

γ線多重層ビルドアップ率の

表示式に関する研究

京都大学 大学院工学研究科 秦 和夫

1 はじめに

放射線利用施設における放射線の遮蔽計算は安全評価の基本的事項である。中でもビルドアップ率はγ線の線量評価の基本データとなっている。

γ線のビルドアップ率の研究の歴史は古く、1954年 Goldstein-Wilkins がモーメント法を用いて一連のデータを算出して以来、多くの研究がなされてきた。1991年には米国原子力学会のもとで包括的なγ線の減衰係数とビルドアップ率標準データが作成され、ANSI/ANS6.4.3 レポートとして公開されたため、これに基づく点減衰核計算コードが世界的に広く利用されることとなったが、その後もビルドアップ率の精度向上の努力は続けられている。

しかしながらγ線ビルドアップ率については非常に大きい問題が残されている。それは多重層体系のデータがい

まだに欠落しているという点である。現実の体系は多くの場合単一物質によってできているわけではないので、本当は多重層体系のデータが必要とされる。実際この問題の重要性は点減衰核法が使われ始めて以来ずっと認識されていて、今までに多くの

研究がされてきている。多重層体系の場合、種々の物質や厚さの組み合わせが考えられるので、表示式を使ってそのデータを整理し、そのパラメータを内挿することにより任意の物質層の組み合わせに対して、求めるデータを得ることになる。今までに提案されている表示式は、いずれも狭いエネルギー範囲の特定の物質の組み合わせに対してしか適用できず、実用出来る一般的な表示式は得られていないのが実情である。

