

3 <竜巻>

- ・竜巻対策について
- ・竜巻影響評価について

竜巻影響評価の基本方針

- 「実用発電所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。

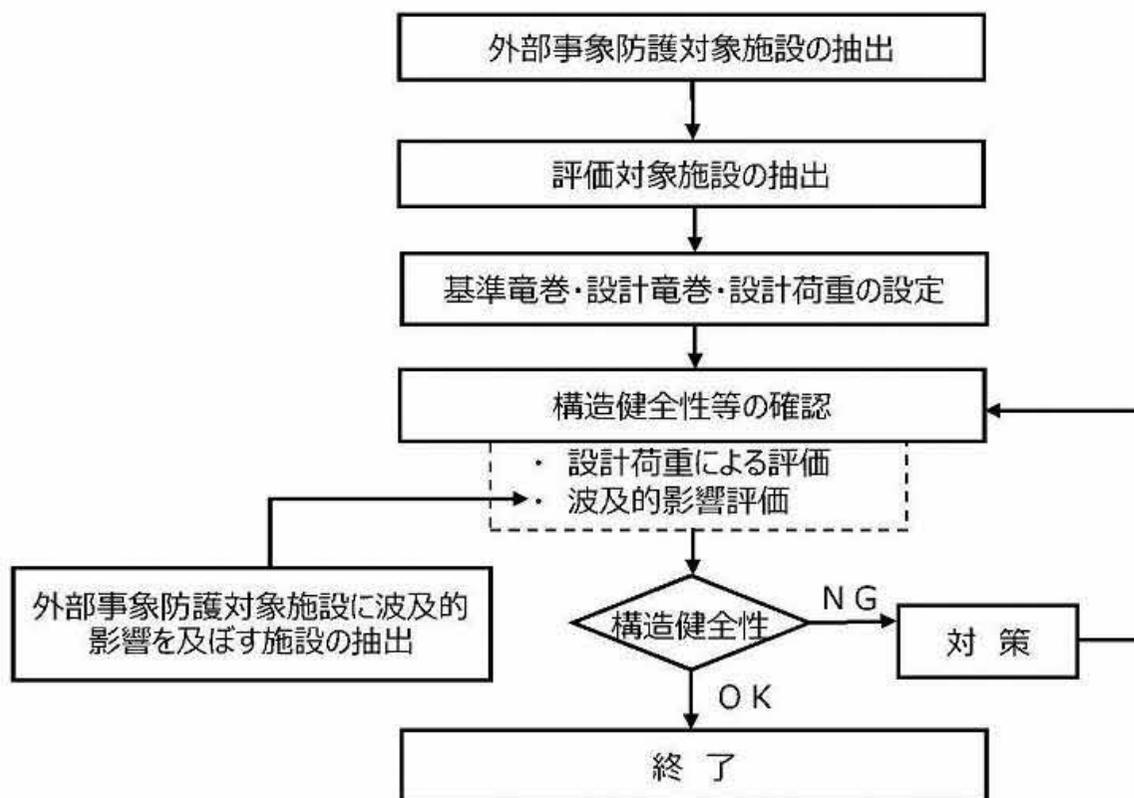


図1 竜巻影響評価の基本フロー

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うち評価対象施設を以下のフローにより抽出する。

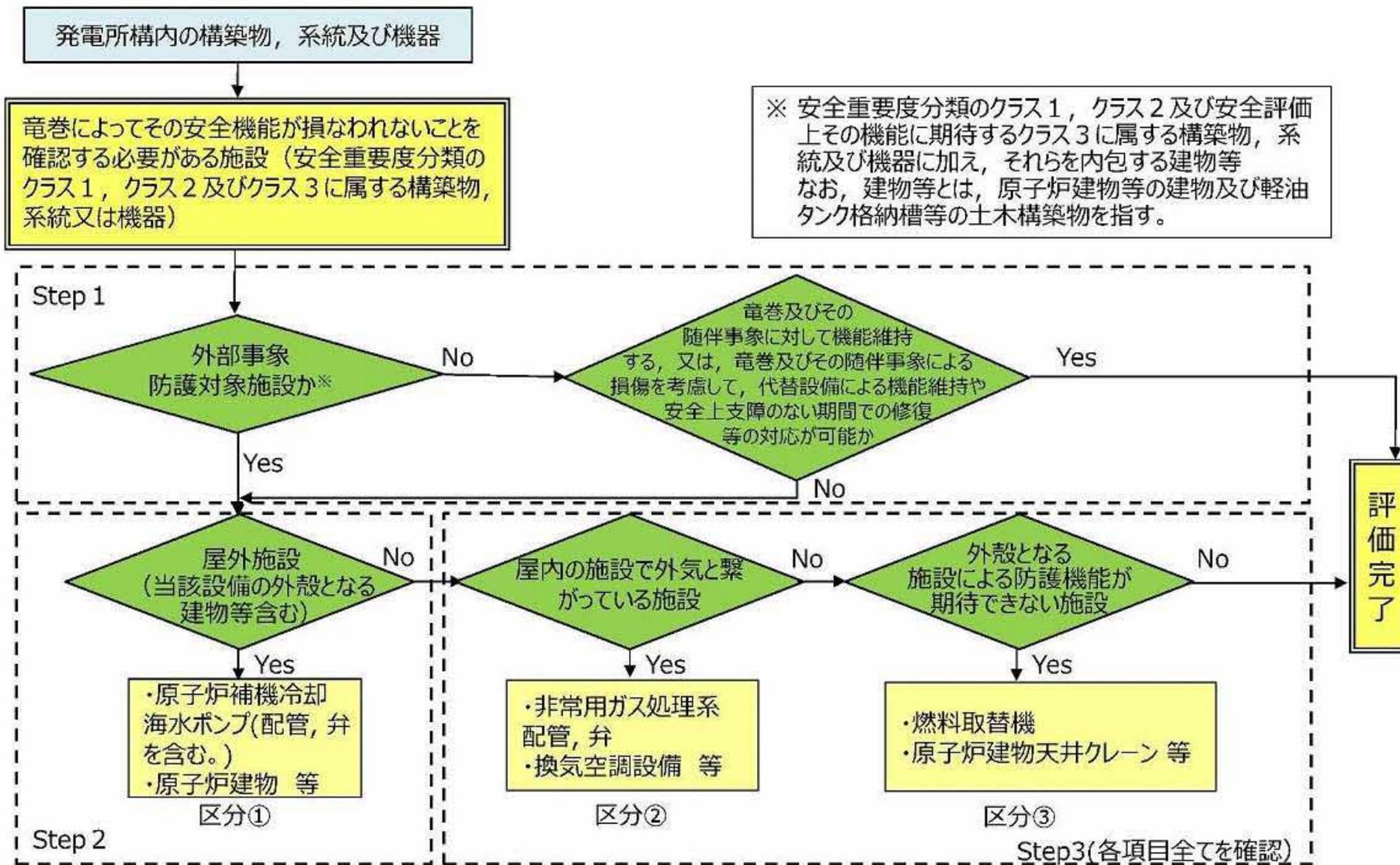


図1 外部事象防護対象施設のうち評価対象施設の抽出フロー

外部事象防護対象施設のうち評価対象施設

表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

区分	抽出結果
① 屋外施設	<ul style="list-style-type: none"> ・原子炉補機冷却海水ポンプ（配管，弁を含む。） ・復水貯蔵タンク ・排気筒（非常用ガス処理系排気管を含む。） ・原子炉建物，タービン建物，制御室建物，軽油タンク格納槽，復水貯蔵タンク基礎・遮蔽壁，屋外配管ダクト(原子炉建物～復水貯蔵タンク)
② 屋内の施設で 外気と繋がって いる施設	<ul style="list-style-type: none"> ・原子炉建物 換気空調設備（原子炉建物付属棟換気空調系，原子炉・タービン建物換気空調系） ・制御室建物 換気空調設備（中央制御室換気空調系，制御室建物計測制御用電源盤区域換気空調系） ・原子炉建物 非常用ガス処理系配管，弁
③ 外殻となる施設 による防護 機能が期待で きない施設	<ul style="list-style-type: none"> ・原子炉建物1階 非常用ディーゼル発電設備 ・原子炉建物3階 原子炉建物付属棟空調換気系 ・原子炉建物5階 原子炉建物天井クレーン，燃料取替機，燃料プール，燃料プール冷却浄化系配管及び弁，使用済燃料貯蔵ラック，燃料集合体，原子炉補機冷却水系配管及び弁，サージタンク ・制御室建物1階 中央制御室換気空調系 ・制御室建物2階 直流電源設備

