

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構
大洗研究所（南地区）高速実験炉原子炉施設（「常陽」）

第6条（外部からの衝撃による損傷の防止）

（その4：耐竜巻設計）

2022年7月15日

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構

大洗研究所高速実験炉部

第6条：外部からの衝撃による損傷の防止

(その4：耐竜巻設計)

目次

1. 要求事項の整理
2. 設置許可申請書における記載
3. 設置許可申請書の添付書類における記載
 - 3.1 安全設計方針
 - 3.2 気象等
 - 3.3 設備等
4. 要求事項への適合性
 - 4.1 基本方針
 - 4.2 耐降下火砕物設計
 - 4.3 要求事項（試験炉設置許可基準規則第6条への適合性説明）

(別紙)

- 別紙1：竜巻に対する安全施設の安全機能の確保
- 別紙2：設計竜巻の最大風速の設定
- 別紙3：竜巻影響評価におけるランキン渦モデルとフジタモデルの適用範囲
- 別紙4：風圧力及び気圧差による圧力の設定
- 別紙5：設計竜巻荷重の設定における設計飛来物の選定
- 別紙6：竜巻以外の自然現象の考慮
- 別紙7：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
- 別紙8：設計竜巻荷重に対する構造健全性評価結果（原子炉建物（格納容器を含む）及び原子炉附属建物並びに主冷却機建物）
- 別紙9：設計竜巻荷重に対する構造健全性評価結果（第一使用済燃料貯蔵建物及び第二使用済燃料貯蔵建物）

別紙 10：設計竜巻荷重に対する構造健全性評価結果（主冷却機のうち屋外部分）

別紙 11：設計竜巻荷重に対する構造健全性評価結果（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）

別紙 12：設計竜巻荷重に対する構造健全性評価結果（主排気筒）

別紙 13：設計飛来物に対する竜巻影響評価対象施設の貫通及び裏面剥離評価

(添付)

添付 1：設置許可申請書における記載

添付 2：設置許可申請書の添付書類における記載（安全設計）

添付 3：設置許可申請書の添付書類における記載（適合性）

添付 4：設置許可申請書の添付書類における記載（気象等）

< 概 要 >

試験研究用等原子炉施設の設置許可基準規則の要求事項を明確化するとともに、それら要求に対する高速実験炉原子炉施設の適合性を示す。

1. 要求事項の整理

試験炉設置許可基準規則第6条における要求事項等を第1.1表に示す。本要求事項は、新規制基準における追加要求事項に該当する。

第1.1表 試験炉設置許可基準規則第6条における要求事項
及び本申請における変更の有無 (1/2)

要求事項	変更の有無
<p>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。</p> <p>【解釈】</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ 第6条は、設計基準において想定される自然現象（地震及び津波を除く。）に対して、安全施設が安全機能を損なわないために必要な安全施設以外の施設又は設備等への措置を含む。 ・ 第1項に規定する「想定される自然現象」とは、敷地の自然環境を基に、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、森林火災等から適用されるものをいう。 ・ 第1項に規定する「想定される自然現象（地震及び津波を除く。）が発生した場合においても安全機能を損なわないもの」とは、設計上の考慮を要する自然現象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、その設備が有する安全機能が達成されることをいう。 	有

第 1.1 表 試験炉設置許可基準規則第 6 条における要求事項
及び本申請における変更の有無 (2/2)

要求事項	変更の有無
<p>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。</p> <p>【解釈】</p> <ul style="list-style-type: none"> 第 2 項に規定する「重要安全施設」については、「水冷却型試験研究用原子炉施設に関する安全設計審査指針」（平成 3 年 7 月 18 日原子力安全委員会決定）の「添付 水冷却型試験研究用原子炉施設の安全機能の重要度分類に関する基本的な考え方」の「4. (1)自然現象に対する設計上の考慮」に示されるものとする。水冷却型研究炉以外の炉型についても、これを参考とすること。 第 2 項に規定する「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」とは、対象となる自然現象に対応して、最新の科学的技術的知見を踏まえて適切に予想されるものをいう。なお、過去の記録、現地調査の結果、最新知見等を参考にし、必要のある場合には、異種の自然現象を重畳させるものとする。 第 2 項に規定する「適切に考慮したもの」とは、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が発生した場合に生じる応力を単純に加算することを必ずしも要求するものではなく、それぞれの因果関係及び時間的变化を考慮して適切に組み合わせた場合をいう。 	有
<p>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。</p> <p>【解釈】</p> <ul style="list-style-type: none"> 第 3 項は、設計基準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、安全施設が安全機能を損なわないために必要な安全施設以外の施設、設備等への措置を含む。 第 3 項に規定する「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。）」とは、敷地及び敷地周辺の状況をもとに選択されるものであり、飛来物（航空機落下等）、ダムの崩壊、爆発、近隣工場等の火災、有毒ガス、船舶の衝突、電磁的障害等をいう。なお、上記の「航空機落下」については、「実用発電用原子炉施設への航空機落下確率の評価基準について」（平成 14・07・29 原院第 4 号（平成 14 年 7 月 30 日原子力安全・保安院制定））等に基づき、防護設計の要否について確認する。 	有

2. 設置許可申請書における記載

添付 1 参照

3. 設置許可申請書の添付書類における記載

3.1 安全設計方針

(1) 設計方針

添付 2 参照

(2) 適合性

添付 3 参照

3.2 気象等

添付 4 参照 (火山 (事象評価) の審査結果を反映したものととして別途提出する。)

3.3 設備等

該当なし

※ 添付の朱書き：審査進捗を踏まえて記載を見直す箇所

4. 要求事項への適合性

4.1 基本方針

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、生物学的事象及び森林火災）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。

重要安全施設については、科学的技術的知見を踏まえ、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じる応力を、それぞれの因果関係及び時間的変化を考慮して、適切に組み合わせるものとする。

また、安全施設は、敷地及びその周辺において想定される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（航空機落下、ダムの崩壊、爆発、近隣工場等の火災、有毒ガス、船舶の衝突及び電磁的障害）に対して、安全機能を損なわないように設計する。

想定される自然現象及び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に対しては、必要に応じて、設備と運用による対策を組み合わせた措置を講じることにより、安全施設が安全機能を損なわない設計とする。また、安全施設が安全機能を損なわないために必要な安全施設以外の施設又は設備等への措置を含める。

「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（第 2.1.1 表参照）。

(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。）

耐竜巻設計、耐降下火砕物設計、耐外部火災設計においては、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、降下火砕物防護施設、外部火災防護施設とし、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。当該影響評価にあつては、当該安全施設の外殻施設を評価対象とする場合がある。重要安全施設以外の安全施設は、竜巻、火山の影響及び外部火災（森林火災及び近隣工場等の火災）により損傷するおそれがある場合に、代替措置や修復等を含めて安全機能を損なわないものとする。

第 4. 1. 1 表(1) 外部からの衝撃による損傷の防止に係る重要安全施設

分類	機能	構築物、系統又は機器	特記すべき関連系
P S - 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。）	
	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	

第 4. 1. 1 表(2) 外部からの衝撃による損傷の防止に係る重要安全施設

分類	機能	構築物、系統又は機器	特記すべき関連系*
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次予熱室素ガス系 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)
	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。)
	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	
	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
	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

* : 上記関連系は、当該系と同位の重要度を有するものとする。

第 4. 1. 1 表(3) 外部からの衝撃による損傷の防止に係る重要安全施設

分類	機能	構築物、系統又は機器	特記すべき関連系
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	
	燃料を安全に 取り扱う機能	① 核燃料物質取扱設備	
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	
	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	
	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。)	

4.2 耐竜巻設計

4.2.1 竜巻防護施設

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し、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（以下、「竜巻影響評価対象施設」という）。

想定される竜巻に対する影響を評価し、外部からの衝撃による損傷の防止に係る安全施設又は外殻施設に飛来物が衝突することを防止するための措置を必要に応じて講じ、その安全機能を損なわないように設計する。重要安全施設以外の安全施設は、竜巻により損傷するおそれがある場合に、代替措置や修復等を含めて安全機能を損なわないものとする。

4.2.2 評価方針

4.2.3項で後述する評価対象施設について、「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。）を参考にして構造健全性評価を行い、安全機能が維持されることを確認する。当該影響評価にあつては、当該安全施設の外殻施設を評価対象とする場合がある。

4.2.3 評価対象施設の抽出

竜巻影響評価対象施設を以下の各区分から抽出する【竜巻に対する安全施設の安全機能の確保：別紙1参照】。

(1) 重要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) 外殻で保護されない重要安全施設

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

(3) 安全施設を内包し保護する外殻施設

第一使用済燃料貯蔵建物及び第二使用済燃料貯蔵建物

(4) 外殻で保護されない安全施設

主排気筒及び外周コンクリート

4.2.4 波及的影響評価対象施設の抽出

破損等により竜巻防護施設に波及的影響を及ぼして安全機能を喪失させる可能性がある施設について、機械的影響、機能的影響の発生を考慮して抽出した。その結果、抽出された波及的影響を及ぼし得る施設は主排気塔のみである。なお、機械的影響及び機能的影響とは、次の通りである。

機械的影響

- 隣接している建物・構築物が竜巻より防護すべき施設を内包する施設に接触し、防護対象施設を損傷させる。
- 隣接していない建物・構築物が竜巻により倒壊して防護対象施設を損傷させる。

機能的影響

- 防護対象施設の外気と繋がる部位が、竜巻による風、気圧変化等により損傷を生じ、防護対象施設の機能に影響する。

4.2.5 評価対象施設の評価

竜巻防護施設の外殻施設である原子炉建物及び原子炉附属建物、主冷却機建物については、設計竜巻に対する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。壁や屋根などに損傷が生じた場合は、損傷による竜巻防護施設への影響が無いことを確認する。

竜巻防護施設の内、外部からの衝撃による損傷の防止に係る重要安全施設である非常用ディーゼル電源系に関連する冷却塔及び主冷却機のうち屋外（建物屋上）部分については、設計竜巻に対して安全機能を喪失しないことを確認する。

4.2.6 波及的影響の評価

波及的影響評価の対象施設として抽出した主排気塔については、竜巻防護施設に影響を与えないことを評価し、確認する。

4.2.7 開口部の評価

外殻施設の開口部のうち、付近に外部からの衝撃による損傷の防止に係る安全施設が位置している箇所については、設計飛来物の衝突による開口部の鋼板の貫通評価を行い、必要に応じて防護策として貫通限界厚さを上回るように鋼板で補強する。

4.2.8 設計竜巻荷重の算定法

「添付書類6 9. 竜巻」に示したように、設計竜巻の最大風速は92m/sである。なお、耐竜巻設計にあっては、設計竜巻の最大風速(92m/s)に余裕を考慮し、最大風速として100m/sを用いる。

原子炉施設の耐竜巻設計に用いる設計竜巻荷重は、風圧力、気圧差による圧力及び飛来物の衝撃荷重を組み合わせた複合荷重として算定する。風圧力については、建築基準法等の安全上適切と認められる規格及び基準を準用して算出する。気圧差による圧力については、設計竜巻による最大気圧低下量及び最大気圧低下率に基づいて設定する。飛来物の衝撃荷重については、原子炉施設周囲の状況等を勘察した上で、設計竜巻の最大風速及び物性値等に基づいて、設計飛来物を選定あるいは設定し、当該設計飛来物が竜巻防護施設又は外殻施設に衝突することを想定して算出する。

設計飛来物は、外部からの衝撃による損傷の防止に係る安全施設又は外殻施設に衝突することを防止するための措置（固縛、固定化、移動）を必要に応じて講じることを考慮して、

選定あるいは設定するものとする。

【設計竜巻の最大風速の設定：別紙 2】

【竜巻影響評価におけるランキン渦モデルとフジタモデルの適用範囲：別紙 3】

【風圧力及び気圧差による圧力の設定：別紙 4】

【設計竜巻荷重の設定における設計飛来物の選定：別紙 5】

【竜巻以外の自然現象の考慮：別紙 6】

4.2.9 荷重の組合せと許容限界

4.2.9.1 荷重の組合せにおいて考慮する原子炉施設の状態

(1) 建物・構築物

(i) 運転時の状態

原子炉施設が通常運転時若しくは運転時の異常な過渡変化時にあり、通常の自然条件下におかれている状態

(ii) 設計基準事故時の状態

原子炉施設が設計基準事故時にある状態

(2) 機器・配管系

(i) 通常運転時の状態

原子炉施設の起動、停止、出力運転、燃料交換等が計画的に行われた場合であって、運転条件が所定の制限値以内にある運転状態

(ii) 運転時の異常な過渡変化時の状態

原子炉施設の通常運転時に予想される機械又は器具の単一の故障若しくはその誤作動又は運転員の単一の誤操作及びこれらと類似の頻度で発生すると予想される外乱によって発生する異常な状態であって、当該状態が継続した場合には炉心又は原子炉冷却材バウンダリの著しい損傷が生ずるおそれがあるものとして安全設計上想定すべき事象が発生した状態

(iii) 設計基準事故時の状態

発生頻度が運転時の異常な過渡変化より低い異常な状態であって、当該状態が発生した場合には原子炉施設から多量の放射性物質が放出するおそれがあるものとして安全設計上想定すべき事象が発生した状態

4.2.9.2 荷重の種類

(1) 建物・構築物

(i) 原子炉のおかれている状態にかかわらず常時作用している荷重（固定荷重、積載荷重、土圧、水圧並びに通常の気象条件による荷重）

(ii) 運転時の状態で作用する荷重

(iii) 設計基準事故時の状態で作用する荷重

(iv) 設計竜巻荷重、積雪荷重

なお、運転時の状態で作用する荷重及び設計基準事故時の状態で作用する荷重には、機器・配管系から作用する荷重が含まれるものとする。

- (2) 機器・配管系
 - (i) 通常運転時の状態で作用する荷重
 - (ii) 運転時の異常な過渡変化時の状態で作用する荷重
 - (iii) 設計基準事故時の状態で作用する荷重
 - (iv) 設計竜巻荷重

4.2.9.3 荷重の組合せ

設計竜巻荷重と他の荷重との組合せは以下のとおりとする。

- (1) 建物・構築物
 - (i) 常時作用している荷重及び運転時の状態で作用する荷重と設計竜巻荷重及び積雪荷重を組み合わせる。
- (2) 機器・配管系
 - (i) 通常運転時の状態で作用する荷重、又は運転時の異常な過渡変化時の状態で作用する荷重のうち、長時間その作用が続く荷重と設計竜巻荷重を組み合わせる。
- (3) 荷重の組合せ上の留意事項
 - (i) 明らかに、他の荷重の組合せ状態での評価が厳しいことが判明している場合には、その荷重の組合せ状態での評価は行わなくてもよいものとする。
 - (ii) 複数の荷重が同時に作用する場合、それらの荷重による応力の各ピークの生起時刻に明らかなずれがあることが判明しているならば、必ずしも、それぞれの応力のピーク値を重ねなくともよいものとする。
 - (iii) 設計基準事故時に評価対象施設に応力は生じず、竜巻防護施設の外殻による防護に影響ないため、設計竜巻荷重及び設計基準事故時に生じる応力の組み合わせは考慮しない。

4.2.9.4 許容限界

各施設の設計竜巻荷重と他の荷重とを組み合わせた状態に対する許容限界は、以下のとおりとする。

- (1) 建物・構築物
 - (i) 建物・構築物が構造物全体として、十分変形能力（ねばり）の余裕を有し、終局耐力に対して妥当な安全余裕を持たせることとする【設計竜巻荷重に対する構造健全性評価結果（原子炉建物（格納容器を含む）及び原子炉附属建物並びに主冷却機建物）：別紙 8 参照】【設計竜巻荷重に対する構造健全性評価結果（第一使用済燃料貯蔵建物及び第二使用済燃料貯蔵建物）：別紙 9 参照】【設計竜巻荷重に対する構造健全性評価結果（主冷却機のうち屋外部分）：別紙 10 参照】【設計竜巻荷重に対する構造健全性評価結果（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）：別紙 11 参照】【設計竜巻荷重に対する構造健全性評価結果（主排気筒）：別紙 12 参照】。なお、終局耐力は、建物・構築物に対する荷重又は応力を漸次増大していくとき、その変形又はひずみが著しく増加するに至る限界の最大耐力とし、既往の実験式等に基づき適切に定めるものとする。

(2) 機器・配管系

- (i) 構造物の相当部分が降伏し塑性変形する場合でも過大な変形、亀裂、破損等が生じ、その施設の機能に影響を及ぼすことがない程度に応力を制限する。

4.2.10 設計における留意事項

(1) 設計飛来物が安全施設又は外殻施設に衝突した際に生じる影響

設計飛来物が、外部からの衝撃による損傷の防止に係る安全施設又は外殻施設に衝突した際に生じる影響（貫通及び裏面剥離）によって、その安全機能を損なわないよう設計する【設計飛来物に対する竜巻影響評価対象施設の貫通及び裏面剥離評価：別紙 13 参照】。なお、影響評価に当たっては、設計竜巻の最大風速を適用する。衝突に係る評価について、飛来物に、「原子力発電所の竜巻影響評価ガイド」に記載された鋼製材も想定する。

設計飛来物については、原子炉施設において、必要に応じて、飛来物が外部からの衝撃による損傷の防止に係る安全施設又は外殻施設に衝突することを防止するための措置（固縛、固定化、移動）を講じることを考慮して、選定あるいは設定するものとする。更に、外殻施設の開口部（ガラリ、シャッター、扉等）にも留意する。

(2) 竜巻随件事象等に対する考慮

竜巻注意情報等が発表され、竜巻が接近するおそれが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が確認された場合の対応フロー：別紙 7】。また、飛来物が、外部からの衝撃による損傷の防止に係る安全施設又は外殻施設に衝突することを防止するために必要な措置（固縛又は移動）を講じる。竜巻随件事象として想定される外部電源喪失等に対しては、原子炉保護系の作動等により、原子炉を自動停止するものとする。溢水に対しては、発生した場合に安全施設に影響を与えないよう、建物の外壁及び開口部等により浸水しないものとする。建物付近にて発生する車両火災については、建物外壁面に不燃材の層を敷設し、火災の影響を緩和する。また、速やかに消火を実施することで安全施設に影響がないものとする。

4.3 要求事項（試験炉設置許可基準規則第6条）への適合性説明

（外部からの衝撃による損傷の防止）

第六条 安全施設は、想定される自然現象（地震及び津波を除く。次項において同じ。）が発生した場合においても安全機能を損なわないものでなければならない。

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。

適合のための設計方針（耐竜巻設計）

1 について

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。

（3）竜巻

原子力施設の耐竜巻設計に用いる設計竜巻荷重は、風圧力、気圧差による圧力及び飛来物の衝撃荷重を組み合わせた複合荷重として算定する。風圧力については、建築基準法等の安全上適切と認められる規格及び基準を準用して算出する。気圧差による圧力については、設計竜巻による最大気圧低下量及び最大気圧低下率に基づいて設定する。飛来物の衝撃荷重については、原子炉施設周囲の状況等を勘案した上で、設計竜巻の最大風速及び物性値等に基づいて、飛来物を選定あるいは設定し、当該飛来物が、外部からの衝撃による損傷の防止に係る安全施設又は外殻施設に衝突することを想定して算出する。

ここでは、設計竜巻の最大風速（92m/s）に余裕を考慮し、最大風速として100m/sを用いて、建物・構築物が構造物全体として、十分変形能力（ねばり）の余裕を有し、終局耐力に対して妥当な安全余裕を持っていることを確認する。また、機器・配管系について、構造物の相当部分が降伏し塑性変形する場合でも過大な変形、亀裂、破損等が生じ、その施設の機能に影響を及ぼすことがない程度に応力を制限する。なお、竜巻注意情報等が発表され、竜巻が接近するおそれが確認された場合には、原子炉を停止する。また、飛来物が、外部からの衝撃による損傷の防止に係る安全施設又は外殻施設に衝突することを防止するために必要な措置（固縛又は避難）を講じる。竜巻随伴事象として想定される外部電源喪失等に対しては、原子炉保護系の作動等により、原子炉を自動停止するものとする。溢水に対しては、発生した場合に安全施設に影響を与えないよう、建物の外壁及び開口部等により浸水しないものとする。建物付近にて発生する車両火災については、建物外壁面に不燃材の層を敷設

し、火災の影響を緩和する。また、速やかに消火を実施することで安全施設に影響がないものとする。

2 について

設計基準事故時に評価対象施設に応力は生じず、竜巻防護施設の外殻による防護に影響ないため、設計竜巻荷重及び設計基準事故時に生じる応力の組み合わせは考慮しない。このため、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。

竜巻に対する安全施設の安全機能の確保

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。当該影響評価にあつては、当該安全施設の外殻施設を評価対象とする場合がある。想定される竜巻に対する影響を評価し、外部からの衝撃による損傷の防止に係る安全施設が、外殻施設又は飛来物となりうる物品の飛散を防止するための措置及び竜巻防護柵の設置による防護により、その安全機能を損なわないように設計する。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。安全施設の安全機能の確保の考え方を第1表に示す。

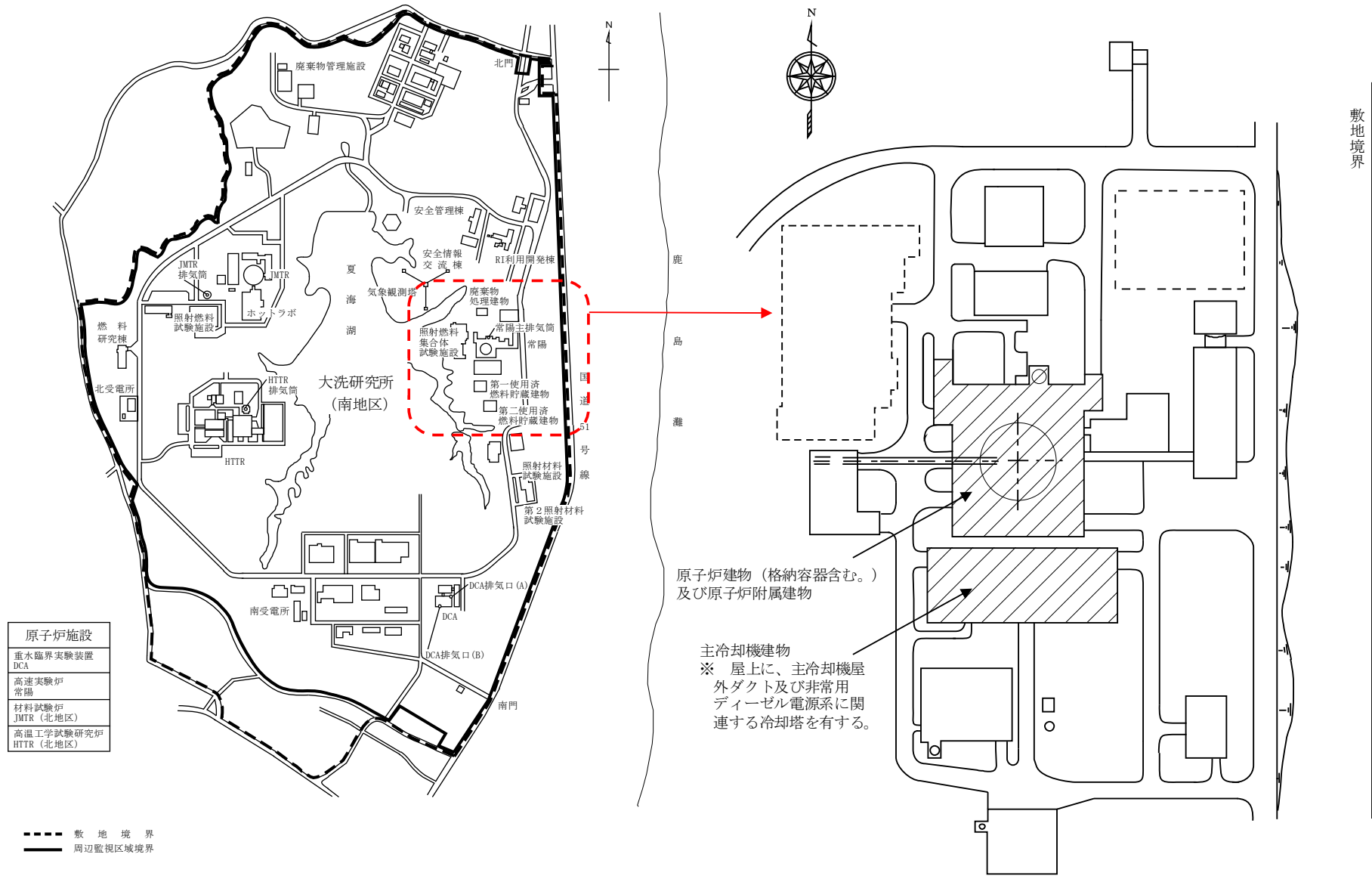
重要安全施設は、基本的に、原子炉建物（格納容器を含む。）及び原子炉附属建物又は主冷却機建物（第1図参照）を外殻施設としており、影響評価の対象部位は、これらの建物の屋根スラブ（コンクリート）及び外壁とする。また、主冷却機のうち屋外部分及び補機冷却設備のうち非常用ディーゼル電源系に関連する冷却塔については、竜巻による影響によって、必要な安全機能を損なわないことを確認する。

外部からの衝撃による損傷の防止に係る安全施設以外の安全施設には、原子炉建物（格納容器を含む。）及び原子炉附属建物又は主冷却機建物ではなく、第一使用済燃料貯蔵建物、第二使用済燃料貯蔵建物、廃棄物処理建物、メンテナンス建物を外殻施設とするものがある。これらを外殻施設としている安全施設にあつては、以下の設計により、必要な機能を確保できるものとする。

- ・ 第一使用済燃料貯蔵建物又は第二使用済燃料貯蔵建物に内包されるものにあつては、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。
- ・ 廃棄物処理建物、メンテナンス建物に内包されるものにあつては、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にあつても、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。

第1表 安全施設の安全機能の確保の考え方

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。） 	<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* ・ クラス3* <div data-bbox="136 1161 797 1353" style="border: 1px solid black; padding: 5px; margin-top: 10px;"> <p>*1 「参考第1表 外部からの衝撃による損傷の防止に係る重要安全施設及び外殻施設」参照</p> <p>*2 「参考第2表 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及び外殻施設」参照</p> </div>	<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、上部にはエア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にあっても、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。



第1図 影響評価対象施設の配置

参考第1表(1) 外部からの衝撃による損傷の防止に係る重要安全施設及び外殻施設

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) バレル構造物 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

参考第1表(2) 外部からの衝撃による損傷の防止に係る重要安全施設及び外殻施設

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次予熱室素ガス系 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

参考第1表(3) 外部からの衝撃による損傷の防止に係る重要安全施設及び外殻施設

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次主循環ポンプモーター 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。

参考第1表(4) 外部からの衝撃による損傷の防止に係る重要安全施設及び外殻施設

分類	機能	構築物、系統又は機器	特記すべき関係	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

参考第2表(1) 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及び外殻施設

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 回転プラグ（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 第一使用済燃料貯蔵建物使用済燃料貯蔵設備 1) 貯蔵ラック 2) 水冷却池 ② 第二使用済燃料貯蔵建物使用済燃料貯蔵設備 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 第一使用済燃料貯蔵建物 ② 第二使用済燃料貯蔵建物 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 第一使用済燃料貯蔵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 ② 第二使用済燃料貯蔵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 第一使用済燃料貯蔵建物 ② 第二使用済燃料貯蔵建物
	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

参考第2表(2) 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及び外殻施設

分類	機能	構築物、系統又は機器	外殻施設
P S - 3	1次冷却材を内蔵する機能 (P S - 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（P S - 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

参考第 2 表(3) 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及び外殻施設

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。

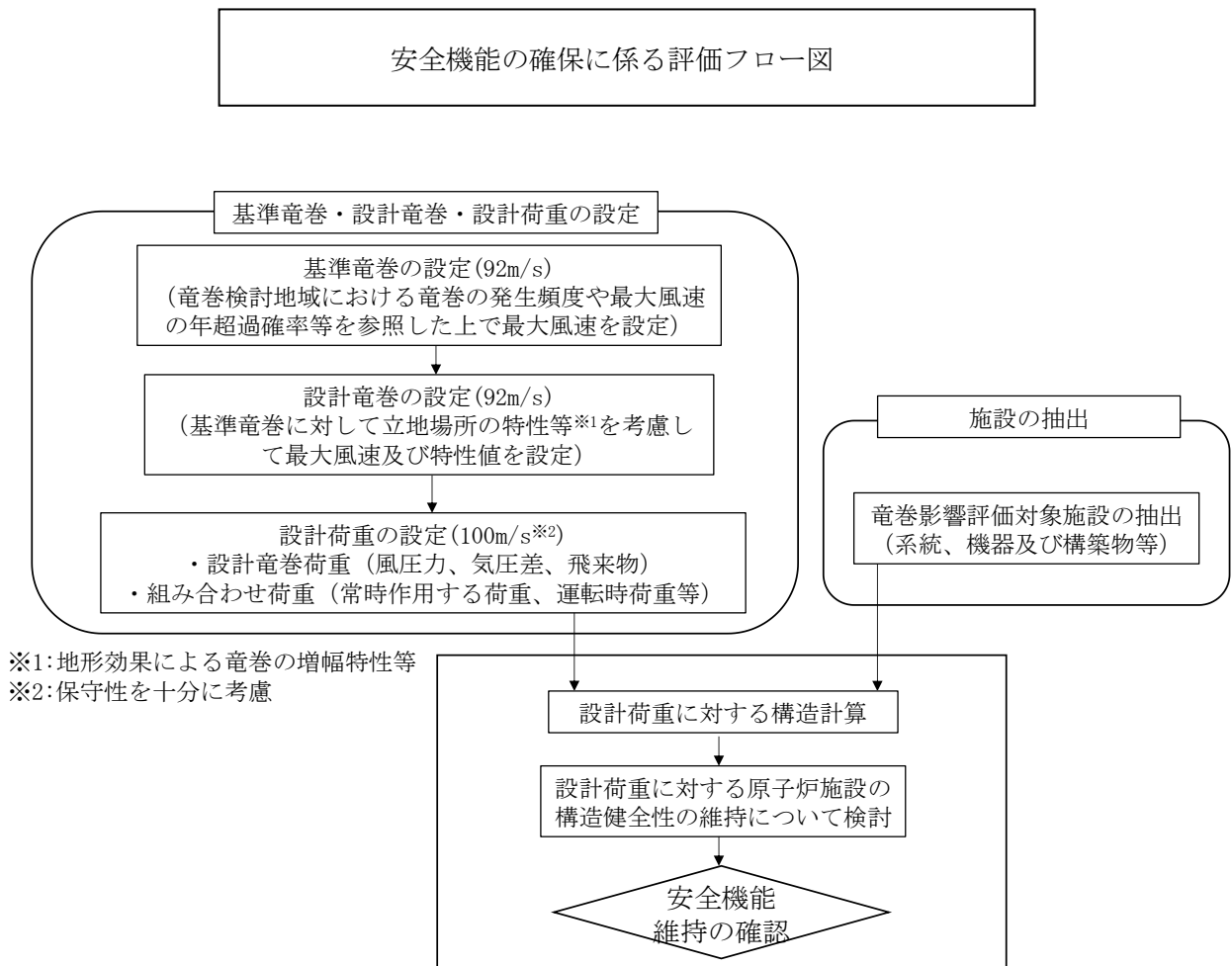


図 竜巻影響評価の基本フロー

第 1 図 竜巻影響評価の基本フロー

設計竜巻の最大風速の設定

設計竜巻の最大風速は、「原子力発電所の竜巻影響評価ガイド」を参考に設定した。当該設定に係る概要を以下に示す。【原子炉設置変更申請書 添6 添付5-6 9. 竜巻：別添1参照】

1. 基準竜巻の最大風速の設定

- ・ 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 に設定 : 68.1m/s*¹
- *1：年超過確率 10^{-5} に相当する風速

→ 基準竜巻の最大風速 (V_B) : 92m/s

2. 設計竜巻の最大風速の設定

大洗研究所（南地区）は標高約38mの平坦な台地に位置し、敷地内には13～16m位の高低がある。高速実験炉原子炉施設は標高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ため、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。

→ 設計竜巻の最大風速(V_D) : 92m/s

なお、耐竜巻設計にあつては、設計竜巻の最大風速(92m/s)に余裕を考慮し、最大風速として100m/sを用いる。

添付書類六 9. 竜巻 抜粋

9. 竜巻

9.1 検討の基本方針

自然現象に対する設計上の考慮として、想定される自然現象に対して原子炉施設が安全性を損なわないことを確認するため、竜巻影響評価を実施する。

竜巻影響評価は、「原子力発電所の竜巻影響評価ガイド」（以下「竜巻評価ガイド」という。）⁽¹⁾を参考に、竜巻検討地域の設定、基準竜巻の最大風速の設定及び設計竜巻の最大風速の設定の流れで実施する。

9.2 竜巻検討地域の設定

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する。

大洗研究所（南地区）の敷地は、茨城県東茨城郡大洗町の南部に位置し、敷地東側は太平洋に面している。この太平洋側沿岸における、気象条件の類似性の観点から、気象総観場ごとの竜巻発生場所の分析を行い、原子炉施設が立地する大洗研究所（南地区）と類似の地域を抽出する。

気象庁の「竜巻等の突風データベース」⁽²⁾を基に、独立行政法人原子力安全基盤機構が東京工芸大学に委託した研究の成果（以下「東京工芸大学の委託成果」という。）⁽³⁾を参考に、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つに分類する。なお、使用するデータは竜巻等の突風データベース⁽²⁾を基に1961年から2012年6月のものとする。第9.2.1図に示す気象総観場ごとの竜巻発生位置から、発生場所の傾向を確認する。

台風起因の竜巻は、九州から太平洋側の沿岸で発生しており、停滞前線起因の竜巻は北海道を除く地域で発生している。なお、低気圧、局地性降雨（局地性擾乱、雷雨含む）、季節風及びその他の起因の竜巻は日本全国で発生しており地域性はない。

竜巻発生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観点から類似性があると判断できる。

これらの検討を踏まえ、海岸線付近に竜巻の発生が集中していることを考慮し、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。竜巻検討地域を第9.2.2図に示す。

9.3 基準竜巻の最大風速の設定

基準竜巻の最大風速(V_B)は、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。

(1) 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})の設定

日本で過去に発生した最大の竜巻は、竜巻等の突風データベース⁽²⁾（1961年から2012年6月）によると第9.3.1表に示す藤田スケールでF3である。F3スケールにおける風速は第9.3.2表から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。

(2) 竜巻最大風速のハザード曲線による最大風速(V_{B2})の設定

ハザード曲線による竜巻最大風速(V_{B2})は、竜巻検討地域における竜巻の観測記録等に基づき評価する。第9.3.1図に竜巻ハザード算定フローを示す。評価は、竜巻データの分析、竜巻風速及び被害幅並びに被害長さの確率密度分布、それらの相関係数の算定、ハザード曲線の算定によって構成される。

a. 竜巻の発生頻度の分析

評価対象とする竜巻は、竜巻等の突風データベース⁽²⁾をもとに、竜巻検討地域における1961年から2012年6月の51.5年間に発生した竜巻事例を使用する。

竜巻等の突風データベース⁽²⁾では、1961年以降に発生した竜巻に関する情報がデータベース化されているが、観測体制は近年になるほど強化されており、年代による観測値の品質のばらつきを考慮し、以下の基本的考え方に基づいて竜巻データをFスケール毎に整理する。

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

なお、竜巻検討地域外で発生して竜巻検討地域内に移動した竜巻も発生数にカウントする。また、F0～F1、F2～F3等のように、Fスケールをまたいだ定義がなされている場合は、保守性を考慮して、それぞれF1、F3等として評価する。

Fスケールが不明な竜巻は以下のように取扱う。陸上で発生した竜巻（以下「陸上竜巻」という。）及び海上で発生して陸上へ移動した竜巻（以下「上陸竜巻」という。）については、被害があつて初めてそのFスケールが推定されるため、これらの竜巻は被害が少ないF0竜巻と見なす。海上竜巻については、その竜巻のFスケールを推定することは困難であることから、沿岸部近傍での海上竜巻の発生特性は、上陸竜巻を含む陸上竜巻と類似していると仮定し、陸上竜巻のFスケール別の発生比率で按分する。

以上の考え方に基づく各年代別の竜巻発生数の分析結果を第9.3.3表に示す。また、海上竜巻の発生数を陸上竜巻のFスケール別発生比率で按分した分析結果を第9.3.4表に示す。その結果、ハザード曲線の算定に使用する疑似竜巻を含めた51.5年間の発生総数は

1,338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。

b. 年発生数の確率密度分布の算定

竜巻の年発生数の確率密度分布は、東京工芸大学の委託成果(3)によればポアソン分布若しくはポリヤ分布に従う。ポアソン分布は、稀な現象の場合に有用な分布である。一方、ポリヤ分布は、発生状況が必ずしも独立でない稀な現象の場合に有用な分布である。台風や前線により竜巻が発生した場合、同時多発的に複数の竜巻が発生する状況が考えられるため、ポリヤ分布の方が実現象をより反映できると考えられる。

なお、国内を対象とした竜巻の年発生数の分布の適合性に関する検討結果は、東京工芸大学の委託成果⁽³⁾に示されており、陸上竜巻及び海上竜巻の両方の発生数について、適合性の良いポリヤ分布により設定した。

以上より、ハザード曲線の算定に当たって使用する竜巻年発生数の確率密度分布はポリヤ分布を採用する。竜巻検討地域における竜巻の年発生数の確率密度分布を第9.3.2図に示す。

c. 竜巻風速、被害幅及び被害長さの確率密度分布と相関係数の算定

竜巻発生数と同様に、竜巻等の突風データベース⁽²⁾をもとに、竜巻被害幅及び竜巻被害長さの観測データを分析する。

なお、疑似的な竜巻の作成に伴う竜巻の被害幅又は被害長さの情報が無い竜巻に対しては、被害幅又は被害長さを有する竜巻の観測値を与えている。その際は、被害幅又は被害長さが大きいデータから優先的に用いることで、これらの平均値が大きくなるように工夫している。また、被害幅又は被害長さが幅を持って記載されている場合は大きい値を用い、0mの場合は計算に用いないとして保守的な評価とした。

ハザード曲線を算定するためには、1つの竜巻が発生した際の竜巻風速、被害幅及び被害長さの確率密度分布が必要となる（第9.3.1図参照）。そこで、これまで算定した竜巻検討地域における51.5年間の竜巻発生数、被害幅及び被害長さのデータを用いて確率密度分布を求める。その際、竜巻評価ガイド⁽¹⁾及び東京工芸大学の委託成果(3)を参照して、確率密度関数が対数正規分布に従うものとして評価する。本評価に用いた竜巻検討地域における竜巻パラメータを第9.3.5表に示す。

第9.3.3図(1)～第9.3.3図(3)に竜巻風速及び竜巻被害幅並びに被害長さに対する確率密度分布を示す。また、第9.3.4図(1)～第9.3.4図(3)に竜巻風速及び竜巻被害幅並びに被害長さの超過確率を示す。これらは観測結果と整合している。

1961年以降の観測データを用いて竜巻風速、被害幅及び被害長さについての相関係数を算定した結果を第9.3.6表に示す。

算定結果から、竜巻検討地域においては、各変量間に約0.4程度の相関が認められ、風速が大きいほど被害域の幅・長さが大きくなる傾向となる。

d. 竜巻影響エリアの設定

竜巻影響エリアは、設計対象施設を含む円形に設定する。竜巻影響エリアを円形に設定することで、ハザード曲線の評価において竜巻の移動方向に依存しないとして評価を行う。高速実験炉原子炉施設の竜巻影響エリアは、第9.3.5図の高速実験炉原子炉施設の概略配置図に示すように、原子炉建物・原子炉附属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、この円（面積：約80,500m²）を竜巻影響エリアとする。

e. ハザード曲線の算定方法

ハザード曲線の算定においては、東京工芸大学の委託成果⁽³⁾にならってポリヤ分布を用いる。竜巻の発生頻度は、以下のポリヤ分布で表されると仮定する。

$$P_T(N) = \frac{(\nu T)^N}{N!} (1 + \beta \nu T)^{-(N+1/\beta)} \prod_{k=1}^{N-1} (1 + \beta k) \quad \dots\dots (9-1 \text{ 式})$$

ここで、Nは竜巻の年発生数、 ν は竜巻の年平均発生数、Tは年数である。 β はポリヤ分布パラメータであり、下式で表される。

$$\beta = \left(\frac{\sigma^2}{\nu} - 1 \right) \times \frac{1}{\nu} \quad \dots\dots (9-2 \text{ 式})$$

ここで、 σ は竜巻の年発生数の標準偏差である。

Dを対象とする構造物が風速 V_0 以上の竜巻に遭遇する事象とし、評価対象とする構造物が1つの竜巻に遭遇し、その竜巻の風速が V_0 以上となる確率を $R(V_0)$ とした時、T年以内にいずれかの竜巻に遭遇し、かつ竜巻風速が V_0 以上となる確率は、下式のようになる。

$$P_{V_0,T}(D) = 1 - [1 + \beta \nu R(V_0) T]^{-1/\beta} \quad \dots\dots (9-3 \text{ 式})$$

この $R(V_0)$ は、竜巻影響評価の対象地域の面積（竜巻検討地域の面積）を A_0 、1つの竜巻の風速が V_0 以上となる面積を $DA(V_0)$ とすると下式で示される。

$$R(V_0) = \frac{E[DA(V_0)]}{A_0} \quad \dots\dots (9-4 \text{ 式})$$

ここで、 $E[]$ は期待値を意味する。

また、以下のようにして $DA(V_0)$ の期待値を算定し、(9-4式)により $R(V_0)$ を算定して、竜巻検討地域における竜巻の年発生数に関するポリヤ分布の特性値を用いて(9-3式)より $P_{V_0,T}(D)$ を求める。風速を V 、被害幅を w 、被害長さを l とし、 $f(V, w, l)$ 等の同時確率密度分布を用いると、竜巻影響エリアを円形で設定しているため竜巻の移動方向に依存しないことから、 $DA(V_0)$ の期待値は(9-5式)のように表すことができる。

$$\begin{aligned}
E[DA(V_0)] = & \int_0^\infty \int_0^\infty \int_{v_0}^\infty W(V_0) l f(V, w, l) dV dw dl \\
& + L \int_0^\infty \int_{v_0}^\infty l f(V, l) dV dl \\
& + L \int_0^\infty \int_{v_0}^\infty W(V_0) f(V, w) dV dw \\
& + S \int_{v_0}^\infty f(V) dV
\end{aligned}
\quad \dots\dots (9-5 \text{ 式})$$

ここで、Lは竜巻影響エリアの直径、Sは竜巻影響エリアの面積、 $lf(V, l)$ および $f(V, w)$ はそれぞれ、竜巻の被害長さ及び被害幅方向に沿った面に竜巻影響評価対象構造物を投影した時の長さである。

また、風速の積分範囲の上限値は、ハザード曲線の形状が不自然にならない程度に大きな値として 120m/s に設定した。また、 $W(V_0)$ は、竜巻の被害幅のうち風速が V_0 を超える部分の幅であり、(9-6 式) により算定される。

$$W(V_0) = \left(\frac{V_{\min}}{V_0} \right)^{1/1.6} w
\quad \dots\dots (9-6 \text{ 式})$$

ここで、 V_{\min} は、被害が発生し始める風速に位置づけられる。このため、竜巻の最小風速を考慮して F0 竜巻 (17~32m/s) の最小風速である $V_{\min}=17\text{m/s}$ とした。

f. 竜巻最大風速のハザード曲線による最大風速 (V_{B2}) の設定

竜巻最大風速のハザード曲線を第 9.3.6 図に示す。竜巻最大風速のハザード曲線による最大風速 (V_{B2}) は、年超過確率 10^{-5} に相当する風速として、68.1m/s と設定する。

(3) 基準竜巻の最大風速の設定

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 $V_{B1}=92\text{m/s}$ と竜巻最大風速のハザード曲線による最大風速 $V_{B2}=68.1\text{m/s}$ 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 と設定する。

9.4 設計竜巻の最大風速の設定

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。

設計竜巻の設定に当たっては、丘陵等による地形効果によって下り斜面において竜巻が増幅する可能性があると考えられることから⁽⁴⁾、立地する地域における設計対象施設の周辺地域等の地形について検討した。

検討の結果、高速実験炉原子炉施設の設計竜巻の最大風速については、以下のとおりとする。大洗研究所 (南地区) は標高約 38m の平坦な台地に位置し、敷地内には 13~16m 位の高低があ

る。高速実験炉原子炉施設は標高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。

以上より、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。

9.5 参考文献

- (1) 原子力規制委員会, 原子力発電所の竜巻影響評価ガイド, 2013年6月, 29p.
- (2) 気象庁, 竜巻等の突風データベース,
<http://www.data.jma.go.jp/obd/stats/data/bosai/tornado/index.html> (参照: 2013年10月4日).
- (3) 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, 424p.
- (4) Lewellen, D.C., Effects of Topography on Tornado Dynamics: A Simulation Study, 26th Conference on Severe Local Storms, American Meteorological Society, Nov. 5-8, 2012, 7p.

