

ガンマ線遮蔽壁のダクト・スリット部における遮蔽性能の低下を補う補償遮蔽の研究

山路昭雄\*

Study on a Compensational Shield for Gamma Radiation  
to Maintain the Shielding Performance of a Shield  
Wall with Duct and Slit

By

Akio YAMAJI

**Abstract**

A compensational shield is necessary to maintain the shielding performance of a wall with air-filled regions equal to that of a wall without irregularities. In this paper, a design method of iron compensational shield is described for a straight duct and -slit, slant duct and -slit, offset slit and cylindrical offset plug in a concrete shield wall against gamma radiation. The characteristic of the present method is to install the iron compensational shield in the concrete wall, to compensate the lowering of shielding efficiency without increasing the concrete wall thickness and to

---

\* 原子力技術部

原稿受付：平成元年7月3日

determine the dimensions of the compensational shield using the densities of the concrete and iron, duct diameter, slit width and the concrete wall thickness depending on the incident gamma-ray energies. The aim of this study is to develop a useful shielding design method for irregularities in the shield wall of reprocessing plant, hot laboratory and nuclear power plant. For this reason, the present method was made under the conditions applicable to the shielding design of above mentioned facilities. These conditions are, for example, 75-150cm of concrete wall thickness and 0.5-10MeV of incident gamma-ray energy.

To verify the present method, experiments using reactor gamma rays were performed for concrete wall with shield irregularity and its compensational shield, which indicated radiation behind shield wall was reduced effectively by the compensational shield and the dose rates behind the wall became nearly equal to those of the bulk wall. However, the verification is not enough, since these experiments were performed using reactor gamma rays and only with a few cases of duct diameter and slit width. For this reason, a multigroup single scattering code G33 was intended to use the further verification of the present method. At first, to verify G33 code, experiments were analyzed with the code for configurations of shield irregularity in concrete wall with and without compensational shield. The agreement between the calculations and the measurements is fairly good. Consequently, G33 code was applied to verification of the present method, and the calculations showed that the shielding performance with compensational shields becomes approximately equal to that of the bulk shield wall. In chapter 9,

the present method was applied to a 14MeV neutron shield wall with offset slit and its compensational shield, and a good shielding performance equivalent to that of the bulk wall was showed by using MORSE-GG Monte Carlo code. In chapter 10, the applicability of the present method to a lead compensational shield was investigated for gamma radiation for a concrete shield wall with offset slit by using G33 code. The calculations showed that the shielding performance with lead compensational shield also becomes nearly equal to that of the bulk shield wall.

In appendix 1, a German nuclear standard is presented for a design of a double bent duct in concrete shield wall against gamma radiation. In appendix 2, recommended values are presented for the maximum diameter of straight- and slant- duct, and the maximum width of straight- and slant- slit with compensational shield.

From the results and discussions, it is concluded that the present method is a reliable and useful tool for the shielding design of the concrete shield wall with irregularities in reprocessing plant, hot laboratory and nuclear power plant.

## 目 次

要 旨	.....	6
第1章	序論 .....	9
第2章	補償遮蔽体の設計条件 .....	12
第3章	設計手法 .....	16
3.1	直ダクト付き遮蔽壁 .....	18
3.2	直スリット付き遮蔽壁 .....	26
3.3	斜ダクト付き遮蔽壁 .....	30
3.4	斜スリット付き遮蔽壁 .....	34
3.5	オフセットスリット付き遮蔽壁 .....	36
3.6	段付き円柱プラグ付き遮蔽壁 .....	38
3.7	セル壁で散乱するガンマ線 .....	39
第4章	原子炉を用いた実験による本設計手法の検証 .....	43
4.1	概要 .....	43
4.2	エネルギースペクトル .....	45
4.3	実験形状及び実験結果 .....	47
4.3.1	補償遮蔽を有する斜ダクト付き遮蔽壁 .....	48
4.3.2	補償遮蔽を有する斜スリット付き遮蔽壁 .....	49
4.3.3	補償遮蔽を有する直スリット付き遮蔽壁 .....	50
4.3.4	補償遮蔽を有するオフセットスリット付き遮蔽壁 .....	51
第5章	実験値との比較によるG33コードの検証 .....	52
5.1	補償遮蔽を有する直スリット付き遮蔽壁 .....	55
5.2	補償遮蔽を有する斜ダクト付き遮蔽壁 .....	56
5.3	補償遮蔽を有する斜スリット付き遮蔽壁 .....	57
5.4	補償遮蔽を有するオフセットスリット付き遮蔽壁 .....	58
5.5	直ダクト付き遮蔽壁 .....	59
5.6	複数の直ダクト付き遮蔽壁 .....	67
5.7	1回屈曲ダクト付き遮蔽壁 .....	79
第6章	G33-GPコードによる本設計手法の検証 .....	85
6.1	直ダクト付き遮蔽壁 .....	85
6.2	直スリット付き遮蔽壁 .....	91
6.3	斜ダクト付き遮蔽壁 .....	95
6.4	斜スリット付き遮蔽壁 .....	97
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 .....	99
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 .....	108
第8章	他の補償遮蔽形状例 .....	113
第9章	中性子遮蔽壁に対する本設計手法の適用性 .....	118
第10章	補償遮蔽材料を鉛とした場合の本設計手法の適用性 .....	122

第11章	考察および結論 .....	124
謝辞	.....	126
附録1	ガンマ線遮蔽用コンクリート壁内の2回屈曲中空ダクト と壁内に組み込む補償遮蔽体に関する設計手法 .....	127
附録2	ダクト直径およびスリット幅の推奨値 .....	138
参考文献	.....	143

## 要 旨

遮蔽壁にスリット・ダクト等の不規則形状部がある場合、その遮蔽性能は一般にバルク遮蔽壁でのそれより劣る。本論文は、ガンマ線遮蔽用コンクリート壁に設けられる代表的な不規則形状部である直ダクト、直スリット、斜ダクト、斜スリット、オフセットスリットおよび段付き円柱プラグについて、これらの不規則形状部による遮蔽性能の低下を補い、コンクリート壁厚を変えらることなしに壁背面の線量率をバルク遮蔽壁での値と同程度にさせるための壁内に組み込む鉄製補償遮蔽体の設計手法を提案した。本手法の特徴は、補償遮蔽体の形状を、入射ガンマ線のエネルギーには依存せず、コンクリートと鉄の密度、間隙幅、ダクト直径および遮蔽壁厚に基づいて定める点にある。また、本研究によって、1回散乱コードG33-GPは不規則形状部付き遮蔽壁の解析に有力な手法であることが明らかにされた。したがって、本設計手法による補償遮蔽構造と異なる構造を採用する場合は、同コードによってその遮蔽性能を求めることができる。

本研究で得られた成果はホットラボ施設、再処理施設、原子炉施設の遮蔽壁接合部やダクトの遮蔽設計に役立てられる。即ち、ホットラボ施設や再処理施設では、遮蔽壁の表面に凹凸がないこと、遮蔽壁付近に機器の設置が容易であることと、不規則形状部付き遮蔽壁の遮蔽性能をバルク遮蔽壁と同程度にするとともに遮蔽壁の厚さの増加を抑えることが要求され、原子炉施設においても船用炉のように船内の狭隘な場所に遮蔽壁が設けられる場合は上記の条件が要求されるからである。また、従来は線源となる機器の配置設計やダクト・スリットの配置設計において、放射線ストリーミングを極力抑えるように線源となる機器とダクト・スリットを離すため、ダクト等の設置場所が限定され、多数のダクトが近接して配置されることによる近接効果が生じて遮蔽解析が複雑となる場合も見られるが、本手法を用いることにより配置場所の制限が緩和され、遮蔽設計および線源となる機器の配置設計やダクト・スリットの配置設計が容易となる。また、線源が大きい体積を有する場合は、線源の一部がダクトやスリットの出口を直視する配置においても、不規則形状部出口の線量率をバルク遮蔽壁のそれに等しくすることが可能であり、廃棄物貯蔵施設のように大きい体積の線源を扱う施設の遮蔽設計にも本手法は役立てられる。本論文は12の章と2つの附録、等から構成される。各章と附録の要旨は次の通りである。

### 第1章 序論

過去において行われた不規則形状および補償遮蔽体に関する研究例を紹介するとともに、本論文の対象とする不規則形状および本論文の構成を記述した。

### 第2章 補償遮蔽体の設計条件

設計条件を示した。主な条件は次の通りである。

- (1) 再処理施設、ホットラボ施設、原子炉施設への適用が十分可能なように、コンクリート遮蔽壁の厚さは75~150cm、遮蔽壁に入射するガンマ線は0.5~10MeVが主な成分である任意のスペクトルを対象とする。
- (2) 実施設におけるダクト直径、スリット幅を参考にして、直ダクト・斜ダクトの直径は15cm以内、直スリット・斜スリットの間隙幅は10mm以内、オフセットスリット・段付き円柱プラグにおける間隙幅は5cm以内をそれぞれ対象とする。ダクト内および間隙内は空気とする。

- (3) 直ダクト付き遮蔽壁・直スリット付き遮蔽壁においては、線源はこれらの不規則形状部出口を直視しない位置に配置される。斜ダクト付き遮蔽壁・斜スリット付き遮蔽壁においては、これらの不規則形状部領域の遮蔽壁にガンマ線が垂直入射するとする。ただし、セル壁で散乱後にダクト(スリット)入口に入射し、コンクリートを透過せずにダクト(スリット)出口に到達するガンマ線も対象とする。また、大きい体積線源の場合は、線源の一部がこれらの不規則形状部出口を直視する配置も本手法の対象に含める。
- (4) 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おいては、線源位置に対する制限はない。

### 第3章 設計手法

補償遮蔽体の設計手法を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・段付き円柱プラグ付き遮蔽壁について記述するとともに、ダクト直径・スリット幅の許容最大値を示した。また、不規則形状部付き遮蔽壁と向かい合ったセル壁で散乱するガンマ線の効果を直ダクト付き遮蔽壁についてG33-GPコードを用いて調べ、平行ビームに基づいて定めた許容ダクト直径以内であれば、ダクト出口の線量率はセル壁散乱ガンマ線による線量率を加えてもバルク遮蔽壁背面での最大線量率以下となることを明らかにした。また、大きい体積の線源の一部が不規則形状部出口を直視する配置においても、補償遮蔽を有する不規則形状部付き遮蔽壁背面の線量率をバルク遮蔽壁背面での値以下に減衰させることのできることをG33-GPコードによる計算で示した。

### 第4章 原子炉を用いた実験による本設計手法の検証

本手法に基づいて設計・製作した補償遮蔽体を有する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およびオフセットスリット付き遮蔽壁を研究用原子炉JRR4の散乱実験室に設置し、原子炉からのガンマ線を同遮蔽壁に入射させた実験により、同遮蔽壁はバルク遮蔽壁との同等の遮蔽性能を有することを示した。

### 第5章 実験値との比較によるG33コードの検証

第4章に示した実験は一部の不規則形状を扱ったのみであるため、種々の不規則形状および入射エネルギーについて本手法の有効性を検証するため、第4章に示した補償遮蔽体を有する不規則形状部付き遮蔽壁実験とJRR4散乱実験室で行われたその他の不規則形状部遮蔽壁(直ダクト、複数の直ダクトおよび1回屈曲ダクト付きの各遮蔽壁)実験をG33コードで解析し、同コードは不規則形状部付き遮蔽壁の遮蔽解析に適用できることを明らかにした。

### 第6章 G33-GPコードによる本設計手法の検証

本手法適用範囲内の種々の不規則形状および入射エネルギーについて、補償遮蔽を有する不規則形状部付き遮蔽壁の遮蔽性能はバルク遮蔽壁のそれと同程度にできることをG33-GPコードによる計算で示した。ただし、遮蔽壁背面の不規則形状出口等においては、局所的にバルク遮蔽壁の線量率を超える箇所もあるが、不規則形状出口周囲を含めた線量率の平均では、バルク遮蔽壁と同等あるいはそれ以上の遮蔽性能となる。また、入射エネルギーが明らかな場合は、より適切な補償遮蔽寸法で設計が行えることを示した。

## 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

直角に1回屈曲するダクト付きコンクリート遮蔽壁をJRR4散乱実験室に設置し、鉄製補償遮蔽体を1回屈曲ダクト周囲の種々の箇所に置いてダクト出口の線量率を測定し、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ダクト出口の線量率を効果的に減少させることのできることを明らかにした。

## 第8章 他の補償遮蔽形状例

本設計手法では、補償遮蔽を、ダクトについてはダクト管、スリットについてはスリット壁として設けた。ただし、他の補償遮蔽配置も可能である。例として、直ダクト付き遮蔽壁の前面部と背面部に補償遮蔽を埋め込む配置の設計手法を示し、原子炉を用いた実験により、同配置の補償遮蔽を有する直ダクト付き遮蔽壁についてもバルク遮蔽壁と同等の遮蔽性能を有することを示した。

## 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の可能性を、14MeV中性子をオフセットスリット付き遮蔽壁に入射させたMORSE-GGモンテカルロ計算によって調べ、補償遮蔽により遮蔽壁背面の0.2MeV以上の速中性子線量率をバルク遮蔽壁背面での値以下に減衰させることのできることを示し、中性子遮蔽壁についても本設計手法は有効であることを明らかにした。

## 第10章 補償遮蔽材料を鉛とした場合の本設計手法の適用性

補償遮蔽材を鉛とした場合の補償遮蔽体厚さを本設計手法に基づいて求め、鉛補償遮蔽を有する不規則形状部付き遮蔽壁の遮蔽性能もバルク遮蔽壁のそれと同等になることをG33-GPコードを用いた計算により示した。

## 第11章 考察および結論

本設計手法の適用範囲と有用性を考察し結論を示すとともに、本研究の今後の課題・展望をガンマ線遮蔽壁と中性子遮蔽壁について記述した。

附録1 ガンマ線遮蔽用コンクリート壁内の2回屈曲中空ダクトと壁内に組み込む補償遮蔽体に関する設計手法(西ドイツDIN規格：DIN25427)を紹介した。

附録2 補償遮蔽を有する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、バルク遮蔽壁と同等あるいはそれ以上の遮蔽性能を有することのできるダクト直径・間隙幅の最大値の推奨値を示した。本推奨値は実験値および計算値に含まれる誤差を考慮して定めた。



## 第1章 序 論

ホットラボ施設、再処理施設、原子炉施設等の遮蔽壁には、換気、給水、電線貫通、マニピュレータ操作等のためのダクトや壁接合部等におけるスリットが多数見られる<sup>(1)~(6)</sup>(以下、これらのダクト・スリットを総称して不規則形状部と言う)。不規則形状部による遮蔽性能の低下の影響を少なくする方法として、

- (1)ダクトやスリットを屈曲させる<sup>(1),(2),(6)</sup>,
- (2)線源から離れた位置に不規則形状部を設け、直通ダクト(以下、直ダクト)と直通スリット(以下、直スリット)については、その出口を線源が直視できない配置とする<sup>(2)</sup>,
- (3)遮蔽壁に追加遮蔽を設ける<sup>(1),(2),(4)</sup>,

が従来から考えられており、遮蔽壁背面の線量率が基準値を満足するように、これらの方法が単独あるいは組み合わせて用いられている<sup>(2)</sup>。

(1)については、放射線漏洩量を精度良く計算する方法の研究が従来から精力的に行われてきた<sup>(6)~(11)</sup>。しかし、ダクトについては、配管設計や施工上の理由から、屈曲構造は換気ダクト等の大口径のダクトに用い、その他のダクトは直通構造とし、(2)、(3)の対策を構ることが多い<sup>(2),(12)</sup>。

(1)、(2)の対策によっては遮蔽壁背面の線量率が基準値を満足しない場合、あるいはこれらの対策が施こせず基準値を満足しない場合には、(3)の追加遮蔽が必要となる。

追加遮蔽は、遮蔽壁の外側に設ける方法と遮蔽壁内に設ける方法とがある。ホットラボ施設等では、操作上および施工上の観点から、遮蔽壁厚を一定に保ちつつダクト等の不規則形状部における遮蔽性能を不規則形状部のない遮蔽壁(以下、バルク遮蔽壁)のそれに等しくさせることを要求される場合が多い。この場合、バルク遮蔽材よりも遮蔽性能の優れた物質(以下、補償遮蔽体)を遮蔽壁内に組み込む方法が考えられ、実施設において施工例が見られ<sup>(1),(12),(14)</sup>、Fig.1.1にこれを示す。しかし、補償遮蔽の設計手法は明確でなく、補償遮蔽体の配置、形状およびその寸法は設計者のノウハウ(drafting technique)に依存していると言ってよい<sup>(1)</sup>。

補償遮蔽体に関する研究は当初、ガンマ線用遮蔽壁に組み込む2回屈曲中空ダクトと遮蔽壁の凹部について行われた<sup>(15)~(17)</sup>。2回屈曲ダクト付き遮蔽壁は直ダクト付き遮蔽壁に比べて一般に放射線ストリーミング量が少なく、補償遮蔽によって遮蔽壁背面の線量率を容易に減衰させることができると考えられる。この研究を発展させて、西ドイツ DIN規格にはガンマ線遮蔽用コンクリート壁内の2回屈曲中空ダクトと壁内に組み込む補償遮蔽体に関する遮蔽設計法<sup>(18)</sup>があり、附録1でこれを紹介する。

本研究は、2回屈曲中空ダクト以外の代表的な不規則形状部である直ダクト、直スリット、斜ダクト、斜スリット、オフセットスリットおよび段付き円柱プラグによるガンマ線遮蔽性能の低下を補う補償遮蔽体の設計手法に関するものであり、次の内容からなる。

- (1)ホットラボ施設、再処理施設等のガンマ線遮蔽用コンクリート壁に設けられたダクト・スリット等の不規則形状部による遮蔽性能の低下を、遮蔽壁の厚さを変えずに補う方法として、壁内にコンクリートよりも遮蔽性能の優れた鉄製の補償遮蔽体を組み込み、その形状を入射ガンマ線のエネルギーに依存せず、また計算コードを使用せずに決定できる設計手法を提案する。

(2)同設計手法に基づく補償遮蔽体を組み込んだ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およびオフセットスリット付き遮蔽壁を製作し、原子炉からのガンマ線をそれぞれの遮蔽壁に入射させて遮蔽壁背面の線量率を測定し、バルク遮蔽壁背面の線量率測定値と比較することによって本設計手法の妥当性を実験的に明らかにする。

実験は一部の不規則形状遮蔽壁について原子炉からのガンマ線を用いて行われた。実施設で対象となる種々の遮蔽壁厚、ダクト直径、スリット幅、入射エネルギーに対する本設計手法の適用性は1回散乱コードG33<sup>(39)</sup>による計算によって示す。このため、

(3)不規則形状付き遮蔽壁のガンマ線遮蔽性能に関する実験をG33コードにて解析し、同コードは不規則形状部におけるガンマ線量率を十分な精度で計算できることを明らかにする。

次に、

(4)実施設で対象となる種々の遮蔽壁厚、ダクト直径、スリット幅、入射ガンマ線エネルギー、に関する遮蔽計算を項目(3)で検証されたG33コードを用いて行い、補償遮蔽体を組み込んだ不規則形状付き遮蔽壁の遮蔽性能はバルク遮蔽壁での性能と同等あるいは優れていることを示す。

さらに、

(5)入射ガンマ線のエネルギーに依存した補償遮蔽体の設計法を示し、G33による計算によって同設計手法の妥当性を明らかにする。

(6)上記以外の不規則形状部である1回屈曲ダクト付き遮蔽壁における補償遮蔽体の効果を実験によって示す。

(7)補償遮蔽の材質を鉛とした場合の本設計手法の有効性をG33コードによる計算で明らかにする。

(8)中性子遮蔽壁に対しても本設計手法が有効であることをモンテカルロ計算によって明らかにする。

附録2に、ダクト直径およびスリット幅の推奨値を示す。

## 船舶技術研究所報告（第26巻第6号）に掲載の論文等の紹介

### 研究論文の紹介

#### ガンマ線遮蔽壁のダクト・スリット部における 遮蔽性能の低下を補う補償遮蔽の研究

山路 昭雄

原子炉施設、ホットラボ施設等の放射線遮蔽壁にはスリット・ダクト等の不規則形状部があり、その遮蔽性能は一般に不規則形状部のない遮蔽壁（以下、バルク遮蔽壁）でのそれより劣る。本論文は、ガンマ線遮蔽用コンクリート壁に設けられる代表的な不規則形状部である直ダクト、直スリット、斜ダクト、斜スリット、オフセットスリットおよび段付き円柱プラグについて、これらの不規則形状部による遮蔽性能の低下を補い、コンクリート壁厚を変えることなしに壁背面の線量率をバルク遮蔽壁での値と同程度にさせるための壁内に組み込む鉄製補償遮蔽体の設計手法を提案した。本手法の特徴は、補償遮蔽体の形状を入射ガンマ線のエネルギーには依存せず、コンクリートと鉄の密度、間隙幅、ダクト直径および遮蔽壁厚に基づいて定める点にある。また、本研究によって、1回散乱コードG33-GPは不規則形状部付き遮蔽壁の解析に有力な手法であることが明らかにされた。したがって、本設計手法による補償遮蔽構造と異なる構造を採用する場合は、同コードによってその遮蔽性能を求めることができる。

本研究で得られた成果はホットラボ施設、再処理施設、原子炉施設の遮蔽壁接合部やダクトの遮蔽設計に役立てられる。即ち、ホットラボ施設や再処理施設では、遮蔽壁の表面に凹凸がないこと、遮蔽壁付近に機器の設置が容易であることと、不規則形状部付き遮蔽壁の遮蔽性能をバルク遮蔽壁と同程度にするとともに遮蔽壁の厚さの増加を抑えることが要求され、原子炉施設においても船用炉のように船内の狭隘な場所に遮蔽壁が設けられる場合は上記の条件が要求されるからである。また、従来は線源となる機器の配置設計やダクト・スリットの配置設計において、放射線ストリーミングを極力抑えるように線源となる機器とダクト・スリットを離すため、ダクト等の設置場所が限定され、多数のダクトが近接して配置されることによる近接効果が生じて遮蔽解析が複雑となる場合も見られるが、本手法を用いることにより配置場所の制限が緩和され、遮蔽設計および線源となる機器の配置設計やダクト・スリットの配置設計が容易となる。本手法は線源がダクトやスリットの出口を直視しない配置に適用される。これは実施設で通常行われている配置である。ただし、大きい体積の線源の場合、本論文は、線源の一部がダクトやスリットの出口を直視する配置においても不規則形状部出口の線量率をバルク遮蔽壁のそれに等しくできるとを示しており、廃棄物貯蔵施設のように大きい体積の線源を扱う施設の遮蔽設計にも本手法は役立てられる。

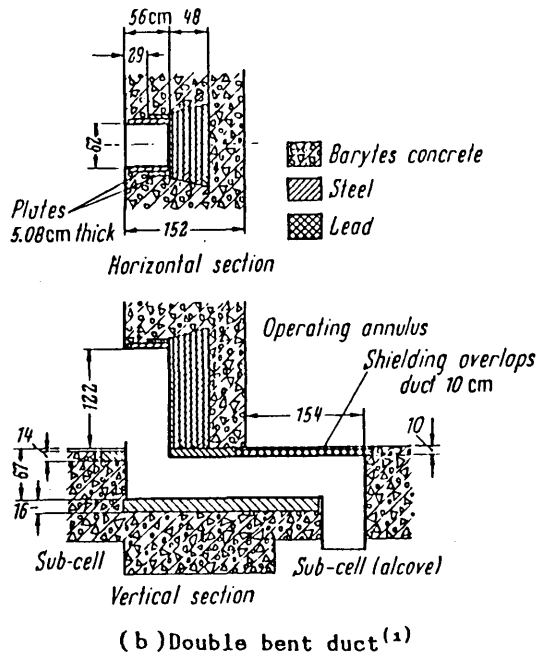
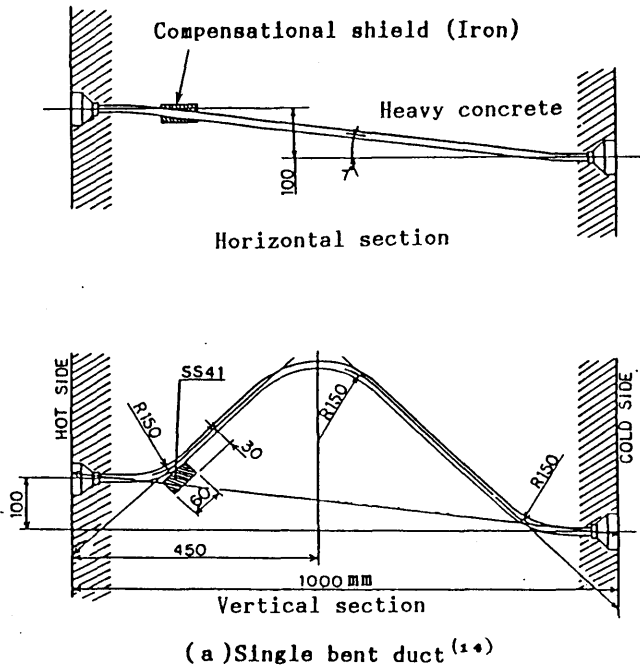


Fig.1.1 Example of compensational shield used in radiation facilities.

## 第2章 補償遮蔽体の設計条件

本設計手法は再処理施設、ホットラボ施設、原子炉施設等のガンマ線遮蔽に適用されるものとする。設計条件は次の通りである。

- (1) 遮蔽壁は普通コンクリート、補償遮蔽体は鉄とする。
- (2) 補償遮蔽体を遮蔽壁内に組み込むことにより、コンクリート壁厚を変えることなしに、遮蔽壁背面の不規則形状部出口およびその近傍での線量率をバルク遮蔽壁での値と同程度にさせる。ホットラボ施設、再処理施設のセル壁ではマニピュレータ操作上の観点から、また船用炉においては遮蔽設備が狭隘な船内に設置されることから、この設計条件は通常設定されるものである。本設計手法が役立てられる例として、ホットラボ施設のセル壁接合部<sup>(13)</sup>と原子力船「オットハーン」、「むつ」二次遮蔽体接合部<sup>(4),(20)</sup>をFig.2.1に示す。また、原子力船の二次遮蔽体には多数の直ダクトが遮蔽体を貫通(注:「むつ」二次遮蔽体には約90個の直ダクトが貫通し、遮蔽体の外側に補償遮蔽体が設けられている。)しており、この不規則形状部に対しても本設計手法は役立てられる。
- (3) 遮蔽壁の厚さは、再処理施設、ホットラボ施設、原子炉施設におけるコンクリート遮蔽壁厚<sup>(2),(3),(5)</sup>に基づき、75~150cmを対象とする。実施設での遮蔽壁厚をTable 2.1に示す。
- (4) 遮蔽壁に入射するガンマ線は、0.5~10MeVの範囲の光子が線源側の遮蔽壁表面の線量率に決定的に寄与するようなスペクトルを有する。この理由は以下に基づいている。
  - ①再処理施設のように使用済燃料が線源となる場合、コンクリート壁を75~150cm透過後の線量率に寄与するガンマ線は、壁入射エネルギーが0.5~2MeVのものが大部分であること。例として、Barnwell再処理工場遠隔プロセスセル設計計算での線源スペクトル<sup>(12)</sup>を用い、各入射エネルギー群ごとにコンクリート壁を75、100、150cm透過後の線量率を点減衰核コードで計算し、これと全エネルギー群による線量率との比を求めTable2.2に示す。同表によるとコンクリート壁厚75cmでは、壁入射エネルギー0.5~0.9MeVのガンマ線が壁背面における線量率の46%を占め、壁厚100cmと150cmでは、壁入射エネルギー1.35~2.2MeVのガンマ線が壁背面における線量率の77%と97%をそれぞれ占めている。
  - ②ホットラボ施設では照射済燃料や<sup>137</sup>Cs、<sup>60</sup>Co等の放射性同位元素を扱い、再処理施設と同様にコンクリート壁を75~150cm透過後の線量率に寄与するガンマ線は、壁入射エネルギーが0.5~2MeVのものが大部分である。
  - ③原子炉施設ではチッ素16からの約6MeVのガンマ線や構造材等の鋼で発生する約8MeVのガンマ線が遮蔽壁に入射する。
- (5) バルク遮蔽壁の壁前面と壁背面の線量率の比は与えられている。
- (6) 直ダクトおよび直スリットは遮蔽壁に垂直に配置される。オフセットスリットおよび段付き円柱プラグにおける段は遮蔽壁の中央に設ける。
- (7) 以下の寸法は与えられている。①コンクリート遮蔽壁の厚さ、②ダクト直径、③スリット幅、④段付き円柱プラグ付き遮蔽壁におけるプラグ直径(2つのプラグ直径のうちの一つ)およびプラグとダクトとの間隙(スリーブ幅)。ただし、直ダクトおよび斜ダクトのダクト直径は、遮蔽壁厚、入射角およびバルク遮蔽壁での線量率の減衰率

から定められる許容値(注：第3章に示す。)以下で、且つ実施設における寸法<sup>(2),(3)</sup>を参考にして15cm以内のものを対象とする。オフセットスリット、段付き円柱プラグにおける間隙幅は実施設における寸法を参考にして0~5cmを対象とする。実施設での直ダクトの直径、オフセットスリット・段付き円柱プラグの間隙幅をTable2.3に示す。実施設では、放射線ストリーミングを抑えるため、直スリット・斜スリットを可能な限り避けてFig.2.1に示すようなオフセット構造としている<sup>(1)</sup>。オフセット構造におけるスリットの間隙幅は5mm以内が多い<sup>(1),(12)</sup>。直スリット・斜スリットの間隙幅は、放射線ストリーミングを抑えるため、オフセットスリットの間隙幅に比べて狭いと考えられるが、本手法では直スリット・斜スリットの間隙幅として第3章に示す許容値以下で且つ10mm以内を対象とする。

- (8)ダクト内および間隙内は空気とする。
- (9)直ダクト付き遮蔽壁・直スリット付き遮蔽壁においては、線源はこれらの不規則形状部出口を直視しない位置に配置される。これは実施設において通常行われている配置である<sup>(9),(12)</sup>。ただし、セル壁で散乱し、不規則形状部付き遮蔽壁に入射するガンマ線は設計対象に含める。したがって、セル壁で散乱後に直ダクト(直スリット)入口に入射し、コンクリートを透過せずに直ダクト(直スリット)出口に到達するガンマ線も対象とする。また、大きい体積線源の場合は、線源の一部がこれらの不規則形状部出口を直視する配置も本手法の対象に含める。
- (10)斜ダクト付き遮蔽壁・斜スリット付き遮蔽壁においては、これらの不規則形状部領域の遮蔽壁にガンマ線が垂直入射するとする。ただし、セル壁で散乱後に斜ダクト(斜スリット)入口に入射し、コンクリートを透過せずに斜ダクト(斜スリット)出口に到達するガンマ線も対象とする。また、大きい体積線源の場合は、線源の一部がこれらの不規則形状部出口を直視する配置も本手法の対象に含める。
- (11)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おいては、線源位置に対する制限はない。

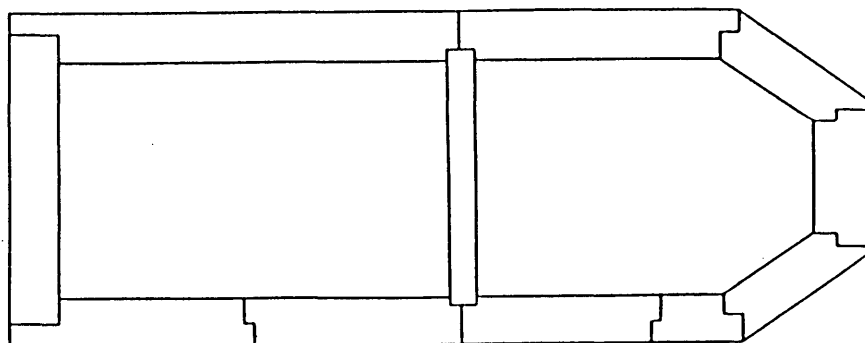


Fig.2.1(a) Example of shield irregularity of hot laboratory<sup>(12)</sup>

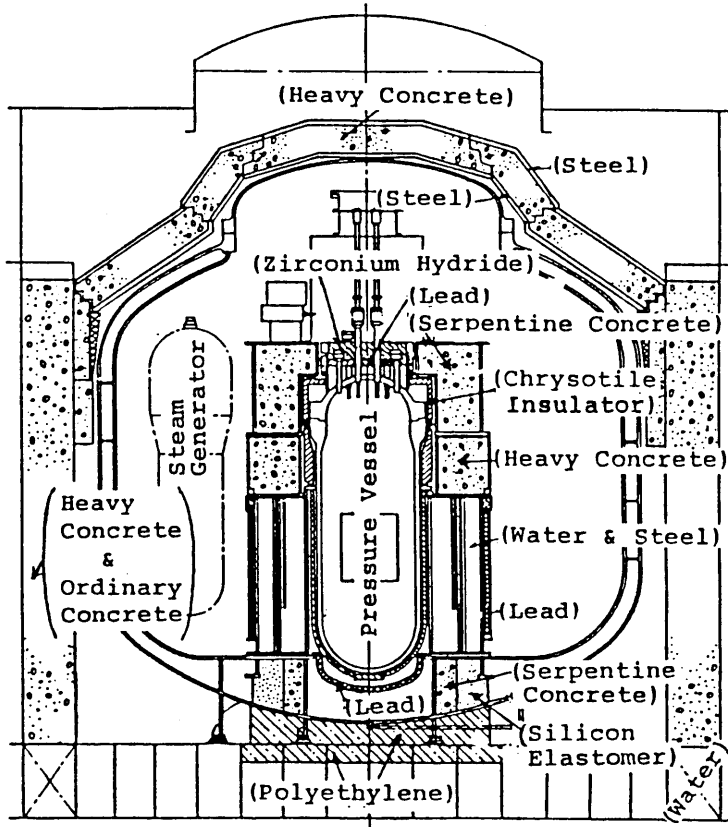


Fig.2.1(b) Shielding arrangement of nuclear ship MUTSU (4)

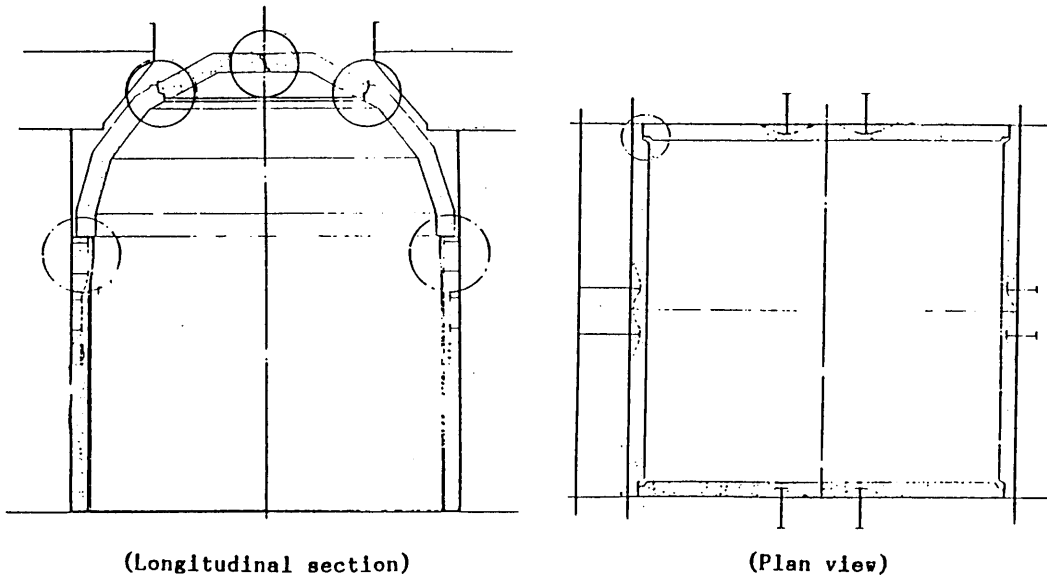


Fig.2.1(c) Secondary shield of nuclear ship OTTO HAHN (20)

Table2.1 Example of shield wall thickness

Facility	Shield wall	Thickness (cm)
N.S. Mutsu <sup>(3)</sup>	C/V side shield	100~110
Barnwell reprocessing plant <sup>(12)</sup>	Remote process cell	61~152
WASTEF <sup>(14)</sup>	No.1~5 cell	75~155

Table2.2 Percentage of calculated dose rate of each incident  $\gamma$ -ray energy group to the total behind concrete wall with thickness of 75,100 and 150cm, respectively.

