☆

ガンマ線ビルドアップ係数の現状と 今後の課題

「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*

γ 線(光子)のビルドアップ係数は遮蔽計算上もっとも重要な基本データの1つである。1956年以来 Goldstein らのデータが長い間利用されてきたが、最近、米国原子力学会の ANS 6.4.3. グループが中心となり抜本的な改訂が行われた。

本稿では、こうした最近の動きを中心にビルドアップ係数の現状と今後の課題を解説する。

☆

☆

I. はじめに

ビルドアップ係数が最初に登場したのは1950年の *Physical Review* に掲載された White の論文⁽¹⁾であるが、遮蔽計算に広く利用されるようになったのは1954年 Goldstein ら⁽²⁾が一連のビルドアップ係数を計算して以来のことである。とりわけ、点減衰核計算コードが γ 線の遮蔽計算に使われるようになるとともに、その基本データとしてのビルドアップ係数の必要性が強く認識され、ビルドアップ係数に関する研究は一貫して遮蔽研究の重要な位置を占めてきた。

そして、Goldstein らの研究から30年経過し、米国原子力学会の ANS 6.4.3 グループが中心となって「ビルドアップ係数と γ 線減衰係数の標準データ評価」⁽³⁾が1980年以来続けられてきた。この作業はこれまでの研究の進展を基礎に Goldstein 以来のビルドアップ係数データを全面的に改訂するもので、その成果の一部はすでに、我が国をはじめ世界各国で広く利用されている点減衰核計算コード QAD-CGGP⁽⁴⁾、G 33-GP⁽⁵⁾に、反映されて大きな反響を呼んでいる。我が国では ANS のこうした活動に呼応して1984年、本会「放射線施設遮蔽」研究専門委員会の下に「ビルドアップ係数小委員会」を設置し、ANS の活動に積極的に協力するとともに、White 以来の研究論文の収集、検索を行い、ビルドアップ係数の現状と問題点を明らかにしてきた。

本稿では、上記「ビルドアップ係数小委員会」の成果と ANS での編集・評価作業の内容を中心に、ビルドアップ係数データに関する研究のこれまでの進展と現状および今後の課題を紹介する。

II. ビルドアップ係数と光子輸送計算

1. ビルドアップ係数と応答関数

ビルドアップ係数は、ある検出器に入射した非衝突

光子線に対する全光子線の比として求められ、検出器の特性に応じて種々のビルドアップ係数が定義される。したがって、原理的には水中において ^{60}Co γ 線源からの線量を電離箱で測定した White の実験のように、照射線量や吸収線量あるいは光子数などを何らかの検出器で測定すればビルドアップ係数は得られる。しかし、線源のエネルギー、形状、遮蔽体の種類や形状に応じた一連のビルドアップ係数を実験的に得ることが困難なことから、これまで得られている大部分のビルドアップ係数は光子の輸送計算により求められてきた。

すなわち、エネルギー E_0 の光子線源により生み出される、ある位置 r での全光子線束を $\phi(E, r)$ 、非衝突線束を $\phi(E_0, r)$ とすると、ビルドアップ係数 $B(r)$ は次式で与えられる。

$$B(r) = \frac{\int \phi(E, r) R(E, r) dE}{\phi(E_0, r) R(E_0, r)}$$

ここで、 R は検出器の応答関数で、照射線量ビルドアップ係数の場合は空気質量エネルギー吸収係数が、吸収線量ビルドアップ係数の場合は物質のエネルギー吸収係数やエネルギー変換係数等に対応する。一般に応答関数は既知のものとして利用できるので、ビルドアップ係数は物質中での輸送計算を行い、線束密度を求めることにより算出される。

Current Status and Future Scope of Gamma-Ray Buildup Factor: Research Committee on Shielding of Radiation Facilities, Buildup Factor Sub-Committee. (1988年2月24日受理)

* ○田中俊一、坂本幸夫、田中 進(原研)、播磨良子(東工大)、平山英夫、伴 秀一(高工研)、小佐古敏荘、上巻義朋、橋倉宏行(東大)、中村尚司(東北大)、金井康二(船研)、川合将義(NAIG)

(敬称略・順不同、○は幹事)

2. 光子輸送計算

光子は、第1図に示すように、物質とコンプトン散乱、光電吸収、電子対生成などの相互作用を起し、コンプトン散乱線、消滅光子、制動放射線、特性X線などの2次光子を生成しながら物質中を移動する。光子のエネルギーが低くなると、コヒーレント散乱など第1図に示されていない相互作用も重要になる。つまり、物質中での線束を得るためには、これらすべての相互作用を考慮した光子の輸送計算をすればよいわけであるが、このことはそう容易でない。この結果、ビルドアップ係数は光子の輸送計算コードの発達とともに改訂されてきたのが実状である。

