

ANSI/ANS Standard Gamma-Ray Buildup Factor Data のでき上がるまで

(東工大) 播磨良子

1. はじめに

1979年3月28日のTMI原子炉事故の際、低エネルギーガンマ線の減衰データが無いため、事故後の対策を適切、速やかに講じる上で支障をきたした。これを契機にANS Standard Committeeのworking group ANS-6.4.3で、ANSI (American National Standard Institute) データとなる、点減衰核積分コード用点線源ビルドアップ係数を開発していたが¹⁾、日本から、データの作成、評価、フィッティング式のパラメータ決定、ガンマ線遮蔽計算のための点減衰核コードの組み込みで国際協力をしたので、その内容を紹介する。

2. 点減衰核積分コード

点減衰核積分法では、点線源からの距離 r にある測定点での線量 D を次式で求める。

$$D = \frac{1}{4\pi r^2} K \cdot Br(E, \mu(E)r) \exp(-\mu(E)r)$$

ここで K はガンマ線束から線量率への換算係数、 Br は線量 buildup factor、 $\mu(E)$ は線減衰係数である。そして、三次元体型の線源を小分割し、これを点線源に置き換えて、線源を体積分することにより、三次元の遮蔽計算を簡単に解く事ができる。

代表的な点減衰核積分コードには、遮蔽計算用として、QAD-CGGP、SPAN、ISOSHILD、PATHや、求積はモンテカルロ法で計算し、物質透過に点減衰核を用いたMERCURE4-V5、RANKERN等があり、一回散乱後の散乱ガンマ線に buildup factor を適用した、スカイシャイン計算用のG33-GPや迷路ストリーミング計算用のSCAP等がある。点減衰核積分コードの特徴は、①三次元計算ができる、②計算が早く、費用が安く、精度がよい、③コードの扱いが簡単でやさしく、取り扱いに熟練を要さない。そのため、原子炉関連施設、燃料輸送容器、廃棄物施設、再処理施設、医療用加速器、アイソトープ利用施設、X線発生装置、放射光施設等のガンマ線の遮蔽設計の90%は、点減衰核積分コードを利用して行われている。

3. ビルドアップ係数

ビルドアップ係数は、線源から離れた距離にある検出器に到達する非衝突光子のレスポンスと全光子のレスポンスの比として次式で定義される。

$$B = \int_0^{E_0} R(E) I(E, \mu r) dE / \{R(E_0) I(E_0, \mu_0 r)\}, I(E_0, \mu_0 r) \propto \exp(-\mu_0 r)$$

この型で、非衝突光子以外の寄与を表すことは、物質中でのガンマ線の減衰を表すのに、便利な表現である。即ち、非衝突線束の指数減衰に比べて、ビルドアップ係数は、透過距離、線源エネルギー、

原子番号の変化に対してゆるやかに変化するため、任意の透過距離、線源エネルギー、原子番号の内挿値を精度よく求めることができる事である。

3.1 GoldsteinとWilkinsのビルドアップ係数²⁾

1954年、GoldsteinとWilkinsがモーメント法を用いて、水、Al、Fe、Sn、W、Pb、Uの7物質について計算した結果が、TaylorやCapoの式のパラメータフォームでQAD-CGやSPANコードの基礎データに長く利用されてきた。これらのデータは、光子エネルギーが0.5(水のみ0.255)MeV~10 MeV、透過距離が0~20 mfpで、物質と光子の相互作用として、吸収は光電効果と電子対創生、散乱は自由電子によるコンプトン散乱のみであった。

3.2 ガンマ線ビルドアップ係数の新規の必要性

TMI事故の後処理でも問題になったが、低エネルギーデータへの要求が強い。核燃料サイクル、廃棄物処理、放射光施設、X線発生装置、医療等のアイソトープ利用施設等では、0.5 MeV以下のビルドアップ係数が上記7物質を含めて、多くの物質について要求されている。又、高エネルギー加速器や捕獲中性子反応で発生する高エネルギーのガンマ線に対し、制動輻射を考慮したデータが必要とされている。

