

32 複雑形状部ストリーミング安全評価手法に関する研究

東海支所 *三浦 俊正、平尾 好弘

1. まえがき

放射線施設における遮蔽構造はバルク部と複雑形状部に大別できる。複雑形状部は通常遮蔽壁に開けられた孔や隙間等の遮蔽欠損部を意味し、バルク部はそれらの無い壁部分を意味する（図1参照）。複雑形状部においては、図1のように遮蔽欠損部に沿って放射線が流れでる（これをストリーミングという）。それゆえ、複雑形状部は遮蔽上の弱点となる。ストリーミングする放射線の量は欠損部の形状や配置に強く依存するので、設計においてはストリーミングをできるだけ少なくするように欠損部の形状、配置等に工夫をこらす必要がある。また、当然のことであるが、ストリーミングによる線量率が設計基準値以下であることを保証する必要がある。これらを行うためには、まず、線源強度、複雑形状部の形状、配置等、与えられた条件に対しストリーミング線量を正確に評価することが求められる。しかし、複雑形状部の数は極めて多く、それぞれに対し別々の計算をする必要があるため、計算の数は膨大なものとなる。例えば、評価の対象としてはそのうちの何割かではあるが、原子炉では数千カ所、再処理施設では数万カ所の複雑形状部が存在するといわれている。

また、設計の段階では遮蔽以外の設計条件を満たす必要が生じるため形状、配置等の変更がしばしばなされるのでそれにすばやく対応する必要がある。このため、複雑で計算時間のかかる厳密計算法に基づく計算プログラムは極限られた部分にしか使用されない。実際の設計では円筒ダクト、円環ダクト、スリット等の各複雑形状部に対してそれぞれ与えられた簡単なストリーミング計算式（以下簡易式という）によって計算が行われる。しかし、従来の簡易式は基本的に線源はダクト軸対称配置（図2参照）、パラメータは主に幾何情報であり、入射放射線の実際の方向や放射線と遮蔽壁物質との相互作用をほとんど考慮していない。このため、計算精度が悪く過大な安全裕度をとらざるを得ない。

当所では平成8年度から12年度に原子力施設等安全研究年次計画の課題「複雑形状部遮蔽設計の安全裕度評価に関する実験的研究」を実施し、入射放射線の方向性や放射線と遮蔽壁物質との相互作用を考慮した精度のよいストリーミングに関するデータと評価手法を主な複雑形状部であるコンクリート壁中の円筒ダクト、スリット、円環ダクトに対し開発し、複雑形状部出口での線量評価の精度向上を図った。

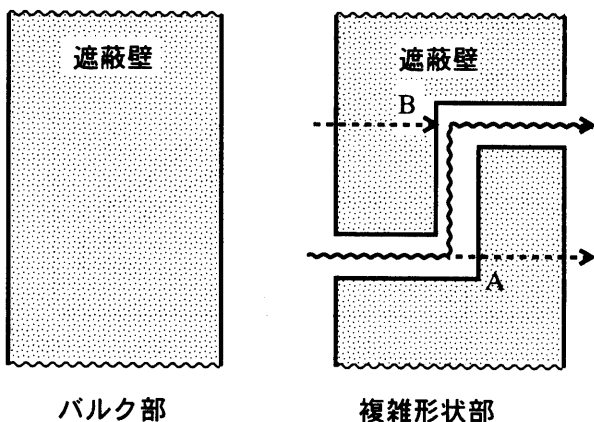


図1 バルク部と複雑形状部

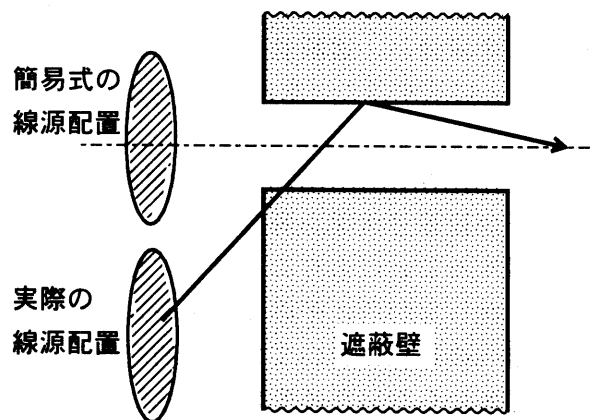


図2 従来の線源位置と実際

これらの結果については平成 11 年度に行われた遮蔽の国際会議⁽¹⁾あるいは日本原子力学会の「原子炉施設等での遮蔽安全性評価手法及びデータの調査」特別専門委員会⁽²⁾等で報告し、検討を行った。このデータと評価手法については現在日本原子力学会の標準委員会の下に本年設置された放射線遮蔽分科会において標準化の検討が行われている。このように中性子及び一次ガンマ線について複雑形状部の遮蔽欠損部出口における線量評価法に進展が見られたが、解決すべき以下のような問題が残っている。

