーク値は非散乱ガンマ線によってほぼ定まる。3つのピークのうち、 $X = -10\text{ cm}$ のものが最も高く、 $X = 10$ 、 25 cm の順である理由は、前節に示した通りである。
- ② $\theta = 14^\circ$ 配置： $Y = 0\text{ cm}$ の線上における非散乱ガンマ線の線量率のピーク(Fig.5.18(b)の $X = -5$ 、 10 、 25 cm の各点)のうち、 $X = 10$ 、 25 cm のものが高い理由は、これらの検出点に到達する非散乱ガンマ線は2つのダクトを横切るのに対し、 $X = -5\text{ cm}$ の検出点に到達する非散乱ガンマ線は1つのダクトを横切ることによる。
- ③ $\theta = 20^\circ$ 配置： $Y = 0\text{ cm}$ の線上においても、 $X < 0\text{ cm}$ の領域では散乱ガンマ線の線量率の方が非散乱ガンマ線のそれよりも高い。この線上の $X > 10\text{ cm}$ の領域で、非散乱ガンマ線の線量率が高い値を示す理由は、この領域に到達する非散乱ガンマ線は2～3個のダクトを横切ることによる。

$Y = 0\text{ cm}$ の線上における線量率比の代表的なピーク点(Fig.5.17参照)に到達する非散乱ガンマ線がダクトを横切る様子をFig.5.19に示す。

実験解析ではこれらの計算結果および考察を参考にして検出器面内の線量率をTable5.5に示す4通りの近似で求めた。すなわち

- ① 1分割計算： 検出器面を1つの領域として扱い、検出器面の中心における線量率で代表させる。
- ② 2、4、6分割計算： 検出器面の半分の面積を有する円を描き、 $Y = 0\text{ cm}$ の水平線として、2分割計算は同円上の 90° と 270° の点、4分割計算は 45° 、 135° 、 225° 、 315° の点、6分割計算は 30° 、 90° 、 150° 、 210° 、 270° 、 330° の点における線量率で、各小領域内の線量率を代表させる。

Table5.5には $-30\text{ cm} \leq X \leq 30\text{ cm}$ の領域における各分割計算での C/E が示されている。1分割計算での C/E は、 7° 配置で $0.48 \sim 7.95$ 、 14° 配置で $0.84 \sim 4.63$ 、 20° 配置で $1.05 \sim 3.70$ と1から大きく外れる。この理由は、実験は半径 5.64 cm の検出器面での線量率であり、面内での線量率の違いは大きい、計算ではこれを面の中心における値で代表させていることによる。以下に、2、4、6分割計算と実験との比較を述べる。3ダクトとバルク形状のこれらの線量率比をFig.5.20(a)～(c)に示す。なお、1分割計算における

線量率比は、Fig.5.17の $Y = 0$ cmの線上での値に等しい。

(b) $\theta = 7^\circ$ 配置

計算における3つのピーク点に到達する非散乱ガンマ線は、3つのダクトのうちのそれぞれ1つを横切る。これらのピークのうち、ダクトc出口部におけるものが最も高く、ダクトa、b出口部の順となる。この理由は既に述べた通りである。

2分割計算での C/E は0.44~0.86で、計算値は実験値に比べて低い。4、6分割計算での C/E はそれぞれ0.51~1.64、0.43~2.03と計算のピーク値は実験値に比べて高い。

(c) $\theta = 14^\circ$ 配置

計算値のピークと谷は、これらの検出点に到達する非散乱ガンマ線のダクト内透過距離の最短に対応する。線量率比は、実験および計算とも、 $\theta = 7^\circ$ 配置のそれとは違って、 $X > 0$ cmの領域の方が $X < 0$ cmの領域よりも高い値となる。この理由は、既に述べたように、 $X > 0$ cmの領域のピーク点に到達する非散乱ガンマ線は2つのダクトを横切ることによる。

2分割計算での C/E は0.76~1.05で、計算値は実験値に比べて全体的に低い。4、6分割計算での C/E はそれぞれ0.83~1.95、0.84~1.98で、計算値は実験値に比べて全体的に高く、かつ4分割と6分割の計算はほぼ等しい値を示す。

(d) $\theta = 20^\circ$ 配置

実験および計算の線量率比のピークが $X = 20$ cm付近にある理由は、既に述べたように、この領域に到達する非散乱ガンマ線は2~3個のダクトを横切ることによる。計算値には、 $\theta = 7^\circ$ 、 14° 配置で見られた顕著な凹凸は現れない。この理由は、検出点の移動に伴う非散乱ガンマ線の遮蔽壁内での平均自由行程の変化が、他の角度配置におけるそれに比べて緩やかなためである。

2分割計算での C/E は0.89~1.28で、計算値は実験値と良い一致を示し、4、6分割計算での C/E はそれぞれ1.06~1.84、1.07~1.86で、計算値は実験値に比べて高い。4分割と6分割の計算はほぼ等しい値を示す。

2~6分割の計算値は実験値とファクタ2以内で一致した。計算における凹凸が実験に比べて大きい理由として、計算では線源面と検出器面を点線源と点検出器の集合として扱っていることが考えられる。

(ii) 7° 配置の5ダクト形状における実験値と計算値の比較

この配置では半径1.78 cmの小型の円板型線量計を用いて測定が行われた。計算は実験値のピークと谷を示す位置($X = -14, -2, 4, 18, 22$ cm)について、計算点の Y 方向の位置を0 cm、1.26 cm、(検出器面の1/2の面積を有する円の半径に相当)、1.78 cm(検出器面の半径に相当)に変化させて行なった。実験値と計算値との比較をFig.5.21に示す。実験値のピークと谷の位置における C/E は、 $Y = 0$ cmの計算値の場合0.81~1.40、 $Y = 1.26$ cmの計算値の場合0.78~1.30、 $Y = 1.78$ cmの計算値の場合0.77~1.23の範囲にある。 $Y = 0$ cmの計算において、非散乱ガンマ線の線量率と散乱ガンマ線・非散乱ガンマ線を合わせた線量率との比は、実験値のピークである $X = -14, 4, 22$ cm、で0.82、0.61、0.51と高く、谷である $X = -2, 18$ cmでは0.15、0.29と低い。散乱ガンマ線の線量率はこれらのピークと谷において大きな変化はなく、変動幅は $\pm 12\%$ 以内である。したがって、線量

率の変動は主として非散乱ガンマ線によるものである。線量率比のピークは、実験および計算ともダクト c 出口部が最も高く、続いてダクト a、b 出口部の順となる。この理由は既に述べた通りである。

計算値に含まれる誤差の要因としては、上述以外に次の点が指摘できる。

〔計算値が過小評価となる要因〕

- ① 計算では 1 回散乱後のガンマ線の減衰を、点等方線源・無限媒質に対する再生係数を用いた点減衰核法計算で行なっており、ダクト壁等で多重散乱しつつダクト内をストリーミングするガンマ線を考慮していない。
- ② 1 回散乱後のガンマ線の減衰計算は、1 回散乱点と検出点とを結ぶ線上の物質および線上における物質の距離に基づいて行う。散乱点と検出点とを結ぶ線が遮蔽壁を斜めに横切の場合、計算では散乱点から遮蔽壁を垂直に透過し、遮蔽壁背面で散乱して検出点に到達するような短い距離で遮蔽壁から出ていくガンマ線を考慮していない。

〔計算値が過大評価となる要因〕

- ① コンプトン散乱の微分断面積は入射ガンマ線のエネルギーが高いほど、前方方向の割合の大きい非等方分布を示す。前方方向の割合の大きい非等方分布線源に対する再生係数は公表されていないがこの値は点等方線源に対する再生係数と垂直な 1 方向の角度分布を有する点線源の再生係数の中間にあると考えられる。垂直 1 方向の点線源に対する再生係数は公表されていないが、等方分布の平面線源と垂直 1 方向の平面線源の再生係数の比較では等方分布に対するものの方が大きく⁽⁴²⁾、点線源においても等方分布に対する再生係数の方が垂直 1 方向に対するものよりも大きいと考えられる。したがって、前方方向に散乱した後のガンマ線の減衰には点等方線源に対する再生係数は過大値であるが、本計算では 1 回散乱後のガンマ線の減衰計算にこれを用いている。
- ② 1 回散乱後のガンマ線の減衰計算に無限媒質に対する再生係数を用いている。

(4) まとめ

複数の直円筒ダクト付きガンマ線遮蔽用コンクリート壁背面の線量率分布の測定を種々の入射角度の平行ガンマ線について行い、複数のダクトを横切るガンマ線および複数のダクト壁で散乱するガンマ線の効果を明らかにした。同効果は $\theta = 0^\circ$ 以外の配置において顕著に現れた。すなわち、遮蔽壁背面の $Y = 0$ cm の水平線上において、単一ダクトとバルク形状との線量率の比は、 7° 、 14° 、 20° 配置について、それぞれ 1.2~7.1、1.1~2.7、1.0~1.9 であるのに対し、3ダクトとバルク形状との比は、3.6~12、1.3~5.0、1.1~4.3 と高い値を示した。

