

深い透過距離におけるガンマ線ビルドアップ係数の Geometric Progression 式を用いたフィッティングパラメータの計算

Calculation of Fitting Parameters using Geometric Progression Formulae for Deep Penetration of Gamma-ray Buildup Factors

吉田 至孝 (Yoshitaka Yoshida)*

要約 これまで点減衰核法で用いられているビルドアップ係数は、計算を高速化するため近似式（主としてGP 式）が使用され、そのフィッティングパラメータは、40mfp 程度までの輸送計算結果に基づき作成されていた。GP 式は、輸送計算法から求めたビルドアップ係数をフィッティングパラメータに変換する際に定式化されたものがなく、その精度はフィッティングを行うものの技量に依存していた。そこで、これまで困難とされてきた深い透過距離を含むビルドアップ係数に対する GP 式のフィッティングパラメータを求める手法を確立し、清水らが計算した300mfp までの照射線量ビルドアップ係数の GP 式フィッティングパラメータを求めた。その結果、標準偏差の平均で3.2%程度と良く近似できることを示した。

キーワード ガンマ線、ビルドアップ係数、GP式、点減衰核法、フィッティングパラメータ、深層透過

Abstract Thus far, buildup factors used in the point attenuation kernel method were adopting fitting expressions (mainly, geometric progression (GP) formulae) to speed up calculations, and the parameters for fitting expressions were determined based on the results of transport theory codes, up to about 40 mean free path (mfp). The calculation method for the fitting parameters of GP formulae was not established to convert the buildup factors calculated by some transport theory codes, so that calculation accuracy depended on the individual technique of the fitting equations. This study establishes a method for calculating the fitting parameters of GP formulae for buildup factors including deep penetration that has heretofore been assumed to be too difficult, and calculates the fitting parameters of exposure buildup factors up to 300 mfp, as provided by Shimizu, et al. As a result, the calculated fitting parameters reveal a good estimate, with approximately 3.2% as the average standard deviation.

Keywords gamma ray, buildup factor, geometric progression, point attenuation kernel method, fitting parameter, deep penetration

1. 緒言

ガンマ線（ γ 線）の遮へい計算には、遮へい物質と距離、ビルドアップ係数を用いた点減衰核法と Sn 法やモンテカルロ法等を用いた輸送計算法があり、一般的な遮へい計算には取扱いが容易な前者が用いられている。点減衰核法は、 γ 線点等方線源から評価地点までの透過物質ならびに距離を用いて評価地点に散乱なしで直接到達する γ 線（直達 γ 線）を求め、ビルドアップ係数を掛けて評価地点の γ 線量率を求めるものである。ビルドアップ係数は再生係数とも呼ばれ、点等方線源に対して無限媒質中における評価地点の全 γ 線と直達 γ 線の比を表す。従来の

ビルドアップ係数は、吸収線量および照射線量に対応したものがあり、実効線量は換算係数⁽¹⁾を用いていた。

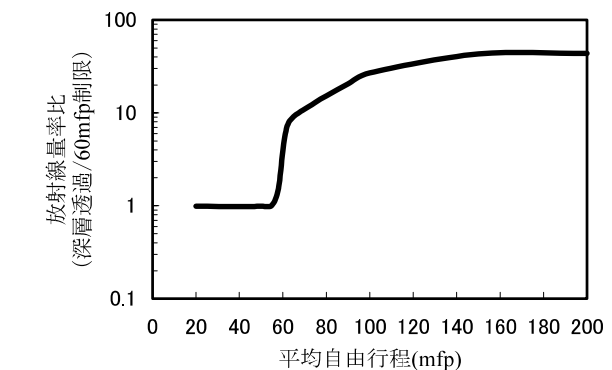
点減衰核法で用いているビルドアップ係数は、計算を高速化するため近似式によりデータを内外挿する方法が採用されている。近似方法には放物線近似式、Taylor の式⁽²⁾⁽³⁾、Berger の式⁽⁴⁾、播磨の式⁽⁵⁾⁽⁶⁾などがあり、播磨の式は Geometric Progression Formula (GP 式) と呼ばれている。

これまで、これらの近似式のフィッティングパラメータは、40 mean free path (mfp:平均自由行程)程度までの輸送計算結果を用いて作成され、GP 式については 40mfp を超える場合は 60mfp まで外挿計算で

* (株)原子力安全システム研究所 技術システム研究所

きるようになっている。一方、原子力災害は、大量の放射性物質から放出される γ 線が原子力発電所構造物の厚いコンクリート遮へいを透過するため、ビルドアップ係数が60mfpを超える場合が多い。点減衰核法計算コードQAD⁽⁷⁾およびG33⁽⁷⁾では、透過距離が60mfpを超えた場合のビルドアップ係数は60mfpの値で一定とされている。このため、QADやG33で求めた γ 線量率は、図1に示すようにコンクリート遮へいで透過距離が60mfpを超えた場合は約1/40程度過小評価となる可能性がある。

ある透過距離におけるビルドアップ係数を求めるための計算時間は、GP式で計算した場合とラグランジュ3点補間法により内挿計算した場合を点減衰核法計算コードQADを使用して比較すると、GP式が2割程度速い。原子力災害時において原子力発電所構内の γ 線量率を推定⁽⁸⁾する場合など多数の線源および評価点が存在するときには、遮へい計算コードの高速化は大きな威力を発揮する。しかしこれまでGP式は、輸送計算法から求めたビルドアップ係数をフィッティングパラメータに変換する際に定式化されたものがなく、その精度はフィッティングを行うものの技量に依存⁽⁹⁾していた。



〔深層透過:IE法で求めたビルドアップ係数を用いた放射線量率〕
〔60mfp制限:QADコードに内蔵されたGP式を用いた放射線量率〕

図1 仮想事故線源コンクリート遮へいの放射線量率比

ビルドアップ係数を求めるためには、輸送計算法により評価点における全 γ 線を計算しなければならない。しかし、Sn法やモンテカルロ法による γ 線の輸送計算は、計算精度の問題から γ 線の透過距離が40～100mfp程度までに限られていた。清水らは、新しい γ 線輸送計算法としてInvariant Embedding法(IE法)を開発し、26物質に対して300mfpまでの輸送計算を実施して照射線量、吸収線量および実効線量のビルドアップ係数を求めた⁽¹⁰⁾。

そこで、本研究では、これまで困難とされてきた

深い透過距離まで適用できるGP式のフィッティングパラメータを求める手法を確立し、清水らが計算した300mfpまでの照射線量、吸収線量および実効線量のビルドアップ係数を用いてGP式のフィッティングパラメータを求め、点減衰核法計算コードで利用できるようにすることを目的とした。

2. GP式の概要

ビルドアップ係数は、 γ 線が透過物質を通り評価点に到達した時の全 γ 線と直達 γ 線の比であることから、必ず1より大きな数値となる。さらに、単一の透過物質の厚さ x に同一の物質 dx を追加したとき、 x におけるビルドアップ係数を $B(x)$ 、 $x+dx$ におけるビルドアップ係数を $B(x+dx)$ とすると、(1)式が成立する。

$$B(x+dx) \geq B(x) \quad (1)$$

つまり、ビルドアップ係数は単一物質中において透過距離に対して一定あるいは増加するものであり、単位透過距離におけるビルドアップ係数を $B(1)$ とすると、透過距離 x におけるビルドアップ係数の増加分 $\Delta B(x)$ は散乱成分の増加を示すことから、(2)式に示すように初項を単位透過距離の散乱成分($B(1)-1$)とし、公比 K の等比数列の和で表すことができると仮定する。

$$\Delta B(x) = (B(1)-1) \frac{K^x - 1}{K - 1} \quad K \neq 1 \quad (2a)$$

$$\Delta B(x) = (B(1)-1)x \quad K = 1 \quad (2b)$$

透過距離 x におけるビルドアップ係数 $B(x)$ は、ビルドアップ係数の増加分 $\Delta B(x)$ に直達 γ 線の成分1を加えた(3)式で表される。(3)式の有効性は、播磨らによって示されている⁽⁵⁾。

$$B(x) = 1 + (B(1)-1) \frac{K^x - 1}{K - 1} \quad K \neq 1 \quad (3a)$$

$$B(x) = 1 + (B(1)-1)x \quad K = 1 \quad (3b)$$

(3)式は、透過距離 x におけるビルドアップ係数 $B(x)$ および単位透過距離におけるビルドアップ係数 $B(1)$ が既知であれば、公比 K が逆算できる。輸送計算結果から実際に当てはめてみると、図2に示すように公比 K は透過距離 x に対して一定とならず、透過距離の関数 $K(x)$ で近似する必要がある。

GP法では、関数 $K(x)$ が指数関数に近い形状を示すことから(4)式に示すように指数項と補正項で表現

されている.

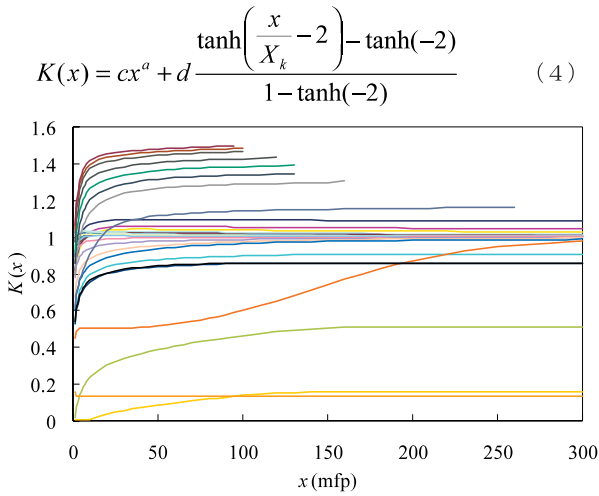


図2 IE法のビルドアップ係数を使用して求めたモリブデンの公比 K

$\left[\begin{array}{l} \gamma \text{線エネルギー } 15\text{keV} \sim 15\text{MeV} \\ B(1) \text{を} 0.5\text{mfp} \text{とした例} \end{array} \right]$

現在のGP式は40mfpまでの輸送計算結果に基づき、フィッティング範囲内のみ精度の良い結果が得られるパラメータが求められているため、40mfpを超えるビルドアップ係数に対しては、(5)式に示す外挿式が提案⁵⁾されている。

$$K(x) = 1 + (K(35) - 1)A^{\xi(x)} \quad 0 \leq A \leq 1 \quad (5a)$$

$$K(x) = K(35) \left(\frac{K(40)}{K(35)} \right)^{\xi(x)^{0.8}} \quad A < 0, A > 1 \quad (5b)$$

$$A = \frac{K(40) - 1}{K(35) - 1} \quad (5c)$$

$$\xi(x) = \frac{\left(\frac{x}{35} \right)^{0.1} - 1}{\left(\frac{40}{35} \right)^{0.1} - 1} \quad (5d)$$

これは、ほとんどの場合35mfpを超えると $K(x)$ の変化が単調になることから、35mfpと40mfpの値 $K(35)$ および $K(40)$ を用いた等比数列の考え方が導入されているものと考えられる。

以上のように、GP式のフィッティングパラメータは、 a 、 $B(1)$ 、 c 、 d と X_k の5つで表され、単位透過距離におけるビルドアップファクタ $B(1)$ を除く4つのパラメータは関数 $K(x)$ のフィッティングに使用されている。

ここで注意しなければならない点は、等比数列は初項に対して公比により増加していくことを前提と

したものであり、初項より減少していくことを前提としていない。このため $B(1)$ より小さい透過距離のビルドアップ係数については外挿となる点に注意が必要である。実際に、QADおよびG33コードに内蔵されているGP式のフィッティング係数は、 $B(1)$ を1mfpのビルドアップ係数としているが、0.5mfpの外挿を行うために、 $B(1)$ の値が調整されている。

3. GP式のフィッティングパラメータの計算手法

GP式のフィッティングパラメータ5つのうち、単位透過距離におけるビルドアップ係数 $B(1)$ は既知であるので、残り4つのパラメータをフィッティングする必要がある。4つのパラメータは全て(4)式に含まれており、 x と $K(x)$ が既知である。そこで、パラメータ a 、 c 、 d 、 X_k の $K(x)$ に対する性質を(6)式の指数項 $F(x)$ と補正項 $G(x)$ に分けて述べる。

$$K(x) = F(x) + G(x) \quad (6a)$$

$$F(x) = cx^a \quad (6b)$$

$$G(x) = d \frac{\tanh\left(\frac{x}{X_k} - 2\right) - \tanh(-2)}{1 - \tanh(-2)} \quad (6c)$$

関数 $F(x)$ は、 $x=0$ のとき c となる指数曲線である。関数 $G(x)$ は、 $x=0$ のとき0、 $x \doteq 10 \times X_k$ のとき d 、あるいは $x \doteq -10 \times X_k$ のとき $-0.0183156d$ となる双曲線である。つまり、関数 $F(x)$ は $cx^a - c$ の幅を持った指数関数の曲線形状を表現でき、関数 $G(x)$ は0 $\sim d$ または0から $-0.0183156d$ の幅を持った双曲線関数の曲線形状を表現できる。初期値と終端値が決まっている曲線形状をフィッティングするには、何れか一方の関数で曲線形状を合わせ、もう一方の関数でベース値（ほぼ定数となる関数曲線）を与える必要がある。曲線形状を合わせるとは、(7)式によりそれぞれの関数の微分値をフィッティングの始点 x_s と終点 x_f の差で相対化することを意味する。これにより、関数 $F(x)$ および $G(x)$ が取りうる全曲線形状を $K(x)$ が透過距離に対して増加している場合および減少している場合の何れにも適用できる。

$$\begin{aligned} \frac{1}{K(x_f) - K(x_s)} \frac{dK(x)}{dx} &= \frac{1}{F(x_f) - F(x_s)} \frac{dF(x)}{dx} \\ &+ \frac{1}{G(x_f) - G(x_s)} \frac{dG(x)}{dx} = R(x) \end{aligned} \quad (7a)$$

x_f : フィッティングする透過距離の終点

x_s : フィッティングする透過距離の始点

$R(x)$: 相対的傾き

ここで、関数 $G(x)$ でベース値を与えるとすると $dG(x)/dx = 0$ より

$$\frac{1}{K(x_f) - K(x_s)} \frac{dK(x)}{dx} = \frac{1}{F(x_f) - F(x_s)} \frac{dF(x)}{dx} \quad (7b)$$

関数 $F(x)$ でベース値を与えるとすると同様に

$$\frac{1}{K(x_f) - K(x_s)} \frac{dK(x)}{dx} = \frac{1}{G(x_f) - G(x_s)} \frac{dG(x)}{dx} \quad (7c)$$

となる。

(7b)式は関数 $F(x)$ で曲線形状を表現することから a フィッティングと呼び、(7c)式は関数 $G(x)$ で曲線形状を表現することから X_k フィッティングと呼ぶこととした。

相対的傾き $R(x)$ を $K(x)$ にするためには、 $R(x)$ を積分して絶対的変化幅への変換係数を乗算し、ベース値の部分を加え、(8)式により計算する。相対的変化幅への変換係数は、フィッティングする透過距離の終点の $K(x_f)$ と始点の $K(x_s)$ 値の差で(8b)式により与えられる。ベース値は、フィッティングする透過距離の終点において(8c)式により与えられる。なお、ベース値は始点で与えることも可能であるが、等比数列は x の累乗で表されるため、終点の誤差を重視して終点の絶対値を一致させることとした。

$$K(x) = C_1 \int R(x) dx + C_2 \quad (8a)$$

$$\begin{aligned} C_1 &= K(x_f) - K(x_s) \\ &= d \frac{\tanh(x_f / X_k - 2) - \tanh(x_s / X_k - 2)}{1 - \tanh(-2)} \\ &\quad + c(x_f^a - x_s^a) \end{aligned} \quad (8b)$$

$$C_2 = K(x_f) - C_1 \int_{x=0}^{x_f} R(x) dx \quad (8c)$$

さらに、フィッティングする透過距離の終点は、(9)式により求められる。

$$K(x_f) = cx_f^a + d \frac{\tanh(x_f / X_k - 2) - \tanh(-2)}{1 - \tanh(-2)} \quad (9)$$

