

| | |
|--------------|------------------|
| 東海第二発電所 審査資料 | |
| 資料番号 | PD-C-1 改 34 |
| 提出年月日 | 平成 29 年 7 月 25 日 |

東海第二発電所

設計基準対象施設について

平成 29 年 7 月
日本原子力発電株式会社

本資料のうち、は商業機密又は核物質防護上の観点から公開できません。

目 次

- 4 条 地震による損傷の防止
- 5 条 津波による損傷の防止
- 6 条 外部からの衝撃による損傷の防止（その他外部事象）
- 6 条 外部からの衝撃による損傷の防止（竜巻）
- 6 条 外部からの衝撃による損傷の防止（外部火災）
- 6 条 外部からの衝撃による損傷の防止（火山）
- 7 条 発電用原子炉施設への人の不法な侵入等の防止
- 8 条 火災による損傷の防止
- 9 条 溢水による損傷の防止等
- 10 条 誤操作の防止
- 11 条 安全避難通路等
- 12 条 安全施設（静的機器の単一故障）
- 14 条 全交流動力電源喪失対策設備
- 16 条 燃料体等の取扱施設及び貯蔵施設
- 17 条 原子炉冷却材圧力バウンダリ
- 23 条 計測制御系統施設（第 16 条に含む）
- 24 条 安全保護回路
- 26 条 原子炉制御室等
- 31 条 監視設備
- 33 条 保安電源設備
- 34 条 緊急時対策所
- 35 条 通信連絡設備

東海第二発電所

外部からの衝撃による損傷の防止

(竜巻)

第6条 外部からの衝撃による損傷の防止

(竜巻)

<目次>

1. 基本方針
 - 1.1 要求事項の整理
 - 1.2 追加要求事項に対する適合性
 - (1) 位置, 構造及び設備
 - (2) 安全設計方針
 - (3) 適合性説明
 - 1.3 気象等
 - 1.4 設備等

2. 外部からの衝撃による損傷の防止
 - 別添資料1 竜巻影響評価について
 - 別添資料2 竜巻影響評価におけるフジタモデルの適用について

< 概 要 >

1. において、設計基準事故対処設備の設置許可基準規則、技術基準規則の追加要求事項を明確化するとともに、それら要求に対する東海第二発電所における適合性を示す。

2. において、設計基準事故対処設備について、追加要求事項に適合するために必要となる機能を達成するための設備又は運用等について説明する。

1. 基本方針

1.1 要求事項の整理

外部からの衝撃による損傷の防止について，設置許可基準規則第 6 条及び技術基準規則第 7 条において，追加要求事項を明確化する。（表 1）

表 1 設置許可基準規則第 6 条及び技術基準規則第 7 条 要求事項

| 設置許可基準規則 | 技術基準規則 | 備考 |
|---|---|---------------|
| <p>第 6 条（外部からの衝撃による損傷の防止）</p> <p>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ものでなければならない。</p> | <p>第 7 条（外部からの衝撃による損傷の防止）</p> <p>設計基準対象施設が想定される自然現象（地震及び津波を除く。）によりその安全性を損なうおそれがある場合は、防護措置、基礎地盤の改良その他の適切な措置を講じなければならない。</p> | <p>追加要求事項</p> |
| <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>追加要求事項</p> |
| <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発電用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>2 周辺監視区域に隣接する地域に事業所、鉄道、道路その他の外部からの衝撃が発生するおそれがある要因がある場合には、事業所における火災又は爆発事故、危険物を搭載した車両、船舶又は航空機の事故その他の敷地及び敷地周辺の状況から想定される事象であって人為によるもの（故意によるものを除く。）により発電用原子炉施設の安全性が損なわれないよう、防護措置その他の適切な措置を講じなければならない。</p> <p>3 航空機の墜落により発電用原子炉施設の安全性を損なうおそれがある場合は、防護措置その他の適切な措置を講じなければならない。</p> | <p>追加要求事項</p> |

1.2 追加要求事項に対する適合性

(1) 位置、構造及び設備

ロ 発電用原子炉施設の一般構造

(3) その他の主要な構造

(i) 本発電用原子炉施設は、(1)耐震構造、(2)耐津波構造に加え、以下の基本的方針のもとに安全設計を行う。

a. 設計基準対象施設

(a) 外部からの衝撃による損傷の防止

安全施設は、発電所敷地で想定される洪水、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、森林火災及び高潮の自然現象（地震及び津波を除く。）又は地震及び津波を含む自然現象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設計とする。

なお、発電所敷地で想定される自然現象のうち、洪水、地滑りについては、立地的要因により設計上考慮する必要はない。

また、自然現象の組合せにおいては、地震、津波、風（台風）、積雪及び火山の影響による荷重の組合せを設計上考慮する。

上記に加え、重要安全施設は、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について、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。

また、安全施設は、発電所敷地又はその周辺において想定され

る、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の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設計とする。

なお、発電所敷地又はその周辺において想定される人為事象のうち、航空機落下については、確率的要因により設計上考慮する必要はない。また、ダムの崩壊については、立地的要因により考慮する必要はない。

ここで、想定される自然現象及び発電用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又は設備等（重大事故等対処設備を含む。）への措置を含める。

- (a-1) 安全施設は、想定される竜巻が発生した場合においても、作用する設計荷重に対して、その安全機能を損なわない設計とする。また、安全施設は、過去の竜巻被害状況及び東海第二発電所のプラント配置から想定される竜巻に随伴する事象に対して、安全機能を損なわない設計とする。

竜巻に対する防護設計を行うための設計竜巻の最大風速は、 100m/s とし、設計荷重は、設計竜巻による風圧力による荷重、気圧差による荷重及び飛来物が安全施設に衝突する際の衝撃荷重を組み合わせた設計竜巻荷重、並びに、安全施設に常時作用する荷重、運転時荷重及びその他竜巻以外の自然現象による荷重等を適切に組み合わせたものとして設定する。

安全施設の安全機能を損なわないようにするため、安全施設に影響を及ぼす飛来物の発生防止対策を実施するとともに、作用する設計荷重に対する安全施設及び安全施設を内包する区画の構造健全性の確保、若しくは、飛来物による損傷を考慮して、代替設備により必要な機能を確保すること、安全上支障のない期間での修復等の対応、又は、それらを適切に組み合わせた設計とする。

飛来物の発生防止対策として、飛来物となる可能性のあるもののうち、資機材、車両等については、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である鋼製材（長さ 4.2m×幅 0.3m×高さ 0.2m、質量 135kg、飛来時の水平速度 51m/s、飛来時の鉛直速度 34m/s）より大きなものに対し、固縛、固定又は竜巻防護施設からの離隔を実施する。

【別添資料 1（3. : 1-47～72）】

(2) 安全設計方針

1.7 竜巻防護に関する基本方針

1.7.1 設計方針

(1) 竜巻に対する設計の基本方針

安全施設が竜巻に対して、発電用原子炉施設の安全性を確保するために必要な各種の機能を損なわないよう、基準竜巻、設計竜巻及び設計荷重を適切に設定し、以下の事項に対して、対策を行い、建屋による防護、構造健全性の維持及び代替設備の確保等によって、安全機能を損なわない設計とする。

また、安全施設は、設計荷重による波及的影響によって、安全機能を損なわない設計とする。

- a. 飛来物の衝突による施設の貫通及び裏面剥離
- b. 設計竜巻による風圧力による荷重，気圧差による荷重，及び設計飛来物による衝撃荷重を組み合わせた設計竜巻荷重及びその他の**組合せ**荷重（常時作用している荷重，運転時荷重，竜巻以外の自然現象による荷重及び設計基準事故時荷重）を適切に組み合わせた設計荷重
- c. 竜巻による気圧の低下
- d. 外気と繋がっている箇所への風の流入

竜巻から防護する施設としては、安全施設が竜巻の影響を受ける場合においても、発電用原子炉施設の安全性を確保するために、「発電用軽水型原子炉施設の安全機能の重要度分類に関する審査指針」で規定されているクラス1，クラス2及びクラス3に該当する構築物，系統及び機器とする。

竜巻から防護する施設のうちクラス1，クラス2に該当する構築物，系統及び機器（以下「竜巻防護施設」という。）として竜巻による影響を評価し設計する。また，竜巻防護施設を内包する施設についても同様に竜巻による影響を評価し設計する。クラス3に属する施設は，損傷する場合を考慮して，代替設備により必要な機能を確保すること，安全上支障のない期間に修復すること等の対応が可能な設計とすることにより，安全機能が維持されることから，竜巻による影響を評価する対象から除外する。

竜巻防護施設については「1.7.1(3) 竜巻防護施設」にて記載する。竜巻防護施設を内包する施設については，「1.7.1(4) 竜巻防護施設を内包する施設」にて記載する。竜巻防護施設に波及的影響を及ぼし得る施設については，「1.7.1(5) 竜巻防護施設に波及的影響を及ぼし得る施設」にて記載する。

竜巻に対する防護設計を行う，竜巻防護施設，竜巻防護施設を内包する施設及び竜巻防護施設に波及的影響を及ぼし得る施設を「評価対象施設」という。

なお，「基準地震動および耐震設計方針に係る審査ガイド」の重要度分類における耐震Sクラスの設計を要求される設備（系統，機器）及び建屋，構築物のうち，竜巻の影響を受ける可能性がある設備を抽出した結果，追加で「1.7.1(3) 竜巻防護施設」に反映する施設はない。

竜巻防護施設の安全機能を損なわないようにするため，竜巻防護施設に影響を及ぼす飛来物の発生防止対策をするとともに，作用する設計荷重に対する竜巻防護施設の構造健全性の維持，竜巻防護施設を内包する区画の構造健全性の確保，若しくは，飛来物による損傷を考慮し安全上支障のない期間での修復等の対応，又は，それらを適切に組み合わせた設計とする。

屋外に設置する竜巻防護施設の構造健全性の維持又は竜巻防護施設を内包する区画の構造健全性の確保において，それらを防護するために設置する竜巻飛来物防護対策設備は，防護ネット，防護鋼板等から構成し，飛来物から竜巻防護施設を防護できる設計とする。

【別添資料1（1. : 1-1～13）】

(2) 設計竜巻の設定

「添付書類六 8. 竜巻」において設定した基準竜巻の最大風速は92m/sとする。

設計竜巻の設定に際して，東海第二発電所は敷地が平坦であるため，地形効果による風の増幅を考慮する必要はないことを確認したが，基準竜巻

の最大風速を安全側に切り上げて、設計竜巻の最大風速は 100m/s とする。

【別添資料 1 (2. : 1-14~46)】

(3) 竜巻防護施設

竜巻防護施設は、外殻となる施設（建屋，構築物）に内包され、外気と繋がっておらず設計竜巻荷重の影響から防護される施設（以下「外殻となる施設による防護される施設（外気と繋がっている施設を除く。））」という。），外殻となる施設（建屋，構築物）に内包されるが設計竜巻荷重の影響から防護が期待できない施設（以下「外殻となる施設による防護機能が期待できない施設」という。），外殻となる施設（建屋，構築物）に内包されるため、設計竜巻の風圧力による荷重及び設計飛来物による衝撃荷重の影響から防護されるが、外気と繋がっており設計竜巻の気圧差による荷重の影響を受ける施設（以下「屋内の施設で外気と繋がっている施設」という。）及び設計竜巻荷重の影響を受ける屋外施設（以下「屋外施設」という。）に分類し、以下のように抽出する。

a. 外殻となる施設による防護される施設（外気と繋がっている施設を除く。）

b. 外殻となる施設による防護機能が期待できない施設

外殻となる施設による防護機能が期待できない施設は、「1.7.1(4) 竜巻防護施設を内包する施設」として、抽出した建屋，構築物の構造健全性の評価を行い、外殻となる施設による防護機能が期待できない施設を抽出する。

(a) 中央制御室換気系ファン（空気調和器含む）

(b) 中央制御室換気系フィルタユニット

（以下(a)(b)を区別不要の場合は「中央制御室換気系ファン」という。）

- (c) 非常用電源盤
- (d) 非常用ガス処理系設備及び非常用ガス再循環系設備
- (e) 使用済燃料プール
- (f) 燃料プール冷却浄化系真空破壊弁
- (g) 使用済燃料乾式貯蔵容器

c. 屋内の施設で外気と繋がっている施設及び屋外施設

<屋内の施設で外気と繋がっている施設>

- (a) 中央制御室換気系隔離弁，ファン（ダクト含む）
- (b) 非常用ディーゼル発電機室換気系ダクト
- (c) 高圧炉心スプレイ系ディーゼル発電機室換気系ダクト
(以下(b)(c)を区別不要の場合は「ディーゼル発電機室換気系ダクト」という。)
- (d) 原子炉建屋換気系隔離弁，ダクト

<屋外施設>

- (a) 非常用ディーゼル発電機吸気フィルタ
- (b) 高圧炉心スプレイ系ディーゼル発電機吸気フィルタ
(以下(a)(b)を区別不要の場合は「ディーゼル発電機吸気フィルタ」という。)
- (c) 非常用ディーゼル発電機室ルーフベントファン
- (d) 高圧炉心スプレイ系ディーゼル発電機室ルーフベントファン
(以下(c)(d)を区別不要の場合は「ディーゼル発電機室ルーフベントファン」という。)
- (e) 中央制御室換気系冷凍機（配管，弁含む）
- (f) 残留熱除去系海水系ポンプ（配管，弁含む）
- (g) 残留熱除去系海水系ストレーナ

- (h) 非常用ディーゼル発電機海水ポンプ（配管，弁含む）
- (i) 非常用ディーゼル発電機海水ストレーナ
- (j) 高圧炉心スプレイ系ディーゼル発電機海水ポンプ（配管，弁含む）
- (k) 高圧炉心スプレイ系ディーゼル発電機海水ストレーナ

（以下(f)～(k)を区別不要の場合は「海水ポンプ室内設備」という。）

- (l) 非常用ガス処理系排気配管
- (m) 排気筒

【別添資料 1 (1.2.2 (1) : 1-3～7)】

(4) 竜巻防護施設を内包する施設

竜巻防護施設を内包する施設を，以下のとおり抽出する。

- (a) 原子炉建屋（原子炉圧力容器，原子炉再循環ポンプ等を内包）
- (b) タービン建屋（気体廃棄物処理系隔離弁等を内包）
- (c) 使用済燃料乾式貯蔵建屋（使用済燃料乾式貯蔵容器を内包）
- (d) 軽油貯蔵タンクタンク室（軽油貯蔵タンクを内包）

【別添資料 1 (1.2.2 (1) : 1-3～7)】

(5) 竜巻防護施設に波及的影響を及ぼし得る施設

竜巻防護施設に波及的影響を及ぼし得る施設としては，当該施設の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損なわせる可能性がある施設，又はその施設の特定の区画とする。

具体的には，発電所構内の構築物，系統及び機器（安全重要度クラス 1，2，3 及びノンクラス）の中から，竜巻防護施設に機械的影響を及ぼし得る施設及び竜巻防護施設に機能的影響を及ぼし得る施設を以下のとおり抽出する。

a. 竜巻防護施設に機械的影響を及ぼし得る施設

竜巻防護施設に機械的影響を及ぼし得る施設としては、施設の高さと、竜巻防護施設及び竜巻防護施設を内包する施設との距離を考慮して、竜巻防護施設を内包する施設に隣接している施設、倒壊により竜巻防護施設を損傷させる可能性がある施設を竜巻防護施設に波及的影響を及ぼし得る施設として抽出する。

- (a) サービス建屋
- (b) 海水ポンプ室
- (c) 鋼製防護壁
- (d) 排気筒

b. 竜巻防護施設に機能的影響を及ぼし得る施設

竜巻防護施設に機能的影響を及ぼし得る施設としては、屋外にある竜巻防護施設の附属設備で、気圧差等による損傷により竜巻防護施設の安全機能を損なわせる可能性がある施設を竜巻防護施設に波及的影響を及ぼし得る施設として抽出する。

- (a) 非常用ディーゼル発電機排気消音器
- (b) 高圧炉心スプレイ系ディーゼル発電機排気消音器
(以下(a)(b)を区別不要の場合は「ディーゼル発電機排気消音器」という。)
- (c) 非常用ディーゼル発電機排気配管
- (d) 非常用ディーゼル発電機燃料デイトンクベント管
- (e) 非常用ディーゼル発電機機関ベント管
- (f) 非常用ディーゼル発電機潤滑油サンプルタンクベント管
- (g) 高圧炉心スプレイ系ディーゼル発電機排気配管
- (h) 高圧炉心スプレイ系ディーゼル発電機燃料デイトンクベント管

- (i) 高圧炉心スプレイ系ディーゼル発電機機関ベント管
- (j) 高圧炉心スプレイ系ディーゼル発電機潤滑油サンプタンク
ベント管

(以下(c)～(j)を区別不要の場合は「ディーゼル発電機附属設備配管」という。)

- (k) 残留熱除去系海水系配管（放出側）
- (l) 非常用ディーゼル発電機海水配管（放出側）
- (m) 高圧炉心スプレイ系ディーゼル発電機海水配管（放出側）

(以下(k)～(m)を区別不要の場合は「海水ポンプ室内設備附属配管（放出側）」という。)

【別添資料 1 (1.2.2 (2) : 1-8～11)】

(6) 設計飛来物の設定

東海第二発電所敷地全体を俯瞰した現地調査及び検討を行い、発電所構内の資機材、車両等の設置状況を踏まえ、評価対象施設に衝突する可能性のある飛来物を抽出する。

設計飛来物は、浮き上がりの有無、運動エネルギー及び貫通力を踏まえ、「原子力発電所の竜巻影響評価ガイド（平成 25 年 6 月 19 日原規技発 13061911 号 原子力規制委員会決定）」を参照して鋼製材を設定する。

また、竜巻飛来物防護対策設備の防護ネットを通過し得る可能性があり、鋼製材にて包含できないことから、砂利も設計飛来物とする。

第 1.7-1 表に東海第二発電所における設計飛来物を示す。

飛来物の発生防止対策については、現地調査により抽出した飛来物や持ち込まれる資機材、車両等の寸法、質量及び形状から飛来の有無を判断し、運動エネルギー及び貫通力を考慮して、衝突時に建屋等又は竜巻飛来物防護

対策設備に与えるエネルギー又は貫通力が設計飛来物によるものより大きく、竜巻防護施設を防護できない可能性があるものは固縛、固定又は竜巻防護施設及び竜巻防護施設を内包する施設からの離隔を実施し、確実に飛来物とならない運用とする。

【別添資料 1 (3.3.1 (3) : 1-49~59)】

(7) 荷重の組合せと許容限界

竜巻に対する防護設計を行うため、評価対象施設に作用する設計竜巻荷重の算出、設計竜巻荷重の組合せの設定、設計竜巻荷重と組み合わせる荷重の設定及び許容限界について以下に示す。

a. 評価対象施設に作用する設計竜巻荷重

設計竜巻により評価対象施設に作用する荷重として「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)」を以下に示すとおり算出する。

(a) 風圧力による荷重 (W_w)

設計竜巻の最大風速による荷重であり、「建築基準法施行令」（昭和 25 年 11 月 16 日政令第 338 号）、「日本建築学会 建築物荷重指針・同解説」及び建設省告示 1454 号（平成 12 年 5 月 31 日）に準拠して、次式のとおり算出する。

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

ここで、

W_w : 風圧力による荷重

q : 設計用速度圧

G : ガスト影響係数 (=1.0)

C : 風力係数（施設の形状や風圧力が作用する部位（屋根、壁等）

に応じて設定する。)

A : 施設の受圧面積

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

ここで,

ρ : 空気密度

V_D : 設計竜巻の最大風速

ただし、竜巻による最大風速は、一般的には水平方向の風速として算定されるが、鉛直方向の風圧力に対してせい弱と考えられる評価対象施設が存在する場合には、鉛直方向の最大風速等に基づいて算出した鉛直方向の風圧力についても考慮した設計とする。

(b) 気圧差による荷重 (W_P)

外気と隔離されている区画の境界部が気圧差による圧力影響を受ける設備及び竜巻防護施設を内包する施設の建屋壁、屋根等においては、設計竜巻による気圧低下によって生じる評価対象施設の内外の気圧差による圧力荷重が発生し、保守的に「閉じた施設」を想定し次式のとおり算出する。

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

ここで,

W_P : 気圧差による荷重

ΔP_{max} : 最大気圧低下量

A : 施設の受圧面積

(c) 設計飛来物による衝撃荷重 (W_M)

飛来物の衝突方向及び衝突面積を考慮して設計飛来物が評価対象施設に衝突した場合の影響が大きくなる向きで衝撃荷重を算出する。

【別添資料 1 (3.3.1 : 1-49~59)】

b. 設計竜巻荷重の**組合せ**

評価対象施設の設計に用いる設計竜巻荷重は、設計竜巻による風圧力による荷重（ W_W ）、気圧差による荷重（ W_P ）及び設計飛来物による衝撃荷重（ W_M ）を組み合わせた複合荷重とし、複合荷重 W_{T1} 及び W_{T2} は米国原子力規制委員会の基準類を参考として、以下のとおり設定する。

$$W_{T1} = W_P$$

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

なお、評価対象施設には W_{T1} 及び W_{T2} の両荷重をそれぞれ作用させる。

【別添資料 1（3.3.1 : 1-58～59）】

c. 設計竜巻荷重と組み合わせる荷重の設定

設計竜巻荷重と組み合わせる荷重は、以下のとおり設定する。

(a) 評価対象施設に常時作用する荷重、運転時荷重

評価対象施設に作用する荷重として、自重等の常時作用する荷重、内圧等の運転時荷重を適切に組み合わせる。

(b) 竜巻以外の自然現象による荷重

竜巻は、積乱雲及び積雲に伴って発生する現象であり⁽¹⁾、積乱雲の発達時に竜巻と同時発生する可能性がある自然現象は、雷、雪、雹及び大雨である。これらの自然現象の**組合せ**により発生する荷重は、以下のとおり設計竜巻荷重に包絡されることから、設計竜巻荷重と組み合わせる荷重として考慮しない。

i) 雷

竜巻と雷が同時に発生する場合においても、雷によるプラントへの影響は雷撃であるため、雷による荷重は発生しない。

ii) 雪

上昇流の竜巻本体周辺では、竜巻通過時に雪は降らない。また、下降流の竜巻通過時は、竜巻通過前に積もった雪の大部分は竜巻の風により吹き飛ばされ、雪による荷重は十分小さく設計竜巻荷重に包絡される。

iii) 雹

雹は積乱雲から降る直径 5mm 以上の氷の粒⁽²⁾であり、仮に直径 10cm 程度の大型の雹を想定した場合でも、その重量は約 0.5kg である。竜巻と雹が同時に発生する場合においても、直径 10cm 程度の雹の終端速度は 59m/s ⁽³⁾、運動エネルギーは約 0.9kJ であり、設計飛来物の運動エネルギーと比べ十分に小さく、雹の衝突荷重は設計竜巻荷重に包絡される。

iv) 大雨

竜巻と大雨が同時に発生する場合においても、雨水により屋外施設に荷重の影響を与えることはなく、また降雨による荷重は十分小さいため、設計竜巻荷重に包絡される。

(c) 設計基準事故時荷重

竜巻防護施設は、設計竜巻によって安全機能を損なわない設計とするため、設計竜巻と設計基準事故は独立事象となる。

設計竜巻と設計基準事故が同時に発生する頻度は十分小さいことから、設計基準事故時荷重と設計竜巻との組合せは考慮しない。

仮に、風速が低く発生頻度が高い竜巻と設計基準事故が同時に発生する場合、評価対象施設のうち設計基準事故時荷重が生じ、竜巻による風荷重等の影響を受ける屋外設備としては動的機器である残

留熱除去系海水系ポンプ等が考えられるが、設計基準事故時においても残留熱除去系海水系ポンプ等の圧力及び温度が変わらず、運転時荷重が変化することはないため、設計基準事故により考慮すべき荷重はなく、竜巻と設計基準事故時荷重の組合せは考慮しない。

【別添資料 1 (3.3.2 : 1-59~60)】

d. 許容限界

建屋、構築物の設計において、設計飛来物の衝突による貫通及び裏面剥離発生の有無の評価については、貫通及び裏面剥離が発生する部材厚（貫通限界厚さ及び裏面剥離限界厚さ）と部材の最小厚さを比較することにより行う。さらに、設計荷重により、発生する変形又は応力が以下の法令、規格、基準、指針類等に準拠し算定した許容限界を下回る設計とする。

- ・ 建築基準法
- ・ 日本工業規格
- ・ 日本建築学会及び土木学会等の基準、指針類
- ・ 原子力発電所耐震設計技術指針 J E A G 4601-1987（日本電気協会）
- ・ 原子力エネルギー協会（NEI）の基準・指針類等

系統及び機器の設計において、設計飛来物の衝突による貫通の有無の評価については、貫通が発生する部材厚（貫通限界厚さ）と部材の最小厚さを比較することにより行う。設計飛来物が貫通することを考慮する場合には、設計荷重に対して防護対策を考慮した上で、系統及び機器に発生する応力が以下の規格、基準及び指針類に準拠し算定した許容応力度等に基づく許容限界を下回る設計とする。

- ・ 日本工業規格
- ・ 日本機械学会の基準、指針類

- ・原子力発電所耐震設計技術指針 J E A G 4601-1987（日本電気協会）
等

【別添資料 1（3.4.1 : 1-61～62）】

(8) 評価対象施設の防護設計方針

評価対象施設の設計荷重に対する防護設計方針を以下に示す。

a. 竜巻防護施設のうち、外殻となる施設による防護される施設（外気と繋がっている施設を除く。）

竜巻防護施設のうち、外殻となる施設による防護される施設（外気と繋がっている施設を除く。）は、建屋、構築物の外殻となる防護機能により設計荷重に対して影響を受けない設計とする。

ただし、外殻となる施設（建屋、構築物）の防護機能が期待できない場合には、「b. 外殻となる施設による防護機能が期待できない施設」とおりにする。

b. 竜巻防護施設のうち、外殻となる施設による防護機能が期待できない施設

外殻となる施設（建屋、構築物）に内包される竜巻防護施設のうち、外殻となる施設が設計竜巻の影響により健全性が確保されず、貫通又は裏面剥離が発生し安全機能を損なう可能性がある場合には、施設の補強、竜巻飛来物防護対策設備又は運用による竜巻防護対策を実施することにより、安全機能を損なわない設計とする。

c. 竜巻防護施設のうち、屋内の施設で外気と繋がっている施設及び屋外施設

外殻となる施設に内包され防護される竜巻防護施設のうち、外気と繋がる施設は、設計荷重の影響を受けても、安全機能を損なわない設計とする。

屋外の竜巻防護施設は、設計荷重による影響により安全機能を損なわない設計とする。安全機能を損なう場合には、防護ネット等の竜巻飛来物防護対策設備又は運用による竜巻防護対策を実施することにより、安全機能を損なわない設計とする。

d. 竜巻防護施設を内包する施設

竜巻防護施設を内包する施設は、設計荷重に対して、構造骨組の構造健全性が維持されるとともに、屋根、壁、開口部（扉類）の破損により内包される竜巻防護施設が安全機能を損なわない設計とする。また、設計飛来物の衝突に対しては、貫通及び裏面剥離の発生により内包される竜巻防護施設が安全機能を損なわない設計とする。

e. 竜巻防護施設に波及的影響を及ぼし得る施設

竜巻防護施設に波及的影響を及ぼし得る施設については、設計荷重による影響を受ける場合においても、竜巻防護施設に影響を及ぼさないよう、設備又は運用による竜巻防護対策を実施することにより、竜巻防護施設の安全機能を損なわない設計とする。

以上の評価対象施設の防護設計を考慮して、設計竜巻から防護する施設及び竜巻防護対策等を第 1.7-2 表に、竜巻防護施設に波及的影響を及ぼし得る施設及び竜巻防護対策等を第 1.7-3 表に、竜巻防護施設を内包する施設及び竜巻防護対策等を第 1.7-4 表に示す。

【別添資料 1（3.4.2 : 1-62～69）】

(9) 竜巻防護施設を内包する施設の設計

竜巻防護施設を内包する施設の設計においては、設計荷重に対して、構造骨組の構造健全性が維持されるとともに、屋根、壁及び開口部（扉類）の破損により施設内の竜巻防護施設が安全機能を損なわない設計とする。

また、設計飛来物の衝突時においても、貫通及び裏面剥離の発生により施設内の竜巻防護施設が安全機能を損なわない設計とする。

【別添資料 1 (3.4.2 (1) : 1-64)】

a. 原子炉建屋，タービン建屋，使用済燃料乾式貯蔵建屋

原子炉建屋，タービン建屋，使用済燃料乾式貯蔵建屋は、風圧力による荷重，気圧差による荷重，設計飛来物の衝撃荷重及び常時作用する荷重に対して、構造骨組の構造健全性が維持されるとともに、屋根，壁，開口部（扉類）の破損により当該建屋内の竜巻防護施設が安全機能を損なわない設計とする。また、設計飛来物の衝突時においても、貫通及び裏面剥離の発生により、当該建屋内の竜巻防護施設が安全機能を損なわない設計とする。

なお、原子炉建屋原子炉棟外壁のブローアウトパネルについては、設計竜巻による気圧低下により開放する可能性があり、原子炉建屋原子炉棟の放射性物質の閉じ込め機能を損なう可能性があるが、設計竜巻と設計基準事故が同時に発生する頻度は十分小さいことから、安全上支障のない期間に補修が可能な設計とすることで、安全機能を損なわない設計とする。

【別添資料 1 (3.4.2 (1) : 1-64)】

b. 軽油貯蔵タンクタンク室

軽油貯蔵タンクタンク室は、地下埋設されていることを考慮すると、風圧力による荷重及び設計飛来物による衝撃荷重は作用しないことから、気圧差による荷重及び自重等の常時作用する荷重に対して、構造健全性が維持され、安全機能を損なわない設計とする。

【別添資料 1 (3.4.2 (1) : 1-64)】

- (10) 竜巻防護施設及び竜巻防護施設に波及的影響を及ぼし得る施設の設計
竜巻防護施設は、構造健全性を損なわないこと又は取替え、補修が可能なことにより、安全機能を損なわない設計とする。また、竜巻防護施設に波及的影響を及ぼし得る施設は、構造健全性を確保すること、設計上の要求を維持すること又は安全上支障のない期間での修復等の対応により、竜巻防護施設の安全機能を損なわない設計とする。

【別添資料 1 (3.4.2 : 1-62~69)】

- a. 竜巻防護施設のうち、外殻となる施設による防護される施設（外気と繋がっている施設を除く。）

外殻となる施設による防護される竜巻防護施設（外気と繋がっている施設を除く。）は、原子炉建屋、タービン建屋、使用済燃料乾式貯蔵建屋、軽油貯蔵タンクタンク室に内包され、設計荷重から防護されること
によって、安全機能を損なわない設計とする。

【別添資料 1 (3.4.2 (1) : 1-62)】

- b. 竜巻防護施設のうち、外殻となる施設による防護機能が期待できない施設

原子炉建屋附属棟については、設計飛来物の衝突により開口部建具等を貫通することを考慮し、開口部建具付近の竜巻防護施設のうち、設計飛来物の衝突により影響を受ける可能性がある中央制御室換気系ファン、非常用電源盤が安全機能を損なわない設計とする。

原子炉建屋原子炉棟外壁のブローアウトパネルについては、設計竜巻による気圧低下により開放されることを考慮し、ブローアウトパネル開放部付近の竜巻防護施設のうち、設計飛来物の衝突により影響を受ける可能性がある非常用ガス処理系設備及び非常用ガス再循環系設備、使用済燃料プール及び燃料プール冷却浄化系真空破壊弁が安全機能を損なわ

ない設計とする。

使用済燃料乾式貯蔵建屋は、設計飛来物の衝突に対し、建屋上部の開口部に貫通が発生することを考慮し、使用済燃料乾式貯蔵建屋内部の竜巻防護施設で、設計飛来物の衝突により影響を受ける可能性がある使用済燃料乾式貯蔵容器が安全機能を損なわない設計とする。

【別添資料 1 (3.4.2 (3) : 1-65~67)】

(a) 中央制御室換気系ファン

中央制御室換気系ファンは、設計飛来物の衝突により、原子炉建屋附属棟 4 階開口部建具に貫通が発生することを考慮し、補強等の竜巻防護対策を行うことにより、設計飛来物の衝突を防止し、中央制御室換気系ファンの構造健全性が維持され、安全機能を損なわない設計とする。

【別添資料 1 (3.4.2 (3) : 1-66)】

(b) 非常用電源盤

非常用電源盤は、設計飛来物の衝突により、原子炉建屋附属棟 1 階電気室扉に貫通が発生することを考慮し、電気室扉の補強等の竜巻防護対策を行うことにより、設計飛来物の衝突を防止し、非常用電源盤の構造健全性が維持され、安全機能を損なわない設計とする。

【別添資料 1 (3.4.2 (3) : 1-66)】

(c) 非常用ガス処理系設備、非常用ガス再循環系設備

非常用ガス処理系設備、非常用ガス再循環系設備は、建屋に内包されていることを考慮すると、風圧力による荷重及び気圧差荷重は作用しない。また、原子炉建屋原子炉棟外壁のブローアウトパネルについては、竜巻襲来による気圧低下により開放されることを考慮しても、ブローアウトパネルの配置高さを考慮すると、設計飛来物は到達しな

いため、衝撃荷重は作用しない。

以上より、非常用ガス処理系設備、非常用ガス再循環系設備には、設計竜巻荷重は作用せず、構造健全性が維持され安全機能を損なわない。

【別添資料1 (3.4.2 (3) : 1-66)】

(d) 使用済燃料プール、燃料プール冷却浄化系真空破壊弁

使用済燃料プール、燃料プール冷却浄化系真空破壊弁は、建屋に内包されていることを考慮すると、風圧力による荷重及び気圧差荷重は作用しない。また、原子炉建屋原子炉棟外壁のブローアウトパネルについては、竜巻襲来による気圧低下により開放されることを考慮しても、ブローアウトパネルの配置高さを考慮すると、設計飛来物は到達しないため衝撃荷重は作用しない。

以上より、使用済燃料プール、燃料プール冷却浄化系真空破壊弁には設計竜巻荷重が作用せず、構造健全性が維持され安全機能を損なわない。

【別添資料1 (3.4.2 (3) : 1-66～67)】

(e) 使用済燃料乾式貯蔵容器

使用済燃料乾式貯蔵容器は、建屋に内包されていることを考慮すると、風圧力による荷重及び気圧差荷重は作用しない。使用済燃料乾式貯蔵建屋上部の開口部に貫通が発生することを考慮し、設計飛来物の衝撃荷重及び自重等の常時作用する荷重に対して、構造健全性が維持され、安全機能を損なわない設計とする。

【別添資料1 (3.4.2 (3) : 1-67)】

c. 竜巻防護施設のうち、屋内の施設で外気と繋がっている施設及び屋外施設

<屋内の施設で外気と繋がっている施設>

(a) 中央制御室換気系隔離弁，ファン

中央制御室換気系隔離弁，ファンは，建屋に内包されていることを考慮すると，風圧力による荷重は作用しない。さらに，中央制御室換気系の取入口の建屋開口部を設計飛来物が貫通し，中央制御室換気系隔離弁に衝突し安全機能を損なうことを考慮して，防護ネットの設置等の竜巻防護対策を行うことにより，設計飛来物の衝突を防止し，気圧差による荷重，中央制御室換気系に常時作用する荷重に対して，構造健全性が維持され，安全機能を損なわない設計とする。

【別添資料 1 (3.4.2 (2) : 1-65)】

(b) ディーゼル発電機室換気系ダクト

ディーゼル発電機室換気系ダクトは，建屋に内包されていることを考慮すると，風圧力による荷重及び設計飛来物による衝撃荷重は作用しないことから，気圧差による荷重，ディーゼル発電機室換気系に常時作用する荷重に対して，構造健全性が維持され，安全機能を損なわない設計とする。

【別添資料 1 (3.4.2 (2) : 1-65)】

(c) 原子炉建屋換気系隔離弁，ダクト

原子炉建屋換気系隔離弁，ダクトは，建屋に内包されていることを考慮すると，風圧力による荷重は作用しない。さらに，原子炉建屋附属棟 4 階開口部建具に貫通が発生することを考慮し，補強等の竜巻防護対策を行うことにより，設計飛来物の衝突を防止し，気圧差による荷重，原子炉建屋換気系に常時作用する荷重に対して，構造健全性が維持され安全機能を損なわない設計とする。

【別添資料 1 (3.4.2 (2) : 1-65)】

<屋外施設>

(a) ディーゼル発電機吸気フィルタ

ディーゼル発電機吸気フィルタは、設計飛来物が衝突により貫通することを考慮しても、閉塞することがなく、ディーゼル発電機の吸気機能が維持される設計とする。さらに、風圧力による荷重、気圧差による荷重及びディーゼル発電機吸気フィルタに常時作用する荷重に対して、構造健全性が維持され、安全機能を損なわない設計とする。

【別添資料 1 (3.4.2 (1) : 1-62)】

(b) ディーゼル発電機室ルーフトファン

ディーゼル発電機室ルーフトファンは、設計飛来物の衝突により貫通することを考慮し、防護ネットの設置等による竜巻防護対策を行うことにより、設計飛来物の衝突を防止し、風圧力による荷重、気圧差による荷重に対して、構造健全性が維持され、安全機能を損なわない設計とする。

【別添資料 1 (3.4.2 (1) : 1-62)】

(c) 中央制御室換気系冷凍機

中央制御室換気系冷凍機は、設計飛来物の衝突により貫通することを考慮して、防護ネットの設置等による竜巻防護対策を行うことにより、設計飛来物の衝突を防止し、風圧力による荷重、気圧差による荷重及び中央制御室換気系冷凍機に常時作用する荷重に対して、構造健全性が維持され、安全機能を損なわない設計とする。

【別添資料 1 (3.4.2 (1) : 1-63)】

(d) 海水ポンプ室内設備

海水ポンプ室内設備は、設計飛来物の衝突により貫通することを考慮し、防護ネットの設置等による竜巻防護対策を行うことにより、設

計飛来物の衝突を防止し、風圧力による荷重、気圧差による荷重及び海水ポンプ室内設備に常時作用する荷重に対して、構造健全性が維持され、安全機能を損なわない設計とする。

【別添資料 1 (3.4.2 (1) : 1-63)】

(e) 非常用ガス処理系排気配管

非常用ガス処理系排気配管は、設計飛来物が衝突により貫通することを考慮しても、閉塞することはなく、非常用ガス処理系排気配管の排気機能が維持される設計とする。さらに、非常用ガス処理系排気配管は開かれた構造物であり気圧差荷重も作用しないことから、風圧力による荷重及び非常用ガス処理系排気配管に常時作用する荷重に対して、構造健全性が維持され、安全機能を損なわない設計とする。

【別添資料 1 (3.4.2 (1) : 1-63)】

(f) 排気筒

排気筒は、設計飛来物の衝突により貫通することを考慮しても、閉塞することなく、排気筒の排気機能が維持される設計とする。さらに、排気筒は開かれた構造物であり気圧差荷重は作用しないことから、風圧力による荷重及び排気筒に常時作用する荷重に対して、構造健全性が維持され、安全機能を損なわない設計とする。

また、排気筒の支持機能に対しては、設計飛来物の衝突により部材が損傷した場合においても構造健全性が維持され、安全機能を損なわない設計とする。

【別添資料 1 (3.4.2 (1) : 1-63~64)】

d. 竜巻防護施設に波及的影響を及ぼし得る施設

(a) サービス建屋

サービス建屋は、風圧力による荷重、気圧差による荷重、設計飛来

物による衝撃荷重及び自重等の常時作用する荷重に対して、倒壊により竜巻防護施設を内包する施設へ波及的影響を及ぼさない設計とする。

【別添資料 1 (3.4.2 (4) : 1-67)】

(b) 海水ポンプ室

海水ポンプ室は、風圧力による荷重、気圧差による荷重、設計飛来物による衝撃荷重及び自重等の常時作用する荷重に対して、補強等を行うことで、倒壊により竜巻防護施設へ波及的影響を及ぼさない設計とする。

【別添資料 1 (3.4.2 (4) : 1-67)】

(c) 鋼製防護壁

鋼製防護壁は、風圧力による荷重、気圧差による荷重、設計飛来物による衝撃荷重及び自重等の常時作用する荷重に対して、倒壊により竜巻防護施設へ波及的影響を及ぼさない設計とする。

【別添資料 1 (3.4.2 (4) : 1-68)】

(d) 排気筒

排気筒は、竜巻防護施設として、構造健全性が維持され、安全機能を損なわない設計としており、転倒により竜巻防護施設を内包する施設へ波及的影響を及ぼさない設計とする。

【別添資料 1 (3.4.2 (3) : 1-68)】

(e) ディーゼル発電機排気消音器

ディーゼル発電機排気消音器は、設計飛来物の衝突により貫通することを考慮しても、ディーゼル発電機排気消音器が閉塞することがなく、ディーゼル発電機等の排気機能が維持される設計とする。さらに、ディーゼル発電機排気消音器が風圧力による荷重、気圧差による荷重及び自重等の常時作用する荷重に対して、構造健全性を維持し、安全

機能を損なわない設計とする。

以上より、ディーゼル発電機排気消音器が、竜巻防護施設であるディーゼル発電機等に機能的影響を及ぼさず、ディーゼル発電機等が安全機能を損なうことのない設計とする。

【別添資料 1 (3.4.2 (4) : 1-68)】

(f) ディーゼル発電機附属設備配管

ディーゼル発電機附属設備配管は、設計飛来物の衝突により貫通することを考慮しても、ディーゼル発電機附属設備配管が閉塞することがなく、ディーゼル発電機等の排気機能等が維持される設計とする。さらに、ディーゼル発電機附属設備配管が風圧力による荷重、気圧差による荷重及びディーゼル発電機附属設備配管に常時作用する荷重に対して、構造健全性を維持し、安全機能を損なわない設計とする。

以上より、ディーゼル発電機附属設備配管が、竜巻防護施設であるディーゼル発電機等に機能的影響を及ぼさず、ディーゼル発電機等が安全機能を損なわない設計とする。

【別添資料 1 (3.4.2 (4) : 1-68～69)】

(g) 海水ポンプ室内設備配管（放出側）

海水ポンプ室内設備附属配管（放出側）は、設計飛来物の衝突により貫通することを考慮しても、海水ポンプ室内設備附属配管（放出側）が閉塞することがなく、海水ポンプ室内設備の機能等が維持される設計とする。さらに、海水ポンプ室内設備附属配管（放出側）が風圧力による荷重、気圧差による荷重及び海水ポンプ室内設備附属配管（放出側）に常時作用する荷重に対して、構造健全性を維持し、安全機能を損なわない設計とする。

以上より、海水ポンプ室内設備附属配管（放出側）が、竜巻防護施

設である海水ポンプ室内設備に機能的影響を及ぼさず、海水ポンプ室内設備が安全機能を損なわない設計とする。

【別添資料 1 (3.4.2 (4) : 1-69)】

(11) 竜巻随件事象に対する評価

竜巻随件事象として、過去の竜巻被害事例及び東海第二発電所の施設の配置から想定される事象とし、火災、溢水及び外部電源喪失を抽出し、事象が発生する場合においても、竜巻防護施設の安全機能を損なわない設計とする。

【別添資料 1 (3.5 : 1-69～71)】

a. 火災

竜巻随件事象として、竜巻による飛来物が建屋開口部付近の発火性又は引火性物質を内包する機器に衝突する場合、屋外の危険物タンク等に飛来物が衝突する場合の火災が想定される。

建屋内については、設計飛来物が侵入する場合でも、建屋開口部付近には、原子炉施設の安全機能を損なわせる可能性がある発火性又は引火性物質を内包する機器は配置されておらず、また、竜巻防護施設を設置している区画の開口部には防護ネット設置等の飛来物防護対策を行うことを考慮すると飛来物が到達することはないことから、設計竜巻により建屋内に火災が発生することはなく、建屋内の竜巻防護施設の安全機能を損なうことはない。

建屋外については、発電所敷地内の屋外にある危険物タンクの火災がある。竜巻防護施設は外部火災影響評価対象施設に包含されることから、外部火災評価における発電所敷地内の危険物タンクの火災影響評価と同様であり、火災源と外部火災影響評価対象施設の位置関係を踏まえて火

災の影響を評価した上で、外部火災影響評価対象施設が安全機能を損なわない設計とすることを「1.9 外部火災防護に関する基本方針」に記載する。

以上より、竜巻随件事象としての火災に対して竜巻防護施設は安全機能を損なわない。

【別添資料1 (3.5 (1) : 1-69～70)】

b. 溢水

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

竜巻防護施設を内包する建屋内については、設計飛来物が侵入する場合でも、建屋開口部付近に飛来物が衝突し、原子炉施設の安全機能を損なう可能性がある溢水源が配置されておらず、また、竜巻防護施設を設置している区画の開口部には、原子炉施設の安全機能を損なう可能性がある溢水源が配置されておらず、防護ネット設置等の飛来物防護対策を行うことを考慮すると、飛来物が到達することはないことから、設計竜巻により建屋内に溢水が発生することはなく、建屋内の竜巻防護施設の安全機能を損なうことはない。

建屋外については、設計竜巻による飛来物の衝突による屋外タンクの破損に伴う溢水を想定されるが、「1.6 溢水に関する基本方針」にて、地震時の屋外タンクの破損を想定し、地震起因の溢水が安全系機器に影響を及ぼさない設計としており、竜巻随件事象による屋外タンク等が損傷して発生する溢水に対しては、上記に包絡されることから、竜巻防護施設の安全機能維持に損なわない。

以上より、竜巻随件事象としての溢水に対して竜巻防護施設は安全機能を損なわない。

c. 外部電源喪失

設計竜巻又は設計竜巻と同時に発生する雷又はダウンバースト等の影響により外部電源喪失が発生する場合については、設計竜巻に対してディーゼル発電機の構造健全性を維持することにより、外部電源喪失の影響がなく竜巻防護施設が安全機能を損なわない設計とする。

1.7.2 手順等

竜巻に対する防護については、竜巻に対する影響評価を行い、安全施設が安全機能を損なわないよう手順等を定める。

- (1) 屋外の作業区画で飛散するおそれのある資機材、車両等については、飛来時の運動エネルギー及び貫通力等を評価し、竜巻防護施設への影響の有無を確認する。竜巻防護施設への影響を及ぼす資機材、車両等については、固縛、固定、竜巻防護施設、竜巻防護施設を内包する施設及び竜巻飛来物防護対策設備から離隔、頑健な建屋内収納又は撤去する。これら飛来物発生防止対策について手順を定める。

- (2) 竜巻の襲来が予想される場合及び竜巻襲来後において、竜巻防護施設を防護するための操作・確認、補修等が必要となる事項について手順を定める。

第 1.7-1 表 東海第二発電所における設計飛来物

| 飛来物の種類 | 砂利 | 鋼製材 |
|-----------------|---------------------------|------------------------|
| サイズ (m) | 長さ×幅×高さ 0.04×0.04×0.04 | 長さ×幅×高さ 4.2×0.3×0.2 |
| 質量 (kg) | 0.18 | 135 |
| 最大水平速度 (m/s) | 62 | 51 |
| 最大鉛直速度 (m/s) | 42 | 34 |

【別添資料 1 (3.3.1 (3) : 1-57)】

第 1.7-2 表 設計竜巻から防護する施設及び竜巻対策等 (1 / 3)

| 設計竜巻から防護する施設 | 竜巻の最大風速条件 | 飛来物発生防止対策 | 防護設備 (外殻となる施設) | 想定する設計飛来物 | 手順等 |
|-----------------------|-----------|---|--------------------------|-----------|----------|
| ディーゼル発電機吸気フィルタ | 100m/s | <ul style="list-style-type: none"> ・ 固縛 ・ 固定 ・ 竜巻防護施設他との隔離 | — | 鋼製材 砂利 | 補修 |
| ディーゼル発電機室ルーフトファン | | | 竜巻飛来物防護対策設備 | 砂利 | 防護扉の閉止確認 |
| 中央制御室換気系冷凍機 (配管, 弁含む) | | | 竜巻飛来物防護対策設備 | 砂利 | 防護扉の閉止確認 |
| 海水ポンプ室内設備 | | | 施設を内包する施設 竜巻飛来物防護対策設備 | 砂利 | 水密扉の閉止確認 |
| 非常用ガス処理系排気配管 | | | — | 鋼製材 砂利 | 補修 |
| 排気筒 | | | — | 鋼製材 砂利 | 補修 |
| 中央制御室換気系ファン | | | 施設を内包する施設 補強した防護扉等 | — | 防護扉の閉止確認 |

第 1.7-2 表 設計竜巻から防護する施設及び竜巻対策等 (2 / 3)

| 設計竜巻から防護する施設 | 竜巻の最大風速条件 | 飛来物発生防止対策 | 防護設備 (外殻となる施設) | 想定する設計飛来物 | 手順等 |
|-----------------------------|-----------|---|-------------------|-----------|----------|
| 非常用電源盤 | 100m/s | <ul style="list-style-type: none"> ・ 固縛 ・ 固定 ・ 竜巻防護施設他との離隔 | 施設を内包する施設増厚した防護扉 | — | 防護扉の閉止確認 |
| 非常用ガス処理系設備 | | | 施設を内包する施設 | — | — |
| 非常用ガス再循環系設備 | | | 施設を内包する施設 | — | — |
| 使用済燃料プール | | | 施設を内包する施設 | — | — |
| 燃料プール冷却浄化系真空破壊弁 | | | 施設を内包する施設 | — | — |
| 使用済燃料乾式貯蔵容器 | | | 施設を内包する施設 | 鋼製材 | — |
| 中央制御室換気系隔離弁, ファン (ダクト含む) | | | 施設を内包する施設 | — | — |
| ディーゼル発電機換気系ダクト | | | 施設を内包する施設 | — | — |
| 原子炉建屋換気系隔離弁, ダクト | | | 施設を内包する施設 | 補強した防護扉等 | — |

第 1.7-2 表 設計竜巻から防護する施設及び竜巻対策等 (3 / 3)

| 設計竜巻から防護する施設 | 竜巻の最大風速条件 | 飛来物発生防止対策 | 防護設備 (外殻となる施設) | 想定する設計飛来物 | 手順等 |
|---|-----------|---|-------------------|-----------|--------------------|
| 安全重要度分類クラス 1 及びクラス 2 に属する施設のうち上記以外の建屋、構築物内の施設 | 100m/s | <ul style="list-style-type: none"> • 固縛 • 固定 • 竜巻防護施設他との離隔 | 施設を内包する施設 | — | — |
| 安全重要度分類クラス 3 に属する施設 | | | | | |
| 上記以外の耐震 S クラス施設 | | | — | — | 代替設備の確保 補修, 取替等 |

第 1.7-3 表 竜巻防護施設に波及的影響を及ぼし得る施設及び竜巻対策等

| 竜巻防護施設を内包する施設 | 竜巻の最大風速条件 | 飛来物発生防止対策 | 防護設備 (外殻となる施設) | 想定する設計飛来物 | 手順等 |
|--------------------|-----------|---|-------------------|-----------|-----|
| サービス建屋 | 100m/s | <ul style="list-style-type: none"> ・ 固縛 ・ 固定 ・ 竜巻防護施設他との離隔 | — | 鋼製材 砂利 | — |
| 海水ポンプ室 | | | — | 鋼製材 砂利 | |
| 鋼製防護壁 | | | — | 鋼製材 砂利 | — |
| 排気筒 | | | — | 鋼製材 砂利 | 補修 |
| ディーゼル発電機排気消音器 | | | — | 鋼製材 砂利 | — |
| ディーゼル発電機附属設備配管 | | | — | 鋼製材 砂利 | — |
| 海水ポンプ室内設備附属配管（放出側） | | | — | 鋼製材 砂利 | — |

第1.7-4表 竜巻防護施設を内包する施設及び竜巻対策等

| 竜巻防護施設を内包する施設 | 竜巻の最大風速条件 | 飛来物発生防止対策 | 防護設備 (外殻となる施設) | 想定する設計飛来物 | 手順等 |
|---|-----------|---|-------------------|-----------|-----|
| 原子炉建屋 タービン建屋 使用済燃料乾式貯蔵建屋 軽油貯蔵タンクタンク室 | 100m/s | <ul style="list-style-type: none"> ・ 固縛 ・ 固定 ・ 竜巻防護施設他との離隔 | — | 鋼製材 砂利 | — |

(3) 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ぬ。

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発電用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

1 について

(2) 竜 巻

安全施設は、最大風速 100m/s の竜巻による風圧力による荷重、気圧差による荷重及び飛来物の衝撃荷重を組み合わせた荷重等に対して安全機能を損なわないために、飛来物の発生防止対策及び竜巻防護対策を行う。

a. 飛来物の発生防止対策

竜巻により発電所構内の資機材等が飛来物となり、竜巻防護施設が安全機能を損なわないために、以下の対策を行う。

- ・ 竜巻防護施設へ影響を及ぼす資機材及び車両については、固縛、固定、

竜巻防護施設からの離隔，頑健な建屋内収納又は撤去する。

b. 竜巻防護対策

固縛等による飛来物の発生防止対策ができないものが飛来し，安全施設が安全機能を損なわないように，以下の対策を行う。

- ・ 竜巻防護施設を内包する施設及び竜巻飛来物防護対策設備により，竜巻防護施設を防護し構造健全性を維持し安全機能を損なわない設計とする。
- ・ 竜巻防護施設の構造健全性が維持できない場合には，代替設備の確保，損傷した場合の取替え又は補修が可能な設計とすることにより安全機能を損なわない設計とする。

ここで，竜巻は積乱雲や積雲に伴って発生する現象であり，積乱雲の発達時に竜巻と同時発生する可能性のある自然現象は，雷，雪，雹及び大雨である。これらの自然現象の組合せにより発生する荷重は，設計竜巻荷重に包含されることから，各々の事象に対して安全施設の安全機能を損なわない設計とする。

1.12 参考文献

- (1) 雷雨とメソ気象 大野久雄, 東京堂出版
- (2) 気象庁ホームページ
- (3) 一般気象学 小倉義光, 東京大学出版会

1.3 気象等

8. 竜巻

8.1 竜巻

竜巻影響評価は、「原子力発電所の竜巻影響評価ガイド（平成 25 年 6 月 19 日原規技発 13061911 号 原子力規制委員会決定）」（以下「ガイド」という。）に基づき実施する。

基準竜巻及び設計竜巻の設定は、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。

【別添資料 1（2.1 : 1-14）】

8.1.1 竜巻検討地域の設定

東海第二発電所が立地する地域と、気象条件の類似性の観点及び局所的な地域性の観点で検討を行い、竜巻検討地域を設定する。

(1) 気象総観場の分析

気象条件の類似性の観点では、気象総観場ごとの竜巻発生位置を整理し、東海第二発電所と類似の地域を抽出する。竜巻発生要因の総観場は、気象庁「竜巻等の突風データベース」⁽¹⁾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「竜巻による原子力施設への影響に関する調査研究」⁽²⁾を参考に、低気圧、台風、停滞前線、局所性降雨、季節風、その他（高気圧等）の 6 つに分類する。なお、低気圧には、暖気の移入、寒気の移入、停滞前線以外の前線を、停滞前線では梅雨前線を、局所的降雨では雷雨を含めている。第 8.1-1 図に総観場ごとの竜巻発生位置の分布を示す。

第 8.1-2 図の都道府県ごとの竜巻の発生要因別比率に示すとおり、低

気圧起因の竜巻は全国一様に発生していること、一方、台風起因の竜巻は日本海側には発生しておらず、主に太平洋側で発生していることが分かる。また、停滞前線起因の竜巻は北海道を除く各地に発生していること、局所性降雨は内陸部での竜巻発生も促すこと、季節風や高気圧起因とされる竜巻の発生数は比較的少ないことが分かる。

【別添資料 1 (2.2.1 : 1-15~17)】

(2) 総観場の分析に基づく地域特性の確認

竜巻発生地域性が見られる台風起因の発生領域から、太平洋側の宮城県～沖縄県にかけての範囲を考慮する。東海第二発電所はこの範囲に立地しており、太平洋側の宮城県～沖縄県を基本として、竜巻の発生頻度の観点から総観場の気象条件に基づく竜巻検討地域 TA_1 の検討を行う。

東海第二発電所から半径 180km 圏内 (10 万 km^2 圏) を含む太平洋側沿岸の海岸線から海側陸側各 5km の範囲を対象として、単位面積当たりの発生数の比較を第 8.1-3 図及び第 8.1-1 表に示す。なお、表の竜巻の個数は各ケースの領域毎における発生した全ての竜巻の個数である。

この結果、福島県から沖縄県にかけての範囲である $TA_{1.6}$ のケースの単位面積当たりの発生数が最も大きくなるため、これを総観場の気象条件に基づく竜巻検討地域 TA_1 とする。

【別添資料 1 (2.2.2 : 1-18~19)】

(3) 過去の竜巻集中地域に基づく地域特性の確認

局地的な地域性の観点では、「原子力発電所の竜巻影響評価ガイド (案) 及び解説」⁽³⁾ に、全国 19 箇所の竜巻集中地域が示されており、第 8.1-4 図に示すとおり、東海第二発電所は、竜巻集中地域⑰に立地している。

竜巻集中地域⑰を第 8.1-1 表の $TA_{1.1}$ とし、これを竜巻集中地域に基づく竜巻検討地域 TA_2 とする。

【別添資料 1 (2.2.3 : 1-20)】

(4) 竜巻検討地域

東海第二発電所に対する竜巻検討地域について、「総観場の分析に基づく地域特性の確認」、「過去の竜巻集中地域に基づく地域特性の確認」により地域特性を確認し、竜巻の個数及び単位面積当たりの発生数によって、福島県から沖縄県にかけての太平洋沿岸の海岸線から陸側及び海側それぞれ 5km の範囲を竜巻検討地域に設定する。(面積約 57,000km²)。

第 8.1-5 図に竜巻検討地域を示す。

【別添資料 1 (2.2 : 1-14~15) (2.2.4 : 1-21)】

8.1.2 基準竜巻の最大風速の設定

基準竜巻の最大風速は、過去に発生した竜巻による最大風速 (V_{B1})、及び竜巻最大風速のハザード曲線による最大風速 (V_{B2}) のうち、最も大きな風速を設定する。

(1) 過去に発生した竜巻による最大風速 (V_{B1})

過去に発生した竜巻による最大風速の設定に当たっては、竜巻検討地域における過去最大竜巻は F 3 であり、F スケールと風速の関係より風速は 70m/s~92m/s であることから、竜巻検討地域で過去に発生した最大竜巻 F 3 の風速範囲の上限値 92m/s を V_{B1} とする。

第 8.1-2 表に竜巻検討地域における F 3 スケール相当以上の竜巻の観測記録を示す。

【別添資料 1 (2.3.1 : 1-22)】

(2) 竜巻最大風速のハザード曲線による最大風速 (V_{B2})

竜巻最大風速のハザード曲線は、ガイドに従い、既往の算定方法に基づき、具体的には「竜巻による原子力施設への影響に関する調査研究」⁽²⁾を参照して、算定する。本評価は、竜巻データの分析、竜巻風速、被害幅及び被害長さの確率密度分布の算定、相関係数の算定、並びにハザード曲線の算定によって構成される。

竜巻最大風速のハザード曲線の算定は、竜巻検討地域（海岸線から陸側及び海側それぞれ 5km 全域の範囲）の評価及び竜巻検討地域を海岸線に沿って 1km 範囲ごとに短冊状に細分化した場合の評価の 2 とおりで算定し、そのうち大きな風速を設定する。

【別添資料 1 (2.3 : 1-23~37)】

a. 海岸線から陸側及び海側それぞれ 5km 全域の評価

本評価では、竜巻検討地域外で発生して竜巻検討地域内に移動した陸上発生竜巻も発生数にカウントする。被害幅及び被害長さは、それぞれ被害全幅及び被害全長を用いる。

【別添資料 1 (2.3.2 : 1-23)】

b. 竜巻の発生頻度の分析

気象庁「竜巻等の突風データベース」をもとに、1961 年～2012 年 6 月までの 51.5 年間の統計量を F スケール別に算出する。なお、観測体制の変遷による観測データ品質のばらつきを踏まえ、以下の(a)～(c)の基本的な考え方に基づいて整理を行う。

