



# 原子炉施設・安全解析のための 大気拡散数値モデル

-様々な発電所を対象とした数値モデルの開発について-

電力中央研究所 原子力リスク研究センター

佐田 幸一

CCSEワークショップ

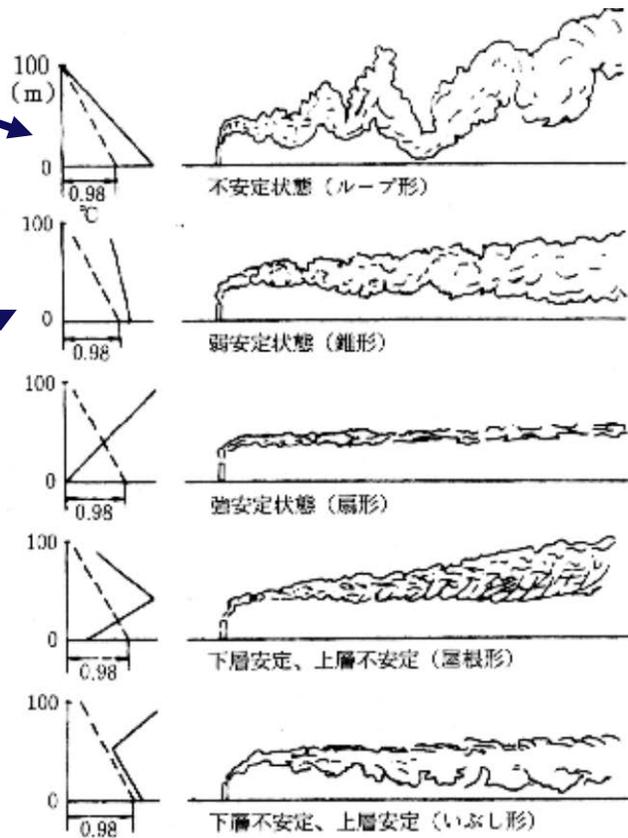
2020年2月21日、東海村産業・情報プラザ

 電力中央研究所

# 本日の内容

1. はじめに : 発生源近傍の大気拡散現象
2. 大気拡散数値モデルの開発の流れ-火力発電所の例-
3. 原子炉施設・安全解析のための大気拡散数値モデルの開発  
-原子力学会標準の制定、2012年度-
4. 現在までの動き-原子炉学会標準の改訂へ-
5. 今後の大気拡散予測について

# ※排ガスの拡散現象-実際に観測された排ガスの拡散現象-

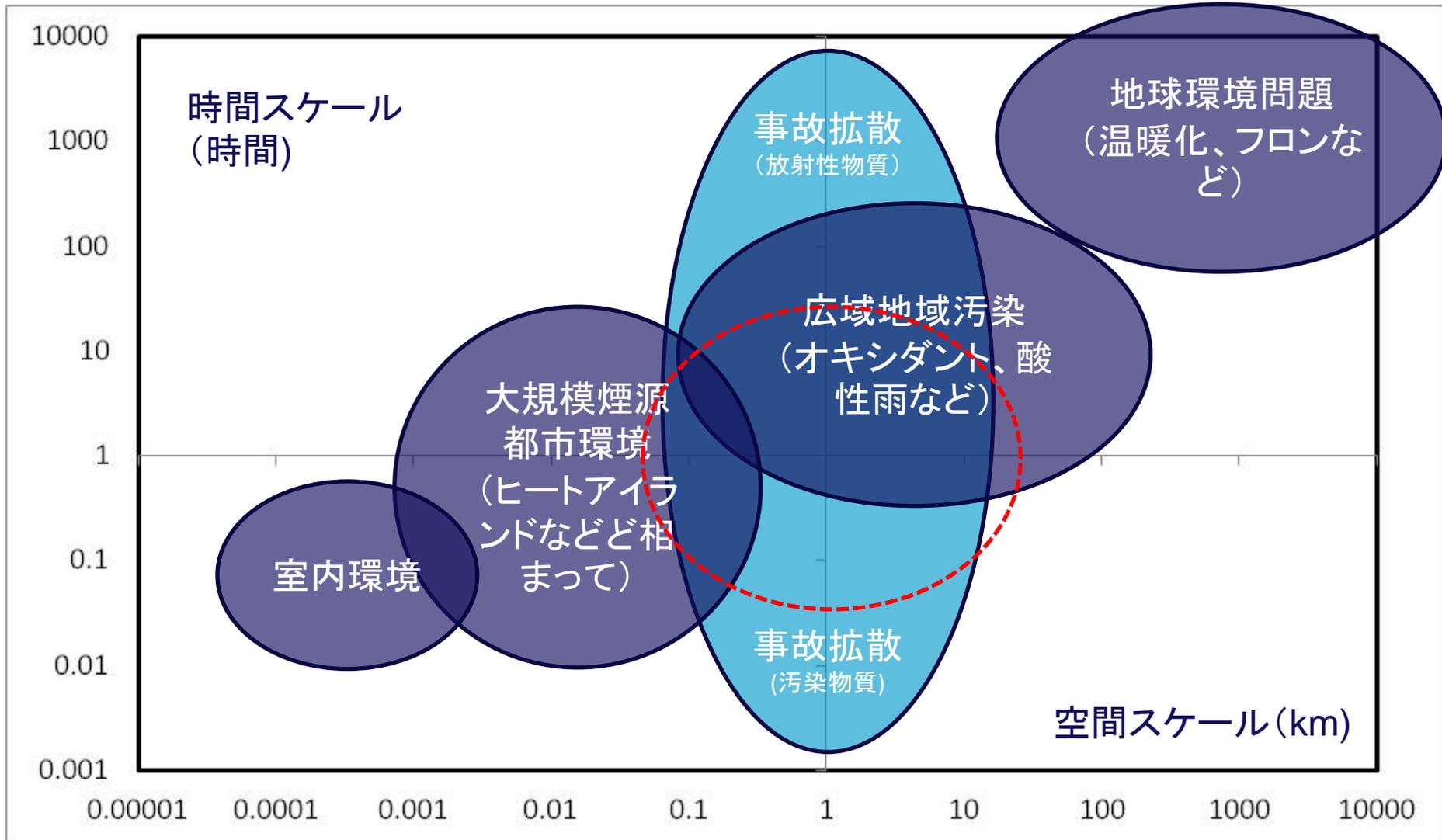


安定

逆転層

熱的な条件による排ガスの拡散状況

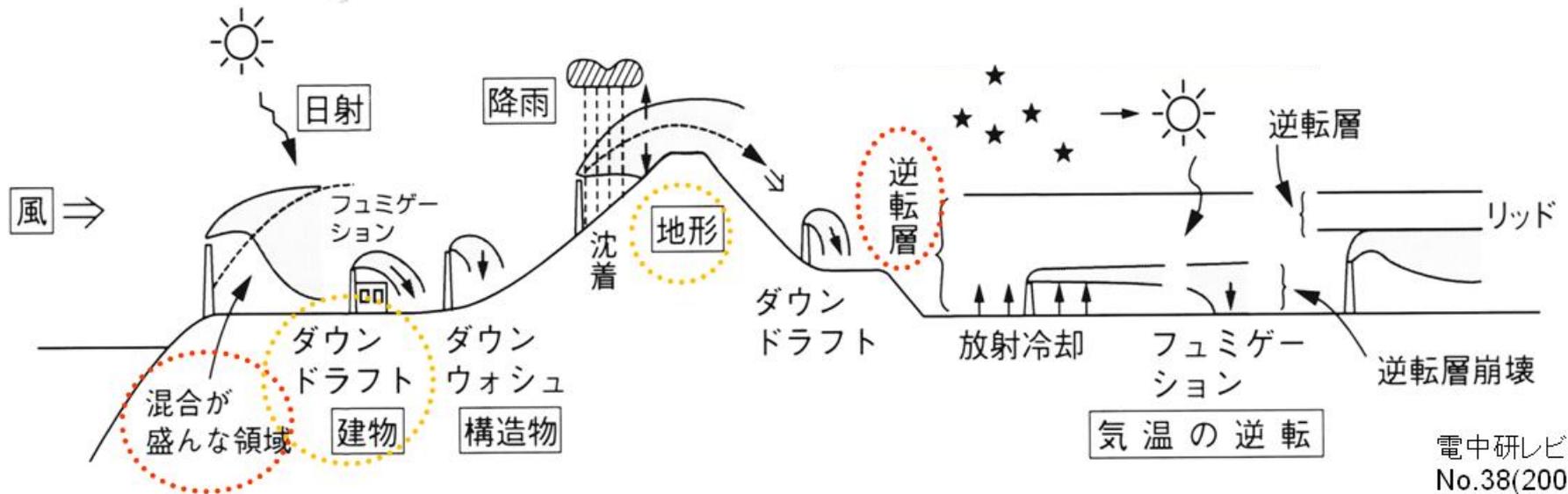
# ※大気などの環境問題のスケール(例示)



# ※排ガス拡散現象 : 排ガス拡散に影響を及ぼす要因

 : 建屋・地形影響

 : 熱の影響



電中研レビュー、  
No.38(2000)より

# ※大気環境、大気拡散の予測手法

方法	内容	特徴
野外観測 (トレーサ実験)	野外で気象観測、トレーサガスを放出し周辺の濃度を測定する。	<ul style="list-style-type: none"> <li>・実現象に相当</li> <li>・再現性に問題</li> <li>・費用と期間が非常に大</li> </ul>
室内実験 (風洞実験)	地形や建屋を再現した模型を風洞に入れ、気流やトレーサ濃度を測定する。	<ul style="list-style-type: none"> <li>・相似則の検討必要</li> <li>・実績多数</li> <li>・費用と期間が多</li> </ul>
数値モデル	運動式や拡散式を数値的に解いて気流や周辺の濃度を求める。	<ul style="list-style-type: none"> <li>・実現象に近い</li> <li>・再現する条件に応じモデル化手法を選択</li> </ul>



野外観測  
(サンプラーの例)

数値モデル  
(計算結果の例)

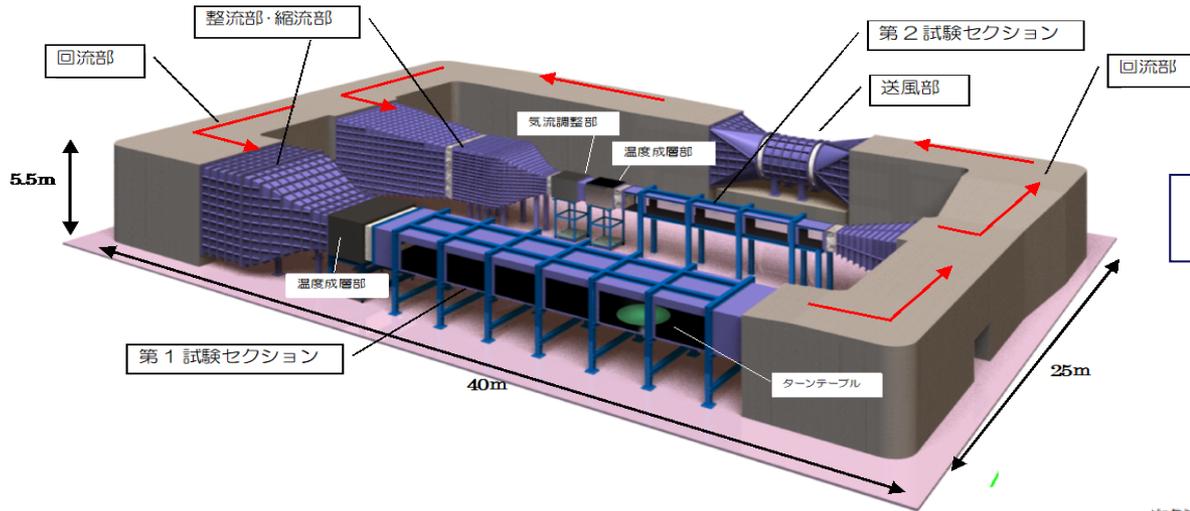


(正規分布型モデル: 排ガスの濃度分布を経験的に与える実用的な簡易的な手法。環境アセスメント&安全解析で広く活用される。)

風洞実験  
(実験状況の例)



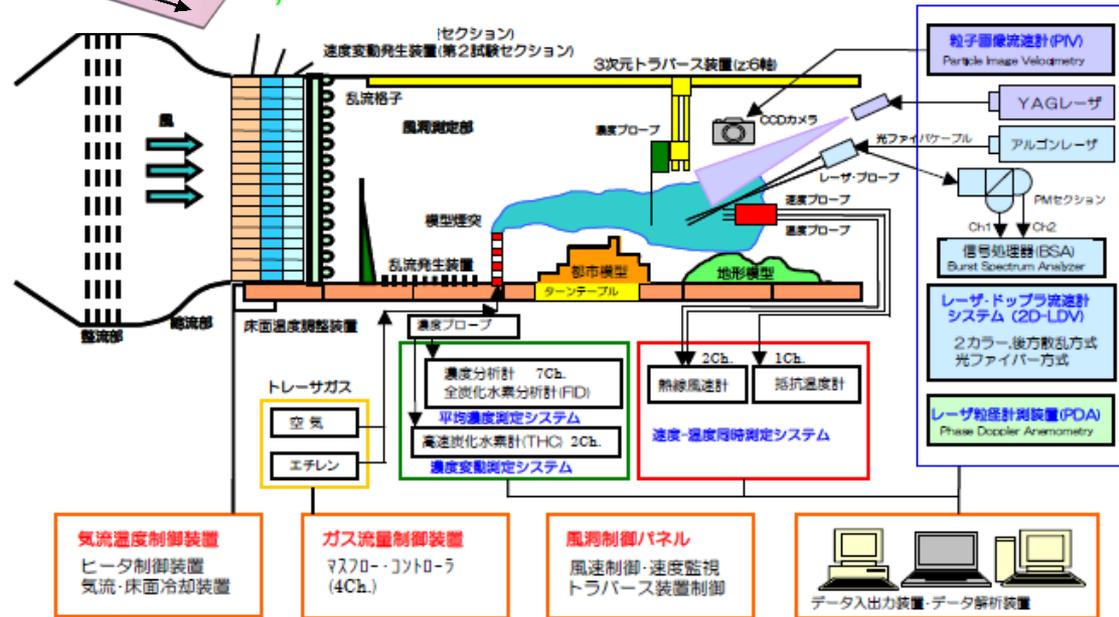
# 乱流輸送モデリング風洞（電中研の例示）



風洞概観



風洞状況



測定システム

# 本日の内容

1. はじめに : 発生源近傍の大気拡散現象
2. 大気拡散数値モデルの開発の流れ-火力発電所の例-
3. 原子炉施設・安全解析のための大気拡散数値モデルの開発  
-原子力学会標準の制定、2012年度-
4. 現在までの動き-原子炉学会標準の改訂へ-
5. 今後の大気拡散予測について

