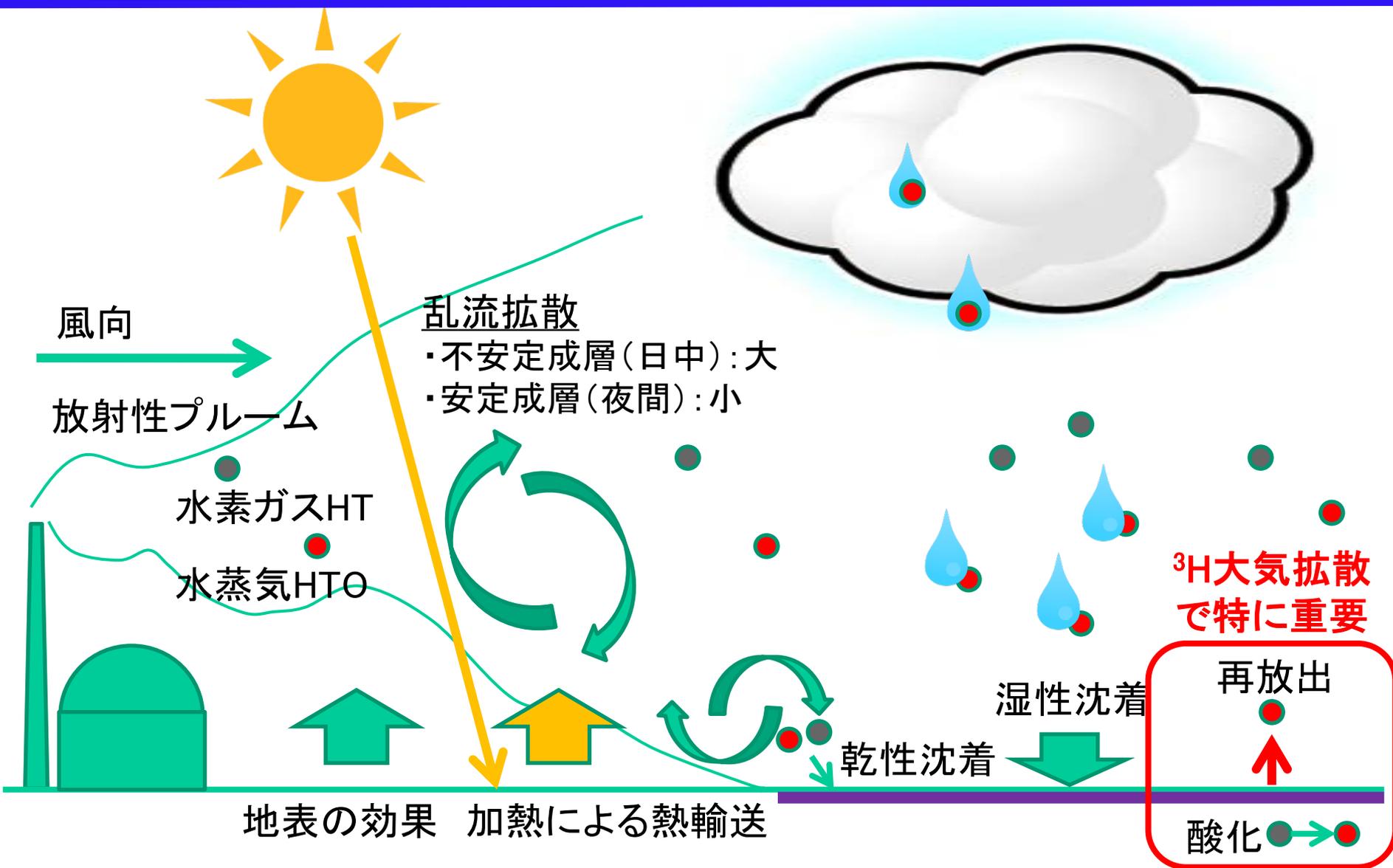


# トリチウムの環境中における拡散現象 — 評価モデルの考え方 —

日本原子力研究開発機構  
原子力基礎工学研究部門  
環境動態研究グループ



放出時の気象条件で拡散状況は大きく異なり、単純な評価はできない

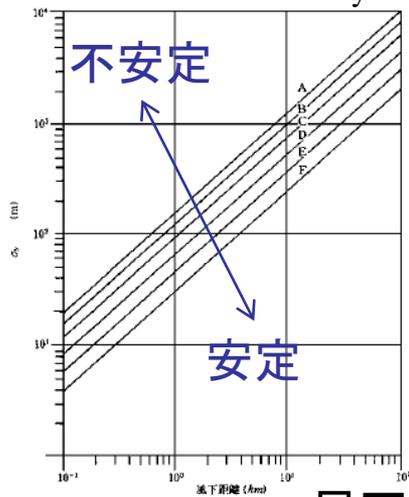
<p>ガウス・プルームモデル 例: 米国MACCS2</p>		<ul style="list-style-type: none"> <li>定常放出</li> <li>平地・近距離(数km以内)</li> <li>時間空間的に一様な風速場</li> <li>移流・拡散方程式の解析解</li> </ul> <p style="text-align: center;">↓</p> <p style="text-align: center;">近距離における簡易的な評価</p>
<p>流跡線パフモデル 例: 米国RASCAL</p>		<ul style="list-style-type: none"> <li>変動放出</li> <li>移流計算: 風速変動に伴う流跡線解析</li> <li>拡散計算: ガウス分布パフの広がりの変化</li> </ul>
<p>数値計算モデル (粒子拡散モデル) 例: 米国NARAC 日本(W) SPEEDI</p>		<ul style="list-style-type: none"> <li>変動放出</li> <li>複雑地形、局地から広域まで</li> <li>時間空間的に変動する風速場</li> <li>移流・拡散方程式を数値的に計算</li> </ul> <p style="text-align: center;">↓</p> <p style="text-align: center;">地形・気象を考慮した厳密評価</p>

