γ 線スカイシャイン線量評価における 天井コンクリートの影響

吉 田 昌 弘^{*1}

(2004年7月21日受理)
(2004年12月21日再受理)

The Effect of Concrete Ceilings in Gamma-ray Skyshine Dose Evaluation

Masahiro YOSHIDA^{*1}

In skyshine dose evaluation for gamma-rays, simple calculation methods are still used in many radiation facilities since various computer codes for the skyshine calculation require considerable experience and expertise to obtain reliable results. The effect of scattered radiations in ceilings needs to be considered in order to obtain reasonable results using simple calculation methods. Therefore, dose distributions on the ceiling were calculated using MCNP-4C in the geometry of the KSU experiment. The results showed that gamma-rays of 0.3 MeV or less scattered inside the facility made a contribution to the dose at the ceiling position, and the dose distribution on the concrete ceiling was strongly affected by the oblique incidence on the ceiling in the case of a point source. Additional calculations confirmed that the effect of the oblique incidence depended on the thickness of the ceiling as a function of mean-free-path. It was found that the effect was expressed as a simple formula considering gamma-ray attenuation and build-up, which would be useful in the simple skyshine calculation.

KEY WORDS: gamma-ray skyshine, MCNP-4C, oblique incidence, point source, concrete shielding.

I 緒 論

γ 線スカイシャイン線量評価では、線源から施設上面を通過して、空気中で散乱した γ 線をモンテカルロ法によるMCNP、輸送計算Sn法によるANISNやDOT、点減衰核積分法によるG33等の計算コードで解析することが専門家では行われている。各種計算コードをスカイシャイン計算で用いる場合、その特徴を把握するために、ベンチマーク実験との比較が行われている。

その代表的なベンチマーク実験が日本原子力研究所とカンザス州立大(KSU)が共同で実施した⁶⁰Coベンチマーク実験であり、通常、KSUベンチマーク実験と呼ばれている。

NASON et al.¹⁾が、このベンチマーク実験の報告と輸送計算法の一つであるDOTとの比較を報告している。この中で、天井コンクリートがない場合、10~15%、天井コンクリートがある場合、20%、実験値を過小評価していると報告している。

日本でも、日本原子力研究所及び原子力安全研究協会²⁾において、first collision source法を採用したDOT-DOT計算法が行われ、天井コンクリートがある場合、概ね10~20%の誤差(実験値を過大評価)であることが報告されている。また、KECK et al.³⁾は、モンテカルロ法により散乱線を積算するSKYSHINE-II及び1回散乱法によ

^{*1} (財)原子力安全技術センター原子力技術展開事業部; 東京都文京区白山5-1-3-101 (〒112-8604)

E-mail: yoshida@nustec.or.jp

Department of Nuclear Technology Development, Nuclear Safety Technology Center; 5-1-3-101, Hakusan, Bunkyo-ku, Tokyo 112-8604, Japan.

る AIRSCAT を用い、天井コンクリートがある場合の解析結果を報告し、OLSHER et al.⁴⁾ は、MCNP を用いてサイロ内の散乱線の影響を含めて天井コンクリートがない場合の解析結果を報告しているが、これらの報告から、次のようなことが理解できる。

- (1) モンテカルロ法のコードである MCNP, SKY-SHINE-II の計算結果は、KSU 実験における施設近傍 (30~100m) ではよく一致している。
- (2) Sn 法、点減衰核法を用いた計算では、天井コンクリートがある場合、KSU 実験値を概ね 20% 過大に評価している。天井コンクリートがない場合、施設近傍で過小評価している。

これらの計算コードによる評価のほか、STEDRY et al.⁵⁾ は、hybrid Monte Carlo and integral line-beam 法を用いてスカイシャイン線量を解析しており、スカイシャイン線量は、主にしゃへい材の平均自由行程 (mfp) 厚さに依存することを報告している。

放射線施設の γ 線スカイシャイン線量評価では、計算コードを専門家以外が使いこなすことが難しいため、非破壊検査でのスカイシャイン評価のように、天井面を考慮せず簡易計算で評価することが多く、また、天井コンクリート厚を考慮する場合でも、散乱線の影響を保守的に考えて簡易計算で行うことが多い。このような簡易計算の精度を上げるためには、天井面での散乱線の影響を

