

ガンマ線スカイシャイン高速計算プログラム (FSKY4C) の作成

Programming of high speed calculation method for gamma-ray sky-shine

吉田 至孝 (Yoshitaka Yoshida)*¹ 清水 彰直 (Akinao Shimizu)*²

要約 加圧水型軽水炉の安全評価では、格納容器を線源とするガンマ線スカイシャインの計算を行う。安全評価で用いられている1回散乱点減衰核法は、天井を透過するガンマ線の散乱効果を適切に考慮できないため、距離による減衰に対し実際とは異なる傾向を予測し、空気のパイルアップ係数で補正を行った場合、線源から遠い場所での予測誤差が大きくなる。そこで、本研究では、距離による減衰に対して予測精度を上げて、原子力防災対応に活用できるよう、原子炉格納容器を線源とするガンマ線スカイシャイン高速計算プログラム (FSKY4C) を作成した。FSKY4C および1回散乱点減衰核法プログラム G33-IE を用いて、カンザス州立大学で実施されたガンマ線スカイシャイン測定実験の再現計算を実施するとともに、実機原子炉格納容器体系での比較計算を実施した。

その結果、FSKY4C による計算値は、カンザス州立大学の測定値よりやや大きめの値であるが、ファクタ2の中に納まっており、距離に対する減衰傾向は実測値とよく一致した。実機原子炉格納容器体系を対象とした FSKY4C と G33-IE の計算結果は、円筒型遮へいを持つ鋼製格納容器プラントでは比較的良い一致を示すものの、ドーム型遮へいを持つ鋼製格納容器プラントおよびコンクリート製格納容器プラントでは、線源点に近い場所を除き、G33-IE による計算値は FSKY4C による計算値より1桁程度大きくなった。

キーワード ガンマ線、スカイシャイン、コンカルビーム応答関数、多重層遮へい、原子炉格納容器

Abstract In the safety evaluation of pressurized water reactors in Japan, the gamma-ray sky-shine is calculated as a radiation source from the reactor containment vessel. It is known that the once-scattered point kernel attenuation method used in safety evaluations predicts a different tendency from the actual attenuation depending on distance generally, because this method do not appropriately consider the effect of scattering of gamma-rays penetrating the ceiling of the vessel. In addition, the prediction error in this method increased in distance from the radiation source even if a correction is employed using the buildup factor of air. In this study, a high speed calculation method (FSKY4C) was programmed for nuclear emergency preparedness to calculate the gamma-ray sky-shine as a radiation source from the reactor containment vessel. Calculation was carried out using the FSKY4C and the G33-IE program with once-scattered point kernel attenuation method, and the prediction by these methods were compared with the gamma-ray sky-shine experiment done at Kansas State University.

The calculation results by FSKY4C were a little larger than measurements made at Kansas State University. Prediction accuracy were within a factor of 2, however attenuation tendency with distance corresponded well. For the reactor containment vessel of the commercial plant, the calculation results by FSKY4C and G33-IE shows good agreement when a steel containment with cylindrical shield was assumed. When the steel containment with a dome shield and concrete containment were assumed, results by G33-IE were about one order of magnitude bigger than those by FSKY4C except near the source point.

Keywords gamma-ray, sky-shine, conical beam response factor, multi-shield, reactor containment vessel

1. 緒言

加圧水型軽水炉 (pressurized water reactor : PWR) の安全評価において、原子炉格納容器を線源

とするガンマ線スカイシャインが評価されている。ガンマ線スカイシャインは、原子炉格納容器の天井遮へいが側壁遮へいに比べて薄い場合、上空で散乱したガンマ線が地上に降り注ぐ効果が無視できなく

* 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

なるために評価される。原子力安全システム研究所では、原子力防災対応の支援技術として従業員被ばく線量予測システムを開発^{(1)~(3)}し、その中でG33-IE^{(4) (5)}を用いて原子炉格納容器を線源とする発電所構内のスカイシャイン線量率を計算している。図1に計算結果の例を示す。

ガンマ線スカイシャインは、G33-IEをはじめとする1回散乱点減衰核法が利用されている。この手法は、点線源から放出されるガンマ線が上空で1回散乱して評価点に到達するものとして、散乱空間を積分することによりスカイシャイン線量率を計算するものである。その際、散乱点から評価点までの空間は衝突線のビルドアップを考慮することができる。カンザス州立大学ガンマ線スカイシャイン測定実験^{(6)~(8)}の天井遮へいが無い場合における測定値とG33-IEの計算値の比較結果を図2に示す。この図より、天井遮へいが無い場合は測定値と計算値が良く一致する。一方、天井遮へいがあると遮へい体透過



図1 原子力防災訓練時発電所構内放射線量率予測例 (平成20年度福井県原子力防災訓練時)