第1図 物質内での光子・電子のカスケード過程⁽²³⁾

Goldstein らのモーメント法による輸送計算では、コンプトン散乱以外の過程はすべて無視されたが、Spencer ら⁽⁷⁾、Morris ら^{(8)~(10)}、Eisenhauer ら⁽¹¹⁾、Chilton ら^{(12)~(13)}のモーメント計算では、コンプトン散乱に加えて電子対生成の過程が考慮されている。また、ディスクリットオーディネイト法に基づく竹内ら^{(14)~(16)}、田中ら⁽¹⁷⁾、Subbaiah ら⁽¹⁸⁾の計算ではさらに制動放射線が、同じく田中ら⁽¹⁹⁾、Subbaiah ら⁽²⁰⁾の計算では特性X線、そして平山ら⁽²¹⁾のモンテカルロ計算ではコヒ

ーレント散乱まで考慮されている。

3. 光子断面積

光子の輸送計算を行うためには各反応ごとの断面積が必要である。またビルドアップ係数を用いて遮蔽計算を行うためには光子の全断面積(全吸収係数)が必要である。初期は Grodstein のデータ⁽²²⁾がよく利用されていたが、最近では Hubbell^{(23)~(25)}や Storm ら⁽²⁶⁾の評価データが利用されることが多い。これらのデータは原子番号の大きい物質で、光電吸収やコヒーレント散乱の優れた低エネルギー領域では10~20%程度の誤差があるといわれているが、全般的に数%以内の精度を有している。

つい最近のことであるが、米国標準局(NBS)が標準データベースとして光子断面積の最新の評価データを有料で提供している⁽²⁷⁾。このデータベースには原子番号1~100の元素について、1 keV~100 GeVの断面積や関連データがすべて網羅されている。これは Hubbell らが長年行なってきた評価作業の集大成で、前述のANS グループの作業の標準データにもなっている。

Ⅲ. ビルドアップ係数基礎データの現状

ビルドアップ係数は検出器のレスポンス、すなわち応答関数により照射線量ビルドアップ係数(空気カーマビルドアップ係数)、吸収線量ビルドアップ係数(エネルギー吸収ビルドアップ係数、物質カーマビルドアップ係数)、線量当量ビルドアップ係数などに分類される。ビルドアップ係数としてはこのほか個数ビルドアップ係数、エネルギービルドアップ係数などもあるが、通常はほとんど使われない。

ビルドアップ係数は線源のエネルギー、線源や遮蔽体の幾何学的条件、遮蔽体の種類などの関数であるが、まず第1に線源条件によって点等方線源、平板垂直入射線源、平板等方線源の3種類に大別される。そして、この中で最も有用で、かつ重要なデータは、点減衰核計算コードの基本データとなる点等方線源に対する無限媒質中でのビルドアップ係数である。ビルドアップ係数の詳細な分類は文献(6)に載せてあるので省略し、ビルドアップ係数に関する主な研究の概略と、ビルドアップ係数を利用して遮蔽計算を行う場合に注意すべき問題点を以下に述べる。(第1表)

1. ビルドアップ係数に対する2次光子の影響

Goldstein ら⁽²⁾は、点等方線源と平板垂直線源についてコンプトン散乱体、水、Al、Fe、Sn、W、Pb、U のビルドアップ係数を算出した。しかし、入射光子のエネルギーは0.5 MeV(水は0.255 MeV)~10 MeV、透過距離

第1表 本稿に出てくる計算コード

(a) ビルドアップ係数を利用する計算コード

コード名	計算手法	用途	文献
QAD-CGGP	点減衰核法	透過計算	(4)
SPAN	//	//	(59)
G 33-GP	1 回散乱法	スカイシャイン計算	(5)

(b) ビルドアップ係数の算出に利用された計算コード

コード名	計算手法	計算形状	文献
DTF-IV	輸送計算法	球, 平板	(29)
PIPE	//	平板	(30)
ASFIT	//	//	(31)
PALLAS	//	球, 平板	(35)
BIGGI-4 T	//	平板	(66)
EGS 4	モンテカルロ法	球, 平板	(37)
ADJMON	モーメント法	平板	(72)

は1~20 mfpと限られており、コンプトン散乱以外の2次光子も無視されたため、その後の研究は主にこれらの制限を拡張する方向で行われてきた。

Morrisら⁽⁹⁾は、改良されたモーメント法を用いて30 keV~10 MeVの点等方線源に対し、0.5~50 mfpの水、Al、コンクリートの照射線量と吸収線量ビルドアップ係数を計算した。また、Eisenhauerら⁽¹¹⁾はコンクリート、Chiltonら⁽¹²⁾は空気、水、Feについて同じモーメント計算法を用いて15 keV~15 MeVの点等方線源に対し40 mfpまでのデータを求めている。このほか、モンテカルロ計算によるSpencerら⁽²⁸⁾の水のビルドアップ係数、DTF-IV⁽²⁹⁾、PIPE⁽³⁰⁾、ASFIT⁽³¹⁾などの輸送計算コードによるEngholm⁽³²⁾、Penkuhn⁽³³⁾、Natrajanら⁽³⁴⁾の各種ビルドアップ係数などがあるが、いずれもコンプトン散乱線と消滅光子しか扱っていない。

