

OSCAAR Version 2.0モデル解説書

Model Descriptions for OSCAAR Version 2.0

リスク評価・防災研究グループ

Risk Analysis Research Group

原子力安全・防災研究所

安全研究センター

Nuclear Safety Research Center

Nuclear Safety and Emergency Preparedness Institute

本レポートは国立研究開発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。
本レポートはクリエイティブ・コモンズ 表示 4.0 国際 ライセンスの下に提供されています。
本レポートの成果（データを含む）に著作権が発生しない場合でも、同ライセンスと同様の
条件で利用してください。（<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ja>）
なお、本レポートの全文は日本原子力研究開発機構ウェブサイト（<https://www.jaea.go.jp>）
より発信されています。本レポートに関しては下記までお問合せください。

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構 研究開発推進部 科学技術情報課
〒 319-1112 茨城県那珂郡東海村大字村松 4 番地 49
E-mail: ird-support@jaea.go.jp

This report is issued irregularly by Japan Atomic Energy Agency.
This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License
(<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.en>).
Even if the results of this report (including data) are not copyrighted, they must be used under
the same terms and conditions as CC-BY.
For inquiries regarding this report, please contact Library, Institutional Repository and INIS Section,
Research and Development Promotion Department, Japan Atomic Energy Agency.
4-49 Muramatsu, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-1112, Japan
E-mail: ird-support@jaea.go.jp

OSCAAR Version 2.0 モデル解説書

日本原子力研究開発機構 原子力安全・防災研究所
安全研究センター

リスク評価・防災研究グループ

(2025 年 11 月 20 日受理)

日本原子力研究開発機構安全研究センターでは、原子力発電所事故の確率論的リスク評価 (PRA: Probabilistic Risk Assessment) 研究の一環として、レベル 3PRA コード OSCAAR の開発を行っている。OSCAAR はレベル 2PRA で得られたソースタームを基に、環境中に放出された放射性物質の移流、拡散、沈着を様々な気象条件に対して評価し、これらの放射性物質によって公衆が受ける被ばく線量および健康影響を確率論的に評価することができる計算コードである。OSCAAR では、実際の原子力発電所事故時に実施される防護措置による被ばく線量低減効果を考慮することができ、原子力発電所周辺住民の事故時の被ばくを低減するための対策や計画の事前策定に資する。本報告書は OSCAAR バージョン 2.0 にて用いられている解析モデルを説明した解説書である。

Model Descriptions for OSCAAR Version 2.0

Risk Analysis Research Group

Nuclear Safety Research Center

Nuclear Safety and Emergency Preparedness Institute

Japan Atomic Energy Agency

Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken

(Received November 20, 2025)

The Japan Atomic Energy Agency's Nuclear Safety Research Center is developing the Level 3 PRA code OSCAAR as part of its research on probabilistic risk assessment (PRA) for nuclear power plant accidents. OSCAAR is a computational code that evaluates the advection, diffusion, and deposition of radioactive materials released into the environment under various meteorological conditions, based on source terms obtained from Level 2 PRA. It can probabilistically assess the radiation doses and health effects to the public caused by these radioactive materials. OSCAAR can account for the dose reduction effects of protective measures implemented during an actual nuclear power plant accident, thereby contributing to the pre-planning of countermeasures and plans to reduce the exposure of residents near nuclear power plants during an accident.

This report is a manual explaining the analysis model used in OSCAAR code version 2.0.

Keywords: Level 3 PRA, Atmospheric Dispersion, Radiation Dose, Health Effect

目次

1. はじめに.....	1
2. OSCAAR コードシステムの概要.....	2
3. OSCAAR の構成.....	2
3.1. 入力と出力.....	3
3.2. 評価メッシュ.....	3
3.3. 被ばく線量評価.....	4
3.4. 防護措置.....	4
3.5. 健康影響.....	5
3.6. 経済影響.....	5
4. 大気拡散計算.....	6
4.1. 大気拡散計算の概要.....	6
4.2. ガウスパフモデル.....	6
4.3. 拡散パラメータ.....	8
4.4. 沈着.....	9
4.5. 放射性壊変.....	10
4.6. 移流.....	10
4.7. ブルームライズ.....	11
4.8. 気象データ.....	12
5. 早期被ばく線量評価.....	19
5.1. 被ばく経路ごとの線量評価方法.....	19
6. 長期被ばく線量評価.....	24
6.1. グラウンドシャイン.....	24
6.2. 再浮遊吸入.....	25
6.3. 食物摂取.....	25
7. 防護措置.....	31
7.1. 早期防護措置.....	32
7.2. 長期防護措置.....	43
8. 健康影響.....	45
8.1. 早期影響.....	45
8.2. 晚発性影響.....	50
8.3. 遺伝的影響.....	54
8.4. 寿命損失.....	56
9. 経済影響.....	59
9.1. 人の移動に関するコスト.....	60
9.2. 食物摂取制限に関するコスト.....	61
9.3. 健康影響コスト.....	61
10. OSCAAR 支援プログラム.....	63

10.1.	気象データ作成プログラム GPV2OSC	63
10.2.	気象データサンプリングプログラム MS	63
10.3.	内部被ばく線量換算係数作成プログラム DSYS	64
10.4.	人口・農畜産物分布データ作成プログラム CURRENT	64
10.5.	晚発性身体的影響・遺伝的影響データ作成プログラム HEINPUT	64
10.6.	ポスト処理プログラム PostOSCAAR	65
11.	まとめ	66
	参考文献	67

Contents

1. Introduction	1
2. Overview of the OSCAAR Code System.....	2
3. Structure of the OSCAAR.....	2
3.1. Input and Output.....	3
3.2. Evaluation Mesh.....	3
3.3. Exposure Dose Assessment.....	4
3.4. Protective Measures	4
3.5. Health Effects	5
3.6. Economic Effects	5
4. Atmospheric Dispersion Calculation.....	6
4.1. Overview of Atmospheric Dispersion Calculation.....	6
4.2. Gaussian Puff Model	6
4.3. Dispersion Parameters.....	8
4.4. Deposition	9
4.5. Radioactive Decay.....	10
4.6. Advection	10
4.7. Plume Rise.....	11
4.8. Meteorological Data.....	12
5. Early Exposure Dose Assessment	19
5.1. Method for Exposure Dose Assessment.....	19
6. Late Exposure Dose Assessment.....	24
6.1. Groundshine	24
6.2. Resuspension Inhalation.....	25
6.3. Dietary Intake.....	25
7. Protective Measures	31
7.1. Early Phase Protective Measures.....	32
7.2. Long-Term Phase Protective Measures	43
8. Health Effects.....	45
8.1. Early Effects.....	45
8.2. Late Effects.....	50
8.3. Genetic Effects	54
8.4. Life-Year Losses.....	56
9. Economic Effects	59
9.1. Costs Related to Human Transportation.....	60
9.2. Costs Related to Food Intake Restrictions.....	61
9.3. Costs Related to Health Effects	61
10. OSCAAR Support Programs.....	63

10.1.	Weather Data Generation Program GPV2OSC	63
10.2.	Weather Data Sampling Program MS	63
10.3.	Internal Exposure Dose Conversion Factor Generation Program DSYS	64
10.4.	Population and Agricultural/Livestock Product Distribution Data Generation Program CURRENT.....	64
10.5.	Late Physical Effects and Genetic Effects Data Generation Program HEINPUT.....	64
10.6.	Post-Processing Program PostOSCAAR.....	65
11.	Summary	66
	References.....	67

表リスト

表 4.1	大気安定度ごとの混合層高さ	7
表 4.2	拡散パラメータ計算の定数	8
表 4.3	OSCAAR 用気象データファイルの概要	13
表 4.4	メソ数値予報モデル GPV データの概要	14
表 4.5	風速のべき乗測の指数	15
表 5.1	早期被ばく評価期間	19
表 5.2	内部被ばく線量換算係数の元素別吸収タイプ	21
表 5.3	内部被ばく線量換算係数のライブラリの概要	22
表 5.4	再浮遊係数の減衰項	23
表 6.1	長期被ばく線量評価の評価期間	24
表 6.2	ウェザリングに関わる係数例	24
表 7.1	Johnson によるヨウ素代謝モデルで使用されるパラメータの対象者別データ	39
表 7.2	安定ヨウ素剤服用による被ばく線量低減係数データベースの条件	40
表 8.1	早期影響評価の期間分類	45
表 8.2	早期死亡で考慮する影響と評価対象臓器	46
表 8.3	早期死亡確率の中央値推定のためのパラメータ	47
表 8.4	早期罹患で考慮する影響と評価対象臓器	48
表 8.5	早期影響により罹患する確率推定のためのパラメータ	49
表 8.6	晚発性影響で考慮する影響と評価対象臓器	52
表 8.7	遺伝的影響で考慮する影響の種類と被ばく線量を評価する臓器	55
表 8.8	遺伝的影響評価の期間分類	55
表 8.9	寿命損失において考慮する疾患と対応臓器	57
表 9.1	防護措置と評価対象項目の関係	60

図リスト

図 3.1	OSCAAR コードの計算の流れ	2
図 3.2	2 次元極座標メッシュのイメージ	4
図 4.1	ガウスパフモデルの概念図	6
図 4.2	パフ補完の概念図	11
図 4.3	広域風速場(上図)および狭域風速場(下図)の格子網の例	17
図 4.4	気象データの位置内挿の概念図	18
図 4.5	風速ベクトル算出に使用するパラメータの概念図	18
図 6.1	直接沈着による放射性物質の移行概念図	25
図 6.2	経根吸収による放射性物質の移行概念図	26
図 7.1	早期防護措置のフロー図	32

図 7.2 COSYMA モデルによる線量低減係数と服用遅延時間の関係	36
図 7.3 ヨウ素代謝のコンパートメントモデル	41
図 7.4 ヨウ素代謝モデルによる線量低減係数と服用遅延時間の関係	41
図 7.5 移動に伴う避難のイメージ	42
図 7.6 移転実施のフロー図	44
図 8.1 絶対リスク予測モデルによる被ばく後の時間の関数としてのリスク概念図	52
図 8.2 線形モデルおよび二つの線形二次モデルにおける線量リスクの関係	53
図 9.1 経済影響評価における算定コスト	59
図 10.1 ビンサンプリングの概念図	64

1. はじめに

東京電力福島第一原子力発電所事故は日本における原子力災害対策の考え方を見直す契機となり、2012年に原子力規制委員会により原子力災害対策指針¹⁾が定められた。原子力災害対策指針では、「住民等の被ばく線量を合理的に達成できる限り低くすると同時に、被ばくを直接の要因としない健康等への影響も抑えることが必要である。」と提言されている。このような考え方を実行するためには、事故進展や住民居住地域の事故時の状態等の想定される状況に応じた事前の計画・対策とそれらを確実に実行するための準備が大変重要であるが、そのためには想定されうる事故シナリオと周辺環境の様々な条件によって、放射性物質による汚染の規模や状況はどの程度になるかをあらかじめ推定する必要がある。そのために、原子力施設等の安全性を確率を用いて定量的に評価する確率論的リスク評価（Probabilistic Risk Assessment：以下、「PRA」という。）が用いられる。

PRAは、レベル1から3までに区分され、レベル1では炉心損傷に至る事故のシナリオを同定し、その発生頻度を評価する。これに続くレベル2PRAではレベル1で評価したシナリオとその頻度を基にソースターム（環境中に放出される放射性物質の種類、性状、放出量、放出時期、放出継続期間）を評価する。レベル3は、広い意味ではレベル1および2を含む敷地外のリスクの定量化までのすべての評価プロセスを含むものであるが、本稿では敷地外に生ずる影響の評価として狭い意味としてレベル3を用いることとする。

日本原子力研究開発機構では、PRAに関する技術基盤を開発する中で1990年代以降、レベル3PRAに用いる確率論的事故影響評価コードシステムOSCAAR(Off-Site Consequence Analysis code for Atmospheric Release in reactor accident)²⁾の開発を進めてきた。OSCAARでは、レベル2PRAから求められた事故のソースタームを基に、サイトごとの過去の気象データを用いて放射性物質の放出から移流・拡散・沈着の過程を計算し、放射性物質の環境中における広がりを評価する。その結果を基に、外部被ばくおよび内部被ばくによる線量を求め、さらに健康リスクや寿命損失等の健康影響や経済的な影響についても評価できる。また、事故発生時に実行される避難、屋内退避、安定ヨウ素剤の服用、移転、食物摂取制限等の防護措置による線量低減効果を考慮した被ばく線量評価を行うことができる。防護措置を線量や時間の条件に応じたタイミングで行うことができ、防護措置をいつどのように実行するかを多角的に検討することができる。

本報告書では、OSCAAR内で用いられている様々な評価モデルについて解説を行い、OSCAARのユーザーの理解を深める一助となることを目的とする。

2. OSCAAR コードシステムの概要

OSCAAR は原子力発電所事故時の公衆被ばく線量および健康影響を確率論的に評価するためのレベル 3PRA コードとして 1990 年に旧日本原子力研究所（現日本原子力研究開発機構）によって開発された²⁾。現在もモデル等の開発・更新が行われている。

OSCAAR では、最初に、レベル 2PRA から得られたソースタームを基に、原子力発電所事故により環境中に放出された放射性物質の移流・拡散・沈着を評価し、次に被ばく線量の評価を行う。得られた被ばく線量評価の結果から、健康影響を評価する。被ばく線量評価では、実際の原子力発電所事故時に実施される防護措置を考慮した評価を行うことができる。

3. OSCAAR の構成

OSCAAR は異なる機能を持つ 6 つのモジュールから構成されている。ADD モジュールでは、放射性物質の放出から移流・拡散・沈着の過程を計算し、空気中の放射性放射能濃度と沈着量を算出することができる。ADD モジュールにより算出された濃度や沈着量を基に、EARLY モジュールでは防護措置を行わない場合の早期被ばく線量を評価し、CHRONIC モジュールでは防護措置を行わない場合の長期被ばく線量を評価する。防護措置を行った場合の被ばく線量は早期・長期ともに PM モジュールで評価する。EARLY モジュール、CHRONIC モジュール、PM モジュールで評価された被ばく線量を基に、HE モジュールで罹患や死亡等のリスクや寿命損失を評価し、ECONO モジュールで経済的な損失を評価することができる。6 つのモジュールによる計算の流れを図 3.1 に示す。

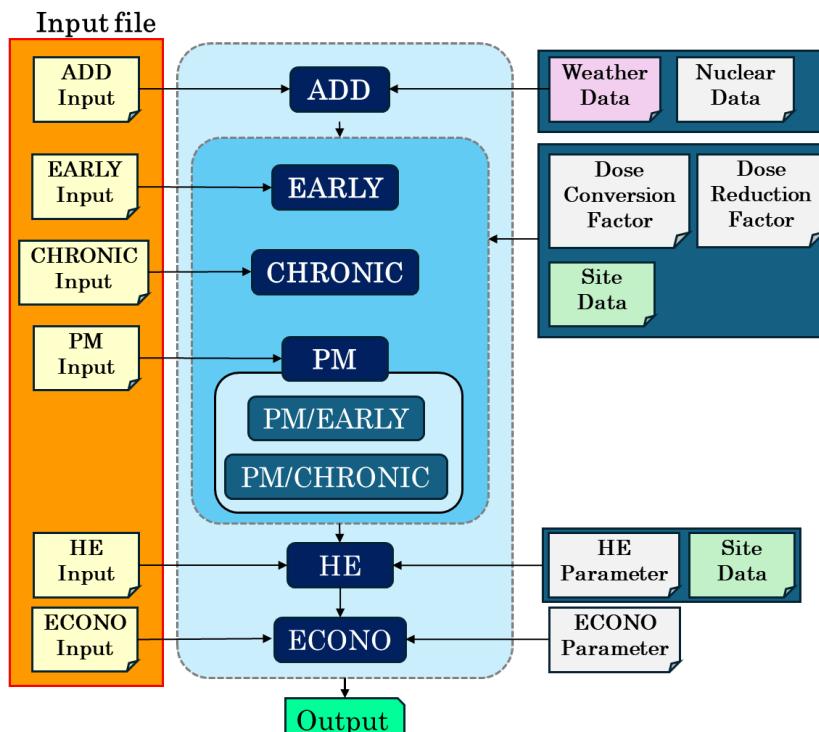


図 3.1 OSCAAR コードの計算の流れ

3.1. 入力と出力

OSCAAR の実行に必要なファイルは大きく分けて、入力ファイル、気象データファイル、サイトファイル、ライブラリファイルに分類される。入力ファイルには各モジュールの計算に必要なパラメータが ADD、EARLY、CHRONIC、PM、HE、ECONO の順に書かれており、パラメータの並び順は固定されている。

気象データファイルは 6 種類あり、サイト気象、狭域気象、広域気象、降水量、一様気象、ユーザーシーケンス気象に関するファイルが必要となる。サイト気象は放出点における風速ベクトル、降水量、大気安定度が 1 時間間隔で格納されている。狭域気象は放出点から 400km 四方程度の範囲内の格子点における風速ベクトルと大気安定度が 1 時間間隔で格納されている。広域気象は日本列島全土を覆う範囲の格子点における風速ベクトルが 3 時間間隔で気圧面ごとに格納されている。降水量は 2 次元極座標メッシュ状のデータが 1 時間間隔で格納されている。サイト気象、狭域気象、広域気象、降水量の 4 データファイルは気象庁が提供する GPV データを基に作成される。一様気象での評価を行う場合は、一様気象データファイルに書かれた風向、風速、降水量、大気安定度、混合層高さが読み込まれる。ユーザーシーケンス気象ファイルは時間ごとの風向、風速、降水量、大気安定度、混合層高さをユーザーが任意に設定して評価を行う場合に使用する。サイトデータは人口データ、農畜産物生産量データ、農作物生産面積データ、家畜数データ、コンクリート造建屋屋内退避場所および避難場所データ、避難移動データ、建蔽率データ、都道府県コードデータ、経済データの 9 つがある。避難移動データ以外のサイトデータは 2 次元極座標メッシュ状のデータが格納されている。

気象データやサイトデータのほか、被ばく線量換算係数と核種データのライブラリデータファイル、健康影響評価に用いる定数データも OSCAAR の実行には必要である。

積算被ばく線量や健康リスク等の計算結果は出力ファイルに出力される。出力項目はオプション選択によって設定することができる。オプション選択によって、1 時間ごとの被ばく線量や濃度をファイル出力することもできる。

3.2. 評価メッシュ

OSCAAR における被ばく線量や健康影響の評価は放射性物質の放出点を中心とした 2 次元極座標メッシュの各メッシュ中心で評価される。図 3.2 に 2 次元極座標メッシュのイメージ図を示す。極座標メッシュの大きさは放射性物質の拡散の度合いに応じて設定する必要がある。例えば、拡散が進んでいない放出点近傍ではより小さく設定する必要がある。OSCAAR では、方位方向の間隔は 32 分割に固定されているため、メッシュの大きさの調整は半径方向の間隔の調整によってのみ行うことができる。半径方向については間隔に加えて、分割数を主入力ファイルから設定することができる。ただし、半径方向の分割数の最大値は 25 を上限としている。そのため、放出点近傍では半径方向の間隔をより小さく設定する必要がある一方で、拡散が進んだ遠方になるに従い半径方向の間隔を大きく設定するような工夫が必要となる。

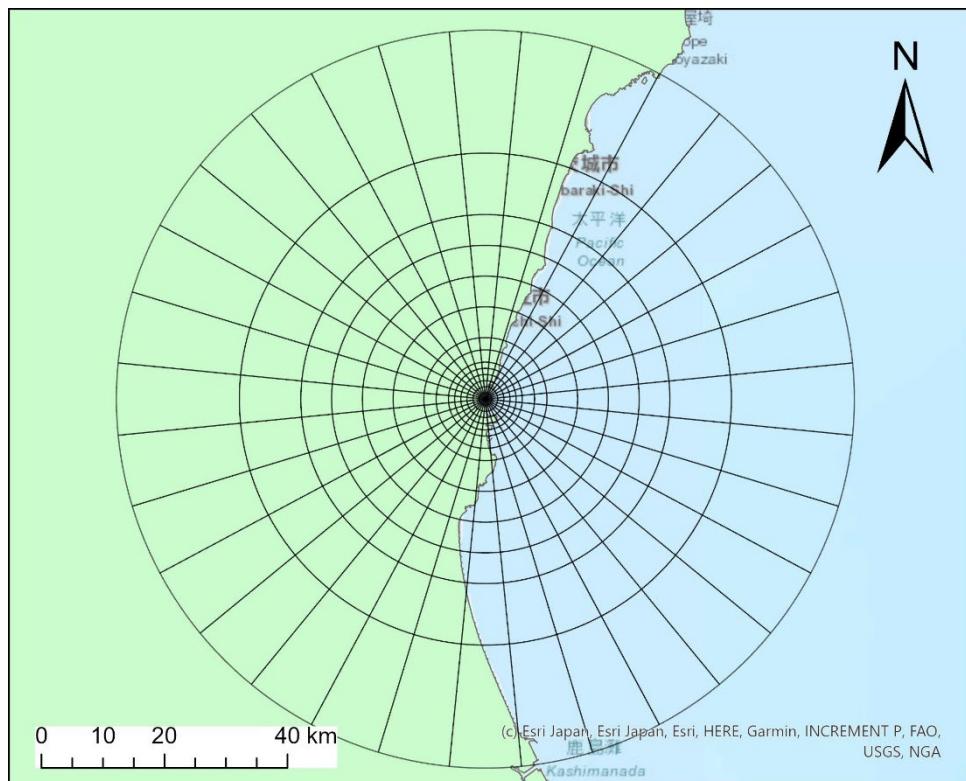


図 3.2 2次元極座標メッシュのイメージ

3.3. 被ばく線量評価

ADD モジュールにより算出された空气中放射能濃度および地表面沈着量を基に、被ばく線量を EARLY モジュール、CHRONIC モジュールおよび PM モジュールで評価する。評価できる被ばく線量はモジュールによって異なっている。

EARLY モジュールでは、空气中に浮遊する放射性物質によるクラウドシャイン、地表面に沈着した放射性物質によるグラウンドシャイン、空气中に浮遊する放射性物質の直接吸入および地表面に沈着した放射性物質が再浮遊により空气中に浮遊した粒子の吸入による実効線量、ユーザーが指定する臓器の等価線量および吸入による甲状腺等価線量を評価することができる。EARLY モジュールでは、被ばく線量の積算期間は 1 年間であるが、クラウドシャインおよび直接吸入については放出開始から最大 7 日間を積算期間としている。

CHRONIC モジュールでは、放射性物質の放出開始から 1 年後以降の被ばく線量を評価しており、地表面に沈着した放射性物質によるグラウンドシャイン、地表面に沈着した放射性物質の再浮遊の吸入、食物摂取による実効線量を評価することができる。

3.4. 防護措置

PM モジュールで適用できる防護措置は早期と長期で異なっており、PM モジュールも 2 種類に分かれている。放射性物質の放出から 1 年以内の期間を評価対象とする PM/EARLY では屋内退避、安定ヨウ素剤服用、避難、移転を考慮することができる。この中で、屋内退避については線量制限により実施するオプションを設定することができる。避難については、線量制限により実施するオプションと空間線量率制限により実施するオプションを設定することができる。放射性

物質の放出から 1 年以降を評価対象とする PM/CHRONIC では移転、食物摂取制限を考慮することができる。

3.5. 健康影響

HE モジュールでは被ばくによる健康影響を評価する。評価される健康影響は、被ばくした個人に現れる身体的影響と子孫に現れる遺伝的影響に分けられる。身体的影響は被ばく後短期間にその影響が現れる早期影響（早期死亡、早期罹患）と、被ばく後長期間を経てから発現する晩発性影響（晩発性がん死、晩発性がん）に分類される。

3.6. 経済影響

ECONO モジュールでは防護措置を実施することにより生じるコストや経済損失を評価する。評価されるコストは、人の移動に関するコスト、食物摂取制限に関するコスト、健康影響に関するコストの 3 つである。

4. 大気拡散計算

4.1. 大気拡散計算の概要

放射性物質が原子炉建屋や排気筒等の放出点から環境中へ放出された後、放射性物質は連続的な煙のような形態(プルーム)として環境中を拡散しながら移流していく。ADD モジュールでは、このような過程のモデルを用いて、放射性物質の空気中濃度や地表面への沈着量の空間的な分布を時間ごとに求めている。古くから、大気拡散をガウス分布で表現した例は多く存在している^{3,4)}。

放射性物質の移流と拡散を表現するモデルとして、OSCAAR ではガウスパフモデルが用いられている。ガウスパフモデルの概念図を図 4.1 に示す。ガウスパフモデルは本来、連続的なプルームを離散的な複数のパフとして放出されていると仮定して、パフごとに移流・拡散を計算するモデルである。ガウスパフモデルを採用することによって、放出点周辺気象の空間的な変化を考慮した計算が可能となる。プルームが移流していく過程で乾性沈着と湿性沈着によって地表面に放射性物質が沈着する。沈着が生じると、プルーム自体から放射性物質が除去されるため、拡散や物理崩壊に加えて、沈着によっても放射能濃度が減少していく。