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

- 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以下のフローにより抽出する。

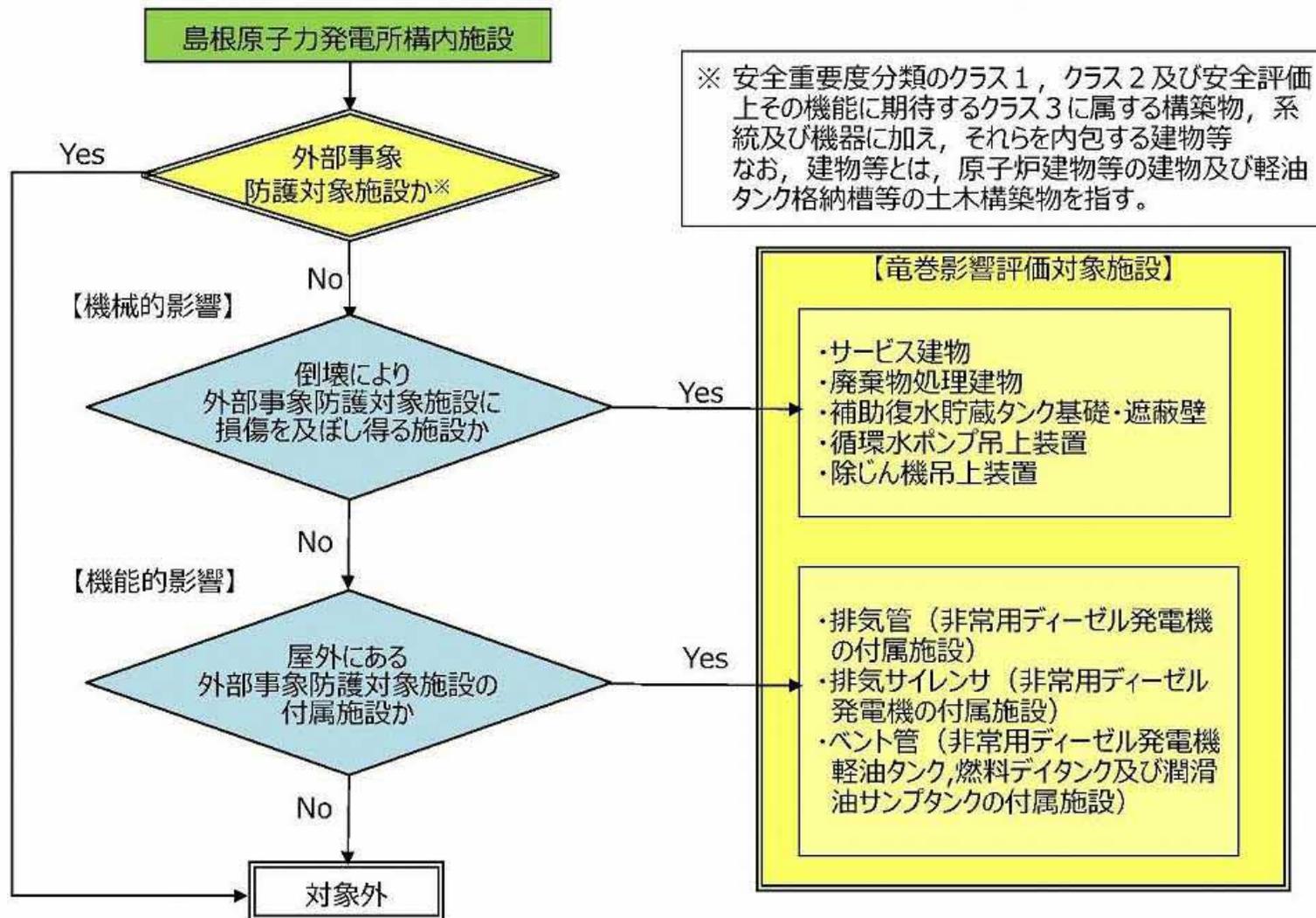


図2 外部事象防護対象施設に波及的影響を及ぼし得る評価対象施設の抽出フロー

- 評価対象施設等の構内配置は以下のとおり。

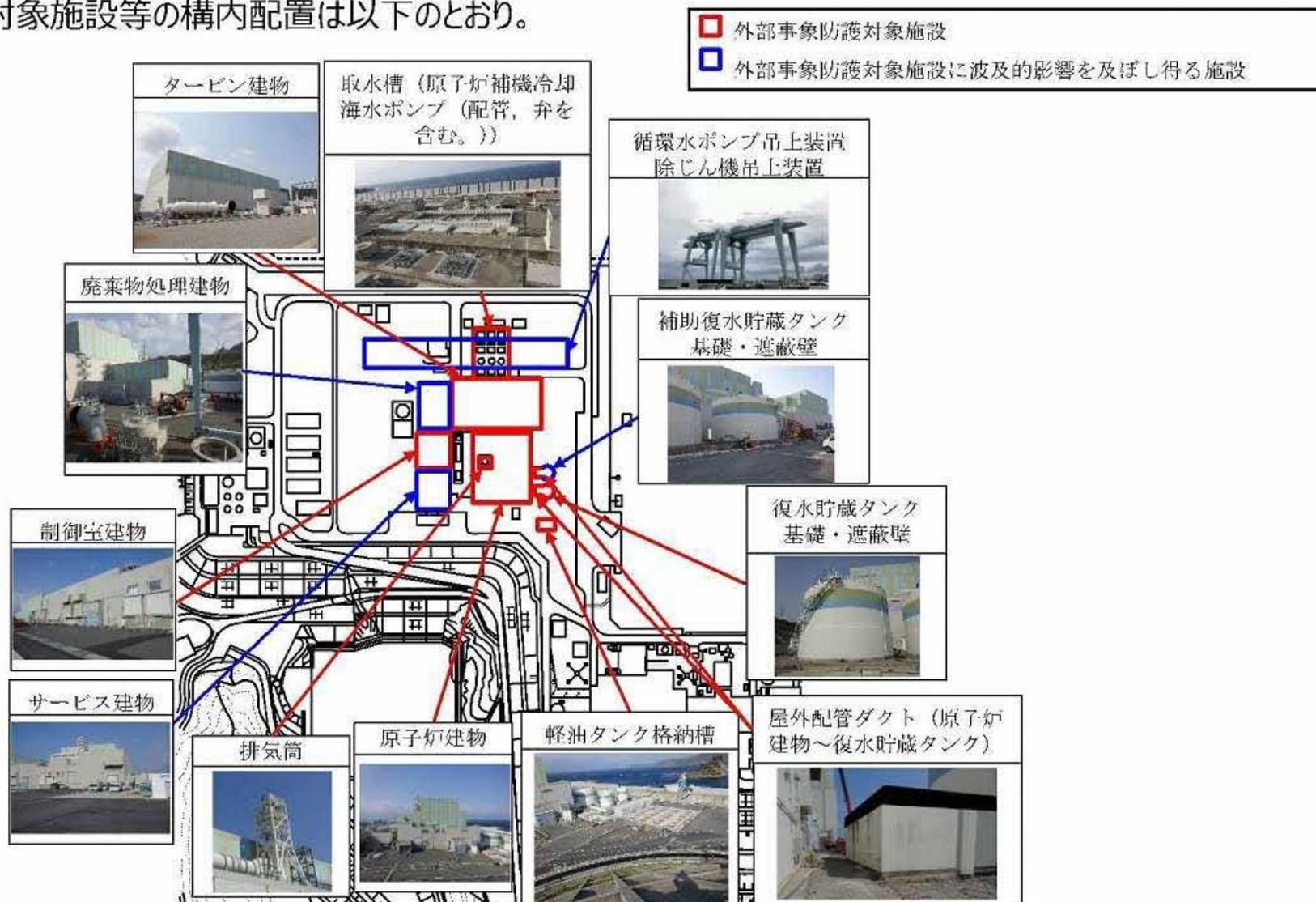


図3 外部事象防護対象施設のうち評価対象施設及び外部事象施設に波及的影響を及ぼし得る評価対象施設の構内配置図

基準竜巻・設計竜巻の設定

- 基準竜巻・設計竜巻の設定の概要
以下のフローに従い、設計竜巻を設定する。

〔結果の概要〕

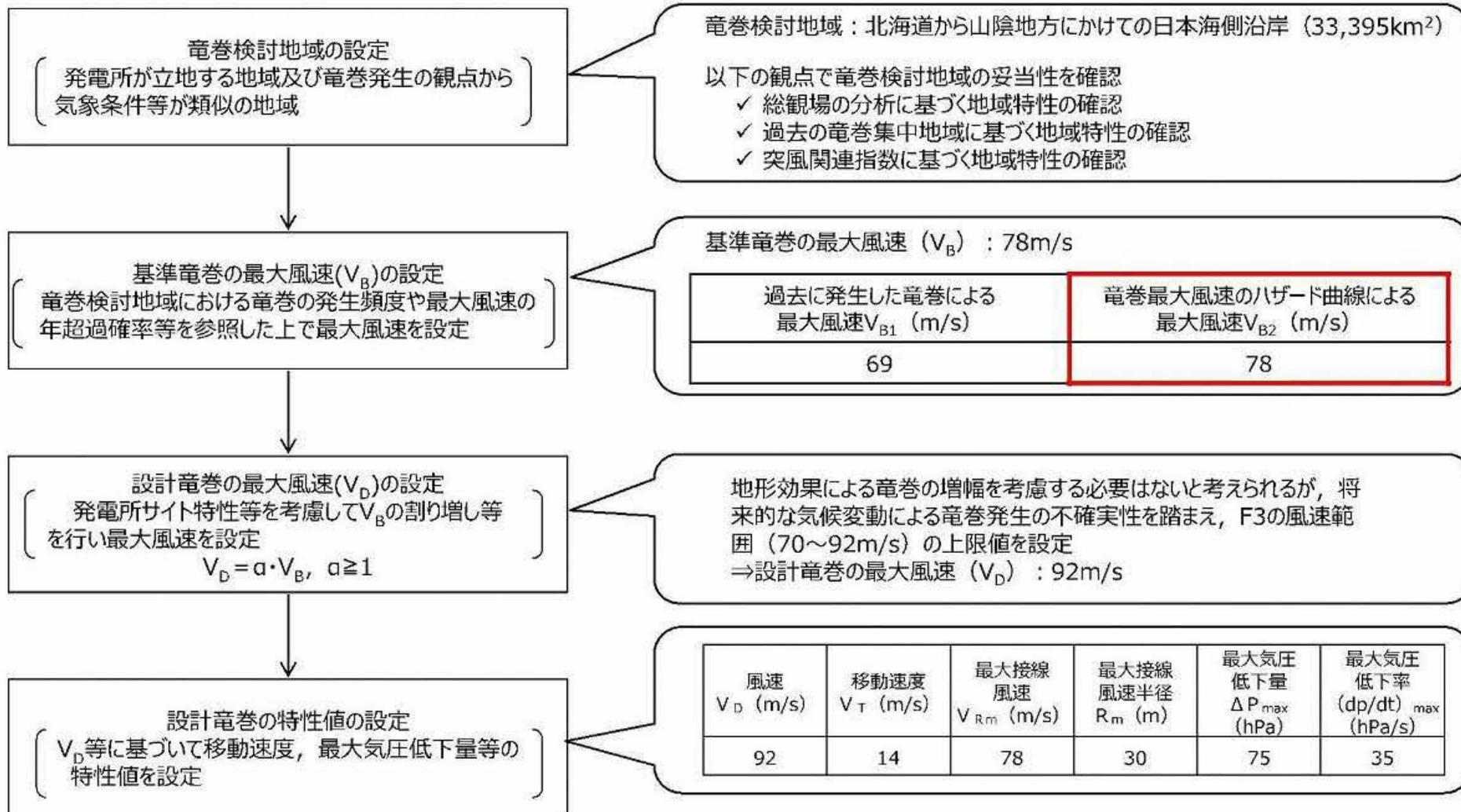


図1 基準竜巻・設計竜巻の設定に係る基本フロー

基準竜巻・設計竜巻の設定

●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以下の検討を行い、日本海側沿岸（北海道から本州、各都道府県に含まれる島、離島を含む）の海岸線より海側5kmと陸側5kmの地域（面積：33,395km²）を竜巻検討地域に設定
 - 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

●過去に発生した竜巻による最大風速 V_{B1}

- ✓ 竜巻検討地域における過去最大竜巻は気象庁「竜巻等の突風データベース」によるとF2である
- ✓ F2における風速は50～69m/sであることから、風速範囲の上限値69m/sを V_{B1} と設定



図2 竜巻検討地域（赤線部）

表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）

発生日時	発生場所	Fスケール※
1962年09月28日	北海道宗谷支庁東利尻町	(F2)
1971年10月17日	北海道留萌支庁羽幌町	(F2)
1974年10月03日	北海道檜山支庁奥尻郡奥尻町	(F1～F2)
1974年10月20日	北海道檜山支庁檜山郡上ノ国町	(F1～F2)
1975年05月31日	島根県簸川郡大社町	(F2)
1975年09月08日	北海道檜山支庁奥尻郡奥尻町	(F1～F2)
1979年11月02日	北海道渡島支庁松前郡松前町	(F2)
1989年03月16日	島根県簸川郡大社町	(F2)
1990年04月06日	石川県羽咋郡富来町	F2
1999年11月25日	秋田県八森町	(F1～F2)

※ 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、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

基準竜巻・設計竜巻の設定

- 竜巻最大風速のハザード曲線による最大風速 V_{B2}
 - ✓ 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た結果、 10^{-5} /年の風速値はそれぞれ61m/s, 62m/sとなる
 - ✓ 竜巻ハザード曲線算出のためのデータの不確実性を踏まえ、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と設定
- 基準竜巻の最大風速 V_B