図1に例を示すようにビルドアップ率は多重層ではエネルギーにより特異な振舞いをしており、経験だけからこれを予測することは困難である。

本研究で提案する式は、4群のベクトル表示を行なうことにより物質層内のγ線スペクトルの変化を直接表現したものである。このため表示式が

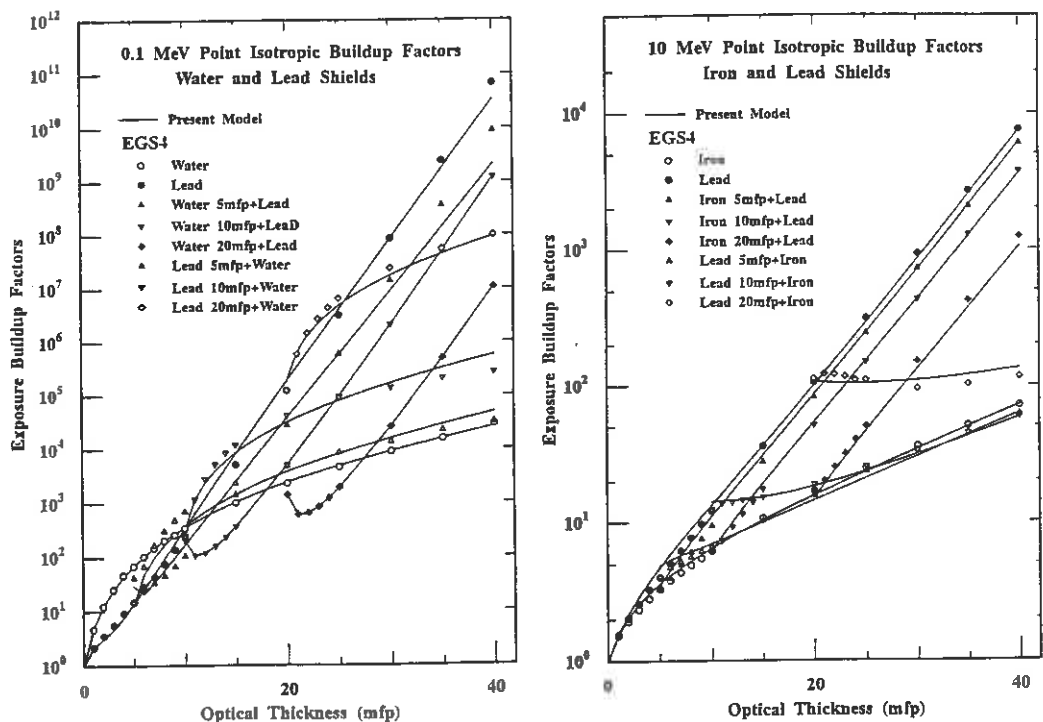


図1 0.1MeVおよび10MeV の二重層ビルドアップ率の特異な振舞い

簡単でかつ極めて一般性の高いものになった点が従来の研究との違いである。

2 表示式 の概念と平板体系への適用

N層からなる多重層平板体系を考える。第N層の後には無限厚の同じ物質が置かれるが、ここでは1平均自由行程 (mfp) の厚さの物質で置き換えることにする。これに一樣な単位強さのγ線を平板に垂直に入射させる。この時の線源強度をSとする。各物質層の厚さを mfp単位で n_i ($i=1, 2, \dots, N$) と表わし、1mfpを透過するγ線の直接線の透過率に対する相対的な透過確率を行列表示してTとすると、多重層γ線ビルドアップ率は、

$$B_D = \vec{C} (I + B_N) \left(\prod_{i=1}^N T_i^{n_i} \right) \vec{S}$$

となる。 B_N は最後に付加した1mfp層の反射行列でCは光子エネルギースペクトルから線量への換算係数である。透過行列は垂直入射を仮定してモンテカルロ計算で求めるが、1 mfp の厚さなので計算は簡単である。

さて、実際にはγ線は透過するにつれて角度分布をもつことになるので、体系中での実効的なスペクトルは上で求めたものよりも小さくなるであろう。これを考慮するために、 α 、 β 、 γ という経験パラメータを透過行列の第2、3、4列にかけておく。経験パラメータという意味は対象とするデータに最もよく合うようにこれらを決めるということである。

こうして定めたパラメータを使って実際に2層系の計算をした例を図2、3に示す。図2は通常よく見慣れた変化をしていて、重い物質のビルドアップ率は小さく、軽い物質は大きい値となっている。また物質層がきり変わると第2層の物質のビルドアップ率に近づく傾向になるが、一致はしない。物質境界では前層のビルドアップ率と少し

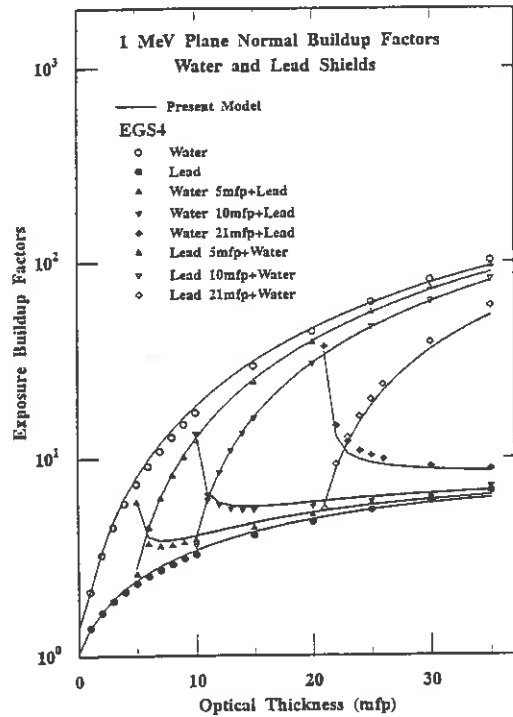


図2. 1 MeV の平板垂直入射体系の二重層ビルドアップ率

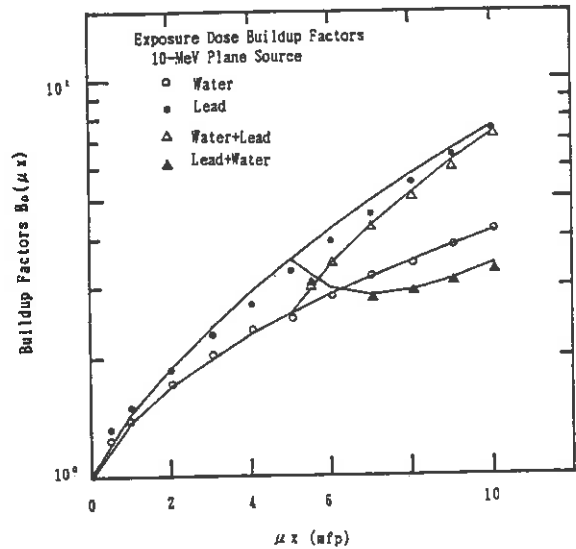


図3. 10MeV の二重層ビルドアップ率

異なる値となっていて、このような点もよく表現されている。エネルギーの高い図3は全く異なり鉛の方がビルドアップ率が大きくなっていて、しかも軽い水層が後ろに来ると水の単一層のビルドアップ率よりも低くなっている。これは鉛中の制

