

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^{(1)~(6)}(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^{(1),(2),(6)},
- (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⁽²⁾,
- (3)遮蔽壁に追加遮蔽を設ける^{(1),(2),(4)},

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⁽²⁾。

(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^{(6)~(11)}。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^{(2),(12)}。

(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^{(1),(12),(14)}、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⁽¹⁾。

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^{(15)~(17)}。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⁽¹⁸⁾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⁽³⁹⁾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。

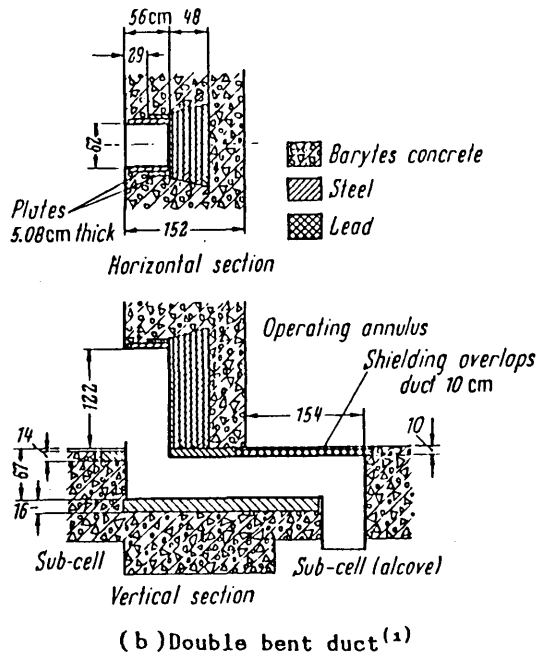
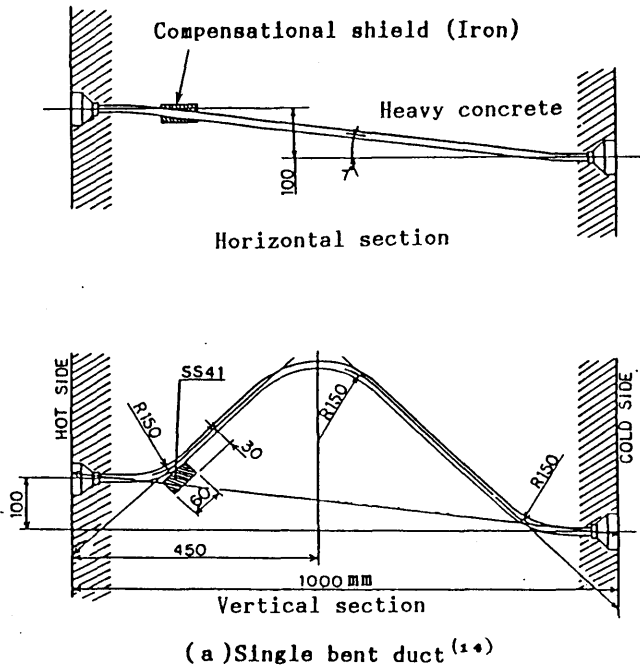


Fig.1.1 Example of compensational shield used in radiation facilities.

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⁽¹³⁾と原子力船「オットハーン」、「むつ」二次遮蔽体接合部^{(4),(20)}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^{(2),(3),(5)}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⁽¹²⁾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¹³⁷Cs、⁶⁰Co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^{(2),(3)}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⁽¹⁾。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^{(1),(12)}。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^{(9),(12)}。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。

