

# モンテカルロコード EGS, MVP, MCNP による ガンマ線スカイシャイン線量評価性能の比較検討

## Comparison of Gamma-ray Skyshine Dose Evaluation Performance among Monte Carlo Codes; EGS, MVP, MCNP

木下 郁男 (Ikuo Kinoshita)\*<sup>1</sup> 植木 紘太郎 (Koutarou Ueki)\*<sup>2</sup>

**要約** スカイシャイン計算にモンテカルロ法を適用するに当たっては、統計誤差を低減するために用いる分散低減法等の計算手法の適用性や計算結果の精度についての検討が必要である。本研究では連続エネルギーモンテカルロ法の代表的コード EGS5, MVP2, MCNP5 を用いて、カンザス州立大学スカイシャイン・ベンチマーク実験の実験解析を行い、各コードのガンマ線スカイシャイン線量の予測性能を評価した。その結果、(1) モンテカルロ法によるガンマ線スカイシャイン線量計算には、質量エネルギー吸収係数を換算係数として用いる方法が有効であり、本実験体系の場合は、分散低減法を用いなくとも 50,000,000 ヒストリー程度で線量評価が可能であった。(2) EGS5, MVP2, および MCNP5 による光子スペクトル計算結果は互いによく一致した。(3) EGS5, MCNP5 による線量計算結果は良く一致し、ともに実験値を精度良く再現した。(4) MVP2 による計算において線量換算を多群形式で与えた場合、約 2 割程度の誤差が生じたが、ドシメトリーファイルを用いた線量計算を行えば、EGS5, MCNP5 による線量計算結果および実験値によく一致した。以上より、線量換算係数を用いた計算によって EGS5, MVP2, MCNP5 はガンマ線スカイシャイン線量を同程度に精度良く評価できることが確認された。ただし、MVP2 の場合は線量換算係数をドシメトリーデータに変換し線量計算する方法が推奨される。

**キーワード** ガンマ線スカイシャイン, 連続エネルギーモンテカルロ法, EGS, MVP, MCNP

**Abstract** In applying the Monte Carlo method to skyshine calculations, examinations are required on the validity of the calculation methods such as variance reductions and the accuracy of the calculation. In this study, using typical codes of the continuous energy Monte Carlo method, i.e. EGS5, MVP2, and MCNP5, analyses were conducted of Kansas State University skyshine benchmark experiment. And the calculation results of the gamma-ray skyshine doses by these codes were compared with each other. The following results were obtained: (1) For the gamma-ray skyshine dose calculations using Monte Carlo codes, the method of using mass energy absorption coefficients as conversion factors was effective. And under this experimental condition, dose calculations were possible for about 50,000,000 histories without variance reduction techniques. (2) The photon spectrum calculation results by EGS5, MVP2, and MCNP5 were in good agreement. (3) The dose calculation results by EGS5 and MCNP5 were in good agreement and agreed well with the experimental values. (4) In the case of MVP2 dose calculations, if dose conversion was performed in multi-group form, about twenty percent error was observed. However, if dose conversion was performed using dosimetry files, the calculation results by MVP2 were significantly improved and agreed well with those by EGS5 and MCNP5, and experimental values. From these results, it was ascertained that EGS5, MVP2, and MCNP5 can evaluate gamma-ray skyshine doses with sufficient accuracy to the same extent. In the case of MVP2, however, dose calculations using dosimetry files which are transformed from dose conversion factors are recommended.

**Keywords** gamma-ray skyshine, continuous energy Monte Carlo method, EGS, MVP, MCNP

\* 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

## 1. はじめに

原子力事故時の線量評価ではガンマ線スカイシャインの線量評価が重要である。原子力安全システム研究所では原子力発電所のシビアアクシデント発生時における適切なアクシデントマネジメントの実施に資するため、ガンマ線スカイシャイン線量の高速計算法を開発しており、その検証解析のために連続エネルギーモンテカルロ法による計算を行っている(1)。

連続エネルギーモンテカルロ法は、ボルツマン輸送方程式を近似することなく乱数を用いて統計的に解く手法であり、エネルギーに関して多群近似を行わず核データの精度を損なわないため、放射線と物質の衝突過程を厳密に扱ったシミュレーションが可能である。この連続エネルギーモンテカルロ法に基づく代表的なコードとしてEGS, MVP, MCNP等がある。EGSは米国SLAC国立加速器研究所、高エネルギー加速器研究機構等を中心に開発・改良が行われている電子・光子の電磁カスケードシャワーを計算するモンテカルロコードである。医学物理や放射線測定分野での利用が多く、現在の最新版はEGS5<sup>(2)</sup>である。MVPは原子力研究開発機構で独自に開発された中性子・光子輸送計算モンテカルロコードである。当初は炉心解析を目的にして開発が行われたが、最新の第2版では点検出器及び面検出器評価法等の機能が追加され、遮へい解析にも適用可能な汎用コードとなっている<sup>(3)</sup>。またMCNPは米国ロスアラモス国立研究所で開発されている汎用の中性子・光子・電子輸送モンテカルロコードである。世界中でユーザー数が多く、様々な分野で用いられている。遮へい計算のための機能も豊富であり、現在の最新版はMCNP5<sup>(4)</sup>である。

スカイシャイン計算や遮へい計算へモンテカルロ法を適用するに当たっては、計算に必要な統計量を得るための分散低減パラメータの設定等の計算手法の適用性や計算結果の精度について検討が必要である。このため、これまでにカンザス州立大学スカイシャイン・ベンチマーク実験<sup>(5)</sup>を対象とした実験解析がMCNPを用いて行われている<sup>(6)</sup>。しかしEGSやMVPを用いた実験解析の報告や各コード間の計算結果についての比較は行われていない。

