

ガンマ線スカイシャイン線量高速計算法の開発

Development of Quick Calculation Method for Gamma-Ray Skyshine Dose

佐々木 泰裕 (Yasuhiro Sasaki)*¹ 吉田 至孝 (Yoshitaka Yoshida)*¹ 清水 彰直 (Akinao Shimizu)*²
 植木 紘太郎 (Kotaro Ueki)*² 播磨 良子 (Yoshiko Harima)*² 宮坂 駿一 (Shun-ichi Miyasaka)*²
 坂本 幸夫 (Yukio Sakamoto)*² 黒澤 直弘 (Naohiro Kurosawa)*²

要約 ガンマ線スカイシャイン線量計算において、1回散乱近似法による計算コードでは、途中で遮へい体が存在する体系では遮へい体による散乱効果を適切に考慮できないため、実効線量を精度よく評価することができない。そこで、途中で遮へい体が存在する体系においても、より精度よく高速でガンマ線スカイシャイン線量を評価できるよう、遮へい体透過計算（ビルドアップ線束エネルギー分布法または透過関数法）と大気中の輸送計算（1回散乱近似法、ラインビームレスポンス法、ビルドアップ係数法）を組み合わせた高速計算法を開発し、モンテカルロ計算コードMCNPによる計算およびベンチマーク実験と比較した。

その結果、大気中の輸送計算にラインビームレスポンス法またはビルドアップ係数法を用いた新しい高速計算法では、1回散乱近似法計算コードより精度よくスカイシャイン線量を計算することができ、上部遮へい体を有する実験に対して概ねファクター2程度の範囲で計算できることを確認した。また計算速度に関しても1秒以内で計算でき、高速計算が可能になった。

キーワード ガンマ線, スカイシャイン, 1回散乱近似法, ラインビームレスポンス法, ビルドアップ係数法

Abstract Gamma-ray skyshine dose calculation for a system including a shielding object can not be made with an accuracy sufficient to practical use by using a computer code based on the single scattering method, since the scattering of gamma-ray in the shielding object cannot be appropriately taken into consideration. New quick calculation methods, which are consist of combinations of a transport calculation in a shielding object with a transport calculation in air, applicable to skyshine dose calculations for a system including a shielding object has been developed.

It is confirmed through comparisons with calculations by MCNP and the benchmark experiments, that the new methods using line beam response method or build-up factor method can quickly provide gamma-ray skyshine dose within 1 second, with an accuracy of factor about two.

Keywords gamma-ray, skyshine, single scattering method, line beam response method, build-up factor method

1. はじめに

原子力安全システム研究所（以下「INSS」という）では、平成12年度より原子力発電所におけるシビアアクシデント発生時の発電所内線量評価システムの開発を進めている。(1)~(4)

このシステムは、①アクシデントマネジメントの実施、②被災者の救助活動、③故障機器の復旧作業、④従業員避難誘導等に伴う、従業員の発電所構内移動時の線量評価を行うことができ、被ばく線量を低く抑えるという面からのアクシデントマネジメントガイドラインに関する検討等にも活用できるものである。

具体的には、シビアアクシデント解析コードMAAP⁽⁵⁾を用いて評価したシビアアクシデントの事象進展と、システムに内蔵している炉内蓄積量データベースから、発電所内各部の放射線源の状況を解析し、その放射線源の強度ならびに線源位置と従業員が移動の際に滞在する評価点との間に存在する遮へい壁等の設置状況から、内蔵している遮へい計算コードQAD-IE^{(6)~(8)}およびスカイシャイン線量計算コードG33-IE⁽⁶⁾⁽⁷⁾⁽⁹⁾を用いて、直接線およびスカイシャイン線線量率を求める。

そして、それらの線量率と各評価点における滞在時間との積から被ばく線量を評価するもので、線量の評価においては、適切なアクシデントマネジメン

*1 (株)原子力安全システム研究所 技術システム研究所

*2 NPO法人 放射線線量解析ネットワーク

トの実施等に資するため、より精度よい線量評価が必要であり、かつ多数の線源に対する多数の評価点の線量率を計算する必要があるため、高速に計算できる計算コードが必要である。

ガンマ線スカイシャイン計算に広く用いられる、1回散乱近似法によるスカイシャイン線計算コード(G33-GP2⁽⁶⁾等)では、線源点から散乱点に到達する線束として非衝突線束のみを考慮しているため、途中で遮へい体が存在する体系では、この遮へい体による散乱効果を考慮できず、実効線量を過小評価することになる。

遮へい体が存在する体系に対するスカイシャイン線量評価手法としては、天井遮へい上面でのガンマ線束の角度・エネルギー分布を1次元 S_n 計算コードANISN⁽¹⁰⁾等で評価し、その線束を点線源としてG33等の1回散乱近似法で計算する方法や、遮へい体の透過計算に関してANISNやモンテカルロ法等を用いてガンマ線輸送計算を行い、透過したガンマ線を実効点線源として、大気中の輸送計算をモンテカルロ法に基づくラインビームレスポンス関数を用いて行う方法などが開発されているが、計算に要する時間やコードの取り扱い等の点から、多数の評価点に対する計算を行う必要がある線量評価システムでの活用は難しい。

また、INSSでは、線源点から散乱点に到達する線束にビルドアップ係数を乗じることにより、近点におけるスカイシャイン線量を補正するG33-IEを開発している。しかしながら、G33-IEによる評価でも、遮へい体による散乱効果を補正したことにより、近距離でのスカイシャイン線量は改善できるものの、遮へい体での散乱によるエネルギースペクトルおよび角度分布の変化を取り入れていないため、遠距離では1桁以上過大評価することがある。

そこで、精度よく、かつ高速で計算できる新しいガンマ線スカイシャイン線量計算法を開発することを目的とした。

2. 高速計算法の概要

高速計算法の開発に当たっては、遮へい体の透過計算および大気中の輸送計算の両方について、計算精度と計算速度の両立を図る観点から検討を行い、遮へい体での散乱によるエネルギースペクトルまたは角度分布の変化を考慮し、高速で大気中の輸送計算を行う評価手法として、表1に示す組み合わせで

計算を行うスカイシャイン線量計算コードを開発した。

表1 開発した高速計算法

遮へい体透過計算法	大気中輸送計算法	コード名
ビルドアップ線束エネルギー分布法 (BFE法)	1回散乱近似法 (G33-GP2Rの改良)	G33-CBFE
ビルドアップ線束エネルギー分布法 (BFE法)	ラインビームレスポンス法 (LBRF法)	FSKY
	ビルドアップ係数法 (BF法)	
透過関数法 (TR法)	ラインビームレスポンス法 (LBRF法)	FSKY-TR
	ビルドアップ係数法 (BF法)	

3. 遮へい体透過計算法

3.1 透過関数法 (TR法)