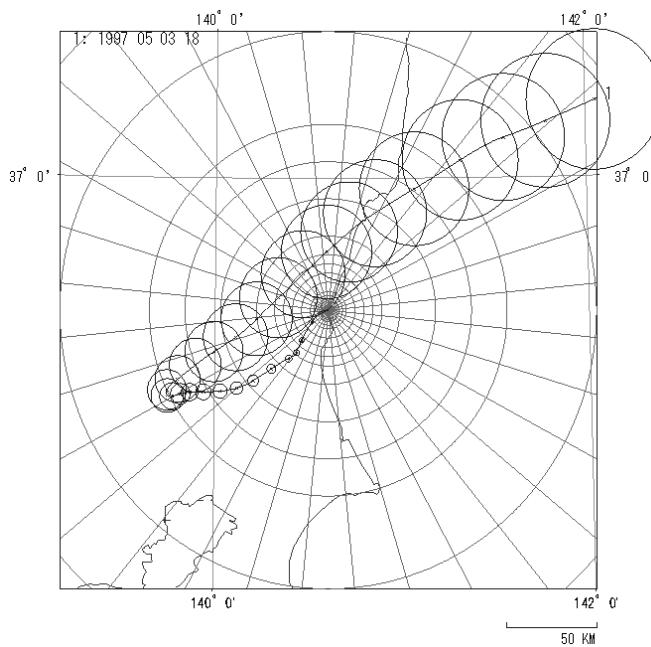


図 4.1 ガウスパフモデルの概念図

4.2. ガウスパフモデル

任意の評価点(x, y, z)における時刻 t における空気中放射能濃度 $\chi(x, y, z, t)$ (Bq m^{-3}) は 1 つのパフによる空気中放射能濃度 $\chi_i(x, y, z, t)$ を全放出パフ数 N_{puff} 分合算することによって次式のように算出される。

$$\chi(x, y, z, t) = \sum_i^{N_{puff}} \chi_i(x, y, z, t) \quad (4.1)$$

1 つのパフによる空気中放射能濃度は次式のように 3 次元ガウス分布として仮定される。

$$\chi_i(x, y, z, t) = Q_i(t) \cdot \frac{1}{2\pi\sigma_r^2} \exp \left[-\frac{(x_{p,i} - x)^2 + (y_{p,i} - y)^2}{2\sigma_r^2} \right] \cdot \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_z} \exp \left[-\frac{(z_{p,i} - z)^2}{2\sigma_z^2} \right] \quad (4.2)$$

ここで、 $(x_{p,i}, y_{p,i}, z_{p,i})$ はパフの中心位置、 σ_r と σ_z はそれぞれ水平方向と垂直方向の拡散パラメータ (m) を示す。 Q_i は 1 つのパフに含まれる放射能 (Bq) を示す。式(4.2)はブルームが地表や大気の混合層に妨げられずに拡散が進む場合であるが、実際には地表や大気の混合層でブルームが反射されるため、式(4.2)中の鉛直方向成分を $\psi(z)$ とすると、次式のように置き換えられる。

$$\begin{aligned} \psi(z) &= \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_z} \sum_{n=-\infty}^{\infty} \left\{ \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{z - h + 2nH}{\sigma_z} \right)^2 \right] + \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{z + h + 2nH}{\sigma_z} \right)^2 \right] \right\} \\ &= \frac{2}{\sqrt{2\pi}\sigma_z} \exp \left[-\frac{h^2}{2\sigma_z^2} \right] \end{aligned} \quad (4.3)$$

ここで、 n は反射回数、 H は混合層高さ(m)、 h は放出高さ(m)を示す。式(4.3)で式(4.2)の鉛直方向成分を置き換えると、次式のように書くことができる。

$$\chi_i(x, y, z, t) = Q_i(t) \cdot \frac{1}{2\pi\sigma_r^2} \exp \left[-\frac{(x_{p,i} - x)^2 + (y_{p,i} - y)^2}{2\sigma_r^2} \right] \cdot \frac{2}{\sqrt{2\pi}\sigma_z} \exp \left[-\frac{(z_{p,i} - z)^2}{2\sigma_z^2} \right] \quad (4.4)$$

移流距離が十分に長く、鉛直方向の拡散が十分に進んだ場合、放射性物質が鉛直方向に対して均一に分布しているとみなすことができ、式(4.2)は次式のようになる。

$$\chi_i(x, y, z, t) = Q_i(t) \cdot \frac{1}{2\pi\sigma_r^2} \exp \left[-\frac{(x_{p,i} - x)^2 + (y_{p,i} - y)^2}{2\sigma_r^2} \right] \cdot \frac{1}{H} \quad (4.5)$$

混合層高さは評価する気象によって、ユーザーが指定する場合と表 4.1 のように OSCAAR 内部で設定されたで固定値を使用する場合がある。4.8 節で後述する一様気象とユーザーシーケンス気象の場合はユーザーが混合層高さを指定し、それ以外では表 4.1 の設定が適用される。

表 4.1 大気安定度ごとの混合層高さ

大気安定度	A	B	C	D	E	F
混合層高さ(m)	1600	1200	800	560	320	200

4.3. 拡散パラメータ

ガウスパフモデルで使用している拡散パラメータは移流距離の増大に従い大きくなるとともに、その増加率は大気安定度に依存する。拡散パラメータと距離の関係を大気安定度ごとにまとめたデータとして、Pasquill-Gifford 曲線⁵⁾が最もよく知られている。Pasquill-Gifford 曲線をフィッティングにより数値式として求めた文献として、Tadmor and Gur⁶⁾、Eimutis and Konicek⁷⁾、Martin and Tikvart⁸⁾等がある。OSCAAR では、拡散パラメータ算出式を以下に示す Type1 と Type2 の 2 種類の式から選択することができる。

Type1 の式は Eimutis and Konicek の文献から、以下の式を用いて拡散パラメータを算出している。

$$\sigma_r = a_r l^{b_r} \quad (4.6)$$

$$\sigma_z = a_z l^{b_z} + c_z \quad (4.7)$$

ここで、 l はパフの移流距離(m)、 a_r 、 a_z 、 b_r 、 b_z 、 c_z は定数であり、大気安定度および距離に応じて表 4.2 の通りに与えられる。Type1 を選択した場合、これらの係数は固定値であり、ユーザーが変更することはできない。

表 4.2 拡散パラメータ計算の定数

	移流距離 (m)	大気安定度					
		A	B	C	D	E	F
a_r	-	0.3658	0.2751	0.2089	0.1471	0.1046	0.0722
b_r	-	0.9031	0.9031	0.9031	0.9031	0.9031	0.9031
a_z	$x < 100$ m	0.192	0.156	0.116	0.079	0.063	0.053
	$100 \text{ m} < x < 1000$ m	0.00066	0.0382	0.113	0.222	0.211	0.086
	$1000 \text{ m} < x$	0.00024	0.055	0.113	1.26	6.73	18.05
b_z	$x < 100$ m	0.936	0.922	0.905	0.881	0.871	0.814
	$100 \text{ m} < x < 1000$ m	1.941	1.149	0.911	0.725	0.678	0.74
	$1000 \text{ m} < x$	2.094	1.098	0.911	0.516	0.305	0.18
c_z	$x < 100$ m	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	$100 \text{ m} < x < 1000$ m	9.27	3.3	0.0	0.0	0.0	0.0
	$1000 \text{ m} < x$	-9.6	2.0	0.0	-13.0	-34.0	-48.6

Type2 では水平方向に対する式は Type1 と同じであるが、鉛直方向に対する式が次式の通りとなり、Type1 とは異なる。

$$\sigma_z = a_z l^{b_z} \quad (4.8)$$

Type1 では鉛直方向に対する拡散計算のための係数が大気安定度と移流距離に応じて異なるのに対し、Type2 では大気安定度のみに依存する。Type2 を選択した場合、式(4.6)および式(4.8)中の

各係数はユーザーが設定する必要があり、例えば、Tadmor and Gur の文献値等を使用することが可能である。

実際の気象場では、大気安定度が時間ごとに変化していく。そのため、OSCAAR では、移流中の大気安定度の変化に対応するため、式(4.6)～式(4.7)の微分値を逐次積算していく手法で拡散パラメータを計算している。Type1 と Type2 いずれに対しても、それぞれの式の微分値は次式の通りとなる。

$$\frac{d\sigma_r}{dl} = a_r \cdot b_r l^{b_r-1} \quad (4.9)$$

$$\frac{d\sigma_z}{dl} = a_z \cdot b_z \cdot l^{b_z-1} \quad (4.10)$$

時間ステップ i の拡散パラメータ $\sigma_{r,i}$ と $\sigma_{z,i}$ は次式の通りとなる。

$$\sigma_{r,i} = a_r \cdot b_r \Delta l^{b_r-1} + \sigma_{r,i-1} \quad (4.11)$$

$$\sigma_{z,i} = a_z \cdot \Delta l^{b_z-1} + \sigma_{z,i-1} \quad (4.12)$$

ここで、 Δl は時間ステップで移動した距離(m)を示す。

4.4. 沈着

OSCAAR における放射性物質の沈着については、乾性沈着と湿性沈着を考慮している。沈着は計算時間間隔ごとに計算している。沈着率の算出に関する係数は化学形態に応じて設定することができ、化学形態ごとの沈着しやすさの違いを考慮することができる。

4.4.1. 乾性沈着

乾性沈着は重力沈降等による空気中の放射性物質の地表面への沈着を指す。乾性沈着率は地表面における空气中放射能濃度に沈着速度 v_d (m s⁻¹) を乗じることにより求めることができる。ガウスパフモデルの場合、1 つのパフからの沈着率 $\omega_{D,i}$ (Bq m⁻² s⁻¹) は次式のように計算できる。

$$\omega_{D,i}(x, y, t) = v_d \cdot \chi_i(x, y, 0, t) \quad (4.13)$$

それぞれのパフからの沈着率を合算することによって任意の点における沈着率を算出することができる。また、乾性沈着による個々のパフからの放射能の減少率は次式のように表すことができる。

$$\frac{dQ_i}{dt} = - \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \omega_{D,i}(x, y, t) dx dy \quad (4.14)$$

式(4.14)を積分すると、次式のようになる。

$$\frac{Q_{i,1}}{Q_{i,0}} = \exp(-v_d \cdot \psi(0) \cdot \Delta t_D) \quad (4.15)$$

ここで、 $Q_{i,0}$ と $Q_{i,1}$ はそれぞれ沈着による放射性物質除去前後のパフ中放射能 (Bq) を示す。 Δt_D は乾性沈着した期間 (s) を示す。

4.4.2. 湿性沈着

湿性沈着は降水による放射性物質の空气中から地表面への沈着を指す。湿性沈着による沈着率 $\omega_{p,i}$ (Bq m⁻² s⁻¹)は単位時間当たりの空气中からの放射性物質の除去率であるウォッシュアウト係数を用いて以下のように計算される。

$$\omega_{p,i}(x, y, t) = \Lambda \int_0^{\infty} \chi_i(x, y, z, t) dz = \Lambda \cdot Q_i(t) \cdot \frac{1}{2\pi\sigma_r^2} \exp \left[-\frac{(x_{p,i} - x)^2 + (y_{p,i} - y)^2}{2\sigma_r^2} \right] \quad (4.16)$$

ウォッシュアウト係数 Λ (s⁻¹)は降水量 R (mm h⁻¹)から次式のように求めることができる。

$$\Lambda = C_1 \cdot R^{C_2} \quad (4.17)$$

ここで、 C_1 (s⁻¹) と C_2 (-) はそれぞれ化学形態に応じた定数である。

また、湿性沈着による個々のパフからの放射能の減少率は次式のように表すことができる。

$$\frac{dQ_i}{dt} = -\Lambda \cdot Q_i \quad (4.18)$$

式(4.18)を積分すると、次式のようになる。

$$\frac{Q_{i,1}}{Q_{i,0}} = \exp(-\Lambda \cdot \Delta t_p) \quad (4.19)$$

ここで、 Δt_p は乾性沈着した期間 (s)を示す。

4.5. 放射性壊変

原子炉内に内蔵された放射性核種は炉停止から放出までの間に炉内で放射性壊変する。その他、放射性壊変はパフの移流中や沈着後の事故早期・長期においても考慮される。放射性壊変による核種ごとの放射能は計算時間ステップごとに計算される。親核種と子孫核種の壊変後の放射能は次式によって計算される。

$$A_1 = A_{10} \cdot \exp(-\lambda_1 \cdot t) \quad (4.20)$$

$$A_2 = \frac{f \cdot \lambda_2}{\lambda_2 - \lambda_1} N_{10} [\exp(-\lambda_1 t) - \exp(-\lambda_2 t)] + A_{20} \cdot \exp(-\lambda_2 t) \quad (4.21)$$

ここで、 A_{10} と A_{20} はそれぞれ壊変前の親核種と子孫核種の放射能 (Bq)を示す。 A_1 と A_2 はそれぞれ壊変後の親核種と子孫核種の放射能 (Bq)を示す。 λ_1 と λ_2 はそれぞれ親核種と子孫核種の壊変定数 (s⁻¹)、 t は経過時間 (s)、 f は分岐比 (-) を示す。

4.6. 移流

パフは風に乗って移流していくが、その中心位置は風速ベクトルを基に算出される。OSCAAR では、鉛直方向のパフの中心位置は放出時の高さ h (m)で一定であり変化しない。一方、水平方向には次式に従い変化する。

$$\Delta x_{p,i} = u \cdot \Delta t \quad (4.22)$$

$$\Delta y_{p,i} = v \cdot \Delta t \quad (4.23)$$

$$z_{p,i} = h \quad (4.24)$$

ここで、 u および v はそれぞれ東西方向と南北方向の速度ベクトル (m s^{-1})を示す。パフの中心位置は任意の計算ステップ Δt ごとに更新される。

パフは任意の放出間隔で放出されるが、離散的なパフの放出で連続的なプルームを表現するためには、パフ同士の距離が離れすぎないように短い間隔で放出する必要がある。しかし、その場合、非常に多くのパフについて計算を行わなければならず、計算コストが増大する。計算コスト削減のため、OSCAAR では図 4.2 のように、位置 (x_i, y_i) を始点として移流したパフが時間ステップ内で到達する位置 (x'_i, y'_i) の間を補完する補完用のパフで埋めることにより連続的な分布を表現している。補完用パフの個数 N_{spuff} は次式のように設定される。

$$N_{spuff} = 10 \cdot \lfloor \Delta x / \sigma_r \rfloor + 1 \quad (4.25)$$

補完用のパフは等間隔で置かれ、放出パフの放射能 $Q_i(\text{Bq})$ はそれぞれの補完用パフに均等に分配される。また、拡散パラメータは補完用パフごとに移流距離に応じて計算される。パフを追跡する範囲は放出点からの距離を指定することで制限することができ、ユーザーが入力ファイルから指定できる。

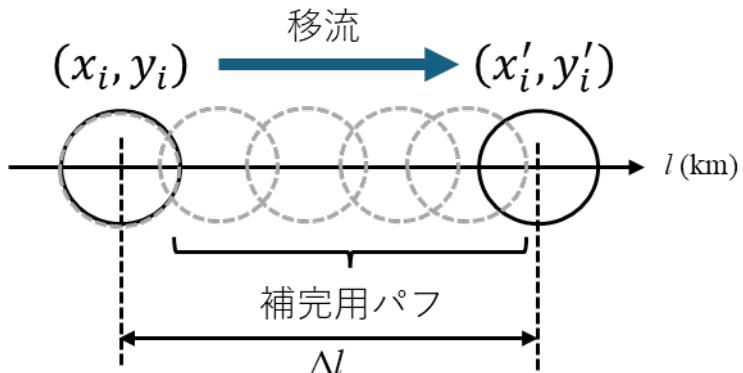


図 4.2 パフ補完の概念図

4.7. プルームライズ

プルームが浮力により放出高さよりも上昇する現象であるプルームライズを考慮することができる。プルームライズによって増加する分の放出高さ Δh (m)を計算する式は大気安定度ごとに異なる。大気安定度が A から D の場合、次式のように計算される^{9, 10)}。

$$\Delta h = \frac{1.6 F^{\frac{1}{3}} l^{\frac{2}{3}}}{\bar{u}} \quad (4.26)$$

一方、大気安定度が E と F の場合は次式のように計算される^{9, 10)}。

$$\Delta h = 2.6 \left(\frac{F}{\bar{u} S} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (4.27)$$

ここで、 \bar{u} は放出点高さにおける風速 (m s^{-1})を示す。F はブルームの上昇流束 ($\text{m}^4 \text{s}^{-3}$)であり、ブルームの熱放出率 Q (W)から、次式のように求めることができる。

$$F = 8.79 \times 10^{-6} \cdot Q \quad (4.28)$$

S は安定度パラメータ (s^2)と呼ばれ、OSCAAR では、大気安定度ごとに固定値を使用している。大気安定度 E では 0.000875、大気安定度 F では 0.00175 となっている。

4.8. 気象データ

3 章で述べた通り、OSCAAR では評価する気象の種類に応じて、6 種類の気象データを使い分ける。

一様気象 (W_TYPE=1) の場合はユーザーが風向、風速、大気安定度、降水量、混合層高さの一定値を入力する。一様気象では時間や場所に依らず一つの気象条件が継続する。ユーザーシーケンス気象 (W_TYPE=2) の場合はユーザーが 1 時間ごとの風向、風速、大気安定度、降水量、混合層高さの値を入力する。評価領域内の全ての場所で同一気象となるが、1 時間ごとに変化する。

一様気象とユーザーシーケンス気象以外では、実際の気象観測データや気象庁から配信される気象データを用いて、OSCAAR 用の気象データを作成する。具体的には、広域風速場データ、狭域風速場データ、サイト気象データ、降水量データの 4 つである (表 4.3)。これらは、気象庁が提供する数値予報の格子点データである GPV^{11, 12)} データを基に、補助コード GPV2OSC¹³⁾を用いて OSCAAR 用気象データを作成することができる。

広域風速場データは、日本全土を覆う領域をカバーする風速場データであり、後述する狭域風速場より外におけるパフの移流・拡散計算に使用される。広域風速場データファイルは GPV データの気圧面物理量に基づいて GPV2OSC で作成される。データファイルには、3 時間ごとに、各格子点の気圧面ごとの風速ベクトル (東西成分、南北成分の順。北向きおよび東向きが正) およびジオポテンシャル高度が収められている。気圧面は GPV2OSC の入力作成時に選択可能であるが、通常は 925hPa、850hPa、700hPa の 3 層を使用する。

狭域風速場データは、サイトを中心とした約 400km 四方の領域を対象としており、この領域におけるパフの移流・拡散計算に使用される。GPV データの地上面物理量に基づいて作成された狭域風速場データファイルには、1 時間ごとに、各格子点の地上 10m における風速ベクトルおよび大気安定度が収められている。

サイト気象データは、サイト近傍の解析に使用する風速ベクトル、大気安定度、降水量のデータである。風速ベクトルと大気安定度については最初の放出時の移流計算にのみサイト気象が使用される。降水量については、降水量データ内で設定されているサイト気象データの適用範囲以内ではサイト気象データの値が採用される。

降水量データは、サイトを中心とした 2 次元極座標メッシュのデータである。データファイルには 1 時間間隔で、サイト気象データの適用範囲以遠の 2 次元極座標メッシュにおける降水量が収められている。

OSCAAR の風速場データに使用する座標はアジアファインメッシュ (AFM) または正距方位図法が用いられており、どちらを使用するかはユーザーにより選択される。

表 4.3 OSCAAR 用気象データファイルの概要

	広域風速場データ	狭域風速場データ	サイト気象データ	降水量データ
座標系	直交座標系	直交座標系	1点のみ	2次元極座標メッシュ ※1※2
収録時間間隔	3時間	1時間	1時間	1時間
収録データ	・風速ベクトル (気圧面ごと) ・ジオポテンシャル高度	・風速ベクトル (地上 10m の値) ・大気安定度	・風速ベクトル ・降水量 ・大気安定度	・降水量
使用条件	・パフの中心が狭域風速場外の時の風速 ・狭域風速場におけるパフの平均輸送風を求める際のジオポテンシャル高度と大気安定度	・パフの中心が狭域風速場内の時の風速	・パフの放出時の風速およびサイト気象データの適用範囲以内の湿性沈着量評価の場合の降水量。なお W_TYPE=1, W_TYPE=2 の場合は、全範囲の湿性沈着量評価に本データが使用される。	・サイト気象データの適用範囲以遠の地表面への湿性沈着量の計算に使用

※1 2次元極座標メッシュは、ほかの人口データ、農畜産物データ、避難関連データ、評価メッシュの方位・距離分割数と一致している必要あり。

※2 空気中濃度および地表濃度を計算するポイントは、2次元極座標メッシュ上の方位・距離で定めたエリアごとの評価点であり、それぞれに平均降水量が計算される。

OSCAAR 用気象データを作成する支援コード GPV2OSC は、メソ数値予報モデル (MSM : Meso Scale Model) の GPV データを使用する。また、2007 年 11 月で配信が停止された領域数値予報モデル (RSM : Regional Spectral Model) も使用できる。表 4.4 にメソ数値予報モデル GPV データの概要を示す。なお、OSCAAR 気象データ作成のための補助コードでは、15 時間予報のデータのみが使用される。

表 4.4 メソ数値予報モデル GPV データの概要
(気象庁¹²⁾, 気象業務支援センター¹¹⁾から引用)

初期値	00, 03, 06, 09, 12, 15, 18, 21UTC (1 日 8 回)
予報時間	15 時間 (全ての初期値) 33 時間 (初期値が 03, 09, 15, 21UTC の場合) 39 時間 (初期値が 03, 06, 09, 15, 18, 21UTC の場合) 51 時間 (初期値が 00, 12UTC の場合) 予報間隔は、地上は 1 時間、気圧面は 3 時間
データフォーマット	GRIB2 (国際気象通報式 FM92 GRIB)
配信領域	北緯 47.6 度、東経 120 度を北西端 北緯 22.4 度、東経 150 度を南東端
格子系	等緯度等経度 地上面：緯度 0.05 度×経度 0.0625 度 (格子数 481×505) 気圧面：緯度 0.1 度×経度 0.125 度 (格子数 241×253)

*UTC:協定世界時 (日本時間は UTC+9(時間))

GPV における二次元風速ベクトルは、各格子点における東西方向の成分を u 成分、南北方向の成分を v 成分として、北向きおよび東向きを正として表現されている。ただし、投影変換により、基準点以外で真北および真東の方向と座標軸の方向がずれてしまうため、 x 軸と u 成分の方向、 y 軸と v 成分の方向が一致しなくなる。そこで、風速ベクトルの長さを保存しながら、以下のように方向を補正する。

$$u' = \sqrt{u^2 + v^2} \cdot \cos\theta \quad (4.29)$$

$$v' = \sqrt{u^2 + v^2} \cdot \sin\theta \quad (4.30)$$

$$\theta = \left(\tan^{-1} \frac{v}{u} \right) \cdot \frac{180}{\pi} + \lambda - \lambda_0 \quad (4.31)$$

ここで、 u は風速ベクトルの東西成分($m s^{-1}$)、 v は風速ベクトルの南北成分($m s^{-1}$)を示す。 λ_0 は基準点の経度 (度) を示し、正距方位図法の場合は対象サイトの経度、AFM の場合は 140 度となる。 λ は対象とする点の経度 (度) を示す。補正後の風速ベクトルの東西成分($m s^{-1}$)は u' 、南北成分($m s^{-1}$)は v' を示す。図 4.3 に広域風速場と狭域風速場の格子網の例を示す。

ガウスパフモデルにおけるパフの移流計算には、放出点高さにおける風速ベクトルが必要となる。しかし、サイト気象データや狭域気象データに格納されている風速ベクトルの観測高さは必ずしも放出高さと一致するとは限らないため、それぞれの観測点での風速ベクトルから放出高さにおける風速ベクトルを推定する必要がある。

放射性物質が放出されて最初の時間ステップではサイト気象が用いられるが、観測高さ h_{ob} (m) で観測されたサイト気象の風速ベクトル \overrightarrow{V}_{ob} ($m s^{-1}$) から放出高さ h (m) の風速ベクトル \overrightarrow{V} は次式を用いて求められる。

$$\overrightarrow{V} = \overrightarrow{V}_{ob} \left(\frac{h}{h_{ob}} \right)^p \quad (4.32)$$

ここで、 p は大気安定度と地面粗度に応じた係数 (-) である。OSCAAR では表 4.5 の値が用いられている。ただし、一様気象とユーザーシーケンス気象の場合、べき乗測は適用されない。