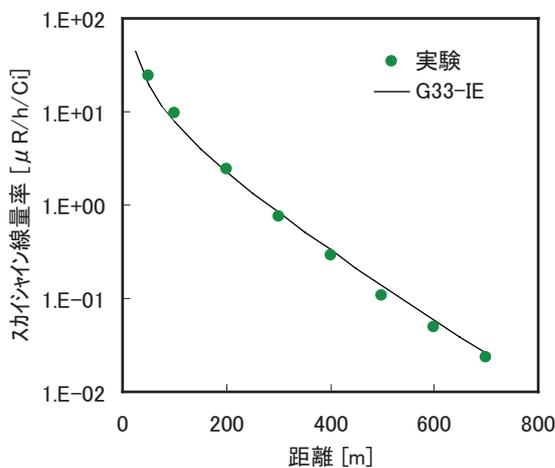


図2 天井遮へいが無い場合の測定値と計算値の比較

時にガンマ線のエネルギーと角度が変化するため、遮へい体表面におけるガンマ線束を別の方法により評価した上で、遮へい体表面からの面線源に対して計算する必要がある。ガンマ線のエネルギーと角度の変化を無視すると、図3に示すようにスカイシャイン線量率は過小評価となる。G33-IEでは、過小評価を避けるため、線源から散乱点まで、ビルドアップ係数を用いて補正する機能が組み込まれている。本機能を使用した場合、ガンマ線エネルギーと角度の変化を無視しているため、図4に示すように近点に合わせて遠点で過大評価となる。

そこで本研究では、原子力防災対応に活用できるよう、原子炉格納容器を線源とするスカイシャイン線の計算速度と計算精度を向上することを目的とし、

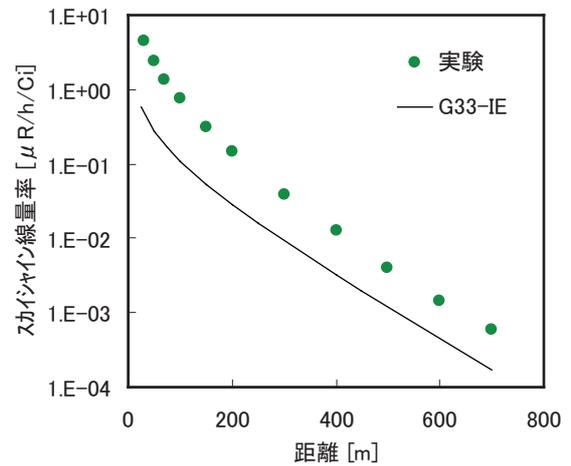


図3 天井遮へい21cmの場合の測定値と計算値の比較

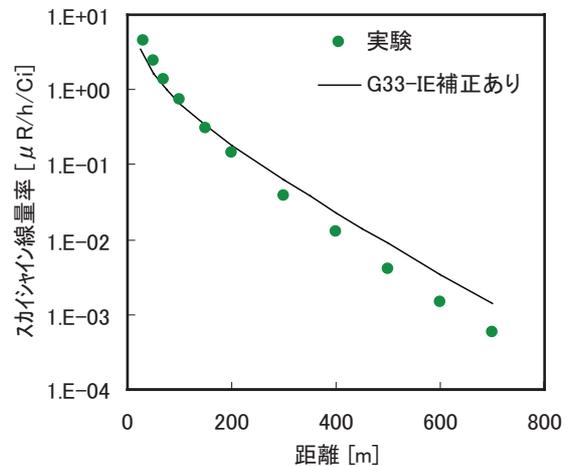


図4 G33-IEの補正機能を用いた計算結果と測定値の比較

ラインビーム応答関数法とガンマ線ビルドアップ係数の評価技術を応用して、ガンマ線スカイシャイン高速計算プログラム (FSKY4C) を作成した。

2. プログラムの概要と計算手順

本章では、詳細な計算原理は別の学術論文に譲ることとして、FSKY4C の概要と計算手順を示す。FSKY4C は、ガンマ線スカイシャイン線量の高速計算手法研究⁽⁹⁾ において1つの手法として開発されたものを改良・汎用化したもので、①遮へい体を透過するガンマ線束 (エネルギー分布) の計算、②非等方ガンマ線の大気中輸送計算の2つで構成した。遮へい体を透過する際のガンマ線束角度分布の変化は、計算結果への影響は小さいと考え無視した。

2.1 遮へい体を透過するガンマ線束の計算

本プログラムでは、遮へい体を透過したガンマ線はエネルギー分布が変化するが、角度は入射角度の余弦 ω_0 と同一と近似して計算する。その際、ガンマ線エネルギーは18群、入射角度の余弦0~1を15に分割して取り扱い、3重の遮へい体まで入射エネルギーと透過後エネルギーの変化を追跡する。エネルギー変化の追跡は、18群毎に入射エネルギー E_i に対する透過後エネルギー E_p の関数としてのビルドアップ係数 (ビルドアップ線束エネルギー分布という) を用いて、(1) 式に示す点減衰核法で解く。

$$\phi(E_p; \omega_0) = B(E_p, r_1; E_i) \phi(E_i; \omega_0) \frac{\exp(-\mu_1 r_1)}{4\pi r_1^2} K(E_p; E_i, \omega_0, Z) \quad (1)$$

ここで、 B : ビルドアップ線束エネルギー分布

ϕ : ガンマ線束 (1/s)

E_i : ガンマ線の入射エネルギー (MeV)

E_p : ガンマ線の透過後エネルギー (MeV)

ω_0 : ガンマ線入射角度の余弦

μ_1 : 天井遮へい体線減衰係数 (1/m)

r_1 : 天井遮へい体透過距離 (m)

K : エッジ効果補正係数

ビルドアップ線束エネルギー分布は、遮へい物質で満たされた無限均質体系において、ガンマ線のエ

ネルギー E_i の点等方線源から透過距離 r におけるガンマ線束エネルギー分布をもとに(2)式で定義し、SimizuらのInvariant Embedding法^{(10)~(16)}を用いて計算し、データベース化した。

$$B(E_p, r; E_i) = \frac{\phi(E_p, r; E_i)}{\phi_0(r; E_i)} \quad (2)$$

ここで、 ϕ_0 : 非衝突線のガンマ線束 (1/s)

