



**第6条（外部からの衝撃による損傷の防止）
（その4：竜巻）に係る説明書**

2022年6月20日

**日本原子力研究開発機構 大洗研究所
高速実験炉部**

説明概要 (1/3)

1. 要求事項
2. 基本方針
3. 竜巻防護施設の抽出
4. 評価の手順
5. 竜巻防護措置の基本的な考え方
6. 設計竜巻の設定
 - 6.1 竜巻検討地域の設定
 - 6.2 基準竜巻の最大風速 (V_B) の設定
 - 6.3 設計竜巻の最大風速 (V_D) の設定
 - 6.4 竜巻影響評価に使用する設計竜巻の特性値
7. 設計荷重の設定
 - 7.1 ランキン渦モデルとフジタモデルの適用範囲
 - 7.2 風圧力の設定
 - 7.3 気圧差による荷重の設定
 - 7.4 設計飛来物の選定
 - 7.5 設計荷重の組み合わせ

説明概要 (2/3)

- 8. 竜巻防護施設の外殻となる施設の評価方法
- 9. 建物・建築物等の構造健全性の確認
 - 9.1 設計荷重に対する外殻施設の構造健全性の評価の概要
 - 9.2 原子炉建物（格納容器を含む。）及び原子炉附属建物の評価結果
 - 9.3 主冷却機建物の評価結果
 - 9.4 第一使用済燃料貯蔵建物の評価結果
 - 9.5 第二使用済燃料貯蔵建物の評価結果
 - 9.6 主冷却機のうち屋外部分の評価
 - 9.7 非常用ディーゼル電源系に関連する冷却塔の評価
 - 9.8 主排気筒の評価
 - 9.9 外周コンクリート壁の評価

説明概要 (3/3)

- 10. 設計飛来物の衝突に対する評価
 - 10.1 竜巻防護施設の外殻となる施設の評価方法
 - 10.2 原子炉建物（格納容器を含む。）及び原子炉附属建物の評価結果
 - 10.3 主冷却機建物の評価結果
 - 10.4 主冷却機建物のうち屋外部分の評価結果
 - 10.5 非常用ディーゼル電源系に関連する冷却塔の防護
- 11. 竜巻が原子炉施設に到達するおそれが確認された場合の対応フロー
- 12. 国道51号から飛来する自動車の衝突からの防護概要
 - 12.1 防護柵の構造概要（計画）
 - 12.2 防護柵へのアラミド繊維シートの適用に関する検討
- 13. 竜巻随伴事象の考慮

1. 要求事項

●試験炉設置許可基準規則第6条における要求事項

- 1 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。
- 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と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。
- 3 安全施設は、工場等内又はその周辺において想定される試験研究用等原子炉施設の安全性を損なわせる原因となるおそれがある事象であって人為によるもの（故意によるものを除く。）に対して安全機能を損なわないものでなければならない。

2. 基本方針

●基本方針(第6条 外部からの衝撃による損傷の防止)

- ・安全施設は、設計上の考慮を要する自然現象（洪水、風（台風）、竜巻、凍結、降水、積雪、落雷、地滑り、火山の影響、生物学的事象、森林火災）又はその組合せに遭遇した場合において、自然事象そのものがもたらす環境条件及びその結果として試験研究用等原子炉施設で生じ得る環境条件においても、安全機能を損なわないように設計する。
- ・「研究炉の重要度分類の考え方」を参考に、その機能、構造及び動作原理を考慮し、その機能喪失により周辺の公衆に過度の放射線被ばくを与えるおそれのある施設として、以下の施設を外部からの衝撃による損傷の防止に係る重要安全施設とする。
 - （i）クラス1
 - （ii）クラス2のうち、周辺の公衆に過度の放射線被ばくを与えることを防止するための安全機能を有し、特に自然現象の影響を受けやすく、かつ、代替手段によってその機能の維持が困難であるか、又はその修復が著しく困難な構築物、系統及び機器（「過度の放射線被ばくを与えるおそれのある」とは、安全機能の喪失による周辺の公衆の実効線量の評価値が発生事故当たり5mSvを超えることをいう。）

●基本方針(第6条その4：耐竜巻設計)

- ・耐竜巻設計においては、安全機能の重要度分類がクラス1、2、3に属する構築物、系統及び機器を竜巻防護施設とする。このうち、外部からの衝撃による損傷の防止に係る安全施設に該当する構築物、系統及び機器を影響評価の対象とする。
- ・当該影響評価にあっては、当該安全施設の**外殻施設を評価対象とする場合がある**。これらの影響評価の対象外の安全施設は、竜巻により損傷するおそれがある場合に、**代替措置や修復等により、安全機能を損なわないものとする**。

3. 竜巻防護施設の抽出（1/8）

- **安全施設の機能の確保の考え方を下表に、評価対象施設の抽出の詳細を以降に示す。**
- **必要に応じて措置する竜巻飛来物の除去を考慮した上で、外殻施設又は安全施設について評価対象竜巻荷重に対する構造健全性を確認する。**

防護対象	安全施設の安全機能の確保の考え方
<p>【外部からの衝撃による損傷の防止に係る重要安全施設】</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ クラス1 ・ クラス2のうち、周辺の公衆に過度の放射線被ばくを与えることを防止するための安全機能を有し、特に自然現象の影響を受けやすく、かつ、代替手段によってその機能の維持が困難であるか、又はその修復が著しく困難な構築物、系統及び機器（「過度の放射線被ばくを与えるおそれのある」とは、安全機能の喪失による周辺の公衆の実効線量の評価値が発生事故当たり5mSvを超えることをいう。）*1 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 想定される竜巻に対する影響を評価し、外殻施設又は竜巻により生ずる荷重からの安全施設の防護設備により、その安全機能を損なわないように設計する。 ※ 設計竜巻荷重を踏まえて健全性を評価し、許容限界以下とすることで、安全施設の安全機能を確保する。主冷却機のうち屋外部分についても同様とする。 ※ 補機冷却設備のうち非常用ディーゼル電源系に関連する冷却塔については、防護設備（障壁）を設けるものとし、竜巻による影響によって、必要な安全機能を損なわないように設計する。
<p>【外部からの衝撃による損傷の防止に係る重要安全施設以外の安全施設】</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ クラス2のうち、周辺の公衆に過度の放射線被ばくを与えることを防止するための安全機能を有し、特に自然現象の影響を受けやすく、かつ、代替手段によってその機能の維持が困難であるか、又はその修復が著しく困難な構築物、系統及び機器に属しないもの*2 ・ クラス3*2 <p>（右記のまとめ） 放射性物質の貯蔵、放射線の遮蔽及び放出低減に係る安全機能が損なわれることはなく、また、代替措置が適応可能であることを確認した。</p>	<p>【原子炉建物（格納容器を含む。）及び原子炉附属建物や主冷却機建物に内包されるもの】</p> <ul style="list-style-type: none"> ＞ 設計竜巻荷重を踏まえて健全性を評価する外殻施設を有し、安全機能を損なうことはない。 <p>【第一使用済燃料貯蔵建物、第二使用済燃料貯蔵建物に内包されるもの】</p> <ul style="list-style-type: none"> ＞ 貯蔵ラック、水冷却池及びサイフォンブレイク弁が該当する（クラス2）。 ＞ 外殻施設について、設計竜巻荷重を踏まえて健全性を評価し、許容限界以下とすることで、貯蔵ラック、水冷却池及びサイフォンブレイク弁の安全機能（放射性物質の貯蔵、放射性物質の貯蔵及び燃料プール水の保持）を確保する。 <p>【廃棄物処理建物、メンテナンス建物に内包されるもの】</p> <ul style="list-style-type: none"> ＞ 液体廃棄物処理設備及び固体廃棄物貯蔵設備が該当する（クラス3）。 ＞ 液体廃棄物処理設備及び固体廃棄物貯蔵設備は、基本的にコンクリート構造の地下階に位置し、上部にはエリアを隔てる蓋が設置されているため、竜巻が来襲した場合であっても、影響を受けず、安全機能（放射性物質の貯蔵）を損なうことはない。 <p>【建物に内包されないもの】</p> <ul style="list-style-type: none"> ＞ 外周コンクリート壁（クラス2）：原子炉建物（格納容器を含む。）及び原子炉附属建物の屋上に位置し、設計竜巻荷重を踏まえて、竜巻に対する外周コンクリート壁の健全性を評価し、許容限界以下とすることで、安全施設の安全機能を確保する。 ＞ 主排気筒（クラス2）：設計竜巻荷重を踏まえて、竜巻に対する主排気筒の健全性を評価し、許容限界以下とすることで、安全施設の安全機能を確保する。 ＞ 一般電源系（受電エリア）（クラス3）：一般電源系の機能を喪失した場合には、非常用ディーゼル電源系等により必要な電源を供給する。これらは、MS-1に該当し、外殻施設の健全性が確保されるため、安全機能を損なうことはなく、代替措置により、必要な機能を確保できる。 ＞ 屋外管理用モニタリングポスト：屋外管理用モニタリングポストの機能を喪失した場合には、代替措置（可搬型測定器）により、必要な機能を確保する。

* 1 6～9頁参照

* 2 10～12頁参照

竜巻防護施設の抽出結果

（1）安全施設を内包し保護する外殻施設

- 原子炉建物（格納容器を含む。）及び原子炉附属建物
- 主冷却機建物

（2）外殻施設で保護されない安全施設

- 主冷却機のうち屋外部分（屋外ダクト）
- 非常用ディーゼル電源系に関連する冷却塔
- 原子炉建物（格納容器を含む。）及び原子炉附属建物
- 主冷却機建物
- 第一使用済燃料貯蔵建物
- 第二使用済燃料貯蔵建物
- 主排気筒
- 外周コンクリート壁

3. 竜巻防護施設の抽出（3/8）

外部からの衝撃による損傷の防止に係る安全施設及び外殻施設の抽出（1/6）

分類	機能	構築物、系統又は機器	特記すべき関連系	外殻施設
PS-1	原子炉冷却材 バウンダリ機能	① 原子炉容器 1) 本体 ② 1次主冷却系、1次補助冷却系及び1次ナトリウム充填・ドレン系 1) 原子炉冷却材バウンダリに属する容器・配管・ポンプ・弁（ただし、計装等の小口径のものを除く。）		① 原子炉建物（格納容器を含む。）及び原子炉附属建物
	炉心形状の維持機能	① 炉心支持構造物 1) 炉心支持板 2) 支持構造物 ② 炉心バレル構造物 1) バレル構造体 ③ 炉心構成要素 1) 炉心燃料集合体 2) 照射燃料集合体 3) 内側反射体 4) 外側反射体（A） 5) 材料照射用反射体 6) 遮へい集合体 7) 計測線付実験装置 8) 照射用実験装置		① 原子炉建物（格納容器を含む。）及び原子炉附属建物

3. 竜巻防護施設の抽出（4/8）

外部からの衝撃による損傷の防止に係る安全施設及び外殻施設の抽出（2/6）

分類	機能	構築物、系統又は機器	特記すべき関連系	外殻施設
MS - 1	原子炉の緊急停止及び未臨界維持機能	① 制御棒 ② 制御棒駆動系 1) 駆動機構 2) 上部案内管 3) 下部案内管 ③ 後備炉停止制御棒 ④ 後備炉停止制御棒駆動系 1) 駆動機構 2) 上部案内管 3) 下部案内管	① 炉心支持構造物 1) 炉心支持板 2) 支持構造物 ② 炉心バレル構造物 1) バレル構造体 ③ 炉心構成要素 1) 炉心燃料集合体 2) 照射燃料集合体 3) 内側反射体 4) 外側反射体 (A) 5) 材料照射用反射体 6) 遮へい集合体 7) 計測線付実験装置 8) 照射用実験装置	① 原子炉建物（格納容器を含む。）及び原子炉附属建物
	1次冷却材漏えい量の低減機能	① 原子炉容器 1) リークジャケット ② 1次主冷却系、1次補助冷却系及び1次ナトリウム充填・ドレン系のうち、原子炉冷却材バウンダリに属する容器・配管・ポンプ・弁の配管（外側）又はリークジャケット ③ 1次主冷却系 1) 逆止弁 ④ 1次補助冷却系 1) サイフォンブレイク弁 ⑤ 1次予熱空素ガス系 1) 仕切弁	① 関連するプロセス計装（ナトリウム漏えい検出器）	① 原子炉建物（格納容器を含む。）及び原子炉附属建物

3. 竜巻防護施設の抽出 (5/8)

外部からの衝撃による損傷の防止に係る安全施設及び外殻施設の抽出 (3/6)

分類	機能	構築物、系統又は機器	特記すべき関連系	外殻施設
MS-1	原子炉停止後の除熱機能	① 1次主冷却系 1) 1次主循環ポンプポニーモータ 2) 逆止弁 ② 2次主冷却系 1) 主冷却機(主送風機を除く。)	① 原子炉容器 1) 本体 ② 1次主冷却系、1次補助冷却系及び1次ナトリウム充填・ドレン系 1) 原子炉冷却材バウンダリに属する容器・配管・ポンプ・弁(ただし、計装等の小口径のものを除く。) ③ 2次主冷却系、2次補助冷却系、2次ナトリウム純化系及び2次ナトリウム充填・ドレン系 1) 冷却材バウンダリに属する容器・配管・ポンプ・弁(ただし、計装等の小口径のものを除く。)	① 原子炉建物(格納容器を含む。)及び原子炉附属建物 ② 主冷却機建物 ※ 主冷却機のうち屋外部分を除く。
	放射性物質の閉じ込め機能	① 格納容器 ② 格納容器バウンダリに属する配管・弁		① 原子炉建物(格納容器を含む。)及び原子炉附属建物
	工学的安全施設及び原子炉停止系への作動信号の発生機能	① 原子炉保護系(スクラム) ② 原子炉保護系(アイソレーション)	① 関連する核計装 ② 関連するプロセス計装	① 原子炉建物(格納容器を含む。)及び原子炉附属建物
	安全上特に重要な関連機能	① 中央制御室 ② 非常用ディーゼル電源系(MS-1に関連するもの) ③ 交流無停電電源系(MS-1に関連するもの) ④ 直流無停電電源系(MS-1に関連するもの)	① 関連する補機冷却設備	① 原子炉建物(格納容器を含む。)及び原子炉附属建物 ② 主冷却機建物 ※ 補機冷却設備のうち、非常用ディーゼル電源系に関連する冷却塔を除く。

分類	機能	構築物、系統又は機器	特記すべき関連系	外殻施設
PS-2	原子炉冷却材バウンダリに直接接続されていないものであって、放射性物質を貯蔵する機能	① 原子炉附属建物使用済燃料貯蔵設備 1) 貯蔵ラック 2) 水冷却池		① 原子炉建物(格納容器を含む。)及び原子炉附属建物
	燃料を安全に取り扱う機能	① 核燃料物質取扱設備		① 原子炉建物(格納容器を含む。)及び原子炉附属建物
MS-2	燃料プール水の保持機能	① 原子炉附属建物使用済燃料貯蔵設備 1) 水冷却池 2) 水冷却浄化設備のうち、サイフォンブレイク弁		① 原子炉建物(格納容器を含む。)及び原子炉附属建物
	事故時のプラント状態の把握機能	① 事故時監視計器の一部		① 原子炉建物(格納容器を含む。)及び原子炉附属建物
	安全上重要な関連機能	① 非常用ディーゼル電源系(MS-1に属するものを除く。) ② 交流無停電電源系(MS-1に属するものを除く。) ③ 直流無停電電源系(MS-1に属するものを除く。)		① 原子炉建物(格納容器を含む。)及び原子炉附属建物 ② 主冷却機建物

3. 竜巻防護施設の抽出（6/8）

外部からの衝撃による損傷の防止に係る安全施設及び外殻施設の抽出（4/6）

分類	機能	構築物、系統又は機器	外殻施設
PS-2	原子炉カバーガス等のバウンダリ機能	① 1次アルゴンガス系 1) 原子炉カバーガスのバウンダリに属する容器・配管・弁（ただし、計装等の小口径のものを除く。） ② 原子炉容器 1) 本体（原子炉冷却材バウンダリに属するもの及び計装等の小口径のものを除く。） ③ 1次主冷却系 1) 原子炉カバーガスのバウンダリに属する容器・配管・弁（原子炉冷却材バウンダリに属するもの及び計装等の小口径のものを除く。） ④ 1次オーバーフロー系 1) 原子炉カバーガスのバウンダリに属する容器・配管・弁（ただし、計装等の小口径のものを除く。） ⑤ 1次ナトリウム充填・ドレン系 1) 原子炉カバーガスのバウンダリに属する容器・配管・弁（ただし、計装等の小口径のものを除く。） ⑥ 回転ブラグ（ただし、計装等の小口径のものを除く。）	①～⑥ 原子炉建物（格納容器を含む。）及び原子炉附属建物
	原子炉冷却材バウンダリに直接接続されていないものであって、放射性物質を貯蔵する機能	① 第一使用 溶燃料貯蔵建物使用 溶燃料貯蔵設備 1) 貯蔵ラック 2) 水冷却池 ② 第二使用 溶燃料貯蔵建物使用 溶燃料貯蔵設備 1) 貯蔵ラック 2) 水冷却池 ③ 気体廃棄物処理設備 1) アルゴン廃ガス処理系	① 第一使用 溶燃料貯蔵建物 ② 第二使用 溶燃料貯蔵建物 ③ 原子炉建物（格納容器を含む。）及び原子炉附属建物
MS-2	燃料プール水の保持機能	① 第一使用 溶燃料貯蔵建物使用 溶燃料貯蔵設備 1) 水冷却池 2) 水冷却浄化設備のうち、サイフォンブレイク弁 ② 第二使用 溶燃料貯蔵建物使用 溶燃料貯蔵設備 1) 水冷却池 2) 水冷却浄化設備のうち、サイフォンブレイク弁	① 第一使用 溶燃料貯蔵建物 ② 第二使用 溶燃料貯蔵建物
	放射線の遮蔽及び放出低減機能	① 外周コンクリート壁 ② アンユラス部排気系 1) アンユラス部排気系（アンユラス部常用排気フィルタを除く。） ③ 非常用ガス処理装置 ④ 主排気筒 ⑤ 放射線低減効果の大きい遮蔽（安全容器及びコンクリート遮へい体冷却系を含む。）	①④ — ②③⑤ 原子炉建物（格納容器を含む。）及び原子炉附属建物

