

令和 2 年 6 月 11 日現在

機関番号：82627

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2016～2019

課題番号：16K06967

研究課題名(和文) 線多重層ビルドアップ係数表示式の系統的パラメータ推定に関する研究

研究課題名(英文) Study on systematic parameter estimation of formula expressing gamma-ray buildup factor for a multi-layer shield

研究代表者

平尾 好弘(Hirao, Yoshihiro)

国立研究開発法人海上・港湾・航空技術研究所・その他部局等・研究員

研究者番号：70425750

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,500,000円

研究成果の概要(和文)：原子力施設等は、施設から発する放射線について法令で定められた線量基準を満たすように安全設計される。点減衰核法は、遮蔽を透過する線量の簡易で合理的な評価に多用されているが、単層材料向きであるため、複数の材料を重ねてできる多重層遮蔽に対してうまく適用できなかった。本研究では既往研究の欠点を見直し、新たな透過表現として、遮蔽体内の平衡スペクトルに着目した順透過スペクトル法を開発した。この手法による線量減衰は入射エネルギーや媒質を変えても全線量に対して良く追従し、また多重層の境界で前後の層から受ける影響を限定して考えられるため、多重層の透過線量表示式の構築に有利になることが示された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

放射線の透過線量を簡易に計算する手法は、施設の安全設計の他、事故緊急時の被ばく評価等、迅速な対応が求められる場面で必要不可欠である。実施設では、エネルギーの異なる放射線や透過中に現れる二次放射線を効果的に遮蔽するため、材質の異なる遮蔽を重ねる例がよくみられる。本研究では、近年発展した精密シミュレーションの知見を得て、簡易計算手法の見直しを行い、多重層遮蔽の合理的な線量評価に対して適用性の高い手法を開発した。今後、遮蔽計算コードへの実装を通じて、廃炉作業時の汚染土壌による被ばく評価や、放射線作業従事者を防護する簡易遮蔽の設置等、幅広い応用が期待できる。

研究成果の概要(英文)：Nuclear facilities are designed to be safe within the radiation dose limits of regulations regarding external exposures received by public and workers. The point-kernel method is often used for simple and reasonable dose evaluation of gamma-rays that penetrates a shield. However, it is originally made for a single-layer material, and cannot be applied well to a multi-layer shield that is often installed in practical applications. In this study, we reviewed the previous studies and then developed 'a forward transmission spectrum method' that focuses on the equilibrium spectrum inside of the shield as a new evaluation method. The dose attenuation expressed by this method follows the total dose well even if the incident energy or medium is different, and also this method can limit the influence from the front or back layer around the boundary of multiple-layer. Thus, it is shown that this method is advantageous in establishing the systematic dose expression of multiple-layer shield.

研究分野：放射線遮蔽工学

キーワード：多重層遮蔽 点減衰核法 簡易遮蔽計算 線ビルドアップ係数 順透過スペクトル法

1. 研究開始当初の背景

(1) 点減衰核法とは、放射線の線源から放出された放射線が遮蔽媒質を透過して評価点に与える線量を簡易的に計算する代表的な手法である。この手法では、線源と評価点を直線で結び、線源-評価点間の距離を幾何減衰する放射線の「直達成分」に、媒質中での放射線の「散乱成分」を上乗せし、評価点での線量を評価する。この線量の上乗せ分に対する補正をビルドアップ係数(以下、BF)と呼び、 γ 線に対して、媒質、媒質の厚さ、線源エネルギー毎に別途計算で求められてきた。単層の遮蔽媒質に対するBFは原子力商業利用の黎明期から開発され、原子力施設・放射線施設の幅広い分野で適用性が確認されてきた。これまで日本は、ANSI/ANS-6.4.3やAESJのBF標準¹⁾策定、またはBFをエネルギー内挿するGP近似式の開発²⁾等、この分野の基礎研究で世界をリードしてきた。