そこで本研究では、3つのコードの最新版EGS5, MVP2, MCNP5を用いて本ベンチマークの実験解析を行い、ガンマ線スカイシャイン線量計算に対す



図1 カンザス州立大学原子力工学遮へい実験場<sup>(7)</sup>

るモンテカルロ法の適用性や精度の確認、各コードの線量評価性能についての比較検討を行った。

## 2. カンザス州立大学スカイシャイン実験のモデル化

1977年に米国のカンザス州立大学原子力工学遮へい実験場で実施されたCo-60ガンマ線スカイシャイン実験を対象として、モンテカルロコードEGS5, MVP2, MCNP5による実験解析を行う。本ベンチマーク実験は、原子力発電所敷地境界近傍のスカイシャイン線量を評価することを目的として実施されたものである<sup>(7)</sup>。実験場の全景を図1に示す。

本実験で用いられた線源サイロは、ほぼ円環状の天井の無いコンクリート構造物で、厚さ10cmのコンクリート平板を2層又は4層重ねたものを天井遮へいとしている。Co-60線源がサイロの中心軸上に配置され、天井遮へいが無い場合、天井遮へいが2層の場合(厚さ21cm)、及び天井遮へいが4層の場合(厚さ42.8cm)に対して、照射線量が線源から30m~700mの地点に配置された電離箱により測定されている。Co-60線源の強度を1Ciあたりに規格化した照射線量率の測定値<sup>(7)</sup>を表1に示す。

計算コードの比較評価のために、本ベンチマーク実験の幾何形状、物質組成、線源について以下のようにモデル化し、3コード共通に用いた。

幾何形状については、実験体系がほぼサイロを中心とした軸対象形状であることから、円柱を用いてモデル化を行った。円柱の半径、高さは文献値に従い定めた。ベンチマーク実験の解析体系を図2に示す。

物質組成については、空気、土壌、コンクリートをモデル化した。これらの原子個数密度を表2に示す。なお天井遮へいコンクリートの密度については、

表1 測定値

線源からの距離(m)	照射線量率 (μR/h/Ci)		
	天井遮蔽 0 cm	天井遮蔽 21cm	天井遮蔽 42.8cm
30		4.48	3.62E-01
50	2.43E+01	2.39	1.95E-01
70		1.36	1.06E-01
100	9.70	7.56E-01	5.82E-02
150		3.09E-01	2.59E-02
200	2.46	1.46E-01	1.17E-02
300	7.45E-01	3.87E-02	2.83E-03
400	2.86E-01	1.27E-02	8.78E-04
500	1.06E-01	4.07E-03	
600	4.91E-02	1.45E-03	
700	2.35E-02	5.91E-04	



図3 天井コンクリート遮へい<sup>(7)</sup>

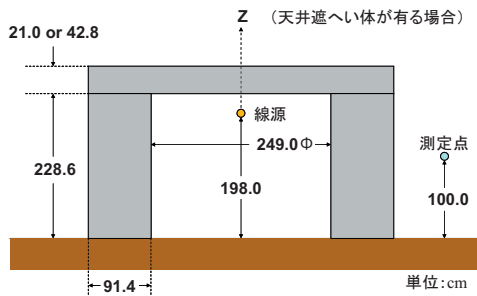


図2 ベンチマーク実験解析体系

2.13g/cm<sup>3</sup>と2.30g/cm<sup>3</sup>の2ケースを考慮した。前者はNasonらの文献<sup>(5)</sup>に従ったものであり、後者は「ガンマ線遮蔽設計ハンドブック」<sup>(8)</sup>に記載のコンクリートの原子個数密度に基づくものである。

実際の天井遮へい体は、図3に見られるように、板状のコンクリートに多くの鉄筋が等間隔で埋め込まれているが、これについては文献値が無いためモデル化を行わなかった。したがって、天井遮へいが

有る場合の解析結果については、実際の測定結果との間にこのモデル化に基づく誤差が生ずることに留意する必要がある。

また線源データについては、Co-60線源を1.173 MeV又は1.333MeVの光子を等確率で放出する固定等方点線源としてモデル化した。

### 3. スカイシャイン線量計算方法

EGS5, MVP2, MCNP5はいずれも連続エネルギーモンテカルロ法に基づく計算コードであり、物質中の光子輸送は次の(時間に独立な)ボルツマン輸送方程式で記述される。

$$\vec{\Omega} \cdot \vec{\nabla} \Phi(\vec{r}, E, \vec{\Omega}) + \Sigma_t(\vec{r}, E) \Phi(\vec{r}, E, \vec{\Omega}) = \int d\vec{\Omega}' \int dE' \Sigma_s(\vec{r}, E' \rightarrow E, \vec{\Omega}' \rightarrow \vec{\Omega}) \Phi(\vec{r}, E', \vec{\Omega}') + S(\vec{r}, E, \vec{\Omega})$$

表2 物質組成

原子番号	元素記号	原子量 (g/mol)	原子個数密度 (10 <sup>24</sup> /cm <sup>3</sup> )			
			空気	土壌	コンクリート ρ = 2.13g/cm <sup>3</sup>	コンクリート ρ = 2.30g/cm <sup>3</sup>
1	H	1.00794	7.1991E-09	9.7700E-03	5.2921E-03	5.7167E-03
6	C	12.0107	7.5847E-09			
7	N	14.0067	3.9099E-05			
8	O	15.9994	1.0538E-05	3.4800E-02	4.0666E-02	4.3929E-02
12	Mg	24.3050			6.0672E-05	6.5540E-05
13	Al	26.981538		4.8800E-03	2.1113E-04	2.2807E-04
14	Si	28.0855		1.1600E-02	1.7626E-02	1.9040E-02
16	S	32.065			2.7994E-05	3.0240E-05
20	Ca	40.078			2.1978E-03	2.3741E-03
26	Fe	55.845			6.2867E-04	6.7911E-04