- (a) 被害が小さくて見過ごされやすい F 0 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及び標準偏

差を用いる。

- (b) 被害が比較的軽微な F 1 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用いる。
- (c) 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 F 2 及び F 3 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用いる。

また、F スケール不明の竜巻については、以下の取扱いを行う。

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、陸上での F スケール不明の竜巻は、被害が少ない F 0 竜巻とみなす。

海上で発生し、その後上陸しなかった竜巻（以下「海上竜巻」という。）については、その竜巻のスケールを推定することは困難であることから、「海岸線から海上 5km の範囲における海上竜巻の発生特性が、海岸線から内陸 5km の範囲における陸上竜巻の発生特性と同様である。」という仮定に基づいて各 F スケールに分類する。その結果、F スケール不明の海上竜巻の取扱いにより、第 8.1-3 表のとおり観測実績に対して保守性を高めた評価としている。

【別添資料 1 (2.3.3 : 1-24~26)】

c. 年発生数の確率密度分布の設定

ハザード曲線の評価に当たって竜巻の発生がポアソン過程に従うと仮定し、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。

竜巻年発生数の確率分布の設定には、ポアソン分布とポリヤ分布が考えられる。

ポアソン分布は、生起確率が正確に分らないまれ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まれな現象（ある事象が生ずるのはまれであるが、一旦ある現象が発生するとその周囲にもその現象が生じやすくなる性質）の場合に有用な分布である（例えば、伝染病の発生件数）。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。

また、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、「竜巻による原子力施設への影響に関する調査研究」⁽²⁾に示されており、陸上及び海上竜巻の両方の発生数について、ポリヤ分布の適合性がポアソン分布に比べて優れているとしている。

東海第二発電所の竜巻検討地域で発生した竜巻を対象に、発生数に関するポアソン分布及びポリヤ分布の適合性を評価した結果、竜巻検討地域においても、ポリヤ分布の適合性がポアソン分布に比べて優れていることを確認している。

【別添資料 1（2.3.3 : 1-27～28）】

d. 竜巻風速、被害幅及び被害長さの確率分布並びに相関係数

竜巻検討地域における 51.5 年間の竜巻の発生数、被害幅及び被害長さを基に、確率密度分布についてはガイド及びガイドが参考としている「竜巻による原子力施設への影響に関する調査研究」を参照し、対数正規分布に従うものとする。（第 8.1-6 図～第 8.1-8 図）

なお、疑似的な竜巻の作成に伴う被害幅又は被害長さの情報がない竜巻には、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ほうから優先的に用いることで、被

害幅又は被害長さの平均値が大きくなるように工夫しているとともに、被害幅又は被害長さ 0 のデータについて計算に用いておらず、保守的な評価を行っている。

このように、前述の F スケール不明の竜巻の取扱い等も含め、データについては保守的な評価となる取扱いを行っている。

また、1961 年以降の観測データのみを用いて、竜巻風速、被害幅及び被害長さについて相関係数を求める。（第 8.1-4 表）

【別添資料 1（2.3.4 : 1-29~31）】

e. 竜巻影響エリアの設定

竜巻影響エリアは、東海第二発電所の評価対象施設の面積及び設置位置を考慮して、評価対象施設を包絡する円形のエリア（直径 300m、面積約 $7.1 \times 10^4 \text{m}^2$ ）として設定する。（第 8.1-9 図）

なお、竜巻影響エリアを円形とするため、竜巻の移動方向には依存性は生じない。

【別添資料 1（2.3.5 : 1-31~32）】

f. ハザード曲線の算定

T 年以内にいずれかの竜巻に遭遇し、かつ竜巻風速が V_0 以上となる確率を求め、ハザード曲線を求める。

前述のとおり、竜巻の年発生数の確率密度分布としてポリヤ分布の適合性が高い。ポリヤ分布は式 (a) ⁽⁴⁾ で示される。

$$P_T(N) = \frac{(vT)^N}{N!} \left(1 + \beta vT\right)^{-(N+1/\beta)} \prod_{k=1}^{N-1} (1 + \beta k) \quad (\text{a})$$

ここで、

N : 竜巻の年発生数

ν : 竜巻の年平均発生数

T : 年数

β は、分布パラメータであり式 (b) で示される。

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

ここで、

σ : 竜巻の年発生数の標準偏差

竜巻影響評価の対象となる構造物が風速 V_0 以上の竜巻に遭遇する事象を D と定義し、竜巻影響評価の対象構造物が 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 $R(V_0)$ としたとき、 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 以上となる確率は式 (c) で示される。

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

この $R(V_0)$ は、竜巻影響評価の対象地域の面積を A_0 (つまり竜巻検討地域の面積約 $57,000\text{km}^2$)、1 つの竜巻の風速が V_0 以上となる面積を $DA(V_0)$ とすると式 (d) で示される。

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

ここで、 $E[DA(V_0)]$ は、 $DA(V_0)$ の期待値を意味する。

本評価では、以下のようにしてDA (V₀) の期待値を算出し、式 (d) によりR (V₀) を推定し、式 (c) によりP_{V₀, T} (D) を求める。風速をV、被害幅をw、被害長さをl、移動方向をαとし、f (V, w, l) 等の同時確率密度関数を用いると、DA (V₀) の期待値は式 (e) ⁽⁵⁾ で示される。

$$E[DA(V_0)] = \int_0^\infty \int_0^\infty \int_0^\infty W(V_0) l f(V, w, l) dV dw dl + \int_0^{2\pi} \int_0^\infty \int_0^\infty H(\alpha) l f(V, l, \alpha) dV dl d\alpha + \int_0^{2\pi} \int_0^\infty \int_0^\infty W(V_0) G(\alpha) f(V, w, \alpha) dV dw d\alpha + S \int_{V_0}^\infty f(V) dV \quad (e)$$

ここで、H (α) 及びG (α) 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評価対象構造物を投影した時の長さである。竜巻影響エリアを円形で設定しているため、H (α) 及びG (α) とともに竜巻影響エリアの直径 300m で一定（竜巻の移動方向に依存しない）となる。Sは竜巻影響エリアの面積（直径 300m の円の面積：約 7.1×10⁴m²）を表わす。円の直径をD₀とした場合の計算式は、式 (f) で示される。

$$E[DA(V_0)] = \int_0^\infty \int_0^\infty \int_0^\infty W(V_0) l f(V, w, l) dV dw dl + D_0 \int_0^\infty \int_0^\infty l f(V, l) dV dl + D_0 \int_0^{2\pi} \int_0^\infty \int_0^\infty W(V_0) f(V, w) dV dw + (\pi D_0^2 / 4) \int_{V_0}^\infty f(V) dV \quad (f)$$

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 に設定する。

なお、W (V₀) は竜巻風速がV₀以上となる幅であり、式 (g) ⁽⁵⁾ ⁽⁶⁾ で示される。この式により、被害幅内の風速分布に応じて被害様相

に分布がある（被害幅の端ほど風速が小さくなる）ことが考慮されている。

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

ここで、係数の 1.6 について、既往の研究では、例えば 0.5 又は 1.0 などの値も提案されている。ガイドにて参照している Garson et al. (6) では、観測値が不十分であるため保守的に 1.6 を用いることが推奨されており、本評価でも 1.6 を用いる。

V_{\min} は、竜巻被害が発生する最小風速であり、Garson は Gale intensity velocity と呼ばれ、被害が発生し始める風速に位置づけられる（Gale とは非常に強い風の意）。Garson et al. (6) では、 V_{\min} は $=40\text{mph} \doteq 18\text{m/s}$ ($1\text{mph} \doteq 1.61\text{km/h}$) を提案している。米国の気象局 (National Weather Service) では、34～47 ノット ($17.5 \sim 24.2\text{m/s}$) とされている。日本の気象庁では、気象通報にも用いられている風力階級において、風力 8 が疾強風 (gale, $17.2 \sim 20.7\text{m/s}$)、風力 9 では大強風 (strong gale, $20.8 \sim 24.4\text{m/s}$) と分類されており風力 9 では「屋根瓦が飛ぶ、人家に被害が出始める」とされている。

以上を参考とし、 $V_{\min} = 25\text{m/s}$ とした。この値は、F0 ($17 \sim 32\text{m/s}$) のほぼ中央値に相当する。

海岸線から陸側及び海側それぞれ 5km 全域を対象に算定したハザード曲線より、年超過確率 10^{-5} における風速を求めると、 73m/s となる。

(第 8.1-10 図)

【別添資料 1 (2.3.6 : 1-33~35)】

g. 1km 範囲に細分化した評価

1km 範囲ごとに細分化した評価は、1km 幅は変えずに順次ずらして移動するケース（短冊ケース）を設定して評価する。評価の条件として、被害幅及び被害長さは、それぞれ 1km 範囲内の被害幅及び被害長さを用いている。上記評価条件に基づいて、海岸線から陸側及び海側それぞれ 5km 全域の評価と同様の方法でハザード曲線を算定する。

これら算定したハザード曲線より、年超過確率 10^{-5} における風速を求めると、陸側 3～4km を対象とした場合の 80m/s が最大となる。（第 8.1-11 図）

【別添資料 1（2.3.6 : 1-35～36）】

h. 竜巻最大風速のハザード曲線による最大風速 (V_{B2})

海岸線から陸側及び海側それぞれ 5km 全域（竜巻検討地域）の評価と 1km 範囲ごとに細分化した評価を比較して、竜巻最大風速のハザード曲線により設定する最大風速 V_{B2} は、ガイドを参考に年超過確率 10^{-5} に相当する風速とし、 80m/s とする。（第 8.1-12 図）

【別添資料 1（2.3.7 : 1-36）】

(3) 基準竜巻の最大風速の設定

過去に発生した竜巻による最大風速 $V_{B1} = 92\text{m/s}$ 及び竜巻最大風速のハザード曲線による最大風速 $V_{B2} = 80\text{m/s}$ より、東海第二発電所における基準竜巻の最大風速 V_B は 92m/s とする。

【別添資料 1（2.3.9 : 1-40）】

8.1.3 設計竜巻の最大風速の設定

東海第二発電所が立地する地域の特性として、周辺の地形を考慮して、基準竜巻の最大風速の割り増しを検討し、設計竜巻の最大風速を設定する。

(1) 東海第二発電所周辺の地形

東海第二発電所敷地周辺の地形を第 8.5-1 図に示す。

竜巻のような回転する流れでは、角運動量保存則により「回転の中心からの距離」及び「周方向の回転速度」の積が一定になるという性質がある。そのため、竜巻の渦が上り斜面を移動する時、基本的に渦は弱まり、下り斜面を移動する時には強まる。

東海第二発電所が立地する敷地周辺は、最大でも標高 40m 程度のなだらかな地形であり、東海第二発電所周辺で発生する竜巻は、敷地周辺の地形において、竜巻渦の旋回強度に影響を及ぼすと考えられるマイクロスケール（数百 m）規模の起伏は認められないことから、地形効果による竜巻の増幅の可能性は低いとする。

【別添資料 1 (2.4.1 (2) : 1-42~43)】

(2) 設計竜巻の最大風速 V_D

東海第二発電所では、地形効果による竜巻の増幅を考慮する必要はないと考えるが、現状では竜巻の観測数等のデータが十分とまでは言い切れず不確実性があることを考慮し、設計竜巻の最大風速 V_D は、基準竜巻の最大風速 92m/s を安全側に切り上げた 100m/s とする。

【別添資料 1 (2.4.1 (3) : 1-43)】

8.1.4 設計竜巻の特性値の設定

設計竜巻の特性値は、設計竜巻の最大風速（ V_D ）より米国NRCの基準類⁽⁷⁾を参考として、以下に示す手法に基づき、第8.1-5表のとおり設定する。

(1) 設計竜巻の移動速度（ V_T ）

設計竜巻の移動速度（ V_T ）は、ガイドに基づき、「竜巻による原子力施設への影響に関する調査研究」による風速場モデルに依存しない日本の竜巻の観測記録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ている以下の算定式を用いて、 V_D から V_T を算定する。

$$V_T = 0.15 \cdot V_D$$

【別添資料1 (2.4.2 (1) : 1-44)】

(2) 設計竜巻の最大接線風速（ V_{Rm} ）

設計竜巻の最大接線風速（ V_{Rm} ）は、ガイドに基づき、米国NRCの基準類⁽⁷⁾を参考に設定されている風速場モデルに依存しない以下の式を用いて算定する。

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

【別添資料1 (2.4.2 (1) : 1-44)】

(3) 設計竜巻の最大接線風速が生じる位置での半径（ R_m ）

設計竜巻の最大接線風速が生じる位置での半径（ R_m ）は、ガイドに基づき、「竜巻による原子力施設への影響に関する調査研究」による日本の

竜巻の観測記録を基に提案された風速場モデルに準拠して以下の値を用いる。

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

【別添資料 1 (2.4.2 (1) : 1-44)】

(4) 設計竜巻の最大気圧低下量 (ΔP_{max})

設計竜巻の最大気圧低下量 (ΔP_{max}) は、ガイドに基づき、米国 NRC の基準類⁽⁷⁾を参考に設定されているランキン渦モデルによる風速分布に基づいた以下の式を用いて算定する。

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

ここで、

$$\rho : \text{空気密度 (1.22kg/m}^3\text{)}$$

【別添資料 1 (2.4.2 (1) : 1-44)】

(5) 設計竜巻の最大気圧低下率 ($(dp/dt)_{max}$)

設計竜巻の最大気圧低下率 ($(dp/dt)_{max}$) は、ガイドに基づき、米国 NRC の基準類⁽⁷⁾を参考に設定されているランキン渦モデルによる風速分布に基づいた以下の式を用いて算定する。

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

【別添資料 1 (2.4.2 (1) : 1-44)】

第 8.1-1 表 竜巻検討地域 T A₁ の候補毎の竜巻の個数と
単位面積当たり発生数

| 領域 | | | 領域面積 (km ²) | 51.5 年間に 領域内で発 生した個数 | 単位面積当たり 発生数 (個/年/km ²) |
|--------------------------|------------|----------------|----------------------------|----------------------------|--|
| T A _{1.1} | ① | 福島県～神奈川県 | 7,900 | 40 | 0.98E-04 |
| T A _{1.2} | ①～② | 福島県～静岡県 | 15,700 | 68 | 0.84E-04 |
| T A _{1.3} | ①～③ | 福島県～和歌山県 | 23,400 | 104 | 0.86E-04 |
| T A _{1.4} | ①～④ | 福島県～高知県 | 28,600 | 138 | 0.94E-04 |
| T A _{1.5} | ①～⑤ | 福島県～鹿児島県 | 46,700 | 194 | 0.81E-04 |
| T A_{1.6} | ①～⑥ | 福島県～沖縄県 | 57,000 | 300 | 1.02E-04 |
| T A _{1.7} | ①～⑦ | 福島県～九州全県 | 79,700 | 337 | 0.82E-04 |
| T A _{1.8} | ①～⑥, ⑧ | 宮城県～沖縄県 | 59,700 | 302 | 0.98E-04 |

【別添資料 1 (2.2.2 : 1-19)】

第 8.1-2 表 竜巻検討地域内で過去 (1961 年 1 月～2012 年 6 月)
に発生した F 3 スケール相当以上の竜巻の観測記録

| 発生日時 | 発生場所 | | | | F スケール |
|----------------------------|----------------|-----------------|------|-----|---------|
| | 緯度 | 経度 | 都道府県 | 市町村 | |
| 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 | F 3 |
| 1990 年 02 月 19 日 15 時 15 分 | 31 度 15 分 38 秒 | 130 度 16 分 35 秒 | 鹿児島県 | 枕崎市 | F 2～F 3 |
| 1978 年 02 月 28 日 21 時 20 分 | 35 度 32 分 1 秒 | 139 度 41 分 50 秒 | 神奈川県 | 川崎市 | F 2～F 3 |
| 198 年 12 月 07 日 18 時 00 分 | 34 度 45 分 4 秒 | 137 度 22 分 46 秒 | 愛知県 | 豊橋市 | F 2～F 3 |
| 1968 年 09 月 24 日 19 時 05 分 | 32 度 7 分 16 秒 | 131 度 32 分 8 秒 | 宮崎県 | 高鍋町 | F 2～F 3 |
| 1967 年 10 月 28 日 03 時 12 分 | 35 度 42 分 3 秒 | 140 度 43 分 10 秒 | 千葉県 | 飯岡町 | F 2～F 3 |

【別添資料 1 (2.3.1 : 1-22)】

第 8.1-3 表 竜巻発生数の分析結果

| | | | F3 | F2 | F1 | F0 | 小計 | 陸上不明 | 海上不明 | 合計 |
|--------------------------------|-----------------------------|------------|------|------|------|------|------|------|-------|-------|
| 過去 に 観測 され た 竜巻 | 1961.1 ～2012.6 51.5年間 | 期間内個数 | 6 | 41 | 100 | 46 | 193 | 20 | 87 | 300 |
| | | 平均値 (個/年) | 0.12 | 0.80 | 1.94 | 0.89 | 3.75 | 0.39 | 1.8 | 5.83 |
| | | 標準偏差 (個/年) | 0.32 | 0.94 | 1.96 | 2.17 | 3.25 | 0.8 | 4.35 | 7.26 |
| | 1991.1 ～2012.6 21.5年間 | 期間内個数 | 1 | 15 | 72 | 46 | 134 | 15 | 86 | 235 |
| | | 平均値 (個/年) | 0.05 | 0.70 | 3.35 | 2.14 | 6.23 | 0.70 | 4.00 | 10.93 |
| | | 標準偏差 (個/年) | 0.22 | 0.78 | 2.03 | 2.96 | 3.24 | 0.84 | 6.08 | 8.81 |
| | 2007.1 ～2012.6 5.5年間 | 期間内個数 | 0 | 1 | 12 | 31 | 44 | 9 | 63 | 116 |
| | | 平均値 (個/年) | 0.00 | 0.18 | 2.18 | 5.64 | 8.00 | 1.64 | 11.45 | 21.09 |
| | | 標準偏差 (個/年) | 0.00 | 0.43 | 1.99 | 4.17 | 4.16 | 0.97 | 8.32 | 11.75 |

| | | | F3 | F2 | F1 | F0 | 計 |
|-----------------------------|----------------------------|------------|------|------|------|-------|-------------|
| 疑似 51.5 年間 の 竜巻 | 疑似 51.5年間 (陸上竜 巻) | 期間内個数 | 6 | 41 | 173 | 376 | 596 |
| | | 平均値 (個/年) | 0.12 | 0.80 | 3.36 | 7.30 | 11.57 |
| | | 標準偏差 (個/年) | 0.32 | 0.94 | 2.03 | 4.74 | 5.25 |
| | 疑似 51.5 年間 (全竜巻) | 期間内個数 | 12 | 82 | 345 | 749 | 1188 |
| | | 平均値 (個/年) | 0.23 | 1.59 | 6.70 | 14.54 | 23.07 |
| | | 標準偏差 (個/年) | 0.46 | 1.33 | 2.87 | 6.8 | 7.42 |

【別添資料 1 (2.3.2 : 1-25)】

第 8.1-4 表 最大風速, 被害幅及び被害長さの対数値の相関係数

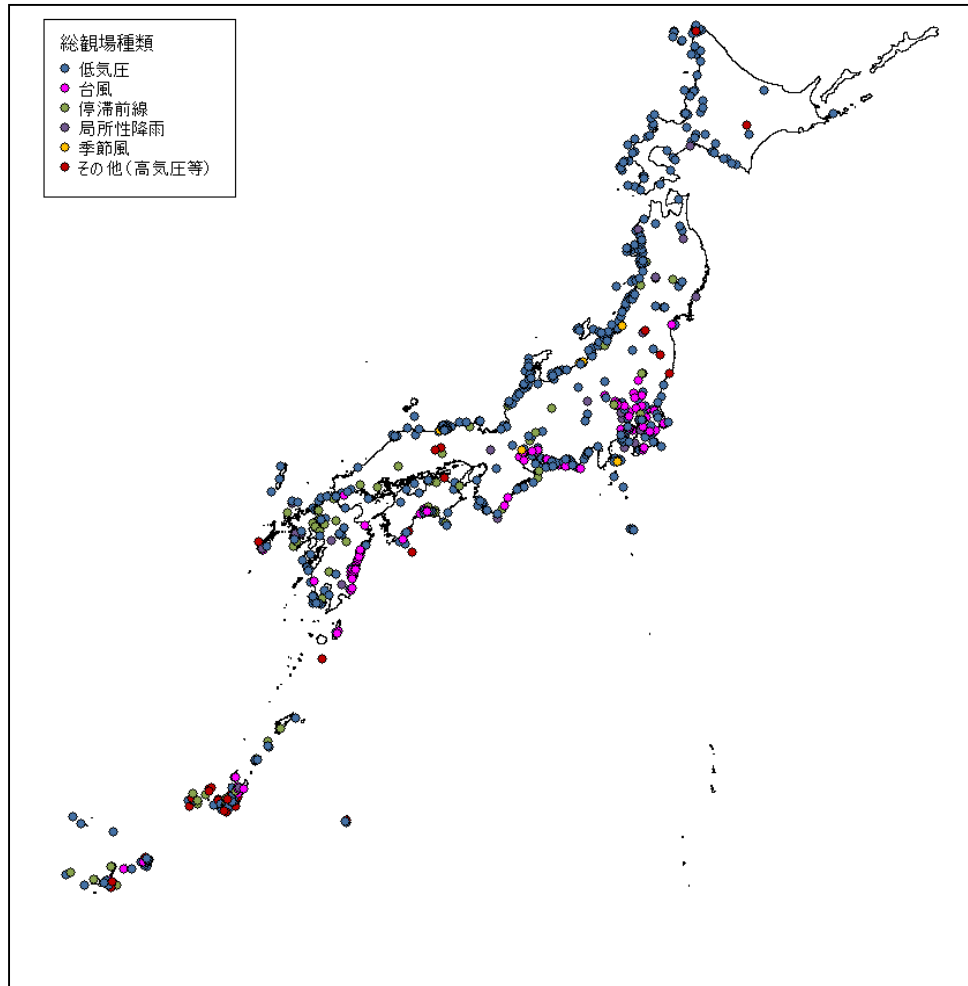
| 相関係数の値 | 最大風速 | 被害幅 | 被害長さ |
|--------|-------|-------|-------|
| 最大風速 | 1.000 | 0.381 | 0.452 |
| 被害幅 | — | 1.000 | 0.381 |
| 被害長さ | — | — | 1.000 |

【別添資料 1 (2.3.4 : 1-31)】

第 8.1-5 表 設計竜巻の特性値

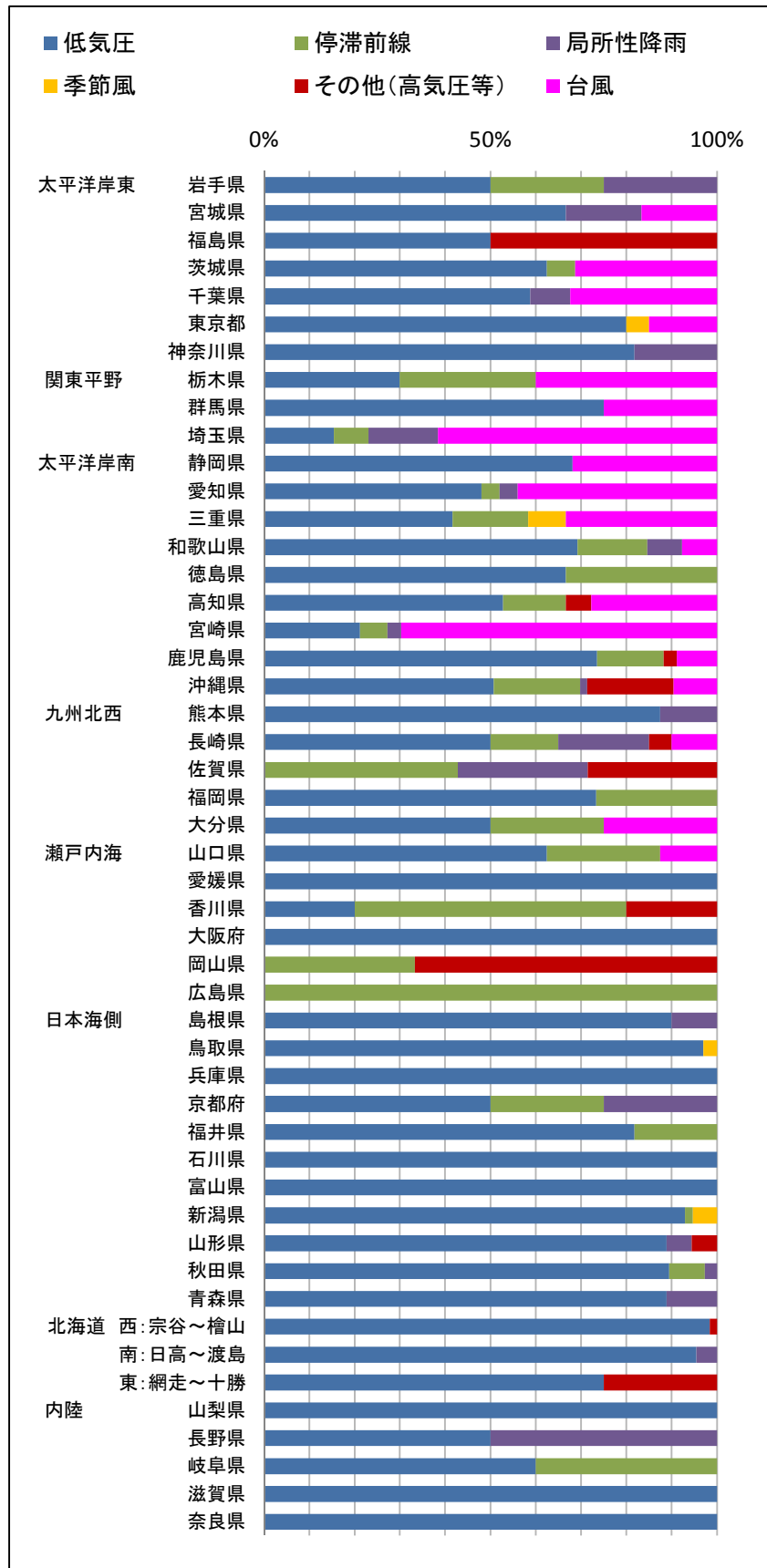
| 設計竜巻の 最大風速 V_D (m/s) | 移動速度 V_T (m/s) | 最大接線 風速 V_{Rm} (m/s) | 最大接線 風速半径 R_m (m) | 最大気圧 低下量 ΔP_{max} (hPa) | 最大気圧 低下率 $(dp/dt)_{max}$ (hPa/s) |
|---------------------------------|------------------------|---------------------------------|------------------------------|--|---|
| 100 | 15 | 85 | 30 | 89 | 45 |

【別添資料 1 (2.4.2 : 1-45)】



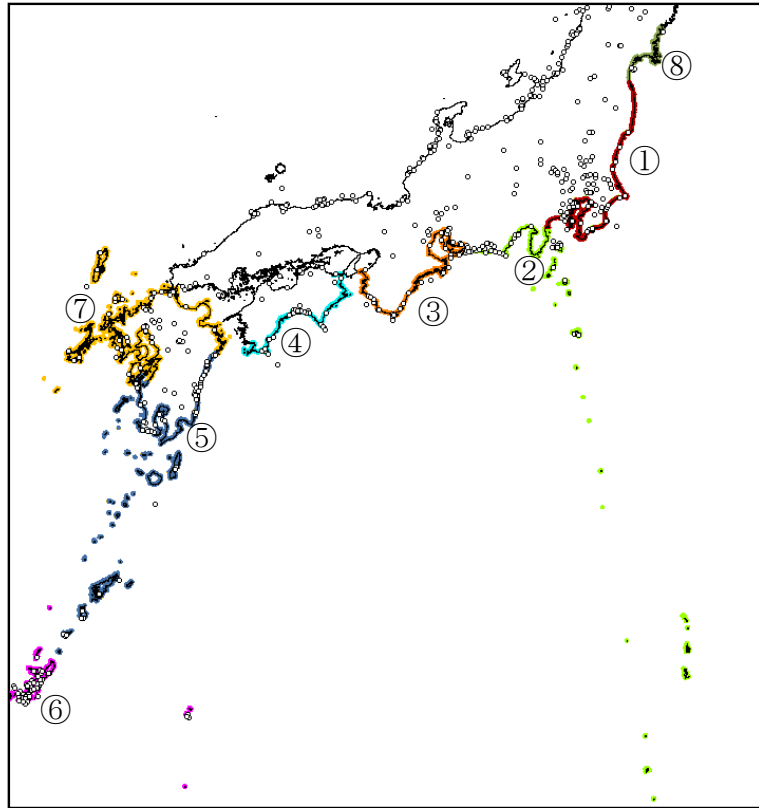
第 8.1-1 図 竜巻発生時の総観場の分布(1961年1月~2012年6月)

【別添資料 1 (2.2.1 : 1-16)】



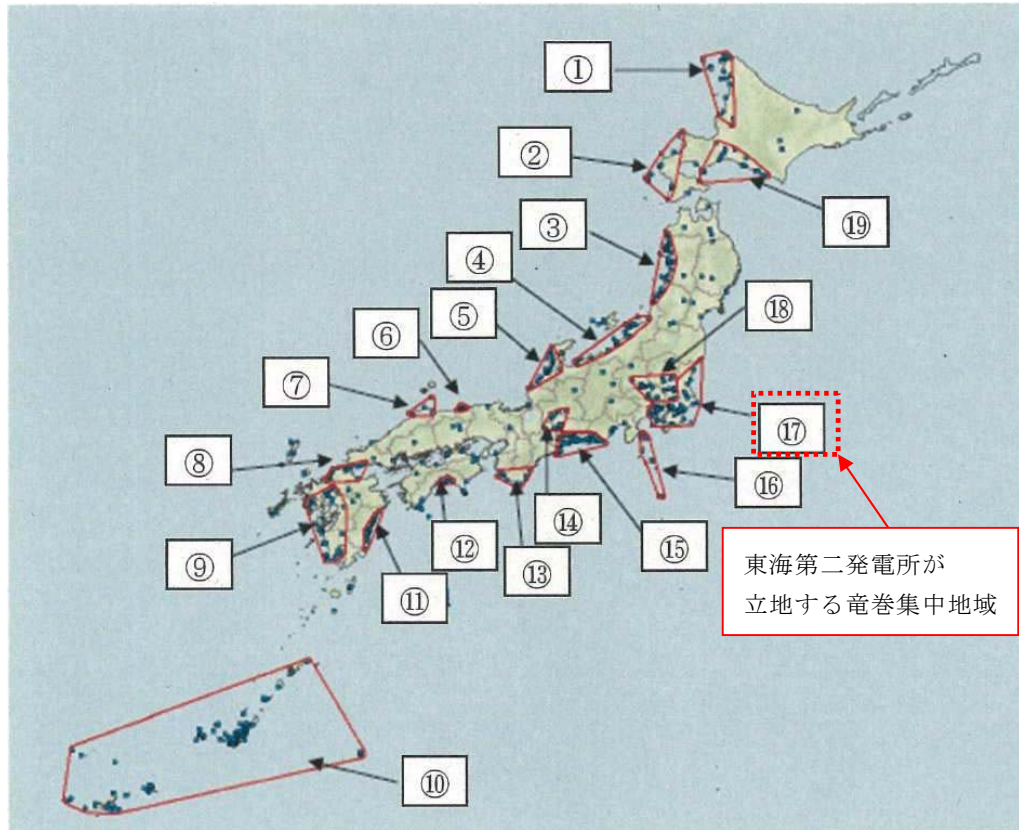
第 8.1-2 図 各都道府県での発生要因別比率

【別添資料 1 (2.2.1 : 1-17)】



第 8.1-3 図 竜巻検討地域 T A₁ の検討領域

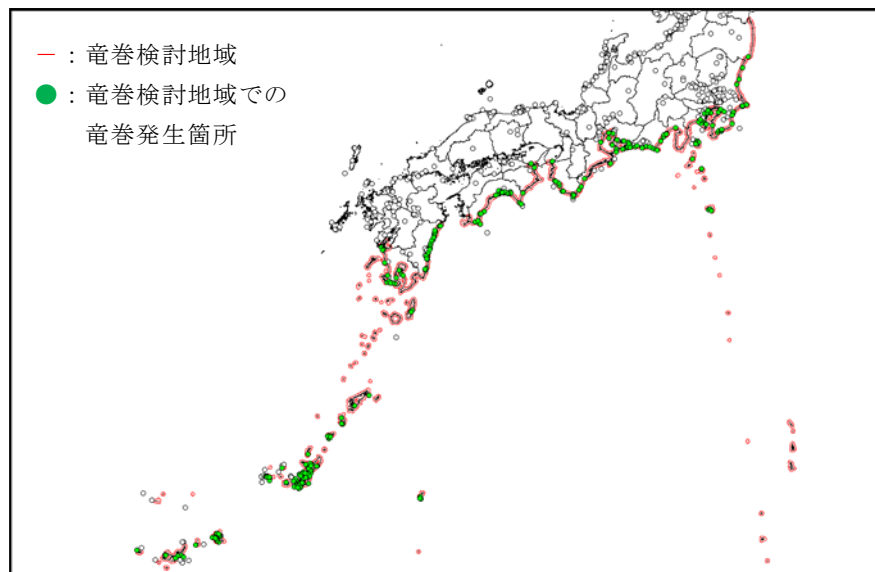
【別添資料 1 (2.2.2 : 1-19)】



第 8.1-4 図 竜巻の発生する地点と竜巻が集中する 19 の地域

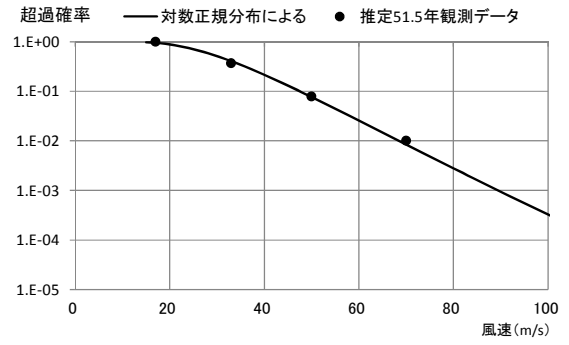
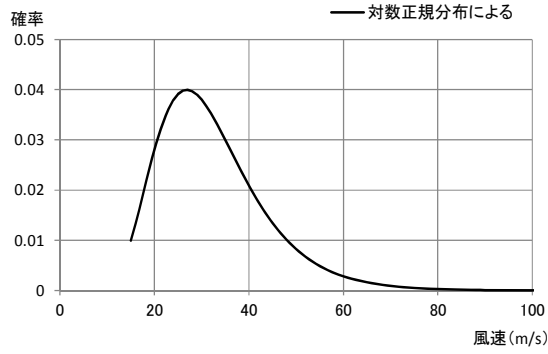
(「原子力発電所の竜巻影響評価ガイド(案)及び解説」より引用)

【別添資料 1 (2.2.3 : 1-20)】

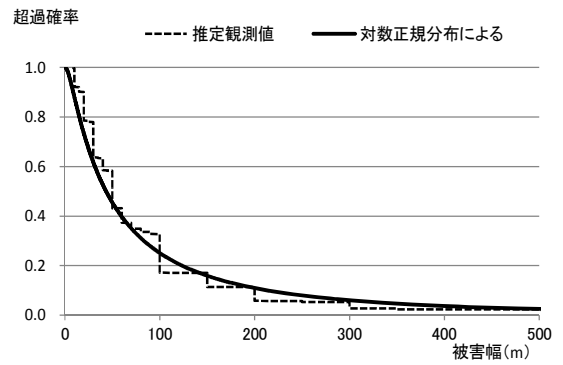
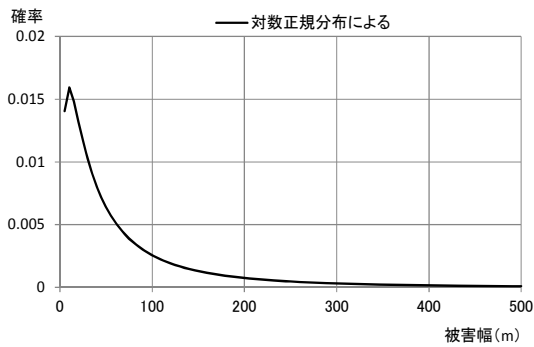


第8.1-5図 竜巻検討地域

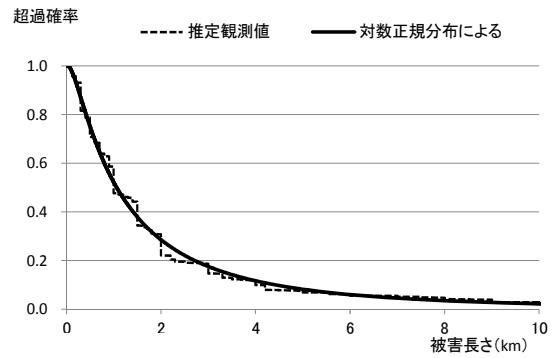
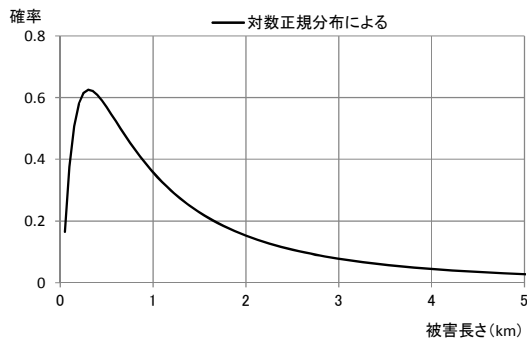
【別添資料 1 (2.2.4 : 1-21)】



第 8.1-6 図 最大風速の確率密度分布（左）と超過確率分布（右）



第 8.1-7 図 被害幅の確率密度分布（左）と超過確率分布（右）

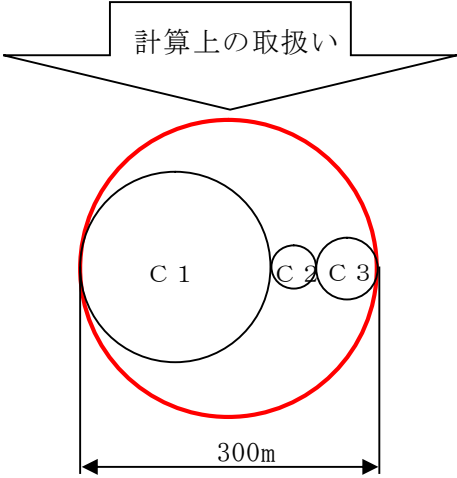


第 8.1-8 図 被害長さの確率密度分布（左）と超過確率分布（右）

【別添資料 1 (2.3.4 : 1-30)】

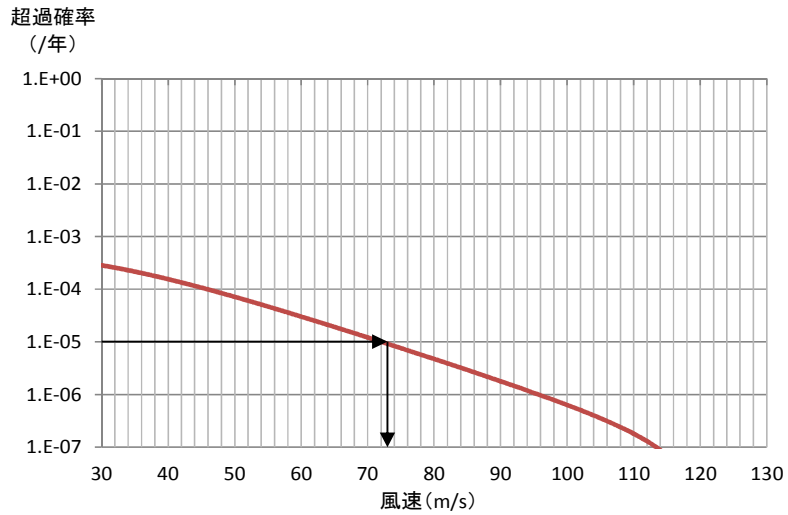


は、商業機密又は核物質防護上の観点から公開できません。



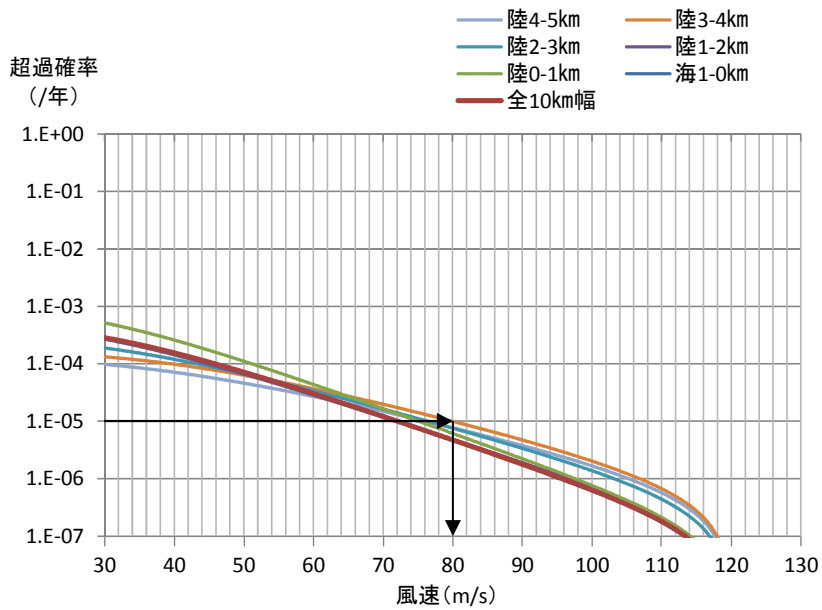
第 8.1-9 図 竜巻影響エリア

【別添資料 1 (2.3.5 : 1-32)】



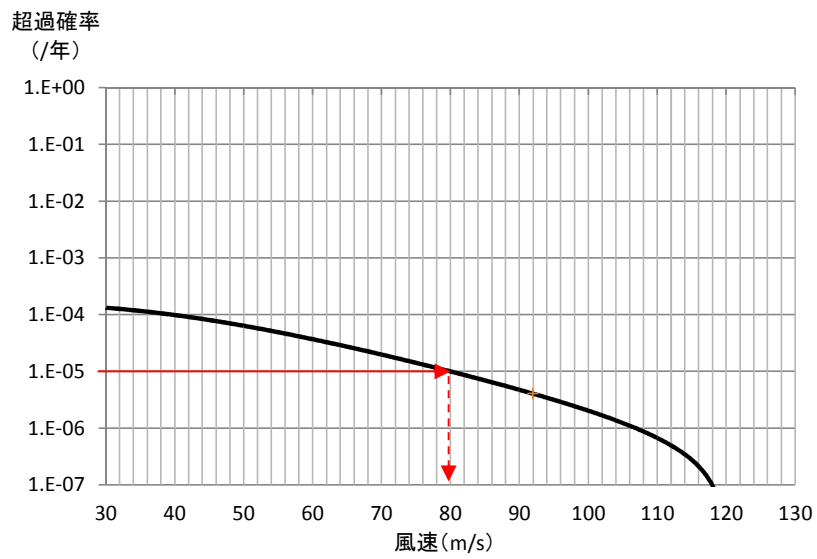
第 8.1-10 図 竜巻最大風速のハザード曲線（海側，陸側 5km 範囲）

【別添資料 1（2.3.6 : 1-35）】



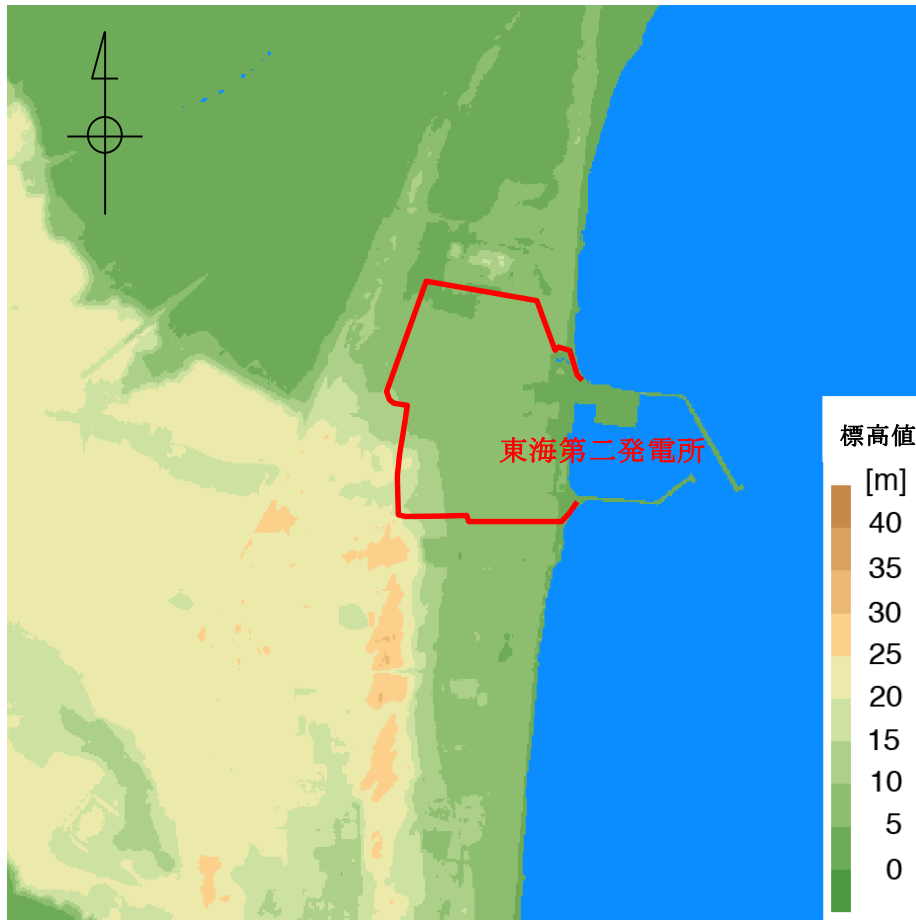
第 8.1-11 図 竜巻検討地域を 1km 幅毎に細分化した場合のハザード曲線

【別添資料 1（2.3.6 : 1-36）】



第 8.1-12 図 竜巻最大風速のハザード曲線

【別添資料 1 (2.3.9 : 1-40)】



第 8.1-13 図 東海第二発電所を中心とした東西 3km×南北 3km の地形
 (国土地理院 5m メッシュ標高データに加筆)

【別添資料 1 (2.4.1 : 1-43)】

8.7 参考文献

- (1) 気象庁 竜巻等の突風データベース
- (2) 東京工芸大学 (2011) : 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
- (3) 井上博登, 福西史郎, 鈴木哲夫, 2013:原子力発電所の竜巻影響評価ガイド (案) 及び解説, 独立行政法人原子力安全基盤機構, JNES-RE-2013-9009
- (4) Wen. Y. K and Chu. S.L. (1973) : Tornado Risks and Design Wind Speed, Journal of the Structural Division, Proceedings of American Society of Civil Engineering, Vol.99, No.ST12, pp.2409-2421
- (5) Garson. R. C., Morla-Catalan J. and Cornell C.A. (1975) : Tornado Risk Evaluation Using Wind Speed Profiles, Journal of the Structural. Division, Proceedings of American Society of Civil Engineering, Vol.101, No.ST5, pp.1167-1171
- (6) Garson. R. C., Morla-Catalan J. and Cornell C.A. (1975) : Tornado Design Winds Based on Risk, Journal of the Structural Division, Proceedings of the American Society of Civil Engineers, Vol.101, No.ST9, pp.1883-1897
- (7) U.S. Nuclear Regulatory Commission, Regulatory Guide 1.76: Design-Basis Tornado and Tornado Missiles for Nuclear Power Plants, Revision 1, March 2007.

1.4 気象等

該当なし

東海第二発電所

竜巻影響評価について

本資料のうち、は商業機密又は核物質防護上の観点から公開できません。

目 次

| | |
|---|----|
| 1. 竜巻に対する防護 | 1 |
| 1.1 概要 | 1 |
| 1.2 評価の基本方針 | 2 |
| 1.2.1 竜巻から防護する施設の抽出 | 2 |
| 1.2.2 竜巻影響評価の対象施設 | 2 |
| 1.2.3 評価の基本的な考え方 | 12 |
| 1.2.3.1 評価方法 | 12 |
| 1.2.3.2 評価対象施設に作用する荷重 | 12 |
| 1.2.3.3 施設の安全性の確認方針 | 13 |
| 2. 基準竜巻・設計竜巻の設定 | 14 |
| 2.1 概要 | 14 |
| 2.2 竜巻検討地域の設定 | 14 |
| 2.2.1 気象総観場の分析 | 15 |
| 2.2.2 総観場の気象条件に基づく竜巻検討地域 $T A_1$ の設定 | 18 |
| 2.2.3 竜巻集中地域に基づく竜巻検討地域 $T A_2$ の設定 | 20 |
| 2.2.4 竜巻検討地域 $T A$ の設定 | 21 |
| 2.3 基準竜巻の最大風速 (V_B) の設定 | 22 |
| 2.3.1 過去に発生した竜巻による最大風速 (V_{B1}) | 22 |
| 2.3.2 竜巻最大風速のハザード曲線による最大風速 (V_{B2}) | 23 |
| 2.3.3 発生頻度の分析 | 24 |
| 2.3.4 竜巻風速, 被害幅, 被害長さの確率密度分布並びに相関係数 | 29 |
| 2.3.5 竜巻影響エリアの設定 | 31 |
| 2.3.6 ハザード曲線の算定 | 33 |

| | | |
|--------|-----------------------------------|----|
| 2.3.7 | 竜巻最大風速のハザード曲線による最大風速 (V_{B2}) | 36 |
| 2.3.8 | 竜巻ハザードの不確かさの検討 | 37 |
| 2.3.9 | 基準竜巻の最大風速 (V_B) | 40 |
| 2.3.10 | 竜巻データの更新に関する対応 | 40 |
| 2.4 | 設計竜巻の設定 | 42 |
| 2.4.1 | 設計竜巻の最大風速 (V_D) の設定 | 42 |
| 2.4.2 | 設計竜巻の特性値 | 44 |
| 3. | 竜巻影響評価 | 47 |
| 3.1 | 概要 | 47 |
| 3.2 | 評価対象施設 | 47 |
| 3.3 | 設計荷重の設定 | 48 |
| 3.3.1 | 設計竜巻荷重の設定 | 48 |
| 3.3.2 | 設計竜巻荷重と組み合わせる荷重の設定 | 59 |
| 3.4 | 評価対象施設の設計方針 | 61 |
| 3.4.1 | 許容限界 | 61 |
| 3.4.2 | 設計方針 | 62 |
| 3.5 | 竜巻随伴事象に対する評価 | 69 |

添付資料

1. 竜巻防護施設のうち評価対象施設の抽出について
別紙 1-1 緊急時対策所の竜巻防護方針について
2. 耐震 S クラス施設について
別紙 2-1 外部事象に対する津波防護施設, 浸水防止設備,
及び津波監視設備の防護方針について
3. 竜巻防護施設に波及的影響を及ぼし得る施設の抽出について
4. 竜巻検討地域の設定について
5. ハザード曲線による竜巻最大風速 (V_{B2}) の計算について
別紙 5-1 海上の F スケール不明竜巻の按分方法の妥当性について
別紙 5-2 竜巻発生数の確率分布 (ポアソン, ポリヤ分布) がハザ
ード結果に及ぼす影響について
6. 地形効果による竜巻の増幅の可能性について
7. 竜巻影響評価の概要及び保守性について
8. 竜巻影響評価及び竜巻防護対策の概要
別紙 8-1 評価対象施設の設計荷重について
別紙 8-2 竜巻防護対策のうち飛散防止対策の概要について
9. 設計飛来物の設定について
別紙 9-1 分解され小型軽量となる物品及び損傷するが飛来物となら
ない物品について
別紙 9-2 空力パラメータについて
10. 竜巻時に発生する雹の影響について
11. 竜巻随件事象の抽出について

: 今回提出範囲

1. 竜巻に対する防護

1.1 概要

原子力規制委員会の定める「実用発電用原子炉及びその附属施設の位置、構造及び設備の基準に関する規則」第六条において、外部からの衝撃による損傷の防止として、「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ものでなければならない」としており、敷地周辺の自然環境を基に想定される自然現象の一つとして、竜巻の影響を挙げている。

発電用原子炉施設の供用期間中に極めてまれに発生する突風、強風を引き起こす自然現象としての竜巻及びその随件事象等によって発電用原子炉施設の安全性を損なわ^なない設計であることを評価するため、「原子力発電所の竜巻影響評価ガイド（平成25年6月19日 原子力規制委員会決定、平成26年9月17日改正）」（以下「竜巻影響評価ガイド」*という）を参照し、以下の竜巻影響評価について実施し、安全機能が維持されることを確認する。

- (1) 設計竜巻及び設計荷重（設計竜巻荷重及びその他の組合せ荷重）の設定
- (2) 東海第二発電所における飛来物に係る調査
- (3) 飛来物発生防止対策
- (4) 考慮すべき設計荷重に対する竜巻防護施設の構造健全性等の評価を行い、必要に応じ対策を行うことで安全機能が維持されることの確認

※：「原子力発電所の竜巻影響評価ガイド（案）及び解説」を含む。（特に区別する必要がある場合は、以下「ガイド（案）及び解説」という）

1.2 評価の基本方針

1.2.1 竜巻から防護する施設の抽出【添付資料1】

竜巻から防護する施設（以下「竜巻防護施設」という。）は、安全施設が竜巻の影響を受ける場合においても原子炉施設の安全性を確保するために、「発電用軽水型原子炉施設の安全機能の重要度分類に関する審査指針」のクラス1、2及び3の設計を要求される構築物、系統及び機器とする。

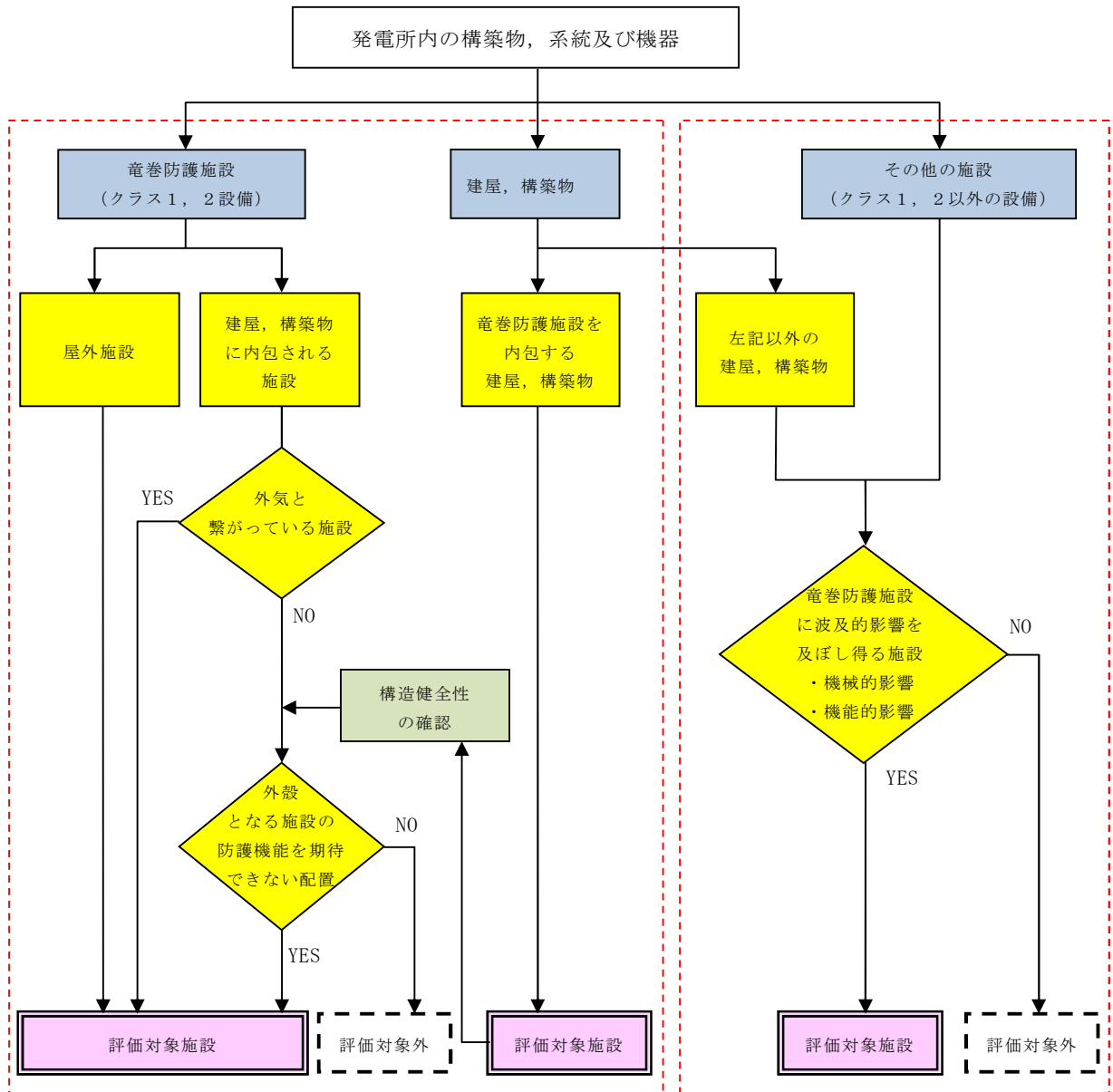
ただし、クラス3に属する施設については、竜巻及びその随件事象による損傷を考慮して、代替設備により必要な機能を確保すること、安全上支障のない期間に修復すること等の対応が可能な設計とすることで、安全機能を損なわれない設計とすることから、以降「竜巻防護施設」という場合は、クラス1及び2に属する施設を指すものとする。

1.2.2 竜巻影響評価の対象施設

以下の(1)及び(2)に示す施設を竜巻影響評価の対象施設（以下「評価対象施設」という。）とする。

評価対象施設の抽出フローを第1.2.2-1図に示す。

なお、「基準地震動及び耐震設計方針に係る審査ガイド」の重要度分類における耐震Sクラスの設計を要求される施設についても、評価対象施設として抽出すべきものがないことを確認した。【添付資料2】



第 1.2.2-2 図

第 1.2.2-4 図

第 1.2.2-1 図 評価対象施設の抽出フロー

(1) 竜巻防護施設

竜巻防護施設のうち、評価対象施設として、屋外施設（竜巻防護施設を内包する施設を含む）、屋内の施設で外気と繋がっている施設及び外殻となる施設（建屋、構築物）による防護機能が期待できない施設を抽出する。

なお、外殻となる施設による防護機能が期待できない施設については、竜巻防護施設を内包する施設の構造健全性の確認結果を踏まえ抽出する。

防護機能を期待できることが確認できた施設（の区画）に内包される竜巻防護施設については，当該外殻施設により防護されることから，個別評価は実施しない。

第 1.2.2-2 図に，竜巻防護施設のうち評価対象施設の抽出フロー及び抽出された評価対象施設を示す。

また，第 1.2.2-2 図において抽出した評価対象施設のうち，屋外施設の配置を第 1.2.2-3 図に示す。

a. 屋外施設（竜巻防護施設を内包する施設を含む）

(a) 非常用ディーゼル発電機吸気フィルタ

(b) 高圧炉心スプレイ系ディーゼル発電機吸気フィルタ

(以下(a)(b)を区別不要の場合は，「ディーゼル発電機吸気フィルタ」という。)

(c) 非常用ディーゼル発電機室ルーフベントファン

(d) 高圧炉心スプレイ系ディーゼル発電機室ルーフベントファン

(以下(c)(d)を区別不要の場合は，「ディーゼル発電機室ルーフベントファン」という。)

(e) 中央制御室換気系冷凍機（配管，弁含む）

(以下(e)を「中央制御室換気系冷凍機」という。)