 - ✓ V_{B1} （69m/s）及び V_{B2} （78m/s）のうち、大きな風速を適用し78m/sを V_B と設定

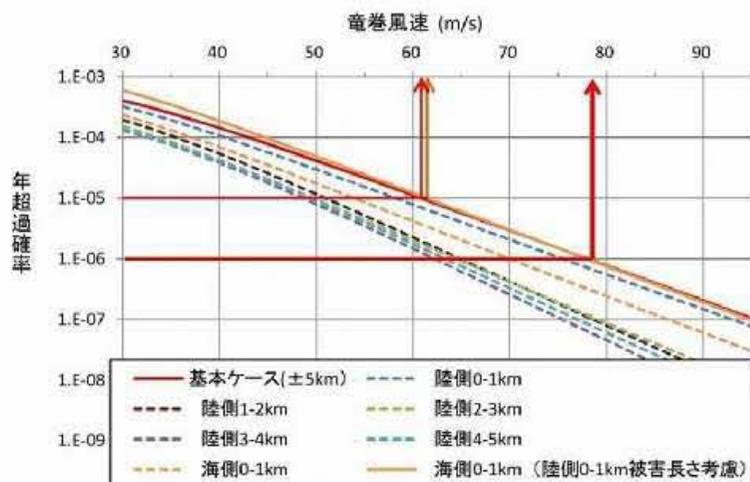


図3 竜巻最大風速のハザード評価

表2 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

基準竜巻・設計竜巻の設定

■ 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】

- ✓ 島根原子力発電所が位置する竜巻集中地域で発生した竜巻は、主に海上又は沿岸部で発生しており、東又は南の方向に移動する
- ✓ 竜巻が海上から発電所（陸上）に移動する場合、地形が平坦であるため竜巻が増幅することはなく、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減衰
- ✓ 竜巻が西方から発電所に移動する場合、上り斜面・下り斜面の影響をほぼ同程度受けるため竜巻が増幅することはなく、発電所西方は森林などに相当する地表面粗度区分Ⅲの影響を受けるため減衰

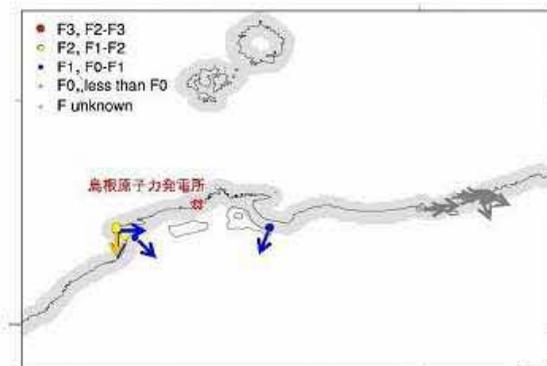
- 上記の確認結果より、地形効果による竜巻の増幅を考慮する必要はないと考えられるが、将来的な気候変動による竜巻発生の不確実性を踏まえ、 V_B の値がF3の風速範囲（70～92m/s）にあることから設計竜巻の最大風速 V_D はF3の風速範囲の上限値92m/sと設定

■ 設計竜巻の特性値の設定

- 「竜巻影響評価ガイド」に示される方法に基づき下表のとおり設定する。

表3 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 ΔP_{max} (hPa)	最大気圧 低下率 $(dp/dt)_{max}$ (hPa/s)
92	14	78	30	75	35



133E 図4 竜巻移動方向



図5 島根原子力発電所周辺の地表面粗度

風圧力・気温差による荷重、設計飛来物の衝撃荷重の設定

ガイドに示された式を用いて、設計竜巻の特性値を設定する。

- 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、下式より算定する。

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

q :設計用速度圧 ($= (1/2) \cdot \rho \cdot V_D^2$), G :ガスト影響係数($= 1.0$), C :風力係数, A :施設の受圧面積,
 ρ :空気密度, V_D :設計竜巻の最大風速

- 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荷重の設定(W_P)

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荷重(W_P)は、最大気圧低下(ΔP_{max})に基づき設定する。

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

ΔP_{max} :最大気圧低下量, A :施設の受圧面積

- 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(W_M)
衝撃荷重(W_M)は、設計飛来物の寸法、質量及び速度を用いて設定する。

