

放射性物質拡散想定図作成業務

報告書

平成 24 年 9 月

岐阜県

目次

1.	はじめに	1-1
2.	岐阜地方気象台による岐阜県の気象特性	2-1
3.	作業内容	3-1
3.1.	評価モデル整備	3-1
3.2.	シミュレーション条件の検討	3-1
3.3.	放射性物質拡散シミュレーション (飛来確率分布計算)	3-1
3.4.	放射性物質拡散シミュレーション (事例計算)	3-2
3.5.	専門委員会	3-2
3.6.	外部発表用資料・報告書の作成	3-2
4.	評価モデル整備	4-1
4.1.	気象モデル：RAMS	4-2
4.2.	粒子モデル：HYPACT	4-2
4.3.	沈着モデル	4-3
4.4.	線量計算プログラム	4-4
5.	シミュレーション条件の検討	5-1
5.1.	計算領域	5-2
5.2.	飛来確率分布計算を実施する年の選定	5-5
5.3.	放出地点	5-12
5.4.	放出高さ	5-12
5.5.	放出粒子数	5-16
6.	放射性物質拡散シミュレーション・飛来確率分布計算	6-1
6.1.	概要	6-1
6.2.	飛来確率	6-3
7.	放射性物質拡散シミュレーション・事例計算	7-1
7.1.	概要	7-1
7.2.	計算ケースについて	7-1
7.3.	評価対象核種	7-4
7.4.	放出継続時間	7-8
7.5.	放出量	7-10
7.6.	放出開始時刻について	7-11
7.7.	計算結果	7-12
8.	専門委員会	8-1
8.1.	開催日時と議題	8-1
8.2.	委員	8-2
9.	外部発表用資料の作成	9-1
10.	用語解説	10-1
11.	参考文献	11-1

1. はじめに

平成 23 年 3 月の福島第一原子力発電所事故では、従来の防災対策を重点的に充実すべき地域を超える範囲にまで、放射性物質による影響があった。岐阜県は、最寄りの原子力事業所（敦賀発電所）から県境まで約 25 km の位置にあることに加え、若狭湾方向から吹く風が卓越していることから、万が一の原子力災害に対して対策を講じておく必要がある。地域防災計画を改定するなど原子力防災対策の充実・強化に資するため、福島第一原子力発電所事故と同様の放射性物質の放出が、敦賀発電所で発生したと仮定した場合のシミュレーションを実施した。

また、気象データの選定、核種別放出量の仮定、及び拡散計算結果（シミュレーション結果）については、学識経験者による委員会に諮り、その妥当性等について助言をいただいた。

なお、本書にあるシミュレーション結果は、過去の気象条件を用いた計算結果であることを踏まえ、万が一の原子力災害時には、このシミュレーション結果に過度に捉われることなく、その時点における事故情報、気象条件、放射線モニタリング情報などを総合的に判断し、応急対策を講じることが重要である。

2. 岐阜地方気象台による岐阜県の気象特性

岐阜県の気象特性について、岐阜地方気象台より資料の提供を受けた。本章にその内容を示す。

岐阜県の風の特性

地表付近の風は、気圧配置などの気象条件に加えて地形の影響を大きく受ける。岐阜県は美濃地方の平地を除けば山岳の多い県であることから複雑な地形をしているため、狭い地域で大きく特性が異なる。代表的な気圧配置の時の各地域別に見た大まかな特性は次のとおりである。

高気圧

本州付近が高気圧に覆われ、晴れて気圧の傾きも小さい場合は、海陸風（日中は海から陸に向かい夜間は陸から海に向かう風）が主体となる。日中は、岐阜・西濃、中濃、飛騨南部では南よりの風だが、東濃では木曾川や土岐川に沿って南西風ないしは西風となる。西濃では滋賀県から入る西風となる場合もある。また、飛騨北部や中濃の北部では、日本海側から入る北よりの風となる。全体に風速は数メートルである。夜間は、概ね日中と逆の風向となり、風速は日中より弱く静穏となる所もある。岐阜・西濃、中濃、飛騨南部では北よりの風だが、西濃では東よりの風となる所もある。東濃では東よりの風、飛騨北部では南よりの風となる。

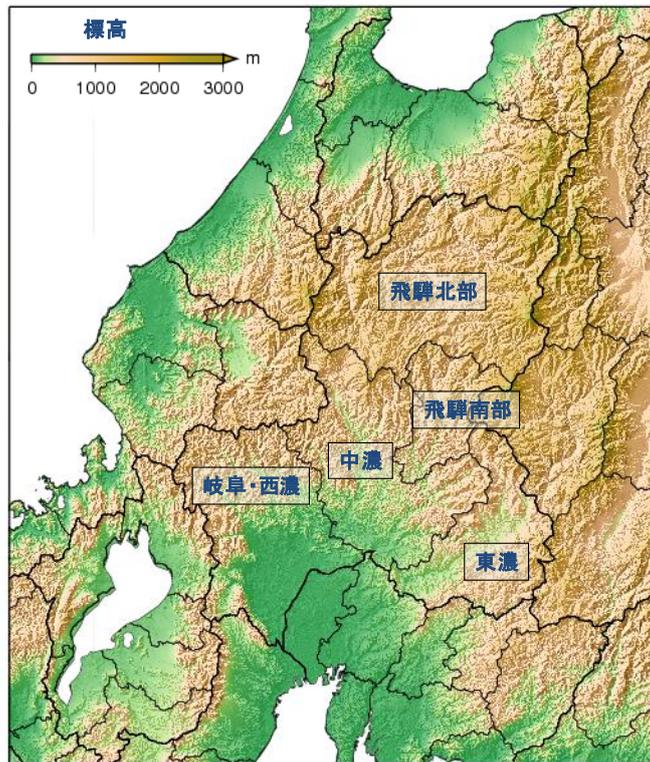
冬型の気圧配置

冬型の気圧配置（大陸に高気圧、日本の東海上から千島方面に発達した低気圧がある冬に現れやすい気圧配置）となる場合には、県全体に西風ないしは北西の風となる。気圧の傾きが大きいときは、平地を中心に強風となる。

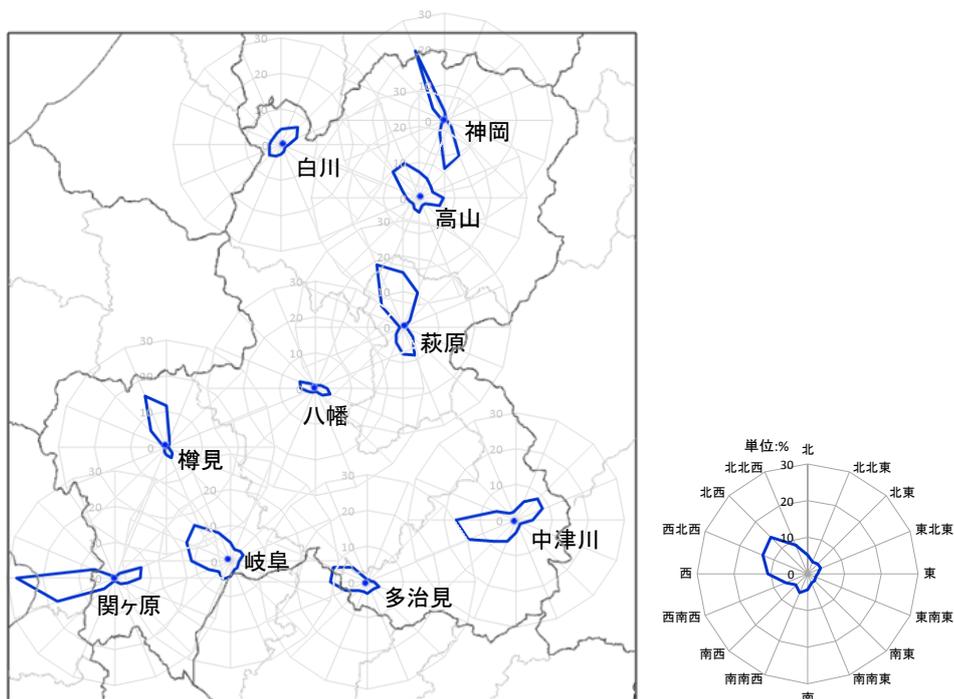
低気圧や気圧の谷、台風

低気圧や台風などが接近・通過する際には、その進路など岐阜県との位置関係で風の向きが大きく異なる。低気圧や台風が本州の南海上を通過し、関東の東海上へ進み気圧の傾きが大きい場合には、冬型の気圧配置時と同様に、県全体に西風ないしは北風となり、強風となる場合もある。

一方、低気圧や気圧の谷が接近してくる場合には、美濃地方の平地では南西風ないし西風となり、強風となる場合もある。



岐阜県内の地形(国土地理院発行の数値地図 50m メッシュ (標高) を利用)



風配図 全年 (左：岐阜県全域、右：岐阜)

1981-2010年の毎時データによる風向の出現頻度 (%) を16方位に分けて示した図
(ただし、中津川は観測所移転により、2010年3月25日～12月のデータによる)

(岐阜地方気象台)

3. 作業内容

作業内容を以下に示す。

3.1. 評価モデル整備

放射性物質拡散シミュレーションを遂行するにあたり、以下のとおり、放射性物質の拡散解析・線量計算モデルの整備を行った。

(a) 気流解析

放出地点（敦賀発電所）から岐阜県全域及びその周辺地形を考慮し、時間的、局地的な気流の変化を再現可能なよう、気流解析モデルの整備を行った。

(b) 拡散解析

拡散解析モデルは、放出地点（敦賀発電所）から岐阜県全域を対象として、粒子モデルをベースとして、放射性物質の物理減衰及び降雨、降雪による沈着を考慮した拡散計算が行えるよう、整備した。放出高さは、地上放出、排気筒放し出いずれも選択可能とし、放射性物質の放出量については、時間的に一定の放出のみならず、時間的に変化する放出量も扱えるものとした。

(c) 被ばく線量計算

放射性核種は、福島第一原子力発電所事故における推定放出核種を踏まえ、希ガス、ヨウ素、セシウムを含む10核種以上を考慮し、大気中及び地表面からの放射線による外部被ばく線量及び呼吸による放射性物質の取り込みによる内部被ばく線量が考慮できるよう、被ばく線量計算プログラムの整備を行った。なお、計算メッシュは1kmメッシュとした。

3.2. シミュレーション条件の検討

放射性物質拡散シミュレーションを実施するに当たり、放出条件や計算対象とする年等を検討した。

(a) 放出量

(b) その他放出条件（放出高さ、放出粒子数等）

(c) 計算対象とする年

3.3. 放射性物質拡散シミュレーション（飛来確率分布計算）

1年間の気象データを基に、岐阜県を対象として、放射性物質が1年間連続的に同一量放出したと仮定した放射性物質拡散シミュレーションを行った。放射性物質は次の2種類を想定し、大気中濃度及び地表沈着量の計算を行った。

(a) 沈着しないガス状物質（希ガスを想定）

(b) 沈着する粒子状の物質（ヨウ素、セシウム等）

3.4. 放射性物質拡散シミュレーション (事例計算)

事例計算は、次の4項目について日時の選定を行い、計20ケースの計算を行った。

- (a) 四季の典型的な気圧配置 (春夏秋冬について2ケースずつ、計8ケース)
- (b) 岐阜県内に高線量が出現するケース (春夏秋冬について2ケースずつ、計8ケース)
- (c) 広域に放射性物質が分布するケース (2ケース)
- (d) 放射性物質の流入経路別 (上記(1)～(3)で見られない流入経路) の計算 (2ケース)

3.5. 専門委員会

学識経験者による委員会「岐阜県放射性物質拡散想定図作成にかかる専門委員会」を、全4回行った。

3.6. 外部発表用資料・報告書の作成

シミュレーション結果のとりまとめ資料として、外部発表用資料及び報告書の作成を行った。

4. 評価モデル整備

大気拡散シミュレーションの分野では、一般に、気流場を計算するためのモデルと、物質の移流・拡散を計算するためのモデルの結合又は組み合わせで解析が行われている。

本件では、気流場の解析を気象モデル RAMS4.4 (The **R**egional **A**tmospheric **M**odeling **S**ystem version 4.4) [参考文献 1]、種々の放射性物質の移流・拡散計算を粒子モデル HYPACT 1.2 (The **H**ybrid **P**article **A**nd **C**oncentration **T**ransport model version 1.2) [参考文献 2] を用いて行い、得られた拡散情報から線量計算を行うものとする。解析の流れを図 4-1 に示す。

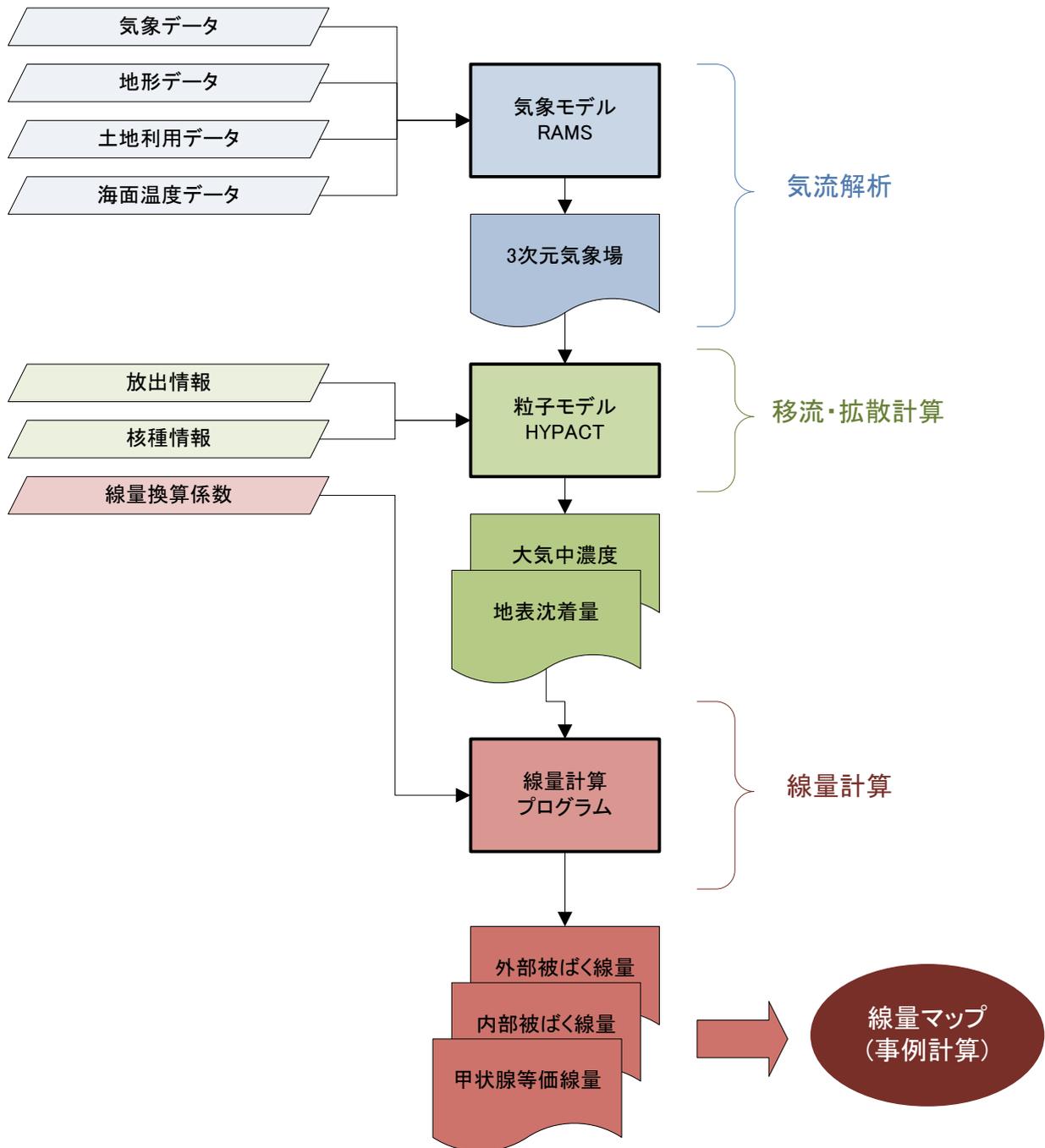


図 4-1 解析の流れ

4.1. 気象モデル：RAMS

RAMS コードは、オイラー型モデルによって気象及び物質の拡散を計算するコードであり、米国コロラド州立大学と Mission Research 社の協力の下で開発され、現在 ATMET 社が保守等を行っている。基本方程式として、非静力学、非定常粘性流を考慮した Navier-Stokes 式を用いている。また多重格子計算法（ネスティング法）を使用しているため、局所領域のメッシュを細分化することで微小空間の計算が可能である。乱流パラメタリゼーションには Mellor and Yamada のレベル 2.5 スキームを使用することができ、バルク法による微小物理モデルを組み込んでいるなど、詳細な物理過程をモデル化している。

これらの特徴により、現実の局域的な地形を反映した気象情報を、時間及び空間的に比較的精度良く求めることができる。RAMS コードはメソスケール（1km～1000km のオーダー）における計算コードとして代表的なコードであり、この範囲における地域天気予報や大気拡散の基礎研究など、世界 30 ヶ国以上で広く利用されている。

4.2. 粒子モデル：HYPACT

HYPACT コードは、RAMS と同じ開発元が開発した物質輸送計算コードであり、オイラー型モデル、ラグランジュ型粒子モデル及びこの 2 つを組み合わせたハイブリッドモデルを内蔵している。HYPACT は基本的な設計思想では、観測値など含んだ任意の入力に対応するものとされているが、入力設定項目では、RAMS における解析データとの関係を考慮に入れるものが多く、また、垂直方向の風向きや乱流エネルギーなど、局地性が高いパラメータ又は直接観測できないパラメータが必要とされる。そのため、HYPACT による拡散計算を実施する際には、RAMS の計算結果を利用するのが一般的である。

