

玄海原子力発電所3号炉及び4号炉

竜巻影響評価について

平成29年1月19日

九州電力株式会社

1. 竜巻影響評価の対象施設
2. 基準竜巻の設定
3. 設計竜巻の設定
4. 設計荷重の設定
5. 構造健全性評価
6. 建屋・構築物及び設備の構造健全性の確認
7. 飛来物対策
8. 竜巻随件事象に対する確認結果

1. 竜巻影響評価の対象施設（1／5）

1.1 評価対象施設の抽出

竜巻防護施設は、発電用原子炉施設の安全性を確保するために「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及び2の構築物、系統及び機器とする。

評価対象施設の抽出としては、以下に従って抽出する。

- ・竜巻防護施設のうち、屋外施設及び建屋内の施設で外気と繋がる施設並びに建屋等に内包されるが防護が期待できない施設を評価対象施設として抽出する。
- ・竜巻防護施設を内包する施設を評価対象施設として抽出する。
- ・竜巻防護施設に波及的影響を及ぼし得る施設として、機械的影響の観点（倒壊により竜巻防護施設に影響を及ぼす）及び機能的影響の観点（竜巻防護施設に機能的な影響を及ぼす）から評価対象施設を抽出する。

評価対象施設（竜巻防護施設及び竜巻防護施設を内包する施設）の抽出フローを図1. 1、波及的影響を及ぼし得る施設の抽出フローを図1. 2に示す。

1. 竜巻影響評価の対象施設（2／5）

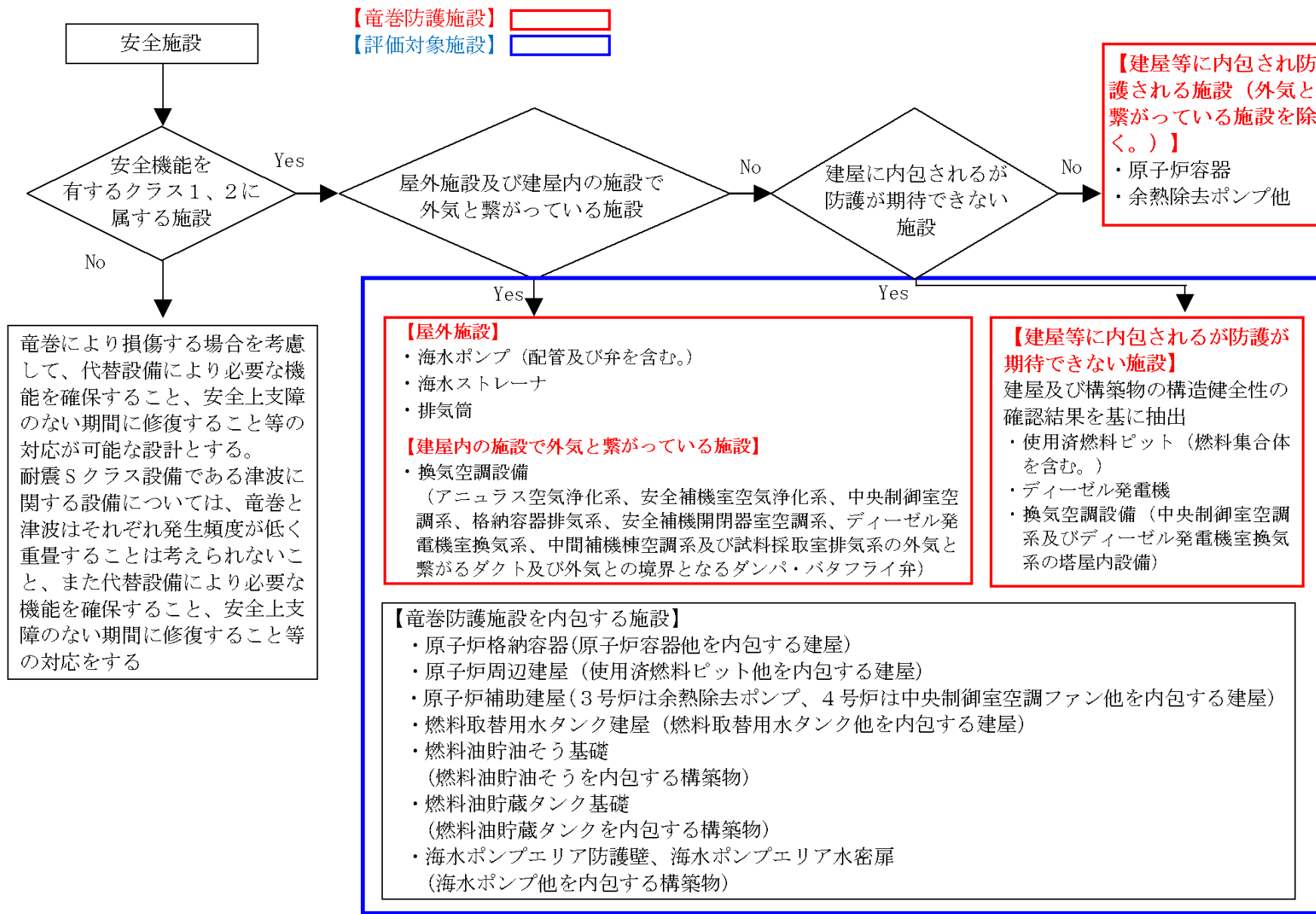


図1.1 評価対象施設（竜巻防護施設及び竜巻防護施設を内包する施設）の抽出フロー

1. 竜巻影響評価の対象施設（3／5）

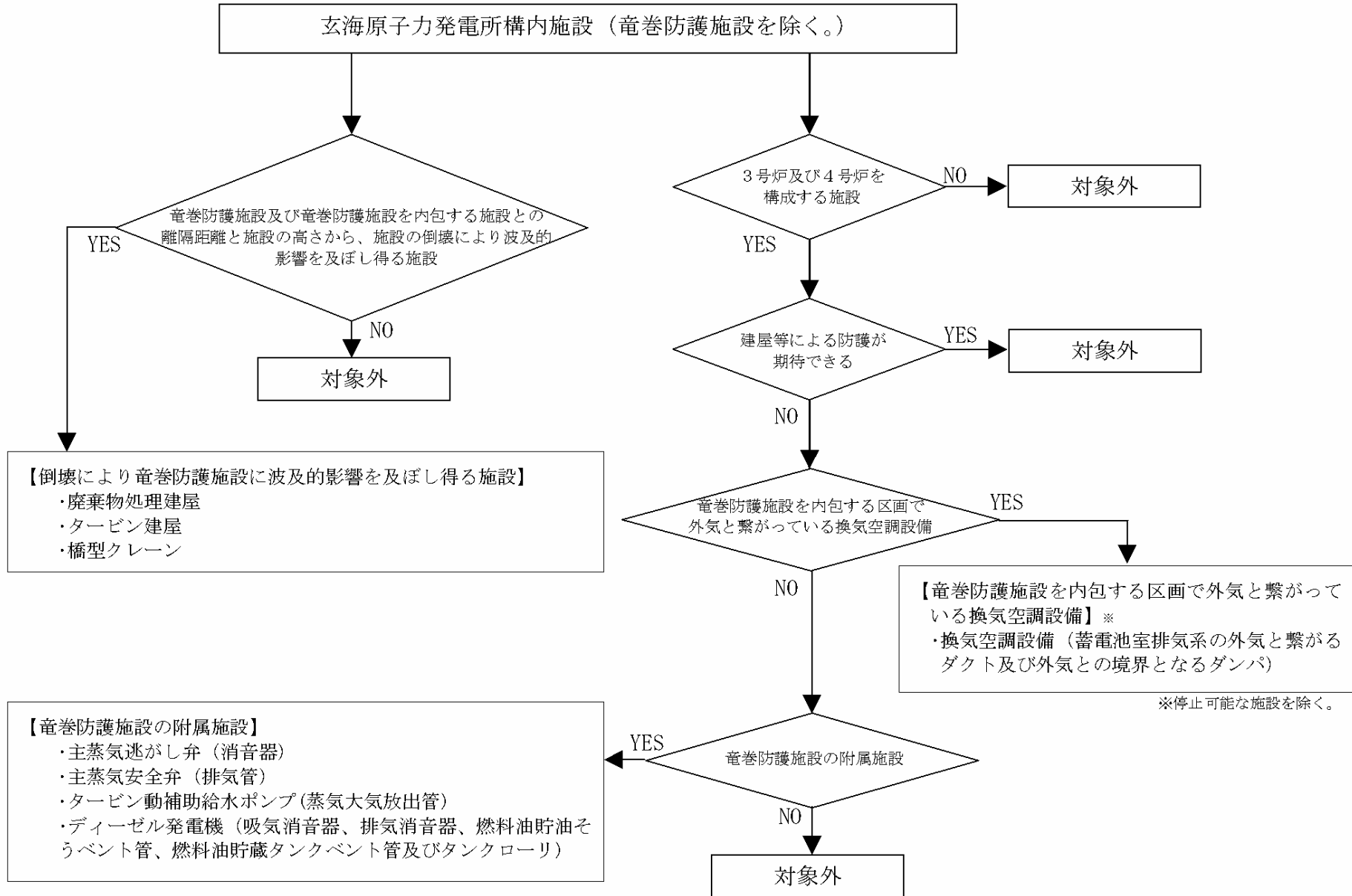


図1.3 竜巻防護施設に波及的影響を及ぼし得る施設の抽出フロー

1. 竜巻影響評価の対象施設（4 / 5）

図1. 3に評価対象施設（竜巻防護施設及び竜巻防護施設を内包する施設）の配置図を示す。



図1. 3 評価対象施設（竜巻防護施設及び竜巻防護施設を内包する施設）の配置図

1. 竜巻影響評価の対象施設（5 / 5）

図1. 4に評価対象施設(竜巻防護施設に波及的影響を及ぼし得る施設)の配置図を示す。

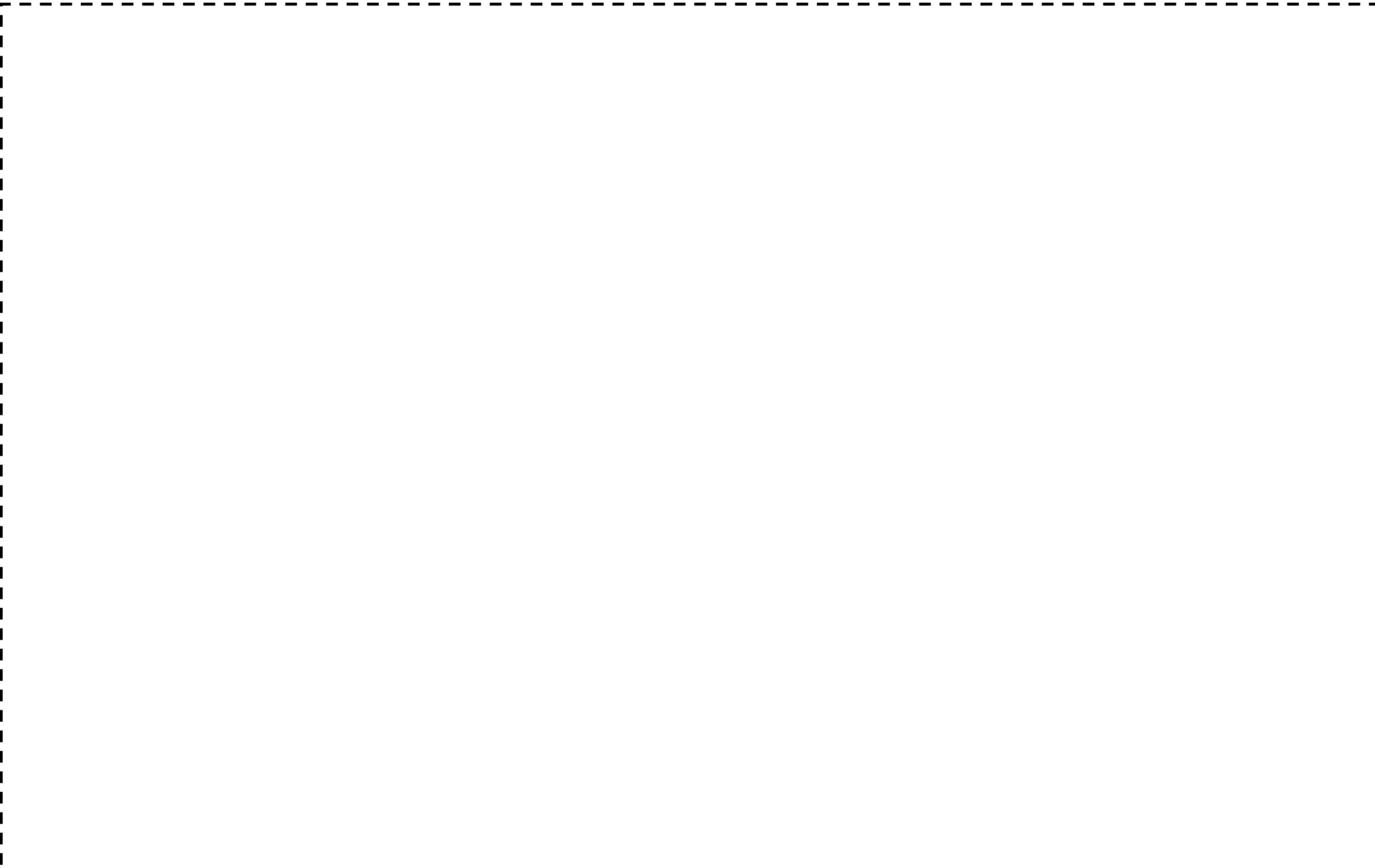


図1. 4 評価対象施設(竜巻防護施設に波及的影響を及ぼし得る施設)の配置図

2. 基準竜巻の設定 (1 / 4)

