

島根原子力発電所 2号炉 審査資料	
資料番号	EP-021 改 11
提出年月日	令和 2年 5月 7日

## 島根原子力発電所 2号炉

### 外部からの衝撃による損傷の防止 (竜巻)

令和 2年 5月  
中国電力株式会社

## 第6条：外部からの衝撃による損傷の防止

### 〈目次〉

1. 基本方針
  - 1.1 要求事項の整理
2. 追加要求事項に対する適合方針
  - 2.1 その他自然現象等
    - 2.1.1 設計基準上考慮すべき事象の抽出及び当該事象に対する設計方針
      - 2.1.1.1 自然現象
      - 2.1.1.2 人為現象
    - 2.1.2 自然現象の組合せ
    - 2.1.3 大きな影響を及ぼすおそれがあると想定される自然現象に対する重要安全施設への考慮
  - 2.2 竜巻
    - 2.2.1 竜巻に対する防護に関して、設計上対処すべき施設を抽出するための方針
    - 2.2.2 発生を想定する竜巻の設定
      - 2.2.2.1 竜巻検討地域の設定
      - 2.2.2.2 基準竜巻の設定
      - 2.2.2.3 設計竜巻の設定
    - 2.2.3 設計荷重の設定
      - 2.2.3.1 設計竜巻荷重
      - 2.2.3.2 設計竜巻荷重と組み合わせる荷重
    - 2.2.4 評価対象施設等の設計方針
      - 2.2.4.1 設計方針
    - 2.2.5 竜巻随伴事象に対する評価対象施設の設計方針
    - 2.2.6 参考文献
  - 2.3 火山
    - 2.3.1 火山活動に対する防護に関して、評価対象施設を抽出するための方針
    - 2.3.2 降下火砕物による影響の選定
    - 2.3.3 設計荷重の設定
    - 2.3.4 降下火砕物の直接的影響に対する設計方針
    - 2.3.5 降下火砕物の間接的影響に対する設計方針
    - 2.3.6 参考文献

## 2.4 外部火災

2.4.1 外部火災に対して，設計上対処すべき施設を抽出するための方針

2.4.2 考慮すべき外部火災

2.4.3 外部火災に対する設計方針

2.4.3.1 森林火災

2.4.3.2 近隣の産業施設の火災・爆発

2.4.3.3 発電所敷地内における航空機墜落による火災

2.4.3.4 ばい煙及び有毒ガス

## 3. 外部からの衝撃による損傷の防止

別添 1-1 外部事象の考慮について

別添 2-1 竜巻影響評価について

別添 2-2 竜巻影響評価におけるフジタモデルの適用について

別添 3-1 火山影響評価について

別添 4-1 外部火災影響評価について

## 4. 運用，手順能力説明資料

別添 1-2 運用，手順能力説明資料（外部事象）

別添 2-3 運用，手順能力説明資料（竜巻）

別添 3-2 運用，手順能力説明資料（火山）

別添 4-2 運用，手順能力説明資料（外部火災）

## 5. 現場確認のプロセス

別添 4-3 森林火災評価に係る植生確認プロセスについて

下線は，今回の提出資料を示す。

## 2.2 竜巻

### (1) 竜巻に対する設計の基本方針

安全施設が竜巻に対して、発電用原子炉施設の安全性を確保するために必要な安全機能を損なわないよう、基準竜巻、設計竜巻及び設計荷重を適切に設定し、以下の事項に対して、対策を行い、建物による防護、構造健全性の維持、代替設備の確保等によって、安全機能を損なわない設計とする。

また、安全施設は、設計荷重による波及的影響によって、安全機能を損なわない設計とする。

- a. 飛来物の衝突による施設の貫通及び裏面剥離
- b. 設計竜巻による風圧力による荷重、気圧差による荷重及び設計飛来物による衝撃荷重を組み合わせた設計竜巻荷重並びにその他の組合せ荷重（常時作用している荷重、運転時荷重、竜巻以外の自然現象による荷重及び設計基準事故時荷重）を適切に組み合わせた設計荷重
- c. 竜巻による気圧の低下
- d. 外気と繋がっている箇所への風の流入

### 2.2.1 竜巻に対する防護に関して、設計上対処すべき施設を抽出するための方針

#### (1) 竜巻から防護する施設の抽出

竜巻によってその安全機能が損なわれないことを確認する必要がある施設を、安全重要度分類のクラス1、クラス2及びクラス3に該当する構築物、系統及び機器とする。

竜巻によってその安全機能が損なわれないことを確認する必要がある施設のうち、外部事象防護対象施設は、設計荷重に対し機械的強度を有すること等により、安全機能を損なわない設計とする。

竜巻影響評価の対象施設としては、「(2-1) 評価対象施設」及び「(2-2) 外部事象防護対象施設に波及的影響を及ぼし得る評価対象施設」に示す。

また、竜巻に対する防護設計を行う、外部事象防護対象施設のうち評価対象施設、外部事象防護対象施設に波及的影響を及ぼし得る評価対象施設を「評価対象施設等」という。

外部事象防護対象施設の安全機能を損なわないようにするため、外部事象防護対象施設に影響を及ぼす飛来物の発生防止対策を実施するとともに、作用する設計荷重に対する外部事象防護対象施設の構造健全性の維持、外部事象防護対象施設を内包する区画の構造健全性の確保若しくは飛来物による損傷を考慮して、代替設備により必要な機能を確保すること、安全上支障のない期間での修復等の対応又はそれらを適切に組み合わせた設計とする。

屋外に設置する外部事象防護対象施設の構造健全性の維持又は外部事象防護対象施設を内包する区画の構造健全性の確保において、それらを防護するために設置する竜巻防護対策設備は、竜巻防護ネット、竜巻防護鋼板等から構成し、飛来物から外部事象防護対象施設を防護できる設計とする。

## (2) 竜巻影響評価が必要となる施設の選定

### (2-1) 評価対象施設

外部事象防護対象施設は、外殻となる施設（建物、構築物）（以下「外殻となる施設」という。）に内包され、外気と繋がっておらず設計竜巻荷重の影響から防護される施設（以下「外殻となる施設に内包され防護される施設（外気と繋がっている施設を除く。））」という。）、設計竜巻荷重の影響を受ける屋外施設（以下「屋外施設」という。）、外殻となる施設に内包されるため、設計竜巻の風圧力による荷重及び設計飛来物等による衝撃荷重の影響から防護されるが、外気と繋がっており設計竜巻の気圧差による荷重の影響を受ける施設（以下「外気との接続がある施設」という。）及び外殻となる施設に内包されるが設計竜巻荷重の影響から防護が期待できない施設（以下「外殻となる施設等による防護機能が期待できない施設」という。）に分類し、このうち、外殻となる施設に内包され防護される施設（外気と繋がっている施設を除く。）は内包する建物により防護する設計とすることから、評価対象施設は、屋外施設、外気との接続がある施設及び外殻となる施設による防護機能が期待できない施設とし、以下のように抽出する。

また、外殻となる施設による防護機能が期待できない施設については、建物、構築物の構造健全性維持可否の観点、設計飛来物の衝突による開口部の開放又は開口部の貫通等の観点から、施設を抽出する。

なお、外部事象防護対象施設に含まれない構築物、系統及び機器は、竜巻及びその随伴事象により損傷した場合であっても、代替手段があること等により安全機能は損なわれない。

評価対象施設の抽出フローを「別添2-1 添付資料1.2」に示す。抽出結果を以下に示す。

また、上記の抽出に加え、「基準地震動及び耐震設計方針に係る審査ガイド」の重要度分類における耐震 S クラスの設計を要求される設備（系統、機器）及び建物・構築物のうち、竜巻の影響を受ける可能性がある施設を抽出し、追加で評価対象施設に反映する施設がないことを確認した。

耐震 S クラス設備等のうち評価対象施設の抽出フロー及び抽出結果を「別添2-1 添付資料1.3」に示す。

#### (屋外施設)

- ・海水ポンプ（原子炉補機冷却系、高圧炉心スプレー補機冷却系）（配管、弁を含む。）
- ・海水ストレーナ（原子炉補機冷却系、高圧炉心スプレー補機冷却系）
- ・排気筒（非常用ガス処理系用排気筒を含む。）
- ・排気筒モニタ
- ・ディーゼル燃料移送ポンプ（A-非常用ディーゼル発電機系、高圧炉心スプレー非常用ディーゼル発電機系）（配管、弁を含む。）
- ・原子炉建物

- ・タービン建物
- ・制御室建物
- ・廃棄物処理建物
- ・排気筒モニタ室
- ・ディーゼル燃料貯蔵タンク室（A-非常用ディーゼル発電機系, 高圧炉心スプレイ非常用ディーゼル発電機系）
- ・ディーゼル燃料貯蔵タンク格納槽※（B-非常用ディーゼル発電機系）  
※ディーゼル燃料貯蔵タンク及びディーゼル燃料移送ポンプを内包

（外気との接続がある施設）

- ・空調換気設備（原子炉棟空調換気系，中央制御室換気系，原子炉建物附属棟空調換気系の外気と繋がるダクト・ファン及び外気との境界となるダンパ・隔離弁）
- ・非常用ガス処理系配管

（外殻となる施設による防護機能が期待できない施設）

- ・原子炉建物1階 原子炉補機冷却水ポンプ，熱交換器，配管及び弁
- ・原子炉建物2階 原子炉建物附属棟空調換気設備
- ・原子炉建物4階 原子炉建物天井クレーン，燃料取替機，燃料プール，燃料プール冷却系配管及び弁，使用済燃料貯蔵ラック，燃料集合体
- ・廃棄物処理建物3階 中央制御室空調換気設備等

## （2-2）外部事象防護対象施設に波及的影響を及ぼし得る評価対象施設

外部事象防護対象施設に波及的影響を及ぼし得る評価対象施設としては，発電所構内の構築物，系統及び機器（安全重要度分類のクラス1，クラス2，クラス3及びノンクラス）の中から，以下のa. 及びb. に示す，倒壊により外部事象防護対象施設の機能を喪失させる可能性がある施設，気圧差等による損傷により外部事象防護対象施設の機能を喪失させる可能性のある屋外の外部事象防護対象施設の附属施設を抽出する。

外部事象防護対象施設に波及的影響を及ぼし得る評価対象施設の抽出フロー及び抽出結果を「別添2-1 添付資料1.2」に示す。

### a. 機械的影響の観点での抽出

外部事象防護対象施設に機械的影響を及ぼし得る施設としては，施設の高さと外部事象防護対象施設との距離を考慮して，倒壊により外部事象防護対象施設を損傷させる可能性がある施設を，外部事象防護対象施設に機械的影響を及ぼし得る施設として抽出する。

- ・排気筒モニタ室
- ・1号炉原子炉建物
- ・1号炉タービン建物

- ・ 1号炉廃棄物処理建物
  - ・ 1号炉排気筒
- b. 機能的影響の観点での抽出
- 外部事象防護対象施設に機能的影響を及ぼし得る施設としては、屋外にある外部事象防護対象施設の付属設備で、風圧力及び設計飛来物の衝突等による損傷により外部事象防護対象施設の安全機能を損なわせる可能性がある施設を、外部事象防護対象施設に機能的影響を及ぼし得る施設として抽出する。
- ・ 排気管（非常用ディーゼル発電機の付属施設）
  - ・ 排気消音器（非常用ディーゼル発電機の付属施設）
  - ・ ベント管（ディーゼル燃料貯蔵タンク、ディーゼル燃料デイトank及び潤滑油サンプルタンクの付属施設）

### (2-3) 建物の選定

「(2-1)評価対象施設」の屋外施設にて、建物も含めて抽出する。

### (2-4) 竜巻随件事象の観点での抽出

発電所構内の構築物、系統及び機器のうち、竜巻随件事象の影響により外部事象防護対象施設の機能を喪失させる可能性がある施設として、以下を抽出する。

- ・ 溢水により外部事象防護対象施設の機能を機能喪失させる可能性のある施設（純水タンク、ろ過水タンク等）
- ・ 火災発生により外部事象防護対象施設の機能を喪失させる可能性がある施設（変圧器等）
- ・ 外部電源

### (2-5) 手順等

竜巻に対する防護については、竜巻に対する影響評価を行い、安全施設が安全機能を損なわないよう手順等を定める。

- a. 屋外の作業区画で飛散するおそれのある資機材、車両等については、飛来時の運動エネルギー及び貫通力等を評価し、外部事象防護対象施設への影響の有無を確認する。外部事象防護対象施設に影響を及ぼす資機材、車両等については、固縛、固定、外部事象防護対象施設から離隔、頑健な建物内に収納又は撤去する。これら飛来物発生防止対策について手順を定める。
- b. 竜巻の襲来が予想される場合及び竜巻襲来後において、外部事象防護対象施設を防護するための操作・確認、補修等が必要となる事項について手順を定める。

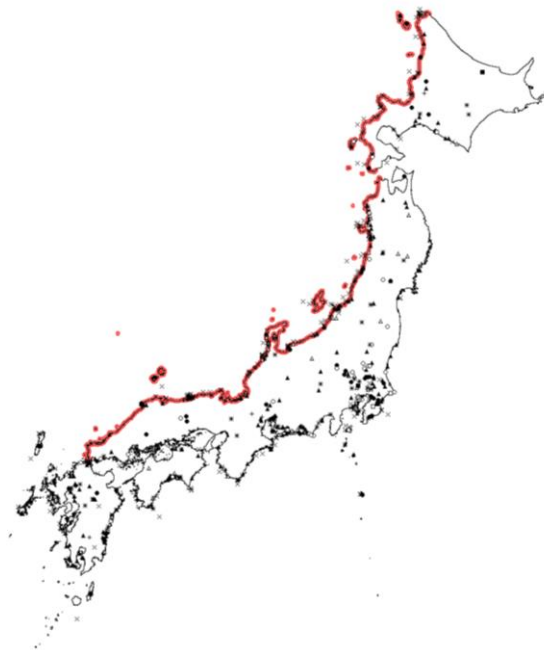
## 2.2.2 発生を想定する竜巻の設定

### 2.2.2.1 竜巻検討地域の設定

島根原子力発電所に対する竜巻検討地域について、発電所が立地する地域と気象条件の類似性の観点で検討を行い、第2.2.2.1-1図に示すとおり北海道から山陰地方にかけての日本海沿岸の海岸線から陸側及び海側それぞれ5kmの範囲を竜巻検討地域に設定した（面積約33,395km<sup>2</sup>）。

竜巻検討地域は、竜巻発生要因となる気象条件（総観場）を確認する観点から、「総観場の分析に基づく地域特性の確認」、「過去の竜巻集中地域に基づく地域特性の確認」により地域特性を確認し、設定した。

また、一般的に大気現象は時空間スケールの階層構造が見られ、ある大気現象はスケールの小さな現象を内包しているため、大きな竜巻の発生要因となる環境場の形成のしやすさ（大きな竜巻の発生に対する大気場の必要条件）を把握する観点から、「突風関連指数に基づく地域特性の確認」により竜巻の発生スケールに近いメソスケールの気象場が有する地域性と齟齬がないことについても確認した。

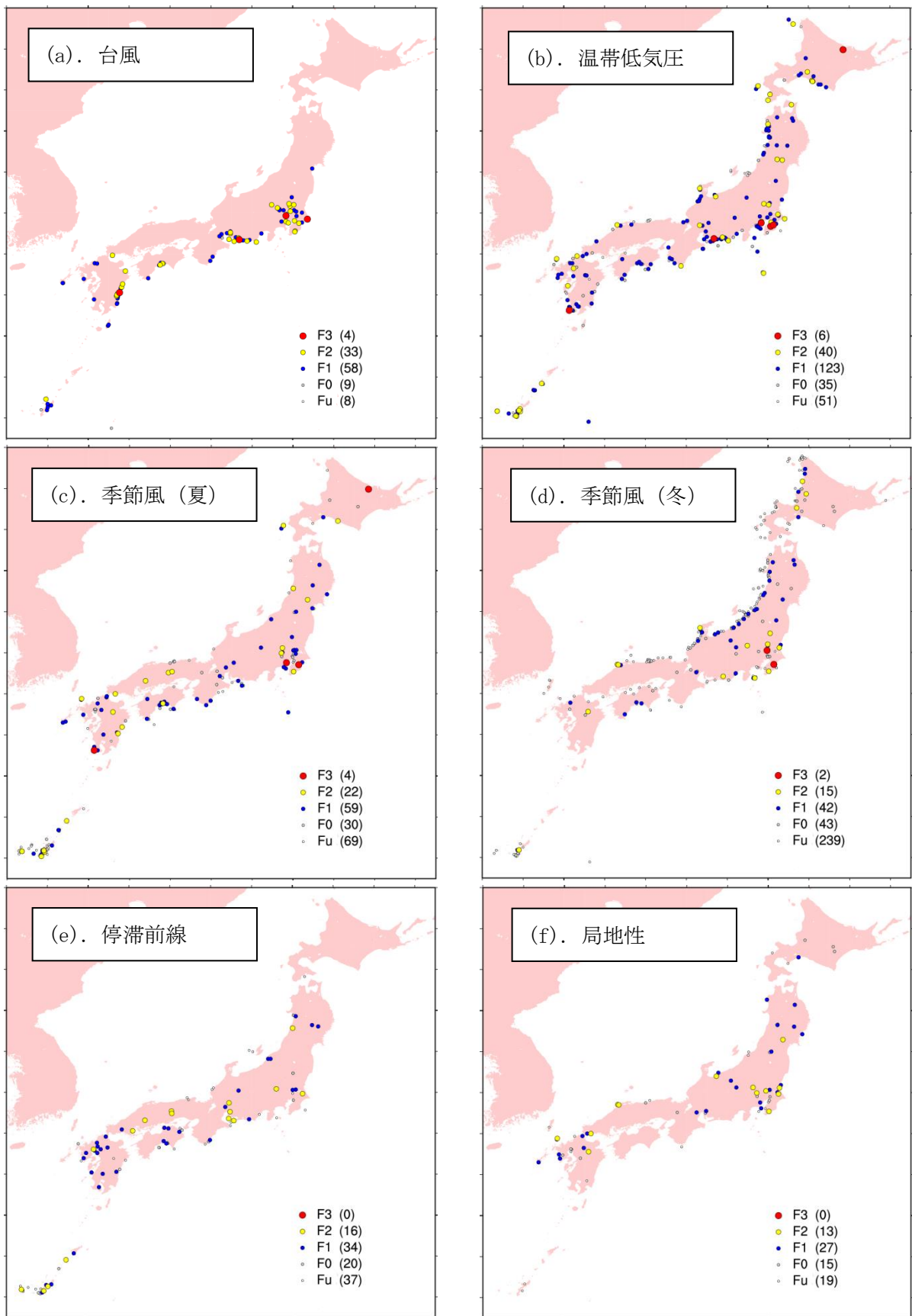


第2.2.2.1-1図 竜巻検討地域（赤線部）

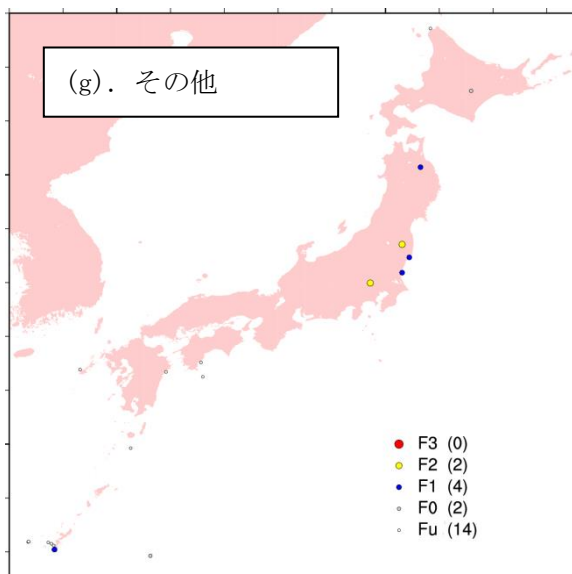
#### (1) 総観場の分析に基づく地域特性の確認

竜巻を発生させる親雲の発生要因<sup>(1)</sup>を考慮して7種の総観場に再編し、発生分布の特徴を分析した。第2.2.2.1-2図の総観場ごとの竜巻発生地点の分布、第2.2.2.1-3図の竜巻検討地域（日本海沿岸）と太平洋側地域の総観場の特徴の比較に示す通り、日本海側と太平洋側では竜巻の発生要因となる総観場が大きく異なっており、竜巻検討地域を日本海側とすることは妥当な設定である。

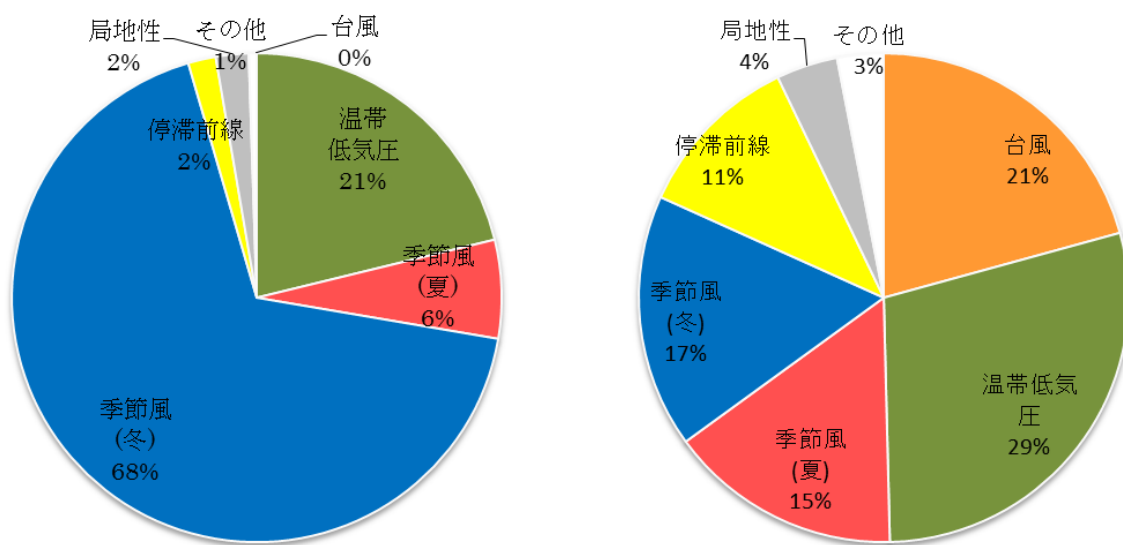




第2.2.2.1-2図 総観場ごとの竜巻発生地点の分布(1961年～2012年)  
 (気象庁「竜巻等の突風データベース」<sup>(2)</sup>のデータをもとに作成)



第2.2.2.1-2図(続き) 総観場ごとの竜巻発生地点の分布 (1961年～2012年)  
 (気象庁「竜巻等の突風データベース」<sup>(2)</sup>のデータをもとに作成)



竜巻検討地域 (日本海沿岸)

太平洋側地域

第2.2.2.1-3 図 竜巻の総観場の特徴の比較

(2) 過去の竜巻集中地域に基づく地域特性の確認

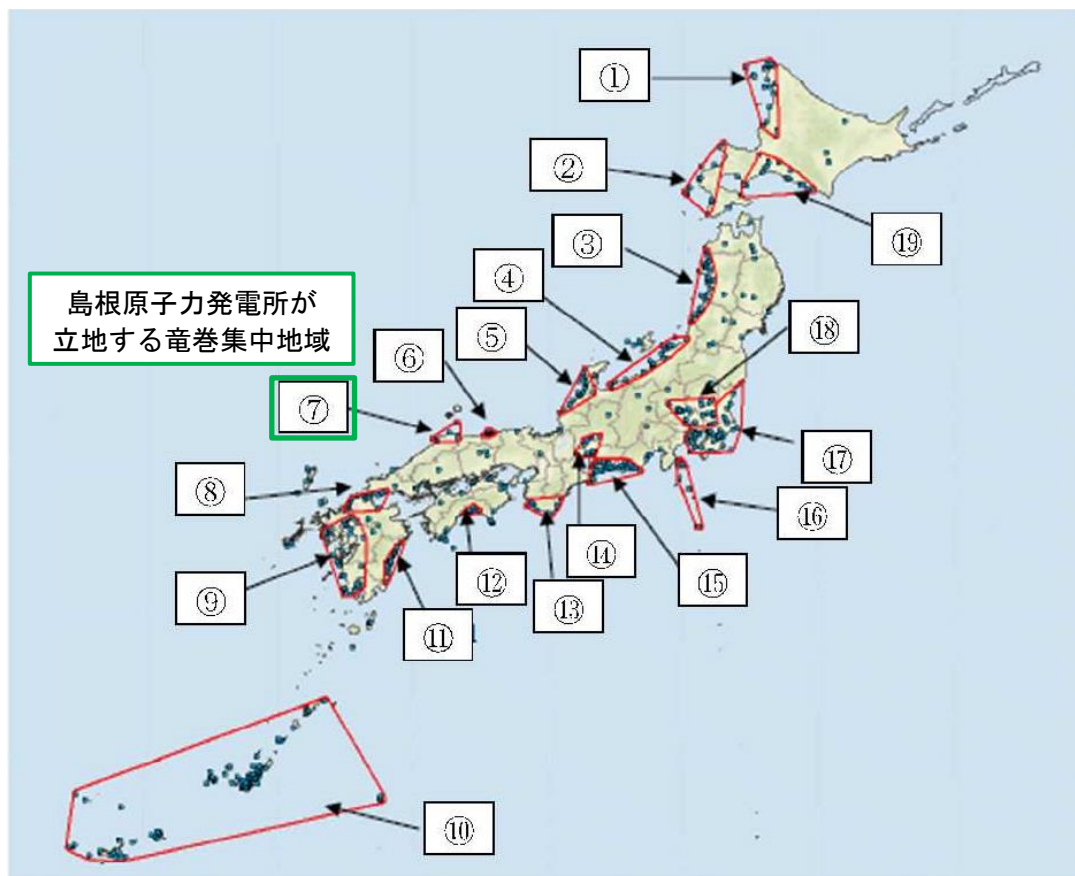
日本で竜巻が集中する地域については、「原子力発電所の竜巻影響評価ガイド(案)及び解説」<sup>(1)</sup>に、全国19箇所の竜巻集中地域が示されており、第2.2.2.1-4図に示す通り、島根原子力発電所は、竜巻集中地域⑦(島根県の一部)に立地している。

気象庁「竜巻等の突風データベース」<sup>(2)</sup>によると、1961年1月から2012年6月の51.5年間に発生が確認された竜巻は竜巻集中地域⑦で8個であり、この期間に竜巻集中地域⑦で観測されているもっとも強い竜巻は藤田スケール(以下、「Fスケール」という。)でF2となる。(「別添2-1」の表2.2.3.1)

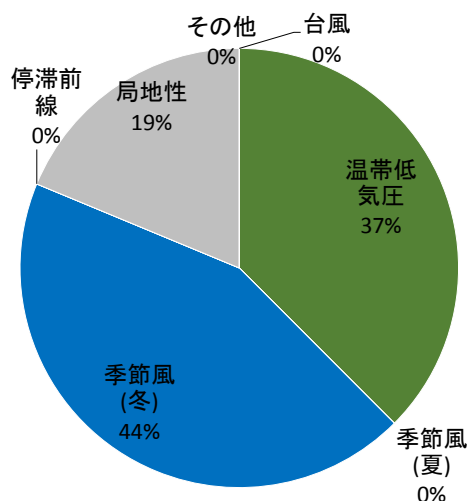
竜巻発生の影響評価の観点からすると、データ数は多い方がよいため、竜巻検討地域としては北海道から山陰地方にかけての日本海沿岸を設定する。竜巻検討地域での竜巻個数は192個であり、観測されたもっとも強い竜巻はF2である。

なお、竜巻検討地域と竜巻集中地域⑦の竜巻発生確率は、 $1.1 \times 10^{-4}$ 、 $1.3 \times 10^{-4}$ （個/年/km<sup>2</sup>）であり、単位面積あたりの竜巻発生数は竜巻集中地域⑦の方がやや大きくなるものの、両者は概ね同程度である。竜巻集中地域⑦における竜巻の観測記録は8事例とかなり少なく、影響評価を行うにはデータ数が乏しいため、192個の竜巻個数がある竜巻検討地域を評価対象とすることは妥当な設定である。

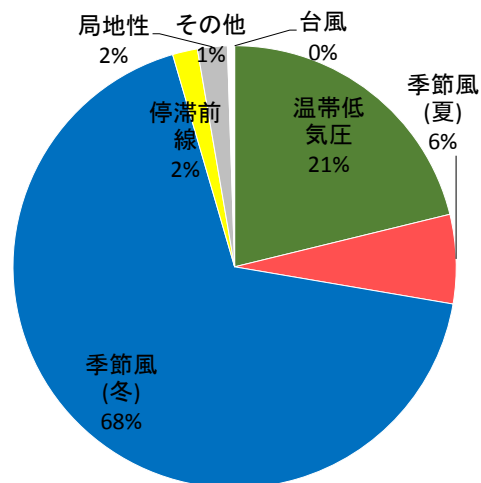
竜巻の地域特性を確認するため、第2.2.2.1-5図に示す通り、竜巻集中地域⑦と竜巻検討地域、竜巻集中地域⑦に隣接する竜巻集中地域⑥（鳥取県の一部）における総観場の比較を行い、いずれの地域でも“季節風（冬）”と“温帯低気圧”あるいは“季節風（夏）”が竜巻発生の主要因となっていることから、北海道から山陰地方にかけての日本海沿岸を竜巻検討地域にすることは竜巻集中地域における地域特性の観点からも妥当な設定である。



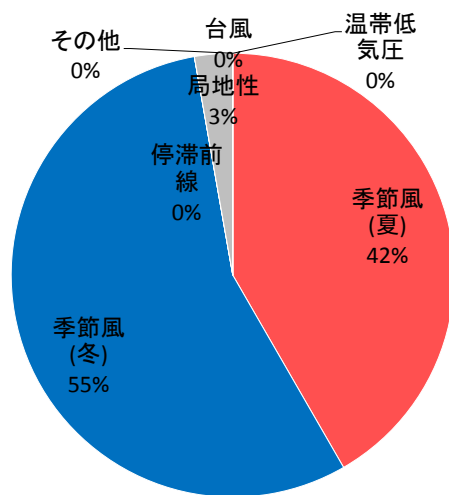
第2.2.2.1-4図 竜巻の発生地点と竜巻が集中する19個の地域  
（「原子力発電所の竜巻影響評価ガイド（案）及び解説」<sup>(1)</sup>より引用）



竜巻集中地域⑦（島根県の一部）



竜巻検討地域（日本海沿岸）



竜巻集中地域⑥（鳥取県の一部）

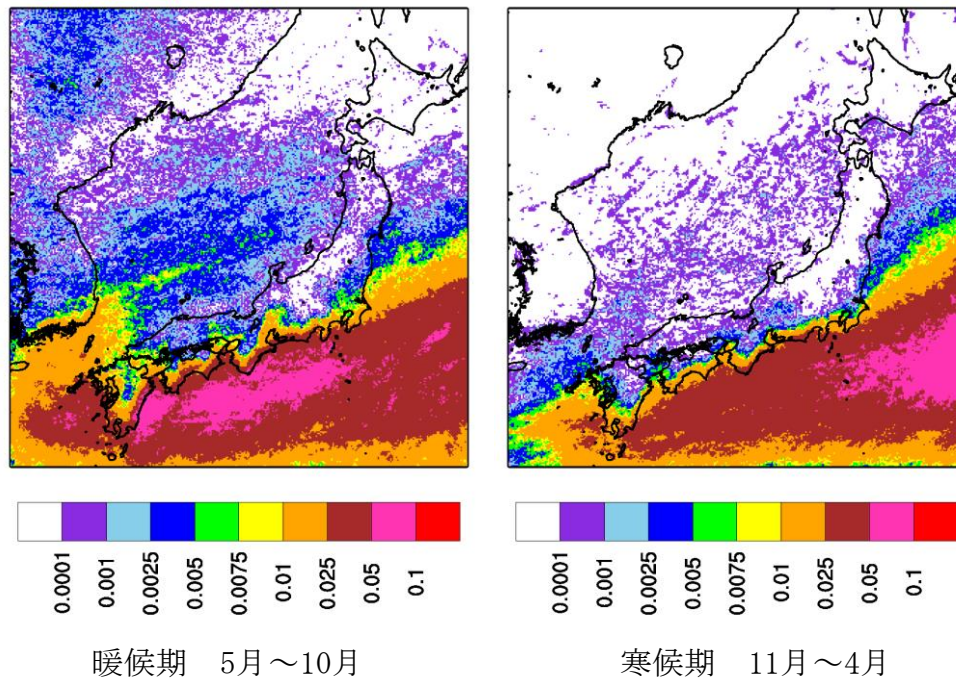
第 2.2.2.1-5 図 各地域の竜巻発生要因に関する総観場の特徴

### (3) 突風関連指数に基づく地域特性の確認<sup>(3)~(39)</sup>

総観場での確認に加え、大きな被害をもたらす強い竜巻の発生要因となる環境場の形成のしやすさについての地域特性を確認するため、気象庁や米国気象局においても竜巻探知・予測に活用されており、竜巻の発生のしやすさを数値的に示すことができる突風関連指数を用いて地域特性の確認を行った。

大きな被害をもたらす竜巻の親雲の多くはスーパーセルであり、スーパーセルが発生しやすい環境場として、大気下層の鉛直シア（異なる高度間での風向・風速差）と、強い上昇気流を発生させるきっかけとしての不安定な大気場が必要であることから、突風関連指数としては、竜巻の発生実態を解明する研究において国内外で広く利用され、大気的不安定度を表す指標である「CAPE」、鉛直シアに伴って発生する水平渦度が親雲に取り込まれる度合いを表す指標である「SReH」を採用し、両者の指標が同時に高くなる頻度について、地域的な特徴を確認する分析を実施した。（第2.2.2.1-6図）

これらの分析より、スーパーセルに伴って発生する大規模な竜巻形成につながる環境場の発生頻度分布の観点からも、日本海側と太平洋側で大きな地域特性の違いがあることを確認した。



第2.2.2.1-6図 F3規模以上を対象としたSReH, CAPE 同時超過頻度分布 (単位: %)

### 2.2.2.2 基準竜巻の設定

基準竜巻の最大風速は、過去に発生した竜巻による最大風速 ( $V_{B1}$ ) 及び竜巻最大風速のハザード曲線による最大風速 ( $V_{B2}$ ) のうち、大きな風速を設定する。

#### (1) 過去に発生した竜巻による最大風速 ( $V_{B1}$ )

第2.2.2.2-1 表より竜巻検討地域における過去最大竜巻はF2であり、Fスケールと風速の関係より風速は50～69m/sであることから、 $V_{B1}$ はF2の風速範囲の上限値69m/sとする。

第2.2.2.2-1表 竜巻検討地域における竜巻の観測記録 (F1より大きい竜巻) ※1

発生日時	発生場所		Fスケール※2	総観場
	都道府県	市町村		
1962年09月28日 14時20分	北海道 宗谷支庁	東利尻町	(F2)	寒冷前線
1971年10月17日 05時00分	北海道 留萌支庁	羽幌町	(F2)	寒気の移流
1974年10月03日 19時05分	北海道 檜山支庁	奥尻郡奥尻町	(F1~F2)	温暖前線
1974年10月20日 15時00分	北海道 檜山支庁	檜山郡上ノ国町	(F1~F2)	寒冷前線
1975年05月31日 18時10分	島根県	簸川郡大社町	(F2)	日本海低気圧 局地性じょう乱 寒気の移流
1975年09月08日 01時30分	北海道 檜山支庁	奥尻郡奥尻町	(F1~F2)	日本海低気圧 暖気の移流
1979年11月02日 01時58分	北海道 渡島支庁	松前郡松前町	(F2)	日本海低気圧 温暖前線
1989年03月16日 19時20分	島根県	簸川郡大社町	(F2)	局地性じょう乱 寒気の移流
1990年04月06日 02時55分	石川県	羽咋郡富来町	F2	オホーツク海低気圧 気圧の谷
1999年11月25日 15時40分	秋田県	八森町	(F1~F2)	日本海低気圧 寒冷前線

※1 気象庁「竜巻等の突風データベース」<sup>(2)</sup>より作成

※2 Fスケールは、ア) 被害の詳細な情報等から推定できたもの、イ) 文献等からの引用又は被害のおおまかな情報等から推定したもの、があり、F2以上の事例ではア)とイ)を区別し、イ)の場合には値を括弧で囲んでいる。

## (2) 竜巻最大風速のハザード曲線による最大風速 ( $V_{B2}$ )

以下(a)~(e)の検討の結果、海岸線から陸側及び海側それぞれ5km全域(竜巻検討地域)を対象に算定したハザード曲線、竜巻検討地域を海岸線に沿って1km範囲ごとに短冊状に細分化して算定したハザード曲線より、年超過確率 $10^{-5}$ における風速はそれぞれ61m/s、62m/sである。

また、使用した竜巻の統計データの不確実性については「別添2-1」で検討を実施しており、Fスケール不明の海上竜巻の発生数は、陸上竜巻のFスケール別発生比率で按分して取り扱っているが、竜巻検討地域を「北海道から山陰地方にかけての日本海沿岸」にすることに伴う竜巻ハザード曲線算出のためのデータの不確実性(日本海側はFスケール不明の海上竜巻が多い)を踏まえ、参照する年超過確率を $10^{-5}$ から一桁下げた年超過確率 $10^{-6}$ における風速とすると、陸側及び海側5km全域での評価、1km範囲ごとに細分化した評価ともに78m/sとなる。以上より、竜巻最大風速のハザード曲線による最大風速 $V_{B2}$ は78m/sとする。

竜巻最大風速のハザード曲線は、気象庁「竜巻等の突風データベース」<sup>(2)</sup>より竜巻検討地域における竜巻の観測記録を抽出・評価し、既往の算定法(Wen&Chu<sup>(41)</sup>)及び

Garson et. al<sup>(42)</sup>)に基づき算定する。具体的には、東京工芸大学委託成果<sup>(40)</sup>を参考とし、「別添2-1 添付資料2.3」に示すフローに従いハザード曲線を算定する。

ハザード曲線は、竜巻検討地域の竜巻特性を適切に考慮できる海岸線から海側、陸側それぞれ5kmの範囲内で算定した。加えて、竜巻検討地域において過去に発生した竜巻は、海上発生 of Fスケール不明の竜巻が半数以上を占める偏った発生となっていることや竜巻発生確認数にばらつきがあることを踏まえ、「原子力発電所の竜巻影響評価ガイド（平成25年6月19日 原規技発13061911号 原子力規制委員会決定）」（以下、「ガイド」という。）に基づき、ハザード曲線に保守性をもたせるために竜巻検討地域を海岸線に沿って1km範囲ごとに短冊状に細分化した場合のハザード曲線も算定した。

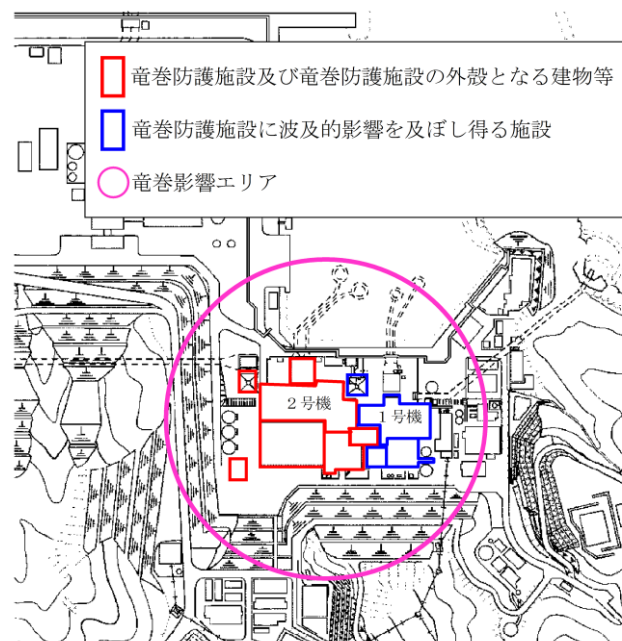
#### a. 竜巻影響エリアの設定

##### (a) 竜巻影響エリア

竜巻影響エリアは、2号炉の竜巻影響評価対象施設を十分な余裕をもって包絡するエリアとして設定する。

第2.2.2.2-1図に島根原子力発電所2号炉の竜巻影響エリアを示す。竜巻影響エリアは、島根原子力発電所2号炉の評価対象施設を包絡する円形のエリア（直径450m、面積約 $1.6 \times 10^5 \text{m}^2$ ）として設定する。

なお、竜巻影響エリアを円形とするため、竜巻の移動方向には依存性は生じない。



第 2.2.2.2-1 図 島根 2 号炉 竜巻影響エリア

(b) 竜巻風速，被害幅及び被害長さの確率分布並びに相関係数

竜巻検討地域における1961年1月～2012年6月までの51.5年間の竜巻の発生数，被害幅及び被害長さを基に，確率密度分布についてはガイド及びガイドが参考としている東京工芸大学委託成果<sup>(40)</sup>を参照し，対数正規分布に従うものとする。（第2.2.2.2-2図～第2.2.2.2-7図）

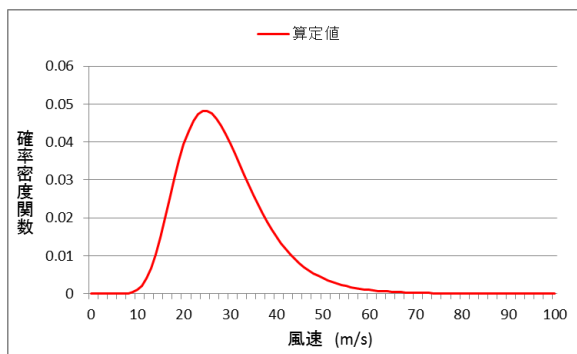
なお，擬似的な竜巻の作成において被害幅又は被害長さの情報がない竜巻には，観測された竜巻と同程度の竜巻を想定し，それに相当する被害幅又は被害長さを与えている。その際は，被害幅又は被害長さが大きいほうから優先的に用いることにより，保守的に評価を行う。

また，1961年以降の観測データのみを用いて，竜巻風速，被害幅及び被害長さについて相関係数を求める。（第2.2.2.2-2表）

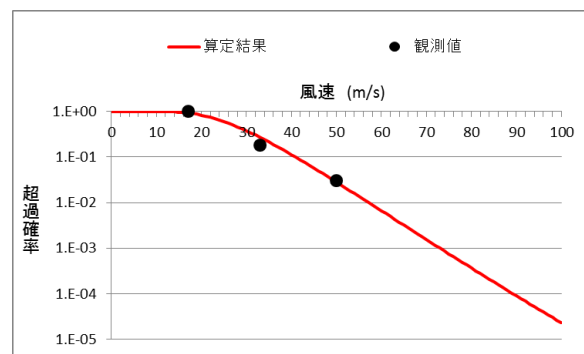
第 2.2.2.2-2 表 竜巻風速，被害幅及び被害長さの相関係数（単位なし）

相関係数	風速	被害幅	被害長さ
風速	1.000	-0.050 <sup>※</sup>	0.312
被害幅	-0.050 <sup>※</sup>	1.000	0.462
被害長さ	0.312	0.462	1.000

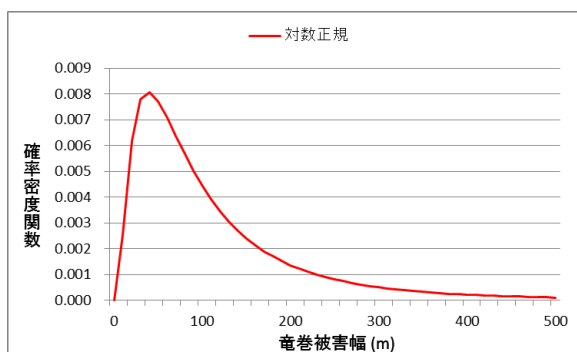
※風速と被害幅は無相関との知見が得られたため，ハザード算定の際には，相関係数0として計算



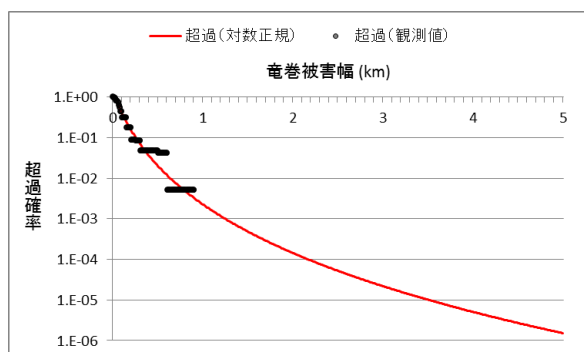
第 2.2.2.2-2 図 竜巻風速の確率密度分布



第 2.2.2.2-3 図 竜巻風速の超過確率分布

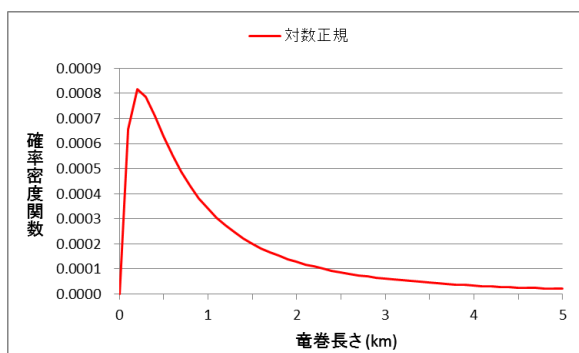


第2.2.2.2-4図 被害幅の確率密度分布

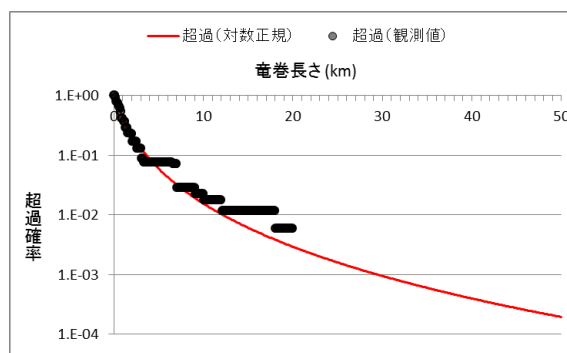


第2.2.2.2-5図 被害幅の超過確率分布





第2.2.2.2-6図 被害長さの確率密度分布



第2.2.2.2-7図 被害長さの超過確率分布

## b. 竜巻の年発生数の確率分布の設定

### (a) 竜巻の年発生数の確率分布

設定に当たっては、竜巻は気象事象の中でも極めて稀に発生する事象であり、発生数の変動（標準偏差）が大きい分布であることから、東京工芸大学委託成果<sup>(40)</sup> になってポリヤ分布により設定した。なお、ポリヤ分布は、ガイドにおいて推奨されているポアソン分布を一般化したものであり、年発生数の年々変動の実態をポアソン分布よりも適合性が高い形で表現できることを確認している。

### (b) 竜巻の発生頻度の分析

気象庁「竜巻等の突風データベース」<sup>(2)</sup> をもとに、1961年1月～2012年6月までの51.5年間の統計量をFスケール別に算出する。なお、観測体制の変遷による観測データ品質のばらつきを踏まえ、以下の①～③の基本的な考え方に基づいて整理を行う。

- ① 被害が小さくて見過ごされやすいF0及びFスケール不明竜巻に対しては、観測体制が強化された2007年以降の年間発生数や標準偏差を用いる。
- ② 被害が比較的軽微なF1竜巻に対しては、観測体制が整備された1991年以降の年間発生数や標準偏差を用いる。
- ③ 被害が比較的大きく見逃されることがないと考えられるF2及びF3竜巻に対しては、観測記録が整備された1961年以降の全期間の年間発生数や標準偏差を用いる。また、Fスケール不明の竜巻については、以下の取扱いを行う。

陸上で発生した竜巻（以下「陸上竜巻」という。）及び海上で発生して陸上へ移動した竜巻については、被害があつて初めてそのFスケールが推定されるため、陸上でFスケール不明の竜巻は、被害が少ないF0竜巻とみなす。海上で発生しその後上陸しなかった竜巻（以下「海上竜巻」という。）については、その竜巻のスケールを推定することは困難であることから、「海岸線から海上5kmの範囲における海上竜巻の発生特性が、海岸線から内陸5kmの範囲における陸上竜巻の発生特性と同様である。」という仮定に基づいて各Fスケールに分類する。（第2.2.2.2-3表）

第2.2.2.2-3表 竜巻発生数の解析結果

竜巻検討地域 (沿岸±5km)	発生数の統計	小計	竜巻スケール				不明		総数 (含む不明)
			F0	F1	F2	F3	(陸上)	(海上)	
1961～ 2012/6 (51.5年間)	期間内総数	74	24	40	10	0	13	105	192
	平均値(年)	1.44	0.47	0.78	0.19	—	0.25	2.04	3.73
	標準偏差(年)	2.25	1.75	0.90	0.49	—	0.71	5.92	7.81
	CV(年)	1.56	3.76	1.16	2.52	—	2.83	2.90	2.09
1991～ 2012/6 (21.5年間)	期間内総数	46	24	21	1	0	12	105	163
	平均値(年)	2.14	1.12	0.98	0.05	—	0.56	4.88	7.58
	標準偏差(年)	3.11	2.61	0.91	0.22	—	1.02	8.49	11.07
	CV(年)	1.45	2.34	0.93	4.64	—	1.83	1.74	1.46
2007～ 2012/6 (5.5年間)	期間内総数	27	22	5	0	0	7	91	125
	平均値(年)	4.91	4.00	0.91	—	—	1.27	16.55	22.73
	標準偏差(年)	5.55	4.32	1.24	—	—	1.69	11.41	15.10
	CV(年)	1.13	1.08	1.36	—	—	1.33	0.69	0.66
擬似 51.5年間 (陸上竜巻)	期間内総数	333	206	51	10	0	66	853	1186
	平均値(年)	6.44	4.00	0.98	0.19	—	1.27	16.55	22.99
	標準偏差(年)	4.75	4.32	0.91	0.49	—	1.69	11.41	12.36
	CV(年)	0.74	1.08	0.93	2.52	—	1.33	0.69	0.54
擬似 51.5年間 (全竜巻)	期間内総数	1187	969	182	36	0	0	0	1187
	平均値(年)	23.05	18.82	3.53	0.70	—	—	—	23.05
	標準偏差(年)	8.97	8.76	1.72	0.92	—	—	—	8.97
	CV(年)	0.39	0.47	0.49	1.32	—	—	—	0.39

c. 竜巻最大風速の確率密度分布の設定

(a) 竜巻最大風速の確率密度分布

a. (b)に示すとおり、竜巻検討地域における51.5年間の竜巻の発生数、被害幅及び被害長さをもとに、確率密度分布については、ガイド及びガイドが参考としている東京工芸大学委託成果<sup>(40)</sup>を参照し、対数正規分布に従うものとする。

(b) 海岸線から陸側及び海側それぞれ5km全域の評価

本評価では、竜巻検討地域外で発生して竜巻検討地域内に移動した陸上発生竜巻も発生数にカウントする。被害幅及び被害長さは、それぞれ被害全幅及び被害全長を用いる。

(c) 1km範囲に細分化した評価

海側の竜巻発生位置は不明な場合が多く、セグメント長さ（短冊内の竜巻の移動長さ）が精度良く求められないため、海側0-1kmのセグメント長さの評価に陸側0-1km短冊の値などを代用する方法を用いて評価した。陸側0-1kmの長さで代用した場合、ハザードの風速は61.4m/sと±5kmケースとほぼ同じとなる。海側0-1kmのハザードは、不確実性が最も大きな短冊であり、そのセグメント長さの取り方によって結果が62～64m/sの範囲となることから、基準値設定に影響しない。

d. 竜巻最大風速のハザード曲線の算定

ハザード曲線は、T年以内にいずれかの竜巻に遭遇し、かつ竜巻風速が $V_0$ 以上となる確率を求める。竜巻の年発生数の確率密度分布としてポリヤ分布の適合性が高い。ポ

リヤ分布は式(1)<sup>(41)</sup>で示される。

$$P_T(N) = \frac{(vT)^N}{N!} (1 + \beta vT)^{-N-1/\beta} \prod_{k=1}^{N-1} (1 + \beta k) \quad (1)$$

ここで、

N : 竜巻の年発生数

v : 竜巻の年平均発生数

T : 年数

$\beta$  は分布パラメータであり式(2)で示される。

$$\beta = \left( \frac{\sigma^2}{v} - 1 \right) \times \frac{1}{v} \quad (2)$$

ここで、

$\sigma$  : 竜巻の年発生数の標準偏差

Dをリスク評価対象構造物が風速 $V_0$ 以上の竜巻に遭遇する事象と定義し、 $R(V_0)$ をリスク評価対象構造物が1つの竜巻に遭遇し、竜巻風速が $V_0$ 以上となる確率と定義すると、T年以内にいずれかの竜巻に遭遇し、かつ竜巻風速が $V_0$ 以上となる確率は式(3)で示される。

$$P_{V_0,T}(D) = 1 - [1 + \beta v R(V_0) T]^{-1/\beta} \quad (3)$$

この $R(V_0)$ は、竜巻影響評価の対象地域の面積を $A_0$  (つまり竜巻検討地域の面積約33,395km<sup>2</sup>)、1つの竜巻の風速が $V_0$ 以上となる面積を $DA(V_0)$ とすると式(4)で示される。

$$R(V_0) = \frac{E[DA(V_0)]}{A_0} \quad (4)$$

ここで、 $E[DA(V_0)]$ は、 $DA(V_0)$ の期待値を意味する。

本評価では、以下のようにして $DA(V_0)$ の期待値を算出し、式(4)により $R(V_0)$ を推定して、式(3)により $P_{v_0,T}(D)$ を求める。風速を $V$ 、被害幅 $w$ 、被害長さ $l$ 、移動方向 $\alpha$ 及び構造物の寸法を $A, B$ とし、 $f(V, w, l)$ 等の同時確率密度関数を用いると、 $DA(V_0)$ の期待値は式(5)で示される。<sup>(42)</sup>

$$\begin{aligned}
E[DA(V_0)] &= \int_0^\infty \int_0^\infty \int_{V_0}^\infty W(V_0) l f(V, w, l) dV dw dl \\
&+ \int_0^{2\pi} \int_0^\infty \int_{V_0}^\infty H(\alpha) l f(V, l, \alpha) dV dl d\alpha + \int_0^{2\pi} \int_0^\infty \int_{V_0}^\infty W(V_0) G(\alpha) f(V, w, \alpha) dV dw d\alpha \\
&+ AB \int_{V_0}^\infty f(V) dV
\end{aligned} \tag{5}$$

ここで、 $W(V_0)$ は竜巻風速が $V_0$ 以上となる幅であり、式(6)で示される。  
 $H(\alpha)$ 及び $G(\alpha)$ はそれぞれ、竜巻の被害長さ及び被害幅方向に沿った面にリスク評価対象構造物を投影した時の長さであり、式(7)で示される。

$$W(V_0) = \left( \frac{V_{\min}}{V_0} \right)^{1/1.6} w \tag{6}$$

ここで、

$V_{\min}$ ：被害幅 $w$ 内の最小竜巻風速

$V_0$ ：被害が発生する最小風速

$$\begin{aligned}
H(\alpha) &= B |\sin \alpha| + A |\cos \alpha| \\
G(\alpha) &= A |\sin \alpha| + B |\cos \alpha|
\end{aligned} \tag{7}$$

本評価ではリスク評価対象構造物を円形構造物（竜巻影響エリア）で設定しているため、 $H(\alpha)$ 、 $G(\alpha)$ ともに竜巻影響エリアの直径450mで一定（竜巻の移動方向に依存しない）となる。円の直径を $D_0$ とした場合の計算式は式(8)で示される。

$$\begin{aligned}
E[DA(V_0)] &= \int_0^\infty \int_0^\infty \int_{V_0}^\infty W(V_0) l f(V, w, l) dV dw dl \\
&+ D_0 \int_0^\infty \int_{V_0}^\infty l f(V, l) dV dl + D_0 \int_0^\infty \int_{V_0}^\infty W(V_0) f(V, w) dV dw \\
&+ (D_0^2 \pi / 4) \int_{V_0}^\infty f(V) dV
\end{aligned} \tag{8}$$

$V_{min}$ は、竜巻被害が発生する最小風速であり、Garsonはgale intensity velocityと呼んでいる（galeとは非常に強い風の意）。米国の気象局（National Weather Service）では、34～47ノット（17.5～24.2m/s）とされている。日本の気象庁では、気象通報にも用いられている風力階級において、風力8が疾強風（gale, 17.2～20.7m/s）、風力9は大強風（stronggale, 20.8～24.4m/s）と分類されており、風力9では「屋根瓦が飛ぶ。人家に被害が出始める」とされている。

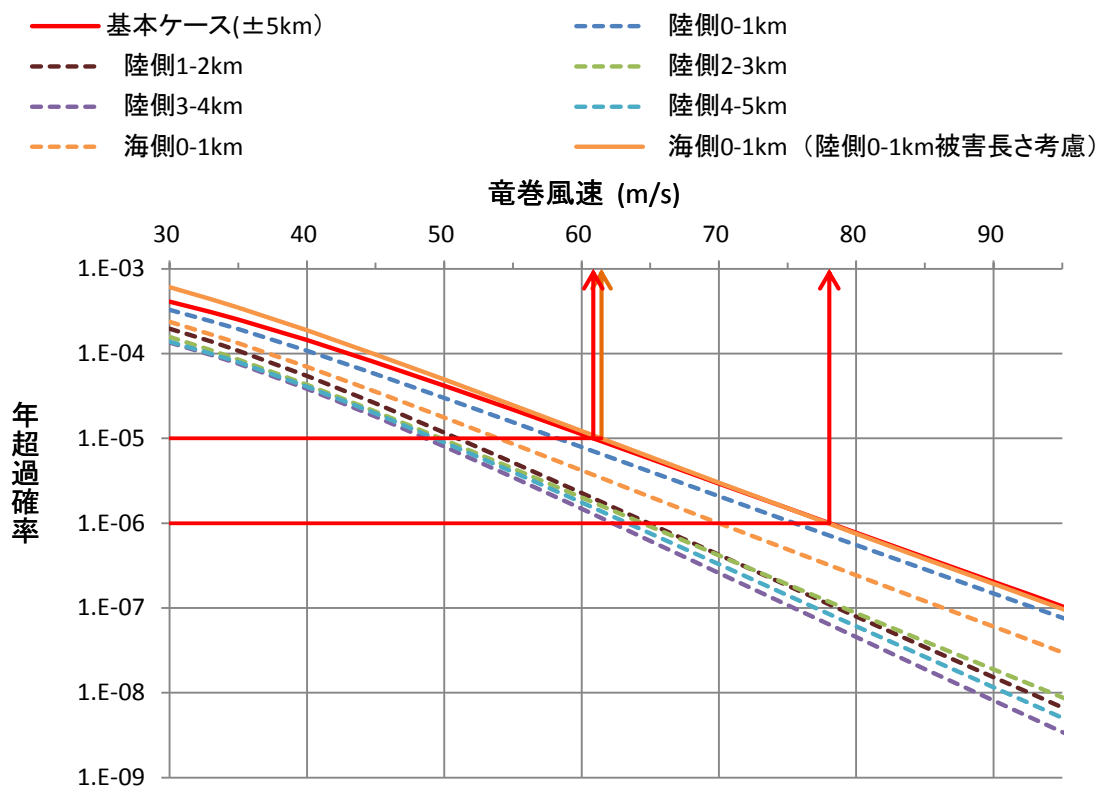
以上より、これらの風速を包括するよう、 $V_{min}=25\text{m/s}$ とした。この値は、F0（17～32m/s）のほぼ中央値に相当する。

e. 年超過確率（ $P_{B2}$ ）に対応する最大風速（ $V_{B2}$ ）の算定

海岸線から陸側及び海側それぞれ5km全域（竜巻検討地域）を対象に算定したハザード曲線、1km範囲ごとに短冊状に細分化して算定したハザード曲線より、年超過確率 $10^{-5}$ における風速を求めると第2.2.2.2-8図に示すとおりそれぞれ60.8m/s、61.4m/sとなった。

また、年超過確率 $10^{-5}$ から一桁下げた年超過確率 $10^{-6}$ における風速を求めると第2.2.2.2-8図に示すとおり陸側及び海側5km全域での評価、1km範囲ごとに細分化した評価ともに78.0m/sとなった。

以上より、竜巻最大風速のハザード曲線による最大風速 $V_{B2}$ は78m/sとする。



第2.2.2.2-8図 竜巻最大風速のハザード曲線

(3) 基準竜巻の最大風速

過去に発生した竜巻による最大風速 $V_{B1}=69\text{m/s}$ 及び竜巻最大風速のハザード曲線による最大風速 $V_{B2}=78\text{m/s}$ のうち、大きい風速である $78\text{m/s}$ を島根原子力発電所における基準竜巻の最大風速 $V_B$ とする。

### 2.2.2.3 設計竜巻の設定

#### (1) 設計竜巻の最大風速 ( $V_D$ ) の設定

島根原子力発電所が立地する地域の特性として、周辺の地形や竜巻の移動方向を考慮して、基準竜巻の最大風速の割り増しを検討し、設計竜巻の最大風速を設定する。

#### a. 地形効果による竜巻風速への影響

地形効果が竜巻強度に及ぼす影響に関する知見として、(a)地形起伏による影響、(b)地表面粗度による影響、について既往の研究において示されており、その知見を踏まえ、島根原子力発電所周辺の地形効果による竜巻の増幅可能性について検討する。また、既往の研究に基づく地形起伏及び地表面粗度による影響に関する知見の詳細については、「別添2-1 添付資料2.4」に示す。

#### (a) 地形起伏による影響<sup>(43)~(48)</sup>

竜巻のような回転する流れでは、角運動量保存則により「回転の中心からの距離」及び「周方向の回転速度」の積が一定になるという性質がある。そのため、竜巻の渦が上り斜面を移動するとき、基本的に渦は弱まり、下り斜面を移動するときには強まる。

#### (b) 地表面粗度による影響<sup>(49)~(60)</sup>

風は地表面の細かな凸凹が与える摩擦抵抗の影響を受けやすく、風速は、地表面において0となり上空に向かうにつれて増加する。地表面粗度は竜巻の旋回流を減衰させる効果を有し、地表面粗度の構成物が飛来物として運動することで風速が減衰することも示唆されていることから、地表面粗度の増加とともに竜巻に起因する強風の風速を低下させるといえる。

#### b. 島根原子力発電所周辺の地形

島根原子力発電所敷地周辺の地形を第2.2.2.3-1図、島根原子力発電所東西方向の鉛直断面での地形起伏を第2.2.2.3-2図、島根原子力発電所敷地周辺の地表面粗度を第2.2.2.3-3図に示す。発電所が立地する敷地は、北側を輪谷湾に面し、他の三方を山で囲まれている。

#### c. 竜巻の移動方向の分析

島根原子力発電所の周辺地域を対象に竜巻の移動方向に関する分析を行う。なお、分析の対象とする地域は、「原子力発電所の竜巻影響評価ガイド(案)及び解説」<sup>(1)</sup>に示されている竜巻集中地域を参考に、集中地域⑥(鳥取県の一部)及び⑦(島根県

の一部) とした。

第2.2.2.3-4図に竜巻集中地域⑥及び⑦で発生した竜巻の移動方向、第2.2.2.3-5図に竜巻集中地域⑥及び⑦で発生した竜巻の移動方向の頻度を分析した結果を示す。竜巻の移動方向の分析の結果、島根原子力発電所周辺で発生する竜巻は、その大部分が海上又は沿岸部で発生しており、その移動方向は東に向かう頻度が高いことが確認できる。また、島根原子力発電所が立地する竜巻集中地域⑦では、発電所北方の海上から南（陸側）へ向かう頻度が高いことが確認できる。

#### d. 竜巻風速の増幅に関する検討

##### (a) 地形起伏による竜巻増幅

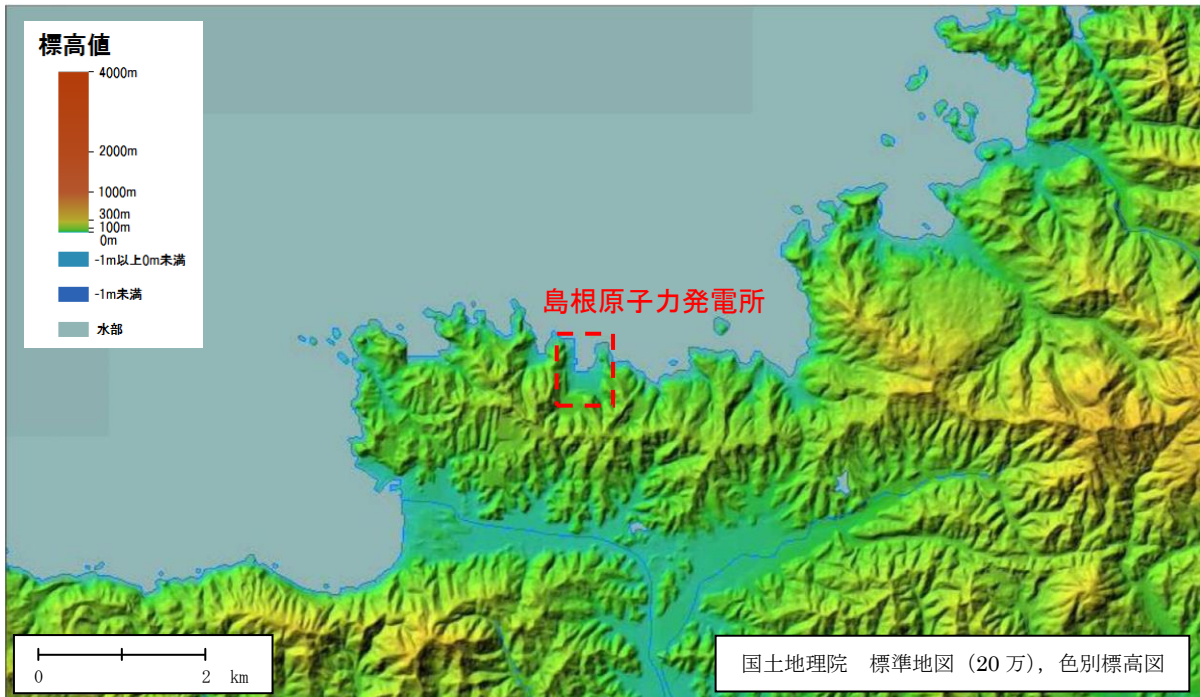
島根原子力発電所周辺で発生する竜巻は、発電所北方または西方の海上あるいは沿岸部で発生し、竜巻が発電所の北方で発生し南方向（陸側）へ移動する場合には、地形が平坦な海側から発電所敷地に進入することとなり、発電所敷地自体も平坦であるため竜巻が増幅することはないと考えられる。また、発電所西方で発生する竜巻は、上り斜面・下り斜面の影響をほぼ同程度受け発電所敷地に進入する可能性が高く発電所敷地はほぼ平坦であるため竜巻が増幅することはないと考えられる。万が一発電所敷地外の南側（例えば鹿島町の平地）で竜巻が発生し、その竜巻が海側に向かって移動し、発電所敷地内に進入した場合、竜巻は山を越える必要がある。この場合の地形効果による増幅は、山の上り勾配と下り勾配で相殺される。

##### (b) 地表面粗度による竜巻増幅

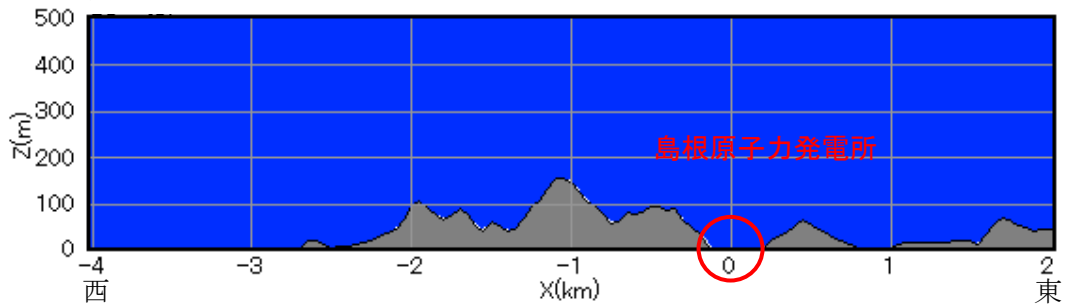
島根原子力発電所周辺では、竜巻の移動経路となり得る発電所西方に着目すると森林などに相当する粗度区分Ⅲの領域が2km以上にわたり存在していることから、粗度による減衰効果が期待できる。発電所北方または西方の海上あるいは沿岸から南または東方向へ向かう竜巻が極めて多く、発電所北方の海上で発生した竜巻が南方向へ移動する場合には、地表面粗度の小さい海上から粗度の大きな陸上に上陸するため、粗度により減衰するものと考えられる。

#### e. 設計竜巻の最大風速 $V_D$

以上のことから、島根原子力発電所では、地形効果による竜巻の増幅を考慮しない。一方、将来的な気候変動による竜巻発生の不確実性を踏まえ、 $V_B$ の値がF3の風速範囲（70～92m/s）にあることから設計竜巻の最大風速 $V_D$ はF3の風速範囲の上限値92m/sとする。

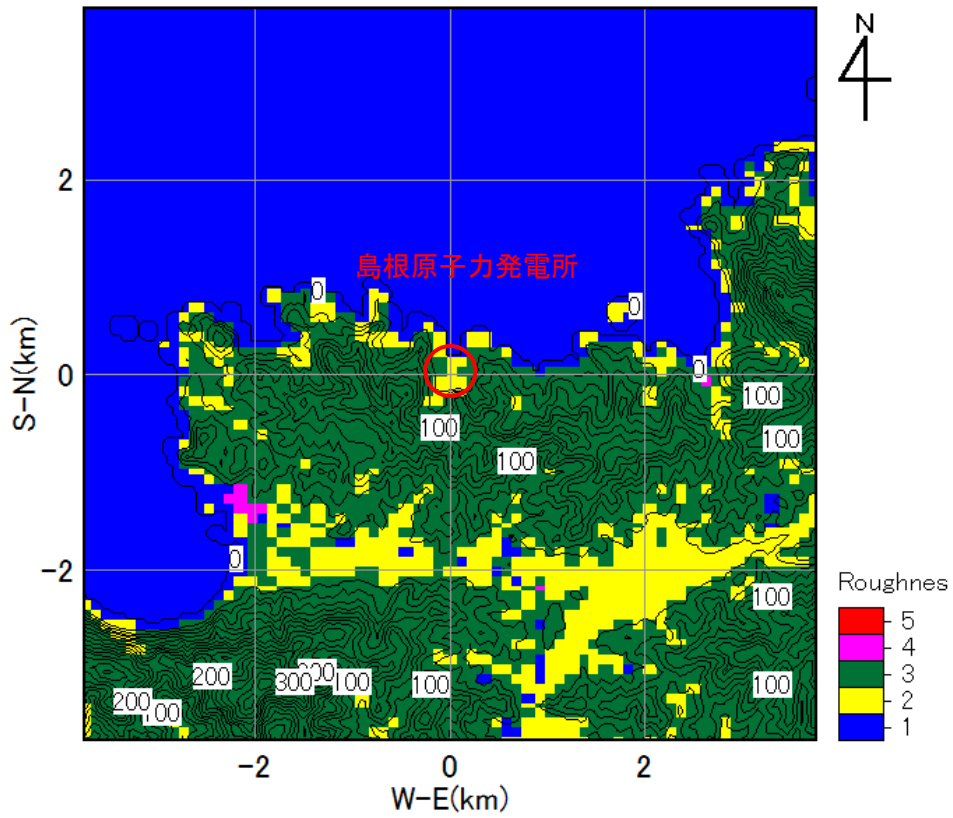


第2.2.2.3-1図 島根原子力発電所周辺の地形  
 (国土地理院「電子国土Web」より作成)

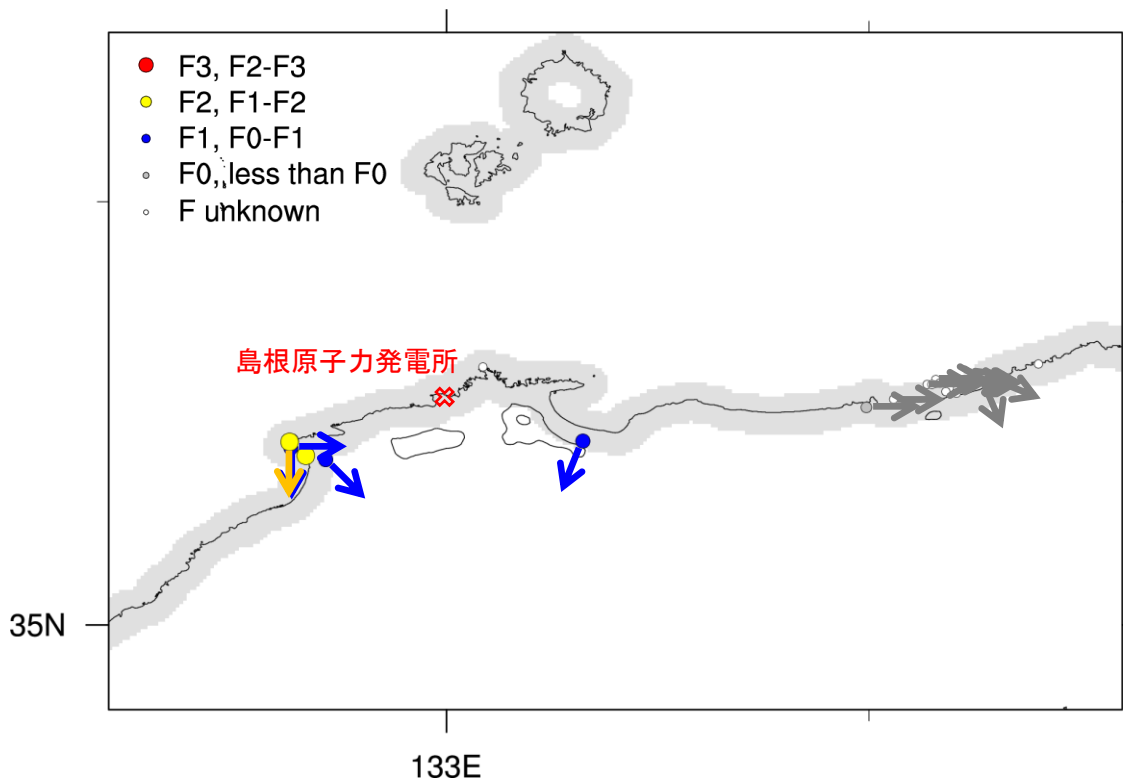


第2.2.2.3-2図 島根原子力発電所東西方向の鉛直断面での地形起伏

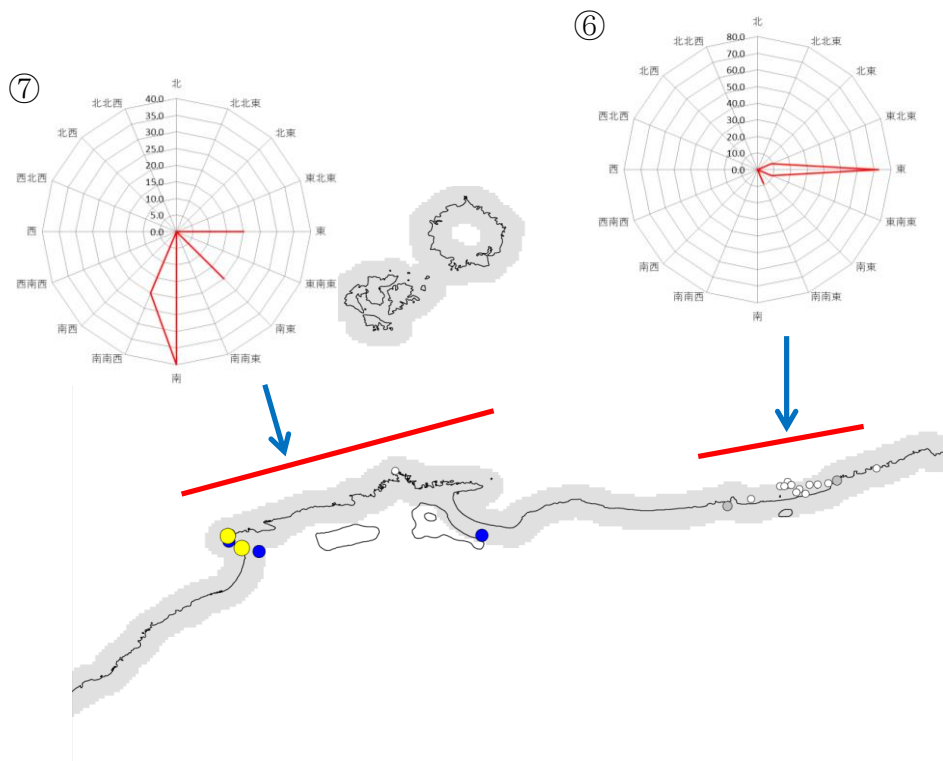




第2. 2. 2. 3-3図 島根原子力発電所周辺の地表面粗度



第2. 2. 2. 3-4図 竜巻集中地域⑥及び⑦における竜巻移動方向



第2.2.2.3-5図 竜巻集中地域⑥及び⑦における竜巻移動方向の頻度

## (2) 設計竜巻の特性値の設定

設計竜巻の特性値については、第2.2.2.3-1表のとおり設定する。また、飛来物の運動モデルについてはフジタモデル<sup>(61)</sup>を適用する。フジタモデルの適用の妥当性及び設計竜巻の特性値の設定の詳細については、「別添2-2」に示す。

### a. 設計竜巻の移動速度 ( $V_T$ )

設計竜巻の移動速度 ( $V_T$ ) は、風速場モデルに依存しない日本の竜巻観測記録（竜巻等の突風データベース）に基づいた竜巻移動速度（平均値）と最大風速との関係<sup>(40)</sup>を参照して設定した以下の算定式を用いて $V_D$ から $V_T$ を算定する。

$$V_T = 0.15 \cdot V_D \quad (9)$$

### b. 設計竜巻の最大接線風速 ( $V_{Rm}$ )

設計竜巻の最大接線風速 ( $V_{Rm}$ ) は、米国NRCの基準類<sup>(62)</sup>を参考として、風速場モデルに依存しない以下の算定式を用いて算定する。

$$V_{Rm} = V_D - V_T \quad (10)$$

### c. 設計竜巻の最大接線風速が生じる位置での半径 ( $R_m$ )

設計竜巻の最大接線風速が生じる位置での半径 ( $R_m$ ) は、風速場モデルに依存しない以下の値を用いる。

$$R_m = 30 \text{ (m)} \tag{11}$$

d. 設計竜巻の最大気圧低下量 ( $\Delta P_{\max}$ ) ・最大気圧低下率 ( $(dp/dt)_{\max}$ )

設計竜巻の最大気圧低下量 ( $\Delta P_{\max}$ ) は、計算の簡便性の観点から、米国NRCの基準類<sup>(62)</sup>を参考として、以下の算定式を用いて算定する。

$$\Delta P_{\max} = \rho \cdot V_{Rm}^2 \quad \rho : \text{空気密度 (kg/m}^3\text{)} \tag{12}$$

設計竜巻の最大気圧低下率 ( $(dp/dt)_{\max}$ ) は、ガイドに基づき、米国NRCの基準類<sup>(62)</sup>を参考に設定されているランキン渦モデルによる風速分布に基づいた以下の式を用いて算定する。

$$(dp/dt)_{\max} = (V_T/R_m) \cdot \Delta P_{\max} \tag{13}$$

第2.2.2.3-1表 設計竜巻の特性値

風速 $V_D$ (m/s)	移動速度 $V_T$ (m/s)	最大接線 風速 $V_{Rm}$ (m/s)	最大接線 風速半径 $R_m$ (m)	最大気圧 低下量 $\Delta P_{\max}$ (hPa)	最大気圧 低下率 $(dp/dt)_{\max}$ (hPa/s)
92	14	78	30	75	35

## 2.2.3 設計荷重の設定

### 2.2.3.1 設計竜巻荷重

設計竜巻により評価対象施設等に作用する荷重として「風圧力による荷重 ( $W_w$ )」, 「気圧差による荷重 ( $W_p$ )」及び「設計飛来物による衝撃荷重 ( $W_M$ )」を以下に示すとおり算出する。

#### (1) 風圧力の設定

設計竜巻の最大風速による荷重であり, 「建築基準法施行令」(昭和25年11月16日政令第338号), 「日本建築学会 建築物荷重指針・同解説」及び建設省告示1454号(平成12年5月31日)に準拠して, 風圧力による荷重 ( $W_w$ ) を次式のとおり算出する。

$$W_w = q \cdot G \cdot C \cdot A \quad (14)$$

ここで,

$W_w$  : 風圧力による荷重 (N)

$q$  : 設計用速度圧 ( $N/m^2$ )

$G$  : ガスト影響係数 (=1.0)

$C$  : 風力係数 (施設の形状や風圧力が作用する部位 (屋根・壁等) に応じて設定する。)

$A$  : 施設の受圧面積 ( $m^2$ )

$$q = (1/2) \cdot \rho \cdot V_d^2 \quad (15)$$

ここで,

$\rho$  : 空気密度 ( $kg/m^3$ )

$V_d$  : 設計竜巻の最大風速 (m/s)

ただし, 竜巻による最大風速は, 一般的には水平方向の風速として算定されるが, 鉛直方向の風圧力に対してせい弱と考えられる評価対象施設等が存在する場合には, フジタモデルの風速場により求まる鉛直方向の風速等に基づいて算出した鉛直方向の風圧力についても考慮した設計とする。

#### (2) 気圧差による圧力

外気と隔離されている区画の境界部が気圧差による圧力影響を受ける施設及び評価対象施設を内包する施設の建物壁, 屋根等においては, 設計竜巻による気圧低下によって生じる評価対象施設等の内外の気圧差による圧力荷重が発生する。保守的に「閉じた施設」を想定し, 気圧差による荷重 ( $W_p$ ) を最大気圧低下量 ( $\Delta P_{max}$ ) を用いて次式のとおり算出する。

$$W_P = \Delta P_{\max} \cdot A \quad (16)$$

ここで、

$W_P$  : 気圧差による荷重 (N)

$\Delta P_{\max}$  : 米国NRC の基準類を参考にして算出した最大気圧低下量 (N/m<sup>2</sup>)

$A$  : 施設の受圧面積 (m<sup>2</sup>)

### (3) 飛来物の衝撃荷重

#### a. 設計飛来物の設定

飛来物に係る現地調査結果及び「原子力発電所の竜巻影響評価ガイド（平成25年6月19日 原規技発13061911号 原子力規制委員会決定）」に示されている設計飛来物の設定例を参照し設定する。

現地調査にて確認した発電所構内の常設物（マンホール蓋等）、仮設物（資機材等）及び二次飛来物（屋根等）、また、それらの飛散防止対策の可否、固定状況、過去の被害事例や代表性（運動エネルギー、貫通力）について検討した結果を、「別添2-1 添付資料3.3」に示す。

設計飛来物は、浮き上がりの有無、運動エネルギー、貫通力の大きさから、鋼製材を選定した。

また、竜巻防護対策設備である竜巻防護ネットを通過し得る可能性があり、鋼製材にて包含できないことから、砂利も設計飛来物とする。

飛来物の発生防止対策については、現地調査により抽出した飛来物や持ち込まれる物品の寸法、質量及び形状から飛来の有無を判断し、運動エネルギー、貫通力を考慮して、衝突時に建物等又は竜巻防護対策設備に与えるエネルギー又は貫通力が設計飛来物によるものより大きく、外部事象防護対象施設を防護できない可能性があるものは、浮き上がりや横滑りの有無を考慮した上で、固縛、固定又は外部事象防護対象施設からの離隔対策を実施し、確実に飛来物とならない運用とする。

#### b. 設計飛来物の速度の設定

設計飛来物のうち鋼製材の最大水平速度( $V_{H\max}$ )及び最大鉛直速度( $V_{V\max}$ )は、設計竜巻の最大風速92m/sにて、フジタモデルを適用した風速場の中での速度を包絡する「竜巻影響評価ガイド」の解説表4.1に示される値とする。設計飛来物のうち砂利の最大水平速度( $V_{H\max}$ )及び最大鉛直速度( $V_{V\max}$ )は、設計竜巻の最大風速92m/sにて、フジタモデルを適用した風速場の中での速度を設定する。

島根原子力発電所における設計飛来物を第2.2.3.1-1表に示す。

第2.2.3.1-1 表 島根原子力発電所における設計飛来物

飛来物	砂利	鋼製材
寸法(m)	長さ×幅×奥行 0.04×0.04×0.04	長さ×幅×奥行 4.2×0.3×0.2
質量 (kg)	0.2	135
最大水平速度 (m/s)	54	51
最大鉛直速度 (m/s)	36	34

c. 設計飛来物の衝突方向，衝突範囲および衝撃荷重の設定

飛来物の衝突方向及び衝突面積を考慮して設計飛来物が評価対象施設等に衝突した場合の影響が大きくなる向きで衝撃荷重を算出する。

なお，設計飛来物の衝突位置については，飛散高さによらず評価対象施設等のどの高さに対しても衝突を考慮する。

(4) 設計竜巻荷重の組み合わせ

評価対象施設等の設計に用いる設計竜巻荷重は，設計竜巻による風圧力による荷重 ( $W_w$ )，気圧差による荷重 ( $W_p$ ) 及び設計飛来物による衝撃荷重 ( $W_M$ ) を組み合わせた複合荷重とし，複合荷重  $W_{T1}$  及び  $W_{T2}$  は米国原子力規制委員会の基準類を参考として，以下のとおり設定する。

$$W_{T1} = W_p$$

$$W_{T2} = W_w + 0.5 \cdot W_p + W_M \quad (17)$$

なお，評価対象施設等には  $W_{T1}$  及び  $W_{T2}$  の両荷重をそれぞれ作用させる。

2.2.3.2 設計竜巻荷重と組み合わせる荷重

設計竜巻荷重と組み合わせる荷重は，以下のとおり設定する。

(1) 評価対象施設等に常時作用する荷重，運転時荷重

評価対象施設等に作用する荷重として，自重等の常時作用する荷重，内圧等の運転時荷重を適切に組み合わせる。

(2) 竜巻以外の自然現象による荷重

竜巻は積乱雲や積雲に伴って発生する現象であり<sup>(30)</sup>，積乱雲の発達時に竜巻と同

時発生する可能性がある自然現象は、雷、雪、ひょう及び降水である。これらの自然現象の組み合わせにより発生する荷重は、以下のとおり設計竜巻荷重に包絡されることから、設計竜巻荷重と組み合わせる荷重として考慮する必要はない。

a. 雷

竜巻と雷が同時に発生する場合においても、雷によるプラントへの影響は、雷撃であるため雷による荷重は発生しない。

b. 雪

島根原子力発電所が立地する地域においては、冬期、竜巻が襲来する場合は竜巻通過前後に降雪を伴う可能性はあるが、上昇流の竜巻本体周辺では、竜巻通過時に雪は降らない。また、下降流の竜巻通過時や竜巻通過前に積もった雪の大部分は竜巻の風により吹き飛ばされるため、雪による荷重は十分小さく設計竜巻荷重に包絡される。

c. ひょう

ひょうは積乱雲から降る直径5mm以上の氷の粒<sup>(63)</sup>であり、仮に直径10cm程度の大型のひょうを想定した場合、その重量は約0.5kgとなる。10cm程度のひょうの終端速度は59m/s<sup>(64)</sup>、運動エネルギーは約0.9kJであり、設計飛来物の運動エネルギーと比べ十分に小さく、ひょうの衝突による荷重は設計竜巻荷重に包絡される。

d. 降水

竜巻と降水が同時に発生する場合においても、雨水により屋外施設に荷重の影響を与えることはなく、また降雨による荷重は十分小さいため、設計竜巻荷重に包絡される。

(3) 設計基準事故時荷重

外部事象防護対象施設は、設計竜巻によって安全機能を損なわない設計とするため、設計竜巻は原子炉冷却材喪失事故等の設計基準事故の起因とはならないことから、設計竜巻と設計基準事故は独立事象となる。

設計竜巻と設計基準事故が同時に発生する頻度は十分小さいことから、設計基準事故時荷重と設計竜巻荷重との組み合わせは考慮しない。

仮に、風速が低く発生頻度が高い竜巻と設計基準事故が同時に発生する場合、評価対象施設等のうち設計基準事故荷重が生じ、竜巻による風荷重等の影響を受ける屋外施設としては、海水ポンプ及びディーゼル燃料移送ポンプが考えられるが、設計基準事故時においても、運転時の系統内圧力及び温度と変わらないため、設計基準事故により考慮すべき荷重はなく、竜巻と設計基準事故時荷重の組み合わせは考慮しない。

2.2.4 評価対象施設等の設計方針

#### 2.2.4.1 設計方針

評価対象施設等については、以下の設計方針のとおり、設計荷重に対してその構造健全性を維持する設計とする。評価対象施設等以外の外部事象防護対象施設については、竜巻及びその随伴事象に対して機能維持する、若しくは、竜巻及びその随伴事象による損傷を考慮して、代替設備により必要な機能を確保すること、安全上支障のない期間に修復すること等の対応が可能な設計とすることにより、外部事象防護対象施設の安全機能を損なわない設計とする。

##### (1) 許容限界

建物・構築物の設計において、設計飛来物の衝突による貫通及び裏面剥離発生の有無の評価については、貫通及び裏面剥離が発生する限界厚さと部材の最小厚さを比較することにより行う。さらに、設計荷重により、発生する変形又は応力が以下の法令、規格、基準、指針類等に準拠し算定した許容限界を下回る設計とする。

- ・ 建築基準法
- ・ 日本産業規格
- ・ 日本建築学会及び土木学会等の基準・指針類
- ・ 原子力発電所耐震設計技術指針JEAG4601-1987（日本電気協会）
- ・ 震災建築物の被災度区分判定基準及び復旧技術指針（日本建築防災協会）
- ・ 原子力エネルギー協会（NEI）の基準・指針類等

系統及び機器の設計において、設計飛来物の衝突による貫通の有無の評価については、貫通が発生する限界厚さと部材の最小厚さを比較することにより行う。設計飛来物が貫通することを考慮する場合には、設計荷重に対して防護対策を考慮した上で、系統及び機器に発生する応力が以下の規格、基準及び指針類に準拠し算定した許容応力度等に基づく許容限界を下回る設計とする。

- ・ 日本産業規格
- ・ 日本機械学会の基準・指針類
- ・ 原子力発電所耐震設計技術指針JEAG4601-1987（日本電気協会）等

##### (2) 屋外施設（建物含む。）

屋外施設は、設計荷重に対して、安全機能が維持される設計とし、必要に応じて竜巻防護ネット、竜巻防護鋼板の設置等の防護対策を講じる方針とする。

なお、外殻となる施設による防護機能が期待できる屋内施設は、建物又は構築物による防護により、設計荷重に対して安全機能を損なわない方針とする。

##### a. 海水ポンプ（原子炉補機冷却系、高圧炉心スプレー補機冷却系）（配管、弁を含む。）

海水ポンプは、風圧力による荷重、気圧差による荷重、海水ポンプに常時作用する荷重、運転時荷重に対して構造健全性が維持され安全機能を損なわない設計



とする。

また、設計飛来物（鋼製材）に対して竜巻防護ネット、竜巻防護鋼板の設置等の防護対策を行う。

なお、竜巻防護ネットを通過する可能性のある設計飛来物（砂利）の衝突に対して、ポンプ、電動機等の部材を貫通しない厚さを確保し、安全機能を損なわない設計とする。

b. 海水ストレーナ（原子炉補機冷却系、高圧炉心スプレイ補機冷却系）

海水ストレーナは、風圧力による荷重、気圧差による荷重、海水ストレーナに常時作用する荷重、運転時荷重に対して構造健全性が維持され安全機能を損なわない設計とする。

また、設計飛来物に対して竜巻防護鋼板の設置等の防護対策を行う。

c. 排気筒（非常用ガス処理系用排気筒を含む。）

排気筒（非常用ガス処理系用排気筒を含む。）は、設計飛来物（鋼製材）により損傷し、排気筒（非常用ガス処理系用排気筒を含む。）の安全機能が維持されないことを考慮して、安全上支障のない期間での補修が可能な設計とするとともに、環境への放射性物質の異常な放出が発生する可能性がある設計基準事故に対して、周辺の公衆に著しい放射線被ばくのリスク抑制する機能を保持できる設計とする。なお、排気筒（非常用ガス処理系用排気筒を含む。）が損傷し、非常用ガス処理系が動作不能と判断された場合は、プラントを停止し補修を行う。

また、排気筒（非常用ガス処理系用排気筒を含む。）は、風圧力による荷重及び設計飛来物による衝撃荷重に対して、排気筒全体が倒壊しない設計とする。

d. 排気筒モニタ

排気筒モニタは、放射性気体廃棄物処理施設の破損の検出手段として期待している。外部事象を起因として放射性気体廃棄物処理施設の破損が発生することはないが、独立事象としての重畳の可能性を考慮し、安全上支障のない期間に補修等の対応を行うことで、安全機能を損なわない設計とする。

e. ディーゼル燃料移送ポンプ（A-非常用ディーゼル発電機系、高圧炉心スプレイ非常用ディーゼル発電機系）（配管、弁を含む。）

ディーゼル燃料移送ポンプは、風圧力による荷重、気圧差による荷重、ディーゼル燃料移送ポンプに常時作用している荷重及び運転時荷重に対して構造健全性が維持され安全機能を損なうことのない設計とする。

また、設計飛来物（鋼製材）に対して竜巻防護鋼板（穴あき）の設置等の防護対策を行う。

なお、竜巻防護鋼板（穴あき）を通過する可能性のある設計飛来物（砂利）の衝突に対しては、設備の配置状況やディーゼル燃料移送ポンプに対する影響を考

慮し、安全機能を損なわない設計とする。

f. 原子炉建物、タービン建物、制御室建物、廃棄物処理建物、ディーゼル燃料貯蔵タンク室(A-非常用ディーゼル発電機系、高圧炉心スプレィ非常用ディーゼル発電機系)、ディーゼル燃料貯蔵タンク格納槽(B-非常用ディーゼル発電機系) 原子炉建物外壁(4階部分)の原子炉建物外側ブローアウトパネルについては、設計竜巻による気圧低下による開放及び設計飛来物の貫通により、原子炉建物の放射性物質の閉じ込め機能を損なう可能性があるが、竜巻防護ネットの設置による竜巻防護対策を行うことにより、設計飛来物の衝突及び気圧低下による開放後の開口部からの設計飛来物の侵入を防止する設計とするとともに、原子炉建物の放射性物質の閉じ込め機能に対しては、設計竜巻と設計基準事故が同時に発生する頻度は十分小さいことから、安全上支障のない期間に補修が可能な設計とすることで、安全機能を損なわない設計とする。

原子炉建物、タービン建物、制御室建物、廃棄物処理建物、ディーゼル燃料貯蔵タンク室、ディーゼル燃料貯蔵タンク格納槽は、風圧力による荷重、気圧差による荷重及び設計飛来物による衝撃荷重に対して、構造骨組の構造健全性が維持されるとともに、屋根、壁、開口部(扉類)の破損により当該建物等内の外部事象防護対象施設が安全機能を損なわない設計とする。また、設計飛来物の衝突時においても、貫通及び裏面剥離の発生により当該建物内の外部事象防護対象施設が安全機能を損なわない設計とする。

外殻となる施設による防護機能が期待できない施設に関する方針は(4)に示す。

#### g. 排気筒モニタ室

排気筒モニタ室については、外部事象を起因として放射性気体廃棄物処理施設の破損が発生することはないが、独立事象としての重畳の可能性を考慮し、安全上支障のない期間に補修等の対応を行うことで、排気筒モニタの安全機能を損なわない設計とする。

### (3) 外気との接続がある施設

外気との接続がある施設は、設計荷重に対して、安全機能が維持される設計とし、必要に応じて竜巻防護ネットの設置等の防護対策を講じる方針とする。

#### a. 空調換気設備(原子炉棟空調換気系、中央制御室換気系、原子炉建物附属棟空調換気系)

空調換気設備は、各建物に内包されていることを考慮すると、風圧力による荷重は作用しない。空調換気設備の建物開口部は竜巻防護ネットの設置等の防護対策を行うことを考慮すると、設計飛来物(鋼製材)による衝撃は作用しない。

気圧差による荷重に対して、空調換気設備の構造健全性が維持され安全機能を

損なうことのない設計とする。

なお、設計飛来物（砂利）による衝突に対して、建物開口部の状況や空調換気設備に対する影響を考慮し、安全機能を損なわない設計とする。

#### b. 非常用ガス処理系配管

非常用ガス処理系配管は、原子炉建物及びタービン建物に内包されていることを考慮すると、風圧力による荷重及び設計飛来物による衝撃荷重は作用しない。

気圧差による荷重に対して、非常用ガス処理系配管の構造健全性が維持され安全機能を損なうことのない設計とする。

#### (4) 外殻となる施設による防護機能が期待できない施設

外殻となる施設による防護機能が期待できない施設は、設計荷重に対して、安全機能が維持される設計とし、必要に応じて施設の補強等の防護対策を講じる方針とする。

原子炉建物外壁のブローアウトパネルが設計竜巻による気圧低下により開放されることを考慮し、原子炉建物外側ブローアウトパネル開放により発生する外壁開口部付近の外部事象防護対象施設のうち、設計竜巻荷重の影響を受ける可能性がある原子炉建物4階設置設備の 原子炉建物天井クレーン、燃料取替機、燃料プール、燃料プール冷却系配管及び弁、使用済燃料貯蔵ラック及び燃料集合体が安全機能を損なわない設計とする。

#### a. 原子炉建物1階 原子炉補機冷却水ポンプ、熱交換器、配管及び弁、原子炉建物2階 原子炉建物付属棟空調換気設備、原子炉建物4階 原子炉建物天井クレーン、燃料取替機、燃料プール、燃料プール冷却系配管及び弁、使用済燃料貯蔵ラック、燃料集合体、廃棄物処理建物3階 中央制御室空調換気設備等

原子炉補機冷却水ポンプ、原子炉補機冷却系熱交換器、原子炉補機冷却系配管及び弁、原子炉建物付属棟空調換気設備、原子炉建物天井クレーン、燃料取替機、燃料プール、燃料プール冷却系配管及び弁、使用済燃料貯蔵ラック、燃料集合体、中央制御室空調換気設備等は、設計飛来物の衝突により、開口部の開放又は開口部建具に貫通が発生することを考慮し、竜巻防護ネットの設置等による竜巻防護対策を行うことにより、原子炉補機冷却水ポンプ、原子炉補機冷却系熱交換器、原子炉補機冷却系配管及び弁、原子炉建物付属棟空調換気設備、原子炉建物天井クレーン、燃料取替機、燃料プール、燃料プール冷却系配管及び弁、使用済燃料貯蔵ラック、燃料集合体、中央制御室空調換気設備等への設計飛来物の衝突を防止し、原子炉補機冷却水ポンプ、原子炉補機冷却系熱交換器、原子炉補機冷却系配管及び弁、原子炉建物付属棟空調換気設備、原子炉建物天井クレーン、燃料取替機、燃料プール、燃料プール冷却系配管及び弁、使用済燃料貯蔵ラック、燃料集合体、中央制御室空調換気設備等の構造健全性が維持され、安全機能を損なわない設計とする。

なお、原子炉建物天井クレーン及び燃料取替機については、竜巻の襲来が予想される場合には、燃料取扱作業を中止し、燃料プール、燃料プール冷却系配管及び弁、使用済燃料貯蔵ラック及び燃料集合体に影響を及ぼさない待機位置への退避措置を行う。

#### (5) 外部事象防護対象施設に波及的影響を及ぼし得る評価対象施設

外部事象防護対象施設に波及的影響を及ぼし得る施設については、設計荷重による影響を受ける場合においても外部事象防護対象施設に影響を及ぼさないよう、施設又は運用による竜巻防護対策を実施することにより、外部事象防護対象施設の安全機能を損なわない設計とする。

##### a. 1号炉排気筒

1号炉排気筒は、風圧力による荷重及び設計飛来物による衝撃荷重に対して、倒壊により外部事象防護対象施設に波及的影響を及ぼさない設計とする。

##### b. 1号炉原子炉建物，1号炉タービン建物，1号炉廃棄物処理建物，排気筒モニタ室

1号炉原子炉建物，1号炉タービン建物，1号炉廃棄物処理建物及び排気筒モニタ室は、風圧力による荷重，気圧差による荷重，設計飛来物による衝撃荷重に対して、倒壊により外部事象防護対象施設へ波及的影響を及ぼさない設計とする。

##### c. 排気管（非常用ディーゼル発電機の付属施設），排気消音器（非常用ディーゼル発電機の付属施設），ベント管（ディーゼル燃料貯蔵タンク，ディーゼル燃料デイタンク及び潤滑油サンプルタンクの付属施設）

排気管（非常用ディーゼル発電機の付属施設），排気消音器（非常用ディーゼル発電機の付属施設），ベント管（ディーゼル燃料貯蔵タンク，ディーゼル燃料デイタンク及び潤滑油サンプルタンクの付属施設）は設計飛来物である鋼製材の衝突を考慮して、安全上支障のない期間での補修が可能な設計とすることにより、非常用ディーゼル発電機に波及的影響を及ぼさない設計とする。また、風圧力による荷重及び気圧差による荷重に対して、構造健全性を維持し安全機能を損なわない設計とする。

#### 2.2.5 竜巻随件事象に対する評価対象施設の設計方針

##### (1) 竜巻に伴い発生が想定される事象の抽出

竜巻随件事象は、過去の竜巻被害状況及び島根原子力発電所のプラント配置から、想定される事象として、火災、溢水及び外部電源喪失を抽出し、事象が発生する場合においても、外部事象防護対象施設が安全機能を損なわない設計とする。（別添2-1（1.5 竜巻随件事象に対する評価））

## (2) 火災

竜巻随伴事象として、竜巻による飛来物が建物開口部付近の発火性又は引火性物質を内包する機器に衝突する場合、屋外の危険物タンク等に飛来物が衝突する場合の火災が想定される。

建物内については、飛来物が侵入する場合でも、建物開口部付近には、発電用原子炉施設の安全機能を損なわせる可能性がある発火性又は引火性物質を内包する機器は配置されておらず、また、外部事象防護対象施設を設置している区画の開口部には竜巻防護ネット設置等の竜巻防護対策を行うことを考慮すると飛来物が到達することはないことから、設計竜巻により建物内に火災が発生することはなく、建物内の外部事象防護対象施設の安全機能を損なわない。

建物外については、屋外にある危険物タンク等からの火災がある。火災源と外部事象防護対象施設の位置関係を踏まえて火災の影響を評価した上で、外部事象防護対象施設が安全機能を損なわない設計とすることを「2.4.3 外部火災に対する設計方針」に記載する。

以上より、竜巻による火災により外部事象防護対象施設が安全機能を損なわない設計とする。

## (3) 溢水

竜巻随伴事象として、竜巻による飛来物が建物開口部付近の溢水源に衝突する場合、屋外タンク等に飛来物が衝突する場合の溢水が想定される。

外部事象防護対象施設を内包する建物内については、飛来物が侵入する場合でも、建物開口部付近に飛来物が衝突して発電用原子炉施設の安全機能を損なう可能性がある溢水源が配置されておらず、また、外部事象防護対象施設を設置している建物の開口部には、竜巻防護ネット設置等の竜巻防護対策を行うことを考慮すると、飛来物が到達することはないことから、設計竜巻により建物内に溢水が発生することはなく、建物内の外部事象防護対象施設の安全機能を損なわない。

建物外については、「第9条:溢水による損傷の防止等」にて、地震時の屋外タンク等の破損を想定し、地震起因の溢水が安全系機器に影響を及ぼさない設計としており、竜巻による飛来物で屋外タンク等が損傷して発生する溢水に対しては、上記に包絡されることから、外部事象防護対象施設の安全機能維持に影響を与えることはない。

以上より、竜巻による溢水により外部事象防護対象施設が安全機能を損なわない設計とする。

## (4) 外部電源喪失

設計竜巻、設計竜巻と同時に発生する雷又はダウンバースト等の影響により外部電源喪失が発生する場合については、設計竜巻に対して非常用ディーゼル発電機の構造健全性を維持することにより、外部電源喪失の影響がなく外部事象防護対象施設が安全機能を損なわない設計とする。

## 2.2.6 参考文献

- (1) 井上博登, 福西史郎, 鈴木哲夫, 2013: 原子力発電所の竜巻影響評価ガイド(案) 及び解説, 独立行政法人原子力安全基盤機構, JNES-RE-2013-9009.
- (2) 気象庁 竜巻等の突風データベース  
(<http://www.data.jma.go.jp/obd/stats/data/bosai/tornado/index.html>)
- (3) Bluestein, H. B., 2013: Severe Convective Storms and Tornadoes. Springer, 456 pp.
- (4) Brady, R. H., and E. J. Szoke, 1989: A case study of nonmesocyclone tornado development in northeast Colorado: similarities to waterspout formation. *Mon. Wea. Rev.*, 843-856.
- (5) Browning, K. A., 1964: Airflow and precipitation trajectories within severe local storms which travel to the right of the winds. *J. Atmos. Sci.*, 21, 634-639.
- (6) Bunkers, M. J., B. A. Klimowski, J. W. Zeitler, R. L. Thompson, and M. L. Weisman, 2000: Predicting supercell motion using a new hodograph technique. *Wea. Forecasting*, 15, 61-79.
- (7) Burgess, D. W., M. A. Magsig, J. Wurman, D. C. Dowell, and Y. Richardson, 2002: Radar observations of the 3 May 1999 Oklahoma City tornado. *Wea. Forecasting*, 17, 456-471.
- (8) Chuda, T., and H. Niino, 2005: Climatology of environmental parameters for mesoscale convections in Japan. *J. Meteor. Soc. Japan*, 83, 391-408.
- (9) Davies, J. M., 1993: Hourly helicity, instability, and EHI in forecasting supercell tornadoes. 17th Conf. on Severe Local Storms, St. Louis, MO, *Amer. Meteor. Soc.*, 107-111.
- (10) Davis-Jones, R., D. Burgess, and M. Foster, 1990: Test of helicity as a tornado forecast parameter. 16th Conf. on Severe Local Storms, Kananaskis Park, AB., Canada, *Amer. Meteor. Soc.*, 588-592.
- (11) Doswell III, C. A., and J. S. Evans, 2003: Proximity sounding analysis for derechos and supercells: an assessment of similarities and differences. *Atmos. Res.*, 67-68, 117-133.
- (12) Dotzek, N., M. V. Kurgansky, J. Grieser, B. Feuerstein, and P. Nevir, 2005: Observational evidence for exponential tornado intensity distributions over specific kinetic energy. *Geophys. Res. Letters*, 32, L24813, doi:10.1029/2005GL024583.
- (13) Fujita, T. T., 1981: Tornadoes and downbursts in the context of generalized planetary scales. *J. Atmos. Sci.*, 38, 1511-1534.
- (14) Klemp, J. B., and R. B. Wilhelmson, 1978: Simulations of right- and left-moving storms produced through storm splitting. *J. Atmos. Sci.*, 35, 1097-1110.

- (15) Lee, B. D., and R. B. Wilhelmson, 1997: The numerical simulation of nonsupercell tornadogenesis. Part II: Evolution of a family of tornadoes along a weak outflow boundary. *J. Atmos. Sci.*, 54, 2387-2415.
- (16) Mashiko, W., H. Niino, and T. Kato, 2009: Numerical simulation of tornadogenesis in an outer-rainband minisupercell of typhoon Shanshan on 17 September 2006. *Mon. Wea. Rev.*, 137, 4238-4260.
- (17) Moncrieff, M., and M. J. Miller, 1976: The dynamics and simulation of tropical cumulonimbus and squall lines. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 102, 373-394.
- (18) Noda, A. T., and H. Niino, 2010: A numerical investigation of a supercelltornado: Genesis and vorticity budget. *J. Meteor. Soc. Japan*, 88, 135-159.
- (19) Onogi, K., J. Tsutsui, H. Koide, M. Sakamoto, S. Kobayashi, H. Hatsushika, T. Matsumoto, N. Yamazaki, H. Kamahori, K. Takahashi, S. Kadokura, K. Wada, K. Kato, R. Oyama, T. Ose, N. Mannoji and R. Taira, 2007: The JRA-25 Reanalysis. *J. Meteor. Soc. Japan*, 85, 369-432.
- (20) Orlanski, I., 1975: A rational subdivision of scales for atmospheric processes. *Bull. Amer. Meteorol. Soc.*, 56, 527-530.
- (21) Rasmussen, E. N., 2003: Refined supercell and tornado forecast parameters. *Wea. Forecasting*, 18, 530-535.
- (22) Rasmussen, E. N., and D. Blanchard, 1998: A baseline climatology of sounding-derived supercell and tornado forecast parameters. *Wea. Forecasting*, 13, 1148-1164.
- (23) 櫻井溪太, 川村隆一, 2008: 日本における竜巻発生の環境場と予測可能性. *天気*, 55, 7-22.
- (24) Roberts, R. D., and J. W. Wilson, 1995: The genesis of three nonsupercell tornadoes observed with dual-Doppler radar. *Mon. Wea. Rev.*, 123, 3408-3436.
- (25) Rotunno, R., and J. Klemp, 1985: On the rotation and propagation of simulated supercell thunderstorms. *J. Atmos. Sci.*, 42, 271-292.
- (26) Suzuki, O, H. Niino, H. Ohno, and H. Nirasawa, 2000: Tornado-producing mini supercells associated with Typhoon 9019. *Mon. Wea. Rev.*, 128, 1868-1882.
- (27) Trapp, R. J., 2013: *Mesoscale-Convective Processes in the Atmosphere*. Cambridge, 346 pp.
- (28) Wakimoto, R. M., and J. W. Wilson, 1989: Non-supercell tornadoes. *Mon. Wea. Rev.*, 117, 1113-1140.
- (29) 飯塚義浩, 加治屋秋実, 2011: 数値予報資料から求めた竜巻に関連する大気環境指数の統計的検証. *天気*, 58, 19-30.
- (30) 大野久雄, 2001: 雷雨とメソ気象. 東京堂出版, pp. 309.
- (31) 加藤輝之, 2008a: 竜巻発生の環境場に関する研究 (I) - 竜巻をもたらす発生

- 環境に関する統計的研究－，平成19年度科学技術振興調整費 重要政策課題への機動的対応の推進，6-12.
- (32) 加藤輝之，2008b：スーパーセルに伴う竜巻の発生機構の研究（Ⅲ）－2006年の佐呂間竜巻に対する解析－，平成19年度科学技術振興調整費 重要政策課題への機動的対応の推進，39-44.
- (33) 杉本聡一郎，野原大輔，平口博丸，2014：国内既往最大規模の竜巻を対象とした発生頻度の地域性について，第11回学術講演会要旨集，日本保全学会，395-402.
- (34) 杉本聡一郎，野原大輔，平口博丸，2014：突風関連指数を用いた大きな竜巻の発生環境場の地域性に関する検討，日本気象学会2014年度春季大会講演予稿集，420.
- (35) 杉本聡一郎，野原大輔，平口博丸，2016：突風関連指数の長期再解析にもとづくスーパーセル型竜巻発生地域気候特性，電力中央研究所報告，015007，22pp.
- (36) 瀧下洋一，2011：竜巻発生確度ナウキャスト・竜巻注意情報について－突風に関する防災気象情報の改善－. 測候時報，78，57-93.
- (37) 新野 宏，2007：竜巻，天気，54，933-936.
- (38) 橋本篤，平口博丸，豊田康嗣，中屋耕，2011：温暖化に伴う日本の気候変化予測（その1）－気象予測・解析システムNuWFASの長期気候予測への適用性評価－. 電力中央研究所報告 N10044，22pp.
- (39) 橋本篤，平口博丸，田村英寿，服部康男，松梨史郎，2013：領域気候モデルを用いた過去53年間の気象・気候再現. 電力中央研究所報告，N13004，18 pp.
- (40) 東京工芸大学(2011)：平成21～22年度原子力安全基盤調査研究（平成22年度）竜巻による原子力施設への影響に関する調査研究，424p.
- (41) Wen, Y. K. and Chu, S. L. (1973) : Tornado risks and design wind speed, Proceedings of American society of Civil Engineering, Journal of Structural Division, Vol. 99, No. ST12, 2409-2421.
- (42) Garson, R. C., Morla-Catalan J. and Cornell C. A. (1975) : Tornado Design Winds Based on Risk, Journal of Structural Division, Proceedings of the American Society of Civil Engineering, Vol. 101, No. ST9, 1883-1897.
- (43) Forbes GS (1998) Topographic influences on tornadoes in Pennsylvania. 19th Conf. on Severe Local Storms, Amer. Meteor. Soc., Minneapolis, MN, 269-272.
- (44) Karstens C. D., 2012: Observations and laboratory simulations of tornadoes in complex topographical regions. Graduate theses and dissertations of Iowa state Univ., paper 12778.
- (45) Lewellen, D. C., 2012: Effects of topography on tornado dynamics: A simulation study. 26th Conference on Severe Local Storms, Amer. Meteorol. Soc., Nashville, TN, 4B. 1.
- (46) Church, C. R., 1993: The tornado: Its structure, dynamics, prediction and hazards. Geophysical Monograph, Vol. 79, American Geophysical Union.



- (47) Hattori Y et al. (2010) Wind-tunnel experiment on logarithmic-layer turbulence under the influence of overlying detached eddies. *Bound.-Layer Meteor.*, 134, 269-283.
- (48) James R. Holton (1992) *An Introduction to Dynamic Meteorology*, pp.511.
- (49) 近藤純正, 2000: 地表面に近い大気の科学—理解と応用. 東京大学出版会, 324pp.
- (50) 塩谷正雄, 1992: 強風の性質—構造物の耐風設計に関連して. 開発社, 201pp.
- (51) 竹内清秀, 近藤純正, 1981: 大気科学講座1 地表に近い大気. 東京大学出版会, 226 pp.
- (52) 日本建築学会, 2004: 建築物荷重指針・同解説. 丸善出版, 651pp.
- (53) Dessens, J., Jr. (1972) Influence of ground roughness on tornadoes : A Laboratory Simulation. *J. Appl. Meteor.*, 11, 72-75.
- (54) Leslie, F. W., 1977: Surface roughness effects on suction vortex formation. *J. Atmos. Sci.*, 34, 1022-1027.
- (55) Lewellen, W. S., and Y. P. Sheng, 1979: Influence of surface conditions on tornado wind distribution. *Proc. 11th Conf. Severe Local Storms*, Amer. Meteorol. Soc., 375-378.
- (56) Lewellen, D. C., B. Gong, W. S. Lewellen, 2008: Effects of finescale debris on near-surface tornado dynamics. *J. Atmos. Sci.*, 65, 3247-3262.
- (57) Natarajan, D., and H. Hangan, 2012: Large eddy simulations of translation and surface roughness effects on tornado-like vortices. *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.*, 104-106, 577-584.
- (58) Maruyama, T. (2011) Simulation of flying debris using a numerically generated tornado-like vortex. *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.*, 99, 249-256.
- (59) Lewellen, D. C., and W. S. Lewellen (2007) Near-surface intensification of tornado vortices. *J. Atmos. Sci.*, 64, 2176-2194.
- (60) Rostek, W. F., and J. T. Snow, 1985: Surface roughness effects on tornado like vortices. *Proc. 15th Conf. Severe Local Storms*, Amer. Meteorol. Soc., 252-255.
- (61) Fujita, T. T., *Workbook of tornadoes and high winds for engineering applications*, U.Chicago, 1978.
- (62) U. S. NUCLEAR REGULATORY COMMISSION : REGULATORY GUIDE 1.76, DESIGN-BASIS TORNADO AND TORNADO MISSILES FOR NUCLEAR POWER PLANTS, Revision 1, March 2007
- (63) 気象庁ホームページ ([http://www.jma.go.jp/jma/kishou/known/yougo\\_hp/kousui.html](http://www.jma.go.jp/jma/kishou/known/yougo_hp/kousui.html))
- (64) 一般気象学 小倉義光, 東京大学出版社

# 島根原子力発電所 2 号炉

## 竜巻影響評価について

## 目次

1. 竜巻に対する防護
  - 1.1. 概要
  - 1.2. 竜巻影響評価の対象施設
  - 1.3. 評価の基本的な考え方
2. 基準竜巻・設計竜巻の設定
  - 2.1. 概要
  - 2.2. 竜巻検討地域の設定
  - 2.3. 基準竜巻の最大風速 ( $V_B$ ) の設定
  - 2.4. 設計竜巻の最大風速 ( $V_D$ ) の設定
  - 2.5. 設計竜巻の特性値
3. 竜巻影響評価
  - 3.1. 評価概要
  - 3.2. 評価対象施設
  - 3.3. 設計荷重の設定
  - 3.4. 評価対象施設等の設計方針
  - 3.5. 竜巻随伴事象に対する評価

### 添付資料

- 1.1 重大事故等対処設備に対する考慮について
  - 1.2 評価対象施設等の抽出について
  - 1.3 耐震Sクラス設備について
  - 2.1 数値気象解析に基づく突風関連指数の地域性について
  - 2.2 竜巻検討地域において発生した竜巻
  - 2.3 竜巻最大風速のハザード曲線の求め方
  - 2.4 地形効果による竜巻風速への影響について
  - 3.1 竜巻影響評価の概要及び保守性について
  - 3.2 竜巻影響評価及び竜巻対策の概要
- 別紙-1 竜巻防護対策のうち飛来物発生防止対策の概要について
- 別紙-2 飛来物化する可能性がある物品の管理について
- 別紙-3 竜巻準備体制の発令の判断基準について
- 別紙-4 原子炉建物ブローアウトパネルに対する対応方針について
- 3.3 設計飛来物の選定について
- 別紙-1 過去の主な竜巻事例に基づく飛来物の検討について
- 別紙-2 極小飛来物の衝突に対する施設への影響について
- 別紙-3 二次飛来物の現地調査について
- 別紙-4 竜巻時に発生するひょうの影響について

別紙-5 空力パラメータについて

別紙-6 設計飛来物の最大水平速度の妥当性について

別紙-7 飛来物発生防止対策エリアの設定について

別紙-8 島根原子力発電所 1 号炉 廃止措置における解体撤去作業の概要及び解体・撤去物品の管理について

## 1. 竜巻に対する防護

### 1.1 概要

原子力規制委員会の定める「実用発電用原子炉及びその附属施設の位置、構造及び設備の基準に関する規則（以下「設置許可基準規則」という。）」第6条において、外部からの衝撃による損傷の防止として、安全施設は、想定される自然現象（地震及び津波を除く。）が発生した場合においても安全機能を損なわないものでなければならないとしており、敷地周辺の自然環境をもとに想定される自然現象の一つとして、竜巻の影響を挙げている。

発電用原子炉施設の供用期間中に極めてまれに突風・強風を引き起こす自然現象としての竜巻及びその随伴事象等によって発電用原子炉施設の安全性を損なうことのない設計であることを確認するために原子力規制委員会の定める「原子力発電所の竜巻影響評価ガイド(平成25年6月19日原規技発13061911号 原子力規制委員会決定)」(以下「ガイド」という。)を参照し、竜巻影響評価として以下を実施し、発電用原子炉施設の安全機能が維持されることを確認する。

- ・設計竜巻及び設計荷重（設計竜巻荷重及びその他の組み合わせ荷重）の設定
- ・島根原子力発電所における飛来物に係る調査
- ・飛来物防止対策
- ・考慮すべき設計荷重に対する外部事象防護対象施設の構造健全性等の評価を行い、必要に応じ対策を行うことで安全機能が維持されることの確認

また、第43条の要求を踏まえ、設計竜巻によって、設計基準対象施設の安全機能と重大事故等対処設備の機能が同時に損なわれることがないことを確認するとともに、重大事故等対処設備の機能が喪失した場合においても、位置的分散又は頑健性のある外殻となる建物による防護に期待できる代替手段等により必要な安全機能を維持できることを確認する。【添付資料 1.1】

## 1.2. 竜巻影響評価の対象施設

竜巻影響評価の対象施設としては、以下の「(1) 外部事象防護対象施設のうち評価対象施設」及び「(2) 外部事象防護対象施設に波及的影響を及ぼし得る評価対象施設」に示す施設を竜巻影響評価の対象施設とする。

また、竜巻に対する防護設計を行う、外部事象防護対象施設のうち評価対象施設、外部事象防護対象施設に波及的影響を及ぼし得る評価対象施設を「評価対象施設等」という。

### (1) 外部事象防護対象施設のうち評価対象施設【添付資料 1.2 1.2.1】

設置許可基準規則第 6 条における安全施設とは、「発電用軽水型原子炉施設の安全機能の重要度分類に関する審査指針」で規定されているクラス 1、クラス 2 及びクラス 3 に属する構築物、系統及び機器（以下「安全重要度分類のクラス 1、クラス 2 及びクラス 3 に属する構築物、系統及び機器」という。）を指していることから、竜巻によってその安全機能が損なわれないことを確認する必要がある施設は、安全重要度分類のクラス 1、クラス 2 及びクラス 3 に属する構築物、系統及び機器とする。

また、以下の点を踏まえ、竜巻によってその安全機能が損なわれないことを確認する必要がある施設のうち、外部事象防護対象施設は、外部事象に対し必要な構築物、系統及び機器（発電用原子炉を停止するため、また、停止状態にある場合は引き続きその状態を維持するために必要な異常の発生防止の機能、又は異常の影響緩和の機能を有する構築物、系統及び機器、並びに、燃料プールの冷却機能及び給水機能を維持するために必要な異常の発生防止の機能、又は異常の影響緩和の機能を有する構築物、系統及び機器として安全重要度分類のクラス 1、クラス 2 及び安全評価上その機能に期待するクラス 3 に属する構築物、系統及び機器）に加え、それらを内包する建物とする。

- ・ 竜巻襲来後に施設等の損壊状況を踏まえ、必要に応じプラント停止の措置をとること
- ・ プラント停止後は、その状態を維持することが重要であること

その上で、本評価における評価対象施設は、外部事象防護対象施設のうち、屋内施設は内包する建物により防護する設計とすることから、屋外施設（建物含む）、外気との接続がある施設及び外殻となる施設等による防護機能が期待できない施設に分類し、抽出した。また、外殻となる施設等による防護機能が期待できない施設については、建物、構築物の構造健全性維持可否の観点、設計飛来物の衝突による開口部の開放又は開口部建具の貫通の観点から、施設を抽出する。

なお、上記に含まれない構築物、系統及び機器は、竜巻及びその随件事象により損傷した場合であっても、代替手段があること等により安全機能を損なわないことを確認した。【添付資料 1.2 1.2.4】

図 1.2.1 に外部事象防護対象施設のうち評価対象施設の抽出フローを、表 1.2.1 に評価対象施設を示す。

また、上記の抽出に加え、「基準地震動及び耐震設計方針に係る審査ガイド」の重要度分類における耐震 S クラスの設計を要求される設備（系統，機器）及び建物・構築物のうち，竜巻の影響を受ける可能性がある施設を抽出し，追加で評価対象施設に反映する施設がないことを確認した。【添付資料 1.3】

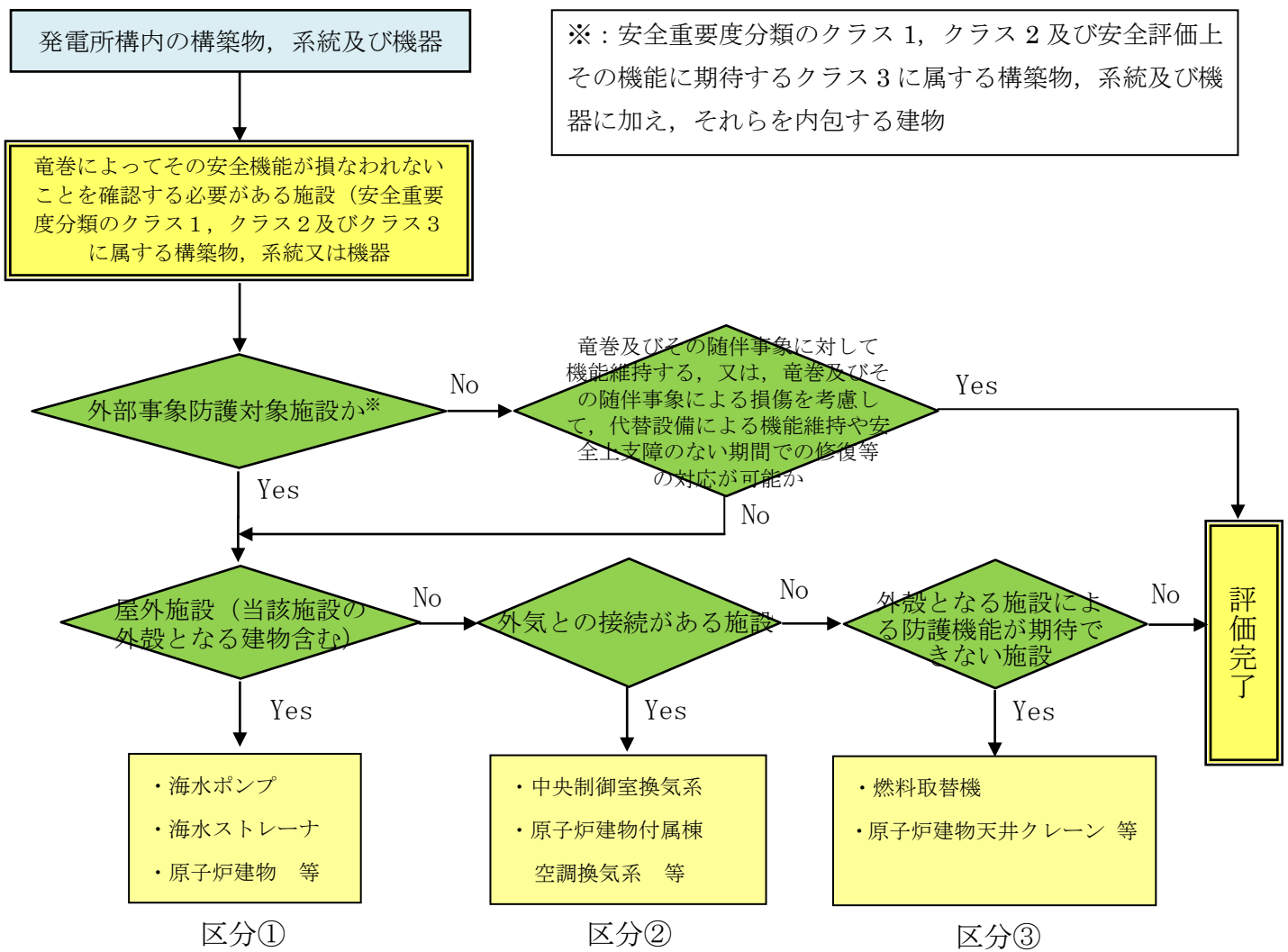


図 1. 2. 1 外部事象防護対象施設のうち評価対象施設の抽出フロー



表 1.2.1 評価対象施設とする外部事象防護対象施設の抽出結果 (1/3)

系統	機器・設備	区分※
原子炉補機冷却系	ポンプ	③
	ポンプ電動機	③
	熱交換器	③
	配管	③
	弁	③
原子炉補機海水系	ポンプ	①
	ポンプ電動機	①
	配管	①
	弁	①
	ストレーナ	①
燃料プール冷却系	燃料プール	③
	使用済燃料貯蔵ラック	③
	配管	③
	弁	③
高圧炉心スプレイ 補機海水系	ポンプ	①
	ポンプ電動機	①
	配管	①
	弁	①
	ストレーナ	①
残留熱除去系	配管	③
	弁	③
非常用ガス処理系	配管（非常用ガス処理系用排気筒）	② (①)
	弁	②
原子炉棟空調換気系	隔離弁	②
	ダクト	②

※区分：①屋外施設

②外気と繋がっている施設

③外殻となる施設による防護機能が期待できない施設

表 1.2.1 評価対象施設とする外部事象防護対象施設の抽出結果 (2/3)

系統	機器・設備	区分※
中央制御室換気系	送風機	②
	非常用再循環送風機	②
	非常用再循環送風機電動機	③
	排風機	②
	空気調和装置 (加湿器含む)	②
	非常用再循環処理装置	②
	ダクト	②
	ダンパ	②
	隔離弁	②
原子炉建物付属棟空調換気系	非常用ディーゼル室送風機	②
	非常用ディーゼル室送風機電動機	③
	高圧炉心スプレイディーゼル室送風機	②
	高圧炉心スプレイディーゼル室送風機電動機	③
	非常用電気室送風機	②
	高圧炉心スプレイ系電気室送風機	②
	非常用電気室外気処理装置	②
	高圧炉心スプレイ系電気室外気処理装置	②
	ダクト	②
	ダンパ	②

※区分：①屋外施設

②外気と繋がっている施設

③外殻となる施設による防護機能が期待できない施設

表 1.2.1 評価対象施設とする外部事象防護対象施設の抽出結果 (3/3)

系統	機器・設備	区分※
非常用所内電源系	A-非常用ディーゼル発電機系ディーゼル燃料移送ポンプ	①
	A-非常用ディーゼル発電機系ディーゼル燃料移送ポンプ電動機	①
	A-非常用ディーゼル発電機系配管	①
	A-非常用ディーゼル発電機系弁	①
	高圧炉心スプレイ非常用ディーゼル発電機系ディーゼル燃料移送ポンプ	①
	高圧炉心スプレイ非常用ディーゼル発電機系ディーゼル燃料移送ポンプ電動機	①
	高圧炉心スプレイ非常用ディーゼル発電機系配管	①
	高圧炉心スプレイ非常用ディーゼル発電機系弁	①
プロセス放射線モニタ系	排気筒モニタ	①
燃料取扱設備	燃料取替機	③
原子炉建物天井クレーン	原子炉建物天井クレーン	③
排気筒	排気筒	①
建物等	原子炉建物	①
	制御室建物	①
	タービン建物	①
	廃棄物処理建物	①
	排気筒モニタ室	①
	A-ディーゼル燃料貯蔵タンク室	①
	高圧炉心スプレイディーゼル燃料貯蔵タンク室	①
	B-ディーゼル燃料貯蔵タンク格納槽	①

※区分：①屋外施設

②外気と繋がっている施設

③外殻となる施設による防護機能が期待できない施設

(2) 外部事象防護対象施設に波及的影響を及ぼし得る評価対象施設【添付資料 1.2 1.2.2】

外部事象防護対象施設に波及的影響を及ぼし得る評価対象施設としては、当該施設の破損等により外部事象防護対象施設に波及的影響を及ぼして安全機能を喪失させる可能性がある施設、又はその施設の特定の区画とする。

外部事象防護対象施設に波及的影響を及ぼし得る評価対象施設としては、発電所構内の構築物、系統及び機器（安全重要度分類のクラス 1、クラス 2、クラス 3 及びノンクラス）の中から、抽出する。

図 1.2.2 に外部事象防護対象施設に波及的影響を及ぼし得る評価対象施設の抽出フローを、表 1.2.2 に倒壊により外部事象防護対象施設に損傷を及ぼし得る施設を、表 1.2.3 に外部事象防護対象施設の付属施設のうち屋外にある施設を示す。

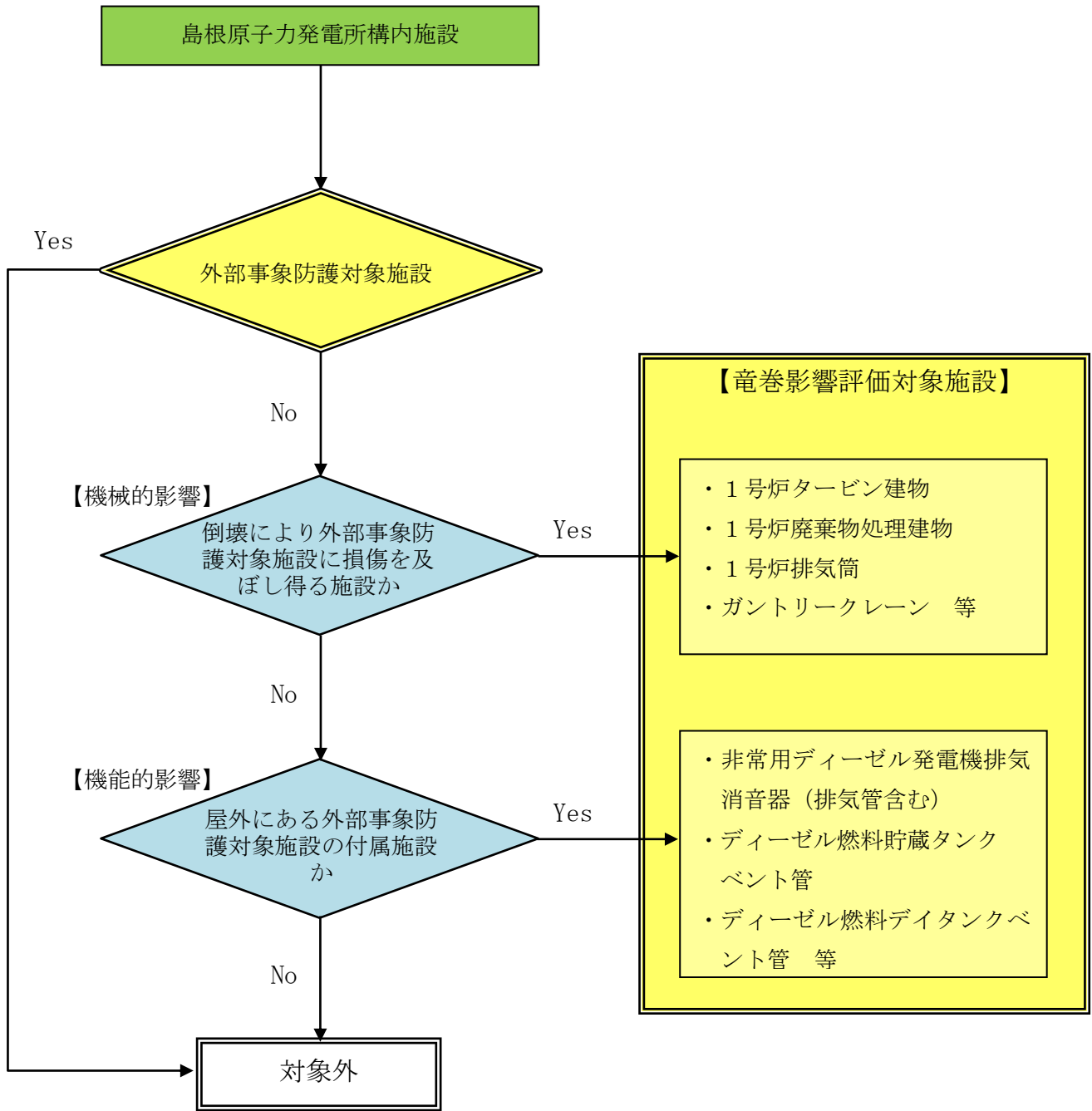


図 1.2.2 外部事象防護対象施設に波及的影響を及ぼし得る評価対象施設の抽出フロー

表 1.2.2 外部事象防護対象施設に波及的影響を及ぼし得る評価対象施設の抽出結果

(倒壊により外部事象防護対象施設に損傷を及ぼし得る施設)

施設名	損傷を受ける可能性のある外部事象防護対象施設	外部事象防護対象施設との距離	地上高さ
1号炉原子炉建物	制御室建物	約 15m	47m
1号炉タービン建物	2号炉タービン建物 制御室建物	隣接	—
1号炉廃棄物処理建物	2号炉廃棄物処理建物 制御室建物	隣接	—
1号炉排気筒	2号炉タービン建物	約 10m	120m
ガントリークレーン	原子炉補機冷却系海水ポンプ等	約 3m	21m
排気筒モニタ室	2号炉排気筒	隣接	—

表 1.2.3 外部事象防護対象施設に波及的影響を及ぼし得る評価対象施設の抽出結果

(外部事象防護対象施設の付属施設のうち屋外にある施設)

外部事象防護対象施設	屋外にある付属施設
非常用ディーゼル発電機	排気消音器 (排気管含む)
高圧炉心スプレイ系 ディーゼル発電機	排気消音器 (排気管含む)
ディーゼル燃料貯蔵タンク	ベント管
ディーゼル燃料デイタンク	ベント管
潤滑油サンプルタンク	ベント管

(3) 評価対象施設等の構内配置

抽出した主な外部事象防護対象施設のうち評価対象施設及び外部事象防護対象施設に波及的影響を及ぼし得る評価対象施設の構内配置を図 1. 2. 3 に示す。

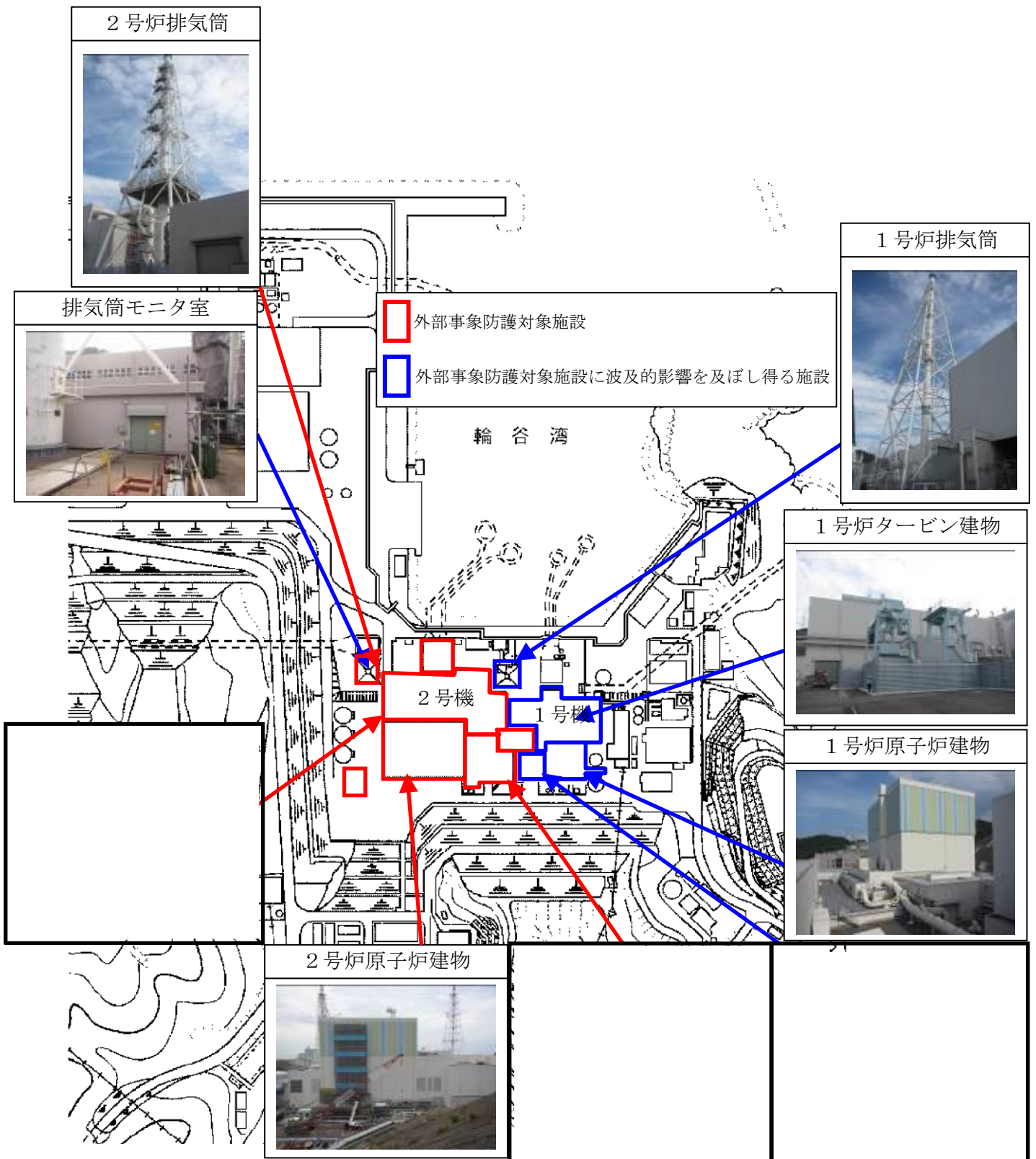


図 1. 2. 3 外部事象防護対象施設のうち評価対象施設及び外部事象防護対象施設に波及的影響を及ぼし得る評価対象施設の構内配置

本資料のうち、枠囲みの内容は機密に係る事項のため公開できません。

### 1.3. 評価の基本的な考え方

#### 1.3.1. 評価の基本フロー

ガイドに基づき基準竜巻，設計竜巻及び設計荷重を適切に設定するとともに，考慮すべき設計荷重に対して，抽出した評価対象施設等の構造健全性評価を行い，必要に応じて対策を行うことで安全機能が維持されていることの確認を行う。図 1.3.1.1 に竜巻影響評価の基本フローを示す。

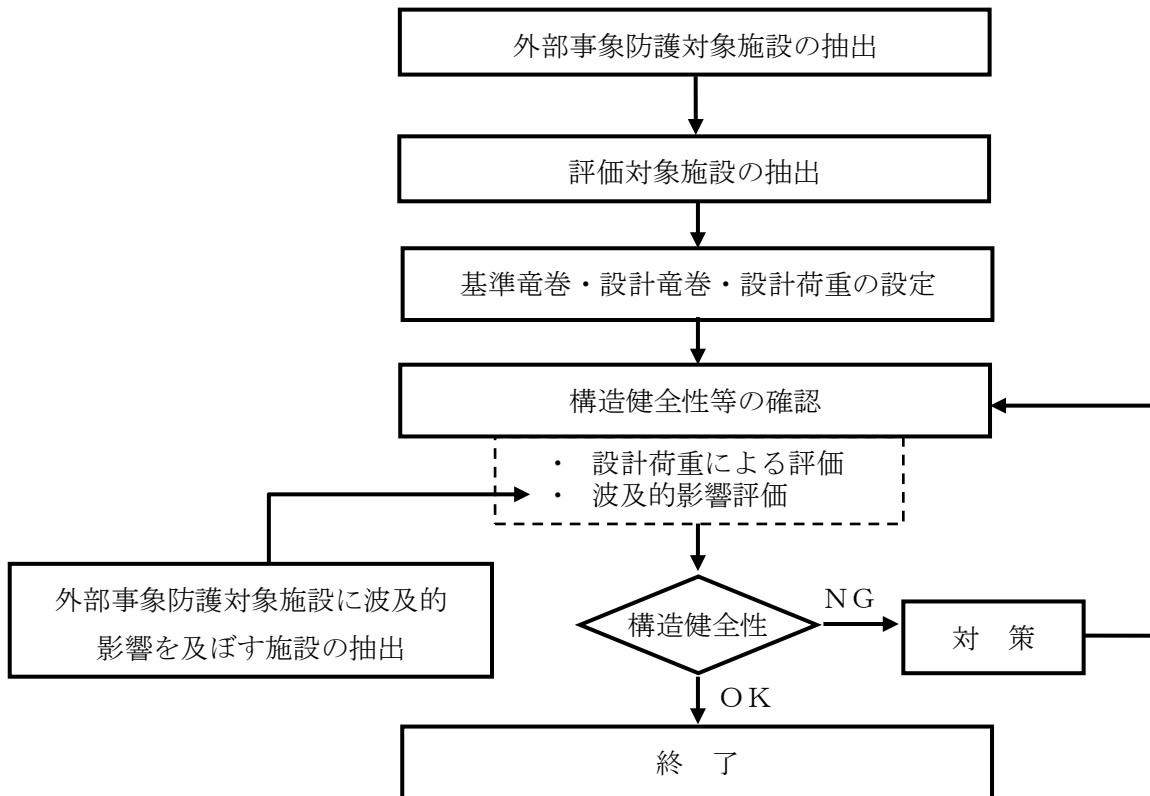


図 1.3.1.1 竜巻影響評価の基本フロー



### 1.3.2. 評価対象施設に作用する荷重

以下に示す設計荷重を適切に設定する。

#### (1) 設計竜巻荷重

設計竜巻荷重を以下に示す。

##### ①風圧力

設計竜巻の最大風速による風圧力

##### ②気圧差による圧力

設計竜巻における気圧低下によって生じる評価対象施設等の内外の気圧差による圧力

##### ③飛来物の衝撃荷重

設計竜巻によって評価対象施設等に衝突し得る飛来物（以下「設計飛来物」という。）が評価対象施設等に衝突する際の衝撃荷重

#### (2) 設計竜巻荷重と組み合わせる荷重

設計竜巻荷重と組み合わせる荷重を以下に示す。

##### ①評価対象施設に常時作用する荷重，運転時荷重等

##### ②竜巻以外の自然現象による荷重，設計基準事故時荷重等

なお，上記(2)の②の荷重については，竜巻以外の自然現象及び事故の発生頻度等を参照して，上記(2)の①の荷重と組み合わせることの適切性や設定する荷重の大きさ等を判断する。