エッジ効果補正係数 K は、ビルドアップ線束エネルギー分布が無限均質体系を前提としているため、遮へい体厚さ Z の関数で有限媒質に変換するものである。定義式は(3)式に示す。

$$K(E_p; E_i, \omega_0, Z) = \frac{\phi(E_p; E_i, \omega_0, Z)}{\phi_Z(E_p; E_i, \omega_0, Z)} \quad (3)$$

ここで、 ϕ_Z : 有限媒質におけるガンマ線束

Z : 遮へい体厚さ (m)

2.2 非等方ガンマ線の大気中輸送計算

非等方ガンマ線の大気中輸送計算は、図5に示すコニカルビームに対して点減衰核コニカルビーム応答関数法を適用して解く。ガンマ線エネルギーは11群、ガンマ線放出角度の余弦は1~-1まで30点に分割して取り扱う。点減衰核法は等方線源が前提であるため、非等方性係数 H を用いて非等方線源への変換を行う。ガンマ線スカイシャイン線量率 R は、遮へい体外表面のガンマ線束 ϕ より(4)式で求める。

$$R(x, h) = \sum_{E_p} \sum_{\omega_0} H(E_p, x, \omega_0, h) B_a(E_p, r_2) \phi(E_p, \omega_0) \frac{\exp(-\mu_2 r_2)}{4\pi r_2^2} \quad (4)$$

ここで、

R : ガンマ線スカイシャイン線量率 ($\mu\text{Sv/h}$)

H : 非等方性係数

B_a : 空気のビルドアップ係数

μ_2 : 空気の線減衰係数 (1/m)

x : 線源と評価点のX軸上の距離 (m)

r_2 : 線源から評価点までの距離 (m)

h : 線源と評価点の高さの差 (m)

非等方性係数 H は、コニカルビーム応答関数 $CBRF$ を用いて (5) 式で定義した。

$$H(E_p, x, \omega_0, h) = \frac{CBRF(E_p, x, \omega_0, h)}{\sum_{\omega_0} w(\omega_0) CBRF(E_p, x, \omega_0, h)} \quad (5)$$

ここで、 $CBRF$ ：コニカルビーム応答関数
 w ：ガンマ線入射角度分布のウェイト

コニカルビーム応答関数は、Hirayama ら⁽¹⁷⁾がモンテカルロ法で計算したラインビーム応答関数を Z 軸で回転させて円錐状のビームの応答関数にし、データベース化した。

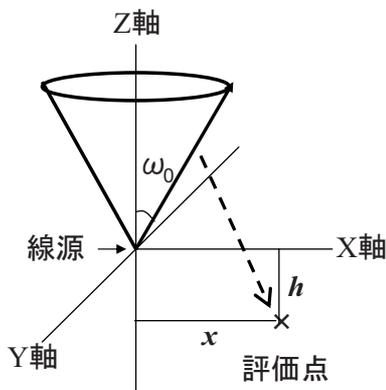


図5 コニカルビームの概念

2.3 計算手順

FSKY4C は、コマンドプロンプト上で動作するプログラムである。プログラムは、実行ファイルとデータライブラリで構成され、計算データは入力ファイルから与える。計算結果は出力ファイルおよびサマリファイルに出力される。

入力ファイルは、テキスト形式を採用し、データの書式はフリーフォーマットでコメントを追加することができる。入力ファイルの内容は、計算制御変数と測定点データ、遮へいデータ、線源データである。

(1) 計算制御変数と測定点データ

以下の計算制御変数 6 種類、測定点データ 6 種類により計算制御を行う。

ICVLAY：格納容器遮へい体系（なし～3 重層まで）

NSKYD：測定点の数（NSTEP1 + NSTEP2 + 1）
 NSRS：線源点の数（最大 10 点まで）
 ISTYPE：線源エネルギー入力形式（18 群のうち 1 群指定、18 群分布、任意入力）
 ISATP：線源の上空放射角度指定方式（角度入力、上部遮へい体から自動計算、側壁から自動計算）
 ADSTI：測定点 1 の水平距離（m）
 NSTEP1：細分区間 1 のメッシュ数
 ADSTW1：細分区間 1 のメッシュ幅（m）
 NSTEP2：細分区間 2 のメッシュ数
 ADSTW2：細分区間 2 のメッシュ幅（m）
 AHIGHT：測定点の高さ（cm）
 WANGL：線源の上空放出角度（度）
 この他の変数 NCVDT, ISINTENS（ダミー）は 0 を指定

(2) 遮へいデータ

遮へいデータは、格納容器遮へい体系（ICVLAY）で指定した数（3 重層のときは 3 セット分繰り返す）を形状、物質、寸法を 9 種類の変数で指定する。

IGTYPER：天井遮へい形状が平板かドームかを指定する。

NMATCVR：遮へい体の物質番号を指定する。整備済みの物質は以下のとおり。

- 26：鉄 101：コンクリート A
 - 82：鉛 102：コンクリート B
 - 100：水 110：コンクリート C
 - 103：空気 111：コンクリート D
- 空気の物質組成は表 1 に、コンクリート A～D の物質組成は表 2 に示す。

表 1 空気の物質組成

原子番号	元素記号	密度 ρ	0.001205	(g/cm ³)
		原子量	重量比	原子数比
7	N	14.0067	0.755	0.78428
8	O	15.9994	0.232	0.21098
18	Ar	39.948	0.013	0.00473