3ダクト形状における実験値と G 3 3 Y S N 計算値との比較では、実験が半径 5.64 cm の円板型線量計を用いて測定を行なっていることから、解析では検出器面を 1、2、4、6 分割した計算を行い、各分割計算に対して検出器面の線量率を求めた。このうち、検出器面の線量率を面の中心における線量率で表わす 1 分割計算の C/E は、 7° 配置で 0.48~7.95、 14° 配置で 0.84~4.63、 20° 配置で 1.05~3.70 と 1 から大きく外ずれ、計算は全体的に過大評価値を示した。この理由として、Fig.5.17 に示したように、検出器面での線量率の変動が大きいことが指摘できる。

2分割計算では、7°配置のC/Eは0.44~0.86で計算値は過小評価値を示し、14°、20°配置のC/Eは0.76~1.05と0.89~1.28で計算値は実験値と30%以内で一致した。4分割と6分割の計算では、7°配置のC/Eは0.51~1.64と0.43~2.03、14°配置のC/Eは0.83~1.95と0.84~1.98、20°配置のC/Eは1.06~1.84と1.07~1.86であり、計算値は全体的に高目の値を示した。14°、20°配置においては、4分割と6分割の計算はほぼ等しい値を示した。計算では、線源面と検出器面を線源と点検出器の集合で表わしており、計算値の凹凸は実験に比べて大きい。半径5.64cmの検出器面を2、4、6分割した計算は、 $-30\text{cm} \leq X \leq 30\text{cm}$ の全測定領域において、実験とファクタ2以内で一致した。

7°配置の5ダクト形状の測定では、半径1.78cmの小型の線量計を用いており、計算は実験値のピークと谷を示す位置($X = -14, -2, 4, 18, 22\text{cm}$)において、計算点のY方向の位置を0、1.26、1.78cmと変化させて行なった。これらの計算によるC/Eは0.78~1.40の範囲に分布した。

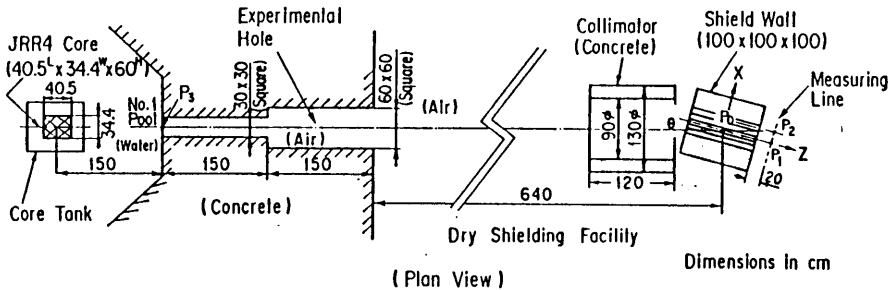


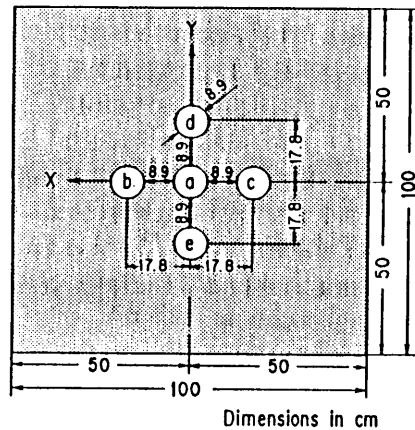
Fig.5.13 Experimental arrangement for proximity effect of straight duct

Table 5.3 Element composition of concrete (g/cm³)

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

Table 5.4 Coordinates of duct axes

Duct	X (cm)	Y (cm)
a	0.0	0.0
b	17.8	0.0
c	-17.8	0.0
d	0.0	17.8
e	0.0	-17.8



Geometry	Arrangement of Duct
1 Duct	a
3 Ducts	a, b, c
5 Ducts	a, b, c, d, e
Bulk	No Duct

Fig.5.14 Arrangement of ducts a, b, c, d and e in front of concrete shield wall

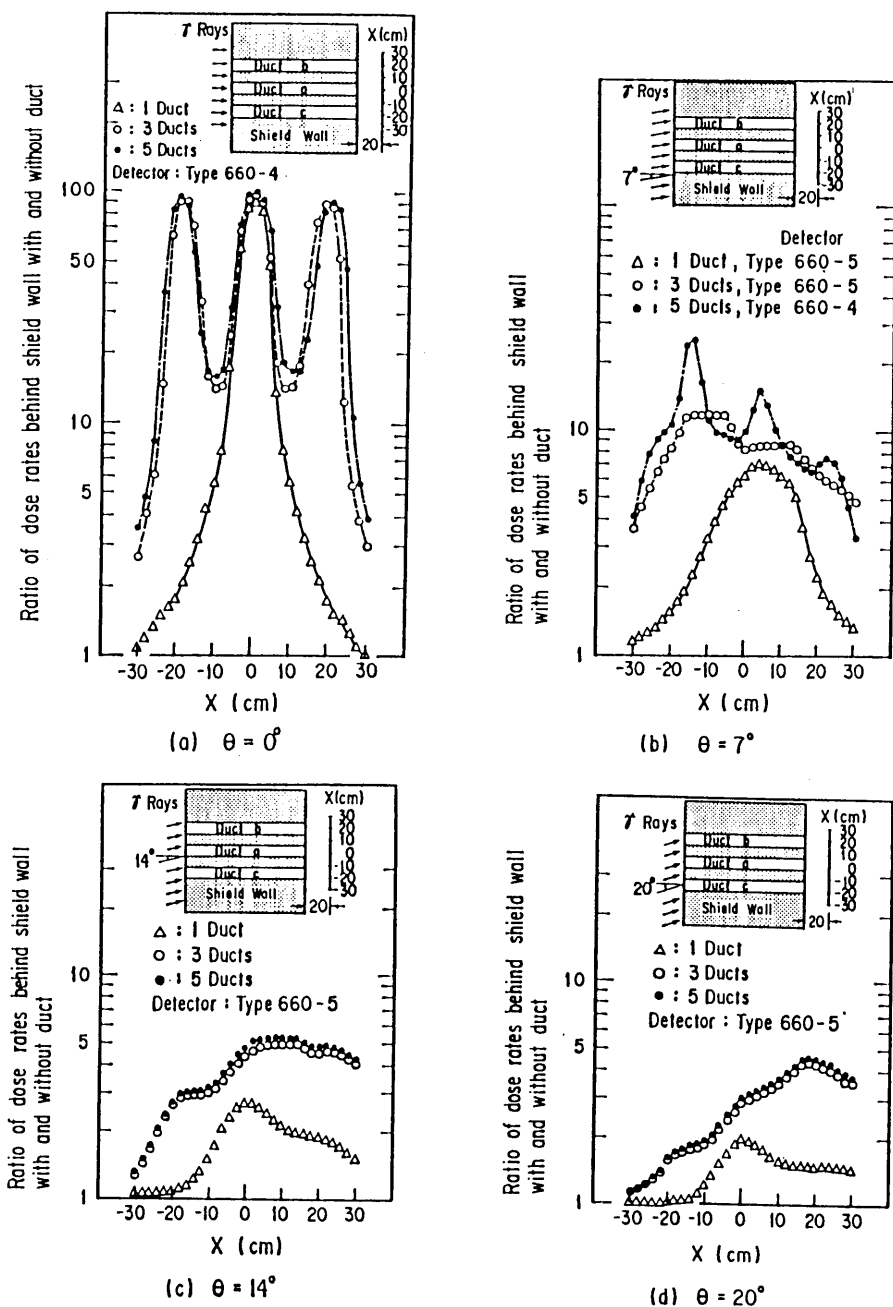


Fig.5.15 (a)~(d) Distributions of dose rate ratio of with 1-, 3- and 5-ducts to no-duct (bulk shield) at measuring positions behind shield wall