具体的な荷重については，「3.3.2 設計竜巻荷重と組み合わせる荷重の設定」に示す。

### 1.3.3. 施設の安全性の確認方針

設計竜巻荷重及びその他組み合わせ荷重（常時作用している荷重，竜巻以外の自然現象による荷重，設計基準事故時荷重等）を適切に組み合わせた設計荷重に対して，評価対象施設，あるいはその特定の区画の構造健全性等の評価を行い，必要に応じて対策を行うことで安全機能が維持されることを確認する。

## 2. 基準竜巻・設計竜巻の設定

### 2.1. 概要

基準竜巻及び設計竜巻の設定は、図 2.1.1 に示すとおり竜巻検討地域の設定、基準竜巻の最大風速の設定及び設計竜巻の最大風速の設定の流れで実施する。

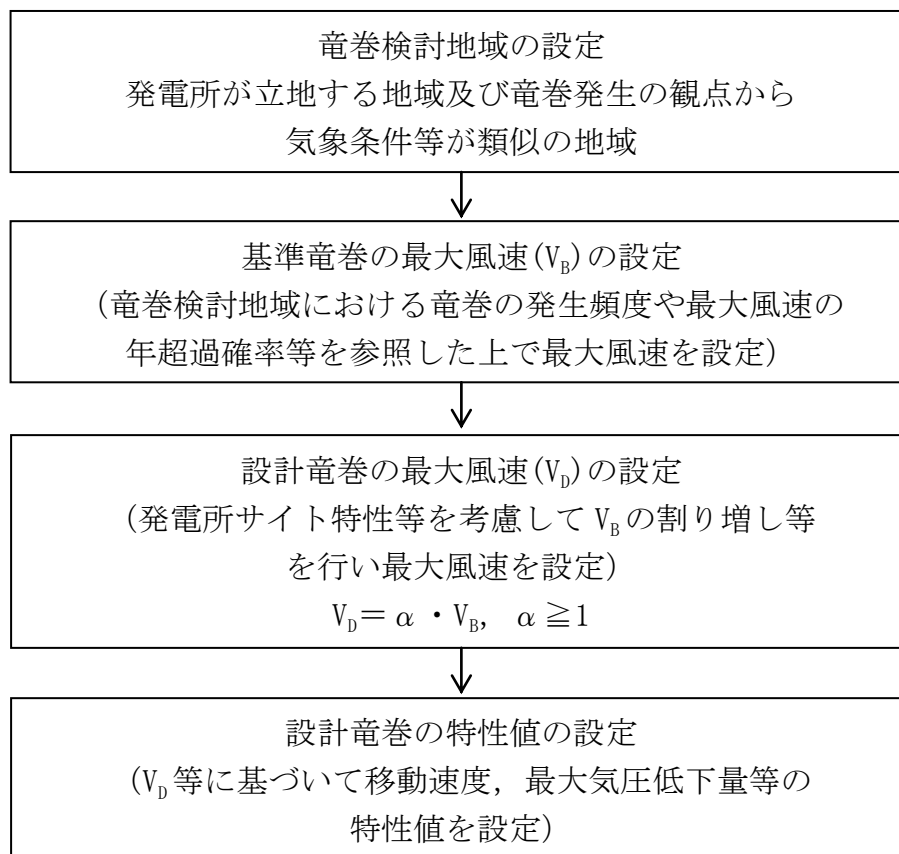


図 2.1.1 基準竜巻・設計竜巻の設定に係る基本フロー

### 2.2. 竜巻検討地域の設定

島根原子力発電所に対する竜巻検討地域について、ガイドを参考に、島根原子力発電所が立地する地域と気象条件の類似性の観点で検討を行い、図 2.2.1 に示すとおり北海道から山陰地方にかけての日本海沿岸の海岸線から陸側及び海側それぞれ 5 km の範囲を竜巻検討地域に設定した (面積約 33,395km<sup>2</sup>)。以下にその妥当性確認の結果を示す。



図 2.2.1 竜巻検討地域（赤線部）

### 2.2.1. 竜巻検討地域の妥当性確認

竜巻検討地域の妥当性について、以下の観点から確認を実施した。

- (1) 総観場の分析に基づく地域特性の確認
- (2) 過去の竜巻集中地域に基づく地域特性の確認
- (3) 突風関連指数に基づく地域特性の確認

独立行政法人原子力安全基盤機構（以下、「JNES」という。）「原子力発電所の竜巻影響評価ガイド（案）及び解説」の考え方にに基づき、竜巻発生要因となる気象条件（総観場）を確認する観点から、(1)、(2)の分析により地域特性を確認し、竜巻検討地域を設定した。

また、一般的に大気現象は時空間スケールの階層構造が見られ、ある大気現象はスケールの小さな現象を内包しているため、大きな竜巻の発生要因となる環境場の形成のしやすさを把握する観点から、(3)の分析により竜巻の発生スケールに近いメソスケールの気象場が有する地域性と齟齬がないことについても確認した。竜巻とその関連気象の時空間スケールを図 2.2.1.1 に、検討の流れを示したフローを図 2.2.1.2 に示す。

なお、(3)の突風関連指数を用いた分析は、“大きな竜巻の発生に対する大気場の必要条件”を把握する上で有効であることを踏まえ、(3)の分析結果のみで竜巻検討地域を設定するのではなく、(1)、(2)の分析により設定した竜巻検討地域の妥当性を確認するために用いている。

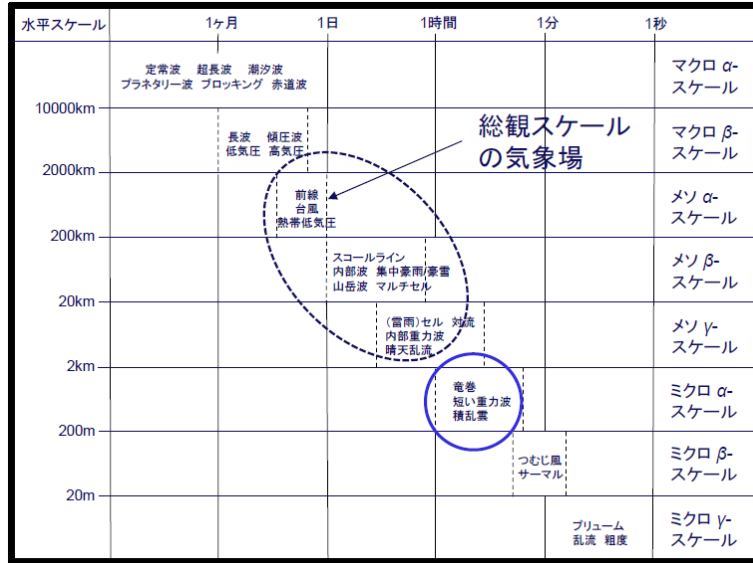


図 2.2.1.1 竜巻とその関連気象の時空間スケール※

※：軽水型原子力発電所の竜巻影響評価における設計竜巻風速および飛来物速度の設定に関するガイドライン，日本保全学会，原子力規制関連事項検討会，2015

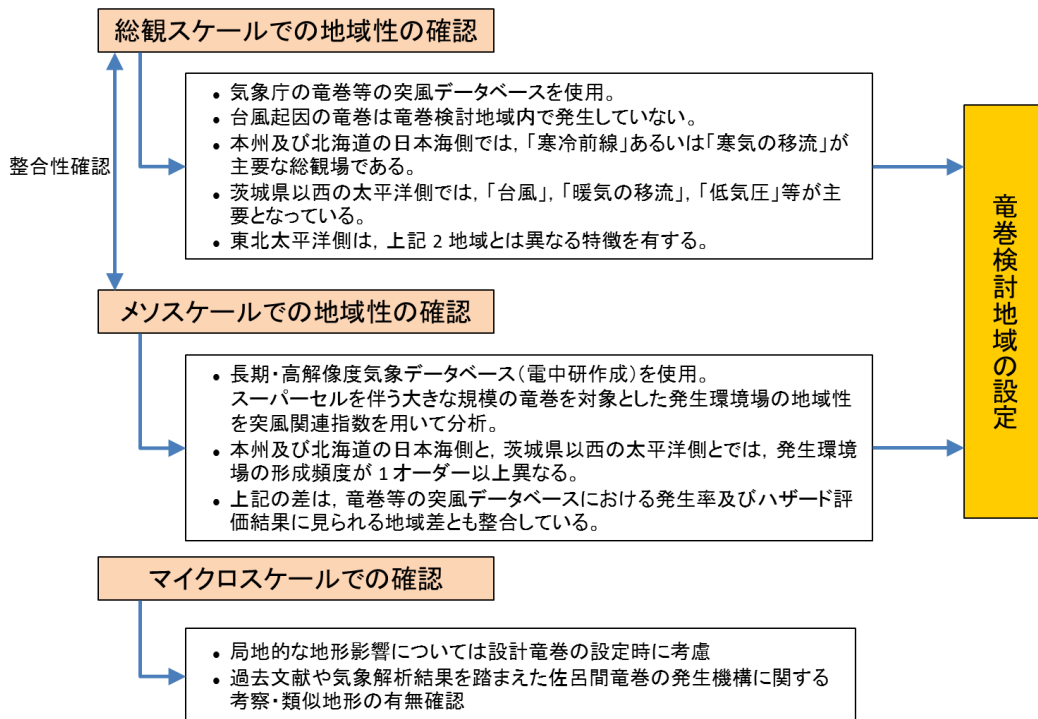


図 2.2.1.2 竜巻検討地域の検討フロー

### 2.2.2. 総観場の分析に基づく地域特性の確認

気象庁「竜巻等の突風データベース」※では、竜巻を発生させた総観場を約 40 種に分類しているが、JNES「原子力発電所の竜巻影響評価ガイド（案）及び解説」を参考に、竜巻を発生させる親雲の発生要因を考慮して 7 種に再編し、発生分布の特徴を分析した。表 2.2.2.1 に総観場の分類法と発生分布の特徴を示す。また、

図 2.2.2.1 に総観場ごとの竜巻発生地点の分布、図 2.2.2.2 に F2 以上の竜巻発生箇所を示す。

分析の結果、竜巻発生要因となる気象条件の観点で、以下のような地域特性があることを確認した。

- ①太平洋側では台風起因の大きな竜巻が多く発生しているのに対し、九州を除く日本海側地域や北海道では発生していない。(図 2.2.2.1(a))  
また、台風は北上するにつれて衰弱しやすい特性を有していることから、仮に台風起因の竜巻が発生した場合も、規模の大きな竜巻の発生可能性は低いと考えられる。
- ②温帯低気圧や季節風(夏)起因の竜巻は全国で発生しているが、規模的には太平洋側で F3 が発生しているのに対し、日本海側では F2 が最大となっている。(図 2.2.2.1(b), (c))
- ③季節風(冬)起因の竜巻は、九州を除く日本海側地域に多く発生している。規模的には、山陰地方では F2 竜巻が 2 件発生しているのみで、F3 竜巻は発生していない。(図 2.2.2.1(d))

図 2.2.2.3 にも示すとおり、日本海側と太平洋側では竜巻発生要因となる気象条件(総観場)が大きく異なっており、竜巻検討地域を日本海側とすることの妥当性が確認できた。

※：気象庁「竜巻等の突風データベース」

(<http://www.data.jma.go.jp/obd/stats/data/bosai/tornado/index.html>)

表 2.2.2.1 総観場の分類法

総観場	気象庁竜巻データベースの分類	特徴
台風	台風	台風を取り巻く雲が竜巻を発生させる。関東以西の太平洋側で発生頻度が高く、F3 竜巻も多くみられる。
温帯低気圧	南岸低気圧, 日本海低気圧, 二つ玉低気圧, 東シナ海低気圧, オホーツク海低気圧, その他(低気圧), 寒冷前線, 温暖前線, 閉塞前線	寒気と暖気が接し傾圧不安定による組織的な雲が形成する環境場。主に南からの下層の暖湿流が親雲の発達に重要な働きをするため, 暖湿流が山岳等で遮られない関東以西の太平洋側で発生頻度が高く, F3 竜巻も見られる。 日本海側での頻度は比較的 low。
季節風(夏)	暖気の移流, 熱帯低気圧, 湿舌, 太平洋高気圧	暖湿流が主要因で親雲を形成する環境場。 関東以西の太平洋側や内陸で多く確認されている。
季節風(冬)	寒気の移流, 気圧の谷, 大陸高気圧, 季節風	大気上層に寒気が流入することで大気が不安定になり, 竜巻の親雲が形成する環境場。寒気は北～西から移流することが多いため, 日本海側や関東以北で発生頻度が高い。
停滞前線	停滞前線, 梅雨前線, 前線帯, 不安定線, その他(前線)	南からの暖湿流により親雲が形成されやすく, 関東以西の太平洋側や内陸で発生頻度が高い。
局地性	局地性じょう乱, 雷雨(熱雷), 雷雨(熱雷を除く), 地形効果, 局地性降水	局地的な循環により親雲が形成する環境場。内陸で発生頻度が高い。
その他	移動性高気圧, 中緯度高気圧, オホーツク海高気圧, 帯状高気圧, その他(高気圧), 大循環異常, その他	上記に当てはまらない環境場。全体的に個数は少ない。

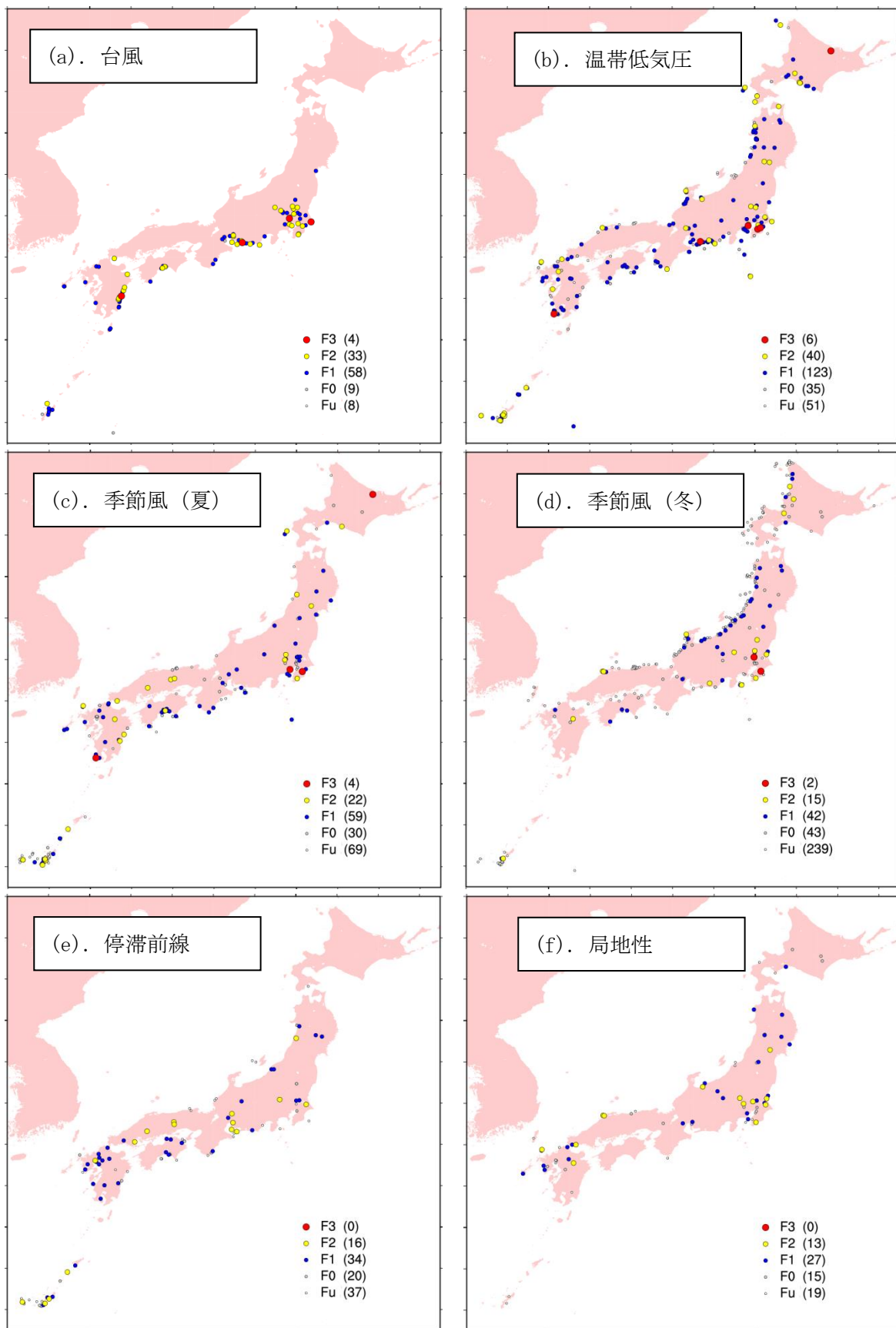


図 2.2.2.1 総観場ごとの竜巻発生地点の分布 (1961年～2012年)  
 (気象庁「竜巻等の突風データベース」をもとに作成)

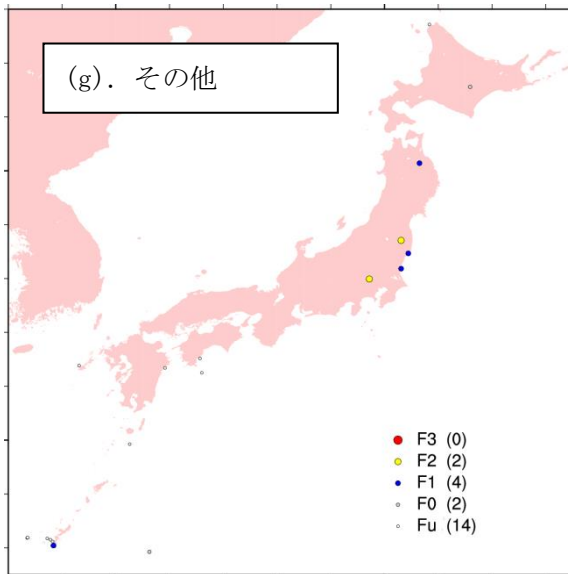


図 2.2.2.1 (続き) 総観場ごとの竜巻発生地点の分布 (1961 年～2012 年)  
 (気象庁「竜巻等の突風データベース」をもとに作成)

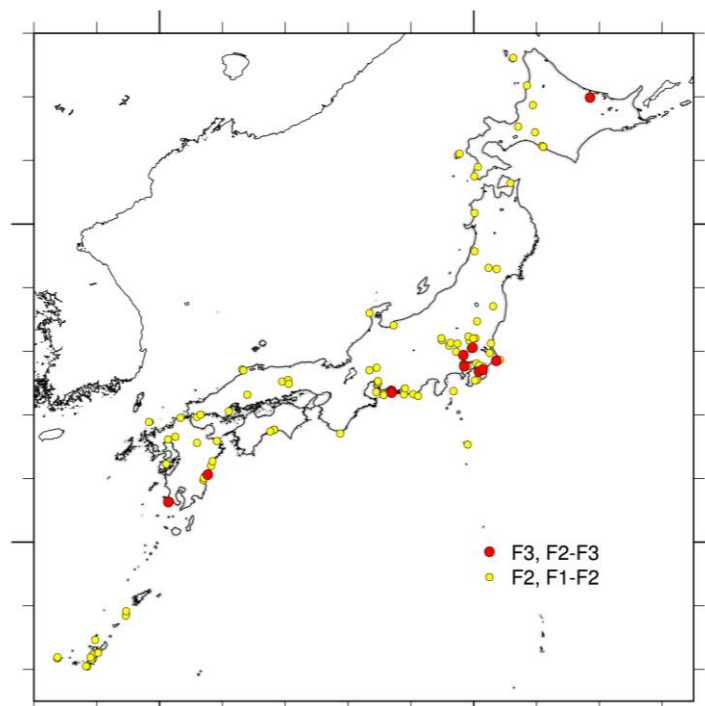
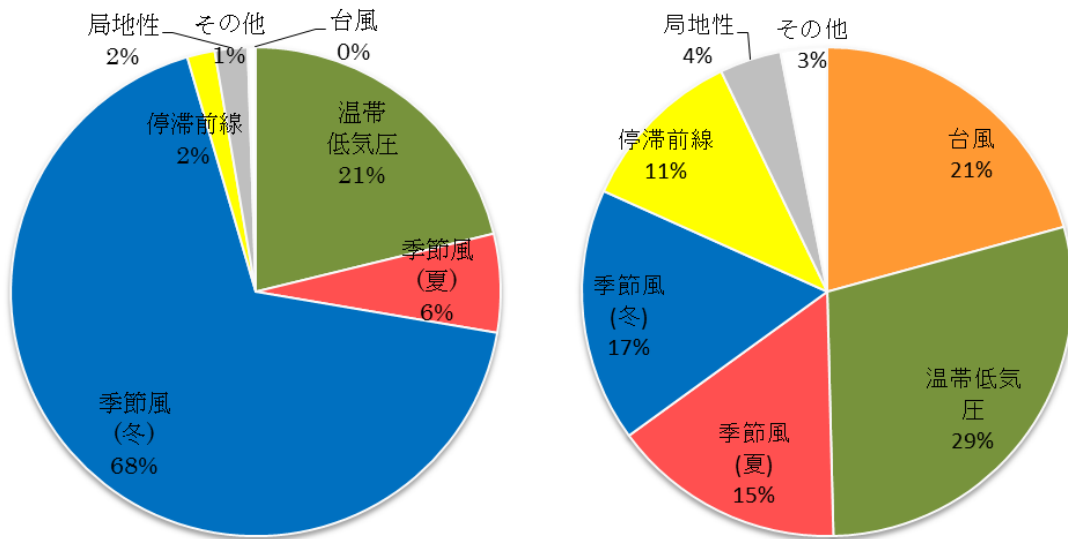


図 2.2.2.2 F2 以上の竜巻発生箇所  
 (気象庁「竜巻等の突風データベース」をもとに作成)





竜巻検討地域 (日本海沿岸)

太平洋側地域

図 2.2.2.3 竜巻の総観場の特徴の比較

### 2.2.3. 過去の竜巻集中地域に基づく地域特性の確認

日本で竜巻が集中する地域については、JNES「原子力発電所の竜巻影響評価ガイド(案)及び解説」に、全国19箇所の竜巻集中地域が示されている。

図 2.2.3.1 に示すとおり、島根原子力発電所は、竜巻集中地域⑦(島根県の一部)に立地している。したがって、基本的な考え方としては島根原子力発電所における竜巻検討地域は、この竜巻集中地域⑦とすることが考えられる。

ただし、気象庁「竜巻等の突風データベース」によると、1961年1月から2012年6月の51.5年間に発生が確認された竜巻は竜巻集中地域⑦で8個であり、この期間に竜巻集中地域⑦で観測されているもっとも強い竜巻は藤田スケール(以下、「Fスケール」という。)でF2となる。(表 2.2.3.1)

竜巻発生の影響評価の観点からすると、データ数は多い方がよいため、竜巻検討地域として北海道から山陰地方にかけての日本海沿岸を設定し、その妥当性を検討する。

なお、設定した竜巻検討地域の竜巻個数は192個、観測されたもっとも強い竜巻はF2となる。表 2.2.3.2 に竜巻検討地域内でのF1を超える竜巻の観測記録を示す。

竜巻検討地域と竜巻集中地域⑦の竜巻発生確率は、 $1.1 \times 10^{-4}$ 、 $1.3 \times 10^{-4}$ (個/年/km<sup>2</sup>)であり、単位面積当たりの竜巻発生数は竜巻集中地域⑦の方がやや大きくなるものの、両者は概ね同程度である。竜巻集中地域⑦における竜巻は8個とかなり少なく、影響評価を行うにはデータ数が乏しいため、192個の竜巻個数がある竜巻検討地域を評価対象とすることは妥当な設定である。

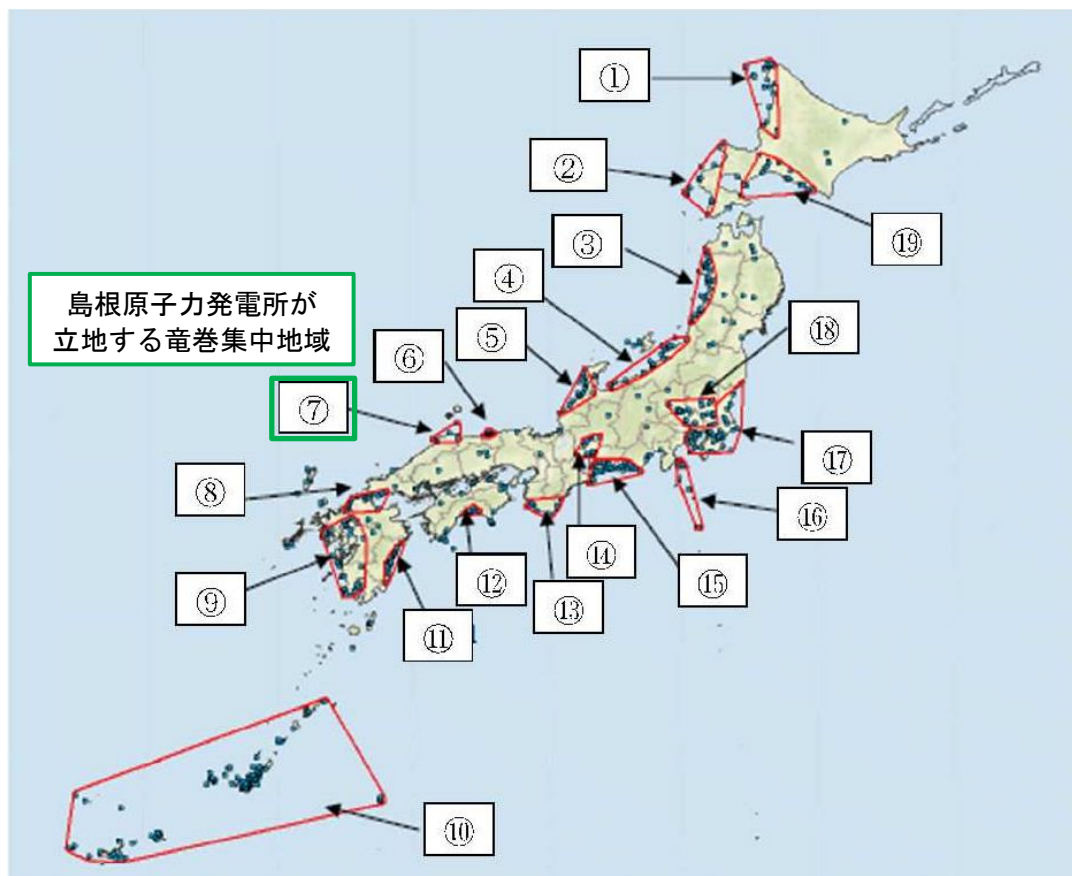
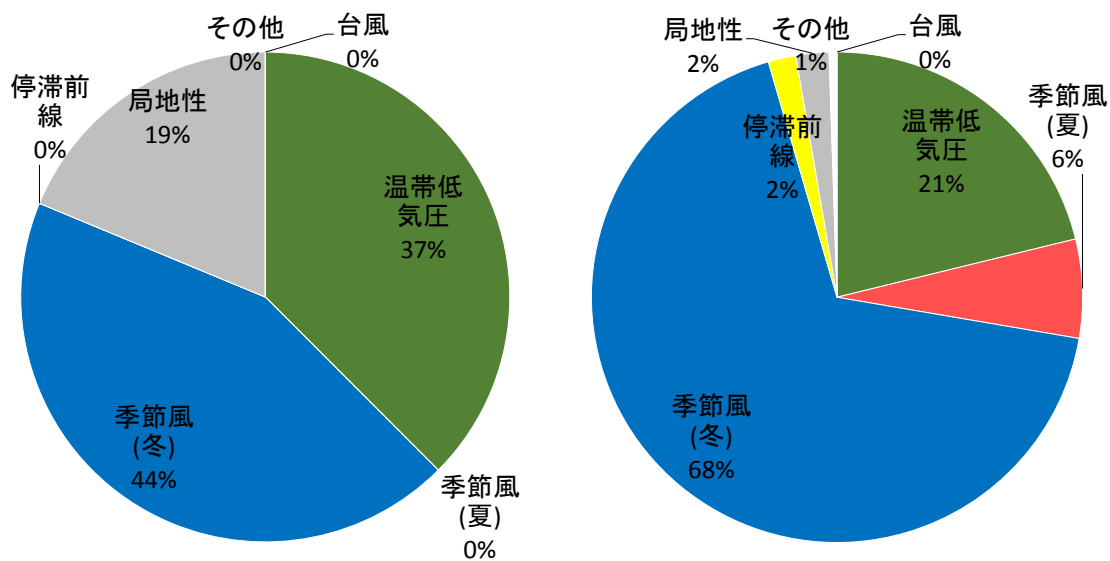


図2.2.3.1 竜巻の発生地点と竜巻が集中する19個の地域  
 (JNES「原子力発電所の竜巻影響評価ガイド(案)及び解説」より引用)

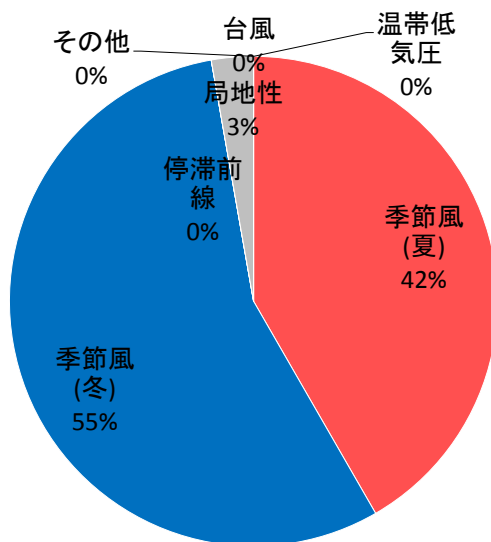
竜巻の地域特性を検討するため、竜巻集中地域⑦と竜巻検討地域、竜巻集中地域⑦に隣接する竜巻集中地域⑥(鳥取県の一部)における総観場の比較を行った。

図 2.2.3.2 に各地域の竜巻発生要因に関する総観場の特徴を示す。また、表 2.2.3.1 に総観場の特徴を示す。



竜巻集中地域⑦ (島根県の一部)

竜巻検討地域 (日本海沿岸)



竜巻集中地域⑥ (鳥取県の一部)

図 2. 2. 3. 2 各地域の竜巻発生要因に関する総観場の特徴

竜巻集中地域⑦で発生した竜巻の総観場は,”季節風(冬)”が44%,”温帯低気圧”が37%を占める。竜巻検討地域では、竜巻集中地域⑦と同様に”季節風(冬)”と”温帯低気圧”の比率が高い。これらの地域では、寒気にもなって発生した親雲に起因した竜巻が多いと推測できる。また、両地域とも、太平洋側で多くみられる台風起因の竜巻は今のところ確認されていない。

また、竜巻集中地域⑦に隣接する竜巻集中地域⑥については,”季節風(夏)”の割合が高いものの,”季節風(冬)”が竜巻発生的主要因素となっている。

以上の分析結果より、北海道から山陰地方にかけての日本海沿岸を竜巻検討地域に設定することは竜巻集中地域における地域特性の観点からも妥当であると考えられる。

表 2.2.3.1 F スケールごとの総観場のまとめ

	個数	総観場 1 位 (比率%)	総観場 2 位 (比率%)	総観場 3 位 (比率%)	主移動方向 (比率%)	
集 中 地 域 ⑦	全体	8	季節風(冬) 44%	温帯低気圧 37%	局地性 19%	南 40%
	F2	2	季節風(冬) 42%	局地性 42%	温帯低気圧 16%	南 100%
	F1	4	季節風(冬) 42%	温帯低気圧 42%	局地性 16%	南, 東, 南南西, 南東: 各 25%
	F0	1	温帯低気圧 100%	-	-	-
	F 不明	1	季節風(冬) 100%	-	-	-
	F1 以 上	6	季節風(冬) 42%	温帯低気圧 33%	局地性 25%	南 40%
	F0 以 上	7	温帯低気圧 43%	季節風(冬) 36%	局地性 21%	南 40%
検 討 地 域	全体	192	季節風(冬) 68%	温帯低気圧 21%	季節風(夏) 6%	東 39%
	F2	10	温帯低気圧 63%	季節風(冬) 23%	局地性 9%	北東 50%
	F1	40	温帯低気圧 51%	季節風(冬) 42%	局地性 6%	東 35%
	F0	24	季節風(冬) 65%	温帯低気圧 27%	停滞前線 4%	東 33%
	F 不明	118	季節風(冬) 81%	季節風(夏) 9%	温帯低気圧 6%	東 46%
	F1 以 上	50	温帯低気圧 54%	季節風(冬) 38%	局地性 6%	東 30%
	F0 以 上	74	季節風(冬) 47%	温帯低気圧 45%	局地性 5%	東 31%
集 中 ⑥	全体	18	季節風(冬) 55%	季節風(夏) 42%	局地性 3%	東 73%
太 平 洋	全体	337	温帯低気圧 29%	台風 21%	季節風(冬) 17%	北東 23%

表 2.2.3.2 竜巻検討地域における竜巻の観測記録 (F1 より大きい竜巻)  
(気象庁「竜巻等の突風データベース」より作成)

発生日時	発生場所		F スケール※	総観場
	都道府県	市町村		
1962年09月28日 14時20分	北海道 宗谷支庁	東利尻町	(F2)	寒冷前線
1971年10月17日 05時00分	北海道 留萌支庁	羽幌町	(F2)	寒気の移流
1974年10月03日 19時05分	北海道 檜山支庁	奥尻郡奥尻町	(F1~F2)	温暖前線
1974年10月20日 15時00分	北海道 檜山支庁	檜山郡上ノ国 町	(F1~F2)	寒冷前線
1975年05月31日 18時10分	島根県	簸川郡大社町	(F2)	日本海低気圧 局地性 じょう乱 寒気の移流
1975年09月08日 01時30分	北海道 檜山支庁	奥尻郡奥尻町	(F1~F2)	日本海低気圧 暖気の 移流
1979年11月02日 01時58分	北海道 渡島支庁	松前郡松前町	(F2)	日本海低気圧 温暖前 線
1989年03月16日 19時20分	島根県	簸川郡大社町	(F2)	局地性じょう乱 寒気 の移流
1990年04月06日 02時55分	石川県	羽咋郡富来町	F2	オホーツク海低気圧 気圧の谷
1999年11月25日 15時40分	秋田県	八森町	(F1~F2)	日本海低気圧 寒冷前 線

※ Fスケールは、ア) 被害の詳細な情報等から推定できたもの、イ) 文献等からの引用又は被害のおおまかな情報等から推定したもの、があり、F2以上の事例ではア)とイ)を区別し、イ)の場合には値を括弧で囲んでいる。

#### 2.2.4. 突風関連指数による地域特性の確認

総観場での確認に加え、大きな被害をもたらす強い竜巻の発生要因となる環境場の形成のしやすさについての地域特性を確認するため、気象庁や米国気象局における現業においても竜巻探知・予測に活用されており、竜巻の発生しやすさを数値的に示すことができる突風関連指数を用いて地域特性の確認を行った。なお、突風関連指数を用いての検討については日本海側と太平洋側の地域特性が異なることを示すために実施し、特定規模の竜巻発生の可能性を評価するものではない。

##### 2.2.4.1. 突風関連指数を用いた竜巻予測の技術について

竜巻の主な発生メカニズムは、二つに大別されると考えられている。一つは局地的な前線（寒気団と暖気団との境界線）に伴って生じた渦が上昇流によって引き伸ばされて竜巻となるもので、比較的寿命が短く強い竜巻になりにくいとされている。

もう一つは「スーパーセル」と呼ばれる、回転する継続した上昇気流域（メソサイクロン）を伴った非常に巨大な積乱雲に伴って竜巻が発生するものである。

スーパーセル内では、下降流域と上昇流域が分離されるため、巨大な積乱雲が長時間持続する傾向にある。近年、ドップラーレーダによる解析をもとにした竜巻の事例調査が進んだことにより、大きな被害をもたらす強い竜巻の多くはスーパーセルに伴って発生することが判明している。現状、竜巻を直接予測することは困難であるが、大規模竜巻の発生と関係が深いスーパーセルの発生環境を予測することにより竜巻発生を間接的に予測できる。以下に、竜巻発生予測について、突風関連指数を適用している例を示す。

#### 気象庁での突風関連指数の適用状況

気象庁では平成 20 年 3 月から、低気圧の発達等に関して半日から 1 日程度前に発表する予告的な気象情報において、11 種類の突風関連指数を算出し、竜巻やダウンバースト等の激しい突風が発生する可能性があるとして予測される場合には、当該気象情報において注意喚起することとした。

その後、気象庁では竜巻等の突風の予測プロダクトとして、平成 22 年 5 月より竜巻発生確度ナウキャスト情報の提供を開始した。竜巻発生確度ナウキャストは、「竜巻が今にも発生する（又は発生している）可能性の程度」（発生確度）を 10 分ごとに解析した結果をもとに、降水域の移動ベクトル等を用いて 1 時間先まで発生確度を予測する。発生確度の解析は、以下の二つの技術を組み合わせて実施している。

- ・気象ドップラーレーダ観測によるメソサイクロン（親雲）検出技術
- ・メソ数値予測（MSM）を用いた突風危険指数の算出技術

竜巻発生確度ナウキャストにおけるデータ等の流れを図 2.2.4.1.1 に示す。竜巻発生確度ナウキャストは最新の観測・解析データをもって短いリードタイムの予測を迅速に行うことが主目的のため、レーダプロダクトに重みを置いている。また、小さな竜巻も見逃しなく予測できるような説明変数として突風関連指数を選択している。

以上のように、気象庁では竜巻の監視や様々なリードタイムに対する予測に突風関連指数を活用している。

#### 海外での突風関連指数の適用状況

海外では、米国の気象庁にあたる NOAA の SPC（ストーム予測センター）においても気象庁と同様に、突風関連指数の情報とレーダー観測のデータが現業で活用されており、突風関連指数に関する検討も盛んに行われている。

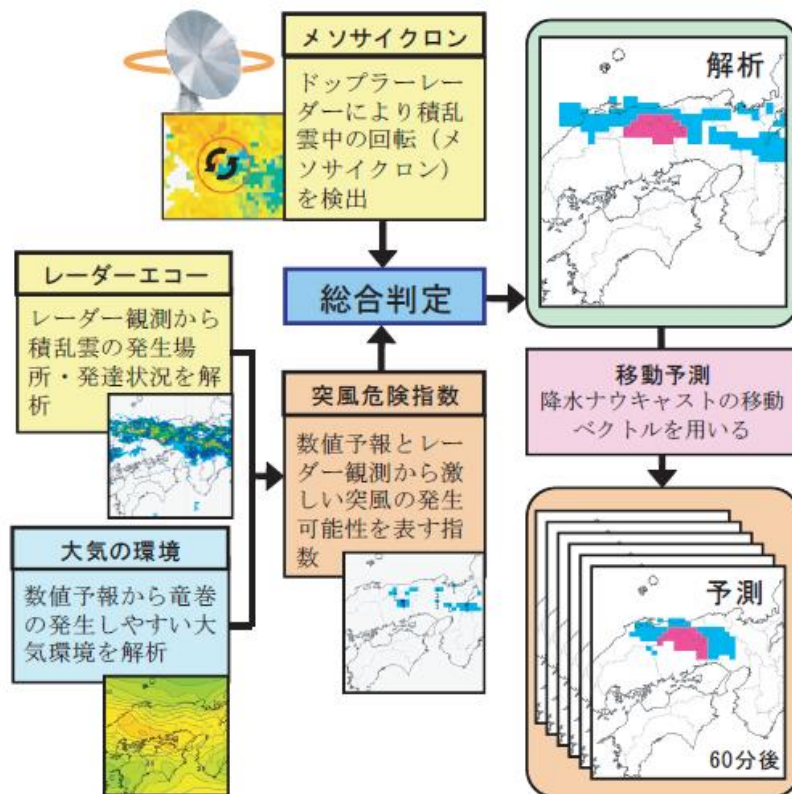


図 2.2.4.1.1 竜巻発生確度ナウキャストの解析・予測技術※

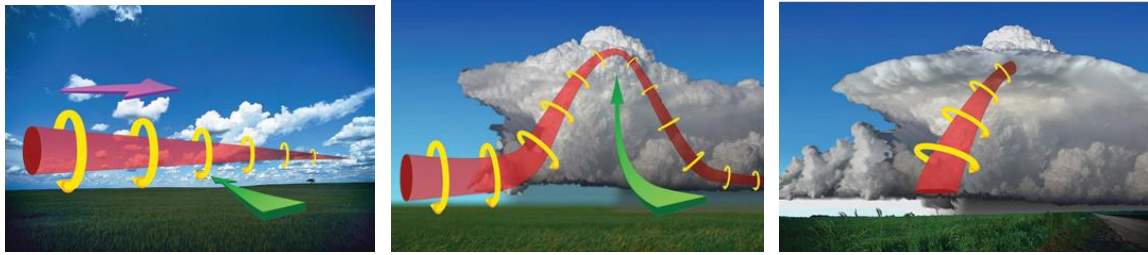
※：竜巻発生確度ナウキャスト・竜巻注意情報について-突風に関する防災気象情報の改善-，瀧下洋一，測候時報，2011

#### 2.2.4.2. 検討に用いる突風関連指数について

大きな被害をもたらす竜巻の親雲の多くはスーパーセルであり，スーパーセルの発生環境は予測できる技術があって気象庁等でも活用されていることを述べてきた。ここでは，本検討に用いる突風関連指数について説明する。

図 2.2.4.2.1 に竜巻の発生メカニズムを示す。スーパーセルが発生しやすい環境場として，大気下層の鉛直シア（異なる高度間での風向・風速差）と，強い上昇気流を起こすきっかけとしての不安定な大気場が必要である。本検討では，大気的不安定度を表す指標として「CAPE」，鉛直シアに伴って発生する水平渦度が親雲に取り込まれる度合いを表す指標として「SReH」を採用し，両者の指標が同時に高くなる頻度について，地域的な特徴を確認する分析を行った。

SReH 及び CAPE について以下に説明する。



風向・風速差による渦の発生      上昇気流の発生      竜巻の発生

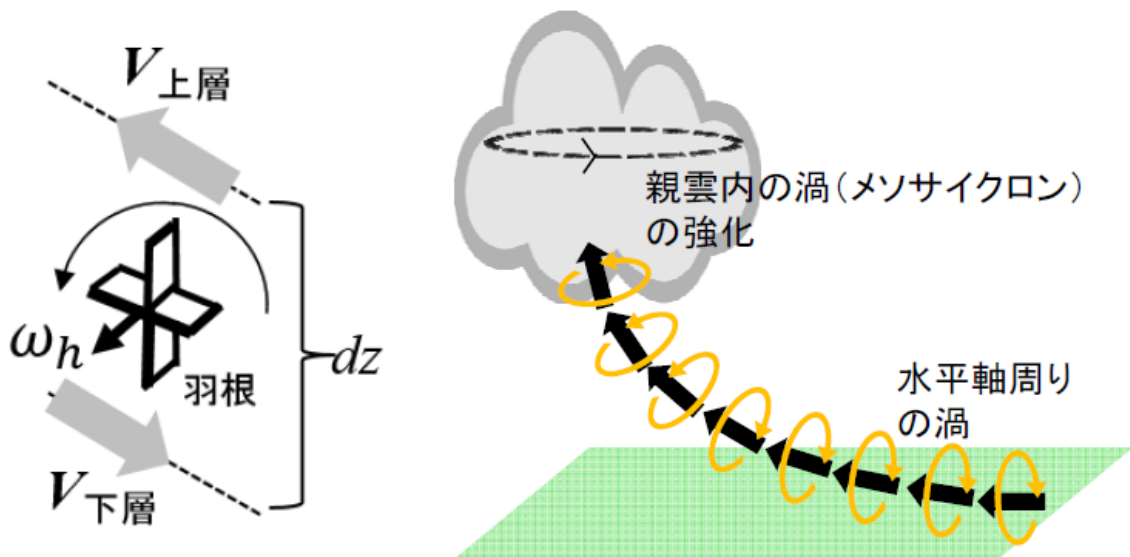
図 2.2.4.2.1 竜巻の発生メカニズム\*

※ : U.S. DEPARTMENT OF COMMERCE (National Oceanic and Atmospheric Administration, National Weather Service), A Preparedness Guide Including Tornado Safety Information for Schools

(1) SReH (Storm Relative Helicity : ストームの動きに相対的なヘリシティ) 風向・風速差により発生した渦度が親雲に取り込まれる度合いを示し、値が大きいほど、積乱雲がスーパーセルに発達しやすい。(図 2.2.4.2.2)

$$SReH = \int_{\text{地上}}^{\text{高度3km}} (\mathbf{V} - \mathbf{C}) \cdot \boldsymbol{\omega} dz$$

V : 水平風速ベクトル C : ストームの移動速度  
 $\omega$  : 鉛直シアに伴う水平渦度



水平渦度生成に関する模式図      水平渦度の親雲への輸送に関する模式図

図 2.2.4.2.2 SReH の算出概念\*

※ : 軽水型原子力発電所の竜巻影響評価における設計竜巻風速および飛来物速度の設定に関するガイドライン, 日本保全学会, 原子力規制関連事項検討会, 2015



(2) CAPE (Convective Available Potential Energy : 対流有効位置エネルギー)  
 上昇気流の発達しやすさを表し、値が大きいほど背の高い積乱雲に発達し得るため、大気的不安定度の指標となる。(図 2. 2. 4. 2. 3)

$$CAPE = \int_{LFC}^{EL} g \frac{\theta'_e(z) - \theta_e(z)}{\theta_e(z)} dz$$

$g$  : 重力加速度  $\theta'_e$  : 下層の空気塊を持ち上げた際の相当温位  
 $\theta_e$  : ストーム周囲の相当温位  $dz$  : 鉛直方向の層厚

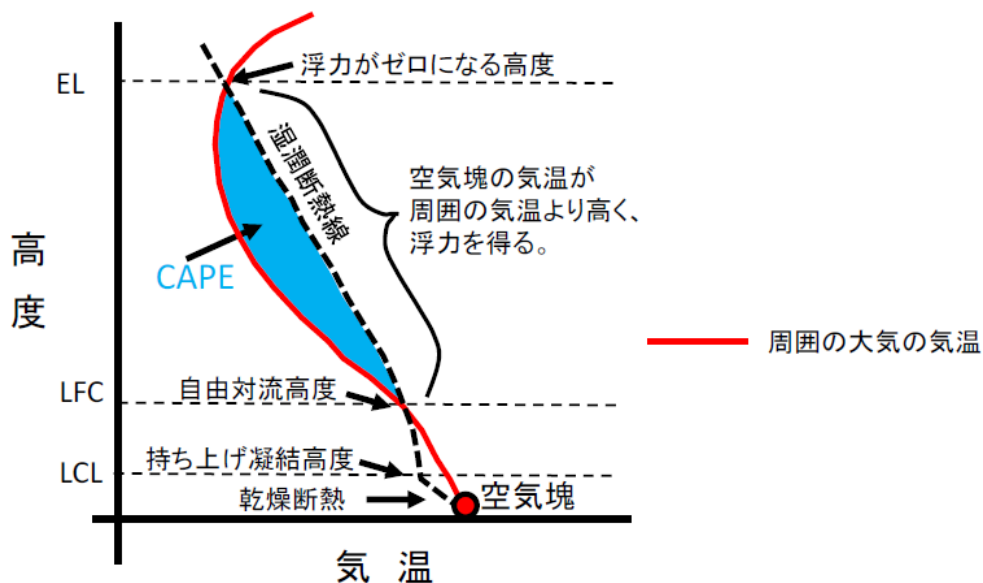


図 2. 2. 4. 2. 3 CAPE の算出概念※

※ : 軽水型原子力発電所の竜巻影響評価における設計竜巻風速および飛来物速度の設定に関するガイドライン, 日本保全学会, 原子力規制関連事項検討会, 2015

(参考) 相当温位

温位とは、下式に示すように気温  $T$  と気圧  $p$  に関する量であり、ある空気塊を断熱的に基準圧力 1000hPa に戻したときの絶対温度である。

2 つの空気塊を比較した場合、温位の高い空気塊は軽く上昇しやすく (不安定であり)、単位体積中に含み得る水蒸気量が多いため、大きな積乱雲の発生につながる。相当温位は、空気塊に含まれる水蒸気の持っている潜熱 (水蒸気が凝結する際に空気塊の温度が上昇) の影響も考慮された温位である。

$$\theta = T \left( \frac{1000}{p} \right)^{\frac{R}{C_p}} \quad (R: \text{気体定数}, C_p: \text{定圧比熱})$$

### 2.2.4.3. 突風関連指数の地域性

これまでに発生した F3 竜巻に対する突風関連指数の分析結果を図 2.2.4.3.1 に示す。WRF モデル (Weather Research and Forecasting model) と呼ばれる数値気象モデルを用いて当時の気象場を解析 (再現) し、それをもとに突風関連指数を算出している。図 2.2.4.3.1 をみると、季節によって CAPE の値が大きく異なるものの、F3 竜巻事例では共通して SReH と CAPE の両方が大きくなる傾向が見られた。

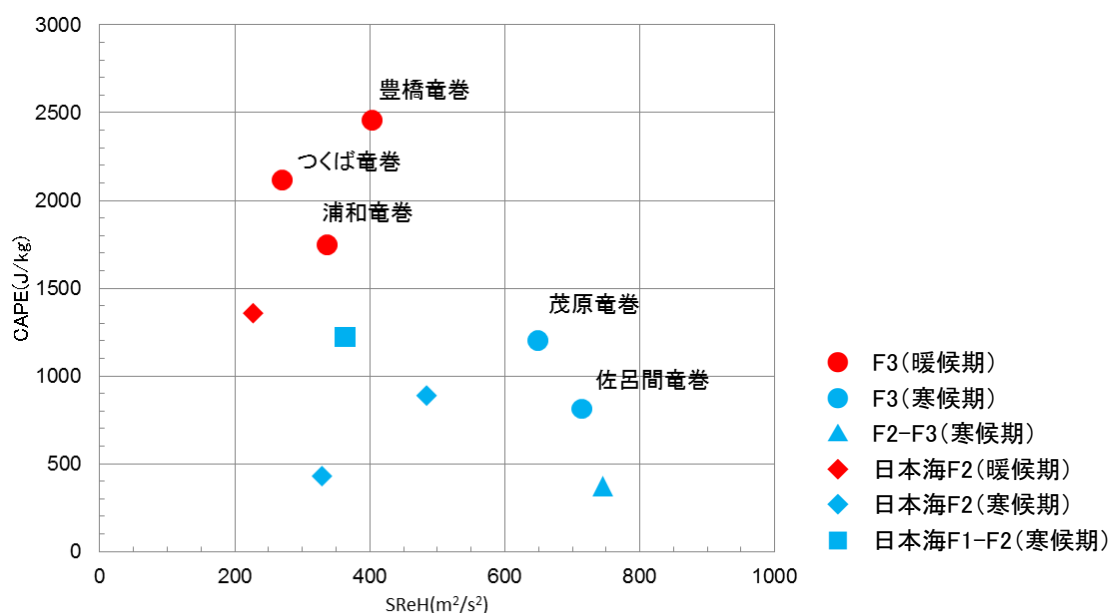


図 2.2.4.3.1 F3 竜巻に対する突風関連指数の分析結果

大きな竜巻を引き起こすスーパーセルの発生要因の指標である SReH と CAPE について、国内で (太平洋側で) 発生した F3 竜巻では、SReH と CAPE の両方が大きな値をとる傾向が見られる。また、これまでに発生した国内における F2-F3 を含めた全ての F3 竜巻 (6 個) は、スーパーセルを伴っていたことが報告されている。

したがって、SReH と CAPE それぞれに対して閾値を設け、その閾値を同時に超える頻度 (以下、同時超過頻度と呼ぶ。) を分析することにより、スーパーセルに伴って発生するような大規模な竜巻の発生環境を観点とした地域性を見出すことができると考えられる。

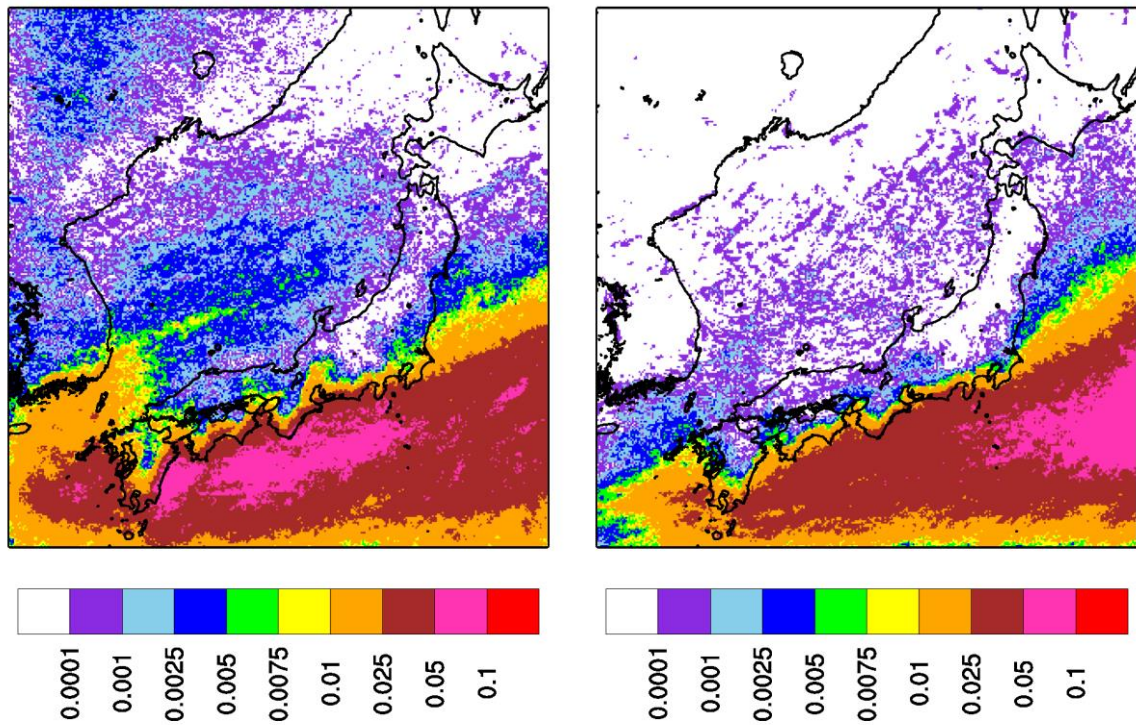
### 2.2.4.4 突風関連指数の同時超過頻度による地域特性の検討

SReH と CAPE の閾値については、図 2.2.4.4.1 の F3 竜巻のデータをもとに、実際の竜巻発生地点と対応するよう、下記のように設定した。また、CAPE の閾値については、緯度・季節で絶対値が大きく変わるため、5 月～10 月 (暖候期) 及び 11 月～4 月 (寒候期) に分けて閾値を設定した。また、竜巻発生時には少なからず降水がもたらされるため、降水量の閾値を設定した。

設定した閾値は、以下の通りとした。

[5月-10月(暖候期)] SReH: 350 m<sup>2</sup>/s<sup>2</sup> 最大 CAPE: 1200 J/kg 降水量: 4 mm/hr  
 [11月-4月(寒候期)] SReH: 350 m<sup>2</sup>/s<sup>2</sup> 最大 CAPE: 500 J/kg 降水量: 4 mm/hr

図 2.2.4.4.1 は、1961 年～2010 年までの 50 年間にわたって 1 時間ごとに解析されたデータをもとに、SReH と CAPE の同時超過頻度分布をマップ化したものである。また、気象庁「竜巻等の突風データベース」で確認された F2-F3 竜巻及び F3 竜巻の発生箇所を図 2.2.4.4.2 に示す。



暖候期 5月～10月

寒候期 11月～4月

図 2.2.4.4.1 F3 規模以上を対象とした SReH, CAPE 同時超過頻度分布 (単位: %)

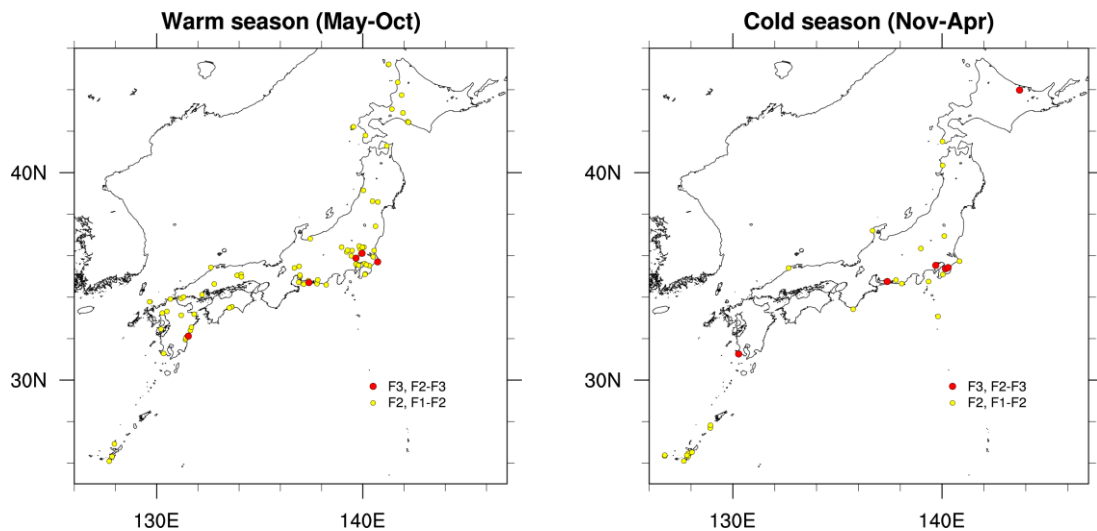


図 2.2.4.4.2 F2 規模以上の竜巻の発生箇所

(左: 暖候期, 右: 寒候期; 気象庁「竜巻等の突風データベース」による)

突風関連指数による、大規模な竜巻形成につながる環境場の発生頻度分析を行った結果、太平洋側、九州太平洋側・東シナ海側で頻度が高くなっているのに比べて、日本海側の値は1～2オーダー以下の頻度となることが分かった。

以上より、スーパーセルに伴って発生する大規模な竜巻形成につながる環境場の発生頻度分布の観点からも、太平洋側と竜巻検討地域で大きな地域特性の違いがあることを確認した。

#### 2.2.4.5. 佐呂間町で発生した竜巻について

突風関連指数を用いた解析結果から、F3 規模以上の竜巻が発生しやすいとされる地域が分かったが、そのエリアに含まれていない北海道網走支庁佐呂間町では2006年11月にF3 竜巻が発生している（以下、「佐呂間竜巻」という。）。

佐呂間竜巻は、太平洋沿岸で発生した竜巻と比較すると、

- ・国内で唯一内陸部（丘陵地の麓）において発生した竜巻である
- ・F3 竜巻としては継続時間（1分）と移動距離（約1.4km）が非常に短かったという点で異なっている。

佐呂間竜巻の発生した地域では、太平洋側からの暖湿流が小高い丘を越えて流入するような地形になっており、平野部の冷気流とぶつかることにより大きな上層・下層間の風向差が生じる環境場となっていた。（図2.2.4.5.1、図2.2.4.5.2）

また、日高山脈の東側では、山を越えた冷気流と太平洋側の暖気流がぶつかる地点となっており、ここで発生した親雲が山脈沿いに北上しながら持続的に発達し、佐呂間地域でF3 規模の竜巻を形成するに至ったと考えられる。

これらの発生メカニズムについて、図2.2.4.5.3 に模式的に示す。

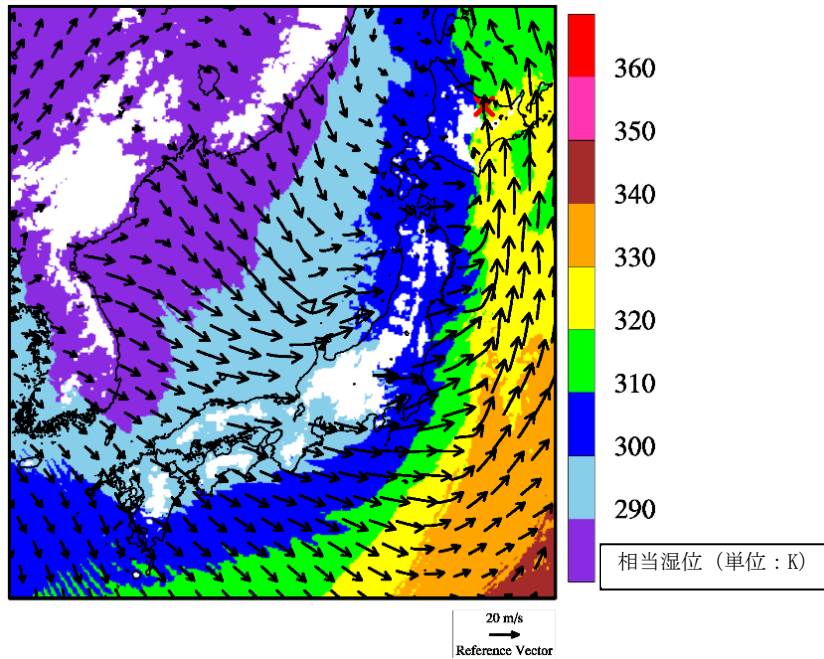
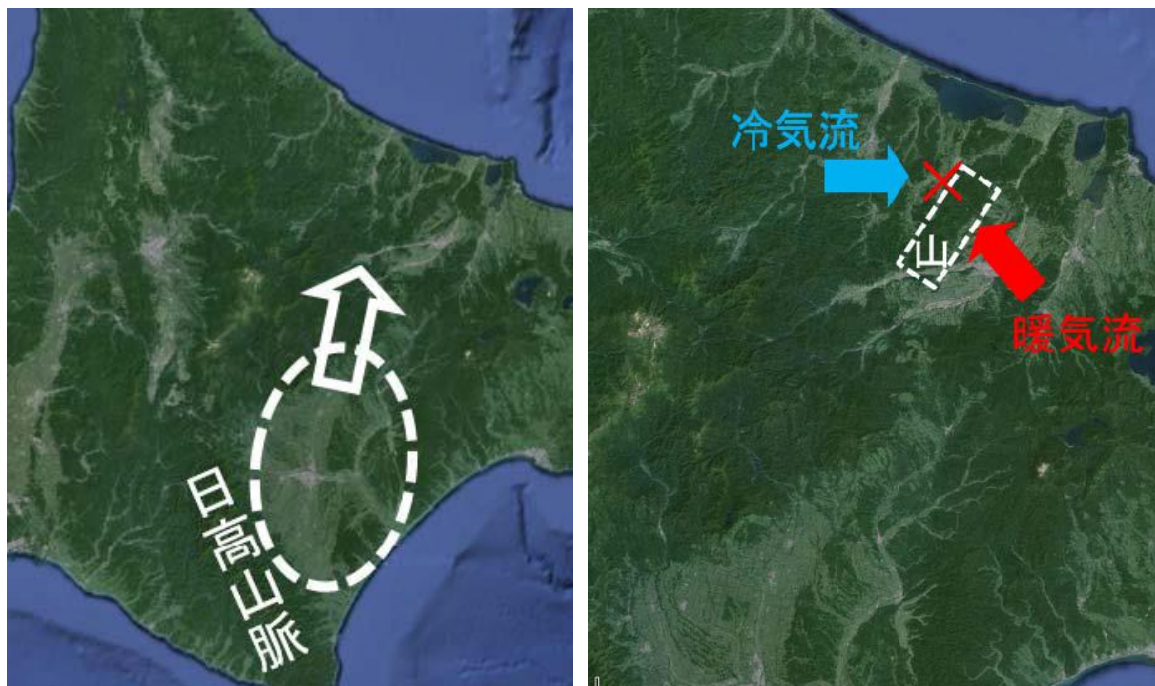


図 2. 2. 4. 5. 1 佐呂間竜巻発生時の風向・風速及び相当湿位の分布 (海拔 500m 高度)



親雲の発生位置 (点線内) と移動方向 竜巻の発生位置 (×) と影響が指摘される山 (点線部)

図 2. 2. 4. 5. 2 親雲の発生箇所と移動方向 (左) 及び竜巻の発生箇所 (右) ※  
 ※: 軽水型原子力発電所の竜巻影響評価における設計竜巻風速および飛来物速度の設定に関するガイドライン, 日本保全学会, 原子力規制関連事項検討会, 2015

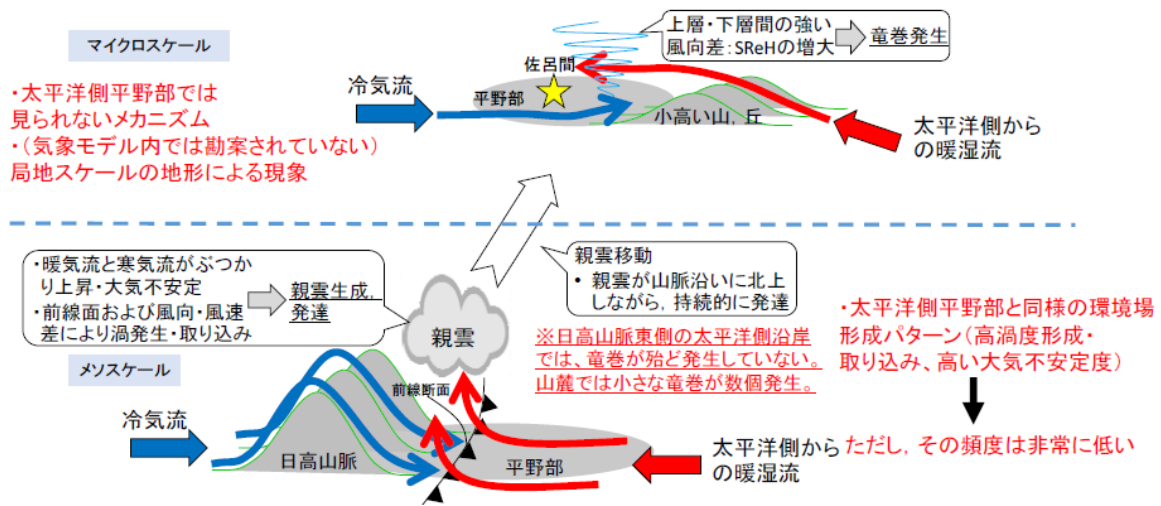


図 2.2.4.5.3 佐呂間竜巻の発生メカニズムに関する模式図\*

※：軽水型原子力発電所の竜巻影響評価における設計竜巻風速および飛来物速度の設定に関するガイドライン，日本保全学会，原子力規制関連事項検討会，2015

このように、佐呂間竜巻の発生メカニズムは、太平洋側沿岸域にて発生しているF3竜巻のメカニズムとは大きく異なっており、竜巻の持続時間・被害長さも大きく異なっている。

竜巻影響評価における取り扱いとしては、基準竜巻設定で対象としている地域性・空間スケールよりも局地的な地形影響を受けており、そういった影響については、設計竜巻 $V_D$ の設定時に考慮するのがガイドの趣旨に沿ったものとなる。

考慮する際のポイントは、以下の2点である。

- ・太平洋側からの暖湿流が高標高山岳等に遮断されずに直接流入し得る地域である。
- ・近隣地形（数キロ程度四方の範囲）において、（太平洋側からの）暖気流の流入する風上側に尾根状の丘・山が存在すること。

その観点で島根原子力発電所の地形を確認すると、以下のように整理できる。

- ・本州中央部及び四国に高標高山岳が存在するため、太平洋側から暖湿流が直接流入しない。（図 2.2.4.5.4）
- ・日本海側で発達する気流は、主に西から東へ移動する傾向が強く、気流の流入する風上側（海側）に尾根状の丘、山が存在しない。

したがって、島根原子力発電所で佐呂間竜巻と同様な地形条件にはなっていないことを確認した。

以上の検討結果より、竜巻発生要因及び発生する竜巻の規模には地域性があることが示され、その観点から島根原子力発電所の竜巻検討地域として、北海道から山陰地方にかけての日本海沿岸を竜巻検討地域として設定することが妥当であることが確認できた。



図 2.2.4.5.4 島根原子力発電所周辺地形図  
 (国土地理院「電子国土Web」より作成)

### 2.3. 基準竜巻の最大風速 ( $V_B$ ) の設定

基準竜巻の最大風速は、過去に発生した竜巻による最大風速 ( $V_{B1}$ ) 及び竜巻最大風速のハザード曲線による最大風速 ( $V_{B2}$ ) のうち、大きな風速を設定する。

#### 2.3.1. 過去に発生した竜巻による最大風速 ( $V_{B1}$ )

表 2.3.1.1 に竜巻検討地域で過去に発生した F1 より大きい竜巻の観測記録を示す。表 2.3.1.1 より竜巻検討地域で発生した過去最大竜巻は F2 であり、F スケールと風速の関係より風速は 50~69m/s であることから、 $V_{B1}$  は F2 の風速範囲の上限値 69m/s とする。

表 2.3.1.1 竜巻検討地域における竜巻の観測記録 (F1 より大きい竜巻)  
(気象庁「竜巻等の突風データベース」より作成)

発生日時	発生場所		F スケール※	総観場
	都道府県	市町村		
1962年09月28日 14時20分	北海道 宗谷支庁	東利尻町	(F2)	寒冷前線
1971年10月17日 05時00分	北海道 留萌支庁	羽幌町	(F2)	寒気の移流
1974年10月03日 19時05分	北海道 檜山支庁	奥尻郡奥尻町	(F1～F2)	温暖前線
1974年10月20日 15時00分	北海道 檜山支庁	檜山郡上ノ国 町	(F1～F2)	寒冷前線
1975年05月31日 18時10分	島根県	簸川郡大社町	(F2)	日本海低気圧 局地性 じょう乱 寒気の移流
1975年09月08日 01時30分	北海道 檜山支庁	奥尻郡奥尻町	(F1～F2)	日本海低気圧 暖気の 移流
1979年11月02日 01時58分	北海道 渡島支庁	松前郡松前町	(F2)	日本海低気圧 温暖前 線
1989年03月16日 19時20分	島根県	簸川郡大社町	(F2)	局地性じょう乱 寒気 の移流
1990年04月06日 02時55分	石川県	羽咋郡富来町	F2	オホーツク海低気圧 気圧の谷
1999年11月25日 15時40分	秋田県	八森町	(F1～F2)	日本海低気圧 寒冷前 線

※ Fスケールは、ア) 被害の詳細な情報等から推定できたもの、イ) 文献等からの引用又は被害のおおまかな情報等から推定したもの、があり、F2以上の事例ではア)とイ)を区別し、イ)の場合には値を括弧で囲んでいる。

### 2.3.2. 竜巻最大風速のハザード曲線の求め方【添付資料 2.3 2.3.1】

竜巻最大風速のハザード曲線は、気象庁「竜巻等の突風データベース」より竜巻検討地域における竜巻の観測記録を抽出・評価し、既往の算定法(Wen&Chu 及び Garson et al.)に基づき算定した。具体的な算定方法は、東京工芸大学委託成果を参考とし、図 2.3.2.1 に示すフローに従いハザード曲線を算定した。なお、ハザード曲線は、竜巻検討地域の竜巻特性を適切に考慮できる海岸線から海側、陸側それぞれ 5km の範囲内で算定した。加えて、竜巻検討地域において過去に発生した竜巻は、海上発生の F スケール不明の竜巻が半数以上を占める偏った発生となっていることや竜巻発生確認数にばらつきがあることを踏まえ、竜巻影響評価ガイドに基づき、ハザード曲線に保守性をもたせるために竜巻検討地域を海岸線に沿って 1km 範囲ごとに短冊状に細分化した場合のハザード曲線も算定した。【添付資料 2.3 2.3.6】



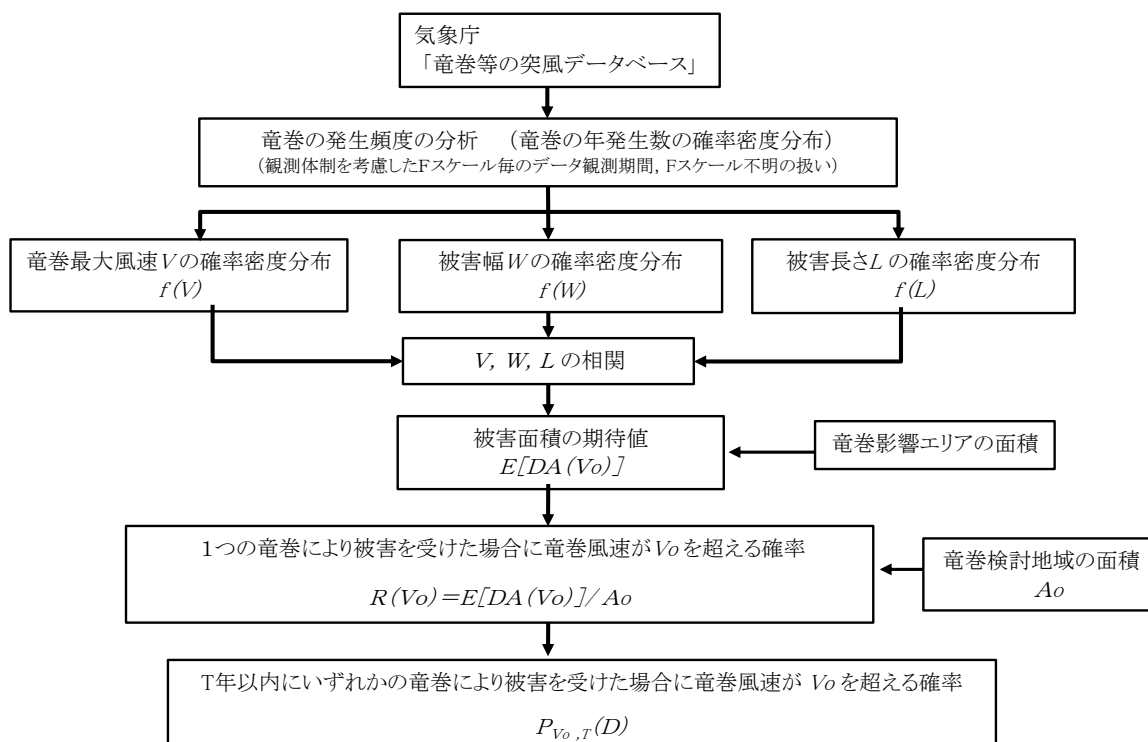


図 2.3.2.1 竜巻最大風速ハザード曲線の算定フロー

### 2.3.3. 海岸線から陸側及び海側それぞれ 5km 全域での評価

本評価では、竜巻検討地域外で発生して竜巻検討地域内に移動した竜巻である通過竜巻も発生数にカウントする。被害幅及び被害長さは、それぞれ被害全幅及び被害全長を用いる。

### 2.3.4. 竜巻の発生頻度の分析【添付資料 2.3 2.3.2】

気象庁「竜巻等の突風データベース」をもとに、1961年1月～2012年6月までの51.5年間の統計量をFスケール別に算出する。なお、観測体制の変遷による観測データ品質のばらつき(図 2.3.4.1 参照)を踏まえ、以下の①～③の基本的な考え方に基づいて整理を行う。

- ① 被害が小さくて見過ごされやすい F0 及び F 不明竜巻は、観測体制が強化された 2007 年以降の年間発生数や標準偏差を採用する。
- ② 被害が比較的軽微な F1 竜巻に対しては、観測体制が整備された 1991 年以降の年間発生数や標準偏差を採用する。
- ③ 被害が比較的大きく見逃されることが少ない F2, F3 竜巻については、観測データが整備された 1961 年以降の全期間の年間発生数や標準偏差を採用する。

また、F スケール不明の竜巻については、以下の取扱いを行う。

陸上で発生した竜巻（以下、「陸上竜巻」という。）及び海上で発生して陸上へ移動した竜巻については、被害があつて初めてその F スケールが推定されるため、

陸上での F スケール不明の竜巻は、被害が少ない F0 竜巻に分類した。海上で発生しその後上陸しなかった竜巻（以下、「海上竜巻」という。）については、その竜巻のスケールを推定することは困難であることから、「海岸線から海上 5km の範囲における海上竜巻の発生特性が、海岸線から内陸 5km の範囲における陸上竜巻の発生特性と同様である。」という仮定に基づいて各 F スケールに分類する。

上記の基本的な考え方に基づいて観測記録を整理・推定した結果を表 2.3.4.1 に示す。

なお、竜巻発生確率モデルは、ガイドに従ってポアソン過程に従うものとし、年発生数の確率分布には、ポリヤ分布を適用した。

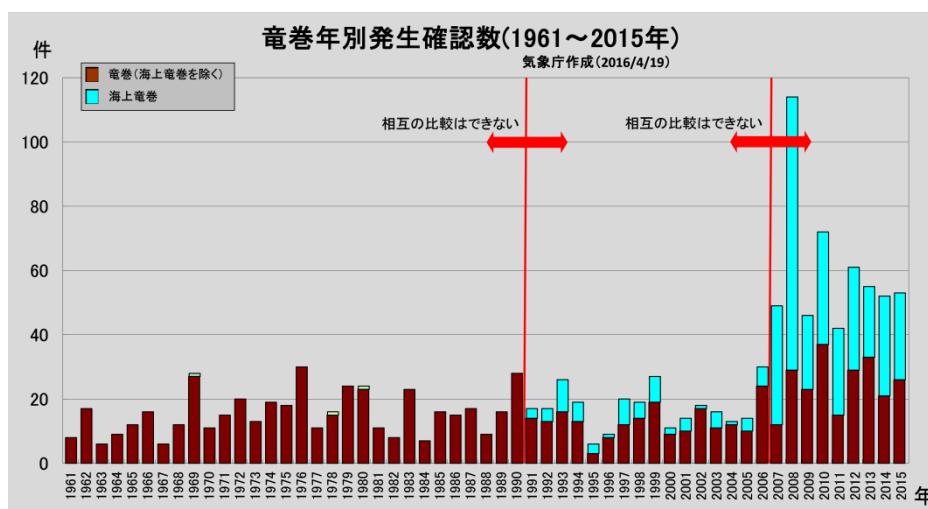


図 2.3.4.1 竜巻の年別発生確認数（気象庁 HP より）

表 2.3.4.1 竜巻発生数の解析結果

竜巻検討地域 (沿岸±5km)	発生数の統計	小計	竜巻スケール				不明		総数 (含む不明)
			F0	F1	F2	F3	(陸上)	(海上)	
1961~ 2012/6 (51.5年間)	期間内総数	74	24	40	10	0	13	105	192
	平均値(年)	1.44	0.47	0.78	0.19	—	0.25	2.04	3.73
	標準偏差(年)	2.25	1.75	0.90	0.49	—	0.71	5.92	7.81
	CV(年)	1.56	3.76	1.16	2.52	—	2.83	2.90	2.09
1991~ 2012/6 (21.5年間)	期間内総数	46	24	21	1	0	12	105	163
	平均値(年)	2.14	1.12	0.98	0.05	—	0.56	4.88	7.58
	標準偏差(年)	3.11	2.61	0.91	0.22	—	1.02	8.49	11.07
	CV(年)	1.45	2.34	0.93	4.64	—	1.83	1.74	1.46
2007~ 2012/6 (5.5年間)	期間内総数	27	22	5	0	0	7	91	125
	平均値(年)	4.91	4.00	0.91	—	—	1.27	16.55	22.73
	標準偏差(年)	5.55	4.32	1.24	—	—	1.69	11.41	15.10
	CV(年)	1.13	1.08	1.36	—	—	1.33	0.69	0.66
擬似 51.5年間 (陸上竜巻)	期間内総数	333	206	51	10	0	66	853	1186
	平均値(年)	6.44	4.00	0.98	0.19	—	1.27	16.55	22.99
	標準偏差(年)	4.75	4.32	0.91	0.49	—	1.69	11.41	12.36
	CV(年)	0.74	1.08	0.93	2.52	—	1.33	0.69	0.54
擬似 51.5年間 (全竜巻)	期間内総数	1187	969	182	36	0	0	0	1187
	平均値(年)	23.05	18.82	3.53	0.70	—	—	—	23.05
	標準偏差(年)	8.97	8.76	1.72	0.92	—	—	—	8.97
	CV(年)	0.39	0.47	0.49	1.32	—	—	—	0.39

2.3.5. 竜巻風速，被害幅及び被害長さの確率分布並びに相関係数【添付資料 2.3  
2.3.3,4】

竜巻ハザードを評価するためには，一つの竜巻が発生した際の，竜巻風速，被害幅及び被害長さの確率分布が必要となることから，これらの確率密度分布を求める。なお，竜巻風速の確率密度分布は，F スケール別の竜巻発生数から求める。

竜巻検討地域における 51.5 年間の竜巻の発生数，被害幅及び被害長さをもとに，確率密度分布についてはガイド及びガイドが参考としている東京工芸大学委託成果を参照し，対数正規分布に従うものとする。(図 2.3.5.1～図 2.3.5.6)

なお，擬似的な竜巻の作成において被害幅又は被害長さの情報がない竜巻には，観測された竜巻と同程度の竜巻を想定し，それに相当する被害幅又は被害長さを与えている。その際は，被害幅又は被害長さが大きいほうから優先的に用いることにより，保守的に評価を行う。

また，竜巻のハザードの計算においては，2 変量あるいは 3 変量の確率分布を対象とするため，竜巻風速，被害幅及び被害長さについての相関係数を求めた。表 2.3.5.1 に 1961 年以降の観測データのみを用いて，竜巻風速，被害幅及び被害長さについて相関係数を求めた結果を示す。

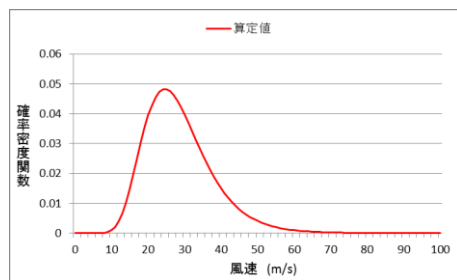


図2.3.5.1 竜巻風速の確率密度分布

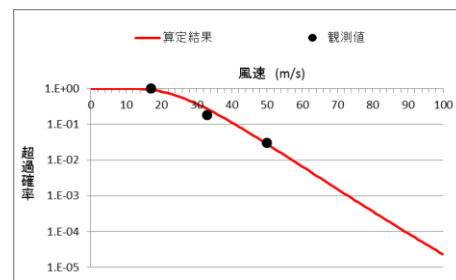


図2.3.5.2 竜巻風速の超過確率分布

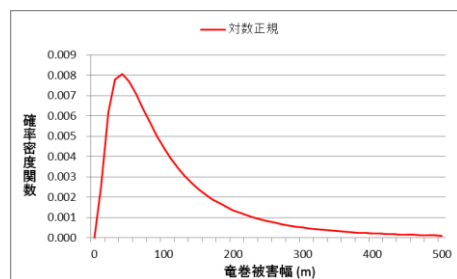


図2.3.5.3 被害幅の確率密度分布

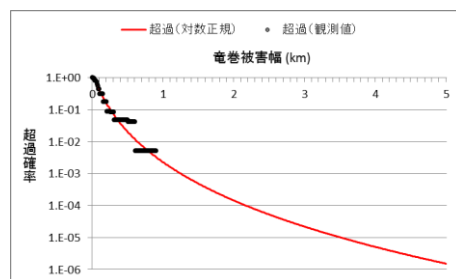


図2.3.5.4 被害幅の超過確率分布

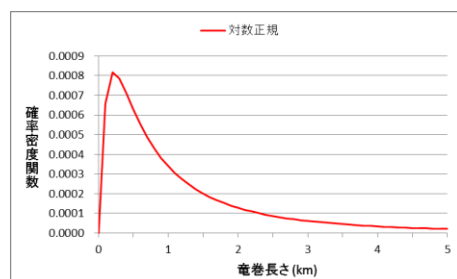


図 2.3.5.5 被害長さの確率密度分布

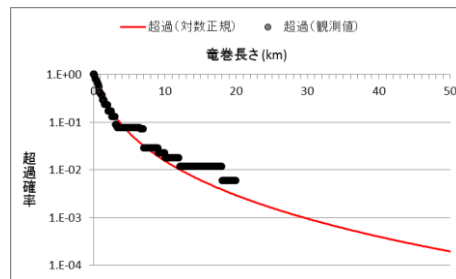


図 2.3.5.6 被害長さの超過確率分布

表 2.3.5.1 竜巻風速，被害幅及び被害長さの相関係数（単位なし）

相関係数	風速	被害幅	被害長さ
風速	1.000	-0.050 <sup>*</sup>	0.312
被害幅	-0.050 <sup>*</sup>	1.000	0.462
被害長さ	0.312	0.462	1.000

※風速と被害幅は無相関との知見が得られたため，ハザード算定の際には，相関係数 0 として計算

### 2.3.6. 竜巻影響エリアの設定

竜巻最大風速のハザード曲線による最大風速 ( $V_{B2}$ ) の算定にあたり， $V_{B2}$  の発生エリアである竜巻影響エリアを設定する。竜巻影響エリアは，島根原子力発電所 2 号炉の竜巻影響評価対象施設を十分な余裕をもって包絡するエリアとして設定する。

図 2.3.6.1 に竜巻影響エリアを示す。竜巻影響エリアは，島根原子力発電所 2 号炉の評価対象施設を包絡する円形のエリア（直径 450m，面積約  $1.6 \times 10^5 \text{m}^2$ ）として設定する。なお，竜巻影響エリアを円形とするため，竜巻の移動方向には依存性は生じない。

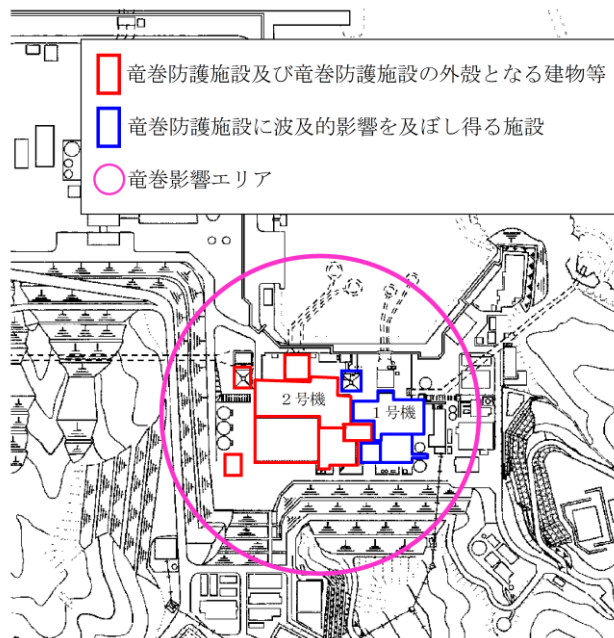


図 2.3.6.1 島根 2 号炉竜巻影響エリア

### 2.3.7. ハザードの算定【添付資料 2.3 2.3.5】

T 年以内にいずれかの竜巻に遭遇し，かつ竜巻風速が  $V_0$  以上となる確率を求める。竜巻の年発生数の確率密度分布としてポリヤ分布の適合性が高い。ポリヤ分

布は式(1)で示される。

$$P_T(N) = \frac{(vT)^N}{N!} (1 + \beta vT)^{-N-1/\beta} \prod_{k=1}^{N-1} (1 + \beta k) \quad (1)$$

ここで、

N : 竜巻の年発生数

v : 竜巻の年平均発生数

T : 年数

$\beta$  は分布パラメータであり式(2)で示される。

$$\beta = \left( \frac{\sigma^2}{v} - 1 \right) \times \frac{1}{v} \quad (2)$$

ここで、

$\sigma$  : 竜巻の年発生数の標準偏差

D をリスク評価対象構造物が風速  $V_0$  以上の竜巻に遭遇する事象と定義し、 $R(V_0)$  をリスク評価対象構造物が 1 つの竜巻に遭遇し、竜巻風速が  $V_0$  以上となる確率と定義すると、T 年以内にいずれかの竜巻に遭遇し、かつ竜巻風速が  $V_0$  以上となる確率は式(3)で示される。

$$P_{V_0, T}(D) = 1 - [1 + \beta v R(V_0) T]^{-1/\beta} \quad (3)$$

この  $R(V_0)$  は、竜巻影響評価の対象地域の面積を  $A_0$  (つまり竜巻検討地域の面積約 33,395km<sup>2</sup>)、1 つの竜巻の風速が  $V_0$  以上となる面積を  $DA(V_0)$  とすると式(4)で示される。

$$R(V_0) = \frac{E[DA(V_0)]}{A_0} \quad (4)$$

ここで、 $E[DA(V_0)]$  は、 $DA(V_0)$  の期待値を意味する。

本評価では、以下のようにして  $DA(V_0)$  の期待値を算出し、式(4)により  $R(V_0)$  を推定して、式(3)により  $P_{V_0, T}(D)$  を求める。風速を  $V$ 、被害幅  $w$ 、被害長さ  $l$ 、移動方向  $\alpha$  及び構造物の寸法を  $A, B$  とし、 $f(V, w, l)$  等の同時確率密度関数を用いると、 $DA(V_0)$  の期待値は式(5)で示される。

$$\begin{aligned} E[DA(V_0)] &= \int_0^\infty \int_0^\infty \int_0^\infty W(V_0) l f(V, w, l) dV dw dl \\ &+ \int_0^{2\pi} \int_0^\infty \int_0^\infty H(\alpha) l f(V, l, \alpha) dV dl d\alpha + \int_0^{2\pi} \int_0^\infty \int_0^\infty W(V_0) G(\alpha) f(V, w, \alpha) dV dw d\alpha \\ &+ AB \int_{V_0}^\infty f(V) dV \end{aligned} \quad (5)$$

ここで、 $W(V_0)$ は竜巻風速が $V_0$ 以上となる幅であり、式(6)で示される。

$H(\alpha)$ 及び $G(\alpha)$ はそれぞれ、竜巻の被害長さ及び被害幅方向に沿った面にリスク評価対象構造物を投影した時の長さであり、式(7)で示される。

$$W(V_0) = \left( \frac{V_{\min}}{V_0} \right)^{1/1.6} w \quad (6)$$

ここで、

$V_{\min}$ ：被害幅  $w$  内の最小竜巻風速

$V_0$ ：被害が発生する最小風速

$$\begin{aligned} H(\alpha) &= B |\sin \alpha| + A |\cos \alpha| \\ G(\alpha) &= A |\sin \alpha| + B |\cos \alpha| \end{aligned} \quad (7)$$

本評価ではリスク評価対象構造物を円形構造物（竜巻影響エリア）で設定しているため、 $H(\alpha)$ 、 $G(\alpha)$ ともに竜巻影響エリアの直径 450m で一定（竜巻の移動方向に依存しない）となる。円の直径を  $D_0$  とした場合の計算式は式(8)で示される。

$$\begin{aligned} E[DA(V_0)] &= \int_0^\infty \int_0^\infty \int_{V_0}^\infty W(V_0) l f(V, w, l) dV dw dl \\ &+ D_0 \int_0^\infty \int_{V_0}^\infty l f(V, l) dV dl + D_0 \int_0^\infty \int_{V_0}^\infty W(V_0) f(V, w) dV dw \\ &+ (D_0^2 \pi / 4) \int_{V_0}^\infty f(V) dV \end{aligned} \quad (8)$$

### 2.3.8. 竜巻最大風速のハザード曲線による最大風速( $V_{B2}$ )

海岸線から陸側及び海側それぞれ 5km 全域（竜巻検討地域）を対象に算定したハザード曲線、1km 範囲ごとに短冊状に細分化して算定したハザード曲線より、年超過確率  $10^{-5}$  における風速を求めると図 2.3.8.1 に示すとおりそれぞれ 60.8m/s、61.4m/s となった。

また、使用した竜巻の統計データの不確実性については検討を実施しており、F スケール不明の海上竜巻の発生数は、陸上竜巻の F スケール別発生比率で按分して取り扱っているが、竜巻検討地域を「北海道から山陰地方にかけての日本海沿岸」にすることに伴う竜巻ハザード曲線算出のためのデータの不確実性（日本海側は F スケール不明の海上竜巻が多い）を踏まえ、参照する年超過確率を  $10^{-5}$  から一桁下げた年超過確率  $10^{-6}$  における風速とすると、陸側及び海側 5km 全域での評価、1km 範囲ごとに細分化した評価ともに 78.0m/s となる。以上より、竜巻最大風速のハザード曲線による最大風速  $V_{B2}$  は 78m/s とする。

※ 設計基準事故の発生頻度が  $10^{-3}$ /年～ $10^{-4}$ /年（発電用軽水型原子炉施設に係る新安全基準骨子案に対する意見募集の結果について：平成 25 年 4 月 3 日技術基盤課）であることから、設計基準として考慮する竜巻の最大風速は年超過確率  $10^{-4}$  に設定することが妥当であると考えます。ただし、ガイドで竜巻最大風速のハザード曲線による最大風速 ( $V_{B2}$ ) の年超過確率は、 $10^{-5}$  を上回らないことが要求されていること、ハザードの不確実性があることを踏まえて保守的に  $10^{-4}$  より 1 桁下げて、参照する年超過確率は  $10^{-5}$  とするが、統計データの不確実性の検討を踏まえて保守的に  $10^{-5}$  より 1 桁下げて、竜巻最大風速のハザード曲線による最大風速 ( $V_{B2}$ ) の年超過確率は  $10^{-6}$  とする。

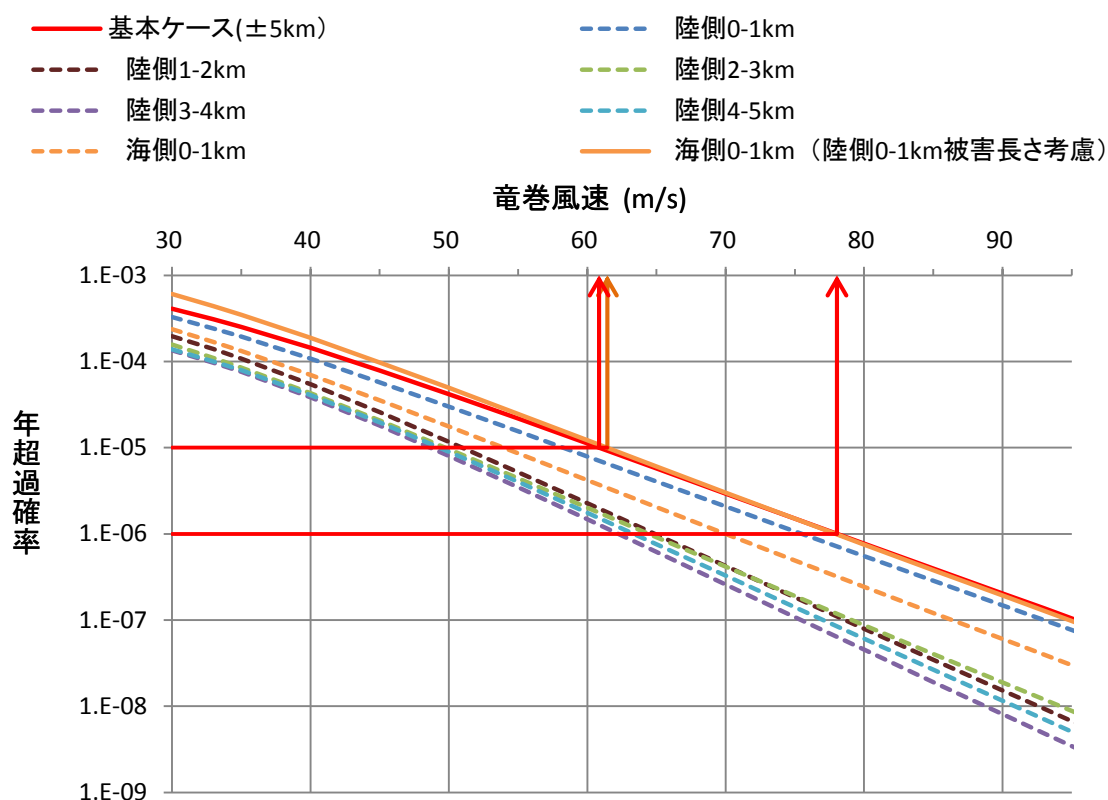
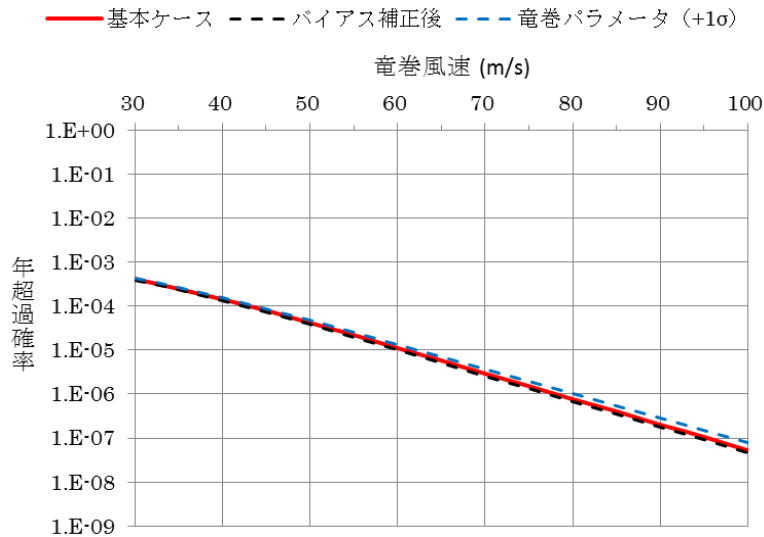


図 2.3.8.1 竜巻最大風速のハザード曲線  
(海側、陸側 5km 範囲及び 1km 範囲ごとに細分化した評価)

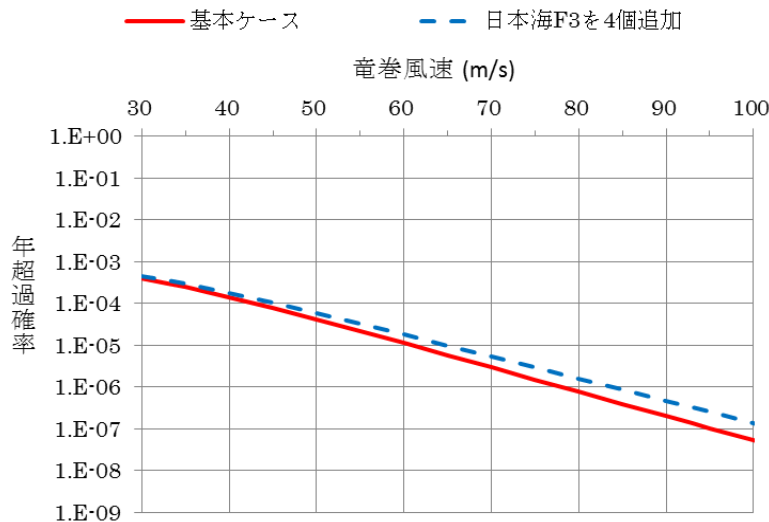
また、不確実要素のハザード算定結果への影響を検討した。

図 2.3.8.2(a)に示した、データ、確率分布形選択及びデータ量が少ないことによる不確実さを表したハザード曲線により、これらの不確実さが十分小さいことを確認した。

さらに、擬似データに F3 竜巻を 4 個追加した感度解析結果を図 2.3.8.2(b)に示す。この場合の年超過確率  $10^{-5}$  に相当する竜巻風速は 64.9m/s となり、かなり保守的な仮定をおいてもハザードへの影響は限定的であることから、データの高い安定性を確認した。



(a) バイアス補正後及び全パラメータ+1σのハザード



(b) 竜巻風速の年超過確率分布

図 2.3.8.2 ハザード不確実さ検討結果

<擬似データ無しの場合の解析>

擬似データの場合、Fスケールの小さな竜巻の割合が多く、幅や長さの変動が小さくなる傾向がある。そのため、3種類の竜巻パラメータがすべて判明している52個の竜巻観測データのみを用いて同様の検討を実施した。即ち、観測データは均質なデータから成り、擬似データは存在しない。パラメータの推定結果を表2.3.8.1、計算条件の一覧を表2.3.8.2、ハザードの算定結果を図2.3.8.3、図2.3.8.4、及び表2.3.8.3に示す。擬似データの場合と比較して、Jackknife推定値は大きくなっていることがわかる。したがってハザードの算定結果についても大きくなる傾向があるものの、発生数の違いを考慮し年超過確率 $10^{-6}$ の最大風速を見ても、風速値の差は10m/s程度であることが確認できる。



表 2.3.8.1 Jackknife 法により得られた竜巻パラメータの推定結果  
(擬似データ無し)

日本海(不明無し) 52個	風速		被害幅		被害長さ		相関係数		
	平均値	標準偏差	平均値	標準偏差	平均値	標準偏差	U~W	U~L	W~L
平均	36.337	11.655	129.8	154.8	1815.4	2227.7	0.0023	0.3210	0.4399
標準偏差	0.226	0.143	3.0	6.5	43.3	59.7	0.0090	0.0168	0.0171
全データ	36.337	11.656	129.8	154.9	1815.4	2228.5	0.0000	0.3210	0.4399
min	35.873	11.277	114.7	111.3	1654.9	1923.5	0.0000	0.2714	0.3840
max	36.559	11.749	132.3	156.4	1849.0	2250.7	0.0590	0.3692	0.4879
バイアス	0.002	-0.045	0.0	-7.0	0.0	-40.7	0.1154	-0.0022	0.0006
Jackknife 推定値	36.335	11.700	129.8	162.0	1815.4	2269.3	-0.1154	0.3232	0.4393
Jackknife 推定幅	1.616	1.021	21.5	46.7	309.0	426.1	0.0645	0.1198	0.1221

表 2.3.8.2 ハザードの計算条件 (擬似データ無し)

ケース名	統計量	発生数	風速	被害幅	被害長さ	U~W	U~L	W~L
基本(全データ)	平均	1.010	36.3365	129.769	1815.385	0.0023	0.3210	0.4399
	標準偏差		11.6550	154.791	2227.749			
バイアス補正後	平均	1.010	36.3346	129.759	1815.400	-0.1154	0.3232	0.4393
	標準偏差		11.7004	161.961	2269.288			
風速・幅・長さ・相関 (+1σ)	平均	1.010	37.9509	151.243	2124.444	-0.0510	0.4429	0.5614
	標準偏差		12.7212	208.638	2695.378			

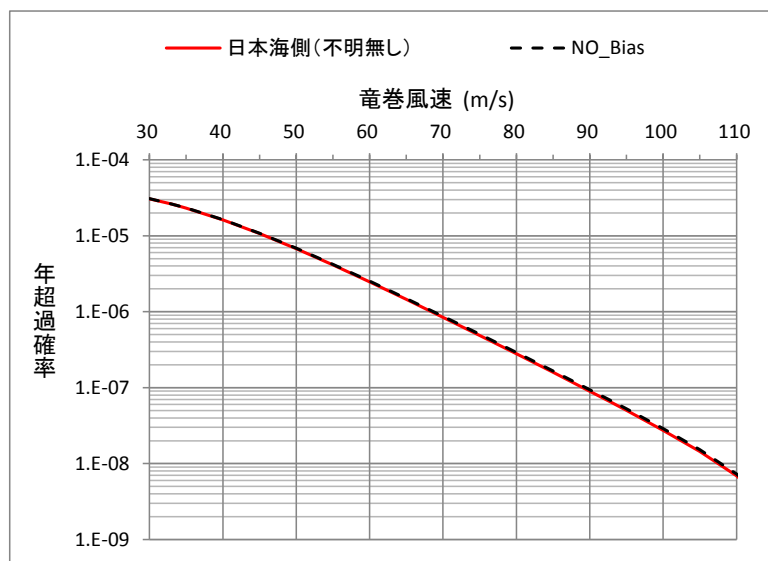


図 2.3.8.3 基本ケースとバイアス補正後ケースのハザード算定結果比較  
(擬似データ無し)

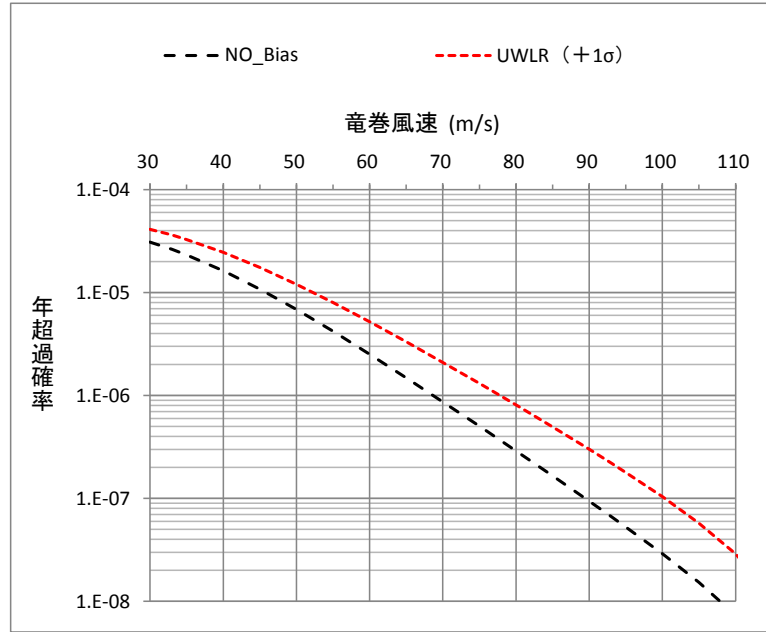


図 2.3.8.4 バイアス補正後ケースと全パラメータ+1 $\sigma$  ケースのハザード算定結果比較 (擬似データ無し)

表 2.3.8.3 ハザード算定結果 (擬似データ無し)

ケース名	超過確率に対応する竜巻風速				バイアス補正後の竜巻風速との差		
	1.E-05	1.E-06	1.E-07	1.E-08	1.E-05	1.E-06	1.E-07
基本(全データ)	45.73	68.45	89.07	107.48	-0.12	-0.26	-0.40
バイアス補正後	45.85	68.71	89.47	107.88	-	-	-
風速・幅・長さ・相関(+1 $\sigma$ )	52.30	77.80	100.34		6.45	9.09	10.87

### 2.3.9. 基準竜巻の最大風速 ( $V_B$ )

過去に発生した竜巻による最大風速  $V_{B1}=69$  m/s 及び竜巻最大風速のハザード曲線による最大風速  $V_{B2}=78$ m/s のうち、大きい風速である 78m/s を島根原子力発電所における基準竜巻の最大風速  $V_B$  とする。(表 2.3.9.1)

使用した竜巻の統計データの不確実性については前項までで検討を実施しているが、将来的な気候変動により規模や発生数の増加傾向となることは否定できない。

将来的な気候変動として現時点でも予想されるものとしては地球温暖化が挙げられる。地球温暖化が進行した際には台風の強度が強まる傾向が考えられ、現時点の経験データでは台風起因の竜巻は日本海側では観測されていないものの将来的には日本海側においても発生する可能性がある。ただし台風は北上するにつれて、山岳での暖湿流遮断による安定化や海水温度低下による水蒸気供給量低下により衰弱しやすい特性を有していることから、仮に発生するとしても規模の大きな竜巻の発生は考えにくい。

将来的な気候変動についての現時点での予想は上記のとおりとなるが、気候変動を完全に予測することは難しいため、最新のデータ・知見をもって気候変動の

影響に注視し、竜巻検討地域や基準竜巻の最大風速は、必要に応じて見直しを実施していくものとする。

表 2.3.9.1 竜巻の最大風速の算定結果

項目	最大風速 [m/s]
過去に発生した竜巻による最大風速 $V_{B1}$	69
竜巻最大風速のハザード曲線による最大風速 $V_{B2}$	78
基準竜巻の最大風速 $V_B$	78

#### 2.3.10. 評価時点以降のデータ更新分について

上記の基準竜巻の検討には、検討実施時点での最新であった1961年1月～2012年6月までの竜巻データベースを用いているが、その後、気象庁により継続的にデータベースが更新されている\*。本状況においても、以下の理由より、最新データを参照した場合でも基準竜巻の最大風速は上記の評価結果を上回るものではなく、現時点での見直しは不要と判断している。

- ・2012年6月以降、竜巻検討地域において現時点での  $V_{B1}$  の風速 69m/s を超える竜巻が報告されていない。
- ・2012年6月以降、竜巻検討地域で観測された竜巻はF不明を除きF0若しくはF1相当のものであり、データベースの更新がハザードへ与える影響は軽微と考えられる。

※ 2019年3月末時点で、2016年3月までのデータ及び2016年4月以降の速報データが掲載されている。

#### 2.4. 設計竜巻の最大風速 ( $V_D$ ) の設定

島根原子力発電所が立地する地域の特性として、周辺の地形や竜巻の移動方向を考慮して、基準竜巻の最大風速の割り増しを検討し、設計竜巻の最大風速を設定する。

##### 2.4.1. 地形効果による竜巻風速への影響

地形効果が竜巻強度に及ぼす影響に関する知見として、(1)地形起伏による影響、(2)地表面粗度による影響、について既往の研究において示されており、その知見を踏まえ、島根原子力発電所周辺の地形効果による竜巻の増幅可能性について検討する。

##### (1) 地形起伏による影響

竜巻のような回転する流れでは、角運動量保存則により「回転の中心からの距離」及び「周方向の回転速度」の積が一定になるという性質がある。そのため、図 2.4.1.1 に示すとおり竜巻の渦が上り斜面を移動するとき（渦1から渦2へ移動する場合）、基本的に渦は弱まり、下り斜面を移動するときには強まる。

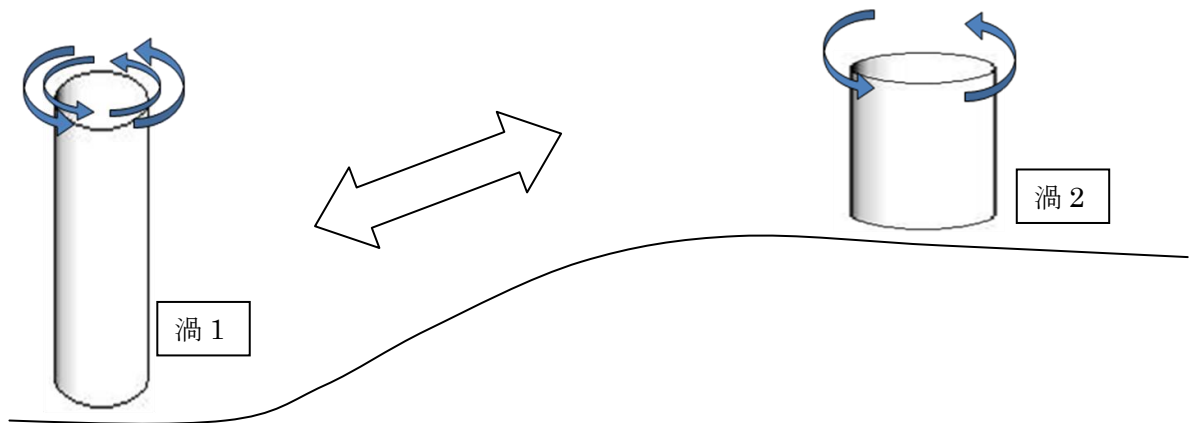


図 2.4.1.1 竜巻旋回流の地形影響に関する模式図

#### (2) 地表面粗度による影響

風は地表面の細かな凸凹が与える摩擦抵抗の影響を受けやすく、風速は、地表面において 0 となり上空に向かうにつれて増加する。地表面粗度は竜巻の旋回流を減衰させる効果を有し、地表面粗度の構成物が飛来物として運動することで風速が減衰することも示唆されていることから、地表面粗度の増加とともに竜巻に起因する強風の風速を低下させるといえる。

#### 2.4.2. 島根原子力発電所周辺の地形

島根原子力発電所敷地周辺の地形を図 2.4.2.1、島根原子力発電所東西方向の鉛直断面での地形起伏を図 2.4.2.2、島根原子力発電所敷地周辺の地表面粗度を図 2.4.2.3 に示す。発電所が立地する敷地は、北側を輪谷湾に面し、他の三方を山で囲まれている。

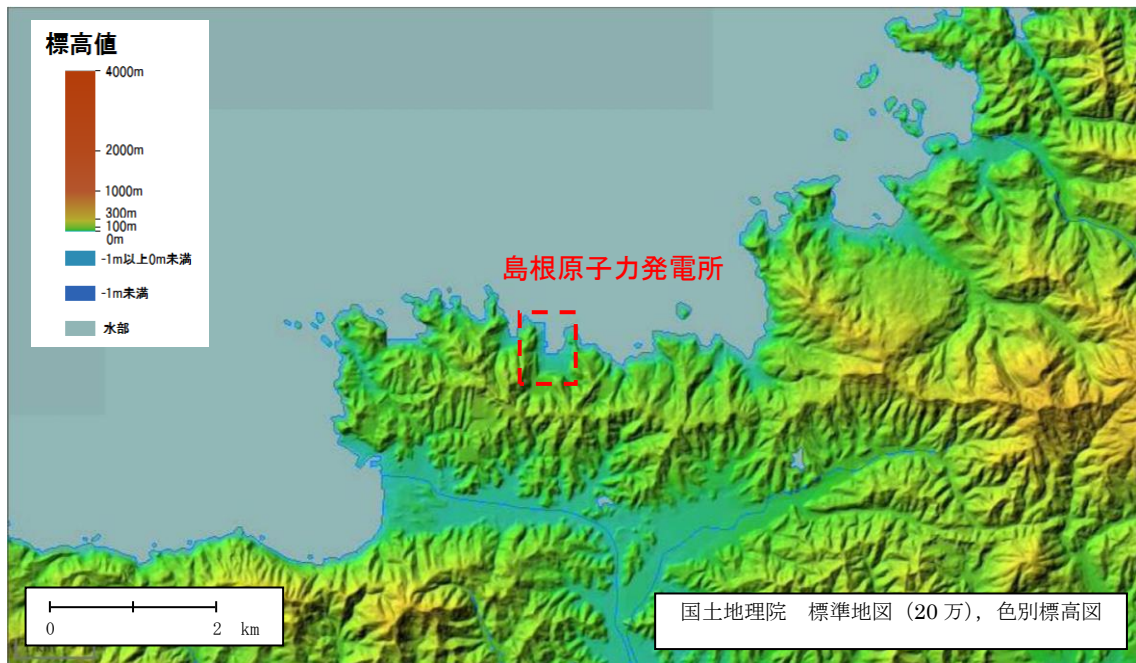


図2. 4. 2. 1 島根原子力発電所周辺の地形  
(国土地理院「電子国土Web」より作成)

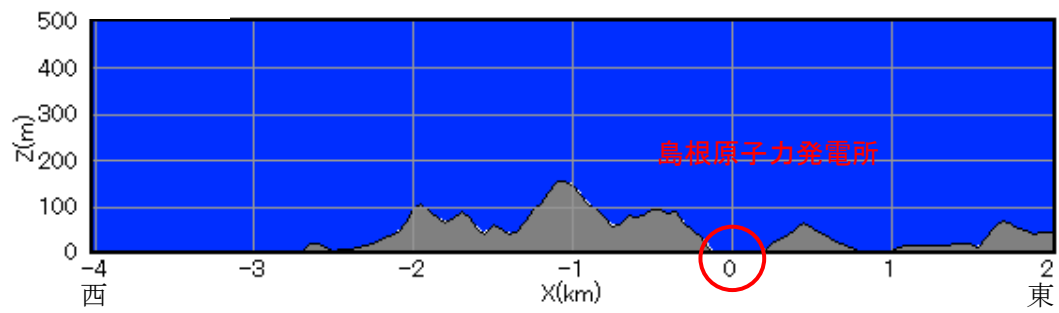


図2. 4. 2. 2 島根原子力発電所東西方向の鉛直断面での地形起伏

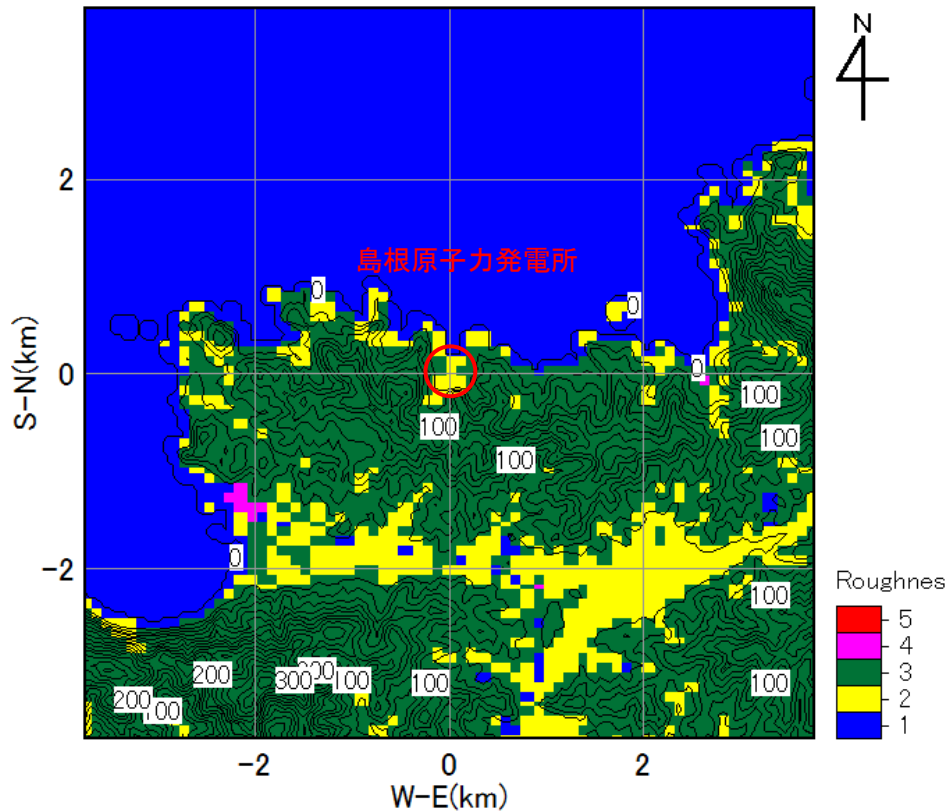


図2. 4. 2. 3 島根原子力発電所周辺の地表面粗度

#### 2. 4. 3. 竜巻の移動方向の分析

島根原子力発電所の周辺地域を対象に竜巻の移動方向に関する分析を行う。なお、分析の対象とする地域は、「原子力発電所の竜巻影響評価ガイド（案）及び解説」に示されている竜巻集中地域を参考に、集中地域⑥（鳥取県の一部）及び⑦（島根県の一部）とした。図 2. 4. 3. 1 に竜巻集中地域⑥及び⑦で発生した竜巻の移動方向、図 2. 4. 3. 2 に竜巻集中地域⑥及び⑦で発生した竜巻の移動方向の頻度を分析した結果を示す。竜巻の移動方向の分析の結果、島根原子力発電所周辺で発生する竜巻は、その大部分が海上又は沿岸部で発生しており、その移動方向は東に向かう頻度が高いことが確認できる。また、島根原子力発電所が立地する竜巻集中地域⑦では、発電所北方の海上から南（陸側）へ向かう頻度が高いことが確認できる。

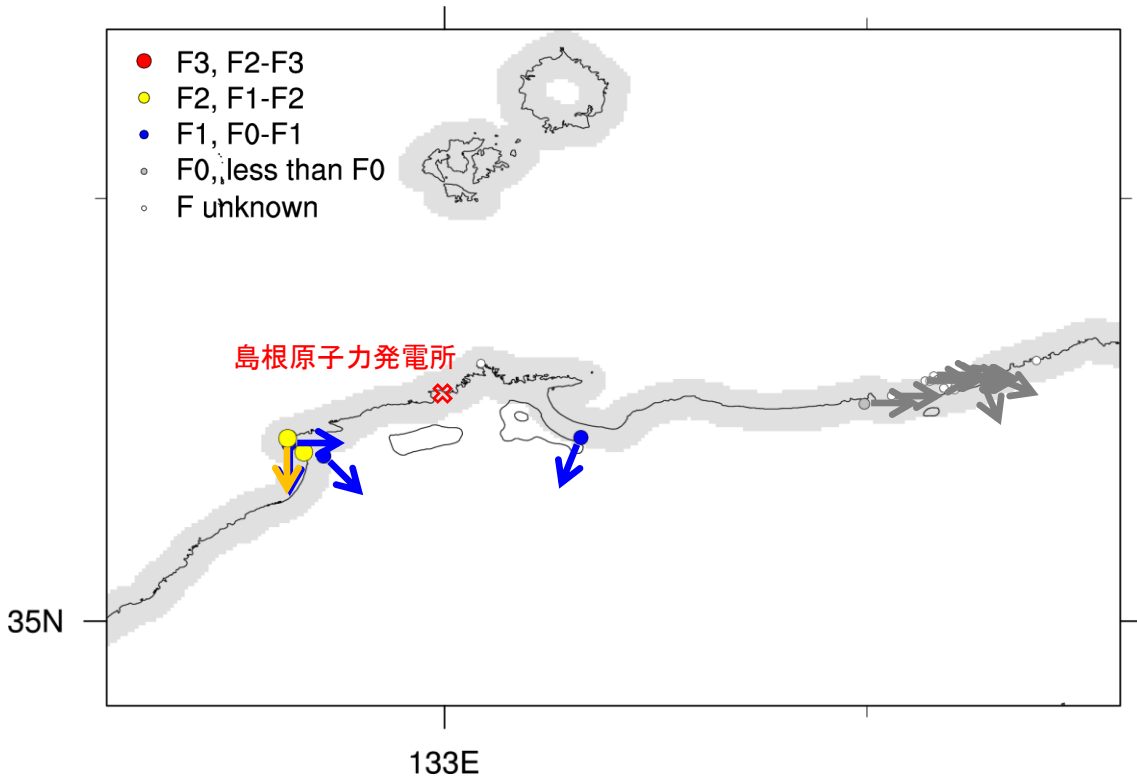


図2.4.3.1 竜巻集中地域⑥及び⑦における竜巻移動方向

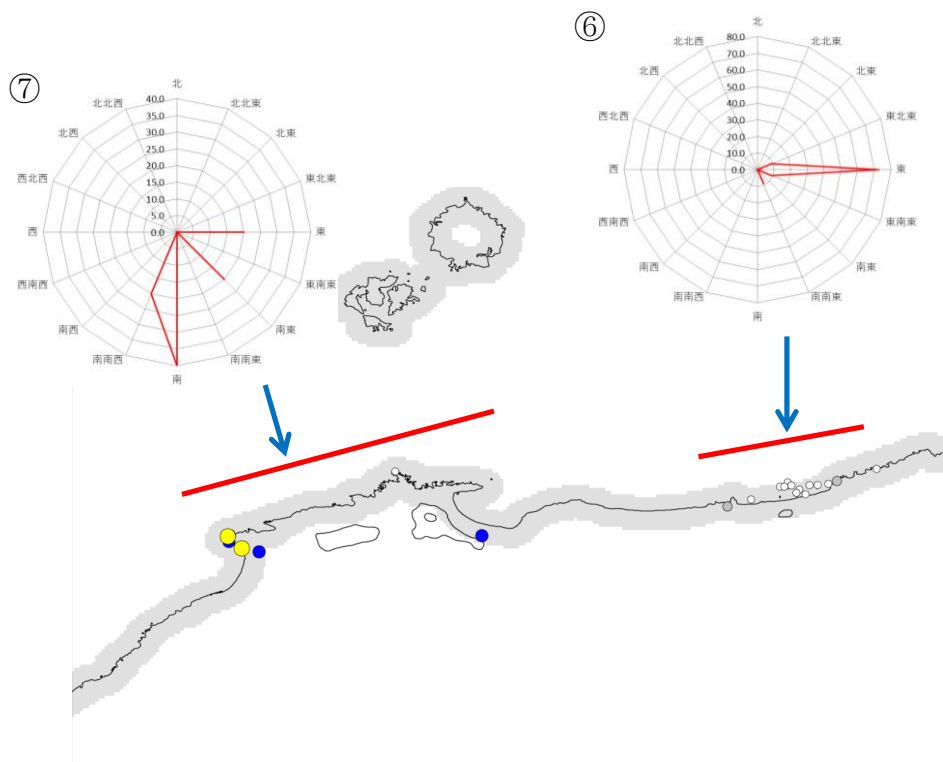


図2.4.3.2 竜巻集中地域⑥及び⑦における竜巻移動方向の頻度

#### 2.4.4. 竜巻風速の増幅に関する検討

##### (1) 地形起伏による竜巻増幅

島根原子力発電所周辺で発生する竜巻は、発電所北方または西方の海上あるいは沿岸部で発生し、竜巻が発電所の北方で発生し南方向（陸側）へ移動する場合

には、地形が平坦な海側から発電所敷地に進入することとなり、発電所敷地自体も平坦であるため竜巻が増幅することはないと考えられる。また、発電所西方で発生する竜巻は、上り斜面・下り斜面の影響をほぼ同程度受け発電所敷地に進入する可能性が高く発電所敷地はほぼ平坦であるため竜巻が増幅することはないと考えられる。万が一発電所敷地外の南側（例えば鹿島町の平地）で竜巻が発生し、その竜巻が海側に向かって移動し、発電所敷地内に進入した場合、竜巻は山を越える必要がある。この場合の地形効果による増幅は、山の上り勾配と下り勾配で相殺される。

## (2) 地表面粗度による竜巻増幅

島根原子力発電所周辺では、竜巻の移動経路となり得る発電所西方に着目すると森林などに相当する粗度区分Ⅲの領域が2km以上にわたり存在していることから、粗度による減衰効果が期待できる。発電所北方または西方の海上あるいは沿岸から南または東方向へ向かう竜巻が極めて多く、発電所北方の海上で発生した竜巻が南方向へ移動する場合には、地表面粗度の小さい海上から粗度の大きな陸上に上陸するため、粗度により減衰するものと考えられる。

### 2.4.5. 設計竜巻の最大風速 ( $V_D$ )

以上のことから、島根原子力発電所では、地形効果による竜巻の増幅を考慮しない。一方、将来的な気候変動による竜巻発生の不確実性を踏まえ、 $V_B$ の値がF3の風速範囲（70～92m/s）にあることから設計竜巻の最大風速 $V_D$ はF3の風速範囲の上限値92m/sとする。



## 2.5. 設計竜巻の特性値

設計竜巻の特性値については、表 2.5.1 のとおり設定する。また、飛来物の運動モデルについてはフジタモデルを適用する。

① 竜巻の移動速度 ( $V_T$ )

$$V_T = 0.15 \cdot V_D$$

② 竜巻の最大接線風速 ( $V_{Rm}$ )

$$V_{Rm} = V_D - V_T$$

③ 竜巻の最大接線風速が生じる位置での半径 ( $R_m$ )

$$R_m = 30 \text{ (m)}$$

④ 竜巻の最大気圧低下量 ( $\Delta P_{max}$ )

$$\Delta P_{max} = \rho \cdot V_{Rm}^2 \quad \rho : \text{空気密度 (1.226 (kg/m}^3\text{))}$$

⑤ 竜巻の最大気圧低下率 ( $(dp/dt)_{max}$ )

$$(dp/dt)_{max} = (V_T/R_m) \cdot \Delta P_{max}$$

表 2.5.1 設計竜巻の特性値

風速 $V_D$ (m/s)	移動速度 $V_T$ (m/s)	最大接線 風速 $V_{Rm}$ (m/s)	最大接線 風速半径 $R_m$ (m)	最大気圧 低下量 $\Delta P_{max}$ (hPa)	最大気圧 低下率 $(dp/dt)_{max}$ (hPa/s)
92	14	78	30	75	35

### 3. 竜巻影響評価

#### 3.1. 評価概要

評価の概要は以下のとおりとする。

- (1) 設計荷重(竜巻荷重及びその他の組み合わせ荷重)の設定
- (2) 原子力発電所における飛来物に係る調査
- (3) 飛来物発生防止対策
- (4) 考慮すべき設計荷重に対する評価対象施設の構造健全性等の評価を行い、必要に応じ対策を行うことで安全機能が維持されることを確認

#### 3.2. 評価対象施設

「1.2 竜巻影響評価の対象施設」に示したとおりとする。

#### 3.3. 設計荷重の設定

##### 3.3.1. 設計竜巻荷重の設定

設計竜巻の最大風速  $V_D$  等に基づき、「風圧力」、「気圧差による圧力」及び「飛来物の衝撃荷重」について、以下のとおり設定する。

##### (1) 設計竜巻による風圧力の設定

設計竜巻の水平方向の最大風速によって施設(屋根を含む)に作用する風圧力 ( $W_w$ ) は、「建築基準法施行令」及び「日本建築学会 建築物荷重指針・同解説」に準拠して、下式により算定する。

なお、ガスト影響係数(G)は  $G=1.0$ 、風力係数(C)は施設の形状や風圧力が作用する部位(屋根、壁等)に応じて設定する。

$$W_w = q \cdot G \cdot C \cdot A$$

q: 設計用速度圧

G: ガスト影響係数 (=1.0)

C: 風力係数

A: 施設の受圧面積

$$q = (1/2) \cdot \rho \cdot V_D^2$$

$\rho$ : 空気密度

$V_D$ : 設計竜巻の最大風速

ただし、竜巻による最大風速は、一般的には水平方向の風速として算定されるが、鉛直方向の風圧力に対してぜい弱と考えられる評価対象施設等が存在する場合には、フジタモデルの風速場による求まる鉛直方向の風速等に基づいて算出した鉛直方向の風圧力についても考慮する。

施設については、鉛直方向の風圧力に対して特にぜい弱と考えられる部位は評価対象施設等の中に存在しないことから、鉛直方向の風圧力の考慮は行わない。

(2) 設計竜巻における気圧低下によって生じる評価対象施設等の内外の気圧差による圧力の設定

設計竜巻による評価対象施設等の内外の気圧差による圧力は、最大気圧低下量 ( $\Delta P_{\max}$ ) に基づき設定する。

①建物・構築物等

建物については、気圧差による圧力荷重が最も大きくなる「閉じた施設」を想定し、内外気圧差による圧力荷重  $W_p$  を以下の式により設定する。

$$W_p = \Delta P_{\max} \cdot A$$

ここで、 $\Delta P_{\max}$ : 最大気圧低下量、A: 施設の受圧面積

外部事象防護対象施設を内包する建物・構築物について、影響評価を実施し、当該施設が破損した場合には安全機能維持について確認を行う。

②設備(系統, 機器)

設備についても、上記と同様に圧力荷重  $W_p$  を設定する。なお、原子炉建物付属棟空調換気系のように外気と隔離されている区画の境界部等気圧差による圧力影響を受ける設備について、圧力影響により作用する応力が許容値内であるか確認し、許容値を上回る場合には安全機能維持への影響について確認する。

(3) 設計竜巻による飛来物が評価対象施設等に衝突する際の衝撃荷重の設定

①島根原子力発電所 2 号炉における飛来物に係る現地調査結果及び設計飛来物の選定について

島根原子力発電所 2 号炉の竜巻影響評価における設計飛来物については、飛来物に係る現地調査結果及びガイドの表 4.1 に示されている設計飛来物の設定例を参照し設定する。

以下に島根原子力発電所にて実施した飛来物の現地調査の結果と、その結果を元に抽出した設計飛来物の設定の考え方を示す。【添付資料 3.3】

a. 評価に用いる設計竜巻の特性

評価に用いる竜巻の速度は、92m/s とする。(表 2.5.1 参照)

b. 飛来物に対する考え方

飛来物のうち、後述する設計飛来物（極小飛来物である砂利を除く。）より運動エネルギー及び貫通力（コンクリートの貫通限界厚さ、鋼板の貫通限界厚さ）が大のものについては、設置場所等に応じ固縛を行うことで飛散させないものとする。また、衝突時に評価対象施設等に与えるエネルギーが設計飛来物の運動エネルギーより小さいものについては、適切な飛来物発生防止対策を行う。なお、これらの対応については、保安規定に規定し管理する。

### c. 設計飛来物の選定

設計飛来物の設定フローを図 3.3.1.1, 選定結果を表 3.3.1.1 に示す。

島根原子力発電所の飛来物に係る調査の結果, 島根原子力発電所において飛来物となる可能性があるものから, 浮き上がりの有無, 運動エネルギー及び貫通力の大きさから, 鋼製材を設計飛来物として選定した。選定した鋼製材のサイズ, 重量については, 現地調査及びガイドに基づいて, 影響が大きい寸法, 重量を設定した。

また, 鋼製材に対する竜巻防護対策として設置する竜巻防護ネットを通過し得る設計飛来物として, 砂利を設定した。砂利のサイズは竜巻防護ネットの網目のサイズ (4 cm) を考慮して設定した。以降の設計飛来物とは, 上記の鋼製材及び砂利の 2 つを示す。

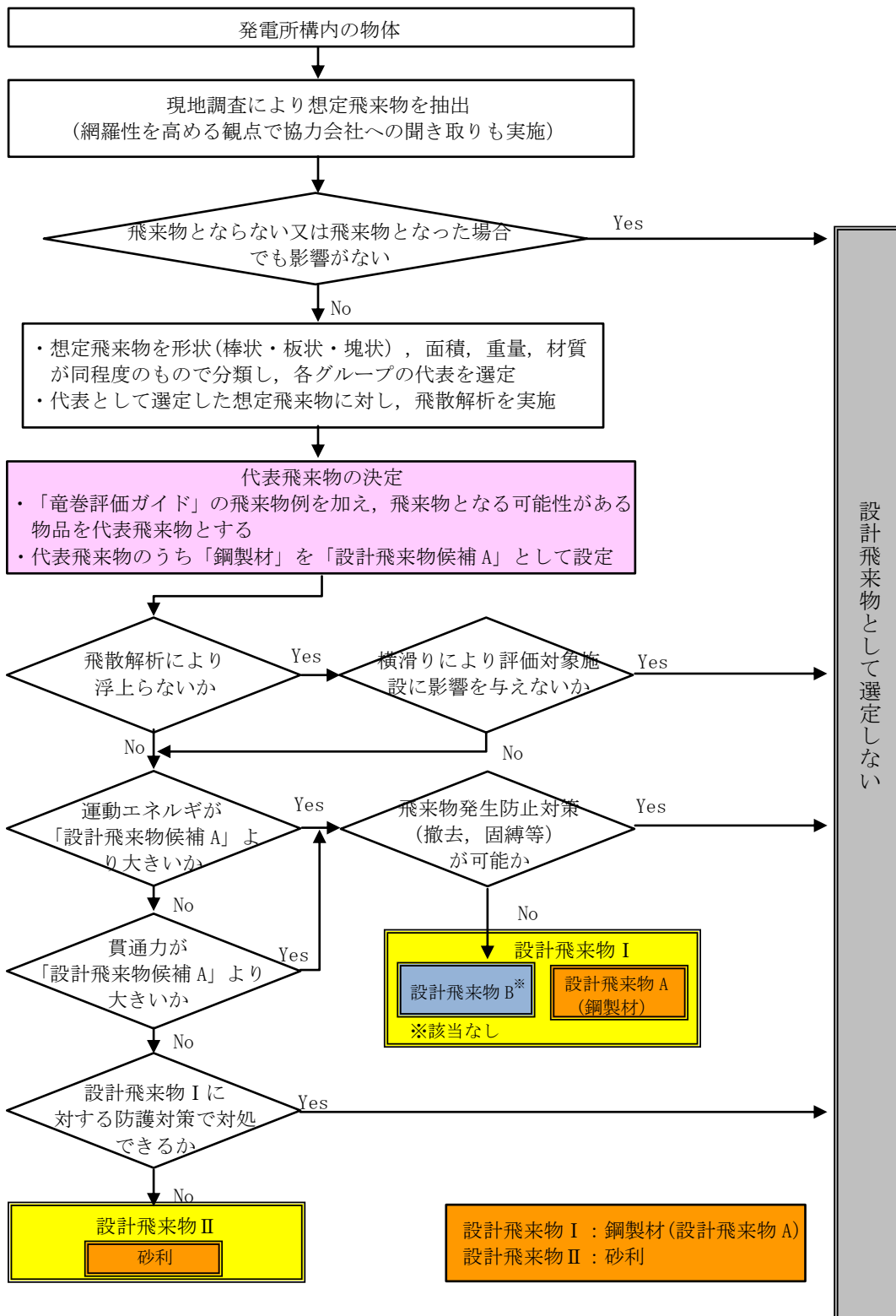


図 3.3.1.1 設計飛来物の選定フロー

d. 島根 1 号炉廃止措置に伴い生じ得る飛来物源への対応

島根 2 号炉に隣接する島根 1 号炉においては廃止措置関連作業が実施されている。施設の解体作業等に関連してどのような飛来物源が生じ得るかを現時点で正確

に特定することは困難であるが、以下のとおり島根2号炉へ影響を及ぼすことはないと判断している。

- ・飛来物源の現地調査においては、島根2号炉に隣接する島根1号炉も対象としており、資機材や施設の種類や形状に関しては、島根2号炉の資機材等との大きな違いは無いことを確認している。したがって、作業用資機材や取り外しが完了した物品については、固縛、離隔、収納等、一般の飛来物源と同様の措置が可能である。
- ・取り外し前の施設の据付状況についても、島根2号炉の施設の状況と有意な差はないと考えられる。島根2号炉の評価対象施設等は風荷重に対し十分に余裕があることを参照すれば、これらの施設が竜巻により基礎等から引き剥がされ、飛来物化することは考えにくい。
- ・廃止措置特有の状況として考えられるケースとしては、解体、撤去の途中の状況が一定期間継続すると想定される場合(例:大規模設備や建物壁面の解体)であるが、このような場合に対しても、作業の計画段階及び実施段階で、適宜風荷重に対し脆弱な形状が生じていないかを確認し、想定される脱落片(飛来物)が設計飛来物による影響を超えることが確認された場合でも、その様な飛来物源が発生しないよう工法を工夫するなどによって対応することで、島根2号炉に影響を及ぼす可能性のある飛来物の発生を防止できない状況は生じないと考えられる。なお、これらの運用管理については、確実に実施するために手順として規定し、保安規定に基づき実施する。

## ②設計飛来物の速度等の設定

設計竜巻による設計飛来物の最大水平速度( $V_{Hmax}$ )及び最大鉛直速度( $V_{Vmax}$ )は、(3) a. に示す竜巻風速 92m/s にて、フジタモデルを適用した風速場の中で算出した速度の値を包絡する「竜巻影響評価ガイド」の表 4.1 に示される値とする。

ただし、「竜巻影響評価ガイド」に記載のない設計飛来物である砂利の速度については、フジタモデルを適用した風速場の中で地上付近の不確定性を考慮し、地上からの初期高さの感度解析の結果から最大となる水平速度を算出した。

なお、設計飛来物の飛散高さによらず、評価対象施設等のどの高さに対しても衝突を考慮する。

表 3.3.1.1 島根原子力発電所における設計飛来物

飛来物	砂利	鋼製材
寸法(m)	長さ×幅×奥行 0.04×0.04×0.04	長さ×幅×奥行 4.2×0.3×0.2
質量 (kg)	0.2	135
最大水平速度 (m/s)	54	51
最大鉛直速度 (m/s) ※1	36	34

※ 1 ここではガイドに基づき最大水平速度の2/3の値を記載。施設の構造健全性評価等では最大水平速度の2/3の値又はフジタモデルによる飛散解析結果による値を用いる。

### ③設計竜巻荷重の組み合わせ

評価対象施設等の評価に用いる設計竜巻荷重は、設計竜巻による風圧力による荷重( $W_w$ )、気圧差による荷重( $W_p$ )、及び設計飛来物による衝撃荷重( $W_M$ )を組み合わせた複合荷重として、以下の式により算定する。

$$W_{T1} = W_p$$

$$W_{T2} = W_w + 0.5 \cdot W_p + W_M$$

ここで、

$W_{T1}$ ,  $W_{T2}$  : 設計竜巻による複合荷重

$W_w$  : 設計竜巻による風圧力による荷重

$W_p$  : 設計竜巻による気圧差による荷重

$W_M$  : 設計飛来物による衝撃荷重

なお、竜巻影響評価対象施設には $W_{T1}$ 及び $W_{T2}$ の両荷重をそれぞれ作用させる。

### 3.3.2. 設計竜巻荷重と組み合わせる荷重の設定

設計竜巻荷重と組み合わせる荷重は、以下のとおりとする。

#### (1) 評価対象施設等に常時作用する荷重，運転時荷重等

評価対象施設等に作用する荷重として，自重等の常時作用する荷重，内圧等の運転時荷重を適切に組み合わせる。

#### (2) 竜巻以外の自然現象による荷重

竜巻は積乱雲や積雲に伴って発生する現象であり<sup>※1</sup>，積乱雲の発達時に竜巻と同時発生する可能性がある自然現象は，雷，雪，ひょう及び降水である。これらの自然現象の組み合わせにより発生する荷重は，以下のとおり設計竜巻荷重に包絡される。

なお，竜巻と同時に発生する自然現象については今後も継続的に新たな知見等の収集に取り組み，必要な事項については適切に反映を行う。

##### ①雷

竜巻と雷が同時に発生する場合においても，雷によるプラントへの影響は，雷撃であるため雷による荷重は発生しない。

##### ②雪

島根原子力発電所が立地する地域においては，冬期，竜巻が襲来する場合は，竜巻通過前後に降雪を伴う可能性はあるが，上昇流の竜巻本体周辺では，竜巻通過時に雪は降らない。また，下降流の竜巻通過時や竜巻通過前に積もった雪の大部分は竜巻の風により吹き飛ばされるため，雪による荷重は十分小さく設計竜巻荷重に包絡される。

##### ③ひょう

ひょうは積乱雲から降る直径5 mm以上の氷の粒<sup>※2</sup>であり，仮に直径10 cm程度の大型のひょうを想定した場合，その重量は約0.5 kgとなる。

10 cm程度のひょうの終端速度は59m/s<sup>※3</sup>，運動エネルギーは約0.9kJであり，設計飛来物の運動エネルギーと比べ十分に小さく，ひょうの衝突による荷重は設計竜巻荷重に包絡される。

##### ④降水

竜巻と降水が同時に発生する場合においても，雨水により屋外施設に荷重の影響を与えることはなく，また降雨による荷重は十分小さいため，設計竜巻荷重に包絡される。

※1：雷雨とメソ気象 大野久雄，東京堂出版



※2：気象庁ホームページ

※3：一般気象学 小倉義光，東京大学出版会

### (3) 設計基準事故時荷重

外部事象防護対象施設は，設計竜巻によって安全機能を損なわない設計とするため，設計竜巻は原子炉冷却材喪失事故等の設計基準事故の起因とはならないことから，設計竜巻と設計基準事故は独立事象となる。

設計竜巻と設計基準事故が同時に発生する頻度は十分小さいことから，設計基準事故時荷重と設計竜巻との組み合わせは考慮しない。

なお，評価対象施設等のうち設計基準事故時荷重が生じ，竜巻による風荷重等の影響を受ける屋外施設としては，海水ポンプ及びディーゼル燃料移送ポンプが考えられるが，設計基準事故時においても，運転時の系統内圧力及び温度と変わらないため，設計基準事故により考慮すべき荷重はなく，竜巻と設計基準事故時荷重の組み合わせは考慮しない。