設計竜巻を設定するまでの基本的な流れを図2.1のフローに示す。

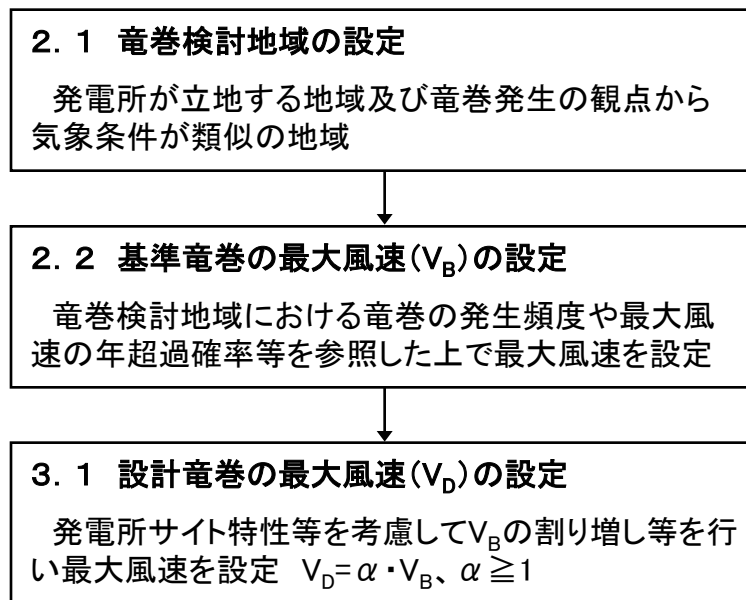


図2.1 設計竜巻の設定フロー

2. 基準竜巻の設定 (2 / 4)

2.1 竜巻検討地域の設定

日本全国において1961年～2012年6月の51.5年間に841個の竜巻が発生している。

気象条件(低気圧、台風、停滞前線等)及び発生頻度の観点から、発電所と類似性のある地域を保守的に選定した結果、九州、山口、太平洋側沿岸(茨城県まで)の海岸線から海・陸両側5kmの範囲を竜巻検討地域(面積:約85,000km²)とした。

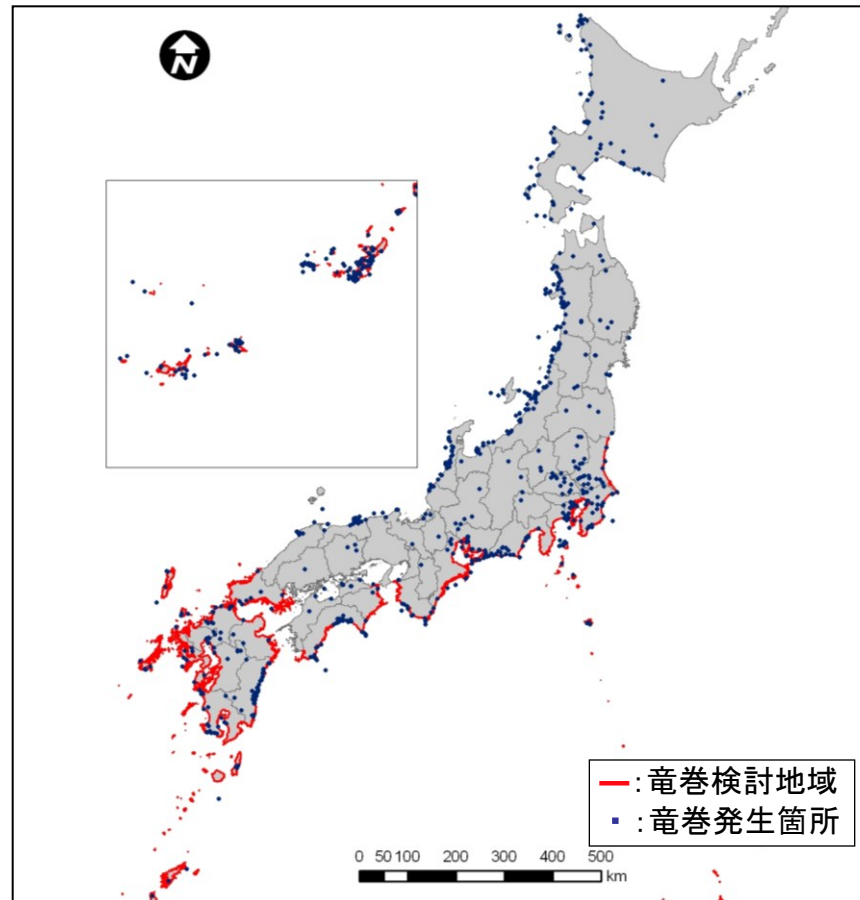


図2.2 竜巻検討地域

2. 基準竜巻の設定（3／4）

玄海原子力発電所を含む九州北部で発生した竜巻を図2. 3に示す。
佐賀県では1961年～2012年6月の期間に7個の竜巻が発生している。
発生した全ての竜巻が有明海側の佐賀市付近で発生しており、玄海原子力発電所が立地する日本海側では、これまで竜巻の発生は確認されていない。