Incident $\gamma$ -ray energy group (MeV)	Percentage of dose rate of each incident $\gamma$ -ray energy group to the total behind concrete wall with thickness of		
	75cm	100cm	150cm
0 ~ 0.5	0.1	<0.001	<0.001
0.5 ~ 0.9	46.4	16.0	0.7
0.9 ~ 1.35	7.4	6.6	2.0
1.35 ~ 1.8	27.7	40.5	35.1
1.8 ~ 2.2	18.3	36.8	61.8
2.2 ~ 5.0	0.1	0.2	0.4

Table2.3 Example of duct diameter and slit width in facilities

Diameter of air-filled straight duct	1.6~14.3cm (N.S.Mutsu <sup>(3)</sup> )
Width of offset slit	<1.5, <1.8, <3.3, <3.6cm (N.S.Mutsu <sup>(3)</sup> )
Width of offset hatch plug	0.42cm (EBR-II fuel cycle facility <sup>(1)</sup> )



## 第3章 設計手法

本設計手法では、

$$\bar{\mu} = \frac{1}{T} \ln \frac{D_0}{D_1} \quad (3.1)$$

ここで、 $T$ ：遮蔽壁の厚さ

$D_0, D_1$ ：バルク遮蔽壁の前面、背面における線量率

で定義された平均減弱係数 $\bar{\mu}$ を用いる。

コンクリートと鉄に対する平均減弱係数を $\bar{\mu}_{\text{con}}$ 、 $\bar{\mu}_{\text{Fe}}$ とし、遮蔽壁の材質を鉄とした場合の壁厚を $T'$ とすると、

$$\exp(-\bar{\mu}_{\text{con}} T) = \exp(-\bar{\mu}_{\text{Fe}} T') = \frac{D_1}{D_0} \quad (3.2)$$

の関係がある。(3.2)式から、

$$\bar{\mu}_{\text{Fe}} / \bar{\mu}_{\text{con}} = T / T' \quad (3.3)$$

が得られる。

コンクリート遮蔽壁と鉄遮蔽壁におけるガンマ線の減衰は、線源と検出点の位置を共通とし、ガンマ線の空気中での減衰を無視すると、

$$B_{\text{con}} e^{-\mu_{\text{con}} T} = B_{\text{Fe}} e^{-\mu_{\text{Fe}} T'} \quad (3.4)$$

ここで、 $B_{\text{con}}$ 、 $B_{\text{Fe}}$ ：コンクリートと鉄の再生係数

$\mu_{\text{con}}$ 、 $\mu_{\text{Fe}}$ ：コンクリートと鉄の線吸収係数

である。(3.4)式は、

$$T' = \frac{1}{\mu_{\text{Fe}}} \left\{ \mu_{\text{con}} T + \ln \left( \frac{B_{\text{Fe}}}{B_{\text{con}}} \right) \right\} \quad (3.5)$$

と書き換えられる。(3.5)式を(3.3)式に代入すると、

$$\frac{\bar{\mu}_{\text{Fe}}}{\bar{\mu}_{\text{con}}} = \frac{\mu_{\text{Fe}}}{\mu_{\text{con}} + \frac{1}{T} \ln \left( \frac{B_{\text{Fe}}}{B_{\text{con}}} \right)} \quad (3.6)$$

となる。コンクリートと鉄の密度を $\rho_{\text{con}}$ 、 $\rho_{\text{Fe}}$ とし、コンクリートと鉄の質量減衰係数を用いて(3.6)式を表示すると、

$$\frac{\bar{\mu}_{\text{Fe}}}{\rho_{\text{Fe}}} / \frac{\bar{\mu}_{\text{con}}}{\rho_{\text{con}}} = \frac{\frac{\mu_{\text{Fe}}}{\rho_{\text{Fe}}}}{\frac{\mu_{\text{con}}}{\rho_{\text{con}}} + \frac{1}{\rho_{\text{con}} T} \ln \left( \frac{B_{\text{Fe}}}{B_{\text{con}}} \right)} \quad (3.7)$$

となる。

ガンマ線の壁入射エネルギー0.5~10MeVについて、コンクリート遮蔽壁厚75~150cmに

相当する平均自由行程における(3.7)式の値をFig3.1に示す。上記のエネルギーおよび平均自由行程の範囲において  $\frac{\bar{\mu}_{Fe}}{\rho_{Fe}} / \frac{\bar{\mu}_{con}}{\rho_{con}}$  は0.94~1.25の範囲にある。上記の計算において、線吸収係数にはNSRDS-NBS 29<sup>(22)</sup>記載の値を、再生係数にはPALLASコードで計算された点等方線源に対する再生係数<sup>(23)</sup>を用いた。同再生係数には制動輻射の効果が含まれている。

以下で述べる各不規則形状部における補償遮蔽体の寸法の計算では安全側に  $\bar{\mu}_{Fe}$  の最小値

$$\bar{\mu}_{Fe} = 0.94 \frac{\bar{\mu}_{con}}{\rho_{con}} \rho_{Fe} \quad (3.8)$$

を用いる。

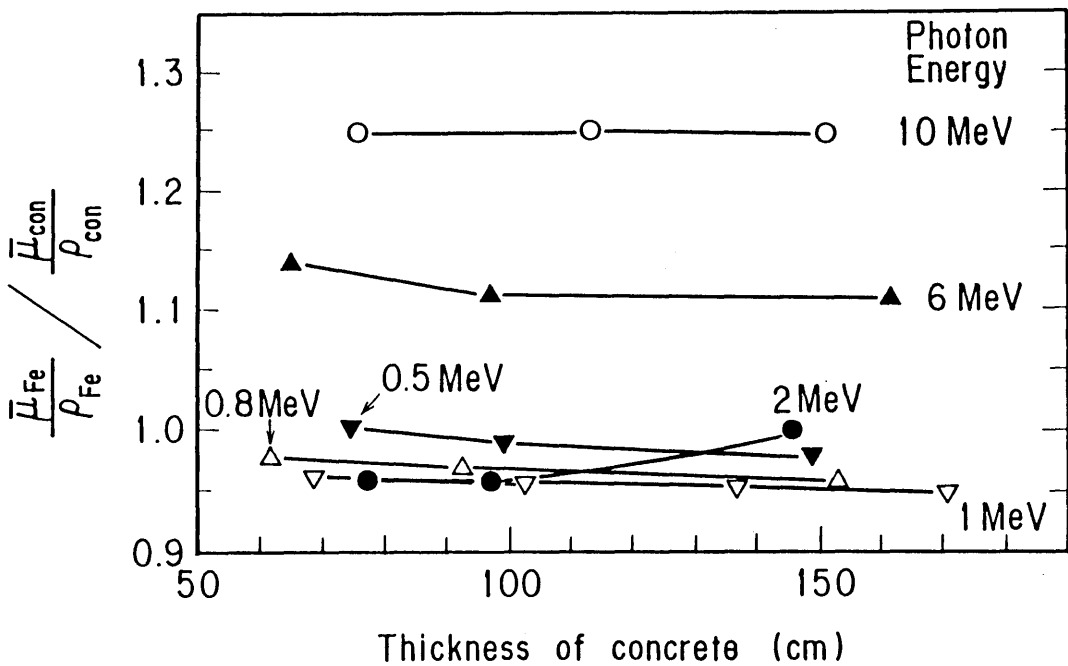


Fig.3.1 Ratio of  $\bar{\mu}_{Fe}/\rho_{Fe}$  to  $\bar{\mu}_{con}/\rho_{con}$  as a function of concrete thickness

### 3.1 直ダクト付き遮蔽壁

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直ダクト付き遮蔽壁の形状をFig.3.2に示す。ダクトの直径をD、補償遮蔽体の厚さをU、遮蔽壁の厚さをTでそれぞれ表示する。

#### (1) 補償遮蔽体の厚さの決定

補償遮蔽体の厚さUは、Fig.3.2のライン①において、

$$\exp\left(\frac{-\bar{\mu}_{\text{con}}T}{\cos\theta_1}\right) \geq \exp\left\{\frac{-\bar{\mu}_{\text{Fe}}U}{\sin\theta_1} - \bar{\mu}_{\text{con}}\left(\frac{T}{\cos\theta_1} - \frac{D+U}{\sin\theta_1}\right)\right\} \quad (3.9)$$

の条件から求める。

(3.9)式をUについて解くと、

$$U \geq \frac{\bar{\mu}_{\text{con}} D}{\bar{\mu}_{\text{Fe}} - \bar{\mu}_{\text{con}}} \quad (3.10)$$

となる。

(3.10)式に $\bar{\mu}_{\text{Fe}}$ の最小値である(3.8)式を代入し、

$$U \geq \frac{\rho_{\text{con}} \cdot D}{0.94 \rho_{\text{Fe}} - \rho_{\text{con}}} \quad (3.11)$$

とする。(3.11)式から明らかなように、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。

#### (2) 許容最小入射角の決定

線源はダクト出口を直視しない位置に配置される。線源とダクト入口とを結ぶ線と遮蔽壁の法線とのなす角度の許容最小値 $\theta_0$ は、Fig.3.2のライン②において、

$$\exp\left(\frac{-\bar{\mu}_{\text{con}}T}{\cos\theta_0}\right) = \exp\left(\frac{-\bar{\mu}_{\text{Fe}}U}{\sin\theta_0}\right) \quad (3.12)$$

の条件から求める。

(3.12)式に(3.11)式のUの値と(3.8)式の $\bar{\mu}_{\text{Fe}}$ の値を代入すると、

$$\theta_0 = \tan^{-1} \frac{0.94 \rho_{\text{Fe}} \cdot D}{(0.94 \rho_{\text{Fe}} - \rho_{\text{con}}) T} \quad (3.13)$$

が得られる。 $\theta_0$ はコンクリートと鉄の密度、ダクト直径、および遮蔽壁の厚さのみに依存する。

#### (3) 許容最大ダクト直径の決定

レイアナリシス法に基づく許容最大ダクト直径と、ダクト壁面で散乱しダクト内を透過するガンマ線に基づく許容最大ダクト直径とを求め、両者のうちの小さい値を許容最大ダクト直径とする。ただし、第2章の設計条件で示したようにダクト直径は15cmを超えないとする。まず、平行ビームのガンマ線について述べる。

レイアナリシス法に基づく許容最大ダクト直径  $d_R$  は(3.13)式から、

$$d_R = \frac{(0.94 \rho_{Fe} - \rho_{con}) T}{0.94 \rho_{Fe}} \tan \theta \quad (3.16)$$

となる。

ダクト壁面で散乱しダクト出口に到達するガンマ線に基づく許容最大ダクト直径  $d_s$  の導出では、ガンマ線ビームのダクト壁面への入射面積を  $f$ 、微分線量アルベドを  $\alpha_{D1}$  とし、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による線量率とダクト入口における線量率との比を  $f \cdot \alpha_{D1} / (T - \frac{d_s}{2 \tan \theta})^2$  で表わす (Fig.3.3参照)。

この値がバルク遮蔽壁の背面と前面における線量率の比  $A$  よりも小さくなるように許容最大ダクト直径  $d_s$  を定める。すなわち、

$$\frac{f \cdot \alpha_{D1}}{(T - \frac{d_s}{2 \tan \theta})^2} \leq A \quad (3.17)$$

とする。  $\theta$  方向から直視できるダクト壁の面積  $f$  は Fig.3.3 から明らかなように  $\frac{3\pi d_s^2}{8 \tan \theta}$  であり、この値を(3.17)式に代入し  $d_s$  について解くと、

$$d_s \leq T \sqrt{\frac{8A \tan \theta}{3\pi \alpha_{D1}}} / \left( 1 + \sqrt{\frac{2A}{3\pi \alpha_{D1} \tan \theta}} \right) \quad (3.18)$$

が得られる。

コンクリート遮蔽壁厚  $T=75, 100, 150$ cm 入射ガンマ線エネルギー  $0.5, 1, 2, 4, 6, 8, 10$ MeV、入射角  $\theta=15^\circ, 30^\circ$ 、における  $d_R, d_s$  を(3.16)、(3.18)式により求め、両者のうちの小さい値を許容最大ダクト直径として Table3.1 に示す。ここで、微分線量アルベド  $\alpha_{D1}$  は、 $\theta=15^\circ$  の場合 0.03、 $\theta=30^\circ$  の場合 0.02 とし<sup>(24)</sup>、バルク遮蔽壁におけるガンマ線量率の減衰率  $A$  は、遮蔽壁から 10km 離れて点等方線源を置き、コンクリートの密度を  $2.30$ g/cm<sup>3</sup>、鉄の密度を  $7.86$ g/cm<sup>3</sup> とし 1 回散乱コード G33-GP<sup>(25)</sup> 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、許容最大ダクト直径は(3.16)、(3.18)式から明らかなようにバルク遮蔽壁でのガンマ線量率の減衰と入射角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 Table3.2 に示す。Table3.2の値は、ダクト入口から 10km 離れた点に点等方線源を置き、線源エネルギー  $E=0.5, 1, 2, 4, 6, 8, 10$ MeV、入射角  $\theta=15^\circ, 30^\circ$ 、ダクト直径  $D=1, 3, 5, 10, 15$ 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 G33 計算値(ダクト出口に相当する点での値)との比から求めた。計算は再生係数にコンクリートの値を用い、補償遮蔽体の厚さ  $U$  は(3.10)式に基づいて、ダクト直径  $D=1, 3, 5, 10, 15$ cm に対してそれぞれ 0.46, 1.36, 2.26, 4.52, 6.78cm とした。G33-GPコードの精度は第5章で述べる。

Table3.1、3.2から明らかなように、上記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。

点線源の場合の遮蔽壁への入射角 $\theta$ は、ダクト入口での値ではなく、線源とダクト出口とを結ぶ線と遮蔽壁の法線とのなす角度とし、体積線源の場合は、Fig.3.4に示すように、線源とダクト出口を結ぶ線と遮蔽壁の法線とのなす角度の最小値とする。Fig.3.5に $\theta = 15^\circ$ 、 $30^\circ$ のライン上において点線源を移動させた場合のダクト出口の線量率と各線源位置についてのバルク壁における最大線量率との比を示す。点線源における線量率の比は平行ビームでの値に比べて小さく、平行ビームを用いて定めた許容最大ダクト直径は点線源に対しても適用できることがわかる。ただし、同図から明らかなように、点線源の場合は平行ビームに基づいて定めた許容最大ダクト直径を超えても線量率の比が1以下となる線源位置があると考えられる。平行ビームで定めた許容最大ダクト直径を超えた形状の計算結果をFig.3.6に示す。同図では、遮蔽壁の近くに置かれた線源での線量率比は1以下である。このように、点線源の場合は平行ビームに基づいて定めた許容最大ダクト直径を超えて使用可能な線源位置がある。ただし、許容最大ダクト直径を超えたダクト直径を用いる場合はG33計算等によって遮蔽性能の確認を行う。

体積線源への本設計手法の適用性を調べる目的で、線源と遮蔽壁との距離が一定(150cm)のライン上において点線源を移動させ、ダクト出口の線量率とバルク遮蔽壁のダクト出口に相当する位置での線量率をG33-GP計算により求め、両者の比をFig.3.7に示す。線量率比は $\theta$ が増すにつれて減少する。同図に示すダクト直径( $D=3\text{cm}$ )と遮蔽壁厚( $T=100\text{cm}$ )での平行ビームの許容最小入射角はTable3.1、3.2から約 $15^\circ$ である。したがって、平行ビームに基づいて定めた許容最小入射角以上の角度領域に置かれた体積線源によるダクト出口の線量率はダクト出口の点に相当するバルク遮蔽壁での線量率に比べて低くなる。

また、体積線源の一部がダクト出口を直視する例としてFig.3.7に示す形状の遮蔽壁から150cm離れた面に面等方線源(円板形状とし、その中心軸はダクト中心軸と一致する。)を置き、円板線源の大きさを変えてダクト出口の線量率とダクト出口に相当する位置でのバルク遮蔽壁の線量率を求め、両者の比をFig.3.8に示す。同図から、この配置においては線源半径が400cm以上であれば、線源の一部がダクト出口を直視してもバルク遮蔽壁以上の遮蔽性能を有することがわかる。また、Fig.3.7、3.8から明らかなように、ダクト出口を直視する線源部にFig.3.8に示す追加遮蔽体を設けることにより、小さい体積線源においてもバルク遮蔽壁と同等の遮蔽性能を保持させることが可能である。線源の大きさと線量率の比との関係は、遮蔽壁厚、ダクト直径、入射エネルギー、線源位置、追加遮蔽形状に依存する。線源の一部がダクト出口を直視する形状においては、G33計算等によって遮蔽性能の確認を行う。

以下に示す直スリット、斜ダクト、斜スリット、オフセットスリット、段付き円柱プラグ付きの各遮蔽壁では、平行ビームのガンマ線に関して議論を行う。

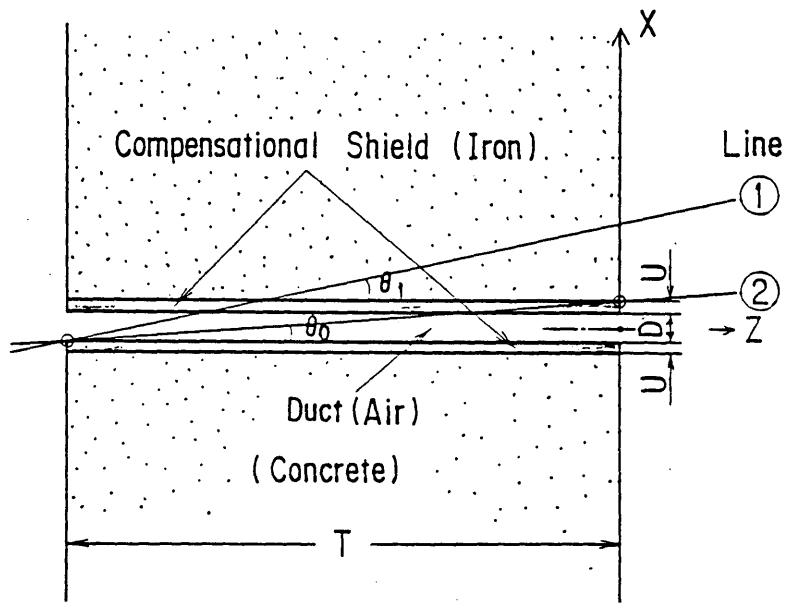


Fig.3.2 Concrete shield wall with straight duct

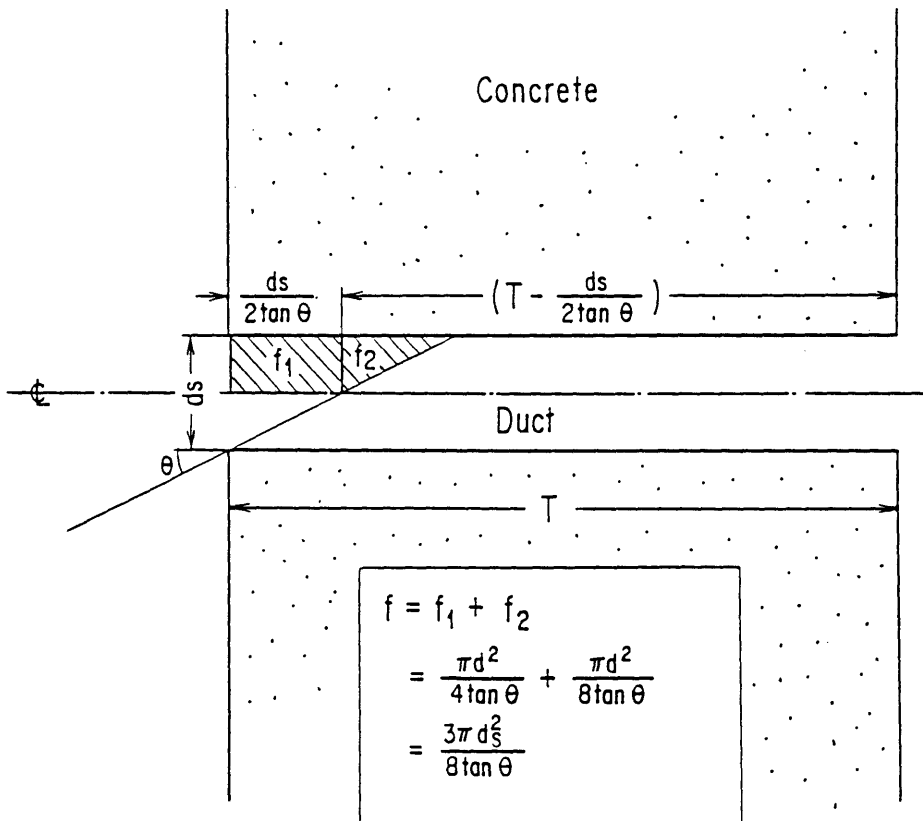


Fig.3.3 Visible area of straight duct surface

Table 3.1 Dose attenuation between front and rear surface of concrete shield wall,  
and allowable maximum diameter of straight duct

Incident gamma-ray energy (MeV)	Dose attenuation in concrete shield wall						Maximum duct diameter (cm)					
	Concrete shield wall thickness						Concrete shield wall thickness					
	75cm		100cm		150cm		75cm		100cm		150cm	
	Incident angle						Incident angle					
	15°	30°	15°	30°	15°	30°	15°	30°	15°	30°	15°	30°
0.5	1.1-5*	4.2-6	1.1-7	3.5-8	9.0-12	1.8-12	0.67	0.75	0.09	0.09	<0.01	<0.01
1	2.4-4	1.0-4	8.5-6	2.9-6	8.9-9	1.8-9	3.0	3.6	0.79	0.84	0.04	0.03
2	2.7-3	1.3-3	2.6-4	1.1-4	2.2-6	5.2-7	8.5	11.6	4.1	5.0	0.61	0.53
4	1.3-2	7.6-3	2.5-3	1.3-3	8.7-5	2.8-5	13.8	15.0	11.0	15.0	3.7	3.8
6	2.2-2	1.4-2	5.6-3	3.1-3	3.3-4	1.3-4	13.8	15.0	14.9	15.0	6.9	8.1
8	2.8-2	1.9-2	8.0-3	4.8-3	6.2-4	2.6-4	13.8	15.0	15.0	15.0	9.1	11.2
10	3.1-2	2.1-2	9.5-3	5.9-3	8.6-4	3.7-4	13.8	15.0	15.0	15.0	10.5	13.2

\* Read as  $1.1 \times 10^{-6}$

Table 3.2 Allowable maximum diameter of straight duct calculated  
by G33-GP code for the incident angles 15° and 30°

Incident gamma-ray energy (MeV)	Maximum duct diameter (cm)					
	Concrete shield wall thickness					
	75cm		100cm		150cm	
	Incident angle					
	15°	30°	15°	30°	15°	30°
0.5	<1	<1	<1	<1	<1	<1
1	2	2	<1	<1	<1	<1
2	7	10	3	4	<1	<1
4	13.8	15	11	15	4	4
6	13.8	15	15	15	8	13
8	13.8	15	15	15	12	14
10	13.8	15	15	15	15	15

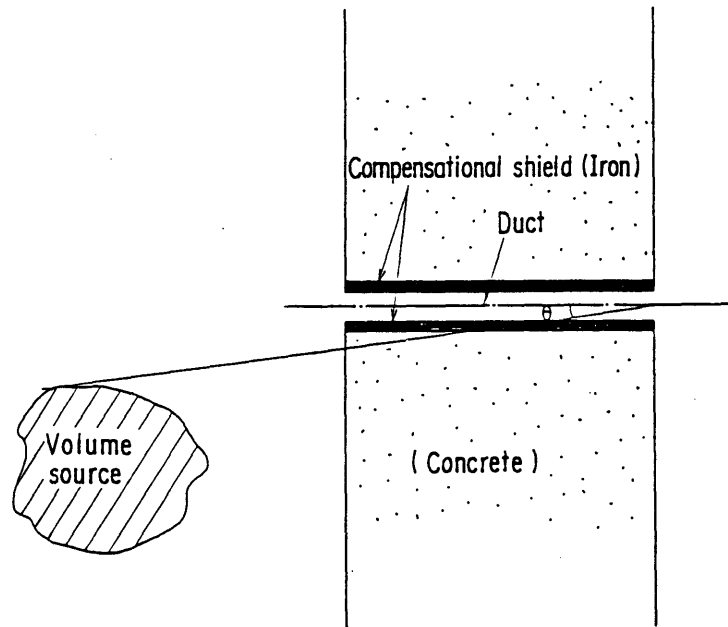


Fig.3.4 Incident angle  $\theta$  for volume source

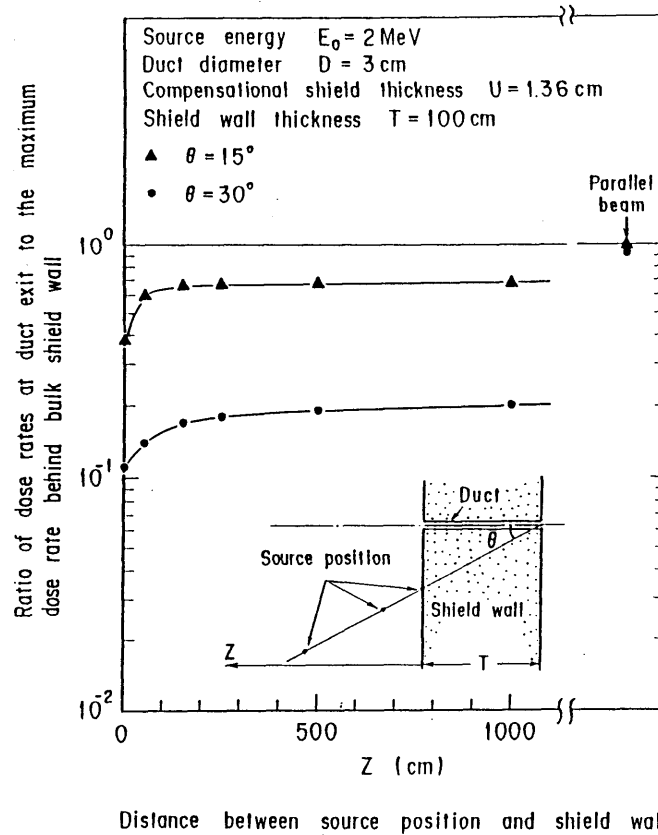


Fig.3.5

Ratio of dose rate at straight duct exit to the maximum dose rate behind bulk shield wall using point source and duct diameter based on the data in Table 3.2.



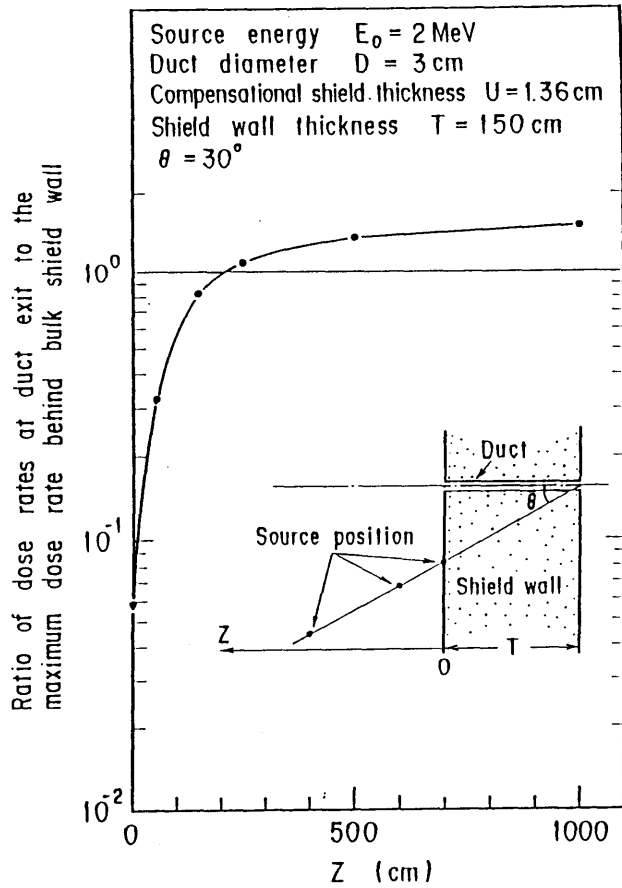


Fig.3.6

Ratio of dose rate at straight duct exit to the maximum dose rate behind bulk shield wall using point source.

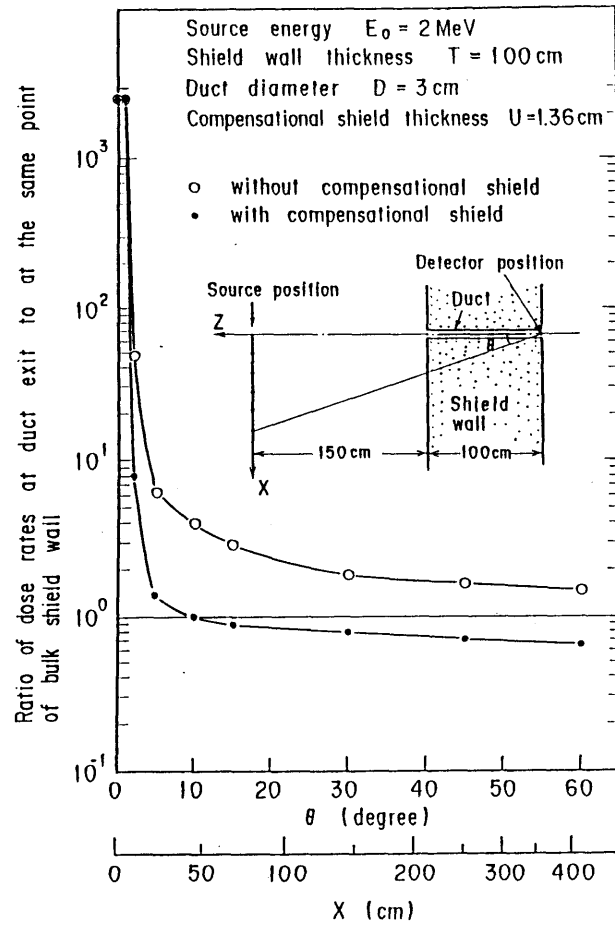


Fig.3.7

Ratio of dose rate at duct exit to at the same point of bulk shield wall using point source of various positions.

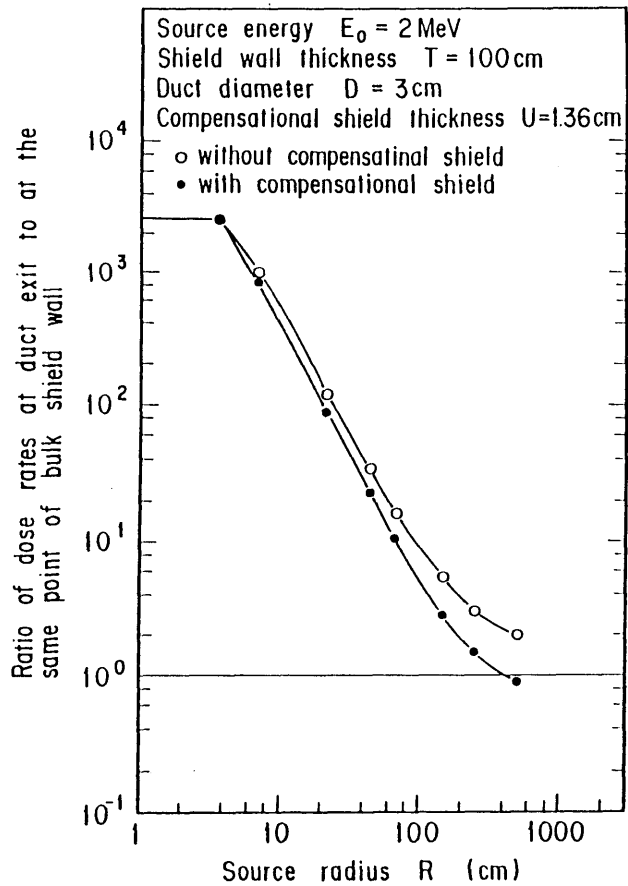


Fig.3.8

Ratio of dose rate at duct exit to at the same point of bulk shield wall using disk source.

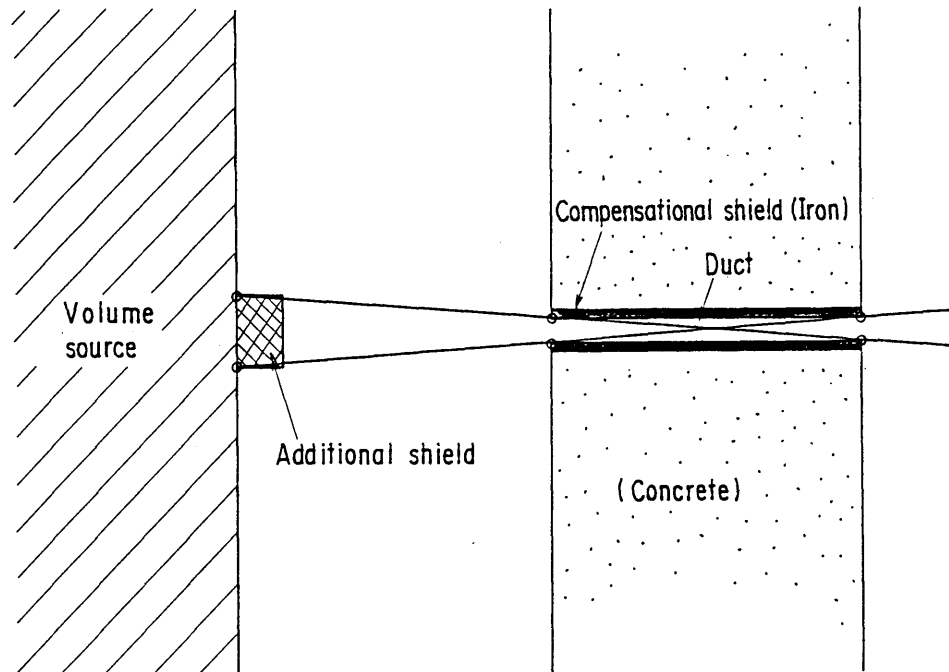


Fig.3.9 Example of additional shield for large volume source

### 3.2 直スリット付き遮蔽壁

補償遮蔽体はスリットの両側に設ける。補償遮蔽体を有する直スリット付き遮蔽壁の形状をFig.3.10に示す。スリット幅はWで表示する。

#### (1) 補償遮蔽体の厚さの決定

補償遮蔽体の厚さUは、Fig.3.10のライン①において、

$$\exp\left(\frac{-\bar{\mu}_{\text{con}} T}{\cos \theta_1}\right) \geq \exp\left\{\frac{-\bar{\mu}_{\text{Fe}} U}{\sin \theta_1} - \bar{\mu}_{\text{con}} \left(\frac{T}{\cos \theta_1} - \frac{W+U}{\sin \theta_1}\right)\right\} \quad (3.19)$$

の条件から求める。(3.19)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

$$U \geq \frac{\rho_{\text{con}} W}{0.94 \rho_{\text{Fe}} - \rho_{\text{con}}} \quad (3.20)$$

が得られる。(3.20)式から明らかなように、補償遮蔽体の厚さはコンクリートと鉄の密度およびスリット幅のみに依存する。

#### (2) 許容最小入射角の決定

線源はスリット出口を直視しない位置に配置される。線源とスリット入口とを結ぶ線と遮蔽壁の法線とのなす角度の許容最小値 $\theta_0$ はFig.3.10のライン②において

$$\exp\left(\frac{-\bar{\mu}_{\text{con}} T}{\cos \theta_0}\right) = \exp\left(\frac{-\bar{\mu}_{\text{Fe}} U}{\sin \theta_0}\right) \quad (3.21)$$

の条件から求める。

(3.21)式に(3.20)式のU値と(3.8)式の $\bar{\mu}_{\text{Fe}}$ 値を代入すると

$$\theta_0 = \tan^{-1} \frac{0.94 \rho_{\text{Fe}} \cdot W}{(0.94 \rho_{\text{Fe}} - \rho_{\text{con}}) T} \quad (3.22)$$

が得られる。 $\theta_0$ はコンクリートと鉄の密度、スリット幅、および遮蔽壁厚さのみに依存する。

#### (3) 許容最大スリット幅

レイアナリシス法に基づく許容最大スリット幅と、スリット壁面で散乱しスリット内を透過するガンマ線に基づく許容最大スリット幅とを求め、両者のうちの小さい値を許容最大スリット幅とする。ただし、第2章の設計条件で示したようにスリット幅は10mmを超えないとする。

(i) レイアナリシス法に基づく許容最大スリット幅 $W_R$

許容最大スリット幅 $W_R$ は(3.22)式から、

$$W_R = \frac{(0.94 \rho_{\text{Fe}} - \rho_{\text{con}}) T}{0.94 \rho_{\text{Fe}}} \tan \theta \quad (3.23)$$

とする。

(ii) スリット壁面で散乱するガンマ線に基づく許容最大スリット幅  $W_s$ 

実施設においては可能な限り直スリット構造を避けて屈曲構造としており<sup>(2),(3)</sup>、遮蔽体接合部等で直スリット構造となる場合は間隙幅を極力抑えている。前節で示したようなアルベドを用いた簡便な方法では、数mm程度の精度で許容スリット幅を算出することは難しいので本節では1回散乱コードG33-GPを用いて許容最大スリット幅を求める。まず、Fig3.11(a)、(b)に、遮蔽壁厚を75、100、125、150cm、スリット幅を3mmと10mm(設計条件で示した最大幅)とし、スリット出口から10km離れた点に点等方線源を置き、スリット入口への入射角 $1^\circ$ と $1.2^\circ$ (許容最小入射角 $\theta_0$ は(3.22)式から、 $T=150\text{cm}$ 、 $W=3\text{mm}$ のとき $0.2^\circ$ 、 $T=75\text{cm}$ 、 $W=10\text{mm}$ のとき $1.1^\circ$ である。)で平行ビームのガンマ線を入射させた計算を行ってスリット出口の線量率を求め、バルク遮蔽壁での線量率計算値との比を示す。同図から明らかなように、スリット幅が3mm以内であれば、本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のそれに等しいかあるいはそれ以上である。

許容スリット幅  $W_s$  は入射エネルギー  $E_0=0.5、1、2、4、6、8、10\text{MeV}$ 、遮蔽壁厚  $T=75、100、120、150\text{cm}$ 、遮蔽壁の高さ100cm、入射角  $\theta=1^\circ、15^\circ、30^\circ$ 、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、平行ビームの放射線を入射させたG33-GP計算により求めた。ここで、補償遮蔽体の厚さ  $U$  は、(3.20)式に基づいて、スリット幅  $W=3、5、7、10\text{cm}$  に対してそれぞれ2、3、4、5mmとした。

## (iii) 許容スリット幅

Table3.4に  $W_R$  と  $W_s$  に基づいて定めた許容最大スリット幅を示す。遮蔽壁の高さは100cmである。同表には、G33-GPコード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の許容最大スリット幅は、この放射線のバルク遮蔽壁における減衰率から、Table3.4に示す許容最大スリット幅を内外挿して求める。

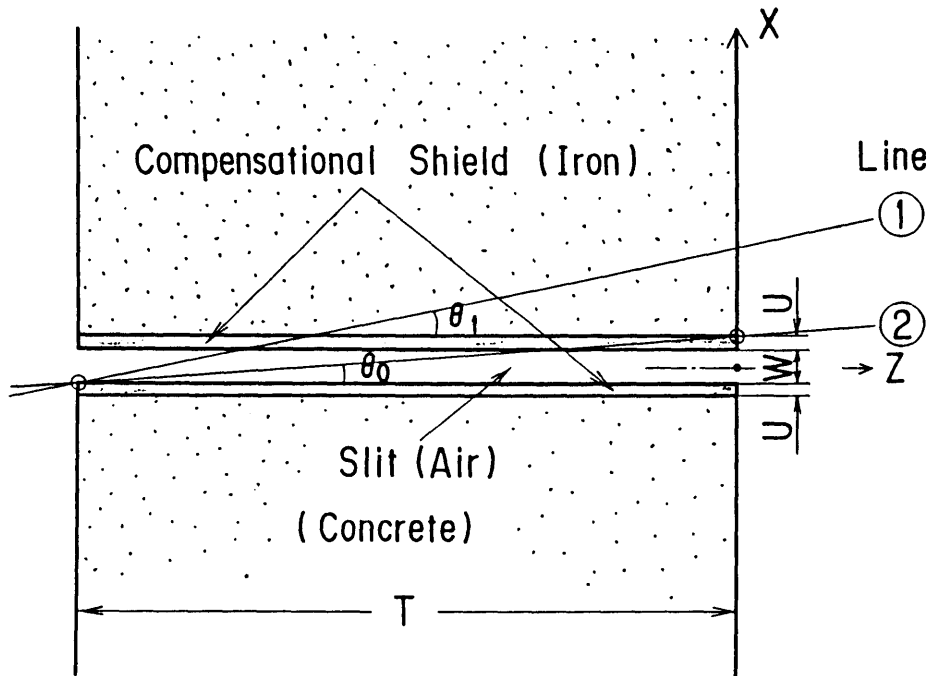
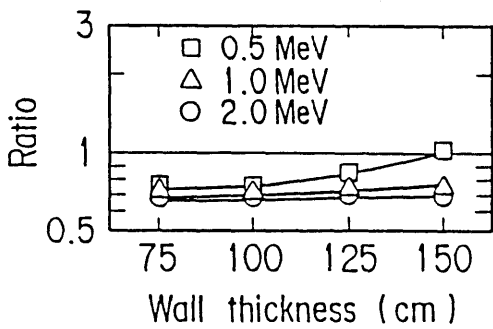
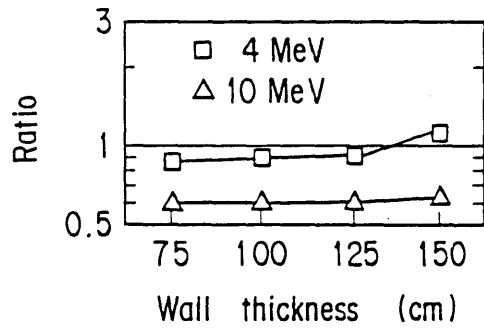


Fig.3.10 Concrete shield wall with straight slit



(a)  $W=3\text{mm}$ ,  $U=2\text{mm}$  and  $\theta=1^\circ$



(b)  $W=10\text{mm}$ ,  $U=5\text{mm}$  and  $\theta=1.2^\circ$

Fig.3.11 Ratio of dose rates with and without a straight slit at a point of slit exit calculated by G33-GP, as a function of the wall thickness

Table 3.4 Dose attenuation between front and rear surface of concrete shield wall,  
and allowable maximum width of straight slit

Incident gamma-ray energy (MeV)	Dose attenuation in concrete shield wall									Maximum slit width(mm)								
	Concrete shield wall thickness									Concrete shield wall thickness								
	75cm			100cm			150cm			75cm			100cm			150cm		
	Incident angle									Incident angle								
	1°	15°	30°	1°	15°	30°	1°	15°	30°	1°	15°	30°	1°	15°	30°	1°	15°	30°
0.5	1.4-5*	1.1-5	4.2-6	1.6-7	1.1-7	3.5-8	1.6-11	9.0-12	1.8-12	3	7	7	3	7	7	3	3	3
1	3.1-4	2.4-4	1.0-4	1.2-5	8.5-6	2.9-6	1.4-8	8.9-9	1.8-9	5	7	7	5	7	7	5	7	7
2	3.3-3	2.7-3	1.3-3	3.4-4	2.6-4	1.1-4	3.3-6	2.2-6	5.2-7	7	10	10	5	7	7	5	7	7
4	1.5-2	1.3-2	7.6-3	3.1-3	2.5-3	1.3-3	1.2-4	8.7-5	2.8-5	9	10	10	10	10	10	7	7	7
6	2.5-2	2.2-2	1.4-2	6.6-3	5.6-3	3.1-3	4.4-4	3.3-4	1.3-4	9	10	10	10	10	10	10	10	10
8	3.2-2	2.8-2	1.9-2	9.4-3	8.0-3	4.8-3	8.1-4	6.2-4	2.6-4	9	10	10	10	10	10	10	10	10
10	3.5-2	3.1-2	2.1-2	1.1-2	9.5-3	5.9-3	1.1-3	8.6-4	3.7-4	9	10	10	10	10	10	10	10	10

\* Read as  $1.4 \times 10^{-5}$

Incident gamma-ray energy (MeV)	Dose attenuation in concrete shield wall		Maximum slit width (mm)	
	Concrete shield wall thickness		Wall thickness	
	120cm		120cm	
	Incident angle		Incident angle	
	2°	5°	2°	5°
0.5	4.2-9	4.0-9	3	5
1	8.7-7	8.4-7	5	7
2	5.6-5	5.5-5	7	7
4	8.9-4	8.7-4	10	10
6	2.4-3	2.3-3	10	10
8	3.7-3	3.7-3	10	10
10	4.7-3	4.6-3	10	10

### 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 $\theta$ で表示する。 $\theta$ は $15^\circ$ と $30^\circ$ 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 $\alpha_{D1}$ 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  $\alpha_{D1}$  は  $\theta=15^\circ$  の場合 0.03、 $\theta=30^\circ$  の場合 0.02 とし<sup>(24)</sup>、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  $\theta$ 、アルベド  $\alpha_{D1}$  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  $10\text{km}$  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 $\text{cm}$  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。

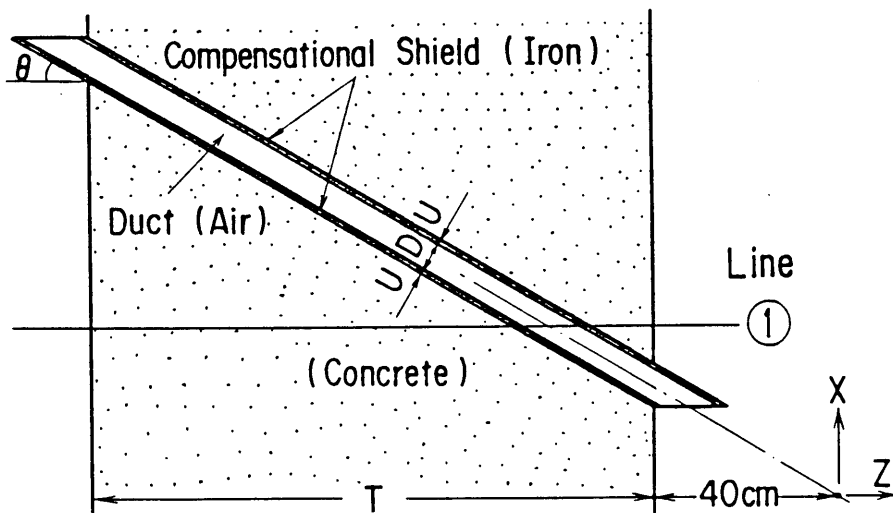


Fig.3.12 Concrete shield wall with slant duct



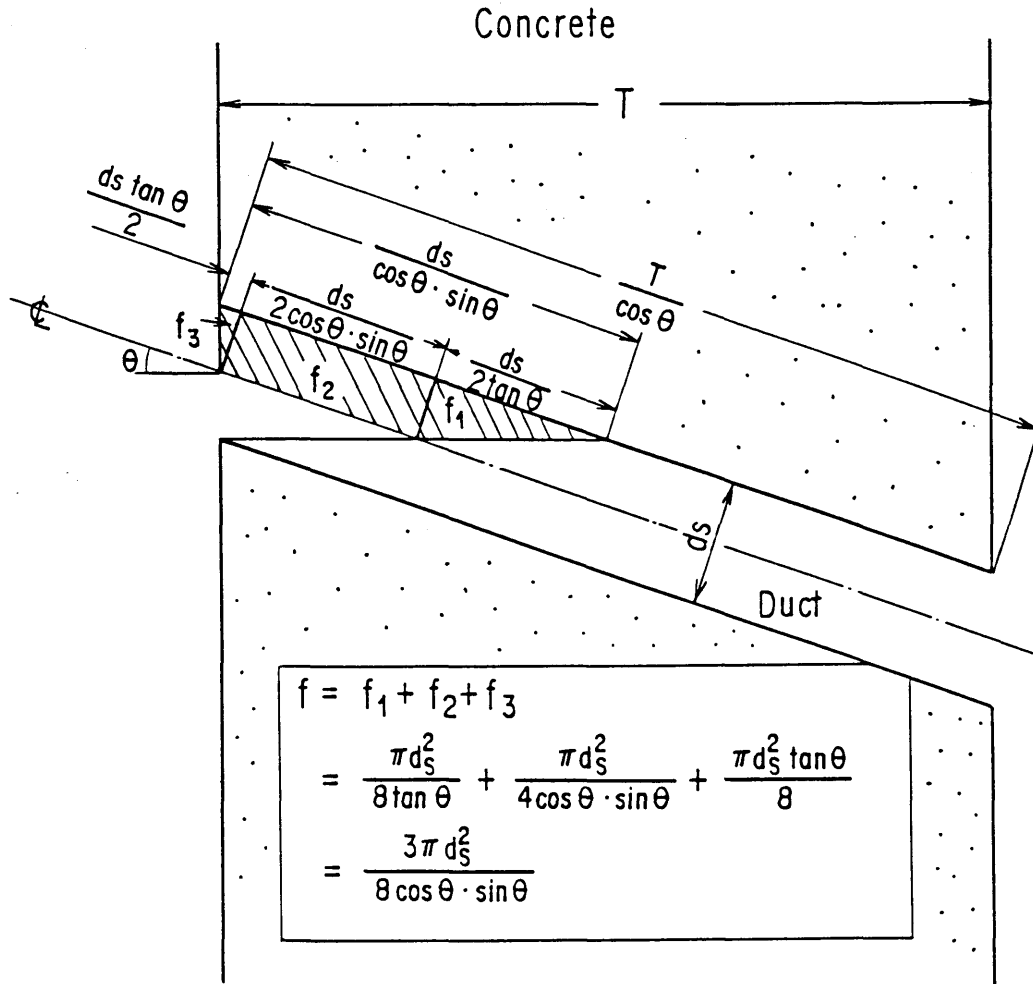


Fig.3.13 Visible area of slant duct surface

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  $1.4 \times 10^{-5}$

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。スリットの中心線と遮蔽壁との法線との間の角度は $\theta$ で表示する。 $\theta$ は $15^\circ$ と $30^\circ$ 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 $100\text{cm}$ 、斜スリットの角度 $\theta=15^\circ, 30^\circ$ 、スリット幅は許容幅が $10\text{mm}$ 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 $10\text{km}$ 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。