第9.3.1表 日本で過去に発生したF3竜巻一覧

No	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

第9.3.2表 藤田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)

第9.3.3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 F不明	総数
		F0	F1	F2	F3	F不明	小計	F0	F1	F2	F3	F不明	小計		
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

第 9.3.4 表 51.5 年間の竜巻発生数の分析結果

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

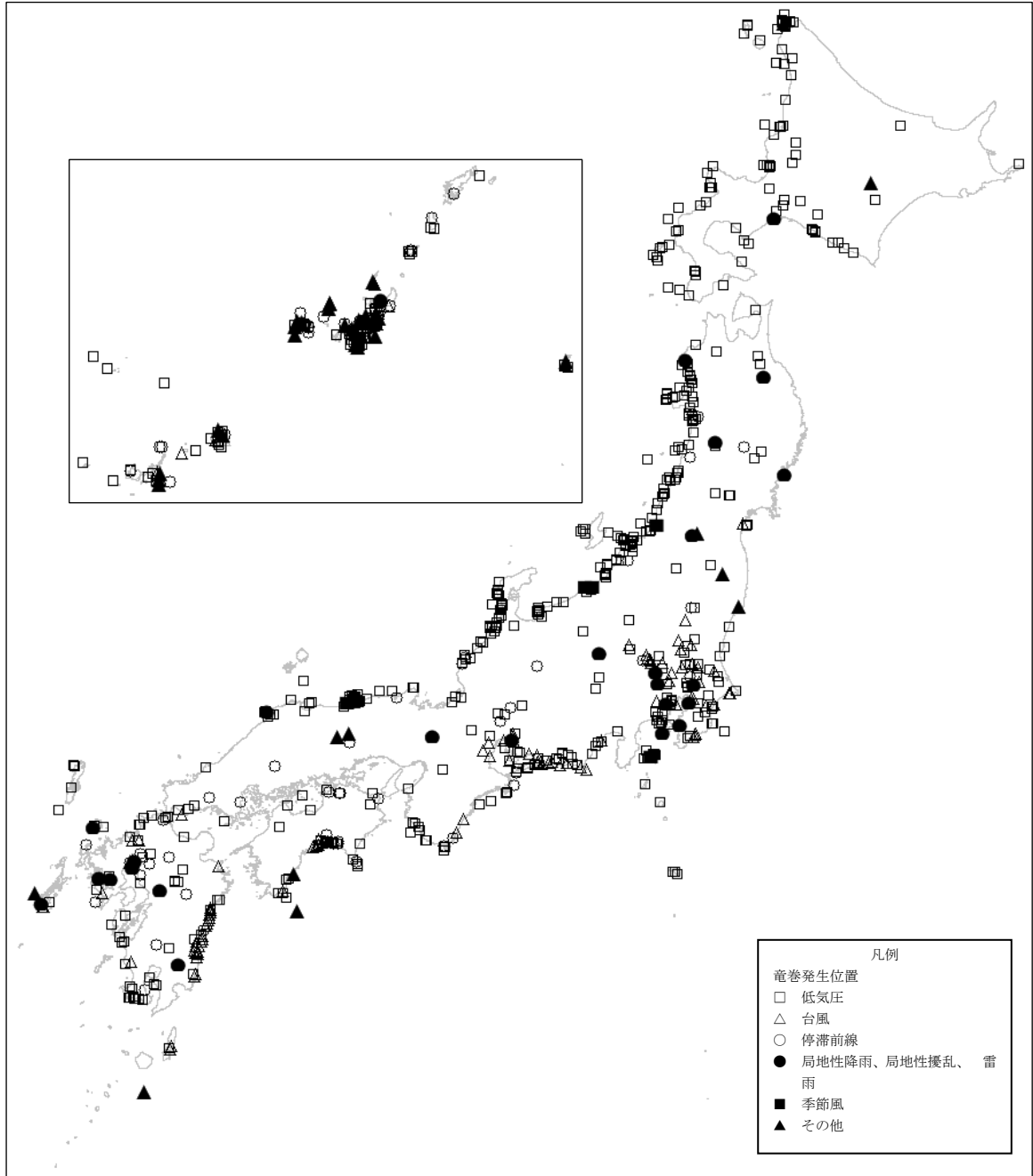
第 9.3.5 表 竜巻検討地域における竜巻パラメータ (51.5 年間の分析結果)

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

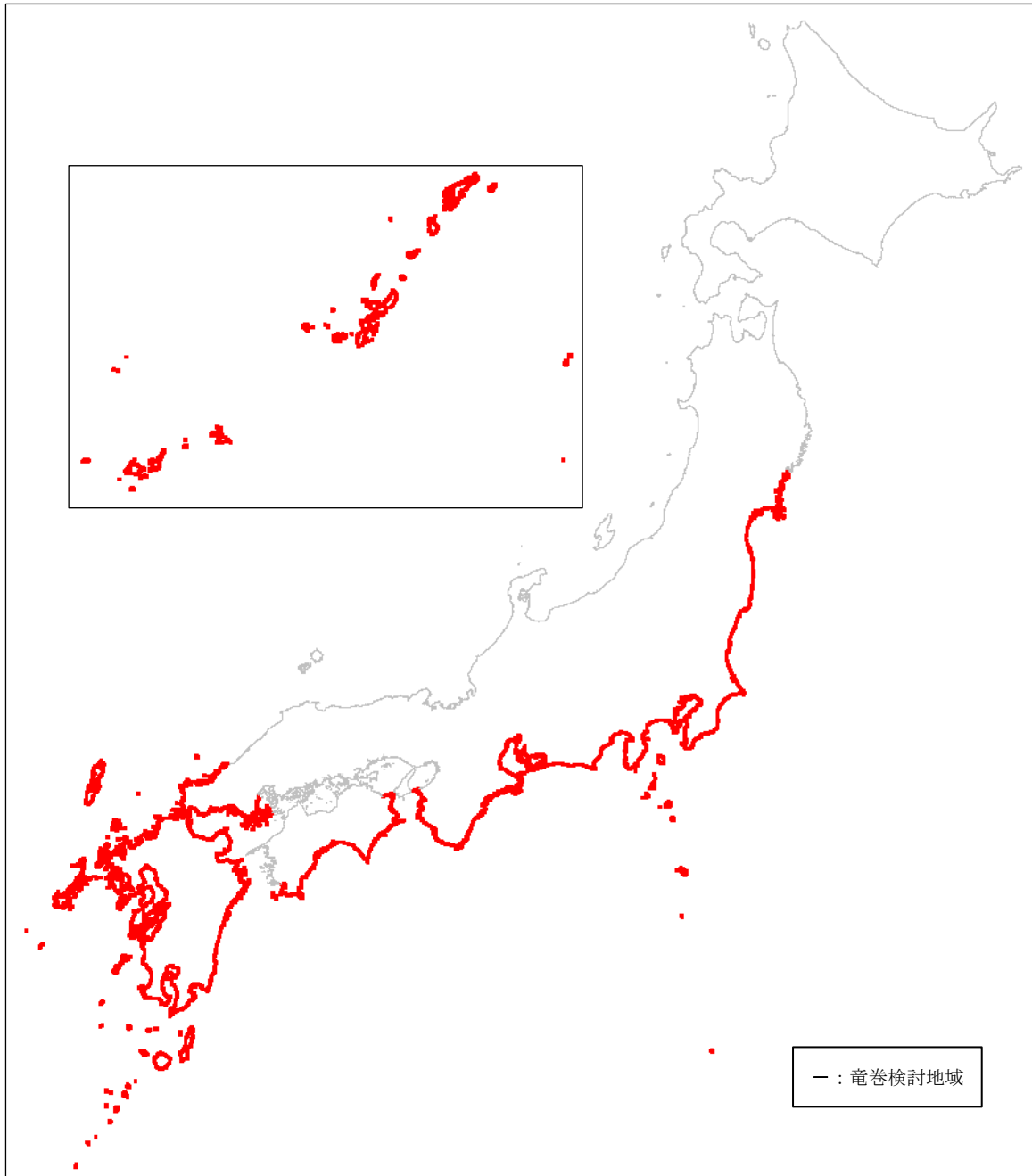
第 9.3.6 表 竜巻風速、被害幅、被害長さの相関係数の算定*

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

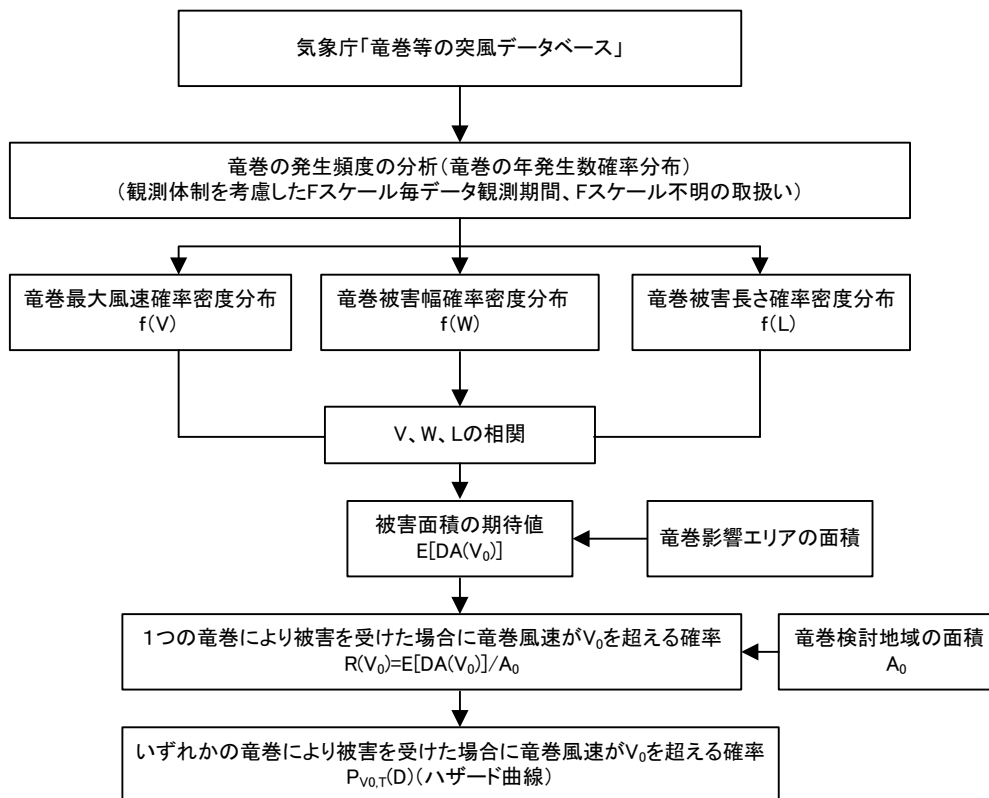
*観測データのみを用いて算定



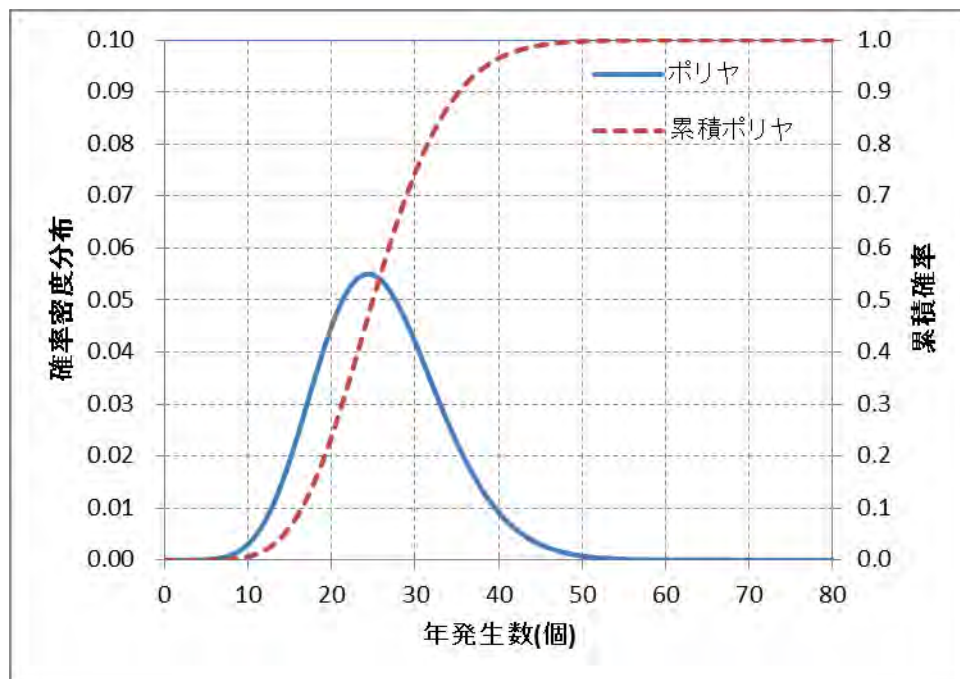
第 9.2.1 図 気象総観場ごとの竜巻発生位置



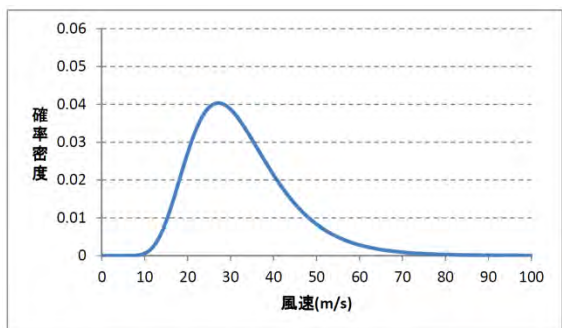
第 9.2.2 図 竜巻検討地域



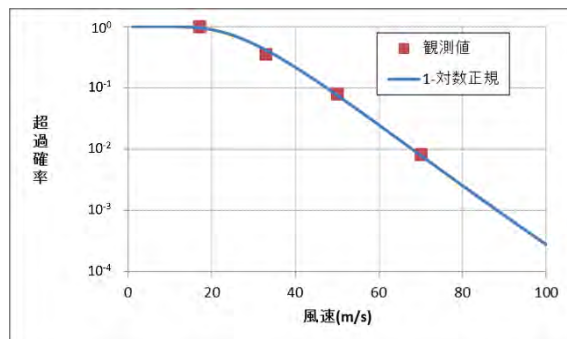
第 9. 3. 1 図 竜巻ハザードの算定フロー



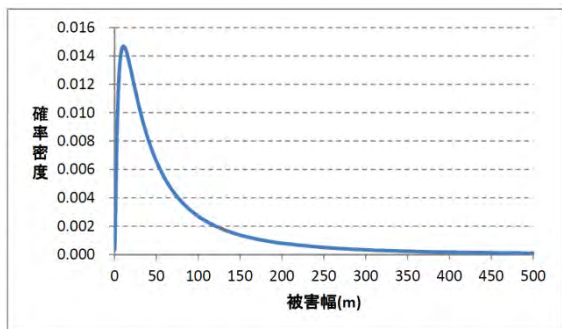
第 9. 3. 2 図 竜巻年発生数の確率密度分布



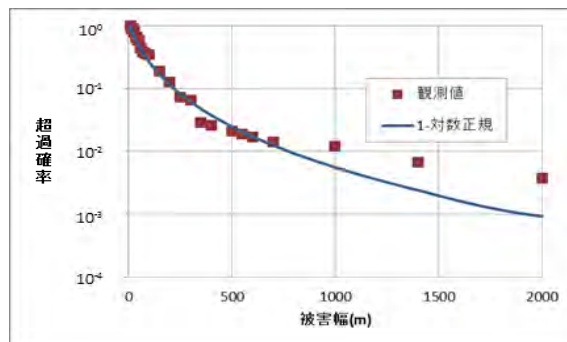
第 9. 3. 3 図(1) 竜巻風速の確率密度分布



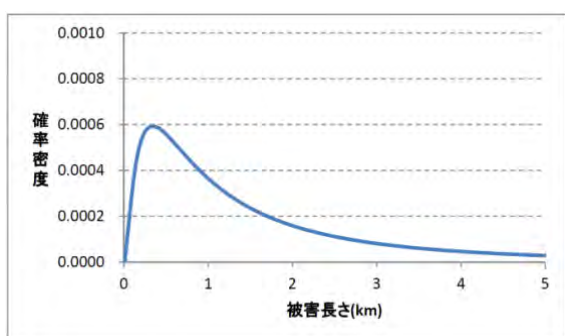
第 9. 3. 4 図(1) 竜巻風速の超過確率



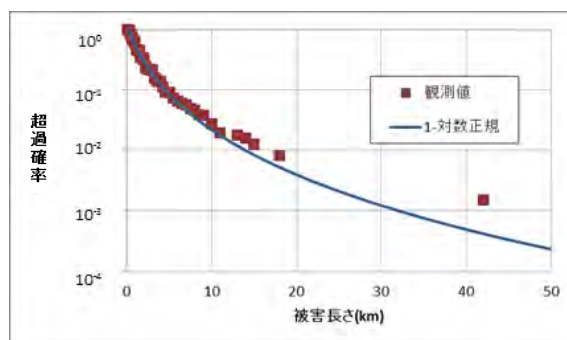
第 9. 3. 3 図(2) 竜巻被害幅の確率密度分布



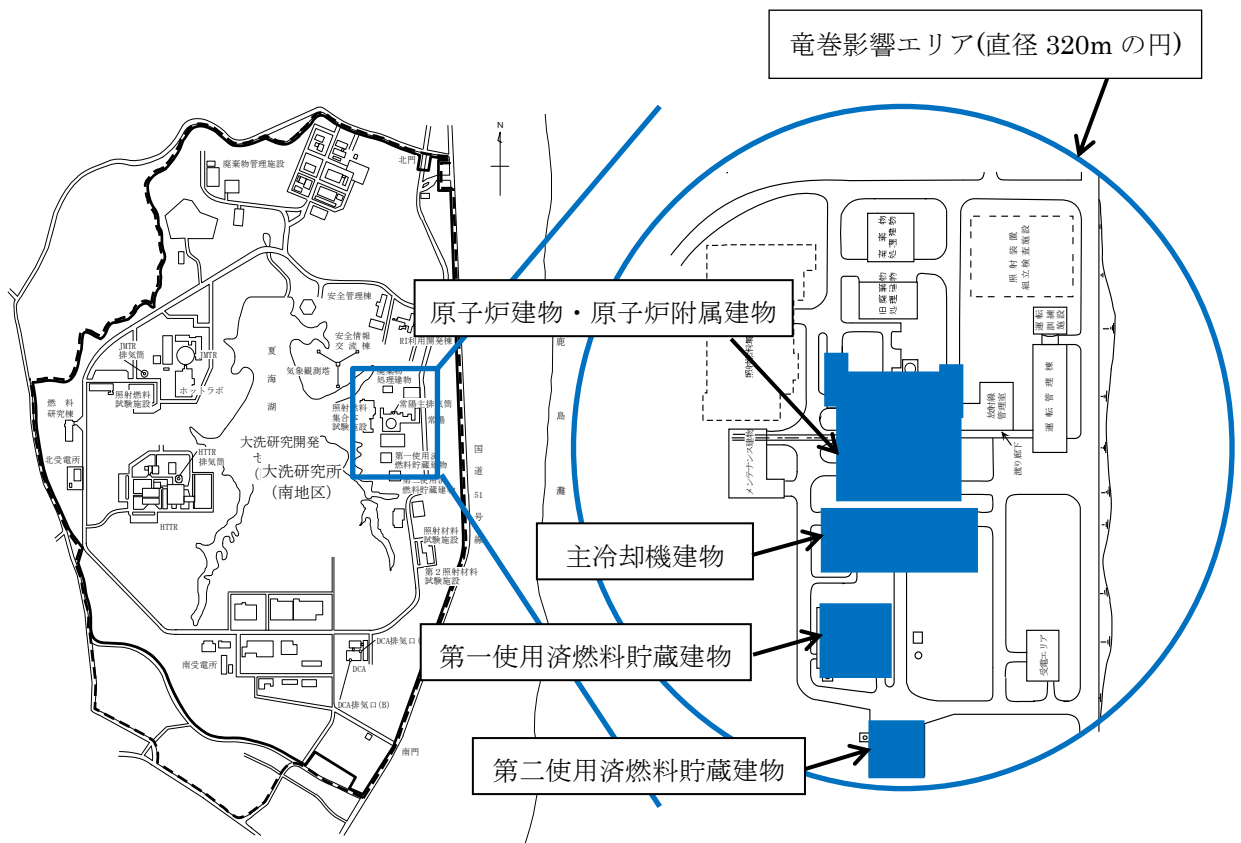
第 9. 3. 4 図(2) 竜巻被害幅の超過確率



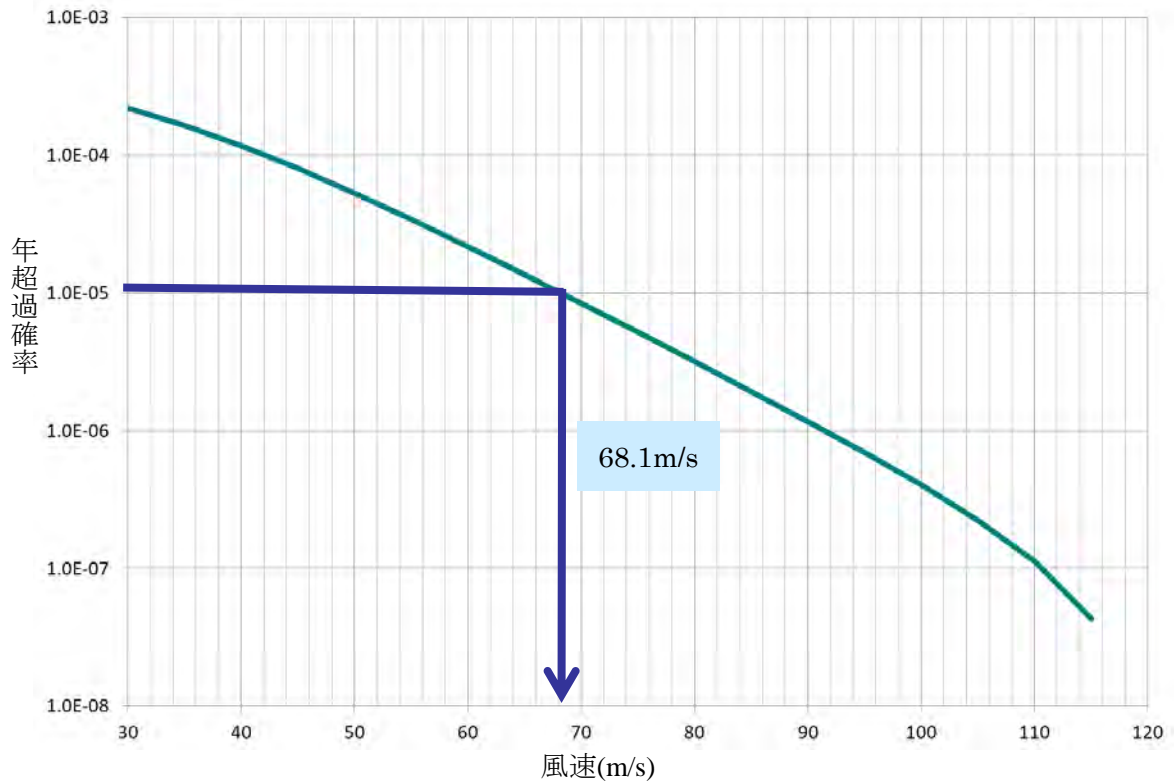
第 9. 3. 3 図(3) 竜巻被害長さの確率密度分布



第 9. 3. 4 図(3) 竜巻被害長さの超過確率



第 9.3.5 図 高速実験炉原子炉施設の概略配置図



第 9.3.6 図 竜巻最大風速のハザード曲線 (海側陸側各 5km の評価)

ハザード曲線の保守性

竜巻最大風速のハザード曲線の算定にあつては、疑似データ作成時の F スケール不明竜巻*1の取扱いにより、例えば、F3 スケールの竜巻の発生数は、観測実績の約 2 倍としている。なお、F3 スケールの竜巻の観測実績は、竜巻検討地域（海岸線から陸側 5km、海側 5km の範囲）について、F3 スケールの竜巻に加えて、F2～F3 スケールの竜巻を含めたものである（北海道網走支庁佐呂間町や茨城県常総市等は対象外）。なお、近年、竜巻検討地域では、F2 及び F3 竜巻は発生していない。

また、竜巻に係る疑似データ作成において、被害幅・長さの情報がない場合がある。被害幅・長さが大きいデータを優先的に使用する一方で、被害幅・長さの情報がない場合のデータは使用しないものとする事で、被害幅・長さの平均値が大きくなるものとし、保守性を確保している。

*1： F スケール不明竜巻の取扱い

竜巻検討地域（海岸線から陸側 5km、海側 5km の範囲）における疑似データ作成フローを第 1 図に示す。ここでは、「竜巻等の突風データベース」（以下、「竜巻 DB」という。）より、竜巻検討地域の竜巻を、まず、その発生位置により「陸上」又は「海上」に大別する。

陸上で発生した竜巻のうち F スケールが判明しているものは、年代別分析のステップに移行する。一方、F スケールが判明していないもの（F スケール不明竜巻）は、F スケールを正確に推定できるほどの竜巻被害がなく、F スケールが推定されなかったものとして、F0 竜巻としている。海上で発生した竜巻のうち上陸したものについても同様である。

海上で発生した竜巻のうち上陸していないものについては、竜巻被害がなく、F スケールの推定が困難である。ここでは、沿岸部近傍での竜巻発生特性は、陸上と海上で類似していると仮定し、海上で発生した竜巻のうち上陸していないものについて、陸上発生竜巻の F スケール別発生比率で按分するものとした。

竜巻最大風速のハザード曲線による最大風速 (V_{B2}) の保守性
--

設計基準事故は、発生頻度が 10^{-4} 程度のもので定義される。ただし、竜巻最大風速のハザード曲線による最大風速の算定にあたり、竜巻発生データの数が少ないことを踏まえ、年超過確率 10^{-5} に相当する風速を V_{B2} とすることで、十分な保守性を確保した。なお、過去に発生した竜巻による最大風速 ($V_{B1}=92\text{m/a}$) から定まる基準竜巻の最大風速 92m/s における年超過確率は、ハザード曲線より、約 10^{-6} となる

最新の竜巻等の突風データベースの考慮

気象庁の「竜巻等の突風データベース」は、2012年6月以降も随時更新されており、2022年6月現在、2016年3月までのデータが公式なものとして公開されている。2016年4月以降のデータは速報値として公開されている。1961年から2016年3月までのデータを、1961年から2012年6月までのデータと同様に分析した結果を以下の通りまとめた。

1961年から2012年6月までのデータを用いて算出した年超過確率 10^{-5} に相当する風速は 68.1m/s であったのに対し、1961年から2016年3月までのデータを用いて算出した年超過確率 10^{-5} に相当する風速は 64.6m/s であったため、いずれも基準竜巻の最大風速 (V_B) として設定した 92m/s と比較すると十分に小さく、設計竜巻の最大風速 (V_D) の設定に影響はない。

第1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～ 2016/3 (54.25年間)	期間内総数	65	92	30	3	190	17	13	43	19	3	78	7	143	435
	平均値	1.20	1.70	0.55	0.06	3.50	0.31	0.24	0.79	0.35	0.06	1.44	0.13	2.64	8.02
	標準偏差	2.49	1.58	0.72	0.23	3.32	0.67	0.51	1.26	0.62	0.23	1.69	0.39	5.40	9.09
1991～ 2016/3 (24.25年間)	期間内総数	65	61	12	1	139	13	13	33	9	0	55	5	143	355
	平均値	2.68	2.52	0.49	0.04	5.73	0.54	0.54	1.36	0.37	0.00	2.27	0.21	5.90	14.64
	標準偏差	3.19	1.70	0.72	0.20	3.64	0.88	0.66	1.64	0.65	0.00	2.03	0.41	6.86	10.12
2007～ 2016/3 (8.25年間)	期間内総数	54	24	1	0	79	9	7	3	0	0	10	3	118	219
	平均値	6.55	2.91	0.12	0.00	9.58	1.09	0.85	0.36	0.00	0.00	1.21	0.36	14.30	26.55
	標準偏差	4.63	2.28	0.19	0.00	4.49	1.44	0.77	0.35	0.00	0.00	1.32	0.35	14.85	26.68
疑似 54.25年間 (陸上竜巻)	期間内総数	356	137	30	3	586	60	47	74	19	3	163	20	776	1525
	平均値	6.56	2.53	0.55	0.06	10.80	1.11	0.85	1.40	0.37	0.06	3.67	0.36	13.28	28.11
	標準偏差	4.63	1.70	0.72	0.23	5.20	1.44	0.77	1.64	0.62	0.23	1.96	0.35	9.12	10.68

第2表 54.25年間の竜巻発生数の分析結果

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 54.25年間 (全竜巻)	期間内総数	1034	393	89	10	1526
	平均値	19.06	7.24	1.64	0.18	28.13
	標準偏差	7.44	3.07	1.26	0.42	8.16

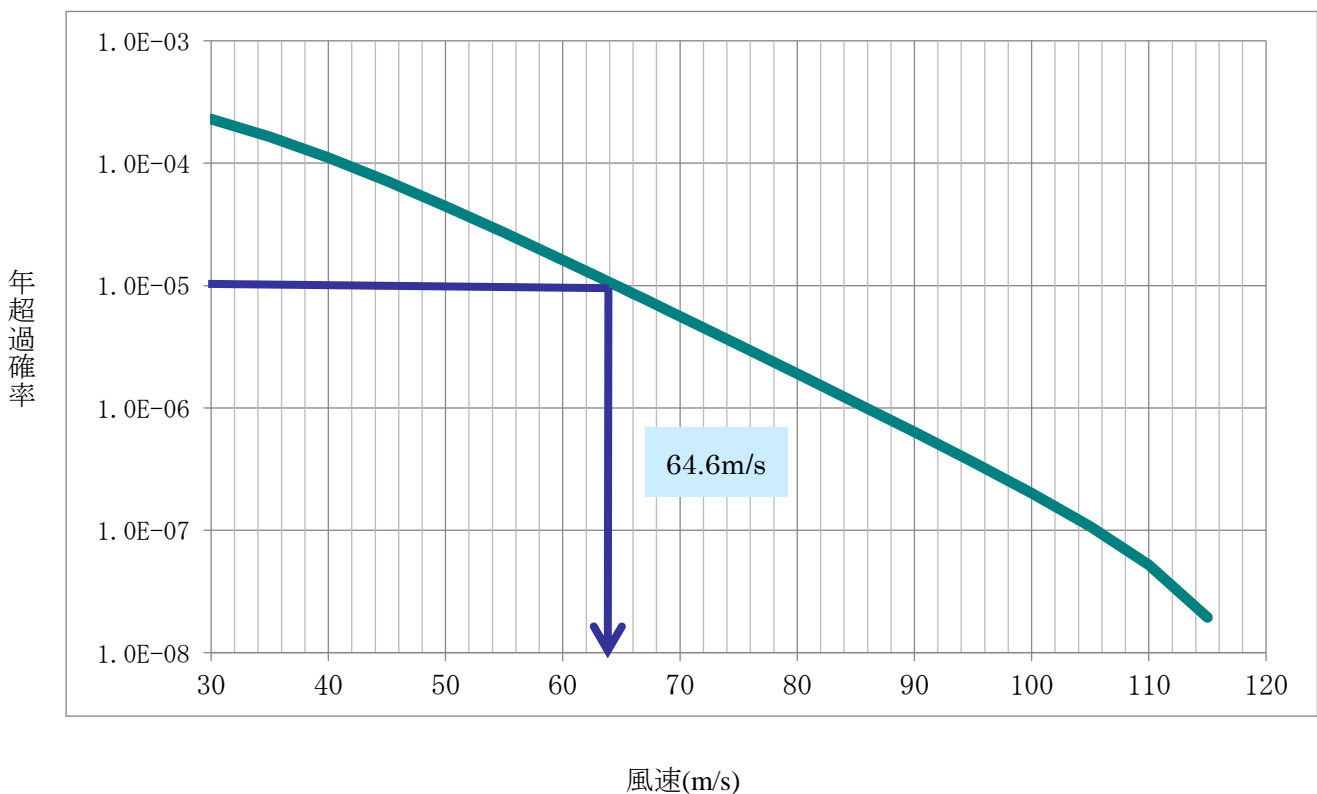
第3表 竜巻検討地域における竜巻パラメータ(51.5年間の分析結果)

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 54.25年間 (全竜巻)	発生数	期間内総数	1034	393	89	10	1526
		平均値(年)	19.06	7.24	1.64	0.18	28.13
		標準偏差(年)	7.44	3.07	1.26	0.42	8.16
	被害幅	期間内総数	1034	393	89	10	1526
		平均値(m)	89.57	143.44	250.11	605.00	116.18
		標準偏差(m)	71.55	188.81	392.78	752.94	167.82
	被害長さ	期間内総数	1034	393	89	10	1526
		平均値(km)	1.33	2.83	4.96	15.95	2.02
		標準偏差(km)	1.33	3.12	4.55	14.73	2.91

第4表 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	0.265	0.416
被害幅	—	1	0.364
被害長さ	—	—	1

*観測データのみを用いて算定



第1図 竜巻最大風速のハザード曲線(海側陸側各5kmの評価)

竜巻影響評価における
ランキン渦モデルとフジタモデルの適用範囲

竜巻影響評価ではランキン渦モデル及びフジタモデルを用い、各々の適用範囲を以下のとおりとした。

ランキン渦モデルの適用範囲；

設計竜巻の物性値及び設計荷重のうち、風圧力による荷重及び気圧差による荷重

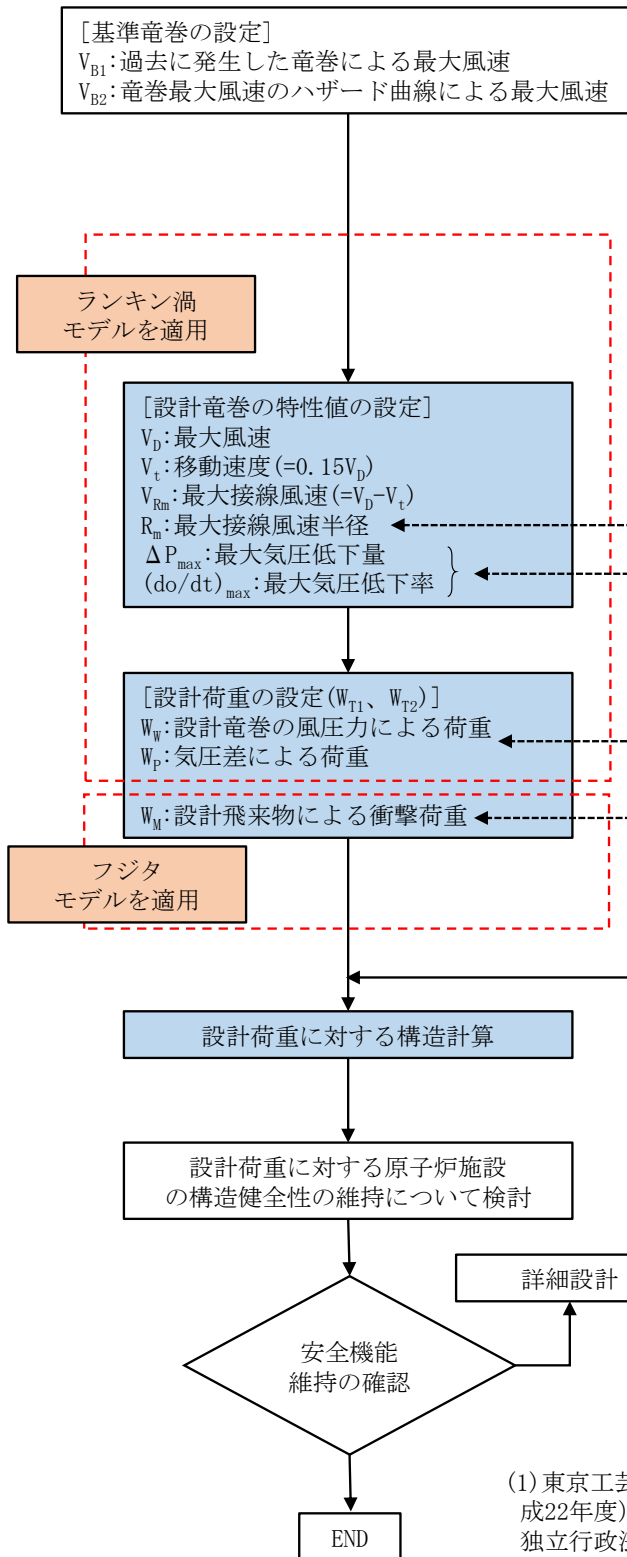
フジタモデルの適用範囲；

設計飛来物の選定及び設計荷重のうち、設計飛来物の選定及び衝撃荷重の設定

フジタモデルの適用範囲の設定理由；「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。

ランキン渦モデルとフジタモデルの適用範囲を以下の図に示す。

< 竜巻影響評価フロー >



評価に用いる竜巻モデル

[ランキン渦モデルにより設定]

東京工芸大報告書⁽¹⁾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。

[ランキン渦モデルにより設定]

ランキン渦モデルとフジタモデルとでは、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。

[フジタモデルにより設定]

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。

(1)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

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

フジタモデルとランキン渦モデルの概要

【フジタモデル】

「フジタモデル」の風況イメージを第 1.1 図に示す。フジタモデルの風速場は、第 1.1 図に示すように半径方向に 3 つの領域（内部コア、外部コア、最外領域）で構成されており、鉛直方向は流入層と非流入層とで構成される。流入層では圧力勾配が遠心力よりも卓越するため、竜巻の中心方向に向かう強い流れがあり、この空気の流れ込みが外部コア内での上昇流となる。内部コアと外部コアの接線風速は半径に比例し、最外領域では半径に反比例する。内部コアには上昇風速や半径方向風速は存在しないが、外部コアには存在する。流入層より上部では、外向きの半径方向風速が存在し、各風速成分は高さとともに減衰する流れとなっている。

図中に示すフジタモデル（DBT-77）における接線風速等の関係式については、Fujita Workbook¹⁾に記載されている。

【ランキン渦モデル】

竜巻の風速場モデルとして利用されている「ランキン渦モデル」の風況イメージを第 1.2 図に示す。ランキン渦モデルは、米国 NRC ガイドでも採用されており、上空の周方向風速分布を良く再現することができることから、設計竜巻の特性値を設定する際に用いられている。米国で開発された飛来物速度評価用のランキン渦モデルは、竜巻中心に向かう半径方向風速 V_r と上昇風速 V_z を付加している。そのため、流れの連続の式（質量保存式）を満たしておらず、図に示すように地面から吹き出しが生じるような流れとなっており、地上からの物体の浮上・飛散を現実的に模擬することができない。ランキン渦モデルを用いて飛散評価を行う場合、地上の物体に対して、初期条件として高所にあることを仮定して評価する場合には保守性が過度に大きくなる。

1)Fujita, T. T., Proposed characterization of tornadoes and hurricanes by area and intensity, SMRP Research Paper 91 (1971), University of Chicago, Chicago, IL, p. 42.