## 基本拡散式

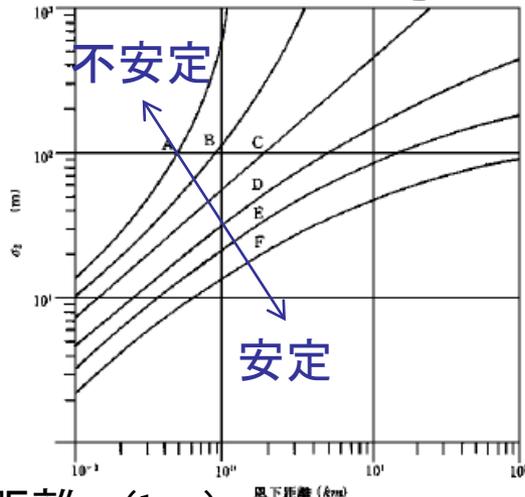
$$\chi(x, y, 0) = \frac{Q}{\pi \sigma_y \sigma_z U} \exp\left(-\frac{y^2}{2\sigma_y^2}\right) \exp\left(-\frac{H^2}{2\sigma_z^2}\right)$$

- $\chi(x, y, 0)$  : 地上濃度 (Bq/m<sup>3</sup>)
- Q : 放出率 (Bq/s)
- U : 風速 (m/s)
- $\sigma_y$  : 水平方向の拡散幅 (m)
- $\sigma_z$  : 鉛直方向の拡散幅 (m)
- H : 放出源の高さ (m)

### 水平拡散幅 $\sigma_y$

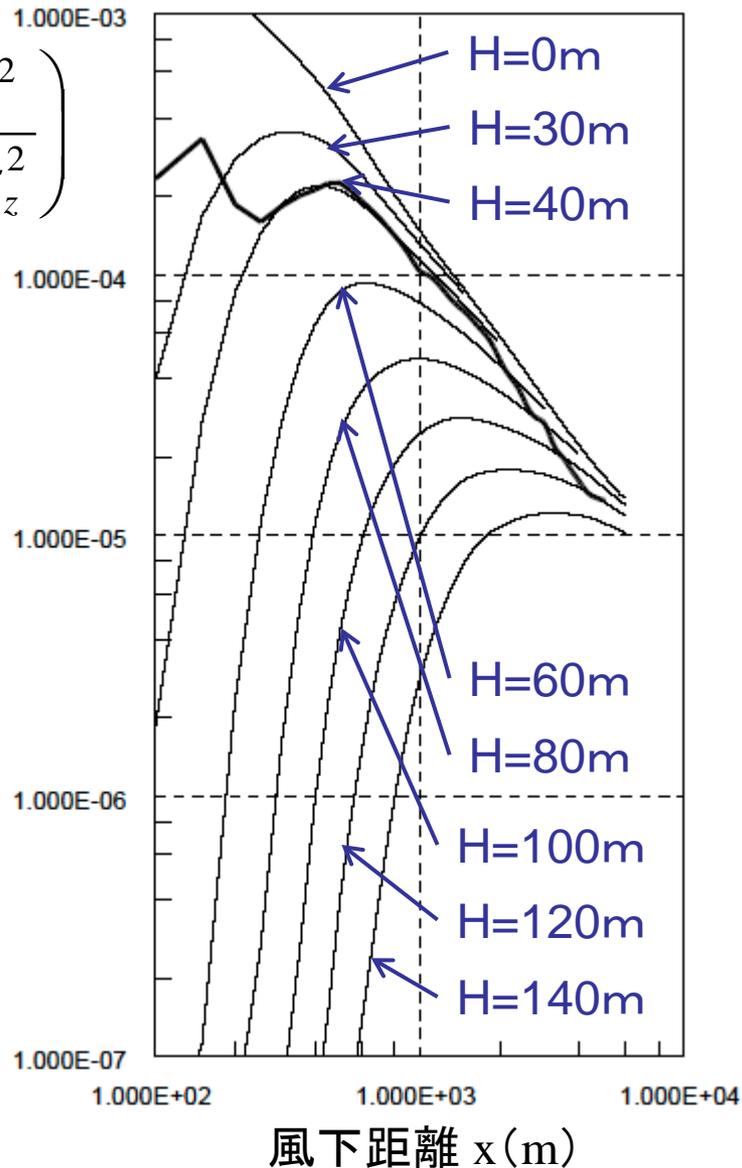


### 鉛直拡散幅 $\sigma_z$



風下距離 x (km)

正規化地上濃度  $U \cdot (\chi/Q)$  (m<sup>-2</sup>)