(f) 残留熱除去系海水系ポンプ（配管，弁含む）

(g) 残留熱除去系海水系ストレーナ

(h) 非常用ディーゼル発電機海水ポンプ（配管，弁含む）

(i) 非常用ディーゼル発電機海水ストレーナ

(j) 高圧炉心スプレイ系ディーゼル発電機海水ポンプ（配管，弁含む）

(k) 高圧炉心スプレイ系ディーゼル発電機海水ストレーナ

(以下(f)～(k)を区別不要の場合は，「海水ポンプ室内設備」という。)

- (l) 非常用ガス処理系排気配管
- (m) 排気筒

<以下、竜巻防護施設を内包する施設>

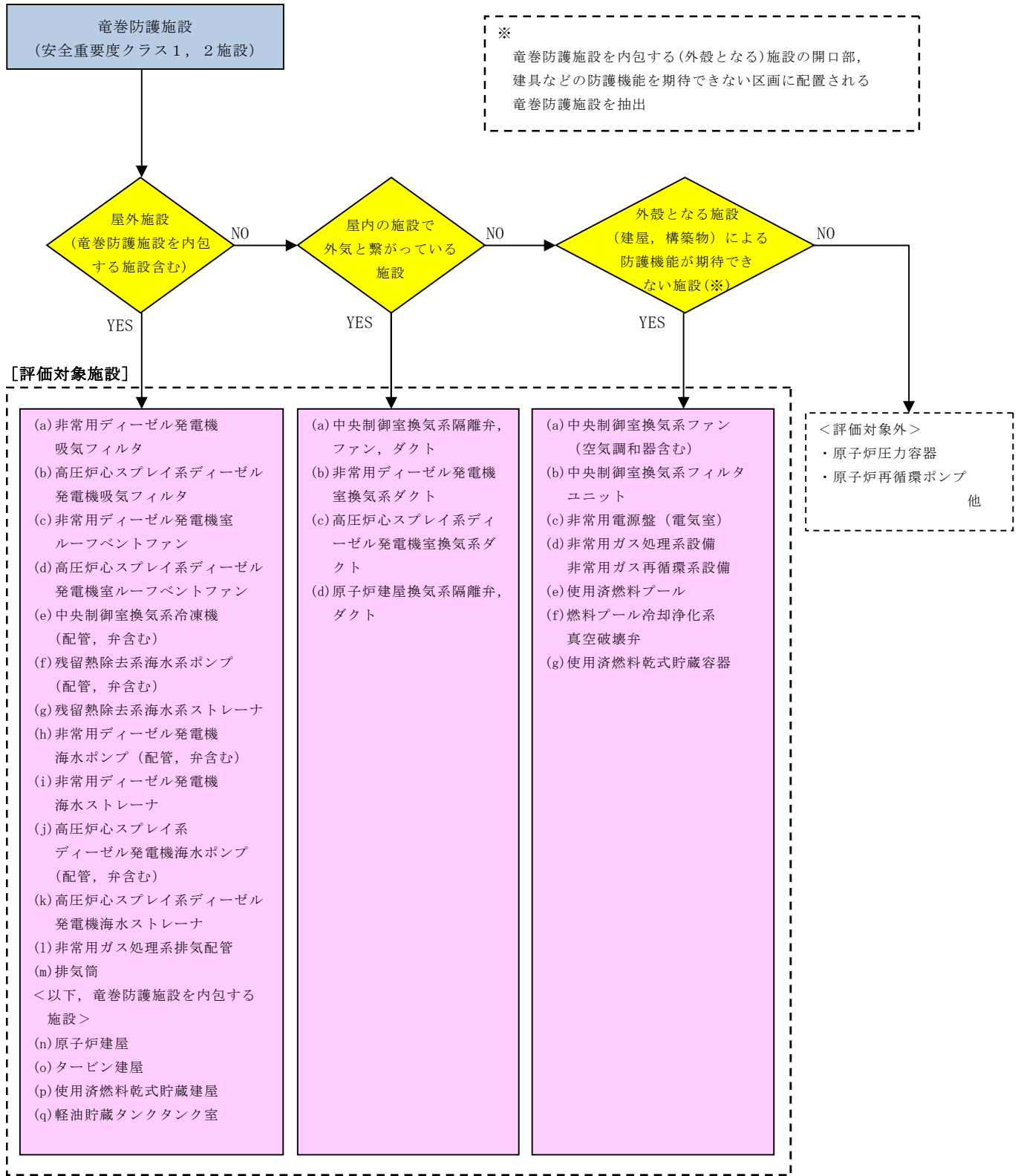
- (n) 原子炉建屋（原子炉圧力容器，原子炉再循環ポンプ等を内包）
- (o) タービン建屋（気体廃棄物処理系隔離弁等を内包）
- (p) 使用済燃料乾式貯蔵建屋（使用済燃料乾式貯蔵容器を内包）
- (q) 軽油貯蔵タンクタンク室（軽油貯蔵タンクを内包）

b. 屋内の施設で外気と繋がっている施設

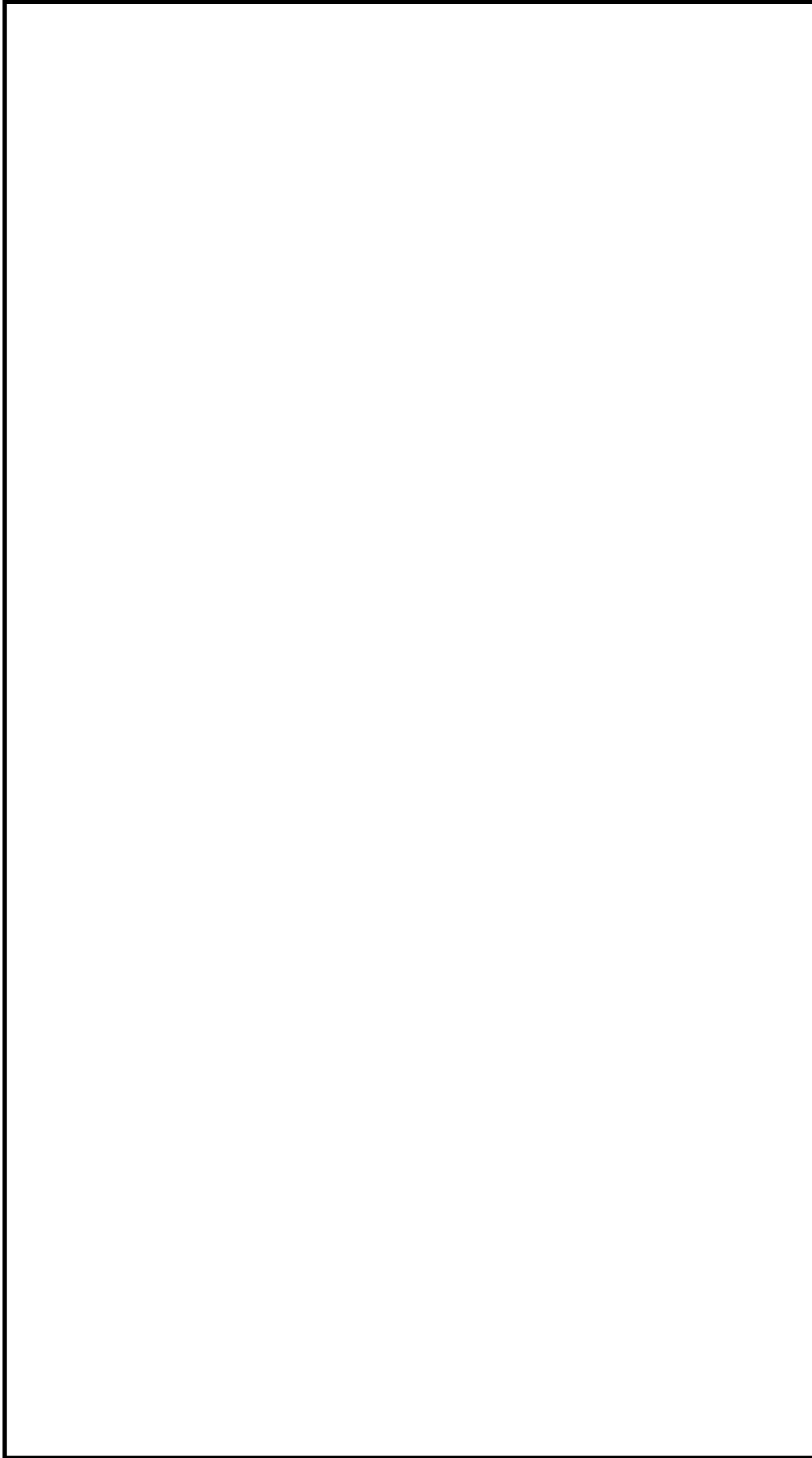
- (a) 中央制御室換気系隔離弁，ファン（ダクト含む）
- (b) 非常用ディーゼル発電機室換気系ダクト
- (c) 高圧炉心スプレイ系ディーゼル発電機室換気系ダクト
(以下(b)(c)を区別不要の場合は，「ディーゼル発電機室換気系ダクト」という。)
- (d) 原子炉建屋換気系隔離弁，ダクト

c. 外殻となる施設（建屋，構築物）による防護機能が期待できない施設

- (a) 中央制御室換気系ファン（空気調和器含む）
- (b) 中央制御室換気系フィルタユニット
(以下(a)(b)を区別不要の場合は，「中央制御室換気系ファン」という。)
- (c) 非常用電源盤（原子炉建屋附属棟1階電気室）
- (d) 非常用ガス処理系設備及び非常用ガス再循環系設備
- (e) 使用済燃料プール
- (f) 燃料プール冷却浄化系真空破壊弁
- (g) 使用済燃料乾式貯蔵容器



第 1.2.2-2 図 竜巻防護施設のうち評価対象施設の抽出フロー



第1.2.2-3 図 竜巻防護施設のうち評価対象施設（屋外施設）の配置図

(2) 竜巻防護施設に波及的影響を及ぼし得る施設【添付資料3】

竜巻防護施設に波及的影響を及ぼし得る施設として評価対象施設となる施設は、発電所構内の構築物、系統及び機器のうち、倒壊により竜巻防護施設を機能喪失させる（機械的影響）可能性があるもの、及び屋外に設置される竜巻防護施設の附属設備のうち、気圧差等による損傷により竜巻防護施設を機能喪失させる（機能的影響）可能性があるものとする。

第1.2.2-4図に、竜巻防護施設に波及的影響を及ぼし得る施設の抽出フロー及び抽出された施設を示す。

また、第1.2.2-4図において抽出した竜巻防護施設に波及的影響を及ぼし得る施設の配置図を、第1.2.2-5図に示す。

a. 機械的影響

- (a) サービス建屋
- (b) 海水ポンプ室
- (c) 鋼製防護壁
- (d) 排気筒

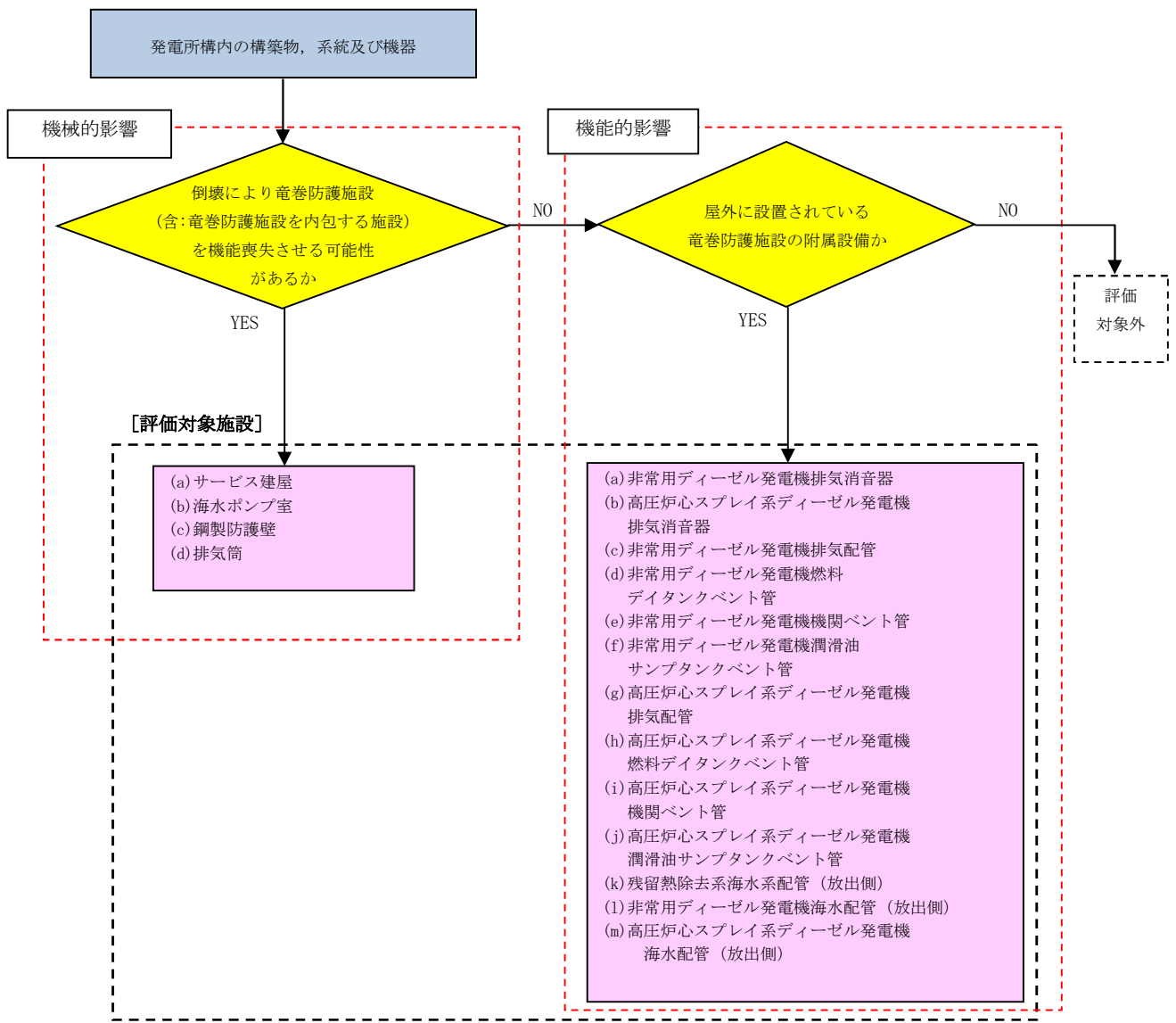
b. 機能的影響

- (a) 非常用ディーゼル発電機排気消音器
- (b) 高圧炉心スプレイ系ディーゼル発電機排気消音器

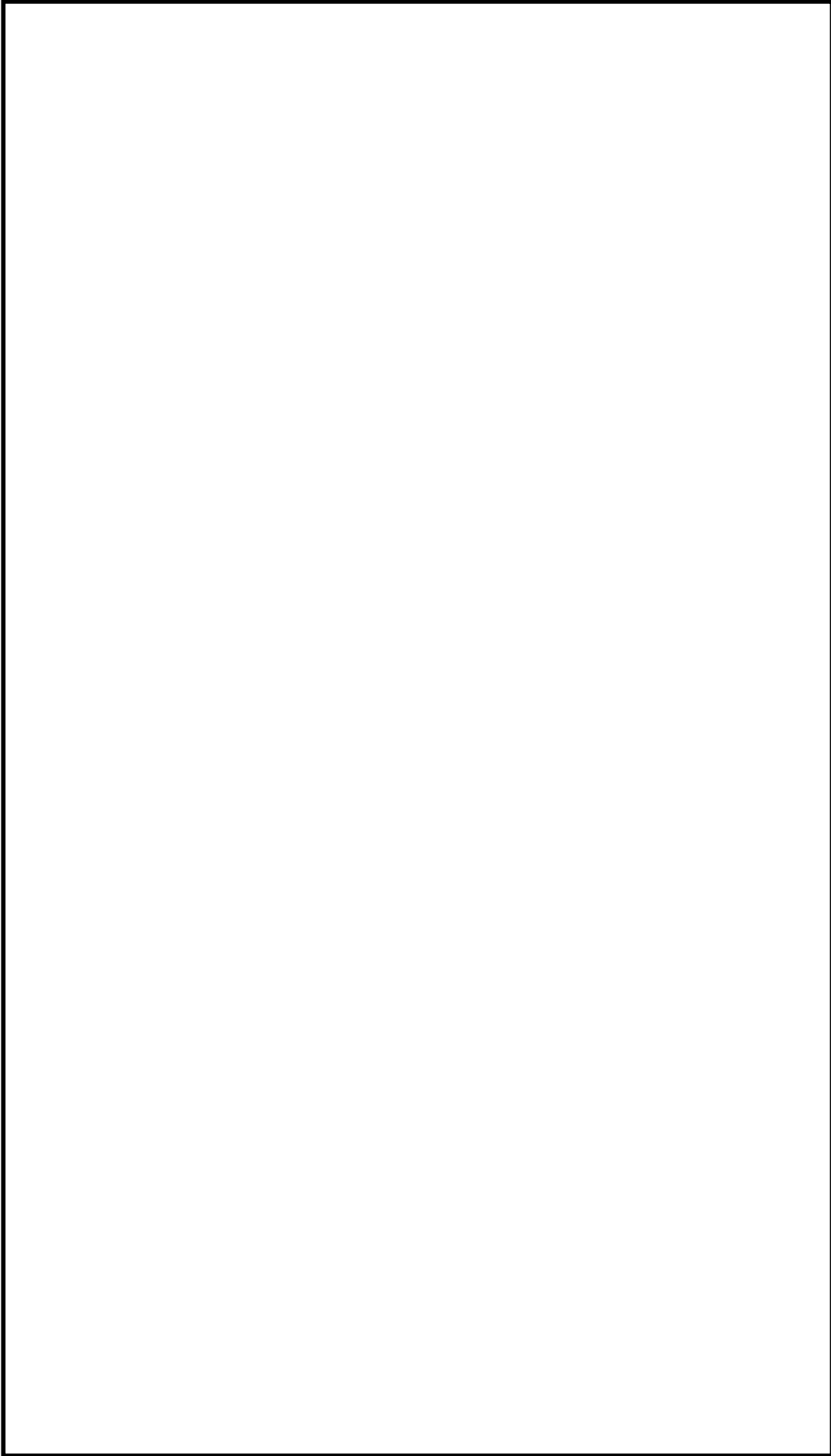
(以下(a)(b)を区別不要の場合は、「ディーゼル発電機排気消音器」という。)

- (c) 非常用ディーゼル発電機排気配管
- (d) 非常用ディーゼル発電機燃料デイトンクベント管
- (e) 非常用ディーゼル発電機機関ベント管
- (f) 非常用ディーゼル発電機潤滑油サンプルタンクベント管
- (g) 高圧炉心スプレイ系ディーゼル発電機排気配管

- (h) 高圧炉心スプレイ系ディーゼル発電機燃料デイトンクベント管
- (i) 高圧炉心スプレイ系ディーゼル発電機機関ベント管
- (j) 高圧炉心スプレイ系ディーゼル発電機潤滑油サンプタンクベント管
(以下(c)～(j)を区別不要の場合は、「ディーゼル発電機附属設備配管」という。)
- (k) 残留熱除去系海水系配管（放出側）
- (l) 非常用ディーゼル発電機海水配管（放出側）
- (m) 高圧炉心スプレイ系ディーゼル発電機海水配管（放出側）
(以下(k)～(m)を区別不要の場合は、「海水ポンプ室内設備附属配管（放出側）」という。)



第 1. 2. 2-4 図 竜巻防護施設に波及的影響を及ぼし得る施設の抽出フロー



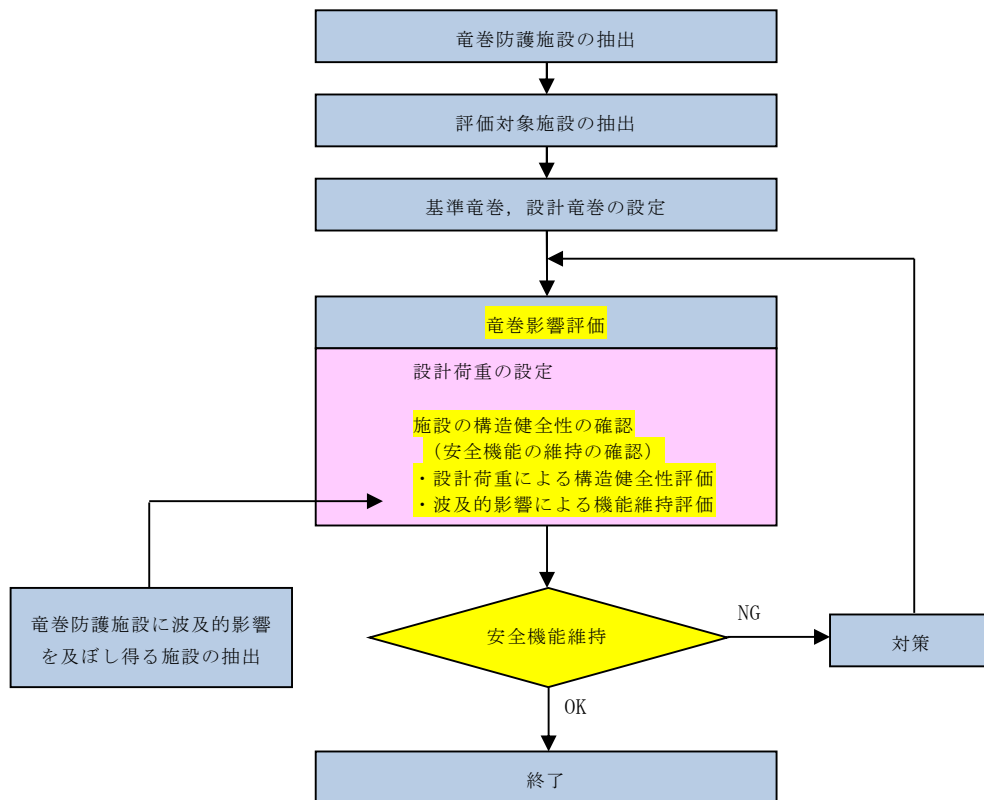
第 1.2.2-5 図 竜巻防護施設に波及的影響を及ぼし得る施設の配置図

1.2.3 評価の基本的な考え方

1.2.3.1 評価方法

基準竜巻、設計竜巻及び設計荷重を適切に設定するとともに、評価対象施設を抽出し、考慮すべき設計荷重に対する評価対象施設の構造健全性について評価を行い、必要に応じ対策を行うことで安全機能が維持されていることを確認する。

竜巻影響評価の基本フローを第 1.2.3.1-1 図に示す。



第 1.2.3.1-1 図 竜巻影響評価の基本フロー

1.2.3.2 評価対象施設に作用する荷重

以下に示す設計荷重を適切に設定する。

(1) 設計竜巻荷重

設計竜巻荷重を以下に示す。

a. 風圧力による荷重

設計竜巻の最大風速による風圧力による荷重

b. 気圧差による荷重

設計竜巻における気圧低下によって生じる評価対象施設内外の気圧差による荷重

c. 設計飛来物の衝撃荷重

設計竜巻によって評価対象施設に衝突し得る飛来物（設計飛来物）が評価対象施設に衝突する際の衝撃荷重

(2) 設計竜巻荷重と組み合わせる荷重

設計竜巻荷重と組み合わせる荷重を以下に示す。

a. 評価対象施設に常時作用する荷重，運転時荷重等

b. 竜巻以外の自然現象による荷重，設計基準事故時荷重等

なお，上記(2) b. の荷重については，竜巻以外の自然現象及び事故の発生頻度等を参照して，上記(2) a. の荷重と組み合わせることの適切性や設定する荷重の大きさ等を判断する。

具体的な荷重については，「3.3.2 設計竜巻荷重と組み合わせる荷重の設定」に示す。

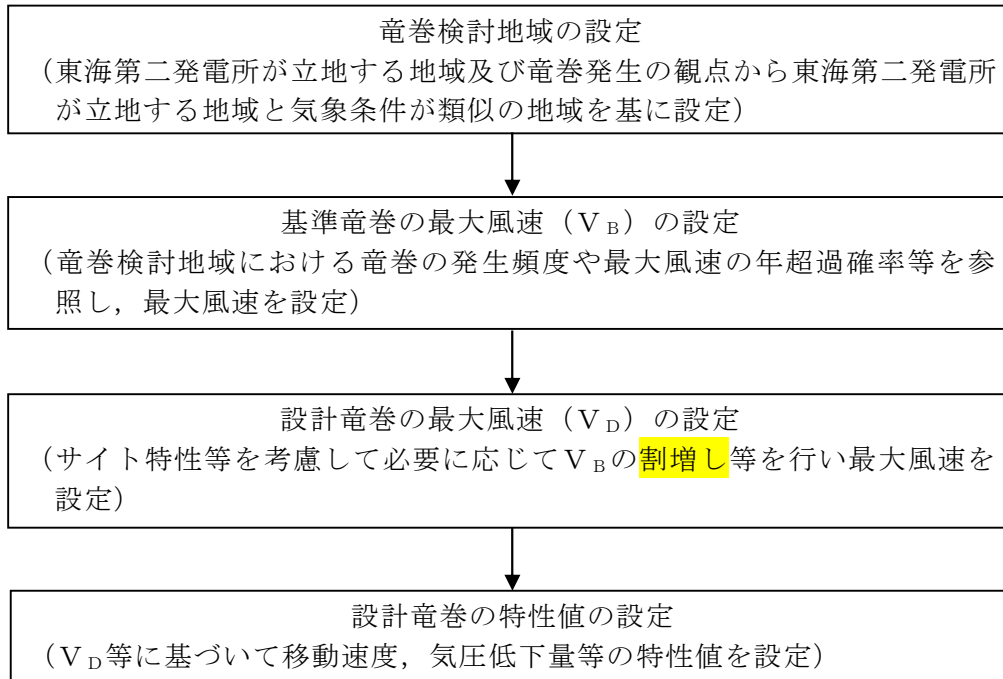
1.2.3.3 施設の安全性の確認方針

設計竜巻荷重及びその他**組合せ**荷重（常時作用している荷重，竜巻以外の自然現象による荷重，設計基準事故時荷重等）を適切に組み合わせた設計荷重に対して，評価対象施設，あるいはその特定の区画の構造健全性等の確認を行い，必要に応じて対策を行うことで安全機能が維持されることを確認する。

2. 基準竜巻・設計竜巻の設定

2.1 概要

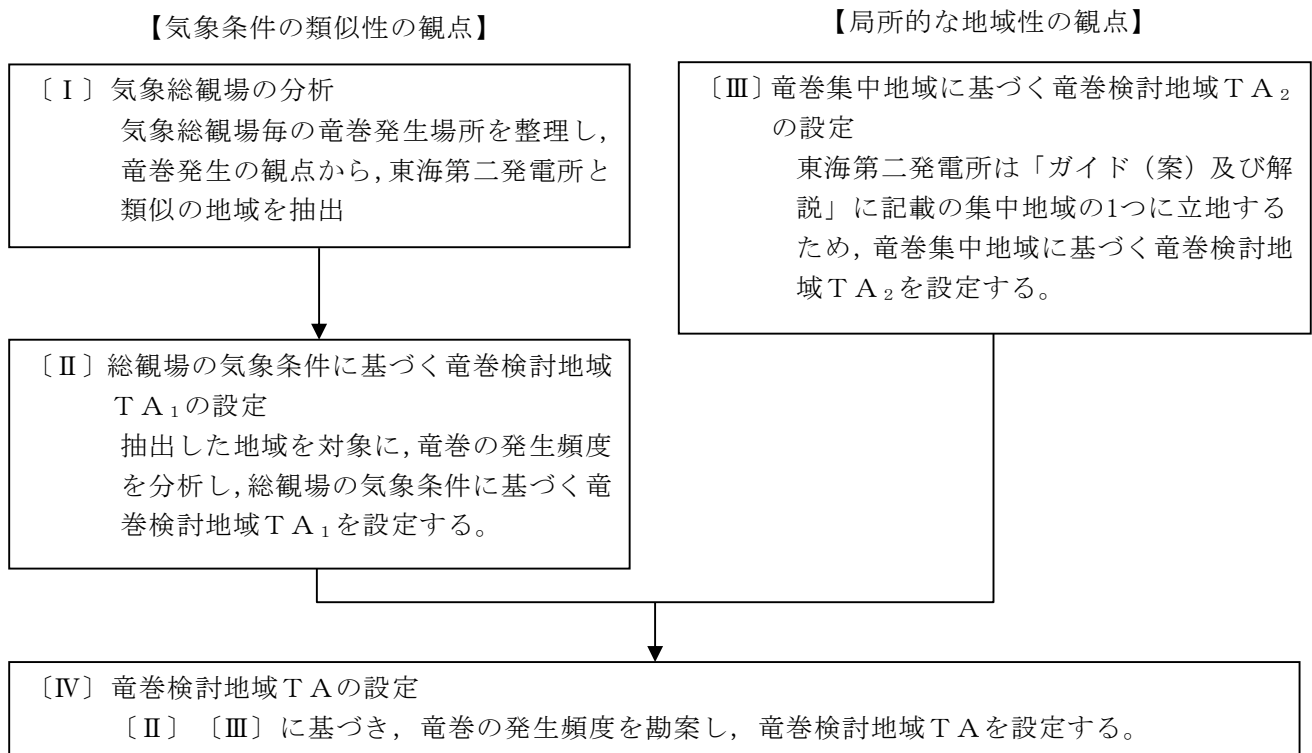
基準竜巻及び設計竜巻の設定フローを，第 2.1-1 図に示す。



第 2.1-1 図 基準竜巻及び設計竜巻の設定フロー

2.2 竜巻検討地域の設定【添付資料 4】

竜巻検討地域は，東海第二発電所が立地する地域及び竜巻発生
の観点から，「総観場の分析に基づく竜巻検討地域 T A₁の検討」
及び「過去の竜巻集中地域に基づく竜巻検討地域 T A₂の検討」
により「竜巻検討地域 T A」を設定する。竜巻検討地域の
設定フローを第 2.2-1 図に示す。



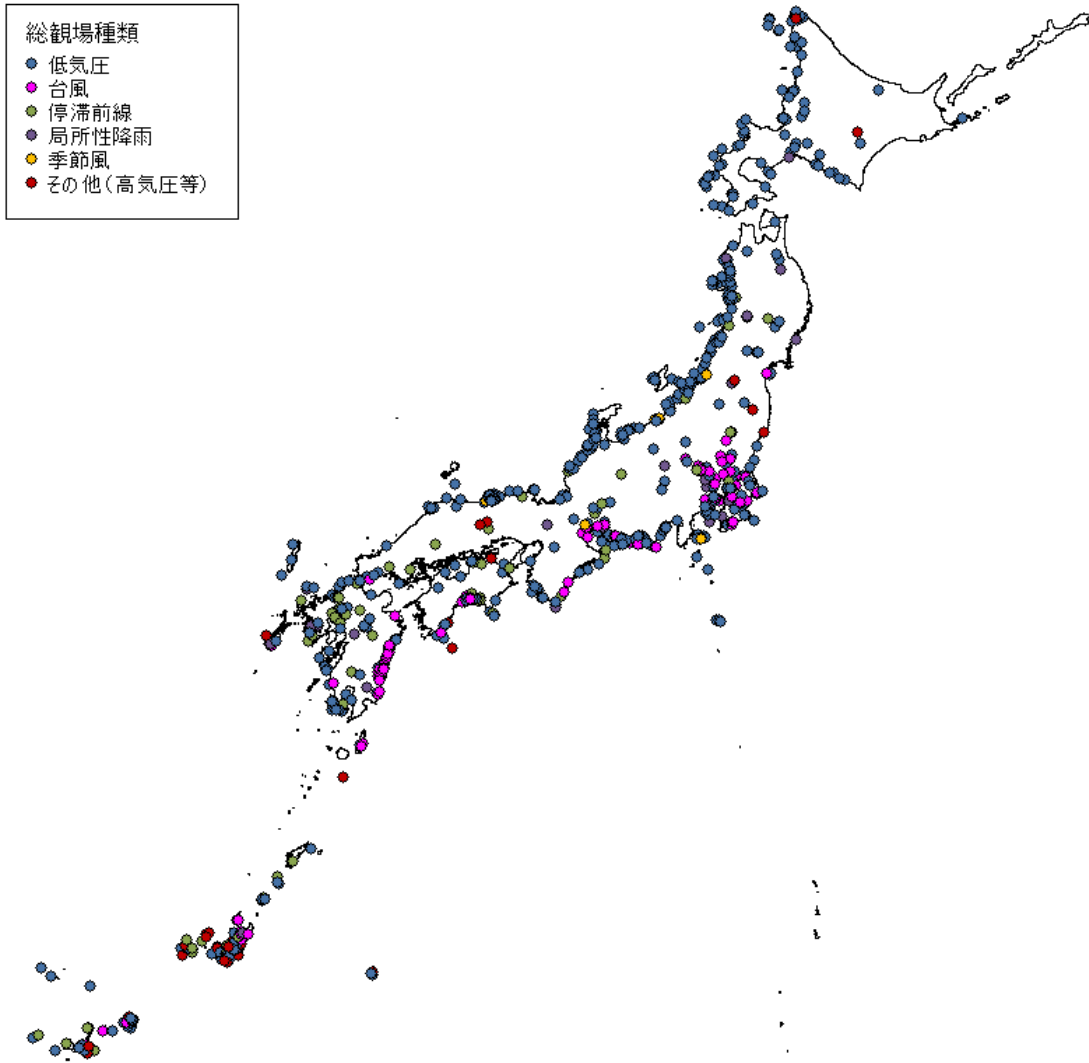
第 2.2-1 図 竜巻検討地域の設定フロー

2.2.1 気象総観場の分析

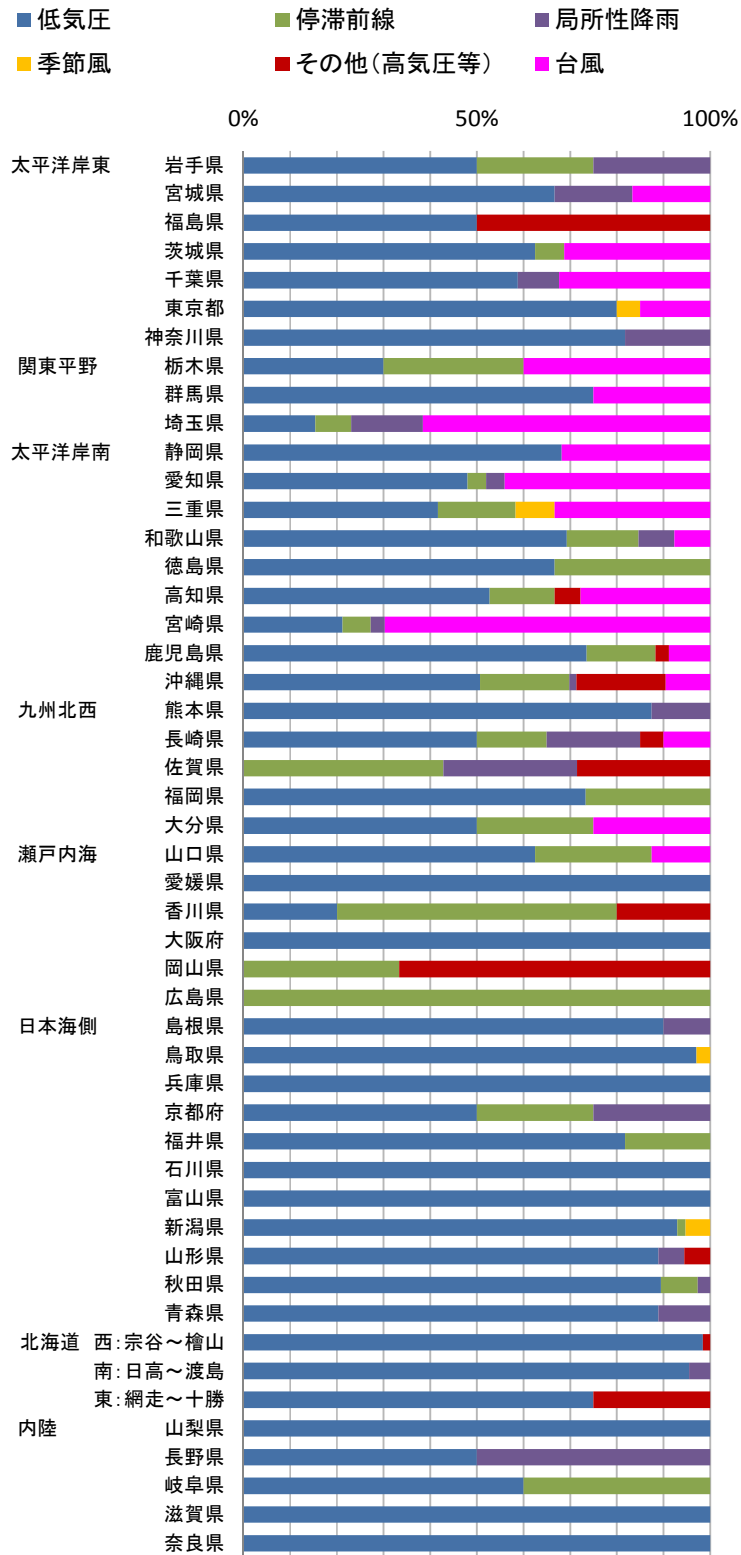
竜巻発生要因の総観場を 6 種類（低気圧，台風，停滞前線，局所性降雨，季節風，その他（高気圧等））に分類し，竜巻発生位置をこの気象要因毎に色分けした分布を，第 2.2.1-1 図に示す。

また，各都道府県での要因別発生比率を第 2.2.1-2 図に示す。

その結果，低気圧起因の竜巻は全国一様に発生していることが分かる。一方台風起因の竜巻は日本海側には発生しておらず，主に太平洋側で発生していることが分かる。また，停滞前線起因の竜巻は北海道を除く各地に発生していること，局所性降雨は内陸部での竜巻発生も促すこと，季節風や高気圧起因とされる竜巻の発生数は比較的少ないことが分かる。



第 2. 2. 1-1 図 竜巻発生時の総観場の分布(1961 年 1 月～2012 年 6 月)



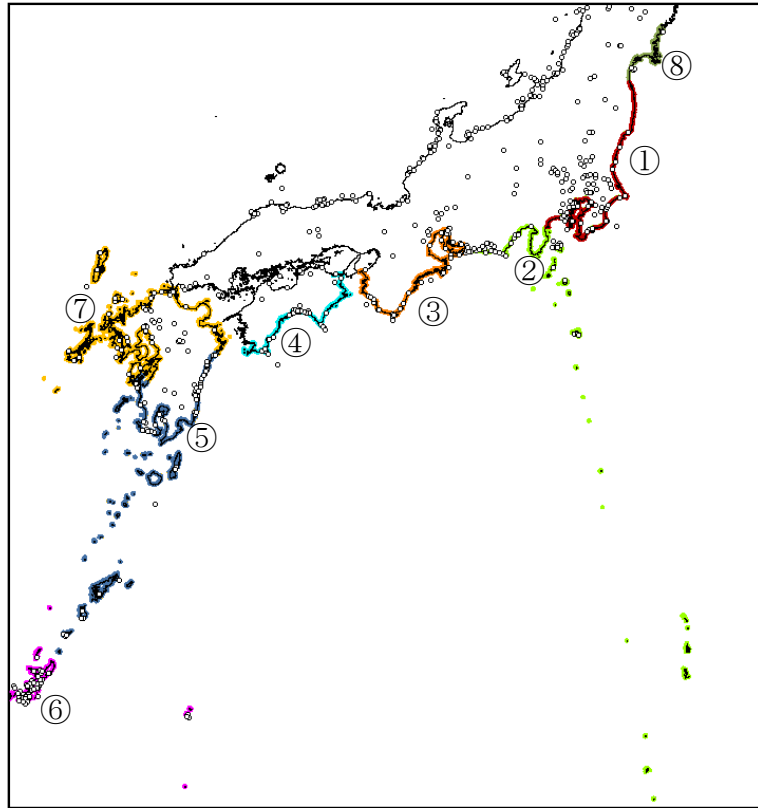
第 2.2.1-2 図 各都道府県での発生要因比率

2.2.2 総観場の気象条件に基づく竜巻検討地域TA₁の設定

竜巻発生地域性が見られる台風起因の発生領域から、太平洋側の宮城県～沖縄県にかけての範囲を考慮する。東海第二発電所はこの範囲に立地しており、太平洋側の宮城県～沖縄県を基本として、竜巻の発生頻度の観点から総観場の気象条件に基づく竜巻検討地域TA₁の検討を行う。

東海第二発電所から半径180km圏内(10万km²圏)を含む太平洋側沿岸の海岸線から海側陸側各5kmの範囲を対象として、竜巻検討地域TA₁の候補の領域8ケース及び竜巻の個数と単位面積当たりの発生数の比較を第2.2.2-1図及び第2.2.2-1表に示す。なお、表の竜巻の個数は各ケースの領域ごとにおける発生した全ての竜巻の個数である。

この結果、TA_{1.6}のケースの単位面積当たりの発生数が最も大きくなるため、これを総観場の気象条件に基づく竜巻検討地域TA₁とする。



第 2.2.2-1 図 竜巻検討地域 T A₁ の検討領域

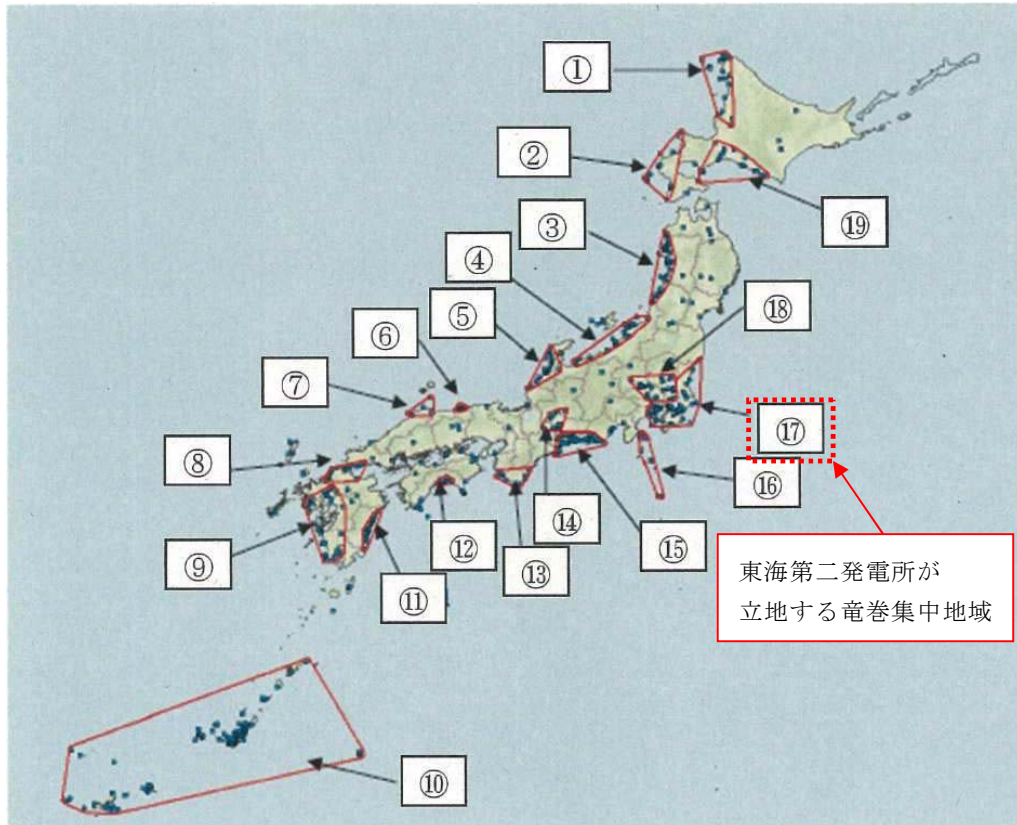
第 2.2.2-1 表 竜巻検討地域 T A₁ の候補毎の竜巻の個数と
単位面積当たり発生数

| 領域 | | | 領域面積 (km ²) | 51.5 年間に 領域内で発 生した個数 | 単位面積当たり 発生数 (個/年/km ²) |
|--------------------------|------------|----------------|----------------------------|----------------------------|--|
| T A _{1.1} | ① | 福島県～神奈川県 | 7,900 | 40 | 0.98E-04 |
| T A _{1.2} | ①～② | 福島県～静岡県 | 15,700 | 68 | 0.84E-04 |
| T A _{1.3} | ①～③ | 福島県～和歌山県 | 23,400 | 104 | 0.86E-04 |
| T A _{1.4} | ①～④ | 福島県～高知県 | 28,600 | 138 | 0.94E-04 |
| T A _{1.5} | ①～⑤ | 福島県～鹿児島県 | 46,700 | 194 | 0.81E-04 |
| T A_{1.6} | ①～⑥ | 福島県～沖縄県 | 57,000 | 300 | 1.02E-04 |
| T A _{1.7} | ①～⑦ | 福島県～九州全県 | 79,700 | 337 | 0.82E-04 |
| T A _{1.8} | ①～⑥, ⑧ | 宮城県～沖縄県 | 59,700 | 302 | 0.98E-04 |

2.2.3 竜巻集中地域に基づく竜巻検討地域TA₂の設定

東海第二発電所は、第 2.2.3-1 図に示す「ガイド（案）及び解説」⁽¹⁾ の竜巻が集中する 19 の地域のうち竜巻集中地域⑰に立地している。

竜巻集中地域⑰を前述のTA_{1.1}とみなし、これを竜巻集中地域に基づく竜巻検討地域TA₂とする。



第 2.2.3-1 図 竜巻の発生する地点と竜巻が集中する 19 の地域

(「ガイド（案）及び解説」より引用)

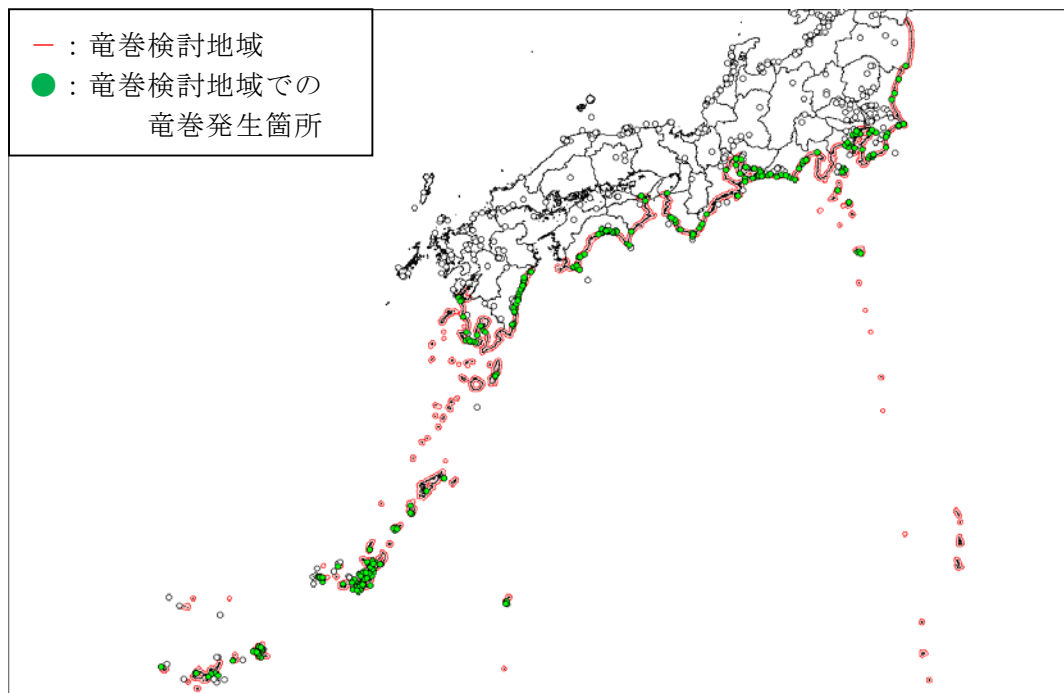
2.2.4 竜巻検討地域 T A の設定

総観場の気象条件に基づく竜巻検討地域 T A₁ 及び竜巻集中地域に基づく竜巻検討地域 T A₂ における、竜巻の個数及び単位面積当たりの発生数を第 2.2.4-1 表に示す。これより、竜巻の個数及び単位面積当たりの発生数の大きさから、T A₁ を竜巻検討地域 T A に設定する（面積約 57,000km²）。

竜巻検討地域 T A を第 2.2.4-1 図に示す。

第 2.2.4-1 表 竜巻検討地域内で発生が確認された竜巻の個数と
単位面積当たり発生数

| | 領域面積 (km ²) | 51.5 年間に 領域内で発 生した個数 | 単位面積当たり発生数 (個/年/km ²) |
|-------------------------------------|----------------------------|----------------------------|--------------------------------------|
| 総観場の気象条件に基づく竜巻検討地域 T A ₁ | 57,000 | 300 | 1.02×10^{-4} |
| 竜巻集中地域に基づく竜巻検討地域 T A ₂ | 7,900 | 40 | 0.98×10^{-4} |



第 2.2.4-1 図 竜巻検討地域 T A

2.3 基準竜巻の最大風速 (V_B) の設定

基準竜巻の最大風速は、過去に発生した竜巻による最大風速 (V_{B1})、及び竜巻最大風速のハザード曲線による最大風速 (V_{B2}) のうち、大きな風速を設定する。

2.3.1 過去に発生した竜巻による最大風速 (V_{B1})

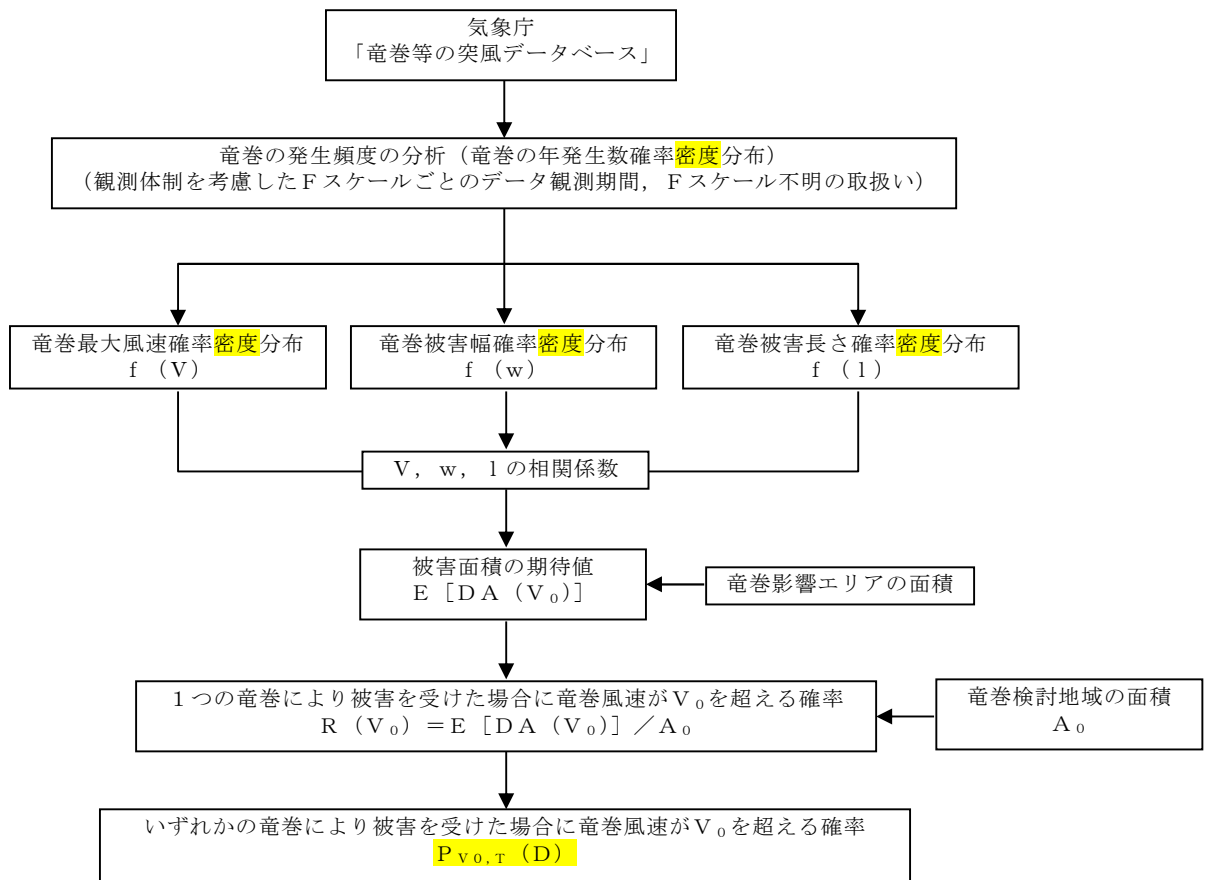
気象庁の「竜巻等の突風データベース」⁽²⁾に基づき、竜巻検討地域内で過去(1961年1月～2012年6月)に発生した竜巻のうち最大であるF3スケール相当以上の竜巻を第2.3.1-1表に示す。F3スケールにおける風速は70m/s～92m/sであることから、過去に発生した竜巻による最大風速 V_{B1} を92m/sとする。

第2.3.1-1表 竜巻検討地域内で過去(1961年1月～2012年6月)に発生したF3スケール相当以上の竜巻の観測記録⁽²⁾

| 発生日時 | 発生場所 | | | | Fスケール |
|-------------------|-----------|------------|------|-----|-------|
| | 緯度 | 経度 | 都道府県 | 市町村 | |
| 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 | F3 |
| 1990年02月19日15時15分 | 31度15分38秒 | 130度16分35秒 | 鹿児島県 | 枕崎市 | F2～F3 |
| 1978年02月28日21時20分 | 35度32分1秒 | 139度41分50秒 | 神奈川県 | 川崎市 | F2～F3 |
| 1969年12月07日18時00分 | 34度45分4秒 | 137度22分46秒 | 愛知県 | 豊橋市 | F2～F3 |
| 1968年09月24日19時05分 | 32度7分16秒 | 131度32分8秒 | 宮崎県 | 高鍋町 | F2～F3 |
| 1967年10月28日03時12分 | 35度42分3秒 | 140度43分10秒 | 千葉県 | 飯岡町 | F2～F3 |

2.3.2 竜巻最大風速のハザード曲線による最大風速 (V_{B2}) 【添付資料 5】

竜巻最大風速のハザード曲線は、「竜巻影響評価ガイド」に従い、具体的には、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「竜巻による原子力施設への影響に関する調査研究」⁽³⁾を参照して算定する。算定フローを第 2.3.2-1 図に示す。



第 2.3.2-1 図 ハザード曲線の算定フロー

竜巻最大風速のハザード曲線は、竜巻検討地域全域（海岸線から海側及び陸側それぞれ 5km 全域（以下「10km 幅」という。））、及び竜巻検討地域を海岸線に沿って 1km 範囲ごとに細分化したケースを作成し、これらの年超過確率 10^{-5} の風速のうち、最も大きなものを V_{B2} として設定する。

2.3.3 発生頻度の分析

竜巻の発生数の分析結果を第 2.3.3-1 表に示す。竜巻検討地域において 1961 年 1 月～2012 年 6 月までの 51.5 年間に 300 個の竜巻が観測されたことに対し、1188 個の竜巻が発生したと推定した。

竜巻についての過去の観測データは少なく、また、観測年代によって精度が異なる。そこで、下記のとおり観測データの補正を行い、年発生数の確率分布に供する統計データを推定した。

- (1) F 0 及び F スケール不明の竜巻については、観測体制が強化される以前は見過ごされた可能性が大きいことから、観測体制が強化された 2007 年以降の統計量を基にする。
- (2) F 1 の竜巻については、1991 年以降の年間発生数がそれ以前の 30 年間の発生数を明らかに上回ることから、1991 年以降の統計量を基にする。
- (3) F 2 以上の竜巻については、見逃されることが少なかったとして、1961 年以降の全期間の統計量を基にする。
- (4) F スケール不明の海上で発生し、上陸せず消滅した竜巻（以下「海上竜巻」という。）については、その竜巻のスケールを推定することは困難であることから、「海岸線から海上 5km の範囲における海上竜巻の発生特性が、海岸線から内陸 5km の範囲における陸上竜巻の発生特性と同様である」という仮定に基づいて、陸上竜巻（上陸竜巻含む）の F スケール別発生比率で按分し、各 F スケールで発生した竜巻に加える。【添付資料 5 別紙 1】なお、F スケール不明の陸上竜巻（上陸竜巻含む）は、痕跡等が残らないほど小さかったとし、F 0 相当の竜巻であったとする。

また、竜巻検討地域内の竜巻の発生個数の評価は、発生地点と消滅地点を結ぶ線分が当該地域に掛かるか否かで判断する。

さらに、竜巻が上陸したか否かは、観測データの詳細情報を基本として、発生地点座標と消滅地点座標を結ぶ線分が、陸地境界内に掛かるか否かも加えて判定する。

第 2.3.3-1 表 竜巻発生数の分析結果

| | | F3 | F2 | F1 | F0 | 小計 | 陸上不明 | 海上不明 | 合計 | |
|------------|-------------------------|------------|------|------|------|------|------|------|-------|-------|
| 過去に観測された竜巻 | 1961.1~2012.6 51.5年間 | 期間内個数 | 6 | 41 | 100 | 46 | 193 | 20 | 87 | 300 |
| | | 平均値 (個/年) | 0.12 | 0.80 | 1.94 | 0.89 | 3.75 | 0.39 | 1.69 | 5.83 |
| | | 標準偏差 (個/年) | 0.32 | 0.94 | 1.96 | 2.17 | 3.25 | 0.69 | 4.35 | 7.26 |
| | 1991.1~2012.6 21.5年間 | 期間内個数 | 1 | 15 | 72 | 46 | 134 | 15 | 86 | 235 |
| | | 平均値 (個/年) | 0.05 | 0.70 | 3.35 | 2.14 | 6.23 | 0.70 | 4.00 | 10.93 |
| | | 標準偏差 (個/年) | 0.22 | 0.78 | 2.03 | 2.96 | 3.24 | 0.84 | 6.08 | 8.81 |
| | 2007.1~2012.6 5.5年間 | 期間内個数 | 0 | 1 | 12 | 31 | 44 | 9 | 63 | 116 |
| | | 平均値 (個/年) | 0.00 | 0.18 | 2.18 | 5.64 | 8.00 | 1.64 | 11.45 | 21.09 |
| | | 標準偏差 (個/年) | 0.00 | 0.43 | 1.99 | 4.17 | 4.16 | 0.97 | 8.32 | 11.75 |