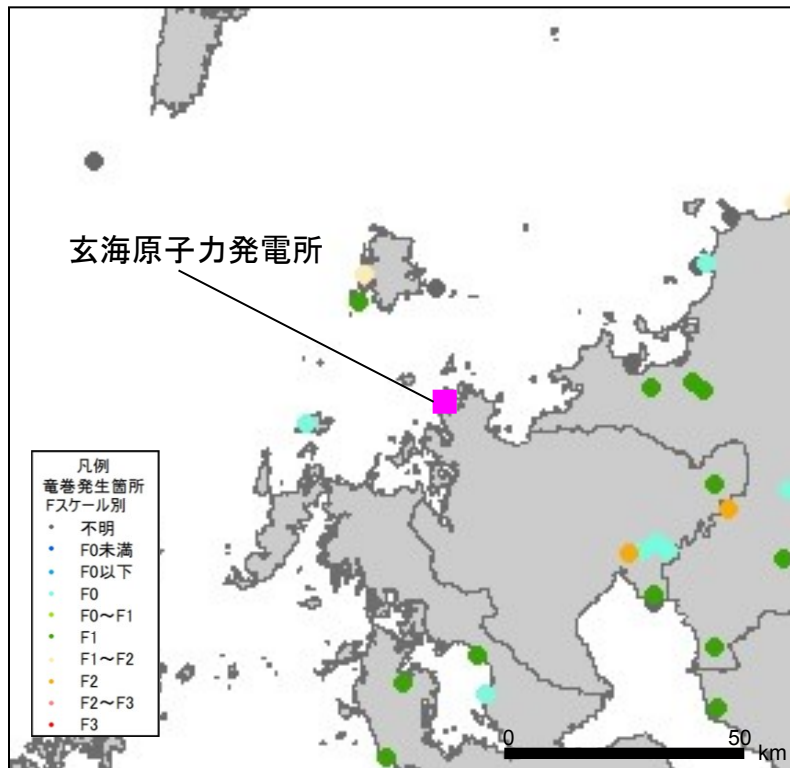


図2. 3 竜巻発生位置

表2. 1 佐賀県における竜巻一覧

発生日時	発生場所	藤田スケール	総観場
1981年06月29日15時35分	佐賀県 佐賀郡川副町	F1	梅雨前線
2004年06月27日07時17分	佐賀県 佐賀市	F2	梅雨前線
2004年06月27日07時50分	佐賀県 鳥栖市	F1	梅雨前線
2006年08月13日16時	佐賀県 佐賀市	F0	雷雨(熱雷)
2006年08月13日17時05分	佐賀県(海上)	不明	雷雨(熱雷)
2007年08月03日18時00分	佐賀県 佐賀市	F0	太平洋高気圧・局地性じょう乱
2007年10月04日15時20分	佐賀県 佐賀市	F0	太平洋高気圧・気圧の谷

(参考1) 日本において過去に発生した最大の竜巻(F3スケール)一覧

発生日時	発生場所
1971年07月07日07時50分	埼玉県浦和市
1990年12月11日19時13分	千葉県茂原市
1999年09月24日11時07分	愛知県豊橋市
2006年11月07日13時23分	北海道網走支庁佐呂間町
2012年05月06日12時35分	茨城県常総市

(参考2) 藤田スケールと風速の関係

階級	風速(m/s)
F0	17～32(約15秒間の平均)
F1	33～49(約10秒間の平均)
F2	50～69(約7秒間の平均)
F3	70～92(約5秒間の平均)
F4	93～116(約4秒間の平均)
F5	117～142(約3秒間の平均)

2. 基準竜巻の設定（4 / 4）

2.2 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の規模や発生頻度、最大風速の年超過確率等を考慮して設定する。

基準竜巻の最大風速(V_B)は、①過去に発生した竜巻による最大風速(V_{B1})と②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。

表2.2 竜巻の最大風速

項目	最大風速
①過去に発生した竜巻による最大風速 V_{B1}	92m/s
②竜巻最大風速のハザード曲線による最大風速 V_{B2}	76.0 m/s



表2.3 基準竜巻の最大風速

項目	最大風速
基準竜巻の最大風速 V_B	92m/s

3. 設計竜巻の設定（1 / 1）

3.1 設計竜巻の最大風速(V_D)の設定

現在の知見では、「下り斜面や下った山裾で竜巻が増幅する可能性がある」とされているものもあるが、玄海原子力発電所周辺では該当する地形が存在しない。

竜巻の進入ルートは地形が平坦な海側(西側)からとなる可能性が高い。

以上より、地形効果を考慮した基準竜巻の最大風速(V_B)の割り増しは必要ないものの、竜巻の観測数等のデータが少なく、不確か性があることから、基準竜巻の最大風速92m/sを安全側に数字を切り上げて、設計竜巻の最大風速 V_D は100m/sとする。

表3.1 設計竜巻の最大風速

項目	最大風速
設計竜巻の最大風速 V_D	100m/s

設計竜巻の特性値については、原則として、十分な信頼性を有した観測記録等に基づいて設定する必要があるが、現状では設定に足る十分な信頼性を有した観測記録等がないため、ガイドに示す方法に基づいて設定する。

表3.2に、設計竜巻の特性値を示す。

表3.2 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 ΔP_{max} (hPa)	最大気圧低下率 (dp/dt) _{max} (hPa/s)
100	15	85	30	89	45

4. 設計荷重の設定 (1 / 3)

4.1 評価荷重の設定

4.1.1 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(P_D)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。

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

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

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

ρ : 空気密度、 V_D : 設計竜巻の最大風速

4.1.2 設計竜巻によ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

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、最大気圧低下量(ΔP_{MAX})に基づき設定する。

設定に際し、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、下式により設定する。

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

ここで、 ΔP_{MAX} : 最大気圧低下量、 A : 施設の受圧面積

4. 設計荷重の設定 (2 / 3)

4.2 設計飛来物の選定

発電所の飛来物調査によって選定した飛来物となる可能性のあるものから、図4.1のフローに従い、浮き上がりの有無、運動エネルギー及び貫通力の大きさ等から設計飛来物を選定した。