フジタモデル モデル概要*

実際の竜巻観測記録を元に、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

$V_\theta = F_r(r)F_h(z)V_m$ 接線風速(V_θ)は高さ依存性あり

$$F_r(r) = \begin{cases} r & (r < 1) \\ \frac{1}{r} & (r \geq 1) \end{cases}, \quad F_h(z) = \begin{cases} z^{\alpha_0} & (z < 1) \\ \exp(-k(z-1)) & (z \geq 1) \end{cases}$$

$$V_r = \begin{cases} 0 & (r \leq \nu) \\ \frac{V_\theta \tan \alpha_0}{1 - \nu^2} \left(1 - \frac{\nu^2}{r^2}\right) & (\nu < r < 1) \\ V_\theta \tan \alpha_0 & (r \geq 1) \end{cases}$$

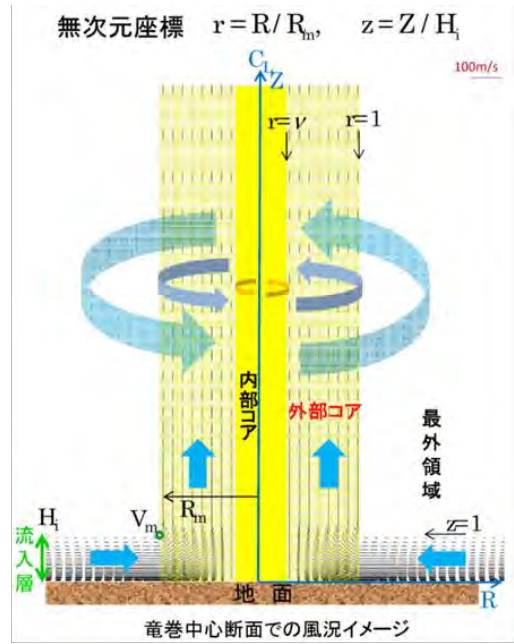
$$\tan \alpha_0 = \begin{cases} -A(1-z^{1.5}) & (z < 1) \\ B[1 - \exp(-k(z-1))] & (z \geq 1) \end{cases}$$

$$V_z = \begin{cases} \frac{3}{28} \frac{\eta V_m}{1 - \nu^2} A(16z^{\frac{7}{6}} - 7z^{\frac{8}{3}}) & (z < 1) \\ \frac{\eta V_m B \exp(-K(z-1))}{K(1 - \nu^2)} [2 - \exp(-k(z-1))] & (z \geq 1) \end{cases}$$

K_0, K, ν, η, A, B は定数

V_θ : 接線風速 V_z : 上昇風速 V_z : 流入層高さ
 V_r : 半径方向風速 V_m : 最大旋回風速 V_z : コア半径

* Fujita, T.T., Workbook of Tornadoes and High Winds for Engineering Applications, U.Chicago, 1978



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、実現象をよく表現

第 1.1 図 フジタモデル (DBT-77) の風況場イメージ

ランキン渦モデル モデル概要*

- 風速分布は高さに依存しない
- 半径方向風速 V_r と上昇風速 V_z は飛来物速度評価のみに付加される(最大接線風速 V_m に $2/\sqrt{5}$ を乗じる)

無次元座標 $r = R/R_m$

$$V_\theta = \frac{2V_m}{\sqrt{5}} F_r(r), \quad F_r(r) = \begin{cases} r & (r < 1) \\ \frac{1}{r} & (r \geq 1) \end{cases}$$

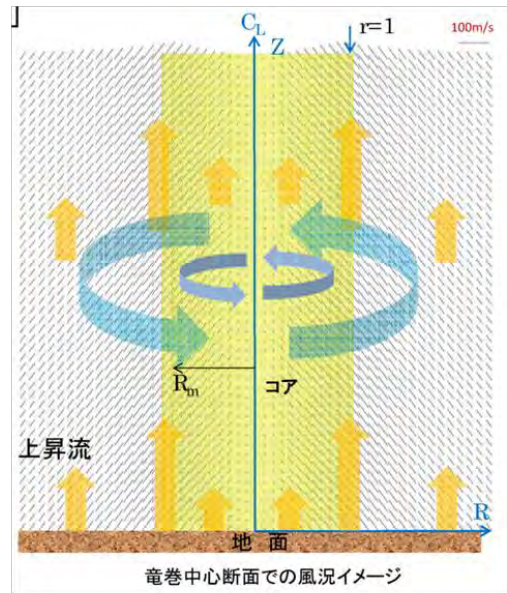
$$V_r = -\frac{1}{2} V_\theta$$

$$V_z = \frac{2}{3} V_\theta$$

旋回風速 $V_h = \sqrt{V_\theta^2 + V_r^2} = V_m F_r(r)$

V_θ : 接線風速 V_z : 上昇風速
 V_r : 半径方向風速 V_m : 最大旋回風速

* Simiu, E. and Cordes, M., NBSIR 76-1050, Tornado-Borne Missile Speeds, 1976



1) U.S. Nuclear Regulatory Commission, Regulatory Guide 1.76, Design-Basis Tornado and Tornado Missiles for Nuclear Power Plants, Revision 1, March 2007.

第 1.2 図 ランキン渦モデルの風況場イメージ

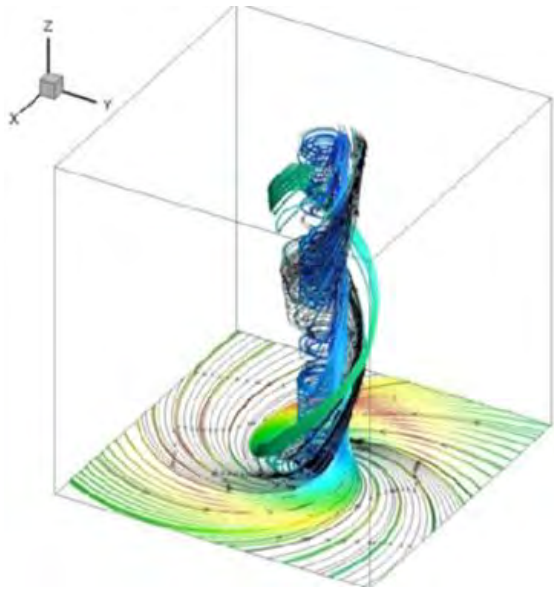
フジタモデルとランキン渦モデルの比較

フジタモデルとランキン渦モデルのメリット、使用実績及び課題を第1表に示す。原子炉施設は、これらの特長を踏まえ、竜巻影響評価について、基本的には、ランキン渦モデルを適用するが、設計飛来物の選定及び衝撃荷重の設定にあつては、フジタモデルを適用する。

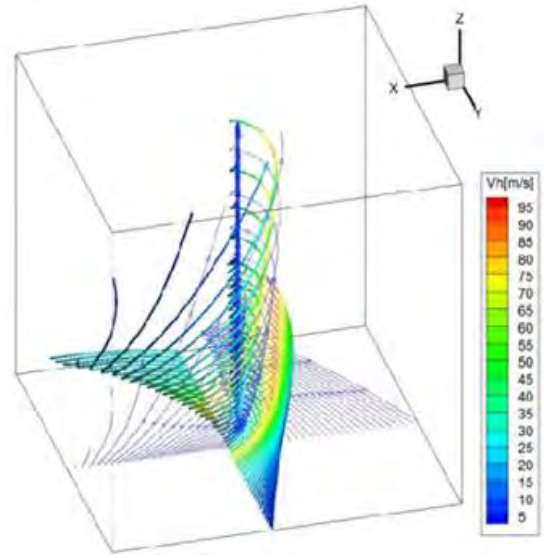
第1表 フジタモデルとランキン渦モデルの特長、使用実績及び課題

モデル	メリット	使用実績	課題
フジタ	<ul style="list-style-type: none"> ・観測に基づき考案されたモデルであり、現実的な風速場を模擬できる。 ・鉛直方向は下部の流入層と上部の非流入層とで構成される。 ・比較的簡単な代数式で風速場を表現できる。 ・地上に設置した状態から飛来物の挙動を解析できる。 	<ul style="list-style-type: none"> ・米国 DOE 重要施設的设计基準作成に利用されている。 	<ul style="list-style-type: none"> ・不確かさを考慮する必要がある。
ランキン渦	<ul style="list-style-type: none"> ・非常に簡単な代数式で風速場を表現できる。 	<ul style="list-style-type: none"> ・米国 NRC ガイドで採用されており、利用実績が高い。 	<ul style="list-style-type: none"> ・上昇流が全領域に存在し、飛来物が落下しにくい。 ・風速場が高さに依存しないため、地面付近では非現実的な風速場となる。

なお、気象庁ホームページでは、『「竜巻」とは、発達した積乱雲又は積雲に伴って発生する上下方向の回転軸を持つ激しい渦巻きで、しばしば漏斗状または柱状の雲を伴う。竜巻の中心では周囲より気圧が低いため、地面の近くでは、空気は渦の中心に向かうように狭い範囲に吹き込み、回転しながら急速に上昇し、積乱雲等と共に移動する』ものとしている。フジタモデル及びランキン渦モデルの風速場を第2.1図及び第2.2図に示す。フジタモデルの風速場の構造は、地表面で渦の中心に向かう水平方向の流れが、「竜巻」の表現とよく一致しており、実際の現象を再現している。



第 2.1 図 フジタモデルの風速場



第 2.2 図 ランキン渦モデルの風速場

飛来物の飛散解析へのフジタモデル適用の妥当性

以下に示す事例との比較結果から、飛来物の飛散解析にフジタモデルを適用することは妥当と判断した。

1. フジタスケールで示されている自動車の被災状況との比較

フジタスケールで示されている自動車の被災状況を第 1.1 表に示す。また、フジタモデルによる自動車の飛散評価結果を第 1.2 表に示す。

フジタスケール F2 における飛散距離は、静止時にあっても 1.4m であり、「自動車が道から吹き飛ばされる」との被災状況と一致する。フジタスケール F3 及び F4 においても同様に、評価結果は、被災状況と一致しており、フジタモデルを適用した自動車の飛散解析結果は、現実の被災状況と概ね整合することを確認した。

第 1.1 表 フジタスケールで示されている自動車の被災状況

フジタスケール	風速 (m/s)	自動車の被災状況 ¹⁾
F2	50-69	自動車が道から吹き飛ばされる
F3	70-92	自動車が持ち上げられて飛ばされる
F4	93-116	自動車が何十 m も空中飛行する

第 1.2 表 フジタモデルによる自動車の飛散評価結果²⁾

フジタスケールとの対応	最大水平風速 V_D (m/s)	竜巻接線速度 V_m (m/s)	竜巻移動速度 V_{tr} (m/s)	計算結果		
				速度 (m/s)	距離 (m)	高さ (m)
F2 (静止)	69	59	10	1.0	1.4	0
F2 (走行)	89*	59	30*	23	25	0.9
F3 (静止)	92	79	13	23	34	1.1
F4 (静止)	116	99	17	42	59	3.1

* : 竜巻の移動速度 10m/s に自動車の相対走行速度 20m/s (72km/h) を加えたもの。

1) Fujita, T. T., Proposed characterization of tornadoes and hurricanes by area and intensity, SMRP Research Paper 91 (1971), University of Chicago, Chicago, IL, p.42.

2) 江口謙, 杉本聡一郎, 平口広丸, 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

2. 米国 Grand Gulf 原子力発電所への竜巻襲来事例との比較

1978年4月17日 ミシシッピ州で建設中の Grand Gulf 原子力発電所に竜巻が来襲した^{1),2)}。第2.1図は、竜巻による飛来物の飛散状況が定量的に分かる事例として、資材置き場のパイプの飛散状況を示したものである。なお、竜巻の規模はF2であったと考えられている。パイプを収納した木箱（一部は二段重ね）は浮上しなかったが転倒し、パイプが散乱したものの7m～9mの範囲に留まったことが報告されている。このパイプは Transute パイプと呼ばれる、コンクリート・石綿製で、長さ8フィート、直径（外径）9インチであった。このパイプの飛散状況に対して、フジタモデル及びランキン渦モデルを風速場として用いた飛散解析を行った。

竜巻影響評価にあたっては、設計竜巻の特性値の設定、設計荷重の設定を行う必要があり、これらの設定にはランキン渦モデルとフジタモデルにより評価を行う。両モデルの間には、第2.1表に示す通り、最大気圧低下率や飛来物の飛散速度に大きな差はなく、何れのモデルも適用可能と考えている。ただし、飛来物の飛散高さや飛散距離については風速場モデルにより、大きな違いが出ることから、現実的な評価が可能なフジタモデルを採用する。飛来物以外については保守的な評価結果を得ることができるランキン渦モデルを用いることとする。

飛散解析の結果、フジタモデルでは、初期高さからの浮上はないとの結果が得られ、実際に確認された状況（浮上せず転倒した木箱からパイプが散乱）に相似している。

一方、ランキン渦モデルでは、飛散距離が初期高さを1mとした場合においても実際に確認された状況（浮上せず転倒した木箱からパイプが散乱）とパイプの飛散状況に大きな差があり、地表面での風況場は実現象と乖離した結果となった。

第 2.1 表 Grand Gulf 原子力発電所資材置き場のパイプ飛散の再現解析条件

竜巻条件	設計竜巻風速	67m/s
	最大接線風速	53.6m/s
	移動速度	13.4m/s
	コア半径	45.7m
飛来物条件	直径 (外径)	9inch(0.2286m)
	物体高さ	0.229m
	密度	1,700kg/m ³
	飛行定数 C _D A/m	0.0080m ² /kg
初期配置	<ul style="list-style-type: none"> ・物体個数 51 個×51 個、竜巻半径の 4 倍を一辺とする正方形内に等間隔配置。 ・設置高さ 1m (パイプが収納されていた木箱が 2 段重ねで配置されていた状況を想定。) 	

第 2.2 表 Grand Gulf 原子力発電所資材のパイプの飛散解析結果

風速場モデル	初期物体高さ (m)	結果		
		飛散距離 (m)	飛散高さ (m)	最大水平速度 (m/s)
フジタ	1	1.19	0	4.85
ランキン渦	1	41.5	0.312	30.5
ランキン渦	40	226	0.312	40.9



第 2.1 図 米国 Grand Gulf 原子力発電所における竜巻による資材置き場パイプの飛散状況

- 1) McDonald, J. R., 2001: T. Theodore Fujita: His contribution to tornado knowledge through damage documentation and the Fujita scale. Bull. Amer. Meteor. Soc., 82, 63-72.
- 2) Fujita, T. T., and J. R. McDonald, 1978: Tornado damage at the Grand Gulf, Mississippi nuclear power plant site: Aerial and ground surveys. NUREG/CR-0383, U.S. Nuclear Regulatory Commission, 61 pp

3. 佐呂間竜巻での自動車飛散事例との比較

2006年11月7日に北海道網走支庁佐呂間町で発生した竜巻（以下、「佐呂間竜巻」と呼ぶ。）により、4tトラックが約40m移動したことが報告されている¹⁾。被災状況を第3.1図に示す。この事例では被災時に4tトラックに2名が乗車しており、4tトラックの初期位置と移動位置が分かっている。また、4tトラックの他に2台の自動車について、初期位置と被災後の移動位置が分かっている。このように竜巻被災前後で車両等の位置が明確になっている事例は、竜巻が頻発する米国でも殆ど実施されていない。この理由としては、来襲した実際の竜巻特性を精度よく計測・推測することが困難であることや自動車等の移動前後の位置が不明瞭な場合が多いことが挙げられる。

フジタモデルを風速場として用い、入手可能なデータ^{1),2)}に基づき竜巻特性条件と4tトラックの物体条件を第3.1表のように設定し、竜巻とトラックの距離を合理的な範囲で変化させて飛散解析を行った。車両と竜巻中心との距離を18m、20m、22mとした場合の解析結果を第3.2表及び第3.2図に示す。車両の軌跡は竜巻中心との相対位置関係に敏感であるが、各ケースとも飛散方向が実際の移動方向と概ね同様であり、特に車両と竜巻中心との距離20mとしたケース2では飛散距離もほぼ正確に再現されている。このように、フジタモデルを風速場とした飛散解析で、飛来物が地上に設置された状況からの飛散挙動が再現できることが確認できた。

次に、フジタモデルを用いた飛来物評価法を検証するため、佐呂間竜巻における4tトラックの被災事例を、多点多数配置を考慮して評価し、実際の被災状況と比較した。この飛来物評価では、多点多数配置した飛来物それぞれがとる最大水平速度及び最大飛散速度のうち、最も大きな値を評価値として採用した。解析条件を第3.3表に示す。

第3.4表に実際の被災状況と、多点多数配置による飛来物評価法の結果の比較を示す。また、第3.3図に被災後の4tトラックの状況を示す。フジタモデルによる多点多数配置を考慮した飛来物評価結果として、4tトラックの最大飛来物速度は36m/s、最大飛散高さは3.6m、最大飛散距離は63.1mとなった。実際の4tトラックの飛距離は約40mであることから、フジタモデルによる多点多数配置を考慮した飛来物評価は保守的な結果となった。また、飛散高さや最大水平速度については、直接の比較は出来ないものの、4tトラックの乗員2名が存命であったこと、被災後の4tトラックがほぼ元の外形を留めていることなどから、多点多数配置における飛来物評価法で飛散解析をした場合でも、実際の被災状況と比較して再現性は高い。ランキン渦モデルによる評価では、最大飛散高さ、最大飛散距離ともに実際の被災状況と比較して過大な結果となった。

1) 札幌管区気象台：平成18年11月7日から9日に北海道（佐呂間町他）で発生した竜巻等の突風 災害時気象調査報告、災害時自然現象報告書、2006年第1号、2006。

2) 奥田泰雄、喜々津仁密、村上知徳、2006年佐呂間町竜巻補外調査報告。建築研究所災害調査、46、2006。

第 3.1 表 佐呂間竜巻の 4t トラックの解析条件

竜巻条件	設計竜巻風速	92m/s	
	最大接線風速	70m/s	
	移動速度	22m/s	
	コア半径	20m	
飛来物条件	車種不明のため、三菱ふそう PA-FK71D の仕様を採用	車両長さ	8.1m
		車両幅	2.24m
		車両高さ	2.5m
		車両重量	4,000kg
	飛行定数 $C_D A/m$	0.0056m ² /kg	
初期配置	<ul style="list-style-type: none"> ・ 物体個数 1 個 ・ 竜巻は遠方から物体に近づくが、風速 60m/s 以下では浮上しない。 ・ 設置高さ 0m 		

第 3.2 表 佐呂間竜巻の 4t トラックの飛散解析結果

解析ケース	車両と竜巻中心との距離	結果		
		飛散距離 (m)	飛散高さ (m)	最大水平速度 (m/s)
1	22	45.2	2.79	25.8
2	20	35.3	2.30	22.2
3	18	25.7	1.67	18.8

第 3.3 表 佐呂間竜巻の乗用車の解析条件

竜巻条件	設計竜巻風速	92m/s
	最大接線風速	78m/s
	移動速度	14m/s
	コア半径	30m
飛来物条件	佐呂間竜巻の 4t トラックと同条件	
初期配置	<ul style="list-style-type: none"> ・ 物体個数 51 個×51 個、竜巻半径の 4 倍を一辺とする正方形内に等間隔配置。 ・ 設置高さ 0m 	

第 3.4 表 実際の被災状況と多点配置による飛来物評価法の結果比較

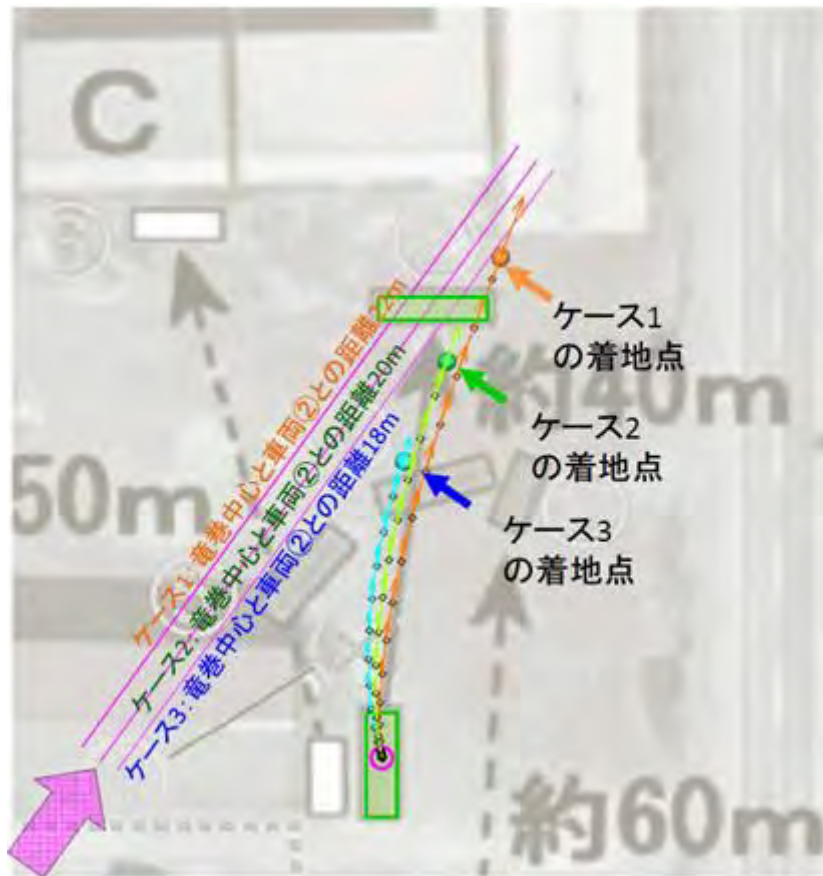
風速場モデル	飛散距離 (m)	飛散高さ (m) ^{*2}	最大水平速度 (m/s)
フジタモデル (地上)	63.1	3.60	36.0
ランキン渦モデル (地上 ^{*1})	192	11.5	43.9
ランキン渦モデル(40m)	254	11.5	43.9
実際の被災状況	約 40m	4tトラックの運転席に乗車していた乗員2名が幸い存命で救出され、搬送先の病院で聞き取り調査に応じており ¹⁾ 、被災した4tトラックが地面からは3.6m以上の高所から落下したとは考えにくい。	被災後もほぼ元の外形を留めていることが示されており ¹⁾ 、実際の飛来物速度は本解析で得られた最大飛来物速度を大きく下回るものと推察できる。

*1：フジタモデルの計算結果（飛散距離）と比較するため、フジタモデルと同条件とした。

*2：初期物体高さからの飛散高さ。



第 3.1 図 佐呂間竜巻による被災状況^{1), 2)}に一部加筆



第 3.2 図 フジタモデルによるトラック飛散の再現解析結果¹⁾



第 3.3 図 竜巻による被災後の 4t トラックの様子^{1),2)}

風圧力及び気圧差による圧力の設定

1. 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、「建築基準法及び同施行令」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。

$$W_W = P_D = q \cdot G \cdot C_f \cdot A$$

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

ここで、

W_W : 設計竜巻による風圧力による荷重 (N)

P_D : 風圧力 (N)

q : 設計用速度圧 (N/m^2)

※ 6,100 N/m^2 (「原子力発電所の竜巻影響評価ガイド」より)

ρ : 空気密度 (kg/m^3)

※ 1.22 kg/m^3 (「日本建築学会 建築物荷重指針・同解説」より)

V_D : 設計竜巻の最大風速 (m/s)

※ 100m/s

G : ガスト影響係数 (-)

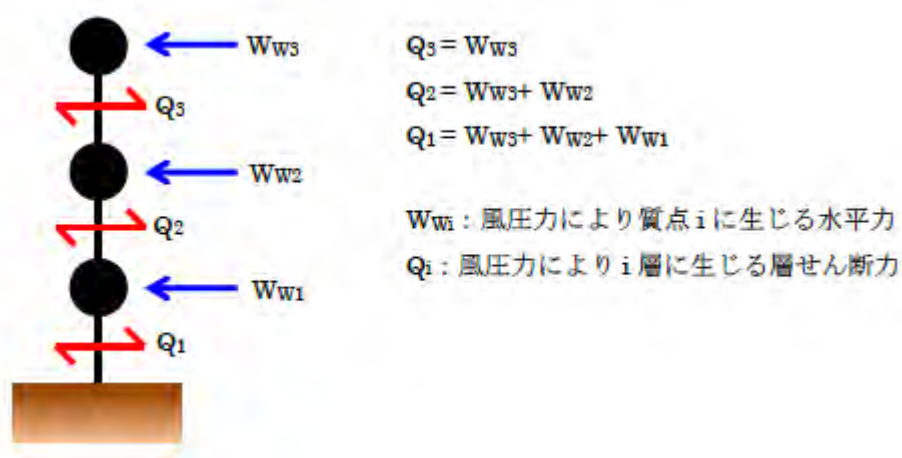
※ 1.0 (「原子力発電所の竜巻影響評価ガイド」より)

C_f : 風力係数 (-)

※ 施設の形状や風圧力が作用する部位(屋根、壁等)に応じて、「建設省告示第1454号」(平成12年5月31日制定)により算定

A : 施設の受圧面積 (m^2)

設計竜巻による風圧力による荷重は、建築基準法に基づき、第1図に示すように、受圧面積と風圧力の積から各質点に作用する水平力を算定し、各部材に生じる層せん断力を設定することで、構造健全性評価に供するものとし、層せん断力が、保有水平耐力を下回ることを確認する。



第1図 風圧力による水平力と層せん断力の設定方法

2. 気圧差による圧力の設定

気圧差による圧力の設定に用いる設計竜巻の特性値は、「原子力発電所の竜巻影響評価ガイド」に基づき、以下の式を用いて設定した。なお、設計竜巻の風速は100m/sとした。設計竜巻の特性値を第2.1表に示す。

(1) 設計竜巻の移動速度 V_T

$$V_T = 0.15 \cdot V_D$$

※ 当該式は、日本の竜巻観測記録（気象庁データベース）に基づいた竜巻移動速度（平均値）と最大風速との関係を参照して設定されたものであり、風速場モデルに関わらず使用可能。

(2) 最大接線風速 V_{Rm}

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

※ 当該式は、竜巻の最大風速から移動速度 V_T を減じたものであり、風速場モデルに関わらず使用可能。

(3) 最大接線風速半径

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

※ 日本における竜巻の観測記録をもとに提案された竜巻モデルに準拠。風速場モデルに関わらず使用可能。

(4) 設計竜巻の最大気圧低下量 (ΔP_{max})

$$\Delta P_{max} = \rho \cdot V_{Rm}^2$$

※ ランキン渦モデルによる風速分布に基づき当該式を適用。 ρ （空気密度）には、 1.22 kg/m^3 を使用。

(5) 設計竜巻の最大気圧低下率 $((dp/dt)_{max})$

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

※ ランキン渦モデルによる風速分布に基づき当該式を適用。

第2.1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

設計竜巻による気圧差による荷重 W_p は、気圧差による圧力荷重が最も大きくなる「閉じた施設」を想定し、最大気圧低下量 (ΔP_{max}) を用いて以下の式により算出する。

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

A：施設の受圧面積 (m^2)

風力係数 C_f の設定

設計竜巻の水平方向の最大風速によって建物に作用する風圧力算定における風力係数 C_f は、「建設省告示第 1454 号(平成 12 年 5 月 31 日制定)」に準拠して算定する。また、煙突については、「煙突構造設計指針」に準拠して算定する。閉鎖型建築物における壁面と陸屋根面の風力係数を第 1 図に、自立形煙突の風力係数を第 2 図に示す。

・水平方向（壁面）

風上壁面の風力係数は $C_{pe}=0.8$ （「建設省告示第 1454 号（平成 12 年 5 月 31 日）」を参考に、保守的に $k_z=1.0$ とする。）とし、風下壁面は $C_{pe}=-0.4$ とする。なお、 C_f は、

$$C_f=C_{pe}-C_{pi}$$

C_f : 風力係数

C_{pe} : 外圧係数（第 1 図内、表 1 及び表 2 参照）

C_{pi} : 内圧係数（第 1 図内、表 5 参照）

と表せられる。

・垂直方向（屋根）

屋根は保守的な評価として、全ての面において $C_{pe}=-1.0$ とする。

C_{pe} : 外圧係数（-）

C_{pi} : 内圧係数（-）

k_z : 平成 12 年建設省告示第 1454 号において定められている数値（-）

・水平方向（円形煙突）

自立形煙突の風力係数は第 2 図より、 $C_f=0.7$ である。なお、図中記載の C_D は、 C_f と同義である。

（設計風速は煙突の全ての高さにおいて 100m/s とし、 $U_z=100\text{m/s}$ 、主排気塔の最小筒身径は 2.55m であるため、 $2550 \leq U_z D$ であり、 $C_f=0.7$ を採用）

・水平方向（正方形煙突）

自立形煙突の風力係数は第 2 図より風向 0° の場合、 $C_f=2.1$ 、風向 45° の場合、 $C_f=2.3$ である。なお、図中記載の C_D は、 C_f と同義である。

$$C_f = C_{pe} - C_{pi}$$

C_f : 風力係数
 C_{pe} : 外圧係数
 C_{pi} : 内圧係数

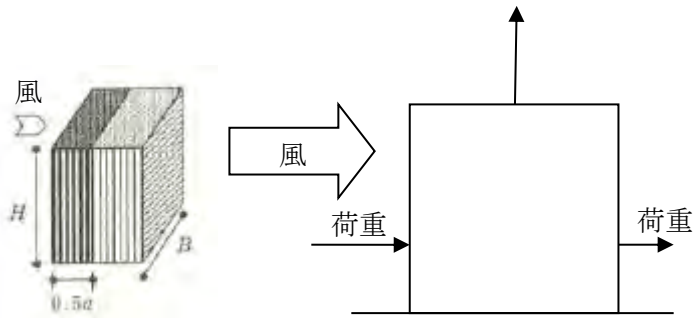


表1 壁面の C_{pe}

部位	風上壁面	側壁面		風下壁面
		風上端部より $0.5a$ の領域	左に掲げる領域以外の領域	
C_{pe}	0.8kz	-0.7	-0.4	-0.4

表2 陸屋根面の C_{pe}

部位	風上端部より $0.5a$ の領域	左に掲げる領域以外の領域
C_{pe}	-1.0	-0.5

表5 閉鎖型及び開放型の建築物の C_{pi}

形式	閉鎖型	開放型	
		風上開放	風下開放
C_{pi}	0及び-0.2	0.6	-0.4

図7 煙突その他の円筒形の構造物 (表9を用いるものとする。)

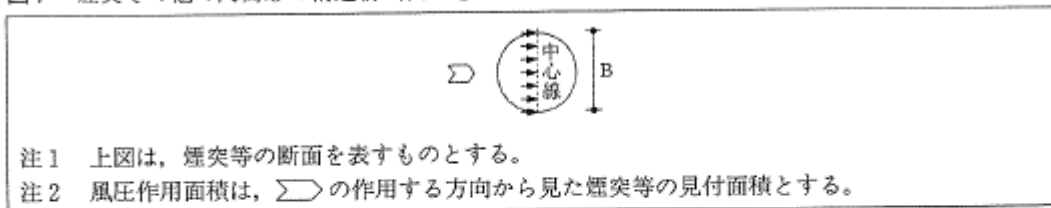


表9 煙突その他の円筒形の構造物の C_f

H/B	(1)	(2)	(3)
	1 以下の場合	1 を超え、8 未満の場合	8 以上の場合
C_f	0.7kz	(1)と(3)とに掲げる数値を直線的に補間した数値	0.9kz

H: 建物の高さ と 軒の高さ との平均 (単位: m)


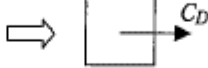


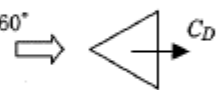
B: 風向きに対する見付幅 (単位: m)

第1図 閉鎖型建築物における壁面と陸屋根面及び円筒形構造物の風力係数

(1) 自立形煙突

自立形煙突の風力係数を表 6.9 に示す。

表 6.9 自立形煙突の風力係数

円形断面		正方形断面		正三角形断面	
		風向 0°  風向 45° 		風向 0°  風向 60° 	
$U_z D$ (m ² /s)	C_D	風向	C_D	風向	C_D
$U_z D \leq 4.4$	1.2	0°	2.1	0°	2.1
$4.4 < U_z D < 10.2$	線形補間	45°	2.3	60°	1.3
$10.2 \leq U_z D$	0.7				

記号

U_z : 地表面からの高さ Z における設計風速(m/s)で, 6.2.2 により定める.