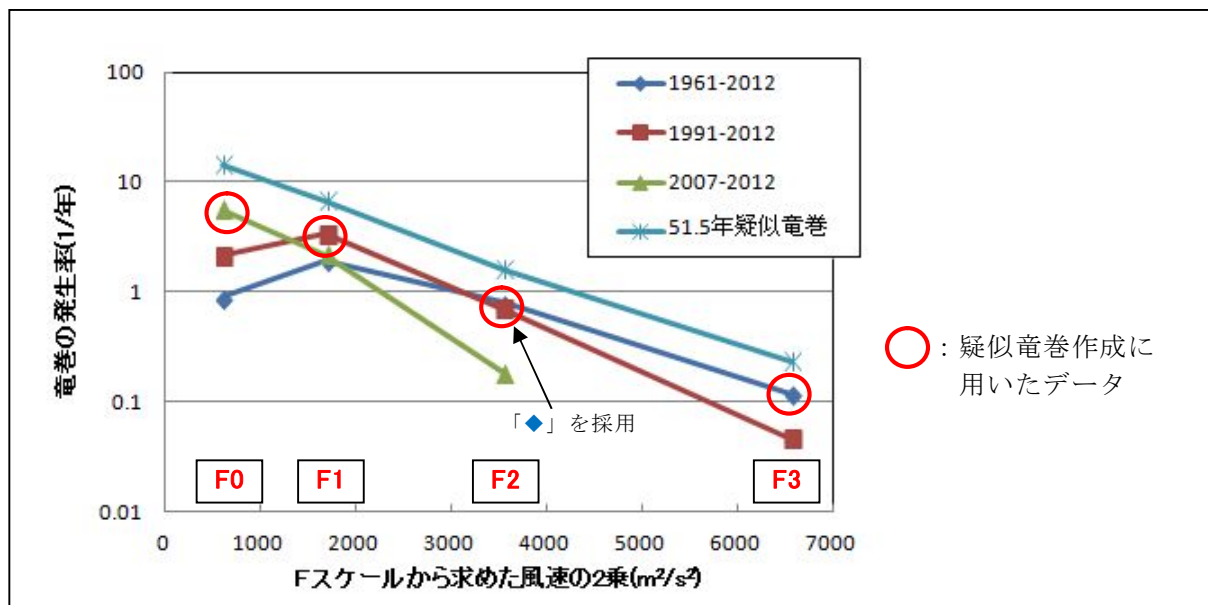
| | | F3 | F2 | F1 | F0 | 計 | |
|-------------|--------------------|------------|------|------|------|-------|--------------|
| 疑似51.5年間の竜巻 | 疑似51.5年間 (陸上竜巻) | 期間内個数 | 6 | 41 | 173 | 376 | 596 |
| | | 平均値 (個/年) | 0.12 | 0.80 | 3.36 | 7.30 | 11.57 |
| | | 標準偏差 (個/年) | 0.32 | 0.94 | 2.03 | 4.74 | 5.25 |
| | 疑似51.5年間 (全竜巻) | 期間内個数 | 12 | 82 | 345 | 749 | 1,188 |
| | | 平均値 (個/年) | 0.23 | 1.59 | 6.70 | 14.54 | 23.07 |
| | | 標準偏差 (個/年) | 0.46 | 1.33 | 2.87 | 6.69 | 7.42 |

また、上記の取扱いのうち(1)~(3)に関する各期間に観測された竜巻及び作成された51.5年間の疑似竜巻についての竜巻強度分布*を第2.3.3-1図に示す。

※：縦軸に竜巻の発生率、横軸に風速の2乗をとってグラフにしたもので、竜巻等突風の発生状況の実態把握や調査体制、スケールの改善に広く利用される (Brooks et al. 2001: Feuerstein et al. 2005)。

突風の知覚漏れがなく、かつ理想的な突風の強さのスケールを用いると、縦軸に対数をとった場合に直線状になる (Dotzek et al. 2005)。

(1)～(3)の扱いにおいて用いたデータは図中で丸囲みしたものであり、理想的な分布とされる直線状態にあるもののみを用いている。また、(4)の扱いも加えて作成された疑似竜巻についても、理想的な直線状の強度分布になっていることから、(1)～(4)の手法は妥当であったと考えられる。

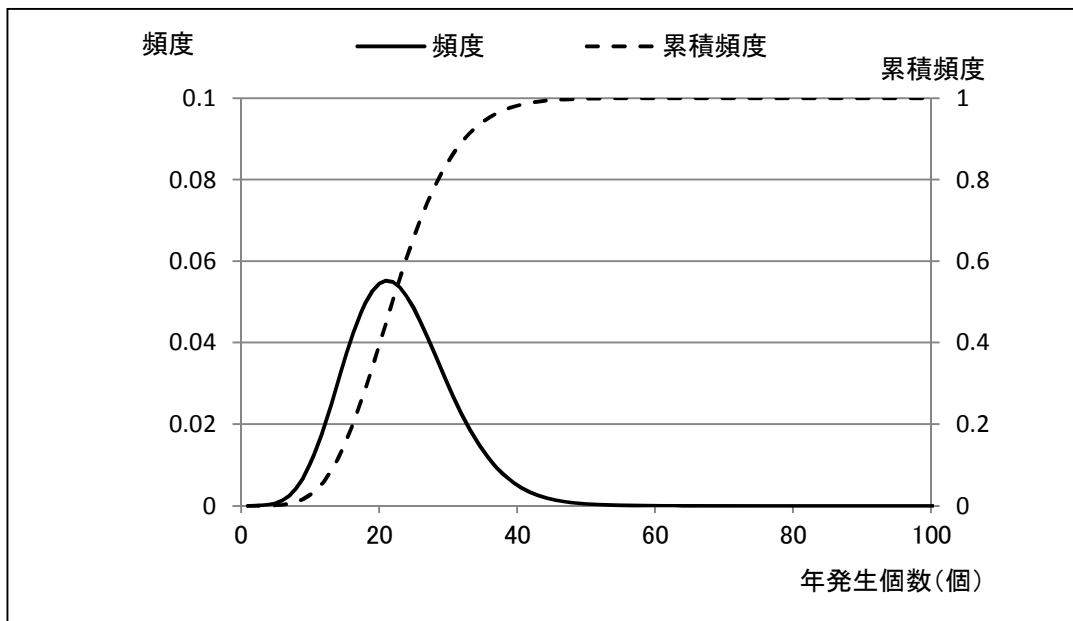


第 2.3.3-1 図 疑似竜巻作成に採用したデータ及び疑似竜巻の強度分布

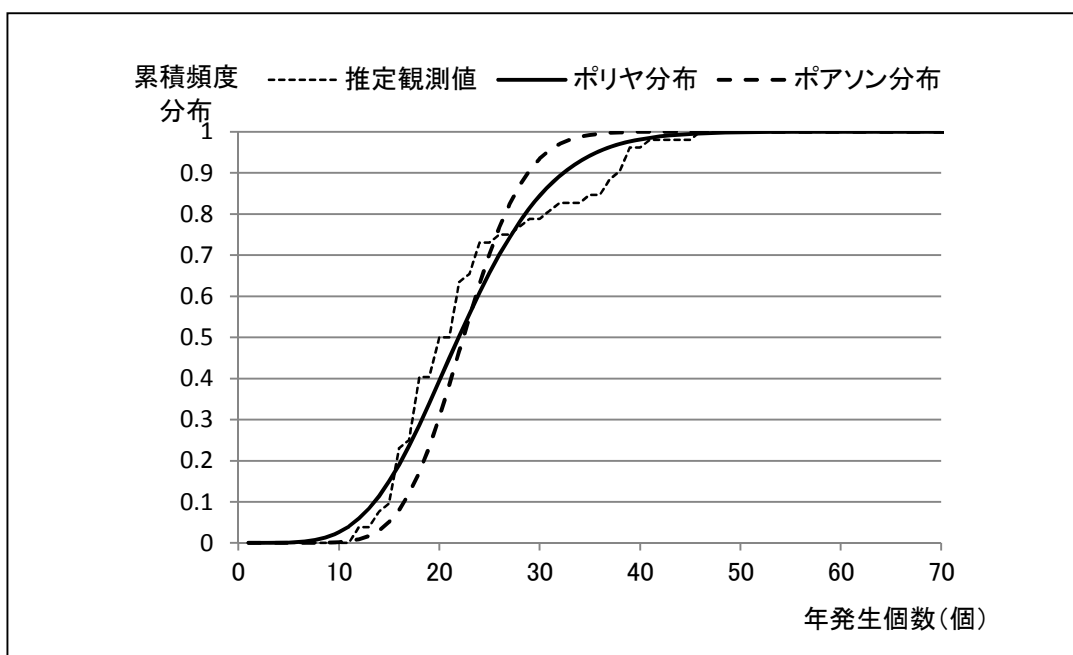
竜巻の年発生数の確率密度分布の設定に当たっては、竜巻は気象事象の中でも極めてまれに発生する事象であり、発生数の変動（標準偏差）が大きいことから、「竜巻による原子力施設への影響に関する調査研究」の成果を参考とし、第 2.3.3-2 図に示すポリヤ分布とした。

(参考) ポリヤ分布の適用について

- ・「竜巻影響評価ガイド」にて、 V_{B2} 算定の参考になるとされている「竜巻による原子力施設への影響に関する調査研究」⁽³⁾によれば、Wen&Chuが、竜巻に遭遇しかつ竜巻風速がある値以上となる確率モデルの推定法を提案し、竜巻の発生がポアソン過程に従うと仮定した場合、竜巻の年発生数の確率密度分布はポアソン分布もしくはポリヤ分布に従うとしている。
- ・ポアソン分布は、生起確率が正確に分からないがまれ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はないまれな現象（ある現象が生ずるのはまれであるが、一旦ある現象が発生するとその周囲にもその現象が生じやすくなる性質）の場合に有用な分布である（例えば伝染病の発生件数など）。台風及び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、上述の「竜巻による原子力施設への影響に関する調査研究」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、ポリヤ分布の適合性がポアソン分布に比べて優れているとしている。
- ・東海第二発電所の竜巻検討地域で発生した竜巻を対象に、発生数に関するポアソン分布及びポリヤ分布の適合性を検討した。その結果、竜巻検討地域においても、ポリヤ分布の適合性がポアソン分布に比べて優れていることを確認した。（第2.3.3-3図）
- ・以上より、ハザード曲線の評価に当たって使用する竜巻年発生数の確率密度分布は、ポリヤ分布を採用した。



第 2.3.3-2 図 竜巻の年発生数の確率密度分布（ポリヤ分布）



第 2.3.3-3 図 竜巻検討地域における竜巻の年発生数の推定値と
ポリヤ分布、ポアソン分布の累積頻度の比較

2.3.4 竜巻風速，被害幅及び被害長さの確率密度分布並びに相関係数

発生数，被害幅及び被害長さについて，観測されたデータを基に，前記で評価した疑似 51.5 年間の発生数に対応するようにサンプリングし，統計量を算定した。統計量を第 2.3.4-1 表に示す。

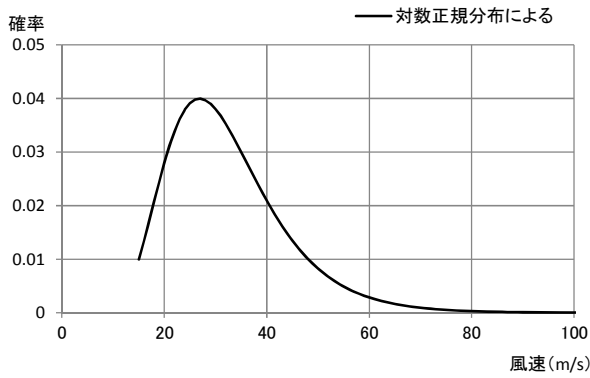
その結果を基に，最大風速，被害幅及び被害長さは対数正規分布に従うものとして求めた確率密度分布を，第 2.3.4-1 図～第 2.3.4-6 図に示す。

また，疑似的な竜巻の作成に伴う被害幅又は被害長さの情報がない竜巻には，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ほうから優先的に用いることで，被害幅又は被害長さの平均値が大きくなるように工夫しているとともに，被害幅又は被害長さが 0 のデータについては，計算に用いておらず，保守的な評価を行っている。

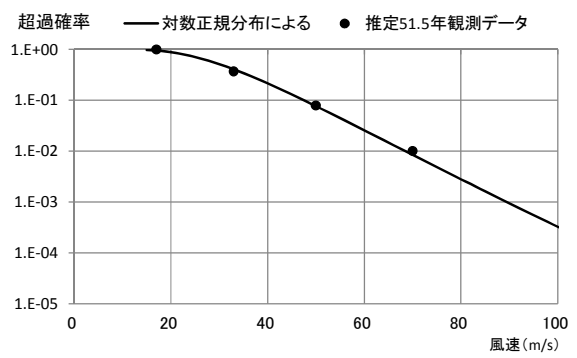
このように，前述の F スケール不明の竜巻の取扱い等を含め，データについては保守的な評価となる取扱いを行っている。

第 2.3.4-1 表 発生数，被害幅及び被害長さの統計量

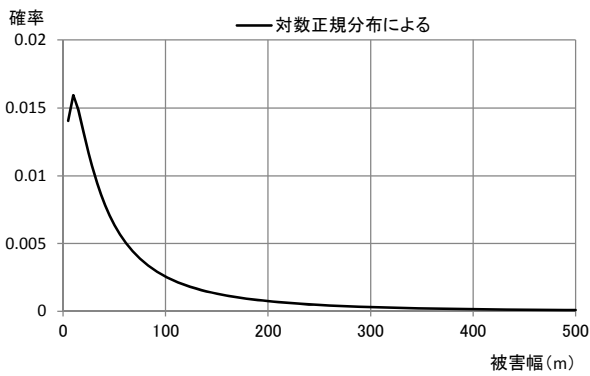
| | | F3 | F2 | F1 | F0 | 計 | |
|---------------|------|------------|------|------|------|-------|-------|
| 疑似 51.5 年間 | 発生数 | 期間内個数 | 12 | 82 | 345 | 749 | 1188 |
| | | 平均値 (個/年) | 0.23 | 1.59 | 6.70 | 14.54 | 23.07 |
| | | 標準偏差 (個/年) | 0.46 | 1.33 | 2.87 | 6.69 | 7.42 |
| | 被害幅 | 期間内個数 | 12 | 82 | 345 | 749 | 1188 |
| | | 平均値 (m) | 525 | 250 | 124 | 56 | 94 |
| | | 標準偏差 (m) | 706 | 408 | 187 | 45 | 179 |
| | 被害長さ | 期間内個数 | 12 | 82 | 345 | 749 | 1188 |
| | | 平均値 (km) | 14 | 5.63 | 2.43 | 1.18 | 1.98 |
| | | 標準偏差 (km) | 14 | 4.94 | 3.03 | 0.97 | 3.10 |



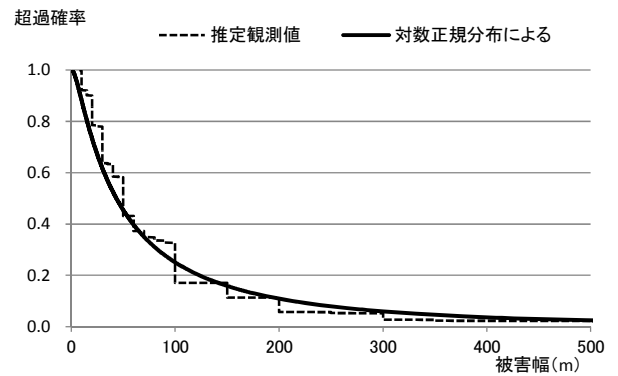
第 2.3.4-1 図 最大風速の確率密度分布



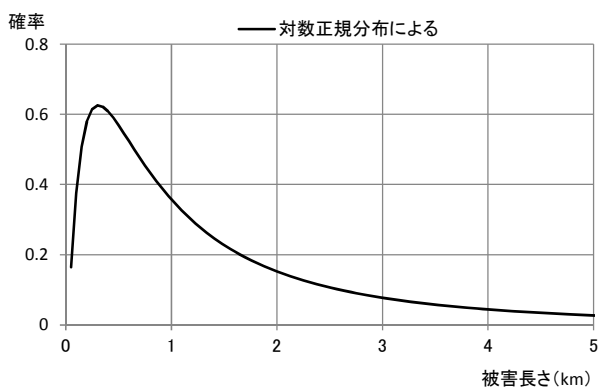
第 2.3.4-2 図 最大風速の超過確率



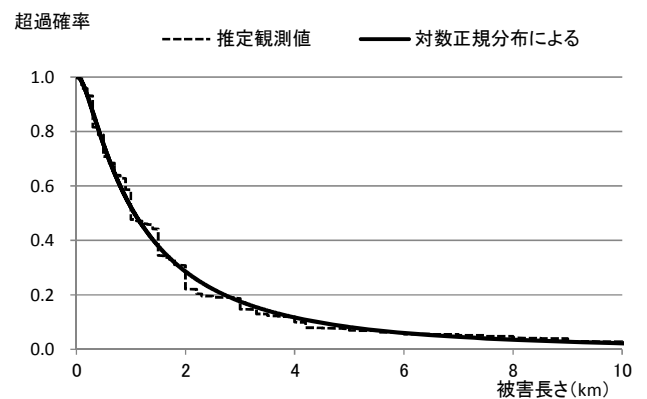
第 2.3.4-3 図 被害幅の確率密度分布



第 2.3.4-4 図 被害幅の超過確率



第 2.3.4-5 図 被害長さの確率密度分布



第 2.3.4-6 図 被害長さの超過確率

相関係数は、竜巻の最大風速，被害幅及び被害長さのうち，少なくとも 2

変量の比較が行える観測データを基に評価した。相関係数を第 2.3.4-2 表に示す。

第 2.3.4-2 表 最大風速，被害幅及び被害長さの対数値の相関係数

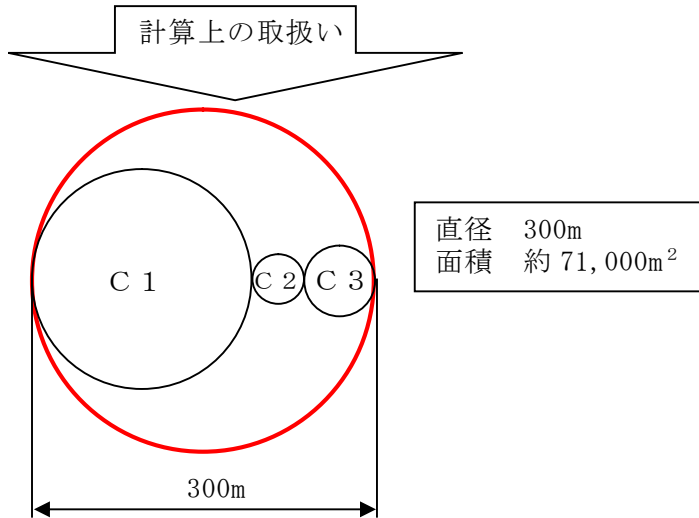
| 相関係数の値 | 最大風速 | 被害幅 | 被害長さ |
|--------|-------|-------|-------|
| 最大風速 | 1.000 | 0.381 | 0.452 |
| 被害幅 | — | 1.000 | 0.381 |
| 被害長さ | — | — | 1.000 |

2.3.5 竜巻影響エリアの設定

東海第二発電所の構築物，系統及び機器のうち，竜巻防護施設を包絡する円形領域を竜巻影響エリアとして設定した。竜巻影響エリアを第 2.3.5-1 図に示す。

なお，竜巻影響エリアは，原子炉建屋周辺，海水ポンプ室及び使用済燃料乾式貯蔵建屋が離れているため，それぞれをまず直径 188m，直径 44m 及び直径 60m の円形領域に包絡させ，さらにこれらの領域を包絡させた直径 300m の円形領域（面積 約 71,000m²）として設定した。

また，竜巻影響エリアを円形とするため，ハザード計算において竜巻の移動方向に対する依存性は生じない。



第 2.3.5-1 図 竜巻影響エリア

2.3.6 ハザード曲線の算定

T 年以内にいずれかの竜巻に遭遇し、かつ竜巻風速が V_0 以上となる確率を算定する。竜巻の年発生数の確率密度分布としてポリヤ分布の適合性が高い。ポリヤ分布は次式で示される。【添付資料 5 別紙 2】

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

ここで、 N : 竜巻の年発生数

ν : 竜巻の年平均発生数

T : 年数

β は分布パラメータであり次式で示される。

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

ここで、 σ : 竜巻の年発生数の標準偏差

D を評価対象構造物が風速 V_0 以上の竜巻に遭遇する事象とし、ある竜巻が評価対象構造物を襲い、その竜巻の風速が V_0 以上となる確率を $R(V_0)$ とすると、竜巻影響評価の対象構造物が、 T 年以内にいずれかの竜巻に遭遇し、かつ竜巻風速が V_0 以上となる確率 $P_{V_0,T}$ を算定する。

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

この $R(V_0)$ は、竜巻影響評価の対象地域の面積を A_0 (竜巻検討地域の面積約 57,000km²)、1 つの竜巻の風速が V_0 以上となる面積を $DA(V_0)$ とすると次式で示される。

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

ここで、 $E[DA(V_0)]$ は $DA(V_0)$ の期待値を意味し、次式で算出する。

$$E[DA(V_0)] = \int_0^\infty \int_0^\infty \int_0^\infty W(V_0) l f(V, w, l) dV dw dl + D_0 \int_0^\infty \int_0^\infty l f(V, l) dV dl \\ + D_0 \int_0^\infty \int_0^\infty W(V_0) f(V, w) dV dw + S \int_{V_0}^\infty f(V) dV$$

ここで、

p : 単位面積当たりの年被災率

$E[]$: 期待値を意味する。

$DA(V_0)$: 1つの竜巻の風速が V_0 以上となる面積

A_0 : 竜巻検討地域の面積

V : 風速

w : 被害幅

l : 被害長さ

$f()$: 確率密度分布

D_0 : 竜巻影響エリアの直径

S : 竜巻影響エリアの面積

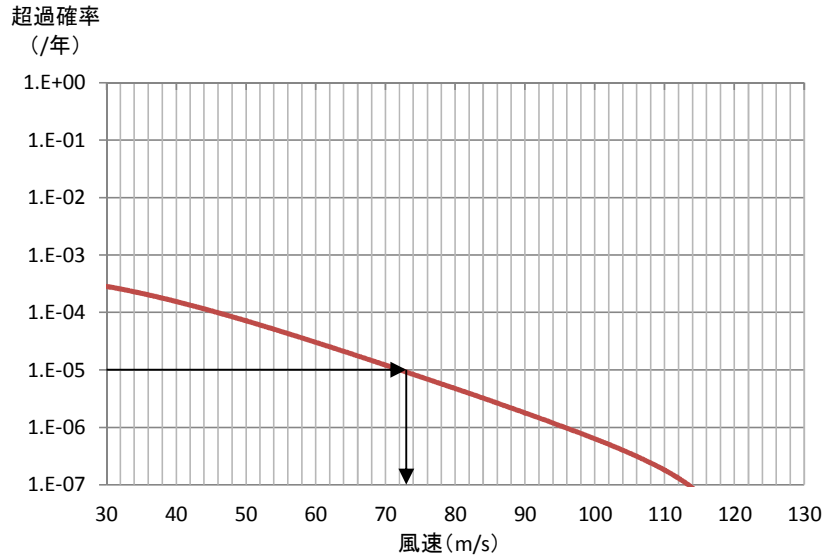
$W(V_0)$: 被害幅のうち風速が V_0 を超える部分の幅

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

V_{\min} : 被害域幅 w 内の最小竜巻風速

竜巻検討地域全域（10km幅）でのハザード曲線を第2.3.6-1図に示す。

年超過確率 10^{-5} に相当する風速は73m/sである。



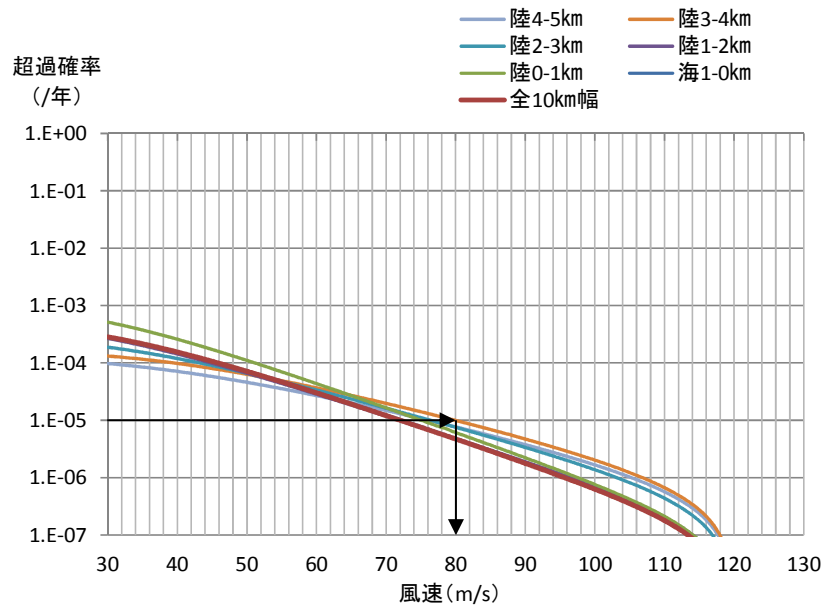
第 2.3.6-1 図 竜巻検討地域全域（10km 幅）でのハザード曲線

竜巻検討地域を 1km 幅毎に細分化した場合の評価条件及び先の 10km 幅でのケースも重ねたハザード曲線を、それぞれ第 2.3.6-1 表及び第 2.3.6-2 図に示す。なお、海側 1km 以遠の海上竜巻については全て F スケール不明であるため、ハザード曲線の算定は不可能である。

年超過確率 10^{-5} にて最も大きな風速を与える陸側 3-4km の場合、80m/s であった。

第 2.3.6-1 表 1km 幅ごとに細分化した場合の評価条件

| | |
|------|------------------------------------|
| 発生数 | 発生地点と消滅地点を結ぶ直線が 1km 幅の領域に掛かる場合カウント |
| 被害幅 | カウントした竜巻の被害幅 |
| 被害長さ | カウントした竜巻が、1km 幅の領域に掛かる長さ |



第 2.3.6-2 図 1km 幅ごとに細分化した場合のハザード曲線
(10 km幅でのハザード曲線も合わせて記載)

2.3.7 竜巻最大風速のハザード曲線による最大風速 (V_{B2})

竜巻検討地域全域 (10km 幅) 及び 1km 幅ごとのハザード曲線において、年超過確率 10^{-5} での風速の最大値は 80m/s であり、これを最大風速 V_{B2} とする。

ハザード曲線による最大風速評価結果を、第 2.3.7-1 表に示す。

第 2.3.7-1 表 ハザード曲線による最大風速評価結果

| ハザード曲線の算定範囲 | 年超過確率 10^{-5} での最大風速 |
|-------------------|---------------------------|
| 竜巻検討地域全域 (10km 幅) | 73m/s |
| 1km 幅ごとの最大 | 80m/s (陸側 3-4km) |

2.3.8 竜巻ハザードの不確かさの検討

竜巻検討地域は竜巻についての過去観測データは少なく、統計処理として必ずしも十分ではない可能性も考えられることから、竜巻ハザードの不確かさ要素について、以下の検討を実施した。

(1) 確率分布形選択に伴う不確かさ（認識論的不確かさ）

確率分布形選択に伴うパラメータ不確かさ

(2) データ量が少ないことに伴う不確かさ（認識論的不確かさ）

データ収集期間が 51.5 年間分であることから、地震等と比較するとデータ量が少ないことに伴うパラメータ不確かさ

(3) データの不確かさ

今後データ収集が進み、疑似データ同様のデータが収集されたとした場合でも残る、データそのものの不確かさ

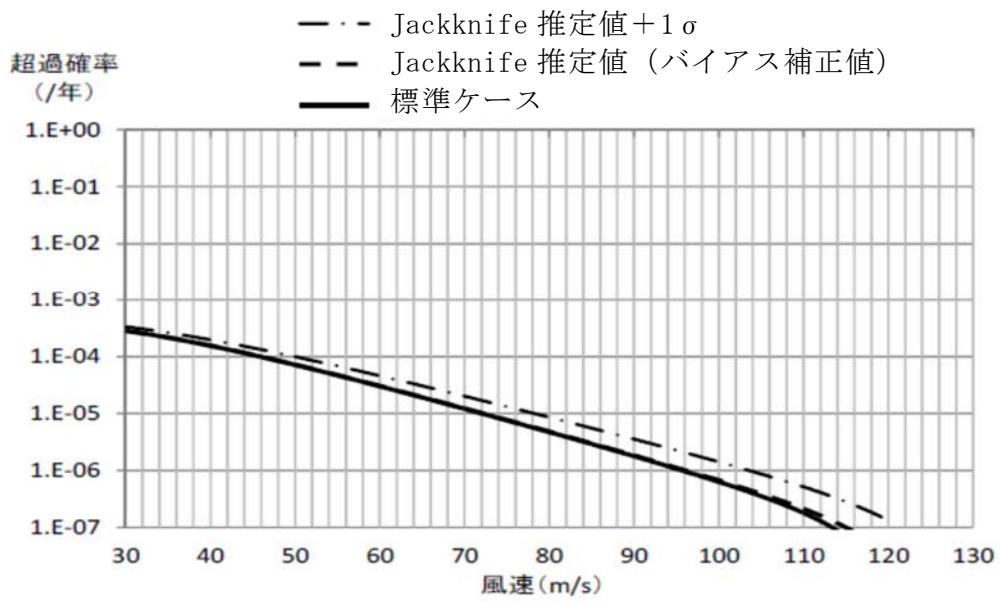
(1) 確率分布形選択に伴う不確かさ

竜巻ハザードの不確かさについて、確率分布形の選択による不確かさを表した第 2.3.8-1 図のハザード曲線によれば、標準ケースと Jackknife 推定値では、ほぼ曲線が重なり合っていることがわかる。また、標準ケースと Jackknife 推定値+1 σ においても、有意な差は認められない。

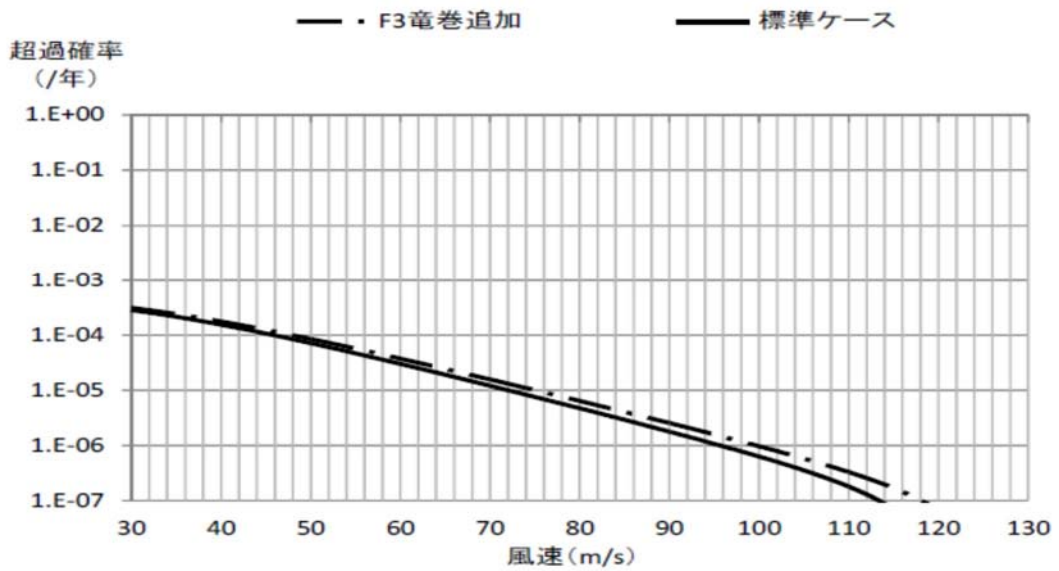
(2) データ量が少ないことに伴う不確かさ

データ量が少ないことに伴う不確かさとして、竜巻検討地域で、F 3 竜巻が 1 つ見落とされていたと仮定した場合のハザードへの影響を検討した。

これを基にハザードを推定したところ、第 2.3.8-2 図の示すとおりであり、年超過確率 10^{-5} に相当する風速は 76m/s となり、標準ケースと比較しても、ハザード曲線による最大風速への有意な差は認められない。



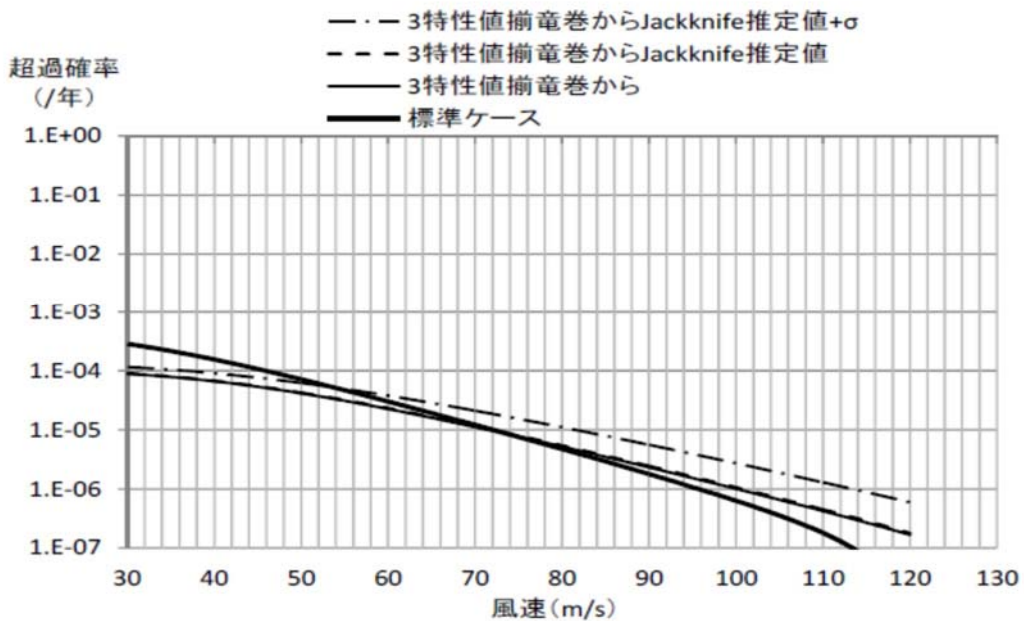
第 2.3.8-1 図 標準ケースと Jackknife 推定値ケース,
Jackknife 推定値+1 σ ケースのハザード算定結果の比較



第 2.3.8-2 図 標準ケースと F 3 竜巻発生を仮定した場合の
ハザード算定結果の比較

(3) データの不確かさ

データの不確かさとして、疑似データを考慮した場合、Fスケールの小さな竜巻の割合が多くなるため、3種類の竜巻のパラメータ（最大風速、被害幅及び被害長さ）が全て判明している161個の竜巻（以下「3特性値揃竜巻」という。）データのみを用いて同様の検討を実施し、その結果を第2.3.8—3図に示す。疑似データを考慮した標準ケースと比較すると、Jackknife推定幅は大きくなっているが、有意な差は認められない。



第2.3.8—3図 標準ケース（疑似データ有）とバイアス補正無と Jackknife 推定値（バイアス補正值），Jackknife 推定値+1σのハザード算定結果の比較

以上のことから、竜巻ハザードに関する不確かさ要素の影響は小さく、ハザードへの影響はほとんどないことから、データの高い安定性を確認した。

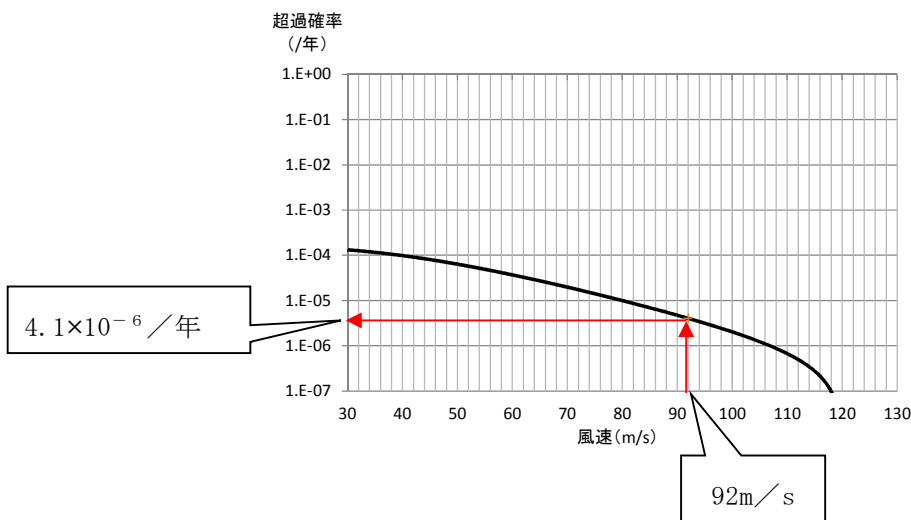
2.3.9 基準竜巻の最大風速 (V_B)

以上をもとに、基準竜巻の最大風速 V_B は V_{B1} と V_{B2} のうち大きな風速とすることから、東海第二発電所における基準竜巻の最大風速 V_B は、第 2.3.9-1 表に示すとおり、 92m/s となる。

V_B の年超過確率は、第 2.3.9-1 図に示すとおり、 4.1×10^{-6} となる。

第 2.3.9-1 表 基準竜巻の最大風速

| 過去最大竜巻による 最大風速 V_{B1} (m/s) | ハザード曲線による 最大風速 V_{B2} (m/s) | 基準竜巻の 最大風速 V_B (m/s) |
|-------------------------------------|-------------------------------------|------------------------------|
| 92 | 80 | 92 |



第 2.3.9-1 図 基準竜巻の最大風速のハザード曲線

2.3.10 竜巻データの更新に関する対応

(1) 評価時点以降のデータ更新分について

上記の基準竜巻の検討には、検討実施時点での最新であった 1961 年 1 月～2012 年 6 月までの竜巻データベースを用いているが、その後、気象庁により継続的にデータベースが更新されている^{*1}。本状況においても、以下の理由

より、最新データを参照した場合でも基準竜巻の最大風速は上記の評価結果を上回るものではなく、現時点での見直しは不要と判断している。

- ・2012年6月以降、現時点での V_{B1} の風速 92m/s を超える竜巻^{※2}が報告されていない。
- ・2012年6月以降、竜巻検討地域で観測された竜巻はF0もしくはF1相当のものがほとんどであり、竜巻強度の分布はハザードを下げる方向に変化していると考えられるため、現時点での V_{B2} が更新されることはない。

※1：2017年3月末時点で、2016年3月までのデータ及び2016年4月以降の速報データが掲載されている。

(2) 将来の気候変動について

将来的な気候変動として予測される地球温暖化により竜巻の規模や発生数が増加する可能性も否定できない。

しかしながら、将来的な気候変動を完全に予測することは難しいため、最新のデータ、知見をもって気候変動の影響に注視し、竜巻検討地域や基準竜巻の最大風速は、必要に応じ見直しを実施していくものとする。

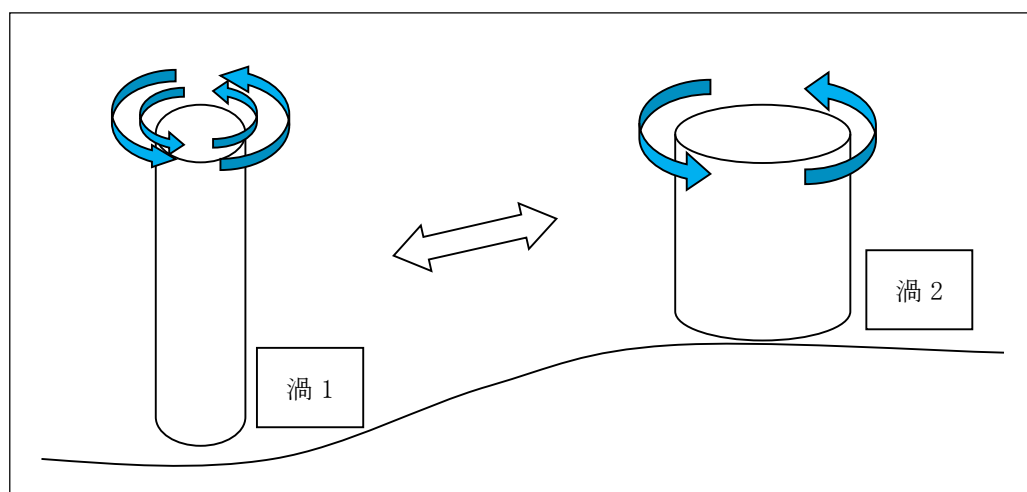
2.4 設計竜巻の設定

2.4.1 設計竜巻の最大風速 (V_D) の設定

(1) 地形効果による竜巻風速への影響【添付資料 6】

地形効果が竜巻強度に及ぼす影響に関する知見として、地形の起伏による影響について既往の研究において示されている。

竜巻のような回転する流れでは、角運動量保存則により「回転の中心からの距離」及び「周方向の回転速度」の積が一定になるという性質がある。そのため、第 2.4.1-1 図に示すとおり竜巻の渦が上り斜面を移動する時（渦 1 から渦 2 へ移動する場合）、基本的に渦は弱まり、下り斜面を移動する時には強まると考えられる。



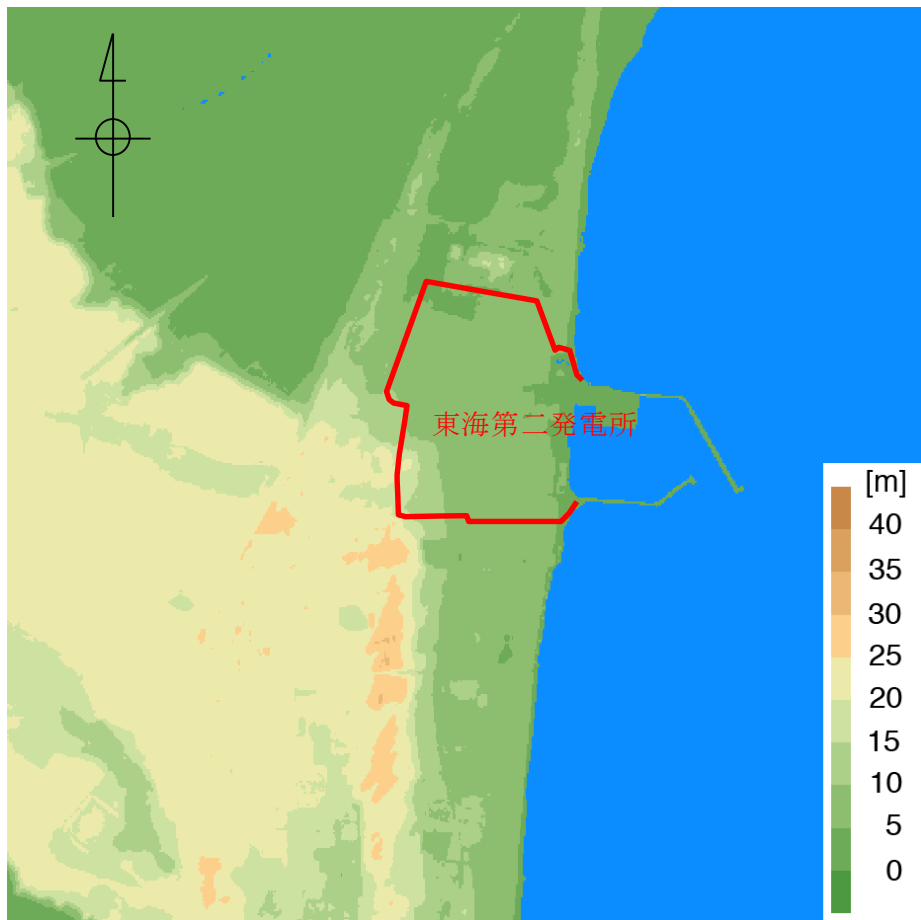
第 2.4.1-1 図 竜巻旋回流の地形影響に関する模式図

(2) 東海第二発電所敷地周辺における地形と竜巻風速への影響

東海第二発電所敷地周辺の地形を第 2.4.1-2 図に示す。敷地周辺は、最大でも標高 40 m 程度のなだらかな地形であり、竜巻渦の旋回強度に影響を及ぼすと考えられるマイクロスケール（数百 m）規模の起伏は認められないことから、地形効果による竜巻の増幅の可能性は低いと判断した。

なお、今後も地形増幅に関する新たな知見や情報（観測記録等も含む）の

収集に取組み、必要な事項については適切に対応する。



第 2.4. 1-2 図 東海第二発電所を中心とした東西 3km×南北 3km の地形標高
(国土地理院 5m メッシュ標高データに加筆)

(3) 設計竜巻の最大風速 (V_D)

設計竜巻の最大風速 V_D の設定においては、上述のとおり、東海第二発電所敷地周辺の地形効果の影響による竜巻の増幅を考慮する必要はないものと判断するが、現状では竜巻の観測数等のデータが十分とまでは言い切れず不確実性があることを考慮し、設計竜巻の最大風速 V_D は、基準竜巻の最大風速 92m/s を安全側に切り上げた 100m/s とする。

2.4.2 設計竜巻の特性値

設計竜巻の特性値は、原則として十分な信頼性を有した観測記録等に基づいて設定する必要があるが、現状では設定に足る十分な信頼性を有した観測記録等が無い場合、「竜巻影響評価ガイド」に示される方法に基づき、下記の5項目に従い設定する。その結果を第2.4.2-1表に示す。

- (1) 設計竜巻の移動速度 (V_T)

$$V_T = 0.15 \cdot V_D$$

V_D (m/s) : 設計竜巻の最大風速

- (2) 設計竜巻の最大接線風速 (V_{Rm})

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

V_D (m/s) : 設計竜巻の最大風速

V_T (m/s) : 設計竜巻の移動速度

- (3) 設計竜巻の最大接線風速が生じる位置での半径 (R_m)

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

- (4) 設計竜巻の最大気圧低下量 (ΔP_{max})

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

ρ : 空気密度 (1.22 (kg/m³))

V_{Rm} (m/s) : 設計竜巻の最大接線風速

- (5) 設計竜巻の最大気圧低下率 ($(dp/dt)_{max}$)

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

V_T (m/s) : 設計竜巻の移動速度

R_m (m) : 設計竜巻の最大接線風速が生じる位置での半径

第 2.4.2-1 表 設計竜巻の特性値

| 設計竜巻の 最大風速 V_D (m/s) | 移動速度 V_T (m/s) | 最大接線 風速 V_{Rm} (m/s) | 最大接線 風速半径 R_m (m) | 最大気圧 低下量 ΔP_{max} (hPa) | 最大気圧 低下率 $(dp/dt)_{max}$ (hPa/s) |
|---------------------------------|------------------------|---------------------------------|------------------------------|--|---|
| 100 | 15 | 85 | 30 | 89 | 45 |

<参考文献>

- (1) 井上博登, 福西史郎, 鈴木哲夫 (2013) : 原子力発電所の竜巻影響評価ガイド (案) 及び解説, 独立行政法人原子力安全基盤機構, JNES-RE-2013-9009.
- (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>)
- (3) 東京工芸大学 (2011) : 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
- (4) Wen. Y. K and Chu. S. L. (1973) : Tornado risks and design wind speed, Proceedings of American Society of Civil Engineering, Journal of the Structural Division 99, 2409-2421
- (5) Garson. R. C., Morla-Catalan J. and Cornell C.A. (1975) : Tornado risk evaluation using wind speed profiles, Journal of the Structural. Division, Proceedings of American Society of Civil Engineering, pp.1167-1171
- (6) Garson. R. C., Morla-Catalan J. and Cornell C.A. (1975) : “Tornado Design Winds Based on Risk,” Journal of the Structural Division, Proceedings of the American Society of Civil Engineers, Vol. 101, No. 9, pp.1883-1897

3. 竜巻影響評価

3.1 概要

竜巻影響評価の概要は以下のとおりとする。

- (1) 設計荷重（設計竜巻荷重及びその他の組合せ荷重）の設定
- (2) 東海第二発電所における設計飛来物の設定（調査含む）
- (3) 飛来物発生防止対策
- (4) 考慮すべき設計荷重に対する評価対象施設の構造健全性等の評価を行い、必要に応じ対策を行うことで安全機能が維持されることの確認

3.2 評価対象施設

「1.2.2 竜巻影響評価の対象施設」に示したとおりとする。

3.3 設計荷重の設定

3.3.1 設計竜巻荷重の設定

設計竜巻の最大風速 V_D 等に基づき、「風圧力による荷重」, 「気圧差による荷重」及び「設計飛来物による衝撃荷重」を基に、以下のとおり設定する。

(1) 風圧力による荷重の設定

設計竜巻の水平方向の最大風速 V_D によって施設（屋根を含む）に作用する風圧力による荷重（ W_w ）は、「建築基準法施行令」, 「日本建築学会 建築物荷重指針・同解説」及び「建設省告示第 1454 号（平成 12 年 5 月 31 日）」に準拠し、下式により算定する。

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

q : 設計用速度圧（ $= (1/2) \cdot \rho \cdot V_D^2$ ）

ρ : 空気密度

G : ガスト影響係数（ $= 1.0$ ）

C : 風力係数

（施設の形状や風圧力が作用する部位（屋根、壁等）に応じて設定）

A : 施設の受圧面積

なお、鉛直方向の風圧力については以下のとおりとする。

- ・ 建屋、構築物については、底部や屋根スラブについては、鉛直方向の風圧力の影響を受けると考えられる。庇については、評価対象施設には存在しないが、屋根スラブについては、鉛直方向の風圧力に対する健全性の評価を行う。
- ・ 設備については、鉛直方向の風圧力に対して特に脆弱と考えられる部位は評価対象施設の中に存在しないことから、鉛直方向の風圧力の考慮は行わない。

(2) 気圧差による荷重の設定

設計竜巻における気圧低下によって生じる評価対象施設内外の気圧差による荷重 (W_p) は、最大気圧低下量 (ΔP_{max}) に基づき設定する。

a. 建屋，構築物

建屋については、気圧差による荷重が最も大きくなる「閉じた施設」を想定し、内外気圧差による圧力荷重 W_p を以下の式により設定する。

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

ΔP_{max} : 最大気圧低下量

A : 施設の受圧面積

竜巻防護施設を内包する建屋，構築物について影響評価を実施し，当該施設が損傷のおそれがある場合には，安全機能維持への影響について確認する。

b. 設備（系統，機器）

設備（系統，機器）についても，上記と同様に W_p を設定する。

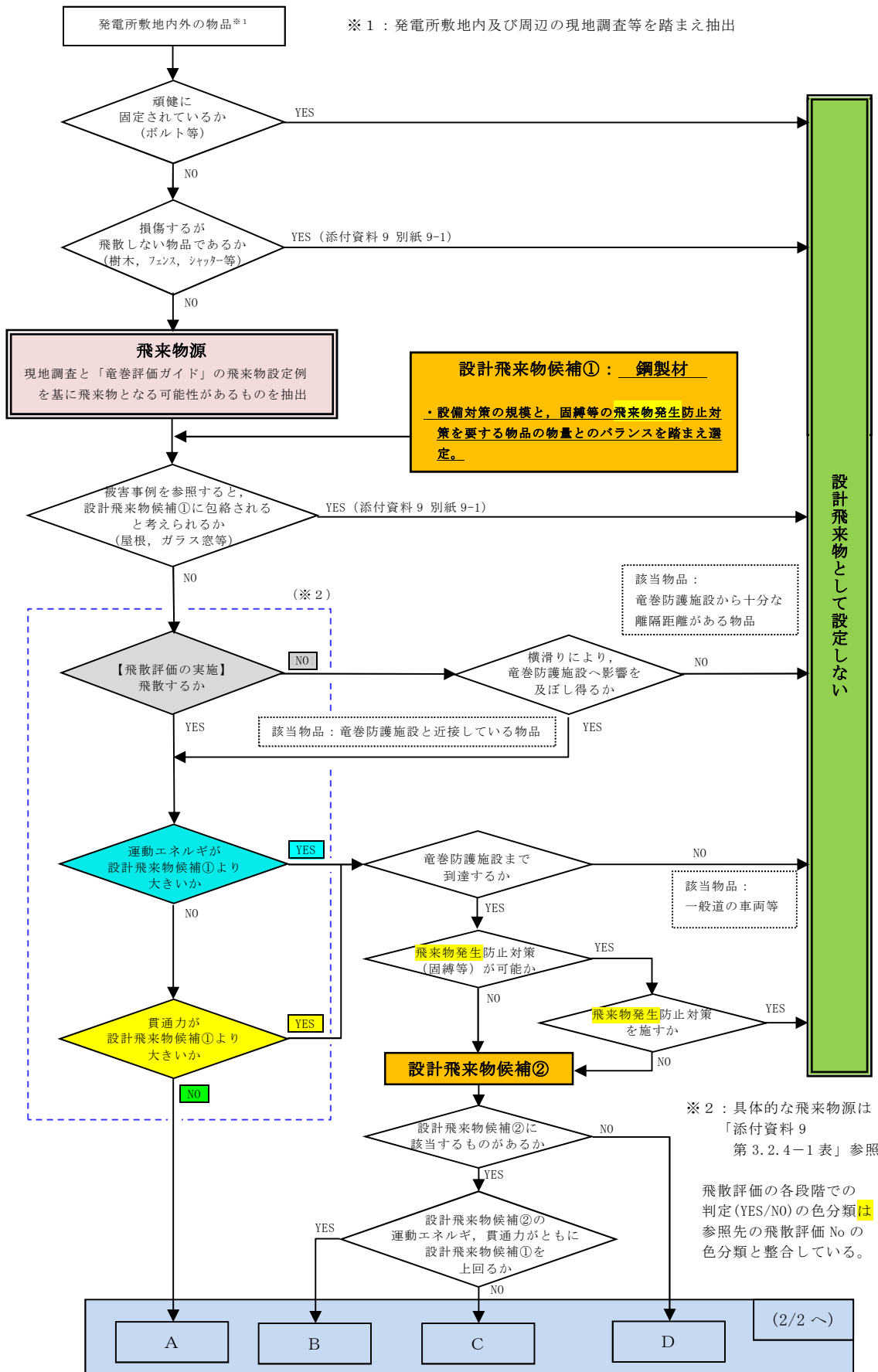
換気空調系のように外気と隔離されている区画の境界部等，気圧差による圧力影響を受ける設備について，気圧差により作用する応力が許容値以内であるか確認し，許容値を上回る場合には安全機能維持への影響について確認する。

(3) 設計飛来物による衝撃荷重の設定

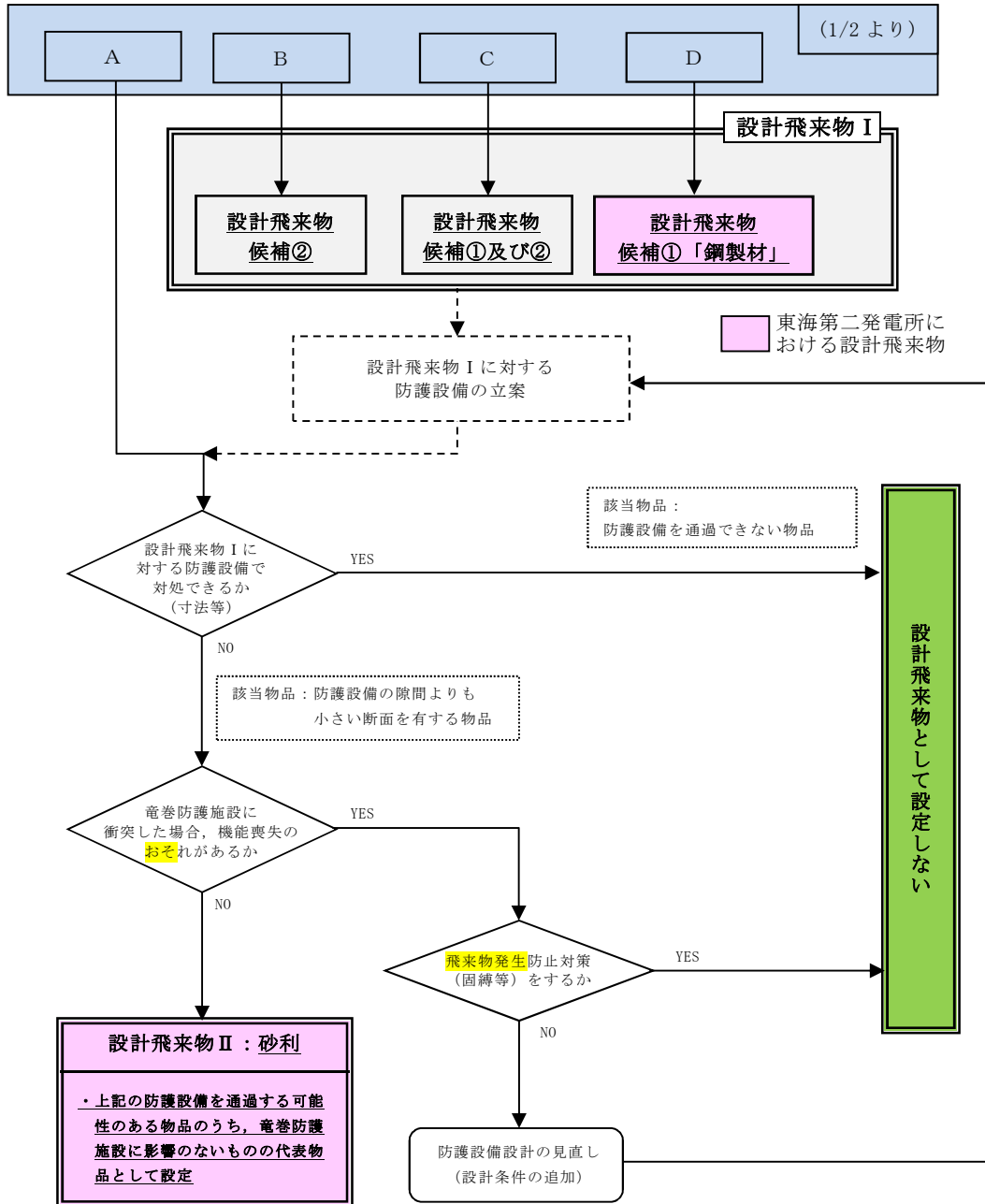
a. 東海第二発電所における設計飛来物の設定【添付資料9】

東海第二発電所の竜巻影響評価における設計飛来物については，東海第二発電所における飛来物源の現地調査結果と，「竜巻影響評価ガイド」の解説表 4.1 に示されている設計飛来物の設定例を参照して設定する。

第 3.3.1-1 図に東海第二発電所における設計飛来物の設定フロー
を, 第 3.3.1-1 表に東海第二発電所における設計飛来物を示す。



第 3.3.1-1 図 設計飛来物の設定フロー (1/2)



第 3.3.1-1 図 設計飛来物の設定フロー (2/2)

第 3.3.1-1 表 東海第二発電所における設計飛来物

| 飛来物の種類 | 砂利 | 鋼製材 |
|---------|---------------------------|------------------------|
| サイズ (m) | 長さ×幅×高さ 0.04×0.04×0.04 | 長さ×幅×高さ 4.2×0.3×0.2 |
| 質量 (kg) | 0.18 | 135 |

(a) 評価に用いる設計竜巻の特性

設計竜巻の最大風速は 100m/s とする。(第 2.4.2-1 表)

(b) 設計飛来物の設定

i) 現地調査

飛来物となり得る物品を確認するため、東海第二発電所の現地調査を実施した。調査範囲は、発電所の敷地のみならず、隣接する日本原子力研究開発機構の敷地や、東海第二発電所敷地近傍の墓地、宅地等も含んだ、原子炉建屋から半径 800m の範囲とした。後述の飛散評価の結果によれば、確認された物品の飛散距離は 800m を十分に下回ることから、調査範囲は十分と考えられる。

ii) 設計飛来物となり得る飛来物源の抽出

現地調査で確認された物品の最大飛散距離は最大でも 400m 程度と評価されたことに加え、近隣施設内での現場調査による物品は東海第二発電所構内の物品に類似していた。したがって、東海第二発電所の設計飛来物の設定に際しては、東海第二発電所敷地内で認められた物品に「竜巻影響評価ガイド」の解説表 4.1 に例示された物品を加えたものを飛来物源として抽出した。

iii) 設計飛来物の設定

上記の飛来物源から、第 3.3.1-1 図のフローに従い、「竜巻影響評価ガイド」に例示されている鋼製材を設計飛来物として設定した。

さらに、鋼製材に対する飛来物防護対策として設置する防護ネットを通過し得る設計飛来物として、砂利を設定した。砂利のサイズはネットの網目のサイズを考慮して設定した。以降の設計飛来物とは、上記の鋼製材及び砂利の 2 つを示す。