3. 竜巻防護施設の抽出（7/8）

外部からの衝撃による損傷の防止に係る安全施設及び外殻施設の抽出（5/6）

分類	機能	構築物、系統又は機器	外殻施設
PS-3	1次冷却材を内蔵する機能（PS-1以外のもの）	① 1次ナトリウム純化系のうち、1次冷却材を内蔵しているか、又は内蔵し得る容器・配管・ポンプ・弁（ただし、計装等の小口径のものを除く。） ② 1次オーバーフロー系のうち、1次冷却材を内蔵しているか、又は内蔵し得る容器・配管・ポンプ・弁（ただし、計装等の小口径のものを除く。） ③ 1次ナトリウム充填・ドレン系のうち、1次冷却材を内蔵しているか、又は内蔵し得る容器・配管・弁（PS-1に属するもの及び計装等の小口径のものを除く。）	①～③ 原子炉建物（格納容器を含む。）及び原子炉附属建物
	2次冷却材を内蔵する機能（通常運転時の炉心の冷却に関連するもの）	① 2次主冷却系、2次補助冷却系、2次ナトリウム純化系及び2次ナトリウム充填・ドレン系 1）冷却材バウンダリに属する容器・配管・ポンプ・弁（ただし、計装等の小口径のものを除く。）	① 原子炉建物（格納容器を含む。）及び原子炉附属建物、主冷却機建物（主冷却機のうち屋外部分を除く。）
	放射性物質の貯蔵機能	① 液体廃棄物処理設備 ② 固体廃棄物貯蔵設備	① 原子炉建物（格納容器を含む。）及び原子炉附属建物、廃棄物処理建物他 ② 原子炉建物（格納容器を含む。）及び原子炉附属建物、廃棄物処理建物他
	通常運転時の冷却材の循環機能	① 1次主冷却系 1）1次主循環ポンプ i）1次主循環ポンプ本体（循環機能） ii）主電動機 ② 2次主冷却系 1）2次主循環ポンプ i）2次主循環ポンプ本体（循環機能） ii）電動機	① 原子炉建物（格納容器を含む。）及び原子炉附属建物 ② 主冷却機建物
	通常運転時の最終ヒートシンクへの熱輸送機能	① 2次主冷却系 1）主送風機 i）電動機 ii）電磁ブレーキ	① 主冷却機建物
	電源供給機能（非常用を除く。）	① 一般電源系（受電エリア）	① -
	プラント計測・制御機能（安全保護機能を除く。）	① 原子炉冷却材温度制御系（関連するプロセス計装及び制御用圧縮空気設備を含む。）	① 原子炉建物（格納容器を含む。）及び原子炉附属建物、主冷却機建物
	核分裂生成物の原子炉冷却材中への放散防止機能	① 炉心構成要素 1）炉心燃料集合体 i）被覆管 2）照射燃料集合体 i）被覆管	① 原子炉建物（格納容器を含む。）及び原子炉附属建物

3. 竜巻防護施設の抽出（8/8）

外部からの衝撃による損傷の防止に係る安全施設及び外殻施設の抽出（6/6）

分類	機能	構築物、系統又は機器	外殻施設
MS - 3	制御室外からの安全停止機能	① 中央制御室外原子炉停止盤（安全停止に関連するもの）	① 原子炉建物（格納容器を含む。）及び原子炉附属建物
	燃料プール水の補給機能	① 原子炉附属建物使用済燃料貯蔵設備 1) 水冷却浄化設備（MS - 2に属するものを除く。） ② 第一使用済燃料貯蔵建物使用済燃料貯蔵設備 1) 水冷却浄化設備（MS - 2に属するものを除く。） ③ 第二使用済燃料貯蔵建物使用済燃料貯蔵設備 1) 水冷却浄化設備（MS - 2に属するものを除く。）	① 原子炉建物（格納容器を含む。）及び原子炉附属建物 ② 第一使用済燃料貯蔵建物 ③ 第二使用済燃料貯蔵建物
	出力上昇の抑制機能	① インターロック系 1) 制御棒引き抜きインターロック系	① 原子炉建物（格納容器を含む。）及び原子炉附属建物
	緊急時対策上重要なもの及び異常状態の把握機能	① 事故時監視計器（MS - 2に属するものを除く。） ② 放射線管理施設（MS - 2に属するものを除く。） ③ 通信連絡設備 ④ 消火設備 ⑤ 安全避難通路 ⑥ 非常用照明	①～⑥ 原子炉建物（格納容器を含む。）及び原子炉附属建物、主冷却機建物 ※ 放射線管理施設（MS - 2に属するものを除く。）のうち屋外管理用モニタリングポストを除く。

4. 評価の手順

原子力発電所の竜巻影響評価ガイド*（以下、「竜巻ガイド」という）を参考に、下記のフローに従い、機能・配置・構造等を経て抽出された竜巻影響評価対象施設の安全機能が維持される方針であることを確認する。

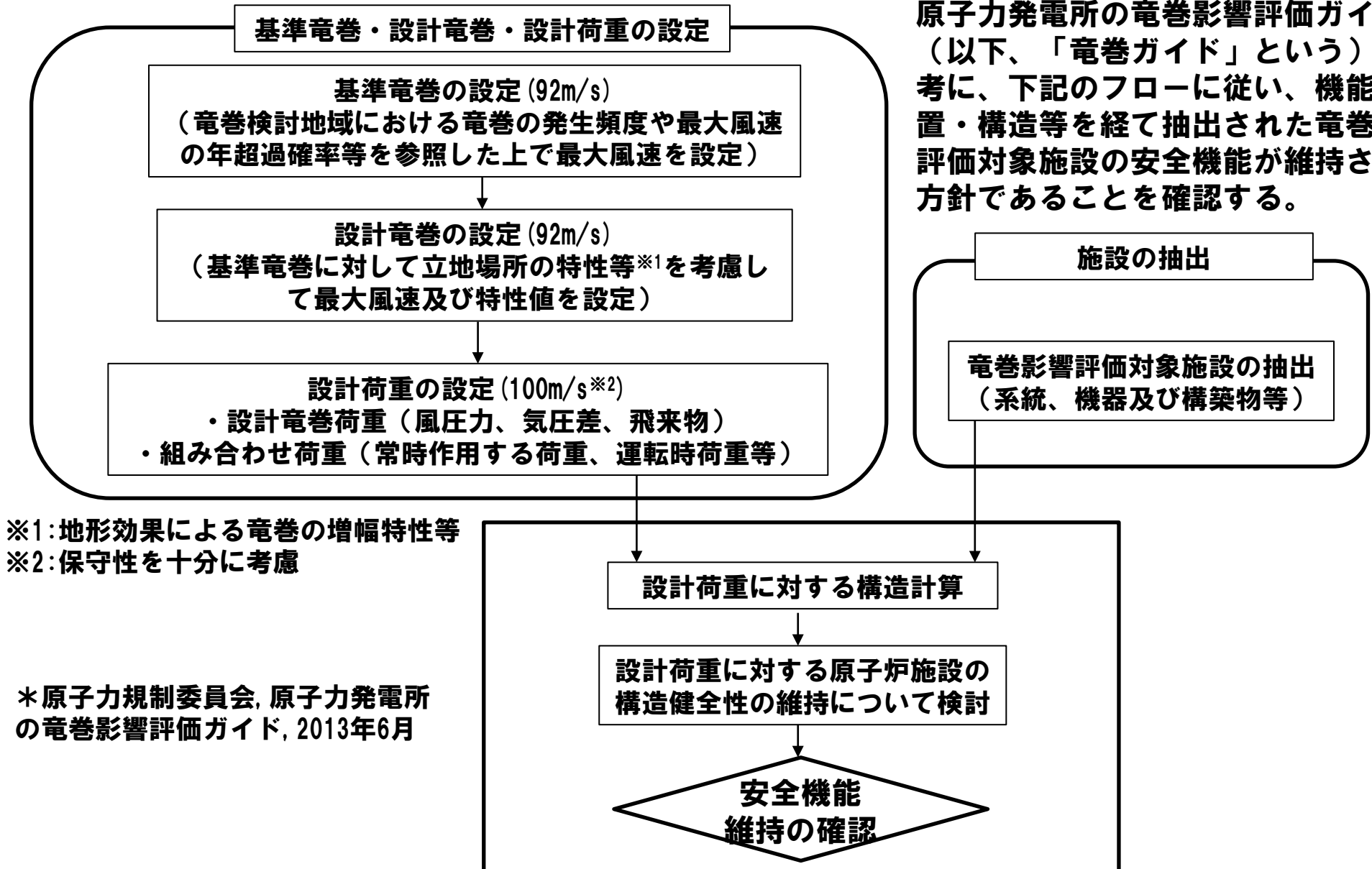


図 竜巻影響評価の基本フロー

5. 竜巻防護措置の基本的な考え方

竜巻防護施設が竜巻により機能を失わないよう、設計荷重に対して健全性を確保できることを確認する。

評価部位及び評価内容は以下の通りである。当該評価により健全性を損なう場合は、防護措置を実施する。

建物構造材：耐力部材評価（保有水平耐力評価）

建物屋根：屋根スラブ評価

建物外壁：設計飛来物の衝突による裏面剥離及び貫通評価

建物開口部：設計飛来物の貫通評価

安全施設のうち屋外施設：機能維持の観点で適切に評価

6. 設計竜巻の設定

6.1 竜巻検討地域の設定（1/2）

(1) 竜巻検討地域の設定方針

竜巻検討地域は、大洗研究所（南地区）が立地する地域と、気象条件の類似性の観点から検討を行い、竜巻検討地域を設定した。

(2) 気象条件の類似性（総観場）による検討

気象庁の「竜巻等の突風データベース*」を基に、気象総観場を低気圧、台風、停滞前線、局地性降雨（局地性擾乱、雷雨含む）、季節風及びその他の6つに分類し、竜巻発生場所の傾向を分析した。

* 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>

6.1 竜巻検討地域の設定（2/2）

- ・ 竜巻発生 の地域性が見られる台風起因と停滞前線起因の発生エリアの重なりを考慮すると、九州、山口の沿岸部、及び太平洋側沿岸部において竜巻発生 の観点から類似性があると判断できる。
- ・ これらを踏まえ、宮城県、福島県、茨城県、千葉県、東京都、神奈川県、静岡県、愛知県、三重県、和歌山県、徳島県、高知県、山口県及び九州（沖縄県含む）の海岸線から陸側及び海側それぞれ5kmの範囲（面積：約89,500km²）を竜巻検討地域に設定する。

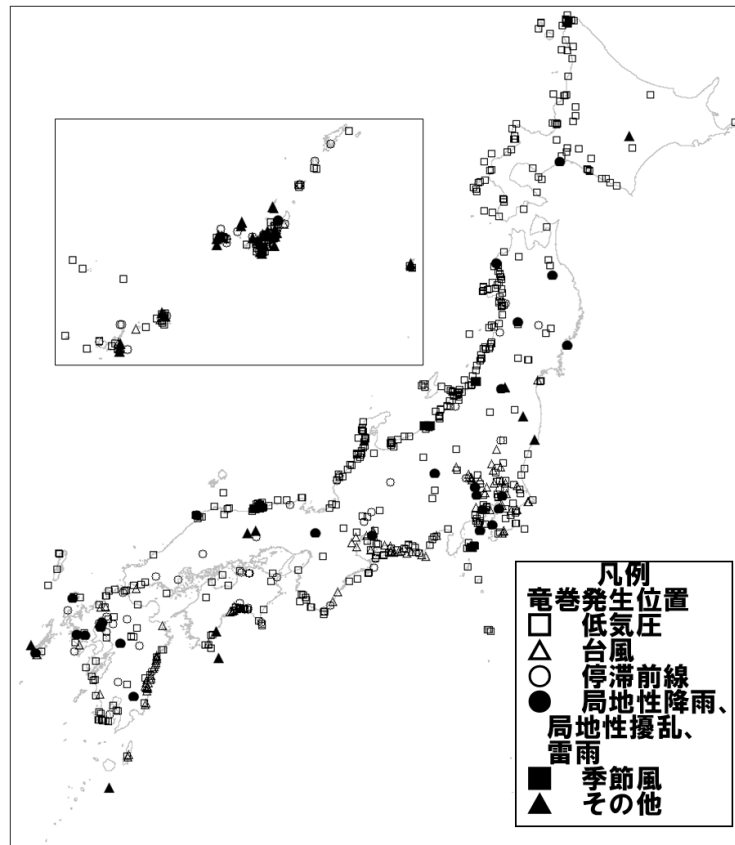


図 気象総観場ごとの竜巻発生位置



図 竜巻検討地域

6.2 基準竜巻の最大風速 (V_B) の設定 (1/11)

(1) 基準竜巻の最大風速 (V_B) の設定方針

竜巻検討地域において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}) のうち大きい方の風速を設定する。

(2) 過去に発生した竜巻による最大風速 (V_{B1}) の設定

日本で過去に発生した最大の竜巻は、気象庁の「竜巻等の突風データベース」によるとフジタスケール（以下、Fスケール）でF3である。F3スケールにおける風速は70m/s～92m/sであることから、竜巻検討地域において過去に発生した竜巻による最大風速 (V_{B1}) を92m/sと設定する。

表 日本で過去に発生したF3竜巻一覧

	発生日時	発生場所緯度	発生場所経度	発生場所
1	1971年07月07日07時50分	35度52分45秒	139度40分13秒	埼玉県 浦和市
2	1990年12月11日19時13分	35度25分27秒	140度17分19秒	千葉県 茂原市
3	1999年09月24日11時07分	34度42分4秒	137度23分5秒	愛知県 豊橋市
4	2006年11月07日13時23分	43度58分39秒	143度42分12秒	北海道 網走支庁 佐呂間町
5	2012年05月06日12時35分	36度6分38秒	139度56分44秒	茨城県 常総市

表 Fスケールと風速の関係

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

6.2 基準竜巻の最大風速 (V_B) の設定 (2/11)

(3) 竜巻最大風速のハザード曲線による最大風速 (V_{B2})

ハザード曲線による竜巻最大風速 (V_{B2}) は、竜巻データの分析、竜巻風速・被害幅・被害長さの確率密度分布及び相関係数の算定、並びにハザード曲線の算出によって構成される。

ハザード算定フローを以下に示す。

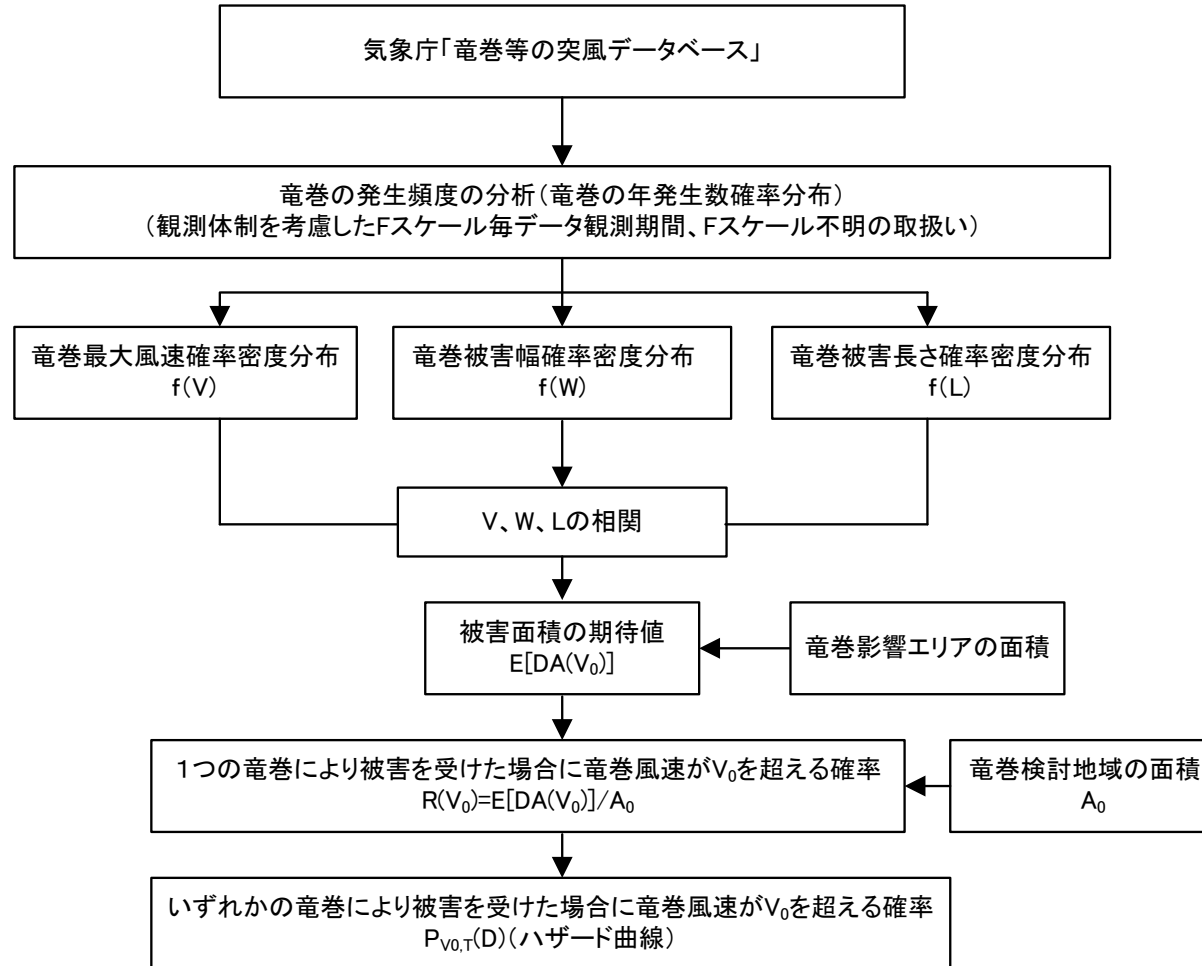


図 竜巻ハザードの算定フロー

【竜巻の発生頻度分析】

- 竜巻の発生数は、気象庁の「竜巻等の突風データベース」における1961年～2012年6月までの51.5年間のデータを基にした。
- 観測体制の変遷や観測された竜巻の特徴を考慮して、竜巻データ分析の対象観測期間を以下のように分類した。
 - a. 観測体制が強化された2007年～2012年6月の5.5年間
 - b. 観測体制が整備された1991年～2012年6月の21.5年間
 - c. 観測記録が整備された1961年～2012年6月の51.5年間

【竜巻発生頻度の分析方針】

- F0及び不明竜巻に関しては、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採用する。
- F1竜巻は被害が比較的軽微であり、1991年以降の年間発生数や標準偏差を採用する。
- F2及びF3竜巻は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ため、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採用する。

【Fスケール不明海上竜巻の取扱い】

- Fスケール不明の海上竜巻については、その竜巻スケールを推定することは困難であるが、海岸線からの海上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し、陸上竜巻の各Fスケールに配分した。

6.2 基準竜巻の最大風速 (V_B) の設定 (4/11)

表 竜巻検討地域における竜巻発生数の分析結果

竜巻検討地域	発生数の統計	陸上で発生した竜巻						海上で発生して陸上へ移動した竜巻						海上竜巻	総数
		F0	F1	F2	F3	F不明	小計	F0	F1	F2	F3	F不明	小計	F不明	
1961～ 2012/6 (51.5年間)	期間内総数	38	78	30	3	14	163	13	43	19	3	7	85	98	346
	平均値	0.74	1.51	0.58	0.06	0.27	3.17	0.25	0.83	0.37	0.06	0.14	1.65	1.90	6.72
	標準偏差	1.85	1.50	0.73	0.24	0.66	2.98	0.52	1.29	0.63	0.24	0.40	1.77	4.77	8.06
1991～ 2012/6 (21.5年間)	期間内総数	38	47	12	1	10	108	13	33	9	0	5	60	98	266
	平均値	1.77	2.19	0.56	0.05	0.47	5.02	0.60	1.53	0.42	0.00	0.23	2.79	4.56	12.37
	標準偏差	2.56	1.72	0.75	0.22	0.92	3.58	0.67	1.68	0.67	0.00	0.43	2.03	6.62	9.93
2007～ 2012/6 (5.5年間)	期間内総数	27	10	1	0	6	44	7	3	0	0	3	13	73	130
	平均値	4.91	1.82	0.18	0.00	1.09	8.00	1.27	0.55	0.00	0.00	0.55	2.36	13.27	23.64
	標準偏差	3.73	1.73	0.43	0.00	1.64	5.08	0.80	0.58	0.00	0.00	0.58	1.25	9.12	14.87
疑似 51.5年間 (陸上竜巻)	期間内総数	253	113	30	3	57	456	66	80	19	3	29	197	684	1337
	平均値	4.91	2.19	0.58	0.06	1.11	8.85	1.27	1.55	0.37	0.06	0.55	2.36	13.28	25.96
	標準偏差	3.73	1.72	0.73	0.24	1.64	4.48	0.80	1.68	0.63	0.24	0.58	2.06	9.12	10.37