考慮することが重要となる。また、点線源の場合、天井透過後の線量分布が均一ではないため、斜めに入射した γ 線を解析することも重要になる。

このようなことから、スカイシャイン評価で実績のある KSU ベンチマーク実験について、天井コンクリート面での線量分布、エネルギー分布、散乱線の状況をスカイシャイン評価計算で一致性がよい MCNP-4C を用いて解析し、簡易計算への応用について検討した。

II MCNP 計算体系

天井コンクリート上部の解析を行うためには、MCNP 使用方法が適正であることを確認する必要がある。このため、KSU 実験に係るスカイシャイン比較計算を実施した。

MCNP 計算体系は、Fig. 1 のように KSU 実験体系を円柱体系・点線源で表現し、線源の放出分布は、等方とした。また、入力パラメータとしては、OLSHER et al. 結果と比較するため、これと同様に、空気密度：1.096E-3 g/cm³、コンクリート密度：2.13 g/cm³、線源カプセル：密度 5 g/cm³ のニッケル製カプセル、土壌密度：1.7 g/cm³ とした。

計算領域は上部半球のみとし、直径 5 cm の球ディテクタを用いて、施設近傍 (30, 50, 70, 100 m) のスカイシャイン線量評価計算を MCNP-4C で実施した。光子ラ

Fig. 1 Calculation model for the KSU experiment.

Table 1 Comparison of calculated exposure rates with the KSU experimental results and other calculations (no shielding).

Distance (m)	Normalized exposure rate ($\mu\text{R/h/Ci}$) ^{*1}			Difference (%)
	KSU experiment	OLSHER et al. ($\pm\%$)	MCNP-4C (R. E. %) ^{*2}	
30	—	42.3 $\pm$ 0.60	44.14 (0.19)	—
50	24.24	23.95 $\pm$ 0.61	24.81 (0.22)	+2.4
70	—	—	16.26 (0.30)	—
100	9.66	9.17 $\pm$ 0.84	9.65 (0.23)	-0.1

^{*1} The data of KSU benchmark experiment were given as a unit of $\mu\text{R/h/Ci}$. To avoid unnecessary confusion, the original unit is used without converting to SI unit.

^{*2} It indicates the relative error in MCNP

Table 2 Comparison of calculated exposure rates with the KSU experimental results (21 cm concrete).

Distance (m)	Normalized exposure rate ($\mu\text{R/h/Ci}$)		Difference (%)
	KSU experiment	MCNP-4C (R. E. %)	
30	4.67	4.94 (0.44)	+5.8
50	2.45	2.62 (0.48)	+6.8
70	1.45	1.61 (0.90)	+11.1
100	0.809	0.90 (0.52)	+11.2

Table 3 Dose distribution on the concrete ceiling normalized to the center.

Distance from the center (cm)	No shielding	21 cm concrete	42.8 cm concrete
0	1.00E+00	1.00E+00	1.00E+00
5	9.91E-01	9.94E-01	9.79E-01
10	9.64E-01	9.37E-01	9.58E-01
20	8.72E-01	7.56E-01	8.11E-01
40	6.26E-01	3.82E-01	6.30E-01
50	5.18E-01	2.45E-01	4.56E-01
70	3.58E-01	1.05E-01	1.92E-01
80	3.00E-01	5.57E-02	7.44E-02
100	2.17E-01	2.58E-02	2.46E-02
125	1.52E-01	8.27E-03	7.36E-03

イブラリーは、MCNP-4C 内蔵の MCPLIB02 を利用し、ヒストリー数は、 10^7 とした。

III 結 果

1. スカイシャイン比較計算結果

比較計算の結果を **Table 1, 2** に示す。この結果、天井コンクリートがない場合、KSU 実験値と 3% 以内で、また、OLSHER et al. 結果と 4% 以内で一致した。さらに、天井コンクリート (21 cm=2.52 mfp) がある場合、施設近傍の KSU 実験値と 7% 以内で一致しており、MCNP は、天井面での線量解析に十分に使用可能であることを確認した。

2. 天井コンクリート上面の線量解析結果

スカイシャイン比較計算での計算体系を用いて、施設上面の 3 状態 (天井なし、天井コンクリート 21 cm, 42.8 cm) での線量分布を計算した。入力パラメータは、スカ

イシャイン比較計算と同様とし、計算点は、線源上部を中心に 10 点を取り、ポイントディテクターで各点での照射線量率を求めた。

次に、中心点 (線源直上部 P_0) の照射線量率に規格化し、各点 (P) での減衰比率 (P/P_0) を算出した。この結果を **Table 3** に示す。