濃度の目安：風下距離10倍で2桁近く低下、大気安定度の違いで2桁程度の差

## MM5 (PSU/NCAR開発)

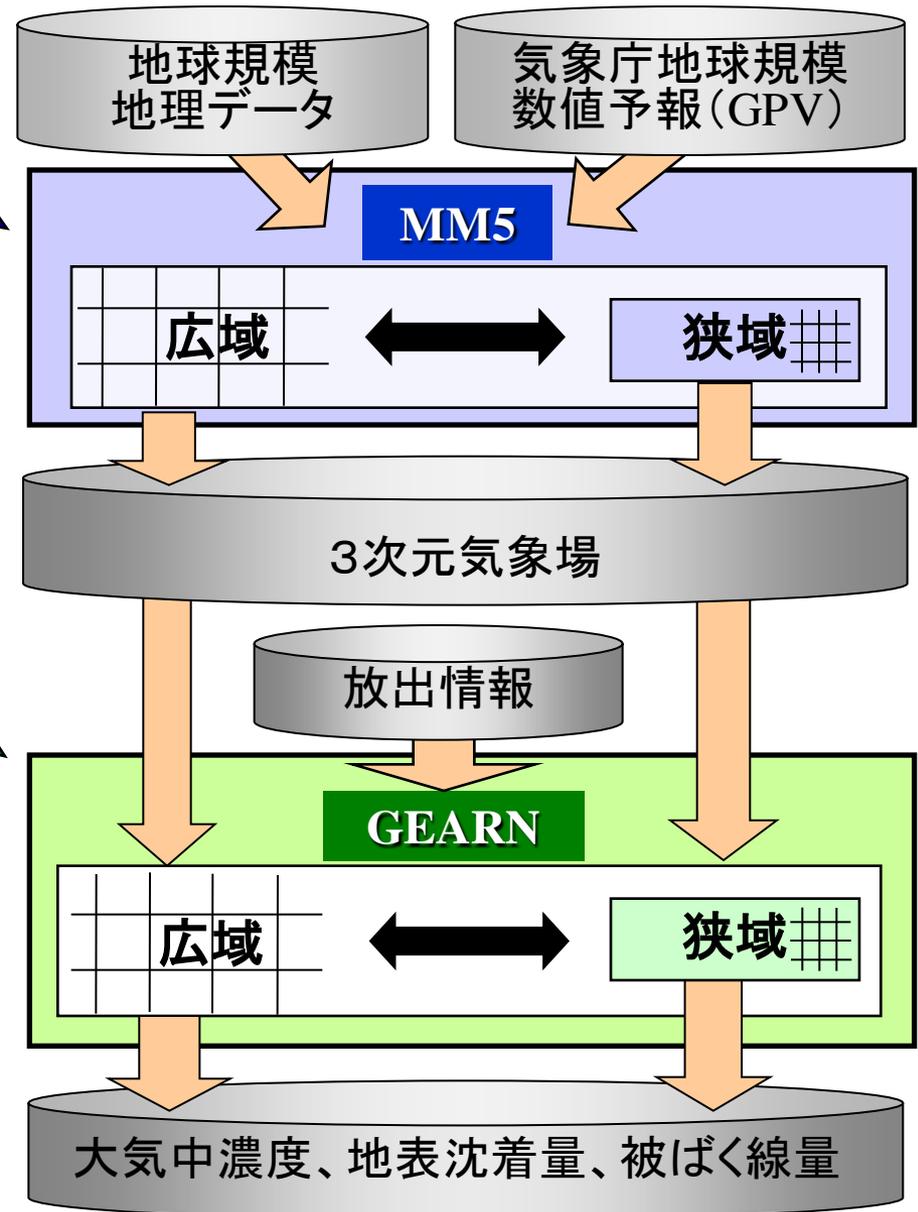
### 領域気象力学モデル

- 雲・降水、大気放射等の各種物理過程を考慮
- 気流、乱れ、降雨、雲量等の気象変数の予測

## GEARN (原子力機構開発)

### ラグランジュ型粒子拡散モデル

- 放射性核種の移流・拡散・沈着・崩壊を考慮
- 大気中濃度、地表沈着量、被ばく線量の予測



参考文献：寺田、他：緊急時環境線量情報予測システム(世界版)WSPEEDI第2版の開発,日本原子力学会和文論文誌, 7[3], 257-267 (2008).



## ■ 座標系

水平：地図投影面上での距離直交座標(x, y)、鉛直：地形準拠座標(z\*)

## ■ 移流拡散方程式（+座標系、沈着、放射性崩壊を考慮）

$$\frac{\partial C}{\partial t} = -u \frac{\partial C}{\partial x} - v \frac{\partial C}{\partial y} - w^* \frac{\partial C}{\partial z^*} + \frac{\partial}{\partial x} \left( K_x \frac{\partial C}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( K_y \frac{\partial C}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z^*} \left( K_{z^*} \frac{\partial C}{\partial z^*} \right)$$

## ■ 数値解法：ラグランジュ型輸送計算（多数の仮想粒子の位置を追跡）

$$\begin{aligned} x_{t+\Delta t} &= x_t + u\Delta t + R_x, \\ y_{t+\Delta t} &= y_t + v\Delta t + R_y, \\ z_{t+\Delta t}^* &= z_t^* + w^*\Delta t + R_{z^*} \end{aligned}$$

$x, y, z^*$  : 粒子位置[m]