拡散物質の放出に関する設定は、時間・空間的に詳細に定義でき、点、面、体積線源などを定義できる。

このシミュレーションでは、ラグランジュ型粒子モデルをベースとして、放射性物質の物理的減衰、乾性及び湿性沈着を考慮できるよう改良したモデルを使用した。沈着モデルについては、次節に示す。

4.3. 沈着モデル

乾性沈着 [用語解説参照] 及び降水による湿性沈着 [用語解説参照] の計算式を以下に示す。

4.3.1. 乾性沈着

乾性沈着は接地層のみで起こるものとする。その寄与率は高度に依存し、沈着速度 v_g に比例する。計算式を (4.1) 式に示す。ここで、 v_g は文献値 [参考文献 3] からヨウ素を含む全ての粒子状核種について、0.2 (cm/s) とする。

$$q_{dry} = k \cdot v_g \cdot q_n \dots\dots\dots (4.1)$$

$$k = \max\left(\frac{2}{\Delta z_s} \left(1 - \frac{z_p}{\Delta z_s}\right), 0\right) \dots\dots\dots (4.2)$$

- q_{dry} : 粒子の乾性沈着率 (Bq/s)
- q_n : 粒子の持つ放射能 (Bq)
- v_g : 粒子の沈着速度 (m/s)
- z_p : 粒子の高度 (m)
- Δz_s : 接地境界層の高さ (m)

4.3.2. 湿性沈着

大気中の放射性物質は、降水によって一様に除去されるものとし、湿性沈着率は (4.3) 式で計算する。洗浄率は (4.4) 式で計算される。ここで、洗浄係数パラメータは、 $a=1.2 \times 10^{-4}$ 、 $b=0.5$ [参考文献 4] とする。

$$q_{wet} = \Lambda \cdot q_n \dots\dots\dots (4.3)$$

$$\Lambda = a \cdot I^b \dots\dots\dots (4.4)$$

- q_{wet} : 粒子の湿性沈着率 (Bq/s)
- q_n : 粒子の持つ放射能 (Bq)
- Λ : 洗浄率 (1/s)
- I : 降水強度 (mm/hr)
- a : 洗浄係数パラメータ (hr/mm/s)
- b : 洗浄係数パラメータ (-)

4.4. 線量計算プログラム

HYPACT から出力される大気中濃度及び地表沈着量から、別途作成した線量計算プログラムで計算を行った。被ばく経路は、放射性雲及び地表沈着による外部被ばく及び吸入による内部被ばくを考慮した。

4.4.1. 線量計算の考え方

各被ばく線量の計算においては、IAEA の包括的判断基準 (GC : Generic Criteria) に基づき、通常の生活を仮定して、屋内滞在時間及び家屋遮へい、フィルター効果を以下のように設定した。呼吸率は、同様の考え方で日平均値を用いた。IAEA の包括的判断基準を表 4-1 に示す。

屋内遮へい、フィルター効果

吸入による甲状腺等価線量	: 0.25 (※1)
クラウドシャイン	: 0.9 (※2)
グラウンドシャイン	: 0.4 (※3)

※1：原子力安全委員会指針集 原子力施設等の防災対策について (付属資料 8) より、通常の換気率の建物に避難すると、甲状腺等価線量は 1/4～1/10 に低減されるとの記載から、最大となる 1/4 を設定。

※2：原子力安全委員会指針集 原子力施設等の防災対策について (付属資料 8) 表 1 から、木造家屋の低減係数

※3：原子力安全委員会指針集 原子力施設等の防災対策について (付属資料 8) 表 2 から、木造家屋の低減係数

1 日の滞在時間

屋内	: 16 時間
屋外	: 8 時間

表 4-1 確率的影響リスクを低減するための防護措置及びその他の対応措置に対する包括的判断基準

出典：IAEA GSR Part 3 (Interim) Annex TABLE A-1

包括的判断基準	防護措置あるいは他の措置の例
甲状腺等価線量 50mSv 以上 (最初の 7 日間)	安定ヨウ素剤予防服用
実効線量 100mSv 以上 (最初の 7 日間) 胎児等価線量 100mSv 以上 (最初の 7 日間)	屋内退避、避難、除染、食物やミルク、水の摂取制限、汚染管理、公衆の安心確保
実効線量 100mSv 以上 (年間) 胎児等価線量 100mSv 以上 (子宮内発育全期間)	一時的避難、除染、食物、ミルク及び水の代替、公衆の安心確保
実効線量 100mSv (月間)	(医療追跡調査の基礎としての) 特定の放射線感受性の高い臓器の等価線量に基づくスクリーニング、カウンセリング
胎児等価線量 100mSv (子宮内発育期間)	個々の状況で告知に基づく決定を実施するためのカウンセリング

なお、現行の防災指針 (原子力安全委員会指針集 原子力施設等の防災対策) で採用されている、放射性雲通過中、屋外に居続け、なんらの措置も講じなかった場合の線量 (予測線量) は、吸入による小児甲状腺等価線量で 2.88 倍 (呼吸率を活動時 (0.31m³/h) とする)、クラウドシャインで 1.07 倍となる。

4.4.2. 放射性雲中の放射性物質を吸入することによる甲状腺等価線量

甲状腺等価線量 [用語解説] は、次の式により計算する。呼吸率を表 4-2、線量係数を表 4-3 に示す。

$$D_e = Df_e \cdot M \cdot \sum_{i=1}^{NT} C_{air,i} \cdot \frac{8+16 \cdot 0.25}{24} \dots\dots\dots (4.5)$$

ここで、

- D_e : 甲状腺等価線量 (Sv)
- Df_e : 甲状腺等価線量係数 (Sv/Bq)
- M : 呼吸率 (m^3/h)
- $C_{air,i}$: ある時間 i における地表空气中核種濃度 (Bq/m^3)
- NT : 放射性雲の滞留時間 (h)

である。

4.4.3. 放射性雲中の放射性物質による外部被ばく線量 (クラウドシャイン)

サブマージョンモデル [用語解説] による外部被ばく線量 (実効線量 [用語解説]) は、次の式により計算する。線量係数を表 4-4 に示す。

$$D_{ext, sbm} = Df_{ext, sbm} \cdot \sum_{i=1}^{NT} C_{air,i} \cdot \frac{8+16 \cdot 0.9}{24} \dots\dots\dots (4.6)$$

ここで、

- $D_{ext, sbm}$: サブマージョンモデルによる外部被ばく線量 (Sv)
- $Df_{ext, sbm}$: サブマージョンモデルによる外部被ばく線量係数 (Sv/h per Bq/m^3)
- $C_{air,i}$: ある時間 i における地表空气中核種濃度 (Bq/m^3)
- NT : 放射性雲の滞留時間 (h)

である。

4.4.4. 地表に沈着した放射性物質からの外部被ばく線量 (グランドシャイン)

地表に沈着した放射性物質からの外部被ばく線量 (実効線量) は、次の式により計算する。線量係数を表 4-4 に示す。

$$D_{ext, sur} = Df_{ext, sur} \cdot \sum_{i=1}^{NT} C_{sur,i} \dots\dots\dots (4.7)$$

ここで、

- $D_{ext, sur}$: 地表に沈着した放射性物質からの外部被ばく線量 (Sv)
- $Df_{ext, sur}$: 地表に沈着した放射性物質からの外部被ばく線量係数 (Sv/h per Bq/m^2)
- $C_{sur,i}$: ある時間 i における地表沈着量 (Bq/m^2)
- NT : 放射性雲の滞留時間 (h)

である。

年間線量 $Dt_{ext,sub}$ (Sv) は、1年間を 365.24 日とし、滞在時間を屋外 8 時間、屋内 16 時間として、沈着してから 1 年間の物理減衰を考慮し、次式で計算する。なお、屋内においては木造家屋の遮蔽係数として、0.4 を乗じる。

$$Dt_{ext,sur} = D_{ext,sur} \cdot \frac{8+16 \cdot 0.4}{24} \cdot \frac{1-e^{-\lambda T}}{\lambda} \dots\dots\dots (4.8)$$

ここで、

- $Dt_{ext,sub}$: 年間線量 (Sv)
- $D_{ext,sur}$: 地表に沈着した放射性物質からの外部被ばく線量 (Sv)
- T : 沈着してからの経過時間 (h) (1 年間 (=365.24 日×24 時間))
- λ : 核種の崩壊定数 (1/h)

表 4-2 呼吸率 (緊急時環境放射線モニタリング指針、ICRP Publ. 71 [参考文献 5])

対象	日平均呼吸率 (m ³ /h)
小児 (1 歳児)	0.215
成人	0.925

表 4-3 吸入による内部被ばく線量係数 (ICRP Publ.72 [参考文献 6])

核種	短半減期子孫核種 (()内は分岐比)	小児 (1 歳児)			成人		
		実効線量 (Sv/Bq)	甲状腺 等価線量 (Sv/Bq)	吸収 タイプ	実効線量 (Sv/Bq)	甲状腺 等価線量 (Sv/Bq)	吸収 タイプ
⁸⁹ Sr		2.40E-08	3.20E-10	M	6.10E-09	4.60E-11	M
¹²⁷ Sb	¹²⁷ Te (0.824)	7.90E-09	2.28E-10	M	1.81E-09	4.33E-11	M
^{129m} Te	¹²⁹ Te (0.65)	2.61E-08	1.20E-08	M	6.62E-09	1.00E-09	M
¹³² Te	¹³² I (1.0)	1.40E-08	6.90E-08	M	2.09E-09	5.70E-09	M
¹³¹ I		7.20E-08	1.40E-06	F	7.40E-09	1.50E-07	F
¹³³ I		1.80E-08	3.50E-07	F	1.50E-09	2.80E-08	F
¹³³ Xe		-	-	-	-	-	-
¹³⁴ Cs		7.30E-09	6.30E-09	F	6.60E-09	6.30E-09	F
¹³⁷ Cs	^{137m} Ba (0.946)	5.40E-09	4.40E-09	F	4.60E-09	4.40E-09	F
¹⁴⁰ Ba	¹⁴⁰ La (1.0)	2.63E-08	1.70E-09	M	6.20E-09	3.36E-10	M

表 4-4 外部被ばく実効線量係数 (EPA-402-R-93-081 [参考文献 7])

核種	短半減期子孫核種 (()内は分岐比)	実効線量係数	
		サブマージョン (mSv/h per Bq/m ³)	グランドシャイン (mSv/h per Bq/m ²)
⁸⁹ Sr		2.78E-10	8.17E-12
¹²⁷ Sb	¹²⁷ Te (0.824)	1.21E-07	2.45E-09
^{129m} Te	¹²⁹ Te (0.65)	1.20E-08	2.77E-10
¹³² Te	¹³² I (1.0)	4.40E-07	8.78E-09
¹³¹ I		6.55E-08	1.35E-09
¹³³ I		1.06E-07	2.15E-09
¹³³ Xe		5.62E-09	1.66E-10
¹³⁴ Cs		2.73E-07	5.47E-09
¹³⁷ Cs	^{137m} Ba (0.946)	9.81E-08	2.00E-09
¹⁴⁰ Ba	¹⁴⁰ La (1.0)	4.52E-07	8.42E-09

5. シミュレーション条件の検討

飛来確率分布計算のための計算条件を表 5-1 に示す。各項目の詳細については、表 5-1 の「詳細」に示す章又は節に示した。

表 5-1 飛来確率分布・計算条件

No.	項目		内容	詳細
1	計算モデル		気象モデル：RAMS 粒子モデル：HYPACT	4.1～4.2 節
2	気象データ		MSM データ (気象庁) 解析雨量 (気象庁)	10 章 用語解説
3	地形データ		50m メッシュ数値地図 (国土地理院)	
4	計算範囲 (格子)	水平方向	敦賀及び岐阜県を含む東西 300 km×南北 240 km、1 km メッシュ	5.1 節
		鉛直方向	上空 13.6 km までとし、最下層を 100 m とした 27 層とする。	
5	放出位置		敦賀発電所 (Google Earth) 緯度： 35.7532 (deg) 経度： 136.0181 (deg)	5.3 節
6	飛来確率分布 計算	放出地上高さ	100 (m)	5.4 節
		放出率	1.0 (Bq/h)	
		放出物質	・沈着しないガス状物質 ・沈着する粒子状物質	
		乾性沈着速度※ ¹	0.2 (cm/s)	3.3.1 項
		湿性沈着 パラメータ※ ¹	a : 1.2×10^{-4} b : 0.5	3.3.2 項
		計算対象とする年	2010 年	5.2 節
		計算期間	2009 年 12 月 31 日 0:00～ 2011 年 1 月 1 日 0:00	
		放出期間	同上	
		タイムステップ	30 秒	10 章 用語解説
		放出粒子数	500 粒子/タイムステップ	5.5 節
		出力時間間隔	1 時間	
出力結果※ ²	大気中濃度 地表沈着量 (粒子状物質)			

※¹ : 粒子状物質の計算時のみ考慮する。

※² : 各メッシュにおける大気中濃度及び地表沈着量は、統計誤差を低減するため、当該メッシュを中心とした 3×3 メッシュの平均とした。

5.1. 計算領域

計算領域は、敦賀発電所及び岐阜県全域を含む領域とし、水平方向を東西 300 km×南北 240 km、鉛直方向を上空 13.6 km まで考慮した。計算領域を図 5-1、領域内の地形を図 5-2 に示す。

