

原子力安全部会、保健物理・環境科学部会 合同セッション
2023年9月7日(木)13:00 ~ 14:30

20_PL04

保健物理の最新動向と原子力安全 大気拡散モデルの進展と課題

日本原子力研究開発機構 原子力科学研究部門
原子力基礎工学研究センター
永井晴康

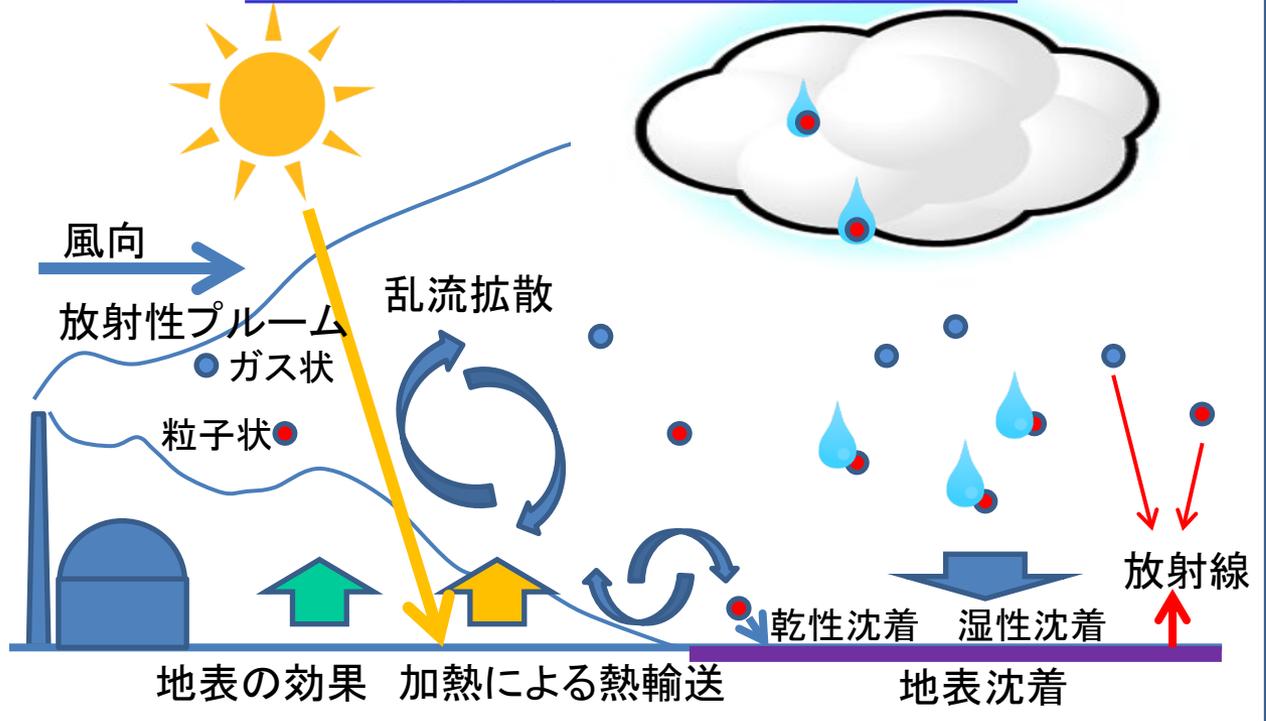
【目的】

国内外の原子力事故により放出される放射性物質の大気拡散と被ばく線量を、計算シミュレーションで迅速に予測

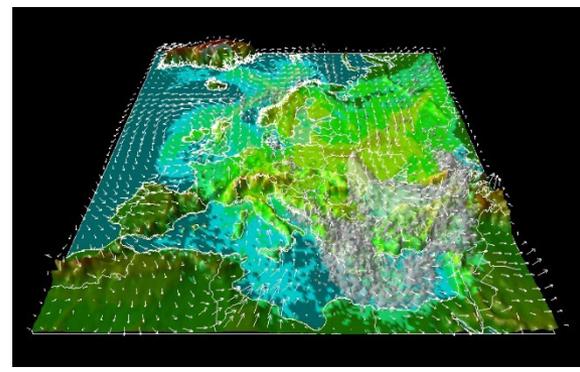
【手法】

- ① 気象モデル計算により、大気中の気流、乱流、降水過程を再現
- ② 拡散モデル計算により、放射性物質の大気拡散・沈着過程を再現
- ③ 放射性物質の大気中濃度、地表沈着分布から被ばく線量を評価

放射性物質の大気拡散現象



チェルノブイリ事故の大気拡散シミュレーション



計算結果の3次元可視化
¹³⁷Cs大気中濃度、沈着量分布(放出開始後1日毎)

【放出量推定】

- 放出量推定と汚染状況把握:原子力安全委員会発表(3月23日、4月12日、5月12日)
⇒ M. Chino, et al., 2011: J. Nucl. Sci. Technol., 48,1129–1134
- 3月15日までの放出量の再評価:原子力安全委員会発表(8月22日)
⇒ G. Katata, et al., 2012a: J. Environ. Radioactiv., 109, 103-113
- 新規データと改良モデルを用いた放出源情報の詳細評価
⇒ G. Katata, et al., 2015: Atmos. Chem. Phys., 15, 1029–1070, 2015
- 放出源情報の最適化と環境中核種分布再構築(環境省被ばく評価事業への貢献)
⇒ H. Terada, et al., 2020: J. Environ. Radioactiv., 213, 106104