(2) 単層BFを用いた点減衰核法による透過線量計算は成功裏に普及したが、実際の放射線場を目を向けると、中性子と γ 線を共に減衰させ、また構造物や重量機器を据え付ける要請から、実際の遮蔽体は2種の方法を重ねた多重層で構成されることが多いため、多重層に対する透過線量の簡易評価が求められてきた。従来、そうした多重層に対して、最外層媒質の単層BFを代表的に用いた簡易評価がなされてきたが、オーダーで過大/過小評価するケースが知られており、より合理的な精度で物理的に分かり易く表わす手法が研究されてきた。

(3) ただし、多重層遮蔽による線量の減衰曲線は層間で急激に変化し、それに応じてBFも層の境界で急激に変化するため、また、層の置かれる順序によっても変化するため、簡易表現は挑戦的な課題であった。1990年代に、透過行列及び散乱行列を用いる線量表示式³⁾が秦らにより提案され、特定の媒質の組み合わせで有効性が確認されたものの、行列要素(以下、パラメータ)の推定法が一般化されておらず、また数百keV以下の領域で誤差が大きく、今日まで実用に至っていない。

2. 研究の目的

(1) 多重層遮蔽の透過線量を表す行列式に対して、改良を施したモデル表示式を開発し、そのパラメータを物理的な根拠をもって系統的に推定する手法の開発を行う。必要に応じて、コンピュータグラフィクス(以下、CG)分野で培われた多層媒質の質感表現の知見を援用する。モンテカルロ(以下、MC)法によるシミュレーションと実測を通じて、改良した表示式のパラメータを予備的に作成し、結果の妥当性を示して、多重層遮蔽の簡易線量計算の予測精度の向上を目指す。

3. 研究の方法

(1) 代表的な媒質(水、鉄、鉛)の単層及び二重層BFのレファレンスデータを整備するため、MC法計算コード(粒子・重イオン輸送計算コードPHITS+電磁カスケードシミュレーションコードEGS)を用いて媒質中における γ 線の透過計算を行う。

(2) 上のBF計算の知見を用いて、秦らの開発した多重層線量(または多重層BF)を近似する次の表示式³⁾の妥当性を検討する。

$$B_N = C(I + R_N) \left\{ \prod_{l=1}^N T_l \right\} S$$

ここで、左辺は B_N (N 層の多重層透過を表わすBF)、 C は線量換算係数の行列、 I は単位行列、 R_N は反射行列、 T_l は媒質 l の透過行列、 S は線源強度の行列である。秦の表示式の特徴は、バルク遮蔽体を透過する単色 γ 線(エネルギー E_0)の線量計算において、そのエネルギー領域を経験的に4群に分割した所にある。従って、この表示式を支配する透過行列 T_l 及び反射行列 R_N は、 4×4 の行列に簡略化される。この4群分割、あるいは反射行列が媒質の最外層にのみ適用されていることの妥当性を調べる。

また、モデル表示式の右辺は線量を与えており、左辺のBFと整合していない。非衝突線の線量を導入して整合可能であるが、その前に右辺の行列式を個々の層の単層BFを用いて構成できないか検討する。

(3) モデル表示式の透過行列 T_l 及び反射行列 R_N の行列要素に対して、法則性を見出し、媒質・厚さ・エネルギーに対して系統的なパラメータ推定法を検討する。CG分野において、多層媒質内の散乱光や遠景を表現するのに、一定の深さ(距離)以上は透過と反射のディテールを削いで簡易表示される。それを参考に、モデル表示式を簡略化する方法の導入を検討する。

(4) 多重層BF及び多重層透過モデル表示式の妥当性を検証するため、多重層を模擬する遮蔽体装置を準備し、最低限の範囲で透過実験を行う。

4. 研究成果

(1) 多重層 BF レファレンスデータの整備

線減弱係数及び原子番号を考慮して、代表的な媒質（水、鉄、鉛）の単層及び二重層に対する BF を MC 法により有限媒質で 20mfp（平均自由行程長）以上計算できることを確認した。この γ 線透過計算では、線源が点の場合と垂直ビームの場合の違い、及び keV 領域で顕著となるコヒーレント散乱等のマイナーな相互作用が BF に与える影響を明らかにすることができた。