## ○火力発電所の大気拡散について

### 火力発電所：環境アセスメント

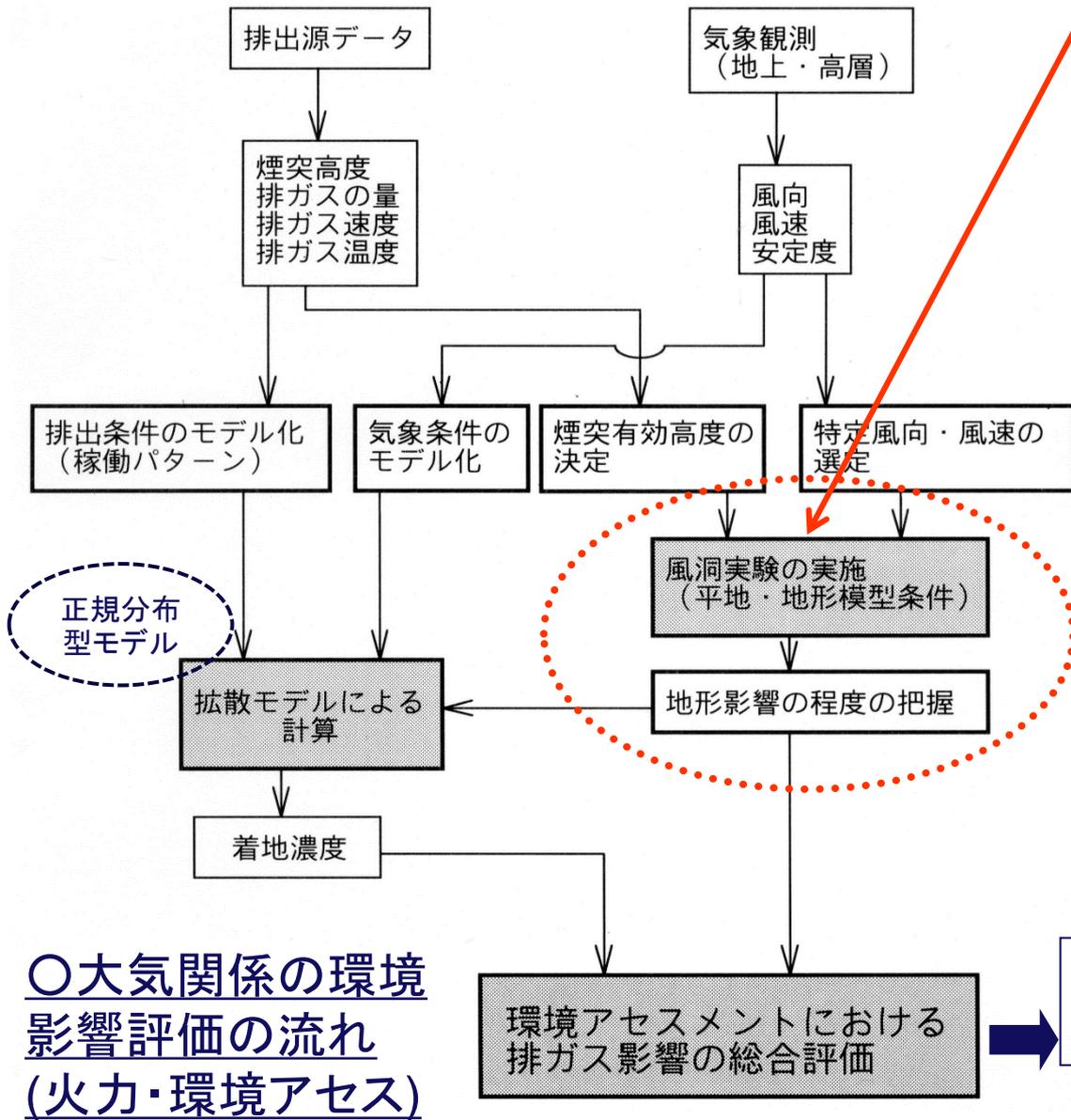
- ・排ガスに浮力有
- ・煙突は高い
- ・上空に排ガス
- ・窒素酸化物等を放出
- 地形の影響が大
- 数10km範囲で排ガス拡散評価

- 発電所等の規模が大きく環境影響が著しいものとなるおそれがある事業  
→ 環境影響評価を義務付け

評価対象としての発電所：道路などとともに多数

- 環境影響評価技術に係わる技術手法の向上、改善
- 住民等の意見の収集(反映)

窒素酸化物・硫黄酸化物・  
ばいじんの環境濃度(環境基準)



**【数値モデルの開発・適用】**

—排ガス拡散に及ぼす  
地形影響の把握—

- 従来から風洞実験を実施
- 信頼性の高い、詳細な排ガス拡散予測を得られる  
数値モデルを新たに開発・適用

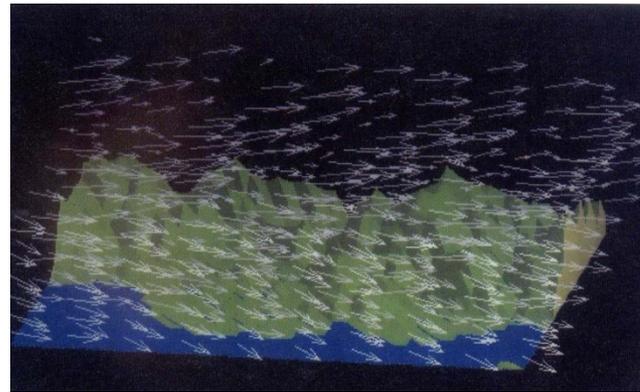
○大気関係の環境  
影響評価の流れ  
(火力・環境アセス)

窒素酸化物・硫黄酸化物・  
ばいじんの環境濃度(環境基準)