AMATCVR：遮へい体名称（20 文字以内）

平板形状 ドーム形状（cm）

ZSPC：天井下端高さ 球中心点高さ

ZLOR：円筒下端高さ 同左

PSPOR：天井上端高さ 球外表面までの半径

表2 コンクリートの物質組成

原子番号	元素記号	種類 密度 ρ 原子量	コンクリート A		コンクリート B		コンクリート C		コンクリート D	
			2.35g/cm ³		2.13g/cm ³		2.35g/cm ³		2.20g/cm ³	
			重量比	原子数比	原子数	原子数比	重量比	組成 g/cm ³	重量比	
1	H	1.00797	0.0056	0.1042642	5.7167E-03	0.07933	0.00600	0.0115	0.00523	
6	C	12.01100						0.0023	0.00105	
8	O	15.99940	0.4983	0.5844966	4.3929E-02	0.60959	0.50000	1.1285	0.51319	
11	Na	22.98980	0.0171	0.0139590			0.01700	0.0368	0.01673	
12	Mg	24.31200	0.0024	0.0018526	6.5540E-05	0.00091		0.005	0.00227	
13	Al	26.98150	0.0456	0.0317171	2.2807E-04	0.00316	0.04800	0.078	0.03547	
14	Si	28.08600	0.3158	0.2110168	1.9040E-02	0.26421	0.31500	0.775	0.35243	
16	Si	32.06400	0.0012	0.0007024	3.0240E-05	0.00042				
19	K	39.10200	0.0192	0.0092150			0.01900	0.0299	0.0136	
20	Ca	40.08000	0.0826	0.0386765	2.3741E-03	0.03294	0.08300	0.1	0.04548	
26	Fe	55.84700	0.0122	0.0040997	6.7911E-04	0.00942	0.01200			
28	Ni	58.69340						0.032	0.01455	

平板形状 ドーム形状 (cm)
 TSPR : 天井平板厚さ ドーム板厚さ
 RCLOR : 円筒外表面までの半径 同左
 TCLR : 円筒板厚さ 同左
 以上を遮へい体系で指定した数繰り返す。

(3) 線源データ

線源データは、線源点の数 (NSRS) で指定した数 (最大 10 個分までを繰り返す) を線源点高さに加えて、線源エネルギーの入力形式 (ISTYPE) に従い、18 群のうち 1 群指定の場合は線源エネルギーとその強度、18 群分布指定の場合は 18 群の線源強度、任意入力の場合は線源エネルギー点数、点数分の平均エネルギーとその強度を指定する。

ZSRS : 線源点高さ (cm)
 ITYPE=1 のとき
 SEDD(1) : 線源エネルギー (MeV)
 SIDD(1) : 線源強度 (1/s)
 ITYPE=2 のとき
 S18DDR (1,K) : 第 K 群 (K=1~18) の線源強度 (1/s)
 ITYPE=3 のとき
 NEGCC : 線源エネルギー数
 XAVECC (I) : 線源エネルギー I (I=1~NGCC) の平均エネルギー (MeV)
 XSIDD (I) : 線源エネルギー I (I=1~NGCC) の線源強度 (1/s)

以上を線源点の数で指定した数繰り返す。
 計算では、コマンドプロンプト上で FSKY4C を起

動すると、入力ファイル名を求めてくるので、入力ファイルが置かれているディレクトリを含めて指定

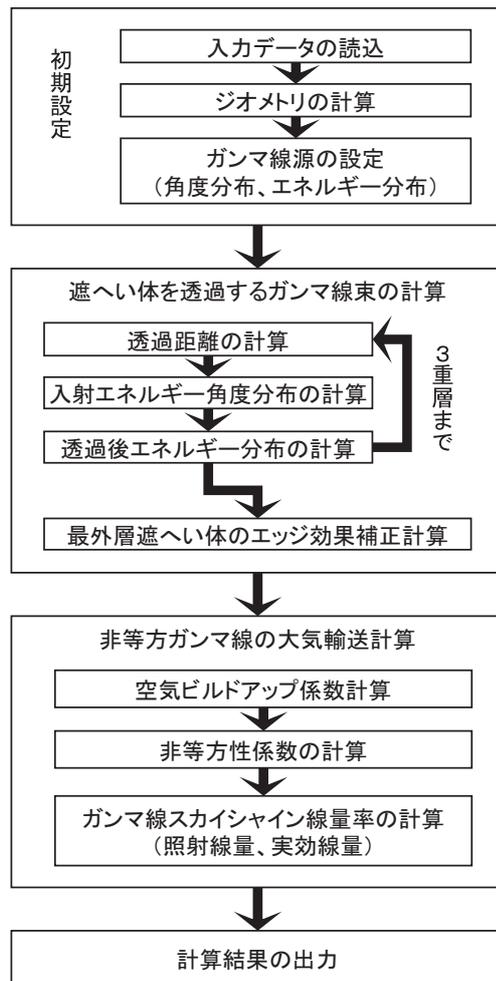


図6 計算の流れ

する。計算を実行すると図6の流れに従って処理され、結果が出力される。計算に要する時間は、一般的なパソコンで1秒未満である。

計算結果は、入力ファイル名の拡張子を .OUT に変更したものにテキスト形式で詳細に出力される。このうち、照射線量 ($\mu\text{Gy/h}$) と実効線量 ($\mu\text{Sv/h}$) は入力ファイル名の拡張子を .CSV に変更した CSV 形式で出力される。