これに対し、竹内ら^{(12)~(16)}、田中ら⁽¹⁷⁾は、PALLASコード⁽³⁵⁾で電子の空間的な輸送は無視できるものとして制動放射線を含む光子輸送計算を行い、0.1~15 MeVの点等方、平板等方、平板垂直入射の3つの線源に関し、水、コンクリート、Fe、Pbについて0.5~40 mfpの照射線量、吸収線量、線量当量ビルドアップ係数を計算し、Pbのように原子番号の大きい物質では入射光子のエネルギーが大きくなると制動放射線が極めて大きな影響を与えることを明らかにした。

一方、平山⁽³⁶⁾は、電磁カスケードモンテカルロ計算コードEGS 4⁽³⁷⁾を用いて電子の空間輸送まで考慮す

ることにより、10~100 MeVの平板垂直入射線源に対する水、コンクリート、Fe、Pbの照射線量ビルドアップ係数を1~10 mfpの範囲で求め、100 MeVまでは電子の空間的移動を無視しても大きな影響がないことを示した。

さらに、田中ら⁽¹⁹⁾は、PALLASコードを改良してK-X線を考慮した90~300 keVの点等方線源に対するPbの照射線量と吸収線量ビルドアップ係数を計算し、K吸収端近傍の入射エネルギーではK-X線が非常に大きな寄与を示すことを明らかにした。最近、Subbaiahら⁽²⁰⁾は、K殻吸収に伴って生じる4本のK-X線を厳密に考慮し、点等方線源の照射線量と吸収線量ビルドアップ係数をSn、W、Pb、Uについて、それぞれのK吸収端エネルギーから500 keVまでの範囲で計算し、特性X線の厳密な取扱が必要であることを指摘した。

第2図は、点等方線源のPbの照射線量ビルドアップ係数に対する制動放射線の影響を透過距離の関数で表わしたものである。入射光子のエネルギーが増加するにつれて制動放射線の寄与が急速に増し、15 MeVで最大10倍近くまで達することを示している。制動放射線生成断面積はほぼ原子番号の2乗に比例するので、Fe、コンクリートでは制動放射線の効果はかなり小さくなるが、それでも15 MeVの入射光子に対し、

第2図 Pbの照射線量ビルドアップ係数に対する制動放射線の影響⁽¹⁵⁾

Fe で70%, コンクリートで10%程度の寄与がある。

第3図は、100 MeV の光子が水に入射した時の吸収線量の空間分布である。電子の空間輸送を無視した場合、0.5 mfp 程度まで過大評価となるが、それ以上の透過距離ではほとんど一致している。この結果は少なくとも 100 MeV の入射光子までは、電子の空間移動を無視したビルドアップ係数が利用できることを示している。

第3図 100 MeV の光子が水に入射した時の吸収線量に対する電子の空間移動の影響⁽³⁶⁾

第4図は、0.1 および 0.13 MeV の入射光子に対する Pb の照射線量ビルドアップ係数である。Subbaiah⁽²⁰⁾と坂本⁽³⁸⁾の結果は4本の K-X 線を厳密に扱ったもので、田中⁽¹⁹⁾の結果は4本の K-X 線を1本の平均エネルギーで代表させたものである。平均エネルギーで代表させると透過距離が大きくなるにつれ過小評価となる。第4図には K-X 線を無視した場合のビルドアップ係数も載せてあるが、最大で2桁程度の過小評価となることがわかる。従来のビルドアップ係数では特性 X 線は無視されていたが、医療、研究用の X 線発生装置、シンクロトロン放射光施設、あるいは核燃料加工施設など低エネルギーの光子が発生する施設の線量評価では特性 X 線の発生に十分注意する必要があることを示している。

さらに、コヒーレント散乱は散乱が前方優位で、散乱によるエネルギーの減少が小さいことから、従来の遮蔽計算では無視されていたが、最近の平山⁽²¹⁾の検討では 60 keV の光子が垂直に Pb 入射した場合、数 10% の影響があることがわかっている。

4 FL: $K_{\alpha 1}$, $K_{\alpha 2}$, $K_{\beta 1}$, $K_{\beta 2}$ -X 線を考慮⁽²⁰⁾⁽³⁸⁾
 $K_{\alpha\beta}$: K-X 線を平均エネルギーで近似⁽¹⁹⁾
 no FL: 蛍光 X 線を無視⁽¹⁹⁾