表1 島根原子力発電所における設計飛来物（詳細は5. で説明）

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

設計竜巻荷重の組合せ、設計竜巻荷重と組み合わせる荷重

■ 設計竜巻荷重の組合せ

- 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。

$$W_{T1} = W_P$$

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

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

■ 設計竜巻荷重と組み合わせる荷重の設定

- 組合せを考慮する荷重

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

雪、ひょう、降水は設計竜巻荷重に包絡されるため、組合せは考慮しない。なお、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。

- 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、組合せは考慮しない。

評価に用いる竜巻風速場モデル

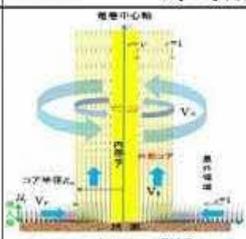
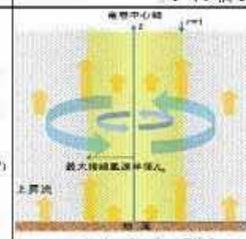
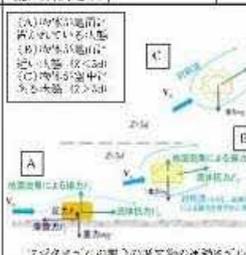
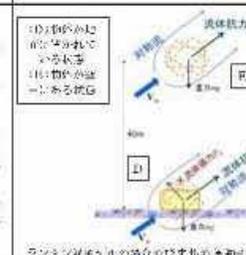
- 気圧差による荷重 W_p 及び設計飛来物による衝撃荷重 W_M は、以下の竜巻風速場モデルをベースに評価
 - W_p の設定：ランキン渦モデル
フジタモデルに比べて計算が簡便であり、最大気圧低下量が保守的な値となるランキン渦モデルを採用
 - W_M の設定：フジタモデル
ランキン渦モデルに比べて物品の飛散挙動を実現象に近く評価できるフジタモデルを採用

表2 竜巻荷重の設定要素と竜巻風速場の適用状況

設計荷重設定要素		適用対象		設定	備考
		W_p	W_M		
竜巻の基本特性	竜巻の移動速度 V_T	○	○	14(m/s)	設計竜巻の最大風速 V_D (92m/s) からガイドの式を用いて算出
	最大接線風速 V_{Rm}	○	○	78(m/s)	
	最大接線風速半径 R_m	—	○	30(m)	
	最大気圧低下量 ΔP_{max}	○	—	75(hPa)	
飛散解析に関する設定	設計飛来物の設定	—	○	鋼製材	フジタモデルによる飛散解析結果を包絡するガイドの鋼製材を設定
	想定飛来物の初期高さ	—	○	飛来物毎に設定	フジタモデルは風速分布が高さ方向で変化するため、飛来物の配置状況を踏まえ個別に設定
	内部コア半径と外部コア半径の比 v	—	○	0.3	フジタモデルの風速場の形を決めるパラメータ (文献値)
	流入層高さ H_i	—	○	15(m)	フジタモデルの風速場の形を決めるパラメータ (文献値)

■ 「フジタモデル」と「ランキン渦モデル」及びこれらを用いた飛散解析手法の特徴は以下のとおり。

表3 「フジタモデル」及び「ランキン渦モデル」の特徴及び飛来物評価手法の比較

	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）																									
風速場モデル	各風速場モデルの概要	 <p>・ Fujitaにより実験値に基づき提案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。 ・ 半径方向に（内部コア、外部コア、最外面域）の3つの領域で構成され、外部コアに上昇風速を有する。 ・ 接線風速や上昇風速に高さ依存性がある。 ・ 米NRC重要施設の基本において、竜巻飛来物速度、飛散高さの設定に使用。</p>			 <p>・ 簡易な式で上空での水平方向の風速場を表現。 ・ 上昇流は全領域に存在。 ・ 接線風速や上昇風速に高さ依存性がなく、地面から吹き出しが生じる流れとなっている（飛散評価を行う場合、地上からの物体の浮上・飛散挙動を表現できないため、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）。 ・ 米NRC Regulatory Guide 1.76Cにて採用。</p>																								
	メリット	<p>・ 地面付近の物体へ影響を与える風速場をよく表現できており、地上からの物体の浮上・飛散挙動が可能。 → 地上における積造物に対する力や挙動を把握するために適しているモデルであり、防護設計や防護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>・ 簡易な式で上空での水平方向の風速場を表現可能。</p>																								
	デメリット	<p>・ 地表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。</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。 → 地上における積造物に対し、過度に保守的な防護対策や円筒対策が必要となる。 （例えば、SA中面を円筒とすることで、機動性が損なわれる）</p>																								
	主なパラメータ (設計竜巻の最大風速92m/sの場合)	<table border="1"> <tr><td>竜巻の移動速度 V_T</td><td>11 (m/s)</td></tr> <tr><td>最大接線風速 V_{Rm}</td><td>78 (m/s)</td></tr> <tr><td>最大接線風速半径 R_m</td><td>30 (m)</td></tr> <tr><td>最大気圧低下量 ΔP_{min}</td><td>64 (hPa)</td></tr> <tr><td>最大気圧低下率 $(dp/dt)_{max}$</td><td>42 (hPa/s)</td></tr> <tr><td>内部コア半径と外部コア半径の比 γ</td><td>0.3</td></tr> <tr><td>竜巻最高高さ H</td><td>15 (m)</td></tr> </table>	竜巻の移動速度 V_T	11 (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)	最大気圧低下量 ΔP_{min}	64 (hPa)	最大気圧低下率 $(dp/dt)_{max}$	42 (hPa/s)	内部コア半径と外部コア半径の比 γ	0.3	竜巻最高高さ H	15 (m)	<p>評価サイズの値や式が風速場モデルに上らないことと確認のため、各値や式をフジタモデルへ適用。</p>		<table border="1"> <tr><td>竜巻の移動速度 V_T</td><td>11 (m/s)</td></tr> <tr><td>最大接線風速 V_{Rm}</td><td>78 (m/s)</td></tr> <tr><td>最大接線風速半径 R_m</td><td>30 (m)</td></tr> <tr><td>最大気圧低下量 ΔP_{min}</td><td>75 (hPa)</td></tr> <tr><td>最大気圧低下率 $(dp/dt)_{max}$</td><td>35 (hPa/s)</td></tr> </table>	竜巻の移動速度 V_T	11 (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)	最大気圧低下量 ΔP_{min}	75 (hPa)	最大気圧低下率 $(dp/dt)_{max}$	35 (hPa/s)
竜巻の移動速度 V_T	11 (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)																												
最大気圧低下量 ΔP_{min}	64 (hPa)																												
最大気圧低下率 $(dp/dt)_{max}$	42 (hPa/s)																												
内部コア半径と外部コア半径の比 γ	0.3																												
竜巻最高高さ H	15 (m)																												
竜巻の移動速度 V_T	11 (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)																												
最大気圧低下量 ΔP_{min}	75 (hPa)																												
最大気圧低下率 $(dp/dt)_{max}$	35 (hPa/s)																												
飛来物評価手法	物体の浮上・飛来モデル	 <p>①物体に働く揚力・抗力② ・ 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により、地面効果による揚力を考慮（左図A/B） ・ 流れの速度方向に平行な抗力については考慮（左図A〜C）、但し地面付近では抗力の影響は小さい。 ③揚力係数④ ・ 地面から吹き上がる際の物体挙動を理論的に評価すると困難であるため、要のような地盤形状を確保保守的となるよう、風速場の結果を踏まえ、代川の揚力係数を算出。 ⑤揚力係数⑥ ・ 揚力係数は傾きの受け方や高さに依存することを踏まえ、流体のレイノルズ数や高さを変化させた場合でも、代加揚力係数が正確より保守的にしていることを確認。</p>			 <p>①物体に働く揚力・抗力② ・ 地面より非現実的な値の揚力が発生し、地面効果は発現しにくいため、地面効果による揚力を考慮していない（左図D） ③流れの速度方向に平均的な抗力を考慮（左図D/E） ④揚力係数⑤ ・ 地面効果による場合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。</p>																								
	竜巻が物体に与える速度等に関する設定	<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。 ・ 実際に竜巻が遠方から近づく場合には、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。 ・ 地表付近の風速場の不確定性を考慮し、以下を実施。 → 設計飛来物の設定においては、任意の地上からの初期高さにおける飛散解析結果を包絡するよう最大水平速度を設定。 → 飛来物発生防止対策においては、物体の地上からの初期高さを0m及び5mとした場合の飛散解析を実施。 → 地面上に設置された物体の飛散解析結果を用いたシナリオ設定の妥当性を確認。</p>			<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。 ・ 実際に竜巻が遠方から近づく場合には、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。</p>																								