IV 考 察

1. 天井コンクリートがない場合

天井コンクリートがない状態での線源直上部 52 cm (線源から内面 31 cm, 内面から外面 21 cm) での照射線量率は、点線源からの非衝突光子フルエンス率から算出した簡易計算の場合、1.24 C/kg/h, MCNP 計算では、1.22 C/kg/h であり、2% 程度で非常によく一致している。しかし、**Fig. 2** に示すとおり、線源直上部 52 cm 平面での MCNP 計算結果と簡易計算の結果を比べると中心近くで

の一致性は良いが、中心からの距離が増すと簡易計算では、照射線量率を過小評価していることがわかる。**Fig. 3**にMCNP計算で得られた各点でのエネルギースペクトル分布を示す。この図から、全点で0.3 MeV以下が高くなっている。これは、床面からの散乱線を含む施設内面の影響によるものであり、この影響を考慮しないために簡易計算が過小評価しているものと考えられる。

2. 天井コンクリートがある場合

光子フルエンス率と照射ビルドアップ係数を用いて簡易計算⁶⁾した結果は、MCNP計算結果と比べ、線源直上部の位置で、コンクリート21 cmは20%、42.8 cmは50%、照射線量を過大評価していた。光子フルエンス率と照射ビルドアップ係数を用いた簡易計算では、単色エネルギー (^{60}Co 1.25 MeV) として計算しているため、

Fig. 2 Dose distribution normalized to the center (no shielding).

mfp 厚が大きくなるにつれて、照射線量を過大に評価したものと推定される。また、MCNP 計算では、施設上面の照射線量率が、中心からの距離が増すと、つまり、 θ が大きくなると急激に減少している。

照射線量ビルドアップは、 γ 線がしゃへい体に斜め入射した場合、大きくなることが知られているため、この減衰は、天井コンクリート内での散乱により、入射 γ 線の量が減少したものと推測される。これを解析するため、**Fig. 4**のような体系で、次のように簡易計算式を補正し、MCNP計算結果との比較を行った。

コンクリート内側表面でのフルエンス率 I_θ は、

$$I_\theta = I_0 \cos^2 \theta / 4\pi r^2 \quad (1)$$

測定点 P での照射線量率 P は、

Fig. 4 Geometry for the ceiling shielding of point source.

Fig. 3 The spectral distribution without concrete shielding.

Fig. 5 Dose distribution normalized to the center (5 cm concrete).

Fig. 6 Dose distribution normalized to the center (20 cm concrete).

$$P = I_0 \cos^2 \theta / 4\pi r^2 \cdot B(\theta) \cdot R(\theta) \cdot \exp(-\mu \text{tsec} \theta) \quad (2)$$

$B(\theta)$: 斜め入射 γ 線の照射線量ビルドアップ係数

$R(\theta)$: フィッティングのための補正係数

ここで,

$$f(\theta) = \cos^2 \theta \cdot \exp(-\mu \text{tsec} \theta) \cdot B(\theta) \cdot R(\theta) \quad (3)$$

$\cos^2 \theta$: 斜め入射による入射フルエンス率の減衰項

$\exp(-\mu \text{tsec} \theta)$: 斜め厚による入射 γ 線減衰項

$B(\theta) \cdot R(\theta)$: ビルドアップを含めた補正項

とすると,

$$P = I_0 / 4\pi r^2 \cdot f(\theta) \quad (4)$$

となり, 測定点 P での照射線量率 P は, $f(\theta)$ の関数となる。この $f(\theta)$ は, 施設上面の照射線量率が, 中心からの距離が増すと, MCNP 計算結果と同様に, 照射線量率が減少することを表せなければならない。

ビルドアップ係数 $B(\theta)$ が Berger 型近似のように増加量を $\sec \theta \cdot \exp(-\sec \theta)$ の形に表現できることから, こ

Fig. 7 Dose distribution normalized to the center (40 cm concrete).

Fig. 8 N approximation curve for the concrete $\mu = 0.12 \text{ cm}^{-1}$.