表 4.5 風速のべき乗測の指数

大気安定度 (6 分類)	A	B	C	D	E	F
p	0.12	0.12	0.15	0.22	0.33	0.56

サイト気象の風速ベクトルが採用される最初の計算ステップ以降では、狭域気象と広域気象の位置と時間に対する内挿値からパフの中心位置とその時刻における風速ベクトルを算出する。最初に、風速ベクトルを取得したい時刻を t 、位置を (x_w, y_w) とする。位置 (x_w, y_w) を囲む最近傍の点の座標をそれぞれ (x_1, y_1) 、 (x_1, y_2) 、 (x_2, y_1) 、 (x_2, y_2) とし、各点の風速を v (m s^{-1}) とする。各点の位置関係を図 4.4 に示す。また、時刻 t の前後の気象データ観測時刻を t_1 と t_2 とする。時刻 t_1 における (x_w, y_w) における風速を $v(t_1, x_w, y_w)$ は近傍点 4 点での風速の内挿値から以下のように求められる。

$$v(t_1, x_w, y_w) = v(t_1, x_1, y_1) \left(\frac{\Delta x_1}{\Delta x} \right) \left(\frac{\Delta y_1}{\Delta y} \right) + v(t_1, x_1, y_2) \left(\frac{\Delta x_1}{\Delta x} \right) \left(\frac{\Delta y_2}{\Delta y} \right) + v(t_1, x_2, y_1) \left(\frac{\Delta x_2}{\Delta x} \right) \left(\frac{\Delta y_1}{\Delta y} \right) + v(t_1, x_2, y_2) \left(\frac{\Delta x_2}{\Delta x} \right) \left(\frac{\Delta y_2}{\Delta y} \right) \quad (4.33)$$

ここで、 Δx 、 Δx_1 、 Δx_2 、 Δy 、 Δy_1 、 Δy_2 はそれぞれ図 4.4 に示す通り、点 (x_w, y_w) とその近傍 4 点間の x 方向および y 方向の距離を示す。式(4.33)と同様に時刻 t_2 についても同様の計算を行い、最後に時刻に対しての内挿を次式の通り行う。

$$v(t, x_w, y_w) = \frac{v(t_1, x_w, y_w) \cdot (t - t_1) + v(t_2, x_w, y_w) \cdot (t_2 - t)}{t_2 - t_1} \quad (4.34)$$

式(4.33)および(4.34)の通りの内挿を狭域気象データの風速ベクトルと大気安定度、広域気象データの風速ベクトルと気圧面高度に対して計算する。広域気象データは広域気象データファイルに格納されている気圧面数に応じて、複数の気圧面に対してそれぞれ風速ベクトルの計算を行う。例えば、広域気象データに 925 hPa、850 hPa、700 hPa の 3 気圧面のデータが格納されている場合は、式(4.33)と式(4.34)から得られた狭域気象データの風速ベクトル v_1 (m s^{-1}) と広域気象データの 3 気圧面の風速ベクトル (v_2 、 v_3 、 v_4) から次式のように重みづけ平均を行うことにより放出高さにおける風速ベクトルを算出する。

$$v_r(t, x_w, y_w) = \frac{\sum_{i=1}^4 (f_i \cdot v_i \cdot \psi_i(z_i) \cdot H_i)}{\sum_{i=1}^4 (f_i \cdot \psi_i(z_i) \cdot H_i)} \quad (4.35)$$

ここで、各パラメータの添え字が 1 の場合は狭域気象データに関する値を示しており、添え字が 2、3、4 の場合はそれぞれ広域気象データの 925 hPa、850 hPa、700 hPa の気圧面に関する値を示している。Z は地上観測高さ (10 m) と気圧面高度 (m) を示す。 ψ は式(4.3)から得られる地上観測高さ z_i (m) および各気圧面高度におけるパフの鉛直方向濃度分布を示している。地上観測高さまたは気圧面高度が混合層高さを超えない場合は f が 1、超える場合は 0 となる。

H_1 、 H_2 、 H_3 、 H_4 はそれぞれ観測高度または気圧面高度の間隔 (m) を示しており、以下のように計算される。

$$H_i = \Delta h_{i+1} + \Delta h_i \quad (4.36)$$

ここで、 Δh_i は条件によって以下のように求められる。

$$\begin{aligned} \Delta h_1 &= z_1 \quad (i=1) \\ \Delta h_i &= (z_i - z_{i-1})/2.0 \quad (z_{i+1} < H) \\ \Delta h_i &= H - z_i \quad (z_{i+1} > H) \end{aligned} \quad (4.37)$$

H および Δh の概念図を図 4.5 に示す。図 4.5 は 700 hPa の気圧面高度が混合層高さを超えた場合の例であり、この場合では(4.35)における f_4 は 0 となる。

広域気象データの気圧面および気圧面数は広域気象データを作成する際にユーザーによって任意に設定されるものである。

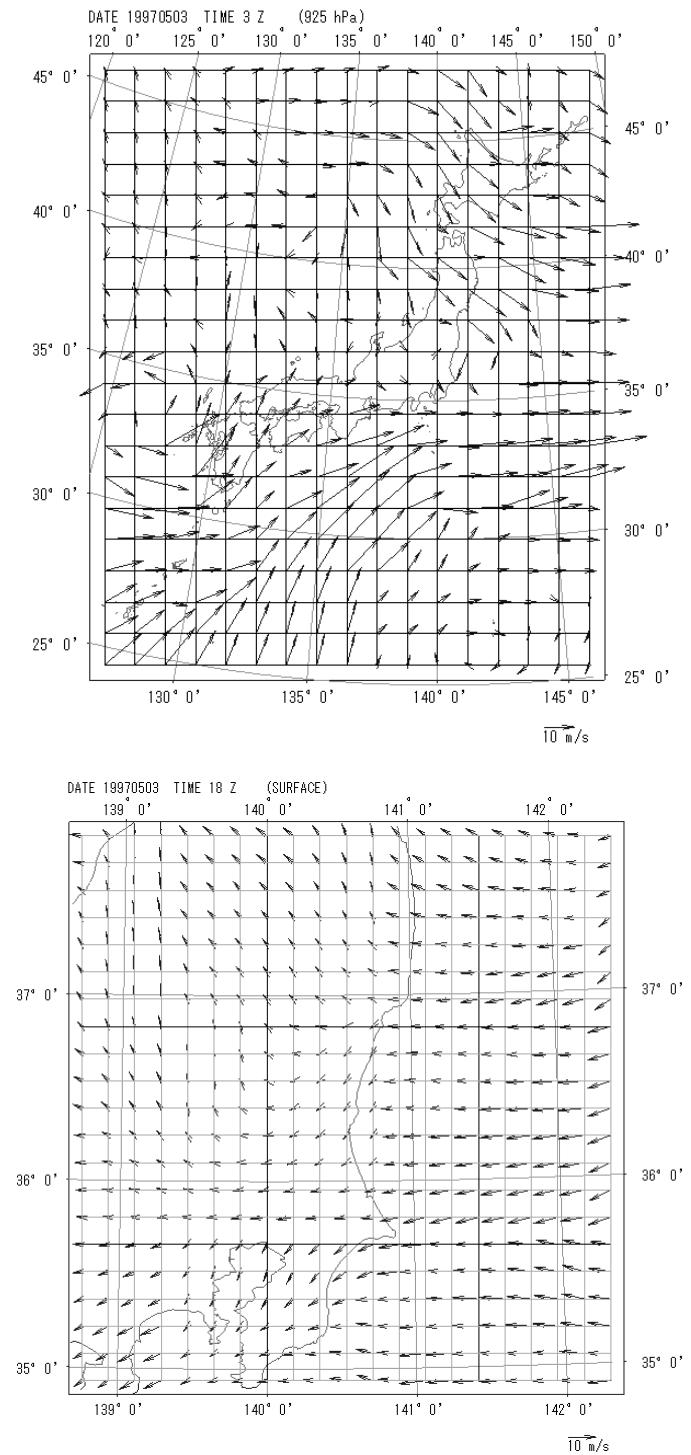


図 4.3 広域風速場(上図)および狭域風速場(下図)の格子網の例

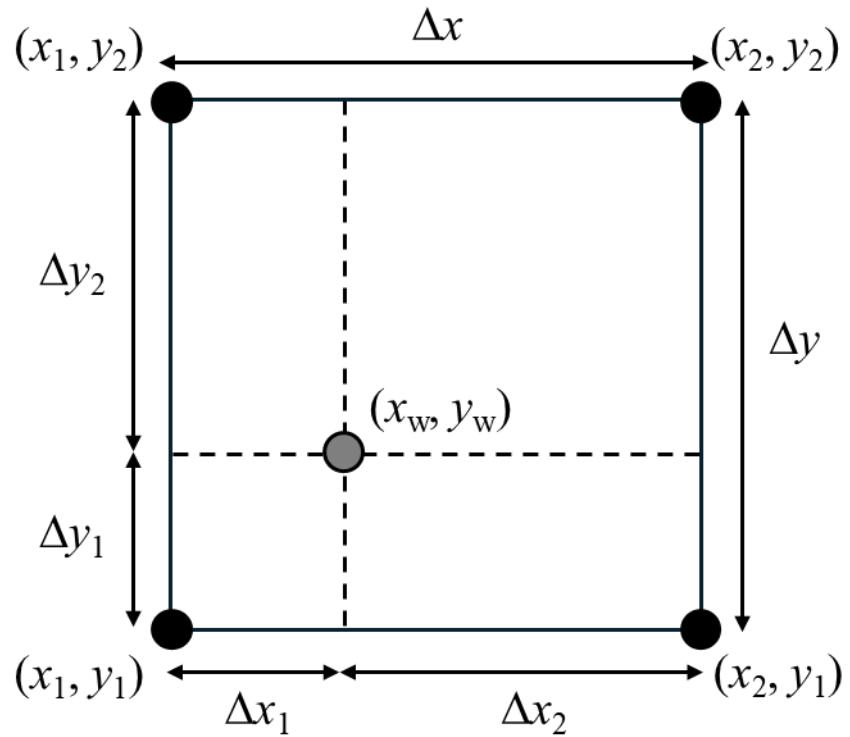


図 4.4 気象データの位置内挿の概念図

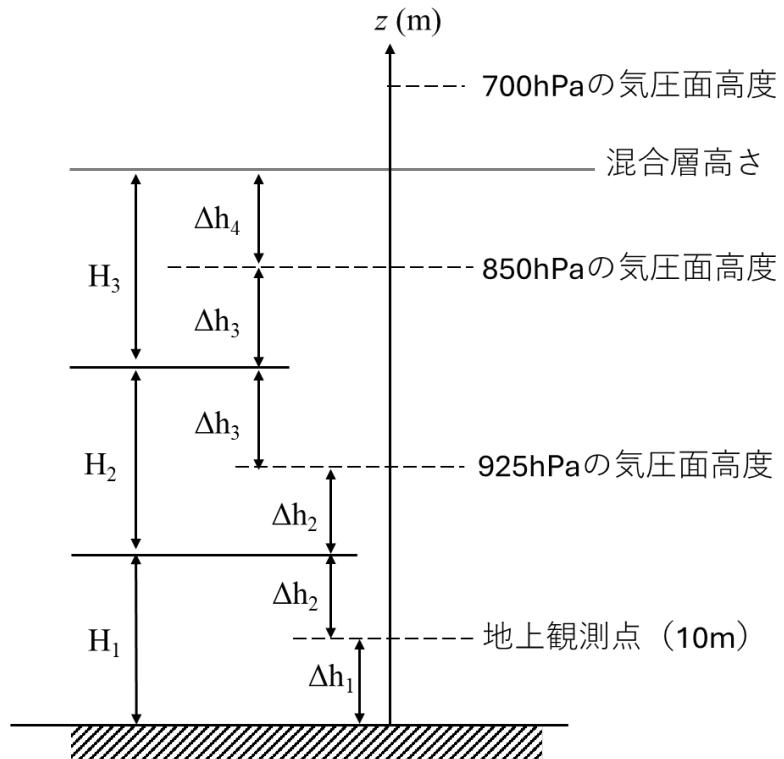


図 4.5 風速ベクトル算出に使用するパラメータの概念図

5. 早期被ばく線量評価

放出開始から 1 年以内の被ばく線量を早期被ばく線量と呼び、OSCAAR では EARLY モジュールで評価を行う。早期被ばく線量評価では、

- ・ 大気中の放射性物質からの外部被ばく（以下、「クラウドシャイン」という。）
- ・ 地表に沈着した物質からの外部被ばく（以下、「グラウンドシャイン」という。）
- ・ 空気中に浮遊した放射性物質の吸入による内部被ばく（以下、「直接吸入」という。）
- ・ 地表に沈着した粒子が再浮遊することにより空気中を浮遊する放射性物質の吸入による内部被ばく（以下、「再浮遊吸入」という。）

の 4 つの被ばく経路を考慮している。各被ばく経路に対する被ばく評価は表 5.1 のように放出開始から 1 年間を 7 つの期間に分けて評価している。

表 5.1 早期被ばく評価期間

Index	期間 (日)
1	0~1
2	1~7
3	7~14
4	14~21
5	21~30
6	30~200
7	200~365

5.1. 被ばく経路ごとの線量評価方法

5.1.1. クラウドシャイン

クラウドシャインによる時間 Δt (s) における臓器 k の外部被ばく量 $D_{CLD,k}$ (Sv) は、次式のように地表面における空気中放射能濃度に線量換算係数を乗じることにより算出される。

$$D_{CLD,k} = \left[\sum_{i=0}^{N_n} (AC_i \cdot DFC_{\infty ik}) \right] \cdot SFE_C \quad (5.1)$$

ここで、 AC_i は核種 i の時間積算された地表面における空気中放射能濃度 (Bq s m⁻³)、 $DFC_{\infty ik}$ は核種 i の臓器 k に対するクラウドシャインの線量換算係数 ((Sv s⁻¹)(Bq m⁻³)⁻¹)、 N_n は評価核種数を指す。 SFE_C はクラウドシャインに対する遮へい係数であり、次式のように求めることができる。

$$SFE_C = TE_O + (1 - TE_O) \cdot DRFE_C \quad (5.2)$$

ここで、 TE_O は屋外滞在割合、 $DRFE_C$ はクラウドシャインの被ばく低減係数を指す。

クラウドシャインによる被ばく線量の計算では放射性物質が空気中の半無限空間に一様の濃度で存在するとするサブマージョンモデル¹⁴⁾での評価を採用している。線量換算係数は ICRP Publ.144¹⁴⁾の核種別、年齢別、性別の値から、入力ファイルで設定した条件の値を用いている。

5.1.2. グラウンドシャイン

地表面に沈着した放射性物質からの時間 Δt (s) におけるグラウンドシャインによる外部被ばく量 $D_{GRD,k}$ (Sv) は、無限平面に一様に放射性物質が分布していると仮定したモデル¹⁴⁾を用いる。グラウンドシャインに対する線量換算係数は、このモデルを仮定して計算された値を用いた。計算式を以下に示す。

$$D_{GRD,k} = \left[\sum_{i=1}^{N_n} (GC_i \cdot DFG_{ik} \cdot \exp(-\lambda_i \cdot \Delta t)) \right] \cdot SFE_G \cdot \Delta t \quad (5.3)$$

ここで、 GC_i は核種 i の地表面沈着量 (Bq m^{-2})、 λ_i は核種 i の物理減衰に対する壊変定数 (sec^{-1})、 Δt は沈着からの経過時間 (s)、 DFG_{ik} は核種 i 、臓器 k に対するグラウンドシャインの線量換算係数 ($(\text{Sv s}^{-1})(\text{Bq m}^{-2})^{-1}$) を指す。 SFE_G はグラウンドシャインに対する遮へい係数であり、式(5.2)と同じ式で算出することができる。ただし、グラウンドシャインに対する被ばく線量低減係数 $DRFE_G$ に置き換える必要がある。グラウンドシャインの被ばく線量換算係数はクラウドシャインと同様に ICRP Publ.144¹⁴⁾ の核種別、年齢別、性別の値から、入力ファイルで設定した条件の値を用いているが、地中の放射性物質の深度分布は最も安全側となる平面線源、深度 0 m に対する値を用いている。

5.1.3. 直接吸入

プルームの通過中など、大気中に浮遊している放射性物質を時間 Δt (s) の間に吸入したことによる内部被ばく線量 $D_{INH,k}$ (Sv) は次式で表される。

$$D_{INH,k} = \left[\sum_{j=1}^7 \sum_{i=1}^{N_n} (AC_i \cdot DFI_{ikj}) \right] \cdot BR \cdot FI \quad (5.4)$$

ここで、 DFI_{ikj} は核種 i 、臓器 k 、評価期間 j に対する内部被ばく線量換算係数 (Sv Bq^{-1})、 BR は呼吸率 ($\text{m}^3 \text{ sec}^{-1}$)、 FI はフィルター係数 (-) を示す。フィルター係数とは、建物のフィルター効果によって、吸入による放射性物質の摂取量の低減が図れ、内部被ばく線量が低減できる効果を示すものであり、屋外滞在時では 1 となる。

内部被ばくの線量評価に使用する線量換算係数は、計算コード DSYS¹⁵⁾ であらかじめ計算した値を用いる。DSYS は体内代謝モデル等から得られる放射性物質の単位摂取量当たりの線量を計算するための支援コードであり、OSCAAR ではあらかじめ DSYS の計算結果を核種ごと、臓器ごと、年齢ごと、性別ごと、預託期間ごとに線量換算係数のデータベースとして備え、それを計算に用いている。放射性物質の吸収は化学形態によって異なり、FAST (F)、MODERATE (M)、SLOW (S) の 3 タイプに分類される。DSYS では、ICRP Pub.68¹⁶⁾ を参考に元素ごとの吸収タイプを表 5.2 のように設定している。DSYS を使用して整備された内部被ばく線量換算係数のライブラリの概要を表 5.3 に示す。なお、内部被ばく線量換算係数ライブラリに収録されている値は、早期被ばく線量評価と長期被ばく線量評価共通で使用する。OSCAAR の内部被ばく線量換算係数ライブラリには 0 日から預託期間までの積算された預託線量換算係数が収録されている。

後述する健康影響評価では、ある特定の期間における預託線量の寄与を考慮する必要があるため、ある期間における内部被ばく線量を計算する際には、OSCAAR 内部で線量換算係数の差分値

を用いて各期間における内部被ばく線量を計算する処理を行っている。なお、50年預託線量を出力しているテーブルはその限りではない。

(例) : 7日間預託線量=0~1日間の預託線量+1日~7日間の預託線量

表 5.2 内部被ばく線量換算係数の元素別吸収タイプ

元素	タイプ
Co	S
Rb	F
Sr	F
Y	S
Zr	M
Nb	S
Mo	S
Tc	M
Ru	S
Rh	S
Sb	M
Te	M
I	F
Cs	F
Ba	F
La	M
Ce	S
Pr	S
Nd	S
Np	M
Pu	S
Am	M
Cm	M

F:FAST、M:MODERATE、S:SLOW

表 5.3 内部被ばく線量換算係数のライブラリの概要

条件	内容
核種	60 核種 (各核種の吸収タイプは、表 5.2 参照)
年齢、性別	3 か月、1 歳、5 歳、10 歳、15 歳、成人の各男女
臓器	胃、小腸、大腸下部、肺、胸、卵巣、赤色骨髓、皮膚、睾丸、甲状腺、子宮、骨、脳、実効線量、副腎、膀胱、食道、大腸上部、結腸、腎臓、肝臓、筋肉、肺臓、気道、脾臓、胸腺、その他の臓器
収録預託期間	<ul style="list-style-type: none"> 吸入被ばく <ul style="list-style-type: none"> 0~1 日、1~7 日、7~14 日、14~21 日、21~30 日、30~200 日、200~365 日 1 年以降は 1 年刻み 経口摂取被ばく <ul style="list-style-type: none"> 1 年から 1 年刻み 最大預託期間 (吸入被ばく、経口摂取被ばく共通) 90 年(3 か月)、85 年(5 歳)、80 年(10 歳)、75 年(15 歳)、70 年 (成人)

5.1.4. 再浮遊吸入

地表面に沈着した放射性物質が風等で再度大気中に浮遊し、それを吸入することで内部被ばくが生じる。再浮遊した放射性物質の空気中放射能濃度は地表面沈着量に再浮遊係数を乗じることにより求めることができる。再浮遊係数は沈着からの経過時間によって変化する。沈着からの経過時間 t_j から Δt の期間における核種 i の再浮遊係数 $RES_{i,j}(\text{s m}^{-1})$ は次式のように求められる。

$$RES_{i,j} = \int_{t_j}^{t_j + \Delta t} e^{-\lambda_i t} \cdot (k_{1,i} \cdot e^{-\lambda_{r1,i} t} + k_{2,i} \cdot e^{-\lambda_{r2,i} t} + k_{3,i}) dt \quad (5.5)$$

ここで、 λ_i は核種 i の放射壊変による減衰定数(y^{-1})、 $k_{1,i}$ 、 $k_{2,i}$ は核種 i の再浮遊係数の短期、中期の減衰項の初期値(m^{-1})を指す。 $k_{3,i}$ は核種 i の再浮遊係数の長期の減衰の定数項(m^{-1})を指す。 $\lambda_{1,i}$ および $\lambda_{2,i}$ は核種 i の再浮遊係数の短期および中期の減衰項の減衰定数(y^{-1})を指す。

式(5.6)に使用される再浮遊係数計算のための係数はユーザーが入力ファイルにて指定するが、一例を表 5.4 に示す。

時刻 t_j から Δt の期間における再浮遊による吸入被ばく線量は次式のように求められる。

$$D_{RESUS,j} = \left[\sum_{k=1}^7 \sum_{i=1}^{N_n} (GC_i(t_i) \cdot DFI_{ikj} \cdot RES_{i,j}) \right] \cdot BR \cdot FI \quad (5.6)$$

ここで、 GC_i は核種 i の地表面濃度(Bq m^{-2})、 RES は核種 i の再浮遊係数(s m^{-1})を指す。 i は預託期間分類を示しており、表 5.3 に示す 7 期間である。

早期被ばく線量評価における再浮遊吸入の被ばく線量は、沈着開始を起点として、計算ステップである Δt を 1 時間として計算される。評価期間はユーザーにより指定されるパフの移流を計算する最大時間である TMAXPUF のステップ数分計算され、評価期間合計の再浮遊吸入被ばく線量 $D_{RESUS}(\text{Sv})$ は次式のように求められる。

$$D_{RESUS} = \sum_{j=0}^{TMAXPUF} D_{RESUS,j} \quad (5.7)$$

表 5.4 再浮遊係数の減衰項

文献	k_1 (m ⁻¹)	k_2 (m ⁻¹)	k_3 (m ⁻¹)	λ_{r1} (y ⁻¹)	λ_{r2} (y ⁻¹)
Linsley (1978) ¹⁷⁾	10^{-6}	-	10^{-9}	10^{-2}	-
Lassey (1980) ¹⁸⁾	9.0×10^{-5}	10^{-5}	10^{-9}	5.75	6.8×10^{-1}
高原 (2016) ¹⁹⁾	2.1×10^{-5}	2.3×10^{-8}	9.0×10^{-10}	25.05	2.91

6. 長期被ばく線量評価

長期被ばく線量評価では、大気拡散計算で計算された地表面への放射性物質の沈着量に基づいて、個人あるいは集団に対する長期被ばく線量を評価する。評価される被ばく経路は

- ・ 地表に蓄積した放射性物質からのグラウンドシャイン
- ・ 地表から再浮遊した放射性物質の吸入による内部被ばく
- ・ 農作物や牧草への直接沈着および根からの吸収により汚染された食物の摂取による内部被ばく

の3経路を評価する。評価期間は表 6.1 に示す通りである。

表 6.1 長期被ばく線量評価の評価期間

P	1	2	...	99	100	101
期間 (y)	0~1	1~2	...	98~99	99~100	100~∞

6.1. グラウンドシャイン

グラウンドシャインの計算では、早期被ばく線量評価の場合と同様に無限平面に一様に放射性物質が分布していると仮定したモデルが用いられている。長期被ばく線量評価においては、さらに土壤中への放射性物質の浸透および降雨等による地表面流亡による減衰の効果(ウェザリング)を、2つの指數関数の和と定数項からなる減衰モデル^{20,21)}で考慮している。評価期間 P (放出を起点とする時間 $t_{1,P}$ 年から $t_{2,P}$ 年)、臓器 L 、核種 i のグラウンドシャインによる外部被ばく線量 $D_{GRD,i,L}^P(\text{Sv})$ は、次式で計算する。

$$D_{GRD,i,L}^P = SF \cdot DFG_{i,L} \cdot SD_i \int_{t_{1,P}}^{t_{2,P}} e^{-\lambda_i t} (d_1 \cdot e^{-\lambda_1 t} + d_2 \cdot e^{-\lambda_2 t}) dt \quad (6.1)$$

ここで、 SF はグラウンドシャインに対する遮へい係数 (-)、 $DFG_{i,L}$ は臓器 L に対する核種 i のグラウンドシャイン線量換算係数 ($(\text{Sv y}^{-1})(\text{Bq m}^{-2})^{-1}$)、 SD_i は核種 i の初期沈着量(Bq m^{-2})、 λ_i は核種 i の放射壊変による減衰定数(y^{-1})、 d_1 はウェザリングによる早期(約 200 日)の減衰項の重み (-)、 d_2 はウェザリングによる後期(約 90 年)の減衰項の重み (-) ($d_{1,i} + d_{2,i} = 1$)、 λ_1 はウェザリングによる早期の減衰項の減衰定数(y^{-1})、 λ_2 はウェザリングによる後期の減衰項の減衰定数(y^{-1})を指す。ウェザリングによる減衰係数は半減期 $T_j(\text{y})$ を用いて次式の通り求められる。

$$\lambda_j = \ln(2)/T_j \quad (6.2)$$

式(6.1)に使用される各係数の例として表 6.2 に示す値が挙げられる。

表 6.2 ウェザリングに関わる係数例

	d_1	d_2	$T_1(\text{y})$	$T_2(\text{y})$
Gale ら ²¹⁾	0.63	0.37	0.61	92
NUREG/CR-4551 ²²⁾	0.5	0.5	0.5	90