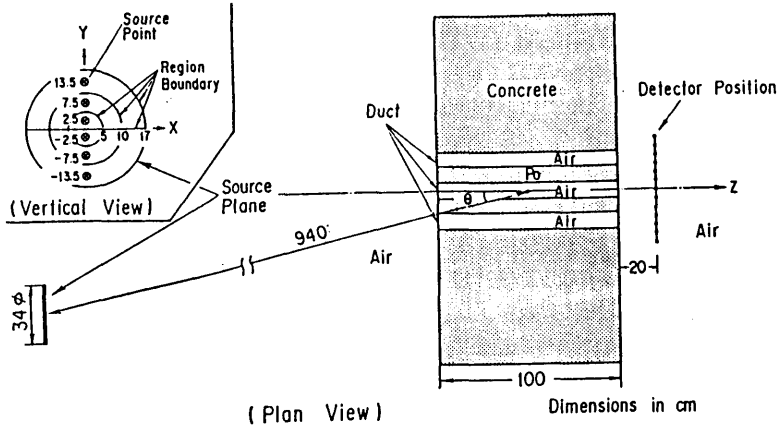


Fig. 5.16 Calculational geometry for 3-and 5-ducts configurations

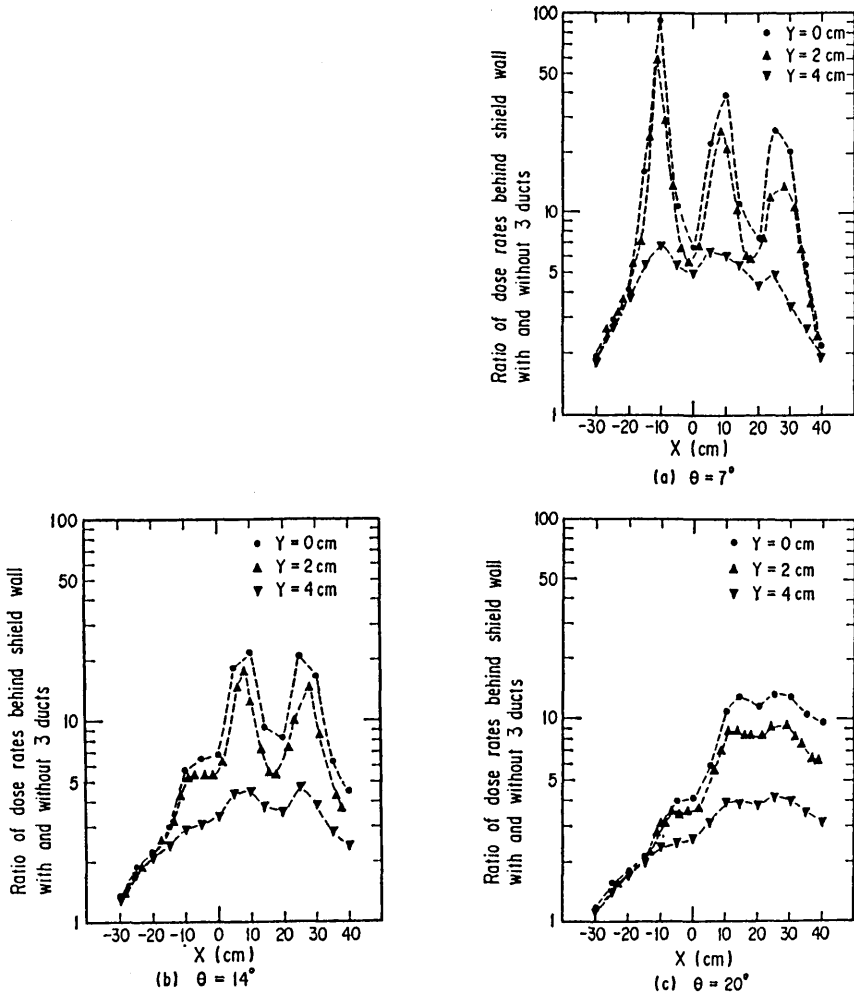


Fig. 5.17 (a)~(c) Calculations of distributions of dose rate ratio of with-3-ducts to no-duct (bulk shield) on lines of $Y=0, 2$ and 4 cm behind shield wall

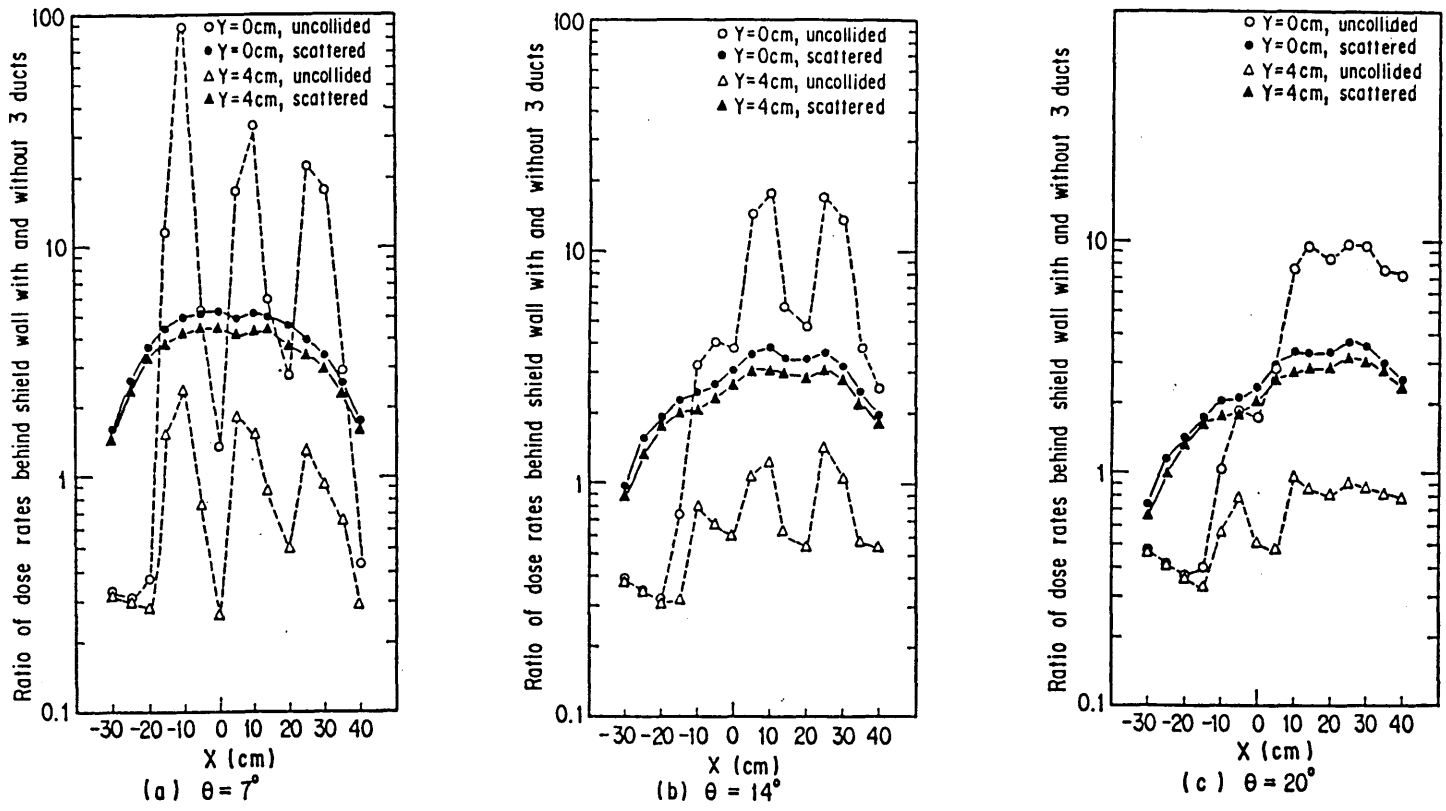


Fig.5.18 (a)~(c) Calculations of distributions of dose rate ratio of uncollided or scattered component with-3-ducts to both components of no-duct (bulk shield) on lines of Y=0 and 4cm behind shield wall

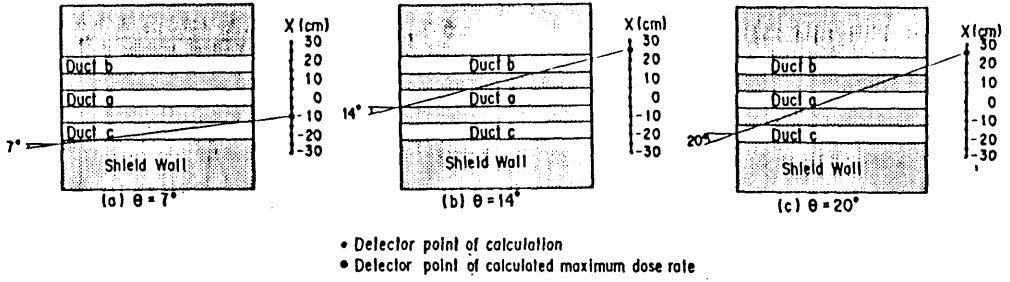
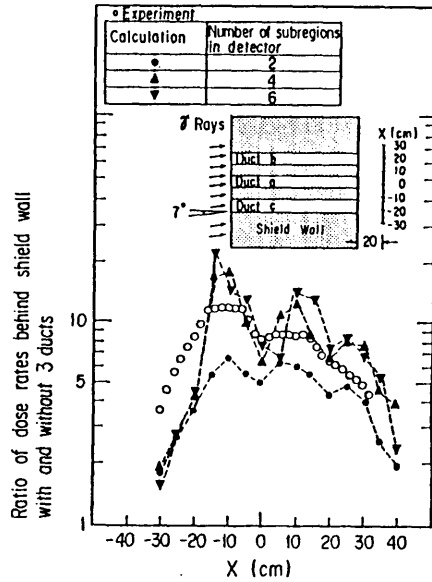


