

# 女川原子力発電所2号炉 竜巻影響評価について

---

平成29年12月  
東北電力株式会社

1. はじめに
2. 竜巻影響評価の対象施設
3. 基準竜巻・設計竜巻の設定
4. 設計飛来物の設定
5. 設計荷重の設定
6. 評価対象施設の設計方針
7. 竜巻対策

# 1. はじめに

「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」第6条に関連して、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件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評価・確認するため、「原子力発電所の竜巻影響評価ガイド(以下「ガイド」という。))を参照し、竜巻影響評価を実施する。

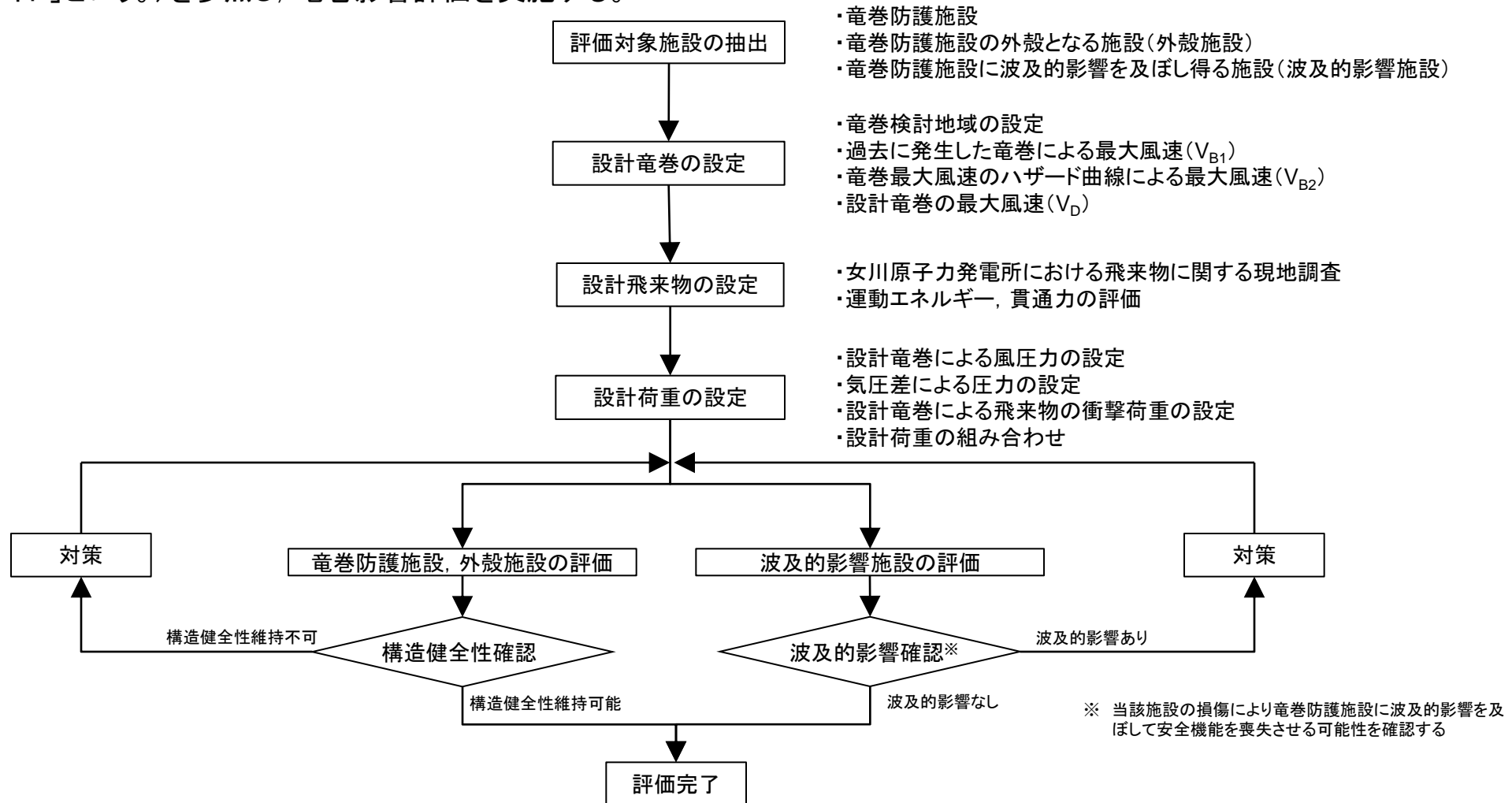


図1-1 竜巻影響評価フロー

# 2. 竜巻影響評価の対象施設(1/4)

## 2-1 竜巻影響評価の対象施設の抽出

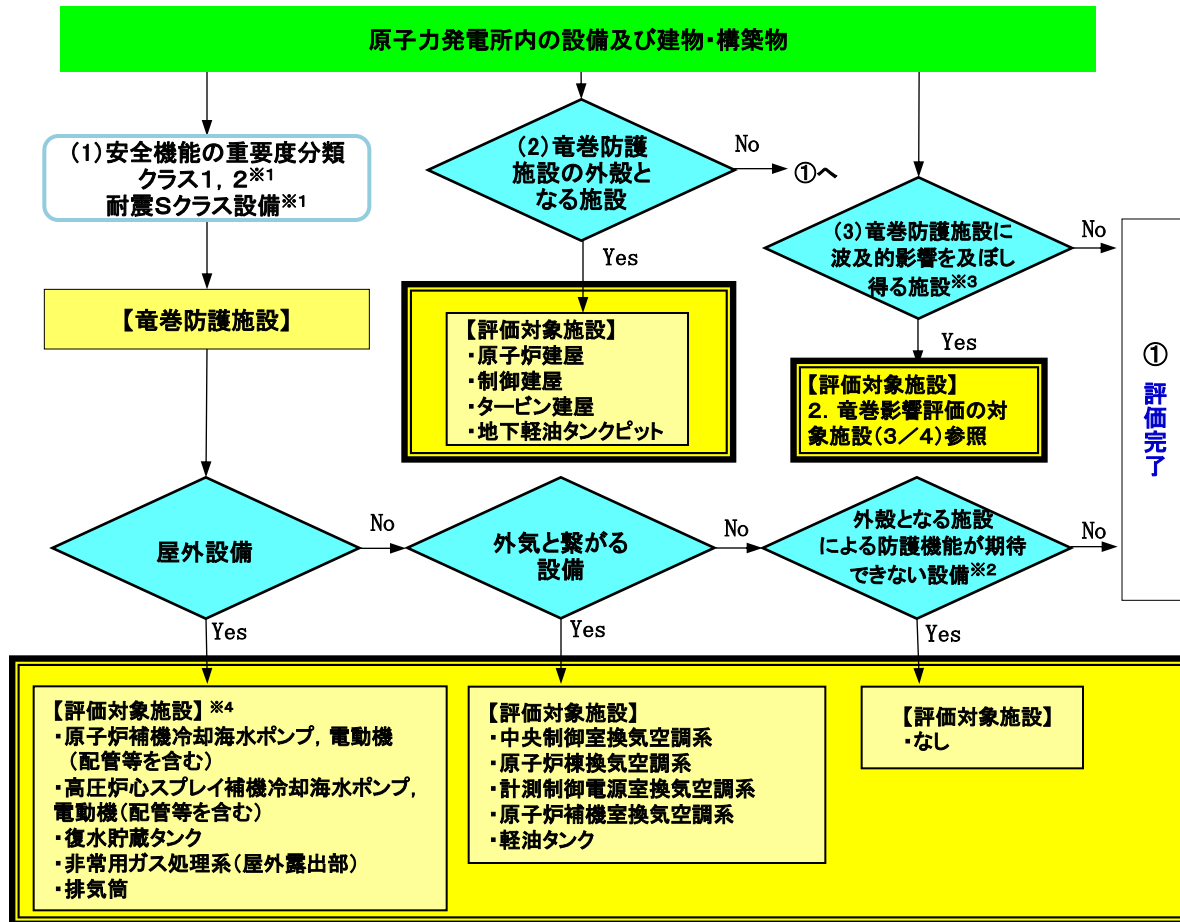
➤原子力発電所内の設備及び建物・構築物のうち、次の3つに該当する設備及び建物・構築物に関して、以下のフローにより抽出。

(1) 竜巻防護施設(安全重要度分類指針に基づくクラス1, クラス2に該当する構築物, 系統及び機器)

(2) 竜巻防護施設の外殻となる施設

(3) 竜巻防護施設に波及的影響を及ぼし得る施設

➤ガイドにおける竜巻防護施設である耐震Sクラス設備についても同様に抽出。



※1 クラス3に属する施設については、竜巻及びその随伴事象に対して機能維持(飛来物が影響を及ぼす高さ(地上10mまで)等を踏まえ、機能が維持されるかを確認)する、又は、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、必要に応じプラントを停止し、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場合には、安全機能を損なわないことから評価完了とする。  
また、竜巻防護施設の外殻となる施設等(竜巻防護施設を内包する建屋・構築物等)による防護機能によって設計竜巻による影響を受けないことが確認された施設については除外する。

- ※2 建屋、構築物等の健全性確認結果を基に抽出
- ※3 機械的影響、機能的影響、二次的影響の観点から抽出
- ※4 安全機能の重要度分類クラス1, 2に含まれない耐震Sクラス設備として、津波防護施設(防潮堤、防潮壁)等を抽出。  
津波防護施設等が竜巻及びその随伴事象により損傷したとしても当該機能が必要となる前に修復等の対応が可能であると考えられるため、評価対象には該当しないと判断。ただし、重要性に鑑み、自主的に機能維持のための配慮を行う。  
なお、竜巻と津波の重畳事象としては十分にスクリーニングレベルにある。