### 3. 4. 評価対象施設等の設計方針

評価対象施設等については、以下の設計方針のとおり、設計荷重に対してその構造健全性を維持する設計とする。評価対象施設等以外の竜巻によってその安全機能が損なわれないことを確認する必要がある施設については、竜巻及びその随伴事象に対して機能維持する、若しくは、竜巻及びその随伴事象による損傷を考慮して、代替設備により必要な機能を確保（例えば、外部電源喪失時における非常用ディーゼル発電機からの受電）すること、安全上支障のない期間に修復（例えば、気圧差により開放したブローアウトパネルに対する閉止措置）すること等の対応が可能な設計とすることにより、竜巻によってその安全機能が損なわれないことを確認する必要がある施設の安全機能を損なわない設計とする。

#### (1) 許容限界

建物・構築物の設計において、設計飛来物の衝突による貫通及び裏面剥離発生の有無の評価については、貫通及び裏面剥離が発生する限界厚さと部材の最小厚さを比較することにより行う。さらに、設計荷重により、発生する変形又は応力が以下の法令、規格、基準、指針類等に準拠し算定した許容限界を下回る設計とする。

- ・ 建築基準法
- ・ 日本産業規格
- ・ 日本建築学会及び土木学会等の基準・指針類
- ・ 原子力発電所耐震設計技術指針 JEAG4601-1987（日本電気協会）
- ・ 震災建築物の被災度区分判定基準及び復旧技術指針（日本建築防災協会）
- ・ 原子力エネルギー協会（NEI）の基準・指針類 等

系統及び機器の設計において、設計飛来物の衝突による貫通の有無の評価については、貫通が発生する限界厚さと部材の最少厚さを比較することにより行う。設計飛来物が貫通することを考慮する場合には、設計荷重に対して防護対策を考慮した上で、系統及び機器に発生する応力が以下の規格、基準及び指針類に準拠し算定した許容応力度等に基づく許容限界を下回る設計とする。

- ・ 日本産業規格
- ・ 日本機械学会の基準・指針類
- ・ 原子力発電所耐震設計技術指針 JEAG4601-1987（日本電気協会）等

#### (2) 屋外施設（建物含む。）

屋外施設は、設計荷重に対して、安全機能が維持される設計とし、必要に応じて施設の補強、竜巻防護ネット、竜巻防護鋼板の設置等の防護対策を講じる方針とする。

なお、外殻となる施設による防護機能が期待できる屋内施設は、建物又は

構築物による防護により，設計荷重に対して安全機能を損なわない方針とする。

①海水ポンプ（原子炉補機冷却系，高圧炉心スプレイ補機冷却系）（配管，弁を含む。）

海水ポンプは，風圧力による荷重，気圧差による荷重，海水ポンプに常時作用する荷重，運転時荷重に対して構造健全性が維持され安全機能を損なわない設計とする。

また，設計飛来物（鋼製材）に対して竜巻防護ネット，竜巻防護鋼板の設置等の防護対策を行う。

なお，竜巻防護ネットを通過する可能性のある設計飛来物（砂利）の衝突に対して，ポンプ，電動機等の部材を貫通しない厚さを確保し，安全機能を損なわない設計とする。

②海水ストレーナ（原子炉補機冷却系，高圧炉心スプレイ補機冷却系）

海水ストレーナは，風圧力による荷重，気圧差による荷重，海水ストレーナに常時作用する荷重，運転時荷重に対して構造健全性が維持され安全機能を損なわない設計とする。

また，設計飛来物に対して竜巻防護鋼板の設置等の防護対策を行う。

③排気筒（非常用ガス処理系用排気筒を含む。）

排気筒（非常用ガス処理系用排気筒を含む。）は設計飛来物（鋼製材）により損傷し，排気筒（非常用ガス処理系用排気筒を含む。）の安全機能が維持されないことを考慮して，安全上支障のない期間に補修が可能な設計とするとともに，環境への放射性物質の異常な放出が発生する可能性がある設計基準事故に対して，周辺の公衆に著しい放射線被ばくのリスク抑制する機能を保持できる設計とする。なお，排気筒（非常用ガス処理系用排気筒を含む。）が損傷し，非常用ガス処理系が動作不能と判断された場合は，プラントを停止し補修を行う。

また，排気筒（非常用ガス処理系用排気筒を含む。）は，風圧力による荷重及び設計飛来物による衝撃荷重に対して，排気筒全体が倒壊しない設計とする。

④排気筒モニタ

排気筒モニタは，放射性気体廃棄物処理施設の破損の検出手段として期待している。外部事象を起因として放射性気体廃棄物処理施設の破損が発生することはないが，独立事象としての重畳の可能性を考慮し，安全上支障のない期間に補修等の対応を行うことで，安全機能を損なわない設計とする。

⑤ディーゼル燃料移送ポンプ（A-非常用ディーゼル発電機系，高圧炉心スプレ  
イ非常用ディーゼル発電機系）（配管，弁を含む。）

ディーゼル燃料移送ポンプは，風圧力による荷重，気圧差による荷重，ディ  
ーゼル燃料移送ポンプに常時作用している荷重及び運転時荷重に対して構造  
健全性が維持され安全機能を損なうことのない設計とする。

また，設計飛来物（鋼製材）に対して竜巻防護鋼板（穴あき）の設置等の防  
護対策を行う。

なお，竜巻防護鋼板（穴あき）を通過する可能性のある設計飛来物（砂利）  
の衝突に対しては，設備の配置状況やディーゼル燃料移送ポンプに対する影響  
を考慮し，安全機能を損なわない設計とする。

⑥原子炉建物，タービン建物，制御室建物，廃棄物処理建物，ディーゼル燃  
料貯蔵タンク室（A-非常用ディーゼル発電機系，高圧炉心スプレイ非常用ディ  
ーゼル発電機系），ディーゼル燃料貯蔵タンク格納槽（B-非常用ディー  
ーゼル発電機系）

原子炉建物外壁（4階部分）の原子炉建物外側ブローアウトパネルについて  
は，設計竜巻による気圧低下による開放及び設計飛来物の貫通により，原子炉  
建物の放射性物質の閉じ込め機能を損なう可能性があるが，竜巻防護ネットの  
設置等による竜巻防護対策を行うことにより，設計飛来物の衝突及び気圧低下  
による開放後の開口部からの設計飛来物の侵入を防止する設計とするるとも  
に，気圧低下による開放に対しては，設計竜巻と設計基準事故が同時に発生す  
る頻度は十分小さいことから，安全上支障のない期間に補修が可能な設計とす  
ることで，安全機能を損なわない設計とする。

原子炉建物，タービン建物，制御室建物，廃棄物処理建物，ディーゼル燃料  
貯蔵タンク室，ディーゼル燃料貯蔵タンク格納槽は，風圧力による荷重，気圧  
差による荷重及び設計飛来物による衝撃荷重に対して，構造骨組の構造健全性  
が維持されるとともに，屋根，壁，開口部（扉類）の破損により当該建物等内  
の外部事象防護対象施設が安全機能を損なわない設計とする。また，設計飛来  
物の衝突時においても，貫通及び裏面剥離の発生により当該建物内の外部事象  
防護対象施設が安全機能を損なわない設計とする。

外殻となる施設による防護機能が期待できない施設に関する方針は(4)に示  
す。

⑦排気筒モニタ室

排気筒モニタ室については，外部事象を起因として放射性気体廃棄物処理施  
設の破損が発生することはないが，独立事象としての重畳の可能性を考慮し，

安全上支障のない期間に補修等の対応を行うことで、排気筒モニタの安全機能を損なわない設計とする。

### (3) 外気との接続がある施設

外気との接続がある施設は、設計荷重に対して、安全機能が維持される設計とし、必要に応じて竜巻防護ネットの設置等の防護対策を講じる方針とする。

#### ①空調換気設備（原子炉棟空調換気系，中央制御室換気系，非常用再循環処理装置，原子炉建物付属棟空調換気系）

空調換気設備は、各建物に内包されていることを考慮すると、風圧力による荷重は作用しない。空調換気設備の建物開口部は竜巻防護ネットの設置等の防護対策を行うことを考慮すると、設計飛来物（鋼製材）による衝撃は作用しない。

気圧差による荷重に対して、空調換気設備の構造健全性が維持され安全機能を損なうことのない設計とする。

なお、設計飛来物（砂利）による衝突に対して、建物開口部の状況や空調換気設備に対する影響を考慮し、安全機能を損なわない設計とする。

#### ②非常用ガス処理系配管

非常用ガス処理系配管は、原子炉建物及びタービン建物に内包されていることを考慮すると、風圧力による荷重及び設計飛来物による衝撃荷重は作用しない。

気圧差による荷重に対して、非常用ガス処理系配管の構造健全性が維持され安全機能を損なうことのない設計とする。

### (4) 外殻となる施設による防護機能が期待できない施設

外殻となる施設による防護機能が期待できない施設は、設計荷重に対して、安全機能が維持される設計とし、必要に応じて施設の補強等の防護対策を講じる方針とする。

#### ① 原子炉建物 1 階 原子炉補機冷却水ポンプ・熱交換器・配管及び弁，原子炉建物 2 階 原子炉建物付属棟空調換気設備，原子炉建物 4 階 原子炉建物天井クレーン，燃料取替機，燃料プール，燃料プール冷却系配管及び弁，使用済燃料貯蔵ラック，燃料集合体，廃棄物処理建物 3 階 中央制御室空調換気設備等

原子炉補機冷却水ポンプ・熱交換器・配管及び弁，原子炉建物付属棟空調換気設備，原子炉建物天井クレーン，燃料取替機，燃料プール，燃料プール

冷却系配管及び弁，使用済燃料貯蔵ラック，燃料集合体，中央制御室空調換気設備等は，設計飛来物の衝突により，開口部の開放又は開口部建具の貫通が発生することを考慮し，竜巻防護ネットの設置等による竜巻防護対策を行うことにより，原子炉補機冷却水ポンプ・熱交換器・配管及び弁，原子炉建物付属棟空調換気設備，原子炉建物天井クレーン，燃料取替機，燃料プール，燃料プール冷却系配管及び弁，使用済燃料貯蔵ラック，燃料集合体，中央制御室空調換気設備等への設計飛来物の衝突を防止し，原子炉補機冷却系冷却水ポンプ・熱交換器・配管及び弁，原子炉建物付属棟空調換気設備，原子炉建物天井クレーン，燃料取替機，燃料プール，燃料プール冷却系配管及び弁，使用済燃料貯蔵ラック，燃料集合体，中央制御室空調換気設備等の構造健全性が維持され，安全機能を損なわない設計とする。

(5) 外部事象防護対象施設に波及的影響を及ぼし得る評価対象施設

設計荷重に対する当該施設の健全性評価を行い，必要に応じて施設の補強等の防護対策を講じる方針とする。

①1号炉排気筒

1号炉排気筒は，風圧力による荷重及び設計飛来物による衝撃荷重に対して，倒壊により外部事象防護対象施設に波及的影響を及ぼさない設計とする。

②1号炉原子炉建物，1号炉タービン建物，1号炉廃棄物処理建物，排気筒モニタ室

1号炉原子炉建物，1号炉タービン建物，1号炉廃棄物処理建物及び排気筒モニタ室は，風圧力による荷重，気圧差による荷重，設計飛来物による衝撃荷重に対して，倒壊により外部事象防護対象施設へ波及的影響を及ぼさない設計とする。

③排気管（非常用ディーゼル発電機の付属施設），排気消音器（非常用ディーゼル発電機の付属施設），ベント管（ディーゼル燃料貯蔵タンク，ディーゼル燃料デイタンク及び潤滑油サンプタンクの付属施設）

排気管（非常用ディーゼル発電機の付属施設），排気消音器（非常用ディーゼル発電機の付属施設），ベント管（ディーゼル燃料貯蔵タンク，ディーゼル燃料デイタンク及び潤滑油サンプタンクの付属施設）は，設計飛来物である鋼製材の衝突を考慮して，安全上支障のない期間での補修が可能な設計とすることにより，非常用ディーゼル発電機に波及的影響を及ぼさない設計とする。また，風圧力による荷重及び気圧差による荷重に対して，構造健全性を維持し安全機能を損なわない設計とする。

3.5 竜巻随件事象に対する評価

竜巻随伴事象は、過去の竜巻被害の状況及び島根原子力発電所のプラント配置から想定される事象として、火災、溢水及び外部電源喪失を抽出し、事象が発生した場合の影響評価を行い外部事象防護対象施設が安全機能を損なわれないことを確認した。なお、抽出した事象のうち、島根原子力発電所における溢水評価・火災評価で抽出した主な評価対象施設の配置を図 3.5.1 示す。

#### (1) 火災

竜巻随伴事象として、竜巻による飛来物が建物開口部付近の発火性又は引火性物質を内包する機器、屋外の危険物タンク等に飛来物が衝突する場合の火災が想定される。

建物内については、飛来物が侵入する場合でも、飛来物衝突位置となる開口部付近に、発電用原子炉施設の安全機能を損なう可能性を有する発火性又は引火性物質を内包する機器が配置されておらず、また、外部事象防護対象施設を設置している区画の開口部には竜巻防護ネット設置等の竜巻防護対策を行うことを考慮すると設計飛来物が到達することはないことから、設計竜巻により建物内に火災が発生することはないと、建物の外部事象防護対象施設の安全機能を損なわない。

建物外については、屋外にある危険物タンク等からの火災がある。火災源と外部事象防護対象施設の位置関係を踏まえた外部火災影響評価において、航空機墜落や敷地内の危険物タンク火災が発生した場合においても、安全上重要な設備が収納されている原子炉建物、タービン建物、廃棄物処理建物、制御室建物や屋外安全系機器に影響を及ぼさないことを確認している。

以上より、竜巻による火災により外部事象防護対象施設の安全機能に影響を与えることはない。

#### (2) 溢水

竜巻随伴事象として、竜巻による飛来物が建物開口部付近の溢水源に衝突する場合、屋外タンク等に飛来物が衝突する場合の溢水が想定される。

外部事象防護対象施設を内包する建物内については、飛来物が侵入する場合でも、飛来物衝突位置となる開口部付近に、発電用原子炉施設の安全機能を損なう可能性を有する溢水源が配置されておらず、また、外部事象防護対象施設を設置している区画の開口部には竜巻防護ネット設置等の竜巻防護対策を行うことを考慮すると、設計飛来物が到達することはないことから、設計竜巻により建物内に溢水が発生することはないと、建物内の外部事象防護対象施設の安全機能を損なわないことを確認している。

内部溢水影響評価において、地震時の屋外タンク等の破損を想定し、原子炉建物や廃棄物処理建物等の開口部の下端高さは、最大溢水水位より高い位置にあることにより、地震起因の溢水が安全系機器に影響を及ぼさないことを確認している。

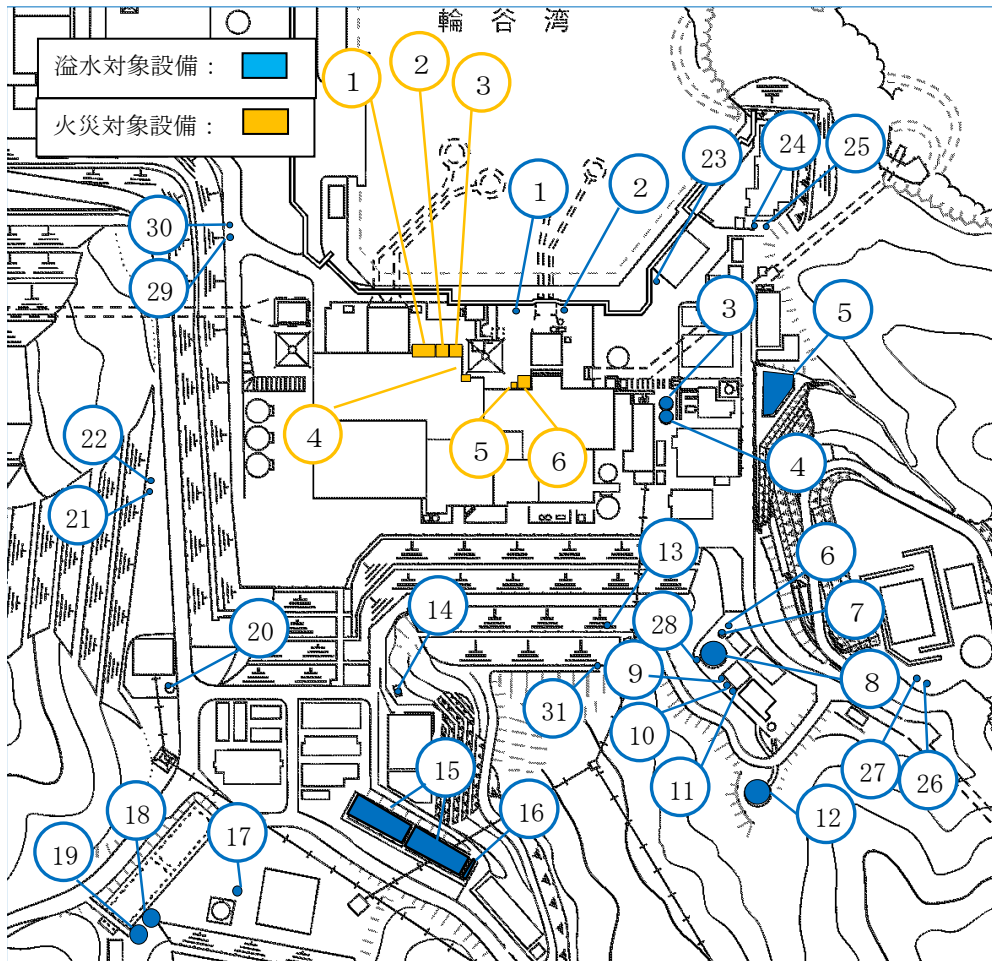
竜巻による飛来物で屋外タンク等が損傷して発生する溢水に対しては、上記に包絡されることから、外部事象防護対象施設の安全機能維持に影響を与えることはない。

以上より、竜巻による溢水により外部事象防護対象施設の安全機能に影響を与えることはない。

### (3) 外部電源喪失

設計竜巻、設計竜巻と同時に発生する雷又はダウンバースト等の影響により外部電源喪失が発生する場合については、設計竜巻に対して非常用ディーゼル発電機の構造健全性を維持することにより、外部電源喪失の影響がなく外部事象防護対象施設が安全機能を損なわない設計とする。





対象 事象	No	設備名	対象 事象	No	設備名	
溢水	1	変圧器消火水槽	溢水	20	碍子水洗タンク	
	2	電解液受槽(1号)		21	S/B 雑用水タンク	
	3	純水タンク(A)		22	宇中系統中継水槽(西山水槽)	
	4	純水タンク(B)		23	消火ツツ, 消火ポンプ, 制御盤(4号館)	
	5	管理事務所1号館東側調整池		24	B-SB 廻り消火設備タンク	
	6	1号ろ過器		25	A-SB 廻り消火設備タンク	
	7	1号除だく槽		26	A-50m 盤廻り消火設備タンク	
	8	1号ろ過水タンク		27	B-50m 盤廻り消火設備タンク	
	9	2号除だく槽		28	22m盤受水槽	
	10	2号ろ過器		29	仮設水槽-1(2号西側法面付近)	
	11	2号濃縮槽		30	仮設水槽-2(2号西側法面付近)	
	12	2号ろ過水タンク		31	74m盤受水槽(2槽)	
	13	59m盤トイレ用水貯槽		火災	1	2号機主変圧器
	14	原水 80 t 水槽			2	所内変圧器本体(A, B)
	15	輪谷貯水槽(東側)			3	起動変圧器本体
	16	輪谷貯水槽(東側)沈砂池			4	水素ガスポンペ(室内)
	17	消防用水タンク			5	1号機所内変圧器
	18	A-44m盤廻り消火設備タンク(南側)			6	1号機主変圧器
	19	B-44m盤廻り消火設備タンク(南側)				

図 3. 5. 1 火災事象及び溢水事象が発生する可能性がある施設の配置図

### 1.1 重大事故等対処設備に対する考慮について

「実用発電用原子炉及びその附属施設の位置、構造及び設備の基準に関する規則」及びその解釈において、自然現象が発生した場合における「外部からの衝撃による損傷の防止」（第6条）及び「重大事故等対処設備」（第43条）として次頁の表 1.1.1 のような記載があり、竜巻発生時の考慮について整理した。

安全重要度クラス 1、クラス 2 及び安全評価上その機能に期待するクラス 3 に属する施設を外部事象防護対象施設として選定し、竜巻が発生した場合でも外部事象防護対象施設の安全機能を損なわないことを確認しているため、竜巻を起因として重大事故等が発生する可能性は小さい。

配置についても、常設重大事故等対処設備と可搬型重大事故等対処設備は 100m 以上の離隔距離をとって、離れた 2ヶ所に分散配置しているため、仮に竜巻の影響を受けたとしても同時に被害を受ける可能性は小さい。

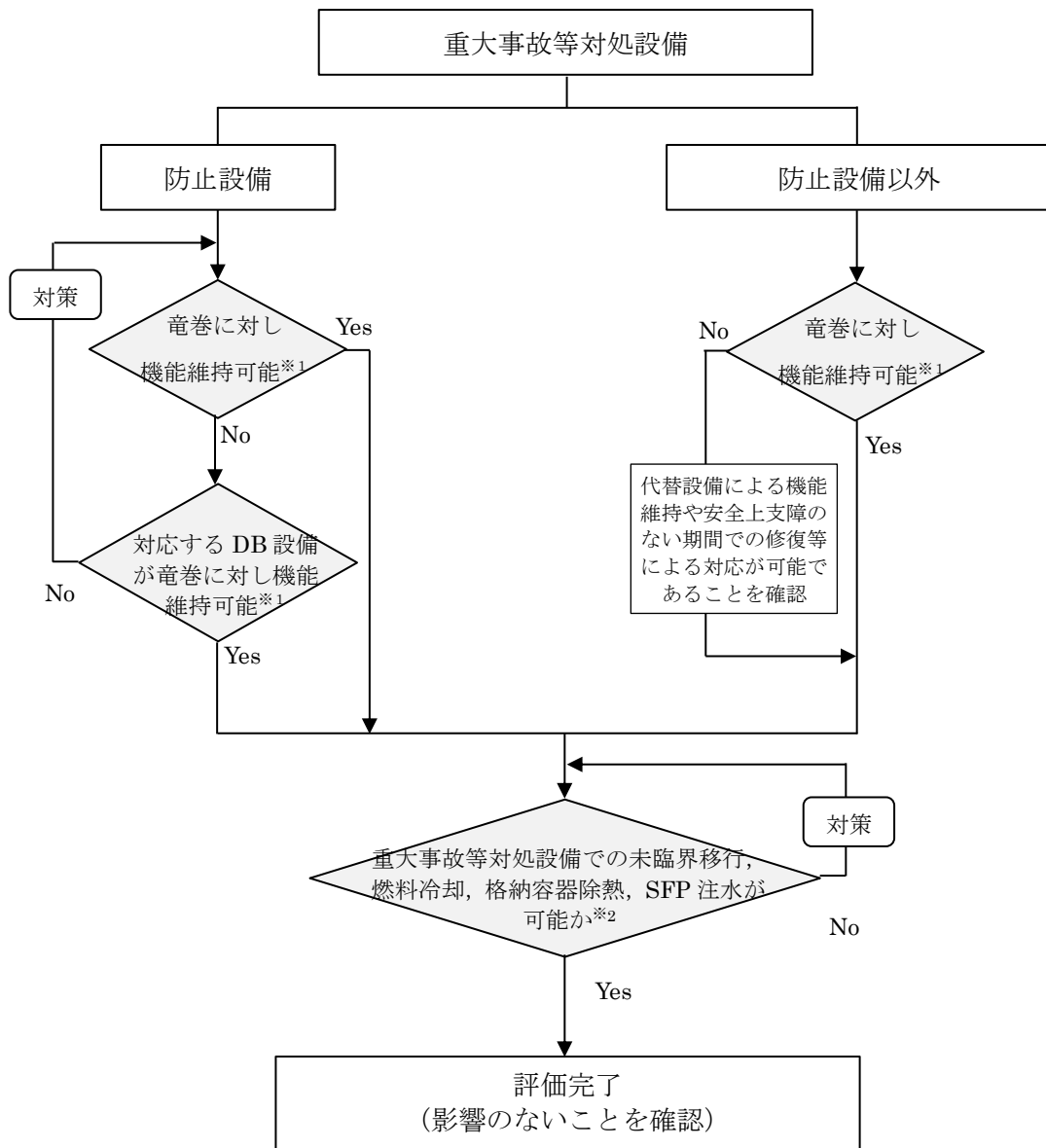
また、設計竜巻 ( $V_D=92\text{m/s}$ ) の発生頻度が小さい ( $1.56 \times 10^{-7}$ /年程度) ため、竜巻と重大事故等が同時に発生する可能性は小さい。

これらを踏まえ、図 1.1.1 のフローに従い、重大事故等対処設備については、竜巻により重大事故等対処設備が、対応する設計基準事故対処設備と同時に機能を損なわないこと、または、竜巻により重大事故等対処設備が損傷した場合においても代替設備や補修等により安全機能を維持できることを確認した。確認結果を表 1.1.2 に示す。また、図 1.1.2 に竜巻襲来時における重大事故等対処設備と代替手段の 3点での位置的分散による安全機能維持の例（低圧原子炉代替注水系の場合）を示す。

プラントの運転については、保安規定に従って重大事故等対処設備を含むプラント設備について問題ないことを確認して行うこととしている。また、竜巻は短時間に通過し、被害範囲は一部に限定されるため、仮に竜巻により重大事故等対処設備が損傷した場合には、補修等を実施するとともに、保安規定の運転上の制限に従い、プラント停止等の対応を行うことにより、プラントの安全性は維持できる。

表 1.1.1 実用発電用原子炉及びその附属施設の位置、構造及び設備の基準に関する規則及びその解釈に対する竜巻の考慮について

新規制基準の項目	解釈	竜巻に対する考慮
<p>(外部からの衝撃による損傷の防止)            第六条            安全施設は、想定される自然現象（地震及び津波を除く。）次項において同じ。）が発生した場合においても安全機能を損なわないものでなければならぬ。</p>	<p>1 第6条は、設計基準において想定される自然現象（地震及び津波を除く。）に対して、安全施設が安全機能を損なわないために必要な安全施設以外の施設又は設備等（重大事故等対処設備を含む。）への措置を含む。</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 竜巻発生時においても外部事象防護対象施設の安全機能を維持できることを確認しているため、竜巻を起因として重大事故等が発生する可能性は小さい。</li> <li>• 設計竜巻 (<math>V_D=92\text{m/s}</math>) の発生頻度が小さい (<math>1.56 \times 10^{-7}/\text{年程度}</math>) ため、竜巻と重大事故等が同時に発生する可能性は小さい。</li> </ul>
<p>(重大事故等対処設備)            第四十三条            3. 可搬型重大事故等対処設備に関しては、第一項に定めるもののほか、次に掲げるものでなければならぬ。            五 地震、津波その他の自然現象又は故意による大型航空機の衝突その他のテロリズムによる影響、設計基準事故対処設備及び重大事故等対処設備の配置その他の条件を考慮した上で常設重大事故等対処設備と異なる保管場所に保管すること。</p>	<p>7 第3項第5号について、可搬型重大事故等対処設備の保管場所は、故意による大型航空機の衝突も考慮すること。例えば原子炉建屋から100m 以上離隔をとり、原子炉建屋と同時に影響を受けにくいこと。又は、故意による大型航空機の衝突に対して頑健性を有すること。</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 常設重大事故等対処設備と可搬型重大事故等対処設備は100m 以上の離隔距離をとって、離れた2ヶ所に分散配置しているため、仮に竜巻の影響を受けたとしても同時に被害を受ける可能性は小さい。</li> </ul>
<p>七 重大事故防止設備のうち可搬型のものは、共通要因によって、設計基準事故対処設備の安全機能、使用済燃料貯蔵槽の冷却機能若しくは注水機能又は常設重大事故防止設備の重大事故に至るおそれがある事故に対処するために必要な機能と同時にその機能が損なわれるおそれがないよう、適切な措置を講じたものであること。</p>		<ul style="list-style-type: none"> <li>• 竜巻発生時においても外部事象防護対象施設の安全機能を維持できることを確認しているため、竜巻を起因として重大事故等が発生する可能性は小さい。</li> <li>• 設計竜巻 (<math>V_D=92\text{m/s}</math>) の発生頻度が小さい (<math>1.56 \times 10^{-7}/\text{年程度}</math>) ため、竜巻と重大事故等が同時に発生する可能性は小さい。</li> </ul>



※1：屋内設備については、当該設備を内包する建物（原子炉建物、タービン建物、制御室建物、廃棄物処理建物等）の影響評価を実施し、安全機能が維持されるかを確認。

※2：竜巻により重大事故等対処設備と設計基準事故対処設備が同時に損なわれることはないが、安全上支障のない期間内での復旧により機能維持可能であることを確認。

図 1.1.1 竜巻による影響を考慮する SA 設備評価フロー

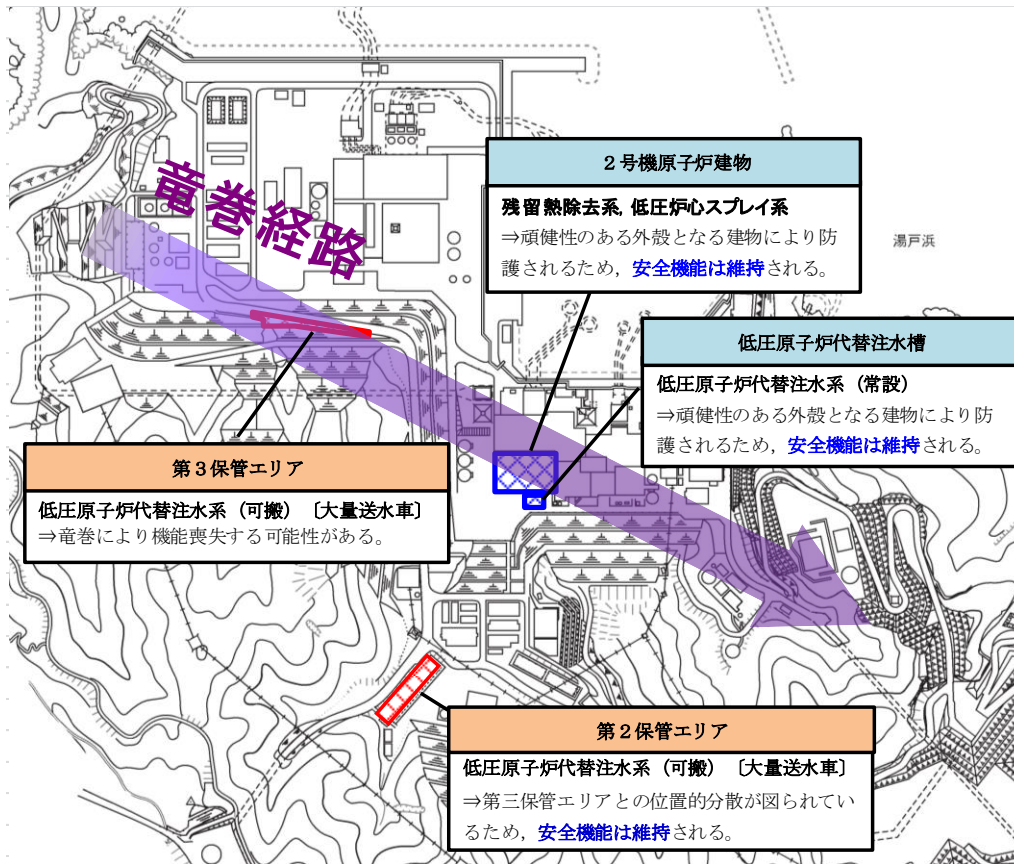


図 1.1.2 竜巻襲来時における代替手段による安全機能維持の例  
 (低圧原子炉代替注水系の場合)

表 1.1.2 竜巻に対する重大事故等対処設備の評価結果(1/30)

設置許可基準	重大事故等対処設備		分類	設置場所	竜巻	
					評価	防護方法
第 37 条 重大事故等の拡大防止等	—	—	—	—	—	—
第 38 条 重大事故等対処施設の地盤	—	—	—	—	—	—
第 39 条 地震による損傷の防止	—	—	—	—	—	—
第 40 条 津波による損傷の防止	—	—	—	—	—	—
第 41 条 火災による損傷の防止	—	—	—	—	—	—
第 42 条 特定重大事故等対処設備	特定重大事故等対処施設		→申請対象外		—	—
第 43 条 重大事故等対処設備	アクセスルート確保	ホイールローダ	防止でも緩和でもない設備	可搬型設備保管場所(屋外)	○	分散配置
第 44 条 緊急停止失敗時に発電用原子炉を未臨界にするための設備	代替制御棒挿入機能による制御棒緊急挿入	ATWS 緩和設備(代替制御棒挿入機能)	防止設備	R/B C/B	○	建物内
		制御棒				
		制御棒駆動機構(水圧駆動)				
		制御棒駆動水圧系水圧制御ユニット				
	制御棒駆動水圧系配管・弁[流路]					
代替原子炉再循環ポンプ停止による原子炉出力抑制	ATWS 緩和設備(代替原子炉再循環ポンプトリップ機能)	防止設備	C/B	○	建物内	
ほう酸水注入	ほう酸水注入ポンプ	ほう酸水注入系 配管・弁[流路]	防止設備・緩和設備	R/B	○	建物内
	ほう酸水貯蔵タンク					
	差圧検出・ほう酸水注入系配管(原子炉压力容器内部)[流路]					
	原子炉压力容器[注入先]		→その他の設備に記載	—	—	
出力急上昇の防止	自動減圧起動阻止スイッチ		→46 条に記載		—	—
	代替自動減圧起動阻止スイッチ					

○：各外部事象に対し安全機能を維持できる  
 又は各外部事象による損傷を考慮した場合でも、対応するDB設備が各外部事象に対し安全機能を維持できる(防止設備)又は各外部事象による損傷を考慮して、代替設備による機能維持や安全上支障のない期間での補修等の対応が可能(緩和設備, 防止でも緩和でもない設備)  
 —：他の項目にて整理

表 1.1.2 竜巻に対する重大事故等対処設備の評価結果(2/30)

設置許可基準	重大事故等対処設備		分類	設置場所	竜巻	
					評価	防護方法
第 45 条 原子炉冷却材圧力バウンダリ高圧時に発電用原子炉を冷却するための設備	高圧原子炉代替注水系による原子炉の冷却	高圧原子炉代替注水ポンプ	防止設備・緩和設備	R/B	○	建物内
		高圧原子炉代替注水系（蒸気系）配管・弁 [流路]				
		主蒸気系 配管 [流路]				
		原子炉隔離時冷却系（蒸気系）配管・弁 [流路]				
		高圧原子炉代替注水系（注水系）配管・弁 [流路]				
		残留熱除去系 配管・弁・ストレーナ [流路]				
		原子炉隔離時冷却系（注水系）配管・弁 [流路]				
		原子炉浄化系 配管 [流路]				
		給水系 配管・弁・スパージャ [流路]				
		サブプレッション・チェンバ[水源]				
	原子炉圧力容器 [注水先]	→その他設備に記載	—	—		
	原子炉隔離時冷却系による原子炉の冷却	原子炉隔離時冷却ポンプ	防止設備（設計基準拡張）	R/B	○	建物内
		原子炉隔離時冷却系（蒸気系）配管・弁 [流路]				
		主蒸気系 配管 [流路]				
原子炉隔離時冷却系（注水系）配管・弁・ストレーナ [流路]						
原子炉浄化系 配管 [流路]						
給水系 配管・弁・スパージャ [流路]						
サブプレッション・チェンバ[水源]		→56 条に記載（うち、防止設備）				
原子炉圧力容器 [注水先]	→その他設備に記載（うち、防止設備）	—	—			

○：各外部事象に対し安全機能を維持できる  
 又は各外部事象による損傷を考慮した場合でも、対応するDB設備が各外部事象に対し安全機能を維持できる（防止設備）又は各外部事象による損傷を考慮して、代替設備による機能維持や安全上支障のない期間での補修等の対応が可能（緩和設備，防止でも緩和でもない設備）  
 —：他の項目にて整理

表 1.1.2 竜巻に対する重大事故等対処設備の評価結果(3/30)

設置許可基準	重大事故等対処設備		分類	設置場所	竜巻				
					評価	防護方法			
第 45 条 原子炉冷却材圧力バウンダリ高圧時に発電用原子炉を冷却するための設備	高圧炉心スプレイ系による原子炉の冷却	高圧炉心スプレイポンプ	防止設備 (設計基準拡張)	R/B	○	建物内			
		高圧炉心スプレイ系配管・弁・ストレータ・スパーージャ[流路]							
		サブプレッション・チェンバ[水源]					→56 条に記載 (うち, 防止設備)	—	—
		原子炉圧力容器[注水先]					→その他設備に記載 (うち, 防止設備)	—	—
	ほう酸水注入系による進展抑制	ほう酸水注入系	→44 条に記載 (うち, 防止設備)	—	—	—			
第 46 条 原子炉冷却材圧力バウンダリを減圧するための設備	逃がし安全弁	逃がし安全弁[操作対象弁]	防止設備 ・緩和設備	R/B	○	建物内			
		逃がし安全弁 逃がし弁機能用アキュムレータ							
		主蒸気系 配管・クエンチャ[流路]							
	原子炉減圧の自動化	代替自動減圧ロジック (代替自動減圧機能)	防止設備	C/B R/B Rw/B	○	建物内			
		自動減圧起動阻止スイッチ							
		代替自動減圧起動阻止スイッチ							
	可搬型直流電源による減圧	可搬型直流電源設備	→57 条に記載 (うち, 防止設備)	—	—				
		SRV 用電源切替盤	防止設備	R/B Rw/B	○	建物内			
	主蒸気逃がし安全弁用蓄電池による減圧	主蒸気逃がし安全弁用蓄電池 (補助盤室)	防止設備	Rw/B	○	建物内			
	逃がし安全弁窒素ガス供給設備による作動窒素ガス確保	逃がし安全弁窒素ガスポンプ	防止設備	R/B	○	建物内			
逃がし安全弁窒素ガス供給系配管・弁[流路]									
逃がし安全弁 逃がし弁機能用アキュムレータ[流路]									
インターフェイスシステム LOCA 隔離弁	残留熱除去系注水弁	防止設備 (設計基準拡張)	R/B	○	建物内				
原子炉建物ブローアウトパネル	原子炉建物ブローアウトパネル	防止設備	屋外	○	竜巻防護対策により安全機能が損なわれないことを確認				

○：各外部事象に対し安全機能を維持できる  
又は各外部事象による損傷を考慮した場合でも、対応するDB設備が各外部事象に対し安全機能を維持できる（防止設備）又は各外部事象による損傷を考慮して、代替設備による機能維持や安全上支障のない期間での補修等の対応が可能（緩和設備、防止でも緩和でもない設備）  
—：他の項目にて整理



表 1.1.2 竜巻に対する重大事故等対処設備の評価結果(4/30)

設置許可基準	重大事故等対処設備		分類	設置場所	竜巻	
					評価	防護方法
第 47 条 原子炉冷却材圧力バウンダリ低圧時に発電用原子炉を冷却するための設備	低圧原子炉代替注水系（常設）による原子炉の冷却	低圧原子炉代替注水ポンプ	防止設備・緩和設備	低圧原子炉代替注水ポンプ格納槽	○	建物内
		低圧原子炉代替注水系 配管・弁[流路]		低圧原子炉代替注水ポンプ格納槽		
		残留熱除去系 配管・弁[流路]	→56 条に記載	R/B	-	-
		低圧原子炉代替注水槽[水源]				
		原子炉圧力容器[注水先]	→その他設備に記載		-	-
	低圧原子炉代替注水系（可搬型）による原子炉の冷却	大量送水車	防止設備・緩和設備	可搬型設備保管場所（屋外）	○	分散配置及び代替設備（低圧原子炉代替注水系（常設））
		低圧原子炉代替注水系 配管・弁[流路]		R/B		
		残留熱除去系 配管・弁[流路]	防止設備・緩和設備	屋外	○	分散配置及び代替設備（低圧原子炉代替注水系（常設））
		ホース・接続口[流路]				
		輪谷貯水槽（西1）[水源]	→56 条に記載		-	-
		輪谷貯水槽（西2）[水源]	→56 条に記載		-	-
		原子炉圧力容器[注水先]	→その他設備に記載		-	-
	低圧炉心スプレイ系	低圧炉心スプレイポンプ	防止設備（設計基準拡張）	R/B	○	建物内
		低圧炉心スプレイ系 配管・弁・ストレーナ・スパージャ[流路]				
		サブプレッション・チェンバ[水源]	→56 条に記載（うち、防止設備）		-	-
		原子炉圧力容器[注水先]	→その他設備に記載（うち、防止設備）		-	-
		残留熱除去ポンプ	防止設備（設計基準拡張）	R/B	○	建物内
	残留熱除去系 配管・弁・ストレーナ[流路]					
	低圧注水	サブプレッション・チェンバ[水源]	→56 条に記載（うち、防止設備）		-	-
		原子炉圧力容器[注水先]	→その他設備に記載（うち、防止設備）		-	-

○：各外部事象に対し安全機能を維持できる  
 又は各外部事象による損傷を考慮した場合でも、対応するDB設備が各外部事象に対し安全機能を維持できる（防止設備）又は各外部事象による損傷を考慮して、代替設備による機能維持や安全上支障のない期間での補修等の対応が可能（緩和設備、防止でも緩和でもない設備）  
 -：他の項目にて整理

表 1.1.2 竜巻に対する重大事故等対処設備の評価結果(5/30)

設置許可基準	重大事故等対処設備		分類	設置場所	竜巻	
					評価	防護方法
第 47 条 原子炉冷却材圧力バウンダリ低圧時に発電用原子炉を冷却するための設備	残留熱除去系(原子炉停止時冷却モード)	残留熱除去ポンプ	防止設備(設計基準拡張)	R/B	○	建物内
		残留熱除去系熱交換器				
		残留熱除去系 配管・弁・ジェットポンプ [流路]				
		原子炉再循環系配管[流路]				
		原子炉圧力容器[注水先]	→その他設備に記載(うち, 防止設備)	-	-	
	原子炉補機冷却系(区分 I, II)	原子炉補機冷却水ポンプ	→48 条に記載(うち, 防止設備)	-	-	
		原子炉補機海水ポンプ				
		原子炉補機冷却系熱交換器				
		原子炉補機冷却系サージタンク[流路]				
		原子炉補機冷却系配管・弁・海水ストレナ[流路]				
	非常用取水設備	取水口	→その他設備に記載	-	-	
		取水管				
		取水槽				
低圧原子炉代替注水系(常設)による残存溶融炉心の冷却	低圧原子炉代替注水系(常設)	低圧原子炉代替注水系(常設)による原子炉の冷却に記載(うち, 緩和設備)	-	-		
低圧原子炉代替注水系(可搬型)による残存溶融炉心の冷却	低圧原子炉代替注水系(可搬型)	低圧原子炉代替注水系(可搬型)による原子炉の冷却に記載(うち, 緩和設備)	-	-		

○ : 各外部事象に対し安全機能を維持できる  
 又は各外部事象による損傷を考慮した場合でも, 対応する DB 設備が各外部事象に対し安全機能を維持できる(防止設備) 又は各外部事象による損傷を考慮して, 代替設備による機能維持や安全上支障のない期間での補修等の対応が可能(緩和設備, 防止でも緩和でもない設備)  
 - : 他の項目にて整理

表 1.1.2 竜巻に対する重大事故等対処設備の評価結果(6/30)

設置許可基準	重大事故等対処設備	分類	設置場所	竜巻					
				評価	防護方法				
第 48 条 最終ヒートシンクへ熱を輸送するための設備	原子炉補機代替冷却系による除熱	移動式代替熱交換設備	防止設備	可搬型設備保管場所（屋外）	○	分散配置及び代替設備（原子炉補機冷却系）			
		大型送水ポンプ車							
		原子炉補機冷却系配管・弁〔流路〕	防止設備	R/B	○	建物内			
		原子炉補機冷却系サージタンク〔流路〕							
		残留熱除去系熱交換器〔流路〕							
		ホース・接続口〔流路〕	防止設備	屋外	○	分散配置及び代替設備（原子炉補機冷却系）			
	取水口	→その他設備に記載（うち、防止設備）		-	-				
	取水管								
	取水槽								
	格納容器フィルタベント系による原子炉格納容器内の減圧及び徐熱	第1ベントフィルタスクラバ容器	→50条に記載（うち、防止設備）		-	-			
		第1ベントフィルタ銀ゼオライト容器							
		圧力開放板							
		遠隔手動弁操作機構							
		格納容器フィルタベント系 配管・弁〔流路〕							
		窒素ガス制御系 配管・弁〔流路〕							
		非常用ガス処理系 配管・弁〔流路〕							
		可搬式窒素供給装置					→52条に記載	-	-
		ホース・接続口〔流路〕							
	原子炉格納容器（サブプレッションチェンバ、真空破壊装置を含む）〔排出元〕	→その他設備に記載（うち、防止設備）		-	-				
	原子炉停止時冷却	残留熱除去系（原子炉停止時冷却モード）	→47条に記載（うち、防止設備）		-	-			
サブプレッション・プール冷却	残留熱除去系（サブプレッション・プール水冷却モード）	→49条に記載（うち、防止設備）		-	-				

○：各外部事象に対し安全機能を維持できる  
 又は各外部事象による損傷を考慮した場合でも、対応するDB設備が各外部事象に対し安全機能を維持できる（防止設備）又は各外部事象による損傷を考慮して、代替設備による機能維持や安全上支障のない期間での補修等の対応が可能（緩和設備、防止でも緩和でもない設備）  
 -：他の項目にて整理

表 1.1.2 竜巻に対する重大事故等対処設備の評価結果(7/30)

設置許可基準	重大事故等対処設備		分類	設置場所	竜巻	
					評価	防護方法
第 48 条 最終ヒートシンクへ熱を輸送するための設備	原子炉補機冷却系 (区分 I, II, III)	原子炉補機冷却水ポンプ	防止設備 (設計基準拡張)	R/B	○	建物内
		原子炉補機冷却系熱交換器				
		原子炉補機冷却系サージタンク [流路]				
		原子炉補機冷却系配管・弁・海水ストレーナ [流路]	防止設備 (設計基準拡張)	R/B T/B 屋外	○	竜巻防護対策により安全機能が損なわれないことを確認
		原子炉補機海水ポンプ	防止設備 (設計基準拡張)	屋外	○	竜巻防護対策により安全機能が損なわれないことを確認
		高圧炉心スプレイ補機冷却水ポンプ	防止設備 (設計基準拡張)	R/B	○	建物内
		高圧炉心スプレイ補機冷却系熱交換器				
		高圧炉心スプレイ補機冷却系サージタンク [流路]				
		高圧炉心スプレイ補機冷却系 配管・弁・海水ストレーナ [流路]	防止設備 (設計基準拡張)	R/B T/B 屋外	○	竜巻防護対策により安全機能が損なわれないことを確認
	高圧炉心スプレイ補機海水ポンプ	防止設備 (設計基準拡張)	屋外	○	竜巻防護対策により安全機能が損なわれないことを確認	
	非常用取水設備	取水口	→その他設備に記載	-	-	
	取水管					
	取水槽					

○：各外部事象に対し安全機能を維持できる  
又は各外部事象による損傷を考慮した場合でも、対応するDB設備が各外部事象に対し安全機能を維持できる（防止設備）又は各外部事象による損傷を考慮して、代替設備による機能維持や安全上支障のない期間での補修等の対応が可能（緩和設備、防止でも緩和でもない設備）  
－：他の項目にて整理

表 1.1.2 竜巻に対する重大事故等対処設備の評価結果(8/30)

設置許可基準	重大事故等対処設備		分類	設置場所	竜巻	
					評価	防護方法
第 49 条 原子炉格納容器内の冷却等のための設備	格納容器代替スプレイ系（常設）による原子炉格納容器内の冷却	低圧原子炉代替注水ポンプ	防止設備 ・緩和設備	低圧原子炉代替注水ポンプ格納槽	○	建物内
		低圧原子炉代替注水系 配管・弁 [流路]		低圧原子炉代替注水ポンプ格納槽 R/B		
		残留熱除去系配管・弁 [流路]	防止設備 ・緩和設備	R/B	○	建物内
		格納容器スプレイ・ヘッダ [流路]				
		低圧原子炉代替注水槽 [水源]	→56 条に記載		—	—
		原子炉圧力容器 [注水先]	→その他設備に記載		—	—
	格納容器代替スプレイ系（可搬型）による原子炉格納容器内の冷却	大量送水車	防止設備 ・緩和設備	可搬型設備 保管場所（屋外）	○	分散配置及び代替設備（格納容器代替スプレイ系（常設））
		可搬型ストレーナ				
		残留熱除去系配管・弁 [流路]	防止設備 ・緩和設備	R/B	○	建物内
		格納容器代替スプレイ系 配管・弁 [流路]				
		格納容器スプレイ・ヘッダ [流路]				
		ホース・接続口 [流路]	防止設備 ・緩和設備	屋外	○	分散配置及び代替設備（格納容器代替スプレイ系（常設））
		輪谷貯水槽（西 1） [水源]	→56 条に記載		—	—
		輪谷貯水槽（西 2） [水源]	→56 条に記載		—	—
原子炉格納容器 [注水先]	→その他設備に記載		—	—		
サブプレッション・プール水の冷却	残留熱除去ポンプ	防止設備 （設計基準拡張）	R/B	○	建物内	
	残留熱除去系熱交換器					
	残留熱除去系配管・弁・ストレーナ [流路]					
	サブプレッション・チェンバ [水源]	→56 条に記載		—	—	
	原子炉格納容器 [注水先]	→その他設備に記載（うち、防止設備）		—	—	

○：各外部事象に対し安全機能を維持できる  
又は各外部事象による損傷を考慮した場合でも、対応するDB設備が各外部事象に対し安全機能を維持できる（防止設備）又は各外部事象による損傷を考慮して、代替設備による機能維持や安全上支障のない期間での補修等の対応が可能（緩和設備、防止でも緩和でもない設備）  
—：他の項目にて整理

表 1.1.2 竜巻に対する重大事故等対処設備の評価結果(9/30)

設置許可基準	重大事故等対処設備		分類	設置場所	竜巻	
					評価	防護方法
第 49 条 原子炉格納容器内の冷却等のための設備	原子炉補機冷却系 (区分 I, II)	原子炉補機冷却水ポンプ	→48 条に記載 (うち, 防止設備)		-	-
		原子炉補機冷却系配管・弁・海水ストレーナ[流路]				
		原子炉補機冷却系サージタンク[流路]				
		原子炉補機冷却系熱交換器				
		原子炉補機海水ポンプ				
	非常用取水設備	取水口	→その他設備に記載		-	-
		取水管				
取水槽						

○：各外部事象に対し安全機能を維持できる  
 又は各外部事象による損傷を考慮した場合でも、対応するDB設備が各外部事象に対し安全機能を維持できる（防止設備）又は各外部事象による損傷を考慮して、代替設備による機能維持や安全上支障のない期間での補修等の対応が可能（緩和設備，防止でも緩和でもない設備）  
 -：他の項目にて整理

表 1.1.2 竜巻に対する重大事故等対処設備の評価結果(10/30)

設置許可基準	重大事故等対処設備		分類	設置場所	竜巻	
					評価	防護方法
第50条 原子炉格納容器の過圧破損を防止するための設備	格納容器フィルタベント系による原子炉格納容器内の減圧及び除熱	第1ベントフィルタスクラバ容器	防止設備 ・緩和設備	フィルタベント格納槽	○	建物内
		第1ベントフィルタ銀ゼオライト容器				
		圧力開放板	防止設備 ・緩和設備	屋外	○	代替設備 (残留熱代替除去系)
		格納容器フィルタベント系 配管・弁 [流路]				
		窒素ガス制御系 配管・弁 [流路]	防止設備 ・緩和設備	R/B	○	建物内
		非常用ガス処理系 配管・弁 [流路]				
		遠隔手動弁操作機構				
		可搬式窒素供給装置	→52条に記載		—	—
		ホース・接続口 [流路]	→52条に記載		—	—
	原子炉格納容器 (サブプレッショ ン・チェンバ, 真空破壊装置を含む) [排出元]	→その他設備に記載		—	—	
	残留熱代替除去系による原子炉格納容器内の減圧及び除熱	残留熱代替除去ポンプ	緩和設備	R/B	○	建物内
		残留熱除去系熱交換器				
		移動式代替熱交換設備	緩和設備	可搬型設備 保管場所 (屋外)	○	分散配置及び代替設備 (格納容器フィルタベント系)
		大型送水ポンプ車				
原子炉補機冷却系 配管・弁 [流路]		緩和設備	R/B	○	建物内	
原子炉補機冷却系 サージタンク [流路]						
残留熱除去系配管・弁・ストレーナ [流路]						
残留熱代替除去系 配管・弁 [流路]						
低圧原子炉代替注水系 配管・弁 [流路]						
格納容器スプレイ・ヘッド [流路]						
ホース・接続口 [流路]						
サブプレッショ ン・チェンバ [水源]	→56条に記載 (うち, 緩和設備)		—	—		

○：各外部事象に対し安全機能を維持できる  
又は各外部事象による損傷を考慮した場合でも、対応するDB設備が各外部事象に対し安全機能を維持できる（防止設備）又は各外部事象による損傷を考慮して、代替設備による機能維持や安全上支障のない期間での補修等の対応が可能（緩和設備、防止でも緩和でもない設備）  
—：他の項目にて整理

表 1.1.2 竜巻に対する重大事故等対処設備の評価結果(11/30)

設置許可基準	重大事故等対処設備		分類	設置場所	竜巻	
					評価	防護方法
第50条 原子炉格納容器の過圧破損を防止するための設備	残留熱代替除去系による原子炉格納容器内の減圧及び除熱	取水口	→その他設備に記載(うち、緩和設備)		-	-
		取水管				
		取水槽				
		原子炉圧力容器[注水先]				
		原子炉格納容器[注水先]				
第51条 原子炉格納容器下部の溶融炉心を冷却するための設備	ペDESTAL代替注水系(常設)によるペDESTAL内注水	低圧原子炉代替注水ポンプ	緩和設備	低圧原子炉代替注水ポンプ格納槽 R/B	○	建物内
		低圧原子炉代替注水系 配管・弁[流路]				
		コリウムシールド	緩和設備	R/B	○	建物内
		残留熱除去系 配管・弁[流路]				
		格納容器スプレイ・ヘッド[流路]				
		低圧原子炉代替注水槽[水源]		→56条に記載(うち、緩和設備)	-	-
	原子炉格納容器[注水先]		→その他設備に記載(うち、緩和設備)	-	-	
	ペDESTAL代替注水系(可搬型)によるペDESTAL内注水	大量送水車	緩和設備	可搬型設備 保管場所(屋外)	○	分散配置及び代替設備(ペDESTAL代替注水系(常設))
		コリウムシールド	緩和設備	R/B	○	建物内
		ペDESTAL代替注水系 配管・弁[流路]				
		ホース・接続口[流路]	緩和設備	屋外	○	分散配置及び代替設備(ペDESTAL代替注水系(常設))
		輪谷貯水槽(西1)[水源]		→56条に記載	-	-
		輪谷貯水槽(西2)[水源]				
		原子炉格納容器[注水先]		→その他設備に記載(うち、緩和設備)	-	-
		溶融炉心の落下遅延及び防止	高圧原子炉代替注水系		→45条に記載(うち、緩和設備)	-
	ほう酸水注入系			→44条に記載(うち、緩和設備)	-	-
	低圧原子炉代替注水系(常設)			→47条に記載(うち、緩和設備)	-	-
低圧原子炉代替注水系(可搬型)						

○：各外部事象に対し安全機能を維持できる  
 又は各外部事象による損傷を考慮した場合でも、対応するDB設備が各外部事象に対し安全機能を維持できる(防止設備) 又は各外部事象による損傷を考慮して、代替設備による機能維持や安全上支障のない期間での補修等の対応が可能(緩和設備、防止でも緩和でもない設備)  
 -：他の項目にて整理



表 1.1.2 竜巻に対する重大事故等対処設備の評価結果(12/30)

設置許可基準	重大事故等対処設備		分類	設置場所	竜巻		
					評価	防護方法	
第52条 水素爆発による 原子炉格納容器の 破損を防止するた めの設備	原子炉格納容器内 不活性化による原 子炉格納容器水素 爆発防止	(窒素ガス制御 系)	(設計基準 対象施設)	R/B 屋外	○	補修を実施	
		窒素ガス代替注入 系による原子炉格 納容器内の不活性 化	可搬式窒素供給装 置	緩和設備	可搬型設備 保管場所(屋 外)	○	代替設備(残 留熱代替除 去系)
			窒素ガス代替注入 系 配管・弁[流路]	緩和設備	R/B	○	建物内
			ホース・接続口[流 路]	緩和設備	屋外	○	分散配置及 び代替設備 (残留熱代 替除去系)
			原子炉格納容器 [注水先]	→その他設備に記載(うち、 緩和設備)		—	—
	格納容器フィルタ ベント系による原 子炉格納容器内の 水素ガス及び酸素 ガスの排出(代替 循環冷却系使用時 の格納容器内の可 燃性ガスの排出を 含む)	第1ベントフィル タスクラバ容器	→50条に記載 (うち、緩和設備)		—	—	
		第1ベントフィル タ銀ゼオライト容 器			—	—	
		圧力開放板			—	—	
		第1ベントフィル タ出口水素濃度	→58条に記載 (うち、緩和設備)		—	—	
		第1ベントフィル タ出口放射線モニ タ(高レンジ)			—	—	
		可搬式窒素供給装 置	緩和設備	可搬型設備 保管場所(屋 外)	○	代替設備(残 留熱代替除 去系)	
		遠隔手動弁操作機 構	→50条に記載 (うち、緩和設備)		—	—	
		格納容器フィルタ ベント系 配管・ 弁 [流路]			—	—	
		窒素ガス制御系 配管・弁[流路]			—	—	
		非常用ガス処理系 配管・弁[流路]			—	—	
	水素濃度及び酸素 濃度の監視	原子炉格納容器 (サブプレッショ ン・チェンバ, 真 空破壊装置を含 む) [排出元]	→その他設備に記載(うち、 緩和設備)		—	—	
		ホース・接続口[流 路]	緩和設備	屋外	○	分散配置及 び代替設備 (残留熱代 替除去系)	
		格納容器水素濃度 (SA)	緩和設備	R/B	○	建物内	
		格納容器水素濃度					
	格納容器酸素濃度 (SA)						
格納容器酸素濃度							

○：各外部事象に対し安全機能を維持できる  
又は各外部事象による損傷を考慮した場合でも、対応するDB設備が各外部事象に対し安全機能を維持できる(防止設備)又は各外部事象による損傷を考慮して、代替設備による機能維持や安全上支障のない期間での補修等の対応が可能(緩和設備, 防止でも緩和でもない設備)  
—：他の項目にて整理

表 1.1.2 竜巻に対する重大事故等対処設備の評価結果(13/30)

設置許可基準	重大事故等対処設備		分類	設置場所	竜巻	
					評価	防護方法
第53条 水素爆発による原子炉建屋等の損傷を防止するための設備	静的触媒式水素処理装置による水素濃度抑制	静的触媒式水素処理装置	緩和設備	R/B	○	建物内
		静的触媒式水素処理装置入口温度				
		静的触媒式水素処理装置出口温度				
	原子炉棟 [流路]	→その他の設備に記載	—	—		
原子炉建物内の水素濃度	原子炉建物水素濃度	緩和設備	R/B	○	建物内	
第54条 使用済燃料貯蔵槽の冷却等のための設備	燃料プールスプレイ系（可搬型）による常設スプレイヘッドを使用した燃料プール注水及びスプレイ	大量送水車	防止設備・緩和設備	可搬型設備 保管場所（屋外）	○	分散配置及び代替設備（残留熱除去系及び燃料プール冷却系）
		可搬型ストレーナ				
		常設スプレイヘッド	防止設備・緩和設備	R/B	○	建物内
		燃料プールスプレイ系 配管・弁 [流路]				
		ホース・接続口 [流路]	防止設備・緩和設備	屋外	○	分散配置及び代替設備（残留熱除去系及び燃料プール冷却系）
		輪谷貯水槽（西1） [水源]				
		輪谷貯水槽（西2） [水源]				
	燃料プール（サイフォン防止機能含む） [注水先]	→その他設備に記載	—	—		
	燃料プールスプレイ系（可搬型）による可搬型スプレイノズルを使用した燃料プール注水及びスプレイ	大量送水車	防止設備・緩和設備	可搬型設備 保管場所（屋外）	○	分散配置及び代替設備（残留熱除去系及び燃料プール冷却系）
		ホース [流路]				
		可搬型ストレーナ	防止設備・緩和設備	R/B	○	建物内
		可搬型スプレイノズル				
		輪谷貯水槽（西1） [水源]	→56条に記載	—	—	
		輪谷貯水槽（西2） [水源]				
燃料プール（サイフォン防止機能含む） [注水先]		→その他設備に記載	—	—		
大気への放射性物質の拡散抑制	大型送水ポンプ車	→55条に記載	—	—		
	ホース [流路]					
	放水砲					

○：各外部事象に対し安全機能を維持できる  
 又は各外部事象による損傷を考慮した場合でも、対応するDB設備が各外部事象に対し安全機能を維持できる（防止設備）又は各外部事象による損傷を考慮して、代替設備による機能維持や安全上支障のない期間での補修等の対応が可能（緩和設備、防止でも緩和でもない設備）  
 —：他の項目にて整理

表 1.1.2 竜巻に対する重大事故等対処設備の評価結果(14/30)

設置許可基準	重大事故等対処設備		分類	設置場所	竜巻	
					評価	防護方法
第54条 使用済燃料貯蔵槽 の冷却等のための設 備	燃料プールの監 視	燃料プール水位 (SA)	防止設備 ・緩和設 備	R/B	○	建物内
		燃料プール水位・温 度 (SA)				
		燃料プールエリア放 射線モニタ (高レン ジ・低レンジ) (SA)				
		燃料プール監視カメ ラ (SA) (燃料プール監視カ メラ用冷却設備を含 む。)				
	重大事故時に おける燃料プールの 除熱	燃料プール冷却ポン プ	防止設備	R/B	○	建物内
		燃料プール冷却系熱 交換器				
		原子炉補機冷却系 配管・弁[流路]				
		原子炉補機冷却系 サージタンク [流路]				
		燃料プール冷却系 配管・弁 [流路]				
		燃料プール冷却系 スキマサージタンク [流路]				
		燃料プール冷却系 ディフューザ [流路]				
		移動式代替熱交換設 備	防止設備	可搬型設備 保管場所(屋 外)	○	分散配置及 び代替設備 (原子炉補 機冷却系)
		大型送水ポンプ車	防止設備	屋外	○	分散配置及 び代替設備 (原子炉補 機冷却系)
		ホース・接続口 [流路]				
燃料プール [注水先]	→その他設備に記載 (う ち, 防止設備)			-	-	
取水口						
取水管						
取水槽						

○：各外部事象に対し安全機能を維持できる  
又は各外部事象による損傷を考慮した場合でも、対応するDB設備が各外部事象に対し安全機能を維持できる（防止設備）又は各外部事象による損傷を考慮して、代替設備による機能維持や安全上支障のない期間での補修等の対応が可能（緩和設備，防止でも緩和でもない設備）  
-：他の項目にて整理

表 1.1.2 竜巻に対する重大事故等対処設備の評価結果 (15/30)

設置許可基準	重大事故等対処設備		分類	設置場所	竜巻	
					評価	防護方法
第 55 条 工場等外への放射性物質の拡散を抑制するための設備	大気への放射性物質の拡散抑制	大型送水ポンプ車	緩和設備	可搬型設備 保管場所(屋外)	○	分散配置
		ホース[流路]				
		放水砲	緩和設備	可搬型設備 保管場所(屋外)	○	補修を実施
	海洋への放射性物質の拡散抑制	放射性物質吸着材	緩和設備	可搬型設備 保管場所(屋外)	○	補修を実施
		シルトフェンス				
		小型船舶				
	航空機燃料火災への泡消火	大型送水ポンプ車	緩和設備	可搬型設備 保管場所(屋外)	○	分散配置
		ホース[流路]				
		放水砲	緩和設備	可搬型設備 保管場所(屋外)	○	補修を実施
		泡消火薬剤容器				
第 56 条 重大事故等の収束に必要な水の供給設備	重大事故等収束のための水源	低圧原子炉代替注水槽	防止設備・緩和設備	低圧原子炉代替注水ポンプ格納槽	○	建物内
		サブプレッション・チェンバ		R/B	○	建物内
		輪谷貯水槽(西1)	— (代替淡水源)	屋外	○	影響なし
		輪谷貯水槽(西2)				
		ほう酸水貯蔵タンク	→44 条に記載		—	—
	水の供給	大量送水車	防止設備・緩和設備	可搬型設備 保管場所(屋外)	○	分散配置及び代替設備 (大型送水ポンプ車, 大量送水車)
		ホース[流路]				
		可搬型ストレーナ				
		大型送水ポンプ車				
		ホース[流路]	→その他設備に記載	—	—	
取水口						
取水管						
取水槽						

○：各外部事象に対し安全機能を維持できる  
 又は各外部事象による損傷を考慮した場合でも、対応するDB設備が各外部事象に対し安全機能を維持できる（防止設備）又は各外部事象による損傷を考慮して、代替設備による機能維持や安全上支障のない期間での補修等の対応が可能（緩和設備、防止でも緩和でもない設備）  
 —：他の項目にて整理

表 1.1.2 竜巻に対する重大事故等対処設備の評価結果(16/30)

設置許可基準	重大事故等対処設備		分類	設置場所	竜巻	
					評価	防護方法
第 57 条 電源設備	常設代替交流電 源設備による給 電	ガスタービン発電機	防止設備・緩和設備	ガスタービン発電機建物	○	建物内
		ガスタービン発電機用サービスタンク				
		ガスタービン発電機用燃料移送ポンプ				
		ガスタービン発電機用燃料移送配管・弁[燃料流路]				
		ガスタービン発電機用軽油タンク				
	ガスタービン発電機～非常用高圧母線 C 系及び D 系電路 [電路]	防止設備・緩和設備	R/B  低圧原子炉代替注水ポンプ格納槽  ガスタービン発電機建物	○	建物内	
	ガスタービン発電機～SA ロードセンタ電路 [電路]					
	ガスタービン発電機～SA ロードセンタ～SA1 コントローラセンタ電路 [電路]					
	ガスタービン発電機～SA ロードセンタ～SA2 コントローラセンタ電路 [電路]					
	ガスタービン発電機～原子炉補機代替冷却系電路 [電路]					

- ：各外部事象に対し安全機能を維持できる  
 又は各外部事象による損傷を考慮した場合でも、対応するDB設備が各外部事象に対し安全機能を維持できる（防止設備）又は各外部事象による損傷を考慮して、代替設備による機能維持や安全上支障のない期間での補修等の対応が可能（緩和設備，防止でも緩和でもない設備）  
 ー：他の項目にて整理

表 1.1.2 竜巻に対する重大事故等対処設備の評価結果(17/30)

設置許可基準	重大事故等対処設備		分類	設置場所	竜巻	
					評価	防護方法
第 57 条 電源設備	可搬型代替交流 電源設備による 給電	高圧発電機車	防止設 備・緩和設 備	可搬型設備 保管場所 (屋外)	○	分散配置及び 代替設備(非常 用 DEG)
		タンクローリ	防止設 備・緩和設 備	可搬型設備 保管場所 (屋外)	○	分散配置
		ホース [燃料流路]	防止設 備・緩和設 備	ガスタービ ン発電機建 物	○	建物内
		ガスタービン発電 機用軽油タンク	防止設 備・緩和設 備	屋外	○	代替設備(ディ ーゼル燃料貯 蔵タンク)
		ガスタービン発電 機用軽油タンク出 口ノズル・弁 [燃料 流路]				
		高圧発電機車～高 圧発電機車接続ブ ラグ収納箱(原子炉 建物西側)～非常用 高圧母線 C 系及び D 系電路 [電路]	防止設 備・緩和設 備	屋外 R/B	○	分散配置及び 代替設備(非常 用交流電源設 備)
	高圧発電機車～高 圧発電機車接続ブ ラグ収納箱(原子炉 建物南側)～非常用 高圧母線 C 系及び D 系電路 [電路]					
	所内常設蓄電式 直流電源設備に よる給電	B-115V系蓄電池	防止設 備・緩和設 備	Rw/B	○	建物内
		B 1-115V系蓄電 池(SA)				
		230V系蓄電池 (RCIC)	防止設備	Rw/B	○	建物内
		B-115V系充電器	防止設 備・緩和設 備	Rw/B	○	建物内
		B 1-115V系充電 器(SA)				
		230V系充電器 (RCIC)	防止設備	Rw/B	○	建物内
		B-115V系蓄電池 及び充電器～直流 盤電路「電路」	防止設 備・緩和設 備	Rw/B	○	建物内
B 1-115V系蓄電 池(SA)及び充電 器～直流盤電路「電 路」						
230V系蓄電池(R C I C)及び充電器 ～直流母線電路[電 路]	防止設備	Rw/B	○	建物内		

○：各外部事象に対し安全機能を維持できる  
又は各外部事象による損傷を考慮した場合でも、対応するDB設備が各外部事象に対し安全機能を維持できる(防止設備)又は各外部事象による損傷を考慮して、代替設備による機能維持や安全上支障のない期間での補修等の対応が可能(緩和設備, 防止でも緩和でもない設備)  
－：他の項目にて整理

表 1.1.2 竜巻に対する重大事故等対処設備の評価結果(18/30)

設置許可基準	重大事故等対処設備		分類	設置場所	竜巻	
					評価	防護方法
第57条 電源設備	常設代替直流電源設備による給電	SA用115V系蓄電池	防止設備・緩和設備	Rw/B	○	建物内
		SA用115V系充電器				
		SA用115V系蓄電池及び充電器～SA対策設備用分電盤(2)直流母線電路「電路」				
	可搬型直流電源設備による給電	高压発電機車	防止設備・緩和設備	可搬型設備保管場所(屋外)	○	分散配置及び代替設備(非常用DEG)
		タンクローリ	防止設備・緩和設備	可搬型設備保管場所(屋外)	○	分散配置
		ホース[燃料流路]	防止設備・緩和設備	ガスタービン発電機建物	○	建物内
		B1-115V系充電器(SA)	防止設備・緩和設備	Rw/B	○	建物内
		SA用115V系充電器				
		230V系充電器(常用)				
		ガスタービン発電機用軽油タンク	防止設備・緩和設備	屋外	○	代替設備(ディーゼル燃料貯蔵タンク)
		ガスタービン発電機用軽油タンク出口ノズル・弁[燃料流路]				
		高压発電機車～高压発電機車接続プラグ収納箱(原子炉建物西側)[電路]	防止設備・緩和設備	屋外 R/B	○	分散配置及び代替設備(非常用交流電源設備)
		高压発電機車接続プラグ収納箱(原子炉建物西側)～直流母線電路[電路]				
		高压発電機車～高压発電機車接続プラグ収納箱(原子炉建物南側)[電路]				
高压発電機車接続プラグ収納箱(原子炉建物南側)～直流母線電路[電路]						

○：各外部事象に対し安全機能を維持できる  
 又は各外部事象による損傷を考慮した場合でも、対応するDB設備が各外部事象に対し安全機能を維持できる(防止設備)又は各外部事象による損傷を考慮して、代替設備による機能維持や安全上支障のない期間での補修等の対応が可能(緩和設備, 防止でも緩和でもない設備)  
 ー：他の項目にて整理

表 1. 1. 2 竜巻に対する重大事故等対処設備の評価結果 (19/30)

設置許可基準	重大事故等対処設備		分類	設置場所	竜巻	
					評価	防護方法
第 57 条 電源設備	代替所内電気設備による給電	緊急用メタクラ	防止設備・緩和設備	ガスタービン発電機建物	○	建物内
		メタクラ切替盤	防止設備・緩和設備	R/B	○	建物内
		SAロードセンタ	防止設備・緩和設備	低圧原子炉代替注水ポンプ格納槽	○	建物内
		SA1コントロールセンタ				
		SA2コントロールセンタ				
		充電器電源切替盤	防止設備・緩和設備	Rw/B	○	建物内
		重大事故操作盤				
		SA電源切替盤	防止設備・緩和設備	R/B	○	建物内
		非常用高圧母線 C 系				
		非常用高圧母線 D 系				
		緊急用メタクラ接続プラグ盤				
	高圧発電機車接続プラグ収納箱					
	非常用交流電源設備	非常用ディーゼル発電機	防止設備 (設計基準拡張)	R/B	○	建物内
		高圧炉心スプレイ系ディーゼル発電機				
		ディーゼル燃料デイトンク				
		ディーゼル燃料貯蔵タンク	防止設備 (設計基準拡張)	屋外 (地下)	○	影響なし(地下)
		ディーゼル燃料移送ポンプ	防止設備 (設計基準拡張)	屋外	○	竜巻防護対策により安全機能が損なわれないことを確認
非常用ディーゼル発電機燃料移送系配管・弁[燃料流路]						
高圧炉心スプレイ系ディーゼル発電機燃料移送系配管・弁[燃料流路]						
非常用ディーゼル発電機～非常用高圧母線 C 系及び D 系電路 [電路]	防止設備 (設計基準拡張)	R/B	○	建物内		
非常用ディーゼル発電機～非常用高圧母線 HPCS 系電路 [電路]						

○：各外部事象に対し安全機能を維持できる  
 又は各外部事象による損傷を考慮した場合でも、対応するDB設備が各外部事象に対し安全機能を維持できる（防止設備）又は各外部事象による損傷を考慮して、代替設備による機能維持や安全上支障のない期間での補修等の対応が可能（緩和設備、防止でも緩和でもない設備）  
 ー：他の項目にて整理



表 1.1.2 竜巻に対する重大事故等対処設備の評価結果 (20/30)

設置許可基準	重大事故等対処設備		分類	設置場所	竜巻					
					評価	防護方法				
第 57 条 電源設備	非常用直流電源	A-115V 系蓄電池	防止設備(設計基準拡張)	R/B	○	建物内				
		A-115V 系充電器		Rw/B						
		B-115V 系蓄電池	防止設備・緩和設備	R/B	○	建物内				
		B-115V 系充電器		Rw/B						
		B1-115V 系蓄電池 (SA)	防止設備(設計基準拡張)	R/B Rw/B	○	建物内				
		B1-115V 系充電器 (SA)								
		高圧炉心スプレイ系蓄電池								
		高圧炉心スプレイ系充電器								
		230V 系蓄電池 (RCIC)								
		230V 系充電器 (RCIC)								
		A-原子炉中性子計装用蓄電池								
		A-原子炉中性子計装用充電器								
		B-原子炉中性子計装用蓄電池								
		B-原子炉中性子計装用充電器								
		A-115V 系蓄電池及び充電器～直流盤電路 [電路]					防止設備(設計基準拡張)	R/B	○	建物内
		B-115V 系蓄電池及び充電器～直流盤電路 [電路]						Rw/B		
		B1-115V 系蓄電池 (SA) 及び充電器～直流盤電路 [電路]					防止設備・緩和設備	R/B	○	建物内
		B1-115V 系蓄電池 (SA) 及び充電器～直流盤電路 [電路]						Rw/B		
		230V 系蓄電池 (RCIC) 及び充電器～直流母線電路 [電路]	防止設備(設計基準拡張)	R/B Rw/B	○	建物内				
		高圧炉心スプレイ系蓄電池及び充電器～高圧炉心スプレイ系直流盤電路 [電路]								
A-原子炉中性子計装用蓄電池及び充電器～直流母線 [電路]										
B-原子炉中性子計装用蓄電池及び充電器～直流母線 [電路]										

○：各外部事象に対し安全機能を維持できる  
 又は各外部事象による損傷を考慮した場合でも、対応するDB設備が各外部事象に対し安全機能を維持できる（防止設備）又は各外部事象による損傷を考慮して、代替設備による機能維持や安全上支障のない期間での補修等の対応が可能（緩和設備、防止でも緩和でもない設備）  
 -：他の項目にて整理

表 1.1.2 竜巻に対する重大事故等対処設備の評価結果(21/30)

設置許可基準	重大事故等対処設備		分類	設置場所	竜巻	
					評価	防護方法
第 57 条 電源設備	燃料補給設備	ガスタービン発電機用軽油タンク	防止設備・緩和設備	屋外	○	代替設備(ディーゼル燃料貯蔵タンク)
		ガスタービン発電機用軽油タンク出口ノズル・弁〔流路〕				
		タンクローリ	防止設備・緩和設備	可搬型設備保管場所(屋外)	○	分散配置
		ホース〔燃料流路〕	防止設備・緩和設備	ガスタービン発電機建物	○	建物内
第 58 条 計測設備	原子炉圧力容器内の温度	原子炉圧力容器温度(SA)	防止設備・緩和設備	R/B	○	建物内
		原子炉圧力	防止設備・緩和設備	R/B	○	建物内
	原子炉圧力容器内の圧力	原子炉圧力(SA)				
	原子炉圧力容器内の水位	原子炉水位(広帯域)	防止設備・緩和設備	R/B	○	建物内
		原子炉水位(燃料域)				
		原子炉水位(SA)				
	原子炉圧力容器への注水量	高压原子炉代替注水流量	防止設備・緩和設備	R/B	○	建物内
		代替注水流量(常設)	防止設備・緩和設備	低压原子炉代替注水ポンプ格納槽	○	建物内
		代替注水流量(可搬型)	防止設備・緩和設備	可搬型設備保管場所(屋外)	○	分散配置
		原子炉隔離時冷却ポンプ出口流量	防止設備(設計基準拡張)	R/B	○	建物内
		高压炉心スプレイポンプ出口流量				
		残留熱除去ポンプ出口流量				
		低压炉心スプレイポンプ出口流量				
	残留熱代替除去系原子炉注水流量	緩和設備	R/B	○	建物内	
	原子炉格納容器への注水量	代替注水流量(常設)	防止設備・緩和設備	低压原子炉代替注水ポンプ格納槽	○	建物内
代替注水流量(可搬型)		防止設備・緩和設備	可搬型設備保管場所(屋外)	○	分散配置	
残留熱代替除去系格納容器スプレイ流量		緩和設備	R/B	○	建物内	

○：各外部事象に対し安全機能を維持できる  
 又は各外部事象による損傷を考慮した場合でも、対応するDB設備が各外部事象に対し安全機能を維持できる(防止設備) 又は各外部事象による損傷を考慮して、代替設備による機能維持や安全上支障のない期間での補修等の対応が可能(緩和設備, 防止でも緩和でもない設備)  
 -：他の項目にて整理

表 1.1.2 竜巻に対する重大事故等対処設備の評価結果 (22/30)

設置許可基準	重大事故等対処設備		分類	設置場所	竜巻	
					評価	防護方法
第 58 条 計測設備	原子炉格納容器内の温度	ドライウエル温度 (SA)	緩和設備	R/B	○	建物内
		ペDESTAL温度 (SA)	防止設備・緩和設備	R/B	○	建物内
		サブプレッション・チェンバ温度 (SA)	緩和設備	R/B	○	建物内
		サブプレッション・プール水温度 (SA)	防止設備・緩和設備	R/B	○	建物内
	原子炉格納容器内の圧力	ドライウエル圧力 (SA)	防止設備・緩和設備	R/B	○	建物内
		サブプレッション・チェンバ圧力 (SA)				
	原子炉格納容器内の水位	ドライウエル水位	防止設備・緩和設備	R/B	○	建物内
		サブプレッション・プール水位 (SA)				
		ペDESTAL水位				
	原子炉格納容器内の水素濃度	格納容器水素濃度	防止設備・緩和設備	R/B	○	建物内
		格納容器水素濃度 (SA)				
	原子炉格納容器内の放射線量率	格納容器雰囲気放射線モニタ (ドライウエル)	防止設備・緩和設備	R/B	○	建物内
		格納容器雰囲気放射線モニタ (サブプレッション・チェンバ)				
	未臨界の維持又は監視	中性子源領域計装	防止設備	R/B	○	建物内
		平均出力領域計装				
	最終ヒートシンクの確保 (残留熱代替除去系)	サブプレッション・プール水温度 (SA)	防止設備・緩和設備	R/B	○	建物内
		残留熱除去系熱交換器出口温度	緩和設備	R/B	○	建物内
		残留熱代替除去系原子炉注水流量	緩和設備	R/B	○	建物内
		残留熱代替除去系格納容器スプレイ流量				
	最終ヒートシンクの確保 (格納容器フィルタベント系)	スクラバ容器水位	防止設備・緩和設備	フィルタベント格納槽	○	建物内
		スクラバ容器圧力				
第 1 ベントフィルタ出口放射線モニタ (高レンジ)		防止設備・緩和設備	R/B	○	建物内	
第 1 ベントフィルタ出口水素濃度		防止設備・緩和設備	可搬型設備 保管場所 (屋外)	○	補修を実施	
最終ヒートシンクの確保 (残留熱除去系)	残留熱除去系熱交換器入口温度	防止設備 (設計基準拡張)	R/B	○	建物内	
	残留熱除去系熱交換器出口温度					
	残留熱除去ポンプ出口流量					

○ : 各外部事象に対し安全機能を維持できる  
 又は各外部事象による損傷を考慮した場合でも、対応するDB設備が各外部事象に対し安全機能を維持できる (防止設備) 又は各外部事象による損傷を考慮して、代替設備による機能維持や安全上支障のない期間での補修等の対応が可能 (緩和設備, 防止でも緩和でもない設備)  
 - : 他の項目にて整理

表 1. 1. 2 竜巻に対する重大事故等対処設備の評価結果 (23/30)

設置許可基準	重大事故等対処設備		分類	設置場所	竜巻	
					評価	防護方法
第 58 条 計測設備	格納容器バイパスの監視 (原子炉圧力容器内の状態)	原子炉水位 (広帯域)	防止設備・緩和設備	R/B	○	建物内
		原子炉水位 (燃料域)				
		原子炉水位 (SA)				
		原子炉圧力				
	格納容器バイパスの監視 (原子炉格納容器内の状態)	原子炉圧力 (SA)	防止設備・緩和設備	R/B	○	建物内
		ドライウエル温度 (SA)				
	格納容器バイパスの監視 (原子炉建屋内の状態)	ドライウエル圧力 (SA)	防止設備 (設計基準拡張)	Rw/B	○	建物内
	水源の確認	残留熱除去ポンプ出口圧力	防止設備・緩和設備	低圧原子炉代替注水ポンプ格納槽	○	建物内
		低圧原子炉代替注水槽水位				
	原子炉建物内の水素濃度	サブプレッション・プール水位 (SA)	防止設備・緩和設備	R/B	○	建物内
		原子炉建物水素濃度				
	原子炉格納容器内の酸素濃度	格納容器酸素濃度	緩和設備	R/B	○	建物内
		格納容器酸素濃度 (SA)				
燃料プールの監視	燃料プール水位 (SA)	防止設備・緩和設備	R/B	○	建物内	
	燃料プール水位・温度 (SA)					
	燃料プールエリア放射線モニタ (高レンジ・低レンジ) (SA)					
	燃料プール監視カメラ (SA) (燃料プール監視カメラ用冷却設備を含む。)					
発電所内の通信連絡	安全パラメータ表示システム (SPDS)	緩和設備	Rw/B 緊急時対策所	○	建物内 (屋外のもの は補修を 実施)	
温度, 圧力, 水位, 注水量の計測・監視	可搬型計測器	防止設備・緩和設備	Rw/B 緊急時対策所	○	建物内	

○：各外部事象に対し安全機能を維持できる  
 又は各外部事象による損傷を考慮した場合でも、対応するDB設備が各外部事象に対し安全機能を維持できる（防止設備）又は各外部事象による損傷を考慮して、代替設備による機能維持や安全上支障のない期間での補修等の対応が可能（緩和設備、防止でも緩和でもない設備）  
 ー：他の項目にて整理

表 1.1.2 竜巻に対する重大事故等対処設備の評価結果(24/30)

設置許可基準	重大事故等対処設備		分類	設置場所	竜巻	
					評価	防護方法
第58条 計測設備	その他	ADS用N2ガス減圧弁二次側圧力	防止設備	R/B	○	建物内
		N2ガスポンベ圧力				
		原子炉補機冷却ポンプ圧力	防止設備 (設計基準拡張)	R/B	○	建物内
		RCW熱交換出口温度				
		RCWサージタンク水位				
		C-メタクラ母線電圧	防止設備・緩和設備	C/B	○	建物内
		D-メタクラ母線電圧				
		HPCS-メタクラ母線電圧				
		C-ロードセンタ母線電圧				
		D-ロードセンタ母線電圧	防止設備・緩和設備	R/B	○	建物内
		HPCS-コントロールセンタ母線電圧				
		B1-115V系蓄電池(SA)電圧	防止設備・緩和設備	Rw/B	○	建物内
		A-115V系直流盤母線電圧				
		B-115V系直流盤母線電圧				
		230V系直流盤(RCIC)母線電圧				
ガスタービン発電機電圧	防止設備・緩和設備	ガスタービン発電機建物	○	建物内		
高圧発電機車電圧	防止設備・緩和設備	屋外	○	補修を実施		
高圧発電機車周波数						

○：各外部事象に対し安全機能を維持できる  
 又は各外部事象による損傷を考慮した場合でも、対応するDB設備が各外部事象に対し安全機能を維持できる（防止設備）又は各外部事象による損傷を考慮して、代替設備による機能維持や安全上支障のない期間での補修等の対応が可能（緩和設備、防止でも緩和でもない設備）  
 -：他の項目にて整理

表 1.1.2 竜巻に対する重大事故等対処設備の評価結果 (25/30)

設置許可基準	重大事故等対処設備		分類	設置場所	竜巻	
					評価	防護方法
第 59 条 運転員が原子炉 制御室にとどまる ための設備	居住性の確保	中央制御室	(重大事故 等対処施設)	C/B	○	建物内
		中央制御室待避室				
		中央制御室遮蔽	防止設備・緩 和設備	C/B	○	建物内
		中央制御室待避室 遮蔽	緩和設備	C/B	○	建物内
		再循環用ファン チャコール・フィ ルタ・ブースタ・ ファン	防止設備・緩 和設備	Rw/B	○	建物内
		非常用チャコー ル・フィルタ・ユ ニット				
		中央制御室換気系 ダンバ[流路]	防止設備・緩 和設備	C/B Rw/B	○	建物内
		中央制御室換気系 ダクト[流路]				
		中央制御室待避室 空気ポンベ	緩和設備	C/B	○	建物内
		中央制御室待避室 空気ポンベ (配 管・弁) [流路]				
		無線通信設備 (固定型)	→62 条に記載		-	-
		衛星電話設備 (固定型)				
		プラントパラメー タ監視装置 (中央 制御室待避室)	(防止でも緩 和でもない 設備)	C/B	○	建物内
		差圧計				
		酸素濃度計	(防止でも緩 和でもない 設備)	C/B Rw/B	○	建物内
		二酸化炭素濃度計				
		無線通信設備 (屋外アンテナ) [伝送路]	→62 条に記載		-	-
衛星電話設備 (屋外アンテナ) [伝送路]						

○：各外部事象に対し安全機能を維持できる  
又は各外部事象による損傷を考慮した場合でも、対応するDB設備が各外部事象に対し安全機能を維持できる（防止設備）又は各外部事象による損傷を考慮して、代替設備による機能維持や安全上支障のない期間での補修等の対応が可能（緩和設備、防止でも緩和でもない設備）  
－：他の項目にて整理

表 1.1.2 竜巻に対する重大事故等対処設備の評価結果 (26/30)

設置許可基準	重大事故等対処設備		分類	設置場所	竜巻	
					評価	防護方法
第 59 条 運転員が原子炉制御室にとどまるための設備	照明の確保	LEDライト (三脚タイプ)	(防止でも緩和でもない設備)	C/B Rw/B	○	建物内
	被ばく線量の低減	非常用ガス処理系 排気ファン	緩和設備	R/B	○	建物内
		前置ガス処理装置 [流路]				
		後置ガス処理装置 [流路]				
		非常用ガス処理系 配管・弁[流路]	緩和設備	R/B T/B	○	建物内
		排気管[流路]	緩和設備	屋外	○	安全機能が損なわれないことを確認
		原子炉棟 [流路]	→その他の設備に記載		—	—
		原子炉建物ブロー アウトパネル閉止 装置	緩和設備	R/B	○	建物内

○：各外部事象に対し安全機能を維持できる  
又は各外部事象による損傷を考慮した場合でも、対応するDB設備が各外部事象に対し安全機能を維持できる（防止設備）又は各外部事象による損傷を考慮して、代替設備による機能維持や安全上支障のない期間での補修等の対応が可能（緩和設備，防止でも緩和でもない設備）  
—：他の項目にて整理

表 1.1.2 竜巻に対する重大事故等対処設備の評価結果(27/30)

設置許可基準	重大事故等対処設備		分類	設置場所	竜巻	
					評価	防護方法
第 60 条 監視測定設備	放射線量の代替測定	可搬式モニタリング・ポスト	(防止でも緩和でもない設備)	可搬型設備保管場所 (屋外)	○	代替設備 (モニタリングポスト)
		データ表示装置 (伝送路)	(防止でも緩和でもない設備)	緊急時対策所	○	建物内
	放射性物質の濃度の代替測定	可搬式ダスト・よう素サンプラ	(防止でも緩和でもない設備)	Rw/B 緊急時対策所	○	建物内
		Na I シンチレーション・サーベイ・メータ				
		GM汚染サーベイ・メータ				
	気象観測項目の代替測定	可搬式気象観測装置	(防止でも緩和でもない設備)	可搬型設備保管場所 (屋外)	○	代替設備 (気象観測装置)
		データ表示装置 (伝送路)	(防止でも緩和でもない設備)	緊急時対策所	○	建物内
	放射線量の測定	可搬式モニタリング・ポスト	(防止でも緩和でもない設備)	可搬型設備保管場所 (屋外)	○	代替設備 (モニタリングポスト)
		データ表示装置 (伝送路)	(防止でも緩和でもない設備)	緊急時対策所	○	建物内
		電離箱サーベイ・メータ	(防止でも緩和でもない設備)	Rw/B 緊急時対策所	○	建物内
		小型船舶	(防止でも緩和でもない設備)	可搬型設備保管場所 (屋外)	○	補修を実施
	放射性物質濃度 (空气中, 水中, 土壌中) 及び海上モニタリング	可搬式ダスト・よう素サンプラ	(防止でも緩和でもない設備)	Rw/B 緊急時対策所	○	建物内
		Na I シンチレーション・サーベイ・メータ				
		GM汚染サーベイ・メータ				
		α・β線サーベイ・メータ				
		小型船舶	(防止でも緩和でもない設備)	可搬型設備保管場所 (屋外)	○	補修を実施
モニタリング・ポストの代替交流電源からの給電	常設代替交流電源設備	→57 条に記載		—	—	

○：各外部事象に対し安全機能を維持できる  
 又は各外部事象による損傷を考慮した場合でも、対応するDB設備が各外部事象に対し安全機能を維持できる（防止設備）又は各外部事象による損傷を考慮して、代替設備による機能維持や安全上支障のない期間での補修等の対応が可能（緩和設備、防止でも緩和でもない設備）  
 —：他の項目にて整理



表 1.1.2 竜巻に対する重大事故等対処設備の評価結果 (28/30)

設置許可基準	重大事故等対処設備		分類	設置場所	竜巻	
					評価	防護方法
第 61 条 緊急時対策所	居住性の確保	緊急時対策所	(重大事故等対処施設)	緊急時対策所(屋外)	○	補修を実施
		緊急時対策所遮蔽	緩和設備	緊急時対策所(屋外)	○	補修を実施
		緊急時対策所空気浄化フィルタユニット	緩和設備	緊急時対策所(屋外)	○	補修を実施
		緊急時対策所空気浄化送風機				
		緊急時対策所空気ポンベ				
		緊急時対策所空気浄化装置用可搬型ダクト[流路]				
		緊急時対策所空気ポンベ可搬型配管・弁[流路]				
		緊急時対策所空気浄化装置(配管・弁)[流路]	緩和設備	緊急時対策所	○	建物内
		緊急時対策所空気ポンベ(配管・弁)[流路]	(防止でも緩和でもない設備)	緊急時対策所	○	建物内
		酸素濃度計				
		二酸化炭素濃度計				
		差圧計	緩和設備	緊急時対策所	○	建物内
		可搬式エリア放射線モニタ				
	可搬式モニタリング・ポスト	→60 条に記載		-	-	
必要な情報の把握	安全パラメータ表示システム(SPD S)	→62 条に記載		-	-	

○：各外部事象に対し安全機能を維持できる  
 又は各外部事象による損傷を考慮した場合でも、対応するDB設備が各外部事象に対し安全機能を維持できる（防止設備）又は各外部事象による損傷を考慮して、代替設備による機能維持や安全上支障のない期間での補修等の対応が可能（緩和設備，防止でも緩和でもない設備）  
 -：他の項目にて整理

表 1.1.2 竜巻に対する重大事故等対処設備の評価結果 (29/30)

設置許可基準	重大事故等対処設備		分類	設置場所	竜巻	
					評価	防護方法
第 61 条 緊急時対策所	通信連絡 (緊急時対策所)	無線通信設備 (固定型)	→62 条に記載		-	-
		無線通信設備 (携帯型)				
		衛星電話設備 (固定型)				
		衛星電話設備 (携帯型)				
		統合原子力防災ネットワークに接続する通信連絡設備				
		無線通信装置 [伝送路]				
		無線通信設備 (屋外アンテナ) [伝送路]				
		衛星無線通信装置 [伝送路]				
		衛星電話設備 (屋外アンテナ) [伝送路]				
		有線 [伝送路]				
	電源の確保	緊急時対策所用発電機	緩和設備	可搬型設備 保管場所(屋外)	○	補修を実施
		可搬ケーブル				
		緊急時対策所 発電機接続プラグ盤	緩和設備	緊急時対策所	○	建物内
		緊急時対策所 低圧母線盤				
緊急時対策所用燃料地下タンク	緩和設備	屋外(地下)	○	影響なし(地下)		
タンクローリ	緩和設備	可搬型設備 保管場所(屋外)	○	分散配置		
ホース	緩和設備	ガスタービン発電機建物	○	建物内		

○：各外部事象に対し安全機能を維持できる  
 又は各外部事象による損傷を考慮した場合でも、対応するDB設備が各外部事象に対し安全機能を維持できる（防止設備）又は各外部事象による損傷を考慮して、代替設備による機能維持や安全上支障のない期間での補修等の対応が可能（緩和設備、防止でも緩和でもない設備）  
 -：他の項目にて整理

表 1. 1. 2 竜巻に対する重大事故等対処設備の評価結果 (30/30)

設置許可基準	重大事故等対処設備		分類	設置場所	竜巻	
					評価	防護方法
第 62 条 通信連絡を行う ために必要な設備	発電所内の通信 連絡	有線式通信設備	緩和設備	Rw/B	○	建物内
		無線通信設備 (固定型)	緩和設備	C/B 緊急時 対策所	○	建物内
		無線通信設備 (携帯型)				
		安全パラメータ 表示システム (SPDS)	緩和設備	Rw/B 緊急時 対策所	○	建物内
		衛星電話設備 (固定型)	(防止でも緩和 でもない 設備)	C/B 緊急時 対策所	○	建物内
		衛星電話設備 (携帯型)	(防止でも緩和 でもない 設備)	緊急時 対策所	○	建物内
		無線通信装置 [伝送路]	(防止でも緩和 でもない 設備)	Rw/B 緊急時 対策所	○	建物内
		有線 [伝送路]				
		無線通信設備 (屋外アンテナ) [伝送路]	(防止でも緩和 でもない 設備)	Rw/B 緊急時 対策所 屋外	○	補修を実施
		衛星電話設備 (屋外アンテナ) [伝送路]				
	発電所外の通信 連絡	衛星電話設備 (固定型)	(防止でも緩和 でもない 設備)	C/B 緊急時 対策所	○	建物内
		衛星電話設備 (携帯型)	(防止でも緩和 でもない 設備)	緊急時 対策所	○	建物内
		統合原子力防災 ネットワークに 接続する通信連 絡設備				
		データ伝送設備	(防止でも緩和 でもない 設備)	Rw/B 緊急時 対策所	○	建物内
		衛星無線通信装 置 [伝送路]				
有線 [伝送路]		衛星電話設備 (屋外アンテナ) [伝送路]	(防止でも緩和 でもない 設備)	Rw/B 緊急時 対策所 屋外	○	補修を実施
その他設備	重大事故時に対 処するための流 路又は注水先、注 入先、排出元等	原子炉圧力容器	防止設備・緩 和設備	R/B	○	建物内
		原子炉格納容器				
		燃料プール				
	非常用取水設備	原子炉棟	緩和設備	屋外	○	安全機能が 損なわれな いことを確 認
		取水口	防止設備・緩 和設備	屋外	○	屋外設備で あるが、竜巻 による影響 を受けない
		取水管				
		取水槽				

○：各外部事象に対し安全機能を維持できる  
又は各外部事象による損傷を考慮した場合でも、対応するDB設備が各外部事象に対し安全機能を維持できる（防止設備）又は各外部事象による損傷を考慮して、代替設備による機能維持や安全上支障のない期間での補修等の対応が可能（緩和設備、防止でも緩和でもない設備）  
－：他の項目にて整理

## 1.2 評価対象施設等の抽出について

## 1.2.1 外部事象防護対象施設のうち評価対象施設

外部事象防護対象施設の中から、屋外施設及び外気と接続する建物内の外部事象防護対象施設を抽出した。

具体的な抽出フローを図 1.2.1 に、屋外施設及び外気と接続する建物内の外部事象防護対象施設の抽出結果を表 1.2.1 に示す。

Step1：安全重要度分類のクラス 1，クラス 2 及びクラス 3 に属する構築物，系統及び機器並びに安全機能を有しない構築物，系統及び機器のうち外部事象防護対象施設<sup>※1</sup>を抽出する。

※1 外部事象に対し必要な構築物，系統及び機器（発電用原子炉を停止するため，また停止状態にある場合は引き続きその状態を維持するために必要な異常の発生防止の機能又は異常の影響緩和の機能を有する構築物，系統及び機器）として，安全重要度分類のクラス 1，クラス 2 及び安全評価<sup>※2</sup>上その機能に期待するクラス 3 に属する構築物，系統及び機器並びにそれを内包する区画

※2 運転時の異常な過渡変化及び設計基準事故解析

また，外部事象防護対象施設を内包する建物（外部事象防護対象施設となる建物を除く。）は，機械的強度を有すること等により，内包する外部事象防護対象施設の安全機能を損なわない設計及び外部事象防護対象施設へ波及的影響を及ぼさない設計とする。

上記以外の安全施設については，竜巻及びその随件事象に対して機能維持すること若しくは竜巻及びその随件事象による損傷を考慮して代替設備により必要な機能を確保すること，安全上支障のない期間での修復等の対応を行うこと又はそれらを適切に組み合わせることにより，その安全機能を損なわないことを確認する。

Step2：Step1 で抽出された設備の設置場所を確認し，竜巻襲来時に風圧，気圧差及び設計飛来物等衝突の影響を受ける屋外施設（外部事象防護対象施設を内包する区画を含む。）を評価対象施設とする。

Step3：屋内施設であるが外気と繋がっているため，竜巻襲来時に気圧差の影響を受ける施設を評価対象施設とする。

Step4：外殻となる施設による防護機能が期待できない区画の内部に配置されている外部事象防護対象施設は，竜巻襲来時に風圧，気圧差及び設計飛来物衝突の影響を受けるため，評価対象施設とする。

なお，外殻による防護機能に期待できるかは，外殻となる施設の竜巻荷重に対する構造健全性の確認結果により，設計飛来物の衝突等による開口部の開放又は開口部建具の貫通の観点から，評価対象施設を抽出する。

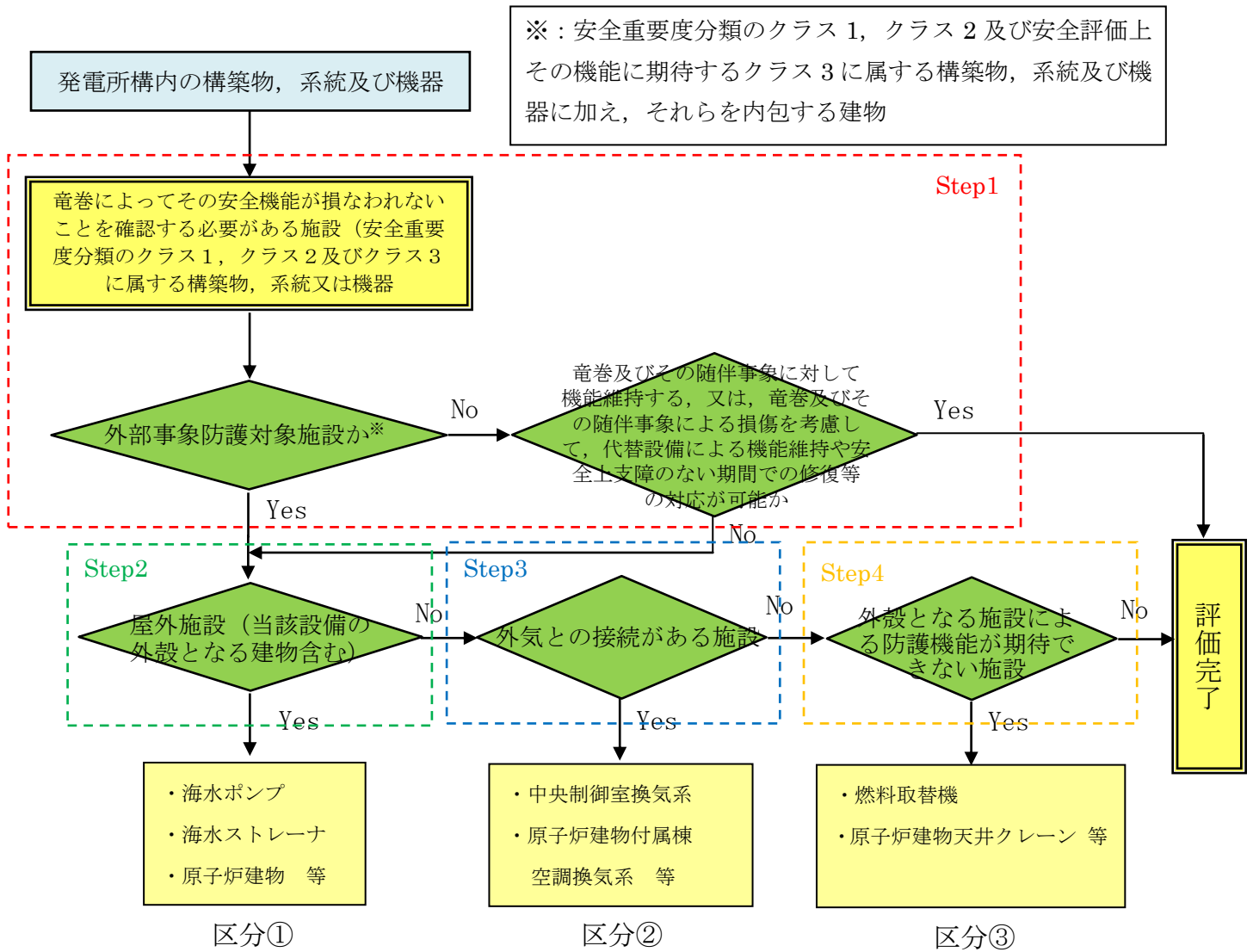


図 1. 2. 1 外部事象防護対象施設のうち評価対象施設の抽出フロー



表 1.2.1 評価対象施設の抽出結果 (外部事象防護対象施設) (2 / 1 2)

分類	重要度分類	機能	系統	系統・機器		設置場所	評価対象施設		備考
				機器・設備	機器・設備		設置場所 (建物名)	外周となる建物の防護機能により 意図的影響を受けないことの確認	
WS-1	1) 異常状態発生時に原子炉停止を緊急に停止し、蒸留熱を除去し、原子炉冷却能力を確保し、放射性汚染物の過剰の放射線の影響を防止する構築物、系統及び機器	1) 原子炉の緊急停止機能 2) 本臨界維持機能	制御棒	制御棒	原子炉	屋外	なし	あり	—
				制御棒案内管	原子炉	屋外	なし	あり	—
			制御棒駆動機	原子炉	屋外	なし	あり	—	
			アクチュエータ	原子炉	屋外	なし	あり	—	
			配管	原子炉	屋外	なし	あり	—	
			弁	原子炉	屋外	なし	あり	—	
			制御棒	原子炉	屋外	なし	あり	—	
			制御棒キャブリング	原子炉	屋外	なし	あり	—	
			制御棒駆動機キャブリング	原子炉	屋外	なし	あり	—	
			制御棒駆動機ハウジング	原子炉	屋外	なし	あり	—	
			制御棒駆動機	原子炉	屋外	なし	あり	—	
			ほうげん水貯蔵タンク	原子炉	屋外	なし	あり	—	
			ほうげん水注入ポンプ	原子炉	屋外	なし	あり	—	
			ほうげん水注入ポンプ電動機	原子炉	屋外	なし	あり	—	
			ほうげん水注入ポンプ潤滑油ポンプ	原子炉	屋外	なし	あり	—	
			配管	原子炉	屋外	なし	あり	—	
			弁	原子炉	屋外	なし	あり	—	
			原子炉制御棒 (2-903)	原子炉	C/B	なし	あり	—	
			ほうげん水注入系操作箱 (2RCR-51)	原子炉	R/B	なし	あり	—	
			主蒸気逃がし安全弁 (安全弁としての機能)	原子炉	R/B	なし	あり	—	
			原子炉隔離時冷却系ポンプ	原子炉	R/B	なし	あり	—	
			原子炉隔離時冷却系ポンプ電動機	原子炉	R/B	なし	あり	—	
			主蒸気タンク	原子炉	R/B	なし	あり	—	
			潤滑油クーラ	原子炉	R/B	なし	あり	—	
			タービン駆動ポンプ	原子炉	R/B	なし	あり	—	
			油冷却器	原子炉	R/B	なし	あり	—	
			弁	原子炉	R/B	なし	あり	—	
			ストレーナ	原子炉	R/B	なし	あり	—	
			原子炉タービン制御棒 (SII) (2-2860)	原子炉	R/B	なし	あり	—	
			高圧炉心スプレイポンプ	原子炉	R/B	なし	あり	—	
			高圧炉心スプレイポンプ電動機	原子炉	R/B	なし	あり	—	
			配管	原子炉	R/B	なし	あり	—	
			弁	原子炉	R/B	なし	あり	—	
			ストレーナ	原子炉	R/B	なし	あり	—	
			原子炉隔離時冷却系 (2-921)	原子炉	Rw/B	なし	あり	—	
			原子炉隔離時冷却系ポンプ (2-921A)	原子炉	Rw/B	なし	あり	—	
			原子炉隔離時冷却系ポンプ電動機	原子炉	R/B	なし	あり	—	
			原子炉隔離時冷却系ポンプ電動機	原子炉	R/B	なし	あり	—	
			原子炉隔離時冷却系ポンプ電動機	原子炉	R/B	なし	あり	—	
			配管	原子炉	R/B	なし	あり	—	
			弁	原子炉	R/B	なし	あり	—	
			原子炉隔離時冷却系熱交換器	原子炉	R/B	なし	あり	—	
			原子炉隔離時冷却系ポンプ	原子炉	R/B	なし	あり	—	
			原子炉隔離時冷却系ポンプ電動機	原子炉	R/B	なし	あり	—	
			配管	原子炉	R/B	なし	あり	—	
			弁	原子炉	R/B	なし	あり	—	

※：外部事象防護対象施設を内包する建物等を「外周となる建物等」として抽出。建物名は、R/B：原子炉建物、C/B：原子炉建物、T/B：タービン建物、Rw/B：廃棄物処理建物、C/B：原子炉建物を示す。





表 1.2.1 評価対象施設の抽出結果 (外部事象防護対象施設) (4 / 12)

分類	重畳区分類		機能	系統	機器・設備	設置場所		外部となる建物の防護機能により被害の影響を受けないことの確認		評価対象施設	備考
	定義	MS-T				屋内外 (建物名)	屋内外 <sup>※</sup> (建物名)	外気との接続	外気との接続		
MS-T	1) 異常事象発生時に原子炉内を緊急に停止し、残留熱を除去し、原子炉炉内圧力パウンダリの増圧を防止し、軽水炉の放射能の放射能の影響を防止する構築物、系統及び機器	0) 放射能物質の閉じ込め機能、放射線の高へい及び放出低減機能	原子炉格納容器	原子炉格納容器	原子炉格納容器	—	R/B	なし	あり	—	
				真空破断装置	真空破断装置	—	R/B	なし	あり	—	
			原子炉格納容器	ベント管	—	R/B	なし	あり	—		
			原子炉格納容器	スプレイ管	—	R/B	なし	あり	—		
			原子炉格納容器	クエンチ管	—	R/B	なし	あり	—		
			原子炉格納容器	配管	—	R/B	なし	あり	—		
			原子炉格納容器	弁	—	R/B	なし	あり	—		
			原子炉格納容器	原子炉格納容器隔離弁	原子炉格納容器隔離弁 (2-904-2)	—	C/B	なし	あり	—	
			原子炉格納容器	TIP閉鎖装置	TIP閉鎖装置 (2-912)	—	C/B	なし	あり	—	
			原子炉格納容器	A-原子炉格納容器隔離弁	A-原子炉格納容器隔離弁 (2-924A)	—	Rw/B	なし	あり	—	
			原子炉格納容器	B-原子炉格納容器隔離弁	B-原子炉格納容器隔離弁 (2-924B)	—	Rw/B	なし	あり	—	
			原子炉格納容器	空調換気制御装置	空調換気制御装置 (2-929-1)	—	C/B	なし	あり	—	
			原子炉格納容器	集塵ガス制御装置	集塵ガス制御装置 (2-929-2)	—	C/B	なし	あり	—	
			原子炉格納容器	A-格納容器貯蔵/02濃度計置	A-格納容器貯蔵/02濃度計置 (2-973A-1)	—	C/B	なし	あり	—	
			原子炉格納容器	B-格納容器貯蔵/02濃度計置	B-格納容器貯蔵/02濃度計置 (2-973B-1)	—	C/B	なし	あり	—	
			原子炉格納容器	AM設備閉鎖装置	AM設備閉鎖装置 (2-974)	—	C/B	なし	あり	—	
			原子炉格納容器	計装弁閉鎖計置	計装弁閉鎖計置 (2-977)	—	C/B	なし	あり	—	
			原子炉格納容器	アクチュエータ	アクチュエータ	—	R/B	なし	あり	—	
			原子炉格納容器	配管	配管	—	R/B	なし	あり	—	
			原子炉格納容器	弁	弁	—	R/B	なし	あり	—	
			原子炉格納容器	安全設備閉鎖装置	安全設備閉鎖装置 (2-903)	—	C/B	なし	あり	—	
			原子炉格納容器	主蒸気流束制限器	主蒸気流束制限器	—	R/B	なし	あり	—	
			原子炉格納容器	残留熱除去熱交換器	残留熱除去熱交換器	—	R/B	なし	あり	—	
			原子炉格納容器	残留熱除去ポンプ	残留熱除去ポンプ	—	R/B	なし	あり	—	
			原子炉格納容器	残留熱除去ポンプ電動機	残留熱除去ポンプ電動機	—	R/B	なし	あり	—	
			原子炉格納容器	配管	配管	—	R/B	なし	あり	—	
			原子炉格納容器	弁	弁	—	R/B	なし	あり	—	
			原子炉格納容器	ストレートナ	ストレートナ	—	R/B	なし	あり	—	
			原子炉格納容器	サブプレッショナ	サブプレッショナ	—	R/B	なし	あり	—	
			原子炉格納容器	サブプレッショナチェンバ	サブプレッショナチェンバ	—	R/B	なし	あり	—	
			原子炉格納容器	原子炉格納容器が棟 (プロロークアウトパネル付)	原子炉格納容器が棟 (プロロークアウトパネル付)	○	—	—	—	○	外気となる建物として評価
			原子炉格納容器	原子炉格納容器格納弁	原子炉格納容器格納弁	—	R/B	あり	あり	○	
			原子炉格納容器	原子炉格納容器換気系格納弁	原子炉格納容器換気系格納弁	—	R/B	あり	あり	○	
			原子炉格納容器	非常用ガス処理系前置ガス処理装置	非常用ガス処理系前置ガス処理装置	—	R/B	なし	あり	—	
			原子炉格納容器	非常用ガス処理系後置ガス処理装置	非常用ガス処理系後置ガス処理装置	—	R/B	なし	あり	—	
			原子炉格納容器	非常用ガス処理系排風機	非常用ガス処理系排風機	—	R/B	なし	あり	—	
			原子炉格納容器	非常用ガス処理系排風機電動機	非常用ガス処理系排風機電動機	—	R/B	なし	あり	—	
			原子炉格納容器	配管	配管	○	R/B, T/B	あり	あり	○	
			原子炉格納容器	弁	弁	—	R/B	あり	あり	○	
			原子炉格納容器	安全設備補助制御装置	安全設備補助制御装置 (2-909)	—	C/B	なし	あり	—	
			原子炉格納容器	排気筒	排気筒 (非常用ガス処理系排気管の支持機能)	○	—	—	—	○	

※：外部事象防護対象施設を内包する建物等を「外気となる建物等」として抽出。建物名は、R/B：原子炉建物、T/B：タービン建物、Rw/B：廃棄物処理建物、C/B：制御室建物を示す。



















### 1.2.2 外部事象防護対象施設に波及的影響を及ぼし得る評価対象施設

外部事象防護対象施設に波及的影響を及ぼし得る施設として、倒壊により外部事象防護対象施設に損傷を及ぼし得る施設及び外部事象防護対象施設の附属施設のうち屋外にある施設を抽出し、外部事象防護対象施設に波及的影響を及ぼし得る評価対象施設とした。外部事象防護対象施設に波及的影響を及ぼし得る評価対象施設の抽出フローを図 1.2.2 に示す。

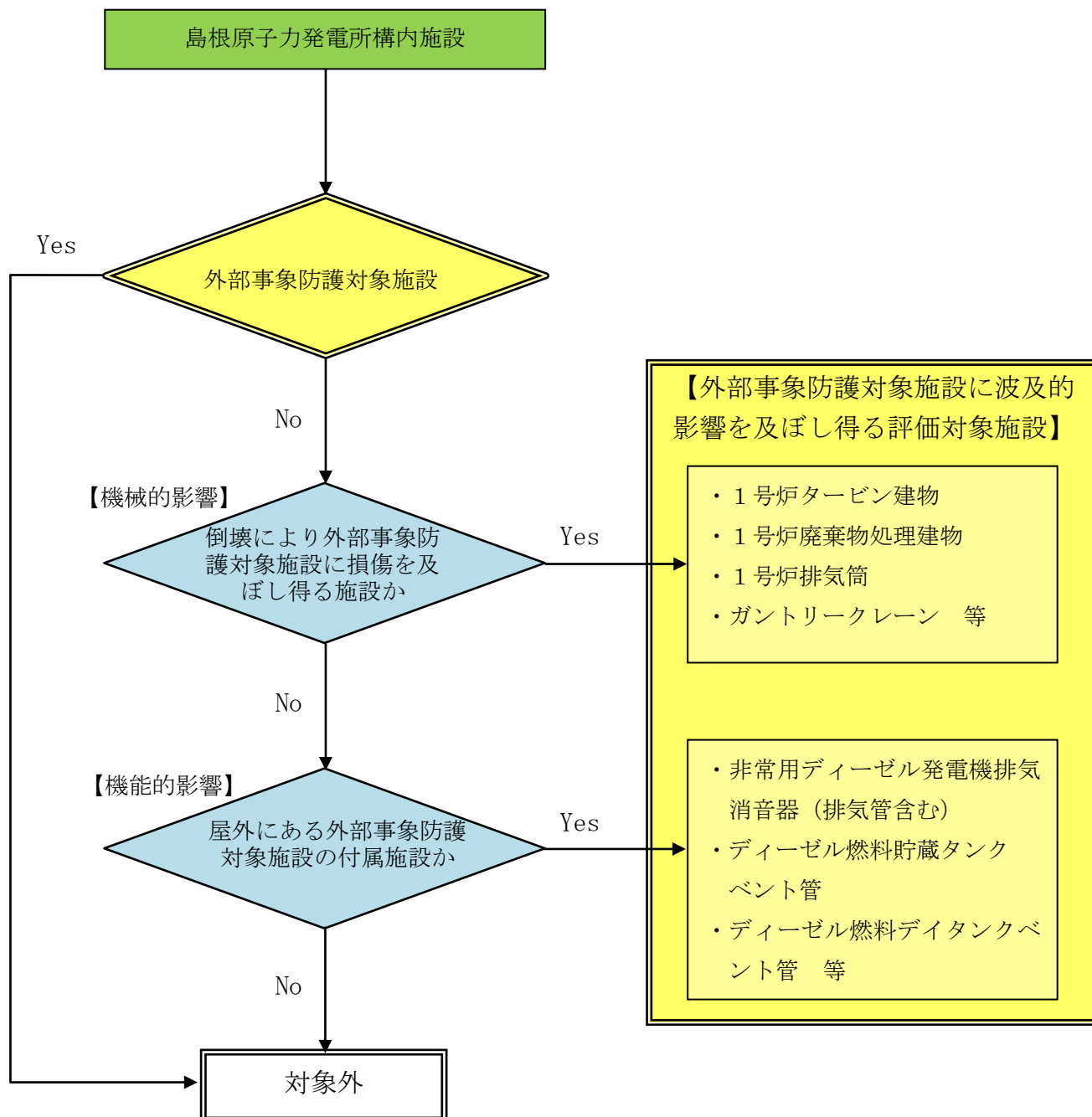


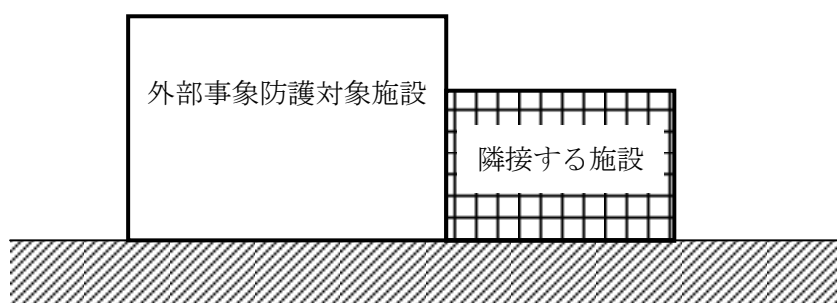
図 1.2.2 外部事象防護対象施設に波及的影響を及ぼし得る評価対象施設の抽出フロー

### 1.2.2.1 倒壊により外部事象防護対象施設に損傷を及ぼし得る施設

倒壊により外部事象防護対象施設に損傷を及ぼし得る施設については、外部事象防護対象施設に対する機械的な影響を考慮し、外部事象防護対象施設に波及的影響を及ぼし得る評価対象施設として抽出した。

具体的には、図 1.2.3 に示すとおり、外部事象防護対象施設に隣接する施設及び地上高さが外部事象防護対象施設との距離以上である施設を抽出した。抽出結果を表 1.2.2 に示す。

【外部事象防護対象施設に隣接する施設】



【地上高さが外部事象防護対象施設との距離以上である施設】（高さ $H$ ≧水平距離 $L$ の場合）

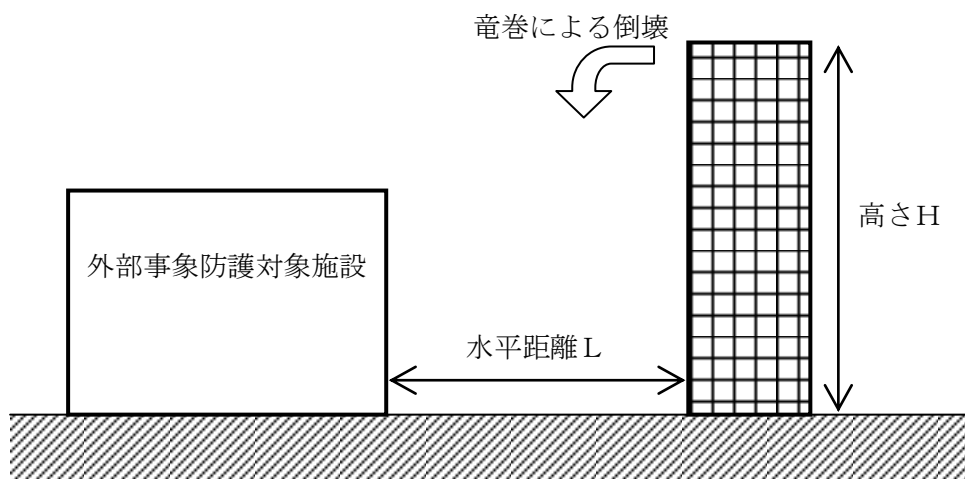


図 1.2.3 倒壊により外部事象防護対象施設に損傷を及ぼし得る施設

表 1.2.2 外部事象防護対象施設に波及的影響を及ぼし得る評価対象施設の  
抽出結果

(倒壊により外部事象防護対象施設に損傷を及ぼし得る施設)

施設名	損傷を受ける可能性のある 外部事象防護対象施設	外部事象防護対 象施設との距離	地上高さ
1号炉原子炉建物	制御室建物	約 15m	47m
1号炉タービン建物	2号炉タービン建物 制御室建物	隣接	—
1号炉廃棄物処理建物	2号炉廃棄物処理建物 制御室建物	隣接	—
1号炉排気筒	2号炉タービン建物	約 10m	120m
ガントリークレーン	原子炉補機海水ポンプ等	約 3m	21m
排気筒モニタ室	2号炉排気筒	隣接	—

1.2.2.2 外部事象防護対象施設の屋外にある付属施設の抽出

外部事象防護対象施設の付属施設のうち屋外にある施設について、外部事象防護対象施設に対する機能的な影響を考慮し、外部事象防護対象施設に波及的影響を及ぼし得る評価対象施設として抽出した。抽出結果を表 1.2.3、表 1.2.4 に示す。

表 1.2.3 外部事象防護対象施設に波及的影響を及ぼし得る評価対象施設の  
抽出結果

(外部事象防護対象施設の付属施設のうち屋外にある施設)

外部事象防護対象施設	屋外にある付属施設
非常用ディーゼル発電機	排気消音器 (排気管含む)
高圧炉心スプレイ非常用ディーゼル 発電機系非常用ディーゼル発電機	排気消音器 (排気管含む)
ディーゼル燃料貯蔵タンク	ベント管
ディーゼル燃料デイタンク	ベント管
潤滑油サンプルタンク	ベント管

表 1.2.4 外部事象防護対象施設に波及的影響を及ぼし得る評価対象施設の抽出結果 (1 / 8)

系統	系統・機器	設置場所		外部事象防護対象施設と配管、ダクト等で接続されている屋外施設	影響有無	機能喪失による影響判断理由	外部事象防護対象施設に波及的影響を及ぼし得る施設	備考
		屋外	屋内※ (建物名)					
原子炉圧力容器	原子炉圧力容器	—	R/B	なし	—	—	—	—
	炉心シュワウド	—	R/B	なし	—	—	—	—
	シュワウドサポート	—	R/B	なし	—	—	—	—
	上部格子板	—	R/B	なし	—	—	—	—
	炉心支持板	—	R/B	なし	—	—	—	—
	燃料支持金具	—	R/B	なし	—	—	—	—
	燃料案内管	—	R/B	なし	—	—	—	—
	制御機動機構ハウジング	—	R/B	なし	—	—	—	—
	チャーンネルボックス	—	R/B	なし	—	—	—	—
	燃料集合体	—	R/B	なし	—	—	—	—
原子炉格納容器	原子炉格納容器	—	R/B	なし	—	—	—	—
	真空破壊装置	—	R/B	なし	—	—	—	—
	ベント管	—	R/B	なし	—	—	—	—
	スプレイ管	—	R/B	なし	—	—	—	—
	クエンチャ	—	R/B	なし	—	—	—	—
	弁	—	R/B	なし	—	—	—	—
	原子炉補機制御盤 (2-904-2)	—	C/B	なし	—	—	—	—
	TP制御盤 (2-912)	—	C/B	なし	—	—	—	—
	A-原子炉保護電源装置 (2-924A)	—	Rw/B	なし	—	—	—	—
	B-原子炉保護電源装置 (2-924B)	—	Rw/B	なし	—	—	—	—
原子炉格納容器隔離弁	空調機制御盤 (2-929-1)	—	C/B	なし	—	—	—	—
	窒素ガス制御盤 (2-929-2)	—	C/B	なし	—	—	—	—
	A-格納容器H2O2濃度計盤 (2-973A-1)	—	C/B	なし	—	—	—	—
	B-格納容器H2O2濃度計盤 (2-973B-1)	—	C/B	なし	—	—	—	—
	A-格納容器H2O2濃度計流量器盤 (2-973A-2)	—	Rw/B	なし	—	—	—	—
	B-格納容器H2O2濃度計流量器盤 (2-973B-2)	—	Rw/B	なし	—	—	—	—
	AM制御盤 (2-974)	—	C/B	なし	—	—	—	—
	計装弁隔離計盤 (2-977)	—	C/B	なし	—	—	—	—
	サブプレッショントラップ	—	R/B	なし	—	—	—	—
	原子炉再循環ポンプ	—	R/B	なし	—	—	—	—
原子炉再循環系	配管	—	R/B	なし	—	—	—	—
	シュートポンプ	—	R/B	なし	—	—	—	—
	配管	—	R/B	なし	—	—	—	—
	弁	—	R/B	なし	—	—	—	—
	PRポンプ計器ラック (2-RIR-1-2-2)	—	R/B	なし	—	—	—	—
	PRポンプ計器ラック (2-RIR-1-2-4)	—	R/B	なし	—	—	—	—
	アキュムレータ	—	R/B	なし	—	—	—	—
	配管	—	R/B	なし	—	—	—	—
	主蒸気流量制限器	—	R/B	なし	—	—	—	—
	減圧し安全弁	—	R/B	なし	—	—	—	—
主蒸気系	主蒸気隔離弁	—	R/B	なし	—	—	—	—
	弁	—	R/B	なし	—	—	—	—
	安全設備制御盤 (2-903)	—	C/B	なし	—	—	—	—
	A-主蒸気流量計器ラック (2-RIR-1-3A)	—	R/B	なし	—	—	—	—
	B-主蒸気流量計器ラック (2-RIR-1-3B)	—	R/B	なし	—	—	—	—
	C-主蒸気流量計器ラック (2-RIR-1-3C)	—	R/B	なし	—	—	—	—
	D-主蒸気流量計器ラック (2-RIR-1-3D)	—	R/B	なし	—	—	—	—
	配管	—	R/B	なし	—	—	—	—
	弁	—	R/B	なし	—	—	—	—
	配管	—	R/B	なし	—	—	—	—
給水系	弁	—	R/B	なし	—	—	—	—
	配管	—	R/B	なし	—	—	—	—
ベント・ドレン系	配管	—	R/B	なし	—	—	—	—
	弁	—	R/B	なし	—	—	—	—

※：建物名は、R/B：原子炉建物、T/B：タービン建物、Rw/B：廃棄物処理建物、C/B：制御室建物を示す。

表 1.2.4 外部事象防護対象施設に波及的影響を及ぼし得る評価対象施設の抽出結果 (2/8)

系統	系統・機器	設置場所		外部事象防護対象施設と配管、ダクト等で接続されている屋外施設	影響有無	機能喪失による影響		外部事象防護対象施設に波及的影響を及ぼし得る施設	備考
		屋外	屋内※ (建物名)			判断理由	影響有無		
原子炉浄化系	制御棒駆動機構	—	R/B	なし	—	—	—	—	
	制御棒カプリアリソング	—	R/B	なし	—	—	—	—	
	制御棒駆動機構カプリアリソング	—	R/B	なし	—	—	—	—	
	制御棒駆動機構ラック機構	—	R/B	なし	—	—	—	—	
	制御棒駆動機構ハウジング	—	R/B	なし	—	—	—	—	
	制御棒案内管	—	R/B	なし	—	—	—	—	
	配管	—	R/B	なし	—	—	—	—	
	弁	—	R/B	なし	—	—	—	—	
	アキユムレータ	—	R/B	なし	—	—	—	—	
	蓄熱容器	—	R/B	なし	—	—	—	—	
原子炉浄化系	原子炉浄化循環ポンプ	—	R/B	なし	—	—	—	—	
	原子炉浄化循環ポンプ電動機	—	R/B	なし	—	—	—	—	
	原子炉浄化補助ポンプ	—	R/B	なし	—	—	—	—	
	原子炉浄化補助ポンプ電動機	—	R/B	なし	—	—	—	—	
	配管	—	R/B	なし	—	—	—	—	
	弁	—	R/B	なし	—	—	—	—	
	再生熱交換器	—	R/B	なし	—	—	—	—	
	排再生熱交換器	—	R/B	なし	—	—	—	—	
	補助熱交換器	—	R/B	なし	—	—	—	—	
	原子炉浄化系サージタンク	—	R/B	なし	—	—	—	—	
原子炉浄化系	過飽和蒸気発生器	—	R/B	なし	—	—	—	—	
	脱塩装置脱塩器	—	R/B	なし	—	—	—	—	
	A-配管開閉温度トリップ設定器 (2-975A)	—	C/B	なし	—	—	—	—	
	B-配管開閉温度トリップ設定器 (2-975B)	—	C/B	なし	—	—	—	—	
	A-CW・RCIC・RRR隔離計器ラック (2-RIC-B1-1A)	—	R/B	なし	—	—	—	—	
	B-CW・RCIC・RRR隔離計器ラック (2-RIC-B1-1B)	—	R/B	なし	—	—	—	—	
	原子炉補機冷却水ポンプ	—	R/B	なし	—	—	—	—	
	原子炉補機冷却水ポンプ電動機	—	R/B	なし	—	—	—	—	
	配管	—	R/B	なし	—	—	—	—	
	弁	—	R/B	なし	—	—	—	—	
原子炉補機冷却系	配管	—	R/B	なし	—	—	—	—	
	弁	—	R/B	なし	—	—	—	—	
	原子炉補機冷却系熱交換器	—	R/B	なし	—	—	—	—	
	サージタンク	—	R/B	なし	—	—	—	—	
	原子炉補機冷却水ポンプ	○	—	なし	—	—	—	—	
	原子炉補機冷却水ポンプ電動機	○	—	なし	—	—	—	—	
	配管	○	R/B、T/B	なし	—	—	—	—	
	弁	○	R/B	なし	—	—	—	—	
	ストレートナ	—	—	なし	—	—	—	—	
	燃料プール	—	R/B	なし	—	—	—	—	
燃料プール冷却系	使用済燃料貯蔵ラック	—	R/B	なし	—	—	—	—	
	配管	—	R/B	なし	—	—	—	—	
	弁	—	R/B	なし	—	—	—	—	
	新燃料貯蔵庫 (臨界を防止する機能)	—	R/B	なし	—	—	—	—	
	原子炉ワエル	—	R/B	なし	—	—	—	—	
	原子炉ワエル	—	R/B	なし	—	—	—	—	
	高圧炉心スプレイ補機冷却水ポンプ	—	R/B	なし	—	—	—	—	
	高圧炉心スプレイ補機冷却水ポンプ電動機	—	R/B	なし	—	—	—	—	
	配管	—	R/B	なし	—	—	—	—	
	弁	—	R/B	なし	—	—	—	—	
高圧炉心スプレイ補機冷却系	高圧炉心スプレイ補機冷却系熱交換器	—	R/B	なし	—	—	—	—	
	サージタンク	—	R/B	なし	—	—	—	—	
	配管	—	R/B	なし	—	—	—	—	
	弁	—	R/B	なし	—	—	—	—	
	原子炉補機冷却水ポンプ	—	R/B	なし	—	—	—	—	
	原子炉補機冷却水ポンプ電動機	—	R/B	なし	—	—	—	—	
	配管	—	R/B	なし	—	—	—	—	
	弁	—	R/B	なし	—	—	—	—	
	高圧炉心スプレイ補機冷却系熱交換器	—	R/B	なし	—	—	—	—	
	サージタンク	—	R/B	なし	—	—	—	—	

※：建物名は、R/B：原子炉建物、T/B：タービン建物、Rw/B：廃棄物処理建物、C/B：制御室建物を示す。

表 1.2.4 外部事象防護対象施設に波及的影響を及ぼし得る評価対象施設の抽出結果 (3 / 8)

系統	系統・機器	設置場所		外部事象防護対象施設と配管、ダクト等で接続されている屋外施設	機能喪失による影響		外部事象防護対象施設に波及的影響を及ぼし得る施設	備考
		屋外	屋内 <sup>※</sup> (建物名)		影響有無	判断理由		
高圧炉心スプレィ補機海水系	高圧炉心スプレィ補機海水ポンプ	○	—	なし	—	—	—	—
	高圧炉心スプレィ補機海水ポンプ電動機	○	—	なし	—	—	—	—
	配管	○	R/B、T/B	なし	—	—	—	—
	弁	○	R/B	なし	—	—	—	—
	ストレーナ	○	—	なし	—	—	—	—
	配管	—	R/B	なし	—	—	—	—
	弁	—	R/B	なし	—	—	—	—
	原子炉隔離時冷却系ポンプ	—	R/B	なし	—	—	—	—
	原子炉隔離時冷却系ポンプ電動機	—	R/B	なし	—	—	—	—
	タービン油ポンプ	—	R/B	なし	—	—	—	—
原子炉隔離時冷却系	配管	—	R/B	なし	—	—	—	—
	弁	—	R/B	なし	—	—	—	—
	ストレーナ	—	R/B	なし	—	—	—	—
	主油タンク	—	R/B	なし	—	—	—	—
	油消油クーラ	—	R/B	なし	—	—	—	—
	油冷却器	—	R/B	なし	—	—	—	—
	RCICタービン制御盤 (SH) (2-2360)	—	R/B	なし	—	—	—	—
	RCICタービン排気圧力計器ラック (2-RIR-B1-3)	—	R/B	なし	—	—	—	—
	残留熱除去系ポンプ	—	R/B	なし	—	—	—	—
	残留熱除去系ポンプ電動機	—	R/B	なし	—	—	—	—
残留熱除去系	配管	—	R/B	なし	—	—	—	—
	弁	—	R/B	なし	—	—	—	—
	ストレーナ	—	R/B	なし	—	—	—	—
	残留熱除去系熱交換器	—	R/B	なし	—	—	—	—
	A-RIR計器ラック (2-RIR-B2-3A)	—	R/B	なし	—	—	—	—
	B-RIR計器ラック (2-RIR-B2-3B)	—	R/B	なし	—	—	—	—
	C-RIR計器ラック (2-RIR-B2-3C)	—	R/B	なし	—	—	—	—
	低圧炉心スプレィポンプ	—	R/B	なし	—	—	—	—
	低圧炉心スプレィポンプ電動機	—	R/B	なし	—	—	—	—
	配管	—	R/B	なし	—	—	—	—
低圧炉心スプレィ系	弁	—	R/B	なし	—	—	—	—
	ストレーナ	—	R/B	なし	—	—	—	—
	高圧炉心スプレィポンプ	—	R/B	なし	—	—	—	—
	高圧炉心スプレィポンプ電動機	—	R/B	なし	—	—	—	—
	配管	—	R/B	なし	—	—	—	—
	弁	—	R/B	なし	—	—	—	—
	ストレーナ	—	R/B	なし	—	—	—	—
	HPCS潤滑器盤 (2-921)	—	Rw/B	なし	—	—	—	—
	HPCSトリップ脱圧器盤 (2-921A)	—	R/B	なし	—	—	—	—
	HPCS計器ラック (2-RIR-B1-4)	—	R/B	なし	—	—	—	—
ほう酸水注入系	ほう酸水注入ポンプ	—	R/B	なし	—	—	—	—
	ほう酸水注入ポンプ電動機	—	R/B	なし	—	—	—	—
	ほう酸水注入ポンプ潤滑油ポンプ	—	R/B	なし	—	—	—	—
	ほう酸水注入ポンプ潤滑油ポンプ電動機	—	R/B	なし	—	—	—	—
	配管	—	R/B	なし	—	—	—	—
	弁	—	R/B	なし	—	—	—	—
	ほう酸水貯蔵タンク	—	R/B	なし	—	—	—	—
	原子炉隔離時冷却系	—	R/B	なし	—	—	—	—
	ほう酸水注入系操作箱 (2RCB-51)	—	C/B	なし	—	—	—	—
	ほう酸水注入系操作箱 (2RCB-51)	—	R/B	なし	—	—	—	—

※：建物名は、R/B：原子炉建物、T/B：廃棄物処理建物、C/B：制御室建物を示す。

表 1.2.4 外部事象防護対象施設に波及的影響を及ぼし得る評価対象施設の抽出結果 (4/8)

系統	系統・機器		設置場所		外部事象防護対象施設と配管、ダクト等で接続されている屋外施設	機能喪失による影響		外部事象防護対象施設に波及的影響を及ぼし得る施設	備考
	機器・設備	屋内* (建物名)	屋外	影響有無		判断理由			
非常用ガス処理系	非常用ガス処理系排風機	R/B	—	なし	—	—	—	—	—
	非常用ガス処理系排風機電動機	R/B	—	なし	—	—	—	—	—
	非常用ガス処理系前置ガス処理装置	R/B	—	なし	—	—	—	—	—
	非常用ガス処理系後置ガス処理装置	R/B, T/B	○	なし	—	—	—	—	—
	弁	R/B	—	なし	—	—	—	—	—
	安全設備補助制御盤 (2-909)	C/B	—	なし	—	—	—	—	—
	A-SGI計器ラック (2-RR-3-2A)	R/B	—	なし	—	—	—	—	—
	B-SGI計器ラック (2-RR-3-2B)	R/B	—	なし	—	—	—	—	—
	配管	R/B	—	なし	—	—	—	—	—
	弁	R/B	—	なし	—	—	—	—	—
自動減圧系	アキュムレータ	R/B	—	なし	—	—	—	—	—
	原子炉補機制御盤 (2-901-1)	C/B	—	なし	—	—	—	—	—
	可燃性ガス濃度計系再結合装置 (7'の含む)	R/B	—	なし	—	—	—	—	—
	事故時サンダルポンプ	R/B	—	なし	—	—	—	—	—
	事故時サンダルポンプ電動機	R/B	—	なし	—	—	—	—	—
	通常時サンダルポンプ	R/B	—	なし	—	—	—	—	—
	通常時サンダルポンプ電動機	R/B	—	なし	—	—	—	—	—
	事故時サンダル昇圧ポンプ	R/B	—	なし	—	—	—	—	—
	通常時サンダル昇圧ポンプ	R/B	—	なし	—	—	—	—	—
	事故時サンダル昇圧ポンプ電動機	R/B	—	なし	—	—	—	—	—
可燃性ガス濃度制御系	通常時サンダル昇圧ポンプ	R/B	—	なし	—	—	—	—	—
	通常時サンダル昇圧ポンプ	R/B	—	なし	—	—	—	—	—
	通常時サンダル昇圧ポンプ電動機	R/B	—	なし	—	—	—	—	—
	気水分離器	R/B	—	なし	—	—	—	—	—
	配管	R/B	—	なし	—	—	—	—	—
	弁	R/B	—	なし	—	—	—	—	—
	冷却器	R/B	—	なし	—	—	—	—	—
	除塵機	R/B	—	なし	—	—	—	—	—
	A-原子炉プロセス計測盤 (2-934A)	Rw/B	—	なし	—	—	—	—	—
	B-原子炉プロセス計測盤 (2-934B)	R/B	—	なし	—	—	—	—	—
A-原子炉格納容器12/02分時計ラック (2-RSR-3-3A)	Rw/B	—	なし	—	—	—	—	—	
B-原子炉格納容器12/02分時計ラック (2-RSR-3-3B)	R/B	—	なし	—	—	—	—	—	

※：建物名は、R/B：原子炉建物、T/B：タービン建物、Rw/B：廃棄物処理建物、C/B：制御室建物を示す。



表 1.2.4 外部事象防護対象施設に波及的影響を及ぼし得る評価対象施設の抽出結果 (5/8)

系統	系統・機器		設置場所 (建物名)	外部事象防護対象施設と配管, ダクト等で接続されている 屋外施設		機能喪失による影響		備考
	機器・設備	系統		影響の有無	判断理由			
非常用所内電源系	非常用メタラクラ装置(2C-M/C)	屋外	なし	なし	—	—	—	—
	2C-動力変圧器	—	なし	なし	—	—	—	—
	非常用メタラクラ装置(2B-M/C)	—	なし	なし	—	—	—	—
	2D-動力変圧器	—	なし	なし	—	—	—	—
	高圧炉心スプレイレイ系メタラクラ装置(2HPCS-M/C)	—	なし	なし	—	—	—	—
	2HPCS-動力変圧器	—	なし	なし	—	—	—	—
	非常用ロードセクタ装置(2C-L/C)	—	なし	なし	—	—	—	—
	非常用ロードセクタ装置(2B-L/C)	—	なし	なし	—	—	—	—
	非常用コントロールセクタ装置(2C1,2,3-R/B-C/C)	—	なし	なし	—	—	—	—
	非常用コントロールセクタ装置(2D1,2,3-R/B-C/C)	—	なし	なし	—	—	—	—
	非常用コントロールセクタ装置(2A-DG-C/C)	—	なし	なし	—	—	—	—
	非常用コントロールセクタ装置(2B-DG-C/C)	—	なし	なし	—	—	—	—
	高圧炉心スプレイレイ系コントロールセクタ装置(2HPCS-C/C)	—	なし	なし	—	—	—	—
	計装用コントロールセクタ装置(2A-計装-C/C)	—	なし	なし	—	—	—	—
	計装用コントロールセクタ装置(2B-計装-C/C)	—	なし	なし	—	—	—	—
	A-中央分電盤	—	なし	なし	—	—	—	—
	B-中央分電盤	—	なし	なし	—	—	—	—
	高圧炉心スプレイレイ系-中央分電盤	—	なし	なし	—	—	—	—
	A-計装分電盤	—	なし	なし	—	—	—	—
	B-計装分電盤	—	なし	なし	—	—	—	—
	A-計装用無停電交流電源装置	—	なし	なし	—	—	—	—
	B-計装用無停電交流電源装置	—	なし	なし	—	—	—	—
	A-ディゼール発電機制御盤(2-2220A1)	—	なし	なし	—	—	—	—
B-ディゼール発電機制御盤(2-2220B1)	—	なし	なし	—	—	—	—	
HPCS-ディゼール発電機制御盤(2-2220H1)	—	なし	なし	—	—	—	—	
所内発電機(2-908)	—	なし	なし	—	—	—	—	
230V系蓄電池	—	なし	なし	—	—	—	—	
A-115V系蓄電池	—	なし	なし	—	—	—	—	
B-115V系蓄電池	—	なし	なし	—	—	—	—	
高圧炉心スプレイレイ系蓄電池	—	なし	なし	—	—	—	—	
A-原子炉中性子計装用蓄電池	—	なし	なし	—	—	—	—	
B-原子炉中性子計装用蓄電池	—	なし	なし	—	—	—	—	
直流コントロールセクタ装置(2-RC1C)直流-C/C)	—	なし	なし	—	—	—	—	
A-原子炉中性子計装用充電器盤	—	なし	なし	—	—	—	—	
B-原子炉中性子計装用充電器盤	—	なし	なし	—	—	—	—	
230V系充電器盤	—	なし	なし	—	—	—	—	
A-115V系充電器盤	—	なし	なし	—	—	—	—	
B-115V系充電器盤	—	なし	なし	—	—	—	—	
高圧炉心スプレイレイ系充電器盤	—	なし	なし	—	—	—	—	
A-原子炉中性子計装用分電盤	—	なし	なし	—	—	—	—	
B-原子炉中性子計装用分電盤	—	なし	なし	—	—	—	—	
230V系直流盤	—	なし	なし	—	—	—	—	
A-115V系直流盤	—	なし	なし	—	—	—	—	
B-115V系直流盤	—	なし	なし	—	—	—	—	
高圧炉心スプレイレイ系直流盤	—	なし	なし	—	—	—	—	
A-主蒸気圧力計器ラック(2-T1R-1-1A)	—	なし	なし	—	—	—	—	
B-主蒸気圧力計器ラック(2-T1R-1-1B)	—	なし	なし	—	—	—	—	
A-復水器真空計器ラック(2-T1R-3-9A)	—	なし	なし	—	—	—	—	
B-復水器真空計器ラック(2-T1R-3-9B)	—	なし	なし	—	—	—	—	

