

東海第二発電所工事計画審査資料	
資料番号	工認-144 改1
提出月日	平成30年7月12日

V-5-6 計算機プログラム（解析コード）の概要
・ QAD-CGGP2R

目次

1. はじめに	1
1.1 使用状況一覧	2
2. 解析コードの概要	3
3. 解析コードの特徴	5

1. はじめに

本資料は，添付資料において使用した計算機プログラム（解析コード）QAD-CGGP2Rについて説明するものである。

本解析コードを使用した添付資料を示す使用状況一覧，解析コードの概要を以降に記載する。

1.1 使用状況一覧

使用添付書類		バージョン
V-1-3-5	使用済燃料貯蔵槽の水深の遮蔽能力に関する説明書	1.04
V-1-7-3	中央制御室の居住性に関する説明書	1.04
V-1-8-1	原子炉格納施設の設計条件に関する説明書	1.04
V-1-9-3-2	緊急時対策所の居住性に関する説明書	1.04

2. 解析コードの概要

項目	コード名 QAD-CGGP2R
使用目的	燃料プール水深の遮蔽計算 中央制御室及び緊急時対策所の居住性に係る被ばく評価 ベント実施に伴う作業等の作業員の被ばく評価
開発機関	日本原子力研究開発機構（（財）高度情報科学研究機構）
開発時期	2001年（初版開発時期 1967年）
使用したバージョン	1.04
計算機コードの概要	<p>本計算機コードは、米国ロスアラモス国立研究所で開発されたガンマ線の物質透過を計算するための点減衰核積分コード「QAD」をベースとし、旧日本原子力研究所が I C R P 1990年勧告の国内関連法令・規則への取入れに合わせて、実効線量を計算できるように改良した最新バージョンである。</p> <p>本計算機コードは、線源を直方体、円筒、球の形状に構成でき、任意の遮蔽体で構成される体系のガンマ線実効線量率を計算する。</p>
検証 (Verification) 及び 妥当性確認 (Validation)	<p>【検証 (Verification)】</p> <p>本計算機コードの検証の内容は、以下のとおりである。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ 計算機能が適正であることは、後述する妥当性確認の中で確認している。 ・ 本計算機コードの運用環境について、開発機関から提示された要件を満足していることを確認している。 ・ 本計算機コードは、線量率評価を実施するコードであり、計算に必要な主な条件は線源条件、遮蔽体条件である。これら評価条件が与えられれば線量率評価は可能であり、使用目的に記載する評価に適用可能である。 <p>【妥当性確認 (Validation)】</p> <p>本計算機コードの妥当性確認の内容は、以下のとおりである。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ JRR-4散乱実験室でのコンクリート透過実験の実験値（「原子力第1船遮蔽効果確認実験報告書」JNS-4（日本原子力船開発事業団、1967））と計算値を比較した。実験孔からのガンマ線を遮蔽体に入射させ、遮蔽体透過後のガンマ線の線量率の実験値と本計算機コードによる計算値を比較している。 ・ 実験値と計算値を比較した結果、概ね一致していることを確認している。

	<ul style="list-style-type: none">・上記妥当性確認では、実験孔からのガンマ線を遮蔽体に入射させ、遮蔽体透過後のガンマ線の線量率の実験値と本計算機コードによる計算値を比較している。・今回の燃料プール水深の遮蔽計算では、上記妥当性確認における実験体系と同様に、ガンマ線の遮蔽体透過後の線量率を計算する。・今回の燃料プール水深の遮蔽計算は上記妥当性確認内容と合致している。・また、原子力発電所放射線遮へい設計規程（J E A C 4 6 1 5 - 2008）（日本電気協会 原子力規格委員会 平成20年6月）では、事故時の中央制御室遮蔽のための点減衰核積分コードとして、QADコードが挙げられている。
--	--