別添2-1 竜巻影響評価について  
1.2 竜巻影響評価の対象施設

図2-1 評価対象施設の抽出フロー

## 2. 竜巻影響評価の対象施設(2/4)

### 2-2 竜巻防護施設のうち評価対象施設の抽出(竜巻防護施設及び外殻施設)

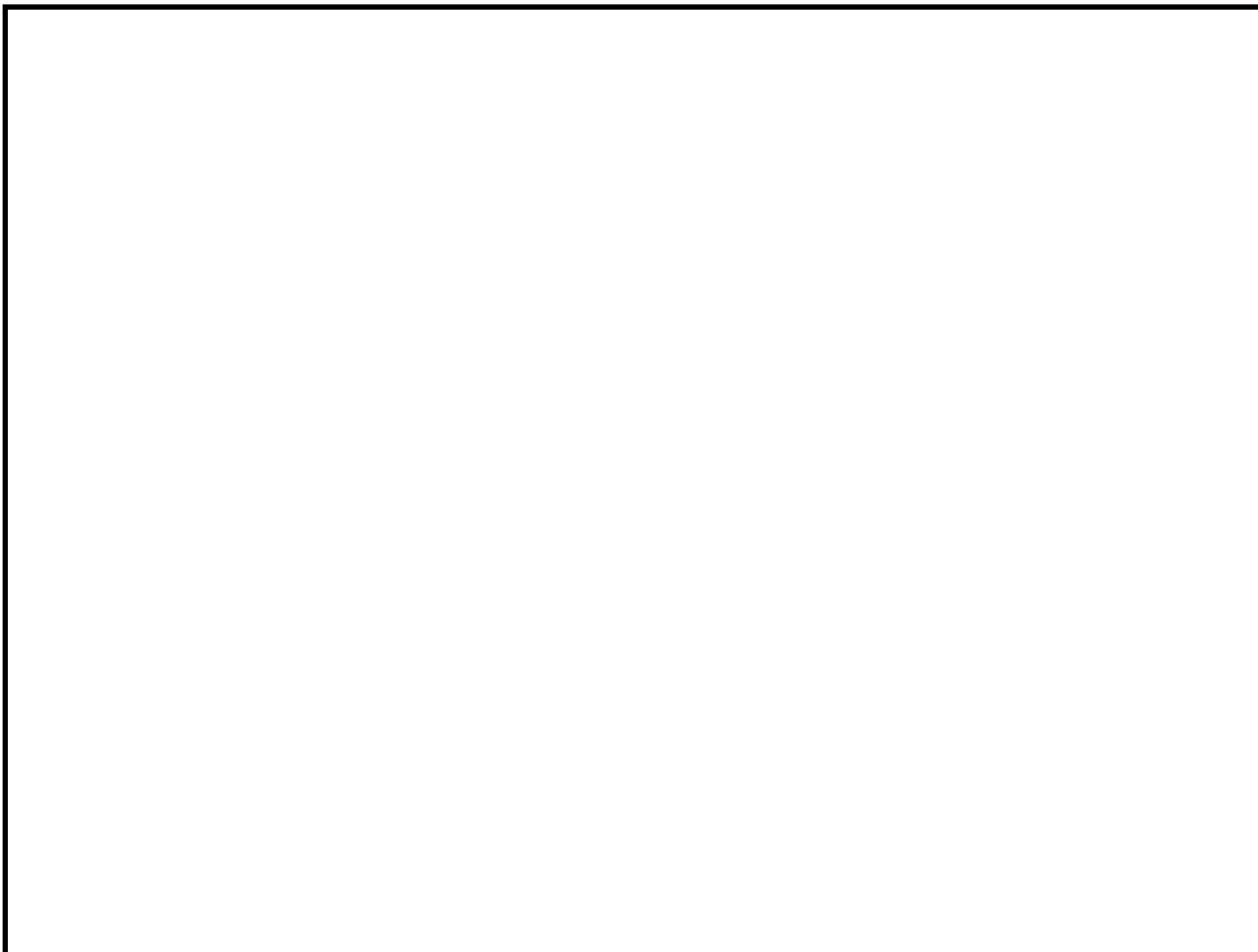


図2-2 竜巻防護施設のうち評価対象施設

枠囲みの内容は商業機密又は防護上の観点から公開できません。

別添2-1 竜巻影響評価について  
1.2 竜巻影響評価の対象施設

## 2. 竜巻影響評価の対象施設(3/4)

### 2-3 竜巻防護施設に波及的影響を及ぼし得る施設の抽出

竜巻防護施設に波及的影響を及ぼし得る施設に関して、以下の3つの観点からフローにより評価対象施設を抽出した。

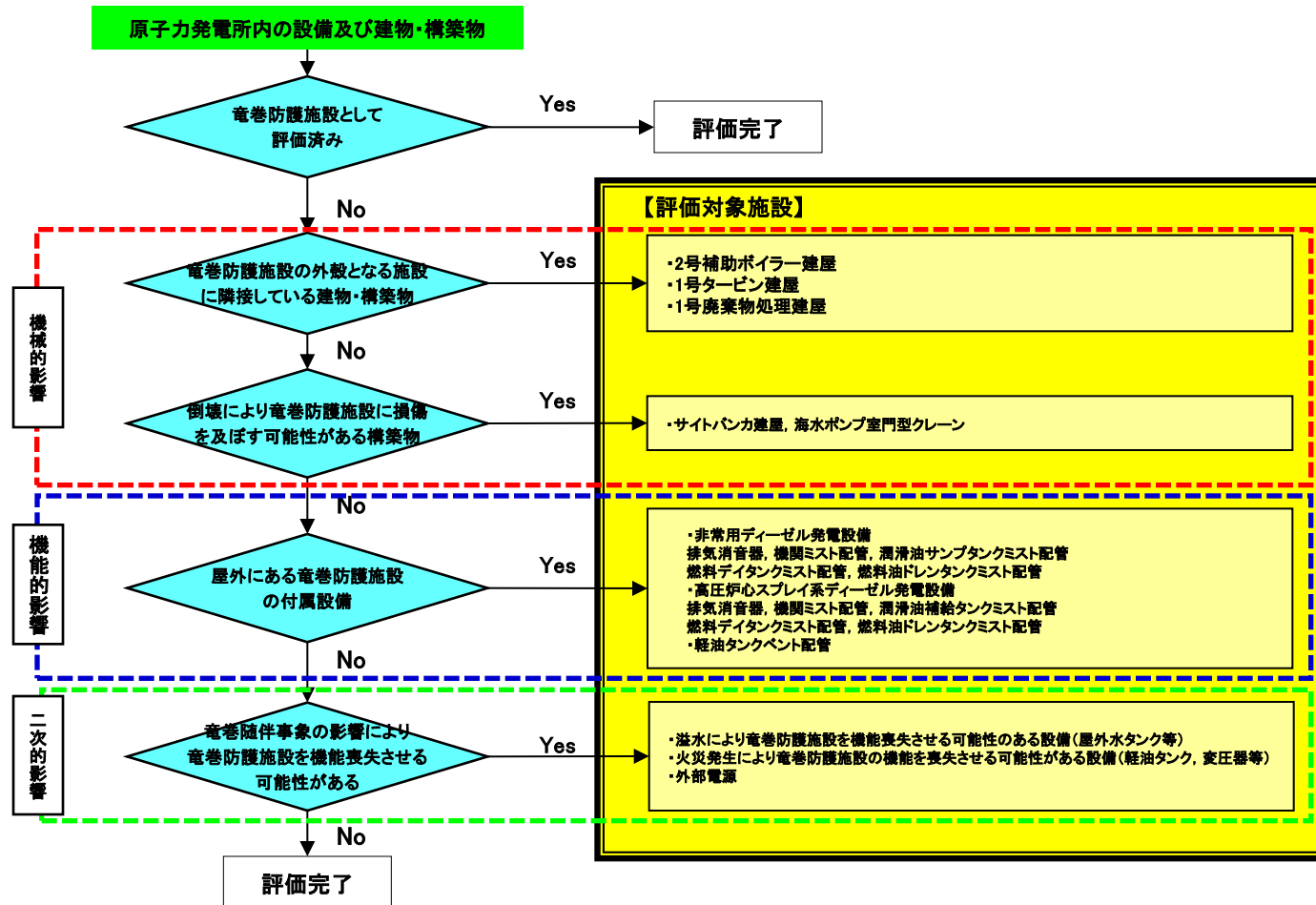


図2-3 波及的影響を及ぼし得る評価対象施設の抽出フロー

別添2-1 竜巻影響評価について  
1.2 竜巻影響評価の対象施設

## 2. 竜巻影響評価の対象施設(4/4)

### 2-4 竜巻防護施設に波及的影響を及ぼし得る施設の抽出(機械的影響, 機能的影響)



図2-4 波及的影響を及ぼし得る評価対象施設

枠囲みの内容は商業機密又は防護上の観点から公開できません。

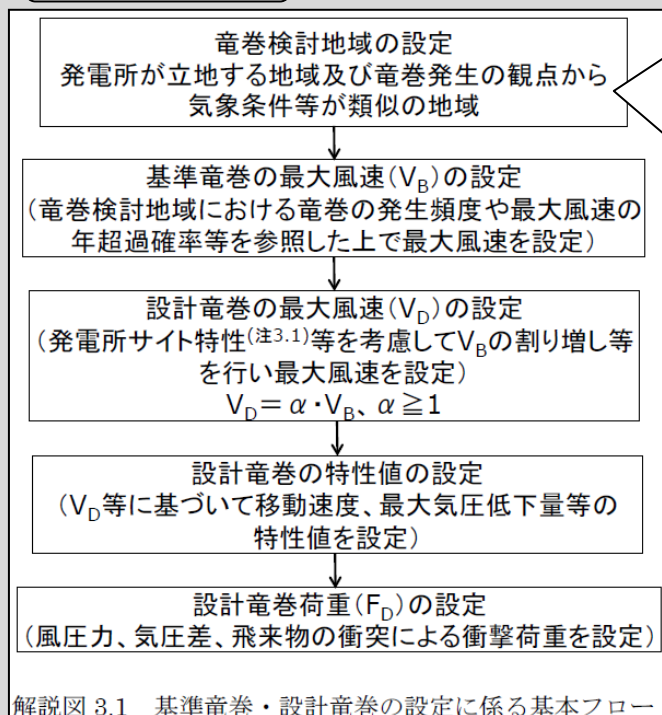
別添2-1 竜巻影響評価について  
1.2 竜巻影響評価の対象施設

### 3. 基準竜巻・設計竜巻の設定(1/5)

#### 3-1 ガイドの記載及び審査における指摘事項

- 基準竜巻及び設計竜巻の設定のうち、竜巻検討地域の設定に関するガイドの記載を示す。
- 申請時は、ガイドの記載(赤下線部)を参考に竜巻検討地域を設定しハザード評価を実施すると共に、青下線部の記載も踏まえ、周辺地域のハザード評価結果も参照し、基準竜巻の最大風速( $V_B$ )を設定した。
- これまでの審査において、竜巻の発生要因である総観場の分析結果では、当社が竜巻検討地域として含めない茨城県及び千葉県との明らかな相違が無いことから、竜巻検討地域の設定について検討するよう指摘を受けた経緯がある。
- こうした経緯を踏まえ、竜巻検討地域の見直しを行い、基準竜巻の最大風速( $V_B$ )及び設計竜巻の最大風速( $V_D$ )の再設定を行った。

#### ガイド(抜粋)



#### 3.2 竜巻検討地域の設定

竜巻検討地域は、原子力発電所が立地する地域及び竜巻発生観点から原子力発電所が立地する地域と気象条件等が類似の地域から設定する。

#### 解説 3.2 竜巻検討地域の設定

##### (1) 基本的な条件

竜巻検討地域の設定にあたっては、IAEAの基準<sup>(\*)</sup>が参考になる。 IAEAの基準では、ある特定の風速を超過する竜巻の年発生頻度の検討にあたって竜巻の記録を調査する範囲として、およそ10万km<sup>2</sup>を目安にあげている。 このIAEAの基準を参考として、竜巻検討地域の目安を、原子力発電所を中心とする10万km<sup>2</sup>の範囲とする。 しかしながら、日本では、例えば日本海側と太平洋側とで気象条件が異なる等、比較的狭い範囲で気象条件が大きく異なる場合があることから、必ずしも10万km<sup>2</sup>に拘らずに、竜巻発生観点から原子力発電所が立地する地域と気象条件等が類似する地域を調査した結果に基づいて竜巻検討地域を設定することを基本とする。

図3-1 ガイドにおける竜巻検討地域設定の考え方

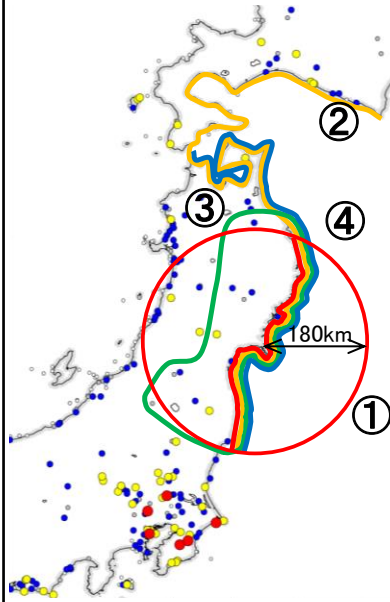



### 3. 基準竜巻・設計竜巻の設定(2/5)

#### 3-2 申請時からの見直し

- 申請時は、IAEAの基準を参考に竜巻検討地域を設定すると共に、周辺地域のハザード評価結果も踏まえて設計竜巻を設定したが、総観場が類似すると考えられる、より広範囲な竜巻検討地域への見直しを行った。
- その結果、設計竜巻の最大風速( $V_D$ )を69m/sから100m/sに見直した。