## ○火力発電所・地形影響モデルの開発(1)

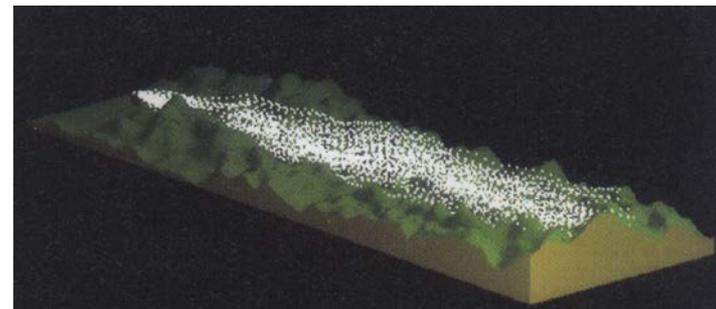
### ・気流場のモデル: 応力方程式モデル【静力】

乱流モデルを使用して運動方程式を閉じる

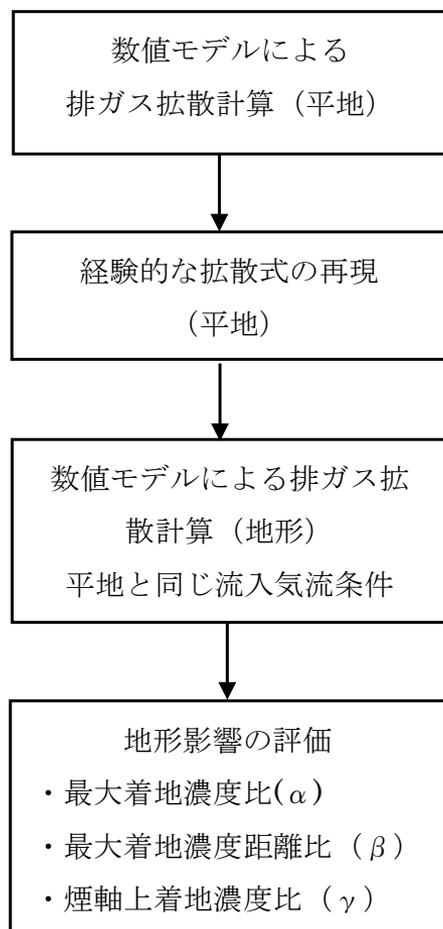


### ・拡散場のモデル: ラグランジュ型粒子モデル

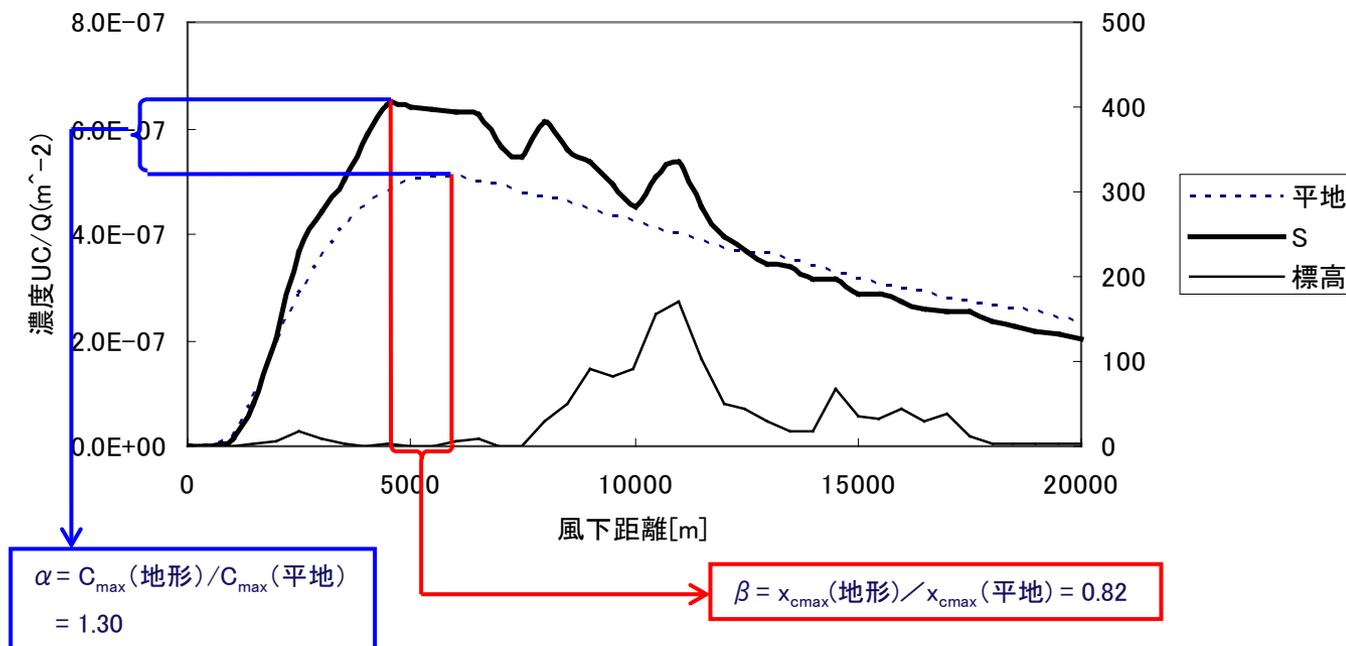
個々の粒子の挙動から統計的に濃度を計算



# ○地形影響係数の評価(1)



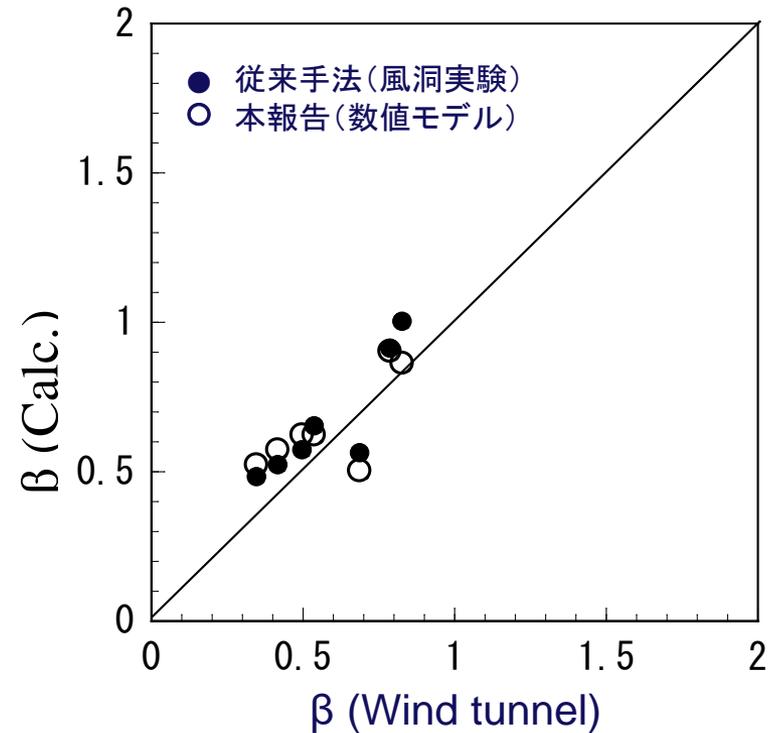
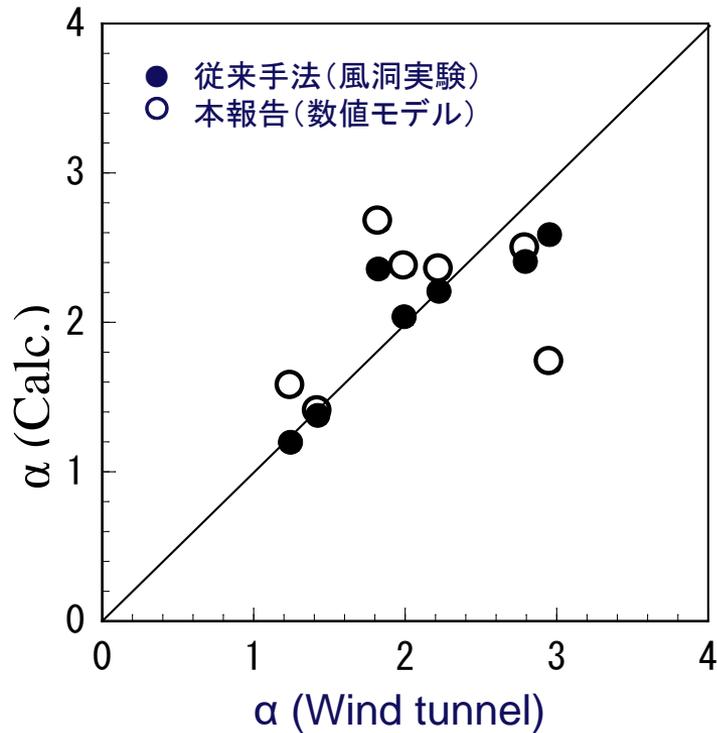
(a) 評価の流れ



(b) αとβの評価概念図

- ・最大着地濃度比(α) = 地形を入れた場合の最大着地濃度 / 平板での最大着地濃度
- ・最大着地濃度距離比(β) = 地形を入れた場合の最大着地濃度の出現距離 / 平板での最大着地濃度の出現距離

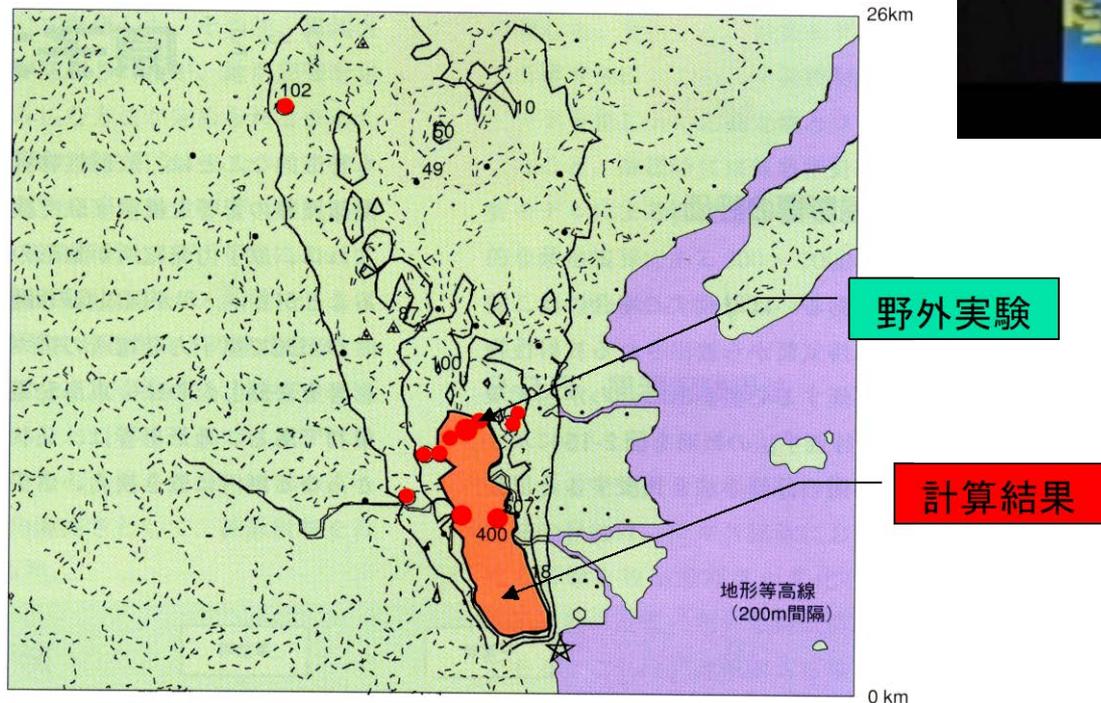
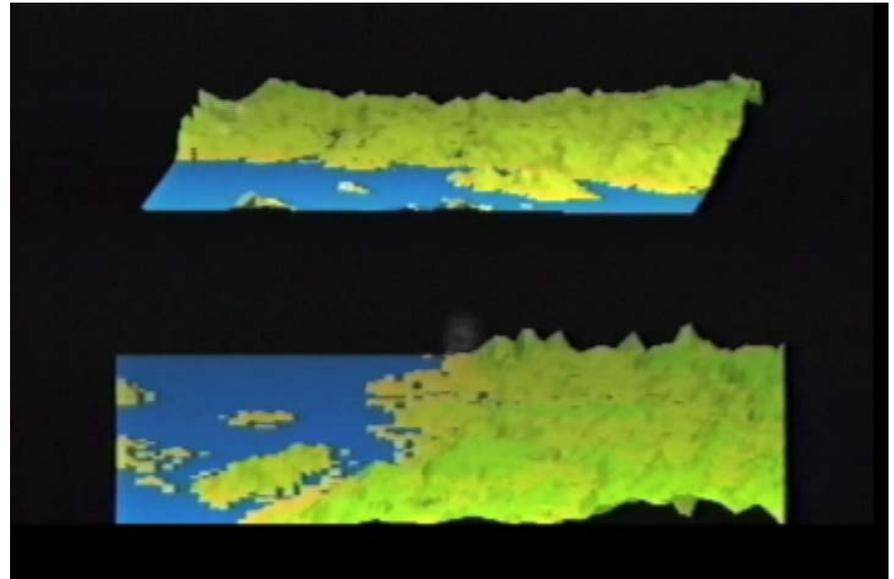
○地形影響係数の評価(2)



(a)地形影響評価係数 (最大着地濃度比  $\alpha$ 、最大着地濃度距離比  $\beta$ )

# ○火力発電所・地形影響モデルの開発(2)

排ガスの可視化例



野外実験

計算結果

数値モデルによる地表濃度分布計算結果と野外トレーサ実験結果の比較

●は野外実験100ppt以上の観測位置、計算結果で灰色の領域は100ppt以上の領域

## ○火力発電所・地形影響モデルの実用化へ

- 開発した**数値モデル** → 環境アセスメント実施のための手引に記載

資源エネルギー庁編，発電所に係る環境影響評価の手引，  
1999.

「地形影響を評価する手法については、従来**風洞実験**によっていたが、現在では**数値モデル**によることも可能となったことから、これらの手法を適宜選択して利用することとする」

○火力・環境アセスへの実適用へ

数値モデル



○: 数値モデル適用地点  
2000年～

- 開発した**数値モデル**を使用適用できる唯一の研究機関(電中研)  
→ 約20地点以上への火力発電所へ適用
- 詳細な予測結果を提供

○大気質に関する予測項目～「手引」の参考手法～

項目		予測手法（参考手法）
年平均値		窒素酸化物総量規制マニュアル
日平均値		同上
特殊気象 (1時間値)	逆転層	同上
	煙突ダウンウォッシュ	同上
	建物ダウンウォッシュ	窒素酸化物総量規制マニュアル EPAモデル(ISC-PRIME)
	内部境界層	窒素酸化物総量規制マニュアル フュミゲーションモデル
地形影響（1時間値）		風洞実験 数値モデル（電中研モデル） EPAモデル(ISC-ST3)

- 火力発電所排ガス拡散評価の中心は、年および日平均値であり、大気拡散のためには正規分布型モデルが活用されている。
- 開発した地形影響モデルは、地形影響がある地点において代表的な数風向に適用されることが多い。

# 本日の内容

1. はじめに : 発生源近傍の大気拡散現象
2. 大気拡散数値モデルの開発の流れ-火力発電所の例-
3. 原子炉施設・安全解析のための大気拡散数値モデルの開発  
-原子力学会標準の制定、2012年度-
4. 現在までの動き-原子炉学会標準の改訂へ-
5. 今後の大気拡散予測について

## ○原子力発電所の大気拡散について

### 原子力発電所：安全性解析

- ・排ガスに浮力無
- ・排気筒は低い
- ・地表付近に排ガス
- ・気体廃棄物を放出
- 建屋・地形の影響が大
- 5km以内で排ガス拡散評価

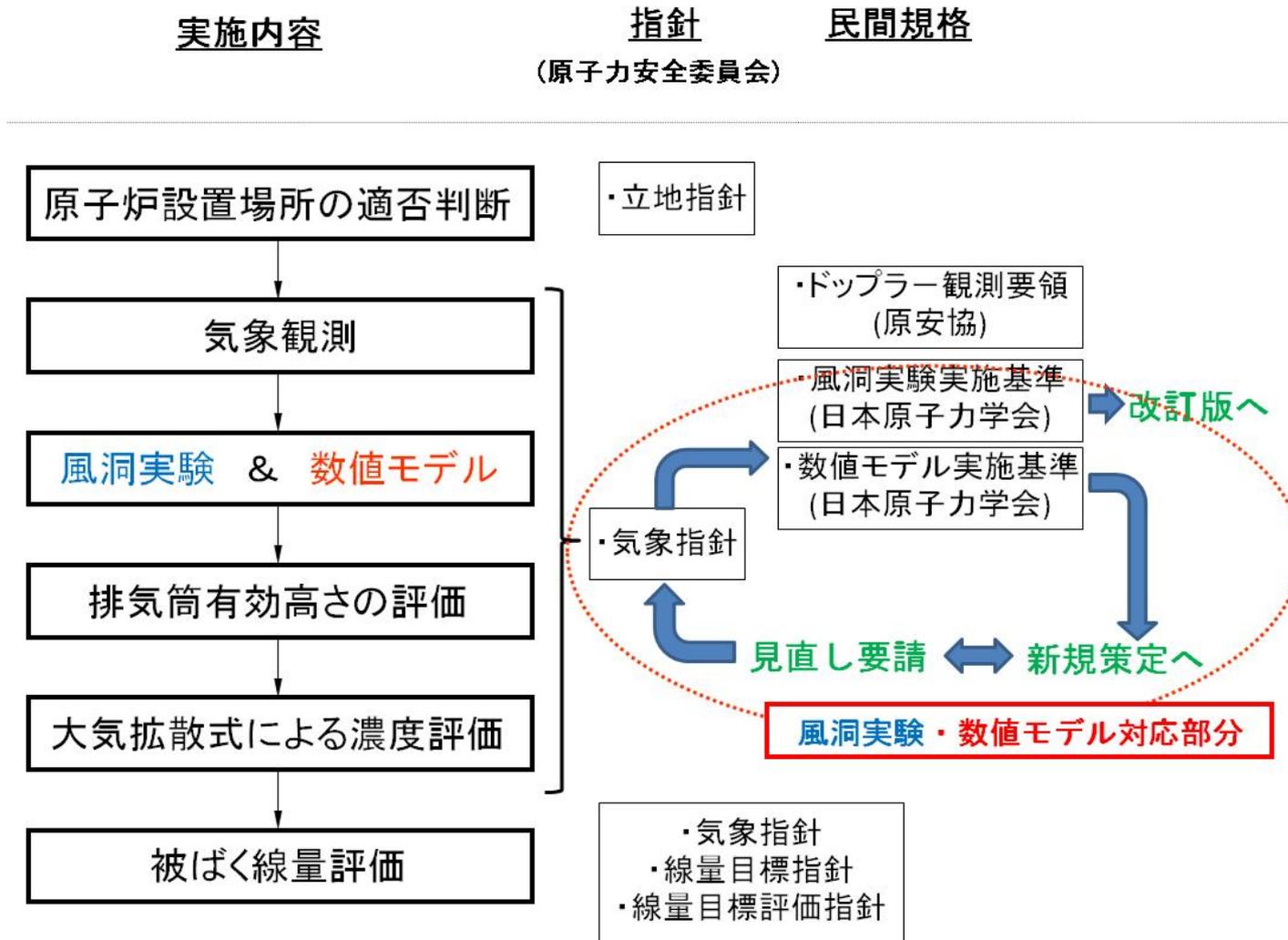
- 発電所等からの放射性物質の環境への放出
  - 十分な防護対策を講じ、被ばく線量を達成できる限り低く保つ