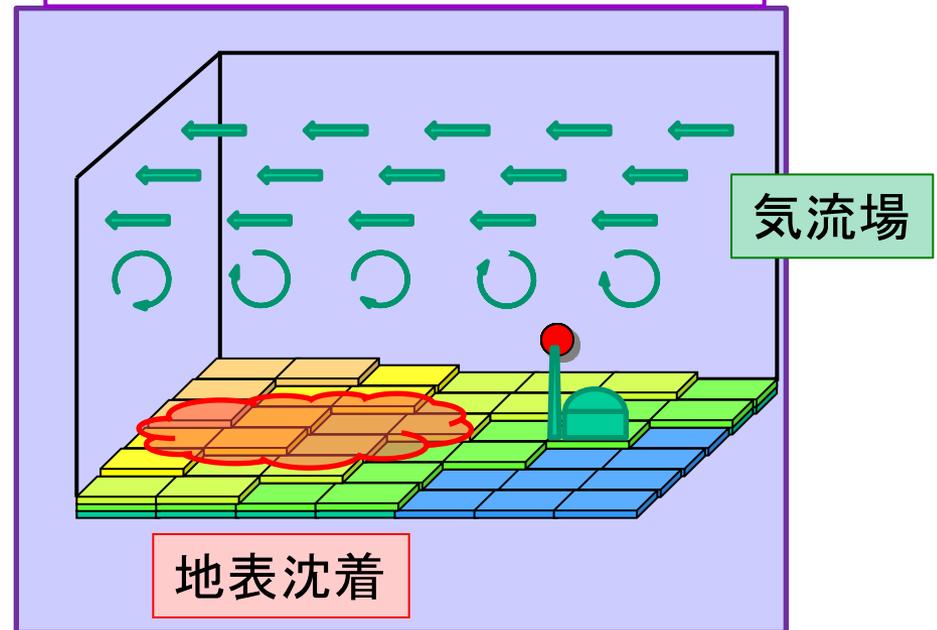
$u, v, w^*$  : 風速[m/s]

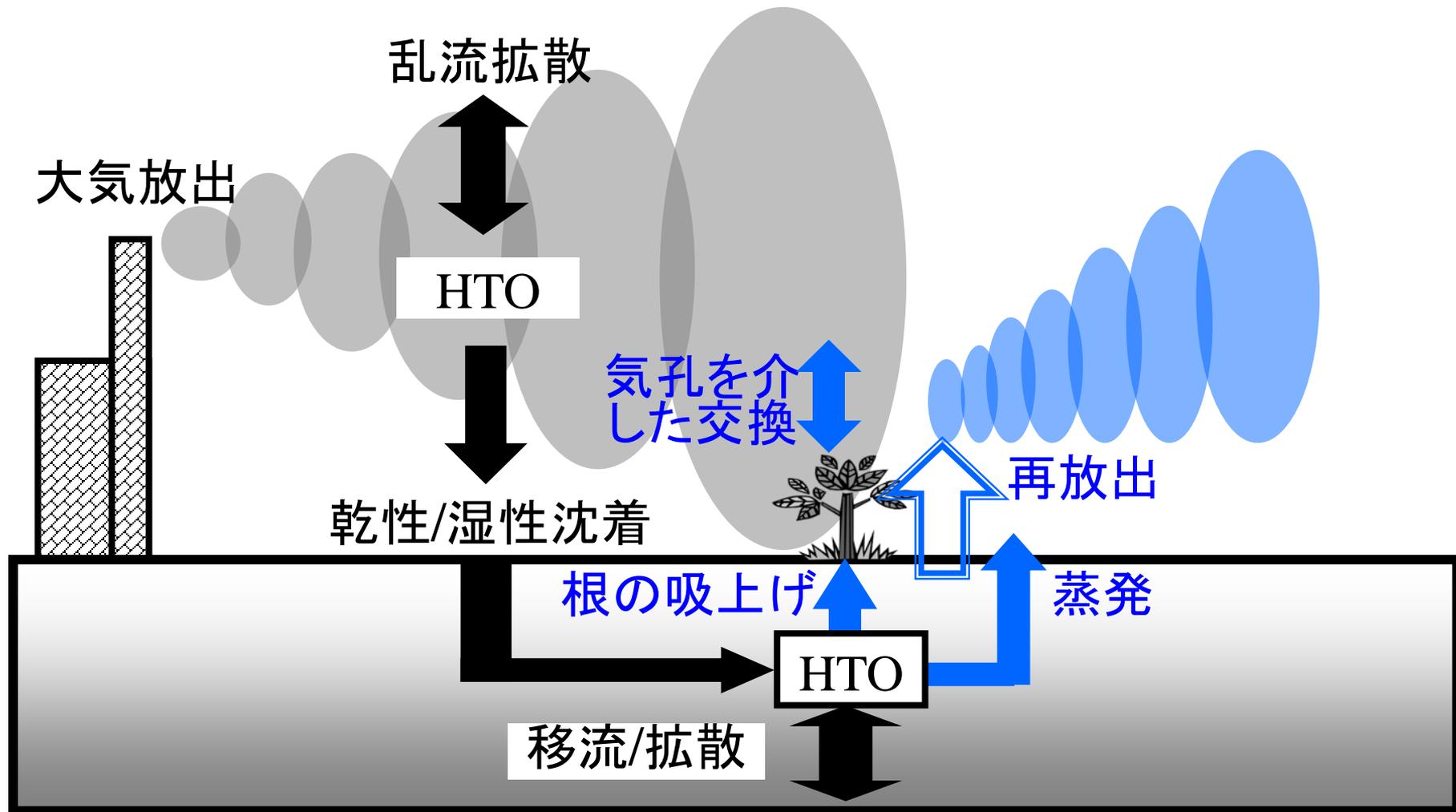
$\Delta t$  : 時間増分[s]

$R_{x,y,z^*}$  : 拡散項[m]