(c) 設計飛来物以外の飛来物源に対する措置

i) 基本方針

設計飛来物以外の飛来物源については、設計竜巻の最大風速 100 m/s における衝突時の運動エネルギー又は貫通力の大きさを、設計飛来物のうちこれらが最大となる鋼製材と比較し、鋼製材を上回る飛来物源（コンテナ等）については、飛来物発生防止対策（固縛等）を施すか、竜巻防護施設等からの離隔及び頑健な建物内への移動等の運用により、設計飛来物による影響を上回らないものとする。

ii) 管理が困難な飛来物源の影響について

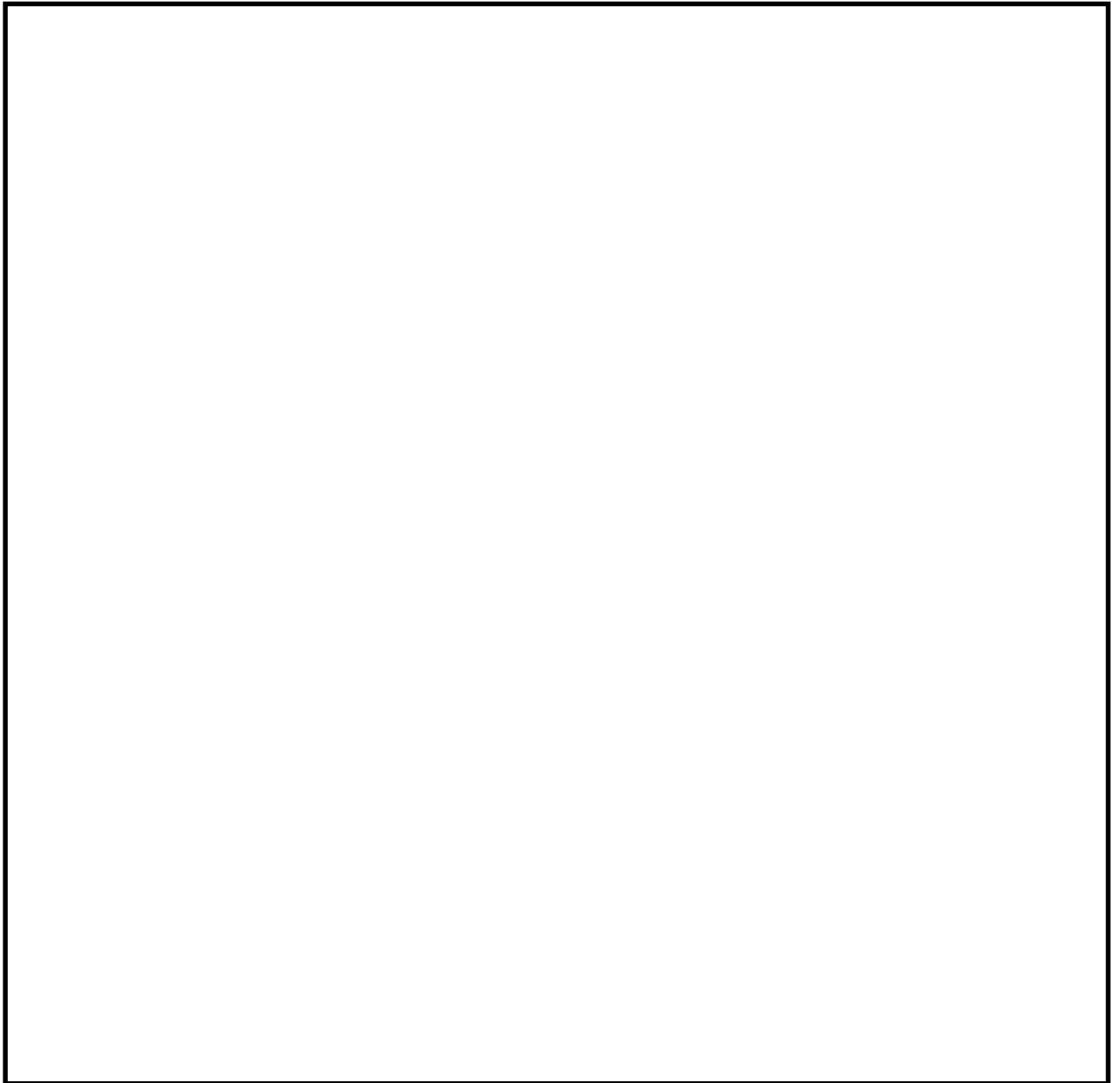
固縛等の管理が困難な飛来物源として、一般道を走行する車両及び近隣施設内の物品が想定されるが、上述のとおり、保守性を含めた解析によれば設計飛来物よりも影響の大きな飛来物源の飛散距離が最大でも 250m 程度であることを考慮すると、敷地外からの飛来物が到達する可能性を現実的に無視できないと考えられる防護対象施設は、使用済燃料乾式貯蔵建屋、緊急時対策所、重大事故等対処設備の可搬型設備及び常設代替高圧電源装置が挙げられる。

使用済燃料乾式貯蔵建屋については、もっとも近い一般道である国道 245 号線とは十分な離隔を有しており、一般道からの車両が衝突することは考え難い^{*}。一方、近隣施設からの飛来物の影響は無視できないが、建屋の壁は十分な厚さのある鉄筋コンクリート構造であり、その他の飛来物の衝突荷重に対して相当の耐力を有していることから、敷地外からの飛来物により建屋内の使用済燃料乾式貯蔵容器に影響を及ぼす可能性は低いと判断している。緊急時対策所についても、一般道からの車両が衝突することは考え難く、かつ建屋の壁は十分な厚さのある鉄筋コンクリート構造であることから、敷地外からの飛来

物によりその機能に影響を及ぼす可能性は低いと判断している。

また、重大事故等対処設備に関しては、設計基準対象施設を含めて分散配置することにより飛来物に対する残存性を確保する設計としており、敷地外からの飛来物に対しても同様に残存性を期待できるものと判断している。（第 3.3.1-2 図参照）

※：種々の車両についての飛散解析結果より、国道 245 号線から飛来する車両の飛距離は最大でも約 190m と考えられる。



第 3.3.1-2 図 管理が困難な飛来物源の影響範囲

iii) 東海発電所廃止措置に伴い生じ得る飛来物源への対応

東海第二発電所に隣接する東海発電所においては廃止措置関連作業が実施されている。施設の解体作業等に関連してどのような飛来物源が生じ得るかを現時点で正確に特定することは困難であるが、以下のとおり東海第二発電所へ影響を及ぼすことはないと判断している。

- ・飛来物源の現地調査においては、東海発電所の敷地も対象としており、資機材や設備の種類や形状に関しては、東海第二発電所の資機材等との大きな違いは無いことを確認している。したがって、作業用資機材や取り外しが完了した物品については、固縛、離隔、収納等、一般の飛来物源と同様の措置が可能である。
- ・取外し前の施設の据付状況についても、東海第二発電所の施設の状態と有意な差はないと考えられる。東海第二発電所の防護対象施設は風荷重に対し十分に余裕があることを参照すれば、これらの設備が竜巻により基礎等から引き剥がされ、飛来物化することは考え難い。
- ・廃止措置特有の状況として考えられるケースとしては、解体、撤去の途中の状態が一定期間継続すると想定される場合（例：大規模設備や建屋壁面の解体）が考えられるが、このような場合に対しても、作業の計画段階及び実施段階で、適宜風荷重に対し脆弱な形状が生じていないかを確認し、想定される脱落片（飛来物）が設計飛来物による影響を超えることが確認された場合でも、そのような飛来物源が発生しないよう、工法を工夫するなどによって対応することで、東海第二発電所に影響を及ぼす可能性のある飛来物の発生を防止できない状況は生じないと考えられる。

b. 設計飛来物の速度の設定

設計竜巻による設計飛来物の最大水平速度 (MV_{Hmax}) 及び最大鉛直速度 (MV_{Vmax}) は、衝撃荷重による影響を保守的に評価するため、「竜巻影響評価ガイド」の解説表 4.1 に示されるものと同じ値とし、第 3.3.1-2 表のとおりとする。

ただし、「竜巻影響評価ガイド」に記載のない設計飛来物である砂利の速度については、文献⁽¹⁾⁽²⁾を参考にして、ランキン渦を仮定した風速場の中での速度を算出した。

第 3.3.1-2 表 東海第二発電所における設計飛来物の速度

| 飛来物の種類 | 砂利 | 鋼製材 |
|-----------------|---------------------------|------------------------|
| サイズ (m) | 長さ×幅×高さ 0.04×0.04×0.04 | 長さ×幅×高さ 4.2×0.3×0.2 |
| 質量 (kg) | 0.18 | 135 |
| 最大水平速度 (m/s) | 62 | 51 |
| 最大鉛直速度 (m/s) | 42 | 34 |

c. 設計飛来物の衝撃荷重の設定

設計竜巻の最大風速 100m/s による設計飛来物の衝撃荷重は、砂利と比べ運動エネルギーが大きくなる鋼製材の衝突方向及び衝突面積を考慮し、鋼製材が評価対象施設に衝突した場合の影響が大きくなる衝突方向で算出する。

鋼製材の最大速度は第 3.3.1-2 表のとおりであり、静的な構造評価を実施する場合の衝撃荷重は、重量分布を均一な直方体として、Riera の方法⁽³⁾を踏まえた下式にて算出した。

$$W_w = F_{MAX} = MV^2 / L_{MIN}$$

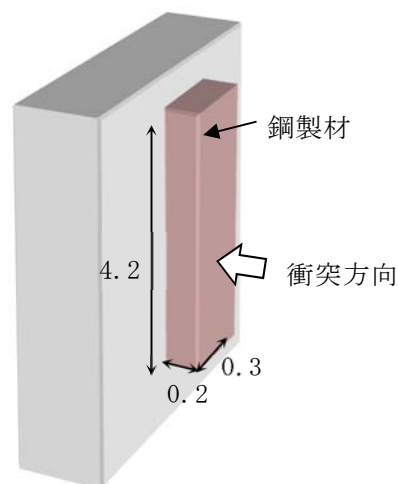
M：飛来物の質量

V：飛来物の衝突速度

L_{MIN}：飛来物の衝突方向長さ

この場合、衝撃荷重が最大となるのは第 3.3.1-3 図に示す向きの衝突（荷重：1760kN）となるが、評価においては、対象部位の構造を考慮した上で衝突姿勢を決定し、上記式の考え方に基づき、その都度衝撃荷重を算出する。

なお、有限要素法による飛来物衝突評価を行う場合には、衝撃荷重は計算の中で自動的に求められる。



第 3.3.1-3 図 最大衝撃荷重となる鋼製材衝突方向（Riera の方法⁽³⁾）

d. 設計竜巻荷重の組合せ

評価対象施設の評価に用いる設計竜巻荷重は、設計竜巻による風圧力による荷重（ W_w ）、気圧差による荷重（ W_p ）、及び設計飛来物による衝撃荷重（ W_m ）を組み合わせた複合荷重とし、以下の式による。

$$W_{T1} = W_P$$

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

W_{T1} , W_{T2} : 設計竜巻による複合荷重

W_W : 設計竜巻の風圧力による荷重

W_P : 設計竜巻の気圧差による荷重

W_M : 設計飛来物による衝撃荷重

なお、評価対象施設には W_{T1} 及び W_{T2} の両荷重をそれぞれ作用させる。

3.3.2 設計竜巻荷重と組み合わせる荷重の設定

設計竜巻荷重と組み合わせる荷重は、以下のとおりとする。

(1) 評価対象施設に常時作用する荷重、運転時荷重等

評価対象施設に常時作用する荷重（自重、死荷重及び活荷重）及び運転時荷重を適切に組み合わせる。

(2) 竜巻以外の自然現象による荷重

竜巻は積乱雲や積雲に伴って発生する現象であり⁽⁴⁾、積乱雲の発達時に竜巻と同時発生する可能性がある自然現象は、雷、雪、雹及び大雨である。これらの自然現象の**組合せ**により発生する荷重は、以下のとおり設計竜巻荷重に包絡される。

なお、竜巻と同時に発生する自然現象については、今後も継続的に新たな知見等の収集に取り組み、必要な事項については適切に反映を行う。

a. 雷

竜巻と雷が同時に発生する場合においても、雷によるプラントへの影響は雷撃であるため、雷による荷重は発生しない。

b. 雪

上昇流の竜巻本体周辺では、竜巻通過時に雪は降らない。また、下降流の竜巻通過時は、竜巻通過前に積もった雪の大部分は竜巻の風により吹き飛ばされ、雪による荷重は十分小さく設計竜巻荷重に包絡される。

c. 雹

雹は積乱雲から降る直径 5mm 以上の氷の粒⁽⁵⁾であり、仮に直径 10cm 程度の大型の雹を想定した場合でも、その重量は約 0.5kg である。直径 10cm 程度の雹の終端速度は 59m/s ⁽⁶⁾、運動エネルギーは約 0.9kJ であり、設計飛来物の運動エネルギーと比べ十分に小さく、雹の衝突荷重は設計竜巻荷重に包絡される。【添付資料 10】

d. 大雨

竜巻と大雨が同時に発生する場合においても、雨水により屋外施設に荷重の影響を与えることはなく、また降雨による荷重は十分小さいため、設計竜巻荷重に包絡される。

(3) 設計基準事故時荷重

設計竜巻は設計基準事故の起因とはならないため、設計竜巻と設計基準事故は独立事象となる。

設計竜巻と設計基準事故が同時に発生する頻度は十分小さいことから、設計基準事故時荷重と設計竜巻との**組合せ**は考慮しない。

仮に、風速が低く発生頻度が高い竜巻と設計基準事故が同時に発生する場合、**評価対象施設**のうち設計基準事故時荷重が生じる設備としては動的機器である残留熱除去系海水系ポンプ等が考えられるが、設計基準事故時においても残留熱除去系海水系ポンプ等の圧力、温度が変わらず、機械的荷重が変化することはないため、設計基準事故により考慮すべき荷重はなく、竜巻と設計基準事故時荷重の**組合せ**は考慮しない。

3.4 評価対象施設の設計方針

評価対象施設のうち竜巻防護施設については、設計荷重に対してその構造健全性を維持すること、又は取替、補修が可能なこと、設計上の要求を維持することにより、安全機能を損なわない設計とする。また、竜巻防護施設に波及的影響を及ぼし得る施設については、竜巻及びその随伴事象に対して構造健全性を確保すること、設計上の要求を維持すること又は安全上支障のない期間での修復等の対応により、竜巻防護施設の安全機能を損なうことのない設計とする。

3.4.1 許容限界

建屋、構築物の設計において、設計飛来物の衝突による貫通及び裏面剥離発生の有無の評価については、貫通及び裏面剥離が発生する部材厚（貫通限界厚さ及び裏面剥離限界厚さ）と部材の最小厚さを比較することにより行う。さらに、設計荷重により、発生する変形又は応力が以下の法令、規格、基準、指針類等に準拠し算定した許容限界を下回る設計とする。

- ・ 建築基準法
- ・ 日本工業規格
- ・ 日本建築学会及び土木学会等の基準・指針類
- ・ 原子力発電所耐震設計技術指針 J E A G 4601-1987（日本電気協会）
- ・ 原子力エネルギー協会（N E I）の基準・指針類等

系統及び機器の設計において、設計飛来物の衝突による貫通の有無の評価については、貫通が発生する部材厚（貫通限界厚さ）と部材の最小厚さを比較することにより行う。設計飛来物が貫通することを考慮する場合には、設計荷重に対して防護対策を考慮した上で、系統及び機器に発生する応力が以下の規格、基準及び指針類に準拠し算定した許容応力度等に基づく許容限界

を下回る設計とする。

- ・ 日本工業規格
- ・ 日本機械学会の基準・指針類
- ・ 原子力発電所耐震設計技術指針 J E A G 4601-1987（日本電気協会）

等

3.4.2 設計方針

(1) 屋外施設（竜巻防護施設を内包する施設も含む。）

設計荷重に対して、安全機能が維持される設計とし、安全機能を損なう可能性がある場合には施設の補強、防護ネット等の設置等の竜巻防護対策を実施することにより、安全機能を損なわない設計とする。

なお、屋内に配置される施設のうち、外殻となる施設等の防護機能が期待できる施設の内部に配置される施設は、その防護機能により設計荷重に対して影響を受けない設計とする。

a. ディーゼル発電機吸気フィルタ

ディーゼル発電機吸気フィルタは、設計飛来物が衝突により貫通することを考慮しても、閉塞することがなく、ディーゼル発電機の吸気機能が維持される設計とする。さらに、風圧力による荷重及び気圧差による荷重、ディーゼル発電機吸気フィルタに常時作用する荷重に対して、構造健全性が維持され、安全機能を損なわない設計とする。

b. ディーゼル発電機室ルーフトファン

ディーゼル発電機室ルーフトファンは、設計飛来物の衝突により貫通することを考慮し、防護ネットの設置等による竜巻防護対策を行うことにより、設計飛来物の衝突を防止し、風圧力による荷重、気圧差による荷重に対して、構造健全性が維持され、安全機能を損なわない設計

とする。

c. 中央制御室換気系冷凍機

中央制御室換気系冷凍機は、設計飛来物の衝突により貫通することを考慮して、防護ネットの設置等による竜巻防護対策を行うことにより、設計飛来物の衝突を防止し、風圧力による荷重、気圧差による荷重、中央制御室換気系冷凍機に常時作用する荷重に対して、構造健全性が維持され、安全機能を損なわない設計とする。

d. 海水ポンプ室内設備

海水ポンプ室内設備は、設計飛来物の衝突により貫通することを考慮し、防護ネットの設置等による竜巻防護対策を行うことにより、設計飛来物の衝突を防止し、風圧力による荷重、気圧差による荷重、海水ポンプ室内設備に常時作用する荷重に対して、構造健全性が維持され、安全機能を損なわない設計とする。

e. 非常用ガス処理系排気配管

非常用ガス処理系排気配管は、設計飛来物が衝突により貫通することを考慮しても、閉塞することではなく、非常用ガス処理系排気配管の排気機能が維持される設計とする。さらに、非常用ガス処理系排気配管は開かれた構造物であり気圧差荷重も作用しないことから、風圧力による荷重及び非常用ガス処理系排気配管に常時作用する荷重に対して、構造健全性が維持され、安全機能を損なわない設計とする。

f. 排気筒

排気筒は、設計飛来物が衝突により貫通することを考慮しても、閉塞することではなく、排気筒の排気機能が維持される設計とする。さらに、排気筒は開かれた構造物であり気圧差荷重も作用しないことから、風圧力による荷重及び排気筒に常時作用する荷重に対して、構造健全性が維

持され、安全機能を損なわない設計とする。

また、排気筒の支持機能に対しては、設計飛来物の衝突により部材が損傷した場合においても構造健全性が維持され、安全機能を損なわない設計とする。

g. 原子炉建屋, タービン建屋, 使用済燃料乾式貯蔵建屋

原子炉建屋, タービン建屋, 使用済燃料乾式貯蔵建屋は、風圧力による荷重、気圧差による荷重、設計飛来物による衝撃荷重及び常時作用する荷重に対して、構造骨組の構造健全性が維持されるとともに、屋根、壁、開口部（扉類）の破損により当該建屋内の竜巻防護施設が安全機能を損なわない設計とする。また、設計飛来物の衝突時においても、貫通及び裏面剥離の発生により、当該建屋内の竜巻防護施設が安全機能を損なわない設計とする。

なお、原子炉建屋原子炉棟外壁のブローアウトパネルについては、設計竜巻による気圧低下により開放する可能性があり、原子炉建屋原子炉棟の放射性物質の閉じ込め機能を損なう可能性があるが、設計竜巻と設計基準事故が同時に発生する頻度は十分小さいことから、安全上支障のない期間に補修が可能な設計とすることで、安全機能を損なわない設計とする。

h. 軽油貯蔵タンクタンク室

軽油貯蔵タンクタンク室は地下埋設されていることを考慮すると、風圧力による荷重及び設計飛来物による衝撃荷重は作用しないことから、気圧差による荷重及び自重等の常時作用する荷重に対して、構造健全性が維持され、安全機能を損なわない設計とする。

(2) 屋内の施設で外気と繋がっている施設

設計荷重に対して、安全機能が維持される設計とし、安全機能を損なう可能性がある場合には施設の補強、防護ネットの設置等の竜巻防護対策を実施することにより、安全機能を損なわない設計とする。

a. 中央制御室換気系隔離弁，ファン

中央制御室換気系隔離弁，ファンは，建屋に内包されていることを考慮すると，風圧力による荷重は作用しない。さらに，中央制御室換気系の取入口の建屋開口部を設計飛来物が貫通し，中央制御室換気系隔離弁に衝突し安全機能を損なうことを考慮して，防護ネットの設置等の竜巻防護対策を行うことにより，設計飛来物の衝突を防止し，気圧差による荷重，中央制御室換気系に常時作用する荷重に対して，構造健全性が維持され，安全機能を損なわない設計とする。

b. ディーゼル発電機室換気系ダクト

ディーゼル発電機室換気系ダクトは，建屋に内包されていることを考慮すると，風圧力による荷重及び設計飛来物による衝撃荷重は作用しないことから，気圧差による荷重，ディーゼル発電機室換気系に常時作用する荷重に対して，構造健全性が維持され，安全機能を損なわない設計とする。

c. 原子炉建屋換気系隔離弁，ダクト

原子炉建屋換気系隔離弁，ダクトは，建屋に内包されていることを考慮すると，風圧力による荷重は作用しない。さらに，原子炉建屋附属棟4階開口部建具に貫通が発生することを考慮し，補強等の竜巻防護対策を行うことにより，設計飛来物の衝突を防止し，気圧差による荷重，原子炉建屋換気系に常時作用する荷重に対して，構造健全性が維持され，安全機能を損なわない設計とする。

(3) 外殻となる施設（建屋，構築物）による防護機能が期待できない施設

設計荷重に対して，安全機能が維持される設計とし，安全機能を損なう可能性がある場合には施設の補強等の竜巻防護対策を実施することにより，安全機能を損なわない設計とする。

a. 中央制御室換気系ファン

中央制御室換気系ファンは，設計飛来物の衝突により，原子炉建屋附属棟4階開口部建具に貫通が発生することを考慮し，補強等の竜巻防護対策を行うことにより，設計飛来物の衝突を防止し，中央制御室換気系ファンの構造健全性が維持され，安全機能を損なわない設計とする。

b. 非常用電源盤

非常用電源盤は，設計飛来物の衝突により，原子炉建屋附属棟1階電気室扉に貫通が発生することを考慮し，電気室扉の補強等の竜巻防護対策を行うことにより，設計飛来物の衝突を防止し，非常用電源盤の構造健全性が維持され，安全機能を損なわない設計とする。

c. 非常用ガス処理系設備，非常用ガス再循環系設備

非常用ガス処理系設備，非常用ガス再循環系設備は，建屋に内包されていることを考慮すると，風圧力による荷重及び気圧差荷重は作用しない。また，原子炉建屋原子炉棟外壁のブローアウトパネルについては，竜巻襲来による気圧低下により開放されることを考慮しても，ブローアウトパネルの配置高さを考慮すると，設計飛来物は到達しないため，衝撃荷重は作用しない。

以上より，非常用ガス処理系設備，非常用ガス再循環系設備には，設計竜巻荷重が作用せず，構造健全性が維持され，安全機能を損なわない。

d. 使用済燃料プール，燃料プール冷却浄化系真空破壊弁

使用済燃料プール，燃料プール冷却浄化系真空破壊弁は，建屋に内包されていることを考慮すると，風圧力による荷重及び気圧差荷重は作用しない。また，原子炉建屋原子炉棟外壁のブローアウトパネルについては，竜巻襲来による気圧低下により開放されることを考慮しても，ブローアウトパネルの配置高さを考慮すると，設計飛来物は到達しないため衝撃荷重は作用しない。

以上より，使用済燃料プール，燃料プール冷却浄化系真空破壊弁には設計竜巻荷重が作用せず，構造健全性が維持され，安全機能を損なわない。

e. 使用済燃料乾式貯蔵容器

使用済燃料乾式貯蔵容器は，建屋に内包されていることを考慮すると，風圧力による荷重及び気圧差荷重は作用しない。使用済燃料乾式貯蔵建屋上部の開口部に貫通が発生することを考慮し，設計飛来物の衝撃荷重及び自重等の常時作用する荷重に対して構造健全性が維持され，安全機能を損なわない設計とする。

(4) 竜巻防護施設に波及的影響を及ぼし得る施設

設計荷重に対して，当該施設の構造健全性を確保すること，設計上の要求を維持すること又は安全上支障のない期間での取替え，補修が可能なことにより，竜巻防護施設の安全機能を損なわない設計とする。

a. サービス建屋

サービス建屋は，風圧力による荷重，気圧差による荷重，設計飛来物による衝突荷重及び自重等の常時作用する荷重に対して，倒壊により竜巻防護施設を内包する施設へ波及的影響を及ぼさない設計とする。

b. 海水ポンプ室

海水ポンプ室は、風圧力による荷重、気圧差による荷重、設計飛来物による衝突荷重及び自重等の常時作用する荷重に対して、壁面の補強等を行うことで、倒壊により竜巻防護施設へ波及的影響を及ぼさない設計とする。

c. 鋼製防護壁

鋼製防護壁は、風圧力による荷重、気圧差による荷重、設計飛来物による衝突荷重及び自重等の常時作用する荷重に対して、倒壊により、竜巻防護施設へ波及的影響を及ぼさない設計とする。

d. 排気筒

排気筒は、竜巻防護施設として構造健全性が維持され、安全機能を損なわない設計としており、転倒により竜巻防護施設を内包する施設へ波及的影響を及ぼさない設計とする。

e. ディーゼル発電機排気消音器

ディーゼル発電機排気消音器は、設計飛来物の衝突により貫通することを考慮しても、ディーゼル発電機排気消音器が閉塞することがなく、ディーゼル発電機等の排気機能が維持される設計とする。さらに、ディーゼル発電機排気消音器が風圧力による荷重、気圧差による荷重及び自重等の常時作用する荷重に対して、構造健全性を維持し、安全機能を損なわない設計とする。

以上より、ディーゼル発電機排気消音器が、竜巻防護施設であるディーゼル発電機等に機能的影響を及ぼさず、ディーゼル発電機等が安全機能を損なわない設計とする。

f. ディーゼル発電機附属設備配管

ディーゼル発電機附属設備配管は、設計飛来物の衝突により貫通する

ことを考慮しても、ディーゼル発電機附属設備配管が閉塞することがなく、ディーゼル発電機等の排気機能等が維持される設計とする。さらに、ディーゼル発電機附属設備配管が風圧力による荷重、気圧差による荷重及びディーゼル発電機附属設備配管に常時作用する荷重に対して、構造健全性を維持し、安全機能を損なわない設計とする。

以上より、ディーゼル発電機附属設備配管が、竜巻防護施設であるディーゼル発電機等に機能的影響を及ぼさず、ディーゼル発電機等が安全機能を損なわない設計とする。

g. 海水ポンプ室内設備附属配管（放出側）

海水ポンプ室内設備附属配管（放出側）は、設計飛来物の衝突により貫通することを考慮しても、海水ポンプ室内設備附属配管（放出側）が閉塞することがなく、海水ポンプ室内設備の機能等が維持される設計とする。さらに、海水ポンプ室内設備附属配管（放出側）が風圧力による荷重、気圧差による荷重及び海水ポンプ室内設備附属配管（放出側）に常時作用する荷重に対して、構造健全性を維持し、安全機能を損なわない設計とする。

以上より、海水ポンプ室内設備附属配管（放出側）が、竜巻防護施設である海水ポンプ室内設備に機能的影響を及ぼさず、海水ポンプ室内設備が安全機能を損なわない設計とする。

3.5 竜巻随件事象に対する評価

竜巻随件事象として、過去の竜巻被害事例及び東海第二発電所の施設の配置から想定される以下の事象を抽出し、竜巻防護施設の安全機能を損なわないことを確認した。【添付資料 11】

(1) 火災

竜巻随件事象として、竜巻による飛来物が建屋開口部付近の発火性又は引火性物質を内包する機器、屋外の危険物タンク等に飛来物が衝突する場合の火災が想定される。

建屋内については、竜巻防護施設を設置している区画の開口部には防護ネット設置等の竜巻防護対策を行うことを考慮すると設計飛来物が到達することはない。仮に、設計飛来物が到達する場合でも、飛来物衝突位置となる開口部付近に、原子炉施設の安全機能を損なう可能性を有する発火性又は引火性物質を内包する機器が配置されていないことから、建屋内の竜巻防護施設の安全機能を損なうことはないことを確認している。

建屋外については、設計竜巻による発電所敷地内の危険物タンクの火災があり、外部火災評価における発電所敷地内の危険物タンクの火災影響評価と同様であり、竜巻防護施設の安全機能を損なうことのないことを確認している。なお、建屋外の火災については、竜巻通過後、速やかに消火活動を行う運用により対応する。

以上により、竜巻による火災により竜巻防護施設の安全機能を損なわない。

(2) 溢水

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

竜巻防護施設を内包する建屋内については、竜巻防護施設を設置している区画の開口部には防護ネット設置等の竜巻防護対策を行うことを考慮すると、設計飛来物が到達することはない。仮に、設計飛来物が到達する場合でも、飛来物衝突位置となる開口部付近に、原子炉施設の安全機能を損なう可能性を有する溢水源が配置されていないことから、建屋内の竜巻防

護施設の安全機能を損なうことはないことを確認している。

建屋外については、溢水評価における屋外タンクの評価に包絡されるため、竜巻防護施設の安全機能を損なわないことを確認している。

以上により、竜巻による溢水により竜巻防護施設の安全機能を損わない。

(3) 外部電源喪失

設計竜巻と同時に発生する雷等により外部電源が喪失した場合でも、非常用ディーゼル発電機は原子炉建屋内に収納しており、外殻機能が期待できることから、設計竜巻による風圧力による荷重、気圧差による荷重、設計飛来物による衝突荷重による機関への影響はないため、竜巻による外部電源喪失により、竜巻防護施設の安全機能を損なわない。

なお、非常用ディーゼル発電機の附属設備について、安全機能を損わないことを以下のとおり確認している。

- ・吸排気については外気と繋がっているが、竜巻襲来時の短時間での圧力差による影響はない。
- ・排気消音器出口に風圧力による荷重が作用して消音器内に大気が逆流した場合において、排気が阻害され系統内が閉塞気味になり、排気ガス温度が徐々に上昇し、許容限界温度（通常運転時の約 420℃を大幅に超える温度）となり出力制限となることが予想されるが、竜巻は長期間停滞することなく数秒～10 数秒のオーダーで通過するため、この程度であれば排気ガス温度の急激な上昇はなくディーゼル発電機運転に支障をきたすことはない。

<参考文献>

- (1) 東京工芸大学 (2011) : 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
- (2) E. Simiu and M. Cordes, NBSIR76-1050. Tornado-Borne Missile Speeds, 1976
- (3) J. D. Riera, "A Critical Reappraisal of Nuclear Power Plant safety against Accidental Aircraft Impact", Nuclear Engineering and Design 57, (1980)
- (4) 雷雨とメソ気象 大野久雄, 東京堂出版
- (5) 気象庁ホームページ
(http://www.jma.go.jp/jma/kishou/known/yougo_hp/kousui.html)
- (6) 一般気象学 小倉義光, 東京大学出版会

添付資料 目次

1. 竜巻防護施設のうち評価対象施設の抽出について
別紙 1-1 緊急時対策所の竜巻防護方針について
2. 耐震Sクラス施設について
別紙 2-1 外部事象に対する津波防護施設，浸水防止設備，
及び津波監視設備の防護方針について
3. 竜巻防護施設に波及的影響を及ぼし得る施設の抽出について
4. 竜巻検討地域の設定について
5. ハザード曲線による竜巻最大風速 (V_{B2}) の計算について
別紙 5-1 海上のFスケール不明竜巻の按分方法の妥当性について
別紙 5-2 竜巻発生数の確率分布（ポアソン，ポリヤ分布）がハザード結果に及ぼす影響について
6. 地形効果による竜巻の増幅の可能性について
7. 竜巻影響評価の概要及び保守性について
8. 竜巻影響評価及び竜巻防護対策の概要
別紙 8-1 評価対象施設の設計荷重について
別紙 8-2 竜巻防護対策のうち飛来物発生防止対策の概要について
9. 設計飛来物の設定について
別紙 9-1 分解され小型軽量となる物品及び損傷するが飛来物とならない物品について
別紙 9-2 空力パラメータについて
10. 竜巻時に発生する雹の影響について
11. 竜巻随件事象の抽出について

竜巻防護施設のうち評価対象施設の抽出について

1. 抽出方針

東海第二発電所における竜巻防護施設から、以下の手順により、評価対象施設を抽出した。

Step1: 竜巻防護施設として抽出された設備の設置場所を確認し、竜巻襲来時に風圧、気圧差及び設計飛来物衝突の影響を受ける屋外施設（当該施設を内包する施設含む）を評価対象とする。

Step2: 屋内施設であるが外気と繋がっているため、竜巻襲来時に気圧差の影響を受ける施設を評価対象とする。

Step3: 外殻となる（竜巻防護施設を内包する）施設（建屋、構築物）による防護機能が期待できない施設（の区画）の内部に配置されているため、竜巻襲来時に風圧、気圧差及び設計飛来物衝突の影響を受ける施設を評価対象とする。

なお、外殻による防護機能に期待できるかは、外殻となる施設（建屋、構築物）の竜巻荷重に対する構造健全性の確認結果により、評価する。

2. 抽出結果

2.1 竜巻防護施設を内包する施設

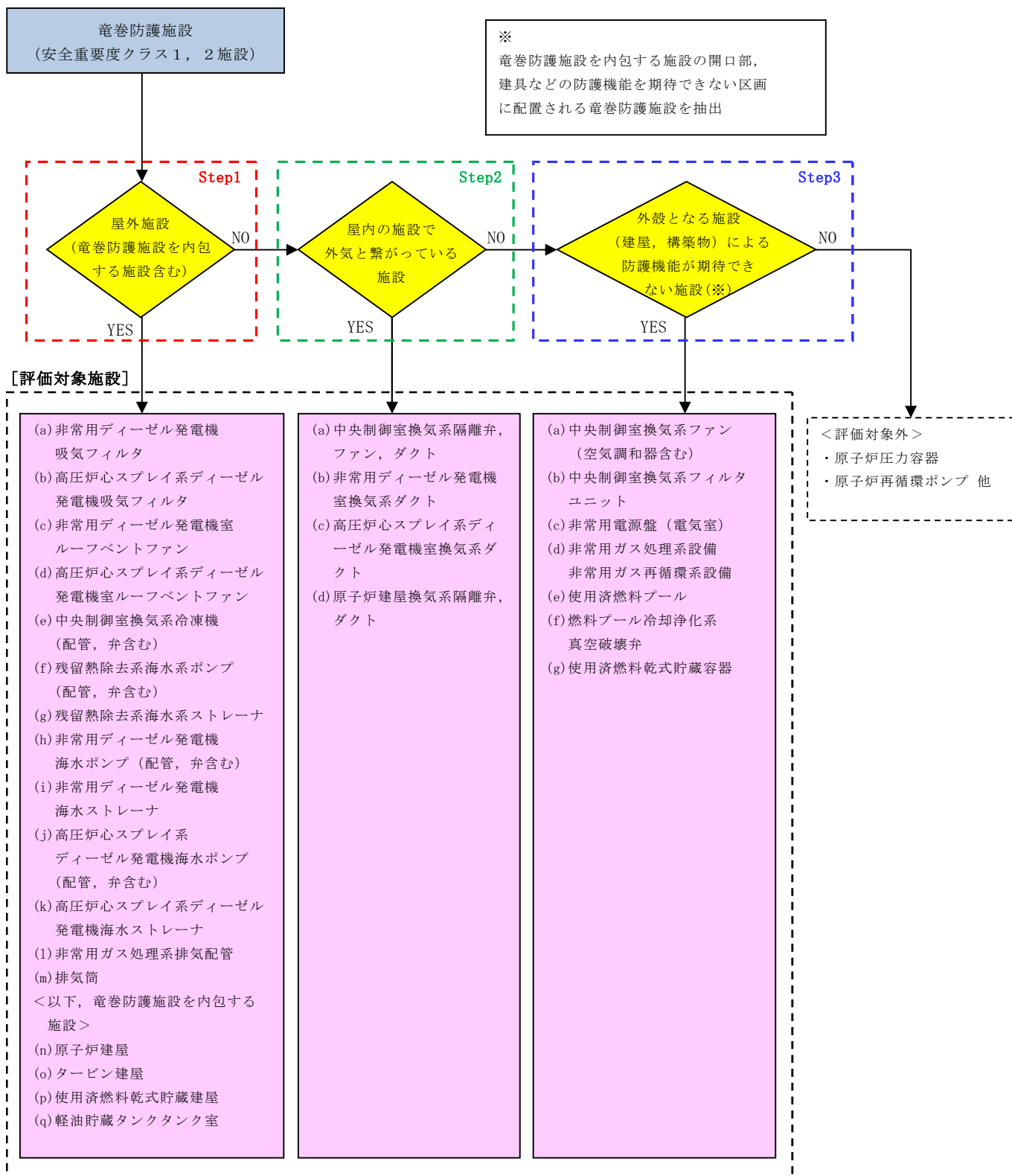
竜巻防護施設を内包する施設を以下のとおり抽出した。

- (1) 原子炉建屋（原子炉圧力容器，原子炉再循環ポンプ等を内包）
- (2) タービン建屋（気体廃棄物処理系隔離弁等を内包）
- (3) 使用済燃料乾式貯蔵建屋（使用済燃料乾式貯蔵容器を内包）
- (4) 軽油貯蔵タンクタンク室（軽油貯蔵タンクを内包）

2.2 竜巻防護施設

第 2.2-1 図に，竜巻防護施設のうち評価対象施設の抽出フローを示し，その結果を第 2.2-1 表に示す。

なお，安全重要度クラス 3 に属する施設については，竜巻及びその随伴事象による損傷を考慮して，代替設備により必要な機能を確保すること，必要によりプラントを停止し，安全上支障のない期間に修復すること等の対応が可能な設計とすることにより，安全機能を損なわないことから評価対象から除外する。確認結果を第 2.2-2 表に示す。



第 2.2-1 図 竜巻防護施設のうち評価対象施設の抽出フロー

第 2.2-1 表 評価対象施設抽出結果（クラス 1 及びクラス 2 の設備）（1/16）

| 分類 | 定義 | 安全機能の重要度分類 | | | | | 抽出結果 | | |
|------|--|---------------------|--|--|-------------------------------------|--------------------------------|------------------------|------|----------|
| | | 機能 | 構築物、系統又は機器 | 該当する電気、機械装置のうち主な施設 | Step1 屋外施設 (竜巻防護施設を内包する施設を含む) | Step2 屋内の施設 で外気と繋がっている施設 | Step3 外殻防護機能を期待できない | 評価対象 | 評価対象施設名称 |
| PS-1 | その損傷又は故障により発生する事象によって、 (a) 炉心の著しい損傷又は (b) 燃料の大量の破損を引き起こすおそれのある構築物、系統及び機器 | 1) 原子炉冷却材圧力バウダンダリ機能 | 原子炉冷却材圧力バウダンダリを構成する機器・配管系（計装等の小口径配管・機器は除く。） | <ul style="list-style-type: none"> 原子炉圧力容器 原子炉再循環ポンプ 配管、弁 隔離弁 制御棒駆動機構ハウジング 中性子束計装管ハウジング | × | × | × | — | — |
| | | 2) 過剰反応度の印加防止機能 | 制御棒カップリング | <ul style="list-style-type: none"> 制御棒カップリング 制御棒駆動機構カップリング | × | × | × | — | — |
| | | 3) 炉心形状の維持機能 | 炉心支持構造物（炉心シユラウド、シユラウドサポート、上部格子板、炉心支持板、制御棒案内管）燃料集合体（ただし、燃料を除く。） | <ul style="list-style-type: none"> 炉心シユラウド シユラウドサポート 上部格子板 炉心支持板 燃料支持金具 制御棒案内管 制御棒駆動機構ハウジング 燃料集合体の下記部分 <ul style="list-style-type: none"> 上部タイププレート 下部タイププレート 燃料集合体（スベーサ） | × | × | × | × | — |

○：Yes ×：No —：該当せず

第 2.2-1 表 評価対象施設抽出結果（クラス 1 及びクラス 2 の設備）（2/16）

| 分類 | 定義 | 安全機能の重要度分類 | | | | | 抽出結果 | | |
|------|---|--|---|---|-------------------------------------|--------------------------------|------------------------|------|----------|
| | | 機能 | 構築物, 系統又は機器 | 該当する電気, 機械装置のうち主な施設 | Step1 屋外施設 (竜巻防護施設を内包する施設を含む) | Step2 屋内の施設 で外気と繋がっている施設 | Step3 外殻防護機能を期待できない | 評価対象 | 評価対象施設名称 |
| MS-1 | 1) 異常状態発生時に原子炉を緊急に停止し, 残留熱を除去し, 原子炉冷却材圧力バウンダリの過圧を防止し, 敷地周辺公衆への過度の放射線の影響を防止する構築物, 系統及び機器 | 1) 原子炉の緊急停止機能 2) 未臨界維持機能 3) 原子炉冷却材圧力バウンダリの過圧防止機能 | 原子炉停止系の制御棒による系 (制御棒及び制御棒駆動系 (スクラム機能)) 原子炉停止系 (制御棒注入系) 原子炉停止系, ほう酸水注入系 | <ul style="list-style-type: none"> ・制御棒 ・制御棒案内管 ・制御棒駆動機構 ・制御棒 ・制御棒カププリング ・制御棒駆動機構カププリング | × | × | × | × | — |
| | | | | <ul style="list-style-type: none"> ・ほう酸水注入系 (ほう酸水注入ポンプ, 注入弁, タンク出口弁, ほう酸水貯蔵タンク, ポンプ吸込配管及び弁, 注入配管及び弁) ・逃がし安全弁 (安全弁開機能) | × | × | × | × | — |

○ : Yes × : No — : 該当せず

第 2.2-1 表 評価対象施設抽出結果（クラス 1 及びクラス 2 の設備）（3/16）

| 分類 | 定義 | 機能 | 安全機能の重要度分類 | | | | 抽出結果 | | |
|------|---|----------------|--|--|----------------------------|-----------------------------|------|------|----------|
| | | | 該当する電気、機械装置のうち主な施設 | Step1 屋外施設（竜巻防護施設を内包する施設を含む） | Step2 屋内の施設で外気と繋がっている施設 | Step3 外殻と外殻となる施設（建屋、構築物） | | 評価対象 | 評価対象施設名称 |
| MS-1 | 1) 異常状態発生時に原子炉を緊急に停止し、残留熱を除去し、原子炉冷却材圧力バウンダリの過圧を防止し、敷地周辺公衆への過度の放射線の影響を防止する構築物、系統及び機器 | 4) 原子炉停止後の除熱機能 | 構築物、系統又は機器 残留熱を除去する系統（残留熱除去系（原子炉停止時冷却モード）、原子炉隔離時冷却系、高圧炉心スプレイス系、逃がし安全弁、（手動逃がし機能）、自動減圧系（手動逃がし機能）） | 該当する電気、機械装置のうち主な施設 ・残留熱除去系（ポンプ、熱交換器、原子炉停止時冷却モードのルートとなる配管、弁） | × | × | × | × | — |
| | | | | ・原子炉隔離時冷却系（ポンプ、サブレーション・プール、タービン、サブレーション・プールから注水先までの配管、弁） | × | × | × | × | — |
| MS-1 | | | | ・高圧炉心スプレイス系（ポンプ、サブレーション・プール、サブレーション・プールからスプレイ先までの配管、弁、スプレイヘッダ） | × | × | × | × | — |
| | | | | ・逃がし安全弁（手動逃がし機能） ・自動減圧系（手動逃がし機能） | × | × | × | × | — |

○：Yes ×：No —：該当せず

第 2.2-1 表 評価対象施設抽出結果（クラス 1 及びクラス 2 の設備）（4/16）

| | | 安全機能の重要度分類 | | | | | 抽出結果 | | |
|------|---|------------|---|--|------------------------|-------------------|--------------------|------|----------|
| 分類 | 定義 | 機能 | 構築物、系統又は機器 | 該当する電気、機械装置のうち主な施設 | Step1 | Step2 | Step3 | 評価対象 | 評価対象施設名称 |
| | | | | | 屋外施設（竜巻防護施設を内包する施設を含む） | 屋内の施設で外気と繋がっている施設 | 外殻と外殻となる施設（建屋、構築物） | | |
| MS-1 | 1) 異常状態発生時に原子炉を緊急に停止し、残留熱を除去し、原子炉冷却材圧力バウンダリの過圧を防止し、敷地周辺公衆への過度の放射線の影響を防止する構築物、系統及び機器 | 5) 炉心冷却機能 | 非常用炉心冷却系（低圧炉心スプレイス系、低圧注水系、高圧炉心スプレイス系、自動減圧系） | ・低圧炉心スプレイス系（ポンプ、サブレッション・プール、サブレッション・プールからスプレイス先までの配管、弁、スプレイヘッダ） | × | × | × | × | — |
| | | | | ・残留熱除去系（低圧注水モータード）（ポンプ、サブレッション・プール、サブレッション・プールから注水先までの配管、弁（熱交換器バイパスライン含む）、注水ヘッダ） | × | × | × | × | — |
| | | | | ・高圧炉心スプレイス系（ポンプ、サブレッション・プール、サブレッション・プールからスプレイス先までの配管、弁、スプレイヘッダ） | × | × | × | × | — |
| | | | | ・自動減圧系（逃がし安全弁） | × | × | × | × | — |

○：Yes ×：No —：該当せず

第 2.2-1 表 評価対象施設抽出結果（クラス 1 及びクラス 2 の設備）（5/16）

| | | 安全機能の重要度分類 | | | | | 抽出結果 | | | |
|------|---|---------------------------------|--|---|-------------------------------------|----------------------------|---------------------|---------------|------|--------|
| 分類 | 定義 | 機能 | 構築物、系統又は機器 | 該当する電気、機械装置のうち主な施設 | Step1 屋外施設 (竜巻防護施設を内包する施設を含む) | Step2 屋内の施設で外気と繋がっている施設 | Step3 | | 評価対象 | |
| | | | | | | | 外殻となる施設 (建物、構築物) | 外殻防護機能を期待できない | | |
| MS-1 | 1) 異常状態発生時に原子炉を緊急に停止し、残留熱を除去し、原子炉冷却材圧力バウンダリの過圧を防止し、敷地周辺公衆への過度の放射線の影響を防止する構築物、系統及び機器 | 6) 放射性物質の閉じ込め機能、放射線の遮へい及び放出低減機能 | 原子炉格納容器、原子炉格納容器隔離弁、原子炉格納容器スプレッド冷却系、原子炉建屋、非常用ガス処理系、非常用再循環ガス処理系、可燃性ガス濃度制御系 | ・格納容器 (格納容器本体、貫通部、所員用エアロック、機器搬入ハッチ) | × | × | × | × | × | — |
| | | | | ・原子炉建屋原子炉棟 | ○ | × | — | — | ○ | ・原子炉建屋 |
| | | | | ・格納容器隔離弁及び格納容器バウンダリ配管 | × | × | × | × | × | — |
| | | | | ・主蒸気流量制限器 | × | × | × | × | × | — |
| | | | | ・残留熱除去系（格納容器スプレッド冷却モード） (ポンプ、熱交換器、サブプレッション・プール、サブプレッション・プールからスプレッド先（ドライウエル及びサブプレッション・プール気相部）までの配管、弁、スプレッドヘッド（ドライウエル及びサブプレッション・プール） | × | × | × | × | × | — |

○：Yes ×：No —：該当せず

第 2.2-1 表 評価対象施設抽出結果（クラス 1 及びクラス 2 の設備）（6/16）

| | | 安全機能の重要度分類 | | | | | 抽出結果 | | | |
|------|---|---------------------------------|---|--|---------------------------------|----------------------------|-----------------|---------------|---|---|
| 分類 | 定義 | 機能 | 構築物、系統又は機器 | 該当する電気、機械装置のうち主な施設 | Step1 屋外施設（竜巻防護施設を内包する施設を含む） | Step2 屋内の施設で外気と繋がっている施設 | Step3 | | 評価対象 | 評価対象施設名称 |
| | | | | | | | 外殻となる施設（建屋、構築物） | 外殻防護機能を期待できない | | |
| MS-1 | 1) 異常状態発生時に原子炉を緊急に停止し、残留熱を除去し、原子炉冷却材圧力バウンダリの過圧を防止し、敷地周辺公衆への過度の放射線の影響を防止する構築物、系統及び機器 | 6) 放射性物質の閉じ込め機能、放射線の遮へい及び放出低減機能 | 原子炉格納容器、原子炉格納容器隔離弁、原子炉格納容器スプレイ冷却系、原子炉建屋、非常用ガス処理系、非常用再循環ガス処理系、可燃性ガス濃度制御系 | <ul style="list-style-type: none"> 原子炉建屋ガス処理系（乾燥装置、排風機、フィルタ装置、原子炉建屋原子炉棟吸込口から排気筒頂部までの配管、弁） | × | × | × | × | × | — |
| | | | | | ○ | × | — | ○ | <ul style="list-style-type: none"> 非常用ガス処理系配管 排気筒 | |
| | | | | | × | ○ | × | × | ○ | <ul style="list-style-type: none"> 原子炉建屋換気系隔離弁、ダクト |
| | | | | | × | × | ○ | ○ | ○ | <ul style="list-style-type: none"> 非常用ガス処理系設備 非常用ガス再循環系設備 |

○：Yes ×：No —：該当せず

第 2.2-1 表 評価対象施設抽出結果（クラス 1 及びクラス 2 の設備）（7/16）

| | | 安全機能の重要度分類 | | | | | Step1 | | Step2 | | Step3 | | 抽出結果 | |
|------|---|---------------------------------|---|--|------------------------|-------------------|-----------------|---------------|-------|------|-------|------|------|--|
| 分類 | 定義 | 機能 | 構築物、系統又は機器 | 該当する電気、機械装置のうち主な施設 | 屋外施設（竜巻防護施設を内包する施設を含む） | 屋内の施設で外気と繋がっている施設 | 外殻となる施設（建屋、構築物） | 外殻防護機能を期待できない | 評価対象 | 評価結果 | 評価対象 | 評価結果 | | |
| MS-1 | 1) 異常状態発生時に原子炉を緊急に停止し、残留熱を除去し、原子炉冷却材圧力バウンダリの過圧を防止し、敷地周辺公衆への過度の放射線の影響を防止する構築物、系統及び機器 | 6) 放射性物質の閉じ込め機能、放射線の遮へい及び放出低減機能 | 原子炉格納容器、原子炉格納容器隔離弁、原子炉格納容器スプレイ冷却系、原子炉建屋、非常用ガス処理系、非常用再循環ガス処理系、可燃性ガス濃度制御系 | <ul style="list-style-type: none"> 可燃性ガス濃度制御系（再結合装置、格納容器から再結合装置までの配管、弁、再結合装置から格納容器までの配管、弁） 遮へい設備（原子炉遮へい壁、一次遮へい壁、二次遮へい壁） | × | × | 原子炉建屋 | × | × | — | | | | |
| | 2) 安全上必須なその他の構築物、系統及び機器 | 1) 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 | 安全保護系 | <ul style="list-style-type: none"> 原子炉緊急停止の安全保護回路 非常用炉心冷却系作動の安全保護回路 原子炉格納容器隔離の安全保護回路 原子炉建屋ガス処理系作動の安全保護回路 主蒸気隔離の安全保護回路 | × | × | 原子炉建屋 | × | × | — | | | | |

○：Yes ×：No —：該当せず

第 2.2-1 表 評価対象施設抽出結果（クラス 1 及びクラス 2 の設備）（8/16）

| | | 安全機能の重要度分類 | | | | | 抽出結果 | | |
|------|-------------------------|-----------------|--|---|------------------------|-------------------|-----------------|------|--|
| 分類 | 定義 | 機能 | 構築物、系統又は機器 | 該当する電気、機械装置のうち主な施設 | Step1 | Step2 | Step3 | 評価対象 | 評価対象施設名称 |
| | | | | | 屋外施設（竜巻防護施設を内包する施設を含む） | 屋内の施設で外気と繋がっている施設 | 外殻となる施設（建物、構築物） | | |
| MS-1 | 2) 安全上必須なその他の構築物、系統及び機器 | 2) 安全上特に重要な関連機能 | 非常用所内電源系、制御室及びその遮へい・非常用換気空調系、非常用補機冷却水系、直流電源系（いずれも、MS-1関連のもの） | <ul style="list-style-type: none"> 非常用所内電源系（ディーゼル機関、発電機、発電機から非常用負荷までの配電設備及び電路） | × | | | × | — |
| | | | | | × | × | × | × | — |
| | | | | | ○ | × | — | ○ | <ul style="list-style-type: none"> 非常用ディーゼル発電機 吸気フィルタ 高圧炉心スプレイ系ディーゼル発電機 吸気フィルタ |
| | | | | | ○ | × | — | ○ | <ul style="list-style-type: none"> 非常用ディーゼル発電機室 ルーフバントファン 高圧炉心スプレイ系ディーゼル発電機室 ルーフバントファン |

○：Yes ×：No —：該当せず

第 2.2-1 表 評価対象施設抽出結果（クラス 1 及びクラス 2 の設備）（9/16）

| | | 安全機能の重要度分類 | | | | | 抽出結果 | | | | |
|------|-------------------------|-----------------|--|---|---------------------------------|----------------------------|--------------------|---------------|----------|--|---|
| 分類 | 定義 | 機能 | 構築物、系統又は機器 | 該当する電気、機械装置のうち主な施設 | Step1 屋外施設（電巻防護施設を内包する施設を含む） | Step2 屋内の施設で外気と繋がっている施設 | Step3 | | 評価対象施設名称 | | |
| | | | | | | | 外殻と外殻となる施設（建屋、構築物） | 外殻防護機能を期待できない | | 評価対象 | |
| MS-1 | 2) 安全上必須なその他の構築物、系統及び機器 | 2) 安全上特に重要な関連機能 | 非常用所内電源系、制御室及びその遮へい・非常用換気空調系、非常用補機冷却水系、直流電源系（いずれも、MS-1関連のもの） | <ul style="list-style-type: none"> 非常用所内電源系（ディーゼル機関、発電機、発電機から非常用負荷までの配電設備及び電路） | × | ○ | | × | ○ | <ul style="list-style-type: none"> 非常用ディーゼル発電機室 換気系ダクト 高圧炉心スプレイ系ディーゼル発電機室 換気系ダクト | |
| | | | | | ○ | × | — | ○ | ※1 | <ul style="list-style-type: none"> 原子炉建屋 | |
| | | | | | × | × | 原子炉建屋 | × | — | × | — |
| | | | | | ○ | × | — | — | ○ | <ul style="list-style-type: none"> 中央制御室 換気系冷凍機（配管、弁含む） | |
| | | | | | × | × | 原子炉建屋 | × | ○ | <ul style="list-style-type: none"> 中央制御室 換気系隔離弁、ファン、ダクト | |
| | | | | | × | × | 原子炉建屋 | ○ | — | <ul style="list-style-type: none"> 中央制御室換気系ファン 中央制御室換気系フィルタユニット | |

※1：原子炉建屋としての評価に包絡される。

第 2.2-1 表 評価対象施設抽出結果（クラス 1 及びクラス 2 の設備）（10/16）

| | | 安全機能の重要度分類 | | | | | 抽出結果 | | |
|------|-------------------------|-----------------|--|--|------------------------|-------------------|-----------------|------|--|
| 分類 | 定義 | 機能 | 構築物、系統又は機器 | 該当する電気、機械装置のうち主な施設 | Step1 | Step2 | Step3 | 評価対象 | 評価対象施設名称 |
| | | | | | 屋外施設（竜巻防護施設を内包する施設を含む） | 屋内の施設で外気と繋がっている施設 | 外殻となる施設（建屋、構築物） | | |
| MS-1 | 2) 安全上必須なその他の構築物、系統及び機器 | 2) 安全上特に重要な関連機能 | 非常用所内電源系、制御室及びびその遮へい・非常用換気空調系、非常用補機冷却水系、直流電源系（いずれも、MS-1 関連のもの） | <ul style="list-style-type: none"> ・残留熱除去系海水系（ポンプ、熱交換器、配管、弁、ストレーナ（MS-1 関連）） | × | × | × | × | — |
| | | | | | ○ | × | — | ○ | <ul style="list-style-type: none"> ・残留熱除去系海水系ポンプ（配管、弁含む） ・残留熱除去系海水系ストレーナ |
| MS-1 | 2) 安全上必須なその他の構築物、系統及び機器 | 2) 安全上特に重要な関連機能 | 非常用所内電源系、制御室及びびその遮へい・非常用換気空調系、非常用補機冷却水系、直流電源系（いずれも、MS-1 関連のもの） | <ul style="list-style-type: none"> ・ディーゼル発電機海水系（ポンプ、配管、弁、ストレーナ） | × | × | × | × | — |
| | | | | | ○ | × | — | ○ | <ul style="list-style-type: none"> ・非常用ディーゼル発電機海水系ポンプ（配管、弁含む） ・高圧炉心スプレイスディーゼル発電機海水系ポンプ（配管、弁含む） |

※2：竜巻の影響により取水路が閉塞することは考え難いため、評価対象としない。

第 2.2-1 表 評価対象施設抽出結果（クラス 1 及びクラス 2 の設備）（11/16）

| | | 安全機能の重要度分類 | | | | | 抽出結果 | | | | | | |
|------|-------------------------|-----------------|--|--|---------------------------------|----------------------------|-----------------|---------------|------|------|--|---|--|
| 分類 | 定義 | 機能 | 構築物、系統又は機器 | 該当する電気、機械装置のうち主な施設 | Step1 屋外施設（竜巻防護施設を内包する施設を含む） | Step2 屋内の施設で外気と繋がっている施設 | 外設となる施設（建屋、構築物） | Step3 | | 評価対象 | 評価対象施設名称 | | |
| | | | | | | | | 外設防護機能を期待できない | 評価対象 | | | | |
| MS-1 | 2) 安全上必須なその他の構築物、系統及び機器 | 2) 安全上特に重要な関連機能 | 非常用所内電源系、制御室及びびその遮へい・非常用換気空調系、非常用補機冷却水系、直流電源系（いずれも、MS-1 関連のもの） | <ul style="list-style-type: none"> ・ディーゼル発電機海水系（ポンプ、配管、弁、ストレートレーナ） （続き） | ○ | × | — | | | | <ul style="list-style-type: none"> ・非常用ディーゼル発電機海水ストレートレーナ ・高圧炉心スプレイ系ディーゼル発電機海水ストレートレーナ | | |
| | | | | | × | × | | | × | × | × | × | <ul style="list-style-type: none"> ・取水路（屋外トレンチ含む） |
| | | | | | × | | 原子炉建屋 | × | × | × | × | × | × |
| | | | | <ul style="list-style-type: none"> ・直流電源系（蓄電池、蓄電池から非常用負荷までの配電設備及び電路（MS-1 関連）） ・計測制御電源系（蓄電池から非常用計測制御装置までの配電設備及び電路（MS-1 関連）） | × | × | 原子炉建屋 | ○ | ○ | ○ | × | × | × |

※2：竜巻の影響により取水路が閉塞することは考え難いため、評価対象としない。


第 2.2-1 表 評価対象施設抽出結果（クラス 1 及びクラス 2 の設備）（12/16）

| 分類 | | 安全機能の重要度分類 | | | | | | 抽出結果 | |
|------------|---|--|---|---------------------------------|----------------------------|------------------------|------|----------|--|
| 定義 | 機能 | 構築物、系統又は機器 | 該当する電気、機械装置のうち主な施設 | Step1 屋外施設（竜巻防護施設を内包する施設を含む） | Step2 屋内の施設で外気と繋がっている施設 | Step3 外殻防護機能を期待できない | 評価対象 | 評価対象施設名称 | |
| P S - 2 | 1) その損傷又は故障により発生する事象によつて、炉心の著しい損傷又は燃料の大量の破損を直ちに引き起こすおそれはないが、敷地外への過度の放射性物質の放出のおそれのある構築物、系統及び機器 | 1) 原子炉冷却材を内蔵する機能（ただし、原子炉冷却材圧力バウンダリから除外されている計装等の小口径のもの及びバウンダリに直接接続されていないものは除く。） | 主蒸気系、原子炉冷却材浄化系（原子炉冷却材圧力バウンダリから外れる部分） ・主蒸気系 | × | × | × | × | — | |
| | 2) 原子炉冷却材圧力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 | 放射性廃棄物処理施設（放射能インベントリの大きいもの）、使用済燃料プール（使用済燃料貯蔵ラックを含む。） | ・放射性気体廃棄物処理系（活性炭式希ガスホールドアップ装置） ・使用済燃料プール（使用済燃料貯蔵ラックを含む） ・新燃料貯蔵庫（臨界防止する機能）（新燃料貯蔵ラック） | × | × | × | × | — | |