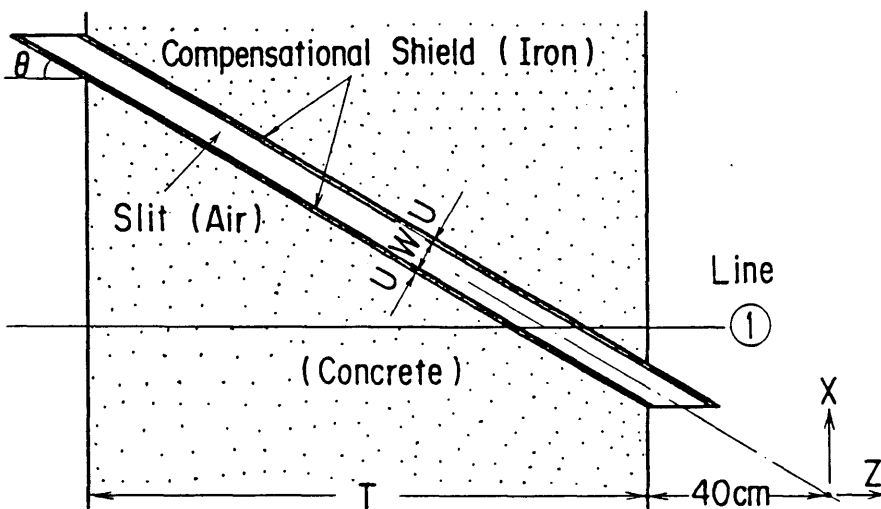


Fig.3.14 Concrete shield wall with slant slit

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				Slant angle			
					75cm		100cm		125cm		150cm	
	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  $1.4 \times 10^{-5}$

### 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。

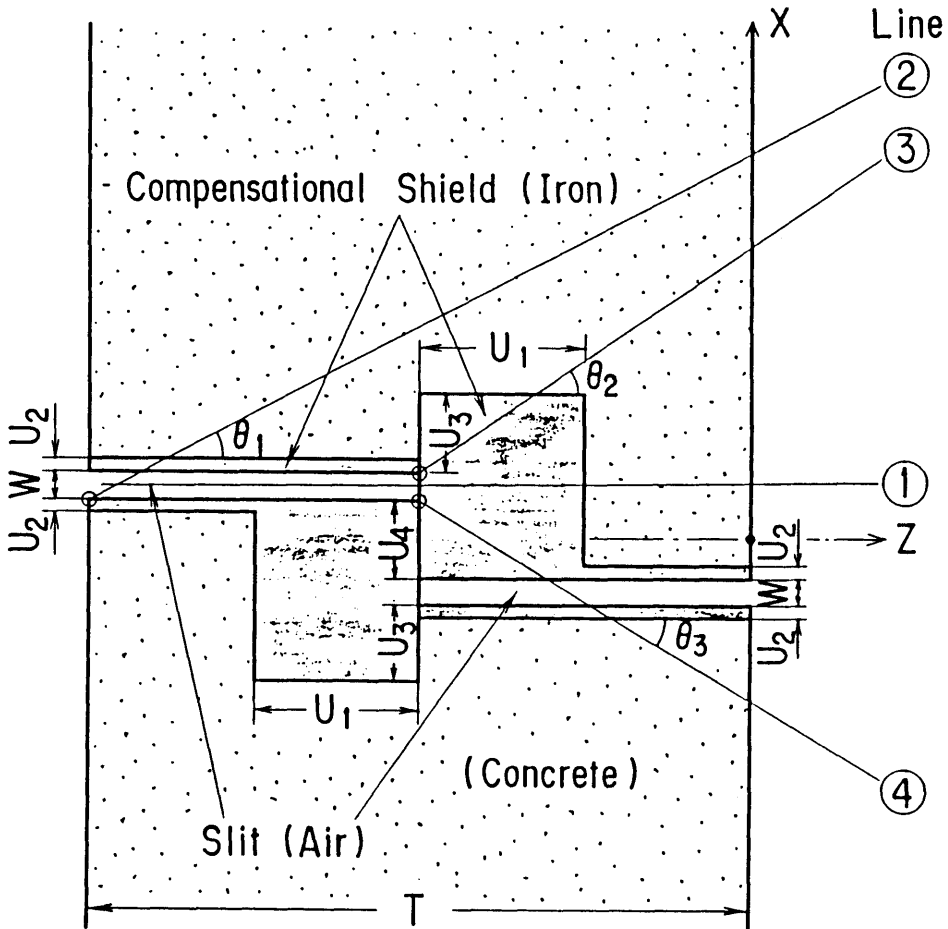


Fig.3.15 Concrete shield wall with offset slit

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。

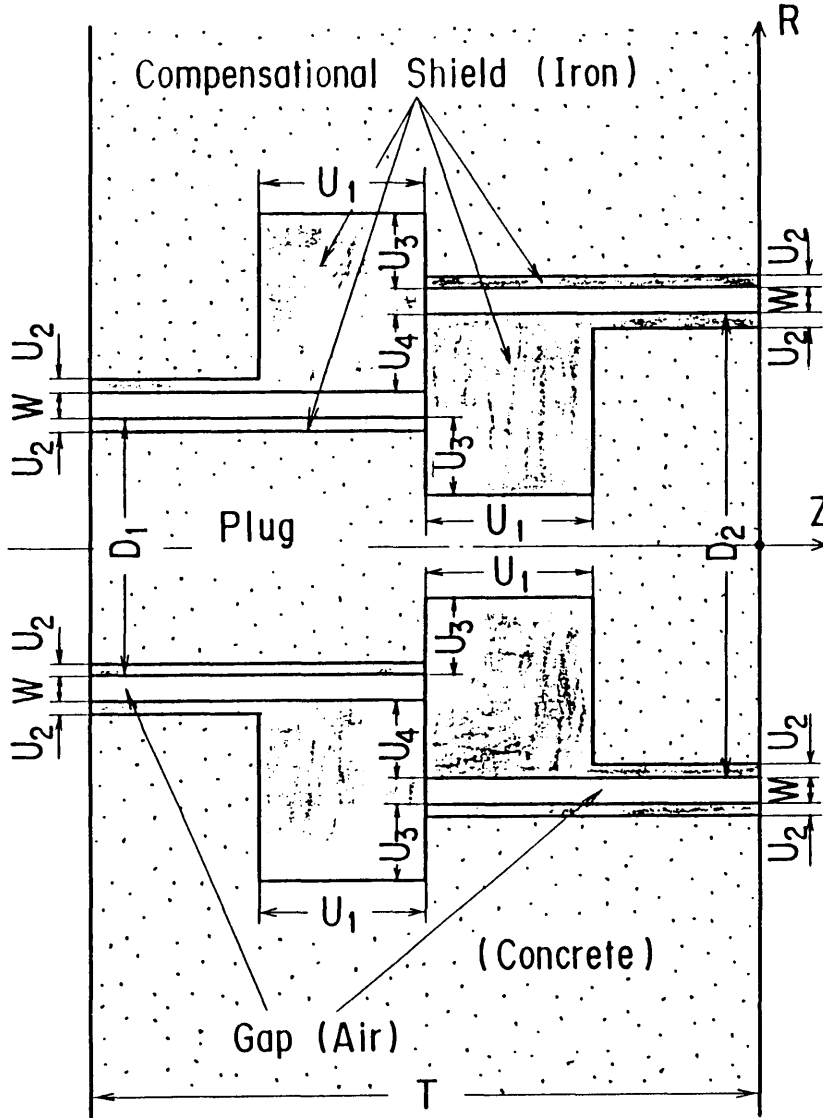


Fig.3.16 Concrete shield wall with cylindrical offset plug

### 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 $\theta$ とする。線源は点等方の単色エネルギーとして、 $\theta = 15^\circ$ 、 $30^\circ$ 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、

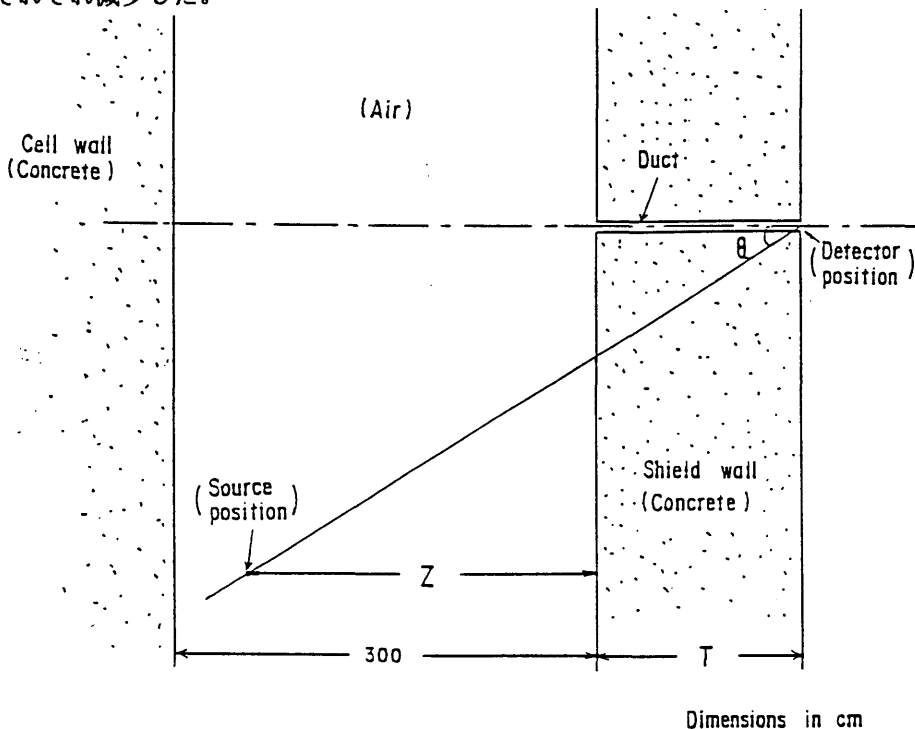
について行い、①と②の線量率は③のバルク遮蔽壁での線量率との比でその量を表示する。まず、線源位置とセル壁散乱ガンマ線によるダクト出口の線量率との関係を求めるため、線源点と遮蔽壁との距離Zを変えた計算を直ダクト付き遮蔽壁について行い、セル壁で散乱後に直ダクト付き遮蔽壁に入射しダクト出口に到達するガンマ線による線量率と線源からバルク遮蔽壁に直接入射するガンマ線による壁背面の最大線量率との比を求め、Fig.3.18に示す。ここで、計算は遮蔽壁厚 $T = 75\text{cm}$ 、入射角 $\theta = 15^\circ$ 、入射ガンマ線エネルギー $E = 1\text{MeV}$ 、ダクト直径 $D = 2.1\text{cm}$ 、補償遮蔽体厚さ $U = 0.95\text{cm}$ 、セル空間の幅 $3\text{m}$ 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 $50\text{cm}$ )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<sup>(24)</sup>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

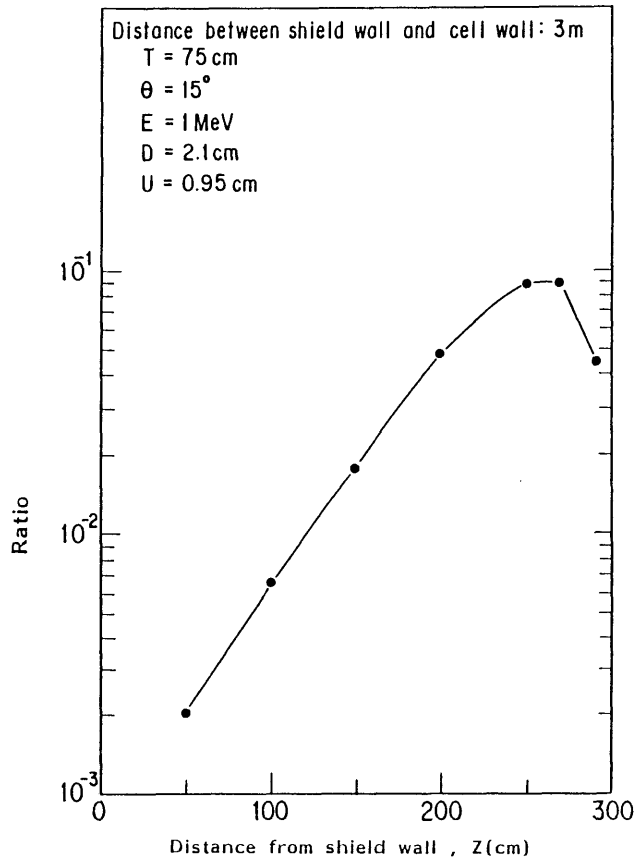


Fig.3.18

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.

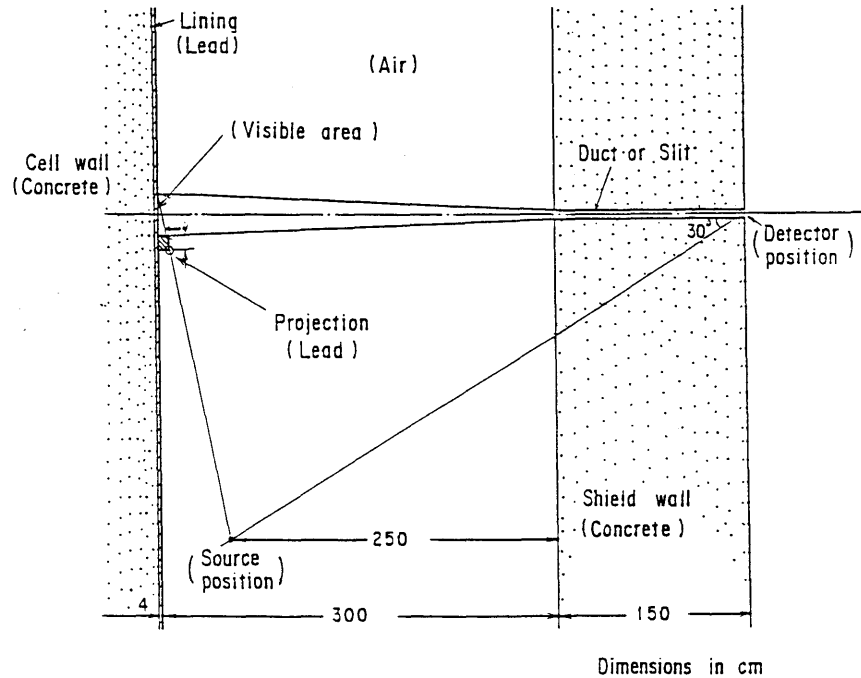


Fig.3.19

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 <sup>***</sup>			Parallel beam	Duct diameter D(cm)	Compensational shield thickness U(cm)	Point source <sup>***</sup>			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 JRR4 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。JRR4 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CaSO<sub>4</sub>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<sup>(28)</sup>。

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 $3 \times 10^{-5}$ 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。

JRR4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/cm<sup>3</sup>)

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

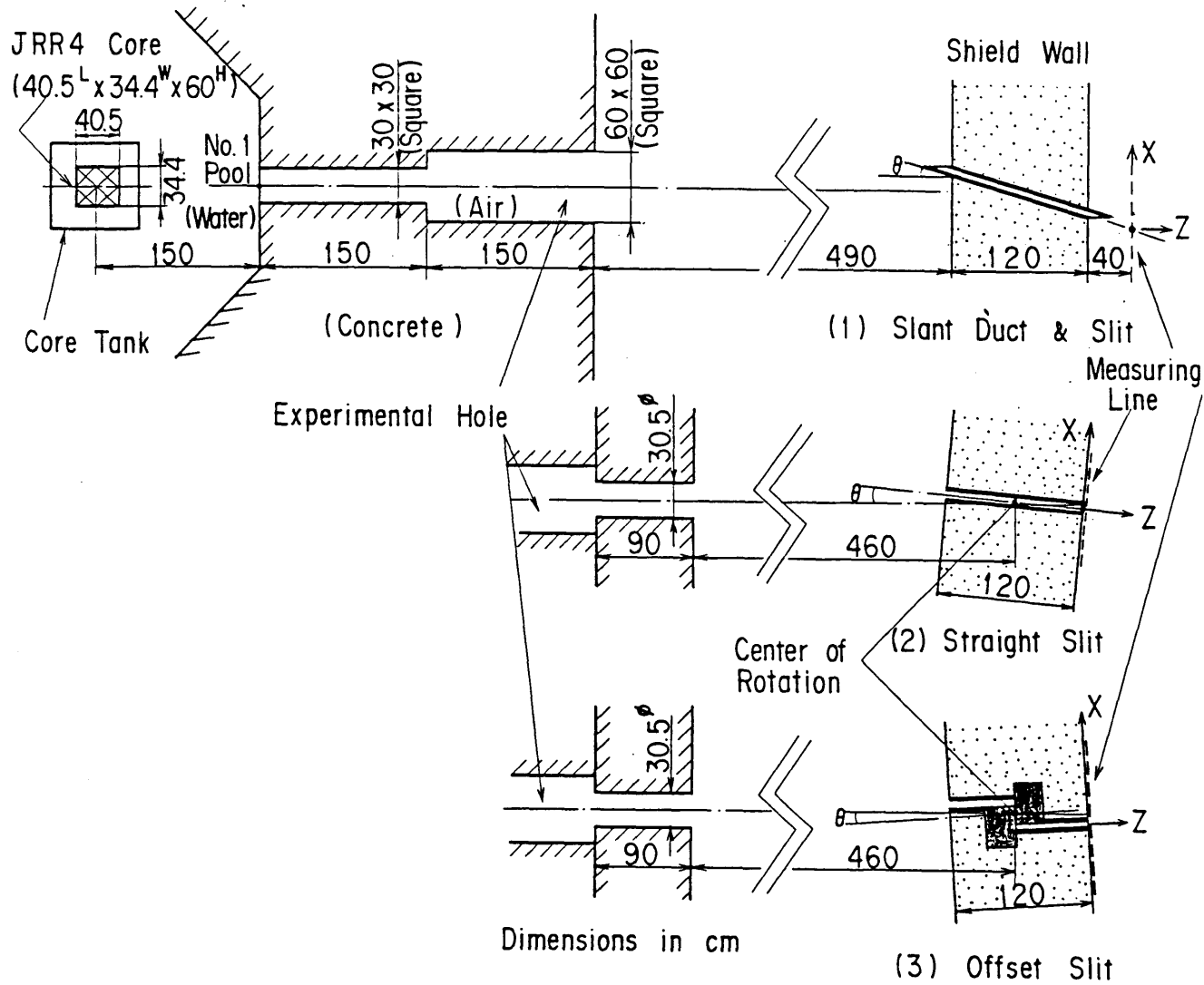


Fig.4.1 Arrangement for compensational shield experiment (Plan view)

#### 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<sup>(29)</sup>。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<sup>(29)</sup>,<sup>(30)</sup>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<sup>(31)</sup>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<sup>(32)</sup>,<sup>(33)</sup>、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<sup>(32)</sup>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。

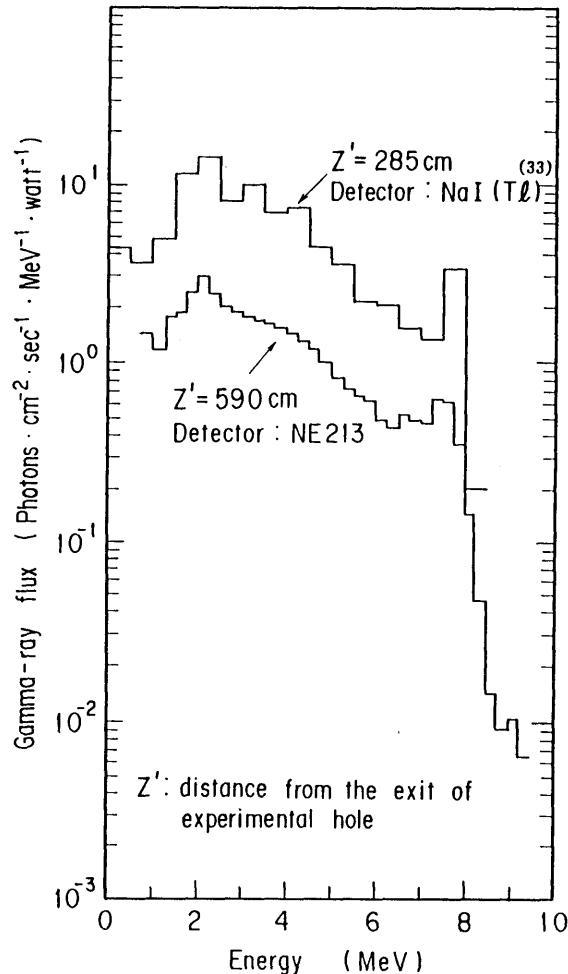
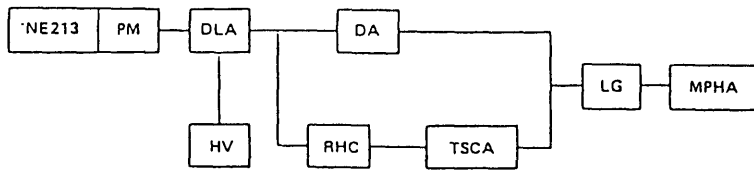


Fig.4.3 Energy spectra of gamma rays on axis of the experimental hole



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  $\gamma$ -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 <sup>†</sup>	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<sup>(34)</sup>

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 $\theta$ で表わす。実験は $\theta = 15^\circ$ と $30^\circ$ 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。

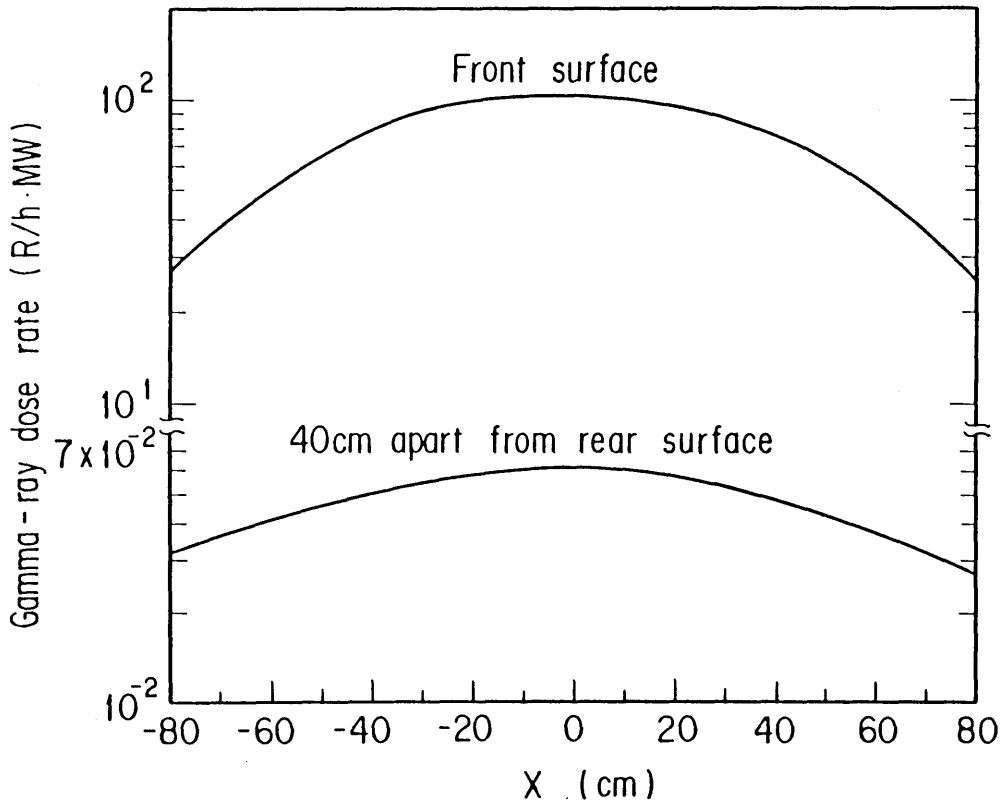


Fig.4.4 Gamma-ray dose rates on the horizontal line of the front surface and 40cm apart from the rear surface of bulk concrete wall with thickness 120cm



### 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 $6.07 \times 10^{-4}$ 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 $\alpha_{D_1}$ は $\theta = 15^\circ$ の場合0.03、 $\theta = 30^\circ$ の場合0.02<sup>(24)</sup>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。

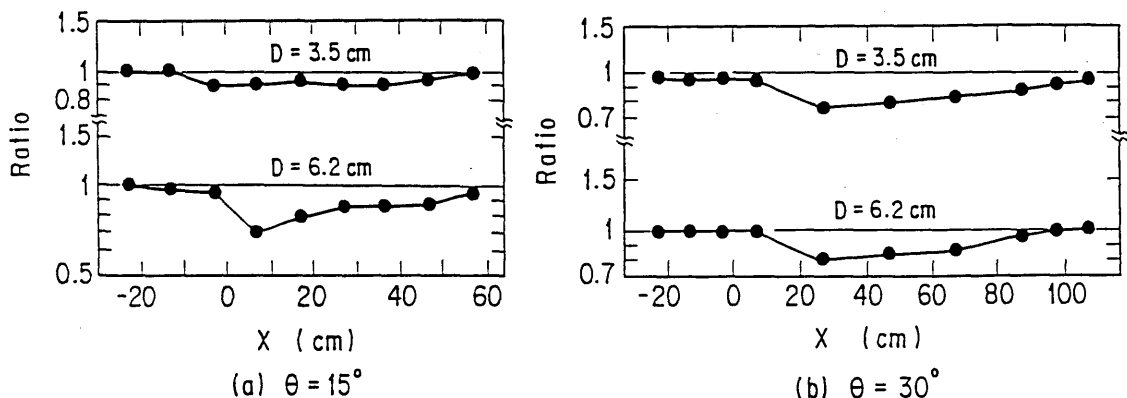


Fig.4.5

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。

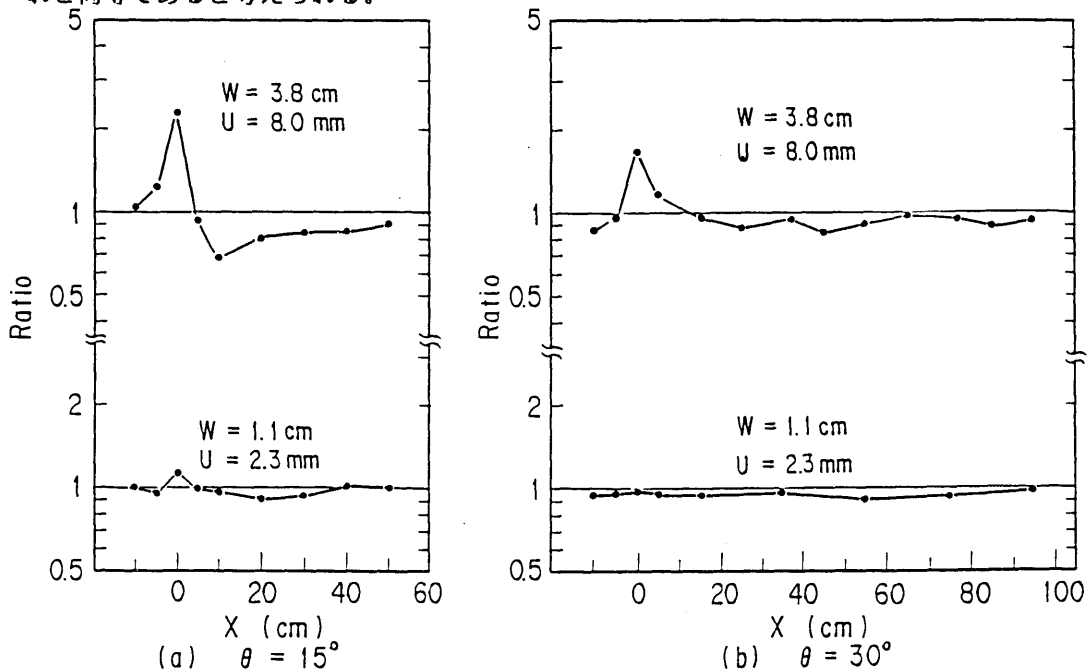


Fig.4.6 Ratio of dose rates with and without slant slit, on the measuring line behind the wall. Here,  $T=120\text{cm}$ .

#### 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 $\pm 1$ mmである。許容最小入射角は(3.22)式から、 $W=9$ mmの場合 $0.7^\circ$ 、 $W=18$ mmの場合 $1.3^\circ$ である。実験は $\theta=2^\circ$ と $5^\circ$ 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 $5^\circ$ 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。

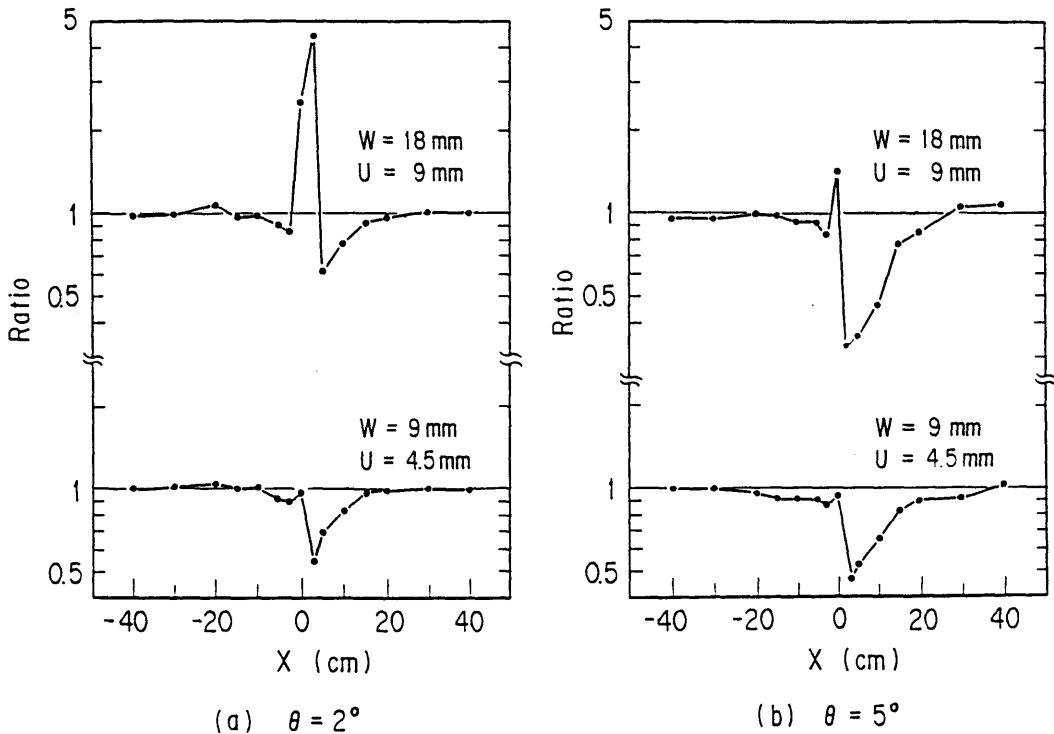


Fig.4.7 Ratio of dose rates with and without straight slit on the measuring line behind the wall. Here,  $T=120$ cm.

#### 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 $-7^\circ$ 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。

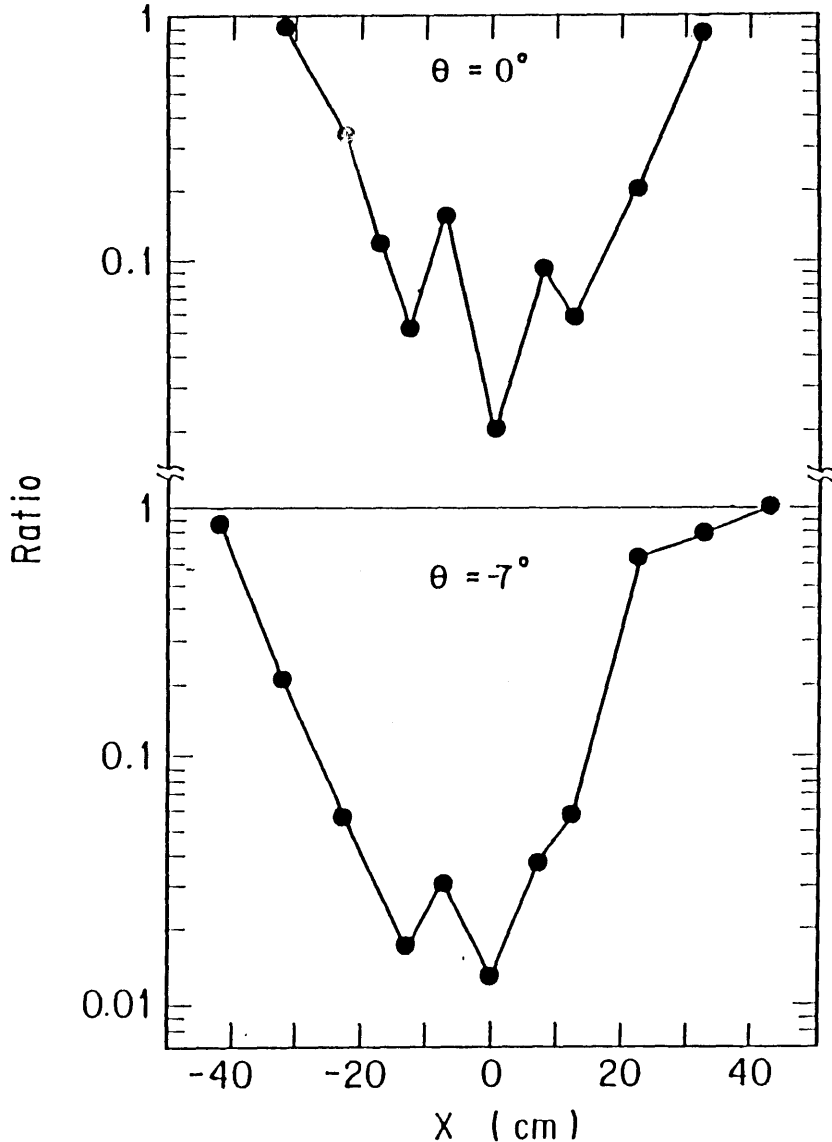


Fig.4.8 Ratio of dose rates with and without offset slit, on the measuring line behind the wall. Here  $T=120\text{cm}$ ,  $W=2.7\text{cm}$ ,  $U_1=28\text{cm}$ ,  $U_2=1.35\text{cm}$  and  $U_3=U_4=12.8\text{cm}$ .

### 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<sup>(34)</sup>には、G33-GPコード(G33コードにGP法<sup>(35)</sup>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<sup>(36),(28)</sup>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<sup>(37)</sup>には、G33コードに体積線源の機能を付加したG33-YSNコード<sup>(38)</sup>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<sup>(7),(12)</sup>。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<sup>(9)</sup>、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<sup>(12)</sup>

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

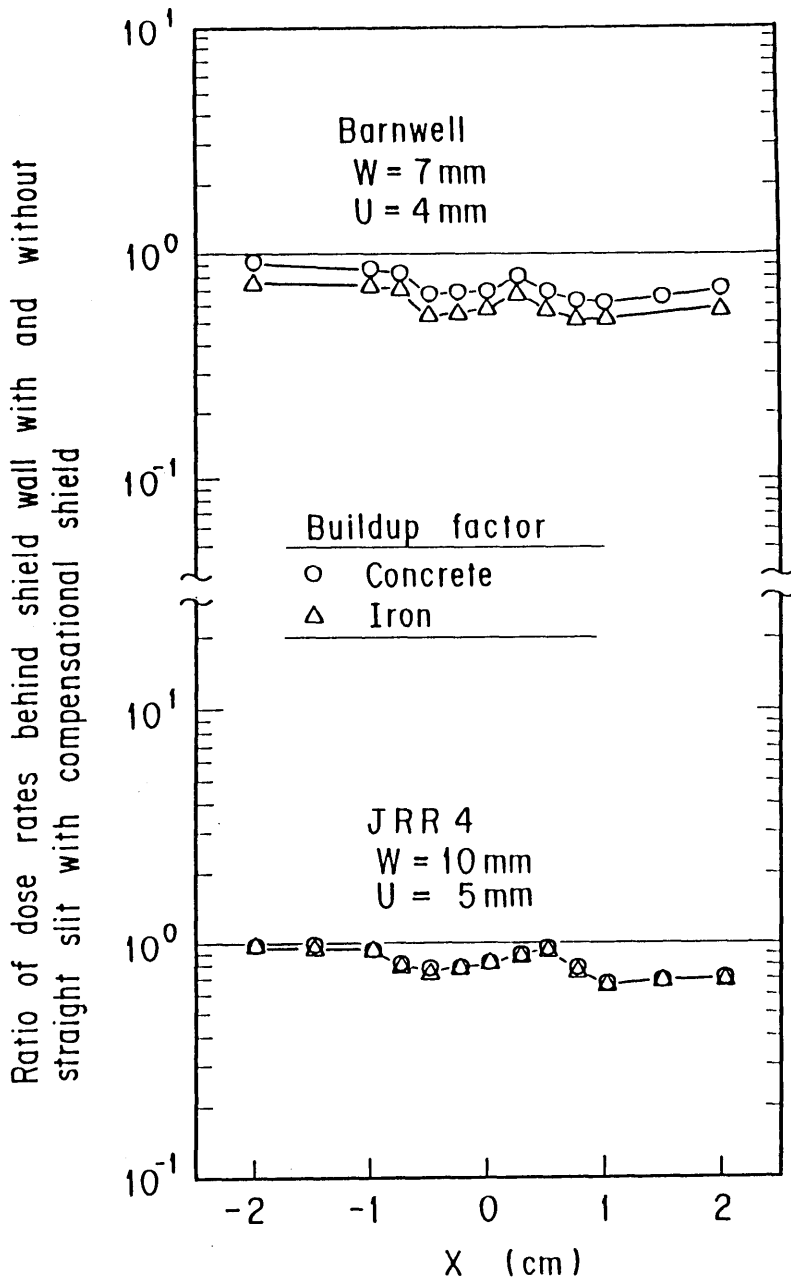


Fig.5.1(a) Ratio of dose rates behind shield wall with and without straight slit with compensational shield calculated by G33-GP code using buildup factors of concrete and iron. Here, shield wall thickness  $T=75\text{cm}$  and incident angle  $\theta=15^\circ$ .

### 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 $\theta$ 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。<sup>(注)</sup> 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/cm<sup>3</sup>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。

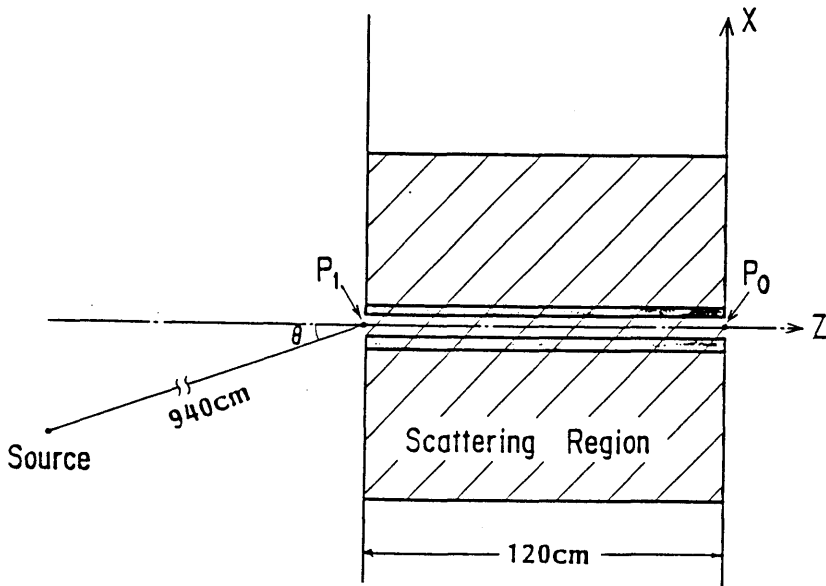


Fig.5.1(b) G33-GP calculational geometry of concrete wall with compensational shield for straight slit.



