

2024年度 第三者検証委員会 (第2回) OSCAARコードの概要

2024年12月24日
日本原子力発電株式会社

1. OSCAARの概要

2. OSCAARによる評価手法

- (1) 評価手法の概略
- (2) 拡散モデル
- (3) 気象データの取扱い
- (4) 放出源情報及び各種設定
- (5) 評価の実施
- (6) 評価結果の出力

3. R-Cubicとの比較

4. 参考資料

OSCAAR(Off-Site Consequence Analysis code for Atmospheric Release in Reactor Accident)は、旧日本原子力研究所による確率論的リスク評価(PRA)に関する研究の一環として、原子炉事故時の公衆の放射線影響を確率論的に評価する環境影響評価(レベル3PRA)手法の確立を目指し開発されたコード。

確率論的環境影響評価コードの国際比較計算への参加(OECD, 1994; CEC, 1994), チェルノブイル事故等で得られた環境中の実測データを基にした, 被ばく評価上重要なI-131やCs-137の食物連鎖を含む生態圏における移行モデルに関する検証(Homma et al, 2000a; Homma and Matsunaga, 2000b), 特定シナリオに対してモンテカルロ法に基づく入力パラメータの不確実さ伝播解析・感度解析手法を導入したレベル3PRAに係わる不確実さ評価(Homma, 1998)等を通じて, OSCAARコードの適用性能の確認や機能の検証作業が行われてきた。

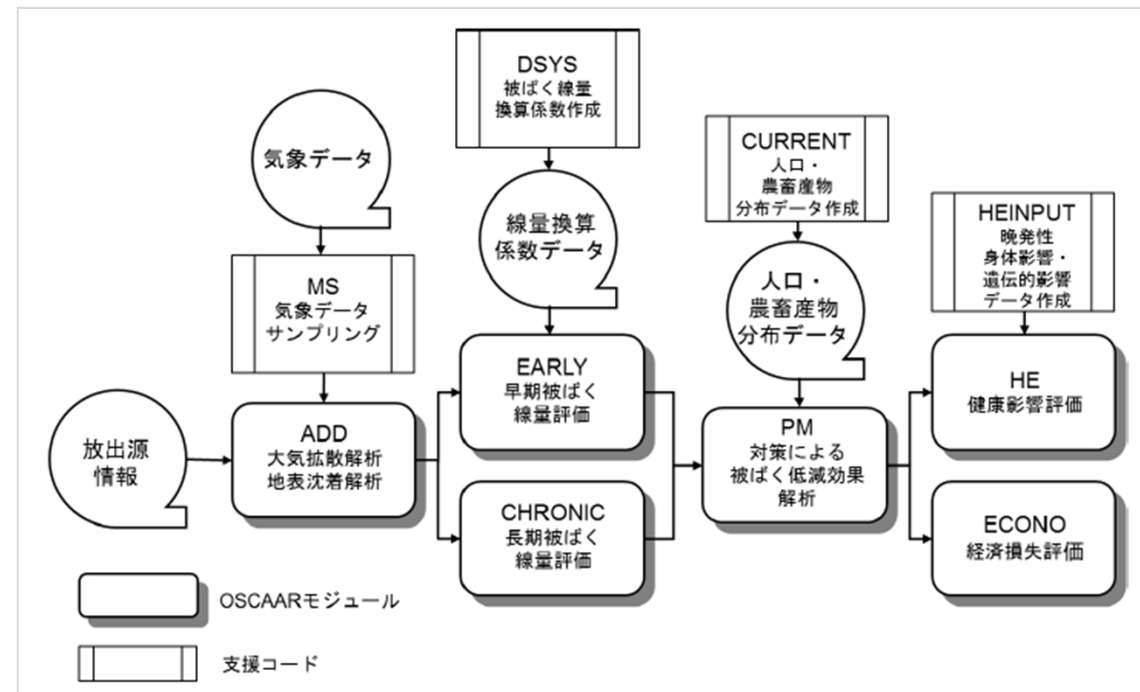
これらの検証を経て「OSCAARコードパッケージ」として整備され, 2020年3月に研究目的での使用に向けて公開された。

参考: 原子力災害で環境に放出される放射性物質による被ばく線量を評価 - 確率論的事故影響評価コード「OSCAAR」の公開 - 日本原子力研究開発機構: プレス発表 (<https://www.jaea.go.jp/02/press2020/p20042301/>)

2. OSCAARによる評価手法: (1) 評価手法の概略

＜OSCAARの構成＞

- OSCAARは、大気拡散・被ばく評価に係る機能を持った種々のモジュールが組み合わさり構成される。
- インプットデータの整理のため、外部支援コードも用いる。
- 出力結果は、早期影響と長期影響に大別される。
- R-Cubicとの比較は、R-Cubicの出力する結果に合わせ、早期の被ばく評価に関する機能に着目して行う。



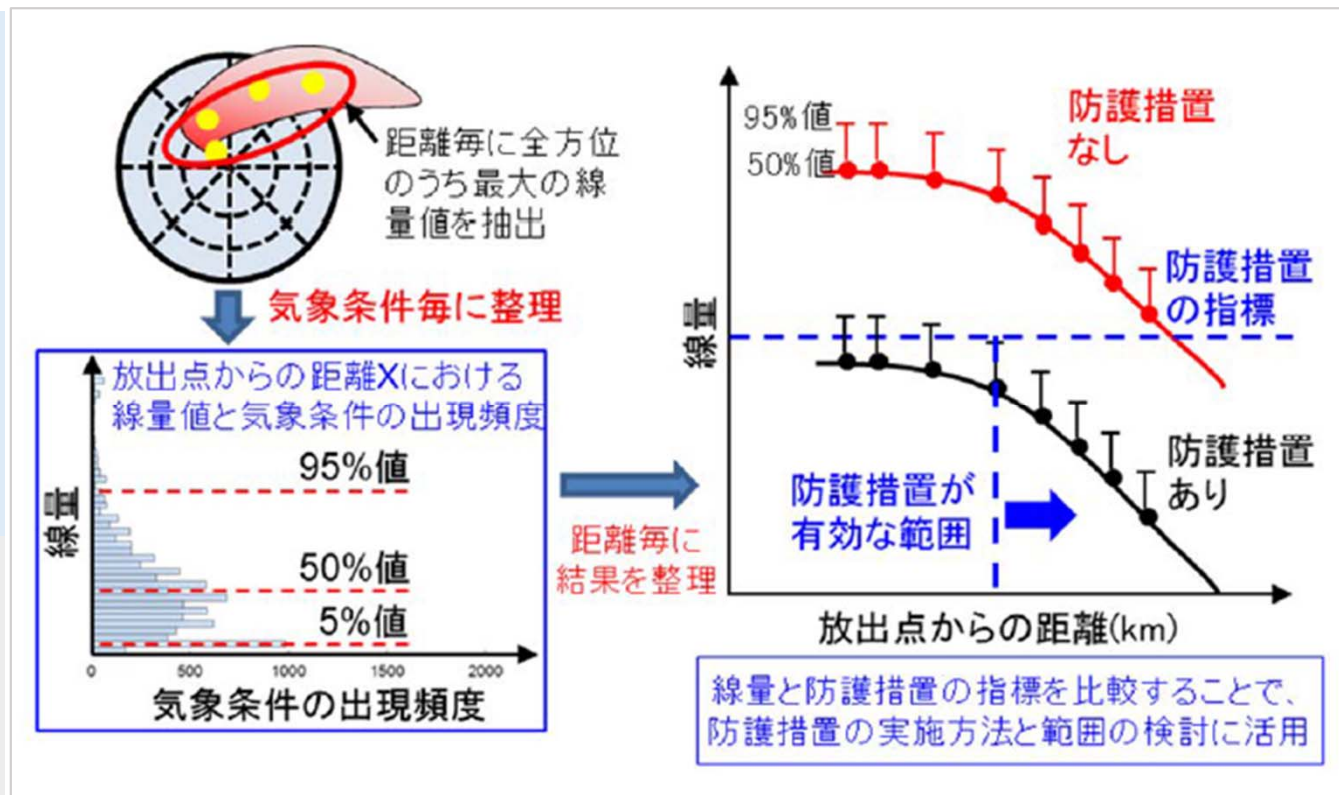
モジュール	機能
ADD	放出される放射性物質及び気象条件の情報を用いたパフモデルによる移流拡散計算
EARLY	放射性物質の通過中、通過後の短期間における早期被ばく評価
CHRONIC	長期にわたり環境中に残留する長半減期核種による被ばく評価
PM	防護対策（屋内退避，避難，安定ヨウ素剤の配布等）による被ばく低減効果の計算
HE	被ばくによる個人の健康影響（早期，晩発性の影響）の推定
ECONO	経済影響の推定

2. OSCAARによる評価手法: (1) 評価手法の概略

- OSCAARは、主に確率論的評価に用いられる。
- 複数の気象条件による解析を統計処理し、被ばく線量の中央値(50%値)、95%値等を評価する。
- 防護措置による効果の考慮の有無を選択でき、その効果の有効性の検討に用いることが可能

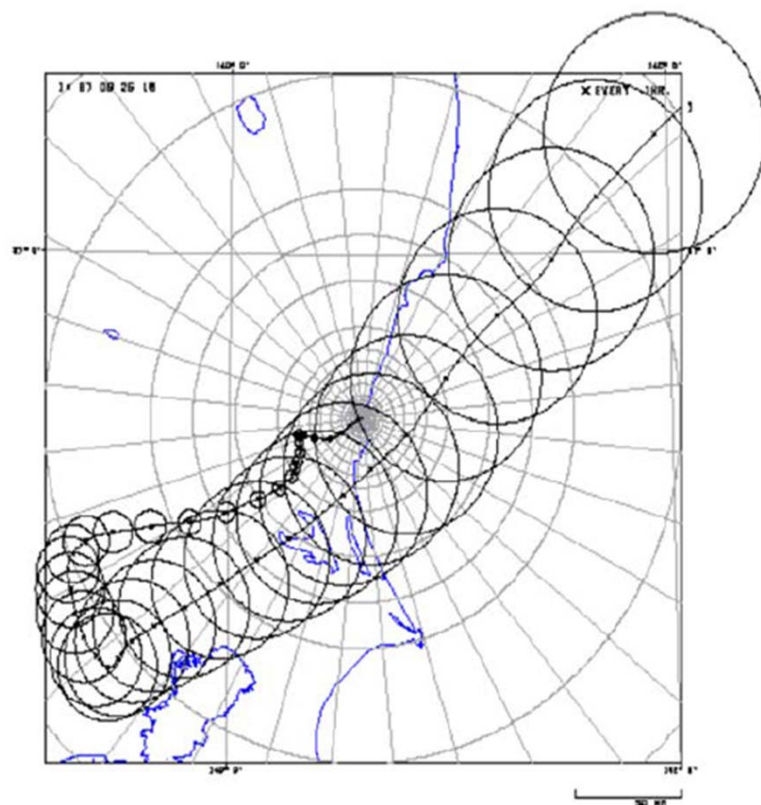
【確率論的評価手法の概略】

- 1つの気象条件を用いてOSCAARによる被ばく線量計算を行い、放出点からの距離毎に全方位のうち最大の被ばく線量値を抽出する(例: 図の左上)。
- 抽出したすべての気象条件についてOSCAARによる計算を繰り返し、放出点からの距離Xにおける被ばく線量値を最小値から順に並べて、気象条件の出現頻度として整理する(例: 図の左下。横軸に気象条件の出現頻度、縦軸に被ばく線量値を小さい順に並べたもの)。この際、被ばく線量値の累積頻度の5%、50%及び95%を求める。
- 被ばく線量値を放出点からの距離毎に図示する。必要に応じて被ばく線量値には累積頻度の50%や95%の範囲を示す。(例: 図の右側)
- 被ばく線量値と防護措置の指標を比較・解析することにより、防護対策の実施方法と有効な範囲、被ばく線量の低減効果についての検討に活用することができる。



< 拡散モデル >

- OSCAARの大気拡散は、パフモデル(ガウス型の変動流跡線パフモデル)により評価する。
- 連続して放出される放出プルームを時間で分割し、それぞれ独立のパフとし、入力となる気象場(風向・風速, 降雨, 大気安定度)を基に放射性物質の移流・拡散を解析する。
- 評価地点の大気中濃度, 地表沈着濃度を各パフからの寄与の合計として求める。
- R-Cubicも同様にパフモデルを用いた評価を行っている。



放射性雲(パフ)の移流イメージ

評価地点(x, y, z)における時刻tの濃度 $\chi(x, y, z, t)$

$$\chi(x, y, z, t) = \sum_{i=1}^N \chi_i(x, y, z, t)$$

$$= \sum_{i=1}^N \frac{Q_i(t)}{(2\pi)^{3/2} \sigma_{h,i}^2 \sigma_{z,i}} \exp\left[-\frac{(x_i - x)^2 + (y_i - y)^2}{2\sigma_{h,i}^2}\right] \exp\left[-\frac{(z_i - z)^2}{2\sigma_{z,i}^2}\right]$$

- σ_h, σ_z は、放出プルームの水平及び鉛直方向の拡散パラメータ
 - $\sigma_h = A_y \cdot x^p$
 - $\sigma_z = A_z \cdot x^q$

表 3.4.2 OSCAARで使用する拡散パラメータ式の係数

大 気安 定度	A_y	p	$X < 0.1 \text{ km}$		$0.1 \text{ km} < d < 1 \text{ km}$		$1 \text{ km} < d$	
			A_z	q	A_z	q	A_z	q
A	0.3658	0.9031	0.192	0.936	0.00066	1.941	0.00024	2.094
B	0.2751	0.9031	0.156	0.922	0.0382	1.149	0.055	1.098
C	0.2089	0.9031	0.116	0.905	0.113	0.911	0.113	0.911
D	0.1471	0.9031	0.079	0.881	0.222	0.725	1.26	0.516
E	0.1046	0.9031	0.063	0.871	0.211	0.678	6.73	0.305
F	0.0722	0.9031	0.053	0.814	0.086	0.740	18.05	0.180