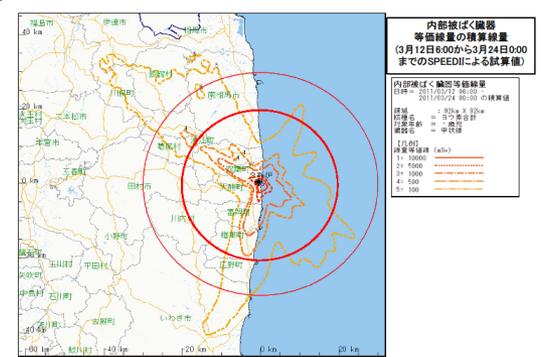
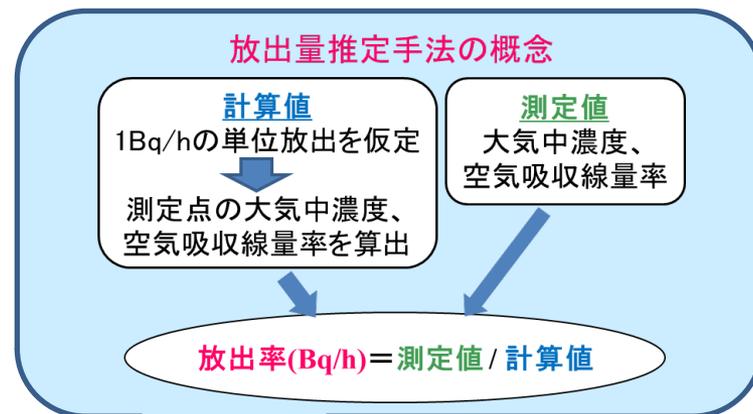
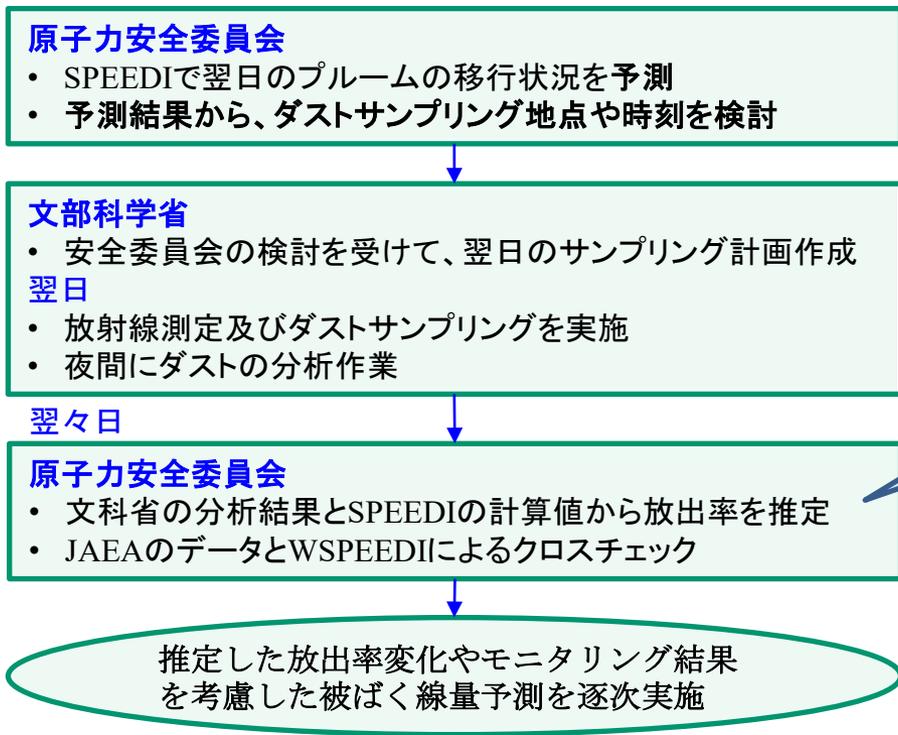
【大気拡散解析】

- 局地詳細計算によるプラント北西地域の線量上昇プロセスを解析
⇒原子力機構プレス発表 (<http://www.jaea.go.jp/english/jishin/press/press110613.pdf>)
G. Katata, et al., 2012b: J. Environ. Radioactiv., 111, 2-12
- 東日本域拡散解析による推定放出源情報(Terada 2012)の確認+沈着過程の解析
⇒ H. Terada, et al., 2012: J. Environ. Radioactiv., 112, 141-154
- 炉内事故進展解析との融合による放出に寄与した原子炉の推定
⇒ M. Chino, et al., 2016: Sci. Rep. 6, 31376
- 北半球拡散解析による推定放出源情報(Terada 2020)の確認
⇒ M. Kadowaki, et al., 2021: J. Environ. Radioactiv., 237, 106704

福島第一原子力発電所(1F)事故時の環境モニタリングと拡散予測の連携

- ✓ 拡散予測の活用により有効な測定値を取得
 - 北西方向の汚染形成直後の希少データ、プルーム通過時の大気中濃度データ
- ✓ 時間・空間的に離散的な測定値を拡散解析により補完
- 限定的な測定値から放出量を推定、汚染状況を早期に把握 → 防護対策の決定

環境モニタリングと拡散予測の連携フロー



原子力安全委員会による被ばく線量予測結果(2011年3月23日発表)

【放出源】

放出源情報: 放出位置、放出核種、放出量、これらの時間変化

➤ 誤差要因: 放出形態、核種組成・化学形、放出量が不明、長期間の変動

↑ 炉内解析: 環境放出の再現困難

プラント情報、炉内状況 → 不十分、不明

連携解析の試み (Chino et al. 2016)

【気象計算】

気象場の再現: 3次元気流、乱流場、降水過程

➤ 誤差要因: モデル計算過程、入力データ

↑ 不確実性の低減: 不十分

気象観測データ(比較、同化) → 周辺で欠如

【拡散計算】

拡散場の再現: 大気中濃度、地表沈着量、線量

➤ 誤差要因: モデル計算過程(乱流拡散、沈着過程)

↑ 不確実性の低減: 不十分

環境モニタリングデータ → 多様、離散的、初期・周辺で欠如

最新推定 (Terada et al. 2020)

- 新規データ: SPMフィルター
- 濃度データのフィードバック
- 統計的手法による最適化

再推定 (Katata et al. 2015)