3. 精度検証

カンザス州立大学にて実施されたガンマ線スカイシャイン測定実験の再現解析を実施し、計算精度の検証を実施した。用いた実験データは、 ^{60}Co 線源に対して天井遮へいなし、天井遮へい21cm および天井遮へい42.8cm の測定結果を単位線源あたりの放射線量率にしたものである。比較のために、G33-IE を用いて空気ビルドアップ係数で補正を実施した計算結果も合わせて示した。G33-IE の散乱空間は、上空2km までとし、ガウス分点法により12000 に分割した。

3.1 天井遮へいなし

天井遮へいがない場合は、1回散乱点減衰核積分計算法でも精度良く計算できることが示されているが、ここでは、非等方ガンマ線の大気輸送計算法の妥当性が確認できるため実施した。

計算対象の線源と遮へい体系を図7に示す。計算に用いたガンマ線源強度は1 Ci ($3.7\text{E} + 10 \text{ Bq}$) である。入力ファイルの例を図8に、測定値とFSKY4C および G33-IE の計算結果を図9に示す。この図より、FSKY4C は G33-IE の結果と良く一致し、測定値との誤差は共に平均17%、最大30%程度

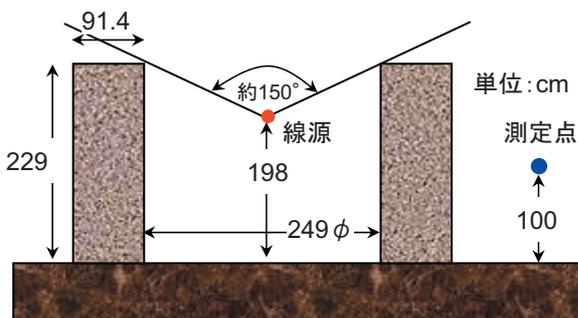


図7 天井遮へい無しの遮へい体系

```
* Title
' FSKY4 VERIFICATION 0cm
*****
*                               制御変数                               *
*****
* ICVLAY  NCVDT  NSKYD  NSRS  ISTYPE  ISATP  ISINTENS
  1      0     29     1     3         1       0
* ADSTI   NSTEP1  ADSTW1  NSTEP2  ADSTW2  AHIGHT  WANGL
  25.0   3       25.0   12       50.0   100.0   75.0
*****
*                               遮蔽データ                               *
*****
* 遮蔽1
* IGTYPYR  NMATCVR  AMATCVR  ZSPC  ZLOR  PSPOR  TSPR  RGLOR  TCLR
  0       103      "AIR"    229.0  0.0   230.0  1.0   215.9  91.4
*****
*                               線源データ                               *
*****
* 線源点 1
* ZSRS    NGECC
  198.0   2
* XAVEGC(1)  XAVEGC(2)
  1.173    1.333
* XSIDD(1)   XSIDD(2)
  3.7E+10  3.7E+10
* END
```

図8 入力ファイルの例

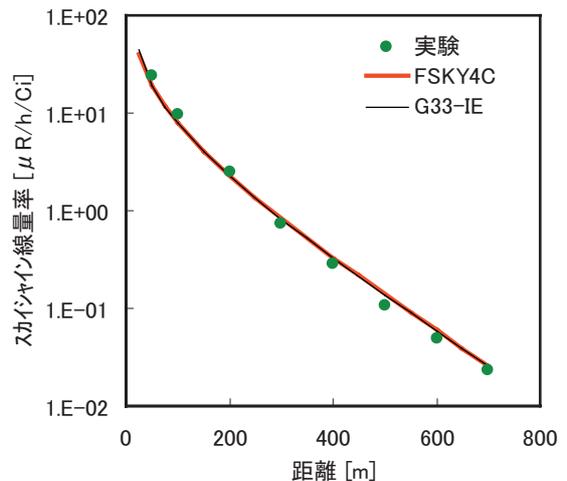


図9 天井遮へいなしの測定値と計算結果の比較

であった。

3.2 天井遮へい21cm

図10に示すような天井遮へい21cmの遮へい体系における単位線源あたりのガンマ線スカイシャイン線量率を比較した。結果を図11に示す。この図より、FSKY4Cの測定値との誤差は平均53%、最大71%程度で、距離による減衰傾向は測定値と良く一致した。G33-IEの誤差は、平均69%、最大141%で