選定の結果、「玄海原子力発電所における現場調査」(以下、現場調査)及びガイドに基づいて、飛散物発生防止対策及び防護対策を考慮して鋼製材を選定した。

選定した鋼製材のサイズ、重量については、現場調査及びガイドに基づいて、発電所内に保管されているもののうち施設への影響が大きなサイズ、重量を選定した。

選定の結果を表4.1に示す。

表4.1 設計飛来物の選定結果

飛来物の種類	サイズ(m) 長さ×幅×奥行き	重量(kg)	飛来速度(m/s)	
			水平	鉛直
鋼製材	4.2×0.3×0.2	135	51	34

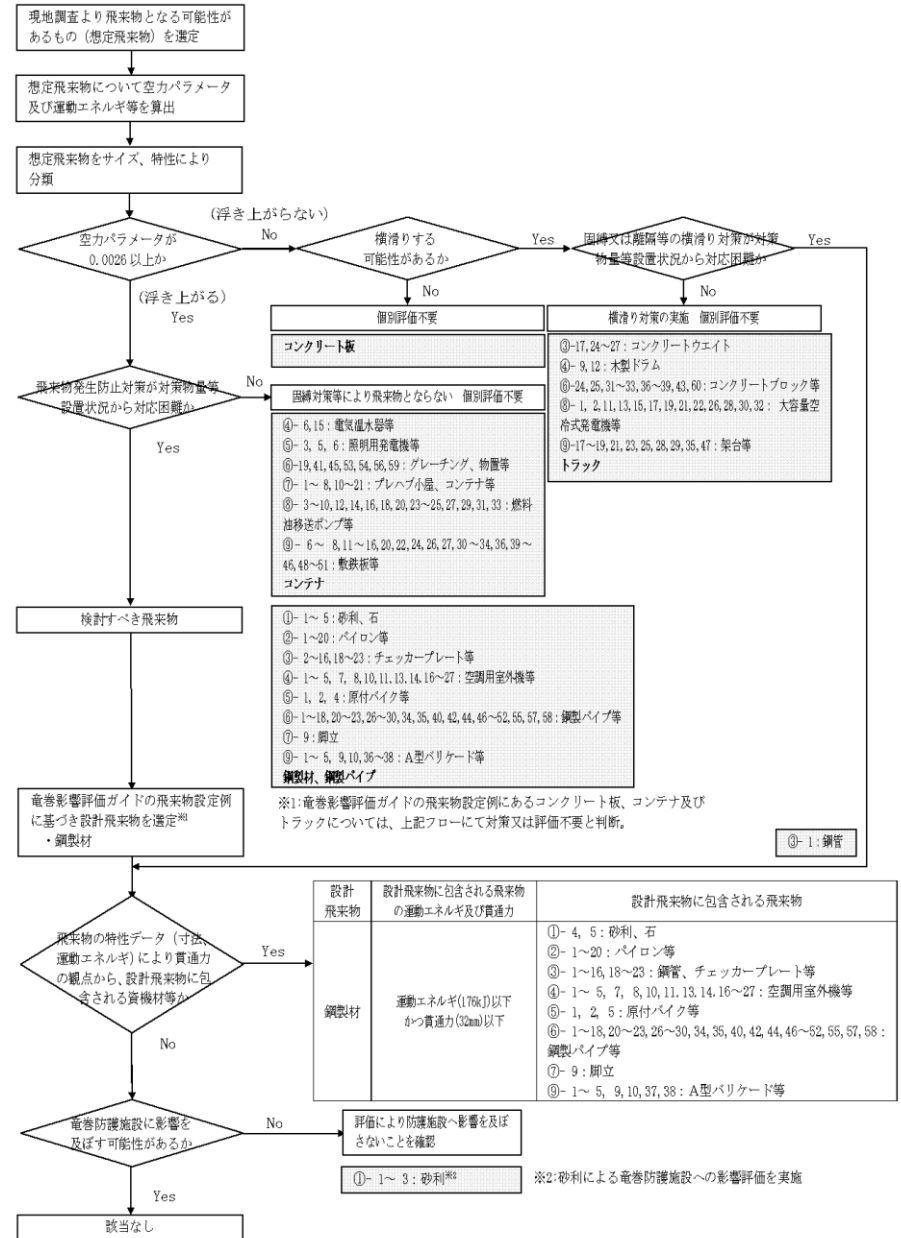


図4.1 設計飛来物の選定フロー

4. 設計荷重の設定 (3 / 3)

4.3 設計荷重の組合せ及びその他の荷重との組合せ

4.3.1 設計荷重の組合せ

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、以下の式により算定する。

$$W_{T1} = W_P$$

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

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

なお、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。

4.3.2 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) 評価対象施設に常時作用する荷重、運転時荷重等

評価対象施設に自重等の常時作用する荷重及び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

竜巻と同時に発生する可能性がある雷、雪、ひょう、雨については、プラントへの影響が相乗しないため、考慮しない。

(3) 設計基準事故時荷重

竜巻防護施設は、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、設計竜巻と設計基準事故は独立事象となる。

また、設計竜巻風速100m/sの竜巻の発生頻度は小さいことから(1.7×10^{-6} /年程度)、設計基準事故時荷重との組合せは考慮しない。

5. 構造健全性評価

設定した設計荷重について、竜巻による風荷重、気圧差荷重及び衝撃荷重に対して構造健全性を確認する。

建屋・構築物の壁、屋根等について、構造健全性を確認し、竜巻防護施設の安全機能維持について確認を実施する。

また、設備については、各設備の竜巻により損傷する恐れのある部位に対して構造健全性を確認し、竜巻防護施設の安全機能維持について確認を実施する。

(1) 設計荷重によって施設に生じる変形・応力等の算定

- ・建屋・構築物及び設備の形状や特徴等を反映して設定した設計荷重によって評価対象施設に生じる変形や応力等を算定する。
- ・評価対象施設に生じる変形や応力等は、その技術的な妥当性を確認した上で、原則として現行の法律及び基準類に準拠して算定する。

(2) 構造健全性の確認

- ・評価対象施設が許容応力度などに基づく許容限界に対して、妥当な安全余裕を有していることを確認する。
→ JEAG-4601-1987等に準拠する。
- ・設計飛来物が評価対象施設あるいはその特定の区画に衝突した際に、竜巻防護施設の安全機能の維持に影響を与えないことを確認する。

6. 建屋・構築物及び設備の構造健全性の確認（1 / 4）

6.1 評価対象施設(建屋・構築物)

評価対象とした建屋・構築物は、評価対象施設に示した竜巻防護施設を内包する施設及び竜巻防護施設に波及的影響を及ぼし得る施設である。

○ 竜巻防護施設を内包する施設

建屋名	要求される機能
原子炉格納容器及び 原子炉周辺建屋	・ 防護機能 ・ 破損により竜巻防護施設 へ影響を与えないこと
原子炉補助建屋	
燃料取替用水タンク建屋	
燃料油貯油そう基礎	
燃料油貯蔵タンク基礎	
海水ポンプエリア防護壁 海水ポンプエリア水密扉	