ここで、 $\Phi$ は光子束、 $\Sigma_t$ は全断面積、 $\Sigma_s$ は散乱断面積、 $S$ は外部線源項、 $\vec{r}$ は空間座標、 $E$ はエネルギー、 $\vec{\Omega}$ は角度を示す変数である。

光子と物質の相互作用についての情報は断面積データ  $\Sigma_t$ 、 $\Sigma_s$ に含まれている。この断面積データは各コードによって異なるものが用いられている。EGS5 の標準の光子断面積データは PHOTX (DLC-136) である<sup>(2)</sup>。MVP2 の光子断面積ライブラリーは、MCNP 用光子断面積データファイル MCPLIB02 から作成されたものである<sup>(3)</sup>。また、MCNP5 の標準の光子断面積ライブラリーは MCPLIB04 である<sup>(4)</sup>。

連続エネルギーモンテカルロ法は上記のボルツマン輸送方程式を、乱数を用いた統計的手法により解く。このため、決定論的手法の場合に生ずるエネルギー分割や幾何形状の分割に伴う近似誤差を回避できる利点がある一方、モンテカルロ計算によって得られた結果は常に統計的不確定性を伴う。特に、スカイシャイン計算や遮へい計算において十分な統計量を現実的な計算時間（ヒストリー数）で得るためには、統計精度を向上させる分散低減法の適切な設定や、求めようとする物理量に応じた適切なエスティメータ（評価法）の設定が重要である。以下、エスティメータ設定の基礎となる線量計算方法について述べる。

今回、測定値との比較のために計算する量は照射線量である。照射線量は、検出器領域で光子により発生した電子が空気との衝突損失により作る正負いずれかのイオンの総電荷量を当該領域の質量で除した量であり、空気の衝突カーマ  $K_c$  を用いて (1) 式のように表される<sup>(10)</sup>。このベンチマーク実験のように、大きな空気の体系中では検出器領域周辺で荷電粒子平衡が成立していると考えられるので、2次電子が検出器領域で空気に付与するエネルギーを集計することにより衝突カーマや照射線量を求めることができる。しかし、体系が大きいかつ対象が空気であるという同じ理由から、この方法では計算効率が悪く統計誤差が低減しない。そこで、質量エネルギー吸収係数を用いて計算するのが現実的である。空気衝突カーマは、(2) 式のように、光子のエネルギーフルエンスに質量エネルギー吸収係数を乗ずることにより計算することができる。

### 照射線量計算

$$X = \frac{e}{W}(1-g)K = \frac{e}{W}K_c \quad [\text{C/kg}]$$

$$= \frac{1}{2.58 \times 10^{-4}} \times \frac{e}{W}K_c \quad [\text{R}] \quad (1)$$

$$K_c = \mu_{en}/\rho \times h\nu \times \Phi \quad [\text{MeV/g}]$$

$$= 1.602 \times 10^{-10} \times \mu_{en}/\rho \times h\nu \times \Phi \quad [\text{J/kg}] \quad (2)$$

ここで、

$X$	照射線量 [C/kg]
$K$	空気カーマ [J/kg]
$K_c$	空気衝突カーマ [J/kg]
$g$	荷電粒子による制動放射線の割合
$e$	素電荷 [C]
$W$	電子に対する空気の W 値 [J]
$\mu_{en}/\rho$	質量エネルギー吸収係数 [m <sup>2</sup> /kg]
$h\nu$	光子エネルギー [J]
$\Phi$	光子束 [m <sup>-2</sup> ]

以下の計算で用いる質量エネルギー吸収係数<sup>(11)</sup>を表3中央欄に示す。

EGS5、MVP2、MCNP5 による線量計算は、共通して上記の方法を用いて行う。以下では、各コードの具体的なエスティメータ設定法や用いる分散低減法の設定法について記す。

## 3.1 EGS コード

### (1) エスティメータ

EGS5 ではユーザーが評価しようとする物理量を収集するためのサブルーチン AUSGAB を作成する必要がある<sup>(2)</sup>。今回の計算では照射線量の評価のために飛程長評価法に基づいた AUSGAB を以下のように作成した<sup>(12)</sup>。

まず、検出器領域としては、計算の効率化のために問題が軸対象性を持つことを考慮して、2m × 2m の正方形を断面に持つリング状の領域に設定した。照射線量はこの領域での平均値を求める。そのため領域中での光子の飛程長  $l$  を使用して、検出器中で光子が移動するごとに  $\mu_{en}/\rho \times h\nu \times l$  を集計し、検出領域の体積で割ることにより  $K_c$  を求めた。ここで、 $\mu_{en}/\rho$  はエネルギー  $h\nu$  対応する質量エネルギー吸収係数であり、表3中央欄のデータから log-log 補間により求めた。

表3 換算係数

光子エネルギー $h\nu$ (MeV)	質量エネルギー 吸収係数 $\mu_{en}/\rho$ ( $\text{cm}^2/\text{g}$ )	照射線量への 換算係数 ( $\text{nR}\cdot\text{cm}^2$ )
0.01	4.742	0.86621
0.015	1.334	0.36552
0.02	0.5389	0.19688
0.03	0.1537	0.08423
0.04	0.06833	0.04993
0.05	0.04098	0.03743
0.06	0.03041	0.03333
0.08	0.02407	0.03517
0.10	0.02325	0.04247
0.15	0.02496	0.06839
0.20	0.02672	0.09762
0.30	0.02872	0.15739
0.40	0.02949	0.21548
0.50	0.02966	0.27090
0.60	0.02953	0.32365
0.80	0.02882	0.42116
1.00	0.02789	0.50946
1.50	0.02547	0.69788
2.00	0.02345	0.85671
3.00	0.02057	1.12724
4.00	0.01870	1.36636
5.00	0.01740	1.58921
6.00	0.01647	1.80513
8.00	0.01525	2.22855
10.00	0.01450	2.64869