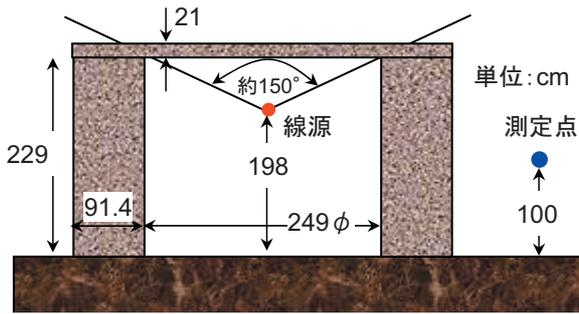


図10 天井遮へい21cmの遮へい体系

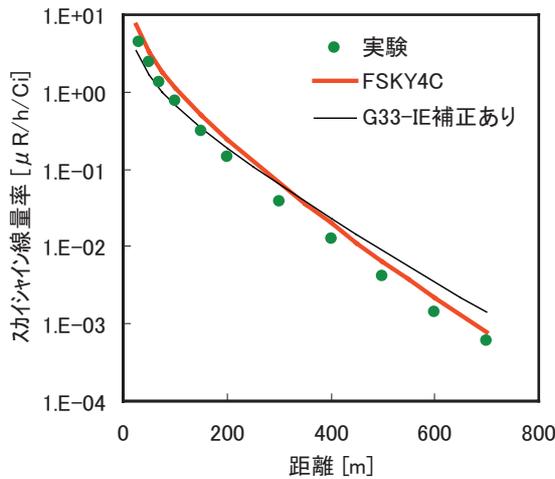


図11 天井遮へい21cmの測定値と計算結果の比較

あり、傾きが測定値と明らかに異なり距離が遠くなるに従い誤差が拡大した。

3.3 天井遮へい42.8cm

図12に示すような天井遮へい42.8cmの遮へい体系における単位線源あたりのガンマ線スカイシャイ

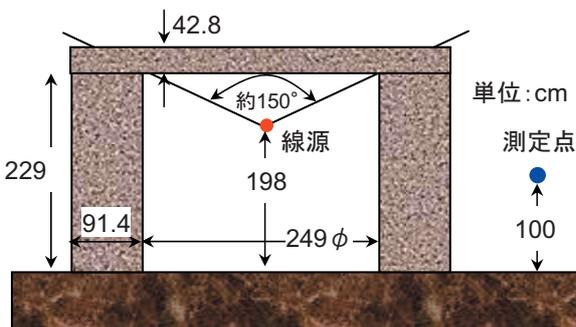


図12 天井遮へい42.8cmの遮へい体系

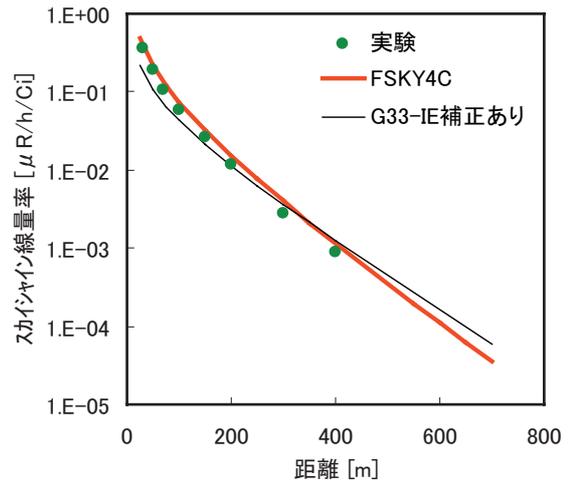


図13 天井遮へい42.8cmの測定値と計算結果の比較

ン線量率を比較した。結果を図13に示す。この図より、FSKY4Cの測定値との誤差は平均27%、最大41%程度であった。FSKY4CとG33-IEの距離による減衰傾向を測定値と比較すると、G33-IEは明らかに傾きが異なっており、FSKY4Cの計算結果は傾きが良く一致した。

4. 実機格納容器体系における計算比較

FSKY4CとG33-IEにより、実機格納容器体系における計算値を比較して、天井遮へい厚さの違いによる影響を把握した。放射線源は、設置変更許可申請書に記載されている原子炉冷却材喪失の重大事故における5群ガンマ線30日間積算線源強度を元に5群の平均ガンマ線束を算出して使用した。計算対象は、天井遮へいが薄い円筒型遮へいを持つ鋼製格納容器、中間的な厚さとなるドーム型遮へいを持つ鋼製格納容器、最も遮へいが厚いコンクリート製格納容器の3種類とした。

4.1 円筒型遮へいを持つ鋼製格納容器

円筒型遮へいを持つ鋼製格納容器プラントとして、関西電力高浜1号機を対象に計算を実施した。設置変更許可申請書⁽¹⁸⁾に記載された遮へい体系を図14に、5群ガンマ線積算線源強度を表3に示す。計算結果を図15に示す。これより、G33-IEは敷地境界付近でFSKY4Cより最大約1.7倍の値を示したが、全般的に計算結果は一致している。

表3 高浜1号機重大事故5群ガンマ線積算強度

代表エネルギー (MeV/dis)	エネルギー範囲 (MeV/dis)	原子炉格納容器内積算線源強度 (MeV)
0.4	$E \leq 0.4$	1.2×10^{22}
0.8	$0.4 < E \leq 1.0$	1.3×10^{22}
1.3	$1.0 < E \leq 1.5$	2.6×10^{21}
1.7	$1.5 < E \leq 1.8$	3.2×10^{21}
2.5	$1.8 < E$	2.2×10^{21}