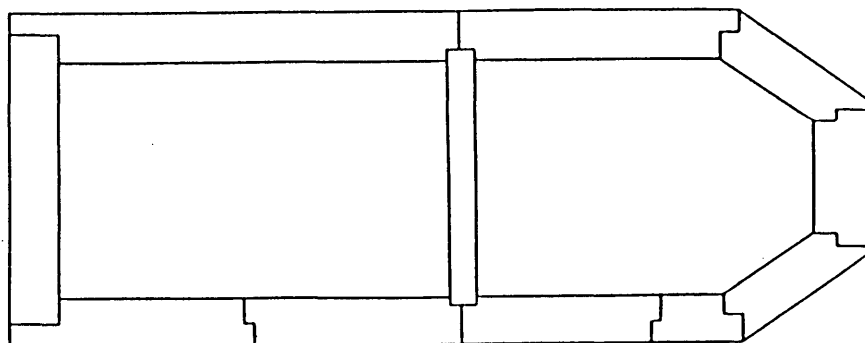


Fig.2.1(a) Example of shield irregularity of hot laboratory^(1,3)

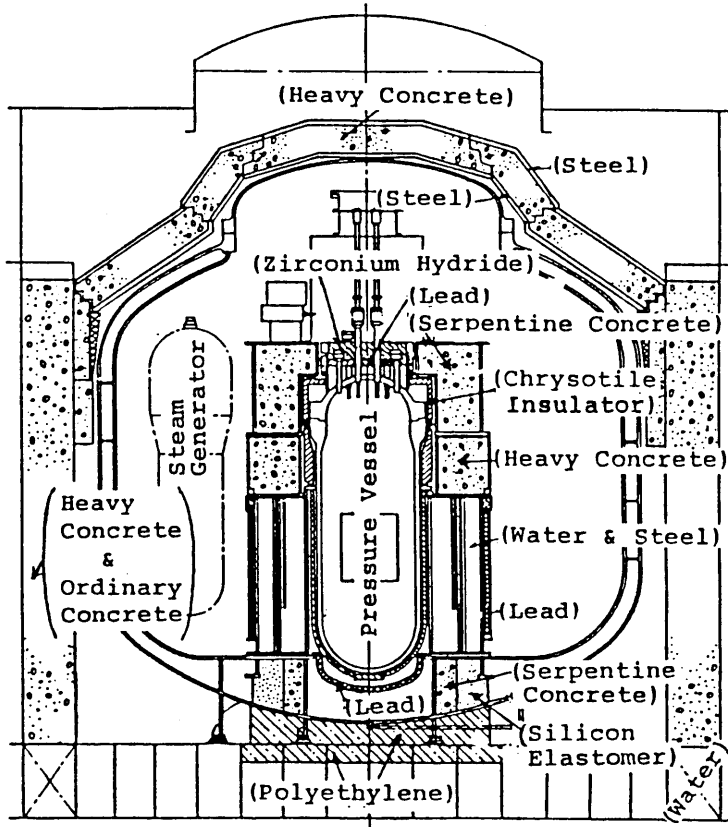


Fig.2.1(b) Shielding arrangement of nuclear ship MUTSU (4)