遮へい体を透過したガンマ線のエネルギー・角度分布を図1に示す計算体系について行う。

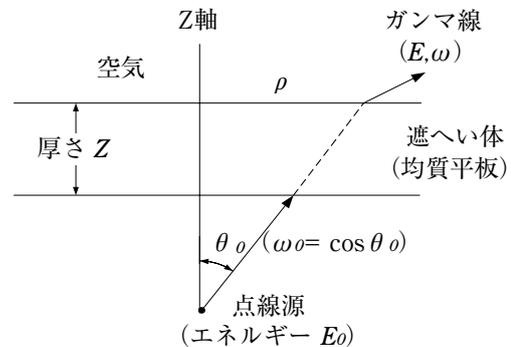


図1 平板遮へい体のガンマ線透過計算体系

遮へい体は厚さ Z の均質平板、点線源からのガンマ線の角度分布は平板に垂直な軸に対して回転対称とし、ガンマ線の方向と Z 軸のなす角度 θ_0 の余弦を ω_0 とする。点線源からエネルギー E_0 、方向 ω_0 に放出されたガンマ線流の強度を $J_0(E_0, \omega_0)$ とする。この時、平板遮へい体の上面におけるガンマ線流強度を $J(E, \omega, \rho)$ とする。ここで ρ は平板上面における Z 軸からの距離を表す。

このガンマ線流を計算するに当たり、次式で表さ

れるガンマ線流強度分布 $J(E, \omega, \rho)$ の平板上面での積分値に着目した.

$$J(E, \omega) = 2\pi \int_0^{\rho_{\max}} d\rho \rho J(E, \omega, \rho)$$

ここで ρ_{\max} は遮へい体平板の半径を表す. このガンマ線流強度は線源からのガンマ線強度に比例するので次式のようになる.

$$J(E, \omega) = \int_0^1 d\omega' \int_0^{E_0} dE' T(E, \omega | E', \omega'; Z) J_0(E', \omega')$$

ここで, 関数 $T(E, \omega | E_0, \omega_0; Z)$ を平板遮へい体のガンマ線透過関数と呼ぶ.

IE (invariant embedding) 法⁽¹¹⁾⁽¹²⁾に基づくと, 平面方向に無限 (ρ_{\max} が無限) の均質平板の透過関数を高速で計算することが可能であり, エネルギーに関して多群近似, 角度変数に関して角度分点近似に基づき, 以下の透過関数を計算した.

$$T_{n,m}(\omega_i, \omega_j; Z) = \int_n dE \int_m dE_0 T(E, \omega_i | E_0, \omega_j; Z) / \Delta E_m$$

ここで, $\int_n dE$ はエネルギー群 n における積分を, また ΔE_m はエネルギー群 m のエネルギー幅を表す.

計算においては, エネルギーに関して線源エネルギーを第1群とする95群を, また角度変数 ω に関して範囲 $0 \leq \omega \leq 1$ における15分点のガウスの積分公式を採用した.

さらに, 95群15角度分点で計算された透過関数 $T_{n,m}(\omega_i, \omega_j; Z)$ をエネルギー18群に縮約して, ラインビームレスポンス法およびビルドアップ係数法に基づくスカイシャイン高速計算コードで使用できるようにした.

3.2 ビルドアップ線束エネルギー分布法 (BFE 法)

遮へい物質の無限均質体系において, エネルギー E_0 のガンマ線を放出する点等方線源がある場合, 線源からの距離 X の点におけるガンマ線束エネルギー分布を $\phi(E, X; E_0)$ とする. このとき, ガンマ線ビルドアップ線束エネルギー分布 (buildup flux energy spectrum :BFE) は次式で定義される.

$$BFE(E, X; E_0) = \phi(E, X; E_0) / \phi_0(X; E_0)$$

ここで, $\phi(X; E_0)$ は距離 X の点における非衝突線束で, 解析的に $\phi_0(X; E_0) = \exp(-\Sigma(E_0)X) / 4\pi X^2$ と表される. ここで, $\Sigma(E_0)$ は遮へい物質のエネルギー E_0 のガンマ線に対する巨視的全断面積である.

また, ビルドアップ線束縮約エネルギー分布 (condensed buildup flux energy spectrum :CBFE) は, $BFE(E, X; E_0)$ の縮約エネルギー群での積分値として次式で表される.

$$CBFE(E_n, X; E_0) = \int_n dE BFE(E, X; E_0)$$

ここで, 積分記号 $\int_n dE$ は縮約エネルギー群の第 n 群における積分を, E_n は第 n 群の代表エネルギーを表す.

これをIE法に基づいて計算を行い, コンクリート4種, 空気2種, 鉄に対して95エネルギー群, 15角度分点に対するBFEデータベースを作成した. 計算結果の例として, コンクリートA, 線源エネルギーが1.25MeVのBFEを図2に示す.

さらにこのBFEデータベースをエネルギー18群に縮約したCBFEデータベースを作成し, G33の改良, ラインビームレスポンス法およびビルドアップ係数法に基づくスカイシャイン高速計算コードで使用できるようにした.

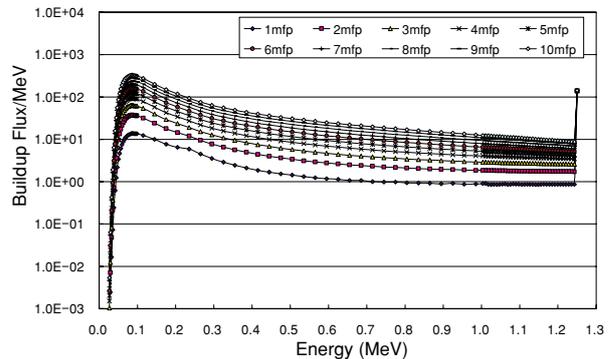


図2 ビルドアップ線束エネルギースペクトル (コンクリートA, 線源エネルギー1.25MeV)

図2に見られるように, コンクリートを透過したガンマ線のエネルギー分布は約0.1MeVにピークを

持っている。先に述べた G33-IE では、コンクリートを透過した全てのガンマ線が線源エネルギーと同じ 1.25MeV のエネルギーを持つと仮定しているの
で、遠距離でのスカイシャイン線量を過大評価した
ものであり、コンクリート透過線のエネルギー分布
を考慮することにより、その過大評価の改善が期待
される。

4. 大気中輸送計算法

4.1 G33 コードの改良

1 回散乱近似法によるスカイシャイン線計算コード G33-GP2R⁽⁶⁾⁽¹³⁾では、線源点から散乱点に到達する線束として非衝突線束のみを考慮しているため、途中に遮へい体が存在する体系では、この遮へい体による散乱効果を考慮できない。

そこで、線源点から散乱点に到達するガンマ線束に遮へい体による散乱効果を考慮するため、遮へい体による散乱効果にエネルギースペクトルの変化を取り込んだ BFE データベースを基に散乱点に到達するガンマ線束を補正することとし、一回散乱線計算コード G33-GP2R に CBFЕ ライブラリーを組み込んだ G33-CBFЕ を作成した。

3.2 節で述べたように、図 3 に示す散乱体系において、線源エネルギー E_k に対する、18 群に縮約された CBFЕ は、線源点と散乱点を結ぶ透過線上で、散乱点への線源入射エネルギー E_j (MeV) と遮へい体透過厚さ x_{shield} (mfp) に依存した次式で表される。