以上より、(8b)式と(9)式から、 a フィッティングの場合はフィッティングパラメータ c で絶対的変化幅への変換係数を与え、 X_k フィッティングの場合は d で与えることにより、フィッティングパラメータ c および

d はフィッティングパラメータ a および X_k の関数として計算可能となる。

(8)式は任意の x に対してフィッティングパラメータ a および X_k が求められることから、フィッティングの始点 x_s から終点 x_f までの範囲に対して収束計算を行い目的とする最適解を求める。誤差を最小にする場合は、ビルドアップ係数の真値と計算値から最小二乗法を用いて(10)式により、ビルドアップ係数の標準偏差が最小となるフィッティングパラメータを求める。誤差を一定の方向（プラスまたはマイナス側）に導きたい場合は、ビルドアップ係数の真値と計算値の差がある一定量内に入るものの中で標準偏差が最小となるフィッティングパラメータを求めれば良い。

$$a, c, d, X_k = \min(\sigma(a, c, d, X_k)) \quad (10a)$$

$$\sigma(a, c, d, X_k) = \sqrt{\frac{1}{m} \sum_{i=1}^m (B_T(x_i) - B_C(x_i))^2} \quad (10b)$$

$B_T(x)$: ビルドアップ係数の真値

$B_C(x)$: ビルドアップ係数の計算値

m : ビルドアップ係数の真値の数

各物質のエネルギー毎に求められた a フィッティングおよび X_k フィッティングの結果から、収束計算条件に良く一致する方のフィッティングパラメータを選択する。

3.1 a フィッティング手法

a フィッティングは、 $K(x)$ の真値に対して関数 $F(x)$ でその曲線形状を表現する。つまり、(8b)式と(9)式により、 d を消去すると c は(11)式で与えられる。 c が求められれば(12)式により d が決まる。ここで、関数 $G(x)$ はベース値を与える役割があることから、 X_k の初期値は $B(1)$ の透過距離より十分小さな値（例えば $X_k = 0.01$ ）を与える。

$$\begin{aligned} c &= \frac{c_1 - c_2}{c_3 - c_4} \\ c_1 &= K(x_f) \left(\tanh\left(\frac{x_s}{X_k} - 2\right) - \tanh(-2) \right) \\ c_2 &= K(x_s) \left(\tanh\left(\frac{x_f}{X_k} - 2\right) - \tanh(-2) \right) \\ c_3 &= x_f^a \left(\tanh\left(\frac{x_s}{X_k} - 2\right) - \tanh(-2) \right) \\ c_4 &= x_s^a \left(\tanh\left(\frac{x_f}{X_k} - 2\right) - \tanh(-2) \right) \end{aligned} \quad (11)$$

$$d = \frac{(K(x_f) - cx_f^a)(1 - \tanh(-2))}{\tanh\left(\frac{x_f}{X_k} - 2\right) - \tanh(-2)} \quad (12)$$

これにより、値が決まらないフィッティングパラメータは a のみとなることから、これを変化させることによりビルドアップ係数の標準偏差が最小となる a を探す。等比数列は x が小さいときは曲線近似精度が悪くてもビルドアップ係数の標準偏差に与える影響は小さいことから、フィッティングする透過距離の始点 x_s を終点方向にずらすことによって、ビルドアップ係数の標準偏差を最小にできる場合がある。このような場合、さらに X_k を少し大きくする($X_k=2$ 程度) ことにより x_s より短い透過距離の誤差を小さくできる。 a フィッティングに適した曲線形状のイメージを図3に示す。この形状以外は標準偏差が大きくなりフィッティングの精度が低下する。

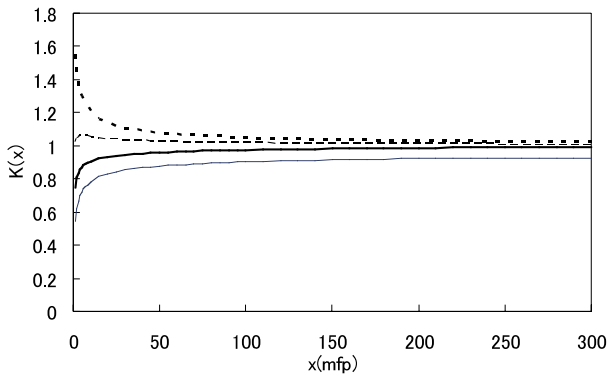


図3 a フィッティングに適した曲線形状

よって、 a フィッティングでは、 a 、 x_s および X_k を変化させることにより収束計算条件に合致する（例えば、ビルドアップ係数の標準偏差が最小となる） a 、 c 、 d 、および X_k を求める。

3.2 X_k フィッティング手法

X_k フィッティングは、 $K(x)$ の真値に対して $G(x)$ でその曲線形状を表現する。つまり、(8b)式と(9)式により、 c を消去すると d は(13)式で与えられる。 d が求められれば(14)式により c が決まる。ここで、関数 $F(x)$ はベース値を与える役割があることから、 a の初期値は透過距離 x の a 乗に対して十分小さな値（例えば $a=0.0$ ）を与える。

$$d = \frac{d_1}{d_2 - d_3}$$

$$d_1 = \left(\left(\frac{x_s^a}{x_f^a} \right) K(x_f) - K(x_s) \right) (1 - \tanh(-2)) \quad (13)$$

$$d_2 = \tanh(x_f / X_k - 2) - \tanh(x_s / X_k - 2)$$

$$d_3 = \left(1 - \frac{x_s^a}{x_f^a} \right) (\tanh(x_f / X_k - 2) - \tanh(-2))$$

$$c = \frac{K(x_f) - d \frac{\tanh(x_f / X_k - 2) - \tanh(-2)}{1 - \tanh(-2)}}{x_f^a} \quad (14)$$

これにより、値が決まらないフィッティングパラメータは X_k のみとなることから、これを変化させることによりビルドアップ係数の標準偏差が最小となる X_k を探す。関数 $G(x)$ は双曲線を示すことから、透過距離 x に対して $K(x)$ が増加または減少傾向を示している場合は、 a を $-0.2 \sim 0.1$ 程度まで変化させることによって、ビルドアップ係数の標準偏差を最小にできる場合がある。なお、双曲線関数ではフィッティングする始点 x_s を移動させるとビルドアップ係数の標準偏差は大きくなる傾向を示す。 X_k フィッティングに適した曲線形状のイメージを図4に示す。この形状以外は標準偏差が大きくなりフィッティングの精度が低下する。

よって、 X_k フィッティングでは、 a および X_k を変化させることにより収束計算条件に合致する a 、 c 、 d および X_k を求める。

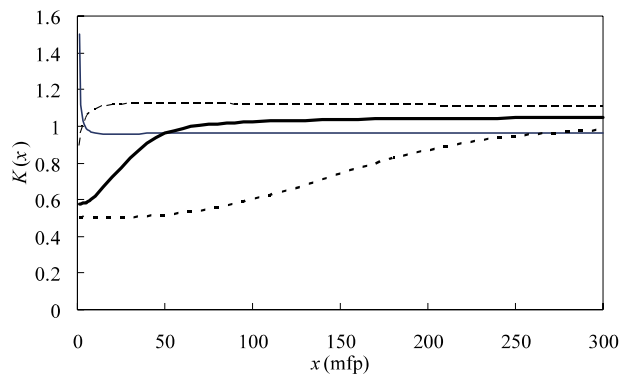


図4 X_k フィッティングに適した曲線形状

4. GP式を用いたフィッティングパラメータの計算

4.1 計算条件

本研究では、以下の計算条件でフィッティングパ

ラメータを計算した。

(1) 対象としたビルドアップ係数

清水らが計算した 300mfp までの照射線量のビルドアップ係数

(2) フィッティングの範囲

0.5mfp から 300mfp まで48点

① x_s 初期値 1mfp

② x_f 初期値 300mfp

ただし, x_f はビルドアップ係数が 1×10^{38} を超えた場合は, それ以降の透過距離を除外

(3) 初項の選択

フィッティング範囲の最小値は0.5mfp であるため, 初項は0.5mfp のビルドアップ係数とした。

初項は1%の誤差を許容するものとし, 0.5mfp のビルドアップ係数に対して上下1%の幅で変動させた。

(4) 収束条件

① ビルドアップ係数の真値と計算値の最大誤差が20%未満かつ標準偏差が10%未満で最小となること。

② 上記①を満足できない(ビルドアップ係数が指数的に上昇するような)場合は, フィッティングする透過距離の終点を100mfp とし, 100mfp 以下のフィッティング精度を重視したパラメータを選択する。

(5) a フィッティングの探索範囲

① a 値 $-20 \sim 2$

② x_s 値 1mfp $\sim (x_f - 10)$

③ X_k 値 0.01, 0.1 $\sim$ 6

(6) X_k フィッティングの探索範囲

① a 値 $-0.2 \sim 0.1$

② X_k 値 $-500 \sim 300$

4.2 計算結果

(1) K 値

輸送計算により求めたビルドアップ係数から K 値を逆算した結果を図5に示す。26種類の物質の K 値を出現頻度でまとめたものを図6に示す。 $B(1)$ を0.5mfp のビルドアップ係数にすると26種類の物質ならびに15keV から15MeV のエネルギーにおいて, K 値は0 $\sim$ 2.4の範囲に入ること, および10mfp を超えると K 値は1.6以下となることがわかった。

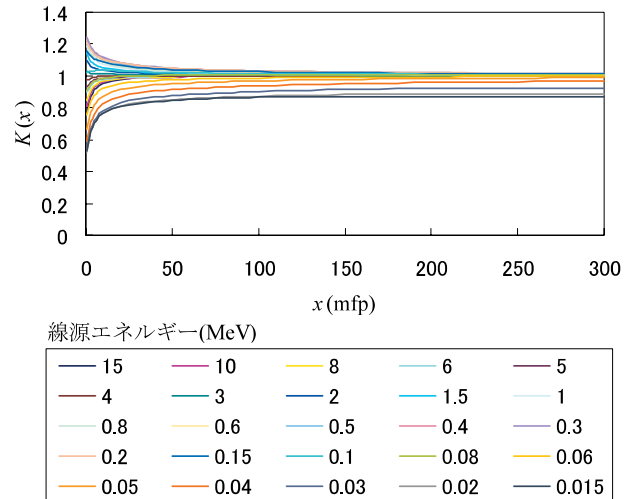


図5 コンクリートの K 値逆算結果

(2) フィッティングパラメータ

全体で708種類の物質とエネルギーの組み合わせのうち541種類(約76%)が a フィッティング, 残りの167種類(約24%)が X_k フィッティングによってビルドアップ係数の真値と計算値の標準偏差を最小とするフィッティングパラメータを与えた。フィッティングパラメータのうち a , c , d , X_k および x_s の分布を図7 $\sim$ 11に示す。 a 値は, X_k フィッティングでは0を中心としてわずかな傾斜を与えるものであり $-0.2 \sim 0.02$ の値であった。 a フィッティングでは $-20 \sim 1$ の範囲にあり, 約80%が $-0.8 \sim -0.4$ の値であった。 c 値は, X_k フィッティングではベース値を与えるため0 $\sim$ 2の範囲となった。 a フィッティングでは, 曲線形状を合わせるため $-20 \sim 6$ までの値を取り, このうち約78%が $-1 \sim 1$ の範囲であった。 d 値は, a フィッ

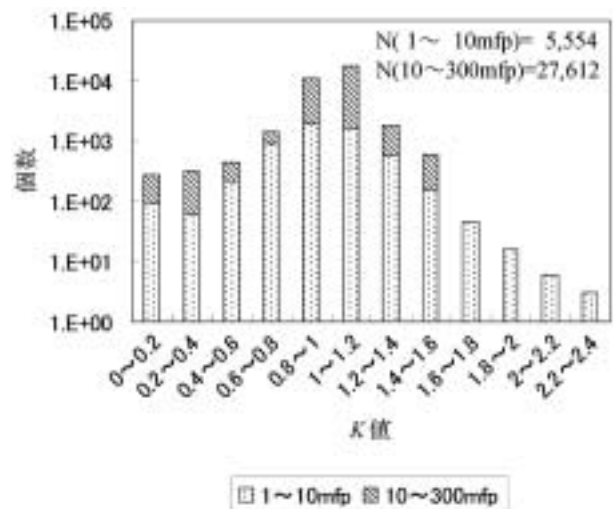


図6 K 値の出現頻度

ティングの場合ベース値となることから約81%が0.9～1.1の範囲にあり、-30～10の値となった。 X_k フィッティングでは約91%が-30～0.4の範囲にあり、-30～100の値となった。 X_k 値は、 a フィッティングの場合2～5mfp程度までの曲線形状を調整するものであり約88%が0～1の範囲にあり、一部に X_k フィッティングに極めて近い-5付近と55付近の値を取るものがあった。 X_k フィッティングでは、約88%が負となり、-500～300までの広い範囲を示した。 x_s 値は X_k フィッティングの場合1としたが、 a フィッティングでは深い透過距離の曲線形状が標準偏差に大きな影響を与えることから、1～200までの広い範囲にばらついた。

照射線量ビルドアップ係数のフィッティングパラメータを付録に示す。吸収線量および実効線量も含めたビルドアップ係数およびフィッティングパラメータは別途まとめて報告する予定である。