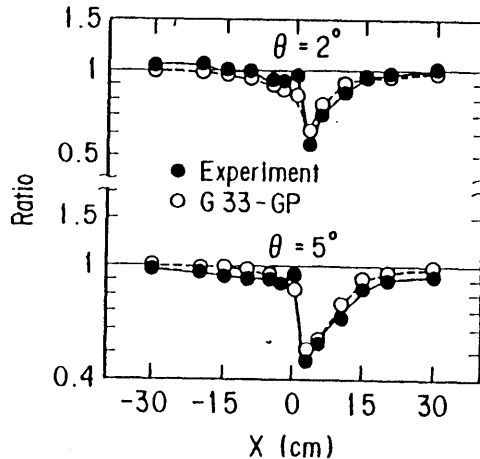


Fig.5.2 Ratio of dose rates with and without straight slit, on the measuring line behind the wall. Here  $T=120\text{cm}$ ,  $W=0.9\text{cm}$  and  $U=0.45\text{cm}$ .

## 5.2 補償遮蔽を有する斜ダクト付き遮蔽壁<sup>(3\*)</sup>

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。

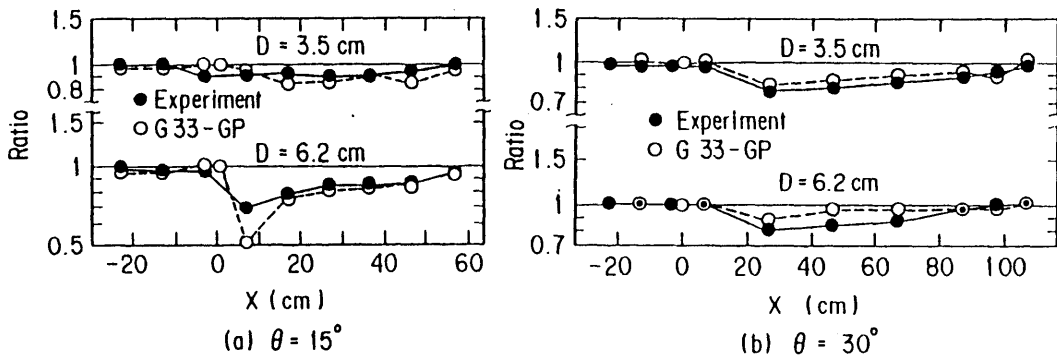


Fig.5.3 Ratio of dose rates with and without slant duct, on the measuring line behind the wall. Here  $T=120\text{cm}$ ,  $U=0.8\text{cm}$  for  $D=3.5\text{cm}$  and  $U=1.4\text{cm}$  for  $D=6.2\text{cm}$ .

### 5.3 補償遮蔽を有する斜スリット付き遮蔽壁<sup>(3,4)</sup>

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。

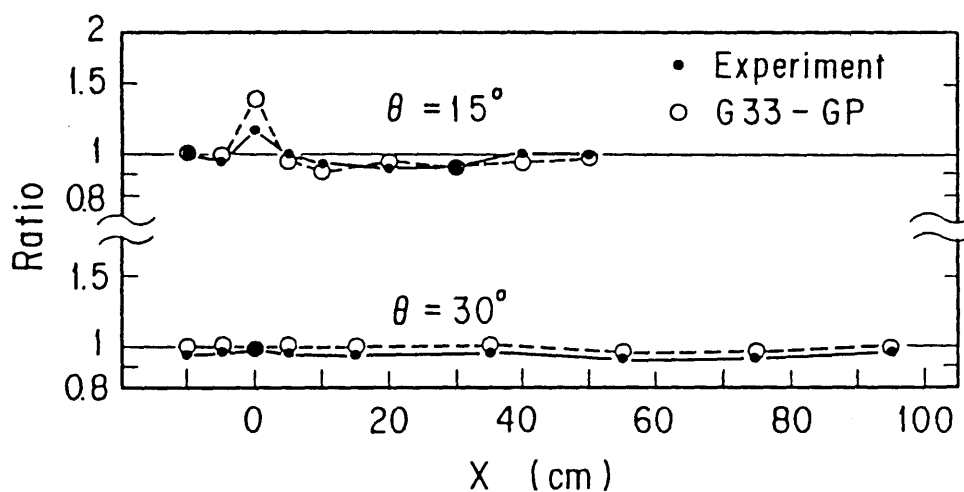


Fig.5.4 Ratio of dose rates with and without slant slit, on the measuring line behind the wall. Here  $T=120\text{cm}$ ,  $W=1.1\text{cm}$  and  $U=0.25\text{cm}$ .

#### 5.4 補償遮蔽を有するオフセットスリット付き遮蔽壁<sup>(34)</sup>

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。

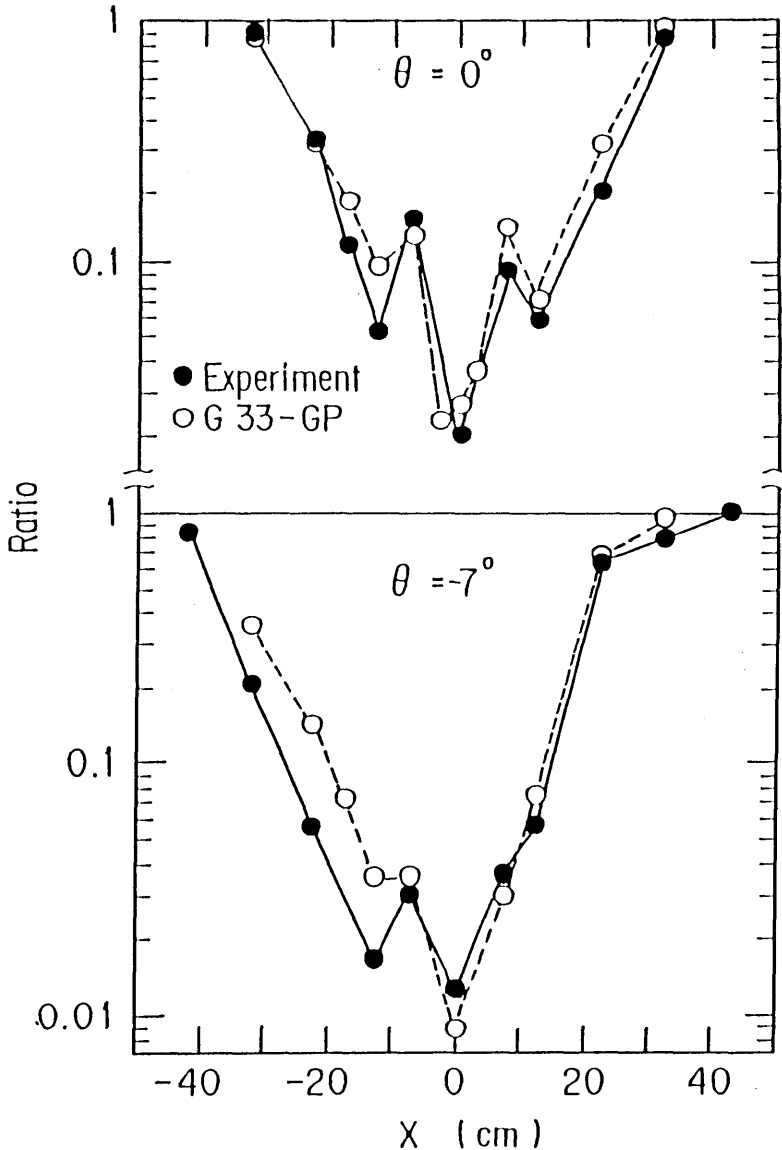


Fig.5.5 Ratio of dose rates with and without offset slit, on the measuring line behind the wall. Here  $T=120\text{cm}$ ,  $W=2.7\text{cm}$ ,  $U_1=28\text{cm}$ ,  $U_2=1.35\text{cm}$  and  $U_3=U_4=12.8\text{cm}$ .

## 5.5 直ダクト付き遮蔽壁<sup>(36)</sup>

### (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<sup>(32)</sup>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/cm<sup>3</sup>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 $\alpha$ (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 $\alpha$ 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

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( $R, \theta, Z$ )座標で入力した。その数は $R, \theta, Z$ 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<sup>(40)</sup>。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。



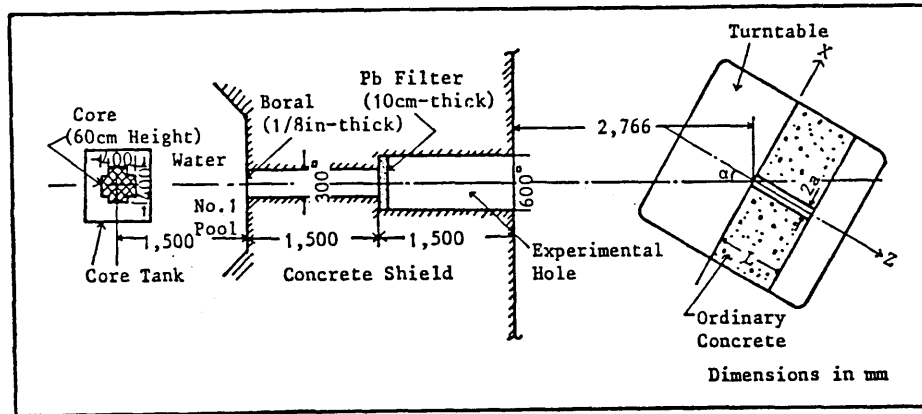


Fig.5.6 Arrangement of straight duct experiment (Plan view)

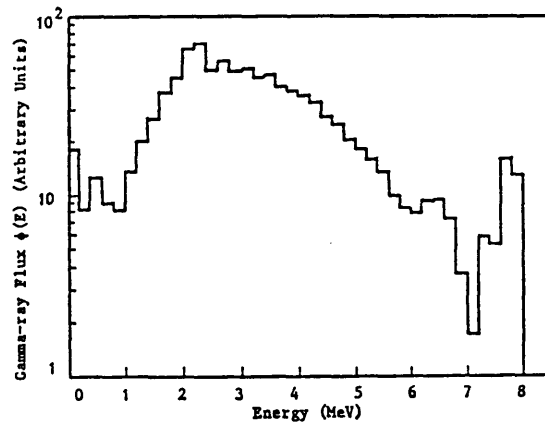


Fig.5.7 Energy spectrum of incident gamma rays

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

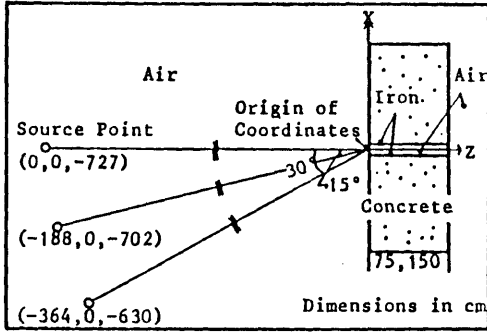


Fig. 5.8 G33 calculational geometry 1 for configuration (i) and (iii) of straight duct experiment.

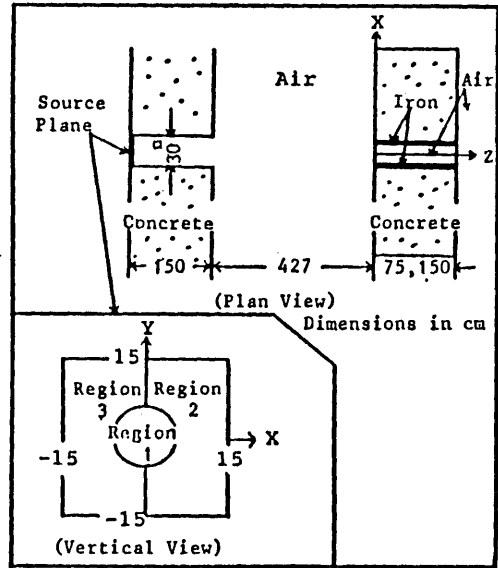


Fig. 5.9 G33 calculational geometry 2 for configuration (ii) of straight duct experiment.

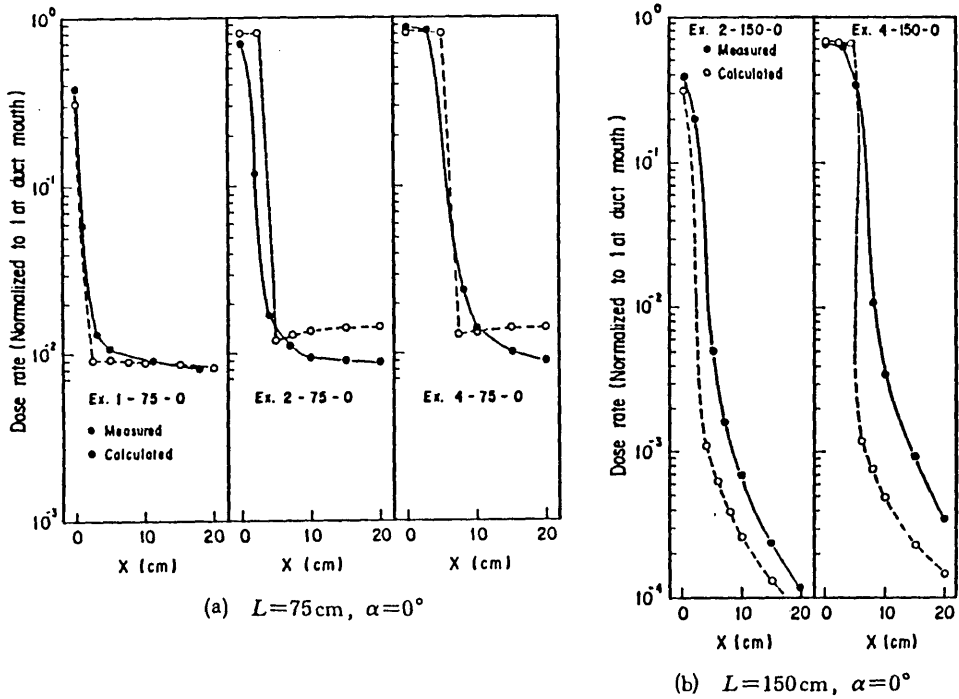


Fig. 5.10(a), (b) Comparison of G33 calculations with measurements of gamma-ray dose rates behind shield wall with straight duct

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

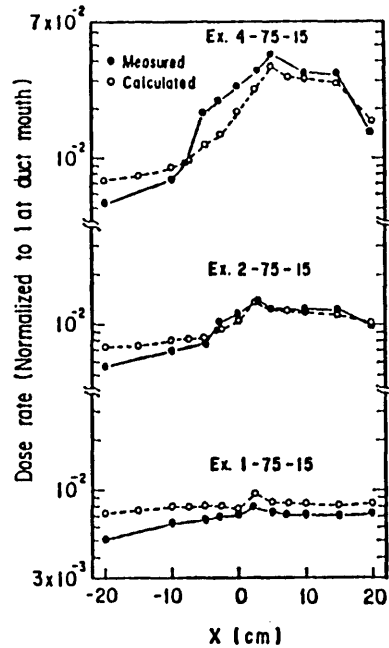
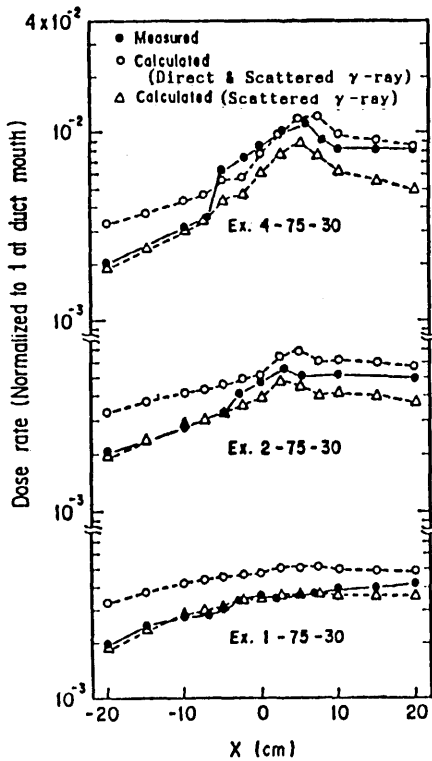
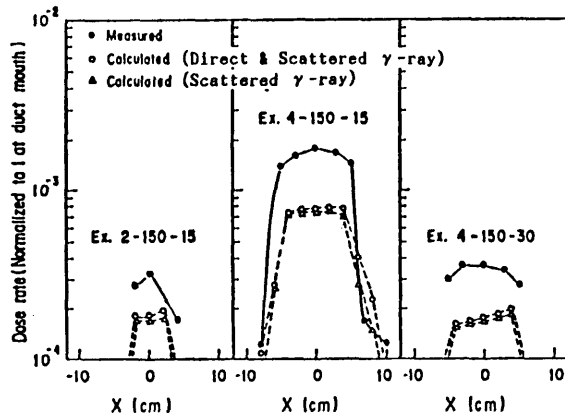


Fig.5.11 Comparison of G-33 calculations with measurements of  $\gamma$ -ray dose rates behind shield wall ( $L=75\text{cm}$ ,  $\alpha=15^\circ$ )



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



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

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<sup>(37)</sup>

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<sup>(12)</sup>。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<sup>(3)</sup>、<sup>(32)</sup>。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<sup>(6)</sup>、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<sub>n</sub>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<sup>(23)</sup>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(100×100×100cm<sup>3</sup>)は、その中心点P<sub>0</sub>(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。P<sub>0</sub>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、P<sub>0</sub>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 $\theta$ とする。測定は $\theta = 0^\circ$ 、 $7^\circ$ 、 $14^\circ$ 、 $20^\circ$ 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、P<sub>0</sub>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、 $-30\text{cm} \leq X \leq 30\text{cm}$ の領域を2cm間隔で移動)の線量率をJRR-4の最大熱出力である3.5MW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 $10\text{cm}^2$ (半径1.78cm)、5型線量計が $100\text{cm}^2$ (半径5.64cm)である。

4型線量計(線量率測定可能範囲 $0.06 \sim 6,000\text{R/h}$ )は小型であり、5型線量計(線量率測定可能範囲 $0.1\text{mR/h} \sim 9.99\text{R/h}$ )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 $0.7 \sim 80\text{R/h}$ 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 $0.96\text{R/h}$ 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 $0.0\text{mR/h}$ )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、 $0^\circ$ 配置のダクトのある形状と $7^\circ$ 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、 $\theta = 7^\circ$ 、 $14^\circ$ 、 $20^\circ$ 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 $1.04(\theta = 14^\circ) \sim 1.11(\theta = 7^\circ)$ 、3ダクト形状における点 $P_1$ で $1.08(\theta = 7^\circ) \sim 1.10(\theta = 20^\circ)$ 、点 $P_2$ で $1.06(\theta = 14^\circ) \sim 1.08(\theta = 20^\circ)$ 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 $\theta = 0^\circ$ 、 $7^\circ$ 、 $14^\circ$ 、 $20^\circ$ 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 $5.73^\circ$ 、 $6.74^\circ$ 、 $7.76^\circ$ 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)  $\theta = 14^\circ$ 、 $20^\circ$  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 $7^\circ$ 、 $14^\circ$ 、 $20^\circ$ 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 $\theta = 7^\circ$ 、 $14^\circ$ 、 $\theta = 20^\circ$ 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<sup>(a)</sup>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、 $\theta$ 、Z)座標で入力し、R、 $\theta$ 、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、 $\theta$ 、 $\phi$ )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、 $\theta = 7^\circ$ 、 $14^\circ$ 、 $20^\circ$ 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、 $\theta = 7^\circ$ 、 $14^\circ$ 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、 $\theta = 7^\circ$ 、 $14^\circ$ 、 $20^\circ$ 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  $X > -20$  cmの領域において、非散乱ガンマ線の線量率は $Y = 0$  cmと $4$  cmとで大きく異なる。
- ② 散乱ガンマ線の $Y = 0$  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  $Y = 4$  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 $Y = 0$  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 $Y = 0$  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、 $X = -10$  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：  $Y = 0$  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、 $X = -5$  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：  $Y = 0$  cmの線上においても、 $X < 0$  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 $X > 10$  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。

$Y = 0$  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、 $Y = 0$  cmの水平線として、2分割計算は同円上の $90^\circ$ と $270^\circ$ の点、4分割計算は $45^\circ$ 、 $135^\circ$ 、 $225^\circ$ 、 $315^\circ$ の点、6分割計算は $30^\circ$ 、 $90^\circ$ 、 $150^\circ$ 、 $210^\circ$ 、 $270^\circ$ 、 $330^\circ$ 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 $-30$  cm  $\leq X \leq 30$  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、 $7^\circ$ 配置で $0.48 \sim 7.95$ 、 $14^\circ$ 配置で $0.84 \sim 4.63$ 、 $20^\circ$ 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、 $\theta = 7^\circ$ 、 $14^\circ$  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)  $7^\circ$  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る場合、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<sup>(42)</sup>、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、 $7^\circ$ 、 $14^\circ$ 、 $20^\circ$  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、 $7^\circ$  配置で 0.48~7.95、 $14^\circ$  配置で 0.84~4.63、 $20^\circ$  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。

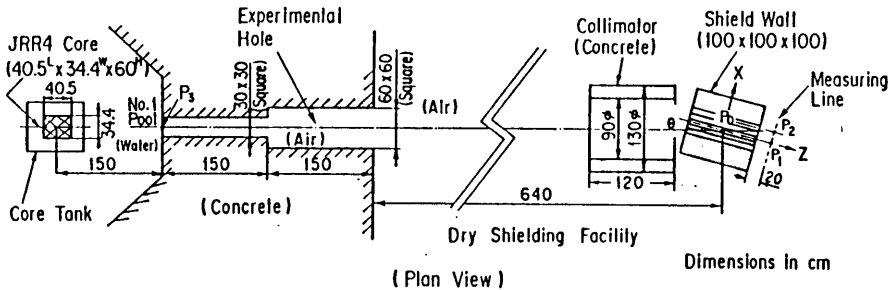


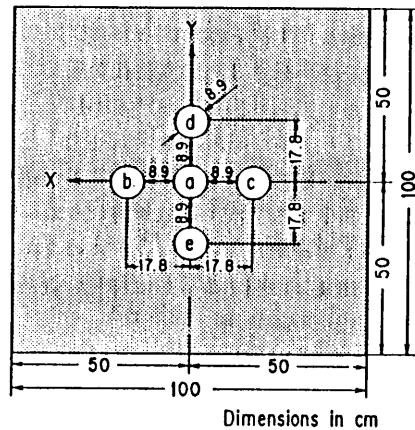
Fig. 5.13 Experimental arrangement for proximity effect of straight duct

Table 5.3 Element composition of concrete (g/cm<sup>3</sup>)

	Element 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

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

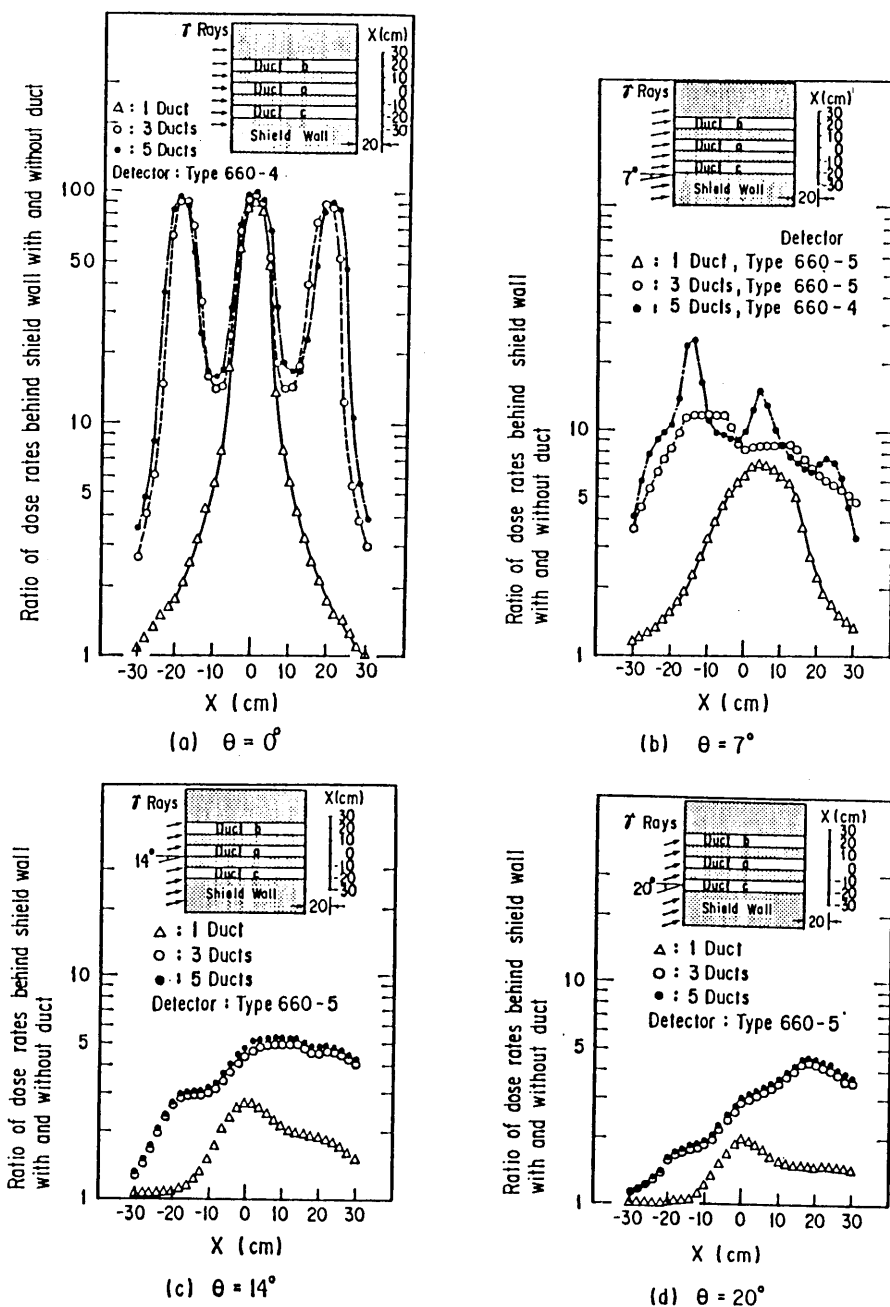


Fig.5.15 (a)~(d) Distributions of dose rate ratio of with 1-, 3- and 5-ducts to no-duct (bulk shield) at measuring positions behind shield wall

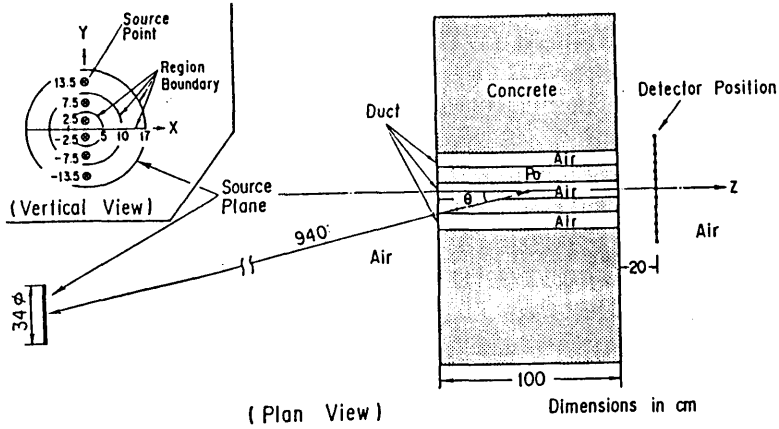


Fig. 5.16 Calculational geometry for 3-and 5-ducts configurations

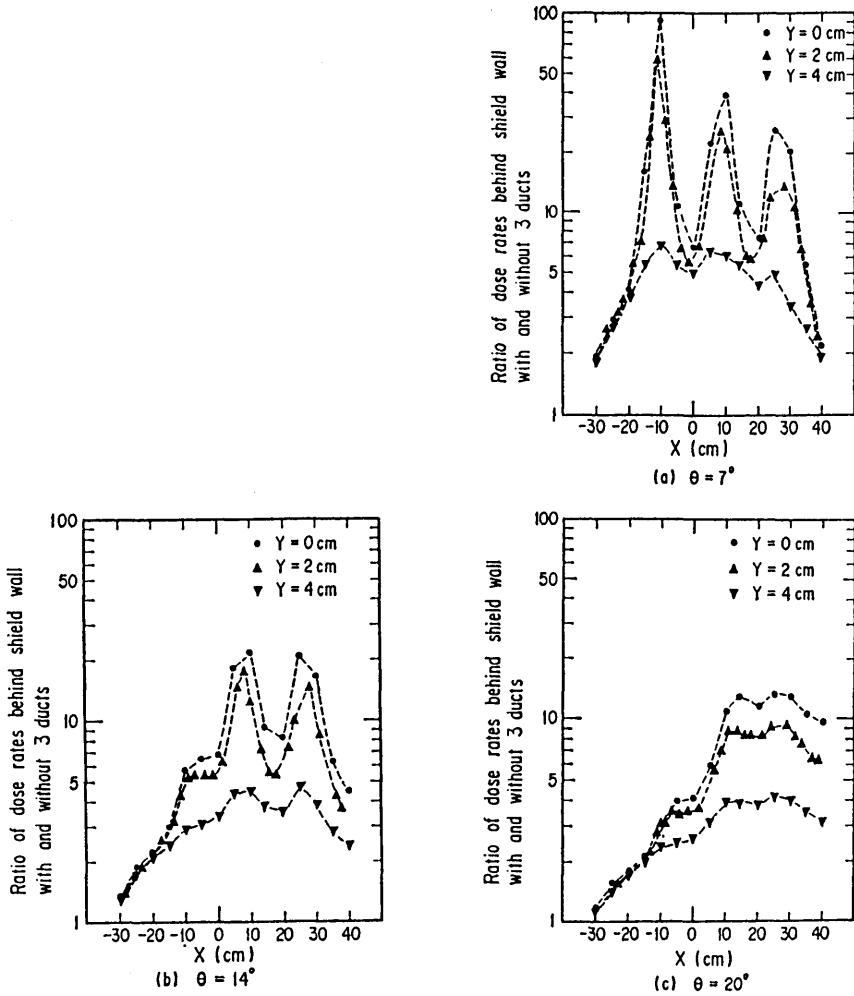


Fig. 5.17 (a)~(c) Calculations of distributions of dose rate ratio of with-3-ducts to no-duct (bulk shield) on lines of  $Y=0, 2$  and  $4$  cm behind shield wall

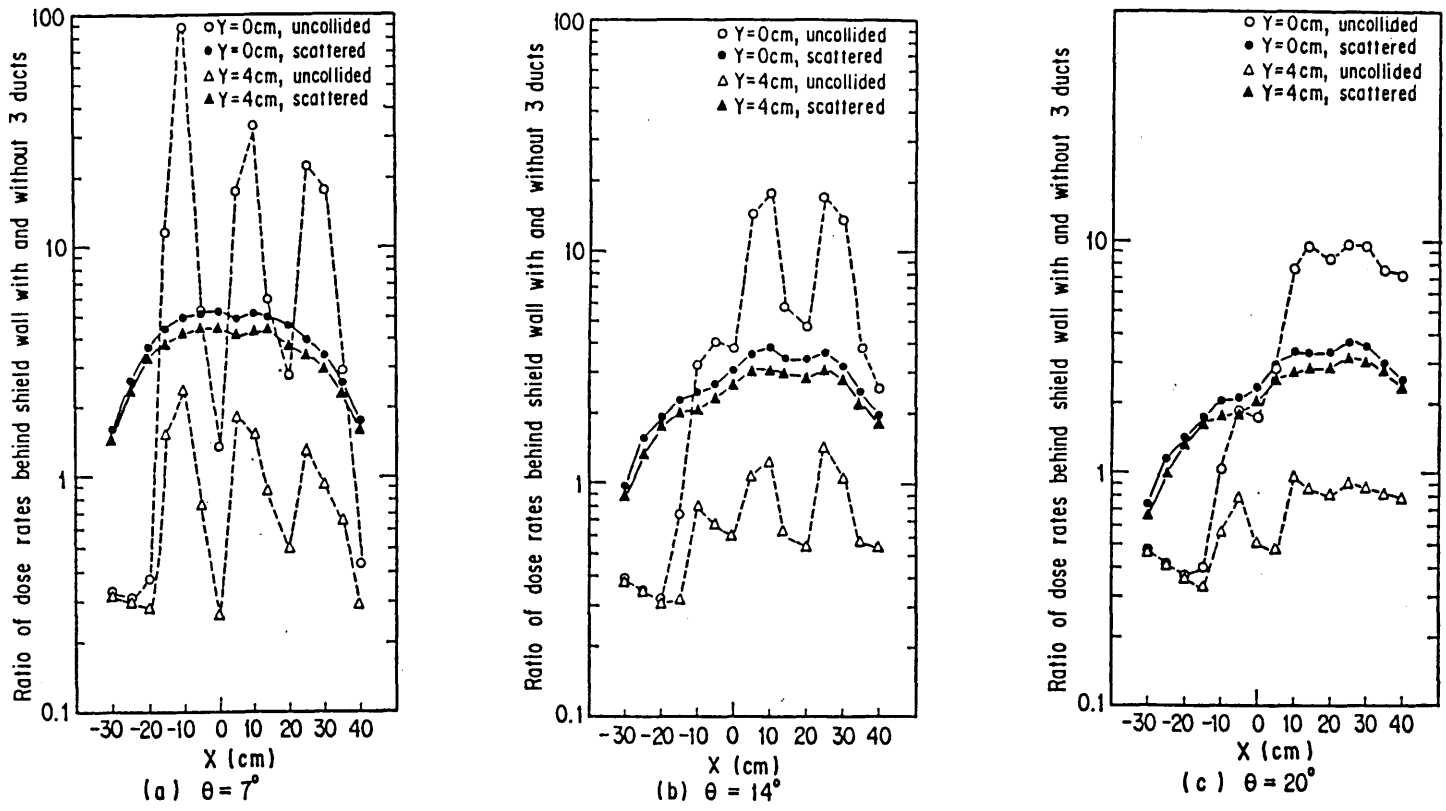


Fig.5.18 (a)~(c) Calculations of distributions of dose rate ratio of uncollided or scattered component with-3-ducts to both components of no-duct (bulk shield) on lines of Y=0 and 4cm behind shield wall

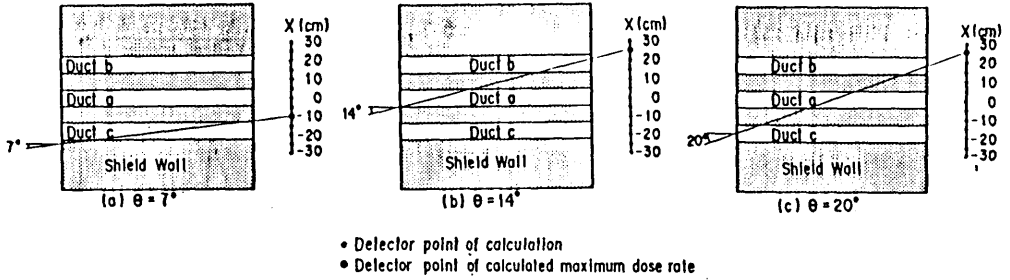
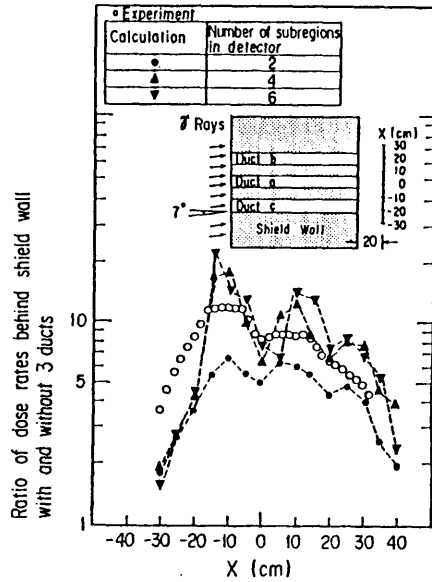


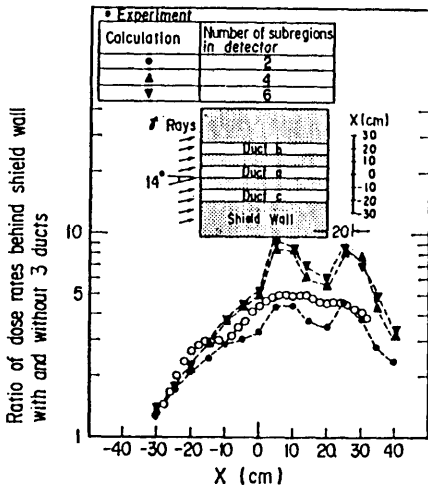
Fig. 5.19 Detector point of calculated maximum dose rate with 3-ducts configuration and lines of uncollided  $\gamma$ -ray reaching point

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

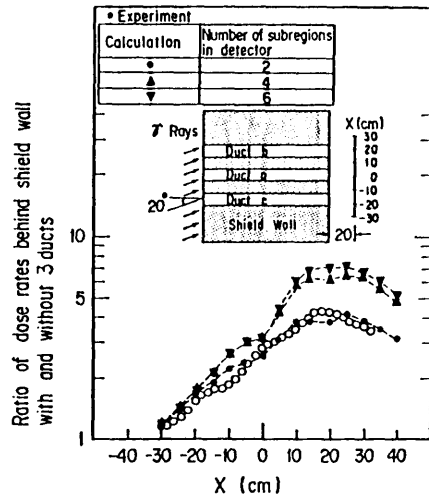
Number of subregions in detector	Calculation points in detector (cm)		C / E		
	X	Y	$7^\circ$	$14^\circ$	$20^\circ$
1	0.0	0.0	0.48 ~ 7.95	0.84 ~ 4.63	1.05 ~ 3.70
2	0.0	4.0	0.44 ~ 0.86	0.76 ~ 1.05	0.89 ~ 1.28
	0.0	-4.0			
4	2.82	2.82	0.51 ~ 1.64	0.83 ~ 1.95	1.06 ~ 1.84
	-2.82	2.82			
	-2.82	-2.82			
	2.82	-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

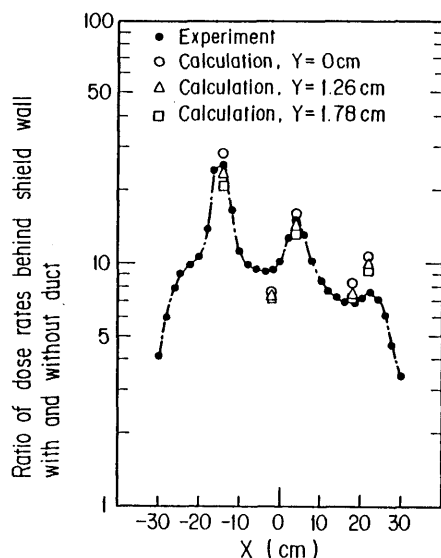


Fig.5.21 Comparisons of calculations with measurements at peak and valley of experimental dose rate ratio of with-5-ducts to no-duct (bulk shield) behind shield

#### 5.7 1回屈曲ダクト付き遮蔽壁<sup>(20)</sup>

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 $\theta$ 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CaSO<sub>4</sub>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<sub>d</sub> 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<sub>s</sub> とすると、第 2 脚内の、X  $>$  L<sub>d</sub> 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<sub>s</sub> 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<sub>d</sub> : 非散乱線と散乱線を合せた値。

(ロ) L<sub>d</sub>  $<$  X  $<$  L<sub>s</sub> : 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<sub>s</sub> : 散乱線のみによる値。

$\theta = 10^\circ$ 、 $20^\circ$  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。

$\theta = -10^\circ$ 、 $-20^\circ$  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。

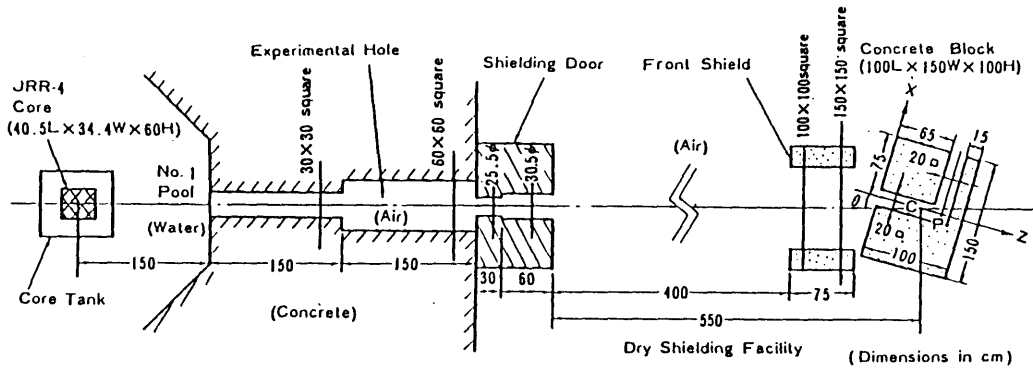


Fig. 5.22 Experimental arrangement of two-legged duct (Plan view)