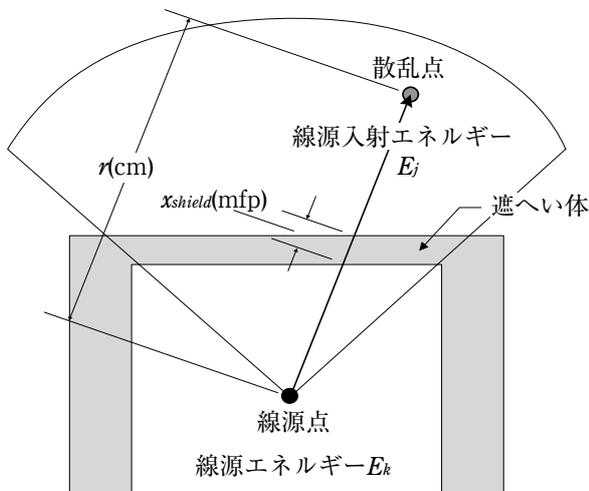


図 3 散乱領域の考え方

$$CBFE(E_j, x_{shield}; E_k) = \frac{\Phi(E_j, x_{shield}; E_k)}{\Phi_{uncollided}(x_{shield}; E_k)}$$

$\Phi(E_j, x_{shield}; E_k)$: γ 線束エネルギー分布

$\Phi_{uncollided}(x_{shield}; E_k)$: 非衝突 γ 線束

x_{shield} : 遮へい体透過厚さ (mfp)

E_j, E_k : 代表エネルギー (MeV)

j, k : エネルギー群インデックス, $j, k = 1 \sim 18$

G33-CBFЕ では、この CBFЕ を用いて、線源から遮へい体を透過して散乱点に到達するガンマ線束を次式のように補正した。

$$\Phi(E_j, r) = \frac{1}{4\pi r^2} \exp\left(-\sum_i \mu_{i,j} x_i\right)$$

$$\times \sum_{k=1}^{18} S(E_k) CBFЕ(E_j, x_{shield}; E_k)$$

ただし、 $r = \sum_i x_i$ 、また $S(E_k)$ は線源の強度である。

また、G33-GP2R に CBFЕ ライブラリーを組み込むに当たり、以下の機能を整備した。

- ① 遮へい材コード入力機能
- ② 微小散乱領域毎の遮へい材透過厚さ (x_{shield} (mfp)) 算出機能
- ③ CBFЕ を適用する遮へい材領域判断機能

4.2 ラインビームレスポンス法 (LBRF 法)

4.2.1 ラインビームレスポンス関数に基づくスカイシャイン線量高速計算コードの作成

特定のエネルギーを持ったガンマ線源から空气中に特定の角度で放出されたガンマ線が、測定点に到達する線束を前もって計算しておき、離散的な計算結果を距離を変数とした近似式で置き換えることにより測定点でのスカイシャイン線量が得られる。

点線源から一方向に空气中に放出されたガンマ線が多数回散乱して測定点に到達した線量を、モンテカルロ法を用いて計算し、線源エネルギー、放出角、線源からの距離を変数として算出した関数をラインビームレスポンス関数 (line beam response function: LBRF) という。

また、垂直軸に対し一方向に放出されたガンマ線

が多数回散乱して測定点に到達した線量は、線源と測定点間を結ぶ距離を半径とした円周上で同じ線量になる。これをラインビームレスポンス関数に対してコニカルビームレスポンス関数 (conical beam response function: CBRF) といい、LBRFを線源からの放出角とエネルギーに対して積分することによって得られる。建屋から空气中に放出されるガンマ線が、エネルギー、放出角度について線源にたてた垂直軸に対し対称である場合は、スカイシャインの計算をするのに CBRF を用いた方が便利である。

そこで、CBRFに基づいてスカイシャイン線量を高速に計算する計算コード FSKY、および FSKY-TR を作成した。

計算コード FSKY は以下の二つのデータベースに基づいて、上部遮へい体がある場合のスカイシャイン線量を内挿計算により高速に計算するものである。

FSKY-TR は、下記の CBF データベースの代わりに平板遮へい体の透過関数をファイルとして搭載使用するものである。

① CBF データベース

上部遮へい体の透過ガンマ線のエネルギー分布に関するデータで、その概要は 3.2 節に示した。

② CBRF データベース

水平面に垂直な軸 (Z 軸) に関して回転対称性を持つ点線源に対するスカイシャイン線量 $\bar{R}(E, X, \omega)$ が CBRF である。ここで、 E は線源エネルギー、 ω は放射線ビームの Z 軸となす角度の余弦、また X は線源から線量測定点までの水平面上の距離である。

4.2.2 CBRF データベースの作成

CBRF データベースはモンテカルロ計算コード EGS4⁽¹³⁾ を用いて計算され^{(15)~(17)}、Harima によって提案された 4 パラメータ近似式⁽¹⁸⁾ を用いて求められた LBRF⁽¹⁹⁾ に基づいて、次のように計算した。

空気の無限均質媒質中に点線源がある体系を対象とし、点線源の位置を原点とする。線源からの光子の放出方向はベクトル OP で表され、球座標系で (r, θ, ϕ) とし、測定点は X 軸上にあるものとする。計算体系を図 4 に示す。ベクトル OP と X 軸のなす角度を Φ とすると、 $\cos \Phi = \sin \theta \cos \phi$ と表される。X 軸上の点 X の線量率を $R(E_0, X, \Phi)$ とする。ここで、 E_0 は線源からの光子のエネルギーである。ま

た、線源強度は OP 方向に 1 個とする。 $R(E_0, X, \Phi)$ は LBRF である。

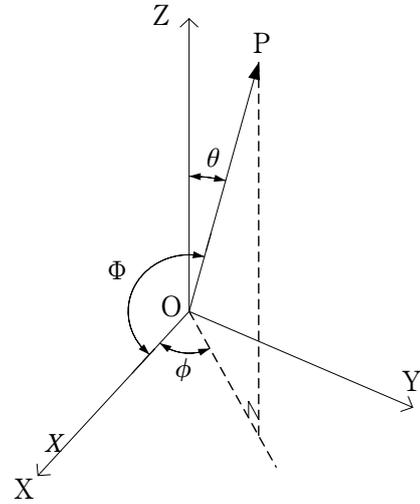


図 4 CBRF の計算体系

つぎに、線源より放出される光子の方向が Z 軸に関して回転対称で上向きのコニカルビーム線源に対して、X 軸上の点 X における線量を求めるものとし、線源強度分布を $f(\omega)$ とする。ここで、

$$\omega = \cos \theta. \quad \text{ただし,} \quad \int_0^1 f(\omega) d\omega = 1.$$

このコニカルビームに対して、X 軸上の点 X におけるスカイシャイン線量率を求めると

$$\int_0^1 d\omega f(\omega) \int_0^{2\pi} d\phi R(E_0, X, \Phi) / 2\pi = \int_0^1 f(\omega) \bar{R}(E_0, X, \omega) d\omega$$

となる。

ここで、Z 軸に関する対称性を考慮すると

$$\bar{R}(E_0, X, \omega) = \int_0^\pi d\phi R(E_0, X, \Phi) / \pi$$

となり、 $\bar{R}(E_0, X, \omega)$ が角度 ω の CBRF である。この関数を LBRF に基づいて、角度 ϕ による積分を数値的に行い、以下の条件でデータベース化した。CBRF の計算例を図 5 に示す。