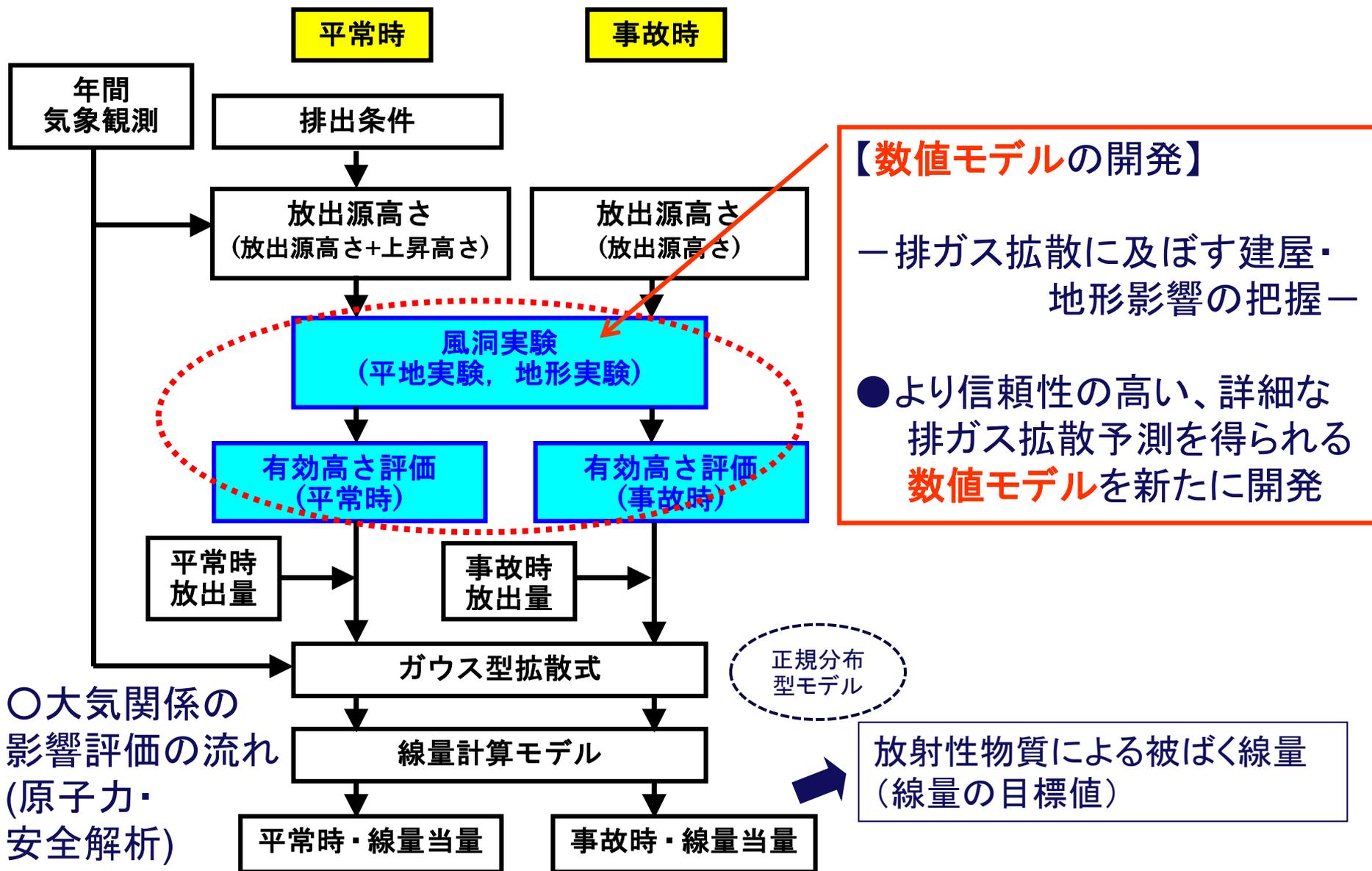
評価対象としての発電所： 全ての発電所、  
再処理関係施設

- 今後の経験と新しい知見により
  - (現行の大気拡散解析方法は) 見直される
- 環境リスクの考え方

放射性物質による被ばく線量  
(線量の目標値)

# ○原子力発電所の大気拡散・被ばく評価に関する安全解析の流れ



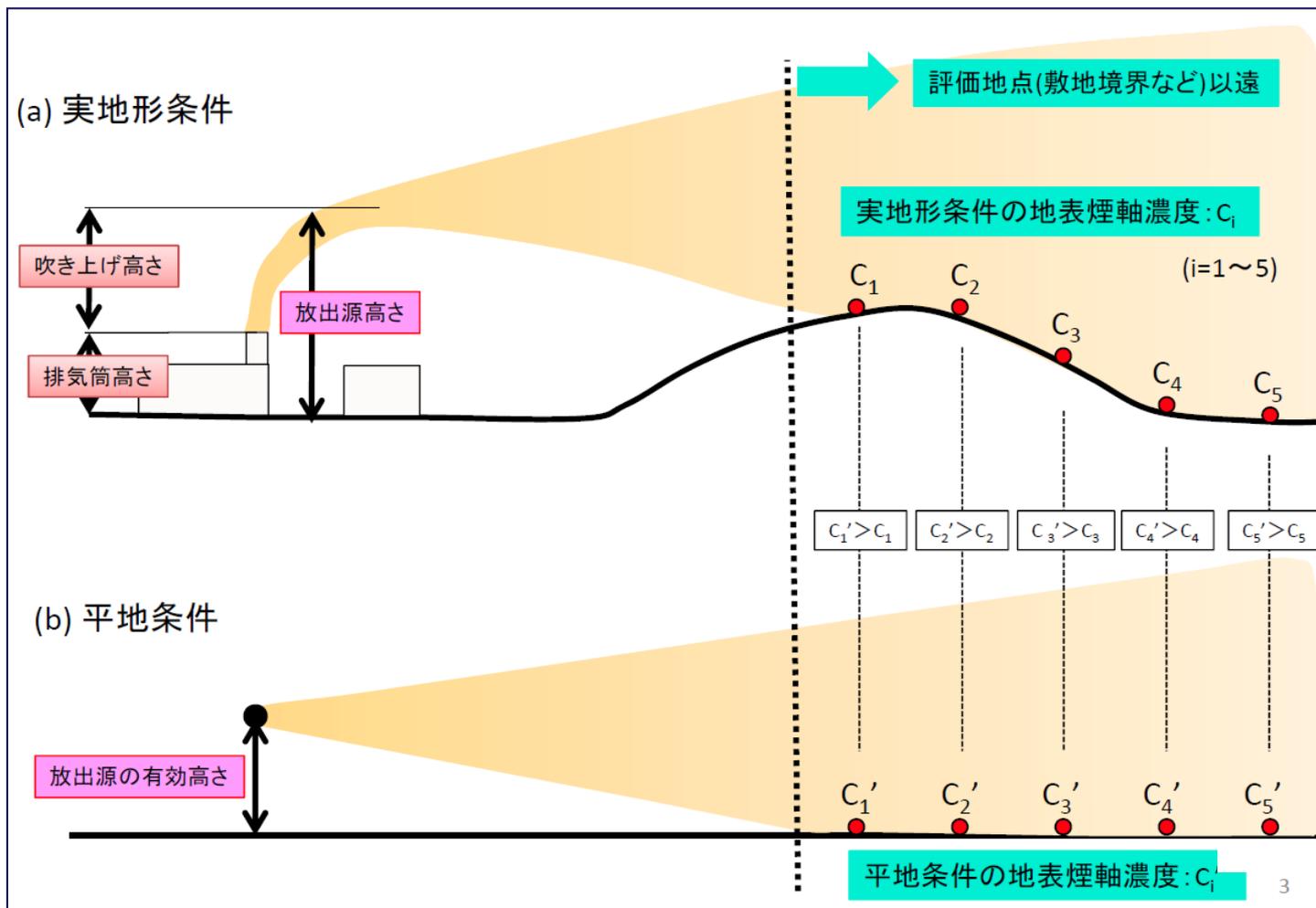


**補足**

○放出源の有効高さの評価方法

○放出源の有効高さを、線量計算を行うために「正規分布型拡散モデル」に入力すると、地表濃度は実際の地形・建屋条件よりも大きくなる。

○放出源の有効高さは、大気拡散の観点から地表濃度を安全側に与えるために仮想的に与えるパラメータと考えることができる。



## ○原子力発電所の数値モデルの開発(1)

- ・**気流場のモデル**: **二方程式モデル(修正k-ε系)**【非静力】

乱流モデルを使用して運動方程式を閉じる

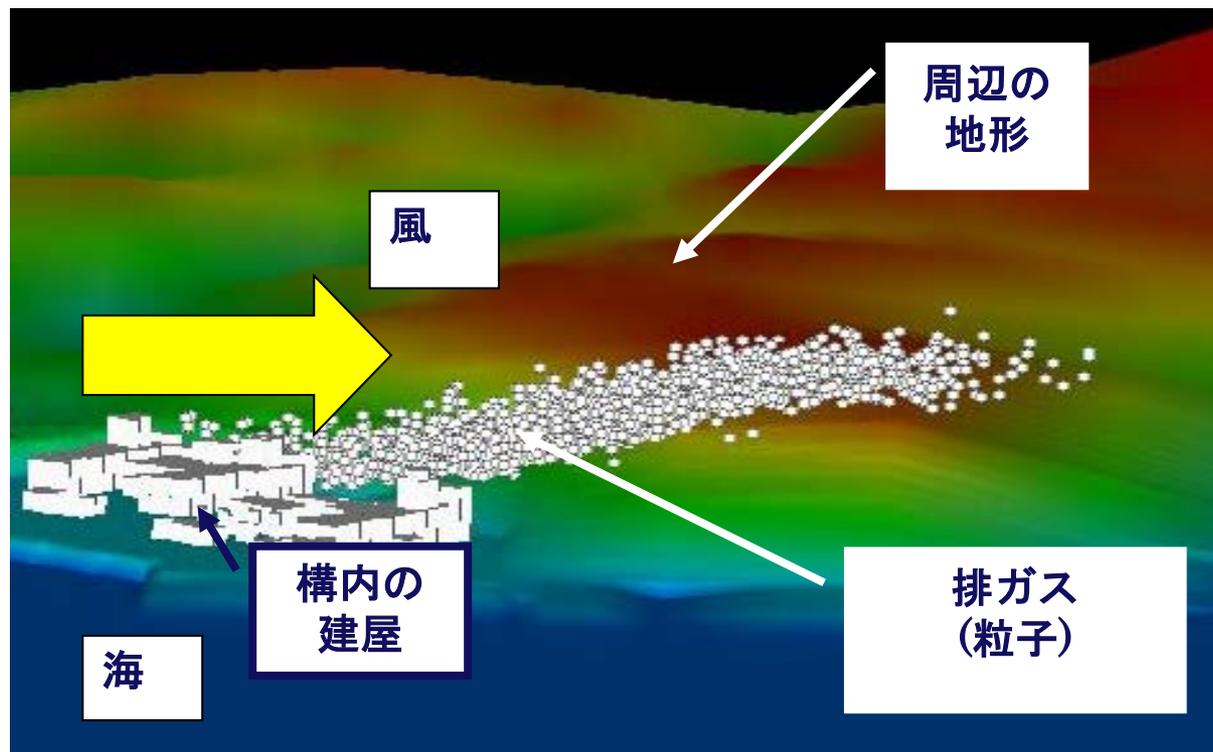


原子力発電所排気筒

- ・**拡散場のモデル**: **ラグランジュ型粒子モデル**

個々の粒子の挙動から統計的に濃度を計算

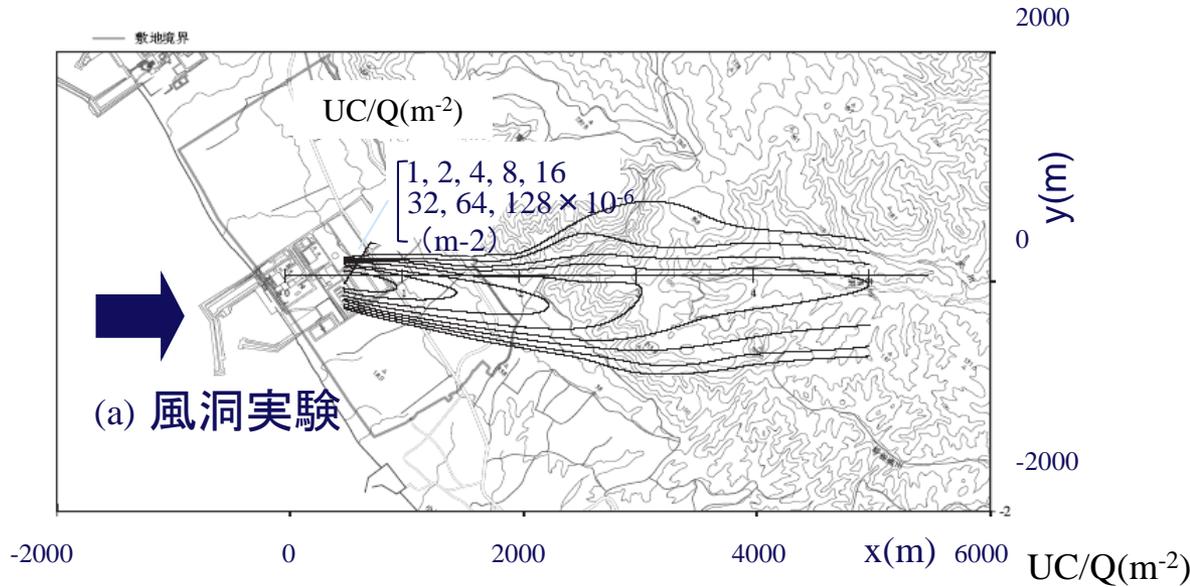
## ○原子力発電所の数値モデルの開発(2)