- (1) ストリーミング中性子が遮蔽壁物質と相互作用した結果発生する二次的ガンマ線による線量の評価
- (2) ダクト等の出口からある程度距離の離れた線量評価点での計算を行うため、ダクト等の出口からでたストリーミング放射線の評価点までの空間伝播の評価
- (3) 配管等が遮蔽壁を部分的に貫通している場合の遮蔽欠損効果の評価
- (4) 多孔ダクトやスクリュダクト等特に複雑な形状におけるストリーミングや配管に巻かれる保温材等の特殊な材料の遮蔽効果の評価

(1)(2)については公表された計算式がほとんどないし、(3)(4)についても評価された計算式やデータがない。⁽³⁾従って、これらに関して信頼できるデータベースや評価手法を開発する必要がある。本研究においてはこれらの問題ごとに系統的な放射線量空間分布データベースを作成するとともに、それに基づいて線量評価手法を開発し、遮蔽設計並びに安全審査の信頼性向上に資することを目的とする。

2. 二次的ガンマ線による線量評価

中性子が複雑形状部を漏洩する際、壁物質と相互作用することにより二次ガンマ線を発生させる。しかしながら、その発生量やストリーミング線量への寄与についての系統的な報告はほとんど見あたらないためその重要性はあまり明らかではないし、また厳密計算法を除けば評価法もないといってよい状況にある。二次ガンマ

線は高速中性子の非弾性散乱及び主に低速中性子の捕獲反応により発生する。このうち捕獲反応により発生するガンマ線はエネルギーが高く透過力が強いので遮蔽上問題が大きい。複雑形状部では高速中性子より低速中性子の方がストリーミングしやすいので複雑形状部の出口に近づくほど二次ガンマ線の寄与が大きくなることが予想される。

図3に厚さ 1.5 m のコンクリート壁に核分裂中性子が垂直入射した場合の中性子透過に伴う二次ガンマ線の線量率分布の計算例を示す。また、同図には二次ガンマ線と中性子の線量比も示した。この場合は入射中性子に低速中性子成分が少ないので遮蔽体の浅いところでは二次ガンマ線は相対的に少ないが、深さが増すと共に低速中性子成分が増加し、それに伴い二次ガンマ線量率が中性子線量率の数十%となる。計算は1次元 Sn 輸送計算コード ANISN で行ったものである。同様の計算をモンテカルロ計算コード MCNP で実施したところ 1.5 m 透過した点でも差が 12 % 程度でほぼ両者は一致したといえる。平行入射線源の入射角度を 15, 30, 45, 60 度と変化させ両コードの比較をしたところ 0 度入射と同様に良い一致が得られた。等方入射とするとその差は最大で 3 % とほぼ一致した。これに対し、入射中性子を中速中性子あるいは熱中性子とすると両者の差は大きくなり、ANISN と MCNP の比は最大で約 83 となった。この原因

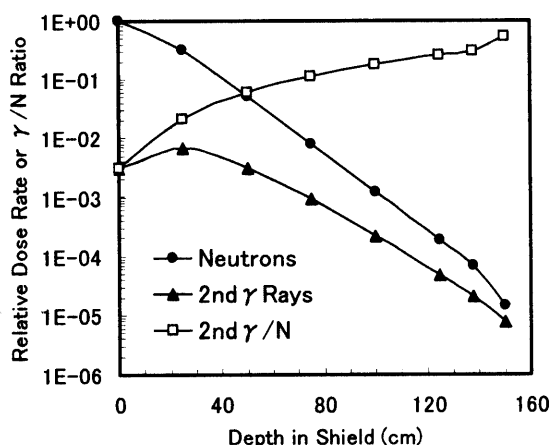


図3 コンクリート壁中性子透過に伴う二次ガンマ線量率分布

は恐らく両者の熱中性子の扱いが異なることにあると考えられる。すなわち、MCNP では熱中性子の加速散乱 (upscattering) を考慮しているのに対し今回の ANISN の計算では熱群は1群でその扱いをしていない。今後 ANISN 等の Sn 計算ではこの点に十分配慮する必要がある。