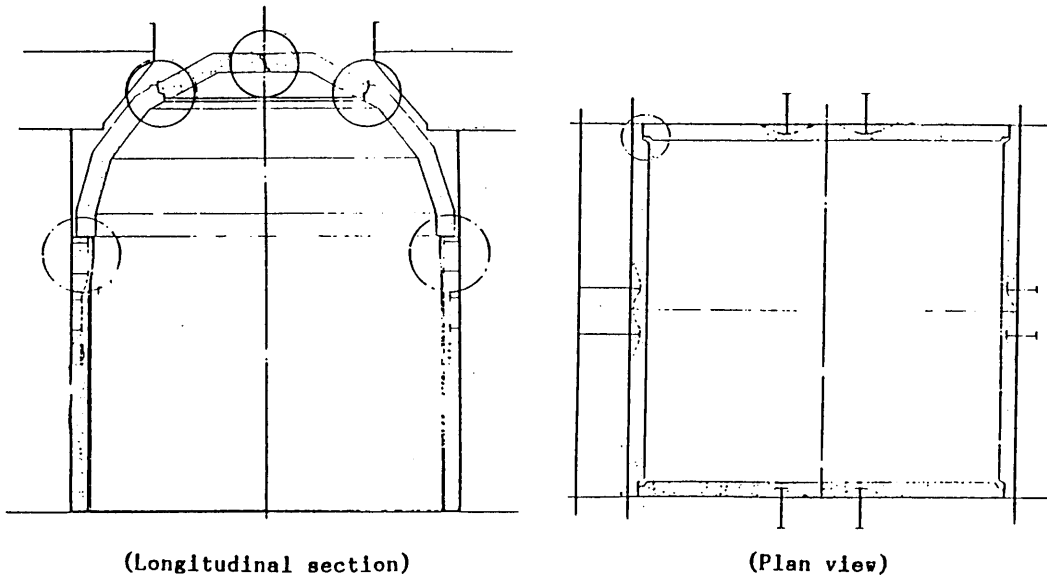


Fig.2.1(c) Secondary shield of nuclear ship OTTO HAHN (20)

Table2.1 Example of shield wall thickness

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

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

Incident γ -ray energy group (MeV)	Percentage of dose rate of each incident γ -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 ⁽³⁾)
Width of offset slit	<1.5, <1.8, <3.3, <3.6cm (N.S.Mutsu ⁽³⁾)
Width of offset hatch plug	0.42cm (EBR-II fuel cycle facility ⁽¹⁾)

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_{con} 、 B_{Fe} ：コンクリートと鉄の再生係数

μ_{con} 、 μ_{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 ρ_{con} 、 ρ_{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⁽²²⁾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⁽²³⁾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。

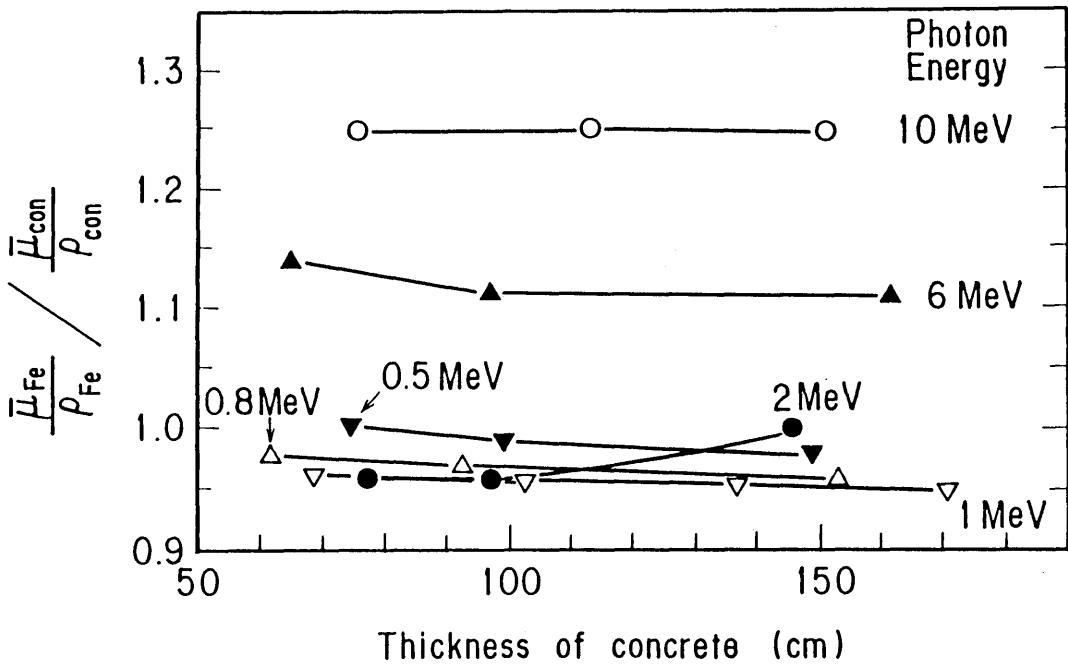


Fig.3.1 Ratio of $\bar{\mu}_{Fe}/\rho_{Fe}$ to $\bar{\mu}_{con}/\rho_{con}$ as a function of concrete thickness