表3-1 申請時との比較

	申請時	見直し後																				
竜巻検討地域	<p>・IAEAの基準(発電所を中心に10万km<sup>2</sup>の範囲)を参考に、発電所を中心に半径約180kmの範囲の沿岸±5kmに設定</p>  <table border="1" data-bbox="559 763 1212 1106"> <thead> <tr> <th>地域</th> <th><math>V_{B1}</math></th> <th><math>V_{B2}(10^{-5}/年)</math></th> <th>結果</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>① 竜巻検討地域</td> <td>49m/s</td> <td>49.0m/s</td> <td>49m/s</td> </tr> <tr> <td>② 福島県～北海道襟裳岬の沿岸±5km</td> <td>69m/s</td> <td>57.6m/s</td> <td>69m/s</td> </tr> <tr> <td>③ 東北地方内陸(福島, 宮城, 岩手)</td> <td>69m/s</td> <td>36.2m/s</td> <td>69m/s</td> </tr> <tr> <td>④ 福島県～青森県竜飛崎の沿岸±5km</td> <td>69m/s</td> <td>55.2m/s</td> <td>69m/s</td> </tr> </tbody> </table>	地域	$V_{B1}$	$V_{B2}(10^{-5}/年)$	結果	① 竜巻検討地域	49m/s	49.0m/s	49m/s	② 福島県～北海道襟裳岬の沿岸±5km	69m/s	57.6m/s	69m/s	③ 東北地方内陸(福島, 宮城, 岩手)	69m/s	36.2m/s	69m/s	④ 福島県～青森県竜飛崎の沿岸±5km	69m/s	55.2m/s	69m/s	<p>・気候区分を参考に、北海道襟裳岬～千葉県九十九里町までの沿岸±5kmに再設定</p> <p>・総観場および突風関連指数地域性の分析により、設定した地域の妥当性を確認</p>  <p>女川原子力発電所</p> <p>— : 竜巻検討地域 (約18,800km<sup>2</sup>)</p>
	地域	$V_{B1}$	$V_{B2}(10^{-5}/年)$	結果																		
① 竜巻検討地域	49m/s	49.0m/s	49m/s																			
② 福島県～北海道襟裳岬の沿岸±5km	69m/s	57.6m/s	69m/s																			
③ 東北地方内陸(福島, 宮城, 岩手)	69m/s	36.2m/s	69m/s																			
④ 福島県～青森県竜飛崎の沿岸±5km	69m/s	55.2m/s	69m/s																			
$V_B$	<p>・69m/s (180kmの範囲で評価すると49m/sとなるが、周辺地域も含めた(上記②の範囲)ハザード評価を踏まえ設定)</p>	・92m/s																				
$V_D$	・69m/s	・100m/s																				

### 3. 基準竜巻・設計竜巻の設定(3/5)

#### 3-3 竜巻検討地域の設定

- 以下の確認・検討結果を踏まえ、「北海道襟裳岬から千葉県九十九里町にかけて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

##### 【気候区分による確認】

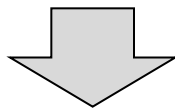
- ・ 日本海側と太平洋側では異なる区域に整理されることを確認
- ・ 女川原子力発電所は区分IV3に立地することを確認

##### 【総観場の分析に基づく地域特性の確認】

- ・ 申請時の竜巻検討地域(半径約180km内の沿岸)と北海道までの沿岸では、共通する総観場が確認され、明確に差別化するには至らない
- ・ 「半径約180km内の沿岸」と「茨城県から千葉県沿岸」を比較すると、類似性があると判断

##### 【突風関連指数に基づく地域特性の検討】

- ・ 東北地方太平洋側は茨城県以西の太平洋側と大規模な竜巻形成につながる環境場の傾向が異なることを確認



北海道から千葉県にかけての太平洋側沿岸を設定することが妥当と判断

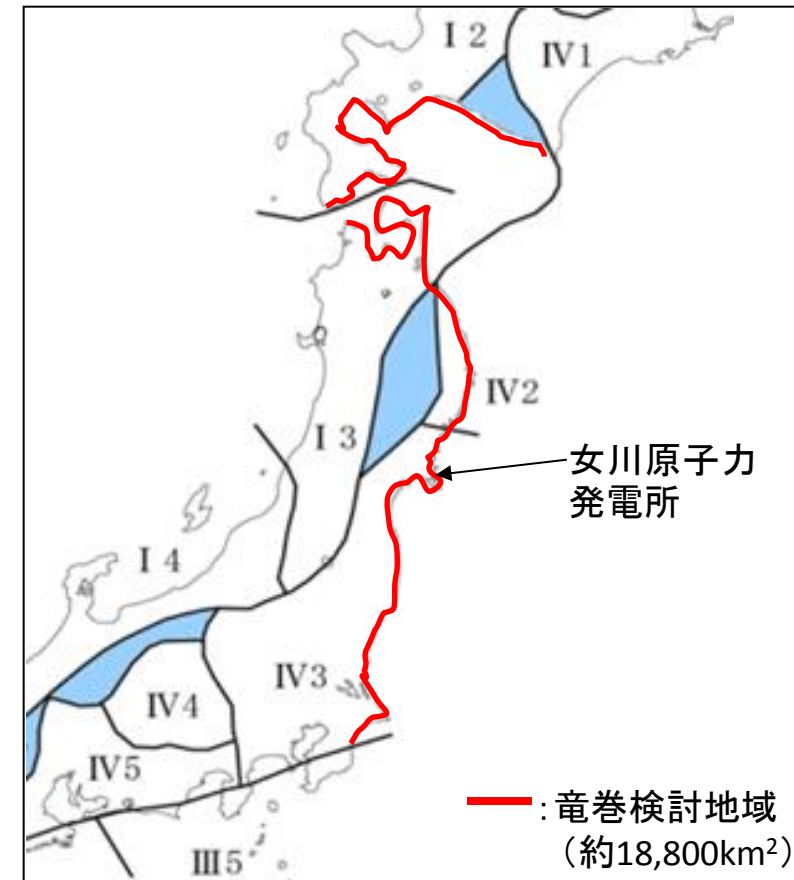


図3-2 竜巻検討地域

### 3. 基準竜巻・設計竜巻の設定(4/5)

#### 3-4 基準竜巻の最大風速( $V_B$ )の設定

基準竜巻の最大風速( $V_B$ )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、大きな風速を適用する。

##### ➤ 過去に発生した竜巻による最大風速( $V_{B1}$ )

- ・発電所が立地する東北地方太平洋側は、過去の発生実績及び突風関連指数を用いた分析結果から、大規模な竜巻は発生しにくいものと考えられる
- ・竜巻は観測の歴史が浅いこと及び竜巻観測体制の変遷を踏まえると、他の気象観測データに比べ不確かさがある
- ・上記を勘案し、日本で過去に発生した竜巻の最大風速を $V_{B1}$ として設定

表3-2 日本で発生したF3竜巻

Fスケール	発生日	発生場所
F3	1971年07月07日	埼玉県浦和市
F3	1990年12月11日	千葉県茂原市
F3	1999年09月24日	愛知県豊橋市
F3	2006年11月07日	北海道網走支庁佐呂間町
F3	2012年05月06日	茨城県常総市

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

- ・竜巻検討地域全域及び竜巻検討地域を1kmごとに細分化(1km短冊)した場合のハザード曲線を算定し、 $10^{-5}$ /年の風速値から $V_{B2}$ を設定

##### ➤ 上記の評価から基準竜巻の最大風速( $V_B$ )を92m/sに設定

表3-3 竜巻の最大風速の評価結果

項目	最大風速
過去に発生した竜巻による最大風速( $V_{B1}$ )	92m/s
竜巻最大風速のハザード曲線による最大風速( $V_{B2}$ )	76.6m/s
基準竜巻の最大風速( $V_B$ )	<b>92m/s</b>

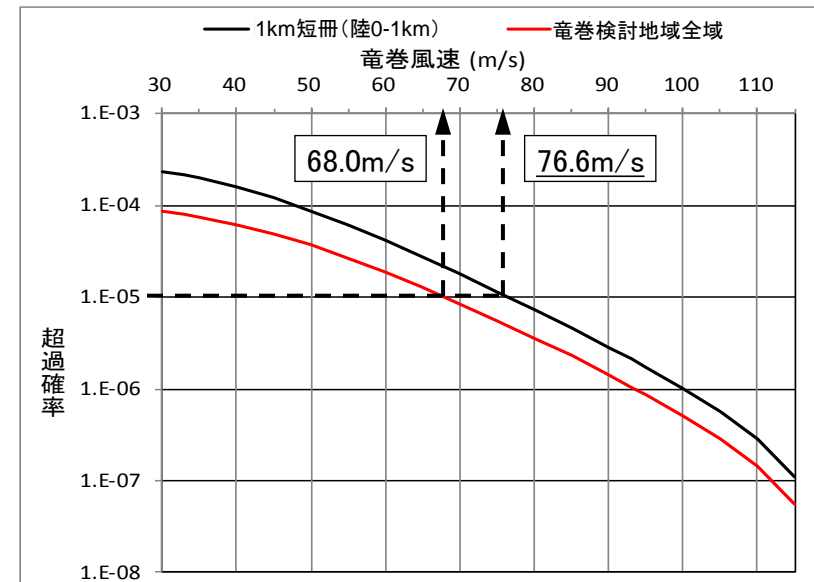


図3-3 竜巻最大風速のハザード曲線

### 3. 基準竜巻・設計竜巻の設定(5/5)

#### 3-5 設計竜巻の最大風速( $V_D$ )の設定

- 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要否を検討し、設計竜巻の最大風速( $V_D$ )を設定する。

##### 【確認結果】

- 竜巻検討地域で発生した竜巻は、多くが海側から陸側の方向に移動
  - 移動方向の確認を踏まえ、竜巻が海上から発電所に進入してきた場合は地表面粗度の影響を受けて減衰した後、さらに防潮堤(O.P.29.0m)で大幅に減衰
  - 山側から発電所の敷地に移動してきた場合も、発電所周辺は広い丘陵地に森林が存在しており、森林による粗度の影響を大きく受けるため減衰
- 従って、地形効果による竜巻の増幅を考慮する必要無いと考えられるため、基準竜巻の割増しは不要と考えるが、将来的な気候変動による竜巻発生の不確実性を考慮し、基準竜巻の92m/sを安全側に切り上げて、設計竜巻の最大風速( $V_D$ )は100m/sに設定した。