第4図 0.1, 0.13 MeV 点等方光子線源に対する Pb の照射線量ビルドアップ係数への特性 X 線の影響

2. 照射線量と線量当量

光子の遮蔽計算では、伝統的に無限媒質中で得られた照射線量ビルドアップ係数を用いて照射線量率を求めている。放射線管理上は線量当量率を評価しなければならないが、これまでは照射線量ビルドアップ係数を用いて求めた照射線量率を線量当量率として準用してきた。しかしながら、第5図に見られるように、光子の照射線量変換係数 f_r と線量当量変換係数 f_{rem} は最大2倍以上の差があり、このため照射線量と線量当量ビルドアップ係数にも差がある。

第6図(a), (b)は、水とコンクリートの照射線量ビルドアップ係数と線量当量ビルドアップ係数との比を入射光子の関数で表わしたもので、すべてのエネルギー範囲で線量当量ビルドアップ係数が照射線量のそれを上回っている。特に、第5図に見られるように、ほとんどのエネルギー範囲で線量当量変換係数は照射線量変換係数より大きく、非衝突線についても線量当量率が照射線量率より大きくなるので、線量当量率と照射線量率の差は第6図(a), (b)以上に大きくなる。例えば、0.5 MeV の γ 線がコンクリートに入射した場合、7 mfp の透過距離では照射線量ビルドアップ係数による評価

第5図 光子線束当りの照射線量(f_r)と線量当量(f_{rem})との比較 (ANS/ANSI-6.1.1.)

(a) 水

(b) コンクリート

第6図 (a), (b) 水とコンクリートの照射線量ビルドアップ係数に対する線量当量ビルドアップ係数の比⁽¹⁶⁾

値は約50%近い過小評価となる。

近く、我が国の放射線管理基準はICRPの勧告-26

に従い、すべて実効線量当量により行われることになるが、この場合は上述の差異に十分配慮することが必要となろう。

3. 無限媒質のビルドアップ係数

使用することの問題点

遮蔽計算で対象とするのは遮蔽体の外側での線量当量率であるが、実際には無限媒質の照射線量ビルドアップ係数が利用されている。第2表は、Trubey ら⁽³⁹⁾が行なった無限厚(column 1),有限厚(column 2)のPbの照射線量ビルドアップ係数,有限厚のPb遮蔽の後に30 cm厚の人体組織がある場合の境界(column 3)および人体組織中での最大線量(column 4)のビルドアップ係数の比較である。Column 4の最大値に対しcolumn 1のビルドアップ係数は低エネルギーではかなり過小評価となるが、1 MeVで約13%, 3 MeVで約5%以下である。この効果はFe, コンクリート, 水と原子番号が減るにつれて小さくなる。

第2表 Pbの無限媒質中でのビルドアップ係数に対する有限厚効果および生体効果⁽³⁴⁾

E (MeV)	厚さ (mfp)	ビルドアップ係数†			
		1	2	3	4
0.05	1	1.02	1.01	1.69	1.74
	2	1.02	1.01	1.70	1.75
	5	1.03	1.02	1.71	1.84
	10	1.03	1.03	1.71	1.77
	20	1.04	1.04	1.74	1.78
0.20	1	1.23	1.16	1.74	1.76
	2	1.26	1.20	1.80	1.83
	5	1.36	1.29	1.94	1.98
	10	1.51	1.41	2.14	2.16
	20	1.81	1.64	2.47	2.48
1.0	1	1.38	1.36	1.53	1.53
	2	1.65	1.63	1.84	1.84
	5	2.29	2.24	2.56	2.56
	10	3.06	3.01	3.46	3.46
	20	4.18	4.09	4.75	4.75
3.0	1	1.49	1.40	1.51	1.51
	2	1.85	1.76	1.89	1.89
	5	2.95	2.78	3.05	3.05
	10	4.80	4.56	5.03	5.03
	20	8.68	8.15	9.16	9.16

† 1: 無限媒質, 2: 有限媒質, 3: 境界, 4: 最大値

4. 多重層のビルドアップ係数

実際の遮蔽計算を想定した場合は、多重層のビルドアップ係数が重要であるが、これまで得られている多重層のデータは垂直入射線源について僅かにあるだけで、点線源に対するデータは公表されていない。多重層のビルドアップ係数は、主に経験式の評価を目的に、

限られたエネルギーと遮蔽体の組合せについて散発的に測定^{(40)~(45)}され、計算^{(46)~(48)}されているだけである。しかしながら、多重層のビルドアップ係数は入射光子のエネルギー、遮蔽体の組合せにより複雑に変化するので遮蔽計算上大きな誤差要因となる。