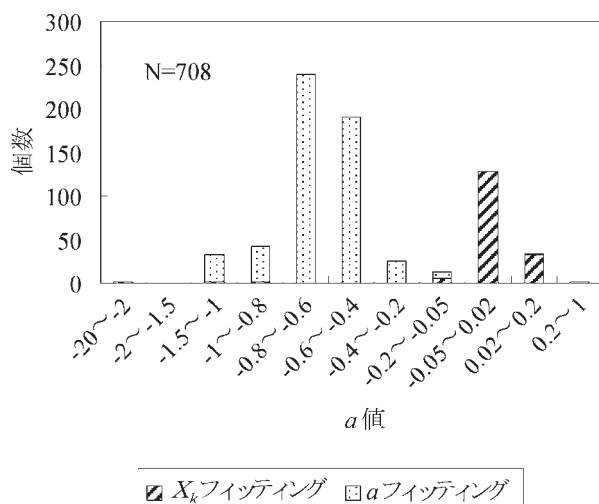
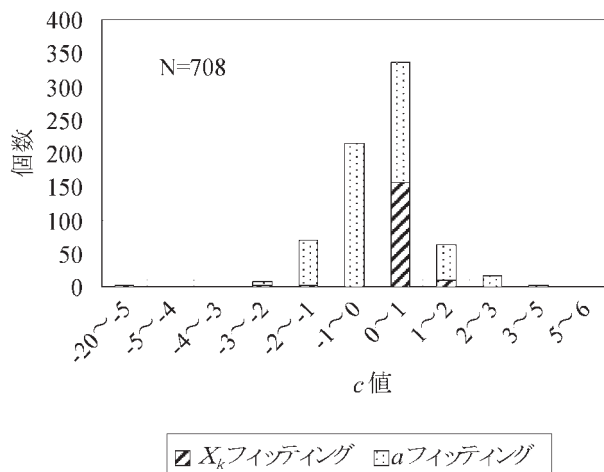
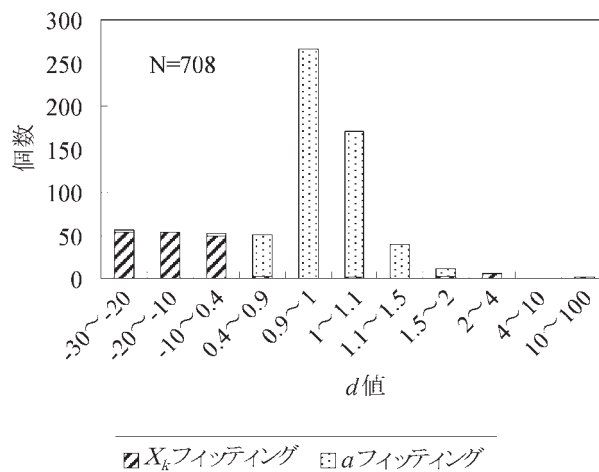
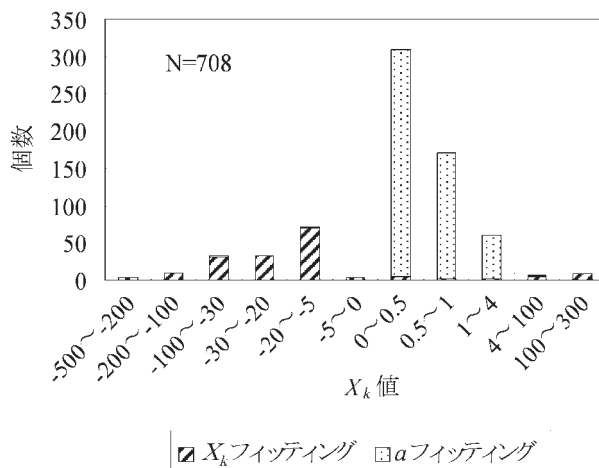
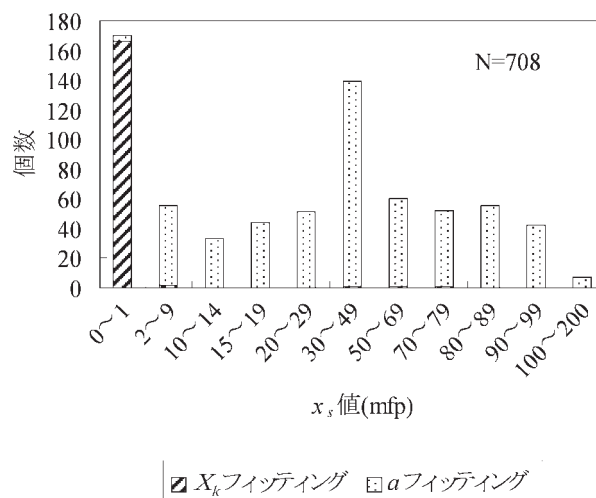
図7 a 値の分布図8 c 値の分布図9 d 値の分布図10 X_k 値の分布図11 x_s 値の分布

表1 コンクリートの照射線量ビルドアップ係数フィッティングパラメータ

E (MeV)	B	c	a	X_k	d	x_s	Max.Dev.	$x_{\max}$	St. Dev.
8	1.268	-0.707	-1.028	0.01	1.0008	15	3.48%	300	1.43%
1	1.436	0.587	-0.655	0.66	0.9983	60	7.85%	3	3.93%
0.6	1.518	0.688	-0.612	0.72	0.9965	85	11.44%	4	6.04%
0.4	1.597	0.712	-0.575	0.74	0.9946	85	13.91%	4	7.09%
0.2	1.758	0.562	-0.499	0.68	0.9912	90	12.66%	5	6.71%
0.08	1.818	0.889	0.000	-22.38	-6.2578	0	5.62%	25	2.25%
0.04	1.288	-0.652	-0.393	0.01	1.0202	75	1.41%	300	0.81%
0.03	1.138	-0.803	-0.503	0.01	0.9550	45	2.70%	180	1.48%

表2 物質毎の最大誤差と標準偏差の平均値

Material	Max. Dev.	$x_{\max}$	E (MeV)	Avg. St. Dev.
Beryllium	19.87%	2	0.4	3.80%
Boron	19.89%	4	0.2	3.42%
Carbon	19.45%	4	0.2	3.06%
Nitrogen	17.13%	4	0.3	2.96%
Oxygen	15.67%	4	0.3	3.10%
Sodium	14.65%	4	0.3	3.13%
Magnesium	14.72%	4	0.3	3.21%
Aluminum	13.65%	20	15	3.23%
Silicon	15.97%	10	15	3.33%
Phosphorus	16.48%	10	15	3.19%
Sulfur	16.60%	10	15	3.34%
Argon	17.76%	30	0.3	3.52%
Potassium	17.32%	10	15	3.15%
Iron	16.55%	8	15	2.58%
Copper	15.81%	10	15	2.73%
Rubidium	17.95%	30	15	3.33%
Molybdenum	18.80%	1	0.03	3.23%
Tin	19.89%	30	15	3.03%
Lanthanum	19.85%	30	8	3.03%
Gadolinium	19.75%	25	6	3.13%
Tungsten	19.97%	25	5	2.84%
Lead	19.99%	20	4	3.20%
Uranium	19.69%	10	0.16	3.20%
Water	16.13%	4	0.3	3.12%
Concrete	14.74%	4	0.3	3.01%
Air	16.59%	4	0.3	3.13%
Total				3.15%

Max. Dev.:最大誤差(%)

 $x_{\max}$:最大誤差の発生位置(mfp) E :最大誤差の発生エネルギー(MeV)

Avg. St. Dev.:物質の標準偏差の平均値(%)

(3) 誤差評価

一例として、表1に示すコンクリートの照射線量ビルドアップ係数フィッティングパラメータのフィッティング曲線とIE法輸送計算で求めたビルドアップ係数(真値)を重ね合わせたものを図12に示す。この図より深い透過距離においてもビルドアップ係数の曲線形状を良く近似した。

GP式のフィッティングパラメータは、ビルドアップ係数の真値と計算値の標準偏差、差の最大値および最大値の発生透過距離の3つで誤差評価を行った。照射線量ビルドアップ係数について、26物質の全エ

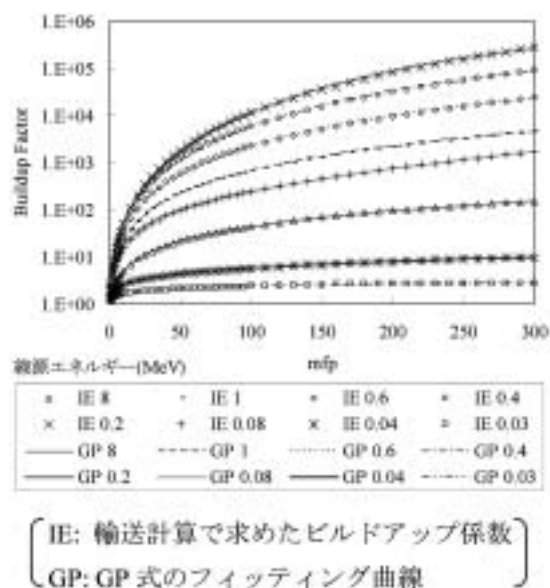


図12 コンクリートのビルドアップ係数フィッティング結果

ネルギー中の最大誤差、最大誤差が発生した透過距離とその放射線エネルギー、および当該物質の標準偏差の平均値を表2に示す。

標準偏差は、全平均で3.15%となり、5%未満のものが全体の約76%を占めた。しかし、38パラメータについては、300mfpまでフィッティングすると標準偏差が10%を超過するか最大誤差が20%を超過するため、 x_f を100mfpにしてフィッティングパラメータを求め、誤差評価対象範囲も100mfpまでとした。対象核種およびエネルギーは付録の表中のApplication欄に示す。

最大誤差は、水、コンクリート、空気とベリリウムからマグネシウムまでの軽核種では0.2~0.4MeVで最大誤差が発生し、発生位置は2または4mfpと短い透過距離であった。これらは全て a フィッティングによるものであり、深い透過距離の誤差を抑制するため、いずれも x_s を60~100mfp程度までずらしたこ

とにより、短い透過距離において誤差が最大になったものである。アルミニウムからスズまでの中核種では、アルゴンとモリブデンを除き、15MeVで最大誤差が発生し、発生位置は8~30mfpであった。これらは全て X_k フィッティングによるものであり、1~30mfpまでの間にK値の急激な変曲点を持ち、深い透過距離においてはビルドアップ係数の変化が小さくなる特徴を持っている。このため、変曲点において最大誤差が発生したものである。アルゴンは X_k フィッティングによる0.3MeVで最大誤差が発生し、発生位置は30mfpであった。モリブデンは a フィッティングによる0.03MeVで最大誤差が発生し、発生位置は1mfpであった。ランタンからウランまでの重核種では、ウランを除く核種が、中核種と同様のK値形状をもつ4~8MeVにおいて最大誤差が発生し、発生位置は20~30mfpであった。ウランは、コンプトン散乱によるエッジの部分で、 a フィッティングを使っ

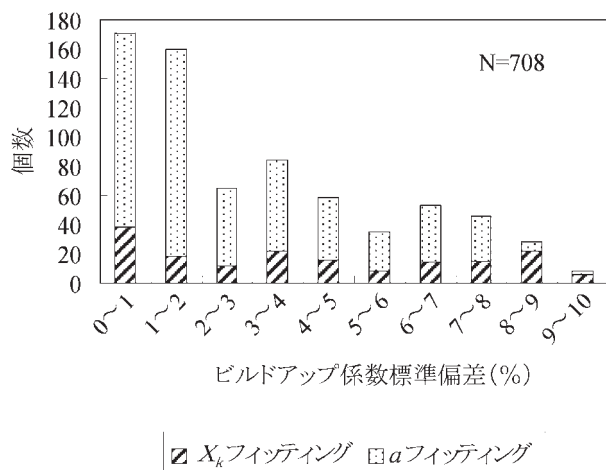


図13 ビルドアップ係数標準偏差の分布

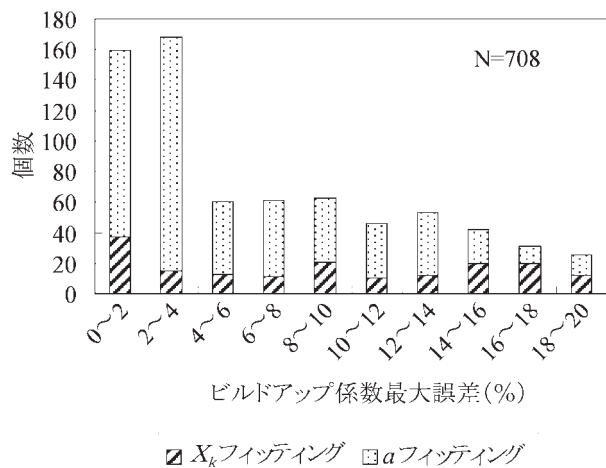


図14 ビルドアップ係数最大誤差の分布

たことにより、10mfp付近で最大誤差が発生したものである。

図13および14は、ビルドアップ係数の標準偏差および最大誤差の分布を示したものである。これより、標準偏差2%未満あるいは最大誤差4%未満となったものは、全体で約46%、 a フィッティングでは約51%、 X_k フィッティングは約30%であった。

図15は、最大誤差発生位置の分布を示したもので

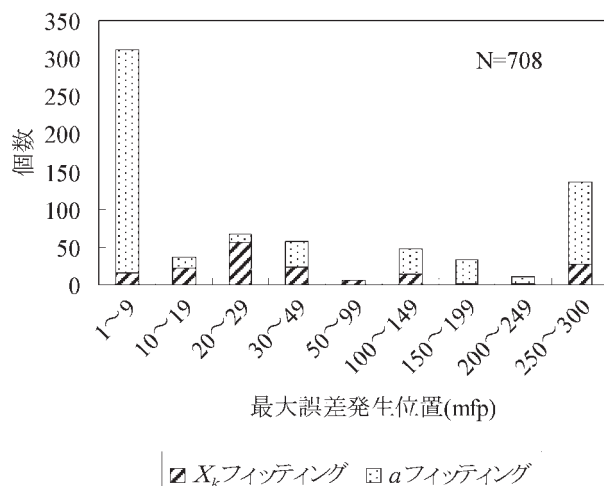


図15 ビルドアップ係数最大誤差発生位置の分布

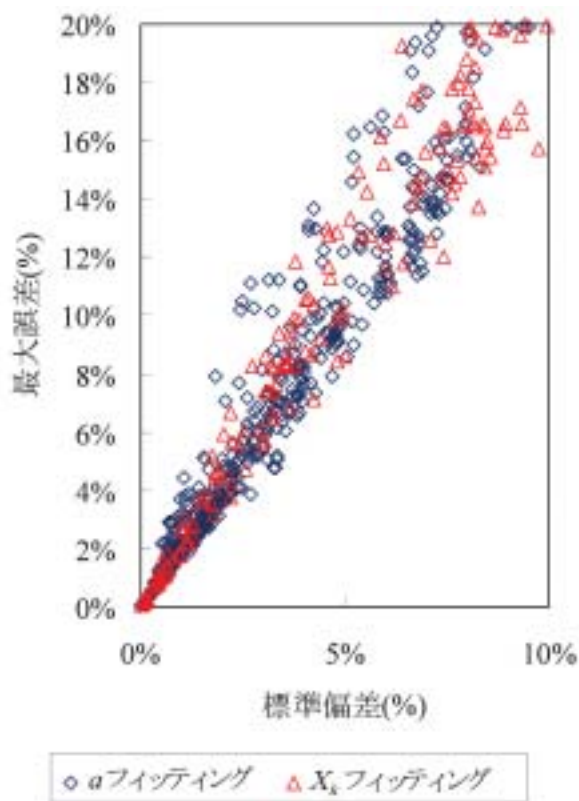


図16 ビルドアップ係数標準偏差と最大誤差の相関

ある。これより、 a フィッティングでは1mfp または 300mfp の両端で、 X_k フィッティングでは10～49mfpの変曲点付近で最大誤差が発生するケースが多いことがわかった。図16は、ビルドアップ係数の標準偏差と最大誤差の相関を示す。この図より、最大誤差は標準偏差の約2倍程度であった。

5. まとめ

これまで困難とされてきた深い透過距離を含むビルドアップ係数に対するGP式のフィッティングパラメータを求める手法を確立し、清水らが計算した300 mfp までの照射線量ビルドアップ係数のGP式フィッティングパラメータを求めた。その結果、標準偏差の平均で3.2%程度と良く近似できることを示した。

本研究において得られた知見を以下に示す。

- (1) これまで困難とされてきた深層透過ビルドアップ係数のGP式によるフィッティングを可能とする手法として a フィッティング手法と X_k フィッティング手法を開発した。
- (2) 本手法は、標準偏差と誤差の判定条件を組み合わせることにより、利用者が期待する精度でパラメータを探索することが可能である。保守性が求められる（フィッティングパラメータから求められるビルドアップ係数は真値より必ず大きな値とする）場合は、誤差が負となるフィッティングを排除して標準偏差が最小となるフィッティングを行うことにより、過小評価を回避することができる。ここでは、最大標準偏差10%未満、最大誤差20%未満を基準とするフィッティングパラメータの計算結果を示した。
- (3) a フィッティングの特徴は、①標準偏差が小さいフィッティングパラメータが得られやすいこと、および②最大誤差が1mfp またはフィッティングする透過距離の終点で発生しやすいことである。一方、 X_k フィッティングの特徴は、 a フィッティングで表現できない10～49 mfp 付近で大きな変曲点がある曲線をフィッティングすることが可能であり、最大誤差は変曲点付近で発生しやすいことである。
- (4) 本手法により、GP式のフィッティングパラメータを求めた場合は、ビルドアップ係数の標準偏差と最大誤差の比は約2倍程度となる。