6.2. 再浮遊吸入

長期被ばく線量評価における再浮遊吸入被ばく線量の計算方法は 5.1.4 項に記述した早期被ばく線量評価における場合と同じである。ただし、評価の起点は放射性物質の沈着終了後であり、積算時間ステップ Δt は 1 年となり、評価年数分積算する。

6.3. 食物摂取

食物摂取による被ばく評価の際に考慮する放射性物質の移行経路として、放射性物質が直接沈着した食物や牧草に起因するものと地表面に沈着した放射性物質を根から吸収（以下、「経根吸収」という。）した野菜等の食物や牧草に起因するものに分けられる。直接沈着した放射性物質による移行と経根による移行の概念図を図 6.1 と図 6.2 に示す。直接沈着による移行は以下の①と②、経根による移行は③と④によるものが考慮される。

- ① 放射性物質が直接沈着した可食植物（葉物野菜、根菜、穀物）を人が摂取
- ② 放射性物質が直接沈着した牧草を摂取した牛の肉や牛乳および牛乳により製造された乳製品を人が摂取
- ③ 地表面に沈着した放射性物質を可食植物（葉物野菜、根菜、穀物）が根から吸収し、それらを人が摂取
- ④ 地表面に沈着した放射性物質を牧草が根から吸収し、それらを摂取した牛の肉や牛乳および牛乳により製造された乳製品を人が摂取

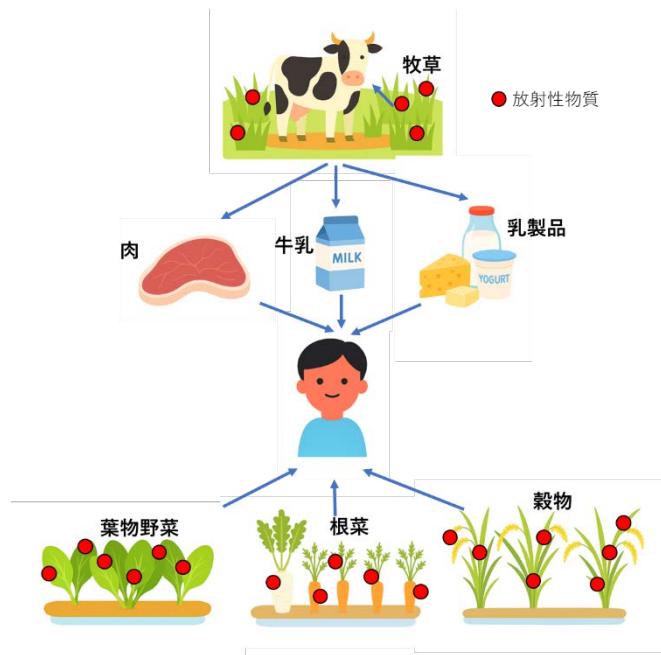


図 6.1 直接沈着による放射性物質の移行概念図

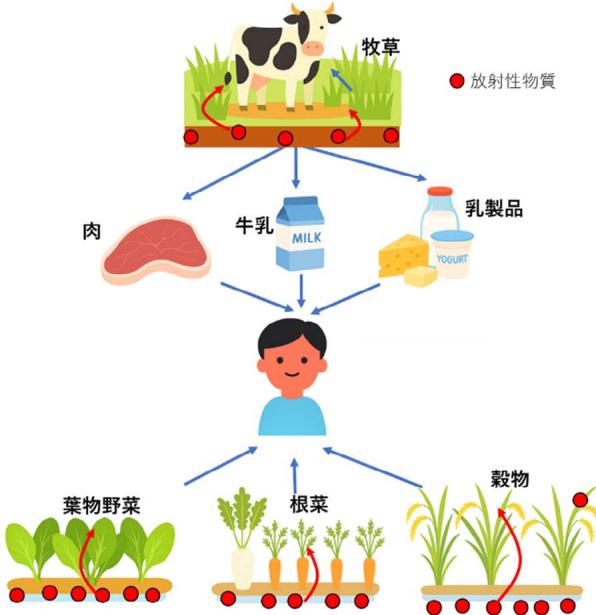


図 6.2 経根吸収による放射性物質の移行概念図

6.3.1. 食物摂取による被ばく線量評価

汚染した食物を摂取することによる食物ごとの放射性物質の移行経路 K 、臓器 L 、核種 i に対する個人内部被ばく線量 $D_{ING}^{K,L,i}$ (Sv) は次式の通り求められる。

$$D_{ING}^{K,L,i} = DF_{ING}^{K,L,i} \cdot Q_{ING}^{K,L,i} \quad (6.3)$$

ここで、 $DF_{ING}^{K,L,i}$ は線量換算係数 (Sv Bq⁻¹)、 $Q_{ING}^{K,L,i}$ は摂取した放射性物質の放射能 (Bq) である。 $Q_{ING}^{K,L,i}$ は地表面沈着量 ω_i (Bq m⁻²) を基に、土壤から食物への放射性物質の移行係数 $TF_{K,i}$ (Bq (Bq m⁻²)⁻¹) を用いて次式のように求められる。

$$Q_{ING,K,i,j} = \omega_i \cdot TF_{K,i} \quad (6.4)$$

OSCAAR では、摂取した放射性物質の放射能を 2 次元極座標メッシュのある 1 つのメッシュ内 (居住メッシュとする)、評価領域内 (2 次元極座標メッシュ内) と評価領域外の 3 領域の値を用いて次式のように計算することができる。

$$D_{ING}^{K,L,i} = DF_{ING}^{K,L,i} [(1 - f_m^K) \cdot f_s^K \cdot Q_{ING,d,r}^{K,L,i} + (1 - f_m^K) \cdot (1 - f_s^K) \cdot Q_{ING,ave}^{K,L,i}] \quad (6.5)$$

ここで、 $Q_{ING,d,r}^{K,L,i}$ は半径 d 、方位 r の居住メッシュ内での摂取量 (Bq)、 $Q_{ING,ave}^{K,L,i}$ は評価領域内の平均摂取量 (Bq) である。 f_s^K は評価領域内で生産される食物のうち居住メッシュ内で生産された食物の消費割合を示す。例えば、消費する食物のうち全てを居住メッシュ内で生産されたものに限定する場合は f_s^K は 1 となり、反対に評価領域全体で生産されたものを消費する場合は f_s^K は 0 となる。 f_m^K は評価領域外で生産された食物の消費率を示す。評価領域外で生産された食物は汚染されていないと仮定する。式(6.7)中の $(1 - f_m^K)$ は消費される食物のうち居住メッシュ評価領域内で生産された食物の消費率を示す。つまり、評価領域より外で生産された食物を消費しない場合は f_m^K は 0 となる。式(6.7)中の $Q_{ING,d,r}^{K,L,i}$ と $Q_{ING,ave}^{K,L,i}$ は式(6.5)から、メッシュごと沈着量 $\omega_{i,d,r}$ (Bq m⁻²) と 1 年間の生産量 $PAY_{d,r}^K$ (kg) から次式のように求められる。

$$Q_{ING,d,r}^{K,L,i} = \omega_{i,d,r} \cdot TF_{K,i} \quad (6.6)$$

$$Q_{ING,ave}^{K,L,i} = \frac{\sum_d \sum_r (\omega_{i,d,r} \cdot PAY_{d,r}^K \cdot TF_{K,i})}{\sum_d \sum_r PAY_{d,r}^K} \quad (6.7)$$

放射性物質を摂取することで生じる集団に対する内部被ばく線量 $D_{ING,P}^{K,L,i}$ は、次式で求められる。

$$D_{ING,P}^{K,L,i} = DF_{ING}^{K,L,i} \cdot \frac{PA_{d,r}}{CR^K} \cdot Q_{ING,ave}^{K,L,i} \quad (6.8)$$

ここで、 $PA_{d,r}$ は距離 d 、方位 r のメッシュにおける 1 日当たりの食物生産量 ($L d^{-1}$ または $kg d^{-1}$)、 CR^K は移行経路 K に該当する食物の平均消費率 ($L d^{-1}$ または $kg d^{-1}$) である。 $PA_{d,r}$ の算出方法は牧草の場合と牧草以外の植物の場合で異なり、次式の通りとなる。

$$PA_{d,r} = \frac{PRO_{dr}^K}{365.25} \quad (\text{牧草の場合}) \quad (6.9)$$

$$PA_{d,r} = \frac{PRO_{dr}^K}{T_{crop}} \quad (\text{牧草以外の食物の場合})$$

ここで、 T_{crop} は農作物の収穫期間 (d) を指す。

6.3.2. 移行係数

式(6.4) 中の移行係数 $CF_{K,i}$ は放射性物質の移行経路および食物の種類によって異なる。以降に放射性物質の移行経路ごとの移行係数について記述する。

6.3.2.1. 可食植物の移行係数

地表面に放射性放射性物質が $1 (Bq m^{-2})$ の濃度で沈着してから時間 t が経過後の直接沈着による可食植物中の放射能濃度 $C_{ep}(t)$ ($Bq m^{-2}$) は次式で求められる。

$$C_{ep}(t) = RF_{ep} \cdot R_r(t) \cdot R_w(t) \quad (6.10)$$

ここで、 RF_{ep} は可食植物による放射性物質の保持係数であり、地表面に沈着した放射性物質のうち可食植物表面または中に保持される割合を示す。 $R_r(t)$ は放射性物質の物理減衰による減少を考慮する係数、 $R_w(t)$ はウェザリングによる放射性物質の減少を考慮する係数を示す。 $R_r(t)$ は次式で求められる。

$$R_r(t) = \exp(-\lambda_r \cdot t) \quad (6.11)$$

ここで、 λ_r は放射性物質の崩壊定数を示す。 $R_w(t)$ は次式で求められる。

$$R_w(t) = l_1 \cdot \exp(-\lambda_w \cdot t) + l_2 \quad (6.12)$$

ここで、 λ_w はウェザリングの減衰定数である。 l_1 は時間に依存する保持係数の初期値であり、 l_2 は時間に依存する保持係数の定数を示す。 $l_1 + l_2$ は必ず 1 になる必要がある。 $R_w(t)$ は指数 λ_w の速さで減少し、 l_2 に収束することになる。

$C_{ep}(t)$ の濃度を持つ植物を人が摂取することにより体内に取込まれる 1 日当たりの放射能 $I_{eph}(t)$ ($Bq d^{-1}$) は次式で求められる。

$$I_{eph}(t) = \frac{C_{ep}(t) \cdot R_r(\Delta t_{ep,c}) \cdot CR_{ep}}{PD_{ep}} \quad (6.13)$$

ここで、 PD_{ep} は可食植物の生産密度 (kg m^{-2})、 CR_{ep} は人による可食植物の 1 日当たりの摂取量 (kg d^{-1})を示している。 $\Delta t_{ep,c}$ は生産から人による消費までの期間 (d)を示しており、 $R_r(\Delta t_{ep,c})$ は $\Delta t_{ep,c}$ の間の物理減衰による放射性物質の減少を考慮する係数となる。放射性物質が直接沈着して $\Delta t_{start,ep}$ (d) 後に生産が開始された可食植物から人への放射性物質の移行係数 TF_{ep} は $I_{eph}(t)$ (Bq d^{-1})を栽培期間 $T_{c,ep}$ で積分し、さらに生産開始までの放射性物質の物理減衰およびウェザリングによる減少を考慮することにより、次式のように求められる。

$$TF_{ep} = R_r(\Delta t_{start,ep}) \cdot R_w(\Delta t_{start,ep}) \cdot P_{LOSS,ep} \cdot \int_0^{T_{c,ep}} I_{eph}(t) dt \quad (6.14)$$

ここで、 $P_{LOSS,ep}$ は可食植物の加工過程における放射性物質の低減率である。

一方、経根吸収による汚染の場合、 $C_{ep}(t)$ は根の深度における土壤中の放射能濃度に依存して変化する。地表面に放射性物質が 1 (Bq m^{-2})の濃度で沈着してから時間 t が経過後の根の深度における土壤中の放射能濃度 $C_s(t)$ (Bq m^{-2})は次式のような微分方程式から求められる。

$$\frac{dC_s(t)}{dt} = -(\lambda_r + TR_{sep} + RR_{pl}) \cdot P(t) \quad (6.15)$$

ここで、 TR_{sep} は土壤から可食植物への移行率(d^{-1})、 RR_{pl} は畑の土壤からの放射性物質の除去率 (d^{-1})を示す。 $C_s(t)$ を用いて、可食植物中の放射能濃度 $C_{ep}(t)$ (Bq m^{-2})は次式の微分方程式から求められる。

$$\frac{dC_{ep}(t)}{dt} = TR_{sep} \cdot C_s(t) - \left(\lambda_r + \frac{CR_{ep}}{A_{cep} \cdot PD_{ep}} \right) \cdot C_{ep}(t) \quad (6.16)$$

ここで、 A_{cep} は一人分の可食植物の 1 日の消費量を生産するために必要な面積 (m^2)、 TR_{sep} は土壤から可食植物への放射性物質の移行率を示す。経根摂取の場合の移行係数は式(6.16)から求められる $C_{ep}(t)$ を式(6.13)に代入して算出される $I_{eph}(t)$ から、式(6.14)によって求められる。

6.3.2.2. 牛乳の移行係数

地表面に放射性物質が 1 (Bq m^{-2})の濃度で沈着してから時間 t が経過後の直接沈着による牧草中の放射能濃度 $C_{pg}(t)$ (Bq m^{-2})は次式で求められる。

$$C_{pg}(t) = RF_{pg} \cdot R(t) \cdot L(t) \quad (6.17)$$

ここで、 RF_{pg} 牧草による放射性物質の保持係数を示す。 $C_{pg}(t)$ の濃度を持つ牧草を牛が摂取することにより牛の体内へ取込まれる 1 日当たりの放射能 $I_{pgc}(t)$ (Bq d^{-1})は式(6.13)と同様に次式のように求められる。

$$I_{pgc}(t) = \frac{C_{pg}(t) \cdot CR_{pg}}{PD_{pg}} \quad (6.18)$$

ここで、 PD_{pg} は牧草の生産密度 (kg m^{-2})、 CR_{pg} は牛による牧草の 1 日当たりの摂取量 (kg d^{-1})を示している。1 日当たりに牛の体内へ取込まれる放射能 $I_{pgc}(t)$ のうち、牛乳へ移行する割合 $TR_{cm}(\text{d L}^{-1})$ は次式のように求められる。

$$TR_{cm} = (tr_1 + tr_2 \cdot t) \cdot (1 - \exp(-tr_3 \cdot t)) \quad (6.19)$$

ここで、 tr_1 、 tr_2 、 tr_3 はそれぞれ牛による放射性物質の消費割合を求めるための経験的係数である。それぞれの値は tr_1 が(d L^{-1})、 tr_2 が(L^{-1})、 tr_3 が(d^{-1})の単位となる。よって、牛乳中の放射能濃度 $C_m(t)$ (Bq L^{-1})は次式のように求められる。

$$C_m(t) = I_{pgc}(t) \cdot TR_{cm} \quad (6.20)$$

汚染された牧草を摂取した牛から得られる牛乳またはその牛乳から生産される乳製品を人が摂取することにより人体に取込まれる放射能 $I_{mh}(t)$ (Bq d^{-1})は次式のように求められる。

$$I_{mh}(t) = C_m(t) \cdot R_r(\Delta t_{m,c}) \cdot CR_{mh} \quad (6.21)$$

ここで、 CR_{mh} は人による 1 日当たりの牛乳の消費量 (L d^{-1})、 $\Delta t_{m,c}$ は牛乳の生産から消費までの期間(d)を示す。放射性物質が沈着して $\Delta t_{start,gr}$ (d) 後に放牧が開始された牛から生産された牛乳から人への移行係数 TF_m は $I_{mh}(t)$ (Bq d^{-1})を放牧期間 T_g で積分し、さらに生産開始までの放射性物質の物理減衰およびウェザリングによる減少を考慮することにより、次式のように求められる。

$$TF_m = R_r(\Delta t_{start,gr}) \cdot R_w(\Delta t_{start,gr}) \cdot P_{LOSS,m} \cdot \int_0^{T_g} I_{mh}(t) dt \quad (6.22)$$

ここで、 $P_{LOSS,m}$ は牛乳の加工過程における放射性物質の低減率である。

一方、経根吸収による汚染の場合、牧草が生育している土壤中の放射能濃度は式(6.15)と同じように求められる。ただし、土壤から牧草への移行係数 TR_{spg} と牧草地の土壤からの放射性物質の除去率 RR_{pos} を用いて、次式のように書き換えられる。

$$\frac{dC_s(t)}{dt} = -(\lambda_r + TR_{spg} + RR_{pos}) \cdot P(t) \quad (6.23)$$

さらに、牧草中の放射能濃度 $C_{pg}(t)$ は次式の微分方程式から求められる。

$$\frac{dC_{pg}(t)}{dt} = TR_{spg} \cdot C_s(t) - \left(\lambda_r + \frac{CR_{pg}}{A_{cpg} \cdot PD_{pg}} \right) \cdot C_{ep}(t) \quad (6.24)$$

ここで、 A_{cpg} は牛 1 頭による牧草の 1 日の消費量を生産するために必要な面積 (m^2)、 TR_{spg} は土壤から牧草への放射性物質の移行率(d^{-1})を示す。牛乳中の放射能濃度 $C_m(t)$ (Bq L^{-1})は次式のように求められる。

$$\frac{dC_m(t)}{dt} = TR_{pgm} \cdot C_{pg}(t) - (\lambda_r + TR_m) \cdot C_m \quad (6.25)$$

ここで、 TR_m は牛乳の分泌率(d^{-1})、 TR_{pgm} は牧草から牛乳への移行率($\text{m}^2 \text{ L}^{-1} \text{ d}^{-1}$)である。経根吸収による移行係数は式(6.25)から得られる $C_m(t)$ を式(6.21)に代入して得られる $I_{mh}(t)$ を用いて、式(6.22)から移行係数を算出する。

乳製品の移行係数の算出方法は牛乳の移行係数の場合と同じである。ただし、各係数を以下のように読み替えて計算式を用いること。

- ・牛乳中の放射能濃度 $C_m(t)$ (Bq L $^{-1}$) → 乳製品の放射能濃度 $C_{dp}(t)$ (Bq kg $^{-1}$)
- ・1日当たりの牛乳の消費量 CR_{mh} (L d $^{-1}$) → 1日当たりの乳製品の消費量 CR_{dph} (kg d $^{-1}$)
- ・牧草から牛乳への移行率 TR_{pgm} (m 2 L $^{-1}$ d $^{-1}$) → 牧草から乳製品への移行率 TR_{pgdp} (m 2 kg $^{-1}$ d $^{-1}$)

6.3.2.3. 牛肉の移行係数

地表面に放射性物質が 1 (Bq m $^{-2}$) の濃度で沈着した場合、牧草から牛の体内に取込まれる放射能は先述の通り、式(6.18)のように求められる。式(6.24)から求められる $C_{pg}(t)$ から、牛肉への放射性物質の移行係数 TR_{cb} (m 2 kg $^{-1}$ d $^{-1}$) と牛の体内における放射性物質の生物学的半減期 T_B (d)を考慮して、牛肉中の放射能濃度 $C_b(t)$ (Bq kg $^{-1}$) は次式の微分方程式のように求められる。

$$\frac{dC_b(t)}{dt} = C_{pg}(t) \cdot \frac{\ln(2)}{T_B} \cdot TR_{cb} - (\lambda_r + \tau_{meta} + \tau_{sl}) \cdot C_b(t) \quad (6.26)$$

ここで、 τ_{meta} は代謝による牛肉からの放射性物質の除去率 (d $^{-1}$)、 τ_{sl} は屠殺率(d $^{-1}$)を示す。牛肉から人への放射性物質の移行量は放牧期間中と放牧期間終了後とで異なる。放牧期間中の移行量は次式のように求められる。

$$I_{bh}(t) = C_b(t) \cdot R_r(\Delta t_{b,c}) \cdot CR_{bh} \quad (6.27)$$

ここで、 CR_{bh} は人による 1 日当たりの牛肉の消費量 (kg d $^{-1}$)、 $\Delta t_{b,c}$ は牛肉の生産から消費までの期間(d)を示す。一方、放牧期間終了後の移行量は次式のように求められる。

$$I'_{bh}(t) = C_b(T_g) \cdot R_r(\Delta t_{b,c}) \cdot CR_{bh} \cdot \exp(-\lambda_b \cdot t) \quad (6.28)$$

ここで、 λ_b は生物学的減衰定数であり、次式のように求められる。

$$\lambda_b = \frac{\ln(2)}{T_B} \quad (6.29)$$

式(6.27)および式(6.28)から、最終的に移行係数は次式のように求められる。

$$TF_b = R_r(\Delta t_{start,gr}) \cdot R_w(\Delta t_{start,gr}) \cdot P_{LOSS,b} \cdot \left\{ \int_0^{T_g} I_{bh}(t) dt + \int_0^{\infty} I'_{bh}(t) dt \right\} \quad (6.30)$$

ここで、 $P_{LOSS,b}$ は牛肉の加工過程における放射性物質の低減率である。

一方、経根吸収による汚染の場合、 $C_b(t)$ は式(6.24)で算出される $C_{pg}(t)$ を用いて、次式の微分方程式で求められる。

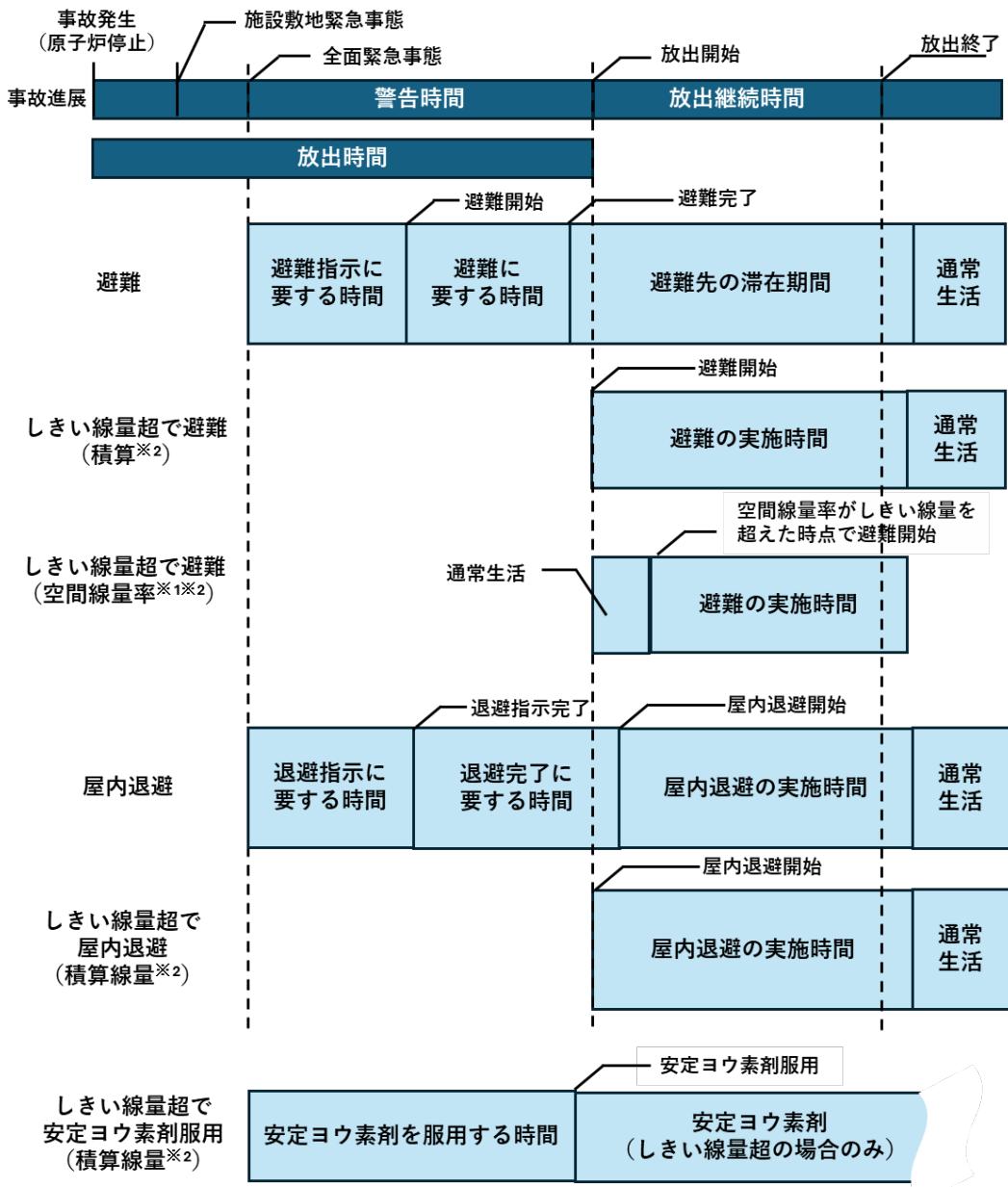
$$\frac{dC_b(t)}{dt} = C_{pg}(t) \cdot TR_{cb} - (\lambda_r + \tau_{meta} + \tau_{sl}) \cdot C_b(t) \quad (6.31)$$