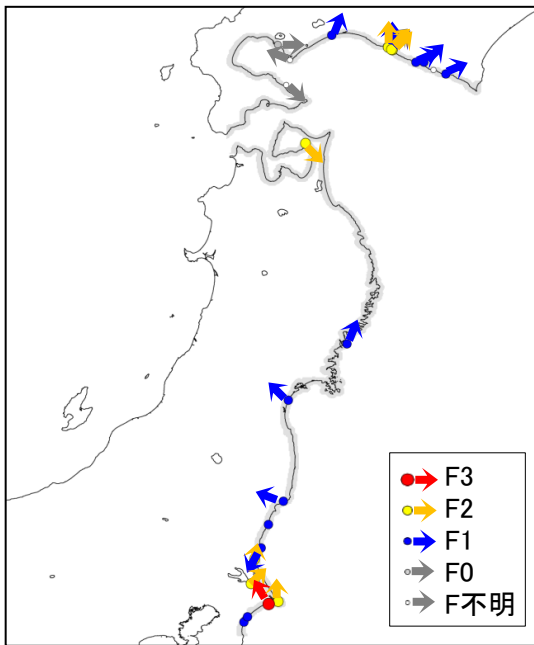


図3-4 竜巻検討地域における竜巻の移動方向

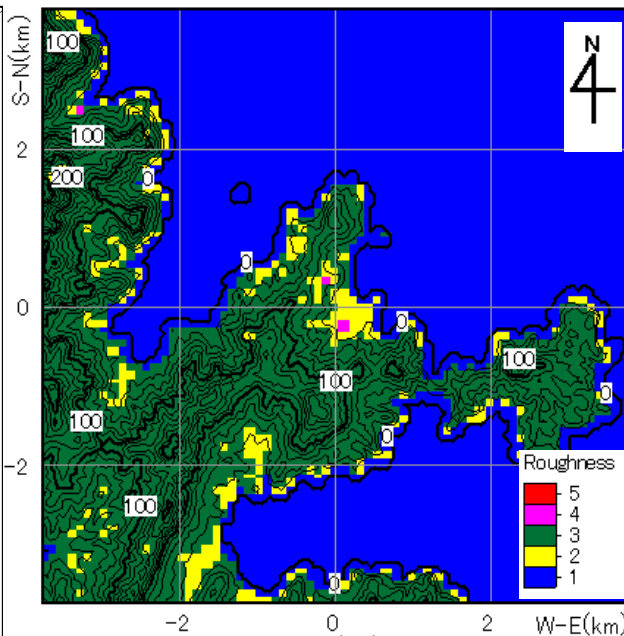


図3-5 発電所周辺の地表面粗度

表3-4 地表面状態に対する粗度長

地表面	粗度長[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

仮に発電所周辺のような森林で竜巻が発生したとしても、粗度の影響により大きな減衰効果が働く。なお、国内で発生したF3クラスの竜巻は、すべて海上または平野部で発生している。

表3-5 粗度区分

粗度区分	評価地点及び風上側地域の地表面の状況
I	海面又は湖面のような、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

別添2-1 竜巻影響評価について  
2.4 設計竜巻の最大風速( $V_D$ )の設定

# 4. 設計飛来物の設定(1/3)

## 4-1 設計飛来物の設定フロー

女川原子力発電所の飛来物に係るウォークダウンを行い、飛来物となる可能性があるものから、浮き上がりの有無、飛来物発生防止対策(撤去, 固縛等)の可否, 運動エネルギー及び貫通力を踏まえて, 設計飛来物を選定する。

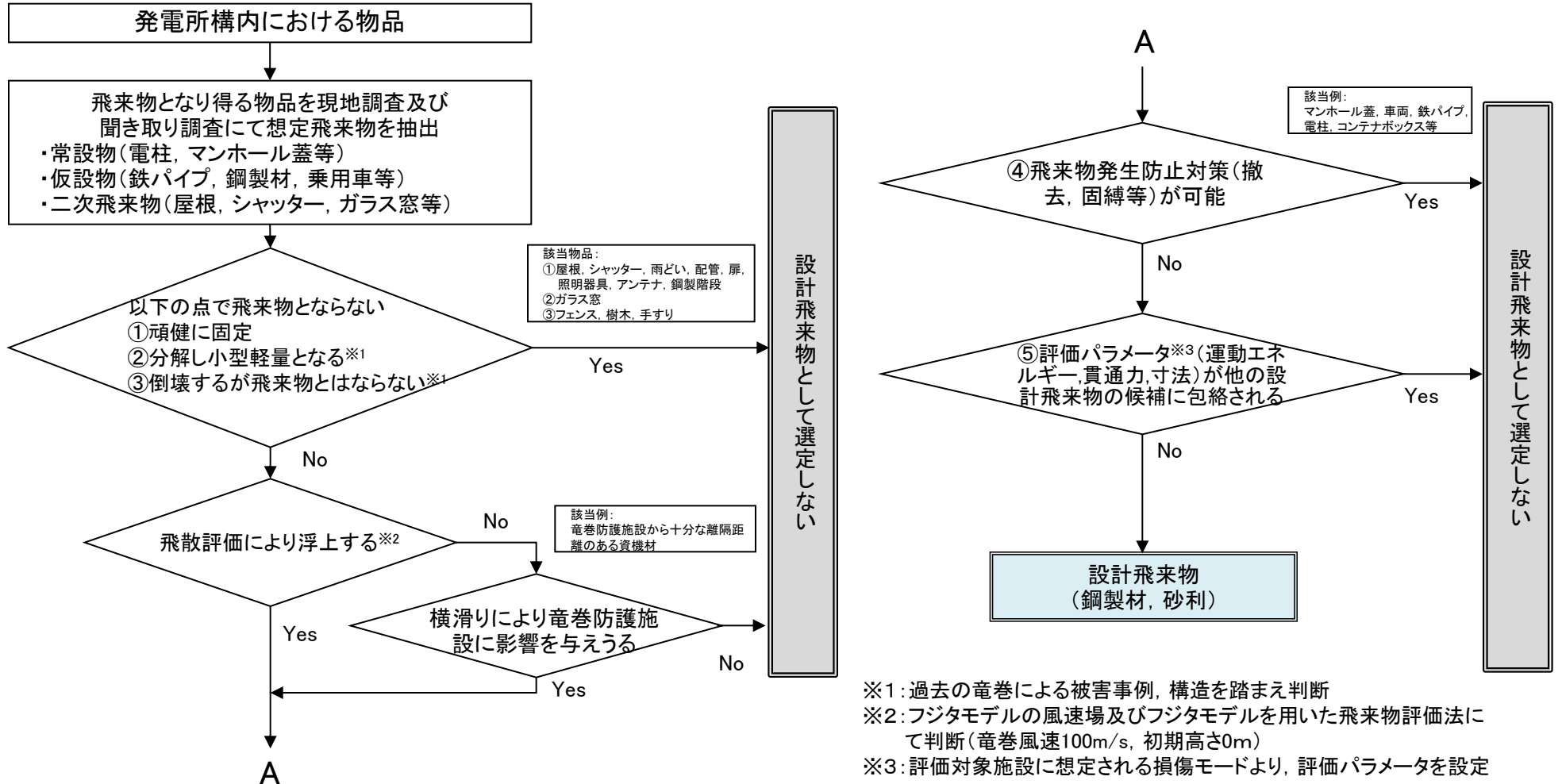


図4-1 設計飛来物の選定フロー

別添2-1 竜巻影響評価について  
3.3 設計荷重の設定

# 4. 設計飛来物の設定(2/3)

## 4-2 想定飛来物の抽出・代表飛来物の選定

女川原子力発電所の防護対象施設から半径800m以内に存在する飛来物になる可能性がある物体について調査し、約2000個の想定飛来物を抽出

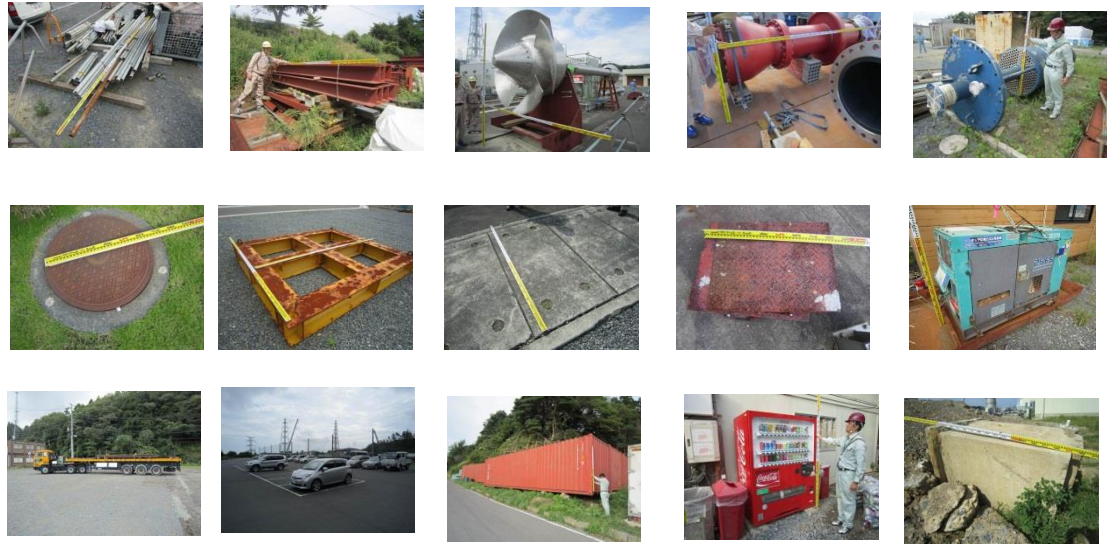
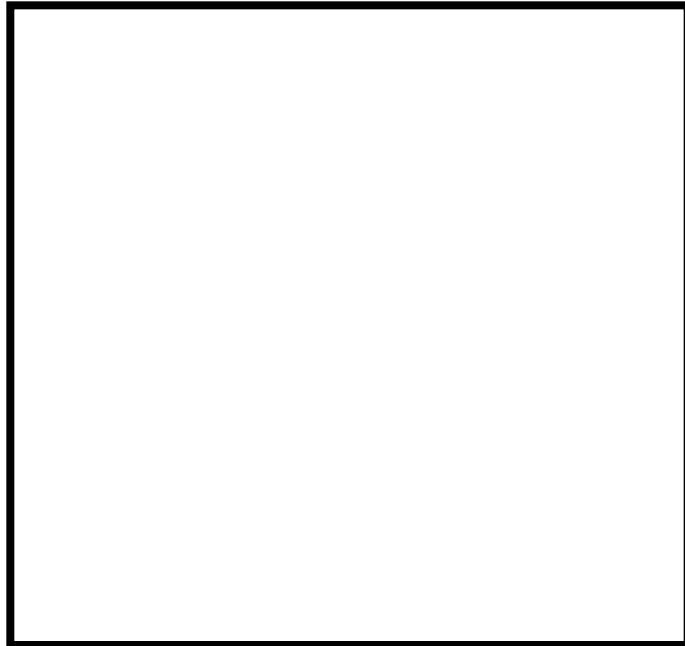


図4-3 調査状況写真

図4-2 想定飛来物の調査範囲

枠囲みの内容は商業機密又は防護上の観点から公開できません。

**想定飛来物を類型化**

- ①形状で分類・・・棒状, 板状, 塊状
- ②形状で分類されない物体  
車, 分解点検の機器等

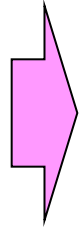


表4-1 代表飛来物の選定結果

棒状	板状	塊状	形状分類しないもの
鉄パイプ 電柱 等	マンホール蓋 敷鉄板 等	コンテナ 発電機 等	乗用車, トラック, ポンプ ケーシング, インペラ等

別添2-1 竜巻影響評価について  
3.3 設計荷重の設定

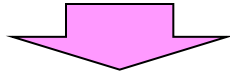
## 4. 設計飛来物の設定(3/3)