D : 地表面からの高さ Z における筒身径(m)

第 2 図 自立形煙突の風力係数

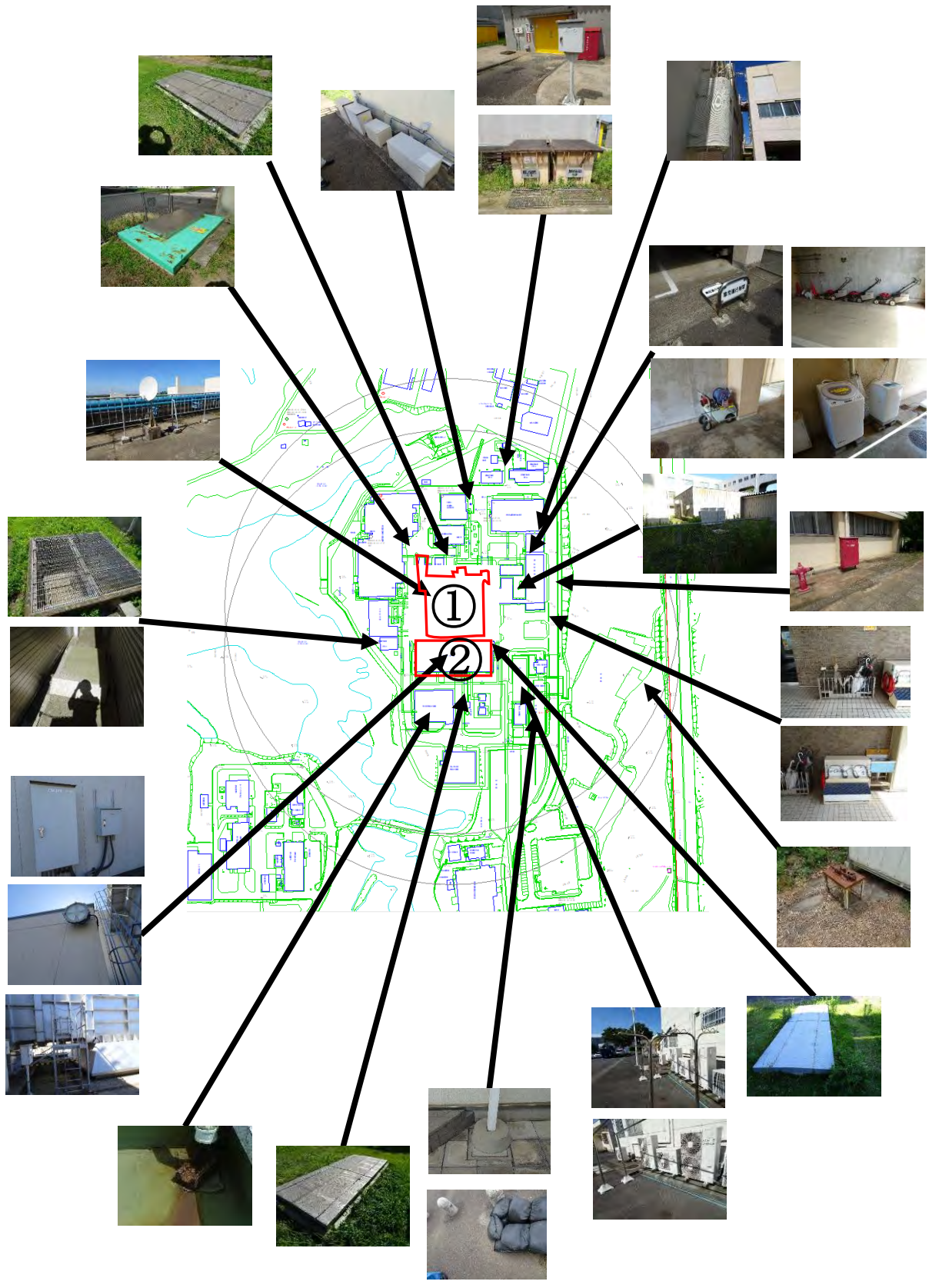
設計竜巻荷重の設定における設計飛来物の選定

1. 「常陽」敷地内の飛来物に係る現地調査

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）。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第1.1表に示す（主な飛来物の配置：第1.1図参照）。なお、飛来物には、敷地に隣接する国道から飛来するワゴン車を含めた。

第1.1表 現地調査により確認された飛来物

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 (隣接する国道 から飛来)	-	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)



- ①原子炉建物（格納容器含む）及び原子炉附属建物
- ②主冷却機建物

第 1.1 図 主な竜巻飛来物の配置

2. 設計飛来物の選定

設計飛来物の選定フローを第 2.1 図に示す。設計飛来物は、サイズ及び剛柔や浮き上がり有無、飛散防止対策を判定基準とした上で、運動エネルギー、衝撃荷重、貫通力等を考慮し、代表的なものとする。

サイズ及び剛柔に係る判定基準を以下に示す。なお、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。

- 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）

上記①～④に該当する竜巻飛来物の浮き上がり有無の評価結果、及び電力中央研究所が開発した竜巻飛来物評価ソフト“TONBOS”により評価した諸元を第 2.1 表に示す。なお、ここではフジタモデルを使用した。また、衝撃荷重は以下に示す式により求めた。

$$W_M = m \cdot V^2 / L$$

W_M : 設計飛来物による衝撃荷重 (N)

m : 質量 (kg)

V : 最大水平速度 (m/s)

L : 設計飛来物の 3 辺のうち最も短い辺の長さ (m)

当該評価結果を踏まえ、設計飛来物は、竜巻ガイドを参考に、鋼製材（中・剛）、足場板（中・剛）、ワゴン車（大・柔：飛散時に空中分解しないもの）、コンクリートブロック（小・剛）とした。なお、コンクリートブロックは主冷却機建物屋上（高さ 12.5m）からの飛来を想定した。選定した設計飛来物を第 2.2 表に示す。飛来物となる可能性のあるもののうち、飛来した場合の運動エネルギー又は貫通力が設定する設計飛来物を超える物品については、竜巻防護施設を内包する建物から隔離（屋内への移動を含む。）、固縛又は固定化を行い、確実に飛来物とならない対策を講じる。

設計飛来物に加えて、衝突に係る評価について、飛来物に、竜巻ガイドに記載された鋼製材（第 2.3 表）も想定する。米国原子力規制庁は飛散物（自動車）が 9.14m(30feet)以下に影響を及ぼすものとしている^[1]ことを踏まえ、本飛来物は高さ 10m まで影響を及ぼすものとして評価することを基本とするが、プラント安全性を高めるべく、貫通・裏面剥離評価においては投影面積が小さい箇所を除いて、高さ 10m 以上への衝突も考慮する。

参考文献

[1] U. S. NUCLEAR REGULATORY COMMISSION, “REGULATORY GUIDE 1. 76, DESIGN-BASIS TORNADO AND TORNADO MISSILES FOR NUCLEAR POWER PLANTS”, March 2007

第 2.1 表 (1/2) 竜巻飛来物の諸元及び浮き上がり有無

剛柔	サイズ	形状	空中での分解	名称	長さ (m)	幅 (m)	奥行 高さ 厚さ (m)	質量 (kg)	空力パラ メータ $C_D A/m$ (m^2/kg)	飛来物の運 動 エネルギー $mVH_{max}^2/2 \times$ 10^3 (kJ)	衝突荷重 Riera (kN)	最大水平 速度 (m/s)	飛散高さ (m)	飛散距離 (m)	最大落下 速度 (m/s)	浮上の有無 (空力 パラメータ ≥ 0.0028)	初期高さ (m)
剛	極小	塊状	無	砂利 (初期高さ12.5m)	0.10	0.10	0.10	1	0.03960	1.1	22	67.0	50.8	237.7	17.7	○	12.5
柔	小	塊状	無	ペーキング	0.40	0.20	0.50	10	0.02508	16.4	164	57.3	3.1	155.3	5.8	○	0
		塊状	無	監視カメラ (初期高さ10m)	0.22	0.25	0.25	7	0.01513	11.9	109	56.7	16.8	201.8	17.6	○	10
		塊状	無	制御盤 (初期高さ14m)	0.40	0.16	0.43	15	0.01378	20.4	256	52.9	17.2	207.8	19.0	○	14
		塊状	無	ライト (初期高さ20m)	0.40	0.40	0.30	15	0.01760	23.4	156	55.9	27.3	232.1	21.2	○	20
		塊状	無	ペーキング (初期高さ15m)	0.51	0.50	0.51	4	0.11613	13.4	53	78.0	55.8	259.2	11.2	○	15
		塊状	無	土のう	0.40	0.18	0.40	21	0.00969	7.4	82	26.7	0.9	19.4	3.0	○	0
		塊状	有	物干し台	0.39	0.32	0.21	20	0.00922	4.2	40	20.6	0.3	18.7	1.5	○	0
剛	小	塊状	無	ブロック	0.20	0.35	0.15	17	0.00592	0.5	7	7.8	0.1	3.0	0.5	○	0
		塊状	無	標識の土台	0.40	0.40	0.13	29	0.00608	0.8	12	7.3	0.0	2.7	0.4	○	0
		塊状	無	コンクリートブロック (初期高さ12.5m)	0.39	0.15	0.19	14	0.00744	15.8	210	47.0	138.5	3.2	15.4	○	0
		板状	無	車両通行止め	0.06	0.75	1.05	13	0.04327	33.5	1116	71.8	27.1	204.5	13.1	○	0
		板状	無	車止め	0.70	0.07	0.91	13	0.03651	30.0	923	68.9	21.5	194.9	12.7	○	0
		棒状	無	鋼製パイプ	2.00	0.05	0.05	8	0.00570	0.0	0	0.0	0.0	0.0	0.0	○	
		塊状	有	コンテナ	2.21	4.52	2.38	800	0.02143	1643.0	1487	64.1	26.5	226.2	15.5	○	0
柔	大	塊状	有	コンテナ	4.65	2.10	2.42	750	0.02297	1582.8	1507	65.0	28.0	227.7	15.6	○	0
		塊状	無	軽自動車	3.40	1.48	1.78	950	0.00953	1242.5	1679	51.1	7.7	156.2	9.2	○	0
		塊状	無	ワゴン車	5.20	1.90	2.30	1890	0.00915	2529.1	2662	51.7	11.9	160.5	11.9	○	0
		塊状	有	足場板 (初期高さ0.0m)	4.00	0.40	0.05	17	0.06610	16.0	627	42.87	0.394	255.2	2.5	○	0
柔	中	塊状	有	ジェットクリーナー(後)	1.01	0.56	0.88	122	0.01052	110.0	393	42.5	2.7	54.7	6.2	○	0
		塊状	有	ジェットクリーナー(前)	0.99	0.32	0.47	33	0.01854	36.5	228	46.9	2.1	127.8	5.5	○	0
		塊状	有	芝刈り機	0.43	1.55	1.02	33	0.05372	91.7	426	74.5	*	*	12.7	○	0
		塊状	有	薬剤散布機	0.40	0.82	0.87	39	0.02379	75.3	377	62.5	12.2	160.0	10.9	○	0
		塊状	有	消火器格納庫	1.30	1.00	1.35	70	0.04153	181.7	363	72.0	30.8	212.7	13.9	○	0
		塊状	有	室外機1 (初期高さ1m)	0.90	0.30	0.80	70	0.01160	64.6	431	43.0	1.1	119.4	4.5	○	1
		塊状	有	室外機2 (初期高さ1m)	0.70	0.30	1.20	87	0.01070	105.1	701	49.2	3.0	136.3	6.6	○	1

第 2.1 表 (2/2) 竜巻飛来物の諸元及び浮き上がり有無

剛柔	サイズ	形状	空中での分解	名称	長さ (m)	幅 (m)	奥行 高さ (m)	質量 (kg)	空力パラ メータ $C_D A / m$ (m^2/kg)	飛来物の運 動 エネルギー $m V H_{max}^2 / 2 \times$ 10^3 (kJ)	衝突荷重 Riera (kN)	最大水平 速度 (m/s)	飛散高さ (m)	飛散距離 (m)	最大落下 速度 (m/s)	浮上の有無 (空力 パラメータ ≥ 0.0028)	初期高さ (m)
柔	中	塊状	有	室外機3 (初期高さ1m)	0.90	0.30	0.80	70	0.01160	64.6	431	43.0	1.1	119.4	4.5	○	1
		塊状	有	室外機4 (初期高さ1m)	0.70	0.30	1.20	87	0.01070	105.1	701	49.2	3.0	136.3	6.6	○	1
		塊状	有	室外機5 (初期高さ1m)	0.90	0.30	0.60	51	0.01281	47.1	314	43.0	0.3	115.1	3.7	○	1
		塊状	有	洗濯機	0.60	0.65	1.03	43	0.02565	89.0	297	64.4	16.8	188.9	12.4	○	0
		塊状	有	室外機6	2.67	0.74	1.65	461	0.01088	653.1	1765	53.2	8.8	157.4	10.0	○	0
		塊状	有	室外機カバー1	0.32	0.78	0.54	11	0.05062	28.5	178	72.0	19.5	235.6	11.2	○	0
		塊状	有	室外機カバー2	0.32	0.78	0.54	11	0.05062	28.5	178	72.0	19.5	235.6	11.2	○	0
		塊状	有	室外機カバー3	0.50	0.31	0.35	6	0.05262	13.1	85	69.1	11.4	245.3	8.8	○	0
		塊状	有	室外機カバー4	0.69	0.31	0.38	4	0.11199	12.3	79	83.7	*	*	9.0	○	0
		塊状	有	室外機7	1.05	0.33	1.34	119	0.01216	175.0	1060	54.2	7.0	156.9	8.6	○	0
		塊状	有	室外機8	0.81	0.30	0.63	44	0.01412	44.5	297	45.0	2.4	97.1	5.8	○	0
		塊状	有	室外機9	0.95	0.37	1.38	103	0.01392	162.9	881	56.2	10.6	168.8	10.9	○	0
		塊状	無	万力	0.60	0.40	0.50	41	0.01191	25.4	127	35.2	1.5	37.4	4.5	○	0
		板状	無	ホース格納箱	0.20	0.80	1.20	35	0.02263	0.3	3	63.3	17.2	193.1	12.8	○	0
剛	中	塊状	有	傘立て	1.23	0.70	0.62	42	0.03228	89.7	289	65.5	11.7	159.9	10.1	○	0
		塊状	無	保管箱	1.10	1.10	1.05	400	0.00581	164.3	313	28.7	1.5	31.0	4.2	○	0
		塊状	無	防護壁	0.90	1.20	1.90	314	0.01066	447.1	993	53.4	11.2	167.4	11.4	○	0
		塊状	無	はしご (初期高さ12.5m)	1.07	1.45	2.64	158	0.03418	337.3	630	65.3	48.0	236.2	18.5	○	12.5
		板状	無	鋼板蓋1	1.05	2.05	0.12	50	0.03129	48.3	825	43.9	0.6	145.3	2.9	○	0
		板状	無	縞鋼板	1.70	1.40	0.19	133	0.01356	51.2	539	27.8	0.5	30.1	2.1	○	0
		板状	無	グレーチング	1.00	0.50	0.03	19	0.01831	2.8	187	17.2	0.1	13.0	0.7	○	0
		板状	無	縞鋼板(蓋)1	1.86	1.00	0.10	83	0.01615	19.5	389	21.7	0.3	17.4	1.5	○	0
		板状	無	縞鋼板(蓋)2	1.70	1.25	0.10	96	0.01583	21.8	437	21.3	0.3	16.9	1.5	○	0
		板状	無	縞鋼板(蓋)3	1.70	1.40	0.10	83	0.02040	40.6	812	31.3	0.3	40.7	1.8	○	0
		棒状	無	鋼製材	4.20	0.30	0.20	135	0.00645	8.9	89	11.5	0.1	6.3	0.9	○	0

*は計算が収束せず、飛散し続けたことによる

第 2.2 表 選定した設計飛来物

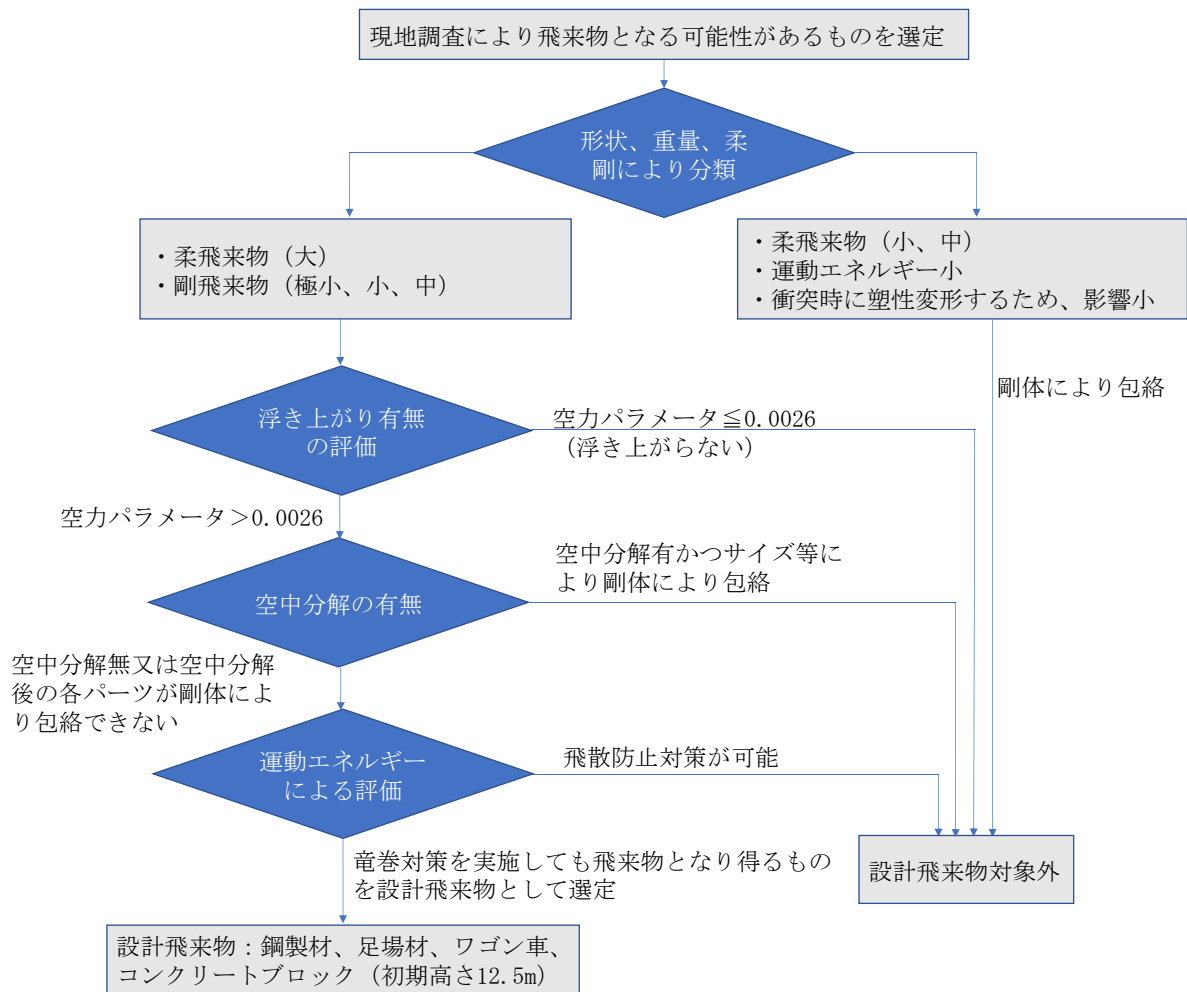
飛来物の種類	板状物	棒状物	塊状物	
	足場材 (初期高さ 0m ^{*1})	鋼製材 (初期高さ 0m ^{*1})	ワゴン車 (初期高さ 0m ^{*1})	コンクリートブロック (初期高さ 12.5m ^{*2})
サイズ (m)	4.0×0.40× 0.051	4.2×0.30× 0.20	5.2×1.9× 2.3	0.39×0.15× 0.19
質量 (kg)	17.4	135	1,890	14.3
飛散距離 (m)	256	6.3	161	139
飛散高さ (m)	0.40	0.15	12	3.2
最大水平速度 (m/s)	43	12	52	47
運動エネルギー (kJ)	16	9.0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

第 2.3 表 衝突評価に用いる飛来物

飛来物の種類	棒状物
	鋼製材
サイズ (m)	4.2×0.30×0.20
質量 (kg)	135
最大水平速度 (m/s)	51
最大鉛直速度 (m/s)	34
運動エネルギー (kJ)	176
衝撃荷重 (kN)	1,760



第 2.1 図 設計飛来物の選定フロー

設計飛来物の飛散防止対策の概要

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) 隔離又は屋内への移動、(2) 固縛、(3) 固定化のいずれかの対策を講じ、確実に飛来物とならない対策を講じる。

(1) 隔離又は屋内への移動

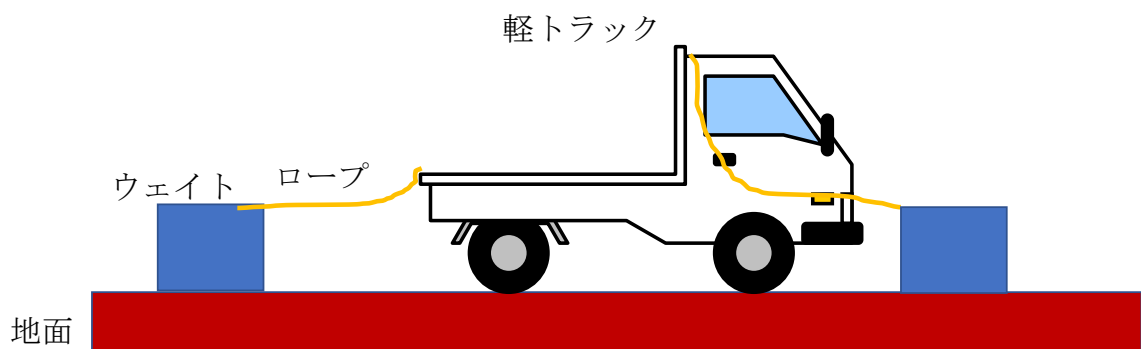
固縛や固定化が困難なものについては、設計竜巻風速による飛散距離を算出し、当該距離を超える隔離距離を確保する。施設周辺の従業員等の自動車に対しては、竜巻が大洗研究所に到達するおそれが確認された場合は、飛散した場合であっても建物への直接的な衝突を避けられる範囲に定めた場所へ移動する。屋内へ移動可能な大きさの物品については屋内へ移動する。

(2) 固縛

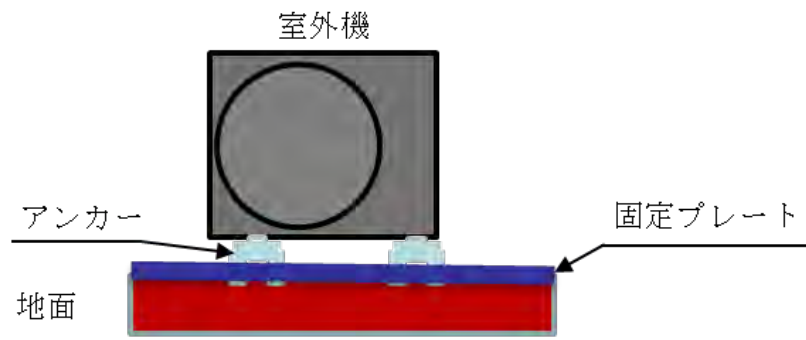
連結治具、ロープ、アンカー、十分な重さのウエイトの取付けにより固縛する。ウエイトの重量については、固縛物品+ウエイトの重量により空力パラメータが 0.0026 (物体の浮上有無の閾値) を下回る重量とする。軽トラックに固縛措置を施した場合の一例を添 2-1 図に示す。

(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等に固定する。室外機に固定化措置を施した場合の一例を添 2-2 図に示す。



添 2-1 図 固縛措置の一例



添 2-2 図 固定化措置の一例

飛来物の浮き上がり評価における保守性の確保

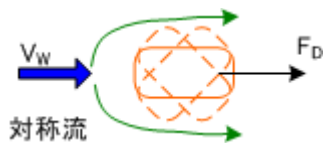
飛来物の飛散解析（空中）では、「原子力発電所の竜巻影響評価ガイド」の飛来物運動モデル^{1),2)}と同様に、飛来物が、ランダムに回転しているものとし、平均的な抗力 F_D と重力が作用する飛行モデルを使用している（第 1 図参照）。

一方、地上にある物体に対しては、揚力を考慮する³⁾。第 2 図に示すように、物体の形状が流れ方向の軸に関して対称であっても、地面の存在により流れが非対称になるため、物体上部の圧力が低くなることで、物体を浮上させる駆動力（揚力）が生じる。物体が非対称であっても同様であり、物体の運動方程式は、次式となる。

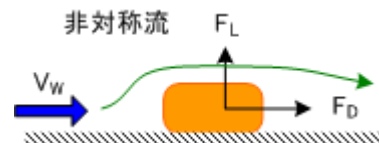
$$F_L = \frac{1}{2} \rho C_{La} |V_W - V_M|_{x,y}^2 \dots (1)$$

ρ : 空気密度、 V_M : 飛来物の速度ベクトル、 V_W : 風速ベクトル

$|*|_{x,y}$: *の x, y 成分（水平成分）の大きさ



第 1 図 空中で飛来物へ作用する力



第 2 図 地面付近飛来物へ作用する力

飛来物の浮き上がり評価にあつては、上記の C_{La} に代わり、以下で定義される抗力係数と見附面積の積の平均値 $C_D A$ を用いている。

$$C_D A = \frac{1}{3} (C_{DX} A_X + C_{DY} A_Y + C_{DZ} A_Z) \dots (2)$$

C_{DX} : 空中での X 軸方向流れに対する抗力係数、 A_X : X 軸方向流れに対する見附面積

揚力係数 C_L は、特殊な形状を除く通常の物体に対して、一般的に、抗力係数 C_D よりも小さく、 C_D を用いた評価は、保守性を有する（参考：第 1 表 $C_D A$ と C_{La} （風洞実験等で得られた実測値）の比較例）。

第 1 表 主な物体の $C_D A$ と C_{La} の値の比較

物体	円柱 $\Phi : d$	自動車 (Dodge Dart)	自動車 (セダン)	自動車 (ミニバン)
参考文献	EPRI、178 ⁴⁾		Schmidlin et al. 2002 ⁵⁾	
C_{La}	2.8d ²	48.7ft. ²	9.5m ² *1	9.1m ² *1
$C_D A$	7.1d ²	129ft. ²	12.0m ²	14.4m ²

*1:4つのタイヤに作用する地面からの反力のうち、少なくとも一つがゼロとなった時点の風速 U から計算した C_{La} 値 ($C_{La}=2mg/\rho U^2$) を使用

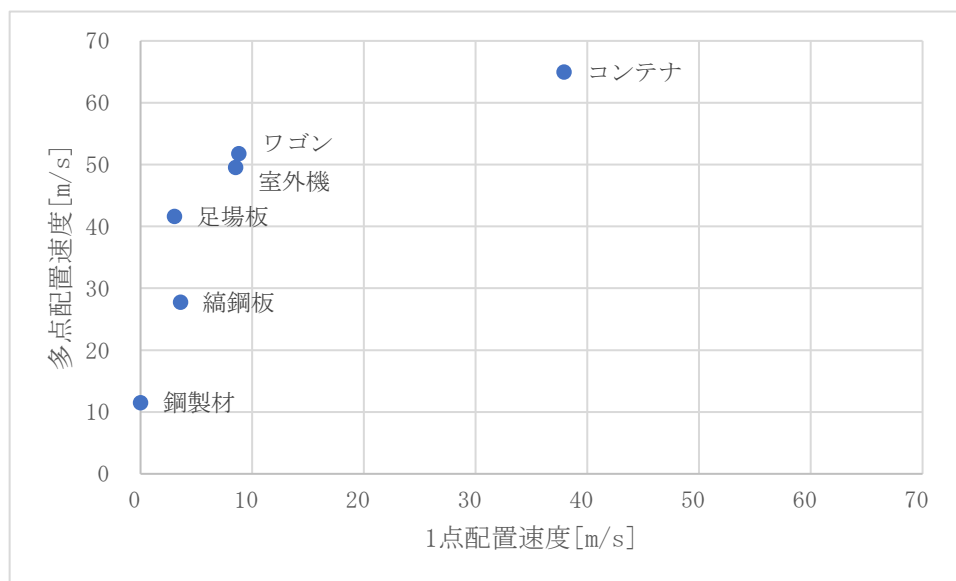
- 1) Simiu, E. and Cordes. M., Tornado-Borne Missile Speeds, NBSR 76-1050, 1976.
- 2) 東京工芸大学、平成 21～22 年度原子力安全基盤調査研究（平成 22 年度）竜巻による原子力施設への影響に関する調査研究、独立行政法人原子力安全基盤機構委託研究成果報告書、2011
- 3) 江口護、杉本聡一郎、服部康男、平口博丸、竜巻による物体の浮上・飛来解析コード TONBOS の開発、電力中央研究所 研究報告 N14002、2014
- 4) Wind field and trajectory models for tornado-propelled objects. EPRI, NP-748.1978
- 5) Schmidlin. t., Hammer, B., King. P., Ono. Y., Miller. K. S. and Thumann. G., Unsafe at any(wind) speed? Testing the stability of motor vehicles in severe winds, pp.1821-1830, Vol. 83, No. 12, Bulletin of the American Meteorological Society. 2020.

飛来物の飛散解析における初期位置の設定

飛来物の飛散解析にあつては、評価対象物を多点配置し、最大飛散速度等を評価している。評価対象物を1点配置とした場合と多点配置とした場合の最大飛散速度を比較した結果を第1図に示す。また、物体のパラメータについて第1表に示す。点配置の最大飛散速度は、全て1点配置と比較し、保守的な結果となっている。米国NRCで用いられている1点配置では、竜巻と評価対象物の相対位置の影響により、一定の不確実性が生じるが、多点配置では、当該懸念を排除できることが原因と考えられ、多点配置を適用することは妥当と判断できる。

第1表 物体のパラメータ

物品名称	長さ (m)	幅 (m)	高さ (m)	質量 (kg)	$C_D A/m$ (m^2/kg)
砂利(初期高さ 12.5m)	0.04	0.04	0.04	0.20	0.016
ワゴン	5.2	1.9	2.3	1,890	0.009
足場板	6.0	0.30	0.08	28	0.019
鋼製材	4.2	0.30	0.20	135	0.004
コンテナ	2.1	4.65	2.42	750	0.023
室外機	0.3	0.70	1.20	87	0.011
縞鋼板	1.4	1.70	0.19	133	0.014

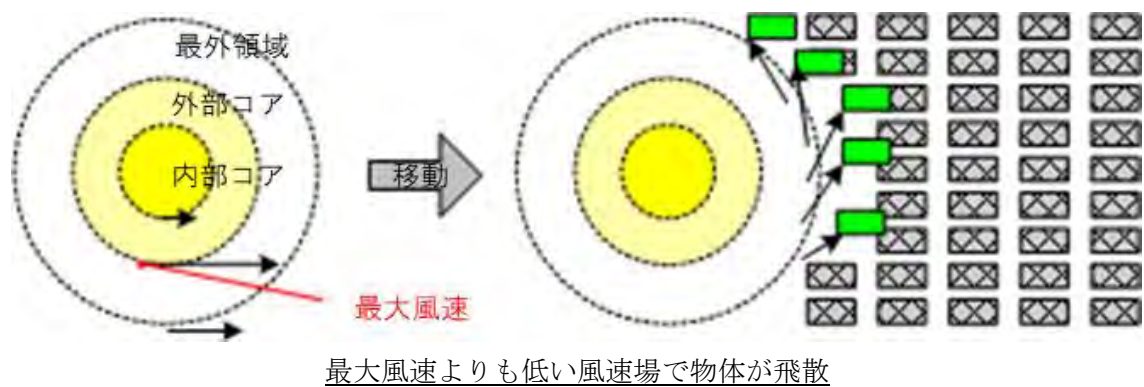


第1図 1点配置時と多点多配置時の最大飛散速度

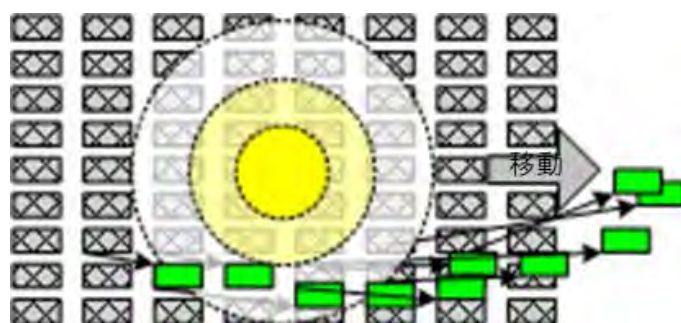
飛来物の飛散解析における竜巻の発生位置の設定

飛来物の飛散解析において、竜巻が遠方から評価対象物に接近するケース（第1図参照）と評価対象物の真上に発生するケース（第2図参照）で、評価対象物の飛散距離は異なる。

より現実を正確に模擬できるのは竜巻が遠方から評価対象物に接近するケース（海上で発生した竜巻が上陸する場合や上昇気流等の発生しやすい平坦な陸上から移動する場合等）であり、評価対象物は、最大風速ではなく、当該風速よりも低い竜巻最外周の風に曝されて飛散する。一方で、評価対象物の真上に竜巻が発生するケースでは、最大風速を有する風速場に評価対象物が位置するため、竜巻が遠方から評価対象物に接近するケースよりも保守的な評価結果が得られる。本評価では、評価対象物の真上に発生することを想定しており、十分な保守性を有する。



第1図 竜巻が遠方から評価対象物に接近するケースでの物体の飛散イメージ



瞬時に竜巻が発生し、飛散するため、最大風速の風速場で飛散する物体が存在

第2図 竜巻が評価対象物の真上に発生するケースでの物体の飛散イメージ

国道を走行するワゴン車の車速及び位置の設定

設計飛来物のうちワゴン車については国道からの飛来を想定している。当該ワゴン車について、以下の2ケースで解析を実施し、設計飛来物の最大水平速度等が保守的に設定されていることを確認した。

- ① ワゴン車が停止していることを想定し、竜巻がその場発生するケース（設計飛来物として選定した条件）
- ② ワゴン車が走行していることを想定し、16.67m/s（60km/h）分の風速を増大させた竜巻（最大風速116.67m/s）が停止しているワゴン車に接近してくるケース

両ケースの飛散解析結果を第1表に示す。

第1表 ワゴン車車速及び竜巻発生位置による飛散解析結果の比較

飛来物の種類	塊状物	
	ワゴン車 (ケース①)	ワゴン車 (ケース②)
サイズ (m)	5.2×1.9×2.3	
質量 (kg)	1,890	
飛散距離 (m)	161	113
飛散高さ (m)	12	4.6
最大水平速度 (m/s)	52	48
運動エネルギー (kJ)	2,530	2,170
衝撃荷重*3 (kN)	2,670	2,280

第1表より、設計飛来物として選定した条件の方がより保守的な結果となった。この理由として、別添5に記載のとおり、遠方から竜巻に接近していくワゴン車は竜巻の最大風速ではなく、当該風速よりも低い竜巻最外周の風に曝されて飛散するが、当該風速にワゴン車の車速である16.67m/sを重ねた場合であっても、竜巻最大風速を下回るためであると考えられる。

設計飛来物のうちワゴン車の選定理由

設計飛来物のうちワゴン車については国道からの飛来を想定している。国道を走行する車両は特定ができないため、車体形状と重量が異なる複数の車両の飛散解析を実施した。各車両の飛散解析結果を第1表に示す。

第1表 各車両の飛散解析結果

ボディタイプ	軽自動車	乗用車	ワゴン	ミニバン	観光バス
長さ(m)	3.4×1.5 ×1.8	5.0×2.0 ×1.3	5.2×1.9 ×2.3	4.9×1.8 ×1.9	12×2.5 ×3.5
幅(m)	1.5	2.0	1.9	1.8	2.5
高さ(m)	1.8	1.3	2.3	1.9	3.5
質量(kg)	950	1,810	1,890	2,110	13,080
最大水平速度(m/s)	52	39	52	46	32
飛散距離(m)	157	53	161	95	57
飛散高さ(m)	7.7	2.8	12	4.7	3.0
衝突荷重(kN)	1680	2023	2663	2346	5399

第1表より、国道から「常陽」重要建物まで到達する車両は軽自動車及びワゴン車であり、衝突時の影響が大きいワゴン車を設計飛来物として選定した。

竜巻以外の自然現象の考慮

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。耐竜巻設計において、安全施設の安全機能を損なわないことを確認する際に使用する自然現象（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。なお、敷地の特性等から設計上考慮が不要である「洪水・降水（大雨）」及び「地滑り」は、対象外としている。

【】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。

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

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以下に示す（第1図参照）。

① 竜巻発生の確認及び監視

大洗研究所において、公共放送や気象庁ホームページにより、竜巻情報を入手する。

② 竜巻対応準備指示の発令

大洗研究所に到達する恐れがある竜巻が発生した場合には、竜巻注意情報^{*1}及び竜巻発生確度ナウキャスト^{*2}の状況等から、竜巻の到達範囲内に大洗研究所の敷地が含まれるかどうかを確認する。竜巻発生確度ナウキャストの1時間後までの予測図に「竜巻発生確度2^{*3}」が出現し、その移動方向に大洗研究所が含まれる予測を確認した場合に、避難、車両移動等の対応準備が必要と判断した場合、大洗研究所長は「竜巻対応準備指示」を発令し、大洗研究所内に周知する。

※1：「竜巻注意情報」とは、積乱雲の下で発生する竜巻、ダウンバーストなどの激しい突風に対して注意を呼び掛ける情報で、雷注意報を補足する情報として、各地の气象台等が担当地域を対象に発表する情報。

※2：「竜巻発生確度ナウキャスト」とは、竜巻の発生確度を10km格子単位で解析し、その1時間後（更新は10分間隔）までの予測を気象庁が行うもの。

※3：「竜巻発生確度」とは、気象ドップレーダーなどから「竜巻が今にも発生する（又は発生している）可能性の程度」を、気象庁が下表のように推定したもの。

表 竜巻発生確度ごとの内容

発生確度2	竜巻などの激しい突風が発生する可能性があり注意が必要である。予測の適中率は7～14%程度*、捕捉率は50～70%程度*である。発生確度2となっている地域に竜巻注意情報が発表される。
発生確度1	竜巻などの激しい突風が発生する可能性がある。発生確度1以上の地域では、予測の適中率は1～7%程度*であり発生確度2に比べて低くなるが、捕捉率は80%程度*であり見逃しが少ない。

*：適中率及び捕捉率は平成30年12月時点の値であり、過去30か月の検証により見直される。

③ 竜巻対応指示の発令

竜巻発生確度ナウキャスト及び雷ナウキャスト^{*4}の1時間後までの予測図に「竜巻発生確度2」及び「雷活動度3^{*5}以上」が出現し、これらの移動方向に大洗研究所が含まれる予測を確認した場合にあって、避難、車両移動等の対応が必要と判断した場合、大洗研究所長は「竜巻対応準備指示」から「竜巻対応指示」に切り替える旨を発令し、大洗研究所内に周知する。また、大洗研究所の現地対策本部を設置し、竜巻情報の進展及び各施設対応状況の確認を行う。

※4：「雷ナウキャスト」とは、雷の激しさや雷の可能性を1km格子単位で解析し、その1時間後（更新は10分間隔）までの予測を気象庁が行うもの。

※5：「雷活動度」とは、雷監視システムによる雷放電の検知及びレーダー観測などを基にして、下表に示す活動度1～4で気象庁が表すもの。

表 雷活動度ごとの雷の状況

活動度	雷の状況	
4	激しい雷	落雷が多数発生している。
3	やや激しい雷	落雷がある。
2	雷あり	雷光が見えたり雷鳴が聞こえる。落雷の可能性が高くなっている。
1	雷可能性あり	現在、雷は発生していないが、今後落雷の可能性はある。

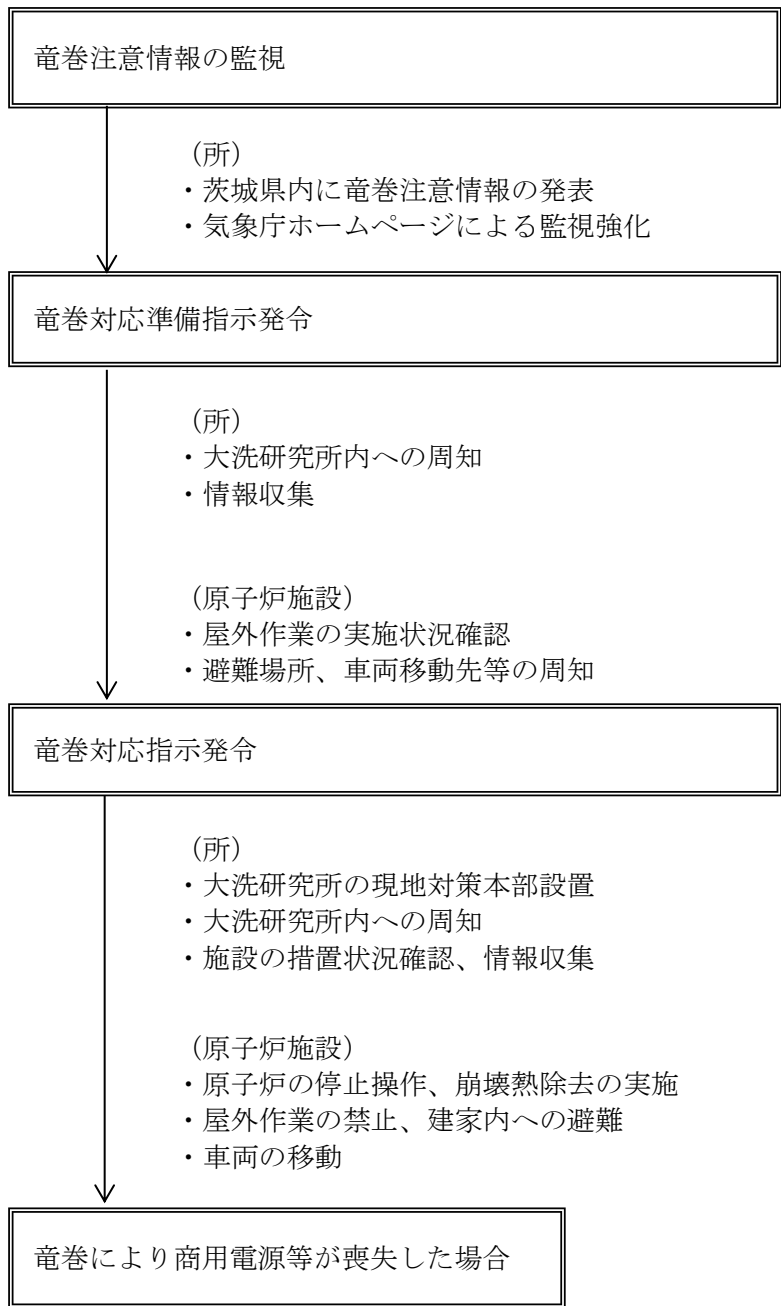
④ 竜巻対応指示発令時の措置

竜巻対応指示が発令された場合は、原子炉施設の従業員及び関係者等に対し、次の措置のうち必要な措置を講ずる。

- ・ 大洗研究所に「竜巻対応指示」が発令されたことを周知する。
- ・ 屋外作業員に対し、作業の中止及び頑丈な建屋内への避難を指示する。
- ・ 車両駐車規制範囲内に駐車している車両の移動を指示し、その完了を確認する。
- ・ 竜巻による飛散時に重要安全施設またはその外殻施設への影響が生じ得る物品の屋内への移動
- ・ 車両移動等以外の緊急性のない屋外作業を禁止する。
- ・ 原子炉の停止、崩壊熱除去の実施
- ・ 建屋内への避難者は、建屋の窓やドアから離れた場所又は窓のない部屋へ移動する。
- ・ その他必要な措置を講ずる。

⑤ 竜巻の影響により商用電源等が喪失した場合の対応

竜巻発生時において原子炉施設外で想定される外部電源喪失等に対しては、原子炉保護系の作動等により、原子炉を自動停止する。外部電源喪失時は非常用ディーゼル電源系、交流無停電電源系及び直流無停電電源系により非常用電源が確保される。原子炉建物・原子炉附属建物及び主冷却機建物は、竜巻により生じる複合荷重に対し、十分な許容応力を有する。