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 θ_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。 θ_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 α_{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。 θ 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 $T=75, 100, 150\text{cm}$ 入射ガンマ線エネルギー $0.5, 1, 2, 4, 6, 8, 10\text{MeV}$ 、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 Table 3.1 に示す。ここで、微分線量アルベド α_{D1} は、 $\theta=15^\circ$ の場合 0.03、 $\theta=30^\circ$ の場合 0.02 とし⁽²⁴⁾、バルク遮蔽壁におけるガンマ線量率の減衰率 A は、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 2.30g/cm^3 、鉄の密度を 7.86g/cm^3 とし 1 回散乱コード G33-GP⁽²⁵⁾ 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 Table 3.2 に示す。Table 3.2 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 $E=0.5, 1, 2, 4, 6, 8, 10\text{MeV}$ 、入射角 $\theta=15^\circ, 30^\circ$ 、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 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 $D=1, 3, 5, 10, 15\text{cm}$ 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 θ 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° 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 θ 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° 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。

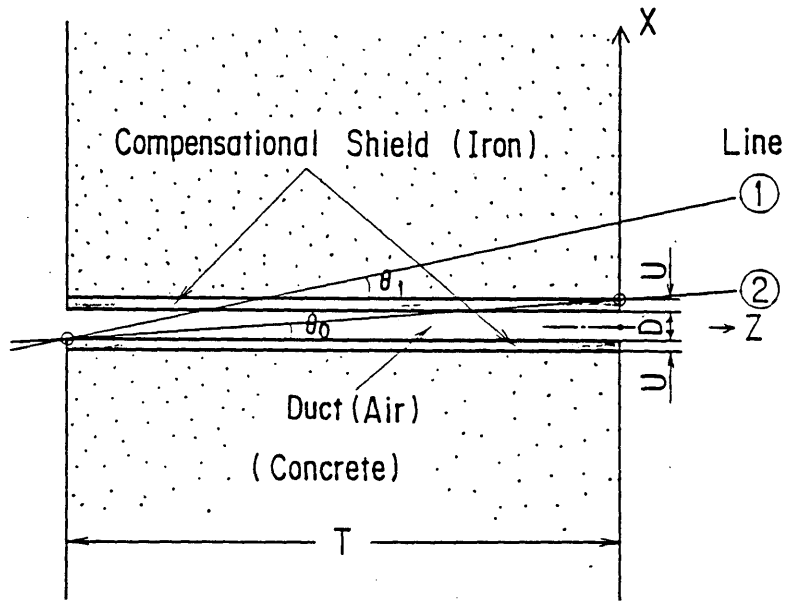


Fig.3.2 Concrete shield wall with straight duct

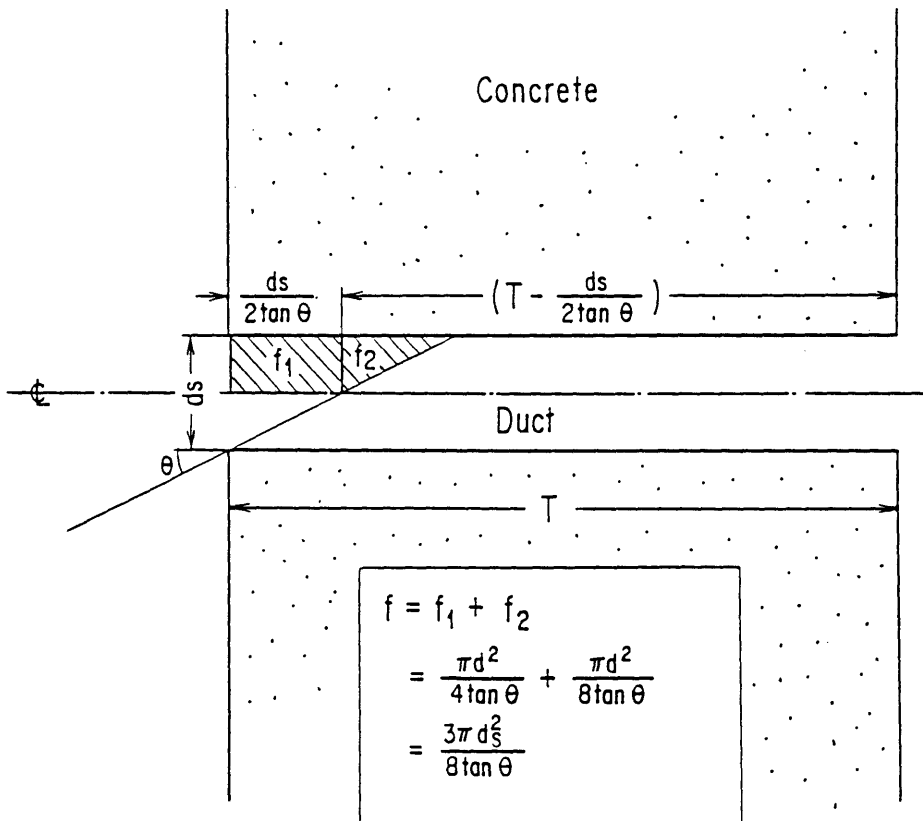


Fig.3.3 Visible area of straight duct surface

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 1.1×10^{-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

