

Table 9.2 Density and hydrogen content
of shielding materials

Material	Hydrogen content g/cm^3	Density g/cm^3
Polyethylene ^(a)	0.14	0.96
Concrete ^(a)	0.022	2.26
Zirconium Hydride ^(a)	0.10	5.6
Water	0.11	1.0

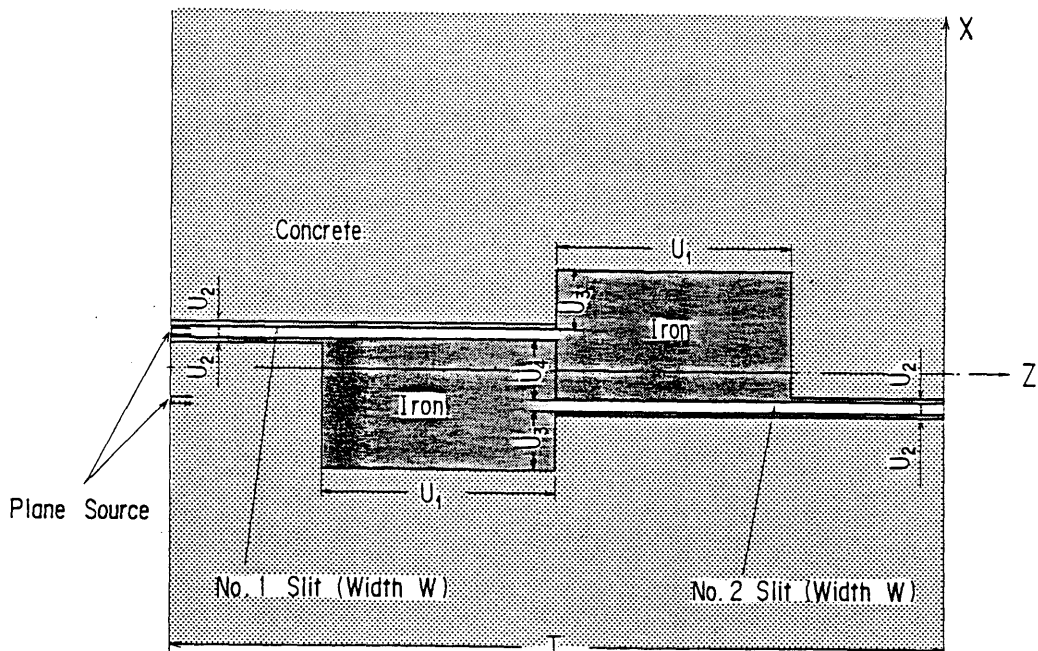


Fig.9.1 MORSE-GG calculational geometry of concrete wall with offset slit
with iron compensational shield for fast neutrons