2. OSCAARによる評価手法:(2)拡散モデル

<パフモデルの拡散式>

- OSCAARとR-Cubicで、マニュアル内における表現の差異はあるものの同様の拡散式による評価を行っている。
- ただし、水平及び鉛直方向の拡散パラメータについては、参照元が異なる。

OSCAAR

位置 (x_i, y_i, z_i) 、放射性物質質量 $Q_i(t)$ であるパフ i の
評価地点 (x, y, z) における時刻 t の濃度 $\chi(x, y, z, t)$

$$\chi(x, y, z, t) = \sum_{i=1}^N \chi_i(x, y, z, t)$$

$$= \sum_{i=1}^N \frac{Q_i(t)}{(2\pi)^{3/2} \sigma_{h,i}^2 \sigma_{z,i}} \exp\left[-\frac{(x_i - x)^2 + (y_i - y)^2}{2\sigma_{h,i}^2}\right] \exp\left[-\frac{(z_i - z)^2}{2\sigma_{z,i}^2}\right]$$

上記式の $\chi(x, y, z, t)$ は、時刻 t の全てのパフの影響を足し合わせた濃度を表す。
また、高さ $z=0$ とすれば、時刻 t における地表空气中濃度を表す式となる。

拡散パラメータ

Tadmor-Gurの近似式に基づくべき乗則のパラメータ設定

水平方向: $\sigma_h = A_y \cdot x^p$

鉛直方向: $\sigma_z = A_z \cdot x^q$

表 3.4.2 OSCAARで使用する拡散パラメータ式の係数

大気安定度	A_y	p	X < 0.1 km		0.1 km < d < 1 km		1 km < d	
			A_z	q	A_z	q	A_z	q
A	0.3658	0.9031	0.192	0.936	0.00066	1.941	0.00024	2.094
B	0.2751	0.9031	0.156	0.922	0.0382	1.149	0.055	1.098
C	0.2089	0.9031	0.116	0.905	0.113	0.911	0.113	0.911
D	0.1471	0.9031	0.079	0.881	0.222	0.725	1.26	0.516
E	0.1046	0.9031	0.063	0.871	0.211	0.678	6.73	0.305
F	0.0722	0.9031	0.053	0.814	0.086	0.740	18.05	0.180

R-Cubic

パフ中心座標 (x_0, y_0, h) 、放出量 Q_i の核種 i の
地表座標 $(x, y, 0)$ における地表空气中濃度 χ_i

$$\chi_i(x, y, 0) = \frac{Q_i}{(\sqrt{2} \cdot \pi^{3/2} \sigma_y^2 \sigma_z)} \exp\left[-\frac{1}{2} \left(\frac{(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2}{\sigma_y^2} \right)\right] \cdot \exp\left[-\frac{1}{2} \left(\frac{h}{\sigma_z} \right)^2\right]$$

上記式の χ_i は、ある時刻における一つのパフの核種 i の地表 ($z=0$) の空气中濃度を表す。
時間の変数 (t) の記載はないが、放射性物質質量 Q_i は、時間による拡散・沈着に伴い変化し、
濃度は、全ての放射性物質及びパフの影響を足し合わせにより計算される。

拡散パラメータ

「発電用原子炉施設の安全解析に関する気象指針(以下、気象指針という。)」に記載された濃度分布の拡がりのパラメータに基づく設定

水平方向: $\sigma_y = 0.67775 \theta_{0.1} \cdot (5 - \log(x)) \cdot x$ (水平方向)

鉛直方向: $\sigma_z = \sigma_1 \cdot x^{a_1} + a_2 \cdot \log(x) + a_3 \cdot \log(x)^2$

表 4 拡散パラメータ計算のための定数

風下距離 (km)	係数	大気安定度					
		A	B	C	D	E	F
all	$\theta_{0.1}$	50	40	30	20	15	10
$x \geq 0.2$	σ_1	768.1	122.0	58.1	31.7	22.2	13.8
	a_1	3.9077	1.4132	0.8916	0.7626	0.7117	0.6582
	a_2	3.898	0.49523	-0.001649	-0.095108	-0.12697	-0.1227
	a_3	1.733	0.12772	0.0	0.0	0.0	0.0
$x < 0.2$	σ_1	165	83.7	58.0	33.0	24.4	15.5
	a_1	1.07	0.894	0.891	0.854	0.854	0.822
	a_2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	a_3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

2. OSCAARによる評価手法:(2)拡散モデル

参考:パフモデル拡散式

日本原子力学会標準 原子力発電所の確率的リスク評価に関する実施基準(レベル3PRA編):2018より引用

$$\chi(x, y, z, t) = \frac{Q(t)}{2\pi\sigma_x\sigma_y} \cdot g \cdot \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{d_x}{\sigma_x}\right)^2\right] \cdot \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{d_y}{\sigma_y}\right)^2\right] \cdots \cdots \cdots \text{(E.3)}$$

$$g = \frac{2}{\sqrt{2\pi}\sigma_z} \cdot \sum_{n=-\infty}^{\infty} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{H_e + 2nh_m}{\sigma_z}\right)^2\right] \cdots \cdots \cdots \text{(E.4)}$$

$\chi(x, y, z, t)$: 位置 (x, y, z) の時刻 t における地表空气中濃度(Bq/m³), 地表における濃度の場合 $z=0$

g : ガウス方程式における鉛直方向成分(1/m)

$Q(t)$: 時刻 t におけるパフの強度(Bq)

$\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$: パフの水平方向 x, y 及び鉛直方向 z の拡散パラメータ(m)

d_x, d_y : パフ中心から x 及び y 地点までの距離(m)

H_e : パフ中心の地表面からの有効高さ(m)

h_m : 混合層上端の高さ(m)

n : 反射回数

水平方向 x, y の拡散パラメータが等しい場合,

$$\chi(x, y, z, t) = \frac{Q(t)}{2\pi\sigma_h^2} \cdot g \cdot \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{S}{\sigma_h}\right)^2\right] \cdots \cdots \cdots \text{(E.5)}$$

$\sigma_h = \sigma_x = \sigma_y$: パフの水平方向の拡散パラメータ(m)

S : パフ中心 (x_i, y_i) から (x, y) 地点までの距離(m)

$$S^2 = d_x^2 + d_y^2 = (x_i - x)^2 + (y_i - y)^2$$

評価地点 (x, y, z) における空气中濃度は, 位置 (x_i, y_i, z_i) にある同時刻のパフの強度 $Q_i(t)$ から, 以下の式より求められる。

$$\chi(x, y, z, t) = \sum_{i=1}^N \frac{Q_i(t)}{2\pi\sigma_{h,i}^2} \cdot g_i \cdot \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{S_i}{\sigma_{h,i}}\right)^2\right] \cdots \cdots \cdots \text{(E.6)}$$

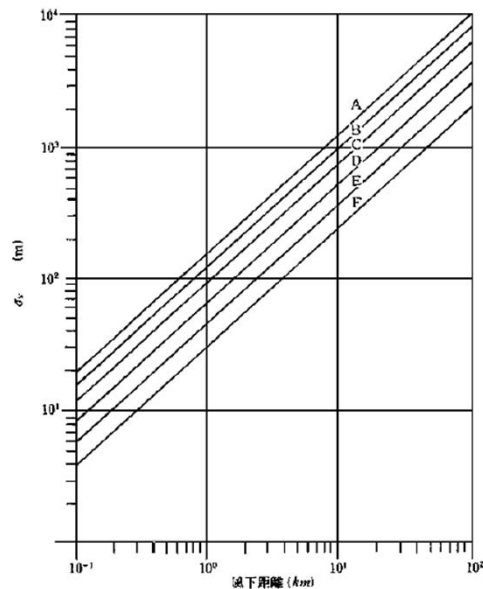
$$S_i^2 = (x_i - x)^2 + (y_i - y)^2$$

$$g_i = \frac{2}{\sqrt{2\pi}\sigma_{z,i}} \cdot \sum_{n=-\infty}^{\infty} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{H_{e,i} + 2nh_{m,i}}{\sigma_{z,i}}\right)^2\right]$$

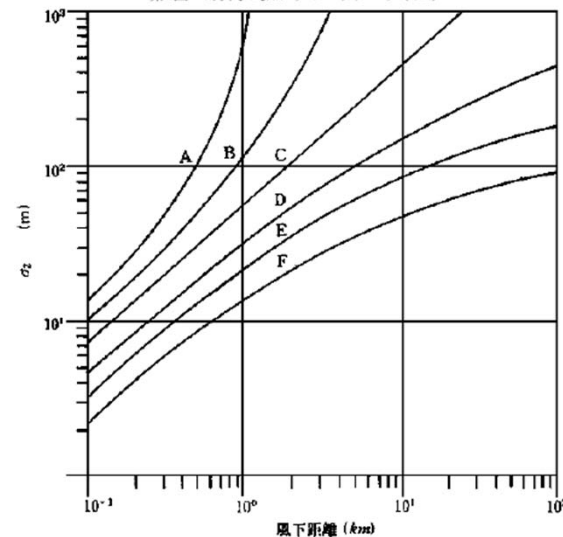
N : パフの数

2. OSCAARによる評価手法:(2)拡散モデル

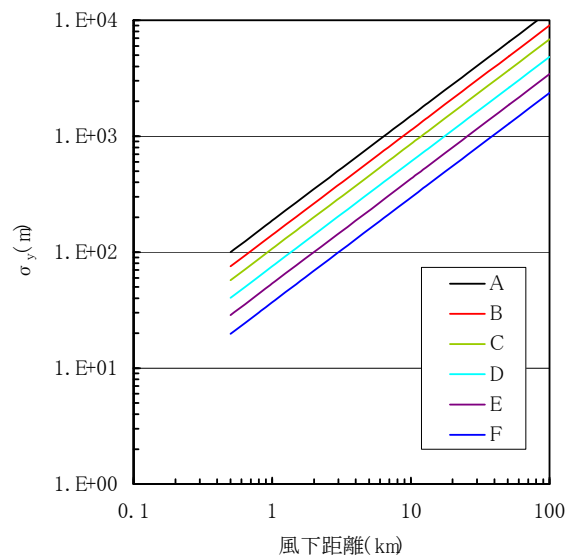
第1図 y方向の拡がりのパラメータ(σ_y)



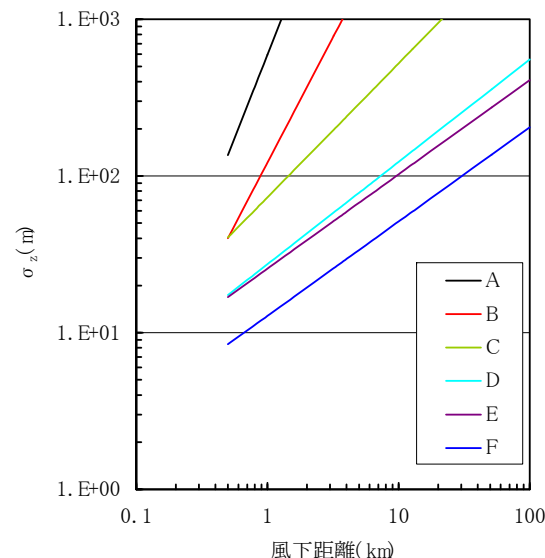
第2図 z方向の拡がりのパラメータ(σ_z)



発電用原子炉施設の安全解析に関する気象指針より引用



Tadmor-Gur近似式(MACCSコード)



<拡散パラメータの差異>

- 2つのコードが使用する拡散式における水平・鉛直方向の拡散パラメータは、参照元が異なる
 - R-Cubic : 気象指針
 - OSCAAR : Tadmor-Gur近似式
- 風向・風速、大気安定度が時間変化するパフモデルにおいては、時間毎の気象条件により拡がり方を評価するため、左図の値をそのまま採用し計算するものではない。(距離別の拡散パラメータの値については、主にガウスプルームモデルによる計算で用いられる。)
- なお、大気安定度の判定にも違いがある。(後述)

日本原子力学会標準 原子力発電所の確率的リスク評価に関する実施基準(レベル3PRA編):2018より引用

<GPVデータ>

- OSCAARに入力する気象データは、気象庁数値予報データ(GPVデータ)を基に作成される。
- GPVデータは、日本全域を含む1000km四方程度の範囲に対応した、メソスケール(200～2000km)を対象とした数値予報モデル(MSM)による予報結果を用いる。
 - 気象庁の数値予報データはGPV(Grid Point Value)として等間隔メッシュの格子点における数値予報情報を格納している。(気象庁の数値予報データをGPV データ, 特にMSM によるGPV データをMSM-GPV データと呼ぶ。)
- GPVデータには、地上面データと上空の気圧面データの2種類があり、以下のデータを収録している。
 - 地上面データ: 海面更正気圧, 地上気圧, 風, 気温, 相対湿度, 時間降水量, 雲量, 日射量
 - 気圧面データ: 高度, 風, 気温, 上昇流, 相対湿度
- GPVデータは、地形による影響を含む気象観測データを基に得られるデータであることから、GPVデータを用いた気象場による拡散評価を行うことで、地形を反映した拡散評価となる。
- OSCAARの気象データは、1年単位で入力する。