※：建物名は、R/B：原子炉建物、T/B：タービン建物、Rw/B：廃棄物処理建物、C/B：制御室建物を示す。

表 1.2.4 外部事象防護対象施設に波及的影響を及ぼし得る評価対象施設の抽出結果 (6/8)

系統	系統・機器		設置場所 (建物名)	外部事象防護対象施設と配管、 ダクト等が接続されている 箇所		影響有無	機能喪失による影響 判断理由		外部事象防護対象施設に 波及的影響を 及ぼし得る施設	備考
	系統	機器・設備		屋外	屋内※ (建物名)		影響有無	判断理由		
気体廃棄物処理系	活性炭式毒ガスホルトアップ塔	機器・設備	屋外	なし	なし	—	—	—	—	—
	隔離弁		—	Rw/B	なし	—	—	—	—	—
	タービン機械制御盤 (2-906)		—	T/B	なし	—	—	—	—	—
	タービン補助盤 (2-943)		—	C/B	なし	—	—	—	—	—
	空気抽出部圧力・温度計器ラック (2-TIR-2-9)		—	C/B	なし	—	—	—	—	—
	排ガス処理系計器ラック (2-TIR-3-0)		—	T/B	なし	—	—	—	—	—
	原子炉種空調機気系隔離弁		—	R/B	なし	—	—	—	—	—
	原子炉種空調機気系ダクト		—	R/B	なし	—	—	—	—	—
	中央制御室送風機		—	Rw/B	なし	—	—	—	—	—
	中央制御室送風機電動機		—	Rw/B	なし	—	—	—	—	—
原子炉種空調機気系	中央制御室非常用汚濁除去風機		—	Rw/B	なし	—	—	—	—	—
	中央制御室非常用汚濁除去風機電動機		—	Rw/B	なし	—	—	—	—	—
	中央制御室排風機		—	Rw/B	なし	—	—	—	—	—
	中央制御室排風機電動機		—	Rw/B	なし	—	—	—	—	—
	中央制御室空気調和装置 (加湿器含む)		—	Rw/B	なし	—	—	—	—	—
	中央制御室非常用再循環処理装置		—	Rw/B	なし	—	—	—	—	—
	中央制御室冷凍機		—	Rw/B	なし	—	—	—	—	—
	中央制御室冷凍機油ポンプ		—	Rw/B	なし	—	—	—	—	—
	中央制御室冷凍機油ポンプ電動機		—	Rw/B	なし	—	—	—	—	—
	中央制御室冷水再循環ポンプ		—	Rw/B	なし	—	—	—	—	—
中央制御室換気系	中央制御室冷水再循環ポンプ電動機		—	Rw/B	なし	—	—	—	—	—
	ダクト		—	Rw/B, C/B	なし	—	—	—	—	—
	タンク		—	Rw/B	なし	—	—	—	—	—
	弁		—	Rw/B	なし	—	—	—	—	—
	A-中央制御室冷凍機制御盤 (2-2256A)		—	Rw/B	なし	—	—	—	—	—
	B-中央制御室冷凍機制御盤 (2-2256B)		—	Rw/B	なし	—	—	—	—	—
	共通盤 (2-945-2)		—	C/B	なし	—	—	—	—	—
	中央制御室A-冷凍機計器ラック (2-WIR-2-6A)		—	Rw/B	なし	—	—	—	—	—
	中央制御室B-冷凍機計器ラック (2-WIR-2-6B)		—	Rw/B	なし	—	—	—	—	—
	非常用ダイヤゼル送風機		—	R/B	なし	—	—	—	—	—
原子炉建物付種空調機気系	高圧初心スプレイ非常用ダイヤゼル送風機		—	R/B	なし	—	—	—	—	—
	高圧初心スプレイ非常用ダイヤゼル送風機電動機		—	R/B	なし	—	—	—	—	—
	機留熱除去系ポンプ送風機		—	R/B	なし	—	—	—	—	—
	機留熱除去系ポンプ送風機電動機		—	R/B	なし	—	—	—	—	—
	低圧初心スプレイポンプ送風機		—	R/B	なし	—	—	—	—	—
	低圧初心スプレイポンプ送風機電動機		—	R/B	なし	—	—	—	—	—
	高圧初心スプレイポンプ送風機		—	R/B	なし	—	—	—	—	—
	高圧初心スプレイポンプ送風機電動機		—	R/B	なし	—	—	—	—	—
	非常用電気送風機		—	R/B	なし	—	—	—	—	—
	非常用電気送風機電動機		—	R/B	なし	—	—	—	—	—
原子炉建物付種空調機気系	高圧初心スプレイ系電気送風機		—	R/B	なし	—	—	—	—	—
	高圧初心スプレイ系電気送風機電動機		—	R/B	なし	—	—	—	—	—
	非常用電気送風機		—	R/B	なし	—	—	—	—	—
	非常用電気送風機電動機		—	R/B	なし	—	—	—	—	—
	高圧初心スプレイ系電気送風機		—	R/B	なし	—	—	—	—	—
	高圧初心スプレイ系電気送風機電動機		—	R/B	なし	—	—	—	—	—
	非常用電気送風機		—	R/B	なし	—	—	—	—	—
	非常用電気送風機電動機		—	R/B	なし	—	—	—	—	—
	高圧初心スプレイ系電気送風機		—	R/B	なし	—	—	—	—	—
	高圧初心スプレイ系電気送風機電動機		—	R/B	なし	—	—	—	—	—

※：建物名は、R/B：原子炉建物、T/B：タービン建物、Rw/B：廃棄物処理建物、C/B：制御室建物を示す。

表 1.2.4 外部事象防護対象施設に波及的影響を及ぼし得る評価対象施設の抽出結果 (7/8)

系統	系統・機器	設置場所 (建物名)	外部事象防護対象施設と配管、 ダクト等で接続されている 屋外施設		影響の有無	機能喪失による影響		外部事象防護対象施設に 波及的影響を 及ぼし得る施設	備考
			屋外	屋内		判断理由	判断理由		
非常用所内電源系	非常用ディーゼル発電機	—	R/B	排気消音器 (排気管含む)	あり	閉塞した場合、ディーゼル機関への排 気に影響を及ぼす可能性がある。	—	○	—
	空気だめ	—	R/B	なし	—	—	—	—	—
	排気消音器フィルタ	—	R/B	なし	—	—	—	—	—
	潤滑油高油機	—	R/B	なし	—	—	—	—	—
	潤滑油サブタンク	—	R/B	ベント管	あり	閉塞した場合、タンクが加圧される可 能性がある。	—	○	—
	潤滑油フィルタ	—	R/B	なし	—	—	—	—	—
	シリンドラ油フィルタ	—	R/B	ベント管	あり	閉塞した場合、タンクが加圧される可 能性がある。	—	○	ベント管は潤滑油サブ タンクベント管と共用
	1次水高油器	—	R/B	なし	—	—	—	—	—
	1次水空気抜タンク	—	R/B	なし	—	—	—	—	—
	1次水膨張タンク	—	R/B	なし	—	—	—	—	—
	ディーゼル燃料デイトンク	—	R/B	ベント管	あり	閉塞した場合、燃料の移送に影響を及 ぼす可能性がある。	—	○	—
	A-非常用ディーゼル発電機系ディーゼル燃料移送ポンプ	○	—	なし	—	—	—	—	—
	A-非常用ディーゼル発電機系ディーゼル燃料移送ポンプ電動機	○	ディーゼル燃料 貯蔵タンク格納 槽	なし	—	—	—	—	—
	B-非常用ディーゼル発電機系ディーゼル燃料移送ポンプ	—	ディーゼル燃料 貯蔵タンク格納 槽	なし	—	—	—	—	—
	B-非常用ディーゼル発電機系ディーゼル燃料移送ポンプ電動機	—	ディーゼル燃料 貯蔵タンク格納 槽	なし	—	—	—	—	—
	燃料フィルタ	—	R/B	なし	—	—	—	—	—
	配管 (給気管、通気機含む)	○	R/B	なし	—	—	—	—	—
	弁	○	R/B	なし	—	—	—	—	—
	高圧炉心スプレイ非常用ディーゼル発電機系非常用ディーゼル発 電機	—	R/B	排気消音器 (排気管含む)	あり	閉塞した場合、ディーゼル機関への排 気に影響を及ぼす可能性がある。	—	○	—
	高圧炉心スプレイ非常用ディーゼル発電機系空気だめ	—	R/B	なし	—	—	—	—	—
	高圧炉心スプレイ非常用ディーゼル発電機系給気消音器フィルタ	—	R/B	なし	—	—	—	—	—
	高圧炉心スプレイ非常用ディーゼル発電機系潤滑油冷却機	—	R/B	なし	—	—	—	—	—
	高圧炉心スプレイ非常用ディーゼル発電機系潤滑油サブタンク	—	R/B	ベント管	あり	閉塞した場合、タンクが加圧される可 能性がある。	—	○	—
	高圧炉心スプレイ非常用ディーゼル発電機系潤滑油フィルタ	—	R/B	なし	—	—	—	—	—
	高圧炉心スプレイ非常用ディーゼル発電機系シリンドラ油タンク	—	R/B	ベント管	あり	閉塞した場合、タンクが加圧される可 能性がある。	—	○	ベント管は潤滑油サブ タンクベント管と共用
	高圧炉心スプレイ非常用ディーゼル発電機系シリンドラ油フィルタ	—	R/B	なし	—	—	—	—	—
	高圧炉心スプレイ非常用ディーゼル発電機系1次水冷却器	—	R/B	なし	—	—	—	—	—
	高圧炉心スプレイ非常用ディーゼル発電機系1次水空気抜タンク	—	R/B	なし	—	—	—	—	—
	高圧炉心スプレイ非常用ディーゼル発電機系1次水膨張タンク	—	R/B	なし	—	—	—	—	—
	高圧炉心スプレイ非常用ディーゼル発電機系ディーゼル燃料デ イトンク	—	R/B	ベント管	あり	閉塞した場合、燃料の移送に影響を及 ぼす可能性がある。	—	○	—
高圧炉心スプレイ非常用ディーゼル発電機系ディーゼル燃料移送 ポンプ	○	—	なし	—	—	—	—	—	
高圧炉心スプレイ非常用ディーゼル発電機系ディーゼル燃料移送 ポンプ電動機	○	—	なし	—	—	—	—	—	
高圧炉心スプレイ非常用ディーゼル発電機系燃料フィルタ	—	R/B	なし	—	—	—	—	—	
高圧炉心スプレイ非常用ディーゼル発電機系配管 (給気管、通気 機含む)	○	R/B	なし	—	—	—	—	—	
高圧炉心スプレイ非常用ディーゼル発電機系弁	○	R/B	なし	—	—	—	—	—	
ディーゼル燃料貯蔵タンク	—	ディーゼル燃料 貯蔵タンク室、 ディーゼル燃料 貯蔵タンク格納 槽	ベント管	あり	閉塞した場合、燃料の移送に影響を及 ぼす可能性がある。	—	○	—	
燃料取扱設備	—	R/B	なし	—	—	—	—	—	
原子炉建物天井クレーン	—	R/B	なし	—	—	—	—	—	
中央制御室外原子炉停止制御盤 (2-2215-1)	—	R/B	なし	—	—	—	—	—	
中央制御室外原子炉停止制御盤 (2-2215-2)	—	R/B	なし	—	—	—	—	—	
RCI(制御室)	—	R/B	なし	—	—	—	—	—	

※：建物名は、R/B：原子炉建物、T/B：タービン建物、Rw/B：廃棄物処理建物、C/B：制御室建物を示す。

表 1.2.4 外部事象防護対象施設に波及的影響を及ぼし得る評価対象施設の抽出結果 (8/8)

系統	系統・機器		設置場所		外部事象防護対象施設と配管、ダクト等で接続されている屋外施設	機能喪失による影響		外部事象防護対象施設に波及的影響を及ぼし得る施設	備考
	機器・設備	屋外	屋内*	影響の有無		判断理由			
原子炉保護系	A-原子炉圧力容器計器ラック (2-R1R-1-8A)	—	R/B	なし	—	—	—	—	—
	B-原子炉圧力容器計器ラック (2-R1R-1-8B)	—	R/B	なし	—	—	—	—	—
	C-原子炉圧力容器計器ラック (2-R1R-1-8C)	—	R/B	なし	—	—	—	—	—
	D-原子炉圧力容器計器ラック (2-R1R-1-8D)	—	R/B	なし	—	—	—	—	—
	A-原子炉格納容器圧力計器ラック (2-R1R-2-8A)	—	R/B	なし	—	—	—	—	—
	B-原子炉格納容器圧力計器ラック (2-R1R-2-8B)	—	R/B	なし	—	—	—	—	—
	C-原子炉格納容器圧力計器ラック (2-R1R-2-8C)	—	R/B	なし	—	—	—	—	—
	D-原子炉格納容器圧力計器ラック (2-R1R-2-8D)	—	R/B	なし	—	—	—	—	—
	A1-原子炉保護トリップ設定器盤 (2-924A1)	—	Rw/B	なし	—	—	—	—	—
	A2-原子炉保護トリップ設定器盤 (2-924A2)	—	Rw/B	なし	—	—	—	—	—
	B1-原子炉保護トリップ設定器盤 (2-924B1)	—	Rw/B	なし	—	—	—	—	—
	B2-原子炉保護トリップ設定器盤 (2-924B2)	—	Rw/B	なし	—	—	—	—	—
	原子炉中性子計装ハウジング	—	R/B	なし	—	—	—	—	—
	原子炉核計装の一部	—	C/B	なし	—	—	—	—	—
原子炉起動領域モニタ盤 (2-910A)	—	C/B	なし	—	—	—	—	—	
原子炉起動領域モニタ盤 (2-910B)	—	C/B	なし	—	—	—	—	—	
原子炉圧力容器計装系	—	Rw/B	なし	—	—	—	—	—	
原子炉圧力容器計装系	—	Rw/B	なし	—	—	—	—	—	
原子炉種	○	—	なし	—	—	—	—	—	
原子炉建物	○	—	なし	—	—	—	—	—	
中央制御室	○	—	なし	—	—	—	—	—	
中央制御室遮蔽	○	—	なし	—	—	—	—	—	
排水路	○	—	なし	—	—	—	—	—	
排気筒	○	—	なし	—	—	—	—	—	
遮蔽設備	—	R/B	なし	—	—	—	—	—	

\*：建物名は、R/B：原子炉建物、T/B：タービン建物、Rw/B：廃棄物処理建物、C/B：制御室建物を示す。

1.2.3 評価対象施設の構内配置について

抽出した主な外部事象防護対象施設のうち評価対象施設及び外部事象防護対象施設に波及的影響を及ぼし得る評価対象施設の構内配置を図 1.2.4 に示す。

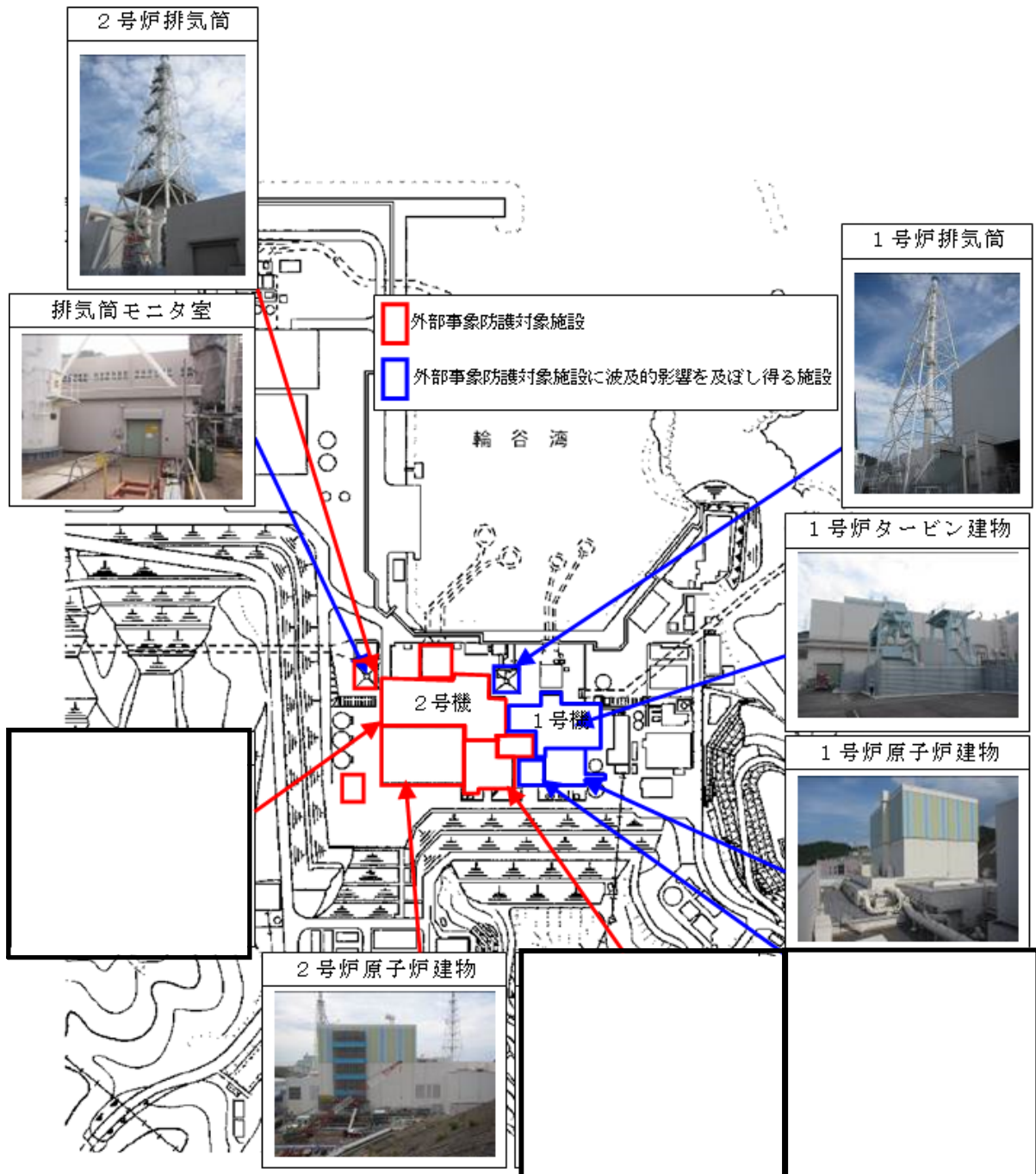


図 1.2.4 外部事象防護対象施設のうち評価対象施設及び外部事象防護対象施設に波及的影響を及ぼし得る評価対象施設の構内配置

本資料のうち、枠囲みの内容は機密に係る事項のため公開できません。

#### 1.2.4 外部事象防護対象施設以外の安全重要度クラス3施設の考慮について

安全評価上その機能に期待する安全重要度クラス3施設以外のクラス3施設については、竜巻及びその随件事象により損傷した場合でも、代替設備により必要な機能を確保すること、又は安全上支障のない期間に修復すること等の対応が可能な設計とすることにより、安全機能を損なわない設計とすることから、外部事象防護対象施設としていない。竜巻及びその随件事象等による影響の大きい主な屋外の外部事象防護対象施設以外の安全重要度クラス3施設が損傷した場合の対応を表1.2.5に示す。外部事象防護対象施設以外の安全重要度クラス3施設が損傷した場合でも、補修等を実施するとともに、保安規定の運転上の制限に従い、プラント停止等の対応を行うことにより、プラントの安全性は維持できる。

表 1.2.5 屋外の外部事象防護対象施設以外の安全重要度クラス3施設  
損傷時の対応

系統	主な機器名称	対応 (【 】はDB施設以外を用いた対応)
窒素ガス制御系	窒素ガス制御系液体窒素貯蔵タンク、窒素ガス制御系液体窒素蒸発装置、窒素ガス制御系サージタンク	必要によりプラントを停止し、補修を実施
所内電気設備系	主変圧器、所内変圧器、起動変圧器、送電線、開閉所	必要によりプラントを停止し、補修を実施 【外部電源が受電できない場合はガスタービン発電機、高圧発電機車で代替可能】
循環水系	循環水ポンプ用電動機、弁駆動部	必要な循環水量が確保できない場合はプラントを停止し、補修を実施
復水輸送系 液体廃棄物処理系	復水貯蔵タンク 補助復水貯蔵タンク トーラス水受入タンク	天板が損傷した場合は補修を実施 (側面は遮蔽壁により防護されている)
消火系	消火ポンプ、配管	補修を実施(消防車で代替可能) 【水ろ過設備、送水車で代替可能】
所内蒸気系	3号所内ボイラ本体、重油サービスタンク、蒸気配管、重油移送配管	補修を実施(4号所内ボイラで代替可能)
海水電解装置設備系(取水槽設備系)	除じん機	必要によりプラントを停止し、補修を実施(健全側水路で代替可能)
気象観測設備	風向風速計、日射・放射収支計、気温計、雨量計、湿度計	補修を実施 【可搬式気象観測設備で代替可能】
プロセス放射線モニタ系	排気筒高レンジモニタ	補修を実施(モニタリングポスト等で代替可能) 【可搬型モニタリングポストで代替可能】
野外放射線モニタ	モニタリングポスト	補修を実施 【可搬型モニタリングポストで代替可能】
通信設備	データ伝送設備(発電所内)及びデータ伝送設備(発電所外)	補修を実施
建物	固体廃棄物貯蔵所	補修を実施(放射性物質の拡散防止について、適切な処置を実施)
	緊急時対策所	補修を実施

## 1.3 耐震 S クラス設備について

ガイドにおいて、竜巻防護施設は「基準地震動及び耐震設計方針に係る審査ガイド」の重要度分類における耐震 S クラスの設計を要求される設備（系統・機能）及び建屋・構築物等とされている。竜巻影響評価では、安全重要度クラス 1, 2 及び安全評価上その機能に期待するクラス 3 に属する構築物, 系統及び機器に加え, それらを内包する建物に属する施設を外部事象防護対象施設として選定しているため, 外部事象防護対象施設に該当しない耐震 S クラス施設について確認を行った結果, 表 1.3.1 に示すとおり, 津波防護施設, 浸水防止設備及び津波監視設備を抽出した。

津波防護施設, 浸水防止設備及び津波監視設備は, 津波に対応するための設備であり, 津波と竜巻は発生原因が異なること及び基準津波の発生頻度 ( $10^{-4}$ /年程度) と設計竜巻 ( $V_D=92\text{m/s}$ ) の発生頻度 ( $1.56 \times 10^{-7}$ /年程度) を踏まえると, 基準津波と設計竜巻が同時に発生する可能性は小さいことから, 評価対象施設としていない。

外殻や竜巻防護対策による防護機能を期待できない津波に対応するための設備として, 防波壁, 防水壁や津波監視カメラ等があるが, 防波壁, 防水壁は敷地レベルを超える津波に対して機能を要求されていること及び津波監視カメラについては, 代替品を保有していることから, 竜巻及びその随件事象により損傷しても対応可能である。

なお, 津波防護施設, 浸水防止設備及び津波監視設備が竜巻及びその随件事象により損傷し, プラントの安全機能に影響を及ぼすと考えられる場合には, 必要によりプラント停止等の対応を行うことにより, プラントの安全性は維持できる。

表 1.3.1 外部事象防護対象施設以外の耐震 S クラス施設の確認結果 (1 / 2)

耐震重要度分類	クラス別施設	対象施設	外部事象防護対象施設	
S	(i) 原子炉冷却材圧力バウンダリを構成する機器・配管系	主要設備	・原子炉圧力容器 ・原子炉冷却材圧力バウンダリに属する容器・配管・ポンプ・弁	○
		補助設備	・隔離弁を閉とするために必要な電気計装設備	○
	(ii) 使用済燃料を貯蔵するための施設	主要設備	・燃料プール ・使用済燃料貯蔵ラック	○
		補助設備	・燃料プール水補給設備 (残留熱除去系 (燃料プール水の補給に必要な設備)) ・非常用電源及び計装設備 (非常用ディーゼル発電機及びその冷却系・補助設備を含む。)	○
	(iii) 原子炉の緊急停止のために急激に負の反応度を付加するための施設, 及び原子炉の停止状態を維持するための施設	主要設備	・制御棒, 制御棒駆動機構及び制御棒駆動水圧系 (スクラム機能に関する部分) ・ほう酸水注入系	○
		補助設備	・炉心支持構造物 ・電気計装設備 ・チャンネル・ボックス	○

表 1.3.1 外部事象防護対象施設以外の耐震Sクラス施設の確認結果（2 / 2）

耐震重要度分類	クラス別施設	対象施設	外部事象防護対象施設	
S	(iv) 原子炉停止後、炉心から崩壊熱を除去するための施設	主要設備	<ul style="list-style-type: none"> <li>原子炉隔離時冷却系</li> <li>高圧炉心スプレイ系</li> <li>残留熱除去系 (原子炉停止時冷却モード運転に必要な設備)</li> <li>冷却水源としてのサブプレッションチェンバ</li> </ul>	○
		補助設備	<ul style="list-style-type: none"> <li>当該設備の冷却系 (原子炉補機冷却系、高圧炉心スプレイ系補機冷却系)</li> <li>炉心支持構造物</li> <li>非常用電源及び計装設備 (非常用ディーゼル発電機及びその冷却系・補助設備を含む。)</li> </ul>	○
	(v) 原子炉冷却材圧力バウンダリ破損事故後、炉心から崩壊熱を除去するための施設	主要設備	<ul style="list-style-type: none"> <li>非常用炉心冷却系</li> <li>1) 高圧炉心スプレイ系</li> <li>2) 低圧炉心スプレイ系</li> <li>3) 残留熱除去系 (低圧注水モード運転に必要な設備)</li> <li>4) 自動減圧系</li> <li>冷却水源としてのサブプレッションチェンバ</li> </ul>	○
		補助設備	<ul style="list-style-type: none"> <li>当該設備の冷却系 (原子炉補機冷却系、高圧炉心スプレイ系補機冷却系)</li> <li>非常用電源及び計装設備 (非常用ディーゼル発電機及びその冷却系・補助設備を含む。)</li> <li>中央制御室遮蔽及び中央制御室換気系</li> </ul>	○
	(vi) 原子炉冷却材圧力バウンダリ破損事故の際に、圧力障壁となり放射性物質の放散を直接防ぐための施設	主要設備	<ul style="list-style-type: none"> <li>原子炉格納容器</li> <li>原子炉格納容器バウンダリに属する配管・弁</li> </ul>	○
		補助設備	<ul style="list-style-type: none"> <li>隔離弁を閉とするために必要な電気計装設備</li> </ul>	○
	(vii) 放射性物質の放出を伴うような事故の際に、その外部放散を抑制するための施設であり、Sクラス(vi)以外の施設	主要設備	<ul style="list-style-type: none"> <li>残留熱除去系(格納容器冷却モード及びサブプレッションプール水冷却モード運転に必要な設備)</li> <li>可燃性ガス濃度制御系</li> <li>原子炉棟</li> <li>非常用ガス処理系及び排気口</li> <li>原子炉格納容器圧力抑制装置(ベント管)</li> <li>冷却水源としてのサブプレッションチェンバ</li> </ul>	○
		補助設備	<ul style="list-style-type: none"> <li>当該設備の冷却系(原子炉補機冷却系)</li> <li>非常用電源及び計装設備 (非常用ディーゼル発電機及びその冷却系・補助設備を含む。)</li> </ul>	○
	(viii) 津波防護機能を有する設備及び浸水防止機能を有する設備	主要設備	<ul style="list-style-type: none"> <li>津波防護施設</li> <li>浸水防止設備</li> </ul>	×
		補助設備	—	—
	(ix) 敷地における津波監視機能を有する施設	主要設備	<ul style="list-style-type: none"> <li>津波監視設備</li> </ul>	×
		補助設備	<ul style="list-style-type: none"> <li>非常用電源及び計装設備 (非常用ディーゼル発電機及びその冷却系・補助設備を含む。)</li> </ul>	○



2.1 数値気象解析に基づく突風関連指数の地域性について

2.1.1 はじめに

一般的に、大気現象の水平方向の広がりについては「水平スケール」と呼ばれ、寿命や周期は「時間スケール」と呼ばれる。図 2.1.1 は雷雨とその関連事象の時空間スケールの関係を表したものである。個々の積雲の時空間スケールは1km・10分程度であり、発達・組織化（マルチセル化・スーパーセル化）すると10～100km・数時間～半日程度にまで大きくなる。それに対し、竜巻の時空間スケールは100m・数分程度である。

竜巻の発生メカニズムを考える際、時空間スケールの階層構造が重要である（図 2.1.2）。ある大気現象は、スケールのより小さな現象を内包しており、竜巻の場合、竜巻の漏斗雲内の気流は数メートル～数百メートル規模（マイクロスケールと呼ばれる（Orlanski 1975）。図 2.1.2 中では“MISOCYCLONE”と記載）の現象であるのに対し、そのもととなる親雲のスケールは数キロメートル～数十キロメートル規模（メソスケール；図 2.1.2 中では“MESOCYCLONE”と記載）である。台風、低気圧、前線等のいわゆる総観場は、数百キロメートル～数千キロメートル規模（総観スケール；図 2.1.2 では”MASOCYCLONE”と記載）で扱われる。また、竜巻内部には吸い込み渦（図 2.1.2 中では“Suction Vortex”と記載）と呼ばれるさらに強い渦が形成されることもある。

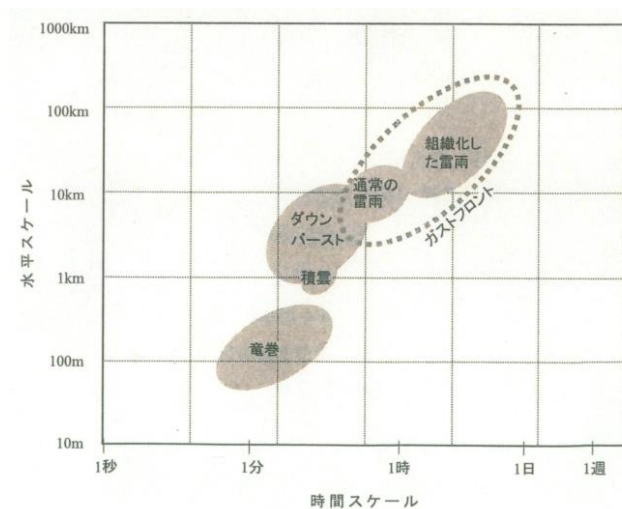


図 2.1.1 雷雨とその関連現象の時空間スケール(大野, 2001)

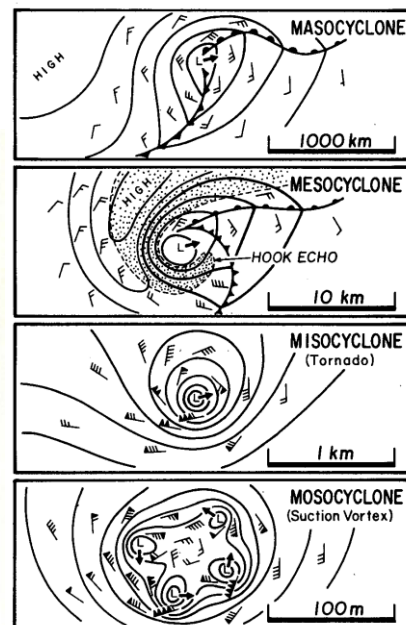


図 2.1.2 竜巻発生時の渦の多重構造 (Fujita, 1981)

このように、竜巻の発生にはさまざまなスケールの現象が介在し、異なるスケールの現象が相互作用しているため、竜巻の発生頻度や強度の地域性は複数の時空間スケールで議論する必要がある。気象学における現状として、観測データの欠如や数値シミュレーション技術の不十分さゆえにマイクロスケールの現象の理解が難しく、未知なメカニズムもあると認識されている。一方、総観場の観点では、さまざまなパターンで竜巻が発生していることがわかっており、「日本海側では台風性竜巻の発生が確認されていない」ことや、地域に応じて総観場の割合が異なる等の分析結果が得られている。しかし、例えば、寒冷前線起因の F3 竜巻が実際に発生している（1990 年茂原竜巻や 2006 年佐呂間竜巻等）が、寒冷前線自体は国内どこでも通過し得るため、ある地域において F3 竜巻が発生し難いことを総観場の分析結果だけで示すのは難しい。

ガイドでは、基準竜巻風速  $V_{BI}$  の設定の際に国内最大規模の竜巻ではなく竜巻検討地域内における記録等を参照する場合には、その明確な根拠を提示する必要があると記載されている。そのため、総観スケールの気象場の分析結果のみではなく、メソスケールあるいはマイクロスケールの気象場の特徴から地域性が見られる理由をより気象力学的に明らかにすることが必要である。ただし、上述のように、マイクロスケールでの議論は極めて困難である。

そこで、竜巻現象の気象場（以下「環境場」という。）として、親雲の水平スケールに対応するメソスケールの気象場を対象として、F3 規模以上の竜巻発生環境場の地域性について検討する。

## 2.1.2 竜巻の発生メカニズム・分類とメソスケール分析の有効性

### 2.1.2.1 竜巻の発生メカニズム

竜巻の発生メカニズムは二つに大別されると考えられている。一つは、スーパーセルと呼ばれる特徴的な構造を有する巨大積乱雲に伴うもの（図 2.1.3 に例示した模式図参照）であり、もう一つは、気温・湿度や風向・風速が急変する局地的な前線（図 2.1.4 に例示した模式図参照）に伴うものである。

スーパーセルを伴う竜巻では、大気下層における鉛直シア（風向が上下で逆転する、あるいは風速が上下で大きく異なる場合に生じる）に伴って水平軸を有した渦管が形成され、それが上昇気流によって数キロメートル上空まで持ち上がる。その際、メソサイクロンと呼ばれる鉛直軸回りの強い渦が積乱雲中にでき、その下部に竜巻が発生する。図 2.1.3 に示すように、鉛直シアによりスーパーセル内では降水粒子の落下域（下降流域）と上昇流域が分離されるため、巨大な積乱雲にまで発達し、長時間持続し得る。国内で発生した F2 規模以上の竜巻に対し、スーパーセルあるいはミニチュア（ミニ）スーパーセルが存在したことを観測・解析した成果も得られている（Suzuki et al. 2000, Mashiko

et al. 2009 等)。また、水平風速のマイクロスケールの空間スケールを有する竜巻漏斗雲の形成メカニズムについては、水平渦が上昇気流により引き伸ばされることの影響、あるいはメソサイクロンが地表面付近の上昇気流への影響等が指摘されている (Noda and Niino 2010) が、多くは未解明であり、レーダ観測や数値実験による研究が行われている。しかし、メソサイクロンが強いほど竜巻強度が大きくなるという関係性が、最先端のドップラーレーダを用いた詳細観測により分かってきている (Burgess et al. 2002)。

一方、局地前線に伴う竜巻では、気温・湿度、風向・風速が水平方向に鋭く変化する局地的前線面において、水平シア流の不安定や傾圧的作用等により生成した鉛直軸周りの渦が鉛直方向に引き伸ばされることによって発生する (Lee and Wilhelmson 1997)。スーパーセルとは大気成層が大きく異なり (Doswell and Evans 2003)、降水粒子が地上に達する段階になると下降気流が上昇気流を打ち消すため (Byers-Braham の概念)、積乱雲がこれ以上発達せず、衰弱・消滅する。そのため、強い竜巻が生じにくいと考えられている。局地的に水平スケールは数キロメートル以下であり、メソスケールのうち小さなスケール (メソスケール)、あるいはマイクロスケールにあたる。この種の渦は、上記のサイクロンに対してマイソサイクロンと呼ばれている。

#### 2.1.2.2 竜巻の分類

上記にて説明した発生メカニズムの観点から、メソサイクロンの形成が大きな竜巻の発生と深く関わっていることがわかる。米国では、メソサイクロンが形成される竜巻は、スーパーセル型と呼ばれる F2~F5 規模を想定した顕著な竜巻として分類され、F1 規模以下の竜巻は局地前線等に伴う非スーパーセル型と分類されている (Rasmussen and Blanchard 1998, Doswell and Evans 2003)。国内にて発生した F2-F3 を含めた全ての F3 竜巻(6 事例)<sup>\*</sup>もメソサイクロンを伴うスーパーセル型であったと報告されている (表 2.1.1)。

そこで、飯塚・加治屋(2011)、Bluestein(2013)及びその他の検討(Rasmussen and Blanchard 1998, Doswell and Evans 2003)と同様に、メソサイクロンの有無で竜巻を分類することとし、メソサイクロンを有する場合を「スーパーセル型」、そうでない場合を「非スーパーセル型」と定義する。

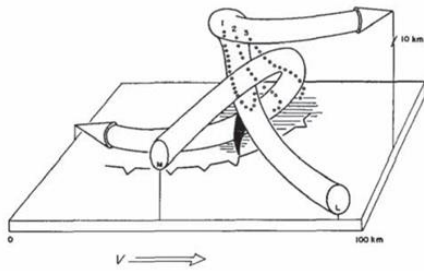
なお、スーパーセル型・非スーパーセル型竜巻の同定に関する国内の検討例として、飯塚・加治屋 (2011) による分析が見られ、2006 年~2009 年間の 3 ヶ年においてスーパーセル型竜巻の竜巻強度は、F2 及び F3 (3 事例)、F1 (6 事例)、F0 (8 事例)、F 不明 (2 事例) であったのに対し、非スーパーセル型竜巻では、F2 及び F3 竜巻 (0 事例)、F1 (9 事例)、F0 (11 事例)、F 不明 (5 事例) であったと報告している。分析期間は短いものの、国内で発生した

F3 竜巻のスーパーセル型の竜巻強度の傾向を考慮すれば、大きな竜巻は米国と同様に基本的にスーパーセル型に分類できるといえる。

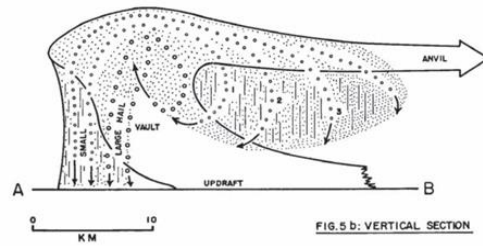
※気象庁データベースにおける括弧つき F2-F3 竜巻（(F2-F3)と記載された竜巻）は過去に5事例（1960年代に4事例，1990年に1事例）報告されている。これらの竜巻については解析を実施した文献が見あたらなかったため，表 2.1.1 には記載していない。

#### 2.1.2.3 メソスケールでの分析の有効性

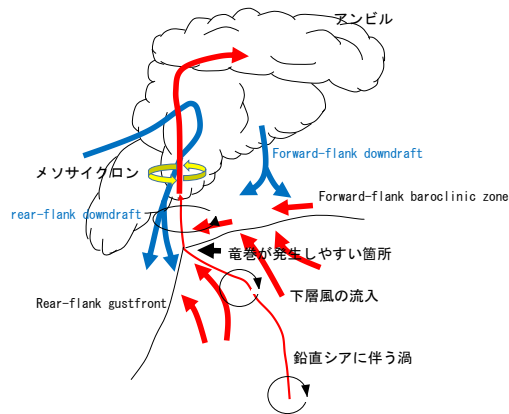
空間スケールの観点では，メソスケール気象場の分析はスーパーセル型竜巻の発生しやすさの傾向・地域性を分析する目的には十分であるが，空間スケールの小さく，竜巻強度も小さい非スーパーセル型竜巻に対しては向かない。また，竜巻強度の観点では，大きな竜巻（国内最大強度の F3 を含む F2 以上の規模の竜巻）の発生のしやすさがメソスケール気象場の分析により検討することができる。したがって，設計基準を考える際には，スーパーセル型竜巻の発生を観点とした地域性を検討することが妥当である。そこで，突風関連指数と呼ばれる竜巻の発生のしやすさを指数化した量を用いて，大きな竜巻の発生のしやすさについて分析し，その地域性について検討する。その際，スーパーセル型竜巻はメソサイクロンを有する点が特徴的であり，その発生はメソスケールにおける風の鉛直シアや大気不安定性と深く係わっている（Bluestein 2013, Klemp and Wilhelmson 1978, Rotunno and Klemp 1985, Trapp 2013）ことから，SReH 及び CAPE と呼ばれる突風関連指数を用いる。



風況場（黒塗り部は竜巻発生箇所を表す）



鉛直断面構造



メソサイクロンの形成メカニズム

図 2. 1. 3 スーパーセル型雷雨の構造

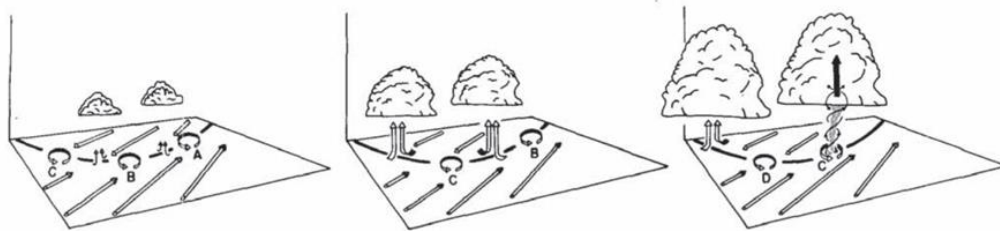


図 2. 1. 4 局地前線に伴う竜巻の発生機構に関する模式図  
(上向きの黒い⇒が上昇気流を表す)

表 2. 1. 1 過去に国内にて発生した F3 規模竜巻の概要

発生日	発生場所 (県・市町村)	Fスケール	主な総観場	メソサイクロンの存在を 報告した資料・文献
1971/7/7	埼玉県浦和市	(F3)	台風	Fujita et al. (1972)
1978/2/28	神奈川県川崎市	F2-F3	寒冷前線	村松 (1979)
1990/12/11	千葉県茂原市	F3	暖気の移流	鈴木・新野 (1991)、Niino et al. (1993)
1999/9/24	愛知県豊橋市	F3	台風	坪木ら(2000)
2006/11/7	網走支庁佐呂間町	F3	寒冷前線	Kato and Niino (2007)
2012/5/6	茨城県常総市	F3	気圧の谷	Yamauchi et al. (2013)

### 2.1.3 用いる突風関連指数

突風関連指数はこれまで数多く提案されており、気象庁における現業においても竜巻探知・予測に活用されている（瀧下 2011）。ここでは、国内外で最も知見が蓄積された指数として SReH（Storm Relative Helicity：ストームの動きに相対的なヘリシティ；Davies-Jones et al. 1990）、CAPE（Convective Available Potential Energy：対流有効位置エネルギー；Moncrieff and Miller 1976）を用いる。両指数の算出式は以下のとおりである。

$$\text{SReH} = \int_{\text{地上}}^{\text{高度3km}} (\mathbf{V} - \mathbf{C}) \cdot \boldsymbol{\omega} dz \quad (1)$$

$$\text{CAPE} = \int_{\text{LFC}}^{\text{EL}} g \frac{\theta'(z) - \theta(z)}{\theta(z)} dz \quad (2)$$

ここで、 $\mathbf{V}$ は水平風速ベクトル、 $\boldsymbol{\omega}$ は鉛直シアに伴う水平渦度（高度方向の風向・風速差に伴って発生する渦度）であり、 $\mathbf{C}$ のストームの移動速度は Bunkers et al. (2000) にしたがって求めた。式(2)の  $g$  は重力加速度、 $\theta$  はストーム周囲の温位、 $\theta'$  は下層の空気塊を上空に持ち上げた際の温位であり、 $dz$  は鉛直方向の層厚である。LFC は自由対流高度と呼ばれ、前線周辺の風の水平方向の収束、太陽による地表面加熱、地形による強制上昇等によって、空気塊がこの高度まで何らかの要因で持ち上げられると、自身の浮力だけで上昇し、平衡高度 EL に達するまで積乱雲が発達する。

ここで、温位  $\theta$  とは、式(3)に示すように気温  $T$  と気圧  $p$  に関する量であり、ある空気塊を断熱的に基準圧力 1000 hPa に戻したときの絶対温度である。気温は高度によって変わるが、温位は同じ空気塊では常に一定（断熱過程では温位は保存される）な物理量であるため、空気塊の暖かさ、浮力特性、及び不安定性を把握するのに用いられる（付録1参照）。

$$\theta = T \left( \frac{1000}{p} \right)^{\frac{R}{C_p}} \quad (R: \text{気体定数}, C_p: \text{定圧比熱}) \quad (3)$$

2つの空気塊を比較した場合、温位の高い空気塊は軽く上昇しやすく（不安定であり）、単位体積中に含みうる水蒸気量が多いと、大きな積乱雲の発生につながる。竜巻が発生する積乱雲の中では、水蒸気が降水粒子に変化しているため、その際に発生する潜熱の影響が考慮された相当温位が保存される。乾燥している気象場では相当温位と温位は等しいので、 $\theta$  や  $\theta'$  を相当温位とみなせば、(2)式により CAPE を算出できる。

図 2.1.5 及び図 2.1.6 にそれぞれ、SReH と CAPE の算出概念を表す。概して言えば、SReH は下層大気の大気塊が親雲に取り込まれる度合、CAPE は大気的不安定度合の指標である。値が大きいほどその度合が高くなる。大気下層の空気塊を「持ち上げて」乾燥断熱線及び湿潤断熱線を求め、空気塊が自由対流高度に達した際に積乱雲の発達するポテンシャルとして CAPE を計算する。

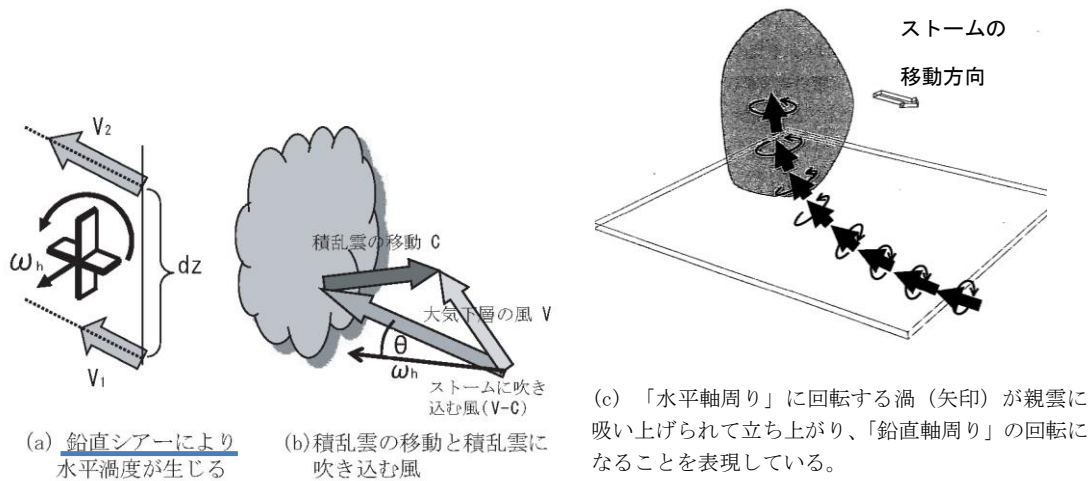


図 2.1.5 (a) (b) SReH の算出概念 (瀧下 2011) (c) SReH の意味づけ (大野 2001 に加筆)

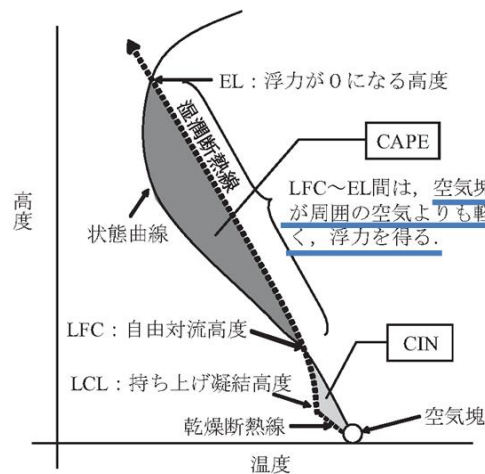


図 2.1.6 CAPE の算出概念 (瀧下 2011)

#### 2.1.4 用いる気象データ

突風関連指数の地域性を見出すには詳細なメッシュ間隔でかつ長期間のデータが必要である。そこで、ヨーロッパ中期予報センター（ECMWF）の再解析データ ECMWF-Interim（1989年以降；水平分解能約70 km）及びERA40（1989年まで；水平分解能約250 km）をもとに、気象モデルを用いて数値的に気象場を解析したデータセット（橋本ら 2011）を用いる。当データセットは、気象庁と電力中央研究所が共同で作成した JRA-25 再解析データ（Onogi et al. 2007）よりも5 km・1時間毎と時空間解像度が細かく、豪雨事例の再現性も高まっている（橋本ら 2013）。本検討では、1961年から2010年までの50年間にわたって1時間毎に解析されたデータを用いる。詳細メッシュでかつこれほど長期間のデータセットは他に類をみない。

ECMWF の再解析データは、地球温暖化予測に世界的に広く活用されており、最も精度が高いものと認識されている。しかし、空間分解能が非常に粗いため、物理的ダウンスケーリングと呼ばれる手法で5 kmメッシュの気象場を算出している。その際、WRF モデル（Weather Research and Forecasting model；Skamarock et al. 2005）と呼ばれる気象モデルを用いた。WRF モデルは、気象力学・物理現象を数値モデル化したものであり、（竜巻の親雲の水平スケールに対応する）メソスケール（水平方向2 km～20 km程度）の気象要素を解析できるコミュニティモデルとして世界的に利用されている（付録2参照）。

本データセットで解析されている上空風、気温、気圧等の気象データを用いて、前節で定義した SReH と CAPE の値を1時間毎・5 kmメッシュで算出する。50年間にわたるデータサンプル数は各メッシュに対して約  $4.4 \times 10^5$  個存在する。

#### 2.1.5 島根県で発生した二つの F2 竜巻の気象解析

##### 2.1.5.1 1975年5月31日に発生した事例

WRF モデルで解析された3 kmグリッド領域内の1500 m高度における雨水粒子混合比・水平風速、及び100 m高度における温位・水平風速の分布を図2.1.7に示す。図2.1.7によると、大陸からの比較的低い温位の気流が北九州に向かって流れ込んでいる（総観場に「日本海低気圧や寒気移流」が記録されている）。また、対馬海峡が太平洋側の暖かい空気の境となっている。大気下層の竜巻発生地点の西側では風が収束しており（ぶつかっており）、この付近で小さな降水域が発生し（総観場に「局地性じょう乱」が記録されている）、竜巻発生地点に向かって沿岸域を次々と東に移動・通過していた（同じ日に3つ竜巻が報告されていた）。



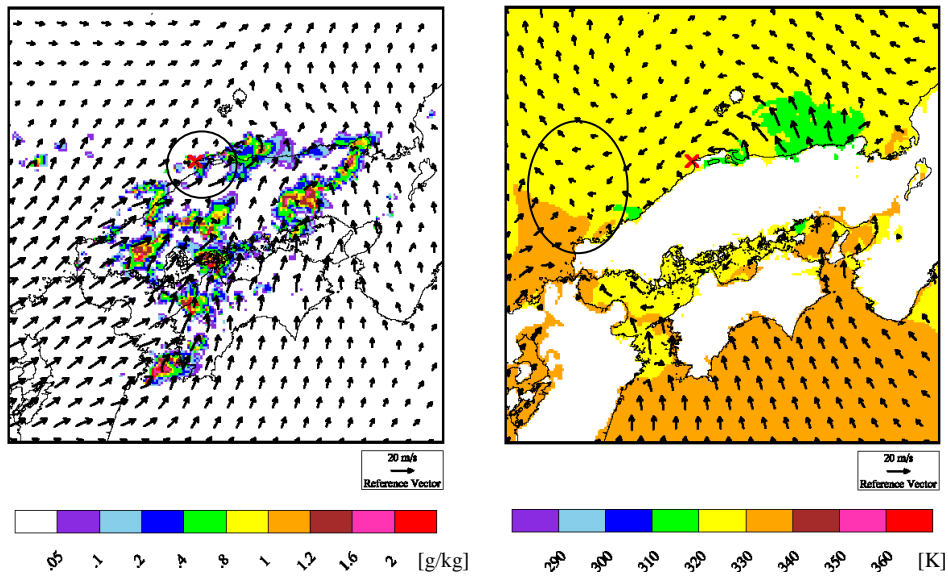


図 2.1.7 雨水混合比・水平風速（1500 m 高度）及び温位・水平風速（100 m 高度）の分布（3 km グリッド；1975 年 5 月 31 日 F2 竜巻）

図 2.1.8 は 3 km グリッドに対する SReH 及び CAPE の分布を示したものである。本事例では、SReH が非常に小さかった。また、降水域では不安定性解消のために CAPE 値が小さくなっているが、周辺でも特に西側の北九州沿岸・対馬海峡から CAPE 値の大きな（不安定性の大きな）空気塊が流れ込んでいたことがうかがえる。

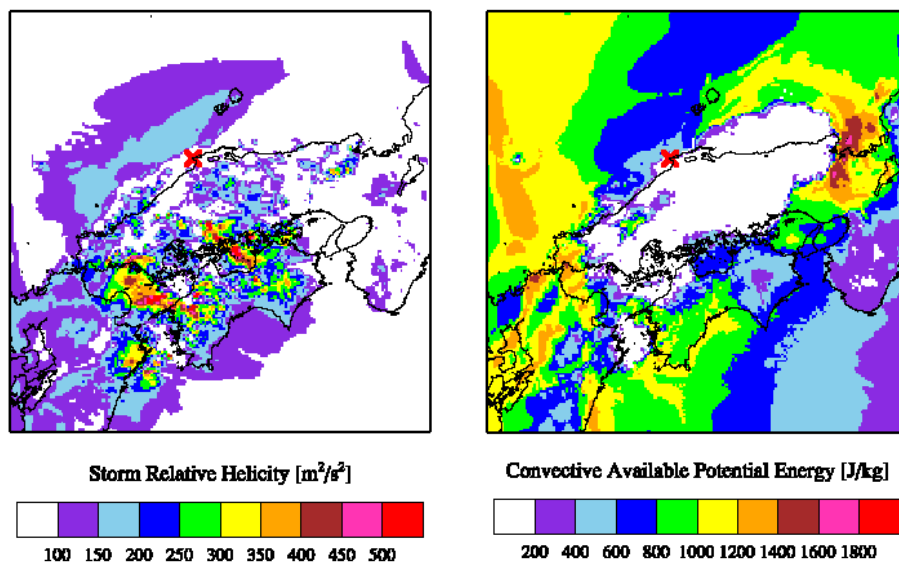


図 2.1.8 SReH 及び CAPE の分布（3 km グリッド；1975 年 5 月 31 日 F2 竜巻）

### 2.1.5.2 1989年3月16日に発生した事例

春先に発生した本事例は、先に取り上げた事例と非常に近い箇所で発生した。弱い西高東低の冬型の気圧配置下での大陸からの寒気流入が顕著であり（総観場に「寒気移流」が記録されている）、下層大気の強い収束を伴うコンマ状の小さな降水域（総観場に「局地性じょう乱」が記録されている）が東に通過した様子が解析されている（図 2.1.9）。このような降水域の先端部では竜巻が発生しやすい。なお、この事例では発生地点を少し通り過ぎた後の結果を示している。突風関連指数の分布においては、SReH は非常に高く、CAPE が非常に低いことが明らかであり（図 2.1.10）、先に取り上げた事例と正反対の傾向を示している。

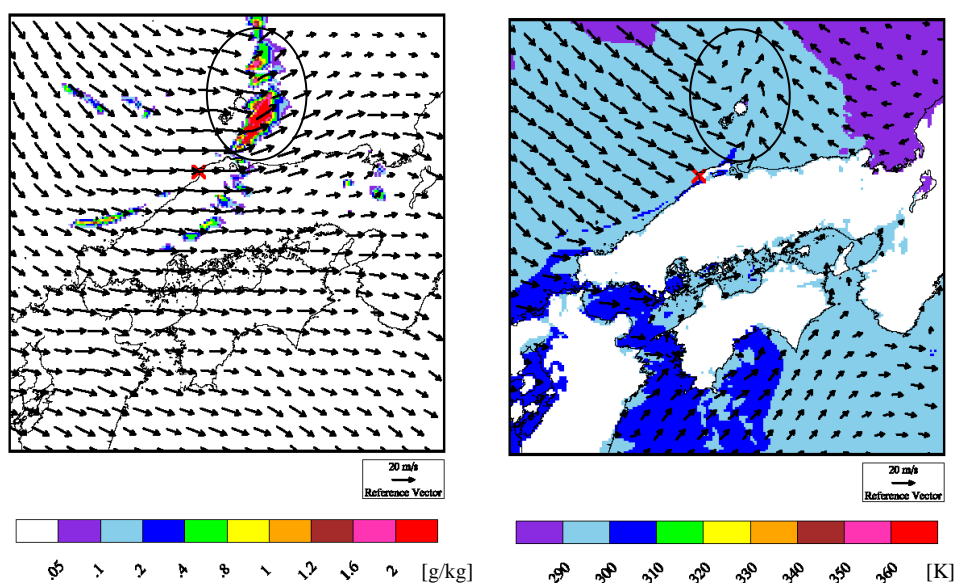


図 2.1.9 あられ混合比・水平風速（1500 m 高度）及び温位・水平風速（100 m 高度）の分布（3 km グリッド；1989年3月16日 F2 竜巻）

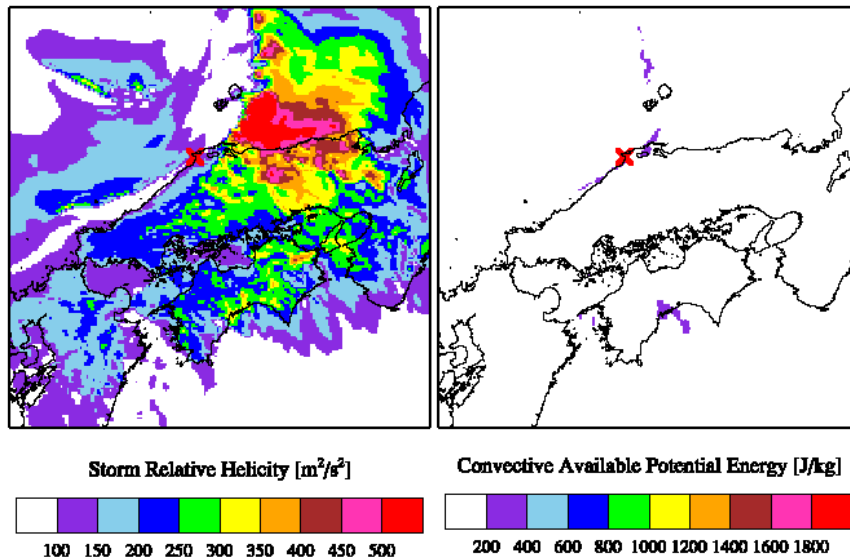


図 2.1.10 SReH 及び CAPE の分布 (3 km グリッド ; 1989 年 3 月 16 日 F2 竜巻)

### 2.1.5.3 太平洋側 F3 竜巻時との違い

SReH や CAPE において、島根県で発生した 2 竜巻事例が正反対の傾向を示している点について考えるために、太平洋側で F3 竜巻が発生した際の典型的な分布として、1999 年 9 月 24 日に愛知県豊橋市にて発生した台風性竜巻時の分布を図 2.1.11 に示す。図 2.1.11 によると、SReH も CAPE もともに大きな値となっている。前述した F2 竜巻の事例は SReH あるいは CAPE の値の片方が大きかった。このことから、F3 以上の規模の竜巻が発生するには、渦 (SReH) だけ、あるいは不安定さ (CAPE) だけ大きいのでは十分でなく、両方がある程度大きくなければならないことが推測できる。

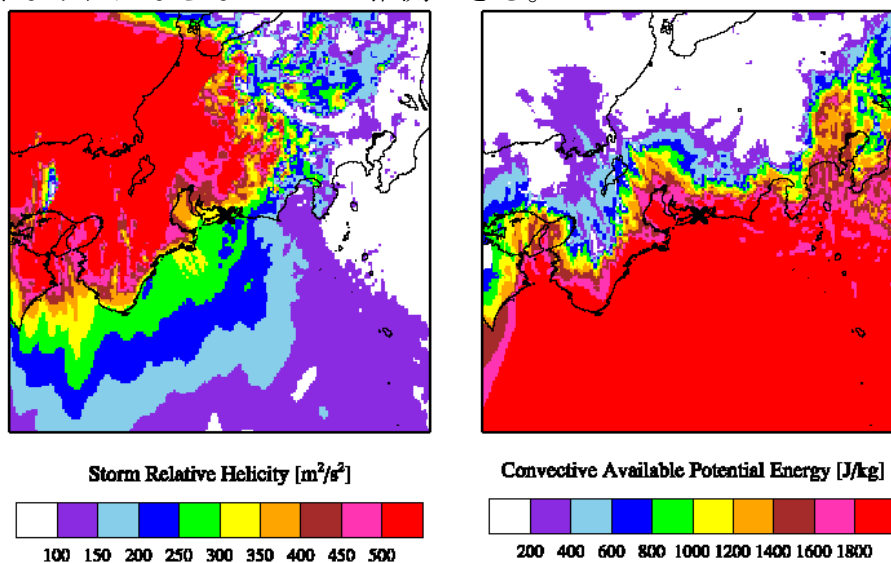


図 2.1.11 SReH 及び CAPE の分布 (3 km グリッド ; 1999 年 9 月 24 日 F3 竜巻)

## 2.1.6 突風関連指数の地域性

### 2.1.6.1 両指数の同時超過頻度の詳細分析

気象学的知見によれば、大きな竜巻を引き起こすスーパーセルの発生には、上空風の強い鉛直シアや大気不安定が大きな要因である。鉛直シアが強く、上空の渦度が高まっても、大気が比較的安定であると、積乱雲が巨大に発達することが阻害されることが予想される。逆に、大気が非常に不安定で豪雨・豪雪がもたらされるような状況でも、上空の渦度が小さいと竜巻の親雲が発生しづらい。そこで、両方の要因が同時生起する確率について考える(杉本ら 2014)。つまり、SReH と CAPE に対して閾値を設定し、両指数とも閾値を超える頻度について考える。加藤(2008a)も同様のアプローチで竜巻発生頻度の地域性について検討している。

1961年1月1日から2010年12月31日までの50年間・1時間毎の再解析データから算出されたSReH及び最大CAPEのデータを分析した。それぞれの指数に対する閾値は、特にCAPEについて緯度・季節で絶対値が大きく変わるため、5月～10月及びそれ以外に分けて設定する。F3規模の竜巻が発生しうる環境場の閾値を以下のように設定した。また、竜巻発生時には少なからず降水がもたらされるため、降水量の閾値を設定した(村松 2013)。

[5月～10月(暖候期)] SReH :  $350 \text{ m}^2/\text{s}^2$  最大CAPE :  $1200 \text{ J/kg}$  降水量 :  $4 \text{ mm/hr}$

[11月～4月(寒候期)] SReH :  $350 \text{ m}^2/\text{s}^2$  最大CAPE :  $500 \text{ J/kg}$  降水量 :  $4 \text{ mm/hr}$

各季節に対してサンプル数は約220,000である。したがって、50年間に1回超過するデータがあれば、約 $4.5 \times 10^{-6}$ の頻度ということになり、より小さな頻度を扱うことはできないが、地域性は異なる箇所間における頻度差をもって議論するものであることから、超過頻度の相対的な大小によりF3規模以上の竜巻発生環境場の地域性の有無を検討する。

暖候期及び寒候期に対する頻度分布の算出結果を図2.1.12に示す。気象庁「竜巻等の突風データベース」で確認されるF2及びF3竜巻の発生箇所を図2.1.13に示す。両図を比較すると、図中の $10^{-4}$ 前後の領域がF3規模竜巻の発生箇所との対応性が高い。寒候期はやや低めの頻度値であるが、暖候期と似た傾向となっており、暖候期と寒候期でF3規模竜巻の発生数に両季節間で大差がないことを反映できている。

図2.1.12によると、海上における竜巻の発生の実態は不明であるが、暖候期においては、太平洋側、東シナ海から対馬海峡にかけては超過頻度が比較的

大きな値となっている。また，沿岸域では，茨城県東海岸から西の本州太平洋側，九州太平洋側・東シナ海側で高く，特に宮崎平野沿岸では大きい。それに比べて，日本海側及び沿岸域の値は1～2 オーダー以上小さな値であることが明らかであり，F3 規模竜巻の発生が未だ確認されていないことと対応している。なお，本解析データの対象領域は沖縄を含んでいないが，南西諸島は九州の鹿児島県や宮崎県沿岸部に比べてやや低い傾向が見られ，実態に即している。寒候期では，頻度の特に高い地域は，房総半島から大隅半島（鹿児島）にかけての太平洋側となっている。いずれにしても図 2. 1. 13 に示される F3 規模の発生箇所との対応性が高い。

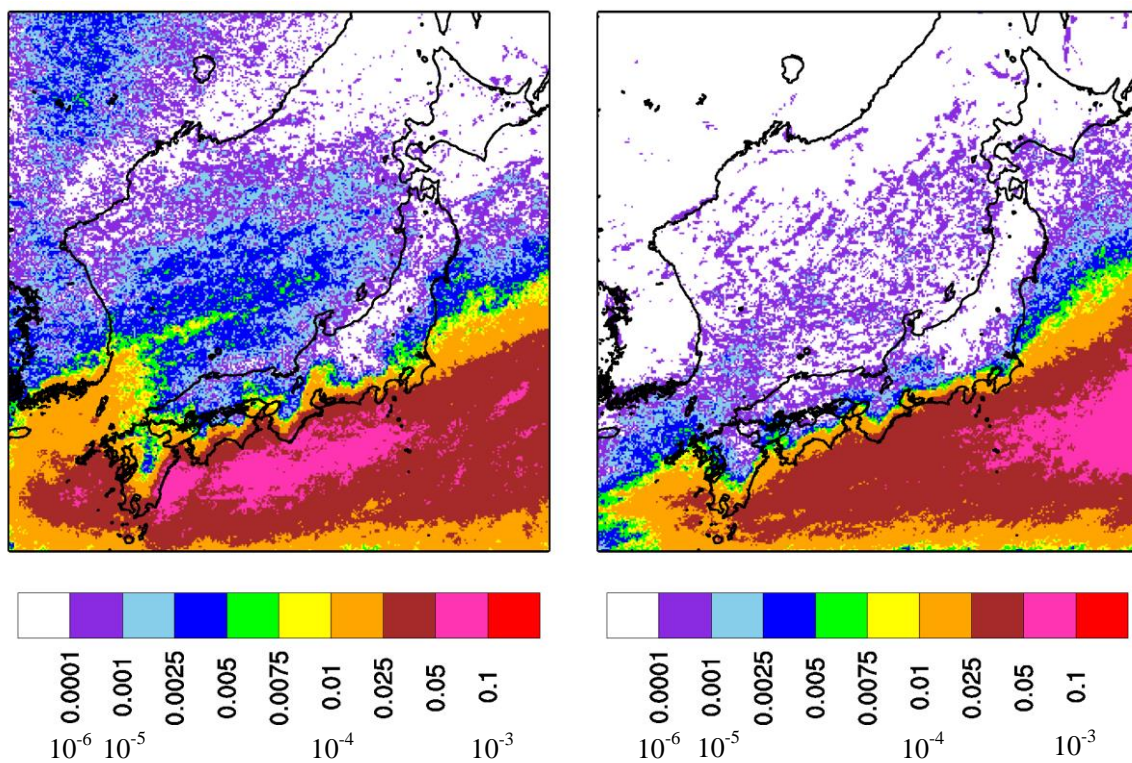


図 2. 1. 12 同時超過頻度分布（単位 %；左：暖候期，右：寒候期）

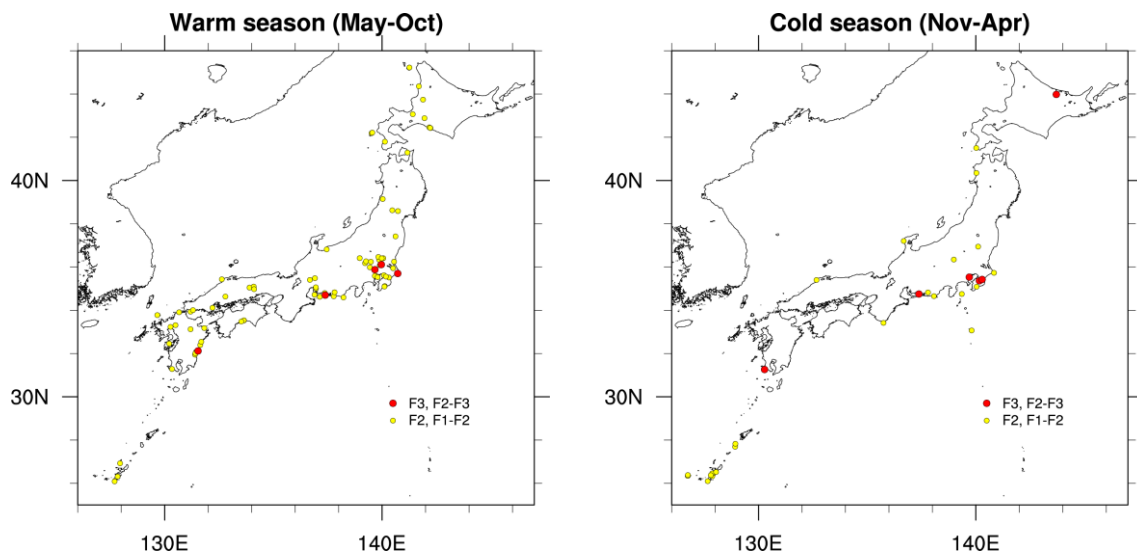


図 2.1.13 F2 及び F3 規模の竜巻の発生箇所（左：暖候期，右：寒候期；気象庁「竜巻等の突風データベース」による）

#### 2.1.6.2 高い山岳の存在による影響

図 2.1.12 によると、高い山岳の存在による影響も見られ、例えば、九州山地の南側に比べ、その北側（寒候期）では値が急に低くなっている。同様の傾向が四国山地や中国山地、及び中央アルプス等でも見られる。これは、「台風等の接近・通過時の渦度が高い時間帯に同時に太平洋側から暖かく湿った空気塊が特に開けた平野部（関東平野、濃尾平野、宮崎平野等）に流入する」という F3 規模竜巻の発生シナリオが日本海側ではあてはまらないことを示唆している。

1990 年 12 月 11 日に千葉県茂原市で発生した日本最大級 F3 竜巻時（総観場：暖気の移流、気圧の谷、寒冷前線）の海拔 100 m 高度における気象場（風向・風速及び相当温位の分布）を図 2.1.14 に示す。太平洋上は（相当温位の高い）暖かく湿潤な大気状態にあり、12 月の冬季としては暖かく湿った大気（緑色）が太平洋側から千葉県南東部房総半島沿岸に発生した地点に流れ込んでいることが解析されている。この大気は内陸部に中心をもつ低気圧の大きな渦に沿って日本海側へ運ばれているが、日本海側では、相当温位が低くなり、不安定性が解消されていることがわかる。

このような高い山岳の南側と北側で空気塊の性質が変わることはいずれの F3 規模の竜巻でも見られている。気象学的には、太平洋側から流入した大気下層の空気塊が山岳を越えようとした場合、空気塊の上昇に伴い気温が低下し、昇り斜面上空で空気塊が飽和して降水粒子が生成され、湿潤不安定な状態が解消されることもある。この場合、空気塊が山岳を乗り越えたとしても乾燥・安

定化の進んだ空気塊になるため、太平洋沿岸部で竜巻を引き起こした大気が、例えば日本列島の中央部に存在する高く複雑な山岳域を湿潤不安定な状態のまま乗り越えて日本海側に流入して大きな竜巻を引き起こすことは考えられない。

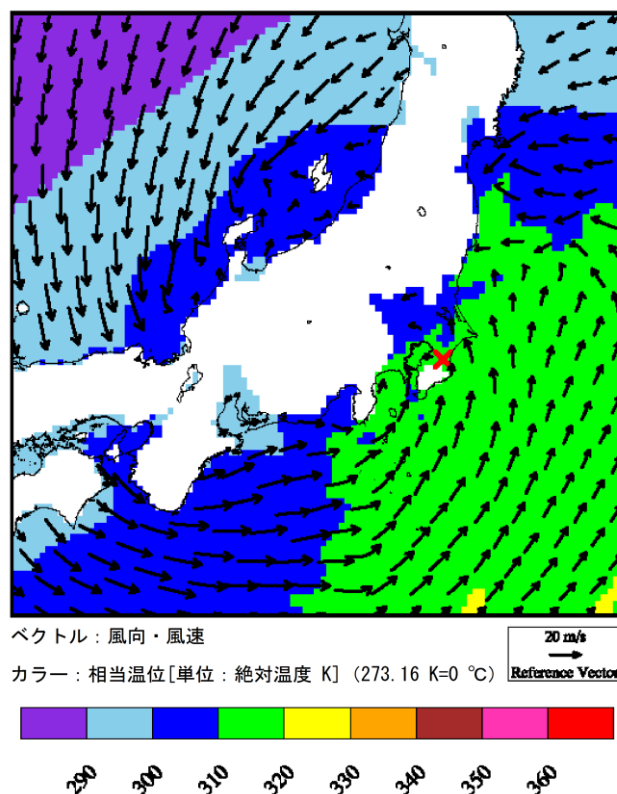


図 2.1.14 1990 年千葉県茂原市にて発生した F3 竜巻時の 100 m 高度における  
 気象場

(図中の×は発生地点を表す。白色はモデル地形標高が海拔 100 m 以上を指す。)

一方、北海道佐呂間町で発生した F3 竜巻のみ、図 2.1.12 の頻度分布が低い地域の比較的内陸部で発生している。この事例も、解析によれば、太平洋側から暖かく湿った風が十勝地方に流入する状況下で、時を同じくして寒冷前線が通過した際に発生している (図 2.1.15)。

図 2.1.16 は SReH の超過確率分布 (50 年間) である。大気不安定な大気の流れ機会が極めて少ないため、図 2.1.12 の同時超過確率の地域性においては、日高山脈の東側はさほど超過頻度は高くないが、図 2.1.16 では、日高山脈付近とその北東側に (佐呂間竜巻の卵が発生し、発達した地域) 非常に高い頻度値が見られることから、強い渦が発生しやすい地域であることがわかる。さらに、加藤(2008b)は詳細なモデル解析結果から、佐呂間町周辺の地形の特殊性を以下のとおり指摘している。

「下層での鉛直シアの強化は、ガストフロントの前面下層の気圧低下による水平風加速に加えて、強い鉛直渦度生成領域の風上（南南東）側に南南西～北北東に伸びる最大標高600 m以上で幅10 kmほどの尾根による山岳波の影響を少なからず受けている。実際の竜巻発生位置の風上側にも同様な尾根が存在していることから、佐呂間竜巻は地形の影響を受けて発生したと考えられる。」

寒冷前線の西側にある寒気が、前線が日高山脈を通過する際に山脈の下り斜面を急速に下降、大気不安定の増幅に寄与し、図 2.1.17 の点線で囲まれた範囲において前線付近における高い鉛直シア (SReH) とともに、メソサイクロン（親雲）の発生・強化につながったことが示唆されているが、同様の現象は米国でも報告されている (Bosart et al. 2006)。上記の幅 10 km の尾根は、図 2.1.18 の円で囲まれた山が対応するが、この山に向かって、南東から湿った暖かい大気が流れ込み、この山を乗り越えた際に竜巻発生地点周辺の鉛直シアがさらに強化されたことが、加藤(2008a)が指摘する山岳の影響にあたる。さらに、寒冷前線から流れ出した冷気と暖気が発生地点周辺の平野部でぶつかり、不安定性を増したことで竜巻が発生した。このように、佐呂間竜巻は地形と総観場の相互作用で発生した特殊な事例であったことがうかがえる。

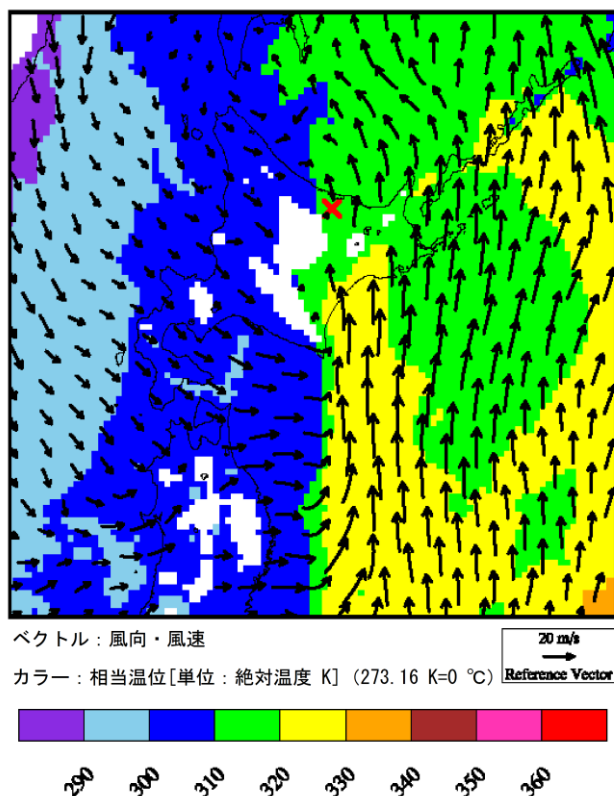


図 2.1.15 2006 年北海道佐呂間町にて発生した F3 竜巻時の 500 m 高度における気象場

(図中の×は発生地点を表す。白色はモデル地形標高が海拔 500 m 以上を指す。)



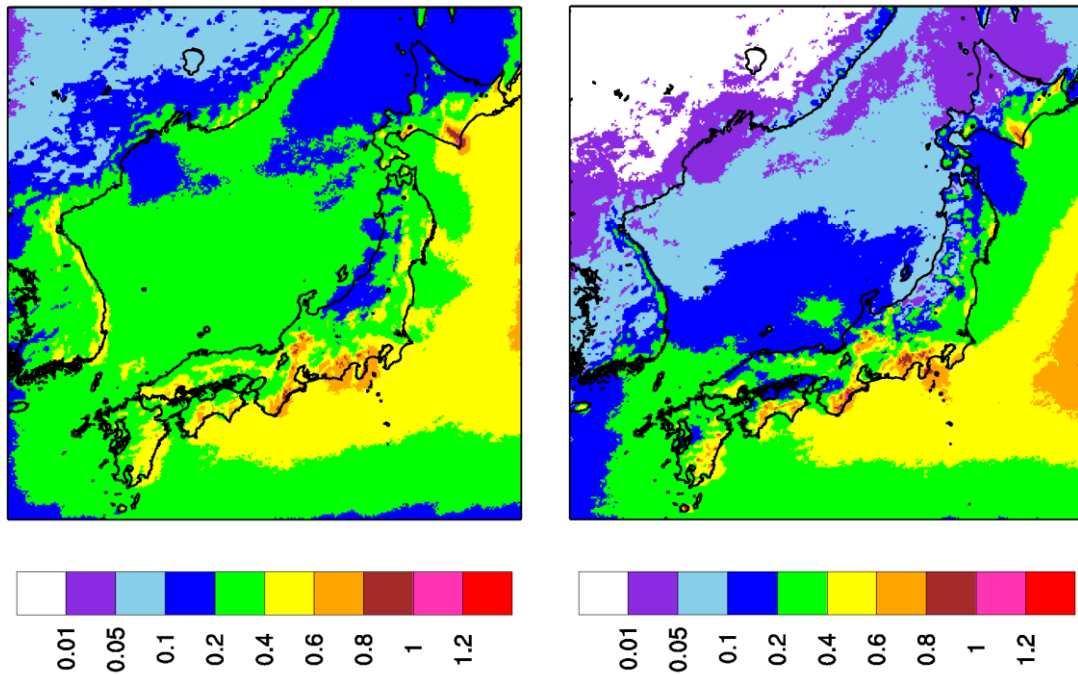


図 2.1.16 閾値を超過する頻度 (%)  
 (SReH の閾値 :  $350 \text{ m}^2/\text{s}^2$ , 降水量の閾値 :  $4 \text{ mm/hr}$ , 左 : 暖候期, 右 : 寒候期)

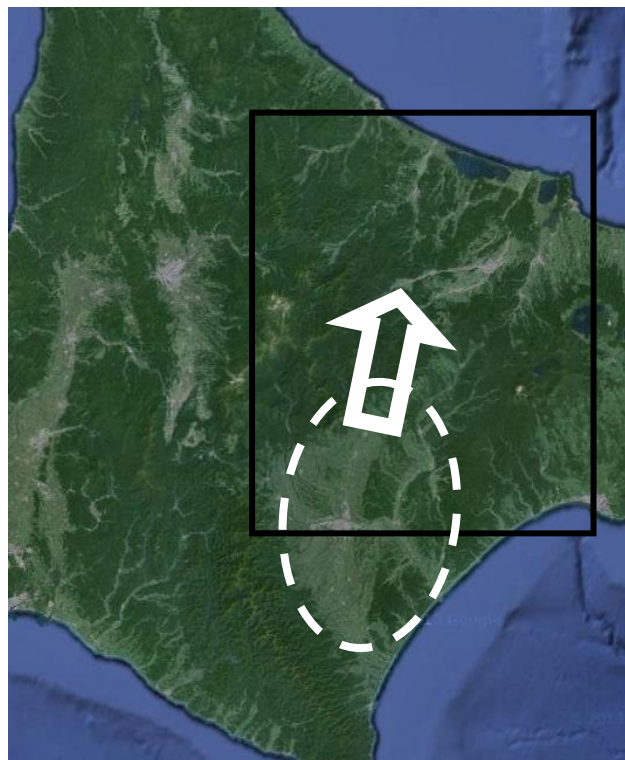


図 2.1.17 佐呂間竜巻の親雲発生箇所 (点線部) と移動方向 (矢印部)

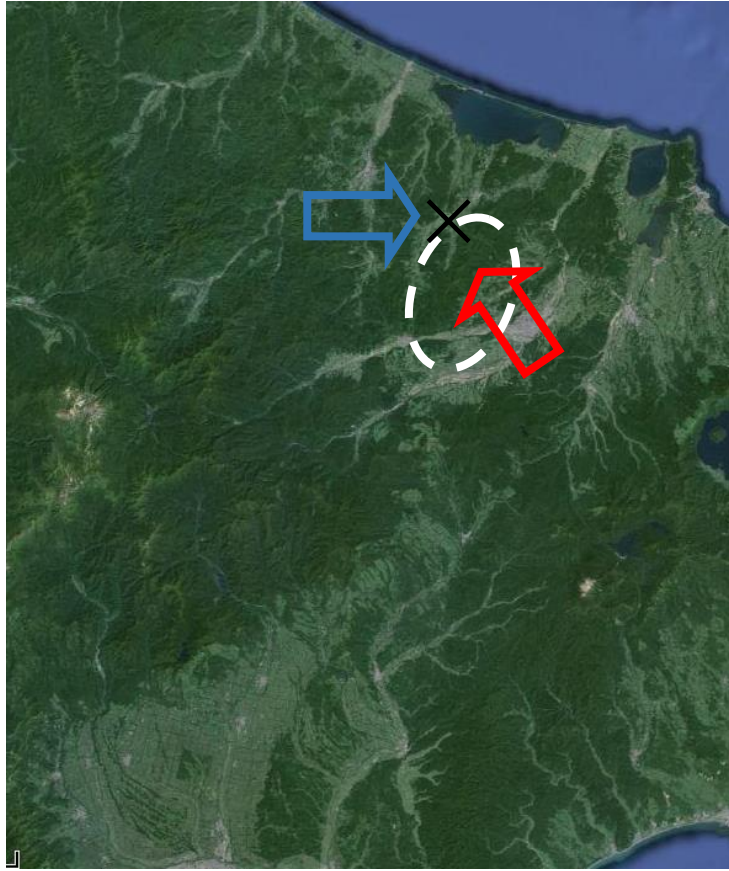


図 2.1.18 佐呂間竜巻の発生箇所（×）及び風の流れ（矢印部）と影響した山岳（点線部）

### 2.1.7 まとめ

長期間の高解像度気象データをもとに、突風関連指数の地域性について検討した。その結果、鉛直シアによる渦に関連した SReH と大気不安定に関連した CAPE の両方がある一定の閾値を超える超過頻度の分布が、過去に記録された F3 規模竜巻の発生箇所をよく表現できることが示された。この頻度分布によれば、日本海側では、F3 規模の大きな竜巻生成につながる環境場の発生頻度が、茨城県以西の太平洋側及び九州西岸域の沿岸部に比べて 1~2 オーダー小さい。この傾向は、大きな山脈で太平洋側からの湿った風の流入が妨げられる効果とも関連しているといえる。

また、頻度分布が低い佐呂間町で発生した F3 竜巻については、周辺地域は強い渦が発生しやすいこと、発生地点の風上側には（親雲の発生・発達に適した）太平洋に面した平野（十勝平野）があること、さらに親雲が移動した先には高い山岳や幅を有する尾根状山地があること、平野部がこれら山岳に囲まれるという特殊な地形状況下にあること、山岳の麓において渦が強化されたこと等が過去研究等でも指摘されており、極めて特殊な事例であったと考えられる。

## 付録1 温位について

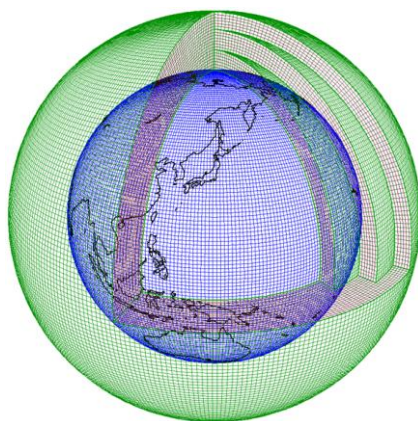
気体の状態方程式によれば、同じ気圧下で密度が小さいほど気体の温度は高くなる。したがって、ある空気塊が周囲よりも高温であれば、その空気塊は浮力を得て上昇する。このとき、下層での空気塊の気温が高いからといって、ある高い高度に断熱的に持ち上げた空気塊は、その高度の周囲の気温より高いとは限らない。同じ高度（気圧）で気温の高低を比較してはじめて、空気塊が浮力を受けるかどうかはわかる。温位を用いれば、式(3)のように、1000 hPa という基準気圧（高度）での気温を算出するため、2つの空気塊の相対的な暖かさや浮力の発生有無を容易に判断できる。

1万メートル程度上空における飛行機の客室内の気温を例にとる。客室内は与圧されて800 hPa程度の気圧となっており、温位は310 K程度とする。それに対し、飛行高度での気圧（100～200 hPa）での気温が約 $-70^{\circ}\text{C}$ とすると温位は360 K程度である。外気をそのまま取り込むと、温位は保存するため、客室内では温位360 Kに対する気温は約 $60^{\circ}\text{C}$ となるため、外気を取り込んだ際に空気を冷やす必要がある（吉崎・加藤 2007）。上空ほど気温は低いため、パラドックス的に感じるが、このように温位を用いれば空気塊の暖かさについて容易に把握・比較することが可能である。温位が高いほど暖かく、上昇しやすいということから、大気的不安定性を論じるのに温位や相当温位が使われるのはそういう理由である。

## 付録2 WRF モデルについて

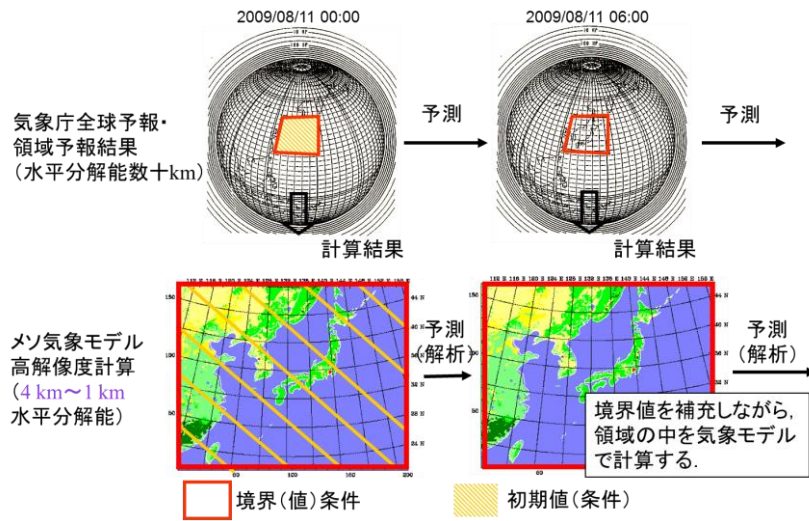
気象モデルとは、物理・力学的法則に基づいて、物理量の時間変化を計算機により数値的に解くために各諸過程を概念化したもので、気象庁による日々の気象予報もこの気象モデルを用いて実施されている。付図1のように計算対象領域を3次元格子で覆い、各格子点上で気圧、風などの物理量を定義する。観測データや気象庁等の解析・予報結果をもとに計算開始時刻の物理量を決めて、計算領域境界部の値を時々刻々変化させながら（付図2）、運動方程式、熱力学方程式、連続式、及び水分量の保存式等を数値積分すると、将来時刻における気象要素の値が計算される。各方程式中の運動量や熱・水のソース・シンク項は各物理過程によって生み出される（例えば、水蒸気から水滴が生成されるとその潜熱が熱力学方程式中のソースとなる）が、気象モデルでは付図3に示すような物理過程がモデル化され、力学系の各保存式のソルバーと連携している。

この種の気象モデルは、放射性汚染気塊の輸送量計算にも使用されており、WSPEEDI-II（Worldwide version of System for Prediction of Environmental Emergency Dose Information；世界版緊急時環境線量情報予測システム第2版）では、本検討に用いているWRFモデルの前身に位置づけられるMM5（PSU/NCAR Mesoscale Model version 5；Dudhia 1993）が気象場の入力情報の作成に用いられている（山澤ら 1997）。WRFモデルは、MM5の力学系・物理モデル共に大幅な改良を加えることにより開発されたものであり、現在米国においては気象の現業・研究の両面で活用されている。また、わが国を含めた諸外国においても広く活用されている。

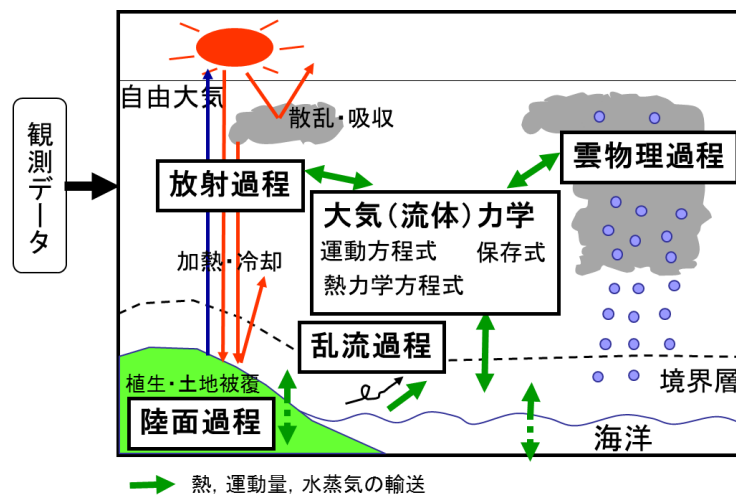


付図1 計算グリッド構造の例  
（気象庁ホームページ

<http://www.jma.go.jp/jma/kishou/known/whitep/1-3-1.html> より)



付図2 気象モデルを用いた解析・予測計算の流れの概念図 (気象庁全球モデルを例に)

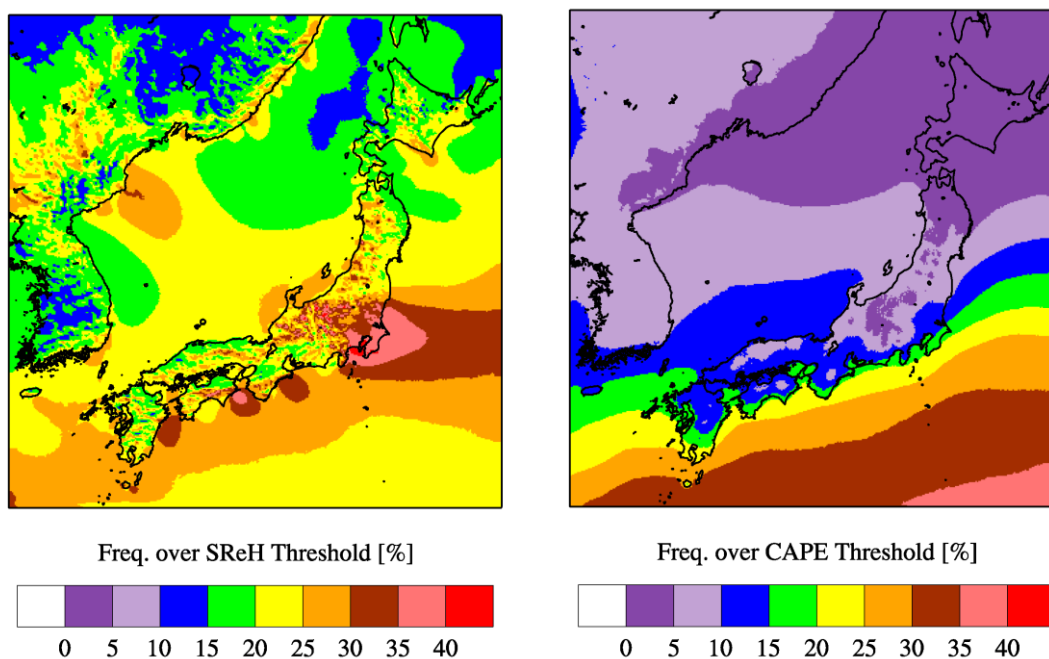


付図3 気象モデルを用いた計算の模式図

### 付録3 各指数 (SReH, CAPE) が有する基本特性

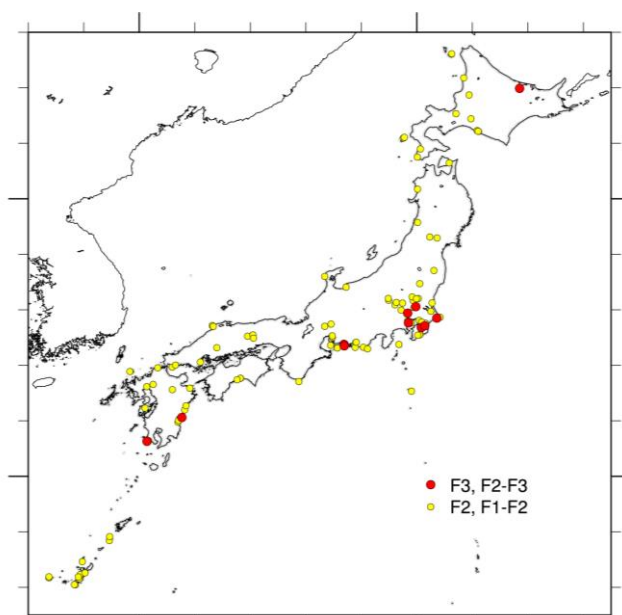
1999年～2010年の12ヵ年のSReHとCAPEのデータに対し、各指数に対する閾値をそれぞれ、 $150 \text{ m}^2/\text{s}^2$ 、及び  $250 \text{ J/kg}$  とし、閾値を超過する頻度（全体の母数に対する割合 (%)）を計算した。なお、閾値を小さく設定するということは、スーパーセルだけではなく、小さな雷雨発生環境場も捕捉することを意味する。ここでは、緯度依存性等の基本特性に着目して、小さな閾値を設定した。これら閾値は、強いスーパーセルが発生するような大きな閾値（例えば、SReHが  $300 \text{ m}^2/\text{s}^2$  程度以上、CAPEが  $1000 \text{ J/kg}$  程度以上（大野 2001））に比べて十分に小さい。計算結果（付図4）から以下のことがわかる。

- ・鉛直シアによる渦の発生頻度は、関東とその周辺で特に大きい。関東以西の太平洋側の沖合では、日本海側に比べて頻度がやや高めである。その他、日高山脈南部周辺や能登半島周辺でもやや頻度が高い。その他は特段の地域性は見られない。
- ・CAPE 閾値の超過頻度は南ほど大きく、加藤（2008a）が指摘するように、CAPE には緯度依存性がある。これは暖候期と寒候期とでは積乱雲の高さが異なり、暖候期の方がCAPE値の絶対量が多いこととも関係する。



付図4 設定した閾値を超過する頻度  
 (左 : SReH (閾値 :  $150 \text{ m}^2/\text{s}^2$ ), 右 : CAPE (閾値 :  $250 \text{ J/kg}$ ))

両指数に上記の基本的特性が見て取れる一方、国内における F2-F3 及び F3 の発生箇所（付図 5）と超過頻度分布の対応が高くないこともうかがえる。設定した閾値が小さいことがその原因の一つであるが、例えば、CAPE に対する超過頻度は南にいくほど高く、沖縄で F3 規模が発生していないことと対応しない。また、SReH の超過頻度分布においては、内陸部で大きな値をとっている。



付図 5 F2 及び F3 規模の竜巻の発生箇所（気象庁の「竜巻等突風データベース」による）

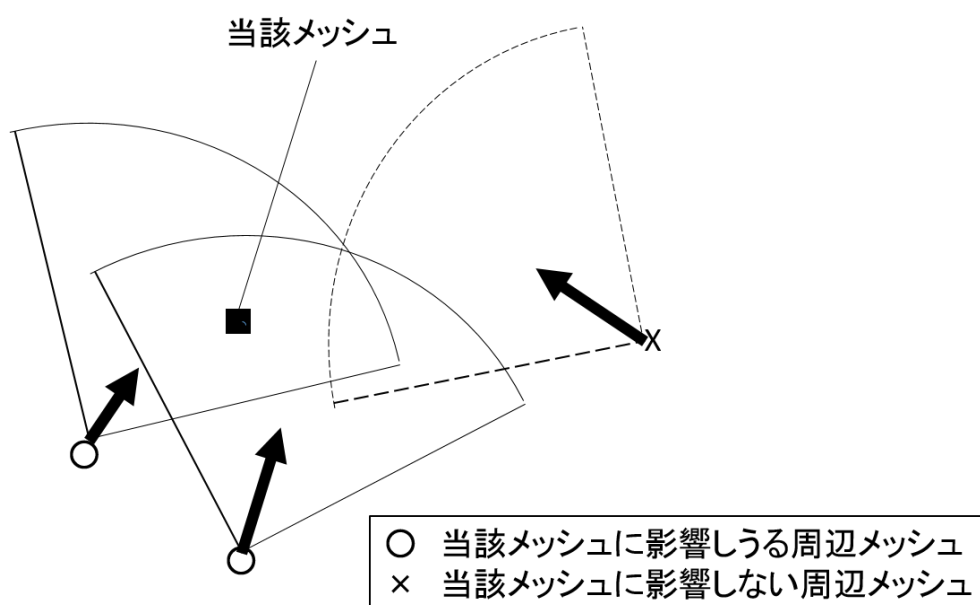


#### 付録 4 両指数の同時超過頻度の詳細分析における CAPE 値の取扱い

両指数の同時超過頻度の詳細分析にあたっては、CAPE 値の取り扱いについて工夫した。雲物理過程によりじょう乱（竜巻を伴う積乱雲）が発生すると、発生前の大気不安定な状況が解消されるからである。このとき、解析データにおいて、当該メッシュにおいて竜巻を伴うじょう乱が発生しているとき、そのメッシュに対する CAPE 値は周辺のメッシュ値に比べて小さめになりうる。これは、F3 規模の竜巻が発生しうる条件として CAPE に対するある閾値を設け、その閾値を超過する頻度を算出することによって大きな竜巻の発生しやすさを評価する際に問題になる。そこで、周辺の CAPE 値の大きな空気塊が当該メッシュを含むスーパーセルに向かって流入することを表現するため、メッシュ周辺の最大の CAPE 値を当該メッシュの CAPE 値（以下、最大 CAPE 値と呼ぶ）とした。最大 CAPE 値を求める方法として、

- ・当該メッシュを中心とした矩形域（例えば、100 km 四方）内の最大 CAPE 値を抽出する（瀧下 2011）。
- ・周辺の各メッシュにおける下層風の平均風向にもとづいてそのメッシュの影響範囲を考え、当該メッシュが影響範囲に入る周辺メッシュの CAPE 値のうち最大の値をとる（付図 6 ; Rasmussen and Blanchard 1998）。

等があるが、より力学的に根拠を有する後者の考え方を採用した。各格子点に対して、地上～500 m 高度までの平均風向を算出し、その風向の±45 度の扇形領域を影響範囲とした。また、影響半径は 25 km とした。



付図 6 最大 CAPE 値の抽出方法の概念図

## 参考文献

- Bosart, L. F., A. Seimon, K. D. LaPenta, M. J. Dickinson, 2006: Supercell tornadogenesis over complex terrain: The Great Barrington, Massachusetts, Tornado on 29 May 1995. *Wea. Forecasting*, 21, 897-922.
- Browning, K. A., 1964: Airflow and precipitation trajectories within severe local storms which travel to the right of the winds. *J. Atmos. Res.*, 21, 634-639.
- Bunkers, M. J., B. A. Klimowski, J. W. Zeitler, R. L. Thompson, and M. L. Weisman, 2000: Predicting supercell motion using a new hodograph technique. *Wea. Forecasting*, 15, 61-79.
- Davis-Jones, R., D. Burgess, and M. Foster, 1990: Test of helicity as a tornado forecast parameter. 16th Conf. on Severe Local Storms, Kananaskis Park, AB., Canada, Amer. Meteor. Soc., 588-592.
- Dudhia, J., 1993: A nonhydrostatic version of the Penn State-NCAR mesoscale model: validation tests and simulation of an Atlantic cyclone and cold front. *Mon. Wea. Rev.*, 121, 1493-1513.
- Fujita, T. T., 1981: Tornadoes and downbursts in the context of generalized planetary scale. *J. Atmos. Sci.*, 38, 1511-1534.
- Moncrieff, M., and M. J. Miller, 1976: The dynamics and simulation of tropical cumulonimbus and squall lines. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 102, 373-394.
- Onogi, K., J. Tsutsui, H. Koide, M. Sakamoto, S. Kobayashi, H. Hatsushika, T. Matsumoto, N. Yamazaki, H. Kamahori, K. Takahashi, S. Kadokura, K. Wada, K. Kato, R. Oyama, T. Ose, N. Mannoji and R. Taira, 2007: The JRA-25 Reanalysis. *J. Meteor. Soc. Japan*, 85, 369-432.
- Orlanski, I., 1975: A rational subdivision of scales for atmospheric processes. *Bull. Amer. Meteorol. Soc.*, 56, 527-530.
- Rasmussen, E. N., and D. Blanchard, 1998: A baseline climatology of sounding-derived supercell and tornado forecast parameters. *Wea. Forecasting*, 13, 1148-1164.
- Skamarock, W. C., J. B. Klemp, J. Dudhia, D. O. Gill, D. M. Barker, W. Wang, and J. G. Powers: A description of the advanced research WRF version 2. *NCAR Tech. Note*, NCAR/TN-468+STR, 88 pp., 2005.
- 飯塚義浩, 加治屋秋実, 2011: 数値予報資料から求めた竜巻に関連する大気環境指数の統計的検証. *天気*, 58, 19-30.
- 大野久雄, 2001: 雷雨とメソ気象. 東京堂出版, pp. 309.

- 加藤輝之, 2008a: 竜巻発生環境場に関する研究 (I) - 竜巻をもたらす発生環境に関する統計的研究 -, 平成 19 年度科学技術振興調整費 重要政策課題への機動的対応の推進, 6-12.
- 加藤輝之, 2008b: スーパーセルに伴う竜巻の発生機構の研究 (III) - 2006 年の佐呂間竜巻に対する解析 -, 平成 19 年度科学技術振興調整費 重要政策課題への機動的対応の推進, 39-44.
- 杉本聡一郎, 野原大輔, 平口博丸, 2014: 突風関連指数を用いた大きな竜巻の発生環境場の地域性に関する検討, 日本気象学会 2014 年度春季大会講演予稿集, 420.
- 村松貴有, 加藤輝之, 佐々木秀孝, 2013: 水平 5km 地域気候モデルに基づく日本域竜巻発生環境場の将来予測. 2013 年度気象学会秋季大会予稿集, 62.
- 瀧下洋一, 2011: 竜巻発生確度ナウキャスト・竜巻注意情報について - 突風に関する防災気象情報の改善 -. 測候時報, 78, 57-93.
- 橋本篤, 平口博丸, 豊田康嗣, 中屋耕, 2011: 温暖化に伴う日本の気候変化予測 (その 1) - 気象予測・解析システム NuWFAS の長期気候予測への適用性評価 -. 電力中央研究所報告 N10044, 22pp.
- 橋本篤, 平口博丸, 田村英寿, 服部康男, 松梨史郎, 2013: 領域気候モデルを用いた過去 53 年間の気象・気候再現. 電力中央研究所報告, N13004, 18 pp.
- 山澤弘実, 茅野政道, 永井晴康, 古野朗子, 1997: 緊急時環境線量情報予測システム (世界版) WSPEEDI の開発と検証. 日本原子力学会誌, 39, 881-892.
- 吉崎正憲, 加藤輝之, 2007: 豪雨・豪雪の気象学. 朝倉書店, pp. 187.

## 2.2 竜巻検討地域において発生した竜巻

1961年1月～2012年6月の51.5年間を対象として、竜巻検討地域において発生した竜巻及び竜巻検討地域外で発生して竜巻検討地域内に移動した竜巻の一覧を示す。

	発生日時	発生場所緯度	発生場所経度	Fスケール	現象区分
001	1962年09月28日 14時20分	45度13分30秒	141度15分25秒	(F2)	竜巻
002	1965年09月30日 02時35分	39度44分33秒	140度4分46秒	F1	竜巻
003	1965年09月30日 03時00分	39度19分29秒	140度0分10秒	F0～F1	竜巻または ダウンバースト
004	1968年01月08日 09時50分	37度13分48秒	138度19分22秒	F1	竜巻
005	1969年06月22日 09時00分	34度37分30秒	131度36分10秒	F1	竜巻
006	1969年11月18日 07時08分	38度54分31秒	139度50分7秒	F1	竜巻
007	1971年02月01日 00時20分	36度41分10秒	136度40分30秒	F1	竜巻
008	1971年10月17日 05時00分	44度21分23秒	141度41分30秒	(F2)	竜巻
009	1971年10月17日 05時00分	44度21分23秒	141度41分30秒	F0～F1	竜巻
010	1972年11月21日 17時05分	36度53分27秒	137度24分57秒	F1	竜巻
011	1973年05月21日 16時30分	36度49分56秒	136度44分45秒	F0～F1	竜巻
012	1973年09月27日 23時00分	45度26分20秒	141度2分10秒	F1	竜巻
013	1973年10月22日 13時20分	39度41分41秒	140度4分20秒	F1	竜巻
014	1974年08月08日 05時05分	40度16分53秒	140度3分24秒	F0～F1	竜巻
015	1974年10月03日 19時05分	42度11分20秒	139度31分0秒	(F1～F2)	竜巻
016	1974年10月20日 15時00分	41度47分45秒	140度7分47秒	(F1～F2)	竜巻

	発生日時	発生場所緯度	発生場所経度	Fスケール	現象区分
017	1975年05月31日 18時10分	35度25分57秒	132度37分42秒	(F2)	竜巻
018	1975年05月31日 18時10分	35度26分6秒	132度37分57秒	F0～F1	竜巻
019	1975年05月31日 18時40分	35度25分8秒	132度37分53秒	F0～F1	竜巻
020	1975年09月08日 01時30分	42度12分52秒	139度32分58秒	(F1～F2)	竜巻
021	1977年01月13日 01時30分	36度34分5秒	136度34分0秒	F0～F1	竜巻
022	1978年08月14日 10時40分	45度5分0秒	141度38分0秒	不明	竜巻
023	1979年10月31日 13時00分	37度8分21秒	136度41分2秒	F0～F1	竜巻
024	1979年11月02日 01時58分	41度30分7秒	140度1分6秒	(F2)	竜巻
025	1984年11月19日 22時00分	35度26分4秒	133度19分22秒	F1	竜巻
026	1987年01月11日 01時32分	40度2分27秒	139度56分19秒	F0～F1	竜巻
027	1987年01月11日 02時00分	40度6分9秒	139度57分57秒	F1	竜巻
028	1989年03月16日 19時20分	35度24分0秒	132度40分0秒	(F2)	竜巻
029	1990年04月06日 02時55分	37度12分10秒	136度40分56秒	F2	竜巻
030	1991年01月13日 14時48分	38度1分25秒	138度12分20秒	不明	竜巻
031	1991年02月15日 11時00分	35度33分54秒	135度52分53秒	F1	竜巻
032	1991年09月17日 08時50分	42度49分12秒	140度12分50秒	不明	竜巻
033	1991年12月11日 20時10分	36度35分59秒	136度38分0秒	F1	竜巻

	発生日時	発生場所緯度	発生場所経度	Fスケール	現象区分
034	1992年09月13日 08時50分	45度26分50秒	141度40分0秒	不明	竜巻
035	1992年09月17日 09時05分	43度50分50秒	141度29分55秒	F1	竜巻
036	1992年09月17日 09時05分	43度50分50秒	141度29分55秒	不明	竜巻
037	1993年09月26日 15時52分	43度57分17秒	141度36分54秒	不明	竜巻
038	1993年10月17日 09時30分	36度55分9秒	136度43分51秒	不明	竜巻
039	1993年10月23日 17時00分	38度5分30秒	138度12分30秒	不明	竜巻
040	1993年11月24日 13時50分	37度13分27秒	138度12分49秒	不明	竜巻
041	1994年03月26日 11時40分	38度48分32秒	139度46分19秒	F1	竜巻
042	1994年09月01日 16時00分	37度59分6秒	139度2分56秒	不明	竜巻
043	1995年12月01日 13時51分	36度26分13秒	136度25分3秒	不明	竜巻
044	1996年09月05日 10時20分	39度15分18秒	139度54分1秒	不明	竜巻
045	1996年10月08日 23時07分	44度43分7秒	141度48分15秒	F1	竜巻
046	1996年11月30日 07時05分	37度23分39秒	138度34分14秒	F1	竜巻
047	1997年01月22日 09時20分	37度54分58秒	139度2分0秒	F0	竜巻
048	1998年09月24日 15時00分	35度38分26秒	134度55分31秒	不明	竜巻
049	1998年10月31日 08時40分	37度19分6秒	136度42分10秒	不明	竜巻
050	1998年11月15日 22時30分	38度56分40秒	139度49分22秒	F1	竜巻

	発生日時	発生場所緯度	発生場所経度	Fスケール	現象区分
051	1999年10月08日 09時30分	36度43分56秒	136度40分18秒	不明	竜巻
052	1999年10月29日 21時25分	40度13分10秒	140度4分11秒	F0～F1	竜巻
053	1999年11月25日 15時40分	40度20分50秒	140度1分37秒	(F1～F2)	竜巻
054	2000年07月25日 06時20分	36度8分1秒	136度4分13秒	不明	竜巻
055	2000年07月25日 06時30分	36度13分26秒	136度8分2秒	不明	竜巻
056	2001年06月01日 13時20分	40度32分7秒	139度56分44秒	F1	竜巻
057	2001年06月19日 14時50分	35度37分58秒	136度3分11秒	F1	竜巻
058	2002年09月23日 14時30分	36度58分15秒	137度33分15秒	F0～F1	竜巻
059	2002年09月24日 13時15分	39度30分6秒	140度4分56秒	F1	竜巻
060	2002年11月04日 11時20分	36度21分14秒	136度19分32秒	F0	竜巻
061	2002年11月05日 10時30分	35度38分45秒	135度56分16秒	不明	竜巻
062	2003年10月18日 16時25分	36度11分51秒	136度7分2秒	不明	竜巻
063	2004年08月15日 12時10分	45度27分22秒	141度2分1秒	F0未満	竜巻
064	2005年01月12日 07時50分	35度32分0秒	134度3分30秒	不明	竜巻
065	2005年12月05日 11時50分	35度23分26秒	132度42分50秒	F1	竜巻またはダウンバースト
066	2005年12月25日 19時10分	38度51分16秒	139度47分16秒	F1	竜巻
067	2006年11月09日 12時05分	42度3分31秒	139度26分50秒	F1	竜巻

	発生日時	発生場所緯度	発生場所経度	Fスケール	現象区分
068	2007年08月24日 08時20分	38度47分40秒	139度42分0秒	不明	竜巻
069	2007年08月24日 08時20分	38度47分40秒	139度42分0秒	不明	竜巻
070	2007年10月01日 14時25分	43度23分0秒	140度26分30秒	不明	竜巻
071	2007年10月01日 14時27分	43度17分8秒	140度20分16秒	不明	竜巻
072	2007年10月01日 15時30分	42度26分26秒	139度47分30秒	不明	竜巻
073	2007年10月04日 13時36分	44度53分0秒	141度41分0秒	不明	竜巻
074	2007年10月04日 16時30分	42度27分15秒	139度50分20秒	不明	竜巻
075	2007年10月11日 09時55分	40度47分21秒	140度7分54秒	不明	竜巻
076	2007年10月11日 10時25分	40度47分21秒	140度7分54秒	不明	竜巻
077	2007年10月16日 15時23分	35度36分35秒	133度5分10秒	不明	竜巻
078	2007年11月22日 09時00分	36度54分32秒	137度24分56秒	不明	竜巻または 漏斗雲
079	2007年12月02日 01時30分	38度54分26秒	139度50分18秒	F0	竜巻
080	2008年06月01日 12時50分	40度23分20秒	139度58分55秒	不明	竜巻
081	2008年07月30日 08時03分	35度34分20秒	134度13分5秒	不明	竜巻
082	2008年07月30日 08時28分	35度33分5秒	134度10分56秒	不明	竜巻または 漏斗雲
083	2008年07月30日 08時28分	35度33分5秒	134度10分56秒	不明	竜巻または 漏斗雲
084	2008年07月30日 08時41分	35度33分36秒	134度11分26秒	不明	竜巻または 漏斗雲



	発生日時	発生場所緯度	発生場所経度	Fスケール	現象区分
085	2008年07月30日 08時55分	35度34分48秒	134度9分30秒	不明	竜巻
086	2008年07月30日 09時01分	35度34分16秒	134度9分26秒	不明	竜巻
087	2008年07月30日 09時18分	35度34分6秒	134度8分16秒	不明	竜巻
088	2008年08月14日 11時25分	38度55分10秒	139度48分31秒	不明	竜巻
089	2008年08月15日 16時20分	35度30分51秒	133度59分38秒	F0以下	竜巻
090	2008年09月14日 08時33分	45度28分53秒	141度50分14秒	不明	竜巻
091	2008年09月14日 08時47分	45度29分22秒	141度37分30秒	不明	竜巻
092	2008年09月21日 11時07分	38度28分16秒	139度28分39秒	不明	竜巻
093	2008年10月01日 11時55分	40度1分15秒	139度45分45秒	不明	竜巻
094	2008年10月01日 11時55分	40度0分37秒	139度44分9秒	不明	竜巻
095	2008年10月10日 09時05分	39度47分5秒	140度0分55秒	不明	竜巻
096	2008年10月10日 10時20分	39度44分36秒	140度0分23秒	不明	竜巻
097	2008年10月10日 12時07分	39度40分20秒	140度1分7秒	不明	竜巻
098	2008年10月11日 00時45分	41度51分7秒	140度7分37秒	F0	竜巻
099	2008年10月15日 13時48分	37度51分36秒	138度54分57秒	F0	竜巻
100	2008年10月15日 14時47分	38度40分48秒	139度34分48秒	不明	竜巻
101	2008年10月15日 16時10分	38度22分2秒	139度26分44秒	不明	竜巻

	発生日時	発生場所緯度	発生場所経度	Fスケール	現象区分
102	2008年10月26日 18時30分	37度56分11秒	139度6分24秒	F0	竜巻
103	2008年10月27日 14時55分	36度9分11秒	136度4分16秒	不明	竜巻
104	2008年10月30日 12時33分	35度32分51秒	134度12分26秒	不明	竜巻
105	2008年10月30日 12時38分	35度35分1秒	134度17分35秒	F0	竜巻
106	2008年10月30日 12時50分	35度34分34秒	134度16分10秒	不明	竜巻
107	2008年10月31日 07時30分	37度7分33秒	136度42分25秒	不明	竜巻
108	2008年11月02日 16時20分	37度44分35秒	138度48分7秒	不明	竜巻
109	2008年11月19日 08時36分	36度27分26秒	136度23分41秒	不明	竜巻または 漏斗雲
110	2008年11月19日 11時45分	37度55分41秒	139度1分4秒	不明	竜巻
111	2008年11月20日 08時30分	37度26分19秒	138度34分17秒	不明	竜巻
112	2008年11月20日 08時40分	36度56分37秒	136度44分33秒	不明	竜巻
113	2008年11月20日 08時42分	36度56分37秒	136度44分33秒	不明	竜巻
114	2008年11月20日 08時42分	36度56分37秒	136度44分33秒	不明	竜巻
115	2008年11月20日 09時40分	37度27分8秒	138度34分43秒	不明	竜巻
116	2008年11月20日 10時00分	36度41分30秒	136度33分4秒	不明	竜巻または 漏斗雲
117	2008年11月23日 10時20分	36度59分16秒	136度46分25秒	F0～F1	竜巻
118	2009年01月24日 11時05分	42度5分27秒	139度23分57秒	不明	竜巻

	発生日時	発生場所緯度	発生場所経度	Fスケール	現象区分
119	2009年01月24日 11時15分	42度0分27秒	139度27分46秒	不明	竜巻
120	2009年02月07日 20時15分	39度41分6秒	140度5分11秒	F0	竜巻
121	2009年03月14日 17時26分	35度35分53秒	134度13分28秒	不明	竜巻または 漏斗雲
122	2009年08月23日 18時37分	38度36分36秒	139度34分27秒	不明	竜巻
123	2009年08月23日 18時51分	38度37分26秒	139度35分7秒	不明	竜巻
124	2009年09月10日 13時30分	37度25分26秒	138度32分38秒	不明	竜巻
125	2009年09月10日 13時35分	37度25分26秒	138度32分38秒	不明	竜巻
126	2009年09月13日 03時40分	38度34分7秒	139度33分9秒	F0	竜巻
127	2009年10月04日 12時50分	39度39分55秒	140度4分26秒	不明	竜巻
128	2009年10月27日 13時10分	37度2分7秒	137度49分14秒	不明	竜巻
129	2009年10月30日 07時26分	40度30分18秒	139度59分57秒	F0	竜巻
130	2009年10月30日 09時20分	40度9分56秒	140度0分26秒	F1	竜巻
131	2009年11月03日 06時25分	36度52分52秒	137度21分58秒	不明	竜巻または 漏斗雲
132	2009年11月03日 06時37分	36度54分8秒	137度22分38秒	不明	竜巻
133	2009年11月03日 06時38分	36度54分8秒	137度22分38秒	不明	竜巻
134	2009年11月03日 06時39分	36度53分27秒	137度22分8秒	不明	竜巻
135	2009年11月03日 06時43分	36度54分56秒	137度23分51秒	不明	竜巻

	発生日時	発生場所緯度	発生場所経度	Fスケール	現象区分
136	2009年12月18日 02時00分	36度34分20秒	136度33分53秒	F0	竜巻
137	2009年12月18日 11時03分	35度34分22秒	134度14分26秒	不明	竜巻または 漏斗雲
138	2010年08月25日 12時30分	43度57分25秒	141度35分10秒	不明	竜巻
139	2010年08月25日 13時05分	43度59分0秒	141度39分15秒	F0未満	竜巻
140	2010年09月07日 03時45分	39度46分12秒	140度3分59秒	F0	竜巻
141	2010年09月16日 14時30分	35度37分0秒	134度24分5秒	不明	竜巻
142	2010年09月17日 10時45分	37度38分56秒	138度44分42秒	不明	竜巻
143	2010年09月17日 10時55分	37度38分3秒	138度45分37秒	F0以下	竜巻
144	2010年10月15日 04時30分	37度10分5秒	136度40分32秒	F0	竜巻
145	2010年10月15日 17時00分	38度3分23秒	139度19分23秒	F0	竜巻
146	2010年10月15日 17時05分	38度4分24秒	139度21分9秒	F1	竜巻
147	2010年10月17日 12時40分	40度22分52秒	139度59分42秒	F0	竜巻
148	2010年10月17日 13時20分	39度51分44秒	140度1分32秒	F0	竜巻
149	2010年10月26日 07時00分	43度24分30秒	141度22分0秒	不明	竜巻
150	2010年10月26日 07時05分	43度24分30秒	141度19分0秒	不明	竜巻
151	2010年10月26日 07時05分	43度8分28秒	140度23分6秒	不明	竜巻
152	2010年10月26日 07時10分	43度23分40秒	141度25分50秒	F0未満	竜巻

	発生日時	発生場所緯度	発生場所経度	Fスケール	現象区分
153	2010年10月26日 07時10分	43度24分0秒	141度24分40秒	不明	竜巻
154	2010年10月26日 07時38分	43度22分30秒	141度24分15秒	不明	竜巻
155	2010年10月26日 08時10分	43度8分38秒	140度23分6秒	不明	竜巻
156	2010年10月26日 15時50分	41度51分39秒	140度6分25秒	不明	竜巻
157	2010年11月12日 13時15分	40度19分0秒	140度1分47秒	F0	竜巻
158	2010年11月29日 09時20分	37度0分3秒	136度46分18秒	F0	竜巻
159	2010年11月29日 12時18分	36度15分21秒	136度6分51秒	不明	竜巻または 漏斗雲
160	2010年11月29日 12時24分	36度15分23秒	136度6分59秒	不明	竜巻
161	2010年11月29日 12時25分	36度15分17秒	136度6分37秒	不明	竜巻
162	2010年12月03日 15時30分	37度50分58秒	138度55分4秒	F0	竜巻
163	2010年12月03日 15時36分	37度52分15秒	138度58分57秒	F0未満	竜巻
164	2010年12月03日 15時45分	37度53分11秒	139度2分24秒	F1	竜巻
165	2010年12月09日 17時10分	37度12分36秒	138度18分7秒	F0～F1	竜巻
166	2010年12月15日 07時56分	36度51分20秒	137度23分5秒	不明	竜巻
167	2010年12月16日 08時00分	38度2分43秒	138度37分10秒	不明	竜巻
168	2010年12月17日 10時20分	42度52分12秒	140度18分46秒	不明	竜巻
169	2010年12月18日 07時18分	35度34分17秒	134度10分6秒	不明	竜巻または 漏斗雲

	発生日時	発生場所緯度	発生場所経度	Fスケール	現象区分
170	2010年12月24日 15時57分	35度34分17秒	134度10分4秒	不明	竜巻
171	2010年12月27日 01時30分	37度1分3秒	136度44分37秒	F0	竜巻
172	2010年12月29日 13時50分	35度46分56秒	135度14分0秒	不明	竜巻
173	2010年12月29日 14時00分	35度46分54秒	135度12分6秒	不明	竜巻
174	2011年01月03日 14時52分	38度3分48秒	139度16分7秒	不明	竜巻
175	2011年03月09日 11時30分	36度13分1秒	136度11分51秒	F0未満	竜巻または 漏斗雲
176	2011年03月09日 17時25分	35度34分6秒	134度8分57秒	不明	竜巻
177	2011年03月31日 09時50分	37度10分31秒	138度13分58秒	F0未満	竜巻または 漏斗雲
178	2011年08月13日 17時32分	40度29分8秒	139度53分20秒	不明	竜巻
179	2011年08月20日 18時30分	43度5分3秒	140度22分46秒	不明	竜巻
180	2011年08月20日 18時40分	43度4分56秒	140度23分57秒	不明	竜巻
181	2011年08月20日 18時45分	43度4分52秒	140度24分37秒	不明	竜巻
182	2011年08月22日 12時05分	45度19分0秒	140度58分47秒	不明	竜巻または 漏斗雲
183	2011年09月20日 05時50分	45度25分27秒	141度41分35秒	不明	竜巻
184	2011年11月15日 16時10分	37度2分0秒	137度42分0秒	不明	竜巻
185	2011年11月15日 16時12分	37度2分0秒	137度42分0秒	不明	竜巻
186	2011年11月15日 16時14分	37度2分0秒	137度42分0秒	不明	竜巻

	発生日時	発生場所緯度	発生場所経度	F スケール	現象区分
187	2011年11月15日 16時15分	37度2分0秒	137度42分0秒	不明	竜巻
188	2011年11月15日 16時20分	37度2分0秒	137度42分0秒	不明	竜巻
189	2011年11月24日 12時10分	36度56分25秒	137度23分30秒	不明	竜巻または 漏斗雲
190	2011年11月25日 06時27分	36度53分45秒	137度23分0秒	不明	竜巻または 漏斗雲
191	2011年12月24日 12時10分	36度48分30秒	136度42分0秒	不明	竜巻
192	2012年02月01日 04時15分	35度21分41秒	132度40分40秒	F0	竜巻

気象庁「竜巻等の突風データベース」より作成

### 2.3 竜巻最大風速のハザード曲線の求め方

「ガイド」に基づき、竜巻に遭遇し、かつ竜巻がある風速以上になる確率モデルの推定法 (Wen and Chu 及び Garson et. al) により、竜巻最大風速のハザード曲線による最大風速 ( $V_{B2}$ ) を算定した。なお、 $V_{B2}$  の具体的な算定方法については、独立行政法人原子力安全基盤機構 (JNES) が東京工芸大学に委託した研究の成果を参考とした。

#### 2.3.1 $V_{B2}$ の評価手順

竜巻検討地域は、山陰地方から北海道にかけての日本海沿岸の海岸線から陸側に 5 km、海側に 5 km の範囲内 (面積 33,395 km<sup>2</sup>) である (図 2.3.1)。これらの地域を対象として、円形構造物 (直径 450 m) に対する竜巻ハザードの評価を行う。ハザードの評価手順を図 2.3.2 に示す。

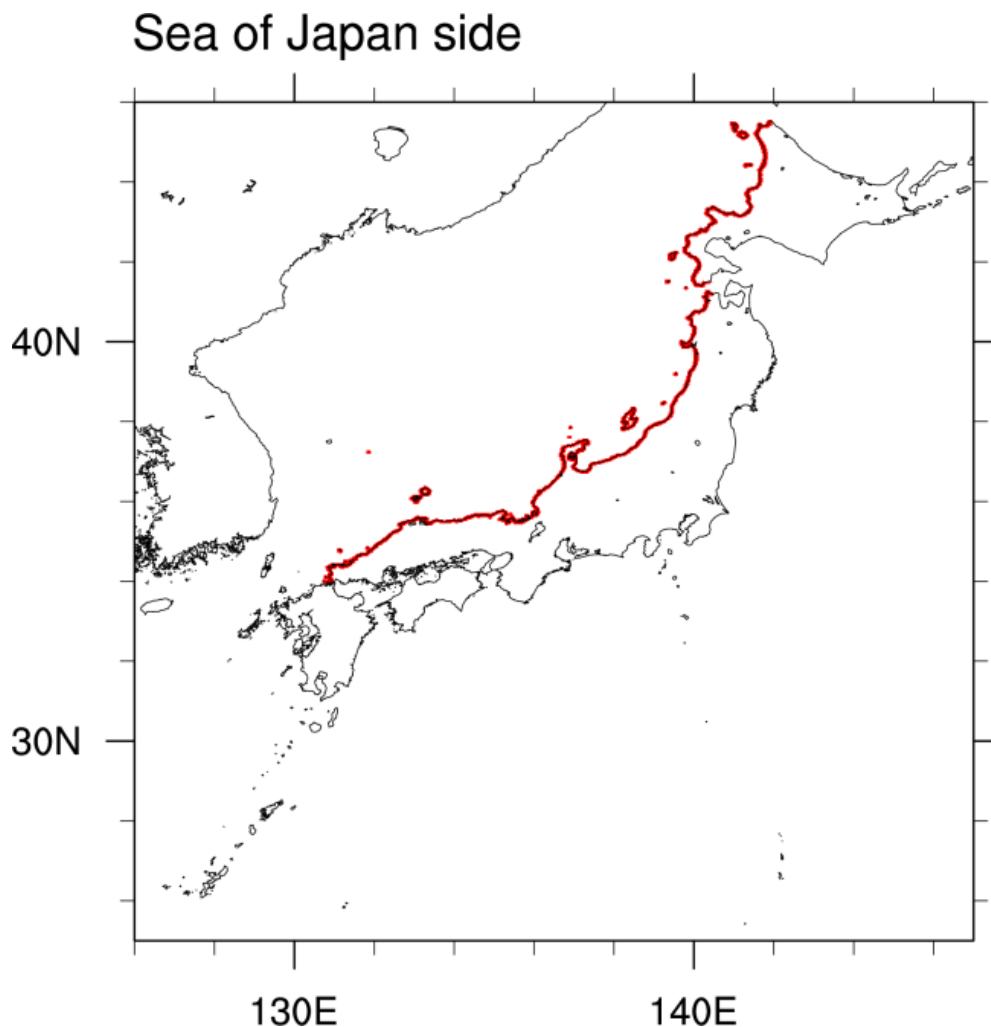


図 2.3.1 竜巻検討地域



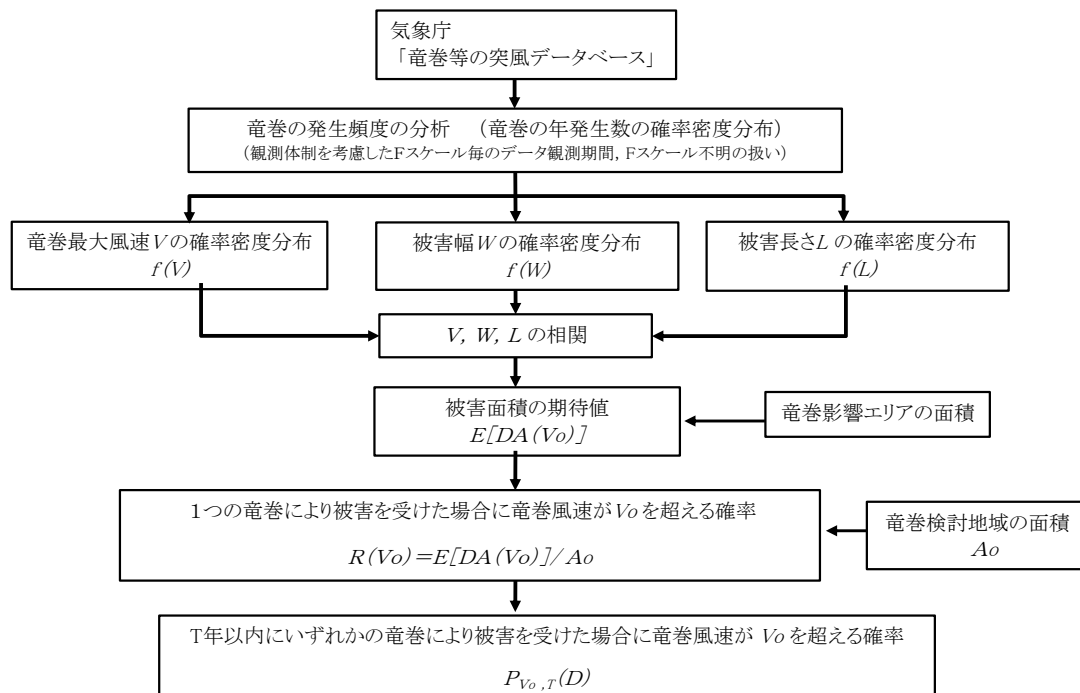


図 2.3.2 竜巻ハザードの算定フロー

### 2.3.2 竜巻の発生頻度

竜巻発生数の平均値や標準偏差を評価するために、気象庁「竜巻等の突風データベース」を使用する。これには1961年以降のデータがデータベース化されているが、観測体制は近年になるほど強化されており、年代により観測値の質にばらつきがある。観測体制が強化された2006年あるいは2007年以降は、発生数が非常に多くなっており、海上竜巻の増加が特に顕著である。ただし、これら海上竜巻の多くは、その詳細が“不明”となっているのも特徴である。

そこで本評価では、観測体制の変遷や観測された竜巻の特徴を考慮して、解析に用いるデータの観測期間を以下のように設定した。

- ✓ 観測体制が強化された2007～2012/6（5.5年間）
- ✓ 観測体制が整備された1991～2012/6（21.5年間）
- ✓ 観測記録が整備された1961～2012/6（51.5年間）

また、解析範囲は、ガイドに基づき、竜巻検討地域（面積33,395km<sup>2</sup>）とした。

上記3つの観測期間について、竜巻発生数、年間平均発生数及びその標準偏差をFスケール毎に調査した結果を表2.3.1に、解析フローを図2.3.3に示す。同表では、1961～、1991～、2007～2012/6の結果をそれぞれ示しており、小

計は F0 から F3 竜巻の発生数の合計、総数は不明（陸上・海上）も含めた合計を表す。気象庁「竜巻等の突風データベース」では、竜巻の発生地点区別は「陸上」、「水上（その後上陸）」、「水上（上陸せず）」の3つに分類されている。ここでは、「陸上」及び「水上（その後上陸）」をまとめて一つの区分として扱った。以下では、特段断らない限り、陸上竜巻と上陸竜巻を“陸上竜巻”と呼ぶ。

1961年以降の51.5年間で、192個の竜巻が観測されているが、このうち5つの竜巻は海側の5km以遠から本検討領域に入ってきた海上竜巻である。陸側5km以遠から当該領域に進入した竜巻は無い。ここでは、ガイド等に基づき、本検討領域に進入あるいは通過した竜巻も発生と見なして解析を行う。

192個の竜巻のうちの約21%（40個）をF1竜巻が占め、不明は半数以上（118個）となっている。不明竜巻の多く（98個）は2007年以降の5.5年間に観測されており、それらの殆ど（91個）が海上竜巻である。F0竜巻についても、その9割以上（24個中22個）が2007年以降の観測である。

一方、F2竜巻については、51.5年間で10個観測されているが、2007年以降の発生例は無く、観測体制の強化に伴う影響をそれほど受けていないことが示唆される。また、F3竜巻の観測例が無いのも、本検討地域の特徴である。

以上の結果を踏まえ、擬似的な51.5年間のデータや統計量をFスケール毎に作成した。その基本的な考え方は以下のとおりである。

- ① 被害が小さくて見過ごされやすいF0及びF不明竜巻は、観測体制が強化された2007年以降の年間発生数や標準偏差を採用する。
- ② 被害が比較的軽微なF1竜巻については、観測体制が整備された1991年以降の年間発生数や標準偏差を採用する。
- ③ 被害が比較的大きく見逃されることが少ないF2、F3竜巻については、観測データが整備された1961年以降の全期間の年間発生数や標準偏差を採用する。
- ④ 51.5年間の発生数を、①～③の観測期間との比率からFスケール毎に推計する。

竜巻は、被害があつて初めてそのFスケールが推定されるため、陸上での不明竜巻（上陸竜巻のF不明を含む）は被害が少ないF0竜巻に分類するのが合理的である。その一方、海上のFスケール不明の竜巻については、そのFスケールを推定することは困難であるが、沿岸部近傍での竜巻の発生特性は陸上と海上では類似していると考えられる。そこで、以下のような仮定の下に、検討地域の竜巻発生数を推計した。

- ⑤ 陸上で発生したF不明竜巻はF0に含める。これにより、全ての陸上竜巻をF0～F3に分類する。
- ⑥ 沿岸部近傍での海上竜巻の発生特性は、陸上竜巻の発生特性と類似して

いるとの仮定の下、不明な海上竜巻の発生数を陸上竜巻のFスケール別発生比率で按分する。(按分後の期間内発生数は切り上げて整数化する)

このようにして得られた結果を表 2.3.2 に示す。検討領域における 51.5 年間の竜巻の発生総数は 1187 個、その 8 割以上が F0, 1 割強が F1 と推定された。また、F2 竜巻は、実際の観測数は 51.5 年間で 10 個であったが、海上竜巻を考慮したため、擬似データでは 36 個に増加している。

図 2.3.4 は、求められた発生数の平均値 (23.05 個) と標準偏差 (8.97 個) に対するポアソン分布とポリヤ分布である。ポアソン分布 (破線) は平均値のみで決まるが、ポリヤ分布 (実線) は標準偏差の影響を受けるため、かなり幅の広い分布形となっている。なお、これらの分布形に関しては 2.3.5 で述べる (式 (1), (2) 参照)。

さらに、擬似データを作成した時の基本的な考え方に則り、発生数のシミュレーションを行い、どのような竜巻発生数の推移を想定しているかを検討した。

具体的には、F スケール毎に採用した期間内の観測値及び不明な陸上・海上竜巻が、繰り返しランダムに現れるものとして、各年の発生数をシミュレーションし、52 年間の発生数データを作成する。そのデータを観測値と見なした場合に、関数形を推定し図 2.3.4 の結果と比較する。

例えば F0 の場合、信頼できるデータは最近 5~6 年間のデータしかないため、この内の一個のデータを乱数により抽出し、その年の F0 の発生数のデータとする。F0 に加えるべき陸上の不明や、海上竜巻についても、乱数を発生させて毎年の発生数をシミュレーションする。F1~F3 についても同様であり、これら全ての発生数を合算し、その年の発生数とする。

図 2.3.5(a) は、このようにして作成した 52 年間の発生数時系列の一例である。F0 や不明竜巻に関する最近の増加特性を反映させている。同図 (b) (c) は、シミュレーションされた発生数の確率分布を推定した結果である。この結果は、図 2.3.4 の結果と非常に類似していることがわかる。また、ポアソン分布に比べて、ポリヤ分布の方が発生数への適合度は高いと言える。

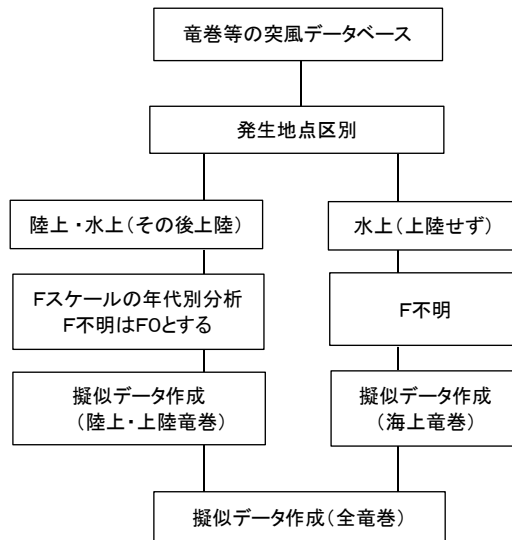


図 2.3.3 竜巻発生数の解析フロー

表 2.3.1 竜巻発生数の解析結果

竜巻検討地域 (沿岸±5km)	発生数の統計	小計	竜巻スケール				不明		総数 (含む不明)
			F0	F1	F2	F3	(陸上)	(海上)	
1961～ 2012/6 (51.5年間)	期間内総数	74	24	40	10	0	13	105	192
	平均値(年)	1.44	0.47	0.78	0.19	—	0.25	2.04	3.73
	標準偏差(年)	2.25	1.75	0.90	0.49	—	0.71	5.92	7.81
	CV(年)	1.56	3.76	1.16	2.52	—	2.83	2.90	2.09
1991～ 2012/6 (21.5年間)	期間内総数	46	24	21	1	0	12	105	163
	平均値(年)	2.14	1.12	0.98	0.05	—	0.56	4.88	7.58
	標準偏差(年)	3.11	2.61	0.91	0.22	—	1.02	8.49	11.07
	CV(年)	1.45	2.34	0.93	4.64	—	1.83	1.74	1.46
2007～ 2012/6 (5.5年間)	期間内総数	27	22	5	0	0	7	91	125
	平均値(年)	4.91	4.00	0.91	—	—	1.27	16.55	22.73
	標準偏差(年)	5.55	4.32	1.24	—	—	1.69	11.41	15.10
	CV(年)	1.13	1.08	1.36	—	—	1.33	0.69	0.66

表 2.3.2 竜巻発生数の推計結果 (擬似 51.5 年間)

日本海 (沿岸±5km)	発生数の統計	小計	竜巻スケール			
			F0	F1	F2	F3
擬似 51.5年間 (全竜巻)	期間内総数	1187	969	182	36	0
	平均値(年)	23.05	18.82	3.53	0.70	—
	標準偏差(年)	8.97	8.76	1.72	0.92	—
	CV(年)	0.39	0.47	0.49	1.32	—

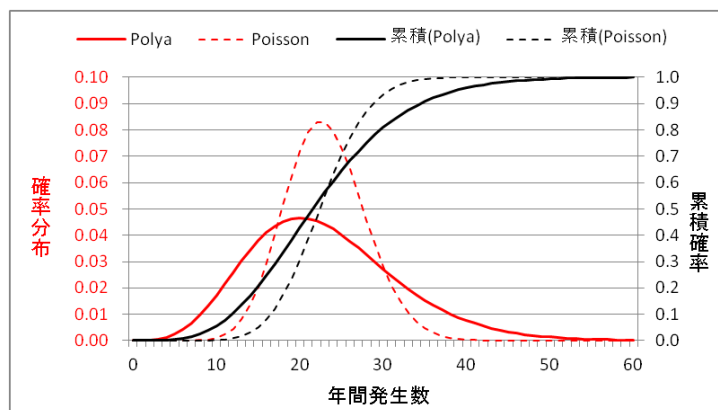
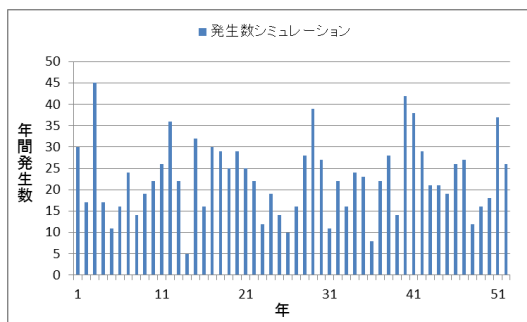
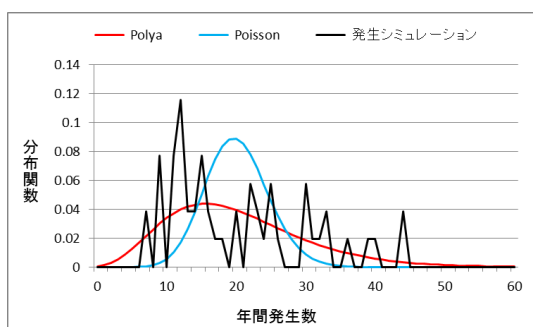


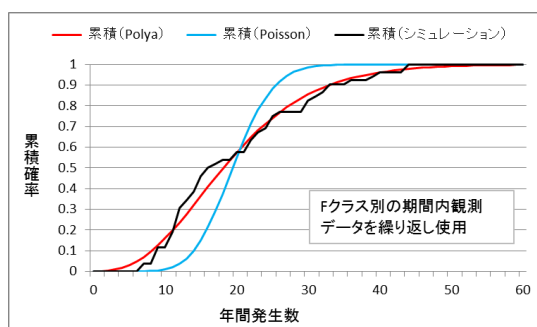
図 2.3.4 竜巻発生数の確率分布（赤）と累積分布（黒）



(a) 発生数の時系列



(b) 分布関数の比較



(c) 累積確率

図 2.3.5 発生数シミュレーションの結果

### 2.3.3 竜巻被害幅・長さの統計

竜巻発生数と同様にして、3つの観測期間を対象にして、被害幅の観測データを解析した。

解析のフローを図2.3.6に、その結果を表2.3.3に示す。ここでの不明とは、被害幅とFスケールの両方もしくは片方が不明であることを表す。また、気象庁「竜巻等の突風データベース」上で、被害幅が0mと記録されている竜巻も不明扱いとし、解析対象からは除外した。