- ①線源エネルギーは、18 エネルギー群構造の各群の平均エネルギーとする。(ただし、LBRF は線源エネルギーが 0.1MeV 以上でしか計算されていないので、群の平均エネルギーは 0.1MeV 以上に限定)
- ②角度 ω は、範囲 $0 \leq \omega \leq 1$ におけるガウスの積分公式に基づく 15 分点とする。
- ③距離は、LBRF と同じく 10m ~ 2000m の 24 点

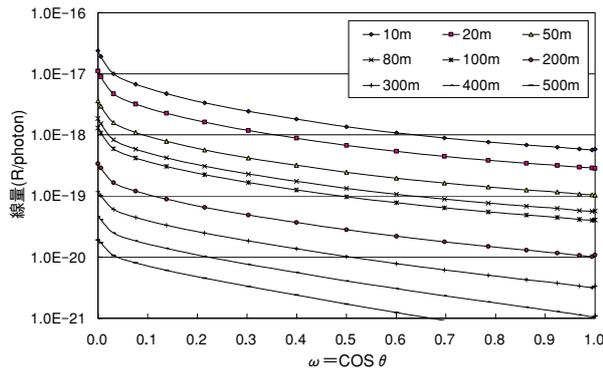


図5 CBRF の計算例
(線源エネルギー：1.25MeV)

4.2.3 スカイシャイン線量の計算方法

計算コード FSKY および FSKY-TR では、*CBRF* に基づきスカイシャイン線量を以下のように計算する。

点線源からエネルギー E_n 、角度 ω_i で放出されるガンマ線の強度を $S(E_n, \omega_i)$ とすると、スカイシャイン線量は (1) 式で与えられる。

$$R(X) = \sum_{n=1}^{18} \sum_{i=1}^{15} \bar{R}(E_n, X, \omega_i) w_i S(E_n, \omega_i) \quad (1)$$

ここで、エネルギー E_n は 18 群中の第 n 群に、角度 ω_i は 15 分点の第 i 分点に属するものとし、 w_i は角度分点 ω_i に対する重みとする。また、 $\bar{R}(E_n, X, \omega_i)$ は入力で指定した距離 X に対する *CBRF* で、*CBRF* データベースを用いて内挿計算で求めるものとする。

いま、遮へい体による散乱での扱いを考慮して、点線源から放出されるガンマ線の線源エネルギーを E_{0m} 、角度を ω_j 、その強度を $S_0(E_{0m}, \omega_j)$ と表すこととする。

上部遮へい体がない場合は、 $\omega_i = \omega_j$ であり、

$$S(E_n, \omega_i) = S(E_n, \omega_j) = \delta_{nm} S_0(E_{0m}, \omega_j)$$

となる。ここで、 δ_{nm} はクロネッカーのデルタである。

また、上部遮へい体がある場合、*CBFE* を利用する計算コード FSKY では、 $\omega_i = \omega_j$ と仮定するので、

$$S(E_n, \omega_i) = S(E_n, \omega_j) = \text{CBFE}(E_n, X_{std}/\omega_j, E_{0m}) S_0(E_{0m}, \omega_j)$$

となる。ここで、 X_{std} は遮へい体の厚さを表す。

透過関数を使う FSKY-TR では

$$S(E_n, \omega_i) = \frac{1}{\omega_i} \sum_{j=1}^{15} w_j T_{n,m}(\omega_i, \omega_j; X_{std}) S_0(E_{0m}, \omega_j)$$

となる。ここで、右辺 $\frac{1}{\omega_i}$ のはガンマ線流 (current) をガンマ線束 (flux) に変換するための係数である。

4.3 ビルドアップ係数法 (BF 法)

4.3.1 ビルドアップ係数法の概要

図 6 に示すように、等方 (全方向) 点線源に対する水平面上の線量を求める問題は、1 次元体系におけるボルツマン輸送方程式を解くことであり、モーメント法、積分方程式に基づく方法および IE 法等の決定論的計算方法により信頼できる計算結果が得られており、ビルドアップ係数としてデータベースが作成されている。

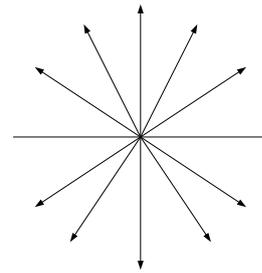


図6 等方 (全方向) 点線源

一方、スカイシャイン問題では、空気の無限体系において、図 7 に示すように、等方 (上向き) 点線源に対する水平面上の線量を計算する。この計算では、2 次元体系においてボルツマン輸送方程式を解くことになり、現在のところ、信頼できる計算方法はモンテカルロ法しかない。

したがって、等方 (全方向) 点線源に対する水平面上の線量を、図 7 に示すような等方 (上向き) 点線源に対する水平面上の線量に変換することが出来れば、高速でかつ精度の良いスカイシャイン計算が可能となる。

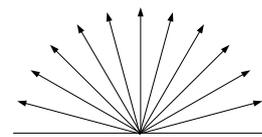


図7 等方 (上向き) 点線源

そこで、以下の式により等方（上向き）点線源に対する水平面上の線量に変換する。

（等方（上向き）点線源に対する線量）
 =（等方（全方向）点線源に対する散乱線線量）
 +（等方（上向き）点線源に対する非衝突線線量）
 これを式で表すと以下のようになる。

$$R_{iso}^+(E_0, X) = (B(X; E_0) - 1) \left(\frac{K_0}{4\pi X^2} \exp(-\Sigma(E_0)X) \right) + \frac{K_0}{2\pi X^2} \exp(-\Sigma(E_0)X)$$

ここで、 $R_{iso}^+(E_0, X)$ は等方（上向き）点線源（エネルギー E_0 ）に対する水平面上の点線源からの距離 X における線量、 $B(X; E_0)$ はビルドアップ係数、 K_0 はガンマ線束から線量への換算係数のエネルギー E_0 に対する値、 $\Sigma(E_0)$ は空気の巨視的全断面積である。

さらに、等方（上向き）点線源に対する線量を、コニカルビーム線源に対する線量に換算するため非等方性係数 $H(E_0, X, \omega_i)$ を導入した。非等方性係数は次のように定義される。

非等方性係数 =

（角度 ω_i のコニカルビーム線源に対する線量） / （等方（上向き）点線源に対する線量）

4.2.2 節で導入した $CBRF$ に基づくと、非等方性係数は次式で与えられる。

$$H(E_0, X, \omega_i) = \bar{R}(E_0, X, \omega_i) / \sum_{k=1}^{15} w_k \bar{R}(E_0, X, \omega_k)$$

非等方性係数の計算例として、距離 100m における非等方性係数を線源エネルギーおよび角度 ω_i の関数として図 8 に、線源エネルギーが 0.125MeV の場合の非等方性係数を距離および角度 ω_i の関数として図 9 に示す。これらの図より $CBRF$ に比べて変数 E_0, X, ω_i に対する変動幅が小さく、内挿または外挿計算が容易となる。