経根吸収による移行係数は式(6.31)から得られる $C_b(t)$ を式(6.27)および式(6.28)に代入して得られる $I_{bh}(t)$ と $I'_{bh}(t)$ を用いて、式(6.30)から移行係数を算出する。

7. 防護措置

原子力発電所事故時に周辺住民の被ばく低減のため、様々な防護措置が実行される。防護措置を実行した場合の周辺住民の被ばく線量を推定するため、OSCAAR では防護措置による被ばく線量低減効果を考慮した被ばく線量評価を行うことができる。OSCAAR では、事故早期に実行される防護措置として、屋内退避、安定ヨウ素剤の服用、避難を考慮することができる。一方、長期の防護措置として、移転と食物摂取制限を考慮することができる。

予防的防護措置を準備する区域（PAZ: Precautionary Action Zone）および緊急防護措置を準備する区域（UPZ: Urgent Protective Action Planning Zone）における事故発生から防護措置が実行・解除されるまでのフロー図を図 7.1 に示す。



※1 UPZのみ空間線量率で避難を判断することが可能
 ※2 しきい線量で実行の防護措置実行を判断する場合、しきい線量以下のメッシュでは対策を行わない（通常生活）。

図 7.1 早期防護措置のフロー図

7.1. 早期防護措置

7.1.1. 通常生活

事故早期に防護措置を実行しない場合、住民は通常生活を送ると仮定される。通常生活では、時間によって、自宅、学校や職場、屋外に滞在することが想定され、その滞在者の割合は昼夜で異なる。滞在場所によって、被ばく線量低減効果が異なるため、通常生活時の被ばく線量低減係数 DRF_{NE} は1日の中でその時々にどれだけの人数がどのような建物もしくは屋外に滞在しているかを基に次式のように評価される。

$$DRF_{NE} = POP_{home} \cdot DRF_{wooden} + POP_{office} \cdot DRF_{conc} + POP_{outdoor} \cdot DRF_{outdoor} \quad (7.1)$$

ここで、 POP_{home} 、 POP_{office} および $POP_{outdoor}$ はそれぞれ自宅、学校・会社、屋外滞在者的人口割合を示す。人口割合は昼夜それぞれで値を設定することができ、時間によって昼夜の値のいずれかが用いられる。 DRF_{wooden} 、 DRF_{conc} および $DRF_{outdoor}$ はそれぞれ木造建屋、コンクリート造建屋および屋外滞在時の被ばく線量低減係数である。被ばく経路ごとの DRF_{wooden} 、 DRF_{conc} および $DRF_{outdoor}$ を用いて被ばく経路ごとの DRF_{NE} が算出される。屋外滞在時の被ばく線量低減係数はクラウドシャインおよび吸入被ばくについては 1 であるが、グラウンドシャインについては建物等による遮へい効果による被ばく線量低減効果を考慮する係数として、1 以下の値となる場合がある。

事故後長期における通常生活については、昼夜の区別はなく、次式のように、屋外、木造建屋内、コンクリート造建屋内の滞在時間割合で重みづけした被ばく線量低減係数 DRF_{NC} が用いられる。

$$DRF_{NC} = T_{home} \cdot DRF_{wooden} + T_{office} \cdot DRF_{conc} + T_{outdoor} \cdot DRF_{outdoor} \quad (7.2)$$

ここで、 T_{home} 、 T_{office} 、 $T_{outdoor}$ はそれぞれ屋外、木造建屋内、コンクリート造建屋内の滞在時間割合を示す。長期のグラウンドシャインに対する被ばく線量低減係数についても、早期の場合と同様に、地面粗度による低減効果を考慮して式(7.2)の通りとなる。

屋内退避や避難等の防護措置が終了した後は、通常生活における被ばく線量低減係数が適用される。

7.1.2. 屋内退避

7.1.2.1. PAZ における屋内退避

PAZ では避難が困難な要配慮者等のコンクリート造の遮へい効果が高い建屋（堅牢な施設）への屋内退避が実施される。クラウドシャイン、グラウンドシャイン、直接吸入被ばく、再浮遊吸入被ばくのそれぞれの被ばく経路に対してユーザーによって設定された堅牢な施設の線量低減係数が適用される。図 7.1 に示す屋内退避指示完了後の退避完了に要する時間は屋外滞在時の被ばく線量低減係数 DRF_{RPF} が適用される。屋内退避指示に要する時間中は通常生活、屋内退避完了に要する時間中は移動のため屋外滞在していると仮定される。

7.1.2.2. UPZ における屋内退避

UPZ では事故発生時に木造建屋やコンクリート造建屋内に滞在している場合はそのまま滞在建屋内で屋内退避を行う。一方、屋外滞在者のうち木造建屋に屋内退避する者とコンクリート造建屋へ屋内退避する者に分けられ、屋外滞在者のうち木造建屋に屋内退避する人口の割合 POP_w として設定される。UPZ における屋内退避による被ばく線量低減係数 $DRF_{Shelt_{UPZ}}$ は次式のように求められる。

$$DRF_{SUPZ} = (POP_{home} + POP_{outdoor} \cdot POP_w) \cdot DRF_{wood} + [POP_{office} + POP_{outdoor}(1 - POP_w)] \cdot DRF_{conc} \quad (7.3)$$

図 7.1 に示す屋内退避指示完了後の退避完了に要する時間は屋外滞在時の被ばく線量低減係数が適用される。

7.1.2.3. WINSEC モデルによる吸入被ばく線量低減係数

吸入被ばく線量に対する線量低減係数算出方法のオプションとして、WINSEC モデルを使用することができる。WINSEC モデルは建蔽率と風速による吸入被ばく線量低減係数の変化を考慮したモデル^{23, 24)}であり、あらかじめ計算された値を収録したライブラリを使用する。吸入被ばく線量低減係数 DRF_{IRF} は次式のように求められる。

$$DRF_{IRF} = \frac{D_I}{D_O} = \frac{\sum_i DFI_i \cdot BR \cdot \int_0^T C_{I,i}(t) dt}{\sum_i DFI_i \cdot BR \cdot \int_0^T C_{O,i}(t) dt} \quad (7.4)$$

ここで、 D は吸入被ばくによる線量 (Sv)、 DFI_i は核種 i に対する内部被ばく線量換算係数 (Sv Bq⁻¹)、 BR は呼吸率 (m³ sec⁻¹)、 C は空気中放射能濃度 (Bq m⁻³) であり、添え字の I は屋内、 O は屋外を表す。なお、屋内の空気中濃度は次式のように求められる。

$$\frac{dC_I(t)}{dt} = P(t)\lambda_e C_O(t) - (\lambda_e(t) + \lambda_d(t) + \lambda) \cdot C_I(t) \quad (7.5)$$

ここで、 λ_e は自然換気率 (h⁻¹)、 λ_d は屋内での沈着率 (h⁻¹)、 P は浸透率、 λ は壊変定数 (h⁻¹) である。WINSEC モデルでは、風速、屋内外の温度差、建蔽率および隙間相当面積を入力値として、先行研究²⁵⁾に基づいて作成された以下の式を用いて算出された自然換気率を使用する。

$$\lambda_e = \exp[1.1[\ln[(0.00005K^2 - 0.004K + 0.08)U^2 + (0.0003K^2 - 0.022K + 0.61)U] + 0.94\ln S] - 3.3] \quad (7.6)$$

ここで、 K は建蔽率 (%)、 U は高さ 10m における風速 (m s⁻¹)、 S は隙間相当面積 (cm² m⁻²) である。 K はある区域内の面積に対するその区域内に存在する建物の占める割合であり、通常使われている建蔽率（土地面積に対する建築された建物面積の割合）とは異なる。隙間相当面積は建物が持っている隙間を全て面積として集め、建物の床面積で規格化したものである。自然換気率は建物の気密性能を表す指標として利用されている値である。

WINSEC モデルでは、Hirouchi ら²³⁾の実験結果を基にした屋内での沈着率と浸透率を使用する。有機ヨウ素の屋内での沈着率は 0 h⁻¹、粒子状元素の屋内での沈着率は 0.1 h⁻¹ を使用する。また、有機ヨウ素の浸透率は 1 を使用し、粒子状元素の浸透率は式(7.6)で求めた自然換気率を用いて、次式のように求められる。

$$P = \begin{cases} -0.2277\lambda_e^2 + 0.719\lambda_e + 0.442 & (\lambda_e < 1.4 \text{ の場合}) \\ 1 & (\lambda_e \geq 1.4 \text{ の場合}) \end{cases} \quad (7.7)$$

ライブラリには、風速を一定としてあらかじめ計算された DRF が収録されており、WINSEC モデルではさらにプルーム通過前後の風速変動を考慮するように、次式を用いて DRF_{IRF} が補正される。

$$DRF'_{IRF} = CC \times DRF \quad (7.8)$$

ここで、 DRF_{IRF} は風速（大気中濃度で重みづけ平均した風速）を一定として計算された吸入被ばく線量低減係数（ライブラリに収録）、 DRF' はプルーム通過前後の風速変動を考慮した吸入被ばく

線量低減係数であり、式(7.2)で使用される。CC は DRF を補正するための係数であり、次式のように求められる。

$$\begin{aligned} CC &= PC \times RU - yI \\ PC &= \alpha_{PC} K^3 + \beta_{PC} K^2 + \gamma_{PC} K + \delta_{PC} \\ yI &= \alpha_{yI} K^3 + \beta_{yI} K^2 + \gamma_{yI} K + \delta_{yI} \end{aligned} \quad (7.9)$$

ここで、RU はプルーム通過中と後の風速比であり、プルーム通過後 5 時間分の平均風速に対する大気中濃度で重みづけした風速の割合である。 α 、 β 、 γ 、 δ は建築年度分類と核種分類（有機ヨウ素または粒子状元素）ごとに異なり、ライブラリに収録されている。

7.1.2.4. 線量制限による屋内退避の実施

PAZ および UPZ の屋内退避の実施をユーザーが指定するしきい線量により判断する機能に対するオプションが整備されている。屋内退避の場合は 7 日間の積算線量 D_{7d} がしきい線量を超えるメッシュについては屋内退避を実施し、反対にしきい線量を超えないメッシュについては、屋内退避は行われず通常生活が継続される。ここで、積算線量 D_{7d} はクラウドシャイン、グラウンドシャイン、直接吸入、再浮遊吸入の 4 経路の合計線量である。プログラム上の手順として、最初に防護措置を行わない 7 日間積算被ばく線量を算出し、次に、その結果からしきい線量を超えるメッシュを抽出し、該当するメッシュに対してのみ屋内退避による被ばく線量低減効果を考慮した計算を行っている。

線量制限による屋内退避の実施オプションを使用した場合、通常の屋内退避のような退避指示に要する時間や退避完了に要する時間の概念はなく、放出開始と同時にしきい線量を超えるメッシュに対して屋内退避が実施される。

7.1.3. 安定ヨウ素剤服用

安定ヨウ素剤の服用によって吸入摂取される放射性ヨウ素の甲状腺への蓄積を低減することができる。安定ヨウ素剤の服用は屋内退避と併用される。OSCAAR では、PAZ および UPZ における屋内退避のオプションとして実施を選択することができる。安定ヨウ素剤の服用は、通常生活時の甲状腺等価線量がユーザーにより指定されるしきい線量を超えると実行される。安定ヨウ素剤による甲状腺等価線量の被ばく線量低減係数を求めるモデルとして、OSCAAR では欧州で開発された原子力事故発生時のオフサイトへの影響を評価するコードである COSYMA (COde SYstem from MARIA)²⁶⁾で使用されているモデル（以下、「COSYMA モデル」という。）とヨウ素代謝を考慮したモデル（以下、「ヨウ素代謝モデル」という。）の 2 つから選択することができる。2 つのいずれかのモデルで算出した甲状腺等価線量の被ばく線量低減係数を用いて、安定ヨウ素剤服用時の吸入被ばく実効線量 $D_{INH,E,ITB}$ (Sv) は次式のように求められる。

$$D_{INH,E,ITB} = D_{INH,E,NoPM} - W_{thyroid} \left[\sum_i (AC_i \cdot DFI_{i,E}) \cdot (1 - DRF_{INH,ITB}) \right] \cdot BR \cdot FI \quad (7.10)$$

ここで、 $D_{INH,E,NoPM}$ は安定ヨウ素剤を服用しない場合の吸入被ばく実効線量 (Sv)、 $W_{thyroid}$ は甲状腺の組織加重係数、 $DFI_{i,E}$ は実効線量に対する内部被ばく線量換算係数 (Sv Bq^{-1})、 $DRF_{INH,ITB}$ は安定ヨウ素剤投与による被ばく低減係数 (-)、 BR は呼吸率 ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$)、 FI はフィルター係数 (-)である。

安定ヨウ素剤の服用はユーザーが指定する甲状腺等価線量のしきい線量を超えるメッシュに対してのみ、図 7.1 に示すように安定ヨウ素剤を服用する時間の経過後に実施される。

7.1.3.1. COSYMA モデル

COSYMA モデルを用いた場合、放射性ヨウ素の吸入摂取による甲状腺等価線量に対する安定ヨウ素剤の服用による低減係数 $DRF_{INH,ITB}$ は次式で示される。

$$DRF_{INH,ITB} = 1 - e^{(-0.693(t+0.25))/4} \quad (7.11)$$

ここで、 t は服用の遅延時間 (単位)を示す。ただし、 $t \leq -0.25(\text{hour})$ のときは $DRF_{INH,ITB}=0$ とする。 $DRF_{INH,ITB}$ と服用遅延時間の関係を図 7.2 に示す。 $t \leq -0.25(\text{hour})$ のとき、 $DRF_{INH,ITB}$ は 0 となる。COSYMA モデルでは、放射性ヨウ素の同位体、対象者の年齢等による違いは考慮されない。

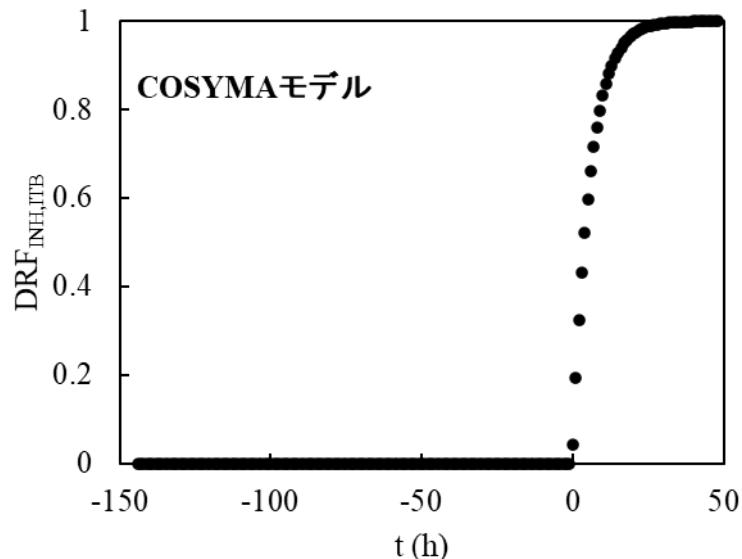


図 7.2 COSYMA モデルによる線量低減係数と服用遅延時間の関係

7.1.3.2. ヨウ素代謝モデル

OSCAAR におけるヨウ素代謝モデルでは、吸入により体内に取り込まれた放射性ヨウ素が呼吸気道を通過して血流に移行する過程に対して ICRP Publ.66 の呼吸気道モデル²⁷⁾を基に、安定ヨウ素剤として経口摂取された安定ヨウ素に対して ICRP Publ.30 の胃腸管モデル²⁸⁾を基にして構築されている。血流に移行した後は、Johnson によるヨウ素代謝モデル²⁹⁾を基に甲状腺への移行をモデル化している。OSCAAR で用いられているヨウ素代謝のコンパートメントモデルを図 7.3 に示す。図 7.3 中の赤矢印が放射性ヨウ素の吸入摂取を示しており、緑矢印が安定ヨウ素の経口摂取を示している。

Johnson によるヨウ素代謝モデルは、内臓または肺、血液、甲状腺、軟部組織、膀胱の 5 つのコンパートメントで構成されている。体内に取込まれたヨウ素は最初に内臓または肺コンパートメントに移行した後、その他のコンパートメントに移行していく。このような移行過程は次式のように 1 次の連立微分方程式によって表される。

内臓または肺 ($i=1$)

$$\frac{dY_1^r(t)}{dt} = I_r(t) - (\lambda_1 + \lambda_r)Y_1^r(t) \quad (7.12)$$

$$\frac{dY_1^s(t)}{dt} = I_s(t) - \lambda_1 Y_1^s(t) \quad (7.13)$$

血液 ($i=2$)

$$\frac{dY_2^r(t)}{dt} = \lambda_1 Y_1^r(t) + \lambda_4 Y_4^r(t) - (\lambda_5 + \lambda_r)Y_2^r - r_2 \quad (7.14)$$

$$\frac{dY_2^s(t)}{dt} = \lambda_1 Y_1^s(t) + \lambda_4 Y_4^s(t) - s_2 \quad (7.15)$$

甲状腺 ($i=3$)

$$\frac{dY_3^r(t)}{dt} = r_2 - (\lambda_3 + \lambda_r)Y_3^r(t) \quad (7.16)$$

$$\frac{dY_3^s(t)}{dt} = s_2 - \lambda_3 Y_3^s(t) \quad (7.17)$$

軟部組織 ($i=4$)

$$\frac{dY_4^r(t)}{dt} = \lambda_3 Y_3^r(t) - (\lambda_4 + \lambda_6 + \lambda_r)Y_4^r(t) \quad (7.18)$$

$$\frac{dY_4^s(t)}{dt} = \lambda_3 Y_3^s(t) - (\lambda_4 + \lambda_6)Y_4^s(t) \quad (7.19)$$

膀胱 ($i=5$)

$$\frac{dY_5^r(t)}{dt} = \lambda_5 Y_2^r(t) + \lambda_6 Y_4^r(t) - \lambda_r Y_5^r(t) \quad (7.20)$$

$$\frac{dY_5^s(t)}{dt} = \lambda_5 Y_2^s(t) + \lambda_6 Y_4^s(t) \quad (7.21)$$

ここで、 Y_i^r は放射性ヨウ素の放射能 (Bq)、 Y_i^s は安定ヨウ素の重量 (mg)、 I_r は放射性ヨウ素の摂取率 (Bq d⁻¹)、 I_s は安定ヨウ素の摂取率 (mg d⁻¹)、 λ_r は放射性ヨウ素の崩壊定数 (d⁻¹) を示す。 λ_i はそれぞれのコンパートメントの移行係数であり、 λ_1 が 192、 λ_4 が 0.053、 λ_5 が 1.92、 λ_6 が 0.005、 λ_3 は甲状腺から軟部組織への移行係数であり s_2/M_T を用いる。ここで、 M_T は甲状腺中の安定ヨウ

素量 (mg)、 r_2 は放射性ヨウ素の甲状腺への取込率(Bq d^{-1})、 s_2 は安定ヨウ素の甲状腺への取り込み率(mg d^{-1})である。 s_2 と r_2 および λ_3 は評価対象者の年齢性別によって異なり、実際には表 7.1 の値が用いられる。

Johnson によるヨウ素代謝モデルでは、体内に取込まれたヨウ素は最初に内臓または肺に沈着すると仮定されている。しかし、摂取から肺や内臓に到達する間にも呼吸器道や胃腸管で沈着や代謝が生じる。これを考慮するため、Johnson によるヨウ素代謝モデルに ICRP Publ.66 の呼吸気道モデルと Publ.30 の胃腸管モデルを組合せたモデルが OSCAAR では用いられている。呼吸気道モデルでは呼吸気道内で放射性ヨウ素の沈着と代謝が呼気・吸気により生じ、複数の細分化されたコンパートメント間をヨウ素が移行する。移行係数等のパラメータはヨウ素の化学形態により異なる。一方、胃腸管モデルは胃、小腸、大腸上部、大腸下部の 4 つのコンパートメントから構成される。ヨウ素は小腸から血液へ移行する。呼吸気道モデル同様、移行係数等のパラメータは化学形態により異なる。

表 7.1 Johnson によるヨウ素代謝モデルで使用されるパラメータの対象者別データ

年齢 (y)	0	1	2	5	10	15	成人 女性	成人 男性
対象者の体重 M_s (kg)	3.51	7.20	10.9	22.0	40.5	58.9	58.0	70.0
毎日のヨウ素摂取率 I_s (mg d ⁻¹)	0.01	0.0206	0.0311	0.0628	0.116	0.168	0.166	0.2
安定ヨウ素の甲状腺 取込率 s_2 (mg d ⁻¹)	3.2593×10^{-3}	6.6857×10^{-3}	1.0121×10^{-2}	2.0429×10^{-2}	3.7607×10^{-2}	5.4693×10^{-2}	5.3857×10^{-2}	6.5000×10^{-2}
甲状腺中の安定ヨウ素 量 M_f (mg)	0.3	0.3	0.3	0.99	3.7	8.3	10.0	12.0
血液中のヨウ素重量 M_b (mg)	0.0051	0.010	0.016	0.032	0.059	0.085	0.084	0.1
軟部組織中のヨウ素 重量 (mg)	0.56	0.12	0.17	0.35	0.65	0.94	0.93	1.1

安定ヨウ素剤服用による甲状腺被ばく低減係数 $DRF_{Thyr,ITB}$ は安定ヨウ素剤を服用しない場合の線量 $H_{Thyr,NoPM}$ に対する $H_{Thyr,ITB}$ の比により、次式のように求められる。

$$DRF_{Thyr,ITB} = \frac{H_{Thyr,ITB}(x, y)}{H_{Thyr,NoPM}} \quad (7.22)$$

ここで、 x は安定ヨウ素剤の服用量 (mg)、 y は放射性ヨウ素摂取から起算した安定ヨウ素剤の服用までの時間 (h)を示す。 y は負の場合は放射性ヨウ素の摂取前に、正の場合は放射性ヨウ素の摂取から遅れて安定ヨウ素剤を服用したことになる。

OSCAAR では式(7.22)から、安定ヨウ素剤の服用量および服用時期、摂取する放射性ヨウ素の種類 (^{131}I 、 ^{132}I 、 ^{133}I 、 ^{134}I 、 ^{135}I) や化学的な性状、摂取する対象者 (幼児、小児、成人等) 等の条件ごとに $DRF_{Thyr,ITB}$ を算出してデータベース化したものを用いている。化学的な性状は粒子状、無機、有機の 3 つに分類され、さらに、呼吸気道モデルにおける血液への移行の速さから、F (速い)、M (中間)、S (遅い) に分類される。実際に OSCAAR に整備されている $DRF_{Thyr,ITB}$ のデータベースの条件を表 7.2 に示す。化学的な性状として、粒子状物質 (タイプ F) のみとなっているのは、本モデルの開発時の検証計算にてタイプ F の無機ヨウ素と有機ヨウ素の線量低減係数が同等であり、タイプ M とタイプ S よりも線量低減係数が高い値を示したためである。また、ICRP Publ.72³⁰⁾ にて推奨されるヨウ素の吸収タイプとして F が勧告されていたことも理由の一つである。このデータベースから得られる線量低減係数は粒子状物質だけでなく、元素状ヨウ素および有機ヨウ素に対しても適用されている。図 7.4 に成人の線量低減係数と放射性ヨウ素の摂取から起算した安定ヨウ素剤の服用までの時間との関係を示す。

表 7.2 安定ヨウ素剤服用による被ばく線量低減係数データベースの条件

項目	条件
安定ヨウ素剤の服用量 (mg)	服用なし : 0 mg 出生後～3 歳未満 : 25 mg 3 歳以上 13 歳未満 : 38 mg 13 歳以上 : 76 mg
放射性ヨウ素の摂取から起算した安定ヨウ素剤の服用までの時間 (h)	-144 h から +48 h まで
対象者	新生児 (3 か月) 生後 1 か月以上 3 歳未満 (1 歳) 3 歳以上 13 歳未満 (10 歳) 13 歳以上 (成人)
放射性ヨウ素の種類	^{131}I 、 ^{132}I 、 ^{133}I 、 ^{134}I 、 ^{135}I
化学的な性状	粒子状物質 (タイプ F)
預託期間	50 年