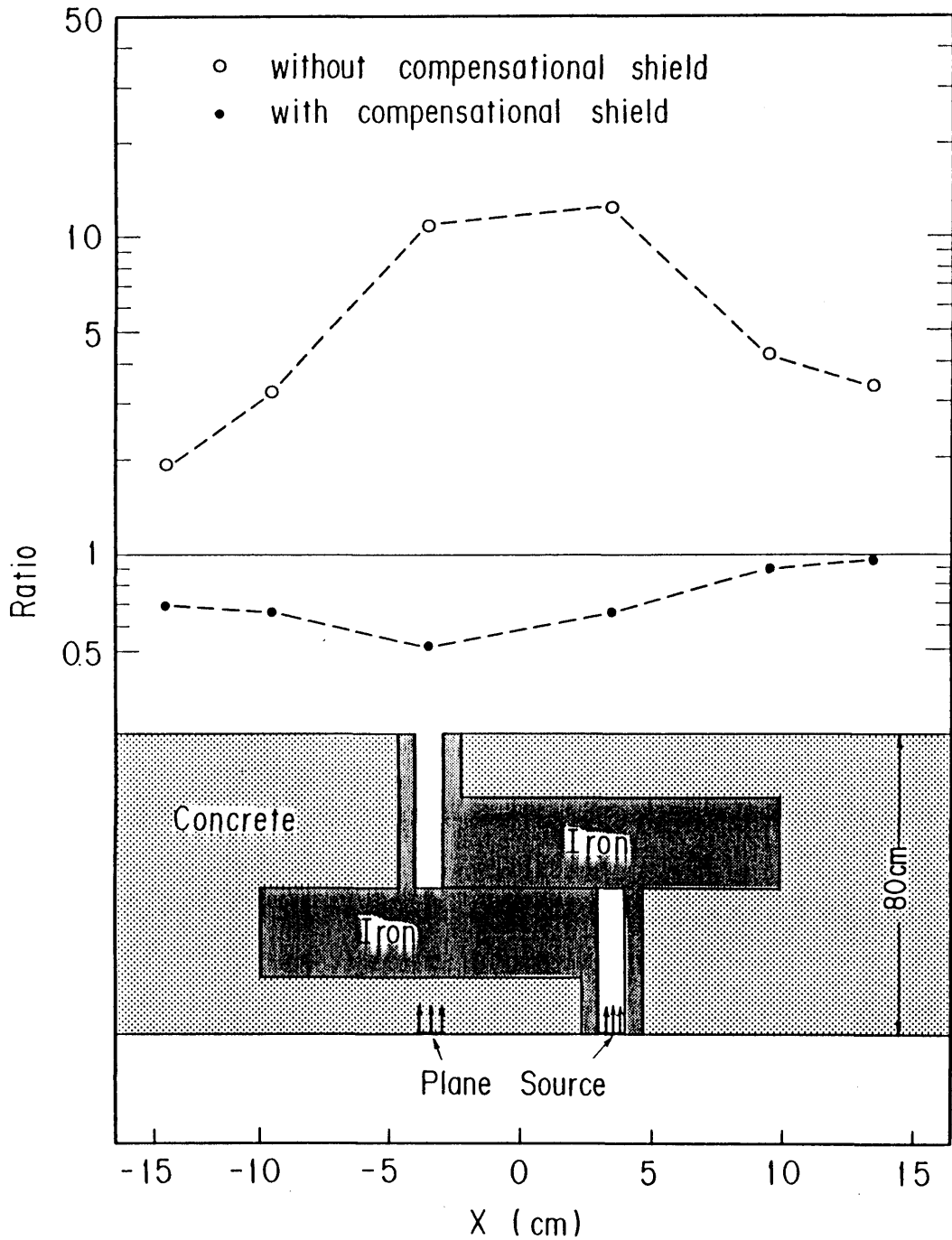


Fig.9.2 Ratio of fast neutron dose rates ($>0.2\text{MeV}$) behind shield wall with and without offset slit calculated by MORSE-GG code for 14MeV neutron source. $T=80\text{cm}$, $W=1\text{cm}$, $U_1=24.3\text{cm}$, $U_2=0.7\text{cm}$, $U_3=U_4=6\text{cm}$.

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 μ_{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 ρ_{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⁽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。

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10k_m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。

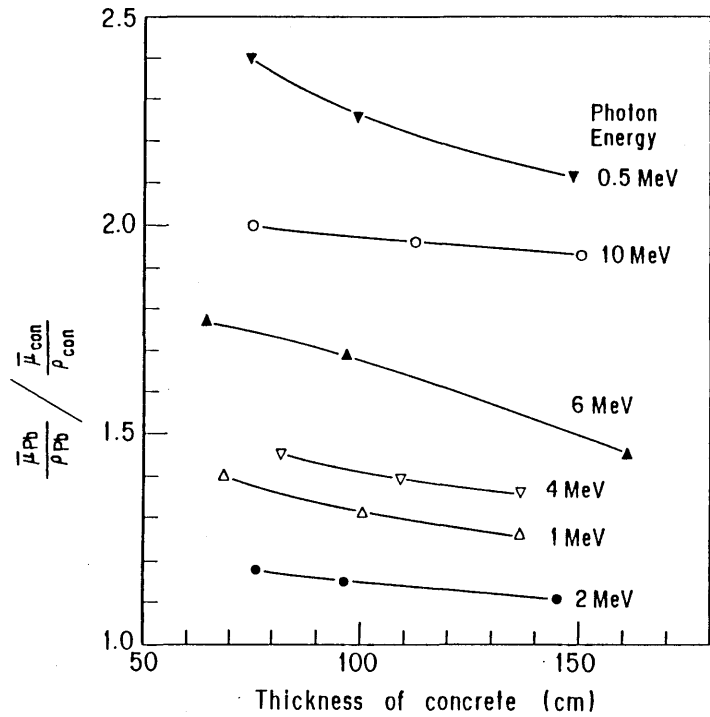


Fig.10.1 Ratio of $\bar{\mu}_{Pb} / \rho_{Pb}$ to $\bar{\mu}_{con} / \rho_{con}$ as a function of concrete thickness

