${\sf AESJ-SC-P003:} 201x$ 

学会の マーク

# 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 を求めるための風洞実験実施基準:201x

(改定案)

201 X 年 X 月

一般社団法人 日本原子力学会

## まえがき

発電用原子炉施設の安全解析においては,平常運転時及び想定事故時に原子炉施設か ら大気中に拡散する放射性物質による周辺公衆の被ばく線量を評価します。この被ばく 線量の評価は,原子力安全委員会の発電用原子炉施設の安全解析に関する気象指針(昭和 57年1月28日決定,平成13年3月29日最終改訂)に基づき実施しています。同指針に おいては,放射性物質の放出源の高さが地形,建屋の影響を受ける場合には,その影響 を検討するため風洞実験を実施することを求めています。

この標準は,一般社団法人日本原子力学会が標準委員会基盤応用・廃炉技術専門部会 風洞実験実施基準分科会,同専門部会,同委員会での審議を経て制定したもので,平地 実験及び模型実験を行い,平坦地形における放出源高さに換算した放出源の有効高さを 評価する安全解析のための風洞実験の具体的な要件を規定した標準です。

2009 年度改定版からの主な変更点としては,従来,中立の気流状態は鉛直方向の拡が りのパラメータのみで確認するとしていましたが,近年の風洞実験の改善の実績を反映 し,水平方向の拡がりのパラメータも合わせて確認するようにしました。また,参考の ため原子炉施設敷地内において防潮堤・建屋等構築物の増設などが行われた際に,風洞 実験を再度行うか否かの目安を最新の知見からより詳細化しました。同じく参考のため, 平常運転時を対象とした実験については,安全解析用の気象データを見直した際に再実 験が必要となる場合がありますので,その目安を追加しました。

AESJ-SC-P003 には,次の附属書があります。ただし,附属書(参考)は規定の一部で はありません。

附属書A(参考) 建屋影響の評価方法

- 附属書 B (参考) 測定対象範囲及び模型再現範囲
- 附属書C(参考) 排気筒出口形状の違いによる吹上げ高さの変化
- 附属書D(参考) 吹上げ高さの計算に用いる風向別風速値
- 附属書E(参考) 想定事故時の建屋影響評価式及びその適用条件
- 附属書 F(参考) トレーサガス濃度測定方法
- 附属書G(参考) 気流設定条件

## 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 を求めるための風洞実験実施基準:201x

1. **適用範囲** 本標準は,発電用原子炉施設から放出される放射性物質の大気拡散評価に対 する建屋及び地形の影響を評価するための風洞実験<sup>1)</sup>について,実験条件及び実験方法並 びに実験結果の整理方法及び実験結果を用いた有効高さの評価方法を規定する。<sup>(1)(2)</sup>本標 準は大気安定度が中立における実験を対象とする。

本標準は,原子炉施設の新設時並びに増設時で大気拡散評価において新たに設置する建 屋及び地形の改変の影響が著しいと予想される場合<sup>2)</sup>に行う風洞実験に適用する。

なお,本標準は,発電用原子炉施設以外の排気筒放出の原子力施設にも適用することが できる。

注<sup>1)</sup> 原子力安全委員会,"発電用原子炉施設の安全解析に関する気象指針"(昭和 57 年 1 月 28 日決定,平成元年 3 月 27 日,平成 6 年 4 月 21 日,平成 13 年 3 月 29 日一部 改訂)(以下,気象指針という。)にて被ばく線量評価に用いる放出源の有効高さを 求めるための風洞実験の実施について定められている。

注<sup>2)</sup>排気筒高さが放出源に隣接して増設する建屋の高さの2.5倍に満たない場合。

既に風洞実験が行われているサイトに原子炉施設を増設し,増設建屋の影響確認実験 結果から既設放出源に対する増設建屋の影響が著しいと予想される場合(附属書A (参考)参照)。

## 2. 用語及び定義

本標準で用いる主な用語及び定義は,次に示すとおりである。

2.1

#### 大気安定度

日射量又は放射収支量及び敷地を代表する地上風の風速から決まる気象条件1)。

## 2.2

#### 放出源高さ

平常運転時の場合は排気筒高さに排ガスの吹上げ高さを加えた高さ,想定事故時の場合は排気筒高さで,いずれも地上高(H<sub>s</sub>)。

2.3

#### 放出源の有効高さ

排ガスの拡散に及ぼす建屋及び地形の影響を表すために安全解析における拡散計算に用

2 **P003**:201x

いるみかけの放出源高さ(H)。

## $\mathbf{2.4}$

## 平常運転時

原子炉施設が通常の運転状態にあり,換気空調系の運転による排ガスの吹上げ高さを考 慮する状態。

2.5

#### 想定事故時

原子炉施設の安全設計の観点から想定される事故状態にあり,換気空調系の運転による 吹上げ高さを考慮しない状態。

2.6

## 平地実験

風洞内に建屋及び地形の縮尺模型を入れずに種々の放出源高さに相当する位置でトレー サガスを放出し地表空気中濃度分布を測定する実験。

 $\mathbf{2.7}$ 

## 模型実験

風洞内に建屋及び地形の縮尺模型を入れ,平常運転時及び想定事故時の放出源高さに相 当する位置からトレーサガスを放出して地表空気中濃度分布を測定する実験。

 $\mathbf{2.8}$ 

#### 閉塞率

建屋及び地形の縮尺模型の最大断面積を流れ方向に直角な方向の風洞の断面積(高さ×幅)で除した値。

2.9

## Γ(ガンマ)型模型排気筒

トレーサガスを水平に放出する場合に用いる模型排気筒。

2.10

## 乱流強度

ある測定点における風速変動の標準偏差をその位置における平均風速で除した値。ここで,平均風速は,風速を時間平均したもの。

2.11

#### 拡がりのパラメータ

水平又は鉛直の拡散物質の濃度分布の標準偏差。

2.12

## 地表煙軸濃度

放出源の風下側の各距離において,風下方位の軸と直角方向の地表空気中濃度分布の中 で最大の濃度。

## 2.13

## 正規化濃度

測定地点の濃度(C)に風洞測定部上層の一様流の風速(U)を乗じてトレーサガスの 放出率(Q)で除した値(UC/Q)。

注<sup>1)</sup>発電用原子炉施設の安全解析に関する気象指針では大気安定度はA(極不安定,

Extremely unstable)からG(極安定, Extremely stable)に分類され,それぞれ拡 散物質の拡がりのパラメータと対応している。基本拡散式による拡散計算に際しては, 大気安定度GはFとして取り扱う。風洞実験は,ほぼ中立とされるC~Dを対象とす る。

## 3. 平常運転時を対象とした実験

3.1 実験風向 放出源を中心とした 16 方位とする。ただし,放出源の風下側に山岳,海岸 などのように明らかに人が居住せず,かつ,葉菜摂取又は牛乳摂取の被ばく経路が存在し ないと判断できる風向は実験を行う必要はない<sup>1)</sup>。

注<sup>1)</sup>原子力安全委員会,"発電用軽水型原子炉施設周辺の線量目標値に対する評価指針"(昭

和 51 年 9 月 28 日決定, 平成元年 3 月 27 日, 平成 13 年 3 月 29 日一部改訂)の解説

「 .線量評価の範囲」に決定経路及び評価地点の考え方が記載されている。

3.2 **測定対象範囲** 放出源から放出されたトレーサガスの地表煙軸濃度の測定対象範囲は, 実際の地形で放出源より風下側 5 km までとする(**附属書 B(参考)**参照)。

3.3 トレーサガス放出位置 放出源高さに相当する位置とする。放出源高さは,排気筒高さに各風向別に(1)式により求めた吹上げ高さを加えた高さとする<sup>1)</sup>。

$$\Delta H = 3 \frac{W}{U} \cdot D \tag{1}$$

ここに,

 $\Delta H$ :風向毎の吹上げ高さ(m)

W:吹出し速度(m/s)

D: 排気筒出口の内径 (m)

出口形状が四角形の場合は,出口面積の等価直径とする(附属書 C (参考)参照)。

1 / U: 風向別風速逆数の平均(s/m)

発電所における1年間の観測データについて,1時間毎の風速の逆数を風向別に平均した値を用いる(**附属書D(参考)**参照)。

**注**<sup>1)</sup> 気象指針に計算式が記載されている。

## 4. 想定事故時を対象とした実験

4.1 実験風向 放出源を中心にした 16 方位とする。ただし,放出源の風下側が海となる風向については,放出源より実際の地形で風下側 5 km 以内に陸又は島が存在する風向を除き

実験を行う必要はない(附属書 B(参考)参照)。

4.2 測定対象範囲 平常運転時の場合と同じ。

- 4.3 トレーサガス放出位置
- a) **排気筒放出の場合** 放出源高さに相当する位置とする。放出源高さは,排気筒高さとす る。なお,排気筒が原子炉建屋の上部に設置され,かつ,原子炉建屋と同等の高さの PWR の場合で,放出源の有効高さをゼロとして(2)式の建屋影響評価式により地表空気中濃 度分布を求めるときには実験を行う必要はない(**附属書 E(参考)**参照)。

$$\frac{C}{Q} = \frac{1}{\pi \cdot \Sigma y \cdot \Sigma z \cdot U} \cdot \exp\left(-\frac{y^2}{2\Sigma y^2}\right) \cdot \exp\left(-\frac{H^2}{2\Sigma z^2}\right)$$
(2)

ここに ,

- U:風速(m/s)
- C:放射性物質の濃度(Bq/m<sup>3</sup>)
- Q:放出率(Bq/s)
- H: 放出源の有効高さ(m)
- y:風下方位中心軸からの水平方向距離(m)

$$\Sigma y^2 = \sigma y_0^2 + \sigma y^2$$
  
$$\Sigma z^2 = \sigma z_0^2 + \sigma z^2$$

$$\sigma_{y0}^2 = \sigma_{z0}^2 = cA/\pi$$

 $\sigma_{10}$ :建屋影響による水平方向の拡がりのパラメータ(m)

- $\sigma_{z0}$ :建屋影響による鉛直方向の拡がりのパラメータ(m)
- $\sigma_{y}$ :水平方向の拡がりのパラメータ(m)
- $\sigma_r$ : 鉛直方向の拡がりのパラメータ(m)
- A:建屋の風向方向の投影面積(m<sup>2</sup>)

c:形状係数(=0.5)

b) 排気筒以外の放出の場合 トレーサガス放出位置を実際の建屋の放出箇所に相当する 位置にして実験を行う。ただし,実験で評価された放出源の有効高さから地表空気中濃 度分布を求める際には,上記a)の(2)式を使用する。なお,放出源の有効高さをゼロ として a)の(2)式の建屋影響評価式により地表空気中濃度分布を求めるときには実験 を行う必要はない。

5. 実験方法

5.1 相似則 大気中における排ガスの拡散現象を風洞実験によって模擬する場合,相似則を

満たさなければならない。風洞実験の相似則は,

a) 模型の幾何学的相似

b) 気流条件の相似

c) 拡散条件の相似

から構成されている。模型の幾何学的相似は,一般的には対象地域の建屋,地形などを幾 何学的に相似にさせて,風洞内に再現することで満足される。この場合,建屋,地形など の影響を風洞実験で再現するため,模型縮尺の選択に注意する必要がある。実験に必要な 縮尺模型の再現範囲を 5.2.1 建屋及び地形模型に示す。気流条件及び拡散条件の相似を満 足させるためには,実験結果が風洞風速に依存しない程度に風洞風速を与える必要がある。 実験に必要な気流の設定条件を 5.3.1 気流設定条件に示す。

5.2 実験装置

5.2.1 建屋及び地形模型 縮尺模型は,樹木,送電鉄塔などを除く,敷地内における高さ 10 m 以上の構造物を再現する。模型の縮尺は,相似則及び風洞の閉塞率を考慮し て 1/3,000 以上とする。縮尺模型で再現する風下範囲は,実際の放出源の風下側 5 km まで の濃度測定が行える範囲とする。また,放出源の風上側に風上距離の 1/10 以上の高さの山 が存在する場合は,その範囲まで縮尺模型で再現する(附属書 B(参考)参照)。

5.2.2 風洞装置 風洞の測定部の大きさは,次による。

a) 測定部の長さは,必要な縮尺模型の長さに,風洞の気流調整のための風上側の助走区間 の長さを加えた長さとする。

b) 測定部の横幅は,測定結果に対して測定部側壁の影響が無視できる大きさとする。

c) 測定部の高さは,閉塞率をできる限り小さくする高さとする。

5.2.3 **測定装置** 測定プローブを移動させて風速及び濃度の測定を行う場合には,風洞測定 部にトラバース装置を設け,プローブを任意の位置に移動できるようにする。風洞気流の 測定には,風速測定プローブと風向風速計を用い,濃度測定には吸引プローブとガス濃度 計を用いる。また,プローブ位置の制御並びにプローブ位置データ及び濃度データの収録, データ解析などにはコンピュータを使用する(**附属書 F(参考)**参照)。

5.2.3.1 風向風速計 熱線風速計又はレーザドップラ流速計(Laser Doppler Velocity meter。以下,LDV という。)を用いる。LDV のプローブをトラバース装置により任意の 位置に移動させて測定する場合には,気流を乱さない程度の大きさのプローブを用いる。

熱線風速計は,校正されたピトー管と微差圧計を組み合わせたものと比較する方法,超 音波風速計,LDV などの基準風速計と比較する方法,校正用風洞を用いる方法のいずれか により校正する必要がある。

LDV は校正の必要はないが,風速計測に十分な出力が得られるようにシーディング剤を 調整する必要がある。

5.2.3.2 ガス濃度計 炭化水素系ガス(C<sub>2</sub>H<sub>4</sub> など)を水素炎式全炭化水素分析計(Flame

6 **P003**:201x

Ionization Detector。以下, FID という。)により測定する方式又はアンモニアガス(NH<sub>3</sub>)の吸収液の電気伝導度を測定する方式のガス濃度計を使用する(**附属書 F(参考)**参照)。 また,ガス濃度計は,風洞実験で測定する濃度が校正範囲に入るように,数種類の濃度の ガスを用いて校正する必要がある。