(2) 多重層透過モデル表示式の妥当性検討の知見（図 1）

上記の BF 計算の知見をもとに、秦らの開発した多重層 BF 表示式の妥当性を検討した。単純 2 重層における γ 線の透過と反射のスペクトルをエネルギーと散乱角度で大まかに分類し、 γ 線の透過及び反射に関するエネルギー依存性及び角度依存性の傾向を整理した。その結果、秦らの論文で見られた透過線量の許容誤差内での一致は確認できたものの、透過中あるいは層間のスペクトル変化を十分に表すことができず、不規則なズレが生じることがわかった。

また、モデル表示式を、多重層を構成する個々の媒質の BF を用いて表わす検討を様々に行った結果、単層 BF で見られた不規則なズレが伝播するため、多重層の複雑なスペクトル変化を表現するには不十分なことが明らかになった。

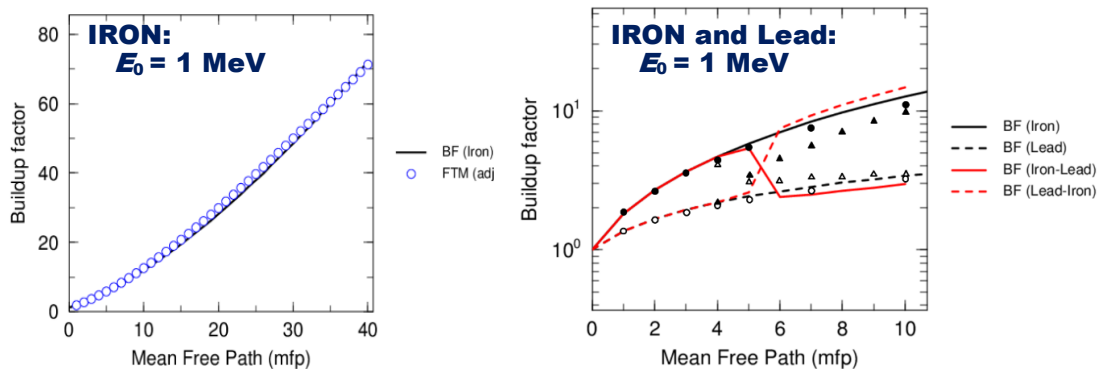


図 1 改良したモデル表示式の透過行列（図中 FTM）を単層で調整した結果（左）、及びその透過行列を多重層に適用した結果（右）

(3) 順透過スペクトル法による新たな透過表現の開発⁴⁾

多重層透過モデル表示式の透過行列のパラメータ推定法を検討するため、上の(2)で整理したスペクトル情報を、媒質の原子番号、厚さ、入射エネルギーについて相関を分析した。CG 分野の知見を参考に、パラメータの変化に対して不変になるような相関を探した結果、厚さ数 mfp の媒質透過によるビルドアップを経て形成される特徴的なスペクトルの存在が明らかになった。過去に Berger が指摘した（準）平衡スペクトル⁵⁾と考えられ、媒質の断面積に依存し、透過距離に対して指数減衰するが形状は保たれること、その減衰の程度は非衝突線の減衰と比べて緩やかであることがわかった。検討を進めた結果、透過減衰を特徴づける平衡スペクトルと、BF の母数である非衝突線との関係性が薄いことが、多重層モデル表示式を BF の概念を用いて系統的に定める障害になることがわかった。前述のとおり、媒質中の γ 線の複雑な挙動を表わすスペクトル情報が低次元の BF に畳み込まれているせいでもある。

そこで、研究の方向性を見直すこととし、媒質中のマクロな透過現象を支配する因子を平衡スペクトルと仮定し、その形成過程を分析することで、平衡スペクトルの形成を主導する特徴的な γ 線を発見した。現象的には媒質中を一度も後方散乱しない前方透過線を指し、「順透過スペクトル」と定義して、それをベースに行列式を見直した順透過スペクトル法を開発した。