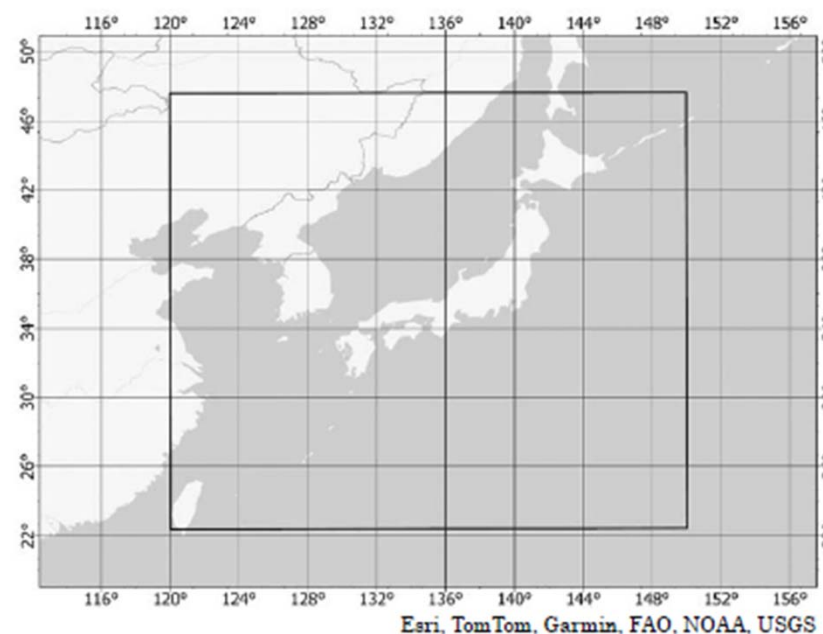


Figure 3.1 MSMの対象範囲

2. OSCAARによる評価手法: (3) 気象データの取扱い

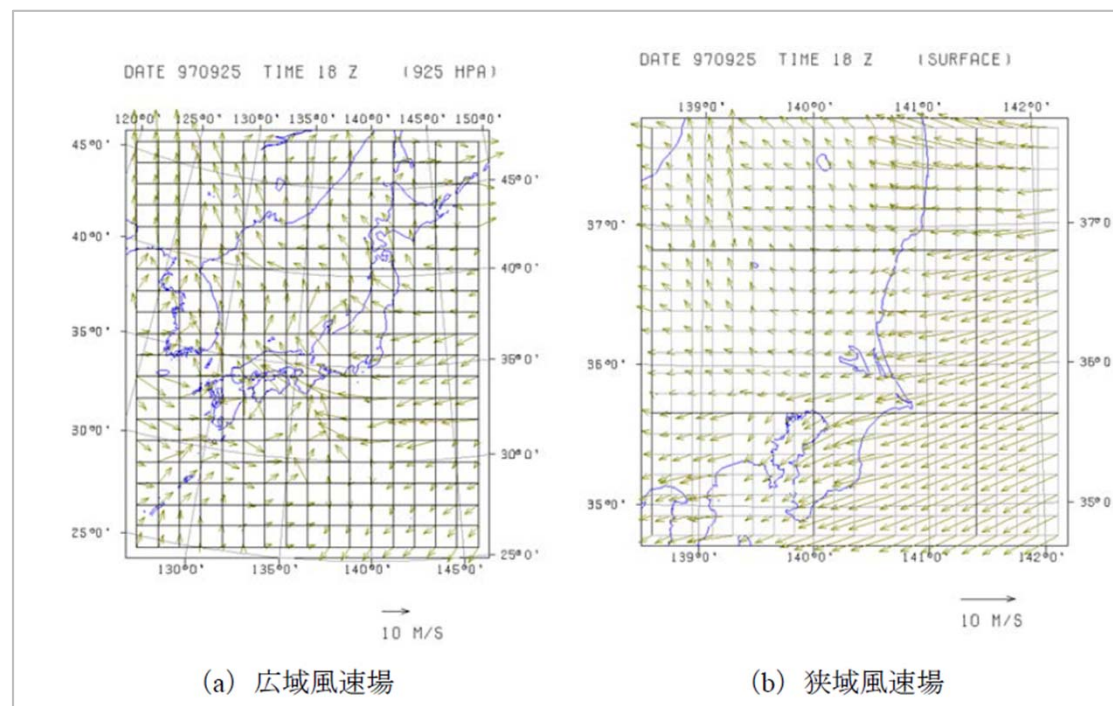
- GPVデータを基に, OSCAARの入力ファイル用気象データを作成する。
- OSCAARの風速場は, スケールの異なる2つの格子網で構成される。

<広域風速場データ>

- 日本全域を含む領域における上空での対象気圧面の高度と上層風の風速の値を持つ。
- 計算領域(固定値): 緯度方向約3000km, 経度方向約2500kmの範囲
- 格子数(固定値): X軸方向17, Y軸方向20(格子間隔が約150km)

<狭域風速場データ>

- 対象サイトを含む400km四方領域の地上の風速, 大気安定度の値を持つ。
- 計算領域: 任意に設定可能だが, 400km四方位程度を推奨。
- 格子数: 格子点数はX軸, Y軸とも81を上限とする。(格子間隔は約20km)



＜大気安定度＞

- GPVデータには、大気安定度が収録されていないため、他の気象要素から大気安定度を計算する。
- OSCAARで採用している大気安定度は、Turner(1964)の分類を採用している。
- 実効日射インデックスと風速の組合せにより、大気安定度を決定する方法。
- 実効日射インデックスは、日射階級番号(太陽高度と日射量)、全雲量及び雲底高度の組合せから求められる。

Table 4.2 日射階級番号と太陽高度の関係 (Turner (1964)⁹⁾)

太陽高度 a	日射量	日射階級番号
$60^\circ < a$	strong	4
$35^\circ < a \leq 60^\circ$	moderate	3
$15^\circ < a \leq 35^\circ$	slight	2
$0^\circ < a \leq 15^\circ$	weak	1
$a \leq 0^\circ$	night	0

Table 4.3 実効日射インデックスの算出法 (Turner (1964)⁹⁾より一部改変)

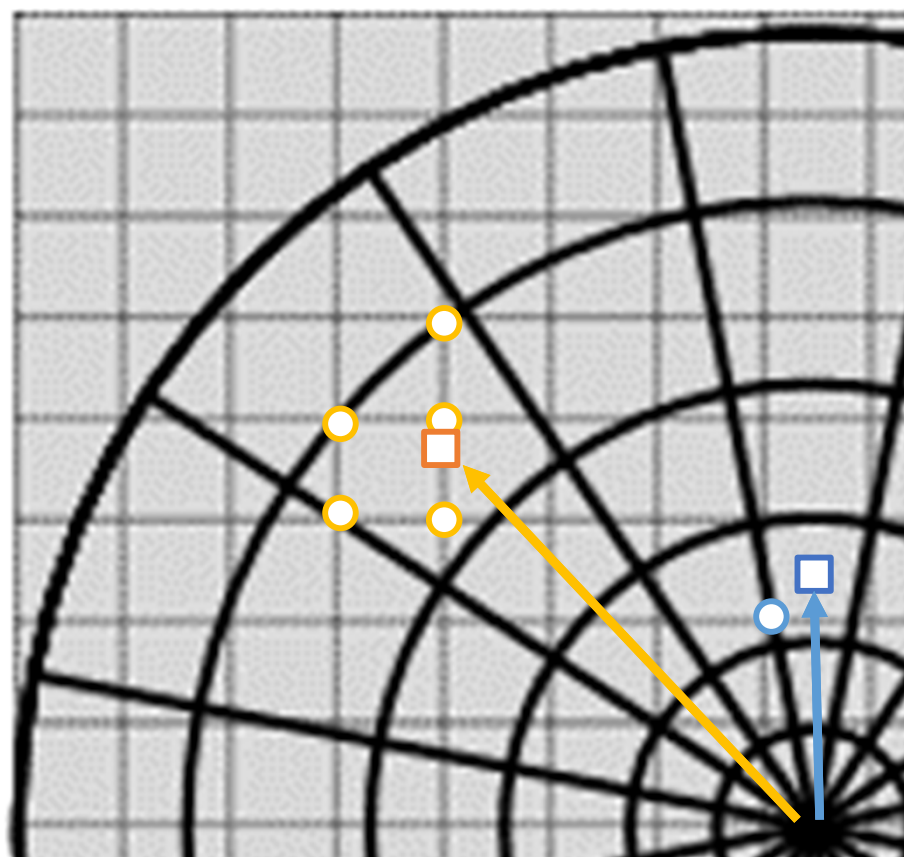
条件			実効日射インデックス
時間帯	全雲量	雲底高度	
夜	4 以下	-	-2
	5 以上 9 以下	-	-1
	10	2000 m 以上	-1
		2000 m 未満	0
昼	5 以下	-	日射階級番号と同じ値
	6 以上 9 以下	2000 m 未満	日射階級番号から 2 を引いた値 (0 以下となった場合は 1)
		2000 m 以上 5000 m 未満	日射階級番号から 1 を引いた値 (0 となった場合は 1)
	10	2000 m 以上	
		2000 m 未満	0

Table 4.1 大気安定度分類表 (Turner (1964)⁹⁾より一部改変)

風速 U (m/s)	実効日射インデックス						
	-2	-1	0	1	2	3	4
$0.0 \leq U < 1.0$	G	F	D	C	B	A	A
$1.0 \leq U < 2.1$	G	F	D	C	B	B	A
$2.1 \leq U < 3.1$	F	E	D	D	C	B	A
$3.1 \leq U < 3.6$	F	E	D	D	C	B	B
$3.6 \leq U < 4.1$	E	D	D	D	C	B	B
$4.1 \leq U < 5.1$	E	D	D	D	C	C	B
$5.1 \leq U < 5.7$	E	D	D	D	D	C	C
$5.7 \leq U < 6.2$	D	D	D	D	D	C	C
$6.2 \leq U$	D	D	D	D	D	D	C

<降水量データ>

- 降水量は、GPVデータに収録されている地表面の時間降水量GPVを利用する。
- OSCAARの線量等の評価は同心円メッシュ単位で行われる。各メッシュにおける降水量は、OSCAARの同心円メッシュの内部に、1点以上のGPVがある場合、メッシュに含まれるGPVから平均降水量を計算し、メッシュの代表値とする。(下図の○の平均を□に適用)
- メッシュ内にGPVがない場合、メッシュの代表点から最近傍のGPVを採用する(下図の○の値を□に適用)。



＜サイト気象データ＞

- ・ 対象サイト周辺の風速ベクトル, 大気安定度, 降水量のデータを設定する。
- ・ GPVデータから作成する場合, 対象サイトの中心点の気象データは, 中心座標から最も近いGPVの4点の距離に応じた加重平均とする。
- ・ サイト気象データの適用範囲を指定可能(対象サイトから10kmまでを推奨)。この範囲では, 狭域風速場データに優先してサイト気象データが採用される。
- ・ 別途, サイト観測データを設定することも可能。

＜気象シーケンス＞

- ・ 放出開始から1時間毎に拡散状況を計算し, 評価対象領域外に出るまでの気象条件の変化を1つの気象シーケンスとして扱う。
- ・ 気象サンプリングとは, 評価に用いる気象シーケンスの出発点(放出開始時刻)の抽出をいう。
- ・ 評価する気象シーケンスの設定により, 決定論的評価か確率論的評価が選択される。
 - ・ 決定論的評価(ある気象条件により一意の結果を得る) : 一定の気象条件, 1シーケンス, 1トライアル
 - ・ 確率論的評価(複数の気象条件の評価を統計的に扱う) : ランダムサンプル, サイクリックサンプル

設定オプション	説明
一定の気象条件	ユーザーが1組の風向、風速、大気安定度、降水率、混合層高さを与え、その気象条件が全領域、全時間、一定で続くものとして計算する。
1シーケンス	ユーザーが毎時間の気象条件(風向、風速、大気安定度、降水率、混合層高さ)を与え、それが全領域で一定であるとして計算する。
1トライアル	1つの気象シーケンスのみ計算する。
ランダムサンプル	指定するシーケンス数分だけ、放出開始時刻をランダムにサンプリングして計算する。
サイクリックサンプル	最初のシーケンスの時刻と、それ以後のシーケンスの間隔(月、日、時刻)を指定して、指定したシーケンス数分だけ計算する。

2. OSCAARによる評価手法: (4) 放出源情報及び各種設定

＜放出源情報＞

- ・ サイト情報として、放出点を選択する。
 - ・ 全国の原子力発電所, JAEA(東海)から選択可能。
- ・ 評価核種は全54核種を設定可能。
- ・ 核種(希ガス, La類…等)に応じて放出グループを設定。
- ・ 事象発生を起点とした任意の期間(放出ステージ)毎に以下のパラメータの設定が可能。
 - ・ 事象発生から放出開始時間, 放出継続時間, 放出高さ
 - ・ 放出グループごとのインベントリに対する環境への放出割合

表6.1 OSCAARで取り扱うことができる評価核種

No.	核種名(親核種名)	No.	核種名(親核種名)	No.	核種名(親核種名)
1	Co-58	19	Ru-105	37	Cs-134
2	Co-60	20	Ru-106	38	Cs-136
3	Kr-85 (Kr-85m)	21	Rh-105 (Ru-105)	39	Cs-137
4	Kr-85m	22	Sb-127	40	Ba-140
5	Kr-87	23	Sb-129	41	La-140 (Ba-140)
6	Kr-88	24	Te-127 (Sb-127)	42	Ce-141
7	Rb-86	25	Te-127m	43	Ce-143
8	Sr-89	26	Te-129 (Sb-129)	44	Ce-144
9	Sr-90	27	Te-129m	45	Pr-143 (Ce-143)
10	Sr-91	28	Te-131m	46	Nd-147
11	Y-90 (Sr-90)	29	Te-132	47	Np-239
12	Y-91 (Sr-91)	30	I-131 (Te-131m)	48	Pu-238 (Cm-242)
13	Zr-95	31	I-132 (Te-132)	49	Pu-239 (Np-239)
14	Zr-97	32	I-133	50	Pu-240 (Cm-244)
15	Nb-95 (Zr-95)	33	I-134	51	Pu-241
16	Mo-99	34	I-135	52	Am-241 (Pu-241)
17	Tc-99m (Mo-99)	35	Xe-133 (I-133)	53	Cm-242
18	Ru-103	36	Xe-135 (I-135)	54	Cm-244

＜粒径分類の設定＞

- ・ 放射性物質を、粒径分類および放出グループ別粒径分類の分布比を設定する。
- ・ OSCAARでは通常、ガス状物質, 粒子状物質1(粒子状物質と無機よう素), 粒子状物質2(有機よう素)に分類する。

放出分類別粒径分類の分布比(%)					列全体をコピー		列全体を貼り付け	
		粒径分類\放出分類	希ガス	有機ヨウ素	無機ヨウ素	Cs-Rb類	Te-Sb類	Sr-Ba類
1		ガス状	100.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
2		粒子状1	0.00	0.00	100.00	100.00	100.00	100.00
3		粒子状2	0.00	100.00	0.00	0.00	0.00	0.00

図6.25 放出分類別粒径分類の分布比の設定

<沈着速度の設定>

- ・ 粒径分類(ガス状物質, 粒子状物質)に応じ, 乾性沈着速度, 洗浄係数の計算に用いる定数を設定する。
- ・ ガス状物質については, 通常は乾性・湿性沈着を考慮しない設定とする。

