



放射性廃棄物処分の操業中シナリオにおける スカイシャイン線量評価コードシステムSKYOSD

Skyshine Dose Calculation Code System SKYOSD for Operational Scenario
of Radioactive Waste Disposal

渡邊 正敏 武田 聖司 木村 英雄

Masatoshi WATANABE, Seiji TAKEDA and Hideo KIMURA

安全研究センター

原子力エネルギー関連施設安全評価研究ユニット

Nuclear Facility Safety Research Unit

Nuclear Safety Research Center

June 2009

Japan Atomic Energy Agency

日本原子力研究開発機構

JAEA-Data/Code

本レポートは独立行政法人日本原子力研究開発機構が不定期に発行する成果報告書です。
本レポートの入手並びに著作権利用に関するお問い合わせは、下記あてにお問い合わせ下さい。
なお、本レポートの全文は日本原子力研究開発機構ホームページ (<http://www.jaea.go.jp>)
より発信されています。

独立行政法人日本原子力研究開発機構 研究技術情報部 研究技術情報課
〒319-1195 茨城県那珂郡東海村白方白根 2 番地 4
電話 029-282-6387, Fax 029-282-5920, E-mail: ird-support@jaea.go.jp

This report is issued irregularly by Japan Atomic Energy Agency
Inquiries about availability and/or copyright of this report should be addressed to
Intellectual Resources Section, Intellectual Resources Department,
Japan Atomic Energy Agency
2-4 Shirakata Shirane, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-1195 Japan
Tel +81-29-282-6387, Fax +81-29-282-5920, E-mail: ird-support@jaea.go.jp

© Japan Atomic Energy Agency, 2009

放射性廃棄物処分の操業中シナリオにおけるスカイシャイン線量評価コードシステム SKYOSD

日本原子力研究開発機構安全研究センター原子力エネルギー関連施設安全評価研究ユニット

渡邊 正敏^{*}・武田 聖司・木村 英雄

(2009 年 4 月 6 日受理)

低レベル放射性廃棄物に対する濃度上限値の算出のための被ばくシナリオの一つである廃棄物処分の操業中シナリオにおいては、廃棄物処分場の周辺監視区域境界に住む一般公衆が廃棄物から放出されるスカイシャインによる被ばく線量が評価されている。

従来の濃度上限値評価では、点減衰核積分法に基づいてスカイシャインによる被ばく線量評価が行われてきた。本研究において整備したスカイシャイン線量評価コードシステム SKYOSD では、光子の物質透過中における物理現象を厳密に取り扱う輸送方程式に基づいて光子の透過問題を解くことにした。このための計算コードとして、処分場外表面における光子フルエンス率の算出コードとして、1次元輸送計算コード ANISN-JR コード及びスカイシャインによる周辺監視区域境界での外部被ばく線量を算出するコードとして2次元輸送計算コード DOT3.5 コードを採用した。

本報告は、SKYOSD コードシステムの構造及びスカイシャイン線量評価のためのパラメータの設定方法等を取りまとめたものである。

Skyshine Dose Calculation Code System SKYOSD for Operational Scenario
of Radioactive Waste Disposal

Masatoshi WATANABE[※], Seiji TAKEDA and Hideo KIMURA

Nuclear Facility Safety Research Unit
Nuclear Safety Research Center
Japan Atomic Energy Agency
Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken

(Received April 6, 2009)

The skyshine dose to the public at the site boundary of radioactive waste disposal facility has been calculated for the operational scenario, which is one of the scenarios for assessing the radionuclide concentration limits for low-level radioactive wastes.

The skyshine dose was calculated with the point kernel method in the previous assessment. A computer code system, SKYOSD, employs more rigorous transport equation than before.

The SKYOSD stores a one-dimensional transport calculation code ANISN-JR to calculate photon fluence rate on a disposal facility, and a two-dimensional transport calculation code DOT3.5 to calculate dose from a point kernel predetermined on the facility.

This report provides a description of the structure of the SKYOSD code system and the parameter setting for skyshine dose calculation.

Keywords : Operational Scenario, Skyshine Dose, SKYOSD Code System, Transport Calculation Code, ANISN-JR, DOT3.5

[※] Special Topic Researcher (Visible Information Center, INC)

目次

1. はじめに.....	1
2. スカイシャイン線量評価コードシステム SKYOSD の概要.....	2
2.1 SKYOSD コードシステム開発の方針.....	2
2.2 SKYOSD コードシステムの構成.....	2
3. スカイシャイン線量評価モデル.....	4
3.1 処分場領域からの光子フルエンス率計算.....	4
3.2 スカイシャインによる外部被ばく線量率の算出.....	5
3.3 処分場周辺の居住者に対するスカイシャイン線量計算.....	5
4. 入出力ファイル及びライブラリファイルの構成.....	8
4.1 SKYOSD コードシステムのファイル構成.....	8
4.2 システム制御コード標準入力ファイル.....	10
4.3 システム制御コード標準出力ファイル.....	12
4.4 ライブラリファイル.....	13
謝辞.....	16
参考文献.....	16
Appendix スカイシャイン線量評価コードシステム SKYOSD の妥当性の確認計算.....	17

Contents

1. INTRODUCTION	1
2. OUTLINE OF SKYOSD CODE SYSTEM	2
2.1 Frame of development of SKYOSD code system	2
2.2 Outline of SKYOSD code system	2
3. MODELS FOR CALCULATING SKYSHINE DOSE	4
3.1 Model for calculating photon fluence rate from repository area	4
3.2 Model for calculating skyshine dose ratio	5
3.3 Model for calculating skyshine dose to residents around repository	5
4. INPUTS, OUTPUTS AND LIBRARIES	8
4.1 Structure of SKYOSD code system files	8
4.2 Input file of system configuration code	10
4.3 Output file of system configuration code	12
4.4 Library files	13
ACKNOWLEDGEMENT	16
REFERENCE	16
APPENDIX CALCULATION OF SKYSHINE DOSE	17

1. はじめに

再処理施設、MOX 燃料施設などから発生する TRU 核種を含む放射性廃棄物（「TRU 廃棄物」）やウラン廃棄物に対する処分方法について、原子力委員会による処分方策の検討に関する報告書では^{1),2)}、放射性廃棄物中の核種濃度レベルに応じた処分方法の可能性が検討されており、これらの廃棄物のうち低レベル放射性廃棄物相当のものは、将来的に、放射性核種の種類と放射能濃度に応じた 3 種類の埋設処分（トレンチ処分、ピット処分、余裕深度処分）が考えられる。また、TRU 廃棄物やウラン廃棄物に対して、将来の処分を見据え、それらの廃棄物に対する埋設処分方式別に、埋設事業の許可申請を行うことができる放射性廃棄物に含まれる放射性核種濃度の最大値である濃度上限値を評価する必要がある、その評価のためのモデル／計算コードを整備する必要がある。

独立行政法人日本原子力研究開発機構 安全研究センターでは、3 種類の埋設処分方式に処分可能な当該廃棄物の範囲を明確化するための濃度上限値（濃度区分値）を評価するためのモデル／計算コード整備を進めてきた。3 種類の埋設処分のうち、人工構造物（コンクリートピット）を設置した廃棄物埋設施設に処分するピット処分と人工構造物を設置しないで処分するトレンチ処分は、表層近傍の浅地中への処分であり、想定される評価シナリオは、放射性廃棄物の処分作業中において、廃棄物処分場の周辺監視区域境界に住む一般公衆が廃棄物から放出される光子（ γ 線、X 線）のスカイシャインにより被ばくするシナリオ（作業中シナリオ）、処分場跡地の再利用による被ばくシナリオ（跡地利用シナリオ）及び処分場から漏洩した核種の地下による移行に伴う被ばくシナリオ（地下水移行シナリオ）の計 3 種類となる。

本研究では、放射性廃棄物処分の作業中シナリオにおけるスカイシャイン線量評価コードシステム SKYOSD（SKYshine dose calculation code system for Operational Scenario of Disposal）を整備した。

SKYOSD コードシステムは、処分場表面の光子フルエンス率の算出のための 1 次元輸送計算コード ANISN-JR³⁾と点線源からのスカイシャインによる外部被ばく線量を求めるための 2 次元輸送計算コード DOT3.5⁴⁾の 2 つのコードを骨格としており、処分場作業時の作業条件に応じた処分場周辺の居住者に対するスカイシャインによる外部被ばく線量を算出することが可能である。従来の濃度上限値評価⁵⁾⁶⁾に用いられたスカイシャイン線量評価コードは点減衰核積分法による G33-GP2 コード⁷⁾である。DOT3.5 コードを用いることにより光子の物質透過中における散乱等の物理現象を厳密に取扱うことにより光子の空気中における透過問題を解くことが可能となった。

本報告は、SKYOSD コードシステムにおける一連のスカイシャインによる外部被ばく線量評価のためのモデル体系を示すとともに、評価コードシステムの構成、パラメータの設定方法及び本コードシステムの妥当性を確認するための計算結果について取りまとめたものである。