### 4-3 設計飛来物の設定

#### ●固定状況等を踏まえた抽出

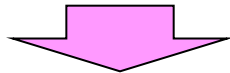
代表飛来物の中から、以下のいずれかに当てはまるものを除外

- 頑健に固定されている※1
- 分解し小型軽量となる※2
- 竜巻で倒壊するが飛来物とならない※2



#### ●設計飛来物候補の抽出

- 以上により抽出された飛来物に対し飛散評価を実施し、浮上しない物品を除外
- 固縛、撤去等の飛来物発生防止対策が可能な物品を除外



#### ●設計飛来物の設定

- 運動エネルギー及び貫通力の大きさから「鋼製材」
- 海水ポンプへの防護対策として設置する竜巻防護ネットを通過する可能性がある「砂利」

※1 女川原子力発電所のウォークダウン結果を踏まえて判断

※2 女川原子力発電所のウォークダウン結果を踏まえて、過去の被害状況を文献から調査し判断

表4-2 設計飛来物の諸元

項目	飛来物の種類		
	砂利	鋼製材	
サイズ(m)	長さ×幅×奥行き 0.04×0.04×0.04	長さ×幅×奥行き 4.2×0.3×0.2	
質量(kg)	0.2	135	
※計算結果	最大水平速度(m/s)	17	12
	最大鉛直速度(m/s)	0.8	0.9
	浮き上がり高さ(m)	0.1	0.2
	飛散距離(m)	11.6	6.5

※設計竜巻風速100m/s、フジタモデルの風速場、初期高さを0mとした場合の計算結果  
影響評価時には敷地の高台等を適切に考慮する



(砂利)



(鋼製材)

図4-4 設計飛来物のイメージ

## 5. 設計荷重の設定(1/4)

### 5-1 設計荷重の設定

竜巻の風速場モデルとしてフジタモデルを用いて、設計竜巻の特性値を設定する。

#### (1) 設計竜巻の特性値

設計竜巻の最大速度は100m/sとし、以下の特性値を設定する。

表5-1 女川原子力発電所における設計竜巻の特性値

最大風速 $V_D$ [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]
100	15	85	30	76	53

#### (2) 設計竜巻による風圧力の設定 ( $W_W$ )

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。

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

$q$ : 設計用速度圧

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

$\rho$ : 空気密度

$V_D$ : 設計竜巻の最大風速

$G$ : ガスト影響係数(= 1.0)

$C$ : 風力係数

$A$ : 施設の受圧面積

#### (3) 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内外の気圧差による圧力の設定 ( $W_P$ )

設計竜巻による評価対象施設内外の気圧差による圧力は、下式により算定する。

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

$\Delta P_{max}$ : 最大気圧低下量

$A$ : 施設の受圧面積



# 5. 設計荷重の設定(2 / 4)

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、竜巻影響評価における風速場としてフジタモデルを適用する。

表 5-2 風速場モデルの概要

<p><b>風速場モデル概要</b></p>	<div style="border: 1px solid black; padding: 5px;"> <p><b>フジタモデル</b></p> <p>実際の竜巻観測記録を元に、半径方向に3つの領域(内部コア・外部コア・最外領域)、高さ方向に2つの領域(流入層・非流入層)に分割してモデル化</p> <math display="block">V_\theta = F_r(r)F_h(z)V_m</math> <math display="block">F_r(r) = \begin{cases} r &amp; (r &lt; 1) \\ 1/r &amp; (r \geq 1) \end{cases} \quad F_h(z) = \begin{cases} z^{k_0} &amp; (z &lt; 1) \\ \exp(-k(z-1)) &amp; (z \geq 1) \end{cases}</math> <p>・接線風速(<math>V_\theta</math>)は高さ依存性あり</p> <math display="block">V_r = \begin{cases} 0 &amp; (r \leq v) \\ \frac{V_\theta \tan \alpha_0}{1 - v^2} \left(1 - \frac{v^2}{r^2}\right) &amp; (v &lt; r &lt; 1) \\ V_\theta \tan \alpha_0 &amp; (r \geq 1) \end{cases}</math> <math display="block">\tan \alpha_0 = \begin{cases} -A(1 - z^{1.5}) &amp; (z &lt; 1) \\ B(1 - \exp(-k(z-1))) &amp; (z \geq 1) \end{cases}</math> <math display="block">V_z = \begin{cases} \frac{3}{28} \frac{\eta V_m}{1 - v^2} A(16z^{5/2} - 7z^3) &amp; (z &lt; 1) \\ \frac{\eta V_m B \exp(-k(z-1))}{k(1 - v^2)} \{2 - \exp(-k(z-1))\} &amp; (z \geq 1) \end{cases}</math> <p>・上昇流(<math>V_z</math>)は外部コアのみが存在</p> <p><math>k_0, k, v, \eta, A, B</math>は定数</p> <p><math>V_\theta</math>: 接線風速    <math>V_z</math>: 上昇風速    <math>H_i</math>: 流入層高さ  <math>V_r</math>: 半径方向風速    <math>V_m</math>: 最大旋回風速    <math>R_m</math>: コア半径</p> </div> <div style="text-align: center;"> <p>無次元座標 <math>r = R/R_m, \quad z = Z/H_i</math></p> <p>竜巻中心断面での風況イメージ</p> <p style="background-color: pink; color: white; padding: 2px;">地表面で渦の中心に向かう水平方向の流れがモデル化されており、実現象をよく再現</p> </div>	<div style="border: 1px solid black; padding: 5px;"> <p><b>ランキン渦モデル</b></p> <p>・風速分布は高さに依存しない          ・半径方向風速<math>V_r</math>と上昇風速<math>V_z</math>は飛来物速度評価のみに付加される(最大接線風速<math>V_m</math>に<math>2/\sqrt{5}</math>を乗じる)</p> <p>無次元座標 <math>r = R/R_m</math></p> <math display="block">V_\theta = \frac{2V_m}{\sqrt{5}} F_r(r)</math> <math display="block">F_r(r) = \begin{cases} r &amp; (r &lt; 1) \\ 1/r &amp; (r \geq 1) \end{cases}</math> <math display="block">V_r = -\frac{1}{2} V_\theta</math> <math display="block">V_z = \frac{2}{3} V_\theta</math> <p>旋回風速 <math>V_h = \sqrt{V_\theta^2 + V_r^2} = V_m F_r(r)</math></p> <p><math>V_\theta</math>: 接線風速    <math>V_z</math>: 上昇風速  <math>V_r</math>: 半径方向風速    <math>V_m</math>: 最大旋回風速</p> </div> <div style="text-align: center;"> <p>竜巻中心断面での風況イメージ</p> <div style="background-color: lightblue; padding: 5px;"> <ul style="list-style-type: none"> <li>・地面からも吹き出しが発生する。</li> <li>・風速分布は高さ依存せず、全域に上昇風がある。</li> </ul> </div> </div>
<p><b>メリット</b></p>	<p>・地面に置かれた物体へ影響を与える風速場を良く表現できており、地上からの物体の浮上・飛散解析が可能。          ⇒地上における構造物に対する力や挙動を表現するのに適しているモデル。          ⇒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。</p>	<p>・簡単な式で上空での水平方向の風速場を表現可能。</p>
<p><b>デメリット</b></p>	<p>特になし。          (ランキン渦モデルに比べて、解析プログラムが複雑になるが、近年の計算機能力向上や評価ツールの高度化により問題とならない。)</p>	<p>・風速場に高さ依存性がなく、上昇流が全領域に存在する(地面からも吹出しがある)ため、実現象から乖離しており、地上からの物体の浮上、飛散挙動を正確に表現できない。          ⇒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。(例えば、SA車両を固縛することで、機動性が損なわれる。)</p>

**連続方程式** 
$$c \equiv \frac{1}{R_m r} \frac{\partial V_\theta}{\partial \theta} + \frac{1}{R_m r} \frac{\partial (rV_r)}{\partial r} + \frac{1}{H_i} \frac{\partial V_z}{\partial z} = 0$$

**連続方程式** 
$$c \equiv \frac{1}{R_m r} \frac{\partial V_\theta}{\partial \theta} + \frac{1}{R_m r} \frac{\partial (rV_r)}{\partial r} + \frac{1}{R_m} \frac{\partial V_z}{\partial z} = \begin{cases} -\frac{2V_m}{\sqrt{5}R_m} & (r < 1) \\ 0 & (r > 1) \end{cases} \rightarrow \text{流体が消滅}$$

別添2-2 フジタモデルの適用について

## 5. 設計荷重の設定(3/4)

設計荷重の設定においては、各ステップに対し保守性を確保している。

### 【設計竜巻(最大風速及び特性値)】

- 揚力係数×物体の見附面積の積( $C_L a$ )の代わりに、抗力係数×見附面積の積の平均値( $C_D A$ )を用い、実際より大きな揚力を作用させ、浮上しやすくなるように計算(鋼製材であれば、 $C_D A/C_L a \doteq 1.14$ )
- 物体を強制的に高速域に配置(直上発生)
- 多点配置された物体の飛来速度の中から、最大となる飛来速度を設定(多点配置)

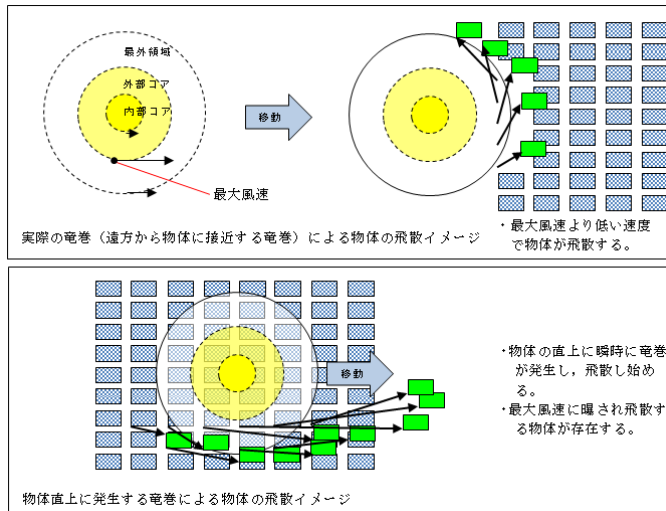


図 5-1 直上発生のイメージ

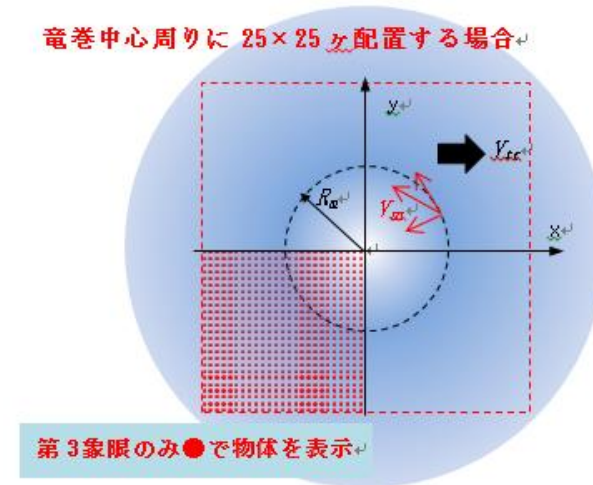


図 5-2 多点配置のイメージ

### 【設計竜巻荷重の設定】

- 竜巻の風速場は高さの影響を受けるが、算出された最大風速、最大気圧低下量に基づき設計竜巻荷重を設定

### 【影響範囲の設定】

- 飛散評価における設計飛来物の浮き上がり高さ(初期高さ0m)は0.2m程度だが、米国のReg.Guide 1.76を参照し、保守的に高さ10mを影響が及ぶ範囲として設定

## 5. 設計荷重の設定(4/4)

### (4) 設計飛来物による衝撃荷重( $W_M$ )

評価対象施設に衝突する設計飛来物の質量, 加速度により衝撃荷重 $W_M$ を算出する。

### (5) 設計竜巻荷重の組み合わせ

評価対象施設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, 以下の式により算出する。

$$W_{T1} = W_P$$

$$W_{T2} = W_W + 0.5 \cdot W_P + W_M$$

$W_{T1}, W_{T2}$  : 設計竜巻による複合荷重  
 $W_W$  : 設計竜巻の風圧力による荷重  
 $W_P$  : 設計竜巻の気圧差による荷重  
 $W_M$  : 設計飛来物による衝撃荷重