<乾性沈着>

- ・ 沈着速度[m/s]を設定する。
- ・ 粒子状物質, 無機よう素について0.001[m/s]

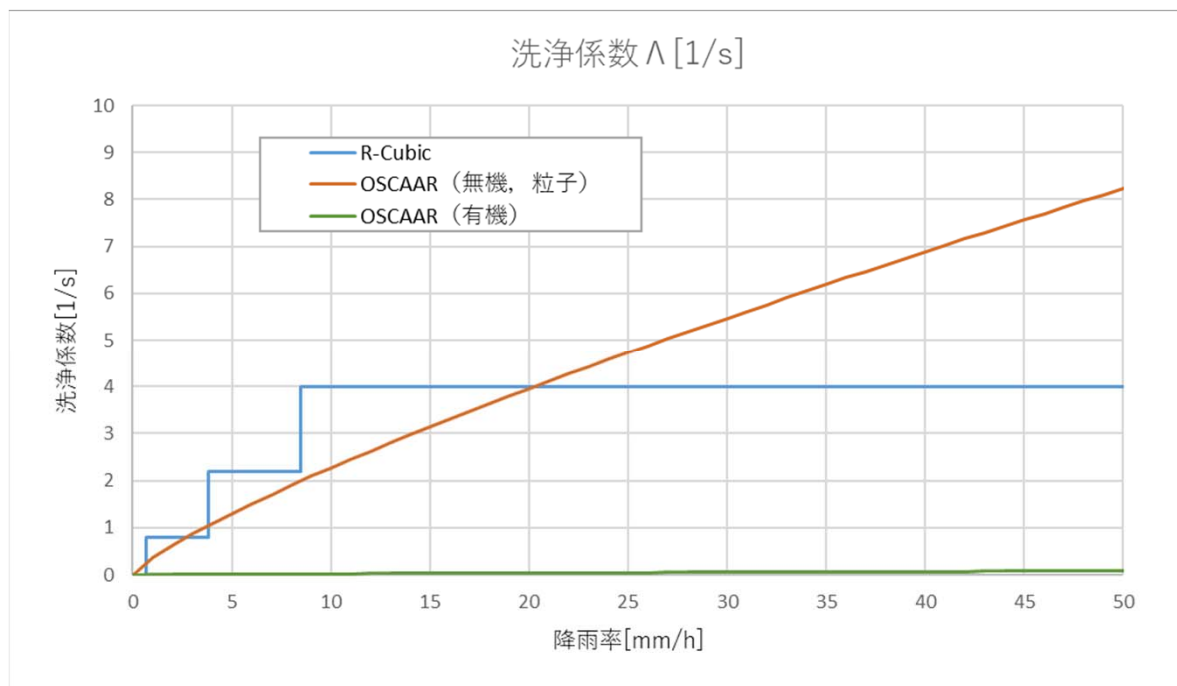
<湿性沈着>

- ・ 洗浄係数に係るパラメータを設定する。
- ・ OSCAARでは, 以下の関数により降雨率に応じた連続した値をとる。
- ・ $\Lambda = a \times R^b$
 - ・ Λ : 洗浄係数[1/s]
 - ・ a: 大気の状態による定数[h/mm/s]
 - ・ R: 降雨率[mm/h]
 - ・ b: 固定の定数
- ・ 定数a及びbの値は, 文献, コード又は評価条件等に応じて設定され, 幅を持つ値である。
- ・ 今回の評価(公開版OSCAAR)においては以下の設定となっている。

		粒径分類	沈着速度 (m/s)	洗浄係数a (h/mm/s)	洗浄係数b
1		ガス状	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00
2		粒子状1	1.000E-03	1.000E-04	8.000E-01
3		粒子状2	5.000E-04	1.000E-06	8.000E-01

＜降雨率による洗浄係数の変化＞

- OSCAARとR-Cubicの洗浄係数の降雨率に応じた変化を示す。
- 粒子状物質に対する洗浄係数は、降雨率が約20[mm/h]のまでの範囲ではR-CubicがOSCAARよりやや大きく、それ以上の降雨率ではOSCAARの方が大きくなる。



OSCAAR : $\Lambda = aR^b$	a	b
粒子状物質, 無機よう素	1.00E-04	0.8
有機よう素	1.00E-06	0.8

R-Cubic (Engelman 1968)		
降水のタイプ(*)	洗浄係数 [1/h]	洗浄係数[1/s]
軽度の降雨 [0.7mm/h]	0.79	2.19E-04
中度の降雨 [3.8mm/h]	2.2	6.11E-04
激しい降雨 [8.5mm/h]	4	1.11E-03

* RASCAL4.2、ZONE 3 (年間降水量>20inch)

<各種設定項目>

- 放出点：サイト情報として登録されている全国の原子力発電所の位置から選択する。
- 評価点：評価距離メッシュ(同心円の半径)を0.01km単位で25点設定可能。
- 計算結果出力：確率論的評価において結果を出力する核種, 距離メッシュ, 臓器を選択する。
- 早期防護対策を行う地域を, 最大で1000kmの範囲を設定可能。

<防護対策>

- 被ばく低減効果の解析のため, 防護の種類, 実施する時間, 範囲等を設定可能。
- 屋内退避：実施範囲(放出点からの距離), 開始時間, 完了時間, 屋内外の滞在時間の割合, 建物の遮蔽係数等を設定する。
- 安定ヨウ素剤の投与：投与時間を設定可能。
- 避難：開始時間, 避難完了時間を設定可能。
- その他：移転, 食物摂取制限について設定可能。

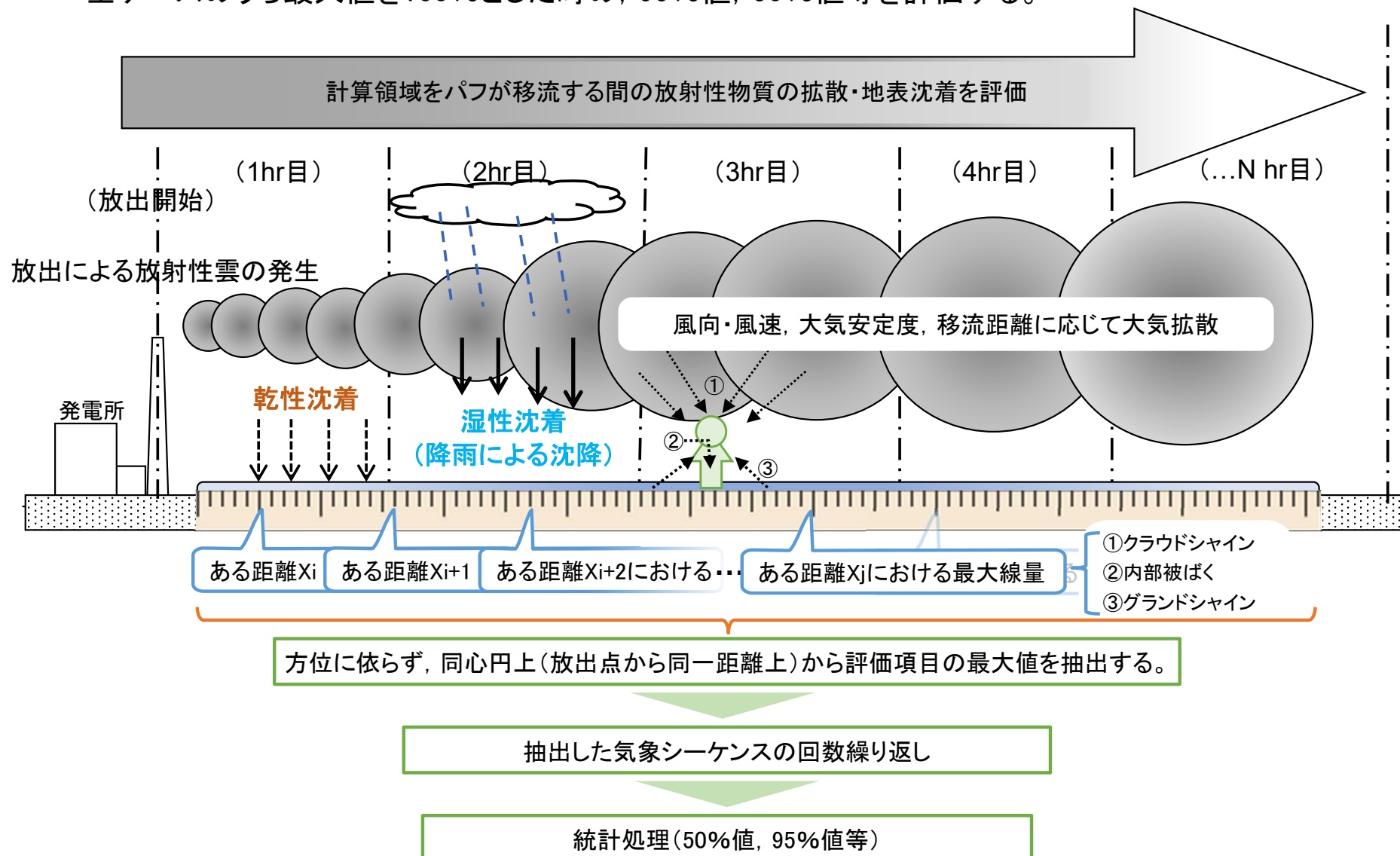
＜線量評価＞

- OSCAARの確率論的評価では、環境へ放出された放射性物質から人への被ばく経路として、以下の経路が考慮されている。
 - ① 放射性雲中の放射性物質からの外部被ばく(クラウドシャイン)
 - ② 通過中の放射性雲の直接の吸入による内部被ばく
 - ③ 地表沈着物質からの外部被ばく(グランドシャイン)
 - ④ 地表沈着物質の再浮遊に伴う吸入による内部被ばく
 - ⑤ 汚染された食物の摂取による内部被ばく
- 早期被ばく:EARLYで、上記の①, ②, ③の被ばく経路からの線量を、1日, 1-7日, 7-14日, 14-21日, 21-30日, 30-200日, 200-365日の7期間の期間別に評価する。
- 長期被ばく:CHRONICで、10年毎に③, ④, ⑤の被ばく経路からの線量を評価する。
- また、大気中積算濃度、地表沈着量の出力が可能となっている。
- 各気象シーケンスについて、同心円・方位線の交点(格子点)の値を評価する。
- R-Cubicとの比較において着目する地表沈着した放射性物質から実効線量への換算には、Federal Guidance Report No.12から、地表沈着(深さ0m)の値を採用している。

2. OSCAARによる評価手法: (5) 評価の実施

<線量評価(確率論的評価)>

- 1年間の全気象条件, もしくはサンプリングした気象条件による拡散評価, 被ばく評価を繰り返す。
- 評価された結果を, 同心円(同一距離)毎に統計処理を行う。
- 全ケースのうち最大値を100%とした時の, 95%値, 50%値等を評価する。



2. OSCAARによる評価手法：(6)評価結果の出力

<評価結果の出力>

- ・ 表計算ソフト用ファイルに評価結果の統計表及び距離別の被ばく線量等のグラフが出力される。
- ・ 大気中積算濃度，地表沈着量については，入力ファイル作成時に選択した核種について出力される。
- ・ 決定論的評価において，放出位置を中心とした拡散状況を示す図は出力されない。
- ・ R-Cubicとの比較において着目する地表沈着した放射性物質にから実効線量への換算には，Federal Guidance Report No.12を採用している。

計算結果	対象項目	確率論的評価	決定論的評価
大気中積算濃度 及び地表沈着量	大気中積算濃度	核種別方位平均値の統計表，グラフ（距離別パーセンタイル値，最大値・最小値等）	格子点（方位別・距離別）の表
	地表沈着量	〃	〃
早期被ばく	クラウドシャイン	臓器別方位平均値の統計表（距離別パーセンタイル値，最大値・最小値等）	格子点（方位別・距離別）の表
	グランドシャイン	〃	〃
	内部被ばく	〃	〃
	早期被ばく線量	〃	〃
長期被ばく	クラウドシャイン	臓器別方位平均値の統計表	格子点（距離・方位別）の表
	グランドシャイン	〃	〃
	内部被ばく	〃	〃
	早期被ばく線量	〃	〃

2. OSCAARによる評価手法：(6)評価結果の出力

<評価結果の出力>

- 表計算ソフト用ファイル形式の出力

決定論的評価における「格子点値の表」のイメージ

§1 大気中積算濃度及び地表沈着量

大気中積算濃度の全格子点値の表 核種名:CS-137

距離(m)	S	SSW	SW	WSW	W	WNW	NW	NNW	N	NNE	NE	ENE	E	ESE
500.0	1.85D+11	1.10D+11	4.66D+10	3.50D+10	1.60D+10	8.88D+10	1.18D+10	4.06D+10	7.74D+10	5.90D+10	5.60D+10	4.67D+10	5.33D+10	5.15D+10
1500.0	1.53D+10	1.51D+10	1.55D+10	7.16D+11	1.51D+11	5.84D+11	9.98D+10	5.44D+10	5.14D+10	4.31D+10	2.88D+10	4.00D+10	2.61D+10	8.85D+09
2500.0	1.43D+10	1.36D+10	1.01D+10	1.83D+11	1.01D+11	5.53D+11	4.85D+10	4.35D+10	3.80D+10	1.94D+10	2.16D+09	2.33D+09	2.70D+09	3.09D+09
3500.0	1.30D+10	1.22D+10	8.03D+09	8.02D+09	8.53D+09	3.05D+11	6.33D+10	4.21D+10	2.60D+10	1.58D+09	1.39D+09	1.66D+09	2.23D+09	2.87D+09
4500.0	9.40D+09	1.13D+10	7.70D+09	7.18D+09	7.76D+09	1.62D+11	5.63D+10	4.32D+10	1.69D+10	8.47D+08	7.69D+08	1.06D+09	1.74D+09	2.61D+09
5500.0	5.37D+09	1.09D+10	6.93D+09	4.40D+09	5.06D+09	8.84D+10	3.82D+10	5.42D+10	7.38D+09	4.02D+08	3.61D+08	6.06D+08	1.30D+09	2.34D+09
7000.0	2.76D+09	1.17D+10	2.47D+09	5.47D+08	9.80D+08	5.15D+09	1.22D+10	4.95D+10	1.37D+09	9.15D+07	8.35D+07	2.15D+08	7.76D+08	1.98D+09
9000.0	7.17D+09	7.50D+09	2.79D+07	1.95D+06	1.40D+07	6.77D+08	9.45D+09	2.22D+10	2.08D+08	5.97D+06	6.25D+06	3.80D+07	3.59D+08	1.62D+09
12500.0	4.53D+09	3.65D+06	9.45D+00	3.91D-01	1.42D+02	1.16D+06	1.07D+09	1.39D+10	1.09D+08	2.92D+03	1.11D+04	8.76D+05	7.85D+07	1.18D+09
17500.0	2.52D+06	9.42D-06	0.00D+00	0.00D+00	0.00D+00	0.00D+00	3.28D+05	1.94D+09	1.77D+08	0.00D+00	0.00D+00	3.17D-01	9.33D+06	7.66D+08
22500.0	3.72D-01	0.00D+00	0.00D+00	0.00D+00	0.00D+00	0.00D+00	0.00D+00	0.00D+00	2.16D+05	4.35D-02	0.00D+00	0.00D+00	1.33D-04	2.92D+06
27500.0	0.00D+00	0.00D+00	0.00D+00	0.00D+00	0.00D+00	0.00D+00	0.00D+00	0.00D+00	0.00D+00	0.00D+00	0.00D+00	1.55D-05	1.12D+06	7.01D+08