光子エネルギーが低くなると、同じ遮蔽材の厚さ(cm)に対し、大きな mfp 単位のデータが必要となる。例えば、1mのコンクリートの場合、その厚さを mfp 単位で表すと、1、0.5、0.1 MeVの光子エネルギーに対し、それぞれ15、20、40であり、上記のGoldsteinとWilkinsのデータでは不足する部分がでてくる。

3.3 標準ライブラリー作成

1980年、現状に即したビルドアップ係数を作成するため、ANS-6.4.3WGがスタートした。一方、日本でも、1983年、原子力研究所原子力コード委員会簡易計算法WGで、ビルドアップ係数のデータを整備し、点減衰核コードのデータベースを作成する準備を始めた。ところが、丁度その年の5月に東京で開催された第6回放射線遮蔽国際会議において、委員長のORNL/RSIC (Radiation Shielding Information Center)のTrubeyから、米国でのANS-6.4.3の紹介があった¹⁾。その中で、2月にNSEから公開された、著者の提案によるG-P (geometric progression) フィッティング式³⁾が、非常に精度がよい式であるという話もあった。

その後、Trubeyからモーメント法で計算した、22物質のビルドアップ係数についてG-Pフィッティング式でフィットしてもらえないかという依頼があり、簡易計算法WGで手分けしてフィッティング・パラメータの決定を行った⁴⁾。

その折、軽い物質に低エネルギーガンマ線が入射した場合について、線源近くに変なデータが含まれている事に気がついた。そこで、PALLASコード⁵⁾とG-Pフィッティング式⁶⁾を用いて、これらのデータの修正や、モーメント法コードではできない制動輻射を考慮したビルドアップ係数の計算⁷⁾、4本のkX線を含めた計算⁸⁾等を行った。比較する実験がないため、EGS4⁹⁾やANISNコード¹⁰⁾で比較計算を行いながら、データを作成した。これらの結果は、1985年設けられた原子力学会「放射線施設遮蔽」研究専門委員会ビルドアップ係数小委員会で討議された。

3.4 ANS-6.4.3のビルドアップ係数

作成されたデータの内容が表1にまとめられている。

照射線量は被爆線量用に、エネルギー吸収は、発熱計算等に用いられる。

エネルギー領域は、0.015~15MeVと低エネルギー部分に広げられ、また透過距離は、40mfpになった。物質の種類も工学的に必要な26物質となった。

フィッティング式としてG-P式の外に、解析計算に長く利用され、まだ需要のあるTaylor式が追加され、ANSでパラメータの値が決められた。

遮蔽材-人体の境界線量への換算係数: 空气中で測定された照射線量率(レントゲン/hr)は、放射線が人体に入り、多重散乱して、実際の被爆量を正しく評価していないとして、保健物理の立場では、垂直入射ガンマ線が組織に入り、組織中で最大となる線量を線量当量として用いている。これは「レム」単位で表示するが、レントゲンからレムへの換算係数がANSI/6.11¹¹⁾として出され、広く利用されてきた。

しかし、遮蔽材の後方に続く人体へ入射する光子は、単一エネルギーでなく、入射角も一定でない。そのため、遮蔽材-組織という体型で、改めて換算係数がASFITで計算され¹²⁾、ANSデータに入れられた。

4. 日本でした仕事

4.1 Buildup Factor Dataの計算と評価

ANSデータ(モーメント法)の評価

Beの0.03~0.3MeV PALLAS計算¹³⁾

Be~Cu 問題のあるデータをG-P fitting式で置き換え¹⁴⁾

制動輻射、特性X線を考慮したデータをPALLASで計算⁸⁾

Goldsteinらのデータは、0.5MeV以下、20mfp以上のデータがなかったため、それより低エネルギー、深い透過距離のデータは0.5MeV、20mfpのデータで代用され、過小評価していた事がわかった。又、モーメント法によるデータは、制動輻射を、例えば、鉛の8、10、15MeVに対しファクター2、3、10過小評価していた事がわかった。K吸収端付近では特性X線を無視していたため、ファクター30も過小評価していた事が明らかになった¹⁵⁾。