(原子炉施設)
 ・非常用電源による停止後の監視継続

第1図 竜巻に対する対応フロー

竜巻情報の確認について

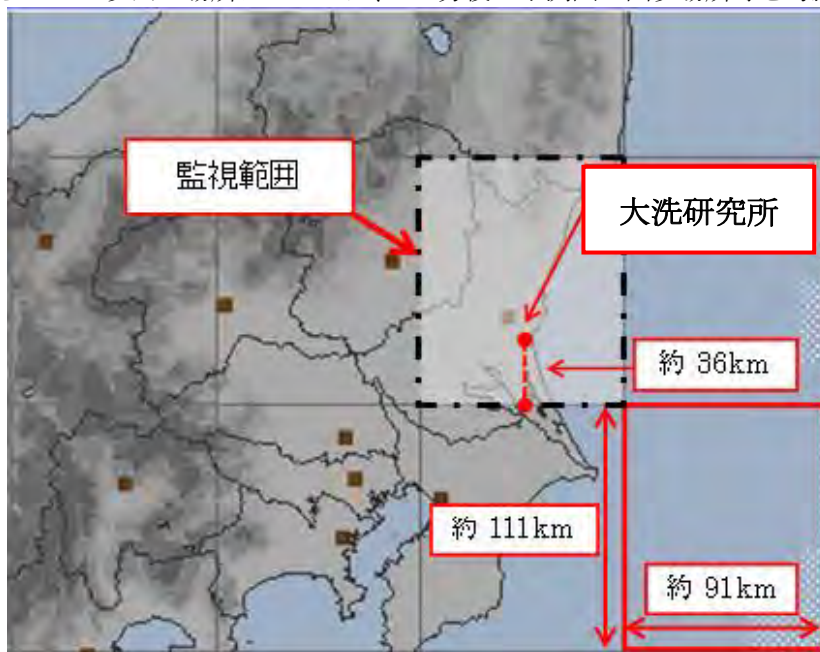
1. 監視範囲の考え方

- ① 監視範囲については、大洗研究所を含むレーダー・ナウキャストの経緯度線によるメッシュ内（約91×約111kmの範囲）とする（下図参照。）
- ② 大洗研究所からメッシュ境界線までの最短距離は、南方向に約36kmである。
- ③ 竜巻、ダウンバースト等の移動速度は、17km/10分※であることから、36km移動するのに21分程度を要する。

※2004年～2013年の10年間に発生した竜巻、ダウンバースト等の移動速度の最大値

（100km/時：2005年11月8日、秋田県で発生）から17km/10分と算出（気象庁データベースより。）

- ④ レーダー・ナウキャストは60分後までの予測を行えるため、例えば、監視範囲における30分後の予測図に「竜巻発生確度2」及び「雷活動度3以上」が出現した場合は、上記③との合計時間である51分から、指示伝達に要する時間等を考慮し、大洗研究所への竜巻襲来予想時間を40分とみなす。
- ⑤ 大洗研究所から36km以内の場所については、60分後の予測図で出現場所等を考慮して判断する。



2. 竜巻に関する気象情報等

- ① 予告的な気象情報は、発達した低気圧などにより大雨などによる災害が予想される場合、通常半日～1日程度前に、予告的な気象情報が発表される。このとき、竜巻などの激しい突風も予想される場合は、「竜巻などの激しい突風に注意」という言葉を用いて特段の注意を呼びかけられる情報をいう。
- ② 雷注意報は、積乱雲に伴う激しい現象（落雷・ひょう・急な強雨・突風）に対して注意を呼びかけられるが、竜巻などの激しい突風が予想される場合は、数時間前に「竜巻」を明記して注意を呼びかけられる情報をいう。
- ③ 竜巻注意情報は、積乱雲の下で発生する竜巻、ダウンバーストなどの激しい突風に対して注意

を呼びかける情報で、雷注意報を補足する情報として、各地の气象台等が担当地域を対象に発表する情報をいう。

具体的には、竜巻発生確度ナウキャストで発生確度2が現れた地域に発表されるほか、目撃情報が得られて竜巻、ダウンバーストなどの激しい突風が発生するおそれが高まったと判断した場合にも発表され、有効期間は発表から約1時間である。発表後速やかに防災機関や報道機関へ伝達される。

- ④ 竜巻発生確度は、気象ドップラーレーダーなどから「竜巻が今にも発生する（又は発生している）可能性の程度」を、気象庁が下表のように推定したものをいう。

*：適中率及び捕捉率は平成30年12月時点の値であり、過去30か月の検証により見直される。

発生確度2	竜巻などの激しい突風が発生する可能性があり注意が必要である。予測の適中率は7～14%程度*、捕捉率は50～70%程度*である。発生確度2となっている地域に竜巻注意情報が発表される。
発生確度1	竜巻などの激しい突風が発生する可能性がある。発生確度1以上の地域では、予測の適中率は1～7%程度*であり発生確度2に比べて低くなるが、捕捉率は80%程度*であり見逃しが少ない。

- ⑤ 竜巻発生確度ナウキャストは、竜巻の発生確度を10km格子単位で解析し、その1時間後（10～60分先）までの予測を気象庁が行うものをいう。

気象庁のホームページで見ることができ、10分ごとに更新される。また、「雨雲の動き（高解像度降水ナウキャスト）」においても表示させることができる。

- ⑥ 雷活動度は、雷監視システムによる雷放電の検知及びレーダー観測などを基にして、下表に示す活動度1～4で気象庁が表すものをいう。予測については、雷雲の移動方向に移動させるとともに、雷雲の盛衰の傾向も考慮される。

活動度	雷の状況	
4	激しい雷	落雷が多数発生している。
3	やや激しい雷	落雷がある。
2	雷あり	電光が見えたり雷鳴が聞こえる。落雷の可能性が高くなっている。
1	雷可能性あり	現在、雷は発生していないが、今後落雷の可能性がある。

- ⑦ 雷ナウキャストは、雷の激しさや雷の可能性を1km格子単位で解析し、その1時間後（10分～60分先）までの予測を気象庁が行うものをいう。

気象庁のホームページで見ることができ、10分ごとに更新される。また、「雨雲の動き（高解像度降水ナウキャスト）」においても表示させることができる。

また、雷ナウキャストでは、雷監視システムによる雷放電の検知数が多いほど激しい雷（活動度が高い：2～4）となる。雷放電を検知していない場合でも、雨雲の特徴から雷雲が解析（活動度2）され、雷雲が発達する可能性のある領域も解析（活動度1）される。

竜巻襲来の前兆

1. 前兆事象

(1) 空が急に暗くなる

積乱雲、かなとこ雲*¹、乳房雲*²等が日射を遮るため、夜のように異様に暗くなる。

大粒の雨が降り出す。

(2) 雷鳴が聞こえる

雷鳴、雷光が頻発*³する。

(3) 雹（ヒョウ）が降ってくる

強い上昇流である竜巻の隣で、強い下降流を生じ降雹を伴うことが多い。ただし、地上気温が高いと雹は地上に達するまでに溶ける。

(4) 冷たい風が吹き出す

下降流の冷気で、風速は 10～15m/s 程度。

(5) 草むらや土の匂いがする。

地上付近の温かい空気が上昇するため、その匂いを感じるものと考えられている。

2. 距離による前兆

(1) 遠くの前兆

「雷鳴が聞こえる」、「かなとこ雲が広がっている」、「乳房雲が雲底に見える」

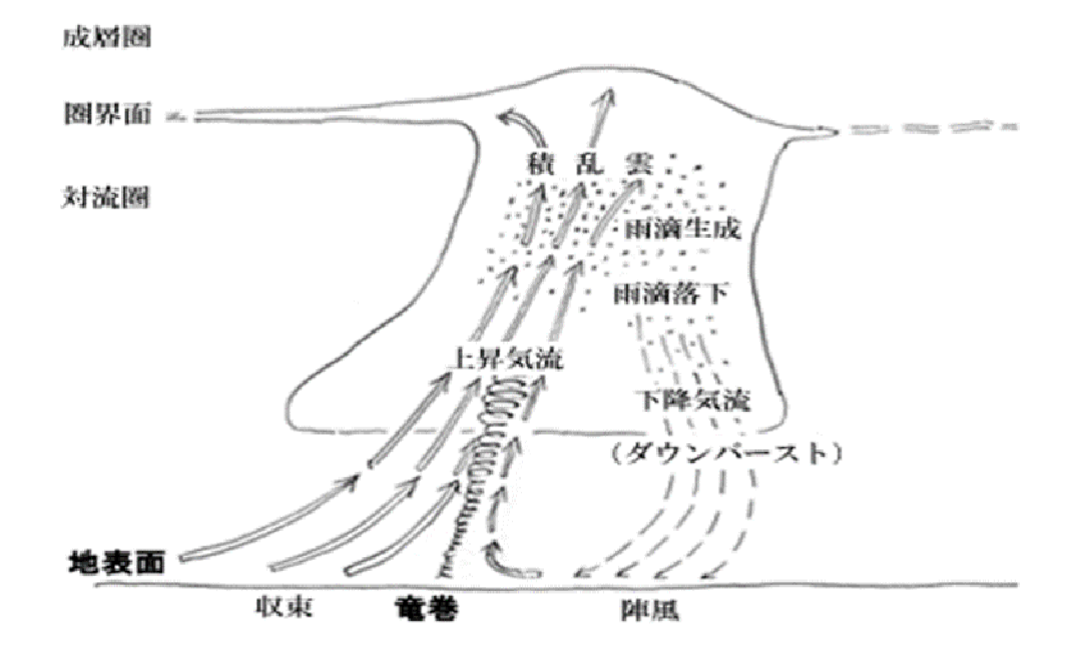
(2) 近くの前兆

「降雹」、「落雷」、「真っ暗になる」、「冷たい風を感じる」、「匂いを感じる」

(3) 竜巻目の状態

「耳鳴りがする」、「ゴーという音がする」、「渦が見える」

3. 竜巻のメカニズム



4. 竜巻の原因

温帯低気圧 (49%) : 全国、季節を問わず発生。発達した低気圧、寒冷前線通過時。

台風 (23%) : 台風の進行方向右側で、台風から比較的離れた場所で発生。

冬型 (14%) : 冬の日本海沿岸

停滞前線(梅雨前線) (8%)

* 1 : かなとこ雲とは

積乱雲は上昇気流によって発達していくが、対流圏界面まで到達すると、雲頂は圏界面を突き破れず、圏界面に沿って水平に伸びる。雲の形がかなとこに似ていることから、かなとこ雲という。

* 2 : 乳房雲とは

かなとこ雲等の雲底から、こぶ状にいくつも垂れ下がっている雲を乳房雲という。

* 3 : 落雷の頻度 (茨城県の例)

2012年5月6日12時35分に茨城県常総市に竜巻が発生した。このときの落雷頻度は、12時

20分から13時までで250回程度であった。また、竜巻がタッチダウンする前に落雷頻度のピークがあり、1分間当たり20回を超える落雷が確認されている。

なお、この竜巻の強さは気象庁の発表でF3であった。被害後の住宅の解析から局所的には最大100m/sを超える風速が計算されている。

出典「竜巻メカニズム・被害・身の守り方 小林文明著 成山堂書店」

<積乱雲の例>



<かなとこ雲の例>



<乳房雲の例>



設計竜巻荷重に対する構造健全性評価結果
(原子炉建物（格納容器を含む）及び原子炉附属建物
並びに主冷却機建物)

1. 建物の構造健全性評価

1.1 概要

原子炉建物（格納容器を含む）及び原子炉附属建物並びに主冷却機建物について、設計竜巻に対する構造健全性を評価する。評価は建物の耐力部材及び屋根スラブを対象とする。

耐力部材については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。

屋根スラブについては、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。

2. 耐力部材の評価

2.1 荷重条件

耐力部材評価に係る設計竜巻荷重は、「原子力発電所の竜巻影響評価ガイド」を踏まえ、設計竜巻の最大風速（ V_D ）等に基づき、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

2.1.1 設計竜巻の風圧力による荷重及び設計竜巻の気圧差による荷重

設計竜巻の風圧力による荷重及び設計竜巻の気圧差による荷重の設定点（質点）は、原子炉建物（格納容器を含む）及び原子炉附属建物について、GL+0.2m、GL+8.5m、GL+13.7m、GL+26.7m とする。なお、GL+26.7m については外周コンクリート壁を評価対象とする。主冷却機建物にあつては、GL+0.2m、GL+4.5m、GL+12.5m、GL+24.4m とする。設計竜巻の風圧力による荷重及び設計竜巻の気圧差による荷重の算定に用いる受圧面積は、対象とする質点について、その直上の質点との中間高さから、その直下の質点との中間高さまでを、当該質点の領域として算出した（第 2.1.1 図及び第 2.1.2 図参照）。ここでは、パラペットを考慮した。なお、当該質点の構成は、地震応答解析モデルと同じである。

2.1.2 設計飛来物による衝撃荷重

設計飛来物による衝撃荷重は、原子炉建物（格納容器を含む）及び原子炉附属建物にあつては竜巻ガイドに記載の鋼製材を、主冷却機建物にあつては設計飛来物のうちワゴン車を想定して設定し 2.1.1 で定めた設定点の頂部に作用させる。

2.1.1 原子炉建物（格納容器を含む）及び原子炉附属建物の構造健全性評価結果

原子炉建物（格納容器を含む）及び原子炉附属建物の耐力部材評価結果を第 2.1.1 表に示す。設計竜巻による複合荷重を用いて算出した層せん断力が、保有水平耐力を上回らず、耐力部材は健全性を損なわない結果を得た。

2.1.2 主冷却機建物の構造健全性評価結果

主冷却機建物の耐力部材評価結果を第 2.1.2 表に示す。設計竜巻による複合荷重を用いて算出した層せん断力が、保有水平耐力を上回らず、耐力部材は健全性を損なわない結果を得た。

第 2.1.1 表 原子炉建物（格納容器を含む）及び原子炉附属建物の耐力部材評価結果

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	2,651	109,079	0.024	良
	13.7	3,179	7,894	584,305	0.014	良
	8.5	10,333	14,476	494,206	0.029	良
	0.2	15,124	18,862	1,730,063	0.011	良
EW	26.7	0	2,651	111,240	0.024	良
	13.7	3,086	7,850	665,892	0.012	良
	8.5	10,686	14,840	735,907	0.020	良
	0.2	15,584	19,324	1,696,213	0.011	良

第 2.1.2 表 主冷却機建物の耐力部材評価結果

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	4,131	38,924	0.106	良
	12.5	8,743	14,287	165,498	0.086	良
	4.5	16,077	21,026	218,966	0.096	良
	0.2	18,893	23,614	487,725	0.048	良
EW	24.4	1,966	4,559	26,867	0.170	良
	12.5	6,864	10,378	184,931	0.056	良
	4.5	10,012	13,260	193,742	0.068	良
	0.2	11,164	14,314	688,259	0.021	良

参考：衝撃荷重の算定に用いた竜巻ガイド記載の鋼製材の仕様（「別紙 5 設計竜巻荷重の設定における設計飛来物の選定」参照）

飛来物の種類	棒状物
	鋼製材
サイズ (m)	4.2×0.30×0.20
質量 (kg)	135
最大水平速度 (m/s)	51
最大鉛直速度 (m/s)	34
運動エネルギー (kJ)	176
衝撃荷重 (kN)	1,760

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。

受圧面	受圧面積(m ²)	備考
①	208.7	円筒部（上 1/2）
②	208.7	円筒部（下 1/2）
③	265.2	主排気筒
④	33.8	2 階屋上出入口階段室（風上、風下）
⑤	42.3	2 階屋上パラペット（風上、風下）
⑥	146.6	2 階壁面（風上、風下）
⑦	146.6	2 階壁面（風上、風下）
⑧	4.5	1 階屋上パラペット（風上、風下）
⑨	259.4	1 階壁面（風上、風下）
⑩	259.4	1 階壁面（風上、風下）
⑪	12.5	1 階壁面（風上、風下）

第 2.1.1 図（1/2） 原子炉建物及び原子炉附属建物の受圧面図（NS 方向）

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。

受圧面	受圧面積(m ²)	備考
①	208.7	円筒部（上 1/2）
②	208.7	円筒部（下 1/2）
③	265.2	主排気筒
④	9.0	パイプシャフト室（風上、風下）
⑤	47.9	2階屋上パラペット（風上、風下）
⑥	166.1	2階壁面（風上、風下）
⑦	166.1	2階壁面（風上、風下）
⑧	4.5	1階屋上パラペット（風上、風下）
⑨	265.2	1階壁面（風上、風下）
⑩	265.2	1階壁面（風上、風下）
⑪	12.8	1階壁面（風上、風下）

第 2.1.1 図 (2/2) 原子炉建物及び原子炉附属建物の受圧面図 (EW 方向)

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。

受圧面	受圧面積(m ²)	備考
①	9.4	4階屋上パラペット（風上、風下）
②	86.3	4階壁面（風上、風下）
③	86.3	4階壁面（風上、風下）
④-1	31.2	屋上空調室（風上、風下）
④-2	24.4	屋上空調室（風上、風下）
⑤	43.6	2階屋上パラペット（風上、風下）
⑥-1	124.9	主冷却機 2 基
⑥-2	124.9	主冷却機 2 基
⑦-1	268.0	2階壁面（風上、風下）
⑦-2	11.5	ボイラー排気塔(上)
⑧-1	268.0	2階壁面（風上、風下）
⑧-2	4.0	ボイラー排気塔(中)
⑧-3	2.0	ガラリ(上)（風上、風下）
⑨-1	144.1	1階壁面（風上、風下）
⑨-2	2.2	ボイラー排気塔(下 1)
⑨-3	2.2	ガラリ(下 1)（風上、風下）
⑩-1	144.1	1階壁面（風上、風下）
⑩-2	2.2	ボイラー排気塔(下 2)
⑩-3	2.2	ガラリ(下 2)（風上、風下）
⑪-1	13.4	1階壁面（風上、風下）
⑪-2	0.2	ボイラー排気塔(下 3)
⑪-3	0.2	ガラリ(下 3)（風上、風下）

第 2.1.2 図 (1/2) 主冷却機建物の受圧面図 (NS 方向)

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。

受圧面	受圧面積(m ²)	備考
①	12.2	4階屋上パラペット（風上、風下）
②	111.6	4階壁面（風上、風下）
③	111.6	4階壁面（風上、風下）
④	51.0	屋上空調室（風上、風下）
⑤	17.8	2階屋上パラペット（風上、風下）
⑥-1	47.0	主冷却機 1 基
⑥-2	47.0	主冷却機 1 基
⑦-1	109.6	2階壁面（風上、風下）
⑦-2	2.9	ガラリ（上）（風上、風下）
⑦-3	2.9	ガラリ（上）（風上、風下）
⑦-4	11.5	ボイラー排気塔（上）
⑧-1	109.6	2階壁面（風上、風下）
⑧-2	4.0	ガラリ（上）（風上、風下）
⑧-3	4.0	ガラリ（上）（風上、風下）
⑧-4	4.0	ボイラー排気塔（中）
⑨-1	58.9	1階壁面（風上、風下）
⑨-2	2.2	ガラリ（下1）（風上、風下）
⑨-3	2.2	ボイラー排気塔（下1）
⑩-1	58.9	1階壁面（風上、風下）
⑩-2	1.0	ガラリ（下2）（風上、風下）
⑩-3	2.2	ボイラー排気塔（下2）
⑪-1	5.5	1階壁面（風上、風下）
⑪-2	0.2	ボイラー排気塔（下3）

第 2.1.2 図 (2/2) 主冷却機建物の受圧面図 (EW 方向)

3. 屋根スラブの評価

設計竜巻による複合荷重によって竜巻防護施設の外殻となる施設の屋根スラブに生じる吹上荷重により、屋根スラブが飛来物とならないことを確認する。

評価方法は、設計竜巻によって竜巻防護施設の外殻となる施設の屋根スラブに生じる吹上荷重(気圧差荷重(W_p)並びに風圧力による荷重及び気圧差荷重による複合荷重($W_w+0.5W_p$))によって、屋根スラブに発生する応力が短期許容応力値を上回らないことを確認する。なお、評価には屋根スラブの固定荷重、積載荷重を考慮するものとし、これらは重力によって下向きの荷重が作用しているものとする。

3.1 吹上荷重の算定

設計竜巻によって竜巻防護施設の外殻となる施設の屋根スラブに生じる吹上荷重は、以下の式で算定する。

風圧力: W_w/A

$$\frac{W_w}{A} = \frac{P_D}{A} = \frac{q \times G \times C_f \times A}{A} = q \times G \times C_f = 6100(\text{N/m}^2) \rightarrow -6.10(\text{kN/m}^2)(\text{上向き})$$

q : 設計用速度圧 (N/m^2) ※ 6,100 N/m^2 (「原子力発電所の竜巻影響評価ガイド」より)

G : ガスト影響係数 (—) ※ 1.0 (「原子力発電所の竜巻影響評価ガイド」より)

C_f : 風力係数 (—) ※ 施設の形状や風圧力が作用する部位 (屋根、壁等) に応じて、「建設省告示第 1454 号」(平成 12 年 5 月 31 日制定)により算定

気圧差による圧力: W_p/A

$$\frac{W_p}{A} = \frac{\Delta P_{\max} \times A}{A} = \Delta P_{\max} = 88.1(\text{hPa}) = -8.81(\text{kN/m}^2)(\text{上向き})$$

吹上荷重: W_t

$$W_t = \frac{W_w + 0.5W_p}{A} = \frac{W_w}{A} + 0.5 \frac{W_p}{A} = -10.51(\text{kN/m}^2)(\text{上向き})$$

3.2 吹上荷重によって屋根スラブが受ける曲げモーメント

算定する代表屋根スラブの位置を第 3.2.1 図及び第 3.2.2 図の各建物の平面図に示す。屋根スラブは、等分布荷重を受ける四辺固定スラブであり、スラブに発生する応力は、荷重状態とスラブ周辺の支持条件で変化する。設計竜巻によって、竜巻防護施設の外殻となる施設の屋根スラブに生じる吹上荷重により屋根スラブに発生する単位幅当たりの曲げモーメントは、以下の式で算定する。

(1) 短辺 X 方向の曲げモーメント

① 両端最大曲げモーメント

$$M_{x1} = -\frac{1}{12} \cdot W_x \cdot L_x^2$$

$$W_x = \frac{L_y^4}{L_x^4 + L_y^4} \cdot W$$

L_x : 短辺有効スパン(m) / L_y : 長辺有効スパン(m)

W : 単位面積あたり屋根スラブが受ける荷重(kN/m²)

② 中央部最大正曲げモーメント

$$M_{x2} = \frac{1}{18} \cdot W_x \cdot L_x^2$$

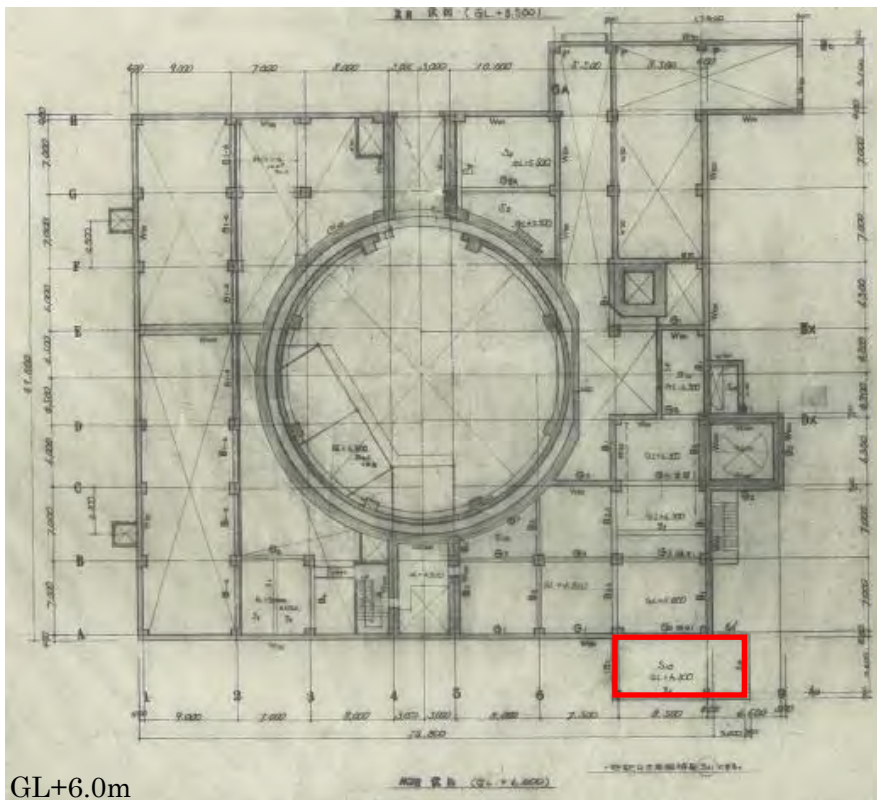
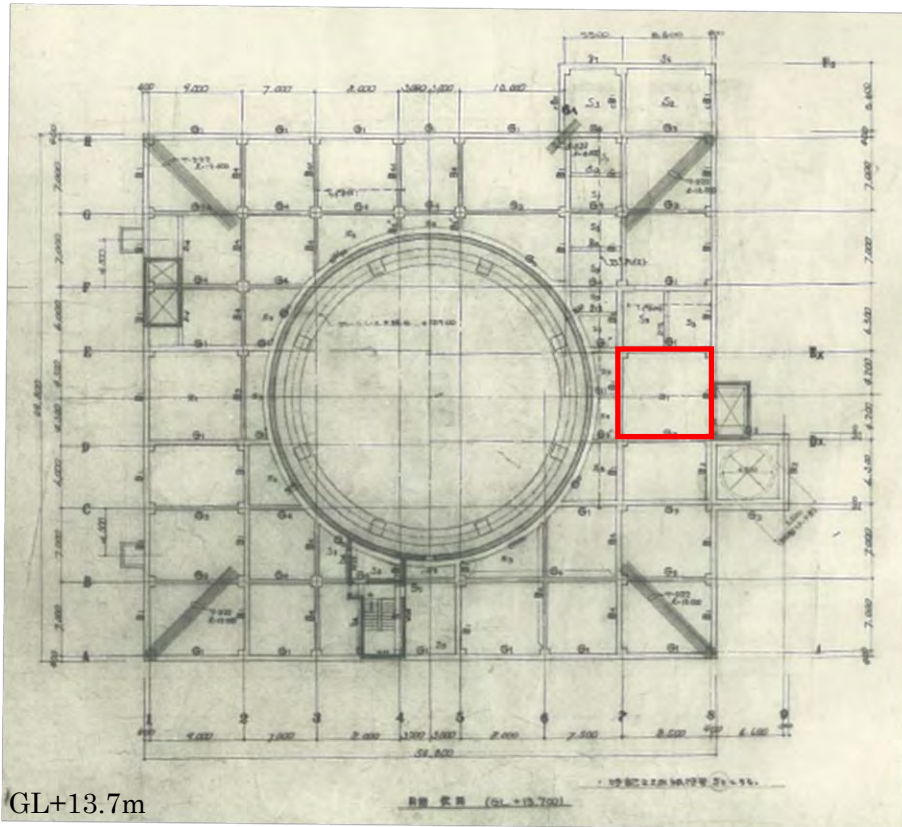
(2) 長辺 Y 方向の曲げモーメント

① 両端最大曲げモーメント

$$M_{y1} = -\frac{1}{24} \cdot W \cdot L_x^2$$

② 中央部最大正曲げモーメント

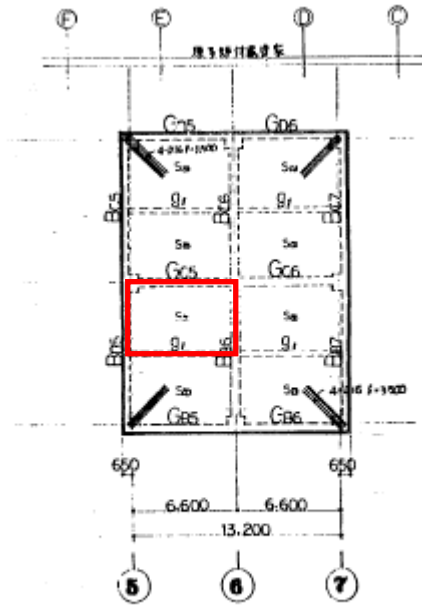
$$M_{y2} = \frac{1}{36} \cdot W \cdot L_x^2$$



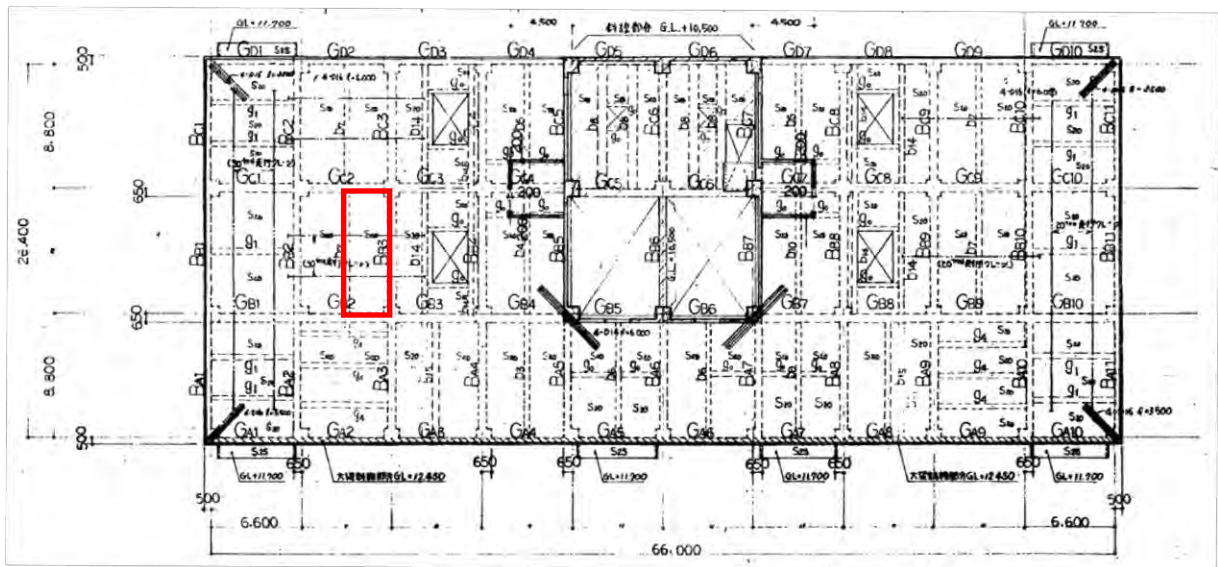
: 評価対象位置

第 3.2.1 図 原子炉附属建物屋上の平面図

6 条(4)-別紙 8-10



GL+24.4m



GL+12.5m

: 評価対象位置

第 3.2.2 図 主冷却機建物屋上の平面図

3.3 短期許容曲げモーメント

屋根スラブの単位幅当たりの短期許容曲げモーメントは、以下の式で算定する。

$$M_a = a \times f_t \times j = a \times f_t \times \frac{7}{8} \times d$$

M_a : 短期許容曲げモーメント (∵ 竜巻荷重は短期荷重)

a : 鉄筋断面積

f_t : 鉄筋の短期引張許容応力度

(平成 12 年建設省告示第 2464 号に基づき、鉄筋の基準強度の 1.1 倍の数値とする)

d : スラブの有効せい

j : スラブの有効丈

$$j = \frac{7}{8} \times d$$

3.4 評価結果

屋根スラブの評価結果を第 3.4.1 表及び第 3.4.2 表に示す。下向きの固定荷重が大きいため、設計竜巻によって生じる吹上荷重（上向き）により、上向きの大きな曲げモーメントの発生がなく、屋根スラブに発生する応力が、短期許容曲げモーメントを上回らないことを確認した。

第 3.4.1 表 原子炉附属建物の屋根スラブの評価結果

項目	記号	単位	原子炉附属建物				原子炉附属建物			
G. L. レベル	—	m	+13.7m				+6.0m			
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）	W _w /A	kN/m ²	-6.10				-6.10			
気圧差による圧力荷重（上向き）	W _p /A	kN/m ²	-8.81				-8.81			
吹上荷重（上向き）	W _t	kN/m ²	-10.51				-10.51			
設計荷重	W	kN/m ²	0.89				4.32			
			0.45				4.12			
吹上荷重による曲げモーメント	M _x	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	M _a	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

第 3.4.2 表 主冷却機建物の屋根スラブの評価結果

名称	記号	単位	主冷却機建物				主冷却機建物			
G. L. レベル		m	+24.4m				+12.5m			
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			
			-3.60				-1.73			
吹上荷重による曲げモーメント	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

設計竜巻荷重に対する構造健全性評価結果
(第一使用済燃料貯蔵建物及び第二使用済燃料貯蔵建物)

1. 建物の構造健全性評価

1.1 概要

第一使用済燃料貯蔵建物及び第二使用済燃料貯蔵建物について、設計竜巻に対する構造健全性を評価する。評価は建物の耐力部材を対象とする。

耐力部材については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。

2. 耐力部材の評価

2.1 荷重条件

耐力部材評価に係る設計竜巻荷重は、「原子力発電所の竜巻影響評価ガイド」を踏まえ、設計竜巻の最大風速 (V_D) 等に基づき、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

2.1.1 設計竜巻の風圧力による荷重及び設計竜巻の気圧差による荷重

設計竜巻の風圧力による荷重及び設計竜巻の気圧差による荷重の設定点（質点）は、第一使用済燃料貯蔵建物について、GL+0.2m、GL+4.7m、GL+10.4m、GL+16.4m とする。第二使用済燃料貯蔵建物にあつては、GL+0.2m、GL+5.1m、GL+9.6m、GL+16.6m とする。設計竜巻の風圧力による荷重及び設計竜巻の気圧差による荷重の算定に用いる受圧面積は、対象とする質点について、その直上の質点との中間高さから、その直下の質点との中間高さまでを、当該質点の領域として算出した（第 2.1.1 図及び第 2.1.2 図参照）。ここでは、パラペットを考慮した。なお、当該質点の構成は、地震応答解析モデルと同じである。

2.1.2 設計飛来物による衝撃荷重

設計飛来物による衝撃荷重は、竜巻ガイドに記載の鋼製材を想定して設定し、2.1.1 で定めた設定点の頂部に作用させる。

2.1.3 第一使用済燃料貯蔵建物の構造健全性評価結果

第一使用済燃料貯蔵建物の耐力部材評価結果を第 2.1.1 表に示す。設計竜巻による複合荷重を用いて算出した層せん断力が、保有水平耐力を上回らず、耐力部材は健全性を損なわない結果を得た。

2.1.4 第二使用済燃料貯蔵建物の構造健全性評価結果

第二使用済燃料貯蔵建物の耐力部材評価結果を第 2.1.2 表に示す。設計竜巻による複合荷重を用いて算出した層せん断力が、保有水平耐力を上回らず、耐力部材は健全性を損なわない結果を得た。

第 2.1.1 表 第一使用済燃料貯蔵建物の耐力部材評価結果

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	3,576	76,850	0.024	良
	10.4	5,255	7,170	173,736	0.031	良
	4.7	8,284	9,942	169,129	0.049	良
	0.2	9,738	11,274	540,101	0.018	良
EW	16.4	1,055	2,835	76,625	0.014	良
	10.4	3,620	5,363	170,245	0.021	良
	4.7	6,065	7,601	191,997	0.032	良
	0.2	7,239	8,676	926,289	0.008	良

第 2.1.2 表 第二使用済燃料貯蔵建物の耐力部材評価結果

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	4,110	95,275	0.025	良
	9.6	3,081	5,745	184,165	0.022	良
	5.1	5,334	7,807	218,484	0.028	良
	0.2	7,035	9,424	497,021	0.015	良
EW	16.6	2,275	4,058	141,229	0.016	良
	9.6	3,065	5,738	203,971	0.020	良
	5.1	5,330	7,812	217,203	0.028	良
	0.2	7,475	9,775	476,942	0.017	良

参考：衝撃荷重の算定に用いた竜巻ガイド記載の鋼製材の仕様（「別紙 5 設計竜巻荷重の設定における設計飛来物の選定」参照）

飛来物の種類	棒状物
	鋼製材
サイズ (m)	4.2×0.30×0.20
質量 (kg)	135
最大水平速度 (m/s)	51
最大鉛直速度 (m/s)	34
運動エネルギー (kJ)	176
衝撃荷重 (kN)	1,760

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。

受圧面	受圧面積(m ²)	備考
①	25.3	3階屋上パラペット（風上、風下）
②	101.1	3階壁面（風上、風下）
③	101.1	3階壁面（風上、風下）
④	45.5	2階屋上パラペット（風上、風下）
⑤	18.9	排気塔
⑥	96.1	2階壁面（風上、風下）
⑦	96.1	2階壁面（風上、風下）
⑧	75.8	1階壁面（風上、風下）
⑨	75.8	1階壁面（風上、風下）
⑩	6.7	1階壁面（風上、風下）

第 2.1.1 図 (1/2) 第一使用済燃料貯蔵建物の受圧面図 (NS 方向)

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。

受圧面	受圧面積(m ²)	備考
①	15.0	3階屋上パラペット（風上、風下）
②	59.9	3階壁面（風上、風下）
③-1	59.9	3階壁面（風上、風下）
③-2	8.3	2階屋上出入口（風上、風下）
④	13.5	2階屋上パラペット（風上、風下）
⑤	18.9	排気塔
⑥	77.5	2階壁面（風上、風下）
⑦	77.5	2階壁面（風上、風下）
⑧	61.2	1階壁面（風上、風下）
⑨	61.2	1階壁面（風上、風下）
⑩	5.4	1階壁面（風上、風下）

第 2.1.1 図 (2/2) 第一使用済燃料貯蔵建物の受圧面図 (EW 方向)

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。

受圧面	受圧面積(m ²)	備考
①	5.4	4階屋上パラペット（風上、風下）
②	18.5	4階壁面（風上、風下）
③	18.5	4階壁面（風上、風下）
④	24.5	3階屋上パラペット（風上、風下）
⑤	95.2	3階壁面（風上、風下）
⑥	95.2	3階壁面（風上、風下）
⑦	0.0	2階屋上パラペット（風上、風下）
⑧	20.5	排気塔
⑨	61.2	2階壁面（風上、風下）
⑩	61.2	2階壁面（風上、風下）
⑪	66.6	1階壁面（風上、風下）
⑫	66.6	1階壁面（風上、風下）
⑬	54.4	地下1階壁面（風上、風下）

第 2. 1. 2 図 (1/2) 第二使用済燃料貯蔵建物の受圧面図 (NS 方向)

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。

受圧面	受圧面積(m ²)	備考
①	4.9	4階屋上パラペット（風上、風下）
②	16.7	4階壁面（風上、風下）
③	16.7	4階壁面（風上、風下）
④	24.6	3階屋上パラペット（風上、風下）
⑤	95.7	3階壁面（風上、風下）
⑥	95.7	3階壁面（風上、風下）
⑦	9.5	2階屋上パラペット（風上、風下）
⑧	20.5	排気塔
⑨	61.5	2階壁面（風上、風下）
⑩	61.5	2階壁面（風上、風下）
⑪	67.0	1階壁面（風上、風下）
⑫	67.0	1階壁面（風上、風下）
⑬	54.7	地下1階壁面（風上、風下）

第 2.1.2 図 (2/2) 第二使用済燃料貯蔵建物の受圧面図 (EW 方向)

設計竜巻荷重に対する構造健全性評価結果
(主冷却機のうち屋外部分)

1. 概要

主冷却機のうち屋外部分について、設計竜巻に対する構造健全性を評価する。設計竜巻荷重は、設計竜巻の最大風速(V_D)等に基づき、風圧力による荷重及び設計飛来物による衝撃荷重を組み合わせた複合荷重とし、当該複合荷重を用いて算出した応力が評価基準値を下回ることを確認する。

2. 解析コード及び解析モデル

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。なお、屋外部分及び屋内部分を含めた全体系でモデル化する。評価対象とするダクトにあつては、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。ダクトを支持している基礎ボルト又は接続ボルトにあつては、発生する応力が許容値以下であることを確認する。解析モデルの概要を第1図に示す。また、質点重量を第1表に示す。

3. 荷重条件

設計竜巻荷重は、「原子力発電所の竜巻影響評価ガイド」を踏まえ、設計竜巻の最大風速(V_D)等に基づき、風圧力による荷重 W_W 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。

$$W_T = W_W + W_M$$

W_T : 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_M : 設計飛来物による衝撃荷重

3.1 設計竜巻の風圧力による荷重

設計竜巻の風圧力による荷重を第2表及び第3表に示す（算定式等については、「別紙4 風圧力及び気圧差による圧力の設定」参照）。

3.2 設計飛来物による衝撃荷重

主冷却機のうち屋外部分は、主冷却機建物の屋上に位置する。設計飛来物の飛散高さ及び投影面積を考慮し、コンクリートブロック（初期高さ 12.5m）の衝突を想定する。なお、当該飛来物の衝撃荷重は 210kN である（「別紙5 設計竜巻荷重の設定における設計飛来物の選定」参照）。