設計飛来物の設定フロー

- 島根原子力発電所の飛来物に係るワークダウンを行い、飛来物となる可能性があるものから、浮上りの有無、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。

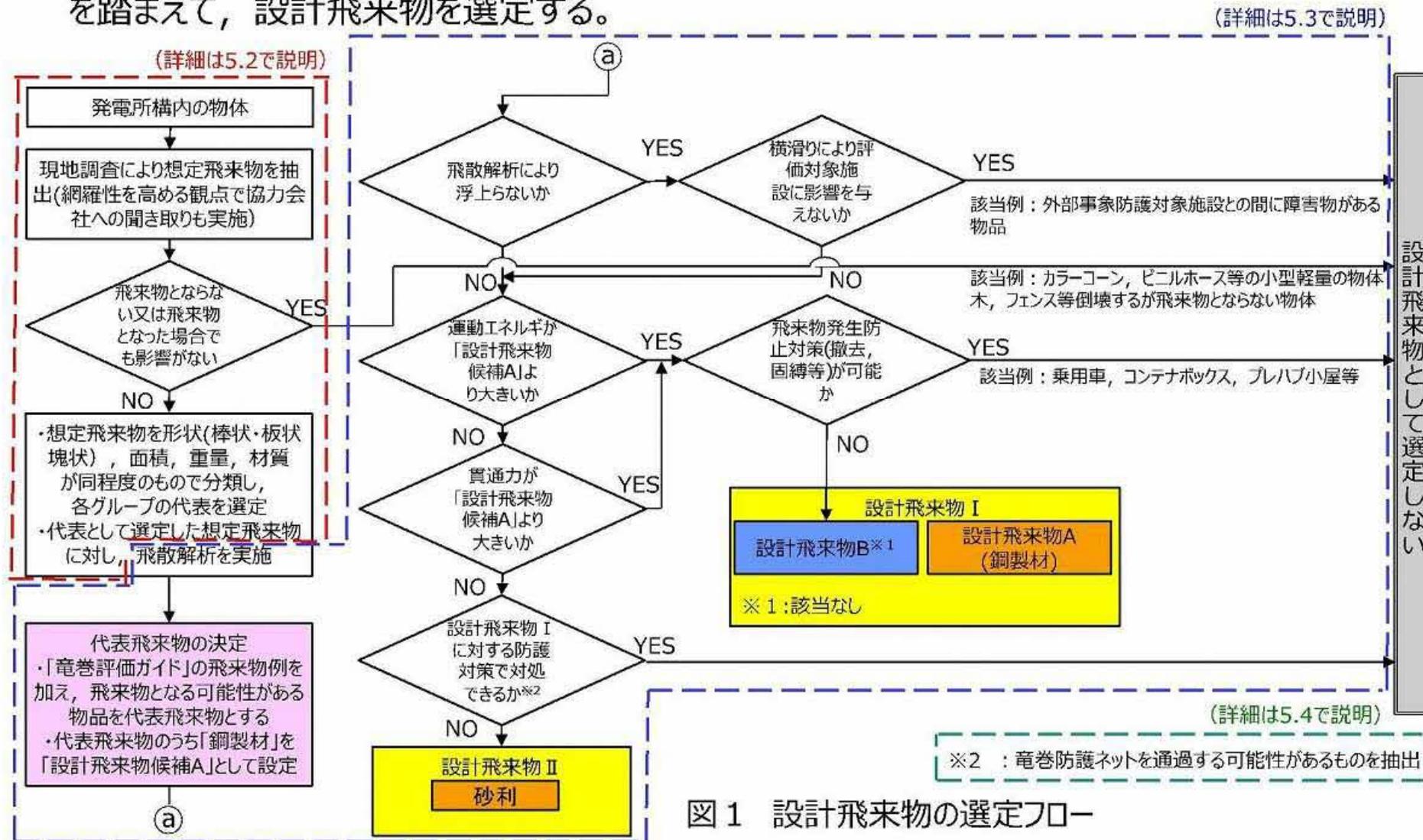


図1 設計飛来物の選定フロー

想定飛来物の抽出及び分類

■ 想定飛来物の抽出

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。）について、平成25年及び令和6年に調査し、約1100個の想定飛来物を抽出した。令和6年の調査においても、想定飛来物としては平成25年の調査と同様の結果になった。

□ : 現地調査範囲

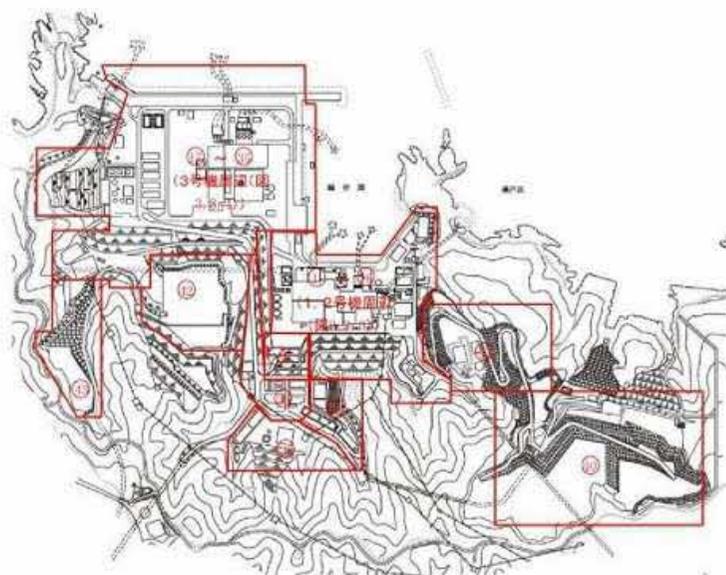


図2 竜巻飛来物現地調査範囲図（全体図）



図3 現地調査結果（抜粋）

- ・想定飛来物を形状で分類（棒状・板状・塊状）
- ・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

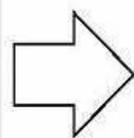


表1 各形状の代表として選定した想定飛来物

棒状	板状	塊状
鋼製材 鋼製パイプ 等	マンホール蓋 仮設足場 等	コンテナボックス 乗用車・トラック 等

想定飛来物の設定評価

- 想定飛来物等の飛散解析結果を比較し、固縛等の飛来物発生防止対策を考慮した上で、運動エネルギー及び鋼板の貫通限界厚さが最大となる「鋼製材（ガイド）」を設計飛来物※¹として設定
 なお、塊状の想定飛来物については、固縛等の飛来物発生防止対策が可能であることから、想定飛来物の設定から除外した。
 ※1 寸法：長さ4.2m×幅0.3m×高さ0.2m、質量：135kg
- 各形状の代表として選定した想定飛来物の飛散解析結果 ※2 工事に伴い組み上げた仮設足場からの飛散を想定
- 鋼製パイプ（足場パイプ）、足場板※²の地上高さ40mからの飛散解析結果
- ガイドにおいて例示された飛来物

なお、設計飛来物は評価対象施設等などの高さに対しても衝突を考慮する。

表2 想定飛来物等の飛散解析結果

	形状	飛来物	解析モデル	最大速度 (m/s)	運動エネルギー (kJ)	鋼板の貫通限界 厚さ※ ⁵ (mm)	コンクリートの貫通限界 厚さ※ ⁶ (mm)
各形状の 代表として 選定した想 定飛来物	棒状	鋼製パイプ[ガイド]	フジタモデル※ ³	45	9	14	11
		鋼製パイプ1	フジタモデル※ ³	45	17	22	14
	板状	仮設足場	フジタモデル※ ³	62	25	6	14
ガイド例示	棒状	鋼製パイプ[ガイド]	LESモデル[ガイド]※ ⁴	49	11	18	11
		鋼製材[ガイド]	LESモデル[ガイド]※ ⁴	51	176	34※ ⁷	27

□：設計飛来物※¹

※³：最大風速92m/s で解析

※⁵：BRL式を用いて算出

※⁴：最大風速100m/s で解析

※⁶：修正ENDRC 式及び、Degen 式を用いて算出

※⁷：34mmは一般的な鋼材料の場合であり、

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。

想定飛来物の設定評価

- 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、その後、緩やかに減少するモデルとなっている。
- フジタモデルを用いた飛散解析においては、物品の地上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。
- 任意の地上高さにある鋼製材をフジタモデルを用いて飛散解析した結果、いずれの高さから飛散した場合でも、その最大速度は51m/sを上回ることはない。