6. 今後の課題

本研究では、照射線量ビルドアップ係数についてGP式にフィッティングした結果をまとめた。今後、吸収線量、実効線量のビルドアップ係数についてもGP式のフィッティングパラメータをまとめる予定である。また、本手法は曲線形状を重視したフィッティングを行うため、従来使用されていた外挿計算式が不要となると考えられることから、米国標準データ⁽⁹⁾を用いて40mfp までのGP式フィッティングパラメータを求め、既存のフィッティングパラメータと比較して性能を確認していく予定である。

謝辞

本研究の実施にあたり、NPO 法人放射線線量解析ネットワーク清水彰直代表および関西電力㈱大飯発電所の恩田隆司氏（元原子力安全システム研究所）にはIE法によるビルドアップ係数の提供を、日本原子力研究所坂本幸夫氏にはGP式のフィッティングについてご指導いただいた。ここに深く感謝します。

文献

- (1) 日本原子力学会標準, 放射線遮へい計算のための線量換算係数:2004, AESJ-SC-R002:2004, AESJ (2004).
- (2) J. J. Taylor, "Application of Gamma Ray Buildup Data to Shield Design," WAPD-RM-217, Bettis Atomic Power Laboratory (1954).
- (3) K. Shure, et. al., "Taylor Parameters for Gamma-Ray Buildup Factors in the Proposed American National Standard," WAPD-TM-1628, Bettis Atomic Power Laboratory (1988).
- (4) M. J. Berger, USNRDL Reviews and Lectures No.29, p.47, U.S. Naval Radiological Defense Laboratory (1956).
- (5) Y. Harima, et. al., "Validity of the Geometric-Progression Formula in Approximating Gamma-Ray Buildup Factors," Nucl. Sci. Eng., 94, pp.24-35 (1986).
- (6) Y. Hirayama, et. al., "Development of New

gamma-Ray Buildup Factor and Application to Shielding Calculations," J. Nucl. Sci. Technol., 28[1], pp.77-84 (1991).

- (7) Y. Sakamoto, et. al., *QAD-CGGP2 and G33-GP2: Revised Versions of QAD-CGGP and G33-GP*, JAERI-M-90-110, JAERI (1990).
- (8) 吉田至孝, 他, "シビアアクシデント時従業員被ばく線量評価手法の検討," 日本原子力学会和文論文誌, 1, pp.191-201 (2002)
- (9) ANS Standard, Gamma-Ray Attenuation Coefficients and Buildup Factors for Engineering Materials, ANSI/ANS-6.4.3-1991, ANS (1991).
- (10) A. Shimizu, et. al., *Generation of an Improved Data Set of Gamma-Ray Buildup Factors by the Method of Invariant Embedding*, WERC-R-004-001, 若狭湾エネルギー研究センター (2004).

付録：照射線量ビルドアップ係数のフィッティングパラメータ

付録：照射線量ビルドアップ係数のフィッティングパラメータ

付録 表-A1 照射線量ビルドアップ係数GP式フィッティングパラメータ

Be Beryllium Medium, Air Response									
E (MeV)	B	c	a	X_k	d	Max. Dev.	$x_{\max}$	St. Dev.	Application
0.015	1.749	-0.650	-1.211	0.01	1.0031	4.96%	20	2.63%	
0.02	2.231	0.537	-0.540	0.71	0.9970	9.64%	3	3.67%	
0.03	3.012	1.508	-0.597	1.38	0.9955	14.56%	3	5.20%	
0.04	3.497	2.038	-0.600	1.39	0.9961	12.96%	3	4.11%	
0.05	3.670	2.421	-0.611	1.42	0.9961	13.12%	3	4.11%	
0.06	3.602	2.661	-0.618	1.45	0.9950	12.99%	3	4.31%	
0.08	3.184	2.965	-0.632	1.60	0.9929	16.23%	4	5.21%	
0.1	2.792	3.122	-0.645	1.80	0.9915	19.39%	4	6.74%	
0.15	2.266	2.834	-0.623	1.71	0.9779	15.38%	4	6.50%	~100mfp
0.2	2.036	2.713	-0.634	1.75	0.9773	14.75%	4	6.93%	~100mfp
0.3	1.821	2.610	-0.675	1.81	0.9840	15.40%	4	6.41%	~100mfp
0.4	1.714	2.872	-0.763	2.02	0.9971	19.87%	2	8.97%	
0.5	1.648	2.723	-0.785	1.97	0.9982	19.61%	2	7.14%	
0.6	1.601	2.503	-0.796	1.80	0.9987	16.87%	4	5.93%	
0.8	1.538	2.070	-0.805	1.49	0.9993	11.01%	3	3.93%	
1	1.498	1.793	-0.819	1.34	0.9998	8.17%	3	2.96%	
1.5	1.447	1.188	-0.818	0.76	0.9991	4.47%	2	1.06%	
2	1.415	0.909	-0.864	0.65	1.0005	1.47%	35	0.81%	
3	1.372	0.740	-1.095	0.57	1.0017	2.20%	30	1.13%	
4	1.367	1.457	0.001	-3.86	25.4068	2.16%	7	1.17%	
5	1.337	-0.073	-0.413	0.01	1.0047	3.14%	2	1.11%	
6	1.318	-0.158	-0.524	0.01	1.0042	2.60%	2	1.06%	
8	1.291	-0.315	-0.612	0.01	1.0036	2.12%	1	1.15%	
10	1.269	-0.431	-0.650	0.01	1.0031	2.39%	300	1.24%	
15	1.231	-0.641	-0.707	0.01	1.0016	2.87%	300	1.59%	

付録 表-A2 照射線量ビルドアップ係数GP式フィッティングパラメータ

B Boron Medium, Air Response									
E (MeV)	B	c	a	X_k	d	Max. Dev.	$x_{\max}$	St. Dev.	Application
0.015	1.405	-0.543	-0.521	0.01	1.0079	1.77%	2	0.75%	
0.02	1.808	-0.630	-1.217	0.10	1.0037	4.66%	20	2.25%	
0.03	2.523	0.721	-0.582	0.72	0.9979	8.66%	2	3.57%	
0.04	3.063	1.311	-0.586	0.79	0.9956	10.27%	2	2.76%	
0.05	3.295	1.697	-0.596	0.83	0.9957	10.51%	2	2.49%	
0.06	3.291	1.967	-0.606	1.23	0.9956	11.11%	1	2.69%	
0.08	2.972	2.253	-0.616	1.37	0.9938	11.21%	3	3.16%	
0.1	2.644	2.393	-0.626	1.50	0.9926	13.67%	3	4.26%	
0.15	2.188	2.483	-0.648	1.79	0.9915	19.86%	4	7.28%	
0.2	1.983	2.430	-0.668	1.88	0.9924	19.89%	4	9.53%	
0.3	1.787	2.285	-0.701	1.87	0.9950	19.86%	4	9.35%	
0.4	1.688	2.109	-0.724	1.75	0.9966	18.18%	4	8.16%	
0.5	1.624	1.973	-0.743	1.66	0.9977	17.19%	4	6.81%	
0.6	1.580	1.783	-0.751	1.51	0.9982	13.39%	4	5.79%	
0.8	1.520	1.492	-0.761	1.34	0.9989	9.84%	3	4.15%	
1	1.481	1.280	-0.773	1.16	0.9994	8.43%	1	3.33%	
1.5	1.431	0.828	-0.768	0.65	0.9988	2.32%	2	1.12%	
2	1.401	0.602	-0.799	0.56	0.9999	1.50%	35	0.83%	
3	1.360	0.399	-0.991	0.01	1.0011	1.62%	30	0.81%	
4	1.344	1.109	0.001	1.56	-0.1156	1.66%	300	0.80%	
5	1.322	-0.098	-0.510	0.01	1.0033	1.68%	2	0.79%	
6	1.304	-0.177	-0.575	0.01	1.0033	2.28%	300	0.84%	
8	1.277	-0.328	-0.649	0.01	1.0028	2.19%	300	1.02%	
10	1.255	-0.436	-0.683	0.01	1.0023	2.21%	200	1.22%	
15	1.222	-0.679	-0.755	0.01	1.0010	3.13%	300	1.76%	

付録 表-A3 照射線量ビルドアップ係数GP式フィッティングパラメータ

C Carbon Medium, Air Response									
E (MeV)	B	c	a	X_k	d	Max. Dev.	$x_{\max}$	St. Dev.	Application
0.015	1.232	-0.636	-0.486	0.01	0.9886	1.97%	190	1.13%	
0.02	1.501	-0.519	-0.546	0.01	1.0099	2.23%	2	0.96%	
0.03	2.115	0.122	-0.413	0.49	0.9988	3.35%	300	1.80%	
0.04	2.669	0.775	-0.572	0.69	0.9968	7.30%	2	3.16%	
0.05	2.958	1.145	-0.576	0.72	0.9952	7.09%	2	2.10%	
0.06	3.014	1.410	-0.585	0.76	0.9949	7.92%	2	1.84%	
0.08	2.794	1.702	-0.595	0.84	0.9936	10.20%	2	2.46%	
0.1	2.526	1.853	-0.605	1.33	0.9928	11.23%	1	3.38%	
0.15	2.129	1.939	-0.621	1.53	0.9914	16.30%	4	5.95%	
0.2	1.944	1.940	-0.644	1.65	0.9926	19.45%	4	8.10%	
0.3	1.763	1.810	-0.672	1.65	0.9947	19.17%	4	8.45%	
0.4	1.684	1.737	-0.705	-4.79	-54.4301	11.53%	6	6.90%	
0.5	1.609	1.545	-0.710	1.48	0.9973	14.96%	4	6.68%	
0.6	1.566	1.409	-0.719	1.39	0.9979	12.20%	3	5.78%	
0.8	1.508	1.187	-0.728	1.24	0.9985	9.94%	1	4.34%	
1	1.470	1.019	-0.740	0.75	0.9991	7.06%	2	3.43%	
1.5	1.417	0.723	-0.765	0.62	0.9998	3.15%	35	1.92%	
2	1.389	0.505	-0.779	0.53	1.0002	2.25%	35	1.21%	
3	1.353	0.268	-0.916	0.01	1.0010	1.59%	30	0.85%	
4	1.335	-0.016	-0.184	0.01	1.0055	1.44%	300	0.63%	
5	1.313	-0.095	-0.530	0.01	1.0029	1.74%	300	0.67%	
6	1.297	-0.200	-0.632	0.01	1.0025	1.76%	300	0.76%	
8	1.270	-0.348	-0.692	0.01	1.0021	2.11%	300	0.99%	
10	1.251	-0.477	-0.733	0.01	1.0016	2.57%	300	1.28%	
15	1.218	-0.731	-0.802	0.01	1.0006	3.41%	300	1.88%	

付録 表-A4 照射線量ビルドアップ係数GP式フィッティングパラメータ

N Nitrogen Medium, Air Response									
E (MeV)	B	c	a	X_k	d	Max. Dev.	$x_{\max}$	St. Dev.	Application
0.015	1.143	-0.779	-0.565	0.01	0.9502	2.44%	170	1.40%	
0.02	1.318	-0.567	-0.432	0.01	1.0135	1.34%	300	0.58%	
0.03	1.840	-0.462	-0.789	0.01	1.0048	4.09%	2	1.42%	
0.04	2.322	0.309	-0.509	0.57	0.9981	3.89%	190	2.71%	
0.05	2.647	0.721	-0.554	0.66	0.9958	5.52%	2	3.02%	
0.06	2.754	0.978	-0.562	0.68	0.9946	5.57%	2	2.30%	
0.08	2.635	1.285	-0.575	0.74	0.9934	7.70%	2	2.42%	
0.1	2.422	1.427	-0.581	0.81	0.9926	10.17%	2	3.23%	
0.15	2.080	1.533	-0.594	1.37	0.9910	12.98%	3	5.37%	
0.2	1.914	1.628	-0.628	-5.03	-54.2221	10.76%	7	5.85%	
0.3	1.744	1.488	-0.648	1.50	0.9946	17.13%	4	7.94%	
0.4	1.655	1.397	-0.671	1.46	0.9961	16.08%	4	7.44%	
0.5	1.598	1.297	-0.686	1.40	0.9970	14.41%	4	6.64%	
0.6	1.556	1.211	-0.699	1.35	0.9977	12.87%	4	5.79%	
0.8	1.500	0.989	-0.700	0.76	0.9982	8.57%	3	4.43%	
1	1.463	0.854	-0.712	0.70	0.9988	6.03%	3	3.57%	
1.5	1.412	0.585	-0.714	0.58	0.9984	2.80%	30	1.50%	
2	1.383	0.417	-0.736	0.48	0.9996	2.27%	30	1.14%	
3	1.347	0.236	-0.891	0.01	1.0010	1.69%	30	0.88%	
4	1.328	-0.013	-0.213	0.01	1.0040	1.28%	300	0.60%	
5	1.310	-0.114	-0.604	0.01	1.0022	1.43%	300	0.63%	
6	1.292	-0.201	-0.662	0.01	1.0021	1.90%	300	0.70%	
8	1.266	-0.370	-0.736	0.01	1.0016	2.24%	300	0.98%	
10	1.245	-0.524	-0.786	0.01	1.0011	2.46%	300	1.26%	
15	1.213	-0.809	-0.861	0.01	1.0005	3.67%	300	2.10%	

付録 表-A5 照射線量ビルドアップ係数GP式フィッティングパラメータ

O Oxygen Medium, Air Response									
E (MeV)	B	c	a	X_k	d	Max. Dev.	$x_{\max}$	St. Dev.	Application
0.015	1.092	-0.847	-0.609	0.01	0.9250	1.99%	150	1.04%	
0.02	1.212	-0.674	-0.465	0.01	0.9885	1.90%	200	1.20%	
0.03	1.603	-0.546	-0.562	0.01	1.0111	3.10%	2	1.31%	
0.04	2.071	0.958	-0.001	-24.07	-2.9037	3.78%	85	2.20%	
0.05	2.366	0.353	-0.500	0.57	0.9966	4.81%	190	3.28%	
0.06	2.517	0.644	-0.538	0.63	0.9952	5.19%	3	3.36%	
0.08	2.486	0.967	-0.558	0.69	0.9936	6.76%	2	3.26%	
0.1	2.326	1.103	-0.558	0.73	0.9924	7.95%	2	3.46%	
0.15	2.037	1.250	-0.573	1.26	0.9910	12.66%	1	5.42%	
0.2	1.887	1.275	-0.591	1.35	0.9918	14.07%	4	6.96%	
0.3	1.729	1.251	-0.624	1.40	0.9942	15.48%	4	7.74%	
0.4	1.644	1.207	-0.651	1.39	0.9958	15.67%	4	7.30%	
0.5	1.589	1.102	-0.661	1.31	0.9966	12.57%	4	6.57%	
0.6	1.548	1.019	-0.670	1.23	0.9972	11.02%	1	5.88%	
0.8	1.493	0.892	-0.686	0.74	0.9981	8.88%	3	4.51%	
1	1.457	0.775	-0.696	0.69	0.9986	6.67%	3	3.66%	
1.5	1.406	0.535	-0.699	0.56	0.9983	3.02%	4	1.61%	
2	1.379	0.378	-0.719	0.49	0.9995	2.26%	30	1.22%	
3	1.345	0.186	-0.827	0.01	1.0009	1.68%	30	0.91%	
4	1.323	-0.009	-0.187	0.01	1.0035	0.97%	300	0.63%	
5	1.304	-0.110	-0.641	0.01	1.0018	1.26%	300	0.63%	
6	1.290	-0.231	-0.726	0.01	1.0016	1.59%	300	0.68%	
8	1.263	-0.400	-0.786	0.01	1.0012	1.96%	200	1.01%	
10	1.245	-0.583	-0.841	0.01	1.0008	2.59%	300	1.36%	
15	1.215	-0.957	-0.929	0.01	1.0005	4.08%	300	2.36%	