## ■ 拡散項：ランダムウォーク法で計算

## 粒子拡散計算のイメージ





HTO乾性沈着  
 HTO湿性沈着  
 HTO再放出

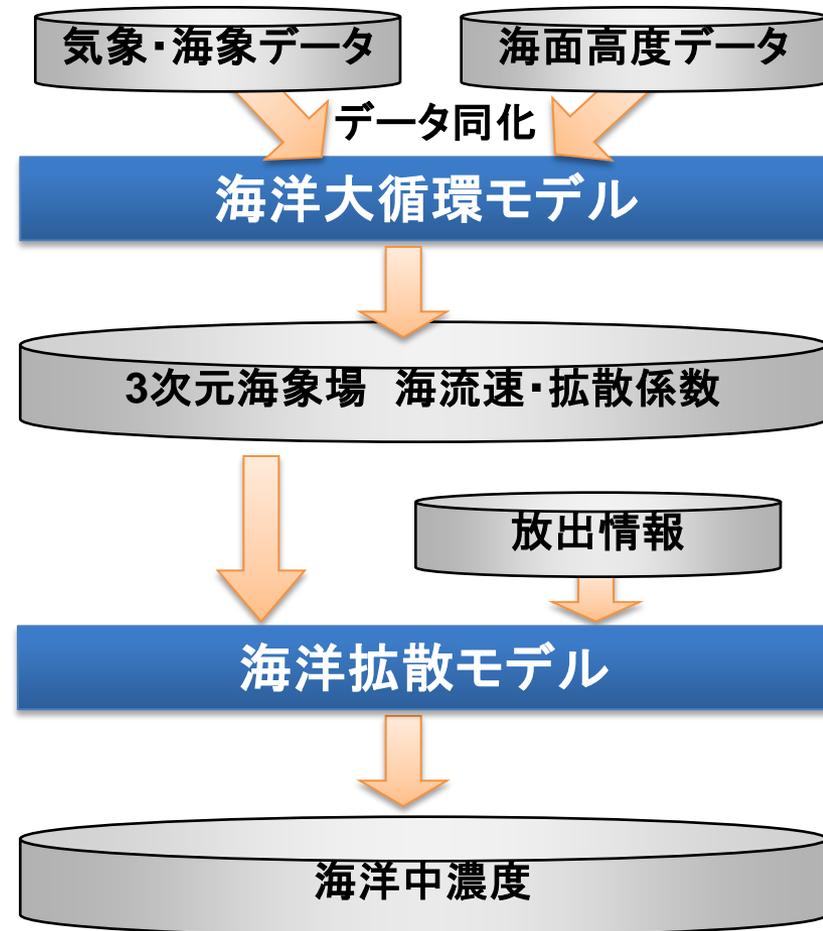
沈着速度:  $4 \sim 8 \times 10^{-3} \text{ m s}^{-1}$

沈着率は降水状況により変化

初期48時間:  $0.9 \sim 8.7\% \text{ h}^{-1}$ 、48時間以降:  $0.25 \sim 1.5\% \text{ h}^{-1}$

## 海水循環モデル

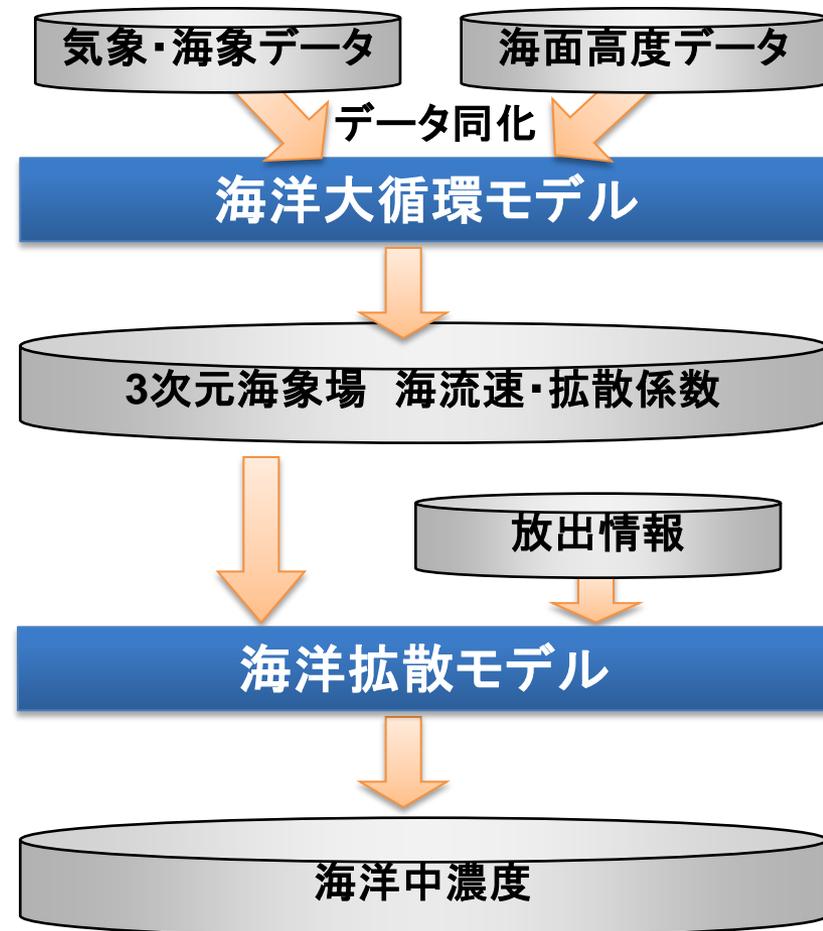
- 海洋中の流速、水温、塩分などの物理量の3次元構造とその変動を物理法則に基づいて求める
- 海洋を格子状に分割し、海面では大気との運動量、熱・淡水の交換を与え、各格子点間では運動方程式や熱・塩分の保存則を満たすように、流速変動、熱、塩分の移動や拡散を計算する
- 人工衛星や船舶から得られた海洋の観測データにモデル結果がより近くなるように、海洋の状態や大気との交換を修正する「データ同化」とよばれる手法を用いて、より現実的な海洋変動を再現する
- 目的に応じて解像度を変化
  - 沿岸付近では高分解能モデル(~2km格子)、原子力機構では、京都大学、海洋研究開発機構、日本海洋科学振興財団が共同開発したモデルの結果を利用する
  - 広域海洋では低分解能モデル(10~100km格子)、原子力機構では、気象庁気象研究所が開発したモデルの結果を利用する