・1961年以降の51.5年間で346個の竜巻が観測されている。そのうちF1及びF2竜巻が約5割を占め、Fスケール不明竜巻の数も約4割となっている。Fスケール不明竜巻の多くは2007年以降の5.5年間に観測されている。F2及びF3竜巻については、51.5年間で55個観測されているが、2007年以降の発生数はF2竜巻が1件のみであり、観測体制の強化に伴う影響を受けていないことが示唆される。

6.2 基準竜巻の最大風速 (V_B) の設定 (5/11)

- 分析方針に従い、疑似的な51.5年間のデータや統計量をFスケール毎に算出した結果、竜巻検討地域における竜巻総発生数は1338個となった。
- 年代毎の竜巻データの品質のばらつき及びFスケール不明竜巻の取扱いにより、観測実績（346個）に対して保守性を高めた評価としている。

表 竜巻検討地域における竜巻パラメータ (51.5 年間の分析結果)

竜巻検討地域	発生数の統計	Fスケール				
		F0	F1	F2	F3	合計
疑似 51.5年間 (全竜巻)	期間内総数	870	363	94	11	1338
	平均値	16.89	7.05	1.83	0.21	25.98
	標準偏差	6.51	3.19	1.31	0.44	7.38

【竜巻の年発生数の確率分布】

確率分布の設定にあたっては、竜巻は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、「竜巻ガイド」及び原子力安全基盤機構の委託成果*にならってポリヤ分布により設定した。

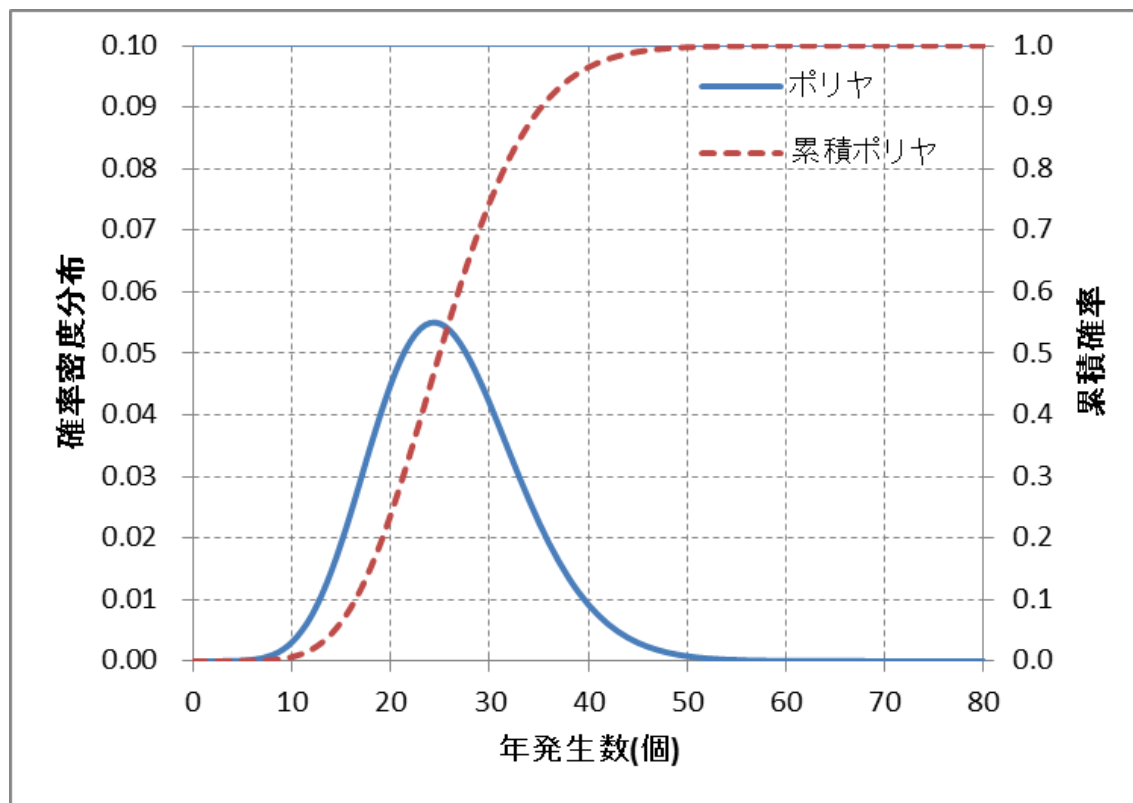


図 竜巻年発生数の確率密度分布

*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年2月

6.2 基準竜巻の最大風速 (V_B) の設定 (7/11)

【竜巻の被害幅、被害長さの分析】

竜巻発生数と同時に、竜巻被害幅、被害長さの観測データを分析方針に従い推定した。

【分析方針】

- ①統計量を確保するため、1961年以降のデータを使用し、Fスケール別に竜巻による被害幅、被害長さデータを抽出する。
- ②各スケール別の51.5年間のデータ数は、観測値ではなくこれまでに算出した値とする。
- ③①の被害幅、被害長さデータを大きい順に並び替え、51.5年間の発生数分、繰り返しサンプリングを行い、疑似データを作成する。
- ④③で作成したデータの平均値、標準偏差を求める。

表 竜巻検討地域における竜巻パラメータ (51.5年間の分析結果)

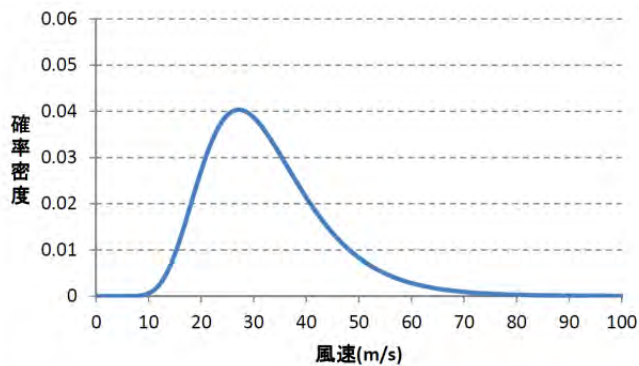
竜巻検討地域 (海岸±5km)	パラメータ	統計量	Fスケール				
			F0	F1	F2	F3	計
疑似 51.5年間 (全竜巻)	発生数	期間内総数	870	363	94	11	1338
		平均値(年)	16.89	7.05	1.83	0.21	25.98
		標準偏差(年)	6.51	3.19	1.31	0.44	7.38
	被害幅	期間内総数	870	363	94	11	1338
		平均値(m)	59.30	132.54	250.64	563.64	96.76
		標準偏差(m)	58.50	190.86	382.18	727.36	175.85
	被害長さ	期間内総数	870	363	94	11	1338
		平均値(km)	1.14	2.87	5.36	14.86	2.02
		標準偏差(km)	0.93	3.12	4.77	14.43	3.03

6.2 基準竜巻の最大風速 (V_B) の設定 (8/11)

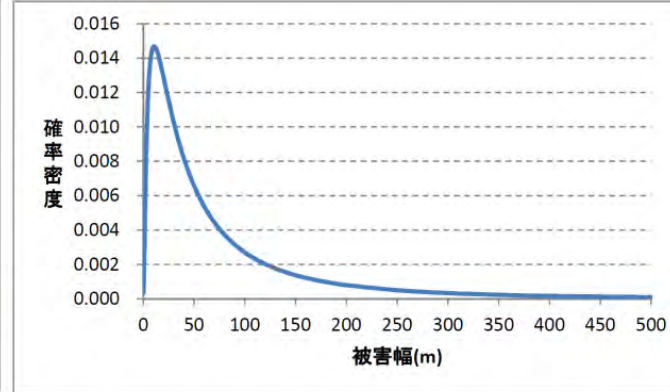
【竜巻風速、被害幅、被害長さの確率分布及び相関係数】

竜巻検討地域における51.5年間の竜巻の発生数、被害幅、被害長さのデータを用いて確率密度分布を求めた。確率密度分布は、「竜巻ガイド」及び原子力安全基盤機構の委託成果を参照して、対数正規分布に従うものとした。以下に、確率密度分布の結果を示す。

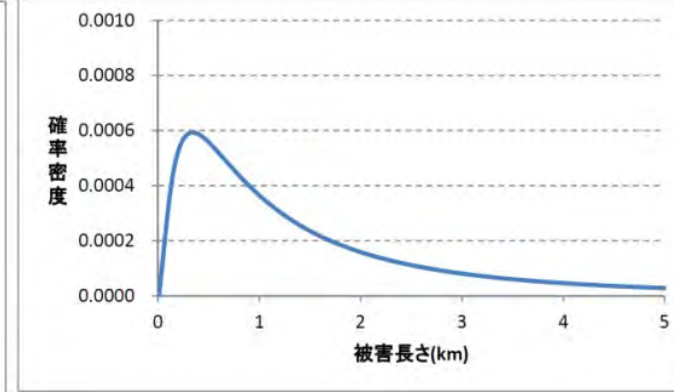
また、竜巻風速、被害幅、被害長さについての相関係数を求めた。



竜巻風速の確率密度分布



竜巻被害幅の確率密度分布



竜巻被害長さの確率密度分布

竜巻風速、被害幅、被害長さの相関係数の算定*

相関係数 (対数)	風速	被害幅	被害長さ
風速	1.000	0.397	0.435
被害幅	—	1.000	0.397
被害長さ	—	—	1.000

*観測データのみを用いて算定

6.2 基準竜巻の最大風速 (V_B) の設定 (9/11)

【竜巻影響エリア】

原子炉施設の概略配置図に示すように、原子炉建物などの主要な施設が、直径320mの円内に収まることから、この直径320mの円（面積約80,500m²）を竜巻影響エリアに設定する。

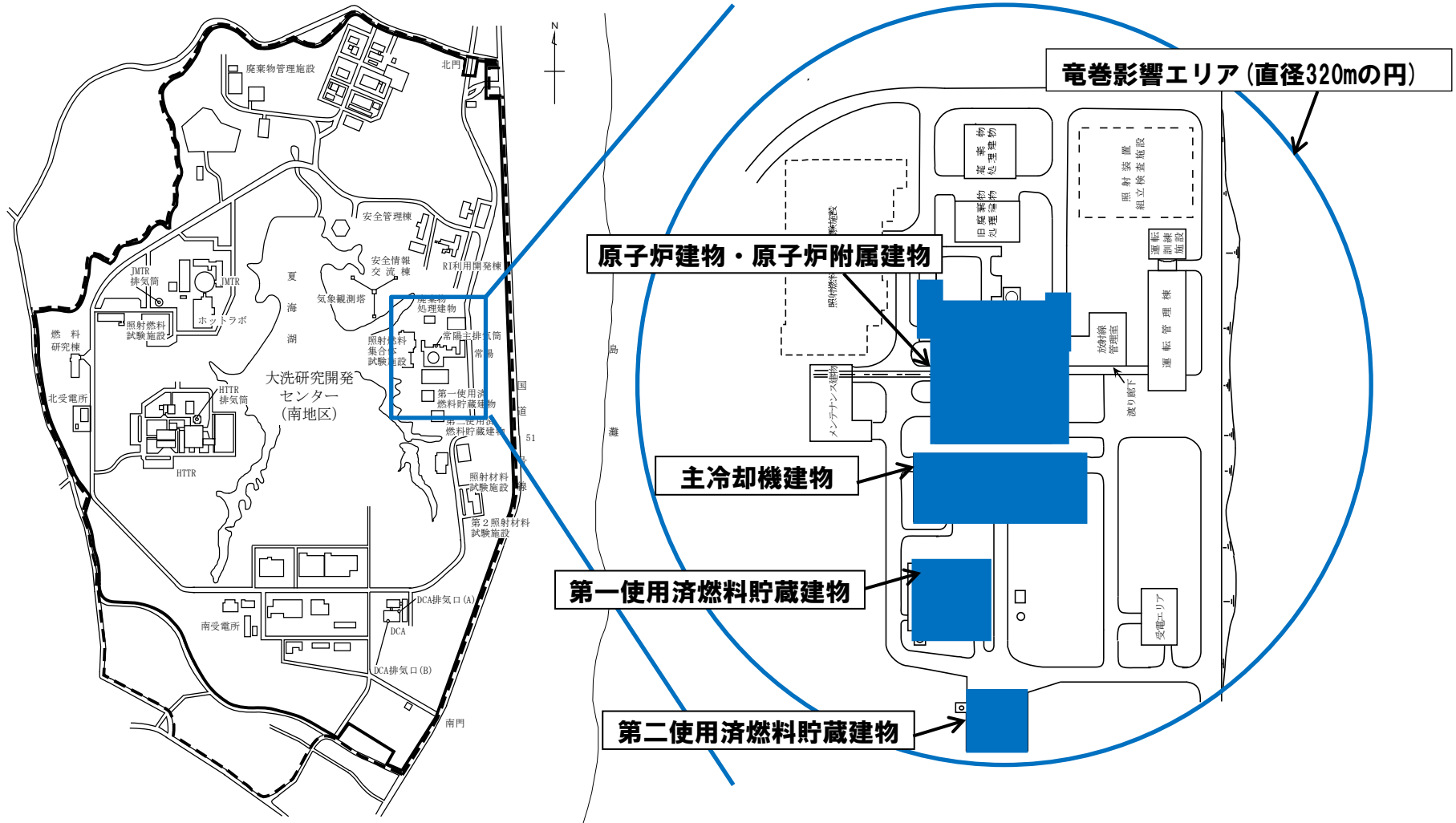


図 高速実験炉原子炉施設の概略配置図

6.2 基準竜巻の最大風速 (V_B) の設定 (10/11)

【ハザード曲線の算定】

- 竜巻の年発生数の確率密度分布は、ポリヤ分布の適合度が高い。
- 以下の式に示すように、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、ハザード曲線を求めた。
- 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68.1m/sとなる。

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

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

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

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

$$E[DA(V_0)] = \int_0^\infty \int_0^\infty \int_0^\infty W(V_0) f(V, w, l) dV dw dl$$

$$+ L \int_0^\infty \int_0^\infty f(V, l) dV dl$$

$$+ L \int_0^\infty \int_0^\infty W(V_0) f(V, w) dV dw$$

$$+ S \int_0^\infty f(V) dV$$

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

β : 竜巻の年発生数の平均と標準偏差で表されるパラメータ (ポリヤ分布パラメータ)

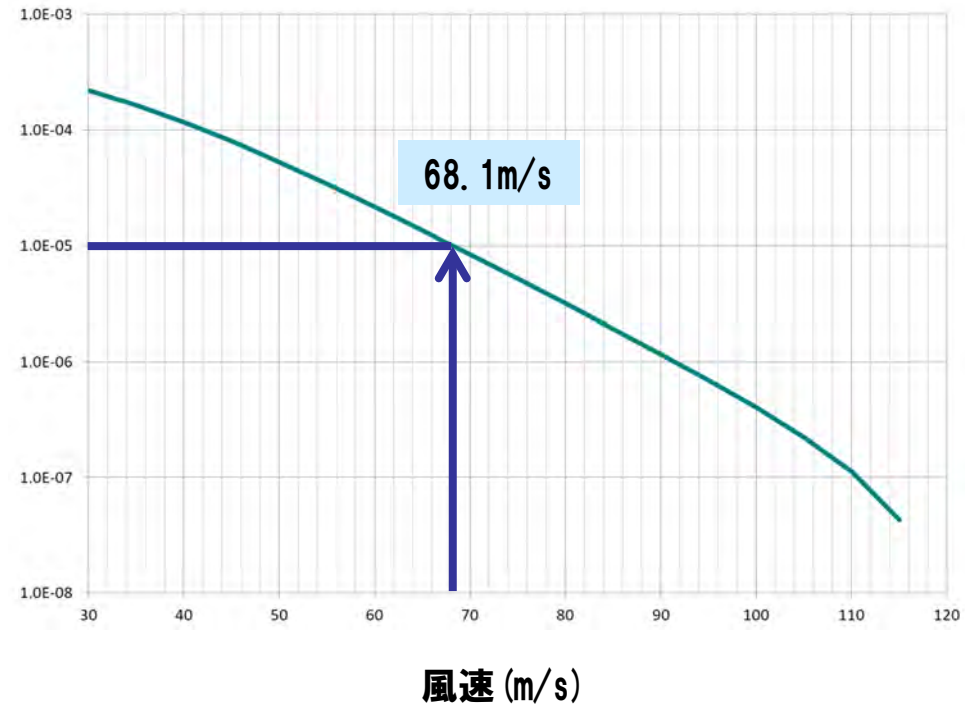
$R(V_0)$: 1つの竜巻に遭遇し、かつ竜巻風速が V_0 を超える確率

$E[DA(V_0)]$ 被害面積の期待値

V: 風速
w: 被害幅
l: 被害長さ
f(*): 確率密度分布
L: 竜巻影響エリアの直径
S: 竜巻影響エリアの面積

V_{\min} : 被害が発生し始める風速
 $W(V_0)$: 竜巻の被害幅のうち風速が V_0 を超える部分の幅

年超過確率



竜巻最大風速のハザード曲線
(海側陸側各5kmの評価)

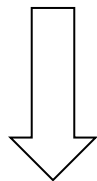
6.2 基準竜巻の最大風速 (V_B) の設定 (11/11)

【基準竜巻の最大風速 (V_B) の算定結果】

・ 基準竜巻の最大風速 V_B は、 V_{B1} と V_{B2} のうちの大きい方の風速とすることから、原子炉施設における基準竜巻の最大風速 V_B は 92m/s とする。

竜巻検討地域において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}) : 68.1m/s



基準竜巻の最大風速 (V_B) : 92m/s

6.3 設計竜巻の最大風速 (V_D) の設定

(1) 設計竜巻の最大風速 (V_D) の設計方針

- 設計竜巻の最大風速 (V_D) は、原子炉施設が立地する地域の特性（地形効果による竜巻の増幅特性等）を考慮して、基準竜巻の最大風速 (V_B) の適切な割増し等を考慮して設定する。

(2) 地形効果の検討

- 設計竜巻の設定に当たっては、丘陵等によって竜巻が増幅する可能性があると考えられることから、立地する地域において設計対象施設の周辺地域等の地形について検討した。

原子炉施設は標高35m～40mに位置しており、東西方向及び南北方向からみても下り斜面には位置していない。

よって、基準竜巻が周辺地形により増幅される可能性はなく、設計竜巻 (V_D) = 基準竜巻 (V_B) と考えられることから、**設計竜巻の最大風速 (V_D) は92m/sと設定する。**



設計竜巻の最大風速 (V_D) : 92m/s

竜巻影響評価に用いる竜巻の最大風速は、保守性を十分に考慮し、国内最大級F3クラスの発生実績から最大風速92m/sに余裕を考慮して100m/sを用いることとする。

6.4 竜巻影響評価に使用する設計竜巻の特性値

表に竜巻影響評価に使用する設計竜巻の特性値を示す。

表 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	88.1	44.1

$$\begin{aligned}
 & \bullet V_T = 0.15 \times V_D & \bullet V_{Rm} = V_D - V_T & \bullet R_m = 30 \\
 & \bullet \Delta P_{max} = \rho \times V_{Rm}^2 \quad (\text{空気密度 } \rho = 1.22 \text{ (kg/m}^3\text{)}) & \bullet (dp/dt)_{max} = (V_T/R_m) \times \Delta P_{max}
 \end{aligned}$$

設定した設計荷重に対して、以下の項目を実施する。

- (1) 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。
- (2) 建物・構築物の外壁、屋根等について、構造健全性を確認し、破損した場合には安全機能維持について確認する。
- (3) 設備（系統・機器）については、各設備の竜巻により破損するおそれのある部位に対して構造健全性を確認し、破損する可能性が確認された場合には安全機能維持への影響を確認する。