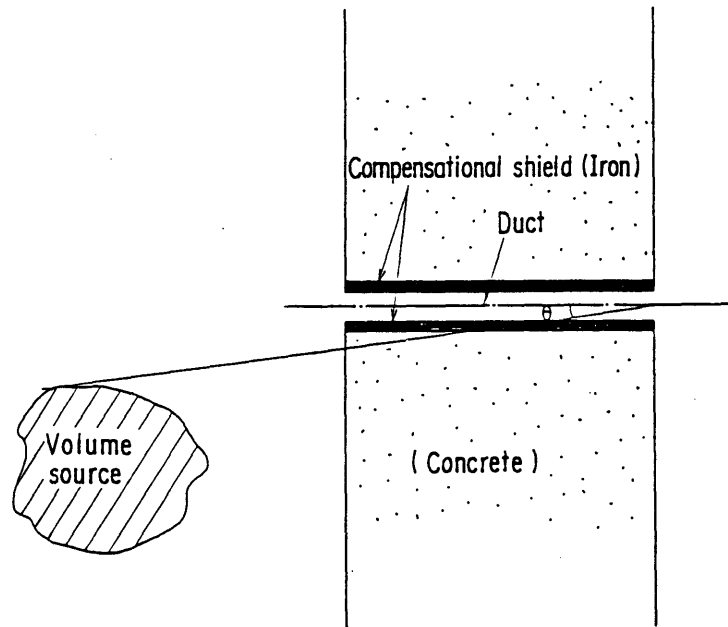


Fig.3.4 Incident angle θ for volume source

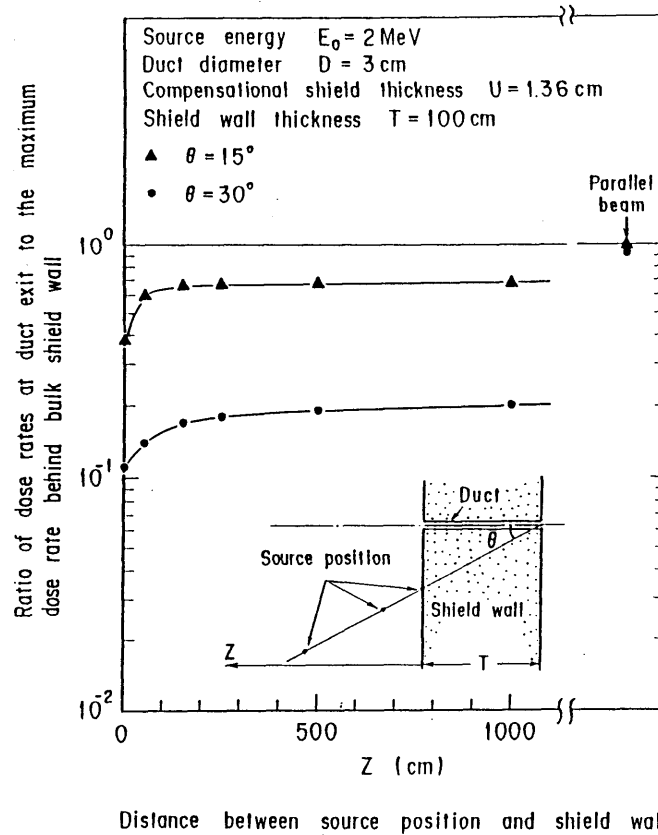
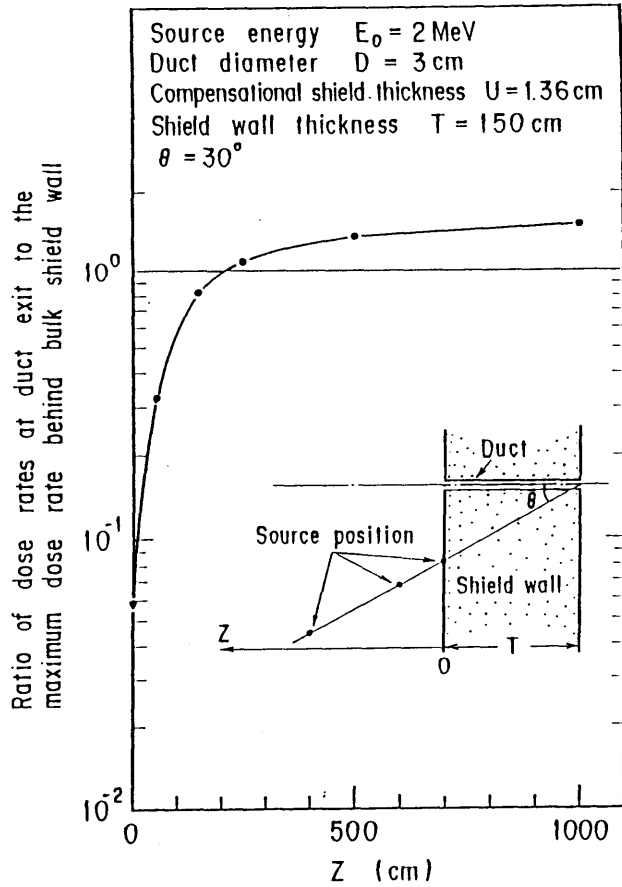


Fig.3.5

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.