付録 表-A6 照射線量ビルドアップ係数GP式フィッティングパラメータ

Na Sodium Medium, Air Response									
E (MeV)	B	c	a	X_k	d	Max. Dev.	$x_{\max}$	St. Dev.	Application
0.015	1.032	-0.994	-0.715	0.01	0.8877	0.91%	120	0.45%	
0.02	1.077	-0.852	-0.588	0.01	0.9191	1.81%	150	0.94%	
0.03	1.243	-0.672	-0.411	0.01	1.0075	1.81%	300	1.03%	
0.04	1.496	-0.588	-0.474	0.01	1.0187	1.97%	2	0.83%	
0.05	1.769	-0.541	-0.696	0.01	1.0059	3.88%	2	1.20%	
0.06	1.927	0.916	-0.001	-22.43	-5.1399	4.67%	25	1.92%	
0.08	2.077	0.261	-0.454	0.56	0.9952	7.35%	6	4.30%	
0.1	2.057	0.473	-0.487	0.62	0.9928	8.98%	6	5.21%	
0.15	1.919	0.703	-0.514	0.69	0.9904	10.78%	5	5.93%	
0.2	1.816	0.792	-0.535	0.73	0.9913	12.49%	4	6.82%	
0.3	1.691	0.864	-0.574	0.78	0.9934	14.65%	4	7.49%	
0.4	1.618	0.853	-0.599	0.77	0.9949	13.52%	4	7.29%	
0.5	1.567	0.815	-0.614	0.75	0.9958	11.68%	3	6.65%	
0.6	1.531	0.790	-0.632	0.74	0.9967	11.12%	3	6.01%	
0.8	1.479	0.718	-0.652	0.70	0.9977	9.23%	3	4.71%	
1	1.445	0.641	-0.668	0.67	0.9984	7.32%	3	3.88%	
1.5	1.397	0.440	-0.662	0.55	0.9979	3.42%	3	1.80%	
2	1.371	0.316	-0.678	0.49	0.9992	2.57%	30	1.42%	
3	1.340	0.127	-0.696	0.01	1.0005	1.89%	30	1.04%	
4	1.321	0.989	0.000	6.43	0.0121	1.16%	300	0.58%	
5	1.306	-0.222	-0.922	0.01	1.0010	1.09%	300	0.60%	
6	1.291	-0.374	-0.944	0.01	1.0009	1.70%	1	0.69%	
8	1.270	-0.629	-0.980	0.01	1.0008	3.19%	300	1.33%	
10	1.255	-0.903	-1.030	0.01	1.0009	4.70%	300	2.11%	
15	1.234	-1.720	-1.160	0.01	1.0017	7.69%	2	4.16%	

付録 表-A7 照射線量ビルドアップ係数GP式フィッティングパラメータ

Mg Magnesium Medium, Air Response									
E (MeV)	B	c	a	X_k	d	Max. Dev.	$x_{\max}$	St. Dev.	Application
0.015	1.024	-1.015	-0.744	0.01	0.8786	0.58%	110	0.32%	
0.02	1.057	-0.968	-0.690	0.01	0.8927	1.18%	130	0.66%	
0.03	1.185	-0.890	-0.609	0.01	0.9409	2.65%	160	1.56%	
0.04	1.389	-0.748	-0.554	0.01	0.9906	2.91%	2	1.37%	
0.05	1.622	-0.629	-0.620	0.01	1.0041	3.64%	2	1.08%	
0.06	1.811	-0.633	-0.894	0.01	1.0019	5.06%	2	1.59%	
0.08	1.954	0.097	-0.289	0.50	0.9908	7.12%	6	3.64%	
0.1	1.970	0.309	-0.433	0.58	0.9914	8.59%	6	5.05%	
0.15	1.879	0.580	-0.499	0.67	0.9908	10.76%	5	6.03%	
0.2	1.793	0.669	-0.512	0.69	0.9907	11.38%	4	6.78%	
0.3	1.679	0.783	-0.562	0.76	0.9933	14.72%	4	7.49%	
0.4	1.609	0.775	-0.584	0.74	0.9946	12.80%	4	7.27%	
0.5	1.561	0.779	-0.610	0.75	0.9959	12.90%	4	6.69%	
0.6	1.525	0.749	-0.623	0.73	0.9965	11.68%	4	5.99%	
0.8	1.475	0.682	-0.644	0.70	0.9976	9.41%	4	4.77%	
1	1.441	0.634	-0.669	0.68	0.9985	8.28%	4	3.92%	
1.5	1.394	0.421	-0.653	0.55	0.9978	3.48%	3	1.85%	
2	1.369	0.301	-0.667	0.49	0.9991	2.63%	30	1.46%	
3	1.339	0.120	-0.672	0.01	1.0004	2.12%	4	1.10%	
4	1.328	0.980	0.000	-23.68	-1.1546	1.84%	3	0.65%	
5	1.307	-0.324	-1.065	0.01	1.0009	1.46%	1	0.60%	
6	1.292	-0.454	-1.029	0.01	1.0009	2.41%	300	0.80%	
8	1.271	-0.838	-1.087	0.01	1.0008	3.80%	2	1.63%	
10	1.259	-1.136	-1.118	0.01	1.0011	5.96%	300	2.60%	
15	1.237	-2.132	-1.270	0.01	1.0023	9.68%	1	5.42%	

付録 表-A8 照射線量ビルドアップ係数GP式フィッティングパラメータ

Al Aluminum Medium, Air Response									
E (MeV)	B	c	a	X_k	d	Max. Dev.	$x_{\max}$	St. Dev.	Application
0.015	1.019	-0.890	-0.674	0.01	0.8818	0.54%	300	0.27%	
0.02	1.044	-0.985	-0.701	0.01	0.8871	1.10%	130	0.56%	
0.03	1.144	-0.912	-0.622	0.01	0.9254	2.30%	150	1.32%	
0.04	1.312	-0.732	-0.516	0.01	0.9825	2.71%	300	1.36%	
0.05	1.502	-0.655	-0.551	0.01	1.0045	2.94%	2	0.84%	
0.06	1.675	-0.601	-0.697	0.01	1.0033	3.83%	2	1.08%	
0.08	1.850	0.916	-0.002	-19.53	-5.4167	3.77%	20	1.51%	
0.1	1.925	1.049	-0.002	-285.92	1.5101	8.42%	210	4.82%	
0.15	1.839	0.477	-0.483	0.65	0.9910	11.21%	5	5.90%	
0.2	1.770	0.599	-0.506	0.69	0.9913	12.76%	5	6.78%	
0.3	1.667	0.698	-0.545	0.73	0.9929	13.65%	4	7.47%	
0.4	1.601	0.728	-0.576	0.74	0.9945	13.56%	4	7.21%	
0.5	1.555	0.725	-0.599	0.74	0.9957	12.63%	4	6.63%	
0.6	1.520	0.708	-0.617	0.72	0.9966	11.45%	4	6.05%	
0.8	1.471	0.648	-0.636	0.69	0.9975	9.27%	4	4.78%	
1	1.438	0.585	-0.652	0.66	0.9982	7.50%	3	3.94%	
1.5	1.391	0.411	-0.650	0.55	0.9978	3.62%	3	1.88%	
2	1.367	0.291	-0.656	0.50	0.9990	2.69%	4	1.52%	
3	1.337	0.113	-0.638	0.01	1.0002	2.08%	35	1.15%	
4	1.335	0.973	0.000	-23.68	-1.5414	2.74%	3	0.99%	
5	1.309	-0.458	-1.205	0.01	1.0009	2.08%	1	0.70%	
6	1.294	-0.643	-1.166	0.01	1.0009	3.05%	1	1.08%	
8	1.277	-1.031	-1.168	0.01	1.0010	4.71%	300	2.09%	
10	1.264	-1.552	-1.231	0.01	1.0014	7.08%	1	3.35%	
15	1.242	-2.406	-1.368	0.01	1.0032	12.03%	20	7.44%	

付録 表-A9 照射線量ビルドアップ係数GP式フィッティングパラメータ

Si Silicon Medium, Air Response									
E (MeV)	B	c	a	X_k	d	Max. Dev.	$x_{\max}$	St. Dev.	Application
0.015	1.015	-0.924	-0.691	0.01	0.8786	0.41%	300	0.22%	
0.02	1.035	-0.962	-0.689	0.01	0.8826	0.82%	120	0.43%	
0.03	1.114	-0.943	-0.639	0.01	0.9124	1.95%	140	1.10%	
0.04	1.251	-0.765	-0.527	0.01	0.9665	2.93%	300	1.58%	
0.05	1.410	-0.676	-0.511	0.01	1.0018	2.17%	2	0.74%	
0.06	1.565	-0.619	-0.600	0.01	1.0054	2.88%	2	0.80%	
0.08	1.773	-0.695	-1.043	0.09	1.0021	5.11%	1	1.54%	
0.1	1.808	0.091	-0.252	0.56	0.9880	9.39%	6	4.51%	
0.15	1.800	0.373	-0.459	0.63	0.9911	10.44%	5	5.70%	
0.2	1.746	0.514	-0.489	0.68	0.9912	12.25%	5	6.75%	
0.3	1.655	0.648	-0.540	0.72	0.9932	14.18%	4	7.35%	
0.4	1.593	0.680	-0.567	0.73	0.9944	13.68%	4	7.14%	
0.5	1.549	0.689	-0.593	0.73	0.9957	12.97%	4	6.63%	
0.6	1.515	0.689	-0.613	0.73	0.9965	12.69%	4	6.03%	
0.8	1.467	0.627	-0.632	0.69	0.9975	9.58%	4	4.82%	
1	1.435	0.570	-0.649	0.66	0.9982	7.82%	3	3.96%	
1.5	1.389	0.398	-0.642	0.56	0.9977	3.81%	3	1.92%	
2	1.366	0.289	-0.655	0.52	0.9990	3.15%	4	1.56%	
3	1.336	0.111	-0.622	0.01	1.0001	2.28%	4	1.21%	
4	1.312	0.014	-0.095	-1.18	-54.2636	2.16%	5	1.16%	
5	1.312	-0.712	-1.376	0.01	1.0010	3.18%	1	1.02%	
6	1.299	-0.825	-1.259	0.01	1.0010	3.63%	1	1.44%	
8	1.282	-1.220	-1.239	0.01	1.0013	6.37%	300	2.77%	
10	1.266	-1.928	-1.342	0.01	1.0018	8.91%	1	4.48%	
15	1.242	0.765	0.000	-34.80	-13.0572	15.97%	10	8.49%	

付録 表-A10 照射線量ビルドアップ係数GP式フィッティングパラメータ

P Phosphorus Medium, Air Response									
E (MeV)	B	c	a	X_k	d	Max. Dev.	$x_{\max}$	St. Dev.	Application
0.015	1.012	-1.014	-0.743	0.01	0.8711	0.28%	100	0.16%	
0.02	1.028	-0.982	-0.709	0.01	0.8762	0.60%	110	0.34%	
0.03	1.092	-0.936	-0.642	0.01	0.9025	1.64%	300	0.92%	
0.04	1.203	-0.858	-0.578	0.01	0.9458	2.70%	300	1.57%	
0.05	1.340	-0.714	-0.512	0.01	0.9902	2.33%	300	1.14%	
0.06	1.473	-0.666	-0.566	0.01	1.0028	2.62%	2	0.82%	
0.08	1.674	-0.597	-0.803	0.01	1.0019	3.70%	2	0.98%	
0.1	1.762	0.900	-0.003	-18.05	-6.6018	3.57%	300	1.57%	
0.15	1.795	1.086	-0.007	-164.00	1.6040	4.54%	300	2.11%	
0.2	1.721	0.462	-0.485	0.68	0.9918	13.75%	5	6.63%	
0.3	1.642	0.585	-0.526	0.71	0.9929	13.60%	4	7.27%	
0.4	1.585	0.635	-0.560	0.72	0.9945	13.53%	4	7.09%	
0.5	1.542	0.652	-0.584	0.73	0.9955	13.09%	4	6.58%	
0.6	1.510	0.644	-0.602	0.72	0.9963	12.04%	4	6.00%	
0.8	1.464	0.601	-0.625	0.69	0.9974	9.81%	4	4.86%	
1	1.432	0.557	-0.648	0.67	0.9983	8.10%	3	4.01%	
1.5	1.387	0.390	-0.639	0.57	0.9977	4.11%	3	1.96%	
2	1.364	0.276	-0.644	0.52	0.9989	3.02%	4	1.61%	
3	1.334	0.102	-0.583	0.01	0.9998	2.53%	35	1.30%	
4	1.317	0.954	-0.001	-12.32	-2.9278	1.75%	130	0.97%	
5	1.303	0.905	0.000	-17.42	-5.2540	3.58%	300	1.49%	
6	1.302	-1.023	-1.349	0.01	1.0012	5.08%	300	2.00%	
8	1.282	-1.622	-1.372	0.01	1.0016	7.28%	1	3.84%	
10	1.267	-2.409	-1.461	0.01	1.0023	11.01%	1	6.17%	
15	1.249	0.772	-0.001	-36.05	-13.0101	16.48%	10	8.44%	

付録 表-A11 照射線量ビルドアップ係数GP式フィッティングパラメータ

E (MeV)	S Sulfer Medium, Air Response								Application
	B	c	a	X_k	d	Max. Dev.	$x_{\max}$	St. Dev.	
0.015	1.010	-0.828	-0.671	0.01	0.8726	0.34%	300	0.17%	
0.02	1.023	-0.947	-0.697	0.01	0.8740	0.56%	300	0.30%	
0.03	1.074	-0.987	-0.679	0.01	0.8926	1.55%	130	0.82%	
0.04	1.166	-0.918	-0.605	0.01	0.9316	2.46%	160	1.40%	
0.05	1.283	-0.757	-0.524	0.01	0.9774	2.47%	190	1.42%	
0.06	1.400	-0.678	-0.529	0.01	1.0004	1.96%	1	0.79%	
0.08	1.589	-0.588	-0.685	0.01	1.0031	2.88%	1	0.75%	
0.1	1.669	0.840	0.000	-18.68	-8.8538	7.42%	25	3.12%	
0.15	1.719	0.208	-0.405	0.60	0.9920	9.59%	5	4.83%	
0.2	1.697	1.120	-0.009	-131.86	2.5032	7.14%	110	4.27%	
0.3	1.630	0.542	-0.522	0.71	0.9933	13.82%	4	7.19%	
0.4	1.576	0.600	-0.553	0.72	0.9944	13.83%	4	6.93%	
0.5	1.536	0.600	-0.571	0.71	0.9953	11.90%	4	6.57%	
0.6	1.505	0.629	-0.602	0.73	0.9965	12.74%	4	6.00%	
0.8	1.460	0.566	-0.614	0.68	0.9972	9.13%	3	4.87%	
1	1.428	0.531	-0.638	0.66	0.9981	7.69%	3	4.00%	
1.5	1.385	0.370	-0.627	0.56	0.9975	3.87%	3	2.00%	
2	1.363	0.269	-0.635	0.53	0.9988	3.28%	4	1.66%	
3	1.334	0.103	-0.574	0.01	0.9997	2.61%	4	1.35%	
4	1.324	0.951	-0.001	-15.12	-3.0959	1.30%	45	0.69%	
5	1.316	0.904	0.000	-22.04	-5.3141	4.11%	300	1.79%	
6	1.292	0.861	0.000	-19.97	-7.6701	6.09%	25	2.94%	
8	1.269	0.807	0.000	-22.04	-10.6465	9.91%	30	4.98%	
10	1.244	0.777	-0.001	-22.72	-12.6154	12.80%	30	6.20%	
15	1.251	0.776	-0.002	-35.37	-13.1376	16.60%	10	8.43%	