4.2 点減衰核法のG-Pパラメータデータベースの作成

全データのG-Pパラメータを決定

G-Pパラメータによるエネルギー、原子番号の内挿により、連続データにする

40 mfp以上のデータの推定する外挿式の確立

QAD-CG¹⁶⁾, G33¹⁷⁾へG-Pパラメータを組み込む

(DLC-129¹⁸⁾): G-PパラメータによるBuildup Factor Data Library)

新しいビルドアップ係数を用いたベンチマーク計算で、他の複雑で時間のかかるディスクリートやモンテカルロコードと同等の結果を短時間に求められる事を確かめた。

4.3 その他基礎的検討

コヒーレント散乱

ANSデータは自由電子による散乱断面積を用いているが、コヒーレント散乱や、束縛電子による散乱断面積を用いたときのANSビルドアップ係数への影響をEGS4コードでチェックした¹⁸⁾。

遮蔽材-人体の境界線量への換算係数

日本では、1 cm深部線量への換算係数をPALLASコードで求めた²⁰⁾。

5. ビルドアップ係数のフィッティング式

フィッティング式は、データ容量の節約と、離散的なデータをエネルギー、距離に関し、連続データとするために用いる。

Goldsteinらのビルドアップ係数に対し、

$$\text{Berger: } Br(X) = cX \exp(aX)$$

$$\text{Taylor: } Br(X) = A_1 \exp(-a_1 X) + (1 - A_1) \exp(-a_2 X)$$

$$\text{Capo: } Br(X) = \sum_{ij} C_{ij} (1/E)^j (X)^i$$

のフィッティング・パラメータが点減衰核コードにデータとして組み込まれていた。新しいビルドアップ係数は、透過距離も40mfp、光子エネルギーが0.015~15MeVまで上げられた事により、低エネルギーの光子が軽い物質に入射した時のビルドアップ係数は、距離に対してやや複雑な依存性を示すため正確に近似できなくなった。しかし、筆者の提案したG-P(Geometric Progression)式⁶⁾は、この場合にも正確に近似できる。G-P式は次のように表される。

$$B(E, x) = 1 + (b - 1)(K^x - 1)/(K - 1), \quad K \neq 1$$

$$B(E, x) = 1 + (b - 1)x, \quad K = 1$$

$$K(E, x) = cx^a + d[\tanh(x/X_k - 2) - \tanh(-2)]/[1 - \tanh(-2)]$$

ここで**b**は1mfpのビルドアップ係数であり、**K**はmfp単位の透過距離の増加に伴う、線量の増倍を表している。単一エネルギーの光子は1mfpの透過距離で、物質と入射エネルギーに対して固有のエネルギースペクトルを形成する。1mfpより深い透過のエネルギースペクトルは、1mfpの連続スペクトルを線源とみなして表すことができる。**K**の値はエネルギースペクトルの優勢なエネルギーフラックスの位置が、透過距離とともに変動する様子を表して居り、深い透過でスペクトルの形が一定になると**K**の値も一定値に近づく。この性質を利用して、40mfp以上のビルドアップ係数の値を推定する外挿式を作成した。G-Pパラメータは、新しいビルドアップ係数の離散的なデータを10%以内の制度で再現した。5つのパラメータは、入射エネルギーとともにゆるやかに変動している故、パラメータのエネルギー内挿により、任意のエネルギーのビルドアップ係数が求められる。

さらに5つのパラメータは、原子番号に対してもなめらかな変化をしているため、データの無い原子番号のビルドアップ係数を求める事ができる。化合物や混合物に対しては、実効原子番号を用いて任意の物質に対するビルドアップ係数が求められる。ここで注意しなければならない事は、原子番号依存性が光電吸収と電子対創生では異なる事である。そのため、実効原子番号も、1.5MeVの前後で異なる値をもつ。例えば、普通コンクリートの場合、実効原子番号は13.5(< 1.5 MeV)と11.5(≥ 1.5 MeV)である²¹⁾。G-P式は、離散的なビルドアップ係数データを、物質、エネルギー透過距離に関し、連続的なデータにした。

6. ANS-6.4.3のデータからANSIデータへ

decay heat libraryの標準化が日本で進められている時期でもあり、米国の標準データへの過程を紹介する。

作成されたANS-6.4.3のビルドアップ係数は、ANS-6.4.3の委員全体の承認を得て、ANS-6に提出される。ANS-6の委員会、N17の委員会の承認を得て、ANS標準委員会からANSIに提出される。それから幾つかの委員会の承認を得てANSIデータとなる。