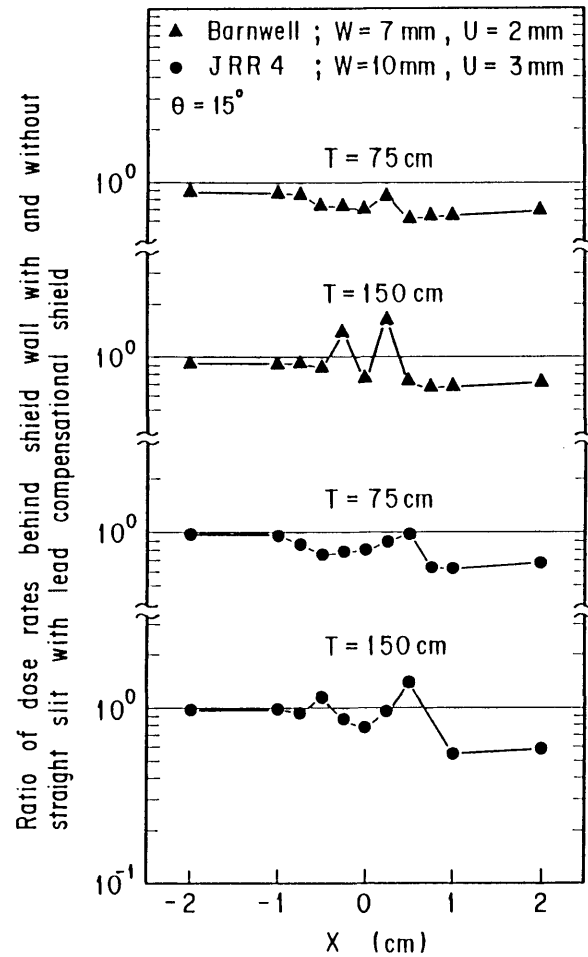


Fig.10.2 Ratio of dose rates behind shield wall with and without straight slit with lead compensational shield using G33-GP code for gamma-ray issuing from PWR spent fuel in remote process cell of Barnwell reprocessing plant and from the experimental hole of JRR4

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。

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あるいは組み合わせることで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⁽⁵⁰⁾、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^(a)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^{(a),(a')}、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^{(50)~(52)}。

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JRR-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⁽¹⁸⁾)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 μ^* 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 κ 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 κ_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 κ_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、 α_1 、 α_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 x_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

$$l_{sk} = 2 \cdot \alpha \cdot \sqrt{B} \cdot \frac{f}{t} \cdot \sqrt{\frac{S}{x_s}} = 0.2 \frac{f}{t} \cdot \sqrt{\frac{S}{x_s}}$$

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 ($x_g = 0$)

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、

ρ_{Bet} : 普通コンクリートの密度

ρ_{Fe} : 鉄の密度

ρ_{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、鉄の密度に鋳鉄に対する $\rho_{Fe} = 7.3 \text{ ton/m}^3$ 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、 μ_{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。

Δt_{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

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

が適用される。

鋳鉄(DIN 1691 鋳鉄)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。 Δt_{Fe} ないし Δu_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。