○：Yes ×：No —：該当せず

第 2.2-1 表 評価対象施設抽出結果（クラス 1 及びクラス 2 の設備）（13/16）

| 分類 | 安全機能の重要度分類 | | | | | Step1 屋外施設 (竜巻防護施設 を内包する施 設含む) | Step2 屋内の施設 で外気と繋 がっている 施設 | Step3 | | 抽出結果 |
|------------|---|--|--|----------------------------|-----------------------------|--|--|-----------------------|---------------------|------|
| | 定義 | 機能 | 構築物、系統又は 機器 | 該当する 電気、機械装置 のうち主な施設 | 外設と なる施設 (建屋、 構築物) | | | 外設防護 機能を期待 できない | 評価 対象 | |
| P S - 2 | 1) その損傷又は故障により発生する事象によつて、炉心の著しい損傷又は燃料の大量の破損を直ちに引き起こすおそれはないが、敷地外への過度の放射性物質の放出のおそれのある構築物、系統及び機器 | 2) 原子炉冷却材圧力バウンダリに直接接続されていないものであつて、放射性物質を貯蔵する機能 | 放射性廃棄物処理施設(放射能インベントリの大きいもの)、使用済燃料プール(使用済燃料貯蔵ラックを含む。) | ・使用済燃料乾式貯蔵容器 | × | × | ○ | ○ | ・使用済燃料 乾式貯蔵容器 | |
| | | 3) 燃料を安全に取り扱う機能 | 燃料取扱設備 | ・燃料交換機 ・原子炉建屋クレーン | × | × | ○ | × | 原子炉 建屋 | |
| | | 1) 安全弁及び逃がし弁の吹き止まり機能 | 逃がし安全弁(吹き止まり機能に連する部分) | ・逃がし安全弁(吹き止まり機能に連する部分) | × | × | ○ | × | 使用済燃料 乾式貯蔵 建屋 | |
| | 2) 通常運転時及び運転時の異常な過渡変化時に作動を要求されるものであつて、その故障により、炉心の冷却が損なわれる可能性の高い構築物、系統及び機器 | | | | × | × | × | × | 原子炉 建屋 | |

※3：竜巻襲来が予想される場合には、燃料取扱作業の中止措置を行う運用とすることから、評価対象施設としない。

第 2.2-1 表 評価対象施設抽出結果（クラス 1 及びクラス 2 の設備）（14/16）

| 分類 | 安全機能の重要度分類 | | | | | 抽出結果 | | | | |
|------|---|----------------------------------|---|---|---|---|----------------------------|-----------------|------------------------|--|
| | 定義 | 機能 | 構築物、系統又は機器 | 該当する電気、機械装置のうち主な施設 | 屋外施設（竜巻防護施設を内包する施設を含む） | | Step2 屋内の施設で外気と繋がっている施設 | 外設となる施設（建屋、構築物） | Step3 外設防護機能を期待できない | 評価対象 |
| MS-2 | 1) P S-2 の構築物、系統及び機器の損傷又は故障により敷地周辺公衆に与える放射線の影響を十分小さくするようにする構築物、系統及び機器 | 1) 燃料プールの補給機能 2) 放射性物質放出の防止機能 | 非常用補給水系 | <ul style="list-style-type: none"> 残留熱除去系（ポンプ、サブプレッジョン・プール、サブプレッジョン・プールから燃料プールまでの配管、弁） | <ul style="list-style-type: none"> × | <ul style="list-style-type: none"> × | 原子炉建屋 | × | × | — |
| | | | | | | | | | | |
| MS-2 | | | 放射性気体廃棄物処理系の隔離弁、排気筒（非常用ガス処理系排気筒の支持機能以外） | <ul style="list-style-type: none"> 放射性気体廃棄物処理系（オフガス）隔離弁 排気筒 | <ul style="list-style-type: none"> × | <ul style="list-style-type: none"> × | タービン建屋 | × | — | — |
| | | | | | | | | | | |
| MS-2 | | 燃料集合体落下事故時放射能放出を低減する系 | 燃料プールの冷却浄化系の燃料プール入口逆止弁 | <ul style="list-style-type: none"> 燃料プールの冷却浄化系の燃料プール入口逆止弁 | <ul style="list-style-type: none"> × | <ul style="list-style-type: none"> × | 原子炉建屋 | ○ | — | <ul style="list-style-type: none"> 燃料プールの冷却浄化系真空破壊弁 |
| | | | | | | | | | | |
| MS-2 | | | 原子炉建屋原子炉棟 | <ul style="list-style-type: none"> 原子炉建屋原子炉棟 | <ul style="list-style-type: none"> ○ | <ul style="list-style-type: none"> × | — | — | — | <ul style="list-style-type: none"> 原子炉建屋 |
| | | | | | | | | | | |
| MS-2 | | | 原子炉建屋ガス処理系 | <ul style="list-style-type: none"> 原子炉建屋ガス処理系 | <ul style="list-style-type: none"> ○ | <ul style="list-style-type: none"> × | — | — | — | <ul style="list-style-type: none"> 非常用ガス処理系排気配管 |
| | | | | | | | | | | |

○：Yes ×：No —：該当せず

第 2.2-1 表 評価対象施設抽出結果（クラス 1 及びクラス 2 の設備）（15/16）

| | | 安全機能の重要度分類 | | | | | 抽出結果 | | | |
|------|---|--------------------|-----------------------|---|---------------------------------|----------------------------|--------------------|---------------|---|---|
| 分類 | 定義 | 機能 | 構築物、系統又は機器 | 該当する電気、機械装置のうち主な施設 | Step1 屋外施設（竜巻防護施設を内包する施設を含む） | Step2 屋内の施設で外気と繋がっている施設 | Step3 | | 評価対象 | 評価対象施設名称 |
| | | | | | | | 外殻と外殻となる施設（建屋、構築物） | 外殻防護機能を期待できない | | |
| MS-2 | 1) P S - 2 の構築物、系統及び機器の損傷又は故障により敷地周辺公衆に与える放射線の影響を十分小さくするようにする構築物、系統及び機器 | 2) 放射性物質放出の防止機能 | 燃料集合体落下事故時放射能放出を低減する系 | <ul style="list-style-type: none"> 原子炉建屋ガス処理系 | × | ○ | × | × | ○ | <ul style="list-style-type: none"> 原子炉建屋換気系隔離弁、ダクト |
| | | | | | × | × | ○ | ○ | <ul style="list-style-type: none"> 非常用ガス処理系設備 非常用ガス再循環系設備 | |
| MS-2 | 2) 異常状態への対応上特に重要な構築物、系統及び機器 | 1) 事故時のプラント状態の把握機能 | 事故時監視計器の一部 | <ul style="list-style-type: none"> 中性子束（起動領域計装） 原子炉スクラム用電磁接触器の状態 制御棒位置 | × | × | × | × | × | — |
| | | | | | × | × | × | × | × | — |
| | | | | | × | × | × | × | × | — |

○：Yes ×：No —：該当せず

第 2.2-1 表 評価対象施設抽出結果（クラス 1 及びクラス 2 の設備）（16/16）

| | | 安全機能の重要度分類 | | | | | 抽出結果 | | | |
|------|-----------------------------|--------------------|--------------------------|---|------------------------|-------------------|-----------------|---------------|------|----------|
| 分類 | 定義 | 機能 | 構造物、系統又は機器 | 該当する電気、機械装置のうち主な施設 | Step1 | Step2 | Step3 | | 評価対象 | 評価対象施設名称 |
| | | | | | 屋外施設（竜巻防護施設を内包する施設を含む） | 屋内の施設で外気と繋がっている施設 | 外殻となる施設（建屋、構造物） | 外殻防護機能を期待できない | | |
| MS-2 | 2) 異常状態への対応上特に重要な構造物、系統及び機器 | 1) 事故時のプラント状態の把握機能 | 事故時監視計器の一部 | [低温停止への移行] ・原子炉圧力 ・原子炉水位（広帯域） [ドライウエルスブレイ] ・原子炉水位（広帯域、燃料域） ・原子炉格納容器圧力 [サブレーション・プール冷却] ・原子炉水位（広帯域、燃料域） ・サブレーション・プール水温度 [可燃性ガス濃度制御系起動] ・原子炉格納容器水素濃度 ・原子炉格納容器酸素濃度 | × | × | | × | | — |
| | | | | | — | — | — | — | — | — |
| | | | | | × | × | | × | — | |
| | | 2) 異常状態の緩和機能 | BWR には対象機能なし | — | — | — | — | — | × | — |
| | | 3) 制御室外からの安全停止機能 | 制御室外原子炉停止装置（安全停止に関連するもの） | ・制御室外原子炉停止装置（安全停止に関連するもの）の操作回路 | × | × | | × | × | — |

○：Yes ×：No —：該当せず

第 2.2-2 表 安全重要度クラス 3 に属する施設の確認結果 (1/9)

| 分類 | 安全機能の重要度分類 | | | | Step1 | Step2 | Step3 | 確認結果 | |
|------|--|----------------------------------|---|--|-------|-------|-------|---|--|
| | 定義 | 機能 | 構築物、系統又は機器 | 該当する電気、機械装置のうち主な施設 | | | | 屋内の施設で外気と繋がっている施設 | 外殻となる施設(建屋、構築物) 外殻防護機能を期待できない:○ 期待できる :× |
| PS-3 | 1) 異常状態の起因事象となるものであって PS-1, PS-2 以外の構築物、系統及び機器 | 1) 原子炉冷却材保持機能 (PS-1, PS-2 以外のもの) | 計装配管, 試料採取管 | 計装配管, 弁 ・ 試料採取管, 弁 ・ ドレン配管, 弁 ・ ベント配管, 弁 | × | × | × | — | — |
| | | 2) 原子炉冷却材の循環機能 | 原子炉再循環系 | 原子炉再循環ポンプ, 配管, 弁, ライザー管 (炉内), ジェットポンプ | × | × | × | — | — |
| | | 3) 放射性物質の貯蔵機能 | サブレーションポンプ ール水排水系, 復水貯蔵タンク, 放射性廃棄物処理施設 (放射能インベントリの小さいもの) | ・ 復水貯蔵タンク ・ 液体廃棄物処理系 (低電導度廃液収集槽, 高電導度廃液収集槽) ・ 固体廃棄物処理系 (CUW 粉末樹脂沈降分離槽, 使用済樹脂槽, 濃縮廃液タンク, 固体廃棄物貯蔵庫 (ドラム缶)) | ○ | × | ○ | ○ | ・ 復水貯蔵タンク ・ 低電導度廃液収集槽 ・ 高電導度廃液収集槽 |
| | | 新燃料貯蔵庫 | ・ 新燃料貯蔵庫 (新燃料貯蔵ラック) | × | × | × | × | ・ CUW 粉末樹脂沈降分離槽 ・ 使用済樹脂槽 ・ 濃縮廃液タンク ・ 固体廃棄物貯蔵庫 (ドラム缶) | 補修を実施 |

○ : Yes × : No — : 該当せず

第 2.2-2 表 安全重要度クラス 3 に属する施設の確認結果 (2/9)

| | | 安全機能の重要度分類 | | | | Step3 | | 確認結果 | | | |
|------|--|---------------|--|--|---------------|----------------------------|---|-------------------|--------------------------------------|----------------------|--|
| 分類 | 定義 | 機能 | 構築物、系統又は機器 | 該当する電気、機械装置のうち主な施設 | Step1 屋外施設 | Step2 屋内の施設で外気と繋がっている施設 | Step3 外設となる施設(建屋、構築物) 外設防護機能を期待できない:○ 期待できる :× | 確認結果 主な対象施設の名称 | | 代替措置等 | |
| PS-3 | 1) 異常状態の起因事象となるものであって PS-1, PS-2 以外の構築物、系統及び機器 | 3) 放射性物質の貯蔵機能 | サブレーションポンプ ール水排水系、復水貯蔵タンク、放射線廃棄物処理施設(放射能インベントリの小さいもの) | ・給水加熱器保管庫 | ○ | × | — | — | ・給水加熱器保管庫 | 補修を実施 | |
| | | | | | × | × | ○ | ○ | ・セメント混練及び雑固体減容処理設備(液体及び固体の放射性廃棄物処理系) | 補修を実施 | |
| PS-3 | 4) 電源供給機能(非常用を除く) | | タービン、発電機及びその励磁装置、復水系(復水器を含む)、給水系、循環水系、送電線、変圧器、開閉所 | ・発電機及びその励磁装置(発電機、励磁器) ・蒸気タービン(主タービン、主要弁、配管) ・復水系(復水器を含む)(復水器、復水ポンプ、配管/弁) | × | × | ○ | ○ | ・発電機 ・励磁器 | 必要に応じプラントを停止し、補修を行う。 | |
| | | | | | × | × | ○ | ○ | ・主タービン | 必要に応じプラントを停止し、補修を行う。 | |
| | | | | | × | × | × | × | — | — | |
| | | | | | × | × | × | × | — | — | |

○ : Yes × : No — : 該当せず

第 2.2-2 表 安全重要度クラス 3 に属する施設の確認結果 (3/9)

| | | 安全機能の重要度分類 | | | | Step3 | | 確認結果 | | 代替措置等 |
|------|--|-----------------------|---|--|-------|-------|--|-----------|---|----------------------|
| 分類 | 定義 | 機能 | 構築物、系統又は機器 | 該当する電気、機械装置のうち主な施設 | Step1 | Step2 | 外設となる施設 (建屋、構築物) 外設防護機能を期待できない:○ 期待できる :× | 主な対象施設の名称 | | |
| PS-3 | 1) 異常状態の起因 事象となるものであって PS-1, PS-2 以外の構築物、系統及び機器 | 4) 電源供給機能 (非常用を除く) | タービン、発電機及びその励磁装置、復水系(復水器を含む)、給水系、循環水系、送電線、変圧器、開閉所 | ・循環水系 (循環水ポンプ、配管/弁) | × | × | × | — | — | — |
| | | | | | ○ | × | — | — | ・循環水ポンプ ・配管/弁 | 必要に応じプラントを停止し、補修を行う。 |
| | | | | ・常用所内電源系 (発電機又は外部電源系から所内負荷までの配電設備及び電路 (MS-1 関連以外)) | × | × | × | × | — | — |
| | | | | | × | × | — | — | ・直流電源系 (蓄電池、蓄電池から常用負荷までの配電設備及び電路 (MS-1 関連以外)) | — |
| | | | | ・計装制御電源系 (電源装置から常用計測制御装置までの配電設備及び電路 (MS-1 関連以外)) | × | × | × | × | — | — |
| | | | | | ○ | × | — | — | ・送電線 | 必要に応じプラントを停止し、補修を行う。 |

○: Yes ×: No —: 該当せず

第 2.2-2 表 安全重要度クラス 3 に属する施設の確認結果 (4/9)

| | | 安全機能の重要度分類 | | | | | 確認結果 | | 代替措置等 | |
|------|--|----------------------------|---|---|-------|-------------------|--|---|----------------------|---|
| 分類 | 定義 | 機能 | 構造物、系統又は機器 | 該当する電気、機械装置のうち主な施設 | Step1 | Step2 | Step3 | 主な対象施設の名称 | | |
| | | | | | 屋外施設 | 屋内の施設で外気と繋がっている施設 | 外設となる施設 (建屋、構造物) 外設防護機能を期待できない: ○ 期待できる: × | | | |
| PS-3 | 1) 異常状態の起因事象となるものであって PS-1, PS-2 以外の構造物、系統及び機器 | 4) 電源供給機能 (非常用を除く) | タービン、発電機及びその励磁装置、復水系 (復水器を含む)、給水系、循環水系、送電線、変圧器、開閉所 | 変圧器 (所内変圧器、起動変圧器、予備変圧器、電路) | ○ | × | — | <ul style="list-style-type: none"> 所内変圧器 起動変圧器 予備変圧器 | 必要に応じプラントを停止し、補修を行う。 | |
| | | 5) プラント計測・制御機能 (安全保護機能を除く) | 原子炉制御系、運転監視補助装置 (制御棒価値ミニマイザ)、原子炉核計装の一部、原子炉プラントプロセス計装の一部 | <ul style="list-style-type: none"> 開閉所 (母線、遮断器、断路器、電路) | × | × | ○ | <ul style="list-style-type: none"> 母線 遮断器 断路器 | 必要に応じプラントを停止し、補修を行う。 | |
| PS-3 | 6) プラント運転補助機能 | 6) プラント運転補助機能 | 所内ボイラ、計装用圧縮空気系 | 補助ボイラ設備 (補助ボイラ、給水タンク、給水ポンプ、配管/弁) | × | × | × | — | — | — |
| | | 6) プラント運転補助機能 | 所内ボイラ、計装用圧縮空気系 | 補助ボイラ設備 (補助ボイラ、給水タンク、給水ポンプ、配管/弁) | ○ | × | — | <ul style="list-style-type: none"> 配管/弁 | 必要に応じプラントを停止し、補修を行う。 | |

○ : Yes × : No — : 該当せず

第 2.2-2 表 安全重要度クラス 3 に属する施設の確認結果 (5/9)

| 分類 | 安全機能の重要度分類 | | | | Step1 | Step2 | Step3 | 確認結果 | | | |
|------|--|---------------|-----------------|--|-------|-------|-------|-------------------|---|---|-----------------------|
| | 定義 | 機能 | 構築物、系統又は機器 | 該当する電気、機械装置のうち主な施設 | | | | 屋内の施設で外気と繋がっている施設 | 外殻となる施設 (建屋、構築物) 外殻防護機能を期待できない: ○ 期待できる : × | 主な対象施設の名称 | 代替措置等 |
| PS-3 | 1) 異常状態の起因事象となるものであって PS-1, PS-2 以外の構築物、系統及び機器 | 6) プラント運転補助機能 | 所内ボイラ, 計装用圧縮空気系 | <ul style="list-style-type: none"> 該当する電気、機械装置のうち主な施設 ・ 所内蒸気系及び戻り系 (ポンプ, 配管/弁) | × | × | × | × | — | — | |
| | | | | | ○ | × | — | — | ・ 配管/弁 | 必要に応じプラントを停止し, 補修を行う。 | |
| | | | | | × | × | × | × | ○ | ・ ポンプ ・ 配管/弁 | 必要に応じプラントを停止し, 補修を行う。 |
| | | | | | × | × | × | × | × | — | — |
| | | | | | × | × | × | × | ○ | ・ 配管/弁 | 必要に応じプラントを停止し, 補修を行う。 |
| | | | | | × | × | × | × | × | — | — |
| | | | | | × | × | × | × | ○ | ・ 原子炉補機冷却水系 ・ 原子炉補機冷却ポンプ, 熱交換器, 配管/弁 | 必要に応じプラントを停止し, 補修を行う。 |
| | | | | | × | × | × | × | × | — | — |
| | | | | | × | × | × | × | ○ | ・ タービン補機冷却水系 (タービン補機冷却ポンプ, 熱交換器, 配管/弁) | 必要に応じプラントを停止し, 補修を行う。 |

○ : Yes × : No — : 該当せず

第 2.2-2 表 安全重要度クラス 3 に属する施設の確認結果 (6/9)

| | | 安全機能の重要度分類 | | | | Step3 | | 確認結果 | | 代替措置等 | |
|------|--|--|--------------------------|--|---------------|----------------------------|--|-----------|-------------------------------|----------------------|---|
| 分類 | 定義 | 機能 | 構築物、系統又は機器 | 該当する電気、機械装置のうち主な施設 | Step1 屋外施設 | Step2 屋内の施設で外気と繋がっている施設 | Step3 外殻となる施設(建屋、構築物) 外殻防護機能を期待できない:○ 期待できる:× | 主な対象施設の名称 | | | |
| PS-3 | 1) 異常状態の起因事象となるものであって PS-1, PS-2 以外の構築物、系統及び機器 | 6) プラント運転補助機能 | 所内ボイラ、計装用圧縮空気系 | ・タービン補機冷却海水系(補機冷却海水ポンプ、配管/弁、ストレーナ) | × | × | × | — | — | — | |
| | | | | | ○ | × | — | — | ・補機冷却海水ポンプ ・配管/弁 ・ストレーナ | 必要に応じプラントを停止し、補修を行う。 | |
| | | | | | × | × | × | × | — | — | — |
| | | | | | ○ | × | — | — | ・復水補給水系(復水移送ポンプ、配管/弁) | 必要に応じプラントを停止し、補修を行う。 | |
| | 2) 原子炉冷却材中放射性物質濃度を通常運転に支障のない程度に低く抑える構築物、系統及び機器 | 1) 核分裂生成物の原子炉冷却材中の放射防止機能 2) 原子炉冷却材の浄化機能 | 燃料被覆管 原子炉冷却材浄化系、復水浄化系 | ・燃料被覆管 ・上/下部端栓 ・タイロッド ・原子炉冷却材浄化系(再生熱交換器、非再生熱交換器、CUWポンプ、ろ過脱塩装置、配管/弁) | × | × | × | × | — | — | |
| | | | | | × | × | × | × | — | — | |
| | | | | | × | × | × | × | — | — | |
| | | | | ・復水浄化系(復水脱塩装置、配管/弁) | × | × | × | × | — | | |

○ : Yes × : No — : 該当せず

第 2.2-2 表 安全重要度クラス 3 に属する施設の確認結果 (7/9)

| | | 安全機能の重要度分類 | | | | | 確認結果 | | 代替措置等 | | |
|------|---|-----------------|---------------------------------------|--|--|-------|-------|-------|-------|---|---|
| 分類 | 定義 | 機能 | 構築物、系統又は機器 | 該当する電気、機械装置のうち主な施設 | Step1 | Step2 | Step3 | Step3 | | | |
| MS-3 | 1) 運転時の異常な過渡変化があっても MS-1, MS-2 とあいまって、事象を緩和する構築物、系統及び機器 | 1) 原子炉圧力上昇の緩和状態 | 逃がし安全弁 (逃がし安全弁) , タービンバイパス弁 | <ul style="list-style-type: none"> 逃がし安全弁 (逃がし弁機能) タービンバイパス弁 | <ul style="list-style-type: none"> 原子炉再循環制御系 制御棒引抜阻止インターロック 選択制御棒挿入系の操作回路 | × | × | × | × | — | — |
| | | 2) 出力上昇の抑制機能 | 原子炉冷却材再循環系 (再循環ポンプトリップ機能) , 制御棒引抜監視装置 | | | × | × | × | × | × | — |
| | | 3) 原子炉冷却材の補給機能 | 制御棒駆動水圧系, 原子炉隔離時冷却系 | <ul style="list-style-type: none"> 制御棒駆動水圧系 (ポンプ, 復水貯蔵タンク, 復水貯蔵タンクから制御棒駆動機構までの配管及び弁) 原子炉隔離時冷却系 (ポンプ, タービン) | <ul style="list-style-type: none"> × ○ | × | × | × | × | × | × |

○ : Yes × : No — : 該当せず

第 2.2-2 表 安全重要度クラス 3 に属する施設の確認結果 (8/9)

| | | 安全機能の重要度分類 | | | | Step3 | | 確認結果 | | 代替措置等 |
|----------|---------------------------|---------------------------|---|--|---------------|----------------------------|--|-----------|----------------------------------|---|
| 分類 | 定義 | 機能 | 構築物、系統又は機器 | 該当する電気、機械装置のうち主な施設 | Step1 屋外施設 | Step2 屋内の施設で外気と繋がっている施設 | Step3 外殻となる施設(建物、構築物) 外殻防護機能を期待できない:○ 期待できる:× | 主な対象施設の名称 | | |
| MS -3 | 2) 異常状態への対応上必要な構築物、系統及び機器 | 1) 緊急時対策上重要なもの及び異常状態の把握機能 | 原子力発電所緊急時対策所、試料採取系、通信連絡設備、放射能監視設備、事故時監視計器の一部、消火系、安全避難通路、非常用照明 | 緊急時対策所 | ○ | × | — | — | 緊急時対策所(建物) | 重大事故等対処施設としての耐震、遮蔽条件により、設計電巻に対する健全性を確保できる |
| | | | | | ○ | × | — | — | 緊急時対策支援システム(無線系) ・所内電気設備(常用) | 無線系、有線系により多様性を確保しており、機能維持が可能 |
| | | | | | × | × | 緊急時対策所建物 原子炉建物 | × | 緊急時対策支援システム(有線系) ・所内電気設備(非常用) | |
| | | | | | × | × | 緊急時対策所建物 | × | 酸素濃度計 | |
| | | | | 試料採取系 (異常時に必要な下記の機能を有するもの。原子炉冷却放射放射性物質濃度サンプリング分析、原子炉格納容器雰囲気放射性物質濃度サンプリング分析) | × | × | 原子炉建物 | × | — | — |

○ : Yes × : No — : 該当せず

第 2.2-2 表 安全重要度クラス 3 に属する施設の確認結果 (9/9)

| 分類 | 安全機能の重要度分類 | | | | Step1 | Step2 | Step3 | 確認結果 | 代替措置等 | | | | | |
|----------|---------------------------|---------------------------|---|------------------------------------|-------|-------------------|--|---|-------|-----------------------------------|------------------|---|---|-------------------|
| | 定義 | 機能 | 構築物、系統又は機器 | 該当する電気、機械装置のうち主な施設 | | | | | | | | | | |
| MS -3 | 2) 異常状態への対応上必要な構築物、系統及び機器 | 1) 緊急時対策上重要なもの及び異常状態の把握機能 | 原子力発電所緊急時対策所、試料採取系、通信連絡設備、放射能監視設備、事故時監視計器の一部、消火系、安全避難通路、非常用照明 | 通信連絡設備 (1つの専用回路を含む複数の回路を有する通信連絡設備) | 屋外施設 | 屋内の施設で外気が繋がっている施設 | 外設となる施設 (建屋、構築物) 外設防護機能を期待できない: ○ 期待できる: × | 主な対象施設の名称 | 代替措置等 | | | | | |
| | | | | | × | × | ○ | <ul style="list-style-type: none"> ・ 携帯型有線通話装置 ・ 衛星連絡設備 (固定型、携帯型) ・ 無線連絡設備 (携帯型) | | 同一機能を有する設備が複数設置されており、通信連絡機能の維持が可能 | | | | |
| | | | | | ○ | × | ○ | <ul style="list-style-type: none"> ・ 送受話器 (ページング) ・ モニタリングポスト | | | 可搬型モニタリングポストにて代替 | | | |
| | | | | | × | × | × | 原子炉建屋 | | × | | × | × | — |
| | | | | | ○ | × | — | — | | — | — | — | — | 可搬型気象観測設備にて代替 |
| | | | | | × | × | × | 原子炉建屋タービン建屋 | | × | × | × | — | |
| | | | | | ○ | × | — | — | | — | — | — | <ul style="list-style-type: none"> ・ 水消火設備 ・ 火災検出装置 (受信機含む) | [消火設備] 消防自動車等にて代替 |
| | | | | | × | × | × | 各建屋 | | ○ | × | <ul style="list-style-type: none"> ・ 水消火設備 ・ 泡消火設備 ・ 二酸化炭素消火設備 ・ 火災検出装置 (受信機含む) | [検出装置] 運転員、作業員等の監視による代替 | |
| | | | | | × | × | × | 原子炉建屋 | | × | × | × | | — |
| | | | | | × | × | × | 原子炉建屋 | | × | × | × | — | — |

○ : Yes × : No — : 該当せず

緊急時対策所の竜巻防護方針について

1. 竜巻に対する防護方針

緊急時対策所は、設計基準対象施設かつ重大事故等対処施設として位置付けられており、それぞれに対し以下の防護方針に基づき、必要とされる機能を維持する設計としている。

設計基準対象施設としては、安全機能の重要度分類におけるクラス3施設（MS-3）に対する防護方針に従い、損傷する場合を考慮して、代替設備により必要な機能を確保すること、安全上支障のない期間に修復する等の対応が可能な設計とすることとしている。

また、重大事故等対処施設としては、緊急時対策所に配置される種々の重大事故等対処設備に対し、同一機能の設備には多様性を考慮する等の配慮により、共通要因である設計竜巻により同時に機能を喪失しないようにすることで、必要な機能を維持する方針としている。

2. 防護方針への適合性

緊急時対策所においては、設計基準対象施設及び重大事故等対処施設として、設置許可基準規則第34条及び第61条に示される要求に応じた各種の設備が設置される。これら設備の配置等の特徴を踏まえ、竜巻に対する機能維持のための方針を整理した結果を別表1-1に示す。

大部分の設備は緊急時対策所建屋に内包されるが、建屋は重大事故等対処施設として要求される遮蔽性、耐震性を考慮した堅牢な構造であり、内部の設備は設計竜巻に対し防護される。また、屋外の一部設備が仮に竜巻により損傷した場合でも、同一機能を有する他の設備が多様性をもって配備されている。こ

れより、上述の設計基準対象施設としての防護方針及び重大事故等対処施設としての防護方針に適合したものとなっている。

別表 1-1 緊急時対策所の設備と竜巻に対する設計方針

| 系統機能 | 設備 | | 配置場所 | 竜巻に対する機能維持 |
|------------|--|---|------------|--|
| | 設計基準対象施設 | 重大事故等対処設備 | | |
| 必要な情報の把握 | <ul style="list-style-type: none"> 緊急時対策支援システム伝送装置 SPDSデータ表示装置 | 同左 | 屋内 一部屋外 | 【屋内設備】 緊対所建屋(もしくは原子炉建屋)による外殻防護 |
| | <ul style="list-style-type: none"> データ伝送装置 | 同左 | 屋内 屋外 | |
| 通信連絡 | <ul style="list-style-type: none"> 統合原子力防災ネットワークに接続する通信連絡設備(テレビ会議システム, IP電話, IP-FAX) 携行型有線通話装置 衛星電話設備(固定型) 衛星電話設備(携帯型) 無線連絡設備(携帯型) | 同左 | 屋内 一部屋外 | 【屋外設備】 仮に一部の設備が損傷した場合でも、多様性を有する他の回線で代替 |
| | <ul style="list-style-type: none"> 電力保安通信用電話設備(固定電話機, PHS端末, FAX) 送受話器(ページング) 無線連絡設備(固定型) 専用電話設備(ホットライン)(自治体向) テレビ会議システム(社内) 加入電話設備(加入電話, 加入FAX) | (左記設備は「自主対策設備」の位置付け) | 屋内 一部屋外 | |
| 電源の確保 | <ul style="list-style-type: none"> 常用所内電気設備 非常用所内電気設備 | — | 屋内 一部屋外 | 【屋内設備】 緊対所建屋(もしくは原子炉建屋)による外殻防護 【屋外設備】 仮に一部の設備が損傷した場合でも、多様性を有する他の設備で代替 |
| | — | <ul style="list-style-type: none"> 緊急時対策所用発電機 緊急時対策所用発電機給油ポンプ 緊急時対策所用M/C 緊急時対策所用発電機燃料油貯蔵タンク | 屋内 | |
| 居住性の確保 | — | <ul style="list-style-type: none"> 緊急時対策所遮蔽 | 屋内 屋外 | 【屋内の遮蔽壁】 建屋外壁により防護 【屋外の遮蔽壁】 竜巻に対し構造健全性を確保 |
| | — | — | — | — |
| 居住性の確保(続き) | <ul style="list-style-type: none"> 酸素濃度計 二酸化炭素濃度計 | 同左 | 屋内 | 緊対所建屋による外殻防護 |
| | — | <ul style="list-style-type: none"> 緊急時対策所非常用送風機 緊急時対策所非常用フィルタ装置 緊急時対策所加圧設備 緊急時対策所差圧計 可搬型モニタリング・ポスト 緊急時対策所エリアモニタ | 屋内 | 緊対所建屋による外殻防護 |

3. 緊急時対策所建屋による外殻防護能力について

別表 1-1 に示すとおり，緊急時対策所においては建屋の外壁により大部分の設備を防護する設計としている。緊急時対策所建屋は，別途要求される耐震性及び遮蔽能力を踏まえた，別表 1-2 に示すとおり厚い鉄筋コンクリート製の外壁を有する設計とすることから，設計竜巻の風荷重に対してもその変形が十分に小さく抑えられ，建屋の損傷には至らない。また，同じく第 2 表に示すとおり，設計飛来物である鋼製材の貫通及び裏面剥離防止に対する必要厚さに対しても十分な余裕があり，設計飛来物の衝突に対しても内部の設備を防護可能な設計とする。

別表 1-2 緊急時対策所の外壁の概要

| 場所 | 材質 | 厚さ | 設計飛来物の 貫通，裏面剥離防止限界 | |
|-------------|----------|---------------|-----------------------|----------|
| | | | 貫通 | 裏面剥離 |
| 壁 (鉛直面) | 鉄筋コンクリート | 100～ 150cm | 貫通 | 約 24.7cm |
| | | | 裏面剥離 | 約 41.2cm |
| 屋根 (水平面) | 同上 | 60cm | 貫通 | 約 17.5cm |
| | | | 裏面剥離 | 約 31.4cm |

以 上

耐震 S クラス施設について

「竜巻影響評価ガイド」においては、竜巻防護施設は「基準地震動及び耐震設計方針に係る審査ガイド」の重要度分類における耐震 S クラスの設計を要求される設備（系統、機能）及び建屋、構築物等とされている。一方、今回の竜巻影響評価では、安全重要度クラス 1，2 に属する施設を竜巻防護施設として選定しているため、安全重要度クラス 1，2 に該当しない耐震 S クラス施設の有無について確認した結果、第 1 表に示すとおり、津波防護施設、浸水防止設備及び津波監視設備が抽出されたが、以下の理由により、竜巻影響評価の評価対象施設として追加する必要はないと判断した。

〈津波防護施設、浸水防止設備及び津波監視設備を評価対象施設としない理由〉

- ・津波防護施設、浸水防止設備及び津波監視設備は、津波に対して機能を発揮する施設であり、竜巻と津波の重畳の考慮要否を検討することで、竜巻に対する機能維持の要否が判断可能である。
- ・竜巻及びその随件事象によりこれらの施設が損傷することを想定した場合、敷地レベル(EL. +3.0m)を超える津波に対する影響を考慮する必要があるが、津波と竜巻は発生原因が異なり独立事象であること、及び敷地レベルを超える津波の発生頻度 (9.5×10^{-3} / 年程度) と設計竜巻 ($V_D=100\text{m/s}$) の発生頻度 (2.0×10^{-6} / 年程度) を踏まえると、敷地レベルを超える津波と設計竜巻が同時に発生する可能性は小さい。また、敷地レベルを超える津波と設計竜巻の発生頻度を踏まえると、竜巻及びその随件事象により津波防護施設等が損傷した場合でも当該機能が必要となる前に修復等の対応が可能と考えられる。

第1表 安全重要度クラス1, 2以外の耐震Sクラス施設の確認結果(1/2)

| 耐震重要度 | 機能別分類 | 設備別分類 | 対象施設 | 安全重要度クラス1 or 2 |
|-------|--|-------|--|----------------|
| S | 原子炉冷却材圧力バウンダリを構成する機器配管系 | 主要設備 | ・原子炉圧力容器 ・原子炉冷却材圧力バウンダリに属する容器, 配管, ポンプ及び弁 | ○ |
| | | 補助設備 | ・隔離弁を閉とするために必要な電気計装設備 | ○ |
| | 使用済燃料を貯蔵するための施設 | 主要設備 | ・使用済燃料プール ・使用済燃料貯蔵ラック ・使用済燃料乾式貯蔵容器 | ○ |
| | | 補助設備 | ・使用済燃料プール水補給設備 (残留熱除去系) ・非常用電源及び計装設備 (非常用ディーゼル発電機及びその冷却系, 補助施設を含む) | ○ |
| | 原子炉の緊急停止のために急激に負の反応度を付加するための施設, 及び原子炉の停止状態を維持するための施設 | 主要設備 | ・制御棒, 制御棒駆動機構及び制御棒駆動水圧系 (スクラム機能に関する部分) | ○ |
| | | 補助設備 | ・炉心支持構造物 ・電気計装設備 ・チャンネル・ボックス | ○ |
| | 原子炉停止後, 炉心から崩壊熱を除去するための施設 | 主要設備 | ・原子炉隔離時冷却系 ・高圧炉心スプレイ系 ・残留熱除去系 (原子炉停止時冷却モード運転に必要な設備) ・冷却水源としてのサブプレッション・プール | ○ |
| | | 補助設備 | ・残留熱除去系海水系 ・炉心支持構造物 ・高圧炉心スプレイ系ディーゼル発電機及びその冷却系, 補助施設 ・非常用電源及び計装設備 (非常用ディーゼル発電機及びその冷却系, 補助施設を含む。) | ○ |
| | 原子炉冷却材圧力バウンダリ破損事故後, 炉心から崩壊熱を除去するための施設 | 主要設備 | ・非常用炉心冷却系 1) 高圧炉心スプレイ系 2) 低圧炉心スプレイ系 3) 残留熱除去系 (低圧注入モード運転に必要な設備) 4) 自動減圧系 ・冷却水源としてのサブプレッション・プール | ○ |
| | | 補助設備 | ・残留熱除去系海水系 ・高圧炉心スプレイ系ディーゼル発電機及びその冷却系, 補助施設 ・非常用電源及び計装設備 (非常用ディーゼル発電機及びその冷却系, 補助施設を含む。) ・中央制御室の遮へい及び空調設備 | ○ |
| | 原子炉冷却材圧力バウンダリ破損事故の際に, 圧力障壁となり放射性物質の放散を直接防ぐための施設 | 主要設備 | ・原子炉格納容器 ・原子炉格納容器バウンダリに属する配管及び弁 | ○ |
| | | 補助設備 | ・隔離弁を閉とするために必要な電気計装設備 | ○ |

第1表 安全重要度クラス1, 2以外の耐震Sクラス施設の確認結果 (2/2)

| 耐震重要度 | 機能別分類 | 設備別分類 | 対象施設 | 安全重要度クラス1 or 2 |
|-------|--|-------|--|----------------|
| S | 放射性物質の放出を伴うような事故の際に、その外部放散を抑制するための施設であり、上記の「放射性物質の放散を直接防ぐための施設」以外の施設 | 主要設備 | <ul style="list-style-type: none"> ・残留熱除去系（格納容器スプレイ冷却モード運転に必要な設備） ・可燃性ガス濃度制御系 ・原子炉建屋 ・非常用ガス処理系 ・非常用ガス再循環系 ・原子炉格納容器圧力低減装置（ダイヤフラムフロア及びベント管） ・冷却水源としてのサブプレッション・プール | ○ |
| | | 補助設備 | <ul style="list-style-type: none"> ・残留熱除去系海水系 ・非常用電源及び計装設備（非常用ディーゼル発電機及びその冷却系、補助施設を含む。） | ○ |
| | 津波防護機能を有する設備及び浸水防止機能を有する設備 | 主要設備 | <ul style="list-style-type: none"> ・津波防護施設 ・浸水防止設備 | 該当しない |
| | | 補助設備 | — | — |
| | 敷地における津波監視機能を有する施設 | 主要設備 | <ul style="list-style-type: none"> ・津波監視設備 | 該当しない |
| | | 補助設備 | <ul style="list-style-type: none"> ・非常用電源及び計装設備（非常用ディーゼル発電機及びその冷却系、補助施設を含む。） | ○ |

外部事象に対する津波防護施設，浸水防止設備，
及び津波監視設備の防護方針について

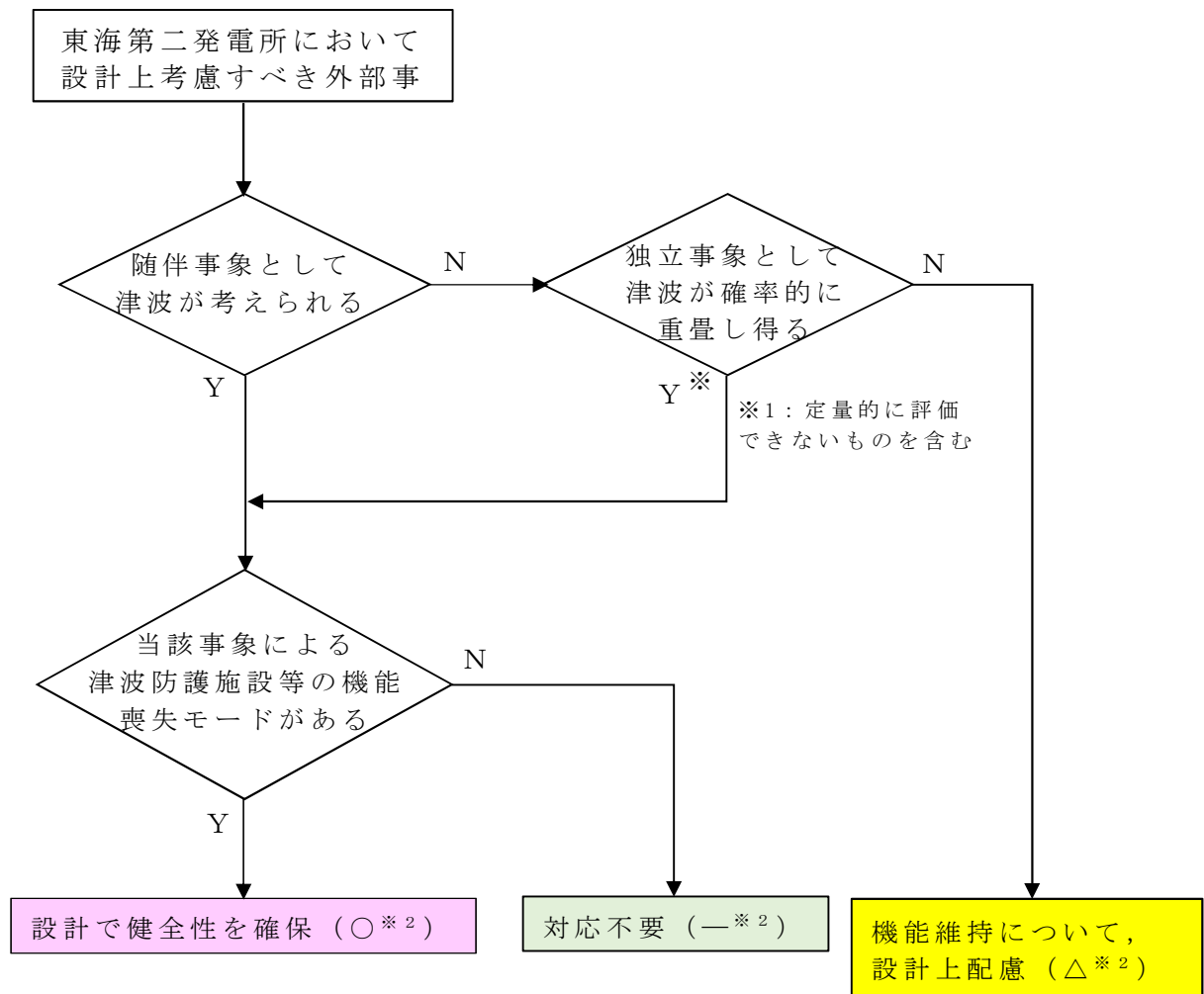
1. 概要

外部事象に対しての，津波防護施設，浸水防止設備，及び津波監視設備（以下「津波防護施設等」という。）の防護方針を以下に示す。

2. 防護に関する考え方

以下の考え方に基づき，東海第二発電所において設計上考慮すべき外部事象に対する，津波防護施設等の機能維持のための対応の要否について整理した。（フローを別図 1-1 に示す）

- ・設計上考慮すべき事象が，津波もしくは津波の随伴，重畳が否定できない事象に該当するかを確認する。定量的な重畳確率が求められない事象については，保守的にその影響を考慮する。
- ・津波の随伴，重畳が否定できない場合は，当該事象による津波防護施設等の機能喪失モードの有無を確認する。機能喪失モードが認められる場合は，設計により健全性を確保する。
- ・津波の随伴，重畳が有意でないと評価される事象についても，東海第二発電所の防潮堤については，基準津波の高さや防護範囲の広さ等その重要性が高いことを鑑み，設計においては，これらの事象により機能喪失に至らない，もしくは損傷防止が困難な事象においては敷地高さを超える津波の襲来前に復旧が可能な構造について配慮する。



別図 1-1 外部事象に対する津波防護施設等の機能維持対応要否判断フロー

3. 検討結果

上記検討フローに基づく各事象に対する防護方針の検討結果を、以下に示す。(詳細は別表 1-1 のとおり)

3.1 「竜巻」, 「火山」 以外の外部事象に対する防護方針

これら事象に対しては、津波との随伴もしくは重畳の可能性

を否定できないため、荷重の重ね合わせのタイミングも考慮した上で設計への反映の可否を検討し、津波防護施設等への影響が考えられる事象については、設計により津波防護施設等の健全性を維持する。

3.2 「竜巻」、「火山」に対する防護方針

これら2事象に津波は随伴せず重畳の確率も有意ではないが、下記の配慮により、津波防護施設等の機能が要求される時にその機能を発揮出来る設計とする。

・「火山」

設計で想定する降下火砕物の給源の噴火と安全施設の中で最も低所にある海水ポンプの水密高さに等しい津波が重畳する年超過確率は約 8.6×10^{-8} (1/y) であり、火山と津波の重畳は有意ではないと評価されるが、堆積した降下火砕物について適時除去が可能な構造とし、津波防護施設等の機能を喪失しないよう設計上配慮する。

・「竜巻」

設計竜巻と安全施設の中で最も低所にある海水ポンプの設置高さに等しい津波が重畳する年超過確率は約 3.8×10^{-8} (1/y) であり、竜巻と津波の重畳は有意ではないと評価されるが、仮に竜巻によって津波防護施設等が損傷した場合でも、海水ポンプの設置高さを超える津波の襲来前に復旧が可能な設計とする。

なお、竜巻の襲来後に海水ポンプの設置高さを超える津波が

重畳する確率が有意になるには、発生間隔として約 2.7 年が必要と評価されるため、復旧期間（18 か月（1.5 年）以内と想定）は十分に確保可能と判断している。

別表 1-1 外部事象に対する津波防護施設等の対応方針整理表

: 津波の随伴, 重量が否定できないため, 設計で健全性を確保する事象 (○)
 : 津波の随伴, 重量は有意ではないが, 機能維持について設計上配慮する事象 (△)
 : 対応が不要な事象 (—)

| 設計上考慮すべき外部事象 | ①随伴事象として津波を考慮 | ②独立事象として津波が重量し得る | 津波との重量を考慮要 (①か②が“○”) | 津波防護施設の機能喪失による安全施設等の機能喪失の可能性 | 設計への反映要否 | 機能維持のための対応方針 |
|--------------|---------------|------------------|----------------------|---|----------|--|
| 地震 | ○ | — | ○ | <u>あり</u> 地震荷重により損傷した場合, 安全施設等への津波の到達, 浸水による機能喪失が想定される。 | ○ | 耐震Sクラス施設として基準地震動Ssに対し健全性を維持し, 津波に対する防護機能を維持する。 また, 津波と余震 (Sd-DI 地震動) の組合せも考慮する。 |
| 洪水 (外部洪水) | — | ○ | ○ | <u>なし</u> 基準津波の遡上高さと洪水ハザードマップの浸水想定を重ねても, 発電所敷地へ侵入し得る高さには達しない。 国道 245 号線西側田畑への洪水高さ: ~T.P. 10m (審査資料「外部からの衝撃による損傷の防止 (その他外部事象)」より) 国道 245 号西側田畑への津波遡上分: ~+4m (遡上解析結果より) =>合計 T.P. ~14m < E.L. (=T.P.) 15m (国道 245 号線 (発電所入口)) | — | — |
| 風 (台風) | — | ○ | ○ | <u>あり</u> 風荷重により損傷した場合, 安全施設等への津波の到達, 浸水による機能喪失が想定される。 | ○ | ・風荷重, 津波荷重を考慮した設計とする。 ・津波監視カメラは, 風荷重を考慮した設計とする。 |

注: 防潮堤形状の変更に伴う再解析実施後に再確認し, 結論に影響が無いことを確認する。

| 設計上考慮すべき外部事象 | ①随件事象として津波を考慮 | ②独立事象として津波が重畳し得る | 津波との重畳を考慮(①か②が“○”) | 津波防護施設の機能喪失による安全施設等の機能喪失の可能性 | 設計への反映要否 | 機能維持のための対応方針 |
|--------------|---------------|------------------|--------------------|--|----------|---|
| 竜巻 | — | — | — | <p><u>なし</u></p> <p>以下のとおり、重畳の頻度は無視し得る。 設計竜巻の確率： 約 $3.9 \times 10^{-6}/y$ (補足 1 参照) 敷地高さ超津波 (> T.P. 3m) の確率： 約 $9.6 \times 10^{-3}/y$ ※ ※：飛来物による海水ポンプ室の壁の損傷を想定し、敷地の最低高とした。 ⇒重畳確率：約 $3.8 \times 10^{-8}/y$ …1×10^{-7} 未満で、有意ではない。</p> | △ | <p>防潮堤の設計においては、自主的に以下の配慮を行い、信頼性を高める。</p> <ul style="list-style-type: none"> 風圧力に対しては、損傷しない様に構造強度を確保する。 飛来物による損傷が認められた場合には、安全上支障のない期間に修復する。 <p>なお、「竜巻⇒津波」の確率が 10^{-7} となる発生間隔は約 2.7 年と評価され、補修期間 (18 か月以内：補足 2 参照) は確保できる。</p> |
| 極低温 (凍結) | — | ○ | ○ | <p><u>あり</u></p> <p>凍害により止水ジョイントが損傷した場合、安全施設等への津波の到達、浸水による機能喪失が想定される。</p> | ○ | 止水ジョイントは最低気温を考慮した設計とする。 |
| 降水 (豪雨 (降雨)) | — | ○ | ○ | <p><u>なし</u></p> <p>降雨による海水面の上昇の影響は無視し得る。</p> | — | — |
| 積雪 (暴風雪) | — | ○ | ○ | <p><u>あり</u></p> <p>積雪荷重により損傷した場合、安全施設等への津波の到達、浸水による機能喪失が想定される。</p> | ○ | 積雪荷重と津波荷重を考慮した設計とする。 |

注：防潮堤形状の変更に伴う再解析実施後に再確認し、結論に影響が無いことを確認する。

| 設計上考慮すべき外部事象 | ①随件事象として津波を考慮 | ②独立事象として津波が重畳し得る | 津波との重畳を考慮(①か②が“○”) | 津波防護施設の機能喪失による安全施設等の機能喪失の可能性 | 設計への反映要否 | 機能維持のための対応方針 |
|-----------------|---------------|------------------|--------------------|--|----------|--|
| 落雷 | — | ○ | ○ | <u>あり</u> 落雷により津波監視設備の機能喪失が想定される | ○ | 津波監視設備については、既設避雷設備の遮へい範囲内への設置又は避雷設備の設置、避雷設備の接地極を構内接地網と接続し接地抵抗の低減を行うとともに、ライインフィルタや絶縁回路を設置することにより、雷サージの侵入を防止する設計とする。 |
| 地滑り | — | ○ | ○ | <u>あり</u> 地滑りにより損傷した場合、安全施設等への津波の到達、浸水による機能喪失が想定される。 | ○ | 耐震Sクラス施設として、地滑りの影響の無い場所に設置する。 |
| 火山 (火山活動・降灰) | — | — | — | <u>なし</u> 以下のとおり、重畳の頻度は無視し得る。 想定する火山の確率： $2.2 \times 10^{-5}/y$ (審査資料「外部からの衝撃による損傷の防止(その他外部事象)」より) 敷地高さ超津波(>T.P.6m)の確率： 約 $3.9 \times 10^{-3}/y$ ※ ※：海水ポンプ室の壁は損傷しないため、ポンプ室水密高さとする。 ⇒重畳確率：約 $8.6 \times 10^{-8}/y$ … 1×10^{-7} 未満で、有意ではない。 | △ | 設計にて長期荷重に対する構造健全性を確保するとともに、降灰後に適宜除去が可能な設計とする。 |
| 生物学的事象 | — | ○ | ○ | <u>なし</u> 生物による影響(閉塞、侵入)による機能喪失モードを有しない。 | — | — |

注：防潮堤形状の変更に伴う再解析実施後に再確認し、結論に影響が無いことを確認する。

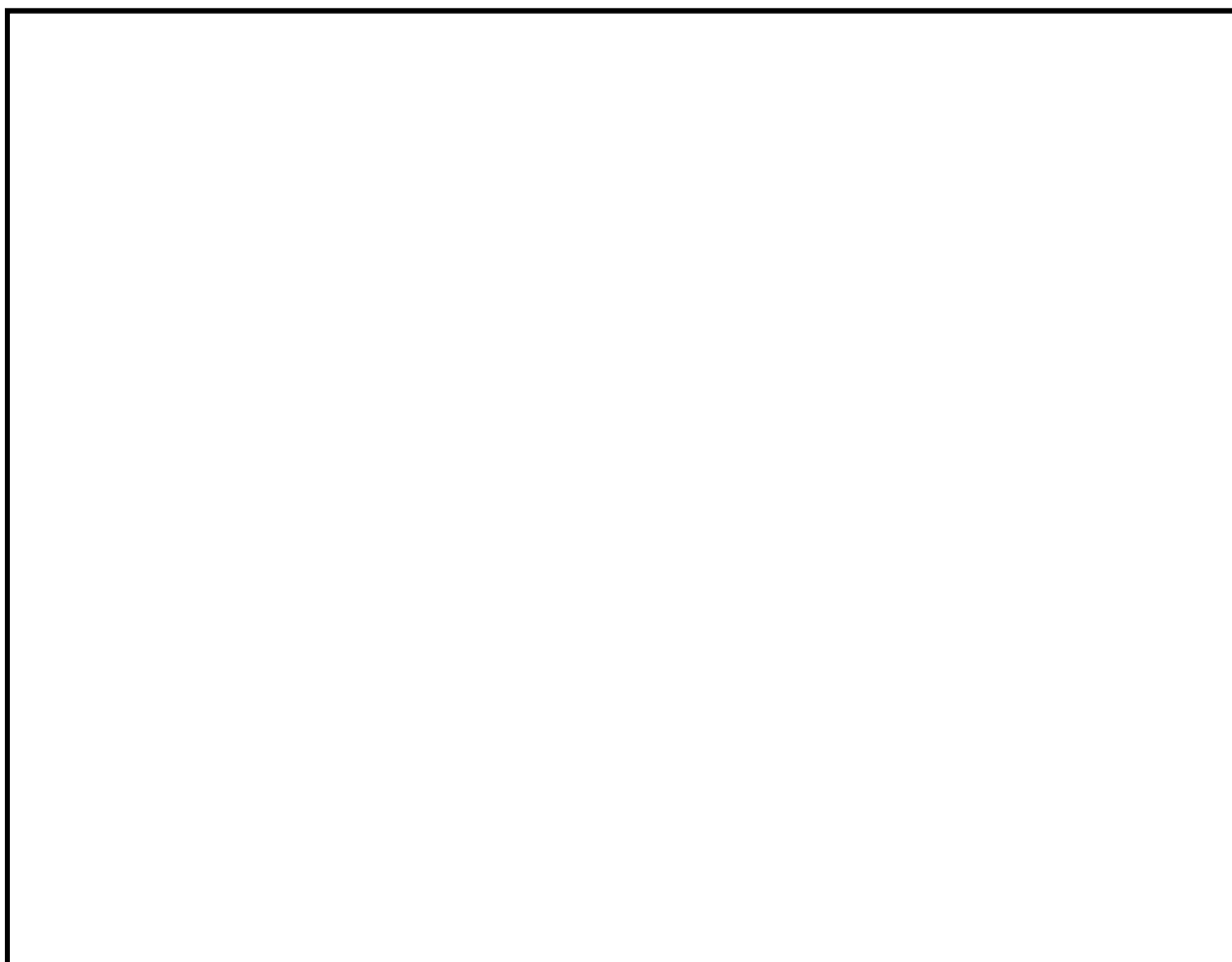
| 設計上考慮すべき外部事象 | ①随伴事象として津波を考慮 | ②独立事象として津波が重畳し得る | 津波との重畳を考慮(①か②が“○”) | 津波防護施設の機能喪失による安全施設等の機能喪失の可能性 | 設計への反映要否 | 機能維持のための対応方針 |
|--------------|---------------|------------------|--------------------|---|----------|--|
| 森林火災 | — | ○ | ○ | <u>あり</u> 熱影響により損傷した場合、安全施設等への津波の到達、浸水による機能喪失が想定される。 | ○ | <ul style="list-style-type: none"> 森林火災の熱影響による強度低下及び止水ジョイントの機能喪失を起さない設計とする。 防潮堤上の津波監視設備が森林火災の影響で機能を喪失した場合は、速やかに予備品と交換する。(機能喪失の可能性があるのは、全4台中2台のみ) |
| 高潮 | — | ○ | ○ | <u>あり</u> 高潮に起因する潮位上昇により防潮堤を越波した場合、安全施設等への津波の到達、浸水による機能喪失が想定される。 | ○ | 高潮と津波の組合せを考慮した設計とする。 |

津波防護施設等を考慮した竜巻の年超過確率の評価について

津波防護施設等を竜巻防護対象と仮定した場合の、設計竜巻（最大風速 100m/s）の年超過確率を評価した。

年超過確率の推定には、竜巻影響エリアに津波防護施設等を取り込むことになるが、第 1 図に示すとおり、防潮堤を囲む円がその他の竜巻防護施設を包含する形となるため、当該円を竜巻影響エリアと見なした。

この竜巻影響エリアに対する設計竜巻（風速 100m/s）時の年超過確率は、第 1 表に示すとおり約 3.9×10^{-6} (1/y) と評価された。



第 1 図 津波防護施設等を考慮した場合の竜巻影響エリア

第1表 年超過確率の評価結果

| ケース | ①ベース (現ハザード) | ②防潮堤考慮 | 備考 |
|--------------------------------------|------------------------|------------------------|--|
| 竜巻影響エリア | 直列したゾーン毎の 小円に外接する大円 | 防潮堤の外接円 (他を包含) | |
| R/B | 円 (D=188m) | 円 (D≒800m) | |
| T/B | | | |
| 排気筒 | | | |
| 海水Pエリア | | | |
| D/C建屋 | | | |
| 防潮堤 (旧形 状) | | | |
| 竜巻検討エリア となる円の直径 (m) (1の位切上) | 300 | 800 | ケース①は上記 3エリアの直径 の和 |
| 竜巻影響エリア の面積 (m ²) | 約71000 | 約503000 | |
| 設計竜巻 (100m/s) の 年超過確率 | 約 2.1×10^{-6} | 約 3.9×10^{-6} | 変化の主要因 は、確率算出式 におけるエリア 幅寄与分 (全体 の約50%) の増 加による。 |