2. スカイシャイン線量評価コードシステム SKYOSD の概要

2.1 SKYOSD コードシステム開発の方針

一般に、光子(X 線、 γ 線)の物質透過問題に対する解法は、光子エネルギーと媒質に依存する線減衰係数とビルドアップ係数により散乱線の寄与を含めた光子の線量率を算出する点減衰核積分法⁸⁾と、ボルツマン輸送方程式⁸⁾に基づいて光子フルエンス率を算出し、それに線量換算計数を乗ずる方法の2種類に大別される。放射性廃棄物処分の操業中シナリオにおけるスカイシャイン線量評価コードシステム SKYOSD では、光子の物質透過中における吸収・散乱の物理現象を厳密に取扱う輸送方程式を適用することにより廃棄物中及び空気中における光子の透過問題を解くことにした。

輸送方程式に基づいて光子フルエンス率を算出するための計算コードとして、原子炉施設等におけるスカイシャインによる外部被ばく線量評価をはじめとした遮へい計算において多数の使用実績がある ANISN-JR³⁾及び DOT3.5⁴⁾コードを採用し、さらに処分場操業の作業条件に応じた処分場周辺の居住者に対するスカイシャインによる外部被ばく線量を算出するためのシステム化を図ることとした。以後においては、輸送方程式に基づいて光子フルエンス率を算出する計算コードを輸送計算コードと呼ぶことにする。

2.2 SKYOSD コードシステムの構成

図 2-1 は、SKYOSD のコードシステムの構成図である。SKYOSD コードシステムにおけるスカイシャイン線量の算出は次のように行う。

- ① 処分場表面における光子フルエンス率 1 次元輸送計算コード ANISN-JR を用いて算出する。
- ② 処分場表面に仮想的な点線源を想定し、ANISN-JR コードで算出した処分場表面の光子フラックスと等価となるような点線源強度をプリポストコードにより算出する。
- ③ 単位放射能、単位時間あたりのスカイシャインによる外部被ばく線量を 2 次元輸送計算コード DOT3.5 により点線源からの距離の関数として算出する。
- ④ 放射能濃度、廃棄物の希釈率、処分場の面積、年間被ばく時間、評価点までの距離を考慮したスカイシャインによる外部被ばく線量を算出する。

SKYOSD コードシステムでは、システム制御モジュールによって、スカイシャイン計算の骨格をなす2つの輸送計算コード ANISN-JR と DOT3.5 において必要となる一部のパラメータの他に、操業シナリオに必要な処分場操業の作業条件などのパラメータの標準入力となるファイル制御を行っている。なお、入力ファイルの構成や内容については、4 章において後述している。

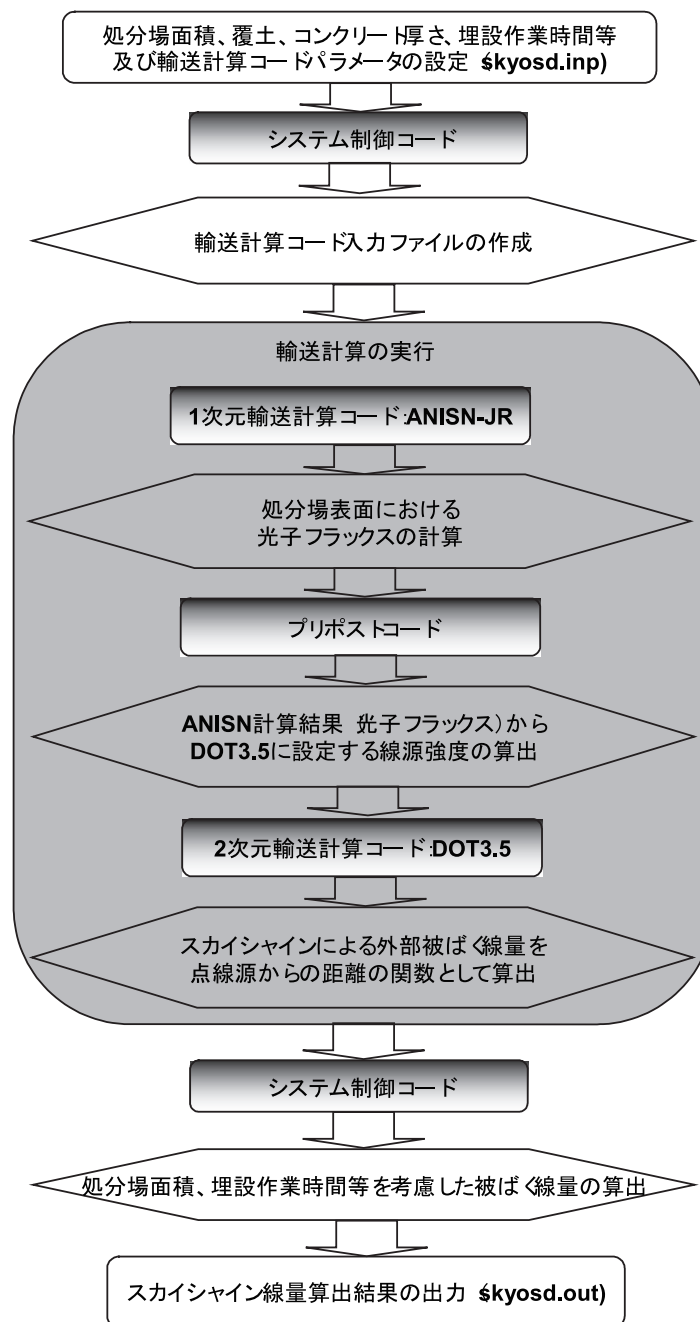


図 2-1 SKYOSD コードシステムの構成

3. スカイシャイン線量評価モデル

ここでは、ANISN-JR コード及びDOT3.5 コードにおける光子の輸送計算モデルの詳細について記述する。なお、処分場の表面からの光子フラックスを評価する平面の領域を「処分場領域」、求めた光子フラックスからの2次元とした空気中へのスカイシャインを評価する領域を「空気領域」と呼ぶこととする。

3.1 処分場領域からの光子フルエンス率計算

輸送理論を記述する輸送方程式は(3-1)式により表される。処分場領域の光子フラックスは、1次元モデルとしてANISN-JR コードにより計算する。ANISN-JR コードでは、輸送方程式の解法として、空間座標、進行方向及びエネルギーを離散化して輸送方程式を解く離散座標法 (discrete ordinate 法) と呼ばれる方法が用いられている。この方法は、光子の進行方向を N 個のセグメント (Segment) に分割するという意味で Sn 法とも呼ばれている。

$$\Omega \cdot \nabla_x \Phi(x, \Omega, E) + \sigma_t(E) \Phi(x, \Omega, E) = \int_{4\pi} d\Omega' \int_E \sigma_s(\Omega' \rightarrow \Omega, E' \rightarrow E) \cdot \Phi(x, \Omega', E') dE' + S(x, \Omega, E) \quad (3-1)$$

ここで、

$\Phi(x, \Omega, E)$: 光子フルエンス率(1/(s*cm ²))
$S(x, \Omega, E)$: 線源の光子フルエンス率(1/(s*cm ²))
x	: 空間座標
Ω	: 散乱後の光子の進行方向単位ベクトル
E	: 散乱後の光子エネルギー(MeV)
$\sigma_s(\Omega' \rightarrow \Omega, E' \rightarrow E)$: 方向 Ω' 、エネルギー E' (MeV)の光子が、散乱により方向 Ω 、エネルギー E (MeV)に変化する場合の巨視的散乱断面積(cm ⁻¹)
$\sigma_t(E)$: エネルギー E (MeV)の粒子の巨視的全断面積(cm ⁻¹)

である。

処分場表面に仮想的な点線源を想定し、点線源からのスカイシャイン線量率をDOT3.5 コードより計算する。DOT3.5 コードに設定する方向セグメント Ω_n 、エネルギー群 E_g に対する、単位放射能当りの仮想点線源強度 $F(\Omega_n, E_g)$ (1/s per (1Bq/ton*cm²)))は、ANISN-JR コードにより算出した処分場表面における光子フルエンス率 $\Phi_n(r, \Omega_n, E_g)$ ($n=1,2, \dots, N, g=1,2, \dots, G$)と、 Ω_n に対する方向余弦 μ_n との積としてプリポストコードにより算出する(3-2)。

$$F(\Omega_n, E_g) = \Phi_n(r, \Omega_n, E_g) \cdot \mu_n \quad (3-2)$$

ここで、

$F(\Omega_n, E_g)$: エネルギー群 E_g 、方向セグメント Ω_n における光子フラックス $\Phi_n(r,$
--------------------	--

	Ω_n, E_g)と等価となる仮想点線源強度(1/s per (1Bq/ton*cm ²))
$\Phi_n(r, \Omega_n, E_g)$: 処分場表面の光子フルエンス率(1/(s*cm ²) per 1Bq/ton)
μ_n	: 方向セグメント Ω_n に対する方向余弦
N	: 角度分点数
G	: エネルギー群数