最近、播磨ら⁽⁴⁹⁾は制動放射線や特性X線を考慮した場合のPb-水の2重層でのビルドアップ係数の変化をPALLAS⁽³³⁾とEGS 4⁽³⁷⁾コードを利用して調べてい

るが、これによると、第7, 8図に見られるように、10あるいは0.1 MeVの光子が水-Pbの2重層に入射した場合のビルドアップ係数は、従来の経験からは予測できない変化を示している。これらの例は、多重層のビルドアップ係数については未知のことが多く、従来の経験式を再評価しあるいは新たな経験式を生み出すためにも今後、系統的な基礎データの蓄積が必要であることを物語っている。

第7図 10 MeV の光子が水-Pb の多重層に入射した時の照射線量ビルドアップ係数の変化⁽⁴⁶⁾

第8図 0.1 MeV の光子が水-Pb の2重層に入射した時の照射線量ビルドアップ係数の変化⁽⁴⁹⁾

IV. ビルドアップ係数を表わす経験式

ビルドアップ係数は線源条件や遮蔽体に依存するため、実際の遮蔽計算で必要とされるすべてのデータをあらかじめ準備することは不可能である。このため、既存のデータを基に必要なデータを内・外挿する経験式が幾つか提案されている。大部分の経験式は透過距離の関数で表わされ、物質と入射光子のエネルギーに関するパラメータが決められている。経験式としては遮蔽体の種類、入射光子のエネルギー、透過距離について、できるだけ広範囲に精度のよいデータが得られることが最も重要で、さらに欲張れば使い易さの点でパラメータの数が少ない方がよい。

1. 単一層の経験式

代表的な単一層の経験式としては、線形近似の

式⁽⁵⁰⁾、Berger の式⁽⁵¹⁾、Taylor の式⁽⁵²⁾、Foderaro の式⁽⁵³⁾、Capo の式⁽⁵⁴⁾、G-P 法^{(55)~(58)}がある。

Berger の式のパラメータは2つで、Goldstein らのデータやその後モーメント計算により求められたコンクリート、水、空気、Fe などのデータに対してパラメータが決められている。しかし、1.5 MeV 以下のエネルギーでの再現性に問題があり、最大誤差が40%にもなる場合がある。

Taylor の式のパラメータは3つで、Berger の式と同様多くのデータについてパラメータが決められているが、最大誤差は同程度でその傾向も似ている。点減衰核コード SPAN⁽⁵⁹⁾には Taylor 型の式が組み込まれている。

Capo の式はパラメータが20もあるが、エネルギーについて内挿ができ、Goldstein らのデータに対して

パラメータが決められ点減衰核コード QAD-CG に組み込まれている。この式の問題点は透過距離がゼロでビルドアップ係数が1にならないこと、エネルギーについて外挿すると負の値を与えることがあることである。G-P 法は2つのパラメータによって表現され、Berger の式や Taylor の式の問題点の1つである、低原子番号の低エネルギー領域のデータの再現性を解決したほか、エネルギー内挿、Z内挿、透過距離の外挿などでも良い結果が得られている。

なお、単一層の経験式については、播磨の解説⁽⁶⁰⁾があるので参照されたい。

2. 多重層の経験式

多重層の経験式としては、加算法、乗積法、優位物質法などの簡単な方法のほか、Bowman と Trubey の式⁽⁶¹⁾、Kalos の式⁽⁶²⁾、Broder の式⁽⁶³⁾、北爪の式⁽⁶⁴⁾、播磨と西脇の式⁽⁶⁵⁾がある。いずれの式も 0.5 MeV 以上の入射エネルギー領域、すなわちコンプトン散乱が優位なエネルギー領域で導かれたもので、Broder の式以外は垂直入射線源についての式である。加算法、乗積法、優位物質法は多重層の条件、入射エネルギーに誤差が大きく依存するので、限られた条件でしか使えない。Jiang ら⁽⁴⁸⁾が水-Pb の2重層に 0.5, 1, 3 および 6 MeV の光子が垂直に入射した時の照射線量ビルドアップ係数を輸送計算コード BIGGI-4 T⁽⁶⁶⁾で計算し、上記の5つの経験式^{(61)~(65)}の再現性を比較している。

これによると、遮蔽体の外側で 3 MeV では Bowman らの式は最大 30% の誤差が生じるが、他の式はいずれもほぼ 10% 以内、6 MeV ではいずれの式も 20% 以内で基本データを再現している。しかし、0.5, 1 MeV となると Kalos の式で 10%、播磨らの式で 30% と誤差が大きくなり、Bowman らの式や Broder の式で 2~3 倍、北爪の式でも 2 倍近くと再現性が極端に悪くなる。播磨⁽⁶⁷⁾はその後、先の経験式を改善することにより、Jiang らのデータを 10% 以内で再現できる経験式を提案している。