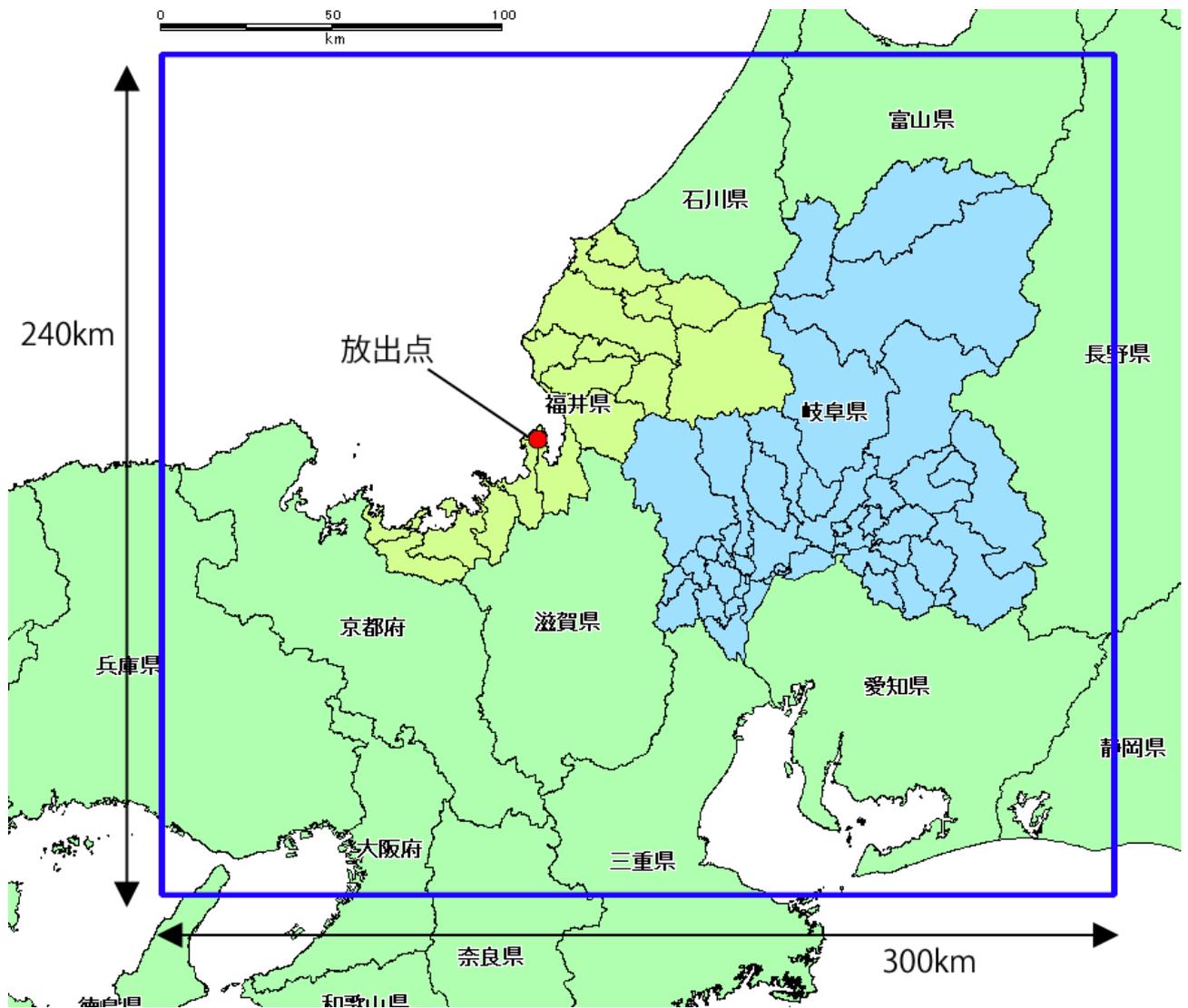


図 5-1 計算領域

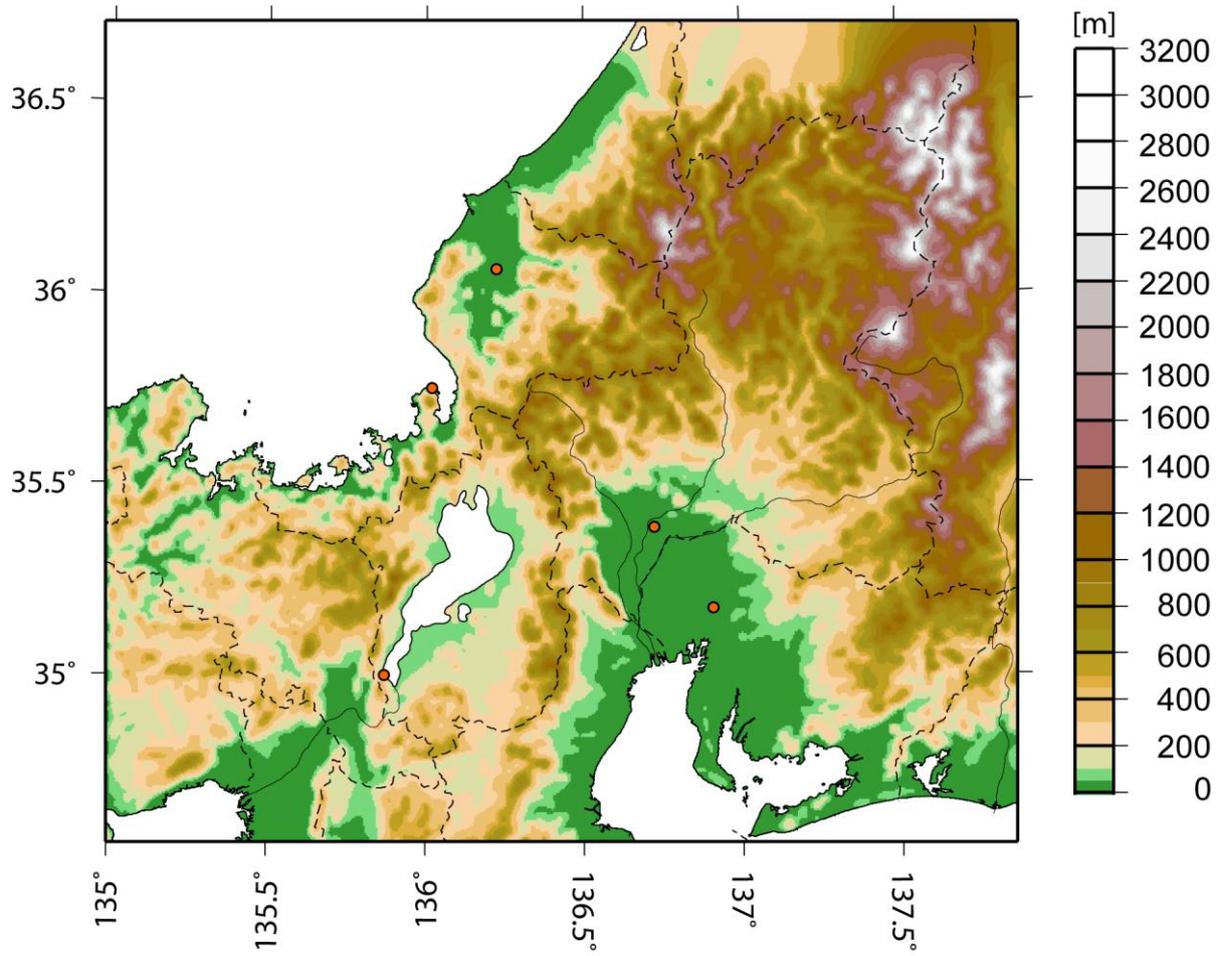


図 5-2 計算領域の地形 (m)

RAMS における鉛直座標は図 5-3 に示す、 σ_z 座標という地形に沿った座標となっており、実際の格子点の位置 (x, y, z) と σ_z 座標系における位置 (x^*, y^*, z^*) との関係は (5.1) 式で表される。ここで H は計算領域最上面の高度 (m)、 z_g は地形高さ (m) である。本件では、最下層を 100 (m) として、上空約 13.6 (km) までを 27 層で分割した。

$$\begin{aligned} x^* &= x \\ y^* &= y \end{aligned}$$

$$z^* = H \cdot \left(\frac{z - z_g}{H - z_g} \right) \dots\dots\dots (5.1)$$

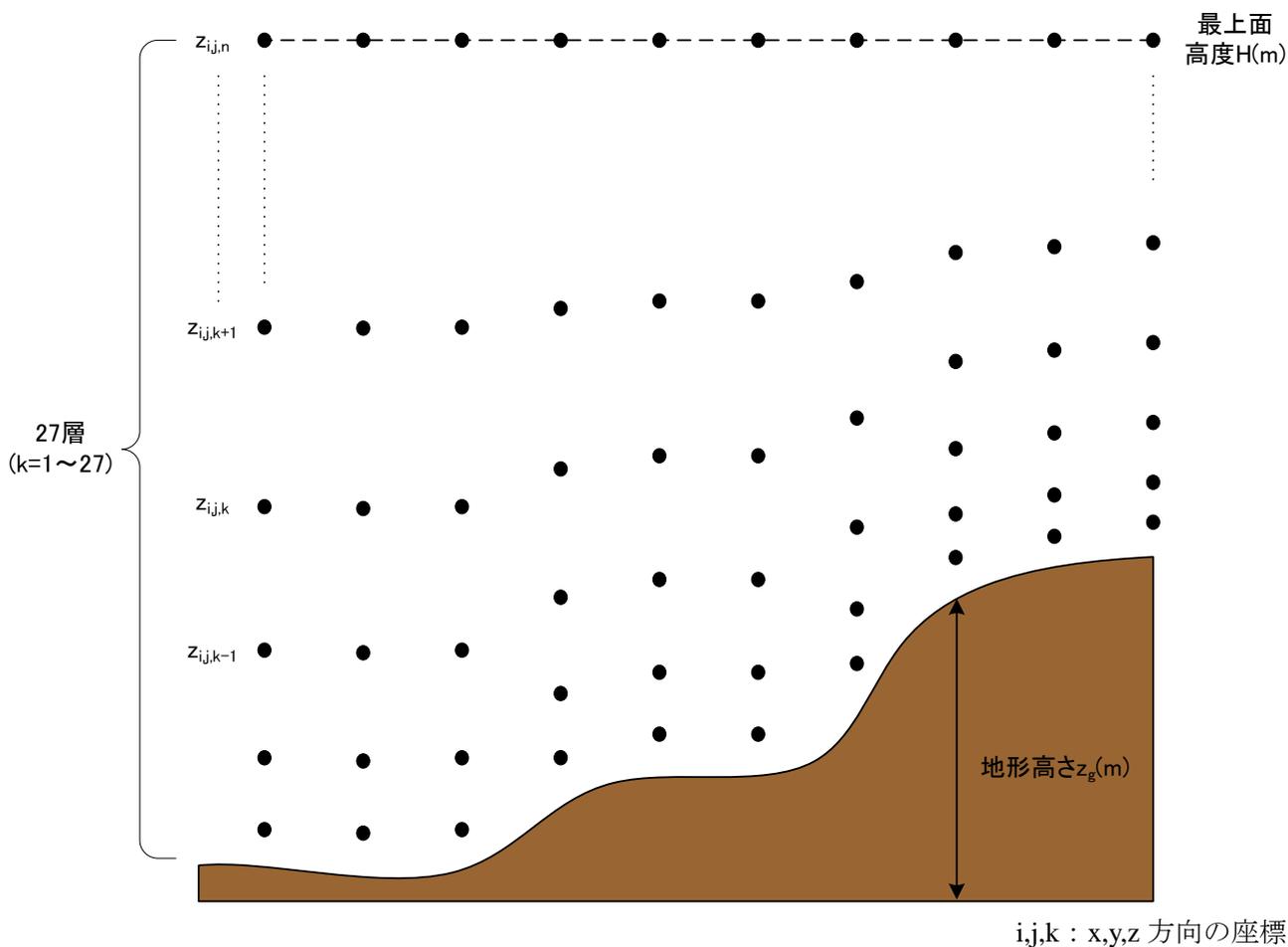


図 5-3 鉛直方向 σ_z 座標 (27 層)

5.2. 飛来確率分布計算を実施する年の選定

放射性物質の飛来確率分布計算は、ある1年間について、敦賀発電所からの単位放出・連続計算を行い、岐阜県へ放射性物質が飛来する可能性の大小を把握することを目的とする。

まず、敦賀発電所からの放射性物質が岐阜県へ至るおおまかな気象条件を把握するため、いくつかの試計算を行った。次に、その結果を踏まえて計算領域内の気象観測点における気象統計を行い、計算対象とする年の選定を行った。

5.2.1. 岐阜県へ放射性雲が至るルート

放射性雲が岐阜県へ至るルートを把握するため、いくつかの試計算を行った。計算条件を表 5-2 に示す。なお、この条件は、上記検討のための計算条件であり、飛来確率分布計算の解析条件とは異なる。

表 5-2 試計算条件

項目		内容
放出点		敦賀発電所 緯度： 35.7532 (deg) 経度： 136.0181 (deg)
計算範囲 (格子)	水平方向	300km 四方、1km メッシュ
	鉛直方向	最下層を 100 m とした上空 20km、27 層
放出高さ		地上 30 m
気象データ		MSM データのみ
地形データ		国土地理院 50m メッシュ
放出率		単位放出
放出パターン		連続放出

試計算の結果、敦賀発電所からの放射性雲が岐阜県へ至ると考えられる主なルートは、図 5-4 に示すとおり、以下の2ケースがあることが分かった。

- (1) 敦賀発電所からの放射性雲が、西北西の風によって東南東へ向かい、揖斐川町西境の山を超えて県内に流入するルート
- (2) 敦賀発電所からの放射性雲が、北北西～北西の風によって滋賀県内を南下し、関ヶ原町付近を通過して県内に流入するルート

関ヶ原町付近は周囲よりも標高が低く、年間を通して西風が卓越しており、滋賀県から岐阜県への風の通り道となっている。また、この他のルートとしては、放射性雲が北又は北東に向かい、岐阜県北部へ至るものがある。

以上の結果を踏まえ、計算対象とする年の選定を行うこととした。

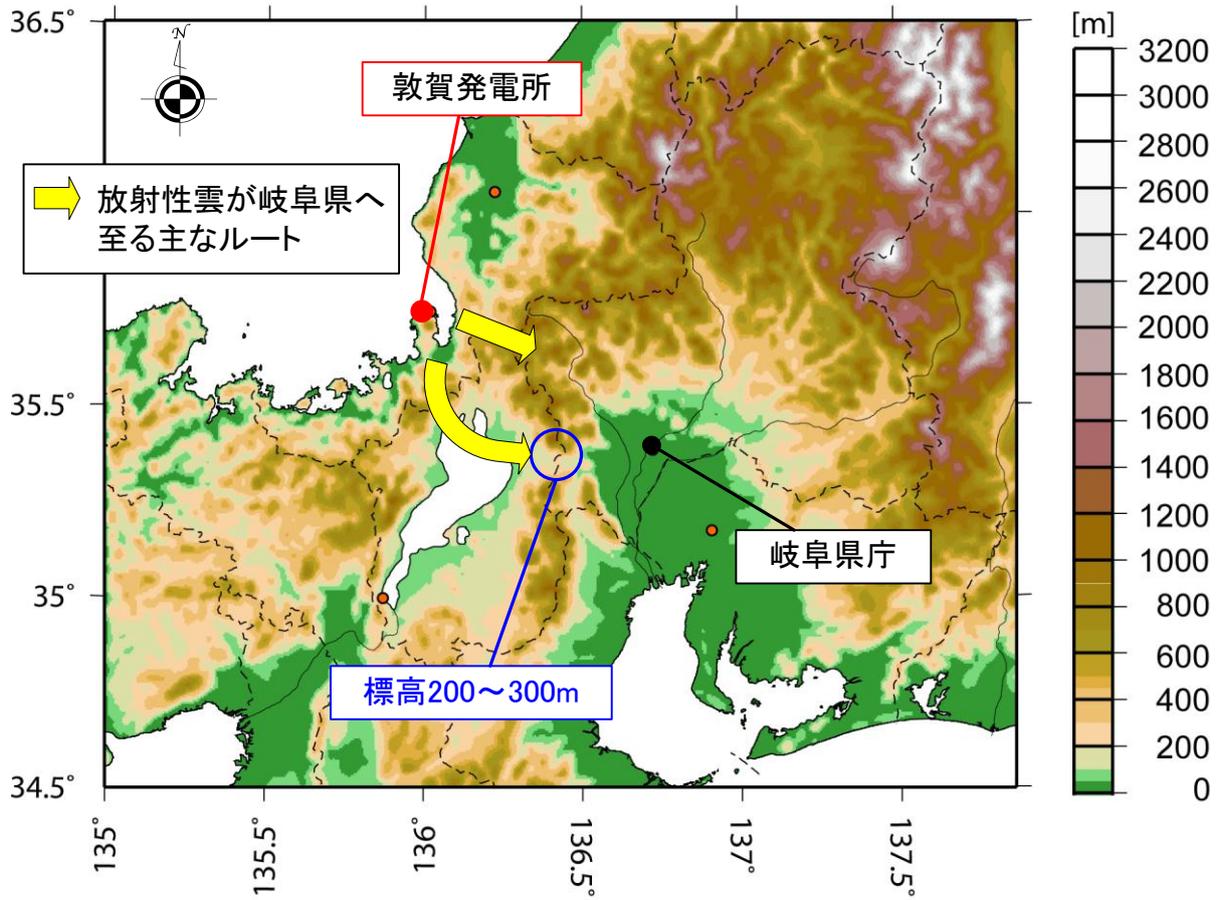


図 5-4 計算領域の標高と放射性雲が岐阜県へ至る主なルート

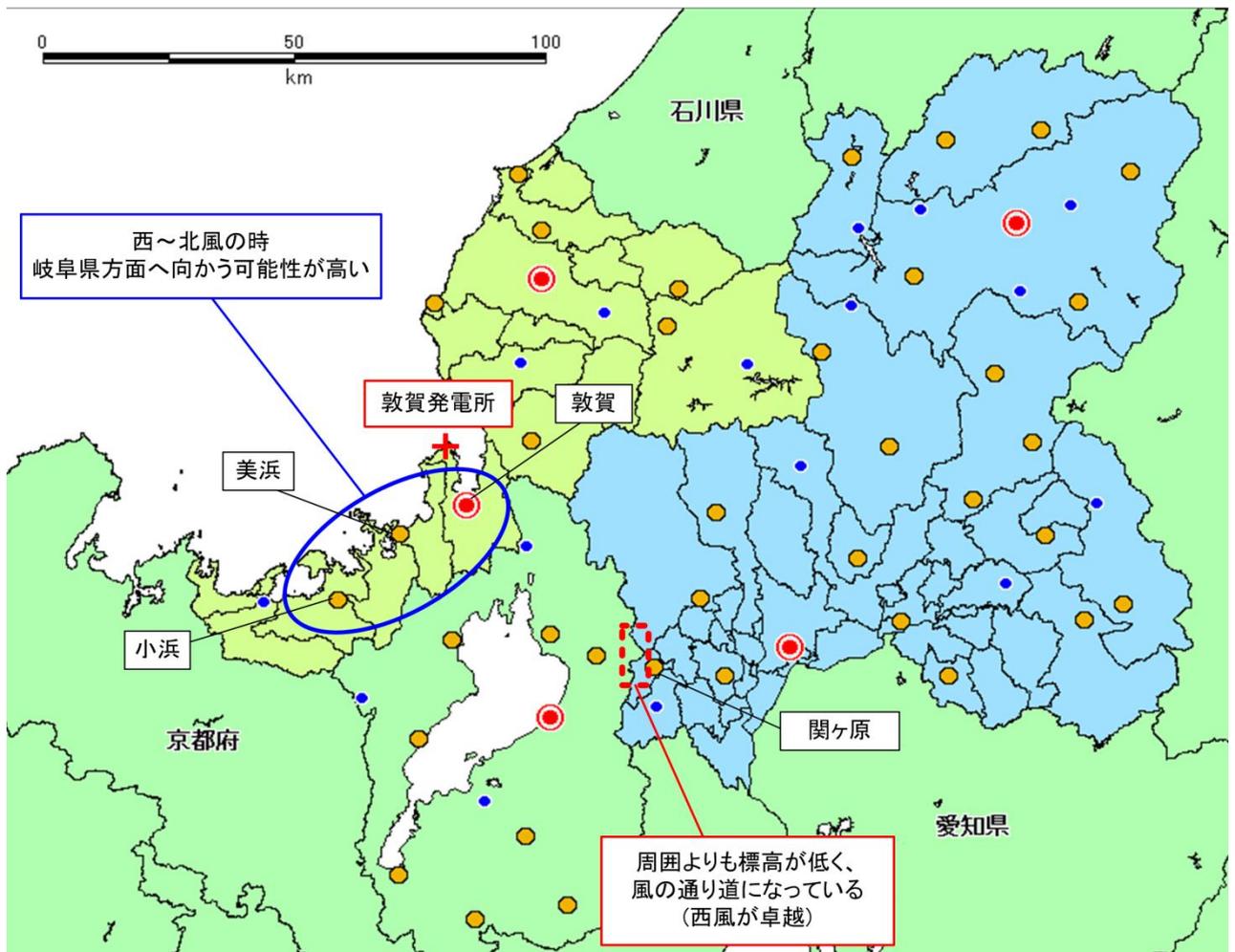
5.2.2. 気象統計

5.2.1 節で示した二つのルートを形成する条件は、敦賀周辺域の風向が、西～北風の時である。従って、過去 10 年間 (2001～2010 年) の敦賀周辺域の気象官署及びアメダス (敦賀、美浜、小浜) における風向データから、西～北風の出現頻度が最も多い年を、飛来確率分布計算の対象年として選定するものとした。計算領域内の気象観測点を図 5-5 に示す。

敦賀、美浜、小浜における過去 10 年間の風配図を図 5-6、西～北風の出現頻度を図 5-7 に示す。図に示すとおり、過去 10 年間の風向の出現頻度に大きな差は見られなかった。従って、どの年を選択しても、敦賀周辺域を通った風が岐阜県方面へ向かう頻度は同様と考えられる。