である。

3.2 スカイシャインによる外部被ばく線量率の算出

空気領域における光子の輸送計算のためのモデル式は、ANISN-JR におけるモデル式と同様に (Eq1)式により表され、Sn 法により光子フルエンス率を求める。空気領域における光子の輸送は、点線源からの距離と処分場表面からの高さに依存する 2 次元円柱モデルとして DOT3.5 コードにより計算する。

(3-1)式を解くことにより得られる光子フラックス $\Phi(r, \Omega, E_g)$ (1/(s*cm²))は、光子の進行方向に依存した量であるために、換算係数を乗じて被ばく線量を求めるために、(3-3)式により方向に依存した光子フルエンスを進行方向で積分する。さらに、(3-4)式により評価距離 $r(m)$ におけるスカイシャイン線量 $D(r)$ (μ Sv/h)を求める。

$$\Phi(r, E_g) = \int_{4\pi} \Phi(r, \Omega, E_g) d\Omega \dots\dots\dots (3-3)$$

$$D(r) = \sum_{g=1}^G CF(E_g) \cdot \Phi(r, E_g) \dots\dots\dots (3-4)$$

ここで、

$\Phi(r, E)$: 仮想点線源からの距離 $r(m)$ における光子フルエンス率(1/(s*cm²) per (1Bq/ton*cm²))

$CF(E)$: 光子フルエンス率から線量率への換算係数(μ Sv/h (s*cm²))

$D(r)$: 点線源から距離 $r(m)$ の点におけるスカイシャインによる外部被ばく線量率
(μ Sv/h per (1Bq/ton*cm²))

である。

3.3 処分場周辺の居住者に対するスカイシャイン線量計算

低レベル放射性廃棄物の埋設施設においては、廃棄物の埋設のための作業計画に基づいて廃棄物が処分されると考えられる。その際、埋設施設が区分けされ、その任意の区画内に計画的に廃棄物が処分されるものとする。このような区画をここでは「処分区画」と呼ぶことにする。廃棄物埋設施設と処分区画に関する概念図を図 3-1 に示す。また、一つの処分区画に対する立面図を図 3-2 に示す。廃棄物層の深さは 5.0m であり、廃棄物の埋設作業中は、覆土あるいはコンクリートが存在しない状態であり、作業終了後に覆土またはコンクリートにより遮へいされる状態となる。

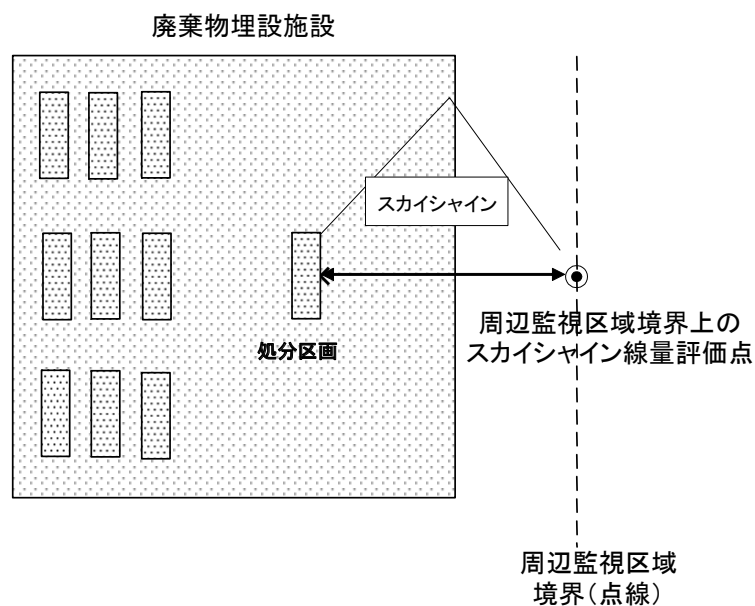


図 3-1 廃棄物埋設施設と処分区画に関する概念図（平面図）

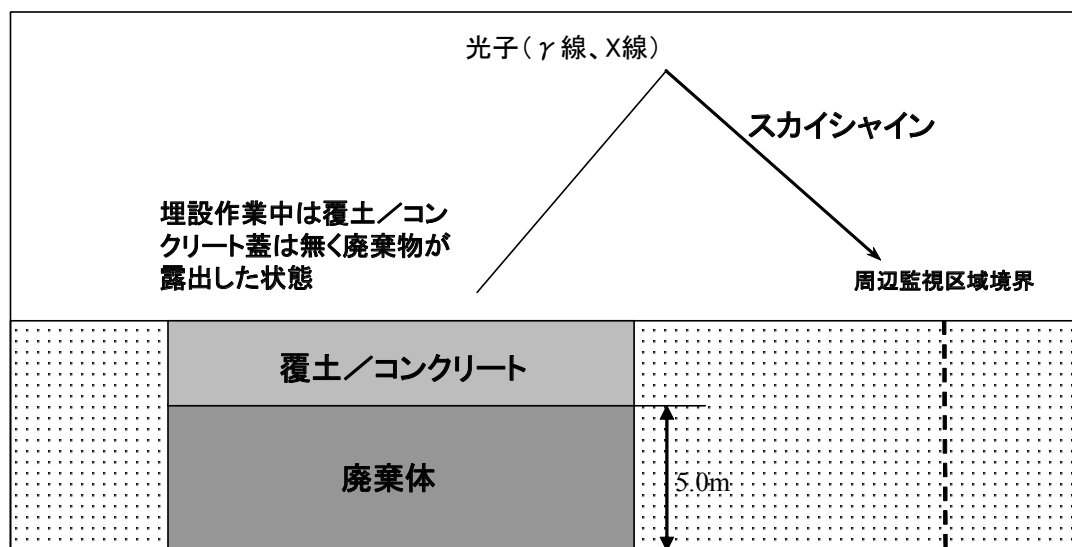


図 3-2 一つの処分区画に対する立面図

ある任意の処分区画への廃棄物の埋設方法に関する概念図を図 3-3 に示す。図 3-3 に示すように、1 つの処分区画に対する処分作業期間を n 年間とする時に、処分区画の長さを処分作業期間で等分割し、廃棄物量を n 等分した量が、線量評価点に近い処分域から 1 年毎に処分される。SKYOSD において計算される 1 年間当りの被ばく線量とは、こうした作業スケジュールに対応した 1 年当りの処分域面積に相当する領域から放出される光子のスカイシャインによる外部被ばく線量である。

図 3-4 は、埋設作業開始から j 年目における処分区画のメッシュ分割に関する概念図である。SKYOSD コードシステムでは、まず、DOT3.5 コードにより仮想点線源からの単位放射能当たりスカイシャイン線量率を仮想点線源からの距離の関数として算出する。次に、標準入力ファイルで指定された正方形微小面積要素 Δ_m （面積要素の中心から線量評価点までの距離 r_m ）を処分区画に割り当てる。DOT3.5 コードの結果より距離 r_m に対応する線量を求め、その結果に対して微小面積要素の面積を乗じた値が、線量評価点における線量の Δ_m からの寄与分となる。最後に、全ての微小面積要素に対する線量を合計することにより、 j 年目における処分区画からの単位放射能、単位時間あたりのスカイシャイン線量が算出される。

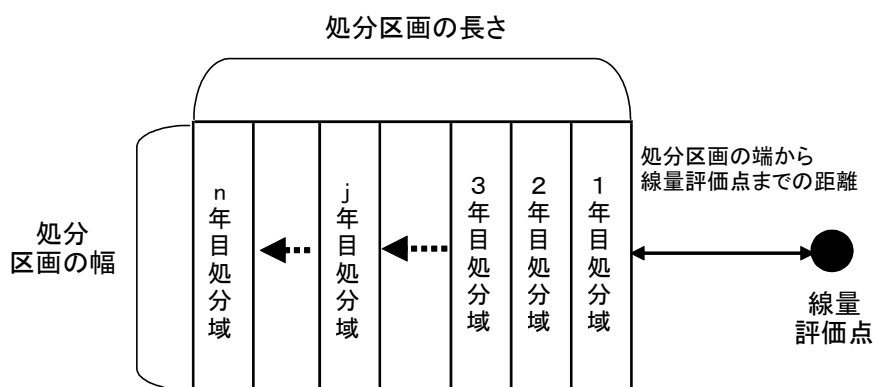


図 3-3 処分操作の開始から終了までの埋設順序に関する概念図

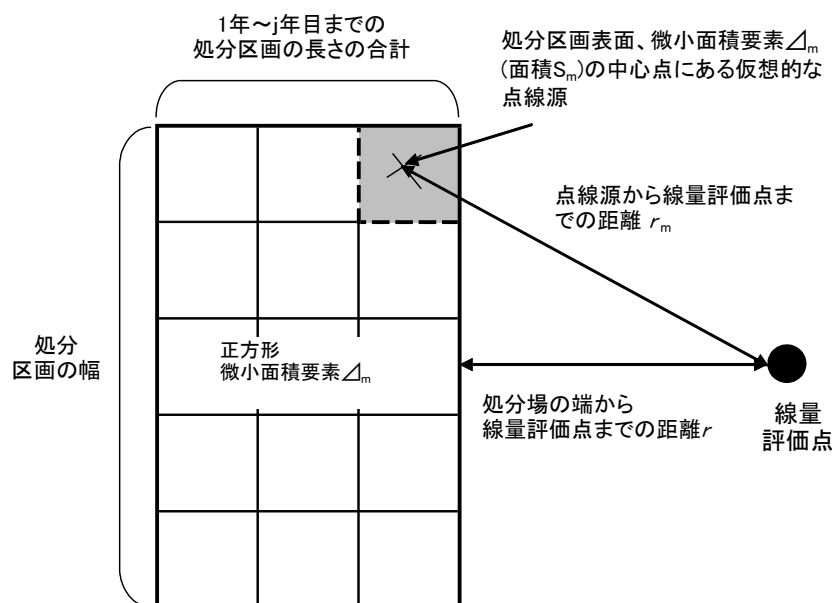


図 3-4 埋設開始から j 年目の処分区画の分割

前述のように求められたスカイシャイン線量率に対して、廃棄物の希釈率、年間被ばく時間、放射能濃度及びその減衰を考慮した線量を求める。以上を式で表現すると以下の(3-5)、(3-6)となる。