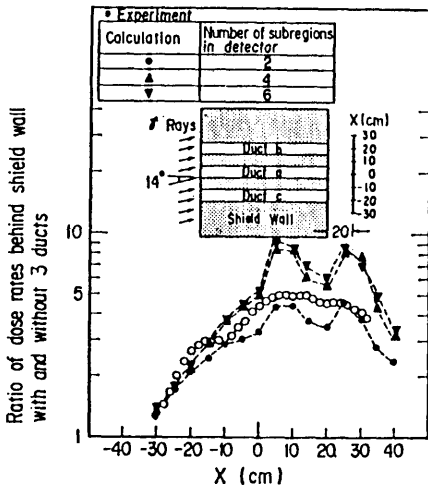
Fig. 5.19 Detector point of calculated maximum dose rate with 3-ducts configuration and lines of uncollided γ -ray reaching point

Table 5.5 Subregions and calculation points in detector in 3 ducts calculations, and C/E values of ratios of dose rates with and without 3 ducts

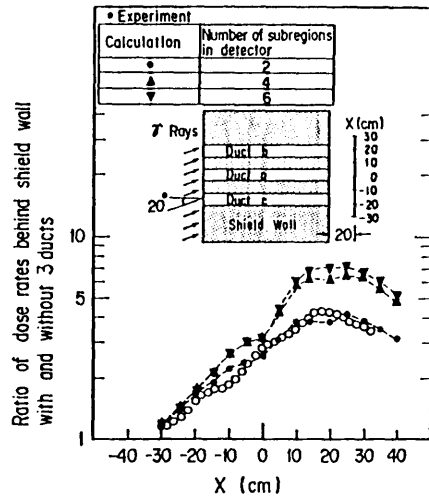
Number of subregions in detector	Calculation points in detector (cm)		C / E		
	X	Y	7°	14°	20°
1	0.0	0.0	0.48 ~ 7.95	0.84 ~ 4.63	1.05 ~ 3.70
2	0.0	4.0	0.44 ~ 0.86	0.76 ~ 1.05	0.89 ~ 1.28
	0.0	-4.0			
4	2.82	2.82	0.51 ~ 1.64	0.83 ~ 1.95	1.06 ~ 1.84
	-2.82	2.82			
	-2.82	-2.82			
	2.82	-2.82			
6	3.5	2.0	0.43 ~ 2.03	0.84 ~ 1.98	1.07 ~ 1.86
	0.0	4.0			
	-3.5	2.0			
	-3.5	-2.0			
	0.0	-4.0			
	3.5	-2.0			



(a) $\theta = 7^\circ$



(b) $\theta = 14^\circ$



(c) $\theta = 20^\circ$

Fig. 5.20 (a)-(c) Comparisons of calculations with measurements of distributions of dose rate ratio of with-3-ducts to no-duct (bulk shield) behind shield wall

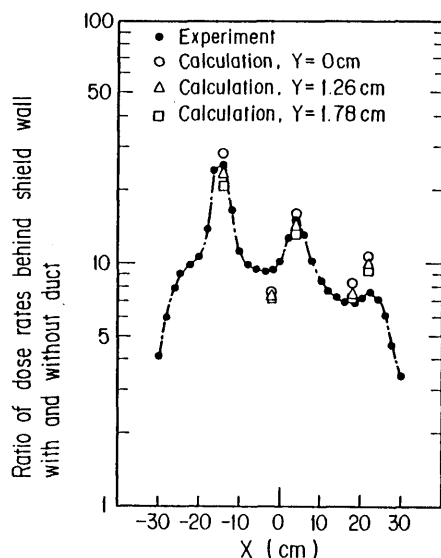


Fig.5.21 Comparisons of calculations with measurements at peak and valley of experimental dose rate ratio of with-5-ducts to no-duct (bulk shield) behind shield

5.7 1回屈曲ダクト付き遮蔽壁⁽²⁰⁾

実験配置をFig.5.22に示す。ダクトは一辺が20cmの矩形で、100cm厚さ×150cm幅×100cm高さのコンクリートブロック内に水平に設けた。コンクリートブロックの原子数密度はテストピースを分析して求めた。数値は文献(28)に示されている。ダクトと実験孔の中心軸は同一水平面上にある。同図に示すようにダクト入口を座標原点とする。第1脚と第2脚の間の角度を90°とし、第1脚と第2脚の交点Pとダクト入口・出口との距離は75cmとした。コンクリートブロックは、その中心Cを遮蔽壁から550cm離れた実験孔軸上に固定させた。この中心Cを通る鉛直線を軸としてコンクリートブロックを回転させ、ガンマ線ビームのコンクリートブロックへの入射角度を変化させた。入射角 θ は上から見て左廻りを正とする。実験は $\theta = 0^\circ$ 、 $\pm 10^\circ$ 、 $\pm 20^\circ$ 配置にてダクト中心軸上の線量率をCaSO₄熱蛍光線量計で測定し、 $\theta = 0^\circ$ 配置の第2脚内に75cm入った $X = 40\text{cm}$ 、 $Y = 0\text{cm}$ 、 $Z = 75\text{cm}$ の点におけるガンマ線エネルギースペクトルをNE 213シンチレーション検出器で測定した。NE 213の測定ブロックダイアグラムおよびアンフォルディング法は第4章に示したものと同一である。

計算形状をFig.5.23に示す。計算では点等方線源を実験孔入口中心に置いた。入射エネルギースペクトルは、Table 4.2の測定値を0~0.75MeV間は0.75~1MeVでの値と同じとして、0~9MeVを0.5MeV間隔で18群に縮約して使用し、1回散乱線の群分けも同じとした。1回散乱領域はコンクリートブロック内に設けた。遮蔽壁前面における $\theta = 0^\circ$ 配置の線量率分布の実験値と計算値の比較をFig.5.24に示す。 $\theta \neq 0^\circ$ 配置では計算コード使用上の制限から実験孔を省略し、この効果を1回散乱領域の設定で考慮した。Fig.5.25に実験孔入口から見ることでできる領域と1回散乱領域との関係を示す。散乱点は(X、Y、Z)座標で表示し、X方向は18点、Y方向は形状が $Y = 0\text{cm}$ の面で対称であることから

0 cm \leq Y \leq 40 cm の領域を 9 点、Z 方向は 16 点とした。第 2 脚内におけるエネルギースペクトルの実験値と計算値の比較を Fig. 5.26 に示す。ただし、計算値はダクト入口での線量率で実験値に規格化した。計算値は非散乱線と再生係数を含まない 1 回散乱線に分けて示す。測定値に含まれる統計誤差は、6 MeV 以下では 10% 以内、6 MeV 以上では 10% を超えている。同図から明らかなように、1 回散乱線の計算値は 2.0 から 6.5 MeV の間で実験値と良い一致を示し、非散乱線の計算値は 6 MeV 以上で実験値と良い一致を示した。この結果は、1 回散乱法は 2 MeV 以上のガンマ線の 1 回屈曲ダクト問題に適用できることを示唆している。2 MeV 以下で計算値が実験値に比べて過小評価となった理由は、実験値には多重散乱線が含まれているのに対し、同図に示す計算では非散乱線と 1 回散乱線のみを表示していることによる。ただし、G 3 3 コードによる線量率計算では 1 回散乱線に再生係数を乗じて多重散乱の効果を表示する。

ダクト内での実験値と計算値の線量率の比較を以下に示す。

(i) $\theta = 0^\circ$ 配置 実験値と計算値の比較を Fig. 5.27 に示す。第 2 脚内の 20 cm $<$ X $<$ 40 cm における C/E の最大値は 1.5 (X = 30 cm の点)。ダクト入口からこの点までの線量率の減衰は 0.014 である。X $>$ 40 cm の領域では計算値は過小評価となり、X = 60 cm の点における C/E は 0.6 である。

(ii) $\theta = \pm 10^\circ$ 、 $\pm 20^\circ$ 配置 計算では前述のように実験孔、遮蔽屏でのガンマ線の減衰は考慮されない。この配置では、Fig. 5.25 に示すように遮蔽屏の延長線と第 2 脚中心軸との交点を L_d とし、同図で示したヴィジブルエリアの境界線と第 2 脚中心軸との交点を L_s とすると、第 2 脚内の、X $>$ L_d の領域では非散乱計算値は過大評価値になると考えられる。また、Table 5.6 に実験孔・遮蔽屏の形状を取り入れた $\theta = 0^\circ$ 配置の線量率計算における非散乱線、1 回散乱線および多重散乱線の割合を示すが、ヴィジブルエリアを越えた X $>$ L_s の領域では、非散乱線は散乱線に比べ極めて小さくなる。この配置では第 2 脚内の計算値を次のように表示する。

(イ) X $<$ L_d : 非散乱線と散乱線を合せた値。

(ロ) L_d $<$ X $<$ L_s : 2 種類の計算値で表示する。1 つは非散乱線と散乱線を合せた値 (maximum として表示)、他の 1 つは散乱線のみによる値 (minimum として表示)。