米国では、ANSIデータの構成員(ANSもその一員)はボランティア活動で、標準データを作成している。ビルドアップ係数の場合、最終データになるまで、コードの改良を続けながら、難問にあたっていた。

ANSIデータは、国の機関が行政に広く利用し、裁判での重要資料にも利用されている。

日本での安全審査に提出される γ 線の遮蔽設計は、現在一部公開されているANS-6.4.3データを用いて行われている。

7. まとめ

○ANS-6.4.3ビルドアップ係数の標準ライブラリー作成に対し国際協力した。

特性X線、制動放射線の寄与を明確にした。

G-Pフィッティング・パラメータを決定した。

QAD-CGGP、G33-GPコードを開発し、RSICに提供した。

○ビルドアップ係数計算法の検討

多種計算法のベンチマークテストを行った。

○今後の課題

多重層ビルドアップ係数の算出

斜入射の問題

ダクト、ボイドのある体型への応用

コヒーレント、束縛電子による散乱問題の検討

表1 ANS-6.4.3 ガンマ線ビルドアップ係数

Buildup Factor	Exposure Buildup Factors, Energy Absorption Buildup Factors
Energy Range	0.015 - 15.0 MeV
Attenuation Distance	0.5 - 40 mfp
Source	Point Isotropic,
Medium	Infinite Medium
Elements	^4Be , ^5B , ^6C , ^7N , ^8O , ^{11}Na , ^{12}Mg , ^{13}Al , ^{14}Si , ^{15}P , ^{16}S , ^{18}Ar , ^{19}K , ^{20}Ca , ^{26}Fe , ^{28}Cu , ^{42}Mo , ^{50}Sn , ^{57}La , ^{64}Gd , ^{74}W , ^{82}Pb , ^{92}U
Mixtures	Air, Water, NBS concrete
Fitting Functions of Buildup Factors	
	G-P (Geometric Progression)
	Taylor
Correction Factors for Shield-tissue Interface	
Shielding Medium	Water, Al, NBS concrete, Iron, Tin, Tungsten, Lead

References

- 1) D. K. Trubey : Proc. 6th Int. Conf. Radiation Shielding, 1241 (1983)
- 2) H. Goldstein, J. E. Wilkins : NYO-3075, (1954)
- 3) Y. Harima : Nucl. Sci. Eng., 83, 299 (1983)
- 4) Y. Harima et al. : JAERI M86-071 (1986)
- 5) K. Takeuchi, and S. Tanaka : PALLAS-ID (VII) JAERI-M 84-214 (1984)
- 6) Y. Harima et al. : Nucl. Sci. Eng., 94, 24 (1986)
- 7) K. Takeuchi, and S. Tanaka : Nucl. Sci. Eng., 90, 158 (1984)
- 8) Y. Sakamoto et al. : JAERI M88-198 (1988)
- 9) R. R. Nelson, et al : EGS4 Code system (1985)
- 10) K. Koyama et al. : JAERI M-6954 (1977)
- 11) ANSI/ANS-6.1.1-1977
- 12) D. V. Gopinath et al. : Nucl. Sci. Eng., 97, 362 (1987)
- 13) Y. Harima et al. : Nucl. Sci. Eng., 96, 241 (1987)
- 14) D. K. Trubey : ORNL/RSIC-49 (1988)
- 15) 播磨良子 他 ; 日本原子力学会誌, 4月号 (1989)
- 16) RSIC Code Package CCC-493/QAD-CGGP (1986)
- 17) RSIC Code Package CCC-494/G33-GP (1986)
- 18) RSIC Data Library Package DLC-129/ANS643 (1987)
- 19) Y. Harima and D. K. Trubey : Nucl. Sci. Eng., 99, 145 (1988)
- 20) 田中俊一, 鈴木友雄 : アイソトープニュース, 2月号 (1989)
- 21) Y. Sakamoto et al. : Nucl. Sci. Eng., 100, 33 (1988)