## (2) 分散低減法

EGS5 コードは、importance sampling 等の分散低減法をユーザーが組み込めるようになっているが、今回の計算では分散低減法は使用していない。

## 3.2 MVP コード

### (1) エスティメータ

MVP2 は光子束を評価するためのエスティメータとして、衝突評価法、飛程長評価法、点検出器評価法、面検出器評価法が利用できる<sup>(3)</sup>。今回は EGS5 での計算と同様の検出器領域を設定して飛程長評価法で光子束を求めた。

照射線量 [R] は光子束を基に換算係数

$$\frac{1}{2.58 \times 10^{-4}} \times \frac{e}{W} \times 1.602 \times 10^{-10} \times \mu_{en}/\rho \times h\nu$$

を乗ずることにより求められる。この換算係数の値を表3右欄に示す。MVP2 でこの換算係数をレスポンス関数として指定するには、エネルギー群依存で与える方法と連続エネルギー形式で与える方法とがある<sup>(3)</sup>。線量を正確に計算するためには連続エネルギー形式が望ましいが、この方式でレスポンス関数を指定するためには、ドシメトリーデータ形式のファイルを用いる必要がある。今回は両方の方法で計算を行った。エネルギー群依存で与える方法では、多群計算による誤差が生じる可能性はあるが、表3右欄の照射線量への換算係数のテーブルを直接用いてレスポンス関数を指定した。また、連続エネルギー形式で与える方法では、テーブルデータから MVP コード用のドシメトリーライブラリを作成するツールを別途用意して<sup>(14)</sup>、同じ表3右欄のテーブルから、ドシメトリーデータファイルを作成した。

### (2) 分散低減法

MVP2 コードはロシアン・ルーレット、インポートランス、ウェイト・ウィンドウ、パス・ストレッチの4つの分散低減法を利用することができる<sup>(3)</sup>。今回は遮へい計算で用いられることの多いウェイト・ウィンドウを用いた。ウェイト・ウィンドウ・パラメータの設定のために、コンクリート遮へい体部分は 2cm、空気層は 100m 幅に分割した。なお MVP2 ではエネルギーに依存してパラメータの設定が可能であるが、今回はこの機能は利用していない。

## 3.3 MCNP コード

### (1) エスティメータ

MCNP5 には豊富なエスティメータが用意されている。今回は、軸対象性を持つスカイシャイン計算に有効なリングディテクタを用いた。なお、除外半径は 25cm とした。

線量換算は表3中央欄の質量エネルギー吸収係数を DE カード (Dose Energy Card) と DF カード (Dose Function Card) を用いて指定した。MCNP5 は標準で log-log 補間を行う<sup>(4)</sup>。

### (2) 分散低減法

MVP2 の計算と同様、ウェイト・ウィンドウを用いた。ウェイト・ウィンドウ・パラメータの設定も MVP2 の設定と同様にした。

### 4. ベンチマーク実験解析結果の比較

2節で説明したベンチマーク体系のモデル化, 3節で説明した線量計算方法を用いて, EGS5, MVP2, MCNP5による解析を行い, これらの計算結果を比較した. 各コードの計算で用いたエスティメータ, 分散低減法をまとめて表4に示す.

表4 計算条件のまとめ

コード	エスティメータ	分散低減法
EGS	飛程長	無し
MVP	飛程長	ウェイト・ウィンドウ
MCNP	リングディテクタ	ウェイト・ウィンドウ

#### 4.1 線量計算結果の比較

3つのコードの計算結果とそれらの実験値に対する比 (C/E 値) を以下に示す. なお, ここでの MVP2 計算値は線量換算を多群形式で与えて求めたものである.