- 沈着過程の精緻化
- 新規データ利用

拡散解析による逆推定

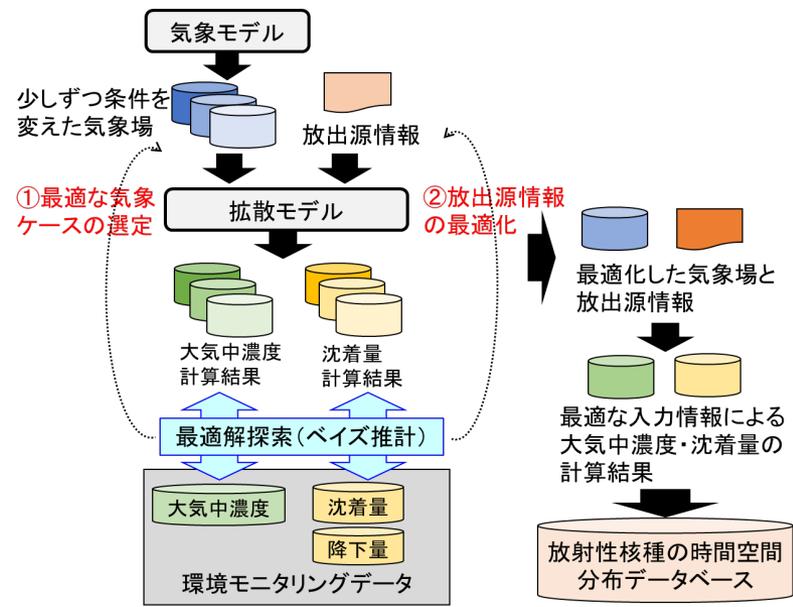
- Chino et al. 2011
- Katata et al. 2012a,b
- Terada et al. 2012

【推定手法】

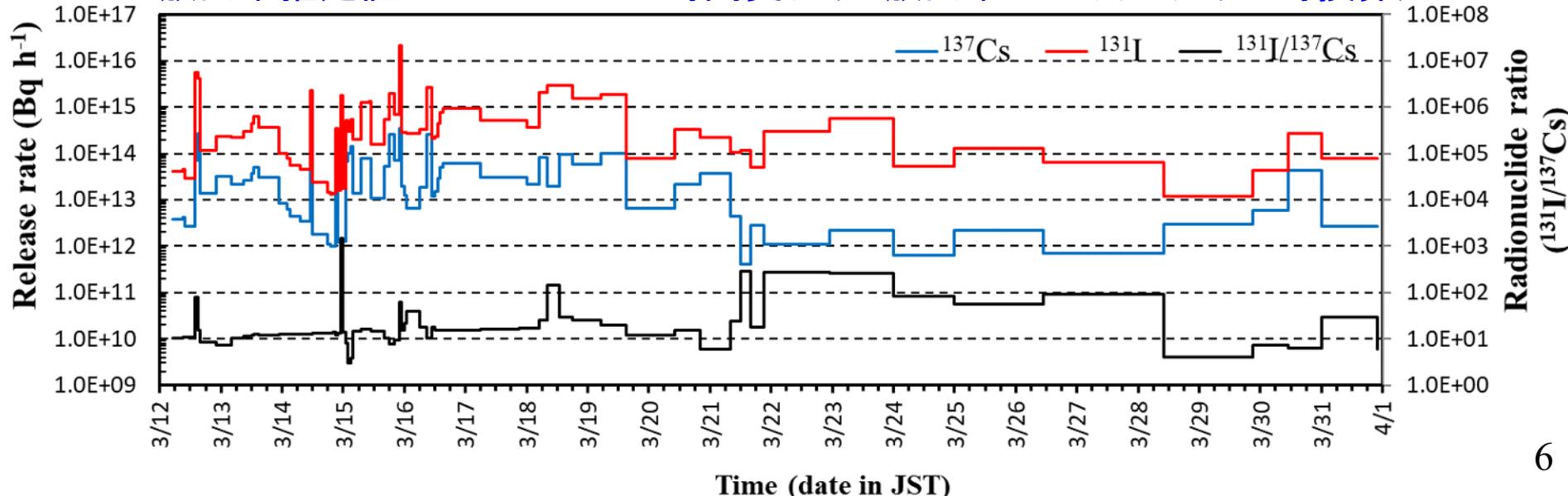
- アンサンブル計算による多数の気象場に対する拡散計算と濃度データの比較からプルームを再現する最適な気象場を選定
- 最適気象場の拡散計算と全測定データのベイズ統計解析により最適放出量推定

【推定結果】

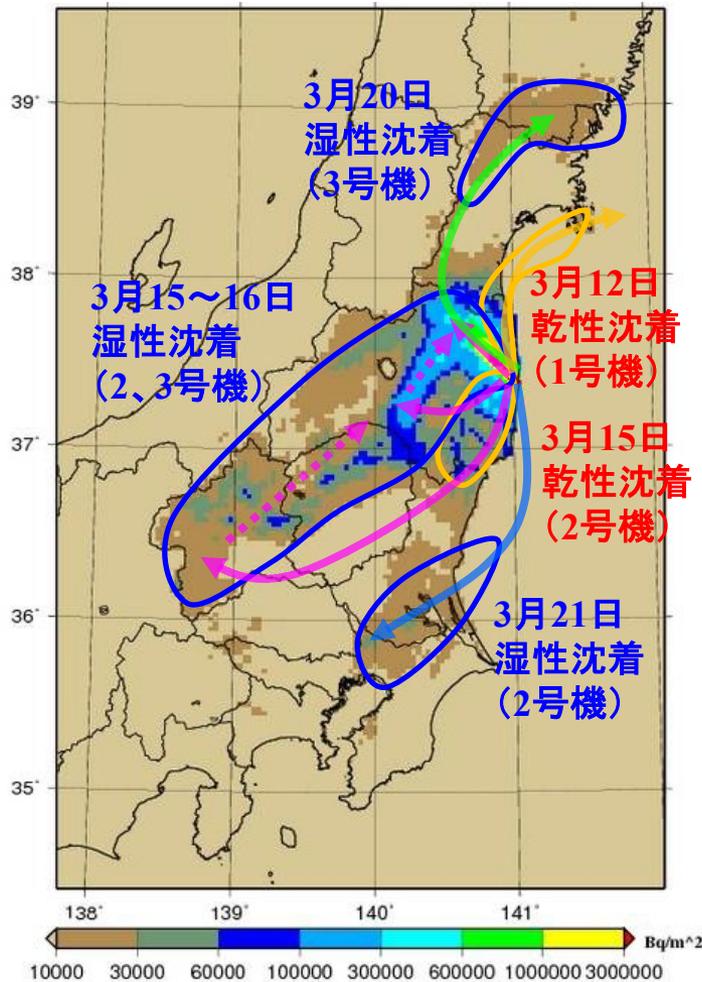
- 総放出量(シャットダウン時換算)
 $^{131}\text{I}: 2.1 \times 10^{17} \text{ Bq}$ 、 $^{137}\text{Cs}: 1.0 \times 10^{16} \text{ Bq}$