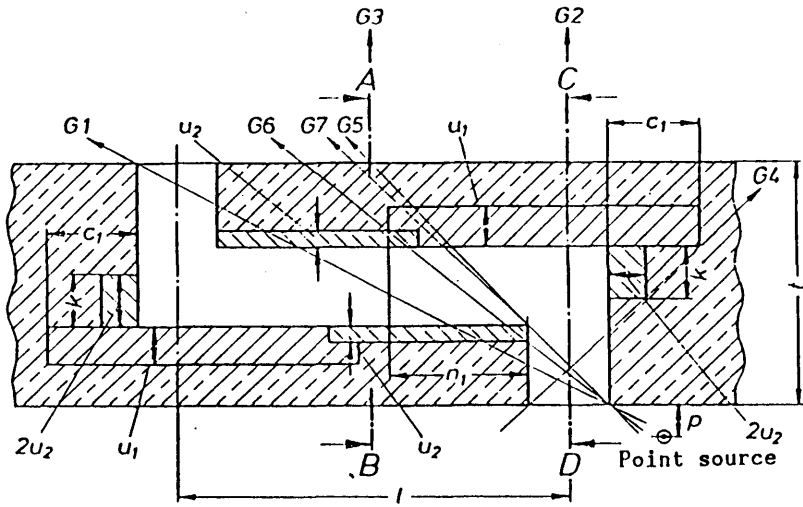


Fig.A.1 Double bent duct and critical directions of incident radiation

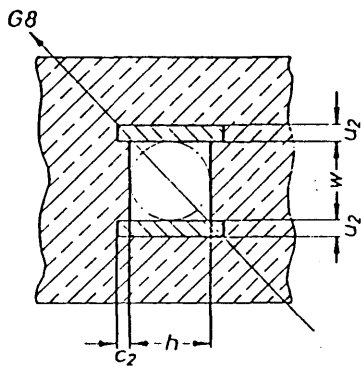


Fig.A.2(a) Cross section A-B

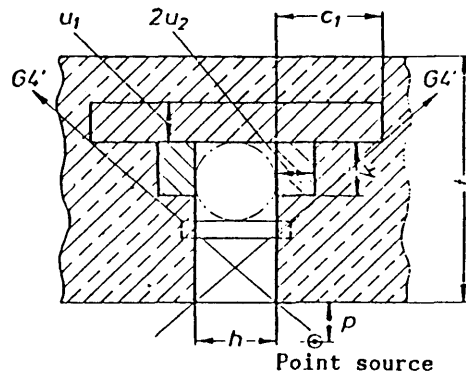


Fig.A.2(b) Cross section C-D

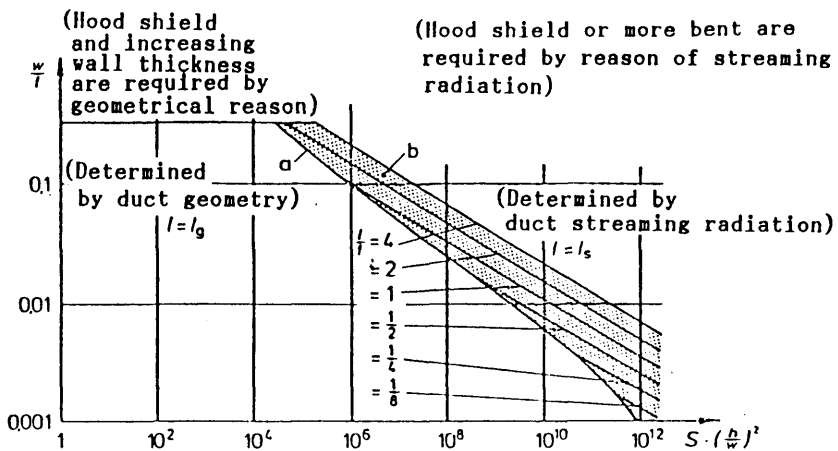


Fig.A.3 Validity range of formula 0 for collimated radiation

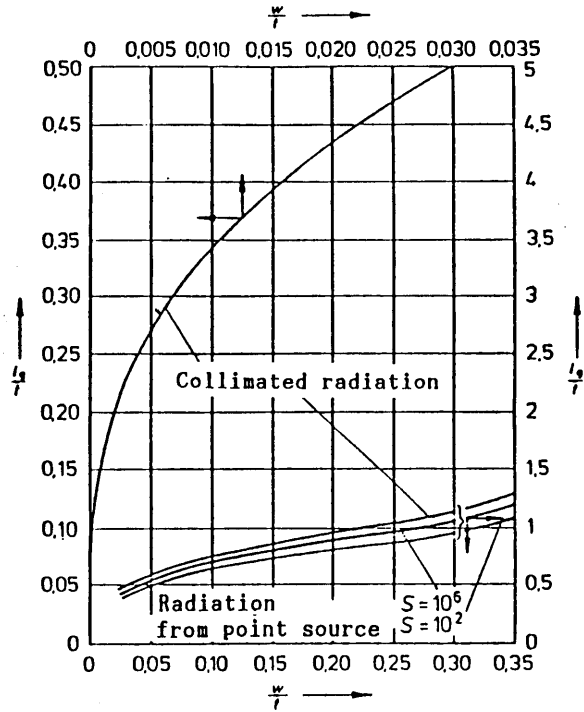


Fig.A.4 Relative transverse duct length l_g/t as a function of w/t

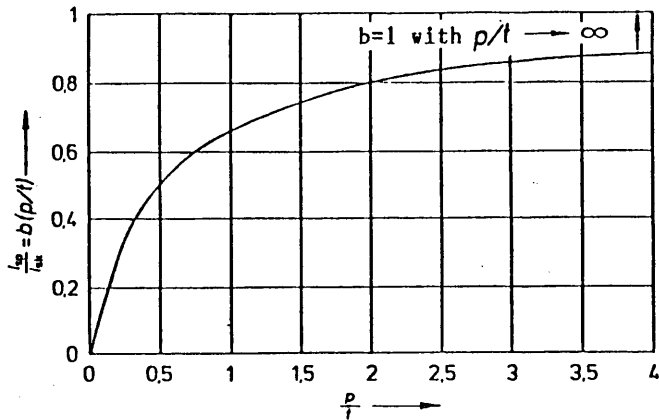


Fig.A.5 Quotient l_{sp}/l_{sk} as a function of p/t

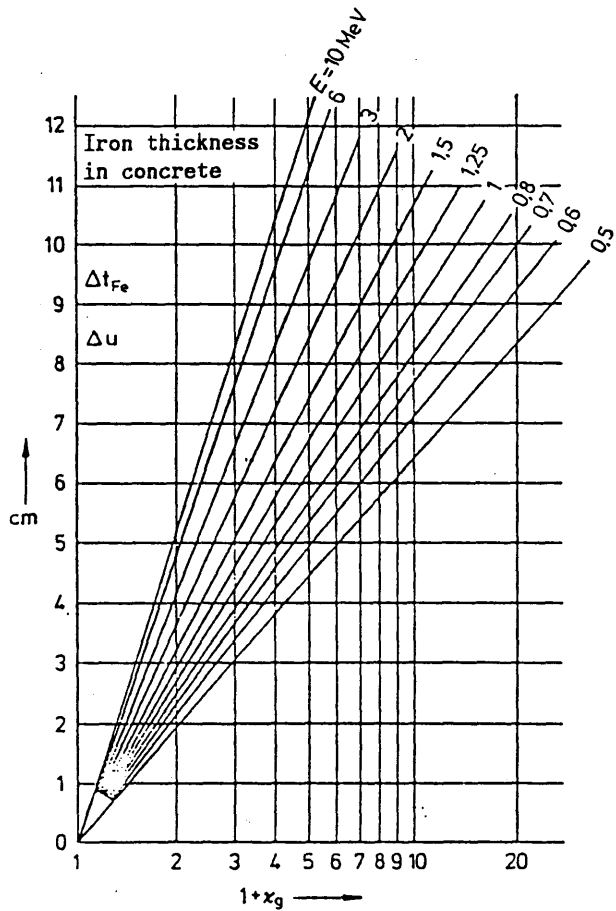


Fig.A.6 Thickness Δt_{Fe} as a function x_g

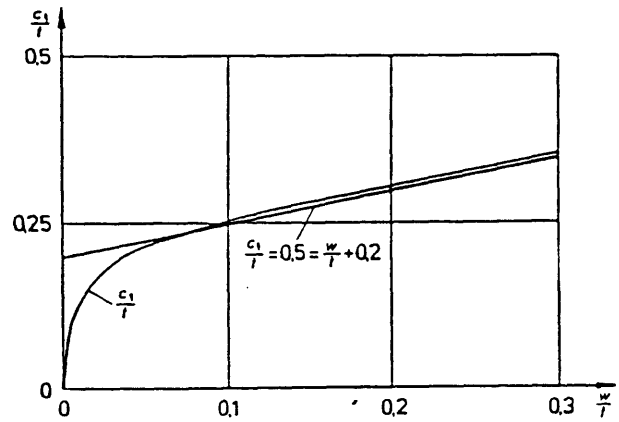


Fig.A.7(a) $\frac{c_1}{r}$ as a function of w/t

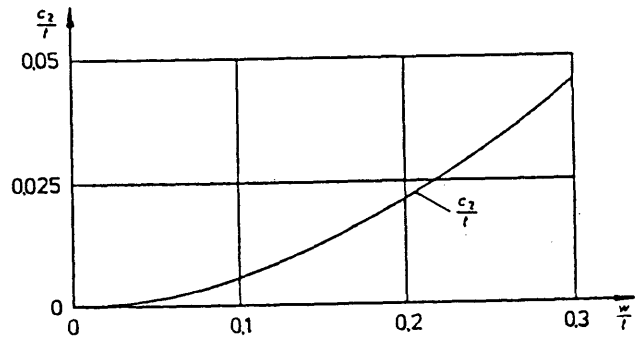


Fig.A.7(b) $\frac{c_2}{r}$ as a function of w/t

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 θ 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 g/cm^3 、鉄の密度は 7.86 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° 、

T=100、125、150cmで1°未満である。) 、直スリット付き遮蔽壁の場合 $\theta = 1^\circ$ 、 5° 、 15° 、 30° 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。Table A.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 1.4×10^{-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 1.4×10^{-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 1.4×10^{-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 1.4×10^{-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).