(ハ) X $>$ L_s : 散乱線のみによる値。

$\theta = 10^\circ$ 、 20° 配置における実験値と計算値の比較を Fig. 5.28 に示す。第 2 脚内、X $<$ 30 cm の領域で計算値は実験値と 40% 以内で一致し、X $>$ 30 cm の領域では計算値は過小評価となり、X = 60 cm での C/E は $\theta = 10^\circ$ 配置で 0.6、 $\theta = 20^\circ$ 配置で 0.25 である。

$\theta = -10^\circ$ 、 -20° 配置における実験値と計算値の比較を Fig. 5.29 に示す。第 2 脚入口において、ガンマ線のコンクリートブロック透過距離が最短になり、実験値、計算値ともピークが生じる。第 2 脚内、X $<$ 30 cm の領域で minimum と表示した計算値は実験値と 20% 以内で一致し、X $>$ 30 cm の領域では過大評価値になる。X = 60 cm における C/E は $\theta = -10^\circ$ 配置で 1.40、 $\theta = -20^\circ$ 配置で 1.35 である。

ダクト内での線量率の減衰が 3 桁の本実験領域において、計算値は実験値と 75% 以内で一致した。

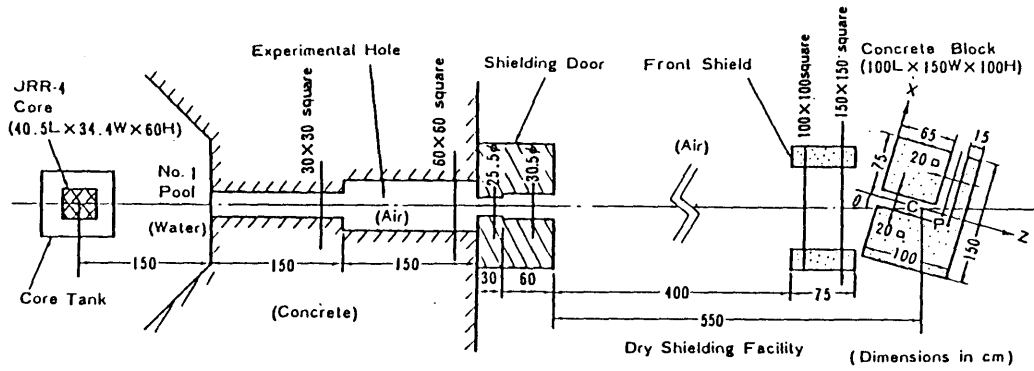
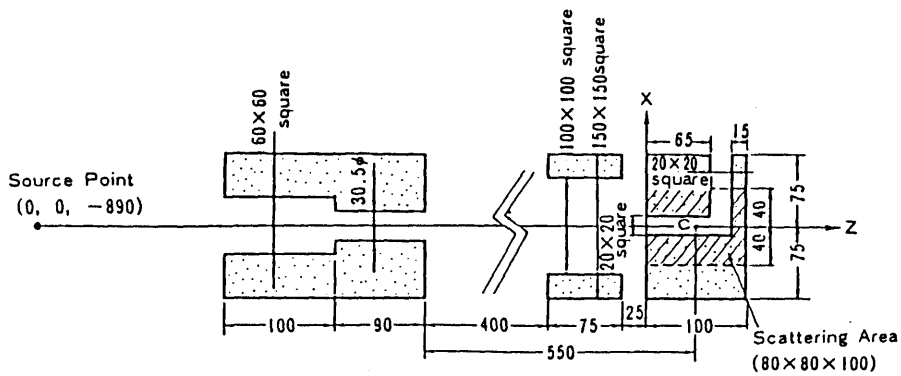
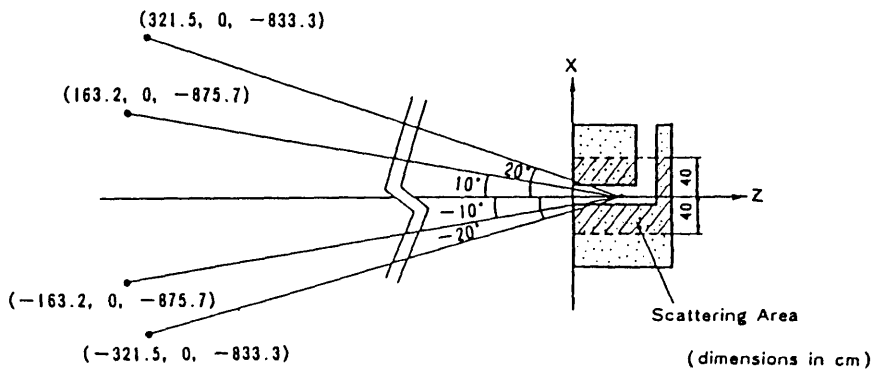


Fig. 5.22 Experimental arrangement of two-legged duct (Plan view)



(a) $\theta = 0^\circ$



(b) $\theta = \pm 10^\circ, \pm 20^\circ$

Fig. 5.23 G33 calculation model for two legged duct experiment

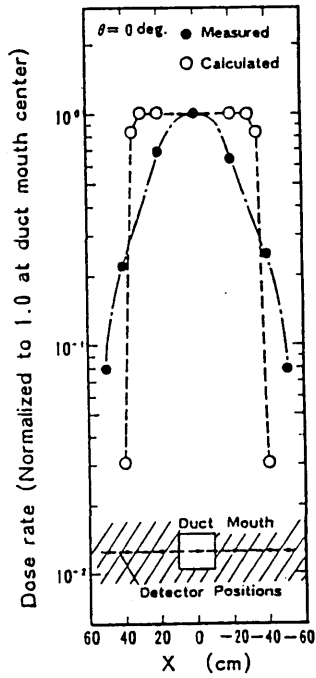
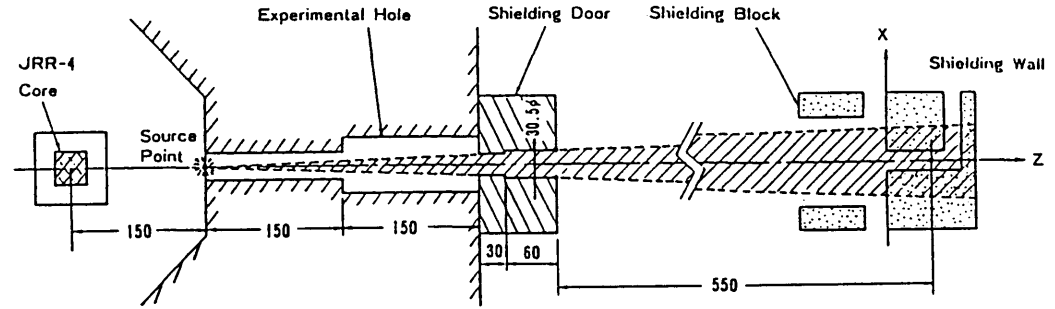


Fig.5.24 Comparison of measured and calculated γ -ray dose rates in front of concrete block ($\theta = 0^\circ$)



(a) Visible area

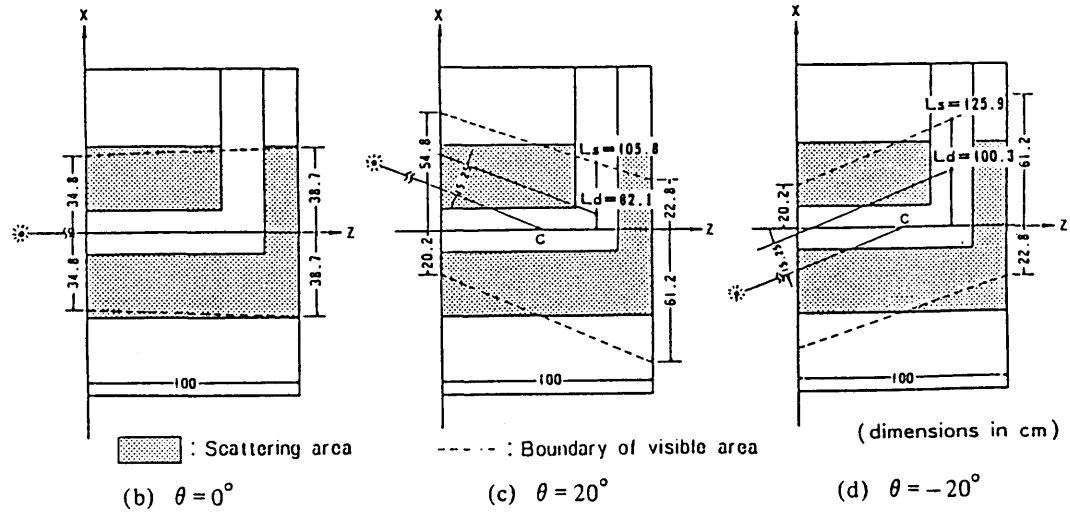


Fig.5.25 (a)~(d) Geometrical form of visible area, and comparison of geometry of scattering area and that of "visible area"