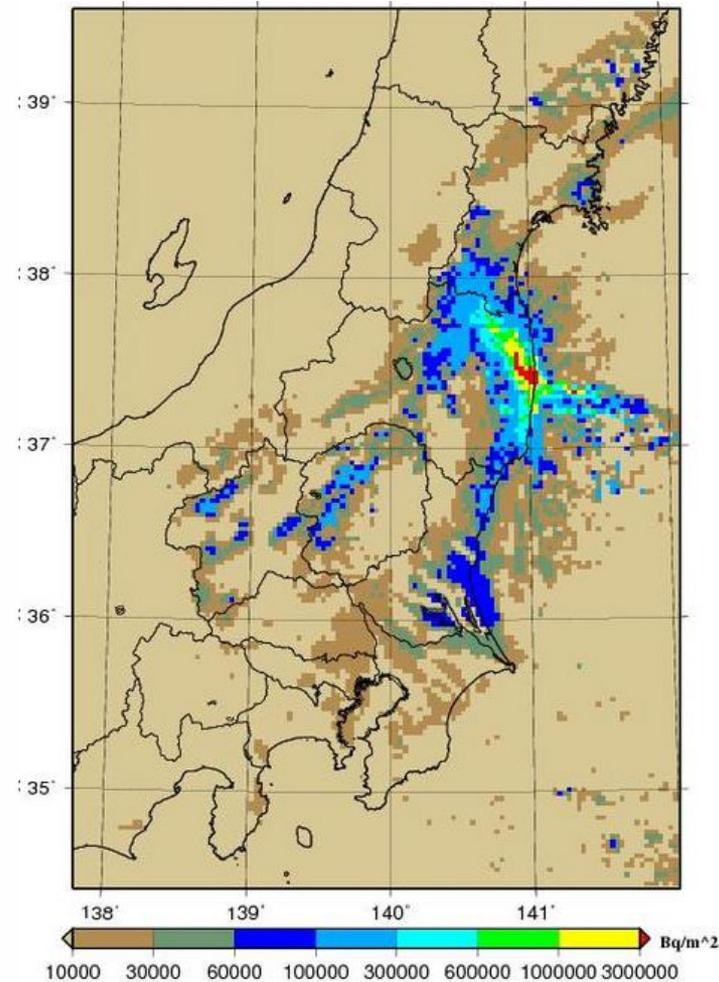
放出率推定値と $^{131}\text{I}/^{137}\text{Cs}$ 比の時間変化(※放出率はシャットダウン時換算)



文部科学省航空機モニタリング ¹³⁷Cs沈着量分布

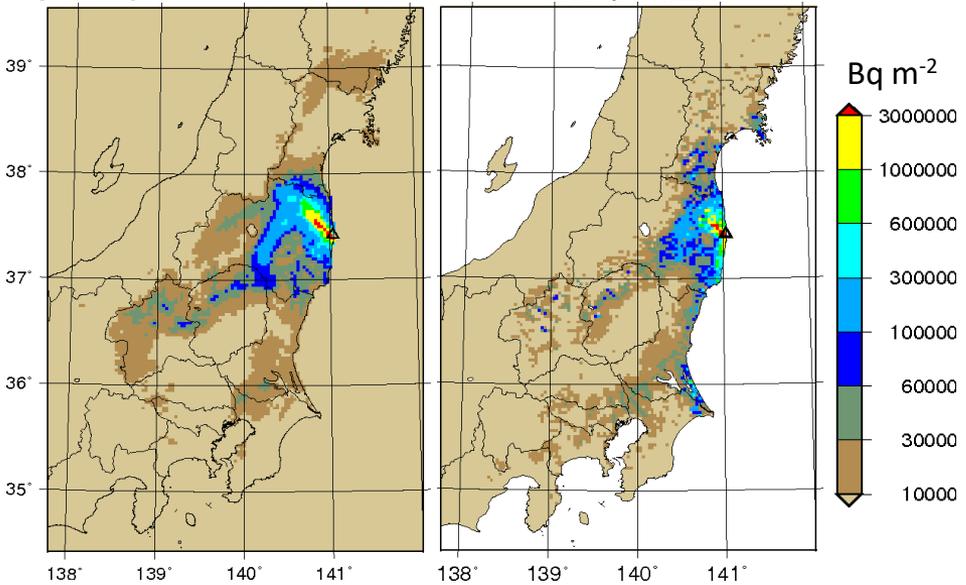


WSPEEDI計算値 ¹³⁷Csの大気中濃度と沈着量分布



- 放射性物質の時空間分布の再現 → 住民の被ばく線量評価に活用
- ¹³⁷Cs沈着分布の形成過程の解明 → 環境回復、事故進展解析に活用

■ ¹³⁷Cs沈着分布 航空機モニタリング



■ ¹³⁷Cs沈着総量(左図範囲内の陸上)

従来研究	本研究	モニタリング
3.7PBq	2.1PBq	2.4PBq

■ ¹³⁷Cs大気中濃度(多地点連続データ)

	FA2 (%)	FA5 (%)	FA10 (%)	相関 係数
従来研究	12.9	29.4	35.9	0.54
本研究	22.7	39.7	47.3	0.60

FA * : 観測値の1/* ~ * 倍に入る計算値の割合

- 沈着量と大気中濃度の再現性向上
- 放射性核種の環境中時間空間分布データベース公開



住民の被ばく線量評価に活用

- 環境省「放射線健康管理・健康不安対策事業」
- 国連科学委員会UNSCEAR2020年レポートで活用

UNSCEARから感謝状→



WSPEEDI-DB

- 毎日定期的に実行し、解析データを連続的に蓄積
- 任意の放出条件に対する計算結果を即座に取得可能

気象庁数値予報
データ(GPV)