5.2.4 トレーサガス FID を用いる測定方式では炭化水素系ガスを用い,縮尺模型表面の吸引れから吸引する場合は,アンモニアガスを用いて全点同時測定することができる。

5.2.5 模型排気筒とトレーサガス放出位置 模型排気筒は,風下方向にトレーサガスを放出 源高さに相当する位置から水平に放出する Г型模型排気筒を使用する。平常運転時のトレ ーサガス放出位置は3.3 トレーサガス放出位置に従い,想定事故時のトレーサガス放出位置 は4.3 トレーサガス放出位置に従う(附属書 F(参考)参照)。

5.3 気流設定

5.3.1 気流設定条件 風洞実験で設定する気流は,野外の大気安定度のほぼ中立の状態とし, 次の気流条件とする。

a) 平均風速鉛直分布:高さの約 1/7 乗に比例

b) 風速境界層厚さ:野外の地上高で 400 m 以上

c) 主流方向の乱流強度: 13% ~16% (野外の地上高で 30mの乱流強度)

風洞風速は,大気安定度が中立の場合には相似則から任意の風速としてよいが,トレー サガス濃度の測定を考慮したときの適切な風速は1 m/s~6 m/s(境界層上部)の範囲であ る。

この気流条件で,風洞内で拡散実験を行い,水平方向の拡がりのパラメータ $\sigma_y$ 及び鉛直方向の拡がりのパラメータ $\sigma_z$ が,気象指針の第1図 y 方向の拡がりのパラメータ( $\sigma_y$ ) 及び第2図 z 方向の拡がりのパラメータ( $\sigma_z$ )に示される大気安定度C ~ Dの値になって いることを確認する(**附属書 G (参考)**参照)。

5.3.2 気流設定方法 気流は,建屋,地形などの縮尺模型を配置しない平地の状態で風洞測 定部上流に設置した空間渦発生器(乱流格子,スパイア,タービュレンスジェネレータ), 地面粗度要素(丸棒,アングル,フラットバー)などにより設定条件に合致させる。

5.4 **拡散実験方法** 

5.4.1 トレーサガスの放出速度 放出位置における風洞風速以下とする。ただし,地上放出 の場合,建屋及び地形の影響が大きい場合で測定位置でのトレ-サガスの絶対量が不足す るときには実際の地形で放出源から周辺監視区域境界又は敷地境界までの距離が0.5 km 以 上であれば,風洞風速の3倍までの範囲で放出速度を大きくできる(附属書 F(参考)参 照)。

5.4.2 トレ - サガスの吸引速度 濃度測定に必要な最低流量を確保できる速度とする(附属 書F(参考)参照)。

5.4.3 トレーサガス濃度の平均化時間 60 秒以上とする(附属書 F(参考)参照)。

5.4.4 濃度測定方法 トラバース装置に吸引プローブを取り付けて吸引する測定方法,模型 表面の吸引孔からトレーサガスを吸引する測定方法のどちらを用いてもよい(附属書F(参考)参照)。

5.4.5 平地実験 設定した気流条件で水平方向の拡がりのパラメータの,及び鉛直方向の拡 がりのパラメータの,が,気象指針の第1図y方向の拡がりのパラメータ(の,)及び第2図z 方向の拡がりのパラメータ(の,)に示される大気安定度C~Dの値となっていることを確 認すること並びに模型実験で得られた地表煙軸濃度分布と比較して放出源の有効高さを評 価するための基準データを取得することを目的として行う(附属書G(参考)参照)。平均 風速及び乱流強度の鉛直分布を測定した後,放出源高さゼロで空間濃度分布を測定し,5.3.1 気流設定条件を満足していることを確認する。また,5.2.5 模型排気筒とトレーサガス放出 位置に示す模型排気筒を用い,放出源高さゼロの場合を含め最低5 高度変化させて地表煙 軸濃度分布を測定する。その際に測定する風下範囲は実際の地形で5 km までとする(附属 書B(参考)参照)。

5.4.6 模型実験 放出源の有効高さを評価することを目的として行う。5.2.1 建屋及び地 形模型に示す縮尺模型と 5.2.5 模型排気筒とトレーサガス放出位置に示す模型排気筒を 5.4.5 平地実験で確認した気流中に配置し,放出源高さに相当する位置からトレーサガスを 放出して地表煙軸濃度分布を測定する。測定する風下範囲は,平地実験と同様に実際の地 形で 5 km までとする。

#### 6. 実験結果の整理方法

#### 6.1 平地実験結果

- a) 平均風速及び乱流強度の鉛直分布 図 6-1 に例示するように図示し, 5.3.1 気流設定条 件を満足していることを確認する。
- b) 拡がりのパラメータ 放出源高さゼロで測定した空間濃度分布から得られる水平方向の 拡がりのパラメータの,及び鉛直方向の拡がりのパラメータの,は、図 6-2 に例示するよう に,気象指針の第1図y方向の拡がりのパラメータ(の,)及び第2図z方向の拡がりの パラメータ(の,)に示される値と比較して記録し,大気安定度C~Dの値になっている ことを確認する(附属書G(参考)参照)。
- c) 地表煙軸濃度分布 図 6-3 に例示するように図示する。また,測定値が連続的で異常値 がないことを確認する。
- 6.2 **模型実験結果**
- a) 地表煙軸濃度分布 各風向の地表煙軸濃度分布は,図6-4に例示するように,平地実験 で得られた正規化濃度分布図に模型実験で得られた正規化濃度分布を重ねて図示する。
- b) 地表空気中濃度分布 各風向の地表空気中濃度分布は,図 6-5 に例示するように図示す る。このとき,地表煙軸濃度が各風向の風下方位(放出源の風下側)にあることを確認す

る。風下方位にない場合は,地形の影響などの要因を確認するとともに放出源の有効高さ を用いる大気拡散計算に反映できるように整理する。

## 7. 実験結果を用いた評価方法

7.1 放出源の有効高さの評価方法 平地実験と模型実験における地表煙軸濃度を比較し,実際の地形で放出源から周辺監視区域境界又は敷地境界以遠において,平地実験による地表 煙軸濃度が模型実験による地表煙軸濃度を下回らないような分布を示す平地実験の放出源 高さを5m間隔で評価し,放出源の有効高さとする(図6-4参照)。ここで,放出源高さよ りも放出源の有効高さが高く評価された場合には,建屋,地形の影響など要因を確認する。 なお,大気拡散計算に際しては,放出源の有効高さは中立以外の大気安定度にも適用する。

## 7.2 実験結果の記録

## a) 平地実験

- 1) 平均風速及び乱流強度の鉛直分布
- 2)水平方向及び鉛直方向の拡がりのパラメータ
- 3) 放出源高さ別地表煙軸濃度分布

## b) 模型実験

- 1) 模型の縮尺
- 2)実験風向
- 3) 風下方位と煙軸方位の関係
- 4) 放出源の有効高さを決めた距離
- 5)放出源高さ
- 6) 地表煙軸濃度分布

## 参考文献

- (1) 佐田幸一,柿島伸次,"発電用原子炉施設の安全解析のための風洞実験手法の検討",
   電力中央研究所報告;T00507,(2001)
- (2) 原子力安全研究協会, "安全解析のための風洞実験実施規定(案)", (2000)
- (3) IHI 検査計測, "東通原子力発電所1号機に関する風洞実験委託実施報告書", (2009)

## 9 **P003**:201x



図 6-1 風洞内の平均風速及び主流方向乱流強度の鉛直分布の例(3)

注<sup>1)</sup> 出典元のデータから作図した。



**図** 6-2 **排ガスの水平方向及び鉛直方向の拡がりのパラメータの例**<sup>(3)</sup> 注<sup>1)</sup> 図中のAからFは大気安定度を示す。

<sup>2)</sup> 出典元の図を見易くした。



図 6-3 平地実験における放出源高さ別地表煙軸濃度分布の例(3)

**注**<sup>1)</sup> 図中の Hs は, 放出源高さを示す。

<sup>2)</sup> 出典元の図を見易くした。



図 6-4 模型実験における地表煙軸濃度分布の例(3)

- **注**<sup>1)</sup> 周辺監視区域境界以遠で放出源の有効高さは平常運転時では 185 m ,想定事故時 では 20 mとなる。
  - <sup>2)</sup> 図中の Hs は, 放出源高さを示す。
  - <sup>3)</sup> 出典元の図を見易くした。



注<sup>1)</sup> 矢羽根は UC / Q を示す。

#### 附属書A

#### (参考)

## 建屋影響の評価方法

序文

この**附属書 A(参考)**は,本体に関連する事柄を説明するものであり,規定の一部ではない。

この附属書では,建屋の影響が著しいと予想される場合の増設建屋の影響について説明 する。

A.1 建屋の影響が著しいと予想される場合について本体では、「建屋の影響が著しいと予想される場合」とは、「排気筒高さが放出源に隣接する建屋の高さの2.5倍に満たない場合」としている。

これは,次を考慮して定めたものである。

- a) 平常運転時のように排ガス速度が大きく,吹上げ効果が十分考慮できる場合には,米国 原子力規制委員会(以下,USNRC という。)の規制指針(Regulatory Guide 1.111) に見られるように,放出源高さが隣接する建屋高さの2倍以上あれば建屋の影響は無視 しうるとされている。
- **b)** 想定事故時については, USNRC の規制指針(Regulatory Guide 1.145)では, 放出源 高さが隣接する建屋高さの 2.5 倍以上の時は建屋の効果を無視している。
- c) 国際原子力機関(IAEA)の安全基準(Safety series No. 50-SG-S3)でもa),b)の考 え方を採用している。
- d) 放出源高さに対する建屋高さの影響を風洞実験によって検討した結果,建屋高さの2~ 2.5 倍以上の放出源高さがあれば建屋の影響を無視できることが確認されている<sup>(1)</sup>。

なお,排気筒高さが放出源に隣接する建屋の高さの2.5 倍に満たない場合において,排気 筒の周辺に防潮堤,建屋等構築物が設置されたときには,放出源の有効高さに影響を及ぼ す可能性がある。このような状況下で追加される構築物の放出源の有効高さに及ぼす影響 度については,安全側の結果となるように排気筒と隣接する原子炉建屋のみが設置された 大気拡散状態に構築物を追加した条件で実施された風洞実験により把握されている(**図**A.1 参照)。これにより,構築物の高さ,排気筒からの距離等によって構築物の影響度が簡易的 に確認できる。ここで,構築物の影響度が小さいと推定される条件(放出源の有効高さの 低下が10%以内)に相当するときは,既存の実験結果をそのまま使用でき,また,構築物 の影響度が大きいと推定される条件に相当するときは,その影響を確認する必要がある。

### A.2 増設建屋の影響について

a)既設放出源に対する増設建屋の影響が著しくないと予想される条件を整理すると,放出 源近傍の地形が増設により極端に変化しない場合であって,既設放出源の実際の放出源 高さが増設建屋の高さの 2.5 倍以上ある場合,又は既設放出源と増設建屋の距離が十分 ある場合となる。

ただし,増設建屋の影響については,この条件が満たされない場合でも,次のように 取り扱うことができる。

- 1)既設,増設建屋配置により,建屋の並びに直角な実験風向,既設放出源と増設建屋を結ぶ風向を求め,既設建屋のみで実施した既存の実験風向のうち,最も,に近い2風向を選定して増設建屋を加えた実験を行い,その結果放出源の有効高さが既存の実験結果と比較してあまり変わらない場合<sup>1)</sup>は,既存の実験結果をそのまま使用できる(図A.2参照)。
- 2) PWR の想定事故時の排気筒放出のように放出源が建屋と一体化している場合には、 増設建屋は鉛直方向及び水平方向の拡がりのパラメータを増大させるように作用し、 濃度を減少させる方向に働くため、既設建屋のみで実施した既存の実験結果をそのま ま使用できる。
- b) 既設建屋について行った実験結果を用いて新設放出源の有効高さを評価する場合には, 評価地点までの距離の違いを考慮する。
- 注<sup>1)</sup> あまり変わらない場合とは,有効高さの変化が10%以内であり,かつ,線量目標値, めやす線量などを下回ることが明らかな場合である。

A.3 風洞実験に用いる風速の観測データの変更について 平常運転時を対象とした風洞実 験においては,放出源高さは排気筒高さに吹上げ高さを加えた高さとしている。吹上げ高 さは発電所の風速の観測データを用いて求めており,気象観測地点の移転等によって風速 の観測データを変更する必要性が生じた場合,建屋影響等を把握されるために実施された 風洞実験に基づく放出源の有効高さを再検討する必要がある。複雑な地形の発電所及び平 坦な地形の発電所において,風速の観測データの変更により平常運転時の放出源高さが変 化している実験の実績によれば放出源高さの変化率 10 %~+20 %に対し,放出源の有効 高さの変化率はほぼ 10 %以内である(図 A.3 参照)。このため,放出源高さが低下する場 合には,放出源高さの低下率が 10 %以内であれば既存の実験結果をそのまま使用できる。 また,放出源高さが上昇する場合には,地表濃度を減少させる方向に働くため,既存の実 験結果はそのまま使用できる。

### 参考文献

(1)柿島伸次,通地克三,中井真行他,"発電用原子炉施設の安全解析のための風洞実験
 手法の研究",電力中央研究所総合報告:219,(1985)