### (6) 設計竜巻荷重と組み合わせる荷重

- 組み合わせを考慮する荷重
  - 評価対象施設に常時作用する自重等の荷重, 内圧等の運転時荷重
- 竜巻以外の自然現象による荷重
  - 雷, 雪, 雹, 降水は設計竜巻荷重に包絡される
- 設計基準事故時荷重
  - 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ず独立事象であるとともに, 同時に発生する頻度は十分小さいため, 組み合わせは考慮しない。

## 6. 評価対象施設の設計方針(1/4)

前項(5. 設計荷重の設定)で示した設計荷重を考慮し、評価対象施設の機能維持に対する評価を行い、必要な対策について整理した。

### 【施設の設計方針】

- 評価対象施設については、設計荷重に対し構造健全性が維持される設計とする。
- 評価対象施設以外の設備については、以下のいずれかを満たす設計とする。
  - ・ 竜巻及びその随件事象に対して機能を維持する
  - ・ 損傷を考慮して代替設備により必要な機能を確保する (例: 外部電源喪失)
  - ・ 必要に応じプラントを停止し、安全上支障のない期間に修復する (例: 循環水ポンプ)

### 【評価対象施設の許容限界】

- 設計竜巻荷重により、発生する変形又は応力が建築基準法や規格・基準等に準拠し算定した許容限界を下回ること
- 設計飛来物の衝突による貫通又は裏面剥離が生じる限界厚さより、部材の最小厚さが上回ること

### 【飛来物に対する評価・対策範囲】

発電所構内の高低差を踏まえて、初期高さを設定し飛来物に対する評価、対策範囲を定める。  
地上面の設計飛来物(鋼製材, 初期高さ0m)の場合、最大飛散高さは非常に僅か(約0.2m)であるが、

- ・ 設計飛来物の鋼製材(4.2m)は回転して飛散する可能性があること
- ・ 米国Reg.Guide1.76にて飛来物(自動車)が9.1m(30feet)以下に影響を及ぼすとしていること

を踏まえて、設計飛来物は高さ10mまで影響を及ぼすものとして評価する。

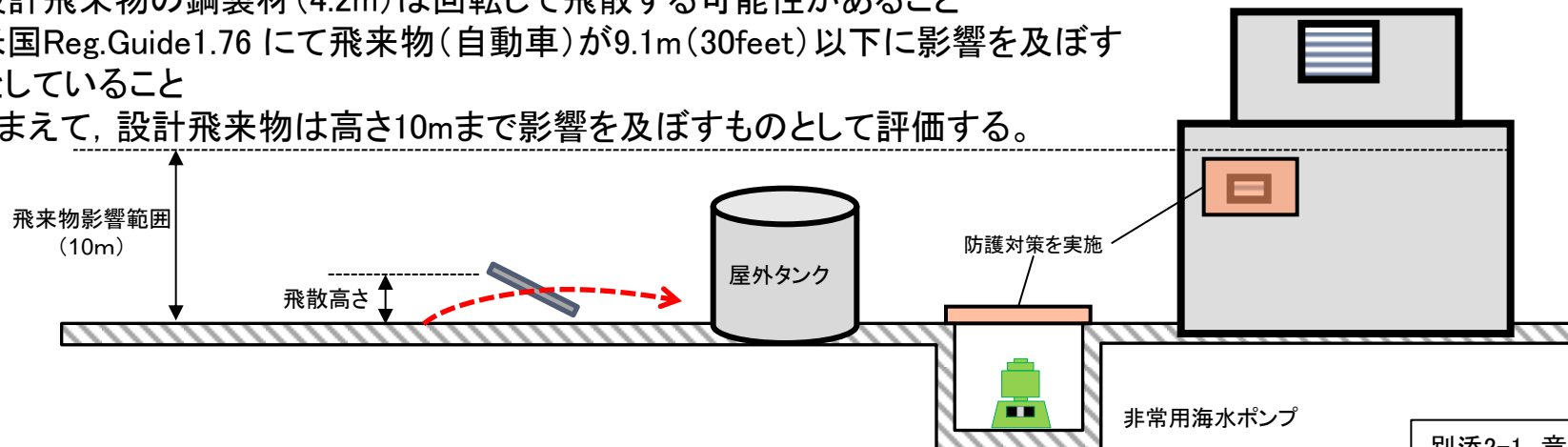


図6-1 飛来物に対する評価・対策範囲

## 6. 評価対象施設の設計方針(2/4)

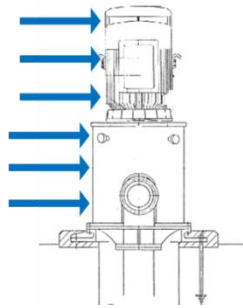
### 【構造健全性評価の例】

施設ごとに考慮すべき設計荷重に対する構造健全性評価を行い、必要に応じて防護対策を行うことで安全機能を維持する。

#### 屋外施設

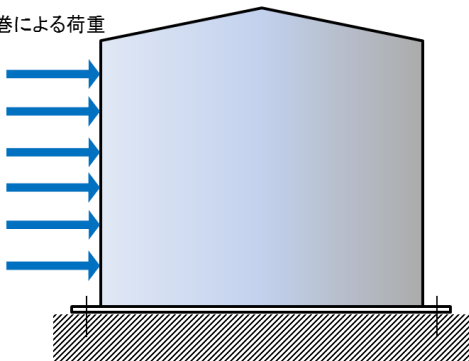
##### 海水ポンプ・モータ

竜巻による荷重



##### 復水貯蔵タンク

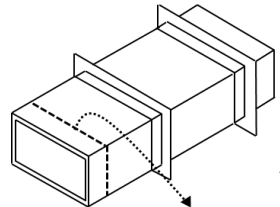
竜巻による荷重



#### 外気と繋がる施設

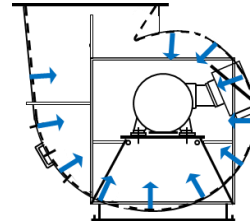
##### 換気空調系

(ダクト)

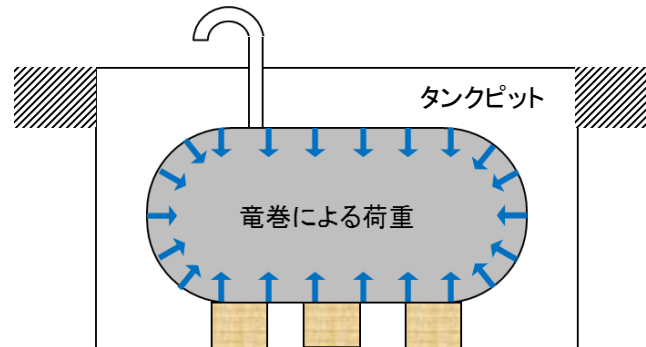


竜巻による荷重

(ファン)



##### 軽油タンク



竜巻による荷重

#### 外殻施設

##### 建屋

竜巻による荷重

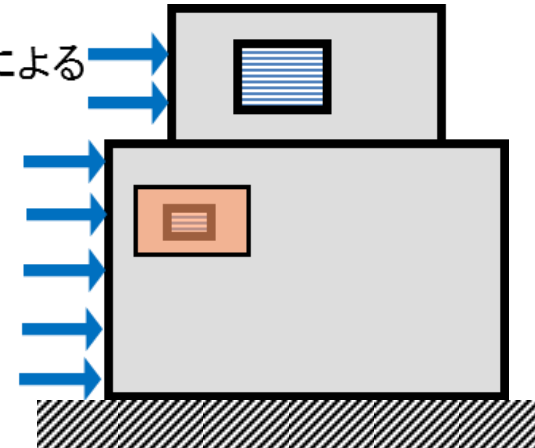


図6-2 構造健全性評価のイメージ

# 6. 評価対象施設の設計方針(3/4)

## 【竜巻随件事象に対する評価】

- 過去の被害事例や女川原子力発電所のプラント配置を踏まえ、竜巻の随件事象として、火災、溢水、外部電源喪失を抽出。
- 随件事象により損傷が発生した場合の影響評価を行い、竜巻防護施設が安全機能を損なわないことを確認。

水タンク等	①	No.1 純水タンク	⑪	1号復水浄化系復水脱塩装置硫酸・苛性ソーダ貯槽	⑳	高置水槽	㉑	配水池	
	②	No.2 純水タンク	⑫	1号差圧調整槽	㉒	高架水槽	㉓	ろ過タンク	
	③	1,2号ろ過水タンク	⑬	2号復水浄化系復水脱塩装置硫酸・苛性ソーダ貯槽・計量槽	㉔	高架水槽	㉕	ポンプ室付消火水槽	
	④	再生純水タンク	⑭	2号バック入り差圧調整装置	㉖	氷蓄熱槽	㉗	第2消火水槽	
	⑤	No.1 サプレッションプール水貯蔵タンク	⑮	3号硫酸・苛性ソーダ貯槽	㉘	主復水装置用電解鉄イオン注入装置電熱槽			
	⑥	No.2 サプレッションプール水貯蔵タンク	⑯	3号差圧調整槽	㉙	氷蓄熱槽			
	⑦	3号純水タンク	⑰	固化系固化剤タンク	㉚	受水槽			
	⑧	3号ろ過水タンク	⑱	1号給排水薬品タンク類	㉛	受水槽			
	⑨	原水タンク	⑲	1,2号給排水建屋	㉜	燃料小仕槽			
	⑩	原水タンク	⑳	3号給排水建屋	㉝	給水タンク			
	軽油タンク、変圧器等	△	大容量電原装置	△	1号起動変圧器	△	2号励磁変圧器	△	3号所内変圧器
		△	3号軽油タンク	△	1号所内変圧器	△	2号補助ボイラー変圧器	△	3号励磁変圧器
		△	1号軽油タンク	△	2号主変圧器	△	2号PLR-WVF変圧器	△	3号補助ボイラー変圧器
		△	予備変圧器	△	2号起動変圧器	△	3号主変圧器	△	3号PLR-WVF変圧器
		△	1号主変圧器	△	2号所内変圧器	△	3号起動変圧器		

○: 水タンク等(溢水)  
△: 軽油タンク、変圧器等(火災)

**枠囲みの内容は商業機密又は防護上の観点から公開できません。**

図6-3 女川原子力発電所のプラント配置図

表6-1 竜巻随件事象に対する影響評価結果

	火災	溢水	外部電源喪失
屋外	竜巻起因の火災による竜巻防護施設への影響は、外部火災影響評価に包絡されることを確認	竜巻起因の溢水による竜巻防護施設への影響は、地震起因の内部溢水影響評価に包絡されることを確認	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し、外部電源喪失により安全機能を損なわない設計とする
屋内	開口部付近の発火性又は引火性物質を内包する機器が設計飛来物による衝撃荷重を受けても安全機能を損なわない設計とする	開口部付近の溢水源が設計飛来物による衝撃荷重を受けても安全機能を損なわない設計とする	

別添2-1 竜巻影響評価について  
3.5 竜巻随件事象に対する評価

# 6. 評価対象施設の設計方針(4/4) (防護対象施設に対する防護対策) P22

## 【防護対策】

設計飛来物によって損傷する可能性がある竜巻防護施設について、下記のとおり防護対策を実施する。

### (1) 竜巻防護ネットによる防護

原子炉補機冷却海水ポンプ、電動機(配管等を含む)及び高圧炉心スプレイ補機冷却海水ポンプ、電動機(配管等を含む。)を防護するため、竜巻防護ネットを設置する。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。