本竜巻検討地域では、51.5年間に192個の竜巻が観測されているが、Fスケールが分かっているものが74個（表2.3.1の1段目の小計）、Fスケールと幅の両方が分かっているものが55個（表2.3.3の1段目の小計）である。被害幅の解析に利用可能なデータ数は、発生数のデータ数に比べてかなり少ないことが分かる。

安定した統計値を算出するためには、データ数を確保する必要がある。また、先に推定したFスケール毎の発生数との整合性も確保する必要がある。そこで、以下のようにして51.5年間の被害幅の統計量を推定した（図2.3.6参照）。

- ① 統計量を確保するために、1961年以降の観測データを使用し、Fスケール別に被害幅データを抽出する。Fスケール別のデータから、被害幅の発生数や平均値・標準偏差を求める（表2.3.3の上段）。
- ② 各スケール別の51.5年間のデータ数は、①で得られる観測値ではなく、表2.3.1で推定された51.5年間の擬似データの発生数とする。
- ③ ①で抽出されたFスケール別の被害幅データを大きい順に並び替え、②で設定した51.5年間の発生数分だけ繰り返しサンプリングを行い、51.5年間の擬似データ（幅のデータ）を作成する。
- ④ 作成された擬似データの平均値や標準偏差を求める。

このようにして求めた結果を表2.3.3の最下段に示す。Fスケール別の平均値や標準偏差は、繰り返しサンプリングを行っている関係で、最上段の観測値とは若干異なっている。以上により、Fスケール毎の被害幅の発生特性を保持しつつ、発生数との整合性を確保した。

竜巻被害長さについても、被害幅と同様の解析を行った。結果を表2.3.4に示す。擬似データの竜巻長さの平均値は約1.6kmであり、F0～F2の平均値はそれぞれ1.1km、3.8km、3.0km程度である。

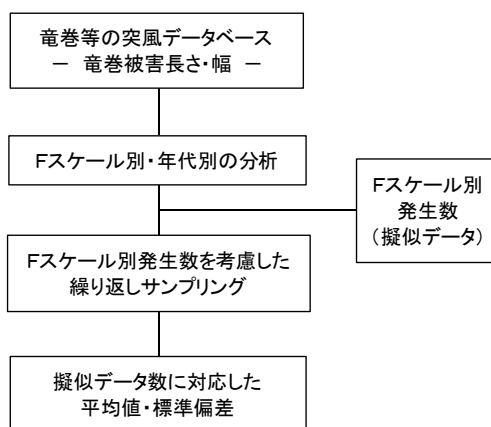


図2.3.6 竜巻被害長さ・幅の分析フロー

表 2.3.3 竜巻被害幅の解析結果

日本海 (沿岸±5km)	竜巻幅 の統計 (m)	小計	竜巻スケール				不 明		総数 (含む不明)
			F0	F1	F2	F3	(陸上)	(海上)	
1961～ 2012/6 (51.5年間)	期間内総数	55	23	26	6	0	32	105	192
	平均値 (m)	124	120	113	190	—			
	標準偏差 (m)	151	125	104	349	—			
	CV	1.22	1.04	0.92	1.84	—			
1991～ 2012/6 (21.5年間)	期間内総数	42	23	18	1	0	16	105	163
	平均値 (m)	123	120	128	100	—			
	標準偏差 (m)	117	125	116	—	—			
	CV	0.96	1.04	0.91	—	—			
2007～ 2012/6 (5.5年間)	期間内総数	26	21	5	0	0	8	91	125
	平均値 (m)	127	126	132	—	—			
	標準偏差 (m)	116	129	54	—	—			
	CV	0.91	1.03	0.41	—	—			
擬似 51.5年間 (全竜巻)	期間内総数	1187	969	182	36	0	0	0	0
	平均値 (m)	121	120	113	190	—			
	標準偏差 (m)	131	123	102	323	—			
	CV	1.08	1.02	0.90	1.70	—			

表 2.3.4 竜巻被害長さの解析結果

日本海 (沿岸±5km)	被害長さ の統計(km)	小計	竜巻スケール				不 明		総数 (含む不明)
			F0	F1	F2	F3	(陸上)	(海上)	
1961～ 2012/6 (51.5年間)	期間内総数	57	23	28	6	0	30	105	192
	平均値 (km)	2.516	1.139	3.550	2.967	—			
	標準偏差 (km)	4.039	1.486	5.243	3.462	—			
	CV	1.61	1.30	1.48	1.17	—			
1991～ 2012/6 (21.5年間)	期間内総数	41	23	17	1	0	17	105	163
	平均値 (km)	1.502	1.139	2.024	1.000	—			
	標準偏差 (km)	1.943	1.486	2.467	—	—			
	CV	1.29	1.30	1.22	—	—			
2007～ 2012/6 (5.5年間)	期間内総数	26	21	5	0	0	8	91	125
	平均値 (km)	1.800	1.219	4.240	—	—			
	標準偏差 (km)	2.300	1.533	3.618	—	—			
	CV	1.28	1.26	0.85	—	—			
擬似 51.5年間 (全竜巻)	期間内総数	1187	969	182	36	0	0	0	0
	平均値 (km)	1.607	1.149	3.780	2.967	—			
	標準偏差 (km)	2.697	1.466	5.287	3.205	—			
	CV	1.68	1.28	1.40	1.08	—			

## 2.3.4 竜巻風速・被害幅・長さの確率分布

### 2.3.4.1 対数正規分布

後述するように、竜巻ハザードを評価するためには、一つの竜巻が発生した際の、竜巻風速・被害幅・長さの確率分布が必要となる。本章では、これらの確率密度関数を求める。(対数正規分布についての概説を付録1に示す。)

2.3.2と2.3.3の結果から、51.5年間の竜巻パラメータは表2.3.5のようにまとめられる。この表を基に、それぞれの竜巻パラメータの確率密度分布関数  $f(x)$  を求める。

JNES の報告書によれば、竜巻の風速・幅・長さに関する分布形は、対数正規分布への適合度が良いことが示されている。この成果及びガイドに基づき、本報告でも対数正規分布を用いるものとする。

#### 2.3.4.2 竜巻速度の確率分布

表 2.3.5 の F スケール別の発生数から、竜巻風速の確率分布を求める。竜巻風速の確率分布の算定結果を図 2.3.7 に示す。観測結果を適切に表現できる形となっており、風速の大きいエリアにおいても不自然な形となっていない。

#### 2.3.4.3 被害幅の確率分布

竜巻風速と同様に、竜巻被害幅の確率分布を推定する。竜巻被害幅の確率分布の推定結果を図 2.3.8 に示す。推定された分布形は、被害幅の小さな竜巻に加え、ごく希に見られる被害幅の非常に大きい確率も適切に評価しているといえる。

#### 2.3.4.4 被害長さの確率分布

被害長さについても、被害幅と同様の方法で確率分布を推定した。図 2.3.9 によると、被害長さが 10~20 km に達する竜巻が観測されているが、推定された分布形はこれも含めて適切に評価していることが分かる。

#### 2.3.4.5 相関係数

後述するように、竜巻のハザードの計算においては、2 変量あるいは 3 変量の確率分布を対象とするため、竜巻風速・被害幅・被害長さについての相関係数が必要となる。(2 変量の確率分布関数についての概説を付録 2 に示す。)

竜巻風速、被害幅、被害長さの相関を求めるには、本来ならば、これら 3 つが同時に観測されているデータを用いるのが望ましいが、十分なデータ数が確保されないため、1961 年以降の利用可能なデータを全て用いて相関を取ることとする。ただし、幅や長さが 0 m のデータは解析対象外とした。

また、それぞれの変数の確率分布の推定では、データ総数の整合性を確保したが、相関係数の推定ではそのような補正は行わない。これは、相関の高い(と思われる) F2 以上のデータを重視するためである。

相関を求めた際のデータ数及び相関係数を表 2.3.6 に示す。ここに、相関係数は  $\ln(x)$  に対する相関係数である。

本竜巻検討地域では、竜巻風速と竜巻被害幅の間に相関は認められない。計算上は負値となっているが、ここでは無相関 (=0) とする。



表 2.3.5 竜巻検討地域における竜巻パラメータ (51.5年間の推定結果)

	パラメータ	統計量	小計	竜巻スケール			
				F0	F1	F2	F3
日本海 (沿岸±5km)	発生数	期間内総数	1187	969	182	36	0
		平均値(年)	23.05	18.82	3.53	0.70	—
		標準偏差(年)	8.97	8.76	1.72	0.92	—
		CV(年)	0.39	0.47	0.49	1.32	—
擬似 51.5年間 (全竜巻)	被害幅	期間内総数	1187	969	182	36	0
		平均値(m)	121	120	113	190	—
		標準偏差(m)	131	123	102	323	—
		CV	1.08	1.02	0.90	1.70	—
	被害長	期間内総数	1187	969	182	36	0
		平均値(km)	1.607	1.149	3.780	2.967	—
		標準偏差(km)	2.697	1.466	5.287	3.205	—
		CV	1.68	1.28	1.40	1.08	—

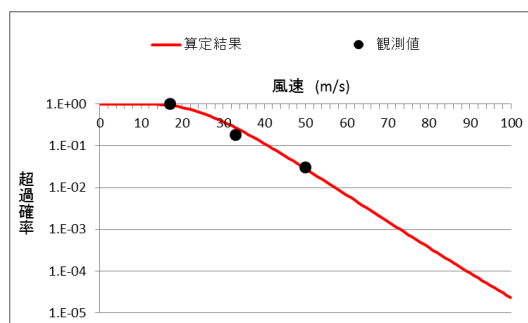
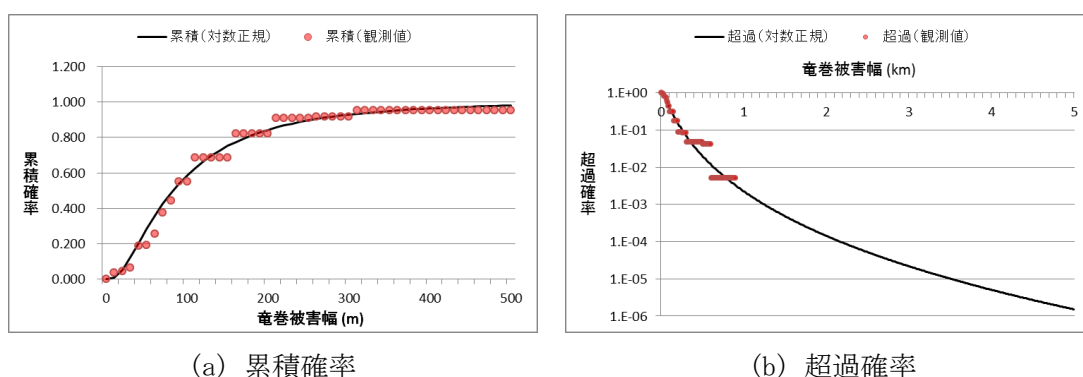


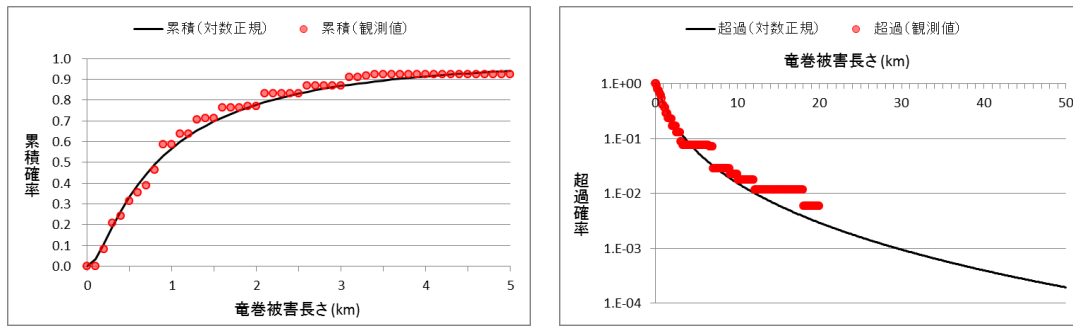
図 2.3.7 竜巻風速の確率分布の推定結果と観測値との比較



(a) 累積確率

(b) 超過確率

図 2.3.8 竜巻被害幅の確率分布の推定結果と観測値との比較



(a) 累積確率 (b) 超過確率

図 2.3.9 竜巻被害長さの確率分布の推定結果と観測値との比較

表 2.3.6 風速, 幅, 長さのデータ数と相関係数

データ数	V(m/s)	Width(m)	Len(m)
V (m/s)	74	55	57
Width (m)	55	59	54
Len (m)	57	54	59
相関_LN	V (m/s)	Width (m)	Len (m)
V (m/s)	1.000	-0.050	0.312
Width (m)	-0.050	1.000	0.462
Len (m)	0.312	0.462	1.000

### 2.3.5 竜巻最大風速のハザード評価結果

#### 2.3.5.1 竜巻ハザードの評価法

竜巻最大風速のハザード曲線は, いずれかの竜巻により被害を受けた場合に, 竜巻風速が  $V_0$  を越える確率として評価する。被害面積の期待値  $E[DA(V_0)]$  の評価方法については, 付録 3 で詳述する。

竜巻の発生頻度が以下のポアソン分布あるいはポリヤ分布で表されると仮定する。

$$\text{ポアソン分布} : P_T(N) = \frac{(vT)^N}{N!} \exp(-vT) \quad (1)$$

$$\text{ポリヤ分布} : P_T(N) = \frac{(vT)^N}{N!} (1 + \beta vT)^{-N-1/\beta} \prod_{k=1}^{N-1} (1 + \beta k) \quad (2)$$

$$\beta = \left( \frac{\sigma^2}{\nu} - 1 \right) \times \frac{1}{\nu} \quad (3)$$

ここに,

$N$  : 竜巻の年発生数

- $\nu$  : 竜巻の年平均発生数
- $T$  : 年数
- $\sigma$  : 竜巻の年発生数の標準偏差

$T$  年以内にいずれかの竜巻に遭遇し、 $V_0$  以上の竜巻風速に遭遇する確率  $P_{\nu 0, T}(D)$  は、次式で表される (Wen and Chu)。

$$\text{ポアソン分布} : P_{V_0, T}(D) = 1 - \exp[-\nu R(V_0)T] \quad (4)$$

$$\text{ポリヤ分布} : P_{V_0, T}(D) = 1 - [1 + \beta \nu R(V_0)T]^{-1/\beta} \quad (5)$$

ここに、

$D$  : 対象とする構造物が風速  $V_0$  以上の竜巻に遭遇する事象

$R(V_0)$  : リスク評価対象構造物が 1 つの竜巻に遭遇し、竜巻風速が  $V_0$  以上となる確率

$$R(V_0) = \frac{E[DA(V_0)]}{A_0} \quad (6)$$

$DA(V_0)$  : 竜巻による構造物の被害面積

$A_0$  : リスクの評価対象とする地域の面積

式(6)は、式(付 3.2)を積分することで評価できる。式(6)を式(4)もしくは式(5)に代入すれば、ハザード曲線を求めることができる。

#### 2.3.5.2 本竜巻検討地域のハザード

本竜巻検討地域を対象に、ポリヤ分布を仮定したハザード算定結果を図 2.3.10 に示す。ここでは構造物直径 450 m 及び検討地域の面積は 33,395 km<sup>2</sup> としている。

表 2.3.7 は、年超過確率に相当する竜巻風速である。年超過確率が  $10^{-5}$  となる風速は約 61 m/s である。

ポアソン分布を仮定した算定結果は、ここに示したポリヤ分布の結果とほとんど変わらない。これは、被害確率  $R(V_0)$  が非常に小さい場合、遭遇確率は平均値  $\nu$  のみに依存し、分布形には無関係になるためである。

$$P_{V_0}(D) \approx \nu R(V_0) \quad (7)$$

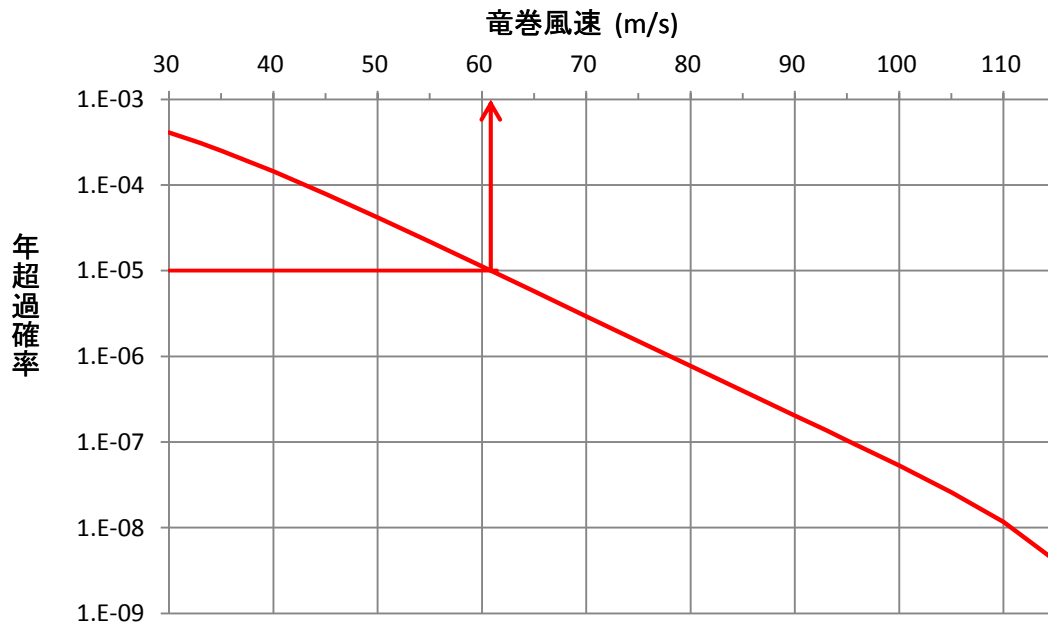


図 2.3.10 竜巻ハザードの算定結果

表 2.3.7 年超過確率に相当する竜巻風速 (m/s) の算定結果

構造物寸法 (m)	年超過確率				
	1. E-4	1. E-5	1. E-6	1. E-7	1. E-8
450	43.0	60.8	78.0	95.3	110.7

## 2.3.6 竜巻最大風速のハザード評価結果（1 km 範囲毎に細分化した評価）

### 2.3.6.1 はじめに

竜巻検討地域は、山口県から北海道にかけての日本海沿岸であり、海岸線から陸側に 5 km、海側に 5 km の範囲内（面積 33,395 km<sup>2</sup>）である。これらの地域を対象として、円形構造物（直径 450 m）に対する竜巻ハザードの評価を行ったが、ここでは 1 km 範囲毎に細分化した場合（以下、「1 km 短冊」という。）の竜巻最大風速のハザード評価を行う。検討ケースを表 2.3.8 に示す。

CASE 2 は 1 km 短冊の評価ケースであり、竜巻移動経路が短冊を横切る長さ（被害長さ）を基にハザードを評価した。ただし、海上竜巻に対する発生・消滅位置の誤差は概ね±30 秒～±1 分程度と大きく、竜巻の発生数・被害長さを特定するという観点において、1 km 毎の分析に耐えられない。また、実際の発生地点ではなく、視認された陸上箇所の緯度・経度情報がデータベースに登録されている竜巻が存在するのも位置特定ができない一因となっている。さらに、海上竜巻の場合は被害幅の情報も得られない。この傾向は、海岸線から遠方に行くほど顕著になる。一方、海上で発生しその後上陸した上陸竜巻は、海側 0-1 km で発生または通過しており、陸上での被害状況等から竜巻特性を得ることが可能である。そこで、海側の評価では、このような上陸竜巻が含まれる 0-1 km の範囲のみを対象に評価することとした。

表 2.3.8 検討ケース一覧

日本海沿岸（33,395km <sup>2</sup> ）	
ケース名	領域
基本ケース	±5km
CASE 2-1	陸側 0-1km
CASE 2-2	陸側 1-2km
CASE 2-3	陸側 2-3km
CASE 2-4	陸側 3-4km
CASE 2-5	陸側 4-5km
CASE 2-6	海側 0-1km

### 2.3.6.2 1 km 短冊での発生数等の解析

気象庁「竜巻等の突風データベース」においてデータベース化されている以下の項目を本検討の解析に用いる。

1. 発生場所： 緯度・経度，誤差範囲
2. 消滅場所： 緯度・経度，誤差範囲
3. 藤田スケール
4. 被害幅(m)
5. 被害長さ(km)
6. 発生地点区別： 陸上 | 水上（上陸せず） | 水上（その後上陸）

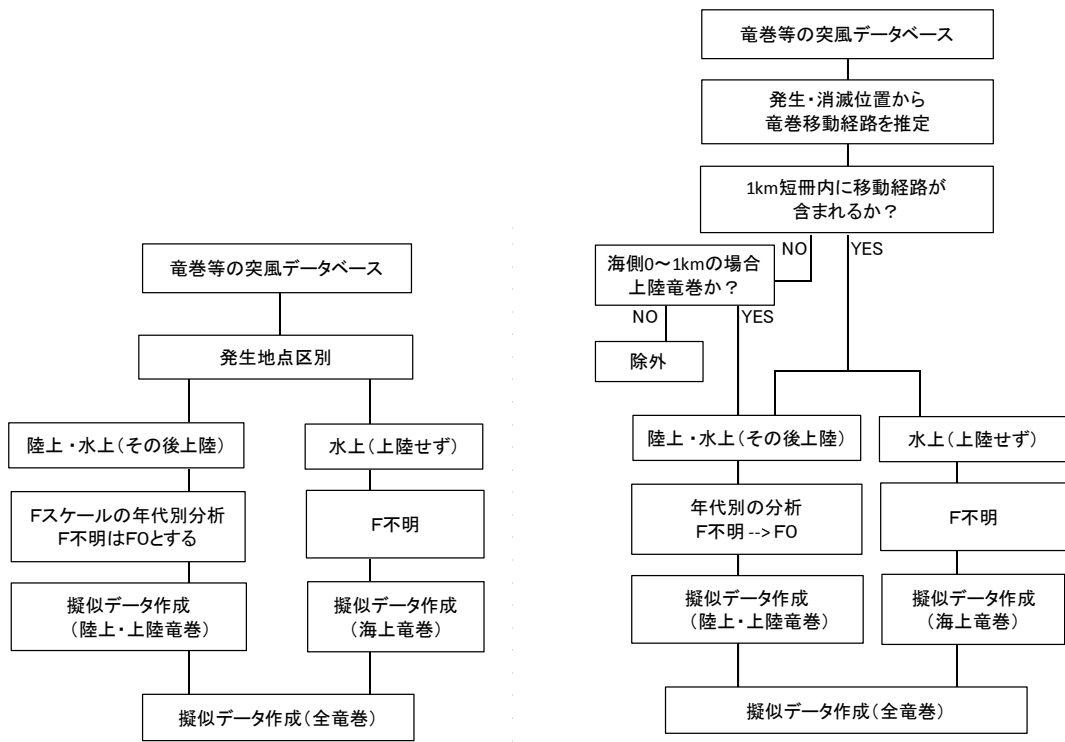
沿岸域を1 km 毎の短冊領域で評価する場合，発生・消滅場所の緯度・経度から竜巻の移動経路を求め，その移動経路が対象とする短冊内に含まれるか，もしくは横切るかを判断し，発生数（通過数を含む）及び短冊内の被害長さを求める。

図 2.3.11 に，基本ケース（±5 km）及び短冊ケースでの発生数の解析フローを示す。発生地点区別で“水上（その後上陸）”とされている竜巻の場合，その発生場所の緯度・経度は陸上を指す場合が多く，上陸地点もしくは被害の発生地点（陸上部）がデータベースに記されていると考えられる。図 2.3.12 に，1975 年 5 月 31 日に島根県簸川郡大社町で発生した（F2）竜巻の発生位置と消滅位置を示す。この竜巻は，気象庁「竜巻等の突風データベース」の発生地点区別では，“水上発生（その後上陸）”とされているが，データベース上の発生位置は内陸部となっている。

そこで，1 km 短冊内に移動経路が含まれない竜巻であっても，発生地点区別から上陸竜巻か否かを判断することにより，緯度・経度情報だけでは捕捉できない上陸竜巻の発生・通過数を考慮した（図 2.3.11 (b)）。

図 2.3.11 (b)のフローにより上陸竜巻の発生数や通過数は考慮できるが，本当の発生位置を特定することは難しく，海側での被害長さを1 km 毎に評価することができない。被害長さが得られる上陸竜巻があつたとしてもその数は少なく，長さの推定結果の信頼度はかなり低下する。

被害長さは，評価する短冊の幅，平均的な竜巻長さ，及び移動方向などの幾何学的要因により決まると考えられる。従って，海側 0-1 km の被害長さは，竜巻特性が最も類似している隣接する陸側 0-1 km 短冊での値で代用するのが合理的であると考え，この評価も検討に加えることとする。また，検討に必要な竜巻風速，被害長さ，被害幅の相関係数については，基本ケースの領域“±5 km”の値を全てのケースで用いる。以上のことを踏まえた検討ケースを表 2.3.9 に示す。



(a) 基本ケース (±5 km) (b) 短冊ケース

図 2.3.11 竜巻発生数の解析フロー

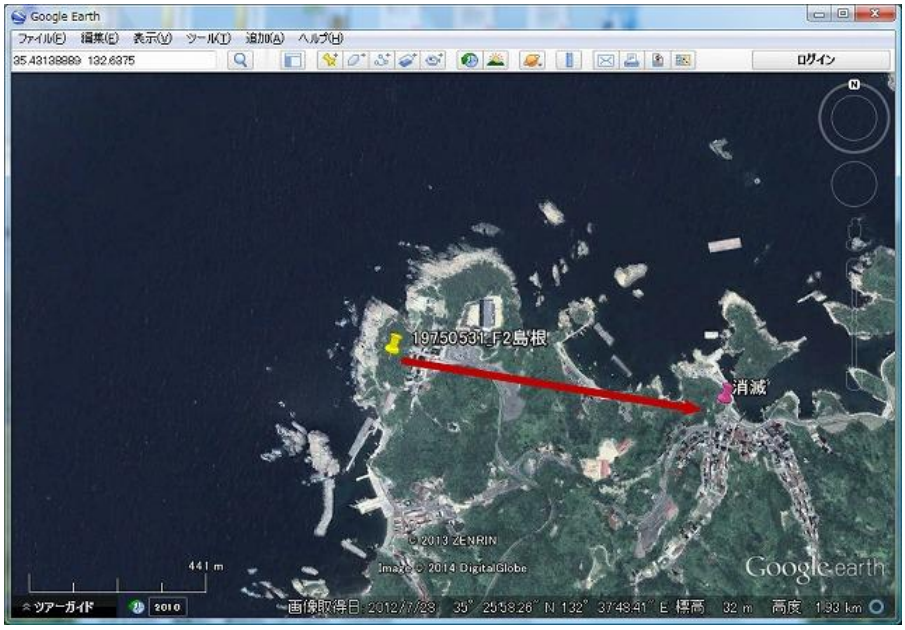


図 2.3.12 上陸竜巻のデータベース上の発生・消滅位置の一例(1975/05/31の竜巻)

表 2.3.9 検討ケース一覧

日本海沿岸 (33,395km <sup>2</sup> )		竜巻長さ	竜巻幅	相関係数
ケース名	領域			
基本ケース	±5km	全長	全幅	±5km
CASE 2-1	陸側 0-1km	短冊	全幅	±5km
CASE 2-2	陸側 1-2km	短冊	全幅	±5km
CASE 2-3	陸側 2-3km	短冊	全幅	±5km
CASE 2-4	陸側 3-4km	短冊	全幅	±5km
CASE 2-5	陸側 4-5km	短冊	全幅	±5km
CASE 2-6A	海側 0-1km	短冊	全幅	±5km
CASE 2-6B	海側 0-1km	陸側 0-1km	全幅	±5km

### 2.3.6.3 竜巻パラメータの推定結果

表 2.3.10 に、1 km 短冊での発生数の推定結果を示す。ここでは、1 km 短冊の通過数も竜巻の発生数に加えて推定している。短冊内での擬似データの作り方は、基本ケース（±5 km 幅）と同じ方法を使用した。

表 2.3.11 に、1 km 短冊での竜巻パラメータ（発生数、被害幅、被害長さ）の推定結果を示し、図 2.3.13 に、竜巻検討地域の 1 km 短冊毎の被害長さの分布形と、全国の海岸線から陸側 5 km、海側 5 km の竜巻データを用いた 1 km 短冊毎の被害長さの分布形を併せて示す。図 2.3.13 の(a)と(b)を比較すると、データ数の少ない(a)の陸側 4-5 km の結果を除き同様な形状を示している。

一方、海側 0-1 km の分布形は、全国の竜巻データを用いた場合でも、被害長さが極端に短い分布形となっており、その被害長さの推定精度に疑問が残ることから、海側 0-1 km のケースでは、竜巻特性が最も類似していると考えられる陸側 0-1 km での値を代用した評価も行った。



表 2.3.10 短冊領域での発生数+通過数の分析結果

(a) 陸側 0-1km

日本海 (陸0-1km)	発生数の統計	小計	竜巻スケール				不明		総数 (含む不明)
			F0	F1	F2	F3	(陸上)	(海上)	
1961～ 2012/6 (51.5年間)	期間内総数	47	15	23	9	0	12	0	59
	平均値(年)	0.91	0.29	0.45	0.17	—	0.23	—	1.15
	標準偏差(年)	1.51	1.13	0.61	0.43	—	0.71	—	1.90
	CV(年)	1.65	3.89	1.37	2.47	—	3.03	—	1.66
1991～ 2012/6 (21.5年間)	期間内総数	28	15	12	1	0	11	0	39
	平均値(年)	1.30	0.70	0.56	0.05	—	0.51	—	1.81
	標準偏差(年)	2.03	1.69	0.60	0.22	—	1.02	—	2.63
	CV(年)	1.56	2.43	1.08	4.64	—	2.00	—	1.45
2007～ 2012/6 (5.5年間)	期間内総数	17	14	3	0	0	6	0	23
	平均値(年)	3.09	2.55	0.55	—	—	1.09	—	4.18
	標準偏差(年)	3.63	2.81	0.88	—	—	1.77	—	4.70
	CV(年)	1.17	1.11	1.62	—	—	1.62	—	1.12
擬似 51.5年間 (全竜巻)	期間内総数	227	189	29	9	0	0	0	0
	平均値(年)	4.37	3.64	0.56	0.17	—	—	—	—
	標準偏差(年)	3.40	3.32	0.60	0.43	—	—	—	—
	CV(年)	0.78	0.91	1.08	2.47	—	—	—	—

(b) 陸側 1-2km

日本海 (陸 1-2 km)	発生数の統計	小計	竜巻スケール				不明		総数 (含む不明)
			F0	F1	F2	F3	(陸上)	(海上)	
1961～ 2012/6 (51.5年間)	期間内総数	29	9	17	3	0	1	0	30
	平均値(年)	0.56	0.17	0.33	0.06	—	0.02	—	0.58
	標準偏差(年)	1.13	0.76	0.59	0.24	—	0.14	—	1.13
	CV(年)	2.01	4.37	1.78	4.06	—	7.18	—	1.94
1991～ 2012/6 (21.5年間)	期間内総数	18	9	8	1	0	0	0	18
	平均値(年)	0.84	0.42	0.37	0.05	—	—	—	0.84
	標準偏差(年)	1.58	1.15	0.59	0.22	—	—	—	1.58
	CV(年)	1.89	2.76	1.58	4.64	—	—	—	1.89
2007～ 2012/6 (5.5年間)	期間内総数	12	8	4	0	0	0	0	12
	平均値(年)	2.18	1.45	0.73	—	—	—	—	2.18
	標準偏差(年)	2.84	2.08	0.86	—	—	—	—	2.84
	CV(年)	1.30	1.43	1.19	—	—	—	—	1.30
擬似 51.5年間 (全竜巻)	期間内総数	98	75	20	3	0	0	0	0
	平均値(年)	1.88	1.45	0.37	0.06	—	—	—	—
	標準偏差(年)	2.17	2.08	0.59	0.24	—	—	—	—
	CV(年)	1.15	1.43	1.58	4.06	—	—	—	—

## (c) 陸側 2-3km

日本海 (陸 2-3 km)	発生数 の統計	小計	竜巻スケール				不明		総数 (含む不明)
			F0	F1	F2	F3	(陸上)	(海上)	
1961～ 2012/6 (51.5年間)	期間内総数	25	10	13	2	0	0	0	25
	平均値(年)	0.49	0.19	0.25	0.04	—	—	—	0.49
	標準偏差(年)	1.00	0.66	0.56	0.20	—	—	—	1.00
	CV(年)	2.07	3.41	2.21	5.02	—	—	—	2.07
1991～ 2012/6 (21.5年間)	期間内総数	16	10	6	0	0	0	0	16
	平均値(年)	0.74	0.47	0.28	—	—	—	—	0.74
	標準偏差(年)	1.37	0.97	0.56	—	—	—	—	1.37
	CV(年)	1.84	2.09	2.00	—	—	—	—	1.84
2007～ 2012/6 (5.5年間)	期間内総数	12	9	3	0	0	0	0	12
	平均値(年)	2.18	1.64	0.55	—	—	—	—	2.18
	標準偏差(年)	2.22	1.46	0.88	—	—	—	—	2.22
	CV(年)	1.02	0.89	1.62	—	—	—	—	1.02
擬似 51.5年間 (全竜巻)	期間内総数	102	85	15	2	0	0	0	0
	平均値(年)	1.95	1.64	0.28	0.04	—	—	—	—
	標準偏差(年)	1.58	1.46	0.56	0.20	—	—	—	—
	CV(年)	0.81	0.89	2.00	5.02	—	—	—	—

## (d) 陸側 3-4km

日本海 (陸 3-4 km)	発生数 の統計	小計	竜巻スケール				不明		総数 (含む不明)
			F0	F1	F2	F3	(陸上)	(海上)	
1961～ 2012/6 (51.5年間)	期間内総数	20	4	15	1	0	0	0	20
	平均値(年)	0.39	0.08	0.29	0.02	—	—	—	0.39
	標準偏差(年)	0.66	0.27	0.57	0.14	—	—	—	0.66
	CV(年)	1.71	3.48	1.97	7.18	—	—	—	1.71
1991～ 2012/6 (21.5年間)	期間内総数	11	4	7	0	0	0	0	11
	平均値(年)	0.51	0.19	0.33	—	—	—	—	0.51
	標準偏差(年)	0.75	0.40	0.57	—	—	—	—	0.75
	CV(年)	1.46	2.15	1.77	—	—	—	—	1.46
2007～ 2012/6 (5.5年間)	期間内総数	7	4	3	0	0	0	0	7
	平均値(年)	1.27	0.73	0.55	—	—	—	—	1.27
	標準偏差(年)	1.04	0.55	0.88	—	—	—	—	1.04
	CV(年)	0.82	0.75	1.62	—	—	—	—	0.82
擬似 51.5年間 (全竜巻)	期間内総数	56	38	17	1	0	0	0	0
	平均値(年)	1.07	0.73	0.33	0.02	—	—	—	—
	標準偏差(年)	0.79	0.55	0.57	0.14	—	—	—	—
	CV(年)	0.74	0.75	1.77	7.18	—	—	—	—

## (e) 陸側 4-5km

日本海 (陸 4-5 km)	発生数 の統計	小計	竜巻スケール				不明		総数 (含む不明)
			F0	F1	F2	F3	(陸上)	(海上)	
1961～ 2012/6 (51.5年間)	期間内総数	15	2	12	1	0	1	0	16
	平均値(年)	0.29	0.04	0.23	0.02	—	0.02	—	0.31
	標準偏差(年)	0.64	0.20	0.62	0.14	—	0.14	—	0.65
	CV(年)	2.20	5.02	2.65	7.18	—	7.18	—	2.08
1991～ 2012/6 (21.5年間)	期間内総数	8	2	6	0	0	1	0	9
	平均値(年)	0.37	0.09	0.28	—	—	0.05	—	0.42
	標準偏差(年)	0.74	0.30	0.71	—	—	0.22	—	0.74
	CV(年)	1.98	3.20	2.55	—	—	4.64	—	1.78
2007～ 2012/6 (5.5年間)	期間内総数	6	2	4	0	0	1	0	7
	平均値(年)	1.09	0.36	0.73	—	—	0.18	—	1.27
	標準偏差(年)	1.16	0.55	1.28	—	—	0.43	—	1.04
	CV(年)	1.06	1.50	1.76	—	—	2.37	—	0.82
擬似 51.5年間 (全竜巻)	期間内総数	45	29	15	1	0	0	0	0
	平均値(年)	0.84	0.55	0.28	0.02	—	—	—	—
	標準偏差(年)	0.99	0.69	0.71	0.14	—	—	—	—
	CV(年)	1.18	1.27	2.55	7.18	—	—	—	—

## (f) 海側 0-1km

日本海 (海 0-1 km)	発生数 の統計	小計	竜巻スケール				不明		総数 (含む不明)
			F0	F1	F2	F3	(陸上)	(海上)	
1961～ 2012/6 (51.5年間)	期間内総数	25	8	12	5	0	9	38	72
	平均値(年)	0.49	0.16	0.23	0.10	—	0.17	0.74	1.40
	標準偏差(年)	0.90	0.75	0.43	0.30	—	0.62	2.52	3.35
	CV(年)	1.86	4.86	1.83	3.08	—	3.55	3.41	2.40
1991～ 2012/6 (21.5年間)	期間内総数	15	8	6	1	0	8	38	61
	平均値(年)	0.70	0.37	0.28	0.05	—	0.37	1.77	2.84
	標準偏差(年)	1.23	1.15	0.46	0.22	—	0.91	3.71	4.86
	CV(年)	1.76	3.09	1.65	4.64	—	2.45	2.10	1.71
2007～ 2012/6 (5.5年間)	期間内総数	9	8	1	0	0	5	34	48
	平均値(年)	1.64	1.45	0.18	—	—	0.91	6.18	8.73
	標準偏差(年)	2.19	2.08	0.43	—	—	1.69	5.79	7.50
	CV(年)	1.34	1.43	2.37	—	—	1.86	0.94	0.86
擬似 51.5年間 (全竜巻)	期間内総数	463	397	49	17	0	0	0	0
	平均値(年)	8.89	7.67	0.91	0.32	—	—	—	—
	標準偏差(年)	4.93	4.83	0.83	0.54	—	—	—	—
	CV(年)	0.55	0.63	0.92	1.71	—	—	—	—

表 2.3.11 短冊領域での竜巻パラメータの分析結果

(a) 陸側 0-1km (CASE 2-1)

	パラメータ	統計量	小計	竜巻スケール			
				F0	F1	F2	F3
日本海 (陸 0-1km)	発生数	期間内総数	227	189	29	9	0
		平均値(年)	4.41	3.67	0.56	0.17	—
		標準偏差(年)	3.40	3.32	0.60	0.43	—
		CV(年)	0.77	0.91	1.07	2.47	—
擬似 51.5年間 (全竜巻)	被害幅	期間内総数	227	189	29	9	0
		平均値(m)	128	123	124	241	—
		標準偏差(m)	154	141	121	375	—
		CV	1.21	1.15	0.97	1.55	—
被害長	期間内総数	227	189	29	9	0	
	平均値(km)	0.632	0.540	1.088	1.108	—	
	標準偏差(km)	0.448	0.279	0.855	0.288	—	
	CV	0.71	0.52	0.79	0.26	—	

(b) 陸側 1-2km (CASE 2-2)

	パラメータ	統計量	小計	竜巻スケール			
				F0	F1	F2	F3
日本海 (陸 1-2 km)	発生数	期間内総数	98	75	20	3	0
		平均値(年)	1.90	1.46	0.39	0.06	—
		標準偏差(年)	2.17	2.08	0.59	0.24	—
		CV(年)	1.14	1.43	1.51	4.06	—
擬似 51.5年間 (全竜巻)	被害幅	期間内総数	98	75	20	3	0
		平均値(m)	197	202	155	350	—
		標準偏差(m)	173	164	133	477	—
		CV	0.88	0.81	0.86	1.36	—
被害長	期間内総数	98	75	20	3	0	
	平均値(km)	0.766	0.685	1.112	0.482	—	
	標準偏差(km)	0.434	0.348	0.548	0.500	—	
	CV	0.57	0.51	0.49	1.04	—	

(c) 陸側 2-3km (CASE 2-3)

	パラメータ	統計量	小計	竜巻スケール			
				F0	F1	F2	F3
日本海 (陸 2-3 km)	発生数	期間内総数	102	85	15	2	0
		平均値(年)	1.98	1.65	0.29	0.04	—
		標準偏差(年)	1.58	1.46	0.56	0.20	—
		CV(年)	0.80	0.89	1.91	5.02	—
擬似 51.5年間 (全竜巻)	被害幅	期間内総数	102	85	15	2	0
		平均値(m)	174	162	206	475	—
		標準偏差(m)	180	167	162	601	—
		CV	1.04	1.04	0.79	1.27	—
被害長	期間内総数	102	85	15	2	0	
	平均値(km)	0.684	0.610	0.988	1.566	—	
	標準偏差(km)	0.366	0.298	0.424	0.433	—	
	CV	0.54	0.49	0.43	0.28	—	

(d) 陸側 3-4km (CASE 2-4)

	パラメータ	統計量	小計	竜巻スケール			
				F0	F1	F2	F3
日本海 (陸 3-4 km)	発生数	期間内総数	56	38	17	1	0
		平均値(年)	1.09	0.74	0.33	0.02	—
		標準偏差(年)	0.79	0.55	0.57	0.14	—
		CV(年)	0.73	0.74	1.74	7.18	—
擬似 51.5年間 (全竜巻)	被害幅	期間内総数	56	38	17	1	0
		平均値(m)	213	224	147	900	—
		標準偏差(m)	216	228	78	—	—
		CV	1.01	1.02	0.53	—	—
被害長	期間内総数	56	38	17	1	0	
	平均値(km)	0.861	0.809	0.961	1.129	—	
	標準偏差(km)	0.310	0.252	0.401	—	—	
	CV	0.36	0.31	0.42	—	—	

(e) 陸側 4-5km (CASE 2-5)

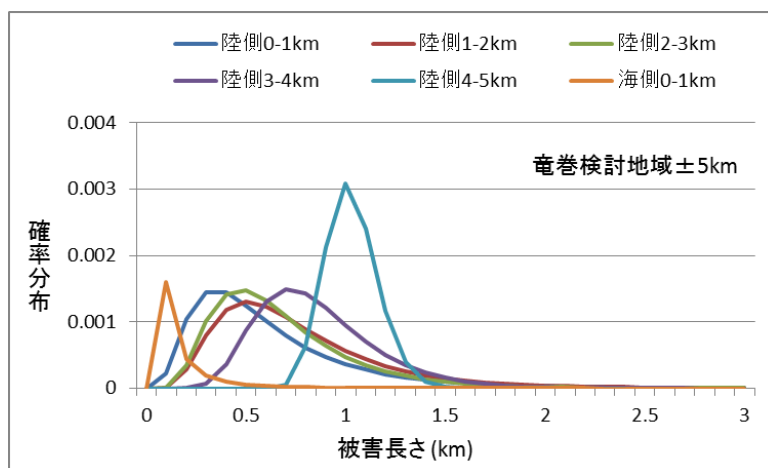
	パラメータ	統計量	小計	竜巻スケール			
				F0	F1	F2	F3
日本海 (陸 4-5 km)	発生数	期間内総数	45	29	15	1	0
		平均値(年)	0.87	0.56	0.29	0.02	—
		標準偏差(年)	0.99	0.69	0.71	0.14	—
		CV(年)	1.14	1.23	2.44	7.18	—
擬似 51.5年間 (全竜巻)	被害幅	期間内総数	45	29	15	1	0
		平均値(m)	299	359	145	900	—
		標準偏差(m)	247	254	63	—	—
		CV	0.83	0.71	0.44	—	—
被害長	期間内総数	45	29	15	1	0	
	平均値(km)	1.029	1.003	1.095	0.807	—	
	標準偏差(km)	0.132	0.001	0.212	—	—	
	CV	0.13	0.00	0.19	—	—	

(f) 海側 0-1km (CASE 2-6A)

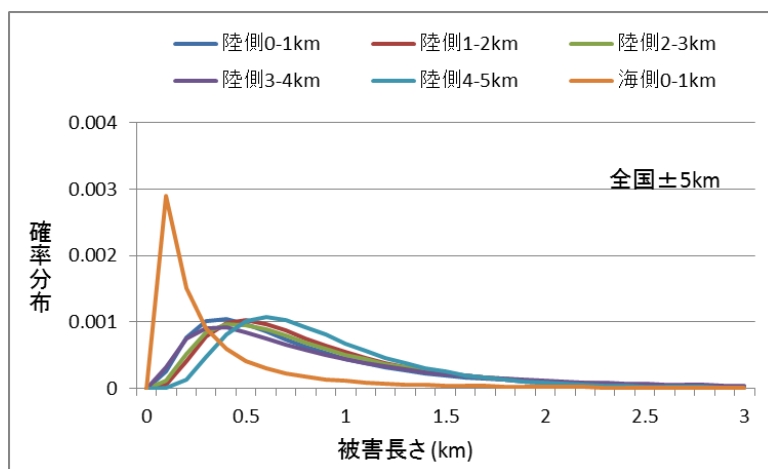
	パラメータ	統計量	小計	竜巻スケール			
				F0	F1	F2	F3
日本海 (海 0-1 km)	発生数	期間内総数	463	397	49	17	0
		平均値(年)	8.99	7.71	0.95	0.33	—
		標準偏差(年)	4.93	4.83	0.83	0.54	—
		CV(年)	0.55	0.63	0.87	1.63	—
擬似 51.5年間 (全竜巻)	被害幅	期間内総数	463	397	49	17	0
		平均値(m)	100	83	145	368	—
		標準偏差(m)	120	62	148	406	—
		CV	1.20	0.74	1.02	1.10	—
被害長	期間内総数	463	397	49	17	0	
	平均値(km)	0.065	0.010	0.517	—	—	
	標準偏差(km)	0.183	0.009	0.273	—	—	
	CV	2.80	0.89	0.53	—	—	

(g) 海側 0-1km (陸側 0-1km 被害長さ考慮) (CASE 2-6B)

パラメータ	統計量	小計	竜巻スケール				
			F0	F1	F2	F3	
日本海 (海 0-1 km) (陸0-1km考慮)	発生数	期間内総数	463	397	49	17	0
		平均値(年)	8.99	7.71	0.95	0.33	—
		標準偏差(年)	4.93	4.83	0.83	0.54	—
		CV(年)	0.55	0.63	0.87	1.63	—
擬似 51.5年間 (全竜巻)	被害幅	期間内総数	463	397	49	17	0
		平均値(m)	100	83	145	368	—
		標準偏差(m)	120	62	148	406	—
		CV	1.20	0.74	1.02	1.10	—
被害長さ	期間内総数	463	397	49	17	0	
	平均値(km)	0.632	0.540	1.088	1.108	—	
	標準偏差(km)	0.448	0.279	0.855	0.288	—	
	CV	0.71	0.52	0.79	0.26	—	



(a) 竜巻検討地域



(b) 全国

図 2.3.13 被害長さの分布形

#### 2.3.6.4 竜巻ハザードの算定結果

ハザードの計算条件を表 2.3.12 に示す。また、ハザードの算定結果を図 2.3.14 及び表 2.3.13 に示す。1 km 短冊の面積は、10 km 幅の面積を短冊幅の比率で等分している。

算定結果によると、1 km 短冊の結果は基本ケースと同等あるいはそれを下回る値となっており、年超過確率が  $10^{-5}$  となる風速については、陸側 0-1 km の被害長さを考慮した海側 0-1 km のケース (CASE 2-6B) が最も大きく、61.4 m/s である。

表 2.3.12 竜巻ハザードの計算条件

検討ケース	日本海側±5km	統計量	発生数	風速(V)	幅(W)	被害長さ(L)	相関係数 <sup>※1</sup>		
			(個)	m/s	m	m	V~W	V~L	W~L
基本ケース	±5km	平均値	23.05	28.6	121	1607	(0.05)	0.31	0.46
		標準偏差	8.97	9.4	131	2697			
CASE 2-1	陸側 0-1km	平均値	4.41	28.5	128	632	同上 (検討地域±5kmの値を代用)		
		標準偏差	3.40	9.7	154	448			
CASE 2-2	陸側 1-2km	平均値	1.90	29.4	197	766			
		標準偏差	2.17	8.6	173	434			
CASE 2-3	陸側 2-3km	平均値	1.98	28.1	174	684			
		標準偏差	1.58	8.8	180	366			
CASE 2-4	陸側 3-4km	平均値	1.09	30.6	213	861			
		標準偏差	0.79	8.6	216	310			
CASE 2-5	陸側 4-5km	平均値	0.87	31.3	299	1029			
		標準偏差	0.99	9.0	247	132			
CASE 2-6A	海側 0-1km	平均値	8.99	28.0	100	65			
		標準偏差	4.93	9.3	120	183			
CASE 2-6B	海側 0-1km (陸側0-1km被害長さ考慮)	平均値	8.99	28.0	100	632			
		標準偏差	4.93	9.3	120	448			

※1：相関係数の赤字は負の相関を表す。負の相関の場合は、無相関 (=0) とする。

1km 短冊の相関係数は、±5 km 領域での値を代用。

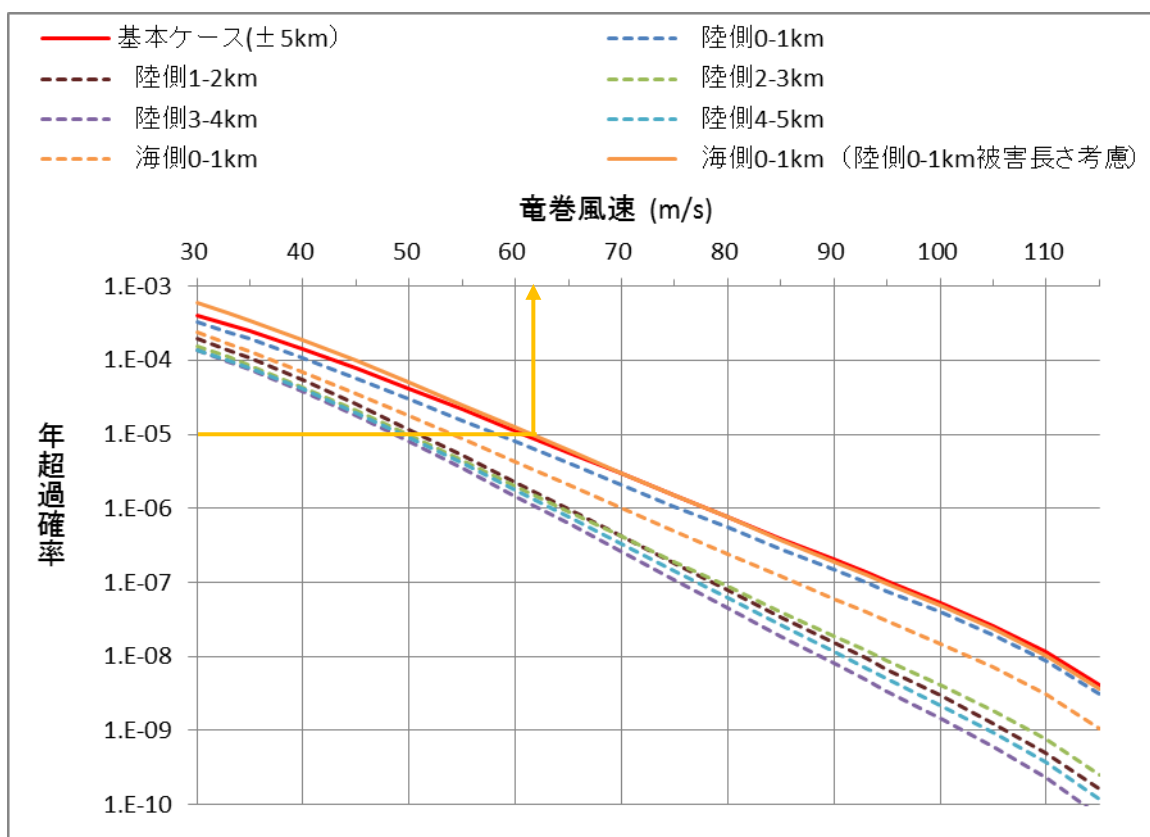


図 2.3.14 短冊領域におけるハザードの算定結果

表 2.3.13 年超過確率に対応した竜巻風速

検討ケース	日本海側	超過確率に対応する風速 (m/s)				
		1.E-04	1.E-05	1.E-06	1.E-07	1.E-08
基本ケース	±5km	43.0	60.8	78.0	95.3	110.7
CASE 2-1	陸側 0-1km	40.6	58.3	75.5	93.0	109.2
CASE 2-2	陸側 1-2km	35.6	51.0	64.9	78.6	92.6
CASE 2-3	陸側 2-3km	33.7	49.8	64.4	79.1	94.2
CASE 2-4	陸側 3-4km	32.7	48.7	62.2	75.5	88.8
CASE 2-5	陸側 4-5km	33.0	49.3	63.4	77.1	90.9
CASE 2-6A	海側 0-1km	37.2	54.0	70.0	86.3	102.7
CASE 2-6B	海側 0-1km (陸側0-1km被害長さ考慮)	44.8	61.4	78.0	94.8	110.2



### 2.3.7 竜巻最大風速のハザード曲線による最大風速 ( $V_{B2}$ ) の設定

F スケール不明の海上竜巻の発生数は、陸上竜巻の F スケール別発生比率で按分して取り扱っているが、竜巻検討地域を「北海道から山陰地方にかけての日本海沿岸」にすることに伴う竜巻ハザード曲線算出のためのデータの不確実性（日本海側は F スケール不明の海上竜巻が多い）を踏まえ、参照する年超過確率を  $10^{-5}$  から一桁下げた年超過確率  $10^{-6}$  における風速とすると、表 2.3.7 及び表 2.3.13 のとおり、陸側及び海側 5km 全域での評価、1km 範囲ごとに細分化した評価ともに 78m/s となる。以上より、竜巻最大風速のハザード曲線による最大風速  $V_{B2}$  は 78m/s とする。

## 付録1 対数正規分布について

平均値  $\mu$ ，標準偏差  $\sigma$  の正規分布は次式で表される。

$$p(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{(x-\mu)^2}{\sigma^2}\right)\right] \quad (\text{付 1.1})$$

ここで、確率変数  $X$  の自然対数を取った変量が、正規分布で表されるとき、 $X$  は対数正規分布に従うと言う。

$$p(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_{\ln}^2}} \frac{1}{x} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{(\ln(x) - \mu_{\ln})^2}{\sigma_{\ln}^2}\right)\right] \quad (\text{付 1.2})$$

上式中の  $\mu_{\ln}$ 、 $\sigma_{\ln}$  は  $\ln(x)$  の平均値と標準偏差であり、変数  $x$  の平均値  $\mu$  や標準偏差  $\sigma$  とは以下の関係にある。

$$\sigma_{\ln}^2 = \ln(CV^2 + 1) \quad (\text{付 1.3})$$

$$\mu_{\ln} = \ln(\mu) - \frac{\sigma_{\ln}^2}{2} \quad (\text{付 1.4})$$

ここに、 $CV$  は変動係数 ( $= \sigma / \mu$ ) である。

即ち、対数正規分布とは、変数  $x$  を対数変換したものが正規分布で表される場合に使用され、大きな値が希に出現するような現象を表す場合に適合度が良くなる。

付録2 2変量の確率分布関数について

確率変数  $X, Y$  があり、それぞれの確率分布が  $f(x), f(y)$  で表されるとする。また、 $X, Y$  の同時確率分布を  $f(x, y)$  とする。例えば  $x$  を竜巻風速、 $y$  を竜巻幅とすると、同時確率分布  $f(x, y)$  とは、風速 50 m/s、幅 100 m の竜巻が発生する確率などを表す。

風速と竜巻幅の間に相関が無い場合は、同時確率分布はそれぞれの分布形の積で表すことができる。

$$f(x, y) = f(x) \times f(y) \quad (\text{付 2.1})$$

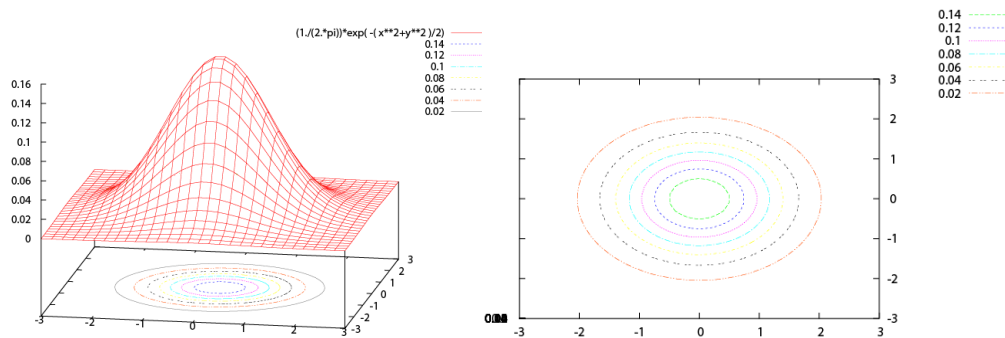
一方、両者の間に相関がある場合、例えば、風速が大きいほど (F スケールが大きいほど) 竜巻の被害幅も大きくなるような場合には、相関係数を考慮する必要がある。この相関関係の有無により、同時確率分布は付図1のように変化する。なお、同時確率分布を  $x$  あるいは  $y$  について積分した結果は、以下のようになる。

$$\int f(x, y) dx = f_1(y)$$

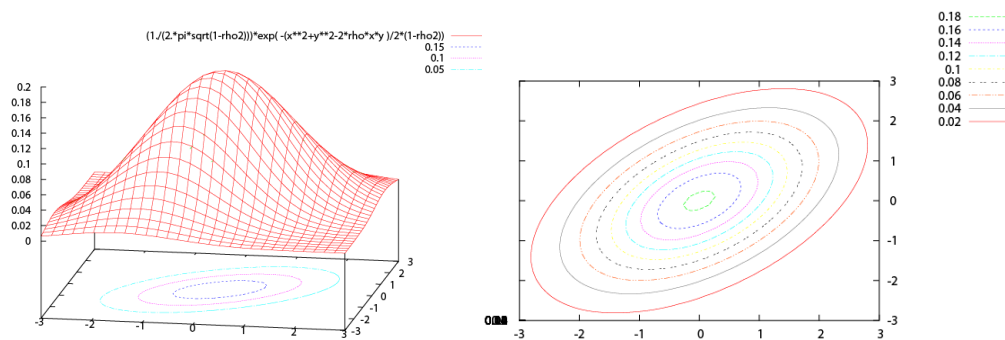
$$\int f(x, y) dy = f_2(x)$$

$$\iint f(x, y) dx dy = 1 \quad (\text{付 2.2})$$

ここに、 $f_1(y), f_2(x)$  は  $x, y$  の1変量確率分布である。



(a) 2変量の正規分布 (無相関の場合)



(b) 2変量の正規分布 (相関がある場合)

付図1 2変量確率分布に関する説明図

付録3 被害面積の期待値  $E[DA(V_0)]$  の評価方法について

(1) 竜巻風速  $V_0$  以上となる面積の期待値

1 個の竜巻の風速が  $V_0$  以上となる面積  $DA(V_0)$  は以下のように表される。

$$DA(V_0) = WL + HL + WG + AB \quad ; Vi \geq V_0 \quad (\text{付 3.1})$$

$$DA(V_0) = 0 \quad ; Vi < V_0$$

ここに、 $W$  は竜巻の被害幅、 $L$  は被害長さ、 $A$ 、 $B$  は矩形構造物の寸法、 $H$  と  $G$  は竜巻の被害幅や長さ方向への構造物の投影長さである。

上記の関係を、竜巻風速  $V$  ・ 幅  $w$  ・ 長さ  $l$  ・ 竜巻移動方向  $\alpha$  の確率分布を用いて表すと以下のようなになる。

$$E[DA(V_0)] = \int_0^\infty \int_0^\infty \int_0^\infty W(V_0) l f(V, w, l) dV dw dl$$

$$+ \int_0^{2\pi} \int_0^\infty \int_0^\infty H(\alpha) l f(V, l, \alpha) dV dl d\alpha + \int_0^{2\pi} \int_0^\infty \int_0^\infty W(V_0) G(\alpha) f(V, w, \alpha) dV dw d\alpha \quad (\text{付 3.2})$$

$$+ AB \int_{V_0}^\infty f(V) dV$$

$$W(V_0) = \left( \frac{V_{\min}}{V_0} \right)^{1/1.6} w \quad (\text{付 3.3})$$

$$H(\alpha) = B |\sin \alpha| + A |\cos \alpha| \quad (\text{付 3.4})$$

$$G(\alpha) = A |\sin \alpha| + B |\cos \alpha|$$

ここに、 $E[\cdot]$  は期待値を表し、 $V_{\min}$  は被害が発生する最小風速、 $H(\alpha)$  と  $G(\alpha)$  は竜巻の幅・長さ方向への構造物の投影長さである。また、3 変量の対数正規分布は以下で表される。

$$f(x, y, z) = \frac{1}{(2\pi)^{3/2} \left| \begin{array}{ccc} \sigma_x^2 & \sigma_x \sigma_y \rho_{xy} & \sigma_x \sigma_z \rho_{xz} \\ \sigma_x \sigma_y \rho_{xy} & \sigma_y^2 & \sigma_y \sigma_z \rho_{yz} \\ \sigma_x \sigma_z \rho_{xz} & \sigma_y \sigma_z \rho_{yz} & \sigma_z^2 \end{array} \right|^{1/2}} \times \frac{1}{xyz}$$

$$\times \exp \left[ -\frac{1}{2} \begin{pmatrix} \ln(x) - \mu_x & \ln(y) - \mu_y & \ln(z) - \mu_z \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \sigma_x^2 & \sigma_x \sigma_y \rho_{xy} & \sigma_x \sigma_z \rho_{xz} \\ \sigma_x \sigma_y \rho_{xy} & \sigma_y^2 & \sigma_y \sigma_z \rho_{yz} \\ \sigma_x \sigma_z \rho_{xz} & \sigma_y \sigma_z \rho_{yz} & \sigma_z^2 \end{pmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} \ln(x) - \mu_x \\ \ln(y) - \mu_y \\ \ln(z) - \mu_z \end{pmatrix} \right] \quad (\text{付 3.5})$$

ここに、 $\mu$ 、 $\sigma$ 、 $\rho$  は  $\ln(x)$ 、 $\ln(y)$ 、 $\ln(z)$  の平均値、標準偏差及び相関係数である。

式(付 3. 2)の右辺第 1 項は、竜巻長さ・幅の積、即ち被害面積を表しており、いわゆるポイント構造物に対する被害に対応する。第 2 項と第 3 項は、竜巻長さ・幅と構造物寸法の積、即ち面構造物あるいは線状構造物の被害面積を表す。竜巻の幅は長さに比べて短いため、第 3 項の寄与は第 2 項に比べて 1 オーダー小さい。第 4 項は建物面積 AB に依存する項であり、一般には第 3 項よりも小さい。従って、式(付 3. 2)の右辺第 1 項と第 2 項の寄与が支配的となる (NUREG の方法では、この 2 つの項のみを考慮している)。

## (2) 竜巻移動方向

ガイドでは、竜巻の移動方向に配慮するよう求めている。ここでは、竜巻の移動特性を考慮した場合について考察する。

竜巻の移動方向を  $\alpha$ 、移動方向の確率分布を  $p(\alpha)$ 、建物寸法を A、B とすると、被害面積の期待値に関する項は以下で与えられる。

$$\int_0^{2\pi} H(\alpha) p(\alpha) d\alpha = \int_0^{2\pi} (B|\sin(\alpha)| + A|\cos(\alpha)|) p(\alpha) d\alpha \quad (\text{付 3. 6})$$

竜巻の移動に方向性が無い (一様分布の) 場合は、 $p(\alpha) = 1/(2\pi)$  であるから、上式は以下のようなになる。

$$\frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} H(\alpha) d\alpha = \frac{1}{2\pi} \left[ 2B[-\cos \alpha]_0^\pi + 2A[\sin \alpha]_{-\pi/2}^{\pi/2} \right] = \frac{2(A+B)}{\pi} \quad (\text{付 3. 7})$$

従って、 $A=B$  の場合 (正方形の構造物) には、 $4A/\pi$  ( $\approx 1.273A$ ) となることがわかる。

一方、構造物を円形構造物 (直径  $D_0$ ) とした場合、竜巻の幅や長さ方向に構造物を投影した長さ  $H(\alpha)$  や  $G(\alpha)$  は、竜巻の移動方向には依存せず、一定値となる。

$$H(\alpha) = G(\alpha) = D_0 \quad ; \text{円形構造物} \quad (\text{付 3. 8})$$

従って、たとえ竜巻の移動方向に方向依存性があり、 $p(\alpha)$  に分布があつたとしても、全方向について積分した式(付 3. 7)の結果は  $D_0$  となる。上記の議論は、 $\alpha$  と  $V$ 、 $W$ 、 $l$  の間が無相関である場合に成り立つ。

以上のことから、建物として円形構造物を仮定する限り (長方形や方向性のある線状構造物を対象としない限り)、竜巻の移動方向の特性を考慮する必要はないことがわかる。

従って、円形構造物に対しては、式(付 3. 2)は次のように簡単になる。

$$\begin{aligned}
E[DA(V_0)] &= \int_0^\infty \int_0^\infty \int_0^\infty W(V_0) l f(V, w, l) dV dw dl \\
&+ D_0 \int_0^\infty \int_0^\infty l f(V, l) dV dl + D_0 \int_0^\infty \int_0^\infty W(V_0) f(V, w) dV dw \\
&+ (D_0^2 \pi / 4) \int_{V_0}^\infty f(V) dV
\end{aligned} \tag{付 3.9}$$

また、2変量の対数正規分布は以下のように書ける。

$$f(x, y) = \frac{1}{2\pi\sigma_x\sigma_y\sqrt{1-\rho^2}} \frac{1}{xy} \exp\left[-\frac{1}{2(1-\rho^2)} \left\{ \left(\frac{\ln(x)-\mu_x}{\sigma_x}\right)^2 - 2\rho\left(\frac{\ln(x)-\mu_x}{\sigma_x}\right)\left(\frac{\ln(y)-\mu_y}{\sigma_y}\right) + \left(\frac{\ln(y)-\mu_y}{\sigma_y}\right)^2 \right\}\right] \tag{付 3.10}$$

本検討では、①竜巻移動方向 $\alpha$ とその他の竜巻パラメータは無相関、②直径 $D_0$ の円形構造物を対象とするため、式(付 3.9)を基礎式とする。

### (3) 被害幅の補正

式(付 3.3)の $W(V_0)$ の項は、風速が $V_0$ 以上となる被害幅の比率を表しており、いわゆる被害面積補正の一種(幅方向の補正)である。今、竜巻としてランキン渦を仮定すると、風速 $V$ と被害域半径 $r$ は次式で表される。

$$\begin{aligned}
\frac{r}{r_c} &= \frac{V_{\max}}{V(r)} \quad ; \quad r \geq r_c \\
\frac{r}{r_c} &= \frac{V(r)}{V_{\max}} \quad ; \quad r < r_c
\end{aligned} \tag{付 3.11}$$

ここに $V_{\max}$ はFスケールに対応する最大風速、 $r_c$ は最大風速半径である。

ランキン渦が変形せずにゆっくりと移動した場合を想定すると、竜巻中心付近の風速は弱い、移動に伴い最大風速 $V_{\max}$ が通過するため、半径 $r_c$ 以内の領域の最大風速は一定値 $V_{\max}$ となる。従って、被害域内の最大風速の面的分布は長さ方向に対して平行となり、幅方向の速度分布は竜巻幅方向( $r$ 方向)の速度分布に一致する(付図 2)。

以上のことから、最大風速 $V_{\max}$ を持つ竜巻の場合、被害域内の風速別の被害面積率は、被害域の幅で表すことができる。

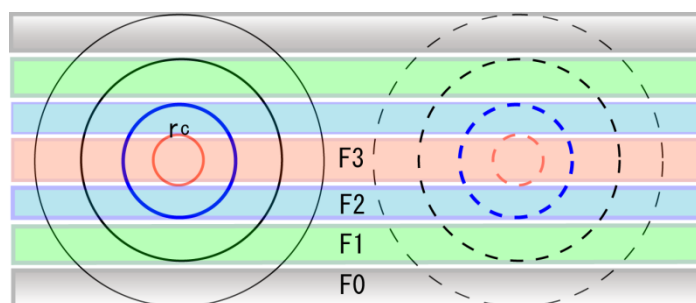
式(付 3.3)では、Hoeckerによる観測値から、風速は距離の1.6乗に反比例するものと仮定している。 $V_{\min}$ は、竜巻被害が発生する最小風速であり、付図 2のエッジ部分の風速に相当する。Garson(1975, No. 101)は、この $V_{\min}$ をgale intensity velocityと呼んでいる。galeとは非常に強い風のことで、米国の

気象局 (National Weather Service) では、34～47 ノット (17.5～24.2 m/s) とされている。

日本の気象庁では、気象通報にも用いられている風力階級では、風力 8 が疾強風 (gale, 17.2～20.7 m/s), 風力 9 は大強風 (strong gale, 20.8～24.4 m/s) と分類されており、風力 9 では「屋根瓦が飛ぶ。人家に被害が出始める」とされている。これらのことを参考にして、本評価では

$$V_{\min} = 25.0 \text{ m/s} \quad (\text{付 3.12})$$

を被害が発生する最小風速とした。この値は、F0 (17～32 m/s) のほぼ中央値に相当する。なお、この値よりも小さな  $V_{\min}$  (例えば、F0 の最小風速 17 m/s) を用いると、風速  $V_0$  以上となる被害面積は小さくなる。



付図 2 ランキン渦と竜巻被害域内の風速分布の模式図

#### 参考文献

- (1) Wen, Y.K. and Chu, S.L. (1973) : Tornado risks and design wind speed, Proceedings of American society of Civil Engineering, Journal of Structural Division, Vol. 99, No. ST12, 2409-2421.
- (2) Garson, R.C., Morla-Catalan J. and Cornell C.A. (1975) : Tornado risk evaluation using wind speed profiles, Journal of Structural Division, Proceedings of American Society of Civil Engineering, Vol. 101, No. St5, 1167-1171.
- (3) Garson, R.C., Morla-Catalan J. and Cornell C.A. (1975) : Tornado Design Winds Based on Risk, Journal of Structural Division, Proceedings of the American Society of Civil Engineering, Vol. 101, No. ST9, 1883-1897.
- (4) Reinhold T.A. and Ellingwood B. (1982) : Tornado damage risk assessment, NUREG CR2944, 55p.
- (5) 東京工芸大学(2010) : 平成 21～22 年度原子力安全基盤調査研究 (その 1) 竜巻による原子力施設への影響に関する調査研究, 256p.
- (6) 東京工芸大学(2011) : 平成 21～22 年度原子力安全基盤調査研究 (平成 22 年度) 竜巻による原子力施設への影響に関する調査研究, 424p.

(7) Ramsdell, J.V., and Rishel J.P. (2007) : Tornado Climatology of the Contiguous United States, NUREG/CR-4461, Rev.1.



#### 付録4 竜巻風速の確率密度分布について

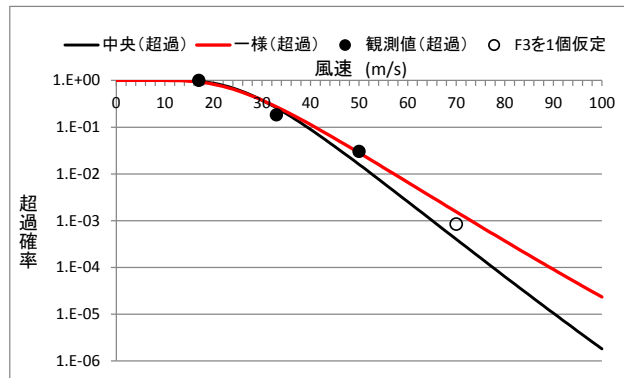
F スケールの竜巻風速には幅があるため、具体的な風速の設定方法には任意性があり、F スケールの範囲内のある値（中央値等）に設定する方法や F スケールの風速範囲内で一様に分布すると仮定する方法などが考えられる。

図1に竜巻風速が中央値に集中した場合（黒い実線）及び一様に分布とした場合（赤い実線）について、風速の分布形（超過確率）を推定した結果を示す。●印は、各 F スケール下限値における観測値（擬似 51.5 年間データ）の超過確率を表しており、例えば F1 の下限値 (33m/s) 以上となる確率は約 0.2 である。また、○印は、F3 が 1 個観測された場合を仮定してプロットをした。

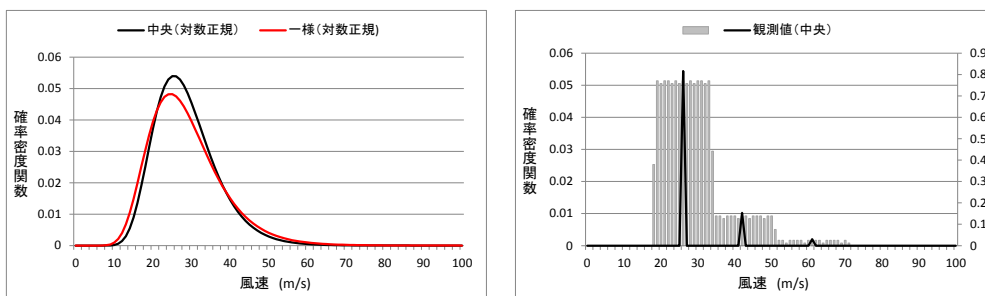
ハザード解析においては、特定の風速以上となる確率が重要であることから、●印で表された観測値ベースの超過確率と適合度が高い分布形が望ましい。図1(a)の○印も含めて評価すると、一様分布の方が中央値の場合よりも適合度が良いと言える。

また、ハザード解析において、竜巻風速が中央値に集中した場合及び一様に分布とした場合で計算した結果、図2のとおり風速設定を一様分布とした方が中央値で代表させる場合よりも厳しいハザード曲線となっている。

以上より、ハザードを保守的に評価するとの観点から、風速分布としては一様分布を採用した。



(a) 超過確率



(b) 確率密度関数 (左: 推定値, 右: 観測値)

図1 竜巻風速の確率分布の推定結果と観測値の比較

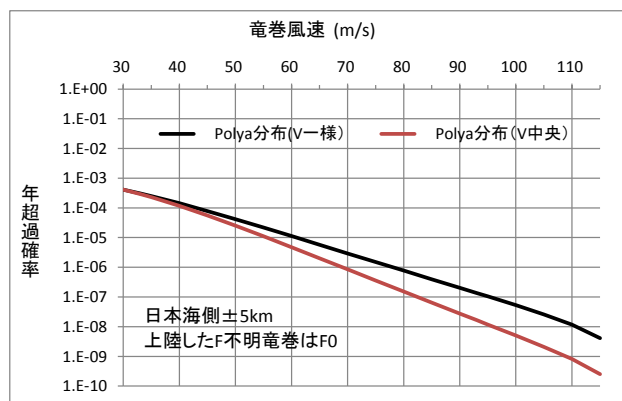


図2 風速設定の違いによる竜巻最大風速のハザード曲線の比較  
(海側, 陸側 5km 範囲)

## 付録5 海上のF スケール不明竜巻の按分方法の妥当性について

51.5 年間の擬似データを推定する際に、海上で発生したF 不明竜巻（非上陸竜巻）を、F スケールが判明している陸上竜巻（含む上陸竜巻）のF スケール毎の発生比率で按分している。ここでは、沿岸部近傍での竜巻の発生特性は陸上と海上とでは類似している、と仮定している。他の合理的な按分方法も無いのが実情ではあるが、観測結果をもとに、この仮定の妥当性について考察する。

ここでは、陸上で発生した竜巻（以後、陸上竜巻と呼ぶ）と、水上で発生しその後上陸した竜巻（以後、上陸竜巻と呼ぶ）を区別して考える。

表1及び図1は、陸上竜巻、上陸竜巻及び（陸上＋上陸）竜巻のそれぞれの竜巻区分に対して、F0, F1, F2 以上の竜巻が占める割合である。全国の上陸竜巻の場合、F スケール毎の割合はそれぞれ 30, 45, 24%となっており、陸上竜巻との間に大きな差は無い（数%以内）。上陸竜巻は海上で発生した竜巻であることから、海上でのF 不明竜巻のF スケール毎の発生割合は、上陸竜巻の発生割合と同様だと考えられる。

上陸竜巻と陸上竜巻の発生割合に大きな差は見られないことは、海側と陸側のF スケール毎の発生割合が類似していることを示唆している。従って、海上でのF 不明竜巻を、陸上竜巻（あるいは（陸上＋上陸）竜巻）の発生割合で按分する手法は妥当な方法だと考えられる。

一方、日本海側の上陸竜巻の場合、F スケール毎の割合はそれぞれ 50, 34, 16%であり、陸上竜巻の値と 10～20%程度異なる。日本海側の場合、F0 の割合が全国の値に比べて大きく、逆にF スケールの大きな竜巻の割合が同程度少なくなっており、地域的な特性が見られる。上陸竜巻と陸上竜巻の割合の差が、地域特性によるものかデータ数が少ないことによるものか判断できないが、（陸上＋上陸）竜巻の割合は、全国の値に比較的近くなる（F0 の数が多いという地域特性は残る）。したがって、（陸上＋上陸）竜巻の割合で按分する本手法は、データ数が少ない場合にも有効な手法だと考えられる。

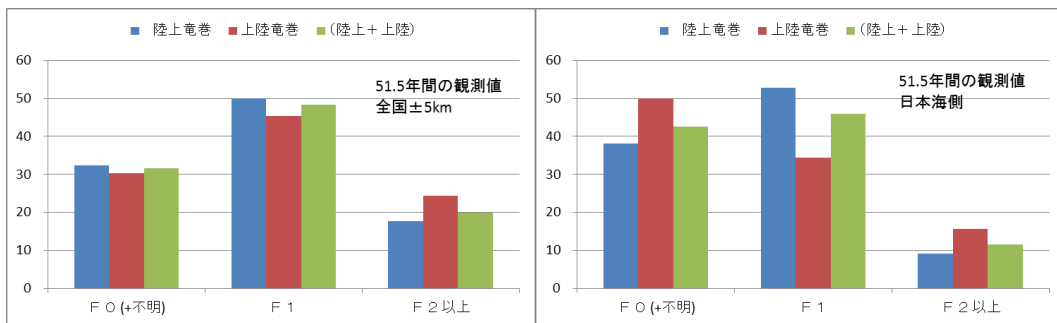
表 1 F スケールごとの竜巻発生数の割合

(a) 全国沿岸±5km

発生数の観測数	FO (+不明)	F1	F2以上
陸上竜巻	32	50	18
上陸竜巻	30	45	24
(陸上+上陸)	32	48	20

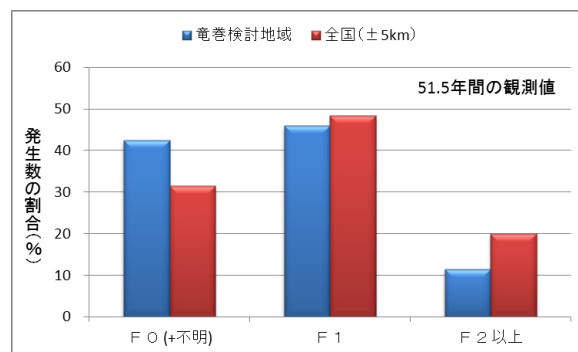
(b) 日本海側

発生数の観測数	FO (+不明)	F1	F2以上
陸上竜巻	38	53	9
上陸竜巻	50	34	16
(陸上+上陸)	43	46	11



(a) 全国±5km

(b) 日本海側



(c) (陸上+上陸) 竜巻

図 1 F スケールごとの発生数の割合

## 2.4 地形効果による竜巻風速への影響について

### 2.4.1 地形起伏による竜巻風速の増幅特性について

#### 2.4.1.1 概要

本資料において、既往の研究に基づく地形起伏の竜巻の風速への影響に関する知見を取りまとめる。

#### 2.4.1.2 対象とする地形起伏スケールの整理

竜巻に対する地形の効果は、スーパーセルスケールへの関与によるメソスケールでの「発生」への影響と、渦の旋回流への関与によるマイクロスケールでの「風速」への影響とに大別される。

竜巻風速  $V_D$  を求める際に検討すべき地形影響は、後者が相当し、タッチダウンした漏斗雲により発生する旋回流、及びそれに随伴して生じる強風への地形影響が論点となる。ここで考慮すべき地形の規模としては、前述のメソスケールのものとは比べて小さく数百メートル規模と考えられる (Karstens 2012, Lewellen 2012)。

#### 2.4.1.3 マイクロスケールの地形の起伏が竜巻の旋回流強度及び強風に与える影響

マイクロスケールの地形の起伏が竜巻の旋回流及び強風に与える影響の定量的評価は、いまだ、研究課題である (Karstens 2012)。しかしながら、定性的な知見を与える関連研究は存在する。そこで用いられている主な手法は、①被害状況調査、②風洞実験、③数値シミュレーションとなる。

①被害状況調査 (Forbes 1998, Karstens 2012) では、実際の竜巻の被害を精査し、被害状況と地形特性との関係を調べる。これにより、被害が発生しやすい地形特性を分析し、そこから旋回流強度及び風速の強弱を類推することになる。

②風洞実験 (Karstens 2012) では、風洞実験の測定部に尾根や斜面といった地形模型を入れ、その上部に竜巻発生装置を設置し、それを移動させたときの、地表面近傍の圧力・風速分布を調べる。

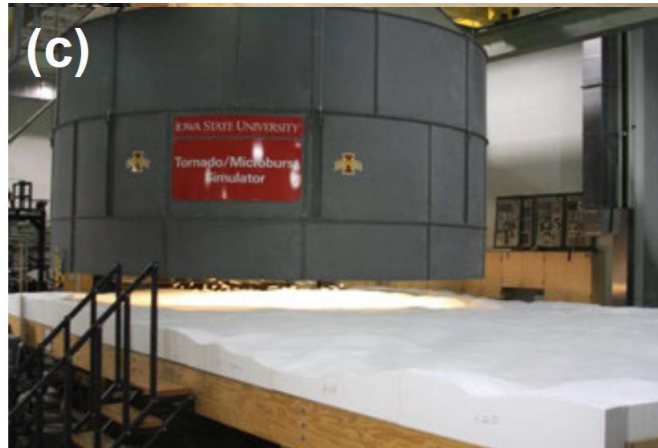


図 2.4.1 風洞実験の様子 (Karstens 2012)

③数値シミュレーション (Lewellen 2012) では、竜巻の旋回流や移動及び地形の起伏を模擬した流体解析コードによる、数値実験を行い、旋回流の強度や風速及び竜巻の構造に関連する圧力分布を調べる。

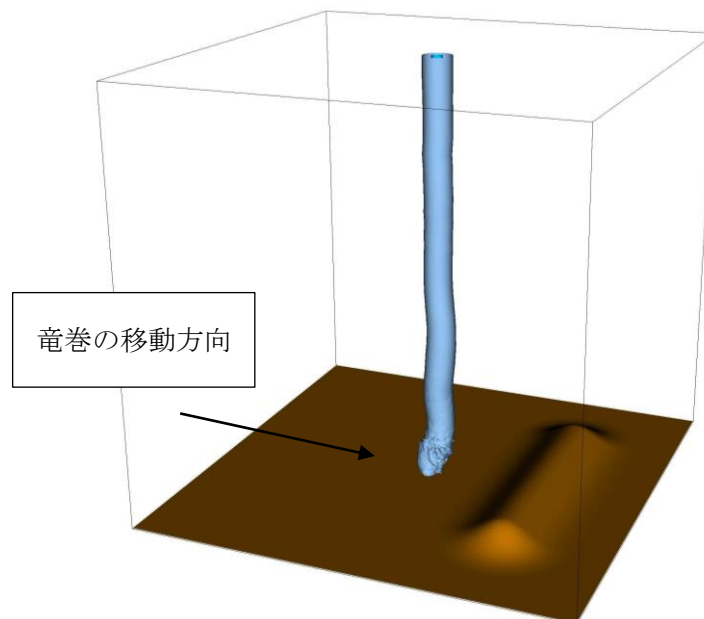


図 2.4.2 数値シミュレーションのセットアップ

これらを通じて、マイクロスケールの地形の起伏に起因する竜巻の旋回流や風速の強化に対する知見が得られている。被害状況調査により、竜巻の強化が下り斜面や尾根の裾で生じる可能性が示唆されている (Forbes 1998, Karstens 2012)。また、実被害調査の知見を支持する結果が風洞実験・数値シミュレー

シオンにおいても確認されている。2次元尾根地形を対象とした場合の風洞実験（Karstens 2012）及び数値シミュレーション（Lewellen 2012）の結果をそれぞれ、図 2.4.3、図 2.4.4 に示す。風洞実験の結果である図 2.4.3 において、(a)に示す二次元尾根地形を図中左側から右側に竜巻を模擬した旋回流が移動するとき、地表面で測定された圧力の最大値が(b)になる。ここで実験仕様の制約上、風速のデータは取得されておらず、風速に相当するものとして、圧力勾配（圧力の高いところから低いところへ流れる風の駆動力になり、風速に相当する）を(c)に示している。(c)の結果から、

- ① 圧力勾配（図 2.4.3(c)）が斜面において、正・負の値を持つこと（= 旋回流が強弱する）
  - ② 斜面に比べ尾根の上・下流の平たん部ではほぼフラットとなること（= 旋回流の強度が変化しない）
- を理解できる。

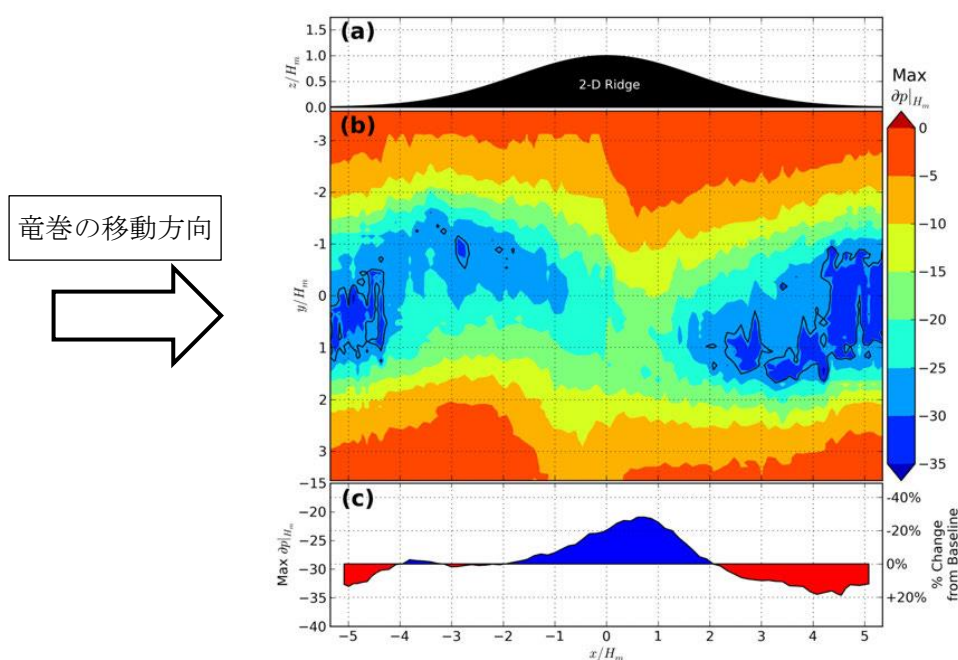


図 2.4.3 尾根地形を竜巻が通過するときの地表面圧力及び圧力勾配（風速に相当）

数値シミュレーション結果である図 2.4.4 において、ピーク圧力が(a)，風速が(b)になる。シミュレーションは風速の取り扱いを可能としており、図 2.4.4 の(b)のような結果の議論を可能としている。図中の黒色実線が等高線を意味し、竜巻は、図 2.4.3 と同じく図中左側から右側へと移動している。この結果も、下記のとおり図 2.4.3 の知見と整合している。

- ・上り斜面では圧力が増加し（緑色→赤色）、下り斜面では圧力が減少（赤色→緑色）する（実験で得られた知見①を支持）
- ・ピーク圧力の高い領域は尾根頂部に限定され、平坦部の圧力は上流側と下流側とで同レベルとなる。（実験で得られた知見②を支持）

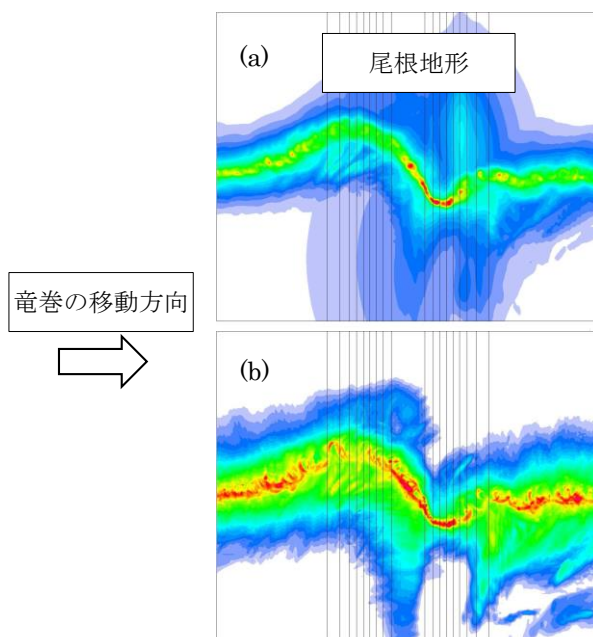


図 2.4.4 尾根地形を竜巻が通過するときの地表面ピーク圧力及び風速

ここで地形の規模として尾根高さ  $H_m$  に対して  $\pm 5H_m$  を考慮していることにも留意が必要である。これは、尾根高さが 100m の場合、 $\pm 500m$  にわたる地形を対象としていることを意味する。

また、これらの研究では、地形の起伏の影響範囲が、斜面及び尾根・山の頂・裾部に限定されることを示唆している。図 2.4.3, 2.4.4 にみられるとおり、地形の下流側の平坦部における風速や圧力の値は、地形を乗り越える前の上流部の値に相当する。

#### 2.4.1.4 地形の起伏に起因する竜巻の旋回流の強弱に対する物理的解釈

ここでは、渦の旋回流への関与によるマイクロスケールでの「風速」への影響についての物理的解釈を示す。なお、ここで示す角運動量保存則に基づく解釈の妥当性を、被害状況調査 (Forbes 1998, Karstens 2012) や風洞実験 (Karstens 2012) の結果も支持している。



系の外側から新たな角運動量の付与がない場合、回転する流れにおいては、「回転の中心からの距離」と「周方向の回転速度」の積が一定になるという性質がある。これは角運動量保存則と呼ばれるが、角運動量保存則と Holton (1992)を参考に、竜巻旋回流が形成された後における渦の伸長・収縮に伴う旋回流風速の増速・減速機構を以下に導く。竜巻のコア部分を一つの鉛直軸を有する剛体運動の気柱と仮定すると、上り坂を越える場合（図 2.4.5 において渦 1 から渦 2 へ移動する場合）には渦の長さが短くなる。その際、角運動量の保存則は次式のように表される。

$$\int_0^{2\pi} \int_0^{r_1} \int_0^{h_1} (\rho r^2 \omega_1) dh \cdot r dr d\phi = \int_0^{2\pi} \int_0^{r_2} \int_0^{h_2} (\rho r^2 \omega_2) dh \cdot r dr d\phi \quad (1.1)$$

$$\frac{1}{4} r_1^4 \omega_1 h_1 = \frac{1}{4} r_2^4 \omega_2 h_2 \quad (1.2)$$

ここで、 $\omega$  は角速度、 $r$  は渦コア（気柱）の半径、 $h$  は渦コア（気柱）の高さ、 $\rho$  は空気密度であり、添字の 1 と 2 はそれぞれ、渦 1 と渦 2 に対する値を表す。また、気柱の体積が保存されるので、式(1.3)が成立する。

$$\pi r_1^2 h_1 = \pi r_2^2 h_2 \Rightarrow r_2^2 = \frac{h_1}{h_2} r_1^2 \quad (1.3)$$

この関係を式(1.2)に代入すると、式(1.4)が得られる。

$$\frac{\omega_1}{h_1} = \frac{\omega_2}{h_2} \Rightarrow \frac{d}{dt} \left( \frac{\omega}{h} \right) = 0 \quad (1.4)$$

(1.4)の関係式は「渦位（ポテンシャル渦度）の保存式」に相当するものであり、角速度 $\omega$ は地上高さ $h$ に比例することがわかる。また、式(1.3)により、渦の半径 $r$ は $h^{1/2}$ に反比例するので、竜巻の最大接線風速（ $\omega \times r$ ）は $h^{1/2}$ に比例する。そのため、竜巻の渦が上り斜面を移動する時、基本的に渦は弱まり、下り斜面を移動する時には強まる。

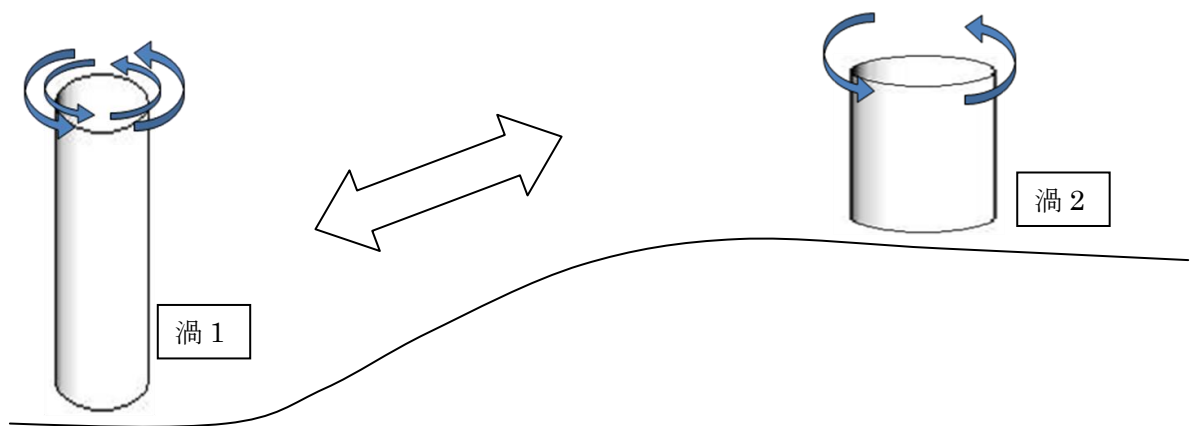


図 2.4.5 竜巻旋回流の地形影響に関する模式図

#### 2.4.1.5 島根原子力発電所周辺での地形起伏の効果

竜巻集中地域⑥及び⑦で観察された竜巻の移動経路の発生頻度を図 2.4.6 に、その発生場所を図 2.4.7 に示す。島根原子力発電所周辺で観察された竜巻は、その大部分が海上又は沿岸部で発生しており、その移動方向は東に向かう頻度が高いことが確認できる。また、島根原子力発電所が立地する竜巻集中地域⑦では、発電所北方の海上から南（陸側）へ向かう頻度が高いことが確認できる。

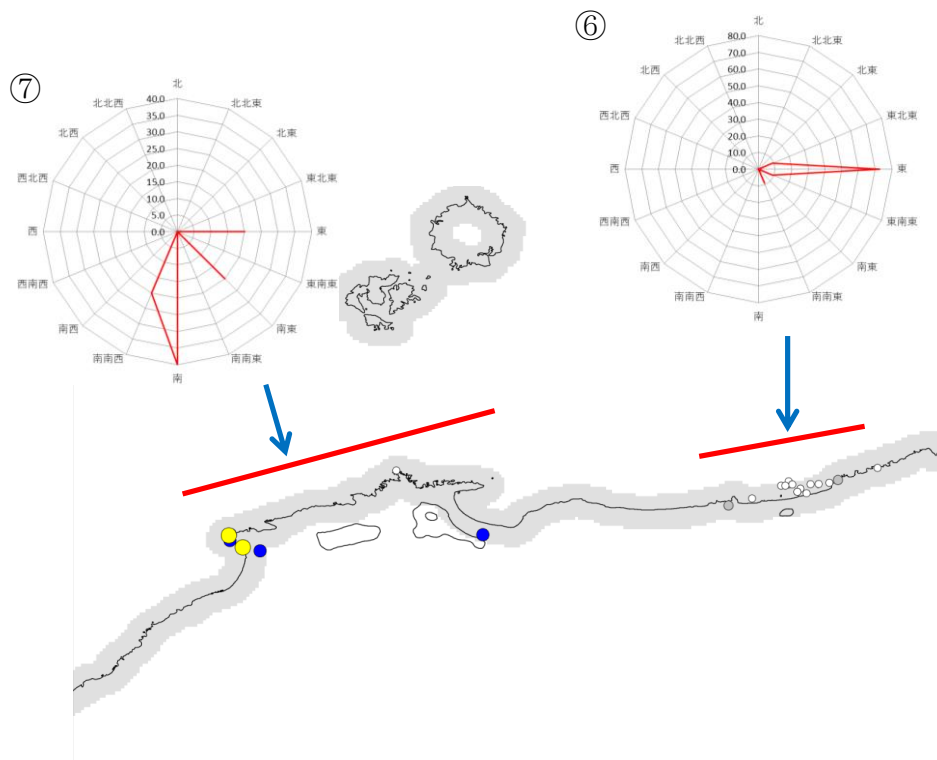


図 2.4.6 島根原子力発電所周辺で発生した竜巻の移動経路の発生頻度

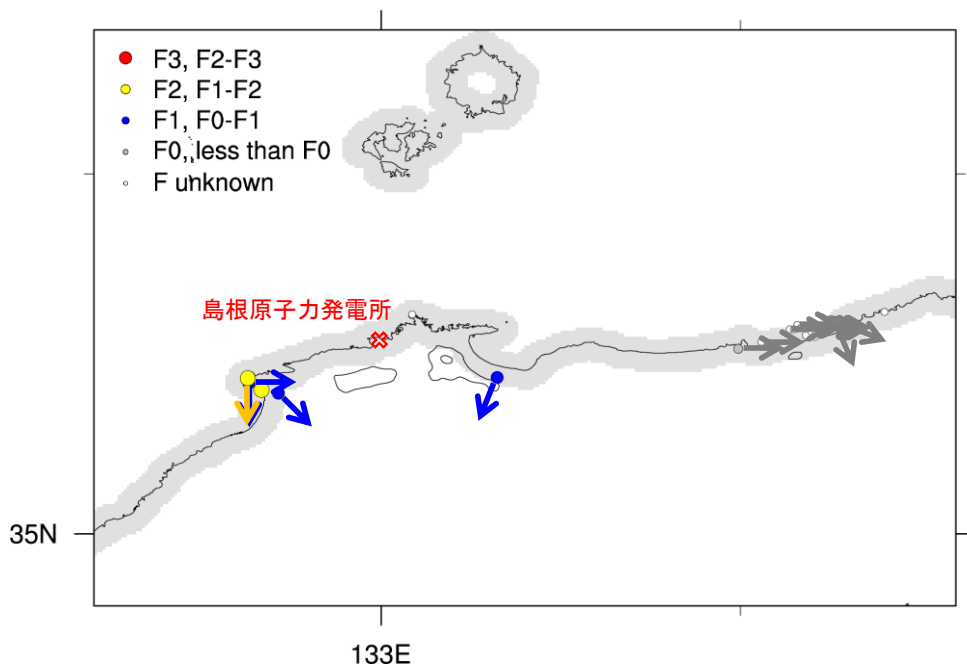


図 2.4.7 島根原子力発電所周辺で発生した竜巻の発生場所

島根原子力発電所を含む東西の地形断面を図 2.4.8 に示す。島根原子力発電所に襲来しうる竜巻の経路上の地形の起伏として、発電所西側の地形特性に着目すると、約 2.5 km 西側の 0 m 標高地域から約 1 km 西側の 130 m 標高地域を越えて、発電所周辺の 0 m 標高地域にわたる起伏を確認できる。この起伏の傾斜は上り斜面・下り斜面とも 1/10 程度となる。

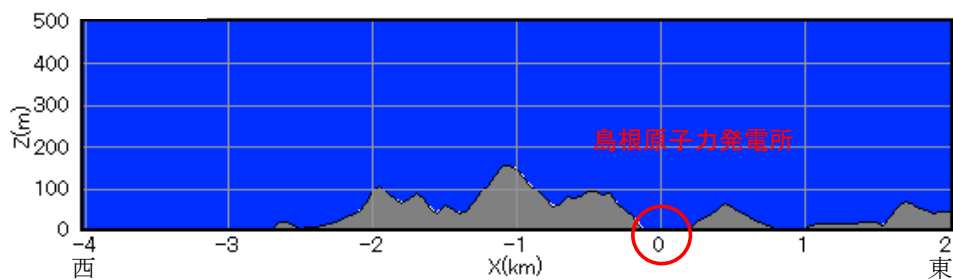


図 2.4.8 島根原子力発電所を含む東西の地形断面

すなわち、島根原子力発電所周辺で観察される竜巻が東進し、発電所に到達する場合、以下のようなになる。

- ・ 竜巻は上り斜面・下り斜面の影響をほぼ同程度受ける
- ・ 竜巻は、周囲の丘の麓から少し離れたほぼ平坦な地点において発電所に到達する

このことから、地形起伏に対する竜巻の旋回流・強風の強化に対する知見である「竜巻の渦が上り斜面を移動する時、基本的に渦は弱まり、下り斜面を移動する時には強まる。」ことを勘案すると、島根原子力発電所における竜巻の風速評価において、地形の起伏による風速の増減は小さいものと判断できる。

また、竜巻が島根原子力発電所の北方で発生し南方向（陸側）へ移動する場合には、地形が平坦な海側から発電所敷地に進入することとなり、発電所敷地も平坦であるため竜巻が増幅することはないと考えられる。

#### 参考文献

- Forbes, G. S., 1998: Topographic Influences on Tornadoes in Pennsylvania, Proc 19th Conf Severe local storms Amer Meteorol Soc, Mineapolis, MN, pp. 269-272
- Karstens C. D., 2012: Observations and laboratory simulations of tornadoes in complex topographical regions. Graduate theses and dissertations of Iowa state Univ., paper 12778.
- Lewellen, D. C., 2012: Effects of topography on tornado dynamics: A simulation study. 26th Conference on Severe Local Storms, Amer. Meteorol. Soc., Nashville, TN, 4B.1.
- Holton, J. R., 1992: An Introduction to Dynamic Meteorology, 3rd Edition, Academic Press.

## 2.4.2 地表面粗度による竜巻風速の増幅特性について

### 2.4.2.1 概要

本資料において、既往の研究に基づく地表面粗度の物理的意味及び竜巻などの暴風時の風速への影響に関する知見を取りまとめる。

### 2.4.2.2 地表面粗度の定義

大気の運動（風）は、地表面の影響を受けるが、地表面に近いほどその影響は強い。影響を受ける範囲は1-2 kmに及ぶことが一般的で、その範囲を大気境界層と呼ぶ。その中でも表面から数十メートルまでの領域は特にその影響が著しく、「接地層」といわれる（竹内・近藤 1981）。

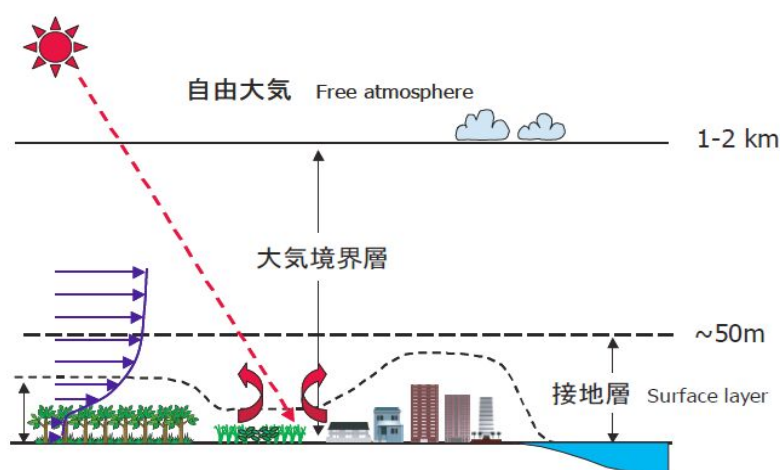


図 2.4.9 大気の鉛直構造の模式図

風速は、地表面において0となり上空に向かうにつれて増加する。強風状態において、この風速の鉛直分布は対数分布と合致する。この対数分布の性状は、地表面の細かな凹凸が与える摩擦抵抗により定まる。この摩擦抵抗による風速分布への効果を示す指標を「粗度長」（地表面粗度）と定義する（塩谷 1992；近藤 2000）。

接地層内の風速  $U$  は、地表面からの高さ  $z$  に対して、粗度長  $z_0$  を用いて

$$U(z) = c \ln(z/z_0) \quad (2.1)$$

により整理される（ここで、 $c$  は係数）。

### 2.4.2.3 粗度長を加味した風速の算定及び竜巻の風速に対する粗度長の効果

この粗度長さを考慮した建築物の耐風設計（強風を対象とした建築物の風荷

重設定) 手順を日本建築学会が取りまとめている (日本建築学会 2004)。ここでは、地表面の状況に応じた粗度長さの変化を 5 つの区分に分類して取り扱うことにしている。

粗度区分	評価地点及び風上の地表面の状況
I	海面または湖面のような、ほとんど障害物のない地域
II	田園地帯や草原のような農作物程度の障害物がある地域、樹木、低層建築物などが散在している地域
III	樹木・低層建築物が多数存在する地域、あるいは中層建築物 (4-9 階) が散在している地域
IV	中層建築物 (4-9 階) が主となる市街地
V	高層建築物 (10 階以上) が密集する市街地

そして、式(2.1)の対数分布を近似するものとして、次式で示されるべき分布とともに、各粗度区分に対して式中のパラメータとして下表の値を提示している。

$$U(z) = c(z/z_G)^\alpha \quad (z_b < z < z_G) \quad (2.2)$$

粗度区分	I	II	III	IV	V
$z_b$ (m)	5	5	10	20	30
$z_G$ (m)	250	350	450	550	650
$\alpha$	0.1	0.15	0.2	0.27	0.35

地表面の凹凸が大きくなるほど、 $z_b$ 、 $z_G$ 、 $\alpha$  (べき指数) の値も大きくなる。粗度区分 I-V に対して、式(2.2)から得られる風速の鉛直分布を図 2.4.10 に示す。

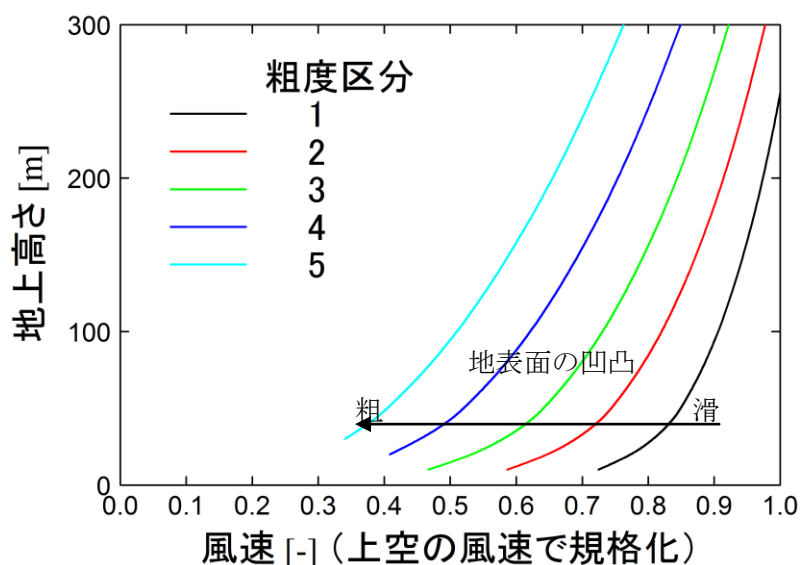


図 2.4.10 粗度区分と風速の鉛直分布との関係

図 2.4.10 は、同一の上空風速 ( $z = z_c$  の風速) に対する分布を示している。すなわち、横軸の数字は地表面粗度の影響に起因する減速の度合いを意味する。地上に近づくにつれ、又、粗度区分が大きくなるにつれて、地表面近傍の風速が小さくなる。例えば、地上高さ 10 m の風速は、粗度区分が I から II に変化することで 20 % 程度低下し、III に変化することで 35 % 程度低下する。

なお、竜巻は通常の強風と異なり、強い渦（旋回流）構造を有する。地表面粗度は、この竜巻の旋回流を減衰させる効果を有するとされている（例えば、Leslie 1977, Lewellen and Sheng 1979, Rostek and Snow 1985, Church 1993, Natarajan and Hangan 2012）。また、地表面粗度の構成物が飛来物として運動することも竜巻の風速を大きく減少させると示唆されている (Lewellen et al. 2008)。

これらの知見から、表面の凹凸、すなわち粗度の増加とともに竜巻に起因する風速を低下させると考えられる。

#### 2.4.2.4 島根原子力発電所周辺での地表面粗度の効果

島根原子力発電所周辺の地表面粗度区分のカラーコンタを図 2.4.11 に示す。図の原点が島根原子力発電所位置となる。北側には海などに相当する粗度区分 I の領域（図中青色）が広がるが、そのほかの三方は森林などに相当する粗度区分 III の領域（図中緑色）に囲まれている。

島根原子力発電所周辺で観察された竜巻の移動経路の発生頻度及び発生場所は、2.4.1.5 の図 2.4.6 及び図 2.4.7 に示したとおり、その大部分が海上ま

たは沿岸部で発生しており，その移動方向は，東に向かう頻度が高い。

図 2.4.11 によると，島根原子力発電所西方においては，森林などに相当する粗度区分Ⅲの領域が 2 km 以上にわたり存在している。

以上のことから，島根原子力発電所における竜巻の風速評価においては，地表面粗度に起因する風速の減衰が見込めると判断できる。

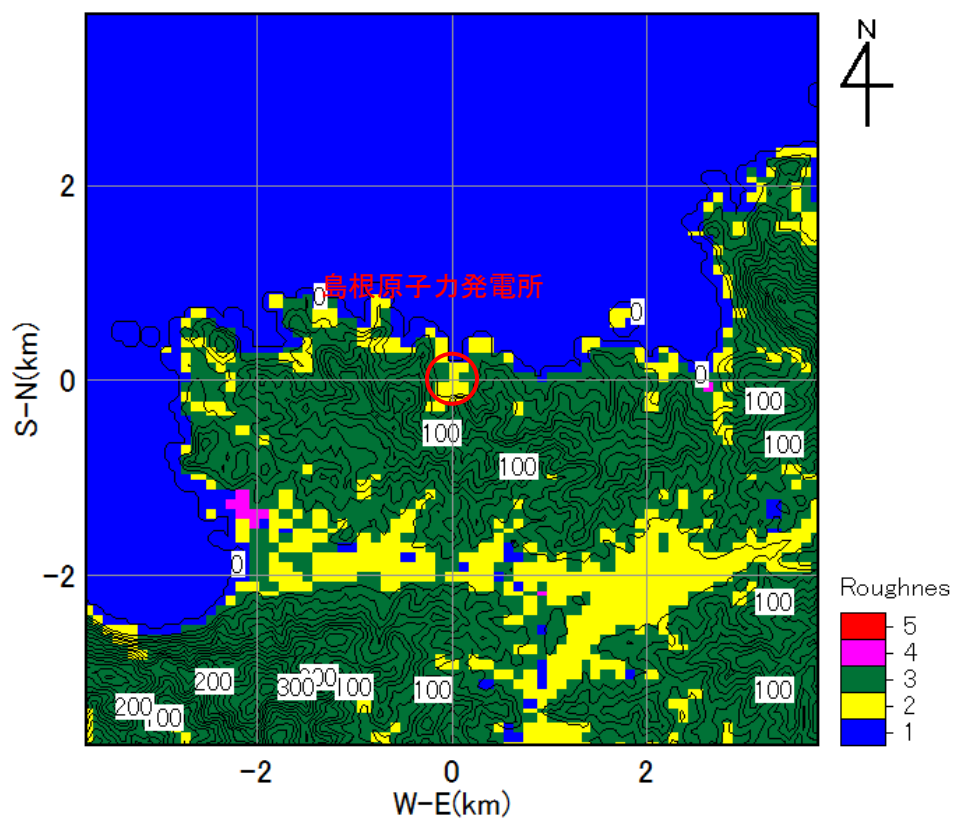


図 2.4.11 島根原子力発電所周辺の地表面粗度



## 付録1 粗度長の値

粗度長の値は、既往の研究において、様々な地表面状態に対して示されている。そこで得られている概略値を以下に示す。

地表面	粗度 [m]
水 (広くて静かな面)	$10^{-6} - 10^{-5}$
砂・砂漠	0.0003
土	0.001 - 0.01
草 (草丈 0.02 - 0.1 m)	0.003 - 0.01
草 (草丈 0.25 - 1.0 m)	0.04 - 0.10
農地	0.04 - 0.20
果樹園	0.5 - 1.0
森林	1.0 - 6.0
大都市 (東京)	2.0

竹内・近藤 1981 より

地表面	粗度 [m]
湖や海面	$10^{-3} - 10^{-5}$
水田	0.01 - 0.05
草 (草丈 0.1 m)	0.01 - 0.03
草 (草丈 1.0 m)	0.1 - 0.3
田園集落	0.2 - 0.5
森林	0.3 - 1.0
大都市	1 - 3

近藤 2000 より

上記から粗度長が地表面の細かな凹凸の度合いに呼応し増減することを確認できる。

参考文献

近藤純正, 2000: 地表面に近い大気の科学－理解と応用. 東京大学出版会, 324pp.

塩谷正雄, 1992: 強風の性質－構造物の耐風設計に関連して. 開発社, 201pp.

竹内清秀, 近藤純正, 1981: 大気科学講座 1 地表に近い大気. 東京大学出版会, 226 pp.

日本建築学会, 2004: 建築物荷重指針・同解説. 丸善出版, 651pp.

Church, C. R., 1993: The tornado: Its structure, dynamics, prediction and hazards. Geophysical Monograph, Vol. 79, American Geophysical Union.

Leslie, F. W., 1977: Surface roughness effects on suction vortex formation. J. Atmos. Sci., 34, 1022-1027.

Lewellen, W. S., and Y. P. Sheng, 1979: Influence of surface conditions on tornado wind distribution. Proc. 11th Conf. Severe Local Storms, Amer. Meteorol. Soc., 375-378.

Lewellen, D. C., B. Gong, W. S. Lewellen, 2008: Effects of finescale debris on near-surface tornado dynamics. J. Atmos. Sci., 65, 3247-3262.

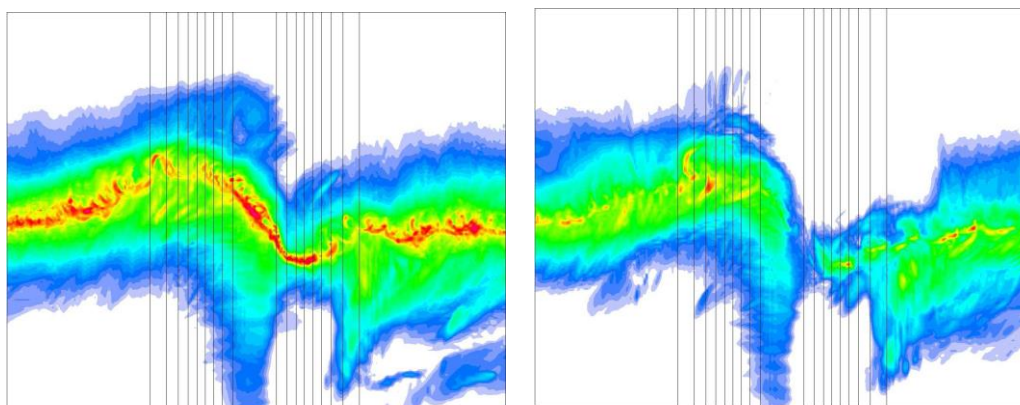
Natarajan, D., and H. Hangan, 2012: Large eddy simulations of translation and surface roughness effects on tornado-like vortices. J. Wind Eng. Ind. Aerodyn., 104-106, 577-584.

Rostek, W. F., and J. T. Snow, 1985: Surface roughness effects on tornado like vortices. Proc. 15th Conf. Severe Local Storms, Amer. Meteorol. Soc., 252-255.

Lewellen, D. C. (2012) Effects of topography on tornado dynamics: A simulation study. 26th Conference on Severe Local Storms, Amer. Meteorol. Soc., Nashville, TN, 4B.1.

## 付録2 地形と粗度との重畳について

ここでは、粗度による竜巻の減衰について、地形効果との重畳について言及する。地表面粗度と地形効果との重畳について、Lewellen (2012) により実施された LES が一つの知見を与えている。この LES では、高さ 100m の尾根を越える竜巻の減衰を 2 種類の地表面粗度 ( $z_0 = 2 \text{ cm}$  と  $20 \text{ cm}$ ) に対して調べている。それにより得られた最大風速のカラーコンタを以下に示す。



地表面粗度  $z_0=2\text{cm}$  の場合      地表面粗度  $z_0=20\text{cm}$  の場合

図1 最大風速のカラーコンタ

地表面粗度の値によらず、地形の起伏に伴う竜巻進路は蛇行している。竜巻の移動に伴う、最大瞬間風速の値の強弱は、地表面粗度に伴い異なる挙動を呈するが、地表面粗度の増加は、最大風速の低下に寄与していることを確認できる。

この結果は、地表面粗度による竜巻風速の減衰について、地形の起伏が重畳する場合も同様の結論となることを示唆する。

### 参考文献

Lewellen, D. C., 2012: Effects of topography on tornado dynamics: A simulation study. 26th Conference on Severe Local Storms, Amer. Meteorol. Soc., Nashville, TN, 4B.1.


Holton, J. R., 1992: An Introduction to Dynamic Meteorology, 3rd Edition, Academic Press.

3.1 竜巻影響評価の概要及び保守性について

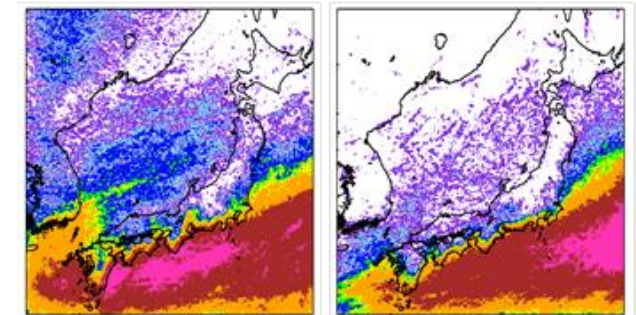
図 3.1.1 に竜巻影響評価の概要及び保守性確保の状況を示す。竜巻影響評価については、その不確実性を踏まえて、各ステップに対し保守性を考慮している。

**【基準竜巻・設計竜巻の設定】**

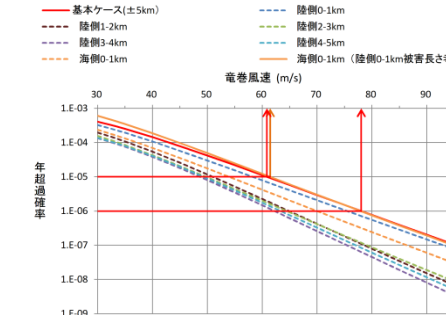
- 竜巻検討地域：総観スケール（総観場）での分析（左下図）により北海道から山陰地方にかけての日本海沿岸を竜巻検討地域と設定。また、メソスケール（突風関連指数）の分析（下中央図）でも地域特性を確認。
- $V_{B1}$ ：竜巻検討地域における過去最大竜巻 F2 の風速範囲の上限値 69m/s と設定。
- $V_{B2}$ ：竜巻風速のハザード曲線（右下図）より、年超過確率  $10^{-5}$  における風速は 62m/s であるが、竜巻検討地域を北海道から山陰地方にかけての日本海沿岸にすることに伴う竜巻ハザード曲線算出のためのデータの不確実性（日本海側は F スケール不明の海上竜巻が多い）を踏まえ、年超過確率  $10^{-5}$  より一桁下げた年超過確率  $10^{-6}$  相当の風速 78m/s (F3) と設定。
- 基準風速： $V_{B1}$  と  $V_{B2}$  のうち大きい風速である年超過確率  $10^{-6}$  相当の風速 78m/s (F3) を基準風速と設定。
- なお、将来的な気候変動を完全に予測することは難しいため、最新のデータ・知見をもって気候変動の影響を注視し、竜巻検討地域や基準風速は、必要に応じて見直しを実施していく。



竜巻検討地域と竜巻発生箇所



暖候期 5~10月  
寒候期 11~4月  
SReH, CAPE の同時超過頻度分布



竜巻風速の年超過確率分布

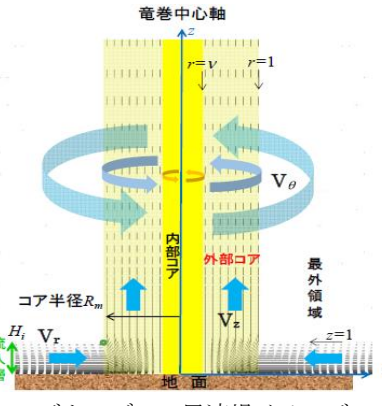
- ・基準風速における保守性  
→ $V_{B2}$  の設定においては、竜巻検討地域を 1km 幅に細分化した場合の竜巻風速のハザード曲線も考慮した上で、年超過確率  $10^{-5}$  から一桁下げた年超過確率  $10^{-6}$  に相当する風速 78m/s と設定。  
なおハザード曲線においては、データ量の少ないことによる不確実さを考慮し、以下の検討を実施。
- ・擬似的な 51.5 年間のデータをフジタスケール毎に作成 (F スケール不明の海上竜巻の発生数は、陸上竜巻の F スケール別発生比率で按分)
- ・Jackknife 法を適用した評価により、データの安定性を確認
- ・日本海側に F3 竜巻 (擬似データ上 4 個) を追加した感度解析を実施

- ・設計風速における保守性  
→基準風速 78m/s に対し、将来的な気候変動を踏まえ F3 の風速範囲の上限値 92m/s と設定。

- ・物体の浮上・飛来モデルにおける不確実性の考慮  
→物体に働く揚力は、風を受ける方向等により様々な値を取りうるため、地面での揚力係数と物体の見附面積 ( $C_{l,a}$ ) の代わりに、空中での xyz 方向の流れに対する抗力係数と見附面積の積 ( $C_D A$ ) を用い、実際より大きな揚力を作用させ、浮上し易くなるよう設定。  
(平板, 円柱, 自動車, 立方体及び角柱を例にすると,  $C_D A / C_{l,a} \approx 1.1 \sim 1.5$ )

**【設計竜巻の設定 (最大風速及び特性値)・設計荷重の設定】**

- 最大風速：地形効果による竜巻の増幅を考慮する必要はないが、将来的な気候変動の不確実性を踏まえ、 $V_B$  の値が F3 の風速範囲 (70~92m/s) にあることから F3 の風速範囲の上限値 92m/s と設定。



フジタモデルの風速場イメージ

- 風速場モデル：各風速場モデルとの比較や、フジタモデルの利用実績を確認し、地面におかれた物体への影響を与える風速場をよく表現できているフジタモデルを選定。
- 飛来物評価手法：飛来物評価における物体の浮上・飛来モデル、竜巻や物体の配置等を設定。
- 設計竜巻の特性値：風速場としてフジタモデルを選定した場合の特性値を設定。ただし、最大気圧差はランキン渦モデルにおける最大気圧低下量及び最大気圧低下率を保守的に設定する。
- 設計荷重：設計竜巻の風荷重、気圧差による荷重、設計飛来物 (鋼製材, 砂利) に衝撃荷重等を設定。

- ・竜巻が物体に与える速度に関する不確実性の考慮  
→実際には竜巻が遠方から物体に近づき、最大風速より低い風速に曝され飛散することになるため、物体を強制的に高速域に配置する。  
→物体の配置場所により竜巻から受ける影響が変化することを考慮し、多点配置することで配置した物体の飛来速度の中から、最大となる飛来速度を設定。  
→設計飛来物は、必ずしも最大速度で防護対象施設に衝突するとは限らないが、設計飛来物の速度としては、評価用竜巻の風速から算出した最大速度 (水平方向・鉛直方向) を設定。

- ・風圧力や気圧差による圧力に関する保守性  
→竜巻の風速場は、接線風速や気圧低下量に高さ依存性があるため、建物や設備に対し必ずしも水平方向の最大風速による風圧力や最大気圧低下量による圧力が作用するとは限らないが、設計荷重としては水平方向の最大風速による風圧力、最大気圧低下量による圧力に基づき設定。

**【施設の構造健全性の確認】**

- 設計荷重に対して、建物・構築物、設備等の評価対象施設の構造健全性が維持されるかを確認。

- ・設計飛来物の設定における保守性  
→仮設足場から鋼製パイプ (足場パイプ)、足場板が飛散する可能性を考慮して、仮設足場の飛散の影響 (運動エネルギー及び貫通力) を包絡した設計飛来物 (鋼製材) を設定した。

**【防護対策】**

- 設計竜巻の最大風速 92m/s にて飛来物発生防止対策や評価対象施設への防護対策を実施。

図 3.1.1 竜巻影響評価の概要及び保守性確保の状況

## 3.2 竜巻影響評価及び竜巻対策の概要

## 【設計竜巻荷重，設計荷重の設定】

○竜巻影響評価ガイドに基づき，設計竜巻荷重は，設計竜巻の風圧力による荷重 ( $W_w$ )，気圧差による荷重 ( $W_p$ ) 及び飛来物による衝撃荷重 ( $W_M$ ) を適切に組み合わせた荷重を設定するとともに，設計竜巻荷重と組合せる荷重（竜巻以外の自然現象による荷重等）は，設計竜巻荷重に包絡される若しくは考慮すべき荷重ではないことを確認。

○ $W_w$ ， $W_p$ ， $W_M$ は，設計竜巻の  $V_D=92\text{m/s}$ ，風速場モデルをフジタモデルとした場合の荷重を設定する。

## 【設計飛来物の選定】

○島根原子力発電所の飛来物に係る現地調査を行い，発電所構内の常設物，仮設物（資機材等）及び二次飛来物（シャッター等）を想定飛来物として抽出した。その中から，それらの飛来物発生防止対策の可否，固定状況，過去の被害事例や代表性（運動エネルギー，貫通力等）を踏まえ，図1のとおり設計飛来物を選定。



鋼製材

砂利

図1 島根原子力発電所の設計飛来物

## 【竜巻影響評価】

○設計荷重に対し，評価対象施設（外部事象防護対象施設の外殻となる建物，外部事象防護対象施設に波及的影響を及ぼし得る施設，設備，機器）の構造安全性及び安全機能が維持されていることを確認。

<外部事象防護対象施設の外殻となる建物，外部事象防護対象施設に波及的影響を及ぼし得る施設の評価>

○評価対象施設（原子炉建物，タービン建物，廃棄物処理建物，制御室建物，ディーゼル燃料貯蔵タンク室，ディーゼル燃料貯蔵タンク格納槽）の構造健全性評価等，局部評価，設計飛来物の衝突に関する評価及び建物外周部建具（扉等）に関する評価を実施し，内包する外部事象防護対象施設が影響を受けないことを確認する。評価対象施設に影響がある場合には防護対策を実施。

○外部事象防護対象施設に波及的影響を及ぼす施設（1号炉原子炉建物，1号炉タービン建物，1号炉廃棄物処理建物，1号炉排気筒，排気筒モニタ室）の構造健全性評価等を実施し，倒壊により外部事象防護対象施設が影響を受けないことを確認。

<設備，機器の評価>

○評価対象施設（海水ポンプ（配管，弁を含む。），海水ストレーナ，排気筒（非常用ガス処理系用排気筒を含む。），ディーゼル燃料移送ポンプ（A-非常用ディーゼル発電機系，高圧炉心スプレイ非常用ディーゼル発電機系）（配管，弁を含む。），空調換気設備，非常用所内電源設備，非常用ガス処理系配管）に対する設計飛来物による貫通評価，設計荷重に対する強度評価を実施し，評価対象施設の構造健全性が維持されることを確認し，評価対象施設に影響がある場合には，防護対策を実施。排気筒は，設計飛来物である鋼製材により損傷し，安全機能が維持されないことを考慮して，補修が可能な設計とするとともに，環境への放射性物質の異常な放出が発生する可能性がある設計基準事故に対して，周辺の公衆に著しい放射線被ばくリスク抑制する機能を保持できる設計とする。また，排気筒及び非常用ガス処理系配管が損傷し，非常用ガス処理系が動作不能と判断された場合は，必要により，プラントを停止し補修を行う。仮に，排気筒の機能が喪失した場合の平常時被ばく評価を実施し，敷地境界線量が線量目標値を超えないことも確認。

○外部事象防護対象施設に波及的影響を及ぼす施設（排気管（非常用ディーゼル発電機の付属施設），排気消音器（非常用ディーゼル発電機の付属施設），ベント管（ディーゼル燃料貯蔵タンク及びディーゼル燃料デイトンクの付属施設），ベント管（潤滑油サンプタンクの付属施設）は，設計飛来物の衝突を考慮して，安全上支障のない期間での補修が可能な設計とすることにより，非常用ディーゼル発電機に波及的影響を及ぼさないことを確認。また，風圧力による荷重及び気圧差による荷重に対して，構造健全性が維持されることを確認。

図3.2.1 竜巻影響評価及び竜巻対策（防護対策，飛来物発生防止対策）の概要(1/3)

【竜巻防護対策】

○設計飛来物（鋼製材）によって損傷する可能性がある外部事象防護対象施設について、下記の通り竜巻防護対策を実施。

＜竜巻防護ネットによる防護＞



竜巻防護ネット

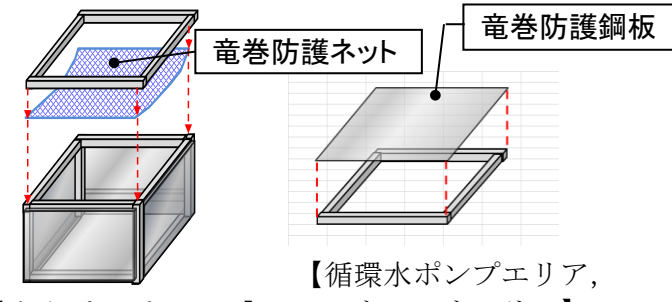
- ・設計飛来物から防護対象設備を防護するため、防護対象設備近傍にある建物開口部へ支持部材又は竜巻防護ネットを設置。
  - ・竜巻防護ネットは設計飛来物の運動エネルギーを吸収可能な設計にするとともに、小径の飛来物\*のすり抜けを防止する設計とする。
- ※：竜巻防護ネットをすり抜ける可能性があるため設計飛来物として選定した砂利を除く。

図2 竜巻防護ネットの設置イメージ

＜鋼製扉による防護＞

- ・設計飛来物の貫通により外部事象防護対象施設への影響が考えられる原子炉建物の扉に対し、鋼製扉のリプレースを実施。
- ・鋼製扉は、設計飛来物の貫通力に耐える設計とする。

＜取水槽の竜巻防護対策＞



竜巻防護ネット

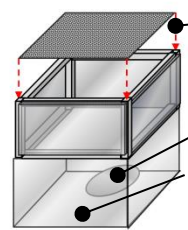
竜巻防護鋼板

【海水ポンプエリア、循環水ポンプエリア、ストレナーエリア】

図3 取水槽の竜巻防護対策イメージ

- ・海水ポンプエリア、循環水ポンプエリア及びストレナーエリアの防護対象設備について設計飛来物からの竜巻防護対策として鋼板（天井面、側面）、竜巻防護ネット（天井面）及び支持部材を設置する。

＜ディーゼル燃料移送ポンプ（A-非常用ディーゼル発電機系、高圧炉心スプレイ非常用ディーゼル発電機系）エリアの竜巻防護対策＞

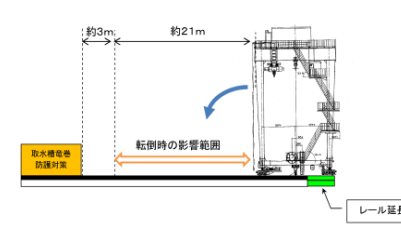


- 竜巻防護鋼板（穴あき）
- ディーゼル燃料移送ポンプ
- ディーゼル燃料移送ポンプピット（コンクリート躯体）

- ・ディーゼル燃料移送ポンプ（A-非常用ディーゼル発電機系、高圧炉心スプレイ非常用ディーゼル発電機系）エリアについて、設計飛来物からの竜巻防護対策として鋼板および支持部材を設置する。

図5 ディーゼル燃料移送ポンプピットの竜巻防護対策イメージ

＜運用による竜巻防護対策＞



レール延長

- ・ガントリークレーンは、竜巻による風荷重等により倒壊した場合、取水槽の竜巻防護対策として設置する防護鋼板等を損傷させる可能性があるため、レールを延長することにより係留位置を変更する。

図6 ガントリークレーンの竜巻防護対策イメージ

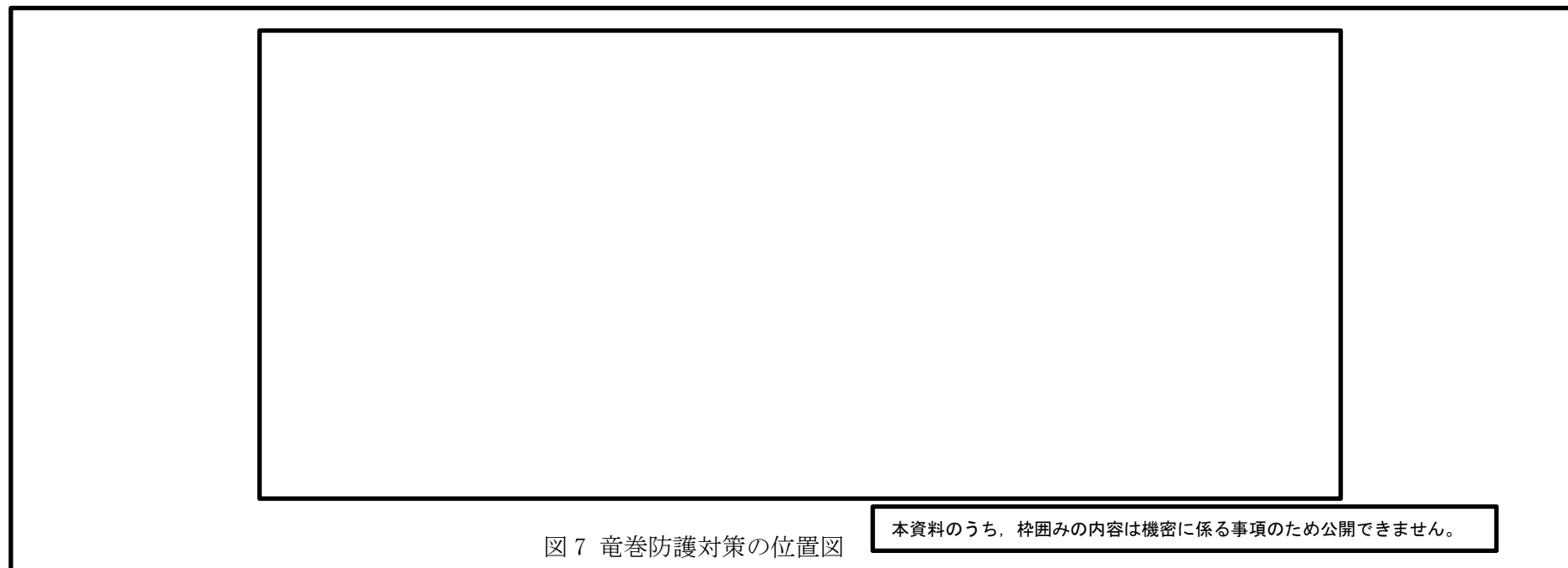


図7 竜巻防護対策の位置図

本資料のうち、枠囲みの内容は機密に係る事項のため公開できません。

【飛来物発生防止対策】

○設計飛来物に選定した鋼製材より運動エネルギー及び貫通力が大きいものについては、設置場所等により応じ下記の通り飛来物発生防止対策を実施。

<飛来物発生防止対策エリアの設定>

- ・飛来物発生防止対策は、飛来物の飛散距離に基づき飛来物発生防止対策エリアを設定し、飛来物となり外部事象防護対象施設に到達するもののうち、その運動エネルギー又は貫通力が設計飛来物に選定した鋼製材よりも大きいものについて飛来物発生防止対策を実施する。
- ・飛来物発生防止対策エリアの設定にあたっては、発電所構内の敷地高さ（図8）を考慮する。
- ・飛来物発生防止対策エリアについては飛散しやすさの観点からプレハブ等の「軽量大型機材」とそれ以外の車両を含めた「資機材・車両」で分類し、飛来物発生防止対策エリアを設定する。
- ・軽量大型機材の飛来物発生防止対策エリアを図9に、資機材・車両の飛来物発生防止対策エリアを図10に示す。

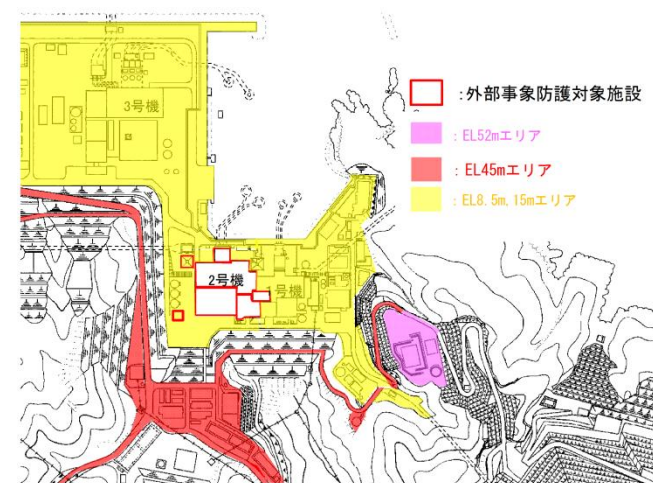


図8 発電所構内の敷地高さ

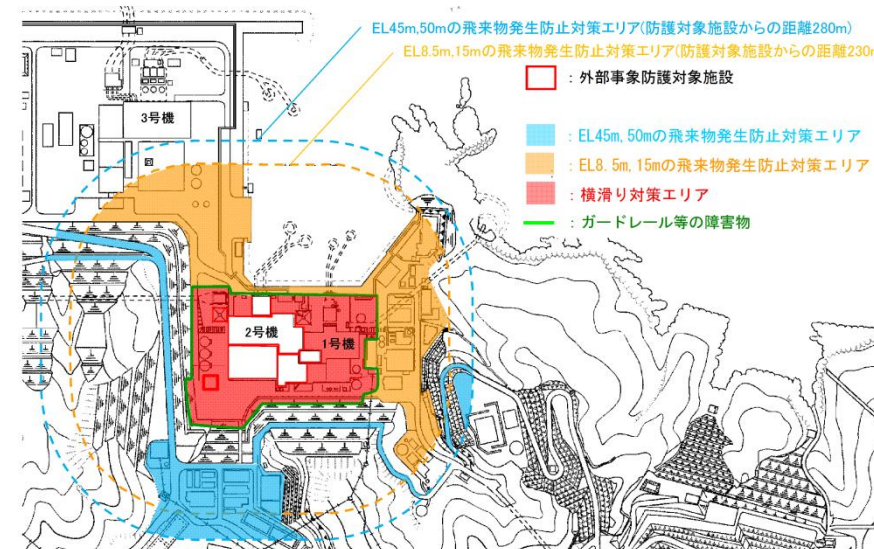


図9 軽量大型機材の飛来物発生防止対策エリア

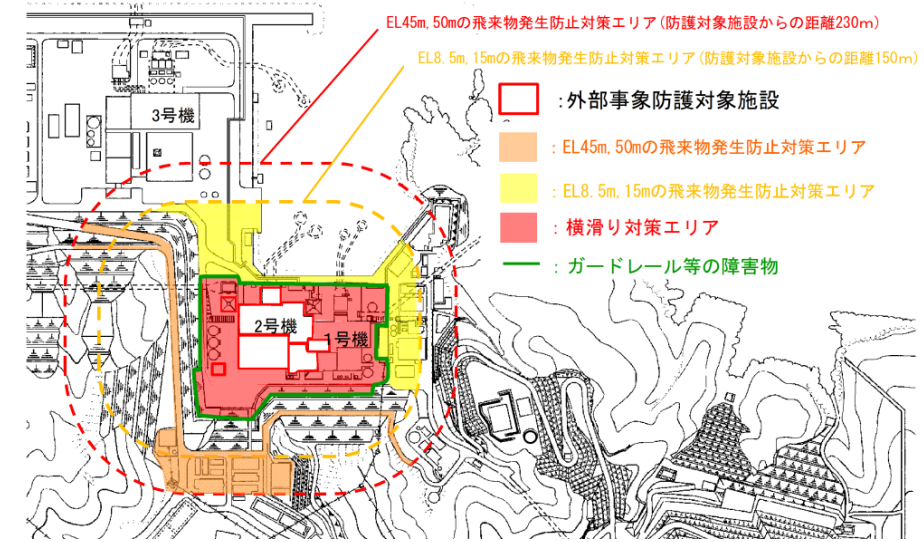


図10 資機材・車両の飛来物発生防止対策エリア

<飛来物発生防止対策の実施>

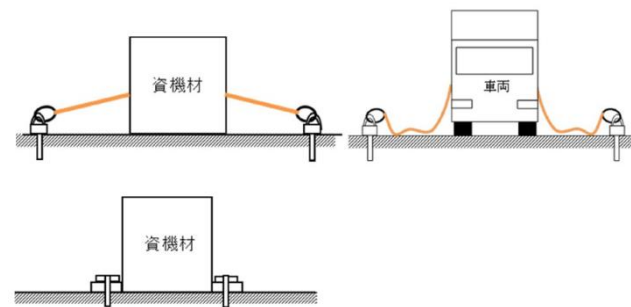


図11 資機材等固縛のイメージ

- ・飛散影響、横滑りを考慮するエリア内に設置した軽量大型機材（プレハブ等）及び資機材等（車両、発電機等）の飛来物発生防止対策としては、移設撤去又は浮き上がりや横滑りを考慮した固縛等を実施。
- ・エリア内の車両の飛来物発生防止対策としては、移設、撤去、固縛に加え、作業中車両について竜巻発生ナウキャスト等を活用し即座に車両を移動できる体制を整え、エリア外への退避等を実施。
- ・対象エリア内のS A車両は飛来物発生防止対策として、固縛等を実施。

図3.2.1 竜巻影響評価及び竜巻対策（防護対策，飛来物発生防止対策）の概要(3/3)