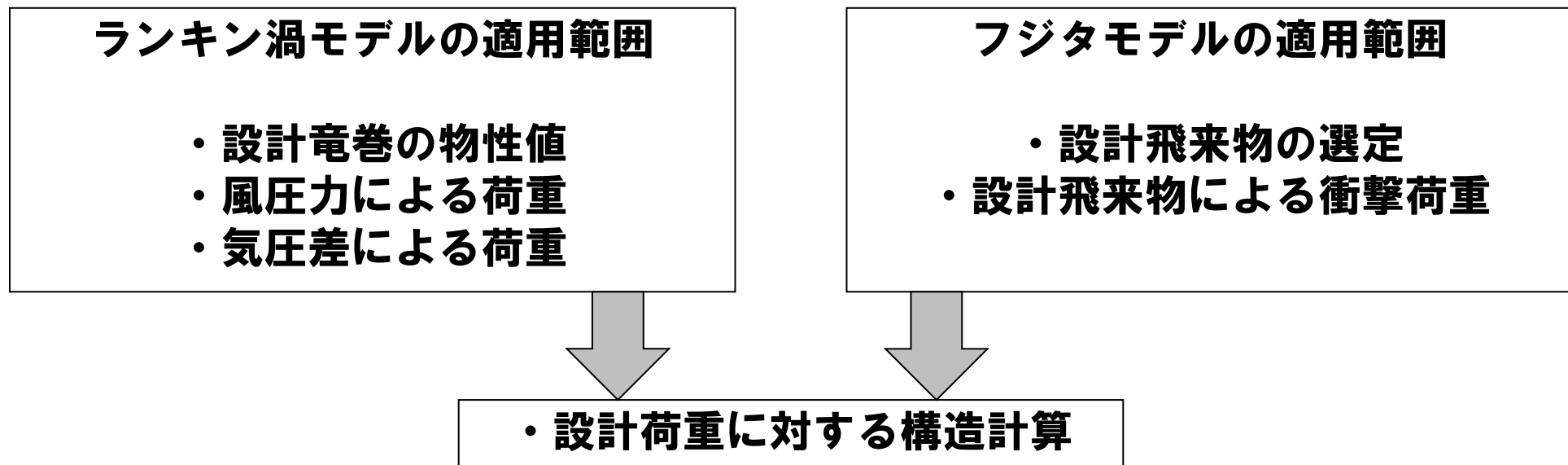
7. 設計荷重の設定

7.1 ランキン渦モデルとフジタモデルの適用範囲 (1/2)

設計荷重の設定にあたり、ランキン渦モデル及びフジタモデルの適用範囲を以下のとおりとした。

なお、適用範囲の設定については「佐呂間竜巻での自動車飛散事例*」をもとに、現実の被災状況との整合性の観点を考慮した。

*平成18年11月7日に北海道網走支庁佐呂間町で発生した竜巻による、4tトラックの飛散事例とその飛散解析との比較を実施



7.1 ランキン渦モデルとフジタモデルの適用範囲 (2/2)

評価に用いる竜巻モデル

[ランキン渦モデルにより設定]

[フジタモデルにより設定]

東京工芸大報告書*において、 $R_m=30m$ 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推定している。これに対し、フジタモデルの水平方向風速 V は、高さ方向に依存性があるが、外部コアの外側では接線風速が最大となる流入層の上端($z=1$)において、ランキン渦モデルと同様に周方向風速半径に反比例する。このことから、ランキン渦モデルと同じ特性値をフジタモデルに用いることが可能であるが、本評価においてはランキン渦モデルの値を用いた。

ランキン渦モデルとフジタモデルとは、竜巻内の圧力分布が異なり、最大気圧低下量を求めるにあたり、フジタモデルの場合は数値解析が必要となるが、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、ランキン渦モデルとフジタモデルで大きく異なることはない。本評価においては、ランキン渦モデルの値を用いた。

竜巻風速場として地表面の風速場を現実的に表現したフジタモデルを選定し、以下の飛散解析結果を用いて設計飛来物を選定

- ・ 浮上判定
- ・ 竜巻防護施設に対する飛散高さ、飛散距離
- ・ 飛散速度 (運動エネルギー)

飛来物の飛散解析と整合を図り、設計飛来物の衝突に対する評価について、フジタモデルで評価

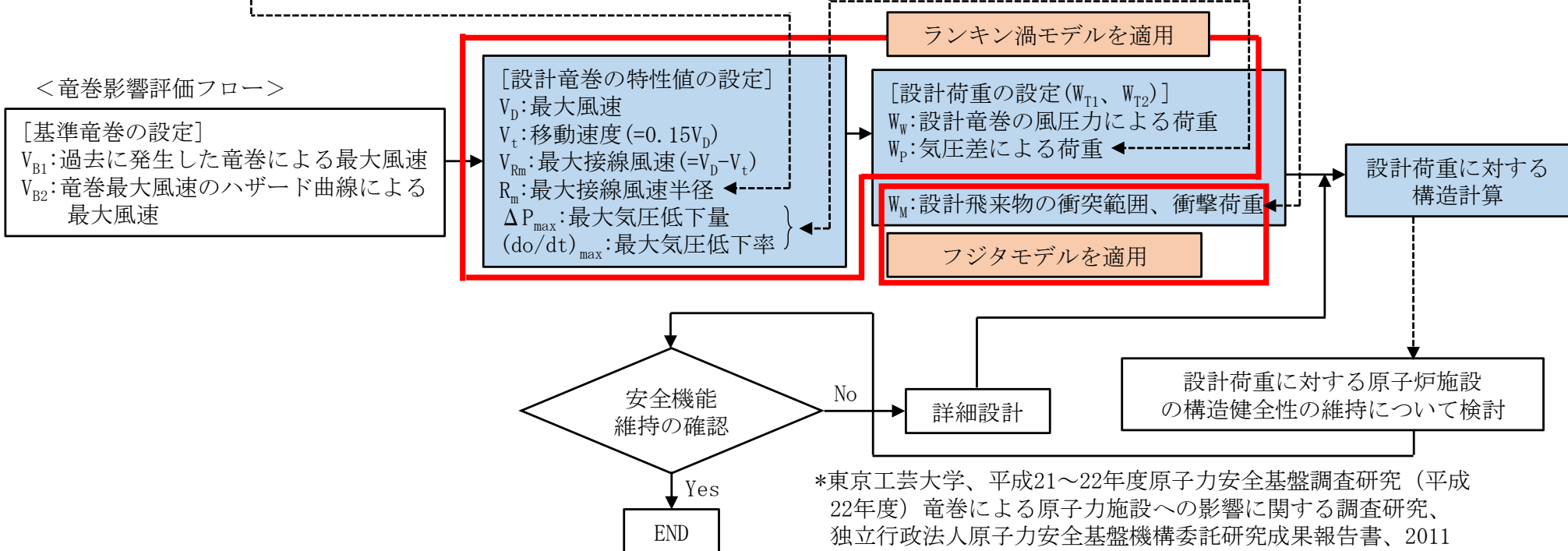


図 竜巻影響評価フロー及びランキン渦モデルとフジタモデルの適用範囲

7.2 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2015」に準拠して、以下の式により算出する。

なお、ガスト影響係数（ G ）は1.0とし、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

7.3 気圧差による荷重の設定

設計竜巻による竜巻影響評価対象施設内外の気圧差による荷重は、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、以下の式により算出する。

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

ΔP_{max} : 最大気圧低下量、 A : 施設の受圧面積

7.4 設計飛来物の選定 (1/6)

【設計飛来物の選定方針】

飛来物の衝突荷重、運動エネルギー、飛散防止対策の実現性等を考慮し、竜巻飛来物のうち、以下の①～④に当てはまる物品を設計飛来物として選定した（次頁参照）。

- ① 極小サイズで剛な飛来物（サイズが非常に小さく、軽量のため、衝撃力は小さいが、あらゆる場所に存在し、固縛等の措置が困難であり、影響を及ぼす可能性を否定できないもの）
- ② 小サイズで剛な飛来物（衝撃力は小さいが、飛来速度が大きい場合、局所的な損傷が生じる可能性を否定できないもの）
- ③ 中サイズで剛な飛来物（局所的に大きな衝撃力が生じる可能性を否定できないもの）
- ④ 大サイズで柔な飛来物（衝撃力が大きいもの）

小又は中サイズで柔な飛来物は、運動エネルギーが小さく、また、塑性変形により衝撃力が緩和され、その影響は、剛な飛来物に包絡されるため、対象外とした。

飛来物の浮き上がりの有無及び速度は、電中研が開発した竜巻による物体の浮上・飛来解析コードTONBOS*により評価し、衝撃荷重は以下に示す式により求めた。

$$F=mv^2/L_1$$

F: 飛来物の衝撃荷重

m: 飛来物の質量

v: 飛来物の最大水平速度

L₁: 飛来物の最短辺

*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.

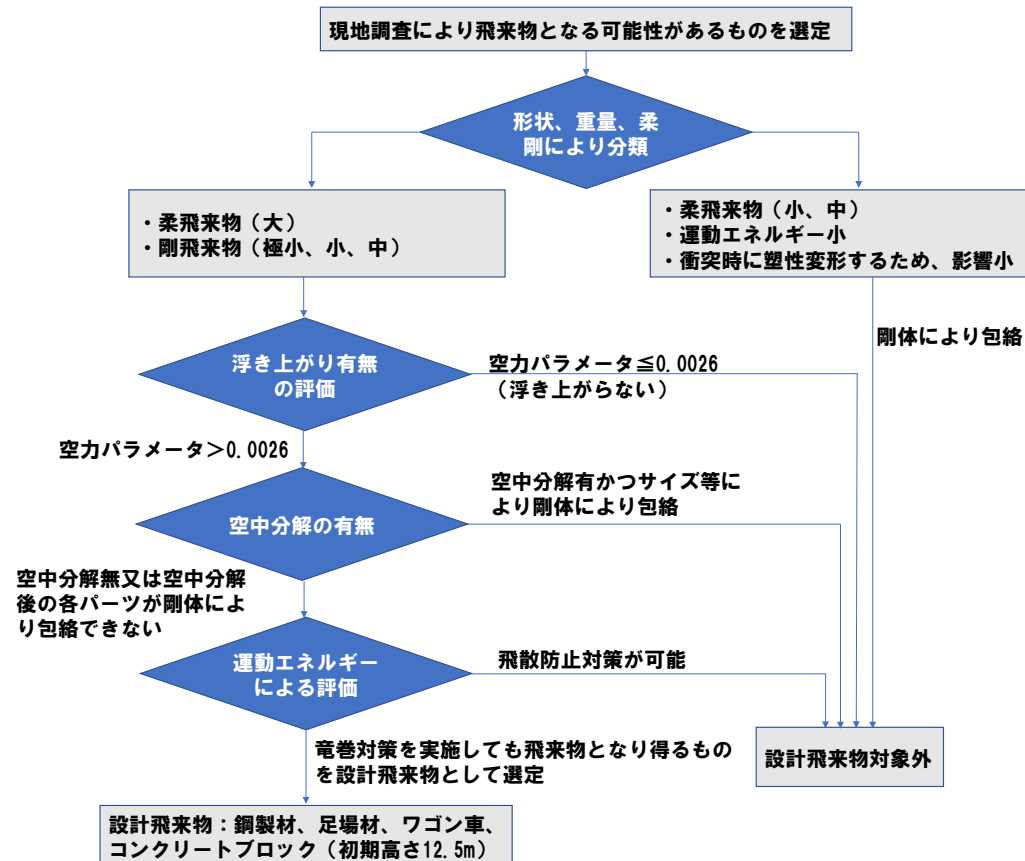
7.4 設計飛来物の選定 (2/6)

【設計飛来物の選定フロー】

設計飛来物は、原子炉施設敷地内の飛来物に係る現地調査結果及び「竜巻ガイド」を参考に設定した。

設計飛来物の選定フローを以下に示す。

設計飛来物による飛来の影響を上回る飛来物については、固縛、撤去等の措置を行い、飛来物とならない対策を講じる。



7.4 設計飛来物の選定 (3/6)

【敷地内のウォークダウン】

設計飛来物の選定にあたり、「常陽」敷地内の飛来物に係る現地調査（ウォークダウン）を行った（2018年12月）結果、下図の通りに飛来物が配置されていることを確認した。

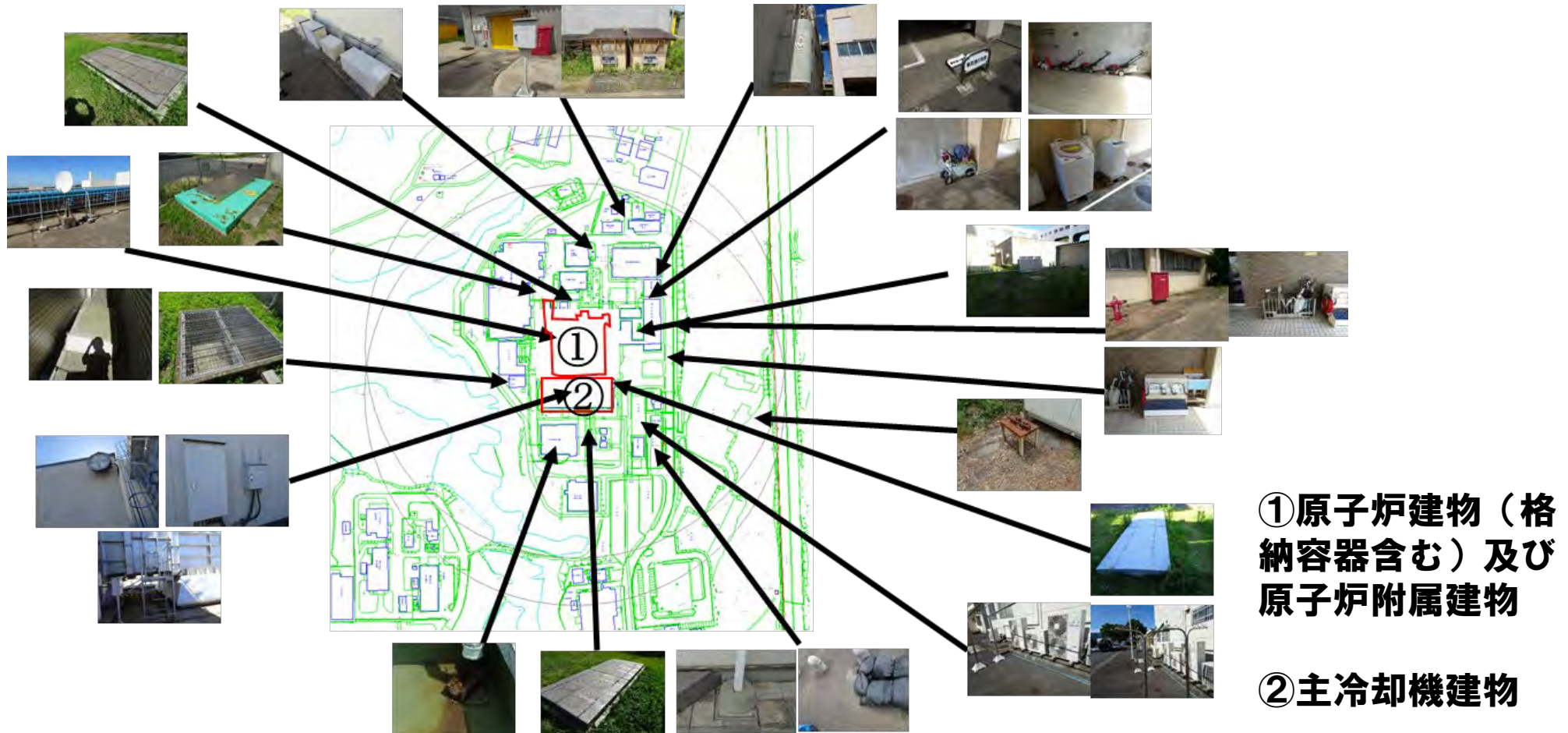


図 主な竜巻飛来物の配置

7.4 設計飛来物の選定 (4/6)

【ウォークダウン結果】

現地調査により確認された飛来物について、サイズ、柔・剛及び形状（棒状、板状、塊状）により分類した結果を下表に示す。なお、想定飛来物には、敷地に隣接する国道51号を走行するワゴン車を含めた。

表 現地調査により確認された竜巻飛来物

形状	柔飛来物			剛飛来物		
	小	中	大	極小	小	中
棒状	-	-		-	鋼製パイプ	足場板 鋼製材
板状	-	ホース格納庫	-	-	車止め柵	グレーチング 縞鋼板
塊状	ページング 監視カメラ 制御盤 ライト 土のう	ジェットクリーナー（後） ジェットクリーナー（前） 芝刈り機 薬剤散布機 消火器格納庫 室外機 洗濯機 室外機カバー	コンテナ ワゴン車 （国道51号を 走行）	-	物干し台 ブロック 標識の土台 万力 コンクリートブロック	傘立て 保管箱 防護壁 はしご 鋼板蓋 縞鋼板（蓋）

7.4 設計飛来物の選定 (5/6)

【設計飛来物の選定結果】

設計飛来物の衝突による衝撃荷重を設定するため、設計飛来物を下表の通り選定した。下表のパラメータはTONBOSを用いて算出した。設計飛来物の施設への衝突については飛散高さ等により適切に考慮する。

表 設計飛来物の選定結果

飛来物の種類	板状物	棒状物	塊状物	
	足場材 (初期高さ 0m*1)	鋼製材 (初期高さ 0m*1)	ワゴン車 (初期高さ 0m*1)	コンクリートブロック (初期高さ 12.5m*2)
サイズ (m)	4.0×0.40 ×0.051	4.2×0.30 ×0.20	5.2×1.9 ×2.3	0.39×0.15 ×0.19
質量 (kg)	17.4	135	1,890	14.3
飛散距離 (m)	256	6.3	161	139
飛散高さ (m)	0.40	0.15	12	3.2
最大水平速度 (m/s)	43	12	52	47
運動エネルギー (kJ)	16	9.0	2,530	16
衝撃荷重*3 (kN)	627	90	2,670	210

*1: 地表面からの飛来を想定

*2: 主冷却機建物屋上からの飛来を想定

*3: 衝撃荷重は以下の式により求めた。

$$F = mv^2 / L_1$$

F: 飛来物の衝撃荷重 m: 飛来物の質量 v: 飛来物の最大水平速度 L₁: 飛来物の最短辺

【設計飛来物からの除外】

設計飛来物として選定した「足場材」、「鋼製材」及び「コンクリートブロック (初期高さ12.5m)」の運動エネルギー又は裏面剥離限界厚さを超える物品は、(1) 移動、(2) 固縛、(3) 固定化のいずれかの対策を講じる。

(1) 移動

屋内へ移動可能な物品については屋内へ移動する。車両については竜巻が大洗研究所に到達するおそれが確認された場合には、原子炉施設への衝突を避けられる場所へ移動する。

(2) 固縛

連結治具、ロープ、アンカー、十分な重さのウエイトの取付けにより固縛する。ウエイトの重量については、固縛物品+ウエイトの重量により空力パラメータが0.0026 (物体の浮上有無の閾値) を下回る重量とする。