○ 竜巻防護施設に波及的影響を 及ぼし得る施設

建屋名	要求される機能
廃棄物処理建屋	・ 波及的影響を 及ぼさないこと
タービン建屋	

図6.1 評価対象施設の配置図

6. 建屋・構築物及び設備の構造健全性の確認（2 / 4）

6.2 竜巻防護施設を内包する施設の評価

竜巻防護施設を内包する施設の構造健全性評価のフローを図6. 2に示す。
 評価の結果、竜巻による荷重に対して構造健全性が確保されることを確認している。

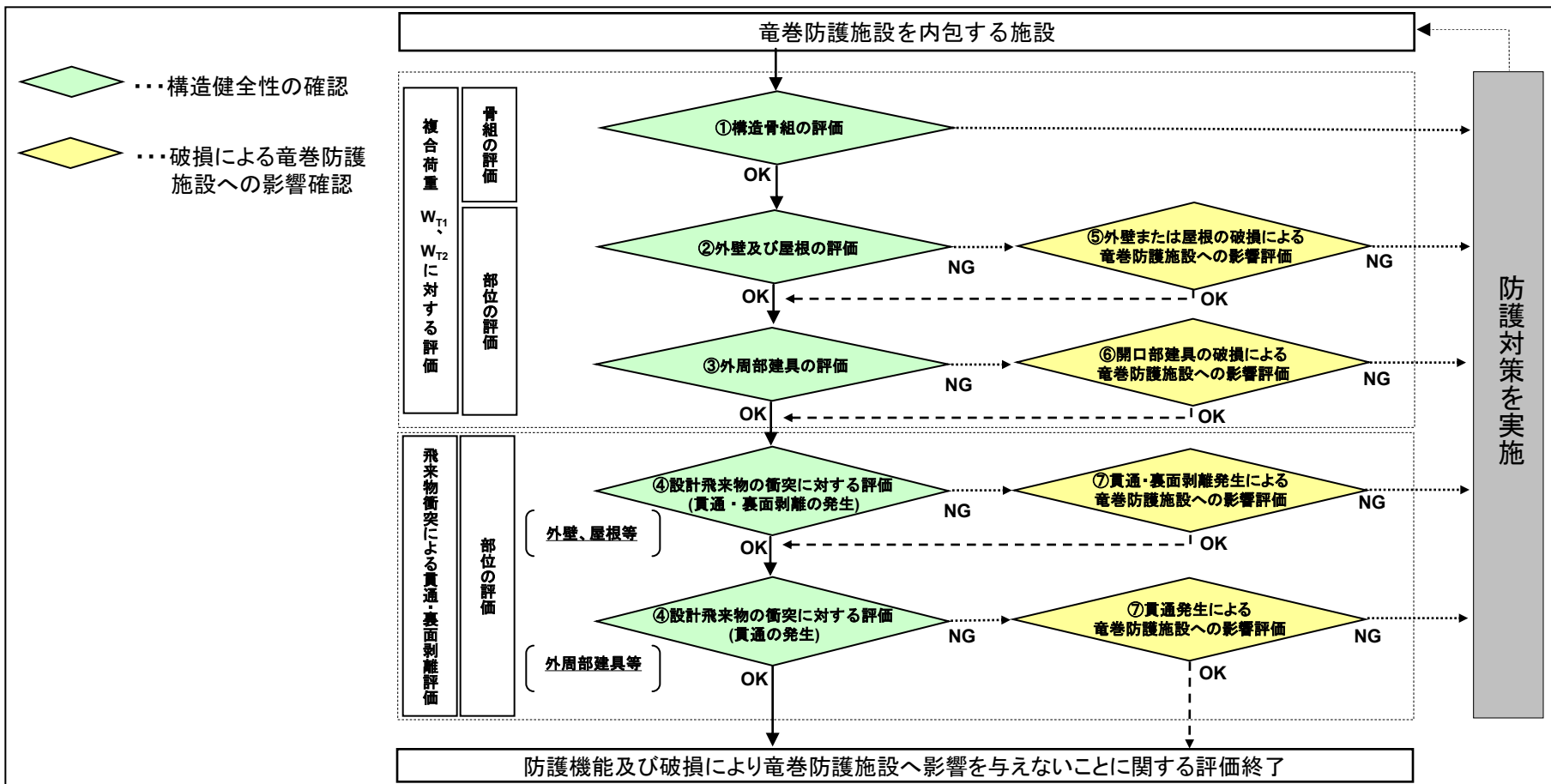


図6. 2 竜巻防護施設を内包する施設に関する評価フロー

6. 建屋・構築物及び設備の構造健全性の確認（3 / 4）

6.3 竜巻防護施設に波及的影響を及ぼし得る施設(建屋)の評価

竜巻防護施設に波及的影響を及ぼし得る施設の構造健全性評価のフローを図6.3に示す。
評価の結果、竜巻による荷重に対して構造健全性が確保されることを確認している。

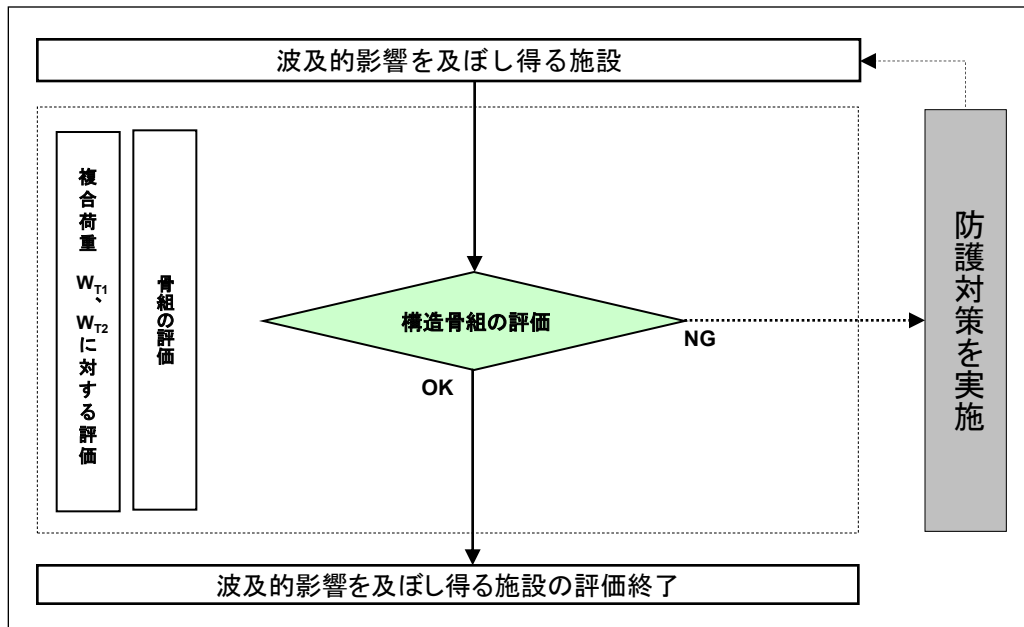


図6.3 竜巻防護施設に波及的影響を及ぼし得る施設に関する評価フロー

6. 建屋・構築物及び設備の構造健全性の確認 (4 / 4)

6.4 竜巻防護施設及び竜巻防護施設に波及的影響を及ぼし得る施設(設備)

竜巻防護施設及び竜巻防護施設に波及的影響を及ぼし得る施設(設備)の構造健全性評価のフローを図6.4に示す。評価の結果、竜巻による荷重に対して構造健全性が確保されることを確認している。