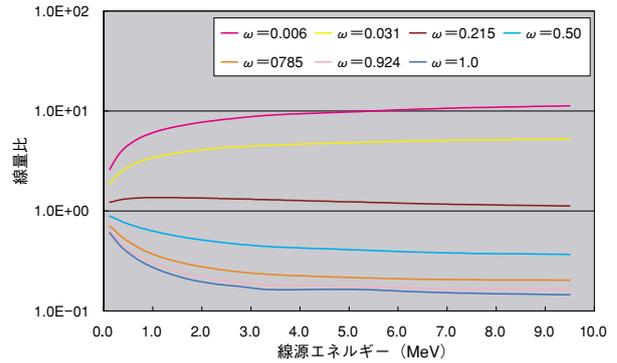


図 8 非等方性係数の例 (X=100m)

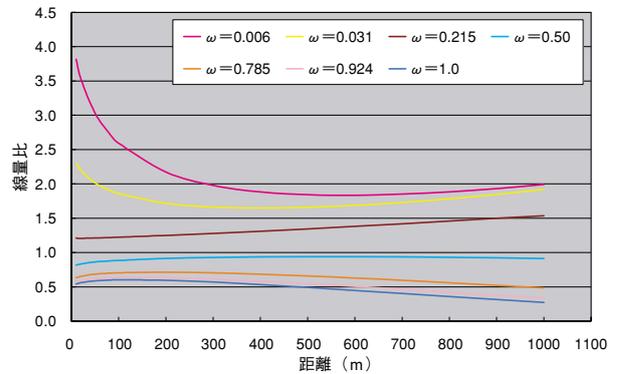


図 9 非等方性係数の例 ($E_0 = 0.125\text{MeV}$)

4.3.2 ビルドアップ係数法計算コードの作成

ビルドアップ係数法に基づくスカイシャイン線量高速計算は、4.2 節で作成した FSKY および FSKY-TR に入力により計算方法を指定することにより選択できるようにした。

計算式は、4.2.3 節の (1) 式において、以下のようになり $\bar{R}(E_n, X, \omega_i)$ を $H(E_n, X, \omega_i) R_{iso}^+(E_n, X)$ に置き換えたものになる。

$$R(X) = \sum_{n=1}^{18} \sum_{i=1}^{15} H(E_n, X, \omega_i) R_{iso}^+(E_n, X) w_i S(E_n, \omega_i)$$

計算コード FSKY では、以下の三つのデータベースに基づき線量計算を行う。

- ① ビルドアップ係数データベース
- ② 非等方性係数データベース (CBRF データベースに含まれる)
- ③ 遮へい体に対する CBF E データベース

また、計算コード FSKY-TR は以下の三つのデータベースに基づいて計算を行う。

- ① ビルドアップ係数データベース
- ② 非等方性係数データベース (CBRF データベースに含まれる)
- ③ 遮へい体に対する透過関数データ

二つの計算コードは共に、データベースに基づいて内挿計算によりスカイシャイン線量を計算するもので、パソコンにより瞬時 (1 秒以下) の計算が可能である。

5. 高速計算コードの検証

3 節および 4 節で述べたスカイシャイン線量高速計算コードについて、ベンチマーク体系における大気中のガンマ線輸送計算に関する高速計算コードによる計算値を、MCNP4C⁽²⁰⁾による計算値と比較、検討することにより精度評価を行った。

また、実験に基づく検証として、カンザス州立大学のベンチマーク実験⁽²¹⁾⁽²²⁾における上部遮へい体がない場合、および上部コンクリート遮へい体がある場合 (遮へい体の厚さは 21.0cm および 42.8cm) の測定値との比較および対応する MCNP4C による計算値との比較により精度評価を行った。

5.1 ベンチマーク体系による検証

点線源から放出される放射線の角度分布について、大気中の無限媒質中に設定した水平面に対して上向きに等方的場合と水平面に垂直の場合の 2 つのケースを対象に、線源エネルギーについては EGS4 を用いて LBRF が計算されている 0.1MeV 以上の 7 点 (5.0MeV ~ 0.125MeV) を対象に、高速計算コードを用いて計算を行い、MCNP4C を用いた計算値と比較した。

5.1.1 垂直点線源に対する評価

垂直点線源に対する空気吸収線量率の高速計算コードによる計算値の MCNP 計算値に対する比を、線源からの距離 100m, 500m, 900m について、線源エネルギーに対してプロットしたものを図 10 に、また、線源エネルギーが 5.0MeV, 1.25MeV, 0.125MeV の場合について、線源からの距離に対してプロットしたものを図 11 に示す。

ラインビームレスポンス (LBRF) 法、ビルドアップ係数 (BF) 法では、0.375MeV よりも低い線

源エネルギーに対しては、MCNP よりも 10 ~ 30% 程度過小評価になる傾向がある。また、BF 法では線源エネルギー 5MeV に対しては 15 ~ 20% 程度過小評価となっている。

上記の LBRF 法、BF 法と MCNP 計算値の差は、LBRF 法、BF 法の基となっている EGS4 と MCNP との差である。従って 30% 程度の差は、減衰の大きいガンマ線輸送計算におけるモンテカルロ計算の誤差の範囲内である。

また、1 回散乱近似 (G33) 法では線源エネルギーによらず他の計算法による値よりもさらに過小評価になっており、しかも線源からの距離が離れるほどその程度が大きくなっている。これは散乱角が大きな体系で過小評価する 1 回散乱近似による誤差によるものと考えられる。

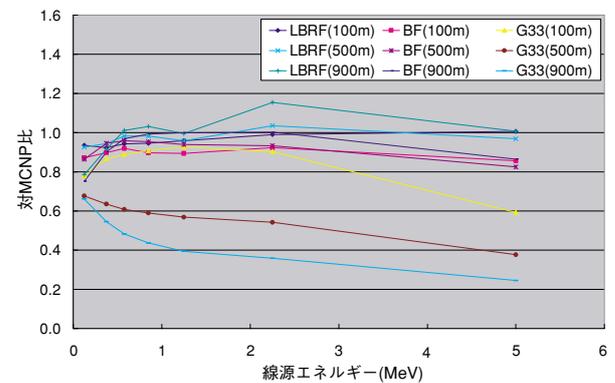


図 10 垂直点線源に対する空気吸収線量率 (1)
(LBRF: ラインビームレスポンス法, BF: ビルドアップ係数法, G33: 1 回散乱近似法)

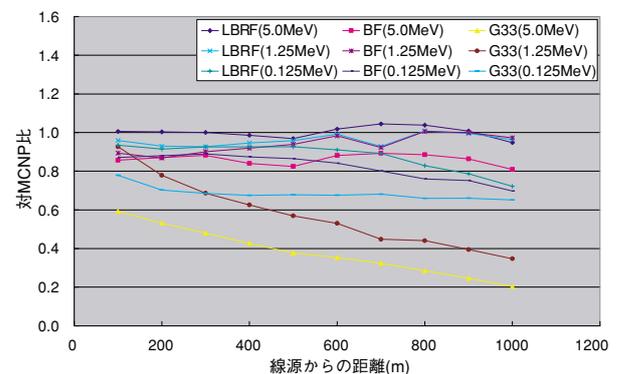


図 11 垂直点線源に対する空気吸収線量率 (2)
(略号は図 10 と同じ)