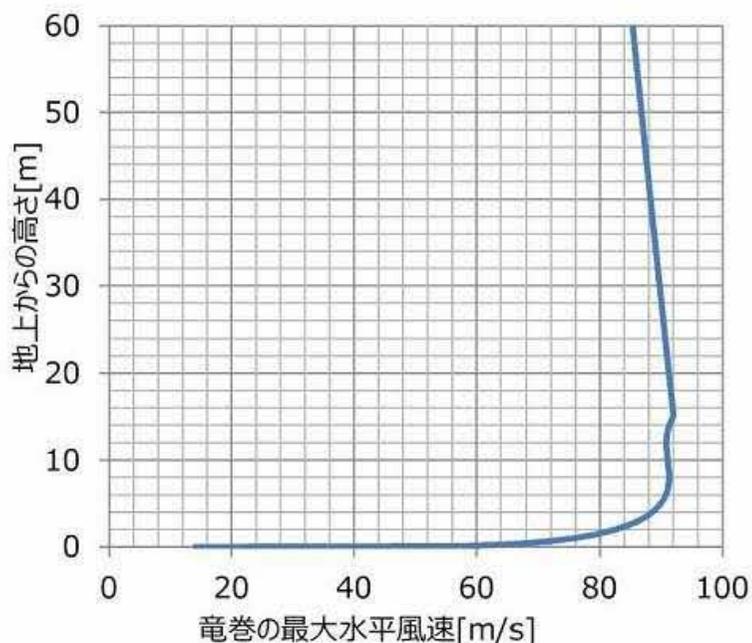


図4 フジタモデルの風速場における最大水平風速と地上からの高さの関係（フジタモデル最大接線風速半径での値）

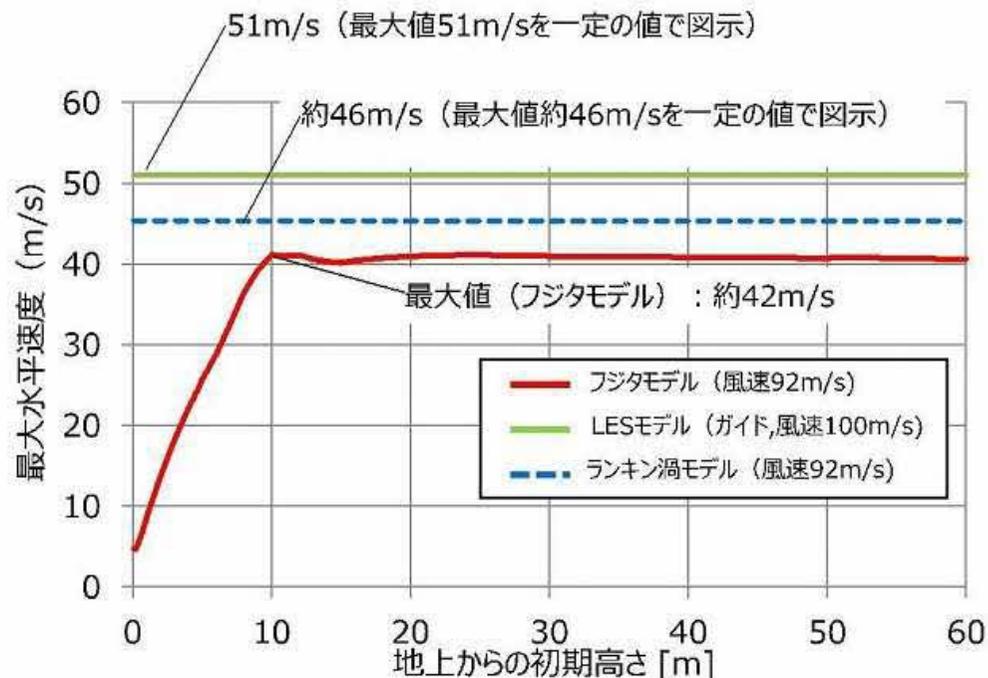


図5 各風速場モデルにおける鋼製材の飛散解析結果

砂利等の極小飛来物の影響について

- 砂利等の極小飛来物による設備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影響がないと考えられる。この理由を以下に示す。
 - 砂利等の極小飛来物による衝撃荷重 W_M
砂利等の極小飛来物による荷重は、短時間の衝突となるため、設備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。
 - 砂利等の極小飛来物の貫通力
極小飛来物として砂利及び大型のひょうを対象に、鋼板に対する貫通力(貫通厚さ)をBRL式※¹により算出した。いずれも貫通力は1 mm未満であり、設備への影響はない。

※ 1 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)

表 3 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※ ²	0.2
	直径0.1	0.5	59※ ²	0.8

※ 2 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。

評価対象施設の設計方針

■ 屋外施設（建物等含む）

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。

■ 外部事象防護対象施設のうち、屋内の施設で外気と繋がっている施設

外気と繋がっている施設は、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対策設備等による竜巻防護対策を講じる方針とする。

■ 外殻となる施設等による防護機能が期待できない施設

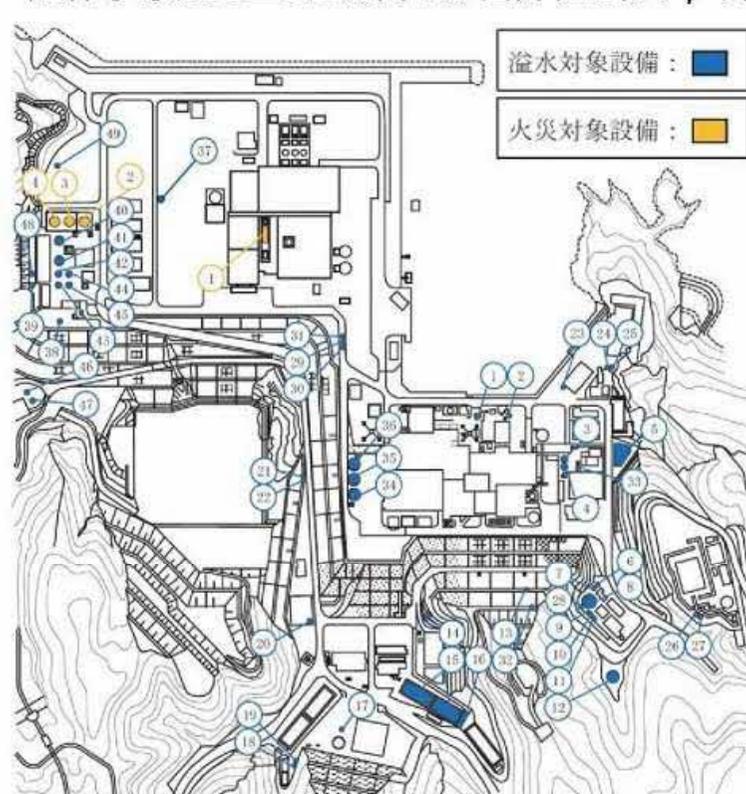
外殻となる施設による防護機能が期待できない施設は、設計荷重に対して、安全機能が維持される設計とし、必要に応じて竜巻防護対策設備等による竜巻防護対策を講じる方針とする。

■ 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

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、設備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。

竜巻随件事象に対する評価

- 過去の被害事例や島根原子力発電所のプラント配置を踏まえ、竜巻随件事象として、火災、溢水、外部電源喪失を抽出。
- 随件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ないことを確認。



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	28	22m貯水水槽
	2	高圧油受槽 (1号)		29	仮設水槽-1 (2号西側法面付近)
	3	純水タンク (A)		30	仮設水槽-2 (2号西側法面付近)
	4	純水タンク (B)		31	仮設水槽-3 (2号西側法面付近)
	5	管束集約所1号貯水槽調整池		32	71m貯水水槽 (2槽)
	6	1号ろ過器		33	原水受槽
	7	1号ろ過器槽		34	2号仮設貯水タンク
	8	1号ろ過水タンク		35	2号補助貯水貯蔵タンク
	9	2号ろ過器槽		36	2号トローラス水受入タンク
	10	2号ろ過器		37	3号仮設海水淡水化装置 (海水受水槽)
	11	2号濃縮槽		38	仮設合併処理槽
	12	2号ろ過水タンク		39	宇中受水槽
	13	59mトイレ用水貯槽		40	消火用水タンク (A)
	14	取水80L水槽		41	消火用水タンク (B)
	15	検査貯水槽 (東側)		42	3号純水タンク (A)
	16	検査貯水槽 (東側) 沈砂池		43	3号純水タンク (B)
	17	ガスタービン発電機用軽油タンク用消火タンク		44	3号ろ過水タンク (A)
	18	A-44m濃縮水タンク		45	3号ろ過水タンク (B)
	19	B-44m濃縮水タンク		46	A-45m濃縮水タンク
	20	貯水水洗タンク		47	B-45m濃縮水タンク
	21	雑用水タンク		48	宇中合併浄化槽 (1)
	22	宇中系統中継水塔 (西山水塔)		49	宇中合併浄化槽 (2)
	23	管理事務所1号貯水タンク		1	主変圧器
	24	B-サイトバンカ中貯水タンク		2	No.1 重油タンク
	25	A-サイトバンカ中貯水タンク		3	No.2 重油タンク
	26	A-50m貯水タンク		4	No.3 重油タンク
	27	B-50m貯水タンク			