付録 表-A12 照射線量ビルドアップ係数GP式フィッティングパラメータ

E (MeV)	Ar Argon Medium, Air Response								Application
	B	c	a	X_k	d	Max. Dev.	$x_{\max}$	St. Dev.	
0.015	1.005	0.699	0.007	-51.25	-8.9313	0.17%	10	0.08%	
0.02	1.013	-0.931	-0.771	0.01	0.8884	0.38%	2	0.21%	
0.03	1.051	-0.997	-0.683	0.01	0.8822	0.98%	120	0.56%	
0.04	1.114	-0.958	-0.636	0.01	0.9095	1.95%	140	1.08%	
0.05	1.200	-0.888	-0.590	0.01	0.9459	2.67%	170	1.56%	
0.06	1.291	-0.749	-0.539	0.01	0.9801	2.89%	300	1.54%	
0.08	1.450	-0.627	-0.580	0.01	1.0034	2.17%	1	0.63%	
0.1	1.558	-0.586	-0.798	0.01	1.0014	2.88%	1	0.69%	
0.15	1.673	0.928	-0.005	-12.40	-5.7479	8.33%	300	3.57%	
0.2	1.645	0.259	-0.410	0.63	0.9899	10.90%	4	5.48%	
0.3	1.603	1.131	-0.007	-120.12	3.6345	17.76%	30	8.04%	
0.4	1.559	0.588	-0.604	0.75	1.0027	15.11%	4	8.34%	
0.5	1.523	0.648	-0.641	1.30	1.0037	15.46%	4	7.98%	
0.6	1.494	0.634	-0.641	0.75	1.0016	13.92%	4	7.22%	
0.8	1.452	0.547	-0.613	0.69	0.9973	10.24%	4	4.83%	
1	1.422	0.478	-0.612	0.65	0.9970	7.24%	3	3.72%	
1.5	1.379	0.461	-0.738	0.64	1.0029	6.39%	3	3.47%	
2	1.356	0.403	-0.836	0.62	1.0062	5.31%	3	2.82%	
3	1.327	0.150	-0.713	0.38	1.0025	3.80%	35	2.15%	
4	1.309	0.026	-0.470	0.01	1.0023	3.83%	5	1.98%	
5	1.315	0.893	0.000	-19.09	-6.0145	3.09%	25	1.09%	
6	1.298	0.855	0.000	-20.19	-8.0882	5.60%	25	2.40%	
8	1.267	0.805	-0.001	-21.22	-11.1339	9.19%	25	4.42%	
10	1.254	0.783	-0.002	-24.64	-12.6622	11.67%	30	6.01%	
15	1.252	0.790	-0.004	-34.45	-13.1161	16.56%	10	8.11%	

付録 表-A13 照射線量ビルドアップ係数GP式フィッティングパラメータ

K Potasium Medium, Air Response									
E (MeV)	B	c	a	X_k	d	Max. Dev.	$x_{\max}$	St. Dev.	Application
0.015	1.004	0.748	0.000	-65.86	-8.1045	0.17%	15	0.08%	
0.02	1.011	-0.961	-0.794	0.01	0.8863	0.33%	2	0.18%	
0.03	1.043	-1.002	-0.691	0.01	0.8777	0.85%	120	0.48%	
0.04	1.096	-0.968	-0.649	0.01	0.9010	1.79%	140	0.95%	
0.05	1.170	-0.892	-0.595	0.01	0.9354	2.53%	300	1.43%	
0.06	1.249	-0.827	-0.572	0.01	0.9673	2.74%	300	1.66%	
0.08	1.395	-0.640	-0.548	0.01	1.0023	1.78%	1	0.66%	
0.1	1.502	-0.564	-0.697	0.01	1.0022	2.18%	1	0.54%	
0.15	1.634	0.891	-0.003	-15.66	-7.0277	2.82%	300	1.31%	
0.2	1.620	0.215	-0.395	0.64	0.9904	11.18%	5	5.15%	
0.3	1.598	1.107	-0.006	-138.92	2.7725	8.59%	120	5.01%	
0.4	1.550	0.569	-0.608	0.76	1.0031	15.68%	4	8.08%	
0.5	1.516	0.639	-0.646	1.33	1.0040	16.27%	4	7.86%	
0.6	1.544	1.099	-0.007	-139.84	2.1912	11.27%	10	4.67%	
0.8	1.448	0.510	-0.599	0.68	0.9970	9.29%	4	4.79%	
1	1.418	0.472	-0.611	0.65	0.9970	7.48%	3	3.70%	
1.5	1.377	0.457	-0.737	0.65	1.0029	6.63%	3	3.47%	
2	1.355	0.379	-0.819	0.62	1.0061	5.16%	3	2.85%	
3	1.328	0.148	-0.699	0.47	1.0024	3.88%	4	2.20%	
4	1.323	0.929	-0.001	-12.92	-4.3907	4.44%	300	1.85%	
5	1.293	0.870	-0.001	-12.23	-7.5857	2.90%	15	1.28%	
6	1.284	0.838	-0.001	-15.64	-9.3266	5.92%	20	2.05%	
8	1.262	0.793	-0.002	-18.63	-12.0864	10.38%	25	4.27%	
10	1.251	0.777	-0.003	-22.68	-13.2970	12.48%	30	6.02%	
15	1.251	0.793	-0.005	-32.91	-13.3321	17.32%	10	8.18%	

付録 表-A14 照射線量ビルドアップ係数GP式フィッティングパラメータ

Fe Iron Medium, Air Response									
E (MeV)	B	c	a	X_k	d	Max. Dev.	$x_{\max}$	St. Dev.	Application
0.015	1.002	0.590	-0.020	-47.57	-18.8033	0.21%	300	0.14%	
0.02	1.005	-1.429	-0.960	0.01	0.8622	0.26%	100	0.16%	
0.03	1.017	-0.928	-0.640	0.01	0.8772	0.45%	300	0.25%	
0.04	1.037	-0.956	-0.611	0.01	0.8917	1.11%	130	0.52%	
0.05	1.066	-0.906	-0.557	0.01	0.9167	1.61%	300	0.91%	
0.06	1.098	-0.854	-0.518	0.01	0.9451	2.86%	180	1.34%	
0.08	1.175	-0.633	-0.373	0.53	1.0137	3.01%	300	1.09%	
0.1	1.244	-0.567	-0.404	0.39	1.0220	1.34%	25	0.76%	
0.15	1.388	-0.439	-0.561	0.01	1.0082	0.99%	300	0.56%	
0.2	1.470	-0.623	-1.171	0.01	1.0019	2.39%	1	0.75%	
0.3	1.490	0.150	-0.411	0.63	0.9947	8.24%	4	3.87%	
0.4	1.483	0.280	-0.473	0.66	0.9939	10.34%	4	4.77%	
0.5	1.466	0.338	-0.501	0.67	0.9941	10.00%	4	4.85%	
0.6	1.449	0.365	-0.518	0.67	0.9943	9.48%	4	4.63%	
0.8	1.419	0.384	-0.550	0.66	0.9953	8.28%	4	3.99%	
1	1.395	0.380	-0.578	0.64	0.9963	7.07%	3	3.31%	
1.5	1.363	0.291	-0.583	0.58	0.9971	4.33%	3	2.11%	
2	1.346	0.209	-0.559	0.52	0.9978	3.66%	4	2.01%	
3	1.325	0.091	-0.420	0.48	0.9969	4.59%	4	2.26%	
4	1.336	0.896	-0.003	-15.89	-6.7744	3.52%	55	1.75%	
5	1.310	0.843	-0.004	-15.60	-9.9406	5.16%	20	1.76%	
6	1.290	0.805	-0.005	-15.65	-12.3021	8.24%	20	2.73%	
8	1.275	0.778	-0.007	-20.26	-14.4430	13.36%	25	5.16%	
10	1.269	0.777	-0.008	-24.31	-15.0371	14.36%	30	6.80%	
15	1.271	0.820	-0.008	-28.57	-13.7690	16.55%	8	7.96%	

付録 表-A15 照射線量ビルドアップ係数GP式フィッティングパラメータ

Cu Copper Medium, Air Response									
E (MeV)	B	c	a	X_k	d	Max. Dev.	$x_{\max}$	St. Dev.	Application
0.015	1.001	1.636	0.038	1.63	-1.1219	1.64%	300	0.54%	
0.02	1.002	-0.628	-0.876	0.01	0.9230	0.13%	20	0.07%	
0.03	1.010	-1.126	-0.874	0.01	0.8741	0.38%	110	0.22%	
0.04	1.025	-1.005	-0.713	0.01	0.8713	0.54%	110	0.31%	
0.05	1.046	-1.057	-0.704	0.01	0.8775	0.97%	120	0.52%	
0.06	1.070	-0.994	-0.668	0.01	0.8974	1.36%	130	0.76%	
0.08	1.127	-0.903	-0.626	0.01	0.9358	2.39%	300	1.31%	
0.1	1.185	-0.800	-0.594	0.01	0.9690	2.81%	190	1.61%	
0.15	1.314	-0.552	-0.571	0.01	1.0014	1.20%	210	0.69%	
0.2	1.396	-0.394	-0.756	0.01	1.0008	0.86%	300	0.34%	
0.3	1.446	0.060	-0.266	0.59	0.9920	6.24%	4	2.61%	
0.4	1.452	0.193	-0.423	0.63	0.9929	8.26%	4	3.84%	
0.5	1.443	0.306	-0.534	0.68	0.9982	10.41%	4	4.98%	
0.6	1.430	0.349	-0.566	0.68	0.9996	9.82%	4	5.20%	
0.8	1.404	0.374	-0.576	0.67	0.9978	8.77%	4	4.29%	
1	1.409	1.072	-0.005	-116.18	1.7418	5.72%	210	3.01%	
1.5	1.354	0.355	-0.697	0.63	1.0027	6.15%	3	3.34%	
2	1.340	0.284	-0.736	0.61	1.0055	5.46%	3	3.02%	
3	1.322	0.104	-0.481	0.54	0.9998	5.92%	4	3.05%	
4	1.334	0.879	-0.003	-14.83	-7.7708	6.45%	55	3.26%	
5	1.303	0.823	-0.005	-13.84	-11.3698	6.06%	300	2.54%	
6	1.300	0.800	-0.006	-17.42	-12.9364	8.59%	20	3.08%	
8	1.294	0.781	-0.008	-23.07	-14.7112	12.72%	30	5.40%	
10	1.289	0.783	-0.009	-26.08	-15.2711	14.80%	35	6.85%	
15	1.299	0.838	-0.008	-28.97	-13.4279	15.81%	10	7.35%	

付録 表-A16 照射線量ビルドアップ係数GP式フィッティングパラメータ

Rb Rubidium Medium, Air Response									
E (MeV)	B	c	a	X_k	d	Max. Dev.	$x_{\max}$	St. Dev.	Application
0.015	1.007	-1.096	-0.814	0.01	0.8675	0.20%	95	0.11%	
0.016	1.846	0.926	0.026	-12.40	-23.4727	8.27%	15	3.82%	
0.017	1.924	-0.601	-0.488	0.45	1.5160	10.07%	15	4.43%	
0.018	2.044	-0.700	-0.515	0.01	1.4931	8.72%	15	3.75%	
0.019	2.174	-0.838	-0.561	0.01	1.4648	7.07%	35	3.95%	
0.02	2.281	-0.958	-0.594	0.01	1.4363	9.07%	30	4.77%	
0.025	2.769	0.660	0.039	-33.46	-22.7829	15.71%	10	9.75%	~100mfp
0.03	3.150	0.473	0.077	29.19	0.3099	14.75%	30	7.82%	~100mfp
0.04	3.168	0.683	-5.000	-1.51	-5.9812	0.00%	3	0.00%	
0.05	2.604	0.005	0.257	55.66	0.0990	0.84%	40	0.43%	
0.06	2.052	-0.008	-0.100	-164.92	-17.3113	2.23%	15	0.94%	
0.08	1.481	-1.138	-0.211	0.01	0.9835	3.80%	170	1.84%	
0.1	1.095	-0.886	-0.633	0.01	0.9350	2.02%	300	1.14%	
0.15	1.185	-0.605	-0.396	0.41	1.0339	3.33%	300	1.76%	
0.2	1.265	-0.496	-0.479	0.36	1.0186	3.66%	300	1.95%	
0.3	1.349	-0.243	-0.618	0.45	1.0035	1.04%	3	0.54%	
0.4	1.400	0.862	-0.001	-11.88	-8.0245	2.46%	300	1.25%	
0.5	1.380	0.119	-0.428	0.60	0.9968	6.00%	4	2.84%	
0.6	1.379	0.176	-0.464	0.61	0.9960	6.29%	4	3.04%	
0.8	1.368	0.238	-0.518	0.62	0.9965	6.18%	4	3.04%	
1	1.354	0.288	-0.594	0.63	0.9992	6.36%	4	3.17%	
1.5	1.337	0.205	-0.525	0.55	0.9966	3.81%	3	2.00%	
2	1.329	0.146	-0.449	0.54	0.9952	4.38%	4	2.22%	
3	1.315	0.088	-0.294	0.58	0.9903	7.81%	5	3.45%	
4	1.316	0.820	-0.007	-12.10	-12.0593	8.20%	300	3.28%	
5	1.320	0.796	-0.008	-17.63	-13.7106	7.42%	20	3.07%	
6	1.297	0.768	-0.010	-17.79	-15.8601	10.61%	20	4.10%	
8	1.282	0.751	-0.012	-20.39	-17.7810	16.69%	25	6.35%	
10	1.284	0.771	-0.011	-23.96	-17.2813	16.49%	30	7.42%	
15	1.285	0.852	-0.009	-24.40	-14.4985	17.95%	30	7.79%	