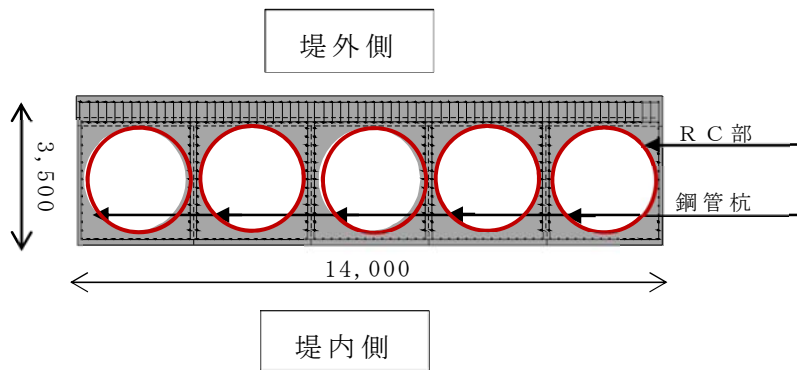
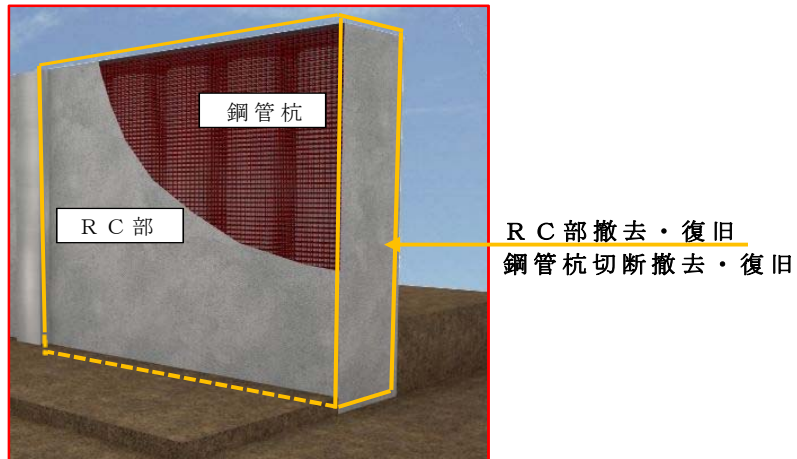
防潮堤の復旧に要する時間について

津波防護施設等のうち、最も復旧に時間を要すると思われる防潮堤に対しては、近くを通る国道 245 号線から、竜巻により車両の飛来する可能性が否定できず、万一衝突した場合は何らかの損傷を生じる恐れが高いことから、復旧に関する流れと期間を評価した。結果を第 1 表に示す。

防潮堤 1 区画の全面復旧という保守的な想定であっても、補修期間は 1 年半程度と考えられ、竜巻と敷地高さ相当津波が重畳する確率が 10^{-7} 以下となる発生間隔約 2.6 年の間には復旧が完了し、津波の襲来に対する防潮堤の機能を回復可能と判断している。

表 1 防潮堤の復旧作業概要と復旧期間

| | |
|-------------------|---|
| 復旧範囲 | RC部+鋼管杭 1ユニット(幅 14.0m) 全面復旧を仮定 |
| 復旧方法 | ①RC部を撤去する。 ②鋼管杭を切断撤去する。 ③継杭して鋼管杭を現況復旧する。 ④鉄筋組立、型枠組立、コンクリート打設の順でRC部を復旧する。 ⑤止水ジョイント及び表層改良地盤を復旧する。 |
| 復旧期間 (調査～復旧完了) | 18ヶ月(1.5年)以内 |



第 1 図 鋼管杭鉄筋コンクリート防潮壁の概要図

竜巻防護施設に波及的影響を及ぼし得る施設の抽出について

1. 抽出方針

発電所構内の構築物，系統及び機器のうち，竜巻防護施設の機能に，次の観点から波及的影響を及ぼし得る施設を抽出する。

第 1-1 図に抽出フローを示す。

(1) 機械的影響の観点

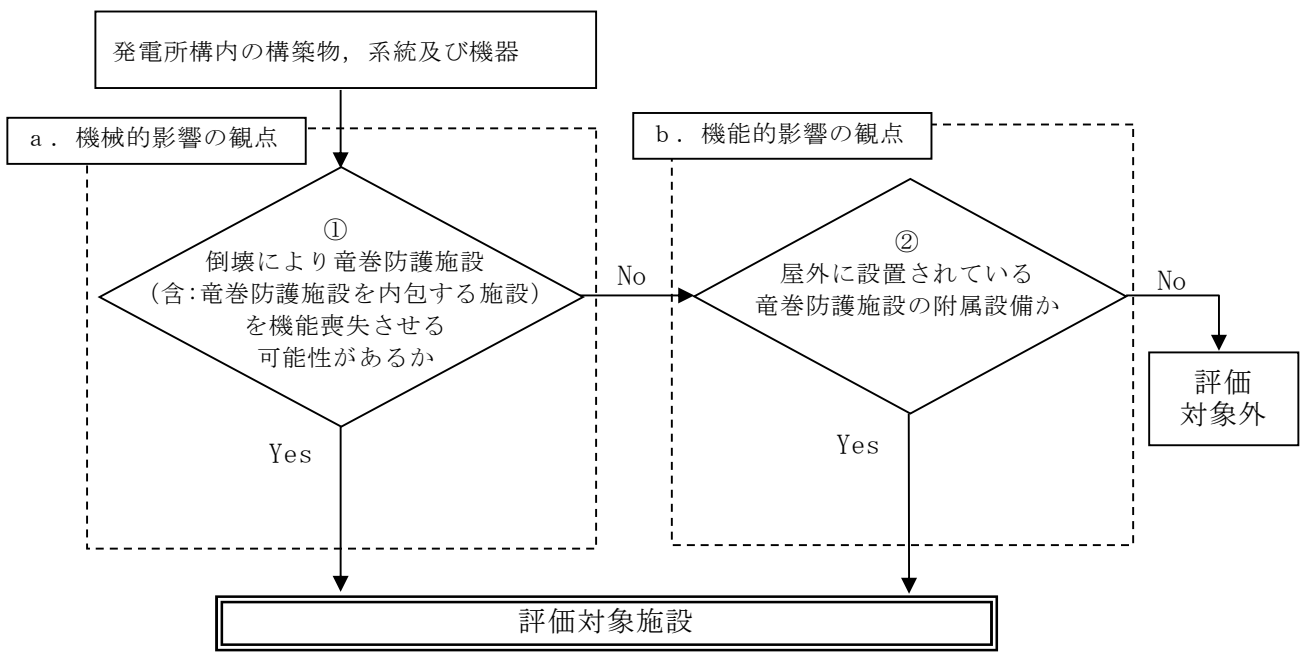
発電所構内の構築物，系統及び機器のうち，竜巻により倒壊して，竜巻防護施設及び竜巻防護施設を内包する施設を機能喪失させる可能性がある施設，またはその施設の特定の区画を抽出する。

(2) 機能的影響の観点

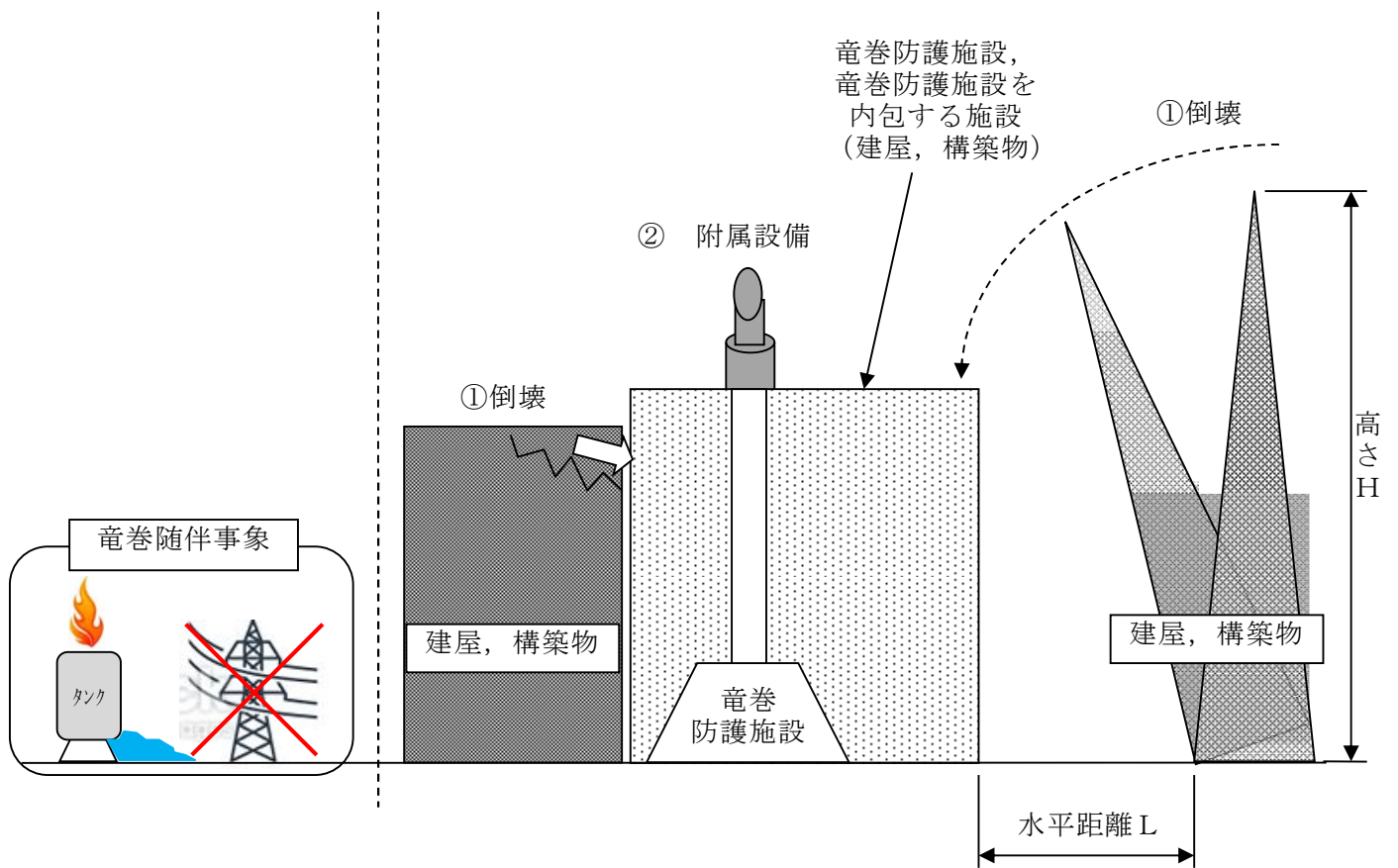
発電所構内の構築物，系統及び機器のうち，竜巻により損傷して，竜巻防護施設の機能喪失させる可能性がある屋外に設置されている竜巻防護施設の附属設備を抽出する。

第 1-2 図に波及的影響を及ぼし得る施設のイメージを示す。

なお，波及的影響として，火災，溢水，外部電源喪失も考えられるが，竜巻随伴事象として「添付資料 11」にて整理する。



第1-1図 評価対象抽出フロー



第1-2図 波及的影響を及ぼし得る施設のイメージ

2. 抽出結果

2.1 機械的影響の観点

機械的影響の観点から、発電所構内の構築物、系統及び機器のうち、「倒壊により竜巻防護施設及び竜巻防護施設を内包する施設を機能喪失させる可能性がある施設」を確認した結果を第 2.1-1 表及び第 2.1-1 図に示す。

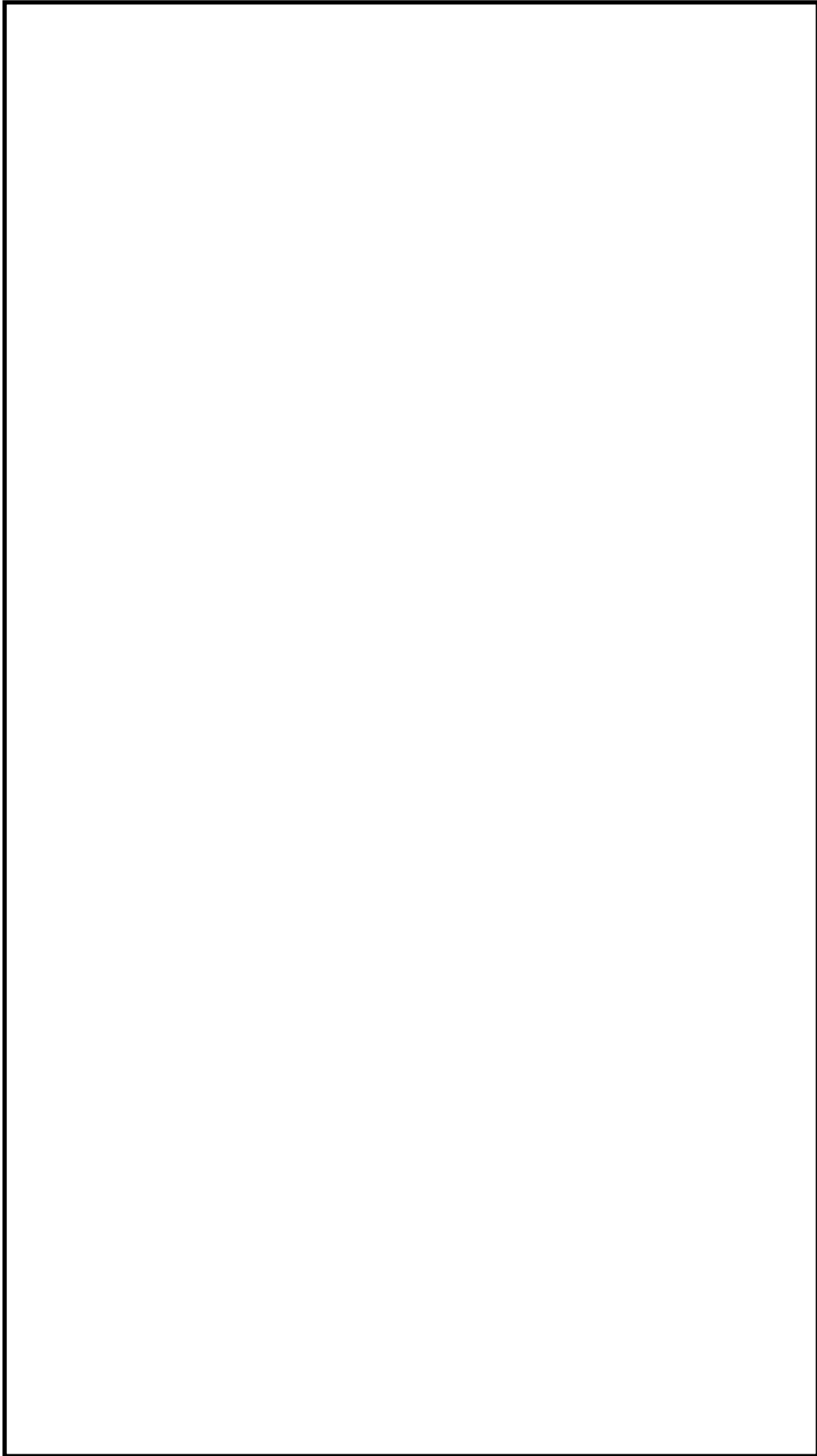
確認の結果、倒壊により竜巻防護施設及び竜巻防護施設を内包する施設を機能喪失させる可能性がある施設として、サービス建屋等の 3 施設を評価対象施設として抽出した。

上記以外の構築物、系統及び機器については、「高さ $H <$ 竜巻防護施設又は竜巻防護施設を内包する施設までの水平距離 L 」であることを確認し、評価対象施設とはならない。

第 2.1-1 表 機械的影響の観点の抽出結果

| 評価対象施設 | 近傍の竜巻防護施設及び竜巻防護施設を内包する施設 | 高さ H | 竜巻防護施設等 までの 水平距離 L | 波及的 影響の 有無 |
|-----------------|--|---------------|--------------------------|------------------|
| サービス建屋 | <ul style="list-style-type: none"> ・原子炉建屋 ・タービン建屋 | 約 19m | 隣接 | ○ |
| 海水ポンプ室 鋼製防護壁 | <ul style="list-style-type: none"> ・残留熱除去系海水系 ポンプ（配管，弁含む） ・残留熱除去系海水系 ストレーナ ・非常用ディーゼル発電機 海水ポンプ（配管，弁含む） ・非常用ディーゼル発電機 海水ストレーナ ・高圧炉心スプレイ系 ディーゼル発電機 海水ポンプ（配管，弁含む） ・高圧炉心スプレイ系 ディーゼル発電機 海水ストレーナ | 約 5m 約 17m | 隣接 | ○ |
| 排気筒 | <ul style="list-style-type: none"> ・原子炉建屋 ・タービン建屋 | 約 140m | 約 25m | ○* |

※ 排気筒は，竜巻防護施設として，構造健全性が維持される設計とすることにより，波及的影響を及ぼすことはない。



第2.1-1 図 竜巻防護施設及び竜巻防護施設を内包する施設に波及的影響を及ぼし得る施設の配置図

2.2 機能的影響の観点

機能的影響の観点から、発電所構内の構築物、系統及び機器のうち、竜巻による損傷により、竜巻防護施設の機能喪失させる可能性がある「屋外に設置されている竜巻防護施設の附属設備」を確認した結果を第2.2-1表に示す。

第2.2-1表 機能的影響の観点の抽出結果

| 設備名称 | 波及的影響の有無 |
|--------------------------------|----------|
| 非常用ディーゼル発電機排気消音器 | ○ |
| 高圧炉心スプレイ系ディーゼル発電機排気消音器 | ○ |
| 非常用ディーゼル発電機排気配管 | ○ |
| 非常用ディーゼル発電機燃料デイトンクベント管 | ○ |
| 非常用ディーゼル発電機機関ベント管 | ○ |
| 非常用ディーゼル発電機潤滑油サンプタンクベント管 | ○ |
| 高圧炉心スプレイ系ディーゼル発電機排気配管 | ○ |
| 高圧炉心スプレイ系ディーゼル発電機燃料デイトンクベント管 | ○ |
| 高圧炉心スプレイ系ディーゼル発電機機関ベント管 | ○ |
| 高圧炉心スプレイ系ディーゼル発電機潤滑油サンプタンクベント管 | ○ |
| 残留熱除去系海水系配管（放出側） | ○ |
| 非常用ディーゼル発電機海水配管（放出側） | ○ |
| 高圧炉心スプレイ系ディーゼル発電機海水配管（放出側） | ○ |

竜巻検討地域の設定について

1. 総観場に基づく気象条件

気象条件は、気象庁の総観場を基に、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「竜巻による原子力施設への影響に関する調査研究」⁽¹⁾等を参考に、低気圧、台風、停滞前線、局所性降雨、季節風、その他（高気圧等）の6つに分類した。

「竜巻等の突風データベース」⁽²⁾において1961年1月～2012年6月に発生位置が示された竜巻の発生位置を第1-1図に示す。さらに、それぞれの発生要因別に図示し、第1-2図～第1-7図に示す。

これらより、低気圧起因の竜巻は全国的に一様に発生していること、一方で、台風起因の竜巻は日本海側には発生しておらず、おおむね宮城県以南の太平洋側及び九州で発生していることがわかる。また、停滞前線起因の竜巻は北海道では発生していないこと、局所性降雨は内陸部での竜巻発生も促すこと、季節風や高気圧等の起因とされる竜巻の発生数は比較的少ないことがわかる。

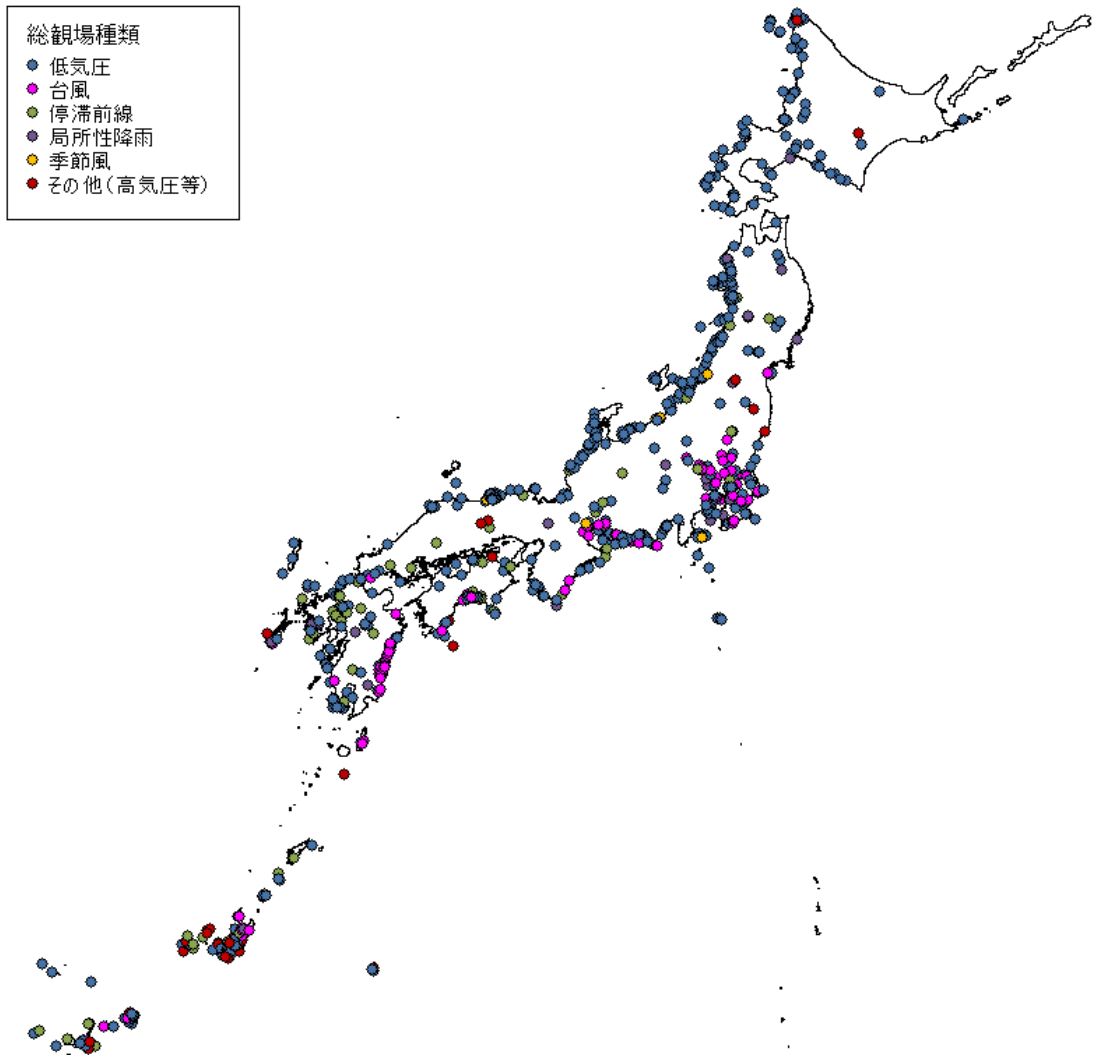
これらの特徴をさらに詳細に分析するために、各都道府県での要因別発生数及び発生要因比率を算定した結果を第1-8図に示す。同図では、近隣の地域との連続性を考慮し並べた。

都道府県別発生数について、太平洋側では沖縄県での発生数が多い。次に多いのは、南海沿いの高知県、宮崎県、鹿児島県である。千葉県、愛知県、静岡県なども比較的多い。日本海側では、北海道西部、新潟県、秋田県、鳥取県、石川県で多く発生している。

都道府県別発生要因について、全国的には低気圧起因の比率が多い。特に、日本海側、北海道西部及び南部では、ほとんどが低気圧起因である。台風起因については、太平洋側に偏っており、宮城県～沖縄県に至る太平洋岸の都道府県、関東平野内の都道府県、大分県、山口県、長崎県などで、台風起因の竜巻が発生している。

都道府県別発生要因の比率について、宮城県、埼玉県では台風起因の比率が60%を超える。また、茨城県、千葉県、栃木県、静岡県、愛知県、三重県で台風起因による竜巻が30%を超える。一方、日本海側、北海道、内陸の都道府県では、台風起因による竜巻はなく、低気圧起因による竜巻が多くを占める。

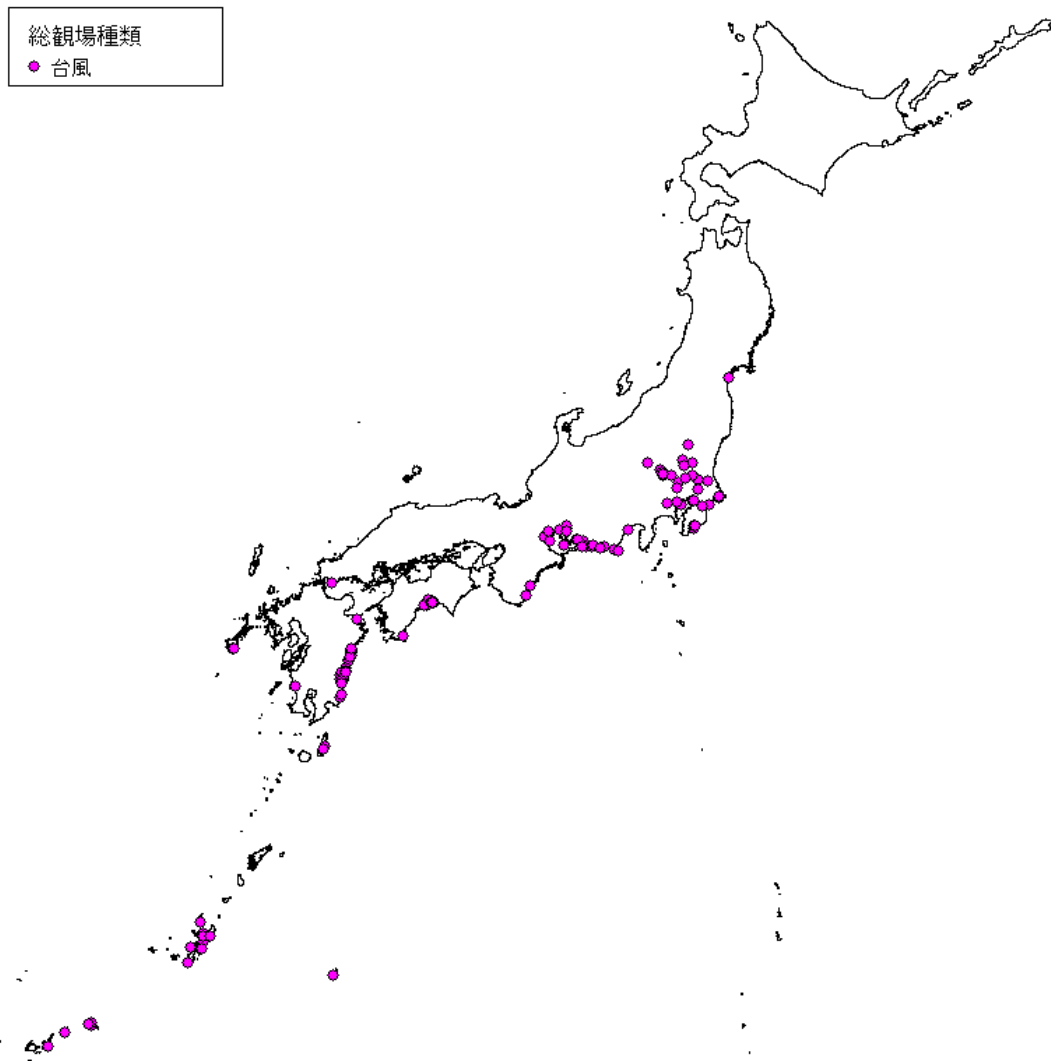
以上より、台風起因以外の竜巻については、地域性が見られない。台風起因の竜巻については、日本海側では発生しておらず、太平洋側の宮城県～沖縄県で多く発生している。



第1-1図 1961年1月～2012年6月に発生した竜巻の総観場の分布



第1-2図 1961年1月～2012年6月に発生した「低気圧」起因の
竜巻発生位置



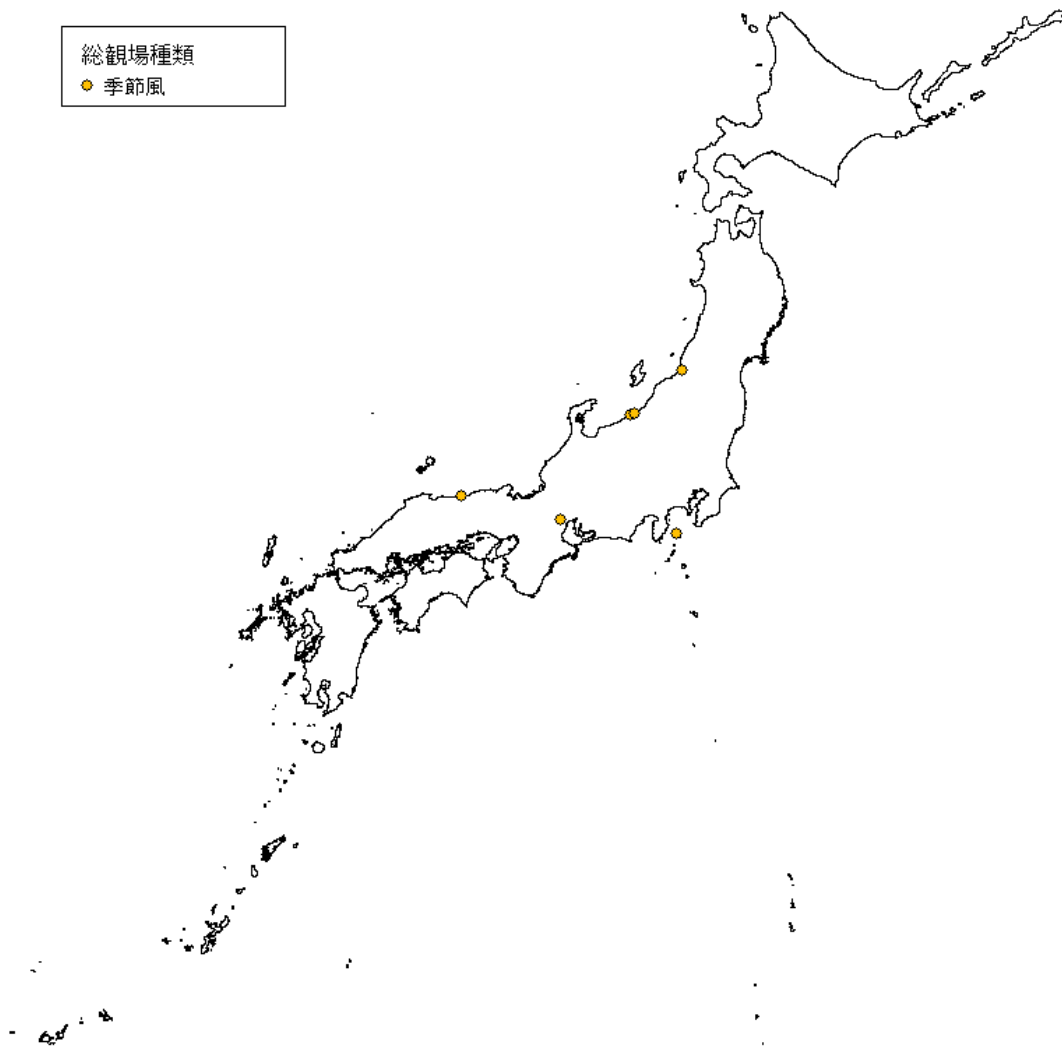
第1-3図 1961年1月～2012年6月に発生した「台風」起因の竜巻発生位置



第1-4図 1961年1月～2012年6月に発生した「停滞前線」起因の
竜巻発生位置



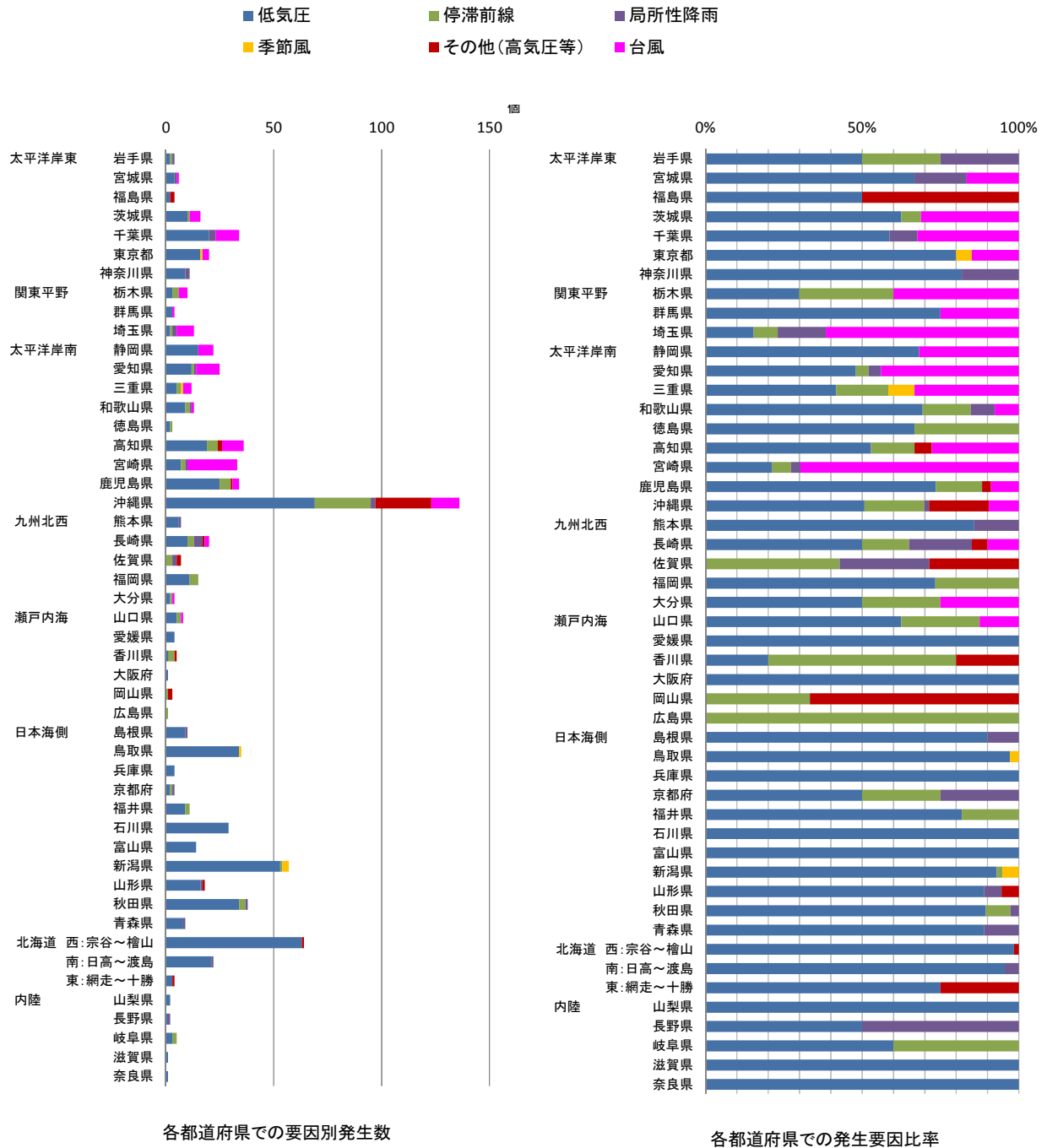
第1-5図 1961年1月～2012年6月に発生した「局所性降雨」起因の
竜巻発生位置



第 1-6 図 1961 年 1 月～2012 年 6 月に発生した「季節風」起因の
竜巻発生位置



第1-7図 1961年1月～2012年6月に発生した「その他(高気圧等)」起因の
竜巻発生位置



第1-8図 各都道府県での竜巻の要因別発生数と発生要因比率

2. 竜巻検討地域の設定

2.1 総観場の気象条件に基づく竜巻検討地域 TA_1

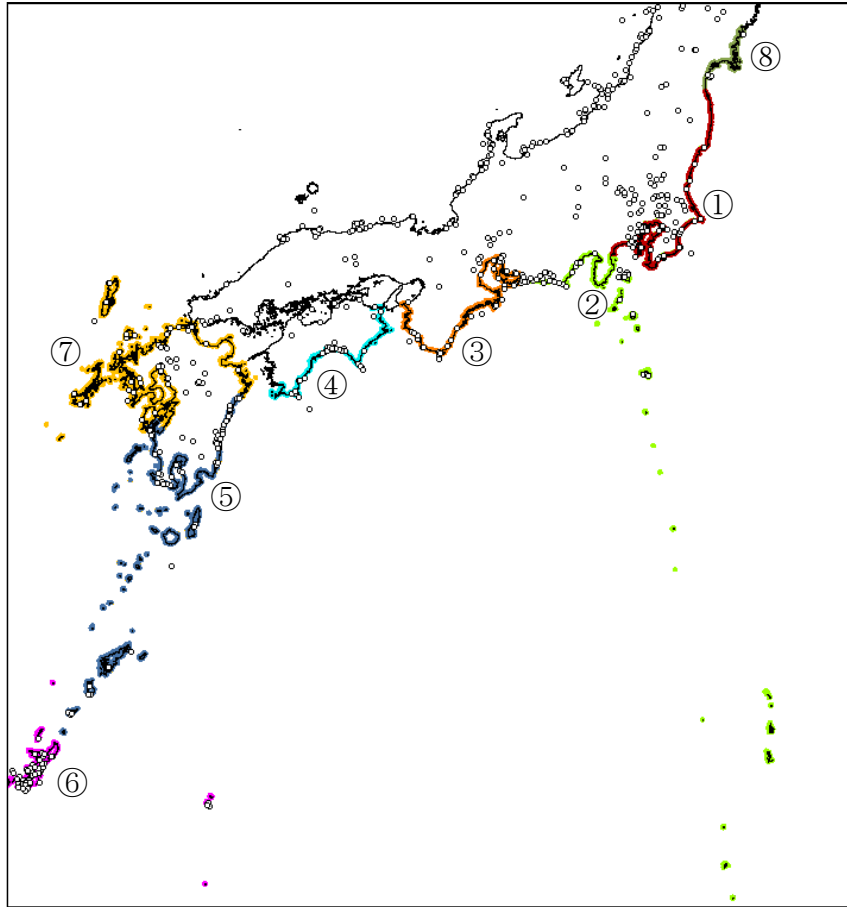
前記の総観場に基づく気象条件から、台風起因の竜巻は、太平洋側の宮城県～沖縄県で多く発生しており、この範囲に東海第二発電所が立地している。太平洋側の宮城県～沖縄県の海岸線より海側及び陸側各 5 km について、複数の竜巻検討地域 TA_1 の候補領域を想定し、各領域内での発生個数を調査し、単位面積当たりの発生数を比較する。

竜巻検討地域 TA_1 の候補の領域 8 ケース及び竜巻の個数と単位面積当たりの発生数の比較を第 2.1-1 図及び第 2.1-1 表に示す。

これより、もっとも単位面積当たりの発生数の大きい $TA_{1.6}$ を、総観場の気象条件に基づく竜巻検討地域 TA_1 とする。

総観場の気象条件に基づく竜巻検討地域 TA_1 :

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、宮崎県、鹿児島県、沖縄県の
海岸線より海側及び陸側各 5 km の地域 (約 57,000km²)



第 2.1-1 図 竜巻検討地域 T A₁ の検討領域

第 2.1-1 表 竜巻検討地域 T A₁ の候補毎の竜巻の個数と
単位面積当たり発生数

| 領域 | | 領域面積 (km ²) | 51.5 年間に 領域内で発 生した個数 | 単位面積当たり 発生数 (個/年/km ²) | |
|--------------------------|------------|----------------------------|----------------------------|--|-----------------|
| T A _{1.1} | ① | 福島県～神奈川県 | 7,900 | 40 | 0.98E-04 |
| T A _{1.2} | ①～② | 福島県～静岡県 | 15,700 | 68 | 0.84E-04 |
| T A _{1.3} | ①～③ | 福島県～和歌山県 | 23,400 | 104 | 0.86E-04 |
| T A _{1.4} | ①～④ | 福島県～高知県 | 28,600 | 138 | 0.94E-04 |
| T A _{1.5} | ①～⑤ | 福島県～鹿児島県 | 46,700 | 194 | 0.81E-04 |
| T A_{1.6} | ①～⑥ | 福島県～沖縄県 | 57,000 | 300 | 1.02E-04 |
| T A _{1.7} | ①～⑦ | 福島県～九州全県 | 79,700 | 337 | 0.82E-04 |
| T A _{1.8} | ①～⑥, ⑧ | 宮城県～沖縄県 | 59,700 | 302 | 0.98E-04 |

2.2 竜巻集中地域に基づく竜巻検討地域TA₂

「ガイド（案）及び解説」⁽³⁾では、19箇所の竜巻集中地域として、第2.2-1図を示している。東海第二発電所は、これらの竜巻集中地域のうち、⑰に立地している。これに基づき、近接地域の180km圏を考慮した上で、下記を竜巻検討地域TA₂とする。この地域は前記の第2.1-1図及び第2.1-1表で示したTA_{1.1}に相当する。

竜巻集中地域に基づく竜巻検討地域TA₂：

福島県，茨城県，千葉県，東京都，神奈川県の海岸線より海側及び陸側各5kmの地域（約7,900km²）



第2.2-1図 竜巻の発生する地点と竜巻が集中する19の地域

（「ガイド（案）及び解説」より引用）

2.3 竜巻検討地域 T A

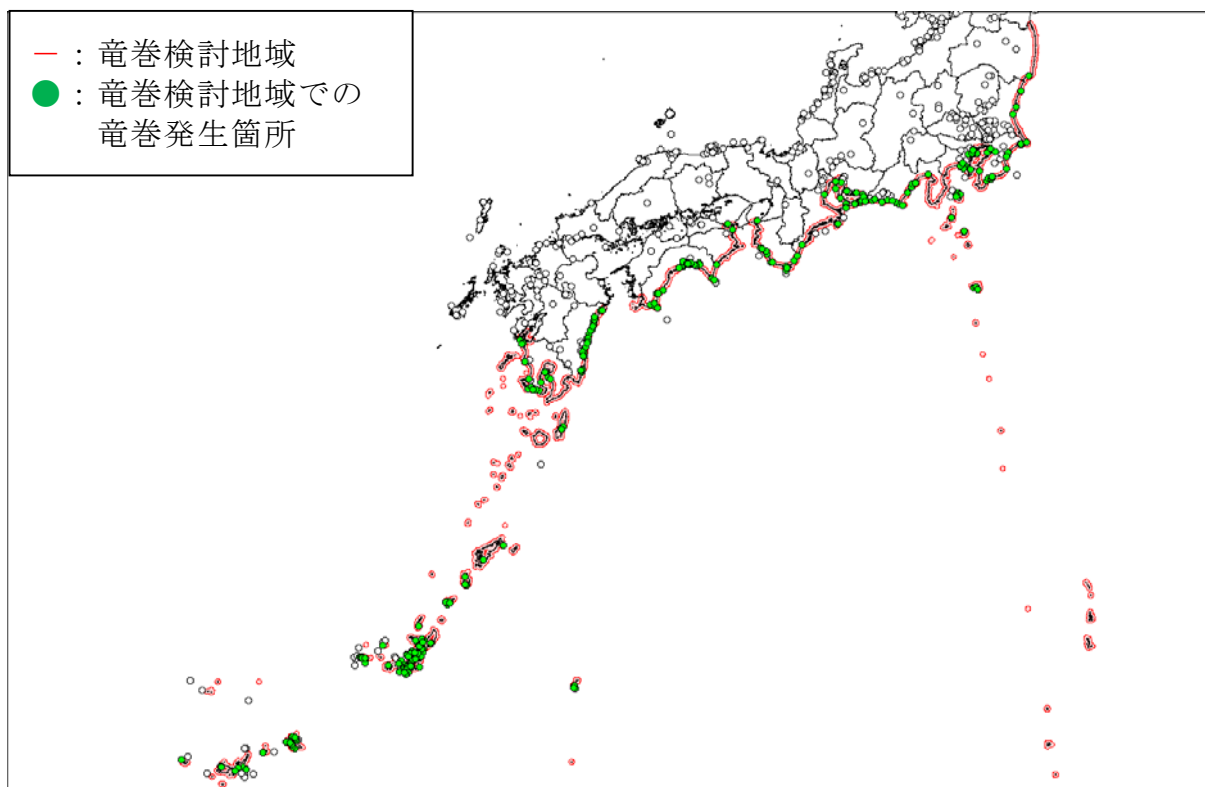
前記の竜巻検討地域 T A₁ 及び T A₂ について、1961 年 1 月～2012 年 6 月（51.5 年間）の「竜巻等の突風データベース」により発生が確認された竜巻の個数を調査し、単位面積当たりの発生数を算定する。その結果を第 2.3-1 表に示す。

ここで、竜巻検討地域内の竜巻の発生個数の評価は、地理情報システム（Map Info）を用い、発生地点と消滅地点を結ぶ線分が当該地域に掛かるか否かで判断した。

これより、竜巻の個数及び単位面積当たりの発生数の大きさから、T A₁ を竜巻検討地域 T A とする。第 2.3-1 図に竜巻検討地域 T A を示す。

第 2.3-1 表 竜巻検討地域内で発生が確認された竜巻の個数と
単位面積当たりの発生数

| | 領域面積 (km ²) | 51.5 年間に 領域内で発 生した個数 | 単位面積当たり発生数 (個/年/km ²) |
|-------------------------------------|----------------------------|----------------------------|--------------------------------------|
| 総観場の気象条件に基づく竜巻検討地域 T A ₁ | 57,000 | 300 | 1.02×10^{-4} |
| 竜巻集中地域に基づく竜巻検討地域 T A ₂ | 7,900 | 40 | 0.98×10^{-4} |



第 2.3-1 図 竜巻検討地域 T A

<参考文献>

- (1) 東京工芸大学 (2011) : 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
- (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>)
- (3) 井上博登, 福西史郎, 鈴木哲夫 (2013): 原子力発電所の竜巻影響評価ガイド (案) 及び解説, 独立行政法人原子力安全基盤機構, JNES-RE-2013-9009.

【参考】 竜巻検討地域 T A において発生した竜巻について

気象庁「竜巻等の突風データベース」をもとに、竜巻検討地域において、1961年から2012年6月に発生した竜巻の一覧を示す。

| No. | 現象 区別 | 発生日時 | 発生場所 | | | 藤田 スケール | 総観場 |
|-------|----------|-------------------|-----------|------------|-----------------|------------|---------------------------|
| | | | 緯度 | 経度 | 市町村 | | |
| F3 相当 | | | | | | | |
| 1 | 竜巻 | 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 | F3 | 台風 |
| 2 | 竜巻 | 1990年02月19日15時15分 | 31度15分38秒 | 130度16分35秒 | 鹿児島県 枕崎市 | F2~F3 | 寒冷前線 暖気の移流 その他(低気圧) |
| 3 | 竜巻 | 1978年02月28日21時20分 | 35度32分1秒 | 139度41分50秒 | 神奈川県 川崎市 | F2~F3 | 寒冷前線 暖気の移流 |
| 4 | 竜巻 | 1969年12月07日18時00分 | 34度45分4秒 | 137度22分46秒 | 愛知県 豊橋市 | F2~F3 | 二つ玉低気圧 |
| 5 | 竜巻 | 1968年09月24日19時05分 | 32度7分16秒 | 131度32分8秒 | 宮城県 高鍋町 | F2~F3 | 台風 |
| 6 | 竜巻 | 1967年10月28日03時12分 | 35度42分3秒 | 140度43分10秒 | 千葉県 飯岡町 | F2~F3 | 台風 |
| F2 相当 | | | | | | | |
| 7 | 竜巻 | 2011年11月18日19時10分 | 27度49分44秒 | 128度55分58秒 | 鹿児島県 大島郡徳之島町 | F2 | 停滞前線 暖気の移流 |
| 8 | 竜巻 | 2006年11月18日12時47分 | 26度31分18秒 | 128度2分42秒 | 沖縄県 名護市 | F2 | 停滞前線 |

| No. | 現象 区別 | 発生日時 | 発生場所 | | | | 藤田 スケール | 総観場 |
|-----|----------|-------------------|-----------|------------|------|---------|------------|---------------|
| | | | 緯度 | 経度 | 都道府県 | 市町村 | | |
| 9 | 竜巻 | 2006年09月17日14時03分 | 32度32分39秒 | 131度41分1秒 | 宮崎県 | 延岡市 | 台風 | |
| 10 | 竜巻 | 2006年03月28日16時00分 | 33度25分0秒 | 135度45分0秒 | 和歌山県 | 串本町 | 日本海低気圧 | 寒冷前線 |
| 11 | 竜巻 | 2004年09月30日03時07分 | 35度31分59秒 | 139度47分41秒 | 東京都 | 大田区 | 台風 | |
| 12 | 竜巻 | 2002年04月03日07時50分 | 26度22分30秒 | 127度48分10秒 | 沖縄県 | 沖縄市 | 東シベ低気圧 | 気圧の谷 暖気の移流 |
| 13 | 竜巻 | 2000年09月11日17時55分 | 34度43分12秒 | 136度53分35秒 | 愛知県 | 南知多町 | 台風 | 停滞前線 |
| 14 | 竜巻 | 1999年09月24日12時10分 | 34度47分45秒 | 137度21分54秒 | 愛知県 | 小坂井町 | 台風 | |
| 15 | 竜巻 | 1998年02月17日02時30分 | 26度22分53秒 | 126度44分45秒 | 沖縄県 | 久米島県志川村 | 停滞前線 | |
| 16 | 竜巻 | 1997年03月29日12時00分 | 26度6分1秒 | 127度39分34秒 | 沖縄県 | 糸満市 | 寒冷前線 | |
| 17 | 竜巻 | 1996年07月05日14時40分 | 35度33分27秒 | 140度10分28秒 | 千葉県 | 千葉市 | 日本海低気圧 | 温暖前線 |
| 18 | 竜巻 | 1994年08月20日10時18分 | 24度48分34秒 | 125度13分4秒 | 沖縄県 | 伊良部町 | 台風 | |
| 19 | 竜巻 | 1993年09月03日20時22分 | 33度28分48秒 | 133度31分33秒 | 高知県 | 吾川郡春野町 | 台風 | |
| 20 | 竜巻 | 1991年04月07日00時05分 | 26度20分48秒 | 126度44分48秒 | 沖縄県 | 島尻郡県志川村 | 暖気の移流 | 寒冷前線 |

| No. | 現象 区別 | 発生日時 | 発生場所 | | | | 藤田 スケール | 総観場 |
|-----|----------|-------------------|-----------|------------|------|---------|----------------------|-----|
| | | | 緯度 | 経度 | 都道府県 | 市町村 | | |
| 21 | 竜巻 | 1991年04月07日00時03分 | 26度20分46秒 | 126度44分22秒 | 沖縄県 | 島尻郡具志川村 | 暖気の移流 寒冷前線 | |
| 22 | 竜巻 | 1990年12月11日17時47分 | 35度5分14秒 | 140度2分10秒 | 千葉県 | 鴨川市 | 暖気の移流 気圧の谷 雷雨(熱雷を除く) | |
| 23 | 竜巻 | 1990年04月03日22時15分 | 26度27分23秒 | 127度51分52秒 | 沖縄県 | 国頭郡金武町 | 寒冷前線 | |
| 24 | 竜巻 | 1989年07月04日16時15分 | 26度18分50秒 | 127度50分6秒 | 沖縄県 | 沖縄市 | 停滞前線 暖気の移流 | |
| 25 | 竜巻 | 1987年01月05日07時55分 | 26度19分43秒 | 127度52分13秒 | 沖縄県 | 勝連町 | 寒冷前線 | |
| 26 | 竜巻 | 1985年09月28日13時55分 | 31度17分3秒 | 130度20分20秒 | 鹿児島県 | 枕崎市 | 東シベ低気圧 | |
| 27 | 竜巻 | 1985年08月31日05時30分 | 32度23分39秒 | 131度38分14秒 | 宮崎県 | 日向市 | 台風 暖気の移流 | |
| 28 | 竜巻 | 1983年09月25日15時00分 | 26度55分34秒 | 127度56分53秒 | 沖縄県 | 伊是名村 | 台風 | |
| 29 | 竜巻 | 1979年05月27日12時25分 | 36度14分50秒 | 140度33分0秒 | 茨城県 | 鹿島郡旭村 | 気圧の谷 寒気の移流 雷雨(熱雷を除く) | |
| 30 | 竜巻 | 1975年02月15日16時20分 | 34度45分10秒 | 139度21分13秒 | 東京都 | 大島町 | 季節風 寒気の移流 | |
| 31 | 竜巻 | 1975年02月06日07時00分 | 27度41分20秒 | 128度55分18秒 | 鹿児島県 | 大島郡伊仙町 | 南岸低気圧 | |
| 32 | 竜巻 | 1974年07月08日03時30分 | 34度37分24秒 | 138度8分7秒 | 静岡県 | 小笠原郡浜岡町 | 台風 梅雨前線 | |

| No. | 現象 区別 | 発生日時 | 発生場所 | | | | 藤田 スケール | 総観場 |
|-----|----------|-------------------|-----------|------------|------|-----|-----------------|-----|
| | | | 緯度 | 経度 | 都道府県 | 市町村 | | |
| 33 | 竜巻 | 1974年07月06日16時40分 | 33度32分4秒 | 133度38分30秒 | 高知県 | 南国市 | 台風 暖気の移流 | |
| 34 | 竜巻 | 1972年06月06日20時30分 | 26度5分30秒 | 127度41分48秒 | 沖縄県 | 糸満市 | 東シベ低気圧 暖気の移流 | |
| 35 | 竜巻 | 1971年08月31日09時00分 | 35度37分14秒 | 140度5分3秒 | 千葉県 | 千葉市 | 台風 | |
| 36 | 竜巻 | 1969年08月23日10時15分 | 35度5分48秒 | 140度6分29秒 | 千葉県 | 鴨川町 | 台風 | |
| 37 | 竜巻 | 1968年09月24日19時20分 | 32度6分44秒 | 131度31分52秒 | 宮崎県 | 高鍋町 | 台風 | |
| 38 | 竜巻 | 1968年09月24日17時25分 | 32度5分16秒 | 131度31分16秒 | 宮崎県 | 高鍋町 | 台風 | |
| 39 | 竜巻 | 1968年08月28日12時30分 | 33度32分0秒 | 133度39分0秒 | 高知県 | 南国市 | 台風 | |
| 40 | 竜巻 | 1967年10月28日02時05分 | 35度7分6秒 | 140度7分22秒 | 千葉県 | 鴨川町 | 台風 | |
| 41 | 竜巻 | 1967年03月23日15時04分 | 35度43分50秒 | 140度50分6秒 | 千葉県 | 銚子市 | 寒冷前線 | |
| 42 | 竜巻 | 1965年10月14日21時40分 | 35度35分20秒 | 139度42分40秒 | 東京都 | 大田区 | 温暖前線 | |
| 43 | 竜巻 | 1964年01月17日15時40分 | 33度4分2秒 | 139度48分26秒 | 東京都 | 八丈町 | 南岸低気圧 | |
| 44 | 竜巻 | 1962年12月30日08時25分 | 34度39分7秒 | 138度4分21秒 | 静岡県 | 千浜村 | 二つ玉低気圧 温暖前線 | |

| No. | 現象 区別 | 発生日時 | 発生場所 | | | | 藤田 スケール | 総観場 |
|------|----------|-------------------|-----------|------------|------|----------|-------------------------------|-----|
| | | | 緯度 | 経度 | 都道府県 | 市町村 | | |
| 45 | 竜巻 | 1962年08月26日08時25分 | 34度35分43秒 | 138度13分29秒 | 静岡県 | 榛原郡御前崎町 | 台風 F1～F2 | |
| 46 | 竜巻 | 1962年08月26日04時00分 | 34度38分49秒 | 137度46分34秒 | 静岡県 | 浜松市 | 台風 F2 | |
| 47 | 竜巻 | 1962年07月02日14時30分 | 35度56分50秒 | 140度30分20秒 | 茨城県 | 稲敷郡東村 | 温暖前線 梅雨前線 局地性じょう乱 F2 | |
| F1相当 | | | | | | | | |
| 48 | 竜巻 | 2011年05月28日05時00分 | 24度22分21秒 | 124度12分54秒 | 沖縄県 | 石垣市 | 台風 F1 | |
| 49 | 竜巻 | 2010年12月03日07時30分 | 35度18分16秒 | 139度33分4秒 | 神奈川県 | 鎌倉市 | 日本海低気圧 暖気の移流 F0～F1 | |
| 50 | 竜巻 | 2009年10月08日04時30分 | 35度32分42秒 | 140度27分43秒 | 千葉県 | 山武郡九十九里町 | 台風 暖気の移流 F1 | |
| 51 | 竜巻 | 2008年12月05日15時30分 | 35度36分28秒 | 139度42分37秒 | 東京都 | 品川区 | 寒冷前線 F1 | |
| 52 | 竜巻 | 2008年10月24日02時30分 | 34度15分5秒 | 136度49分44秒 | 三重県 | 志摩市 | 南岸低気圧 F1 | |
| 53 | 竜巻 | 2008年10月07日14時30分 | 26度35分41秒 | 127度57分31秒 | 沖縄県 | 名護市 | 停滞前線 F0～F1 | |
| 54 | 竜巻 | 2008年03月27日19時00分 | 31度27分51秒 | 130度41分52秒 | 鹿児島県 | 垂水市 | 東シベ低気圧 F1 | |
| 55 | 竜巻 | 2008年03月27日17時20分 | 31度45分23秒 | 130度11分54秒 | 鹿児島県 | いちき串木野市 | 東シベ低気圧 F1 | |

| No. | 現象 区別 | 発生日時 | 発生場所 | | | | 藤田 スケール | 総観場 |
|-----|----------|-------------------|-----------|------------|------|---------|-------------------|-------|
| | | | 緯度 | 経度 | 都道府県 | 市町村 | | |
| 56 | 竜巻 | 2007年04月18日07時55分 | 24度44分21秒 | 125度15分48秒 | 沖縄県 | 宮古島市 | F1 寒冷前線 | |
| 57 | 竜巻 | 2007年03月15日14時55分 | 26度21分50秒 | 127度44分22秒 | 沖縄県 | 中頭郡読谷村 | F1 気圧の谷 | 暖気の移流 |
| 58 | 竜巻 | 2007年02月14日15時40分 | 33度48分53秒 | 135度12分8秒 | 和歌山県 | 日高郡印南町 | F1 日本海低気圧 | 寒冷前線 |
| 59 | 竜巻 | 2007年02月14日06時20分 | 26度13分30秒 | 127度18分12秒 | 沖縄県 | 島尻郡座間味村 | F0~F1 寒冷前線 | 暖気の移流 |
| 60 | 竜巻 | 2006年11月26日15時35分 | 32度47分5秒 | 132度51分31秒 | 高知県 | 土佐清水市 | F1 南岸低気圧 | 暖気の移流 |
| 61 | 竜巻 | 2006年11月22日13時00分 | 26度37分48秒 | 128度12分54秒 | 沖縄県 | 東村 | F1 停滞前線 | 暖気の移流 |
| 62 | 竜巻 | 2006年09月17日13時30分 | 32度20分17秒 | 131度37分10秒 | 宮崎県 | 日向市 | F1 台風 | |
| 63 | 竜巻 | 2006年09月17日12時10分 | 31度34分15秒 | 131度24分8秒 | 宮崎県 | 日南市 | F1 台風 | |
| 64 | 竜巻 | 2006年04月20日12時10分 | 35度21分15秒 | 139度28分50秒 | 神奈川県 | 藤沢市 | F1 寒冷前線 | |
| 65 | 竜巻 | 2006年01月19日19時10分 | 28度8分35秒 | 129度18分56秒 | 鹿児島県 | 瀬戸内町 | F1 停滞前線 | |
| 66 | 竜巻 | 2005年09月05日10時10分 | 31度56分25秒 | 131度27分29秒 | 宮崎県 | 宮崎市 | F1 台風 | |
| 67 | 竜巻 | 2005年05月01日15時00分 | 33度33分45秒 | 133度36分20秒 | 高知県 | 高知市 | F0~F1 その他(低気圧) | 暖気の移流 |