- (2) 原子力安全研究協会,"安全解析のための風洞実験実施規定(案)",(2000)
- (3) Michioka, T. ,Sada, K. ,Okabayashi, K. ,"Effect of Additional Structure on Effective Stack Height of Gas Dispersion in Atmosphere", *Atmosphere*, Vol.7, No.50, pp.1-11, (2016).
- (4) 三菱重工業(株), "敦賀発電所 3,4 号機風洞実験報告書", (2003)
- (5) 三菱重工業(株), "敦賀発電所 3,4 号機風洞実験報告書", (2009)
- (6)電力中央研究所, "東通原子力発電所排ガス拡散に関する風洞実験", V06503, (2006)
- (7) IHI 検査計測, "東通原子力発電所1号機に関する風洞実験委託実施報告書", (2009)



図 A.1 上空煙源の場合の構築物の影響度(1<Hs/Hb1<2.5)<sup>(3)</sup>

- 注<sup>1)</sup> 出典元の図に対して,図,文字配置等の修正を行った。
  - <sup>2)</sup> 記号は,H<sub>s</sub>:排気筒高さ,H<sub>b</sub>:隣接原子炉建屋高さ,H<sub>g</sub>:段丘・防潮堤・盛り土高 さ,H<sub>b</sub>:増設建屋高さ,X<sub>s</sub>:隣接距離をそれぞれ示す。
  - <sup>3)</sup> 図中の は放出源の有効高さの低下が10%以内で構築物の影響度が小さいと推定される条件(構築物と排気筒との距離が隣接原子炉建屋の高さの2倍以上,且つ構築物の高さが隣接原子炉建屋の高さの0.4倍以下)であり,×は放出源の有効高さの低下が10%以上で構築物の影響度が大きいと推定される条件である。



## 図 A.2 増設建屋の影響確認実験の風向選定説明図<sup>(1)</sup>

注<sup>1)</sup> 出典元の図に対して,図,文字配置の微修正を行った。

2) 図中 はそれぞれ既設,増設の放出源位置を示す。



- 図 A.3 平常運転時の風洞実験における放出源高さ変化率と放出源有効高さ 変化率の関係<sup>(4)(5)(6)(7)</sup>
- 注1) 出典元のデータを整理し,作図した。



#### 附属書 B

#### (参考)

#### 測定対象範囲及び模型再現範囲

序文

この**附属書** B(参考)は,本体に関連する事柄を説明するものであり,規定の一部ではない。

この附属書では,地表煙軸濃度の測定対象範囲,建屋及び地形模型の再現範囲などについて説明する。

B.1 測定対象範囲について 本体では、「地表煙軸濃度の測定範囲は、実際の地形で放出源 より風下側 5 km までとする」としている。これは、従来の安全解析のための風洞実験結果 の解析から得られたものである<sup>(1)</sup>。

放出源の有効高さを評価した距離を解析した結果を図 B.1 に示す。図中の風下距離 5 km にある 2 つのデータを評価した地表煙軸濃度分布は,図 F.7 のような平地実験の地表煙軸濃 度分布とほぼ同じ曲線で表される分布となっていて,その範囲において風下距離 5 km より 放出源に近い位置の濃度から評価しても 5 m 単位で評価した放出源の有効高さはほぼ同一 となることを確認している。そのため,実験に用いる模型は風上における適当な模型範囲 を含め,風下側 5 km 程度までのデータを十分に取得可能な範囲の建屋及び地形模型を製作 すればよいことが判明した。なお,図 B.1 に示すデータのうち,BWR は比較的実際の放出 源高さが高いため,放出源の有効高さを評価する風下距離が大きくなる傾向である。一方, 実際の放出源高さが低い PWR は BWR と比較して,放出源の有効高さを評価する風下距離 は小さくなるため,データは1サイトのみ示している。

B.2 想定事故時の風洞実験における海側方位の扱いについて 想定事故時を対象とした風 洞実験については,本体において「放出源の風下側が海となる風向については,放出源よ り実際の地形で風下側5km以内に陸又は島が存在する場合を除き実験を行う必要はない」 としている。これは,海側方位において放出源から5km以遠に居住可能な陸又は島が存在 する場合で,地形の影響がないことを考慮したとしても被ばく線量は評価上有意な値とは ならないことから,再上陸した地点が放出源から十分離れている場合の「めやす」の風下 距離を5kmとしたものである。

B.3 建屋及び地形模型の再現範囲について 風洞実験で用いる建屋及び地形模型は,放出 源を中心に16方位に分割し,1風向ごとに風洞内にセットする。図 B.2 に示すような海に 面した原子炉施設では,陸側に向かう風向のみを実験対象風向とし,風洞測定部の横幅と 計測に必要な風上側の距離及び風下側の距離の長方形模型をセットする。なお,風洞測定 部の幅が大きい場合には,円形模型が使用されるときがある。

建屋及び地形模型で再現する横方向の距離は,模型縮尺と風洞測定部の横幅とによって 決定される。風上側の距離は,排気筒から風上側にある地形の標高によって決まり,風下 側の距離は,放出源の風下側5kmまでの濃度測定が行える範囲とする。

B.4 風上側地形の再現範囲について 風洞実験で再現する風上側地形の風下側への影響範囲については,明確な基準はない。

図 B.3 に示す3次元丘状の地形模型を用いて風洞実験を行った結果では,図 B.4 に示す ように,逆流(キャビティー)領域の風下側の長さが地形高さの数倍程度である。図 B.5 に示すように,地上煙軸濃度分布を平地実験と模型実験で比較し,その最大濃度値の比(A) を次のパラメータについて図示したものが,図 B.6 である。

a) 無次元放出源高さ(H<sub>s</sub>/h;H<sub>s</sub>は放出源高さ,hは丘の高さ)

**b)** 無次元放出源位置(X<sub>s</sub>/X<sub>R</sub>;X<sub>s</sub>は丘の頂部からの風下距離,X<sub>R</sub>は逆流領域の長さ)

c) 無次元地形幅(R=丘の幅/丘の高さ)

この図 B.6 では,無次元放出源位置(X<sub>s</sub>/X<sub>R</sub>)が1.5 までのデータしかないが,放出源の 風上側に風上距離の 1/10 程度の高さの丘が存在する場合の最大濃度値の比(A)は,1.0 に近づくことが予想される。このことから,放出源の風上側に風上距離の 1/10 以上の高さ の丘又は山が存在する場合は,その範囲までを再現すればよいことになる。

### 参考文献

- (1) 佐田幸一,柿島伸次,"発電用原子炉施設の安全解析のための風洞実験手法の検討", 電力中央研究所報告;T00507,(2001)
- (2) Castro, I.P. and Snyder, W. H., "A wind tunnel study of dispersion from sources downwind of three-dimensional hills", *Atmospheric Environment*, Vol.16, No.8, pp.1869-1887, (1982)





**注**<sup>1)</sup> 地形模型(3次元丘)とトレーサガス放出源の拡大図(図中の単位は mm)。 3次元丘は三角柱と両端の半円錐とからなり,三角柱の高さ(*h*)を固定して, 三角柱部分の長さ(*L*<sub>1</sub>)を変化させた4とおりの模型(*C2,C4,C6,CX*)を使用 した。





- **注**<sup>1)</sup>出典元の図に対して鮮明にするための線図のトレース及び短い説明の追記を行った。 <sup>2)</sup>模型風下の高度別平均風速0の水平分布 (a)模型:C2S(Sなめらかな表面)(b)模型: C2 (c)模型:C4 (d)模型:C6
  - <sup>3)</sup>図中の破線は, z = 0の地形形状を示す。
    - -・・・・ z/h=0, -・・・・0.8, -・・・・0.34 は高度z/h(zは丘表面からの高さ, hは丘の高さ)における逆流領域(風速0)の範囲を示す。



図 B.5 平地(実線)及び3次元丘状地形の地表煙軸濃度分布(Cg)<sup>(2)</sup>

**注**<sup>1)</sup> 出典元の図に対して鮮明にするための線図のトレースを行った。
 <sup>2)</sup> 左図: X<sub>s</sub>/X<sub>R</sub>=1.0, H<sub>s</sub>/h=0.25 - 平地, C2, C6, CX
 ここで, X<sub>s</sub>/X<sub>R</sub>; X<sub>s</sub>は丘の頂部からの風下距離、X<sub>R</sub>は逆流領域の長さ
 <sup>3)</sup> 右図: 排気筒が高い場合の平地(実線)及び地形実験の地表煙軸濃度分布 X<sub>s</sub>/X<sub>R</sub>=0.5,
 H<sub>s</sub>/h=1.5 - 平地, C2, C6, CX 黒塗りの印 H<sub>s</sub>/h=2.0
 ここで, X<sub>s</sub>/X<sub>R</sub>; X<sub>s</sub>は丘の頂部からの風下距離, X<sub>R</sub>は逆流領域の長さ



図 B.6 風上地形と放出源位置を変化させた場合の最大地上濃度変化率(A) <sup>(2)</sup>

**注**<sup>1)</sup> 図中のRは無次元地形幅(丘の幅/丘の高さ)(2,6,),X<sub>s</sub>/X<sub>R</sub>は無次元放出 源位置(X<sub>s</sub>は丘の頂部からの風下距離,X<sub>R</sub>は逆流領域の長さ),H<sub>s</sub>/hは無次元 放出源高さ(H<sub>s</sub>は放出源高さ,hは丘の高さ)

## 附属書 C

#### (参考)

## 排気筒出口形状の違いによる吹上げ高さの変化

序文

この**附属書**C(参考)は,本体に関連する事柄を説明するものであり,規定の一部ではない。

この附属書では,排気筒出口形状の違いによる吹上げ高さの変化について説明する。

C.1 排気筒出口形状の違いによる吹上げ高さの変化について 一般的な煙突の出口形状を 変化させて吹上げ高さの変化を確認した実験データは少ないが,火力発電所の集合煙突の 出口形状の違いによる吹上げ高さの変化について,風洞実験で確認したデータを図 C.1 に 示す。

この実験では, **表** C.1 に示すような4本の煙突を頂部で四角形に集合した場合の上昇高 さを測定し,等価直径の円形煙突の上昇高さとの比()を求めている。円形以外の煙突 では上昇高さが風向によって変化するため,全風向の比()を単純平均した数値(<sup>--</sup>) も円グラフの中心に示している。

この単純平均値で四角形の煙突の場合は 0.95 となるが, 排気筒高さに排ガスの吹上げ高 さを加えた放出源高さでは,更に 1.0 に近い値になる。この場合,放出源高さに対する出口 形状の影響は,5%以下であり,本体 3.3 トレーサガス放出位置の(1)式で計算される放 出源高さと大差ない。

## 参考文献

 (1) 筌口展宏,岡本汎貴,倉ヶ崎六夫他,"煙突頂部形状の流力的問題",三菱重工技報, Vol.10, No.5, pp630-635,(1973)



」煙 突 集合本数	名	;	称	頂部断面形状
1	1筒集中形煙突			<u>u</u>
2	集 合	煙	突	- 0
	連 立	煙	突	- 8
3	集 合	熞	穾	-00
	連 立	煙	突	-80
4	集 合	煙	穾	
	連 立	煙	穾	88

## 表 C.1 集合型煙突の出口形状の違い<sup>(1)</sup>



図 C.1 煙突出口形状の違いによる上昇高さの変化率 ()<sup>(1)</sup>

注<sup>1)</sup> V<sub>g</sub>:煙突放出速度, u:煙突出口風速。図中記号 は**表** C.1 の煙突集合本数 4 における, :集合煙突丸型, :集合煙突角型, :連立煙突型の風向によ る上昇高さの変化率を示す。

## **附属書** D

#### (参考)

## 吹上げ高さの計算に用いる風向別風速値

序文

この**附属書 D(参考)**は,本体に関連する事柄を説明するものであり,規定の一部ではない。

この附属書では,吹上げ高さを求める際の風速値の取扱いによる地表空気中濃度の差異の確認方法について説明する。

D.1 確認方法 平常運転時における地表空気中濃度の計算において,気象指針では,排気 筒の吹上げ高さ(ΔH)を求める際に,1年間の風向別風速逆数の平均値を用いるのが適 当と考えられるとしている。本標準は,気象指針の基本拡散式で使用する放出源の有効高 さを求めるための風洞実験について定めており,平常運転時を対象にした実験のトレーサ ガスの放出源高さを決めるに当たっては気象指針に則り吹上げ高さの算出式及び風向別風 速逆数の平均値を使用することにしている。

このため,次に示す計算によって吹上げ高さを求める際の風速値について,1年間の風向 別風速逆数の平均値を用いる場合と毎正時の風速の逆数を用いる場合の地表空気中濃度評 価結果の違いを確認しておくことが望ましい。

**D.1.1 吹上げ高さ**本体 **3.3 トレーサガス放出位置**の(1)式を用いて,次の2ケースについて吹上げ高さ(ΔH)を求める。

$$\Delta H = 3\frac{W}{U}D$$

ここに, 1/U:風向別風速逆数(s/m)

ケース1:1/Uに1年間の風向別風速逆数の平均値を使用

(1)

ケース2:1/Uに毎正時の風速逆数を使用

 $\Delta H$ :風向毎の吹上げ高さ(m)

W:吹出し速度(m/s)

D: 排気筒出口の内径(m)

出口形状が四角形の場合は,出口面積の等価直径とする。

**D.1.2 地表空気中濃度** ケース1及びケース2の吹上げ高さの値を用いて,次の気象指針の地表空気中濃度算出式による結果の違いを比較する。

地表空気中濃度: 
$$C = \frac{2.032 \, Q}{z_i \cdot U_i \cdot x} \cdot \exp\left(-\frac{H^2}{2 z_i^2}\right)$$
 (2)

ここに, Q:放出率(Bq/s)

 $\sigma_{zi}$ :時刻(i)における濃度分布の鉛直方向の拡がりのパラメータ(m)

  $U_i$ :時刻(i)における風速値(m/s)

 H:放出源の有効高さ(m)

ただし,ここでは排気筒高さと吹上げ高さの合計値とする。 x:放出点から着目地点までの距離(m)