##### (1) 天井遮へい無しの場合

天井遮へいが無い場合の計算結果を図4~5に示

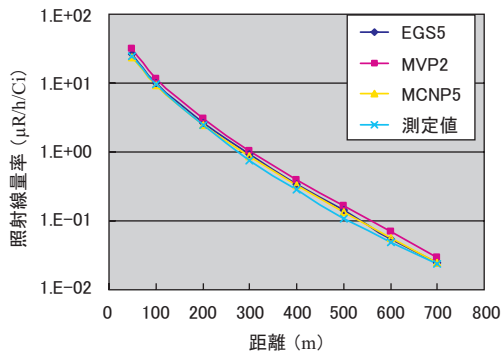


図4 天井遮へい無し 照射線量

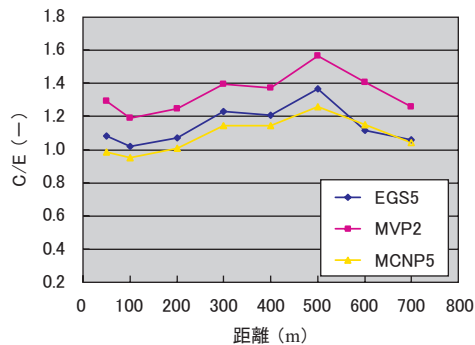


図5 天井遮へい無し C/E 値

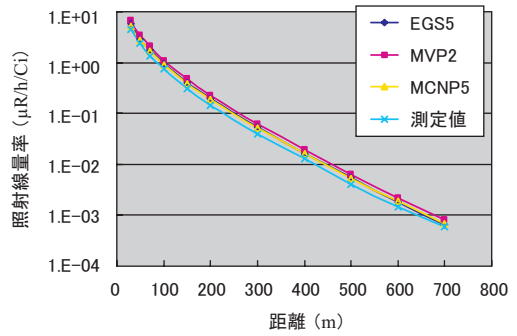


図6 厚さ21cm 密度2.13g/cm³ 照射線量

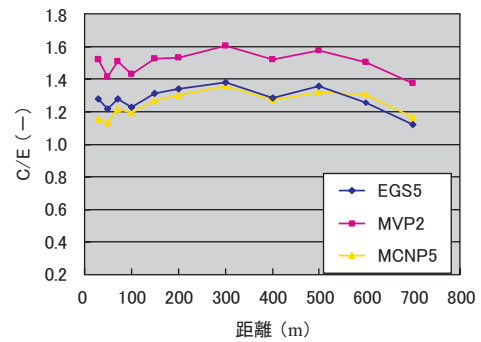


図7 厚さ21cm 密度2.13g/cm³ C/E 値

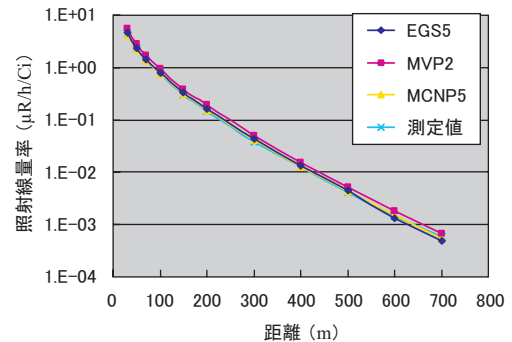


図8 厚さ21cm 密度2.30g/cm³ 照射線量

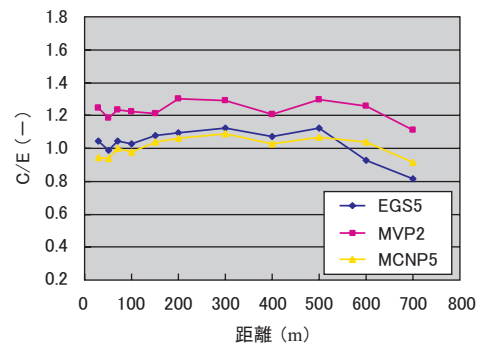


図9 厚さ21cm 密度2.30g/cm³ C/E 値

す。EGS5ではC/E値が1.02~1.37(平均1.15), MCNP5ではC/E値が0.95~1.26(平均1.09)であった。一方, MVP2ではC/E値が1.19~1.56(平均1.35)であった。EGS5, MCNP5の計算結果と比べると, どの測定地点でも約2割程度大きな計算結果となっている。

(2) 天井遮へいの厚さ21cmの場合

天井遮へいの厚さが21cmで, コンクリート密度を2.13g/cm<sup>3</sup>としたケースの計算結果を図6~7に示す。EGS5ではC/E値が1.12~1.38(平均1.28), MCNP5ではC/E値が1.13~1.35(平均1.24)であった。また, MVP2ではC/E値が1.37~1.60(平均1.50)であった。コンクリート密度を2.30g/cm<sup>3</sup>としたケースの計算結果を図8~9に示す。EGS5ではC/E値が0.82~1.12(平均1.03), MCNP5ではC/E値が0.91~1.09(平均1.01)であった。また, MVP2ではC/E値が1.11~1.30(平均1.23)であった。

(3) 天井遮へい42.8cmの場合

天井遮へいの厚さが42.8cmで, コンクリート密度を2.13g/cm<sup>3</sup>としたケースの計算結果を図10~11

に示す。EGS5ではC/E値が1.31~1.60(平均1.43), MCNP5ではC/E値が1.28~1.50(平均1.38)であった。また, MVP2ではC/E値が1.47~1.74(平均1.65)であった。コンクリート密度を2.30g/cm<sup>3</sup>としたケースの計算結果を図12~13に示す。EGS5ではC/E値が0.90~1.01(平均0.94), MCNP5ではC/E値が0.86~1.00(平均0.93)であった。また, MVP2ではC/E値が1.00~1.17(平均1.08)であった。

(4) 考察

各コードの計算結果を比較すると, 何れのケースでもEGS5とMCNP5の計算値はほぼ一致した。これに対して, MVP2の計算値はそれらに比べ約2割程度大きい結果となった。これはMVP2の線量計算で, 換算係数を多群形式で与えたことが原因と推定される。

実験値との比較では, 天井遮へい無しの場合, EGS5, MCNP5の計算結果は実験値をよく再現することができた。一方, 天井遮へい21cm及び42.8cmの場合は, コンクリート密度をNasonらの文献値<sup>(5)</sup>の2.13g/cm<sup>3</sup>としたケースで計算値は実験値を過大