動放射の寄与とコンプトンミニマムの存在のため、光子スペクトルが二つの物質では交差することに由来する。これも含めて本表示式の再現性は十分である。

3. 点等方線源への適用

無限媒質中に点等方線源があると少し事情が異なる。

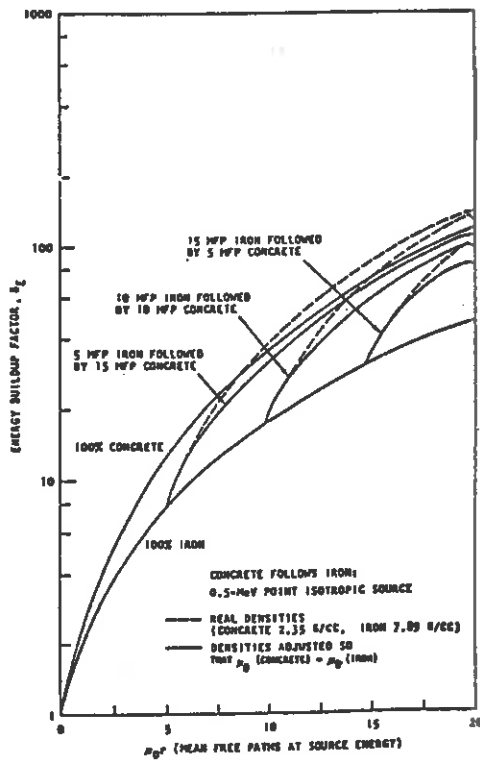


図4. 0.5MeV点等方線源ビルドアップ率の“密度効果”

図4の点線に示すように二層系のデータは組合せにより第二層物質の単一層のビルドアップ率より大きくなるか、逆に小さくなる。直観的には図2のような形になるべきと思われるが、そうならない。しかし、二つの物質の密度を等しくしてやると実線のようになって直観と一致する。これを“密度効果”と呼んできたが、その理由は不明であった。しかし、今回の表示式の立場ではその理由は明確である。即ち、球殻の場合と平板の場合

とでは同じ1 mfp 厚さでも斜めに進む散乱線の透過確率が異なるのである。そこでこの効果をモデル化して球殻の半径効果として透過行列の各行に補正を加えることにより“密度効果”を再現できることがわかった。一旦パラメータが求められれば任意の三層体系に対しても図5のように精度よくデータを予測できる。また図1に示した低・高エネルギーでのビルドアップ率の複雑な変化も図中の実線のように良好に再現できることが確かめられた。

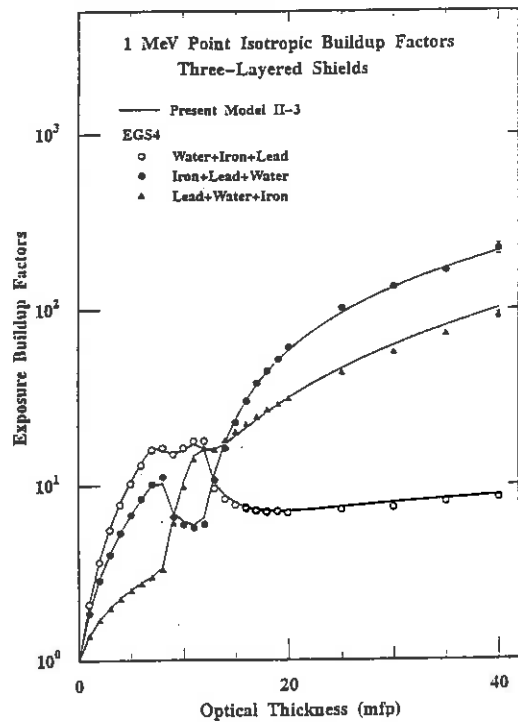


図5. 3重層ビルドアップ率の計算例

4. まとめ

長い間課題とされていた多重層γ線ビルドアップ率の表示式を提案した。本表示式は極めて簡単な形をしており実用に適している。すでに水、鉄、鉛の組合せに対して 0.1~10MeV の範囲で40 mfpの厚さまでのデータに適用して十分に一般性があることも確認している。今後、物質数を増してパラメータが系統的に求められれば、世界的に広く使ってもらえるものになるものと考えている。