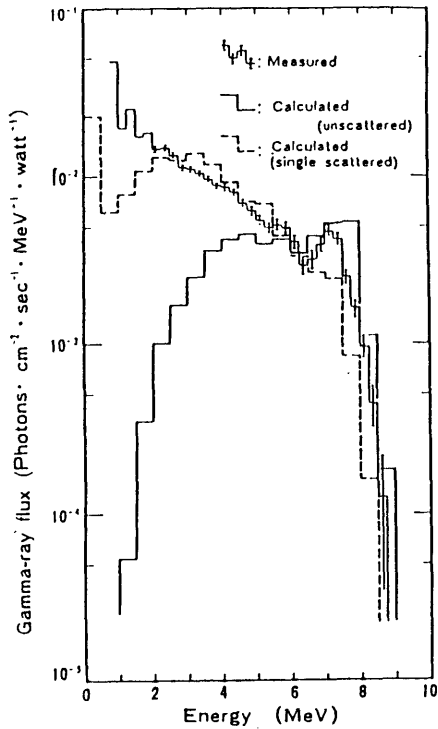


Fig. 5.26 Comparison of measured and calculated γ -ray energy spectra at $X = 40$ cm in second leg

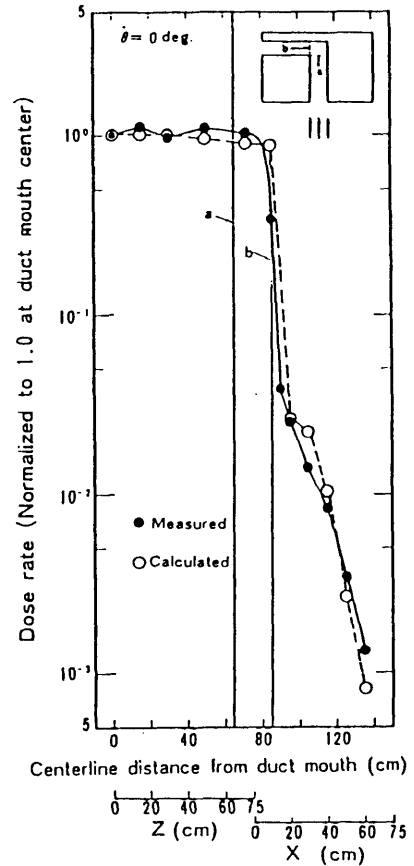


Fig. 5.27 Comparison of measured and calculated γ -ray dose rates along centerline of two-legged duct ($\theta = 0^\circ$)

Table 5.6 Percentage of each component of unscattering, single scattering and multiple scattering in calculated dose rate in configuration with $\theta = 0^\circ$

Detector position		Unscattering component (%)	Single scattering component (%)	Multiple scattering component (%)
X (cm)	Z (cm)			
0	0	98.0	0.8	1.2
0	15	93.8	2.9	3.3
0	30	91.7	4.4	3.9
0	50	92.5	4.1	3.4
0	72	94.5	3.0	2.5
10	75	96.2	2.0	1.8
20	75	30.0	29.4	40.6
30	75	36.4	27.4	36.2
40	75	18.6	34.8	46.6
50	75	1.1	29.5	69.4
60	75	0.1	22.7	77.2

† The multiple scattering component means build up due to the single scattering component.

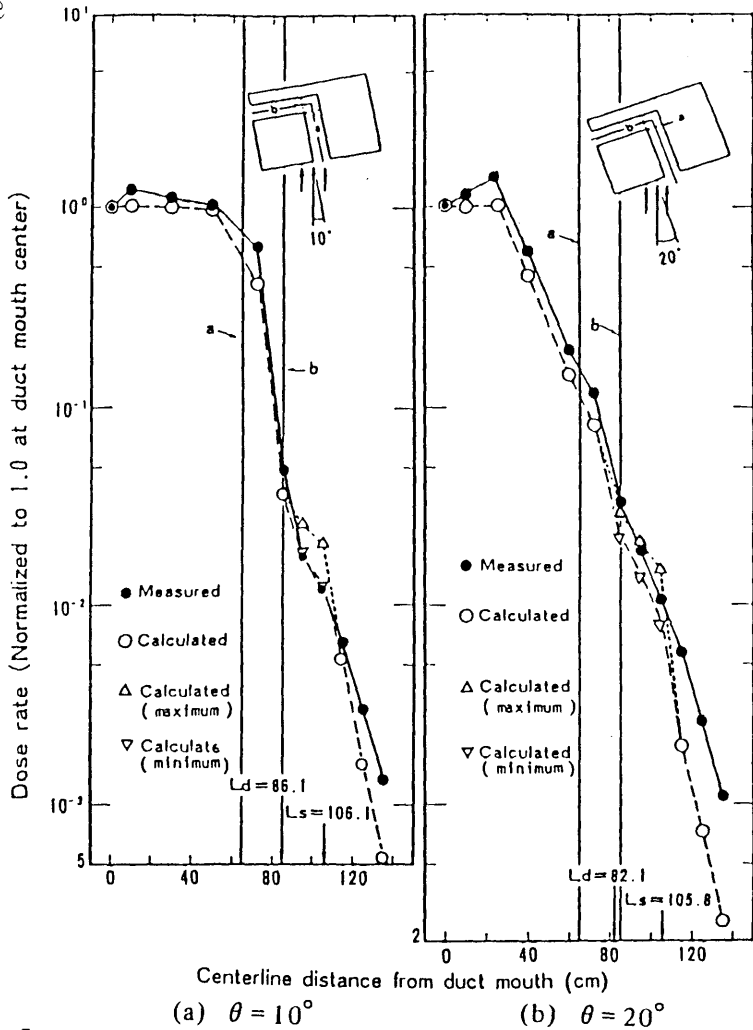


Fig.5.28 Comparison of measured and calculated γ -ray dose rates along centerline of two-legged duct ($\theta = 10^\circ$ and 20°)

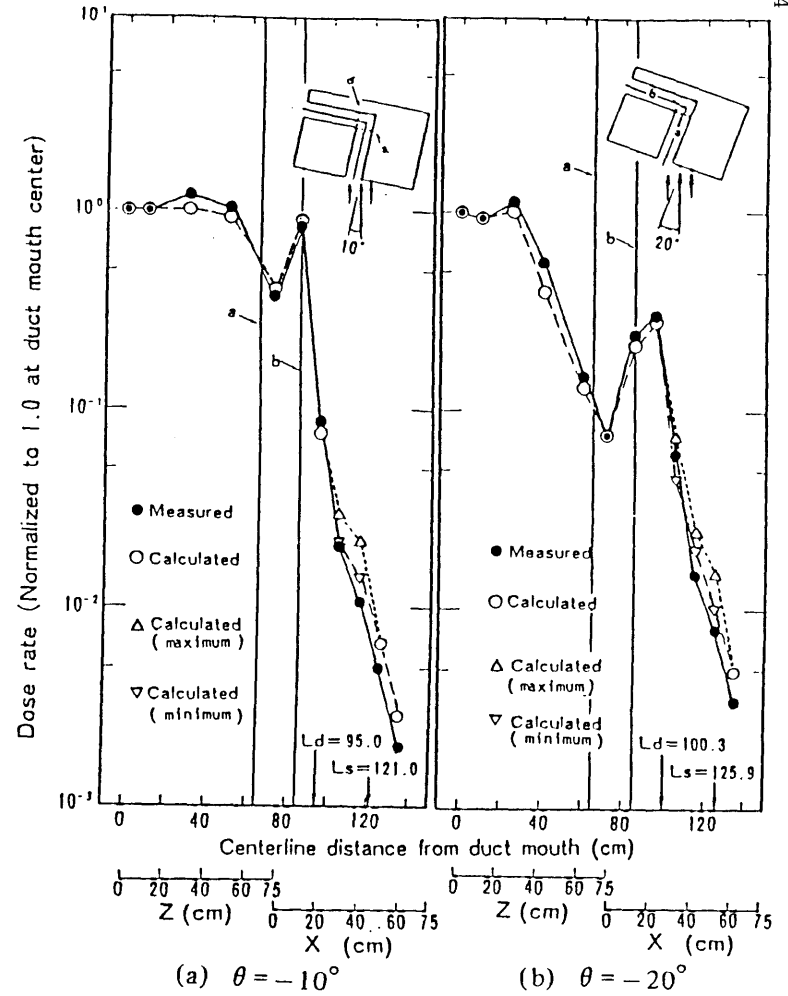


Fig.5.29 Comparison of measured and calculated γ -ray dose rates along centerline of two-legged duct ($\theta = -10^\circ$ and -20°)

第6章 G33-GPコードによる本設計手法の検証

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、オフセットスリット付き遮蔽壁および段付き円柱プラグ付き遮蔽壁について、第2、3章で示した本設計手法の適用範囲内の種々の遮蔽壁厚、入射エネルギー、ダクト直径、スリット幅にて遮蔽計算を行い、補償遮蔽を有するこれらの不規則形状部付き遮蔽壁の遮蔽性能がバルク遮蔽壁でのそれと同程度になることを示す。