V. G-P (Geometric Progression) 法と QAD-CGGP, G 33-GP コードの特徴

最近、我が国でも遮蔽計算やスカイシャイン計算に広く利用されている点減衰核コード QAD および G 33 に従来の Capo の式に代わって、G-P 法パラメータを組み込んだ QAD-CGGP⁽⁴⁾、G 33-GP⁽⁵⁾コードが ORNL-RSIC より公表されたが、その主な特徴は以下の通りである。

(1) 基本データの改訂

従来、Goldstein らが計算した入射エネルギー 0.255 ~ 10 MeV、透過距離 20 mfp までの水、Fe、Pb、コンクリートのビルドアップ係数が基本データとなっていたが、今度の改訂では ANS 6.4.3 グループで評価した Be から U までの 19 種類の単体と水、空気、コンクリートについて、透過距離が 40 mfp、入射エネルギーが 15 keV ~ 15 MeV のデータが基本データとなっている⁽⁶⁸⁾。QAD-CGGP, G 33-GP コードにはこれら ANS のデータを基に我が国の原子力コード委員会で計算した G-P パラメータが内蔵されている。なお、ANS の基本データと G-P パラメータは RSIC の DLC-129 データライブラリー⁽⁶⁹⁾として別途利用できる。

(2) 透過距離に対する内・外挿

ビルドアップ係数のエネルギー範囲、透過距離、物質の種類が拡張されたためビルドアップ係数の値が非常に大きくなる場合がある。例えば、水のビルドアップ係数は 10^4 を越えるが、G-P 法では 3% 以下の誤差で再現できる。また、Pb や U では制動輻射線や特性 X 線の影響で 15 MeV で 10^8 、100 keV で 10^{12} にも達するが、この場合でも 20% 以内で再現され、さらに、40 mfp までの G-P パラメータを用いて 20% 以下の誤差で 70 mfp までの透過距離に関する外挿ができる。

(3) 入射エネルギーの内挿

15 keV ~ 15 MeV の離散した入射エネルギーについて求められた G-P パラメータをエネルギーに関し内挿することにより、任意のエネルギーのビルドアップ係数が数%以下の精度で計算される⁽⁷⁰⁾。

(4) 原子番号についての内挿

基本データが得られていない単体の物質については、エネルギー内挿と同様 G-P パラメータを原子番号の関数として内挿することにより数%の精度で求められる。一方、混合物(化合物)についても散乱断面積と全断面積の比から決められる実効原子番号による内挿が可能である。ただし、この場合の精度は空気、水、コンクリートでは 16% 以内であるが、Pb ガラスのように原子番号の大きく異なる元素で構成される物質ではエネルギーによりファクタの誤差となる⁽⁷¹⁾。

(5) その他の相違点

従来の基本データの下限エネルギーは水で 255 keV、コンクリートで 0.5 MeV である。このため、第 9 図に示すように入射エネルギーが低い場合、透過距離の増加とともに誤差が大きくなる。

現在 QAD-CGGP, G 33-GP コードに組み入れられ

第9図 QAD-CGコード(Capoの式)と
QAD-CGGPコード(G-P法)の
水のビルドアップ係数の差

ている DLC-129 データライブラリーは、モーメント計算コード ADJMON⁽⁷²⁾によるもので、制動放射線とコヒーレント散乱が考慮されておらず、また特性X線の扱いも厳密でない。このため、ANS 6.4.3 グループでは、制動放射線と特性X線を考慮したデータを PALLAS コードで計算し、またコヒーレント散乱の影響を EGS 4 コードで評価し、DLC-129 の大幅な改訂を行なった⁽⁷⁹⁾。今回、PALLAS コード等により改訂されたビルドアップ係数ライブラリーと、その経験式として採用された G-P 法の G-P パラメータとは近いうちに米国標準データ(American National Standards Data)として公表される予定なので、その際には QAD-CGGP と G 33-GP コードの計算精度と適用範囲は一層改善されることになる。

Ⅶ. おわりに

以上、ビルドアップ係数の現状と幾つかの問題点を概観してきたが、本稿がいささかでも読者各位のビルドアップ係数に対する関心と興味をひき、役に立てば幸いである。なお、最後に ANS 6.4.3 の活動と我が国の遮蔽グループとの協力について簡単にふれておきたい。

米国原子力学会(ANS)の活動に関しては、播磨が

ANS 6.4.3 の委員として活躍しているのを初め、PALLAS, EGS 4 コードによる基本データの作成と評価、G-P 法による基本データの評価と G-P パラメータの算出など、本会の「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および「原子力コード委員会」遮蔽グループのメンバーが非常に大きな貢献を果たしてきた。ANS の成果は今後、長期にわたって放射線遮蔽の標準データとして国際的に利用されるものと予想されるが、こうした基礎的な仕事に関する国際協力が本会の委員会と ANS の委員会の間にも自然発生的に生まれ、大きな成果を挙げ得たことは、本会の新たな活動として貴重な経験となろう。