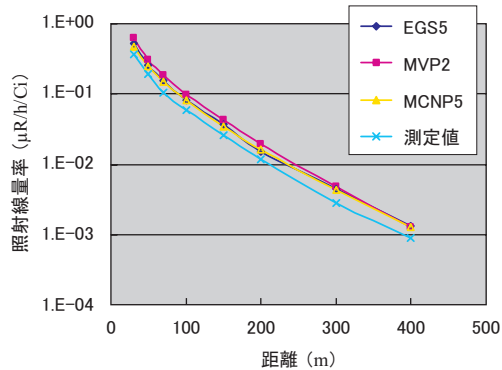


図10 厚さ42.8cm 密度2.13g/cm<sup>3</sup> 照射線量

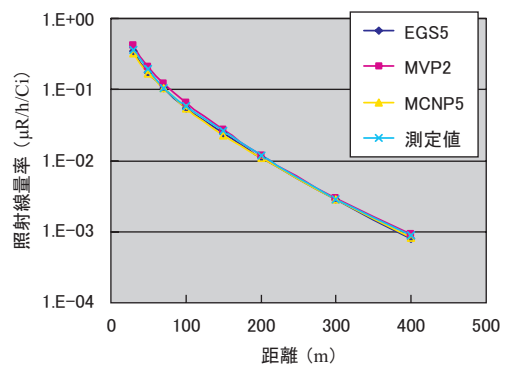


図12 厚さ42.8cm 密度2.30g/cm<sup>3</sup> 照射線量

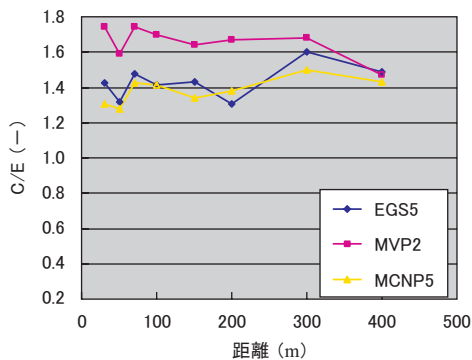


図11 厚さ42.8cm 密度2.13g/cm<sup>3</sup> C/E値

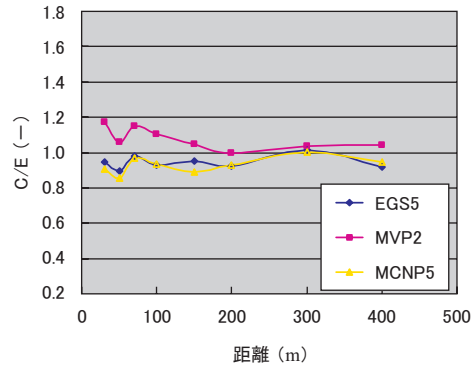


図13 厚さ42.8cm 密度2.30g/cm<sup>3</sup> C/E値

評価した。とくに遮へいの厚い方が過大評価の程度が大きくなっており、天井遮へい中の鉄筋をモデル化していないことがこの過大評価の原因と考えられる。このことはコンクリート密度を  $2.30\text{g/cm}^3$  としたケースでは、計算値は実験値に近い値となったことから裏付けられる。

## 4.2 光子スペクトル計算結果の比較

MVP2 による線量計算の誤差の原因を特定するため、EGS5, MVP2, MCNP5 により光子スペクトルを計算し、これらの計算結果に差異が無いか確かめた。

計算対象としたのは、天井遮へい  $21\text{cm}$ 、コンクリート密度  $2.30\text{g/cm}^3$  のケースである。エネルギービン  $\Delta = 0.025\text{MeV}$  毎に 1 線源光子あたりの粒子フルエンスを計算した。

図 14~16 に 30m 地点、50m 地点、70m 地点での計算結果を示す。ヒストリー数は EGS5 が 10,000,000, MVP2 が 100,000,000, 及び MCNP5

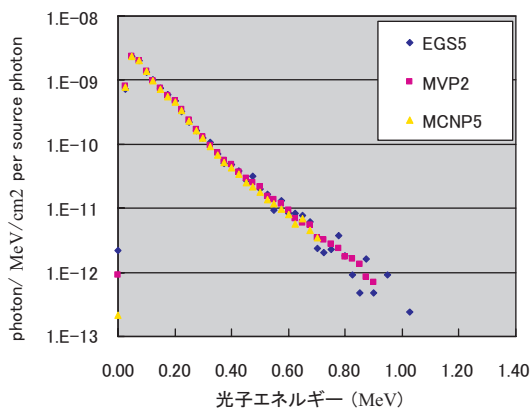


図 14 光子スペクトル 30m 地点

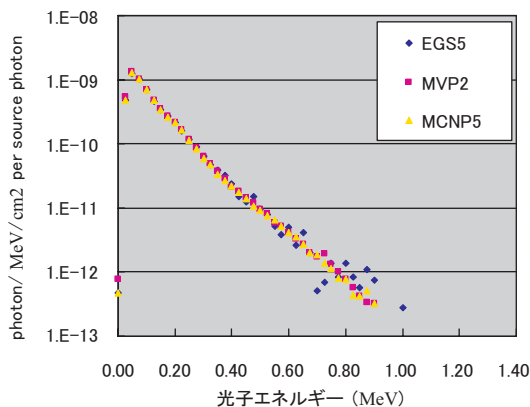


図 15 光子スペクトル 50m 地点

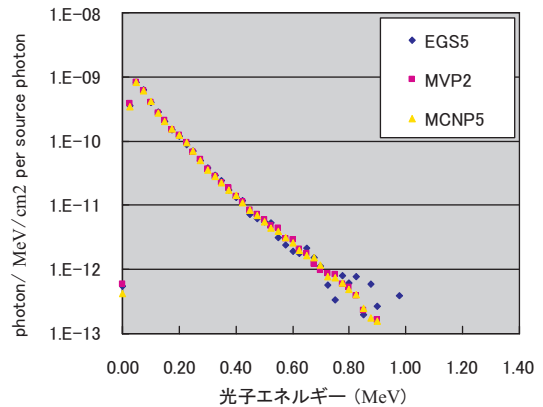


図 16 光子スペクトル 70m 地点

が 500,000 である。EGS5 の計算はヒストリー数が少なく統計誤差が大きくなっているが、光子スペクトルは EGS5, MVP2, MCNP5 とでよく一致していることがわかる。このことは、MVP2 による線量計算の誤差の原因が換算係数を多群形式で与えたことにあるとの推定を裏付ける。