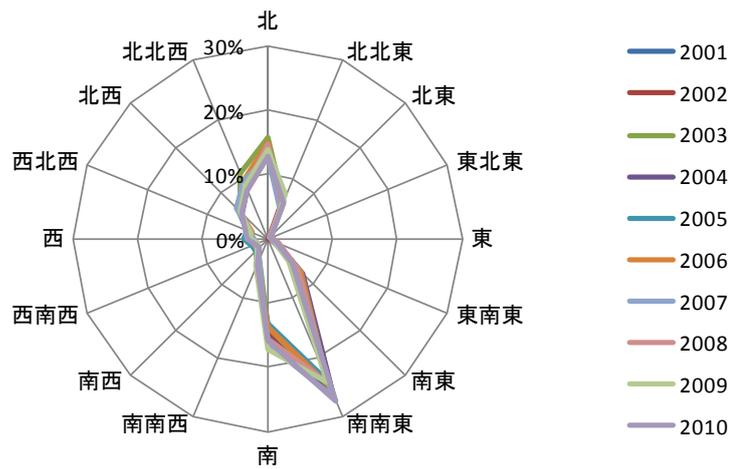
風向の出現頻度という観点からは、どの年を選定しても同様であるので、以下の理由から、飛来確率分布計算及び事例計算の対象とする年として、2010 年を選択することとした。

- (1) 気象計算に使用する GPV データ (MSM データ) は、2009 年以降、同化モデルが更新され、予測精度が向上している。
- (2) 2010 年は関ヶ原や八幡などの岐阜県内の重要な気象観測点において、測定環境の改善が図られている (図 5-8 参照)。
- (3) 岐阜県内の気象概況 (速報) によれば、2010 年は降水量が過去 20 年で最も多く、台風 9 号の進路が日本海側から福井、岐阜県を通過し、太平洋側へ抜けるなど、気象イベントが豊富であり、事例計算のための選択肢が豊富である。

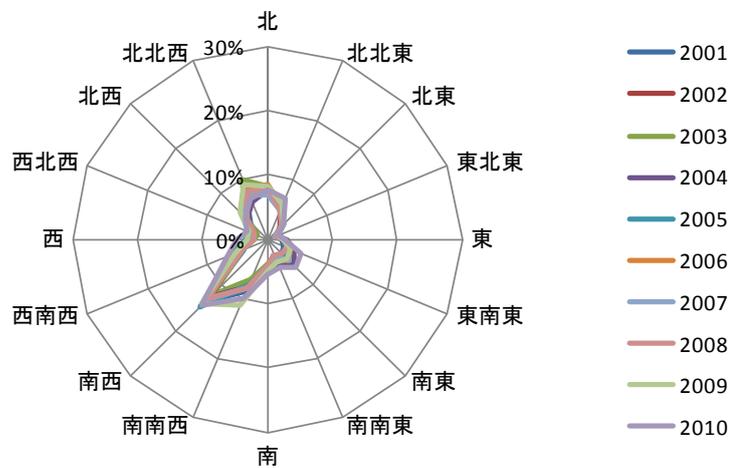


● : 気象官署、● : アメダス、● : 降水のみ

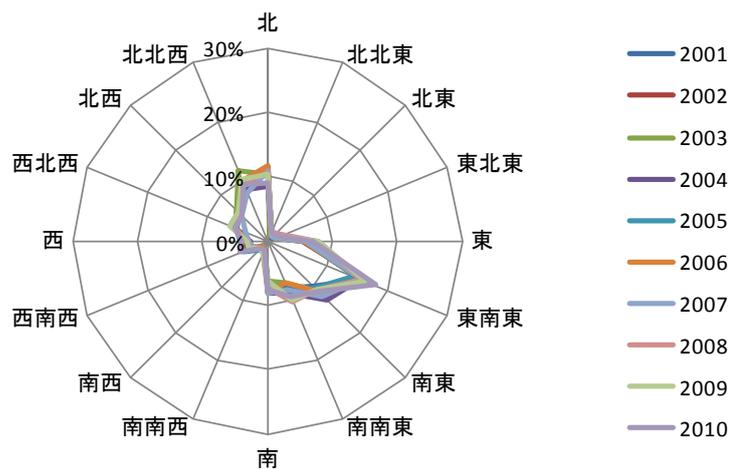
図 5-5 計算領域内の気象観測点



(a) 敦賀

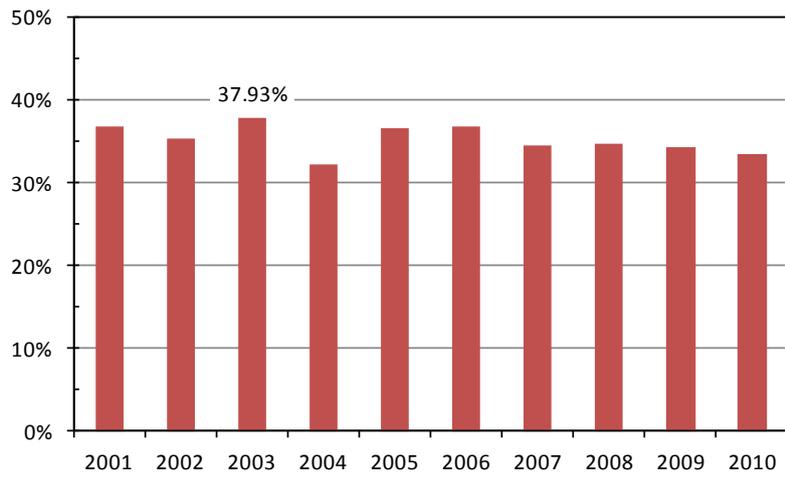


(b) 美浜

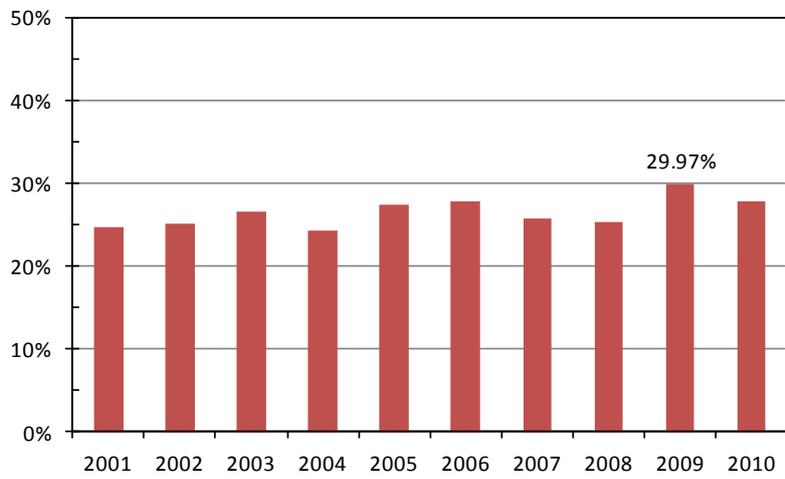


(c) 小浜

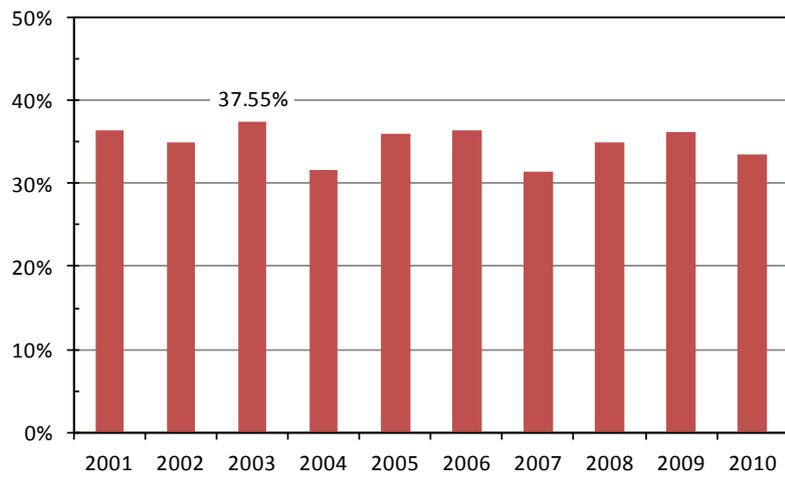
図 5-6 過去 10 年間 (2001~2010 年) の敦賀周辺域の風配図



(a) 敦賀

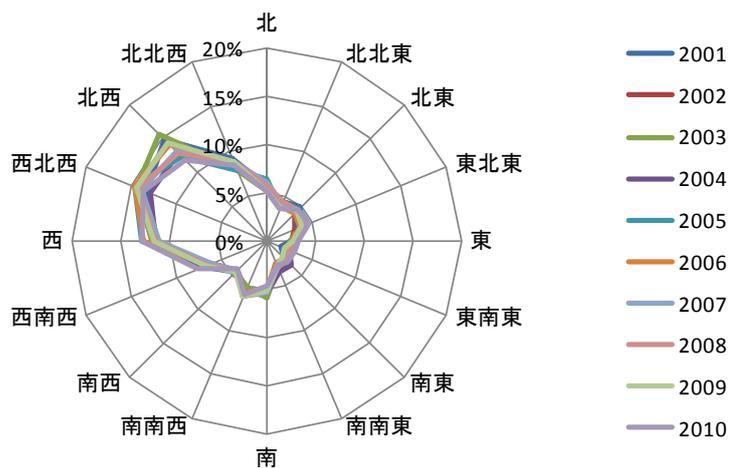


(b) 美浜

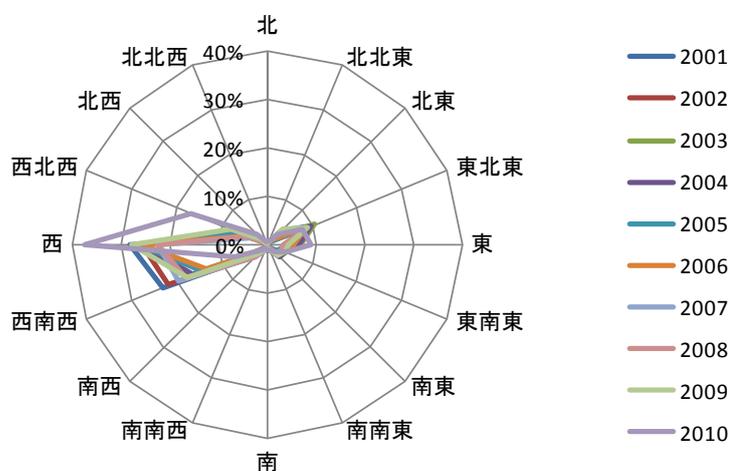


(c) 小浜

図 5-7 過去 10 年間 (2001~2010 年) の敦賀周辺域の西～北風の出現頻度

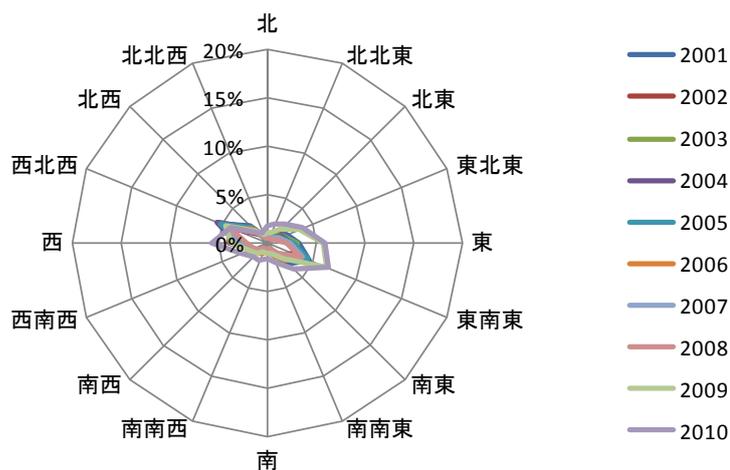


(a) 岐阜



※2010年は測定環境の改善が図られたため、静穏の出現頻度が激減した。

(b) 関ヶ原



※静穏が卓越している。2010年は測定環境の改善が図られたため、静穏の出現頻度が激減した。

(c) 八幡

図 5-8 過去 10 年間 (2001~2010 年) の岐阜県内の風配図 (参考)

5.3. 放出地点

放出源は、岐阜県に最も近い原子力発電所である敦賀発電所とした。緯度経度は Google Earth から、以下のとおりとした。

敦賀発電所

緯度	: 35.7532 deg
経度	: 136.0181 deg

5.4. 放出高さ

福井県内には、複数の原子力発電所及び関連施設があり、各施設における有効放出高さ [用語解説] は様々である。福井県内の原子力発電所における有効放出高さを表 5-3 に示す。有効放出高さは方位別に求められており、表 5-3 に示すように、幅を持っている。

そこで、放出高さを地上 0、50、100、300、500m とし、各々に対する相対濃度の試算を行い、放出高さの検討を行った。

試算は、夏季と冬季の 2 ケースを設定した。夏季は 2010 年 7 月の一ヶ月間の気象計算の結果から、2010/7/4 0:00～7/5 0:00 とした。2010/7/4 は、午前中から午後早い時間においては、放射性雲は岐阜県西側の山を越えて岐阜県に流入し、夜は滋賀県側から関ヶ原を通って岐阜県に流入する気象となっている。冬季も同様に、2010 年 12 月の気象計算の結果から、岐阜県へ流入すると考えられる 2010/12/8 0:00～12/9 9:00 を選定した。放出高さ検討のための試算条件を表 5-4 に示す。

関ヶ原 (気象観測点)、揖斐川 (気象観測点) 及び岐阜県庁における放出高さ別の相対濃度を図 5-9 (夏季)、図 5-10 (冬季) に示す。各メッシュにおける濃度は、当該のメッシュを中心とした、3×3 メッシュの平均値とした。計算の結果、夏季の高度 500m とした計算において、関ヶ原の 16:00-19:00 にのみ、トレンドに違いが見られたが、その他については大きな差は見られなかった。

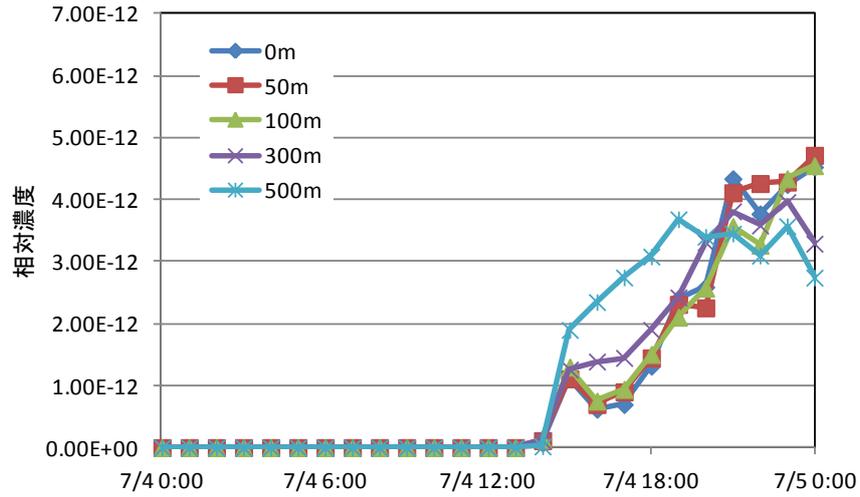
以上のことから、放出高さは福井県内の原子力発電所における有効放出高さの平均である、100m とした。

表 5-3 福井県内原子力発電所の有効放出高さ

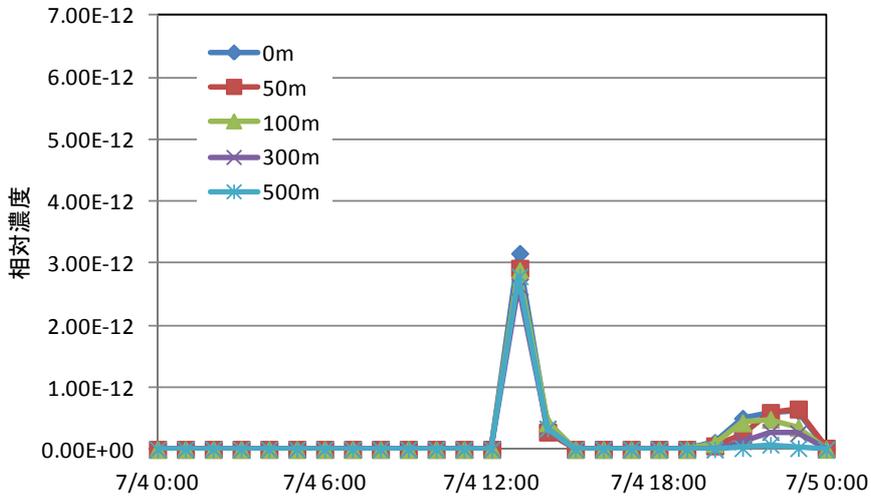
原子力発電所	炉	有効放出高さ
敦賀	2号炉	35～65m
美浜	1号炉	60～125m
美浜	2号炉	55～125m
美浜	3号炉	70～135m
高浜	1号炉	55～140m
高浜	2号炉	60～140m
高浜	3号炉	45～115m
高浜	4号炉	45～110m
大飯	-	35～160m

表 5-4 拡散計算・放出高さ検討のための試算条件

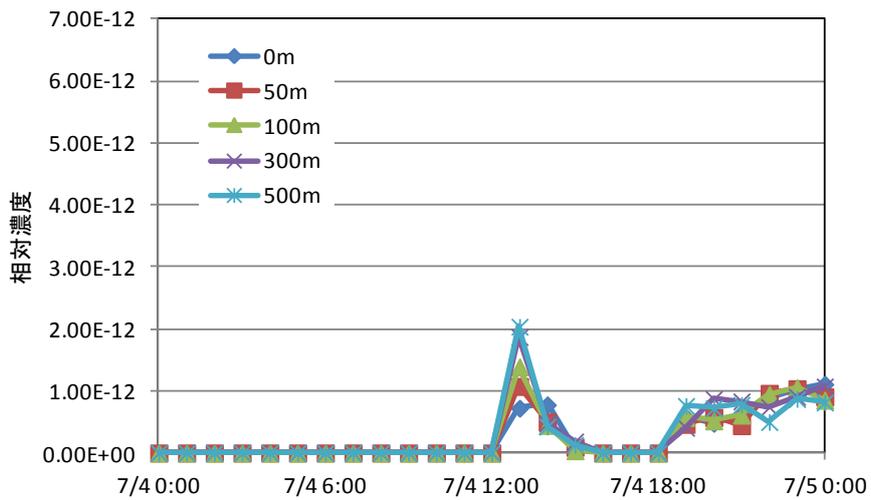
項目	設定
放出点	敦賀発電所 緯度：35.750556 (deg) 経度：136.019722 (deg)
放出率	1 (Bq/h)
放出タイムステップ	30(sec)
タイムステップ当たりの粒子数	500
計算期間	夏季：2010/7/4 0:00～7/5 0:00 冬季：2010/12/8 0:00～12/9 0:00
放出粒子数(24 時間)	144 万個
放出高さ	0,50,100,300,500m