オンライン定期取得

計算機能

自動実行

気象モデル: WRF
局地域詳細気象場予測

3次元気象場

自動実行

拡散モデル: GEARN
単位放出の拡散計算

拡散計算出力データベース

放出期間分割 (1時間毎) × 放出高度
(スタック、建屋) の全ケース単位
放出計算の出力

実行環境 (ハードウェア)
Linux-PCまたはクラウドサーバ

解析機能

放出条件設定

放出率時系列の設定
(任意条件、福島ケース利用可)

放出率時系列

拡散分布解析

放出率時系列による拡散分布作成

拡散分布解析結果

濃度、沈着量、降水量、
空間線量率の時間空間分布

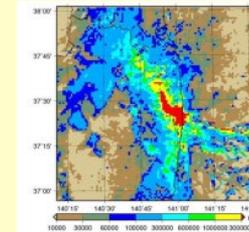
利用者



WEBブラウザ
による操作

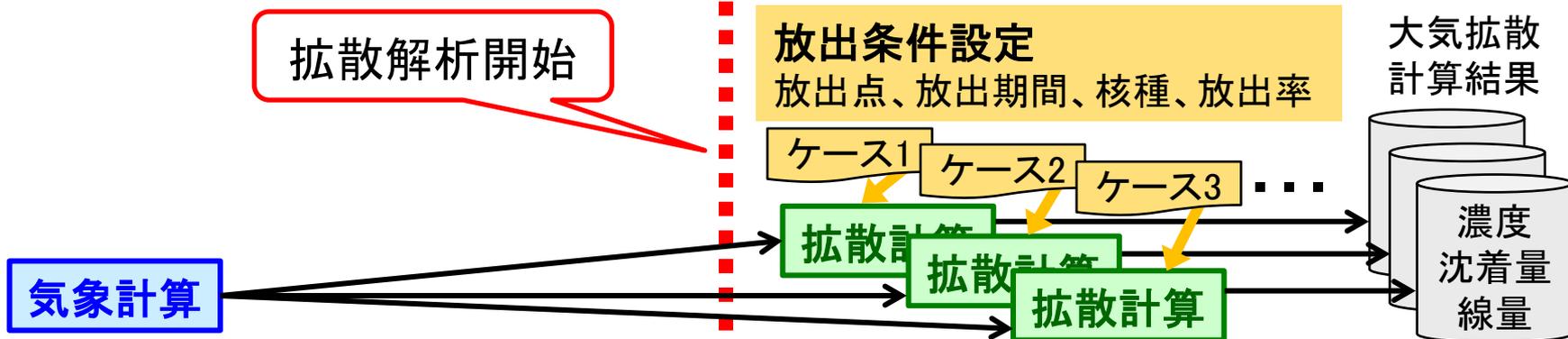
WEB-GUI

- 設定・処理実行
- 結果出力:
水平分布図
時系列グラフ

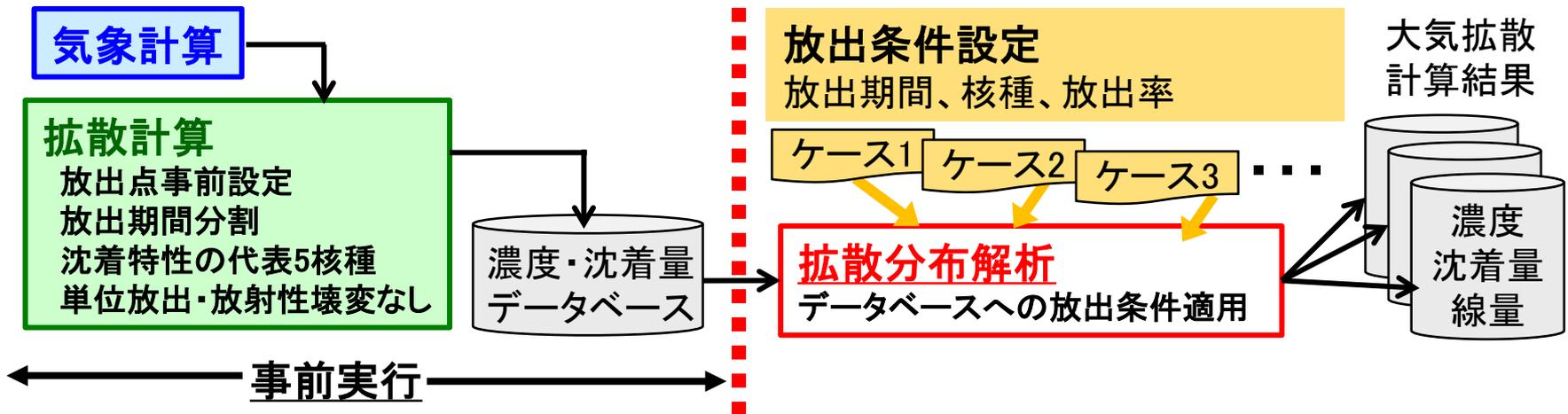


(例) 沈着分布図

従来手法



新規手法



試験結果

気象計算＋拡散計算の時間: 約3時間
 最新気象データ取得時刻: 当日1時頃
 →朝までに過去から数日先までのデータベース作成可能

24時間分の計算に要する時間(1ケース)
 従来手法: 約7分 新規手法: 3~4秒
 →1/100程度に短縮

100ケース計算する場合
 従来手法: 約12時間 新規手法: 5~6分

【目的】 モニタリングポスト配置の妥当性評価(島根県原子力環境センターとの共同研究)