5.1.2 等方上向き点線源に対する評価

等方上向き点線源に対する空気吸収線量率の高速

計算コードによる計算値の MCNP 計算値に対する比を、線源からの距離 100m, 500m, 900m について、線源エネルギーに対してプロットしたものを図 12 に、また、線源エネルギーが 5.0MeV, 1.25MeV, 0.125MeV の場合について、線源からの距離に対してプロットしたものを図 13 に示す。

垂直点線源に比べて評価精度はよくなっており、0.575MeV 以上の線源エネルギーに対しては、LBRF 法、BF 法は概ね 5 ~ 10% 程度の誤差になっている。G33 では線源エネルギーが低くなるにつれ線源から離れた地点で過大評価となっている。

空気は無限均質体系で等方上向き点線源がある場合のスカイシャイン線量の計算では、その精度が良く評価されているビルドアップ係数に基づく BF 法が正確であり、その計算誤差は約 10% 以下である。従って、上記の BF 法と MCNP による計算値の差は、使用したガンマ線の断面積による差および MCNP の計算誤差によるものと推定される。

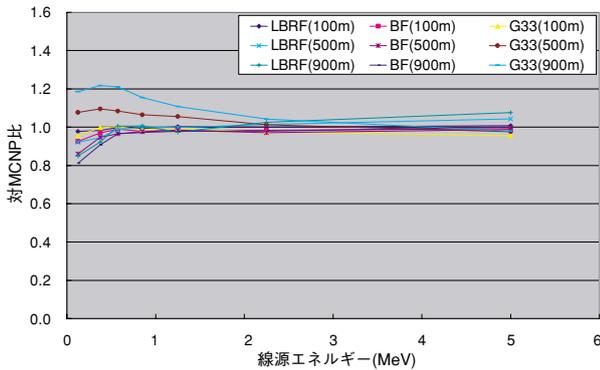


図 12 等方上向き点線源に対する空気吸収線量率 (1) (略号は図 10 と同じ)

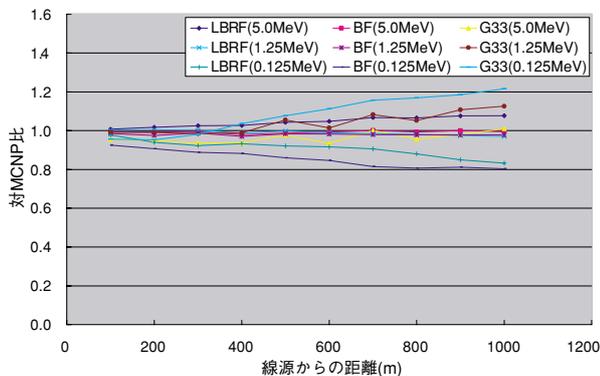


図 13 等方上向き点線源に対する空気吸収線量率 (2) (略号は図 10 と同じ)

5.2 ベンチマーク実験による検証

昭和 52 年度に「スカイシャイン線量評価法確立のための調査研究」の一環として東京電力(株), 中部電力(株), 中国電力(株)および日本原子力発電(株)がセンチリー・リサーチ・センターを通じて米国のラディエーション・リサーチ・アソシエイツに委託し、原子力安全研究協会・原子力施設散乱放射線挙動専門委員会によってその実験結果がまとめられた、図 14 に示すカンザス州立大学のベンチマーク実験解析体系を対象に、高速計算コードを用いてスカイシャイン線量の計算を行い、測定値および MCNP による計算値と比較した。

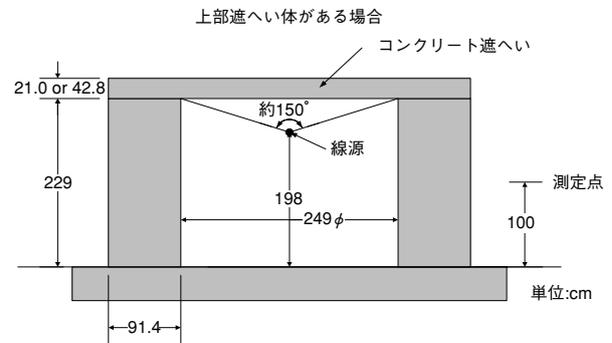


図 14 ベンチマーク実験解析体系 (21) (22)

5.2.1 上部遮へい体がない場合の評価

上部遮へい体がない場合の測定値と計算値との比較を図 15 に示す。MCNP と測定値は 5 ~ 15% 程度の誤差でよく一致している。LBRF 法および BF 法では近距離のところでは 20% 程度過小評価、線源から離れるにつれて 10% 程度過大評価となる。

また、G33 法では近距離で 30% 程度過小評価、遠距離で 25% 程度過大評価となるが、いずれの計算方法でも測定値との差は ± 30% 程度である。また、MCNP とも比較的よく一致する。

上部遮へい体がない場合に高速計算法が比較的よい精度で評価できるということは、空気無限体系での等方上向き点線源に対するスカイシャイン空気吸収線量が、高速計算法と MCNP とでよく一致することとも整合している。

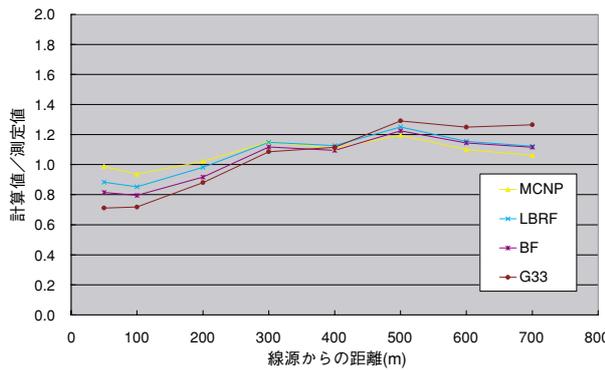


図15 ベンチマーク実験スカイシャイン線量
(上部コンクリート遮へいなし)
(MCNP: MCNP4C, 他の略号は図10と同じ)

5.2.2 上部遮へい体厚さ 21.0cm の場合の評価

上部遮へい体厚さが 21.0cm の場合の測定値と計算値との比較を図 16 に示す。

なお、図の凡例で LBRF-BFE, BF-BFE となっているのは大気中の輸送計算をそれぞれ LBRF 法, BF 法で行い, 遮へい体の透過計算を BFE 法で行っていることを示す。同様に LBRF-TR, BF-TR は遮へい体の透過計算を TR 法で行っていることを示している。また, G33-CBFE は大気中の輸送計算を 1 回散乱近似法, 遮へい体の透過計算を BFE 法で行っており, G33-IE は INSS が改良したビルドアップファクターを遮へい体の透過計算に用いるものである。

MCNP と測定値は 10 ~ 20% 程度の誤差でよく一致している。ガンマ線の遮へい体透過問題に TR 法を用いている FSKY-TR (LBRF-TR, BF-TR) は, 線源に近いところで 20% 程度過小評価, 線源に遠いところでは 40% 程度過大評価となっている。また, MCNP と比較すると, 近距離で -20%, 遠距離で +10% 程度測定値との差が拡大しており, 遮へい体透過線の線量を過小評価する傾向が見られる。