海洋拡散評価モデルの計算の流れ

## 海洋拡散モデル

- 海洋中の放射性物質濃度の3次元構造とその変動を物理・化学法則に基づいて求める
- 一般的なモデルは、海水中の放射性物質の存在形態を、溶存相、粒子相、海底堆積物相と定義し、それぞれの相間を吸着・脱着、沈降・再浮遊により濃度の移行を考慮する
- トリチウムに関しては海水（溶存相）として動き、他の相との交換過程は無視する
- 原子力機構では自主開発したモデルを使用
  - 放射性核種を多数の粒子で模擬しランダムウォークモデルで追跡することで放射性核種の移流・拡散を計算



海洋拡散評価モデルの計算の流れ

(一般的な事例をもとに)

## 典型的な太平洋側の沿岸からの放出計算結果

(海流による移流拡散のみを考慮)

- 放出位置の計算格子の濃度に対して、約10km下流では約1桁低下、約50km下流では約2桁低下、約100km下流では約3桁低下
- 季節が変わっても同様の傾向を示す

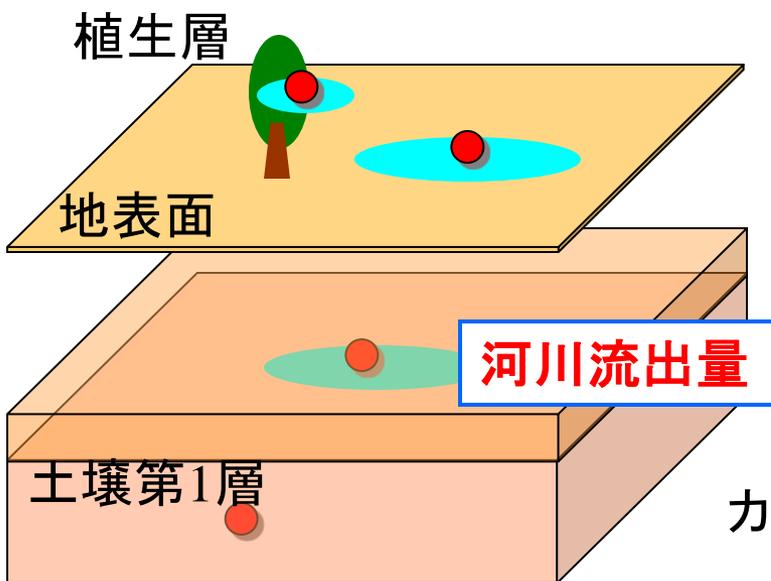
## 陸域移行モデル

### 粒子生成：

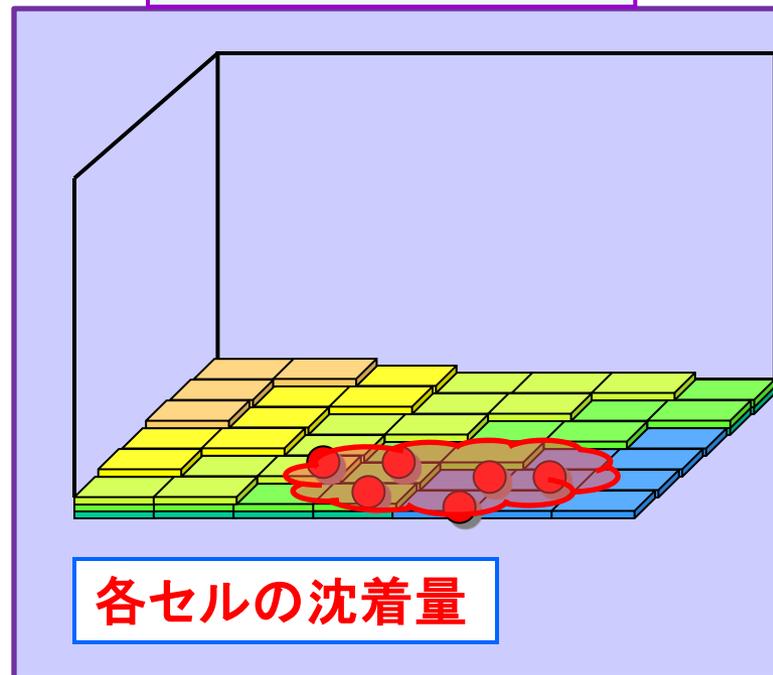
- ・各セル内地表面に粒子配置
- ・沈着量により放射エネルギー付加

### 粒子移動計算：

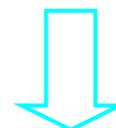
- ・水流出により移動（溶存物質）
- ・地表、土壌、河川の3次元移動
- ・崩壊・放出で放射エネルギー減衰