## 4.3 MVP ドシメトリー計算

4.1 節、4.2 節から、MVP2 コードで線量計算を多群形式で行うと本体系の場合約 2 割程度の誤差が生じることが示唆された。ここでは、MVP2 でドシメトリー計算によって連続エネルギー的な線量計算を行い、EGS5, MCNP5 の計算結果と比較した。

現在、MVP2 コードにおいてレスポンス関数を連続エネルギー形式で指定するには、そのレスポンスデータをドシメトリーデータ形式で用意しなければならない<sup>(3)</sup>。このため、表 3 右欄に示す 25 のエネルギー点で定義された換算係数を基に、対数中点において線形近似値と log-log 内挿値とが 0.05% の精度で一致するようにエネルギー点を補間し、これから MVP 用のドシメトリーデータファイルを作成した<sup>(4)</sup>。

作成したファイルを MVP のドシメトリーインデックスファイルに登録し線量計算を行った。なお、エスティメータ等の他の計算条件は変更しなかった。図 17~20 及び表 5 に計算結果を示す。多群計算を行った場合と比較して MVP2 の計算値は EGS5, MCNP5 の計算値に近づき、これら 3 コードの計算値はほぼ一致していることが確認できた。

MVP2 コードは、現在、線量換算係数のテーブルデータからポイントワイズレスポンス関数を作成し



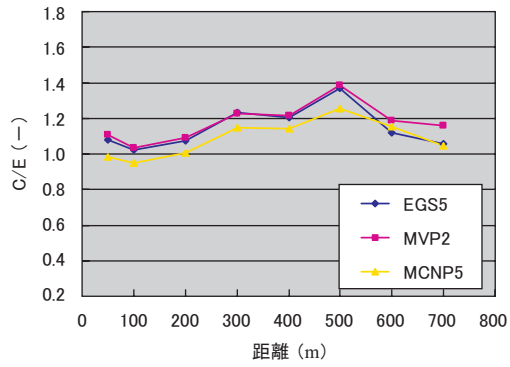


図17 天井遮へい無し

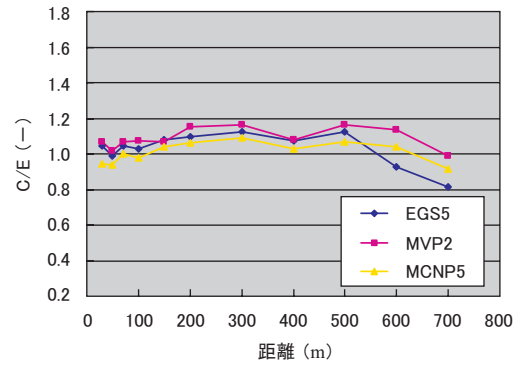


図19 厚さ21cm 密度2.30g/cm³

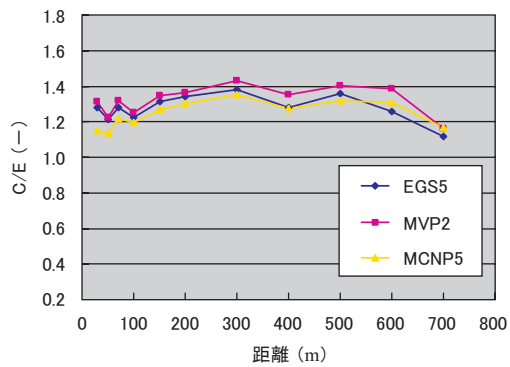


図18 厚さ21cm 密度2.13g/cm³

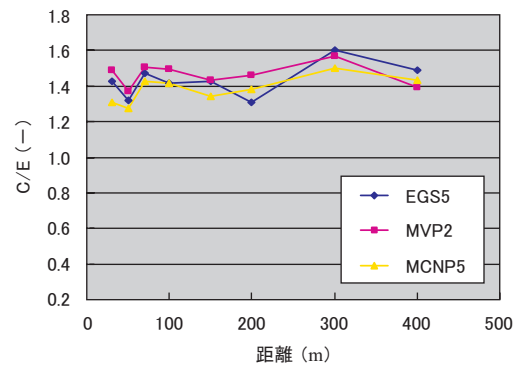


図20 厚さ42.8cm 密度2.13g/cm³

表5 計算結果 (天井厚さ21cm, コンクリート密度2.30g/cm³の場合)

距離	測定値	計算値								
		EGS5			MVP2			MCNP5		
		TLE, 分散低減無, n=50,000,000	TLE, 分散低減 WW, n=5,000,000	RDE, 分散低減 WW, n=500,000	TLE, 分散低減無, n=50,000,000	TLE, 分散低減 WW, n=5,000,000	RDE, 分散低減 WW, n=500,000	TLE, 分散低減無, n=50,000,000	TLE, 分散低減 WW, n=5,000,000	RDE, 分散低減 WW, n=500,000
m	μR/h/Ci	μR/h/Ci	FSD	C/E	μR/h/Ci	FSD	C/E	μR/h/Ci	FSD	C/E
30	4.48	4.69	0.004	1.046	4.77	0.016	1.066	4.24	0.004	0.946
50	2.39	2.36	0.004	0.989	2.43	0.018	1.019	2.24	0.005	0.938
70	1.36	1.42	0.005	1.046	1.45	0.016	1.069	1.36	0.006	1.002
100	7.56E-1	7.75E-1	0.005	1.026	8.11E-1	0.017	1.072	7.41E-1	0.005	0.980
150	3.09E-1	3.33E-1	0.007	1.078	3.31E-1	0.017	1.070	3.21E-1	0.008	1.040
200	1.46E-1	1.60E-1	0.008	1.097	1.68E-1	0.019	1.153	1.55E-1	0.008	1.061
300	3.87E-2	4.35E-2	0.013	1.125	4.50E-2	0.020	1.162	4.22E-2	0.009	1.091
400	1.27E-2	1.36E-2	0.021	1.071	1.37E-2	0.022	1.081	1.31E-2	0.009	1.028
500	4.07E-3	4.57E-3	0.035	1.123	4.73E-3	0.027	1.163	4.34E-3	0.012	1.066
600	1.45E-3	1.35E-3	0.053	0.928	1.64E-3	0.030	1.134	1.51E-3	0.012	1.041
700	5.91E-4	4.82E-4	0.083	0.816	5.86E-4	0.034	0.991	5.40E-4	0.014	0.914