(a) 関ヶ原 (氣象観測点)

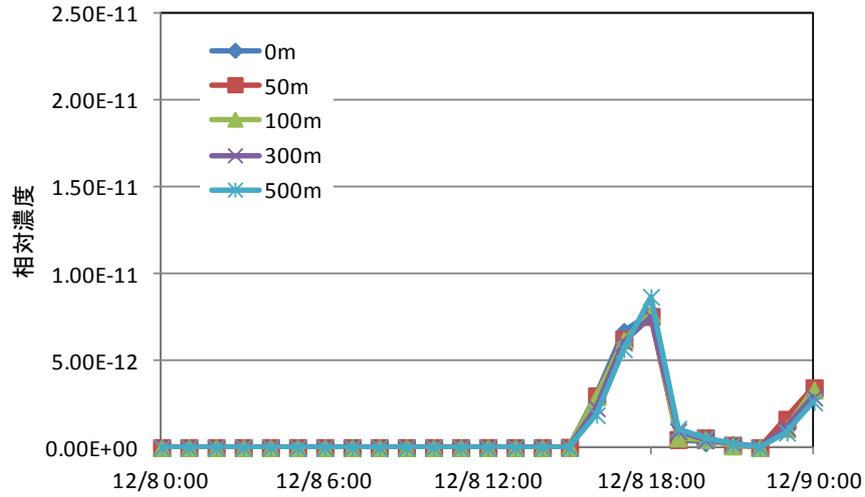


(b) 揖斐川 (氣象観測点)

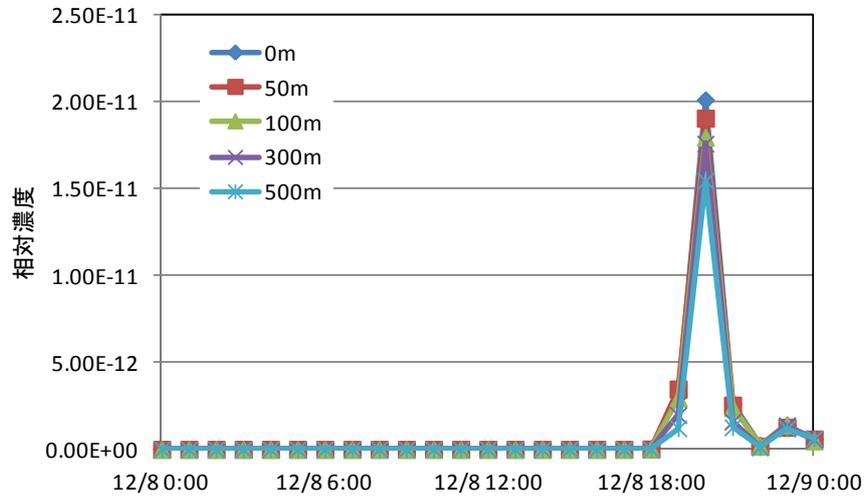


(c) 岐阜県庁

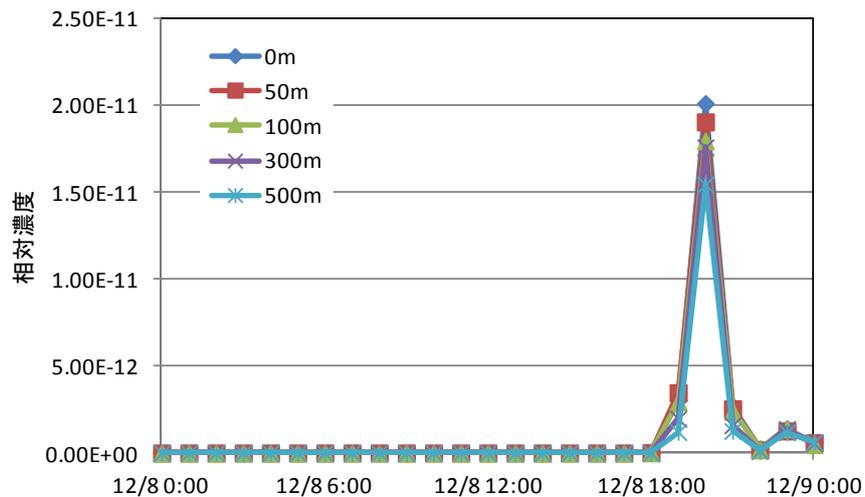
図 5-9 2010/7/4 0:00~7/5 0:00 における相対濃度 (放出高さ別)



(a) 関ヶ原 (気象観測点)



(b) 揖斐川 (気象観測点)



(c) 岐阜県庁

図 5-10 2010/12/8 0:00~12/9 0:00 における相対濃度 (放出高さ別)

5.5. 放出粒子数

飛来確率分布計算において、統計誤差の影響を極力防ぐために必要な、タイムステップ当たりの放出粒子数の検討を行った。計算条件は、放出高さの検討と同様とし、放出高さを 100m、タイムステップ 30 秒当たりの放出粒子数を 10, 50, 100, 300, 500, 1000, 2000 とし、各々に対する相対濃度を計算した。各粒子数に対する 1CPU 当たりの実計算時間の目安を表 5-5 に示す。時系列データを図 5-11 に示す。

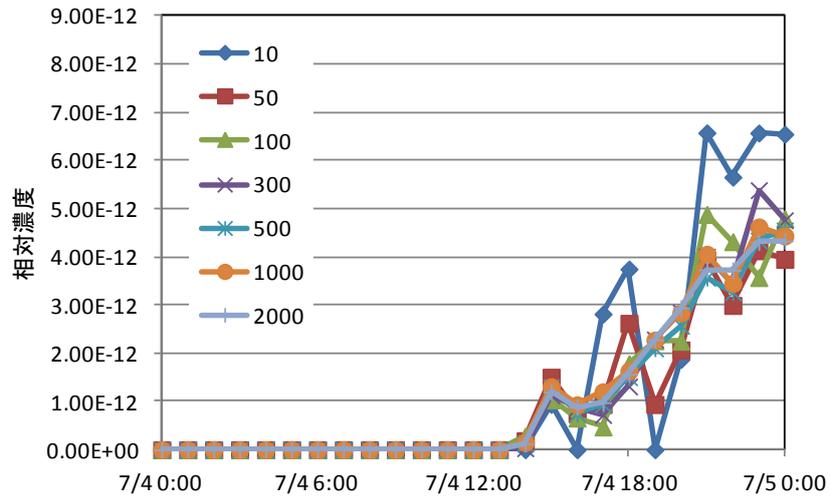
検討の結果、関ヶ原、揖斐川及び岐阜県庁において、タイムステップ当たり 300 個以上で同様の傾向を示し、500 個以上ではほとんど差が見られなくなることがわかった。

以上のことから、本計算は、タイムステップ当たりの放出粒子数を 500 個として計算を行うこととした。

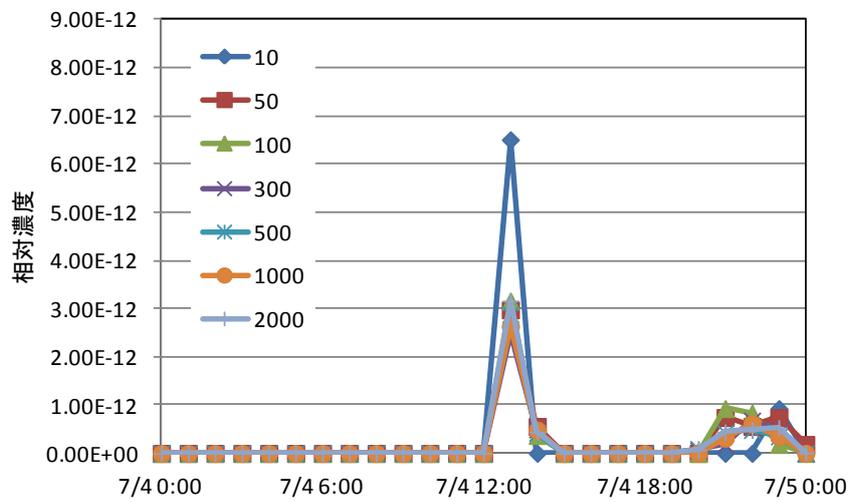
表 5-5 1CPU 当たりの実計算時間 (目安※)

タイムステップ当たりの放出粒子数	計算時間	
	1 日	1 年間
10	3 分	18.5 時間
50	4 分	1 日
100	5 分	1.5 日
300	10 分	2.5 日
500	15 分	3 日
1000	25 分	5 日
2000	45 分	11 日

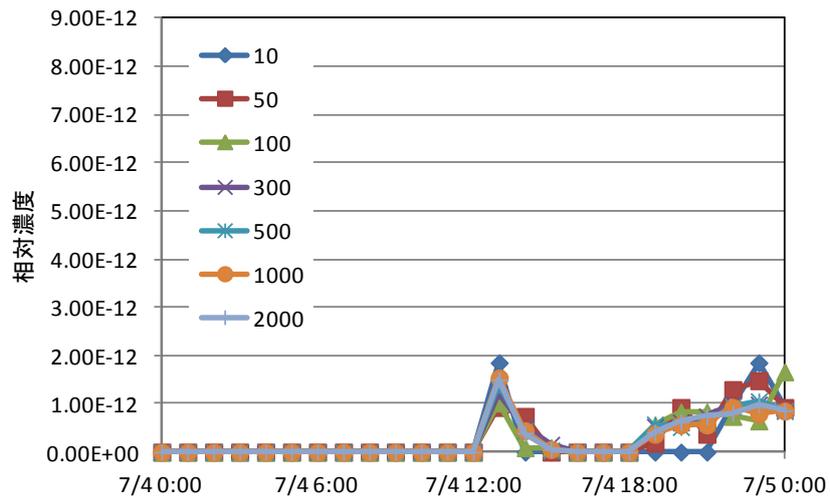
※放射性雲が長期間滞留した場合などはこの限りでない。



(a) 関ヶ原 (気象観測点)



(b) 揖斐川 (気象観測点)



(c) 岐阜県庁

図 5-11 2010/7/4 0:00~7/5 0:00 における相対濃度 (放出粒子数別)

6. 放射性物質拡散シミュレーション・飛来確率分布計算

6.1. 概要

敦賀発電所を放出源として、2009年12月31日0時～2011年1月1日0時までの連続放出による放射性物質の移流・拡散計算を行った。気流解析の結果は資料編に示す。その他の計算条件は、表 5-1 に示す。

計算結果は、県内 12 か所の代表地点における相対濃度及び沈着量を時系列データとしてまとめた。代表地点の一覧を表 6-1、敦賀発電所との位置関係を図 6-1 に示す。

表 6-1 岐阜県内の代表 12 地点

地点名	緯度 (deg) ※	経度 (deg) ※	備考
岐阜県庁	35. 3912	136. 7223	
保健環境研究所	35. 4074	136. 8445	モニタリングポスト
西濃総合庁舎	35. 3561	136. 6334	モニタリングポスト
関ヶ原	35. 3633	136. 4667	気象観測点
揖斐総合庁舎	35. 4903	136. 5661	モニタリングポスト
揖斐川町坂内	35. 6149	136. 3594	モニタリングポスト(設置予定)
中濃総合庁舎	35. 5304	136. 9006	モニタリングポスト
郡上総合庁舎	35. 7624	136. 95	モニタリングポスト
東濃西部総合庁舎	35. 3451	137. 127	モニタリングポスト
恵那総合庁舎	35. 4499	137. 4331	モニタリングポスト
飛騨総合庁舎	36. 1443	137. 241	モニタリングポスト
下呂総合庁舎	35. 8842	137. 2075	モニタリングポスト

※緯度、経度は Google Earth による

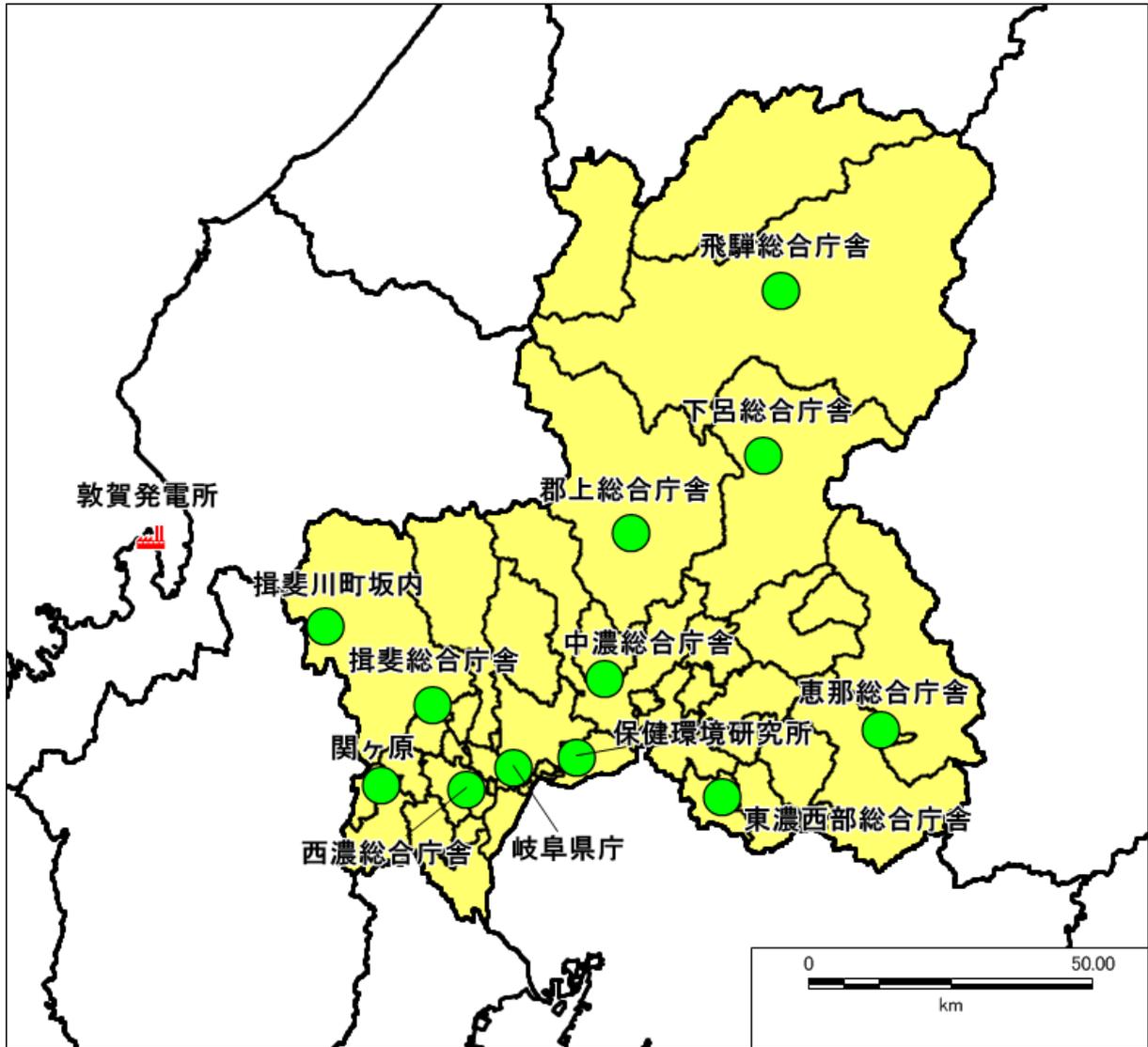


図 6-1 敦賀発電所と岐阜県内の代表 12 地点

6.2. 飛来確率

岐阜県内の代表 12 地点における飛来確率を求めるために、計算結果から累積分布関数を作成した。累積分布関数とは、ある値以下となる確率を示すものである。飛来確率分布計算における 1 時間ごとの計算結果を昇順に並べたものを横軸にとり、縦軸を以下の式で表される確率 $P(k)$ でプロットした。

$$P(k) = \frac{k - 0.5}{n} \dots\dots\dots(5.1)$$

- k : 昇順に並べたデータの番号 (=1~ n)
- $P(k)$: 昇順に並べたデータの k 番目以下となる確率
- n : データ総数 (8760=365 日×24 時間)

岐阜県内の代表 12 地点における、粒子状物質の地表大気中濃度に対する累積分布関数を図 6-2、沈着量に対する累積分布関数を図 6-3 に示す。

図の見方

図 6-2 及び図 6-3 は、横軸の濃度あるいは沈着量に対して、その値以下となる確率を示すものである。例えば、図 6-2 からは以下のことが読み取れる。

- ・ 2010 年では、関ヶ原において地表大気中濃度が $10^{-16}(\text{Bq}/\text{m}^3)$ 以下となる確率は 58%であり、それ以上となる確率は 42%である。
- ・ 関ヶ原における $10^{-12}(\text{Bq}/\text{m}^3)$ 以上の濃度となる確率は、約 13%である。
- ・ 最も確率が小さい地点は、飛騨総合庁舎であり、 $10^{-16}(\text{Bq}/\text{m}^3)$ 以上の濃度となる確率は約 28%である。
- ・ 揖斐川町坂内における分布関数は、他の地点のものより傾きが小さくなっている。これは、放射性物質が飛来した場合には、他の地点より高濃度になりやすいことを示している (沈着量についても同様)。