16方位

距離

確率論的評価における「方位平均値の統計表」のイメージ

A.2 地表沈着量

地表沈着量 方位平均値の統計表

地表沈着量 (Bq/m²) 核種: Cs-137

距離(km)	期待値	5%値	50%値	90%値	95%値	99%値	99.9%値	最小値	最大値	最大値のシー ケンス番号	影響 0 の確 率	期待値以 上の確率
5.00E-01	4.53E+06	#N/A	8.08E+04	1.05E+07	1.57E+07	1.36E+08	#N/A	#N/A	2.09E+08	120	1.240E-01	1.953E-01
1.50E+00	2.51E+06	1.56E+05	1.59E+06	4.10E+06	7.92E+06	2.76E+07	#N/A	9.42E+02	3.57E+07	419	#N/A	2.429E-01
2.50E+00	1.48E+06	2.25E+05	9.25E+05	2.33E+06	5.26E+06	1.46E+07	#N/A	4.54E+03	2.06E+07	180	#N/A	1.905E-01
3.50E+00	9.88E+05	2.15E+05	5.85E+05	1.71E+06	3.46E+06	9.71E+06	#N/A	1.09E+04	1.20E+07	377	#N/A	1.934E-01
4.50E+00	7.58E+05	1.64E+05	4.15E+05	1.46E+06	2.74E+06	7.86E+06	#N/A	6.35E+04	8.31E+06	377	#N/A	1.846E-01
5.50E+00	5.67E+05	1.30E+05	3.22E+05	1.07E+06	2.09E+06	5.71E+06	#N/A	6.89E+04	6.92E+06	336	#N/A	2.096E-01
7.00E+00	4.55E+05	9.46E+04	2.35E+05	8.48E+05	2.03E+06	4.77E+06	#N/A	4.81E+04	6.11E+06	336	#N/A	1.970E-01
9.00E+00	3.18E+05	6.41E+04	1.65E+05	6.26E+05	1.28E+06	3.42E+06	#N/A	3.27E+04	5.66E+06	336	#N/A	2.094E-01
1.25E+01	2.18E+05	3.81E+04	1.04E+05	4.72E+05	8.20E+05	2.28E+06	#N/A	1.71E+04	3.07E+06	336	#N/A	2.575E-01
1.75E+01	1.35E+05	2.19E+04	6.47E+04	3.29E+05	5.21E+05	1.03E+06	#N/A	6.14E+03	1.89E+06	386	#N/A	2.548E-01
2.25E+01	9.99E+04	1.46E+04	4.81E+04	2.30E+05	3.77E+05	9.17E+05	#N/A	5.62E+03	1.52E+06	144	#N/A	2.597E-01
2.75E+01	7.73E+04	9.55E+03	3.43E+04	1.89E+05	2.76E+05	8.53E+05	#N/A	3.60E+03	1.15E+06	252	#N/A	2.666E-01

確率

距離

3. R-Cubicとの比較

OSCAARおよびR-Cubicの概要を比較した表を示す。

	R-Cubic	OSCAAR	別冊 ページ
概要	株式会社原子力安全システム研究所(INSS)及び日本エヌ・ユー・エス株式会社(JANUS)の2社による共同開発したシステム。 事業者が所有し、防災訓練の事前評価等において放射性物質の拡散状況や防護措置範囲等を比較的簡便な操作により評価し、地図上に図示可能なツール。	JAEAの開発しているL3PRA研究用コード。 近年、内閣府(地域防災計画・避難計画の充実化の支援に資する技術的知見の整備事業)や原子力規制庁(緊急時の被ばく線量及び防護措置の効果の試算について、原子力災害事前対策等に関する検討チーム等)で活用されている。	P3
バージョン	2021.12版	2020.3公開版	P3
主な用途	事業者の防災訓練の事前検討等	確率論的評価による防護措置の効果の検討等	P3
拡散評価の対象範囲	当該ツールを所有者のプラントを中心とした評価のみ	全国の原子力発電所とJAEAを放出点とした評価が可能	P15
拡散モデル	パフモデル 拡散パラメータ: 気象指針	パフモデル 拡散パラメータ: Tadmor-Gurの近似式に基づくべき乗則	P6~9
気象条件の適用方法	発電所の観測データ(1時間値)を評価領域に適用 評価期間(約1週間)分の時系列データを入力	気象庁数値予報データ(GPVデータ)の1時間値 10km以内は放出点付近の観測データを入力可能 年間のデータを一括入力	P10~14
地形情報	「国土地理院発行 数値地図50mメッシュ(標高)」から評価モデル用データに変換	なし。ただし、GPVデータを用いることで地形を考慮した拡散評価といえる。	P10
大気安定度	日射・放射収支量と地上風速に基づく分類(気象指針)	実効日射インデックスと風速に基づく分類(Tuner(1964))	P12
放出源情報	本評価においては54核種を対象とした。 放出開始時間、放出継続時間、放出高さを設定可能	最大54核種 放出開始時間、放出継続時間、放出高さを設定可能	P15
粒径分類	ユーザによる設定はなし。 評価上は、放射性物質に応じて設定されたガス状、粒子状の分類に応じて評価。	ガス状、粒子状に分類。 粒子状は、2種(通常は、有機よう素、その他核種+無機よう素)に分類可能。	P15~16
乾性沈着	粒子状物質に対し0.003[m/s]	粒子状物質に対し0.001[m/s]	P16
湿性沈着	降雨率に応じた三段階の設定(RASCALを参考とした)	降雨率に応じた連続分布($\Lambda = a \times R^b$ 式)	P16~17

3. R-Cubicとの比較

	R-Cubic	OSCAAR	別冊 ページ
評価点	<u>正方メッシュ</u> 評価範囲を50×50に分割。メッシュサイズは、80km×80kmの 評価範囲において1.6km×1.6km メッシュの中心点を評価点としている。	<u>同心円メッシュ</u> 評価距離(25点)を設定。 同心円と方位線(32方位)の交点(格子点)を評価点として。 (格子点(距離・方位別)の表への出力は16方位分)	P18,19, 21,22
計算ステップ	10分毎(ただし、気象データは1時間統計値のため、評価にお いては6Step毎に同じデータを入力)	1時間毎	P14
グランドシャイ ン線量の評価 に用いる係数	安全審査指針, ICRP pub.38, ICRP pub.72 Federal Guidance Report No.12 Cs-137の地表沈着に対して, FGR No.12深さ0mの値を参照	Federal Guidance Report No.12 Cs-137の地表沈着に対して, FGR No.12深さ0mの値を参照	P19
防護対策の 解析	防護措置を考慮しない	被ばく低減解析のための各種措置を入力可能 (屋内退避時間, 遮蔽係数, 避難開始時間等)	P18
評価計算	<u>決定論的評価: 1つの気象条件による評価(事象発生から 約1週間における時系列変化)</u> <u>確率論的評価: 対応していない。</u>	<u>決定論的評価: 1つの気象条件による評価</u> <u>確率論的評価: 年間気象のサンプリング等の統計処理</u>	P14
評価項目	<u>決定論的評価: 経路別被ばく線量(全合計, 内部, 外部 外部のうちグランドシャインは核種別), 小児甲状腺等価線量, 地表沈着濃度(核種別), 空気カーマ率</u>	<u>決定論的評価: 大気中積算濃度, 地表沈着量(距離・方位別(2核種)), 経路別被ばく線量(実効線量と臓器別で計3種)</u> <u>確率論的評価: 大気中積算濃度, 地表沈着量(確率値), 健康影響リスク(確率値)</u>	P19～21
結果の出力 方法	<u>評価メッシュ毎, 指定した評価ステップにおける評価値。</u> <u>地図上への拡散状況等を表した図の表示。</u> <u>空間線量率を基にした防護措置範囲の図示。</u>	<u>決定論的評価: 格子点(距離・方位別)の表, 距離別グラフ。</u> <u>地図上への拡散状況等の表示機能は無し。</u> <u>確率論的評価: 核種別方位平均値の統計表, グラフ</u> 臓器別方位平均値の統計表 健康影響リスク方位平均値の統計表, グラフ	P19～21

4. 参考資料

- 本資料の作成に当たり、参考とした文献
- 本資料において使用した図、表について以下の文献より引用している。

	文献名	
1	OSCAARコードパッケージの使用マニュアル	JAEA-Testing 2020-001
2	原子力防災における大気拡散モデルの利用に関する考察	JAEA-Review 2021-021
3	OSCAAR 用気象データ作成プログラムGPV2OSC	JAEA-Data/Code 2024-006
4	令和2度原子力規制庁委託成果報告書 原子力施設等防災対策等委託費（被ばく解析手法の整備）に関する研究	

参考

第1回説明資料の抜粋

・ OSCAARコードに係る公開文献の例

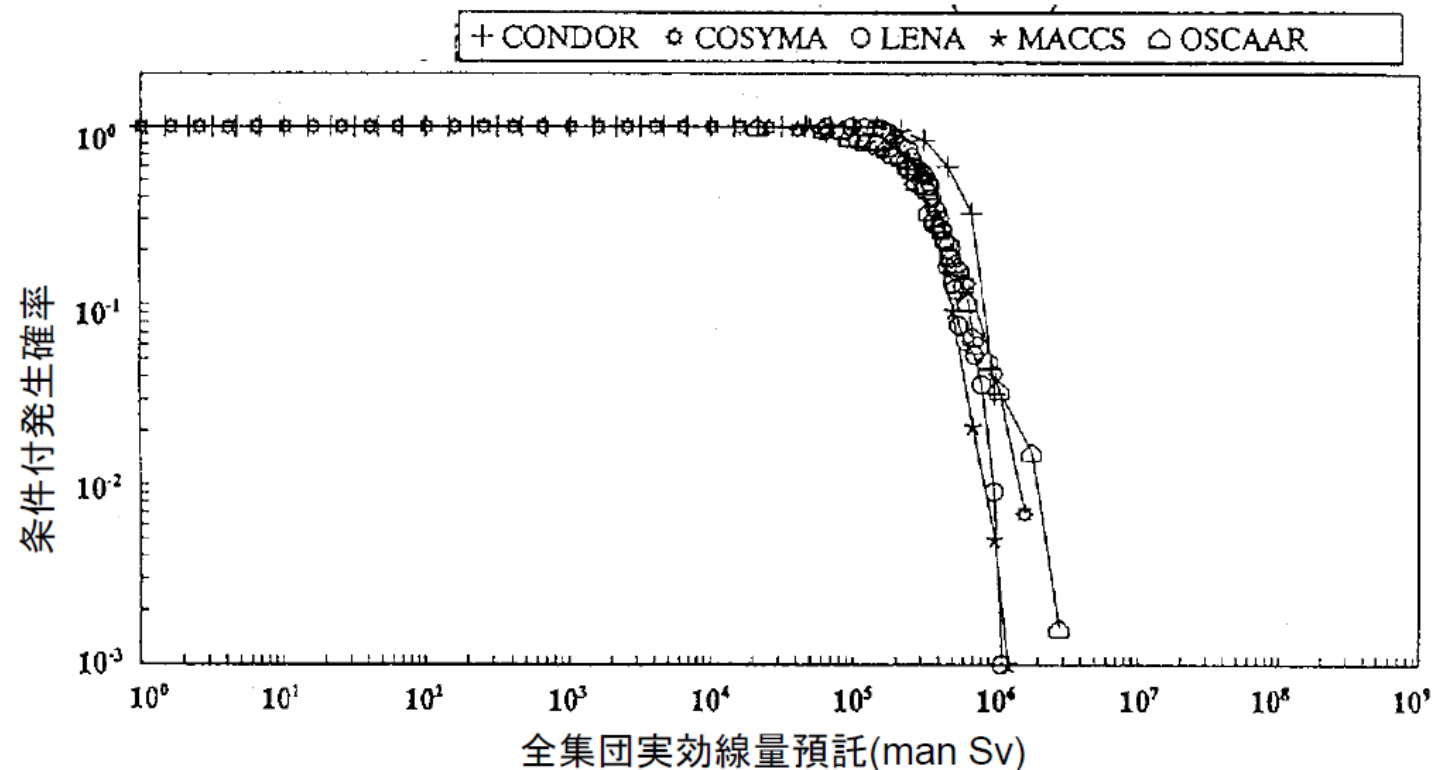
	文献(例)	概要
ベンチマーク等	BIOMASSテーマ2のハンフォード線量再構築シナリオに対するOSCAARコードの計算 (JAEA-Research 2000-049)	OSCAARをIAEA主催のBIOMASS計画のシナリオに適用した結果。 I-131の大気中拡散・沈着及び食物連鎖移行モデルを実測データを用いて検証した。
	《特集: 原研におけるチェルノブイリ研究協力》 II. 事故影響評価モデルの検証 (保健物理, 36 (4), 308～313 (2001))	・チェルノブイリ周辺の実環境で得られた測定データを用いて評価モデル及びモデルパラメータの検証を行った。 ・サイト近傍の早期被ばく線量の推定に関する OSCAAR の適用研究も実施した。
	令和2度原子力規制庁委託成果報告書 原子力施設等防災対策等委託費(被ばく解析手法の整備)に関する研究	・OSCAARの大気拡散・沈着解析モデル, 被ばく評価モデル及び防護措置解析モデルについて, モデルの改良の検討。OSCAARで用いる評価モデルを検討するため, 確率論的環境影響評価の実施に必要な項目を整理した。 ・OSCAARとMACCS2, OSCAARとRAMS/HYPACTのベンチマークを実施
使用実績	確率論的安全評価(PSA)手法に基づくPAZの検討(原子力安全委員会 防災指針検討ワーキンググループ(第4回会合)配付資料) 【活用例①参照】	BWR 及びPWR の代表プラントの内の事象に関する確率論的安全評価(PSA)の情報参考にOSCAAR を用いてPAZ のめやす範囲を検討した。様々な事故シーケンスに対し平均的な気象条件を仮定した場合、確定的影響を防止するための防護指標(線量レベル)を超える線量となる範囲は、概ね3 km以内に収まる結果となった。
	緊急時の被ばく線量及び防護措置の効果の試算について 【活用例②参照】	関係自治体において、リスクに応じた合理的な準備や対応を行うための参考とすることを目的として、仮想的な事故における放出源からの距離に応じた被ばく線量と予防的防護措置による低減効果の全体的な傾向を捉えるための試算
	放射線防護対策を施した屋内退避施設における被ばく線量評価及び技術的知見の整備	様々な条件における屋内退避の効果の評価し、技術的知見を整備した。(平成29年度～平成31年度に実施した内閣府「原子力防災研究事業」において得られた成果であり、内閣府による「原子力災害発生時の防護措置—放射線防護対策が講じられた施設等への屋内退避—」に活用されている)
	原子力災害時の屋内退避の運用に関する検討チーム 【活用例③参照】	OSCAARによる拡散シミュレーションを実施し、重大事故等対策が奏功した場合には、UPZ全域で屋内退避を一斉解除できる程度に被ばく線量が低くなる蓋然性が高いことを確認