(凡例) TLE：飛行長エスティメータ, RDE：リングディテクタ・エスティメータ, WW：ウェイト・ウィンドウ, n：ヒストリー数, FSD：相対標準偏差

て連続エネルギー的な計算をする機能を備えていない<sup>(14)</sup>。しかしながら、上述のように、ドシメトリー計算によって連続エネルギー的な線量計算を行えば、EGS5 や MCNP5 による線量計算結果と一致する。

## 5. まとめ

本研究では連続エネルギーモンテカルロ法の代表的コード EGS5, MVP2, MCNP5 を用いて、カンザス州立大学スカイシャイン実験の実験解析を行い、計算値同士および、実験値との比較を通して、各コードのガンマ線スカイシャイン線量の評価性能について比較検討した。その結果、以下の知見が得られた。

- (1) モンテカルロ法によるガンマ線スカイシャイン線量計算には、質量エネルギー吸収係数を換算係数として用いる方法が有効であり、本実験体系の場合、分散低減法を用いなくとも 50,000,000 ヒストリー程度で線量評価が可能であった。(表5参照)
- (2) EGS5, MVP2, MCNP5 による光子スペクトル計算結果は互いによく一致した。光子輸送に関してこれらのコードは同様の計算結果を与えるものと考えられる。
- (3) EGS5, MCNP5 による線量計算結果は良く一致し、ともに実験値を精度良く再現した。
- (4) MVP2 による計算で線量換算を多群形式で与えると、本体系の場合、約 2 割程度の誤差が生ずることが確認された。しかし、ドシメトリーファイルを用いた線量計算を行えば、EGS5, MCNP5 による線量計算結果や実験値によく一致した。

以上より、線量換算係数を用いた計算によって EGS5, MVP2, MCNP5 はガンマ線スカイシャイン線量を同程度に精度良く評価できることを確認した。ただし、MVP2 の場合は線量換算係数をドシメトリーデータに変換し線量計算する方法が推奨される。

## 謝辞

本研究にあたり、高エネルギー加速器研究機構の平山英夫教授、波戸芳仁氏にはスカイシャイン計算及び EGS コードについて御教授頂きました。特に平山教授にはスカイシャイン計算のための EGS ユーザーコードを作成して頂きました。また、日本原子

力機構原子力基礎工学部門の長家康展氏には MVP コードについて御教授頂き、線量計算のための MVP 用ドシメトリーファイルを作成して頂きました。ここに厚く謝意を表します。

## 文献

- (1) 佐々木泰裕, 吉田至孝, 他, “ガンマ線スカイシャイン線量高速計算法の開発,” INSS JOURNAL, Vol.14, p.384 (2007).
- (2) Hideo Hirayama, Yoshihito Namito, Alex F. Bielajew, Scott J. Wildermann and Walter R. Nelson, “The EGS5 Code System,” SLAC-R-730, 2005 and KEK Report 2005-8, (2005).
- (3) 長家康展・奥村啓介・森貴正・中川正幸, 「MVP/GMVP Version2 連続エネルギー法及び多群法に基づく汎用中性子・光子輸送計算モンテカルロコード」, 日本原子力研究開発機構, (2006).
- (4) X-5 Monte Carlo Team, “MCNP – A General Monte Carlo N-Particle Transport Code, Version 5,” LA-UR-03-1987 (2003).
- (5) R. R. Nason, J. K. Shultis, R. E. Faw, and C. E. Clifford, “A Benchmark Gamma-Ray Skyshine Experiment,” Nuclear Science and Engineering, 79, pp.404-416, (1981).
- (6) R. H. Olsher, H. H. Hsu, and W. F. Harvey, “Benchmarking the MCNP Monte Carlo Code with a Photon Skyshine Experiment,” Nuclear Science and Engineering, 114, pp.219-226, (1993).
- (7) (財) 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, 「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」, 昭和 53 年 3 月.
- (8) 日本原子力学会 (編), 「ガンマ線遮蔽設計ハンドブック」, 1988 年 1 月.
- (9) 日本原子力学会 (編), 「モンテカルロ計算ハンドブック」, 2006 年 9 月.
- (10) 平山英夫, 「空気カーマ, 空気衝突カーマ, 空気吸収線量, 照射線量と実効線量」, <http://rcwww.kek.jp/research/shield/kerma.pdf> (2003).
- (11) J. H. Hubbell and S. M. Seltzer, “Tables of

X-Ray Mass Attenuation Coefficients and Mass Energy-Absorption Coefficients 1 keV to 20 MeV for Elements  $Z=1$  to 92 and 48 Additional Substances of Dosimetric Interest,” *NSTIR* 5632, (1995).

- (12) 私信：平山英夫, 「スカイシャイン計算について」, 2008年12月14日
- (13) Hideo Hirayama and Yoshihito Namito, “Lecture Notes of EGS4 Course at KEK (Japan-Part),” KEK Internal 99-5, (2003).
- (14) 私信：長家康展, 「テーブルデータからのMVPコード用ドシメトリライブラリ作成とその利用について」, 2009年2月27日.