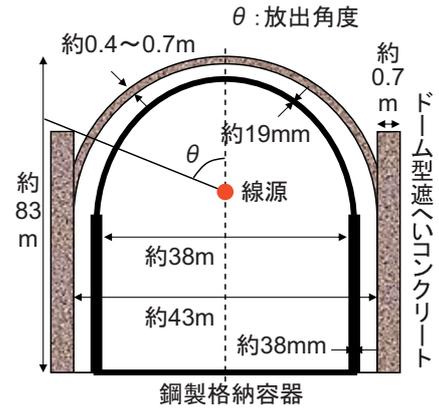


図16 ドーム型遮へいを持つ鋼製格納容器の体系

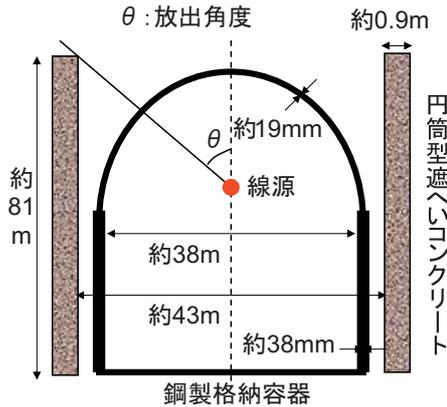


図14 円筒型遮へいを持つ鋼製格納容器の体系

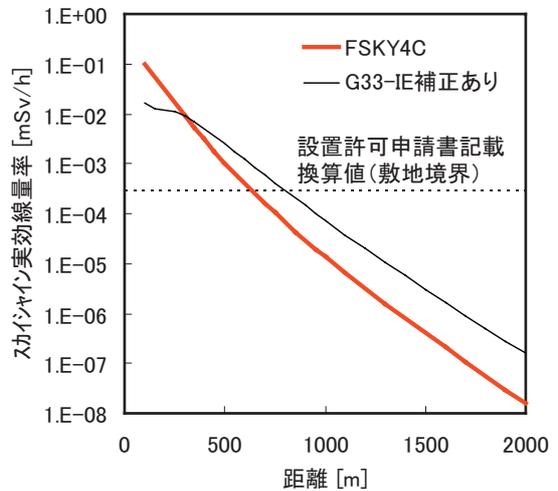


図17 ドーム型遮へいを持つ鋼製格納容器の比較

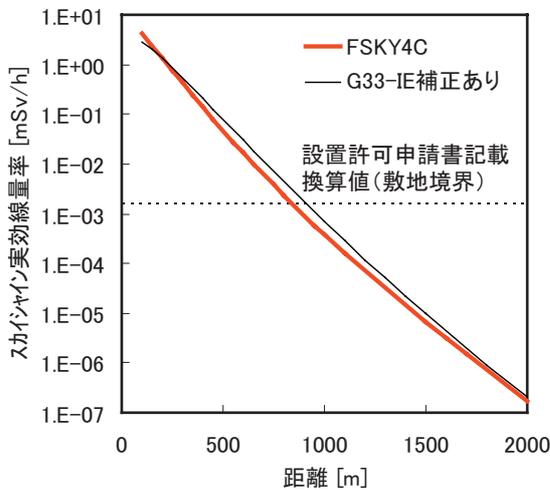


図15 円筒型遮へいを持つ鋼製格納容器の比較

表4 美浜3号機重大事故5群ガンマ線積算強度

代表エネルギー (MeV/dis)	エネルギー範囲 (MeV/dis)	原子炉格納容器内積算線源強度 (MeV)
0.4	$E \leq 0.4$	1.2×10^{22}
0.8	$0.4 < E \leq 1.0$	1.3×10^{22}
1.3	$1.0 < E \leq 1.5$	2.6×10^{21}
1.7	$1.5 < E \leq 1.8$	3.2×10^{21}
2.5	$1.8 < E$	2.2×10^{21}

4.2 ドーム型遮へいを持つ鋼製格納容器

ドーム型遮へいを持つ鋼製格納容器プラントとして、関西電力美浜3号機を対象に計算を実施した。設置変更許可申請書⁽¹⁹⁾に記載された遮へい体系を図16に、5群ガンマ線積算線源強度を表4に示す。計算結果を図17に示す。これより、線源点から

200m以下では、G33-IEがFSKY4Cより最大約1/6.5の値を示したが、これを超過すると最大約5倍の値を示した。これは、図11および図13に示したG33-IEの距離に対する減衰傾向が異なるためである。

4.3 コンクリート製格納容器

コンクリート製格納容器プラントとして、関西電力大飯3号機を対象に計算を実施した。設置変更許可申請書⁽²⁰⁾に記載された遮へい体系を図18に、5群ガンマ線積算線源強度を表5に示す。計算結果を図19に示す。線源点から100mではG33-IEが

表5 大飯3号機重大事故5群ガンマ線積算強度

代表エネルギー (MeV/dis)	エネルギー範囲 (MeV/dis)	原子炉格納容器内 積算線源強度 (MeV)
0.4	$E \leq 0.4$	1.7×10^{22}
0.8	$0.4 < E \leq 1.0$	1.8×10^{22}
1.3	$1.0 < E \leq 1.5$	3.7×10^{21}
1.7	$1.5 < E \leq 1.8$	4.5×10^{21}
2.5	$1.8 < E$	3.1×10^{21}

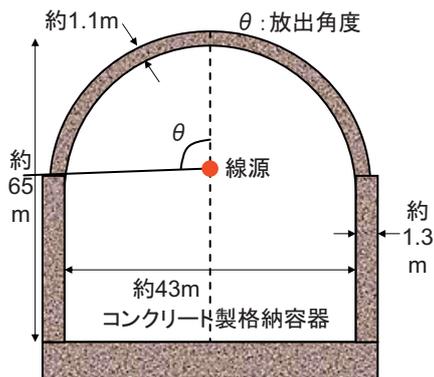


図18 コンクリート製格納容器の体系

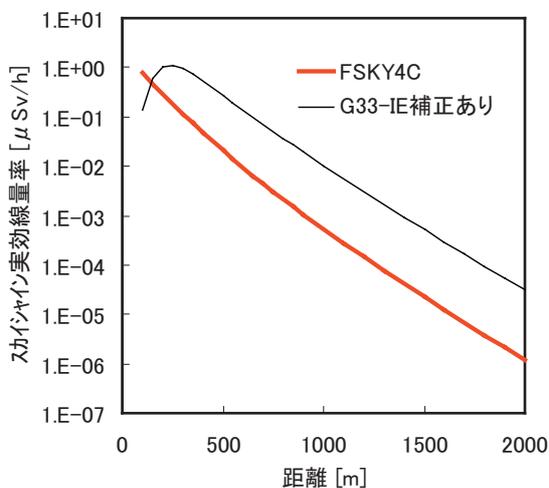


図19 コンクリート製格納容器の比較

FSKY4Cより約1/6の値を示したが、これより遠い場所では最大24倍の値を示した。これは、ドーム型遮へいを持つ鋼製格納容器の計算結果と同じ理由で、遮へいが厚くなった分その影響がより顕著に現れたものである。