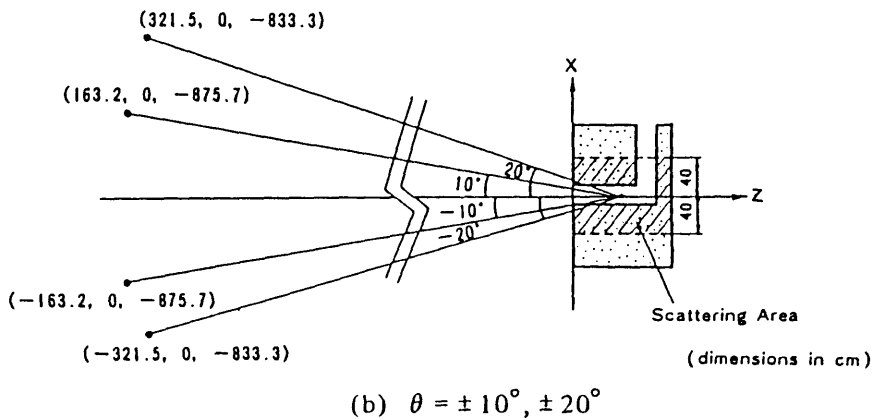
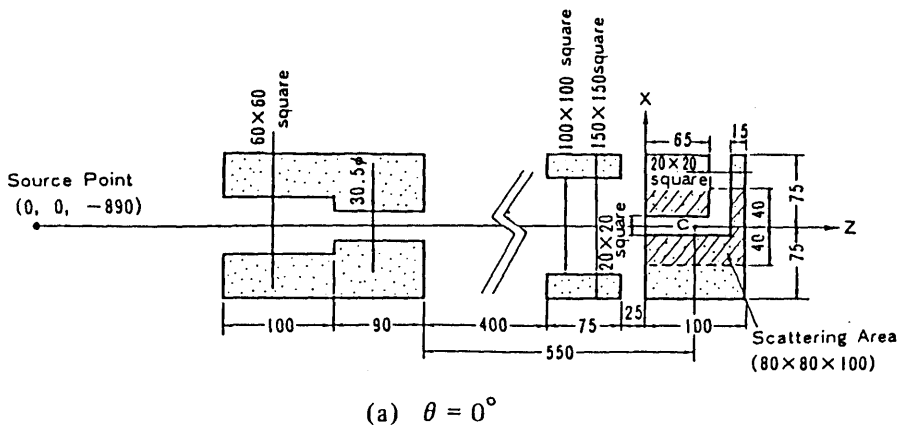


Fig. 5.23 G33 calculation model for two-legged duct experiment

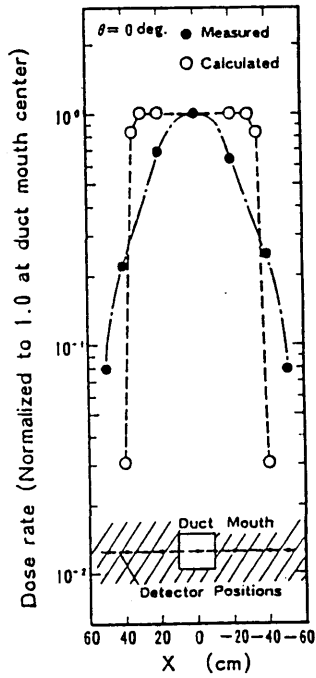
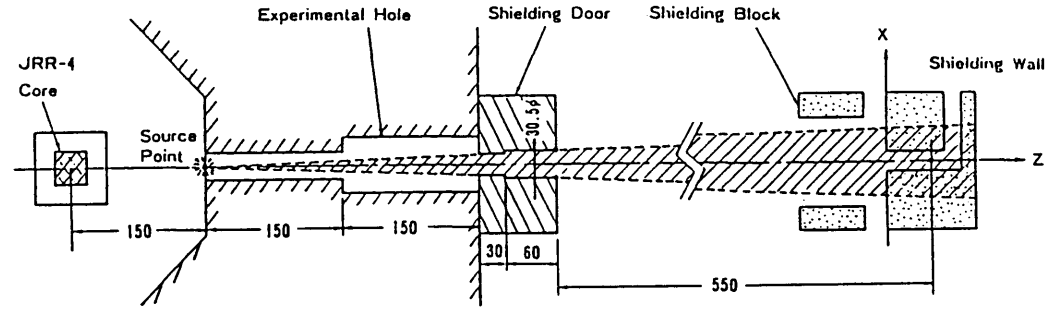


Fig.5.24 Comparison of measured and calculated  $\gamma$ -ray dose rates in front of concrete block ( $\theta = 0^\circ$ )



(a) Visible area

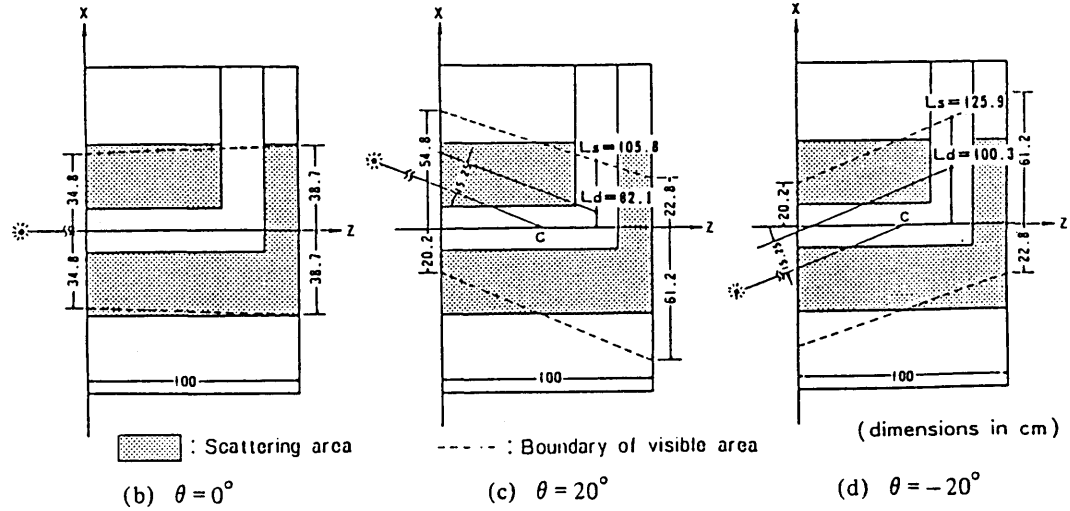


Fig.5.25 (a)~(d) Geometrical form of visible area, and comparison of geometry of scattering area and that of "visible area"

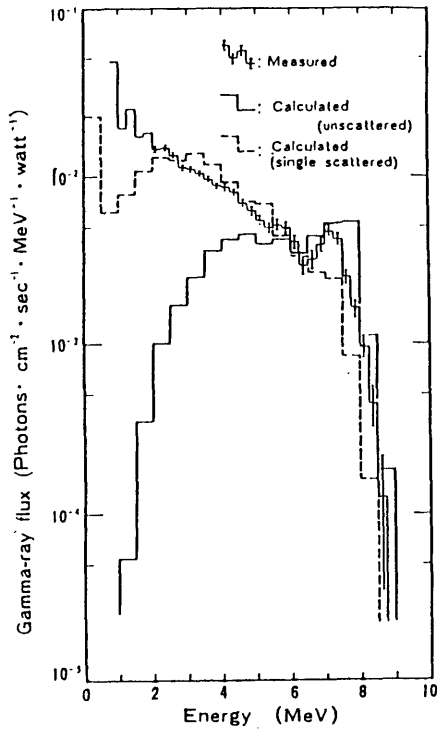


Fig. 5.26 Comparison of measured and calculated  $\gamma$ -ray energy spectra at  $X = 40$  cm in second leg

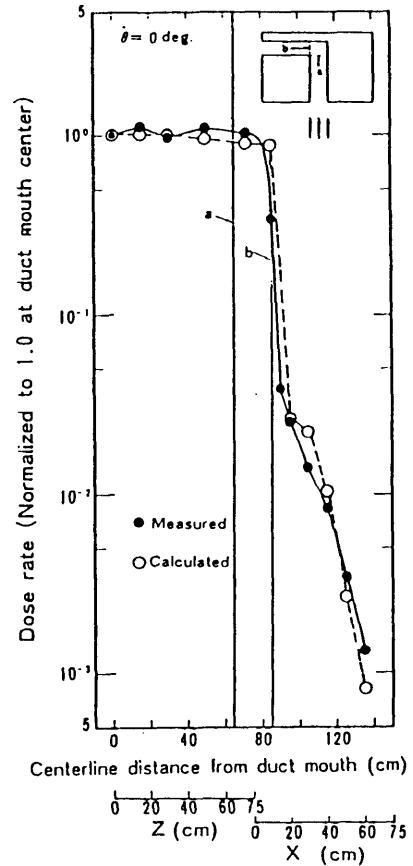


Fig. 5.27 Comparison of measured and calculated  $\gamma$ -ray dose rates along centerline of two-legged duct ( $\theta = 0^\circ$ )

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.

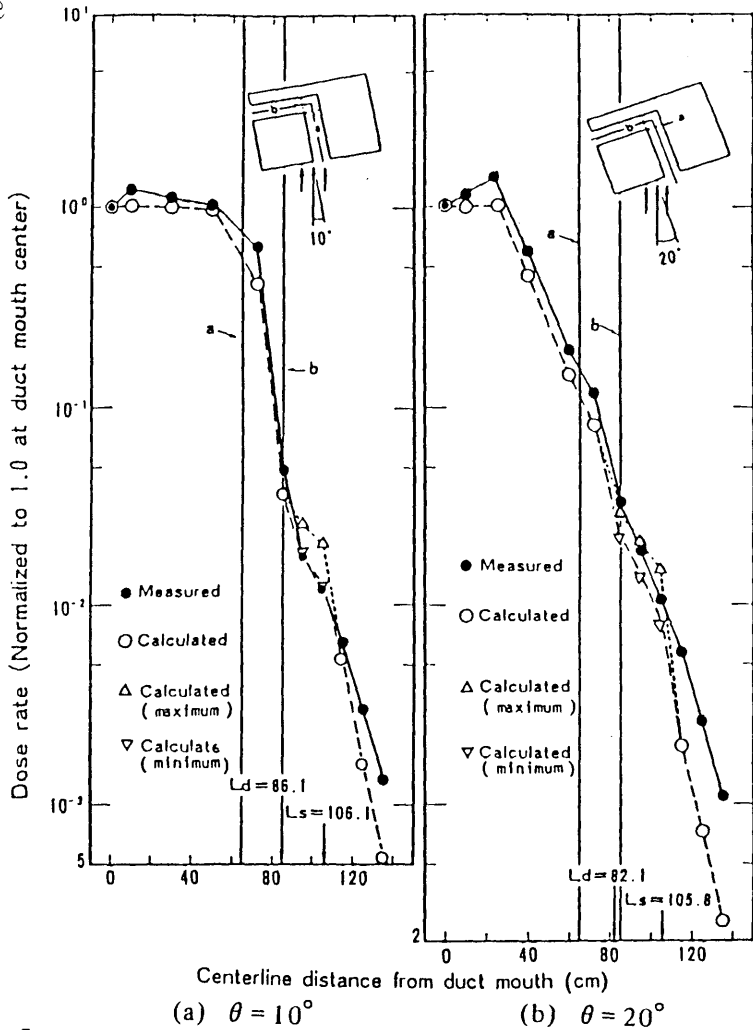


Fig.5.28 Comparison of measured and calculated  $\gamma$ -ray dose rates along centerline of two-legged duct ( $\theta = 10^\circ$  and  $20^\circ$ )

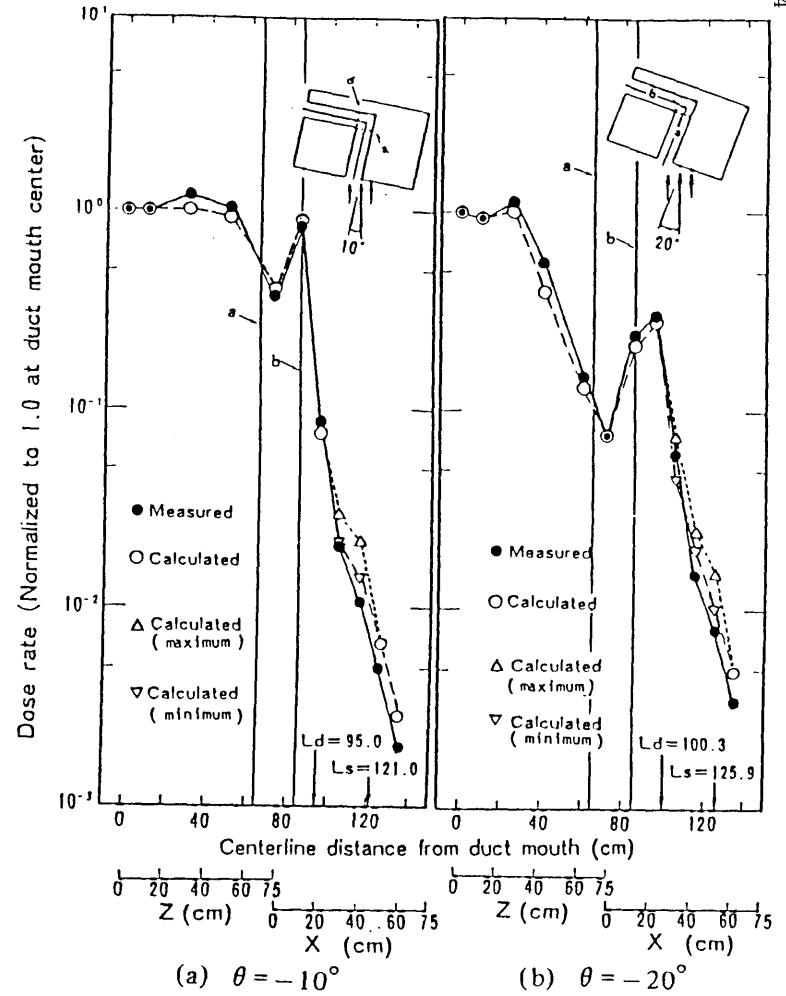


Fig.5.29 Comparison of measured and calculated  $\gamma$ -ray dose rates along centerline of two-legged duct ( $\theta = -10^\circ$  and  $-20^\circ$ )

## 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 $10\text{cm}$ 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 $\text{mm}$ 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 $2\text{mm}$ 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 $40\text{cm}$ 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 $1\text{cm}$ 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 $1\text{cm}$ 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 $T=75\text{cm}$ 、 $150\text{cm}$ 、入射角 $\theta=15^\circ$ 、 $30^\circ$ 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 $T=150\text{cm}$ 、 $\theta=15^\circ$ 、 $30^\circ$ 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 $\alpha_{D1}$ は、 $\theta = 15^\circ$ の場合0.03、 $\theta = 30^\circ$ の場合0.02とした<sup>(2\*)</sup>。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 $15\text{cm}$ を超えるので、 $T = 150\text{cm}$  ( $\theta = 15^\circ$ 、 $30^\circ$ とも、許容最大ダクト直径は $5.3\text{cm}$ 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 $1\text{cm}$ 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 $1.6\text{cm}$ 、 $\theta = 30^\circ$ の場合 $2.0\text{cm}$ 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。

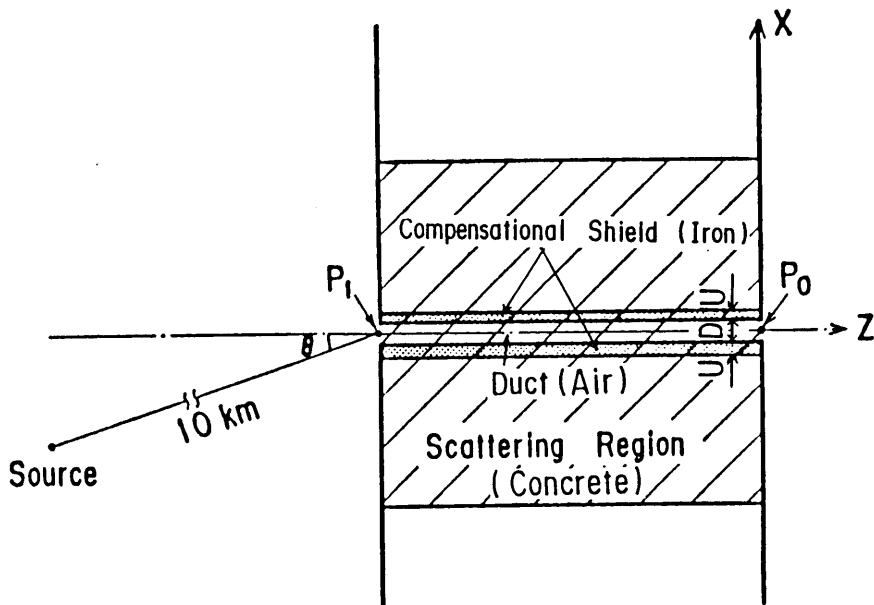


Fig.6.1 G33-GP calculational geometry of concrete wall with compensational shield for straight duct

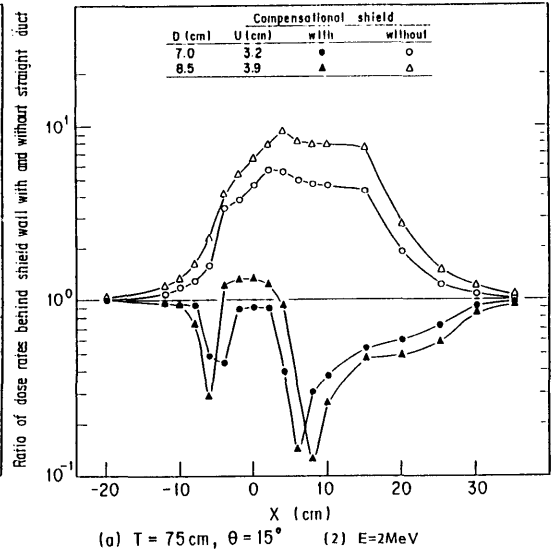
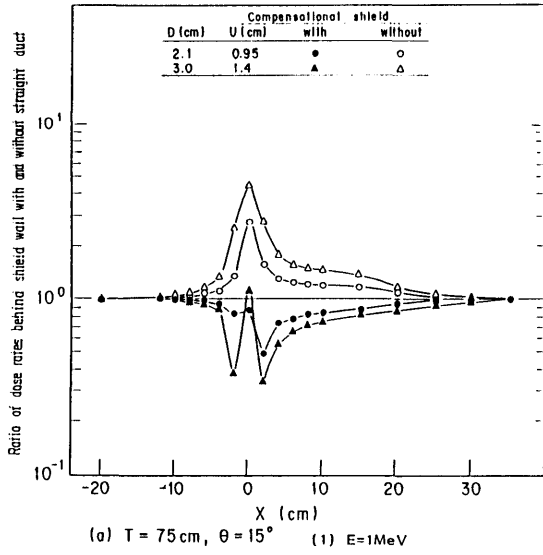


Fig.6.2(a) Ratio of dose rates behind shield wall with and without straight duct calculated by G33-GP code for mono energy gamma-ray source.

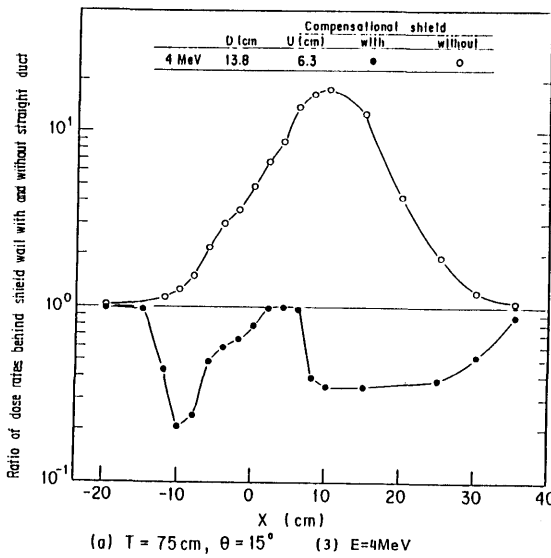


Fig.6.2(a) (Continued)

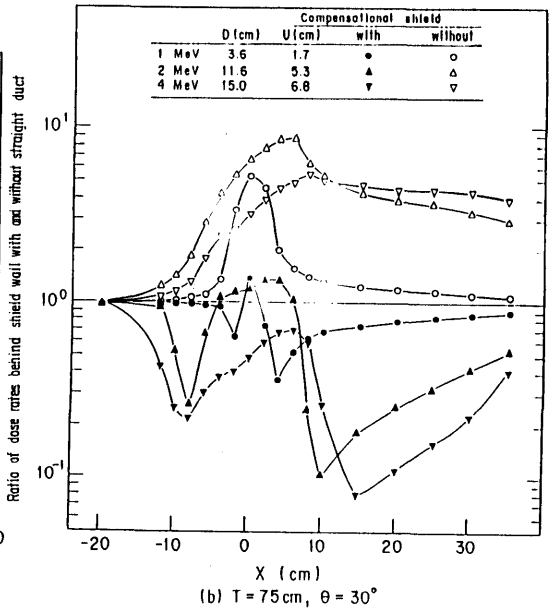


Fig.6.2(b)

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



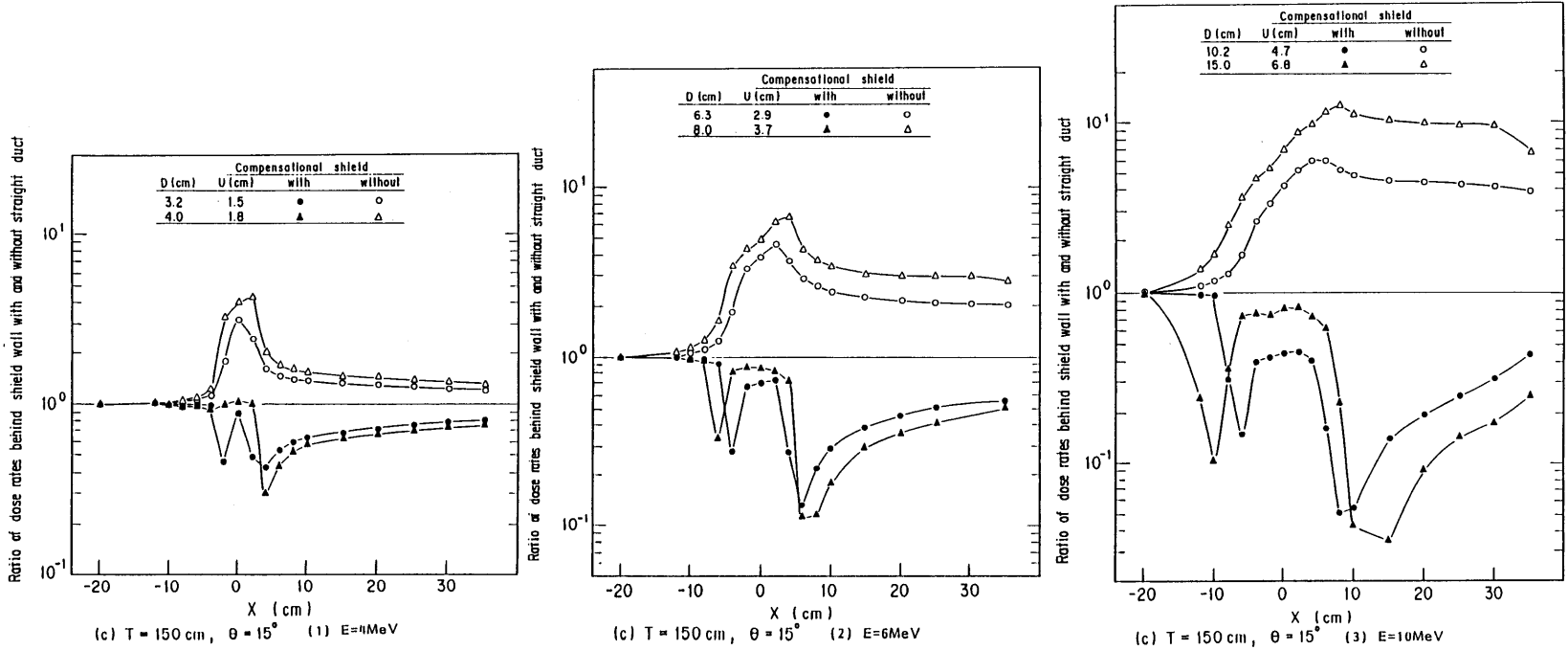


Fig.6.2(c) Ratio of dose rates behind shield wall with and without straight duct calculated by G33-GP code for mono energy gamma-ray source.

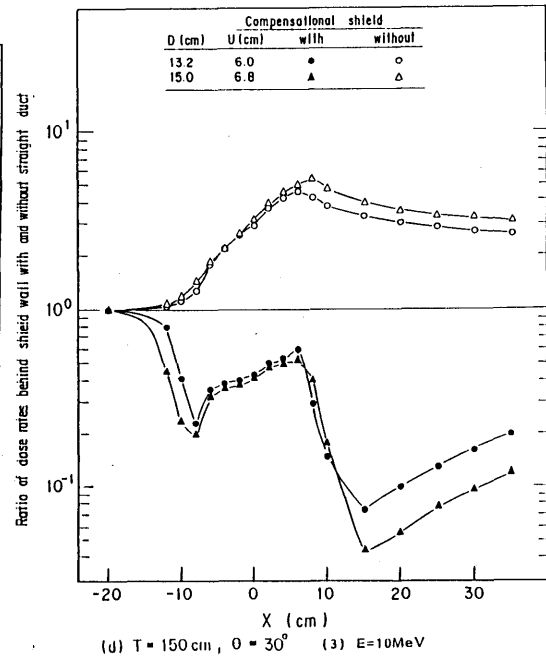
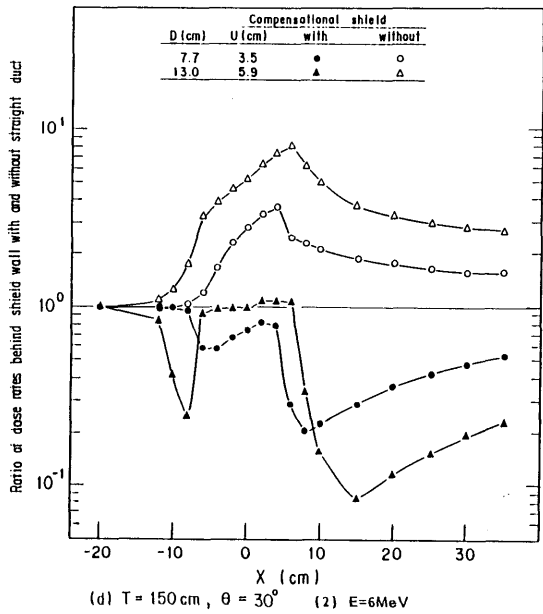
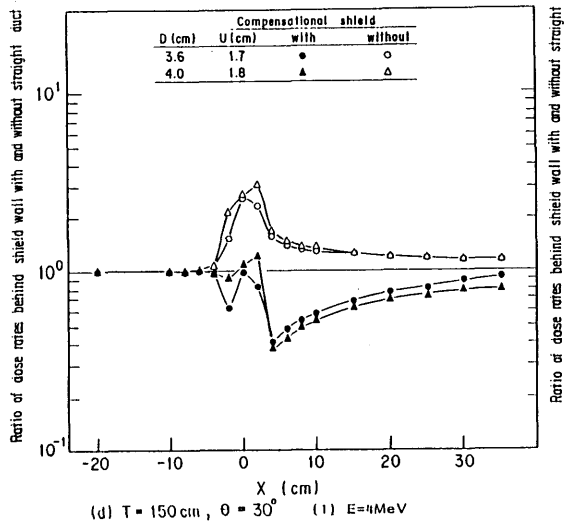


Fig.6.2(d) Ratio of dose rates behind shield wall with and without straight duct calculated by G33-GP code for mono energy gamma-ray source.

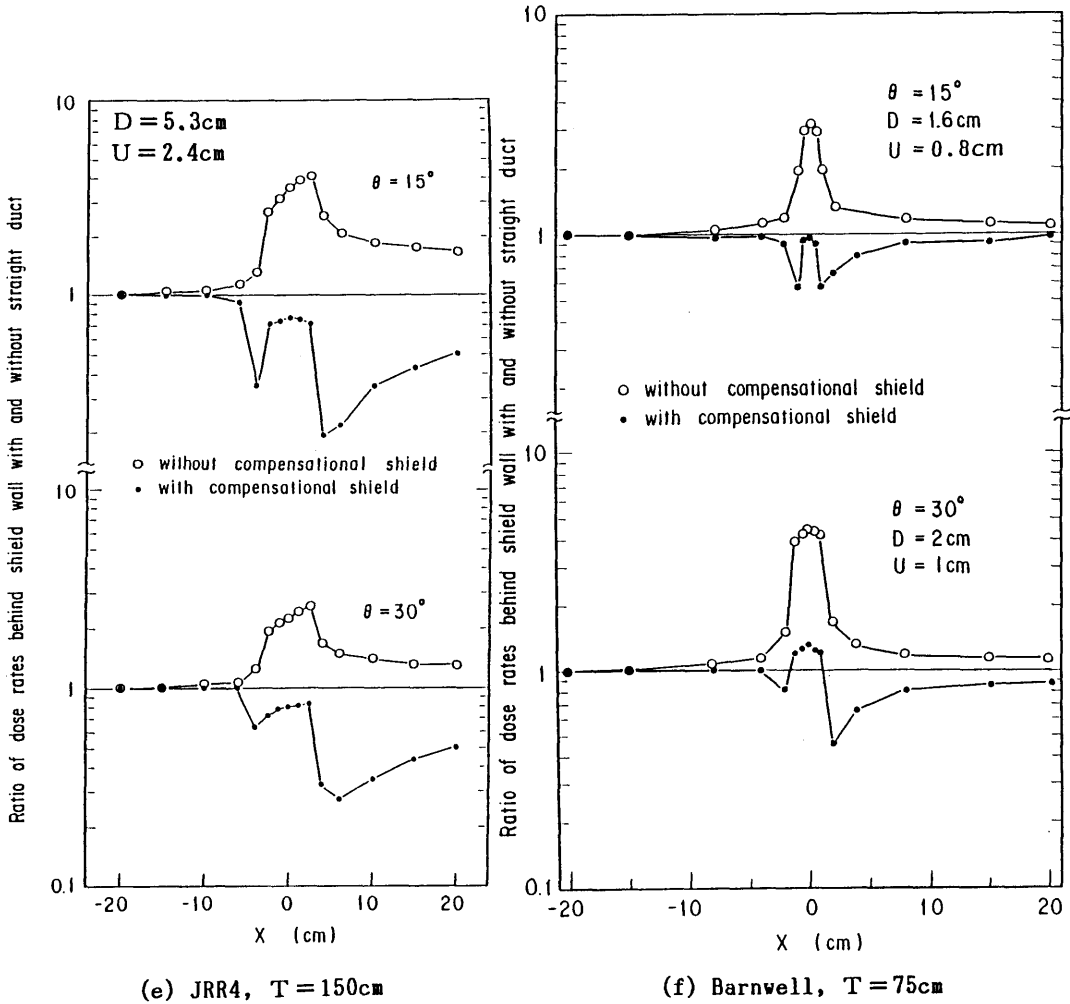


Fig.6.2 (e),(f)

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 $T = 75$ 、 $100$ 、 $150$ 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 $T = 75$ 、 $150$ 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 $T = 75$ cmで $0.6^\circ$ 、 $T = 150$ cmで $0.3^\circ$ である。本計算では、入射角 $\theta$ を $T = 75$ cmの場合 $1^\circ$ 、 $T = 150$ 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。

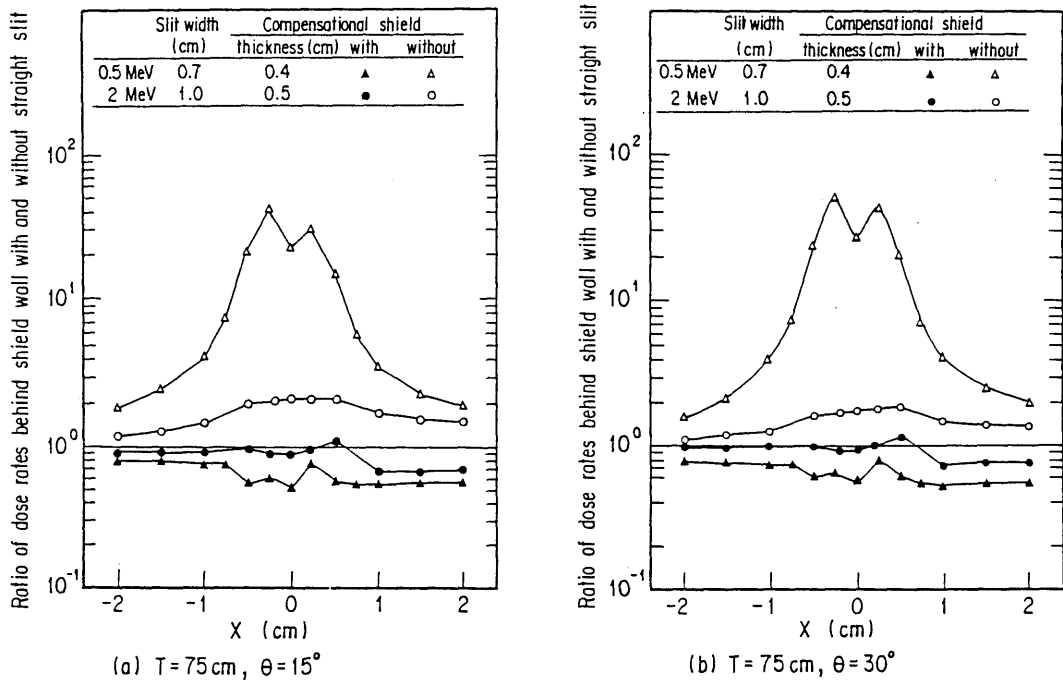
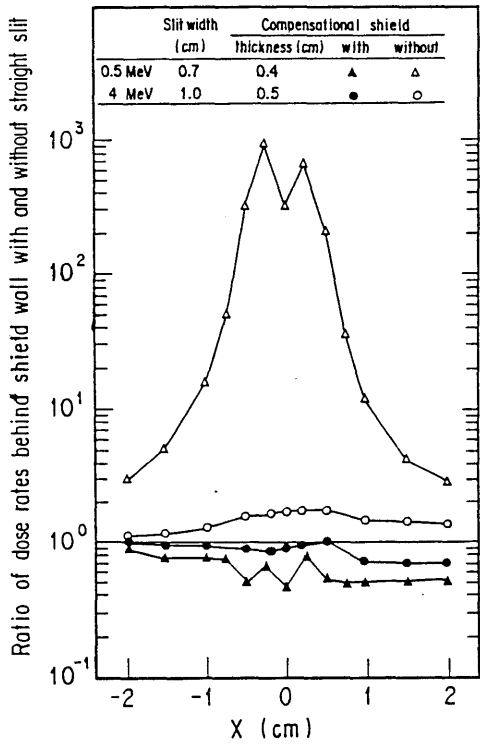
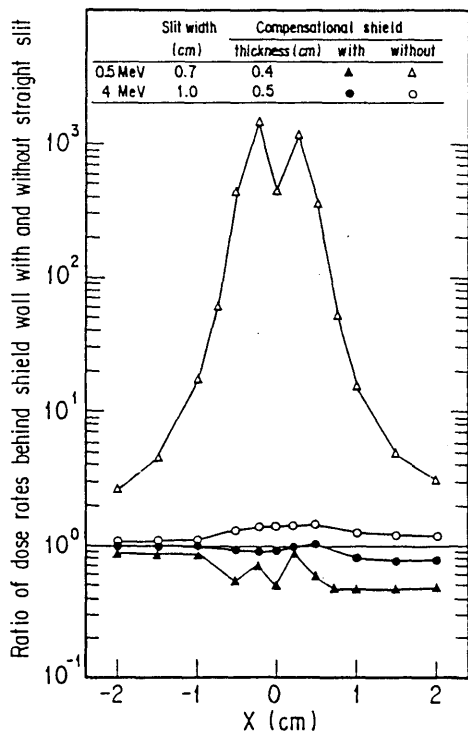


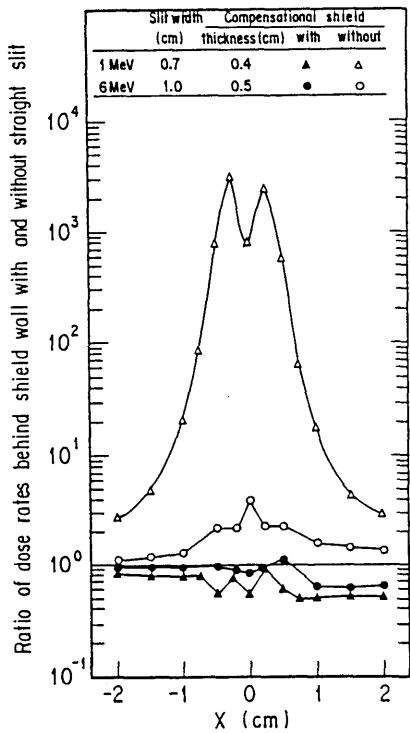
Fig.6.3(a)~(f) Ratio of dose rates behind shield wall with and without straight slit calculated by G33-GP code for mono energy gamma-ray source



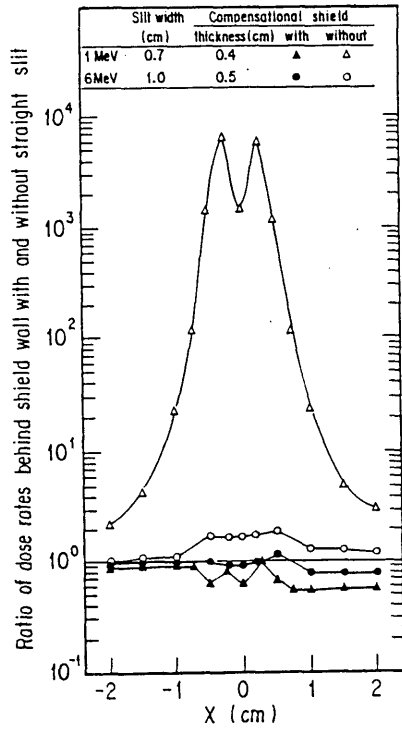
(c)  $T=100\text{ cm}, \theta=15^\circ$



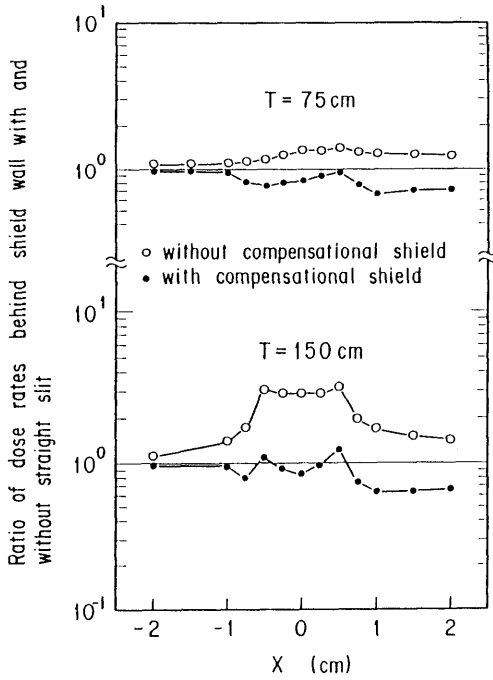
(d)  $T=100\text{ cm}, \theta=30^\circ$



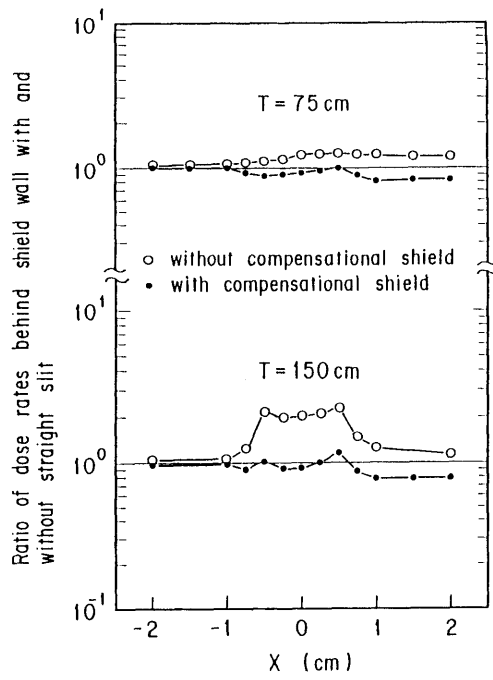
(e)  $T=150\text{ cm}, \theta=15^\circ$



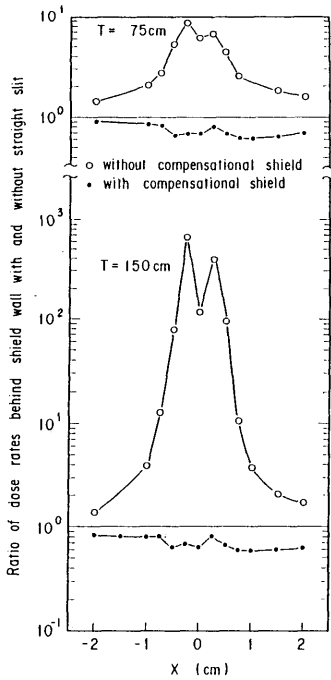
(f)  $T=150\text{ cm}, \theta=30^\circ$



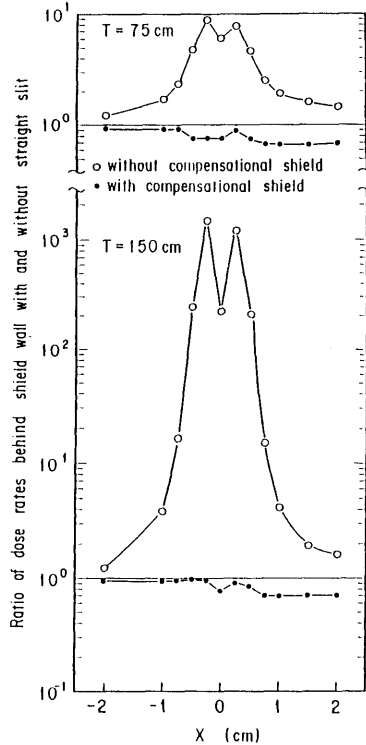
(g) JRR 4,  $\theta = 15^\circ$



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



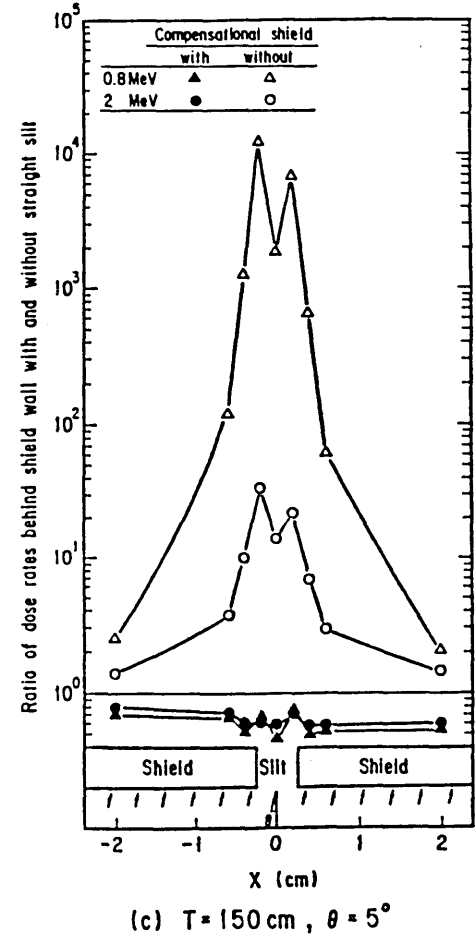
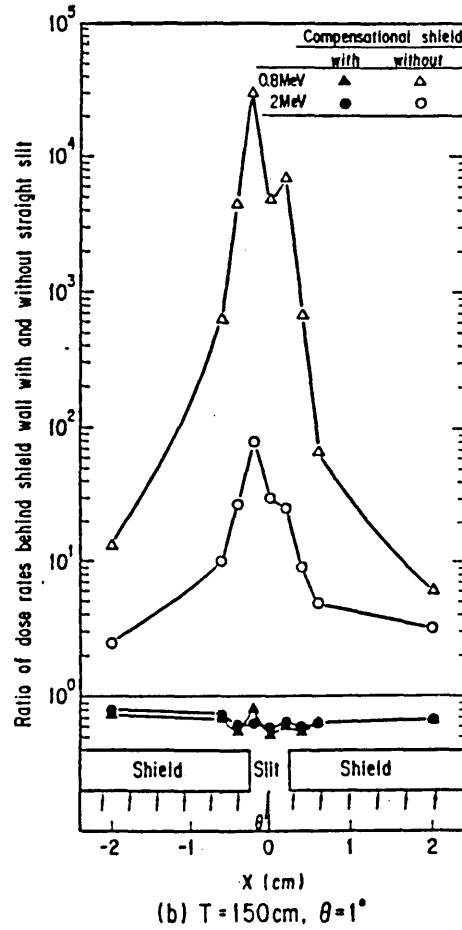
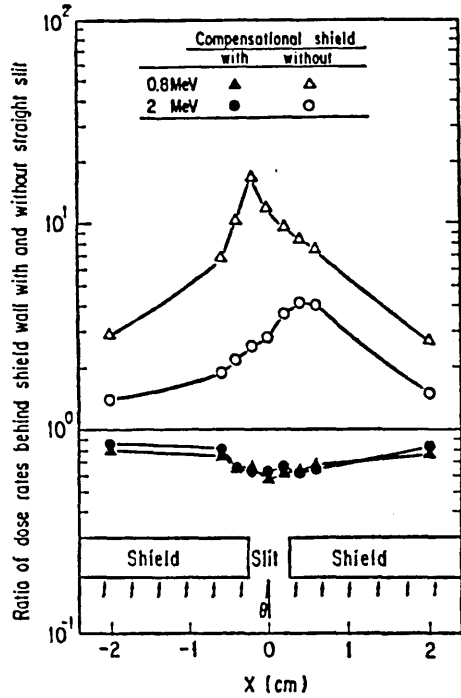
(i) Barnwell,  $\theta = 15^\circ$