ガンマ線の遮へい体透過問題に BFE 法を用いている FSKY (LBRF-BFE, BF-BFE) では, 30% ~ 100% 程度過大評価となっており, BFE 法は遮へい体透過線の線量を過大評価する傾向が見られる。

また, G33-CBFE では近距離での過小評価が見られる。これは, 線源からの放射角によって遮へい体を透過する距離が変わるため, 透過の際の減衰が比較的少ない垂直上方成分が多くなり, 5.1.1 節の垂

直点線源に対する評価で述べたように, 散乱角が大きい体系で過小評価する 1 回散乱近似法特有の誤差が表れていると考えられる。図では INSS で開発した G33-IE による評価も示しているが, 散乱によるエネルギースペクトルの変化を考慮していないため, 遠方で過大評価となっており, 距離に伴うスカイシャイン線量の低下傾向が, 測定値や他の計算法とは明らかに異なったものとなっている。ただし, G33-IE と比較すると, G33-CBFE は散乱によるエネルギースペクトルの変化を考慮しているため, 距離に伴う線量低下傾向は改善されている。

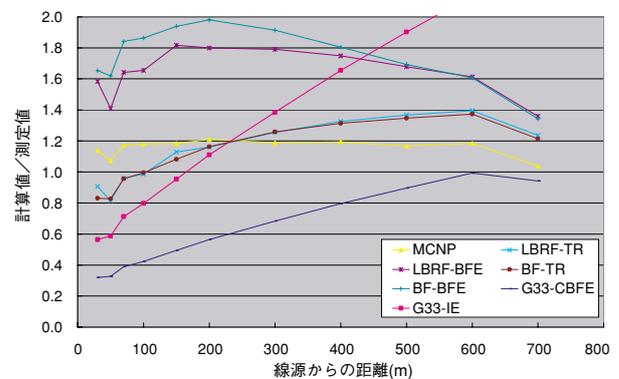


図16 ベンチマーク実験スカイシャイン線量
(上部コンクリート遮へい厚さ 21.0cm)

5.2.3 上部遮へい体厚さ 42.8cm の場合の評価

上部遮へい体厚さが 42.8cm の場合の測定値と計算値との比較を図 17 に示す。

MCNP と測定値との比較では, 30 ~ 50% の過大評価となっている。

ガンマ線の遮へい体透過問題に TR 法を用いている FSKY-TR (LBRF-TR, BF-TR) は, 近距離で 30% 程度過小評価となっている。

ガンマ線の遮へい体透過問題に BFE 法を用いている FSKY (LBRF-BFE, BF-BFE) では, 30 ~ 50% 程度過大評価する傾向が見られるが, MCNP との差は小さくなっている。

G33 をベースにした G33-CBFE, G33-IE はともに過小評価が著しいが, これは上部遮へい体厚さが 21.0cm の場合と同様である。

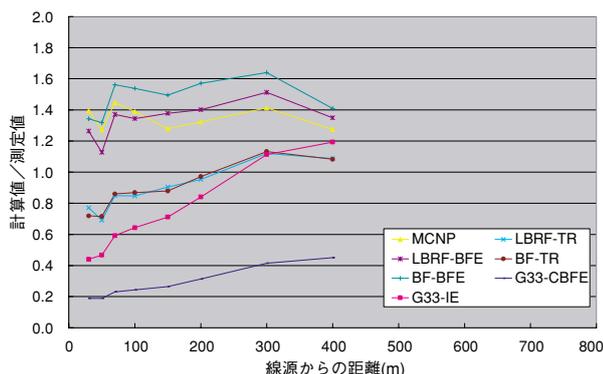


図 17 ベンチマーク実験スカイシャイン線量
(上部コンクリート遮へい厚さ 42.8cm)

5.2.4 遮へい体透過線計算の評価

実験体系に対する遮へい体透過線分布の計算に関して、平板遮へい体の透過関数に基づく TR 法は透過線量を過小評価し、また、遮へい物質の無限体系でのエネルギー分布に基づく BFE 法は過大評価していることが明らかになった。

これは、図 14 に示すベンチマーク実験解析体系において、TR 法による計算では、線源から上部遮へい体への入射線は、図の 150 度の開き角度（平板に垂直な軸とのなす角度は 75 度）の範囲の放射線しか考慮していない。一方、実際には、180 度の開き角度（垂直軸とのなす角度は 90 度）で線源から放射され、側壁で散乱された後上部遮へい体に入射する放射線が存在する。MCNP 計算においても、線源から 180 度の開き角度で放射されるものとし、側壁による散乱を考慮している。従って、TR 法は実験や MCNP と比べ、遮へい体透過線量をやや過小評価しているものと考えられる。

また、BFE 法による計算では、線源の下部にもコンクリートが存在する無限体系を想定し、また線源からは下方向にも放射線が放射されるものとしている。従って、BFE 法は、下方向に放射され、下部のコンクリートで反射された後、上方向に透過する放射線の線量を含めて計算している。実際には、線源の下部には鉛の遮へい体があり、その反射は微少と推定される。また、MCNP の計算では、線源より下方向の放射線の放出はないものとしている。従って、BFE 法は遮へい体透過線量を過大評価しているものと考えられる。

6. まとめ

6.1 ガンマ線スカイシャイン線量高速計算コードの作成

IE 法に基づいて作成されたビルドアップ線束エネルギー分布データベースを元に、透過ガンマ線束縮約エネルギー分布 (CBFE) データベースを作成し、これを用いてスカイシャイン線量計算を行うよう 1 回散乱スカイシャイン線量計算コード G33-GP2R を改良して G33-CBFE を作成した。

また、モンテカルロ計算コード EGS4 で計算されたラインビームレスポンス関数 (LBRF) または既存のビルドアップ係数データベースと CBFE データベースを用いてスカイシャイン線量計算を行う計算コード FSKY を作成した。

さらに、IE 法を用いて平板遮へい物を透過したガンマ線のエネルギー・角度分布を表す透過関数を計算し、これと LBRF データまたはビルドアップ係数データベースを用いてスカイシャイン線量を計算する計算コード FSKY-TR を作成した。

6.2 ガンマ線スカイシャイン線量高速計算コードの検証

作成した計算コードを用いてスカイシャインベンチマーク計算体系およびベンチマーク実験体系について計算を行い、MCNP4C による計算値およびベンチマーク実験値と比較することにより高速計算コードの精度および計算速度の検証を行った。

6.2.1 ベンチマーク計算体系

ラインビームレスポンス法およびビルドアップ係数法は、等方上向き点線源ならびに垂直点線源に対して MCNP とほぼ同等の精度でスカイシャイン線量の計算ができる。

G33 では、等方上向き点線源に対しては MCNP と同等の計算精度で計算可能であるが、垂直点線源に対しては高い線源エネルギーのガンマ線によるスカイシャイン線量を著しく過小評価 (MCNP 計算値の約 1/5) するため、垂直点線源への適用は適切ではない。