本計算においては、ダクトは水平に、スリットは垂直に設置されているとした。コンクリート遮蔽壁の原子数密度はTable4.1に示す値を用い、補償遮蔽体の鉄の密度は $7.86\text{g}/\text{cm}^3$ とし、空気は真空として扱った。線源は点等方とした。その位置はダクト中心軸や段付き円柱プラグのプラグ中心軸と同一水平面($Y=0\text{cm}$)で遮蔽壁前面から 10cm 離れた点とし、平行ビームのガンマ線が遮蔽壁に入射するとした。ガンマ線ビームの遮蔽壁の入射角は、線源点を同一水平面上で移動させることによって変化させた。補償遮蔽体の厚さは第3章に示した式で計算される最小値の mm 未満の数値を切り上げて用いた。ただし、補償遮蔽体の厚さの最小値は 2mm とした。1回散乱領域は遮蔽壁内に設けた。その範囲は、遮蔽壁の厚さ方向については遮蔽壁の前面から背面までとし、遮蔽壁の横方向および上下方向については領域幅をパラメトリックに変えた計算を行い、1回散乱領域外側のコンクリートで散乱したガンマ線によるダクト・スリット出口の線量率が1回散乱領域内で散乱したガンマ線による値に比べて無視できる範囲とした。

補償遮蔽を有する遮蔽壁とバルク遮蔽壁の線量率の比較は、直ダクト付き遮蔽壁、直スリット付き遮蔽壁、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については遮蔽壁背面の線源と同一水平面($Y=0\text{cm}$)の線上にて行い、斜ダクト付き遮蔽壁、斜スリット付き遮蔽壁については、補償遮蔽体としてのダクト管・スリット壁が遮蔽壁から突出しているため、遮蔽壁背面から 40cm 離れた水平線上($Y=0\text{cm}$)にて行なった。なお比較のため、補償遮蔽のないこれらの不規則形状部付き遮蔽壁とバルク遮蔽壁での線量率の比較も示す。

6.1 直ダクト付き遮蔽壁

実際に施工されている直ダクトの直径はTable2.3に示すように通常 1cm 以上であり、且つ小口径のダクトは大口径のものに比べてストリーミング量が少ないので、計算は許容最大ダクト直径が 1cm 以上となる直ダクト付き遮蔽壁を対象とした。計算形状をFig.6.1に示す。

遮蔽性能計算は、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 $T=75\text{cm}$ 、 150cm 、入射角 $\theta=15^\circ$ 、 30° 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。入射ガンマ線が単色エネルギーの場合のダクト直径は、Table3.1に示すアルベド法に基づく許容最大ダクト直径とTable3.2に示すG33-GP計算に基づく許容最大ダクト直径のうちの大きい値(注： $T=75\text{cm}$ ではTable3.1の値の方がTable3.2の値より大きく、 $T=150\text{cm}$ では逆にTable3.2の値の方がTable3.1の値より大きい。)を用い、 $T=75\text{cm}$ 、 $\theta=15^\circ$ と $T=150\text{cm}$ 、 $\theta=15^\circ$ 、 30° の計算では、この他に許容最大ダクト直径未満の値も使用した。結果をFig.6.2(a)~(d)

に示す。入射ガンマ線が連続エネルギーの場合は、まずバルク遮蔽壁での線量率の減衰率をG33-GPコードで計算し、この値を(3.18)式のアルベド法に基づく許容最大ダクト直径算出式に代入してダクト直径を求め、遮蔽計算に使用した。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とした^(2*)。ただし、JRR4スペクトルの場合は、(3.18)式の許容最大ダクト直径が $T = 75\text{cm}$ では15cmを超えるので、 $T = 150\text{cm}$ ($\theta = 15^\circ$ 、 30° とも、許容最大ダクト直径は5.3cmとなる。)についてのみ計算を行い、Barnwellスペクトルの場合は、 $T = 150\text{cm}$ での許容最大ダクト直径が1cm未満であるため、 $T = 75\text{cm}$ (許容最大ダクト直径は、 $\theta = 15^\circ$ の場合1.6cm、 $\theta = 30^\circ$ の場合2.0cmとなる。)についてのみ計算を行った。結果をFig.6.2(e)、(f)に示す。補償遮蔽を有する直ダクト付き遮蔽壁とバルク遮蔽壁との線量率の比は、ダクト出口部において、単色エネルギーでは $T = 75\text{cm}$ で最大1.3、 $T = 150\text{cm}$ で最大1.2、連続エネルギーでは最大1.4を示し、ダクト出口周囲では1以下となった。

Fig.6.2(a)~(f)に示す単色エネルギーと連続エネルギーについての結果から、アルベド法に基づいて定めた許容最大ダクト直径以内であれば、補償遮蔽を有する直ダクト付き遮蔽壁の遮蔽性能はバルク遮蔽壁のそれと同程度かあるいは優れていると考えられる。

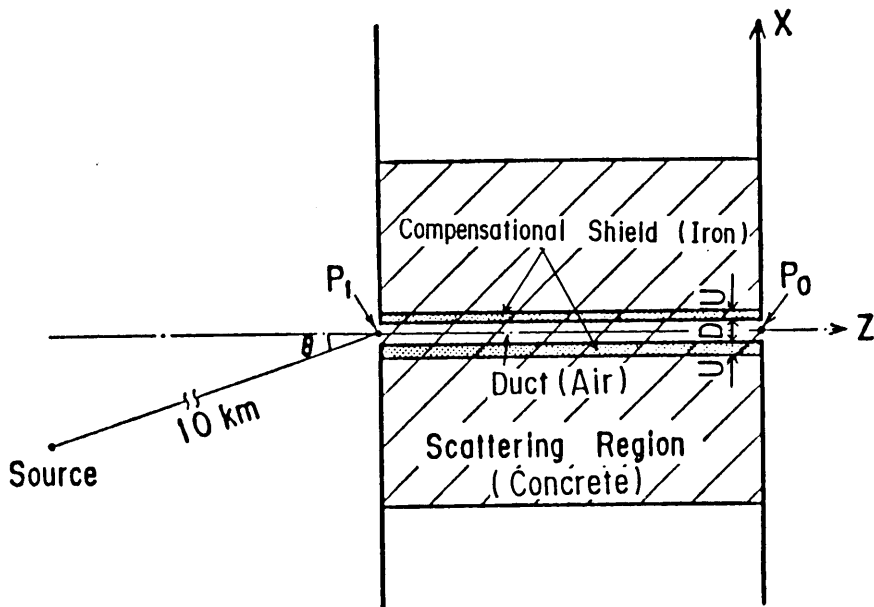


Fig.6.1 G33-GP calculational geometry of concrete wall with compensational shield for straight duct

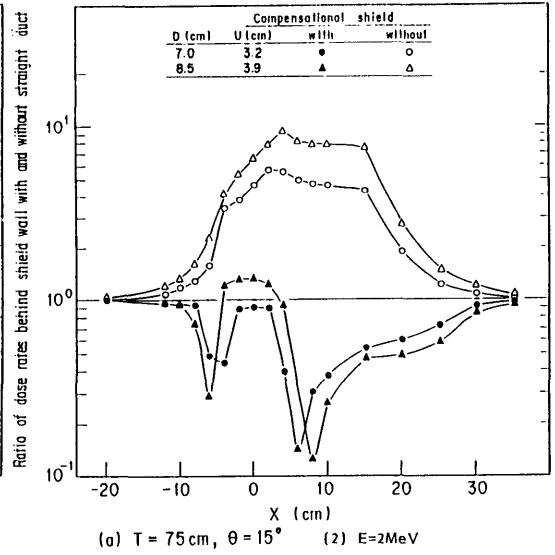
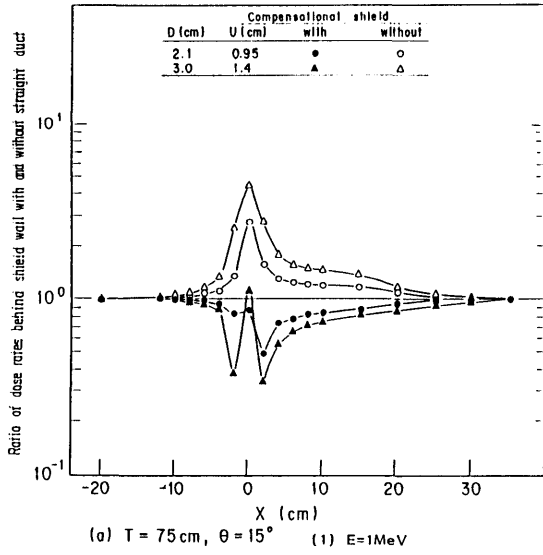


Fig.6.2(a) Ratio of dose rates behind shield wall with and without straight duct calculated by G33-GP code for mono energy gamma-ray source.