図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

表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外部事象防護対象施設への影響は、外部火災評価に包絡されることを確認。	竜巻起因の溢水による外部事象防護対象施設への影響は、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。
屋内	設計竜巻により飛来物が侵入し、火災が発生した場合でも、発電用原子炉施設の安全機能維持に影響を与えない。	設計竜巻により飛来物が侵入した場合でも、開口部付近に溢水により発電用原子炉施設の安全機能維持に影響を与えない。	

- 竜巻防護対策設備（竜巻防護ネット、鋼製扉、竜巻防護鋼板）による防護
 - 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屋外施設開口部へ支持部材及び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とともに、小径の飛来物（砂利を除く）のすり抜けを防止する設計とする。
 - 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する。
 - 外部事象防護対象施設である原子炉建物や復水貯蔵タンクに対して竜巻防護鋼板（材質：原子炉建物はSS400、復水貯蔵タンクは ）の設置等の防護対策を行う。



図1 竜巻防護対策の位置図

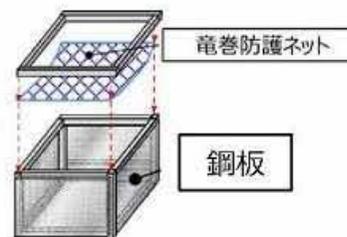


図2 竜巻防護ネットの竜巻防護対策イメージ

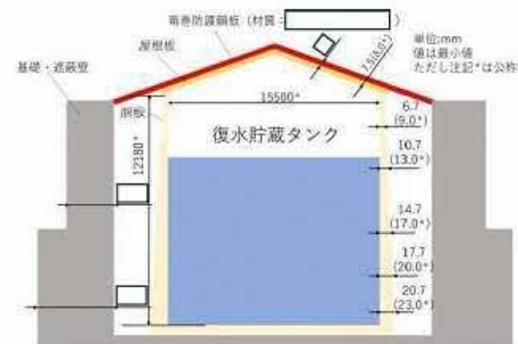


図3 竜巻防護鋼板の設置イメージ

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の概要

- 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で、評価対象施設に到達し得るものについて固縛等を実施する。

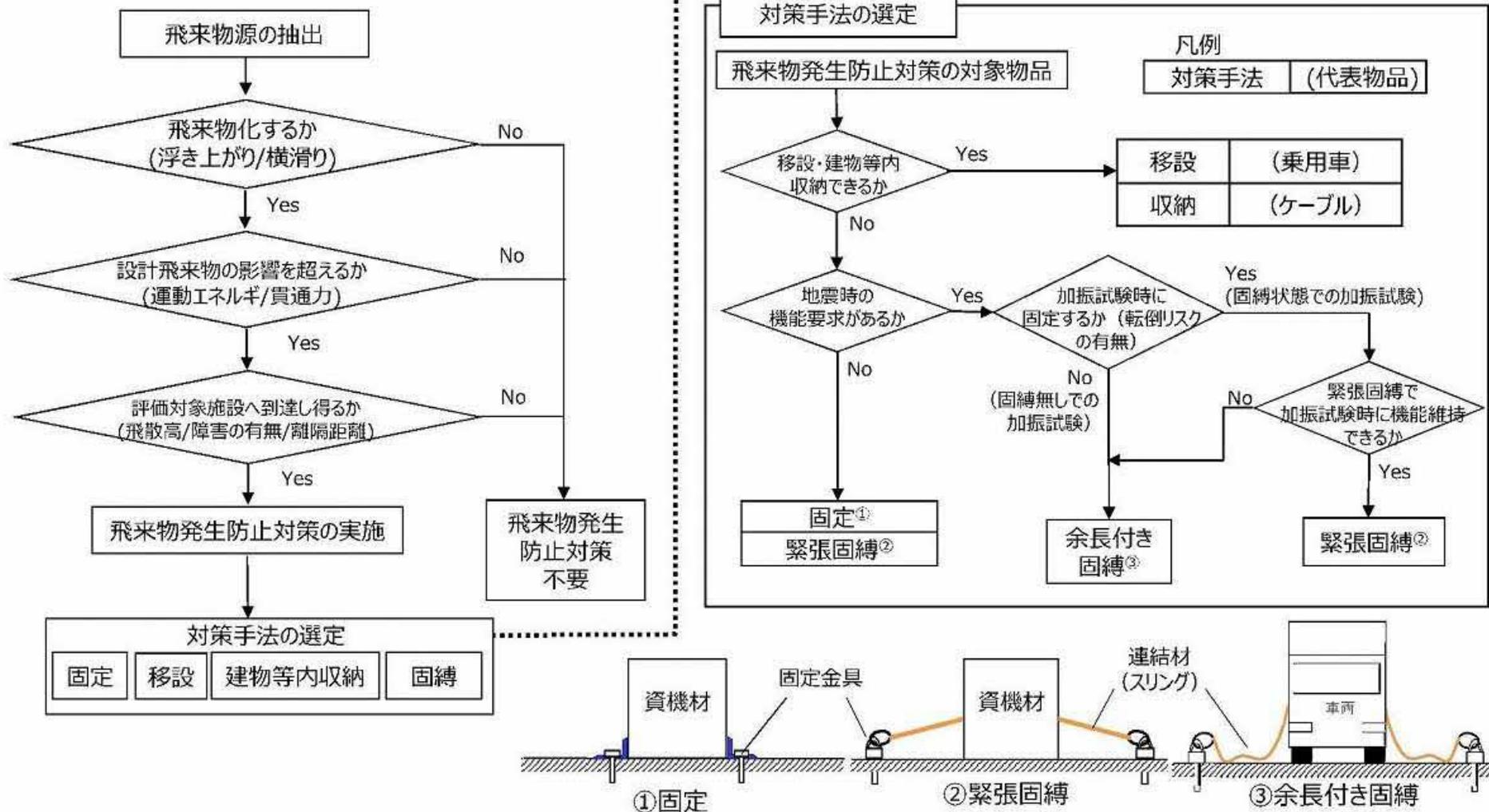


図1 飛来物発生防止対策のフロー及び固定・固縛の例

飛来物発生防止対策エリア

島根2号炉と同様の方針
ただしEL.及びそれに伴う飛散距離の増加を除く
(島根2号炉は最大EL.50m)

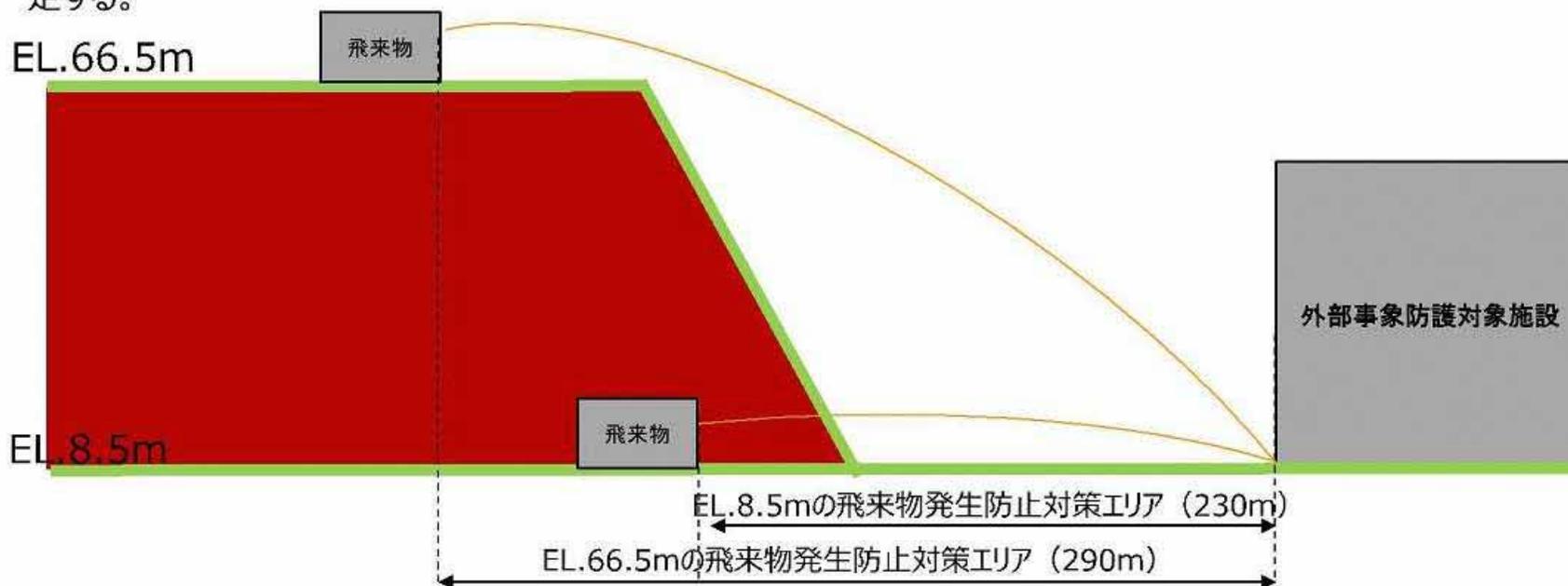
- 飛来物発生防止対策の運用管理の対象として、「資機材・車両」及び「軽量大型機材」に分類。