## 大気拡散モデル



Coupler



海洋拡散モデル

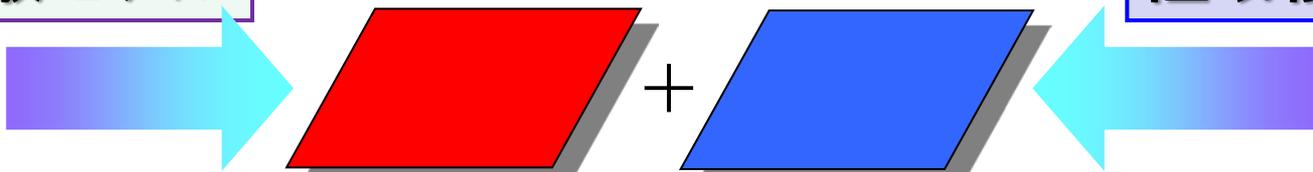
カップラー：時間・空間補間

大気拡散モデル

海表面沈着量

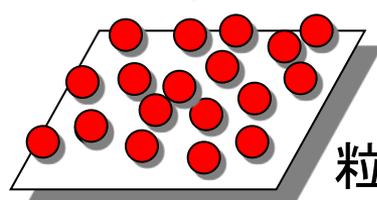
河川流出量

陸域移行モデル



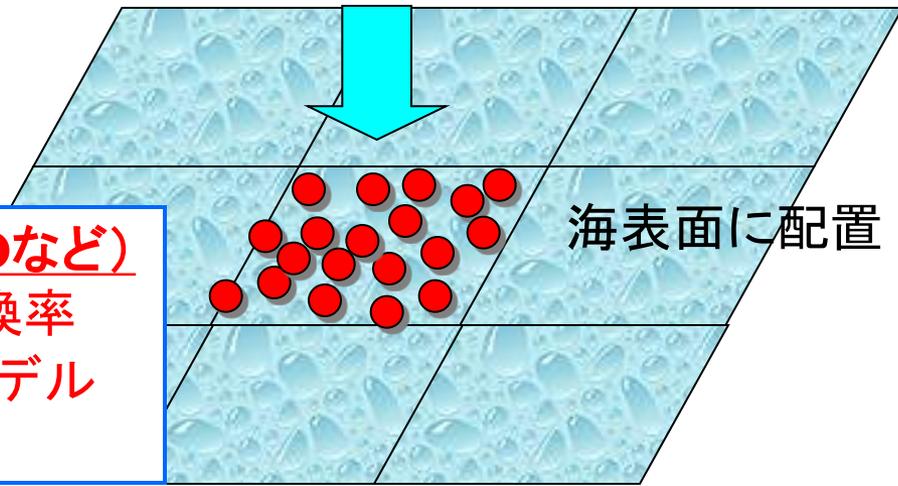
河口域

河川流出量と海表面沈着量の和



粒子に分配

Coupler



海表面に配置

海面放出量 (HTOなど)