(3) 固定化

固定プレートやアンカーにより基礎コンクリートに固定する。

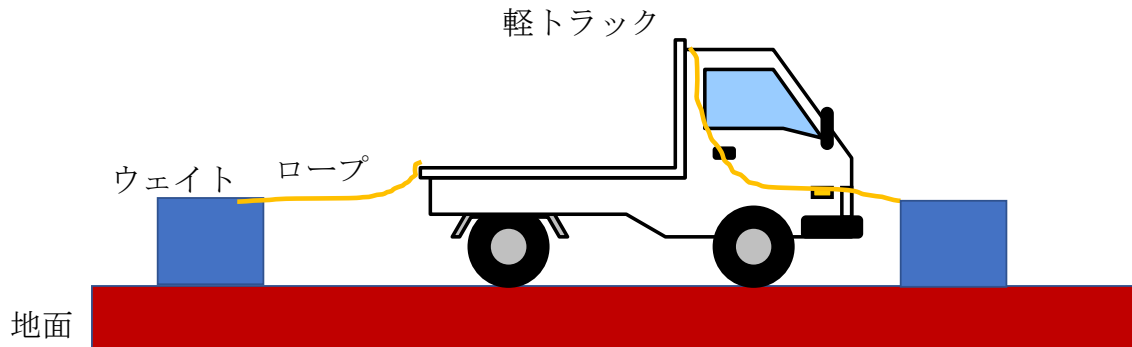


図 固縛措置の一例

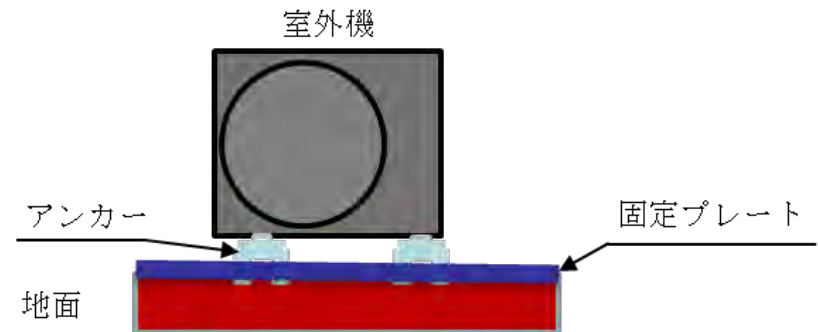


図 固定化措置の一例

7.5 設計荷重の組み合わせ (1/3)

竜巻影響評価対象施設は以下の通りである。

(1) 安全施設を内包し保護する外殻施設

- ・原子炉建物（格納容器を含む。）及び原子炉附属建物
- ・主冷却機建物
- ・第一使用済燃料貯蔵建物 ・第二使用済燃料貯蔵建物

(2) 外殻施設で保護されない安全施設

- ・主冷却機のうち屋外部分（屋外ダクト）
- ・非常用ディーゼル電源系に関連する冷却塔

竜巻影響評価対象施設の設計竜巻荷重は、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) を適切に組み合わせた複合荷重とし、「竜巻ガイド」に記載の以下の式により算出する。

$$W_{T1} = W_p \qquad W_{T2} = W_w + 0.5W_p + W_M$$

- 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

竜巻影響評価対象施設には、 W_{T1} 及び W_{T2} の両荷重のうち、大きい方を作用させる。

設計竜巻荷重と組み合わせる荷重は以下の通りとする。

- (1) 竜巻影響評価対象施設に常時作用する荷重、運転時荷重
竜巻影響評価対象施設に常時作用する荷重（自重、死荷重、活荷重）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
次頁に記載

なお、重要安全施設を含む安全施設は、自然現象又はその組合せにより、安全機能を損なわない設計としている。安全機能を損なわなければ設計基準事故に至らないため、重要安全施設に大きな影響を及ぼすおそれがあると想定される設計竜巻荷重及び設計基準事故時に生じる応力を組み合わせる必要はなく、重要安全施設は、個々の事象に対して、安全機能を損なわない設計とする。

7.5 設計荷重の組み合わせ (3/3)

自然現象の組合せについて、安全施設へ影響を与えるパラメータ（荷重、温度及び電氣的影響）を考慮し、その要否について検討した結果を以下に示す。自然現象（地震及び津波を除く。）の組合せとして、「常陽」では、「竜巻」＋「積雪」を考慮する。判断基準を下表注釈に示す。

【】内：影響を与えるパラメータ

サブ事象 メイン事象	森林 火災 【温度】	生物学的 事象 【電氣的 影響】	火山の 影響 【荷重】	落雷 【電氣的 影響】	積雪 【荷重】	凍結 【温度】	風 (台風) 【荷重】
竜巻 【荷重】	*1	*1	*2	*1	評価対象 *3	*1	評価対象 に包絡

*1：安全施設への影響を与えるパラメータが異なるため、組み合わせることによる設計への影響が小さい。

*2：同時発生を考慮することが過度に保守的である。

*3：積雪荷重と組み合わせることが保守的になる場合のみ考慮する。

8. 竜巻防護施設の外殻となる施設の評価方法

- ・ 竜巻防護施設の外殻となる施設に求められる機能は、安全施設の防護機能の維持及び波及的影響を及ぼさないことである。
- ・ 防護機能については、設計竜巻に対し、竜巻防護施設の外殻となる施設の構造健全性を評価することにより、内包する竜巻防護施設が影響を受けないことを確認する。
- ・ 設計飛来物により壁や屋根など竜巻防護施設の外殻となる施設の各部に損傷が生じる場合は、損傷による竜巻防護施設への波及的影響が生じないように、対策を施す。
- ・ 開口部も同様とする。

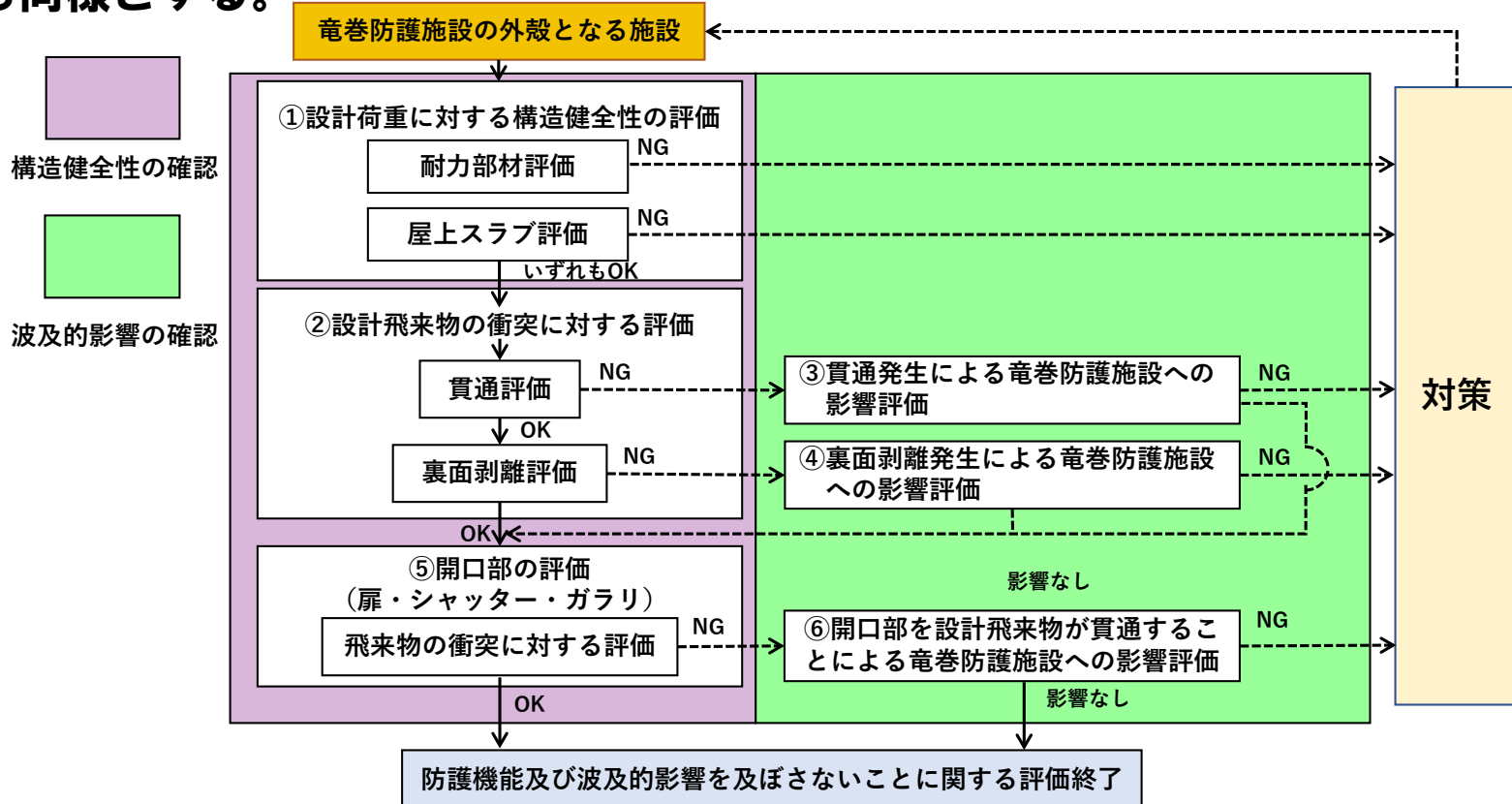


図 竜巻防護施設の外殻となる施設に関する評価フロー

9. 建物・建築物等の構造健全性の確認

9.1 設計荷重に対する外殻施設の構造健全性の評価の概要(1/2)

竜巻防護施設の外殻となる施設の構造健全性の評価内容を下表に示す。

評価項目	荷重	評価内容	
		評価対象	評価基準値
設計荷重に対する耐力部材の評価	W_{T1} 、 W_{T2}	建物各層に発生する層せん断力	保有水平耐力以下
設計荷重に対する屋根スラブの評価	W_W 、 W_P 、 自重、 積雪荷重	建物屋根スラブに発生する曲げモーメント	許容曲げモーメント以下

$$W_{T1} = W_P, \quad W_{T2} = W_W + 0.5W_P + W_M$$

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

【設計荷重に対する耐力部材の評価方法】

評価に用いる設計竜巻による複合荷重 (W_{T1} 、 W_{T2}) に対し、建物各層に生じる層せん断力が、評価基準値を下回ることを確認する。

評価基準値は、保有水平耐力とする。

【設計荷重に対する屋根スラブの評価方法】

屋根は、複合荷重 (W_{T1} 、 W_{T2}) が面外方向に作用する。これらの荷重に対し、破損のおそれがある部位として考えられるため、破損して安全施設の外殻となる施設としての機能が損なわれないよう、設計竜巻による複合荷重により生じる応力が、断面算定により得た許容曲げモーメントを下回ることを確認する。

9.2 原子炉建物（格納容器を含む。）及び原子炉附属建物の評価結果 (1/2)

【耐力部材評価結果】

方向	G. L. (m)	設計竜巻荷重		保有水平耐力 (kN)	検定比	結果
		複合荷重 (W_{T1}) による 層せん断力 (kN)	複合荷重 (W_{T2}) による 層せん断力 (kN)			
NS	26.7*	0	1,101	109,079	0.010	良
	13.7	3,179	6,344	584,305	0.011	良
	8.5	10,333	13,343	494,206	0.027	良
	0.2	15,124	17,729	1,730,063	0.010	良
EW	26.7*	0	1,101	111,240	0.010	良
	13.7	3,086	6,300	665,892	0.009	良
	8.5	10,686	13,707	735,907	0.019	良
	0.2	15,584	18,191	1,696,213	0.011	良

*：外周コンクリート壁部分

設計荷重に対して耐力部材は健全性を損なわない結果を得た。

9.2 原子炉建物（格納容器を含む。）及び原子炉附属建物の評価結果 (2/2)

【屋根スラブ評価結果】

項目	記号	単位	原子炉附属建物							
G. L.	—	m	+13.7				+6.0			
境界条件	—	—	四辺固定				四辺固定			
固定荷重	G	kN/m ²	9.62				13.05			
積載荷重	P	kN/m ²	1.77				1.77			
風圧力荷重（上向き）	Ww/A	kN/m ²	-6.10				-6.10			
気圧差による圧力荷重（上向き）	Wp/A	kN/m ²	-8.81				-8.81			
吹上荷重（上向き）	Wt	kN/m ²	-10.51				-10.51			
設計荷重	W	kN/m ²	0.89				4.32			
	Wx	kN/m ²	0.45				4.12			
曲げモーメント	Mx	kN・m/m	2.7	1.8	2.6	1.7	10.8	7.2	5.6	3.8
短期許容曲げモーメント	Ma	kN・m/m	76.1	76.1	70.1	70.1	127.7	127.7	98.5	98.5
M検定比	—	—	0.04	0.02	0.04	0.02	0.08	0.06	0.06	0.04
結果	—	—	良	良	良	良	良	良	良	良

屋根スラブは健全性を損なわない結果を得た。

【耐力部材評価結果】

方向	G. L. (m)	設計竜巻荷重		保有水平耐力 (kN)	検定比	結果
		複合荷重 (W_{T1}) による 層せん断力 (kN)	複合荷重 (W_{T2}) による 層せん断力 (kN)			
NS	24.4	1,520	1,671	38,924	0.043	良
	12.5	8,743	11,827	165,498	0.071	良
	4.5	16,077	18,566	218,966	0.085	良
	0.2	18,893	21,571	487,725	0.044	良
EW	24.4	1,966	2,099	26,867	0.078	良
	12.5	6,864	7,918	184,931	0.043	良
	4.5	10,012	10,800	193,742	0.056	良
	0.2	11,164	12,271	688,259	0.018	良

設計荷重に対して耐力部材は健全性を損なわない結果を得た。

【屋根スラブ評価結果】

名称	記号	単位	主冷却機建物							
G. L.		m	+24.4				+12.5			
境界条件		—	四辺固定				四辺固定			
固定荷重	G	kN/m ²	5.30				6.97			
積載荷重	P	kN/m ²	0.89				1.77			
風圧力荷重 (上向き)	Ww/A	kN/m ²	-6.10				-6.10			
気圧差による圧力荷重 (上向き)	Wp/A	kN/m ²	-8.81				-8.81			
吹上荷重 (上向き)	Wt	kN/m ²	-10.51				-10.51			
設計荷重	W	kN/m ²	-4.32				-1.77			
	Wx	kN/m ²	-3.60				-1.73			
曲げモーメント	Mx	kN・m/m	-5.8	-3.9	-3.5	-2.3	-1.6	-1.0	-0.8	-0.5
短期許容曲げモーメント	Ma	kN・m/m	34.5	34.5	25.4	25.4	34.5	34.5	25.4	25.4
M検定比		—	-0.17	-0.11	-0.14	-0.09	-0.05	-0.03	-0.03	-0.02

屋根スラブは健全性を損なわない結果を得た。

【耐力部材評価結果】

方向	G. L. (m)	設計竜巻荷重		保有水平耐力 (kN)	検定比	結果
		複合荷重 (W_{T1}) による 層せん断力 (kN)	複合荷重 (W_{T2}) による 層せん断力 (kN)			
NS	16.4	1,781	1,816	76,850	0.024	良
	10.4	5,255	5,410	173,736	0.031	良
	4.7	8,284	8,182	169,129	0.049	良
	0.2	9,738	9,514	540,101	0.018	良
EW	16.4	1,055	1,075	76,625	0.014	良
	10.4	3,620	3,603	170,245	0.021	良
	4.7	6,065	5,841	191,997	0.032	良
	0.2	7,239	6,916	926,289	0.008	良

設計荷重に対して耐力部材は健全性を損なわない結果を得た。

9.5 第二使用済燃料貯蔵建物の評価結果

【耐力部材評価結果】

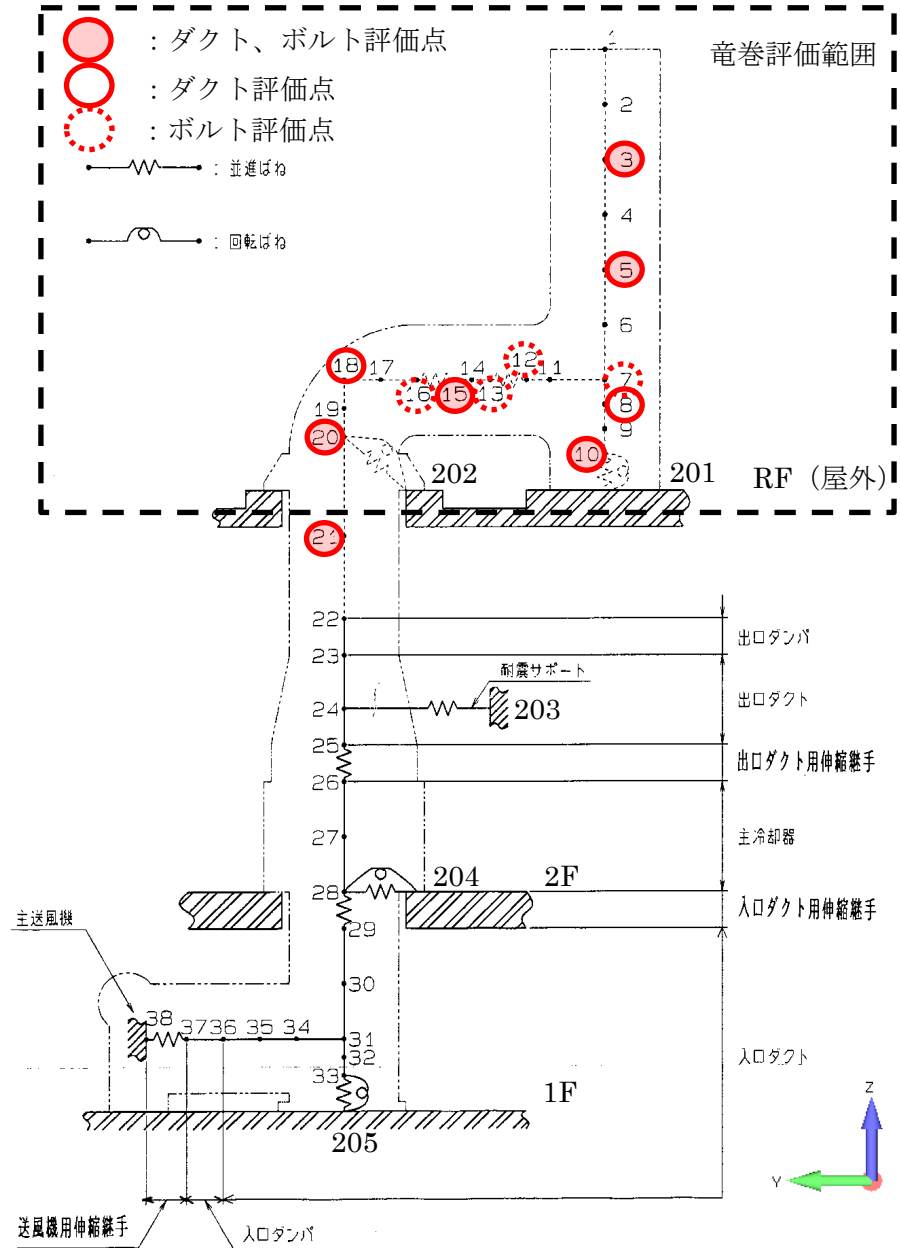
方向	G. L. (m)	設計竜巻荷重		保有水平耐力 (kN)	検定比	結果
		複合荷重 (W_{T1}) による 層せん断力 (kN)	複合荷重 (W_{T2}) による 層せん断力 (kN)			
NS	16.6	2,329	2,350	95,275	0.025	良
	9.6	3,081	3,985	184,165	0.022	良
	5.1	5,334	6,047	218,484	0.028	良
	0.2	7,035	7,664	497,021	0.015	良
EW	16.6	2,275	2,298	141,229	0.016	良
	9.6	3,065	3,978	203,971	0.020	良
	5.1	5,330	6,052	217,203	0.028	良
	0.2	7,475	8,015	476,942	0.017	良