ベンチマーク例: NEA/CEC国際比較計算(1991-1994)

総合資源エネルギー調査会原子力の自主的安全性向上に関するWG 第3回会合「資料3 レベル3PSAの現状」(JAEA安全研究センター 本間俊充氏)より抜粋

- OECD/NEAとCECの共催で、1991-1994年に実施された。
- 参加コードの予測結果を比較し、相違の原因を明らかにすると共に、コードのQA(品質保証)に役立てることを主たる目的とした。
- コード間の評価結果の相違の程度は、評価項目で異なっていたが、一般的には数ファクター以内であった。主たる相違の原因は、モデル構造と採用された仮定の相違による。

(例)計算課題1
・ソースターム
放出開始時間: 2時間
放出継続時間: 1時間
放出高さ: 10m
警告時間: 1時間
放出比: Xe-Kr: 1.0, Org-I: 0.001, I: 0.1, Cs-Rb: 0.1, Te-Sb: 0.1, Ba-Sr, Ru: 0.01, La: 0.001
・防護対策
屋内退避、避難、移転、食物摂取制限



活用例①:確率論的安全評価(PSA)手法に基づくPAZの検討

解説3-4 範囲のめやす

「原子力施設等の防災対策について」の見直しに関する考え方について 中間とりまとめ
(平成24年3月22日、原子力安全委員会
原子力施設等防災専門部会 防災指針検討
ワーキンググループ)より抜粋

(1) 確率論的安全評価 (PSA) 手法に基づく PAZ の検討

平成 21 年度「発電用原子炉施設の災害時における予防的措置範囲（PAZ）の調査（内閣府受託報告書）」（日本原子力研究開発機構，平成 22 年 3 月）では、BWR 及び PWR の代表プラントの内的事象に関する確率論的安全評価（PSA）の情報を参考に、原子力機構の確率論的環境影響評価（レベル 3PSA）コード OSCAAR を用いて PAZ のめやす範囲を検討した。

その結果、図 5 に示すように、様々な事故シーケンスに対し平均的な気象条件を仮定した場合、確定的影響を防止するための防護指標（線量レベル）を超える線量となる範囲は、概ね 3 km 以内に収まっていることが明らかになった。

PSA手法に基づくPAZの検討 - PAZのめやす範囲の検討 -

- 1日間骨髄線量(経路合計: cloud+ground+inhalation, 気象の出現確率50%)

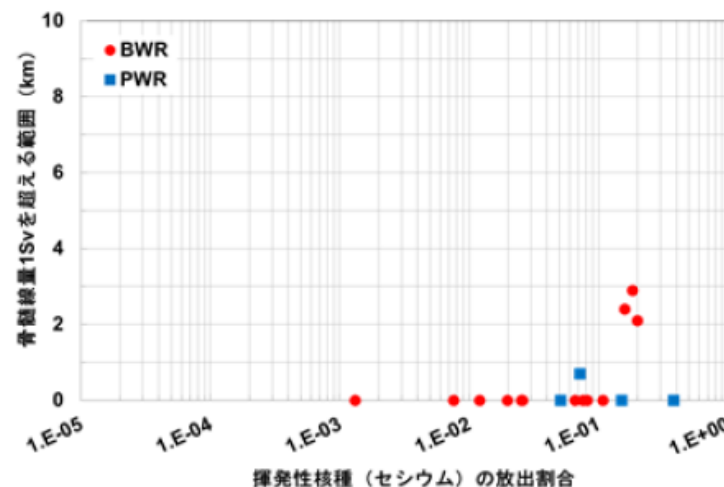
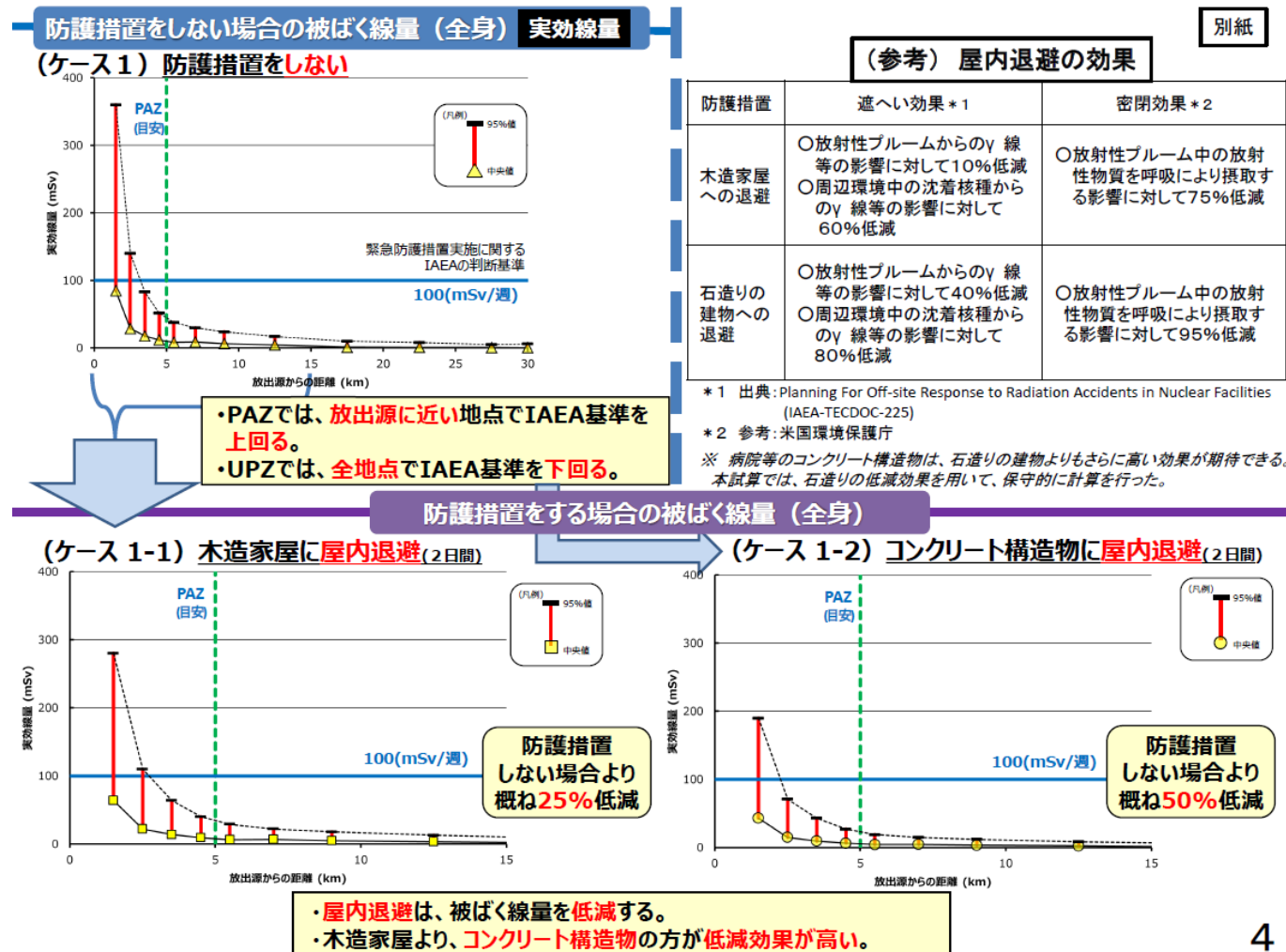


図 解 3-2 PAZ のめやす範囲の検討

活用例②：緊急時の被ばく線量及び防護措置の効果の試算について（案）（平成26年5月28日，原子力規制委員会）

関係自治体において，リスクに応じた合理的な準備や対応を行うための参考とすることを目的として，仮想的な事故における放出源からの距離に応じた被ばく線量と予防的防護措置による低減効果の全体的な傾向を捉えるための試算を実施



活用例③：原子力災害時の屋内退避の運用に関する検討チーム

OSCAARによる拡散シミュレーションを実施し、重大事故等対策が奏功した場合には、UPZ全域で屋内退避を一斉解除できる程度に被ばく線量が低くなる蓋然性が高いことを確認

第2回（令和6年5月20日 資料2より）

2. 解析に用いる被ばく線量評価コードの概要

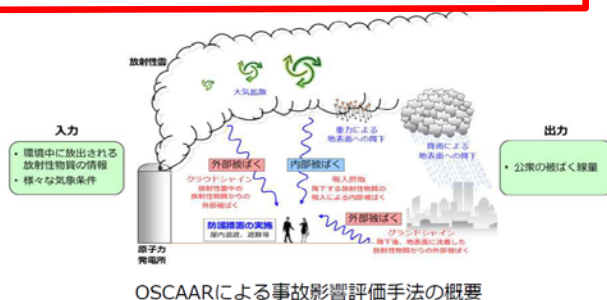
✓ 被ばく線量評価コードは、JAEAが開発した確率論的事故影響評価コードOSCAAR（オスカー）※を用いる。※OSCAAR: Off-Site Consequence Analysis code for Atmospheric Release in Reactor Accident

✓ OSCAARは原子力施設から放出される放射性物質の種類・量などを設定して、実際の気象状況を踏まえた拡散計算を行い、原子力施設からの距離ごとの被ばく線量の傾向を評価するもの。

✓ 原子力規制委員会は、原子力災害対策に係る過去の検討において、当該解析コードを用いた被ばく線量評価を複数回実施してきており、それらの実績を踏まえ、今回の検討においても引き続きその活用を図るものとする。

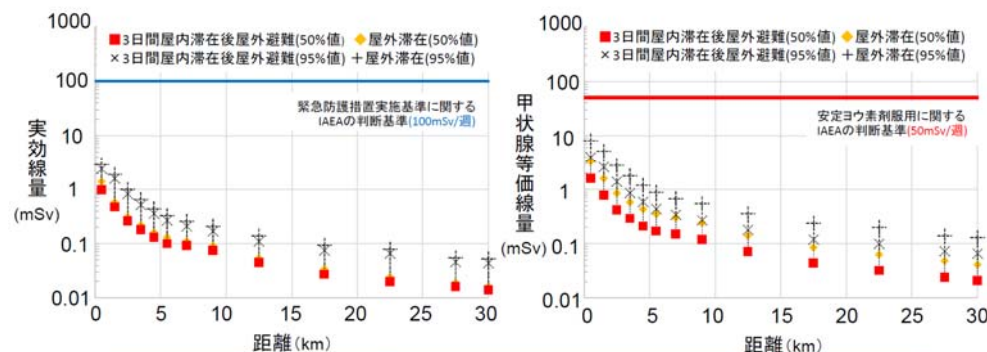
【OSCAARの特徴】

- 原子力施設の事故解析で得られた核種の放出源情報（ソースターム）をもとに、大気拡散・沈着解析、被ばく評価及び防護措置解析に関する一連の評価・解析手法を統合。
- 多様な事故条件及び気象条件を考慮することで、事故の影響を幅広く網羅的に評価することが可能。
- 出力として公衆の被ばく線量（距離ごとの実効線量等）を表示。



第5回（令和6年9月30日）資料1-2より

ケースB 代替循環冷却系による格納容器除熱を実施するケース（BWR）



4.5km地点 ⁽¹⁾ の50%値における経路別の寄与割合	外部被ばく		内部被ばく
	放射線雲	沈着核種	吸入摂取
実効線量	88%	2%	10%
甲状腺等価線量	38%	1%	61%

(1) 経路別の寄与割合については距離に対する依存性がないため、代表して4.5 kmのものを記載

- ケースAと比べて、希ガス類の割合が大きくなり、ヨウ素やCs類の寄与が小さくなる。このため、吸入摂取の寄与割合が小さくなり、放射線雲からの外部被ばくの割合が大きくなる。
- 放射線雲からの寄与割合が大きくなるので、被ばく低減効果は、ケースAよりも比べて低くなっている。