代表的な媒質（水、鉄、鉛）に対し、PHITS+EGS シミュレーションで順透過スペクトルの特徴を確認した。鉄遮蔽体中における全線量の減衰、順透過スペクトルの線量減衰、及び非衝突 γ 線の線量減衰を図 2 に示す。

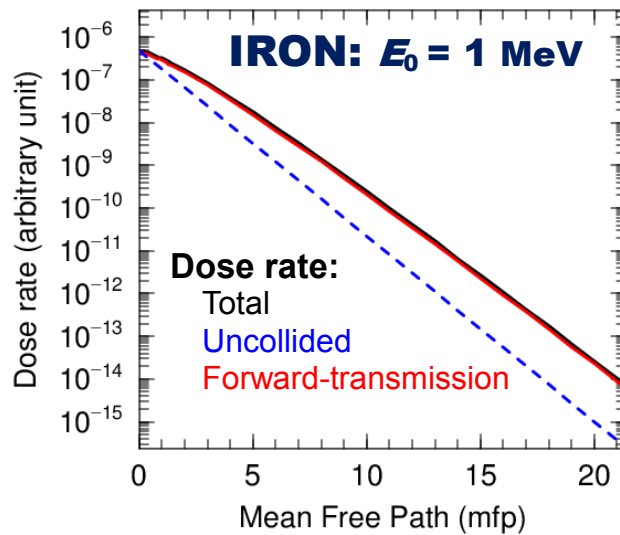


図2 鉄遮へい体中における線量の減衰

非衝突 γ 線の線量減衰と比べて、順透過スペクトルの線量は、全線量の減衰によく追従することがわかる。全線量に対する順透過スペクトルの線量減衰の追従性の良さは、入射エネルギーや媒質を変えても確認することができた。順透過スペクトルは、その定義により、線源 - 評価点間に設置された媒質による影響しか受けることがない。この性質は、多重層の境界において、前層・後層媒質から受ける様々な影響（ γ 線の複雑な振る舞い）を限定して考えることができるため、その線量減衰の表示式の構築において有利に働く。現在、同手法を多重層に応用した場合の妥当性を調べている。

(4) 順透過スペクトル法の既往研究における位置付け⁶⁾

新たに開発した順透過スペクトル法について、過去に多重層に対して展開した透過線量計算手法の原理と特徴をレビューし、手法の位置付けを行った。代表的な手法として、点減衰核法、Invariant Embedding (IE) 法、及び透過行列法を対象にレビューした結果を表1に示す。

表1 γ 線バルク遮蔽に対する線量計算法のレビュー

	点減衰核法 (簡易)	IE法 (詳細)	透過行列法
原理	非衝突線の線量に対して、多様な補正係数を考慮	光の反射・透過問題の行列解法を γ 線の輸送問題に拡張	γ 線のエネルギー領域を分割した行列計算に基づく
特徴・応用	<ul style="list-style-type: none"> パラメータが少なく理解容易 拡張性なく多重層問題は対処療法的 	<ul style="list-style-type: none"> ビルドアップ係数算出に利用 多重層問題へ拡張 	<ul style="list-style-type: none"> 多重層問題に有利で、適用性あり

簡易計算法は通例、パラメータを絞るために馴染み深いベースと、そこからの変化やバイアスを表現する定数を用いた数式で表現される。ベースと定数の関係性が複雑だと直感的理解を妨げるので、現象を支配する放射線挙動の概念をベースとして選び、また関係性が線型になるようにベースと定数の独立性が考慮される。例えば、点減衰核法はベースが非衝突線量でBFの独立性が高く、次元も低いことが広く利用される所以である。一方、多重層境界の不連続な線量変化を説明するには、点減衰核法に畳み込まれた情報では足りず、対処療法的な補正しかできない。順透過スペクトル法は、次元を増やしてスペクトルの変動を表す行列要素を定数とする透過行列法に倣ったものである。そして、透過中に不変性のある平衡スペクトルに着目し、その分析をもとに順透過スペクトルを定義してベースとした所に新規性がある。