【実施内容】

- 1年間(2015年)の拡散計算データベース作成
- 30km圏内・陸上の放出24時間後の空間線量率解析

【結果】

- 全放出ケースにおけるホットスポット発生率:1.2%
- 高い線量率・・・大部分は降雨沈着に起因



現状のモニタリング配置は・・・

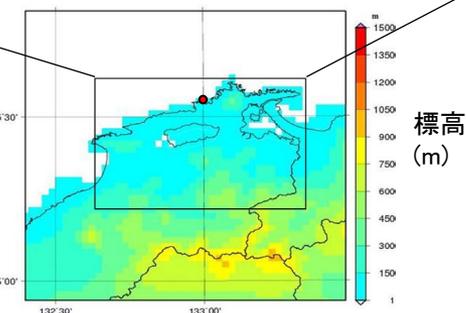
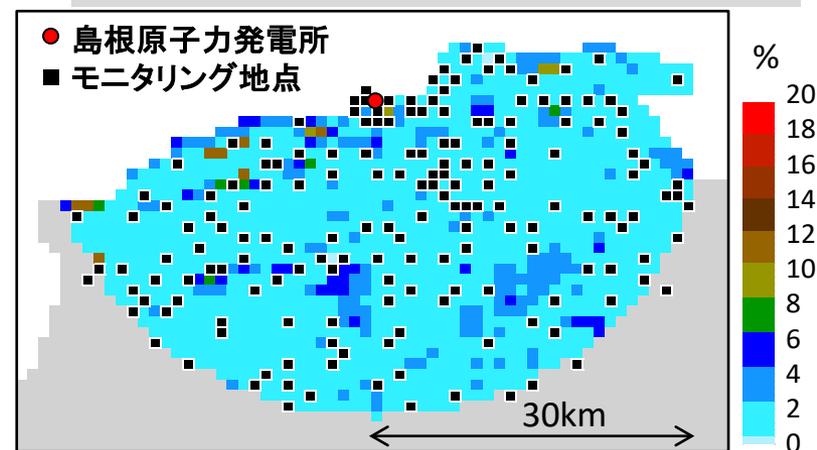
- 降水なし:空間線量率の空間分布の把握に有効
- 降水あり:把握できないホットスポットが想定される



可搬型モニタリングポストや走行サーベイ等による観測の補強が有効

ホットスポット発生率

ある地点の空間線量率の計算値が、周辺4つのモニタリング地点で計算された最大値の2倍以上となった割合



令和2年6月10日WSPEEDI-DBの公開と合わせてプレス発表
(<https://www.jaea.go.jp/02/press2020/p20061101/>)

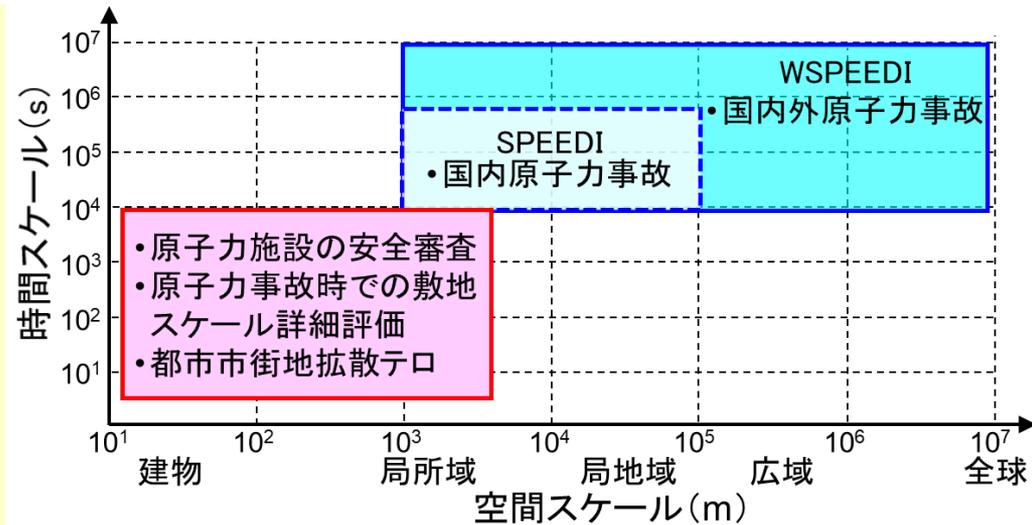
局所域大気拡散解析のニーズ

- **原子力施設の安全審査**
 - 風洞実験の代替としての数値シミュレーションモデルの活用
- **原子力事故時での敷地スケール詳細評価**
 - 建屋・地形起伏を考慮した詳細拡散・線量評価
- **都市市街地での拡散テロ対策**
 - 都市ビル群による大気中濃度・沈着量の3次元分布を考慮した影響解析