#### 附属書 E

#### (参考)

#### 想定事故時の建屋影響評価式及びその適用条件

序文

この**附属書 E(参考)**は,本体に関連する事柄を説明するものであり,規定の一部ではない。

この附属書では,想定事故時を対象とした建屋影響評価式の基になった風洞実験の研究 成果の概要,適用条件などについて説明する。

E.1 建屋影響評価式の研究成果の概要 想定事故時の PWR 排気筒放出並びに PWR 及び BWR 建屋放出の場合は,地表煙軸濃度が最大となるのは一般に建屋の背後であることが判 明している。

したがって,その風下距離以遠に存在する地形の影響は,排ガスをより拡散させて地表 煙軸濃度を小さくする方向に働く。

このようなことから, PWR 及び BWR 建屋を対象として風洞実験を行い, 想定事故時の 建屋影響に関する評価式を検討した<sup>(1)</sup>。

実験に用いた建屋模型を図 E.1 に示す。

#### a) 想定事故時 PWR 排気筒放出の場合

実験条件は,次のとおりである。

- 1) 建屋模型 : PWR, 3 Loop, T型建屋配置
  - : PWR, 4 Loop, T型建屋配置
  - : PWR, 4 Loop, I 型建屋配置
- 2) 模型縮尺 : 1/1,000
- 3) 放出源高さ:排気筒出口高さ(格納容器頂部高さ,図E.2参照)
- 4) 実験風向 : 図 E.2 に示す。

各実験条件に対する実験結果は、地表煙軸濃度分布として評価された。この結果から, 想定事故時の PWR 排気筒放出の場合の地表煙軸濃度分布は, **図 E.3**に 3Loop の例を示 すように(1)式による計算結果よりも風下距離数百 m 以遠において低濃度となること が分かった。ここで,(1)式は気象指針に示される建屋影響評価式である。なお、想定 事故時であるため(1)式中の放出源の有効高さはゼロである。また,風速*U*は場を代 表する位置での値,例えば排気筒位置での値などを用いることが多い。

$$\frac{C}{Q} = \frac{1}{\pi \cdot \Sigma_y \cdot \Sigma_z \cdot U} \cdot \exp\left(-\frac{y^2}{2\Sigma_y^2}\right) \cdot \exp\left(-\frac{H^2}{2\Sigma_z^2}\right)$$
(1)

## ここに、 U:風速(m/s) C: 放射性物質の濃度(Bg/m<sup>3</sup>)Q:放出率(Bq/s) *H*:放出源の有効高さ(m) y:風下方位中心軸からの水平方向距離(m) $\Sigma_v^2 = \sigma_{vo}^2 + \sigma_v^2$ $\Sigma_z^2 = \sigma_{z0}^2 + \sigma_z^2$ $\sigma_{v0}^2 = \sigma_{z0}^2 = cA/\pi$ $\sigma_{yo}: 建屋影響による水平方向の拡がりのパラメータ(m)$ $\sigma_{z0}: 建屋影響による鉛直方向の拡がりのパラメータ(m)$ $\sigma_y$ :水平方向の拡がりのパラメータ(m) $\sigma_z$ :鉛直方向の拡がりのパラメータ(m) A:建屋等の風向方向の投影面積( $m^2$ ) C :形状係数(=0.5) b) 想定事故時建屋放出の場合 実験条件は,次のとおりである。 1) 建屋模型 : BWR, T型建屋配置 : PWR, 4 Loop, T型建屋配置 2) 模型縮尺 : 1/1,000 3) 放出位置 : BWR , . T/B ブローアウトパネル . R/B ブローアウトパネル .R/B下部(図E.4の(ウ)- ,(ウ)- ,(ウ) 参照)

- PWR, .R/B 排気管
  - . T/B 全体

. R/B 下部

4) 実験風向 : 図 E.4 に示す。

各実験条件に対する実験結果は,地表煙軸濃度分布として評価された。この結果から, 建屋放出の場合の地表煙軸濃度分布は,図E.5に示すように(1)式による計算結果より も低濃度となる傾向があることが分かった。

E.2 適用条件について 想定事故時の PWR 排気筒放出並びに PWR 及び BWR 建屋放出の 場合には,周辺建屋及びその周辺の地形の影響で鉛直方向及び水平方向の拡がりのパラメ ータが増大し,地表煙軸濃度が低下するため,気象指針に示される建屋影響評価式を適用 32 **P003**:201x

すれば周辺監視区域境界以遠では安全側に評価できる。

## 参考文献

- (1)柿島伸次,通地克三,中井真行他,"発電用原子炉施設の安全解析のための風洞実験手法の研究",電力中央研究所総合報告:219,(1985)
- (2) 原子力安全研究協会, "安全解析のための風洞実験実施規定(案)", (2000)





矢印は実験風向を示す。 2)


**注**<sup>1)</sup>出典元の図に対して縦軸ラベル名称と記号の変更を行った。



- <sup>2)</sup> 出典元の図に対して放出位置の名称を変更した。
  - <sup>3)</sup> 矢印( ) は排ガスの放出方向を示す。 <sub>1-5</sub>は実験風向を示す。



### 図 E.5 建屋放出時の地表煙軸濃度分布<sup>(1)</sup>

注<sup>1)</sup> 出典元の図に対して縦軸ラベル名称と記号の変更を行った。

### 附属書 F

### (参考)

### トレーサガス濃度測定方法

序文

この**附属書 F(参考)**は,本体に関連する事柄を説明するものであり,規定の一部ではない。

この附属書では、風洞実験に用いる風洞装置、濃度測定方法などについて説明する。

F.1 実験装置(例)について 風洞装置の例を図 F.1 に示す。また,レーザドップラ流速計 による風速測定の例を図 F.2,濃度測定の例を図 F.3 及び図 F.4 に示す。

F.2 濃度測定方法について 吸引プローブによる方法は図 F.3 に示すように,吸引プローブ をトラバース装置によって任意の位置に移動させて,自動吸引したガスの濃度を水素炎式 全炭化水素分析計(以下,FIDという。)で測定する。この方法は空間濃度の測定に適して おり,データ収録,解析などがオンラインで可能であり,省力化された実験手法である。

模型表面の吸引孔による方法は,図F.4 に示すように,模型表面の多数の吸引孔からトレーサガスを同時に採取し,吸収液の電気伝導度から濃度を測定する。この方法は模型表面の全測定点を一度に測定できることから測定時間が短くできるため,風洞気流の定常性が問題となる場合には吸引時間を長くするのが容易である。

両者の測定結果は,図F.5に示すように,有意な差がないことが確認されている。

F.3 トレーサガス放出方法(排気筒の模擬)について 安全解析のための風洞実験では建屋 及び地形を縮尺模型で再現しているが,排気筒は縮尺模型ではなく,大気拡散式に合わせ て放出源を点源として模擬している。

原子炉施設の排気筒仕様例を示す。

吹出し速度 : *W* = 23 m/s (平常運転時)

W = 0 m/s (想定事故時)

排気筒出口の内径:<u>D</u>=3.4 m

排気筒高さ : *Ha* =155 m

排気筒から放出される排ガスは,吹出し速度<u>W</u>をもって真上に上昇するが,排気筒周辺の風速<u>U</u>の風によって風下方向に曲げられ上昇軌跡をたどってほぼ水平に達する。この上 昇過程の軌跡は Briggs らによって多くの研究がなされているが,気象指針では,平常運転時の吹上げ高さ(ΔH)の算出に(1)式に示す Briggs の式<sup>(3)</sup>を採用している。

(2)

$$\Delta H = 3\frac{W}{U} \cdot D \tag{1}$$

ここで,模型縮尺を S = 1/2,000 とすると,排気筒出口の内径は 1.7 mm となるが,実験 では内径 2 mm ~ 3 mm 程度の管を用い,排気筒高さに吹上げ高さを加えた高さに相当する 位置から水平方向にトレーサガスを放出している(**図 F.6**参照)。想定事故時は吹出し速度 を 0 m/s とし,吹上げ高さは考慮せずに排気筒高さに相当する位置から水平方向にトレーサ ガスを放出している。この水平放出管は,ギリシャ文字のガンマ()に形状が似ている ため,「型模型排気筒」と呼ばれている。

これに対して,上昇過程を模擬する放出管として真上方向にトレーサガスを放出する「I 型模型排気筒」がある。I型模型排気筒を用いて実際の排気筒の放出状況を模擬するため には,排出ガスの速度比(吹出し速度と風速の比<u>R</u>),運動量,浮力の相似を考慮する必要 がある。原子炉施設では,排ガスがほぼ常温のため浮力は考慮する必要はないが,速度比 と運動量の相似を同時に満足させるには,排気筒直径の縮尺を模型の縮尺と一致させる必 要があり,それが困難な場合には排ガスの上昇に及ぼす影響が大きいと考えられる速度比 を一致させる。上昇軌跡を模擬する場合は,その基準として(2)式に示す Briggs の 1/3 乗則の式<sup>(4)</sup>によって求めた計算結果を用いることができる。

$$z = \left(\frac{3}{4}\right)^{1/3} \left(\frac{RD}{0.4 + 1.2/R}\right)^{2/3} x^{1/3}$$

R = W / U

ここで, z は排ガスの中心軸の高さ, x は風下距離である。実際の排ガスの中心軌跡は (2)式のように無限に上昇するが, Briggs は, 実用上の最終上昇高さを dz/dx = 0.1 と して前述の(1)式を導入している。I型模型排気筒を用いる場合は, 排気筒近傍の空間濃 度分布を測定して上昇軌跡が(2)式に一致することを確認する必要がある。実験で用いる 放出管は, 直径が小さいと放出ガスが出口付近で層流となり, 初期の拡がりが狭くなって (2)式を満足しないため, 直径を大きくするか, 内部にオリフィスなどを付けて流れを乱 流にする必要がある<sup>(5)</sup>。また, 想定事故時は吹上げ速度が小さいため, I型模型排気筒を 用いる場合の条件設定が困難である。

この標準では,トレーサガス放出方法として,型模型排気筒の使用を規定している。 この標準に従って求めた放出源の有効高さは,ガウス型の拡散式に適用される。この拡散 式では,上昇軌跡を考慮せずに,型模型排気筒と同じ最終上昇高さの仮想点源を想定し ているため,実験でも型模型排気筒を使用することが適している。しかし,プラントの 条件(建屋及び地形)によっては,風下方向が定まらず,型模型排気筒の放出方法では 実際の放出状況を模擬できないことがある。このようなプラントでの実験,排気筒近傍の 建屋影響などを考慮した特別な実験などの場合には,実験の目的を明確にして,目的に応 じた相似条件を選択し,相似の限界を認識した上でトレーサガスの放出方法を選択し,評 価を行う必要がある。このため,型模型排気筒による実験が適切でない場合については, I型模型排気筒の利用を検討することが望ましい。

F.4 トレーサガス放出速度について PWR 及び BWR の模型を用い,トレーサガスの放出 速度が放出源の有効高さの評価結果に及ぼす影響を検討した実験結果を図F.7 及び図F.8 に 示し,その結果から5 m単位で評価した有効高さを表F.1 及び表F.2 に示す。トレーサガ ス放出位置における風速に対するトレーサガスの放出速度の比(表F.1 及び表F.2 では放出 速度比)が大きくなると,放出源に近い範囲ではその影響が大きくなる。

上記の結果から,放出源の有効高さの評価精度を±5mとすると,敷地境界などの線量評価地点が0.5km以遠であれば,放出速度比()は3倍以下とすればよい。

F.5 トレーサガス吸引速度について トレーサガスの吸引速度を,測定点ごとに変えること は実用的ではなく,測定点における風速が低い場合には濃度分析計に必要な最低流量以下 となる場合もある。PWR 及び BWR の模型を用い,トレーサガスの吸引速度が放出源の有 効高さの評価結果に及ぼす影響を検討した。図 F.9 及び図 F.10 並びに表 F.3 及び表 F.4 に 示すように,吸引速度 4 m/s 以下でも有効高さで±5 m 以上の有意な差はない。なお、模 型表面の吸引孔から吸引する方法の場合にも,トレーサガスの吸引速度を考慮する必要が ある。

F.6 トレーサガス濃度の平均化時間について 平均化時間は,風洞気流の乱流強度,放出源からの距離に関係する。実際の吸引時間を決定する際には,吸引プローブが測定位置に移動した後 FID にトレーサガスが到達するまでの時間と,風洞気流の乱れによる濃度の変動 周期を考慮したトレーサガス濃度の平均化時間に配慮する必要がある。

PWR 及び BWR の模型を用い,濃度の平均化時間と濃度変動との関係を検討した実験結 果を図 F.11~図 F.14 に示す。濃度変動は, PWR, BWR ともに風下距離 0.5 km では 2 km と比較して大きいが,周辺監視区域境界又は敷地境界までの距離が 0.5 km 以上であれば, 平均化時間を 60 秒とすればすべての実験範囲で十分なデータが得られる。

なお、模型表面の吸引孔から吸引する方法の場合にも,トレーサガス濃度の平均化時間 を考慮する必要がある。

### 参考文献

- (1) 佐田幸一,柿島伸次,"発電用原子炉施設の安全解析のための風洞実験手法の検討", 電力中央研究所報告;T00507,(2001)
- (2) 原子力安全研究協会,"安全解析のための風洞実験実施規定(案)",(2000)
- (3) Briggs, G., A., Plume rise (AEC Critical Review Series), U.S. Atomic Energy Commission, (1969)
- (4) Randerson, D., Atmospheric Science and Power Production, U.S. DOE, DOE/TIC-27601 (DE84005177), (1984)
- (5) Snyder, W. H., Guideline for fluid modeling of atmospheric diffusion, U.S. EPA, 600/8-81-009, (1981)