$$SKYD_i(r, j) = dl \cdot TB \cdot D_i(r) \cdot C_i \cdot \text{Exp}(-\lambda_i \cdot (j-1)) \dots\dots\dots (3-5)$$

$$D_i(r) = \sum_{m=1}^{dmax_j} S_{\triangle m, rm} \cdot \text{dot}_i(r_m) \dots\dots\dots (3-6)$$

$SKYD_i(r, j)$: 核種 i の埋設作業開始から j 年目、処分場端から評価までの距離 $r(\text{m})$ におけるスカイシャインによる外部被ばく線量 ($\mu \text{ Sv/y}$)

dl : 廃棄物処分時の希釈率 (-)

C_i : 核種 i の放射能濃度の初期値 (Bq/ton)

λ_i : 核種 i の崩壊定数 ($1/\text{y}$)

TB : 年間被ばく時間 (h/y)

j : 処分開始からの経過年数 (y)

$D_i(r)$: 核種 i の処分開始から j 年目 ($1 \leq j \leq n$) における単位放射能、単位時間当りのスカイシャイン線量 ($\mu \text{ Sv/h per 1Bq/ton}$)

$S_{\triangle m, rm}$: 微小面積要素 \triangle_m (面積要素の中心から線量評価点までの距離 r_m) の面積 (cm^2)

$\text{dot}_i(r_m)$: DOT3.5 コードにより算出された核種 i 、点線源から評価点までの距離 $r_m(\text{m})$ (図 3-4 参照) における、単位放射能及び処分場単位面積当たりのスカイシャイン線量率 ($\mu \text{ Sv/h per (1Bq/ton} \cdot \text{cm}^2)$)

$dmax_j$: j 年目の処分域における微小面積要素数

4. 入出力ファイル及びライブラリファイルの構成

ここでは、SKYOSD コードシステムの入力ファイル及びライブラリファイルの構成について記述する。

4.1 SKYOSD コードシステムのファイル構成

図 4-1 に、SKYOSD コードシステムのファイル構成、表 4-1 に、図 4-1 に示したファイルとその内容を示す。システム制御コードの標準入力ファイル `Skyosd.inp` においては、評価対象とする廃棄物埋設施設、埋設作業の特性を規定するパラメータ (埋設処分区画面積、埋設時間等) 及び輸送計算コードに関するパラメータを設定する。システム制御コードの標準入力で設定したパラメータ、換算係数ライブラリ (`dcf.dat`)、光子エネルギー及び発生率ライブラリ (`yield.dat`)、半減期及び子孫核種ライブラリ (`nucdat.dat`) の 3 種類のライブラリデータ及びデフォルトの輸送計算パラメータ設定ファイル `Anisnformat.dat`、`dot35format.dat` を基に Sn 法輸送計算コード ANISN-JR、DOT3.5 の標準入力ファイルが作成される。また、ANISN-JR コード、DOT3.5 コードによる輸送計算時における断面積データは、`xsg18.lib` のデータが参照される。これらのライブラリデータについては、4.3 で記述する。ANISN-JR による計算で得られる処分場光子フルエンス率データ (`anin.flux`) から、プリポストコードにより点線源強度データ (`cnct.out`) が作成される。`Cnct.out` の線

源強度データを参照して、DOT3.5 コードにより単位放射能、単位時間あたりのスカイシャイン線量が算出される。線量計算結果(dot35.out)に対して、再びコードシステム制御モジュールにより被ばく時間、処分区画面積を考慮した計算結果は出力ファイル（skyosd.out）に格納される。