5. 結言

原子力防災対応に活用できるよう、原子炉格納容器を線源とするガンマ線スカイシャイン高速計算プログラム(FSKY4C)を作成した。FSKY4Cと1回散乱点減衰核積分法プログラムのG33-IEを用いて、カンザス州立大学で実施されたガンマ線スカイシャイン測定実験の再現計算を実施するとともに、実機原子炉格納容器体系での比較計算を実施した。その結果、以下に示す知見が得られた。

- (1)天井遮へいが無い場合、FSKY4CとG33-IEによる計算結果は測定結果と良い一致を示した。
- (2)天井遮へいがある場合、FSKY4Cは実験値よりやや大きめの値を予測するが、ファクタ2の範囲に収まっており、スカイシャイン線の距離に対する減衰傾向はよく一致した。G33-IEはスカイシャイン線の距離に対する減衰傾向が異なり、天井遮へい透過時の影響を空気のパールドアップ係数で補正すると遠点で過大評価となる傾向を示した。
- (3)実機原子炉格納容器体系を対象としたFSKY4CとG33-IEの計算結果は、円筒型遮へいを持つ鋼製格納容器プラントでは両者は比較的良い一致を示し、ドーム型遮へいを持つ鋼製格納容器プラントおよびコンクリート製格納容器プラントでは、線源点に近い場所を除き、G33-IEがFSKY4Cより1桁程度大きな値を示した。これは、G33-IEが天井遮へい透過時のガンマ線エネルギー変化を無視し、パールドアップ係数を用いて補正しているため、過大評価傾向が強く出たものである。

6. 成果の公開

ガンマ線スカイシャイン高速計算プログラム(FSKY4C)は、プログラム本体およびデータライブラリで構成される。

原子力安全システム研究所は、上述の精度検証を踏まえ、プログラム本体、データライブラリ、操作説明書、ソースコード一式をパッケージとして、平成21年3月16日より高度情報科学技術研究機構原

子力コードセンター (<http://www.rist.or.jp>) を通じて国内へ公開するとともに、平成 21 年 4 月 28 日より経済協力開発機構原子力機関原子力データバンク (<http://www.Nea.fr/abs/html/nea-1846.html>) を通じて世界へ公開した。

既に、いくつかの利用申し込みをいただいている状況であり、国内外で広く利用されることを期待している。

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).
- (2) 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).
- (3) 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).
- (4) 吉田至孝, 清水彰直, 放射線遮へい計算に用いるガンマ線ビルドアップ係数とその GP フィッティングパラメータ, INSS Monographs No.2 (2006).
- (5) 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,” 原子力学会 2007 春の年会予稿集, B43 (2007).
- (6) R. R. Nason, J. K. Shultis and R. E. Faw, “A Benchmark Gamma-Ray Skyshine Experiment,” Nuclear Science and Engineering, 79, pp.404-416 (1981).
- (7) 「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.
- (8) 「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.
- (9) 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).
- (10) A. Shimizu, H. Mizuta, “Application of invariant imbedding to the reflection and transmission problem of gamma rays (I)”, J. of Nuclear Science and Technology, 3, p.57 (1966).
- (11) A. Shimizu, H. Mizuta, “Application of invariant imbedding to the reflection and transmission problem of gamma rays (II)”, J. of Nuclear Science and Technology, 3, p.441 (1966).
- (12) A. Shimizu, “Calculation of the penetration of gamma rays through slabs by the method of invariant embedding”, Nuclear Science and Engineering, 32, p.385 (1968).
- (13) A. Shimizu, K. Aoki, Application of Invariant Embedding to Reactor Physics, Academic Press, (1972).
- (14) A. Shimizu, “Calculation of Gamma-Ray Buildup Factors up to Depths of 100 mfp by the Method of Invariant Embedding, (I),” J. of Nuclear Science and Technology, 39, p.477 (2002).
- (15) A. Shimizu, H. Hirayama, “Calculation of Gamma-Ray Buildup Factors up to Depths of 100 mfp by the Method of Invariant Embedding, (II),” J. Nuclear Science and Technology, 40, p.192 (2003).
- (16) A. Shimizu, T. Onda, Y. Sakamoto, “Calculation of Gamma-Ray Buildup Factor up to Depth of 100 mfp by the Method of Invariant Embedding, (III)-Generation of an Improved Data Set-,” J. of Nuclear Science and Technology, 41, p.413 (2004).
- (17) H. Hirayama, Y. Harima, Y. Sakamoto, et al., Data Library of the Line and Conical Beam Response Functions and Four-Parameter Empirical Formula in Approximating the Response Functions for Gamma-Ray Skyshine Analysis, KEK Report 2008-2 (2008).
- (18) 「高浜発電所 1 号炉原子炉設置変更許可申請書」, 関西電力株式会社 (1998).
- (19) 「美浜発電所 3 号炉原子炉設置変更許可申請書」, 関西電力株式会社 (2003).
- (20) 「大飯発電所 3 号炉および 4 号炉原子炉設置変更許可申請書」, 関西電力株式会社 (2003).