表1 飛来物発生防止対策エリアの設定方法

	資機材・車両	軽量大型機材
主な物品	小型自動二輪車, 鋼製材, 乗用車	プレハブ小屋, コンテナ ボックス, 仮設トイレ
飛来物発生防止 対策エリアの設定 (敷地高さ毎に設定)	・最も飛散距離が大きい 「小型自動二輪車」の 飛散距離※から設定	・最も飛散距離が大きい 「プレハブ小屋」の飛散 距離※から設定

※解析コード「TONBOS」を用いて飛散距離を算出

- 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」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。



- 発電所構内の敷地高さ (8.5m, 15m, 45m, 50m, 60m, 66.5m) 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。
- 飛散しない「資機材・車両」及び「軽量大型機材」であっても横滑り※の検討が必要であるため、ガードレール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。

※解析コード「TONBOS」を用いて横滑りの有無, 移動距離を算出

資機材・車両の管理イメージ

- 発電所へ入構する車両については、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を考慮して対策を行う。（竜巻警戒レベルについては9.4，車両の退避については9.5 参照。）

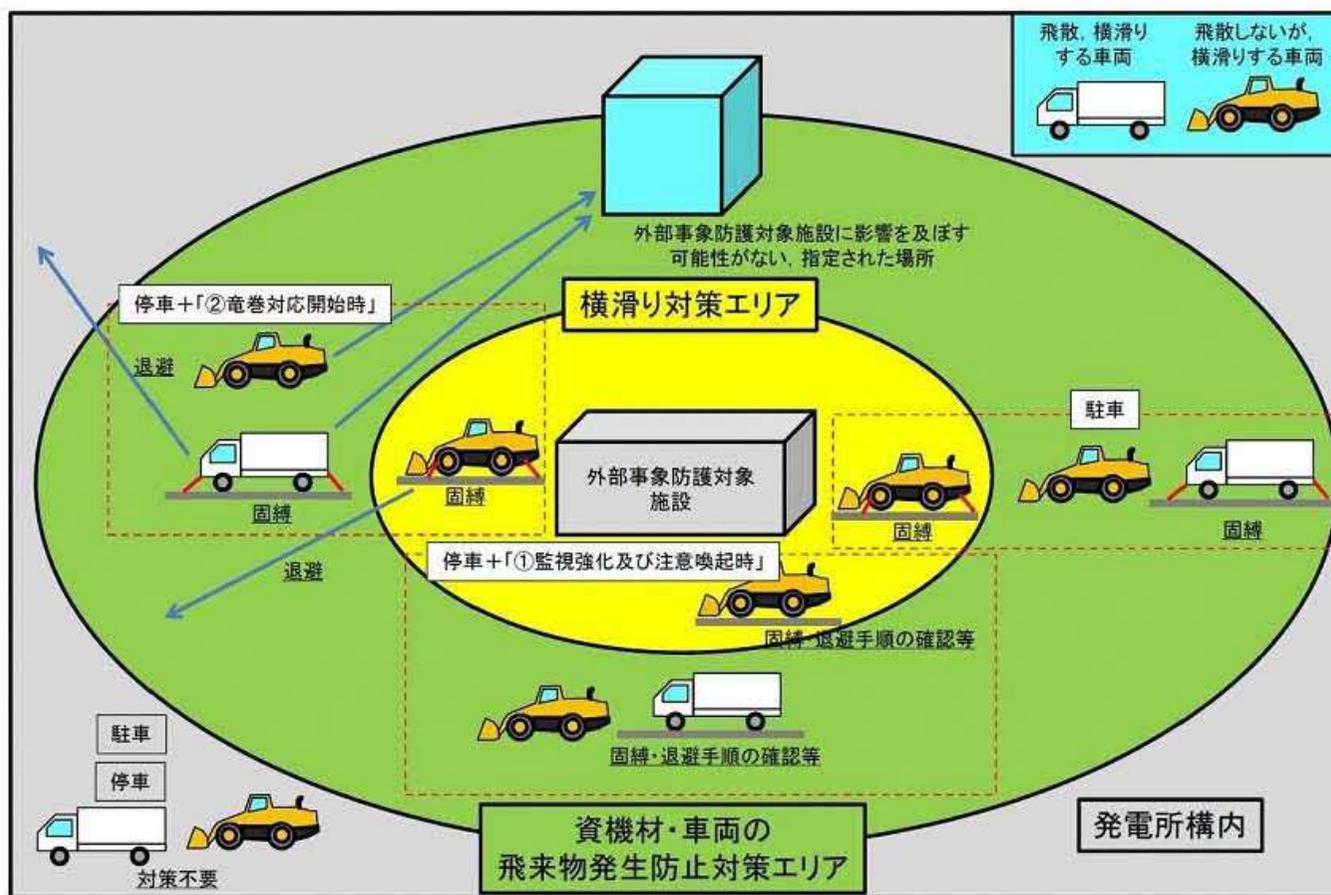


図5 資機材・車両の管理イメージ

竜巻準備体制の実施準備

- 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。

表2 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」	<ul style="list-style-type: none"> ・竜巻発生確度ナウキャスト 発電所を中心に南北方向10km×東西方向20kmの範囲：図の監視範囲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：図の監視範囲C 	資機材・車両の固縛，人・車両の退避

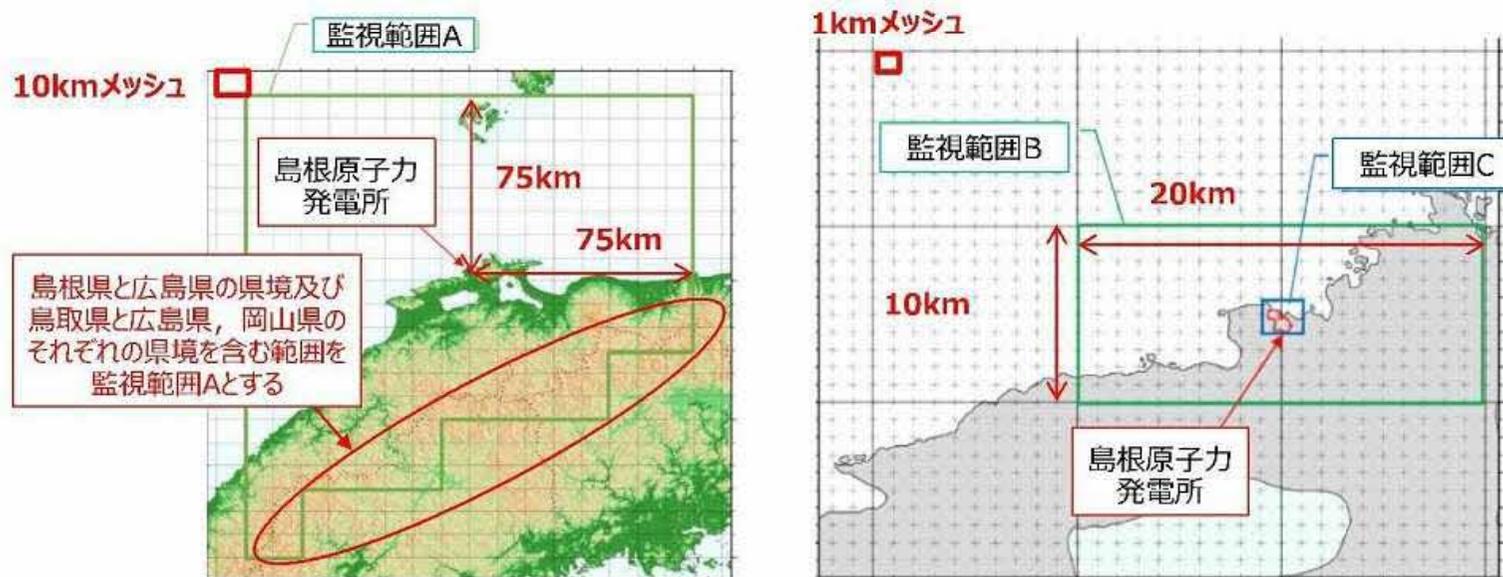


図6 竜巻発生確度ナウキャスト，雷ナウキャストの監視範囲

車両の退避について

- 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は、原則として入構を禁止する。
 - 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、「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。
 - 車両退避エリア候補地と退避に要する時間を概算したところ、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。



表3 退避に要する所要時間

	基点からの距離	想定時間※1
退避エリア候補地a	約1.8km※2	約23分
退避エリア候補地b	使用しない	

- ※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7中のAとして距離を設定した。

図7 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

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。