付録 表-A17 照射線量ビルドアップ係数GP式フィッティングパラメータ

Mo Molybdenum Medium, Air Response									
E (MeV)	B	c	a	X_k	d	Max. Dev.	$x_{\max}$	St. Dev.	Application
0.015	1.005	0.503	0.027	-31.72	-14.2686	0.26%	300	0.11%	~100mfp
0.019	1.009	-1.125	-0.812	0.01	0.8639	0.26%	100	0.14%	
0.02	1.898	0.935	0.026	-12.36	-23.2256	8.24%	95	3.59%	
0.021	1.938	-0.596	-0.496	0.46	1.5264	10.40%	15	4.50%	
0.022	2.020	-0.638	-0.503	0.01	1.5089	9.49%	15	3.97%	
0.024	2.231	-0.831	-0.560	0.01	1.4688	6.39%	10	3.45%	
0.026	2.404	-1.045	-0.618	0.01	1.4232	9.33%	30	4.57%	
0.028	2.576	-1.314	-0.673	0.01	1.3748	11.27%	1	5.82%	
0.03	2.744	-1.591	-0.714	0.01	1.3245	17.65%	1	7.02%	
0.035	3.019	0.565	0.047	-40.64	-22.8369	7.65%	25	3.31%	
0.04	3.190	0.437	0.034	157.46	0.4477	4.74%	4	2.56%	
0.05	2.965	0.202	0.000	0.84	-0.0660	0.01%	0.5	0.00%	
0.06	2.412	0.001	-0.099	-226.36	-8.5928	1.28%	10	0.51%	
0.08	1.610	-1.348	-0.091	0.31	1.2658	2.99%	150	1.48%	
0.1	1.066	-0.922	-0.662	0.01	0.9199	1.58%	300	0.86%	
0.15	1.139	-1.002	-0.541	0.01	1.0201	6.08%	300	3.10%	
0.2	1.209	-0.756	-0.527	0.01	1.0211	6.67%	300	3.86%	
0.3	1.298	-0.359	-0.514	0.48	1.0117	3.36%	300	1.40%	
0.4	1.331	-0.133	-0.638	0.51	1.0038	2.09%	3	1.03%	
0.5	1.354	0.853	-0.002	-8.21	-8.7580	4.62%	300	1.85%	
0.6	1.348	0.091	-0.411	0.57	0.9970	4.46%	4	2.22%	
0.8	1.344	0.176	-0.509	0.59	0.9974	5.06%	4	2.42%	
1	1.336	0.222	-0.581	0.60	0.9996	5.16%	4	2.71%	
1.5	1.326	0.157	-0.472	0.54	0.9956	3.46%	4	1.79%	
2	1.319	0.129	-0.420	0.55	0.9947	4.95%	4	2.33%	
3	1.337	0.861	-0.006	-11.41	-9.5678	9.88%	300	3.87%	
4	1.326	0.803	-0.008	-14.70	-13.2735	8.29%	300	3.20%	
5	1.318	0.767	-0.010	-17.38	-15.8386	9.52%	20	3.69%	
6	1.298	0.742	-0.012	-17.73	-17.8691	12.85%	20	4.83%	
8	1.315	0.745	-0.012	-24.25	-18.4864	15.62%	30	6.99%	
10	1.307	0.765	-0.011	-25.06	-18.1830	17.12%	35	8.05%	
15	1.310	0.858	-0.009	-23.80	-15.0986	18.80%	30	8.02%	

付録 表-A18 照射線量ビルドアップ係数GP式フィッティングパラメータ

Sn Tin Medium, Air Response									
E (MeV)	B	c	a	X_k	d	Max. Dev.	$x_{\max}$	St. Dev.	Application
0.015	1.003	0.541	0.092	127.10	-0.1118	0.28%	300	0.09%	~100mfp ~100mfp ~100mfp
0.02	1.006	-1.091	-0.801	0.01	0.8605	0.17%	100	0.09%	
0.029	1.017	-0.958	-0.694	0.01	0.8635	0.42%	300	0.22%	
0.03	2.002	-0.631	-0.512	0.01	1.5256	9.01%	15	3.81%	
0.035	2.302	-0.973	-0.603	0.01	1.4568	8.14%	30	3.75%	
0.04	2.549	-1.394	-0.687	0.01	1.3741	12.87%	20	5.96%	
0.045	2.656	0.665	0.042	-32.03	-22.6262	13.73%	10	8.30%	
0.05	2.669	0.550	0.049	-39.46	-23.3781	8.75%	10	4.04%	
0.055	2.644	0.458	0.078	30.86	0.3320	16.43%	30	7.51%	
0.06	2.514	3.294	-4.165	1.01	0.3917	0.05%	3	0.01%	
0.07	2.112	0.185	-0.045	68.41	0.1032	0.85%	2	0.32%	
0.08	1.816	0.057	-0.100	-209.58	-15.5253	1.04%	6	0.44%	
0.09	1.558	0.003	-0.100	171.23	-24.6943	2.62%	15	1.05%	
0.1	1.402	-1.309	-0.123	0.29	1.2021	3.28%	150	1.69%	
0.15	1.085	-0.819	-0.629	0.01	0.9441	2.15%	300	1.18%	
0.2	1.135	-0.680	-0.575	0.01	0.9742	2.83%	190	1.58%	
0.3	1.218	-0.478	-0.530	0.01	1.0002	1.72%	200	0.98%	
0.4	1.269	-0.275	-0.516	0.48	1.0066	1.10%	300	0.50%	
0.5	1.293	-0.168	-0.640	0.45	1.0024	1.16%	4	0.61%	
0.6	1.315	-0.477	-1.345	0.01	1.0010	1.28%	1	0.43%	
0.8	1.311	0.051	-0.392	0.54	0.9981	3.02%	4	1.53%	
1	1.308	0.119	-0.579	0.56	1.0008	3.62%	4	1.93%	
1.5	1.309	0.093	-0.385	0.54	0.9947	3.42%	4	1.63%	
2	1.306	0.089	-0.325	0.55	0.9922	5.35%	4	2.58%	
3	1.327	0.813	-0.007	-12.05	-12.3984	9.93%	300	3.74%	
4	1.321	0.757	-0.010	-15.30	-16.2728	8.57%	20	3.56%	
5	1.298	0.719	-0.013	-16.05	-19.2282	12.75%	20	4.60%	
6	1.298	0.706	-0.014	-18.89	-20.5102	15.23%	25	5.97%	
8	1.297	0.720	-0.013	-22.30	-20.6613	18.24%	30	7.85%	
10	1.319	0.745	-0.011	-24.94	-20.1000	19.61%	35	9.30%	
15	1.331	0.851	-0.009	-22.60	-16.7296	19.89%	30	8.69%	

付録 表-A19 照射線量ビルドアップ係数GP式フィッティングパラメータ

La		Lanthanum Medium, Air Response							
E (MeV)	B	c	a	X_k	d	Max. Dev.	$x_{\max}$	St. Dev.	Application
0.015	1.002	0.619	0.063	113.02	-0.0630	0.21%	300	0.07%	
0.02	1.004	0.548	0.018	-38.23	-13.1680	0.13%	300	0.07%	
0.03	1.012	-1.016	-0.724	0.01	0.8596	0.26%	100	0.15%	
0.038	1.022	-1.099	-0.753	0.01	0.8612	0.54%	1	0.28%	
0.039	1.973	-0.669	-0.531	0.01	1.5233	7.21%	15	3.29%	
0.04	2.028	-0.725	-0.545	0.01	1.5137	6.70%	15	3.05%	
0.042	2.093	-0.820	-0.567	0.01	1.4946	5.70%	10	2.75%	
0.044	2.139	-0.898	-0.585	0.01	1.4734	5.37%	30	2.74%	
0.046	2.183	-1.031	-0.621	0.01	1.4489	6.93%	25	3.57%	
0.048	2.226	-1.158	-0.650	0.01	1.4242	9.27%	25	4.17%	
0.05	2.265	-1.281	-0.671	0.01	1.3993	9.65%	1	4.90%	
0.055	2.268	-1.772	-0.747	0.01	1.3297	19.07%	1	7.05%	
0.06	2.250	0.634	0.043	-33.03	-23.3036	11.78%	100	6.45%	~100mfp
0.07	2.005	0.475	0.034	-66.67	-26.5741	17.78%	15	7.62%	~100mfp
0.08	1.841	0.340	0.037	-59.98	2.6740	0.71%	140	0.32%	
0.09	1.622	0.216	-0.100	-229.49	-13.7517	0.64%	140	0.23%	
0.1	1.465	0.102	0.013	-191.24	-19.6545	0.95%	20	0.48%	
0.15	1.155	-1.242	-0.402	0.01	0.9906	3.82%	300	2.01%	
0.2	1.128	-0.778	-0.386	0.46	1.0327	3.09%	300	1.72%	
0.3	1.168	-0.547	-0.526	0.01	0.9929	2.23%	200	1.26%	
0.4	1.219	-0.339	-0.445	0.46	1.0119	1.28%	300	0.60%	
0.5	1.251	-0.255	-0.517	0.46	1.0059	1.17%	300	0.46%	
0.6	1.269	-0.198	-0.625	0.43	1.0021	0.78%	30	0.41%	
0.8	1.284	-0.107	-0.874	0.45	1.0007	1.20%	30	0.61%	
1	1.304	0.918	0.000	-12.56	-4.6026	1.45%	1	0.67%	
1.5	1.291	0.047	-0.226	0.52	0.9908	3.09%	4	1.52%	
2	1.318	0.875	-0.004	-12.43	-8.1830	4.21%	45	2.25%	
3	1.316	0.781	-0.007	-13.85	-14.1008	6.85%	60	3.69%	
4	1.295	0.711	-0.012	-14.05	-19.1885	10.52%	20	4.05%	
5	1.278	0.673	-0.015	-15.21	-22.1802	14.92%	20	5.35%	
6	1.287	0.668	-0.015	-18.51	-22.9608	17.74%	25	6.91%	
8	1.285	0.688	-0.013	-21.52	-22.8300	19.85%	30	8.87%	
10	1.330	0.711	-0.003	-19.99	-20.9850	12.58%	25	7.11%	~100mfp
15	1.369	0.841	-0.007	-23.09	-17.6627	18.50%	30	8.22%	

付録 表-A20 照射線量ビルドアップ係数GP式フィッティングパラメータ

Gd		Gadolinium Medium, Air Response							
E (MeV)	B	c	a	X_k	d	Max. Dev.	$x_{\max}$	St. Dev.	Application
0.015	1.001	0.637	0.066	201.48	-0.1216	0.15%	300	0.08%	
0.02	1.003	0.520	0.030	-34.41	-12.2000	0.19%	300	0.08%	
0.03	1.008	-1.254	-0.868	0.01	0.8518	0.29%	100	0.16%	
0.04	1.017	-1.173	-0.806	0.01	0.8557	0.50%	110	0.27%	
0.05	1.030	-1.031	-0.696	0.01	0.8694	0.61%	110	0.35%	
0.051	1.938	-0.778	-0.572	0.01	1.5076	5.39%	10	2.62%	
0.052	1.949	-0.800	-0.571	0.01	1.5012	5.24%	10	2.49%	
0.054	1.965	-0.881	-0.591	0.01	1.4846	4.45%	10	2.35%	
0.056	1.974	-0.978	-0.619	0.01	1.4658	5.70%	25	2.83%	
0.058	1.982	-1.061	-0.636	0.01	1.4478	6.63%	25	3.17%	
0.06	1.988	-1.155	-0.654	0.01	1.4290	6.71%	25	3.59%	
0.065	1.933	-1.471	-0.712	0.07	1.3774	12.20%	2	4.98%	
0.07	1.877	-1.863	-0.764	0.01	1.3227	18.37%	2	6.65%	
0.075	1.824	0.644	0.042	-31.89	-23.4229	11.79%	35	6.84%	~100mfp
0.08	1.761	0.577	0.046	-35.84	-23.8154	9.87%	100	4.77%	~100mfp
0.09	1.591	0.469	0.008	-80.80	-29.9959	14.48%	25	6.73%	~100mfp
0.1	1.492	0.363	0.023	75.90	0.0614	1.00%	3	0.36%	
0.15	1.171	-1.188	-0.345	0.01	0.9378	2.81%	170	1.46%	
0.2	1.116	-0.807	-0.356	0.32	1.0212	4.72%	300	1.68%	
0.3	1.132	-0.636	-0.572	0.01	0.9775	2.98%	300	1.66%	
0.4	1.179	-0.479	-0.536	0.01	0.9962	2.16%	300	1.29%	
0.5	1.214	-0.353	-0.459	0.46	1.0152	2.92%	300	1.52%	
0.6	1.238	-0.303	-0.513	0.49	1.0113	4.08%	300	1.83%	
0.8	1.255	-0.138	-0.490	0.50	1.0057	1.05%	300	0.58%	
1	1.262	-0.064	-0.484	0.50	1.0039	1.60%	4	0.75%	
1.5	1.269	0.829	-0.002	-5.95	-9.9807	2.22%	8	1.10%	
2	1.303	0.838	-0.003	-13.66	-9.8514	3.19%	60	1.79%	
3	1.295	0.730	-0.008	-12.88	-17.0184	7.34%	15	3.27%	
4	1.281	0.667	-0.013	-14.28	-21.7150	12.98%	20	4.56%	
5	1.271	0.633	-0.016	-15.56	-24.5422	19.26%	20	6.39%	
6	1.281	0.638	-0.015	-19.29	-24.7363	19.75%	25	8.07%	
8	1.314	0.649	-0.004	-19.36	-23.6367	14.21%	20	7.63%	~100mfp
10	1.333	0.689	-0.002	-19.64	-22.4741	14.51%	25	7.70%	~100mfp
15	1.384	0.809	-0.002	-18.48	-18.9143	13.82%	20	6.71%	~100mfp

付録 表-A21 照射線量ビルドアップ係数GP式フィッティングパラメータ

W Tungsten Medium, Air Response								
E (MeV)	B	c	a	X_k	d	Max. Dev.	$x_{\max}$	St. Dev. Application
0.015	1.001	0.595	0.070	101.29	-0.0674	0.14%	300	0.05%
0.02	1.002	0.554	0.086	116.19	-0.1027	0.20%	300	0.06%
0.03	1.005	-1.421	-0.948	0.01	0.8502	0.21%	1	0.12%
0.04	1.011	-1.060	-0.740	0.01	0.8545	0.25%	1	0.14%
0.05	1.019	-0.899	-0.656	0.01	0.8650	0.54%	300	0.26%
0.06	1.027	-1.110	-0.749	0.01	0.8726	0.69%	120	0.35%
0.069	1.035	-1.072	-0.736	0.01	0.8849	0.85%	120	0.45%
0.07	1.778	-0.871	-0.620	0.01	1.4919	4.27%	10	1.95%
0.075	1.755	-1.044	-0.657	0.01	1.4598	4.71%	25	2.30%
0.08	1.727	-1.165	-0.674	0.01	1.4262	5.72%	1	2.52%
0.09	1.620	-1.606	-0.745	0.01	1.3509	12.25%	2	4.48%
0.1	1.532	-2.206	-0.807	0.01	1.2680	19.11%	2	6.60%
0.11	1.435	0.565	0.047	-37.50	-23.0899	11.67%	100	4.60% ~100mfp
0.12	1.344	0.482	0.039	-64.01	-24.9484	9.11%	20	3.68% ~100mfp
0.13	1.307	-29.415	-0.001	0.38	29.8372	1.26%	140	0.64%
0.14	1.259	0.337	0.039	-176.21	-9.7728	0.81%	150	0.41%
0.15	1.222	0.267	0.070	-135.17	-13.2285	1.10%	160	0.62%
0.2	1.123	-1.162	-0.448	0.01	0.9389	2.67%	180	1.39%
0.3	1.093	-0.709	-0.604	0.01	0.9623	2.62%	170	1.44%
0.4	1.133	-0.585	-0.562	0.01	0.9843	2.84%	190	1.61%
0.5	1.165	-0.415	-0.401	0.40	1.0239	2.70%	300	1.49%
0.6	1.191	-0.405	-0.465	0.01	1.0175	4.51%	300	2.29%
0.8	1.217	-0.251	-0.456	0.49	1.0103	1.69%	300	0.78%
1	1.229	-0.184	-0.484	0.43	1.0070	1.22%	300	0.58%
1.5	1.261	-0.653	-1.207	0.01	0.9994	3.26%	300	1.30%
2	1.264	0.766	-0.002	-12.03	-13.3887	6.68%	15	2.20%
3	1.260	0.668	-0.008	-12.26	-20.2256	9.42%	15	3.38%
4	1.262	0.615	-0.013	-15.27	-24.3985	16.10%	20	5.88%
5	1.261	0.592	-0.015	-17.83	-26.5372	19.87%	25	8.08%
6	1.263	0.596	-0.014	-20.32	-26.8863	19.97%	30	9.95%
8	1.310	0.610	-0.001	-19.56	-25.5152	15.73%	25	8.46% ~100mfp
10	1.336	0.656	0.001	-19.44	-24.1073	15.11%	20	8.43% ~100mfp
15	1.399	0.784	0.000	-18.20	-20.3514	14.64%	20	7.35% ~100mfp