設計荷重に対して耐力部材は健全性を損なわない結果を得た。

【評価方針】

解析コード「FINAS Ver. 21.3」により、多質点系モデルを用いた応答解析を実施する。

解析モデルは、空気流路を形成するダクト、主冷却器本体、出入口ダンパ等で構成される主冷却機を曲げ、せん断変形を考慮したビーム要素で多質点系モデルに置換したモデルとする。モデル化の範囲は屋内部分も含めた全体系とする。



【ダクトの発生モーメント及びせん断応力の評価方法】

補強板で補剛された板要素で構成されたダクトに発生するモーメントが許容値以下であることを確認する。補強板で補剛された板要素で構成されたダクトに発生するモーメントは、以下の式で求める。なお、発生するモーメントは、自重、熱荷重と設計竜巻による風荷重を組み合わせる。

$$M = |M_D| + |M_T| + |M_W| + (W_D + W_T + |W_W|) \cdot L$$

ここで、

M : 自重、熱荷重、風荷重によりダクトに発生するモーメント (N・mm)

M_D : 自重によりダクトに発生するモーメント (N・mm)

M_T : 熱荷重によりダクトに発生するモーメント (N・mm)

M_W : 設計竜巻による風荷重によりダクトに発生するモーメント (N・mm)

W_D : 自重によりダクトに発生する引張荷重 (N)

W_T : 熱荷重によりダクトに発生する引張荷重 (N)

W_W : 設計竜巻による風荷重によりダクトに発生する引張荷重 (N)

L : 風荷重方向のダクト幅 (mm)

【ダクトの許容曲げモーメントの評価方法】

補強板で補剛された板要素で構成されたダクトの許容曲げモーメントは、以下の式で求める。なお、座屈応力度は、「鋼構造座屈設計指針」から求める。

$$M_{cr} = \sigma_{icr} \cdot (A_S \cdot N + t \cdot b) \cdot L$$
$$\sigma_{icr} = k_C \cdot \frac{\pi^2 \cdot D}{b^2 \cdot t}$$
$$D = \frac{E \cdot t^3}{12(1 - \nu^2)}$$

ここで、

M_{cr} : 許容曲げモーメント (N・mm)

σ_{icr} : 補強材で補剛された板要素で構成されたダクトの座屈応力度 (N/mm²)

A_S : ダクト補強材1本の断面積 (mm²)

N : 水平幅方向のダクト縦補強材の本数 (—)

t : ダクト材の板厚 (mm)

b : ダクト材の水平幅 (mm)

L : 風荷重方向のダクト幅 (mm)

k_C : 座屈係数 (—)

D : ダクト材の曲げ剛性 (N・mm)

E : 縦弾性係数 (N/mm²)

ν : ポアソン比 (—)

【ダクトの許容せん断応力の評価方法】

補強板で補剛された板要素で構成されたダクトの許容せん断応力は、「発電用原子力設備規格 設計・建設規格 (JSME S NC1-2005)」から求める。

$$1.5f_s^* = 1.5 \cdot \frac{F^*}{1.5\sqrt{3}} = (\text{中略}) = 110 \text{ (N/mm}^2\text{)}$$

$1.5f_s^*$: 短期許容せん断応力 (N/mm²)

F^* : $1.2S_y$ 又は $0.7S_u$ のいずれか小さい方の値

S_y : 材料 (SS400) の設計降伏点 (N/mm²) = 159 (N/mm² for 350°C)

S_u : 材料 (SS400) の設計引張強さ (N/mm²) = 373 (N/mm² for 350°C)

【ダクトの評価結果】

EW方向の荷重に係るダクトの評価結果を以下に示す。全ての部位で検定比が1.0を下回るため、健全性を損なわない。

G. L. (m)	要素 番号	部位	EW方向										
			受圧 面積 (m ²)	速度圧q (N/m ²)	ガスト 影響 係数 (-)	風力 係数 (-)	風荷重 (N)	曲げ			せん断		
								発生 モーメント M (N・mm)	許容 モーメント Mcrrp (N・mm)	検定比 (-)	せん断応力 τ (N/mm ²)	許容せん断 応力 1.5fs* (N/mm ²)	検定比 (-)
26.0	1	屋外ダクト1	6.140	6,100	1.0	2.1	78,654	3.6479E+08	2.5903E+09	0.15	10.8	110	0.10
24.1	2		6.210	6,100	1.0	2.1	79,551						
22.2	3	屋外ダクト2	6.350	6,100	1.0	2.1	81,344	1.4088E+09	2.3749E+09	0.60	15.4	110	0.14
20.2	4		5.735	6,100	1.0	2.1	73,466						
18.2	5	屋外ダクト3	4.360	6,100	1.0	2.1	55,852	2.6828E+09	6.8930E+09	0.39	8.9	110	0.09
17.0	6		2.915	6,100	1.0	2.1	37,342						
15.9	7		2.260	6,100	1.0	2.1	28,951						
15.7	8	屋外ダクト (鉛直部)	3.215	6,100	1.0	2.1	41,185	3.7536E+09	6.6433E+09	0.57	9.3	110	0.09
14.4	9		4.095	6,100	1.0	2.1	52,457						
14.4	10		0.000	6,100	1.0	2.1	0						
15.9	11		0.000	6,100	1.0	2.1	0						
15.9	13	屋外ダクト4	0.000	6,100	1.0	2.1	0	1.2745E+08	7.2556E+09	0.02	10.4	110	0.10
15.9	14		0.000	6,100	1.0	2.1	0						
15.9	16	屋外ダクト5	0.000	6,100	1.0	2.1	0	3.4515E+08	9.7041E+09	0.04	7.1	110	0.07
15.9	17		0.000	6,100	1.0	2.1	0						
15.9	18		0.000	6,100	1.0	2.1	0	4.7081E+08	7.2556E+09	0.07	13.7	110	0.13
14.9	19		2.865	6,100	1.0	2.1	36,701						
13.9	20	屋外ダクト (貫通部)	2.865	6,100	1.0	2.1	36,701	5.6944E+08	5.4953E+09	0.11	9.3	110	0.09

9.6 主冷却機のうち屋外部分の評価 (6/10)

【ダクトの評価結果】

NS方向の荷重に係るダクトの評価結果を以下に示す。全ての部位で検定比が1.0を下回るため、健全性を損なわない。

G. L. (m)	要素 番号	部位	NS方向										
			受圧 面積 (m ²)	速度圧q (N/m ²)	ガスト 影響 係数 (-)	風力 係数 (-)	風荷重 (N)	曲げ			せん断		
								発生 モーメント M (N・mm)	許容 モーメント M _{crp} (N・mm)	検定比 (-)	せん断応力 τ (N/mm ²)	許容せん 断応力 1.5f _s * (N/mm ²)	検定比 (-)
26.0	1	屋外ダクト1	6.140	6,100	1.0	2.1	78,654	3.6479E+08	2.5903E+09	0.15	10.8	110	0.10
24.1	2		6.210	6,100	1.0	2.1	79,551						
22.2	3	屋外ダクト2	6.350	6,100	1.0	2.1	81,344	1.4072E+09	2.3749E+09	0.60	15.3	110	0.14
20.2	4		5.735	6,100	1.0	2.1	73,466						
18.2	5	屋外ダクト3	4.215	6,100	1.0	2.1	53,995	2.9677E+09	6.8930E+09	0.44	9.8	110	0.09
17.0	6		2.480	6,100	1.0	2.1	31,769						
15.9	7		1.655	6,100	1.0	2.1	21,201						
15.7	8	屋外ダクト (鉛直部)	2.715	6,100	1.0	2.1	34,780	4.2693E+09	6.6433E+09	0.65	11.0	110	0.11
14.4	9		3.910	6,100	1.0	2.1	50,088						
14.4	10		1.580	6,100	1.0	2.1	20,240						
15.9	11	屋外ダクト4	2.545	6,100	1.0	2.1	32,602	1.4374E+08	7.2556E+09	0.02	11.6	110	0.11
15.9	13		2.440	6,100	1.0	2.1	31,257						
15.9	14	屋外ダクト5	2.440	6,100	1.0	2.1	31,257	3.1224E+08	9.7041E+09	0.04	8.9	110	0.09
15.9	16		2.200	6,100	1.0	2.1	28,182						
15.9	17		2.385	6,100	1.0	2.1	30,552						
15.9	18		2.400	6,100	1.0	2.1	30,744						
14.9	19	屋外ダクト (貫通部)	4.155	6,100	1.0	2.1	53,226	5.1203E+08	7.2556E+09	0.08	13.9	110	0.13
13.9	20		2.875	6,100	1.0	2.1	36,829						

【ボルトに発生する引張力及びせん断力の評価方法】

ダクトを支持している基礎ボルト又は接続ボルトに発生する応力は、以下の式で求める。発生する引張力・せん断力は、自重及び熱荷重に、設計竜巻による風荷重を組み合わせたものとする。

$$\sigma = \frac{F_t}{n_f \cdot A_b}, \quad F_t = \frac{(|M_D| + |M_T| + |M_W|)}{L} + (W_D + W_T + |W_W|)$$

ここで、

σ : ボルト1本あたりの引張応力 (N/mm²)

F_t : 自重、熱荷重、風荷重によりボルトに発生する引張力 (N)

n_f : 引張を受けるボルトの本数 (—)

A_b : 引張を受けるボルト1本の有効断面積 (mm²)

M_D : 自重によりボルトに発生するモーメント (N・mm)

M_T : 熱荷重によりボルトに発生するモーメント (N・mm)

M_W : 設計竜巻による風荷重によりボルトに発生するモーメント (N・mm)

L : 風荷重方向のダクト幅 (mm)

W_D : 自重によりボルトに発生する引張荷重 (N)

W_T : 熱荷重によりボルトに発生する引張荷重 (N)

W_W : 設計竜巻による風荷重によりボルトに発生する引張荷重 (N)

$$\tau = \frac{Q}{n \cdot A_b}$$

ここで、

τ : ボルト1本あたりのせん断応力 (N/mm²)

Q : 自重、熱荷重、風荷重によりボルトに発生するせん断力 (N)

n : せん断を受けるボルトの本数 (—)

A_b : 引張を受けるボルト1本の有効断面積 (mm²)

【ボルトの許容引張応力及び許容せん断応力の評価方法】

許容引張応力及び許容せん断応力は、「発電用原子力設備規格 設計・建設規格 (JSME S NC1-2005)」から求める。

$$1.5f_t^* = 1.5 \cdot \frac{F^*}{2}$$

$1.5f_t^*$: 短期許容引張応力 (N/mm²)

F^* : $1.2S_y$ 又は $0.7S_u$ のいずれか小さい方の値

S_y : 材料 (SS400) の設計降伏点 (N/mm²) = 153 (N/mm² for 350°C)

S_u : 材料 (SS400) の設計引張強さ (N/mm²) = 373 (N/mm² for 350°C)

$$1.5f_s^* = 1.5 \cdot \frac{F^*}{1.5\sqrt{3}}$$

$1.5f_s^*$: 短期許容せん断応力 (N/mm²)

F^* : $1.2S_y$ 又は $0.7S_u$ のいずれか小さい方の値

S_y : 材料 (SS400) の設計降伏点 (N/mm²) = 153 (N/mm² for 350°C)

S_u : 材料 (SS400) の設計引張強さ (N/mm²) = 373 (N/mm² for 350°C)

せん断応力と引張応力を同時に受けるボルトの短期許容引張応力は、次のいずれか小さい方の値

$$1.5f_{ts}^* = 1.5 \cdot (1.4f_{to}^* - 1.6\tau) \quad , \quad 1.5f_{ts}^* = 1.5f_{to}^*$$

$1.5f_{ts}^*$: せん断応力と引張応力を同時に受けるボルトの短期許容引張応力 (N/mm²)

$f_{to}^* = f_t^*$: 許容引張応力 (N/mm²)

τ : ボルトに作用するせん断応力 (N/mm²)

9.6 主冷却機のうち屋外部分の評価 (9/10)

【ボルトの評価結果】

EW方向の荷重に係るボルトの評価結果を以下に示す。全ての部位で検定比が1.0を下回るため、健全性を損なわない。

質点番号	部位	EW方向					
		許容値		発生応力		引張応力 検定比 (-)	せん断応力 検定比 (-)
		引張 1.5fts* (N/mm ²)	せん断 1.5fs* (N/mm ²)	引張 σ (N/mm ²)	せん断 τ (N/mm ²)		
3	屋外ダクト1と屋外ダクト2の接続ボルト	113	106	15	33	0.13	0.31
5	屋外ダクト2と屋外ダクト3の接続ボルト	80	106	65	46	0.81	0.44
7	屋外ダクト3の接続ボルト	137	106	105	21	0.77	0.19
10	屋外ダクト3（鉛直部）の基礎ボルト	137	106	62	19	0.45	0.18
12	屋外ダクト3と伸縮継手の接続ボルト	137	106	3	14	0.02	0.13
13	伸縮継手と屋外ダクト4の接続ボルト	137	106	2	13	0.01	0.12
15	屋外ダクト4と伸縮継手の接続ボルト	137	106	2	13	0.01	0.12
16	伸縮継手と屋外ダクト5の接続ボルト	137	106	2	12	0.01	0.11
20	屋外ダクト5とダクトの接続ボルト	114	106	44	47	0.39	0.45
21	屋外ダクト5（貫通部）の基礎ボルト	124	106	39	28	0.31	0.27

9.6 主冷却機のうち屋外部分の評価(10/10)

【ボルトの評価結果】

NS方向の荷重に係るボルトの評価結果を以下に示す。全ての部位で検定比が1.0を下回るため、健全性を損なわない。

質点番号	部位	NS方向					
		許容値		発生応力		引張応力 検定比 (-)	せん断応力 検定比 (-)
		引張 1.5fts* (N/mm ²)	せん断 1.5fs* (N/mm ²)	引張 σ (N/mm ²)	せん断 τ (N/mm ²)		
3	屋外ダクト1と屋外ダクト2の接続ボルト	113	106	15	33	0.13	0.31
5	屋外ダクト2と屋外ダクト3の接続ボルト	80	106	65	46	0.81	0.44
7	屋外ダクト3の接続ボルト	137	106	108	22	0.79	0.21
10	屋外ダクト3(鉛直部)の基礎ボルト	137	106	68	23	0.50	0.21
12	屋外ダクト3と伸縮継手の接続ボルト	137	106	1	14	0.01	0.13
13	伸縮継手と屋外ダクト4の接続ボルト	137	106	2	12	0.01	0.11
15	屋外ダクト4と伸縮継手の接続ボルト	137	106	2	14	0.01	0.13
16	伸縮継手と屋外ダクト5の接続ボルト	137	106	1	13	0.01	0.12
20	屋外ダクト5とダクトの接続ボルト	110	106	50	48	0.45	0.45
21	屋外ダクト5(貫通部)の基礎ボルト	120	106	44	30	0.37	0.28

【防護方法】

重要安全施設のうち屋外施設である非常用ディーゼル電源系に関連する冷却塔の周囲には防風壁を設置する。これにより、当該冷却塔を竜巻の設計竜巻荷重から防護する。

【評価方針】

数値流体力学（CFD）計算コードFLUENTを用いて、防護柵による冷却塔本体に作用する風圧力の低減効果を評価し、防風壁によって低下した風荷重に対して機能維持できることを確認する。なお、非常用ディーゼル電源系に関連する冷却塔本体は更新を予定しており、建築基準法に基づく大洗町の基準風速である34m/sで機能維持できるように設計する。

非常用ディーゼル冷却塔

防護柵
冷却塔架台
防風壁基礎

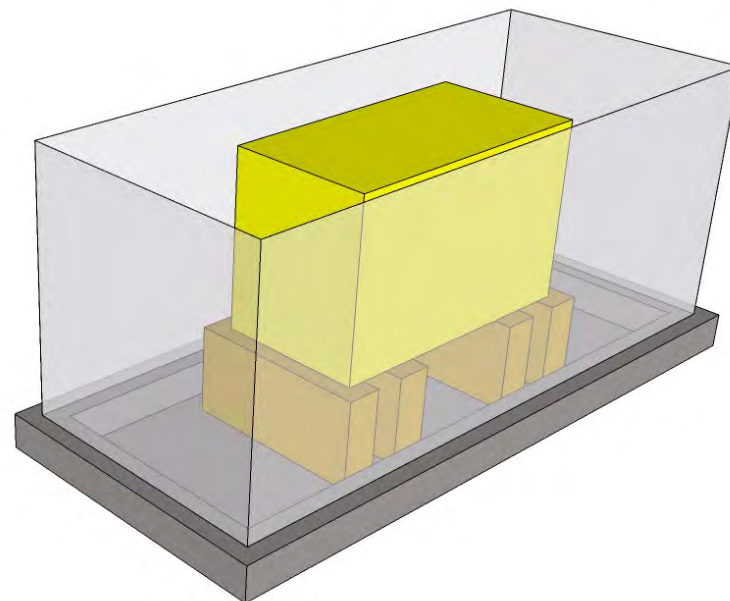
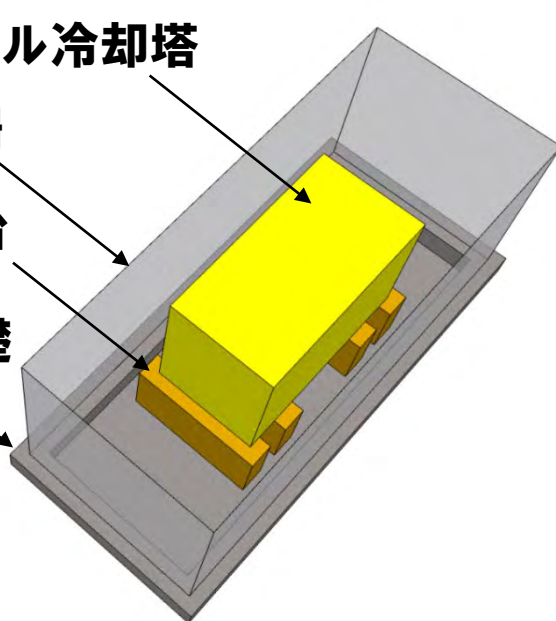
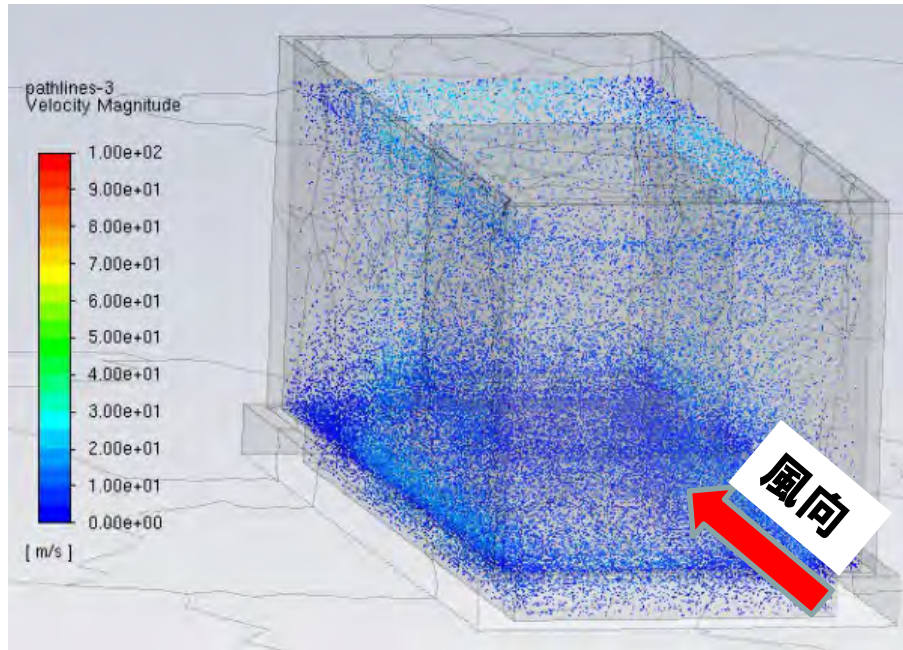