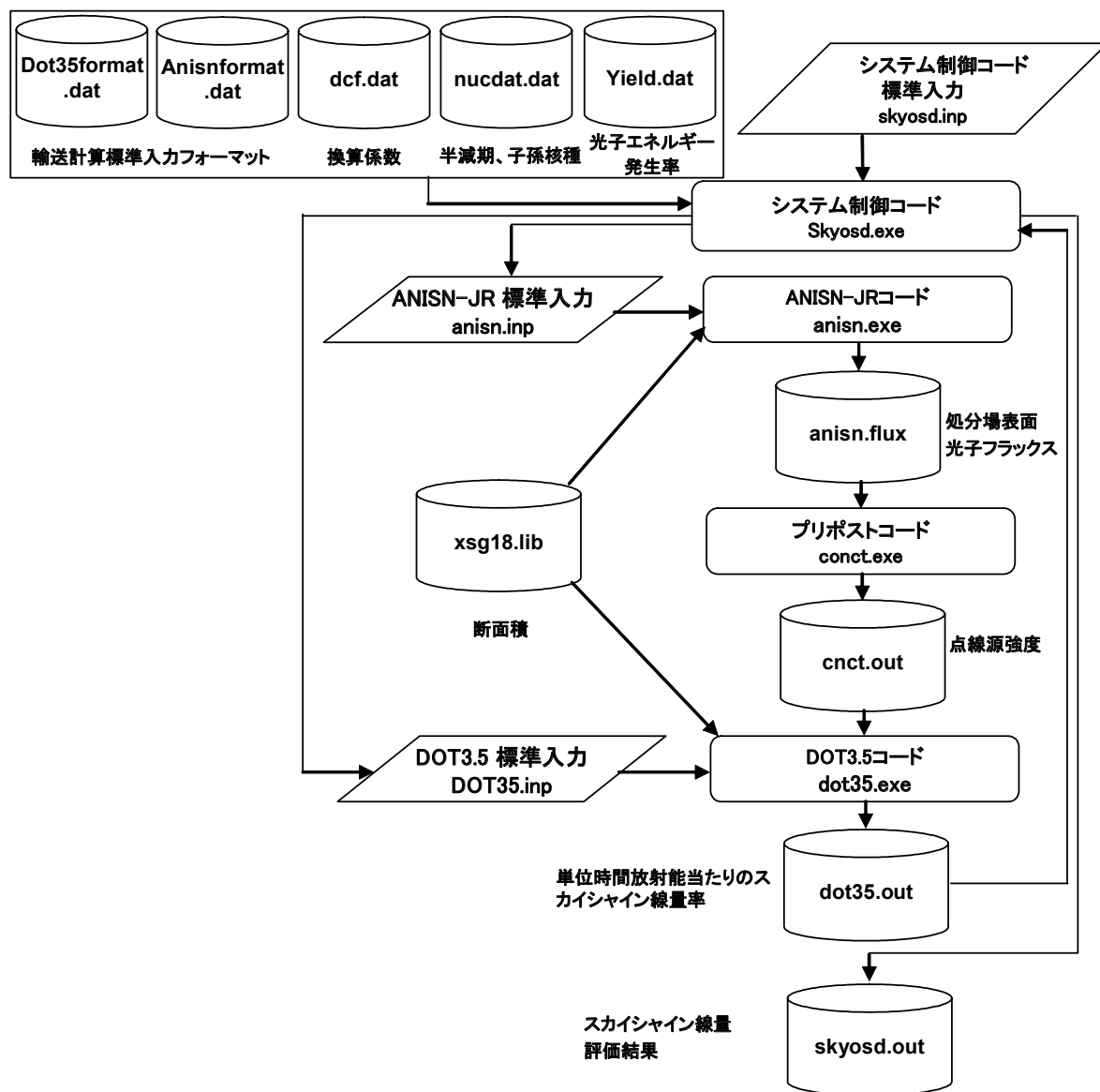


図 4-1 SKYOSD コードシステムのファイル構成

表 4-1 SKYOSD コードシステムの関連ファイルとその内容

ファイル名	カテゴリー	ファイル内容
skyosd.inp	標準入力	システム制御コード標準入力ファイル。処分場、埋設作業の特性、対象核種及び輸送計算パラメータ(角度分点、ルジャンドル次数、境界条件、メッシュ)を設定する。
anisn.inp		処分場表面の光子フラックスを計算するためのANISN-JRコード標準入力ファイル。anisnformat.datのデータを基に、skyosd.inpで設定した輸送計算パラメータを反映した本入力ファイルがシステム制御コードにより作成される。
dot35.inp		単位放射能当りのスカイシャイン線量率を計算するためのDOT3.5コード標準入力ファイル。dot35format.datのデータを基に、skyosd.inpで設定した輸送計算パラメータを反映した本入力ファイルがシステム制御コードにより作成される。
dcf.dat	ライブラリ	DOT3.5コードによりスカイシャイン線量率を算出するための換算係数データ
nucdat.dat		半減期と子孫核種に関するデータ
yield.dat		光子エネルギーと発生率に関するデータ
xsg18.lib		輸送計算時に使用する断面積に関するデータ
anisnformat.dat		ANISN-JRのデフォルト入力パラメータ。Skyosd.inpで設定可能なパラメータ以外のANISN-JRコードに関する入力パラメータは、本ファイルで設定する。
dot35format.dat		DOT3.5のデフォルト入力パラメータ。Skyosd.inpで設定可能なパラメータ以外のDOT3.5コードに関する入力パラメータは、本ファイルで設定する。
anisn.flux	標準出力	ANISN-JRの計算結果出力ファイル。処分場表面の光子フラックスデータが格納される。
cnct.out		ブリポストコードの計算結果に関する出力ファイル。DOT3.5に設定する点線源強度データが格納される。
dot35.out		DOT3.5の計算結果に関する出力。単位放射能あたりのスカイシャイン線量率が格納される。
skyosd.out		被ばく時間、希釈、処分場面積を考慮したスカイシャイン線量結果が格納される。

4.2 システム制御コード標準入力ファイル

表 4-2 は、システム制御コードの標準入力ファイル(skyosd.inp)で設定するパラメータとパラメータの内容に関する一覧を示したものである。Skyosd.inp では、処分場の面積、埋設作業時間等の処分場、埋設作業に関するパラメータに加えて、ANISN-JR コード、DOT3.5 のコードによる輸送計算のために必要なパラメータのうち、境界条件 (カード 17,18)、角度分点数(カード 19)、ルジャンドル展開の最大次数(カード 20)、メッシュ分割(カード 21~23)が設定可能である。上記以外の輸送計算に関するパラメータを変更したい場合には、ANISN-JR コードの場合は、anisnformat.dat ファイル、DOT3.5 コードの場合は dot35format.dat ファイルを直接書き換える必要

がある。

表 4-2 コードシステム制御モジュール標準入力ファイルに設定するパラメータとその内容

カード番号	パラメータ名	単位	内容
1	遮へい物質の種類	-	遮へい物質の種類を設定する(1:コンクリート、2:土壌)
2	遮へい物質の厚さ	cm	カード1で指定した遮へい物質の厚さを設定する。
3	遮へい物質の密度	g/cm ³	カード1で指定した遮へい物質の密度を設定する。
4	空気の密度	g/cm ³	空気の密度を設定する。
5	処分区画の端から評価点までの距離	m	処分場の端から線量評価点までの距離を設定する(図3.1参照)
6	廃棄物の希釈率	-	廃棄物の希釈率を設定する
7	処分区画の幅	m	処分区画の幅を設定する(図3.1参照)
8	処分区画の長さ	m	処分区画の長さを設定する(図3.1参照)
9	基準線量	μSv/y	基準線量相当濃度を算出する場合の基準となる線量を設定する。
10	線量評価期間	y	処分作業開始からの線量評価終了までの期間を設定する。
11	処分作業期間	y	処分区画処分作業開始から処分作業終了までの期間を設定する。
12	年間被ばく時間	h/y	年間の被ばく時間を設定する。
13	処分区画メッシュの1辺の長さ	m	正方形処分区画メッシュの1辺の長さを設定する
14	換算係数選択オプション	-	スカイシェインによる外部被ばく線量を求める際に使用する換算係数を選択するオプションを設定する。(dcf.dat)
15	核種数	-	評価核種の合計数を設定する。
16	核種名と初期核種濃度(カード15で設定した核種数分繰り返す)		
16-1	核種名	-	評価核種名を設定する。
16-2	核種濃度	Bq/g	評価核種の初期濃度を設定する。
16-3	子孫核種計算オプション	-	0:子孫核種からの線量は計算しない。1:瞬時に放射平衡となることを仮定し、子孫核種からの線量を合算する。(子孫核種が存在しない核種の場合はダミー)
17	ANISN-JRで計算する処分場領域の境界条件		ANISN-JRで計算する1次元処分場領域の境界条件を指定する。
17-1	右側境界条件(座標軸正方向の体系の境界)	-	0:真空(処分場領域に入射する光子はないが、放出する光子ことは出来る)
17-2	左側境界条件(座標軸負方向の体系の境界)	-	1:反射(領域から放出した光子と入射する光子の量が釣り合っている)
18	DOT3.5で計算する2次元空気領域の境界条件		DOT3.5で計算する2次元空気領域の境界条件を指定する。
18-1	右側境界条件(R軸正方向の体系の境界)	-	0:真空(処分場領域に入射する光子はないが、放出する光子ことは出来る)
18-2	左側境界条件(R軸負方向の体系の境界)	-	1:反射(領域から放出した光子と入射する光子の量が釣り合っている)
18-3	上側境界条件(Z軸正方向の体系の境界)	-	
18-4	下側境界条件(Z軸負方向の体系の境界)	-	
19	角度分点数		1次元処分場領域及び2次元空気領域における輸送計算の際の角度分点数を設定する。(デフォルトでは、Anisnの角度分点数32、Dot3.5の角度分点数48)。対応するAngular quadrature cosine及びweightは、anisnformat.dat及びdot35format.datを参照する。
19-1	1次元処分場領域(ANISN-JR)	-	
19-2	2次元空気領域(DOT3.5)	-	
20	散乱成分のルジャンドル展開の最大次数		1次元処分場領域及び2次元空気領域における輸送計算の際のルジャンドル展開の最大次数を設定する。
20-1	1次元処分場領域(ANISN-JR)	-	
20-2	2次元空気領域(DOT3.5)	-	
21	ANISN-JRで計算する1次元処分場領域における遮へい体(土壌、コンクリート)のメッシュ分割数	-	ANISN-JRで計算する1次元処分場領域における遮へい体(土壌、コンクリート)メッシュ分割数を指定する。
22	DOT3.5で計算する2次元空気領域(R方向)のメッシュ		
22-1	R方向のメッシュ分割幅が変わる点の総数	-	DOT3.5で計算する2次元空気領域におけるメッシュ分割幅が変わる点の総数、変わる点及び分割幅(R方向)を指定する。
22-2	R方向のメッシュ分割幅が変わる点	-	
22-3	R方向のメッシュ分割数	-	
23	DOT3.5で計算する2次元空気領域(Z方向)のメッシュ		
23-1	Z方向のメッシュ分割幅が変わる点の総数	-	DOT3.5で計算する2次元空気領域におけるメッシュ分割幅変わる点の総数、変わる点及び分割幅(Z方向)を指定する。
23-2	Z方向のメッシュ分割幅が変わる点	-	
23-3	Z方向のメッシュ分割数	-	

4.3 システム制御コード標準出力ファイル

図 4-2 に、システム制御コードの標準出力ファイルの出力例を示す。システム制御コード標準出力ファイルでは、入力ファイルの出力内容のエコーに続いて、初期放射能濃度、外部被ばく線量の最大値、基準線量相当濃度の順に出力される。続いて、1 年毎の被ばく線量が対して出力される。

```

*****
SKYOSD 標準入力ファイルのエコー
*****

*
* 遮へい物質選択オプション 1 → コンクリート、2 → 土壌
*
* 2
*
* 覆土あるいはコンクリート厚さ (cm)
*
* 0.0
*
* 覆土あるいはコンクリートの密度 (g/cm3)
*
* 1.70

                                (中略)

* DOT3.5 のデータ
* Z 方向のメッシュ設定
*
* 7
600.0   1000.0   3000.0   11000.0   20000.0   100000.0  200000.0
   12       1       4         4         3         16        10

*****
SKYOSD 標準入力ファイルのエコー終了
*****

スカイシャインによる外部被ばく線量と基準線量 (1.00E+03  $\mu$ Sv) 相当濃度

```

核種	放射能濃度 (Bq/ton)	被ばく線量最大値 (μ Sv/y)	基準線量相当濃度 (Bq/ton)
C060	1.000E+06	5.728E-05	1.746E+13

評価期間内の 1 年毎の各核種の被ばく線量
(単位: μ Sv/y)