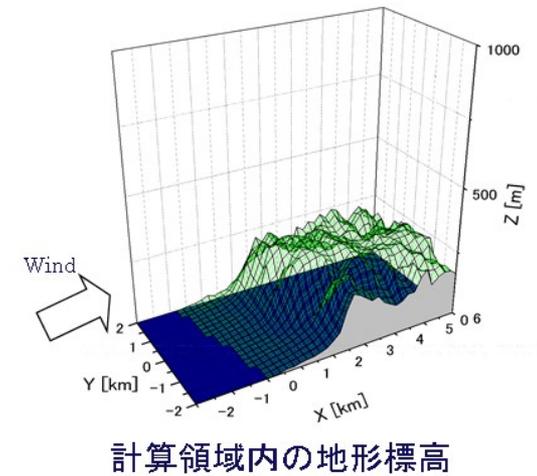
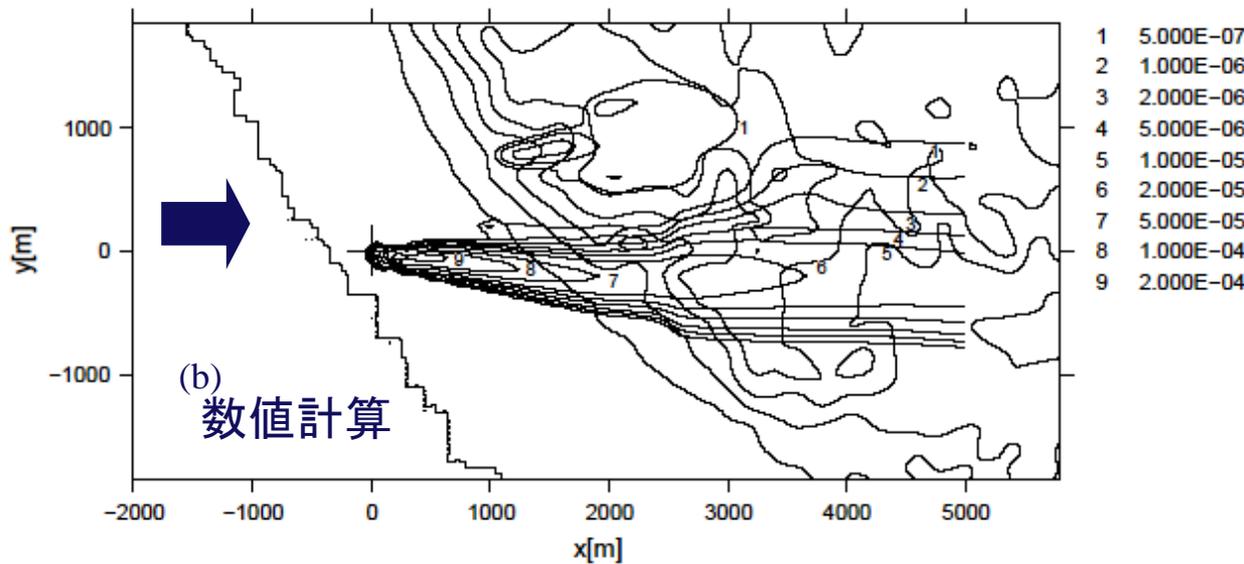
原子力施設・事故時(想定)の排ガス拡散状況

- 排気筒が低く、建屋に近接  
→建屋・地形の複合条件に適用できる数値モデルを開発
- 信頼性が高く、詳細な予測結果を提供へ

○原子力発電所の数値モデルの開発(3)



事故時における  
地表濃度分布(風向6)



日本原子力学会標準 発電用原子炉施設の安全解析における放出源の有効高さを求めるための数値モデル計算実施基準:2011

1. 適用範囲
2. 用語及び定義
3. 放出源の有効高さ評価用の数値モデルの**検証及び妥当性確認**
  - 3.1 検証と妥当性確認の実施
  - 3.2 数値モデルの検証方法
  - 3.3 数値モデルの妥当性確認方法
    - 3.3.1 直方体建屋の風洞実験結果による妥当性確認
    - 3.3.2 放出源の有効高さの風洞実験結果による妥当性確認

4. 平常運転時を対象とした計算
5. 想定事故時を対象とした計算

6. 計算方法
  - 6.2 計算モデル
    - 6.2.1 気流計算モデル
    - 6.2.2 拡散計算モデル

7. 計算結果の整理方法
8. 計算結果を用いた放出源の有効高さ評価方法

9. 計算結果の記録
- 10.品質保証の確保

V&Vの考え方を導入

今後の課題(本標準策定時)

※関連する指針への数値モデル導入

※数値モデルの“適用地点の蓄積”、“予測精度の向上” etc

【2011年当時】



# 本日の内容

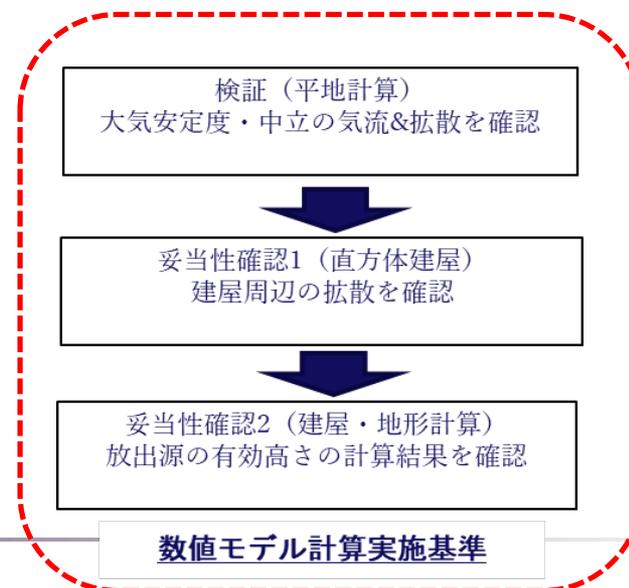
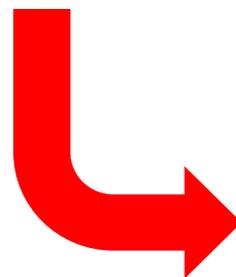
1. はじめに : 発生源近傍の大気拡散現象
2. 大気拡散数値モデルの開発の流れ-火力発電所の例-
3. 原子炉施設・安全解析のための大気拡散数値モデルの開発  
-原子力学会標準の制定、2012年度-
4. 現在までの動き-原子炉学会標準の改訂へ-
5. 今後の大気拡散予測について

# 日本原子力学会標準 発電用原子炉施設の安全解析における放出源の有効高さを求めるための数値モデル計算実施基準:2011

1. 適用範囲
2. 用語及び定義
3. 放出源の有効高さ評価用の数値モデルの検証及び妥当性確認
  - 3.1 検証と妥当性確認の実施
  - 3.2 数値モデルの検証方法
  - 3.3 数値モデルの妥当性確認方法
    - 3.3.1 直方体建屋の風洞実験結果による妥当性確認
    - 3.3.2 放出源の有効高さの風洞実験結果による妥当性確認



4. 平常運転時を対象とした計算
5. 想定事故時を対象とした計算
6. 計算方法
  - 6.2 計算モデル
    - 6.2.1 気流計算モデル
    - 6.2.2 拡散計算モデル
7. 計算結果の整理方法
8. 計算結果を用いた放出源の有効高さ評価方法
9. 計算結果の記録
- 10.品質保証の確保



放出源有効高さモデル実施基準-V&V との対応・評価

全体像(詳細版)

“現実世界”【大気】

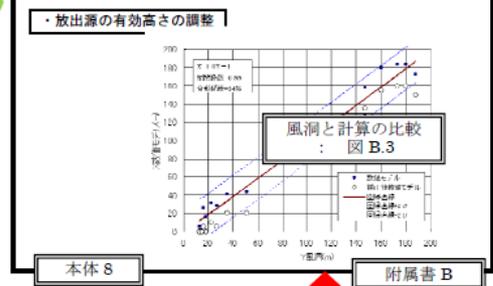
概念モデルへの抽象化  
(重要物理プロセスの抽出)  
【有効高さ】

“被ばく評価”

有効高さの評価方法

【大気拡散式は、本来放射線物質が放出源から定常的に放出され、かつ、地形が平坦な場合に適用】  
【地形が複雑な場合や放出源に対する建屋等の影響が著しい場合】(大気)拡散式による値を修正し、評価する必要】

① 「敷地の地形が複雑な場合又は放出源に対する建屋等の影響が著しいと予想される場合」には、  
② 「放出源の有効高さ等の妥当性を検討するため、それぞれの幾何学的条件を取り入れたモデルを用いて風洞実験を実施する」



**数値モデル**

本体 3.2 本体 6.2

平地計算との比較で評価される放出源の有効高さの評価への適用という意図した利用法

気流モデル 拡散モデル

- 建屋及び地形によって生じる平地条件からの気流の変化、乱流強度等の平地条件からの変化を解析
- その目的に沿って、十分な精度で計算できる乱流モデル (k-εモデル等) を使用
- 建屋及び地形の影響が反映された平均風速及び乱流強度等の計算結果を入力して解析
- その目的に沿って、十分な精度で計算できる粒子モデル等の拡散計算モデルを使用

**計算モデル・計算コードの確認**

本体 3.2 附属書 B

気流モデルの例&適用 拡散モデルの例&適用

地形&建屋、輸送方程式の座標変換、地表面等の取扱、計算手法(離散化、収束判定)やアルゴリズム等

計算領域 & 構造物の再現 & 気流及び拡散設定 & 粒子数・計算格子

(計算モデル・計算コードの確認を、主に検証(平地計算)とともに実施)

附属書 C&E&G

**検証**

本体 3.2 本体 6.1 附属書 B

平地計算

平地計算による気流拡散条件の確認

(a) 1/7 乗則、(b)境界層高さ 400m 以上、(c)30m で乱流強度 8%-16%、(d) 鉛直広がりパラメータ C-D 相当

気流及び拡散設定

附属書 F

**風洞実験**

風洞実験実施基準

△D

**合否判断**

比較誤差  $E \sim \delta_{model} + (\delta_{num} + \delta_{input} - \delta D)$

数値シミュレーション

**妥当性確認**

本体 3.3

建屋・地形計算

建屋地形計算による放出源の有効高さの確認

(a) 回帰直線の傾き 0.9~1.1 で (b) 相関係数が 20% 以内

風洞実験結果の例

直方体建屋計算

直方体建屋による濃度分布の確認

(a) 濃度値: ファクター 2 以内になる割合が 54% 以上

(b) 地表煙軸濃度: ファクター 2 以内になる割合が 89% 以上

風洞実験結果: 図 B.2

日本原子力学会標準 シミュレーションの信頼性確保に関するガイドライン:2015

1. 適用範囲
2. 用語及び定義

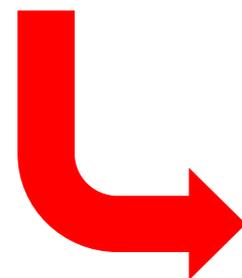
3. シミュレーションの信頼性確保のための基本的な考え方

- 3.1 エlement1: 概念モデルの開発
- 3.2 エlement2: 数学的モデル化
- 3.3 エlement3: 物理的モデル化
- 3.4 エlement4: シミュレーションモデルの予測性能の判断

3.5 不確かさを考慮した予測評価の実施

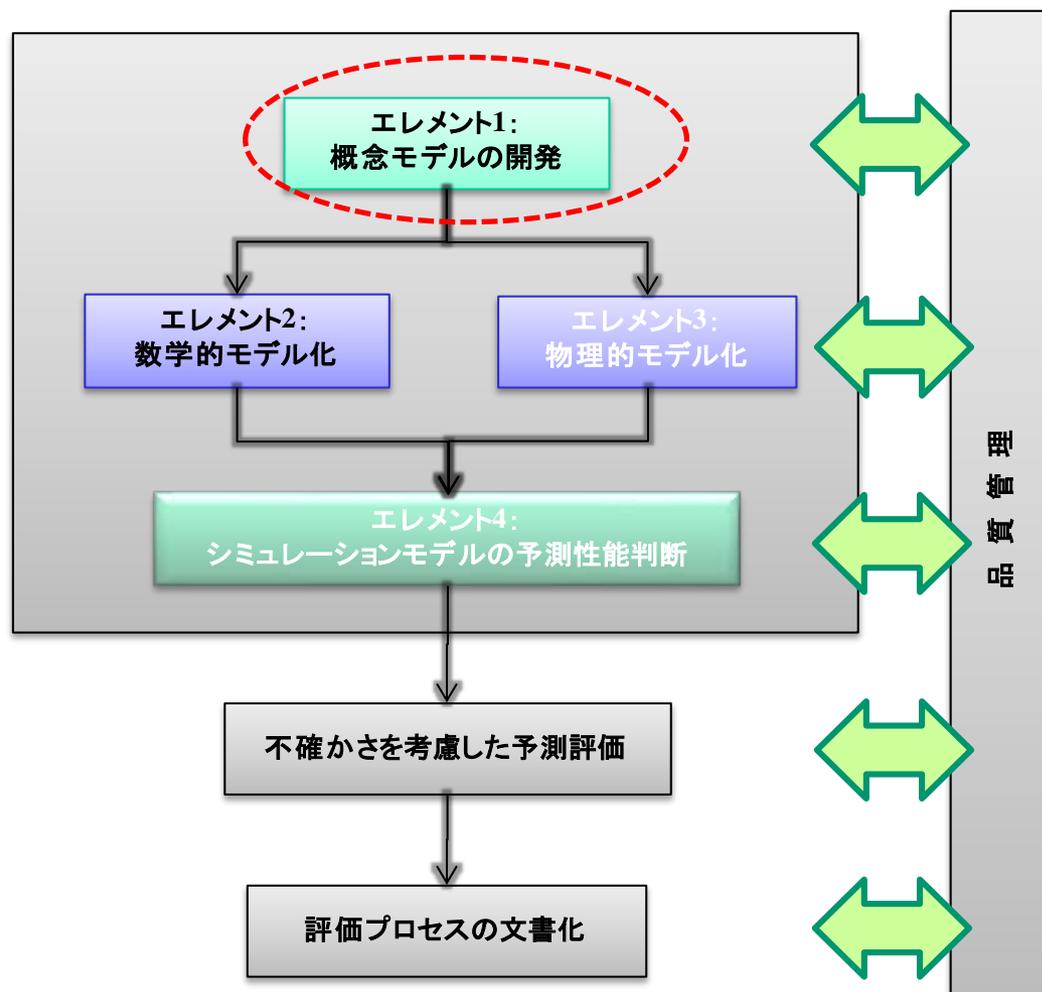
3.6 評価プロセスの文書化

3.7 品質管理



次ページ

各エレメントの概要①



- ✓ エレメント1  
 (概念モデルの開発)  
 ・シミュレーションの対象となるシステム内の実現象を同定 & シミュレーションの所期の利用目的を特定  
 ・実現象(現実世界?)を理想化した概念モデルを開発