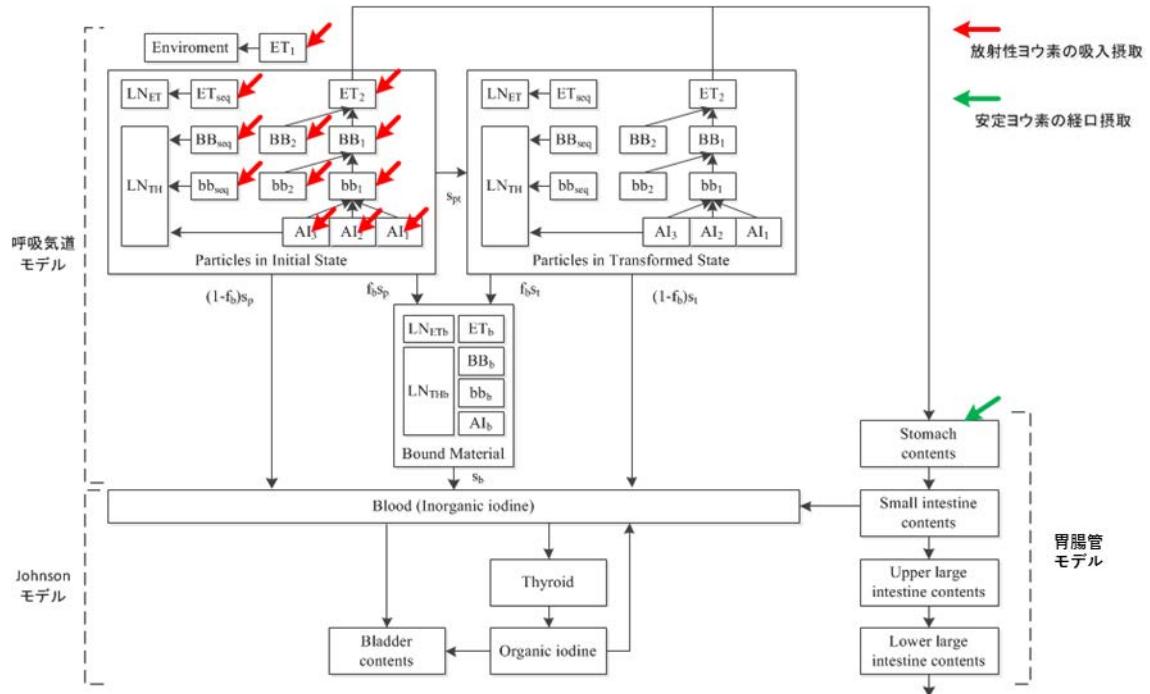


図 7.3 ヨウ素代謝のコンパートメントモデル

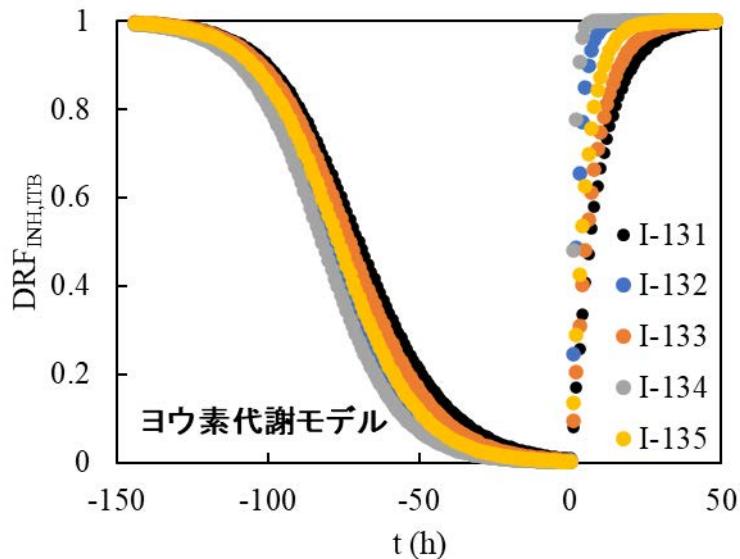


図 7.4 ヨウ素代謝モデルによる線量低減係数と服用遅延時間の関係

7.1.4. 避難

OSCAAR における避難モデルは避難中の移動経路を考慮したモデルであり、2 次元極座標メッシュにおける避難元となるメッシュから避難先となるメッシュに到達するまで次々とメッシュを移動していき、その過程で通過するそれぞれのメッシュでの被ばく線量と滞在時間から避難中の積算被ばく線量を求めている。早期被ばく線量は 1 時間ごとに計算するため、1 時間以内に複数のメッシュを移動する場合は滞在時間で重み付けして各メッシュでの被ばく線量を足し合わせたものを 1 時間の被ばく線量とする。避難に伴う移動のイメージを図 7.5 に示す。地図上の避難経

路は道路網に従い、図 7.5 中の黄色線で示すような経路であるが、OSCAAR の 2 次元極座標メッシュ上での評価に適用するため、避難のための移動を開始するメッシュに対して、移動先となるメッシュが切り替わる時間ステップごとの方位番号と距離番号、移動距離をあらかじめサイトデータとして準備している。移動速度は全ての避難元メッシュに共通の値を指定するか、避難元メッシュごとの値を指定するサイトデータを準備する。移動速度は距離番号ごとに一定の倍率で増減することができる。移動距離と移動速度から移動に要する時間を求めることができる。地図データ等の移動経路データから OSCAAR 用のデータへの変換には OSCAAR 支援ツールの RouteMesh を用いる。避難場所への移動は自動車を想定しており、移動時の被ばく線量評価ではユーザーが指定した自動車内に滞在時の被ばく線量低減係数(DRF_{CAR})が適用される。

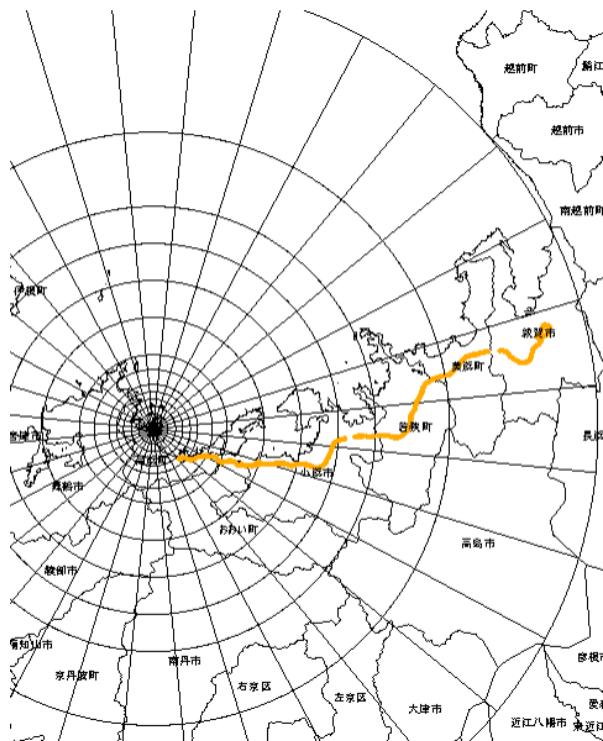


図 7.5 移動に伴う避難のイメージ

PAZ の避難は、無条件で避難が開始されるオプションと実効線量がユーザーにより指定されるしきい線量を超えると避難が開始されるオプションのいずれかから選択する必要がある。ここで、実効線量とは 7.1.2.4 で述べたしきい線量を考慮した屋内退避の場合と同様に D_{7d} のことを指す。一方、UPZ の場合は無条件で避難が開始されるオプションと実効線量がユーザーにより指定されるしきい線量を超えると避難が開始されるオプションに加えて、空間線量率がユーザーにより指定されるしきい線量を超えると避難が開始される、運用上の介入レベル (OIL: Operational Intervention Level) を基準とした避難を考慮できるオプションもある。

避難完了後は避難先となるメッシュでコンクリート造建屋内の屋内退避の被ばく線量低減係数が適用される。UPZ の避難と屋内退避が同時にオプションとして選択されている場合は、屋内退避が優先される。

避難のオプションとして、PAZ と UPZ の両方について、積算線量とユーザーにより設定されるしきい線量を比較して、避難の実施を判断することができる。この機能は 7.1.2.4 で述べたしきい線量による屋内退避の判断機能と同じように、通常生活における 7 日間積算被ばく線量がしきい線量を超えるメッシュを抽出し、該当するメッシュに対してのみ避難を実施する機能である。この機能を使用する場合は、通常の避難と異なり、避難指示に要する時間と避難完了に要する時間の概念はなく、放出開始と同時に避難が開始される。空間線量率で避難の実施を判断する場合は、放出開始から空間線量率がユーザーにより指定される空間線量率に対するしきい線量を超えると避難が開始され、それ以前は通常生活となる。空間線量率による避難実施の判断は UPZ のみで実施可能である。

7.2. 長期防護措置

長期防護措置では移転および食物摂取制限が考慮され、主に地表面に沈着した放射性物質からの外部被ばくおよび汚染食物の摂取による内部被ばくが制限され、晚発性の健康影響が低減される。

7.2.1. 移転

事故後 1 年間に受ける被ばくの予測線量が、ユーザーにより設定された介入レベルを超えるメッシュに居住する住民に対して移転が実施される。OSCAAAR では、移転実施の判断は放出からの経過時間または 1 年間の積算被ばく線量で判断することができる。移転実施後、1 年ごとに同じ経路からの予測線量が移転解除レベル(LV_{REL}) (Sv)を下回るまで移転が継続される。移転実施期間中はその領域の住民は長期の被ばくを受けないこととする。移転は放出開始から 7 日後から実施される。移転後の被ばく線量は生じないとする。図 7.6 に移転を実施した場合のフロー図を示す。

移転の実施解除の判断に用いる 1 年間の被ばく線量は、早期ではクラウドシャイン、グラウンドシャイン、直接吸入、再浮遊吸入の 4 経路に対する線量で評価し、長期ではグラウンドシャインと再浮遊吸入の 2 経路に対する線量で評価する。

移転実施をユーザーが指定する経過時間を基に判断する場合は、放出開始から指定した時間が経過した後の被ばく線量は 0 となる。一方、線量制限で移転を実施した場合、放出から 7 日以降の線量が 0 となる。

屋内退避または避難と移転を併用することができる。ただし、屋内退避または避難が優先して実行され、屋内退避または避難が終了後に移転が実施される。放出開始からの時間で移転実施の判断を行う場合で、移転までの経過時間が屋内退避または避難終了前の場合は即時移転を開始し、移転までの経過時間が屋内退避または避難終了後の場合は移転が開始されるまで滞在場所にて通常生活を送ることになる。線量制限で移転を実施する場合は、屋内退避または避難終了直後に移転が実施される。

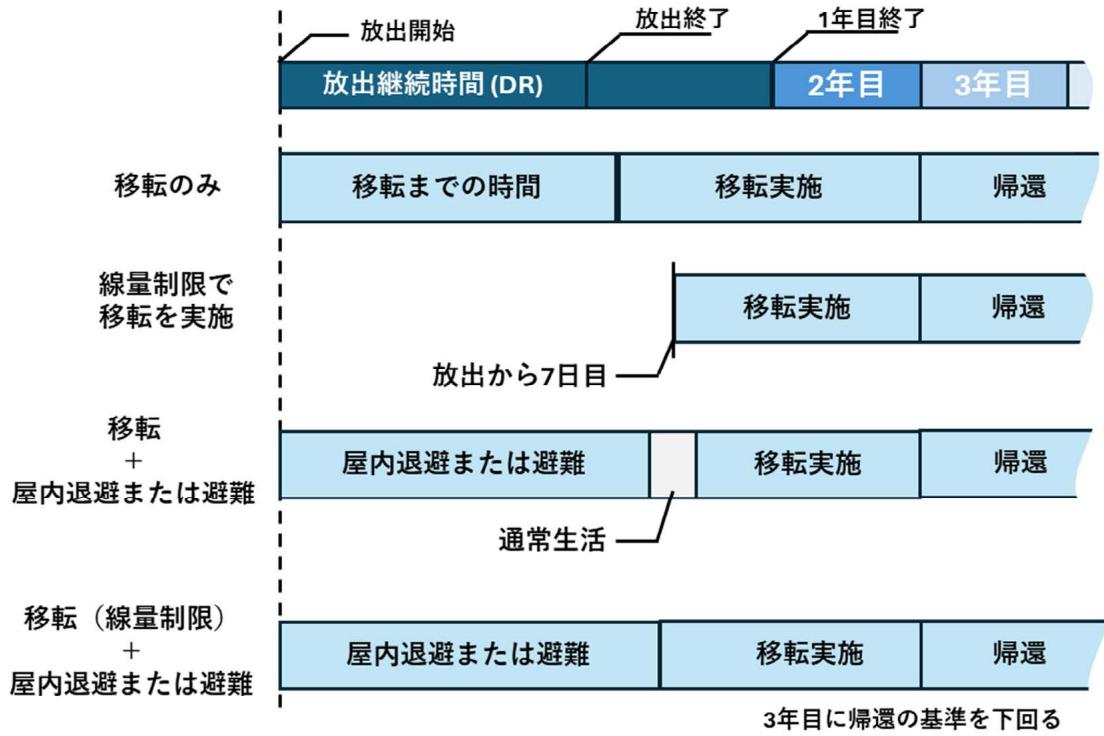


図 7.6 移転実施のフロー図

7.2.2. 食物摂取制限

食物の摂取制限の考え方は2つあり、一つ目は1年間の摂取による預託実効線量がユーザーにより設定された介入線量レベルを超えた地域（メッシュ）の食物の摂取を禁止する方法、二つ目は放射性核種別、食物別に設定された濃度の介入レベルを超えた食物の摂取を禁止する方法である。年ごとの実効線量または食物中の放射能濃度が基準値を超える場合はその年以降は食物を摂取しないように制限される。

実効線量による制限の場合は、式(6.5)および式(6.6)と同様の方法で次式のようにメッシュごとの食物摂取量を算出する。

$$D_{ING}^{K,L,i}(r, d) = DF_{ING}^{K,L,i} \cdot \omega_i(r, d) \cdot CF_{K,i} \quad (7.23)$$

食物ごとの移行係数 $CF_{K,i}$ を算出する際の消費率は平均消費率ではなく、最大消費率を用いる。

8. 健康影響

被ばくにより生じる人体の健康影響には、被ばくした個人に現れる身体的影響と子孫に現れる遺伝的影響がある。身体的影響は、さらに被ばく後短期間にその影響が現れる早期影響（早期死亡、早期罹患）と、被ばく後長期間を経てから発現する晚発性影響（晚発性がん死、晚発性がん）に区別される。現在、OSCAAR で用いられている健康影響のモデルは、米国原子力規制委員会（USNRC）の NUREG/CR-4214^{31, 32)}を基礎とし、日本人への適用を考慮して作成されたモデル^{33, 34)}と米国環境保護庁（EPA）³⁵⁾から作成された。

8.1. 早期影響

身体的影響のうち、早期影響の評価は表 8.1 に示される 7 期間に分けて評価が行われる。

表 8.1 早期影響評価の期間分類

番号(index)	期間 (日)
1	0~1
2	1~7
3	7~14
4	14~21
5	21~30
6	30~200
7	200~365

早期影響を評価する際に用いられる被ばく線量は表 8.1 に示した期間における預託線量として定義される。早期影響を評価する場合に考慮する被ばく経路は 5 章で示したクラウドシャイン、グラウンドシャイン、直接吸入、再浮遊吸入の 4 経路である。

8.1.1. 早期死亡

早期死亡の評価において考慮する影響とその対象となる臓器を表 8.4 に示す。早期死亡については中央値推定、下限値推定および上限値推定を行う。早期死亡は造血臓器障害、肺障害、胃腸管障害および中枢神経障害に起因する死亡（以下、「臓器死亡」という。）と胎児／新生児の死亡に分けられる。

表 8.2 早期死亡で考慮する影響と評価対象臓器

影響	臓器
造血臓器障害	骨髄
肺障害	肺
胃腸管障害	小腸/結腸 (OSCAAR では 0 日～1 日の期間では 小腸壁、1 日以上では結腸を対象とする。)
中枢神経障害	脳
出生前/新生児死亡	胚 (OSCAAR では子宮として評価する。)

早期の確定的影響の評価には、「ハザード関数」を用いている。個人に影響が発生する確率 r は、ハザード関数を用いて次式のように求められる。

$$r = 1 - \exp(-H) \quad (8.1)$$

ここで、 H は累積ハザードであり、次式に示すワイブル関数で求められる。

$$H = \ln 2 \cdot \left(\frac{D}{D_{50}} \right)^\beta \quad (8.2)$$

ここで、 D は確定的影響の対象となる臓器の吸収線量 (単位)、 D_{50} は被ばく集団の 50% が影響を受ける線量レベル (単位) であり、 β は線量一リスク関数の傾きを表す形状因子である。

式(8.2)を基に、任意の臓器に対する累積ハザード $H_{ORG}^{s,e}$ は次式のように求めることができる。

$$H_{ORG}^{s,e} = \begin{cases} \ln 2 \cdot \left(\sum_{ipath=1}^7 \frac{D_{ORG,ipath}^{s,e}(te)}{D_{50,ORG}(te)} \right)^\beta & (D_{ORG,ipath}^{s,e}(te) \geq D_{th,ORG}) \\ 0.0 & (D_{ORG,ipath}^{s,e}(te) < D_{th,ORG}) \end{cases} \quad (8.3)$$

ここで、 $D_{ORG,ipath}^{s,e}(te)$ は事故時の年齢が e 歳で性別が s の個人に対して、被ばくからの経過時間 $te(1)$ から $te(2)$ の間に受ける臓器 ORG に対する被ばく経路 $ipath$ による吸収線量 (単位) を示す。 $D_{50,ORG}(te)$ は期間 te 時点での被ばく集団の 50% が影響を受ける線量レベル (単位)、 $D_{th,ORG}$ は影響が発生するしきい線量を示す。 $D_{50,ORG}(te)$ は NUREG/CR-4214 を参考に、事故後の経過期間の関数として与えている。 $ipath$ は被ばく経路を示しており、早期のクラウドシャイン、グラウンドシャイン、直接吸入、再浮遊吸入、食物摂取が対象となる。治療を行うことによる効果は表 8.3 に示すように、治療の程度に応じて β と D_{50} の値を用いることで考慮することができる。治療の程度 M は最低限の治療、 S は支持的治療、 I は集中治療に分類される。早期死亡の場合は、式(8.3)中のしきい線量は 0 となる。

表 8.3 早期死亡確率の中央値推定のためのパラメータ

Index	影響	治療の程度	β	事故後の期間 (d) での D_{50}						
				0-1	1-7	7-14	14-21	21-30	30-200	200-365
1	造血臓器 症状	M	10.0	3.4	7.0	7.0	14.0	14.0		
		S	6.6	4.5	9.0	9.0	18.0	18.0		
		I	6.6	5.5						
2	肺症状	M	3.0	8.5	80.0	80.0	185.0	185.0	185.0	450.0
		I	3.0	16.0	160.0	160.0	370.0	370.0	370.0	900.0
3	胃腸管症 状	M	10.0	15.0	35.0					
		S	10.0	45.0	105.0					
3'	中枢神経 症状	M	10.0	22.5						
4	出生前／ 新生児 死亡	区分 なし	3.0	1.0						

臓器死亡は、造血臓器障害、肺障害、胃腸管障害および中枢神経障害に起因する。式(8.1)から治療程度 TR の治療を受けた場合の早期死亡確率 $r_{ed,TR}^{s,e}$ は次式のように求められる。

$$r_{ed,TR}^{s,e} = 1 - \exp\{-(H_1^{s,e} + H_2^{s,e} + H_3^{s,e} + H_4^{s,e})\} \quad (8.4)$$

ここで、 $H_1^{s,e}$ 、 $H_2^{s,e}$ 、 $H_3^{s,e}$ 、 $H_4^{s,e}$ はそれぞれ造血臓器障害、肺障害、胃腸管障害および中枢神経障害に起因する死亡に関する累積ハザードである。早期死亡の確率は先述した M から I の治療の程度に応じて異なる。異なる治療を施された集団の早期死亡確率は治療の程度ごとの死亡確率を、治療を受けた人口割合で重みづけした合計値として次式のように求められる。

$$r_{ed}^{s,e} = f_M \cdot r_{ed,M}^{s,e} + f_S \cdot r_{ed,S}^{s,e} + f_I \cdot r_{ed,I}^{s,e} \quad (8.5)$$

ここで、 $r_{ed,M}^{s,e}$ 、 $r_{ed,S}^{s,e}$ 、 $r_{ed,I}^{s,e}$ はそれぞれの治療程度の死亡確率であり、 f_M 、 f_S 、 f_I はそれぞれの治療程度の治療を受けた人口割合を示す。ただし、 f_M 、 f_S 、 f_I の合計は 1 となる。

評価領域内における早期影響による死亡数 $N_{ed}^{s,e}$ は各メッシュの総人口と死亡確率から次式のように求めることができる。

$$N_{ed}^{s,e} = \sum_{ir=1}^{nr} \sum_{id=1}^{ndir} (POP(ir, id) \cdot r_{ed}^{s,e}(ir, id)) \quad (8.6)$$

ここで $r_{ed}^{s,e}(ir, id)$ は式(8.5)から求められるメッシュ (ir, id) における死亡確率、 $POP(ir, id)$ はメッシュ (ir, id) における人口を示す。

胎児と新生児の死亡数 $N_{edfi}^{em,em}$ については、最初に、式(8.2)から求めた胚の累積ハザードを用いて、式(8.1)から死亡確率をメッシュごとに算出する。胎児と新生児の早期死亡については、治療は行われないので、式(8.5)のように治療の程度を考慮する必要はない。算出された死亡確率から次式のように死亡数が求められる。

$$N_{edfi}^{em,em} = F_{FI} \sum_{ir=1}^{nr} \sum_{id=1}^{ndir} \left(POP(ir, id) \cdot r_{edfi}^{em,em}(ir, id) \right) \quad (8.7)$$

ここで、 F_{FI} は全人口に対する胎児と新生児の割合を指し、 $r_{edfi}^{em,em}(i, j)$ はメッシュ(ir, id)における胎児と新生児の死亡確率を示す。

OSCAAR では、ハザード関数から算定されたリスクがある確率以下ならば、有意な数値ではないとして 0 としている。有意な数値であるか否かを判断する基準は、自然に発生する病気および事故による死亡確率と比較してリスクの増加が検知できないレベルとしており、HE モジュールでは死亡確率の 10% 値としている。

8.1.2. 早期罹患

早期罹患の評価において考慮する影響とその対象となる臓器を表 8.4 に示す。早期罹患は女性の不妊、男性の不稔、小頭症と知的障害それぞれによる疾患とその他の全ての疾患に対する罹患(以下、「臓器罹患」という。)の 4 つに分類される。

表 8.4 早期罹患で考慮する影響と評価対象臓器

影響	対象臓器
前駆症状	腹部 (OSCAAR では胃として評価する。)
肺機能障害	肺
甲状腺機能減退症	甲状腺
急性甲状腺炎	甲状腺
皮膚障害	表皮の基底細胞 (OSCAAR では皮膚として評価する。)
白内障	眼のレンズ (OSCAAR では皮膚として評価する。)
不妊／不稔	卵巣／精巣
小頭症	胚 (OSCAAR では子宮として評価する。)
知的障害	胚 (OSCAAR では子宮として評価する。)

早期罹患の確率は早期死亡と同様に式(8.1)から式(8.5)を用いて求めることができる。女性の不妊、男性の不稔については式(8.4)のように積算ハザードを合計する必要はない。早期罹患の累積ハザードの算出に必要なパラメータを表 8.5 に示す。甲状腺機能減退症と急性甲状腺炎についてはしきい線量が存在する。

表 8.5 早期影響により罹患する確率推定のためのパラメータ

Index	影響	β	事故後の期間 (d) での D ₅₀							
			しきい 線量	0-1	1-7	7-14	14-21	21-30	30-200	200-365
5	前駆症状－食欲不振	2.0		0.97	2.0					
5	前駆症状－吐き気	2.0		1.4	2.6					
5	前駆症状－倦怠感	2.0		1.5						
5	前駆症状－嘔吐	3.0		1.8	4.9					
5	前駆症状－下痢	2.0		2.3	5.3					
6	肺症状	3.0		4.0	40.0	40.0	40.0	90.0	90.0	225.0
7	甲状腺機能減退症*	1.3	2.0	60.0						
		1.3	10.0	0.0	300.0	300.0	300.0			
8	急性甲状腺炎	1.9	200.0	0.0	1200.0	1200.0	1200.0			
9	紅斑	5.2		6.0	10.0	10.0	10.0			
9	表皮浸透性障害	5.3		20.0	34.0	34.0	34.0			
10	白内障	7.4		3.1	6.2	6.2	6.2	9.3	9.3	9.3
11	不妊	3.0		2.6	6.3					
11	不稔	10.0		0.7	0.4					
12	小頭症	1.0		0.37						
13	知的障害	0.8		5.6						

* 甲状腺機能減退症は、期間 0-1d のハザード関数の計算は上段のパラメータを使用し、期間 1-7d 以降のハザード関数の計算は下段のパラメータを使用し、これらの合算値が甲状腺機能減退症のハザードの値となる。

臓器死亡の罹患数 $N_{emo}^{s,e}$ は式(8.6)のようにメッシュごとの人口と罹患確率 $r_{emo}^{s,e}(i,j)$ に加え、早期死亡の影響を補正する係数 Q_n を用いて、次式のように求められる。

$$N_{emo}^{s,e} = \sum_{ir=1}^{nr} \sum_{id=1}^{ndir} (Q_n(ir, id) \cdot POP(ir, id) \cdot r_{emo}^{s,e}(ir, id)) \quad (8.8)$$

$Q_n(i,j)$ はメッシュ内の全人口から早期死亡した人口の減少分を補正する係数であり、次式のように求めることができる。

$$Q_n = f_M \cdot (1 - r_{ed,M}^{s,e}) + f_S \cdot (1 - r_{ed,S}^{s,e}) + f_I \cdot (1 - r_{ed,I}^{s,e}) \quad (8.9)$$