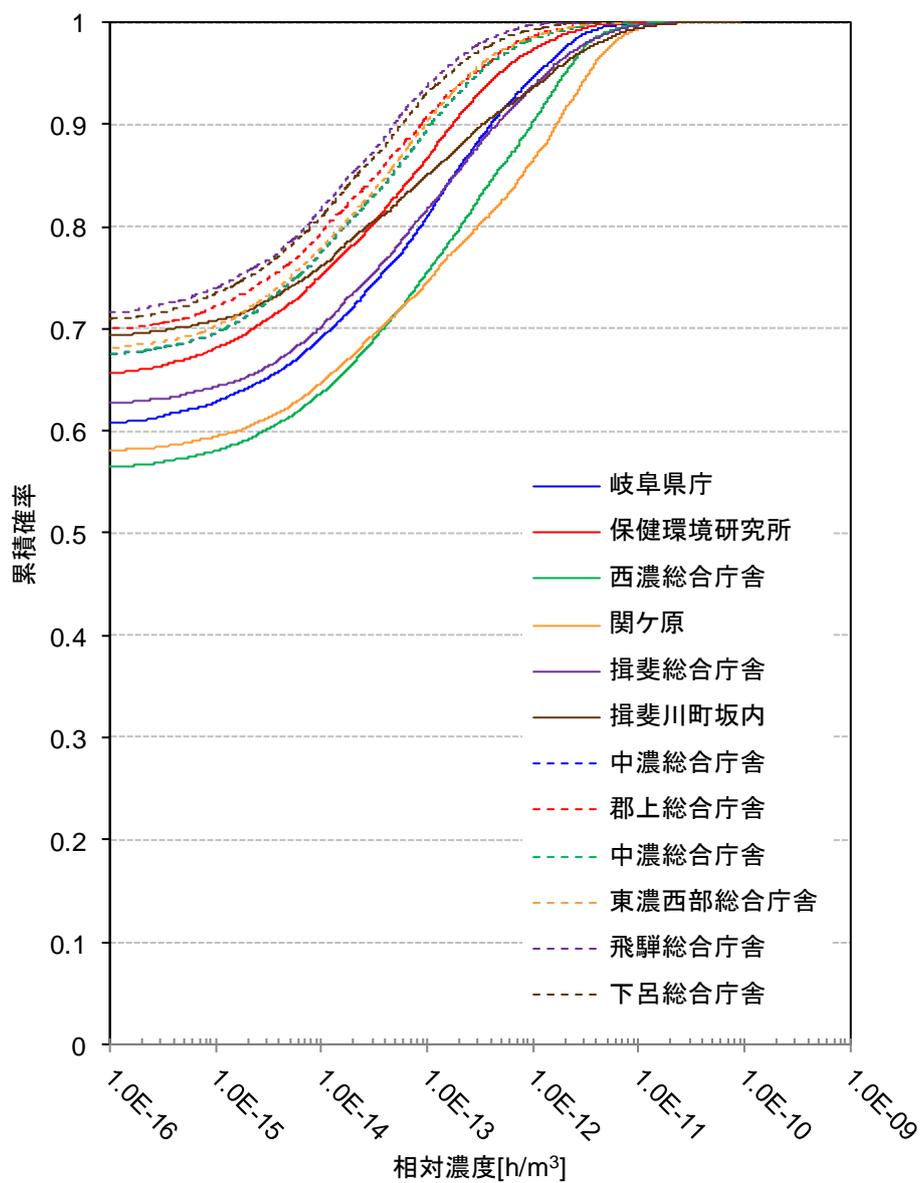


図 6-2 代表 12 地点における飛来確率分布 (粒子状物質の地表大気中濃度)

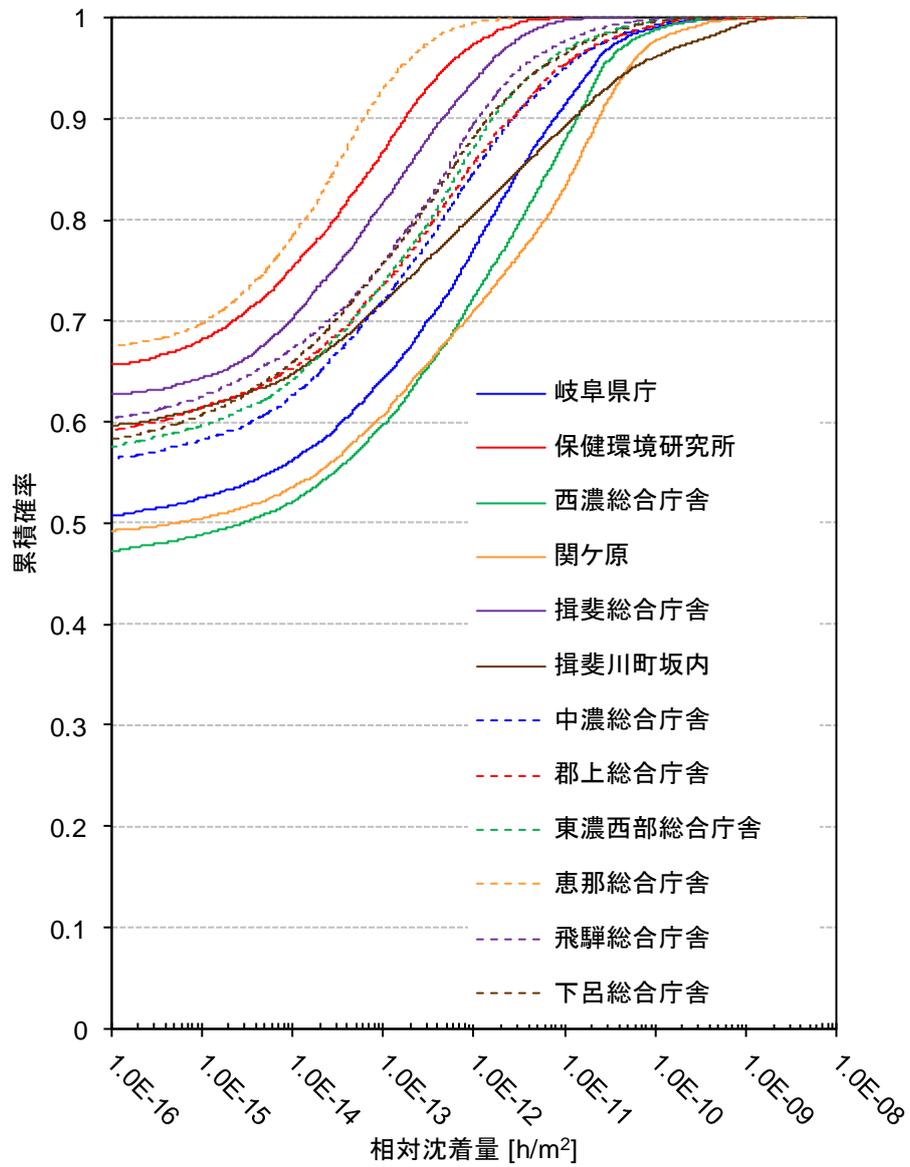


図 6-3 代表 12 地点における飛来確率分布 (粒子状物質の沈着量)

7. 放射性物質拡散シミュレーション・事例計算

7.1. 概要

事例計算は以下の4つの計算ケースから日時の選定を行った。評価項目は、原子力防災対策を検討する上で重要と考えられる以下の3つとした。

計算ケース

- (1) 四季の典型的な気圧配置
- (2) 岐阜県内に高線量が出現するケース
- (3) 広域に放射性物質が分布するケース
- (4) 放射性物質の流入経路別の計算（上記(1)～(3)で見られない流入経路）

評価項目

- (a) 放射性雲中の放射性物質の吸入による甲状腺の等価線量
- (b) 放射性雲中の放射性物質から放出される γ 線による外部被ばく実効線量（クラウドシャイン）
- (c) 地表面に沈着した放射性物質から放出される γ 線による外部被ばく実効線量（グラウンドシャイン）

7.2. 計算ケースについて

本節に計算ケースの概要を示す。

(1) 四季の典型的な気圧配置

春、夏、秋、冬（各2ケース）の典型的な気圧配置の日（計8ケース）について計算を行うこととした。また、その際の計算開始時間は、天気図が発表された日時である、当日の9時とした。

(2) 岐阜県内に高線量が出現するケース

冒頭に示した3つの評価項目について、被ばく線量が高くなる日時を季節ごとに選定した。ただし、(b)のクラウドシャインについては、予備解析の結果、岐阜県内においては最大0.3mSv程度であり、現行の防災指針における指標（10mSv）よりも十分低いことを確認したため、ケース選定の項目からは除外することとした。

従って、本ケースは、(a)と(c)について、4ケースずつ（春、夏、秋、冬の各1ケース）選定し、合計8ケースとした。

(3) 広域に放射性物質が分布するケース

飛来確率分布計算の結果から、岐阜県において、各評価項目の線量のしきい値に相当する濃度あるいは沈着量を超えるメッシュの数をカウントし、最多となった日時を放射性物質が広域に分布するケースとして選定した。各線量のしきい値は、小児甲状腺等価線量50mSv、グラウンドシャイン年間20mSvとした。

選定の結果、岐阜県において小児甲状腺等価線量が 50mSv 以上となる範囲が最も広がるケースは、2010/7/24 20:00 に放出を開始したケース (66 メッシュ) となり、岐阜県内に高線量が出現するケース 10 と放出開始日時が同一となった。グランドシャインについても、年間 20mSv 以上となる範囲が最も広がるケースは、2010/7/6 10:00 に放出を開始したケース (594 メッシュ) となり、岐阜県内に高線量が出現するケース 14 と放出開始日時が同一となった。

(4) 放射性物質の流入経路別の計算

岐阜県への主な放射性雲の流入経路は、(a) 西北西の風により、揖斐川町西境の山を超えて県内に流入するルート、(b) 敦賀からの北北西～北西の風により滋賀県内を南下し、関ヶ原町付近を通過して県内に流入するルートの二つである。

この他の流入経路としては、福井県北部あるいは石川県南部を通過して岐阜県に至るケースがあるが、これらのルートについても岐阜県への影響を把握しておくことが重要であることから、福井県北部～石川県南部を通るケースについて、計算を行うこととした。

事例計算のケースを表 7-1 に示す。

表 7-1 事例計算の計算ケース

ケース 番号	種類	概要	季節	放出開始日時	放出終了日時	備考
1	四季の典型的な気圧配置		春	2010/3/20 9:00	2010/3/20 15:00	日本海低気圧
2				2010/4/8 9:00	2010/4/8 15:00	移動性高気圧
3			夏	2010/6/19 9:00	2010/6/19 15:00	梅雨前線
4				2010/8/22 9:00	2010/8/22 15:00	夏型
5			秋	2010/10/7 9:00	2010/10/7 15:00	移動性高気圧
6				2010/10/30 9:00	2010/10/30 15:00	台風
7			冬	2010/1/7 9:00	2010/1/7 15:00	冬型
8				2010/2/1 9:00	2010/2/1 15:00	南岸低気圧
9	岐阜県に高線量が 出現するケース	放射性雲中の放射性 ヨウ素の吸入による 小児甲状腺等価線量	春	2010/5/8 20:00	2010/5/9 2:00	
10			夏	2010/7/24 20:00	2010/7/25 2:00	
11			秋	2010/10/15 20:00	2010/10/16 2:00	
12			冬	2010/1/29 16:00	2010/1/29 22:00	
13		グランドシャイン	春	2010/3/28 14:00	2010/3/28 20:00	
14			夏	2010/7/6 10:00	2010/7/6 16:00	
15			秋	2010/9/19 10:00	2010/9/19 16:00	
16			冬	2010/12/24 4:00	2010/12/24 10:00	
17	放射性物質が広域に分布するケース		ケース 10 と放出開始日時が同一		甲状腺等価線量について選定	
18			ケース 14 と放出開始日時が同一		グランドシャインについて選定	
19	福井県北部あるいは石川県南部から 流入するケース		夏	2010/7/26 5:00	2010/7/26 11:00	郡上市方面へ流入
20			春	2010/5/2 0:00	2010/5/2 6:00	飛騨方面へ流入

7.3. 評価対象核種

評価対象核種は、原子力安全・保安院による福島第一原子力発電所事故の核種別推定放出量 [参考文献 8] から、被ばく線量への寄与が大きい上位 10 核種とした。選定方法を以下に示す。

7.3.1. 核種選定の考え方

- ・ 保安院による核種、31 核種の合計放出量、線量に対する寄与から数核種を抽出する。
- ・ 放出パターンや拡散状況が核種によって大きく変わらず、放出量と空气中濃度の比 (相対濃度) が核種によって変わらないとする。
- ・ 外部被ばく経路の代表として、空气中の放射性核種からの外部被ばく (サブマージョン)、内部被ばく経路の代表として、空气中の放射性核種の吸入による内部被ばくを考慮する。
- ・ 以下の式により放出量と被ばく線量への影響を考慮した「核種選定のための被ばく線量」を求める。

$$D_i = Q_i \cdot (\chi/Q)_i \cdot (DF_{sub,i} + DF_{inh,i} \cdot B) \dots\dots\dots (7.1)$$

ここで、

- D_i : 核種 i に対する核種選定のための被ばく線量 [Sv]
- Q_i : 核種 i の放出量 [Bq]
- $(\chi/Q)_i$: 核種 i の相対濃度 [h m^{-3}]
- $DF_{sub,i}$: 核種 i の外部被ばく線量換算係数 (サブマージョン) [$\text{Sv h}^{-1} \text{Bq}^{-1} \text{m}^3$]
- $DF_{inh,i}$: 核種 i の吸入による内部被ばく線量係数 [Sv Bq^{-1}]
- B : 呼吸率 [$\text{m}^3 \text{h}^{-1}$]

である。

- ・ 相対濃度は核種によらず $1 (\text{h m}^{-3})$ 、呼吸率は $1.2 (\text{m}^3 \text{h}^{-1})$ と仮定する。
- ・ 核種選定のための被ばく線量を、最大値からの比で規格化し、被ばく評価上重要となる核種を選定する。

7.3.2. 選定結果

表 7-2 に、以上の考え方による核種選定のための被ばく線量の計算表を示す。以下の 10 核種が、最大値からの比が 0.01 を超える核種である。

Sr-89、Sb-127、Te-129m、Te-132、I-131、I-133、Xe-133、Cs-134、Cs-137、Ba-140

グランドシャインに対する各核種の寄与について

グランドシャインについても、上記と同様の考え方で、当初 1 年間の積算線量に対するそれぞれの核種の寄与を、以下の式で計算した。ここで、粒子状の放射性物質については全て同じ沈着パラメータを用いているので、寄与割合に影響するのは物理的な減衰のみである。

$$D_{ci} = Q_i \cdot D_{0i} \cdot DF_{ext,sur,i} \cdot \frac{1 - e^{-\lambda_i t}}{\lambda_i} \dots\dots\dots (7.2)$$

ここで、

- D_{ci} : 核種 i に対する核種選定のための被ばく線量 [Sv]
- Q_i : 核種 i の放出量 [Bq]
- D_{0i} : 核種 i の相対沈着量 [h m²] (=1.0)
- $DF_{ext,sub,i}$: 核種 i のグランドシャインによる外部被ばく線量換算係数 [Sv h⁻¹ Bq⁻¹ m²]

である。

計算結果を表 7-3 に示す。表 7-3 から、グランドシャインに対する核種の寄与は、本項で選定した 10 核種が、当初 1 年間で全体の 99.86% を占めた。