竜巻防護対策のうち飛来物発生防止対策の概要について

1. 飛来物発生防止対策

飛来物発生防止対策の選定フローを図1に示す。

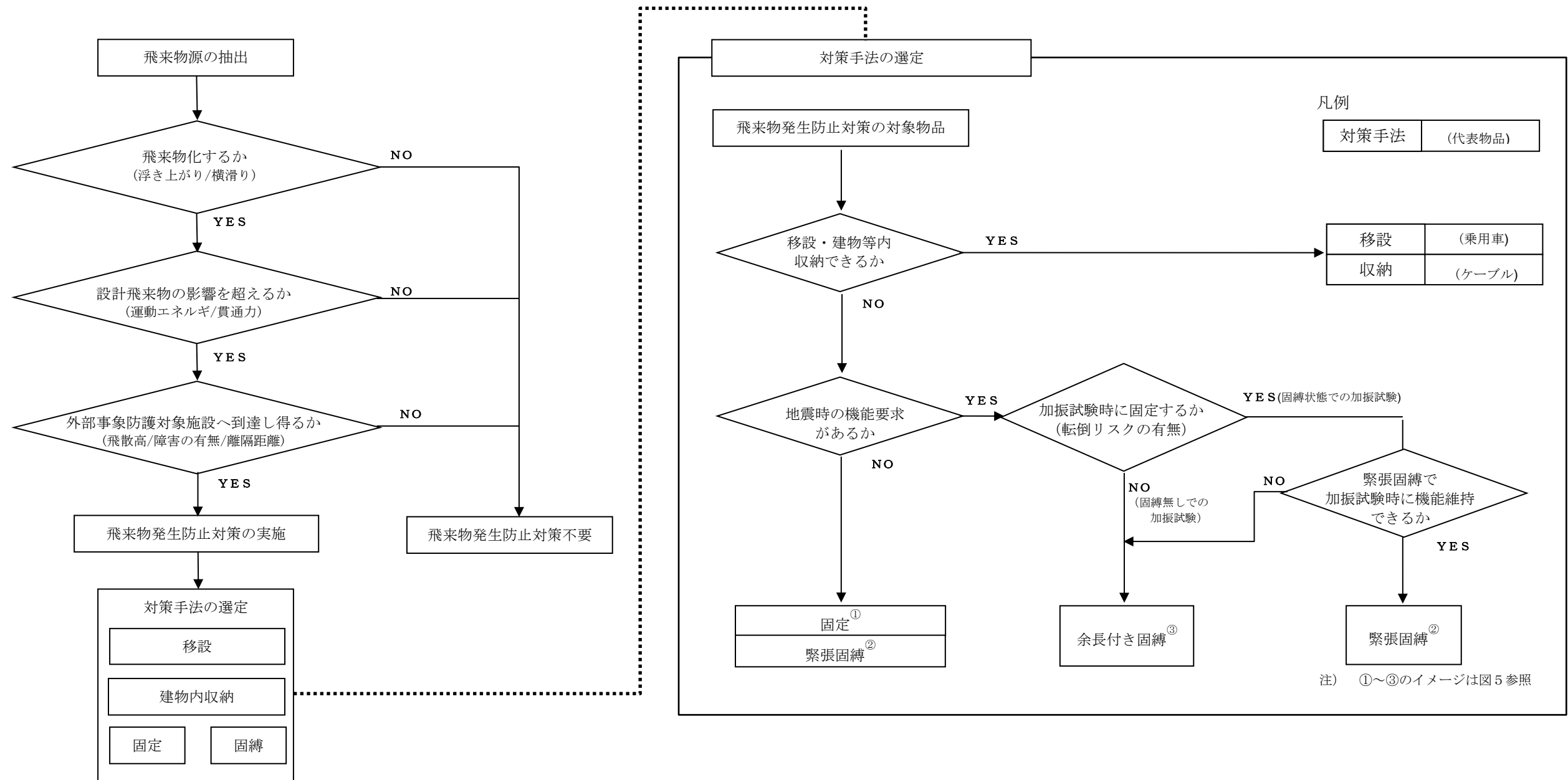


図1 発電所の飛来物発生防止対策の選定フロー



2. 飛来物発生防止対策の基本方針

外部事象防護対象施設に悪影響を及ぼす可能性のある飛来物源に対して飛来物発生防止対策を実施する。

飛来物発生防止対策の実施条件：①～③を全て満たす飛来物源

- ① 飛散（浮き上がり、横滑り）する。
- ② 設計飛来物（鋼製材）の運動エネルギー及び貫通力を上回る。
- ③ 評価対象施設等に到達する。

3. 外部事象防護対象施設への到達、隔離

外部事象防護対象施設に到達しないケースを下記に示す。

- ① 外部事象防護対象施設に到達できない距離を確保した配置とする。（飛来物発生防止対策エリア（図2，3）に示す隔離距離の確保。車両については、図3の範囲内に作業に関係のない車両を原則立入をさせない運用を行う。（飛来物発生防止対策エリアの詳細については、別紙-2参照。））
- ② 横滑りする飛来物と外部事象防護対象施設の間に高低差がある又は障害物が配置されている。（図4に、横滑りする飛来物に対して未到達となる例を示す。）

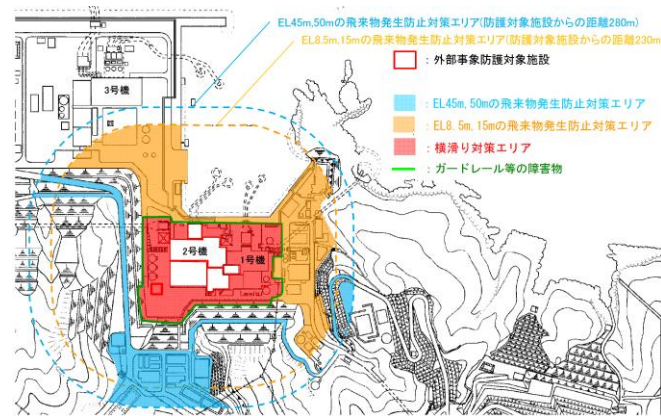


図2 軽量大型機材の飛来物発生防止対策エリア

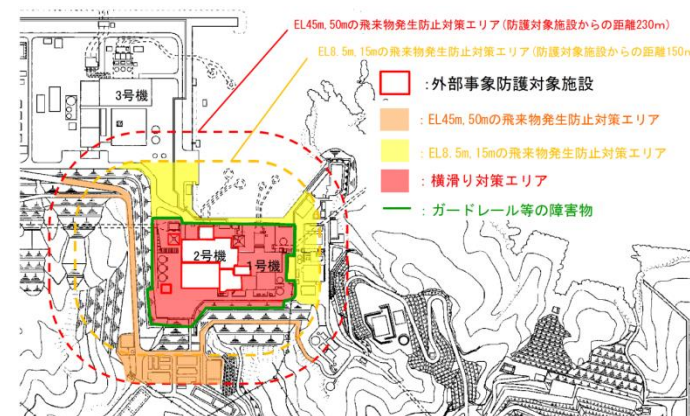


図3 資機材・車両の飛来物発生防止対策エリア

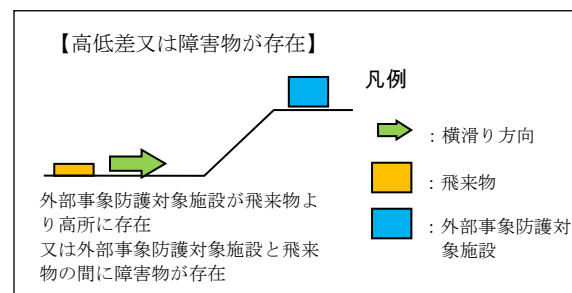


図4 横滑りに対して未到達となる例

4. 飛来物発生防止対策（固定、固縛）の手法の例

飛来物発生防止対策のうち、固定及び固縛の手法の例を図5に示す。

手法	対策の概要図	
①固定		飛来物源に固定金具を取り付けて固定
②緊張固縛		飛来物源を連結材（ロープ）を用いて固縛
③余長付き固縛		飛来物源を連結材（ロープ）を用いて固縛 【動き代がある】

図5 飛来物発生防止対策（固定・固縛）の例

5. 飛来物発生防止対策の実施について

設計飛来物の選定に係る飛来物現地調査（平成25年7月）において確認した、飛来物発生防止対策エリア内で設計飛来物（鋼製材）の影響を超える物品に対して、図1の発電所の飛来物発生防止対策の選定フローに基づき、固定・固縛等の飛来物発生防止対策を実施する。

また、飛来物現地調査以降に発電所構内へ配置された物品（例：土嚢構築物（平成27年10月、平成29年2月に配置）等）についても、追加調査を行い同様に飛来物発生防止対策を実施する。

## 飛来物化する可能性がある物品の管理について

## 1. 概要

発電所内の飛来物となる可能性があるものについては、設計飛来物である鋼製材が設計竜巻により飛散した場合の運動エネルギー及び貫通力を基準として、鋼製材より運動エネルギー又は貫通力が大きい場合は飛来物発生防止対策（運用管理）を実施する。

## 2. 運用管理方針

## 2.1 運用管理の基準

気象庁が発表する竜巻関連の気象情報を踏まえ、運用管理の基準（竜巻警戒レベル）を定める。竜巻運用対策の実施基準を以下のとおり定義する。（竜巻準備体制については、別紙-3にまとめる。）

通常時：竜巻準備体制が発令されていない時

監視強化及び注意喚起：雷注意報（竜巻）又は竜巻注意情報又は竜巻発生確度ナウキャスト（実況）「竜巻発生確度2」かつ雷ナウキャスト（実況）「雷活動度2以上」発令時

竜巻対応開始：竜巻発生確度ナウキャスト（予測（60分先まで））「竜巻発生確度2」かつ雷ナウキャスト（予測（60分先まで））「雷活動度2以上」発令時

## 2.2 運用管理の対象

運用管理の対象は、「資機材・車両」及び「軽量大型機材」とし、「資機材・車両」及び「軽量大型機材」を合わせて、「資機材・車両等」という。「資機材・車両」及び「軽量大型機材」の分類は飛散しやすさの観点から実施し、具体的には150mを超えて飛散する「資機材・車両等」を「軽量大型機材」と定義する。（2.2.1.1(2)参照。）

## 2.2.1 資機材・車両等の管理

## 2.2.1.1 資機材・車両等の管理に際し考慮する事項

資機材・車両等については、飛散の可能性、置かれている場所、竜巻襲来に対する体制の状態に応じて以下の(1)～(4)の対策を行う。

なお、車両については、速やかに固縛・固定することが難しい場合も想定されるため、以下の管理を行う。

・発電所構内での作業に関係のない車両については、原則として入構を禁止す

る。

- ・発電所へ入構する車両については、以下のとおり、車両の飛散の可能性、車両が置かれている場所、車両の状態及び竜巻警戒レベルの発令の有無に応じて対策を行う。

(1) 資機材・車両等の飛散の可能性

発電所に持ち込まれる予定のある資機材・車両等については、原則として事前にサイズ、重量から飛散評価を行い、飛散の可能性の有無を評価・通知する。事前の確認がなされていない場合は、確認が完了するまでは飛散するものとして取り扱う。

(2) 資機材・車両等が置かれている場所

資機材・車両等が飛散することによって評価対象施設等及び竜巻防護対策設備（以下「評価対象施設等」という。）に衝突する可能性があるエリアを「飛来物発生防止対策エリア」と定め、資機材・車両等が飛来物発生防止対策エリア内にある場合には、「2.2.1.2 資機材・車両等の管理方針」に示す管理を行う。

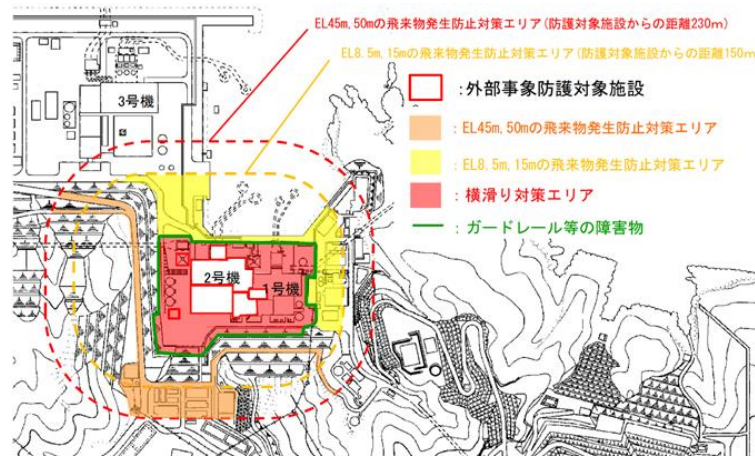
<飛来物発生防止対策エリアの考え方（具体的なエリアは図1, 図2参照）>

飛来物発生防止対策エリアの範囲設定は、資機材・車両等が飛散し、評価対象施設等に影響の与える範囲を保守的に設定する必要がある。そのため、各々の評価対象施設等に対する飛散影響を考慮して設定する。

評価対象施設等と資機材・車両等が置かれている敷地高さの関係および資機材・車両等の形状によって、飛散距離が異なることから、以下の観点で資機材・車両等の飛来物発生防止対策エリアを設定する。

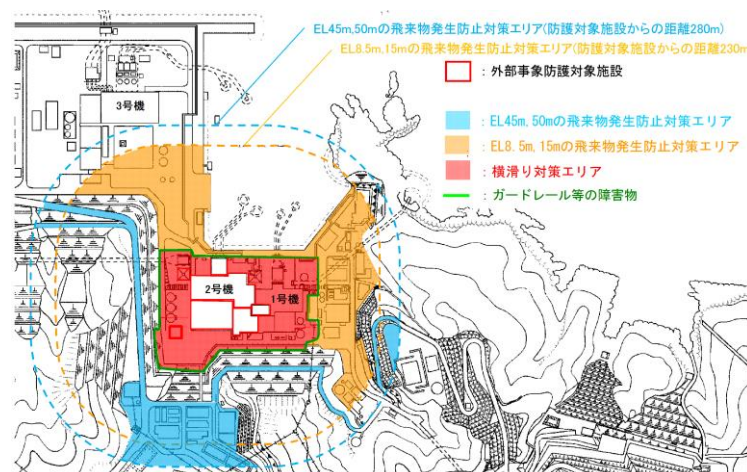
- ① 発電所構内の敷地高さを考慮し、敷地高さ毎に資機材・車両等の飛来物発生防止対策エリアを設定する
- ② 発電所構内の斜面に、資機材・車両等を設置する場合は、設置状況に応じた飛来物発生防止対策を行う
- ③ 資機材・車両及び軽量大型機材それぞれに対し、飛来物発生防止対策エリアを設定する。資機材・車両及び軽量大型機材の分類は飛散距離及び飛散高さにより実施し、飛散距離が150mを超える資機材・車両等を軽量大型機材とし、飛散距離が150m以下の資機材・車両等を資機材・車両とする
- ④ 資機材・車両の飛来物発生防止対策エリアは、ウォークダウンで確認された資機材・車両のうち、最も飛散距離が大きい資機材・車両である「乗用車」の飛散距離から設定する
- ⑤ 軽量大型機材の飛来物発生防止対策エリアは、ウォークダウンで確認された軽量大型機材のうち、最も飛散距離が大きい物品である「プレハブ小屋」の飛散距離から設定する
- ⑥ 発電所構内の敷地高さ（8.5m, 15m, 45m, 50m）から乗用車及びプレハブ小屋をフジタモデルで飛散させた場合の飛散距離から、資機材・車両及び軽量大型機材の飛来物発生防止対策エリアを設定する

- ⑦ 飛散しない資機材・車両等であっても横滑りの検討が必要であるが、フェンス等の障害物により横滑りを防止できない範囲を横滑り対策の検討対象(横滑り対策エリア)とする



- <条件>  
 ・フジタモデル (敷地高さ 8.5m, 15m, 45m, 50m)  
 ・竜巻風速: 92m/s  
 ・飛来物: 乗用車

図1 資機材・車両の飛来物発生防止対策エリア



- <条件>  
 ・フジタモデル (敷地高さ 8.5m, 15m, 45m, 50m)  
 ・竜巻風速: 92m/s  
 ・飛来物: プレハブ小屋

図2 軽量大型機材の飛来物発生防止対策エリア

### (3) 車両の状態

停車：運転手が車両に乗っている（走行中含む）、または緊急時に車両に即座に駆けつけることができる状態。

駐車：停車時以外の状態。

### (4) 竜巻襲来に対する体制の状態

「2.1運用管理の基準」のとおり。

#### 2.2.1.2 資機材・車両等の管理方針

上記の考慮事項に基づき、資機材・車両等の管理方針を以下のとおり定める。

また、管理方針のまとめを表2及び表3、管理イメージを図5に示す。

##### (1) 飛散する資機材・車両等の場合

###### a. 飛散する車両

- ・資機材・車両の飛来物発生防止対策エリア内の駐車状態の車両については、固縛する
- ・資機材・車両の飛来物発生防止対策エリアの停車状態の車両については、平時及び「①監視強化及び注意喚起」時では対策不要だがナウキャストの60分先の予測情報を判断基準としている「②竜巻対応開始」時には固縛又は退避の準備を実施し、退避を開始する。  
ただし、評価対象施設等に影響を及ぼす可能性がないと指定された場所に「①監視強化及び注意喚起」時以前より入域している場合は退避不要とする。
- ・資機材・車両の飛来物発生防止対策エリアの停車状態で作業を行っている工事車両の場合、平時及び「①監視強化及び注意喚起」時では対策不要だが「②竜巻対応開始」時には速やかに作業を中止し、固縛又は退避の準備を実施し、資機材・車両の飛来物発生防止対策エリア外に退避する。ただし、評価対象施設等に影響を及ぼす可能性がないと指定された場所に「①監視強化及び注意喚起」時以前より入域している場合は退避不要とする。なお、作業中止及び車両、物品の固縛、隔離等行うために時間（60分以上）を要する作業（クレーン車等による大型重量物の吊り上げ作業等）を実施する場合には、事前の気象予報等を踏まえて、作業可否を判断する運用を行う
- ・上記の退避又は固縛を速やかに開始するため、資機材・車両の飛来物発生防止対策エリア内の車両については、「①監視強化及び注意喚起」時の段階で、運転者が近くに待機する

###### b. 飛散する「資機材・車両」のうち資機材及び「軽量大型機材」

- ・飛来物発生防止対策エリア内の常設の物品については、平時、「①監視強化及び注意喚起」及び「②竜巻対応開始」時のいずれにおいても原則として固定・固縛しておくが、作業等で一時的に固定・固縛を解除している物品は、「②竜巻対応開始」に移行した場合には速やかに再固定・再固縛が可能なように、作

業者が物品から離れないようにする

- ・飛来物発生防止対策エリア内の仮設の物品は、平時及び「①監視強化及び注意喚起」時では対策不要だが、「②竜巻対応開始」時には固縛・固定又は撤去を実施する
  - ・評価対象施設等に影響を及ぼす可能性がないと指定された場所に「①監視強化及び注意喚起」以前より搬入している場合は固縛・固定は不要とする
- <評価対象施設等に影響を及ぼす可能性がないと指定された場所>
- 飛来物発生防止対策エリア内で、竜巻の風荷重に対し構造健全性を維持することが確認された建物、構築物の内部。（「①監視強化及び注意喚起」以前に、作業等で既に持ち込まれている資機材・車両等が対象）

(2) 飛散はしないが横滑り（転がり含む）する資機材・車両等の場合

a. 飛散はしないが横滑り（転がり含む）する車両

横滑り（転がり含む）による悪影響を考慮し以下のとおりとする。

- ・横滑り対策エリア内の駐車状態の車両は、平時、「①監視強化及び注意喚起」及び「②竜巻対応開始」時のいずれにおいても固縛する。

ただし、評価対象施設等に影響を及ぼす可能性がないとされた場所に駐車する車両の固縛は不要とする

- ・横滑り対策エリア内の停車状態の車両は、平時及び「①監視強化及び注意喚起」時では対策不要だが、「②竜巻対応開始」時には固縛・退避の準備を実施し、横滑り対策エリア外に退避する
- ・上記の退避又は固縛を速やかに開始するため、横滑り対策エリア内の車両については、「①監視強化及び注意喚起」時の段階で、運転者が近くに待機する

b. 飛散はしないが横滑り（転がり含む）する資機材・車両のうち資機材及び軽量大型機材

横滑りによる悪影響を考慮し以下のとおりとする。

- ・横滑り対策エリア内の常設の物品については、平時、「①監視強化及び注意喚起」及び「②竜巻対応開始」のいずれにおいても原則として固定・固縛しておくが、作業等で一時的に固定・固縛を解除している物品は、「②竜巻対応開始」時に移行した場合には速やかに再固定・再固縛が可能なよう、作業者が物品から離れないようにする
- ・横滑り対策エリア内の仮設の物品は、平時及び「①監視強化及び注意喚起」時では対策不要だが、「②竜巻対応開始」時には固縛・固定又は撤去を実施する
- ・評価対象施設等に影響を及ぼす可能性がないと指定された場所に置かれている物品については、固定・固縛は不要とする

表2 発電所への入構車両の管理方針

飛散の有無	配置場所	車両の状態	管理方法		
			平時	①監視強化及び注意喚起	②竜巻対応開始
飛散しないが横滑りはする車両	資機材・車両の飛来物発生防止エリア（横滑り対策エリア）内	駐車	固縛 <sup>※1</sup>		
		停車	対策不要	固縛・退避手順の確認等	固縛又は退避 <sup>※1</sup>
	資機材・車両の飛来物発生防止エリア（横滑り対策エリア）外	駐車	対策不要		
		停車			
飛散する車両	資機材・車両の飛来物発生防止エリア内	駐車	固縛 <sup>※1</sup>		
		停車	対策不要	固縛・退避手順の確認等	固縛又は退避 <sup>※1</sup>
	資機材・車両の飛来物発生防止エリア外	駐車	対策不要		
		停車			

※1 竜巻に対し構造健全性を維持することが確認された建物、構築物の内部に「①監視強化及び注意喚起」以前に入域している車両は対象外

表3 「資機材・車両」のうち資機材及び「軽量大型機材」の管理方針

飛散の有無	配置場所	物品の分類	管理方法		
			平時	①監視強化及び注意喚起	②竜巻対応開始
飛散しないが横滑りはする資機材・車両のうち資機材及び「軽量大型機材」	飛来物発生防止対策エリア（横滑り対策エリア）内	常設	固縛・固定 <sup>※1, 2</sup>		固縛・固定 <sup>※2</sup>
		仮設	対策不要	固縛・固定又は撤去手順の確認等	固縛・固定又は撤去 <sup>※2</sup>
	飛来物発生防止対策エリア（横滑り対策エリア）外	常設	対策不要		
		仮設			
飛散する資機材・車両のうち資機材及び「軽量大型機材」	飛来物発生防止対策エリア内	常設	固縛・固定 <sup>※1, 2</sup>		固縛・固定 <sup>※2</sup>
		仮設	対策不要	固縛・固定又は撤去手順の確認等	固縛・固定又は撤去 <sup>※2</sup>
	飛来物発生防止対策エリア外	常設	対策不要		
		仮設			

※1 作業等で必要な場合は解除可能とするが、速やかに再固定・再固縛が可能なよう、作業者が物品から離れないようにする

※2 竜巻に対し構造健全性を維持することが確認された建物、構築物の内部に「①監視強化及び注意喚起」以前に設置している物品は対象外

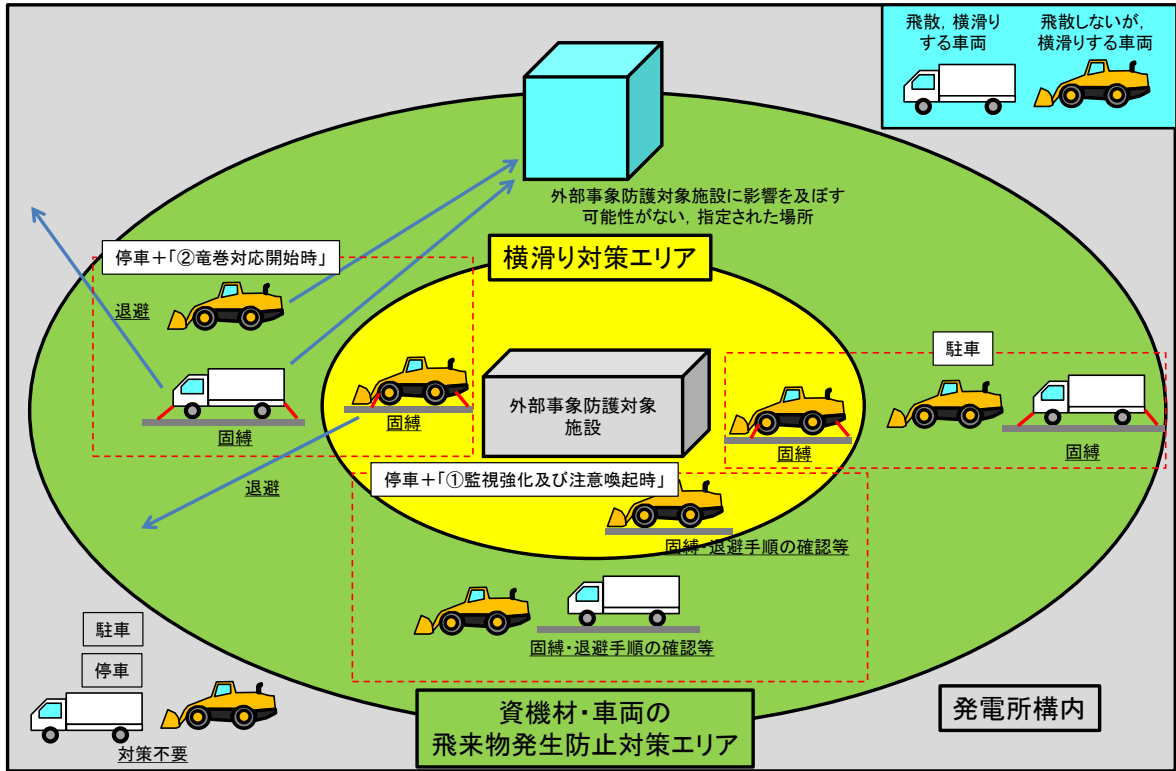


図5 発電所への入構車両の管理イメージ

### 2.2.1.3 車両の退避場所

車両の退避に要する時間について、退避エリア候補地 a 及び b への退避に要する場合を図6で例示する。

退避エリア候補地 a の基点は、資機材・車両の飛来物発生防止対策エリア内から退避エリア候補地 a までの距離が最も遠くなる原子炉建物南側エリア（図6中の A）とする。退避エリア候補地 b の基点も同様の考え方でタービン建物北側（図6中の B）とする。

退避エリア候補地 a 及び b への車両の避難については表4 のとおりであり、竜巻襲来までの時間余裕として見込んでいる60分の中で、退避は可能と判断している。

今後、構内の道路状況や関連設備の整備状況を踏まえて運用面の具体的な手順化を行っていく。

表4 退避に要する所要時間

	基点からの距離	想定時間 <sup>※1</sup>
退避エリア候補地a	約2.0km <sup>※2</sup>	約25分
退避エリア候補地b	約0.9km <sup>※2</sup>	約12分

※1 退避時の車両渋滞の可能性も考慮し、保守的に車両の移動速度を徒歩(80m/min)程度として算出した。

※2 退避エリア候補地aの基点は図6中のA, 退避エリア候補地bの基点は図6中のBとして距離を設定した。



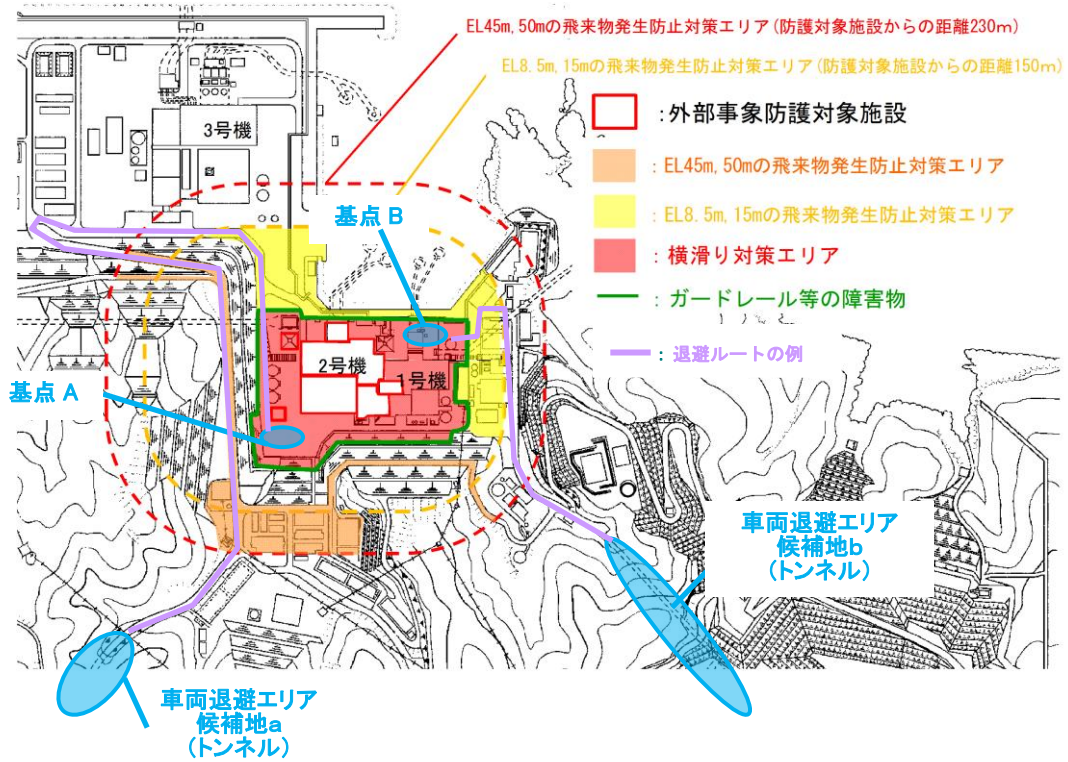


図6 資機材・車両の飛来物発生防止対策エリア及び車両退避エリア候補地

竜巻準備体制の発令の判断基準について

1. 基本方針

評価対象施設及び竜巻防護対策設備（以下「評価対象施設及び防護対策設備」という。）の安全機能維持に影響を与えないよう、評価対象施設及び防護対策設備周辺に駐車及び停車している車両を固縛又は退避させる必要がある。

竜巻による評価対象施設及び防護対策設備への被害を防止するため、竜巻の兆候を早期に検知し、事前に準備を行うことが重要であり、兆候を早期に検知する方法として、気象庁から発表される「竜巻注意情報」及び「雷注意報」に加え、レーダーナウキャストによる予測を用いる。

気象庁による監視体制は2013年3月のドップラーレーダー化完了により強化され、さらに研究も進んでいることから、今後さらなる予測精度の向上が見込まれる。よって以下の判断基準等については、今後もデータ・知見等の収集に努め、より信頼度の高い判断基準となるよう検討を継続し、改善を図っていくものとする。

2. 実施基準の定義

発電所での竜巻襲来時における体制（以下「竜巻準備体制」という。）の発令等の判断基準として、竜巻準備体制の実施基準（イメージ）を表1に、竜巻発生確度ナウキャスト、雷ナウキャストの監視範囲を図1に示す。

表1 竜巻準備体制の実施基準

対応	判断基準	監視範囲	運用対策案
①監視強化及び注意喚起	雷注意報(竜巻)の発表	松江市, 出雲市, 雲南市, 安来市, 境港市, 米子市	連絡体制の確認
	竜巻注意情報の発表	島根県東部, 島根県西部, 隠岐 鳥取県中・西部	
	竜巻発生確度ナウキャスト(実況) 「竜巻発生確度2」 かつ雷ナウキャスト(実況) 「雷活動度2以上」	発電所を中心に東西及び北方向に75km, 南側は県境までを含む範囲 (図1の監視範囲A)	
②竜巻対応開始	竜巻発生確度ナウキャスト(予測(60分先まで)) 「竜巻発生確度2」 かつ雷ナウキャスト(予測(60分先まで)) 「雷活動度2以上」	・竜巻発生確度ナウキャスト 発電所を中心に南北方向20km×東西方向10kmの範囲 (図1の監視範囲B) ・雷ナウキャスト 発電所を中心に南北方向2km×東西方向2kmの範囲 (図1の監視範囲C)	資機材・車両等の固縛, 人・車両の退避

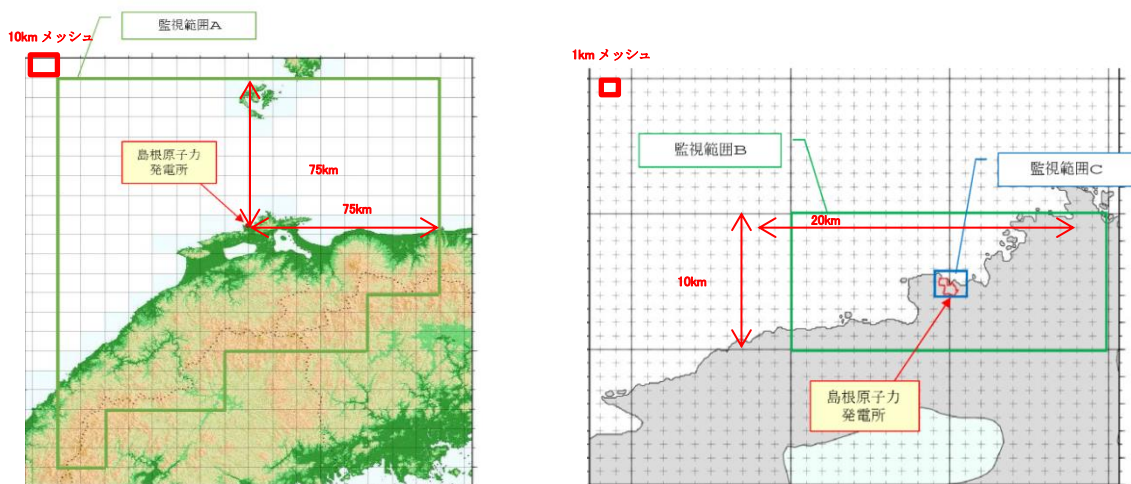


図1 竜巻発生確度ナウキャスト、雷ナウキャストの監視範囲

3. 各実施基準の判断基準に用いる気象情報の妥当性

(1) 監視強化及び注意喚起の確認の判断

気象情報：以下の or 条件

- ①雷注意報（竜巻）
- ②竜巻注意情報
- ③竜巻発生確度ナウキャスト（実況）「竜巻発生確度2」かつ雷ナウキャスト（実況）「雷活動度2以上」

表2に、藤田スケール1以上の竜巻に対し、上記条件のうち、①雷注意情報（竜巻）、②竜巻注意情報が竜巻を捕捉した確率を調査した結果を示す。

表2 ①雷注意報（竜巻）及び②竜巻注意情報による竜巻の捕捉率

（気象庁HP「竜巻注意情報の発表状況」より、2010年～2018年12月までのデータを調査）

時間的余裕	年	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	合計	2013.3.14以降 <sup>*1</sup>	2016.12.15以降 <sup>*2</sup>
予見失敗		0	0	0	0	0	0	1	0	1	2	2	1
10分以内		1	1	0	3	0	0	2	0	0	7	5	0
10分超～30分以内		0	2	0	2	0	0	1	0	1	6	4	1
30分超～40分以内		2	0	1	0	0	0	0	0	0	3	0	0
40分超～50分以内		1	0	0	0	2	1	0	0	1	5	4	1
50分超～60分以内		0	1	1	0	0	0	0	0	0	2	0	0
60分超		4	1	8	16	4	8	10	5	10	66	51	16
合計		8	5	10	21	6	9	14	5	13	91	66	19
全捕捉率		100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	92.9%	100.0%	92.3%	97.8%	97.0%	94.7%
猶予10分超での補足率		87.5%	80.0%	100.0%	85.7%	100.0%	100.0%	78.6%	100.0%	92.3%	90.1%	89.4%	94.7%
猶予30分超での補足率		87.5%	40.0%	100.0%	76.2%	100.0%	100.0%	71.4%	100.0%	84.6%	83.5%	83.3%	89.5%
猶予40分超での補足率		62.5%	40.0%	90.0%	76.2%	100.0%	100.0%	71.4%	100.0%	84.6%	80.2%	83.3%	89.5%
猶予60分超での補足率		50.0%	20.0%	80.0%	76.2%	66.7%	88.9%	71.4%	100.0%	76.9%	72.5%	77.3%	84.2%

※1 全国の気象レーダーのドップラーレーダー化完了日。観測精度の向上が期待できる期間として設定。

※2 竜巻注意情報の単位領域の細分化開始日。

捕捉率はほぼ100%であり、また、近年のデータからは猶予時間30分以上での捕捉率についても改善傾向が認められる。したがって、「雷注意報（竜巻）」又は「竜巻注意情報」を判断基準とすることにより、竜巻準備体制を整えるための猶予時間は確保できると考える。

また、より信頼性が高い判断基準となるよう③竜巻発生確度ナウキャスト

(実況)「竜巻発生確度2」かつ雷ナウキャスト(実況)「雷活動度2以上」も考慮する。

藤田スケール(Fスケール)の被害指標ではF3の場合に「自動車は持ち上げられて飛ばされる。」となっており、万一衝突した場合の影響が大きい車両が評価対象施設及び防護対策設備に影響を及ぼす竜巻のスケールはF3スケール以上と考えられるが、表3のとおり、ナウキャスト運用開始後に発生したF3スケール以上の竜巻については竜巻発生確度2が事前に出されていることから、「竜巻発生確度2」を用いることで、F3スケールの竜巻の予測は可能と考える。

表3 竜巻ナウキャストによるF3竜巻の予測実績

発生時間	発生箇所	竜巻発生確度 及び発令時間
2012.5.6 12:35~12:53	茨城県常総市	確度2(12:20)

また、雷は積乱雲内の上昇気流によって発生する<sup>※1</sup>ことから、雷ナウキャストも考慮に加えることとした。

強い竜巻は、スーパーセルと呼ばれる発達した積乱雲の下で発生する。竜巻ナウキャストの発生確度2は、メソサイクロン(スーパーセル中にある水平規模数kmの小さな低気圧)の検出が条件となっているが、これはメソサイクロン付近で竜巻などの激しい突風の可能性がある<sup>※2</sup>と判断されるためである。更に降水強度を低めに見積もることによって、発達中の積乱雲から発生する突風を見逃さないようにしている。

積乱雲は成長期、成熟期及び衰退期の3段階のライフサイクルで形成、消滅する<sup>※2</sup>が、このサイクル中で竜巻及び雷が発生するのは積乱雲が最も発達した成熟期であり、この成熟期の初期段階又は発達した積乱雲の接近を把握する方法として、雷ナウキャストを利用する。

雷ナウキャストの活動度2は、上空の放電状態や発達した積乱雲の周辺を表しており、竜巻が発生する可能性が高い発達した積乱雲の発生又は接近を予告する指標として活用できると考える。また、ナウキャストにおいては予測だけでなく直近の過去のデータ及び予測値を見ることが可能であるため、準備体制の確認の段階においてナウキャストを監視することにより、積乱雲の状況を確認することが可能である。

以上より、竜巻ナウキャストの発生確度2に雷ナウキャストの活動度2以上の組み合わせを、強い竜巻が発生するおそれが高まっていることの指標とすることは妥当であると判断した。

(2) 竜巻対応開始の判断

気象情報：以下の and 条件

①竜巻発生確度ナウキャスト（予測（60分先まで））

「竜巻発生確度2」

②雷ナウキャスト（予測（60分先まで））

「雷活動度2以上」

雷活動度の予測には盛衰傾向による補正が加えられており、現時点では成長期や成熟期初期にある積乱雲に対して継続時間を考慮した予測がなされている。すなわち、単純な積乱雲の移動による雷の発生の予測でなく、積乱雲の発達も考慮に加えられている<sup>※2</sup>。

以上より、予測を含む竜巻ナウキャストの発生確度2と雷ナウキャストの活動度2以上の組み合わせを、強い竜巻の発生の指標とすることは妥当であると判断した。

なお、人員の避難はプラント運用面への負担が大きな対策であると考えられるため、ナウキャストの値だけでなく、現場の気象状況も加味して判断することが現実的と考えられる<sup>※3</sup>ことから、カメラ等を用いた上空の監視も判断基準に加えることとしている。

※1 大野久雄：雷雨とメソ気象（2001，東京堂出版）

※2 雷ナウキャストにおける雷の解析・予測技術と利用方法（測候時報 78.3 2011）

※3 竜巻などの激しい突風に関する気象情報の利活用について（H22.3 気象庁）

『竜巻注意情報や竜巻発生確度ナウキャストは、適中率が低く空振りが多くなるため、これらの発表と連動して負担（対策に要する時間や手間、及び対策の影響）の大きな対策を実施するのは難しいのが現状である。

したがって、「空の様子に注意する」など、なるべく負担の小さな対策から実施するのが適当であり、負担の大きな対策の実施については、発生確度1や2の発表に現場の気象状況を加味して判断するのが現実的な利用方法といえる。』

## 竜巻発生確度ナウキャスト及び雷ナウキャスト

### (1) 竜巻発生確度ナウキャストとは

10km格子単位で「竜巻が発生する可能性の程度」を2つの階級（発生確度1, 2）で解析し、10分ごとに1時間先までの予測を行うもの。

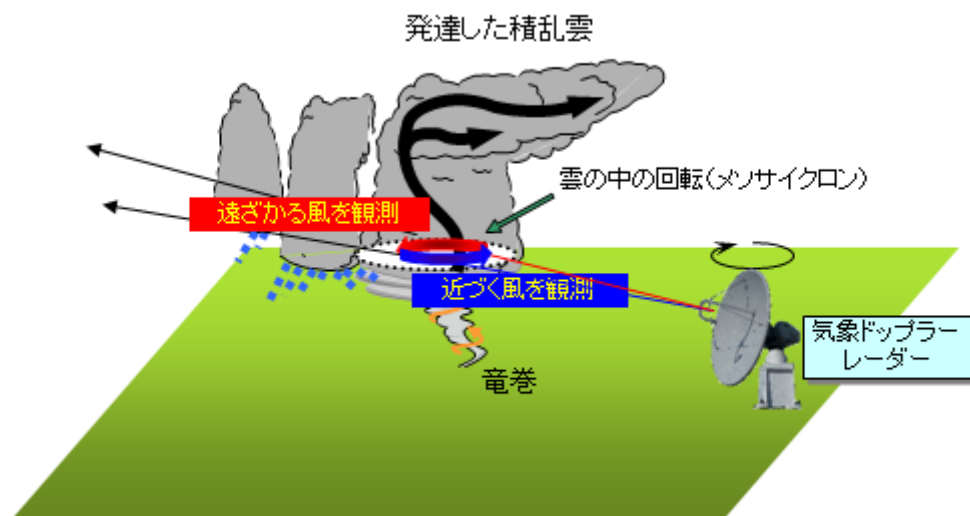
竜巻などの激しい突風は、規模が小さくレーダーなどの観測機器で直接実体を捉えることができないため、竜巻をもたらす発達した積乱雲の中にある直径数キロのメソサイクロンの検出又は、大気環境、積乱雲の発生場所・発達状況から突風の発生可能性を表す指数「突風危険指数」が基準を満たした場合に発生確度の解析を開始し、降水強度の解析と重ねて降水強度が強い格子を発生確度1, 2と判定する。

#### ・発生確度1

メソサイクロンの検出又は突風危険指数の基準を満たした（OR条件）格子の周辺100km範囲は「積乱雲が発生すれば突風の可能性がある」領域（発生確度1背景）と考え、この領域の降水強度が強い格子が「発生確度1」と判定する。

#### ・発生確度2

メソサイクロンの検出及び突風危険指数の基準を満たした（AND条件）格子の周辺40km範囲は「積乱雲が発生すれば突風の可能性が発生確度1背景より高い」領域（発生確度2背景）と考え、この領域の降水強度が強い格子が「発生確度2」と判定する。



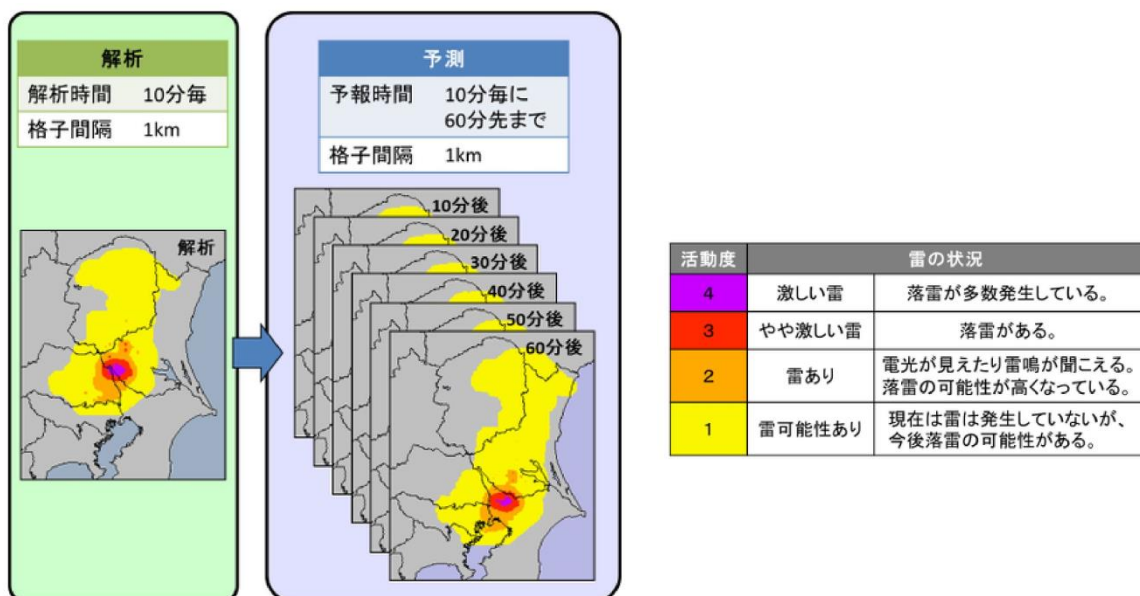
出典：竜巻などの激しい突風に関する気象情報の利活用について：平成22年3月気象庁

(2) 雷ナウキャストとは

雷ナウキャストは、雷の激しさや雷の可能性を1km格子単位で解析し、その1時間後（10分先～60分先）までの予測を行うもので、10分ごとに更新して気象庁より提供される。

雷の解析は、雷監視システムによる雷放電の検知及びレーダー観測などを基にして活動度1～4で表される。予測については、雷雲の移動方向に移動させるとともに、雷雲の盛衰の傾向も考慮している。

雷ナウキャストでは、雷監視システムによる雷放電の検知数が多いほど激しい雷（活動度が高い）としており、雷放電を検知していない場合でも、雷雲の特徴から雷雲解析をするとともに、雷雲が発達する可能性のある領域も解析している。



出典：雷ナウキャストとは 気象庁HP

## 原子炉建物ブローアウトパネルに対する対応方針について

## 1. 概要

原子炉建物のブローアウトパネル（以下、「ブローアウトパネル」という。）の竜巻に対する対応方針について整理した。

## 2. 竜巻によるブローアウトパネルの機能への影響と基本対応方針

竜巻襲来時にブローアウトパネルに想定される状態、プラントへの影響及び対応方針を整理した結果を表1に示す。

ブローアウトパネルは原子炉建物4階の北側2箇所の設置されている。飛来物によるブローアウトパネルの損傷（貫通）については、ブローアウトパネルへの飛来物防護対策を行う方針とする。

また、ブローアウトパネルが設計竜巻により生じる気圧差で開放した場合には再閉止措置を行う設計とする。

ブローアウトパネルが開放したときの外壁開口部への竜巻の影響及び防護方針については、3.にて整理する。

表1 竜巻襲来時のブローアウトパネル状態とプラントへの影響と対応

竜巻襲来時のブローアウトパネルの状態	プラントへの影響	基本対応方針
気圧差による開放	原子炉建物の閉じ込め機能の喪失	設計基準事故と竜巻の重畳頻度は十分小さい。設計竜巻により生じる気圧差で開放した場合は再閉止措置をする。
	開口部の発生による、建物内部の評価対象施設への竜巻荷重（風圧力、飛来物）の作用	各評価対象施設の配置状況等を踏まえ以下の対策を実施。 ・風圧力に対する評価 ・飛来物の侵入防止
飛来物による損傷（貫通）	原子炉建物の閉じ込め機能の喪失	（飛来物の侵入防止対策に含まれる）
	飛来物の侵入による、建物内部の評価対象施設の損傷	



### 3. 竜巻によるブローアウトパネルの開放に伴う影響評価及び防護方針

ブローアウトパネルは設計竜巻による気圧低下に伴う気圧差で開放する可能性があり、その際に原子炉建物外壁には開口が生じた状態となることから、当該状態に対する竜巻による影響を評価した。

#### 3.1 ブローアウトパネルが開放した場合に竜巻の影響を受ける外部事象防護対象施設

ブローアウトパネルが開放した場合に、竜巻の影響を受ける外部事象防護対象施設は、オペレーティングフロア内に設置している燃料プール、燃料取替機、原子炉建物天井クレーン等がある。当該外部事象防護対象施設及びブローアウトパネルの配置を図1に示す。

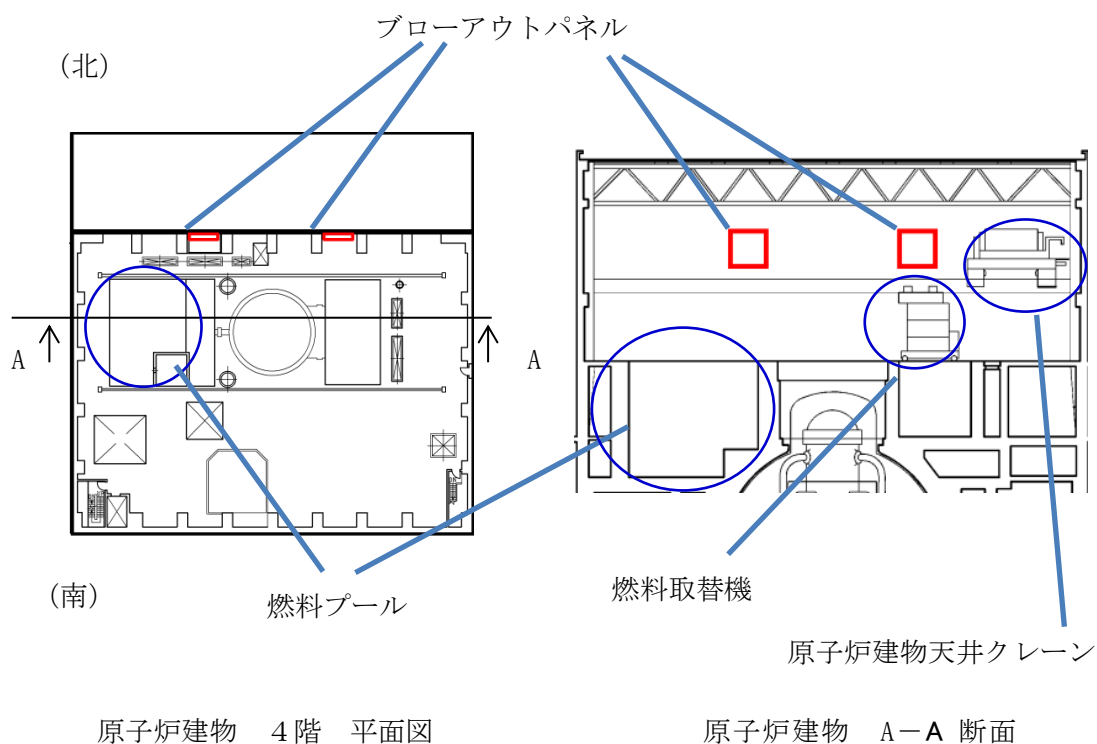


図1 原子炉建物ブローアウトパネル配置図

### 3.2 外部事象防護対象施設に作用し得る荷重

ブローアウトパネルが設計竜巻による気圧低下に伴う気圧差により開放した場合、当該開口部から原子炉建物の外部事象防護対象施設に作用し得る竜巻に関連する荷重について、表2の通り整理した。その結果、考慮すべき荷重として抽出されるものはない。

表2 ブローアウトパネル開口部から原子炉建物内部に作用し得る竜巻に関連する荷重

荷重	評価	考慮の 要否	
風圧力による荷重 ( $W_w$ )	同一の区画において複数のブローアウトパネルが開放すると風の流路が形成されるが、ブローアウトパネルは同じ面に2箇所設置されており、流路が形成されないことから考慮不要。	否	
気圧差による荷重 ( $W_p$ )	開口部の付近には密閉された設備がないため考慮不要。	否	
設計飛来物による 衝撃荷重 ( $W_M$ )	ブローアウトパネルへの飛来物防護対策を実施することから考慮不要。	否	
随 伴 事 象 が 考 え ら れ る 事 象	雷	建物開口部から雷の侵入は考え難いため考慮不要。	否
	降水	雨の影響は開口部近傍に限られるとともに、安全施設は内部溢水対策が講じられていることから、考慮不要。	否
	ひょう	衝突した場合の影響が設計飛来物に包含できるため、考慮不要。 (「添付資料 3.3 別紙-3 竜巻時に発生するひょうの影響について」)	否

以上

### 3.3 設計飛来物の選定について

#### 3.3.1 設計飛来物設定の考え方

島根原子力発電所の竜巻影響評価対象施設に対する評価を実施するにあたって、現地調査及びガイドにおける設計飛来物の設定例を参考として設計飛来物を設定した。

島根原子力発電所構内において竜巻によって飛散し飛来物となり得る物体を現地調査により抽出し、サイズ、形状及び変形性状により分類・整理した上で、竜巻風速場における挙動を解析することにより浮き上がりの有無及び最大飛散速度を求めた。解析結果及びガイドに示されている設定例に基づき、竜巻影響評価対象施設への影響及び飛来物発生防止対策実施の有無を考慮して、設計飛来物を設定した。なお、設計飛来物の設定に当たっては、別紙-1に示す過去の主な竜巻事例も考慮した。

設計飛来物の設定フローを図3.3.1に示す。



### 3.3.2 島根原子力発電所における飛来物現地調査

島根原子力発電所において、竜巻により飛来物となり得る物体（以下「想定飛来物」という。）を抽出するために、以下の通り現地調査を実施した。

#### 3.3.2.1 現地調査

想定飛来物を抽出するため、島根原子力発電所構内において、平成25年7月9、10日に現地調査を実施した。主な調査対象を以下に示す。

- ①原子炉建物・タービン建物等の主要建物及びその周辺（建物外周及び屋上）
- ②サイトバンカ建物、固体廃棄物貯蔵所等の周辺建物及びその周辺（建物外周及び屋上）
- ③取水槽・屋外タンク・開閉所等の屋外施設及びその周辺

#### （1）現地調査の観点

現地調査では、各分野の担当（電気、機械及び建築）が参加し、2班に分かれて、発電所構内を41のエリアに細分化した図3.3.2～3.3.4に示す各エリアについて、飛来物になる可能性のある物体（構内で固定されていないもの）を網羅的に抽出した。建物・構築物の外壁や地盤にボルト等により固定されているものは、飛来物になるとは考えにくいですが、空調室外機や屋外照明などの一般産業品については、念のため想定飛来物として抽出した。

なお、調査においては、波及的影響を及ぼし得る施設の抽出の観点から施設の高さが外部事象防護対象施設までの距離より小さいものも含め抽出した。

#### （2）現地調査結果

現地調査の結果、図3.3.5に示す通り想定飛来物（約1000個）が抽出された。

また、発電所構外から持ち込む仮置き物品（夏場や冬場に屋外作業の準備等のために使用する休憩所等季節的な観点から抽出されるものも含める）について、現地調査で確認した結果の網羅性を高めることを目的に協力会社への聞き取りを実施し、現地調査で確認した想定飛来物以外に特別な物体等がないことを確認した。

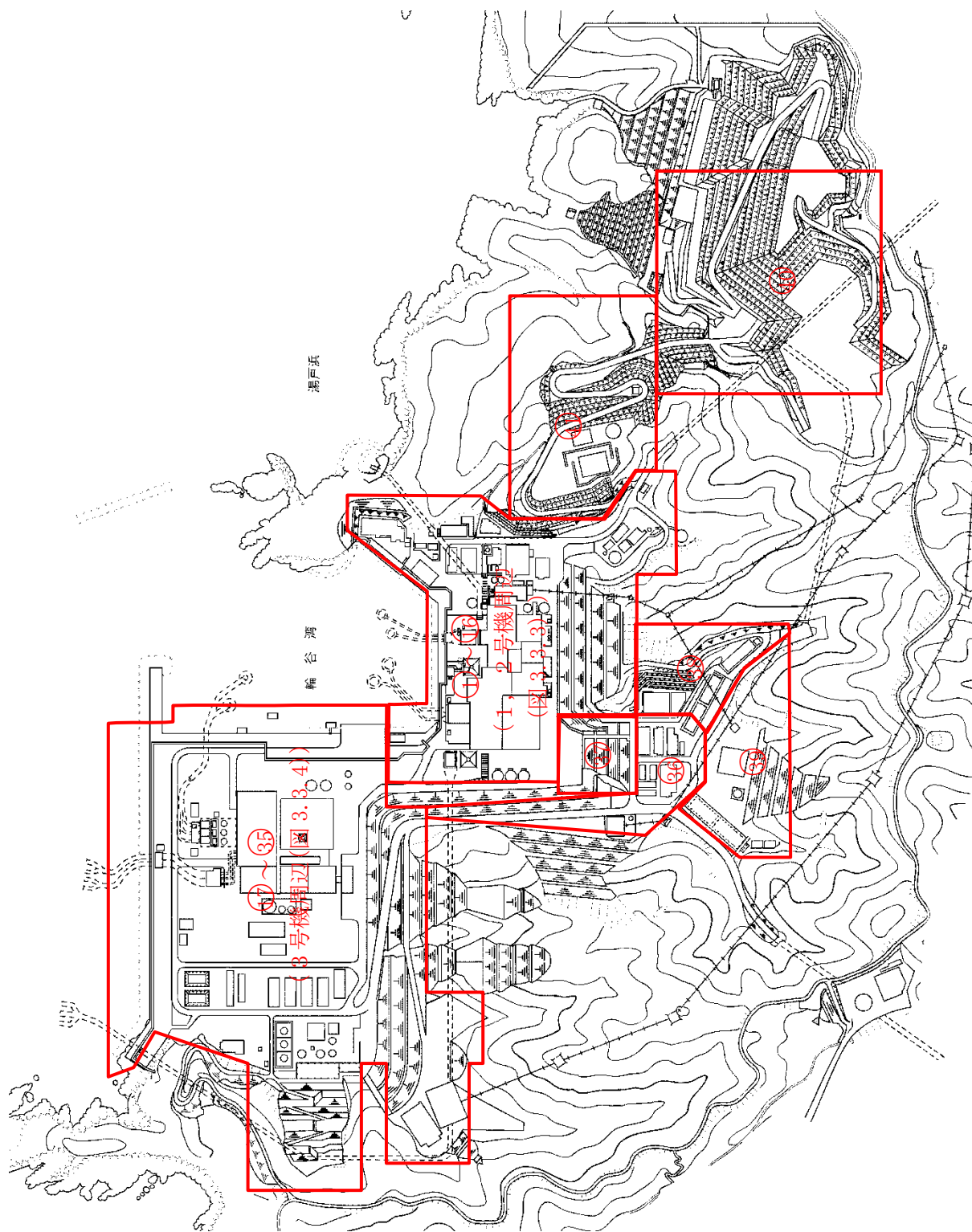


図 3.3.2 島根原子力発電所 竜巻飛来物現地調査区画図 (全体図)

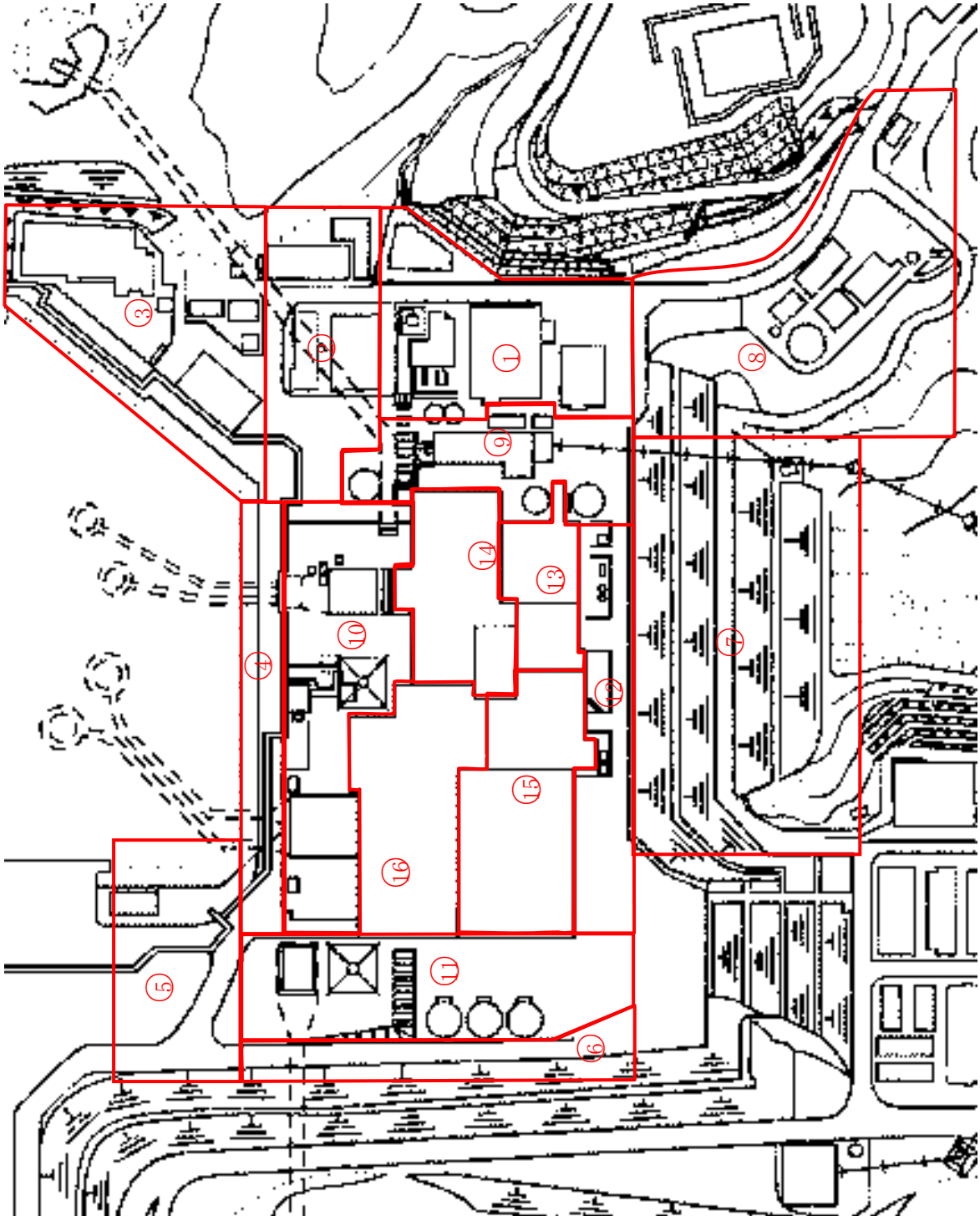


図 3.3.3 島根原子力発電所 竜巻飛来物現地調査区画図 (1, 2号炉周辺)

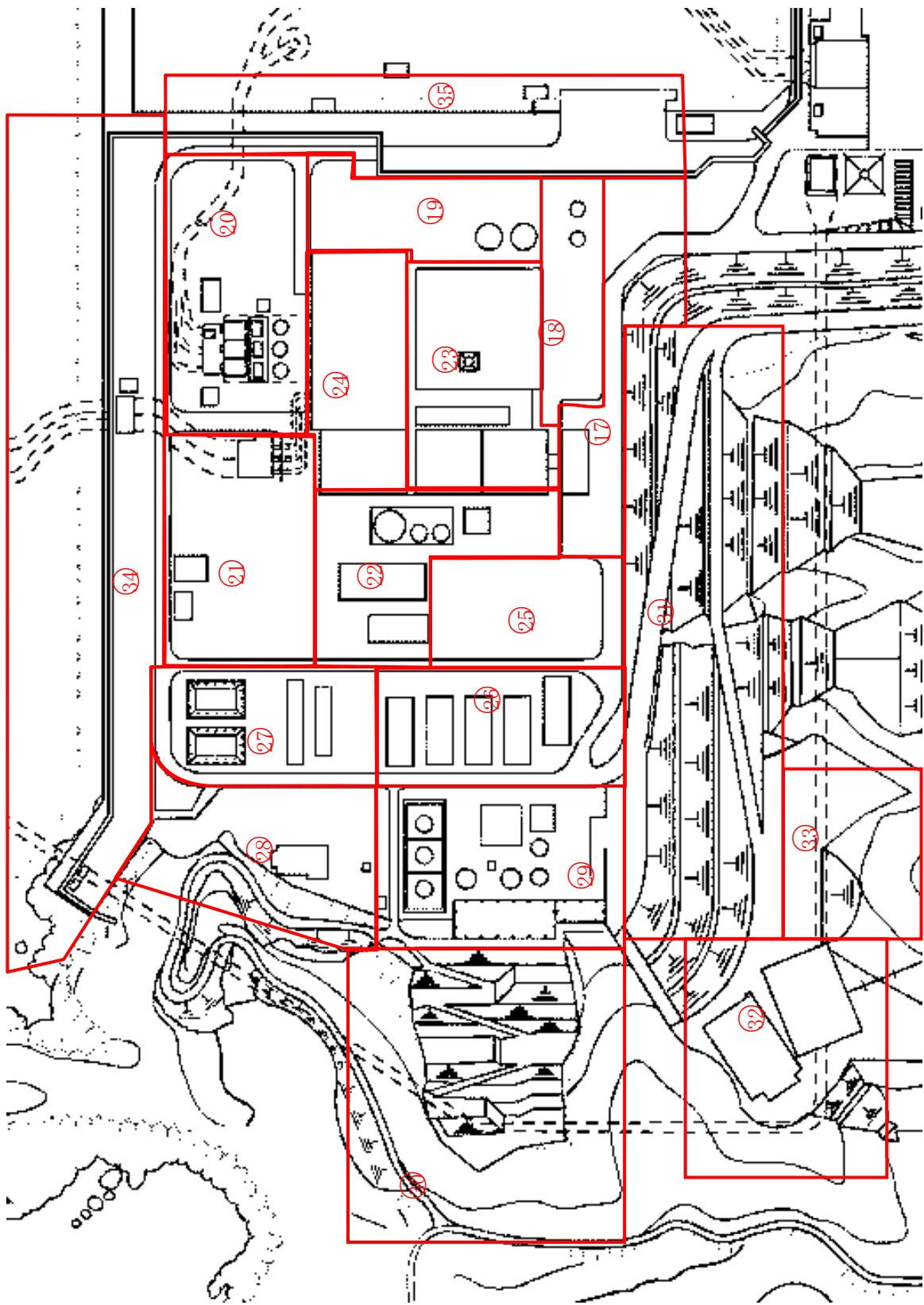


図 3.3.4 島根原子力発電所 竜巻飛来物現地調査区画図（3号炉周辺）



【①：事務本館エリア】


図 3.3.5 現地調査結果 (1/30)

【②：1，2号炬倉庫エリア】


図 3.3.5 現地調査結果 (2/30)

【③：サイトバトンカ建物エリア】

03M01_マンホール蓋(小)	03M02_ガラコーン	03M03_消火器格納箱	03M04_ホース格納箱	03M05_消火栓	03M06_チェッカープレート	03M07_ブレーキング	03M08_鋼製蓋	03M09_合板	03M10_コンクリート板
03M11_鋼製看板	03M12_土のう袋	03M13_カーブミラー	03M14_配管カバー	03M15_金属笠木	03M16_屋外照明	03M17_チェーン	03M18_ゴム配管	03M19_鋼製ロープ	03M20_レダグー
03M21_木材	03M22_鋼製パイプ	03M23_百葉箱	03M24_制御盤	03M25_空調室外機(家庭用)	03M26_空調室外機(ビル用)	03M27_自動販売機	03M28_電気盤	03M29_制御盤	03M30_送信盤
03M31_制御盤	03M32_送信盤	03M33_ビニール配管	03M34_仮設トイレ	03M35_鋼製クワ	03M36_レダグ小屋	03M37_空調室外機屋根	03M38_設備機械	03M39_冷凍機	03M40_大型発電機
03M41_産廃ソケット	03M42_小型自動二輪車	03M43_乗用車	03M44_キャリア	03M45_ショベルカー					

図 3.3.5 現地調査結果 (3/30)

【④：1，2号炉海岸エリア】











04M01_マホール蓋(小)	04M02_ガレオン	04M03_砂利	04M04_鋼製標識	04M05_鋼製リケート	04M06_グレーチング	04M07_鋼製パイ	04M08_コンクリート板	04M09_設備機械	04M10_制御盤
	04M12_トラック								
04M11_大型発電機	04M12_トラック								

【⑤：荷揚場南エリア】

05M01_ガレオン	05M02_消火器	05M03_ビニールホース	05M04_マホール蓋(大)	05M05_グレーチング	05M06_チェッカープレート	05M07_鋼製パイ	05M08_朝礼台	05M09_仮設足場	05M10_仮設資材
05M11_小型発電機	05M12_鋼製クレーン	05M13_空調室外機(家庭用)	05M14_空調室外機(家庭用)	05M15_鋼製フタ	05M16_ガソリンポンプ	05M17_自動販売機	05M18_制御盤	05M19_制御盤	05M20_コンクリート板
05M21_鋼製材	05M22_鋼製階段	05M23_鋼製架台	05M24_仮設トイレ	05M25_仮設屋根	05M26_プレハブ小屋	05M27_オイルエンストラム	05M28_中型発電機	05M29_乗用車	05M30_トラック
	05M32_トラック								
05M31_トラックレーン	05M32_トラック								

図3.3.5 現地調査結果 (4/30)

【⑥：1，2号炉西側道路エリア】

									
06M01_マンホール蓋(小)	06M02_ゲレチツク	06M03_鋼製のリケート	06M04_鋼製のゲツ	06M05_ガードレール	06M06_ガードレール	06M07_鋼製のイ	06M08_仮設トイレ	06M09_アレーツ小屋	06M10_乗用車
									
06M11_トラック									

【⑦：1，2号炉南側道路エリア】

								
07M01_土のう袋	07M02_鋼製のゲツ	07M03_コンクリート板	07M04_送信盤	07M05_中継盤	07M06_産廃コンテナ			
								

図 3.3.5 現地調査結果 (5/30)

【⑧：1，2号炉駐車場エリア】

									
08M01_マホール蓋(小)	08M02_消火器格納箱	08M03_ホ→格納箱	08M04_屋外照明	08M05_鋼製標識	08M06_鋼製標識	08M07_カーブミラー	08M08_グレーチング	08M09_フェイクプレート	08M10_鋼製看板
									
08M11_鋼製パイプ	08M12_仮設資材	08M13_鋼製カーブ	08M14_鋼製矢板	08M15_道具箱	08M16_二輪車置き場	08M17_仮設トイル	08M18_空調室外機(家庭用)	08M19_空調室外機(ビル用)	08M20_給湯器
									
08M21_自動販売機	08M22_タンク水位計盤	08M23_制御盤	08M24_コンクリート板	08M25_レハブ小屋	08M26_レハブ小屋	08M27_小型自動二輪車	08M28_大型巻電機	08M29_乗用車	08M30_ホ→拡張車

図 3.3.5 現地調査結果 (6/30)

【⑨：1，2号炉東エリア】

09M11_傘立て	09M12_マホール蓋(大)	09M13_ブレーキング	09M14_ブレーキング	09M15_フェックアップレート	09M16_送水ボックス	09M17_鋼製パイプ	09M18_仮設事務所	09M19_鋼製フェックアップ	09M20_ベンディング格納箱
09M21_空調室外機(家庭用)	09M22_空調室外機(家庭用)	09M23_制御盤	09M24_制御盤	09M25_昇降機	09M26_歩廊屋根	09M27_歩廊屋根	09M28_小型発電機	09M29_コンクリート板	09M30_可動式フェンス
09M31_電気盤	09M32_仮置資材	09M33_高圧発電機車	09M34_ボマーガード	09M35_ジョブカー					

図 3.3.5 現地調査結果 (7/30)

【⑩ : 1, 2号炉北エリア】



















									
10M01_ガレージ	10M02_屋外スポットライト	10M03_屋外照明	10M04_消火器格納箱	10M05_ホース格納箱	10M06_注水口ボックス	10M07_消火栓	10M08_マホウ蓋(小)	10M09_鋼製蓋	10M10_マホウ蓋
									
10M11_鋼製スラッグ	10M12_チェッカープレート	10M13_敷き鉄板	10M14_木材	10M15_木製レフト	10M16_空調室外機(家庭用)	10M17_道具箱	10M18_道具箱	10M19_脚立	10M20_台車
									
10M21_鋼製パイプ	10M22_鋼製ロープ	10M23_仮設資材	10M24_鋼製枠	10M25_ベージュソング格納箱	10M26_空調室外機(家庭用)	10M27_空調室外機(ビル用)	10M28_閉止板	10M29_鋼製パイプ	10M30_鋼製パイプ
									
10M31_トラス柱	10M32_ガスボンブ	10M33_ボリタック	10M34_鋼製材	10M35_鋼製材	10M36_鋼製材	10M37_コンクリート板	10M38_仮置資材	10M39_制御盤	10M40_制御盤
									
10M41_レゾ小室	10M42_可動式ボックス	10M43_乗用車	10M44_トラック	10M45_ショベル					

図 3.3.5 現地調査結果 (8/30)



【(11) : 1, 2号炉西エリア】

									
11M01_ガラコーン	11M02_屋外照明	11M03_鋼製標識	11M04_鋼製看板	11M05_木材	11M06_消火器格納箱	11M07_ホ→格納箱	11M08_消火栓	11M09_石	11M10_鋼製フック
									
11M11_鋼製スロープ	11M12_マホール蓋(大)	11M13_鋼製蓋	11M14_レ→フック	11M15_鋼製フック	11M16_分電盤	11M17_木製トラム	11M18_鋼製「イ」	11M19_仮設資材	11M20_台車
									
11M21_道具箱	11M22_ガ→ボンバ	11M23_空調室外機(家庭用)	11M24_空調室外機(ビル用)	11M25_管制器	11M26_コン→リター	11M27_投光器	11M28_小型発電機	11M29_自動販売機	11M30_鋼製フック
									
11M31_コンクリート板	11M32_汚水処理設備	11M33_折半屋根	11M34_鋼製枠	11M35_鋼製材	11M36_可動式コン→ス	11M37_資機材格納箱	11M38_工→用コンテナ	11M39_産廃コンテナ	11M40_ブ→レフ小屋
									
11M41_大型発電機	11M42_トラフ	11M43_コン→ク	11M44_ホ→展張車	11M45_ブ→クレーン	11M46_電源車				

図 3.3.5 現地調査結果 (9/30)

【12】：1, 2号炉南エリア】

12M01_消火器格納箱	12M02_ホーチキ格納箱	12M03_消火栓	12M04_注水口ボックス	12M05_配管ボックス	12M06_鋼製標識	12M07_屋外照明	12M08_マンホール蓋(大)	12M09_木製ボックス	12M10_配管ボックス
12M11_鋼製パイプ	12M12_仮設足場	12M13_分電盤	12M14_鋼管	12M15_鋼製パイプ	12M16_鋼製パイプ	12M17_敷き鉄板	12M18_フェックホート	12M19_鋼製ハッチ	12M20_鋼製梁台
12M21_鋼製梁台	12M22_仮置資材	12M23_空調室外機(家庭用)	12M24_空調室外機(ビル用)	12M25_設備機械	12M26_設備機械	12M27_制御盤	12M28_電気盤	12M29_ケーブル	12M30_プレハブ小屋
12M31_大型発電機	12M32_工事用コンテナ	12M33_トラック	12M34_ショベルカー	12M35_クレーン					

【13】：1号炉原子炉建物屋上】

13M01_空調室外機(家庭用)	13M02_空調室外機(ビル用)	13M03_鋼製ハッチ							

図 3.3.5 現地調査結果 (10/30)

【14】：1号炉タービン建物屋上】

14M01_配線ボックス	14M02_計装盤	14M03_鋼製ステップ	14M04_金属笠木	14M05_空調室外機(ビル用)	14M06_空調室外機(ビル用)	14M07_鋼製ハッチ	14M08_空調室外機(ビル用)	14M09_空調室外機(ビル用)	14M10_設備機械

【15】：2号炉原子炉建物屋上】・・・飛来物となり得る物体はなし

【16】：2号炉タービン建物屋上】・・・飛来物となり得る物体はなし

【17】：3号炉南側外周道路エリア】

17M01_ガードコーン	17M02_布	17M03_プラスチック製標識	17M04_ビニールホース	17M05_記念碑	17M06_鉄くず	17M07_鉄くず	17M08_屋外照明	17M09_消火栓	17M10_マンホール蓋(小)
17M11_配管ボックス	17M12_グレーディング	17M13_チェッカープレート	17M14_鋼製ハッチ	17M15_ベンチ	17M16_鋼製ハッチ	17M17_仮設足場	17M18_手押し車	17M19_はしご	17M20_鋼製ステップ
17M21_地震観測計	17M22_電気盤	17M23_分電盤	17M24_空調室外機(家庭用)	17M25_小型差電機	17M26_コンクリート板	17M27_鋼管	17M28_敷き鉄板	17M29_産廃コンテナ	17M30_鋼製材
17M31_鋼製架台	17M32_岩	17M33_ブレンダ小室	17M34_仮設ト化	17M35_産廃コンテナ	17M36_小型自動二輪車	17M37_乗用車	17M38_ユニット	17M39_タンクローリー	17M40_ショベルカー

図 3.3.5 現地調査結果 (11/30)

【⑱：3号炉南エリア】

								
18M01_プラスチック製パレット	18M02_木材	18M03_扉受け	18M04_合板	18M05_鋼製看板	18M06_鋼製パレット	18M07_チェッカープレート	18M08_ホース格納箱	18M09_屋外照明
								
18M11_はしご	18M12_ベージュ格納箱	18M13_操作盤	18M14_鋼製パイプ	18M15_仮設足場	18M16_プラスチック製容器	18M17_仮置資材	18M18_鋼管	18M19_空調室外機(冷用)
								
18M21_トラック								18M20_コンクリート製ハッチ

図 3.3.5 現地調査結果 (12/30)

【19 : 3号炉東エリア】


図 3.3.5 現地調査結果 (13/30)

【20 : 3号炉北東エリア】








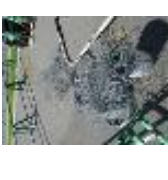


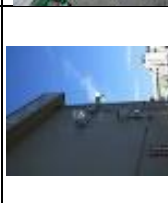






























									
									
									
									
									

図 3.3.5 現地調査結果 (14/30)

【 ㉑ : 3号炉北西エリア 】

									
21M01_消火器格納箱	21M02_小型カク外	21M03_屋外照明	21M04_道具箱	21M05_避雷針	21M06_チェッカープレート	21M07_仮置資材	21M08_鋼製フェンス	21M09_止水板	21M10_鋼製材
									
21M11_ﾌﾞﾚｯﾄﾞﾊﾞｯｼﾞ小屋	21M12_ﾌﾞﾚｯﾄﾞﾊﾞｯｼﾞ倉庫	21M13_大型発電機	21M14_乗用車	21M15_ﾄﾞﾗｯｸ	21M16_ﾌｵｰｸﾘﾌﾄ				

【 ㉒ : 3号炉西エリア 】

									
22M01_ﾌﾞﾚｯﾄﾞｶﾞｯｼﾞ製標識	22M02_鋼製看板	22M03_屋外照明	22M04_扉受け	22M05_マンホールの蓋(小)	22M06_コンクリートから	22M07_木材	22M08_目隠し板	22M09_折半屋根	22M10_鋼製ｽﾛｰﾌﾟ
									
22M11_はしご	22M12_仮設足場	22M13_ｶﾞｽﾎﾞﾝﾊﾞ	22M14_制御盤	22M15_仮置資材	22M16_鋼製ﾊﾞｲﾌﾞﾙ	22M17_仮置資材	22M18_鋼製材	22M19_仮設ﾄｲﾚ	22M20_ﾌﾞﾚｯﾄﾞﾊﾞｯｼﾞ小屋
									
22M21_大型発電機	22M22_工事用ｺﾝﾃﾈﾞｰ	22M23_産廃ｺﾝﾃﾈﾞｰ	22M24_乗用車	22M25_ｼﾞｮｲﾝﾄｶｰ	22M26_ﾌｵｰｸﾘﾌﾄ				

図 3. 3. 5 現地調査結果 (15/30)

【23 : 3号炉原子炉建物屋上】

23M01_屋外照明	23M02_工具箱	23M03_コンクリートブロック	23M04_コンクリート板	23M05_チェッカープレート	23M06_避雷針	23M07_消火栓	23M08_鋼製ハッチ	23M09_仮設資材	23M10_制御盤
23M11_操作盤	23M12_鋼製ハッチ	23M13_鋼製ステップ	23M14_はしご	23M15_はしご	23M16_鋼製階段	23M17_鋼製階段	23M18_空調室外機(ℓ用)	23M19_空調室外機(ℓ用)	23M20_冷凍機
	/								
23M21_大型発電機	/								

【24 : 3号炉タービン建物屋上】

24M01_突起カバー	24M02_避雷針	24M03_避雷針	24M04_コンクリートブロック	24M05_コンクリート板	24M07_鋼管	24M08_鋼管	24M09_鋼製階段
/							

図 3.3.5 現地調査結果 (16/30)



【25】：協力会社加工場エリア】

25M01_屋外照明	25M02_鋼製看板	25M03_土のう袋	25M04_ビニールネット	25M05_鉄くず	25M06_鉄くず	25M07_脚立	25M08_鋼製ハ	25M09_鋼製ハ	25M10_鋼製ハ
25M11_鋼管	25M12_鋼管	25M13_鋼製材	25M14_キレビネット	25M15_ビニールネット	25M16_庇	25M17_折半屋根	25M18_鋼製材	25M19_敷き鉄板	25M20_鋼製材
25M21_仮設資材	25M22_仮置資材	25M23_仮置資材	25M24_鋼製フェンス	25M25_鋼板	25M26_ガラスハ置場	25M27_操作盤	25M28_大型発電機	25M29_プレハブ小屋	25M30_プレハブ倉庫
25M31_鹿焼コンテナ	25M32_乗用車	25M33_トラック							

図 3.3.5 現地調査結果 (17/30)

【26 : 3号炉倉庫エリア】

26M01_ガラクーン	26M02_プラフック製標識	26M03_カーブミラー	26M04_グレーンク	26M05_鋼製パイ	26M06_仮設資材	26M07_仮設資材	26M08_仮置資材	26M09_仮置資材	26M10_建設材料パレット
26M11_はしご	26M12_目隠し板	26M13_折半屋根	26M14_敷き鉄板	26M15_敷き鉄板	26M16_チャッカープレート	26M17_鋼製材	26M18_鋼管	26M19_工事用機械	26M20_重機台具
26M21_鋼管	26M22_コンクリートブロック	26M23_電原盤	26M24_プレバツ倉庫	26M25_産廃コンテナ	26M26_小型自動二輪車	26M27_乗用車	26M28_トラック	26M29_エンジン	26M30_建設重機
26M31_建設重機	26M32_ジョハーカー								

図 3.3.5 現地調査結果 (18/30)

【 27 : 3 号 炉 西 側 協 力 会 社 事 務 所 エ リ ア ( 東 側 ) 】

図 3.3.5 現地調査結果 (19/30)

【 28 : 3 号炉西側協力会社事務所エリア (西側) 】

図 3.3.5 現地調査結果 (20/30)

【29】：補助ボイラー建物エリア】






図 3.3.5 現地調査結果 (21/30)

【30：西側法面事務所エリア】

								
30M01_プラスチック製標識	30M02_木製台	30M03_カーブミラー	30M04_鋼製看板	30M06_消火器	30M07_小型ポンプアンプ	30M08_コンクリートブロック	30M09_線状アンプ	30M10_折半屋根
								
30M11_石	30M12_鋼製フェンス	30M13_ビニールタタ	30M14_洗濯機	30M16_電気盤	30M17_中継盤	30M18_メーターボックス	30M19_コンクリートブロック	30M20_コンクリートブロック
								
30M21_コンクリート板	30M22_プラスチック製コンテナ	30M23_自動販売機	30M24_仮設トイレ	30M26_旗ポール	30M27_電柱	30M28_プレハブ小屋	30M29_中型発電機	30M30_産廃コンテナ
								
30M31_乗用車								

図3.3.5 現地調査結果 (22/30)

【 ㊸ : 3号炉南側道路エリア】

									
31M01_鋼製看板	31M02_鋼製認識	31M03_屋外照明	31M04_工事用信号機	31M05_花壇	31M06_鋼製看板	31M07_カーブミラー	31M08_地震観測計	31M09_接続盤	31M10_ボリタンク
									
31M11_乗用車	31M12_高圧発電機車	31M13_アークブレーン	31M14_ボックスカー						

【 ㊹ : 開閉所エリア】



























									
32M01_マンホール蓋(小)	32M02_ボイ格納箱	32M03_消火栓	32M04_敷き鉄板	32M05_鋼製ロープ	32M06_木製トマ	32M07_電柱	32M08_緊急時サイン	32M09_アレーブ小屋	32M10_アレーブ倉庫
									
32M11_アレーブ小屋	32M12_エネット								

図3.3.5 現地調査結果 (23/30)

【33】：44m盤エリア

									
33M01_木製小屋	33M02_ビニルハウス	33M03_手すり	33M04_鋼製パイプ	33M05_仮設足場	33M06_仮置資材	33M07_仮置資材	33M08_仮置資材	33M09_ガードレール	33M10_自動販売機
									
33M11_コンクリート小屋	33M12_乗用車	33M13_トラック	33M14_エントリ						

【34】：3号炉北側海岸エリア

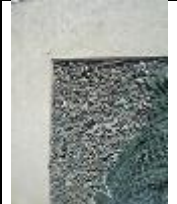














									
34M01_砂利	34M02_木材	34M03_マンホール蓋(小)	34M04_グレーチング	34M05_配管ボックス	34M06_配管ボックス	34M07_ビニル配管	34M08_鋼製パイプ	34M09_空調室外機(家庭用)	34M10_鋼製パイプ
									
34M11_覆工板	34M12_重機治具	34M13_コンクリート小屋	34M14_大型発電機	34M15_ショベルカー					

図3.3.5 現地調査結果 (24/30)



【35】：荷揚場南エリア】




















									
									

図 3.3.5 現地調査結果 (25/30)

【36】：44m 盤協力会社事務所エリア（北側）



















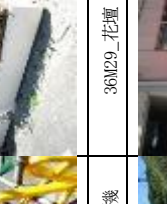





									
									
									
									
									

図 3.3.5 現地調査結果 (26/30)

【37】：エスカレーター周辺エリア】

37M01_分電盤	37M02_鋼製バリアード	37M03_台車	37M04_扇風機	37M05_コンクリートがら	37M06_屋外照明	37M07_クーブトレイ	37M08_操作盤	37M09_小型発電機	37M10_仮設トイレ
37M11_鋼製材	37M12_2レバ小屋	37M13_乗用車	37M14_トラック	37M15_アークレーン					

【38】：固体廃棄物貯蔵所B・C棟エリア】

38M01_鉄くず	38M02_鉄くず	38M03_鋼製看板	38M04_鋼製看板	38M05_フェッカープレート	38M06_クーブシール	38M07_土のう袋	38M08_コンクリート板	38M09_コンクリートブロック	38M10_ガボン
38M11_はしご	38M12_はしご	38M13_仮置資材	38M14_送信機	38M15_鋼製材	38M16_避雷針	38M17_電柱	38M18_鋼製ハッチ	38M19_ガボン置場	38M20_二輪車置き場
38M21_産廃コンテナ	38M22_産廃コンテナ	38M23_乗用車	38M24_トラック						

図 3.3.5 現地調査結果 (27/30)

【 39 : 44m 盤協力会社事務所エリア (南側) 】


図 3.3.5 現地調査結果 (28/30)

【40：才津谷エリア】






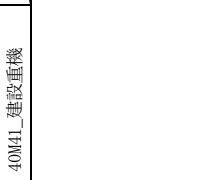





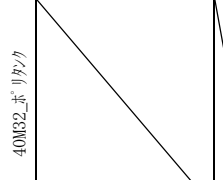




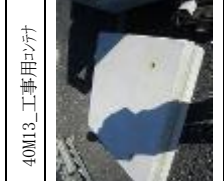

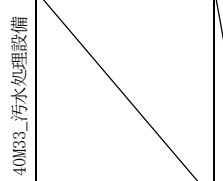






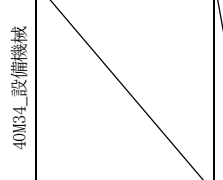



									
40M01_鋼製器械	40M02_鉄くず	40M03_鋼製パイプ	40M04_鋼製パイプ	40M05_鋼製パイプ	40M06_鋼製揮散	40M07_木材	40M08_鋼製パイプ	40M09_敷き鉄板	40M10_鋼製材
									
40M11_折半屋根	40M12_鋼製枠	40M13_工事用コンテナ	40M14_手押し車	40M15_仮設資材	40M16_仮設資材	40M17_仮設資材	40M18_仮設資材	40M19_仮設資材	40M20_仮設資材
									
40M21_鋼製材	40M22_計器盤	40M23_コンクリート板	40M24_コンクリート柵	40M25_コンクリートブロック	40M26_電柱	40M27_電柱	40M28_仮設トイレ	40M29_プレハブ小屋	40M30_プレハブ倉庫
									
40M31_テント	40M32_ボリタンク	40M33_汚水処理設備	40M34_設備機械	40M35_中型発電機	40M36_大型発電機	40M37_産廃コンテナ	40M38_トラック	40M39_エンジン	40M40_ショベルカー
									
40M41_建設重機									

図 3.3.5 現地調査結果 (29/30)

【④：免震重要棟エリア】






















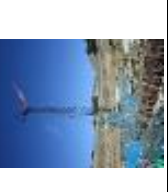
	41M01_鋼製パイ		41M02_鋼製パイ		41M03_仮設足場		41M04_手洗いソック		41M05_鋼管		41M06_鋼製材		41M07_鉄くず		41M08_仮置資材		41M09_ポンプ		41M10_コンクリート側溝
	41M11_敷き鉄板		41M12_朝礼台		41M13_仮設トイレ		41M14_ラブ倉庫		41M15_汚水処理設備		41M16_工事用コンテナ		41M17_中型発電機		41M18_乗用車		41M19_ポンプ		41M20_工事用機械
	41M21_ポンプ		41M22_パワータービン																

図 3.3.5 現地調査結果 (30/30)

### 3.3.2.2 現地調査結果の整理

現地調査により抽出した想定飛来物から、小型軽量で竜巻影響評価対象施設に衝突した場合の影響が小さい物体及び損傷するが飛来物とならない物体を設計飛来物の選定候補から除外した。

その他の想定飛来物について、表3.3.1に基づき形状、変形性状、サイズが同程度なものに分類し、グループ分けした。

表3.3.1 想定飛来物の分類基準

	分類	基準
形状	棒状	—
	板状	—
	塊状	—
変形性状	柔	木製，ゴム製，中空状又は複数の材からなる。
	剛	コンクリート又は鋼製で密実，単体からなる。
サイズ	極小	概ね0.01m <sup>2</sup> 未満 概ね1kg未満
	小	概ね0.01m <sup>2</sup> ～0.5m <sup>2</sup> 概ね1kg～20kg
	中	概ね0.5m <sup>2</sup> ～2.0m <sup>2</sup> 概ね20kg～500kg
	大	概ね2.0m <sup>2</sup> ～10m <sup>2</sup> 概ね500kg～2,000kg
	特大	概ね10m <sup>2</sup> 以上 概ね2,000kg以上

形状が棒状又は板状で変形性状が柔と分類されたものについては、評価対象施設に衝突した場合の影響が軽微であり、同形状の変形性状が剛なものに包絡されると考えられるため、設計飛来物の選定候補から除外した。

各グループにおいて、ガイドの設定例も参考にし、発電所構内に存在するもののうち、運動エネルギー又は貫通力が大きいと考えられるものを代表として選定した。想定飛来物の分類及び各グループを代表する想定飛来物の選定結果を表3.3.2に示す。





### 3.3.3 飛来物の運動エネルギー及び貫通力の算出

前項にて代表として選定した想定飛来物について、解析コード「TONBOS」を用いてフジタモデルの風速場における運動を解析することにより浮き上がりの有無及び最大速度を求めた。飛来物の飛散速度については、「竜巻影響評価ガイド」に基づき、飛散解析により算出される際の最大水平速度及び最大鉛直速度を設定した。

解析方法の詳細については別添2-2に示す。

また、現地調査の結果から代表として選定した飛来物に加えて、ガイドに設定例として示されている飛来物を考慮することとし、解析により求めた最大速度又はガイドに示された最大速度を用いて、運動エネルギー及び貫通力を算出した。貫通力については、BRL式を用いて鋼板に対する貫通厚さTを、鉄筋コンクリート版に対する貫入深さ $x_c$ を修正NDRC式で算出し、Degen式を用いて鉄筋コンクリート版に対する貫通限界版厚 $t_p$ を算出した。コンクリートの評価においては、kg/cm<sup>2</sup>単位系の値を使用する。

【BRL式】（鋼板に対する貫通厚さT）：

$$T^{3/2} = \frac{0.5MV^2}{1.4396 \times 10^9 K^2 D^{3/2}}$$

- T: 鋼板貫通厚さ (m)
- M: ミサイル質量 (kg)
- V: ミサイル速度 (m/s)
- D: ミサイル直径 (m)
- K: 鋼板の材質に関する係数 (≒ 1)

出典：ISES7607-3 「軽水炉構造機器の衝撃荷重に関する調査  
その3 ミサイルの衝突による構造壁の損傷に関する  
評価式の比較検討」（高温構造安全技術研究組合）

【修正 NDRC 式】（コンクリートに対する貫入深さ $x_c$ ）：

$$x_c = \alpha_c \left\{ 4 \left( \frac{12145}{\sqrt{F_c}} \right) W N d \left( \frac{V}{1000d} \right)^{1.8} \right\}^{0.5}, \text{ 但し, } \frac{x_c}{\alpha_c d} < 2$$

【Degen 式】（コンクリートに対する貫通限界版厚 $t_p$ ）：

$$t_p = \alpha_p d \left\{ 2.2 \left( \frac{x_c}{\alpha_c d} \right) - 0.3 \left( \frac{x_c}{\alpha_c d} \right)^2 \right\}, \text{ 但し, } \frac{x_c}{\alpha_c d} \leq 1.52$$

- $t_p$  : 貫通限界版厚 (cm)  
 $x_c$  : 貫入深さ (cm)  
 $d$  : 飛来物直径 (cm)  
 $F_c$  : コンクリートの設計基準強度 (kgf/cm<sup>2</sup>) (=240kgf/cm<sup>2</sup>)  
 $W$  : 飛来物重量 (kgf)  
 $V$  : 衝突速度 (m/s)  
 $N$  : 飛来物先端形状係数で、以下の値を使用する。  
・ 棒状の物体、板状の物体 : 1.14  
・ 塊状の物 : 0.72  
 $\alpha_c$  : 貫入評価についての飛来物低減係数で、1.00 を使用する。  
 $\alpha_p$  : 貫通評価についての飛来物低減係数で、1.00 を使用する。

なお、BRL式は「タービンミサイル評価について（昭和52年7月20日 原子炉安全専門審査会）」の中で、鋼板に対する貫通厚さの算出式として用いられているものである。

最大風速92m/sの竜巻によるフジタモデル（地上からの初期高さ0m）を用いた飛散解析による飛来物の浮き上がりの有無及び運動エネルギー、貫通力の算出結果を表3.3.3に示す。

表 3.3.3 想定飛来物の飛散解析結果(フジタモデル(地上からの初期高さ 0m), 最大風速 92m/s)

形状	名称	長さ (mm)	幅 (mm)	高さ (mm)	質量 (kg)	飛散の有無	最大速度 (m/s)	運動エネルギー (kJ)	コンクリートの貫通限界厚さ*1 (cm)	鋼板の貫通限界厚さ*2 (mm)
棒状	鋼製パイプ [ガイド]	2000	50	50	8.4	○	7	1	3	2
	鋼製パイプ 1	4000	50	50	16.8	○	7	1	3	2
	鋼製材 [ガイド]	4200	300	200	135.0	○	8	5	6	3
	鋼製材 1	5500	100	100	95.0	-	-	-	-	-
	鋼製材 2	5500	150	150	174.0	-	-	-	-	-
	電柱	10000	257	257	690.0	-	-	-	-	-
	コンクリート側溝	2100	380	340	132.0	○	8	4	5	1
	ガスボンベ	1500	230	230	57.0	○	5	1	3	1
板状	マンホール蓋 (小)	650	650	50	33.5	○	6	1	3	1
	マンホール蓋 (大)	975	975	60	88.0	○	4	1	3	1
	コンクリート板 [ガイド]	1500	1000	150	540.0	-	-	-	-	-
	コンクリート板 1	2700	1000	200	1300.0	-	-	-	-	-
	敷き鉄板 1	3000	1400	12	400.0	-	-	-	-	-
	敷き鉄板 2	3000	1500	22	802.0	-	-	-	-	-
	敷き鉄板 3	6100	1500	25	1820.0	-	-	-	-	-
	仮設足場	4000	250	40	13.2	○	40	11	10	4
塊状	砂利	40	40	40	0.2	○	14	1	1	1
	コンクリートブロック	390	190	150	14.3	○	9	1	3	1
	コンクリート枡	1200	1200	1200	1300.0	-	-	-	-	-
	鋼製ドラム	3000	3000	2000	6000.0	-	-	-	-	-
	ドラム缶	600	600	900	24.0	○	65	50	10	2
	空調室外機 (家庭用)	800	250	300	10.0	○	48	12	7	2
	空調室外機 (ビル用)	1400	940	320	134.0	○	21	29	9	2
	自動販売機	740	1362	1830	365.0	○	46	372	24	4
	コンテナボックス [ガイド]	6000	2400	2600	2300.0	○	50	2810	44	6
	プレハブ小屋 1	3700	2000	2600	800.0	○	58	1304	31	4
	プレハブ小屋 2	7300	2300	2600	1400.0	○	58	2350	40	6
	プレハブ小屋 3	7300	6900	2600	4200.0	○	54	5927	52	6
	プレハブ小屋 4	27000	7200	3400	7500.0	○	63	14496	74	9
	小型発電機	1330	630	1650	354.0	○	39	262	21	4
	中型発電機	2550	1080	1500	1770.0	○	3	5	3	1
	大型発電機	5380	1650	2100	7220.0	-	-	-	-	-
	小型自動二輪車	1855	725	1045	89.0	○	61	166	16	3
	乗用車 1	3395	1475	1610	840.0	○	47	899	31	5
	乗用車 2	4360	1695	1460	1140.0	○	44	1074	33	5
	乗用車 3	4790	1780	1535	1510.0	○	40	1192	35	5
	乗用車 4	5230	1880	2285	1890.0	○	48	2089	41	6
	トラック [ガイド]	5000	1900	1300	4750.0	-	-	-	-	-
	トラック 1	8445	2230	2465	3790.0	○	46	3869	53	8
	バス 1	6990	2010	2645	3880.0	○	43	3462	51	7
	バス 2	11990	2490	3750	12100.0	○	38	8537	72	10
	高圧発電機車	6825	2150	3260	7680.0	○	27	2759	45	6
	フォークリフト	3200	1520	2240	6920.0	-	-	-	-	-
	ホイールローダー	6130	2250	3035	9350.0	○	10	433	20	2
	ショベルカー	9425	2800	3040	19500.0	-	-	-	-	-
	ラフタークレーン	11000	2600	3500	26500.0	-	-	-	-	-

※1: 修正 NDRC 式及び, Degen 式を用いて算出

※2: BRL 式を用いて算出

### 3.3.4 設計飛来物の設定

#### 3.3.4.1 設計飛来物候補 A の設定

フジタモデルによる飛散解析においては、物体の地上からの初期高さを高く設定したほうが地表面から解析した場合に比べて最大水平速度は高くなり、最大水平速度に依存するパラメータである運動エネルギー及び貫通力も大きくなる。

よって、前項にて算出した想定飛来物の飛散解析結果に加え、工事に伴い組み上げた仮設足場から鋼製パイプ（足場パイプ）、足場板が飛散する可能性を考慮し、鋼製パイプ等が地上からの初期高さ 40m から飛散した場合を想定し、フジタモデルにより最大水平速度を求め、運動エネルギー及び貫通力を算出した。算出結果を表 3.3.4 に示す。

また、ガイドにおいて例示されている棒状飛来物の最大水平速度を参照し、運動エネルギー及び貫通力を算出した。算出結果を表 3.3.5 に示す。

表 3.3.3～3.3.5 の結果を踏まえ、運動エネルギーおよび貫通力の観点から表 3.3.4 の算出結果に対して保守性を考慮し、表 3.3.5 の鋼製材[ガイド]を設計飛来物候補 A として設定した。

< 鋼製材を選定した理由 >

- ・ 鋼製材は、想定飛来物の中で大きな運動エネルギーを有しているコンテナボックスやプレハブ小屋、車両等に固定・固縛が容易なものを除き、比較的大きな運動エネルギーおよび最大の貫通力を有している。
- ・ コンテナボックス、プレハブ小屋等は鋼製材を超える運動エネルギーを有しているが、固定・固縛対策が容易である。車両等については、避難が可能である。

表 3.3.4 想定飛来物の飛散解析結果（フジタモデル（地上からの初期高さ 40m）, 最大風速 92m/s）

形状	名称	長さ (mm)	幅 (mm)	高さ (mm)	質量 (kg)	飛散の 有無	最大速度 (m/s)	運動 エネルギー (kJ)	コンクリートの 貫通限界 厚さ* <sup>1</sup> (cm)	鋼板の 貫通限界 厚さ* <sup>2</sup> (mm)
棒状	鋼製パイプ [ガイド]	2000	50	50	8.4	○	45	9	11	14
	鋼製パイプ <sup>1</sup>	4000	50	50	16.8	○	45	17	14	22
板状	仮設足場	4000	250	40	13.2	○	62	25	14	6

※1：修正 NDRC 式及び、Degen 式を用いて算出

※2：BRL 式を用いて算出

表 3.3.5 想定飛来物の飛散解析結果（ガイド）

形状	名称	長さ (mm)	幅 (mm)	高さ (mm)	質量 (kg)	飛散の 有無	最大 速度 (m/s)	運動 エネルギー <sup>※1</sup> (kJ)	コンクリートの貫通 限界厚さ <sup>※2</sup> (cm)	鋼板の貫通 限界厚さ <sup>※3</sup> (mm)
棒状	鋼製パイプ [ガイド]	2000	50	50	8.4	○	49	11	11	18
	鋼製材 [ガイド]	4200	300	200	135	○	51	176	27	34

※1：ガイドの飛散速度から算出

※2：ガイドの飛散速度から修正 NDRC 式及び、Degen 式を用いて算出

※3：ガイドの飛散速度から BRL 式を用いて算出

### 3.3.4.2 横滑りの考慮

浮上しないが横滑りにより評価対象施設等に影響を与え得る物品については、浮上する物品同様、3.3.4.3 以降の結果を踏まえ設計飛来物として選定する必要があるかを判断する。

### 3.3.4.3 飛来物発生防止対策の実施

竜巻影響評価対象施設への影響の大きさが設計飛来物として仮設定した鋼製材を超過する想定飛来物については、風荷重を考慮した固定・固縛等の飛来物発生防止対策を実施することから設計飛来物としない。また、鋼製材は地上からの初期高さ 40m から飛散した場合を想定していることから、仮設足場の飛散の影響を包絡できていると考え、仮設足場に対する固縛・固定等は実施しない。

### 3.3.4.4 設計飛来物の設定結果

前項の飛来物発生防止対策を実施する想定飛来物を除外した上で、運動エネルギーおよび貫通力が最大である「鋼製材」を設計飛来物 I とする。

また、設計飛来物に対する竜巻防護対策設備として設置する竜巻防護ネットを通過する可能性があり、鋼製材にて包含できないものとして、砂利も設計飛来物に設定した。砂利等の極小飛来物が外部事象防護対象施設に与える影響について、別紙-2 に示す。

以上の結果により設定した設計飛来物を表 3.3.6 に示す。

表 3.3.6 設計飛来物

飛来物	砂利	鋼製材
寸法 (m)	長さ×幅×奥行 0.04×0.04×0.04	長さ×幅×奥行 4.2×0.3×0.2
質量 (kg)	0.2	135
最大水平速度 (m/s)	54	51
最大鉛直速度 (m/s) <sup>※1</sup>	36	34

※1：ここではガイドに基づき最大水平速度の 2 / 3 の値を記載。施設の構造健全性評価等では最大水平速度の 2 / 3 の値又はフジタモデルによる飛散解析結果による値を用いる。

### 3.3.5 二次飛来物の確認

竜巻による風圧力や飛来物によって破損して飛来物となり得る物体（以下「二次飛来物」という。）について、過去の竜巻事例（別紙－1）に基づき、平成26年8月に現地調査を実施した。

#### （1）現地調査の観点

風圧力や飛来物による被害を受けると考えられる設備及び建物・構築部（固定状況等含む）を調査し、二次飛来物となり得る部位を抽出した。

#### （2）現地調査結果

現地調査の結果、建物の金属製屋根・外壁，シャッター，ガラス窓及び給排気用格子を二次飛来物として抽出した。これらの二次飛来物について、設計飛来物の影響を超過するものはないことを確認した。

詳細は別紙－2「二次飛来物の現地調査について」に示す。

## 過去の主な竜巻事例に基づく飛来物の検討について

島根原子力発電所における設計飛来物の設定にあたり、「損傷するが飛来物とならない物品」及び「分解して小型軽量となる物体」について、過去の主な竜巻による被害概要を調査した文献を用いて検討を行った。検討の結果、「樹木、フェンスについては、竜巻時に損傷するが飛来物とならない」、「建物の金属製屋根・外壁、シャッター、ガラス窓等については、竜巻時に飛散するが、分解され小型軽量となるため、設計飛来物に包含される」と判断した。検討内容を以下に示す。

## (1) 損傷するが飛来物とならない物体

## ① 樹木

樹木の被害状況を図1～7に示す。

樹木については、被害状況より幹の折損、根の引き抜き等が見られるが、折損した場合、引き抜かれた場合どちらにおいてもその場で損傷しているのみであることが確認できる。これは竜巻の風荷重により、樹木が損傷した後、竜巻が既に通過しているためであると考えられ、樹木が折損、引き抜かれた後、さらに竜巻により巻き上げられ、飛来物となることは考え難い。



写真1 天神寺外観(南から見る)



写真3 倒木(北西からみる)

図1 平成14年7月10日群馬県境町にて発生したF2竜巻による樹木の被害状況<sup>※1</sup>



写真 16 樹木の転倒



写真 38 樹木の転倒(緑ヶ丘)

図 2 平成 18 年 9 月 17 日宮崎県延岡市にて発生した F2 竜巻による樹木の被害状況<sup>※2</sup>



写真 47 樹木の折損

図 3 平成 20 年 5 月 25 日米国アイオワ州にて発生した EF5 竜巻による樹木の被害状況<sup>※3</sup>



写真 25 倒木(火打谷地区)

図 4 平成 21 年 7 月 19 日岡山県美作市にて発生した F2 竜巻による樹木の被害状況<sup>※4</sup>





写真 44 樹木の被害

図 5 平成 21 年 10 月 8 日茨城県土浦市にて発生した F1 竜巻による樹木の被害状況<sup>※5</sup>



写真 3.5-15 樹木の折損



写真 3.5-16 樹木の折損と鳥居の被害



写真 3.5-17 樹木の倒木



写真 3.5-18 倒木による社の倒壊

図 6 平成 24 年 5 月 6 日茨城県つくば市にて発生した F3 竜巻による樹木の被害状況<sup>※6</sup>



写真 5.1.12 樹木の倒壊



写真 5.1.13 樹木の倒壊による小屋組の被害



写真 5.2.14 樹木の被害



写真 5.2.15 樹木の被害



写真 5.2.16 樹木の被害



写真 5.2.17 樹木の被害

図 7 平成 25 年 9 月 2 日埼玉県にて発生した F2 竜巻による樹木の被害状況<sup>※7</sup>

## ②フェンス

フェンスの被害状況を図8～10に示す。

フェンスについては、被害状況より、傾き、損傷等が見られるが樹木と同様にその場で損傷しているのみであり、損傷した後、竜巻はすでに通過していると考えられ、竜巻により巻き上げられ、飛来物となることは考え難い。



写真20 フェンスの著しい変形



写真31 フェンスの変形

図8 平成21年7月27日群馬県館林市にて発生したF1(F2)竜巻によるフェンスの被害状況<sup>※8</sup>



写真3.5-10 フェンスの被害状況

図9 平成24年5月6日茨城県つくば市にて発生したF3竜巻によるフェンスの被害状況<sup>※6</sup>



写真 4.1.9 フェンスの倒壊



写真 4.1.14 フェンスの倒壊



写真 4.1.15 支柱部の破断



写真 5.1.16 フェンスの被害



写真 5.2.19 フェンスの被害（工事中の構築物）



写真 5.2.20 フェンスの被害

図 10 平成 25 年 9 月 2 日埼玉県にて発生した F2 竜巻によるフェンスの被害状況<sup>※7</sup>

### ③原子炉建物外側ブローアウトパネル

原子炉建物外側ブローアウトパネルには開放時の落下を防止する機構が付けられており、竜巻によって外れた場合でも、落下時の挙動は通常の開放時と変わりないと考えられることから、落下防止機構が破断して飛来物となることはないと考えられる。また、原子炉建物外側ブローアウトパネルの開放後には竜巻は速やかに遠ざかっていくと考えられることから、開放した原子炉建物外側ブローアウトパネルが強風に煽られ、落下防止機構が破断し飛来物化する可能性も小さいと考えられる。

## (2) 分解され小型軽量となる物体

### ① 建物の金属製屋根・外壁

建物の金属製屋根・外壁の被害状況を図 11～15 に示す。

建物の金属製屋根・外壁については，F0～F3 の被害状況において形を保ったままではなく，分解された状態で飛来しており，また，厚さが極めて薄い柔飛来物であるため，飛散した場合大きく形状が変形していることが分かる。

発電所構内の資機材等のうち，運動エネルギー及び貫通力が設計飛来物を超過するものは飛散防止対策を実施することとしているが，建物の金属製屋根・外壁は柔飛来物であり，設計飛来物に比べ貫通の影響は小さい。発電所構内の建物の金属製屋根・外壁が飛散した場合，運動エネルギーは表 1 に示すとおり最大でも 103kJ であり，設計飛来物（鋼製材）の運動エネルギーよりも十分に小さいことから，発電所構内の建物の金属製屋根・外壁については飛散防止対策の対象としない。

表 1 設計飛来物（鋼製材）と金属製屋根の飛散速度と運動エネルギー

	寸法	重量	飛散速度	運動エネルギー
金属製屋根	5,000×700×1.0t	42kg	70m/s	103kJ
設計飛来物 (鋼製材)	4,200×300×200× 4.2t	135kg	51m/s	176kJ



牛舎の屋根東方向，柱・トタン板は西方向に飛散している

図 11 平成 16 年 6 月 27 日佐賀県にて発生した F2 竜巻による野  
外屋根の被害状況<sup>※9</sup>



カーボード屋根の飛散及び骨組の損傷



カーボード屋根の破損



屋外トイレ屋根の損傷

図 12 平成 18 年 9 月 17 日宮崎県延岡市で発生した F2 竜巻による屋外屋根の被害状況<sup>※2</sup>



折板の損傷



カーボードの被害

図 13 平成 21 年 10 月 8 日茨城県土浦市で発生した F1 竜巻による屋外屋根の被害状況<sup>※5</sup>



周囲の田に散乱した屋根ふき材

図 14 平成 24 年 2 月 1 日島根県出雲市にて発生した F0 竜巻による屋外屋根の被害状況<sup>※10</sup>



飛散した鋼板製屋根材



飛散した折板屋根の状況



電線等に引っ掛かった飛来物（鋼板製屋根材）

図 15 平成 24 年 5 月 6 日茨城県つくば市で発生した F3 竜巻による屋外屋根の被害状況<sup>※6</sup>

②シャッター

シャッターの被害状況を図 16～20 に示す。

シャッターについては、被害状況より、F1(F2), F3, EF5 の竜巻において形状は変形しているが、固定部が外れていないことが確認できる。



写真 31

図 16 平成 20 年 5 月 25 日米国アイオワ州にて発生した EF5 竜巻によるシャッターの被害状況<sup>※3</sup>



写真 10 シャッターの破損

図 17 平成 21 年 10 月 8 日茨城県土浦市にて発生した F1 竜巻によるシャッターの被害状況<sup>※5</sup>



写真 22 シャッターの外れ

図 18 平成 21 年 7 月 27 日群馬県館林市にて発生した F1(F2) 竜巻によるシャッターの被害状況<sup>※8</sup>





写真 3.4-37 消防団施設のシャッターの被害状況

図 19 平成 24 年 5 月 6 日茨城県つくば市にて発生した F3 竜巻によるシャッターの被害状況<sup>※6</sup>



写真 4.1.30 シャッターの変形

図 20 平成 25 年 9 月 2 日埼玉県にて発生した F2 竜巻によるシャッターの被害状況<sup>※7</sup>

### ③ガラス窓

ガラス窓の被害状況を図 21～26 に示す。

ガラス窓については、被害状況より、F0～F3、EF5 の竜巻において損壊し、分解されていることが確認できる。分解された状態では小型軽量となっており、設計飛来物に包含されると考える。



写真 8 エントランスの窓ガラスの破損



写真 25 破損した窓ガラス片の屋内壁面への突き刺さり[山下町]

図 21 平成 18 年 9 月 17 日宮崎県延岡市にて発生した F2 竜巻によるガラス窓の被害状況<sup>※2</sup>



写真 44 バスの窓ガラス破損

図 22 平成 20 年 5 月 25 日米国アイオワ州にて発生した EF5 竜巻によるガラス窓の被害状況<sup>※3</sup>



写真 19 窓ガラスの損壊



写真 27 窓ガラスの飛来物衝突痕

図 23 平成 21 年 7 月 27 日群馬県館林市にて発生した F1(F2) 竜巻によるガラス窓の被害状況<sup>※8</sup>



写真 8 倉庫の窓ガラスと屋根の被害状況



写真 16 窓ガラスの破損



写真 30 出隅部の窓ガラスの被害

図 24 平成 21 年 10 月 8 日茨城県土浦市にて発生した F1 竜巻によるガラス窓の被害状況<sup>※5</sup>



出雲市立第二中学校 提供

写真 3 体育館窓ガラスの破損



出雲市立第二中学校 提供



出雲市立第二中学校 提供



出雲市立第二中学校 提供

図 25 平成 24 年 2 月 1 日島根県出雲市にて発生した F0 竜巻によるガラス窓の被害状況<sup>※9</sup>



写真 3.4-21 店舗の窓ガラスの被害状況



写真 3.4-22 店舗の窓ガラスの被害状況



写真 3.4-35 ガラスへの飛来物の衝突痕



写真 3.4-36 ガラスへの飛来物の衝突痕

図 26 平成 24 年 5 月 6 日茨城県つくば市にて発生した F3 竜巻によるガラス窓の被害状況<sup>※6</sup>

- ※ 1 : 「群馬県境町で発生した突風による建築物等の被害について」(平成 14 年 7 月 26 日独立行政法人建築研究所)
- ※ 2 : 「2006 年台風 13 号被害調査報告延岡市の竜巻被害と飯塚市文化施設の屋根被害-」(平成 18 年 10 月 10 日)
- ※ 3 : 「米国アイオワ州におけるトルネード被害調査報告」(平成 20 年 6 月 9 日)
- ※ 4 : 「平成 21 年 7 月 19 日岡山県美作市竜巻被害調査報告」(平成 21 年 8 月 4 日)
- ※ 5 : 「平成 21 年 10 月 8 日茨城県土浦市竜巻被害調査報告」(平成 21 年 10 月 13 日)
- ※ 6 : 「平成 24 年(2012 年)5 月 6 日に茨城県つくば市で発生した建築物等の竜巻被害調査報告」  
(ISSN1346-7328 国総研資料第 703 号 ISSN0286-4630 建築研究資料第 141 号平成 25 年 1 月)
- ※ 7 : 「平成 25 年 9 月 2 日に発生した竜巻による埼玉県越谷市、北葛飾郡松伏町及び千葉県野田市での建築物等被害(速報)」(国土交通省国土技術政策総合研究所 独立行政法人建築研究所平成 25 年 9 月 10 日一部修正)
- ※ 8 : 「平成 21 年 7 月 27 日群馬県館林市竜巻被害調査報告」(平成 21 年 8 月 17 日一部修正)
- ※ 9 : 「佐賀市・鳥栖市竜巻現地被害調査報告」(平成 16 年 7 月 13 日)
- ※ 10 : 「平成 24 年 2 月 1 日島根県出雲市で発生した突風被害調査報告」(平成 24 年 2 月 14 日)

## 極小飛来物の衝突に対する施設への影響について

砂利等の極小飛来物及び砂等の粒子状の極小飛来物について、外部事象防護対象施設への影響の有無を確認する。

砂利及び砂等の飛来物による外部事象防護対象施設への影響としては、

- (1) 砂利，ひょう等の極小飛来物による貫通及び衝突
- (2) 砂等の粒子状の極小飛来物による目詰まり、閉塞及び嚙込みが考えられることから、これらについて評価する。

(1) 砂利，ひょう等の極小飛来物による施設への影響については、衝撃荷重 $W_M$ 及び鋼板に対する貫通力のいずれの観点においても無視し得ると考えられる。この理由を以下に示す。

a. 極小飛来物による衝撃荷重 $W_M$ 

砂利，ひょう等の極小飛来物の衝突は瞬間的で衝突時間が極めて短いため、施設は振動しにくく破壊は生じないと考えられる。これは、高速の極小飛来物が施設に衝突した場合、施設に生じる荷重は衝突時間の極めて短い片振幅波形となるため、施設に有意な変位（応力）が生じないためである。

このような衝撃により伝達される荷重については、機械工学便覧の「過渡振動・衝撃」に、図1のとおり示されている。

図1は、横軸には衝突時間( $t_r$ )と衝突される施設の固有周期( $T$ )との比である $t_r/T$ 、縦軸は応答加速度 $\ddot{x}$ （施設に伝わった加速度）と入力加速度 $\ddot{x}_x$ （施設へ伝えようとした加速度）の応答加速度比として、 $\ddot{x}/\ddot{x}_x$ の関係としてまとめられている。

図1より、衝撃パルスの形状によって関数形は異なるものの、衝突物の入力加速度 $\ddot{x}_{0max}$ と被衝突構造物の応答加速度 $\ddot{x}_{max}$ の比( $\ddot{x}_{max}/\ddot{x}_{0max}$ )が、衝突時間 $t_r$ と被衝突構造物の固有周期 $T$ の比( $t_r/T$ )に依存していることを示している。衝突時間 $t_r$ が被衝突構造物の固有周期 $T$ より小さいときには、衝撃パルスの形状によらず応答加速度は入力加速度を下回っており、特に衝突時間が非常に短く衝突時間と被衝突構造物の固有周期の比( $t_r/T$ )が非常に小さい場合、入力加速度と被衝突構造物の応答加速度の比( $\ddot{x}_{max}/\ddot{x}_{0max}$ )は非常に小さい値となる。これは衝突時間が被衝突構造物の固有周期に比べて小さい値をとる場合には、衝突物から非衝突物に伝達されるエネルギーが小さく、施設に有意な変位（応力）が生じないことを示している。

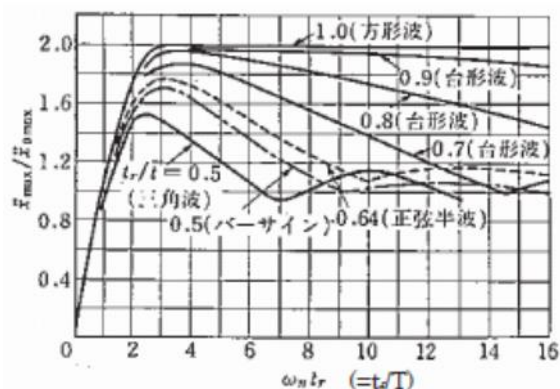


図1 代表的理想衝撃パルスによる加速度衝撃スペクトル  
(機械工学便覧より)

図1より、飛来物の速度が速くて、衝撃パルスの作用時間( $t_r$ )が施設の固有周波数より短い場合（横軸が1より小さい場合）には、入力加速度と応答加速度の比は1を下回り、エネルギーの伝達は小さくなることがわかる。

砂利やひょう等の極小飛来物による荷重は、このような短時間の衝突となるため、施設全体に影響を及ぼす荷重はごくわずかしか発生しないため、衝撃による影響はない。

b. 極小飛来物の貫通力

砂利、ひょう等の極小飛来物の鋼板に対する貫通力について、以下に示すBRL式を用いて算出し、極小飛来物の貫通力が無視し得ることを確認した。なお、砂利の寸法は竜巻防護ネットの網目の寸法（40mm目合い）を考慮して設定する。

極小飛来物として砂利及び大型のひょう（直径5cm, 10cm）を対象に、鋼板に対する貫通力をBRL式により算出した結果を表1に示す。いずれも貫通力は1mm未満であり、鋼板への影響は無視し得るものである。

表1 極小飛来物の鋼板貫通力

飛来物	サイズ (m)	重量 (kg)	速度 (m/s)	鋼板貫通厚さ (mm)
砂利 (設計飛来物)	0.04×0.04×0.04	0.2	54	0.8
ひょう	直径 0.05	0.06	33*	0.2
	直径 0.1	0.5	59*	0.8

※ ひょうの速度は直径に対応した終端速度に基づいて設定した。（別紙-4参照。）

(2) 砂等の粒子状の極小飛来物による目詰まり、閉塞及び嘔込み

砂等の粒子状の極小飛来物による目詰まり、閉塞及び嘔込みの影響を受ける可能性がある施設として、軸受け等の狭隘部を有する屋外施設、水循環系や換気系の流路を有する屋外施設・外気との接続がある施設・屋外にある外部事象防護対象施設の付属施設について評価する。評価施設を表2に示す。

表2 目詰まり、閉塞、嘔込みに対する評価施設

分類	評価施設	分類
屋外施設	・海水ポンプ	嘔込み 閉塞
	・海水ポンプ電動機	閉塞
	・海水ストレーナ	目詰まり
	・ディーゼル燃料移送ポンプ	嘔込み
	・排気筒（非常用ガス処理系用排気筒含む）	閉塞
外気との接続がある施設	・空調換気設備（中央制御室換気系，原子炉棟空調換気系，原子炉建物付属棟空調換気系）	目詰まり
屋外にある外部事象防護対象施設の付属施設	・給気消音器（非常用ディーゼル発電機の付属施設）	閉塞
	・排気消音器（排気管含む）（非常用ディーゼル発電機の付属施設）	閉塞
	・ベント管（ディーゼル燃料貯蔵タンク，ディーゼル燃料デイタンク，潤滑油サンプルタンクの付属施設）	閉塞

[屋外施設]

a. 海水ポンプ

(a) 水循環系の閉塞

① 流水部の閉塞

海水ポンプ流水部の狭隘部は、以下に示すとおりであり、砂等の粒子状の極小飛来物より十分大きいいため、閉塞には至らない。

- ・ 原子炉補機海水ポンプ 約 60mm
- ・ 高圧炉心スプレイ補機海水ポンプ 約 30mm

② 軸受部の噛込み

海水ポンプの軸受の隙間は、約 1.38mm～1.49mm で管理している。一部の砂等の粒子状の極小飛来物は軸受の隙間より、軸受内部に入り込む可能性があるが、図 2 及び図 3 のとおり、異物逃がし溝（約 3.5mm～5.5mm）が設けられており、軸受部の閉塞には至らない。

- ・ 原子炉補機海水ポンプ

軸受部（異物逃がし溝）：

- 軸受①：3.5mm
- 軸受②，③，⑤：4.5mm
- 軸受④：5.5mm

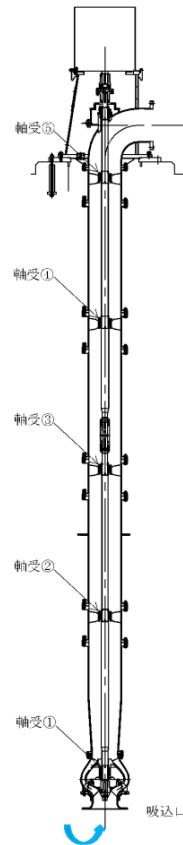


図 2 原子炉補機海水ポンプ軸受構造

本資料のうち、枠囲みの内容は機密に係る事項のため公開できません。



- ・ 高圧炉心スプレイ補機海水ポンプ  
軸受部（異物逃がし溝）：  
軸受①～⑤：3.5mm

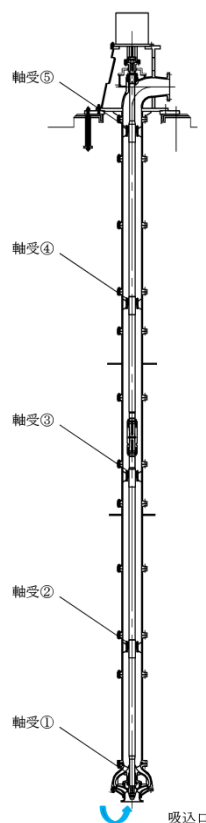
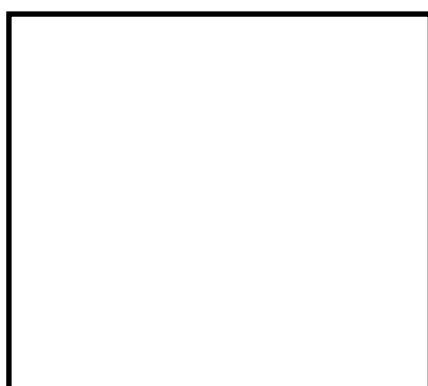


図3 高圧炉心スプレイ補機海水ポンプ軸受構造

b. 海水ポンプ電動機の閉塞

(a) 原子炉補機海水ポンプ電動機

原子炉補機海水ポンプ電動機は、全閉外扇形構造の電動機に取替を行うことから、砂等の粒子状の極小飛来物が侵入することはない。

(b) 高圧炉心スプレイ補機海水ポンプ電動機

高圧炉心スプレイ補機海水ポンプ電動機は、図4のとおり電動機本体が全閉外扇形構造となっており、電動機内部の熱は電動機の外筒に伝達され、外気を外扇により冷却フィンへ送風して放熱している。全閉外扇形の冷却方式であり砂等の粒子状の極小飛来物が侵入することはない。

また、砂等の粒子状の極小飛来物の粒径は冷却フィンの冷却経路の最小径（約11mm）に対して小さく、運転中はファンからの通風により外部に排出されることから、閉塞に至らないため影響はない。

本資料のうち、枠囲みの内容は機密に係る事項のため公開できません。



図4 高圧炉心スプレイ補機海水ポンプ電動機冷却方式

c. 海水ストレーナの日詰まり

各海水ストレーナのフィルタ穴径を以下に示す。

- ・原子炉補機海水系 7mm
- ・高圧炉心スプレイ補機海水系 7mm

砂等の粒子状の極小飛来物は、海水ストレーナのエレメントのメッシュサイズより小さく、また、取水口からポンプ取水箇所までの距離が約120m あるため、海水ストレーナは閉塞する可能性は低い。なお、海水ストレーナは2系統設けており、フィルタが閉塞することがないように差圧管理されており、一定の差圧（原子炉補機海水系：0.13MPa、高圧炉心スプレイ補機海水系：0.05MPa）になると切替えて、清掃を行うことも可能である。

d. ディーゼル燃料移送ポンプの噛込み・閉塞

ディーゼル燃料移送ポンプ本体への異物混入経路としては、軸貫通部があるが、当該部はメカニカルシール等を用いて潤滑剤や内部流体の漏えいのないよう適切に管理されていることから、砂等の粒子状の極小飛来物がポンプ本体へ侵入することはなく噛込みや摩耗による影響はない。

ディーゼル燃料移送ポンプの概略構造図を図5に示す。

動力源となる電動機については「全閉外扇屋外型」であり、ケーシングの放熱フィン等に砂等の粒子状の極小飛来物が冷却ファン側から吸入された場合でも、電動機内部に砂等の粒子状の極小飛来物が侵入することはない。

本資料のうち、枠囲みの内容は機密に係る事項のため公開できません。

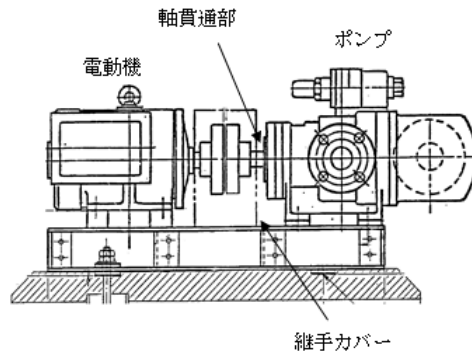


図5 ディーゼル燃料移送ポンプ概略構造図

e. 排気筒（非常用ガス処理系用排気筒含む）の閉塞

(a) 排気筒

排気筒の径はφ3,300mmあり、短期間の竜巻による砂等の粒子状の極小飛来物により閉塞することはないと考える。

(b) 非常用ガス処理系用排気筒

非常用ガス処理系用排気筒は図6に示すとおり、横方向を向いており砂等の粒子状の極小飛来物が侵入しにくい構造となっている。また、竜巻の通過に要する時間は短時間であるため、閉塞する量の飛来物は侵入し難い。

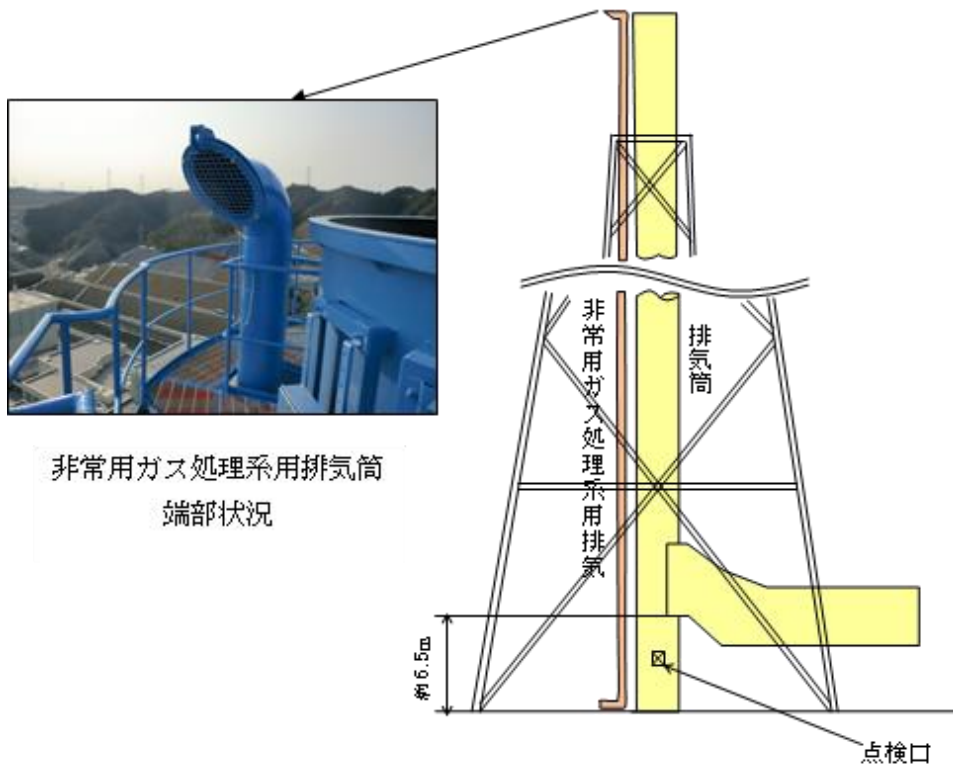


図6 排気筒周辺の概要

[外気との接続がある施設]

a. 空調換気設備（外気取入口）の目詰まり

各評価対象設備の外気取入口には、図7に示すとおりルーバが取り付けられており、砂等の粒子状の極小飛来物が侵入しにくい構造となっている。

また、外気取入口には平型フィルタ（粒径 $2\mu\text{m}$ に対して76%以上を捕獲する性能）や袋型フィルタ（粒径 $2\mu\text{m}$ に対して80%以上を捕獲する性能）が設置されており、想定する砂等の粒子状の極小飛来物は十分除去されることから、給気を供給する系統及び機器に対して砂等の粒子状の極小飛来物を与える影響は少ない。また、フィルタには差圧計が設置されており、必要に応じて取替え又は清掃をすることが可能である。

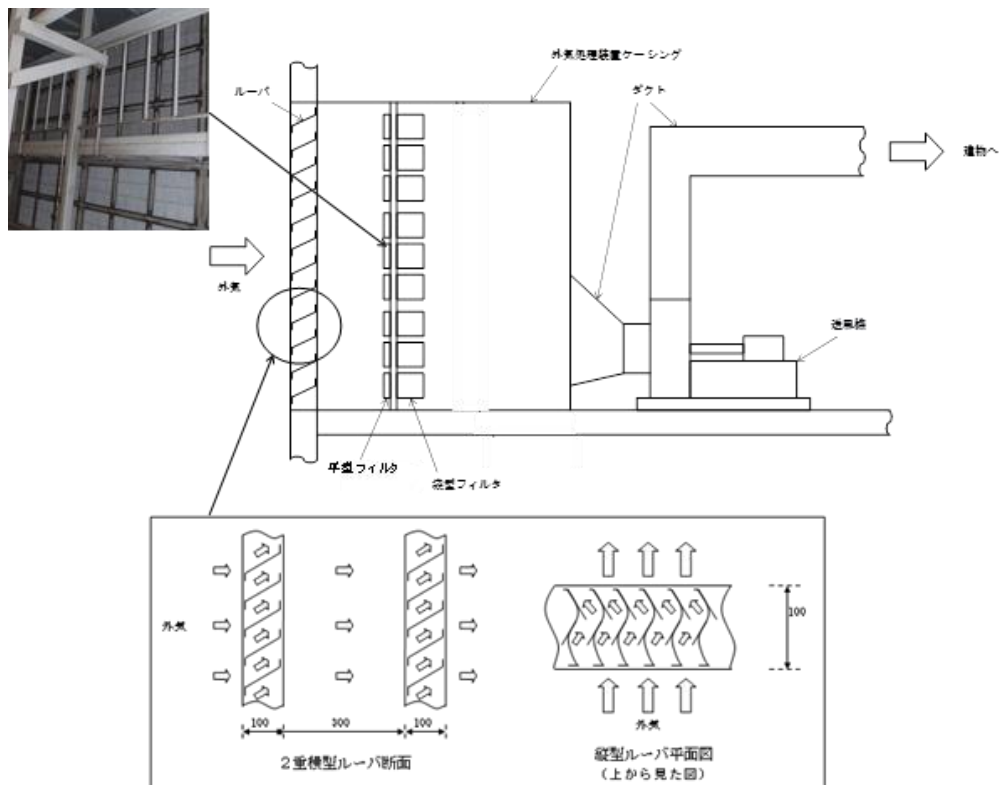


図7 外気取入口の空気の流れ概要

[屋外にある外部事象防護対象施設の付属施設]

a. 給気消音器，排気消音器（非常用ディーゼル発電機の付属施設）の閉塞

(a) 給気消音器

非常用ディーゼル発電機の吸入空気は図8のとおり、下に向いており、砂等の粒子状の極小飛来物が侵入しにくい構造である。

機関給気口の給気消音器にはフィルタ（粒径 $1\mu\text{m}$ 以上の砂等の粒子状の極小飛来物は80%以上捕集）が設置されており、砂等の粒子状の極小飛来物の侵入を防止している。

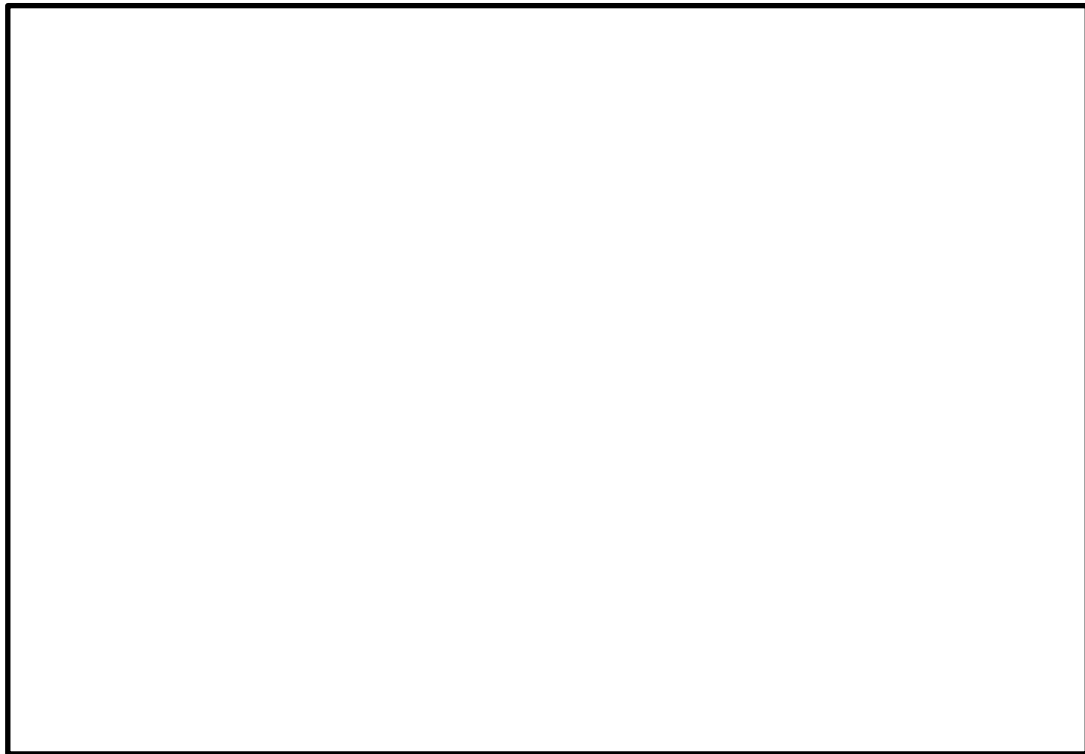


図8 非常用ディーゼル発電機の給気空気の流れ

(b) 排気消音器（排気管含む）

排気消音器及び排気管は図9に示すとおり、横方向を向いており砂等の粒子状の極小飛来物が侵入しにくい構造となっている。また、運転中は排気しているため、砂等の粒子状の極小飛来物が侵入することはない。また、竜巻の通過に要する時間は短時間であるため、閉塞する量の飛来物は侵入し難い。



図9 非常用ディーゼル発電機排気消音器及び排気管

本資料のうち、枠囲みの内容は機密に係る事項のため公開できません。

b. ベント管（ディーゼル燃料貯蔵タンク，ディーゼル燃料デイタンク，潤滑油サンプタンクの付属施設）の閉塞

(a) ディーゼル燃料貯蔵タンク

ディーゼル燃料貯蔵タンク本体は，ディーゼル燃料貯蔵タンク室内（地下埋設式）であり，砂等の粒子状の極小飛来物からの影響は受けませんが，ディーゼル燃料貯蔵タンクのベント管は屋外に設置していることから影響について確認する。

ディーゼル燃料貯蔵タンクのベント管先端には図 10 のとおり，カバーが取り付けられており，開口部の閉塞には至らない。

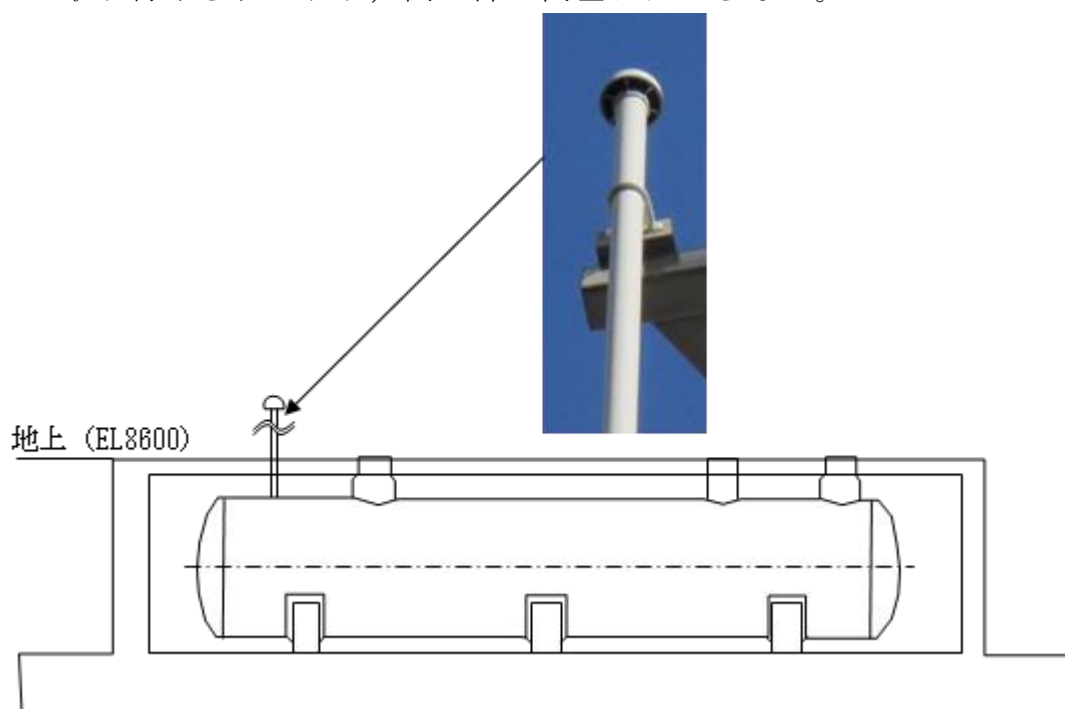


図 10 ディーゼル燃料貯蔵タンク及びベント管の概要

(b) ディーゼル燃料デイタンク，潤滑油サンプタンク

ディーゼル燃料デイタンク，潤滑油サンプタンクのベント管は，下方を向いており砂等の粒子状の極小飛来物が侵入しにくい構造となっている。また、竜巻の通過に要する時間は短時間であるため、閉塞する量の飛来物は侵入し難い。

二次飛来物の現地調査について

1. 現地調査の概要

竜巻による二次飛来物を抽出するため、発電所構内において平成 26 年 8 月に現地調査を実施した。現地調査では、風圧力や飛来物による被害を受けると考えられる設備及び建物・構築物を確認した。

二次飛来物の発生を考慮する建物・構築物として、以下を調査対象施設とした。調査対象施設の配置を図 1 に示す。

- |             |            |
|-------------|------------|
| a) 原子炉建物    | i) 開閉所     |
| b) 廃棄物処理建物  | j) 管理事務所   |
| c) タービン建物   | k) 協力会社事務所 |
| d) サービス建物   | l) 送電鉄塔    |
| e) サイトバンカ建物 | m) 技術訓練棟   |
| f) 制御室建物    | n) 免震重要棟   |
| g) 補助ボイラ    | o) 純水装置建物  |
| h) 固体廃棄物貯蔵所 | p) 排気筒     |