図4と図5にはそれぞれ口径が5 cmと20 cmのコンクリート壁中の直円筒ダクトに入射面に対し斜め45度に核分裂中性子が平行入射した場合のダクト内の中性子及び二次ガンマ線量率とそれらの比の空間分布を示す。これらの例からダクトの後方ほど二次ガンマ線の寄与が大きくなることが確認される。その理由は前述したとおりである。また、ダクト口径が小さい方が二次ガンマ線の寄与が大きく、ダクト後部で二次

ガンマ線と中性子の線量率はほぼ等しい。これらの例は二次ガンマ線の評価の重要性を示している。図6には口径20 cmのコンクリート壁中90度屈曲ダクトの例を示す。第1脚の長さは1 m、第2脚の長さは1.5 mである。この場合は等方核分裂線源を第1脚の入口部においた。従って、第1脚部では壁物質と相互作用しない直視成分が圧倒的に多く二次ガンマ線の割合は少ない。しかし、第2脚に入るとその割合は急激に増える。この例は屈曲ダクトの場合、線源を第1脚の入口部にのみ置くことは二次ガンマ線量評価に大きな誤差を生じさせる可能性があることを示唆している。

今後は 二次ガンマ線発生量を正しく計算できるよう使用する核定数の検討、また、実際の遮蔽壁の構成物質及び二次ガンマ線発生に主に寄与する物質の検討を行う。これらのデータに基づき二次ガンマ線ストリーミング計算をモンテカルロ法あるいは2次元 Sn 計算法により行う。結果は二次ガンマ線発生に寄与する物質をパラメータとしたデータベースにまとめる。さらに、その結果を解析してストリーミングにおける二次ガンマ線評価手法を開発する。

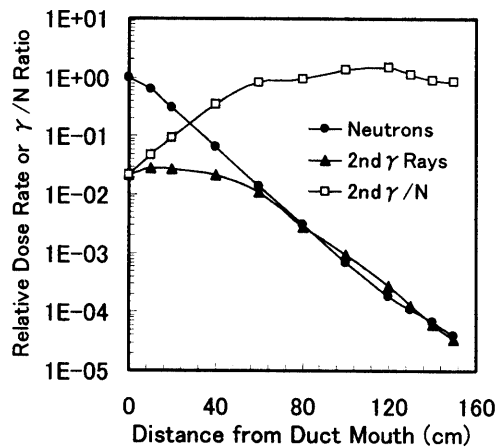


図4 口径5cmの直円筒ダクト内中性子及び二次ガンマ線量率分布

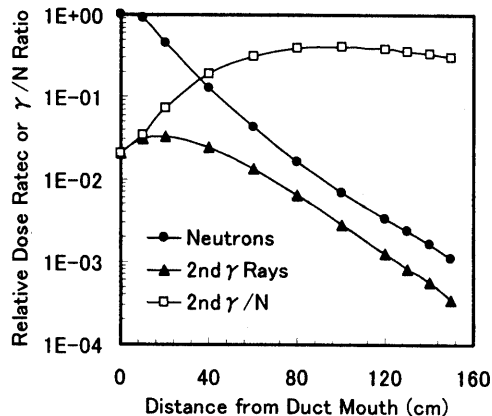


図5 口径20cmの直円筒ダクト内中性子及び二次ガンマ線量率分布

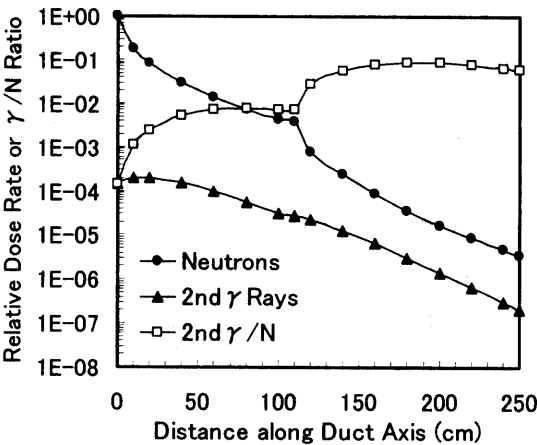


図6 口径20cmの90度屈曲円筒ダクト内中性子及び二次ガンマ線量率分布

3. 遮蔽壁後部空間線量分布

遮蔽壁後部空間における線量評価点は通常複雑形状部出口から離れた位置で、かつ、ストリーミング放射線が直接当たらない場所である。

従って、評価点での線量を求めるためにはストリーミング線量だけでなく複雑形状部出口での放射線の角度分布あるいは遮蔽壁後部空間における線量空間分布を知る必要がある。しかし、このような計算に利用できるデータは少ない。そこで、出口での角度分布を等方分布等と仮定して計算を行っている。直円筒ダクトの場合等方分布を仮定すると評価点での線量率 D は次のようになる。