3. 解析コードの特徴

このコード*1は、点減衰核積分法に基づく高速中性子及びガンマ線に対する遮蔽計算用コードである。図1にQAD-CGGP2Rコードの計算体系を示す。

一般に点減衰核積分法では、線源領域を細かく分割し、細分化された各線源領域を点線源で近似する。そして各点線源から計算点までの媒質の通過距離を計算して非散乱ガンマ線束を求める。次に個々の点線源について求められた非散乱ガンマ線束にビルドアップ係数を掛け、これを線源領域全空間について積分した後、線量率換算係数を掛けて計算点での線量率を求める。エネルギーEのガンマ線を等方に放出する強度Sの線源による線量率は次式のとおりである。

$$D(r) = F \int_V \frac{S(r', E) \cdot B(\mu | r - r', E) \cdot e^{-\mu |r - r'|}}{4 \cdot \pi \cdot |r - r'|^2} dv \dots\dots\dots (1)$$

ここで、

- r : 線量率を計算する位置
- r' : 個々の点線源の位置
- D(r) : r点での線量率
- S(r', E) : r'点におけるエネルギーEのガンマ線源強度
- μ : エネルギーEのガンマ線の線吸収係数
- B(μ · |r - r'|, E) : エネルギーEの線量ビルドアップ係数
- V : 線源領域全空間
- F : エネルギーEの線量率換算係数

ガンマ線ビルドアップ係数は、無限均質媒質中での非散乱ガンマ線による線量に対する散乱ガンマ線を含む全線量比である。

ガンマ線ビルドアップ係数は、米国で整備されたモーメント法*2に基づく計算結果を基礎としており、GP (Geometrical Progression) 式を使用する。GP式では、エネルギーE、透過距離xでのγ線ビルドアップ係数B(x, E)を下式で近似する。

$$B(x, E) = 1 + (B - 1) \cdot \frac{K^x - 1}{K - 1} \quad : K \neq 1 \text{ のとき}$$

$$= 1 + (B - 1) \cdot x \quad : K = 1 \text{ のとき}$$

B及びKは透過距離x (mfp) で決まる値であり、このときKは、次式で与えられる。なお、パラメータBは、1 mfpでのビルドアップ係数に相当する。

$$K = c \cdot x^a + d \cdot \frac{\tanh(x / X_k - 2) - \tanh(-2)}{1 - \tanh(-2)} \quad : x \leq 40$$

$$= 1 + (K_{35} - 1) \left| \frac{K_{40} - 1}{K_{35} - 1} \right|^{\zeta(x)} \quad : x > 40 \text{ かつ } 0 < \left| \frac{K_{40} - 1}{K_{35} - 1} \right| < 1$$

$$= 1 + K_{35} \cdot \left| \frac{K_{40}}{K_{35}} \right|^{\zeta(x)^{0.8}} \quad : x > 40 \text{ かつ}$$

$$\left| \frac{K_{40} - 1}{K_{35} - 1} \right| \leq 0 \text{ 又は } \left| \frac{K_{40} - 1}{K_{35} - 1} \right| \geq 1$$

ここで、 K_{35} 及び K_{40} は透過距離 x が 35 mfp 又は 40 mfp のときのパラメータ K の値であり、 B, c, a, X_k 及び d は表 1 に示されるビルドアップ係数を近似するガンマ線エネルギー毎の GP 式パラメータである。使用するパラメータとして、水、コンクリート、鉄及び鉛に対するデータを準備しており、これらのもので近似的にいろいろな物質を代表させている。

また、 $\zeta(x)$ は次式で与えられる。

$$\zeta(x) = \frac{\left(\frac{x}{35}\right)^{0.1} - 1}{\left(\frac{x}{40}\right)^{0.1} - 1}$$