(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。

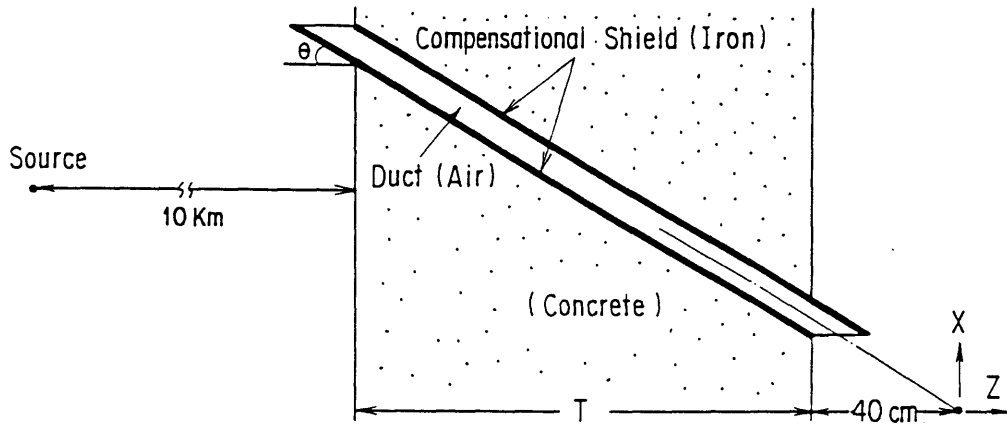
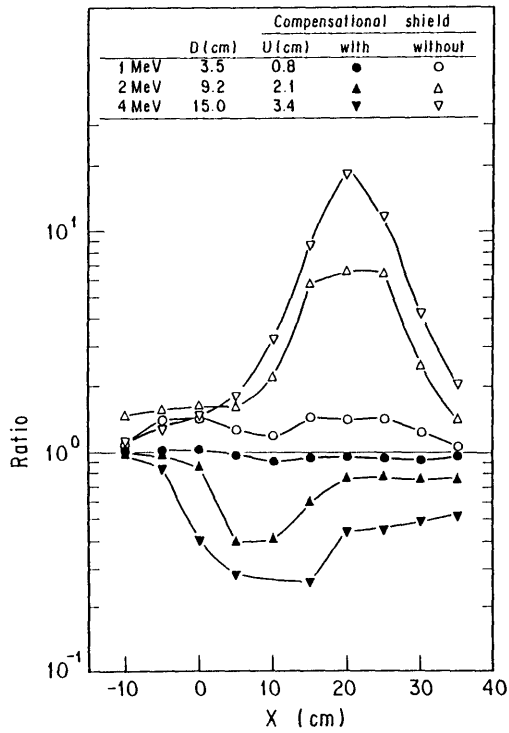
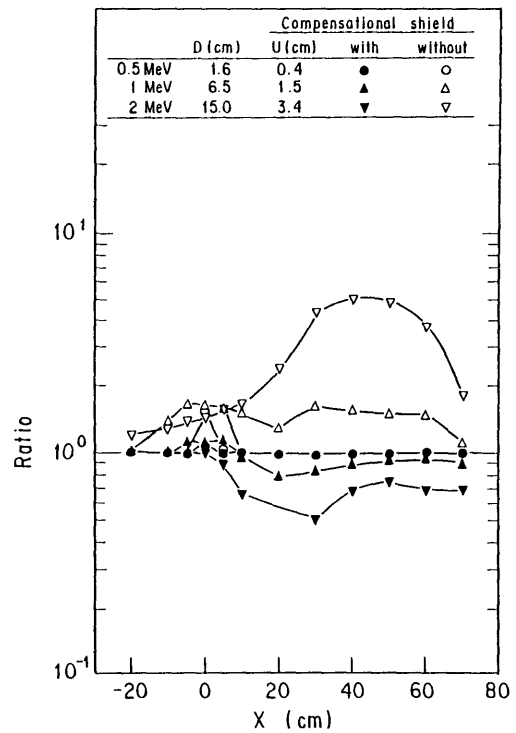


Fig.6.5 G33-GP calculational geometry of concrete wall with compensational shield for slant duct

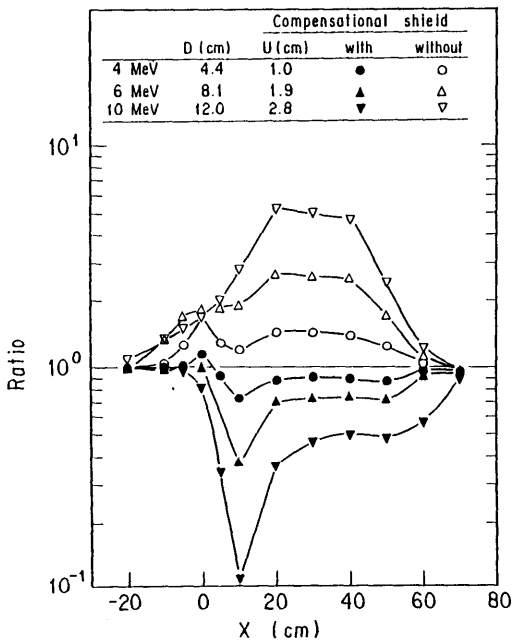




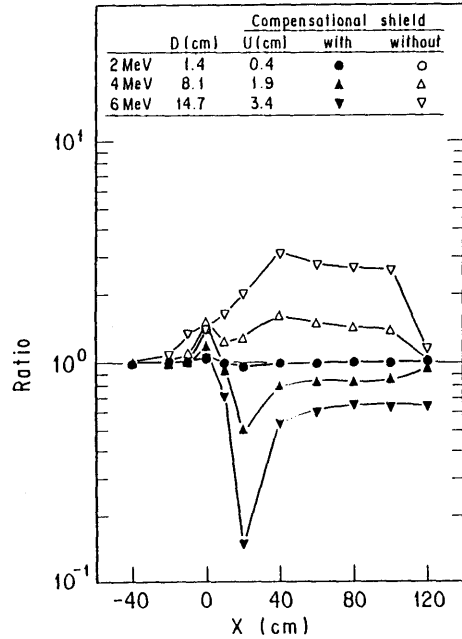
(a)  $T = 75 \text{ cm}, \theta = 15^\circ$



(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。

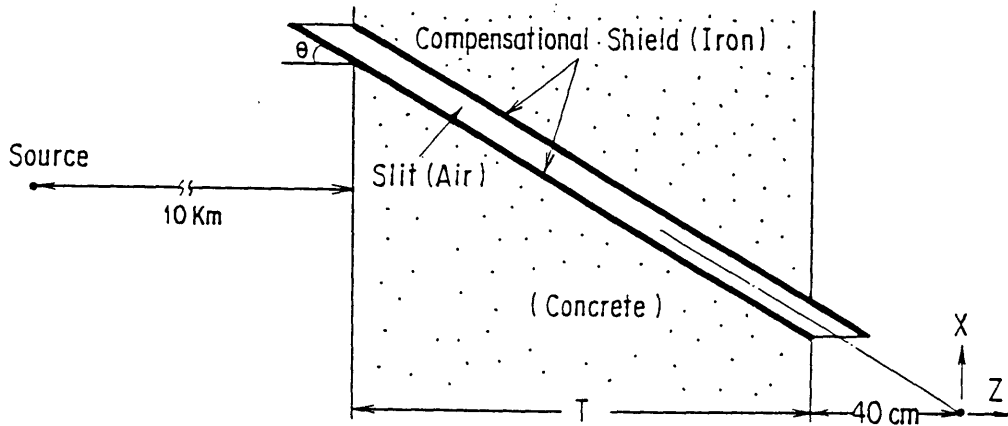
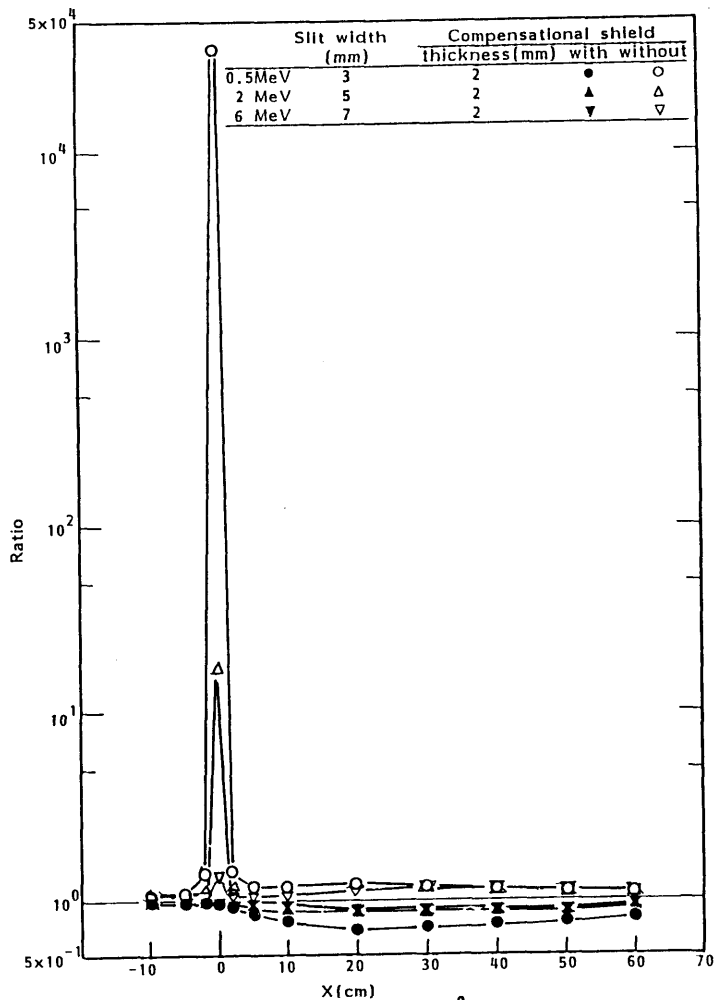
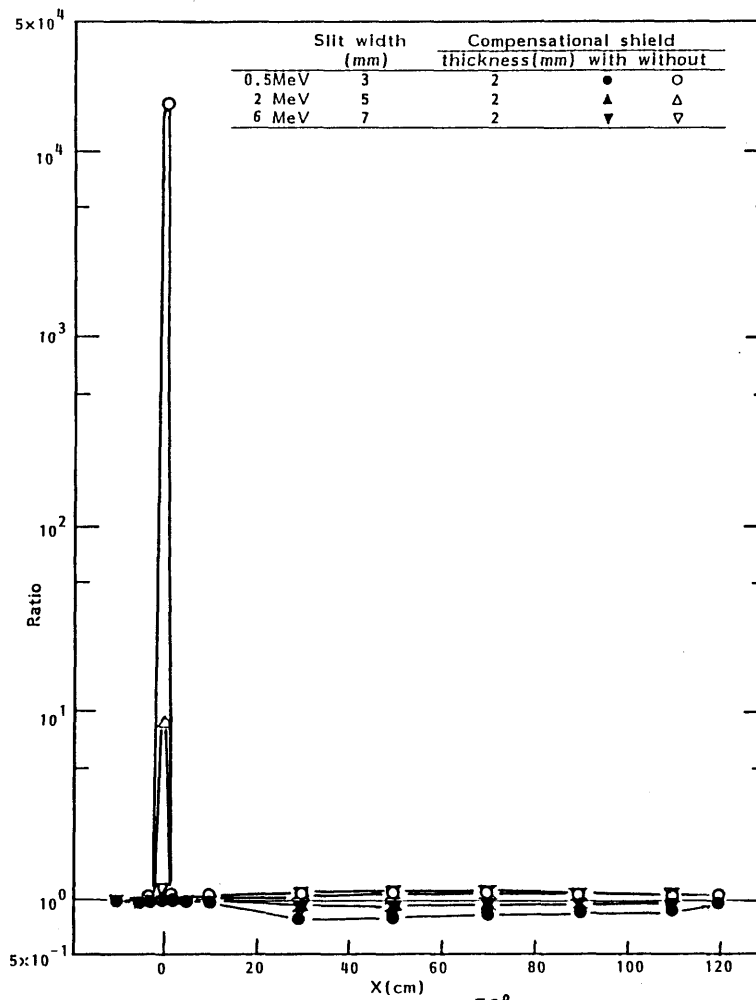


Fig.6.7 G33-GP calculational geometry of concrete wall with compensational shield for slant slit.



(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。

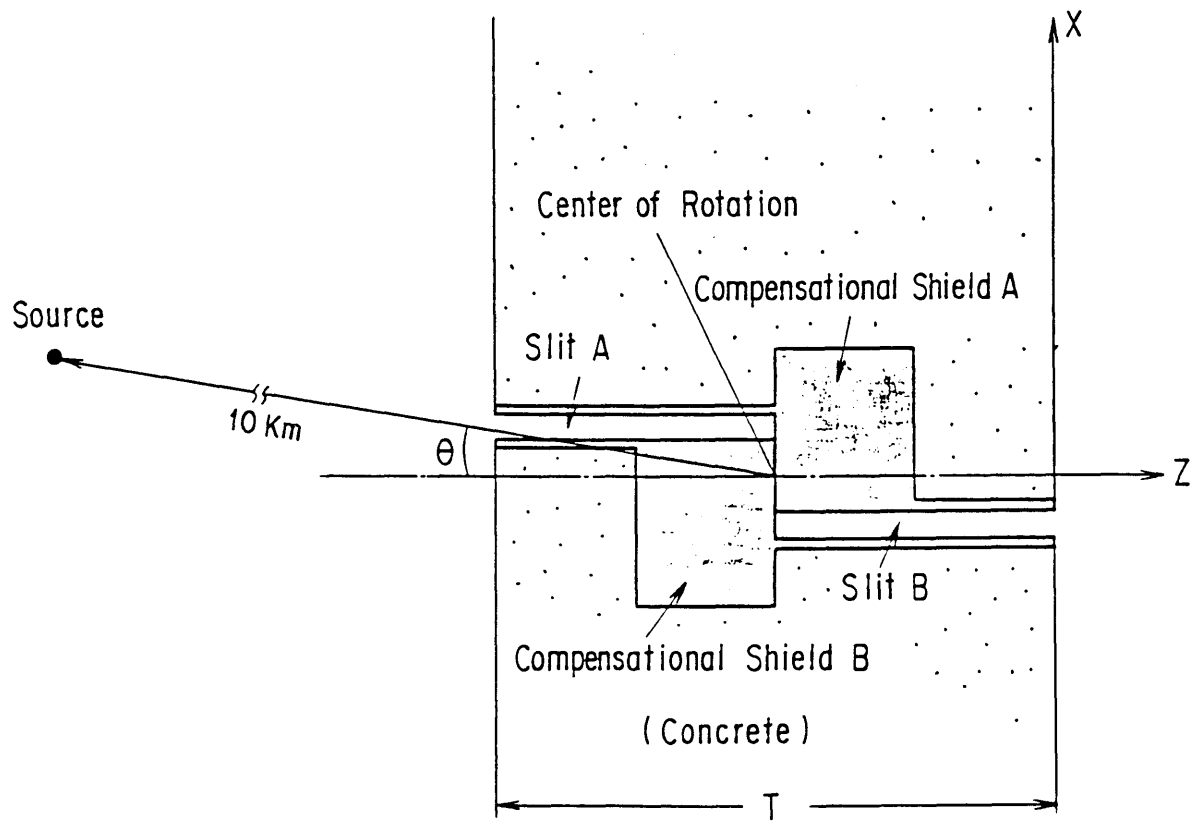
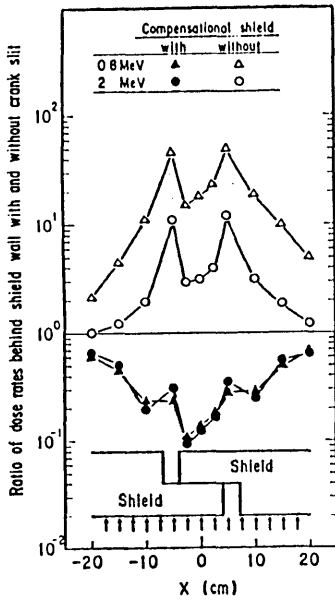
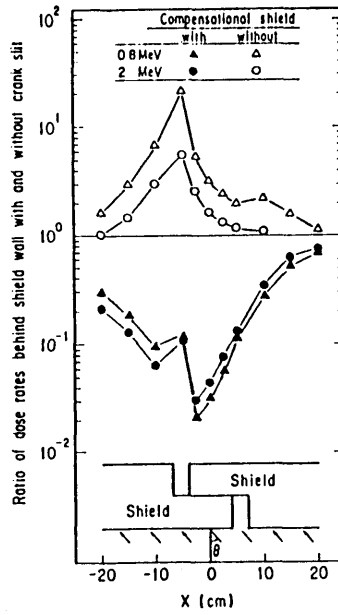


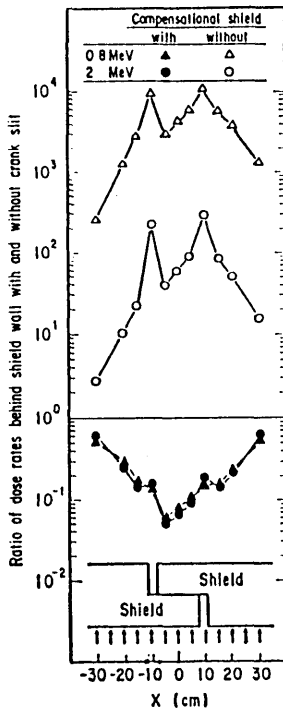
Fig.6.9 G33-GP calculational geometry of concrete wall with compensational shield for offset slit.



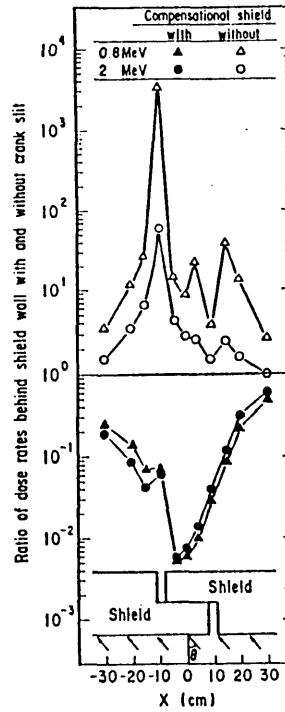
(a)  $T = 75 \text{ cm}, \theta = 0^\circ$



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



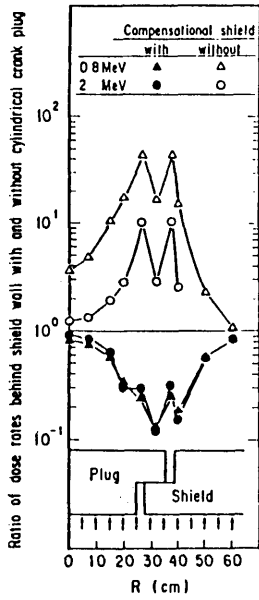
(c)  $T = 150 \text{ cm}, \theta = 0^\circ$



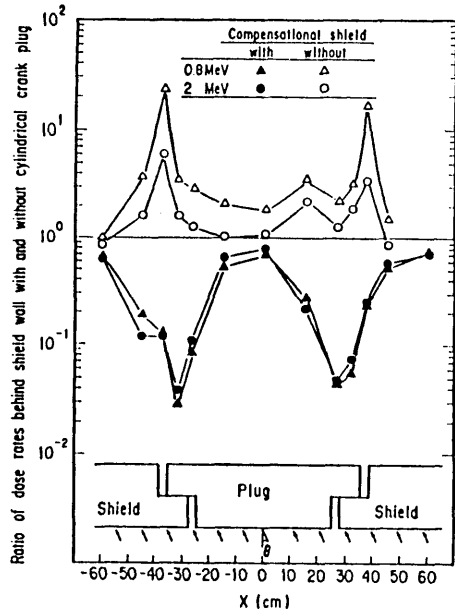
(d)  $T = 150 \text{ cm}, \theta = -8^\circ$

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  $T=150\text{cm}$ .

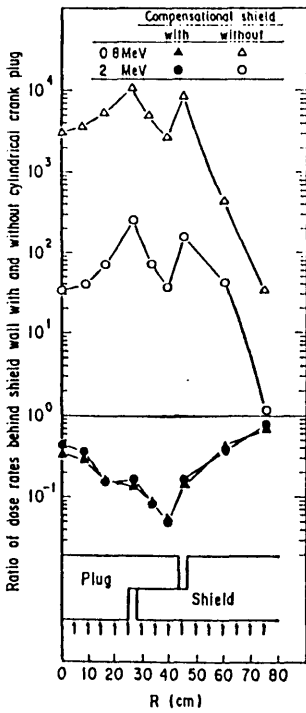
Fig.6.10(a)~(d) Ratio of dose rates behind shield wall with and without offset slit calculated by G33-GP code for mono energy gamma-ray source.<sup>(21)</sup>



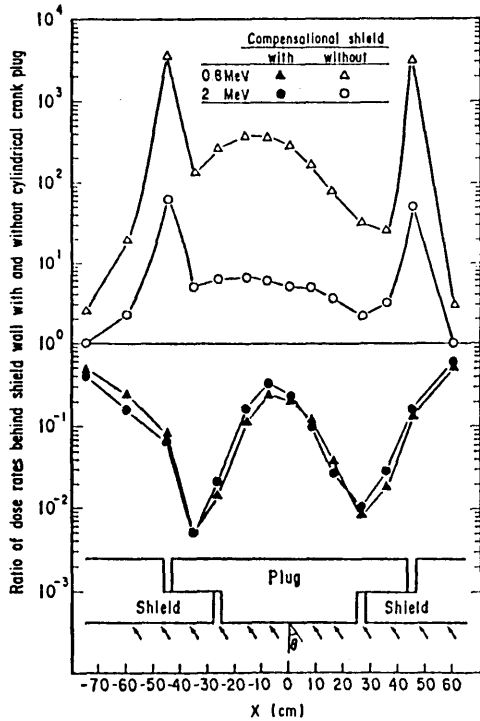
(a)  $T = 75 \text{ cm}, \theta = 0^\circ$



(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)



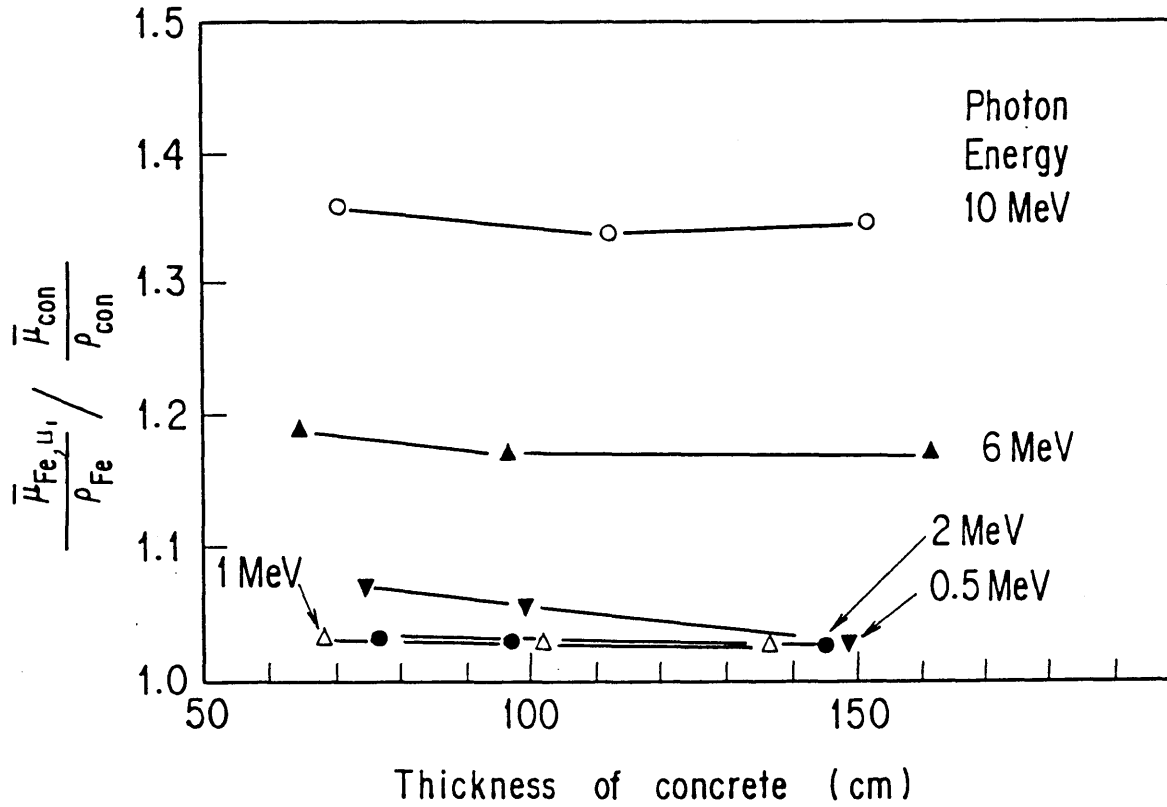


Fig.6.12 Ratio of  $\bar{\mu}_{Fe,U,Pb} / \rho_{Fe}$  to  $\bar{\mu}_{con} / \rho_{con}$  as a function of concrete thickness for shield wall with offset slit and cylindrical offset plug.

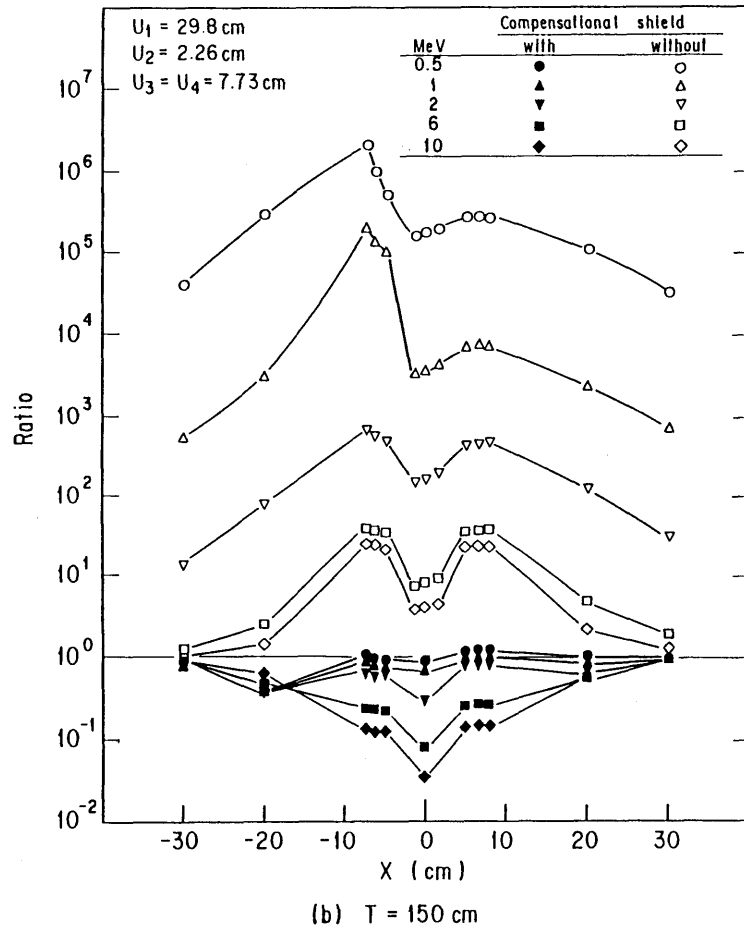
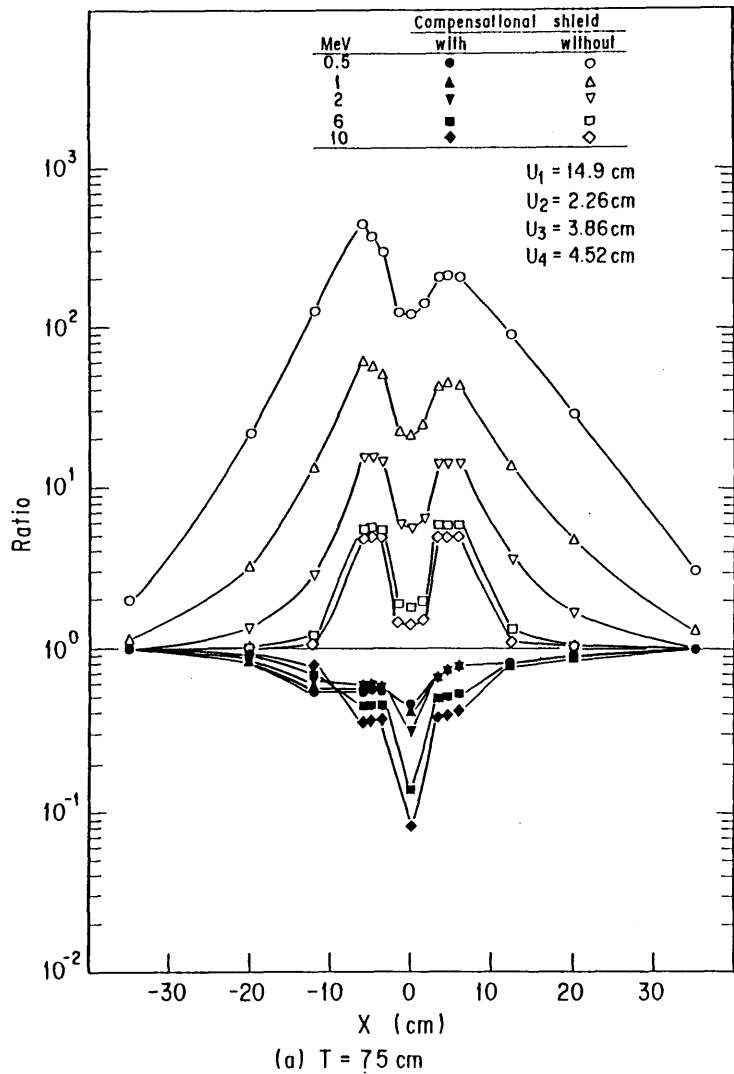
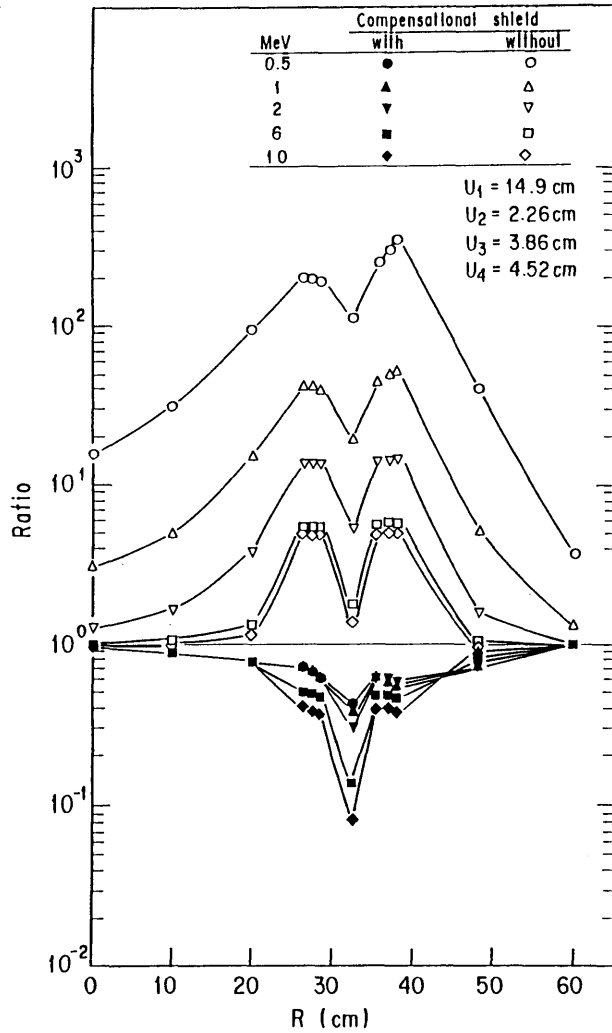


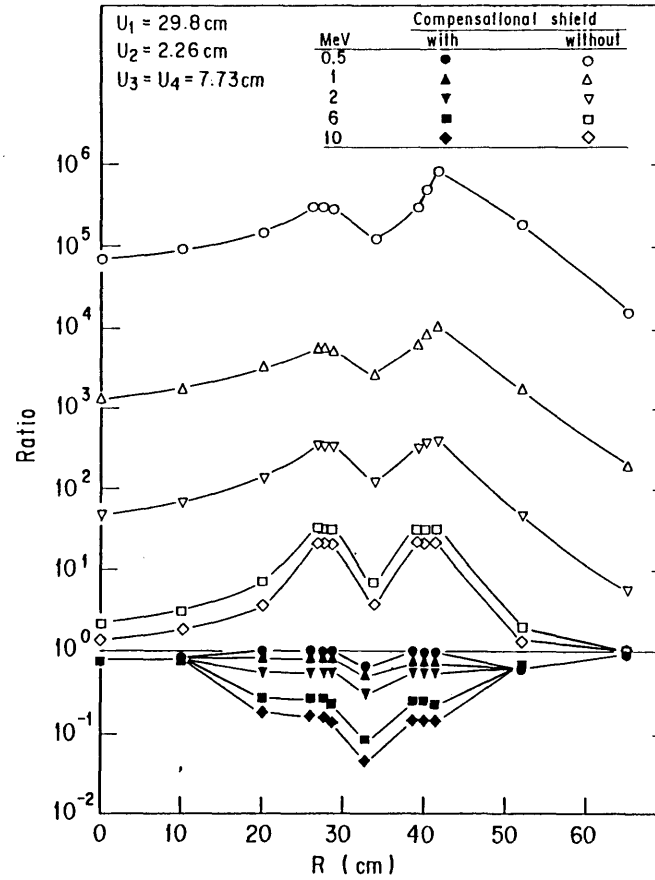
Fig.6.13(a), (b)

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  $\theta=0^\circ$ .



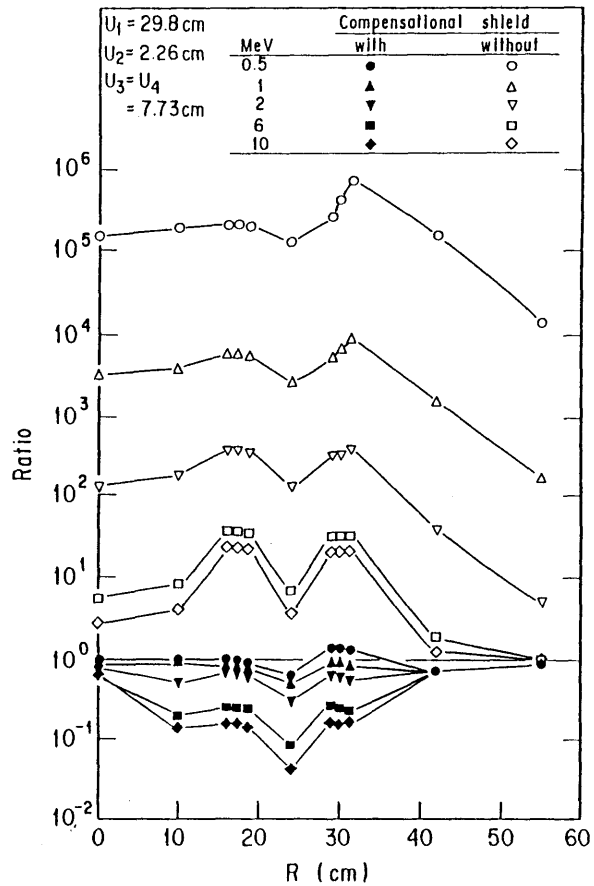
(a)  $T = 75 \text{ cm}$ ,  $D_1 = 50 \text{ cm}$  and  $D_2 = 69 \text{ cm}$

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)

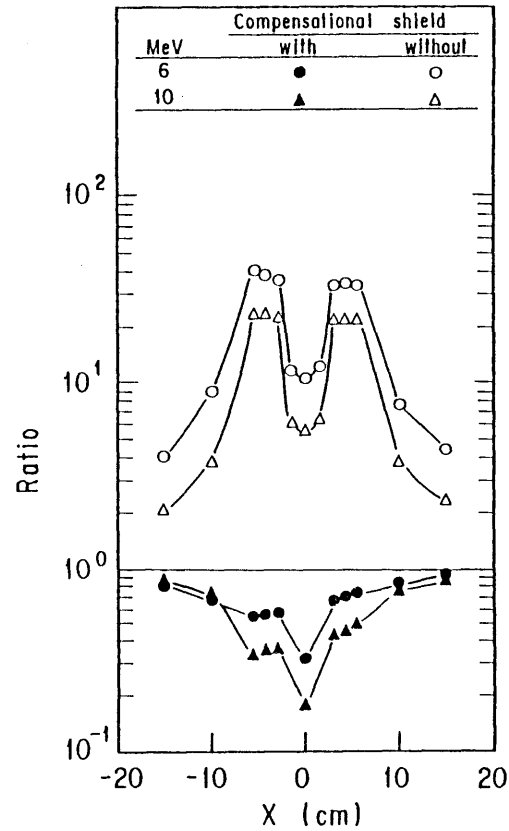


Fig. 6.15 Ratio of dose rates behind shield wall with and without offset slit calculated by G33-GP code for mono energy gamma-ray source. Here,  $T=150$  cm,  $W=5$  cm,  $\theta=0^\circ$ ,  $U_1=25$  cm,  $U_2=U_3=1.79$  cm and  $U_4=3.58$  cm.