6.2.2 カンザス州立大学におけるベンチマーク実験体系

天井遮へいがない場合は、3つの高速計算法によるスカイシャイン線量計算値は、測定値およびMCNP計算値と誤差約30%以内で比較的良好一致する。

天井遮へいがある場合は、G33-CBFEでは測定値と比べて著しい過小評価（計算値/測定値は0.2～0.45）となった。したがって、天井遮へいのある体系への適用は適切ではないと考えられる。

天井遮へいがある場合のFSKYによる計算値は、測定値およびMCNP計算値と比べて30%～100%過大評価となる。これは、遮へい体透過計算に用いているBFE法が無限体系を想定しているため、線源より下方で反射されるガンマ線を過大に評価しているためと考えられる。また、BFE法は平板遮へい体だけでなく実機のような球形の遮へい体にも容易に適用可能である。

天井遮へいがある場合のFSKY-TRによる計算値は、測定値と比較的良好一致（計算値/測定値は0.7～1.4）するが、近距離において約30%過小評価、遠距離では10%～30%過大評価する。これは、側壁による反射線を考慮していないためと考えられる。また、TR法は平板遮へい体には適用できるものの、実機のような球形の遮へい体にはそのまま適用できず、計算方法の改良が必要である。

計算精度に関しては、上部遮へい体を有するベンチマーク実験体系に対して、FSKY、FSKY-TRとも概ねファクター2程度の範囲で計算できることを確認した。

計算速度に関しては、1GHzのCPUを用いたパソコンで、一つの体系のスカイシャイン線量計算に要する時間は、G33-CBFEで約20秒、FSKYおよびFSKY-TRでは1秒以下であり、高速計算を実現した。

実機適用の点からは、過大評価または過小評価となった透過計算法の改良や、格納容器形状を想定した計算方法の改良等が必要である。

文献

- (1) 吉田至孝, 入江隆, 郡山民男, 工藤清一, 西村和哉, “シビアアクシデント時の発電所内被ばく線量評価手法の検討,” INSS JOURNAL, Vol.8, p.174 (2001).
- (2) 吉田至孝, 入江隆, 郡山民男, 工藤清一, 西村和哉, “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, Vol.1, pp.85-95 (2002).
- (3) 恩田隆司, 吉田至孝, 工藤清一, 西村和哉, “シビアアクシデント時原子力発電所内線量評価システムの改良,” INSS JOURNAL, Vol.10, p.241 (2003).
- (4) 佐々木泰裕, 南則敏, 吉田至孝, “シビアアクシデント時原子力発電所内線量評価システムの改良—線量率換算係数の導入とアクセスルート編集機能の追加—,” INSS JOURNAL, Vol.13, p.296 (2006).
- (5) “MAAP4 Modular Accident Analysis Program User’s Manual,” EPRI (1994).
- (6) Y. Sakamoto, S. Tanaka, “QAD-CGGP2 AND G33-GP2: REVISED VERSIONS OF QAD-CGGP AND G33-GP,” JAERI-M 90-110, Japan Atomic Energy Research Institute, (1990).
- (7) 恩田隆司, 吉田至孝, 清水彰直, 坂本幸夫, “シビアアクシデント時原子力発電所内線量評価システムの改良—IE法によるビルドアップ係数の整備とQAD, G33両コードの深層透過問題への対応—,” INSS JOURNAL, Vol.11, p.229 (2004).
- (8) 吉田至孝, 山口勝義, 「ガンマ線遮へい計算コードQADの改良」, 日本原子力学会「2006秋の年会」, E57, (2006).
- (9) 吉田至孝, 山口勝義, 坂本幸夫, 「ガンマ線スカイシャイン計算コードG33の改良」, 日本原子力学会「2007春の年会」, B43, (2007).
- (10) W.W. Engle Jr., A User’s Manual for ANISN, K-1693, (1967).
- (11) A. Shimizu, H. Mizuta: Application of Invariant Embedding to the Reflection and Transmission Problem of Gamma Rays (II); J. Nucl. Sci. Technol, 3, 441-447 (1966)
- (12) A. Shimizu :Development of Angular Eigenvalue Method for Radiation Transport Problems in Slabs and Its Application to Penetration of Gamma Rays; J. Nucl. Sci. Technol, 37, 15-25 (2000).
- (13) 坂本幸夫, “新法令に対応した点減衰核法コードQAD-CGGP2R及び一回散乱法コードG33-

- GP2R”, 日本原子力学会放射線工学部会 第9回夏期セミナー (「夏の研究会 2002」) 遮へい用計算コード講習会配付資料, 日本原子力学会放射線工学部会, (2002).
- (14) W.R. Nelson, Y. Hirayama, D.W. O. Rogers, “EGS4 Code system,” SLAC-265, Stanford Linear Accelerator Center, Stanford, CA (1985).
- (15) Y. Harima, H. Hirayama, Y. Sakamoto, N. Kurosawa, and M. Nemoto, “Comparison of Line Beam Response Function for Gamma-ray Skyshine Analysis Based on Single Scattering Method with the Monte Carlo Calculations,” J. Nucl. Sci. Technol., 34, 856 (1997).
- (16) Y. Harima, H. Hirayama, Y. Sakamoto, N. Sasamoto, F. Masukawa, H. Nakashima, K. Hayashi, H. Handa, R. Tayama, N. Kurosawa, M. Nemoto, T. Abe, “Validity of the Four-Parameter Empirical Formula in Approximating the Response Functions for Gamma-ray Skyshine Analyses”, J. Nucl. Sci. Technol., Vol.40, 569 (2003).
- (17) M. Nemoto, Y. Harima, H. Hirayama, Y. Sakamoto, K. Hayashi, Y. Hayashida, S. Ishikawa, O. Sato, and R. Tayama, “Improvement of Air Transport Data and Wall Transmission/Reflection Data in the SKYSHINE Code (1) Calculation of Line Beam Response Function for Gamma-Ray Skyshine Analysis,” J. Nucl. Sci. Technol., Supplement, 1, 616 (2000).
- (18) Y. Harima, H. Hirayama, Y. Sakamoto, and A. Shimizu, “A Simplified Method of Gamma-Ray Skyshine Calculations,” Proc. 8th Int. Conf. Radiation Shielding, Arlington Texas, April 24-28, 1994, Vol.2, p.939, American Nuclear Society (1994).
- (19) H. Hirayama, Y. Harima, Y. Sakamoto, N. Kurosawa, M. Nemoto, “Data Library of the Line-Beam Response Functions and the Four-Parameter Empirical Formula in Approximating the Response Functions for Gamma-ray Skyshine Analyses”, to be published to KEK report.
- (20) “RSICC COMPUTER CODE COLLECTION MCNP4C2”, CCC-701 MCNP4C2, Oak Ridge National Laboratory (2001).
- (21) 「スカイシャイン線量評価法確立のための調査研究報告書」, 原子力施設散乱放射線挙動専門委員会, (財)原子力安全研究協会, 昭和53年3月.
- (22) 「スカイシャイン線量評価法確立のための実験研究報告書」, Vol.1 & 2, センチュリ・リサーチセンタ(株), 昭和53年3月.