男性の不稔罹患数 $N_{emofm}^{s,e}$ は次式で求められる。

$$N_{emo fm}^{s,e} = F_M \sum_{ir=1}^{nr} \sum_{id=1}^{ndir} (Q_n(ir, id) \cdot POP(ir, id) \cdot r_{emo fm}^{s,e}(ir, id)) \quad (8.10)$$

ここで、 $r_{emo fm}^{s,e}(i, j)$ は男性不稔の罹患確率、 F_M は子供を作ることができる 12 歳以上の男性の人口の全人口に対する割合を示す。

女性の不妊罹患数 $N_{emo off}^{s,e}$ についても、男性の不稔罹患と同様に、次式のように求められる。

$$N_{emo off}^{s,e} = F_F \sum_{ir=1}^{nr} \sum_{id=1}^{ndir} (Q_n(i, j) \cdot POP(ir, id) \cdot r_{emo off}^{s,e}(ir, id)) \quad (8.11)$$

ここで、 $r_{emo off}^{s,e}(i, j)$ は女性不妊の罹患確率、 F_F は子供を作ることができる 14 歳から 45 歳の女性の人口の全人口に対する割合を示す。

小頭症および知的障害の罹患数 $N_{emomid}^{s,e}$ は胎児の早期死亡の影響を補正する係数 Q_{fn} を用いて次式のように求めることができる。

$$N_{emomid}^{s,e} = F_{FN} \sum_{ir=1}^{nr} \sum_{id=1}^{ndir} (Q_{fn}(i, j) \cdot POP(ir, id) \cdot r_{emomid}^{s,e}(ir, id)) \quad (8.12)$$

ここで、 $r_{emomid}^{s,e}(i, j)$ は小頭症および知的障害の罹患確率、 F_{FN} は胎児と新生児の全人口に対する割合を示す。 Q_{fn} は胎児および新生児の早期死亡による人口減少を補正する係数であり、胎児および新生児の早期死亡確率を用いて、次式のように求められる。

$$Q_{fn} = 1 - r_{edfi}^{em,em}(i, j) \quad (8.13)$$

8.2. 晩発性影響

被ばく後長期間を経てから発現する晩発性影響として、致死性および非致死性のがんリスクが計算される。晩発性影響については、放射性物質の放出開始時から起算して、0 年から 100 年までの 1 年刻みで 100 の期間に分けて評価が行われる。晩発性影響として、表 8.6 に示す影響が各臓器に対して発生する。

8.2.1. 晩発性影響リスクの予測モデル

晩発性影響として発生するがんによる死亡またはがんに罹患する集団のリスクを推定する場合、年齢と性別を代表する個人に対するリスクを評価し、全年齢性別のリスクを平均化することによって得られる。被ばく後生涯の間に生じるがん死亡確率（生涯リスク）を予測するための方法として、絶対（相加）リスクモデルと相対（相乗）リスクモデルが用いられている。

絶対リスクモデルでは、図 8.1 に示すように、被ばくから一定期間の潜伏期を経過した後に影響が発現するプラト一期間があり、この期間でがん死亡やがん罹患のリスクが発生する。性別 s 、被ばく時の年齢 e の対象者が D (Gy) の線量を被ばくした後の期間 t でがんによって死亡またはがんに罹患するリスク $r^{s,e}(t, D)$ は次式のように求められる。

$$r^{s,e}(t, D) = F^{s,e} \cdot P^e(t) \cdot (\alpha \cdot D + \beta \cdot D^2) \quad (8.14)$$

ここで、 $F^{s,e}$ は性別 s で被ばく時の年齢 e の対象者に対するリスク係数 ($\text{y}^{-1} \text{Gy}^{-1}$)、 α と β は係数である。 $P^e(t)$ は被ばく後の評価期間 t で影響が出現している年数 (y)であり、評価期間がプラトー期間に含まれる場合は 1 となる。

これに対し、相対リスクモデルでは、放射線誘発のがん死亡またはがん罹患のリスクを次式のように求めることができる。

$$r^{s,e}(t, D) = A^{s,e} \cdot M^{s,e}(t) \cdot P^e(t) \cdot (\alpha \cdot D + \beta \cdot D^2) \quad (8.15)$$

ここで、 $A^{s,e}$ は性別 s で被ばく時の年齢 e の対象者に対する自然発生のがんもしくはがん罹患のリスクに対する 1Gy の線量を被ばくした場合のリスクの割合 (Gy^{-1})、 $M^{s,e}(t)$ は被ばく後 t 年目に自然発生のがんで死亡もしくはがんに罹患するリスク (y^{-1})を示している。

式(8.14)および式(8.15)から、がんで死亡するリスクまたはがんに罹患するリスクと線量との依存性は次式のような関数で表される。

$$r^{s,e}(t, D) \propto \alpha \cdot D + \beta \cdot D^2 \quad (8.16)$$

図 8.2 は線量とリスクの関係を線形または線形二次関数で表したものである。式(8.16)の α は定線量率の効果係数である。 β は1.5 Gy におけるリスクが 1 になるように補正する係数である。NUREG/CR-4214 では、線量が 1.5 Gy 超える場合は線形式を用いることを推奨している。また、0.05 Gy d^{-1} 以下の線量率については次式を用いることが推奨されている。

$$r^{s,e}(t, D) \propto \alpha \cdot D \quad (8.17)$$

OSCAAR では、白血病、骨がん、甲状腺がん、皮膚がん、子宮内被ばくによる白血病および他の全てのがん、良性甲状腺結節の 7 つの晩発性影響に対するリスクの予測に絶対リスクモデルを用いている。一方、胃腸管がん、肺がん、乳がん、その他のがんの 4 つの晩発性影響に対するリスクの予測に相対リスクモデルを用いている。

表 8.6 晩発性影響で考慮する影響と評価対象臓器

影響	対象臓器	リスクモデル
白血病	赤色骨髓	絶対
骨がん	骨	絶対
乳がん	乳房	相対
肺がん	肺	相対
胃腸管がん	大腸下部	相対
甲状腺がん	甲状腺	絶対
皮膚がん	顔面 (OSCAAR では皮膚として評価する。)	絶対
その他のがん	脳、腎臓、膀胱、卵巣、 子宮 (女性のみ対象)、悪性リンパ腫、多発性骨髓腫	相対
子宮内被ばくによる 白血病	胚 (OSCAAR では子宮として評価する。 対象は女性のみ。)	絶対
子宮内被ばくによる その他のがん	胚 (OSCAAR では子宮として評価する。 対象は女性のみ。)	絶対
良性甲状腺結節	甲状腺	絶対

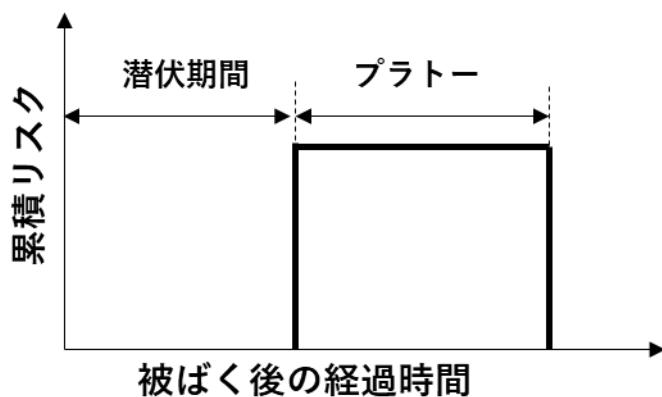


図 8.1 絶対リスク予測モデルによる被ばく後の時間の関数としてのリスク概念図

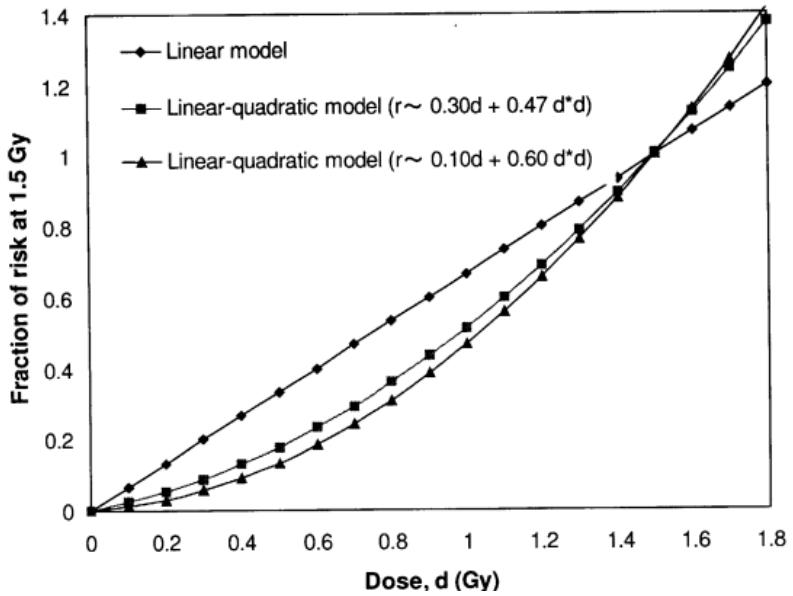


図 8.2 線形モデルおよび二つの線形二次モデルにおける線量リスクの関係
(NUREG/CR-4124 から引用)³¹⁾

8.2.2. 晩発性がんによる死亡

晩発性がん k による死亡が生じる割合 $R_{k,TOT}^{s,e}(D)$ は任意の期間 i における割合 $R_{k,i}^{s,e}(t_i, D)$ を合算することによって以下の式のように求めることができる。

$$R_{k,TOT}^{s,e}(D) = \sum_{i=0}^{Nt} R_{k,i}^{s,e}(t_i, D) \quad (8.18)$$

ここで、 D は長期線量評価で算出された 1 年ごとの被ばく線量(Sv)を示す。 Nt は評価期間年数を示す。さらに、 $R_{k,i}^{s,e}(t_i, D)$ は次式で求めることができる。

$$R_{k,i}^{s,e}(t_i, D) = R_{k,TOT}^{s,e}(1) \cdot g_k^{s,e}(D) \cdot h_k^{s,e}(t_i) \quad (8.19)$$

ここで、 $R_{k,TOT}^{s,e}(1)$ は 1(Gy) の線量を被ばくした場合の生涯リスクであり、式(8.18)の変数 D を 1 として求められる。 $g_k^{s,e}(D)$ は 1(Gy) の線量を被ばくした場合の生涯リスクに対する D (Gy) の線量を被ばくした場合の生涯リスクの比であり、次式のように求められる。

$$g_k^{s,e}(D) = \frac{\alpha \cdot D + \beta \cdot D^2}{\alpha + \beta} \quad (8.20)$$

$h_k^{s,e}(t_i)$ は被ばく後 t 年目に発生が予測されるリスクの生涯リスクに対する割合を示す。式(8.19)中の計算に必要な $R_{k,i}^{s,e}(1)$ 、 $g_k^{s,e}(D)$ および $h_k^{s,e}(t)$ は OSCAAR の支援プログラムである HEINPUT³³⁾を用いて算出されたがんの種類、年齢、性別ごとの値を OSCAAR のライブラリデータとして格納している。式(8.18)から求められる割合は早期死亡による人口減少を考慮していない。この影響を補正する係数を用いて(8.18)式は次式のようになる。

$$R_{k,TOT}^{s,e}(D) = \sum_{i=0}^{Nt} [R_{k,i}^{s,e}(t_i, D) \cdot Q_{ED,k}^{s,e}] \quad (8.21)$$

$Q_{ED,k}^{s,e}$ は被ばくの対象臓器に応じて式(8.9)または式(8.13)から求めることができる。晩発性がんによる死亡数 $N_{ld}^{s,e}$ はメッシュごとに算出された $R_{k,TOT}^{s,e}$ とメッシュごとの人口 $POP(ir, id)$ から次式のように求めることができる。

$$N_{ld}^{s,e} = \sum_{ir=1}^{nr} \sum_{id=1}^{ndir} (R_{k,TOT}^{s,e}(D) \cdot POP(ir, id)) \quad (8.22)$$

8.2.3. 晩発性がんの罹患

晩発性がんの罹患リスクは 8.2.2 項で述べた晩発性がんによる死亡リスクと同様の手法で求められる。計算に必要な係数は晩発性がんによる死亡リスクの場合と同様に HEINPUT を用いて得られたデータを OSCAAR のライブラリとして格納している。

8.2.4. 甲状腺に対する影響

甲状腺が高線量で被ばくした場合、甲状腺細胞の死滅により甲状腺が除去されることによってがんリスクが減少する。このような現象を考慮するため、甲状腺が 15 (Gy) 以上の線量を被ばくした場合は次式で求められる補正係数 $CF_{thy}(D)$ を被ばく線量に乘じることによってリスクを補正する。

$$CF_{thy}(D) = \exp \left[-\ln 2 \cdot \left(\frac{D - 15}{12} \right)^2 \right] \quad (8.23)$$

^{125}I と ^{131}I の甲状腺に対する内部被ばくの効果は他の被ばく経路および他の核種に比べて明らかに低いため、OSCAAR では ^{125}I と ^{131}I の甲状腺に対する内部被ばく線量に補正係数 E を乗じている。 E は甲状腺がんについては 1/3、良性甲状腺結節については 1/5 となっている。

8.3. 遺伝的影響

遺伝的影響には、被ばくした集団の子供の出生異常が増加する直接的なリスクと潜在的な突然変異を通して孫以降の子孫に現れる間接的なリスクがある。原爆被爆者の子供についての研究という限られた人のデータからは遺伝的影響の過剰発生は認められていないが、遺伝的リスクの説を否定するほど強力な結果ではない。そこで、遺伝的リスクの推定は動物モデルからの外挿に基づいている。OSCAAR では USNRC 報告書 NUREG/CR-4214 に基づき、遺伝的影響を単一遺伝子障害、染色体異常、多因子性疾患に分け、基本的に晩発性影響と同じ表式のモデルを用い、それに各世代に現れる累積リスクの項を付加して評価を行っている。遺伝的影響で考慮する影響を表 8.7 に示す。遺伝的影響については、評価する世代ごとに表 8.8 に示す 6 期間に分類して評価を行っている。

表 8.7 遺伝的影響で考慮する影響の種類と被ばく線量を評価する臓器

Index	影響	文献で想定する臓器	OSCAAR で線量を適用する臓器
25	単一遺伝子-優勢	卵巣／精巣	同左
26	単一遺伝子-X 染色体性連鎖	卵巣／精巣	同左
27	染色体-数の異常（異数性）	卵巣／精巣	同左
28	染色体-構造異常（不均衡転座）	卵巣／精巣	同左
29	多因子性疾患	卵巣／精巣	同左

表 8.8 遺伝的影響評価の期間分類

番号	事故発生からの経過期間（年）
1	0～9
2	10～19
3	20～29
4	30～39
5	40～49
6	50≤

遺伝的影響は早期の被ばく線量と長期的な被ばく線量の両方に起因する。単一遺伝子障害および染色体異常の発生リスクは次式のように求められる。

$$r(k, D_g) = (\alpha \cdot D_g + \beta \cdot D_g^2) \cdot T^{k-1} \quad (8.24)$$

ここで、 D_g は生殖腺の被ばく線量 (Gy)、 T は世代間の遺伝率、 k は世代数を示す。 $r(k, D_g)$ は D_g (Gy) の線量を被ばく後に k 世代目に遺伝的影響が発生する確率である。ただし、線量率が 0.5 (Gy d⁻¹) 以下の場合は代わりに次式が用いられる。

$$r(k, D_g) = (\alpha \cdot D_g) \cdot T^{k-1} \quad (8.25)$$

性別 s で被ばく時の年齢 e の対象者が期間 i に被ばくすることにより、各世代に生じる遺伝的リスク $R_{ge,i,m}^{s,e}$ は晩発性影響の場合と同様に、次式で求めることができる。

$$R_{ge,i,m}^{s,e}(D_g) = R_{ge,TOT}^{s,e}(1) \cdot g(D_g) \cdot h_m \quad (8.26)$$

ここで、 $R_{ge,TOT}^{s,e}(1)$ は 1 (Gy) の線量による全世代のリスクである。生涯、世代にわたる遺伝的影響 $R_{ge,TOT}^{s,e}(D_g)$ は評価期間と世代ごとの $R_{ge,i,m}^{s,e}$ を合算することにより求められ、次式のように求められる。

$$R_{ge,TOT}^{s,e}(D_g) = \sum_{m=1}^{N_{ge}} \sum_{i=0}^{N_t} R_{ge,i,m}^{s,e}(D_g) \quad (8.27)$$

ここで、 N_{ge} は世代数を示す。式(8.26)から、 $D_g=1$ とすることにより $R_{ge,TOT}^{s,e}(1)$ が求められる。

$g(D_g)$ は1(Gy)の線量を被ばくした場合の生涯リスクに対する D_g (Gy)の線量を被ばくした場合の生涯リスクの比を示しており、次式のように求められる。

$$g(D_g) = \frac{\alpha \cdot D_g + \beta \cdot D_g^2}{\alpha + \beta} \quad (8.28)$$

h_m は被ばく後に m 世代目に発生が予想されるリスクの全世代のリスクに対する割合である。式(8.26)は遺伝的影響による出生率の変化を考慮していないため、出生率の変化を考慮する場合、式(8.26)に次式で計算されるリスクに補正係数 CF_{br} を乗じる必要がある。

$$CF_{br} = \frac{\sum_p (f_p \cdot S_p(t) \cdot B_p(t))}{\sum_p (f_p \cdot B_p(0))} \quad (8.29)$$

ここで、 f_p は被ばく時の年齢が p である人口の全人口に対する割合、 $S_p(t)$ は被ばく時の年齢が p である人のうち被ばく後 1 年間に他の死因をまぬがれた人口の割合、 $B_p(t)$ は事故後 t 年目における出生率を示す。メッシュごとの全世代および全期間における合計リスクと人口を用いて、遺伝的影響による罹患数 $N_{ge}^{s,e}$ は次式で求められる。

$$N_{ge}^{s,e} = \sum_{ir=1}^{nr} \sum_{id=1}^{ndir} \left(R_{ge,TOT}^{s,e}(D_g) \cdot POP(ir, id) \right) \quad (8.30)$$

晩発的影響と同様に、遺伝的影響リスクの評価に関わる計算に必要な係数等は HEINPUT で計算された値を OSCAAR のライブラリとして格納している。

8.4. 寿命損失

寿命損失とは、被ばくに起因した予測される個人の余命の損失のことである。ある年齢において期待される余命に対して、被ばくによる致死がんリスクの割合分が寿命損失である。OSCAAR HE モジュールでは、晩発性リスク評価の対象とした疾患に対する寿命損失係数および寿命損失を求める。寿命損失係数は EPA 402-R-93-076³⁵⁾に基づくモデルである。寿命損失を考慮する疾患と対応する臓器を表 8.9 に示す。

表 8.9 寿命損失において考慮する疾患と対応臓器

影響名	モデル	OSCAAR の 対応臓器	ベースラインとして対象とした がん (相対リスクのみ)
白血病	絶対リスク	赤色骨髓	-
骨がん	絶対リスク	骨表面	-
乳がん	相対リスク	乳房	乳がん
肺がん	相対リスク	肺	肺がん
消化器がん	相対リスク	結腸	食道、胃、結腸、直腸、肝臓、胆 嚢・胆管、脾臓、大腸がん (NUREG/CR-4214)
甲状腺がん	絶対リスク	甲状腺	-
皮膚がん	絶対リスク	皮膚	-
その他のがん	相対リスク	女性：卵巣 男性：精巣	悪性リンパ腫、多発性骨髄腫、脳、 腎臓、膀胱、卵巣 (女性)、子宮 (NUREG/CR-4214)
良性甲状腺結節	絶対リスク	甲状腺	-

8.4.1. 生存率関数

年齢 x 歳における生存率関数 $S(x)$ とは、生まれてから x 歳までに生存している割合を意味する。EPA³⁵⁾では、被ばくに起因しないがんによる死亡を考慮した生存率関数 $S_0(x)$ と、被ばくによるがん i による死亡を考慮した生存率関数 $S_i(x)$ に対して、全ての年齢 x において死亡率が十分に小さいときは、 $S(x)$ と $S_0(x)$ には本質的な違いはないとしている。このことに倣い、OSCAAR では、ベースラインに基づいた生存率を用いる。生存率として第 23 回生命表³⁶⁾で与えられている死亡率 $q(x)$ を用いて、次式で算出したものを使用する³⁷⁾。

$$S(x) = (1 - q(x - 1)) \cdot S(x - 1) \quad (8.31)$$

$$S(0) = 1$$

8.4.2. 寿命損失係数

年齢 x 、性別 g 、臓器 o の 1Gy の被ばく当たりの寿命損失係数 $e_o^g(x)$ (y/Gy) は、晩発性影響のリスク推定と同様に、絶対リスクモデルと相対リスクモデルの 2 種類のモデルがある³⁵⁾。OSCAAR の寿命損失評価では、NUREG/CR-4214 の晩発性影響評価の分類のうち表 8.9 に示す影響を評価することができる。各がんに対して、等価線量を計算する対応臓器は OSCAAR の晩発性影響評価と同じとする。

8.4.2.1. 絶対リスクモデル

過剰絶対リスクモデルを用いた寿命損失係数は、次式で計算する。

$$e_o^g(x) = \frac{1}{S_{ga}(x)} \int_x^{\infty} \varepsilon_o(u) \cdot \dot{e}_g(u) \cdot S_{ga}(u) du \quad (8.32)$$

ここで、 $S_{ga}(x)$ は年齢 x 、性別 g の個人に対するベースラインに基づいた生存率関数、 $\varepsilon_o(x)$ は年齢 x における臓器 o に生じるがんの過剰絶対リスク ($\text{y}^{-1} \text{Gy}^{-1}$)、 $\dot{e}_g(x)$ は年齢 x 、性別 g の個人に対する余命期待値 (y)を示す。

8.4.2.2. 相対リスクモデル

相対リスクモデルを用いた寿命損失係数は、次式で計算する。

$$e_o^g(x) = \frac{1}{S_{gr}(x)} \int_x^{\infty} \eta_o(u) \cdot \mu_g(u) \cdot \dot{e}_g(u) \cdot S_{gr}(u) du \quad (8.33)$$

ここで、 $S_{gr}(x)$ は年齢 x 、性別 g における死亡率ベースライン $\mu_g(u)$ による生存率関数 (-)、 $\eta_o(u)$ は年齢 u における臓器 o に生じるがんの過剰相対リスク (Gy^{-1})、 $\mu_g(u)$ はベースラインの死亡率 (y^{-1})を示す。

8.4.3. 寿命損失の評価

任意の方位 id および距離 ir に位置するメッシュにおける被ばく時年齢 u 、性別 g 、臓器 o に対する 1 度の被ばくによる寿命損失 $FL_{g,o}(id, ir, u)$ は式(8.32)および式(8.33)から求められる寿命損失係数を用いて、次式で求められる。

$$FL_{g,o}(id, ir, u) = e_o^g(u) \cdot D_{g,o}(id, ir, u) \quad (8.34)$$

ここで、 $D_{g,o}(id, ir, u)$ は性別 g 、被ばく時年齢 u に対する臓器 o の吸収線量 (Gy)を示す。 $FL_{g,o}$ を全被ばく時年齢について合算することにより、次式のように生涯にわたる寿命損失が求められる。

$$FL_{g,o}(id, ir) = \int_a^{\infty} FL_{g,o}(id, ir, t) dt \quad (8.35)$$

リスクモデルで使用した疫学調査の結果は、比較的短い期間内で高線量に被ばくした人のデータであるため、低線量・低線量率のリスクに適用すると過大評価となる。この過大評価の度合いは、線量・線量率効果係数 (Dose and Dose Rate Effectiveness Factor : DDREF) により表され、低線量・低線量率のリスクは、高線量のリスクを $DDREF$ で割ることにより求められている。ここで、EPA 402-R-93-073 で定義している低線量は $< 0.2 \text{Gy}$ 、低線量率は $< 0.1 \text{mGy/min}$ である。また、 $DDREF$ は、乳がんのみ 1、乳がん以外のがんについては 2 を仮定している。臓器 o に対する線量・線量率効果 $DDREF$ を考慮した寿命損失 EL は次式のように求められる。

$$EL_{g,o}(dir, dist, a) = \frac{FL_{g,o}(dir, dist, a)}{DDREF} \quad (8.36)$$

評価領域($dir, dist$)における年齢 a 、性別 g の個人に対する寿命損失(y)は、全ての臓器に対する合計であり、次式のように求められる。

$$LL_g(dir, dist, a) = \sum_o EL_{g,o}(dir, dist, a) \quad (8.37)$$

9. 経済影響

OSCAAR では経済影響として、放射線防護措置に関する輸送コスト、経済損失、健康影響対策費などの種々のコストを評価する。OSCAAR で用いられているモデルは欧州共同体委員会(CEC)の事故影響評価コード COSYMA (COCO-1) に用いられているモデル^{38, 39)}を参考にしている。COSYMA に用いられているモデルは防護措置による国内総生産 (GDP : Gross Domestic Product) の損失寄与を推定する方法であり、地域ごとの 1 人当たりの GDP を基準に経済損失を示すため地域規模から国際規模までの幅広い範囲の区域に適用できる高い汎用性を持つ。