### 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。

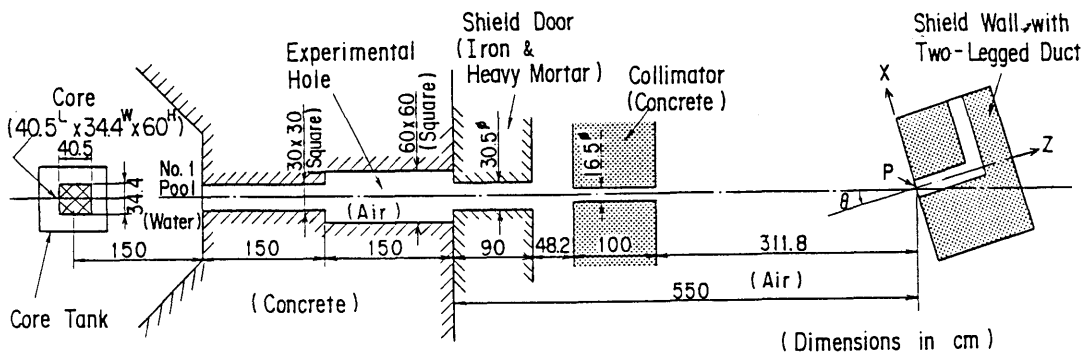
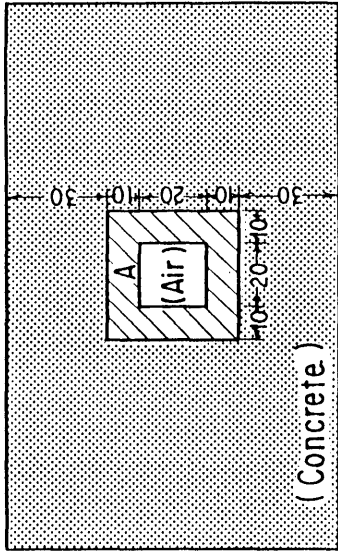
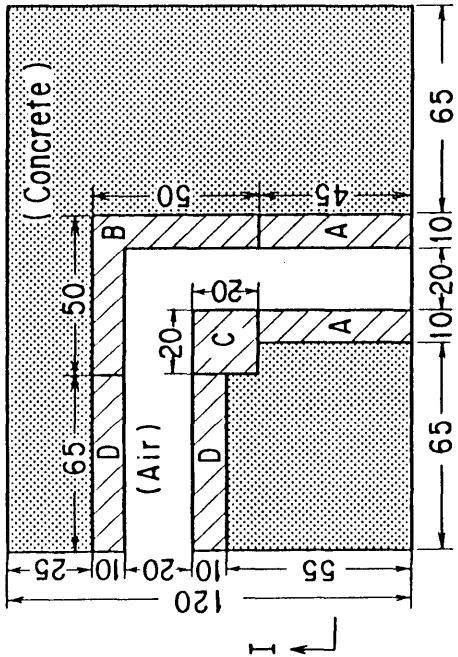


Fig.7.1 Experimental arrangement for gamma-ray streaming through two-legged duct

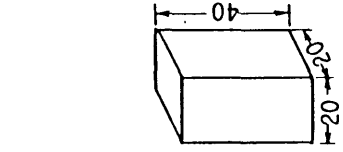


( Section I - I' )

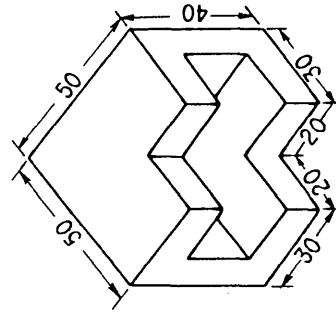
( Dimensions in cm )



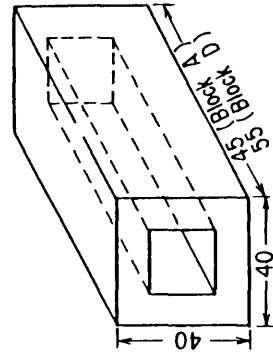
( Plan View )



( Block C )



( Block B )



( Blocks A and D )

Fig.7.2 Shield blocks around two-legged duct

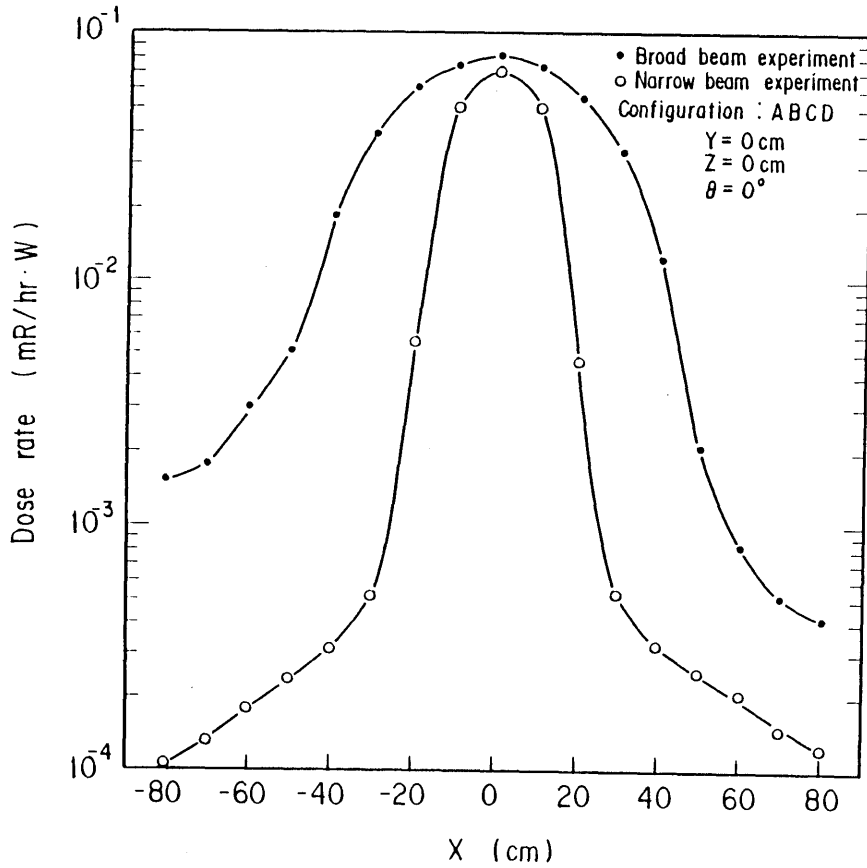


Fig.7.3 Dose rate distribution in front surface of shield wall with two-legged duct

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



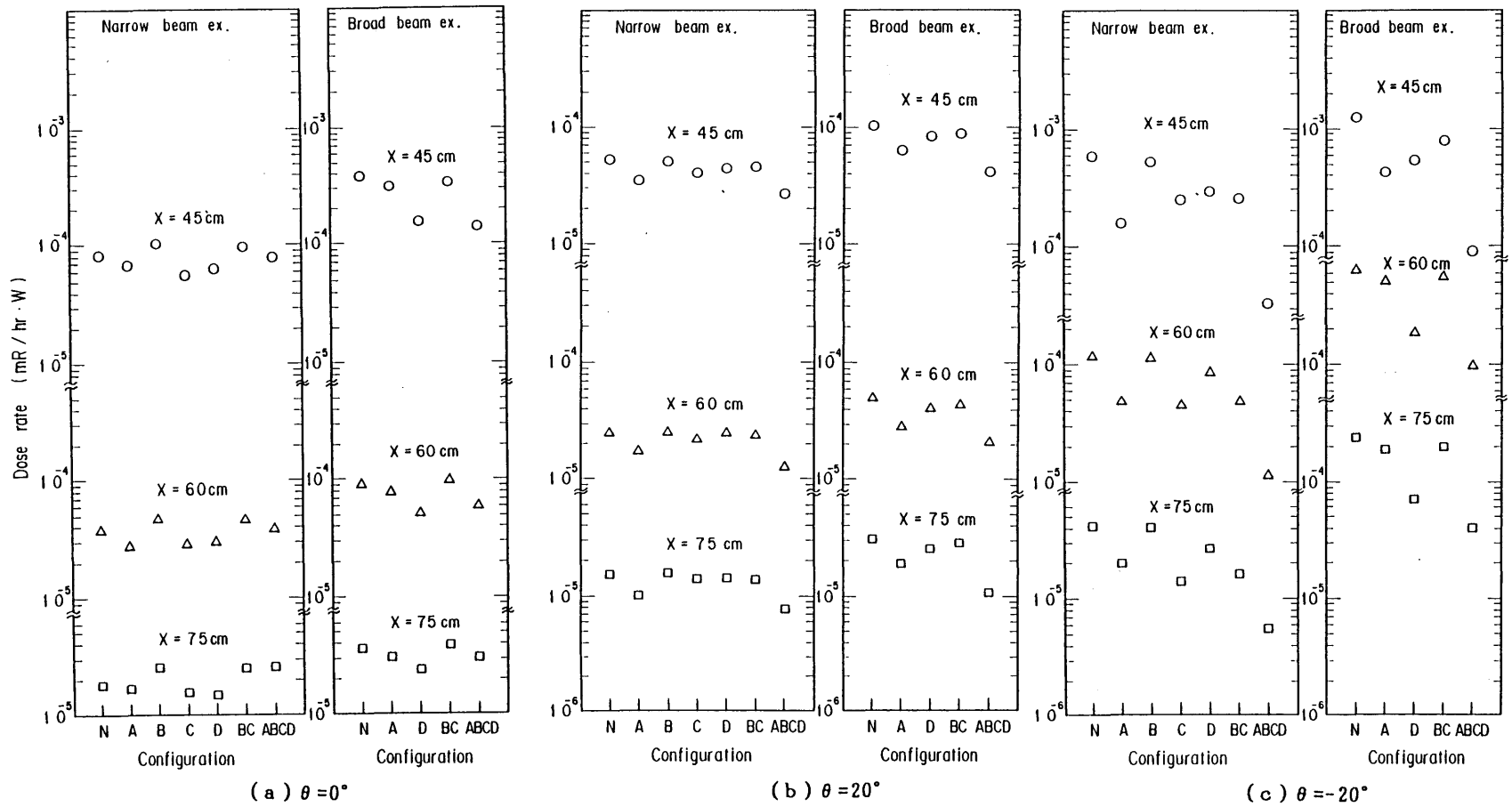


Fig.7.4(a)~(c) Dose rate in second leg

### 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。

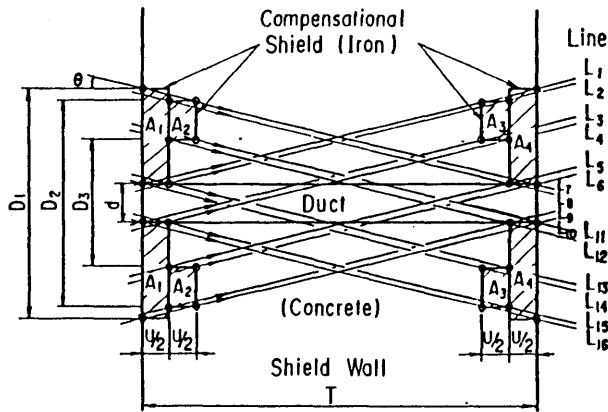


Fig.8.1 Example of compensational shield for straight duct and critical directions of incident gamma rays

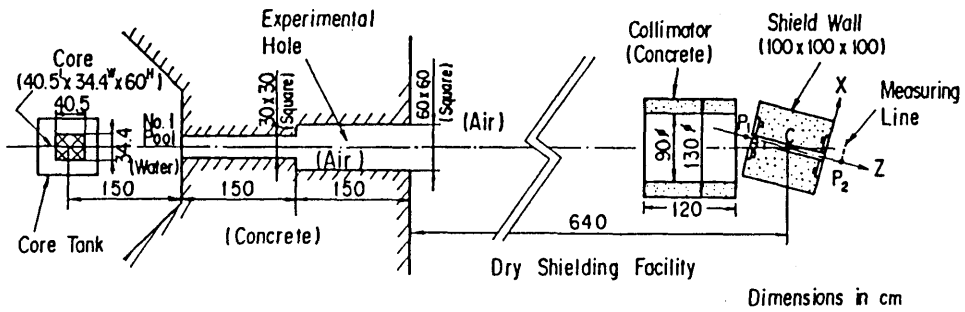


Fig.8.2 Experimental arrangement of straight duct with compensational shield

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

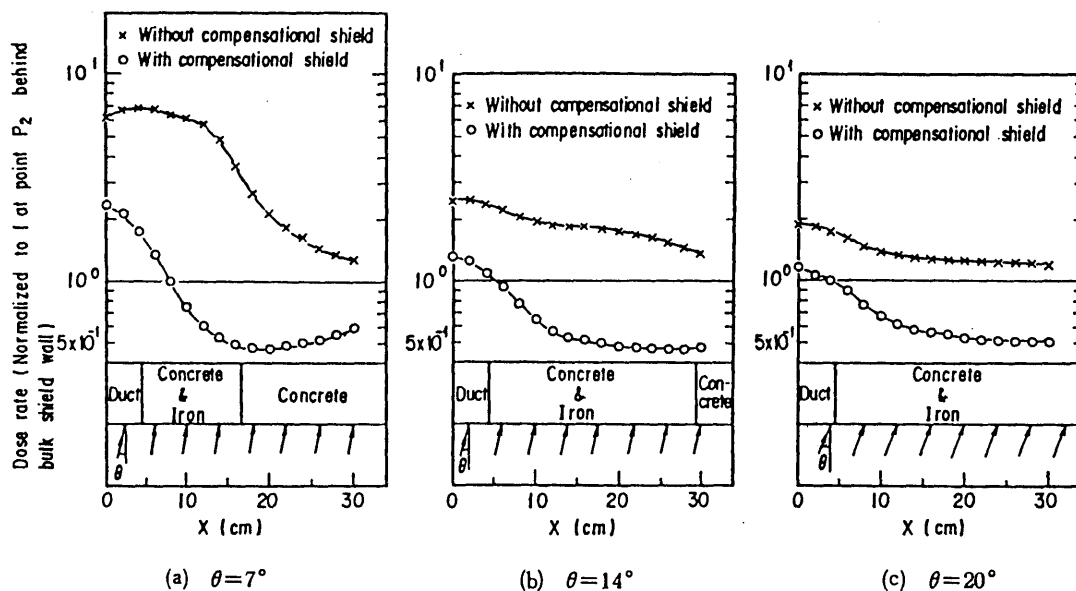


Fig.8.3 Measured dose rates behind shield wall with straight duct with and without compensational shield

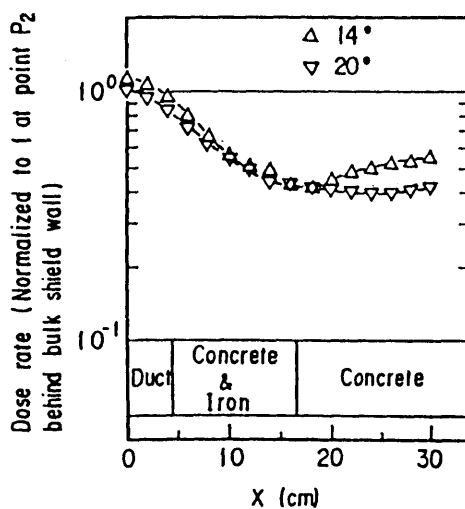


Fig.8.4 Measured dose rates behind shield wall with straight duct with compensational shield designed for  $\theta = 7^\circ$

### 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



Table 9.2 Density and hydrogen content  
of shielding materials

Material	Hydrogen content $\text{g/cm}^3$	Density $\text{g/cm}^3$
Polyethylene <sup>(a)</sup>	0.14	0.96
Concrete <sup>(a)</sup>	0.022	2.26
Zirconium Hydride <sup>(a)</sup>	0.10	5.6
Water	0.11	1.0

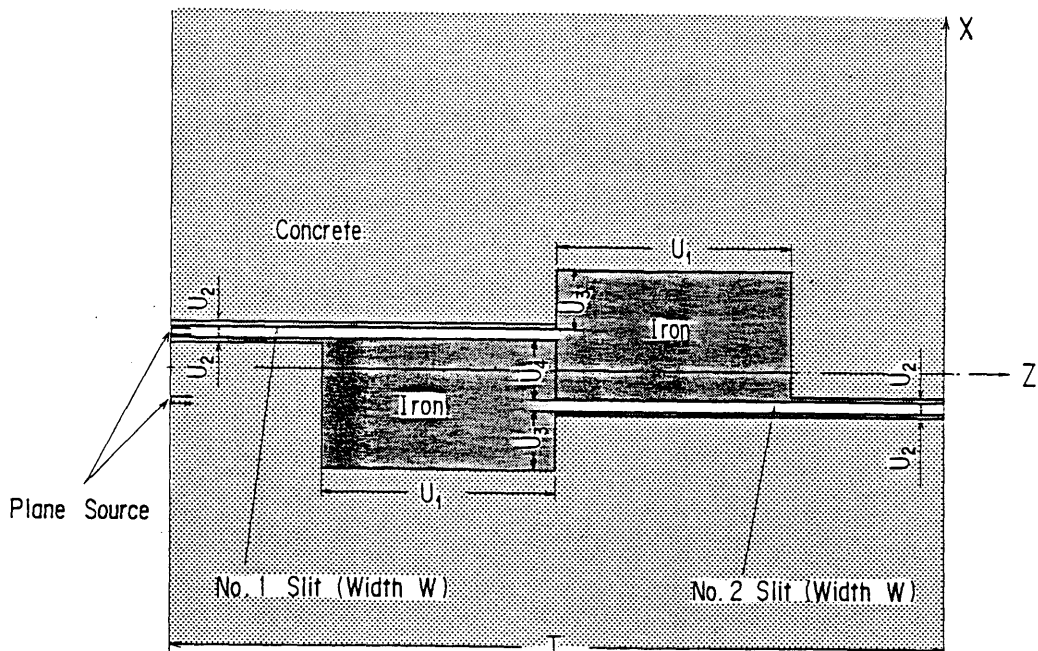


Fig.9.1 MORSE-GG calculational geometry of concrete wall with offset slit  
with iron compensational shield for fast neutrons

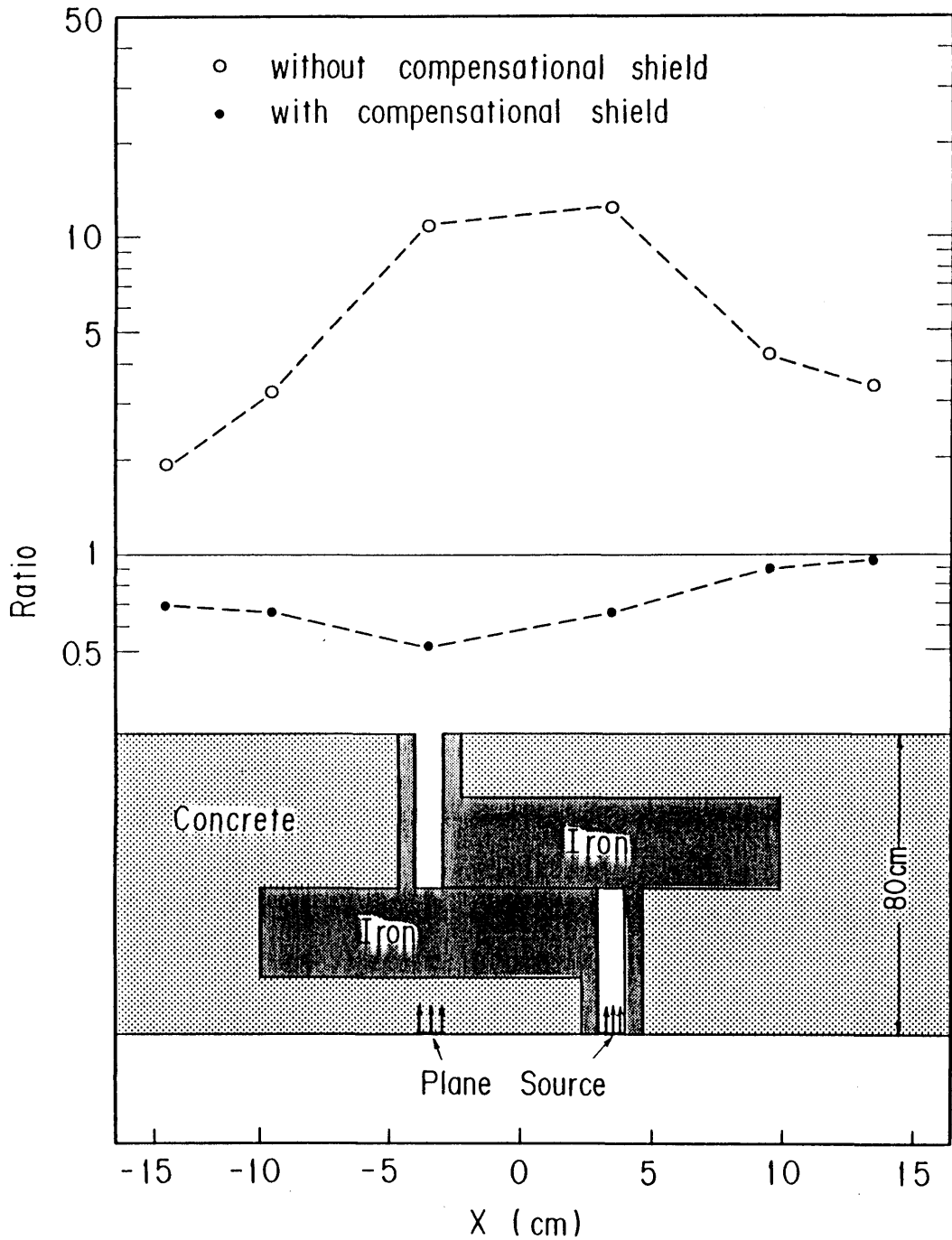


Fig.9.2 Ratio of fast neutron dose rates ( $>0.2\text{MeV}$ ) behind shield wall with and without offset slit calculated by MORSE-GG code for 14MeV neutron source.  $T=80\text{cm}$ ,  $W=1\text{cm}$ ,  $U_1=24.3\text{cm}$ ,  $U_2=0.7\text{cm}$ ,  $U_3=U_4=6\text{cm}$ .

### 第10章 補償遮蔽材料を鉛とした場合の本設計手法の適用性

鉛の線吸収係数を  $\mu_{Pb}$ 、第3章で定義された平均減弱係数を  $\bar{\mu}_{Pb}$ 、再生係数を  $B_{Pb}$ 、密度を  $\rho_{Pb}$  とする。鉛とコンクリートの平均減弱係数の関係を第3章で述べた方法で求めると、

$$\frac{\bar{\mu}_{Pb}}{\rho_{Pb}} / \frac{\bar{\mu}_{con}}{\rho_{con}} = \frac{\frac{\mu_{Pb}}{\rho_{Pb}}}{\frac{\mu_{con}}{\rho_{con}} + \frac{1}{\rho_{con} T} \ln\left(\frac{B_{Pb}}{B_{con}}\right)} \quad (10.1)$$

となる。

ガンマ線の壁入射エネルギー0.5、1、2、6、10MeVについて、コンクリート遮蔽壁厚75～150cmに相当する平均自由行程における(10.1)式の値をFig.10.1に示す。上記のエネルギーおよび平均自由行程の範囲において  $\frac{\bar{\mu}_{Pb}}{\rho_{Pb}} / \frac{\bar{\mu}_{con}}{\rho_{con}}$  は1.1～2.4の範囲にある。上記の計算において、線吸収係数にはNSRDS-NBS 29<sup>(22)</sup> 記載の値を、再生係数にはPALLASコードで計算された点等方線源に対する再生係数<sup>(23)</sup>を用いた。同再生係数には制動輻射の効果が含まれている。

補償遮蔽体の寸法の計算では安全側に  $\bar{\mu}_{Pb}$  の最小値

$$\bar{\mu}_{Pb} = 1.1 \frac{\bar{\mu}_{con}}{\rho_{con}} \rho_{Pb} \quad (10.2)$$

を用いる。

鉛の補償遮蔽体を有する遮蔽壁の遮蔽性能を直スリット付き遮蔽壁について以下に示す。

鉛の補償遮蔽体は鉄の補償遮蔽体の場合と同じくスリット壁に設け、その厚さUは第3章に示した方法により

$$U \geq \frac{\rho_{con} W}{1.1 \rho_{Pb} - \rho_{con}} \quad (10.3)$$

から求める。

G33-GPコードで、鉛の補償遮蔽体を有する直スリット付き遮蔽壁とバルクと遮蔽壁の背面の線量率を計算し、両者の比をFig.10.2に示す。計算は、入射ガンマ線を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、の2種類とし、点等方線源を遮蔽壁から10km離れた点に置き、入射角  $\theta = 15^\circ$ 、遮蔽壁厚  $T = 75, 150\text{cm}$  として行った。スリット幅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、JRR4線源の場合スリット幅  $W = 10\text{mm}$ 、補償遮蔽体の厚さ  $U = 3\text{mm}$ 、Barnwell線源の場合  $W = 7\text{mm}$ 、 $U = 2\text{mm}$  とした。線量率の比は一部で1.5程度となる箇所も見られるが概ね1以下であり、鉛を補償遮蔽材料とすることの適用性が示された。

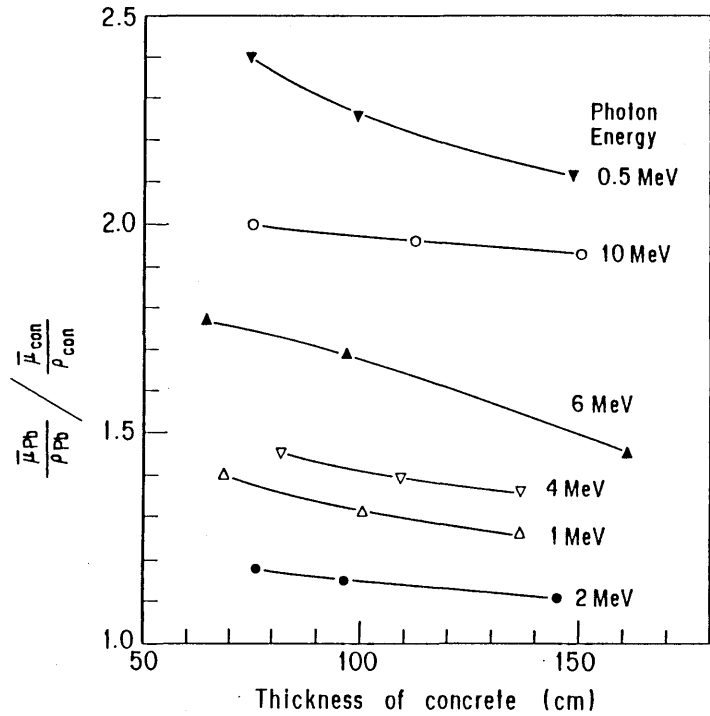


Fig.10.1 Ratio of  $\bar{\mu}_{Pb} / \rho_{Pb}$  to  $\bar{\mu}_{con} / \rho_{con}$  as a function of concrete thickness

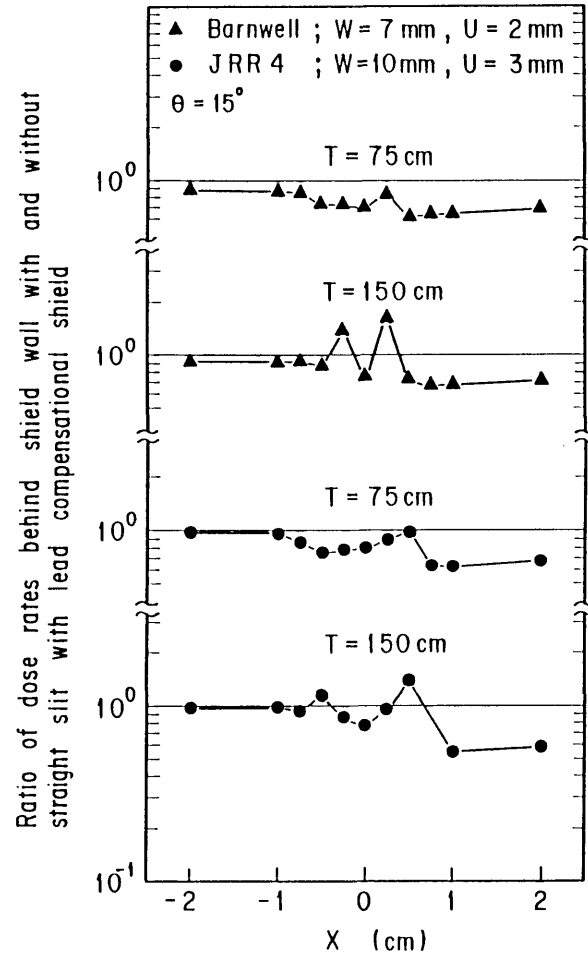


Fig.10.2 Ratio of dose rates behind shield wall with and without straight slit with lead compensational shield using G33-GP code for gamma-ray issuing from PWR spent fuel in remote process cell of Barnwell reprocessing plant and from the experimental hole of JRR4

## 第11章 考察および結論

遮蔽壁にスリット、ダクト等の不規則形状部がある場合、その遮蔽性能は一般にバルク遮蔽壁でのそれより劣る。本論文は、ガンマ線遮蔽用コンクリート壁に設けられる代表的な不規則形状部である直ダクト、直スリット、斜ダクト、斜スリット、オフセットスリットおよび段付き円柱プラグについて、これらの不規則形状部による遮蔽性能の低下を補い、コンクリート壁厚を変えないに壁背面の線量率をバルク遮蔽壁での値と同程度にさせるための壁内に組み込む鉄製補償遮蔽体の設計手法を提案した。本手法の特徴は、補償遮蔽体の形状を、入射ガンマ線のエネルギーには依存せず、コンクリートと鉄の密度、間隙幅、ダクト直径および遮蔽壁厚に基づいて定める点にある。

本手法は、再処理施設、ホットラボ施設、原子炉施設への適用が十分可能なように、コンクリート遮蔽壁の厚さは75~150cm、遮蔽壁に入射するガンマ線は0.5~10MeVが主な成分である任意のスペクトルを対象とした。直ダクトおよび斜ダクトの直径は、遮蔽壁厚、入射角およびバルク遮蔽壁での線量率の減衰率から第3章に示した方法にて定められる許容値以下で、且つ実施設における寸法を参考にして15cm以内のものを対象とした。オフセットスリット、段付き円柱プラグにおける間隙幅は実施設における寸法を参考にして0~5cmを対象とした。直スリット、斜スリットにおける間隙幅は第3章に示す許容値以下で且つ10mm以内を対象とした。

本手法に基づいて設計・製作した補償遮蔽体を有する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およびオフセットスリット付き遮蔽壁を研究用原子炉JRR4の散乱実験室に設置し、原子炉からのガンマ線と同遮蔽壁に入射させた実験により、同遮蔽壁はバルク遮蔽壁と同等の遮蔽性能を有することを示した。ただし、上記実験は一部の不規則形状を扱ったのみであるので、種々の不規則形状および入射エネルギーについて本手法の有効性を検証するため、まず上記実験およびJRR4散乱実験室で行われたその他の不規則形状部付き遮蔽壁(直ダクト、複数の直ダクトおよび1回屈曲ダクト付きの各遮蔽壁)の実験をG33コードで解析し、同コードは不規則形状部付き遮蔽壁の遮蔽解析に適用できることを明らかにし、次いで本手法適用範囲内の種々の不規則形状および入射エネルギーについて、補償遮蔽を有する不規則形状部付き遮蔽壁の遮蔽性能はバルク遮蔽壁のそれと同程度にできることをG33コードによる計算で示した。ただし、遮蔽壁背面の不規則形状部出口等においては、局所的にバルク遮蔽壁の線量率を超える箇所もあるが、不規則形状部出口周囲を含めた線量率の平均では、バルク遮蔽壁と同等あるいはそれ以上の遮蔽性能となる。また、入射エネルギーが明らかな場合は、より適切な補償遮蔽寸法で設計が行えることを示した。

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、実際の施設で行われているように、線源はこれらの不規則形状部出口を直視しない位置に置かれるとした。したがって、ホットラボ施設、再処理施設のように、セル内で線源の移動が行われる場合には、線源が不規則形状部出口を直視せず且つ第3章で示した入射角に対する条件を満たすようにハード面での対策を構しておくことが必要である。しかし、線源は不規則形状部出口を直視しない位置に置かれても、セル壁等で散乱したガンマ線の中には不規則形状部出口を直視するものも生じ、出口の線量率を高めると考えら

れる。ホットラボ施設におけるコンクリートセル壁散乱ガンマ線の効果を、直ダクト付き遮蔽壁についてG33-GPコードを用いて調べ、平行ビームに基づいて定めた許容ダクト直径以内であれば、ダクト出口の線量率はセル壁散乱ガンマ線による線量率を加えてもバルク遮蔽壁背面での最大線量率以下となることを明らかにした。また、大きい体積の線源については線源の一部がこれらの不規則形状部出口を直視する配置も本手法の対象に含め、大きい体積の線源の一部が不規則形状部出口を直視する配置においても、不規則形状部付き遮蔽壁の遮蔽性能をバルク遮蔽壁の遮蔽性能に等しくできることをG33-GPコードによる計算で示した。

本設計手法では、補償遮蔽を、ダクトについてはダクト管、スリットについてはスリット壁として設けた。ただし、他の補償遮蔽配置も可能である。例として、直ダクト付き遮蔽壁の前面部と背面部に補償遮蔽を埋め込む配置の設計手法を示し、原子炉を用いた実験により、同配置の補償遮蔽を有する直ダクト付き遮蔽壁についてもバルク遮蔽壁と同等の遮蔽性能を有することを示した。また、補償遮蔽材を鉛とした場合の補償遮蔽体厚さを本設計手法に基づいて求め、鉛補償遮蔽を有する不規則形状部付き遮蔽壁の遮蔽性能もバルク遮蔽壁のそれと同等になることをG33-GPコードを用いた計算により示した。

本設計手法は屈曲ダクトを対象としていない。ただし、直角に1回屈曲するダクト付きコンクリート遮蔽壁については、JRR4散乱実験室に同遮蔽壁を設置し、鉄製補償遮蔽体を1回屈曲ダクト周囲の種々の箇所においてダクト出口の線量率を測定し、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ダクト出口の線量率を効果的に減少させることのできることを明らかにした。なお、2回屈曲ダクトについては、補償遮蔽体の設計手法が西ドイツDIN規格にある。

本研究によって、1回散乱コードG33-GPは不規則形状部付き遮蔽壁の解析に有力な手法であることが明らかにされた。したがって、本設計手法による補償遮蔽構造と異なる構造を採用する場合は、同コードによってその遮蔽性能を求めることができる。

さらに、中性子用コンクリート遮蔽壁に対する鉄製補償遮蔽の可能性を、14MeV中性子をオフセットスリット付き遮蔽壁に入射させたMORSE-GGモンテカルロ計算によって調べ、補償遮蔽により遮蔽壁背面の0.2MeV以上の速中性子線量率をバルク遮蔽壁背面での値以下に減衰させることのできることを示し、中性子遮蔽壁についても本設計手法は有効であることを明らかにした。なお、中性子遮蔽壁については、遮蔽壁透過放射線と不規則形状部をストリーミングする放射線の両方に注目し、ダクト・スリットの周囲に、それぞれの遮蔽目的に合せて、速中性子除去断面積の大きい物質、水素含有量の多い物質、熱中性子断面積の大きい物質、アルベドの小さな物質、捕獲ガンマ線の少ない物質、放射化の少ない物質等を単独であるいは組み合わせて埋め込むことにより、各目的に合った遮蔽効果が得られると推定される。

本研究で得られた成果は、Fig.1.1, 2.1(a), (b), (c)に示すようなホットラボ施設、再処理施設、原子炉施設の遮蔽壁接合部やダクトの遮蔽設計に役立てられる。即ち、ホットラボ施設や再処理施設では、遮蔽壁の表面に凹凸がないこと、遮蔽壁付近に機器の設置が容易であることと、不規則形状部付き遮蔽壁の遮蔽性能をバルク遮蔽壁と同程度にするとともに遮蔽壁の厚さの増加を抑えることが要求され<sup>(50)</sup>、原子炉施設においても船用炉

のように船内の狭隘な場所に遮蔽壁が設けられる場合は上記の条件が要求される<sup>(a)</sup>からである。また、従来は線源となる機器の配置設計やダクト・スリットの配置設計において、放射線ストリーミングを極力抑えるように線源となる機器とダクト・スリットを離すため、ダクト等の設置場所が限定され、多数のダクトが近接して配置されることによる近接効果が生じて遮蔽解析が複雑となる場合も見られるが<sup>(a),(a')</sup>、本手法を用いることにより配置場所の制限が緩和され、遮蔽設計および線源となる機器の配置設計やダクト・スリットの配置設計が容易となる。また、線源が大きい体積を有する場合は、線源の一部がダクトやスリットの出口を直視する配置においても、不規則形状部出口の線量率をバルク遮蔽壁のそれに等しくすることが可能であり、廃棄物貯蔵施設のように大きい体積の線源を扱う施設の遮蔽設計にも本手法は役立てられる。

本研究によって得られた成果のうち、直ダクト付き遮蔽壁、斜ダクト付き遮蔽壁および1回屈曲ダクト付き遮蔽壁の補償遮蔽構造については、それぞれ特許を出願した<sup>(50)~(52)</sup>。

今後の課題・展望として、ガンマ線遮蔽壁については、(i)ダクト直径、スリット幅、遮蔽壁厚、入射エネルギーについて、その適用範囲を拡大させるための研究、(ii)本研究以外の補償遮蔽材の研究、(iii)本研究以外の補償遮蔽構造の研究、(iv)遮蔽壁背面の線量率がバルク遮蔽壁での値の任意の倍数となることが許容された場合の補償遮蔽構造の研究、等が挙げられ、中性子遮蔽壁については、(i)補償遮蔽効果の実験的検証、(ii)速・中速・熱中性子および中性子線量率のそれぞれを対象とした補償遮蔽体の研究、等が挙げられ、原子炉施設のようにガンマ線と中性子を対象とした遮蔽壁については、ガンマ線と中性子の遮蔽に適した補償遮蔽体の研究が挙げられる。

## 謝 辞

本研究は船舶技術研究所と日本原子力研究所の複雑形状遮蔽設計法に関する共同研究の一部として行なったものである。本研究の全般にわたりご助言とご指導をいただいた船舶技術研究所竹内清東海支所長、また研究遂行にあたりご助言とご激励をいただいた布施卓喜前原子力技術部長、伊従功原子力技術部長に篤く感謝いたします。本研究で実施した実験と計算の一部は清水建設(株)沼田茂生、斎藤鉄夫両研究員と共同で行ったものであり、両研究員に感謝いたします。また実験を実施するうえで原子炉を運転して下さった日本原子力研究所 J R R - 4 の職員の皆様に感謝いたします。

本研究をまとめるにあたり懇篤なるご助言とご指導をいただいた東京大学中沢正治教授に篤い感謝の意を表します。

## 附録1 ガンマ線遮蔽用コンクリート壁内の2回屈曲中空ダクトと壁内に組み込む補償遮蔽体に関する設計手法

西ドイツDIN規格(DIN 25427: Auslegung von zweifach geknickten gasgefüllten Kanälen in Abschirmwänden aus Beton gegen Gammastrahlung<sup>(18)</sup>)には、ガンマ線遮蔽用コンクリート壁内に設置する2回屈曲中空ダクトと壁内に組み込む補償遮蔽体に関する設計手法がある。同規格に基づき、2回屈曲ダクトと補償遮蔽体の設計手法を述べる。

この規格では、ホットラボラトリや再処理施設等の遮蔽壁内に設置する2回屈曲中空ダクトが遮蔽上の要求を満足しているかどうかの評価、並びにダクトの断面積、ダクト脚の長さ、コンクリート壁内の補償遮蔽の寸法等の設計上のパラメータの変更に対する遮蔽上の効果の評価を特別の遮蔽計算を行うことなしに示す。この規格においては、簡単な式および図を含むが、これは実際に存在する可能性の全てを網羅しているわけではない。設計余裕の非常に少ない極端なケースにおいては、実際に存在する可能性の調査のため、正確な遮蔽性能計算を行うことが望ましい。

### 1. 適用範囲

この規格は、原子炉施設、核物質取扱施設、ホットラボラトリ等において、ガンマ線遮蔽のための普通コンクリート壁に、直角に2回屈曲した矩形または円筒形の中空ダクトを組み込んだ配置にて、必要な鉄の補償遮蔽体の形状の設計に関するものである。中性子に対しては、この規格は適用されない。

### 2. 目的

この規格はダクト寸法と必要な補償遮蔽体の形状寸法に対する指針を与えるものである。ここで補償遮蔽体は、あらゆる方向から入射する放射線を遮蔽壁の後方において、バルク遮蔽の後方での線量率に対する増加比 $x$ で定められた局所的に高い線量率にまで減衰させるためのものである。

### 3. 概念

#### 3.1 コリメートされた放射線

コリメートされた放射線とは、近似的に平行な方向の放射線であり、実験孔やコリメータを通過する放射線あるいは遠く離れた線源からの放射線によって生じる。

#### 3.2 点線源放射線

点線源放射線とは、等方放射の線源で且つその大きさがダクトの幅ないし高さの $1/2$ 以下であるものからの放射線である。

#### 3.3 準等方放射線場

準等方放射線場とは、自己吸収のある大きな体積線源の表面において生じる放射線場に相当する。

注意：これは、その強度が遮蔽壁の法線と放射線との角度のコサインに比例するように放射線を放出する平面線源に相当する。

#### 3.4 ダクト散乱放射線

ダクト散乱放射線とは、ダクト壁での散乱によってダクトに沿って進行する放射線である。



### 3.5 入口開口部

この規格における入口開口部とは線源側の開口部である。

### 3.6 出口開口部

この規格における出口開口部とは線源と反対側の開口部である。

### 3.7 壁減弱係数

この規格における壁減弱係数  $S$  とは、バルク遮蔽壁において線源側の壁表面における線量率と線源と反対側の壁表面における線量率との比である。

### 3.8 ダクト減弱係数

この規格におけるダクト減弱係数  $S_s$  とは、ダクト入口での線量率とダクト出口でのダクト散乱放射線による線量率との比である。

### 3.9 平均減弱係数

この規格における平均減弱係数  $\bar{\mu}$  とは、与えられた遮蔽壁の厚さ  $t$  と壁減弱係数  $S$  によって次のように定義される。

$$\bar{\mu} = \frac{1}{t} \ln S$$

### 3.10 微分減弱係数

この規格における微分減弱係数  $\mu^*$  とは、与えられた遮蔽壁の厚さ  $t$  と壁減弱係数  $S$  によって次のように定義される。

$$\mu^* = \frac{d \ln S}{dt}$$

### 3.11 補完係数

この規格における補完係数  $G$  とは、バルク部と等しい遮蔽性能を得る目的でコンクリート壁内に組み込む鉄層の厚さを求めるために、放射線の進行方向にある空洞部の寸法に乗じるファクターである。

### 3.12 局所的な線量率の増加比

この規格における局所的な線量率の増加比  $\kappa$  とは、遮蔽壁の背面において、ポイド(透過に対する遮蔽欠損)に対する補償が十分でないことによって生じる線量率の増加  $\kappa_g$  やダクトストリーミングによって生じる線量率の増加  $\kappa_s$  をバルク遮蔽壁背面の線量率で割った値である。

注意：全体としての線量率の増加比とは、ポイドとしての補償が十分でないことによって生じる線量率の増加比とダクトストリーミングによって生じる線量率の増加比との和である。

### 3.13 壁厚 $t$

バルク遮蔽壁の厚さである。Fig.A.1, A.2参照。

### 3.14 横ダクトの長さ $l$

遮蔽外壁と平行に置かれたダクト部の脚長である。

### 3.15 ダクトの横幅 $w$

Fig.A.2(a)参照。

3.16 ダクトの縦幅  $h$

Fig.A.2(b)参照。

3.17 ダクトの断面積  $f$

注意：円形の断面積  $f = \pi r^2$  は等断面積の矩形に置き換える。 $w = 2r$ 、 $h = 0.5 \cdot \pi \cdot r = 1.57r$  とする。