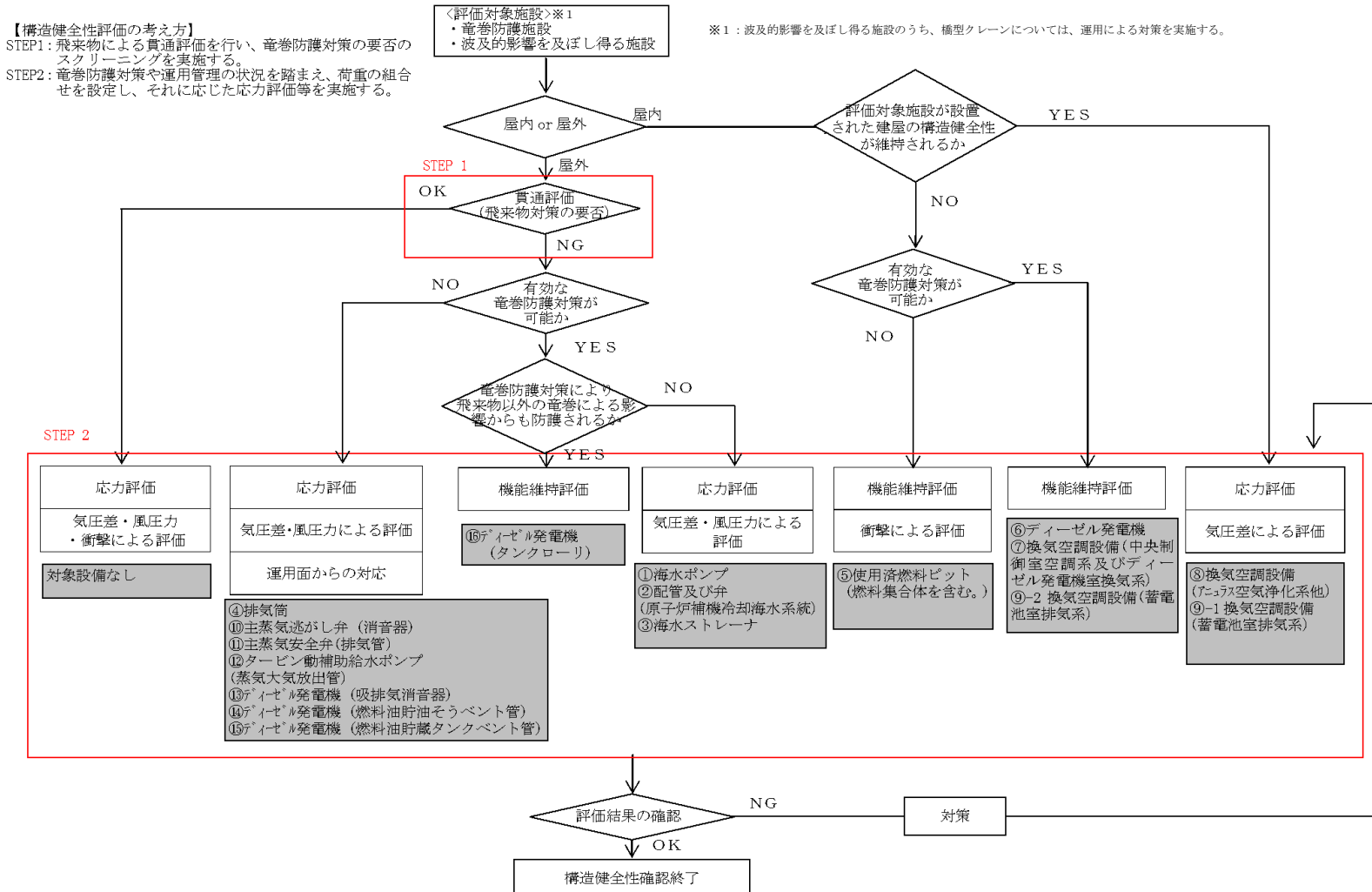


図6.4 竜巻防護施設及び竜巻防護施設に波及的影響を及ぼし得る施設(設備)の構造健全性評価フロー

7. 飛来物対策（1／9）

7.1 飛来物発生防止対策

竜巻襲来時に資機材等の飛散・衝突により竜巻防護施設の安全機能の維持に影響を与えないように、固縛、固定、竜巻防護施設等からの離隔、建屋内収納又は撤去による飛来物発生防止対策を実施する。

設計飛来物である鋼製材の運動エネルギー及び貫通力を基準とし、運動エネルギー又は貫通力が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。

車両については、入構制限、対策区域内での停車制限、退避等の運用上の管理を実施する。

図7.1～7.4に飛来物発生防止対策の例を示す。

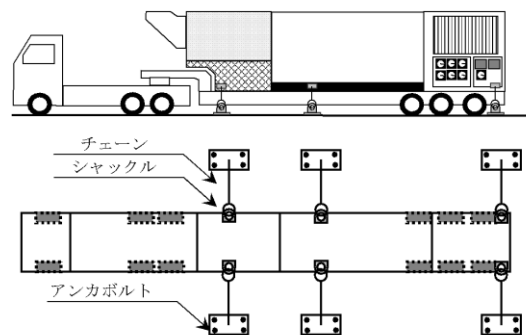


図7.1. 車両の固縛

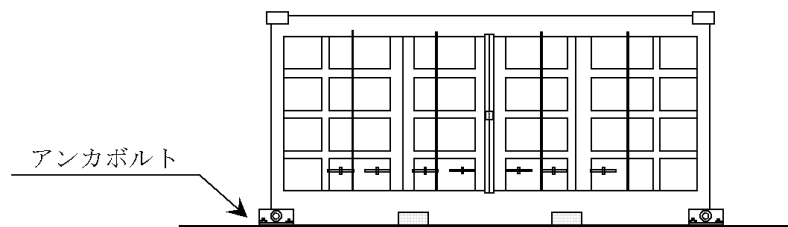


図7.2 コンテナの固定(例)



図7.3 建屋内収納

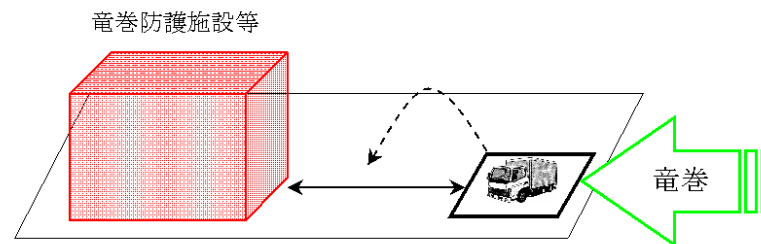


図7.4 飛来物発生防止対策の概念図

7. 飛来物対策（2／9）

飛散時の運動エネルギー又は貫通力が設計飛来物である鋼製材よりも小さい資機材等についても、飛散防止が可能なものについては飛散防止対策を講じ、竜巻防護施設への影響を軽減する。

図7. 5に飛散防止対策の例を示す。



(1)マンホールふた



(2)チェッカープレート



(3)プレハブ小屋



(4)グレーチング

図7. 5 飛散防止対策(例)

7. 飛来物対策（3／9）

屋外の重大事故等対処設備についても、竜巻の影響を考慮して対策区域内の重大事故等対処設備は固縛、固定及び竜巻防護建屋内への建屋内収納を実施し、その他の区域の重大事故等対処設備についても分散配置等を行う。

図7. 6に屋外の重大事故等対処設備の配置図を示す。



図7. 6 屋外の重大事故等対処設備の配置図

7. 飛来物対策（4／9）

7.2 設備による防護対策

海水ポンプ、海水ストレーナ、配管

海水ポンプ等については海水ポンプエリアに竜巻防護ネット及び防護壁を設置することにより、安全機能を維持するものとする。
図7.7に海水ポンプエリアの防護対策を示す。