$$D = D_0 \times S \times \alpha \times \cos \theta / \rho^2 \quad (1)$$

ここで、 D_0 はダクト出口での線量率、 S はダクト切り口面積、 α はダクト壁の微分アルベド、 θ はダクト出口中心と評価点を結ぶ線とダクト軸がなす角度、そして ρ はダクト出口中心から評価点までの距離である。以下は上式とモンテカルロ計算の比較である。計算体系はコンクリート壁中の口径 20 cm のダクトである。線源は 1.25 MeV ガンマ線で斜め 45 度平行入射である。図 7 にダクト軸に対し 30 度及び 60 度の方向での比較を示す。縦軸はダクト出口線量率を 1 とした場合の相対線量率である。式 (1) の値は Chilton-Huddleston の式⁽⁴⁾ から求めたアルベドを用いて求めたものでストリーミングによるもののみであるが MCNP の計算結果には壁透過線も含まれている。しかし、式 (1) の結果は 2 桁以上 MCNP の結果より過大である。過大評価の理

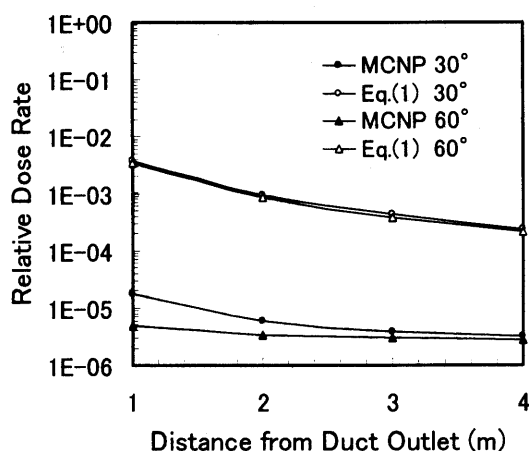


図 7 ストリーミングガンマ線による遮蔽壁後部空間線量率分布

由の最大のものは出口壁での散乱を等方と仮定したことにあると考えられる。このように従来の方法は安全側の結果を与えるとはいえ精度が悪すぎるので、新しい精度の良い評価法が必要である。今後は、例えば円筒ダクトを例にすると、ダクト口径、ダクト長さ、ダクト屈曲角度、放射線の方角とエネルギー等をパラメータとしたダクト壁後部空間での放射線線量分布に関するデータベースを作成し、その解析を通して新しい精度のよい評価式を導出する。

4. 部分的遮蔽欠損効果

図 1 の第 1 脚や第 3 脚部のように部分的に遮蔽壁を貫通する遮蔽欠損部の効果はすでにこれまで開発した計算コード⁽²⁾の中には組み込まれている。この場合、遮蔽欠損の前後の遮蔽壁中の放射線の減衰は遮蔽壁全面に入射する放射線源に対する減衰データを使用している。しかし、このような減衰データでは図 1 の A 点から遮蔽壁後部までの減衰については過大評価することになる。従って、より実際的な減衰データが必要である。このように各種の遮蔽欠損の効果を評価する精度の良いデータや方法が必要である。これを解決するための具体的な方法については今後検討を行う。

5. 特殊形状等の扱い

多孔ダクト、スクリューダクト、保温材が挿入された円環ダクト、内管内がナトリウムの円環ダクト等について計算法を開発し、ストリーミング計算コードの適用範囲の拡張を行う。

参考文献

- (1) Miura, T. et al. : J. Nucl. Sci. Technol., Supplement 1, p. 660 (2000).
- (2) 日本原子力学会 : 「原子力施設等での遮蔽安全性評価手法及びデータの調査 (V)」 p. 116 (2000).
- (3) 三浦他 : JAERI-Tech 97-052 (1997).
- (4) Chilton, A. B., Huddleston, C. M. : Nucl. Sci. Eng., 35, 401 (1969).