第1表 主冷却機（屋外部分）の質点重量

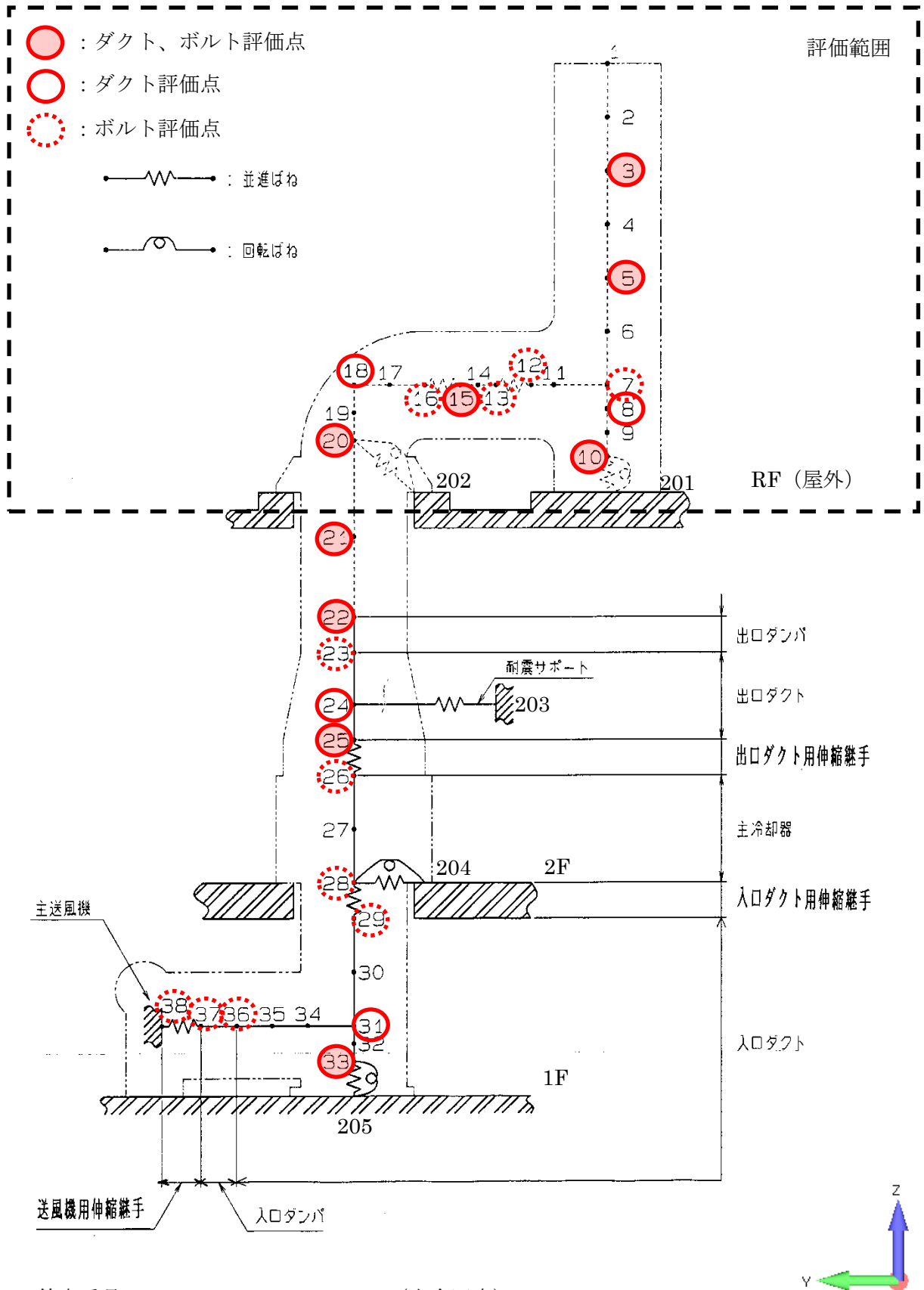
部位	質点番号	要素番号	G.L. (m)	質点重量 (N)
屋外ダクト1	1		26.0	6,963
	2	1	24.1	13,926
	3	2	22.2	14,809
屋外ダクト2	4	3	20.2	15,593
	5	4	18.2	16,966
屋外ダクト3	6	5	17.0	18,339
	7	6	15.9	7,355
	8	7	15.7	19,222
	9	8	14.4	30,205
屋外ダクト (鉛直部)	10	9	13.2	0
	7			
	11	10	15.9	2,452
	12	11	15.9	7,454
	13	12	15.9	8,042
	14	13	15.9	5,884
伸縮継手	15	14	15.9	8,042
	16	15	15.9	9,611
屋外ダクト4	17	16	15.9	9,023
	18	17	15.9	10,003
	19	18	14.9	16,476
	20	19	13.9	0
	21	20	12.5	18,927
屋外ダクト (貫通部)				

第2表 主冷却機のうち屋外部分の風荷重(EW方向)

質点 番号	要素 番号	部位	EW方向				
			受圧面積 (m ²)	速度圧 (N/m ²)	ガス 影響係数 (-)	風力係数 (-)	風荷重 (N)
1	1	屋外ダクト1	6.140	6,100	1.0	2.1	78,654
2			6.210	6,100	1.0	2.1	79,551
3	2	屋外ダクト2	6.350	6,100	1.0	2.1	81,344
4			5.855	6,100	1.0	2.1	75,003
5	3	屋外ダクト3	2.645	6,100	1.0	2.1	33,883
6			0.000	6,100	1.0	2.1	0
7	6	屋外ダクト3	0.000	6,100	1.0	2.1	0
8			0.000	6,100	1.0	2.1	0
9	8	屋外ダクト (鉛直部)	0.000	6,100	1.0	2.1	0
10			2.060	6,100	1.0	2.1	26,389
10 7	10	屋外ダクト (鉛直部)	0.000	6,100	1.0	2.1	0
11			0.000	6,100	1.0	2.1	0
12	11	屋外ダクト (鉛直部)	0.000	6,100	1.0	2.1	0
13	12	伸縮継手	0.000	6,100	1.0	2.1	0
14	13	屋外ダクト4	0.000	6,100	1.0	2.1	0
15			0.000	6,100	1.0	2.1	0
16	14	伸縮継手	0.000	6,100	1.0	2.1	0
17	16	屋外ダクト5	0.000	6,100	1.0	2.1	0
18			3.485	6,100	1.0	2.1	44,643
19	18	屋外ダクト5	5.135	6,100	1.0	2.1	65,780
20			4.515	6,100	1.0	2.1	57,838
21	20	屋外ダクト (貫通部)	2.865	6,100	1.0	2.1	36,701

第3表 主冷却機のうち屋外部分の風荷重(NS方向)

質点 番号	要素 番号	部位	NS方向				
			受圧面積 (m ²)	速度圧 (N/m ²)	ガスト 影響係数 (-)	風力係数 (-)	風荷重 (N)
1	1	屋外ダクト1	6.140	6,100	1.0	2.1	78,654
2			6.210	6,100	1.0	2.1	79,551
3	3	屋外ダクト2	6.350	6,100	1.0	2.1	81,344
4			5.735	6,100	1.0	2.1	73,466
5	5	屋外ダクト3	4.215	6,100	1.0	2.1	53,995
6			2.480	6,100	1.0	2.1	31,769
7			1.655	6,100	1.0	2.1	21,201
8	8	屋外ダクト (鉛直部)	2.715	6,100	1.0	2.1	34,780
9			3.910	6,100	1.0	2.1	50,088
10			1.580	6,100	1.0	2.1	20,240
11			2.545	6,100	1.0	2.1	32,602
12	12	伸縮継手	1.875	6,100	1.0	2.1	24,019
13	13	屋外ダクト4	2.440	6,100	1.0	2.1	31,257
14			2.440	6,100	1.0	2.1	31,257
15	15	伸縮継手	1.845	6,100	1.0	2.1	23,635
16	16	屋外ダクト5	2.200	6,100	1.0	2.1	28,182
17			2.385	6,100	1.0	2.1	30,552
18			2.400	6,100	1.0	2.1	30,744
19			4.155	6,100	1.0	2.1	53,226
20	20	屋外ダクト (貫通部)	2.875	6,100	1.0	2.1	36,829
21							



節点番号 : 201、202、203、204、205 (完全固定)

風向 : X 方向 (NS 方向)、Y 方向 (EW 方向)

第1図 解析モデルの概要

4. 評価結果

4.1 ダクト

(1) 発生モーメント及びせん断応力

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及びせん断応力は、以下の式で求める。発生モーメント・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。なお、積雪荷重については、下降流の竜巻通過時や竜巻通過前の積雪は、竜巻により吹き飛ばされること、また、当該ダクトが、原子炉運転時において高温環境にあり、積雪が発生する状況にないことを踏まえ、積雪高さを 0cm とし無視することとした。

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

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)

$$\tau = \frac{Q}{2(As \cdot N + t \cdot b)}$$

ここで、

τ : 自重、熱荷重、設計竜巻複合荷重によりダクトに発生するせん断応力 (N/mm²)

Q : 自重、熱荷重、設計竜巻複合荷重によりダクトに発生するせん断力 (N)

As : 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 : ダクトの水平幅 (mm)

(2) 許容値

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。座屈応力度は、「鋼構造座屈設計指針 (2009)」から求める。なお、求めた座屈応力度がダクト材の設計降伏点 S_y を超える場合は、 S_y を座屈応力度とする。また、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。

$$M_{cr} = \sigma_{icr} \cdot (A_s \cdot N + t \cdot b) \cdot L$$

$$\sigma_{icr} = \min\left(k_c \cdot \frac{\pi^2 \cdot D}{b^2 \cdot t}, S_y\right)$$

$$D = \frac{E \cdot t^3}{12(1 - \nu^2)}$$

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)

S_y : ダクト材 (SS400) の設計降伏点 (N/mm²)

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 (-)

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

$1.5f_s^*$: 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)

(3) 評価結果

各ダクト材の評価結果を第 4 表及び第 5 表に示す。弾性座屈に対する検定比は最大 0.65 (屋外ダクト (鉛直部)) であり、弾性座屈が発生しないことを確認した。また、せん断応力は最大 15.4(N/mm²)であり、許容値(110N/mm²)を下回ることを確認した。

第4表 ダクト材の評価結果 (EW 方向)

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)	圧縮+曲げ			せん断		
								発生モーメント M (N・mm)	許容モーメント M _{crrp} (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

6条(4)-別紙10-8

第5表 ダクト材の評価結果 (NS 方向)

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)	圧縮+曲げ			せん断		
								発生モーメント M (N・mm)	許容モーメント M _{crrp} (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	1.4072E+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		2.545	6,100	1.0	2.1	32,602						
15.9	13	屋外ダクト4	2.440	6,100	1.0	2.1	31,257	1.4374E+08	7.2556E+09	0.02	11.6	110	0.11
15.9	14		2.440	6,100	1.0	2.1	31,257						
15.9	16	屋外ダクト5	2.200	6,100	1.0	2.1	28,182	3.1224E+08	9.7041E+09	0.04	8.9	110	0.09
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	5.1203E+08	7.2556E+09	0.08	13.9	110	0.13
14.9	19		4.155	6,100	1.0	2.1	53,226						
13.9	20	屋外ダクト(貫通部)	2.875	6,100	1.0	2.1	36,829	6.5034E+08	5.4953E+09	0.12	9.7	110	0.09

6条(4)-別紙10-9

4.2 ボルト

(1) 引張応力及びせん断応力

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。なお、積雪荷重については、下降流の竜巻通過時や竜巻通過前の積雪は、竜巻により吹き飛ばされること、また、当該ダクトが、原子炉運転時において高温環境にあり、積雪が発生する状況にないことを踏まえ、積雪高さを 0cm とし無視することとした。

$$\sigma = \frac{F_t}{n_f \cdot A_b}$$

$$F_t = \frac{(|M_D| + |M_T| + |M_W|)}{L} + (W_D + W_T + |W_W|)$$

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)

(2) 許容値

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

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

$$1.5f_{ts}^* = 1.5f_{to}^*$$

$1.5f_{ts}^*$: 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)

(3) 評価結果

各ボルトの評価結果を第6表及び第7表に示す。引張応力は最大 105N/mm² (屋外ダクト3の接続ボルト) であり、許容値 (137 N/mm²) を下回ることを確認した。また、せん断応力は最大 48N/mm² (屋外ダクト5とダクトの接続ボルト) であり、許容値 (106 N/mm²) を下回ることを確認した。

第6表 ボルトの評価結果 (EW 方向)

質点番号	部位	ボルト 材質	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 1.5fs* (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	SS400	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	SS400	80	106	65	46	0.81	0.44
7	屋外ダクト3の接続ボルト	SS400	137	106	105	21	0.77	0.19
10	屋外ダクト3(鉛直部)の基礎ボルト	SS400	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	SS400	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	SS400	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	SS400	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	SS400	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	SS400	114	106	44	47	0.39	0.45
21	屋外ダクト5(貫通部)の基礎ボルト	SS400	124	106	39	28	0.31	0.27

第7表 ボルトの評価結果 (NS方向)

質点番号	部位	ボルト 材質	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 1.5fs* (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	SS400	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	SS400	80	106	65	46	0.81	0.44
7	屋外ダクト3の接続ボルト	SS400	137	106	108	22	0.79	0.21
10	屋外ダクト3(鉛直部)の基礎ボルト	SS400	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	SS400	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	SS400	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	SS400	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	SS400	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	SS400	110	106	50	48	0.45	0.45
21	屋外ダクト5(貫通部)の基礎ボルト	SS400	120	106	44	30	0.37	0.28

設計竜巻荷重に対する構造健全性評価結果
(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)

1. 概要

非常用ディーゼル電源系に関連する冷却塔は、建築基準法に基づく立地地域（大洗町）の基準風速（34m/s）において、その機能を確保できるように設計する。竜巻（100m/s）時に、その機能を担保することは困難であり、防風壁により、冷却塔が通常的环境条件で運転される状況を整える。

2. 設計方針

非常用ディーゼル電源系に関連する冷却塔について、34m/sの風速に対して維持する機能は、「ディーゼル発電機の冷却水」の冷却機能である。非常用ディーゼル電源系に関連する冷却塔本体にあつては、建築基準法に基づく大洗町の基準風速である、34m/sの風による荷重により機能を維持できるように設計する。

防風壁の要求仕様は、竜巻による最大風速 100m/s の風が冷却塔本体位置にて 34m/s の風速に低減されることである。屋外に設置する冷却塔は、一般的に建築基準法に基づく基準風速において、その機能を確保できるように設計される。屋外に設置する冷却塔は、一般的に建築基準法に基づく基準風速において、その機能を確保できるように設計される。竜巻（100m/s）時に、その機能を担保することは困難であり、防風壁により、冷却塔が通常的环境条件で運転される状況を整える。また、構造健全性の観点では、風圧力+設計飛来物（コンクリートブロック）の衝突により倒壊しないものとする。

3. 評価条件

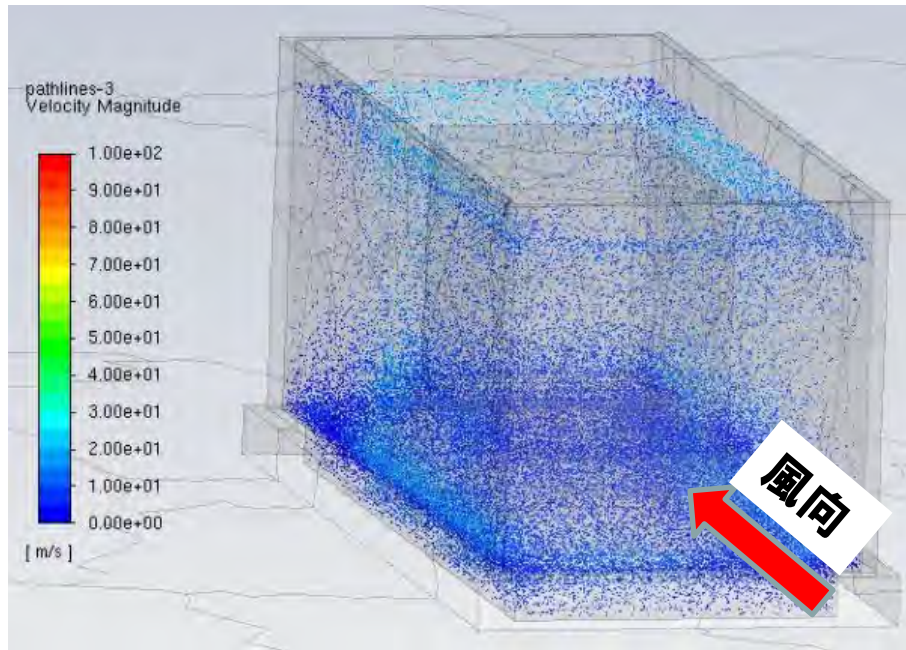
数値流体力学（CFD）計算コード FLUENT を用いて、防風壁による風圧力の低減効果を評価し、冷却塔本体の位置において風速が 34m/s を下回ることを確認する。

4. 評価結果

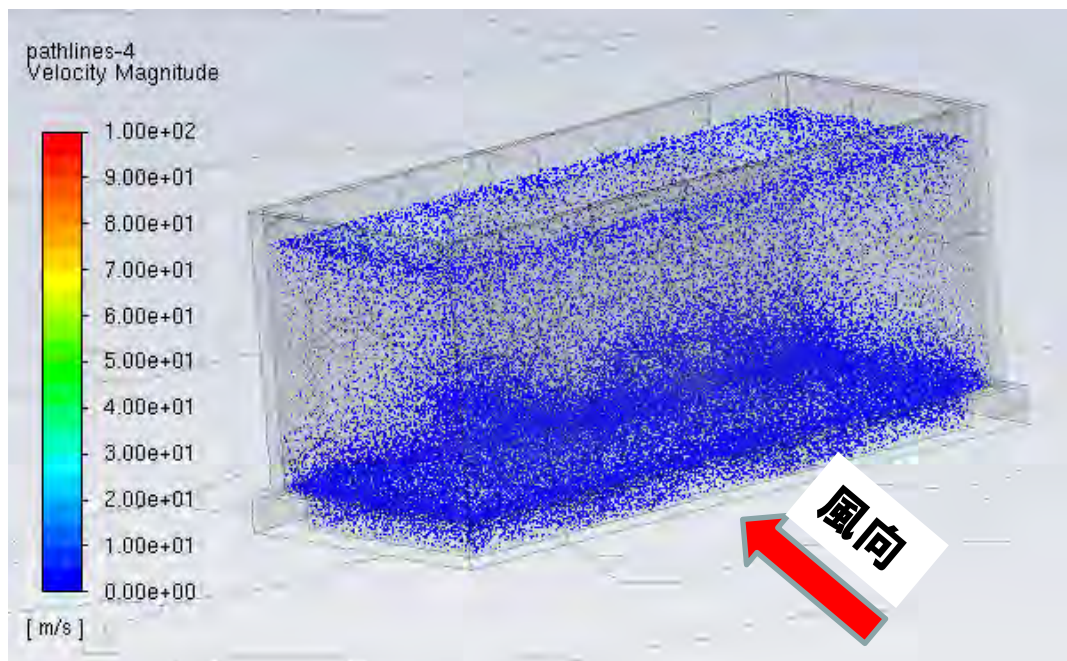
非常用ディーゼル電源系に関連する冷却塔に EW 方向、NS 方向の各風向の 100m/s の風を受圧させた場合、防風壁内の冷却塔本体位置における最大風速は 28.6m/s であり、34m/s を下回ることを確認した（第 1 表、第 1 図、第 2 図参照）。

第 1 表 防風壁による風圧力低減効果

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



第 1 図 EW 方向防風壁内風速分布



第 2 図 NS 方向防風壁内風速分布

設計竜巻荷重に対する構造健全性評価結果
(主排気筒)

1. 建物の構造健全性評価

1.1 概要

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。

評価部位は主排気筒筒身部及び支持部とし、評価方法は、設計竜巻による風圧力が与える荷重及び設計飛来物のうち、コンクリートブロック（初期高さ G. L. +12.5m）の衝突による複合荷重によって発生する応力が評価基準値を下回ることを確認する。

2. 解析コード及び解析モデル

2.1 荷重条件

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。

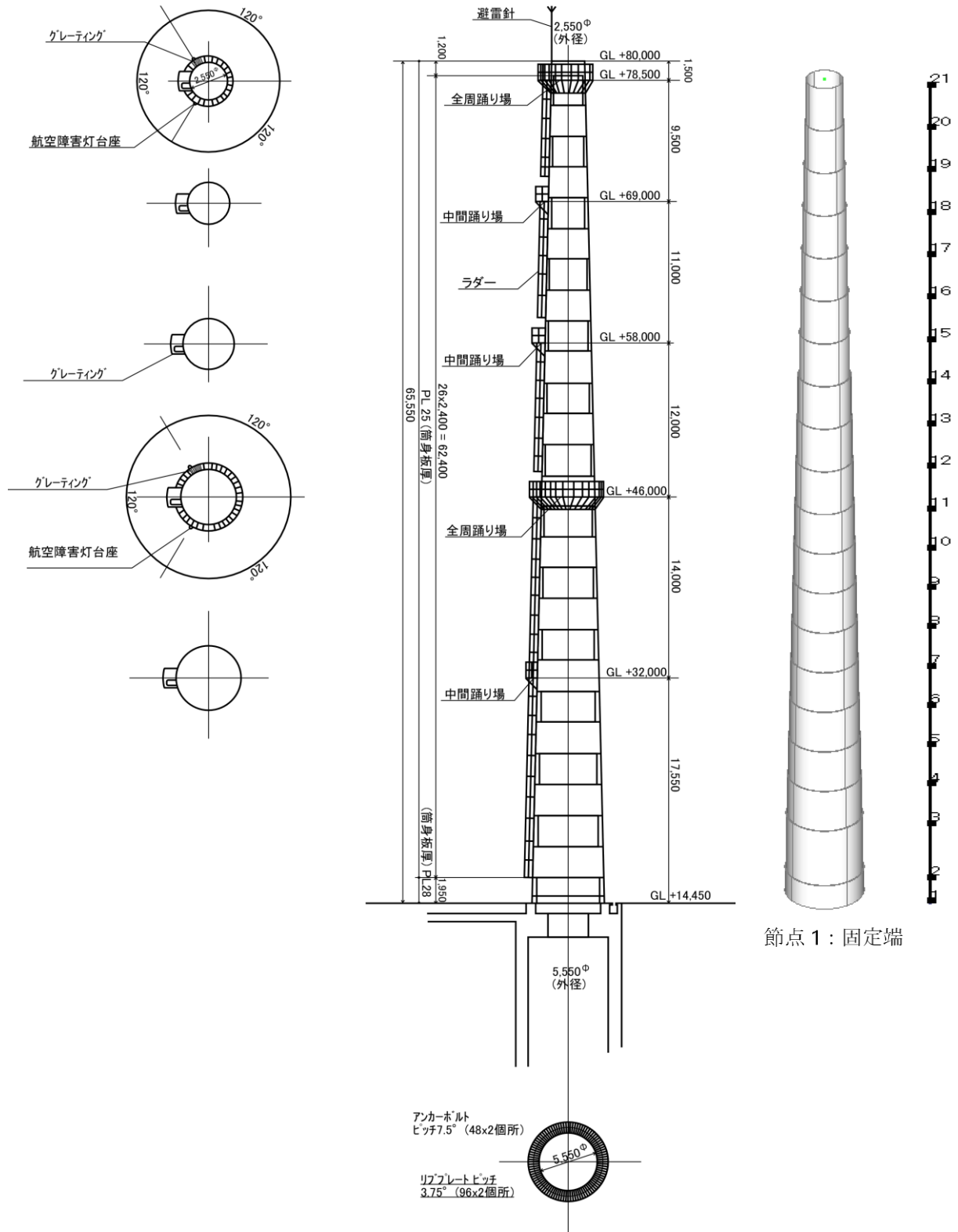
主排気筒は、原子炉附属建物の屋上に設置されており、地上面からの高さ 80m、主排気筒自体の高さ 65.55m、底部外径 5.55m、頂部外径 2.55m、底部から 1.95mまでの厚さ 28mm、それより上部の厚さ 25mm の円錐状の鋼製煙突である。

解析モデルは、主排気筒を曲げ、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。

主排気筒の構造及び解析モデルの概要を第 1 図に示す。また、質点重量を第 1 表に示す。

第1表 主排気筒の質点重量

質点 No.	要素 No.	GL (m)	排気筒 高さ (m)	各要素 高さ (m)	外径 (m)	肉厚 (mm)	分布荷重	集中荷重
							排気筒 重量 (N)	猿梯子、踊場等 合計 (N)
21	20	80.00	65.55	3.40	2.55	25	53,519	8,320
20		76.60	62.15		2.71			876
19	19	73.20	58.75	3.40	2.86	25	56,720	
18	18	69.80	55.35	3.40	3.02	25	59,921	3,538
17	17	66.40	51.95	3.40	3.17	25	63,122	
16	16	63.00	48.55	3.40	3.33	25	66,322	
15	15	59.60	45.15	3.40	3.48	25	69,523	3,831
14	14	56.20	41.75	3.40	3.64	25	72,724	
13	13	52.80	38.35	3.40	3.80	25	75,925	
12	12	49.40	34.95	3.40	3.95	25	79,126	
11	11	46.00	31.55	3.40	4.11	25	82,327	13,760
10	10	42.85	28.40	3.16	4.25	25	79,258	
9	9	39.69	25.24	3.16	4.40	25	82,014	
8	8	36.54	22.09	3.16	4.54	25	84,770	
7	7	33.38	18.93	3.16	4.68	25	87,526	5,036
6	6	30.23	15.78	3.16	4.83	25	90,283	
5	5	27.07	12.62	3.16	4.97	25	93,039	
4	4	23.92	9.47	3.16	5.12	25	95,795	
3	3	20.76	6.31	3.16	5.26	25	98,551	
2	2	16.40	1.95	4.36	5.46	25	140,728	272
1	1	14.53	0.08	1.88	5.55	28	69,578	
合計							1,636,402	



節点番号 : 1 (完全固定)

風向 : X 方向 (NS 方向)、Y 方向 (EW 方向)

第 1 図 主排気筒の構造及び解析モデルの概要

3. 荷重条件

設計竜巻荷重は、「原子力発電所の竜巻影響評価ガイド」を踏まえ、設計竜巻の最大風速(V_D)等に基づき、風圧力による荷重 W_W 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。なお、主排気筒の形状を考慮し、気圧差による荷重は 0 とする。

$$W_T = W_W + W_M$$

W_T : 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_M : 設計飛来物による衝撃荷重

3.1 設計竜巻の風圧力による荷重

設計竜巻の風圧力による荷重を第 2 表に示す（算定式等については、「別紙 4 風圧力及び気圧差による圧力の設定」参照）。

3.2 設計竜巻の風圧力による荷重

主排気筒、原子炉付属建物の屋上に位置する。設計飛来物の飛散高さ及び投影面積を考慮し、コンクリートブロック（初期高さ G.L. +12.5m）の衝突を想定する。なお、当該飛来物の衝撃荷重は 210kN である（「別紙 5 設計竜巻荷重の設定における設計飛来物の選定」参照）。

第2表 主排気筒の風荷重

質点 No.	要素 No.	見付面積 (m ²)	空気密度 (kg/m ³)	設計風速 (m/s)	速度圧 (N/m ²)	ガス 影響係数 (-)	風力係数 (-)	風荷重 (N)
21	20	8.94	1.22	100	6,100	1.0	0.7	38,174
20	19	9.47	1.22	100	6,100	1.0	0.7	40,437
19	18	10.00	1.22	100	6,100	1.0	0.7	42,700
18	17	10.53	1.22	100	6,100	1.0	0.7	44,964
17	16	11.06	1.22	100	6,100	1.0	0.7	47,227
16	15	11.59	1.22	100	6,100	1.0	0.7	49,490
15	14	12.12	1.22	100	6,100	1.0	0.7	51,753
14	13	12.64	1.22	100	6,100	1.0	0.7	53,973
13	12	13.17	1.22	100	6,100	1.0	0.7	56,236
12	11	13.70	1.22	100	6,100	1.0	0.7	58,499
11	10	13.19	1.22	100	6,100	1.0	0.7	56,322
10	9	13.65	1.22	100	6,100	1.0	0.7	58,286
9	8	14.10	1.22	100	6,100	1.0	0.7	60,207
8	7	14.56	1.22	100	6,100	1.0	0.7	62,172
7	6	15.01	1.22	100	6,100	1.0	0.7	64,093
6	5	15.47	1.22	100	6,100	1.0	0.7	66,057
5	4	15.92	1.22	100	6,100	1.0	0.7	67,979
4	3	16.38	1.22	100	6,100	1.0	0.7	69,943
3	2	23.38	1.22	100	6,100	1.0	0.7	99,833
2	1	10.33	1.22	100	6,100	1.0	0.7	44,110
1	合計	265.21						1,132,455

4. 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。

4.1 主排気筒筒身の評価

主排気筒の筒身部材の応力検定及び許容応力度の算定は、煙突構造設計指針の鋼製煙突の断面算定に準拠する。

筒身部材の座屈に対する応力検定は、以下の式による。

$$\frac{\sigma_c}{c f_{cr}} + \frac{\sigma_b}{b f_{cr}} \leq 1$$

かつ

$$\frac{\tau}{s f_{cr}} \leq 1$$

σ_c : 平均軸圧縮応力度 = W/A (N/mm²)

σ_b : 圧縮側曲げ応力度 = M/Z (N/mm²)

τ : せん断応力度 = $2Q/A$ (N/mm²)

W : 軸圧縮力 (N)

M : 転倒モーメント (N・mm)

Q : せん断力 (N)

A : 断面積 (mm²)

Z : 断面係数 (mm³)

$c f_{cr}$: 許容軸圧縮応力度 (N/mm²)

$b f_{cr}$: 許容曲げ応力度 (N/mm²)

$s f_{cr}$: 許容せん断応力度 (N/mm²)

軸圧縮、曲げ及びせん断の長期応力に対する許容応力度は、半径板厚比 (r/t) の値に応じて、それぞれ次の①～③より求める。

軸圧縮、曲げおよびせん断の短期応力に対する許容応力度は、長期許容応力度の 1.5 倍とする。また、終局強度は、2007 年版建築物の構造関係技術基準解析書から短期許容応力度の 1.1 倍とする。

① 許容軸圧縮応力度 $c f_{cr}$ (N/mm²)

$c f_{cr}$ は次式による。

$$\frac{r}{t} \leq 0.377 \left(\frac{E}{F} \right)^{0.72} : c f_{cr} = \frac{F}{1.5}$$

r : 筒身の内半径 (mm)

t : 筒身の板厚 (mm)

E : 縦弾性係数 (N/mm²)

F : 材料の許容応力を決定する場合の降伏応力度の基準値 (N/mm²)

$$0.377\left(\frac{E}{F}\right)^{0.72} \leq \frac{r}{t} \leq 2.567\left(\frac{E}{F}\right)^{0.72} : {}_c f_{cr} = 0.267 F + 0.4F \left[\frac{2.567 - \frac{r}{t} \left(\frac{F}{E}\right)^{0.72}}{2.190} \right]$$

$$2.567\left(\frac{E}{F}\right)^{0.72} \leq \frac{r}{t} : {}_c f_{cr} = \frac{1}{2.25} {}_c \sigma_{cr.e}$$

${}_c \sigma_{cr.e}$: 弾性軸圧縮座屈応力度 (N/mm²) で、下式により求める。

$${}_c \sigma_{cr.e} = 0.6E \frac{t}{r} \left\{ 1 - 0.901 \left[1 - \exp \left[-\frac{1}{16} \left(\frac{r}{t} \right)^{\frac{1}{2}} \right] \right] \right\}$$

② 許容曲げ応力度 ${}_b f_{cr}$ (N/mm²)

${}_b f_{cr}$ は次の式による。

$$\frac{r}{t} \leq 0.274 \left(\frac{E}{F} \right)^{0.78} : {}_b f_{cr} = \frac{F}{1.5}$$

$$0.274 \left(\frac{E}{F} \right)^{0.78} \leq \frac{r}{t} \leq 2.106 \left(\frac{E}{F} \right)^{0.78} : {}_b f_{cr} = 0.267 F + 0.4F \left[\frac{2.106 - \frac{r}{t} \left(\frac{F}{E} \right)^{0.78}}{1.832} \right]$$

$$2.106 \left(\frac{E}{F} \right)^{0.78} \leq \frac{r}{t} : {}_b f_{cr} = \frac{1}{2.25} {}_b \sigma_{cr.e}$$

${}_b \sigma_{cr.e}$: 弾性曲げ座屈応力度 (N/mm²) で、下式により求める。

$${}_b \sigma_{cr.e} = 0.6E \frac{t}{r} \left\{ 1 - 0.731 \left[1 - \exp \left[-\frac{1}{16} \left(\frac{r}{t} \right)^{\frac{1}{2}} \right] \right] \right\}$$

③ 許容せん断応力度 ${}_s f_{cr}$ (N/mm²)

${}_s f_{cr}$ は次の式による。

$$\frac{r}{t} \leq \frac{0.204 \left(\frac{E}{F} \right)^{0.81}}{\left(\frac{l}{r} \right)^{0.4}} : {}_s f_{cr} = \frac{F}{1.5\sqrt{3}}$$

$$\frac{0.204 \left(\frac{E}{F} \right)^{0.81}}{\left(\frac{l}{r} \right)^{0.4}} \leq \frac{r}{t} \leq \frac{1.446 \left(\frac{E}{F} \right)^{0.81}}{\left(\frac{l}{r} \right)^{0.4}} : {}_s f_{cr} = \frac{0.267 F}{\sqrt{3}} + \frac{0.4F}{\sqrt{3}} \left[\frac{1.446 - \frac{r}{t} \left(\frac{l}{r} \right)^{0.4} \left(\frac{F}{E} \right)^{0.81}}{1.242} \right]$$

$$\frac{1.446 \left(\frac{E}{F} \right)^{0.81}}{\left(\frac{l}{r} \right)^{0.4}} \leq \frac{r}{t} : {}_s f_{cr} = \frac{1}{2.25} {}_s \sigma_{cr.e}$$

l : 座屈区間長さ (mm)

${}_s \sigma_{cr.e}$: 弾性せん断座屈応力度 (N/mm²) で、下式により求める。

$${}_s \sigma_{cr.e} = 0.8 \frac{4.83E}{\left\{ \frac{l}{r} \left(\frac{r}{t} \right)^{\frac{1}{2}} \right\}^2} \frac{t}{r} \left[1 + 0.0239 \left\{ \frac{l}{r} \left(\frac{r}{t} \right)^{\frac{1}{2}} \right\}^3 \right]^{\frac{1}{2}}$$

主排気筒筒身部材の応力検定結果を第3表に示す。

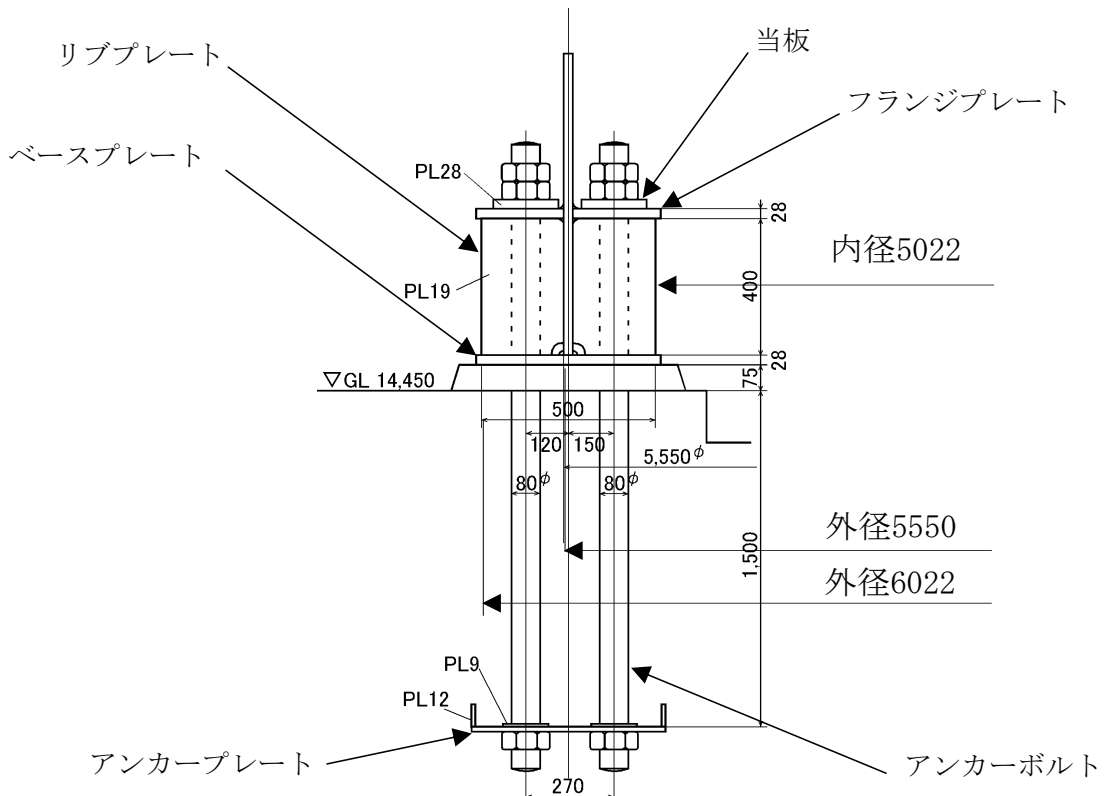
4.2 主排気筒支持部の評価

主排気筒の支持部の評価は、煙突構造設計指針を準拠する。

主排気筒の支持部の評価は、以下の式による。

① 鋼製部の排気筒取付け部の詳細

鋼製部の排気筒取付け部の詳細図を第3図に示す。



第3図 主排気筒取付け部の詳細図

② アンカーボルトの応力

(a) アンカーボルトの引張応力 σ_t

$$\sigma_t = \frac{T_a}{A_0}$$

T_a : アンカーボルト 1 本当たりの引張力

$$T_a = \left(\frac{-N_D}{\pi \cdot D \cdot t} + \frac{4M}{\pi \cdot D^2 \cdot t} \right) \cdot \frac{\pi \cdot D \cdot t}{n}$$

N_D : 長期軸力

D : 排気筒の脚部の筒身外径

t : 排気筒の脚部の板厚

M : 転倒モーメント

n : アンカーボルトの本数

A_0 : ボルト 1 本あたりの有効断面積

ボルトがせん断力を同時に受ける場合の合成許容引張応力度 f_{ts} は、以下より求める。

$$f_{ts} = \min(1.4 \cdot f_{t0} - 1.6 \cdot \tau, \text{短期許容引張応力度})$$

f_{t0} : 引張力のみを受けるボルトの短期許容引張応力

τ : せん断応力

(b) アンカーボルトのせん断応力 τ

$$\tau = \frac{Q}{n \cdot A_0}$$

Q : せん断力

短期許容せん断応力度は、長期せん断許容応力度 $f_s = F/1.5\sqrt{3}$ の 1.5 倍より求める。

(c) アンカーボルトの付着応力 σ_{bd}

$$\sigma_{bd} = T_a / (\pi \cdot d_a \cdot L)$$

d_a : アンカーボルト呼び径

L : アンカーボルトの長さ

短期許容付着応力度は、丸鋼のコンクリートに対する長期許容付着応力度の 1.5 倍より求める。なお、 F_c は、コンクリートの設計基準強度 22.1N/mm² とする。

③ ベースプレート

(a) ベースプレート下面部コンクリートの圧縮応力 σ_c

$$\sigma_c = \left(\frac{N_D + 0.4N}{A_c} + \frac{M}{Z} \right)$$

A_c : ベースプレート下面部のコンクリート面積

Z : ベースプレート下面部の断面係数

コンクリートの許容圧縮応力度は、 $2(F_c)/3$ より求める。なお、 F_c は、コンクリートの設計基準強度 22.1N/mm² とする。

(b) ベースプレートの曲げ応力 σ

ベースプレートをリブ位置で支持される周辺方向連続梁とみなし、その発生モーメント

を算定する。

発生モーメント

$$M_{base} = \frac{\sigma_c \cdot (B_b / 2) \cdot l^2}{12} \quad (\text{片側あたり})$$

σ_c : ベースプレート下面部コンクリートの圧縮応力

B_b : ベースプレート幅

l : 外側ベースプレート平均長

ベースプレート曲げ応力 σ

$$\sigma = \frac{M_{base}}{t_b^2 \cdot (B_b / 2) / 6}$$

t_b : ベースプレート厚さ

④ フランジプレート

フランジプレートをリブ位置で支持される周方向連続梁とみなし、その発生モーメントを算定する。なお、ボルト締め付け部にはフランジプレートと同厚さの当板が溶接固定されているため、断面係数には当板も考慮するものとする。