また、地震の影響により竜巻防護施設に波及影響を与えない設計とする。

### (2) 防護板等による防護

設計飛来物の貫通により竜巻防護施設への影響が考えられる建屋開口部の空調ルーバ等へ防護板等を設置する。

### (3) 地下埋設による防護

軽油タンク及び燃料移送系(ポンプ、配管等)を防護するため、地下構造のタンクにリプレースを実施。

### (4) 鋼製扉強化による防護

設計飛来物の貫通により竜巻防護施設への影響が考えられる扉に対し、強化した鋼製扉にリプレースを実施する。

なお、鋼製扉は、設計飛来物の貫通力に耐える設計とする。

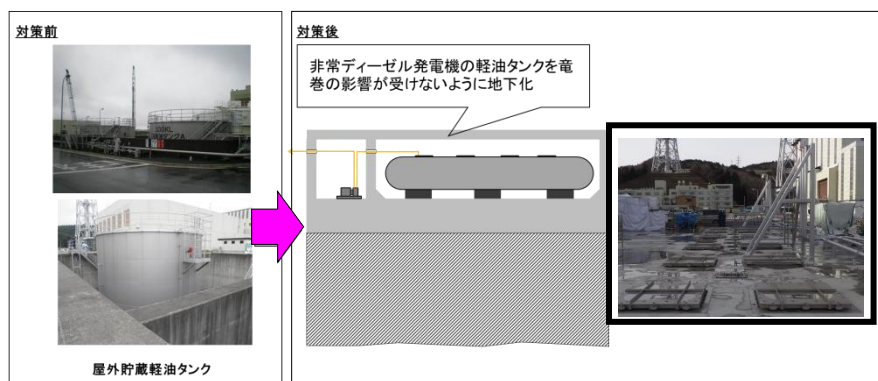


図 6-4 軽油タンク地下化

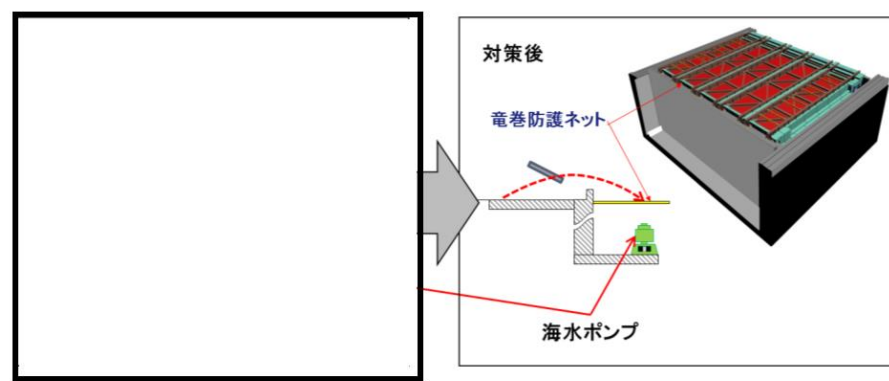


図 6-5 竜巻防護ネットの設置イメージ

枠囲みの内容は商業機密又は防護上の観点から公開できません。

別添2-1 竜巻影響評価について  
添付資料3.2 竜巻影響評価及び竜巻対策の概要

## 7. 竜巻対策(1/5) 飛散防止対策①

- 評価対象設備に対し影響を及ぼす可能性がある物品等に対する対策及び運用(ソフト対策)について示す。

### 【飛散防止対策】

設計飛来物である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、設置場所等に応じて固縛等を実施する。

#### (1) 資機材・車両

- ・飛散影響・横滑りを考慮するエリア内に設置する資機材等(発電機, コンテナボックス等)は、飛散防止の観点から、移設・撤去を行う。また、移設や撤去が困難なものについては、浮き上がりや横滑りを考慮し固縛等を行う運用とする。
- ・車両の飛散防止対策としては、移設、撤去、固縛に加え、作業中車両について竜巻発生確度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、飛散影響・横滑りを考慮するエリア外への退避を行う運用とする。

#### (2) 仮設足場

- ・竜巻による風圧力の影響により仮設足場の各部材が容易に飛散しないよう、足場材の緊結等の適切な飛散防止対策を行う運用とする。

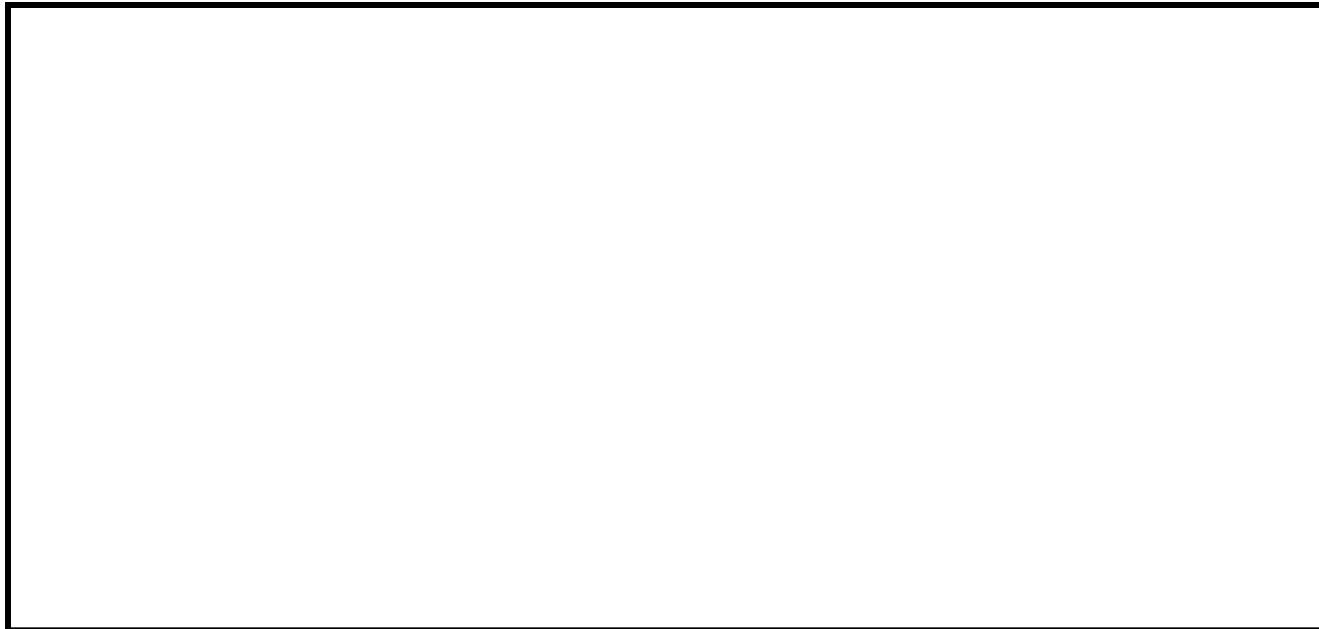


図 7-1 飛散影響・横滑りを考慮するエリア

枠囲みの内容は商業機密又は防護上の観点から公開できません。

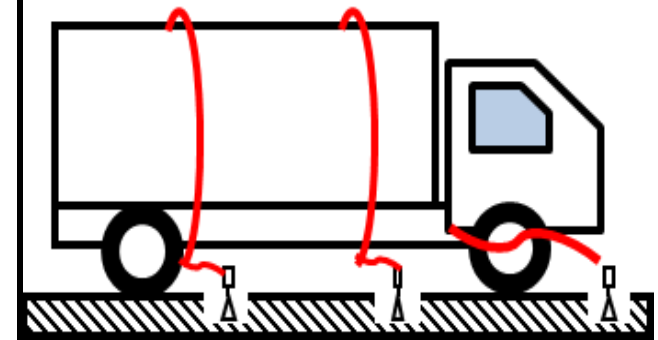


図 7-2 車両の固縛イメージ

別添2-1 竜巻影響評価について  
添付資料3.2竜巻影響評価及び竜巻対策の概要



## 7. 竜巻対策(2/5) 飛散防止対策②

可搬型SA設備は竜巻に対して以下を配慮して保管する。

- ① 原子炉建屋等に対し離隔距離を確保, 又は固縛等の飛散防止対策を実施し, 原子炉建屋等への影響を与えないこと
- ② 同じ機能を持つ設計基準対象施設(DB施設)との位置的分散を図り, 竜巻によりDB施設と同時に安全機能が喪失しないこと
- ③ 重大事故等対処設備(SA設備)の保管場所の位置的分散を図り, 竜巻により同時に全て機能喪失しないこと

表7-1 保管エリアの竜巻に対する配慮

	①DB施設への 悪影響防止※	②DB施設 との分散	③SA設備 相互の分散
第1保管 エリア	固縛 (緊急時対策所等)	DB施設は竜巻 に対して安全機 能を維持するこ とから, 同時に 機能喪失しない	第3・4保管 エリアと分散
第2保管 エリア	固縛 (緊急時対策所等)		
第3保管 エリア	離隔		第1・2保管 エリアと分散
第4保管 エリア	離隔		
第5保管 エリア	固縛 (原子炉建屋等)		第6保管 エリアと分散
第6保管 エリア	固縛 (原子炉建屋等)		第5保管 エリアと分散