— 参考文献 —

- (1) WHITE, G.R.: *Phys. Rev.*, **80**(2), 154 (1950).
- (2) GOLDSTEIN, H., WILKINS, J.E.: *NYO-3075*, (1954).
- (3) TRUBEY, D.K.: *Proc. 6th Int. Conf. Radiation Shielding*, 1241 (1983).
- (4) Oak Ridge Nat. Lab. RSIC Computer Code Collection' CCC-493 (1986).
- (5) *ibid.*, CCC-494 (1986).
- (6) TANAKA, S., *et al.*: *Int. J. Appl. Radiat.*, **39**(3), 241 (1988).
- (7) SPENCER, L.V., SIMMONS, G.L.: *Nucl. Sci. Eng.*, **50**, 20 (1973).
- (8) MORRIS, E.E., CHILTON, A.B.: *ibid.*, **40**, 128 (1970).
- (9) MORRIS, E.E.: *ibid.*, **50**, 32 (1973).
- (10) MORRIS, E.E. *et al.*: *ibid.*, **56**, 171 (1975).
- (11) EISENHAEUER, C.M., SIMMONS, G.L.: *ibid.*, **56**, 263 (1975).
- (12) CHILTON, A.B.: *Nucl. Eng. Des.*, **6**, 205 (1967).
- (13) CHILTON, A.B., *et al.*: *Nucl. Sci. Eng.*, **73**, 97 (1980).
- (14) TAKEUCHI, K., TANAKA, S.: *ibid.*, **87**, 478 (1984).
- (15) *idem*: *ibid.*, **90**, 158 (1985).
- (16) *idem*: *Int. J. Appl. Radiat. Isot.*, **37**(4), 283 (1986).
- (17) TANAKA, S., TAKEUCHI, K.: *JAERI-M 4-018*, (1984).
- (18) SUBBAIAH, K.V., *et al.*: *Nucl. Sci. Eng.*, **81**, 172 (1982).
- (19) TANAKA, S., TAKEUCHI, K.: *ibid.*, **93**, 376 (1986).
- (20) SUBBAIAH, K.V., NATARAJAN, A.: *ibid.*, **96**, 330 (1987).
- (21) HIRAYAMA, H., TRUBEY, D.K.: Effect of coherent scattering on the buildup factors of low-energy gamma rays, To be published in *Nucl. Sci. Eng.*, (1988).
- (22) GRODSTEIN, W.: *NBS 583*, (1957).
- (23) HUBBELL, J.H.: *NSRDS-NBS 29*, (1969).
- (24) *idem*: *J. Phys. Chem. Ref. Data*, **9**(4), 1023 (1980).
- (25) *idem*: *Int. J. Appl. Radiat. Isot.*, **33**, 1269 (1982).
- (26) STORM, E., ISRAEL, H.I.: *Nucl. Data Tables*, **A7**, 565 (1970).
- (27) BERGER, M.J., HUBBELL, J.H.: XCOM: Photon cross sections on a personal computer, *NBSIR 87-3597*, (1987).