## 各エレメントの概要②

## ✓ エレメント2(数学的モデル化)

・概念モデルを数学的表現に変換&デジタル計算機によって解を求めるべく数値モデルとして実装

## ✓ エレメント3(物理的モデル化)

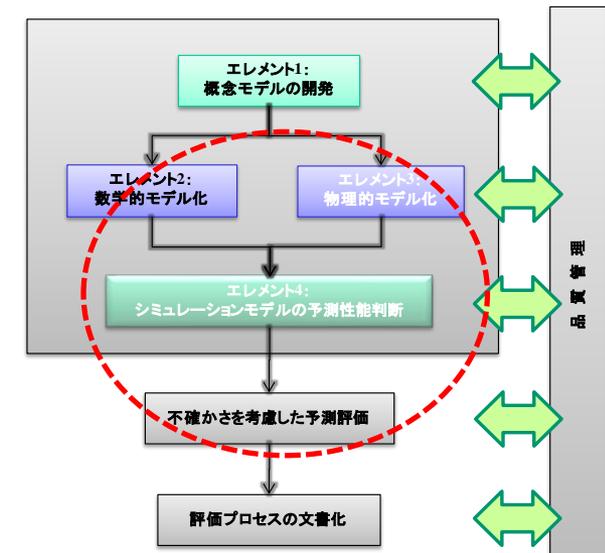
・概念モデルを実験計画に変換して実験データを取得、又は概念モデルに従った不確かさについて評価済みの実験データが取得されていることの確認

## ✓ エレメント4(シミュレーションモデルの予測性能の判断)

・モデルの予測性能を評価&所期の利用目的に即して合否判定

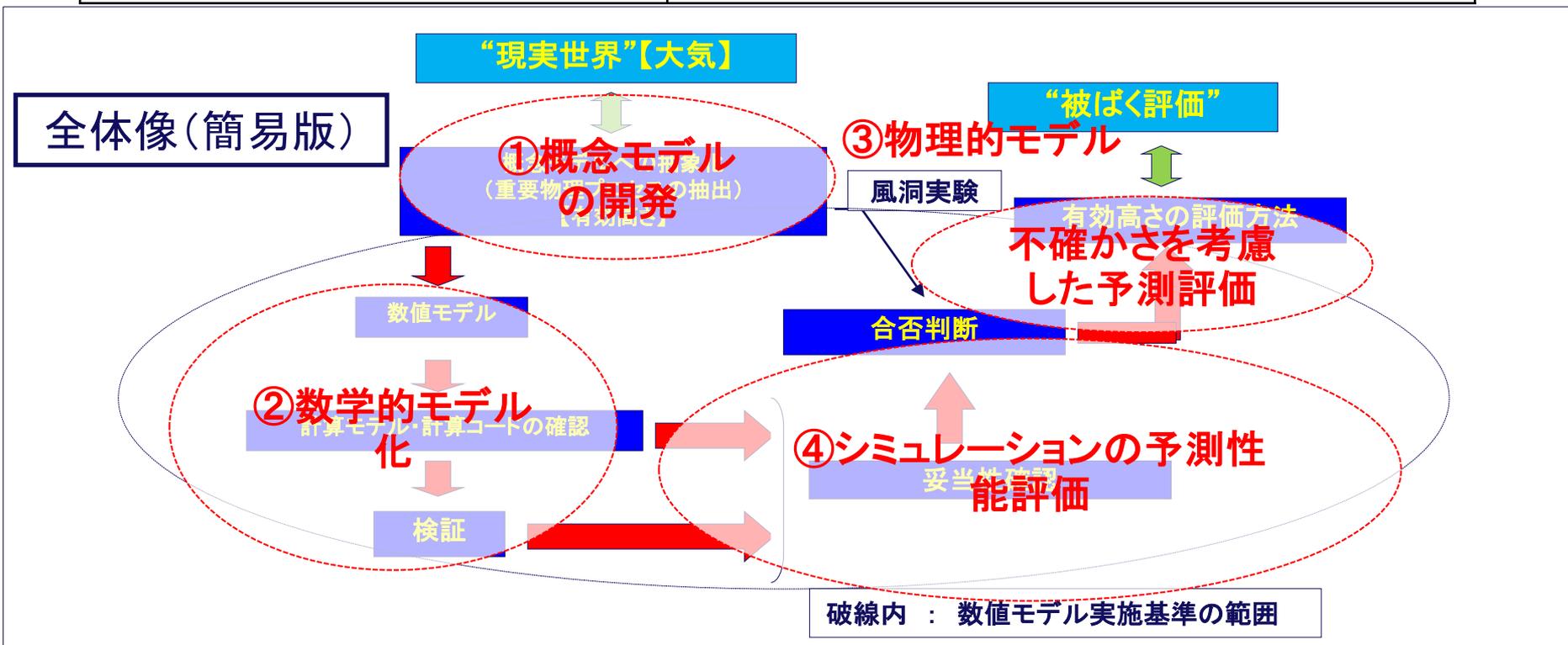
## ✓ 不確かさを考慮した予測評価

・所期の利用目的に対して、不確かさを考慮した予測計算を実施



○放出源有効高さモデル実施基準とガイドの対応(まとめ)

「ガイドライン」での実施プロセス	従来の考え方による実施プロセス (例示)
エレメント①：概念モデルの開発	概念モデルへの抽象化
エレメント②：数学的モデル化	計算モデル・計算コードの確認、検証
エレメント③：物理的モデル化	—
エレメント④： シミュレーションの予測性能判断	妥当性確認、合否判定
不確かさを考慮した予測評価	有効高さの評価



## ○ガイドライン(用語の定義)

### ・モデル検証

数値モデルが、その基礎となる数理モデルを忠実に表現し、かつ数値モデルの解を、デジタル計算機の打ち切り誤差及び収束許容値の範囲内において導くことを確認する実施プロセス。

### ・モデル妥当性確認

モデルが、その所期の利用目的に従ったシミュレーションの予測性能に関する要求の観点から、対象とする実現象を満足できる幅で予測できることを確認する実施プロセス。

## ○放出源有効高さモデル実施基準(用語の定義)

### ・検証

数値モデルが概念モデルとその解をどのくらい精度良く表しているかを定めるプロセス。  
⇒“モデル検証”か、数値モデルの呼称を活用するか

### ・妥当性確認

使用目的に対してモデルが現実世界をどのくらい精度良く表しているかを定めるプロセス。  
⇒“モデル妥当性確認”か、ここで現実世界(実現象?)に言及するか

## ○ガイドラインにおける不確かさ

- ・“シミュレーションモデルの誤差 $\delta_{model}$ ”、“比較誤差成分 $E_{comparison}$ ”は、所期の利用目的に対して、それぞれ“数値モデルの推定誤差”および“実験と数値モデルの差違”と位置づける。
- ・数値モデルの推定誤差 $\delta_{model}$  は、実験と数値モデルの差違 $E_{comparison}$  と以下の関係である。