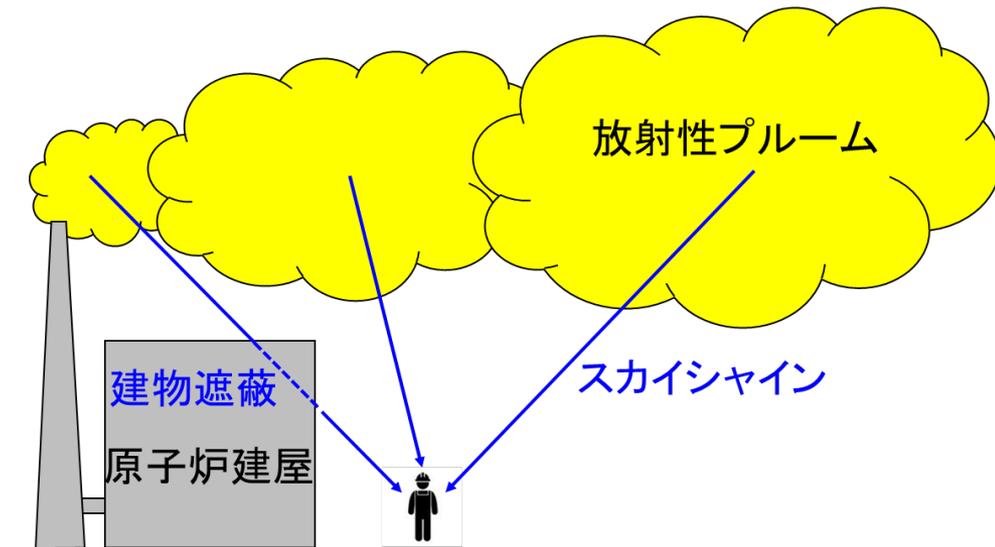
放出源近傍の影響評価



建物影響を考慮した高分解能大気拡散計算と建物遮蔽を考慮した線量評価が行える計算コードが必要



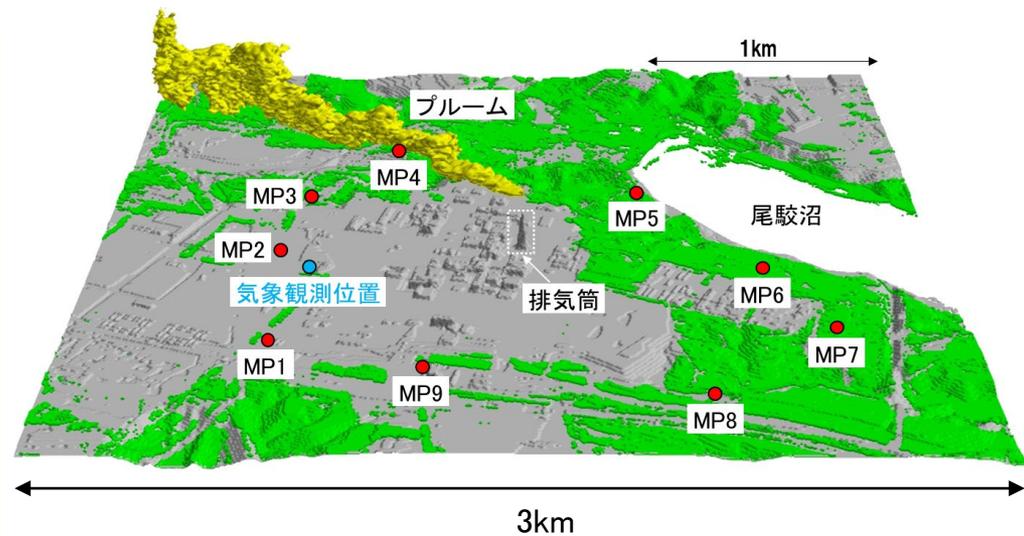
原子力機構の大気拡散モデル



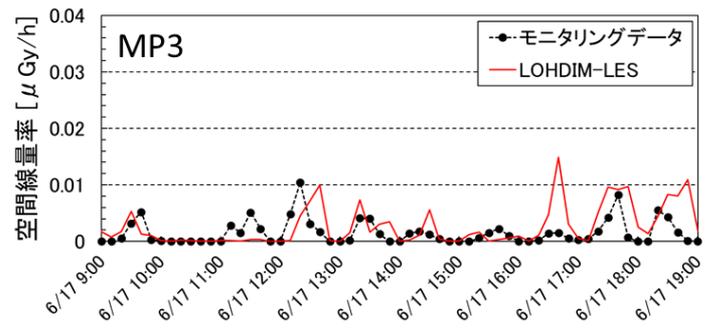
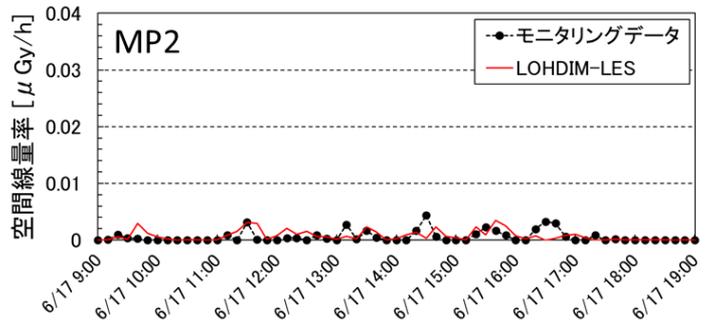
建物スケールの大気拡散と被ばく

- 六ヶ所再処理工場のアクティブ試験により管理放出された ^{85}Kr の大気拡散・線量計算
- 敷地内のモニタリングポストにおける大気中濃度と空間線量率の測定値と比較

→ 大気中濃度・空間線量率再現



計算領域とモニタリングポストの配置



モニタリングポスト空間線量率データとの比較
(Nakayama et al., JNST, 58, 949-969, 2021)

局所域高分解能大気拡散・線量評価システムLHADDAS

各種データベース + 入力作成プログラム

放出率、気象データ、地理情報データ、線量換算係数などを設定

**迅速詳細
線量率評価コード
SIBYL**

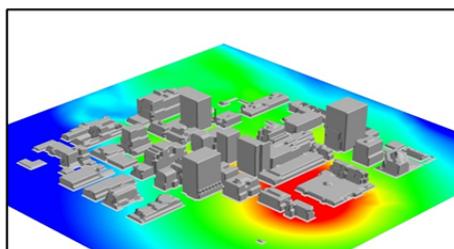
大気拡散計算の結果を基に
各地点の線量率を即座に得
ることができる計算コード

**局所域高分解能
大気拡散計算コード
LOHDIM-LES**

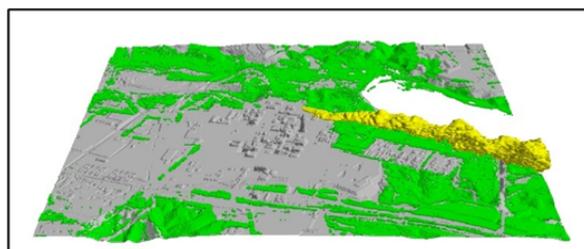
原子力施設近傍や都市市街地
での放射性物質の大気拡散を
詳細評価できる計算コード

**都市大気拡散
高速計算コード
CityLBM**

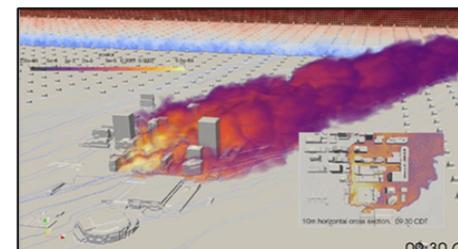
都市市街地での大気拡散解析
に特化した高速計算コード



都市市街地空間線量率分布



原子力施設での3次元濃度分布

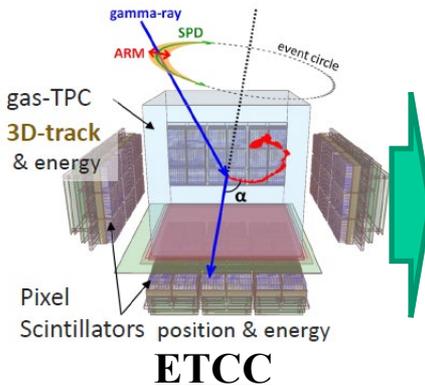


都市市街地での3次元濃度分布

令和4年3月4日に完成とコード公開をプレス発表

(<https://www.jaea.go.jp/02/press2021/p22030501/>)