れにパラメータ N を導入し, モンテカルロ計算で得られた線量率の減少を次式でフィッティングすることとした。

$$B(\theta) \cdot R(\theta) = \sec^N \theta \cdot \{\exp(-\sec \theta)\}^{-N} \quad (5)$$

これにより, $f(\theta)$ は, 次のように表現できる。

$$f(\theta) = \cos^{(2-N)} \theta \cdot \exp(-\sec \theta)^{\mu \text{tsec} \theta - N} \quad (6)$$

この $f(\theta)$ と MCNP 計算結果との比較を行うため, $\theta = 0$ の時 $f(0) = 1$ と規格化 (P/P_0) して N の近似値を求めると, Fig. 5 から Fig. 7 に示すとおり, 天井コンクリート 5 cm ($\mu = 0.12 \text{ cm}^{-1}$) の時 $N = 0.1$, 20 cm の時 $N = 0.33$, 40 cm の時 $N = 0.66$ であった。また, Fig. 8 に示すとおり, 5.5 mfp までの間で,

$$N = 0.0058X^2 + 0.1021X + 0.0471 \quad (7)$$

X : 平均自由行程 (mfp) 厚さ

の近似式で表せることができた。

このことから, 点線源体系での天井コンクリート上面の線量分布は, 簡易計算式を補正して表現できることが

わかる。

体積線源の場合は、点線源の場合と異なり、斜め散乱による影響が少なくなるため、SHEU et al.⁷⁾が報告しているように MCNP と他のスカイシャインコード結果がよく一致することを裏付けている。また、 γ 線スカイシャイン計算に簡易式及びフィッティング係数を用いている SHINE-II においても、この簡易式補正により精度が高まると考えられる。

V. 結 論

γ 線スカイシャイン評価において、実験体系が明確である KSU 実験体系を用いて、天井面での線量分布を MCNP で解析し、照射線量率を計算した。この結果、天井がない場合、床面からの散乱を含む施設内面の影響は、0.3 MeV 以下の散乱線が影響していることがわかった。また、天井がある場合、点線源体系では、点線源からの距離が増すとコンクリートへの斜め入射の影響により、天井面での線量分布は、大きく異なることが確認された。さらに、コンクリート厚を変化させた計算を行い、斜め入射による影響は、mfp 厚さに依存し、 γ 線の減少率とビルドアップ係数の積で表現できることが示された。

これらの結果から、 γ 線スカイシャイン線量の簡易計算において、天井コンクリートの影響を適切に補正するための有用なデータが得られた。また、点線源を仮定した壁コンクリートでのしゃへい計算においても、特に点線源と壁が近い場合には、この簡易計算式を補正する方法が有効と考えられる。

参 考 文 献

- 1) R. R. NASON, J. K. SHULTIS, R. E. FAW and C. E. CLIFFORD; A benchmark gamma-ray skyshine experiment, *Nucl. Sci. Eng.*, **79**, 404-416 (1981).
- 2) S. MIYASAKA, H. RYUFUKU, S. MORIUCHI, S. SHIMURA, K. TERADA, A. YAJIMA, Y. KIMURA and H. KADOTANI; Evaluations of skyshine dose due to gamma rays from nuclear power plant, *J. At. Energy Soc. Jpn.*, **20**(7), 485-492 (1978).
- 3) B. KECK and P. HERCHENRODER; Nach rechnen eines γ -Skyshine-Benchmark Experiments, *Atomwirtschaft*, **27**, 266-267 (1982).
- 4) R. H. OLSHER, H.-H. HSU and F. H. WELLS; Benchmarking the MCNP Monte Carlo code with a photon skyshine experiment, *Nucl. Sci. Eng.*, **114**, 219-227 (1993).
- 5) M. H. STEDRY, J. K. SHULTIS and R. E. FAW; Effect of an overhead shield on gamma-ray skyshine, *Nucl. Sci. Eng.*, **123**, 289-294 (1996).
- 6) “放射線施設のしゃへい計算実務マニュアル 2000”, 原子力安全技術センター, p.258 (2000).
- 7) R. D. SHEU, B. J. CHANG, I. J. CHAN and S. H. JIANG; Effect of source angular distribution on the evaluation of gamma-ray skyshine, *J. Nucl. Sci. Tech. Suppl.*, **1**, 645-649 (2000).

吉田 昌弘 (よしだ まさひろ)

1958 年生まれ。気象庁気象研究所、東京工業大学原子炉工学研究所を経て、1989 年より (財) 原子力安全技術センターに勤務。放射線障害防止法に基づく主任運搬物・運搬方法確認員、講習機関講師。

専門のキーワードは、放射線計測、安全評価。現在、東京工業大学大学院博士後期課程在学中。

E-mail: yoshida@nustec.or.jp