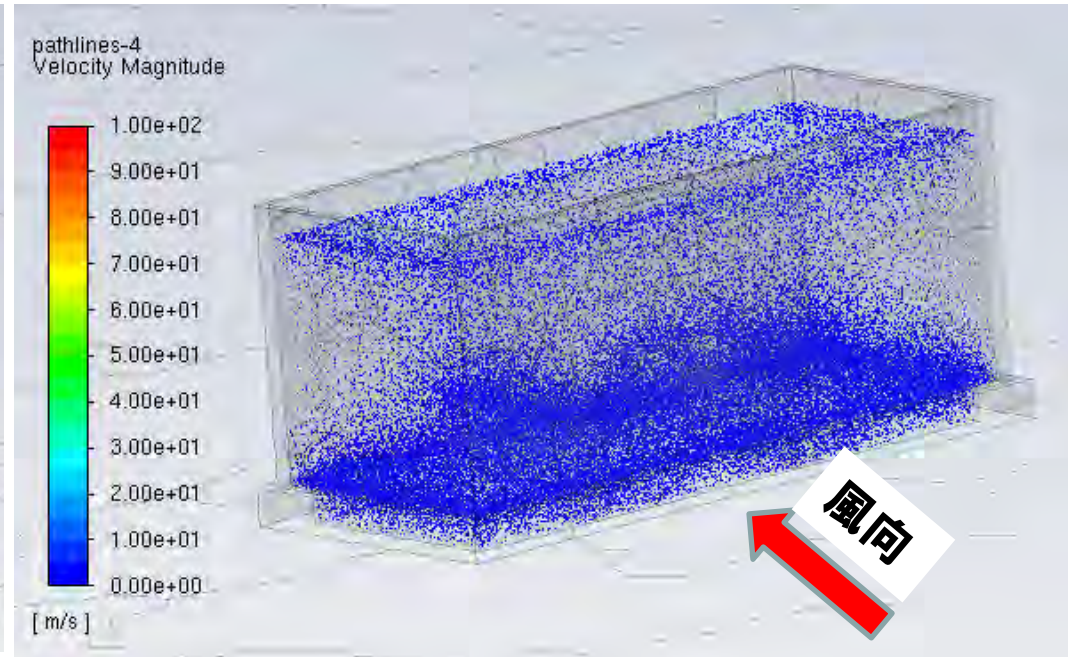
図 非常用ディーゼル電源系に関連する冷却塔本体及び防風壁イメージ

【評価結果】

非常用ディーゼル電源系に関連する冷却塔にEW方向、NS方向の各風向の100m/sの風を受圧させた場合、防風壁内の冷却塔本体位置における最大風速は34m/sを下回ることを確認した。



EW方向壁内風速分布（前方）



NS方向壁内風速分布（前方）

風向	防風壁内冷却塔位置における最大風速 (m/s)
EW方向	28.6
NS方向	7.5

【評価方針】

- 波及的影響評価対象施設として選定した主排気筒について、設計荷重に対する筒身部及び支持部の評価を実施し、設計竜巻により倒壊しないことを確認する。
- 設計飛来物のうち足場板が主排気筒頂部に衝突することとする。
- 主排気筒の形状を考慮し、気圧差による荷重は0とする。

【評価結果】

主排気筒筒身部及び支持部のいずれも、終局耐力に対する応力検定比が1.0を下回ることを確認した。

よって、主排気筒は設計竜巻により倒壊が生じることはない。
評価結果の詳細は以降に示す。

9.8 主排気筒の評価 (2/3)

【筒身部の評価結果】

要素 番号	GL (m)	発生応力度			終局強度			検定比	
		圧縮 応力度 σ_c (N/mm ²)	曲げ 応力度 σ_b (N/mm ²)	せん断 応力度 τ (N/mm ²)	軸圧縮 強度 $1.5c f_{cr}$ (N/mm ²)	曲げ 強度 $1.5b f_{cr}$ (N/mm ²)	せん断 強度 $1.5s f_{cr}$ (N/mm ²)	圧縮+曲 げ 応力検定 $\sigma_c/c f_{cr} +$ $\sigma_b/b f_{cr}$ (-)	せん断 応力検定 $\tau/s f_{cr}$ (-)
20	80.00 ~ 76.60	0.32	0.51	0.40	254.5	258.5	139.2	0.00	0.00
19	76.60 ~ 73.20	0.59	1.84	0.77	252.7	255.8	138.3	0.01	0.01
18	73.20 ~ 69.80	0.83	3.77	1.13	250.9	254.3	137.4	0.02	0.01
17	69.80 ~ 66.40	1.09	6.17	1.47	249.1	252.8	136.6	0.03	0.01
16	66.40 ~ 63.00	1.31	8.91	1.80	247.2	251.4	135.7	0.04	0.01
15	63.00 ~ 59.60	1.53	11.90	2.12	245.5	249.9	135.0	0.05	0.02
14	59.60 ~ 56.20	1.76	15.10	2.42	243.7	248.4	134.1	0.07	0.02
13	56.20 ~ 52.80	1.97	18.44	2.72	241.9	247.1	133.3	0.08	0.02
12	52.80 ~ 49.40	2.17	21.89	3.01	240.1	245.6	132.6	0.10	0.02
11	49.40 ~ 46.00	2.36	25.42	3.29	238.3	244.2	131.8	0.11	0.02
10	46.00 ~ 42.85	2.59	28.76	3.55	236.5	242.9	132.1	0.13	0.03
9	42.85 ~ 39.69	2.76	32.12	3.80	234.9	241.5	131.5	0.14	0.03
8	39.69 ~ 36.54	2.93	35.53	4.05	233.2	240.2	130.8	0.16	0.03
7	36.54 ~ 33.38	3.10	38.93	4.30	231.6	238.8	130.2	0.18	0.03
6	33.38 ~ 30.23	3.28	42.37	4.54	229.9	237.5	129.6	0.19	0.04
5	30.23 ~ 27.07	3.45	45.81	4.78	228.3	236.1	129.0	0.21	0.04
4	27.07 ~ 23.92	3.61	49.23	5.01	226.6	234.8	128.4	0.23	0.04
3	23.92 ~ 20.76	3.77	52.67	5.24	224.8	233.4	127.8	0.24	0.04
2	20.76 ~ 16.40	3.99	57.40	5.56	222.6	231.6	121.8	0.27	0.05
1	16.40 ~ 14.53	3.63	52.60	5.04	228.4	236.3	136.3	0.24	0.04

【支持部の評価結果】

部位		評価項目	単位	発生値	許容値	検定比
アンカーボルト	本体	引張応力	N/mm ²	45.4	177.0	0.26
		せん断応力	N/mm ²	2.8	136.0	0.03
	コンクリート 定着	コーン状破壊耐力	N	4.5568E+05	9.6633E+05	0.48
		付着応力	N/mm ²	0.605	1.989	0.31
		せん断力	N	1.1830E+04	9.5557E+04	0.13
ベースプレート	本体	曲げ応力	N/mm ²	66.7	298.2	0.23
	コンクリート	圧縮応力	N/mm ²	3.2	14.7	0.22
フランジプレート		曲げ応力	N/mm ²	172.0	298.2	0.58
リブプレート		座屈応力	N/mm ²	32.3	614.9	0.06

9.9 外周コンクリート壁の評価

外周コンクリート壁の評価結果は9.2 原子炉建物（格納容器を含む。）及び原子炉附属建物の評価結果（1/2）の耐力部材評価に含む。

外周コンクリート壁は設計竜巻荷重により健全性を損なわない。

10. 設計飛来物の衝突に対する評価

10.1 竜巻防護施設の外殻となる施設の評価方法 (1/5)

竜巻防護施設の外殻となる施設の構造健全性の評価及び竜巻防護施設の破損による波及的影響の評価内容をそれぞれ一覧として、下表に示す。

評価項目		荷重	評価内容	
			評価対象	評価基準値
設計飛来物の衝突に対する評価	外壁及び屋根への裏面剥離の発生	W_M	コンクリート裏面剥離限界厚さ	コンクリート厚さ未満
	外壁及び屋根における設計飛来物の貫通	W_M	コンクリート貫通限界厚さ	コンクリート厚さ未満
	開口部における設計飛来物の貫通	W_M	鋼板貫通限界厚さ	鋼板厚さ未満

W_M : 設計飛来物による衝撃荷重

【設計飛来物の衝突に対する外壁健全性の評価方法】

設計飛来物が竜巻防護施設の外殻となる施設に衝突した場合の、コンクリートの貫通及び裏面剥離発生の有無に係る評価を実施する。

飛来物の衝突に対する貫通限界厚さ及び裏面剥離限界厚さを算出し、建物の外壁または屋根の厚さと比較する。

評価には、以降に記載する評価式を用いる。

【コンクリート貫通限界厚さの評価式】

鉄筋コンクリートに対する飛来物の貫通限界厚さ (t_p) は以下の式により算出する。

$$t_p = \alpha_p D \{ 2.2 (X_c / \alpha_c D) - 0.3 (X_c / \alpha_c D)^2 \} \quad \text{※ Degan式}$$

$$X_c = \alpha_c \sqrt{4kWN D (V/1000D)^{1.8}} \quad \text{※ 修正NDRC式}$$

$$k = 180 / \sqrt{F_c}$$

- t_p : 貫通限界厚さ (in)
- α_p : 貫通限界厚さ低減係数
- α_c : 貫入深さ飛来物低減係数
- X_c : 貫入深さ (in)
- N: 形状係数
- F_c : コンクリート強度 (psi)
- D: 飛来物直径 (in)
- W: 飛来物重量 (lb)
- V: 衝突速度 (ft/s)

評価式に適用する低減係数は、剛飛来物=1.0 柔飛来物=0.65とする。
 形状係数は、剛飛来物=1.14 柔飛来物=0.72 とする。
 各設計飛来物のコンクリート貫通限界厚さは下表のとおりである。

飛来物の種類	足場材 (初期高さ 0m)	鋼製材 (初期高さ 0m)	ワゴン車 (初期高さ 0m)	コンクリートブロック (初期高さ 12.5m)
コンクリート貫通限界厚さ (mm)	核物質防護情報 (管理情報) が含まれているため公開できません。			

【コンクリート裏面剥離限界厚さの評価式】

鉄筋コンクリートに対する飛来物の裏面剥離限界厚さ (t_s) は以下の式により算出する。

$$t_s = \alpha_s 1.84 (200/V)^{0.13} (MV^2)^{0.4} / (D/12)^{0.2} (144F_c)^{0.4} \quad \text{※ Chang式}$$

- t_s : 裏面剥離厚さ (ft)
- V : 衝突速度 (ft/s)
- g : 重力加速度 (32.2 ft/s²)
- F_c : コンクリート強度 (psi)
- α_s : 裏面剥離限界厚さ低減係数
- M : 質量 (lb/(ft/s²))
- D : 飛来物直径 (in)

評価式に適用する低減係数は、剛飛来物=1.0 柔飛来物=0.6とする。

形状係数は、剛飛来物=1.14 柔飛来物=0.72とする。

各設計飛来物のコンクリート貫通限界厚さは下表のとおりである。

飛来物の種類	足場材 (初期高さ 0m)	鋼製材 (初期高さ 0m)	ワゴン車 (初期高さ 0m)	コンクリートブロック (初期高さ 12.5m)
コンクリート裏面剥離限界厚さ (mm)	核物質防護情報（管理情報）が含まれているため公開できません。			

【開口部の鋼板貫通評価対象】

設計飛来物が貫通した場合に、安全施設及び関連する盤、機器等に飛来物が衝突する可能性がある開口部については、開口部の鋼板に対して貫通評価を実施する。

【開口部の鋼板貫通評価方法】

設計飛来物が建物開口部等（鋼板部分）に衝突した場合の貫通限界厚さを、BRL式を用いて算出し、貫通力がある足場材の貫通厚さと開口部鋼板部分の板厚を比較し、飛来物による貫通の有無を確認する。

飛来物による鋼板の貫通限界厚さは、以下の評価式によって算出する。

$$T^{3/2} = 0.5MV^2 / 17400K^2d^{3/2} \quad \text{※BRL式}$$

T: 鋼板貫通厚さ (in)

M: ミサイル質量 (lb・s²/ft)

V: ミサイル速度 (ft/s)

d: ミサイル直径 (in)

K: 鋼板の材質に関する定数=1

各設計飛来物の鋼板貫通限界厚さは下表のとおりである。

飛来物の種類	足場材 (初期高さ0m)	鋼製材 (初期高さ0m)	ワゴン車 (初期高さ0m)	コンクリートブロック (初期高さ 12.5m)
鋼板貫通限界厚さ (mm)	核物質防護情報（管理情報）が含まれているため公開できません。			

10.2 原子炉建物（格納容器を含む。）及び原子炉附属建物の評価結果⁷⁴ (1/3)

【設計飛来物の衝突に対する評価結果】

各設計飛来物の衝突に係る限界厚さは以下の通りである。

飛来物の種類	足場材 (初期高さ 0m)	鋼製材 (初期高さ 0m)	ワゴン車 (初期高さ 0m)	コンクリートブロック (初期高さ 12.5m)
コンクリート貫通限界厚さ (mm)	核物質防護情報（管理情報）が含まれているため公開できません。			
コンクリート裏面剥離限界厚さ (mm)				
鋼板貫通限界厚さ (mm)				
飛散距離 (m)	256	6.3	161	139

原子炉附属建物は外壁厚さが [] であり、ワゴン車以外の全ての設計飛来物が衝突した場合に影響はない。

原子炉附属建物と国道51号との距離は162m以上であり、原子炉附属建物にワゴン車が衝突することはない。

原子炉建物は厚さ [] の外周コンクリート壁により防護されるため、設計飛来物が衝突することはない。

開口部への影響については以降に示す。

10.2 原子炉建物（格納容器を含む。）及び原子炉附属建物の評価結果⁷⁵ (2/3)

【設計飛来物の衝突に対する評価結果】

原子炉附属建物の開口部のうち、飛来物が貫通した場合に経路上に安全施設に関する設備・盤が配置されている箇所を下表に示す。

核物質防護情報（管理情報）が含まれているため公開できません。

10.2 原子炉建物（格納容器を含む。）及び原子炉附属建物の評価結果⁷⁶ (3/3)

【設計飛来物の衝突に対する評価結果】

前頁に示した開口部のうち、最も低い場所に位置する開口部はG. L. 6. 6mであるため、開口部に衝突する設計飛来物は浮き上がり高さを考慮し、コンクリートブロック（初期高さG. L. +12. 5m）のみである。

コンクリートブロックの鋼板貫通限界厚さは \square であるため、これを下回る鋼板厚さの開口部については、鋼板厚さ \square を上回る厚さまで補強する。

中央制御室については開口部の位置を考慮し、2次制御盤駆体にのみコンクリートブロックが衝突することを想定する。2次制御盤駆体の鋼板厚さは \square であるため、影響を及ぼさない。

【設計飛来物の衝突に対する評価結果】

各設計飛来物の衝突に係る限界厚さは以下の通りである。

飛来物の種類	足場材 (初期高さ 0m)	鋼製材 (初期高さ 0m)	ワゴン車 (初期高さ 0m)	コンクリートブロック (初期高さ 12.5m)
コンクリート貫通限界厚さ (mm)	核物質防護情報（管理情報）が含まれているため公開できません。			
コンクリート裏面剥離限界厚さ (mm)				
鋼板貫通限界厚さ (mm)				
飛散距離 (m)	256	6.3	161	139

主冷却機建物の外壁厚さはG. L. +12.5m以下では \square 、G. L. +12.5を上回る箇所では一部 \square である。よって、ワゴン車以外の全ての設計飛来物が衝突した場合に影響はない。ワゴン車にとっては、主冷却機建物と国道51号との間に竜巻防護柵を設置するものとし、ワゴン車が主冷却機建物に衝突することを防止する。

【設計飛来物の衝突に対する評価結果】


原子炉附属建物の開口部のうち、飛来物が貫通した場合に経路上に安全施設に関する設備が配置されている箇所を下表に示す。

核物質防護情報（管理情報）が含まれているため公開できません。

開口部はいずれも地上高さであるため、竜巻防護柵により防護するワゴン車以外の設計飛来物が衝突する可能性がある。しかしながら、シャッターから安全施設に関連する設備の間には、通常運転時に開放している扉があり、当該扉の鋼板厚さは「 」である。よって、シャッター＋扉の鋼板厚さの合計は「 」となり、大洗研究所の竜巻対応準備指示発令時に扉を閉めることで、これらの設備に設計飛来物が衝突することはない。

主冷却機のうち屋外部分の鋼板厚さは [] であり、コンクリートブロックの鋼板貫通限界厚さである [] を超えるため、飛来物の衝突による影響は生じない。

9.7 非常用ディーゼル電源系に関連する冷却塔の評価(1/2)で示した通り、冷却塔周囲には防護柵を設けることとする。

防護柵の高さをコンクリートブロックの飛散高さである3.2mを超えるものとし、また、防護柵の厚さをコンクリートブロックの鋼板貫通限界厚さである「」相当以上とし、非常用ディーゼル電源系に関連する冷却塔への直接の衝突を防ぐこととする。

11. 竜巻が原子炉施設に到達するおそれの確認された場合の対応フロー 81

竜巻注意情報及び竜巻発生確度ナウキャストにより、竜巻が大洗研究所に到達するおそれの確認された場合には、原子炉を停止する。竜巻が原子炉施設に到達するおそれの確認された場合の対応フローを下図に示す。