$$\delta_{model} = E_{comparison} - (\delta_{input} + \delta_{num} - \delta_D)$$

$\delta_{input}$  : モデルによるシミュレーション(に起因するもの)  
⇒入力による不確かさ

$\delta_{num}$  : 離散化誤差成分及び丸め誤差(に起因するもの)  
⇒離散化にともなう不確かさ

$\delta_D$  : 実験の誤差  
⇒実験(例えば、風洞実験による放出源の有効高さ)の不確かさ

## ○原子力学会ガイドラインにおける不確かさへの対応(1)

### ・風洞実験と数値モデルの差違 $E_{comparison}$ の場合

⇒原子力学会ガイドラインの“不確かさを考慮した予測評価”の入力値となる。

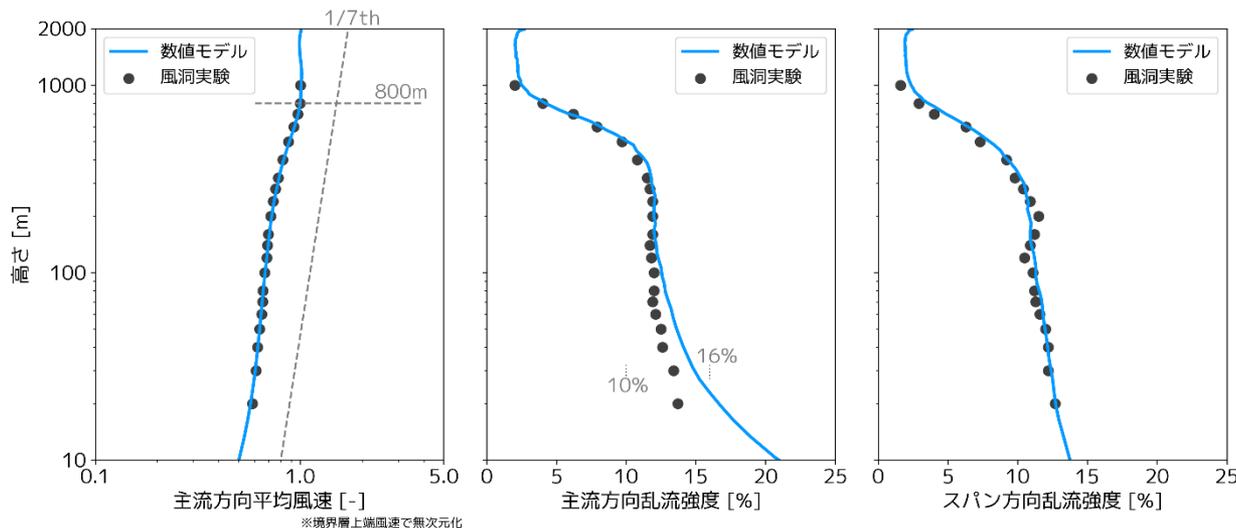
⇒本標準に加えて、以下の最新の計算手法による新知見の活用へ

例えば、『放出源の有効高さを求めるための数値モデルの高度化 -LESを用いた風洞実験再現精度の向上-』、電力中央研究所研究報告O18009(2019)』など

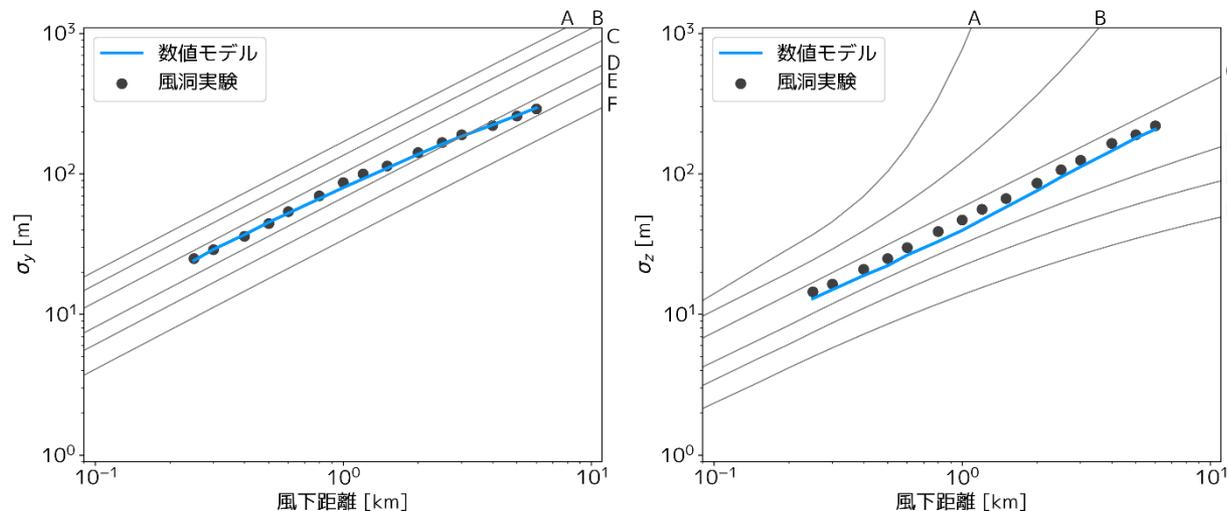
・気流場、拡散場ともに、LESによる細かい計算格子により数値解を得ること。

# ○最新の計算手法による新知見の活用へ (LES適用結果例1-平地条件における再現-)

・気流計算結果  
～平均速度、乱流強度など

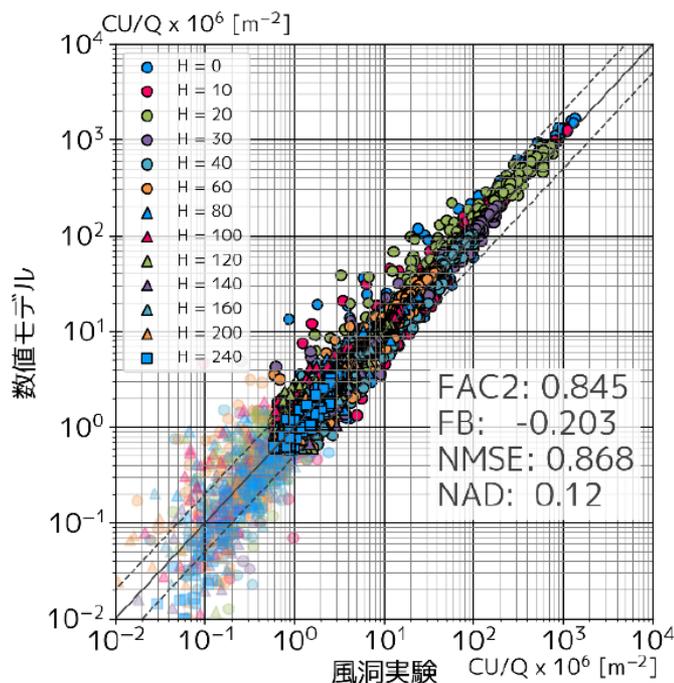


・拡散計算結果  
～水平および鉛直方向の拡散のパラメータ

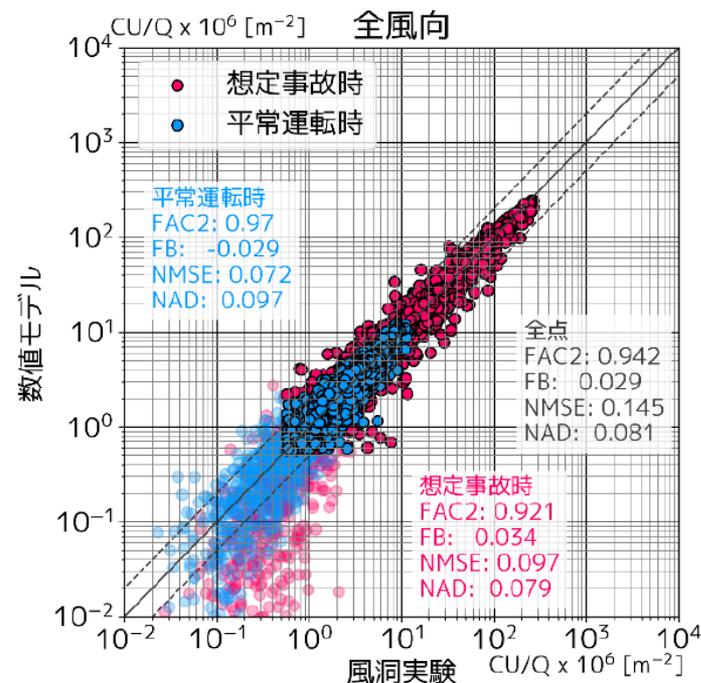


数値モデル実施基準では、『検証』に相当する。

# ○最新の計算手法による新知見の活用へ (LES適用結果例2-地表濃度分布-)



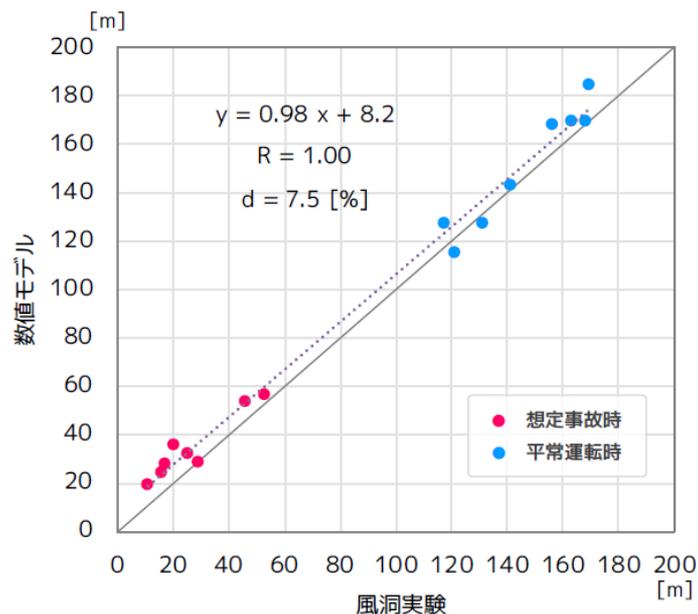
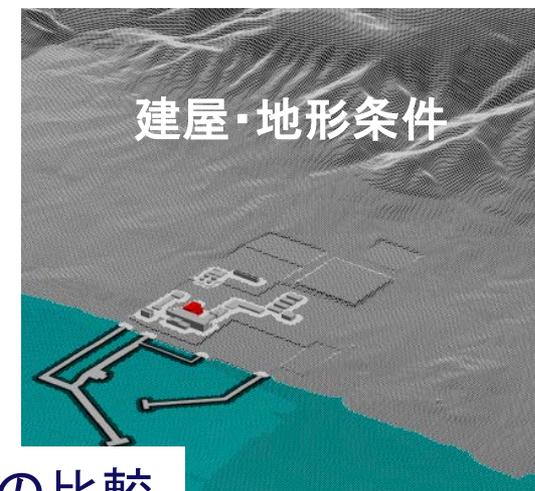
・平地条件



・実地点(建屋地形条件)

数値モデル実施基準では、“濃度”の予測に関する規定は無い。

# ○最新の計算手法による新知見の活用へ (LES適用結果例3 -放出源の有効高さ-)



## ・放出源の有効高さの比較

	数値モデル 実施基準	従来の数値 モデル <sup>注1)</sup>	本報の 数値モデル
回帰直線の 傾き	0.9~1.1	1.0	0.98
相関係数	0.9以上	0.99	1.00
変動係数	20%以下	14%	7.5%

## ・放出源の有効高さ

数値モデル実施基準では、『妥当性確認』に相当する。

## ○原子力学会ガイドラインにおける不確かさへの対応(2)

### ・離散化にともなう不確かさ $\delta_{num}$ の場合

⇒例えば、GCI(Grid Convergence Index)を導入することより、離散化にともなう評価を実施するか。

(“2019秋の大会/一般セッション”などを参照。この定量化も最新の研究実施による新知見として反映へ。)

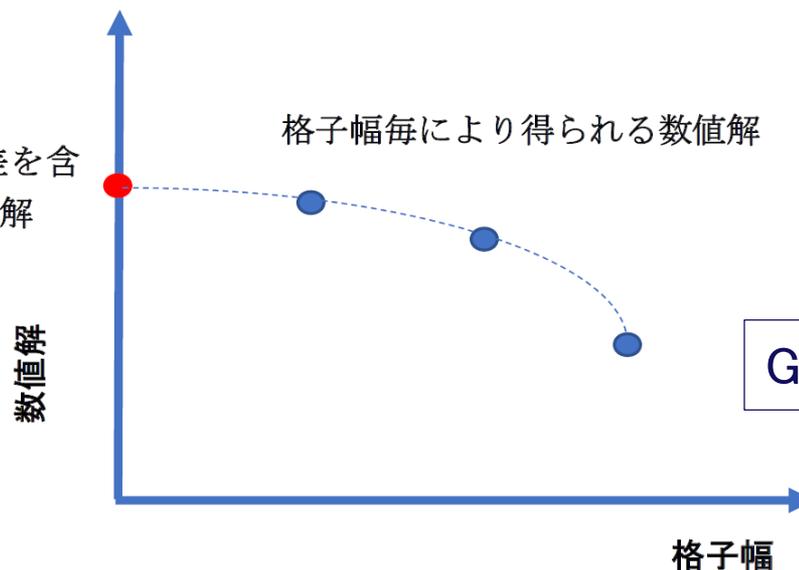
“放出源の有効高さを求めるための数値モデルの不確かさ評価 GCIを用いた離散化に伴う不確かさの検討”、日本原子力学会、秋の大会、2019

離散化誤差を含まない数値解

格子幅毎により得られる数値解

GCIの考え方

数値モデル実施基準では、計算格子の大きさによる感度解析を紹介している(付属書)。



## ○原子力学会ガイドラインにおける不確かさへの対応(3)

・風洞実験(例えば、放出源の有効高さ)の不確かさ  $\delta_D$  の場合

⇒風洞実験における不確かさを導入か。

その場合でも、本標準における“妥当性確認1(直方体建屋)”のような単純化した境界条件で把握か、“妥当性確認2(建屋・地形計算)”のような最終的な数値モデルの適用対象である条件下で把握か。

～風洞実験の繰り返しとして評価するのか、不確かさへ及ぼす要因も含めて評価するのか・・・

～放出源の有効高さとして評価するのか、濃度として評価するのか・・・

数値モデル実施基準では、(風洞実験における)実験的な不確かさに言及していない。

## ○信頼性確保及び不確かさの活用に向けて、必要な検討項目 (まとめ-例示-)

### 原子力学会ガイドラインへの対応(例)

- ・信頼性確保のための基本的な考え方との整合性確認  
→各エレメントの位置づけ&用語の定義、など
- ・不確かさの定量化&不確かさを考慮した予測評価への対応  
→数学的モデル化&物理的モデル化、など

### [その他の対応(必要に応じ)]

- ・気象指針&風洞実験実施基準との対応  
→所期の利用目的に基づく検証&妥当性確認などの位置付け(不確かさ定量化の整合性も含む)、補正の必要性、など
- ・新知見にともなう新たな数学的モデルの導入  
→既存の数学的モデル、(他のコードの対応)、など
- ・シミュレーション手法の実適用へ  
→適用実績の蓄積、不確かさ拡大の定量化、など

“不確かさの有効活用によるシミュレーションの信頼性確保”、日本原子力学会、秋の大会、2019

# 本日の内容

1. はじめに : 発生源近傍の大気拡散現象
2. 大気拡散数値モデルの開発の流れ-火力発電所の例-
3. 原子炉施設・安全解析のための大気拡散数値モデルの開発  
-原子力学会標準の制定、2012年度-
4. 現在までの動き-原子力学会標準の改訂へ
5. 今後の大気拡散予測について

# ※発電所などの大気拡散予測の流れ(数値モデルを軸に)-1-

## ○野外トレーサ実験からプルームモデル・風洞実験へ

⇒1960～1970年代

- ・正規分布式(プルームモデル)の信憑性が未確認
  - 事前調査としての野外トレーサ実験、気象観測手法の適用へ
  - 適切な拡散パラメータによる大気拡散予測が可能であることを確認へ

⇒1980年代

- ・事前調査(気象観測を含む)や大気拡散予測に対するマニュアル類が整備へ
- ・1982年:気象指針は正規分布拡散式を採用
  - 地形が複雑、建屋の影響は著しい場合、放出源高さを修正へ
- ・1985年:産業公害事前調査マニュアル
  - 地形が平坦な場合には正規分布モデルを推奨、地形が複雑・建屋の影響が著しい場合、風洞実験は有効な手段

⇒1990年代

- ・『火力発電所排ガス拡散予測数値モデルの実証調査』を開始(1992年～)

## ※発電所などの大気拡散予測の流れ(数値モデルを軸に)-2-

### ○風洞実験から数値モデルへ

⇒2000年代～

- ・『発電所に係わる環境影響評価の手引き(資源エネルギー庁)』(1999年)に、地形影響を把握する大気拡散モデルとして数値モデルを採用  
→2000年以降、風洞実験が実施されたことがなく、数値モデルのみが適用へ
- ・『Model Evaluation Guidance and Protocol Document, COST Action 732』(2007年)
- ・『発電用原子炉施設の安全解析における放出源の有効高さを求めるための数値モデル計算実施基準:2011(日本原子力学会)』(2012年)
- ・『CFDモデル(DiMCFD)による大気環境アセスメント手法ガイドライン(大気環境学会)』(2013年)  
→大気拡散モデルとして数値モデルに言及へ(含む・数値モデル性能の評価)

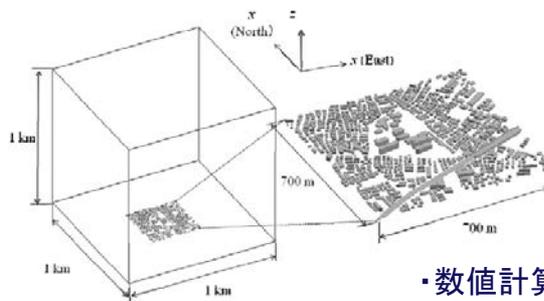
# ※数値モデルの実施基準、『解説』に記される事項について (懸案事項)－数値モデルを軸に－1