(5) 多重層透過実験の知見

上の(1)で整備した BF レファレンスデータと(3)で開発した順透過スペクトル法の妥当性を検証するため、多重層遮蔽を模擬する治具及び遮蔽板の一部を開発して、Cs と Co 線源を用いた透過実験を実施した (図 3)。多重層の遮蔽実測の例は限られており、旧く 1960 年代の鶴尾らの実測が計算と良い一致を見せている⁷⁾。水タンク、鉄、鉛の組み合わせで 2 重層を作り、段階的に遮蔽厚さを増やして 10mfp 位まで透過線量とスペクトルを測定した。結果的に、線量が低くなると計算及び鶴尾論文と比較してあまり良く一致しなかった。治具が周囲からの後方散乱の影響と考えられ、改めてコンフィギュレーションを検討する必要がある。

図 3 多重層遮蔽を模擬する治具、線源コリメータ、遮蔽板（水タンクと鉄）の実験配置

<引用文献>

- 1) 日本原子力学会標準、 γ 線ビルドアップ係数：2013、AESJ-SC-A005: 2013, 360 頁 (2013).
- 2) Y. Harima, "An Approximation of Gamma-Ray Buildup Factors by Modified Geometrical Progression", Nucl. Sci. Eng. 83, 299 (1983).
- 3) K. Shin and H. Hirayama, "A New Approximating Model for Gamma-Ray Buildup Factors of Stratified Shields", Nucl. Sci. Eng. 118, 91 (1994).
- 4) 松田 規宏、平尾 好弘「順透過スペクトル法の開発 (1) 順透過スペクトル法の原理」日本原子力学会 2019 年秋の大会、富山大学五福キャンパス、2019 年 9 月 11～13 日.
- 5) M.J. Berger and J. Doggett, "Reflection and Transmission of Gamma Radiation by Barriers: Semianalytic Monte Carlo Calculation", J. res. Natl. Bur. Stand. 56, 89 (1956).
- 6) 平尾 好弘、松田 規宏「順透過スペクトル法の開発 (2) バルク透過計算における視点」日本原子力学会 2019 年秋の大会、富山大学五福キャンパス、2019 年 9 月 11～13 日.
- 7) 鶴尾昭、 γ 線の多重層透過問題におけるスペクトルマトリックス計算法、日本原子力学会誌、6, 2 (1964).

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計3件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 平尾 好弘, 延原 文祥, 松田 規宏, 大西 世紀, 坂本 幸夫
2. 発表標題 簡易遮蔽解析コードレビューWG第1期活動の総括 (2016-2017)
3. 学会等名 日本原子力学会 2019年春の年会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 平尾 好弘, 松田 規宏, 坂本 浩紀, 河野 秀紀, 大西 世紀, 延原 文祥
2. 発表標題 簡易遮蔽解析コードレビューWGの2016年活動概要 (1) コード開発利用調査とアクションプラン
3. 学会等名 日本原子力学会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 延原 文祥, 平尾 好弘, 松田 規宏, 坂本 浩紀, 坂本 幸夫, 岩下 充成, 吉岡 健太郎
2. 発表標題 簡易遮蔽解析コードレビューWGの2016年活動概要 (2) 新しい点減衰核コードの開発課題とロードマップ
3. 学会等名 日本原子力学会
4. 発表年 2017年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

<p>・日本原子力学会放射線工学部会 簡易遮蔽解析コードレビューワーキンググループ 平成29年度活動報告書 http://www.aesj.or.jp/~rst/H29_WG_report.pdf</p> <p>・日本原子力学会放射線工学部会 簡易遮蔽解析コードレビューワーキンググループ 令和元年度活動報告書 (2020年8月頃に部会HPに掲載予定 http://www.aesj.or.jp/~rst/)</p>

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	松田 規宏 (Matsuda Norihiro) (80354760)	国立研究開発法人日本原子力研究開発機構・原子力科学研究部門 原子力科学研究所 原子力基礎工学研究センター・研究職 (82110)	
連携研究者	坂本 幸夫 (Sakamoto Yukio) (90354703)	株式会社アトックス技術開発センター・その他部局等・研究員 (92505)	