発生モーメント M_F

$$M_F = \frac{T_a \cdot l}{8} \quad (\text{片側あたり})$$

T_a : ボルト1本の引張り力

フランジの曲げ応力 σ_F

$$\sigma_F = \frac{M_F}{t_{f1}^2 \times (B_{f1} - d_f) / 6 + t_{f2}^2 \times (B_{f2} - d_f) / 6}$$

t_{f1} : フランジプレート厚さ

B_{f1} : フランジプレート幅

d_f : ボルト欠損径

t_{f2} : フランジプレートボルト部当板厚さ

B_{f2} : フランジプレートボルト部当板幅

⑤ リブプレート

リブプレートの圧縮力 N_r

$$N_r = \sigma_c \cdot (B_b / 2) \cdot l$$

リブプレートの圧縮応力 σ_r

$$\sigma_r = \frac{N_r}{b_r \cdot t_r}$$

b_r : リブプレート幅

t_r : リブプレート厚さ

許容座屈応力度 σ_{rk}

$$\sigma_{rk} = \frac{K_r}{\mu_r} \cdot \frac{\pi^2 \cdot E}{12 \cdot (1 - \nu^2)} \cdot \left(\frac{t_r}{b_r} \right)^2$$

係数 $K_r = 0.42 + (b_r / h_r)^2$

h_r : リブプレート高さ

μ_r : 座屈安全率

E : ヤング係数

ν : ポアソン比

主排気筒支持部の評価結果を第4表に示す。

第3表 主排気筒筒身部材の応力検定結果

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 $1.5_c f_{cr}$ (N/mm ²)	曲げ 強度 $1.5_b f_{cr}$ (N/mm ²)	せん断 強度 $1.5_s f_{cr}$ (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	0.99	0.59	254.5	258.5	139.2	0.01	0.00
19	76.60 ~ 73.20	0.59	2.69	0.95	252.7	255.8	138.3	0.01	0.01
18	73.20 ~ 69.80	0.83	4.92	1.30	250.9	254.3	137.4	0.02	0.01
17	69.80 ~ 66.40	1.09	7.55	1.63	249.1	252.8	136.6	0.03	0.01
16	66.40 ~ 63.00	1.31	10.47	1.95	247.2	251.4	135.7	0.05	0.01
15	63.00 ~ 59.60	1.53	13.61	2.26	245.5	249.9	135.0	0.06	0.02
14	59.60 ~ 56.20	1.76	16.92	2.56	243.7	248.4	134.1	0.08	0.02
13	56.20 ~ 52.80	1.97	20.35	2.85	241.9	247.1	133.3	0.09	0.02
12	52.80 ~ 49.40	2.17	23.88	3.14	240.1	245.6	132.6	0.11	0.02
11	49.40 ~ 46.00	2.36	27.47	3.42	238.3	244.2	131.8	0.12	0.03
10	46.00 ~ 42.85	2.59	30.84	3.67	236.5	242.9	132.1	0.14	0.03
9	42.85 ~ 39.69	2.76	34.24	3.92	234.9	241.5	131.5	0.15	0.03
8	39.69 ~ 36.54	2.93	37.66	4.16	233.2	240.2	130.8	0.17	0.03
7	36.54 ~ 33.38	3.10	41.08	4.40	231.6	238.8	130.2	0.19	0.03
6	33.38 ~ 30.23	3.28	44.53	4.64	229.9	237.5	129.6	0.20	0.04
5	30.23 ~ 27.07	3.45	47.97	4.88	228.3	236.1	129.0	0.22	0.04
4	27.07 ~ 23.92	3.61	51.40	5.11	226.6	234.8	128.4	0.23	0.04
3	23.92 ~ 20.76	3.77	54.83	5.34	224.8	233.4	127.8	0.25	0.04
2	20.76 ~ 16.40	3.99	59.55	5.65	222.6	231.6	121.8	0.28	0.05
1	16.40 ~ 14.53	3.63	54.50	5.12	228.4	236.3	136.3	0.25	0.04

第4表 主排気筒支持部の評価結果

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	65.9	177.0	0.38
		せん断応力	N/mm ²	3.3	136.0	0.03
	コンクリート 定着	コーン状破壊耐力	N	6.6213E+05	9.6633E+05	0.69
		付着応力	N/mm ²	0.879	1.989	0.45
		せん断力	N	1.4017E+04	9.5557E+04	0.15
ベースプレート	本体	曲げ応力	N/mm ²	91.7	298.2	0.31
	コンクリート	圧縮応力	N/mm ²	4.4	14.7	0.30
フランジプレート		曲げ応力	N/mm ²	250.0	298.2	0.84
リブプレート		座屈応力	N/mm ²	44.4	614.9	0.08

設計飛来物に対する竜巻影響評価対象施設の
貫通及び裏面剥離評価結果

1. 検討の基本方針

竜巻影響評価対象施設について、飛来物が衝突した場合にあっても貫通又は裏面剥離により、その健全性を損なわない設計とする。各部位に衝突させる飛来物については竜巻影響評価対象施設の設置位置や投影面積等を考慮し、選定する。評価の結果、貫通又は裏面剥離が生じる場合には、当該箇所を補強する。

2. 建物・構築物等の飛来物の貫通及び裏面剥離評価に用いる評価式等

2.1 鉄筋コンクリート部

屋根及び外壁について、飛来物の衝突に対する裏面剥離または貫通を生じさせないための必要最小厚さと評価部材の厚さを比較し、必要な対策等を確認する。

貫通限界厚さ t_p 及び裏面剥離限界厚さ t_s は、以下の評価式によって算出する。なお、貫通限界厚さは、貫入深さを①式に示す修正NDRC式により算出し、②式に示すDegan式により求める。また、裏面剥離限界厚さは、③式に示すChang式により算出する。

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

$$X_c = \alpha_c \sqrt{4kWN D (V/1000D)^{1.8}} \quad \text{※ ①修正NDRC式}$$

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

t_p : 貫通厚さ(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

D: 飛来物直径(in)

X_c : 貫入深さ(in)、W: 飛来物重量(lb)、N: 形状係数、V: 衝突速度(ft/s)

F_c : コンクリート強度(psi)

$$t_s = \alpha_s 1.84 (200/V)^{0.13} (MV^2)^{0.4} / (D/12)^{0.2} (144F_c)^{0.4} \quad \text{※ ③Chang式}$$

t_s : 裏面剥離厚さ(ft)、 α_s : 裏面剥離限界厚さ低減係数

V: 衝突速度(ft/s)、M: 質量(lb/(ft/s²))、g: 重力加速度(32.2ft/s²)

D: 飛来物直径(in)、 F_c : コンクリート強度(psi)

評価式に適用する低減係数^[1]は、剛飛来物において貫通・裏面剥離=1.0、柔飛来物において貫通=0.65・裏面剥離=0.6とする。また、形状係数^[2]は、剛飛来物=1.14、柔飛来物=0.72とする。

※ 先端形状が非常に鋭い場合の形状係数は1.14、平坦な場合は0.72。剛飛来物は、角が当たることを想定し、1.14を採用。柔飛来物は、先端がつぶれて平坦になることを想定し、0.72を採用。

2.2 鋼板部

飛来物が主冷却機建物及び建家開口部等（鋼板部分）に衝突した場合の貫通限界厚さを、BRL^[3]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、必要な対策等を確認する。

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。

$$T^{3/2}=0.5MV^2/17400K^2d^{3/2}$$

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

3. 衝突する飛来物の設定

設計飛来物及び竜巻ガイドに記載の鋼製材の各貫通限界厚さ及び裏面剥離厚さを第3.1表に示す。各貫通限界厚さ及び裏面剥離限界厚さについては、飛来物の衝突方向（水平、鉛直）を考慮する。

ガイド鋼製材については、米国原子力規制庁は飛散物（自動車）が9.14m(30feet)以下に影響を及ぼすものとしている^[4]ことを踏まえ、本飛来物は高さ10mまで影響を及ぼすものとして評価することを基本とするが、プラント安全性を高めるべく、貫通・裏面剥離評価においては投影面積が小さい箇所を除いて、高さ10m以上への衝突も考慮する。

安全施設の外殻施設の外壁及び屋根スラブあつては、竜巻ガイドに記載の鋼製材が衝突することを想定する。

安全施設の外殻施設の開口部について、比較的大きな開口部には竜巻ガイドに記載の鋼製材が、小さな開口部には設計飛来物のうちコンクリートブロックが衝突することを想定する。

外殻施設で保護されない安全施設である、主冷却機のうち屋外部分については、竜巻ガイドに記載の鋼製材が衝突することを想定する。

非常用ディーゼル電源系に係る冷却塔については、投影面積が小さいことからコンクリートブロックが衝突することを想定する。

第3.1表 飛来物の貫通及び裏面剥離限界厚さ

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。

4. 竜巻影響評価対象施設の各部厚さ及び材質等

4.1 原子炉建物（格納容器を含む。）及び原子炉附属建物

原子炉建物（格納容器を含む。）及び原子炉附属建物の各部厚さ及び材質等は第4.1表の通りである。

第4.1表 原子炉建物（格納容器を含む。）及び原子炉附属建物各部の厚さ及び材質等

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。

4.2 主冷却機建物

主冷却機建物の各部厚さは第4.2表の通りである。

第4.2表 原子炉建物（格納容器を含む。）及び原子炉附属建物各部の厚さ及び材質等

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。

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。

4.3 主冷却機のうち屋外部分

主冷却機のうち屋外部分は厚さ \square の鋼板で製作されている。

4.4 非常用ディーゼル電源系に関連する冷却塔

非常用ディーゼル電源系に関連する冷却塔については周囲に防風壁を設置予定である。衝突する飛来物はコンクリートブロックを想定し、当該飛来物により貫通が生じない設計とする。

5. 竜巻影響評価対象施設の評価結果及び対策

5.1 原子炉建物（格納容器を含む。）及び原子炉附属建物

原子炉建物（格納容器を含む。）及び原子炉附属建物の各部評価結果は第5.1表の通りである。

評価結果より、屋根スラブについて、最上階の天井面にアラミド繊維シートを塗布することにより、裏面剥離防止対策を実施する。当該アラミドシートの仕上げには不燃材を用いる。

第5.1表 原子炉建物（格納容器を含む。）及び原子炉附属建物各部の厚さ及び材質等

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。

5.2 主冷却機建物

主冷却機建物の各部評価結果は第5.5表の通りである。

評価結果より、外壁について、外側及び内側にアラミド繊維シートを塗布することにより、貫通及び裏面剥離防止対策を実施する。

屋根スラブについて、最上階の天井面にアラミド繊維シートを塗布することにより、裏面剥離防止対策を実施する。

開口部について、鋼板厚さ換算 \square を上回るよう補強する。補強には鋼板又はアラミド繊維シートを用いる。これらの対策に用いるアラミド繊維シートの仕上げには不燃材を用いる。

第5.2表 原子炉建物（格納容器を含む。）及び原子炉附属建物各部の厚さ及び材質等

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。

4.3 主冷却機のうち屋外部分

主冷却機のうち屋外部分の鋼板厚さは[]であり、竜巻ガイドに記載の鋼製材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。

4.4 非常用ディーゼル電源系に関連する冷却塔

非常用ディーゼル電源系に関連する冷却塔については周囲に防風壁を設置予定である。防風壁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、防風壁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止する。

- [1] Experimental Studies on Local Damage of Reinforced Concrete Structures by the Impact of Deformable Missiles Part 4:Overall Evaluation of Local Damage, Kiyoshi Muto, etc., 10th SMiRT
- [2] 「構造物の衝撃挙動と設計法」土木学会
- [3] 「ISES7607-3 軽水炉構造機器の衝撃荷重に関する調査その3 ミサイルの衝突による構造壁の損傷に関する評価式の比較検討（高温構造安全技術研究組合）」及び「タービンミサイル評価について（昭和52年7月20日 原子炉安全専門審査会）」において、鋼板に対する貫通厚さの算出式に使用。
- [4] U. S. NUCLEAR REGULATORY COMMISSION, “REGULATORY GUIDE 1. 76, DESIGN-BASIS TORNADO AND TORNADO MISSILES FOR NUCLEAR POWER PLANTS”, March 2007

建物壁へ貼り付けるアラミド繊維シートの概要

「常陽」では、設計飛来物及び竜巻ガイドの記載された鋼製材の衝突により、建物外壁の一部に貫通及び裏面剥離が生じ、建物屋上スラブに裏面剥離が生じる。これらの貫通及び裏面剥離を防止するため、建物外壁及び屋根スラブにアラミド繊維シートを貼り付ける。アラミド繊維シートの概要を以下に示す。

1. 建物に係る貫通・コンクリート裏面剥離に係る評価

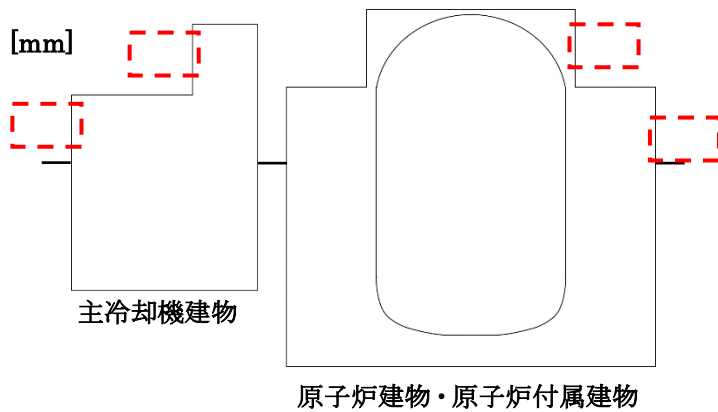
原子炉付属建物及び主冷却機建物のコンクリート厚さ及び鋼板厚さを第 1.1 図に示す。図中には、飛来物衝突に伴う貫通及び裏面剥離に対する健全性を示す。コンクリートの貫通及び裏面剥離限界厚さ、鋼板の貫通限界厚さについては、別紙 13 と同一の式を用いた。図に示す通り、水平方向については主冷却機建物の外壁に貫通及び裏面剥離が生じることがわかる。また、鉛直方向については、原子炉付属建物及び主冷却機建物の屋根スラブに裏面剥離が生じることがわかる。これらの貫通及び裏面剥離を防止するため、建物外壁及び屋根スラブにアラミド繊維シートを貼り付ける。アラミド繊維シートを貼り付ける範囲は、建物内の安全施設の位置等を考慮して決定する。

2. アラミド繊維シートの概要

アラミド繊維として、東レ・デュポン株式会社製ケブラー®を使用する予定である。ケブラー®は、高強度・高弾性や耐切創性、軽量等の特性を有し、火山時の噴石飛来に対する防護資材等として使用実績を有する。アラミド繊維シートを用いた施工例を第 1.2 図に示す。アラミド繊維シートは橋脚や床版の補強で採用されている実績を有している。

「常陽」で用いるアラミド繊維シートのイメージを第 1.3 図に示す。貫通を防止する箇所には、壁の外側にアラミド繊維シートを貼り、裏面剥離を防止する箇所には、壁（屋根スラブ含む）の内側にアラミド繊維シートを貼る。シートの構成は、壁側から下処理樹脂、アラミド繊維シートとし、表面は不燃材仕上げとする。内閣府による活火山における退避壕の検討^[1]における衝突試験結果を用いて鋼板厚さと等価のアラミド繊維シート厚さを算出し、この結果を基に貫通を防止するために必要なアラミド繊維シートの厚さは、 とした。この必要な厚さを確保するため、厚み のアラミド繊維シートを 。裏面剥離を防止するためのアラミド繊維シートは、 のシートを とした。

[1] 内閣府（防災担当）、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）、平成 27 年 12 月



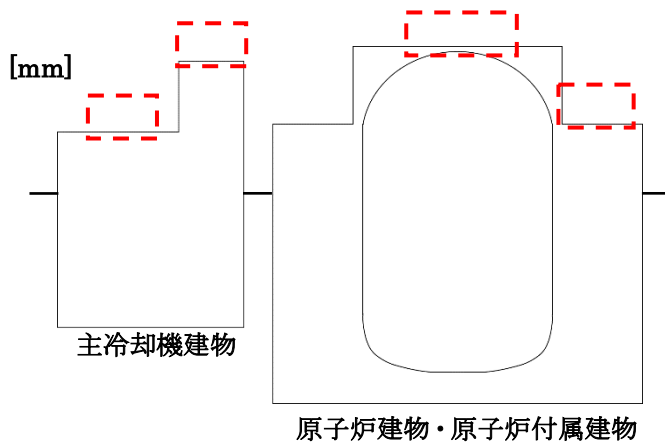
	貫通	裏面剥離
原子炉付属建物	○	○
主冷却機建物	×	×

基準：ガイド鋼製材衝突時の貫通または裏面剥離限界厚さ。

○：貫通または裏面剥離は生じない。

×：貫通または裏面剥離は生じる。

(a) 水平方向



	貫通	裏面剥離
原子炉付属建物	○	×
主冷却機建物	○	×

基準：ガイド鋼製材衝突時の貫通または裏面剥離限界厚さ。

○：貫通または裏面剥離は生じない。

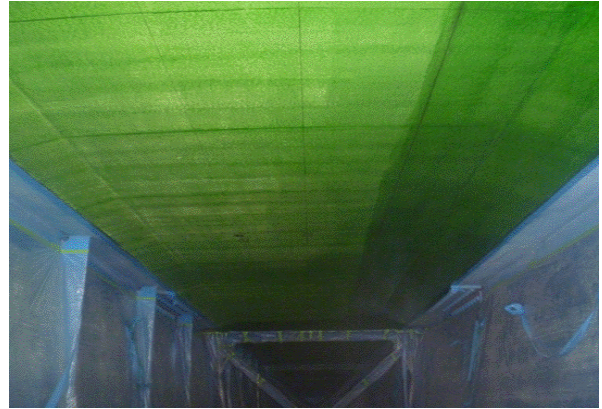
×：貫通または裏面剥離は生じる。

(b) 鉛直方向

第 1.1 図 原子炉付属建物及び主冷却機建物のコンクリート厚さ及び鋼板厚さ

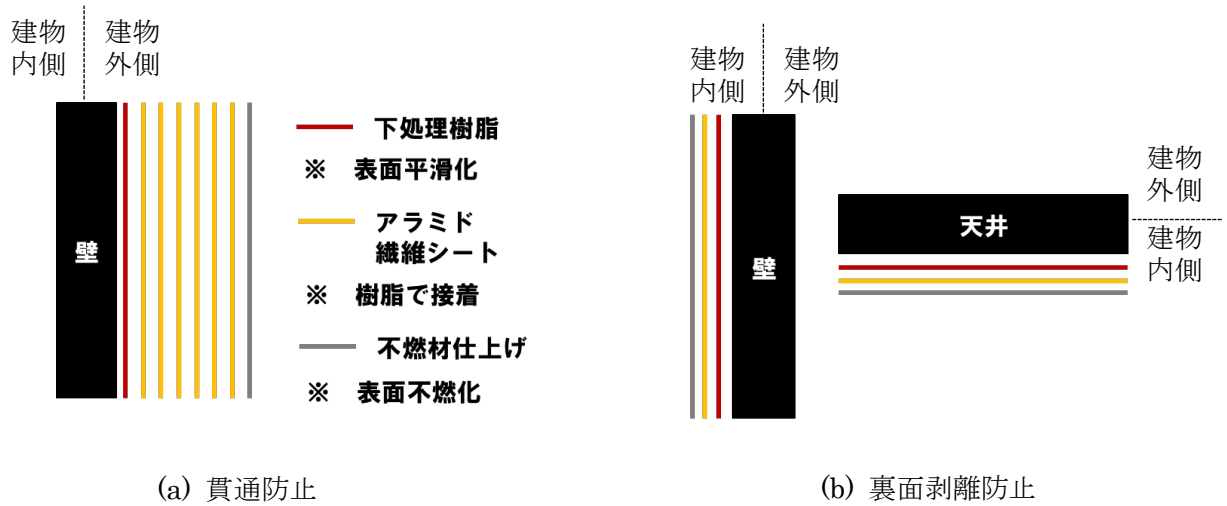


(a) 橋脚補強



(b) 床板補強

第 1.2 図 アラミド繊維シートの施工例



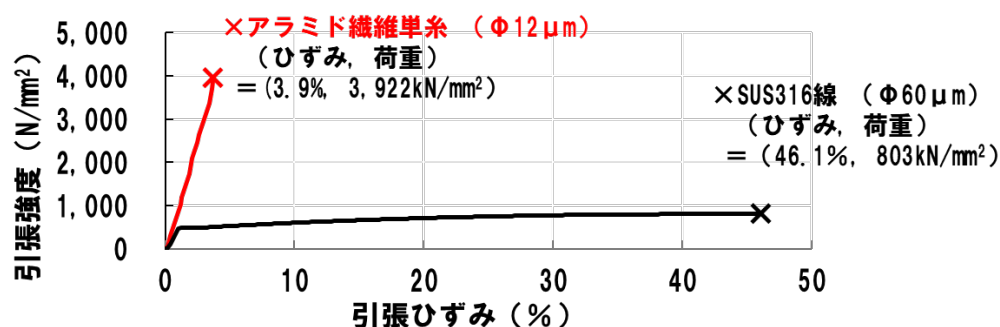
第 1.3 図 「常陽」で用いるアラミド繊維シートのイメージ

アラミド繊維シートの特性等

1. 引張強度等

第 1 図にアラミド繊維（東レ・デュポン社製ケブラー®）と SUS316 の引張強度を示す。アラミド繊維は SUS316 線材の約 5 倍の引張強度を有する高強度部材である。また、アラミド繊維の密度は SUS316 の約 1/5 であり、軽量という特徴も有する。

アラミド繊維は高強度、高弾性、耐切削性等の特性が求められる用途で多くの実績（防弾チョッキ、装甲車、竜巻用シェルタ等）を有している。



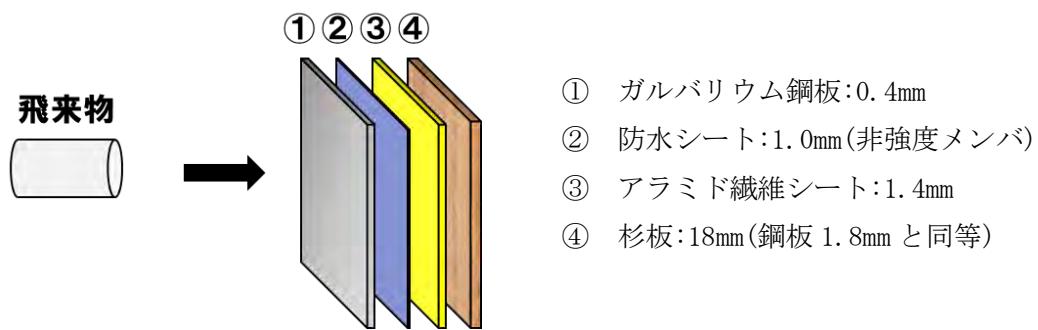
第 1 図 引張強度の比較（アラミド繊維、SUS316）

2. 耐貫通性

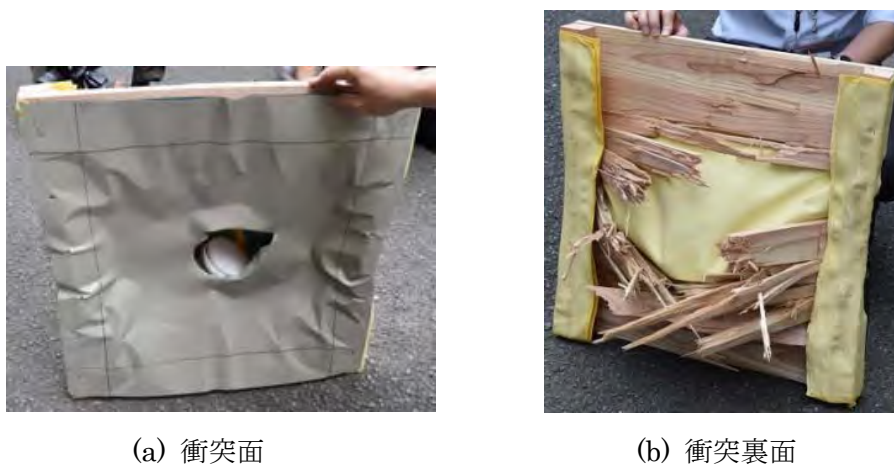
内閣府による活火山における退避壕の検討^[1]において、第 1 表に示す飛来物条件に対して第 2 図に示すアラミド繊維シートを構成要素とした退避壕補強屋根に貫通は生じなかった。試験後の退避壕補強屋根を第 3 図に示す。文献 1 において別途実施された試験（BRL 式^[2]評価 1.9mm となる飛来物条件）により、合板 1mm は鋼板 0.1mm 相当と判断し、杉板は合板と同等の強度と見なした。これらより、鋼板厚さ 2.7mm 分（4.9mm－0.4mm－1.8mm）を 1.4mm のアラミド繊維シートで受け止めたと判断した。したがって、耐貫通性の観点で、鋼板 2.7mm 厚さとアラミド繊維シート 1.4mm 厚さは等価と考えられる。

第 1 表 飛来物条件

衝突速度 (m/s)	99.9
質量 (kg)	2.66
直径 (mm)	90
鋼板貫通限界厚さ (BRL 式評価) (mm)	4.9



第2図 アラミド繊維シートを構成要素とした退避壕補強屋根の概要

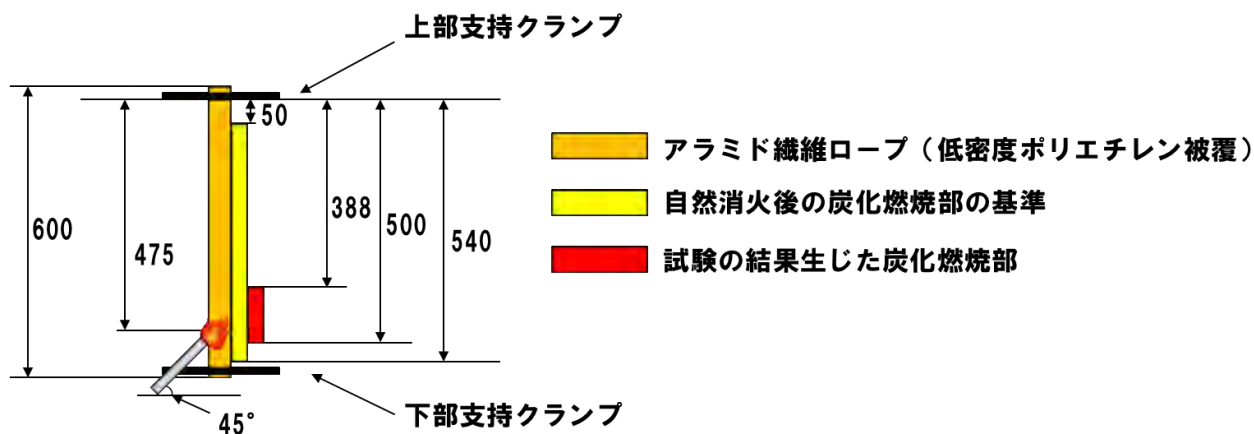


第3図 試験後の退避壕補強屋根 (写真)

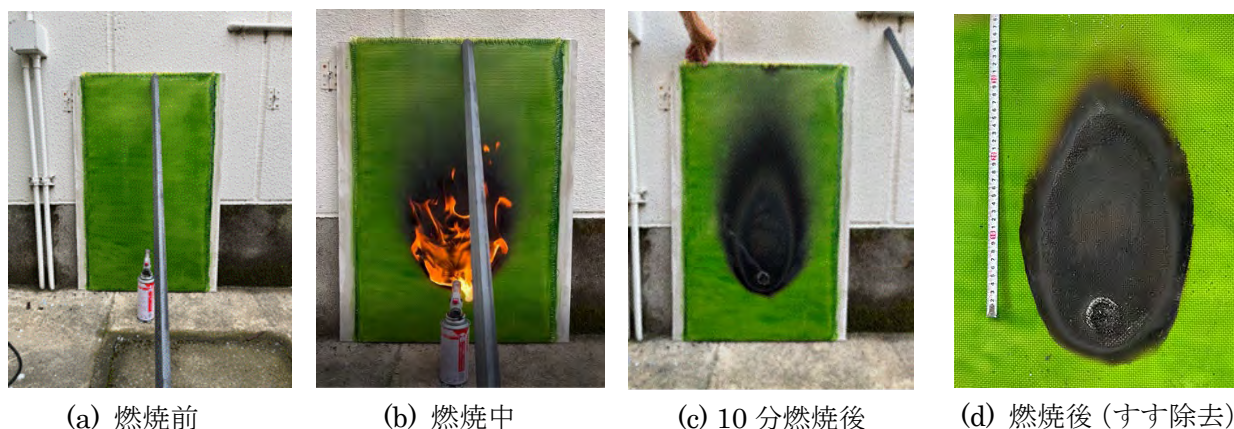
3. 耐燃焼性

アラミド繊維に低密度ポリエチレンを被覆したロープを用いて、国際電気標準会議が制定する規格 ICE60632-1-2^[3]に基づき一条垂直試験を実施した。試験結果を第4図に示す。試験の結果生じた炭化燃焼部は、文献3に定められた自然消火後の炭化燃焼部の基準に収まっており、難燃性を有することを確認した。また、東レ・デュポン社製ケブラー®の酸素限界指数 (LOI 値) は29であり^[4]、一般的に難燃性と言われる基準である26を超えており、酸素限界指数の観点からも難燃性を有していることを確認した。

ガイド鋼製材の貫通を防止するために必要なアラミド繊維シート^[]を対象とした簡易燃焼試験として、ガスバーナーによる垂直燃焼試験(燃焼10分間)を実施した。試験結果を第5図に示す。燃焼中において自己消火性があり燃え広がらないことが確認された。ガスバーナーの火を直接受けた部分の表層は炭化し穴が開き、シート浮きを確認されたのは表層の25cm×15cm程度と小さいことが確認された。これらの結果よりアラミド繊維シートは難燃性を有していると判断した。実際の施工においては、アラミド繊維シートの表面は不燃材仕上げとする。



第4図 アラミド繊維ロープの一条垂直試験



第5図 アラミド繊維シートの垂直燃焼試験

[1] 内閣府（防災担当）、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）、平成27年12月

[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] International Electrotechnical Commission、“Tests on electric and optical fiber cables under fire conditions - Part 1-2: Test for vertical flame propagation for a single insulated wire or cable - Procedure for 1 kW premixed flame”、IEC 60332-1-2:2004, (2004)

[4] 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

添付 1 設置許可申請書における記載

5. 試験研究用等原子炉及びその附属施設の位置、構造及び設備

ロ. 試験研究用等原子炉施設の一般構造

(3) その他の主要な構造

原子炉施設は、(1) 耐震構造、(2) 耐津波構造に加え、以下の基本方針に基づき、「設置許可基準規則」に適合するように設計する。

- a. 安全施設は、想定される自然現象（地震及び津波を除く。）が発生した場合においても、安全機能を損なわないように設計する。また、重要安全施設については、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じる応力を適切に考慮するものとする。
- b. 安全施設は、敷地及びその周辺において想定される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ように設計する。

添付2 設置許可申請書の添付書類における記載（安全設計）

添付書類八

1. 安全設計の考え方

1.7 外部からの衝撃による損傷の防止に係る設計

1.7.1 基本方針

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、生物学的事象及び森林火災）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。

重要安全施設については、科学的技術的知見を踏まえ、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じる応力を、それぞれの因果関係及び時間的变化を考慮して、適切に組み合わせるものとする。

また、安全施設は、敷地及びその周辺において想定される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（航空機落下、ダムの崩壊、爆発、近隣工場等の火災、有毒ガス、船舶の衝突及び電磁的障害）に対して、安全機能を損なわないように設計する。

想定される自然現象及び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に対しては、必要に応じて、設備と運用による対策を組み合わせた措置を講じることにより、安全施設が安全機能を損なわない設計とする。また、安全施設が安全機能を損なわないために必要な安全施設以外の施設又は設備等への措置を含める。

「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。）

耐竜巻設計、耐降下火砕物設計、耐外部火災設計においては、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、降下火砕物防護施設、外部火災防護施設とし、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。重要安全施設以外の安全施設は、竜巻、火山の影響及び外部火災（森林火災及び近隣工場等の火災）により損傷するおそれがある場合に、代替措置や修復等を含めて安全機能を損なわないものとする。

1.7.3 耐竜巻設計

1.7.3.1 竜巻防護施設

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し、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（以下、「竜巻影響評価対象施設」という）。

想定される竜巻に対する影響を評価し、外部からの衝撃による損傷の防止に係る安全施設又は外殻施設に飛来物が衝突することを防止するための措置を必要に応じて講じ、その安全機能を損なわないように設計する。重要安全施設以外の安全施設は、竜巻により損傷するおそれがある場合に、代替措置を含めて安全機能を損なわないものとする

1.7.3.2 評価方針

後述する評価対象施設について、「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。）を参考にして構造健全性評価を行い、安全機能が維持されることを確認する。当該影響評価にあつては、当該安全施設の外殻施設を評価対象とする場合がある。

1.7.3.3 評価対象施設の抽出

竜巻影響評価対象施設を以下の各区分から抽出する。

(1) 重要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) 外殻で保護されない重要安全施設

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

(3) 安全施設を内包し保護する外殻施設

第一使用済燃料貯蔵建物及び第二使用済燃料貯蔵建物

(4) 外殻で保護されない安全施設

主排気筒及び外周コンクリート

1.7.3.4 波及的影響評価対象施設の抽出

破損等により竜巻防護施設に波及的影響を及ぼして安全機能を喪失させる可能性がある施設について、機械的影響、機能的影響の発生を考慮して抽出した。その結果、抽出された波及的影響を及ぼし得る施設は主排気塔のみである。なお、機械的影響及び機能的影響とは、次の通りである。

機械的影響

- 隣接している建物・構築物が竜巻より防護すべき施設を内包する施設に接触し、防護対象施設を損傷させる。
- 隣接していない建物・構築物が竜巻により倒壊して防護対象施設を損傷させる。

機能的影響

- 防護対象施設の外気と繋がる部位が、竜巻による風、気圧変化等により損傷を生じ、防護対象施設の機能に影響する。

1.7.3.5 評価対象施設の評価

竜巻防護施設の外殻施設である原子炉建物及び原子炉附属建物、主冷却機建物については、設計竜巻に対する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。壁や屋根などに損傷が生じた場合は、損傷による竜巻防護施設への影響が無いことを確認する。

竜巻防護施設の内、外部からの衝撃による損傷の防止に係る重要安全施設である非常用ディーゼル電源系に関連する冷却塔及び主冷却機のうち屋外（建物屋上）部分については、設計竜巻に対して安全機能を喪失しないことを確認する。

1.7.3.6 波及的影響の評価

波及的影響評価の対象施設として抽出した主排気塔については、竜巻防護施設に影響を与えないことを評価し、確認する。

1.7.3.7 開口部の評価

外殻施設の開口部のうち、付近に外部からの衝撃による損傷の防止に係る安全施設が位置している箇所については、設計飛来物の衝突による開口部の鋼板の貫通評価を行い、必要に応じて防護策として貫通限界厚さを上回るように鋼板で補強する。

1.7.3.8 設計竜巻荷重の算定法

「添付書類6 9. 竜巻」に示したように、設計竜巻の最大風速は 92m/s である。なお、耐竜巻設計にあつては、設計竜巻の最大風速（92m/s）に余裕を考慮し、最大風速として 100m/s を用いる。

原子炉施設の耐竜巻設計に用いる設計竜巻荷重は、風圧力、気圧差による圧力及び飛来物の衝撃荷重を組み合わせた複合荷重として算定する。風圧力については、建築基準法等の安全上適切と認められる規格及び基準を準用して算出する。気圧差による圧力については、設計竜巻による最大気圧低下量及び最大気圧低下率に基づいて設定する。飛来物の衝撃荷重については、原子炉施設周囲の状況等を勘案した上で、設計竜巻の最大風速及び物性値等に基づいて、設計飛来物を選定あるいは設定し、当該設計飛来物が竜巻防護施設又は外殻施設に

衝突することを想定して算出する。

設計飛来物は、外部からの衝撃による損傷の防止に係る安全施設又は外殻施設に衝突することを防止するための措置（固縛、固定化、移動）を必要に応じて講じることを考慮して、選定あるいは設定するものとする。

1.7.3.9 荷重の組合せと許容限界

1.7.3.9.1 荷重の組合せにおいて考慮する原子炉施設の状態

(1) 建物・構築物

(i) 運転時の状態

原子炉施設が通常運転時若しくは運転時の異常な過渡変化時にあり、通常の自然条件下におかれている状態

(ii) 設計基準事故時の状態

原子炉施設が設計基準事故時にある状態

(2) 機器・配管系

(i) 通常運転時の状態

原子炉施設の起動、停止、出力運転、燃料交換等が計画的に行われた場合であって、運転条件が所定の制限値以内にある運転状態

(ii) 運転時の異常な過渡変化時の状態

原子炉施設の通常運転時に予想される機械又は器具の単一の故障若しくはその誤作動又は運転員の単一の誤操作及びこれらと類似の頻度で発生すると予想される外乱によって発生する異常な状態であって、当該状態が継続した場合には炉心又は原子炉冷却材バウンダリの著しい損傷が生ずるおそれがあるものとして安全設計上想定すべき事象が発生した状態

(iii) 設計基準事故時の状態

発生頻度が運転時の異常な過渡変化より低い異常な状態であって、当該状態が発生した場合には原子炉施設から多量の放射性物質が放出するおそれがあるものとして安全設計上想定すべき事象が発生した状態

1.7.3.9.2 荷重の種類

(1) 建物・構築物

(i) 原子炉のおかれている状態にかかわらず常時作用している荷重（固定荷重、積載荷重、土圧、水圧並びに通常の気象条件による荷重）

(ii) 運転時の状態で作用する荷重

(iii) 設計基準事故時の状態で作用する荷重

(iv) 設計竜巻荷重、積雪荷重

なお、運転時の状態で作用する荷重及び設計基準事故時の状態で作用する荷重には、機器・配管系から作用する荷重が含まれるものとする。

(2) 機器・配管系

- (i) 通常運転時の状態で作用する荷重
- (ii) 運転時の異常な過渡変化時の状態で作用する荷重
- (iii) 設計基準事故時の状態で作用する荷重
- (iv) 設計竜巻荷重

1.7.3.9.3 荷重の組合せ

設計竜巻荷重と他の荷重との組合せは以下のとおりとする。

- (1) 建物・構築物
 - (i) 常時作用している荷重及び運転時の状態で作用する荷重と設計竜巻荷重及び積雪荷重を組み合わせる。
- (2) 機器・配管系
 - (i) 通常運転時の状態で作用する荷重、又は運転時の異常な過渡変化時の状態で作用する荷重のうち、長時間その作用が続く荷重と設計竜巻荷重を組み合わせる。
- (3) 荷重の組合せ上の留意事項
 - (i) 明らかに、他の荷重の組合せ状態での評価が厳しいことが判明している場合には、その荷重の組合せ状態での評価は行わなくてもよいものとする。
 - (ii) 複数の荷重が同時に作用する場合、それらの荷重による応力の各ピークの生起時刻に明らかなずれがあることが判明しているならば、必ずしも、それぞれの応力のピーク値を重ねなくともよいものとする。
 - (iii) 設計基準事故時に評価対象施設に応力は生じず、竜巻防護施設の外殻による防護に影響ないため、設計竜巻荷重及び設計基準事故時に生じる応力の組み合わせは考慮しない。

1.7.3.9.4 許容限界

各施設の設計竜巻荷重と他の荷重とを組み合わせた状態に対する許容限界は、以下のとおりとする。

- (1) 建物・構築物
 - (i) 建物・構築物が構造物全体として、十分変形能力（ねばり）の余裕を有し、終局耐力に対して妥当な安全余裕を持たせることとする。なお、終局耐力は、建物・構築物に対する荷重又は応力を漸次増大していくとき、その変形又はひずみが著しく増加するに至る限界の最大耐力とし、既往の実験式等に基づき適切に定めるものとする。
- (2) 機器・配管系
 - (i) 構造物の相当部分が降伏し塑性変形する場合でも過大な変形、亀裂、破損等が生じ、その施設の機能に影響を及ぼすことがない程度に応力を制限する。