## ○気流・拡散条件の設定について(その1)

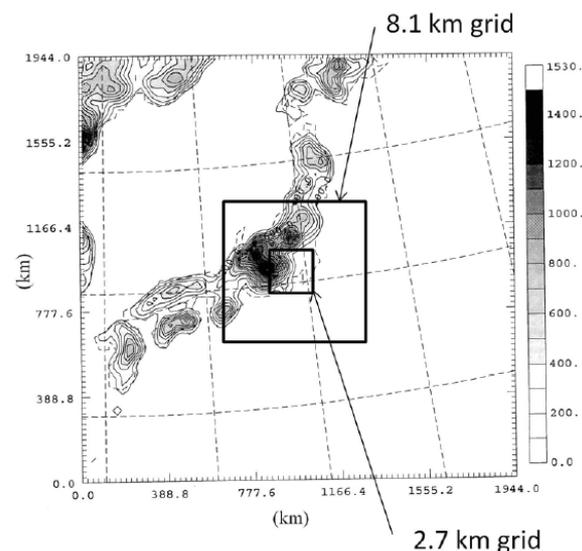
- ・鉛直方向の拡がりのパラメータに加え、水平方向の拡がりのパラメータの設定について(メソスケールの乱れを組み込む手法の適用など)

領域	格子数 (x×y×z)	計算領域 (km) (x×y×z)	水平方向 格子幅	鉛直方向 最小格子幅	水平境界面での データ更新間隔 $\Delta T_b$
1	83 x 83 x 53	1944 x 1944 x 25	24.3 km	50 m	1 時間
2	83 x 83 x 53	648 x 648 x 25	8.1 km	50 m	10 分
3	83 x 83 x 53	216 x 216 x 25	2.7 km	50 m	10 分
4	83 x 83 x 53	72 x 72 x 20	900 m	30 m	10 分
5	83 x 83 x 53	24 x 24 x 17.5	300 m	20 m	5 分
6	83 x 83 x 53	8 x 8 x 16	100 m	10 m	10 秒

- ・気象モデルの適用領域を小さくしていく(領域1→6)。
- ・その結果をから境界条件を与えて、数値計算を行う。



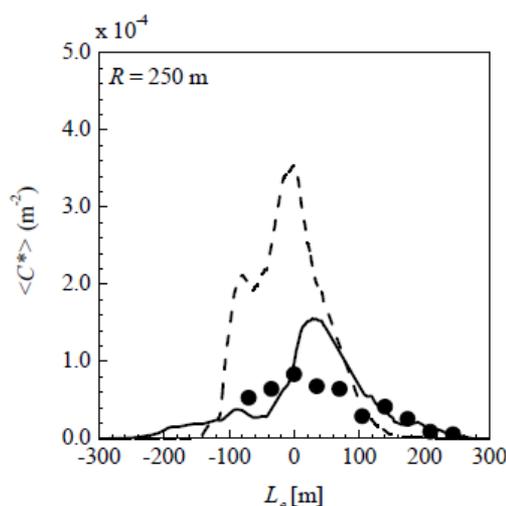
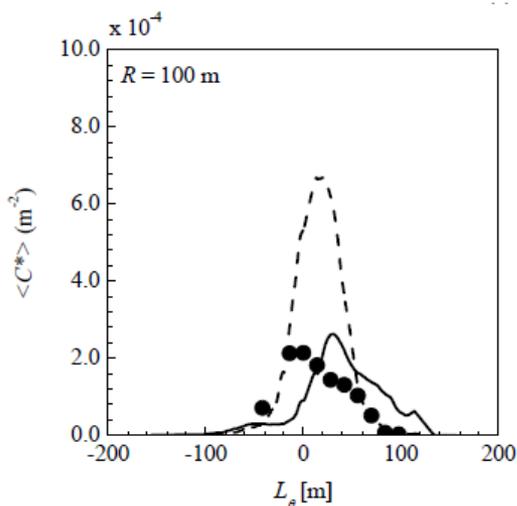
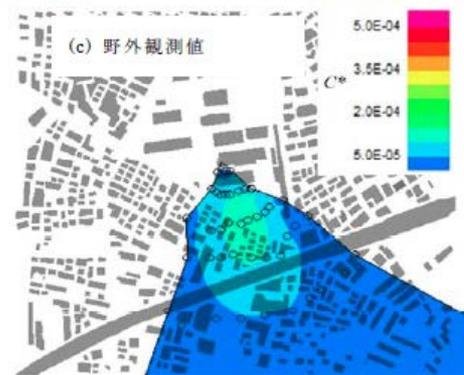
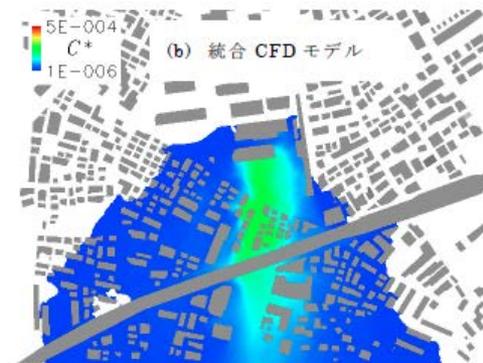
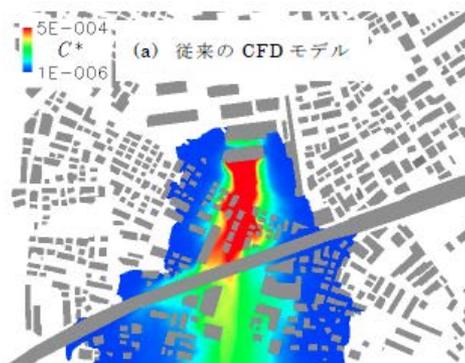
- ・数値計算(LES)では、計算格子幅を約1m程度まで細かく与え建屋を再現する。



“メソスケール擾乱を考慮した市街地内のガス拡散予測手法の開発”、電中研研究報告V09024、2010

# ※数値モデルの実施基準、『解説』に記される事項について (懸案事項)－数値モデルを軸に－2

- ・従来の数値計算のみでは(CFDモデル)、煙が拡がらず、濃度の高い地表濃度が生じる(赤い領域)
- ・気象モデルにより大きな渦、乱れの影響を考慮することにより、野外観測に近い地表濃度が再現できる。



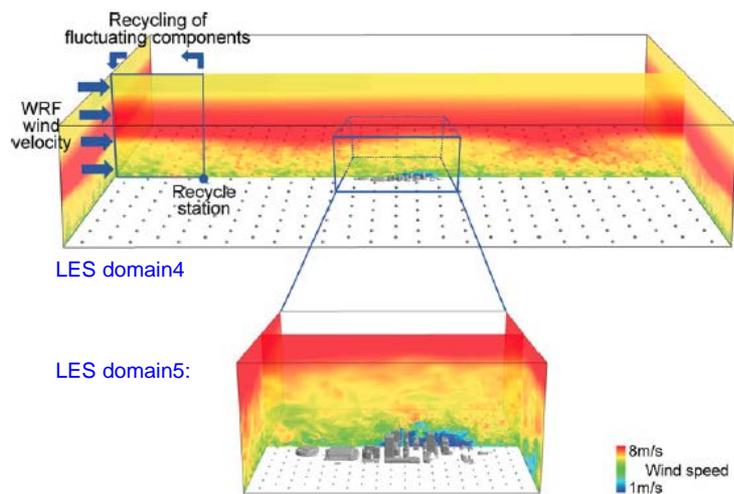
- ・風下距離100m、250mともに気象モデルを用いた場合(実線)、野外観測に近い分布が得られる(●)。

# ※数値モデルの実施基準、『解説』に記される事項について (懸案事項)－数値モデルを軸に－3

## ○気流・拡散条件の設定について(その2)

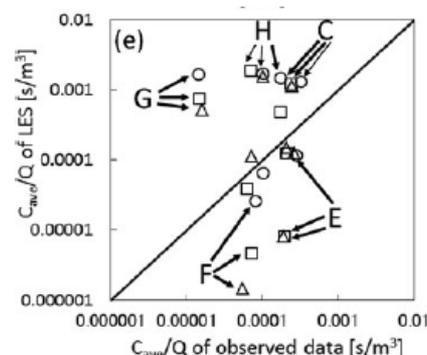
- ・鉛直方向の拡がりのパラメータに加え、水平方向の拡がりのパラメータの設定について(メソスケールの乱れを組み込む手法の適用など)

Coupling between WRF and LES-based CFD models



“Development of Local-scale High-resolution atmospheric Dispersion Model using Large-Eddy Simulation. Part 5: detailed simulation of turbulent flows and plume dispersion in an actual urban area under real meteorological conditions”, Journal of Nuclear Science and Technology, 53-6, 2016

Mean concentration



The model performance for mean concentrations is comparable to that of the existing models.

## ○複雑地形が大気拡散評価に与える影響について

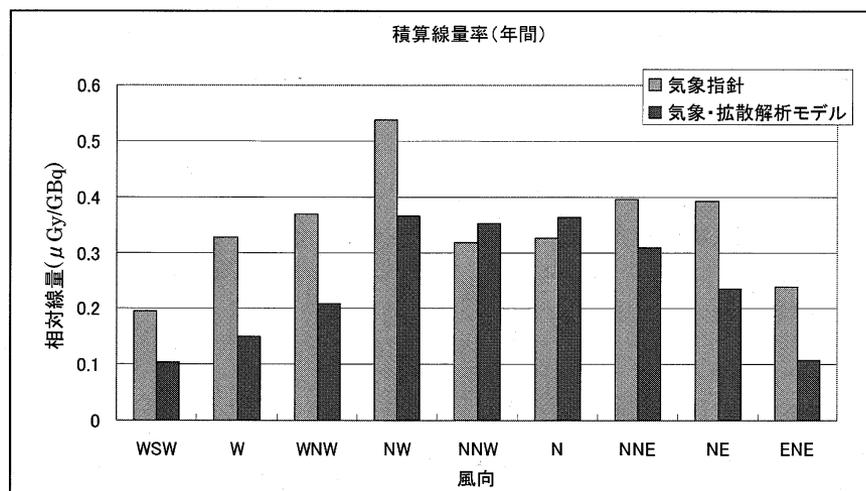
- ・放射性雲による外部被ばくに当たって、空間濃度の計算が容易にできる数値モデルの特性を利用するが可能であろうか・・・(例えば、He-σ法)

※そもそも、風洞実験、正規分布型モデル、数値計算(気象モデルを入力しない場合など)の拡散状況は三分値相当(時間希釈)。この三分値相当を1時間値相当とした上で、年間平均値として良いのか？

## ※風洞実験実施基準、『解説』に記される事項について (懸案事項)－ 現行の有効高さによる手法を軸に－

- 模型実験において地表煙軸濃度が風下でないときの対応について
- 放出源の有効高さが放出源高さよりも高く評価される原因追及について

- 安全解析における大気拡散評価時の大気安定度の影響について
  - ・ 当面の安全解析では、中立の大気安定度での評価結果(放出源の有効高さ)を、他の大気安定度に適用して大気拡散評価を行うことになる。
  - ・ 気象拡散解析モデルと比較した結果、安全解析で活用される気象指針モデルは高い値(地表濃度)を示す傾向があることが示された。



PWR複雑地形サイトの相対線量  
評価結果

## ※国の調査、安全審査における大気拡散の解析手法の調査、 平成21年度委託調査報告書、平成22年3月

※国会図書館蔵書: <http://iss.ndl.go.jp/books/R100000002-I000010930992-00>

- ・数値モデルは、長期的には放出源の有効高さの評価のみではなく、直接的に安全審査の大気拡散評価に適用することが考えられる。
- ・数値流体力学モデルの適用範囲拡大の検討ではなく、緊急時拡散予測システム(SPEEDIほか)のような気象モデルによる被ばく評価手法、又は、数値流体力学モデルと気象モデルを組み合わせた評価手法などを検討してゆく必要がある。
- ・(当面は風洞実験を数値シミュレーションで置き換えることができるかどうかを検討し)それが可能であれば数値シミュレーションだけでなく被ばく評価を行うことについて検討するという流れになる。……近い将来、被ばく評価まで数値シミュレーションで実施することが可能となると考えられる。

※本調査結果は検討委員会(気象・大気拡散の学識委員、電力委員などで構成)で審議され、今後の気象指針のあり方、大気拡散に係わる研究すべき項目など、報告書として取りまとめられ国へ報告(その後、公開)。

# ※大気流れおよび大気拡散の分類例(数値モデル)および特徴

〈大気流れ〉	
モデルの 複雑さ	分類(特徴)
レベル6	予報型方程式、非静力モデル LESおよび高次のクロジャ-
レベル5	予報型方程式 k-εタイプのクロジャ-
レベル4	診断的方程式、静力学モデル k-εタイプのクロジャ-
レベル3	線形化した流れの方程式
レベル2	質量保存モデル
レベル1	簡単な内層
レベル0	一点での観測(正規分布型モデル)

〈大気拡散〉	
モデルの 複雑さ	分類(特徴)
レベル6	オイラー格子を使用 (LESおよび高次のクロジャ-) ラグランジェ型粒子モデル (3次以上の乱れを考慮)
レベル5	オイラー格子を使用(クロジャ-) ラグランジェ型粒子モデル (2次の乱れを考慮)
レベル4	オイラー格子を使用(K理論) ラグランジェ型粒子モデル
レベル2、3	パフモデル
レベル0、1	プルームモデル(正規分布型モデル)

- ・経験的な正規分布モデルは、レベル0に相当する。
- ・火力発電所の地形影響モデルは赤字で静力学モデルなどに相当する(レベル4以上)。
- ・安全解析用モデルは、現状は下線部でk-εタイプのクロジャ-などに相当し(レベル5以上)、今後は青字のLESなどに相当する(レベル6)。
- ・将来的には、有効高さによらない予測のために、気象モデルを組み合わせた手法とすること、被ばく評価を含めた手法とすること、などの研究展開も想定される。