風下距離	有効高さ:H(m)				
x (km)	$\alpha = 0.8$	$\alpha = 1.0$	$\alpha = 2.0$	$\alpha = 3.0$	$\alpha = 5.0$
0.15	15	15	10	10	5
0.2	15	15	15	10	10
0.25	15	15	15	10	10
0.3	20	20	15	15	10
0.4	20	20	20	20	15
0.5	20	20	20	20	15
0.6	-	25	-		-
0.7	20	20	20	20	15
0.8	-	20		-	-
1.0	30	30	30	25	25
1.25	-	30			-
1.75	-	45			-
2.0	45	50	50	50	45
2.5	-	55		-	-

# 表 F.1 放出源の有効高さに及ぼす放出速度比の影響(PWR)<sup>(2)</sup>

**注**<sup>1)</sup>ここでは出典に従い記号を用いた。

<b>表</b> F.2 放出源の有語	効高さに及ぼす	放出速度比の	<b>影響(</b> BWR)	(2)
こでは出典に従い記号	を用いた。			

風下距離	有効高さ:H(m)					
x (km)	$\alpha = 0.8$	$\alpha \equiv 1.0$	$\alpha = 2.0$	$\alpha = 3.0$	$\alpha = 5.0$	
0.3	65	65	75	80	80	
0.4	70	70	75	75	80	
0.5	65	65	65	70	65	
0.55	50	50	50	50	40	
0.7	60	60	55	55	50	
0.8	55	-55	50	45	40	
1.0	60	60	55	55	45	
1.5	60	70	65	60	55	
2.0	95	90	90	85	75	
2.5	115	115	115	110	105	

**注**<sup>1)</sup>ここでは出典に従い記号を用いた。

風下距離	有効高さ:H(m)			
x (km)	1m/s	2m/s	3m/s	4m/s
0.2	15	15	15	15
0.3	15	20	15	15
0.4	-	20	-	•
0.5	20	20	20	20
0.6	25	25	20	20
0.8	25	25	25	20
1.0	30	30	30	30
1.2	35	35	35	35
1.25	-	30	-	-
1.5	40	40	35	40
1.75	-	45		-
2.0	45	45	45	45
2.5	-	55		-

## 表 F.3 放出源の有効高さに及ぼす吸引速度の影響(PWR)<sup>(2)</sup>

# 表 F.4 放出源の有効高さに及ぼす吸引速度の影響(BWR)<sup>(2)</sup>

風下距離	有効高さ:H(m)					
x (km)	1m/s	2m/s	3m/s	4m/s		
0.3	65	65	65	70		
0.4	70	70	70	70		
0.5	65	65	65	65		
0.55	50	50	50	50		
0.7	60	60	55	60		
0.8	55	55	55	55		
1.0	60	60	65	60		
1.5	75	70	75	75		
2.0	95	90	95	95		
2.5		115	-	-		













図 F.5 吸引プローブと模型表面の吸引孔による測定結果<sup>(1)</sup>

- 注<sup>1)</sup>炭化水素系のガスの一つとして CH4 もトレーサガスとして使用されている。
  - 2) 出典元の図に対して,凡例中の不要な記載(実験番号)を削除した。



図 F.6 トレーサガスの放出概念図



図 F.7 放出速度比に対する地表煙軸濃度分布 (PWR)<sup>(1)</sup>

注<sup>1)</sup> 図中の Hs は,放出源高さを示す。



図 F.8 放出速度比に対する地表煙軸濃度分布 (BWR)<sup>(1)</sup>

注<sup>1)</sup> 図中の Hs は,放出源高さを示す。



図 F.9 吸引速度に対する地表煙軸濃度分布 (PWR)<sup>(1)</sup>

注<sup>1)</sup> 図中の Hs は,放出源高さを示す。



図 F.10 吸引速度に対する地表煙軸濃度分布 (BWR)<sup>(1)</sup>

注<sup>1)</sup> 図中の Hs は,放出源高さを示す。







注1) 出典元の図に対して用語の適正化を行った。





# 注1) 出典元の図に対して用語の適正化を行った。

### 附属書 G

### (参考)

### 気流設定条件

序文

この**附属書**G(参考)は,本体に関連する事柄を説明するものであり,規定の一部ではない。

この附属書では、風洞実験時の風洞の気流設定条件について説明する。

G.1 気流設定条件について 本体 5.3.1 気流設定条件では、大気安定度がほぼ中立の状態に調整することとしている。このため,少なくともトレーサガス放出位置付近から放出源の有効高さが評価される風下距離付近までの範囲では鉛直方向の拡がりのパラメータ  $\sigma_z(以下,\sigma_z という。)ばかりでなく,水平方向の拡がりのパラメータ\sigma_y(以下,\sigma_y という。)もほぼ中立とされる大気安定度C ~ Dの値となるような気流条件を調整することにした。これは,スパイア,アングル等の乱流発生装置を用いた気流調整方法に関する技術的な知見が蓄積され,より大きな水平方向の乱れが得られる改善が図られたため,従来の<math>\sigma_z$ に加え, $\sigma_y$ も本体で規定することとしたものである。

野外の地上高で 30 mにおける主流方向の乱流強度が約 16 %の場合には,  $\sigma_y$ は**図** G.1 に示すようにほぼ中立とされる大気安定度 C ~ Dの値となり,  $\sigma_z$ もほぼ中立とされる大気 安定度 C ~ Dに近い値となる。また,過去に実施されていた乱流強度 10 %の実験の結果に よると,  $\sigma_z$  はほぼ中立とされる大気安定度 C ~ Dの値となるが, $\sigma_y$  は大気安定度 F の値 以下になっている。なお,近年の実験では乱流強度 13%で**図** G.2 に示すように $\sigma_y$ もほぼ中 立とされる大気安定度 C ~ Dに近い値となっている。

乱流強度が 10%と 16%の場合を比較して,その影響を以下に検討した。

σ<sub>z</sub> 及びσ<sub>y</sub>の変化, すなわち, 乱れの大きさが相違した場合, その拡散に及ぼす地形の影響は, 理論的には無視できない。しかし, **図** G.3 及び**図** G.4 に示すように, 同じ地形模型 (BWR, PWR)を用いて, 異なる風洞(A, B, C社)で, 乱流強度が10%と16%の 2つの気流条件で模型実験を行った結果によると,対象としたサイトの地形模型の数が限定 されているが, 実用的には放出源の有効高さに有意な差はないこと, また, 風洞が異なっ ていても, 気流設定条件を満足していればよいことが判明している。

乱流強度が10%と16%で放出源の有効高さに有意な差が生じなかった理由を理論的に 説明することは難しい。しかし,主流方向の乱流強度を変化させると鉛直方向及び水平方 向の乱流強度も変化するため,それらが総合的に働いて放出源の有効高さが変化しなかっ たものと考えられる。

以上から,放出源の有効高さの評価に際しては,同一の気流条件で平地実験と模型実験

を行って地表煙軸濃度を相対比較する方法を用いているため,地上高30 mにおける主流方向の乱流強度を10 %~16 %の範囲で実験を行えば乱流強度の影響は小さいと考えられる。 すなわち, $\sigma_y$ も本体で規定することとしたものの,従来の標準に応じて乱流強度を16 %と して $\sigma_y$ が風下距離3~5 km で大気安定度Dよりも僅かに小さく,大気安定度D~E 間の ほぼ中間(**図G.1**参照)に設定しても,放出源の有効高さに有意な差が生じないことが実 績としては確認されている。

なお, **図** G.5 は気流設定条件を満たし,異なる風洞により模型実験を行った結果であるが,放出源の有効高さには有意な差がないことが確認されている。

### 参考文献

(1) 佐田幸一,柿島伸次,"発電用原子炉施設の安全解析のための風洞実験手法の検討", 電力中央研究所報告;T00507,(2001)



(m) z つ : 酔りが放向た直縫

及び は乱流強度がそれぞれ 10%と 16%を示す。

1

퓠



図 G.2 地上高 30m の乱流強度 13%時における拡がりのパラメータ

(m) っ やートマパのいれ油の向大直能

60 **P003**:201x







(m) H ち 高 皎 斉 の 祇 出 姑



### 解説

### 序文

この解説は,本体及び附属書に関連する事柄を説明するものであり,標準の一部ではない。

### 1 **はじめ**に

本標準は,2003 年度に制定され,放出源の有効高さを大気拡散評価に適用するに当たっ ての留意すべき事柄を充実させるなど,より使い易い標準にするために2009 年度に改正を 行った。今回の改訂にあたっては,新たな知見の取入れ,標準体系の見直しに伴う記載の 適正化等,現時点での最新記載への変更を行った。具体的には,本文の"5.実験方法"におい て実験に際して水平方向の拡がりのパラメータも含めて大気安定度が中立に相当する気流 状態であることを確認することを規定した。また,附属書Aの"建屋影響の評価方法"に敷 地内において防潮堤・建屋等の構築物を設置したときの有効高さに影響する条件を風洞実 験で確認し,整理した結果から再実験が必要となる目安を追加した。さらに平常運転時を 対象とした実験については,安全解析用の気象データを見直した際に再実験が必要となる 場合があるため,その目安を追加した。なお,前回の改定後に、"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"が制定され たため,解説の数値モデルの適用性に関する記述を削除して風洞実験に特化する内容とし, 本文,附属書及び解説を通して記載の適正化を実施した。

改訂にあたっての分科会での審議中には,新たな知見として取り入れた構築物を設置した場合の再実験の目安について,公開文献を用いて詳細な説明を行い,附属書(参考)への知見取入れの妥当性について審議がなされた。また,記載のレビューの観点から分担して記載案のレビューを実施し,180件を超えるコメントについて,分科会にてその対応の検討を行い,必要なものは改訂に反映した。

2 風洞実験における相似則(本体 5.1,本体 5.2,本体 5.3) 野外における排ガスの拡散 現象を風洞実験によって模擬する場合,相似則が満たされていることを確認する必要があ る。風洞実験を実施する際の前提条件となる相似則について説明する。

2.1 相似則の関連バラメータ 説明に用いる主な記号は,次のとおりである。

- Q:放出率
- *C*:排ガスの濃度
- L:代表長さ
- P: 圧力
- Re:レイノルズ数( $R_e = UL/v$ )

- Ro:ロスビー数(R<sub>0</sub>= $U/L\Omega$ )
- Sc:シュミット数(Sc =  $\nu/\alpha$ )
- Se:模型の幾何学的縮尺
- *t* :時間
- U:代表風速
- $U_i$ :風速ベクトル成分
- *u*\*: 摩擦速度
- z0:地表粗度
- $\alpha$ :分子拡散係数
- $\varepsilon_{iik}$ : エディントンのイプシロン
- $\nu:$ 動粘性係数
- Ω:地球自転の代表角速度
- $\Omega_i$ :地球自転の角速度ベクトル成分
- $\rho$ :密度
- $\sigma: 風速変動の標準偏差$
- $X_i$ :座標系
- 2.2 **基礎方程式**中立時における気流と拡散の相似は,野外と風洞実験それぞれの代表寸法 などを用いて無次元化した(1)式~(3)式によって表現される<sup>(1)</sup>。
- a) 連続の式

$$\frac{\partial U_i^*}{\partial X_i^*} = 0 \qquad (1)$$

b) 運動量保存の式

$$\frac{\partial U_{i}^{*}}{\partial t^{*}} + U_{j}^{*} \frac{\partial U_{i}^{*}}{\partial X_{j}^{*}} + 2\varepsilon_{ijk} \Omega_{j}^{*} U_{k}^{*} \left[\frac{L\Omega}{U}\right] = -\frac{1}{\rho^{*}} \cdot \frac{\partial P^{*}}{\partial X_{i}^{*}} + \left[\frac{\nu}{UL}\right] \cdot \frac{\partial^{2} U_{i}^{*}}{\partial X_{j}^{*} \partial X_{j}^{*}}$$

$$(2)$$

c) 物質拡散の式

$$\frac{\partial C^*}{\partial t^*} + U_i^* \frac{\partial C^*}{\partial X_i^*} = \left[\frac{\alpha}{UL}\right] \cdot \frac{\partial^2 C^*}{\partial X_i^* \partial X_i^*} + 1$$
(3)

ここでは,風洞実験を中立時に実施するため,温度変化による影響,例えばエネル ギーの輸送方程式を省略している。また,各変数は代表値(添字0などで示す。)を用 い,次のように無次元化されている。

$$X_{i}^{*} = X_{i}/L$$
 ,  $U_{i}^{*} = U_{i}/U$  ,  $t^{*} = Ut/L$  ,  $\rho^{*} = \rho/\rho_{0}$  ,

 $P^* = P/\rho_0 U^2$  ,  $\Omega_i^* = \Omega_i / \Omega$  ,  $C^* = C/C_0$ 

ここに,代表濃度 $C_0 = Q/UL^2$ 

境界条件に加えて,次に示す無次元パラメータ1),2),3)も野外と風洞で一致すれば,上記(1)式~(3)式より無次元濃度(UCL<sup>2</sup>/Q)も野外と風洞で一致する。

1) ロスビー数  $\operatorname{Ro} = U/L \Omega$ 

**2)**レイノルズ数 Re = UL/v

3)シュミット数 Sc =  $v/\alpha$ 

発電用原子炉施設の安全解析のための排ガス拡散風洞実験では,ガス濃度の絶対値(C) を評価するのではなく,ガス濃度(C)が平地実験と模型実験でどのように変化するかを 相対的に評価する。このため,正規化濃度(UC/Q)<sub>風洞</sub>×( $L_{В洞}/L_{Ву}$ )<sup>2</sup>を平地実験と 模型実験で求め,両者を相対評価すればよい。この場合,ガス濃度(C)は,風速(U) に反比例し,放出率(Q)に比例するので,平地実験と模型実験で風速(U)と放出率(Q) を必ずしも,一致させる必要はない。

排ガスの拡散に関する風洞実験では,模型の幾何学的な相似とこれらの無次元パラメー タ,地表面の粗さなどで表される地表面境界条件,更に,風速の平均及び変動の分布など で表される気流の境界条件の相似が必要である。