以上のことから、全ての被ばく経路について、本項で選定した 10 核種を対象とすることに問題がないことを確認した。

表 7-2 核種選定のための被ばく線量の計算表

■ : 選定した 10 核種

No.	核種	半減期	永続平衡を考慮した 短半減期子孫核種 (括弧内は分岐比)	サブマージョン 線量換算係数 (Sv h ⁻¹ Bq ⁻¹ m ³)	吸入内部被ばく 線量係数 (Sv Bq ⁻¹)	推定放出量 (Bq)	評価値 (Sv)	評価値の 最大値との比
1	Sr-89	50.5 d		1.36E-12	6.10E-09	2.00E+15	1.46E+07	1.0E-02 (2桁)
2	Sr-90	+	29.1 y Y-90(1)	2.59E-12	3.75E-08	1.40E+14	6.30E+06	4.4E-03
3	Y-91	58.5 d		1.97E-12	8.90E-09	3.40E+12	3.63E+04	2.5E-05
4	Zr-95	+	64 d Nb-95m(0.007)	1.20E-10	4.81E-09	1.70E+13	1.00E+05	7.0E-05
5	Mo-99	+	66 h Tc-99m(0.876)	4.40E-11	9.07E-10	6.70E+09	7.58E+00	5.3E-09
6	Ru-103	+	39.3 d Rh-103m(0.997)	7.58E-11	2.40E-09	7.50E+09	2.22E+01	1.6E-08
7	Ru-106	+	368.2 d Rh-106(1)	3.64E-11	2.80E-08	2.10E+09	7.06E+01	4.9E-08
8	Sb-127	+	3.9 d Te-127(0.824)	1.07E-10	1.81E-09	6.40E+15	1.46E+07	1.0E-02 (2桁)
9	Sb-129	+	4.3 h Te-129(0.775)	2.43E-10	2.59E-10	1.40E+14	7.74E+04	5.4E-05
10	Te-127m	+	109 d Te-127(0.976)	1.62E-12	7.53E-09	1.10E+15	9.94E+06	6.9E-03
11	Te-129m	+	33.6 d Te-129(0.65)	1.22E-11	6.62E-09	3.30E+15	2.63E+07	1.8E-02 (2桁)
12	Te-131m	+	30 h Te-131(0.22)	2.48E-10	9.46E-10	5.00E+15	6.92E+06	4.8E-03
13	Te-132	+	78.2 h I-132(1)	4.08E-10	2.09E-09	8.80E+16	2.57E+08	1.8E-01 (1桁)
14	I-131	8 d		6.00E-11	7.40E-09	1.60E+17	1.43E+09	1.0E+00 (最大)
15	I-132	2.3 h		3.73E-10	9.40E-11	1.30E+13	6.32E+03	4.4E-06
16	I-133	20.8 h		9.69E-11	1.50E-09	4.20E+16	7.97E+07	5.6E-02 (2桁)
17	I-135	+	6.6 h Xe-135m(0.154)	2.72E-10	3.20E-10	2.30E+15	1.51E+06	1.1E-03
18	Xe-133	5.2 d		5.59E-12	0.00E+00	1.10E+19	6.15E+07	4.3E-02 (2桁)
19	Cs-134	2.1 y		2.51E-10	6.60E-09	1.80E+16	1.47E+08	1.0E-01 (1桁)
20	Cs-137	+	30 y Ba-137m(0.946)	9.09E-11	4.60E-09	1.50E+16	8.42E+07	5.9E-02 (2桁)
21	Ba-140	+	12.7 d La-140(1)	4.16E-10	6.20E-09	3.20E+15	2.51E+07	1.8E-02 (2桁)
22	Ce-141	32.5 d		1.22E-11	3.20E-09	1.80E+13	6.93E+04	4.8E-05
23	Ce-144	+	284.3 d Pr-144m(0.018), Pr-144(0.982)	1.13E-11	3.60E-08	1.10E+13	4.76E+05	3.3E-04
24	Pr-143	13.6 d		6.23E-13	2.40E-09	4.10E+12	1.18E+04	8.3E-06
25	Nd-147	11 d		2.12E-11	2.40E-09	1.60E+12	4.64E+03	3.2E-06
26	Np-239	2.4 d		2.65E-11	9.30E-10	7.60E+13	8.68E+04	6.1E-05
27	Pu-238	87.7 y		1.45E-14	4.60E-05	1.90E+10	1.05E+06	7.3E-04
28	Pu-239	24065 y		1.31E-14	5.00E-05	3.20E+09	1.92E+05	1.3E-04
29	Pu-240	6537 y		1.43E-14	5.00E-05	3.20E+09	1.92E+05	1.3E-04
30	Pu-241	+	14.4 y U-237(2.45e-5)	5.17E-16	9.00E-07	1.20E+12	1.30E+06	9.1E-04
31	Cm-242	162.8 d		1.62E-14	5.20E-06	1.00E+11	6.24E+05	4.4E-04

+は短半減期子孫核種を考慮していることを示す。放出量は原子力安全・保安院の推定値。

サブマージョン線量換算係数：Health Physics Vol.45, No.3、吸入内部被ばく線量係数：ICRP Publ.72 (成人、実効線量)

表 7-3 当初 1 年間のグランドシャインに対する各核種の寄与

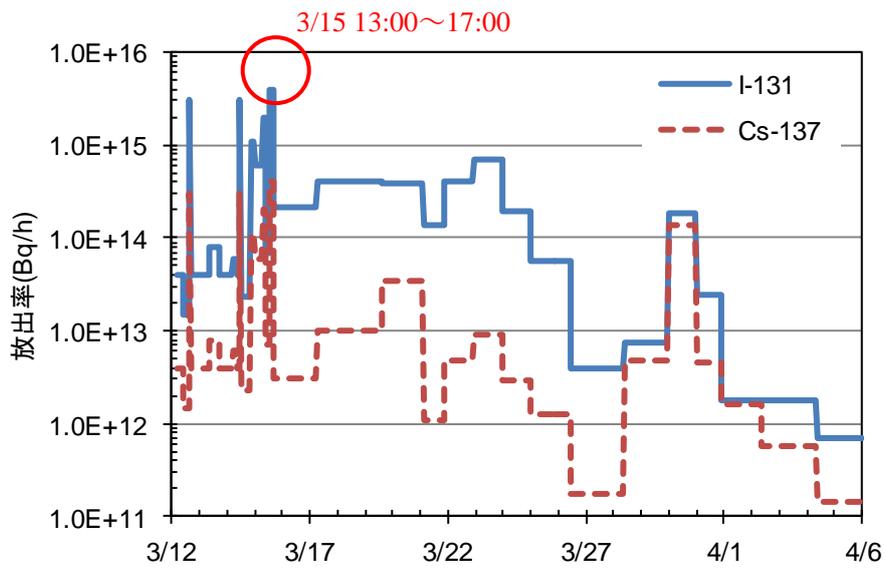
■ : 選定した 10 核種

核種名	評価値	割合
Cs-134	7.35E+08	63.32%
Cs-137	2.60E+08	22.35%
Te-132	8.71E+07	7.50%
I-131	6.00E+07	5.17%
Ba-140	1.19E+07	1.02%
I-133	2.71E+06	0.23%
Sb-127	2.12E+06	0.18%
Te-131m	1.14E+06	0.10%
Te-129m	1.06E+06	0.09%
Te-127m	2.20E+05	0.02%
I-135	1.21E+05	0.01%
Zr-95	9.62E+04	0.01%
Sr-89	2.84E+04	0.00%
Sr-90	2.45E+04	0.00%
Ce-144	1.32E+04	0.00%
Ce-141	5.38E+03	0.00%
Sb-129	4.46E+03	0.00%
Np-239	3.71E+03	0.00%
I-132	3.43E+02	0.00%
Nd-147	3.05E+02	0.00%
Y-91	1.40E+02	0.00%
Ru-103	1.70E+01	0.00%
Ru-106	1.02E+01	0.00%
Pr-143	4.87E+00	0.00%
Cm-242	1.53E+00	0.00%
Mo-99	5.81E-01	0.00%
Pu-238	5.00E-01	0.00%
Pu-241	8.34E-02	0.00%
Pu-240	8.11E-02	0.00%
Pu-239	3.71E-02	0.00%
Xe-133	0.00E+00	0.00%
10 核種合計		99.86%

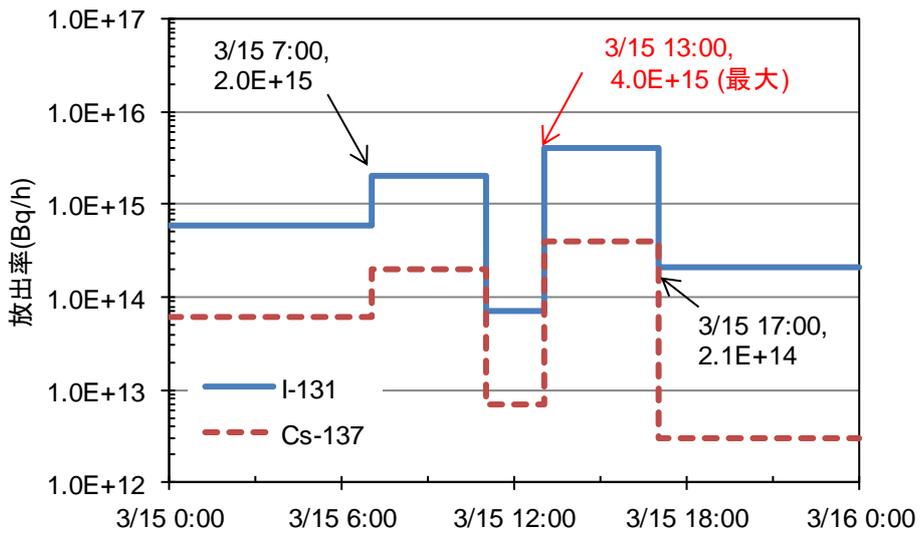
7.4. 放出継続時間

放出継続時間は、福島事故で最も放出率が大きい時間帯を想定し、厳しい状況での影響評価を行うという基本方針に基づき、図 7-1 に示す福島第一原子力発電所事故における推定放出率 (原子力安全委員会) [参考文献 9]を基に 6 時間とした。6 時間放出とする根拠を以下に示す。

- ・ 図 7-1 による ^{131}I の最大放出率の継続時間は 3/15 13:00~17:00 の 4 時間となる。しかし、その前後の時間帯の放出の影響を考慮しなければ、過小評価の可能性が生じる。
- ・ そのため、過小評価とならないよう、最大放出率となった時間帯の前後 6 時間分の放出量も考慮する。
- ・ 前後 6 時間分の放出量は最大放出率で換算すると、約 2 時間分に相当するため、これを 4 時間の前後に加えるという形で 6 時間とする。



(a) 3/12~4/6



(b) 3/15 0:00~3/16 0:00 ((a) 図の○部分の拡大)

図 7-1 福島第一原子力発電所事故における推定放出率 (原子力安全委員会)

7.5. 放出量

放出率については、 ^{131}I 及び ^{137}Cs は前節に示した福島第一原子力発電所事故における推定放出率 (原子力安全委員会) の最大放出率とした。その他の核種については、原子力安全・保安院による核種別推定放出量 [参考文献 8] の ^{131}I との放出量比 から求めた。

評価対象核種とその放出率を表 7-4 に示す。

表 7-4 各核種の放出量

核種	半減期		短半減期子孫核種 (()内は分岐比)	放出率[Bq/h]	放出量[Bq]
^{89}Sr	50.5	d		5.00E+13	3.00E+14
^{127}Sb	3.9	d	^{127}Te (0.824)	1.60E+14	9.60E+14
$^{129\text{m}}\text{Te}$	33.6	d	^{129}Te (0.65)	8.25E+13	4.95E+14
^{132}Te	78.2	h	^{132}I (1.0)	2.20E+15	1.32E+16
^{131}I	8	d		4.00E+15	2.40E+16
^{133}I	20.8	h		1.05E+15	6.30E+15
^{133}Xe	5.2	d		2.75E+17	1.65E+18
^{134}Cs	2.1	y		4.50E+14	2.70E+15
^{137}Cs	30	y	$^{137\text{m}}\text{Ba}$ (0.946)	4.00E+14	2.40E+15
^{140}Ba	12.7	d	^{140}La (1.0)	8.00E+13	4.80E+14

7.6. 放出開始時刻について

敦賀発電所から放出された放射性物質が、移流・拡散により岐阜県内に到達するまでは数時間かかり、その時間は大気の状態や県内への流入ルートに依存する。岐阜県内における線量が最大となる放出開始日時を決定するために、飛来確率分布計算から得られた各ケースのピーク出現時間の0～12時間前で放出時間を変えるサーベイ計算を事前に行うこととした。

例として、飛来確率分布計算において、7/25 6:00の関ヶ原にピークが出現した場合の放出開始日時サーベイ計算の結果を図7-2に示す。この結果では、7/24 20:00を放出時刻とし、7/25 2:00までの6時間放出とした条件設定が、岐阜県内において最も高い線量を示した。従って、このケースでは、放出開始日時は7/24 20:00となる。他のケースでも同様にして、放出開始日時を決定した。

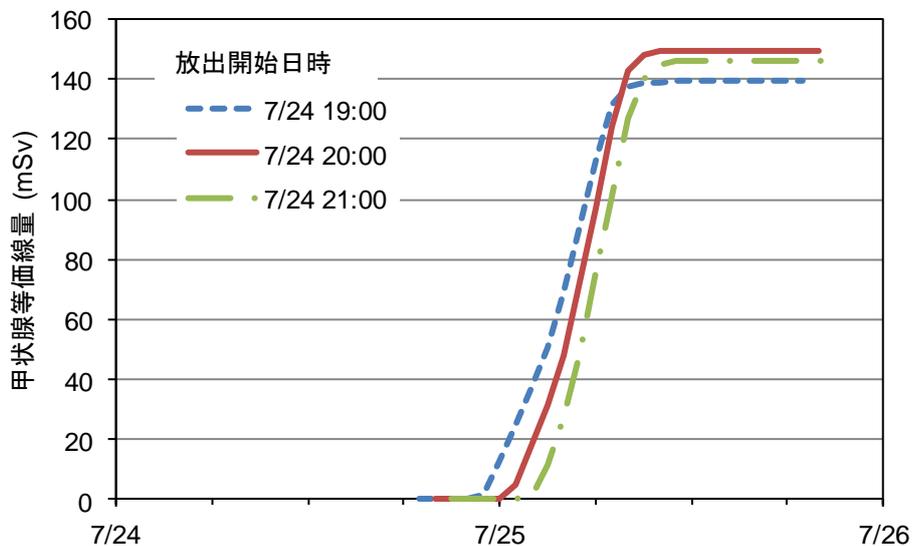


図 7-2 7/25 の関ヶ原における放出時間別の甲状腺等価線量 (小児)

7.7. 計算結果

7.7.1. 計算結果のまとめ方について

事例計算の計算結果は、各ケースについて以下の順でまとめ、資料編に記載した。

- (1) 岐阜県内の代表地点 (12 地点) における ^{131}I の地表空气中濃度の経時変化
- (2) 岐阜県内の代表地点 (12 地点) における ^{137}Cs の沈着量の経時変化
- (3) 吸入による小児の甲状腺等価線量分布
- (4) 地表に沈着した放射性物質による年間の外部被ばく線量分布
- (5) 風配図
- (6) 天気図
- (7) 降水分布 (降水がある場合)
- (8) 岐阜県内の代表地点 (12 地点) における被ばく線量
- (9) 最大値出現地点における核種別の被ばく線量

7.7.2. 計算結果を評価するにあたり参考とした指標

国の原子力防災に関する指針は、現在、福島第一原子力発電所事故を受けた見直しが行われている段階である。見直しに関する中間とりまとめでは、防護措置の実施を判断する指標として、表 7-5 に示す IAEA の指標を参考としている。また、内閣府は、福島第一原子力発電所事故における計画的避難区域、「特定避難勧奨地点」の設定に際して、「事故発生後の 1 年間の積算放射線量が 20mSv を超える」ことを目安としている。

以上のことを踏まえ、計算結果を評価するにあたり、参考とする指標値として小児甲状腺等価線量を 50mSv、グランドシャインを年間 100mSv ならびに年間 20mSv と設定した。なお、クラウドシャインについては、最大でも 0.3mSv 程度であり、現行の防災指針における指標 (10mSv) と比較して十分低い値であることを確認したため、分布図を省略した。

表 7-5 IAEA の指標 (表 4-1 から抜粋)

包括的判断基準	防護措置あるいは他の措置の例
以下の包括的判断基準を超える予測線量：緊急防護措置と他の対応措置を実施する	
甲状腺等価線量 50mSv 以上 (最初の 7 日間)	安定ヨウ素剤予防服用
実効線量 100mSv 以上 (最初の 7 日間)	屋内退避、避難、除染、食物やミルク、水の摂取制限、汚染管理、公衆の安心確保
以下の包括的判断基準を超える予測線量： 緊急時の早い段階で防護措置と他の対応措置を実施する	
実効線量 100mSv 以上 (年間)	一時的避難、除染、食物、ミルク及び水の代替、公衆の安心確保

7.7.3. 検討結果

事例計算の計算結果を表 7-6 に、計算結果から得られた知見を以下にまとめた。

典型的な気圧配置における線量計算について (ケース 1～8)

- ▶ ケース 1、3 については、岐阜県方面への風配がなく、放射性雲は岐阜県に飛来しない結果となった。ケース 5、8 についても同様の理由で、ほとんど飛来しない結果となっている。
- ▶ 小児甲状腺等価線量は、全てのケースにおいて、50mSv を超えない結果となった。県内の最大値は、ケース 2 の 28mSv である。
- ▶ グランドシャインは、ケース 6 (秋・台風)、ケース 7 (冬・冬型) を除いて、年間 20mSv を越えるエリアは出現しない結果となった。ケース 6、7 では、原発から放出された放射性物質が、敦賀周辺域の北西～北北西の風を受けて滋賀県内を南下し、滋賀県から関ヶ原町付近を抜ける西風を受けて岐阜県内に流入しており、関ヶ原町付近に年間 20mSv を越えるエリアが出現した。これは、放射性物質が岐阜県内に流入した際、降水を伴ったためである。また、グランドシャインの最大値出現地点では、放出開始時刻から約 5～6 時間後に沈着量の最大値が出現している。ケース 6、7 における県内の最大値は、それぞれ年間 23、41mSv である。

岐阜県において高線量が出現するケースについて

① 小児甲状腺等価線量 (ケース 9～12)

- ▶ ケース 9～11 において、50mSv を超えるエリアが岐阜県内に出現する結果となった。
- ▶ ケース 9～12 の県内における小児甲状腺等価線量の最大値は、それぞれ 81、85、110、38mSv である。
- ▶ 全てのケースで降水はなかった。
- ▶ ケース 9 及び 10 は、原発から放出された放射性物質が、敦賀周辺域の北西～北北西の風を受けて滋賀県内を南下し、滋賀県から関ヶ原町付近を抜ける西風を受けて岐阜県内に流入した。また、この風配が数時間にわたって継続していたために、高線量となっている。
- ▶ ケース 11 は、敦賀周辺域で北西の風が数時間にわたって継続した後、西北西の風により、放射性雲が揖斐川町西境の山を超えて県内に流入している。県内では、複雑な風の流れにより拡散した。そのため、流入経路近傍において高線量が出現する結果となっている。
- ▶ ケース 9～11 において、ピークが出現した代表地点における放射性雲の到達時刻は、放出開始時刻から約 6 時間となっている。

② グランドシャイン (ケース 13～16)

- ▶ 全てのケースにおいて、年間 20mSv を超えるエリアが出現する結果となった。
- ▶ ケース 13、14、16 については、年間 100mSv を超えるエリアが出現する結果となった。
- ▶ ケース 13～16 の県内におけるグランドシャインの最大値は、それぞれ年間 110、110、42、