年	C060	核種合計
処分開始		
1	5.728E-05	5.728E-05
処分期間終了		

#END

図 4-2 システム制御コード標準出力ファイル

4.4 ライブラリファイル

(1) マクロ断面積の物質組成

輸送計算コードにおいて使用する断面積ライブラリには、PHOTX⁹⁾のマイクロ断面積データを引用した。PHOTX のマイクロ断面積データから、空気、土壌、コンクリートに対するマクロ断面積ライブラリバイナリファイル xsg18.lib を作成した。光子のエネルギー群は、表 4-4 に示す Origen18 エネルギー群¹⁰⁾に従うものとした。マクロ断面積作成時の空気、土壌、コンクリートの物質の組成を表 4-3 に示す。なお、ANISN-JR コードによる処分場領域の計算では、廃棄体を密度 2.0g/cm^3 のコンクリートとして輸送計算を行う。

表 4-3 断面積ライブラリの物質組成¹¹⁾

核種	原子番号	原子量	原子個数密度(1/barn/cm)		
			空気	土壌	コンクリート
H	1	1.008	7.1990E-09	9.7700E-03	6.9932E-03
C	6	12.011	7.5846E-09	—	3.2631E-04
N	7	14.007	3.9099E-05	—	—
O	8	15.999	1.0538E-05	3.4800E-02	4.5302E-02
Na	11	22.990	—	—	7.0229E-04
Mg	12	24.305	—	—	5.6982E-04
Al	13	26.982	—	4.8800E-03	3.0424E-03
Si	14	28.086	—	1.1600E-02	1.5619E-02
K	19	39.098	—	—	2.9887E-04
Ca	20	40.078	—	—	3.0101E-03
Mn	25	54.938	—	—	6.5751E-05
Fe	26	55.845	—	—	7.2017E-04
密度(g/cm ³)			1.20E-03	1.70E+00	2.43E+00

表 4-4 Origen18 エネルギー群構造

群	下限エネルギー(MeV)	上限エネルギー(MeV)
1	8	11
2	6	8
3	4	6
4	3	4
5	2.5	3
6	2	2.5
7	1.5	2
8	1	1.5
9	0.7	1
10	0.45	0.7
11	0.3	0.45
12	0.15	0.3
13	0.1	0.15
14	0.07	0.1
15	0.045	0.07
16	0.03	0.045
17	0.02	0.03
18	0.01	0.02

(2) 光子エネルギー及び光子発生率

yield.dat は、評価対象核種の光子エネルギー及び光子発生率に関する情報が格納されるライブラリである。yield.dat の書式フォーマットを図 4-3 に示す。yield.dat では、核種名、光子数に続いて、光子エネルギー(keV)、発生率を光子数分繰り返す。yield.dat には、デフォルトとして JAERI-Data/Code 2001-004¹²⁾ による光子データを整備した。

```

<核種数の合計>
<核種名>
<光子数>
<光子エネルギー(keV)> <発生割合>
光子数分繰り返す。

(例)
C060
  2
  1.173E+03  9.990E-01
  1.332E+03  1.000E+00
    
```

図 4-3 yield.dat の書式

(3) 半減期、子孫核種及び分岐比

nucdat.dat は、評価対象核種の半減期、子孫核種及び分岐比に関する情報が格納されるライブラリである。図 4-4 に nucdat.dat の書式を示す。図 4-3 に示すように、nucdat.dat では、親核種名（最大 8 文字）、半減期、半減期の単位(Y：年、H：時間、H：分、S：秒)、子孫核種数の順に設定する。子孫核種が存在する場合には、改行後に子孫核種名（最大 8 文字）、分岐比（%）を子孫核種の数だけ設定する。半減期が親核種と比較して十分短く瞬時に放射平衡となる場合に子孫核種の線量を合算するには、表 4.2 に示すように、コードシステム制御モジュール標準入力ファイルカード 17-3 の子孫核種計算オプションの設定を 1 と設定する。この場合に、親核種のスカイシャイン線量と子孫核種に対するスカイシャイン線量結果を合算した結果が skyosd.out に出力される。nucdat.dat には、デフォルトとして Table of Isotopes Eighth Edition(1996)¹³⁾ によるデータを整備した。

```

*
* nucdat.dat の書式
*
<親核種名> <半減期> <半減期単位> <子孫核種数>
<子孫核種名 1> <子孫核種分岐比 1 (%)> <子孫核種 2> <子孫核種分岐比 2 (%)> . . . . .
* (書式例)
C060      5.271E+00  Y 0
CS137     3.017E+01  Y 1
BA137M    100.0
    
```

図 4-4 nucdat.dat の書式

(4) 換算係数

dcf.dat は、DOT3.5 コードで用いる外部被ばく線量換算係数に関する情報を格納するライブラリである。dcf.dat の書式を図 4-5 に示す。設定する線量換算係数データセット数を設定し、次に Origen18 エネルギー群の高エネルギー側から順に、線量換算係数の値を設定する。dcf.dat には、デフォルトとして周辺線量当量への換算係数（換算係数選択オプション 1）及び実効線量（AP ジオメトリ）への換算係数¹⁴⁾（換算係数選択オプション 2）を整備した。

```
* * は、コメント行である。
* Origen18 群の高エネルギー側から換算係数を設定する。(mSv/y per flux)
* 設定する換算係数の種別数
*
2
*
* コードシステム制御モジュール標準入力のカード 15 を 1 とした場合に選択される換算係数 1
* origen18 群の上限エネルギー (MeV)
* 11.0      8.0      6.0      4.0                      0.07      0.045      0.03      0.02
  7.20E-01 5.66E-01 4.43E-01 3.45E-01 . . . . (中略) . . . . 1.17E-02 1.05E-02 8.30E-03 3.94E-03
*
* コードシステム制御モジュール標準入力のカード 15 を 2 とした場合に選択される換算係数 2
* origen18 群の上限エネルギー (MeV)
* 11.0      8.0      6.0      4.0                      0.07      0.045      0.03      0.02
  7.76E-01 6.19E-01 4.99E-01 3.87E-01 . . . . (中略) . . . . 1.64E-02 2.15E-02 2.94E-02 2.61E-02
```

図 4-5 dcf.dat の書式

謝辞

株式会社ヴィジブルインフォメーションセンターの黒澤直弘氏、根本誠氏には、本レポートの作成に当たり助言を頂いたことを感謝いたします。

参考文献

- 1) 原子力委員会：「超ウラン核種を含む放射性廃棄物処理処分の基本的考え方について」、平成 12 年
- 2) 原子力委員会：「ウラン廃棄物処理処分の基本的考え方について」、平成 12 年
- 3) K.KOYAMA, Y. TAJI, K. MINAMI, T.TSUTSUI, T.IDETA ,S.MIYASAKA ”ANISN-JR, A ONE-DIMENSIONAL DISCRETE ORDINATES CODE FOR NEUTRON AND GAMMA-RAY TRANSPORT CALCULATIONS”, JAERI-M 6954 (1977)
- 4) W.A.Rhoades.”DOT3.5 Two Dimensional Discrete Ordinates Radiation Transport Code”, ORNL/RISC/CCC-276(1975)
- 5) 原子力安全委員会：「低レベル放射性固体廃棄物の陸地処分の安全規制に関する基準値について（第 2 次中間報告）」、平成 4 年
- 6) 原子力安全委員会：「低レベル放射性固体廃棄物の陸地処分の安全規制に関する基準値について（第 3 次中間報告）」、平成 12 年
- 7) Yukio SAKAMOTO Shun-ichi TANAKA : ”QAD-CGGP2 AND G33-GP2 : REVISED VERSIONS OF QAD-CGGP AND G33-GP” JAERI-M 90-110(1990)
- 8) 中村尚司：「放射線物理と加速器安全の工学」, 地人書館(1995)
- 9) Radiation Shielding Information Center(RSIC) : “DLC-136/PHOTX, Photon Interaction Cross Section Library” , Contributed by National Institute of Standards and Technology(1988).
- 10) A. G. Croff: “A USER’S MANUAL FOR THE ORIGEN2 COMPUTER CODE ” ORNL / TM – 7175 (1980)
- 11) Naoki YAMANO. “JSD1000 : MULTI-GROUP CROSS SECTION SETS FOR SHIELDING MATERIALS” JAERI-M 84-038(1984)
- 12) A. Endo and Y. Yamaguchi, “Compilation of Nuclear Decay Data Used for Dose calculation: Revised Data for Radionuclides Listed in ICRP Publication 38”, JAERI-Data/Code 2001-004(2001)
- 13) R.B. Firestone and V. S. Shirley, ”Table of Isotopes 8th Edition ” John Wiley & Sons, New York(1996)
- 14) (社)日本アイソトープ協会、“ICRP Publ.74 外部放射線に対する放射線防護に用いるための換算係数”、丸善出版、(1998)
- 15) 原子力安全委員会：「低レベル放射性固体廃棄物の埋設処分に係る放射能濃度上限値について」、平成 19 年
- 16) W. W. Engle, Jr.. “A USERS MANUAL FOR ANISN, A One-Dimensional Discrete Ordinates Transport Code With Anisotropic Scattering” K-1693, Union Carbide Corp.(1967)
- 17) R.K. Disney: ”A User’s Manual for the WANL ANISN, A General Anisotropic Scattering Sn Transport Method Program,” D&A-66(NDRA-44)(1967)
- 18) Mori T., Nakagawa M. and Sasaki M.:”ANISN-DD : One-Dimensional Sn Transport Code Using Multi-Group Double-Differential Form Cross Sections,” JAERI M 87-123(1987)