付録 表-A22 照射線量ビルドアップ係数GP式フィッティングパラメータ

Pb Lead Medium, Air Response								
E (MeV)	B	c	a	X_k	d	Max. Dev.	$x_{\max}$	St. Dev. Application
0.03	1.004	0.505	0.027	-36.26	-13.5503	0.18%	300	0.08%
0.04	1.008	-1.014	-0.716	0.01	0.8548	0.18%	300	0.11%
0.05	1.013	-1.209	-0.819	0.01	0.8546	0.40%	1	0.21%
0.06	1.020	-0.853	-0.637	0.01	0.8733	0.62%	300	0.30%
0.08	1.034	-1.075	-0.731	0.01	0.8896	0.87%	120	0.45%
0.088	1.040	-1.075	-0.742	0.01	0.8959	1.03%	120	0.54%
0.089	1.711	-0.960	-0.650	0.01	1.4738	3.10%	30	1.74%
0.09	1.702	-1.005	-0.661	0.01	1.4686	3.73%	25	1.91%
0.1	1.619	-1.307	-0.719	0.01	1.4124	7.33%	2	3.16%
0.11	1.530	-1.640	-0.764	0.01	1.3521	11.86%	2	4.44%
0.12	1.457	-2.085	-0.808	0.01	1.2866	16.46%	2	5.65%
0.13	1.396	0.608	0.043	-33.53	-23.1821	12.78%	100	5.63% ~100mfp
0.14	1.327	0.539	0.046	-41.78	-23.2044	8.36%	100	3.60% ~100mfp
0.15	1.276	0.488	0.018	-79.56	-27.1506	8.67%	30	4.19% ~100mfp
0.16	1.256	-0.408	-0.154	0.54	0.8149	1.25%	140	0.58%
0.2	1.162	-1.039	-0.375	0.01	0.8705	2.24%	160	1.12%
0.3	1.071	-0.759	-0.632	0.01	0.9527	2.32%	160	1.22%
0.4	1.105	-0.664	-0.593	0.01	0.9736	3.18%	180	1.65%
0.5	1.134	-0.452	-0.376	0.43	1.0283	2.52%	300	1.40%
0.6	1.158	-0.447	-0.425	0.01	1.0234	3.88%	300	2.14%
0.8	1.186	-0.312	-0.423	0.38	1.0148	1.65%	300	0.88%
1	1.203	-0.255	-0.454	0.32	1.0105	1.55%	300	0.76%
1.5	1.235	-0.446	-0.880	0.01	0.9991	1.75%	300	0.85%
2	1.261	-1.687	-1.476	0.01	1.0004	6.85%	300	2.87%
3	1.237	0.628	-0.007	-12.13	-22.0560	11.85%	15	3.81%
4	1.237	0.589	-0.012	-15.44	-25.4874	17.45%	20	6.70%
5	1.250	0.578	-0.013	-19.91	-26.8618	19.99%	25	9.44%
6	1.280	0.554	-0.002	-18.73	-27.1775	15.41%	25	8.23% ~100mfp
8	1.305	0.583	0.002	-20.10	-26.5018	16.56%	25	8.94% ~100mfp
10	1.334	0.629	0.004	-19.36	-25.1157	16.33%	20	8.90% ~100mfp
15	1.402	0.763	0.002	-18.25	-21.1999	15.30%	20	7.77% ~100mfp

付録 表-A23 照射線量ビルドアップ係数GP式フィッティングパラメータ

U Uranium Medium, Air Response									
E (MeV)	B	c	a	X_k	d	Max. Dev.	$x_{\max}$	St. Dev.	Application
0.03	1.002	0.639	-0.019	-51.55	-16.3833	0.21%	300	0.13%	
0.04	1.005	0.493	-0.001	-36.69	-19.4185	0.26%	7	0.17%	
0.05	1.009	-1.213	-0.814	0.01	0.8543	0.28%	1	0.13%	
0.06	1.013	-1.241	-0.835	0.01	0.8609	0.42%	110	0.22%	
0.08	1.023	-1.100	-0.754	0.01	0.8827	0.63%	110	0.32%	
0.1	1.034	-1.050	-0.734	0.01	0.9015	0.96%	120	0.49%	
0.115	1.043	-0.990	-0.714	0.01	0.9139	1.24%	130	0.63%	
0.116	1.640	-1.070	-0.686	0.01	1.4532	3.83%	1	1.68%	
0.12	1.609	-1.153	-0.703	0.01	1.4361	4.84%	1	2.05%	
0.13	1.539	-1.319	-0.719	0.01	1.3929	7.19%	2	2.62%	
0.14	1.479	-1.614	-0.764	0.01	1.3442	11.04%	2	3.91%	
0.15	1.428	-2.030	-0.815	0.01	1.2921	15.46%	2	5.23%	
0.16	1.362	-2.209	-0.836	0.01	1.2384	19.69%	10	8.00%	
0.17	1.343	0.591	0.042	-36.10	-22.8605	10.25%	100	4.93%	~100mfp
0.18	1.295	0.540	0.043	-43.38	-22.9682	5.56%	100	2.97%	~100mfp
0.19	1.258	0.501	0.029	-71.17	-24.7883	6.74%	25	3.24%	~100mfp
0.2	1.248	0.452	0.096	195.23	-0.0385	1.81%	10	0.93%	
0.25	1.164	-0.979	-0.391	0.01	0.8790	2.08%	160	1.16%	
0.3	1.125	-1.084	-0.467	0.01	0.9438	2.66%	180	1.39%	
0.4	1.080	-0.666	-0.572	0.01	0.9690	2.71%	180	1.43%	
0.5	1.103	-0.473	-0.357	0.36	1.0293	2.56%	200	1.35%	
0.6	1.124	-0.486	-0.393	0.01	1.0289	3.26%	300	1.82%	
0.8	1.152	-0.360	-0.385	0.39	1.0204	1.75%	300	0.91%	
1	1.170	-0.314	-0.414	0.01	1.0156	1.75%	300	0.87%	
1.5	1.208	-0.492	-0.759	0.01	0.9982	2.19%	200	1.26%	
2	1.226	-0.799	-1.050	0.01	0.9992	2.93%	300	1.06%	
3	1.220	0.591	-0.003	-13.62	-23.0979	14.25%	20	5.55%	
4	1.215	0.567	-0.009	-16.96	-25.9222	19.46%	25	8.26%	
5	1.247	0.537	0.001	-17.64	-26.6469	14.99%	20	7.52%	~100mfp
6	1.262	0.527	0.003	-19.41	-27.6151	15.45%	25	8.57%	~100mfp
8	1.292	0.554	0.007	-20.20	-27.0344	16.60%	25	9.34%	~100mfp
10	1.326	0.606	0.007	-20.25	-25.6320	17.15%	25	9.30%	~100mfp
15	1.400	0.742	0.004	-18.69	-21.7731	16.44%	20	8.23%	~100mfp

付録 表-A24 照射線量ビルドアップ係数GP式フィッティングパラメータ

Water Water Medium, Air Response									
E (MeV)	B	c	a	X_k	d	Max. Dev.	$x_{\max}$	St. Dev.	Application
0.015	1.114	-0.813	-0.588	0.01	0.9364	2.16%	160	1.22%	
0.02	1.257	-0.591	-0.422	0.01	1.0060	1.58%	300	0.83%	
0.03	1.708	-0.519	-0.647	0.01	1.0073	3.84%	2	1.46%	
0.04	2.161	0.113	-0.388	0.45	0.9978	3.85%	300	2.17%	
0.05	2.495	0.531	-0.539	0.62	0.9966	5.09%	3	3.34%	
0.06	2.626	0.794	-0.550	0.65	0.9948	5.24%	2	2.87%	
0.08	2.554	1.100	-0.564	0.71	0.9933	6.72%	2	2.80%	
0.1	2.370	1.245	-0.569	0.76	0.9925	8.82%	2	3.26%	
0.15	2.057	1.361	-0.581	1.29	0.9910	12.28%	1	5.40%	
0.2	1.899	1.416	-0.607	1.43	0.9925	15.98%	4	7.23%	
0.3	1.736	1.347	-0.634	1.43	0.9945	15.96%	4	7.98%	
0.4	1.649	1.300	-0.664	1.43	0.9964	16.13%	4	7.55%	
0.5	1.593	1.174	-0.671	1.34	0.9970	12.69%	4	6.80%	
0.6	1.552	1.097	-0.683	1.28	0.9977	11.38%	4	6.04%	
0.8	1.496	0.948	-0.698	0.76	0.9986	9.12%	3	4.67%	
1	1.460	0.819	-0.710	0.70	0.9992	6.55%	3	3.82%	
1.5	1.407	0.624	-0.750	0.61	1.0003	4.10%	4	2.44%	
2	1.379	0.407	-0.743	0.51	1.0000	2.49%	30	1.37%	
3	1.342	0.271	-0.963	0.44	1.0016	2.26%	30	1.20%	
4	1.323	-0.022	-0.084	0.01	1.0140	1.36%	300	0.64%	
5	1.304	-0.089	-0.503	0.01	1.0039	1.51%	300	0.66%	
6	1.288	-0.175	-0.598	0.01	1.0035	1.66%	300	0.66%	
8	1.262	-0.321	-0.678	0.01	1.0029	1.84%	300	0.78%	
10	1.242	-0.458	-0.734	0.01	1.0022	2.15%	300	1.01%	
15	1.210	-0.736	-0.822	0.01	1.0010	2.93%	2	1.76%	

付録 表-A25 照射線量ビルドアップ係数GP式フィッティングパラメータ

Concrete Concrete Medium, Air Response									
E (MeV)	B	c	a	X_k	d	Max. Dev.	$x_{\max}$	St. Dev.	Application
0.015	1.019	-0.850	-0.659	0.01	0.8822	0.60%	300	0.30%	
0.02	1.043	-0.929	-0.648	0.01	0.8966	1.21%	130	0.58%	
0.03	1.138	-0.803	-0.503	0.01	0.9550	2.70%	180	1.48%	
0.04	1.288	-0.652	-0.393	0.01	1.0202	1.41%	300	0.81%	
0.05	1.469	-0.596	-0.465	0.01	1.0195	1.54%	1	0.70%	
0.06	1.632	-0.573	-0.625	0.01	1.0078	3.12%	2	0.93%	
0.08	1.818	0.889	0.000	-22.38	-6.2578	5.62%	25	2.25%	
0.1	1.853	0.146	-0.352	0.56	0.9925	9.17%	6	4.82%	
0.15	1.821	0.440	-0.485	0.65	0.9925	11.12%	5	6.14%	
0.2	1.758	0.562	-0.499	0.68	0.9912	12.66%	5	6.71%	
0.3	1.661	0.688	-0.548	0.73	0.9933	14.74%	4	7.38%	
0.4	1.597	0.712	-0.575	0.74	0.9946	13.91%	4	7.09%	
0.5	1.552	0.694	-0.590	0.72	0.9954	12.13%	4	6.64%	
0.6	1.518	0.688	-0.612	0.72	0.9965	11.44%	4	6.04%	
0.8	1.469	0.637	-0.634	0.69	0.9975	9.36%	4	4.80%	
1	1.436	0.587	-0.655	0.66	0.9983	7.85%	3	3.93%	
1.5	1.390	0.405	-0.648	0.56	0.9978	3.72%	3	1.90%	
2	1.365	0.291	-0.663	0.50	0.9991	2.73%	30	1.49%	
3	1.334	0.116	-0.667	0.01	1.0004	2.22%	30	1.11%	
4	1.319	0.972	0.000	-17.69	-1.5884	0.81%	110	0.45%	
5	1.305	-0.303	-1.014	0.01	1.0009	1.16%	1	0.61%	
6	1.288	-0.397	-0.978	0.01	1.0009	2.03%	300	0.71%	
8	1.268	-0.707	-1.028	0.01	1.0008	3.48%	300	1.43%	
10	1.255	-0.999	-1.071	0.01	1.0009	5.18%	300	2.25%	
15	1.234	-1.814	-1.200	0.01	1.0020	7.91%	1	4.70%	

付録 表-A26 照射線量ビルドアップ係数GP式フィッティングパラメータ

Air Air Medium, Air Response									
E (MeV)	B	c	a	X_k	d	Max. Dev.	$x_{\max}$	St. Dev.	Application
0.015	1.105	-0.837	-0.601	0.01	0.9317	2.28%	160	1.17%	
0.02	1.238	-0.601	-0.425	0.01	1.0012	1.78%	300	0.97%	
0.03	1.660	-0.533	-0.608	0.01	1.0087	3.48%	2	1.41%	
0.04	2.096	0.055	-0.249	0.01	0.9950	3.83%	300	2.06%	
0.05	2.428	0.436	-0.518	0.59	0.9964	4.81%	190	3.32%	
0.06	2.568	0.718	-0.544	0.64	0.9949	5.06%	2	3.10%	
0.08	2.517	1.044	-0.564	0.71	0.9936	7.25%	2	3.05%	
0.1	2.346	1.156	-0.560	0.73	0.9921	7.86%	2	3.37%	
0.15	2.046	1.302	-0.577	1.27	0.9910	12.41%	1	5.34%	
0.2	1.892	1.336	-0.599	1.38	0.9923	14.48%	4	7.14%	
0.3	1.732	1.309	-0.631	1.43	0.9945	16.59%	4	7.94%	
0.4	1.646	1.241	-0.656	1.40	0.9962	15.33%	4	7.49%	
0.5	1.590	1.173	-0.674	1.36	0.9972	14.36%	4	6.75%	
0.6	1.550	1.098	-0.687	1.31	0.9979	12.86%	4	6.04%	
0.8	1.495	0.913	-0.691	0.75	0.9985	8.88%	3	4.71%	
1	1.458	0.815	-0.710	0.70	0.9992	7.16%	3	3.82%	
1.5	1.407	0.540	-0.704	0.57	0.9985	3.09%	4	1.71%	
2	1.379	0.401	-0.740	0.52	1.0000	2.47%	4	1.39%	
3	1.342	0.229	-0.910	0.01	1.0015	2.21%	30	1.21%	
4	1.323	-0.020	-0.076	0.01	1.0135	1.06%	300	0.64%	
5	1.303	-0.088	-0.530	0.01	1.0034	1.23%	300	0.66%	
6	1.289	-0.189	-0.636	0.01	1.0030	1.43%	300	0.65%	
8	1.262	-0.349	-0.719	0.01	1.0024	1.86%	300	0.76%	
10	1.242	-0.511	-0.793	0.01	1.0010	2.43%	200	1.29%	
15	1.212	-0.849	-0.885	0.01	1.0005	3.94%	300	2.19%	