海表濃度 × 水交換率  
水交換率: 大気モデル  
で計算

海洋拡散モデル

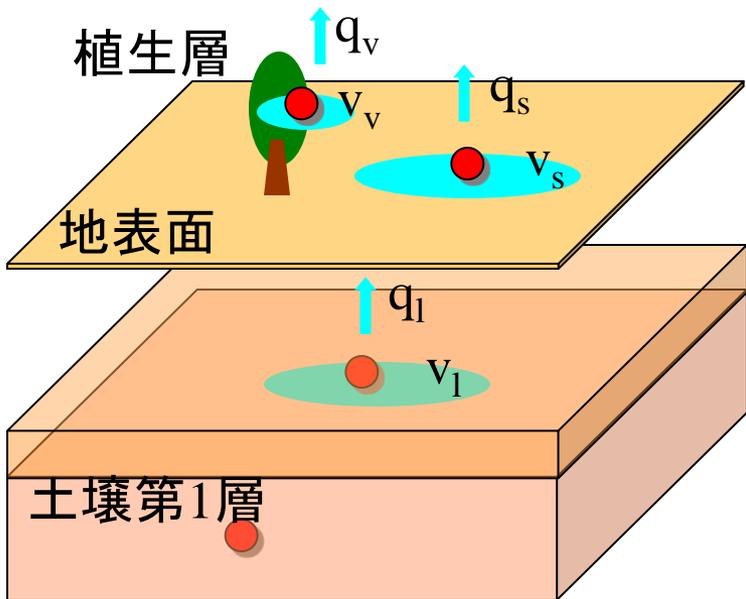
## 陸域移行モデル

各セル時間ステップ放出量：

$$FQ = \sum_i Q(i) \times r(i)$$

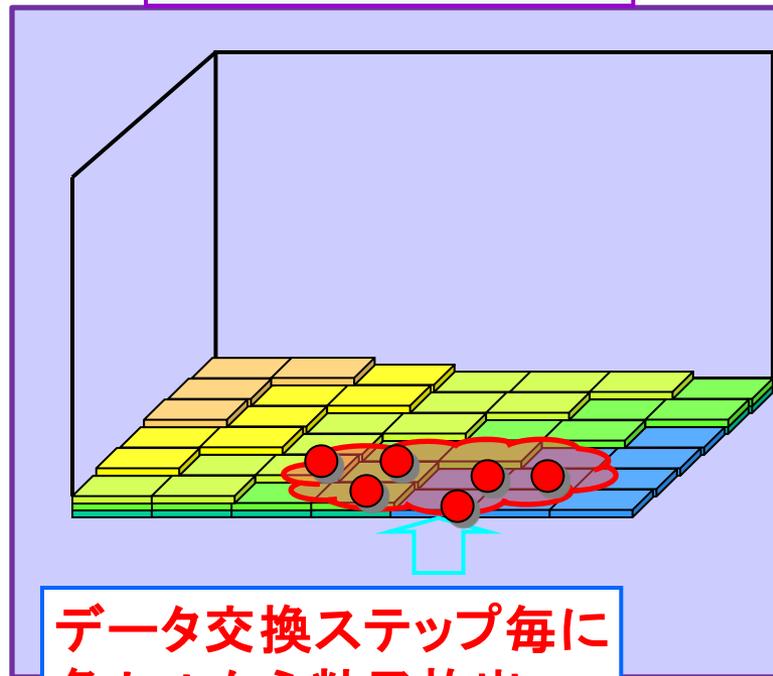
$Q(i)$ ：各粒子の放射エネルギー

$r(i) = q/v$ ：放出率（粒子位置毎）



放出エリア  
土壤表層

## 大気拡散モデル



データ交換ステップ毎に  
各セルから粒子放出

**Coupler**

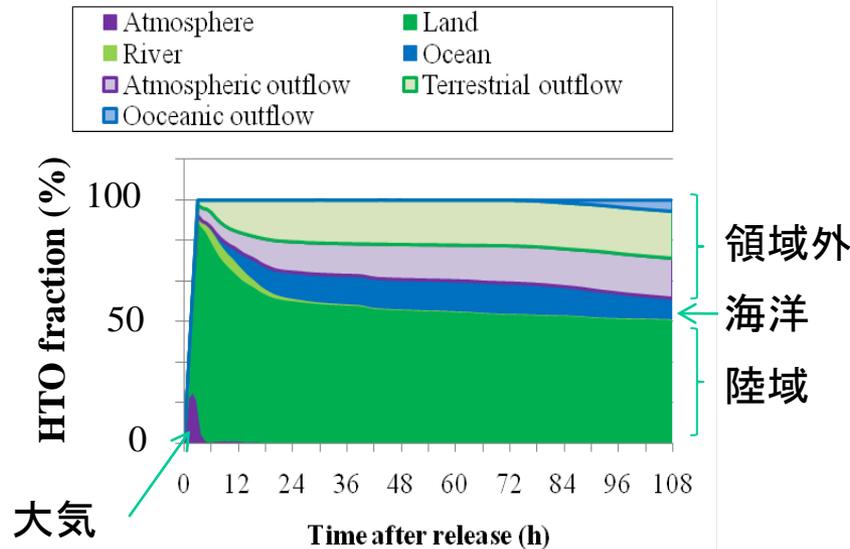
データ交換ステップ  
で積算

各セルの放出量  
海陸分布の融合

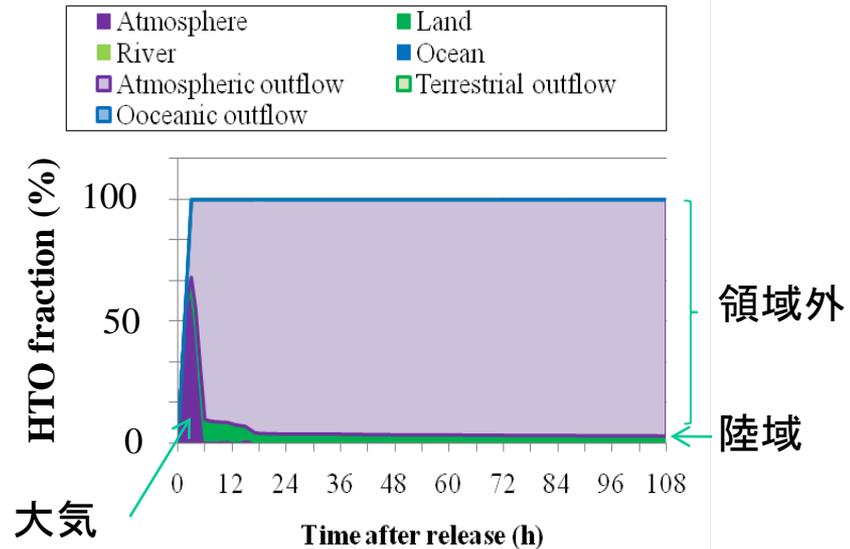
海洋拡散モデル

HTO大気放出時の環境中存在割合(130km四方領域内)の降水依存性  
 (JAEA結合モデルによる感度解析、放出条件:地上50mからの3時間定常放出)

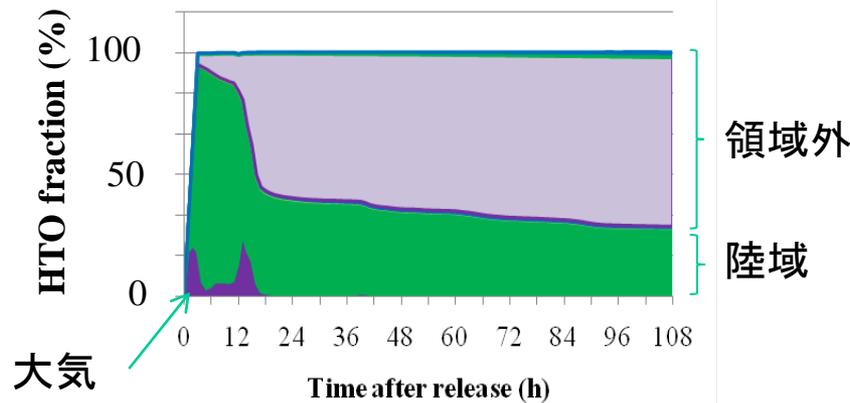
(a) 豪雨ケース



(c) 弱雨ケース



(b) 通常降雨ケース



(d) 雨なしケース