220mSv である。

- 全てのケースで降水があった。
- ケース 14 は、放射性物質は北西の風により、滋賀県北東部を南東に進んだ後、西北西の風により、関ヶ原町付近を通過して県内に流入。この間、滋賀県北東部で降水はない。放射性雲が流入した際に、関ヶ原、大垣を中心に 3.5～9mm/h の降水があり、放射性物質が地表に降下したために、高線量が出現する結果となった。
- 最も高線量となったケース 16 は、強い冬型の気圧配置下であり、放出された放射性物質が、敦賀付近の西北西の風を受けて、揖斐川町西境の山を超えて県内に流入し、降水によって沈着したものである。
- ケース 13～15 において、ピークが出現した代表地点における放射性雲の到達時刻は、放出開始時刻から 6～10 時間となっている。ケース 16 については、強風であること、放射性雲の流入経路が短いことなどから、2 時間後には揖斐川町坂内において、沈着量の有意な上昇が認められる。

放射性物質が広範囲に分布するケース (ケース 17, 18)

放射性物質が広範囲に分布するケースについては、選定を行った結果、岐阜県において高線量が出現するケース (ケース 10 及び 14) と放出開始時刻が同一となった (7.2 節参照)。

福井県北部あるいは石川県南部を通過して流入するケース (ケース 19, 20)

- 小児甲状腺等価線量は、全てのケースにおいて、50mSv を超えない結果となった。県内の最大値は、ケース 19 の 12mSv である。グランドシャインについては、ケース 19 において、郡上・下呂市周辺で年間 20mSv を超えるエリアが出現する結果となった。県内の最大値は、年間 66mSv である。
- ケース 19 は、揖斐川町北境に沿ってゆっくり東に進んだ放射性物質が郡上市方面へ流入した際、降水 (7/26 19:00 八幡 (郡上市) : 1.5mm/h、萩原 (下呂市) : 3mm/h) により、地表に沈着したものである。また、郡上市において沈着量のピークが出現した時刻は、放出開始から 14 時間後となっている。

全体のまとめ

岐阜県内において甲状腺等価線量が 50mSv 以上となる場合の放射性雲の流入経路は、以下の 2 つであることが示された。

- ① 敦賀発電所からの放射性雲が、概ね 5m/s 以上の西北西の風によって東へ向かい、揖斐川町西境の山を超えて県内に流入するケース
 - 西北西の風が卓越する冬場に多く見られ、降水を伴うことが多い。放射性雲の到達時刻は、放出開始から約 2～6 時間程度である。
- ② 敦賀発電所からの放射性雲が、概ね 5m/s 以下の北北西～北西の風によって滋賀県内を南下し、関ヶ原町付近を通過して県内に流入するケース

- ②は①よりも発生頻度が少ない。
- 放射性雲の到達時刻は、放出開始から約 6 時間程度である。

これらの流入経路となる風の流れが継続し、放射性物質が県内に至るまでの間に県内外で降水がない場合に、50mSv 以上となるエリアが出現する場合があることがわかった。

岐阜県内において、グランドシャインが年間 20mSv 以上となる場合の放射性雲の主な流入経路は、甲状腺等価線量が高くなる場合と同様に、①と②であることが示された。また、その他の流入経路として、郡上市方面へ流入する経路でも 20mSv を超えるエリアが県内に出現する場合があります、このケースにおける郡上市への放射性雲が到達時刻は、放出開始時刻から約 14 時間後である。

グランドシャインが高線量となるケースでは、全てのケースにおいて県内で降水があり、県内に放射性雲が流入した時間帯に降水がある場合に、高線量が出現する可能性があることが示された。

クラウドシャインについては、全ケースを通しての最大値が 0.3mSv であり、現行の防災指針における指標 (10mSv) よりも十分低い線量であった。

※ なお、表 7-6 に示した各線量の出現確率は、1Bq/h の 1 年間の連続放出である飛来確率分布計算の結果から求めた目安である。事例計算は 6 時間放出であるため、その出現確率は必ずしも一致しないことがある。

例：ケース 13 とケース 16

双方とも揖斐川町坂内での出現確率であるが、ケース 16 の方が事例計算では高線量であるにもかかわらず、出現確率が高くなっている。連続放出である飛来確率分布計算では、ケース 13 の方が高濃度となっている (上位となっている) が、事例計算では、放出時間の設定や計算方法の違いなどが影響して、順位が入れ替わったものである。

表 7-6 事例計算・計算結果一覧

ケース	季節	放出期間	岐阜県内の代表 12 地点における各線量の最大値						備考
			小児甲状腺等価線量			グランドシャイン			
			地点	線量 (mSv)	出現確率	地点	線量 (mSv/y)	出現確率	
1	春	2010/3/20 9:00～15:00	なし	0.0	-	なし	0.0	-	日本海低気圧
2	春	2010/4/8 9:00～15:00	西濃	21.2	1.87%	西濃	4.97	4.54%	移動性高気圧
3	夏	2010/6/19 9:00～15:00	なし	0.0	-	なし	0.0	-	梅雨前線
4	夏	2010/8/22 9:00～15:00	関ヶ原	3.4	3.8%	関ヶ原	0.8	8.83%	夏型
5	秋	2010/10/7 9:00～15:00	揖斐川町坂内	0.2	8.84%	揖斐川町坂内	0.05	11.6%	移動性高気圧
6	秋	2010/10/30 9:00～15:00	関ヶ原	6.9	4.47%	西濃	5.1	0.61%	台風
7	冬	2010/1/7 9:00～15:00	関ヶ原	1.1	11.19%	関ヶ原	3.2	2.7%	冬型
8	冬	2010/2/1 9:00～15:00	関ヶ原	0.001	24.8%	関ヶ原	0.006	43.82%	南岸低気圧
9	春	2010/5/8 20:00～5/9 2:00	関ヶ原	52.4	0.04%	関ヶ原	13.1	-	
10	夏	2010/7/24 20:00～7/25 2:00	関ヶ原	56.2	0.01%	関ヶ原	17.1	-	
11	秋	2010/10/15 20:00～10/16 2:00	揖斐川町坂内	9.9	0.03%	揖斐	2.6	-	
12	冬	2010/1/29 16:00～22:00	岐阜県庁	12.4	0.34%	岐阜県庁	3.2	-	
13	春	2010/3/28 14:00～20:00	揖斐川町坂内	13.4	-	揖斐川町坂内	102	0.01%	
14	夏	2010/7/6 10:00～16:00	関ヶ原	6.2	-	西濃	100	0.01%	
15	秋	2010/9/19 10:00～16:00	関ヶ原	1.9	-	岐阜県庁	25.6	0.02%	
16	冬	2010/12/24 4:00～10:00	揖斐川町坂内	1.3	-	揖斐川町坂内	117	0.03%	
17	ケース 10 と放出開始日時が同一								甲状腺等価線量について選定
18	ケース 14 と放出開始日時が同一								グランドシャインについて選定
19	夏	2010/7/25 0:00～6:00	揖斐川町坂内	8.4	6.63%	郡上	26.8	0.01%	郡上市方面へ流入
20	春	2010/5/2 0:00～6:00	飛騨	0.7	0.13%	飛騨	0.17	2.29%	飛騨方面へ流入

■：典型的な気圧配置、■：岐阜県内に高線量が出現するケース、■：放射性物質が広範囲に分布するケース、■：福井県北部又は石川県南部を通して岐阜県へ流入するケース、■：小児甲状腺等価線量：50mSv、グランドシャイン：年間 20mSv を超えたもの

出現確率の計算方法について

- 6 章の飛来確率分布計算の結果から得られた、県内代表地点 (12 地点) における 1 時間ごとの地表大気中濃度 (又は地表沈着量) のデータ (データ数：1 年間で 8,760 個 (365 日×24 時間)) を値の大きい順に並べ、これを「順序表」とする。
- 事例計算の各ケースにおいて、県内代表地点の中で最大の線量となる地点を選択する。
- その地点の 1 時間ごとの線量が最大となる時刻を特定する。
- 特定した時刻と順序表を照らし合わせ、その時刻データが順序表で大きい方から何番目に当たるかを求め、それをデータ総数で割ったものを「出現確率」とする。

8. 専門委員会

本件の検討・審議のため、学識経験者による、「岐阜県放射性物質拡散想定図作成にかかる専門委員会」を下記のとおり開催した（全4回）。

8.1. 開催日時と議題

第1回

日時：平成24年1月26日（木）9:30～11:30

議題

- (1) 放射性物質拡散想定図作成業務にかかる検討事項とスケジュール、検討体制について
- (2) 放射性物質拡散想定図作成にあたっての解析条件について
- (3) 次回委員会について

第2回

日時：平成24年4月17日（火）14:30～16:20

議題

- (1) 飛来確率分布計算の結果について
- (2) 事例計算の解析条件（計算期間、放出条件等）について
- (3) 次回委員会について

第3回

日時：平成24年6月1日（金）13:45～15:45

議題

- (1) 事例計算について
- (2) 外部発表用資料の構成について（素案）
- (3) 飛来確率分布計算の修正について
- (4) 今後の進め方について（事例計算、次回委員会等）

第4回

日時：平成24年8月13日（月）9:00～11:25

議題

- (1) 事例計算の結果について
- (2) 外部発表用資料について
- (3) 報告書について

8.2. 委員

氏名 (敬称略、50 音順)	所属
占部 逸正	福山大学 工学部 情報工学科 教授
小林 俊彦	岐阜地方気象台 台長 (2012 年 4 月～)
下 道國	藤田保健衛生大学 客員教授
高橋 知之	京都大学原子炉実験所 原子力基礎工学研究部門 准教授 兼 京都大学大学院農学研究科 地域環境科学専攻 准教授
辻村 豊	岐阜地方気象台 台長 (～2012 年 3 月)
土田 昭司	関西大学 社会安全学部 副学部長
山澤 弘実 (委員長)	名古屋大学大学院工学研究科 エネルギー理工学専攻エネルギー環境工学講座 教授

9. 外部発表用資料の作成

外部発表用資料：「放射性物質拡散シミュレーション結果について」を作成した。外部発表用資料の外観を図 9-1 に示す。

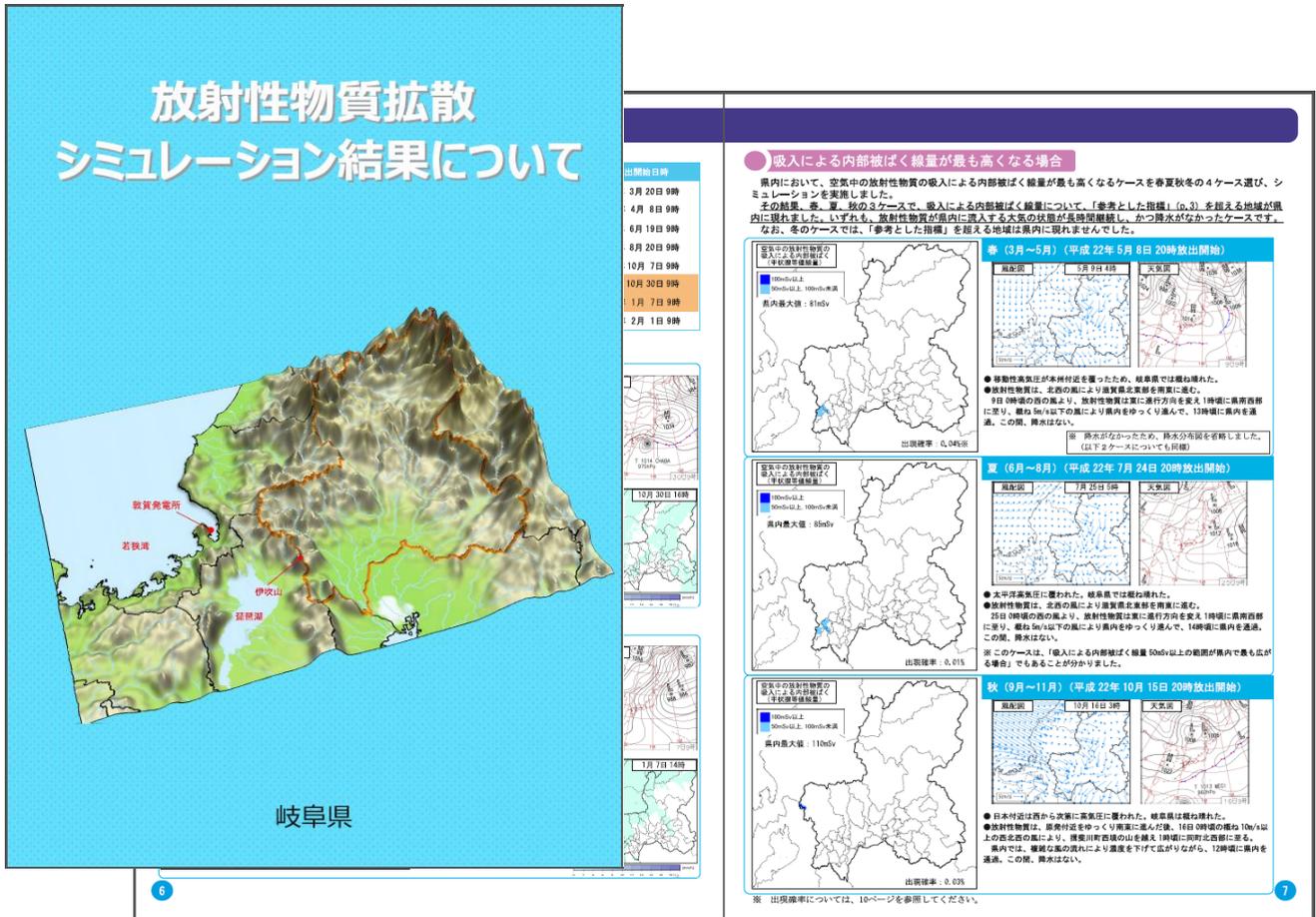


図 9-1 外部発表用資料の外観

10. 用語解説

オイラー型モデル

地表面に固定した座標系に基づく拡散方程式を数値的に解くモデル。拡散係数に対する情報が少ないため、モデル内で拡散係数が直接求められる気象モデルとの組み合わせで使用されることが多い。

ラグランジュ型粒子モデル

物質を多数の粒子で模擬し、平均風と乱流による粒子の移動を追跡するモデル。オイラー型モデルにおける差分法で発生する疑似拡散がなく、物質の移流を詳細に表現することが可能である。

乾性沈着

大気の流れや重力沈降によって大気中の物質が地表近くに運ばれ、地面や植物に衝突するなどして、地表に捕捉される過程。

湿性沈着

雨や雪などの降水による、大気中からの物質の除去過程。

MSM (Meso Scale Model) データ

気象庁のメソ数値予報モデルによって解析された、解析領域の格子点における気象データ。解析領域は、水平方向は日本領域、鉛直方向は上空 100 (hPa) となっている。データ概要を表 10-1 に示す。

表 10-1 MSM データ概要

項目	概要
初期時刻	1日8回、0,3,6,9,12,15,18,21 (UTC)
解析領域	北緯：22.4-47.6 (deg) 東経：120-150 (deg)
座標系	等緯度経度
解像度	地上：0.05×0.0625 (deg)、格子数 505×481 気圧面：0.1×0.125 (deg)、格子数 253×241
気圧面	16 (1000, 975, 950, 925, 900, 850, 800, 700, 600, 500, 400, 300, 250, 200, 150, 100 (hPa))
気象要素	地上： 海面気圧、地上気圧、東西方向風速成分、南北方向風速成分、気温、相対湿度、降水量、雲量 気圧面： 東西方向風速成分、南北方向風速成分、気温、高度、上昇流、相対湿度 (300 (hPa) まで)

解析雨量

国土交通省河川局・道路局と気象庁が全国に設置しているレーダー、アメダス等の地上の雨量計を組み合わせて、1kmの解像度で解析した降水量分布。時間分解能は30分である。

タイムステップ

シミュレーション計算における時間刻みで、粒子モデルでは、指定した時間刻み毎に（例えば、30秒なら30秒ごとに）粒子の移動が計算される。

等価線量

放射線の種類やエネルギーによって影響が異なることを考慮して、組織や臓器ごとの被ばく量を計算した線量。

サブマージョンモデル

人が放射性物質を含む大気に覆われた状態（サブマージョン）を仮定した外部被ばく線量計算モデル。

実効線量

人体への全体的な影響を評価した被ばく線量で、内部被ばくによる実効線量と、外部被ばくによる実効線量がある。外部被ばくは、主として、空気中の放射性物質からのガンマ線と、地表に沈着した放射性物質からのガンマ線によって生じる。

有効放出高さ

排気筒高さに排気筒を出てからの排ガスの上昇分（排出速度、熱による浮力等）を加えた、発生源高さ。

11. 参考文献

- [1] R. L. Walko et al., RAMS Regional Atmospheric Modeling System Technical Description, Mission Research Corporation (1999).
- [2] R. L. Walko et al., HYPACT Hybrid Particle and Concentration Transport Model version 1.2.0 User's Guide, Mission Research Corporation (2001).
- [3] IAEA, Generic models and parameters for assessing the environmental transfer of radionuclides from routine release, IAEA SS, 57 (1982).
- [4] 原子力学会, 原子力発電所の確率論的安全評価に関する実施基準 (レベル 3PSA 編) : 2008 (2008).
- [5] ICRP, ICRP Publication 71 Age-dependent doses to member of the public from intake of radionuclides: Part 4 inhalation dose coefficients, 25 (1995).
- [6] ICRP, ICRP Publication 72 Age-dependent doses to member of the public from intake of radionuclides: Part 5 Complication of ingestion and inhalation dose coefficients, 26, 1 (1996).
- [7] K. F. Eckerman and J. C. Ryman, External exposure to radionuclides in air, water, and soil, Federal guidance report 12 (1993).
- [8] 原子力安全・保安院, 東京電力株式会社福島第一原子力発電所の事故に係る 1 号機、2 号機及び 3 号機の炉心の状態に関する評価について (平成 23 年 6 月 6 日、10 月 20 日訂正)
- [9] (独) 日本原子力研究開発機構, 福島第一原子力発電所事故に伴う ^{131}I と ^{137}Cs の大気放出量に関する試算 (II), 第 63 回原子力安全委員会 資料第 5 号 (平成 23 年 8 月 22 日)