Appendix スカイシャイン線量評価コードシステム SKYOSD の妥当性の確認計算

ここでは、SKYOSD コードシステムの妥当性を確認するために、トレンチ処分を対象とした濃度上限値試算¹⁵⁾と同一の条件でスカイシャインによる外部被ばく線量計算を行い、第2次、第3次中間報告に示された処分操業中シナリオの結果と比較を行った。対象核種は Co58、Co60、Cs137(Ba137m と放射平衡)、Am241 とした。

本計算では、1日 50m³、年間 10,000m³ の廃棄物がトレンチ処分されることを想定したものである。埋設処分の作業時間は1日 8時間であり、埋設作業直後に 1.8m の覆土で廃棄物が覆われるものとする。さらに、廃棄物の希釈率は 0.3 としている。これらのパラメータは、第2次及び第3次中間報告におけるスカイシャイン線量の計算条件と同一である。本計算において設定したパラメータの一覧を表 A-1 に示す。なお、覆土 1.8m の条件に対するスカイシャインの影響は十分小さいことから、埋設作業時におけるスカイシャイン線量により比較検討した。

表 A-1 スカイシャイン線量評価のパラメータ一覧

カード番号	パラメータ名	設定値
1,2,3	遮へい物質の種類、厚さ、密度	遮へいなし(開放部の計算)
4	空気の密度	1.2E-3g/cm ³
5	処分区画の端から評価点までの距離	450m
6	廃棄物の希釈率	0.3
7	処分区画の幅	5.81m
8	処分区画の長さ	5.81m
9	濃度算出のための基準線量	1000 μ Sv
10	線量評価期間	1.0y
11	処分操業期間	1.0y
12	年間被ばく時間	1600h/y
13	処分区画メッシュの1辺の長さ	1.0m
14	換算係数	実効線量(APジオメトリ)
15	核種数	1
16	核種名と初期核種濃	Co58、Co60、Cs137、Ba137m、Am241 1.0E+6 Bq/g
17	1次元処分場領域の境界条件	右側:真空、左側:反射
18	2次元処分場領域の境界条件	左側:反射、その他:真空
19	角度分点数	ANISN-JR:32,DOT3.5 :48
20	散乱成分のルジャンドル展開の最大次数	5(ANISN-JR、DOT3.5共通)
21	1次元処分場領域のメッシュ分割数	0(遮へいなし)
22	2次元空気領域(R方向)のメッシュ	
22-1	R方向のメッシュ分割幅が変わる点の総数	7
22-2	R方向のメッシュ分割幅が変わる点	600.0 1000.0 3000.0 11000.0 20000.0 100000.0 200000.0
22-3	R方向のメッシュ分割数	12 1 4 4 3 16 10
23	2次元空気領域(Z方向)のメッシュ	
23-1	Z方向のメッシュ分割幅が変わる点の総数	7
23-2	Z方向のメッシュ分割幅が変わる点	600.0 1000.0 3000.0 11000.0 20000.0 100000.0 200000.0
23-3	Z方向のメッシュ分割数	12 1 4 4 3 16 10

(2) 計算結果

表 A-2 は、表 A-1 で示したパラメータ設定で計算したスカイシャインによる外部被ばく線量と、第 2 次及び第 3 次中間報告に示されている操業中シナリオに対する基準線量相当濃度を線量(μ Sv/y)に換算した結果を示したものである。4 核種共に、第 2 次中間報告記載の基準線量相当濃度から換算した線量に対する SKYOSD による計算結果の比が、0.3 倍～1.0 倍となった。

本計算と、第 2 次及び第 3 次中間報告におけるスカイシャイン線量の計算で条件が異なっているものとして、以下の①～③が挙げられる。

① スカイシャイン線量算出コード

SKYOSD のスカイシャインによる外部被ばく線量率算出コードは、ANISN-JR コード及び DOT3.5 コードを用いているが、第 2 次及び第 3 次中間報告では、ANISN コード及び G33-GP2 コードを用いてスカイシャインによる外部被ばく線量を算出している。G33-GP2 コードは点減衰核積文法による線量評価コードであり、空気領域における光子の透過問題の解法の違いが結果に影響を及しているものと考えられる。なお、ANISN コードには数種類のバージョンが（例えば 16)、17)、18)) 存在するが、バージョンの違いが光子フラックスの計算結果に影響を及ぼすことは無いものと考えられる。

② 断面積ライブラリ

SKYOSD コードシステムでは、ANISN-JR コード及び DOT3.5 コードによる輸送計算に採用したライブラリは PHOTX を基にしたものである。一方、第 2 次及び第 3 次中間報告におけるスカイシャイン線量計算において輸送計算に採用した断面積ライブラリについては文献には記載がなく、本コードシステムで採用した断面積ライブラリと異なっている可能性がある。

③ 線量換算係数

第 2 次及び第 3 次中間報告では、スカイシャインによる外部被ばく線量の算出に適用した換算係数は周辺線量当量(1cm 線量等量)であるが、本計算では実効線量 (AP ジオメトリ) 換算係数により算出している。

対象核種によっては、上記①～③の違いにより SKYOSD による計算結果と第 2 次及び第 3 次中間報告の結果との間にファクター程度の差が生じているものの、両者の計算結果はよく一致しており、本コードシステムの妥当性を確認できた。

表 A-2 SKYOSD による計算結果と第 2 次、第 3 次中間報告との比較

核種	SKYOSDによる 実効線量計算結果 (μ Sv/y)	第2次、第3次中間報告記載 の基準線量相当濃度から 線量に換算(μ Sv/y)	線量比 (SKYOSD／中間報告)
Co58	2.2E-05	2.2E-05	1.0
Co60	5.7E-05	9.1E-05	0.6
Cs137	9.6E-06	1.2E-05	0.8
Am241	8.2E-09	3.1E-08	0.3

国際単位系 (SI)

表 1. SI 基本単位

基本量	SI 基本単位	
	名称	記号
長さ	メートル	m
質量	キログラム	kg
時間	秒	s
電流	アンペア	A
熱力学温度	ケルビン	K
物質	モル	mol
光度	カンデラ	cd

表 2. 基本単位を用いて表されるSI組立単位の例

組立量	SI 基本単位	
	名称	記号
面積	平方メートル	m ²
体積	立方メートル	m ³
速度	メートル毎秒	m/s
加速度	メートル毎秒毎秒	m/s ²
波数	毎メートル	m ⁻¹
密度, 質量密度	キログラム毎立方メートル	kg/m ³
面積密度	キログラム毎平方メートル	kg/m ²
比体積	立方メートル毎キログラム	m ³ /kg
電流密度	アンペア毎平方メートル	A/m ²
磁界の強さ	アンペア毎メートル	A/m
量濃度 ^(a) , 濃度	モル毎立方メートル	mol/m ³
質量濃度	キログラム毎立方メートル	kg/m ³
輝度	カンデラ毎平方メートル	cd/m ²
屈折率 ^(b)	(数字の)	1
比透磁率 ^(b)	(数字の)	1

(a) 量濃度 (amount concentration) は臨床化学の分野では物質濃度 (substance concentration) ともよばれる。

(b) これらは無次元量あるいは次元 1 をもつ量であるが、そのことを表す単位記号である数字の 1 は通常は表記しない。

表 3. 固有の名称と記号で表されるSI組立単位

組立量	SI 組立単位			
	名称	記号	他のSI単位による表し方	SI基本単位による表し方
平面角	ラジアン ^(b)	rad	1 ^(b)	m/m
立体角	ステラジアン ^(b)	sr ^(c)	1 ^(b)	m ² /m ²
周波数	ヘルツ ^(d)	Hz		s ⁻¹
力	ニュートン	N		m kg s ⁻²
圧力, 応力	パスカル	Pa	N/m ²	m ⁻¹ kg s ⁻²
エネルギー, 仕事, 熱量	ジュール	J	N m	m ² kg s ⁻²
仕事率, 工率, 放射束	ワット	W	J/s	m ² kg s ⁻³
電荷, 電気量	クーロン	C		s A
電位差 (電圧), 起電力	ボルト	V	W/A	m ² kg s ⁻³ A ⁻¹
静電容量	ファラド	F	C/V	m ⁻² kg ⁻¹ s ⁴ A ²
電気抵抗	オーム	Ω	V/A	m ² kg s ⁻³ A ⁻²
コンダクタンス	ジーメンズ	S	A/V	m ⁻² kg ⁻¹ s ³ A ²
磁束	ウェーバ	Wb	Vs	m ² kg s ⁻² A ⁻¹
磁束密度	テスラ	T	Wb/m ²	kg s ⁻² A ⁻¹
インダクタンス	ヘンリー	H	Wb/A	m ² kg s ⁻² A ⁻²
セルシウス温度	セルシウス度 ^(e)	°C		K
光強度	ルーメン	lm	cd sr ^(c)	cd
放射能	ルクス	lx	lm/m ²	m ⁻² cd
放射性核種の放射能 ^(f)	ベクレル ^(d)	Bq		s ⁻¹
吸収線量, 比エネルギー分与, カーマ	グレイ	Gy	J/kg	m ² s ⁻²
線量当量, 周辺線量当量, 方向性線量当量, 個人線量当量	シーベルト ^(g)	Sv	J/kg	m ² s ⁻²
酸素活性	カタール	kat		s ⁻¹ mol