※( )は悪影響防止の対象



図 7-3 可搬型SA設備の飛散防止対策(例)※

※飛散防止対策, 分散配置及び離隔状況の例であり, 別途, 設置許可基準第43条の適合性にて評価する。

枠囲みの内容は商業機密又は防護上の観点から公開できません。

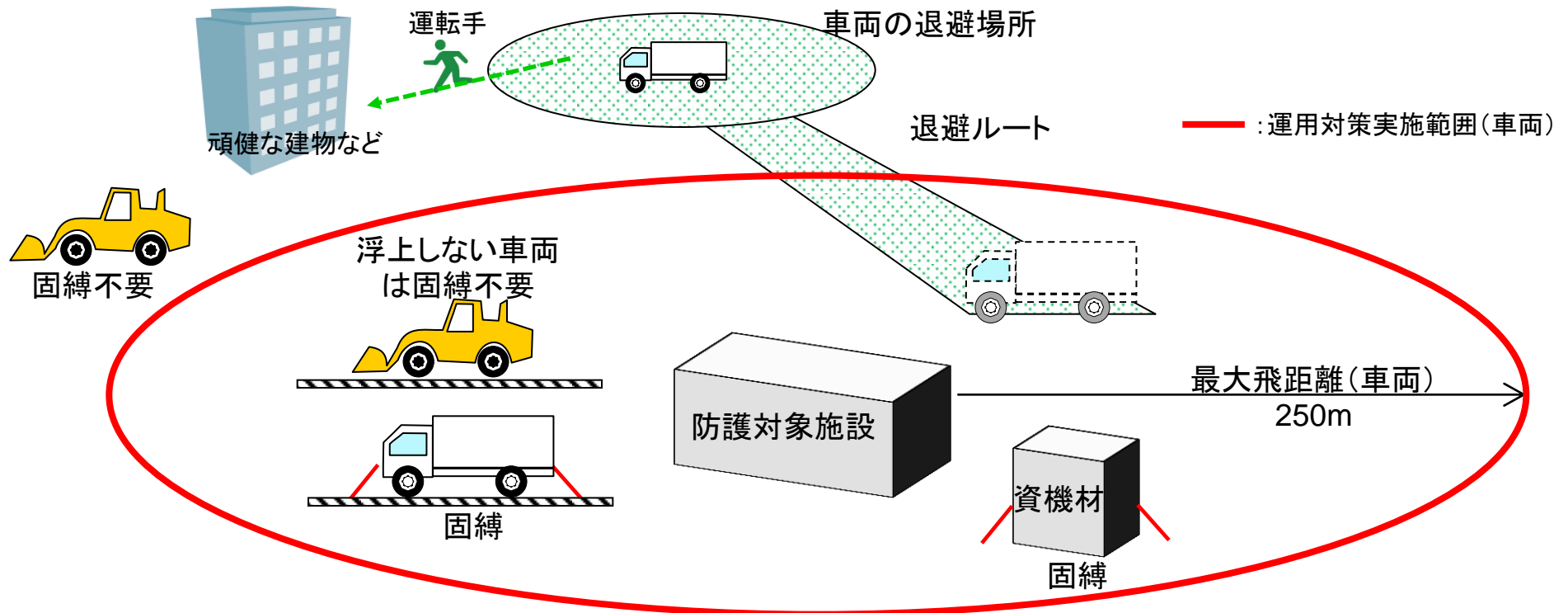
図 7-4 可搬型SA設備保管エリアの分散配置及び離隔状況(例)※

別添2-1 竜巻影響評価について  
添付資料1.1 重大事故対処施設に対する考慮について

## 7. 竜巻対策(3/5) 離隔対策①

### 【離隔による飛来物発生防止対策】

- 運用対策実施範囲内に配置する資機材は、飛散評価の結果(飛散距離, 浮上判定, 衝突エネルギー等)を踏まえ, 衝突エネルギー等が設計飛来物を越えるものは設置場所に応じ固縛。また, 設計飛来物を越えないものについても適切な飛散防止対策を実施。
- 運用対策実施範囲内の車両は, 飛散評価の結果(浮上判定, 横滑り判定)を踏まえ固縛対策を実施。
- 固縛せず停車させる場合は, 即座に車両を移動できる体制を構築し, 竜巻襲来の恐れが高まった際に, 運用対策実施範囲外の退避場所に車両を移動。



## 7. 竜巻対策(4/5) 離隔対策②

- 気象庁が発表する竜巻関連の気象情報を踏まえ、竜巻運用対策の実施基準(竜巻警戒レベル)を定める。

表 7-2 竜巻警戒レベルの設定

竜巻警戒レベル	発令条件(案)	運用対策(案)
低 (注意喚起レベル)	石巻市および女川町で雷注意報が発令	連絡体制の確認
中 (対応準備レベル)	対象地域内(下図A)で竜巻発生確度ナウキャストの発生確度2または雷ナウキャストの活動度4が発令	車両, 人の退避準備
高 (退避レベル)	発電所上空(下図B, C)で竜巻発生確度ナウキャストの発生確度2または雷ナウキャストの活動度4が発令	車両, 人の退避

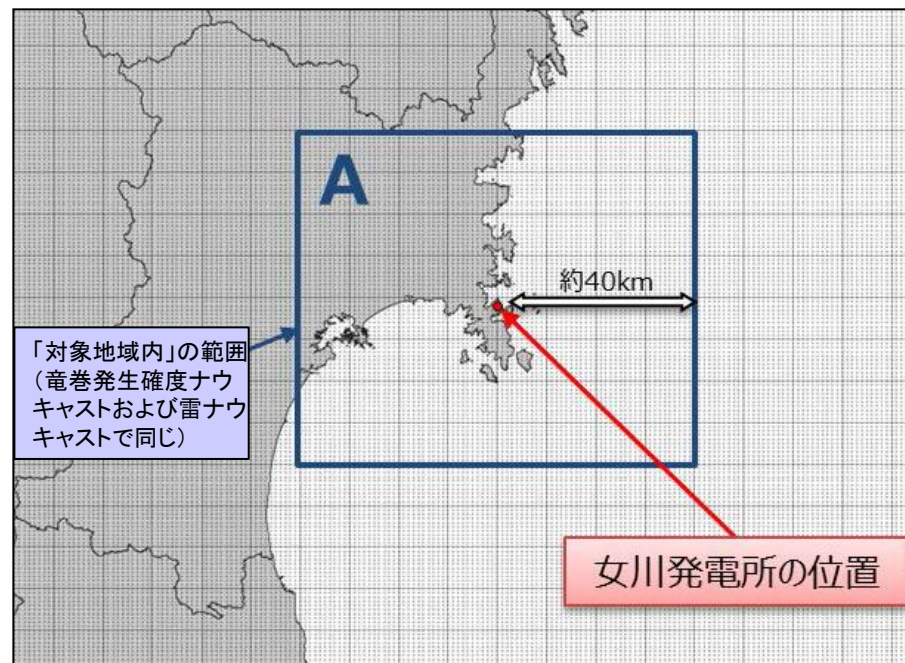


図 7-6 対象地域の範囲

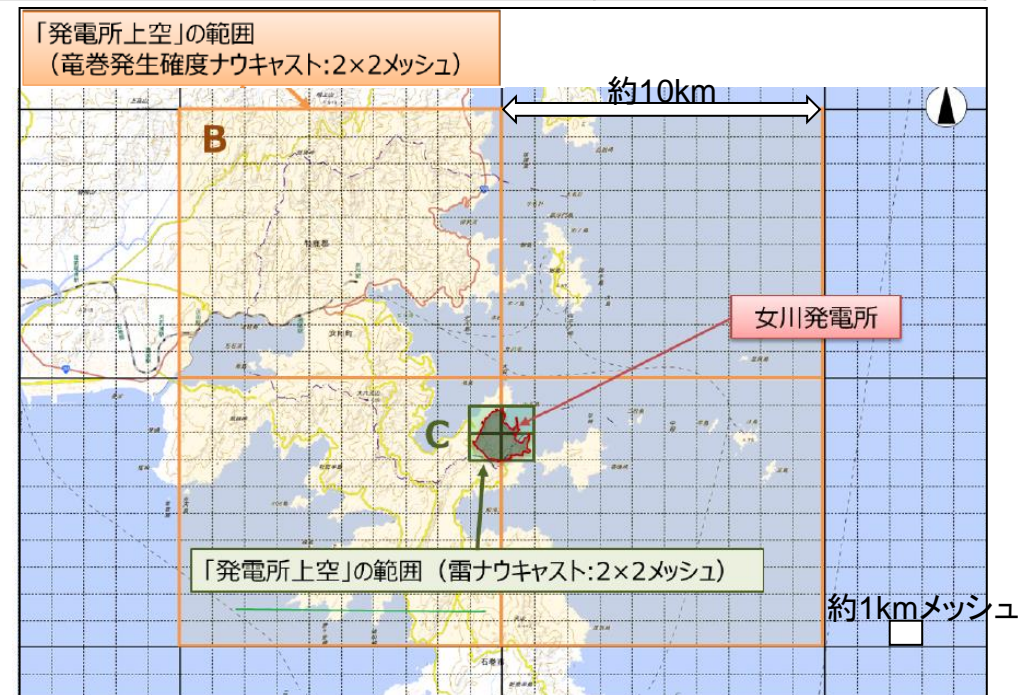
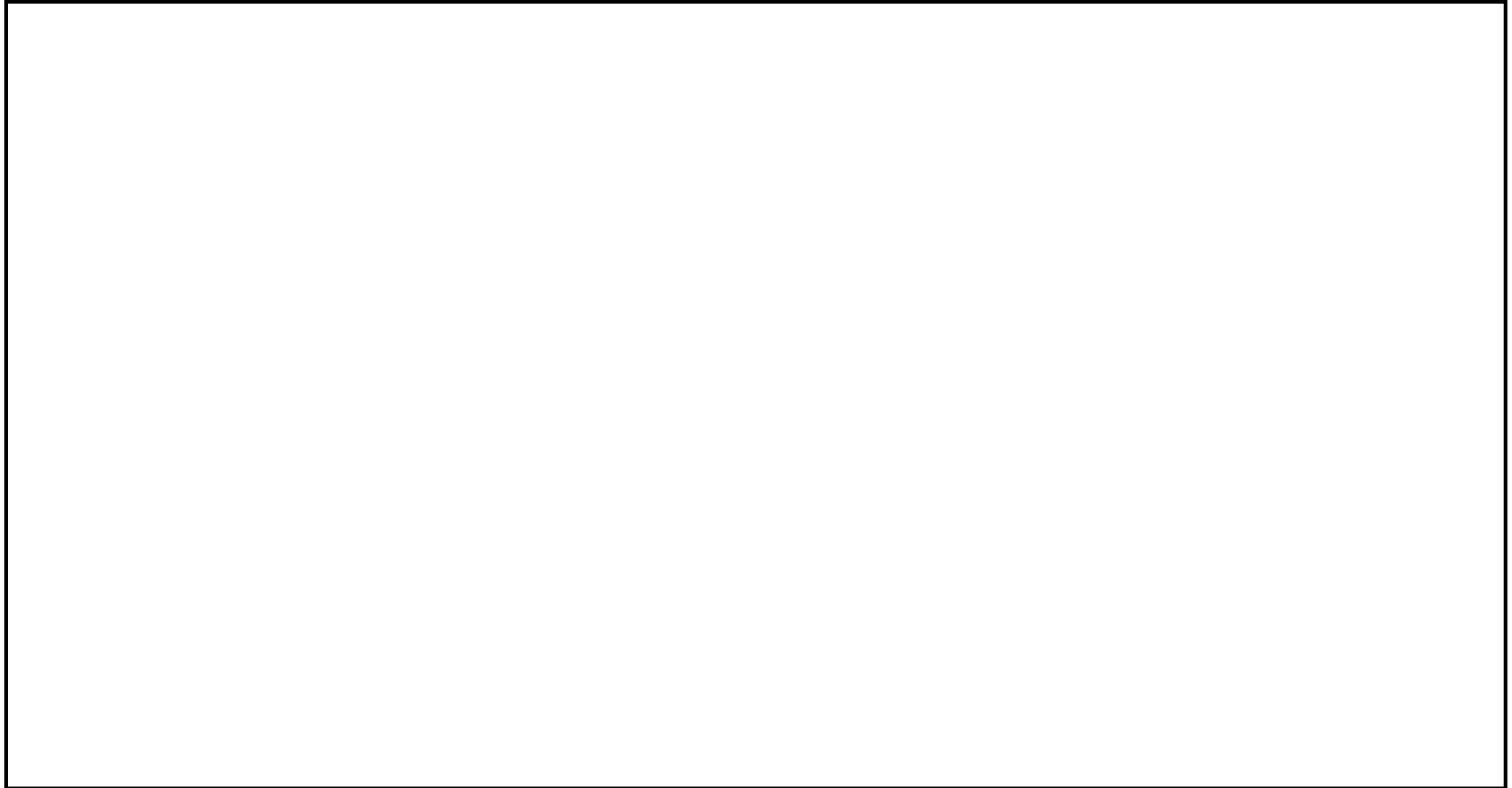


図 7-7 発電所上空の範囲

## 7. 竜巻対策(5/5) 離隔対策③

- 車両は、竜巻襲来のおそれが高まった場合、竜巻防護施設に対し離隔、退避することで、影響を与えないようにする。
- 車両退避場所は、退避時の混雑も考慮し発電所内に複数個所を設定する。



※1: 発電所構内のうち、資機材、車両を保管する可能性のあるエリアの最大高さ  
※2: コンテナボックスは、代表飛来物のうち資機材として最も飛散距離がある  
※3: 車両(軽)は、代表飛来物のうち車両として最も飛散距離がある

枠囲みの内容は商業機密又は防護上の観点から公開できません。

図 7-8 竜巻発生時の退避イメージ

別添2-1 竜巻影響評価について  
添付資料3.2 竜巻影響評価及び竜巻対策の概要