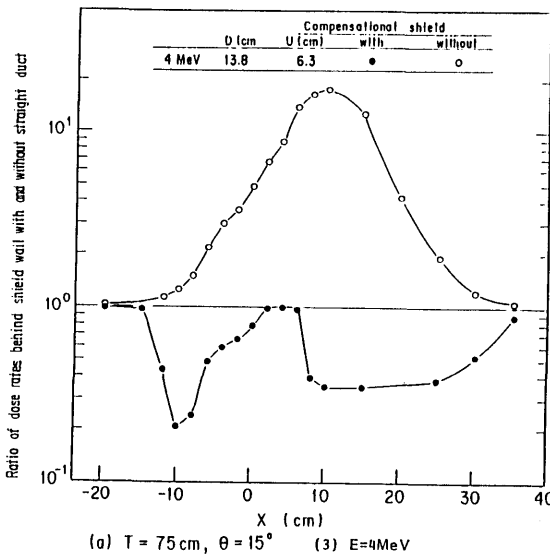


Fig.6.2(a) (Continued)

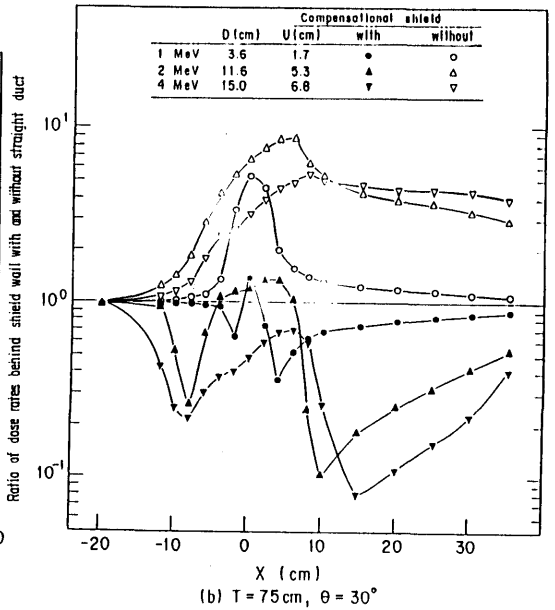


Fig.6.2(b)

Ratio of dose rates behind shield wall with and without straight duct calculated by G33-GP code for mono energy gamma-ray source.

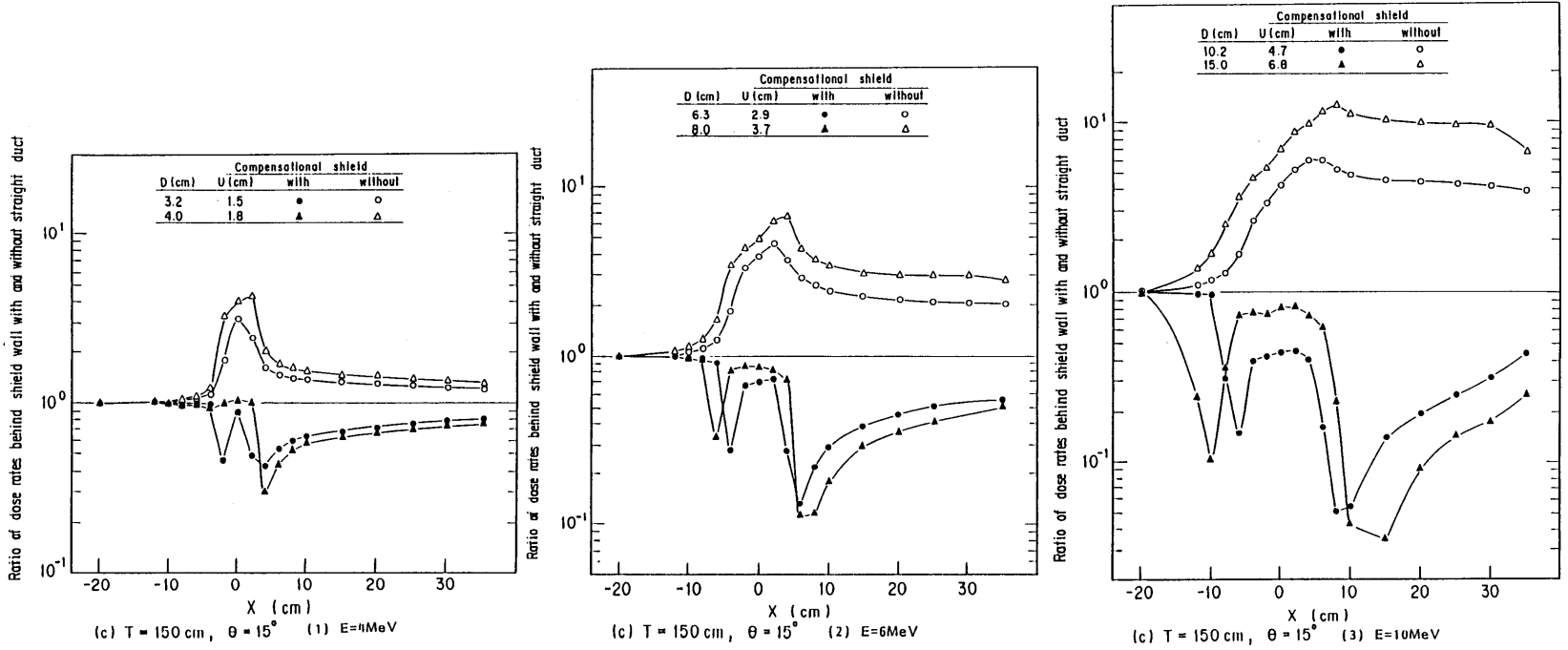


Fig.6.2(c) Ratio of dose rates behind shield wall with and without straight duct calculated by G33-GP code for mono energy gamma-ray source.

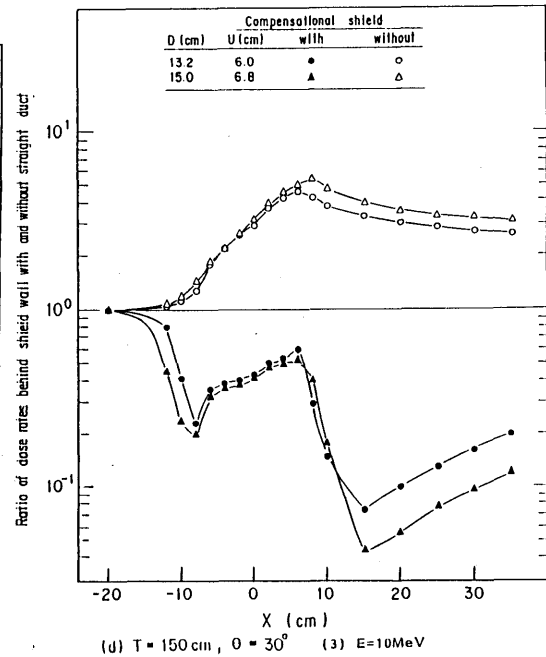
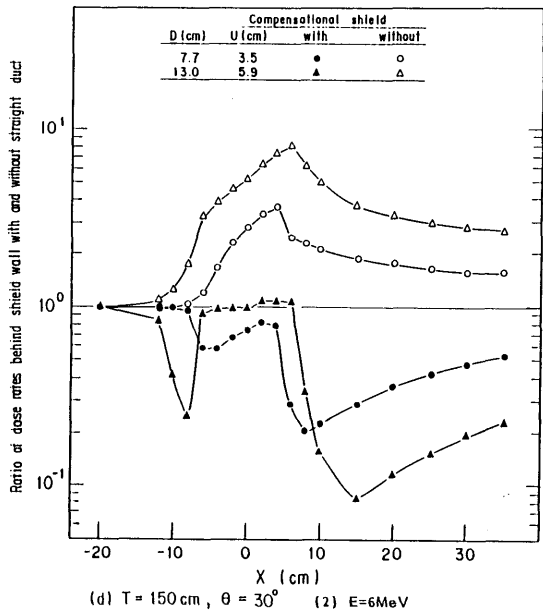
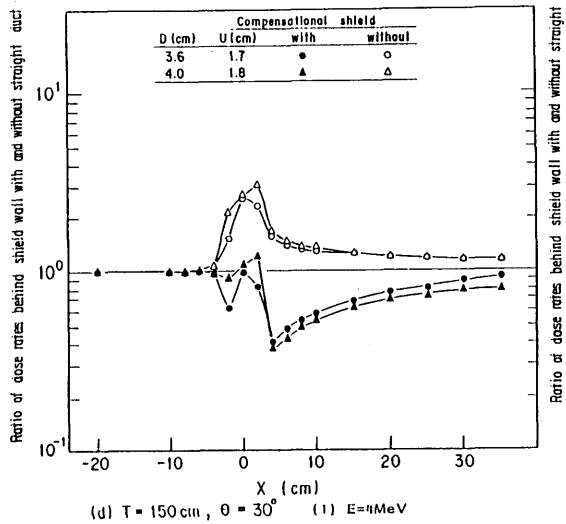


Fig.6.2(d) Ratio of dose rates behind shield wall with and without straight duct calculated by G33-GP code for mono energy gamma-ray source.