以上は部分的な表現の相違や省略があるものの,本質的には Cermak<sup>(2)</sup>, Snyder<sup>(3)</sup>, Robins<sup>(4)</sup>, Halitsky<sup>(5)</sup>, Ukeguti<sup>(6)</sup>, 横山<sup>(7)</sup>などによっても報告されている。実験を行 う場合にはこれらの相似条件が必要であるが,すべての一致を図ると実際と同じ条件で実 験を行うことになり, 縮尺模型による実験が成立しなくなる。そのため,実際の現象に対 する各無次元パラメータ及び境界条件がどの程度影響するかを検討し,不必要なものや影 響の小さいものを無視することによって実験を可能にする。排ガスの拡散に関する風洞実 験を行う場合の各無次元パラメータ,境界条件及びその影響の程度について,現在までに 明らかになっている知見は,1.3 **無次元パラメータ及び境界条件**のとおりである。

### 2.3 無次元パラメータ及び境界条件

a) ロスビー数 ロスビー数は慣性力と地球自転によるコリオリカの比を表す無次元パラ メータである。Snyder<sup>(3)</sup>は, Pasquill<sup>(8)</sup>の野外実験データの解析及び Howroyd and Slawson<sup>(9)</sup>の環状に回転する風洞による実験結果などを解析した。その結果,平坦で かつ中立,あるいは安定な大気の場を対象とする場合には,風下側5km以上の範囲に おいては,ロスビー数の影響を考慮しておいた方が良いとしている。ただし,Robins <sup>(4)</sup>は,同じ Howroyd and Slawson<sup>(9)</sup>の実験結果から5~10km までは無視できると している。Cermak<sup>(10)</sup>は,5km までは無視できるとともに,気流に対しては僅かな 影響しか与えないと考えたため,排ガス拡散のための風洞実験では考慮していないと 述べている。 また,わが国の緯度(北緯 30°~45°)において発電用原子炉施設の安全解析のた めの排ガス拡散風洞実験で対象とする領域を5km,評価対象の風速を数m/sとし,こ れを模型縮尺 1/3,000 で風洞実験する場合を考える。この場合,運動量保存の式におけ るコリオリカの項は野外,風洞実験共にそれぞれがかなり小さくなり,ロスビー数の 相似は無視できる程度であることが分かる。

b) レイノルズ数 レイノルズ数は気流の持つ慣性力と粘性力の比を表す無次元パラメータである。一般の排ガス拡散を対象とした風洞実験では縮尺の小さな模型を使用するため、1.22)の定義によると大気の値より3~4桁小さな値となり、一致させることは不可能となる。この問題に関しては、レイノルズ数が十分大きければ大局的な流れ場はレイノルズ数に依存しないという"レイノルズ数の独立則(Reynolds Number Independence Law)"がTownsend<sup>(11)</sup>より発表され、多くの研究者により実験的な検証がなされて一般的な認識となっている。

レイノルズ数 Re = UL/v が十分に大きい乱流状態であれば,動粘性係数 による運動量輸送よりも乱流拡散係数(K)による運動量輸送が支配的となり,乱流レイノルズ数(Re<sub>t</sub> = UL/K)が支配的な無次元パラメータとなる。この乱流拡散係数(K)は風速(U)と代表長さ(L)に比例する。したがって,乱流レイノルズ数 Re<sub>t</sub>が風速(U)と代表長さ(L)に依存しないこととなる。

 $\operatorname{Re}_{t} = UL/K$ 

~ULIaUL(aは定数)=Const.

このように境界条件の相似に加えて十分発達した乱流にしておけば,自動的に流れの 相似が成り立ち,レイノルズ数を一致させる必要がない。これが,地形,建屋などの 縮尺模型を用いた実験の妥当性の根拠となっている。すなわち,大気安定度が中立の 場合には,レイノルズ数が大きな値となる任意の風洞風速を用いることができる<sup>(1)</sup>。 レイノルズ数を大きくするために必要な風洞風速は,レイノルズ数(Re=UL/v)の 定義には代表寸法Lが含まれるため,実験対象となる模型の寸法の選択に依存してい る。しかし,実際の実験では本体 5.3 気流設定 で示される気流設定条件を用いた場合, レイノルズ数が十分に大きな値となる。その結果,放出源の有効高さや正規化濃度の 評価結果は,風洞風速に依存しないことが確認されている<sup>(12)(13)</sup>。

- c) シュミット数(Sc = ν/α)は物性値の比であり,実際と同じように空気を用いること,また拡散(排ガス)に関しては乱流状態の効果が大きいことから,その影響を無視することができる。
- d) 境界条件 境界条件は地形などの起伏又は表面の粗さなどで表される地表面境界条件 と、風速の平均及び変動の分布などで表される気流の流入境界条件の2つがある。地 表面境界条件のうち、地形などの起伏は、幾何学的に相似にして再現する。表面粗さ については、Jensen<sup>(14)</sup>は、風洞気流が乱流で風速鉛直分布が対数則で表現される場

合,模型縮尺は(4)式を基準として決定できることを示した。

 $\frac{Z_{0,\mathrm{m}}}{Z_{0,\mathrm{p}}} = S\ell \tag{4}$ 

ここで,添字p及びmは,それぞれ野外及び風洞を表す。Jensenの基準は現在まで 多く用いられているが<sup>(7)(15)(16)</sup>,この基準は模型が小さくなると技術的な問題が生じ る。このような場合には,野外では完全粗面条件 $u_*z_0/v>2~3$ が成立していると考え られるので,模型表面でも同条件の成立を考慮することで代替すればよい。その場合, 必要とされる値に対して $z_{0,m}$ の値は幾分大きくなるが,その差に相当する地表面の粗さ が模擬されないのみで,実際問題としてはそれほど大きな影響を与えない。<sup>(14)</sup>

気流の流入境界条件,すなわち風洞測定部入口における気流については,その平均 風速と乱れに関する相似が必要となる<sup>(10)</sup>。この気流の乱れはパワースペクトルに関係 付けられ,(5)式のとおり表される。

 $\sigma^2 = \int_0^\infty F(n) dn$ 

(5)

ここで,  $\sigma$  は風速乱れの標準偏差で, F(n) はパワースペクトル, <u>n</u> は周波数であ る。野外の大気境界層中では小さな渦の領域で $F(n) \propto n^{-5/3}$  となる領域, すなわち慣性 小領域が存在するが, 風洞気流はレイノルズ数が小さくなるとこの領域が明瞭ではな くなる。Stewart and Townsend<sup>(17)</sup>は, 風洞による格子乱流のパワースペクトル分布 を測定してこのことを確認するとともに,レイノルズ数が小さくなっても流れを支配 する代表渦の大きさは変わらないことを報告している。このことから,実際の現象が 慣性小領域の渦の範囲に強く依存するような現象でなければ問題はなく, 排ガスの大 気拡散を模擬するような実験では,慣性小領域の渦よりも大きな渦の影響が卓越して いるため,パワースペクトル分布の相似を厳密に考慮する必要はない。このことは Tayor<sup>(18)</sup>の乱流拡散理論により明らかにされており, Snyder<sup>(3)</sup>の他に Armitt and Counihan<sup>(19)</sup>によっても定量的に検討されている。

まとめると,実際の現象を支配する代表渦と風洞気流の代表渦の大きさの比を模型縮 尺とすればよく,逆に,模型縮尺が決まっていれば,それに応じて気流の乱れの強さ を格子などによって調節すればよい。

2.4 本体への適用 本解説で説明した相似則は, a) 模型の幾何学的相似 b) 気流条件の相 (() な) 拡散条件の相似から構成されている。模型の幾何学的相似は, 対象地域の建屋, 地形などを幾何学的に相似させて製作することで満足される。

本体 5.2.1 建屋及び地形模型で模型縮尺を 1/3,000 以上としているのは,本標準では実際 の高さ 10 m 以上の構造物を再現する必要があり,風洞実験用の模型製作及び測定の空間分 解能の観点から,1/3,000 より小さくすることは困難なためである。 実際の拡散現象と模 型実験で再現した現象が相似になっているためには,気流の力学的な相似と物質拡散の相 似を実際の風洞実験で満足させる必要がある。気流条件の相似は連続の式,運動量保存の 式などを用いて,野外と風洞間の相似が満足される。拡散条件の相似は物質拡散の式を用 いて,野外と風洞間の相似が満足される。

具体的には,乱流状態において気流及び拡散実験を行う必要性を本体では次のように規 定している。ここで,実際の高さ10mに相当する建屋を1/3,000で風洞内に再現し,風洞 風速 1~6 m/s を仮定すると、レイノルズ数は 102~103 となり乱流状態に至るレイノルズ 数より小さくなる。しかし , 風洞実験では乱流格子 ( **附属書 F ( 参考 )** 参照 ) などを用いて 気流を調整するため風洞内気流は乱流となり、放出源の有効高さ、正規化濃度などが風洞 風速に依存しなくなる。平地実験との比較で放出源の有効高さを求めるという目的におい て,乱流状態では,風洞気流の乱れよりも地形の起伏による乱れが大きいことが想定され る。これは乱流強度10%と16%(野外の地上高で30m)で比較した実験において,放 出源の有効高さに有意な変化が見られなかったことからも裏付けられる(附属書G(参考) 参照)。さらに,乱流強度が大きな場合,鉛直方向の拡がりのパラメータに加えて,水平方 向の拡がりのパラメータがほぼ中立とされる大気安定度 C~D に近い値となることが確認 されている。このように乱流強度と拡がりのパラメータ間は密接な関係を有するものの本 体で規定した風洞風速や乱流強度を満足させた場合には以上の相似則と矛盾することなく、 かつ大気と近い拡散状況(拡がりのパラメータ)となる(附属書 G(参考)図 G.1 参照)。 したがって,本体で規定した風洞風速や乱流強度は風洞実験に関わる相似条件を満足する と考えられる。

### 参考文献

- (1)柿島伸次,通地克三,中井真行他,"発電用原子炉施設の安全解析のための風洞実験
   手法の研究",電力中央研究所総合報告,219,(1985)
- (2) Cermak, J. E., Applications of fluid mechanics to wind engineering-A Freeman Scholar Lecture, J. Fluids Eng., Vol.97, No.1, pp.9-38, (1975)
- (3) Snyder, W. H., *Guideline for fluid modeling of atmospheric diffusion*, U.S. EPA, 600/8-81-009, (1981)
- (4) Robins, A. G., *Wind tunnel modeling of plume dispersal*, CEGB, R/M/R247, (1977)
- (5) Halitsky, J., Gas diffusion near buildings, Meteorology and atomic energy, U.S.
   AEC, (1968)
- (6)Ukeguti, N. ,Sakata H. ,Okamoto H. ,et al. ,*Study on stack gas diffusion* ,Mitsubishi
   Tech. Bull. , No. 52 , (1967)
- (7)横山長之,林正康,北林興二他,"大気汚染質の拡散に関する研究",公害資源研 究所報告,第15号,(1979)

- (8) Pasquill, F., "Some observed properties of medium-scale diffusion in the atmosphere", *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, Vol. 88, pp. 70-79, (1962)
- (9) Howroyd, G. C., Slawson, P. R., "The characteristics of a laboratory produced turbulent Ekman layer", *Bound.-Layer Meteor.*, Vol.8, pp. 201-219, (1975)
- (10) Cermak, J. E., Petersen, R. L., Atmospheric transport of hydrogen sulfide from proposed geothermal power plant (UNIT 16), Predictions by physical modeling in a wind tunnel, Colorado State Univ., CER76-77JEC-RLP47, (1977)
- (11) Townsend, A. A., *The structure of turbulent shear flow*, Cambridge Univ. Press,
   (1956)
- (12) 佐田幸一, 柿島伸次, "発電用原子炉施設の安全解析のための風洞実験手法の検討",
   電力中央研究所報告, T00507, (2001)
- (13) Ohba, R., Nakamura, S., "Numerical Calculations and wind tunnel experiments on gas diffusion in thermally stratified flow over a ridge", J. of Meteorological Society of Japan, Vol.61, No.1, pp. 125-141, (1983)
- (14) Jensen, M., "The model-law for phenomena in a natural wind", *Ingenioren*, *Int.,Ed.*, Vol.2, No.4, pp. 121-128, (1958)
- (15)四方浩,通地克三,柿島伸次,"原子炉施設からの放出ガス拡散に関する風洞実験と その解析法",電力中央研究所報告,研究報告,278031,(1979)
- (16)Kothari, K. M., Merone, R. N., Peterka, J. A., Nuclear power plant building wake effects on atmospheric diffusion; Simulation in wind tunnel, NP-1891, EPRI, (1981)
- (17) Stewart, R. W., Townsend, A. A., "Similarity and self-preservation in isotropic turbulence", *Philos. Trans. A.*, Vol.243, pp. 359-386, (1951)
- (18)日野幹生,流体力学,朝倉書店,pp.235-242,(1974)
- (19) Armitt, J., Counihan, J., "The simulation of the atmospheric boundary layer in a wind tunnel", Atmos. Environ., Vol.2, pp. 49-71, (1968)
3 模型実験において地表煙軸濃度が風下方位にないときの評価事例(本体 6.2) 本解説で は,模型実験結果において地表煙軸濃度が風下方位にないときの原因検討,大気拡散評価 の例について説明する。

3.1 煙軸曲がりと見なすめやす 発電用原子炉施設の安全解析の一環としての大気拡散評価は,放出源を中心として16方位に分ける方位線と敷地境界又は周辺監視区域境界が交差する地点などにおいて行っており,模型実験結果から地表煙軸濃度が風下方位にない事象(以下,「煙軸曲がり」という。)出現の有無を判断する場合には方位ごとに確認する必要がある。