- ②⑩ SPENCER, L.V., *et al.*: NBS 6591, (1959).
 ②⑨ LATHROP, K.D.: LA-3373, (1968).
 ③⑩ PENKUHN, H.: EUR 4624 e, (1971).
 ③⑪ Oak Ridge National Lab. RSIC Computer Code Collection, CCC-336/ASFIT-DS2.
 ③⑫ ENGHOLM, B.A.: GA-8741, (1968).
 ③⑬ PENKUHN, H.: Nucl. Sci. Technol., 1[3], 569 (1979).
 ③⑭ NATARAJAN, A., *et al.*: Nucl. Sci. Eng., 85, 418 (1983).
 ③⑮ TAKEUCHI, K., TANAKA, S.: JAERI-M 84-214, (1984).
 ③⑯ HIRAYAMA, H.: Nucl. Technol., 77, 60 (1987).
 ③⑰ NELSON, W.R., *et al.*: SLAC-265, (1985).
 ③⑱ SAKAMOTO, Y., *et al.*: JAERI-M 87-210, (1988).
 ③⑲ TRUBEY, D.K., *et al.*: Trans. Am. Nucl. Soc., 41, 494 (1982).
 ④⑩ MIYASAKA, S., TSURUO, A.: J. Nucl. Sci. Technol., 3[9], 393 (1966).
 ④⑪ BURKE, G.P., BECK, H.L.: Nucl. Sci. Eng., 53, 109 (1974).
 ④⑫ BISHOP, G.B.: Ann. Nucl. Energy, 9, 233 (1982).
 ④⑬ BOWMAN, L.A., TRUBEY, D.K.: CF-58-1-41, (1958).
 ④⑭ 北爪光幸, 大串 明: 日立評論, 49[7], 1 (1967).
 ④⑮ SIMIZU, A.: NBS-9618, (1967).
 ④⑯ KUSPA, J.P., TSOUFANIDIS, N.: Nucl. Sci. Eng., 52, 117 (1973).
 ④⑰ BURRELL, M.O., *et al.*: AERR 5773, RS/1.3/3, (1967).
 ④⑱ JIANG, S.H.: Nucl. Sci. Eng., 75, 16 (1980).
 ④⑲ 播磨良子, 他: 原子力学会「昭和63年会」要旨集, C 63, (1988).
 ⑤⑩ TRUBEY, D.K.: ORNL-RSIC-10, (1960).
 ⑤⑪ BERGER, M.J.: USNRDL Reviews and Lectures No. 29, 47 (1956).
 ⑤⑫ TAYLOR, J.J.: WAPD-RM-217.
 ⑤⑬ FODERARO, A., HALL, R.J.: Nucl. Sci. Eng., 78, 74 (1981).
 ⑤⑭ CAPO, M.A.: APEX-510, (1958).
 ⑤⑮ HARIMA, Y., NISHIWAKI, Y.: Nucl. Eng. Des., 23, 209 (1972).
 ⑤⑯ HARIMA, Y.: Nucl. Sci. Eng., 83, 299 (1983).
 ⑤⑰ HARIMA, Y., *et al.*: *ibid.*, 94, 24 (1986).
 ⑤⑱ HARIMA, Y., *et al.*: JAERI-M 86-071, (1986).
 ⑤⑲ WALLACE, O.J.: WAPE-TM-809, (1969).
 ⑥⑩ 播磨良子: 放射線, 9[2], 3 (1982).
 ⑥⑪ BOWMAN, L.A., TRUBEY, D.K.: ORNL-2609, (1958).
 ⑥⑫ KALOS, M.H.: Quoted in GOLDSTEIN, H.: "Fundamental Aspects of Reactor Shielding", p. 225 (1959), Addison-Wesley Publ., Reading, Massachusetts.
 ⑥⑬ BRODER, D.L., *et al.*: Sov. J. At. Energy, 12, 26 (1962).
 ⑥⑭ 北爪光幸: 原子力誌, 7[9], 496 (1965).
 ⑥⑮ HARIMA, Y., NISHIWAKI, Y.: J. Nucl. Sci. Technol., 6[12], 711 (1969).
 ⑥⑯ PENKUHN, H.: EUR 3555 e, (1967).
 ⑥⑰ HARIMA, Y.: Nucl. Sci. Eng., 85, 45 (1983).
 ⑥⑱ TRUBEY, D.K., HARIMA, Y.: Topical Conf. on Theory and Practices for Radiation Protection and Shielding, PR & S Division and the Oak Ridge/Knoxville Section of ANS 503, Knoxville, April, (1987).
 ⑦⑩ DLC-129/ANS 643: RSIC Newsletter, Aug., (1987).
 ⑦⑪ HARIMA, Y., *et al.*: Applicability of geometrical progression approximation (G-P method) of gamma-ray buildup factors, JAERI-M 86071, (1986).
 ⑦⑱ SAKAMOTO, Y., *et al.*: Interpolation of gamma-ray buildup factors for point isotropic source in atomic number, Submitted to Nucl. Sci. Eng. (1987).
 ⑦⑲ SIMMONS, G.L.: National Bureau of Standards Technical Note 748, (1973).
 ⑦⑳ TRUBEY, D.K.: "New Gamma-Ray Buildup Factor Data for Point Kernel Calculation", ORNL-RSIC, (1988).

原子力安全研究協会

第21回原子力安全研究総合発表会

日 時 昭和63年6月2日(木), 3日(金)
 場 所 全共連ビル中会議室(東京都千代田区平河町)

○ プ ロ グ ラ ム ○

6月2日(木) 10:00~16:30

開会挨拶 理事長 田島英三
 原安協の活動 副理事長 三島良積
 特別講演 米国における放射線安全に関する最近の

動向と主な論点 (IRPA 副会長) C.B. Meinhold
 パネル討論会 放射線防護の今後の展望

6月3日(金) 10:00~16:30

講演 1 軽水炉に関する安全の考え方 (原安協) 都甲泰正
 講演 2 軽水炉に関する安全研究の現状

① Severe Accident, Source Term,
 事故管理等を中心として (原研) 早田邦久

② Human Factor, Man-Machine
 Interface 等を中心として (関電) 辻倉米蔵

パネル討論会 軽水炉に関する安全研究の今後の展望

参加費(予稿集, レセプション代含む) 1名 24,000円

問合せ先 原子力安全研究協会 調査部(03-503-5785)