Distance between source position and shield wall

Fig.3.6

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

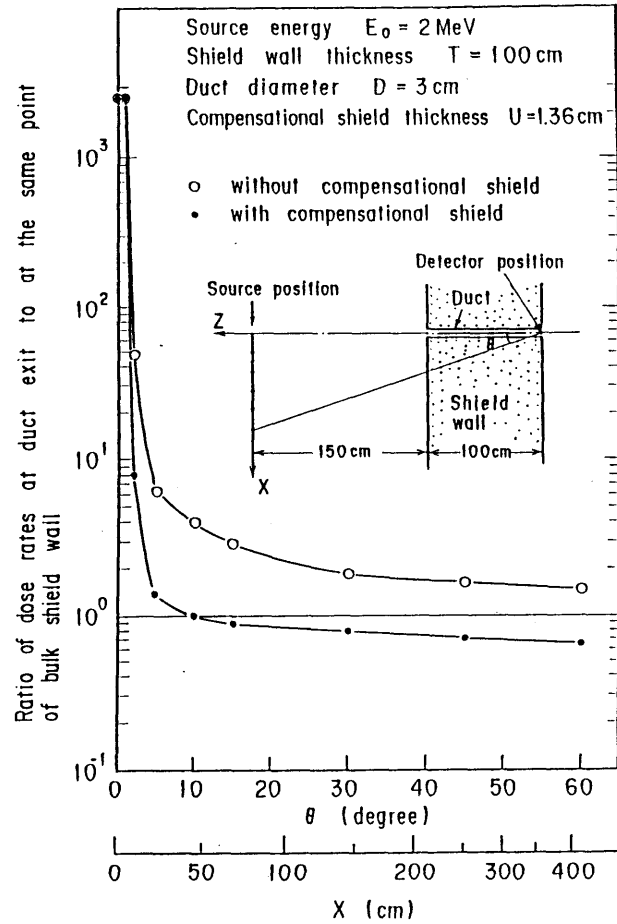


Fig.3.7

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

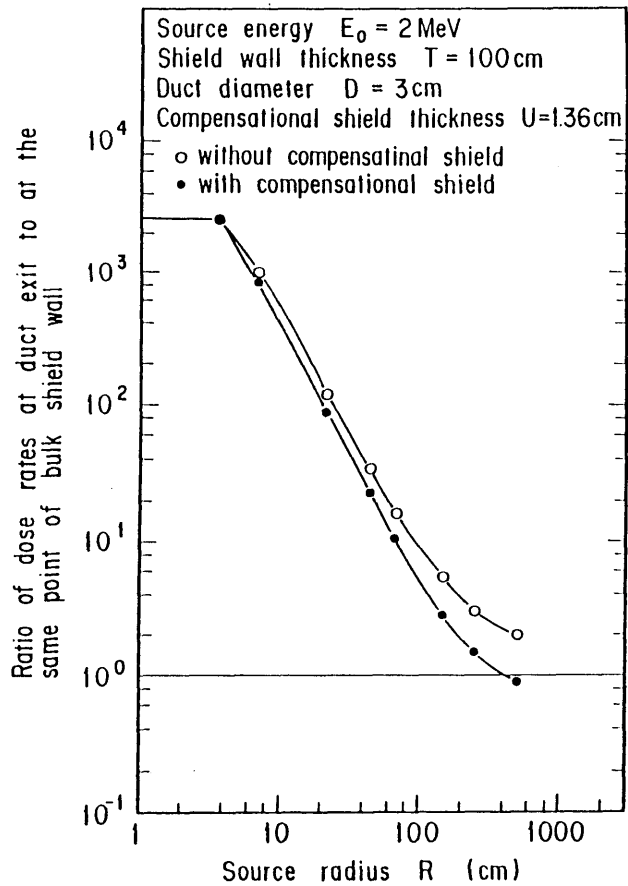


Fig.3.8

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

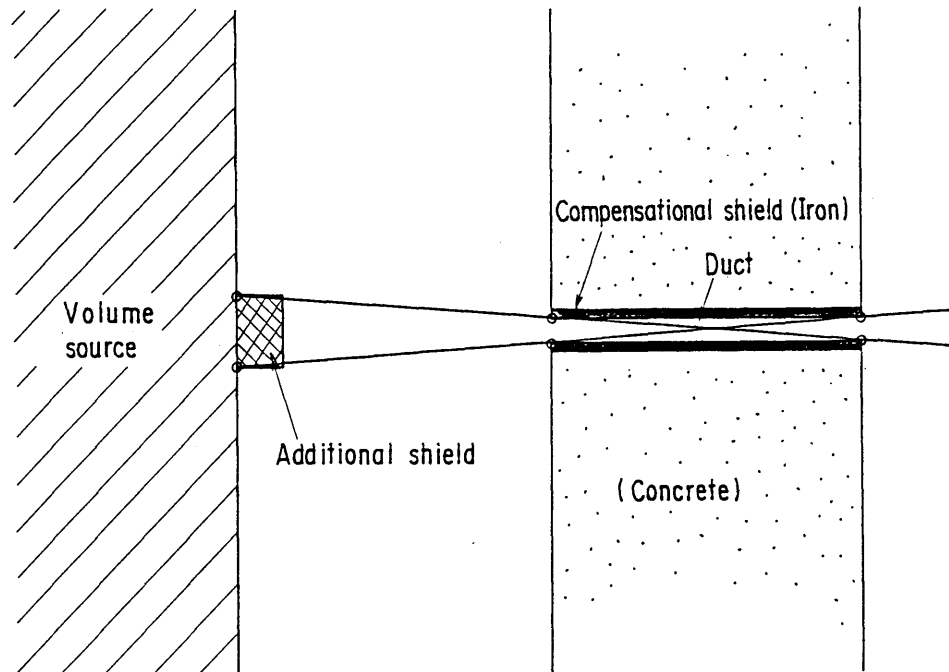