ケースB（漏えいケース）

著しい炉心損傷が生じるが、格納容器破損防止対策（格納容器内の冷却及び除熱）が奏功し、格納容器が破損せず、格納容器圧力に応じた放射性物質の漏えいが生じるケース

第三者検証委員会 (第2回) システム・解析コードの信頼性

2023年1月27日
日本原子力発電株式会社

● 議題：システム・解析コードの信頼性

今回の説明概要

- R-Cubicの概要・特徴
- 評価の流れと拡散モデル, 計算の方法
- 今回の評価におけるR-Cubicの信頼性(適用性)

システム・解析コードの信頼性	頁
1. R-Cubicの概要と特徴	3
2. R-Cubicの選定理由と信頼性の確認	5
3. R-Cubicによる拡散評価	
(1) 拡散評価の流れ	6
(2) 設定項目	7
(3) 拡散モデルについて	8
(4) 評価計算	10
(5) 評価結果の出力	14
3. 今回の評価におけるR-Cubicの信頼性	15

放射性物質の放出量，気象条件等から，放射性物質放出後の各地点における空間線量率等の評価が可能なシステム

・ R-Cubicの概要

名称	R3(R-Cubic) (Radioactive Release, Radiation Dose and Radiological Protection Area Prediction System)
開発者	株式会社 原子力安全システム研究所(INSS)および日本エヌ・ユー・エス株式会社(JANUS)の2社による共同開発（拡散予測に関しては米国NRCが使用しているシステムを参考に開発）
機能※	放出量及び気象の経時変化に基づき，放射性物質の拡散を模擬する。 拡散状況から，特定地点における時系列の空間線量率等を評価する。
特徴	一般的なWindows PCにおいて動作し，簡便な操作で評価可能
用途例	原子力施設における防災訓練における線量予測評価等

※：放出量評価機能も有するが今回の評価では使用していない。

・ 今回の拡散シミュレーションにおいて使用した主な設定等

評価モデル	パフモデル(3次元移流拡散モデル)
周辺地形情報	「国土地理院発行 数値地図50mメッシュ(標高)」から評価モデル用の地形データに変換
評価範囲	80km×80km(東海第二発電所を中心とした半径40km範囲を含むR-Cubicの設定において使用可能な地図範囲)
放出地点	原子炉建屋，地上放出
気象データ	東海第二発電所の観測値(2020年度)
評価期間	放射性物質の放出開始から24時間後 (原子力災害対策指針で，OIL2は「1日以内を目途に区域を特定する」とされていることを踏まえて設定)
対象核種	セシウム，ヨウ素等の合計54核種(地表面からの線量率に寄与する核種)
評価項目	防護措置範囲(グランドシャインによる空間線量率がOIL1，2の基準を上回る範囲)

1. R-Cubicの概要と特徴(2/2)

	他コードの例①(MACCS2)	他コードの例②(SPEEDI)	R-Cubic
概要	規制当局が、2012年12月の拡散シミュレーションに用いた評価コード	規制当局が所有する緊急時の線量等予測システム	事業者が所有する緊急時用の迅速拡散評価ツール
拡散モデル	ガウスプルームモデル	粒子モデル(地形考慮可)	パフモデル(地形考慮可)
気象条件の取り扱い	1年間分の気象データ(8760個)を入力	気象データの経時変化(オンラインデータ)	気象データの経時変化(発電所の観測データ等の入力)
評価対象	任意の期間(7日間以内)の積算線量	特定地点における時系列の線量率等の評価	特定地点における時系列の線量率等の評価, OIL1,2範囲の表示機能
結果 (イメージ)			
用途例	原子力発電所のリスク評価	緊急時の線量予測評価	防災訓練における線量予測評価

注: 図は評価結果の例であり, 今回の報告とは関係ない

● R-Cubicの特徴

事業者が所有し, 防災訓練の事前評価等において放射性物質の拡散状況や防護措置範囲等を比較的簡便な操作により評価し, 地図上に図示可能なツール。

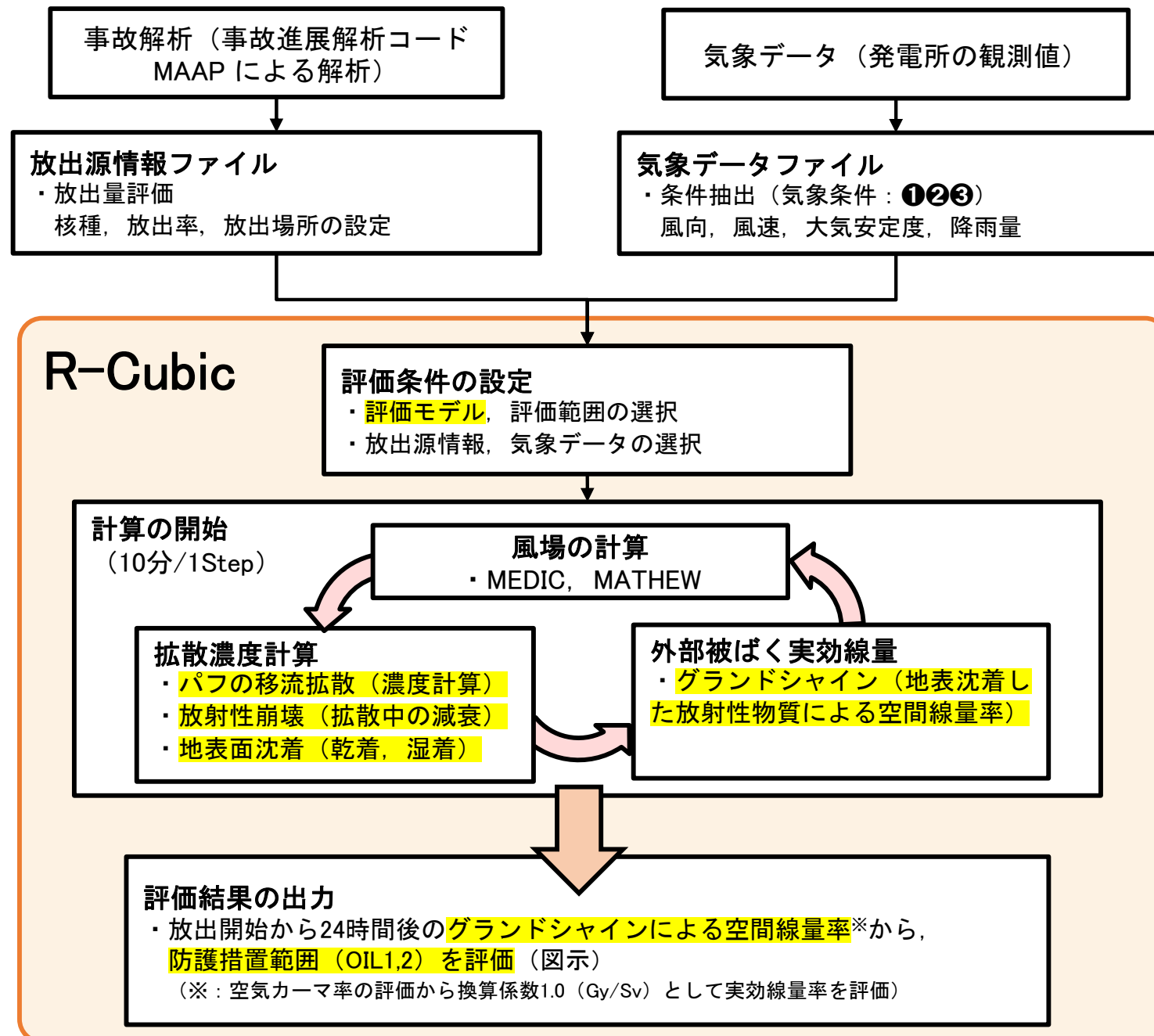
● R-Cubicの選定理由

実気象を用いた拡散評価が可能なコードとして当初検討したMACCS2では、空間線量率の計算結果や地図上での範囲表示が不可能であることから、今回の要請の趣旨（避難・一時移転の範囲の確認）を踏まえ、事業者（当社）が所有し、放射性物質の拡散状況进行评估し、地図上に図示可能であるR-Cubicを選定した。

- 以降では、R-Cubicの信頼性について、今回実施した評価の流れに沿って、以下の観点から説明する。

観 点	概 要
拡散評価手法（拡散モデル）	評価モデルと計算方法
地表沈着濃度の計算	乾着・湿着の計算方法
空間線量率の計算	地表沈着濃度から空間線量率への換算方法
防護措置範囲の評価	空間線量率による防護措置範囲の評価

2. R-Cubicによる拡散評価：(1) 拡散評価の流れ



2. R-Cubicによる拡散評価:(2)設定項目

● 評価範囲

- 東海第二発電所を中心に80km×80km範囲(UPZ圏を内包する範囲)
- 評価範囲を50×50の評価領域に分割し, 領域メッシュ(1.6km×1.6km)毎に線量率等を計算
- 風場計算のための鉛直メッシュは, 50m×20
- 地形情報は,「国土地理院発行 数値地図50mメッシュ(標高)」から評価モデル用データに変換

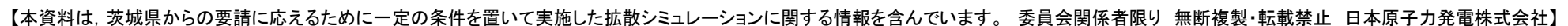
● 放出源情報

- 対象核種:Cs, I等の54核種(地表面からの線量率に寄与する核種を選定)
- 放出継続時間:1~4時間(I-131は約11時間)
- 放出位置の設定
 - ・ 平面位置:原子炉建屋
 - ・ 放出高さ:地上放出(GL.0m)(格納容器破損に伴う原子炉建屋からの漏えい)

● 気象データの設定

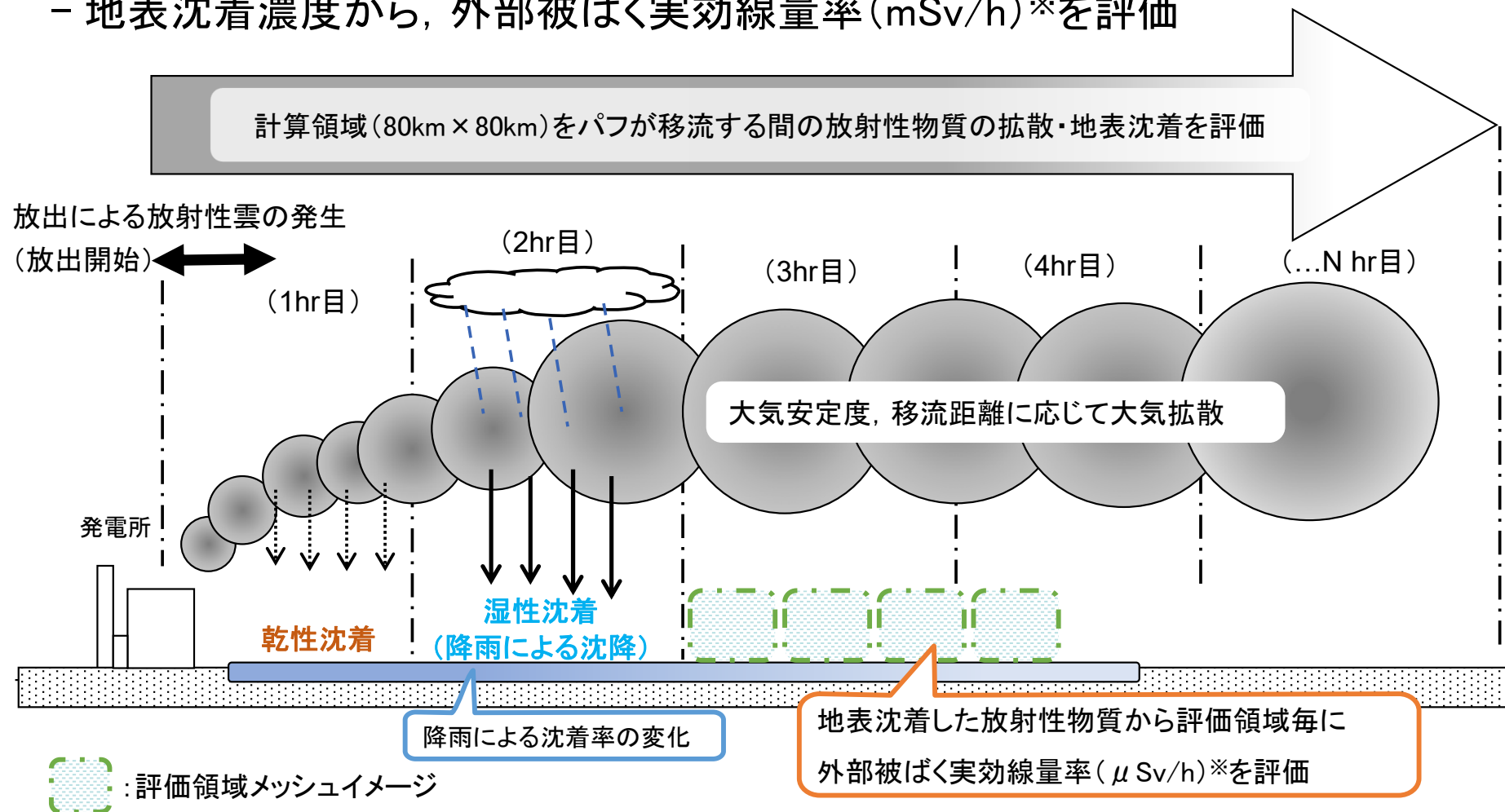
- R-Cubicへの入力
 - ・ 東海第二発電所で観測された気象データから条件抽出(別途説明)
 - ・ 風向・風速(地上高, 高所), 大気安定度, 降雨量の経時変化を入力
- R-Cubic内の処理(風場の計算)
 - ・ 風向・風速:入力の風向・風速から全メッシュ点の風速成分へ変換
MEDIC:各メッシュにおける2次元風速場の計算
MATHEW:地形を考慮し, 質量保存則を満たすように修正計算
 - ・ 大気安定度:領域内一定
 - ・ 降水量:領域内一定

- もう一つの一般的なモデルであるガウスプルームモデルの場合は、
- ・地形を考慮しない、
 - ・風向風速が時間空間的に一様である
- といった条件の下、簡易評価に用いられる。