(a) SI接頭語は固有の名称と記号を持つ組立単位と組み合わせても使用できる。しかし接頭語を付した単位はもはやコヒーレントではない。

(b) ラジアンとステラジアンは数字の 1 に対する単位の特別な名称で、量についての情報をつたえるために使われる。実際には、使用する時には記号rad及びsrが用いられるが、習慣として組立単位としての記号である数字の 1 は明示されない。

(c) 測光学ではステラジアンという名称と記号srを単位の表し方の中に、そのまま維持している。

(d) ラジアンは周期現象についてのみ、ベクレルは放射性核種の統計的過程についてのみ使用される。

(e) セルシウス度はケルビンの特別な名称で、セルシウス温度を表すために使用される。セルシウス度とケルビンの単位の大きさは同一である。したがって、温度差や温度間隔を表す数値はどちらの単位で表しても同じである。

(f) 放射性核種の放射能 (activity referred to a radionuclide) は、しばしば誤った用語で"radioactivity"と記される。

(g) 単位シーベルト (PV,2002,70,205) についてはCIPM勧告2 (CI-2002) を参照。

表 4. 単位の中に固有の名称と記号を含むSI組立単位の例

組立量	SI 組立単位		
	名称	記号	SI 基本単位による表し方
粘度	パスカル秒	Pa s	m ⁻¹ kg s ⁻¹
力のモーメント	ニュートンメートル	N m	m ² kg s ⁻²
表面張力	ニュートン毎メートル	N/m	kg s ⁻²
角速度	ラジアン毎秒	rad/s	m m ⁻¹ s ⁻¹ =s ⁻¹
角加速度	ラジアン毎秒毎秒	rad/s ²	m m ⁻¹ s ⁻² =s ⁻²
熱流密度, 放射照度	ワット毎平方メートル	W/m ²	kg s ⁻³
熱容量, エントロピー	ジュール毎ケルビン	J/K	m ² kg s ⁻² K ⁻¹
比熱容量, 比エントロピー	ジュール毎キログラム毎ケルビン	J/(kg K)	m ² s ⁻² K ⁻¹
比エネルギー	ジュール毎キログラム	J/kg	m ² s ⁻²
熱伝導率	ワット毎メートル毎ケルビン	W/(m K)	m kg s ⁻³ K ⁻¹
体積エネルギー	ジュール毎立方メートル	J/m ³	m ⁻¹ kg s ⁻²
電界の強さ	ボルト毎メートル	V/m	m kg s ⁻³ A ⁻¹
電荷密度	クーロン毎立方メートル	C/m ³	m ⁻³ sA
表面電荷	クーロン毎平方メートル	C/m ²	m ⁻² sA
電束密度, 電気変位	クーロン毎平方メートル	C/m ²	m ⁻² sA
誘電率	ファラド毎メートル	F/m	m ³ kg ⁻¹ s ⁴ A ²
透磁率	ヘンリー毎メートル	H/m	m kg s ⁻² A ⁻²
モルエネルギー	ジュール毎モル	J/mol	m ² kg s ⁻² mol ⁻¹
モルエントロピー, モル熱容量	ジュール毎モル毎ケルビン	J/(mol K)	m ² kg s ⁻² K ⁻¹ mol ⁻¹
照射線量 (X線及びγ線)	クーロン毎キログラム	C/kg	kg ⁻¹ sA
吸収線量	グレイ毎秒	Gy/s	m ² s ⁻³
放射強度	ワット毎ステラジアン	W/sr	m ⁴ m ⁻² kg s ⁻³ =m ² kg s ⁻³
放射輝度	ワット毎平方メートル毎ステラジアン	W/(m ² sr)	m ² m ⁻² kg s ⁻³ =kg s ⁻³
酵素活性濃度	カタール毎立方メートル	kat/m ³	m ⁻³ s ⁻¹ mol

表 5. SI 接頭語

乗数	接頭語	記号	乗数	接頭語	記号
10 ²⁴	ヨタ	Y	10 ⁻¹	デシ	d
10 ²¹	ゼタ	Z	10 ⁻²	センチ	c
10 ¹⁸	エクサ	E	10 ⁻³	ミリ	m
10 ¹⁵	ペタ	P	10 ⁻⁶	マイクロ	μ
10 ¹²	テラ	T	10 ⁻⁹	ナノ	n
10 ⁹	ギガ	G	10 ⁻¹²	ピコ	p
10 ⁶	メガ	M	10 ⁻¹⁵	フェムト	f
10 ³	キロ	k	10 ⁻¹⁸	アト	a
10 ²	ヘクト	h	10 ⁻²¹	ゼプト	z
10 ¹	デカ	da	10 ⁻²⁴	ヨクト	y

表 6. SIに属さないが、SIと併用される単位

名称	記号	SI 単位による値
分	min	1 min=60s
時	h	1 h=60 min=3600 s
日	d	1 d=24 h=86 400 s
度	°	1°=(π/180) rad
分	′	1′=(1/60)°=(π/10800) rad
秒	″	1″=(1/60)′=(π/648000) rad
ヘクタール	ha	1 ha=1 hm ² =10 ⁴ m ²
リットル	L, l	1 L=1 l=1 dm ³ =10 ³ cm ³ =10 ⁻³ m ³
トン	t	1 t=10 ³ kg

表 7. SIに属さないが、SIと併用される単位で、SI単位で表される数値が実験的に得られるもの

名称	記号	SI 単位で表される数値
電子ボルト	eV	1 eV=1.602 176 53(14)×10 ⁻¹⁹ J
ダルトン	Da	1 Da=1.660 538 86(28)×10 ⁻²⁷ kg
統一原子質量単位	u	1 u=1 Da
天文単位	ua	1 ua=1.495 978 706 91(6)×10 ¹¹ m

表 8. SIに属さないが、SIと併用されるその他の単位

名称	記号	SI 単位で表される数値
バール	bar	1 bar=0.1 MPa=100 kPa=10 ⁵ Pa
水銀柱ミリメートル	mmHg	1 mmHg=133.322 Pa
オングストローム	Å	1 Å=0.1 nm=100 pm=10 ⁻¹⁰ m
海里	M	1 M=1852 m
バイン	b	1 b=100 fm ² =(10 ⁻¹² cm) ² =10 ⁻²⁸ m ²
ノット	kn	1 kn=(1852/3600) m/s
ネーパ	Np	SI 単位との数値的な関係は、 対数量の定義に依存。
ベベル	B	
デジベル	dB	

表 9. 固有の名称をもつCGS組立単位

名称	記号	SI 単位で表される数値
エルグ	erg	1 erg=10 ⁻⁷ J
ダイン	dyn	1 dyn=10 ⁻⁵ N
ボアズ	P	1 P=1 dyn s cm ² =0.1 Pa s
ストークス	St	1 St=1 cm ² s ⁻¹ =10 ⁻⁴ m ² s ⁻¹
スチルプ	sb	1 sb=1 cd cm ² =10 ⁻⁴ cd m ²
フォトル	ph	1 ph=1 cd sr cm ² 10 ⁴ lx
ガリ	Gal	1 Gal=1 cm s ⁻² =10 ⁻² ms ⁻²
マクスウェル	Mx	1 Mx=1 G cm ² =10 ⁻⁸ Wb
ガウス	G	1 G=1 Mx cm ⁻² =10 ⁻⁴ T
エルステッド ^(c)	Oe	1 Oe ≐ (10 ³ /4π) A m ⁻¹

(c) 3 元素系のCGS単位系とSIでは直接比較できないため、等号「 \doteq 」は対応関係を示すものである。

表 10. SIに属さないその他の単位の例

名称	記号	SI 単位で表される数値
キュリー	Ci	1 Ci=3.7×10 ¹⁰ Bq
レントゲン	R	1 R=2.58×10 ⁻⁴ C/kg
ラド	rad	1 rad=1 cGy=10 ⁻² Gy
レム	rem	1 rem=1 cSv=10 ⁻² Sv
ガンマ	γ	1 γ=1 nT=10 ⁻⁹ T
フェルミ	f	1 f=エルミ=1 fm=10 ⁻¹⁵ m
メートル系カラット		1 メートル系カラット = 200 mg = 2×10 ⁻⁴ kg
トル	Torr	1 Torr = (101 325/760) Pa
標準大気圧	atm	1 atm = 101 325 Pa
カロリー	cal	1 cal=4.1858 J (「15°C」カロリー), 4.1868 J (「IT」カロリー) 4.184 J (「熱化学」カロリー)
ミクロン	μ	1 μ=1 μm=10 ⁻⁶ m