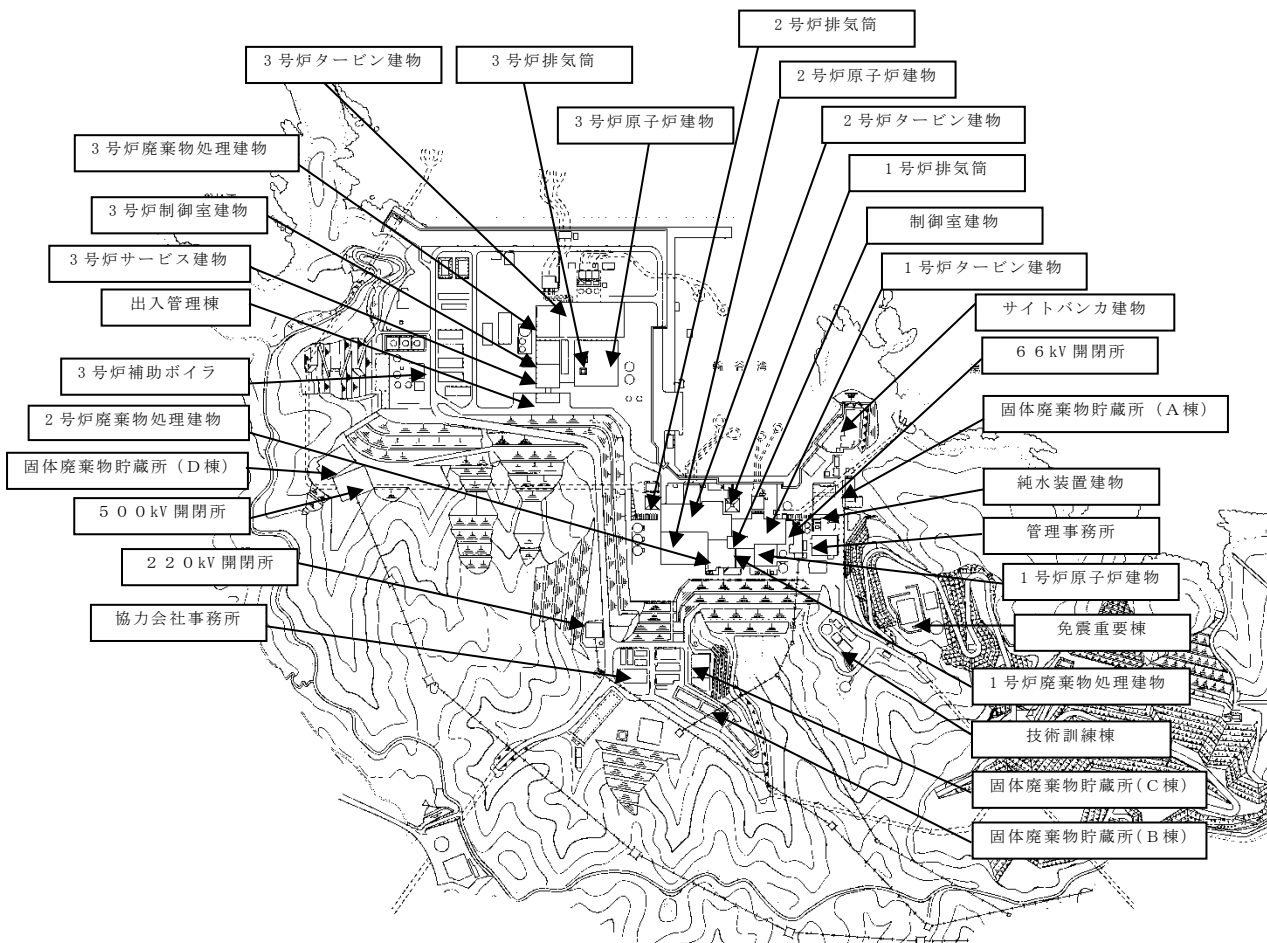


図 1 調査対象施設の配置

## 2. 現地調査結果

二次飛来物の発生を考慮する設備及び建物・構築物を調査した結果、建物の金属製屋根・外壁、シャッター、ガラス窓及び給排気用格子が飛散物となり得ると判断した。なお、地面に固定されていたり、複数のボルト等で締結されているものについては二次飛来物となり難いことから除外した。二次飛来物となり得る部位の抽出結果を表1に、二次飛来物になり得る部位の写真を図2に示す。

建物の金属製屋根・外壁、シャッター、ガラス窓及び給排気用格子については、「過去の竜巻事例に基づく飛来物の検討（別紙-1）」により、二次飛来物となった場合でも、分解され小型軽量な物品となるため、その影響は設計飛来物に包含されると考えられる。

表1 二次飛来物の発生を考慮する設備及び建物・構築物における二次飛来物となり得る部位の抽出結果（1/4）

飛来物に対して影響を受ける可能性のある部位		二次飛来物になり得る部位の有無	二次飛来物になり得る部位
1	1号T/B北側DEG給気口	—	
2	鉄イオン溶解槽、電解液受槽（取水槽）	—	
3	北側出入管理建物ガラス窓	○	ガラス窓
4	1号Rw/B南側シャッター（1FL）	○	シャッター
5	1号Rw/B南西側シャッター（1FL）	○	シャッター
6	1号Rw/B南側シャッター（2FL）	○	シャッター
7	1号T/B空調換気系給気用格子（屋上）	○	給排気用格子
8	1号T/B空調換気系給気用格子（水平）	○	給排気用格子
9	1号中央制御室空調換気系給気用格子	○	給排気用格子
10	1号R/B空調換気系給気用格子	○	給排気用格子
11	2号T/B北東側水素ガスボンベ室シャッター	○	シャッター
12	2号鉄イオン溶解タンク（取水槽）	—	
13	2号鉄イオン保管建物シャッター（取水槽）	○	シャッター
14	2号T/Bシャッター	○	シャッター
15	補機メンテナンス建物東側シャッター	○	シャッター
16	補機メンテナンス建物西側シャッター、ガラス窓	○	シャッター ガラス窓
17	補機メンテナンス建物南側シャッター、ガラス窓	○	シャッター ガラス窓
18	補機メンテナンス建物北側シャッター	○	シャッター
19	補機メンテナンス建物東側シャッター、ガラス窓	○	シャッター ガラス窓
20	補機メンテナンス建物西側シャッター、ガラス窓	○	シャッター ガラス窓
21	R/B西側液化酸素タンク	—	
22	水素ガストレーラ庫	—	
23	HPCS-DEG室排気用格子	○	給排気用格子
24	R/B空調換気系給気用格子	○	給排気用格子
25	HPCS-DEG室給気用格子	○	給排気用格子
26	A, B-DEG室給気用格子	○	給排気用格子
27	HPCS電気室空調換気系給気用格子	○	給排気用格子
28	HPCS電気室空調換気系排気口	—	
29	A, B非常用電気室空調換気系給気用格子	○	給排気用格子
30	T/B空調換気系給気用格子 常用電気室空調換気系給気用格子	○	給排気用格子



表1 二次飛来物の発生を考慮する設備及び建物・構築物における  
二次飛来物となり得る部位の抽出結果（2/4）

飛来物に対して影響を受ける可能性のある部位		二次飛来物 になり得る 部位の有無	二次飛来物に なり得る部位
31	R w / B 空調換気系給気用格子	○	給排気用格子
32	中央制御室空調換気系給気用格子	○	給排気用格子
33	エスカレータガラス窓（4.4m盤）	○	ガラス窓
34	上水タンク（5.0m盤，7.7m盤）	—	
35	日立6号棟シャッター（4.4m盤）	○	シャッター
36	日立6号棟ガラス窓（4.4m盤）	○	ガラス窓
37	日立5号棟ガラス窓（4.4m盤）	○	ガラス窓
38	C P C 事務所ガラス窓（4.4m盤）	○	ガラス窓
39	日立2号棟ガラス窓（4.4m盤）	○	ガラス窓
40	日立1号棟ガラス窓（4.4m盤）	○	ガラス窓
41	日立3，4号棟ガラス窓（4.4m盤）	○	ガラス窓
42	協力会社事務所南側ガラス窓（4.4m盤）	○	ガラス窓
43	協力会社事務所北側ガラス窓（4.4m盤）	○	ガラス窓
44	第2防護本部シャッター（4.4m盤）	○	シャッター
45	免震重要棟	—	窓等なし
46	事務所2号館西側給排気用格子	○	給排気用格子
47	事務所2号館北側給排気用格子	○	給排気用格子
48	事務所2号館北側シャッター	○	シャッター
49	事務所1号館ガラス窓	○	ガラス窓
50	事務所3号館シャッター	○	シャッター
51	事務所3号館シャッター	○	シャッター
52	事務者3号館ガラス窓	○	ガラス窓
53	純水処理建物給気用格子	○	給排気用格子
54	補助ボイラー室北側シャッター（1）	○	シャッター
55	補助ボイラー室北側シャッター（2）	○	シャッター
56	純水タンク（A）	—	
57	純水タンク（B）	—	
58	3号倉庫東側シャッター，ガラス窓	○	シャッター ガラス窓
59	3号倉庫北側シャッター，ガラス窓	○	シャッター ガラス窓
60	2号倉庫西側シャッター，ガラス窓	○	シャッター ガラス窓
61	2号倉庫南西側シャッターガラス窓	○	シャッター ガラス窓
62	2号倉庫南東側シャッター	○	シャッター
63	2号倉庫東側シャッター	○	シャッター
64	2号倉庫ガラス窓	○	ガラス窓
65	サイトバンカ建物西側シャッター	○	シャッター
66	サイトバンカ建物南側シャッター	○	シャッター
67	サイトバンカ建物給気口	—	
68	サイトバンカ建物ガラス窓（1）	○	ガラス窓
69	サイトバンカ建物ガラス窓（2）	○	ガラス窓
70	危険物屋内貯蔵所東側シャッター	○	シャッター
71	プロワ室ガラス窓	○	ガラス窓
72	汚水処理施設ガラス窓	○	ガラス窓
73	固体廃棄物貯蔵庫A棟西側シャッター	○	シャッター
74	空コンテナ保管庫西側に面するシャッター	○	シャッター
75	技術訓練棟1号館ガラス窓	○	ガラス窓
76	技術訓練棟1号館北側シャッター，ガラス窓	○	シャッター ガラス窓
77	技術訓練棟2号館西側シャッター，ガラス窓	○	シャッター ガラス窓
78	1号ろ過水装置建物の西側シャッター，ガラス窓	○	シャッター ガラス窓
79	1号ろ過水装置タンク（1）	—	
80	1号ろ過水装置タンク（2）	—	

表1 二次飛来物の発生を考慮する設備及び建物・構築物における  
二次飛来物となり得る部位の抽出結果（3/4）

飛来物に対して影響を受ける可能性のある部位		二次飛来物 になり得る 部位の有無	二次飛来物に なり得る部位
81	2号ろ過水装置建物シャッター, ガラス窓	○	シャッター ガラス窓
82	2号ろ過水装置建物ガラス窓	○	ガラス窓
83	2号ろ過水装置タンク(1)	—	
84	2号ろ過水装置タンク(2)	—	
85	2号ろ過水タンク	—	
86	固体廃棄物貯蔵庫B棟南西側シャッター(1)	○	シャッター
87	固体廃棄物貯蔵庫B棟南西側シャッター(2)	○	シャッター
88	高圧ガス貯蔵所南側フェンス扉	—	
89	5号倉庫給気用格子, ガラス窓	○	給排気用格子 ガラス窓
90	5号倉庫南側シャッター	○	シャッター
91	5号倉庫西側シャッター	○	シャッター
92	44m版事務所東側シャッター	○	シャッター
93	固体廃棄物貯蔵庫C棟西側シャッター	○	シャッター
94	1号開閉所ガラス窓	○	ガラス窓
95	1号開閉所西側シャッター	○	シャッター
96	1号開閉所南側シャッター	○	シャッター
97	2号開閉所ガラス窓	○	ガラス窓
98	2号炉T/B北側事務所西側シャッター, ガラス窓	○	シャッター ガラス窓
99	鉄イオン貯蔵建物南側シャッター	○	シャッター
100	エスカレータ南側シャッター(44m盤)	○	シャッター
101	2号No.1鉄塔	—	
102	2号No.2鉄塔	—	
103	3号No.3鉄塔	—	
104	ガスタービン発電機資材倉庫南側シャッター	○	シャッター
105	資材倉庫シャッター	○	シャッター
106	緊急用電気室入口	—	
107	危険物屋内貯蔵建物給気用格子	○	給排気用格子
108	危険物屋内貯蔵倉庫給気用格子	○	給排気用格子
109	R/B東側給気口	—	
110	T/B東側給気口	—	
111	R/B南側給気口	—	
112	S/B屋上階東側給気口	—	
113	S/B南側ガラス窓	○	ガラス窓
114	出入管理棟南側ガラス窓	○	ガラス窓
115	S/B屋上階西側給気口	—	
116	S/B西側ガラス窓	○	ガラス窓
117	S/B西側給気口	—	
118	補助ボイラー建物北側給気口	—	
119	補助ボイラー建物北側重油サービスタンク	—	
120	補助ボイラー建物東側シャッター, ガラス窓	○	シャッター ガラス窓
121	固体廃棄物貯蔵所D棟南東側シャッター	○	シャッター
122	D棟南西側シャッター	○	シャッター
123	固体廃棄物貯蔵所D棟付属建物西側ガラス窓	○	ガラス窓
124	3号開閉所	—	
125	倉庫西, 東側シャッター	○	シャッター
126	倉庫北, 南側ガラス窓	○	ガラス窓
127	除じん機メンテナンス建物北, 南側シャッター	○	シャッター
128	除じん機建物東, 西側ガラス窓	○	ガラス窓
129	補機海水系ポンプメンテナンス建物北, 東, 南側シャッター	○	シャッター
130	補機海水系ポンプメンテナンス建物東, 西側ガラス窓	○	ガラス窓

表1 二次飛来物の発生を考慮する設備及び建物・構築物における  
二次飛来物となり得る部位の抽出結果（4/4）

飛来物に対して影響を受ける可能性のある部位		二次飛来物 になり得る 部位の有無	二次飛来物に なり得る部位
131	ガスボンベ庫東側給気口	—	
132	ガスボンベ庫西側給気口	—	
133	第3危険物倉庫東側シャッター	○	シャッター
134	ボーリングコア倉庫東側シャッター	○	シャッター
135	ボーリングコア倉庫南、北側ガラス窓	○	ガラス窓
136	島根原子力幹線送電鉄塔(No.1,2)	—	
137	島根原子力幹線送電鉄塔(No.3)	—	
138	給水設備建物東側シャッター	○	シャッター
139	給水設備建物東、北側ガラス窓	○	ガラス窓
140	給水設備建物西側ガラス窓	○	ガラス窓
141	純水タンク、ろ過水タンク、消火用水タンク	—	
142	排気筒	—	
143	重油タンク移送ポンプ室南側ガラス窓	○	ガラス窓
144	2号炉放水路モニタ室東、南側に面するガラス窓	○	ガラス窓
145	海水電解装置設備周囲の亚克力ケース	—	
146	東口建物北側ガラス窓	○	ガラス窓
147	東口建物東、西側亚克力扉	—	
148	北口建物西側ガラス窓	○	ガラス窓
149	北口建物南、北側亚克力扉	—	
150	1号炉原子炉建物	○	金属製外壁
151	1号炉タービン建物	○	金属製屋根
152	1号炉廃棄物処理建物	—	
153	1号炉排気筒	—	
154	2号炉原子炉建物	○	ブローアウト パネル
155	2号炉タービン建物	—	
156	2号炉廃棄物処理建物	—	
157	2号炉排気筒	—	
158	制御室建物	—	
159	3号炉原子炉建物	—	
160	3号炉タービン建物	—	
161	3号炉廃棄物処理建物	—	
162	3号炉排気筒	—	
163	3号炉制御室建物	—	
164	3号炉サービス建物	—	
165	3号炉補助ボイラ	○	金属製屋根・外壁
166	3号出入管理棟	○	金属製屋根・外壁
167	固体廃棄物貯蔵所(A棟)	—	
168	固体廃棄物貯蔵所(B棟)	—	
169	固体廃棄物貯蔵所(C棟)	—	
170	固体廃棄物貯蔵所(D棟)	—	
171	66kV開閉所(1号機屋内開閉所)	○	金属製屋根・外壁
172	220kV開閉所(2号機開閉所電気室)	—	
173	500kV開閉所(開閉所電気品室)	—	
174	管理事務所1号館	○	金属製屋根・外壁
175	管理事務所2号館	—	
176	管理事務所3号館	○	金属製屋根
177	管理事務所4号館	○	金属製屋根
178	サイトバンカ建物	—	
179	サイトバンカ付属倉庫	○	金属製屋根
180	純水装置建物	○	金属製屋根・外壁
181	免震重要棟	○	金属製屋根
182	技術訓練棟	—	



3 北側出入管理建物ガラス窓



4 1号Rw/B南側シャッター(1FL)



5 1号Rw/B南西側シャッター(1FL)



6 1号Rw/B南側シャッター(2FL)



7 1号T/B空調換気系給気用格子(屋上)



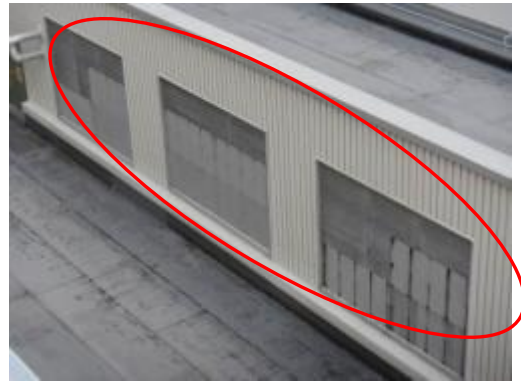
8 1号T/B空調換気系給気用格子(水平)

図2. 二次飛来物になり得る施設の写真(1/20)

本資料のうち、枠囲みの内容は機密に係る事項のため公開できません。



9 1号中央制御室空調換気系給気用格子



10 1号R/B空調換気系給気用格子



11 2号T/B北東側水素ガスポンベ室シャッター



13 2号鉄イオン保管建物シャッター（取水槽）



14 2号T/Bシャッター



15 補機メンテナンス建物東側シャッター

図2. 二次飛来物になり得る施設の写真(2/20)

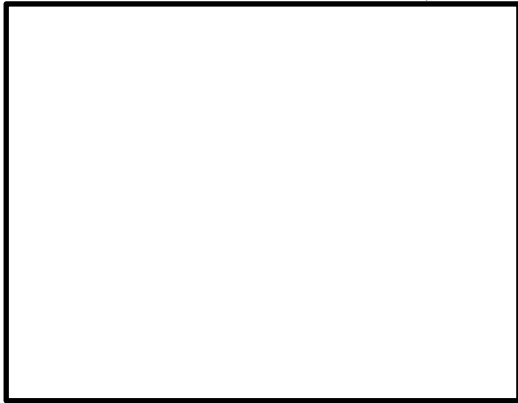
本資料のうち、枠囲みの内容は機密に係る事項のため公開できません。



16 補機メンテナンス建物西側シャッター，ガラス窓



17 補機メンテナンス建物南側シャッター，ガラス窓



18 補機メンテナンス建物北側シャッター



19 補機メンテナンス建物東側シャッター，ガラス窓



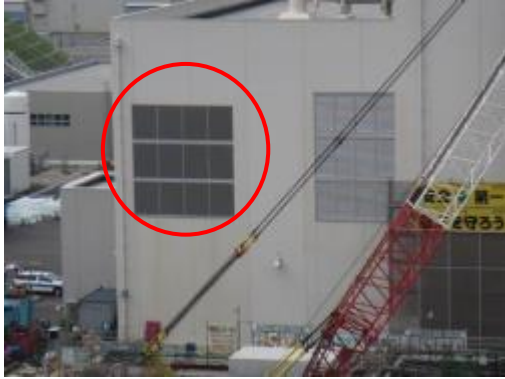
20 補機メンテナンス建物西側シャッター，ガラス窓



23 HPCS-DEG室排気用格子

図2. 二次飛来物になり得る施設の写真(3 / 20)

本資料のうち，枠囲みの内容は機密に係る事項のため公開できません。



24 R/B空調換気系給気用格子



25 HPCS-DEG室給気用格子



26 A, B-DEG室給気用格子



27 HPCS電気室空調換気系給気用格子



29 A, B非常用電気室空調換気系給気用格子



30 T/B空調換気系給気用格子

常用電気室空調換気系給排気用格子

図2. 二次飛来物になり得る施設の写真(4/20)



31 R w / B 空調換気系給気用格子



32 中央制御室空調換気系給気用格子



33 エスカレータガラス窓 (4.4m盤)



35 日立6号棟シャッター (4.4m盤)



36 日立6号棟ガラス窓 (4.4m盤)



37 日立5号棟ガラス窓 (4.4m盤)

図2. 二次飛来物になり得る施設の写真(5 / 20)





38 C P C 事務所ガラス窓 (4 4 m 盤)



39 日立 2 号棟ガラス窓 (4 4 m 盤)



40 日立 1 号棟ガラス窓 (4 4 m 盤)



41 日立 3, 4 号棟ガラス窓 (4 4 m 盤)



42 協力会社事務所南側ガラス窓 (4 4 m 盤)



43 協力会社事務所北側ガラス窓 (4 4 m 盤)

図 2. 二次飛来物になり得る施設の写真(6 / 2 0)



44 第2防護本部シャッター（4.4m盤）



46 事務所2号館西側給排気用格子



47 事務所2号館北側給排気用格子



48 事務所2号館北側シャッター



49 事務所1号館ガラス窓



50 事務所3号館シャッター

図2. 二次飛来物になり得る施設の写真(7/20)

本資料のうち，枠囲みの内容は機密に係る事項のため公開できません。



51 事務所 3 号館シャッター



52 事務者 3 号館ガラス窓



53 純水処理建物給気用格子



54 補助ボイラー室北側シャッター (1)



55 補助ボイラー室北側シャッター (2)



58 3号倉庫東側シャッター, ガラス窓

図 2. 二次飛来物になり得る施設の写真(8 / 20)



59 3号倉庫北側シャッター，ガラス窓



60 2号倉庫西側シャッター，ガラス窓



61 2号倉庫南西側シャッターガラス窓



62 2号倉庫南東側シャッター



63 2号倉庫東側シャッター



64 2号倉庫ガラス窓

図2. 二次飛来物になり得る施設の写真(9 / 20)



65 サイトパンカ建物西側シャッター



66 サイトパンカ建物南側シャッター



68 サイトパンカ建物ガラス窓（1）



69 サイトパンカ建物ガラス窓（2）



70 危険物屋内貯蔵所東側シャッター



71 プロワ室ガラス窓

図2. 二次飛来物になり得る施設の写真(10/20)



72 汚水処理施設ガラス窓



73 固体廃棄物貯蔵庫A棟西側シャッター



74 空コンテナ保管庫西側に面するシャッター



75 技術訓練棟1号館ガラス窓



76 技術訓練棟1号館北側シャッター，ガラス窓



77 技術訓練棟2号館西側シャッター，ガラス窓

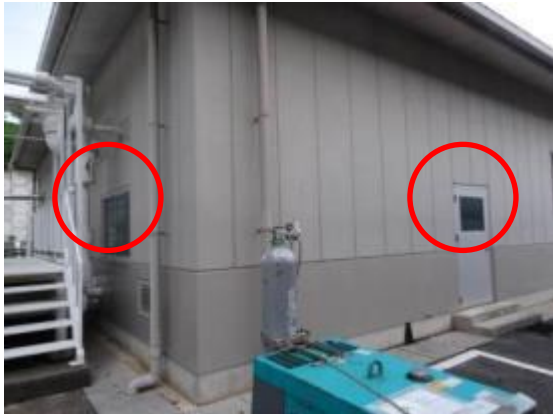
図2. 二次飛来物になり得る施設の写真(11/20)



78 1号ろ過水装置建物の西側シャッター，ガラス窓



81 2号ろ過水装置建物シャッター，ガラス窓



82 2号ろ過水装置建物ガラス窓



86 固体廃棄物貯蔵庫B棟南西側シャッター（1）



87 固体廃棄物貯蔵庫B棟南西側シャッター（2）



89 5号倉庫給気用格子，ガラス窓

図2. 二次飛来物になり得る施設の写真(12/20)



90 5号倉庫南側シャッター



91 5号倉庫西側シャッター



92 44m版事務所東側シャッター



93 固体廃棄物貯蔵庫C棟西側シャッター



94 1号開閉所ガラス窓



95 1号開閉所西側シャッター

図2. 二次飛来物になり得る施設の写真(13/20)

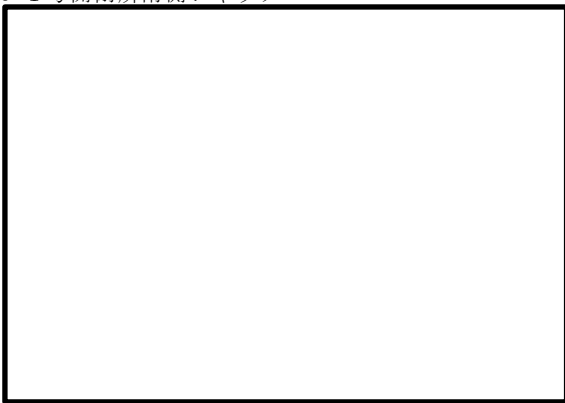




96 1号開閉所南側シャッター



97 2号開閉所ガラス窓



98 2号炉T/B北側事務所西側シャッター，ガラス窓



99 鉄イオン貯蔵建物南側シャッター



100 エスカレータ南側シャッター（4.4m盤）



104 ガスタービン発電機資材倉庫南側シャッター

図2. 二次飛来物になり得る施設の写真(14/20)

本資料のうち、枠囲みの内容は機密に係る事項のため公開できません。



105 資材倉庫シャッター



107 危険物屋内貯蔵建物給気用格子



108 危険物屋内貯蔵倉庫給気用格子



113 S/B 南側ガラス窓



114 出入管理棟南側ガラス窓



116 S/B 西側ガラス窓

図2. 二次飛来物になり得る施設の写真(15/20)



120 補助ボイラー建物東側シャッター，ガラス窓



121 固体廃棄物貯蔵所D棟南東側シャッター



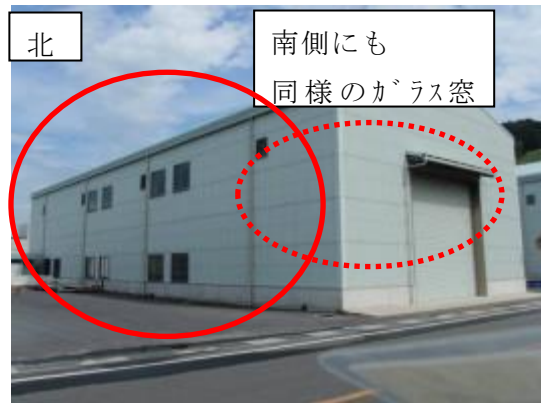
122 D棟南西側シャッター



123 固体廃棄物貯蔵所D棟付属建物西側ガラス窓

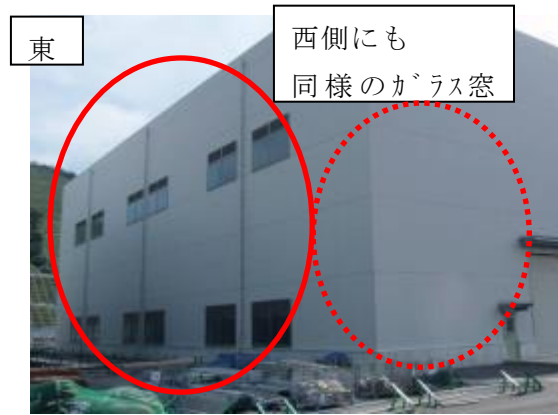
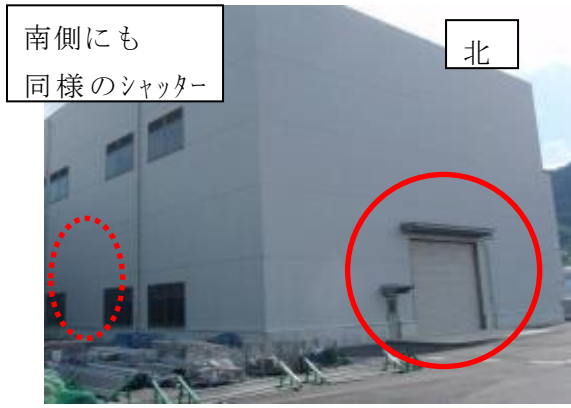


125 倉庫西，東側シャッター

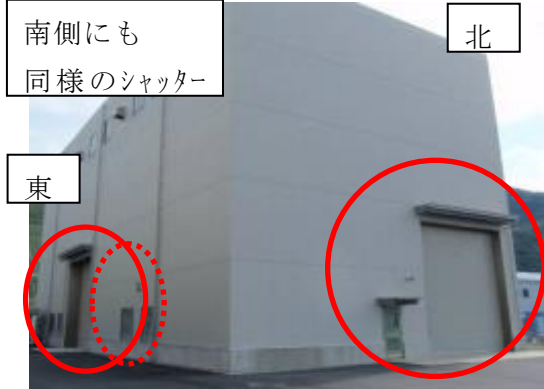


126 倉庫北，南側ガラス窓

図2. 二次飛来物になり得る施設の写真(16 / 20)



127 除じん機メンテナンス建物北，南側シャッター



128 除じん機建物東，西側ガラス窓



129 補機海水系ポンプメンテナンス建物北，東，南側シャッター



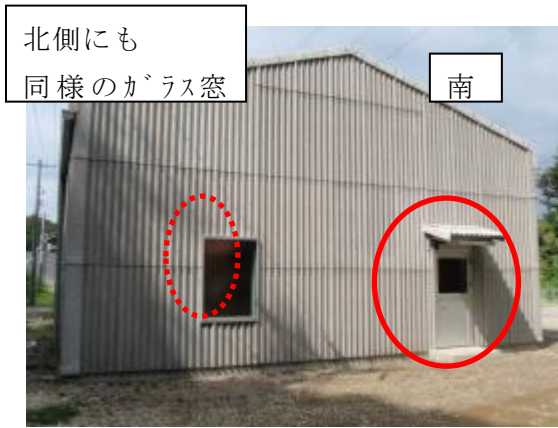
130 補機海水系ポンプメンテナンス建物東，西側ガラス窓



133 第3危険物倉庫東側シャッター

134 ボーリングコア倉庫東側シャッター

図2. 二次飛来物になり得る施設の写真(17/20)



135 ボーリングコア倉庫南，北側ガラス窓



138 給水設備建物東側シャッター



139 給水設備建物東，北側ガラス窓



140 給水設備建物西側ガラス窓



143 重油タンク移送ポンプ室南側ガラス窓



144 2号炉放水路モニタ室東，南側に面するガラス窓

図2. 二次飛来物になり得る施設の写真(18/20)



146 東口建物北側ガラス窓



148 北口建物西側ガラス窓



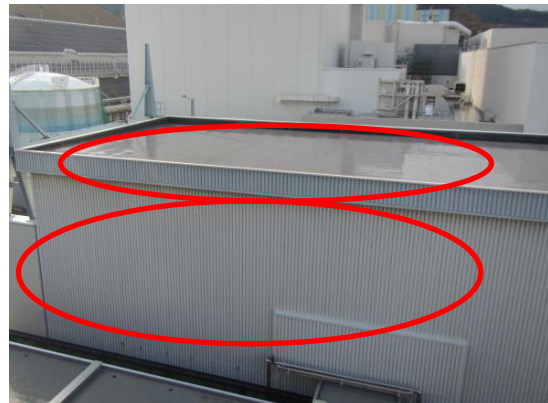
150 1号炉原子炉建物



165 3号炉補助ボイラ



166 3号出入管理棟



171 6 6 kV 開閉所 (1号機屋内開閉所)



174 1号館管理事務所



176 3号館管理事務所

図2. 二次飛来物になり得る施設の写真(19/20)

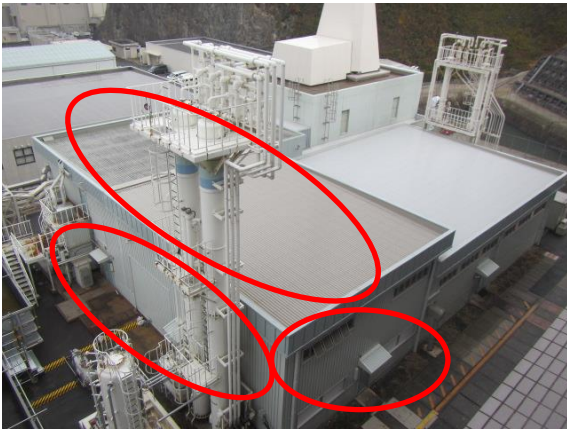
本資料のうち、枠囲みの内容は機密に係る事項のため公開できません。



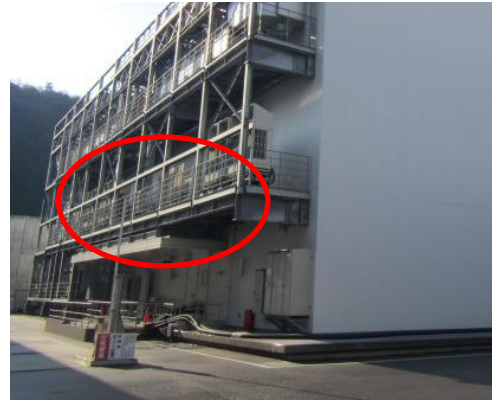
177 4号館管理事務所



179 サイトバンカ付属倉庫



180 純水装置建物



181 免震重要棟

図2. 二次飛来物になり得る施設の写真(20/20)

## 竜巻時に発生するひょうの影響について

竜巻時はひょうを伴うこともあるため、ひょうに関する文献を参考にひょうの影響について検討を行った。

ひょうはあられが大きく成長したもので、直径5mm以上の氷の粒子である。ひょうの大きさは、通常は直径が5～50mmである<sup>※1</sup>。このことから、直径50mmのひょうを対象に影響評価を行う。

空気中を落下する物体は空気抵抗を受けるので、時間が経てば空気抵抗と重力が釣り合い等速運動（終端速度）となる。空気中を落下するひょうもこの終端速度で落下する。ひょうの粒径毎の終端速度を表1に示す。

表 1 ひょうの粒径毎の終端速度<sup>※2</sup>

粒径 (cm)	終端速度 (m/s)
1	9
2	16
5	33
10	59

ひょうの大きさの変化に対する影響度を確認するため、比較対象として、参考文献<sup>※2</sup>に記載のある最大10cmのひょうに対して運動エネルギー、貫通のしやすさの評価を実施し、設計飛来物（鋼製材）との比較した結果を表2に示す。ひょうの影響は設計飛来物（鋼製材）に包含できる。

表 2 粒径5cm 及び10cm ひょうの影響評価

		粒径5cm ひょう	粒径10cm ひょう	設計飛来物 (鋼製材)
運動エネルギー		0.04kJ	0.91kJ	176kJ
貫通限界 厚さ (鉛直)	コンクリート Fc=330kgf/cm <sup>2</sup>	0.8cm	2.7cm	27cm
	鋼板	0.2mm	0.8 mm	34mm

※1 : 白木正規, 百万人の天気教室, 成山堂書居

※2 : 小倉義光, 一般気象学, 東京大学出版会



## 空力パラメータについて

物体の飛散解析に用いる空力パラメータは「竜巻影響評価ガイド」の参考文献<sup>(1)</sup>及び米国 NRC の竜巻設計のための飛来物特性を与える NUREG-0800 (1996)<sup>(2)</sup>に引用されている文献<sup>(3)</sup>を参照し、下式により算出する。

$$\frac{C_D A}{m} = c \frac{(C_{D1} A_1 + C_{D2} A_2 + C_{D3} A_3)}{m}$$

ここで、

$$\frac{C_D A}{m} : \text{空力パラメータ} \quad (\text{m}^2 / \text{kg})$$

$$m : \text{物体の質量} \quad (\text{kg})$$

$$c : \text{係数} \quad (0.33)$$

$$C_{D1}, C_{D2}, C_{D3} : \text{直交 3 方向における物体の抗力係数(表 1 より選定)}$$

$$A_1, A_2, A_3 : C_{D1} \sim C_{D3} \text{ を定義した各方向に対する見附面積} \quad (\text{m}^2)$$

表1 空力パラメータ算出のための抗力係数

物体の形状	$C_{D1}$	$C_{D2}$	$C_{D3}$
塊状	2.0	2.0	2.0
板状	1.2	1.2	2.0
棒状	2.0	0.7 (円形断面) 1.2 (矩形断面)	0.7 (円形断面) 1.2 (矩形断面)

**塊状物体**  
 $C_{D1}: 2.0$ ,  $C_{D2}: 2.0$ ,  $C_{D3}: 2.0$

**板状物体**  
 $C_{D1}: 1.2$ ,  $C_{D2}: 1.2$ ,  $C_{D3}: 2.0$   
 ・  $A_3 > A_2, A_1$

**棒状物体**  
 $C_{D1}: 2.0$ ,  $C_{D2}: 0.7$  (円形断面)  
 $: 1.2$  (矩形断面),  $C_{D3}: 0.7$  (円形断面)  
 $: 1.2$  (矩形断面)  
 ・ 円形断面の場合,  $A_2, A_3$  は「見附面積 (直径×長さ)」

<参考文献>

- (1) 東京工芸大学 (2011) : 平成 21~22 年度原子力安全基盤調査研究 (平成 22 年度) 竜巻による原子力施設への影響に関する調査研究, 独立行政法人原子力安全基盤機構
- (2) US-NRC: “3.5.1.4 MISSILE GENERATED BY NATURAL PHENOMENA,” Standard Review Plan, NUREG-0800, 1996.
- (3) E.Simiu, M. Cordes: “Tornado-Borne Missile Speeds,” NBSIR76-1050, National Bureau of Standards, Washington D.C., 1976.

## 設計飛来物の最大水平速度の妥当性について

## 1. 鋼製材の最大水平速度の妥当性について

発電所の竜巻影響評価に用いる設計飛来物である鋼製材は、「竜巻影響評価ガイド」に示されている数値を採用しているが、その最大水平速度（51m/s）は非定常乱流渦モデルによるシミュレーション（LES）にて導出されている。

一方、発電所の竜巻影響評価における物体の飛散解析にはフジタモデルを適用する方針としており、フジタモデルでは風速が地上からの高さによって変化するため、飛来物源の地上からの初期高さにより飛散時の挙動が異なる。

このため、任意の地上からの初期高さにある鋼製材をフジタモデルで飛散させた場合でも、その最大水平速度が51m/sを超えることがないことを確認した。結果を図1に示す。また、図1には参考としてランキン渦モデルによる最大水平速度も記す。

図1から、いずれの地上からの初期高さから飛散した場合でも、その最大水平速度は51m/sを上回ることはないことが分かる。よって、フジタモデルを採用する場合においても、設計飛来物の最大水平速度には「竜巻影響評価ガイド」の数値である51m/sを用いることは問題なく、かつ保守性を有すると判断している。

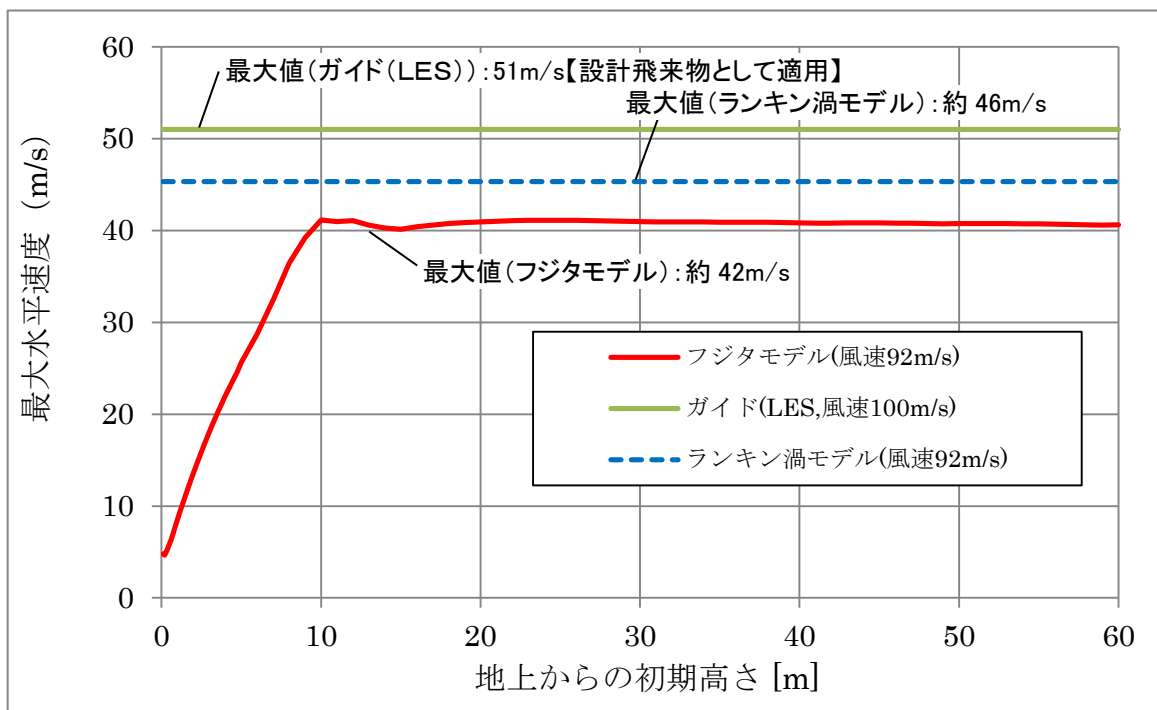


図1 各風速場モデルにおける鋼製材の飛散解析結果  
(鋼製材：300mm×200mm×4, 200mm, 135kg)

## 2. 砂利の最大水平速度の妥当性について

「竜巻影響評価ガイド」に記載のない設計飛来物である砂利の速度については、フジタモデルを適用した風速場の中で地上付近の不確実性を考慮し、地上からの初期高さの感度解析の結果から最大となる水平速度（54m/s）を算出した。

結果を図2に示す。

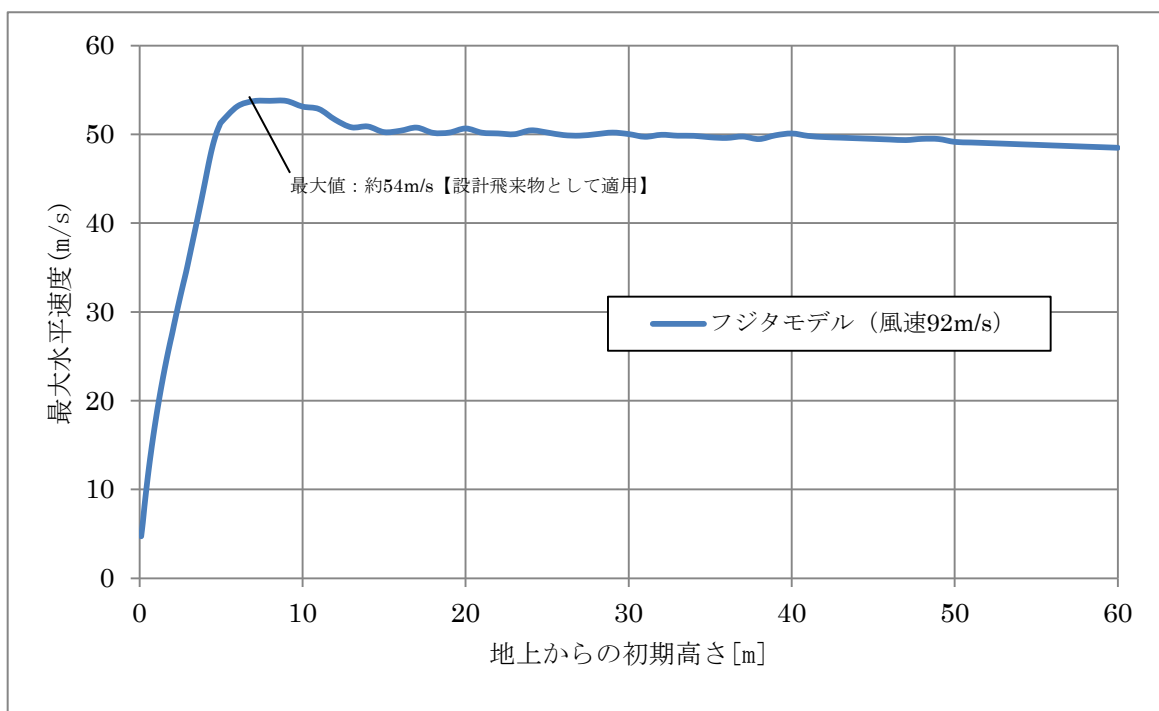


図2 砂利の飛散解析結果  
(砂利：40mm×40mm×40mm, 0.2kg)

## フジタモデルによる飛散解析の特徴について

## 1. はじめに

フジタモデルを用いた飛散解析では、物体の地上からの初期高さが飛散速度や飛散距離に影響する。ここでは、フジタモデルの風速場の概要及びフジタモデルを用いた飛散解析の特徴について、設計飛来物（鋼製材）に対する飛散解析結果を例に説明する。

## 2. フジタモデルの風速場のモデル化

## (1) 風速場の概要

フジタモデルを用いた飛散解析における風速場は図 1 に示すように、半径方向に 3 つの領域（内部コア、外部コア、最外領域）で構成され、鉛直方向は流入層と非流入層で構成される。流入層では竜巻中心方向に向かう強い流れ（流入風）があり、この空気の流れ込みが外部コア内での上昇風となる。流入風の最大風速は流入層の上限で発生するようにモデル化されており、地表面に近づくにつれて連続的に減衰する。水平風速は、周方向の風速と流入風の風速を合成することで得られ、最大水平方向風速は最大周方向風速に竜巻の移動速度を足したものと一致する。フジタモデルの風速場における最大水平風速と地上からの高さの関係を図 2 に示す。

フジタモデルにおける最大水平風速は、地表面（0m）から流入層高さ（15m）までは大きく上昇し、流入層高さにおいて最大風速が発生する。流入層高さを超えると、地上からの高さが高くなるにつれて最大水平風速は緩やかに減少するモデルとなっている。

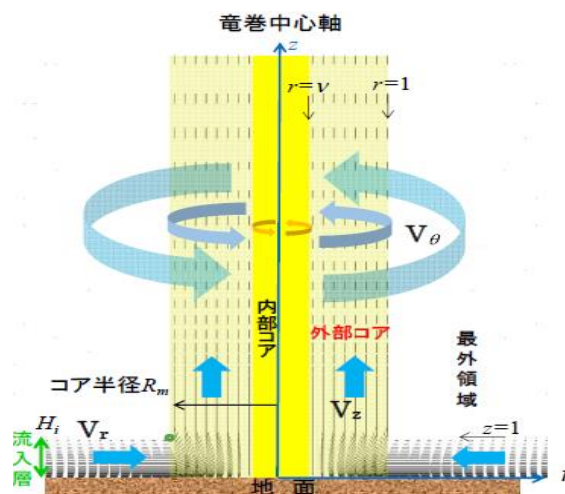


図 1 フジタモデルの風速場（イメージ）

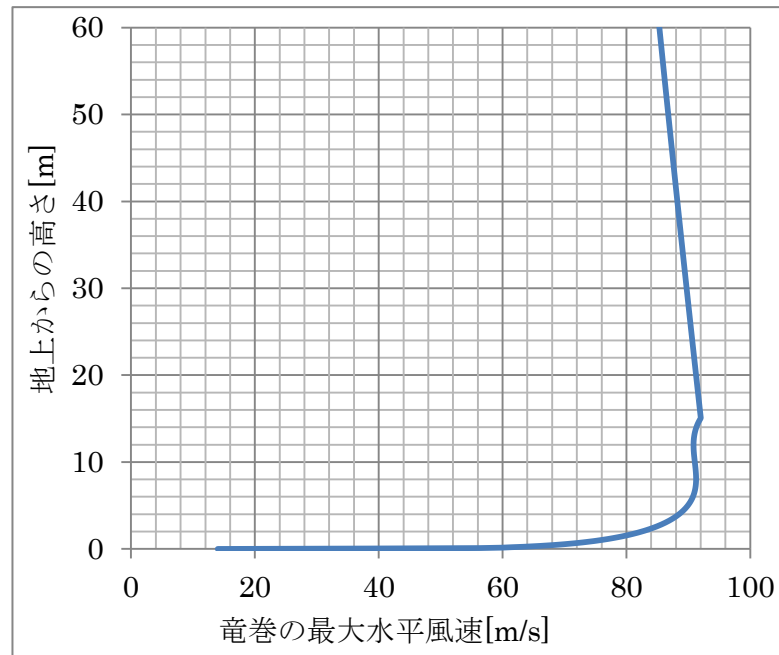


図2 フジタモデルの風速場における最大水平風速と地上からの高さの関係 (r=1)

(2) 地面効果の影響

地表面付近の物体については、物体の形状に応じた揚力（地面効果）を加えている。揚力は空力パラメータに応じて決定され、物体高さの3倍までの範囲で連続的に減衰するように作用する。（別添2-2 5. 参照）

3. フジタモデルによる飛散解析の特徴について

フジタモデルによる飛散解析の特徴的な傾向として、地上からの初期高さが増加するに従い、約10mまでは飛来物の水平速度が大きく増加し、その後の変化は緩やかとなる。（図3参照）

- ①地上からの初期高さが増加するに従い（約10mまでの範囲（図3中の①））、風速場に滞空する時間が長くなり、飛来物の水平速度は増加する傾向となる。
- ②地上からの初期高さが高い場合（約10m以上の範囲（図3中の②））は、図2に示す通り、地上からの初期高さが高くなるにつれて竜巻の水平風速は緩やかに減少していくモデルとなっていることから、飛来物の水平速度も同様に低下していく。

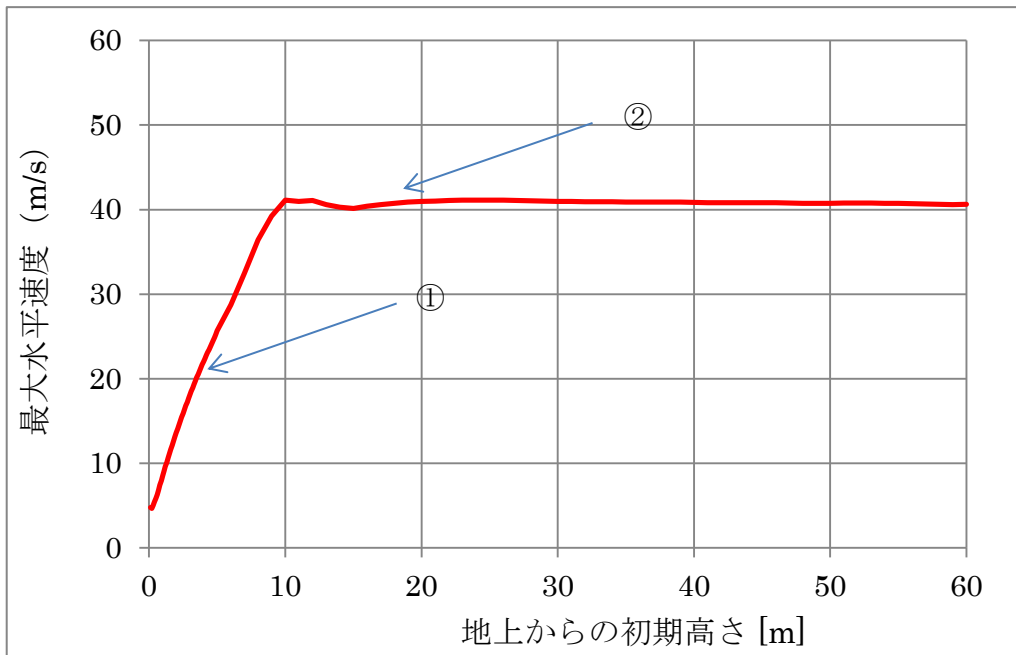


図3 フジタモデルを用いた飛散解析における地上からの初期高さと飛来物の水平速度の関係（鋼製材）

## 飛来物発生防止対策エリアの設定について

飛来物発生防止対策エリアは、ウォークダウン等で確認された飛散した場合の影響が設計飛来物を超える「資機材・車両」及び「軽量大型機材」の飛散解析結果より設定しており、飛散解析は以下の方針に基づきフジタモデルを用いて実施した。

なお、「軽量大型機材」は、プレハブ小屋、コンテナボックス等の飛散しやすい傾向にある軽量で大型の物品とし、「資機材・車両」は、「軽量大型機材」以外の物品とする。

## (1) 飛散解析条件

- a. 物品は地表面（地上からの初期高さ0m）に配置されていることとする。  
 なお、フジタモデルの地表面付近の風速場の不確定性を考慮し、地表面に設置された物品の飛散解析の妥当性を確認するために、フジタモデルの風速場で約90m/sの風速となる高さである地上からの初期高さを5mとした場合の飛散解析も実施する。（フジタモデルの地表面付近の風速場の不確定性に係る至近の研究報告等については、別添2-2参照。）
- b. 竜巻の最大風速は、設計竜巻の最大風速92m/sを設定する。
- c. 飛散解析において考慮する敷地の高低差は、物品を設置する敷地高さ（EL8.5～50m）と評価対象施設の設置高さ（EL8.5, 15m）を考慮し、表1のとおり余裕をもって設定した。

表1 飛散解析において考慮する敷地の高低差

物品を設置する敷地高さ （発電所の敷地高さ）	EL8.5～15m	EL45～50m
評価対象施設の設置高さ （EL8.5, 15m）との高低差	0m	41.5m

## (2) 飛散解析結果及び飛来物発生防止対策エリアの設定

表2に、ウォークダウン等で確認された飛来物となり得る物品の形状（棒状、板状、塊状）、寸法、質量、空力パラメータ及び表1に記載している2種類の飛散解析において考慮する敷地の高低差に対する地上からの初期高さを0mとした場合の飛散解析結果（最大飛散距離、最大水平速度、最大飛散高さ等）を示す。

表2の結果より、「資機材・車両」及び「軽量大型機材」の飛来物発生防止対策エリアを、「資機材・車両」及び「軽量大型機材」のうち飛散距離が最大となる「乗用車」及び「プレハブ小屋」の飛散距離から、図1、2のとおり設定する。

また、地上からの初期高さを5mとした場合の飛散解析結果を表3に示す。表2、3より、以下の通りフジタモデルの地表面付近の風速場の不確定性を考慮しても飛来物発生防止対策エリアの設定に影響はないことを確認した。



- ・飛散した場合の影響が設計飛来物を超える物品は、地上からの初期高さを5mとした場合においても、飛来物発生防止対策エリアの設定に用いた最大飛散距離を超えない
- ・飛散した場合の影響が設計飛来物以下の物品は、地上からの初期高さを5mとした場合においても、設計飛来物の影響以下である
- ・飛散しない物品は、地上からの初期高さを5mとした場合においても、飛散しない（初期位置から浮上しない）

地上からの初期高さを5mとしたことで作用する初期風速が増加し、飛散距離が増加した物品もあるが、飛来物発生防止対策エリアの設定に用いた「乗用車」や「プレハブ小屋」については、地上からの初期高さを0mとした方が飛散距離が大きくなった。これは、「資機材・車両」や「軽量大型機材」に分類されるような表面積及び物品高さが大きい物品は、地面効果による揚力の影響により高く浮上すること及び地上からの初期高さを0mとした方が地上からの初期高さを5mとした場合より長時間設計竜巻の最大風速程度の強い風を受けたことが要因と考えられる。

「資機材・車両」及び「軽量大型機材」のうち、飛散距離が最大となる「乗用車」及び「プレハブ小屋」の、地上からの初期高さを0m及び5mとした場合における飛跡（飛散距離と飛散高さの関係）を図3～6に示す。「乗用車」及び「プレハブ小屋」共に、地上からの初期高さを0mとした方が地上からの初期高さを5mとした場合より、初期位置からの飛散高さは高くなっており、飛散距離が大きくなっている。地上からの初期高さを0mとした場合の最大飛散高さは、「乗用車」は約8m、「プレハブ小屋」は約30mとなっており、地上からの高さ8m以上では、90m/s程度の強い風を受けることになる。

以上より、飛来物発生防止対策エリアの設定に対して、地表面付近の風速場の不確定性の影響は小さく、地表面に設置した物品に対する飛散解析結果を用いることは妥当であると考えられる。

表 2 想定飛来物の飛散解析結果 (地上からの初期高さ 0m) (1/7)

飛来物の種類	代表飛来物	形状	長さ L (mm)	幅 W (mm)	高さ D (mm)	質量 m (kg)	空カパラ メータ $C_d A/m$ ( $m^2/kg$ )	高低差 0m				高低差 41.5m					
								最大飛散高さ h (m)	最大飛散距離 l (m)	最大水平速度 V (m/s)	運動エネルギー (水平) K (kJ)	鋼板貫通 厚さ T (mm)	最大飛散高さ h (m)	最大飛散距離 l (m)	最大水平速度 V (m/s)	運動エネルギー (水平) K (kJ)	鋼板貫通 厚さ T (mm)
								h	l	V	K	T	h	l	V	K	T
軽 量 大 型 資 機 材	ブレハブ小屋 7	塊状	7200	27000	3400	7500	0.0277	32	222	63	14496	9	32	275	63	14496	9
	ブレハブ小屋 12	塊状	18000	7200	3100	5000	0.0277	31	220	63	9710	7	31	273	63	9710	7
	ブレハブ小屋 9	塊状	4600	2300	3300	1000	0.0223	28	219	60	1776	4	28	274	60	1776	4
	仮設トイレ 1	塊状	5100	1590	2500	450	0.0368	34	214	66	973	4	34	266	66	973	4
	簡易水洗トイレ	塊状	800	1120	2400	100	0.0367	33	213	66	216	3	33	265	66	216	3
	ブレハブ小屋 13	塊状	25000	6000	3000	8000	0.0203	26	213	59	13678	10	26	271	59	13678	10
	仮設トイレ 2	塊状	6800	1200	2400	400	0.0456	37	212	69	933	4	37	261	69	933	4
	物置 1	塊状	3100	1400	2100	281	0.0328	28	210	64	576	3	28	263	64	576	3
	ブレハブ小屋 5	塊状	2300	7300	2600	1400	0.0199	23	205	58	2350	6	23	267	58	2350	6
	ブレハブ小屋 14	塊状	3000	2200	2500	650	0.0202	23	204	58	1093	4	23	266	58	1093	4
	ブレハブ小屋 4	塊状	2000	3700	2600	800	0.0186	22	202	58	1304	4	22	265	58	1304	4
	ブレハブ小屋 11	塊状	5000	5000	3000	2400	0.0153	22	198	55	3599	5	22	263	55	3599	5
	ブレハブ小屋 10	塊状	4600	2300	3300	1850	0.0121	20	187	52	2481	5	20	254	52	2481	5
	ブレハブ小屋 8	塊状	2600	1850	1850	460	0.019	18	187	57	739	4	18	251	57	739	4
	ブレハブ小屋 6	塊状	6900	7300	2600	4200	0.0139	18	185	54	5927	6	18	253	54	5927	6
	コンテナボックス	塊状	2400	6000	2600	2300	0.0106	13	161	50	2810	6	13	235	50	2810	6
	ブレハブ小屋 3	塊状	11500	5600	2600	6850	0.0106	13	161	50	8405	8	13	235	50	8405	8
	鉄くずコンテナ	塊状	2000	1500	1100	200	0.0229	12	160	58	332	3	12	227	58	332	3
	ブレハブ小屋 1	塊状	2600	1850	1850	730	0.012	9	157	51	925	4	9	229	51	925	4
	ブレハブ小屋 2	塊状	5000	5000	3000	4400	0.0084	11	147	47	4743	6	11	219	47	4743	6
産廃コンテナ	塊状	3800	2100	1500	930	0.0121	6	143	50	1126	5	6	232	50	1126	5	
ホース収納用コンテナ	塊状	7200	2300	2900	3800	0.0078	9	127	46	3900	7	9	210	46	3900	7	
乗用車 4	塊状	1880	5230	2285	1890	0.0092	8	144	48	2089	6	8	221	48	2089	6	
乗用車 5	塊状	3395	1475	1535	710	0.0118	6	138	49	851	5	6	229	49	851	5	

\*: 評価計算上、設定時間 (180 秒) では運動が終了しないため数値なし。  
(運動エネルギー評価にて飛来物発生防止対策の要否判断は可能)

表 2 想定飛来物の飛散解析結果 (地上からの初期高さ 0m) (2/7)

飛来物の種類	代表飛来物	形状	長さ L (mm)	幅 W (mm)	高さ D (mm)	質量 m (kg)	空カパラ メータ $C_p A/m$ ( $m^2/kg$ )	高低差 0m				高低差 41.5m					
								最大飛散高さ h (m)	最大飛散距離 l (m)	最大水平速度 V (m/s)	運動エネルギー (水平) K (kJ)	鋼板貫通 厚さ T (mm)	最大飛散高さ h (m)	最大飛散距離 l (m)	最大水平速度 V (m/s)	運動エネルギー (水平) K (kJ)	鋼板貫通 厚さ T (mm)
	燃料ポンプユニット車	塊状	8000	2500	4200	7180	0.006	10	129	43	6578	8	10	209	43	6578	8
	自動販売機 (小)	塊状	660	999	1830	249	0.0099	6	126	47	273	4	6	222	47	273	4
	ユニック (4 t) 1	塊状	7710	2230	2950	4510	0.0069	7	116	44	4291	8	7	202	44	4291	8
	トラック 1	塊状	2230	8445	2465	3790	0.008	7	115	46	3869	8	7	204	46	3869	8
	ユニック (4 t) 2	塊状	8180	2230	2420	3620	0.008	7	114	46	3700	8	7	203	46	3700	8
	乗用車 9	塊状	3395	1475	1910	1010	0.0095	6	110	47	1086	5	6	202	47	1086	5
	トラック (20t)	塊状	10500	2500	3600	8770	0.0056	7	107	41	7294	9	7	196	41	7294	9
	ユニック (2 t)	塊状	8500	2300	3000	5550	0.0063	6	107	43	4958	8	6	196	43	4958	8
	乗用車 1	塊状	1475	3395	1610	840	0.0102	5	100	47	899	5	5	199	47	899	5
	バス 1	塊状	2010	6990	2645	3880	0.0066	6	97	43	3462	7	6	193	43	3462	7
	自動販売機	塊状	1362	740	1830	365	0.0089	6	96	46	372	4	6	196	46	372	4
	バス 2	塊状	2490	11990	3750	12100	0.0047	5	81	38	8537	10	5	176	38	8642	10
	乗用車 8	塊状	4600	1700	1800	1600	0.008	4	80	42	1412	5	4	180	43	1414	6
	乗用車 2	塊状	1695	4360	1460	1140	0.0095	4	77	44	1074	5	4	182	44	1074	5
	積載車	塊状	3400	1500	2000	1430	0.007	4	72	40	1130	5	4	170	40	1138	5
	12 t ユニック車	塊状	9880	2490	2740	7160	0.0055	4	71	38	4979	8	4	167	38	5106	8
	乗用車 7	塊状	4370	1690	1510	1250	0.0089	4	70	43	1112	5	4	174	43	1115	5
	モニタリングカー	塊状	4900	1800	2200	2545	0.0062	4	65	38	1764	6	4	162	38	1817	6
	乗用車 3	塊状	1780	4790	1535	1510	0.0083	4	64	40	1192	5	4	160	41	1214	5
	防眩材	塊状	2500	1300	1300	570	0.0096	4	64	42	488	4	4	165	42	492	4
	第 1 パントフィリタ出口 分析計車	塊状	8545	2300	3270	7950	0.0047	4	61	34	4404	7	4	144	35	4609	8
	小型発電機 1	塊状	630	1330	1650	354	0.0077	4	61	39	262	4	4	159	39	267	4
	中型ホース展開車	塊状	7400	2300	3400	7985	0.0042	3	54	32	3853	7	3	136	33	4093	7

資機材・車両

\*: 評価計算上, 設定時間 (180 秒) では運動が終了しないため数値なし。  
(運動エネルギー評価にて飛来物発生防止対策の要否判断は可能)

表 2 想定飛来物の飛散解析結果 (地上からの初期高さ 0m) (3/7)

飛来物の種類	代表飛来物	形状	長さ L (mm)	幅 W (mm)	高さ D (mm)	質量 m (kg)	空カバラ メータ $C_p A/m$ ( $m^2/kg$ )	高低差 0m				高低差 41.5m					
								最大飛散高さ h (m)	最大飛散距離 l (m)	最大水平速度 V (m/s)	運動エネルギー (水平) K (kJ)	鋼板貫通 厚さ T (mm)	最大飛散高さ h (m)	最大飛散距離 l (m)	最大水平速度 V (m/s)	運動エネルギー (水平) K (kJ)	鋼板貫通 厚さ T (mm)
								h	l	V	K	T	h	l	V	K	T
資機材・車両	中型ホース展開車 (150A)	塊状	7430	2240	3300	7975	0.0041	3	47	30	3392	6	3	127	31	3664	7
	水中ポンプ車 (追加分)	塊状	6090	1865	2700	5010	0.0044	3	43	29	2029	5	3	120	30	2187	6
	送水車	塊状	5500	1900	2500	4330	0.0045	3	41	29	1706	5	3	118	30	1837	5
	直流給電車 (230V)	塊状	6700	2320	3020	7100	0.0041	3	41	28	2631	6	3	113	29	2801	6
	水中ポンプ車	塊状	6000	1900	2700	5045	0.0044	3	41	28	1942	5	3	117	29	2116	6
	高圧発電機車	塊状	2150	6825	3260	7680	0.0039	2	40	27	2759	6	2	113	28	2971	6
	ホイールローダ 2	塊状	6200	2200	3100	6880	0.0039	2	38	27	2362	5	2	109	28	2561	5
	放水砲	塊状	4700	1900	2000	3020	0.0049	2	37	28	1159	4	2	111	29	1225	5
	タンクローリ 1	塊状	5300	1900	2100	3560	0.0048	2	36	27	1282	5	2	111	28	1382	5
	直流給電車 (115V)	塊状	8980	2470	3320	10990	0.0037	2	36	25	3418	6	2	104	27	3813	6
	タンクローリ 2	塊状	4900	1900	2100	3440	0.0046	2	34	26	1145	4	2	108	28	1257	5
	ホイールローダ 3	塊状	6200	2200	3100	7270	0.0037	2	33	24	2091	5	2	99	26	2292	5
	高圧発電機車 (追加分)	塊状	6900	2225	2940	7850	0.0036	2	30	23	2072	5	2	95	25	2313	5
	電気盤	塊状	1500	1200	1900	1000	0.0047	2	30	25	300	3	2	99	26	325	3
	大量送水車 (追加分)	塊状	8350	2490	3550	12350	0.0032	1	29	22	2941	5	1	91	24	3327	6
	可搬式モニタリングポスト ト運搬用トラック	塊状	5985	1885	2135	4705	0.004	1	25	22	1083	4	1	87	23	1218	4
乗用車 6	塊状	3100	1600	1300	1430	0.0052	2	24	23	365	3	2	90	24	401	3	
ホース展開車 (大型) (追加分)	塊状	9395	2490	3550	14495	0.0031	1	19	18	2336	5	1	76	21	3026	5	
大量送水車	塊状	8570	2490	3560	13650	0.003	1	18	18	2000	4	1	71	20	2610	5	
精密測定用 WBC (Ge)	塊状	8530	2300	3765	14000	0.0029	1	17	17	1960	4	1	70	19	2490	5	
化学消防車	塊状	7160	2280	2900	9465	0.0031	1	14	16	1119	3	1	63	18	1453	4	
窒素ガス発生装置車	塊状	11990	2490	3790	21330	0.0027	1	8	12	1427	3	1	51	16	2434	5	

\*: 評価計算上, 設定時間 (180 秒) では運動が終了しないため数値なし。  
(運動エネルギー評価にて飛来物発生防止対策の要否判断は可能)

表 2 想定飛来物の飛散解析結果 (地上からの初期高さ 0m) (4/7)

飛来物の種類	代表飛来物	形状	長さ L (mm)	幅 W (mm)	高さ D (mm)	質量 m (kg)	空カバラ メータ C <sub>st</sub> A/m (m <sup>2</sup> /kg)	高低差 0m				高低差 41.5m					
								最大飛散高さ h (m)	最大飛散距離 l (m)	最大水平速度 V (m/s)	運動エネルギー K (kJ)	鋼板貫通 厚さ T (mm)	最大飛散高さ h (m)	最大飛散距離 l (m)	最大水平速度 V (m/s)	運動エネルギー K (kJ)	
								鋼板貫通 厚さ T (mm)	鋼板貫通 厚さ T (mm)	鋼板貫通 厚さ T (mm)	鋼板貫通 厚さ T (mm)						
・資 車 機 両 材	ホイールローダー1	塊状	2250	6130	3035	9350	0.0028	1	6	10	433	2	1	44	14	812	3
	大型送水ポンプ車	塊状	12000	2500	3600	21930	0.0025	1	2	5	227	1	1	27	10	896	3
	ドラム缶	塊状	600	600	900	24	0.04	19	186	65	50	2	19	242	65	50	2
	物置3	塊状	1400	800	1100	76	0.0311	17	181	62	144	3	17	235	62	144	3
	小型自動二輪車	塊状	725	1855	1045	89	0.0303	16	173	61	166	3	16	223	61	166	3
	ケープルくゾコンテナ	塊状	1200	800	1100	100	0.0211	10	158	57	160	3	10	229	57	160	3
	空調室外機 (家庭用)	塊状	250	800	300	10	0.0344	2	142	48	12	2	2	196	48	12	2
	仮設足場	板状	250	4000	40	13.2	0.0557	1	138	40	11	4	1	171	40	11	4
	台車	塊状	1000	500	150	20	0.0242	1	88	38	15	2	1	180	38	15	2
	物置2	塊状	1200	800	1100	285	0.0074	2	35	31	132	2	2	113	31	136	2
	砂利6	塊状	40	40	40	0.1	0.032	1	24	23	1	1	1	83	23	1	1
	スクラップ用鉄箱 2	塊状	1300	900	700	240	0.0076	1	21	24	69	2	1	87	25	72	2
	工具箱	塊状	1000	500	500	100	0.0084	1	16	22	24	2	1	77	23	25	2
	スクラップ用鉄箱 1	塊状	1500	1350	600	400	0.0063	1	14	18	61	2	1	66	19	67	2
	空調室外機 (ビル用)	塊状	940	1400	320	134	0.0103	1	13	21	29	2	1	71	22	30	2
砂利1	塊状	50	50	50	0.3	0.0167	1	11	16	1	1	1	59	16	1	1	
砂利5	塊状	40	40	40	0.15	0.0214	1	11	16	1	1	1	59	17	1	1	
小型発電機 2	塊状	1500	700	1200	600	0.0041	1	11	15	60	2	1	56	16	76	2	
砂利	塊状	40	40	40	0.2	0.016	1	9	14	1	1	1	52	14	1	1	
砂利2	塊状	50	50	50	0.35	0.0143	1	7	12	1	1	1	46	13	1	1	
砂利3	塊状	40	40	40	0.25	0.0128	1	5	10	1	1	1	37	12	1	1	
コンクリートブロック 3	塊状	390	190	190	18	0.0069	1	4	9	1	1	1	33	11	1	1	
コンクリートブロック	塊状	190	390	150	14.3	0.0076	1	4	9	1	1	1	34	11	1	1	

\*: 評価計算上、設定時間 (180 秒) では運動が終了しないため数値なし。  
(運動エネルギー評価にて飛来物発生防止対策の要否判断は可能)

表 2 想定飛来物の飛散解析結果 (地上からの初期高さ 0m) (5/7)

飛来物の種類	代表飛来物	形状	長さ L (mm)	幅 W (mm)	高さ D (mm)	質量 m (kg)	空カバラ メータ C <sub>ρ</sub> A/m <sup>2</sup> (m <sup>2</sup> /kg)	高低差 0m				高低差 41.5m					
								最大飛散高さ h (m)	最大飛散距離 l (m)	最大水平速度 V (m/s)	運動エネルギー (水平) K (kJ)	鋼板貫通 厚さ T (mm)	最大飛散高さ h (m)	最大飛散距離 l (m)	最大水平速度 V (m/s)	運動エネルギー (水平) K (kJ)	鋼板貫通 厚さ T (mm)
								h	l	V	K	T	h	l	V	K	T
設計飛来物の影響を超えない物品	コンクリートブロック 1	塊状	390	190	100	10.3	0.0086	1	4	9	1	1	32	11	1	1	
	コンクリートブロック 2	塊状	390	190	120	12	0.008	1	4	9	1	1	32	10	1	1	
	形鋼 [ガイド]	棒状	4200	300	200	135	0.0066	1	4	8	5	3	31	10	7	4	
	鋼製材 [ガイド]	棒状	300	4200	200	135	0.0066	1	4	8	5	3	31	10	7	4	
	コンクリート側溝	棒状	380	2100	340	132	0.0053	1	3	8	4	1	29	10	6	1	
	鋼製パイプ [ガイド]	棒状	50	2000	50	8.4	0.0098	1	3	7	1	2	26	9	1	2	
	鋼製パイプ 1	棒状	50	4000	50	16.8	0.0097	1	3	7	1	2	26	9	1	3	
	マンホール蓋 (小)	板状	650	650	50	33.5	0.0092	1	2	6	1	1	23	9	2	1	
	ガスボンベ	棒状	230	1500	230	57	0.0055	1	2	5	1	1	20	8	2	1	
	マンホール蓋 (大)	板状	975	975	60	88	0.0078	1	1	4	1	1	17	7	2	1	
	中型発電機 1	塊状	1080	2550	1500	1770	0.0031	1	1	3	5	1	16	6	29	1	
	130tクレーン	塊状	15490	2780	4020	38100	0.0021	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	G T G車	塊状	14740	4248	4220	45000	0.0022	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	H形鋼 2	棒状	5500	100	100	95	0.0048	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	L形鋼	棒状	5500	100	100	82	0.0055	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	カニクレーン	塊状	4285	1280	1695	3900	0.0026	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	コンクリート板	板状	2700	1000	200	1300	0.0017	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
コンクリート板 [ガイド]	板状	1500	1000	150	540	0.0022	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
コンクリート桁	塊状	1200	1200	1200	1300	0.0023	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
シヨバルカー 1	塊状	2800	9425	3040	19500	0.0022	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
シヨバルカー 2	塊状	9600	2800	3010	20500	0.0021	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
トラック [ガイド]	塊状	1900	5000	1300	4750	0.0026	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
バックホー	塊状	9400	2800	3000	19500	0.0022	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
フォークリフト	塊状	1520	3200	2240	6920	0.0015	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	

\*: 評価計算上, 設定時間 (180 秒) では運動が終了しないため数値なし。  
(運動エネルギー評価にて飛来物発生防止対策の要否判断は可能)

表 2 想定飛来物の飛散解析結果 (地上からの初期高さ 0m) (6/7)

飛来物の種類	代表飛来物	形状	長さ L (mm)	幅 W (mm)	高さ D (mm)	質量 m (kg)	空カバラ メータ C <sub>ρ</sub> A/m <sup>2</sup> (m <sup>2</sup> /kg)	高低差 0m				高低差 41.5m						
								最大飛散高さ h (m)	最大飛散距離 l (m)	最大水平速度 V (m/s)	運動エネルギー (水平) K (kJ)	鋼板貫通 厚さ T (mm)	最大飛散高さ h (m)	最大飛散距離 l (m)	最大水平速度 V (m/s)	運動エネルギー (水平) K (kJ)	鋼板貫通 厚さ T (mm)	
								h	l	V	K	T	h	l	V	K	T	
	フォークリフト (3 t)	塊状	3775	1225	2090	4370	0.0023	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	フォークリフト	塊状	3600	1100	2100	3600	0.0026	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	ラフタークレーン	塊状	2600	11000	3500	26500	0.002	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	ラフタークレーン (60t)	塊状	13000	2800	3700	41295	0.0016	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	ラフタークレーン 2	塊状	11405	2620	3490	31900	0.0017	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	移動式WBC	塊状	7000	2200	2700	16000	0.0017	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	移動式代替熱交換器車	塊状	15500	2490	4090	42341	0.0018	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	角形鋼 1	棒状	5500	125	125	120	0.0047	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	角形鋼 2	棒状	5500	200	200	288	0.0032	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	形鋼 1	棒状	2900	200	200	145	0.0034	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	形鋼 2	棒状	8000	350	350	1080	0.0022	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	鋼製ドラム	塊状	3000	3000	2000	6000	0.0024	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	鋼製材 1	棒状	100	5500	100	95	0.0048	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	鋼製材 2	棒状	150	5500	150	174	0.0039	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	鋼板 (大・厚) (覆工板)	板状	2996	997	200	640	0.0037	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	鋼板 (大・薄) (敷き鉄板・大) 1	板状	6000	1500	22	1600	0.0038	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	鋼板 (大・薄) (敷き鉄板・大) 2	板状	6000	1500	25	1800	0.0034	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	鋼板 (大・薄) (敷き鉄板・大) 3	板状	6100	1500	25	1820	0.0034	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	鋼板 (大・薄) (敷き鉄板・中) 2	板状	3000	1500	25	900	0.0034	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	大型ホース展張車 (300A)	塊状	8380	2490	3280	21980	0.0018	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	大型発電機	塊状	1650	5380	2100	7220	0.0022	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	中型発電機 2	塊状	2000	880	1200	1300	0.0027	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	電源車	塊状	15455	2490	4101	41000	0.0019	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

設計飛来物の影響を超えない物品

\*: 評価計算上, 設定時間 (180 秒) では運動が終了しないため数値なし。  
(運動エネルギー評価にて飛来物発生防止対策の要否判断は可能)

表 2 想定飛来物の飛散解析結果 (地上からの初期高さ 0m) (7/7)

飛来物の種類	代表飛来物	形状	長さ L (mm)	幅 W (mm)	高さ D (mm)	質量 (kg)	空力パラメータ $C_{DA}/m$ ( $m^2/kg$ )	高低差 0m				高低差 41.5m				
								最大飛散高さ h (m)	最大飛散距離 l (m)	最大水平速度 V (m/s)	運動エネルギー (水平) K (kJ)	鋼板貫通厚さ T (mm)	最大飛散高さ h (m)	最大飛散距離 l (m)	最大水平速度 V (m/s)	運動エネルギー (水平) K (kJ)
設計飛来物の影響を ない物品を超え	電柱	棒状	257	10000	257	690	0.0031	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	敷き鉄板 1	板状	1400	3000	12	400	0.0071	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	敷き鉄板 2	板状	1500	3000	22	802	0.0038	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	敷き鉄板 3	板状	1500	6100	25	1820	0.0034	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	電	塊状	50	50	50	0.06	0.0834	*	*	46	1	*	46	1	1	1
	足場板 2	板状	4000	240	32	7.6	0.0914	*	*	43	7	*	43	7	7	3
手洗シンク	塊状	1600	530	1200	24	0.0946	*	*	76	69	*	76	69	69	2	

\* : 評価計算上, 設定時間 (180 秒) では運動が終了しないため数値なし。  
(運動エネルギー評価にて飛来物発生防止対策の要否判断は可能)



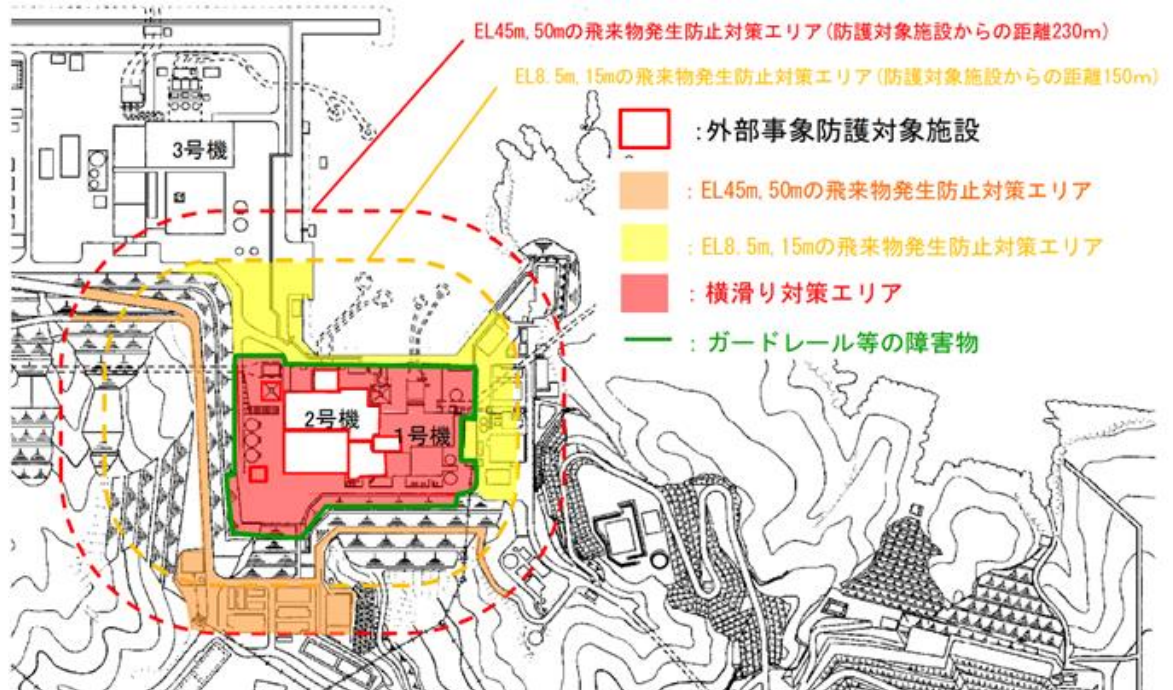


図1 資機材・車両の飛来物発生防止対策エリア

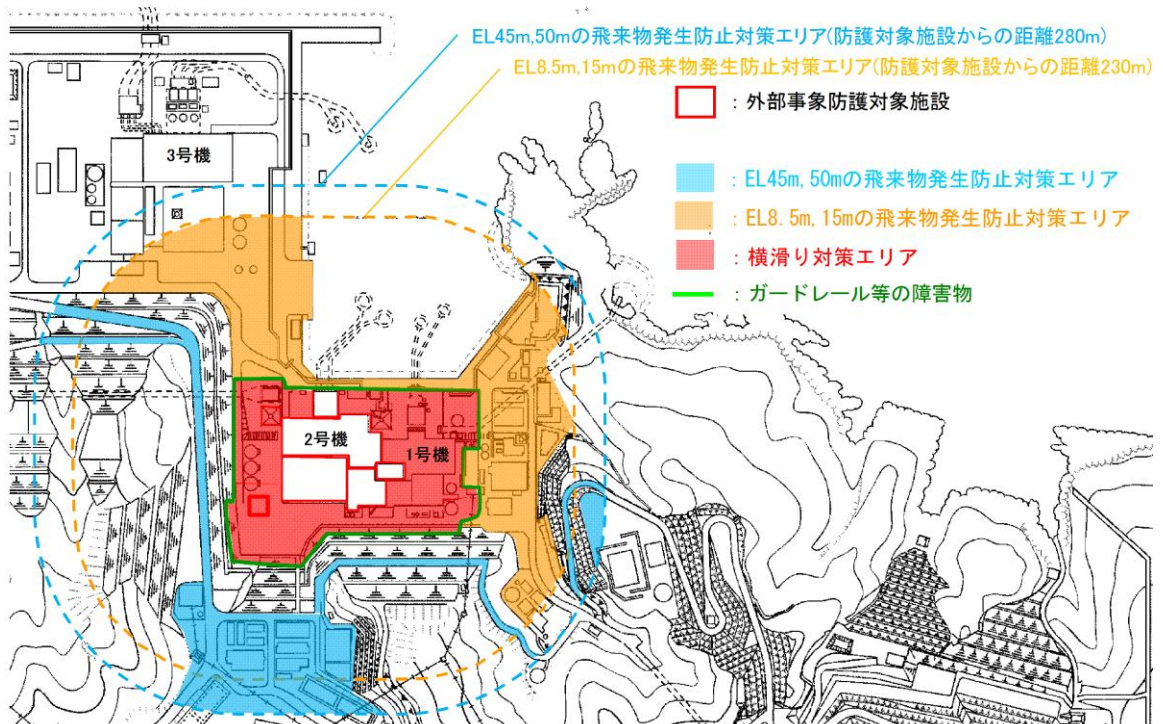


図2 軽量大型機材の飛来物発生防止対策エリア

表3 想定飛来物の飛散解析結果（地上からの初期高さ5m）（1/7）

飛来物の種類	代表飛来物	形状	長さ L (mm)	幅 W (mm)	高さ D (mm)	質量 m (kg)	空カバラ メータ CDA/m <sup>2</sup> (m <sup>2</sup> /kg)	高低差 0m						高低差 41.5m					
								最大飛散高さ h (m)	最大飛散距離 l (m)	最大水平速度 V (m/s)	運動エネルギー K <sup>*</sup> (水平) (kJ)	鋼板貫通厚さ T (mm)	最大飛散高さ h (m)	最大飛散距離 l (m)	最大水平速度 V (m/s)	運動エネルギー K <sup>*</sup> (水平) (kJ)	鋼板貫通厚さ T (mm)	最大飛散高さ h (m)	最大飛散距離 l (m)
	ブレハブ小屋7	塊状	7200	27000	3400	7500	0.0277	29	206	62	14118	9	29	260	62	14118	9		
	ブレハブ小屋12	塊状	18000	7200	3100	5000	0.0277	28	203	62	9411	7	28	258	62	9411	7		
	ブレハブ小屋9	塊状	4600	2300	3300	1000	0.0223	20	196	59	1714	4	20	256	59	1714	4		
	仮設トイレ1	塊状	5100	1590	2500	450	0.0368	34	205	65	945	4	34	255	65	945	4		
	簡易水洗トイレ	塊状	800	1120	2400	100	0.0367	33	204	65	210	3	33	254	65	210	3		
	ブレハブ小屋13	塊状	25000	6000	3000	8000	0.0203	15	188	58	13160	10	15	252	58	13160	10		
	仮設トイレ2	塊状	6800	1200	2400	400	0.0456	40	207	68	904	4	40	254	68	904	4		
	物置1	塊状	3100	1400	2100	281	0.0328	25	198	64	559	3	25	250	64	559	3		
	ブレハブ小屋5	塊状	2300	7300	2600	1400	0.0199	12	180	58	2291	5	12	244	58	2291	5		
	ブレハブ小屋14	塊状	3000	2200	2500	650	0.0202	12	178	58	1066	4	12	242	58	1066	4		
	ブレハブ小屋4	塊状	2000	3700	2600	800	0.0186	11	175	57	1258	4	11	241	57	1258	4		
	ブレハブ小屋11	塊状	5000	5000	3000	2400	0.0153	10	170	54	3468	5	10	246	54	3468	5		
	ブレハブ小屋10	塊状	4600	2300	3300	1850	0.0121	8	165	51	2377	5	8	242	51	2377	5		
	ブレハブ小屋8	塊状	2600	1850	1850	460	0.019	5	164	56	719	4	5	233	56	719	4		
	ブレハブ小屋6	塊状	6900	7300	2600	4200	0.0139	6	157	53	5727	6	6	231	53	5727	6		
	コンテナボックス	塊状	2400	6000	2600	2300	0.0106	2	147	49	2680	6	2	223	49	2680	6		
	ブレハブ小屋3	塊状	11500	5600	2600	6850	0.0106	3	147	49	8017	8	3	223	49	8017	8		
	鉄くずコンテナ	塊状	2000	1500	1100	200	0.0229	6	154	59	339	3	6	216	59	339	3		
	ブレハブ小屋1	塊状	2600	1850	1850	730	0.012	1	148	49	862	4	1	230	49	862	4		
	ブレハブ小屋2	塊状	5000	5000	3000	4400	0.0084	2	139	46	4526	5	2	221	46	4526	5		
	産廃コンテナ	塊状	3800	2100	1500	930	0.0121	1	81	48	1042	5	1	190	48	1042	5		
	ホース収納用コンテナ	塊状	7200	2300	2900	3800	0.0078	1	104	45	3698	7	1	204	45	3698	7		
	乗用車4	塊状	1880	5230	2285	1890	0.0092	1	109	46	1979	6	1	205	46	1979	6		
	乗用車5	塊状	3395	1475	1535	710	0.0118	1	79	47	780	4	1	188	47	780	4		

一：浮上しないため記載しない  
 \*：評価計算上、設定時間（180秒）では運動が終了しないため数値なし。  
 （運動エネルギー評価にて飛来物発生防止対策の要否判断は可能）

表3 想定飛来物の飛散解析結果（地上からの初期高さ5m）（2/7）

飛来物の種類	代表飛来物	形状	長さ L (mm)	幅 W (mm)	高さ D (mm)	質量 m (kg)	空力パラメータ CDA/m (m <sup>2</sup> /kg)	高低差0m						高低差41.5m					
								最大飛散高さ h (m)	最大飛散距離 l (m)	最大水平速度 V (m/s)	運動エネルギー K <sup>*</sup> (水平) (kJ)	鋼板貫通厚さ T (mm)	最大飛散高さ h (m)	最大飛散距離 l (m)	最大水平速度 V (m/s)	運動エネルギー K <sup>*</sup> (水平) (kJ)	鋼板貫通厚さ T (mm)	最大飛散高さ h (m)	最大飛散距離 l (m)
	燃料ポンプユニット車	塊状	8000	2500	4200	7180	0.006	2	106	42	6282	8	2	194	42	6282	8		
	自動販売機(小)	塊状	660	999	1830	249	0.0099	1	72	45	245	4	1	180	45	245	4		
	ユニック(4t)1	塊状	7710	2230	2950	4510	0.0069	1	81	43	4005	7	1	182	43	4005	7		
	トラック1	塊状	2230	8445	2465	3790	0.008	1	81	44	3556	7	1	184	44	3556	7		
	ユニック(4t)2	塊状	8180	2230	2420	3620	0.008	1	79	44	3391	7	1	183	44	3391	7		
	乗用車9	塊状	3395	1475	1910	1010	0.0095	1	71	45	980	5	1	179	45	980	5		
	トラック(20t)	塊状	10500	2500	3600	8770	0.0056	1	71	39	6572	9	1	168	39	6658	9		
	ユニック(2t)	塊状	8500	2300	3000	5550	0.0063	1	68	40	4427	8	1	167	41	4470	8		
	乗用車1	塊状	1475	3395	1610	840	0.0102	0	-	-	-	-	0	-	-	-	-		
	バス1	塊状	2010	6990	2645	3880	0.0066	1	56	38	2801	6	1	153	39	2897	7		
	自動販売機	塊状	1362	740	1830	365	0.0089	0	-	-	-	-	0	-	-	-	-		
	バス2	塊状	2490	11990	3750	12100	0.0047	1	49	33	6207	8	1	128	33	6463	8		
	乗用車8	塊状	4600	1700	1800	1600	0.008	0	-	-	-	-	0	-	-	-	-		
	乗用車2	塊状	1695	4360	1460	1140	0.0095	0	-	-	-	-	0	-	-	-	-		
	積載車	塊状	3400	1500	2000	1430	0.007	0	-	-	-	-	0	-	-	-	-		
	12tユニック車	塊状	9880	2490	2740	7160	0.0055	0	-	-	-	-	0	-	-	-	-		
	乗用車7	塊状	4370	1690	1510	1250	0.0089	0	-	-	-	-	0	-	-	-	-		
	モニタリングカー	塊状	4900	1800	2200	2545	0.0062	0	-	-	-	-	0	-	-	-	-		
	乗用車3	塊状	1780	4790	1535	1510	0.0083	0	-	-	-	-	0	-	-	-	-		
	防眩材	塊状	2500	1300	1300	570	0.0096	0	-	-	-	-	0	-	-	-	-		
	第1ペンシル出口分析計車	塊状	8545	2300	3270	7950	0.0047	0	-	-	-	-	0	-	-	-	-		
	小型発電機1	塊状	630	1330	1650	354	0.0077	0	-	-	-	-	0	-	-	-	-		
	中型ホース展張車	塊状	7400	2300	3400	7985	0.0042	0	-	-	-	-	0	-	-	-	-		

資機材・車両

一：浮上しないため記載しない  
 \*：評価計算上、設定時間(180秒)では運動が終了しないため数値なし。  
 (運動エネルギー評価にて飛来物発生防止対策の要否判断は可能)

表3 想定飛来物の飛散解析結果（地上からの初期高さ5m）（3/7）

飛来物の種類	代表飛来物	形状	長さ L (mm)	幅 W (mm)	高さ D (mm)	質量 (kg)	空カパラ メータ CDA/m <sup>2</sup> (m <sup>2</sup> /kg)	高低差0m				高低差41.5m						
								最大飛散高さ h (m)	最大飛散距離 l (m)	最大水平速度 V (m/s)	運動エネルギー K (kJ)	鋼板貫通 厚さ T (mm)	最大飛散高さ h (m)	最大飛散距離 l (m)	最大水平速度 V (m/s)	運動エネルギー K (kJ)	鋼板貫通 厚さ T (mm)	
								h	l	V	K	T	h	l	V	K	T	
資機材・車両	中型ホース展開車(150A)	塊状	7430	2240	3300	7975	0.0041	0	-	-	-	0	-	-	-	-	-	-
	水中ポンプ車(追加分)	塊状	6090	1865	2700	5010	0.0044	0	-	-	-	0	-	-	-	-	-	-
	送水車	塊状	5500	1900	2500	4330	0.0045	0	-	-	-	0	-	-	-	-	-	-
	直流給電車(230V)	塊状	6700	2320	3020	7100	0.0041	0	-	-	-	0	-	-	-	-	-	-
	水中ポンプ車	塊状	6000	1900	2700	5045	0.0044	0	-	-	-	0	-	-	-	-	-	-
	高圧発電機車	塊状	2150	6825	3260	7680	0.0039	0	-	-	-	0	-	-	-	-	-	-
	ホイールローダ2	塊状	6200	2200	3100	6880	0.0039	0	-	-	-	0	-	-	-	-	-	-
	放水砲	塊状	4700	1900	2000	3020	0.0049	0	-	-	-	0	-	-	-	-	-	-
	タンクローリ1	塊状	5300	1900	2100	3560	0.0048	0	-	-	-	0	-	-	-	-	-	-
	直流給電車(115V)	塊状	8980	2470	3320	10990	0.0037	0	-	-	-	0	-	-	-	-	-	-
	タンクローリ2	塊状	4900	1900	2100	3440	0.0046	0	-	-	-	0	-	-	-	-	-	-
	ホイールローダ3	塊状	6200	2200	3100	7270	0.0037	0	-	-	-	0	-	-	-	-	-	-
	高圧発電機車(追加分)	塊状	6900	2225	2940	7850	0.0036	0	-	-	-	0	-	-	-	-	-	-
	電気盤	塊状	1500	1200	1900	1000	0.0047	0	-	-	-	0	-	-	-	-	-	-
	大量送水車(追加分)	塊状	8350	2490	3550	12350	0.0032	0	-	-	-	0	-	-	-	-	-	-
	可搬式モニタリングポスト ト運搬用トラック	塊状	5985	1885	2135	4705	0.004	0	-	-	-	0	-	-	-	-	-	-
乗用車6	塊状	3100	1600	1300	1430	0.0052	0	-	-	-	0	-	-	-	-	-	-	
ホース展開車(大型)(追加分)	塊状	9395	2490	3550	14495	0.0031	0	-	-	-	0	-	-	-	-	-	-	
大量送水車	塊状	8570	2490	3560	13650	0.003	0	-	-	-	0	-	-	-	-	-	-	
精密測定用WBC(Ge)	塊状	8530	2300	3765	14000	0.0029	0	-	-	-	0	-	-	-	-	-	-	
化学消防車	塊状	7160	2280	2900	9465	0.0031	0	-	-	-	0	-	-	-	-	-	-	
窒素ガス発生装置車	塊状	11990	2490	3790	21330	0.0027	0	-	-	-	0	-	-	-	-	-	-	

一：浮上しないため記載しない  
 \*：評価計算上、設定時間(180秒)では運動が終了しないため数値なし。  
 (運動エネルギー評価にて飛来物発生防止対策の要否判断は可能)



表3 想定飛来物の飛散解析結果 (地上からの初期高さ5m) (5/7)

飛来物の種類	代表飛来物	形状	長さ L (mm)	幅 W (mm)	高さ D (mm)	質量 m (kg)	空カバ ラ メ ー タ CDA/m (m <sup>2</sup> /kg)	高低差 0m				高低差 41.5m							
								最大飛散 高さ h (m)	最大飛散 距離 l (m)	最大水 平速度 V (m/s)	運動エネ ルギ (水平) K (kJ)	鋼板貫通 厚さ T (mm)	最大飛散 高さ h (m)	最大飛散 距離 l (m)	最大水 平速度 V (m/s)	運動エネ ルギ (水平) K (kJ)	鋼板貫通 厚さ T (mm)		
								h	l	V	K	T	h	l	V	K	T		
	コンクリートブロック1	塊状	390	190	100	10.3	0.0086	0	-	-	-	0	-	-	-	-	-	-	-
	コンクリートブロック2	塊状	390	190	120	12	0.008	0	-	-	-	0	-	-	-	-	-	-	-
	形鋼 [ガイド]	棒状	4200	300	200	135	0.0066	0	-	-	-	0	-	-	-	-	-	-	-
	鋼製材 [ガイド]	棒状	300	4200	200	135	0.0066	0	-	-	-	0	-	-	-	-	-	-	-
	コンクリート側溝	棒状	380	2100	340	132	0.0053	0	-	-	-	0	-	-	-	-	-	-	-
	鋼製パイプ [ガイド]	棒状	50	2000	50	8.4	0.0098	0	-	-	-	0	-	-	-	-	-	-	-
	鋼製パイプ1	棒状	50	4000	50	16.8	0.0097	0	-	-	-	0	-	-	-	-	-	-	-
	マンホール蓋 (小)	板状	650	650	50	33.5	0.0092	0	-	-	-	0	-	-	-	-	-	-	-
	ガスボンベ	棒状	230	1500	230	57	0.0055	0	-	-	-	0	-	-	-	-	-	-	-
	マンホール蓋 (大)	板状	975	975	60	88	0.0078	0	-	-	-	0	-	-	-	-	-	-	-
	中型発電機1	塊状	1080	2550	1500	1770	0.0031	0	-	-	-	0	-	-	-	-	-	-	-
	130tクレーン	塊状	15490	2780	4020	38100	0.0021	0	-	-	-	0	-	-	-	-	-	-	-
	G T G車	塊状	14740	4248	4220	45000	0.0022	0	-	-	-	0	-	-	-	-	-	-	-
	H形鋼2	棒状	5500	100	100	95	0.0048	0	-	-	-	0	-	-	-	-	-	-	-
	L形鋼	棒状	5500	100	100	82	0.0055	0	-	-	-	0	-	-	-	-	-	-	-
	カニクレーン	塊状	4285	1280	1695	3900	0.0026	0	-	-	-	0	-	-	-	-	-	-	-
	コンクリート板	板状	2700	1000	200	1300	0.0017	0	-	-	-	0	-	-	-	-	-	-	-
	コンクリート板 [ガイド]	板状	1500	1000	150	540	0.0022	0	-	-	-	0	-	-	-	-	-	-	-
	コンクリート桁	塊状	1200	1200	1200	1300	0.0023	0	-	-	-	0	-	-	-	-	-	-	-
	ショベルカー1	塊状	2800	9425	3040	19500	0.0022	0	-	-	-	0	-	-	-	-	-	-	-
	ショベルカー2	塊状	9600	2800	3010	20500	0.0021	0	-	-	-	0	-	-	-	-	-	-	-
	トラック [ガイド]	塊状	1900	5000	1300	4750	0.0026	0	-	-	-	0	-	-	-	-	-	-	-
	バックホー	塊状	9400	2800	3000	19500	0.0022	0	-	-	-	0	-	-	-	-	-	-	-
	フォークリフト	塊状	1520	3200	2240	6920	0.0015	0	-	-	-	0	-	-	-	-	-	-	-

設計飛来物の影響を超えない物品

一：浮上しないため記載しない  
 \*：評価計算上、設定時間 (180秒) では運動が終了しないため数値なし。  
 (運動エネルギー評価にて飛来物発生防止対策の要否判断は可能)

表3 想定飛来物の飛散解析結果（地上からの初期高さ5m）（6/7）

飛来物の種類	代表飛来物	形状	長さ L (mm)	幅 W (mm)	高さ D (mm)	質量 (kg)	空カバラ メータ (m <sup>2</sup> /kg)	高低差 0m						高低差 41.5m						
								最大飛散高さ h (m)	最大飛散距離 l (m)	最大水平速度 V (m/s)	運動エネルギー K <sup>*</sup> (水平) K (kJ)	鋼板貫通 厚さ T (mm)	最大飛散高さ h (m)	最大飛散距離 l (m)	最大水平速度 V (m/s)	運動エネルギー K <sup>*</sup> (水平) K (kJ)	鋼板貫通 厚さ T (mm)			
								h	l	V	K	T	h	l	V	K	T			
	フォークリフト (3 t)	塊状	3775	1225	2090	4370	0.0023	0	-	-	-	0	-	-	-	-	-	-	-	-
	フォークリフト	塊状	3600	1100	2100	3600	0.0026	0	-	-	-	0	-	-	-	-	-	-	-	-
	ラフタークレーン	塊状	2600	11000	3500	26500	0.002	0	-	-	-	0	-	-	-	-	-	-	-	-
	ラフタークレーン (60t)	塊状	13000	2800	3700	41295	0.0016	0	-	-	-	0	-	-	-	-	-	-	-	-
	ラフタークレーン 2	塊状	11405	2620	3490	31900	0.0017	0	-	-	-	0	-	-	-	-	-	-	-	-
	移動式WBC	塊状	7000	2200	2700	16000	0.0017	0	-	-	-	0	-	-	-	-	-	-	-	-
	移動式代替熱交換器車	塊状	15500	2490	4090	42341	0.0018	0	-	-	-	0	-	-	-	-	-	-	-	-
	角形鋼 1	棒状	5500	125	125	120	0.0047	0	-	-	-	0	-	-	-	-	-	-	-	-
	角形鋼 2	棒状	5500	200	200	288	0.0032	0	-	-	-	0	-	-	-	-	-	-	-	-
	形鋼 1	棒状	2900	200	200	145	0.0034	0	-	-	-	0	-	-	-	-	-	-	-	-
	形鋼 2	棒状	8000	350	350	1080	0.0022	0	-	-	-	0	-	-	-	-	-	-	-	-
	鋼製ドラム	塊状	3000	3000	2000	6000	0.0024	0	-	-	-	0	-	-	-	-	-	-	-	-
	鋼製材 1	棒状	100	5500	100	95	0.0048	0	-	-	-	0	-	-	-	-	-	-	-	-
	鋼製材 2	棒状	150	5500	150	174	0.0039	0	-	-	-	0	-	-	-	-	-	-	-	-
	鋼板 (大・厚) (覆工板)	板状	2996	997	200	640	0.0037	0	-	-	-	0	-	-	-	-	-	-	-	-
	鋼板 (大・薄) (敷き鉄板・大) 1	板状	6000	1500	22	1600	0.0038	0	-	-	-	0	-	-	-	-	-	-	-	-
	鋼板 (大・薄) (敷き鉄板・大) 2	板状	6000	1500	25	1800	0.0034	0	-	-	-	0	-	-	-	-	-	-	-	-
	鋼板 (大・薄) (敷き鉄板・大) 3	板状	6100	1500	25	1820	0.0034	0	-	-	-	0	-	-	-	-	-	-	-	-
	鋼板 (大・薄) (敷き鉄板・中) 2	板状	3000	1500	25	900	0.0034	0	-	-	-	0	-	-	-	-	-	-	-	-
	大型ホース展張車 (300A)	塊状	8380	2490	3280	21980	0.0018	0	-	-	-	0	-	-	-	-	-	-	-	-
	大型発電機	塊状	1650	5380	2100	7220	0.0022	0	-	-	-	0	-	-	-	-	-	-	-	-
	中型発電機 2	塊状	2000	880	1200	1300	0.0027	0	-	-	-	0	-	-	-	-	-	-	-	-
	電源車	塊状	15455	2490	4101	41000	0.0019	0	-	-	-	0	-	-	-	-	-	-	-	-

設計飛来物の影響を超えない物品

一：浮上しないため記載しない

\*：評価計算上、設定時間 (180 秒) では運動が終了しないため数値なし。  
(運動エネルギー評価にて飛来物発生防止対策の要否判断は可能)

表3 想定飛来物の飛散解析結果（地上からの初期高さ5m）（7/7）

飛来物の種類	代表飛来物	形状	長さ L (mm)	幅 W (mm)	高さ D (mm)	質量 (kg)	空カバラ メータ CDA/m (m <sup>2</sup> /kg)	高低差 0m				高低差 41.5m					
								最大飛散高さ h (m)	最大飛散距離 l (m)	最大水平速度 V (m/s)	運動エネルギー K <sup>*</sup> (水平) (kJ)	鋼板貫通 厚さ T (mm)	最大飛散高さ h (m)	最大飛散距離 l (m)	最大水平速度 V (m/s)	運動エネルギー K <sup>*</sup> (水平) (kJ)	鋼板貫通 厚さ T (mm)
設計飛来物の影響を ない物品を 超え	電柱	棒状	257	10000	257	690	0.0031	0	-	-	-	0	-	-	-	-	-
	敷き鉄板 1	板状	1400	3000	12	400	0.0071	0	-	-	-	0	-	-	-	-	-
	敷き鉄板 2	板状	1500	3000	22	802	0.0038	0	-	-	-	0	-	-	-	-	-
	敷き鉄板 3	板状	1500	6100	25	1820	0.0034	0	-	-	-	0	-	-	-	-	-
	覆	塊状	50	50	50	0.06	0.0834	41	209	74	1	41	259	74	1	1	1
	足場板 2	板状	4000	240	32	7.6	0.0914	43	214	75	22	43	260	75	22	22	7
	手洗シンク	塊状	1600	530	1200	24	0.0946	*	*	76	68	*	*	76	68	68	2

一：浮上しないため記載しない  
 \*：評価計算上、設定時間（180秒）では運動が終了しないため数値なし。  
 （運動エネルギー評価にて飛来物発生防止対策の要否判断は可能）



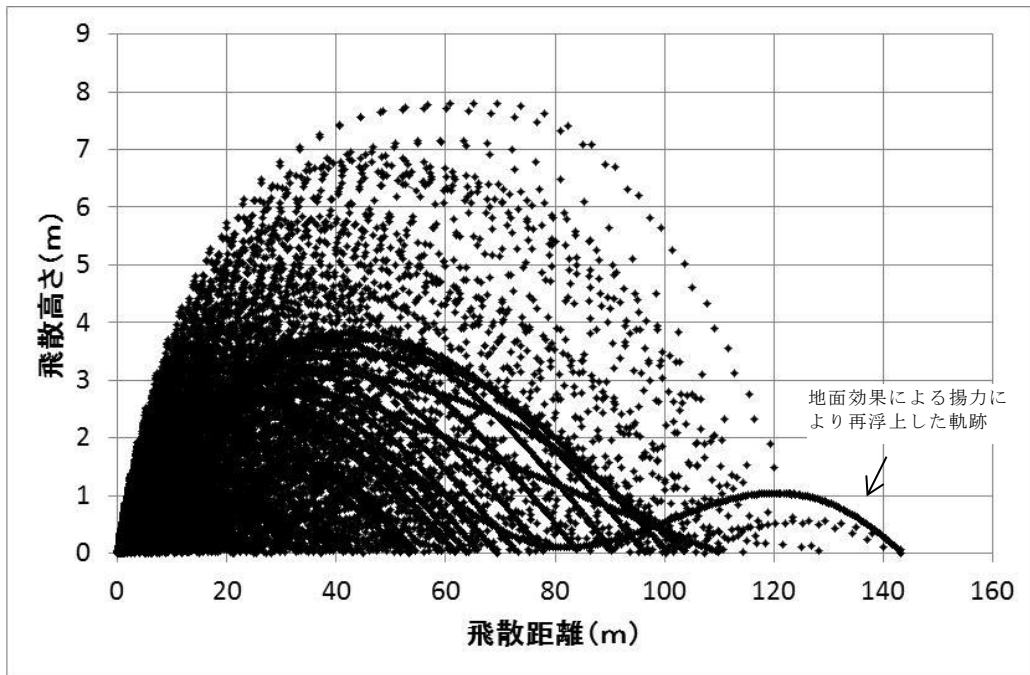


図3 乗用車（資機材・車両）の飛跡  
 (乗用車の諸元：長さ 1,900mm 幅 5,200mm 高さ 2,300mm,  
 質量 1,890kg,  
 最大風速：92m/s, 地上からの初期高さ：0m)

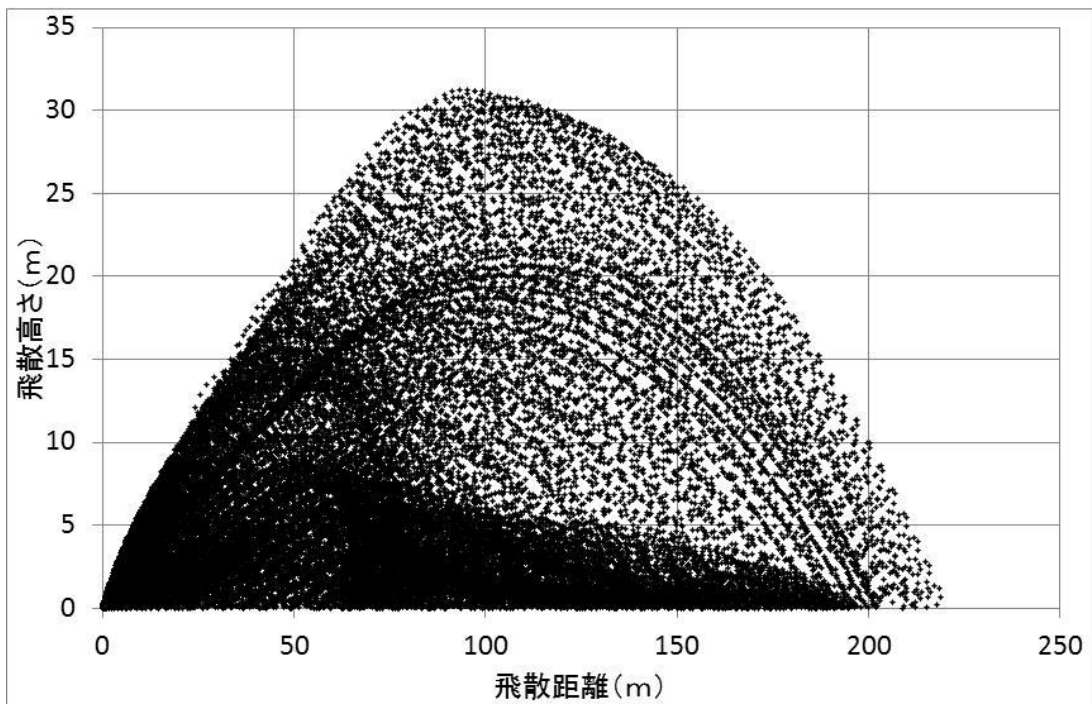


図4 プレハブ小屋（軽量大型機材）の飛跡  
 (プレハブ小屋の諸元：長さ 7,200mm 幅 27,000mm 高さ 3,400mm,  
 質量 7,500kg,  
 最大風速：92m/s, 地上からの初期高さ：0m)

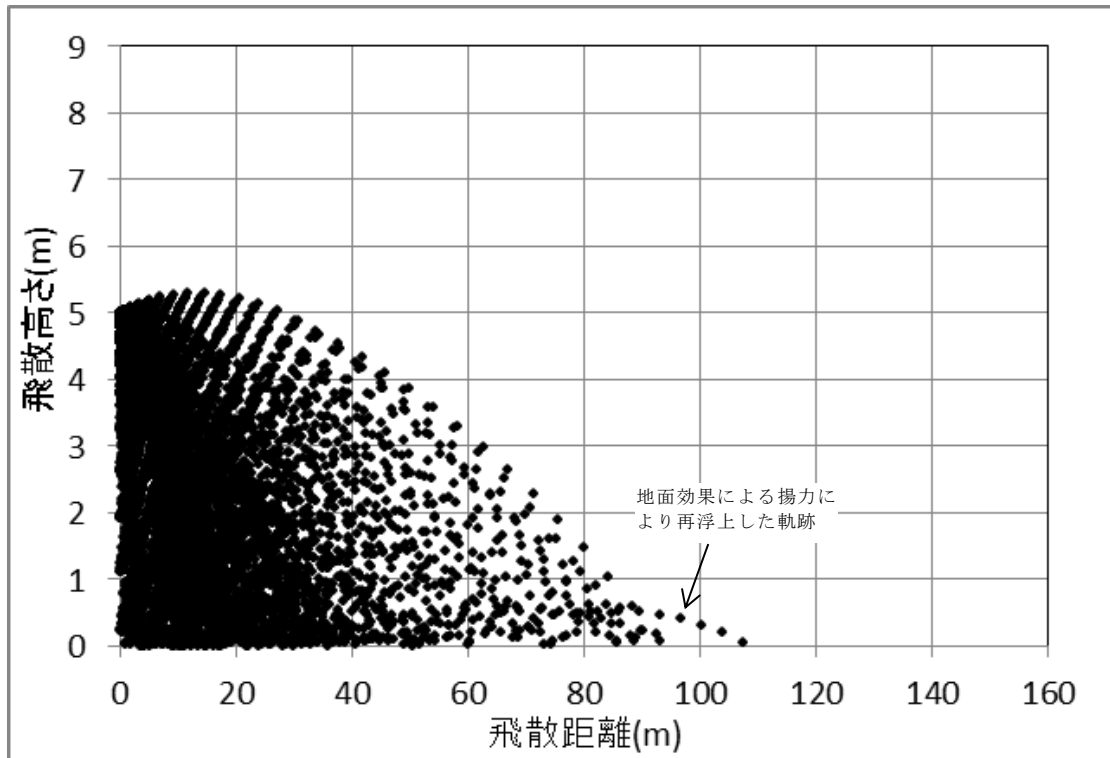


図5 乗用車（資機材・車両）の飛跡  
 (乗用車の諸元：長さ 1,900mm 幅 5,200mm 高さ 2,300mm,  
 質量 1,890kg,  
 最大風速：92m/s, 地上からの初期高さ：5m)

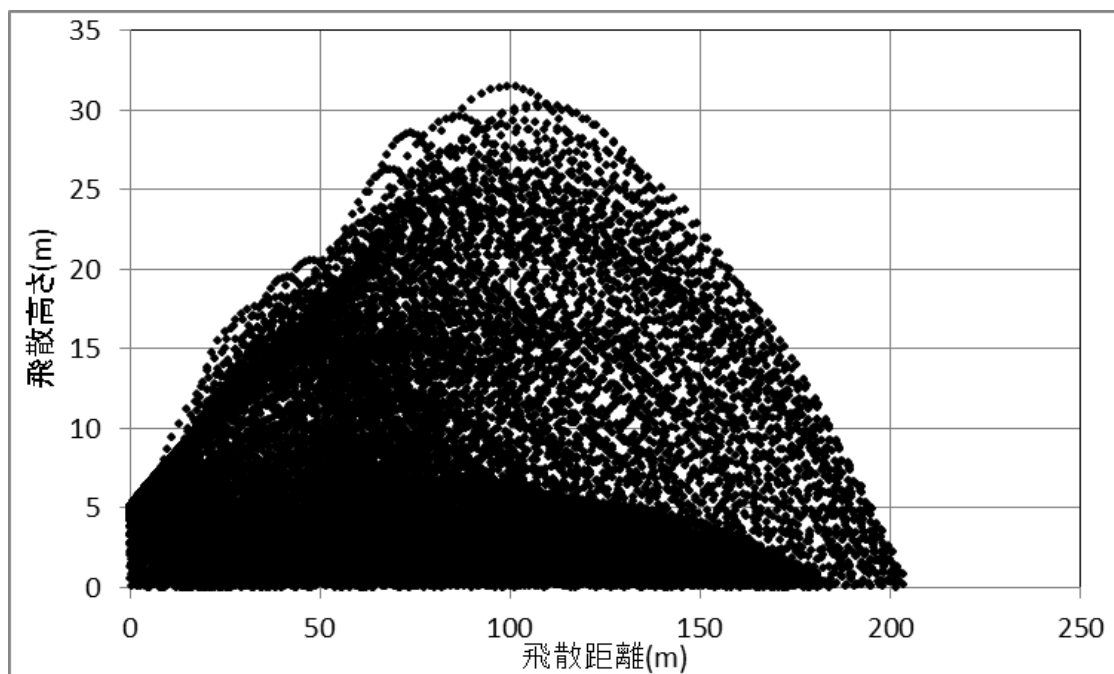


図6 プレハブ小屋（軽量大型機材）の飛散  
 (プレハブ小屋の諸元：長さ 7,200mm 幅 27,000mm 高さ 3,400mm,  
 質量 7,500kg,  
 最大風速：92m/s, 地上からの初期高さ：5m)

## 飛散距離に対する地上からの初期高さの感度解析について

添付資料 3.3 別紙-7 表 2, 3 では, 地上からの初期高さを 0m 及び 5m とした場合の飛散距離を示したが, ここでは, 地上からの初期高さが飛散距離に及ぼす影響を確認するために, 地上からの初期高さ (0~5m) の感度解析を実施する。

## (1) 感度解析範囲

解析範囲は, フジタモデルの風速場で約 90m/s の風速となる高さである地上からの初期高さ 5m までの範囲とする。

## (2) 対象物品について

感度解析を実施する対象物品については, 3 種類の物品形状 (板状, 棒状, 塊状) のうち, それぞれ地上からの初期高さを 0m とした場合の飛散距離が最大となるプレハブ小屋 (塊状), 仮設足場 (板状), 鋼製材 (棒状) を選定する。

## (3) 感度解析結果

感度解析結果を図 1 に示す。

プレハブ小屋 (塊状) については, 地上からの初期高さが増加するに従い, 飛散距離が減少している。

地上からの初期高さが増加するに従い物品に作用する初期風速も増加するが, 地面効果による揚力の減少の影響のほうが大きいため飛散距離が減少したと考えられる。地上からの初期高さ 0m で飛散距離が最大となったのは, 地面効果による揚力の影響により, 物品が高く浮上し, 長時間設計竜巻の最大風速程度の強い風を受けたためと考えられる。

仮設足場 (板状) については, 地上からの初期高さ約 0.1m までは, 地上からの初期高さの増加に伴い飛散距離が減少し, 地上からの初期高さ約 0.1m 以上では, 地上からの初期高さの増加に伴い飛散距離は増加している。

地上からの初期高さ約 0.1m までで地上からの初期高さの増加に伴い飛散距離が減少したのは, プレハブ小屋 (塊状) と同様に, 物品の地上からの初期高さの増加に伴い地面効果による揚力が減少したためと考えられる。

一方で, 地上からの初期高さ約 0.1m 以上で地上からの初期高さの増加に伴い飛散距離が増加したのは, 地上からの初期高さ 0.12m 以上で地面効果による揚力は消滅するため, 物品の地上からの初期高さの増加に伴い物品に作用する初期風速が増加するためと考えられる。

鋼製材（棒状）については、地上からの初期高さの増加に伴い、飛散距離が徐々に増加している。

これは、鋼製材（棒状）は物品高さが低く地面効果による揚力の影響を受けにくいこと、空力パラメータがプレハブ小屋（塊状）や仮設足場（板状）に比べて小さく竜巻風速により加速されにくいことが理由と考えられる。

なお、仮設足場（板状）及び鋼製材（棒状）は地上からの初期高さの増加に伴い飛散距離も大きくなる傾向が確認されたが、これらを含め構内の現地調査等で確認された板状、棒状の物品は、飛散した場合の影響（運動エネルギー、貫通力）が設計飛来物以下であることを確認しており、飛来物発生防止対策エリアの設定に影響しない。

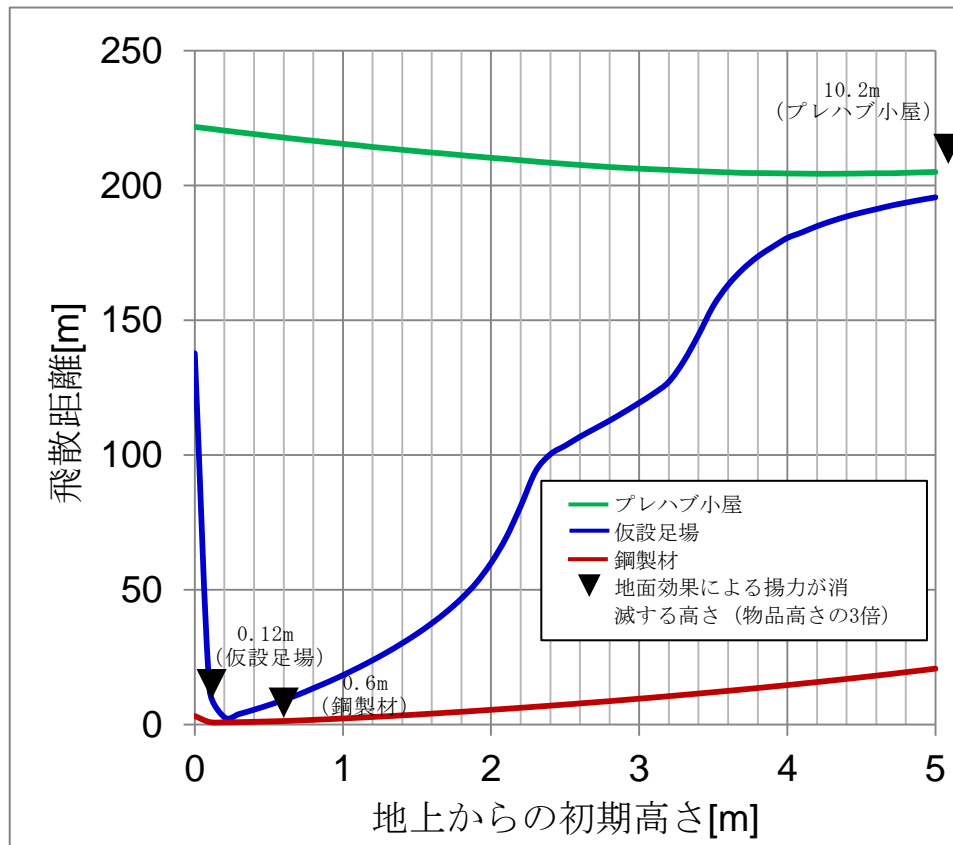


図1 プレハブ小屋（塊状），仮設足場（板状），鋼製材（棒状）の地上からの初期高さとの飛散距離の関係

（プレハブ小屋の諸元：長さ7,200mm 幅27,000mm 高さ3,400mm, 質量7,500kg, 空力パラメータ 0.0277m<sup>2</sup>/kg,

仮設足場の諸元：長さ250mm 幅4,000mm 高さ40mm, 質量14kg, 空力パラメータ 0.0557 m<sup>2</sup>/kg,

鋼製材の諸元：長さ300mm 幅4,200mm 高さ200mm, 質量135kg, 空力パラメータ 0.0066 m<sup>2</sup>/kg, 最大風速：92m/s)

## 島根原子力発電所1号炉

### 廃止措置における解体撤去作業の概要及び解体・撤去物品の管理について

島根原子力発電所1号炉の廃止措置は、4つに区分することができ、以下にそれぞれの段階での解体撤去作業の内容を示す。

(1) 解体工事準備期間【屋外・屋内作業】

供用を終了した設備のうち、管理区域外の設備の解体撤去を行う。

(2) 原子炉本体周辺設備等解体撤去期間【屋外・屋内作業】

供用を終了した設備のうち、管理区域内にある放射性物質により汚染された設備（原子炉本体除く）等の解体撤去を行う。

(3) 原子炉本体等解体撤去期間【屋外・屋内作業】

放射能レベルの比較的高い原子炉本体等の解体撤去を行う。

(4) 建物等解体撤去期間【屋外・屋内作業】

供用を終了する放射性廃棄物の廃棄施設、換気設備、その他解体の対象とするすべての設備、建物等の解体撤去を行う。

また、各段階での島根原子力発電所1号炉の状態とその作業概要及び竜巻防護に関する廃止措置の各段階での解体撤去作業の物品の管理方法を図1に示す。

作業概要		竜巻防護に関する解体撤去物の管理	
① 解体工事準備期間		<ul style="list-style-type: none"> <li>建物内／外の管理区域外にある設備を解体撤去し、解体撤去物は産業廃棄物として敷地外へ搬出する。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>解体作業に係る資機材、車両は、島根2号炉と同様の管理を行い、設計飛来物の影響を超えることのないように管理する。</li> </ul>
② 原子炉本体周辺設備等解体撤去期間		<ul style="list-style-type: none"> <li>建物内／外の管理区域外にある放射性物質により汚染された設備を解体撤去する。</li> <li>解体撤去物は容器等に収納し、固体廃棄物貯蔵所等へ保管、又は廃棄施設に廃棄する。</li> </ul>	
③ 原子炉本体等解体撤去期間		<ul style="list-style-type: none"> <li>放射能レベルの比較的高い原子炉本体を解体撤去する。</li> <li>特に放射能レベルの高い炉心支持構造物等の解体においては、遠隔操作による水中での切断等、被ばく低減を考慮した工法を採用する。</li> <li>解体撤去物は容器等に収納し、固体廃棄物貯蔵所等へ保管、又は廃棄施設に廃棄する。</li> </ul>	
④ 建物等解体撤去期間		<ul style="list-style-type: none"> <li>汚染した設備の撤去後、建物内に残っている汚染をはつきり等の方法で除去する。施設内の汚染を除去した後、汚染状況を確認した上で管理区域を順次解除する。</li> <li>管理区域を解除した後、解体の対象とする建物を解体撤去する。建物の解体は、圧縮機やブレイカ等を用いて行う。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>解体作業に係る資機材、車両は、島根2号炉と同様の管理を行い、設計飛来物の影響を超えることのないように管理する。</li> <li>建物の解体作業時は、設計飛来物の影響を超える解体撤去物が発生しないよう予め飛散距離評価を行った区画を設定する等の管理を行う。</li> </ul>

図1 島根原子力発電所1号炉の解体撤去作業の概要及び解体、撤去された物品管理

## 島根原子力発電所 2 号炉

### 竜巻影響評価における フジタモデルの適用について



## 目次

### 別添 2-2

1. はじめに
2. 各風速場モデルの概要
  - 2.1. フジタモデル
  - 2.2. ランキン渦モデル
  - 2.3. 非定常乱流渦モデル (LES による数値解析)
3. 各風速場モデルの比較
4. 米国におけるフジタモデルの取扱い
  - 4.1. フジタモデルの利用実績
  - 4.2. NRC ガイドでの取扱い
5. 飛来物評価
  - 5.1. 物体の浮上・飛来モデルにおける不確定性の考慮
  - 5.2. 竜巻が物体に与える速度に関する不確定性の考慮
  - 5.3. フジタモデルの地表面付近の風速場に関する不確定性の考慮
  - 5.4. 飛来物評価法のまとめ
6. 実際の飛散状況に対する検証
  - 6.1. フジタスケールとの比較
  - 6.2. 米国 Grand Gulf 原子力発電所への竜巻来襲事例
  - 6.3. 佐呂間竜巻での車両飛散事例
7. 飛散以外の挙動に対する考慮
8. まとめ
9. 参考文献

別紙 1 「フジタモデル」及び「ランキン渦モデル」並びに「それぞれの風速場モデルを用いた際の飛来物評価手法」の比較

別紙 2 フジタモデルのパラメータ設定等について

別紙 3 竜巻影響評価と竜巻モデルの関係

1. はじめに

「原子力発電所の竜巻影響評価ガイド」<sup>(1)</sup>（以下「ガイド」という。）に従い竜巻影響評価を行う上で、設計飛来物の飛来速度を設定するための風速場モデルを選定する必要がある。これまでの竜巻飛来物評価において用いられている風速場モデルとして、米国NRCの基準類に記載されている「ランキン渦モデル<sup>(2)(3)</sup>」、原子力安全基盤機構の調査研究報告書に記載されている。

「LES(Large-eddy simulation)」の数値解析<sup>(4)</sup>があるが、当社の竜巻影響評価においては、地面に置かれた物体への影響をよく表現できている風速場モデルにより、評価対象施設の影響評価・防護対策を実施するため、風速場モデルとしてフジタの竜巻工学モデルDBT-77(DBT: Design Basis Tornado)<sup>(5)</sup>を選定する。

図1に風速場モデルの選定及び飛来物評価方法に関する検討フローを示す。また、図2に竜巻影響評価フローとフジタモデルの関連箇所を示す。

次節以降にてフジタモデルの詳細や、フジタモデルを適用した理由等を説明する。

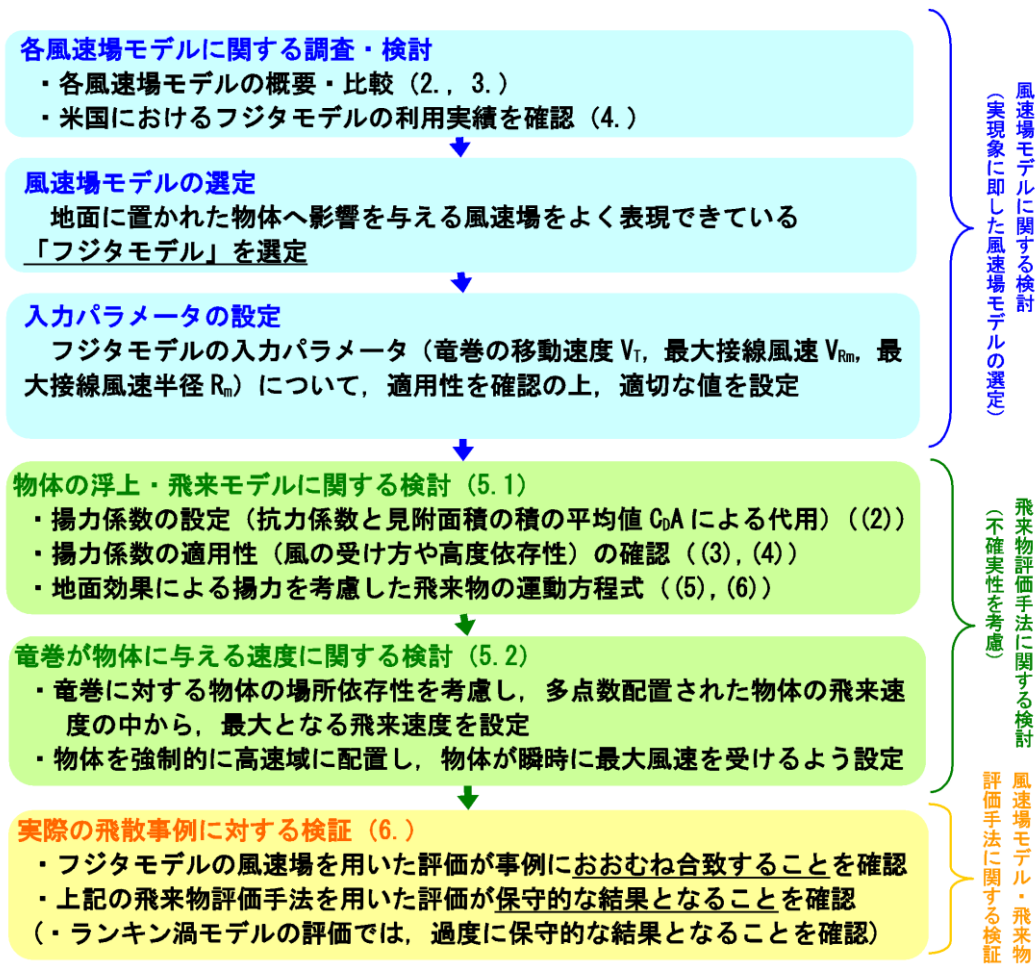


図1 風速場モデルの選定及び飛来物評価方法に関する検討フロー  
(括弧内の数字は、本資料の節番号)

■ : フジタモデル関連箇所

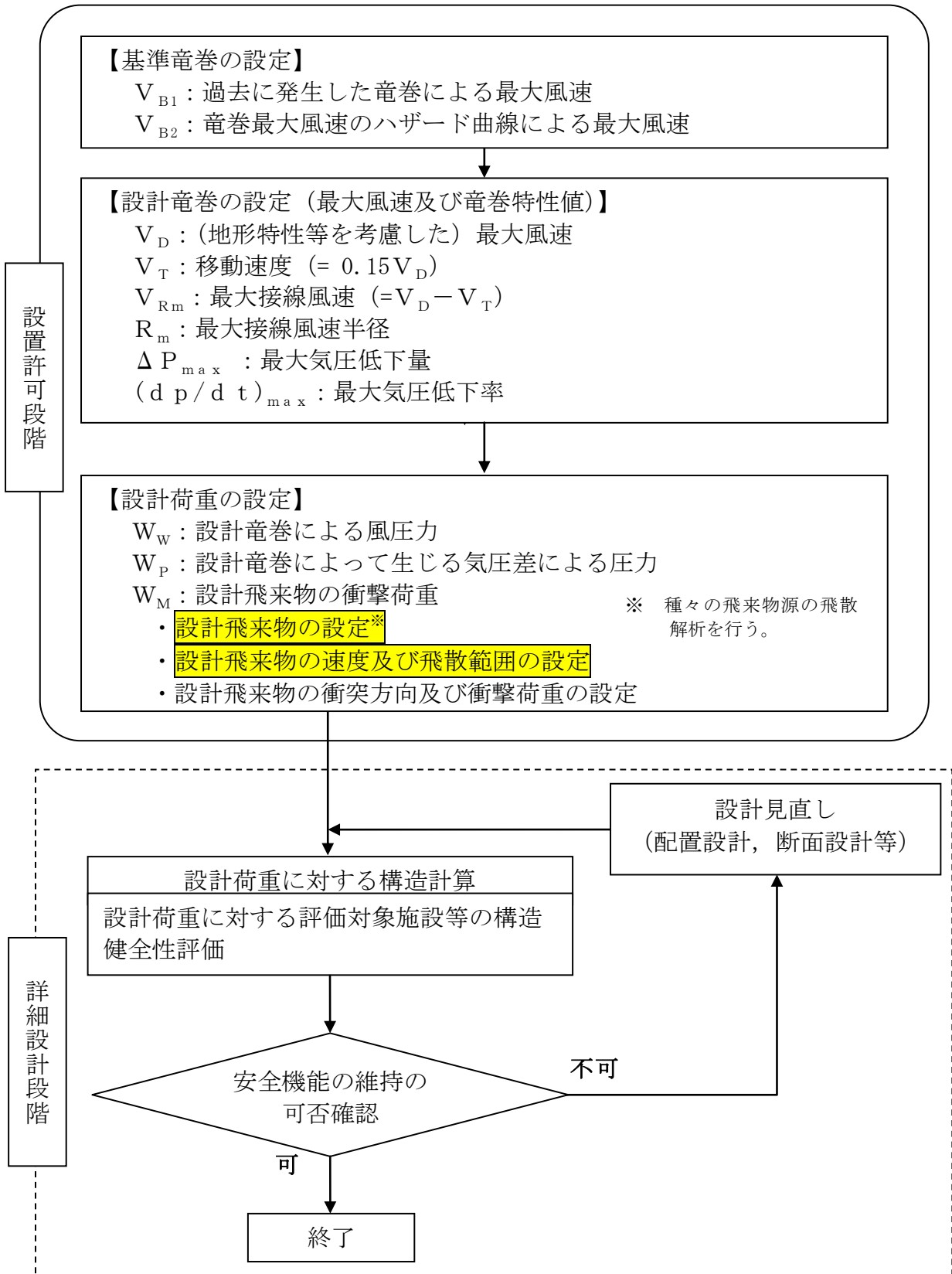


図2 竜巻影響評価フローとフジタモデルの関連箇所

## 2. 各風速場モデルの概要

### 2.1 フジタモデル

フジタモデルは、米国 NRC の実際の竜巻風速場をモデル化したいという要望により、藤田博士が 1978 年に竜巻観測記録をもとに考案した工学モデルである。モデル作成に当たっては、1974 年 8 月に米国カンザス州 Ash Valley 等で発生した竜巻(図 3)の記録ビデオ画像の写真図化分析を行い、竜巻の地上痕跡調査、被災状況調査結果と照合することで風速ベクトルを作成し、そのベクトル図をもとに作成した流線モデルから、竜巻風速場を代数式で表現している(図 4)。

フジタモデルの特徴は、地表面付近における竜巻中心に向かう強い水平方向流れ、及び外部コアにおける上昇流といった、実際の竜巻風速場を良く表現している点にある。



図 3 Ash Valley 竜巻 (1974. 8. 30) のビデオ画像

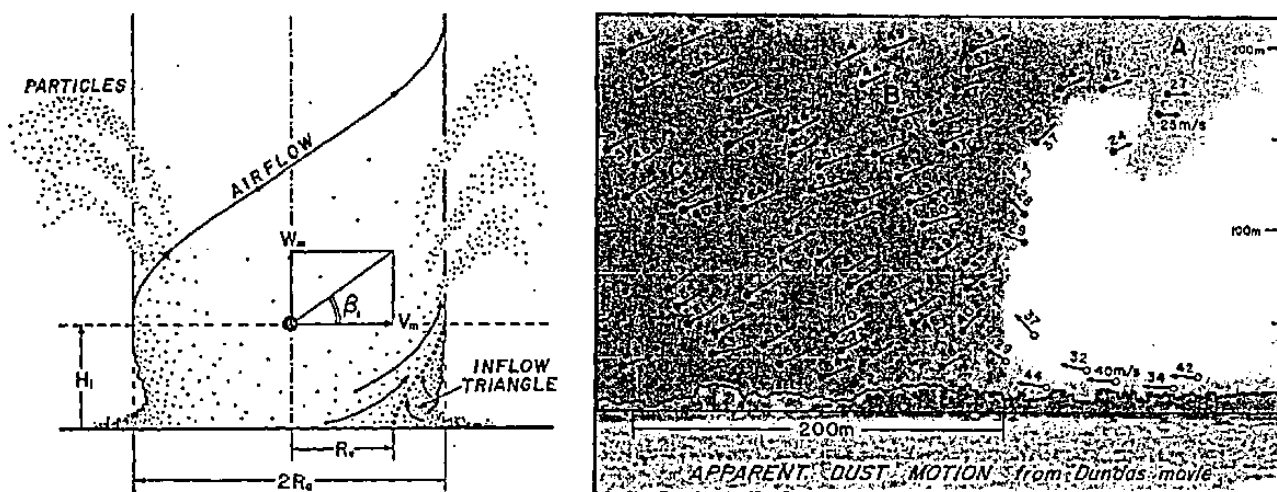


図 4 フジタモデルの流線(左)と風速ベクトルの分析図(右)

フジタモデルの風速場は図 5-1 に示すように半径方向に 3 つの領域(内部コア、外部コア、最外領域)で構成され、内部コアと外部コアの接線(周)方向

風速  $V_\theta$  は半径に比例し、その外側の最外領域では周方向風速は半径に反比例するモデルとなっている。内部コアには上昇風速  $V_z$  や半径方向風速  $V_r$  は存在しないが、外部コアには存在する。高さ方向には地上からの高さ  $H_i$  までを流入層としてモデル化しており、竜巻中心方向に向かう半径方向風速  $V_r$  があり、この空気の流れ込みが外部コア内での上昇流となる。流入層より上部では外向きの半径方向風速が存在し、各風速成分は地上からの高さとともに減衰する流れとなっている。フジタモデルは、流体の連続式を満たす形で定式化されており、力学的に根拠のある風速場となっている。フジタモデルの風速場における最大水平風速と地上からの高さの関係を図 5-2 に示す。

フジタモデル DBT-77 における接線風速等の関係式については、Fujita Work Book<sup>(5)</sup> の Chapter6 に下記のとおり記載されている。(Chapter6 では、単一渦型のモデルであるフジタモデル DBT-77 を引用しているが、多重渦型のモデルであるフジタモデル DBT-78 は引用されていない。)

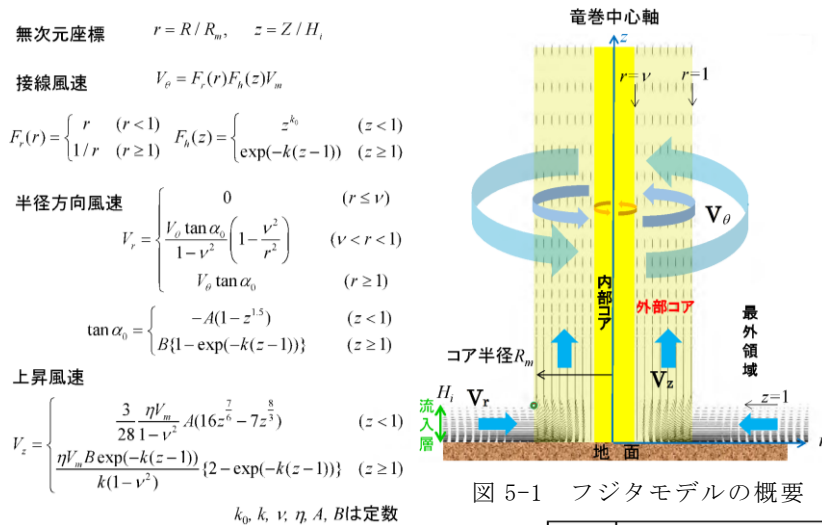


図 5-1 フジタモデルの概要

連続の式:  $c \equiv \frac{1}{R_m r} \frac{\partial V_\theta}{\partial \theta} + \frac{1}{R_m r} \frac{\partial (r V_r)}{\partial r} + \frac{1}{H_i} \frac{\partial V_z}{\partial z} = 0$

フジタモデルでは  $c = 0$  となり連続の式を満たす。

$V_\theta$	接線(周)方向風速
$V_r$	半径方向風速(中心方向が正)
$V_z$	上昇風速
$V_m$	最大接線風速
$R_m$	外部コア半径

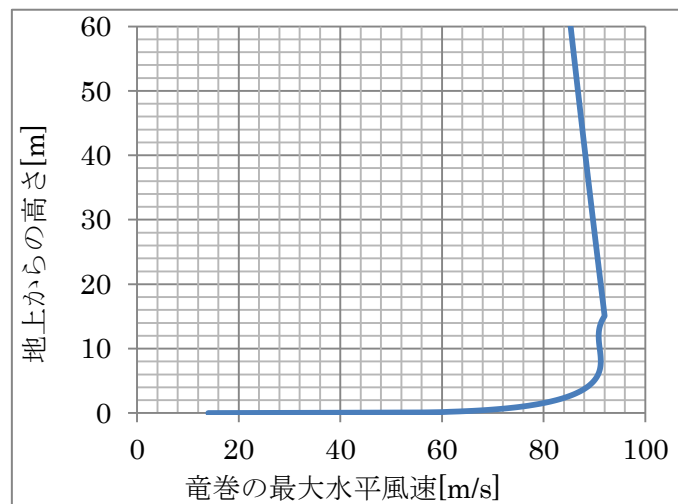


図 5-2 フジタモデルの風速場における最大水平風速と地上からの高さの関係 ( $r=1$ )

内部コアの半径  $R_n$  と外部コアの半径  $R_m$  の比  $\nu=R_n/R_m$  については、Fujita<sup>(5)</sup>が以下の経験式を提案しているの、これを用いる。

$$(1)$$

また、流入層は、地面との摩擦により低下した遠心力と圧力分布のバランスが崩れ、流体が竜巻中心方向の低圧部に引き込まれることにより形成されることから、摩擦の影響が及ぶ範囲のみで形成される。Fujita<sup>(5)</sup>は、流入層高さ  $H_i$  を竜巻中心の低圧部の大きさ（外部コア半径） $R_m$  に比例するものとして、以下の経験式を提案しており、これを用いる。

$$(2)$$

ここで、 $\eta$  は1以下の正の値であり、Fujita Work Book<sup>(5)</sup>の(6.4)式より  $\eta = 0.55(1-\nu^2)$  で定義される。

上記式において、外部コア半径  $R_m=30$ (m)の場合、 $\eta = 0.501(H_i=15$ (m))となり、原子力安全基盤機構の調査研究報告書<sup>(4)</sup>の図 2.2.3.10 における流入層高さ と竜巻半径の比 ( $\eta=0.4$ 程度) や、Kosiba<sup>(6)</sup>により示されている流入層高さ ( $H_i=10\sim 14$ (m)以下) とおおむね同じである。

なお、その他の定数についても、Fujita<sup>(5)</sup>の提案している値として、 $k_0=1/6$ ,  $k=0.03$ ,  $A=0.75$ ,  $B=0.217$  を用いる。

## 2.2 ランキン渦モデル

ランキン渦モデルは、米国 NRC ガイドでも採用されており、設計竜巻の特性値を設定する際に用いられている。しかし、米国で開発された飛来物速度評価用のランキン渦モデル<sup>(3)</sup>は、竜巻中心に向かう半径方向風速  $V_r$  と上昇風速  $V_z$  を特別に付加している(図 6)。そのため、流れの連続の式(質量保存式)を満たしておらず、図 7 に示すように地面から吹き出しが生じるような流れとなっており、地上からの物体の浮上・飛散を現実的に模擬することができない。ランキン渦モデルを用いて飛散評価を行う場合、地上の物体であっても空中浮遊状態を仮定して評価することになる。

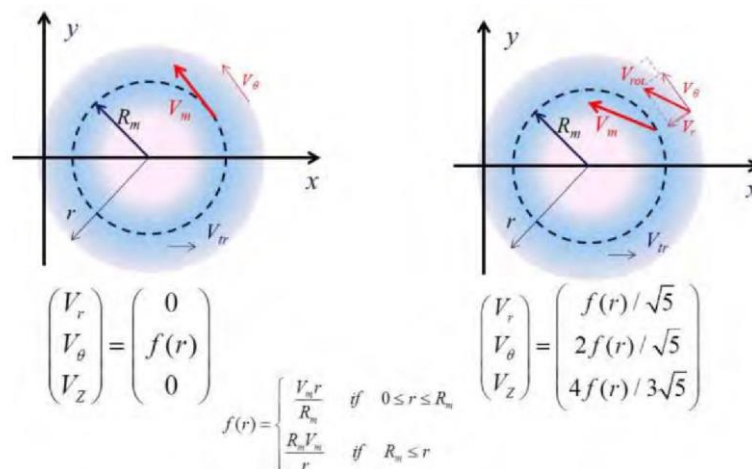


図 6 設計竜巻圧力用のランキン渦モデル(左)と飛来物速度評価用のランキン渦モデル(右)

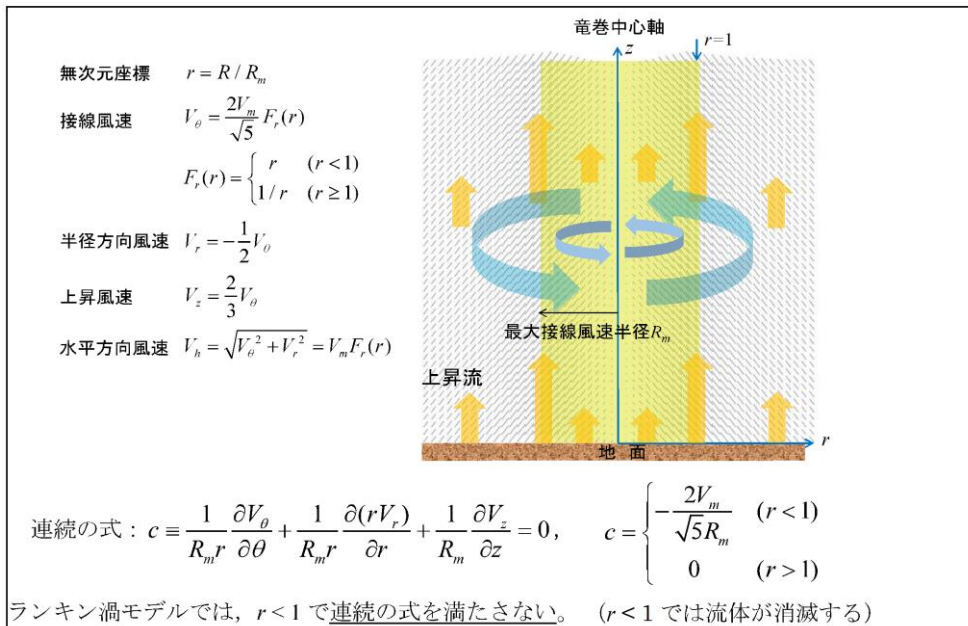


図 7 飛来物速度評価用のランキン渦モデルの概要

### 2.3 非定常乱流渦モデル (LES による数値解析)

LES は、非定常な乱流場を数値的に計算する手法として、ガイドにおける飛来物の最大速度の設定例にも活用されている。図 8 に LES による渦の発生状況を示す。

古典的な Smagorinsky モデルに基づく LES の基礎方程式 (運動量保存式及び質量保存式) は、流体が非圧縮性であると仮定する場合、以下ようになる。

$$\frac{\partial U_i}{\partial t} + U_1 \frac{\partial U_i}{\partial x_1} + U_2 \frac{\partial U_i}{\partial x_2} + U_3 \frac{\partial U_i}{\partial x_3} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x_i} + (\nu + \nu_s) \left( \frac{\partial^2 U_i}{\partial x_1^2} + \frac{\partial^2 U_i}{\partial x_2^2} + \frac{\partial^2 U_i}{\partial x_3^2} \right) - f_i \quad (i=1,2,3) \quad (3)$$

$$\frac{\partial U_1}{\partial x_1} + \frac{\partial U_2}{\partial x_2} + \frac{\partial U_3}{\partial x_3} = 0 \quad (4)$$

ここで、 $U_i$  及び  $P$  は、 $i$  方向の流速ベクトル及び圧力を表し、 $\nu$  は動粘性係数を、 $f_i$  は  $i$  方向の外力加速度を表す。また、 $x_i$  は  $i$  方向の座標を表す。

一方、Smagorinsky モデルの渦粘性係数  $\nu_s$  は以下のように定義される。

$$\nu_s = (C_s h)^2 \sqrt{\sum_{i,j=1}^3 2S_{ij}^2} \quad (5)$$

ここで、 $h$  は解像スケール (メッシュ幅相当)、 $C_s$  は Smagorinsky 定数を表し、ひずみ速度テンソル  $S_{ij}$  は  $S_{ij} = 0.5 (\partial U_i / \partial x_j + \partial U_j / \partial x_i)$  で定義される。

以上のとおり、LES は風速の時間的な変動 (乱流) を考慮できる点が特長とな

っている。

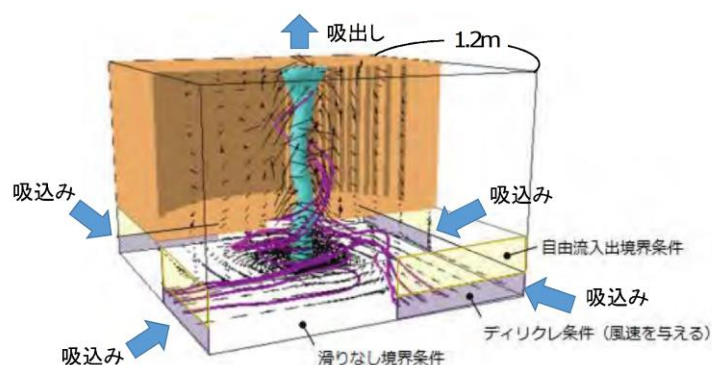


図 8 LES 計算領域内での竜巻状の渦の発生状況 ((4)に一部加筆)

以上が一般的な LES の説明となる。LES の手法自体は、広く活用されているものであるが、実スケールでの精緻な評価を行うためには、必要なメッシュ解像度の確保に膨大な計算機資源が必要となる。

また、ガイドで例示されている LES による数値解析については、条件設定等に関して下記のような問題点がある。

ガイドで例示されている LES による解析では、境界条件（側面からの流入風速の分布等）や解析領域の形状（流入箇所を局所的に配置等）を調整して人為的な乱れを与え、竜巻状の渦を生成している。渦の生成に当たって、以下のような条件を仮定していることから、実スケールでの評価を実施するには課題があるものと考えられる。

- ・人為的な流入境界条件（流入風速分布や流入箇所の局所的配置等）を設定していることから、流入境界条件の影響を受ける地表面付近の実際の竜巻風速場の再現はできていないものと考えられる。
- ・小規模な計算領域によるシミュレーションであり、実スケールへの適用（飛来物評価）の際には単純に速度を規格化して飛来物評価に適用している。  
⇒風速の規格化の際には、時間平均の最大風速を 100m/s（風速＋移動速度）に設定している。Maruyama<sup>(7)</sup>によれば、瞬間的な周方向風速は 1.7 倍程度まで大きくなる場合があり、移動速度と合わせると最大 160m/s 程度まで達するため、飛来物評価の際に非常に保守的な結果が算出されることが考えられる。
- ⇒流速が早い場合には粘性の影響は小さくなる傾向となるが、その影響については考慮していないことから、特に地表面付近については実際の風速場の再現はできていないものと考えられる。



(参考：フジタモデルを適用した場合の物体の飛跡)

図9にフジタモデルを適用した場合におけるコンテナの飛散解析(諸元：長さ6m×幅2.4m×高さ2.6m, 2300kg,  $CD_A/m=0.0105$ , 最大風速100m/s)における飛跡を示す。

また、フジタモデルの流入層高さ  $H_i$  は、外部コア半径  $R_m=30$ (m)の場合、 $H_i=15$ (m)であり、2.1に記載のとおり他の文献<sup>(4)(6)</sup>ともおおむね整合しているが、ここでは、その不確実性を考慮し、流入層高さ  $H_i$  を±10%変化させた場合の飛跡も示す。

$H_i=15$ (m)の際のコンテナの最大飛散距離189.4(m)に対し、流入層高さ  $H_i$  を±10%変化させた場合の最大飛散距離は183.4(m)(-3.2%)、194.7(m)(+2.8%)となり、流入層高さ  $H_i$  に対する最大飛散距離の感度は小さいことが分かる。

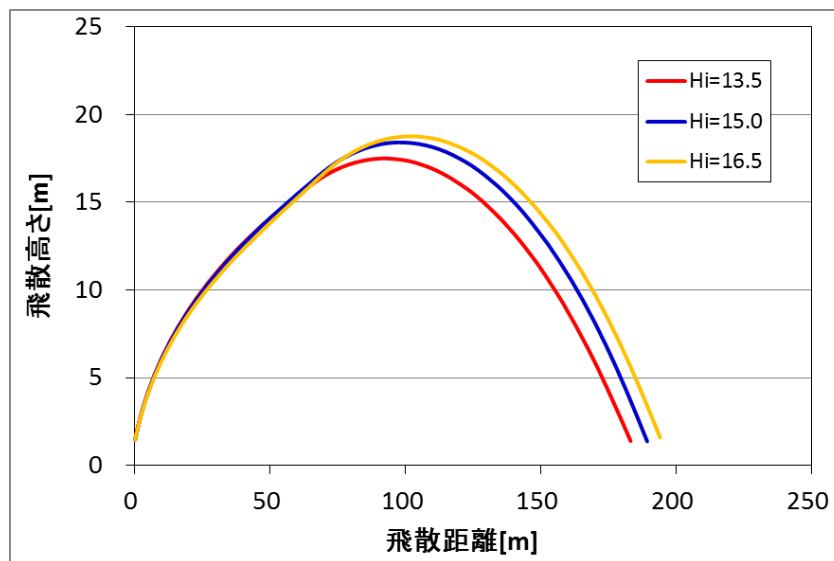


図9 流入層高さを変化させた場合のコンテナの飛跡 (最大風速100m/s)

### 3. 各風速場モデルの比較

各風速場モデルの特徴の比較を表1に示す。また、フジタモデルとランキン渦モデルの風速場構造の比較を図10に示す。フジタモデルの風速場構造の流線は、地面付近を含め、より実際の竜巻風速場に即した形で表現されており、地上からの物体の浮上・飛散解析が可能となっていることがフジタモデルの大きなメリットとなっている。

それに対し、ランキン渦モデルは上空での水平方向風速の観点からは比較的よく表現できると言えるものの、地上付近では実現象と乖離しており、地上からの飛散挙動は解析するには適切でない。ガイドで例示されているLESで生成した風速場も、2.3の通り人為的な境界条件を設定していることや、小規模領域での計算結果を定数倍して実スケールサイズの値に変換している<sup>(4)(7)</sup>ことから、地上付近での風速場が実現象と乖離していると考えられるため、地上からの飛散挙動を解析するには適切でない。また、他のモデルと比較して、フジタモデルは特に問題となるような点もないことから、竜巻影響評価に用いる風速場モデルとしてフジタモデルを選定することは妥当であると考えられる。

表 1 各風速場モデルの特徴の比較

風速場モデル	使用実績	特長	問題点
フジタモデル	<ul style="list-style-type: none"> <li>竜巻飛来物設計速度、飛散高さに関する米国DOE重要施設の設計基準作成に利用されている</li> <li>【対象施設の例】 Pantex Plant(テキサス州), Oak Ridge(X-10, K-25,Y-12)(テネシー州), Savannah River Site(サウスカロライナ州)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>実観測に基づいて考案されたモデルであり、実際に近い風速場構造を表現している</li> <li>比較的簡易な代数式により風速場を表現できる</li> <li>流体の連続式を満たす定式化</li> </ul> <p><b>地上に設置した状態から飛来物の挙動を解析できる</b></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>特になし</li> </ul> <p>(ランキン渦モデルと比較すると、解析プログラムが複雑になるが、計算機能力の向上、および評価ツールの高度化により問題とならない)</p>
ランキン渦モデル	<ul style="list-style-type: none"> <li>米国NRC Regulatory Guide 1.76で採用されている</li> <li>ガイド(設計竜巻の特性値の設定)で例示されている</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>簡易な式で上空での水平方向の風速場を表現できる</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>風速場に高度依存性がなく、上昇流が全領域に存在する(地面からも吹き出しがある)ため、実現象から乖離</li> <li>流体の連続式を満たしていない</li> </ul> <p><b>地上からの飛散挙動を解析するには適切でない</b></p>
非定常乱流渦モデル(LES)	<ul style="list-style-type: none"> <li>ガイドにおいて、飛来物および最大速度の設定例に使用されている</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>風速の時間的な変動、乱れをある程度模擬できる</li> </ul>	<p>ガイドに例示されているLESで生成した風速場で飛散解析を行う場合、以下の問題がある。</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>小規模領域での計算結果を、実スケールサイズに規格化するため、粘性の影響が実現象と乖離(特に地表面付近)</li> <li>人為的な境界条件を設定しており、地面や境界近傍で実現象と乖離</li> <li>実スケールに規格化した場合の平均風速が100m/sとなるため、飛来物評価が非常に保守的な場合がある(瞬間的な最大値は160m/s程度)</li> </ul> <p><b>地上からの飛散挙動を解析するには適切でない</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>実スケールでの解析は、膨大な計算機資源が必要になるため、現実的ではない</li> </ul>

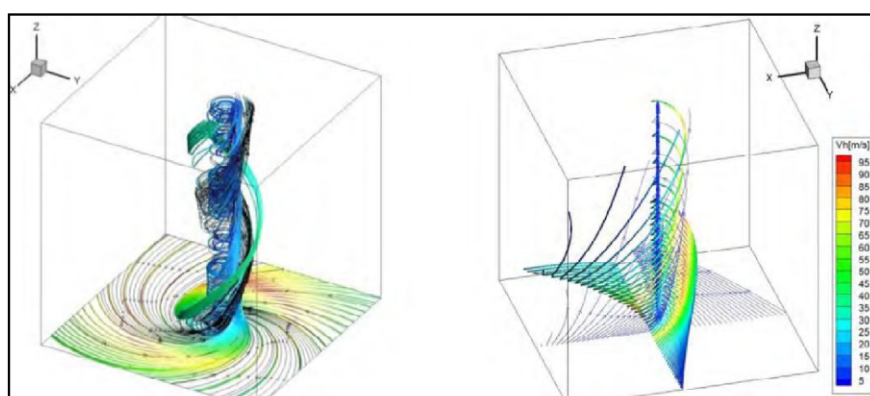


図 10 フジタモデル (左) とランキン渦モデル (右) の風速場構造の比較

#### 4. 米国におけるフジタモデルの取扱い

##### 4.1 フジタモデルの利用実績

米国エネルギー省 (DOE : Department of Energy) が管理するエネルギー関連施設等に適用する基準<sup>(8)</sup>において、竜巻飛来物速度、飛散高さの設定にフジタモデルを用いた計算結果が使用されている<sup>(9)(10)</sup> (文献(8)の D.4 節 : Windborne missile criteriaspecified herein are based on windstorm damage documentation and computer simulation of missiles observed in the field. ... Computer simulation of tornado missiles is accomplished using a methodology developed at Texas Tech University.)。

この基準では、施設に要求される性能ごとにカテゴリ 0 から 4 まで分類し、カテゴリ 0～2 は一般的な建築物、カテゴリ 3, 4 は核物質や危険物質を取り扱う施設に適用される。カテゴリ 3, 4 に該当する施設として、Pantex Plant, Oak Ridge(X-10, K-25, Y-12), Savannah River Site が挙げられている。

フジタモデルの技術的な妥当性の検証については、米国 DOE 管轄のローレンス・リバモア国立研究所報告書<sup>(11)</sup>にてまとめられている。この報告書では、フジタモデル DBT-77 を他の風速場モデルと比較検討しており、流体力学の連続の式を満足する (Fluid mechanics equations of continuity are satisfied) こと、モデル流況は、竜巻の映像分析で得られる流れの空間分布と整合する (Flow patterns are consistent with the spatial distribution of flow observed in photogrammetric analysis of tornado movies) こと等を利点として挙げている。

また、実際の事例に対するフジタモデルの検証としては、1978 年 12 月 3 日に米国ルイジアナ州 Bossier 市で発生した F4 竜巻による鋼製材の飛来について、フジタモデル DBT-77 で再現した事例<sup>(9)</sup> がローレンス・リバモア国立研究所報告書<sup>(11)</sup>及び米国気象学会論文集<sup>(12)</sup>に掲載されている。

なお、米国 LES (Louisiana Energy Services) の濃縮施設 (NEF : National Enrichment Facility) では、上記の DOE 施設の基準に基づき竜巻飛来物 (鋼鉄パイプや木材の板等) を設定しており、米国 NRC は当該施設に対する安全評価報告書 (NUREG-1827)<sup>(13)</sup>の中で竜巻飛来物に対する LES の竜巻設計を是認している。

(Based on the review of the information concerning tornados and tornado-generated missiles, NRC concludes: (i) the information is accurate and is from reliable sources; and (ii) the design bases tornado-generated missiles are acceptable because they were determined based on an appropriate DOE standard. The use of a DOE standard is an acceptable approach to NRC staff.)