図7.7 海水ポンプエリアの防護対策

7. 飛来物対策（5／9）

換気空調設備（中央制御室空調系等）

換気空調設備（中央制御室空調系等）については、飛来物の侵入を防止するために竜巻防護鋼板を設置することにより、安全機能を維持するものとする。

図7.8に換気空調設備（中央制御室空調系等）の防護対策を示す。

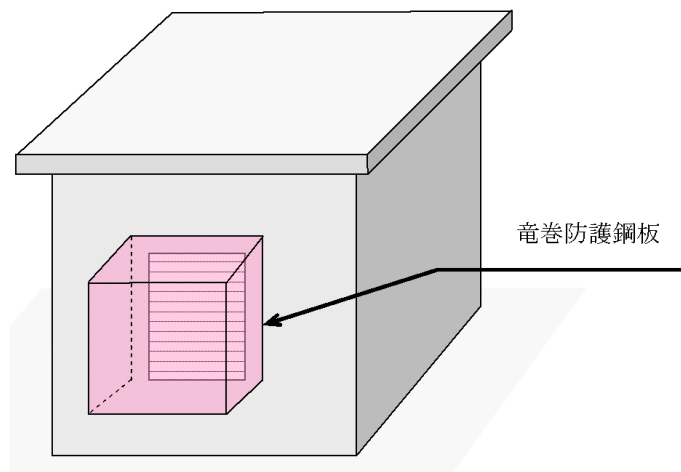


図7.8 換気空調設備（中央制御室空調系等）の防護対策

7. 飛来物対策（6／9）

ディーゼル発電機、換気空調設備（中央制御室空調系等）等

ディーゼル発電機、換気空調設備（中央制御室空調系等）等については、飛来物の侵入を防止するために竜巻防護扉を設置することにより、安全機能を維持するものとする。

図7.9にディーゼル発電機等の防護対策を示す。



図7.9 ディーゼル発電機の防護対策

7. 飛来物対策（7／9）

タンクローリ

タンクローリについては、飛来物による損傷を防止するために竜巻防護建屋を設置することにより、安全機能を維持するものとする。
図7. 10にタンクローリ等の防護対策を示す。



図7. 10 タンクローリの防護対策

7. 飛来物対策（8／9）

7.3 運用による防護対策

7.3.1 損傷時の補修等による対応

排気筒

排気筒は竜巻による風圧力による荷重により損傷することはない。

竜巻による飛来物の衝突により損傷した場合には、保安規定に則った措置を実施し、損傷箇所の補修を実施する。

なお、竜巻による飛来物の衝突により排気筒は損傷する可能性があるが、竜巻を起因事象として放射性物質の放出を伴う事故（LOCA等）は発生しないことから、竜巻襲来時においては排気筒に求められる安全機能要求はなく、安全機能に与える影響はないと評価している。

消音器、蒸気大気放出管、排気管、ベント管

消音器、蒸気大気放出管、排気管及びベント管は竜巻による風圧力による荷重により損傷することはない。

竜巻による飛来物の衝突により貫通し損傷する可能性があるが、仮に、竜巻により損傷した場合には、保安規定に則った措置を実施し、損傷箇所の補修を実施する。

7. 飛来物対策 (9 / 9)

7.3.2 転倒対策

橋型クレーン

海水ポンプエリアの橋型クレーンは、竜巻の襲来が予測される場合には運転を中止し、停留位置に固定することにより、橋型クレーンが損傷したとしても竜巻防護施設である海水ポンプ等との離隔を確保し、衝突しない設計としている。

図7.11に橋型クレーンの転倒時のイメージ図を示す。

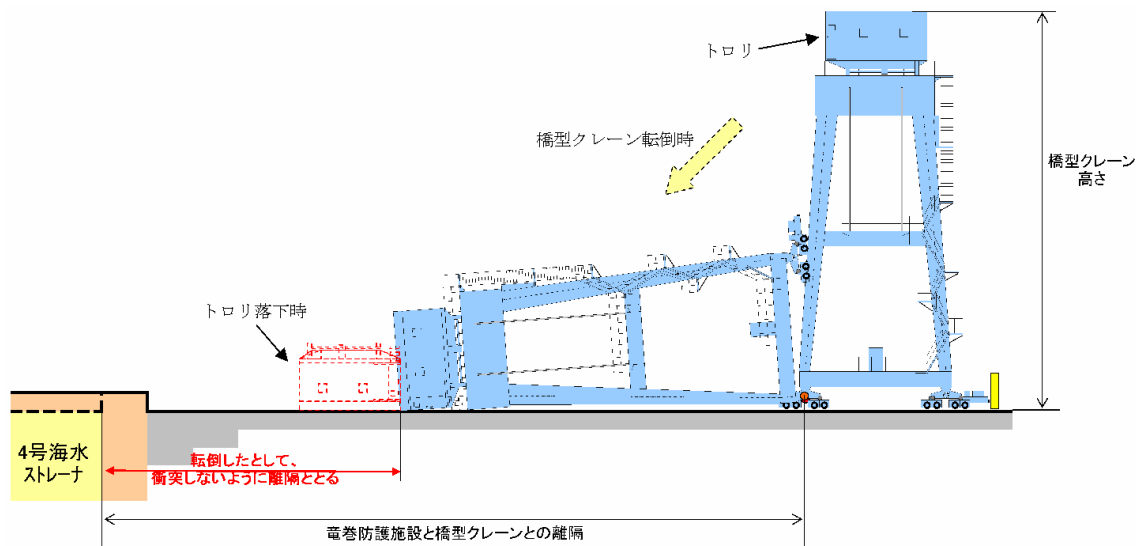


図7.11 橋型クレーン転倒時のイメージ図

8. 竜巻随件事象に対する確認結果（1 / 1）

竜巻随件事象として想定される事象について影響評価を行い、以下のとおり竜巻防護施設の安全機能が維持されることを確認した。

・火災

竜巻随件事象として、竜巻による飛来物が建屋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。

建屋内については、火災源に飛来物が衝突することはない。また、建屋外については、外部火災影響評価により安全機能に影響がないことを確認している。

・溢水

竜巻による飛来物が建屋開口部付近の溢水源に衝突する場合、屋外タンクに飛来物が衝突する場合の溢水が想定される。

建屋内については、溢水源に飛来物が衝突することはない。また、建屋外については、竜巻により発生する溢水が溢水評価に包絡されていることから、安全機能に影響がないことを確認している。

・外部電源喪失

竜巻により、送電網等が損傷して外部電源喪失に至った場合、原子炉の負荷喪失となり、所内単独運転に移行して事象収束する可能性があるが、移行できず原子炉トリップした場合においても、自動的にディーゼル発電機から受電できるため、外部電源喪失の影響がなく原子炉の安全停止に影響を与えることはない。