●地表沈着濃度，空間線量率の評価

- 放射性物質の拡散(空气中濃度)の評価に基づき，乾性沈着，湿性沈着による地表沈着濃度を評価
- 地表沈着濃度から，外部被ばく実効線量率(mSv/h)※を評価



※実際には評価地点の空間放射線量率(空気カーマ率)を評価しているが，換算係数 $1.0(\text{Sv/Gy})$ で実効線量率に換算

●パフモデルにおける地表空气中濃度の計算

地形変化，気象条件の経時変化を考慮して，10分周期のタイムステップ毎に計算する。

$$\chi_i(x, y, 0) = \frac{Q_i}{(\sqrt{2} \cdot \pi^{3/2} \sigma_y^2 \sigma_z^2)} \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2}{\sigma_y^2} \right) \right] \cdot \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{h}{\sigma_z} \right)^2 \right] \quad (1)$$

- $\chi_i(x, y, 0)$: 地表の座標(x,y,0)における核種iの空气中濃度(Bq/m³)
- Q_i : 核種iの放出量 (Bq)
- σ_y, σ_z : 水平(x,y)方向及び鉛直方向の大気安定度依存拡散パラメータ(m)(定数に係る記載は省略)

$$\sigma_y(x) = 0.67775 \cdot \theta_{0.1} \cdot (5 - \log_{10}(x)) \cdot x \quad (2)$$

$$\sigma_z(x) = \sigma_1 \cdot x^{(a_1 + a_2 \log(x) + a_3 (\log(x))^2)} \quad (3)$$

- (x_0, y_0, h) : パフ中心の位置座標(m), hは地表からの高さ

風下距離大で $\sigma_z \geq H$ (H: 混合層高さ, H=1,000m) の場合，鉛直濃度分布はz=0～Hの範囲で一定と仮定する

$$\chi_i(x, y, 0) = \frac{2Q_i}{(2\pi)\sigma_y^2 H} \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2}{\sigma_y^2} \right) \right] \quad (4)$$

● 乾着量

$$\Delta Q_i(x, y) = -v_{i,dd} \cdot \chi_i(x, y, 0) \cdot \Delta t \quad (5)$$

- $\Delta Q_i(x, y)$: 地表面位置 (x, y) におけるタイムステップ Δt (s) の乾着量 (Bq/m^2)
- $v_{i,dd}$: 核種 i の乾着速度 (m/s) ただし, 全ての粒子状物質について = 0.003 m/s
- $\chi_i(x, y, 0)$: 核種 i の地表空气中濃度 (Bq/m^3)

● 湿着量

$$\Delta Q_i(x, y) = -\lambda_p \cdot \Delta t \cdot \int_0^\infty \chi_i(x, y, z) \cdot dz \quad (6)$$

- $\Delta Q_i(x, y)$: 地表面位置におけるタイムステップ(s)の湿着量 (Bq/m^2)
- λ_p : 核種 i についての洗浄係数 (1/s) (降雨率に依存(Engelman 1968による))
- $\chi_i(x, y, z)$: 核種 i の地表空气中濃度 (Bq/m^3)

パフの場合, 空气中濃度として(4)式を代入して計算する

$$\Delta Q_i(x, y) = -\lambda_p \cdot \Delta t \cdot \frac{Q_i}{2\pi \cdot \sigma_y^2} \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2}{\sigma_y^2} \right) \right] \quad (7)$$

- (x_0, y_0) : パフの中心位置 (km, km)
- (x, y) : 計算地点の位置座標 (km, km)

● 地表面沈着量(乾着量+湿着量)

$$\Delta Q_i(x, y) = v_{i,dd} \cdot \chi_i(x, y, 0) \cdot \Delta t + \lambda_p \cdot \int_0^\infty \chi_i(x, y, z) dz \cdot \Delta t \quad (8)$$

- $\Delta Q_i(x, y)$: (x, y) 地点における $t=t \sim t+\Delta t$ の地表面沈着量を示す。
- (x, y) 地点におけるの積算地表面沈着量は, 次式で計算される。

$$Q_i(x, y) = \sum_{\Delta t} \Delta Q_i(x, y) \quad (9)$$

洗浄係数(Engelman 1968)

降水のタイプ*	洗浄係数 (1/h)
軽度の降雨 (0.7mm/h)	0.79
中度の降雨 (3.8mm/h)	2.2
激しい降雨 (8.5mm/h)	4.0
*: タイプ別降水量の数値はRASCAL4.2, ZONE3 (年間降水量>20inch)を引用	

● 地表沈着による大気中の放射性物質量の減少

$$\Delta Q_i(\Delta t) = \sum_x \sum_y \Delta Q_i(x, y) \quad (10)$$

パフの時刻 $t + \Delta t$ における大気中の放射性物質量は, (8)式の全沈着量の分減少する。

$$Q'_i(t + \Delta t) = Q'_i(t) - Q'_i(\Delta t) \quad (11)$$

● その他

- 空気カーマ率は, 換算係数1.0(Sv/Gy)にて換算
- 経過時間による放射性崩壊を考慮する。
- 移流拡散中のプルームライズは考慮しない。
- 移流拡散中の重力沈降は考慮しない。
- 放出後の放射性崩壊により生成した核種の影響は考慮しない。

2. R-Cubicによる拡散評価：(4)評価計算（地表面濃度から空間線量率への換算）



● 地表面沈着濃度から空間線量率への換算

- 防護措置範囲(OIL1, OIL2)に該当する範囲を判断するに当たり, 地表沈着した放射性物質からの空間放射線量率を評価する。(空間放射線量率(空気カーマ率)を評価しているが, 換算係数1.0(Sv/Gy)で実効線量率に換算)
- 空間放射線量率は, 地面粗度因子×地表沈着量×線量係数×被ばく時間 で計算される。

$$D_{GS}(x, y; \Delta t) = SRF \cdot \sum_i DCF_i \cdot Q_{i,DEP}(x, y; t) \cdot \Delta t \quad (12)$$

- $D_{GS}(x, y; \Delta t)$: タイムステップ Δt (s) のグランドシャイン線量核種合計 (Sv)
- SRF : 地面粗度因子 (1.0)
- DCF_i : 核種 i のグランドシャイン線量変換係数 (Sv/s/(Bq·m⁻²))
- $Q_{i,DEP}(x, y; t)$: 核種 i の地表沈着濃度

核種別 グランドシャイン実効線量換算係数(今回評価に使用した54核種)

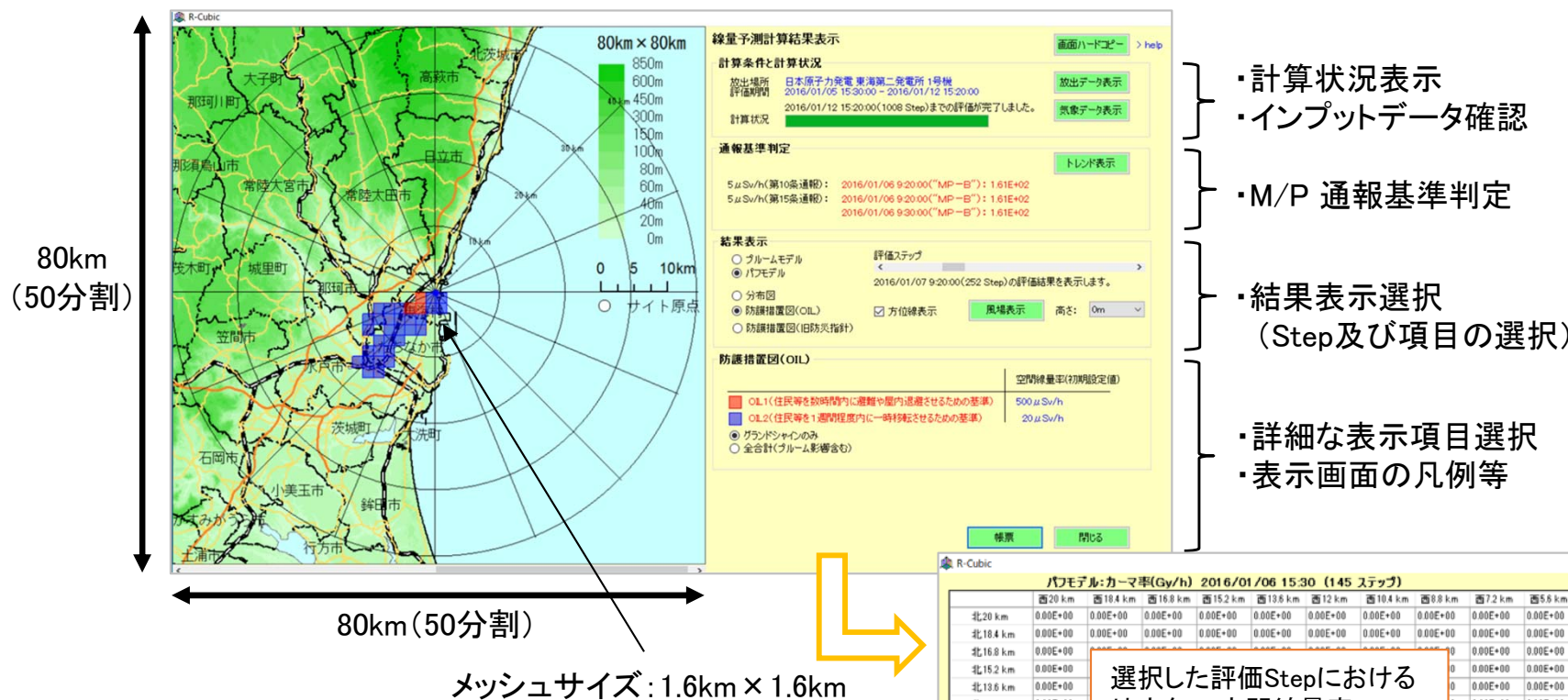
核種	半減期	単位	実効線量 変換係数 [Sv/(Bq·s·m ⁻²)]	核種	半減期	単位	実効線量 変換係数 [Sv/(Bq·s·m ⁻²)]	核種	半減期	単位	実効線量 変換係数 [Sv/(Bq·s·m ⁻²)]	核種	半減期	単位	実効線量 変換係数 [Sv/(Bq·s·m ⁻²)]
Co-58	70.8	d	9.50E-16	Tc-99m	6.02	h	1.21E-16	I-131	8.06	d	3.76E-16	Ce-141	32.5	d	7.38E-17
Co-60	5.27	y	2.35E-15	Ru-103	39.28	d	4.63E-16	I-132	2.28	h	2.21E-15	Ce-143	33	h	2.79E-16
Rb-86	18.66	d	9.31E-17	Ru-105	4.44	h	7.69E-16	I-133	20.8	h	5.97E-16	Ce-144	284.3	d	2.03E-17
Sr-89	50.5	d	2.27E-18	Ru-106	368.2	d	0.00E+00	I-134	52.6	min	2.53E-15	Pr-143	13.56	d	7.01E-19
Sr-90	28.5	y	2.84E-19	Rh-105	35.36	h	7.62E-17	I-135	6.61	h	1.47E-15	Nd-147	10.98	d	1.39E-16
Sr-91	9.5	h	6.77E-16	Sb-127	3.85	d	6.76E-16	Cs-134	2.06	y	1.52E-15	Np-239	2.355	d	1.63E-16
Sr-92	2.71	h	1.25E-15	Sb-129	4.32	h	1.38E-15	Cs-136	13.1	d	2.09E-15	Pu-238	87.74	y	8.38E-19
Y-90	64.0	h	5.32E-18	Te-127m	109	d	1.13E-17	Cs-137	30	y	2.85E-19	Pu-239	24065	y	3.67E-19
Y-91	58.51	d	5.74E-18	Te-127	9.35	h	5.18E-18	Ba-139	82.7	m	4.59E-17	Pu-240	6537	y	8.03E-19
Y-92	3.54	h	2.53E-16	Te-129m	33.6	d	3.78E-17	Ba-140	12.8	d	1.80E-16	Pu-241	14.4	y	1.93E-21
Y-93	10.1	h	9.12E-17	Te-129	69.6	m	6.01E-17	La-140	40.27	h	2.16E-15	Am-241	432.2	y	2.75E-17
Zr-95	65.5	d	7.23E-16	Te-131m	30	h	1.37E-15	La-141	3.93	h	4.54E-17	Cm-242	162.8	d	9.56E-19
Zr-97	16.9	h	1.74E-16	Te-132	78.2	h	2.28E-16	La-142	92.5	m	2.46E-15	Cm-244	18.11	y	8.78E-19
Nb-95	35.1	d	7.48E-16												
Mo-99	66.0	h	1.47E-16												

主な出典: 原子力安全審査指針等, ICRP pub.38, ICRP pub.72,
Federal Guidance Report No.12 Eckerman & Ryman (1993)

2. R-Cubicによる拡散評価: (5) 評価結果の出力

● 評価結果出力画面

- 任意の評価ステップにおいて、地表濃度等の項目を選択し状況を地図上に図示(下図参照)
- 今回の拡散シミュレーションにおいては、放射性物質の放出から24時間後の地表沈着による空間線量率から防護措置範囲(OIL1 $>500\mu\text{Sv/h}$, OIL2 $>20\mu\text{Sv/h}$)に該当する地点を評価し、提示している。(注:メッシュは、R-Cubicの設定条件として評価範囲に対し50×50分割で固定。茨城県の設定する避難・一時移転を実施する単位とは一致しない。)



注: 図は評価結果の例であり、今回の報告の内容とは関係ない。

- R-Cubicの拡散評価機能について、今回の要請に基づく評価への信頼性についてまとめる。

項 目	評価手法等の妥当性	信頼性
拡散評価手法 (拡散モデル)	風場の時間変化や地形情報を考慮した評価を行うのに適したパフモデルが使用できる。一般的な環境アセスメントでも使用されている計算手法用いており問題ない。	○
地表沈着濃度の計算	文献値に基づき、乾着及び降雨の影響を踏まえた沈着量(湿着)の計算がされており問題ない。	○
空間線量率の計算	文献値に基づき、地表沈着濃度から空間線量率に換算しており問題ない。	○
防護措置範囲の評価	原子力災害対策指針の値に基づき、空間線量率の評価値から該当する範囲を図示しており問題ない。	○

以上より、今回の要請に基づく評価における、R-Cubic(拡散評価機能)の信頼性が確認できたものとする。

END