#### 4.2 NRC ガイドでの取扱い

2.1 でも述べたとおり、フジタモデルは実際の竜巻風速場をモデル化したいという米国 NRC の要請を受けて考案されたものであるが、米国 NRC Regulatory Guide 1.76<sup>(2)</sup>では、フジタモデルについて “The NRC staff chose the Rankine combined vortex model for its simplicity, as compared to the model developed by T. Fujita (Ref. 7).” と述べられており、単に数式の簡易さを理由にランキン渦モデルが選定されている。また、NRC スタッフ自身で水平方向の飛来物速度 (Simiu らの運動方程式<sup>(3)</sup>) を計算するプログラムを開発している (The NRC staff developed a computer program to calculate the maximum horizontal missile speeds by solving these equations.) ことが明記されている。

したがって、米国 NRC ガイドでランキン渦モデルが採用されているのは、フジタモデルより簡易であるという理由が主であり、竜巻風速場としての優劣を指摘

されたものではない。

(参考) 米国におけるランキン渦モデル以外の風速場モデルの利用実績

米国 NRC では、竜巻防護対策の追加を検討しているプラントに対し、確率論的竜巻飛来物評価手法 TORMIS の利用を承認している。

TORMIS は、米国の EPRI で開発され、原子力発電所の構造物・機器への竜巻飛来物の衝突・損傷確率を予測する計算コードであり、同コードでは、ランキン渦モデル以外の風速場モデル（統合風速場モデル）が利用されていることから、米国 NRC においても、ランキン渦モデル以外の風速場モデルが認められていないわけではない。

## 5. 飛来物評価

前節まででは、フジタモデルの風速場を適用することの妥当性について述べてきた。フジタモデルの風速場を適用することで、より現実的な竜巻影響評価を行うことが可能と考えられるが、一方で、実際の竜巻による風速場や物体の飛散挙動の不確定性についても考慮する必要がある。

本節では、地表面付近の風速場、フジタモデルの特長である地上からの飛散挙動及び竜巻が物体と衝突する際の竜巻風速に関する不確定性等について、飛来物評価の中でどのように考慮しているかを説明する。

### 5.1 物体の浮上・飛来モデルにおける不確定性の考慮

本評価における物体の浮上・飛来モデルの考え方と、その中で保守性の観点から評価上考慮している点について説明する。

#### (1) 物体の揚力の計算式

物体が空中にある場合、物体に作用する力は、ガイドの飛来物運動モデル<sup>(3)(4)</sup>と同様に、物体は図 11-1 のようにランダムに回転しているものとし、平均的な抗力(流れの速度方向に平行な力)  $F_D$  と重力のみが作用する飛行モデルを採用している。

一方、物体が地面に置かれている場合や地面に近い場合は、地面効果による揚力(次頁参照)を考慮している<sup>(14)</sup>。具体的には、物体の形状が流れ方向の軸に関して対称であっても、図 11-2 に示すように地面の存在により流れが非対称になり、物体上部の圧力が低くなることで物体を浮上させる駆動力が生じることから、これを揚力  $F_L$  として考慮する。

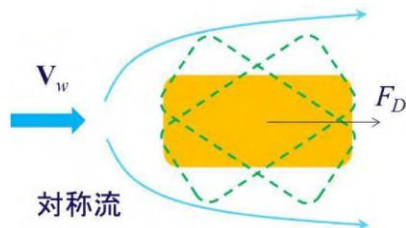


図 11-1 空中で物体へ作用する力

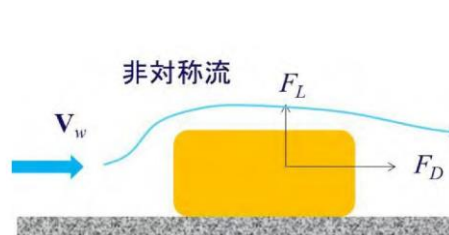


図 11-2 地面付近で物体へ作用する力

このような揚力  $F_L$  は地面での揚力係数  $C_L$ 、地上での物体の見附面積（風向方向から見た投影面積） $a$  を用いて、以下のように表される<sup>(15)</sup>。

$$F_L = \frac{1}{2} \rho C_L a |\mathbf{V}_w - \mathbf{V}_M|_{x,y}^2 \quad (6)$$

ただし、 $\rho$  は空気密度、 $\mathbf{V}_M$  は物体の速度ベクトル、 $\mathbf{V}_w$  は風速ベクトル、 $|\ast|_{x,y}$  は $\ast$  の  $x, y$  成分（水平成分）の大きさを表す。

（参考）地上の物体における地面効果による揚力について

物体や地面は完全な滑面ではなく、凹凸を有しているため、完全接触と非接触の領域に区別される。物体の地面への投影面積を  $A$  とし、物体と地面の完全接触面積を  $s$  とした場合、無風時（図 12 の左）は物体が流体に接する全表面で圧力は一定 ( $p_0$ ) とみなせるため、鉛直方向（上向き）に作用する揚力  $F_{L0}$  は、以下で与えられる。

$$F_{L0} = -p_0 A + p_0 (A - s) = -p_0 s \quad (7)$$

吸盤のように完全に地面に密着している場合は  $s=A$  となるため、大気圧  $p_0$  に投影面積  $A$  を乗じた力が下向きに作用し、物体と地面の間に僅かに空隙が生じる場合には、大気圧  $p_0$  に完全接触面積  $s$  を乗じた力が下向きに作用することになるため、いずれの場合においても揚力は発生しないことが分かる。

一方、竜巻通過時（図 12 の右）の物体に圧力差に伴う流体力が作用（簡単のため上面での圧力  $p_1$ 、下面での圧力  $p_2$  と仮定）する場合、鉛直方向の流体力  $F_L$  は、以下で与えられる（圧力分布がある任意形状の物体についても圧力の表面積分を用いれば同様に計算は可能）。

$$F_L = -p_1 A + p_2 (A - s) \quad (8)$$

吸盤のように完全に地面に密着している場合は  $s=A$  となるため、上面の圧力  $p_1$  に投影面積  $A$  を乗じた力が下向きに作用するが、物体と地面の間に僅かに空隙が生じる場合には、地面と物体の接触状態によっては上向きの力が発生することがある。実際には、地面と物体の接触状態を確認することは難しいことから、本評価においては、保守的に地上における物体に揚力が作用することとしている。

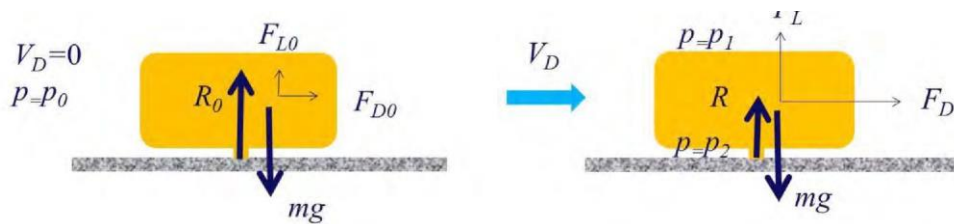


図 12 部分的に地面に接する物体に作用する力  
(左：無風時，右：強風時， $R_0$ ， $R$ ：無風時，強風時における垂直抗力)

## (2) 揚力係数の設定

(6)式の  $C_{La}$  は風洞実験から求められる値であるが，実験条件（風を受ける方向等）により様々な値を取り得るため，それを包含するような係数を設定することが望ましい。

本評価では，条件によらず保守性を確保できるように， $C_{La}$  に代わり以下で定義される抗力係数と見附面積の積の平均値  $C_D A$  を用いることとする。

$$C_D A = \frac{1}{3} (C_{Dx} A_x + C_{Dy} A_y + C_{Dz} A_{xz}) \quad (9)$$

ここで， $C_{Dx}$  は空中での  $x$  軸方向流れに対する抗力係数， $A_x$  は  $x$  軸方向流れに対する見附面積であり，その他も同様である。

物体の運動モデルを図 13 に示す。上記 (9) 式の考え方は，図 13 に当てはめ整理すると以下のとおり。

- 物体がある程度浮き上がった後の状態（図 13 の状態 B）であれば，物体はランダム回転し，物体各面に均等に風を受けるものと考えられること。
- 物体が地面に置かれた状態（図 13 の状態 A）から，実際に浮き上がる際には，物体の上面や下面での圧力が均一ではなく，傾きながら浮き上がるようなことも考えられるが，このような挙動を理論的に評価することは難しい。そのため，これに準ずる方法として，評価に用いる係数は，地面から浮かせた状態で実測された  $C_{La}$  のうち，物体が地面に置かれた状態（図 13 の状態 A）にできる限り近い場合の値よりも大きな係数を用いることで，保守性は確保できると考えられること。
- 物体が地面に置かれた状態（図 13 の状態 A）と物体がある程度浮き上がった状態（図 13 の状態 B）での評価にて，共通の係数を用いることは，地上からの物体浮上・飛散評価における実用性の観点からも望ましいこと。

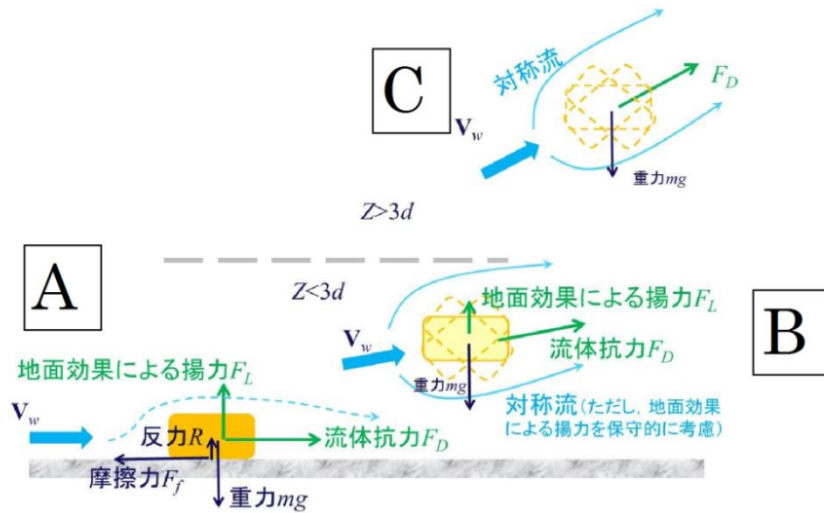


図 13 物体の運動モデルの模式図

(A : 地面上, B :  $Z < 3d$  の高さの範囲, C :  $Z > 3d$  の高さの範囲, ただし,  $Z = z - d/2$ ,  $d$  : 物体高さ)

物体の飛散解析におけるモデル化の基本的な考え方は、地面における揚力係数  $C_L$  と見附面積  $a$  の積  $C_L a$  をより大きな値で置き換えて、浮上現象を保守的に評価できるようにすることであり、この保守的な代用値として飛行定数  $C_D A/m$  と同類の  $C_D A$  の利用が適切であることを以下で説明する。

物体が風速  $U$  を受ける場合の揚力係数  $C_L$  は、一般にその定義により揚力  $F_L$  と以下の関係にある。

$$F_L = \frac{1}{2} \rho U^2 C_L a \quad (10)$$

これを変形すると、 $C_L a = 2F_L / \rho U^2$  となり、風速、風向及び物体の向きが一定であれば、揚力  $F_L$  及び速度圧  $q = 1/2 \rho U^2$  は見附面積  $a$  の取り方には無関係の物理量であるので、 $C_L a$  も見附面積  $a$  の取り方（風向投影面積や揚力方向投影面積）に依存しないことが分かる。

一方、同じ風速  $U$  が同じ物体に作用する場合であっても、地面に置かれた物体の向きと風向の関係によって積  $C_L a$  は変化する。（例えば、円柱の長手方向と風向が平行な場合の揚力は小さいが、直角の場合には最大となる）

そこで、典型的な塊状物体・柱状物体・板状物体が地面に置かれた場合の  $C_L a$  の最大値（又は、それに近い値）の実測結果と物体の幾何学形状のみで決定される  $C_D A$  の値を比較する。（表 2）

表 2 より、 $C_D A > C_L a$  の関係が成立しており、 $C_L a$  の代用として  $C_D A$  の利用が適切であることが確認できる。なお、 $C_D A$  は各方向の抗力係数と見附面積の積の平均値であり、例えば、一辺  $d$  の立方体では  $C_D A = 2d^2$ 、一辺  $d$  の平板では  $C_D A = 0.66d^2$  となる。両者には約 3 倍の違いがあるが、いずれの場合も実際の  $C_L a$  値よりも大き

な値であり、揚力の評価モデルとして  $C_{La}$  値の代わりに  $C_{DA}$  を用いることで保守性は確保できる。

また、以上の揚力のモデル化の説明は浮上時（図 13 の状態 A）に対するものであるが、この揚力が物体高さの 3 倍までの高さの範囲で連続的に低減するように作用するようにモデル化しており、図 13 の状態 A, B, C の全領域で揚力の連続性が確保されている。



表2 主な物体の  $C_{DA}$  と地面に置かれた物体の  $C_{La}$  (実測値) の比較

形状	物体	仕様	$C_{DA}^*$	$C_{La}$ (実測値)	$C_{DA}/C_{La}$	$C_{La}$ (実測値) に係る試験条件等
塊状	自動車	実物の Dodge Dart (長さ $s=16.7ft.$ , 幅 $w=5.8ft.$ , 高さ $d=4.3ft.$ )	$2(sw+wd+ds)/3$ (=129ft. <sup>2</sup> )	1.865wd (=46.5ft. <sup>2</sup> )	2.65	<ul style="list-style-type: none"> <li>文献(16)の風洞試験(風速 <math>22\sim 31m/s</math>, <math>Re=2.8\times 10^6\sim 4\times 10^6</math>)</li> <li><math>C_{La}</math>が最大となる流入角での値を <math>C_{La}</math> (実測値) として記載</li> </ul>
		一辺の長さ $D$	$2D^2$	$0.2D^2$ 程度	10 程度	<ul style="list-style-type: none"> <li>文献(17)の水路試験(<math>Re=8000\sim 28000</math>)</li> <li>流入方向と立方体面の一面が垂直になる配置における値を <math>C_{La}</math> (実測値) として記載</li> </ul>
柱状	円柱	長さ $\lambda$ , 直径 $D$	$0.47D\lambda$	$0.2D\lambda$	2.35	<ul style="list-style-type: none"> <li>文献(16)の風洞試験(<math>Re=1.3\times 10^6</math>)</li> <li>流入方向と円柱の軸直角方向が垂直になる配置(円柱の軸方向は地面と平行)における値を <math>C_{La}</math> (実測値) として記載</li> </ul>
		長さ $\lambda$ , 断面が一辺 $D$ の正方形	$0.8D\lambda$ ( $1.3D\lambda$ )**	$0.5D\lambda\sim 0.7D\lambda$ 程度	1.14~1.6	<ul style="list-style-type: none"> <li>文献(17)の水路試験(<math>Re=8000\sim 28000</math>)</li> <li>長方形断面(アスペクト比 4:3)の角柱は地面から <math>0.167D</math> 以上離れると揚力は負となる(電中研風洞実験)</li> <li>流入方向と角柱の軸直角方向が垂直となる配置(角柱の軸方向は地面と平行)における値を <math>C_{La}</math> (実測値) として記載</li> </ul>
		長さ $\lambda$ , 幅 $B$ , 厚さ $D$ ( $B=200mm$ , $D=5mm$ , $\lambda=1000mm$ の場合)	$0.66B\lambda$	0に近い値 (地面から $0.25B$ 離れた位置で $C_{La}=0.04B\lambda$ )	16.5	<ul style="list-style-type: none"> <li>文献(18)の風洞試験(幅 <math>B</math> に基づく <math>Re=2\times 10^5</math>)</li> <li>流入方向と平板の長さ方向が垂直になる配置(平板は地面と平行)における値を <math>C_{La}</math> (実測値) として記載</li> </ul>
平板	平板状 ブロック	長さ $\lambda$ , 幅 $B$ , 厚さ $D$	$0.66B\lambda$ $0.66(B\lambda+D(B+\lambda))$ **	$0.1B\lambda$ 程度	6.6	<ul style="list-style-type: none"> <li>文献(19)の水路試験(<math>Re=5\times 10^4</math> 程度)</li> <li>流入方向と平板状ブロックの長さ方向が垂直になる配置(平板状ブロックは地面と平行)における値を <math>C_{La}</math> (実測値) として記載</li> </ul>

\*: 柱状及び平板では微小項を無視して記載      \*\*: 塊状とみなせる場合

### (3) 設定した揚力係数の適用性の確認

地面における揚力係数  $C_L$  と見附面積  $a$  の積  $C_L a$  が、飛行定数  $C_D A/m$  と同類の  $C_D A$  で代用できることについて、表 2 における  $C_L a$  (実測値) が竜巻における物体の飛散解析に適用可能であることについて、レイノルズ数の観点から確認を行う。

表 2 の各文献中の実験でのレイノルズ数  $Re$  は同表の備考欄に示すとおり、 $10^4$  から  $10^6$  のオーダーにある。

ここで、実物の自動車 (Dodge Dart の諸元 : 長さ 16.7ft. , 幅 5.8ft. , 高さ 4.3ft. ) では風速を 30mph (13m/s) から 120mph (54m/s) まで変化させてレイノルズ数の影響を調べた結果、風速は各空力係数に対して顕著な影響がないことが確認されている<sup>(16)</sup>。これは、剥離点が物体角部等に固定されてレイノルズ数にほとんど依存しないためであり、このような特性を有する立方体等についてもレイノルズ数依存性はないものと考えられる。

一方、円柱周りの流れのように剥離点が曲面上にある場合については、図 14 に示すようにレイノルズ数  $Re$  が変化すると、剥離点が移動し、抗力係数等が変化することが知られている。表 2 の EPRI の円柱の風洞試験結果<sup>(16)</sup> は  $Re=1.3 \times 10^6$  の高レイノルズ数条件で得られたものであり、竜巻中の円柱状の飛来物のレイノルズ数範囲に入るものと考えられる (例えば、相対風速 92m/s の直径 0.1m のパイプのレイノルズ数は  $Re=6.0 \times 10^5$  程度)。また、電力中央研究所我孫子地区内の吹出式開放型風洞 (吹出口寸法 : 高さ 2.5m × 幅 1.6m, 風速 : 3.0 ~ 16.5m/s) においても、壁 (地面) 近くに設置した円柱 (直径 100mm × 模型長 1000mm) を対象として、 $Re=3.0 \times 10^4$  から  $1.0 \times 10^5$  程度までの揚力係数の測定試験が行われている。

EPRI の風洞試験と電力中央研究所の風洞試験には、レイノルズ数条件に大きな違いがあるが、図 15 に示すとおり風洞試験で得られた円柱揚力係数に顕著な相違は認められない。

以上より、地面における各物体の揚力係数  $C_L$  と見附面積  $a$  の積  $C_L a$  はレイノルズ数にほとんど依存せず、表 2 に示す風洞試験結果に基づくモデル化は妥当であると考えられる。

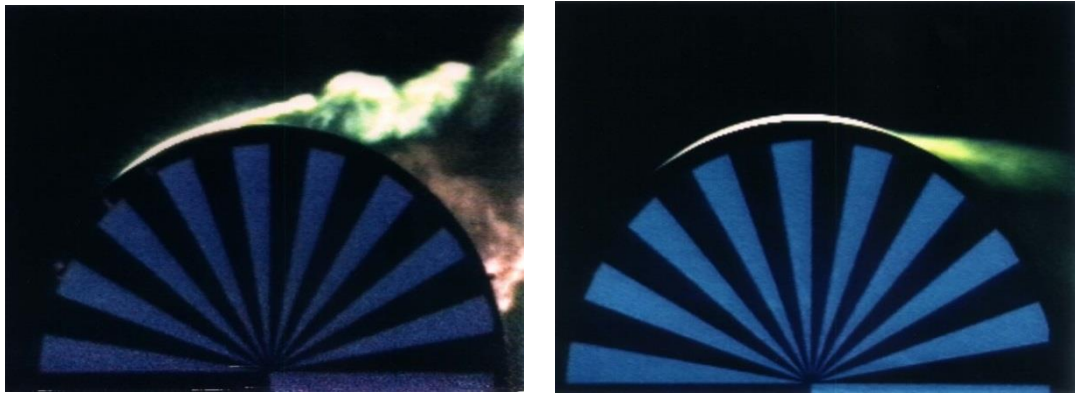


図 14 可視化した円柱周りの流れ  
(左 :  $Re \approx 4.0 \times 10^4$ , 右 :  $Re \approx 2.0 \times 10^5$ )

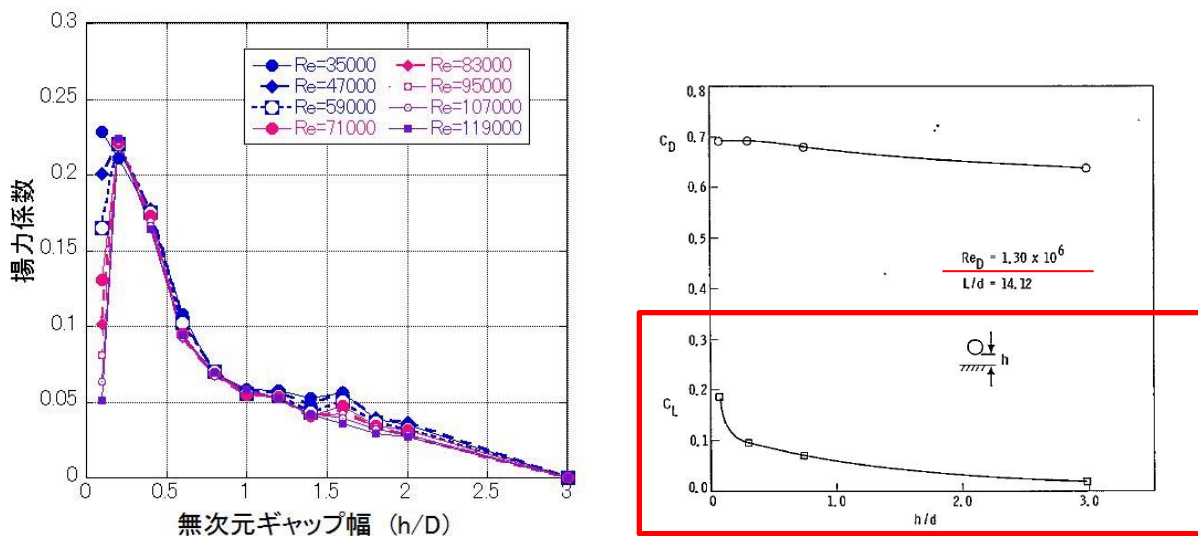


図 15 (左) 電力中央研究所の風洞試験 ( $Re=3.0 \times 10^4 \sim 1.0 \times 10^5$ ) と (右) EPRI の風洞試験<sup>(16)</sup> ( $Re=1.3 \times 10^6$ ) で得られた円柱揚力係数

#### (4) 揚力の高さ依存性

この地面効果による揚力は高さとともに減衰するので、既往の風洞実験の結果<sup>(16)(22)</sup>を考慮して、物体高さ  $d$  の物体にかかる揚力は、物体底面が地面から  $3d$  の高さとなった時に消滅すると仮定する。

具体的には、地面から  $z$  の距離 (高さ) にある物体に作用する揚力加速度  $L$  を以下の関数形でモデル化する。(  $Z$  : 物体底面の高さ ( $=z-d/2$ ) )

$$L = \frac{1}{2} \rho \frac{C_D A}{m} |\mathbf{V}_w - \mathbf{V}_M|_{x,y}^2 f(Z/d) \quad (11)$$

ただし、 $f(Z/d)$  は、EPRI の風洞実験結果<sup>(16)(22)</sup>を参考に、以下の反比例式とする。

$$f(Z/d) = \begin{cases} \{1 - (Z/3d)\} / \{1 + (Z/d)\} & (0 \leq Z \leq 3d) \\ 0 & (3d < Z) \end{cases} \quad (12)$$

また、以下において、塊状物体（自動車）、柱状物体（角柱、円柱）、板状物体（平板）の風洞試験結果を踏まえ、物体高さ  $d$  の物体にかかる揚力は、物体底面が地面から  $3d$  の高さで消滅するとした仮定が適切であることを確認する。

a. 塊状物体（自動車）の揚力の高さ依存性

自動車の揚力係数は、EPRI の風洞試験<sup>(16)</sup>にて、地面及び風洞中央 ( $h/d \doteq 3.5$ ) に設置した場合にて計測されており、図 16-1 に示すように流入角 ( $0^\circ$  は正面、 $90^\circ$  は側面に風を受ける角度) に依存した揚力係数が得られている。

また、図 16-2 にて、EPRI の風洞試験によって得られた揚力係数と本モデルにて代用した揚力係数の関係を示す。EPRI の風洞試験では空中での自動車の姿勢は地面設置と同じ姿勢に保たれているため、空中においても揚力係数がゼロとはならないが、実際に飛来する自動車の姿勢はランダムに変化することから、平均的な揚力係数は本モデルでの代用した揚力係数に近いものと考えられる。

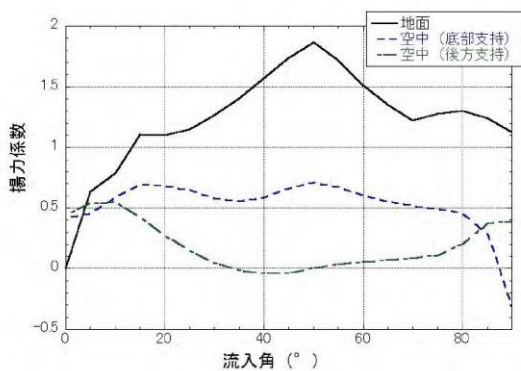


図 16-1 地面及び風洞中央に設置した自動車の揚力係数の流入角依存性

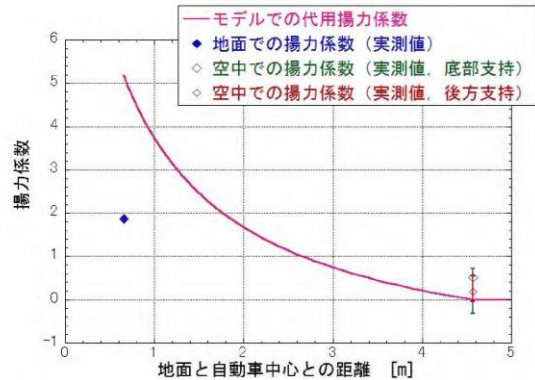


図 16-2 自動車の風洞試験による揚力係数と本モデルで代用した揚力係数の関係

b. 柱状物体（角柱・円柱）の揚力の高さ依存性

角柱の揚力係数は、電力中央研究所我孫子地区内の吹出式開放型風洞（吹出口寸法：高さ 2.5m×幅 1.6m、風速：3.0～16.5m/s）にて測定しており、図 17 にその結果を示す。角柱の場合、地面から  $0.167D$  以上離れると揚力は負となるので、正の揚力を与える本モデルで代用した揚力式（図 17 の赤線）は保守的な結果となっていることが分かる。

円柱の揚力係数は、EPRI の風洞試験<sup>(16)</sup>にて測定しており、図 18 に示すように本モデルで代用した揚力係数（図 18 の赤線）は実際の円柱に働く揚力の最大揚力係数よりも大きな値となっているため、保守的な結果となっていることが分かる。

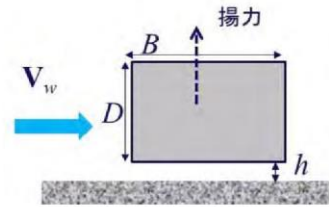
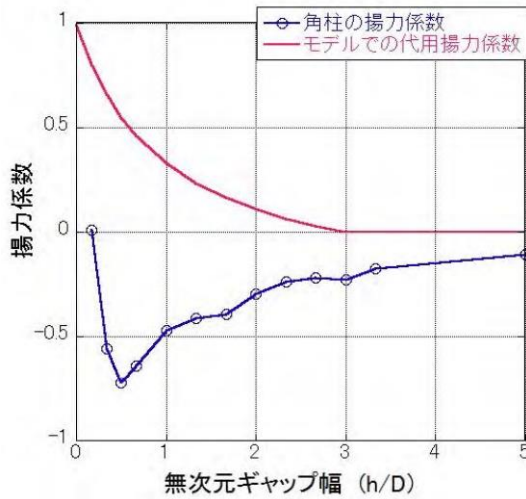


図 17 角柱の風洞試験による揚力係数と本モデルで代用した揚力係数の関係  
(幅 B=80mm×高さ D=60mm×模型長 1000mm)

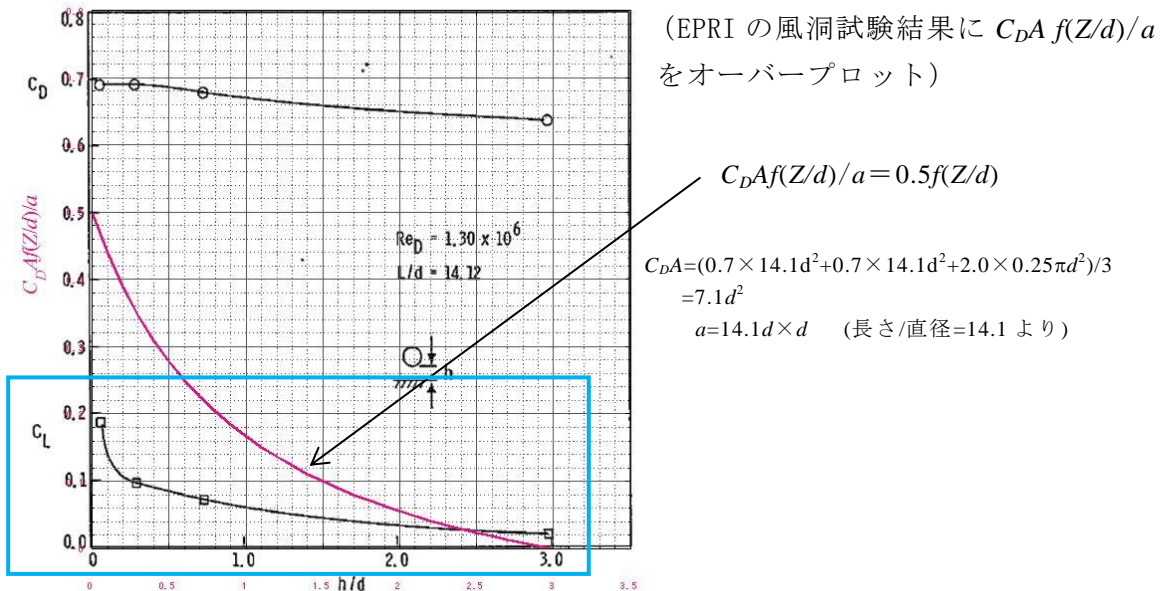


図 18 円柱の風洞試験による揚力係数と本モデルで代用した揚力係数の関係

c. 板状物体（平板）の揚力の高さ依存性

平板の揚力係数は、平面的な形状を有する翼（迎角  $0^\circ$ ）の試験結果<sup>(21)</sup>に基づき考察すると、本モデルで代用した揚力係数（図 19 の赤線）は実際の翼に働く地面効果による揚力係数よりもおおむね大きな値となっている。また、この翼は奥行方向が長い形状で流れに直交するような配置となっており、実際の平板に比べて揚力が作用しやすいことを考慮すると、実際の平板の揚力係数は更に小さいものと考えられる。

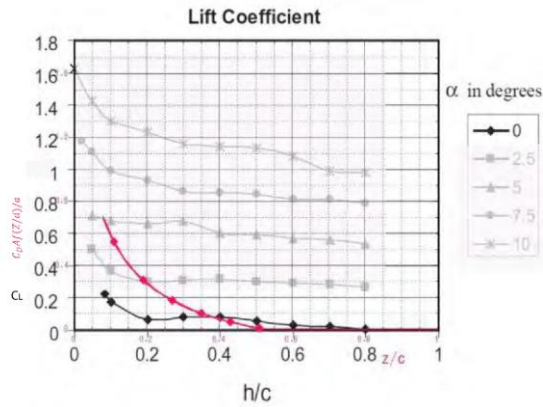


Fig. 8. Coefficient of lift at varying ground clearances for different angles of attack.

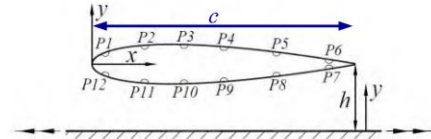


Fig. 2. Locations of pressure tappings.

図 19 翼の風洞試験による揚力係数と本モデルで代用した揚力係数の関係

d. 確認結果

a. ~c. より，本モデルで代用した揚力係数は，風洞試験により得られた揚力係数よりおおむね大きな値となっており，物体高さ  $d$  の物体にかかる揚力は，物体底面が地面から  $3d$  の高さで消滅するとした仮定が適切であることが確認された。

(5) 物体の運動方程式

上記(1)～(4)を踏まえ，重力加速度  $g$ ，上向きの単位ベクトル  $\mathbf{k}$  を用いて，飛行物体の運動方程式は以下のように記述される。

$$\frac{d\mathbf{V}_M}{dt} = \frac{1}{2} \rho \frac{C_D A}{m} |\mathbf{V}_W - \mathbf{V}_M| (\mathbf{V}_W - \mathbf{V}_M) - (g - L) \mathbf{k} \quad (13)$$

物体の位置  $\mathbf{X}_M(t)$  と速度  $\mathbf{V}_M(t)$  の時刻歴の計算には陽解法（一定加速度法）を用いる。具体的には，時刻  $t = \tau$  における物体の位置  $\mathbf{X}_M(\tau)$  と速度  $\mathbf{V}_M(\tau)$  を既知として，時刻  $t = \tau + \Delta \tau$  における物体の速度と位置を以下の式で求める。ただし， $\mathbf{A}(\tau)$  は上記運動方程式の右辺に対応する時刻  $t = \tau$  における加速度ベクトルである。

$$\mathbf{V}_M(\tau + \Delta \tau) = \mathbf{V}_M(\tau) + \mathbf{A}(\tau) \Delta \tau \quad (14)$$

$$\mathbf{X}_M(\tau + \Delta \tau) = \mathbf{X}_M(\tau) + \mathbf{V}_M(\tau) \Delta \tau + \frac{\mathbf{A}(\tau) \Delta \tau^2}{2} \quad (15)$$

$\mathbf{A}(\tau)$  の計算には，時刻  $t = \tau$  における風速場も必要であるが，初期に原点に位

置する竜巻の中心が  $x$  軸上を移動速度  $V_t$  で移動することを仮定しており、任意の時刻での風速場を陽的に求められるため、物体の速度  $\tau$  位置を算出することができる。

(6) 物体の運動方程式 ((13)式) に関する考察

地面上の物体 (図 13 の状態 A) が浮上するには、地面からの反力が消滅 ( $R < 0$ , つまり  $mg < F_L$ ) する条件で浮上し、浮上後は、(13)式を成分表示した以下の運動方程式に従って飛散する。

$$\frac{dV_{M,x}}{dt} = \frac{1}{2} \rho \frac{C_D A}{m} \sqrt{(V_{w,x} - V_{M,x})^2 + (V_{w,y} - V_{M,y})^2 + (V_{w,z} - V_{M,z})^2} \times (V_{w,x} - V_{M,x}) \quad (16)$$

$$\frac{dV_{M,y}}{dt} = \frac{1}{2} \rho \frac{C_D A}{m} \sqrt{(V_{w,x} - V_{M,x})^2 + (V_{w,y} - V_{M,y})^2 + (V_{w,z} - V_{M,z})^2} \times (V_{w,y} - V_{M,y}) \quad (17)$$

$$\frac{dV_{M,z}}{dt} = \frac{1}{2} \rho \frac{C_D A}{m} \sqrt{(V_{w,x} - V_{M,x})^2 + (V_{w,y} - V_{M,y})^2 + (V_{w,z} - V_{M,z})^2} \times (V_{w,z} - V_{M,z}) - g + L \quad (18)$$

ここで、物体の速度  $\mathbf{V}_M = (V_{M,x}, V_{M,y}, V_{M,z})$ 、竜巻風速  $\mathbf{V}_w = (V_{w,x}, V_{w,y}, V_{w,z})$  であり、右辺第 1 項が流体抗力  $F_D$  の加速度を表しており、(18)式の右辺第 3 項が地面効果による揚力  $F_L$  の加速度を表している。上記の式で、物体が静止している状態 (上記の式(16)～(18)で物体の速度  $\mathbf{V}_M$  を 0) を仮定すると、以下の式となる。

$$\frac{dV_{M,x}}{dt} = \frac{1}{2} \rho \frac{C_D A}{m} \sqrt{V_{w,x}^2 + V_{w,y}^2 + V_{w,z}^2} \times V_{w,x} \quad (16')$$

$$\frac{dV_{M,y}}{dt} = \frac{1}{2} \rho \frac{C_D A}{m} \sqrt{V_{w,x}^2 + V_{w,y}^2 + V_{w,z}^2} \times V_{w,y} \quad (17')$$

$$\frac{dV_{M,z}}{dt} = \frac{1}{2} \rho \frac{C_D A}{m} \sqrt{V_{w,x}^2 + V_{w,y}^2 + V_{w,z}^2} \times V_{w,z} - g + L \quad (18')$$

フジタモデルでは、物体が地面上にある場合 (図 13 の状態 A) では上昇速度はゼロに近く、地面で静止している物体が受ける上昇速度はほぼゼロであるため、

式(18')の右辺第1項は右辺第2,第3項に比べてはるかに小さな量となり,以下のとおり物理的に合理的な関係式が成立する。

$$\frac{dV_{M,z}}{dt} \approx -g + L \quad (19)$$

例として,竜巻コア半径30m,設計竜巻の最大風速92m/sの竜巻が原点に位置しx方向に14m/sで移動する場合,点(0,-30m)における式(18')の右辺第1項の値(z方向抗力(流体抗力)による加速度)と第3項の値(地面効果による揚力加速度)を図20に示す。

図20より,地面上(z=0)においては,z方向抗力による加速度は十分小さく,地面効果による揚力加速度の影響が大きいことが分かる。

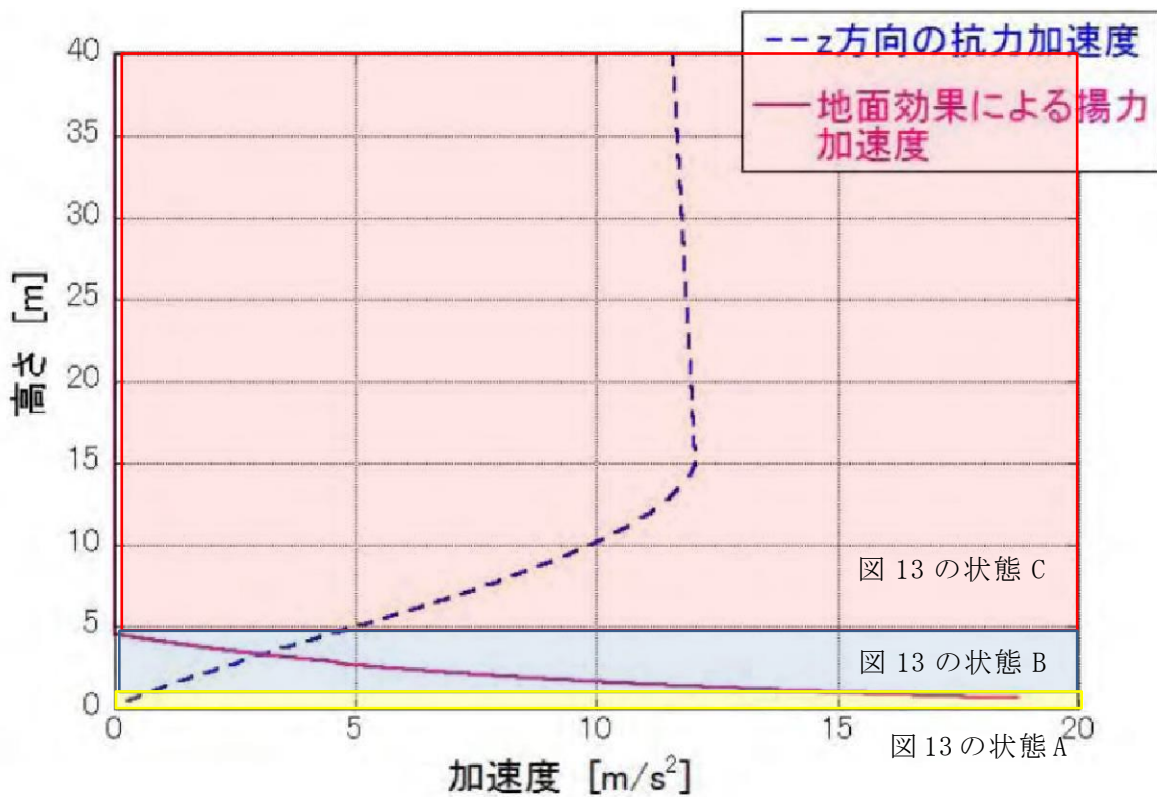


図20 地面近傍の物体に作用するz方向の加速度  
 $(0.5 \rho C_D A/m = 0.004 \text{ [m}^{-1}\text{]}, d = 1.31 \text{ [m]})$

なお,高さ方向の依存性が考慮されていないランキン渦の場合は,上昇風速が水平風速の約60%にも達するため,地面から非現実的な風の噴出が発生する。地面効果は地面の存在によって水平な風が物体付近で湾曲・剥離することによって生じるものであるが,ランキン渦の風速場では地面の有無によって物体周りの流況が大きく変化せず,地面効果は物理的に発現しにくいいため,ランキン渦モデルを用いた解析においては鉛直方向による揚力Lを付加していない(図21)。



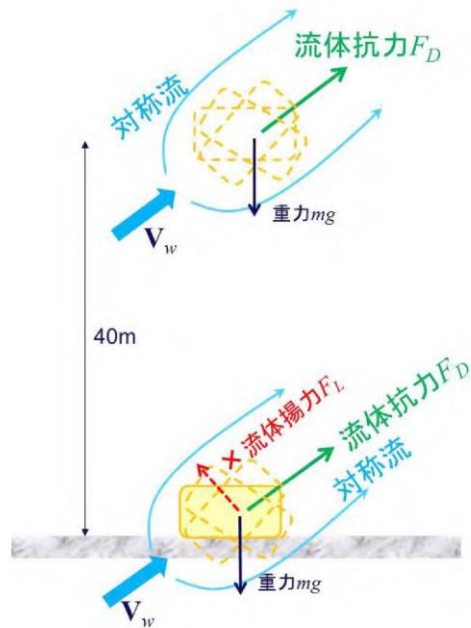


図 21 ランキン渦の場合の物体の運動モデルの模式図

## 5.2 竜巻が物体に与える速度に関する不確定性の考慮

竜巻によって飛散する物体の飛来速度や飛散距離は、同じ竜巻内であっても物体の受ける風速（物体がある位置の竜巻風速）によって大きく変動する。その影響度合いを確認するため、米国 NRC ガイド<sup>(2)</sup>に記載されている方法（物体の 1 点配置）と、物体を多点配置した場合の飛来速度の違いを比較する。配置の違いについて、図 22 に示す。

1 点配置の場合は、特定位置（竜巻進行方向の竜巻半径の位置  $(x, y) = (R_m, 0)$ ）に物体 1 個を設置する。また多点配置の場合は、竜巻半径の 4 倍の正方形の領域に  $51 \times 51$  個の物体を配置する。その上で飛散させた物体のうち、最も速度が大きくなったものをその物体の飛来速度とする。

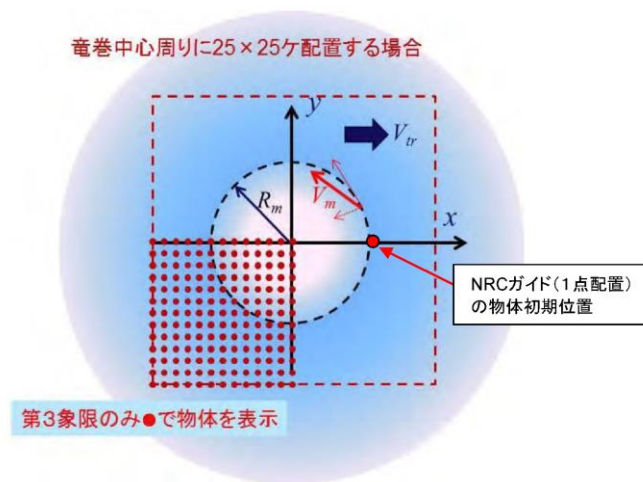


図 22 飛来物評価における竜巻と物体の位置関係

評価条件として、竜巻の最大風速を 92m/s とし、フジタモデルの風速場を用いて地上から飛散させるものとする。また、ガイドの記載より竜巻の移動速度  $V_t$  を 15m/s、竜巻コア半径  $R_m$  を 30m とする。飛散させる物体のパラメータとして、原子力安全基盤機構の調査研究報告書<sup>(4)</sup>に掲載されている物体の飛行定数 (5.1 の  $C_D A$  を質量で割った値： $C_D A/m$ ( $m^2/kg$ )) を用いる。図 23 に比較結果を示す。

米国 NRC で用いられている 1 点配置の手法と比較し、多点配置の手法では、飛行定数の大きい物体の多くが 1 点配置に比べて大きな飛来速度となる。多点配置することで、その竜巻風速場における最大風速（最大接線風速と半径方向風速のベクトル和が竜巻移動方向と重なる点）を受ける物体が出てくるため、このような結果となったと考えられる。

したがって、物体を多点配置することは、竜巻から受ける風速に関する不確定性を考慮できるものと考えられるため、本検討における方法として適用することとする。

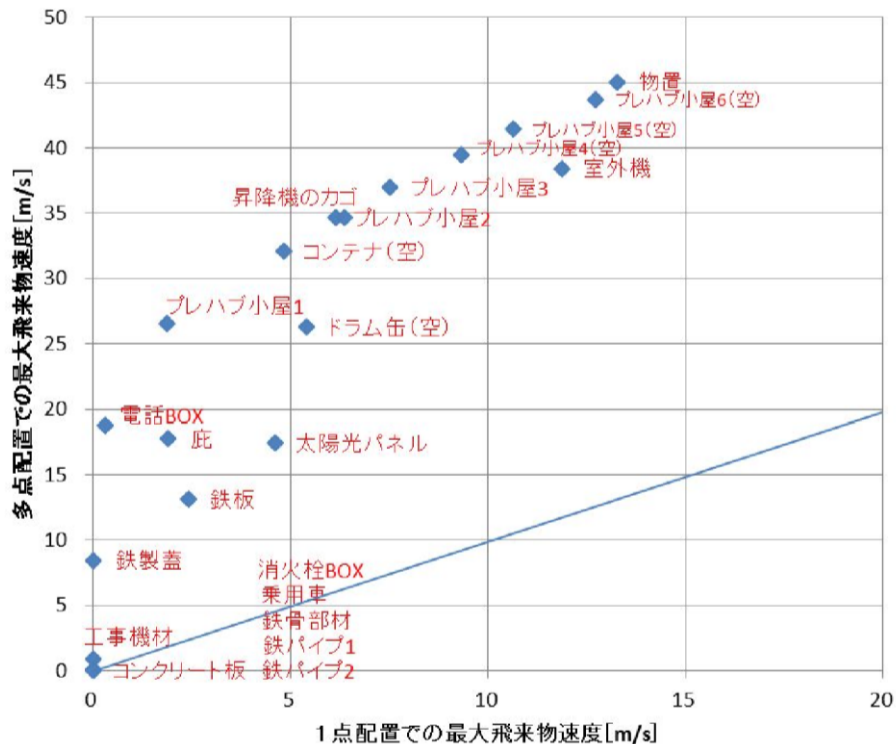


図 23 1 点配置時と多点配置時の最大飛来物速度の比較

前頁の図 22 に示す物体の多点配置（竜巻半径の 4 倍の正形状の領域に 51 × 51 個の物体を配置）を初期状態として適用したが、この手法は、物体の直上に竜巻を発生させており、竜巻発生地点の不確定性についても考慮した設定となる。

図 24 に遠方から物体に接近する竜巻と、物体直上に発生する竜巻による飛散

の比較イメージ図を示す。実際の竜巻に遭遇する状況（海上で竜巻が発生して上陸する場合等）を考慮すると、竜巻は遠方から物体に近づくため、最大風速より低い風速に曝され、飛散することになる。しかし、物体の直上に竜巻を発生させる設定とすることで、実際の竜巻による飛散と比較して、より厳しい結果を与えることになる。

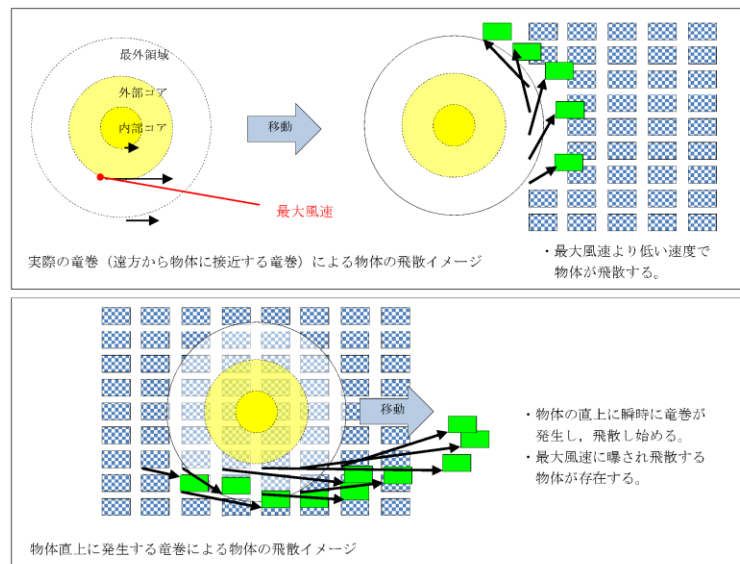


図 24 物体に接近する竜巻と物体直上に発生する竜巻の比較イメージ図

この物体を多点配置する方法と、竜巻を直上に発生させる方法を組み合わせることにより、必ずその竜巻による最大風速に曝される物体が発生するため、竜巻が物体に与える速度の不確定性を考慮することができると考えられる。

### 5.3 フジタモデルの地表面付近の風速場に関する不確定性の考慮

#### (1) 至近の研究報告

竜巻の地表面付近の風速分布に関する研究として、Kosiba and Wurman 2013<sup>(6)</sup>は、図 25 に示すとおり地上からの高さ約 5m における風速は地上からの高さ約 40m に比べて約 25% 大きな値が観測されたことが報告されている。

ただし、地上から高さ 3m 程度は観測していないこと等を踏まえて、本研究の結論としては、「地表面付近の竜巻特性として一般化するには、種々の渦構造・強度の竜巻について更なる観察が必要である」としている。よって、現状では、フジタモデルの風速分布に直接関連付けられるものではないが、地表面付近の風速場の不確定性を踏まえて保守性を確保することとする。

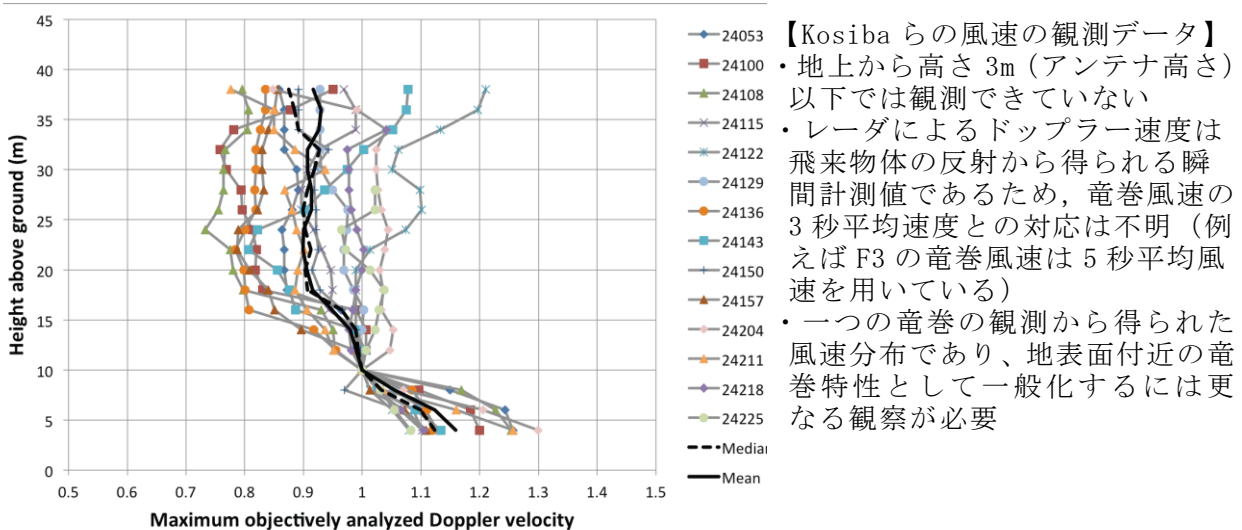


図 25 地上からの高さで風速（ドップラー速度）分布<sup>(6)</sup>

## (2) 設計飛来物設定における保守性

フジタモデルを用いた飛散解析においては、物体の地上からの初期高さを高く設定したほうが地表面から解析した場合に比べて最大水平速度は高くなり、最大水平速度に依存するパラメータである運動エネルギー及び貫通力も大きくなる。

設計飛来物の設定においては、任意の地上からの高さにある鋼製材をフジタモデルを用いて飛散解析をした結果を包絡するガイド記載の鋼製材を設定しており、フジタモデルの地上付近の風速場の不確定性は考慮できている。（添付資料 3.3 別紙-6 参照。）

## (3) 飛来物評価における保守性

物体の飛散距離、飛散高さ及び飛散速度についても、5.2, 5.3 に示す保守性を考慮することで実際の被災事例に対し、保守的な結果が得られることも確認している。（6.3 参照。）

## (4) 地表面付近の風速場の不確定性について

フジタモデルは高さ方向に風速が変化し、地上からの高さ 0m では風速が 0m/s となるモデルである。地表面付近の風速場には不確定性があることから、物体の地上からの初期高さを変化させた感度解析を実施し、地表面に設置された物体の飛散解析の妥当性を確認する。

### a. 物体の地上からの初期高さの感度解析

物体の地上からの初期高さの感度解析条件を(a), (b)に示す。

#### (a) 地上からの初期高さの解析範囲

地上からの初期高さの解析範囲は、フジタモデルの風速場で最大水平風速の 97.7% (89.9m/s) の風速となる地上高さ 5m までの範囲とする。（図 5-2 参照。）

(b) 対象飛来物について

資機材・車両及び軽量大型機材の飛来物発生防止対策エリアの設定に用いている「乗用車」及び「プレハブ小屋」を対象とする。

(c) 感度解析結果

最大飛散距離と地上からの初期高さの関係を図 26 に示す。図 26 より、乗用車、プレハブ小屋ともに、地上からの初期高さが高くなるに従い、最大飛散距離が徐々に減少する傾向にある。地上からの初期高さが増加するに従い物品に作用する初期風速も増加するが、地面効果による揚力の減少の影響のほうが大きいため飛散距離が減少したと考えられる。以上より、飛来物発生防止対策エリアの設定に対して、地表面付近の風速場の不確定性の影響は小さく、地表面に設置した物品に対する飛散解析結果を用いることは妥当であると考えられる。

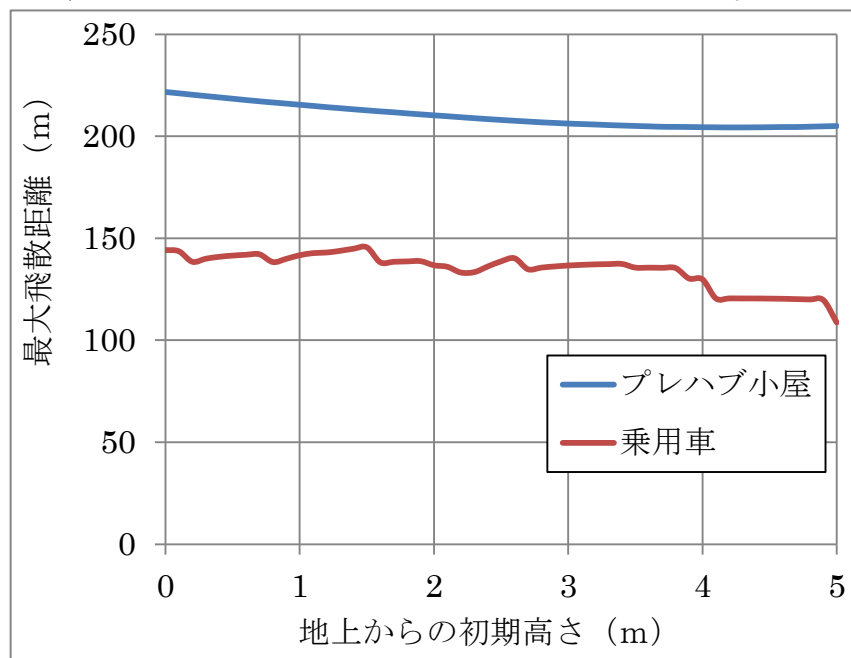


図 26 最大飛散距離と地上からの初期高さの関係  
(最大風速 92m/s, 敷地の高低差 : 0m, 飛来物 : 乗用車 (5.2m×1.9m×2.3m, 1,890kg), プレハブ小屋 (27.0m×7.2m×3.4m, 7,500kg) )

5.4 飛来物評価法のまとめ

物体の浮上・飛散モデルにおいて、実際の実験結果よりも浮上しやすい係数を設定することで、浮上に関する不確定性を考慮できるような設定とする。

また、物体を多点配置し、その物体直上で竜巻が発生するという設定を組み合わせることにより、竜巻風速場内で物体が受ける風速の不確定性を考慮し、その竜巻において最大となる飛来速度が評価できるような設定とする。

当社が実施するフジタモデルの風速場を用いた飛散評価手法では、地表面付近の風速場の不確定性を踏まえ、設計飛来物設定における保守性や飛来物評価

における保守性を確保している。

以上により、フジタモデルを用いて物体の飛散速度評価を行う場合でも、竜巻による物体飛散の不確定性を考慮した評価結果が得られるものと考えられる。

なお、参考として図 27 に本検討の条件設定による、物体の飛散イメージを示す。同じ物体でも、受ける風速によって大きく飛散状況が変わる様子が分かる。

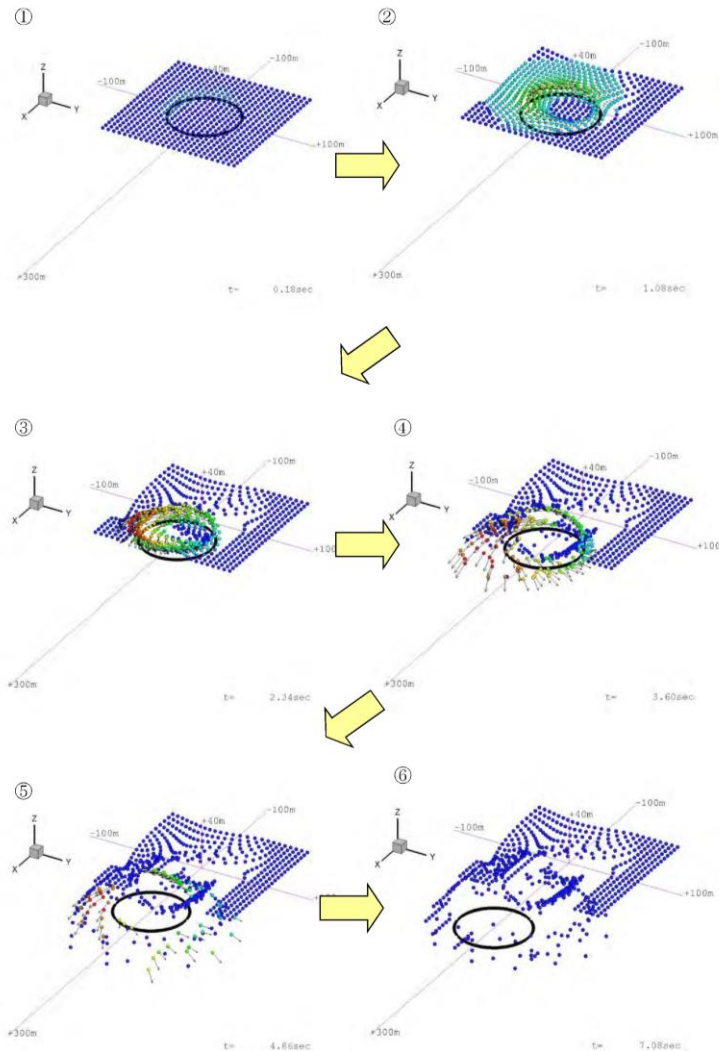


図 27 竜巻による物体の飛散イメージ

## 6. 実際の飛散状況に対する検証

前節までは、フジタモデルの風速場を用いる優位性や、飛来物評価を行う上で考慮している事項等についての説明である。

本節では、フジタモデルの風速場や、前節の飛来物評価法を適用した場合、実際の事例等に比べて妥当な結果となるかどうかの検証を行う。

### 6.1 フジタスケールとの比較

フジタスケールは、竜巻等の突風により発生した建築物や車両等の被害状況から、当時の竜巻風速を推定するために考案された指標である。このフジタス

ケールで示されている自動車の被災状況を表 3 に示す。

ここで、各スケールに対応する最大風速(69m/s, 92m/s, 116m/s)を用いて、フジタモデルによる自動車飛散解析を行う。その結果を表 4 に示す。

フジタモデルによる自動車飛散解析の結果は、各スケールに対応する自動車の被災状況とおおむね合致していると考えられる。なお、ランキン渦モデルを用いた場合は、F2 相当の風速(69m/s)で評価しても大きく飛散することになり、フジタスケールの定義の観点からは過度に保守的な結果となる。

表 3 フジタスケールで示されている自動車の飛散状況

フジタスケール	風速 [m/s]	自動車の被災状況
F2	50-69	cars blown off highway (自動車が道路からそれる)
F3	70-92	cars lifted off the ground (自動車が地面から浮上する)
F4	93-116	cars thrown some distances or rolled considerable distances (自動車がある距離を飛ばされる, 又は, かなりの距離を転がる)

表 4 フジタモデルによる自動車の飛散解析結果

(自動車の特性: 長さ 5.1m×幅 1.77m×高さ 1.31m, 質量 1814.4kg,  
 $C_D A/m=0.0066 \text{ m}^2/\text{kg}$ )

フジタスケールとの対応	最大水平風速 (m/s)	竜巻接線風速 (m/s)	竜巻移動速度 (m/s)	計算結果		
				最大水平速度 (m/s)	飛散距離 (m)	飛散高さ (m)
F 2	69	59	10	8.9	4.4	0.1
F 3	92	79	13	30	35	1.8
F 4	116	99	17	51	95	4.3

## 6.2 米国 Grand Gulf 原子力発電所への竜巻来襲事例

1978 年 4 月 17 日に米国のミシシッピ州にて建設中の Grand Gulf 原子力発電所に F3 の竜巻が来襲した<sup>(23)</sup>。主な被害として、建設中の冷却塔内部に設置されていたコンクリート流し込み用のクレーンが倒壊し、冷却塔の一部が破損したことが挙げられる。また、竜巻によりトレーラーが台から剥がれ移動したことや、直径 8~10 インチの木が折れた事例等も確認されており、図 28 は、竜巻による飛来物の飛散状況が定量的に分かる事例として、資材置き場のパイプの飛散状況を示したものである。なお、通過時の竜巻規模は F2 であったと考えられている。このパイプはコンクリート・石綿製で、長さは 8 フィート、直径(内径)は 8 インチであった。このパイプの飛散状況に対して、フジタモデルあるいはランキン渦モデルを風速場として用いた飛来解析を行った。その計算条件は過去の記録に基づき表 5 のとおりとする。



"Courtesy of HathiTrust" <http://babel.hathitrust.org/cgi/pt?id=mdp.39015037472209#view=1up;seq=65> <sup>(19)</sup>

図 28 Grand Gulf 原子力発電所資材置き場におけるパイプの散乱状況

被害状況	<ul style="list-style-type: none"> <li>パイプを収納した木箱（一部は二段重ね）は浮上せずに転倒し、パイプが周辺 7m～9m に散乱。</li> </ul> <p>(Pieces of pipe were scattered over the area, but none traveled more than 25-30 ft. The pipe joints are 8 in. dia x 8 ft long. <sup>(23)</sup>)</p>
------	---

表 5 Grand Gulf 原子力発電所の竜巻によるパイプ飛散の再現をする上での計算条件

竜巻条件	竜巻の最大風速	67 m/s
	最大接線風速	53.6 m/s
	移動速度	13.4 m/s
	コア半径	45.7 m
飛来物条件	直径（外径）	0.2286 m (=9 in.)
	物品高さ	0.229 m
	密度	1700 kg/m <sup>3</sup>
	飛行定数 (C <sub>D</sub> A/m)	0.0080 m <sup>2</sup> /kg
初期配置	<ul style="list-style-type: none"> <li>物体個数：51×51本を、最大接線風速半径の4倍を1辺とする正方形内(x, y=[-2R<sub>m</sub>, +2R<sub>m</sub>])に等間隔配置。</li> <li>設置高さ：1m (パイプ収納箱が2段重ねされた状況を想定)</li> </ul>	

計算結果を表6に示す。フジタモデルを風速場とした場合は、パイプがほとんど飛散せず、木箱が倒れた影響で散らばったと思われる状況とおおむね合致している。

なお、参考としてランキン渦モデルで評価した場合、飛散距離や最大水平速度に大きな違いがあり、実際の報告と比較して過度に保守的な評価結果となる。



表 6 Grand Gulf 原子力発電所のパイプの飛散計算結果

風速場モデル	地上からの 初期高さ	計算結果		
		飛散距離	飛散高さ※ <sup>2</sup>	最大水平速度
フジタモデル	1 m (地上)	1.2 m	0.0 m	4.9 m/s
ランキン渦モデル	1 m※ <sup>1</sup>	42.6 m	0.34 m	30.7 m/s
	40 m	227 m		40.9 m/s

※<sup>1</sup> 比較のため、フジタモデルと同条件とした。

※<sup>2</sup> 初期物体高さからの飛散（浮上）高さ。

### 6.3 佐呂間竜巻での車両飛散事例

2006年11月7日に北海道網走支庁佐呂間町に発生した竜巻（以下「佐呂間竜巻」という。）により、4tトラックが約40m移動したことが報告されている<sup>(24)</sup>。被災状況を図29に示す。この事例では被災時に4tトラックに乗員2名が乗車しており、4tトラックの初期位置と移動位置が分かっている（図29左上画像の②）。また、4tトラックの他に2台の自動車（図29左上画像の③と⑥）について、初期位置と被災後の移動位置が分かっている。このように竜巻被災前後で車両等の位置が明確になっている事例は極めてまれである。なお、竜巻飛来物の再現計算は、竜巻が頻発する米国でもほとんど実施されていない。この理由としては、来襲した実際の竜巻特性を精度よく計測・推測することが困難であることや自動車等の移動前後の位置が不明確な場合が多いことが挙げられる。



図 29 佐呂間竜巻（2006.11.7）による被災状況（工事事務所敷地内の車両被災）<sup>(24)</sup>

（文献(24)で示されている竜巻被害の方向を で加筆）

ここでは、フジタモデルを風速場として用いた車両（4tトラック，乗用車）の飛散評価を行い、実際の被害状況と比べて妥当な結果となるかどうかの確認

を行う。方法としては、下記の2通りとする。

- (a) 竜巻特性や飛来物（4tトラック，乗用車）の状況を現実的に設定した場合の再現解析
- (b) 今回の飛散解析手法による検証

(a) 竜巻特性や飛来物の状況を現実的に設定した場合の再現解析

(i) 4tトラックの飛散解析

再現解析の条件として、入手可能なデータ<sup>(24)(25)</sup>に基づき、合理的と考えられる竜巻特性条件と飛来物（4tトラック）の条件を表7のように設定する。初期配置の条件として、配置個数は1個とし、竜巻が遠方から近づく状況設定としている。また、風速60m/s以下では浮上しない設定となっている。その上で、竜巻との距離を合理的な範囲で変化させ、佐呂間竜巻の再現性を確認する。

車両と竜巻中心との距離を18m，20m，22mとした場合の解析結果を表8及び図30に示す。車両の軌跡は竜巻中心との相対位置関係に敏感であるが、各ケースとも飛散方向が実際の移動方向とおおむね合致しており、特に車両と竜巻中心との距離を20mとしたケース2では飛散距離もほぼ正確に再現されている。このように、フジタモデルを風速場とした飛散解析で、物体が地上に設置された状況からの飛散挙動が再現できることが確認できる。

表7 佐呂間竜巻の4tトラックの計算条件

竜巻条件	設計最大風速	92 m/s	
	最大接線風速	70 m/s	
	移動速度	22 m/s	
	コア半径	20 m	
飛来物条件	車種不明のため、三菱ふそう PA-FK71D の仕様を採用	長さ	8.1 m
		幅	2.24 m
		高さ	2.5 m
		重量	4000 kg
	飛行定数 ( $C_D A / m$ )	0.0056 m <sup>2</sup> /kg	
初期配置	<ul style="list-style-type: none"> <li>・物体個数1個</li> <li>・竜巻は遠方から物体に近づくが、風速60m/s以下では浮上しない</li> <li>・地上からの初期高さ0m</li> </ul>		

表8 佐呂間竜巻での4tトラックの飛散計算結果

解析ケース	車両と竜巻中心との距離	計算結果（フジタモデル）		
		飛散距離	飛散高さ	最大水平速度
1	22 m	45.4 m	2.8 m	25.8 m/s
2	20 m	35.5 m	2.3 m	22.2 m/s
3	18 m	25.9 m	1.7 m	18.8 m/s

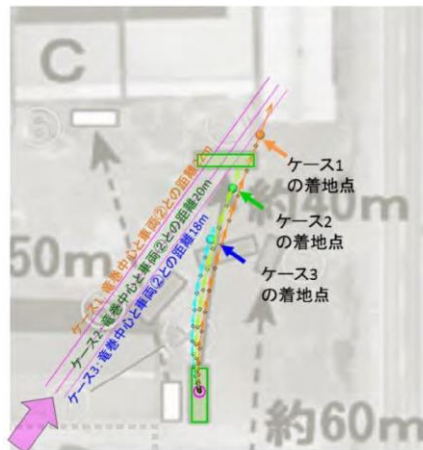


図 30 フジタモデルによるトラック飛散の再現解析結果

(ii) 乗用車の飛散解析

白い乗用車（図 29 の⑥）の被災事例を対象として，物体を 1 点初期配置した条件で最大水平速度等を計算する。

白い乗用車の計算条件について，表 9 に示す。

表 9 佐呂間竜巻の白い乗用車の計算条件

竜巻条件	表 7 と同様	
飛来物条件	長さ <sup>※1</sup>	4.4 m
	幅 <sup>※1</sup>	1.7 m
	高さ <sup>※1</sup>	1.5 m
	飛行定数 ( $C_D A / m$ )	$0.0097 \text{ m}^2 / \text{kg}$
初期配置等	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 物体個数：1 台</li> <li>・ 地上からの初期高さ：0 m（地上）</li> <li>・ 「竜巻は遠方から物体に近づくが，風速 60m/s 以下では浮上しない」ことを条件として付加</li> </ul>	

※1 車種不明のため，トヨタカローラを仮定。

白い乗用車と竜巻中心との距離を，18m，20m，22m とした場合の解析結果を表 10 及び図 31 に示す。飛散距離についてはケース 1 でおおむね合致している。

飛散方向については，飛び出し方向はおおむね合致しているものの，最終的な着地点には多少のずれが生じている。これは乗用車（白）が建物に近接して駐車していたため，この建物の倒壊の影響を受けて飛散方向のずれが生じたものと推定される。

なお，赤い乗用車（図 29 の③）について評価した場合は，竜巻中心との距離が大きいため飛散しない解析結果となる。ただし，実際には，赤い乗用車は全

壊・飛散したプレハブ建物（軽量鉄骨造2階建て、図29のA）の直ぐ下流側に駐車しており、その瓦礫の影響を受けて一緒に移動したものと考えられる。

表10 佐呂間竜巻での白い乗用車の飛散計算結果

解析 ケース	白い乗用車と竜巻 中心との距離	計算結果(フジタモデル)		
		飛散距離	飛散高さ	最大水平速度
1	22m	51.9 m	3.6m	28.9 m/s
2	20m	43.5 m	3.4m	24.7 m/s
3	18m	34.7 m	2.9m	21.1 m/s

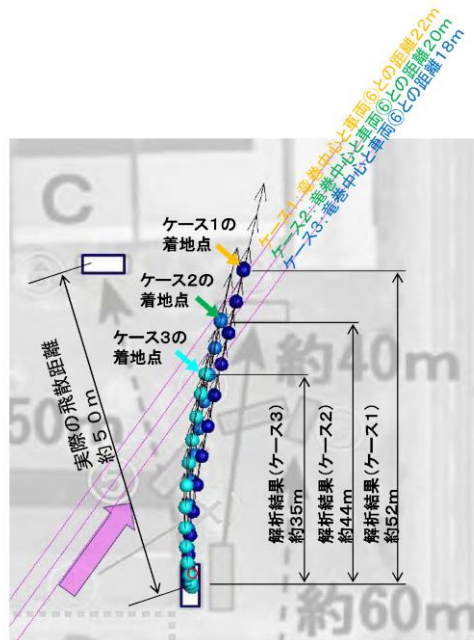


図31 フジタモデルによる白い乗用車飛散の再現解析結果

(iii) 多点配置等を考慮した場合の竜巻評価の影響

多点配置等を考慮した場合の飛散解析手法を、前述の佐呂間竜巻における4tトラックの被災事例に適用し、佐呂間竜巻での実際の被災状況（移動距離等）の結果を比較した。

多点配置等を考慮した場合の飛散解析手法では、多数配置した物体それぞれがとる最大水平速度のうち、最も大きな値を設計値として用いる。そこで、物体個数は51×51個とし、竜巻半径の4倍を一辺とする正方形内に等間隔で地面レベルに物体を配置した。計算条件を表11に示す。

図32(a)に0.1s毎の物体の軌跡（水平移動距離と飛散高さの関係）を、図32(b)に水平移動距離と物体の水平速度の関係を示す。これらの図から、物体の最大水

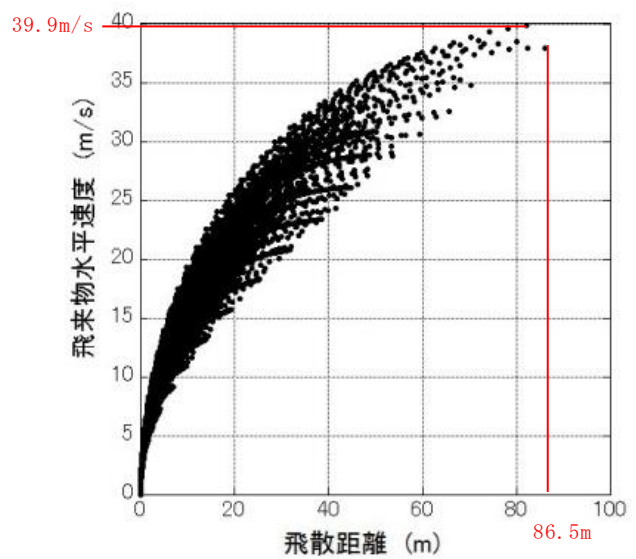
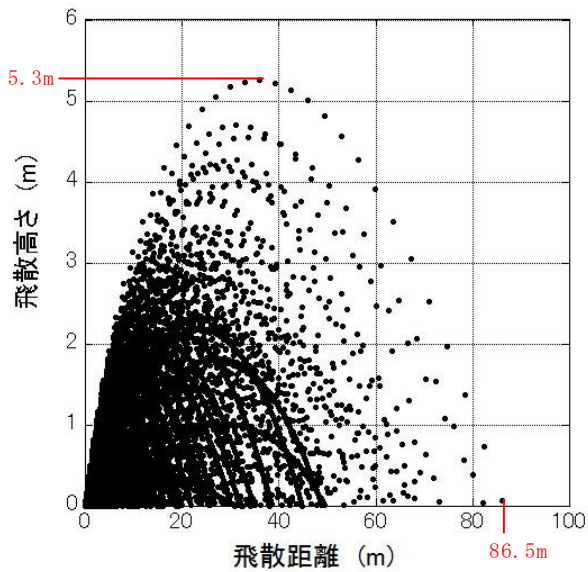
平速度は 39.9 m/s，最大飛散高さは 5.3 m，最大飛散距離は 86.5 m となっている。実際の被災状況と多点配置等を考慮した場合の飛散解析手法による解析結果の比較を表 12 に示す。解析結果は佐呂間竜巻でのトラックの被災状況に対して保守性があることが確認できる。

表 11 多点配置時の計算条件

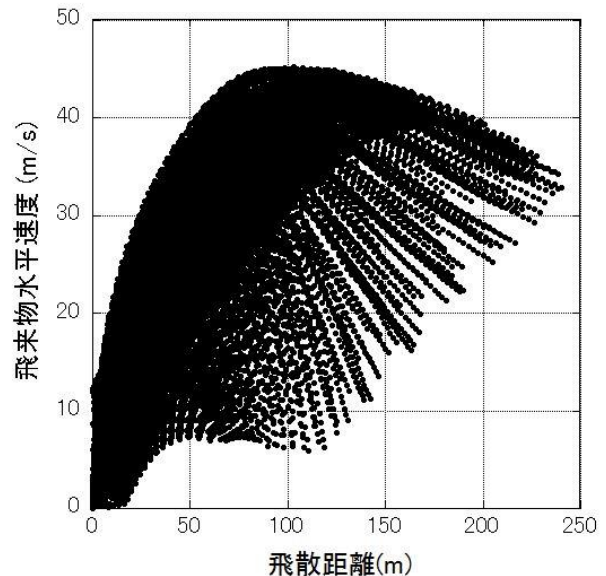
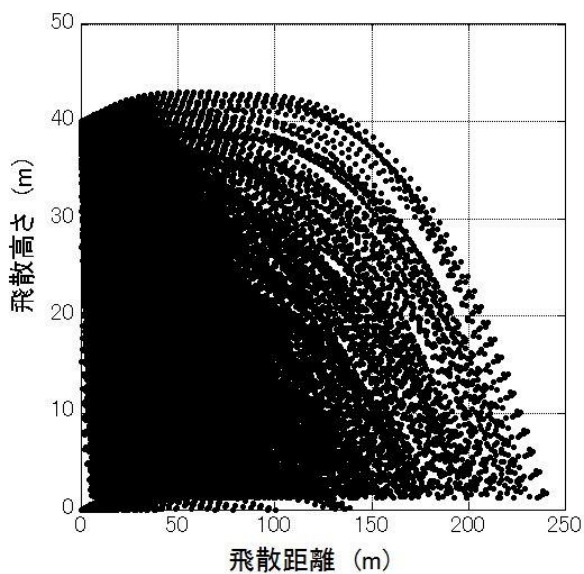
竜巻条件	表 7 と同様
飛来物条件	表 7 と同様
初期配置等	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 物体個数：51×51 台を，最大接線風速半径の 4 倍を 1 辺とする正方形内 (x, y=[-2Rm, +2Rm]) に等間隔配置。</li> <li>・ 地上からの初期高さ：0m (地上)</li> </ul>

表 12 実際の被災状況と多点配置等を考慮した場合の飛散解析手法の結果の比較

	飛散距離	飛散高さ	最大水平速度
計算結果 (TONBOS)	86.5 m	5.3 m	39.9 m/s (約 144 km/hr)
実際の被災状況	約 40 m	トラックの運転席に乗車していた乗員 2 名が幸いにも存命で救出され，搬送先の病院で聞き取り調査に応じており <sup>(24)</sup> ，被災したトラックが地面から 5.3 m 以上の高所から落下したとは考えにくい。	被災後もほぼ元の外形を留めていることが示されており <sup>(24)</sup> ，実際の飛来物速度は本解析で得られた最大飛来物速度(約 144 km/hr)を遙かに下回るものと推察できる。



(a) 物体の軌跡（水平移動距離と飛散高さの関係） (b) 水平移動距離と水平速度の関係  
（フジタモデル，地上）



(a) 物体の軌跡（水平移動距離と飛散高さの関係） (b) 水平移動距離と水平速度の関係  
（参考：ランキン渦モデル，地上 40 m）

図 32 多点配置等を考慮した場合の飛散解析手法による解析結果

(b) 今回の飛散解析手法による検証<sup>(26)</sup>

ここでは、今回の飛散解析手法で、前述の佐呂間竜巻における 4t トラック及び白い乗用車の被災事例を評価し、佐呂間竜巻での実際の被災状況（移動距離等）との結果を比較する。

(i) 4tトラックの飛散解析

計算条件について表 13 に示す。竜巻条件としては、設計竜巻の最大風速を 92 m/s とし、その他の特性量については、ガイドに例示されている方法に従い、移動速度  $V_t$  を 14m/s (最大風速の 15%) , 竜巻コア半径  $R_m$  を 30m とする。

表 13 島根原子力発電所に適用する飛来物評価法の計算条件

竜巻条件	設計竜巻風速	92 m/s
	最大接線風速	78 m/s
	移動速度	14 m/s
	コア半径	30 m
飛来物条件	表 7 と同様	
初期配置	・ 物体個数 : 51×51 台を、最大接線風速半径の 4 倍を 1 辺とする正方形内 ( $x, y = [-2R_m, +2R_m]$ ) に等間隔配置。 ・ 地上からの初期高さ : 0 m (地上)	

表 14 に実際の被災状況と、今回の飛散解析手法による結果の比較を示す。また、図 33 に被災後の 4tトラックの状況を示す。

フジタモデルによる飛散評価結果として、4tトラックの最大飛来物速度は 36 m/s, 最大飛散高さは 3.6m, 最大飛散距離は 63.4m となる。

実際の 4tトラック飛散距離は約 40m であり、フジタモデルによる飛散距離の評価結果はこれを上回る。また、飛散高さや最大水平速度については、直接の比較はできないものの、4tトラックの乗員 2 名が存命であったこと、被災後の 4tトラックがほぼ元の外形をとどめていること等から、今回の飛散解析手法で評価をした場合でも、実際の被災状況と比較して妥当な結果となるものと考えられる。

なお、参考として同様の検証をランキン渦モデルでも実施しており、ランキン渦モデルによる評価では、最大飛散高さ、最大飛散距離ともに実際の被災状況と比較して非常に保守性が大きい結果となっていることが分かる。

表 14 実際の被災状況と今回の飛散解析手法による評価結果の比較（4t トラックの場合）

風速場モデル	飛散距離	飛散高さ※ <sup>2</sup>	最大水平速度
フジタモデル (地上)	63.4 m	3.6 m	36.0 m/s (約 130 km/hr)
ランキン渦モデル (地上※ <sup>1</sup> )	193.7 m	11.7 m	43.9 m/s
ランキン渦モデル (40 m)	254.9 m	11.7 m	43.9 m/s
実際の被災状況	約 40 m	トラックの運転席に乗車していた乗員 2 名が幸いにも存命で救出され、搬送先の病院で聞き取り調査に応じており <sup>(24)</sup> 、被災したトラックが地面から 3.6 m 以上の高所から落下したとは考えにくい。	被災後もほぼ元の外形を留めていることが示されており <sup>(24)</sup> 、実際の飛来物速度は本解析で得られた最大飛来物速度（約 130 km/hr）を遙かに下回るものと推察できる。

※1: ランキン渦モデルでは地上付近の風速場を模擬できていないが、フジタモデルの計算結果（飛散距離）と比較をするため、フジタモデルと同条件とする。

※2: 初期物体高さからの飛散高さ



図 33 竜巻による被災後の 4t トラックの様子<sup>(24) (25)</sup>

(ii) 乗用車（白）の飛散解析

4t トラックの場合と同様に、今回の飛散解析手法で白い乗用車の飛散解析を行った場合の結果を表 15 に示す。



表 15 実際の被災状況と今回の飛散解析手法による評価結果の比較（白い乗用車の場合）

風速場モデル	飛散距離	飛散高さ <sup>※2</sup>	最大水平速度
フジタモデル (地上)	82.3m	4.2m	44.1m/s
ランキン渦モデル (地上 <sup>※1</sup> )	269.6m	39.4m	49.6m/s
ランキン渦モデル (40m)	305.8m	39.4m	49.6m/s
実際の被災状況	約 50m	—	—

※1：ランキン渦モデルでは地上付近の風速場を模擬できていないが、フジタモデルの計算結果（飛散距離）と比較をするため、フジタモデルと同条件とする。

※2：初期物体高さからの飛散高さ。

## 7. 飛散以外の挙動に対する考慮

前節までで、飛来物の竜巻による挙動のうち、飛散に関する評価手法について説明をした。実際の竜巻による飛来物の挙動としては、飛散だけではなく、横滑りや転がりによる挙動が発生することも考えられるため、本節では、これらの飛来物の挙動について、下記の2点に分けて考察する。

(a) 飛散する物体における横滑りや転がりの影響

(b) 飛散しない物体における横滑りや転がりの影響

### (a) 飛散する物体における横滑りや転がりの影響

「5.2 竜巻が物体に与える速度に関する不確定性の考慮」に記載のとおり、本検討においては、竜巻を直上に発生させる方法を採用していることから、実際には横滑りや転がりを伴い移動する物体も強制的に高速域に配置され、浮上をして飛散することになる。

この場合、空中では地面の摩擦力を受けないため、実際に比べて大きな水平速度が得られることになる。

また、浮上後に地面に衝突する場合は、運動エネルギーの大部分は物体や地面の変形・破損等で消費されることから、落下後の横滑りや転がりによる移動距離は実際には小さいものと考えられる。

「6.3 佐呂間竜巻での車両飛散事例」における飛散した4tトラックや乗用車は、実際には飛散だけではなく、横滑りや転がりを伴ったものと考えられるが、飛散解析より得られた飛散距離や最大水平速度は、実際の被災状況よりも保守的な評価となっていることから、飛散過程における不確実性を裕度として包含している。

## (b) 飛散しない物体における横滑りや転がりの影響

飛散しない物体においても、竜巻による風荷重が静止摩擦力より大きい場合には、横滑りをする。また、横滑りをしない場合でも、風荷重によるモーメントが自重のモーメントよりも大きい場合には転がることになる。このように、竜巻により横滑りや転がる場合には、地面での摩擦力の影響を受けながら移動することから、移動距離や水平速度は十分に小さいものと考えられる。

また、物体と外部事象防護対象施設の間に、障害物となるフェンス等がある場合には、横滑りや転がった物体が外部事象防護対象施設に到達することは阻止される。

以上より、飛散しない物体が横滑りや転がりにより、障害物の影響を受けず、外部事象防護対象施設と衝突することが想定される場合については、横滑りや転がった物体の影響が設計飛来物の影響に包含されることを確認し、包含されない場合には固縛等の措置を実施する。固縛等の措置に当たっては、フジタモデルの風速場より求まる風荷重に、地面での摩擦力を適切に考慮した上で、設計用荷重を設定する。

## 8. まとめ

フジタモデルは、米国 NRC による要望で実際の竜巻観測記録をもとに考案された風速場モデルであり、米国 DOE の重要施設に対する設計基準の作成の際にも用いられている。フジタモデルは、他のモデルではできなかった地上からの物体の浮上を現実的に評価することができる点が大きなメリットである。

これは、「6.3 佐呂間竜巻での車両飛散事例」の「(a) 竜巻特性や飛来物の状況を現実的に設定した場合の再現解析」において、フジタモデルを風速場とした飛散解析結果が実際の飛散状況とおおむね合致していることから、確認することができる。

また、フジタモデルにより算出される風速 ( $V_w$ ) は、飛来物の飛散評価のインプットとして用いるものであり、設計竜巻の最大風速の算出に当たっては保守性を確保した上で、「5. 飛来物評価における不確定性の考慮」のとおり、竜巻を多数の物体の直上に瞬時に発生させて物体が最大風速を受けるような初期条件を用いる等の評価手法により、不確実性も含めて飛来物速度等を保守的に評価できるようにしている。

これにより、「6.3 佐呂間竜巻での車両飛散事例」の「(b) 今回の飛散解析手法による検証」では、本評価手法を用いることでフジタモデルにおいても実際の飛散状況に対して、保守性を有した妥当な結果となることを確認している。

地上からの浮上・飛散評価を行うことのメリットは、発電所敷地内に数多く存在する物の中から、竜巻による飛来物化の影響度合いを、浮上の有無の観点を含め、より正確に把握できることである。竜巻飛来物の影響（浮上の有無、飛散高さ、飛散距離、最大速度等）を正確に捉えることにより、飛来物の発生防止対策や評価対象施設の防護対策の範囲や強度について、適切な保守性を確

保した上で実効性の高い竜巻防護対策を実施することが可能となると考えられる。


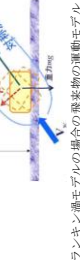
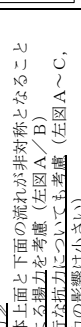
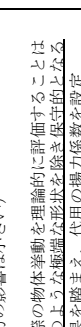
評価全体として一定の保守性を確保しつつ、適切な竜巻対策によりプラント全体の安全性を向上させるため、当社の竜巻影響評価については、フジタモデルを適用することとする。

## 9. 参考文献

- (1) 原子力規制委員会, 2013: 原子力発電所の竜巻影響評価ガイドの制定について, 原規技発第 13061911 号, 平成 25 年 6 月 19 日制定, 平成 26 年 9 月一部改正.
- (2) U. S. NUCLEAR REGULATORY COMMISSION: REGULATORY GUIDE 1.76, 2007: Design-Basis Tornado and Tornado Missiles for Nuclear Power Plant, Revision 1.
- (3) Simiu, E. and Cordes, M., Tornado-Borne Missile Speeds, NBSIR 76-1050, 1976.
- (4) 東京工芸大学 (2011) :平成 21~22 年度原子力安全基盤調査研究(平成 22 年度)竜巻による原子力施設への影響に関する調査研究, 独立行政法人原子力安全基盤機構.
- (5) Fujita, T. T. (1978) Workbook of tornadoes and high winds for engineering applications. SMRP Research Paper 165, Department of Geophysical Sciences, University of Chicago, 142pp.
- (6) Karen A. Kosiba and Joshua Wurman, 2013: The Three-Dimensional Structure and Evolution of a Tornado Boundary Layer. Wea. Forecasting, 28, 1552-1561.
- (7) Maruyama, T. (2011) Simulation of flying debris using a numerically generated tornado-like vortex. J. Wind Eng. Ind. Aerodyn., 99, 249-256.
- (8) U. S. Department of Energy, Natural Phenomena Hazards Design and Evaluation Criteria for Department of Energy Facilities, DOE-STD-1020-2002, 2002.  
(<https://www.standards.doe.gov/standards-documents/1000/1020-astd-2002/@images/file>)
- (9) Malaeb, D. A., Simulation of tornado-generated missiles. M.S. thesis, Texas Tech University, 1980.
- (10) P.-H. Luan, Estimates of Missile Speeds in Tornadoes, M.S. thesis, Texas Tech University, 1987.
- (11) J. R. McDonald, Rationale for Wind-Borne Missile Criteria for DOE facilities, UCRL-CR-135687, Lawrence Livermore National Laboratory, 1999. (<https://e-reports-ext.llnl.gov/pdf/236459.pdf>)
- (12) McDonald, J. R., T. Theodore Fujita: His contribution to tornado knowledge through damage documentation and the Fujita scale. Bull. Amer. Meteor. Soc., 82, pp.63-72, 2001.
- (13) NUREG-1827 Safety Evaluation Report for the National Enrichment Facility in Lea County, New Mexico (Docket No. 70-3103)
- (14) 江口讓, 杉本聡一郎, 服部康男, 平口博丸, 竜巻による物体の浮上・飛来解析コード TONBOS の開発, 電力中央研究所 研究報告 N14002, 2014.

- (15) 日本鋼構造協会, 構造物の耐風工学, p82
- (16) EPRI, Wind field and trajectory models for tornado-propelled objects, ReportNP-748, 1978.
- (17) 林建二郎・大井邦昭・前田稔・斉藤良, 開水路中に水没設置された立方体および棧粗度の流体力, 土木学会論文集 B1(水工学) Vol. 67, No. 4, I\_1141-I\_1146, 2011.
- (18) 松宮央登, 中岡宏一, 西原 崇, 木村吉郎: 太陽光発電パネルに作用する空気力の地面効果に関する風洞実験, 構造工学論文集, Vol. 60A, pp. 446-454, 2014.
- (19) 山本晃一, 林建二郎, 関根正人, 藤田光一, 田村正秀, 西村晋, 浜口憲一郎, 護岸ブロックの抗力・揚力係数、および相当粗度の計測方法について, 水工学論文集, 第 44 巻, pp1053~1058, 2000.
- (20) 江口 譲, 西原 崇, 水流動試験による電線の風荷重低減化のメカニズム解明, 電力中央研究所 研究報告 U96050, 1997.
- (21) M. R. Ahmed, S. D. Sharma, An investigation on the aerodynamics of a symmetrical airfoil in ground effect, Experimental Thermal and Fluid Science, 29, pp. 633-647, 2005.
- (22) Lei, C., Cheng, L. and Kavanagh, K., Re-examination of the effect of a plane boundary on force and vortex shedding of a circular cylinder, J. Wind Eng. Ind. Aerodyn., Vol. 80, pp. 263-286, 1999.
- (23) Fujita, T. T., and J. R. McDonald, Tornado damage at the Grand Gulf, Mississippi nuclear power plant site: Aerial and ground surveys, U. S. Nuclear Regulatory Commission NUREG/CR-0383, 1978.
- (24) 札幌管区气象台: 平成 18 年 11 月 7 日から 9 日に北海道 (佐呂間町他) で発生した竜巻等の突風. 災害時気象調査報告, 災害時自然現象報告書, 2006 年第 1 号, 2006.  
(<http://www.jma-net.go.jp/sapporo/tenki/yohou/saigai/saroma/saroma.html> にて閲覧可能。)
- (25) 奥田泰雄, 喜々津仁密, 村上知徳, 2006 年佐呂間町竜巻 被害調査報告. 建築研究所災害調査, 49, 2006.  
(<http://www.kenken.go.jp/japanese/contents/activities/other/other.html>)
- (26) 江口譲, 杉本聡一郎, 服部康男, 平口博丸, 原子力発電所での竜巻飛来物速度の合理的評価法 (Fujita の竜巻モデルを用いた数値解析コードの妥当性確認), 日本機械学会論文集, Vol. 81, No. 823, 2015.

「フジタモデル」及び「ランキン渦モデル」を用いた際の飛来物評価手法」の比較

風速場モデル	フジタモデル (及び同モデルを用いた際の飛来物評価手法)	ランキン渦モデル (及び同モデルを用いた際の飛来物評価手法)																								
<p>各風速場モデルの概要</p> 	<p>・ Fujitaにより実観測に基づき考察された竜巻風速場モデルであり、実際に近い風速場構造を有する</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・ 半径方向に (内部コア, 外部コア, 最外領域) の3つの領域で構成され、外部コアに上昇風速を有する</li> <li>・ 接線風速や上昇風速に高さ依存性がある</li> <li>・ 米国D06重要施設設計の基準において、竜巻飛来物速度、飛散高さの設計に使用</li> </ul>	<p>・ 簡易な式で上空での水平方向の風速場を表現</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・ 上昇流は全領域に存在</li> <li>・ 接線風速や上昇風速に高さ依存性はなく、地面から吹き出しが生じる流れとなっている</li> <li>・ (飛散評価を行う場合、地上からの物体の浮上・飛散挙動を表現して評価するため)、地上の物体であっても空中浮遊状態を仮定して評価することになる</li> <li>・ 米国NRC Regulatory guide 1.76にて採用</li> </ul>																								
メリット	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 地面に置かれた物体へ影響を与え、表現できているモデルであり、防護対策や固縛対策の範囲や強度について、実効性の高い対策とすることが可能</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 竜巻が全領域に存在する (地面からも吹き出しがある) ため、実現象から乖離しており、地上からの物体の浮上・飛散挙動を表現できない</li> <li>→ 地上における構造物に対し、過度に保守的な防護対策や固縛対策が必要となる。</li> <li>(例えば、S車を固縛することで、機動性が損なわれる)</li> </ul>																								
デメリット	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 地表面付近の風速場に不確定性があるため、飛来物評価において不確定性の考慮が必要。</li> </ul>	<p>・ 風速場に高さ依存性はなく、上昇流が全領域に存在する (地面からも吹き出しがある) ため、実現象から乖離しており、地上からの物体の浮上・飛散挙動を表現できない</p>																								
<p>主なパラメータ (設計・竜巻の最大風速92m/sの場合)</p>	<table border="1"> <tr><td>竜巻の移動速度 <math>V_T</math></td><td>14 (m/s)</td></tr> <tr><td>最大接線風速 <math>V_{Rm}</math></td><td>78 (m/s)</td></tr> <tr><td>最大接線風速半径 <math>R_m</math></td><td>30 (m)</td></tr> <tr><td>最大気圧低下率 <math>\Delta P_{max}</math></td><td>64 (hPa)</td></tr> <tr><td>最大気圧低下率 (dp/dt)<math>_{max}</math></td><td>42 (hPa/s)</td></tr> <tr><td>内筒コア半径と外部コア半径の比 <math>v</math></td><td>0.3</td></tr> <tr><td>流入層高さ <math>H_i</math></td><td>15 (m)</td></tr> </table>	竜巻の移動速度 $V_T$	14 (m/s)	最大接線風速 $V_{Rm}$	78 (m/s)	最大接線風速半径 $R_m$	30 (m)	最大気圧低下率 $\Delta P_{max}$	64 (hPa)	最大気圧低下率 (dp/dt) $_{max}$	42 (hPa/s)	内筒コア半径と外部コア半径の比 $v$	0.3	流入層高さ $H_i$	15 (m)	<table border="1"> <tr><td>竜巻の移動速度 <math>V_T</math></td><td>14 (m/s)</td></tr> <tr><td>最大接線風速 <math>V_{Rm}</math></td><td>78 (m/s)</td></tr> <tr><td>最大接線風速半径 <math>R_m</math></td><td>30 (m)</td></tr> <tr><td>最大気圧低下率 <math>\Delta P_{max}</math></td><td>75 (hPa)</td></tr> <tr><td>最大気圧低下率 (dp/dt)<math>_{max}</math></td><td>35 (hPa/s)</td></tr> </table> <p>評価ガイドの値や式より算出</p>	竜巻の移動速度 $V_T$	14 (m/s)	最大接線風速 $V_{Rm}$	78 (m/s)	最大接線風速半径 $R_m$	30 (m)	最大気圧低下率 $\Delta P_{max}$	75 (hPa)	最大気圧低下率 (dp/dt) $_{max}$	35 (hPa/s)
竜巻の移動速度 $V_T$	14 (m/s)																									
最大接線風速 $V_{Rm}$	78 (m/s)																									
最大接線風速半径 $R_m$	30 (m)																									
最大気圧低下率 $\Delta P_{max}$	64 (hPa)																									
最大気圧低下率 (dp/dt) $_{max}$	42 (hPa/s)																									
内筒コア半径と外部コア半径の比 $v$	0.3																									
流入層高さ $H_i$	15 (m)																									
竜巻の移動速度 $V_T$	14 (m/s)																									
最大接線風速 $V_{Rm}$	78 (m/s)																									
最大接線風速半径 $R_m$	30 (m)																									
最大気圧低下率 $\Delta P_{max}$	75 (hPa)																									
最大気圧低下率 (dp/dt) $_{max}$	35 (hPa/s)																									
<p>物体の浮上・飛来モデル</p>	<p>《物体に働く揚力・抗力》</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・ 地面の存在により物体上面と下面の流れが非対称となることで生じる地面効果による揚力を考慮 (左図A/B)</li> <li>・ 流れの速度方向に平行な抗力についても考慮 (左図A~C、但し地面付近では抗力の影響は小さい)</li> </ul> <p>《揚力係数》</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・ 地面から浮き上がる際の物体挙動を理論的に評価することは困難であるため、覆のような単純な形状を除き保守的となるよう、風洞実験の結果を踏まえ、代用の揚力係数を設定</li> <li>・ 揚力係数は風の受け方や高さに依存することを踏まえ、流体レイノルズ数や高度を変化させた場合でも、代用揚力係数が実測値より保守的になっていることを確認</li> </ul>   	<p>《揚力係数》</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・ 物体に働く揚力・抗力</li> <li>・ 地面より非現実的な風の噴出が発生し、地面効果は整理しにくい</li> <li>・ 流れの速度方向に平均的な抗力を考慮 (左図D/E)</li> <li>・ 揚力係数</li> <li>・ 揚力効果による揚力は考慮していないことから、揚力係数の設定はしていない</li> </ul>  																								
飛来物評価手法	<p>・ 竜巻に対する物体の場所依存性を考慮し、風速場における物体の中から、最大の飛来物速度や飛来距離を設定</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・ 実際に竜巻が遠方から近づくと場合に、低い風速に曝され飛来することになるが、物体を強制的に高速域に配置し、物体が臨時に最大風速を受けるよう設定</li> <li>→ 飛来物発生防止対策においては、物体の地上からの初期速度を0m/sとした場合の飛散解析を実施し、地表面に設置された物体の飛散解析結果を用いたエリア設定の妥当性を確認</li> </ul>	<p>・ 竜巻に対する物体の場所依存性を考慮し、風速場における物体の中から、最大の飛来物速度や飛来距離を設定</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・ 実際に竜巻が遠方から近づくと場合に、低い風速に曝され飛来することになるが、物体を強制的に高速域に配置し、物体が臨時に最大風速を受けるよう設定</li> <li>→ 設計・飛来物の設定においては、任意の地上からの初期速度とにおける飛散解析結果を右記するよう最大水平速度を設定</li> <li>→ 飛来物発生防止対策においては、物体の地上からの初期速度を0m/sとした場合の飛散解析を実施し、地表面に設置された物体の飛散解析結果を用いたエリア設定の妥当性を確認</li> </ul>																								

## フジタモデルのパラメータ設定等について

## 1. 適用するフジタモデルについて

フジタモデルのパラメータ設定については、フジタワークブック（文献(1)）において、単一渦型の DBT-77 モデル（文献(1)第 6 章）と複数の小さな吸込渦（suction vortices）を有する多重渦型の DBT-78 モデル（文献(1)第 7 章）について記載されている（図 1 参照）。

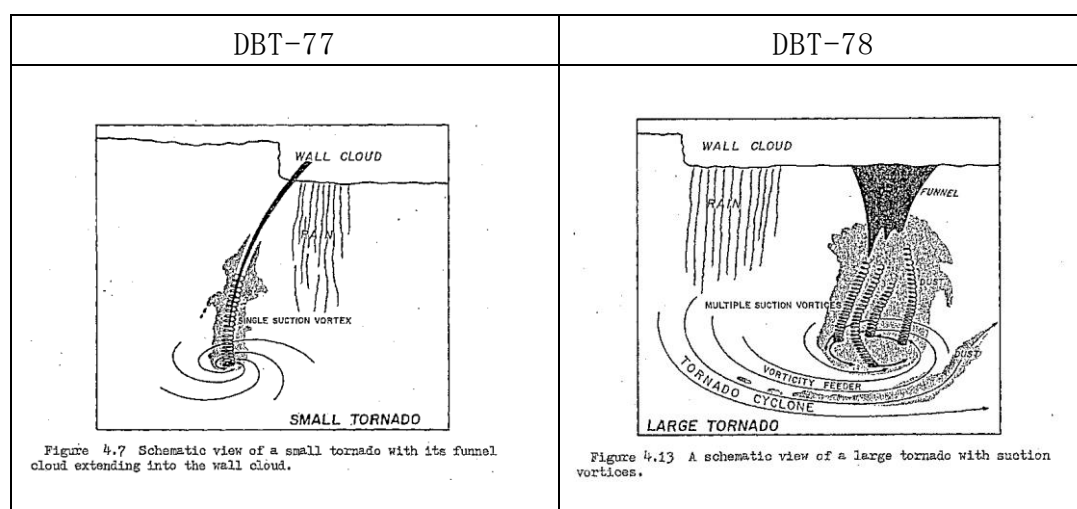


図 1 フジタモデル「DBT-77」と「DBT-78」のモデル図（文献(1)）

米国エネルギー省の管理するエネルギー施設（DOE 施設）に対する竜巻飛来物の検証を行ったローレンス・リバモア国立研究所報告書（文献(2)）においては、「多重渦型の DBT-78 モデルで考慮されている吸込渦はすぐに減衰するので、大多数の専門家は竜巻被災の重要因子ではないと考えている」と述べており、単一渦型のフジタモデル DBT-77 を飛来物評価の竜巻風速場として選定している。以上のことから、今回の竜巻影響評価においても DBT-77 モデルを用いている。（なお、文献(1)において、DBT-78 モデルは、最大風速や発生率がモデル化されているのみであり、飛散解析に必要となる風速場に関する数式が明確となっていない。）

また、米国 REG 1.76（文献(3)）は DBT-78 モデルの竜巻半径を採用した場合は、改訂前（2007 年以前）から米国 REG 1.76 で採用されている竜巻半径（45.7m）よりも大きな半径となり、圧力の時間変化率は半径に反比例して大きくなるため、改訂前の半径（45.7m）のままするとの記述があるが、今回の竜巻影響評価では外部コア半径を 30m としているため、米国 REG1.76 よりも圧力の時間変化率を保守的に評価している。

最大風速が同じ場合、DBT-78 モデルは DBT-77 モデルに比べ竜巻半径は大きくなるが、高速域の大きさは DBT-77 モデルの方が DBT-78 モデルに比べ大きくなる

ため物体は加速されやすく、飛散解析においては保守的であることから、当社の竜巻影響評価においては、単一渦型の DBT-77 モデルを適用している。

## 2. 入力パラメータの設定について

文献(1)において、単一渦型の DBT-77 の入力パラメータは、最大接線風速  $V_{Rm}$ 、外部コア半径  $R_m$  及び移動速度  $V_T$  の3つであり、これらの入力値の制約に係る記載はなく、竜巻影響評価ガイドに基づき、 $V_{Rm}=85\text{m/s}$ 、 $R_m=30\text{m}$ 、 $V_T=15\text{m/s}$  を設定している。

竜巻影響評価ガイドにおいては、ランキン渦モデルを仮定して、観測された被害幅から最大接線風速半径  $R_m$  を推定している。竜巻によって被害が生じる風速を  $V_0$  とした場合、 $R_m$  を超えた範囲では、風速  $V_0=V_{Rm} \cdot (R_m/r_0)$  と表せるため、 $V_0$  と、被害幅  $r_0$ 、及び最大接線風速  $V_{Rm}$  が分かれば最大接線風速半径  $R_m$  を得ることができる。(図2)

フジタモデルでは、ランキン渦モデルと異なり高さによって風速が変化するが、ある任意の高さの風速分布はランキン渦モデルと同様となる(図2と同じ)ため、ランキン渦を仮定して設定した外部コア半径を用いても問題ないとする。

例えば、東京工芸大報告書<sup>(4)</sup>p.163の仮定2より、F3あるいはF3に近いF2竜巻(最大風速  $V_m=70\text{m/s}$ )の被害幅250mを基にランキン渦モデルを仮定する場合、竜巻半径の外側では  $V=V_m R_m/r$  が成立するので、 $V$  に被害をもたらす風速である17m/sを、 $r$  に被害幅(250m)に接する円の半径である125mを代入すると  $R_m=30\text{m}$  を得る。

一方、フジタモデルの水平風速  $V$  は接線風速と径方向風速を合成したものであるので、外部コア半径の外側では水平風速  $V$  は以下で与えられる。

$$V = \sqrt{V_\theta^2 + V_r^2}$$

$$= F_r(r) F_h(z) V_m \sqrt{1 + \tan^2 \alpha_0}$$

$$\text{ここで、} \quad F_r(r) = \frac{R_m}{r}, \quad F_h(z) = \begin{cases} z^{k_0} & (z < 1) \\ \exp(-k(z-1)) & (z \geq 1) \end{cases}$$

$$\tan \alpha_0 = \begin{cases} -A(1-z^{1.5}) & (z < 1) \\ B\{1-\exp(-k(z-1))\} & (z \geq 1) \end{cases}$$

フジタモデルでは、ランキン渦モデルと異なり高さによって風速が変化するが、外部コア半径の内側では  $r$  に比例して風速が大きくなり、外部コア半径の外側では  $r$  に反比例して小さくなる点ではランキン渦モデルと同様であり、竜巻半径と風速の関係は図2の通りとなる。

また、接線風速  $V$  が最大となる流入層の上端 ( $z=1$ ) では、 $F_h(z)=1$ 、 $\tan \alpha_0=0$  となり、竜巻外部コア半径の外側ではランキン渦モデルと同様に  $V=V_m R_m/r$  が近似



的に成立する。従って、ランキン渦と同じ竜巻半径を用いることができると考えられる。

流入層高さ  $H_i$  は、外部コア半径  $R_m=30\text{m}$  の場合、 $H_i=15\text{m}$  ( $i=0.501$ ) となり、文献(4)の図 2.2.3.10 における流入層高さと竜巻半径の比 ( $i=0.4$  程度) や、Kosiba<sup>(5)</sup>により示されている流入層高さ ( $H_i=10\sim 14\text{m}$  以下) と概ね同じである。

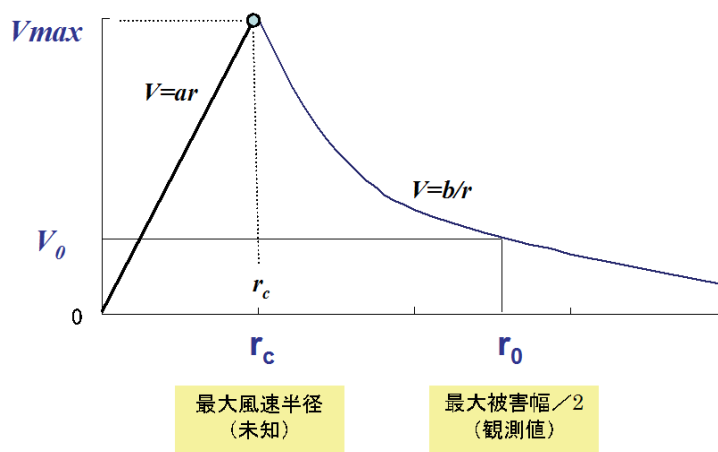


図2 ランキン渦の風速分布と竜巻スケールの関係

文献(1)Fujita, T. T., Workbook of tornadoes and high winds for engineering applications (1978), U. Chicago.

文献(2)Rationale for Wind-Borne Missile Criteria for DOE facilities, UCRL-CR-135687, Lawrence Livermore National Laboratory, 1999

文献(3)U. S. Nuclear Regulatory Commission, Design-basis tornado and tornado missiles for nuclear power plants, Regulatory Guide 1.76, Revision 1 (2007).

文献(4) 東京工芸大学,平成 21~22 年度原子力安全基盤調査研究(平成 22 年度) 竜巻による原子力施設への影響に関する調査研究, 独立行政法人原子力安全基盤機構委託研究 成果報告書, 2011.

文献(5) Karen A. Kosiba Joshua Wurman The three-dimensional structure and evolution of a tornado boundary layer

竜巻影響評価と竜巻モデルの関係

ガイド記載内容

設計竜巻の最大接線風速が生じる位置での半径( $R_m$ )は日本における竜巻の観測記録をもとに提案された竜巻モデルに準拠して以下の値を用いる。  
 $R_m = 30(m)$

設計竜巻の最大気圧低下量( $\Delta P_{max}$ )は、米国 NRC の基準類を参考としてランキン渦モデルによる風速分布に基づいて、最大気圧低下量( $\Delta P_{max}$ )を設定する。  
 $\Delta P_{max} = \rho \cdot V_{Rm}^2$

設計竜巻の最大気圧低下率( $(dp/dt)_{max}$ )は、米国 NRC の基準類を参考としてランキン渦モデルによる風速分布に基づいて、最大気圧低下率( $(dp/dt)_{max}$ )を設定する。  
 $(dp/dt)_{max} = (V_i / R_m) \cdot \Delta P_{max}$

設計飛来物に設定する速度は、設計竜巻によって飛来した際の最大速度とする。設計飛来物の最大水平速度( $V_{Hmax}$ )は、非常な乱流場を数値的に解析できる計算手法等による計算結果等に基づいて設定することを基本とする。ただし、安全側の設計となるように、設計飛来物の最大風速( $V_0$ )を設計飛来物の最大水平速度として設定してもよい。

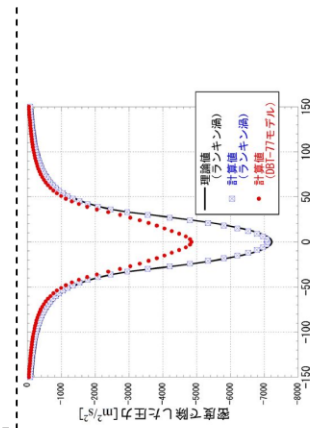


図2 地面高さにおけるランキン渦モデル及びフジタモデルの空圧分布で除した圧力分布 (最大風速 85m/s の場合)<sup>#2</sup>  
 ※2: 竜巻による物体の浮上・飛来解析コード TONBOS の開発  
 ※1: 電力中央研究所 研究報告 N14002

評価に用いる竜巻モデル

ランキン渦モデル(2次元)により設定  
 $R_m=30m$ は、F3 あるいは F3 に近い F2 竜巻の被害幅を基にランキン渦モデルを仮定し、最大風速半径の外側の風速  $V = V_{Rm} \cdot R / R_m$  に被害をもたらす風速( $V_0=17m/s$ )、最大風速( $V_m=70m/s$ )及び最大被害幅の  $1/2(r_0=125m)$ を代入し、算定している。(図1)

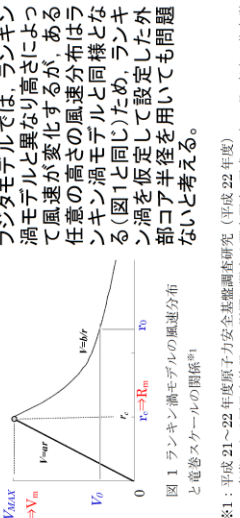


図1 ランキン渦モデルの風速分布  
 ※1: 平成 21 ~ 29 年度原子力安全基礎調査研究 (平成 22 年度) 竜巻による原子力施設への影響に関する調査研究 平成 23 年 2 月 東京工業大学

ランキン渦モデル(2次元)  
 最大気圧差は、最大接線風速(周方向風速)による影響が大きく、両モデルとも最大接線風速が生じる断面の周方向風速分布に大きな差はないことから、最大気圧低下量もほぼ同等の結果となるが、ランキン渦モデルのほうが計算が簡便であり、保守的な値(図2)となる

フジタモデル(3次元)による飛散解析  
 1 地上に設置した状態から飛来物挙動を解析可能  
 フジタモデルによる想定飛来物に当たる風速  $V_0$

$L = 1/2 \times \rho \cdot V_0^2 \cdot C_{La} > mg$

フジタモデルによる飛散高さ・飛散距離

フジタモデルによる最大水平速度  $V$

運動エネルギー:  $1/2 \times m \cdot V^2$

貫通力 (BRL式):

$$T^{3/2} = \frac{0.5MV^2}{1.4396 \times 10^9 K^2 D^3/2}$$

T: 鋼板貫通厚さ (m)  
 M: ミサイル質量 (kg)  
 V: ミサイル速度 (m/s)  
 D: ミサイル直径 (m)  
 K: 鋼板の材質に関する係数 (=1)

竜巻影響評価フロー

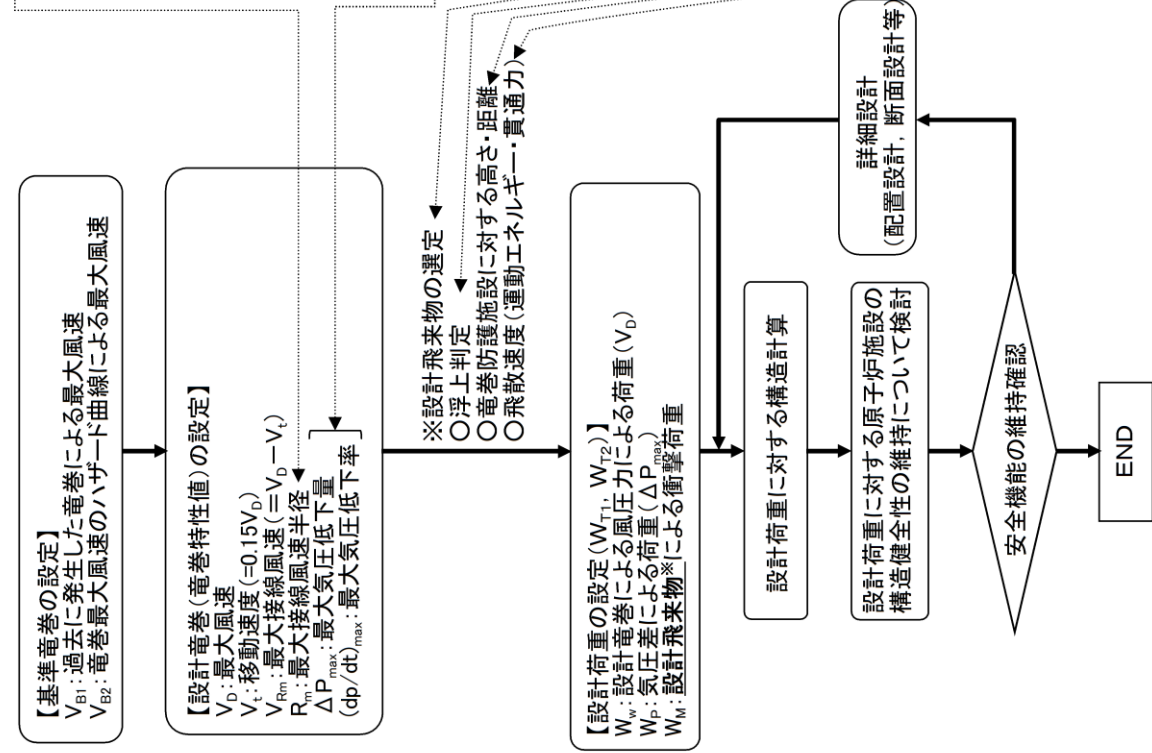


図1 竜巻影響評価と竜巻モデルの関係

島根原子力発電所 2 号炉

運用，手順能力説明資料

外部からの衝撃による損傷の防止

(竜巻)

## (第6条 竜巻)

安全施設は、想定される自然現象（地震及び津波を除く。次項について同じ。）が発生した場合においても安全機能を損なわないものでなければならない。

2 重要安全施設は、当該重要安全施設に大きな影響を及ぼすおそれがある想定される自然現象により当該重要安全施設に作用する衝撃及び設計基準事故に生ずる応力を適切に考慮したものでなければならない。

安全施設は、想定される自然現象（地震及び津波を除く。次項において同じ。）が発生した場合においても安全機能を損なわないものでなければならない。

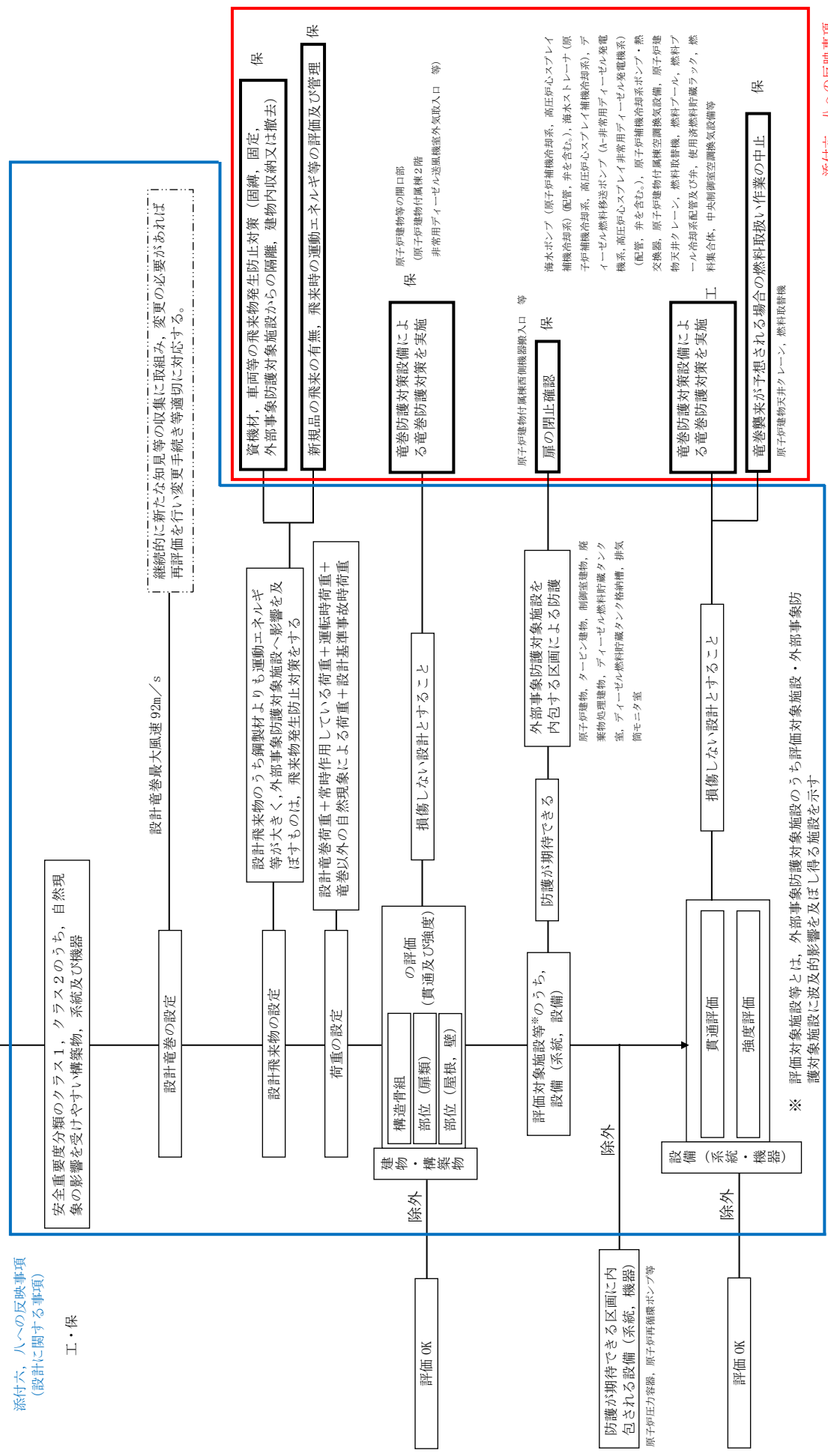
重要安全施設は、当該重要安全施設に大きな影響を及ぼすおそれがある想定される自然現象により当該重要安全施設に作用する衝撃及び設計基準事故時に生ずる応力を適切に考慮したものでなければならない。



重要安全施設は、当該重要安全施設に大きな影響を及ぼすおそれがある想定される自然現象により当該重要安全施設に作用する衝撃及び設計基準事故時に生ずる応力を適切に考慮したものでなければならぬ

添付六、八への反映事項  
(設計に関する事項)

工・保



**保**

資機材、車両等の飛来物発生防止対策 (固縛、固定、外部事象防護対象施設からの隔離、建物内収納又は撤去)

**保**

新規品の飛来の有無、飛来時の運動エネルギー等の評価及び管理

**保**

竜巻防護対策設備による竜巻防護対策を実施

原子炉建物付属種別機器出入口等

**保**

原の閉止確認

海水ポンプ (原子炉補機冷却系、高圧炉心スプレイ補機冷却系) (配置、弁を含む)、海水ストレーナ (原子炉補機冷却系、高圧炉心スプレイ補機冷却系)、デューセル燃料移送ポンプ (A-非常用ディーゼル発電機系、高圧炉心スプレイ非常用ディーゼル発電機系) (配置、弁を含む)、原子炉補機冷却系ポンプ・熱交換器、原子炉建物付属種別空調換気設備、原子炉建物及び井クレーン、燃料取扱機、燃料プールの冷却系配管及び弁、使用済燃料貯蔵ラック、燃料集合体、中央制御室空調換気設備等

**工**

竜巻防護対策設備による竜巻防護対策を実施

**保**

竜巻襲来が予想される場合の燃料取扱い作業の中止

原子炉建物及び井クレーン、燃料取扱機

添付六、八への反映事項  
(手順に関する事項)

※ 評価対象施設等とは、外部事象防護対象施設のうち評価対象施設・外部事象防護対象施設に波及的影響を及ぼし得る施設を示す

**【後段規制との対応】**

工：工認 (基本設計方針, 添付資料)

保：保安規定 (下位文書含む)

**【添付六、八の反映事項】**

□：添付六、八に反映

□：当該条文に関係しない (他条文での反映事項他)



設置許可基準対象条文	対象項目	区分	運用対策等
第6条 外部からの衝撃による損傷の防止	評価対象施設等を防護するための操作・確認事項	運用・手順	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 竜巻の襲来が予想される場合及び竜巻襲来後において、評価対象施設等を防護するための操作・確認、補修等が必要となる事項について手順等を定める。 <ul style="list-style-type: none"> <li>[操作・確認事項] <ul style="list-style-type: none"> <li>・ 竜巻に関する情報入手及び情報入手後の対応（情報の入手，周知，体制判断，実施方法と手順）</li> <li>・ 竜巻襲来が予想される場合の対応に関する運用・手順（竜巻襲来が予想される場合の使用中の資機材の固縛等）</li> <li>・ 竜巻襲来が予想される場合の燃料取扱作業の運用，手順</li> <li>・ 原子炉建物付属棟西側機器搬入口等の閉止確認手順</li> </ul> </li> <li>[補修] <ul style="list-style-type: none"> <li>・ 設備が損傷した場合の代替設備の確保及び補修，取替等の運用，手順</li> </ul> </li> </ul> </li> </ul>
		体制	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 担当箇所による作業中止等の実施体制</li> <li>・ 担当箇所による扉閉止確認体制</li> <li>・ 竜巻襲来に備えた体制の構築，実施及び解除の判断基準，実施手順，連絡方法等</li> <li>・ 担当箇所による保守・点検の体制</li> <li>・ 担当箇所による損傷箇所の補修体制</li> </ul>
		保守・点検	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 日常点検</li> <li>・ 定期点検</li> <li>・ 損傷時の補修</li> </ul>
		教育・訓練	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 運用・手順，体制，保守・点検に関する教育</li> </ul>