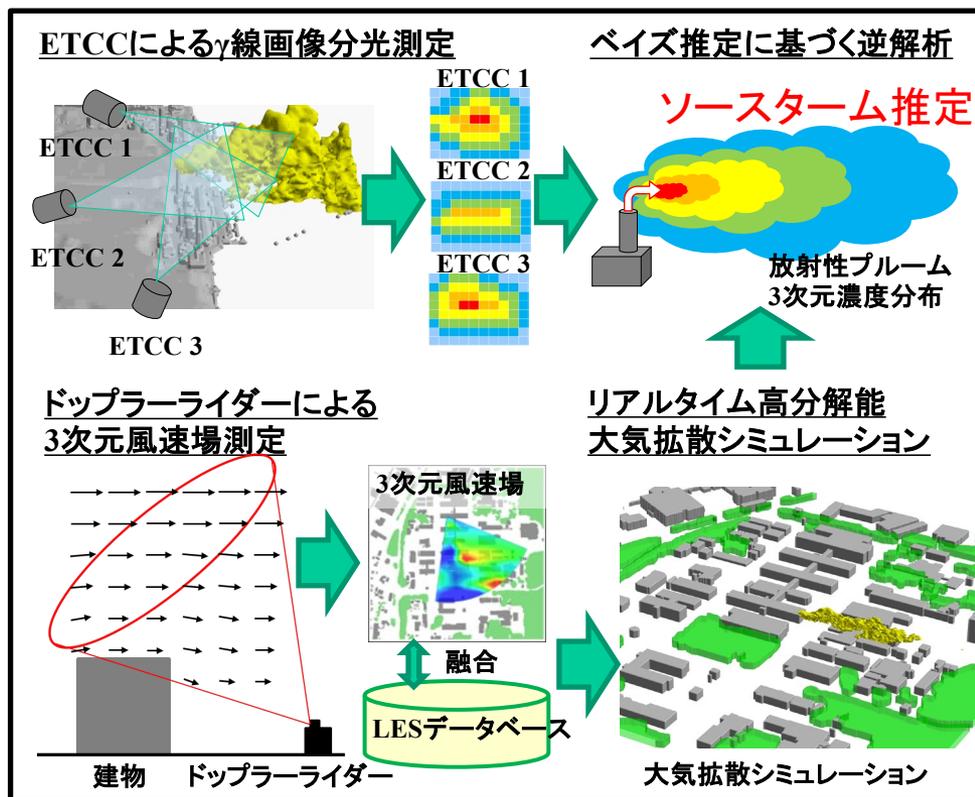
原子力事業者等と共同で原子力施設内の詳細線量評価に活用開始



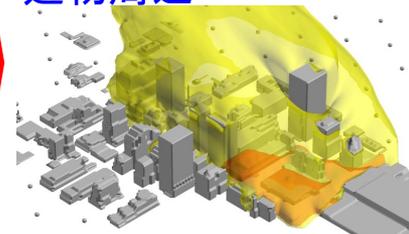
ETCC
γ線イメージング



ドップラーライダー
3次元風速場測定

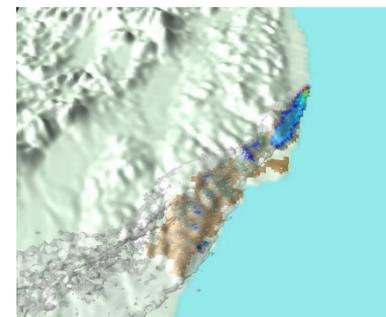


建物周辺



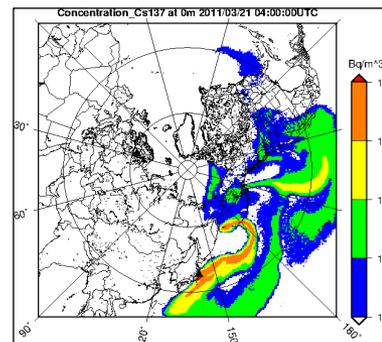
LOHDIM-LES

局地



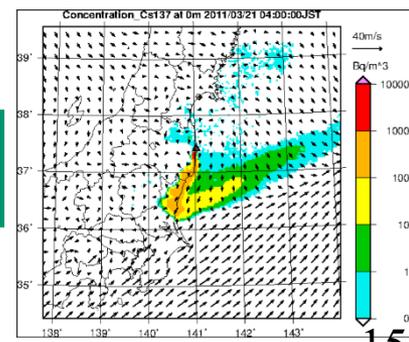
WSPEEDI-DB

全球



GEARN-FDM

日本域



WSPEEDI-DB

革新的モニタリング手法：γ線画像分光測定と3次元風速測定に基づくリアルタイム大気拡散シミュレーションの融合による放射性プルームの定量可視化
Nagai et al. 2023: Journal of Nuclear Science and Technology,
<https://doi.org/10.1080/00223131.2023.2197445>

- AI導入による推定手法の高度化
- 炉内解析によるソースターム予測との融合

1F事故での活用

- 事故初期対応：モニタリングと連携した放出量推定と汚染状況把握
 - 限定的な測定値から汚染状況を早期に把握し防護対策に活用
- 大気拡散解析による放出量推定と環境中核種分布の再現
 - 環境省事業の被ばく評価、UNSCEAR2020レポートで活用

1F後の大気拡散モデルの開発

- WSPEEDI-DB：様々な気象条件や任意の放出源情報に対する予測結果を即座に取得、放出源情報推定や拡散方向の不確実性評価が可能なシステム
 - 島根県原子力環境センターとの共同研究でモニタリング計画の最適化に活用
- LHADDAS：原子力施設の建物の影響を考慮した高分解能大気拡散計算と線量評価が可能なシステム
 - 完成したシステムを公開 → 原子力施設内の詳細線量評価に活用開始

今後の展開

- 局地から全球までのマルチスケール大気拡散結合計算
 - オンサイトとオフサイトの連続的な拡散解析・線量評価
- 電子飛跡検出型コンプトンカメラ(ETCC)を活用したプルーム定量可視化手法
 - 放射線計測と大気拡散計算を融合した新たな緊急時対応システム