Fig.3.9 Example of additional shield for large volume source

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 θ_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。 θ_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^{(2),(3)}、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° と 1.2° (許容最小入射角 θ_0 は(3.22)式から、 $T=150\text{cm}$ 、 $W=3\text{mm}$ のとき 0.2° 、 $T=75\text{cm}$ 、 $W=10\text{mm}$ のとき 1.1° 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。

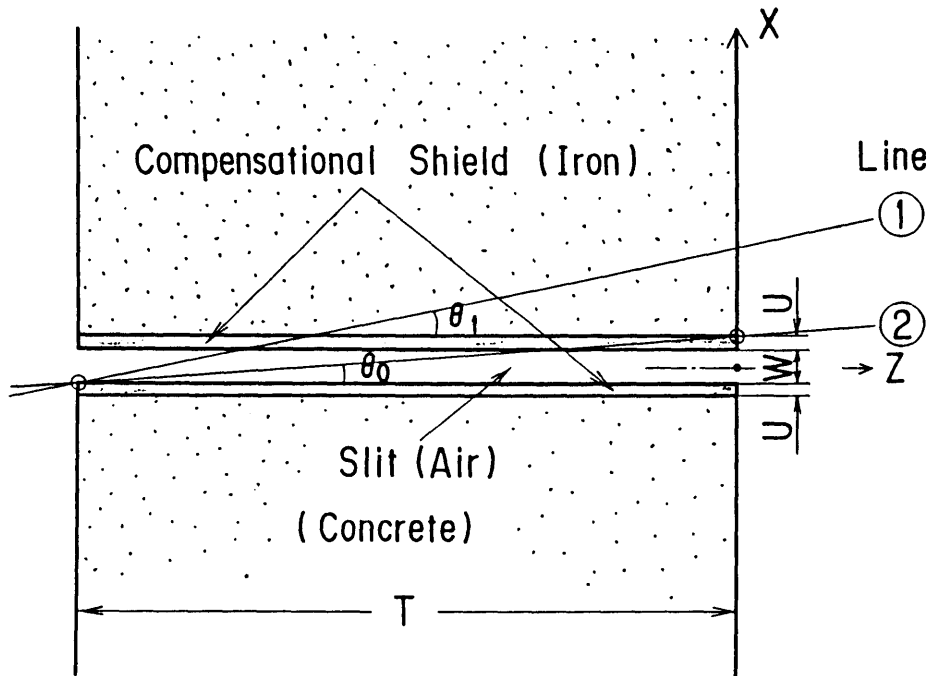
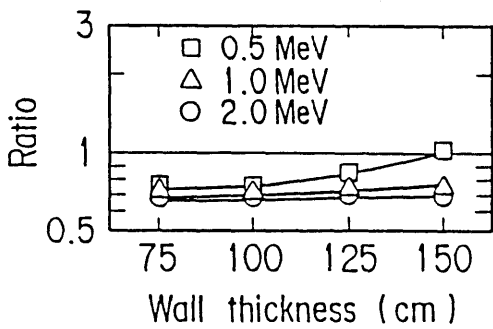
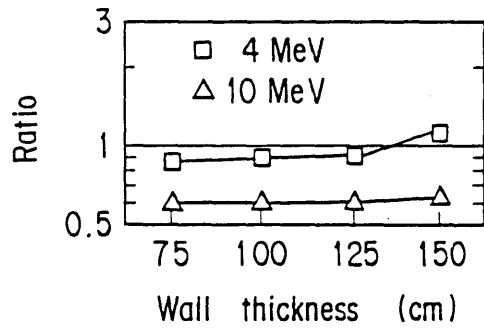


Fig.3.10 Concrete shield wall with straight slit



(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 1.4×10^{-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