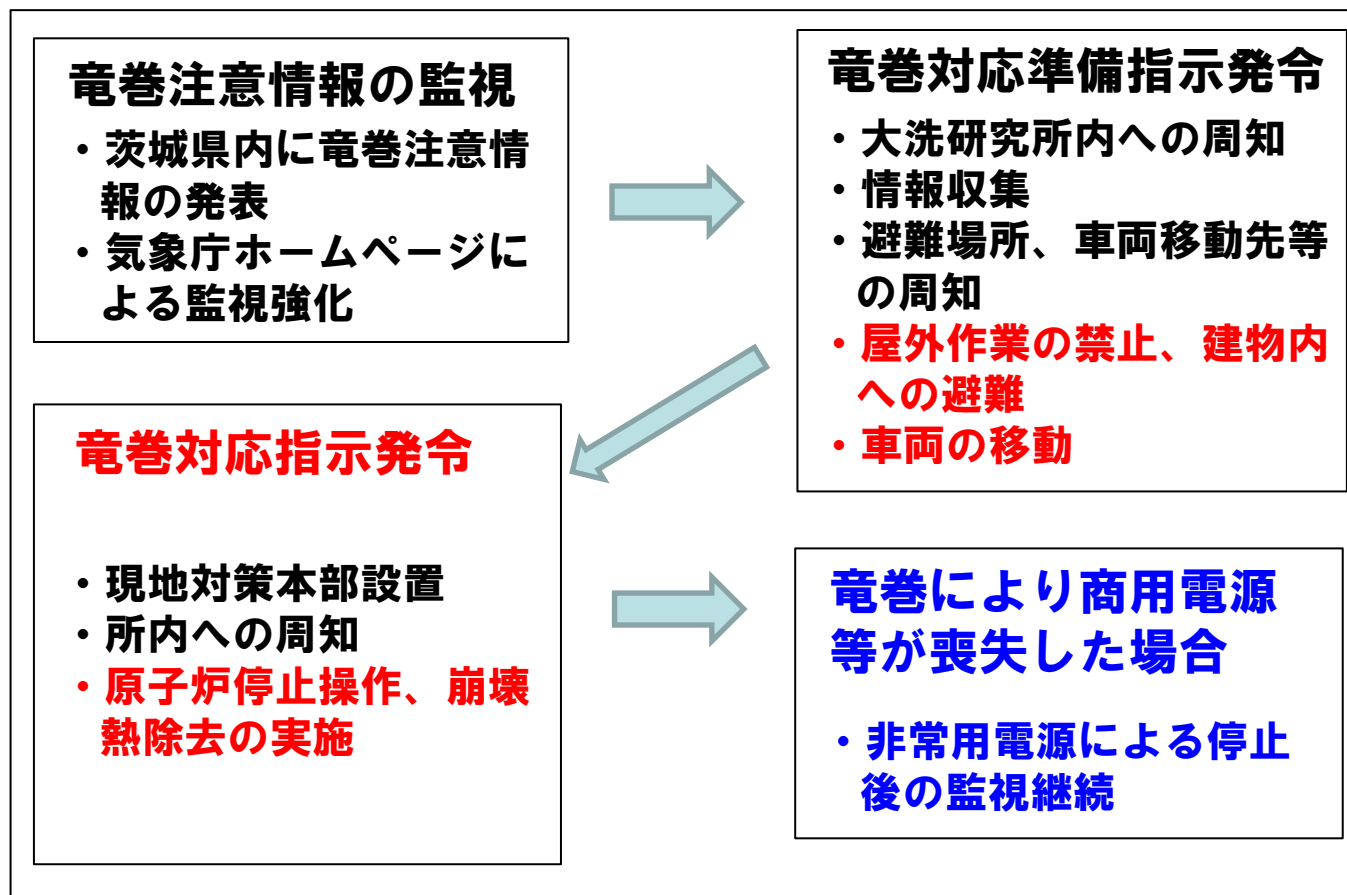


図 竜巻に対する対応フロー

12. 国道51号から飛来する自動車の衝突からの防護概要

12.1 防護柵の構造概要（計画）

原子炉施設は、国道51号に面した位置に設置されており、飛散評価を実施した結果、設計竜巻により国道51号からワゴン車が飛来し、安全施設の外殻施設である主冷却機建物に衝突し、裏面剥離を生じさせるおそれがある。

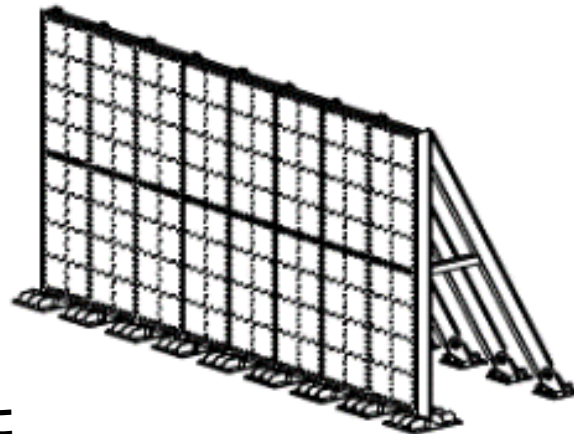
そのため、国道51号に面する主冷却機建物の東側について、防護柵によりワゴン車の衝突が生じないように、防護する。防護柵の設置位置の例を下図に示す。

<竜巻防護柵の設置イメージ>

ワゴン車の想定飛散距離：161m > 主冷却機建物と国道までの距離：約150m

→ 国道と主冷却機建物の間に竜巻防護柵を設置（一例：右図参照）

防護柵イメージ (鋼板式の場合)



※ 架台は、今後の詳細設計において、合理化することを予定。



図 竜巻防護柵の設置位置例

- ・ 竜巻防護柵について銅板式を基本とするが、軽量高強度素材であるアラミド繊維*1への置き換えを検討している。
- ・ アラミド繊維は、下図に示す通り、**SUS316線材の約5倍の引張強度**を有する**高強度部材**である。

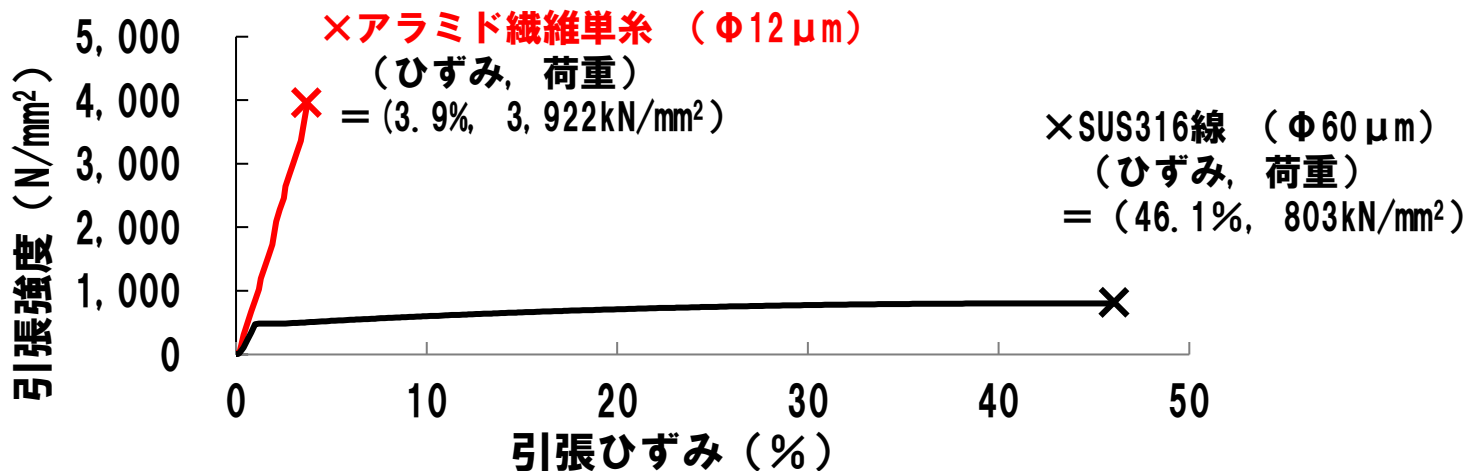
(参考情報)

耐衝撃部材としての使用実績

- ・ 防弾チョッキ
- ・ 装甲車
- ・ 竜巻用シェルタ等

高強度、高弾性、耐切創性等の特性が求められる用途で多くの実績有。

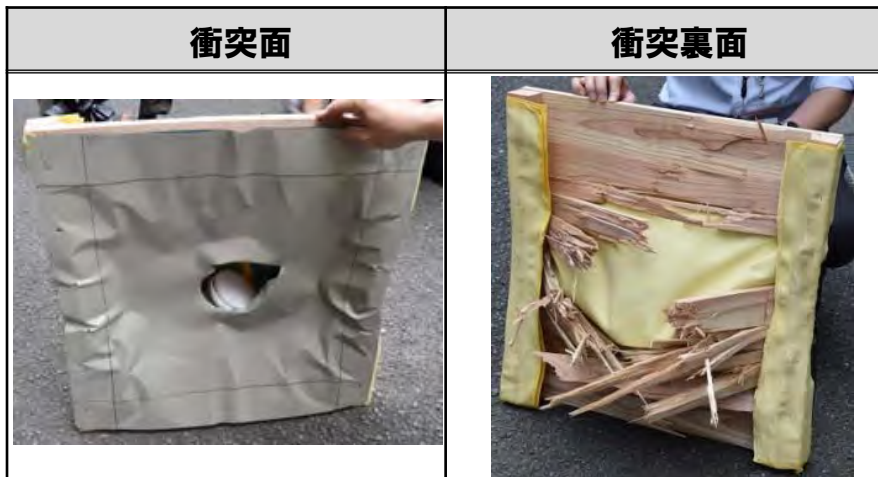
引張強度 (試験値) の比較



*1: 東レ・デュポン社製ケブラー®を使用

12.2 防護柵へのアラミド繊維シートの適用に関する検討 (2/4)

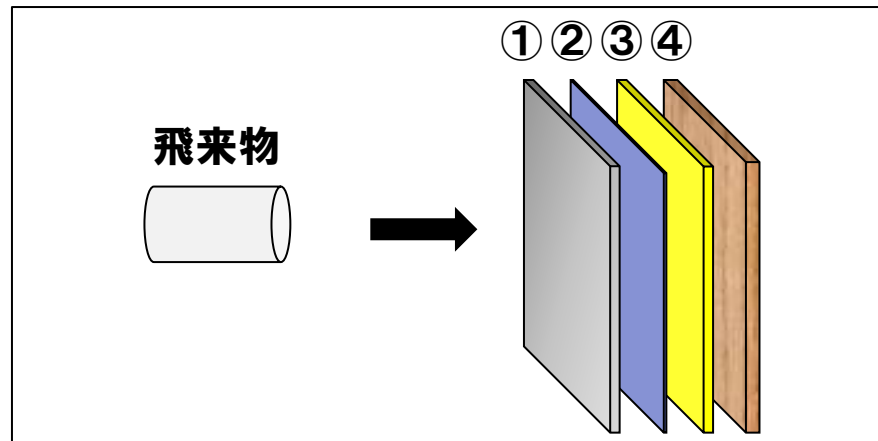
内閣府による活火山における退避壕の検討*¹における衝突試験で、アラミド繊維シートを構成要素とした退避壕補強屋根に貫通は生じなかった。



参考) 右記①～④と同構成の
衝突側供試体での試験写真

飛来物の諸元

- 衝突速度：99.9m/s
- 質量：2.66kg
- 直径：φ90mm
- 鋼板貫通限界厚さ (BRL式*²)：4.9mm



退避壕補強屋根 (模擬)

- ①0.4mm ガルバリウム鋼板
 - ②1.0mm 防水シート (非強度メンバ)
 - ③1.4mm アラミド繊維シート
 - ④18.0mm 杉板 (鋼板1.8mmと同等と算定*³)
- ⇒鋼板厚さ2.7mm分 (4.9mm-0.4mm-1.8mm) を1.4mmのアラミド繊維シートが受け止めた。

鋼板：2.7mmとアラミド繊維シート：1.4mmを等価とし、鋼板をアラミド繊維シートに置き換えて、詳細設計を実施する。

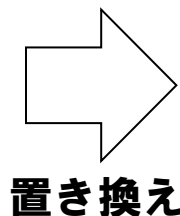
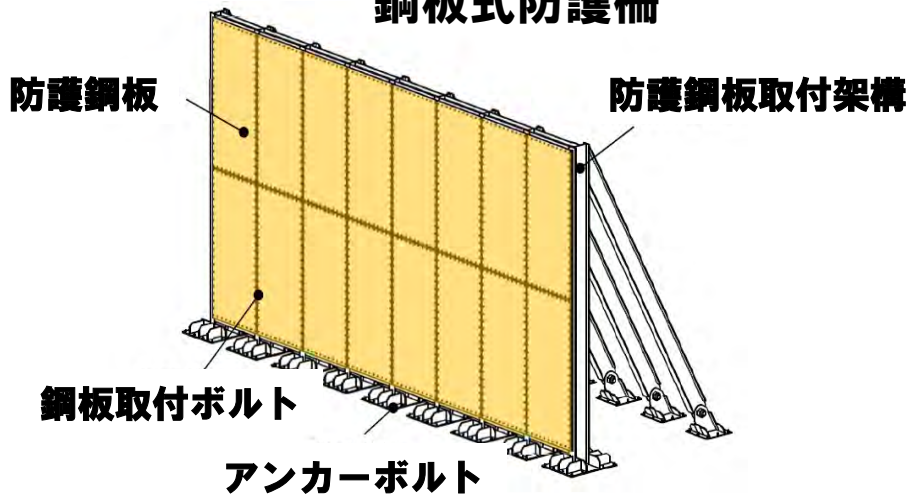
*1：内閣府 (防災担当)：平成27年12月 活火山における退避壕等の充実に向けた手引き (参考資料)

*2：日本機械学会、竜巻飛来物の衝撃荷重による構造物の構造健全性評価手法ガイドライン、JSME S NX6-2019

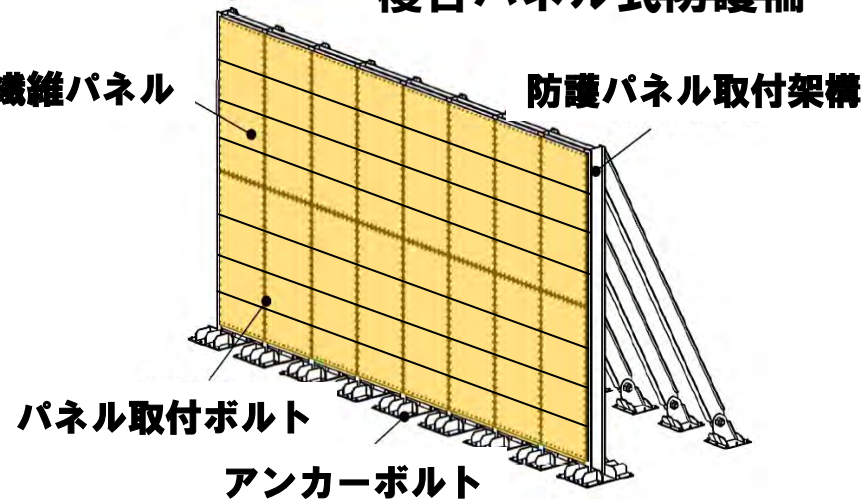
*3：BRL式評価1.9mmとなる飛来物条件での試験より、合板1mmは鋼板0.1mm相当と判断した。杉板は合板と同等の強度と見なし、杉板18mmは鋼板1.8mm同等と算定した。

鋼板を下記の通り、アラミド繊維シート+鋼板による複合パネルに置き換える。

鋼板式防護柵

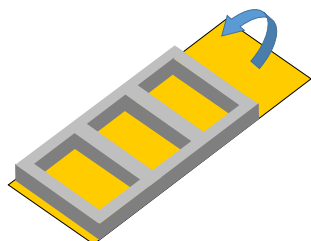


複合パネル式防護柵



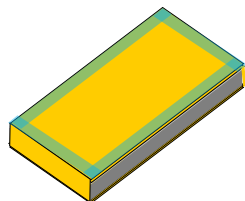
複合パネルの製作イメージ

手順①



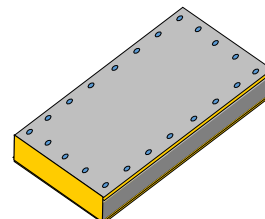
ラダー型フレーム (1.5m×3.0m) にアラミド繊維シートを巻き付ける。
中空部は難燃性又は不燃性の発泡スチロール等を検討中。

手順②



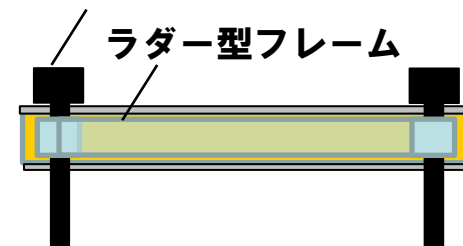
ラダー型フレームに順次、アラミド繊維シートを巻き付け必要厚さを確保する。

手順③



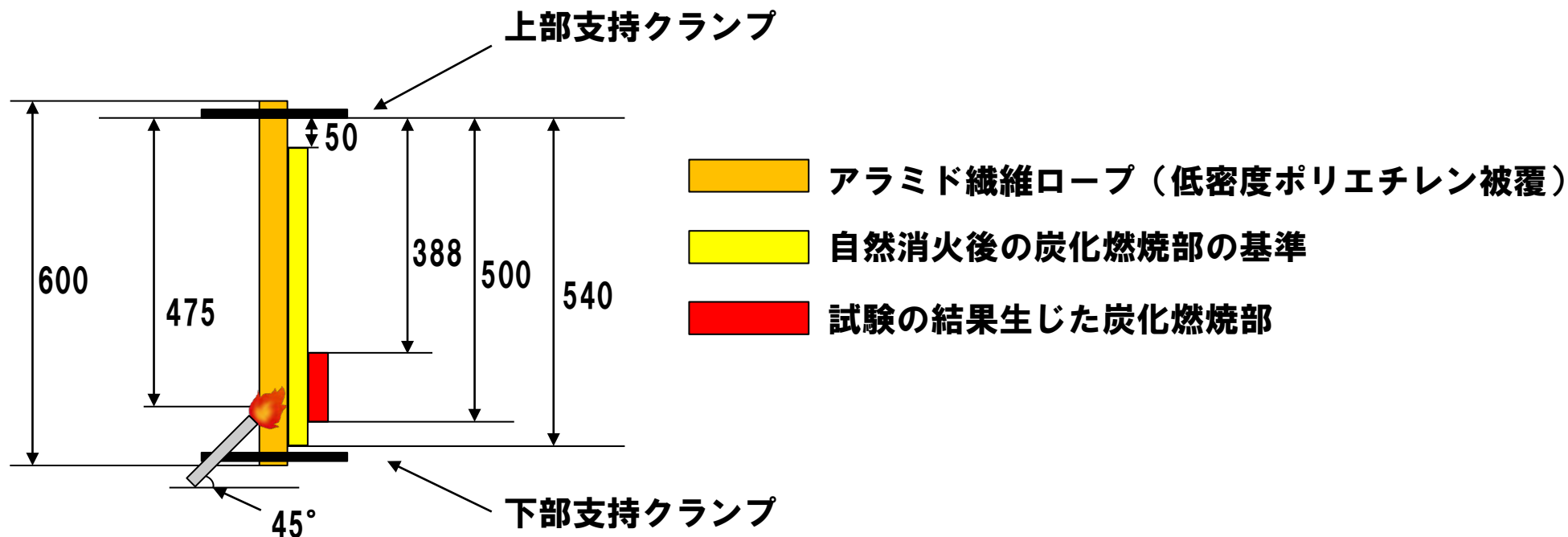
アラミド繊維シートを巻き付け後、保護鋼板をビスで固定し、架構設置用のボルト穴を穿孔する。

架構取付ボルト



一条垂直試験結果

アラミド繊維（低密度ポリエチレン被覆）は国際電気標準会議規格（IEC）で定める一条垂直試験及び酸素限界指数（LOI値）により、難燃性を有することを確認した。



酸素限界指数による難燃性確認結果

ケブラー繊維（アラミド繊維の一種）の酸素限界指数（LOI値）は29であり*、一般的に「難燃性」と言われる基準である26を超える。

*：東レ・デュポンHPの技術情報書類：https://www.td-net.co.jp/kevlar/data/download/pdf/Burning_properties.pdf

13. 竜巻随伴事象の考慮

竜巻随伴事象として、国道51号から飛来する自動車の火災、飛来物が衝突することによる屋外の純水タンクからの溢水及び外部電源喪失を想定し、これらに対して、竜巻防護施設の安全機能を損なわない設計とする。

- ・火災については、国道51号から飛来する自動車は竜巻防護柵を設けることにより竜巻防護施設の付近で炎上することはなく、影響を受けない。
- ・溢水については、純水タンクが主冷却機建物の南約30mに位置しており、溢水が発生しても安全施設及びその外殻施設等に多量の水が到達することはない。万が一多量の水が到達した場合にあっても、建物外壁により水の侵入を防止できるため、影響を受けない。
- ・一般電源系の機能を喪失した場合には、非常用ディーゼル電源系等により必要な電源を供給するため、他の安全機能を損なうことはない。