このため,模型実験結果から「煙軸曲がり」があると見なすめやすは,風下側の敷地境 界又は周辺監視区域境界の以遠において地表煙軸が風下方位の中心軸から 11.25 。以上離 れている場合とする。また,放出源の有効高さは,「煙軸曲がり」によって地表煙軸濃度が 現れた方位で評価する。なお,各方位の角度間隔は放出源を中心とした 16 方位について等 間隔に模型実験を実施することから,22.5 。である(**解説図**1参照)。

3.2 煙軸曲がりの原因の検討例 模型実験結果において「煙軸曲がり」が確認されたときには、その方位の模型実験の地表濃度分布と大気拡散に及ぼす地形の影響などとの関係を整理し、原因を検討する必要がある。

模型実験の地表濃度分布に「煙軸曲がり」が認められる例として,平常運転時で風下方 位が南のケースを解説図2,想定事故時で風下方位が南南東のケースを解説図3に示す。い ずれのケースにおいても風下方位の方位軸上には標高約700mの山に連なる斜面があり, この斜面によって気流が妨げられて地表煙軸濃度が海側に現れ,「煙軸曲がり」が生じてい る。

3.3 煙軸曲がりを考慮した大気拡散評価の例 模型実験結果において「煙軸曲がり」が確認 されたときには,その状況を反映した大気拡散評価を行う必要がある。「煙軸曲がり」が起 こっているときには,排ガスの水平方向の拡がりも大きくなっており,複数の方位に影響 を与えるが,風下方位に向う風は煙軸の曲がった方位に向うとして拡がりのパラメータに は手を加えずに安全側に大気拡散計算を行う方法がある(解説図1参照)。この安全側な方 法により平常運転時及び想定事故時の評価を行った例を次に示す。

- a) 平常運転時の大気拡散評価の例 平常運転時の大気拡散評価は,着目した風下方位とその両隣の方位について行っており,関係する主方位,隣接方位の「煙軸曲がり」の状況 を反映して評価を行う。「煙軸曲がり」を考慮して大気拡散評価を行った結果(A)を,「煙 軸曲がり」を考慮しないときの結果(B)と比較して解説表1に示す。これから,「煙軸 曲がり」を考慮して安全側に評価した場合には,「煙軸曲がり」を考慮しない場合の約2 倍になる。
- b) 想定事故時の大気拡散評価の例 想定事故時の大気拡散評価は,着目した風下方位につ いて累積出現頻度が 97%に相当する相対線量,相対濃度<sup>1)</sup>を求めた上で行っている。

このため、「煙軸曲がり」の結果として風が向う方位については、「煙軸曲がり」を考慮 したとき影響を受ける数方位分の風のデータから 97%相当値を計算する。「煙軸曲がり」 を考慮し大気拡散評価を行った結果(A)を、「煙軸曲がり」を考慮しないときの結果(B) と比較して**解説表 2**に示す。これらは、加圧水型原子炉施設の原子炉冷却材喪失事故及 び蒸気発生器伝熱管破損事故の例であるが、「煙軸曲がり」を考慮して安全側に評価した 場合には、「煙軸曲がり」を考慮しない場合の約 1.5~1.7 倍になる。なお、想定事故時 においては、地上から放射性物質が放出される経路も想定されているが、想定事故時の 排気筒の放出源高さは比較的低いため排気筒放出の場合と同様に「煙軸曲がり」が出現 するとして評価している。

注<sup>1)</sup>相対線量(Gy/Bq)と相対濃度(s/m<sup>3</sup>)は,それぞれ各方位における敷地境界等以遠の放射線量率及び地表濃度の最大値を放射性物質の放出量で除し,規格化した値である。累積出現頻度97%相当値は,方位別の相対線量又は相対濃度の値が小さい方からの累積度数を年間データ数で除した累積出現頻度が97%に当たる値である。



## 解説表1 煙軸曲がりを考慮する平常運転時の大気拡散評価の例

a) 平常運転時の煙軸曲がりの状況

模型 風 <sup>-</sup>	型実験 下方位	地表煙軸濃度の 出現方位	大気拡張評価上の扱い	評 <b>邸</b> 離(m) <sup>3)</sup>
東南東 ( ESE )		$\mathbf{SE}$	-	
南東 (SE)	(隣接方位2)	SE	SE ( 80m ) <sup>2)</sup> , ESE ( 75m ) <sup>2)</sup>	940m/SSE
南南東 ( SSE )	(主方位)	SSE	SSE ( 90m ) <sup>2)</sup> , S ( 75m ) <sup>2)</sup>	(放射性希ガス) , 1300m/SE
南 (S)	(隣接方位1)	SSE	-	(放射性よう素)
南南西 ( SSW )		SSW		

**注**<sup>1)</sup> 南南東を着目方位とする地点を評価する場合。

<sup>2)</sup>放出源の有効高さ。ただし,煙軸曲がりが生じている場合は,地表煙軸が出現した 方位の評価距離以遠で決定。ここでは,ESE及びS方位で煙軸曲がりが発生してい る。

<sup>3)</sup>人の居住を考慮したときの放射性希ガス,放射性よう素による線量が最大となる評価地点までの放出源からの距離。

	2	煙軸曲がりを	煙軸曲がりを	下网
項		考慮する場合	考慮しない場合	
		(A)	(B)	(AD)
放射性希ガス放出	連続放出分(Bq/s)	$5.4  imes 10^5$	同左	-
量(1MeV 換算値)	間欠放出分(Bq/y)	$3.8 \times 10^{13}$	同左	-
トン表 191 幼虫号	連続放出分(Bq/s)	$3.5 \times 10^{2}$	同左	-
よ ノ糸 101 瓜田里	間欠放出分(Bq/y)	$8.5 \times 10^{8}$	同左	-
トン麦 199 故屮昌	連続放出分(Bq/s)	$4.0 \times 10^{2}$	同左	-
よ ノ系 155 瓜田里	間欠放出分(Bq/y)	$1.2 \times 10^{9}$	同左	-
実効線量	放射性希ガス分	2.3	1.0	2.3
(µSv/y)	放射性よう素分1)	4.4 × 10 <sup>-1</sup>	$2.4 \times 10^{-1}$	1.8
	合計	2.7	1.2	2.3

b) 煙軸曲がりを考慮した大気拡散評価

注<sup>1)</sup>海産物摂取,吸入摂取及び葉菜摂取による内部被ばくの実効線量を示す。

### 解説表2 煙軸曲がりを考慮する想定事故時の大気拡散評価の例

a) 想定事故時の煙軸曲がりの状況

模型実験風下方位	地表煙軸濃度の 出現方位	大気拡散評価上の扱い (相対濃度,相対線量 の97%値の計算)	評価距離( m ) <sup>2)</sup>
南東 (SE)	SE	SE(70m) <sup>1)</sup> , SSE(60m) <sup>1)</sup> 方位の風データから計算	1120m/SE
南南東 (SSE)	$\mathbf{SE}$	- (計算対象外)	(排気同放出) .1120m/SE
南(S)	S	S(120m) <sup>1)</sup> 方位の風データ から計算	(地上放出)

注 1) 放出源の有効高さ。ただし, 煙軸曲がりが生じている場合は, 地表煙軸が出現した方 位の評価距離以遠で決定。 

2)放出源からの距離。

b) 煙軸曲がりを考慮した大気拡散評価

1)原子炉冷却材喪失事故

項目		煙軸曲がりを 考慮する場合 (A)	煙軸曲がりを 考慮しない場合 (B)	比率 ( A/B )
放射性希ガス放出量	排気筒放出分	$6.7 \times 10^{13}$	同左	-
(Bq-0.5MeV 換算値)	地上放出分	$-3.9  imes 10^{12}$	同左	-
放射性よう素放出量	排気筒放出分	$1.2 \times 10^{11}$	同左	-
(Bq·I131 等価量)	地上放出分	$2.4  imes 10^{11}$	同左	-
相対線量	排気筒放出分	$8.8 \times 10^{-20}$	$6.3 \times 10^{-20}$	1.4
( Gy/Bq )	地上放出分	$3.5  imes 10^{-19}$	$2.3  imes 10^{-19}$	1.5
相対濃度	排気筒放出分	$6.4  imes 10^{-6}$	$3.8 \times 10^{-6}$	1.7
( s/m <sup>3</sup> )	地上放出分	$4.0 \times 10^{-5}$	$2.8 \times 10^{-5}$	1.4
実効線量	放射性希ガス分	7.3 × 10 <sup>-3</sup>	$5.1 \times 10^{-3}$	1.4
( mSv )	放射性よう素分	$9.8 \times 10^{-2}$	$6.8 \times 10^{-2}$	1.4
	直接線·散乱線分	$6.3 \times 10^{-4}$	$6.3 \times 10^{-4}$	-
	合計	$1.1 \times 10^{-1}$	$7.4 \times 10^{-2}$	1.5

2) 蒸気発生器伝熱管破損事故

項目		煙軸曲がりを 考慮する場合 (A)	煙軸曲がりを 考慮しない場合 (B)	比率 (A/B)
放射性希ガス放出量 (Bq-0.5MeV 換算値)	地上放出分	$4.2 \times 10^{14}$	同左	-
放射性よう素放出量 (Bq-I131 等価量)	地上放出分	$8.9  imes 10^{10}$	同左	-
相対線量 (Gy/Bq)	地上放出分	$6.5  imes 10^{-19}$	4.0 × 10 <sup>-19</sup>	1.6
相対濃度 ( s/m <sup>3</sup> )	地上放出分	$4.4 \times 10^{-5}$	$2.6 \times 10^{-5}$	1.7
実効線量	放射性希ガス分	$2.7 \times 10^{-1}$	$1.7 \times 10^{-1}$	1.6
( mSv )	放射性よう素分	$5.4 \times 10^{-2}$	$3.2 \times 10^{-2}$	1.7
	合計	3.3 × 10 <sup>-1</sup>	$2.0 \times 10^{-1}$	1.7



- **注**<sup>1)</sup> 敷地境界以遠などで地表煙軸が主方位内にある。この場合は,主方位の風はそのま ま進むとして通常通りの大気拡散評価を行う。
- b) 煙軸曲がりがある場合



**注**<sup>2)</sup> 敷地境界以遠などで地表煙軸が主方位内にない。この場合には,主方位の風は地表 煙軸が現れた方位(例では隣接方位1)に向うとして大気拡散評価を行う。

解説図1 煙軸曲がりと見なすめやすの説明図



解説図2 模型実験で煙軸曲がりが認められる地表濃度分布の例 (平常運転時,風下方位:南)



#### 77 **P003**:201x **解説**



解説図 3 模型実験で煙軸曲がりが認められる地表濃度分布の例 (想定事故時,風下方位:南南東) 4 放出源の有効高さが放出源高さより高く評価されるときの原因検討方法(本体 7.1)本解 説では,放出源高さより風洞実験で評価される有効高さの方が高くなる原因の検討方法に ついて説明する。

4.1 放出源の有効高さが放出源高さより高くなる原因の検討方法 放出源の有効高さを求めるための風洞実験では、平地実験のときよりも模型実験のときの方が起伏のある地形の影響で拡散が促進され、排ガスが放出源に近いところで地表に到達し高濃度となるため、近距離では放出源の有効高さは低く評価される。また、放出源から距離が遠くなるに従って地形の影響によって拡散幅が増大し、濃度低下が促進され、評価地点の手前で模型実験の地表煙軸濃度分布が同じ放出源高さの平地実験に比べて下回っている場合には、その濃度低下に見合う分だけ、放出源の有効高さの方が放出源高さよりも高く評価される。放出源の有効高さが放出源高さより高く評価される傾向は、放出源高さが低いほど、又は放出源から敷地境界又は周辺監視区域境界までの距離が遠いほど濃度低下の度合が大きいため顕著となる。

放出源の有効高さが放出源高さよりも高く評価されたときの地表煙軸濃度分布図の例を 解説図4に示す。この山越えの風のケースでは、風下距離が1km以遠においては放出源高 さによらず地形の影響で地表煙軸濃度が平地実験に比べて顕著に低下しており、想定事故 時の放出源高さ63m,平常運転時の放出源高さ148mの地表煙軸濃度はほぼ同じになって いる。周辺監視区域境界以遠では、想定事故時と平常運転時とは同じ放出源の有効高さと 評価されるが、放出源高さの低い想定事故時の場合には放出源の有効高さが放出源高さよ りも高く評価されることになる。

このように高目に評価された放出源の有効高さを特に安定な大気安定度の状態(E,F)の 大気拡散評価に適用した場合には,排ガスは実際よりも小さな拡散幅で上空に留まると想 定される。このため,解説表 3 に示すように放出源の有効高さが放出源高さよりも高く評 価された場合には,有効高さを放出源高さで制限して想定時事故時の実効線量(A)を試算 し,従来の方法で評価した有効高さから計算した実効線量(B)と比較した結果,直接線・ 散乱線分を除いても(A)は(B)の約 1.5 倍であり両者に大差はなかった。なお,風洞実 験で得られる拡散幅を用いる地表濃度分布モデルによる評価方法を検討したが,風下距離 の全般に亘って適用できる方法とはならなかった。今後,地表濃度分布モデルの改良,気 象拡散解析モデルの適用(解説 5.3 参照)など地形影響を評価する方法について,更に検 討する必要がある。

## 解説表3 放出源の有効高さを放出源高さで制限したときの大気拡散評価例

ิล	)	放出源の有効高さ	と評価距離
a			

模型実験 風下方位 <sup>1)</sup>	放出源 有効高さ(m)	制限した 有効高さ(m)	評価距離 ( m )
北東(NE)	70	55	550
東北東(ENE)	75	55	600
東(E)	120	55	1170
<b>注</b> <sup>1)</sup> 放出源高さは 58	m		