表 1 ビルドアップ係数を近似する GP 式パラメータ (普通コンクリート) *3

E (MeV)	B	c	a	実効線量ビルドアップ係数	
				X_k	d
0.015	1.059	0.144	0.485	14.36	-0.3593
0.02	1.084	0.288	0.298	12.58	-0.1728
0.03	1.180	0.451	0.188	13.93	-0.1047
0.04	1.373	0.526	0.156	14.51	-0.0859
0.05	1.597	0.659	0.103	15.58	-0.0538
0.06	1.942	0.681	0.111	11.82	-0.0576
0.08	2.404	0.893	0.043	14.24	-0.0428
0.1	2.710	1.065	0.002	12.83	-0.0255
0.15	2.948	1.311	-0.048	9.22	-0.0059
0.2	2.862	1.454	-0.075	16.43	0.0136
0.3	2.689	1.518	-0.087	15.67	0.0192
0.4	2.539	1.511	-0.088	15.93	0.0212
0.5	2.412	1.482	-0.085	15.99	0.0212
0.6	2.298	1.463	-0.084	15.91	0.0234
0.8	2.160	1.401	-0.076	15.42	0.0227
1	2.068	1.337	-0.066	15.34	0.0197
1.5	1.904	1.234	-0.049	15.25	0.0169
2	1.817	1.155	-0.033	15.95	0.0107
3	1.704	1.047	-0.008	12.49	-0.0021
4	1.614	0.991	0.007	11.96	-0.0107
5	1.545	0.945	0.022	10.18	-0.0198
6	1.500	0.925	0.026	13.20	-0.0204
8	1.411	0.900	0.034	13.47	-0.0267
10	1.374	0.974	-0.007	8.51	0.0484

QAD-CGGP2Rコードでは、エネルギー第 j 群の線量率を求めるのに(1)式を近似的に次式で計算する。

$$D_j = \sum_i F_j \cdot \frac{S_{ij}}{4 \cdot \pi \cdot R_i^2} \cdot e^{\left(- \sum_k \mu_{jk} \cdot t_k \right)} \cdot B_{ij}$$

ここで、

- j : エネルギー群番号
- i : 線源点番号
- k : 領域番号
- F_j : 線量率換算係数
- S_{ij} : i 番目の線源点で代表される領域の体積で重みづけされたエネルギー
 j 群の点線源強度
- R_i : i 番目の線源点と計算点の距離
- B_{ij} : ビルドアップ係数
- μ_{jk} : 領域 k における、エネルギー j 群のガンマ線に対する線吸収係数
- t_k : 領域 k をガンマ線が透過する距離

このようにして求められた線量率 D_j から、すべての線源エネルギー群について加えることにより全線量率が計算される。

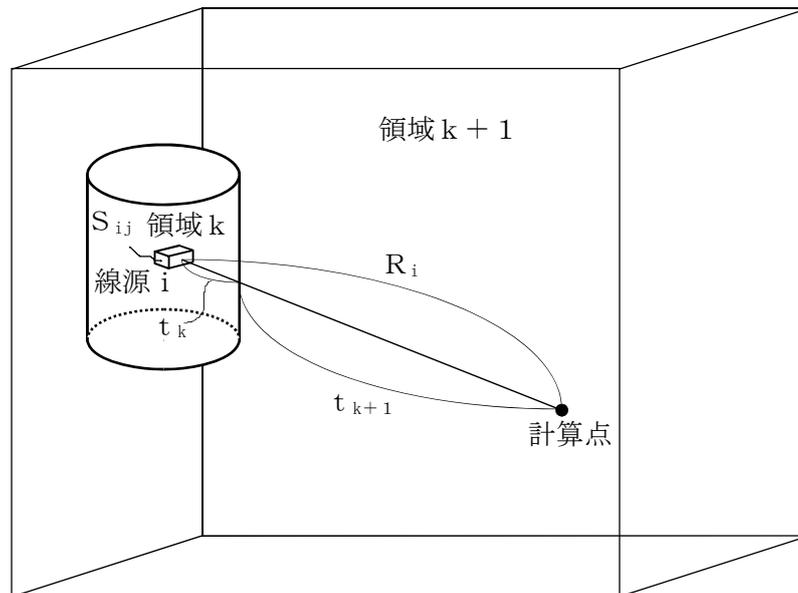


図1 QAD-CGGP 2Rコードの計算体系

注記*1 : R I S T NEWS No.33 「実効線量評価のための遮蔽計算の現状」
2002. 3. 31, (財) 高度情報科学技術研究機構

注記*2 : C.M.Eisenhauer and G.L.Simmons, “Point Isotropic Gamma-Ray Buildup Factors in Concrete, Nul. Sci. Eng., 56, 263(1975)”

注記＊3：（財）原子力安全技術センター 「放射線施設のしゃへい計算実務マニュアル
（2000）」