1.7.3.10 設計における留意事項

- (1) 設計飛来物が安全施設又は外殻施設に衝突した際に生じる影響
設計飛来物が、外部からの衝撃による損傷の防止に係る安全施設又は外殻施設に衝

突した際に生じる影響（貫通及び裏面剥離）によって、その安全機能を損なわないよう設計する。なお、影響評価に当たっては、設計竜巻の最大風速を適用する。安全施設の外殻施設については竜巻ガイドに記載されている鋼製材の衝突を考慮する。

設計飛来物については、原子炉施設において、必要に応じて、飛来物が外部からの衝撃による損傷の防止に係る安全施設又は外殻施設に衝突することを防止するための措置（固縛、固定化、移動）を講じることを考慮して、選定あるいは設定するものとする。更に、外殻施設の開口部（ガラリ、シャッター、扉等）にも留意する。

（2）竜巻随件事象等に対する考慮

竜巻注意情報等が発表され、竜巻が接近するおそれが確認された場合には、原子炉を停止する。また、飛来物が、外部からの衝撃による損傷の防止に係る安全施設又は外殻施設に衝突することを防止するために必要な措置（固縛又は移動）を講じる。竜巻随件事象として想定される外部電源喪失等に対しては、原子炉保護系の作動等により、原子炉を自動停止するものとする。溢水に対しては、発生した場合に安全施設に影響を与えないよう、建物の外壁及び開口部等により浸水しないものとする。建物付近にて発生する車両火災については、建物外壁面に不燃材の層を敷設し、火災の影響を緩和する。また、速やかに消火を実施することで安全施設に影響がないものとする。

添付 3 設置許可申請書の添付書類における記載（適合性）

添付書類八

1. 安全設計の考え方

1.8 「設置許可基準規則」への適合

原子炉施設は、「設置許可基準規則」に適合するように設計する。各条文に対する適合のための設計方針は次のとおりである。

(外部からの衝撃による損傷の防止)

第六条 安全施設は、想定される自然現象（地震及び津波を除く。次項において同じ。）が発生した場合においても安全機能を損なわないものでなければならない。

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。

適合のための設計方針

1 について

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。

(3) 竜巻

原子炉施設の耐竜巻設計に用いる設計竜巻荷重は、風圧力、気圧差による圧力及び飛来物の衝撃荷重を組み合わせた複合荷重として算定する。風圧力については、建築基準法等の安全上適切と認められる規格及び基準を準用して算出する。気圧差による圧力については、設計竜巻による最大気圧低下量及び最大気圧低下率に基づいて設定する。飛来物の衝撃荷重については、原子炉施設周囲の状況等を勘案した上で、設計竜巻の最大風速及び物性値等に基づいて、設計飛来物を選定あるいは設定し、当該設計飛来物が、外部からの衝撃による損傷の防止に係る重要安全施設又は外殻施設に衝突することを想定して算出する。

ここでは、設計竜巻の最大風速（92m/s）に余裕を考慮し、最大風速として100m/sを用いて、建物・構築物が構造物全体として、十分変形能力（ねばり）の余裕を有し、終局耐力に対して妥当な安全余裕を持っていることを確認する。また、機器・配管系について、構造物の相当部分が降伏し塑性変形する場合でも過大な変形、亀裂、破損等が生じ、その施設の機能に影響を及ぼすことがない程度に応力を制限する。なお、竜巻注意情報等が発表され、竜巻が接近するおそれが確認された場合には、原子炉を停止する。また、飛来物が、外部からの衝撃による損傷の防止に係る安全施設又は外殻施設に衝突することを防止するために必要な措置（固縛又は避難）を講じる。竜巻随伴事象として想定される外部電源喪失等に対しては、原子炉保護系の作動等により、原子炉を自動停止するものとする。溢水に対しては、発生した場合に安全施設に影響を与えないよう、建物の外壁及び開口部等により浸水しないものとする。建物付近にて発生する車両火災については、建物外壁面に不燃材の層を敷設し、火災の影響を緩和する。また、速やかに消火を実施することで安全施設に影響がないものとする。

2 について

設計基準事故時に評価対象施設に応力は生じず、竜巻防護施設の外殻による防護に影響ないため、設計竜巻荷重及び設計基準事故時に生じる応力の組み合わせは考慮しない。このため、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。

添付書類六の以下の項目参照

2. 気象
3. 地盤
4. 水理
6. 社会環境
8. 火山
9. 竜巻
10. 生物

添付書類八の以下の項目参照

1. 安全設計の考え方

添付書類六 9. 竜巻

9. 竜巻

9.1 検討の基本方針

自然現象に対する設計上の考慮として、想定される自然現象に対して原子炉施設が安全性を損なわないことを確認するため、竜巻影響評価を実施する。

竜巻影響評価は、「原子力発電所の竜巻影響評価ガイド」(以下「竜巻評価ガイド」という。)⁽¹⁾を参考に、竜巻検討地域の設定、基準竜巻の最大風速の設定及び設計竜巻の最大風速の設定の流れで実施する。

9.2 竜巻検討地域の設定

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する。

大洗研究所(南地区)の敷地は、茨城県東茨城郡大洗町の南部に位置し、敷地東側は太平洋に面している。この太平洋側沿岸における、気象条件の類似性の観点から、気象総観場ごとの竜巻発生場所の分析を行い、原子炉施設が立地する大洗研究所(南地区)と類似の地域を抽出する。

気象庁の「竜巻等の突風データベース」⁽²⁾を基に、独立行政法人原子力安全基盤機構が東京工芸大学に委託した研究の成果(以下「東京工芸大学の委託成果」という。)⁽³⁾を参考に、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つに分類する。なお、使用するデータは竜巻等の突風データベース⁽²⁾を基に1961年から2012年6月のものとする。第9.2.1図に示す気象総観場ごとの竜巻発生位置から、発生場所の傾向を確認する。

台風起因の竜巻は、九州から太平洋側の沿岸で発生しており、停滞前線起因の竜巻は北海道を除く地域で発生している。なお、低気圧、局地性降雨(局地性擾乱、雷雨含む)、季節風及びその他の起因の竜巻は日本全国で発生しており地域性はない。

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。

これらの検討を踏まえ、海岸線付近に竜巻の発生が集中していることを考慮し、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。竜巻検討地域を第9.2.2図に示す。

9.3 基準竜巻の最大風速の設定

基準竜巻の最大風速(V_B)は、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。

(1) 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})の設定

日本で過去に発生した最大の竜巻は、竜巻等の突風データベース⁽²⁾（1961年から2012年6月）によると第9.3.1表に示す藤田スケールでF3である。F3スケールにおける風速は第9.3.2表から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。

(2) 竜巻最大風速のハザード曲線による最大風速(V_{B2})の設定

ハザード曲線による竜巻最大風速(V_{B2})は、竜巻検討地域における竜巻の観測記録等に基づき評価する。第9.3.1図に竜巻ハザード算定フローを示す。評価は、竜巻データの分析、竜巻風速及び被害幅並びに被害長さの確率密度分布、それらの相関係数の算定、ハザード曲線の算定によって構成される。

a. 竜巻の発生頻度の分析

評価対象とする竜巻は、竜巻等の突風データベース⁽²⁾をもとに、竜巻検討地域における1961年から2012年6月の51.5年間に発生した竜巻事例を使用する。

竜巻等の突風データベース⁽²⁾では、1961年以降に発生した竜巻に関する情報がデータベース化されているが、観測体制は近年になるほど強化されており、年代による観測値の品質のばらつきを考慮し、以下の基本的考え方に基づいて竜巻データをFスケール毎に整理する。

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

なお、竜巻検討地域外で発生して竜巻検討地域内に移動した竜巻も発生数にカウントする。また、F0～F1、F2～F3等のように、Fスケールをまたいだ定義がなされている場合は、保守性を考慮して、それぞれF1、F3等として評価する。

Fスケールが不明な竜巻は以下のように取扱う。陸上で発生した竜巻（以下「陸上竜巻」という。）及び海上で発生して陸上へ移動した竜巻（以下「上陸竜巻」という。）については、被害があつて初めてそのFスケールが推定されるため、これらの竜巻は被害が少ないF0竜巻と見なす。海上竜巻については、その竜巻のFスケールを推定することは困難であることから、沿岸部近傍での海上竜巻の発生特性は、上陸竜巻を含む陸上竜巻と類似していると仮定し、陸上竜巻のFスケール別の発生比率で按分する。

以上の考え方に基づく各年代別の竜巻発生数の分析結果を第9.3.3表に示す。また、海上竜巻の発生数を陸上竜巻のFスケール別発生比率で按分した分析結果を第9.3.4表に示す。その結果、ハザード曲線の算定に使用する疑似竜巻を含めた51.5年間の発生総数は

1,338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。

b. 年発生数の確率密度分布の算定

竜巻の年発生数の確率密度分布は、東京工芸大学の委託成果(3)によればポアソン分布若しくはポリヤ分布に従う。ポアソン分布は、稀な現象の場合に有用な分布である。一方、ポリヤ分布は、発生状況が必ずしも独立でない稀な現象の場合に有用な分布である。台風や前線により竜巻が発生した場合、同時多発的に複数の竜巻が発生する状況が考えられるため、ポリヤ分布の方が実現象をより反映できると考えられる。

なお、国内を対象とした竜巻の年発生数の分布の適合性に関する検討結果は、東京工芸大学の委託成果⁽³⁾に示されており、陸上竜巻及び海上竜巻の両方の発生数について、適合性の良いポリヤ分布により設定した。

以上より、ハザード曲線の算定に当たって使用する竜巻年発生数の確率密度分布はポリヤ分布を採用する。竜巻検討地域における竜巻の年発生数の確率密度分布を第9.3.2図に示す。

c. 竜巻風速、被害幅及び被害長さの確率密度分布と相関係数の算定

竜巻発生数と同様に、竜巻等の突風データベース⁽²⁾をもとに、竜巻被害幅及び竜巻被害長さの観測データを分析する。

なお、疑似的な竜巻の作成に伴う竜巻の被害幅又は被害長さの情報が無い竜巻に対しては、被害幅又は被害長さを有する竜巻の観測値を与えている。その際は、被害幅又は被害長さが大きいデータから優先的に用いることで、これらの平均値が大きくなるように工夫している。また、被害幅又は被害長さが幅を持って記載されている場合は大きい値を用い、0mの場合は計算に用いないとして保守的な評価とした。

ハザード曲線を算定するためには、1つの竜巻が発生した際の竜巻風速、被害幅及び被害長さの確率密度分布が必要となる（第9.3.1図参照）。そこで、これまで算定した竜巻検討地域における51.5年間の竜巻発生数、被害幅及び被害長さのデータを用いて確率密度分布を求める。その際、竜巻評価ガイド⁽¹⁾及び東京工芸大学の委託成果(3)を参照して、確率密度関数が対数正規分布に従うものとして評価する。本評価に用いた竜巻検討地域における竜巻パラメータを第9.3.5表に示す。

第9.3.3図(1)～第9.3.3図(3)に竜巻風速及び竜巻被害幅並びに被害長さに対する確率密度分布を示す。また、第9.3.4図(1)～第9.3.4図(3)に竜巻風速及び竜巻被害幅並びに被害長さの超過確率を示す。これらは観測結果と整合している。

1961年以降の観測データを用いて竜巻風速、被害幅及び被害長さについての相関係数を算定した結果を第9.3.6表に示す。

算定結果から、竜巻検討地域においては、各変量間に約0.4程度の相関が認められ、風速が大きいほど被害域の幅・長さが大きくなる傾向となる。

d. 竜巻影響エリアの設定

竜巻影響エリアは、設計対象施設を含む円形に設定する。竜巻影響エリアを円形に設定することで、ハザード曲線の評価において竜巻の移動方向に依存しないとして評価を行う。高速実験炉原子炉施設の竜巻影響エリアは、第9.3.5図の高速実験炉原子炉施設の概略配置図に示すように、原子炉建物・原子炉附属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、この円（面積：約 80,500m²）を竜巻影響エリアとする。

e. ハザード曲線の算定方法

ハザード曲線の算定においては、東京工芸大学の委託成果⁽³⁾にならってポリヤ分布を用いる。竜巻の発生頻度は、以下のポリヤ分布で表されると仮定する。

$$P_T(N) = \frac{(\nu T)^N}{N!} (1 + \beta \nu T)^{-(N+1/\beta)} \prod_{k=1}^{N-1} (1 + \beta k) \quad \dots\dots (9-1 \text{ 式})$$

ここで、N は竜巻の年発生数、 ν は竜巻の年平均発生数、T は年数である。 β はポリヤ分布パラメータであり、下式で表される。

$$\beta = \left(\frac{\sigma^2}{\nu} - 1 \right) \times \frac{1}{\nu} \quad \dots\dots (9-2 \text{ 式})$$

ここで、 σ は竜巻の年発生数の標準偏差である。

D を対象とする構造物が風速 V_0 以上の竜巻に遭遇する事象とし、評価対象とする構造物が 1 つの竜巻に遭遇し、その竜巻の風速が V_0 以上となる確率を $R(V_0)$ とした時、T 年以内にいずれかの竜巻に遭遇し、かつ竜巻風速が V_0 以上となる確率は、下式のようになる。

$$P_{V_0,T}(D) = 1 - [1 + \beta \nu R(V_0) T]^{-1/\beta} \quad \dots\dots (9-3 \text{ 式})$$

この $R(V_0)$ は、竜巻影響評価の対象地域の面積（竜巻検討地域の面積）を A_0 、1 つの竜巻の風速が V_0 以上となる面積を $DA(V_0)$ とすると下式で示される。

$$R(V_0) = \frac{E[DA(V_0)]}{A_0} \quad \dots\dots (9-4 \text{ 式})$$

ここで、 $E[]$ は期待値を意味する。

また、以下のようにして $DA(V_0)$ の期待値を算定し、(9-4 式) により $R(V_0)$ を算定して、竜巻検討地域における竜巻の年発生数に関するポリヤ分布の特性値を用いて (9-3 式) より $P_{V_0,T}(D)$ を求める。風速を V 、被害幅を w 、被害長さを 1 とし、 $f(V, w, 1)$ 等の同時確率密度分布を用いると、竜巻影響エリアを円形で設定しているため竜巻の移動方向に依存しないことから、 $DA(V_0)$ の期待値は (9-5 式) のように表すことができる。

$$\begin{aligned}
E[DA(V_0)] = & \int_0^{\infty} \int_0^{\infty} \int_0^{\infty} W(V_0) l f(V, w, l) dV dw dl \\
& + L \int_0^{\infty} l f(V, l) dV dl \\
& + L \int_0^{\infty} \int_0^{\infty} W(V_0) f(V, w) dV dw \\
& + S \int_0^{\infty} f(V) dV
\end{aligned}
\quad \dots\dots (9-5 \text{ 式})$$

ここで、L は竜巻影響エリアの直径、S は竜巻影響エリアの面積、 $l f(V, l)$ および $f(V, w)$ はそれぞれ、竜巻の被害長さ及び被害幅方向に沿った面に竜巻影響評価対象構造物を投影した時の長さである。

また、風速の積分範囲の上限値は、ハザード曲線の形状が不自然にならない程度に大きな値として 120m/s に設定した。また、 $W(V_0)$ は、竜巻の被害幅のうち風速が V_0 を超える部分の幅であり、(9-6 式) により算定される。

$$W(V_0) = \left(\frac{V_{\min}}{V_0} \right)^{1/1.6} w
\quad \dots\dots (9-6 \text{ 式})$$

ここで、 V_{\min} は、被害が発生し始める風速に位置づけられる。このため、竜巻の最小風速を考慮して F0 竜巻 (17~32m/s) の最小風速である $V_{\min}=17\text{m/s}$ とした。

f. 竜巻最大風速のハザード曲線による最大風速 (V_{B2}) の設定

竜巻最大風速のハザード曲線を第 9.3.6 図に示す。竜巻最大風速のハザード曲線による最大風速 (V_{B2}) は、年超過確率 10^{-5} に相当する風速として、68.1m/s と設定する。

(3) 基準竜巻の最大風速の設定

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 $V_{B1}=92\text{m/s}$ と竜巻最大風速のハザード曲線による最大風速 $V_{B2}=68.1\text{m/s}$ 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 と設定する。

9.4 設計竜巻の最大風速の設定

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。

設計竜巻の設定に当たっては、丘陵等による地形効果によって下り斜面において竜巻が増幅する可能性があると考えられることから⁽⁴⁾、立地する地域における設計対象施設の周辺地域等の地形について検討した。

検討の結果、高速実験炉原子炉施設の設計竜巻の最大風速については、以下のとおりとする。

大洗研究所（南地区）は標高約38mの平坦な台地に位置し、敷地内には13～16m位の高低がある。高速実験炉原子炉施設は標高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。

以上より、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。

9.5 参考文献

- (1) 原子力規制委員会, 原子力発電所の竜巻影響評価ガイド, 2013年6月, 29p.
- (2) 気象庁, 竜巻等の突風データベース,
<http://www.data.jma.go.jp/obd/stats/data/bosai/tornado/index.html> (参照: 2013年10月4日).
- (3) 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, 424p.
- (4) Lewellen, D.C., Effects of Topography on Tornado Dynamics: A Simulation Study, 26th Conference on Severe Local Storms, American Meteorological Society, Nov. 5-8, 2012, 7p.

第9.3.1表 日本で過去に発生したF3竜巻一覧

No	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

第9.3.2表 藤田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)

第9.3.3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

第 9.3.4 表 51.5 年間の竜巻発生数の分析結果

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

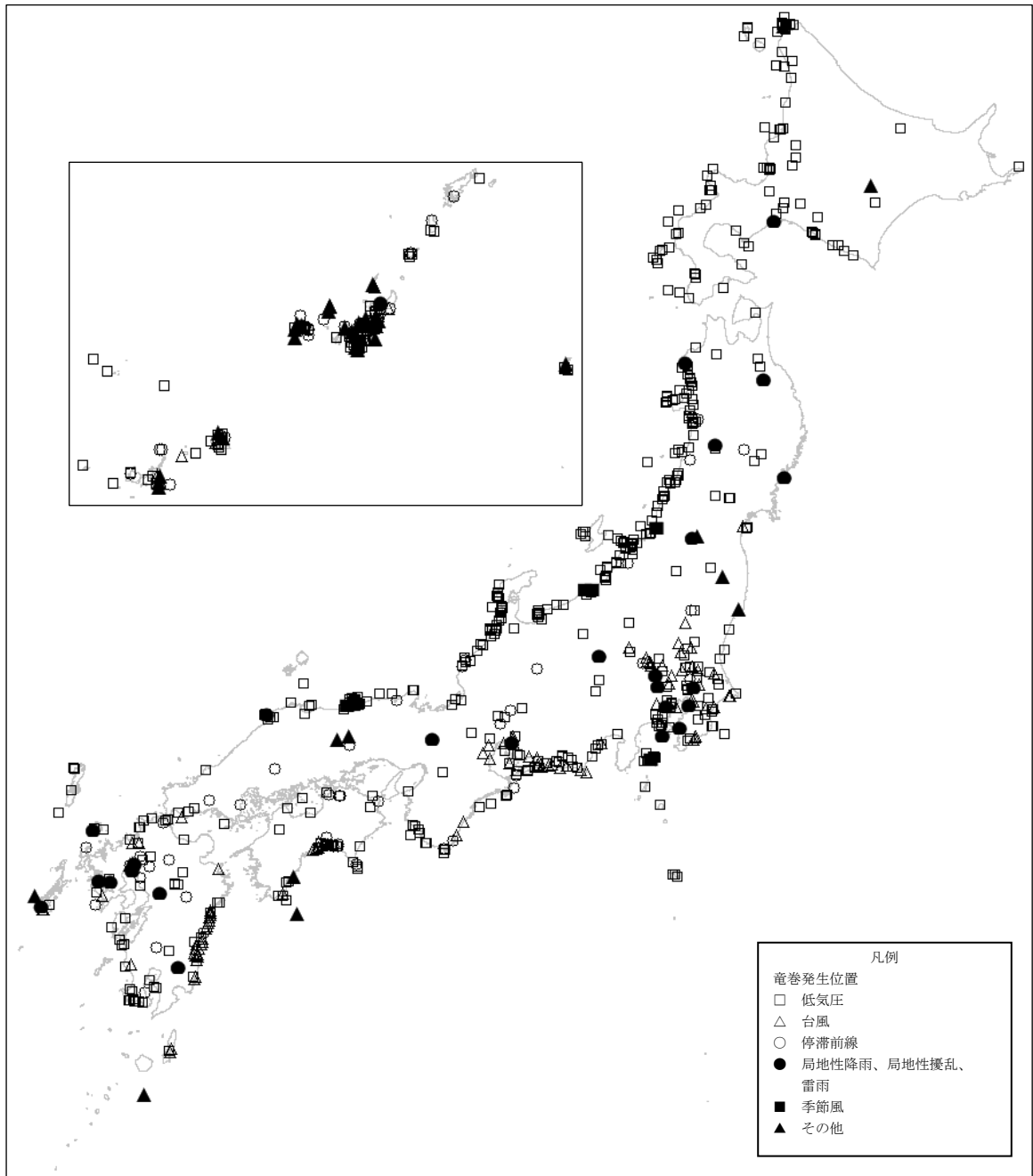
第 9.3.5 表 竜巻検討地域における竜巻パラメータ (51.5 年間の分析結果)

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

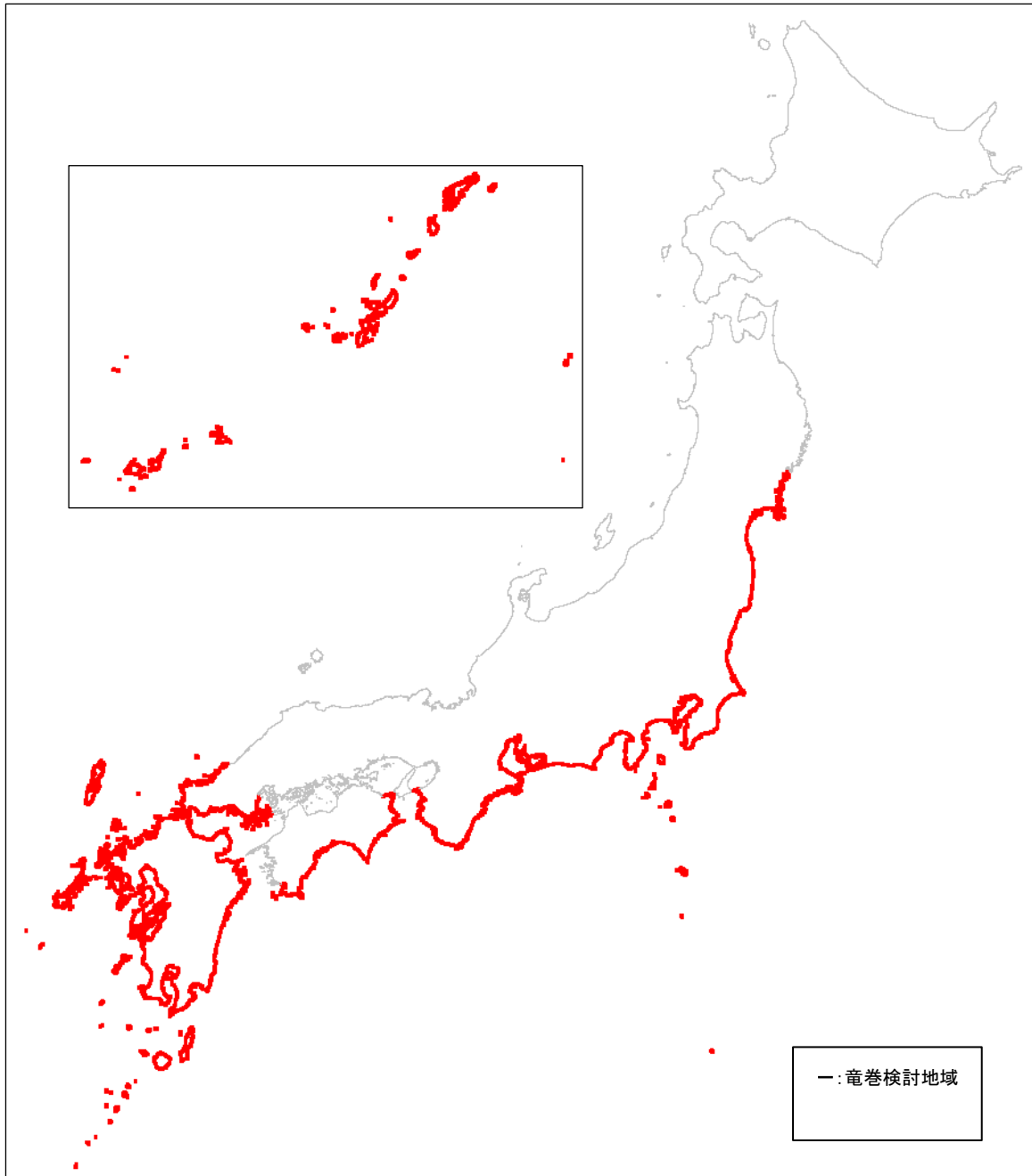
第 9.3.6 表 竜巻風速、被害幅、被害長さの相関係数の算定*

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

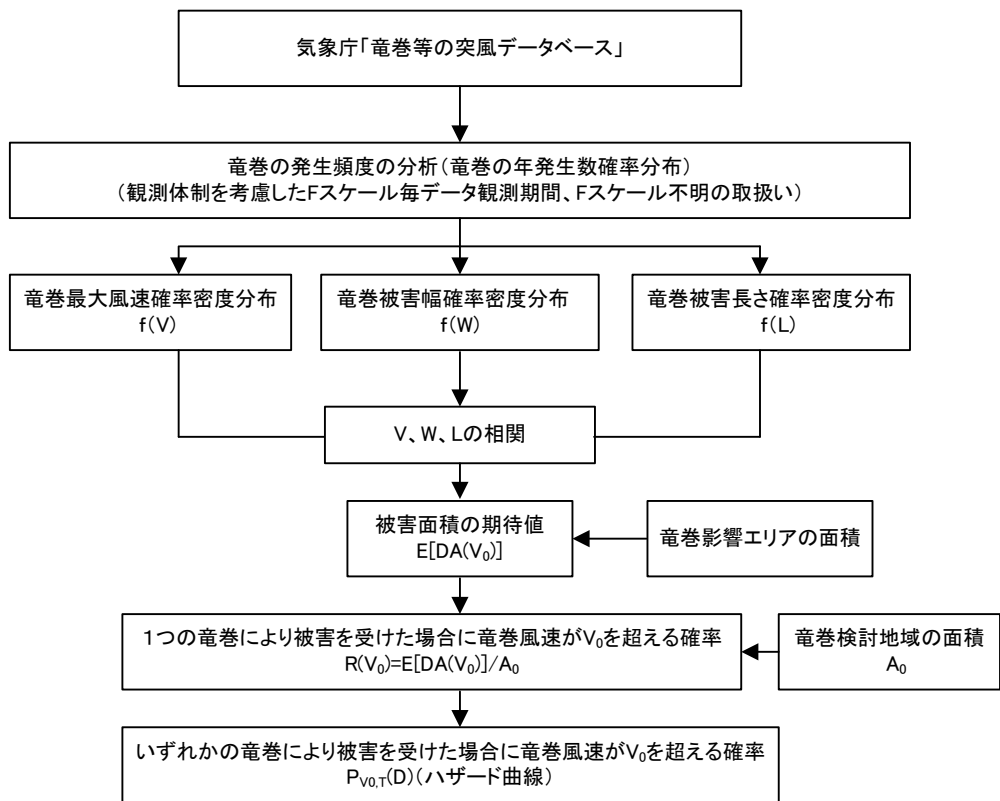
*観測データのみを用いて算定



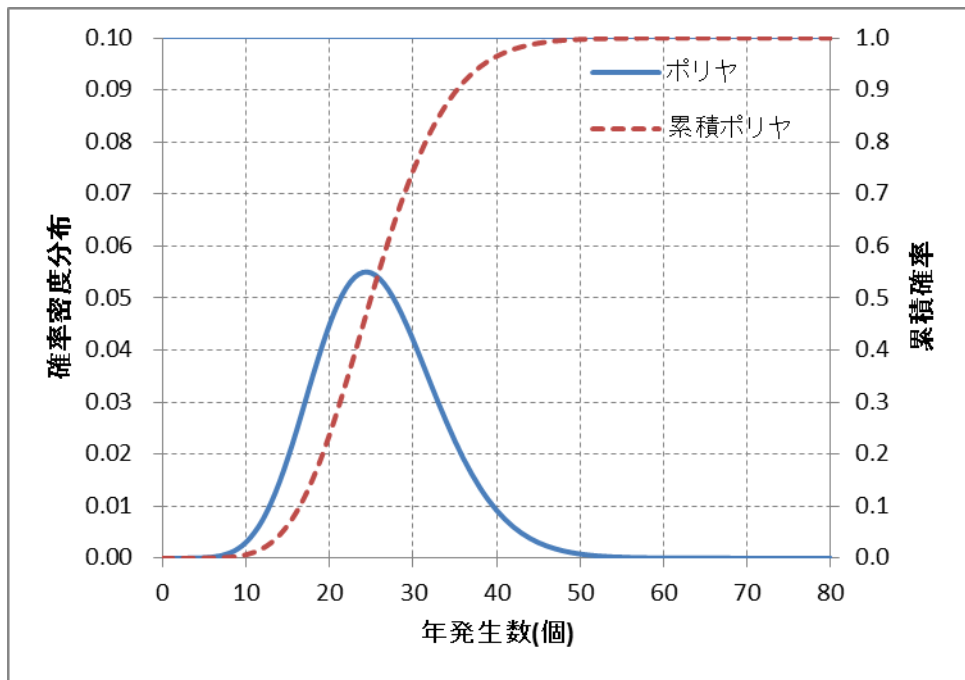
第 9.2.1 図 気象総観場ごとの竜巻発生位置



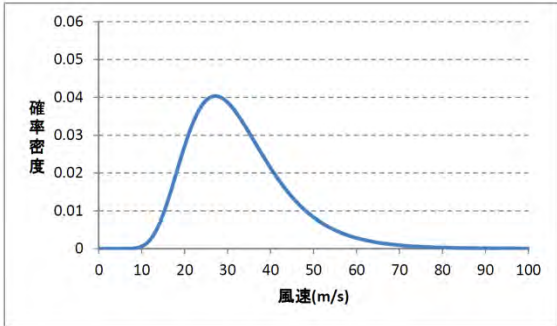
第 9.2.2 図 竜巻検討地域



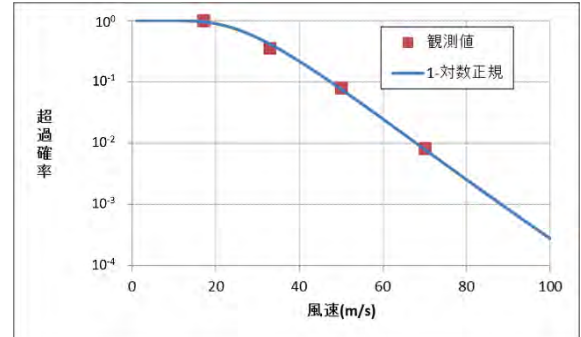
第 9. 3. 1 図 竜巻ハザードの算定フロー



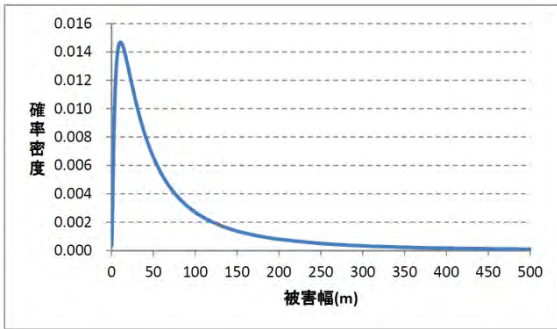
第 9. 3. 2 図 竜巻年発生数の確率密度分布



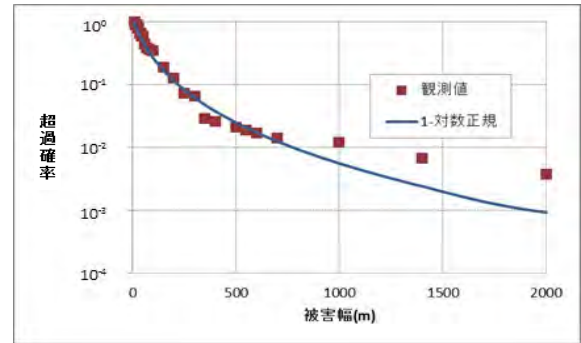
第 9. 3. 3 図(1) 竜巻風速の確率密度分布



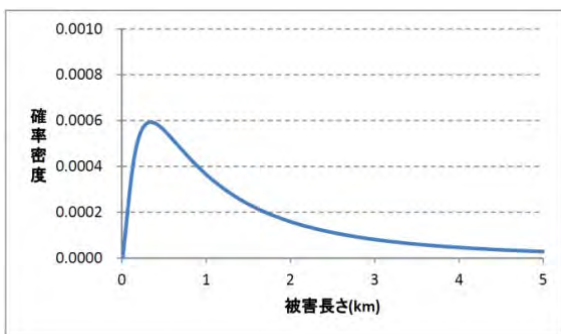
第 9. 3. 4 図(1) 竜巻風速の超過確率



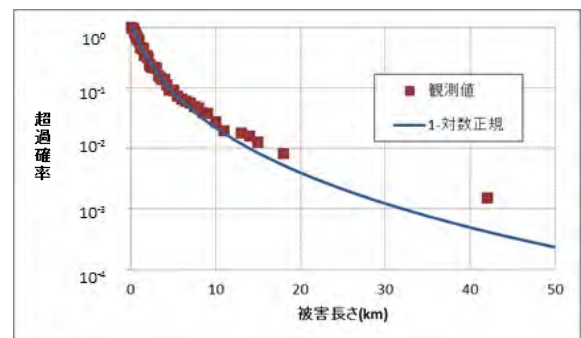
第 9. 3. 3 図(2) 竜巻被害幅の確率密度分布



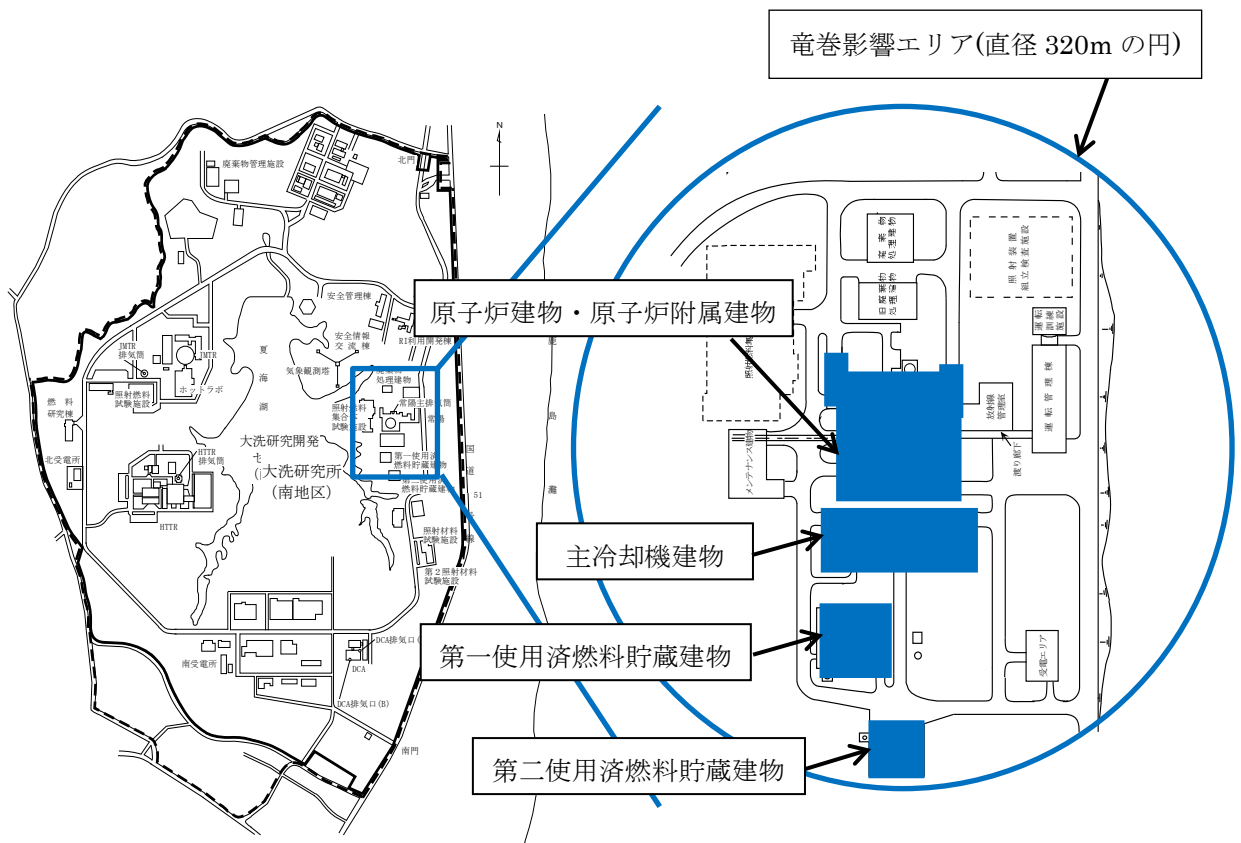
第 9. 3. 4 図(2) 竜巻被害幅の超過確率



第 9. 3. 3 図(3) 竜巻被害長さの確率密度分布



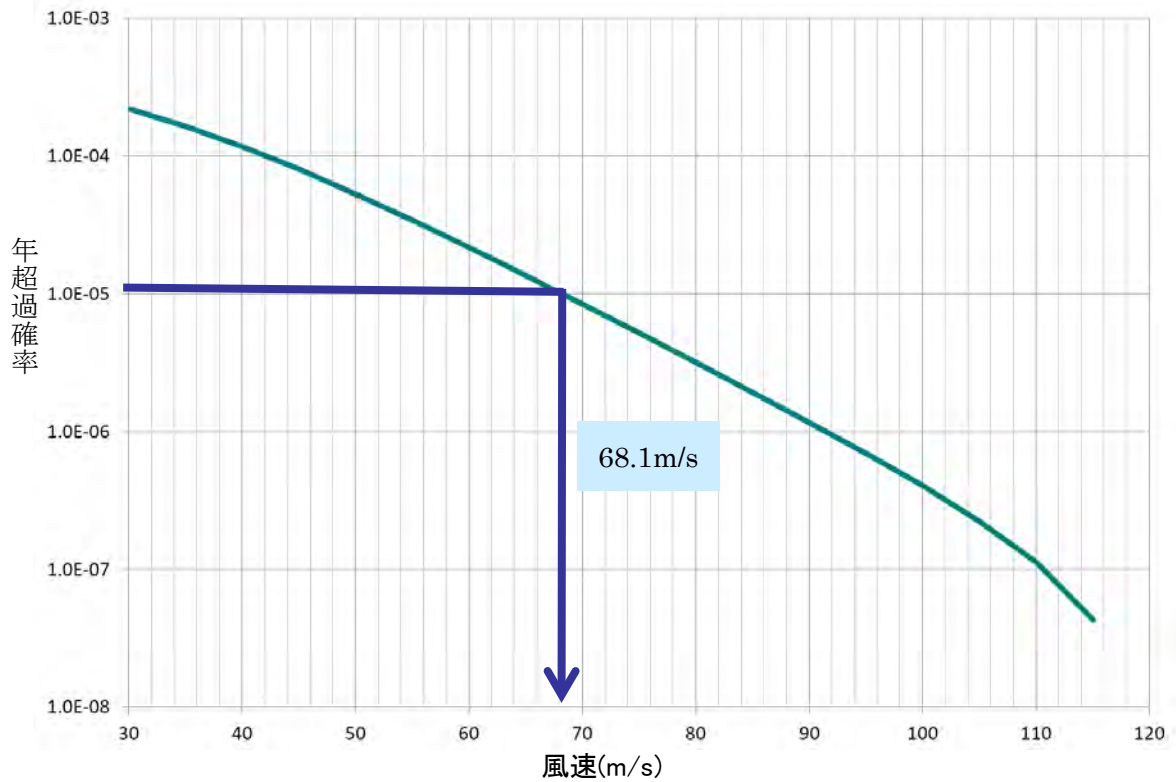
第 9. 3. 4 図(3) 竜巻被害長さの超過確率



大洗研究所施設配置図

高速実験炉原子炉施設の概略配置図

第 9.3.5 図 高速実験炉原子炉施設の概略配置図



第 9.3.6 図 竜巻最大風速のハザード曲線（海側陸側各 5km の評価）