**注**<sup>1)</sup> 放出源高さは 58 m。

### b) 放出源の有効高さを放出源高さで制限したときの大気拡散評価例

項目			有効高さを放出源 高さで制限する 場合(A)	有効高さを制限 しない場合 (B)	比率 (A/B)
放射性柔 (Bq-0.5	☆ガス放出量 MeV 換算値)	排気筒放出分	$4.2 \times 10^{13}$	同左	-
放射性よう素放出量 (Bq-I131 等価量)		排気筒放出分	$2.2 \times 10^{11}$	同左	-
北東 方位	相対線量 ( Gy/Bq )	排気筒放出分	1.0 × 10 <sup>-19</sup>	$7.7  imes 10^{-20}$	1.3
試算 例 <sup>1 )</sup>	相対濃度 (s/m <sup>3</sup> )	排気筒放出分	$5.3 \times 10^{-6}$	$3.2 \times 10^{-6}$	1.7
	実効線量 (mSv)	放射性希ガス分	4.4 × 10 <sup>-3</sup>	3.3 × 10 <sup>- 3</sup>	1.3
		放射性よう素分	$1.1 \times 10^{-2}$	6.7 × 10 <sup>-3</sup>	1.7
		直接線·散乱線分	$3.7 \times 10^{-2}$	$3.7 \times 10^{-2}$	1.0
		合計 <sup>2)</sup>	$5.3 \times 10^{-2}$ ( $1.5 \times 10^{-2}$ )	$4.7 \times 10^{-2}$ ( $1.0 \times 10^{-2}$ )	1.1 (1.5)

**注**<sup>1)</sup>実効線量の合計が最大となる方位を示す。

2) ()内は直接線・散乱線分を除いた実効線量の合計。



解説図4 放出源の有効高さが放出源高さよりも高くなる例

注<sup>1)</sup> 実線に表示した数値は,放出源高さ Hs を表す。なお,破線は実線の10m 毎の補間線である。 5 安全解析における大気拡散評価時の大気安定度の影響(本体 7.1) 安定又は不安定に相 当する大気安定度の風洞実験を行うには温度条件の設定が必要となるため,実施は研究レ ベルに留まっており,本標準で要求しているような大型の風洞が必要となる風洞実験は中 立の大気安定度以外で実施することが難しいのが現状である。従って,当面は中立の大気 安定度で行った風洞実験の結果を他の大気安定度にも適用して大気拡散評価を行うことに なる。本解説では,大気安定度が中立に相当する気流条件で実施した風洞実験で求めた放 出源の有効高さを用いる大気安定度を考慮した大気拡散評価の例について説明する。

5.1 風洞実験結果に基づく安全評価 風洞実験は,大気安定度が中立状態で実施しているが, 野外では中立以外の大気安定度も出現するので,風洞実験により求めた放出源の有効高さ を気象指針の大気拡散式に適用して求めた地表煙軸濃度などの評価値を,野外拡散試験測 定値及び気象モデルを用いた数値シミュレーションによる計算濃度とそれぞれ比較した結 果、次のように風洞実験による放出源の有効高さを気象指針の大気拡散式に適用した評価 値の方が概ね高い値という結果が得られている。

5.2 野外拡散試験結果との比較例 筑波山を含む地域を対象とした風洞実験によって求め た放出源の有効高さに基づく大気拡散評価結果と同地域において実施された現地拡散試験 結果について比較した例を以下に示す。風洞実験に用いた地形模型を解説図 5 に示す。風 洞実験結果から本体 7.実験結果を用いた評価方法によって評価した放出源の有効高さと現 地拡散試験データから評価した放出源の有効高さを比較した結果を解説表4に示す。また, 風洞実験から評価した放出源の有効高さを気象指針に示される大気拡散式に代入して求め た地表煙軸濃度分布を現地拡散試験データとともに解説図 6~解説図 10 に示す。

風洞実験結果から評価した地表煙軸濃度が現地拡散試験の地表濃度測定結果をほとんど 上回っているときには,風洞実験結果から評価する方法が安全側の数値であったことにな り,9ケースのうち,5ケースは安全側であったと評価される。解説図9に示す風洞実験6, 7では,現地拡散試験の放出点から1km付近に高濃度地点が出現しており安全側とはなら なかった。風洞実験6,7と比較している現地拡散試験のケースは,大気状態が安定で弱風 の特殊なケースであった。なお,解説図6に示す風洞実験1では,現地拡散試験の放出点 から2km付近に高濃度となる点が1点だけ,解説図10に示す風洞実験9では,現地拡散 試験の放出点から3km付近に高濃度となる点が4点だけあり,これらの点に関しては風洞 実験から評価した放出源の有効高さでは安全側とはならなかった。

5.3 気象モデルを用いた数値シミュレーション結果との比較例 近年,原子力緊急時被ば く予測システムをダウンスケーリングして,数km四方の狭域気象(風速,気温,湿度など) 及び拡散現象を複雑地形上で再現計算することが可能となってきた。緊急時被ばく予測シ ステムとして現状稼動している各システムの例を解説表5に示す。

解説図 11 の例に示すように現地拡散試験において安定時に筑波山周辺で測定された風速 a),b)には,一部差異が見られるが,地表煙軸濃度分布 c)は MEASURES<sup>(5)</sup>で計算し た結果とよい整合が見られた。この計算では,実際の原子力発電所について,拡散計算の 再現性確認は行っていないが,このような気象拡散解析モデルを用いて**解説図**12に示す計 算手順で,実サイトの年間気象を再現すれば,この非定常な気流場で非中立時を含んだ1 年間の地表濃度及び線量率を計算することが可能である。このため,気象拡散解析モデル で地表濃度及び線量率を計算し,気象指針に示された大気拡散式で気象拡散解析モデルの 気象データを用いて計算した結果と比較検討した例を示す。

PWR の複雑地形サイトについて、1年間の気象再現計算を行い、排気筒高さからの年間 一定量連続放出条件を仮定して、年間積算値並びに97%値の相対濃度及び相対線量につい て計算し、気象指針の大気拡散式による計算結果と比較した例を解説図13及び解説図14 に示す。このサイトでは、解説図13のa)相対濃度1時間平均値を風向別に整理したb) 風向別相対濃度年間積算値は、風向によって大小関係が異なるが、全風向の最大値(NW風 向)については気象指針の大気拡散式による結果が気象拡散解析モデルよりも高い値となった。ここで、相対濃度が高くなっているのは、一般的に弱風で強安定度の場合である。 また、原子炉施設における想定事故時の安全評価のように、c)相対濃度1時間平均値の累 積出現頻度から風向別に求めたd)風向別相対濃度97%値も、全風向の最大値(NW風向) については気象指針の大気拡散式による結果が気象拡散解析モデルよりも高い値となった。 相対線量について、同じように整理し比較した結果も、解説図14のb)、d)に示すように 気象指針の大気拡散式による結果が気象拡散解析モデルよりも高い値となっている。この ケースで気象指針の大気拡散式が高くなる要因としては、次が考えられる。

- a)気象指針では大気拡散式で使用している評価時間が数分間相当の水平方向の拡がりのパ ラメータ(σ<sub>y</sub>)を1時間相当としていることから,気象拡散解析モデルが再現している 1時間相当の拡散幅よりも小さくなるため,気象指針の大気拡散式の方が高濃度となる 傾向がある。
- b)ここで示した気象指針の大気拡散式の評価値は,方位ごとに各時刻の敷地境界等以遠の 最大値のみを累積し累積出現頻度から97%相当値を導出した結果である。これに対し, 気象拡散解析モデルは地表面を格子分割して非定常計算を実施し,方位に関係なく各格 子点で各時刻の値を積算した後,方位ごとに敷地境界等以遠の最大値を求め,この累積 出現頻度から97%相当値を導出しており,気象指針の大気拡散式の方が高濃度となる傾 向がある<sup>(2)</sup>。なお,気象拡散解析モデルにおける気流計算の計算格子は4段階のネステ ィングを行い,水平方向の最小格子幅を250mとした<sup>(5)</sup>。また,濃度計算に用いた水平 方向の格子幅は50mである<sup>(2)</sup>。

#### 参考文献

(1)林隆,茅野政道,山澤弘実他, "風洞及び野外拡散実験から求めた放出源有効高さ",

JAERI-Tech 2001-34 , ( 2001 )

- (2)財団法人 原子力安全研究協会、"非中立時における大気拡散評価手法の妥当性に関する研究 平成18年度(最終報告書)", pp.130-157及び pp.211-229, (2007)
- (3)須田直英、"SPEEDI ネットワークシステムの現状と展望"、保健物理、pp.88-98、
  (2006)
- (4)永井晴康,茅野政道,山澤弘実,"大気力学モデルを用いた緊急時の放射能大気拡散 予測手法の開発",日本原子力学会誌,Vol.41,pp.777-785,(1999)
- (5) 大場良二, "流体・拡散方程式の環境問題への応用と高速数値解法",応用数理, Vol.17, No.1, pp.53-56, (2007)
- (6) Kikuchi, Y., Arakawa, S., Kimura, F., et al., "Numerical Study on the Effects of Mountains on the Land and Sea breeze Circulation in the Kanto District", *Journal* of Meteorological Society of Japan, pp.723-738, (1981)

風洞実験	1	2	3	4	5	6	7	8	9
No									
現地試験	89-1	89-2	89-3	89-5	89-7	90-4	90-5	90-6	90-8
No									
放出高度	116	89	102	90	119	102	130	107	109
(m)									
大気安定度	D	C - D	D	D	С	F	F	A - B	В
放出高風速	4.5	5.2	4.5	3.0	3.6	0.5	0.2	2.4	2.0
( m/s )									
風洞実験	100	80	90	80	70	85	95	85	90
<b>郁熇さ(</b> m)									
現地試験1)	D:70	C:80	D:90	C:80	C:68	E:60	E:75	C:85	C:90
<b> </b>									

# 解説表4 風洞実験の有効高さと現地拡散試験の有効高さ(1)

**注**<sup>1)</sup>現地試験の有効高さ及び大気安定度は,現地試験で測定された地上濃度データを安全 側に評価するように選定された。

# 解説表 5 緊急時被ばく予測システムの例<sup>(3)(4)(5)(6)</sup>

システム名	SPEEDI <sup>1)</sup>	MEASURES <sup>2)</sup>	LOCALS <sup>3)</sup>
1. 気流計算			
a)基礎式	・静力学モデル(広域)	・非静力学モデル	・静力学モデル
	・マスコンモデル(狭域)		
b) 乱流モデル	• Mellor-Yamada E7	・k/1 モデル	• Mellor-Yamada ᠲ͡デル
	ll l		
c)境界条件	・GPVデータ&	・GPVデータ&	・GPVデータ&
	サイト気象データ	サイト気象データ	サイト気象データ
	・国土メッシュデータ	・国土メッシュデータ	・国土メッシュデータ
2. 拡散計算			
a) 基礎式	・乱流拡散式	・乱流拡散式	・乱流拡散式
b)数値計算法	・粒子拡散モデル	・粒子拡散モデル	・粒子拡散モデル
c) 拡散係数	• Mellor-Yamada الحَرْ	・完全3次元 k/lモデ	• Mellor-Yamada सर्न`∦
	ル(鉛直拡散)	ル	(水平・鉛直拡散)
	・P-G チャート		・P-Gチャート
	(水平拡散)		(水平拡散)

注<sup>1)</sup>SPEEDI (System for Prediction of Environmental Emergency Dose Information )

<sup>2</sup>) MEASURES (Multiple Radiological Emergency Assistance System for Urgent Response System )

<sup>3)</sup> LOCALS (Local Circulation Assessment and Prediction System)



解説図 5 風洞実験の地形模型<sup>(1)</sup>





**解説図**6 地表煙軸濃度分布(上:風洞実験1,下:風洞実験2)<sup>(1)</sup>

**注**<sup>1)</sup> 出典元の図に対して現地試験データを鮮明にした。また,規準化濃度 (m<sup>-2</sup>)は、本実施基準の正規化濃度と同様な定義である。



解説図 7 地表煙軸濃度分布 (上:風洞実験 3,下:風洞実験 4)<sup>(1)</sup>

**注**<sup>1)</sup> 出典元の図に対して現地試験データを鮮明にした。また,規準化濃度 (m<sup>-2</sup>)は、本実施基準の正規化濃度と同様な定義である。



解説図 8 地表煙軸濃度分布 (風洞実験 5)<sup>(1)</sup>

**注**<sup>1)</sup> 出典元の図に対して現地試験データを鮮明にした。また,規準化濃度 (m<sup>-2</sup>)は、本実施基準の正規化濃度と同様な定義である。





**注**<sup>1)</sup> 出典元の図に対して現地試験データを鮮明にした。また,規準化濃度 (m<sup>-2</sup>)は、本実施基準の正規化濃度と同様な定義である。



解説図 10 地表煙軸濃度分布 (上:風洞実験 8,下:風洞実験 9)<sup>(1)</sup>

**注**<sup>1)</sup> 出典元の図に対して現地試験データを鮮明にした。また,規準化濃度 (m<sup>-2</sup>)は、本実施基準の正規化濃度と同様な定義である。

c) 筑波山周辺の地表煙軸上濃度分布比較

#### a) 筑波山頂の風速変化



解説図 11 筑波山野外拡散試験の観測結果と計算結果の比較<sup>(5)</sup>

a) 気象指針モデル

b) 気象拡散解析モデル







a)相対濃度1時間平均値の年間変化





解説図 13 PWR 複雑地形サイトの相対濃度評価結果 (1/2)<sup>(2)</sup>



#### c)相対濃度1時間平均値の年間出現頻度分布

d) 風向別相対濃度97% 値の比較



解説図 13 PWR 複雑地形サイトの相対濃度評価結果 (2/2)<sup>(2)</sup>



a)相対線量1時間平均値の年間変化

# b) 風向別相対線量1時間平均値の年間累積値の比較



解説図 14 PWR 複雑地形サイトの相対線量評価結果 (1/2)<sup>(2)</sup>



# c) 相対線量1時間平均値の年間出現頻度分布

d) 風向別相対線量97% 値の比較



解説図 14 PWR 複雑地形サイトの相対線量評価結果 (2/2)<sup>(2)</sup>