3.18 補償遮蔽体の厚さ  $u$

遮蔽壁内に組み込まれる鉄の補償遮蔽体の厚さである。

3.19 補償遮蔽体の長さ  $n$

横ダクトに沿って横ダクトの端から設置する鉄の補償遮蔽体の長さである。

3.20 突出部の幅  $c$

ダクトの外側に設置する鉄の補償遮蔽体の幅である。

3.21 入口・出口開口ダクトの頂部囲い遮蔽の高さ  $k$

入口・出口開口ダクトの頂部(屈曲部)における囲い遮蔽の高さである。

3.22 点線源との距離  $p$

遮蔽壁と点線源との距離である。

4. 前提

4.1 エネルギースペクトル

入射ガンマ線としては、0.5MeVから10MeVの範囲の光子が線源側の遮蔽外壁の線量率に決定的に寄与するようなスペクトルを仮定する。

4.2 放射線場

本設計においては、次の3つの放射線場を考える。

点線源放射線場

コリメートされた放射線場

準等方な放射線場

問題とする放射線場が、この3つのタイプの放射線場に直接的に一致しない場合は、この3つのうちの最も近い放射線場に基づくとし、本手法による補償遮蔽体の寸法値のうちの最大値を用いる。

4.3 ダクトの形状

4.3.1 ダクトの形状と想定される鉄の補償遮蔽体の形状はFig.A.1, A.2に縦横断面として示されている。同図には放射線のクリティカル方向と補償遮蔽体等の大きさを表わす記号も示す。横ダクトの軸は遮蔽外壁に平行で壁厚の半分の位置に配置される。

4.3.2 ダクト形状の条件は次の通りである。短形断面では縦と横の辺の長さの比  $h/w$  が2を越えないこと。半径  $r$  の円形断面では  $w = 2r$ 、 $h = 1.57r$  で評価すること。ダクトの横幅  $w$  と遮蔽壁厚  $t$  との比  $w/t$  は0.3を越えないこと。ダクト屈曲部で内側の屈曲半径が0.1 $t$  以下の場合には、鋭い角のある屈曲部として扱うこと。

4.4 補償遮蔽

ダクト部における遮蔽性能の低下を補償するため、ダクト壁近傍のコンクリート中に鉄板を組み込む。遮蔽壁の外側に補償遮蔽体を設けることや鉄以外の補償遮蔽体を用いることは対象外とする。壁が遮蔽上の要求よりも厚い場合、壁背面での局所的な線量率の増加比  $x$  は、遮蔽上の要求に基づいて定められた壁厚における線量率よりも適切な高い値を取ることが許される。

#### 5. 横ダクトの長さ $l$ の大きさ

横ダクトの長さ  $l$  を決定するクリティカルな方向である  $G_1$  (Fig.A.1参照)の放射線を十分に減衰させるには、横ダクトの長さが最小値  $l_g$  より大きいことが必要である。最小値  $l_g$  は  $w/t$  値、壁減衰係数  $S$  ないしこれに関係する壁厚  $t$ 、線量率の許容された増加比  $x_g$  および点線源の場合の線源距離  $p$  に依存する。

ダクトで散乱しダクト内をストリーミングする放射線を十分に減衰させるためには最小長さ  $l_s$  が要求される。この値はダクト断面積  $f$  と  $S$ 、 $t$ 、 $x$ 、 $p$  に依存する。

##### 5.1 横ダクトの長さの決定法について

Fig.A.3のカーブ  $a$  は  $w/t$  値と壁減衰係数  $S$  との関係を示す。

ここで  $l$  と  $l_g$  は  $x_s = 1$ 、 $x_g = 0$  では等しい値となる。この境界カーブの右上の領域では、必要とされる  $l/t$  値がダクト散乱放射線によって、即ち  $l_s$  によって定められる。この境界カーブの他の側の領域では、 $l/t$  は Fig.A.1の線  $G_1$  に沿って透過する放射線を十分に減衰させるための幾何学上の条件、即ち  $l_g$  によって定められる。カーブ  $b$  はストリーミングが決定的な場合、与えられた  $l/t$  値に対し、 $w/t$  と  $S \cdot (h/w)^2$  との関係を近似的に与える。

注意：上記以外の設計の可能性について

横ダクトが必要最小長さ以下の場合の設計は、DIN規格の対象とはなっていないが、次の方法が考えられる。

ダクトストリーミングが顕著な場合は、屈曲部を増加させるかあるいはダクト開口部に補償遮蔽を設ける。

幾何学上の原因で、Fig.A.1の線  $G_1$  に沿って透過する放射線が十分に減衰しない場合は、鉄の補償遮蔽をコンクリート壁の外側に設ける。

横ダクトの幾何学上の必要最小長さ  $l_g$  は、線  $G_1$  (Fig.A.1) が横切る屈曲部のエッジをコンクリートから鉄に置き換えることによって小さくできる。

##### 5.2 ダクトストリーミング放射線を十分に減衰させるために必要な横ダクト最小長さ $l_s$

###### 5.2.1 コリメートされた放射線

コリメートされた放射線では、ダクト内をストリーミングした放射線のダクト出口での線量率  $\dot{D}_a$  は入口の線量率を  $\dot{D}_e$  とすると、

$$\dot{D}_a = \dot{D}_e \frac{4 \cdot f^2}{l_s^2 l^2} \cdot \alpha_1 \alpha_2 B \left( \frac{w}{t} \right)$$

で与えられる。ここで、 $\alpha_1$ 、 $\alpha_2$  は両方の屈曲部における実効的な散乱ファクターであり、屈曲部での散乱によるエネルギーの変化の線量率への影響やダク

ト壁での多重散乱による線量率への影響を含めたものである。補正係数  $B\left(\frac{w}{t}\right)$  は入口と出口のダクト脚が  $w/t \geq 1/6$  と短い場合において、屈曲部のエッジを透過する放射線の効果を表わしている。

### 5.2.2 点線源放射線

ダクト壁からの距離が  $p$  である点線源からの放射線には次式が適用される。

$$\dot{D}_a = \dot{D}_c \frac{4 \cdot f^2}{l_s^2 t^2} \cdot \alpha_1 \alpha_2 B\left(\frac{w}{t}\right) \cdot \frac{1}{\left(1 + \frac{t}{2p}\right)^2}$$

### 5.2.3 横ダクトの必要最小長さに関する概算式

概算では次の値を用いる。(ここに示す値は上限値である。)

$$B = 1.5$$

$$\alpha_1 = \alpha_2 = \frac{0.5}{2\pi} \approx 0.08 = \alpha$$

$$\text{ないし、} \alpha_1 \cdot \alpha_2 \cdot B \approx 0.01$$

この値を用いることにより、壁減衰係数  $S$  が  $10^3$  以上で、線量率の増加比  $\kappa_s$  が許容される遮蔽壁に対し、ダクトストリーミング放射線を減衰させるために必要な横ダクトの最小長さ  $l_s$  の上限値が得られる。

#### 5.2.3.1 コリメートした放射線

$$l_{sk} = 2 \cdot \alpha \cdot \sqrt{B} \cdot \frac{f}{t} \cdot \sqrt{\frac{S}{\kappa_s}} = 0,2 \frac{f}{t} \cdot \sqrt{\frac{S}{\kappa_s}}$$

#### 5.2.3.2 点線源による放射線

$$l_{sp} = l_{sk} \cdot \frac{1}{1 + t/2p} = l_{sk} \cdot b\left(\frac{p}{t}\right)$$

$b\left(\frac{p}{t}\right)$  は Fig. A.5 から得られる。

### 5.3 線 $G_1$ に沿った放射線を十分に減衰させるために必要な最小長さ $l_g$ (Fig. A.1)

#### 5.3.1 線量率比の増加が局所的にも無い場合 ( $\kappa_g = 0$ )

コリメートされた放射線において、線  $G_1$  に沿った放射線による横ダクトの必要最小長さ  $l_g$  は、ダクト形状から

##### 5.3.1.1 $w/t \leq 0.1$ に対しては、

$$\frac{l_g}{t} \geq \sqrt[3]{4 \frac{w}{t}}$$

##### 5.3.1.2 $0.1 \leq w/t \leq 0.3$ に対しては、

$$\frac{l_g}{t} \geq 1 + \frac{w}{t} - \frac{1}{2 \left(1 + 2 \frac{w}{t}\right)^2}$$

がそれぞれ適用される。

横ダクトの必要最小長さは  $l_g/t$  の形で Fig. A.4 から得られる。同図では

$w/t$  を横軸としている。この他、同図には壁からの距離  $p=0$  の点線源で減弱係数  $S=10^3$  と  $10^5$  における  $l_g/t$  も示す。

### 5.3.2 線量率比の増加が局所的にある場合 ( $x_g > 0$ )

$x_g = 3$  (即ち、バルク部線量率300%に相当)まで線量率を局所的に増加させると、減弱係数  $S$  が  $10^3$  以上の場合において、横ダクトの長さ  $l_g$  を最大10%減らすことが可能となる。

遮蔽材の密度の不確かさやダクト出口におけるストリーミング成分量に対しては、線量率比の局所的な増加  $x_g$  に伴う  $l_g$  の減少に関する式は与えられない。

## 6. 横ダクトと開口部(縦ダクト)における鉄補償遮蔽体の設計 (Fig.A.1, A.2)

コンクリート壁内に深さ  $t_H$  の開口部が設けられた配置では、残りのコンクリート層内に厚さ  $t_{Fe} = G \cdot t_H$  の鉄層を組み込むことによって、遮蔽性能の低下は少なくとも相殺される。その際、補完係数  $G$  の最小値として

$$G = \frac{\rho_{Bet}}{\rho_{Fe} \cdot 0.94 - \rho_{Bet}}$$

が適用される

ここで、

$\rho_{Bet}$  : 普通コンクリートの密度

$\rho_{Fe}$  : 鉄の密度

$\rho_{Fe}$  でのファクタ0.94は鉄とコンクリートとの質量減衰係数および線量再生係数の違いを考慮したものである。例として、コンクリートの密度に普通コンクリートに対する  $\rho_{Bet} = 2.35 \text{ ton/m}^3$  を使い、鉄の密度に鑄鉄に対する  $\rho_{Fe} = 7.3 \text{ ton/m}^3$  を用いると、 $G = 0.52$  が得られる。

開口部の効果を完全に補償するのではなく、バルク遮蔽の線量率に対する局所的な線量率の増加比  $x_g$  を許容する場合は、完全な補償に必要な鉄の厚さ  $t_{Fe}$  から次の厚さの鉄層を減らすことができる。

$$\Delta t_{Fe} = 1.5 \frac{1}{\mu_{Fe}} \ln(1 + x_g)$$

ここで、 $\mu_{Fe}^*$  はバルク部コンクリート壁と同じ遮蔽性能を有する厚さの鉄層における鉄の微分減弱係数である。

$\Delta t_{Fe}$  は Fig.A.6 から許容された線量率の局所的な増加比  $x_g$  とエネルギー  $E$  の関数で読み取ることができる。

## 6.1 鉄補償遮蔽体の厚さ

### 6.1.1 線 $G_2$ に対応する鉄補償遮蔽体の厚さ $u_1$ (Fig.A.1)

$u_1$  は次式

$$u_1 = 0.5 \cdot G \cdot (t + w) - \Delta u_1$$

が適用される。

鑄鉄 (DIN 1691 鑄鉄) と普通コンクリートの場合は

$$u_1 = 0.26 \cdot (t + w) - \Delta u_1$$

である。

ここで、

$$\Delta u_1 = \frac{3}{2} \frac{1}{\mu_{Fe}^*} \cdot \ln(1 + x_g)$$

である。 $\Delta t_{Fe}$  ないし  $\Delta u_1$  は  $(1 + x_g)$  の関数として Fig.A.6 から得られる。

### 6.1.2 線 $G_3$ に対応する横ダクト前後の鉄補償遮蔽体の厚さ $u_2$ (Fig.A.1)

$u_2$  は次式

$$u_2 = 0.5 \cdot G \cdot w - \Delta u_2$$

が適用される。

鋳鉄と普通コンクリートの場合は  $u_2 = 0.26w - \Delta u_2$  である。

ここで

$$\Delta u_2 = \frac{3}{2} \frac{1}{\mu_{Fe}^*} \ln(1 + x_g)$$

ないし

$$\Delta u_2(x_g) = \Delta t_{Fe} = f(1 + x_g) \quad ; \text{ Fig.A.6 に対応}$$

## 6.2 鉄補償遮蔽体の厚さ方向以外の寸法

厚さ  $u_1$  の補償遮蔽体は横ダクトに沿って長さ  $n_1$  で組み込まれる。その他の3つの方向はダクト端部から外側に距離  $c_1$  まで組み込まれる。(Fig.A.1, Fig.A.2(b))

### 6.2.1 厚さ $u_1$ の補償遮蔽体の横方向の拡がり $c_1$

Fig.A.1の線  $G_4$  と Fig.A.2(b)の線  $G_4'$  に沿って透過する放射線の十分な減衰は Fig.A.7(a)の  $\frac{c_1}{t}$  と  $\frac{c_1}{w}$  の関係から求められる。

$c_1$  の値には次の近似式が適用される。

$$\frac{w}{t} \leq 0.1 \text{ では、 } c_1 = \frac{t}{2} \cdot \left[ \sqrt[3]{2 \frac{w}{t} - \frac{w}{t}} \right]$$

$$\frac{w}{t} \geq 0.1 \text{ では、 } c_1 = \frac{w}{2} + \frac{t}{5}$$

この横方向の拡がり  $c_1$  に対する最適化作業は行っていない。その理由は、この補償遮蔽体の終端部近傍でのみ、その遮蔽効果が顕著に変化するからである。

### 6.2.2 入口・出口開口ダクトの頂部囲い遮蔽

6.2.1で得られた横方向の拡がり  $c_1$  が長すぎる場合は、頂部の側面に高さ  $k$ 、厚さ  $2u_2$  の囲い遮蔽を組み込むことができる。必要な囲い遮蔽の高さ  $k$  は、

$$k = \frac{w + t}{2} \cdot \frac{c_1 - 2u_2}{w + c_1}$$

となる。

### 6.2.3 厚さ $u_1$ の補償遮蔽体の長さ $n_1$

厚さ  $u_1$  の補償遮蔽体は、横ダクトに沿って横ダクト端部からの長さ  $n_1$  で組み

込まれる。 $n_1$ は次の3つの式のうちの最も高い値が取られる。

$$n_1 = 2w \frac{w + u_1}{t - w} \quad (\text{線 } G_s)$$

$$n_1 = 2w \frac{w + u_2}{t - w - 2u_2} \quad (\text{線 } G_e)$$

$$n_1 = c_1 - 2u_2 \frac{w + c_1}{w + t} \quad (\text{線 } G_r)$$

6.2.4 厚さ  $u_2$  の補償遮蔽体において線  $G_e$  に対応する横方向の拡がり  $c_2$  (Fig.A.2(a))  
この値は

$$\frac{c_2}{t} = 0,28 \cdot \frac{w}{t} \cdot \sqrt{\frac{w}{t}}$$

により計算される。

$\frac{c_2}{t}$  は Fig.A.7(b) のカーブから得られる。

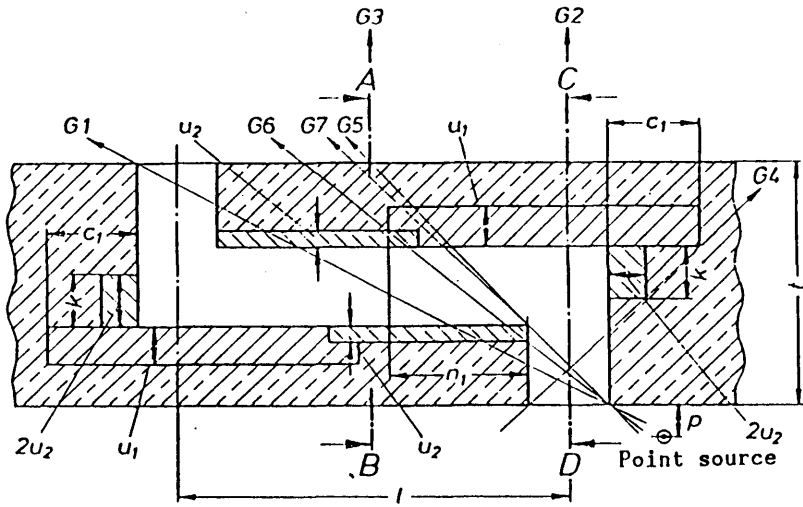


Fig.A.1 Double bent duct and critical directions of incident radiation

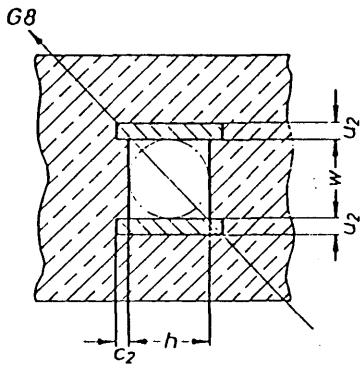


Fig.A.2(a) Cross section A-B

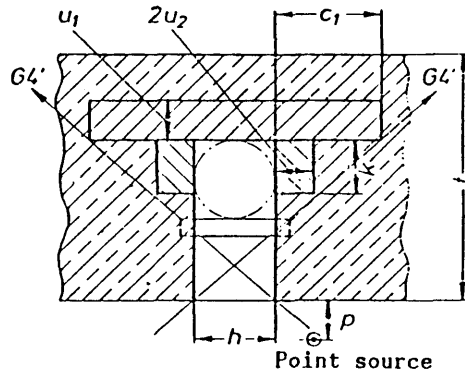


Fig.A.2(b) Cross section C-D

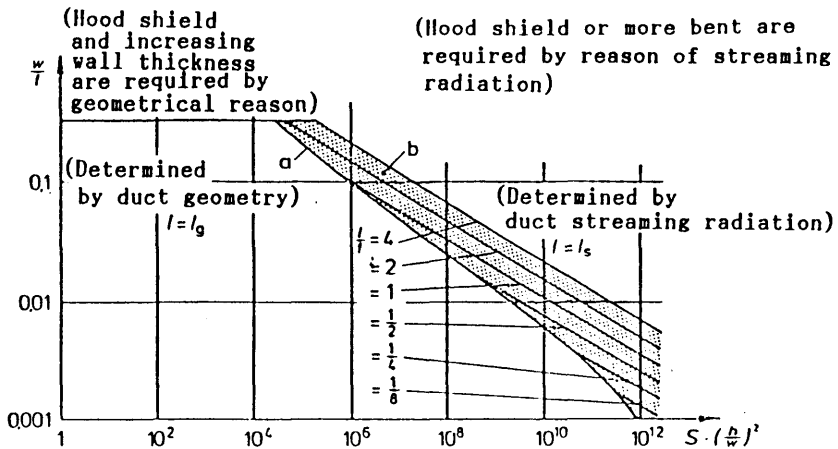


Fig.A.3 Validity range of formula 0 for collimated radiation



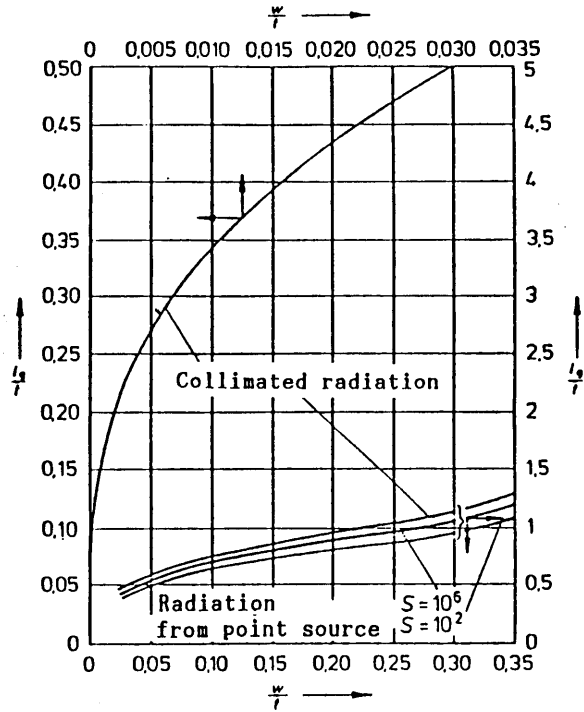


Fig.A.4 Relative transverse duct length  $l_g/t$  as a function of  $w/t$

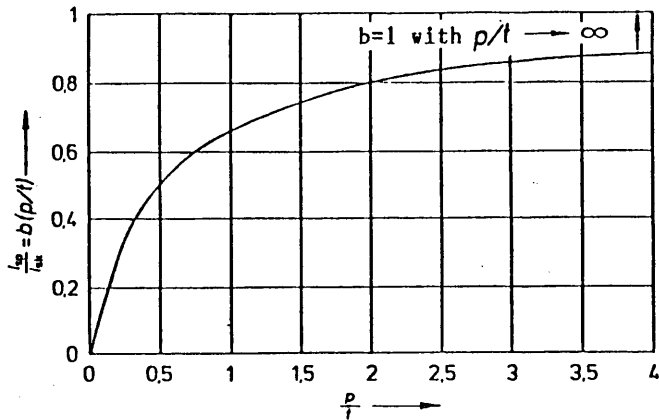


Fig.A.5 Quotient  $l_{sp}/l_{sk}$  as a function of  $p/t$

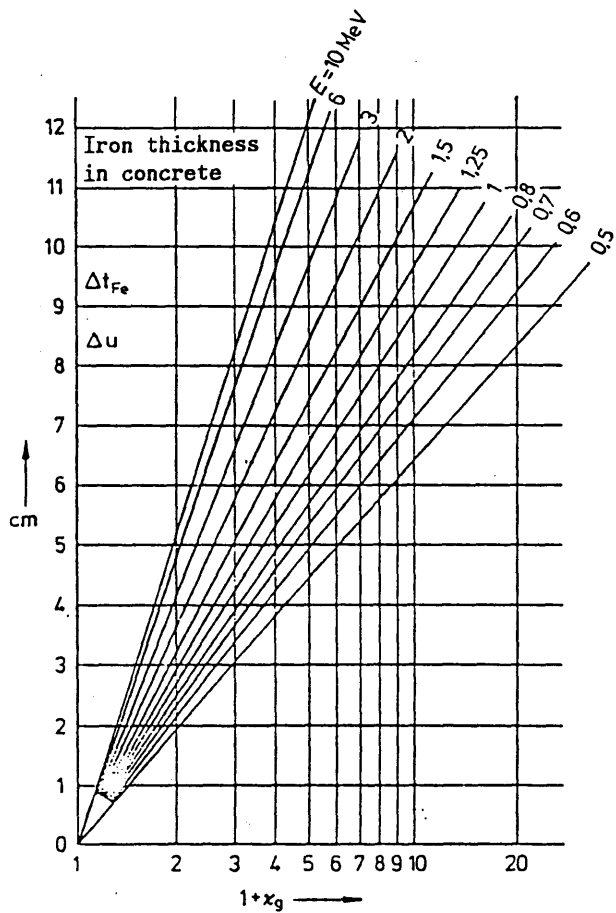


Fig.A.6 Thickness  $\Delta t_{Fe}$  as a function  $x_g$

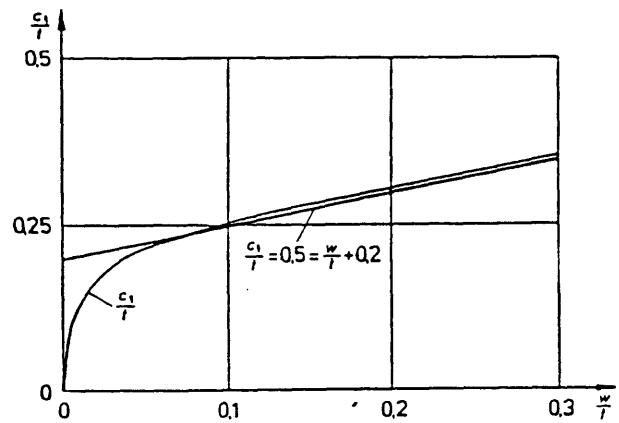


Fig.A.7(a)  $\frac{c_1}{r}$  as a function of  $w/t$

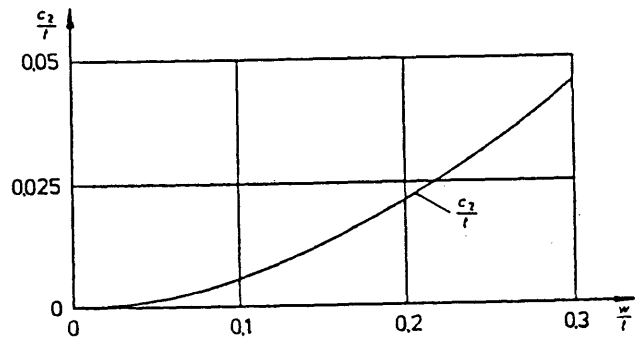


Fig.A.7(b)  $\frac{c_2}{r}$  as a function of  $w/t$

## 附録2 ダクト直径およびスリット幅の推奨値

本手法に基づく補償遮蔽を有する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、バルク遮蔽壁と同等あるいはそれ以上のガンマ線遮蔽性能を有するダクト直径および間隙幅の推奨値を示す。補償遮蔽体の設計条件は第2章に示した通りである。本推奨値は、第4章原子炉を用いた実験による本設計手法の検証、第5章実験値との比較によるG33コードの検証、第6章G33-GPコードによる本設計手法の検証、および新たに実施したG33計算に基づいて第3章に示した許容最大値を評価し直したものであり、本推奨値には実験値および計算値に含まれる誤差が考慮されている。

本推奨値は、(i)遮蔽壁に入射するガンマ線が平行ビーム、(ii)点線源、および(iii)体積線源に適用される。補償遮蔽を有する不規則形状部付き遮蔽壁の遮蔽性能の評価は、同遮蔽壁背面の線量率をバルク遮蔽壁背面の線量率と比較することによって行った。ここで、点線源と体積線源については、バルク遮蔽壁背面の線量率の最大値をバルク遮蔽壁背面の線量率として用いた。点線源と体積線源における入射角 $\theta$ の表示法は第3章に示した通りである。線源は不規則形状部出口を直視しないとする。ホットラボ施設のようにセル内に線源が置かれた場合、セル壁で散乱後に不規則形状部付き遮蔽壁に入射するガンマ線が不規則形状部出口の線量率に寄与する割合は、第3章に示したように小さいと考えられるが、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することが望ましい。もし、セル壁散乱ガンマ線の効果で不規則形状部出口の線量率がバルク遮蔽壁背面の線量率より高くなる場合は、第3章に示したような方法でセル壁散乱ガンマ線による線量率を減少させる。

本推奨値の導出に当たり、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。各不規則形状部についての補償遮蔽体厚さの計算式は次の通りである。

直ダクト付き遮蔽壁 : (3.11)式

直スリット付き遮蔽壁 : (3.20)式

斜ダクト付き遮蔽壁 : (3.25)式

斜スリット付き遮蔽壁 : (3.30)式

オフセットスリット付き遮蔽壁 : (3.33)、(3.35)、(3.38)、(3.41)式

段付き円柱プラグ付き遮蔽壁 : (3.33)、(3.35)、(3.38)、(3.41)式

上記補償遮蔽体厚さの計算において、コンクリートの密度は $2.30 \text{ g/cm}^3$ 、鉄の密度は $7.86 \text{ g/cm}^3$ を用いた。ただし、我国における普通コンクリートの多くは密度 $2.15 \sim 2.30$ の範囲にあり、本推奨値はこれらのコンクリートに対して適用可能である。

直ダクト付き遮蔽壁・斜ダクト付き遮蔽壁の最大ダクト直径の推奨値(1cm以上のダクト直径を対象とし、上限値は15cmとする。)をTable A.1、A.3に示し、直スリット付き遮蔽壁・斜スリット付き遮蔽壁の最大スリット幅の推奨値(上限値は1cmとする。スリット高さについての制限はない。)をTable A.2、A.4に示す。同表に示す値は、遮蔽壁厚 $T=75、100、125、150 \text{ cm}$ について、遮蔽壁への入射角を、直ダクト付き遮蔽壁の場合 $\theta=1.5^\circ、5^\circ、15^\circ、30^\circ$ (ダクト直径が1cmの場合の許容最小入射角は(3.13)式から、 $T=75 \text{ cm}$ で $1.1^\circ$ 、

T=100、125、150cmで $1^\circ$ 未満である。) 、直スリット付き遮蔽壁の場合  $\theta = 1^\circ$ 、 $5^\circ$ 、 $15^\circ$ 、 $30^\circ$ とし、斜ダクト付き遮蔽壁と斜スリット付き遮蔽壁についてはガンマ線が遮蔽壁に垂直入射するとした。TableA.1～A.4にはバルク遮蔽壁にこれらの角度で入射する平行ビームガンマ線の壁背面と前面との線量率の比も示す。これらの線量率比はG33-GPコードで求めた。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同上の角度で入射する場合は、この放射線のバルク遮蔽壁における線量率の減衰率から内挿により最大ダクト直径、最大スリット幅の推奨値が求められる。直ダクト付き遮蔽壁と直スリット付き遮蔽壁への入射角が同表に示す角度以外の場合は、同表に示す角度のうち、入射角以下で且つ入射角に最も近い角度における推奨値を用いる。

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の最大間隙幅の推奨値は5cmである。

Table A.1 Recommended value of the maximum diameter of straight duct and ratio dose rate between front and rear surface of bulk shield wall

T (cm)	E (MeV)	Dose attenuation in bulk wall				Maximum diameter (cm)			
		1.5°	5°	15°	30°	1.5°	5°	15°	30°
75	0.5	1.4-5*	1.4-5	1.1-5	4.2-6	—**	—	—	—
	1	3.1-4	3.0-4	2.4-4	1.0-4	1	2	2	2
	2	3.3-3	3.2-3	2.7-3	1.3-3	1	3	7	9
	4	1.5-2	1.5-2	1.3-2	7.6-3	1	4	13	15
	6	2.5-2	2.5-2	2.2-2	1.4-2	1	4	13	15
	8	3.2-2	3.1-2	2.8-2	1.9-2	1	4	13	15
	10	3.5-2	3.5-2	3.1-2	2.1-2	1	4	13	15
100	0.5	1.6-7	1.5-7	1.1-7	3.5-8	—	—	—	—
	1	1.2-5	1.2-5	8.5-6	2.9-6	—	—	—	—
	2	3.4-4	3.3-4	2.6-4	1.1-4	1	1	2	3
	4	3.1-3	3.0-3	2.5-3	1.3-3	1	5	7	12
	6	6.6-3	6.5-3	5.6-3	3.1-3	1	5	14	15
	8	9.4-3	9.3-3	8.0-3	4.8-3	1	5	15	15
	10	1.1-2	1.1-2	9.5-3	5.9-3	1	5	15	15
125	0.5	1.7-9	1.6-9	1.0-9	2.6-10	—	—	—	—
	1	4.5-7	4.3-7	2.9-7	7.3-8	—	—	—	—
	2	3.5-5	3.4-5	2.5-5	7.6-6	—	—	1	1
	4	6.4-4	6.2-4	4.9-4	1.9-4	1	3	4	7
	6	1.8-3	1.8-3	1.4-3	6.3-4	1	4	9	10
	8	2.9-3	2.8-3	2.3-3	1.1-4	1	4	10	12
	10	3.7-3	3.6-3	3.0-3	1.5-3	1	5	12	15
150	0.5	1.6-11	1.5-11	9.0-12	1.8-12	—	—	—	—
	1	1.4-8	1.4-8	8.9-9	1.8-9	—	—	—	—
	2	3.3-6	3.2-6	2.2-6	5.2-7	—	—	—	—
	4	1.2-4	1.2-4	8.7-5	2.8-5	1	1	2	2
	6	4.4-4	4.3-4	3.3-4	1.3-4	1	3	5	6
	8	8.1-4	7.9-4	6.2-4	2.6-4	1	4	8	10
	10	1.1-3	1.1-3	8.6-4	3.7-4	1	5	10	15

\* Read as  $1.4 \times 10^{-5}$

\*\* Smaller than 1 (No recommended value)

Table A.2 Recommended value of the maximum width of straight slit and ratio dose rate between front and rear surface of bulk shield wall

T (cm)	E (MeV)	Dose attenuation in bulk wall				Maximum width (mm)			
		1°	5°	15°	30°	1°	5°	15°	30°
75	0.5	1.4-5*	1.4-5	1.1-5	4.2-6	3	3	3	3
	1	3.1-4	3.0-4	2.4-4	1.0-4	3	3	3	3
	2	3.3-3	3.2-3	2.7-3	1.3-3	5	7	7	7
	4	1.5-2	1.5-2	1.3-2	7.6-3	5	7	7	7
	6	2.5-2	2.5-2	2.2-2	1.4-2	9	10	10	10
	8	3.2-2	3.1-2	2.8-2	1.9-2	9	10	10	10
	10	3.5-2	3.5-2	3.1-2	2.1-2	9	10	10	10
100	0.5	1.6-7	1.5-7	1.1-7	3.5-8	2	3	3	3
	1	1.2-5	1.2-5	8.5-6	2.9-6	3	3	3	3
	2	3.4-4	3.3-4	2.6-4	1.1-4	3	5	5	5
	4	3.1-3	3.0-3	2.5-3	1.3-3	5	5	7	7
	6	6.6-3	6.5-3	5.6-3	3.1-3	5	5	7	7
	8	9.4-3	9.3-3	8.0-3	4.8-3	7	10	10	10
	10	1.1-2	1.1-2	9.5-3	5.9-3	7	10	10	10
125	0.5	1.7-9	1.6-9	1.0-9	2.6-10	1	2	2	2
	1	4.5-7	4.3-7	2.9-7	7.3-8	2	3	3	3
	2	3.5-5	3.4-5	2.5-5	7.6-6	2	4	4	3
	4	6.4-4	6.2-4	4.9-4	1.9-4	4	5	6	6
	6	1.8-3	1.8-3	1.4-3	6.3-4	5	6	7	7
	8	2.9-3	2.8-3	2.3-3	1.1-4	6	8	8	8
	10	3.7-3	3.6-3	3.0-3	1.5-3	6	8	8	8
150	0.5	1.6-11	1.5-11	9.0-12	1.8-12	1	2	2	2
	1	1.4-8	1.4-8	8.9-9	1.8-9	1	3	3	3
	2	3.3-6	3.2-6	2.2-6	5.2-7	2	3	3	3
	4	1.2-4	1.2-4	8.7-5	2.8-5	3	5	5	5
	6	4.4-4	4.3-4	3.3-4	1.3-4	5	7	7	7
	8	8.1-4	7.9-4	6.2-4	2.6-4	5	7	7	7
	10	1.1-3	1.1-3	8.6-4	3.7-4	5	7	7	7

\* Read as  $1.4 \times 10^{-5}$

Table A.3 Recommended value of the maximum diameter of slant duct and ratio of dose rate between front and rear surface of bulk shield wall

E (MeV)	Dose attenuation in bulk wall, where incident angle equal to 0°				Maximum diameter (cm)							
					Bulk wall thickness							
					75cm	100cm	125cm	150cm	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	—	1	—	—	—	—	—	—
1	3.1-4	1.2-5	4.5-7	1.5-8	3	4	1	1	—	—	—	—
2	3.3-3	3.4-4	3.6-5	3.3-6	10	14	3	5	1	2	—	—
4	1.5-2	3.1-3	6.4-4	1.2-4	15	15	10	12	5	8	2	5
6	2.6-2	6.7-3	1.8-3	4.4-4	15	15	15	15	9	13	7	12
8	3.2-2	9.4-3	2.9-3	8.1-4	15	15	15	15	10	14	8	13
10	3.5-2	1.1-2	3.7-3	1.1-3	15	15	15	15	12	15	10	15

\* Read as  $1.4 \times 10^{-5}$

\*\* Smaller than 1 (No recommended value)

Table A.4 Recommended value of the maximum width of slant slit and ratio of dose rate between front and rear surface of bulk shield wall

E (MeV)	Dose attenuation in bulk wall, where incident angle equal to 0°				Maximum width (mm)							
					Bulk wall thickness							
					75cm	100cm	125cm	150cm	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	3	3	3	3	2	2	2	2
1	3.1-4	1.2-5	4.5-7	1.5-8	5	5	4	4	3	3	2	2
2	3.3-3	3.4-4	3.6-5	3.3-6	5	5	5	5	3	3	3	3
4	1.5-2	3.1-3	6.4-4	1.2-4	7	7	5	5	5	5	4	4
6	2.6-2	6.7-3	1.8-3	4.4-4	7	7	7	7	5	5	5	5
8	3.2-2	9.4-3	2.9-3	8.1-4	10	10	8	8	7	7	6	6
10	3.5-2	1.1-2	3.7-3	1.1-3	10	10	8	8	7	7	6	6

\* Read as  $1.4 \times 10^{-5}$

## 参考文献

- (1) Jaeger, R.G., et al.(ed): "Engineering Compendium on Reactor Shielding", Vol.Ⅲ, (1970), Springer-Verlag.
- (2) 日本原子力学会「遠隔操作技術」研究専門委編: "高放射性物質取扱い施設とロボット" (1983).
- (3) 日本原子力船研究開発事業団: JNS-T-report 1034, (1981).
- (4) Yamaji, A., et al.: Proc. 6th Int. Conf. Radiation Shielding, Tokyo, 617 (1983).
- (5) 山路昭雄, 他: 日本原子力学会誌, 26(2), 139 (1984).
- (6) Selph, W.E., Claiborne, H.C.: ORNL-RSIC-20, (1968).
- (7) Avery, A.F., Small, V.G., Taylor, J.B.: Proc. 6th Int. Conf. Radiation Shielding, Tokyo, 975 (1983).
- (8) Shin, K.: Proc. 7th Int. Conf. Radiation Shielding, Bournemouth, (29), (1988).
- (9) Miura, T., Sasamoto, N.: Nucl. Sci. Eng., 83, 333 (1983).
- (10) Oka, Y. et al.: Proc. 7th Int. Conf. Radiation Shielding, Bournemouth, (61), (1988).
- (11) 田中俊一, 他: JAERI-M 8686, (1980).
- (12) 関口 晃, 内藤俣孝(編): JAERI-M 86-060, (1986).
- (13) 日本原子力学会「放射線施設遮蔽」研究専門委員会「ガンマ線遮蔽設計法ワーキンググループ」: "ガンマ線遮蔽設計ハンドブック", (1988).
- (14) 松本征一郎, 他: JAERI-M 84-102, (1984).
- (15) Fiebig, R., Yamaji, A.: Atomkernenergie, 22(2), 105 (1973).
- (16) 山路昭雄, Fiebig, R.: 船研報告, 11(3), 127 (1974).
- (17) Fiebig, R., Yamaji, A.: Atomkernenergie, 22(2), 113 (1973).
- (18) DIN Deutsches Institut für Normung e.V.: DIN 25427, (1977), Beuth Verlag.
- (19) Malenfant, R.E.: LA-5176, (1973).
- (20) Gesellschaft für Kernenergieverwertung in Schiffbau and Schifffahrt mbH: Nuclear Research Ship "OTTO HAHN" Safety Assessment, (1968).
- (21) 山路昭雄: 日本原子力学会誌, 30(6), 539 (1988).
- (22) Hubbel, J.H.,: NSRDS-NBS29, (1969).
- (23) Takeuchi, K., Tanaka, S.: Nucl. Sci. Eng., 90, 158 (1985).
- (24) Selph, W.E.: ORNL-RSIC-21, (1968).
- (25) RSIC Computer Code Collection: CCC-494, (1986).
- (26) 宮坂駿一: JAERI 6016, (1965).
- (27) 新藤満夫(編): JAERI 1120, (1966).
- (28) Numata, S., Yamaji, A., Saito, T.: J. Nucl. Sci. Technol., 25(1), 19 (1988)
- (29) Burrus, W.R., Verbinski, V.V.: "Recent Development in the Proton-Recoil Scintillation Neutron Spectrometer", ANS-SD-2, (1964).



- (30) Burrus, W.R., Verbinski, V.V.: Nucl. Instrum. Methods, 67, 181 (1969).
- (31) Shin, K., et al.: J. Nucl. Sci. Technol., 16[6], 390(1979).
- (32) 日本原子力船開発事業団: JNS-4-3, (1967).
- (33) Miura, T., Takeuchi, K., Kinno, M.: Proc. 6th Int. Conf. Radiation Shielding, Tokyo, 787 (1983).
- (34) Yamaji, A.: Proc. 7th Int. Conf. Radiation Shielding, Bournemouth, (33), (1988).
- (35) Harima, Y.: Nucl. Sci. Eng., 83, 299 (1983).
- (36) 山路昭雄: 日本原子力学会誌, 28[2], 169 (1986).
- (37) 山路昭雄、斎藤鉄夫: 同上, 30[3], 264 (1988).
- (38) 山路昭雄、沼田茂生、斎藤鉄夫: 同上, 29[6], 555 (1987).
- (39) 原研炉物理研究委員会・遮蔽専門部会: JAERI-M7799, (1978).
- (40) Foderaro, A.: "The Photon Shielding Manual", (1978), The Penn State Bookstore.
- (41) 奥村芳弘、山路昭雄: 日本原子力学会「昭55分科会」予稿集, C4, (1980).
- (42) Takeuchi, K., Tanaka, S.: Nucl. Sci. Eng., 87, 478 (1984).
- (43) Allen, F.J., Futterer, A.T.: Nucleonics, 21[8], 120 (1963).
- (44) Allen, F.J., Futterer, A.T., Wright, W.: BRL-1224 (1963).
- (45) Straker, E.A., et al.: ORNL 4585, (1970).
- (46) 関泰、飯田浩正: JAERI-M 8818, (1980).
- (47) Goldberg, M.D. et al. (ed): BNL-325, Second Edition, Supplement No.2, (1966), Brookhaven National Laboratory.
- (48) 兵藤知典: 放射線遮蔽入門(第2版), (1979), 産業図書.
- (49) Jaeger, R.G., et al. (ed): "Engineering Compendium on Reactor Shielding", Vol. II, (1975), Springer-Verlag.
- (50) 山路昭雄、沼田茂生、斎藤鉄夫: 特許出願番号 61-047762, (1986).
- (51) 山路昭雄、沼田茂生: 同上 62-076802, (1987).
- (52) 山路昭雄: 同上 63-12648, (1988).