算定されるコストは、大きく分けて次の 3 種類となる。なお、除染に関するコストは最適な評価モデルが不確定であるため、評価しないものとした。

- ・ 人の移動に関するコスト
- ・ 食物摂取制限に関するコスト
- ・ 健康影響に関するコスト

また、食物摂取制限に関するコストに含まれる農業資本用役損失（使用できなくなる農地の資本用役損失）は、農畜産物損失と二重に評価してしまう恐れがあるため、計算対象外としている。

ECONO モジュールでの算定コスト項目を図 9.1 に示す。本モデルでは図 9.1 に示す 14 項目についての経済損失を算定する。

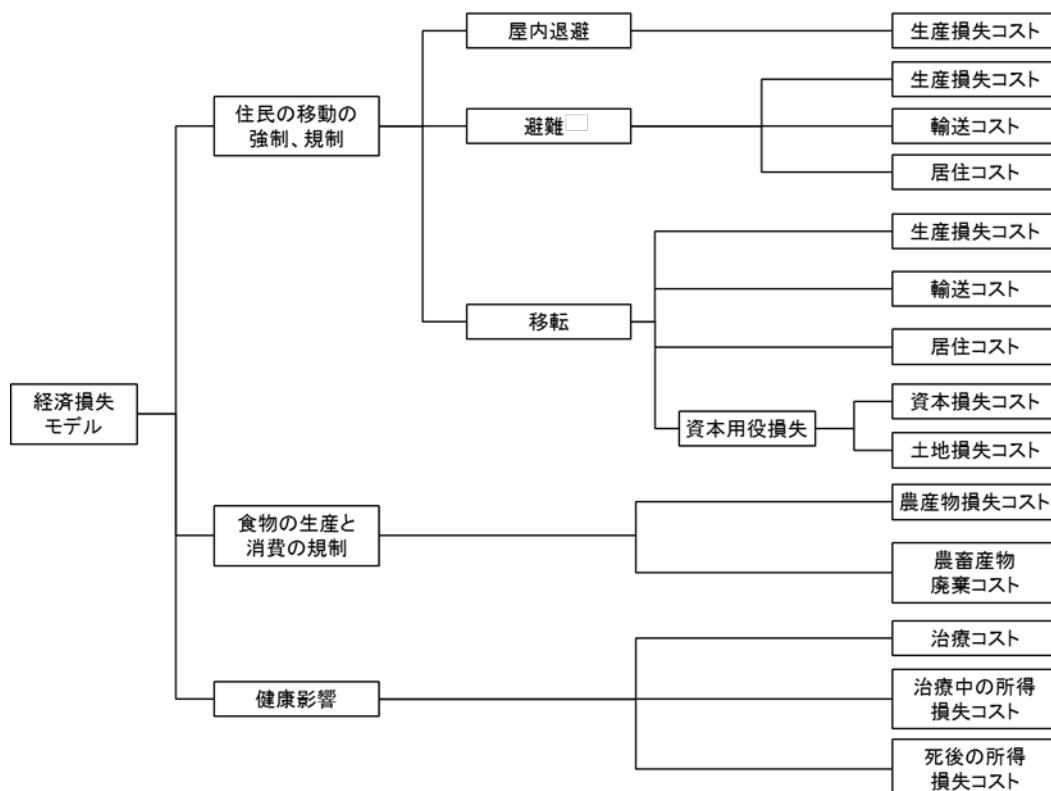


図 9.1 経済影響評価における算定コスト

9.1. 人の移動に関するコスト

人の移動に関するコストは、生産損失、居住コスト、輸送コスト、資本用役損失の4項目から成り、実施する防護措置別に評価対象項目が異なる。対策と評価対象項目の関係を表9.1に示し、各項目の計算式を以降に示す。

表9.1 防護措置と評価対象項目の関係

評価項目	対策の種類		
	屋内退避	避難	移転
生産損失	○	○	○
居住コスト	-	○	○
輸送コスト	-	○	○
資本用役損失	-	-	○

9.1.1. 生産損失

方位 d 、距離 r の住民に対する生産活動の損失 CST_{LI} は、以下の式に従って評価する。1人当たり GDP は、ライブラリから読み込んだ値を使用する。

$$CST_{LI}(d, r) = GDP(d, r) \times POP(d, r) \times TIME(d, r) \quad (9.1)$$

ここで、 GDP は1人当たり GDP (円 $\text{人}^{-1} \text{y}^{-1}$)、 POP : 移動人数 (人)、 $TIME$ は移動期間 (y)を示す。

9.1.2. 居住コスト

方位 d 、距離 r の住民に対する居住コスト CST_{AC} は、次式に基づいて計算する。居住費は、ライブラリから読み込んだ値を使用する。また、移動元のメッシュの値とする。

$$CST_{AC}(d, r) = ACCM(d, r) \times POP(d, r) \times TIME(d, r) \quad (9.2)$$

ここで、 $ACCM$ は居住費 (円 $\text{人}^{-1} \text{y}^{-1}$)を示す。

9.1.3. 輸送コスト

避難場所、移転場所へ人を移動する輸送コスト CST_{TR} は次式により評価する。移動距離 $ECDTR$ は評価メッシュによらず、入力データで与える一定値を用いる。

$$CST_{TR}(d, r) = COFTR \times POP(d, r) \times ECDTR \quad (9.3)$$

ここで、 $COFTR$ は輸送費 (円 $\text{人}^{-1} \text{km}^{-1}$)、 $ECDTR$ は移動距離 (km)を示す。

9.1.4. 資本用役損失

移転により使用できなくなる資本の損失で、土地および土地以外の資本価値について評価する。土地の資本用役損失 CST_{LL} は、次式で計算する。土地の投資回収率は、入力データで与える一定値を使用する。

$$CST_{LL}(d, r) = PLAND(d, r) \times SAREA(d, r) \times TIME(d, r) \times RINTR \quad (9.4)$$

ここで、 $PLAND$ は土地の資本価値 (円 m^{-2})、 $SAREA$ は移転面積 (m^2)、 $TIME$ は移転期間 (y)、 $RINTR$ は土地の投資回収率 (y^{-1})を示す。

土地以外の資本用役損失 CST_{LC} は、次の式で計算する。この式は、資本価値の算定式を簡略化したものである。減価償却率および利子率は、入力データで与える一定値を使用する。利子率については、土地の資本用役損失算出式における土地の投資回収率と同じ値を用いる。

$$CST_{LC}(d, r) = GCF(d, r) \times POP(d, r) \times TIME(d, r) \times (1-DECRS) \times (DECRS+RINTR) \times 1 \text{ 年} \quad (9.5)$$

ここで、 GCF は土地以外の資本価値 (円 $人^{-1}$)、 POP は移転人数 (人)、 $TIME$ は移転期間 (y)、 $DECRS$ は年間の減価償却率 (-)、 $RINTR$ は利子率 (-)を示す。

9.2. 食物摂取制限に関するコスト

食物摂取制限に関するコストは、農畜産物損失、農畜産物廃棄コストの 2 項目であり、食物摂取制限が実施された場合に評価を行う。

9.2.1. 農畜産物損失

食物摂取制限により生産できなくなる農畜産物の損失 CST_{LF} は、以下の式により評価メッシュ別・農畜産物別に算出し合計する。対象とする農畜産物は、葉菜、根菜、穀物、牛乳、乳製品、牛肉の 6 種類とする。

$$CST_{LF}(d, r) = GAP(d, r) \times AGRDT(d, r) \times TIME(d, r) \quad (9.6)$$

ここで、 GAP は先述した 6 種類のうちのある農畜産物の産出額 (円 ton^{-1})、 $AGRDT$ は生産量 ($ton y^{-1}$)、 $TIME$ は制限期間 (y)を示す。

9.2.2. 農畜産物廃棄コスト

食物摂取制限により出荷できなくなる農畜産物の廃棄コスト CST_{LF} の評価モデルである。ECONO では牛乳のみを対象とする。以下のモデル式によって評価を行う。廃棄時の輸送費と運搬距離は、入力データで与える一定値を用いる。

$$CST_{LF}(d, r) = TRCC \times DTCRM \times AGRDT(d, r) \times 1 \text{ 年} \quad (9.7)$$

ここで、 $TRCC$ は廃棄時の輸送費 (円 $ton^{-1}km^{-1}$)、 $DTCRM$ は運搬距離 (km)、 $AGRDT$ は農畜産物 (牛乳のみ考慮) の生産量 ($ton y^{-1}$)を示す。

9.3. 健康影響コスト

治療コスト、治療中の所得損失、死後の所得損失の 3 項目から成り、防護措置の有無に関わらず評価する。健康影響コストに関しては、防護措置を考慮して算出された健康影響別の総人数を用いており、評価メッシュごとではなく全評価メッシュの合計人数に対するコストとなる。

9.3.1. 治療コスト

健康影響別の治療費 CST_{ME} であり、健康影響別に計算し合計する。対象とする健康影響項目は、早期罹患、早期死亡、晩発性がん、晩発性がん死亡、遺伝的影響の 5 種類である。健康影響別の治療費および治療期間は、入力データで与える一定値を使用する。

$$CST_{ME}(i) = HEN(i) \times HEC(i) \times TMHE(i) \quad (9.8)$$

ここで、 HEN は健康影響 i の人数 (人)、 HEC は健康影響 i の治療費 (円 人 $^{-1}$ y $^{-1}$)、 $TMHE$ は健康影響 i の治療期間 (y)を示す。

9.3.2. 治療中の所得損失

治療期間中に就業できないために発生した所得損失 CST_{LW} であり、健康影響別に計算し合計する。対象とする健康影響項目は、早期罹患、早期死亡、晩発性がん、晩発性がん死亡、遺伝的影響の 5 種類である。給与所得と治療期間は、入力データで与える一定値を使用する。

$$CST_{LW}(i) = HEN(i) \times DLBR \times TMHE(i) \quad (9.9)$$

ここで、 HEN は健康影響 i の人数 (人)、 $DLBR$ は給与所得 (円 人 $^{-1}$ y $^{-1}$)、 $TMHE$ は健康影響 i の治療期間 (y)を示す。

9.3.3. 死後の所得損失

死後の所得損失 CST_{LWDE} および CST_{LWDC} は、早期死亡および晩発性がん死亡のみを対象とし、それぞれ以下の式で計算する。死亡数以外の各データは、入力データで与える一定値を使用する。

早期死亡

$$CST_{LWDE} = EMTN \times DLBR \times ETRM \quad (9.10)$$

ここで、 $EMTN$ は早期死亡数 (人)、 $DLBR$ は給与所得 (円 人 $^{-1}$ y $^{-1}$)、 $ETRM$ は所得可能期間 (y)を示す。

晩発性がん死亡

$$CST_{LWDC} = FACN \times DLBR \times (ETRM - INCB) \times DISC \quad (9.11)$$

ここで、 $FACN$ は晩発性がん死亡数 (人)、 $DLBR$ は給与所得 (円 人 $^{-1}$ y $^{-1}$)、 $ETRM$ は所得可能期間 (y)、 $INCB$ はがんの潜伏期間 (y)、 $DISC$ は割引率 (-)を示す。

10. OSCAAR 支援プログラム

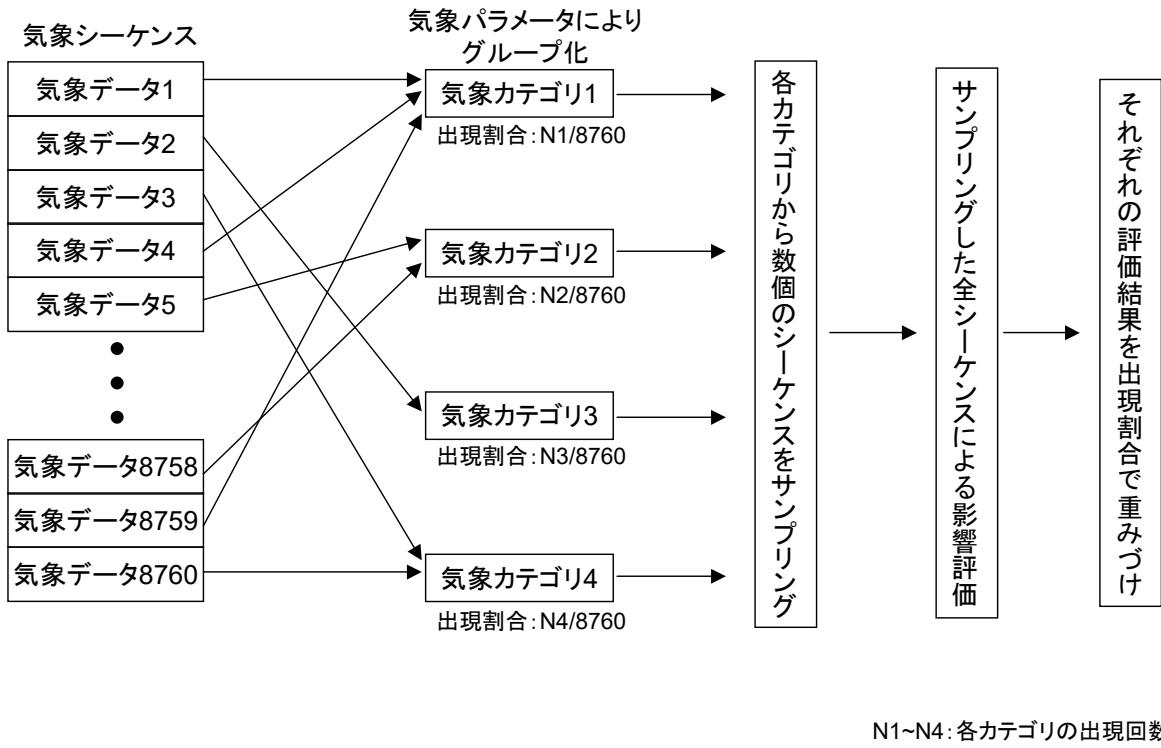
OSCAAR には、実行する上で必要なデータファイルの作成や OSCAAR の出力解析のための様々な関連プログラム（OSCAAR 支援プログラム）が整備されている。以降に各プログラムの概要を紹介する。

10.1. 気象データ作成プログラム GPV2OSC

GPV2OSC は気象庁から配信されるメソスケールを対象とした数値予報モデル（MSM）から OSCAAR における計算で使用される気象データのうち、広域気象データ、狭域気象データ、サイト気象データおよび降水量データを作成するプログラムである。モデルの詳細やプログラムの使用方法については、JAEA-Data/Code 2024-006¹³⁾に記載されている。

10.2. 気象データサンプリングプログラム MS

OSCAAR において確率論的解析を行う場合、解析を行う気象データのサンプリングの方法として、ランダムサンプリング、サイクリックサンプリング、бинサンプリングを選択することができる。бинサンプリングは図 10.1 に示すように、1 年間に出現する気象シーケンスを風速、大気安定度、降水量等の気象パラメータの値で定義されたカテゴリに分類し、分類された気象бинに該当する気象シーケンスからランダムに数個の気象シーケンスを選択して解析を行い、各カテゴリの発生確率で重みづけすることで確率論的解析を行う方法である。カテゴリ分類の際には出現可能な気象シーケンスの全範囲を代表し、事故影響のできるだけ正確な頻度分布を与えることができるよう工夫する必要がある。MS ではбинサンプリングを行い、気象シーケンスを選定することができる。



N1~N4: 各カテゴリーの出現回数

図 10.1 ビンサンプリングの概念図

10.3. 内部被ばく線量換算係数作成プログラム DSYS

DSYS は OSCAAR が使用する線量の算出に用いる内部被ばく線量換算係数を作成するプログラムである。内部被ばく線量換算係数は、ICRP が勧告した呼吸気道モデル (ICRP Publ.66)²⁷⁾、胃腸管モデル (ICRP Publ.30)²⁸⁾、体内動態モデル (ICRP Publ.30²⁸⁾, 56⁴⁰⁾, 67⁴¹⁾, 68⁴⁶⁾, 69⁴²⁾, 71⁴³⁾, 72³⁰⁾) および線量評価モデル (ICRP Publ.56⁴⁰⁾) によって計算されている。モデルの詳細やプログラムの使用方法については、JAEA-Data/Code 2008-031¹⁵⁾に記載されている。

10.4. 人口・農畜産物分布データ作成プログラム CURRENT

OSCAAR では、集団線量の算定や食物摂取経路による被ばく線量の推定等を放射性物質の放出点を中心とした 2 次元極座標メッシュで評価を行っており、それらの評価に必要な人口および農畜産物生産データ等についても同じく 2 次元極座標メッシュで整備する必要がある。CURRENT では、地域メッシュ統計の人口データや農畜産物データに関する市区町村別統計データから OSCAAR の 2 次元極座標メッシュのデータを作成する機能を持っている。

10.5. 晩発性身体的影響・遺伝的影響データ作成プログラム HEINPUT

HEINPUT は晩発性の身体的影響および遺伝的影響について 1Gy 当たりの生涯リスク、被ばく後における影響の発生率の時間変化など HE モジュールで必要なデータをあらかじめ計算するプログラムである。HEINPUT で使用されているモデルは、基本的に米国原子力規制委員会 (USNRC) の報告書「原子力発電所事故影響解析のための健康影響モデル (NUREG/CR-4214)」^{31,32)}を基礎としている。HEINPUT のモデルの詳細やプログラムの使用方法については、JAERI-Data/Code 99-002³³⁾に記載されている。

10.6. ポスト処理プログラム PostOSCAAR

PostOSCAAR は OSCAAR から出力される出力ファイル (.out) からユーザーが必要となる情報の出力および確率論的解析を行うプログラムである。OSCAAR で確率論的解析を行うと、解析した気象シーケンスの数の解析結果が出力ファイルに出力される。PostOSCAAR はこの全気象シーケンスの結果を解析し、2 次元極座標メッシュの距離に応じた最大値または平均値について、最小値、最大値、50%値、95%値を出力する。

11. まとめ

レベル3PRA コードとして、OSCAAR を開発した。OSCAAR は大気拡散計算、早期被ばく線量評価、長期被ばく線量評価、防護措置、健康影響評価、経済影響評価のための各モデルにより構成されている。

OSCAAR が今後の原子力利用の安全に貢献できることを期待する。

参考文献

- (1) 原子力規制委員会, 原子力災害対策指針, 2025.
- (2) Homma, T. et.al., O. Development of accident consequence assessment code at JAERI, EUR-13013-2. 1991, pp. 1049–1063.
- (3) Randerson D., Atmospheric science and power production, DOE/TIC-27601, 1984.
- (4) Seinfeld, J. H., Atmospheric Chemistry and Physics of Air Pollution, Environmental Science & Technology. 1986, vol. 20, no. 9, p. 863.
- (5) Gifford, F. A., Turbulent diffusion-typing schemes: a review, Nuclear Safety, vol. 17, no. 1, 1976, pp. 68-86.
- (6) Tadmor, J. and Gur, Y., Analytical expressions for the vertical and lateral dispersion coefficients in atmospheric diffusion, Atmospheric Environment, vol. 3, no. 6, 1969, pp. 688–689.
- (7) Eimutis, E. C. and Konicek, M. G., Derivations of continuous functions for the lateral and vertical atmospheric dispersion coefficients, Atmospheric Environment, vol. 6, no. 11, 1972, pp. 859–863.
- (8) Martin, D. O. and Tikvart, J. A., A general atmospheric diffusion model for estimating the effects on air quality of one or more sources, 1968.
- (9) Hanna, S. R. et.al., Handbook on atmospheric diffusion. USDOE, DOE/TIC-11223, 1982.
- (10) Bixler, N. and Nosek, A., MACCS Theory Manual, SAND2021-11535, 2021.
- (11) 気象業務支援センター, “オンライン気象情報 メソ数値予報モデル GPV (MSM) ”, <https://www.jmbsc.or.jp/jp/online/file/f-online10200.html>, (参照 2025-10-07).
- (12) 気象庁, “数値予報解説資料集”, <https://www.jma.go.jp/jma/kishou/books/nwpkaisetu/nwpkaisetu.html>, (参照 2025-10-07).
- (13) 日本原子力研究開発機構, OSCAAR 用気象データ作成プログラム GPV2OSC, JAEA-Data/Code 2024-006, 2024, 40p.
- (14) ICRP, Dose Coefficients for External Exposures to Environmental Sources, 2020, ICRP Publication 144.
- (15) 波戸真治ほか, 内部被ばく線量係数計算システム DSYS-GUI のユーザーズマニュアル, JAEA-Data/Code 2008-031, 2009, 75p.
- (16) ICRP, Dose Coefficients for Intakes of Radionuclides by Workers, ICRP, ICRP Publication 68, 1994.
- (17) Linsley, G. S., Resuspension of the transuranium elements-a review of existing data, NRPB-R-75, 1978.
- (18) Lassey, K. R., The possible importance of short-term exposure to resuspended radionuclides, Health Physics, vol. 38, no. 5, 1980, pp. 749–761.
- (19) 高原省五, 原子力発電所事故後の汚染地域における住民の被ばく線量評価と管理に関する研究, 京都大学, 2016.
- (20) 日本原子力学会, 原子力発電所の確率論的リスク評価に関する実施基準 (レベル 3PRA 編) :2018, 2018.
- (21) Gale, H. J. et.al., Weathering of caesium-137 in soil, Nature, vol. 201, no. AERE-R-4241, 1964, pp. 257–261.
- (22) Sprung, J. L. et.al., Evaluation of severe accident risks: Quantification of major input parameters, MACCS Input, NUREG/CR-4551, SAND86-1309 Vol.2, Rev.1, Part 7, 1990.
- (23) Hirouchi, J. et.al., Penetration factor and indoor deposition rate of elementary and particulate iodine in a Japanese house for assessing the effectiveness of sheltering for radiation exposures. Journal of Radiological Protection, vol. 41, no. 3, 2021, pp. S139-S149.

- (24) Hirouchi, J. et.sl., Evaluating the effect of temporal variations in wind speed on sheltering effectiveness and developing a simplified correction method to account for these variations. *Journal of Radiological Protection*, vol. 45, no. 2, 2025, 021506.
- (25) 赤林伸一ほか, 周辺に建物群のある独立住宅の風圧分布に関する風洞実験および換気量予測: 住宅の換気・通風に関する実験的研究 その1. *日本建築学会計画系論文集*, vol. 59, no. 456, 1994, pp. 9–16.
- (26) Ehrhardt, J. and Jones, J. A., An Outline of COSYMA, A New Program Package for Accident Consequence Assessments, *Nuclear Technology*, vol. 94, no. 2, 1991, pp. 196–203.
- (27) ICRP, Human Respiratory Tract Model for Radiological Protection, ICRP Publication 66, 1994.
- (28) ICRP, Limits for Intakes of Radionuclides by Workers, ICRP Publication 30, 1979.
- (29) Johnson, J., Radioiodine dosimetry. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, vol. 65, no. 1–2, 1981, pp. 223–238.
- (30) ICRP, Age-dependent Doses to Members of Public from Intake of Radionuclides: Part 5 Compilation of Ingestion and Inhalation Dose Coefficients, ICRP Publication 72, 1996.
- (31) U.S. NRC, Health Effects Model for Nuclear Power Plant Accident Consequence Analysis, NUREG/CR-4214, SAND85-7185, 1985.
- (32) U.S. NRC, Health Effects Models for Nuclear Power Plant Accident Consequence Analysis, Low LET Radiation, NUREG/CR-4214 Rev.1, 1989.
- (33) 外川織彦ほか, 放射線による晩発性身体的影響と遺伝的影響を推定するための計算コード HEINPUT, JAERI-Data/Code 99-002, 1999, 59p.
- (34) 本間俊充ほか, 原子炉事故時放射線影響解析で用いるための健康影響モデル 2, JAERI-Review 2000-029, 2000, 83p.
- (35) U.S. EPA, ESTIMATING RADIOGENIC CANCER RISKS, EPA 402-R-93-076, 1994.
- (36) 厚生労働省. “第 23 回生命表（完全生命表）の概況”,
<https://www.mhlw.go.jp/toukei/saikin/hw/life/23th/index.html>, (参照 2025-10-08).
- (37) 高原省五ほか, 放射線による晩発性健康影響を推定する計算コード HEINPUT の改良と GUI 作成, JAEA-Data/Code 2009-001, 2009, 83p.
- (38) Haywood, S. M. et.al., COCO-1: Model for Assessing the Cost of Offsite Consequences of Accidental Releases of Radioactivity. NRPB, NRPB-R-243, 1991.
- (39) Faude, D., COSYMA Modelling of Economic Consequences, KfK 4336, 1992.
- (40) ICRP. Age-dependent Doses to Members of the Public from Intake of Radionuclides - Part 1, ICRP Publication 56, 1990.
- (41) ICRP, Age-dependent Doses to Members of the Public from Intake of Radionuclides - Part 2 Ingestion Dose Coefficients, ICRP Publication 67, 1993.
- (42) ICRP, Age-dependent Doses to Members of the Public from Intake of Radionuclides - Part 3 Ingestion Dose Coefficients, ICRP Publication 69, 1995.
- (43) ICRP, Age-dependent Doses to Members of the Public from Intake of Radionuclides - Part 4 Inhalation Dose Coefficients, ICRP Publication 71, 1995.