| No. | 現象 区別 | 発生日時 | 発生場所 | | | | 藤田 スケール | 総観場 |
|-----|----------|-------------------|-----------|------------|------|---------|------------|------------------------------|
| | | | 緯度 | 経度 | 都道府県 | 市町村 | | |
| 68 | 竜巻 | 2005年01月27日17時00分 | 26度21分53秒 | 127度44分16秒 | 沖縄県 | 読谷村 | F1 | 寒冷前線 暖気の移流 |
| 69 | 竜巻 | 2004年09月29日23時01分 | 34度40分30秒 | 137度27分0秒 | 愛知県 | 豊橋市 | F0~F1 | 台風 |
| 70 | 竜巻 | 2004年09月27日20時50分 | 26度41分44秒 | 128度1分10秒 | 沖縄県 | 今帰仁村 | F1 | 台風 |
| 71 | 竜巻 | 2004年09月27日20時30分 | 26度31分11秒 | 128度1分7秒 | 沖縄県 | 名護市 | F1 | 台風 |
| 72 | 竜巻 | 2003年10月12日10時00分 | 33度30分0秒 | 133度50分0秒 | 高知県 | 安芸市 | F0~F1 | 停滞前線 暖気の移流 |
| 73 | 竜巻 | 2003年09月12日13時00分 | 33度29分29秒 | 133度33分34秒 | 高知県 | 高知市 | F1 | 台風 暖気の移流 |
| 74 | 竜巻 | 2003年08月08日07時20分 | 32度19分3秒 | 131度35分52秒 | 宮崎県 | 日向市 | F0~F1 | 台風 |
| 75 | 竜巻 | 2003年08月08日01時40分 | 31度36分36秒 | 131度25分37秒 | 宮崎県 | 日南市 | F0~F1 | 台風 |
| 76 | 竜巻 | 2003年06月19日09時00分 | 32度28分32秒 | 131度39分29秒 | 宮崎県 | 東臼杵郡門川町 | F1 | 台風 |
| 77 | 竜巻 | 2002年12月16日18時10分 | 33度16分14秒 | 134度9分40秒 | 高知県 | 室戸市 | F0~F1 | 日本海低気圧 暖気の移流 |
| 78 | 竜巻 | 2002年10月07日03時50分 | 35度14分40秒 | 139度39分50秒 | 神奈川県 | 横須賀市 | F1 | 日本海低気圧 雷雨(熱雷を除く) 暖気の移流 |
| 79 | 竜巻 | 2002年10月07日03時05分 | 34度47分1秒 | 139度21分11秒 | 東京都 | 大島町 | F1 | 日本海低気圧 |

| No. | 現象 区別 | 発生日時 | 発生場所 | | | | 藤田 スケール | 総観場 |
|-----|------------------|-------------------|-----------|------------|------|--------|------------|-------------------|
| | | | 緯度 | 経度 | 都道府県 | 市町村 | | |
| 80 | 竜巻または ダウンバースト | 2002年10月06日22時38分 | 34度43分13秒 | 136度53分46秒 | 愛知県 | 南知多町 | F1 | 二つ玉低気圧 |
| 81 | 竜巻 | 2002年10月06日14時50分 | 31度33分38秒 | 130度37分11秒 | 鹿児島県 | 鹿児島市 | F1 | 寒冷前線 |
| 82 | 竜巻 | 2002年01月21日12時15分 | 34度38分57秒 | 137度19分36秒 | 愛知県 | 田原町 | F1 | 二つ玉低気圧 温暖前線 暖気の移流 |
| 83 | 竜巻 | 2001年10月01日07時00分 | 33度45分36秒 | 135度18分50秒 | 和歌山県 | 南部町 | F0～F1 | 日本海低気圧 暖気の移流 |
| 84 | 竜巻 | 2000年12月25日13時37分 | 34度45分00秒 | 139度17分30秒 | 東京都 | 大島町 | F1 | 寒気の移流 |
| 85 | 竜巻 | 2000年09月11日08時10分 | 33度40分33秒 | 135度58分23秒 | 和歌山県 | 新宮市 | F0～F1 | 台風 停滞前線 暖気の移流 |
| 86 | 竜巻 | 1999年11月15日05時07分 | 32度59分12秒 | 132度59分51秒 | 高知県 | 大方町 | F0～F1 | 日本海低気圧 寒気の移流 |
| 87 | 竜巻 | 1999年11月01日07時00分 | 34度50分36秒 | 137度1分59秒 | 愛知県 | 西尾市 | F1 | 日本海低気圧 |
| 88 | 竜巻 | 1999年10月27日21時00分 | 36度39分54秒 | 140度42分59秒 | 茨城県 | 多賀郡十王町 | F1 | 南岸低気圧 |
| 89 | 竜巻 | 1999年09月24日12時51分 | 35度1分16秒 | 136度47分45秒 | 愛知県 | 海部郡弥富町 | F1 | 台風 |
| 90 | 竜巻 | 1999年09月24日11時56分 | 34度49分24秒 | 137度13分7秒 | 愛知県 | 湍田市 | F1 | 台風 |
| 91 | 竜巻 | 1999年09月24日03時00分 | 33度31分27秒 | 133度37分17秒 | 高知県 | 南国市 | F1 | 台風 暖気の移流 |

| No. | 現象 区別 | 発生日時 | 発生場所 | | | | 藤田 スケール | 総観場 |
|-----|----------|-------------------|-----------|------------|------|---------|------------|---------------|
| | | | 緯度 | 経度 | 都道府県 | 市町村 | | |
| 92 | 竜巻 | 1999年05月04日09時50分 | 34度37分5秒 | 137度12分46秒 | 愛知県 | 渥美郡赤羽根町 | F1 | 日本海低気圧 |
| 93 | 竜巻 | 1999年04月10日16時00分 | 33度31分1秒 | 133度48分5秒 | 高知県 | 芸西村 | F1 | その他(低気圧) 気圧の谷 |
| 94 | 竜巻 | 1998年10月17日14時50分 | 32度10分10秒 | 131度32分0秒 | 宮崎県 | 児湯郡川南町 | F0~F1 | 台風 |
| 95 | 竜巻 | 1998年09月18日16時02分 | 31度54分29秒 | 131度27分3秒 | 宮崎県 | 宮崎市 | F1 | 台風 |
| 96 | 竜巻 | 1998年02月19日23時43分 | 25度49分1秒 | 131度13分45秒 | 沖縄県 | 南大東村 | F1 | その他(低気圧) |
| 97 | 竜巻 | 1997年11月17日08時00分 | 33度6分0秒 | 139度46分40秒 | 東京都 | 八丈町 | F1 | 温暖前線 暖気の移流 |
| 98 | 竜巻 | 1997年09月16日13時19分 | 33度32分50秒 | 133度40分27秒 | 高知県 | 南国市 | F1 | 台風 暖気の移流 |
| 99 | 竜巻 | 1997年09月14日06時50分 | 30度33分13秒 | 131度0分20秒 | 鹿児島県 | 熊毛郡中種子町 | F1 | 台風 |
| 100 | 竜巻 | 1997年04月07日17時20分 | 35度31分6秒 | 139度36分50秒 | 神奈川県 | 横浜市 | F0~F1 | 雷雨(熱雷を除く) |
| 101 | 竜巻 | 1996年07月01日06時10分 | 31度22分28秒 | 130度32分27秒 | 鹿児島県 | 喜入町 | F1 | 停滞前線 |
| 102 | 竜巻 | 1996年03月30日05時30分 | 31度15分10秒 | 130度21分52秒 | 鹿児島県 | 枕崎市 | F1 | 寒冷前線 日本海低気圧 |
| 103 | 竜巻 | 1995年09月23日09時05分 | 26度23分9秒 | 127度59分42秒 | 沖縄県 | 与那城町 | F1 | 台風 |

| No. | 現象 区別 | 発生日時 | 発生場所 | | | | 藤田 スケール | 総観場 |
|-----|----------|-------------------|-----------|------------|------|--------|------------|--------------|
| | | | 緯度 | 経度 | 都道府県 | 市町村 | | |
| 104 | 竜巻 | 1994年10月12日10時22分 | 33度31分11秒 | 133度47分22秒 | 高知県 | 芸西村 | F0~F1 | 日本海低気圧 暖気の移流 |
| 105 | 竜巻 | 1994年09月29日19時00分 | 34度40分56秒 | 137度34分8秒 | 静岡県 | 新居町 | F0~F1 | 台風 |
| 106 | 竜巻 | 1994年09月29日17時35分 | 34度48分57秒 | 137度14分8秒 | 愛知県 | 蒲郡市 | F1 | 台風 |
| 107 | 竜巻 | 1994年09月29日17時30分 | 34度40分50秒 | 137度21分30秒 | 愛知県 | 豊橋市 | F1 | 台風 |
| 108 | 竜巻 | 1994年03月23日02時00分 | 27度40分14秒 | 128度58分4秒 | 鹿児島県 | 大島郡伊仙町 | F0~F1 | その他(低気圧) |
| 109 | 竜巻 | 1993年12月01日01時10分 | 31度26分28秒 | 130度44分21秒 | 鹿児島県 | 垂水市 | F1 | 寒冷前線 |
| 110 | 竜巻 | 1993年12月01日00時30分 | 31度15分5秒 | 130度26分26秒 | 鹿児島県 | 指宿郡穎娃町 | F1 | 寒冷前線 暖気の移流 |
| 111 | 竜巻 | 1993年09月03日15時45分 | 32度30分31秒 | 131度40分30秒 | 宮崎県 | 延岡市 | F0~F1 | 台風 |
| 112 | 竜巻 | 1993年09月03日13時00分 | 32度49分23秒 | 132度56分45秒 | 高知県 | 土佐清水市 | F1 | 台風 |
| 113 | 竜巻 | 1993年05月27日01時50分 | 26度13分56秒 | 127度45分8秒 | 沖縄県 | 西原町 | F1 | 梅雨前線 |
| 114 | 竜巻 | 1992年09月22日10時00分 | 26度38分0秒 | 128度2分6秒 | 沖縄県 | 名護市 | F1 | 台風 |
| 115 | 竜巻 | 1992年02月15日09時25分 | 26度21分36秒 | 126度43分31秒 | 沖縄県 | 島尻郡志川村 | F1 | 寒冷前線 |

| No. | 現象 区別 | 発生日時 | 発生場所 | | | | 藤田 スケール | 総観場 |
|-----|-----------------|-------------------|-----------|------------|------|---------|-------------------|-----|
| | | | 緯度 | 経度 | 都道府県 | 市町村 | | |
| 116 | 竜巻 | 1992年01月06日03時30分 | 27度22分7秒 | 128度31分47秒 | 鹿児島県 | 大島郡知名町 | 東シベ低気圧 寒冷前線 暖気の移流 | |
| 117 | 竜巻 | 1991年11月28日16時30分 | 33度33分30秒 | 135度26分50秒 | 和歌山県 | 日置川町 | 南岸低気圧 | |
| 118 | 竜巻 | 1991年11月28日11時45分 | 31度35分58秒 | 131度22分51秒 | 宮崎県 | 日南市 | 南岸低気圧 | |
| 119 | 竜巻 | 1991年02月13日22時27分 | 26度11分52秒 | 127度41分4秒 | 沖縄県 | 那覇市 | 東シベ低気圧 暖気の移流 | |
| 120 | 竜巻 | 1990年12月12日00時20分 | 36度22分50秒 | 140度37分40秒 | 茨城県 | 海上～那珂湊市 | 寒気の移流 局地性じょう乱 その他 | |
| 121 | 竜巻 | 1990年03月12日06時30分 | 34度15分23秒 | 136度50分34秒 | 三重県 | 志摩郡志摩町 | 日本海低気圧 寒冷前線 | |
| 122 | 竜巻 | 1989年09月22日14時00分 | 34度19分0秒 | 135度8分0秒 | 大阪府 | 泉南郡岬町 | 寒冷前線 | |
| 123 | 竜巻 | 1988年09月25日09時40分 | 33度27分22秒 | 135度45分29秒 | 和歌山県 | 串本町 | 寒冷前線 暖気の移流 | |
| 124 | 竜巻 | 1986年12月19日01時30分 | 34度36分45秒 | 137度12分15秒 | 愛知県 | 渥美郡赤羽根町 | 閉塞前線 | |
| 125 | 竜巻 | 1985年10月05日18時45分 | 33度34分6秒 | 133度33分40秒 | 高知県 | 高知市 | 台風 大陸高気圧 暖気の移流 | |
| 126 | 竜巻 | 1985年10月05日18時40分 | 33度27分22秒 | 133度28分17秒 | 高知県 | 土佐市 | 台風 太平洋高気圧 暖気の移流 | |
| 127 | 竜巻または ターンの暴風 | 1983年09月25日15時30分 | 26度37分48秒 | 128度11分59秒 | 沖縄県 | 東村 | 台風 | |

| No. | 現象 区別 | 発生日時 | 発生場所 | | | | 藤田 スケール | 総観場 |
|-----|----------|-------------------|-----------|------------|------|--------|------------|--------------|
| | | | 緯度 | 経度 | 都道府県 | 市町村 | | |
| 128 | 竜巻 | 1983年03月12日06時20分 | 26度5分33秒 | 127度41分5秒 | 沖縄県 | 糸満市 | F1 | 東シベ低気圧 その他 |
| 129 | 竜巻 | 1980年10月14日02時15分 | 32度0分51秒 | 131度29分11秒 | 宮崎県 | 宮崎市 | F1 | 台風 |
| 130 | 竜巻 | 1980年10月14日01時30分 | 31度50分46秒 | 131度26分50秒 | 宮崎県 | 宮崎市 | F1 | 台風 |
| 131 | 竜巻 | 1980年10月13日20時10分 | 30度30分35秒 | 130度58分39秒 | 鹿児島県 | 中種子町 | F1 | 台風 |
| 132 | 竜巻 | 1979年09月03日16時29分 | 31度55分20秒 | 131度25分10秒 | 宮崎県 | 宮崎市 | F1 | 台風 |
| 133 | 竜巻 | 1978年02月10日05時30分 | 31度25分49秒 | 130度16分40秒 | 鹿児島県 | 加世田市 | F1 | 寒冷前線 暖気の移流 |
| 134 | 竜巻 | 1976年10月23日07時20分 | 26度11分6秒 | 127度43分2秒 | 沖縄県 | 南風原村 | F1 | 東シベ低気圧 暖気の移流 |
| 135 | 竜巻 | 1976年02月28日14時00分 | 32度5分8秒 | 130度10分20秒 | 鹿児島県 | 阿久根市 | F1 | 不安定線 |
| 136 | 竜巻 | 1975年11月15日18時15分 | 35度28分51秒 | 140度25分6秒 | 千葉県 | 大網白里町 | F1 | 南岸低気圧 |
| 137 | 竜巻 | 1975年11月15日16時22分 | 34度7分5秒 | 139度30分56秒 | 東京都 | 三宅島三宅村 | F1 | 南岸低気圧 温暖前線 |
| 138 | 竜巻 | 1975年11月14日20時40分 | 33度30分28秒 | 134度16分28秒 | 高知県 | 安芸郡東洋町 | F1 | 南岸低気圧 温暖前線 |
| 139 | 竜巻 | 1975年08月22日14時30分 | 33度52分32秒 | 136度5分10秒 | 三重県 | 熊野市 | F1 | 台風 |

| No. | 現象 区別 | 発生日時 | 発生場所 | | | | 藤田 スケール | 総観場 |
|------|----------|-------------------|-----------|------------|------|---------|------------|-----|
| | | | 緯度 | 経度 | 都道府県 | 市町村 | | |
| 140 | 竜巻 | 1974年07月08日03時00分 | 34度41分18秒 | 137度53分20秒 | 静岡県 | 磐田郡福田町 | 台風 停滞前線 | |
| 141 | 竜巻 | 1974年06月06日12時50分 | 34度59分14秒 | 138度25分37秒 | 静岡県 | 静岡市 | 気圧の谷 | |
| 142 | 竜巻 | 1974年03月13日13時20分 | 36度56分52秒 | 140度53分52秒 | 福島県 | いわき市 | 移動性高気圧 | |
| 143 | 竜巻 | 1972年06月06日23時30分 | 27度21分30秒 | 128度35分57秒 | 鹿児島県 | 大島郡知名町 | 寒冷前線 | |
| 144 | 竜巻 | 1971年08月31日04時00分 | 35度0分53秒 | 138度28分52秒 | 静岡県 | 清水市 | 台風 | |
| 145 | 竜巻 | 1968年09月24日15時30分 | 31度51分30秒 | 131度26分0秒 | 宮崎県 | 宮崎市 | 台風 | |
| 146 | 竜巻 | 1961年10月07日10時10分 | 34度59分33秒 | 138度29分24秒 | 静岡県 | 清水市 | 寒冷前線 | |
| 147 | 竜巻 | 1961年01月24日13時45分 | 31度15分7秒 | 130度22分26秒 | 鹿児島県 | 川辺郡知覧町 | 寒冷前線 | |
| F0相当 | | | | | | | | |
| 148 | 竜巻 | 2012年06月05日03時20分 | 25度49分20秒 | 131度14分14秒 | 沖縄県 | 島尻郡南大東村 | 台風 | |
| 149 | 竜巻 | 2012年02月28日17時40分 | 26度21分20秒 | 127度58分15秒 | 沖縄県 | うるま市 | 停滞前線 | |
| 150 | 竜巻 | 2011年10月21日21時30分 | 32度46分44秒 | 132度56分57秒 | 高知県 | 土佐清水市 | 暖気の移流 | |

| No. | 現象 区別 | 発生日時 | 発生場所 | | | | 藤田 スケール | 総観場 |
|-----|----------|-------------------|-----------|------------|------|---------------|------------|---------------|
| | | | 緯度 | 経度 | 都道府県 | 市町村 | | |
| 151 | 竜巻 | 2011年10月14日07時30分 | 32度41分12秒 | 131度48分29秒 | 宮崎県 | 延岡市 | F0 | 暖気の移流 |
| 152 | 竜巻 | 2011年07月18日19時10分 | 34度47分13秒 | 136度33分11秒 | 三重県 | 津市 | F0 | 台風 暖気の移流 |
| 153 | 竜巻 | 2011年02月11日00時20分 | 26度10分0秒 | 127度39分20秒 | 沖縄県 | 豊見城市 | F0 | 停滞前線 |
| 154 | 竜巻 | 2010年11月22日15時30分 | 27度23分1秒 | 128度34分31秒 | 鹿児島県 | 大島郡和泊町 | F0 | 停滞前線 暖気の移流 |
| 155 | 竜巻 | 2010年11月01日05時20分 | 35度30分16秒 | 140度25分50秒 | 千葉県 | 山武郡九十九里町 | F0 | 南岸低気圧 |
| 156 | 竜巻 | 2010年10月22日10時50分 | 26度21分45秒 | 126度44分51秒 | 沖縄県 | 島尻郡久米島町 | F0以下 | 停滞前線 暖気の移流 |
| 157 | 竜巻 | 2010年10月09日18時00分 | 35度2分34秒 | 139度59分30秒 | 千葉県 | 南房総市 | F0 | その他(低気圧) |
| 158 | 竜巻 | 2010年09月28日09時15分 | 34度49分20秒 | 138度19分25秒 | 静岡県 | 焼津市 | F0 | 二つ玉低気圧 |
| 159 | 竜巻 | 2010年09月13日14時20分 | 26度55分57秒 | 127度56分32秒 | 沖縄県 | 島尻郡伊是名村 | F0 | 太平洋高気圧 |
| 160 | 竜巻 | 2010年08月11日16時55分 | 33度32分20秒 | 133度43分1秒 | 高知県 | 香南市 | F0 | 台風 暖気の移流 |
| 161 | 竜巻 | 2010年07月09日14時40分 | 33度35分18秒 | 135度54分36秒 | 和歌山県 | 東牟婁郡 那智勝浦町 | F0 | 梅雨前線 |
| 162 | 竜巻 | 2010年06月25日19時00分 | 32度14分59秒 | 131度33分33秒 | 宮崎県 | 児湯郡都農町 | F0 | 梅雨前線 |

| No. | 現象 区別 | 発生日時 | 発生場所 | | | | 藤田 スケール | 総観場 |
|-----|----------|-------------------|-----------|------------|------|---------|------------|----------------------|
| | | | 緯度 | 経度 | 都道府県 | 市町村 | | |
| 163 | 竜巻 | 2010年04月29日02時00分 | 33度30分14秒 | 133度52分26秒 | 高知県 | 安芸市 | F0 | 寒冷前線 |
| 164 | 竜巻 | 2010年02月01日09時30分 | 31度13分43秒 | 130度29分55秒 | 鹿児島県 | 南九州市 | F0 | 東シベ低気圧 寒冷前線 |
| 165 | 竜巻 | 2010年02月01日09時10分 | 31度25分51秒 | 130度17分2秒 | 鹿児島県 | 南さつま市 | F0 | 東シベ低気圧 寒冷前線 |
| 166 | 竜巻 | 2009年11月13日17時00分 | 32度10分27秒 | 131度31分7秒 | 宮崎県 | 児湯郡川南町 | F0 | その他(低気圧) |
| 167 | 竜巻 | 2009年11月11日09時00分 | 34度39分7秒 | 138度4分11秒 | 静岡県 | 掛川市 | F0 | 寒気の移流 |
| 168 | 竜巻 | 2009年08月08日15時20分 | 24度51分28秒 | 125度17分19秒 | 沖縄県 | 宮古島市 | F0 | 台風 |
| 169 | 竜巻 | 2009年07月25日11時00分 | 33度32分39秒 | 133度53分40秒 | 高知県 | 安芸市 | F0 | 梅雨前線 |
| 170 | 竜巻 | 2009年03月09日12時30分 | 26度5分40秒 | 127度41分35秒 | 沖縄県 | 糸満市 | F0 | 寒冷前線 |
| 171 | 竜巻 | 2008年10月07日12時20分 | 26度20分0秒 | 126度48分43秒 | 沖縄県 | 島尻郡久米島町 | F0未満 | 停滞前線 |
| 172 | 竜巻 | 2008年09月21日13時00分 | 34度9分20秒 | 134度36分50秒 | 徳島県 | 鳴門市 | F0未満 | 停滞前線 |
| 173 | 竜巻 | 2008年08月16日13時25分 | 35度37分13秒 | 140度3分43秒 | 千葉県 | 千葉市 | F0以下 | 台風 停滞前線 雷雨(熱雷) |
| 174 | 竜巻 | 2008年07月22日17時30分 | 26度12分7秒 | 127度45分56秒 | 沖縄県 | 島尻郡与那原町 | F0未満 | 気圧の谷 |

| No. | 現象 区別 | 発生日時 | 発生場所 | | | | 藤田 スケール | 総観場 |
|-----|------------------|-------------------|-----------|------------|------|-------------------------------|------------|----------------|
| | | | 緯度 | 経度 | 都道府県 | 市町村 | | |
| 175 | 竜巻 | 2008年06月29日02時30分 | 33度30分24秒 | 133度54分15秒 | 高知県 | 安芸市 | F0 | 梅雨前線 |
| 176 | 竜巻 | 2008年05月01日18時00分 | 30度31分33秒 | 130度57分19秒 | 鹿児島県 | 熊毛郡中種子町 | F0 | その他(低気圧) |
| 177 | 竜巻 | 2008年04月09日17時00分 | 31度15分37秒 | 130度15分50秒 | 鹿児島県 | 枕崎市 | F0 | 東シベ低気圧 |
| 178 | 竜巻 | 2008年04月07日11時20分 | 32度43分21秒 | 133度0分30秒 | 高知県 | 土佐清水市 | F0 | その他(低気圧) |
| 179 | 竜巻 | 2006年09月25日11時40分 | 25度51分20秒 | 131度15分10秒 | 沖縄県 | 南大東村 | F0 | その他 |
| 180 | 竜巻 | 2003年10月12日04時25分 | 32度32分49秒 | 131度40分54秒 | 宮崎県 | 延岡市 | F0 | その他(低気圧) |
| 181 | 竜巻または ダウンバースト | 2002年10月15日21時30分 | 34度40分8秒 | 137度59分34秒 | 静岡県 | 磐田郡浅羽町,小笠 郡大須賀町,小笠郡 大東町 | F0 | 日本海低気圧 寒冷前線 |
| 182 | 竜巻 | 2001年05月29日13時00分 | 35度0分20秒 | 136度55分5秒 | 愛知県 | 東海市 | F0 | 局地性降水 |
| 183 | 竜巻 | 2001年01月13日07時35分 | 26度8分43秒 | 127度41分26秒 | 沖縄県 | 糸満市 | F0 | 寒冷前線 |
| 184 | 竜巻 | 1999年06月30日09時30分 | 35度9分8秒 | 138度45分55秒 | 静岡県 | 富士市 | F0 | 日本海低気圧 寒冷前線 |
| 185 | 竜巻 | 1998年10月17日15時00分 | 32度25分13秒 | 131度39分49秒 | 宮崎県 | 日向市 | F0 | 台風 |
| 186 | 竜巻 | 1998年02月14日19時55分 | 24度23分26秒 | 123度44分55秒 | 沖縄県 | 竹富町 | F0 | 寒冷前線 |

| No. | 現象 区別 | 発生日時 | 発生場所 | | | | 藤田 スケール | 総観場 |
|--------------|--------------|-------------------|-----------|------------|------|--------|-----------------------|--------|
| | | | 緯度 | 経度 | 都道府県 | 市町村 | | |
| 187 | 竜巻 | 1998年01月14日10時50分 | 26度10分23秒 | 127度38分51秒 | 沖縄県 | 豊見城村 | F0 寒冷前線 暖気の移流 | |
| 188 | 竜巻 | 1997年11月28日09時30分 | 27度19分45秒 | 128度33分35秒 | 鹿児島県 | 知名町 | F0 東シベ低気圧 暖気の移流 | |
| 189 | 竜巻 | 1995年09月23日08時50分 | 26度24分18秒 | 127度42分59秒 | 沖縄県 | 読谷村 | F0 台風 | |
| 190 | 竜巻 | 1994年10月04日17時30分 | 33度32分8秒 | 133度40分50秒 | 高知県 | 南国市 | F0 暖気の移流 | |
| 191 | 竜巻 | 1994年10月04日17時15分 | 33度32分17秒 | 133度43分31秒 | 高知県 | 香美郡赤岡町 | F0 暖気の移流 | |
| 192 | 竜巻 | 1993年01月23日17時30分 | 24度22分35秒 | 123度45分11秒 | 沖縄県 | 竹富町 | F0 停滞前線 | |
| 193 | 竜巻 | 1991年11月28日22時00分 | 34度22分30秒 | 139度15分0秒 | 東京都 | 新島若郷 | F0 南岸低気圧 | |
| Fスケール不明の陸上竜巻 | | | | | | | | |
| 194 | 竜巻 | 2012年05月13日12時56分 | 24度42分42秒 | 125度19分3秒 | 沖縄県 | (海上) | 不明 | 気圧の谷 |
| 195 | 竜巻または 漏斗雲 | 2010年08月14日17時20分 | 26度23分0秒 | 127度44分0秒 | 沖縄県 | (海上) | 不明 | 太平洋高気圧 |
| 196 | 竜巻 | 2010年08月04日12時25分 | 34度33分0秒 | 137度1分0秒 | 愛知県 | (海上) | 不明 | 暖気の移流 |
| 197 | 竜巻 | 2009年08月08日15時10分 | 24度47分0秒 | 125度16分0秒 | 沖縄県 | 宮古島市 | 不明 | 台風 |

| No. | 現象 区別 | 発生日時 | 発生場所 | | | | 藤田 スケール | 総観場 |
|-----|--------------|-------------------|-----------|------------|------|-------------------|---------------|-----|
| | | | 緯度 | 経度 | 都道府県 | 市町村 | | |
| 198 | 竜巻または 漏斗雲 | 2008年10月07日12時35分 | 26度21分5秒 | 126度49分0秒 | 沖縄県 | (海上) | 停滞前線 | |
| 199 | 竜巻または 漏斗雲 | 2008年07月22日17時40分 | 26度11分54秒 | 127度46分7秒 | 沖縄県 | 島尻郡与那原町付 近 | 気圧の谷 | |
| 200 | 竜巻または 漏斗雲 | 2008年07月22日17時40分 | 26度11分54秒 | 127度46分7秒 | 沖縄県 | 島尻郡与那原町付 近 | 気圧の谷 | |
| 201 | 竜巻 | 2007年10月09日12時30分 | 32度8分44秒 | 130度6分16秒 | 鹿児島県 | 長島町 | 東シナ海低気圧 | |
| 202 | 竜巻または 漏斗雲 | 2007年09月14日15時05分 | 32度34分19秒 | 131度40分28秒 | 宮崎県 | 延岡市 | 台風 | |
| 203 | 竜巻 | 2004年06月01日14時15分 | 26度17分47秒 | 127度48分45秒 | 沖縄県 | 北中城村 | 梅雨前線 暖気の移流 | |
| 204 | 竜巻 | 1999年07月03日12時30分 | 26度34分30秒 | 127度58分0秒 | 沖縄県 | (海上) | 停滞前線 暖気の移流 | |
| 205 | 竜巻 | 1997年05月20日13時30分 | 33度40分0秒 | 135度10分0秒 | 和歌山県 | (海上) | 南岸低気圧 寒気の移流 | |
| 206 | 竜巻 | 1993年01月07日10時30分 | 33度47分50秒 | 135度14分30秒 | 和歌山県 | 印南町 | 南岸低気圧 | |
| 207 | 竜巻 | 1992年11月19日11時10分 | 32度41分5秒 | 131度50分33秒 | 宮崎県 | 北浦町 | 不安定線 移動性高気圧 | |
| 208 | 竜巻 | 1991年02月13日18時00分 | 26度26分4秒 | 127度46分49秒 | 沖縄県 | 国頭郡恩納村 | 東シナ海低気圧 暖気の移流 | |
| 209 | 竜巻 | 1990年09月19日14時00分 | 34度42分10秒 | 137度37分40秒 | 静岡県 | 浜松市, 舞阪町, 雄 踏町 | 台風 | |

| No. | 現象 区別 | 発生日時 | 発生場所 | | | | 藤田 スケール | 総観場 |
|-----|--------------|-------------------|-----------|------------|------|------|-------------------|-----|
| | | | 緯度 | 経度 | 都道府県 | 市町村 | | |
| 210 | 竜巻 | 1972年06月06日20時30分 | 26度8分40秒 | 127度41分8秒 | 沖縄県 | 糸満市 | 東シベ利亚低気圧 暖気の移流 | |
| 211 | 竜巻 | 1971年09月08日02時00分 | 35度42分0秒 | 140度43分30秒 | 千葉県 | 飯岡町 | 台風 | |
| 212 | 竜巻 | 1971年08月31日10時50分 | 35度42分1秒 | 140度42分11秒 | 千葉県 | 飯岡町 | 台風 | |
| 213 | 竜巻 | 1964年05月24日14時55分 | 35度37分47秒 | 139度38分7秒 | 東京都 | 世田谷区 | 寒冷前線 暖気の移流 | |
| 214 | 竜巻 | 2012年05月13日16時57分 | 24度53分54秒 | 125度15分27秒 | 沖縄県 | (海上) | 気圧の谷 | |
| 215 | 竜巻 | 2012年05月09日08時40分 | 34度53分50秒 | 136度48分0秒 | 愛知県 | (海上) | 気圧の谷 寒気の移流 | |
| 216 | 竜巻 | 2011年12月04日07時10分 | 34度49分0秒 | 139度24分40秒 | 東京都 | (海上) | 寒気の移流 | |
| 217 | 竜巻 | 2011年12月04日07時10分 | 34度49分0秒 | 139度24分40秒 | 東京都 | (海上) | 寒気の移流 | |
| 218 | 竜巻 | 2011年12月04日07時00分 | 34度49分25秒 | 139度23分30秒 | 東京都 | (海上) | 寒気の移流 | |
| 219 | 竜巻 | 2011年12月04日06時45分 | 34度47分50秒 | 139度25分45秒 | 東京都 | (海上) | 寒気の移流 | |
| 220 | 竜巻または 漏斗雲 | 2011年11月30日11時08分 | 26度24分52秒 | 127度41分54秒 | 沖縄県 | (海上) | 停滞前線 気圧の谷 | |
| 221 | 竜巻 | 2011年08月22日16時17分 | 26度29分0秒 | 127度49分0秒 | 沖縄県 | (海上) | 太平洋高気圧 | |

| No. | 現象 区別 | 発生日時 | 発生場所 | | | | 藤田 スケール | 総観場 |
|-----|--------------|-------------------|-----------|------------|------|------|------------|-----|
| | | | 緯度 | 経度 | 都道府県 | 市町村 | | |
| 222 | 竜巻または 漏斗雲 | 2011年08月22日14時15分 | 24度51分0秒 | 125度21分0秒 | 沖縄県 | (海上) | 太平洋高気圧 | |
| 223 | 竜巻 | 2011年02月25日17時20分 | 26度14分0秒 | 127度39分0秒 | 沖縄県 | (海上) | その他(高気圧) | |
| 224 | 竜巻 | 2011年02月03日10時00分 | 26度7分0秒 | 127度39分0秒 | 沖縄県 | (海上) | 気圧の谷 | |
| 225 | 竜巻 | 2010年10月07日17時00分 | 33度2分48秒 | 133度8分2秒 | 高知県 | (海上) | その他(高気圧) | |
| 226 | 竜巻 | 2010年10月02日17時00分 | 26度22分0秒 | 126度42分0秒 | 沖縄県 | (海上) | その他(高気圧) | |
| 227 | 竜巻 | 2010年10月02日15時50分 | 26度23分0秒 | 126度43分0秒 | 沖縄県 | (海上) | その他(高気圧) | |
| 228 | 竜巻 | 2010年09月23日10時05分 | 33度28分47秒 | 135度44分45秒 | 和歌山県 | (海上) | 停滞前線 | |
| 229 | 竜巻 | 2010年08月18日11時36分 | 26度25分0秒 | 127度42分0秒 | 沖縄県 | (海上) | 太平洋高気圧 | |
| 230 | 竜巻 | 2010年07月28日16時20分 | 26度30分0秒 | 128度1分0秒 | 沖縄県 | (海上) | 暖気の移流 | |
| 231 | 竜巻または 漏斗雲 | 2010年07月25日14時45分 | 26度35分0秒 | 127度11分0秒 | 沖縄県 | (海上) | 太平洋高気圧 | |
| 232 | 竜巻 | 2009年09月15日11時40分 | 26度26分0秒 | 127度58分0秒 | 沖縄県 | (海上) | 暖気の移流 | |
| 233 | 竜巻 | 2009年08月08日15時30分 | 24度38分0秒 | 124度38分0秒 | 沖縄県 | (海上) | 台風 | |

| No. | 現象 区別 | 発生日時 | 発生場所 | | | | 藤田 スケール | 総観場 |
|-----|--------------|-------------------|-----------|------------|------|------|---------------------|-----|
| | | | 緯度 | 経度 | 都道府県 | 市町村 | | |
| 234 | 竜巻 | 2009年07月30日17時50分 | 26度18分0秒 | 127度34分0秒 | 沖縄県 | (海上) | 不明 その他(高気圧) | |
| 235 | 竜巻 | 2009年07月06日16時35分 | 26度35分0秒 | 127度57分0秒 | 沖縄県 | (海上) | 不明 暖気の移流 | |
| 236 | 竜巻または 漏斗雲 | 2009年07月06日18時54分 | 24度18分16秒 | 124度3分2秒 | 沖縄県 | 石垣市 | 不明 暖気の移流 | |
| 237 | 竜巻 | 2009年06月26日13時10分 | 26度14分24秒 | 127度39分3秒 | 沖縄県 | (海上) | 不明 梅雨前線 | |
| 238 | 竜巻または 漏斗雲 | 2009年02月26日11時50分 | 24度55分27秒 | 125度16分4秒 | 沖縄県 | (海上) | 不明 その他(高気圧) | |
| 239 | 竜巻 | 2008年11月08日10時25分 | 25度47分38秒 | 131度16分25秒 | 沖縄県 | (海上) | 不明 気圧の谷 | |
| 240 | 竜巻 | 2008年11月03日11時55分 | 34度15分0秒 | 134度30分0秒 | 徳島県 | (海上) | 不明 その他(前線) 寒気の移流 | |
| 241 | 竜巻 | 2008年10月27日16時00分 | 35度15分20秒 | 140度25分40秒 | 千葉県 | (海上) | 不明 寒気の移流 | |
| 242 | 竜巻 | 2008年10月27日15時50分 | 35度15分20秒 | 140度25分40秒 | 千葉県 | (海上) | 不明 寒気の移流 | |
| 243 | 竜巻 | 2008年10月27日15時50分 | 35度15分20秒 | 140度25分30秒 | 千葉県 | (海上) | 不明 寒気の移流 | |
| 244 | 竜巻 | 2008年10月27日15時40分 | 35度15分20秒 | 140度25分20秒 | 千葉県 | (海上) | 不明 寒気の移流 | |
| 245 | 竜巻 | 2008年10月27日15時30分 | 35度15分20秒 | 140度25分0秒 | 千葉県 | (海上) | 不明 寒気の移流 | |

| No. | 現象 区別 | 発生日時 | 発生場所 | | | | 藤田 スケール | 総観場 |
|-----|--------------|-------------------|-----------|------------|------|------|----------------------|-----|
| | | | 緯度 | 経度 | 都道府県 | 市町村 | | |
| 246 | 竜巻または 漏斗雲 | 2008年10月10日17時20分 | 26度5分38秒 | 127度43分38秒 | 沖縄県 | 糸満市 | 気圧の谷 | |
| 247 | 竜巻 | 2008年10月07日11時30分 | 26度20分0秒 | 126度49分0秒 | 沖縄県 | (海上) | 停滞前線 | |
| 248 | 竜巻 | 2008年10月07日11時00分 | 26度16分0秒 | 126度49分0秒 | 沖縄県 | (海上) | 停滞前線 | |
| 249 | 竜巻 | 2008年08月26日14時12分 | 28度24分0秒 | 129度45分0秒 | 鹿児島県 | (海上) | 暖気の移流 | |
| 250 | 竜巻 | 2008年08月16日13時45分 | 35度36分57秒 | 140度3分20秒 | 千葉県 | (海上) | 台風 停滞前線 雷雨(熱雷) | |
| 251 | 竜巻 | 2008年08月08日16時45分 | 24度21分8秒 | 124度7分13秒 | 沖縄県 | 石垣市 | その他(低気圧) | |
| 252 | 竜巻または 漏斗雲 | 2008年08月08日13時40分 | 26度15分0秒 | 127度31分0秒 | 沖縄県 | (海上) | その他(低気圧) | |
| 253 | 竜巻 | 2008年07月22日17時40分 | 26度11分54秒 | 127度47分10秒 | 沖縄県 | (海上) | 気圧の谷 | |
| 254 | 竜巻 | 2008年07月22日17時08分 | 26度11分6秒 | 127度47分8秒 | 沖縄県 | (海上) | 気圧の谷 | |
| 255 | 竜巻 | 2008年07月22日17時05分 | 26度11分6秒 | 127度47分8秒 | 沖縄県 | (海上) | 気圧の谷 | |
| 256 | 竜巻 | 2008年07月07日09時30分 | 26度11分46秒 | 127度58分7秒 | 沖縄県 | (海上) | 太平洋高気圧 | |
| 257 | 竜巻 | 2008年07月03日15時00分 | 26度30分2秒 | 128度0分1秒 | 沖縄県 | (海上) | 太平洋高気圧 気圧の谷 | |

| No. | 現象 区別 | 発生日時 | 発生場所 | | | | 藤田 スケール | 総観場 |
|-----|--------------|-------------------|-----------|------------|------|------|---------------------|-----|
| | | | 緯度 | 経度 | 都道府県 | 市町村 | | |
| 258 | 竜巻または 漏斗雲 | 2008年05月27日13時00分 | 24度52分35秒 | 125度20分14秒 | 沖縄県 | (海上) | 気圧の谷 | |
| 259 | 竜巻または 漏斗雲 | 2008年05月27日12時30分 | 24度55分7秒 | 125度19分31秒 | 沖縄県 | (海上) | 気圧の谷 | |
| 260 | 竜巻 | 2008年05月27日11時41分 | 24度52分39秒 | 125度18分42秒 | 沖縄県 | (海上) | 気圧の谷 | |
| 261 | 竜巻 | 2008年05月19日16時50分 | 34度36分44秒 | 137度1分14秒 | 愛知県 | (海上) | 気圧の谷 南岸低気圧 | |
| 262 | 竜巻または 漏斗雲 | 2008年04月23日16時23分 | 34度39分43秒 | 137度24分43秒 | 愛知県 | 豊橋市 | 気圧の谷 | |
| 263 | 竜巻 | 2008年03月25日21時04分 | 35度16分57秒 | 139度31分36秒 | 神奈川県 | (海上) | 気圧の谷 寒気の移流 | |
| 264 | 竜巻 | 2008年03月25日20時57分 | 35度15分40秒 | 139度29分57秒 | 神奈川県 | (海上) | 気圧の谷 寒気の移流 | |
| 265 | 竜巻 | 2008年03月25日20時53分 | 35度18分16秒 | 139度26分34秒 | 神奈川県 | (海上) | 気圧の谷 寒気の移流 | |
| 266 | 竜巻 | 2007年10月14日12時55分 | 34度32分35秒 | 137度0分30秒 | 三重県 | (海上) | 停滞前線 気圧の谷 | |
| 267 | 竜巻または 漏斗雲 | 2007年10月09日16時00分 | 32度4分8秒 | 130度8分23秒 | 鹿児島県 | (海上) | 東シナ海低気圧 | |
| 268 | 竜巻 | 2007年10月09日14時00分 | 32度9分12秒 | 130度5分33秒 | 鹿児島県 | (海上) | 東シナ海低気圧 | |
| 269 | 竜巻 | 2007年09月25日16時45分 | 26度7分48秒 | 127度35分24秒 | 沖縄県 | (海上) | 気圧の谷 熱帯低気圧(台風以外) | |

| No. | 現象 区別 | 発生日時 | 発生場所 | | | | 藤田 スケール | 総観場 |
|-----|--------------|-------------------|-----------|------------|------|------|------------|--------------------|
| | | | 緯度 | 経度 | 都道府県 | 市町村 | | |
| 270 | 竜巻または 漏斗雲 | 2007年09月02日13時02分 | 24度19分29秒 | 124度16分44秒 | 沖縄県 | (海上) | 不明 | 太平洋高気圧 雷雨(熱雷) |
| 271 | 竜巻または 漏斗雲 | 2007年08月29日13時40分 | 26度3分29秒 | 127度40分48秒 | 沖縄県 | (海上) | 不明 | その他(高気圧) 気圧の谷 |
| 272 | 竜巻または 漏斗雲 | 2007年08月29日13時25分 | 26度5分6秒 | 127度38分6秒 | 沖縄県 | (海上) | 不明 | その他(高気圧) 気圧の谷 |
| 273 | 竜巻 | 2007年08月28日17時30分 | 26度40分12秒 | 128度3分36秒 | 沖縄県 | (海上) | 不明 | 雷雨(熱雷) |
| 274 | 竜巻 | 2007年08月28日15時40分 | 26度20分40秒 | 127度56分0秒 | 沖縄県 | (海上) | 不明 | 雷雨(熱雷) |
| 275 | 竜巻 | 2007年07月30日10時00分 | 24度29分57秒 | 122度55分11秒 | 沖縄県 | (海上) | 不明 | 気圧の谷 |
| 276 | 竜巻 | 2007年05月31日17時30分 | 35度13分0秒 | 139度51分0秒 | 千葉県 | (海上) | 不明 | 雷雨(熱雷を除く) 寒気の移流 |
| 277 | 竜巻 | 2006年11月06日12時00分 | 33度42分0秒 | 135度20分0秒 | 和歌山県 | (海上) | 不明 | 日本海低気圧 |
| 278 | 竜巻 | 2006年09月19日17時30分 | 33度29分33秒 | 133度34分14秒 | 高知県 | (海上) | 不明 | 寒気の移流 |
| 279 | 竜巻 | 2006年08月29日14時16分 | 26度40分0秒 | 127度52分30秒 | 沖縄県 | (海上) | 不明 | 気圧の谷 |
| 280 | 竜巻 | 2006年08月28日15時50分 | 26度26分49秒 | 128度1分56秒 | 沖縄県 | (海上) | 不明 | 太平洋高気圧 |
| 281 | 竜巻 | 2003年01月11日15時40分 | 33度5分25秒 | 139度43分19秒 | 東京都 | (海上) | 不明 | 気圧の谷 |

| No. | 現象 区別 | 発生日時 | 発生場所 | | | | 藤田 スケール | 総観場 |
|-----|----------|-------------------|-----------|------------|------|------|------------------|-----|
| | | | 緯度 | 経度 | 都道府県 | 市町村 | | |
| 282 | 竜巻 | 2001年08月04日15時27分 | 26度21分52秒 | 126度41分12秒 | 沖縄県 | (海上) | 気圧の谷 | |
| 283 | 竜巻 | 2001年08月04日15時00分 | 26度21分52秒 | 126度41分12秒 | 沖縄県 | (海上) | 気圧の谷 | |
| 284 | 竜巻 | 2001年07月09日17時59分 | 24度49分39秒 | 125度7分44秒 | 沖縄県 | (海上) | 気圧の谷 | |
| 285 | 竜巻 | 2001年07月08日16時14分 | 24度46分54秒 | 125度14分41秒 | 沖縄県 | (海上) | 気圧の谷 | |
| 286 | 竜巻 | 2000年08月07日17時55分 | 35度32分30秒 | 140度0分52秒 | 千葉県 | (海上) | 雷雨(熱雷) | |
| 287 | 竜巻 | 1999年11月02日16時40分 | 34度55分40秒 | 138度23分50秒 | 静岡県 | 静岡市 | その他(前線) 寒気の移流 | |
| 288 | 竜巻 | 1999年08月12日10時18分 | 26度21分40秒 | 126度41分12秒 | 沖縄県 | (海上) | 気圧の谷 | |
| 289 | 竜巻 | 1999年07月21日11時20分 | 26度6分3秒 | 127度38分19秒 | 沖縄県 | (海上) | 熱帯低気圧(台風以外) | |
| 290 | 竜巻 | 1998年09月24日17時27分 | 26度9分1秒 | 127度38分41秒 | 沖縄県 | (海上) | 気圧の谷 | |
| 291 | 竜巻 | 1998年04月18日13時15分 | 32度59分50秒 | 133度2分2秒 | 高知県 | (海上) | 南岸低気圧 | |
| 292 | 竜巻 | 1997年09月06日15時30分 | 33度14分37秒 | 134度13分20秒 | 高知県 | (海上) | 停滞前線 暖気の移流 | |
| 293 | 竜巻 | 1997年05月03日10時50分 | 26度6分30秒 | 127度32分30秒 | 沖縄県 | (海上) | 寒冷前線 | |

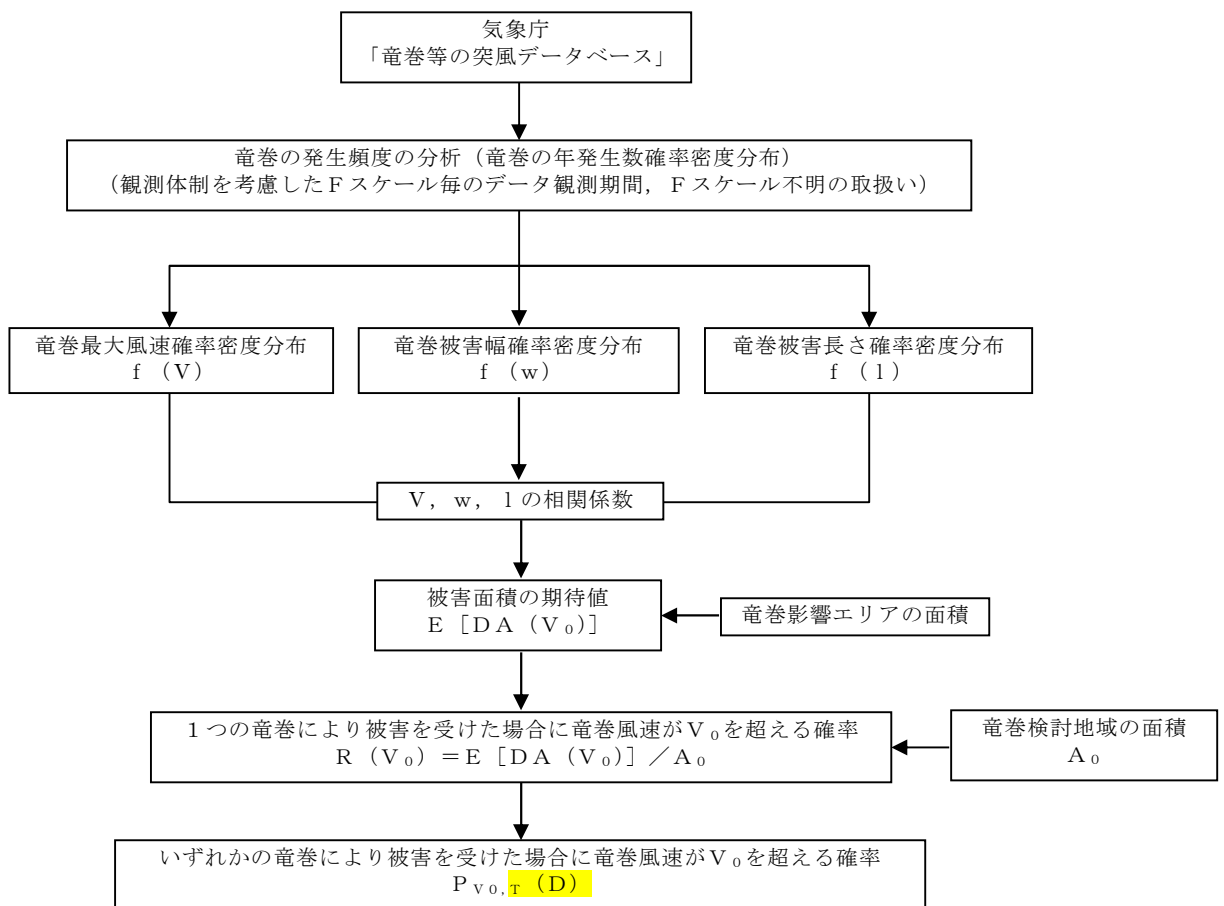
| No. | 現象 区別 | 発生日時 | 発生場所 | | | | 藤田 スケール | 総観場 |
|-----|----------|-------------------|-----------|------------|------|------|------------------|-----|
| | | | 緯度 | 経度 | 都道府県 | 市町村 | | |
| 294 | 竜巻 | 1994年10月04日17時05分 | 33度31分15秒 | 133度41分47秒 | 高知県 | (海上) | 暖気の移流 | |
| 295 | 竜巻 | 1994年10月04日17時05分 | 33度31分8秒 | 133度41分30秒 | 高知県 | (海上) | 暖気の移流 | |
| 296 | 竜巻 | 1994年10月04日17時05分 | 33度31分17秒 | 133度42分9秒 | 高知県 | (海上) | 暖気の移流 | |
| 297 | 竜巻 | 1992年05月17日14時33分 | 26度21分49秒 | 126度41分8秒 | 沖縄県 | (海上) | 東シナ海低気圧 暖気の移流 | |
| 298 | 竜巻 | 1992年04月15日16時55分 | 33度33分30秒 | 135度25分0秒 | 和歌山県 | 日置川町 | 寒冷前線 | |
| 299 | 竜巻 | 1992年03月31日14時55分 | 26度26分0秒 | 127度56分0秒 | 沖縄県 | (海上) | 東シナ海低気圧 暖気の移流 | |
| 300 | 竜巻 | 1971年08月31日07時15分 | 35度3分51秒 | 140度6分7秒 | 千葉県 | 鴨川市 | 台風 | |

ハザード曲線による竜巻最大風速 (V_{B2}) の計算について

1. 評価フロー

「竜巻影響評価ガイド」⁽¹⁾の解説 3.3.2 に例示された Wen & Chu⁽²⁾及び Garsonet al.⁽³⁾⁽⁴⁾による方法に沿って、竜巻最大風速のハザード曲線を算定し、ハザード曲線による最大風速 V_{B2} を算定する。具体的な算定方法については、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「竜巻による原子力施設への影響に関する調査研究」⁽⁵⁾を参考とする。

第 1-1 図に算定フローを示す。



第 1-1 図 ハザード曲線の算定フロー

2. 竜巻の発生頻度の分析

竜巻についての過去の観測データは少なく、また、観測年代によって精度が異なる。そこで、下記のとおり、観測データの補正を行い、年発生数の確率分布に供する統計データを推定する。

(1) 適用データ

気象庁「竜巻等の突風データベース」⁽⁶⁾より、竜巻検討地域における 1961 年 1 月～2012 年 6 月の竜巻のデータを用いる。

(2) 竜巻の発生頻度の補正

「竜巻等の突風データベース」は 1961 年以降に観測された竜巻がデータベース化されているが、観測体制が段階的に強化された結果、特に 2007 年以降のデータにおいては発生数が非常に多く、海上竜巻の増加も顕著である。そこで、観測体制が強化されたことによる補正を以下のとおり行い、疑似 51.5 年間の統計量を評価する。

a. ハザード曲線評価に用いるデータの観測期間を以下の(a)～(c)の3期間に分ける。

(a) 2007 年 1 月～2012 年 6 月 (5.5 年間)

(b) 1991 年 1 月～2012 年 6 月 (21.5 年間)

(c) 1961 年 1 月～2012 年 6 月 (51.5 年間)

b. 次に、各年代において F スケールごとに、統計量（竜巻発生数、年間平均発生数、標準偏差）を算定する。

c. F 0 及び F スケール不明の竜巻については、観測体制が強化される以前は見過ごされた可能性が大きいことから、観測体制が強化された 2007 年以降の統計量を基にする。

d. F 1 の竜巻については、1991 年以降の年間発生数がそれ以前の 30 年間の発生数を明らかに上回ることから、1991 年以降の統計量を基にする。

- e. F 2以上の竜巻については、見逃されることが少なかったとして、1961年以降の全期間の統計量を基にする。
- f. 51.5年間の発生数を、(a)～(c)の観測期間との比率からFスケール毎に推計する。
- g. 海上竜巻でFスケール不明の場合、被害痕跡等が残っていないため、そのFスケールを推定することは難しい。そこで、沿岸部近傍では竜巻の発生状況については陸上と海上で変わらないと仮定し、「海岸線から海上5kmの範囲における海上竜巻の発生特性が、海岸線から内陸5kmの範囲における陸上竜巻の発生特性と同様である」という仮定に基づいて、陸上竜巻（上陸竜巻含む）でのFスケール別発生比率で按分し、各Fスケールで発生した竜巻に加える。【添付資料5 別紙1】
- 一方、Fスケール不明の陸上竜巻は、痕跡等が残らないほど小さかったとし、F 0相当の竜巻であったとする。

竜巻検討地域について、発生数に関する統計量の算定結果を第2-1表に示す。竜巻検討地域において51.5年間に300個の竜巻が観測されたことに対し、1188個の竜巻が発生したと推定した。

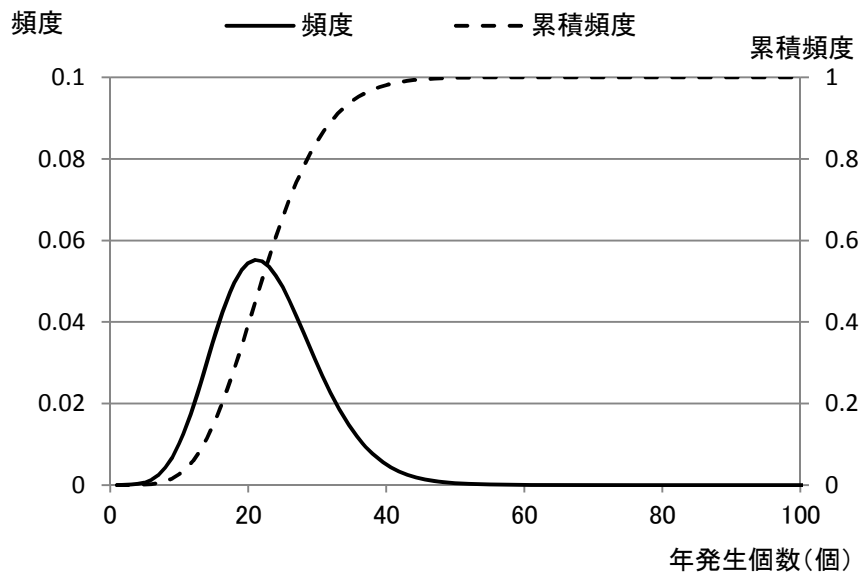
第2-1表 竜巻発生数の分析結果

| | | F3 | F2 | F1 | F0 | 小計 | 陸上 不明 | 海上 不明 | 合計 | |
|------------------------|-------------------------|-----------|------|------|------|------|----------|----------|-------|-------|
| 過去に 観測 された 竜巻 | 1961.1-2012.6 51.5年間 | 期間内個数 | 6 | 41 | 100 | 46 | 193 | 20 | 87 | 300 |
| | | 平均値(個/年) | 0.12 | 0.80 | 1.94 | 0.89 | 3.75 | 0.39 | 1.69 | 5.83 |
| | | 標準偏差(個/年) | 0.32 | 0.94 | 1.96 | 2.17 | 3.25 | 0.69 | 4.35 | 7.26 |
| | 1991.1-2012.6 21.5年間 | 期間内個数 | 1 | 15 | 72 | 46 | 134 | 15 | 86 | 235 |
| | | 平均値(個/年) | 0.05 | 0.70 | 3.35 | 2.14 | 6.23 | 0.70 | 4.00 | 10.93 |
| | | 標準偏差(個/年) | 0.22 | 0.78 | 2.03 | 2.96 | 3.24 | 0.84 | 6.08 | 8.81 |
| | 2007.1-2012.6 5.5年間 | 期間内個数 | 0 | 1 | 12 | 31 | 44 | 9 | 63 | 116 |
| | | 平均値(個/年) | 0.00 | 0.18 | 2.18 | 5.64 | 8.00 | 1.64 | 11.45 | 21.09 |
| | | 標準偏差(個/年) | 0.00 | 0.43 | 1.99 | 4.17 | 4.16 | 0.97 | 8.32 | 11.75 |

| | | F3 | F2 | F1 | F0 | 計 | |
|-------------------------|---------------------|-----------|------|------|------|-------|-------------|
| 疑似 51.5 年間の 竜巻 | 疑似 51.5年間 (陸上竜巻) | 期間内個数 | 6 | 41 | 173 | 376 | 596 |
| | | 平均値(個/年) | 0.12 | 0.80 | 3.36 | 7.30 | 11.57 |
| | | 標準偏差(個/年) | 0.32 | 0.94 | 2.03 | 4.74 | 5.25 |
| | 疑似 51.5年間 (全竜巻) | 期間内個数 | 12 | 82 | 345 | 749 | 1188 |
| | | 平均値(個/年) | 0.23 | 1.59 | 6.70 | 14.54 | 23.07 |
| | | 標準偏差(個/年) | 0.46 | 1.33 | 2.87 | 6.69 | 7.42 |

(3) 年発生数の確率密度分布の設定

竜巻の年発生数の確率密度分布の設定に当たっては、竜巻は気象事象の中でも極めて稀に発生する事象であり、発生数の変動(標準偏差)が大きいことから、竜巻検討地域で過去に発生した竜巻の記録等に基づき平均値と標準偏差を評価し、「竜巻による原子力施設への影響に関する調査研究」の成果を参考とし、第2-1図に示すポリヤ分布とした。



第 2-1 図 竜巻の年発生数の確率密度分布（ポリヤ分布）

3. 竜巻の被害幅，被害長さの分析

被害幅及び被害長さについても発生数と同様に疑似 51.5 年間の統計量を基にする。被害幅及び被害長さの分析に利用可能なデータ数は，竜巻発生数評価時のデータ数に比べて少ない。そこで，先に作成した疑似 51.5 年間の竜巻発生数と対応した被害幅及び被害長さの統計量の分析は，以下の手順で行った。

Step1：基となる観測データ数を確保するために，1961 年以降の被害幅及び被害長さのデータを基にする。そのデータを F スケールごとに仕分ける。

Step2：各 F スケールに対し，上記で抽出された被害幅や被害長さのデータを大きい順に並び替え，51.5 年間の発生数分だけ繰り返しサンプリングを行い，疑似 51.5 年間のデータとする。例えば，被害幅が観測されている 7 個のデータを大きい順から並べたものを 7 回繰り返し，計 49 個のデータを作成する。

Step3：疑似 51.5 年間のデータについて，統計量（平均値及び標準偏差）を求める。

第 3-1 表，第 3-2 表に，疑似 51.5 年間のデータを基に評価した被害幅及び被害長さの統計量を示す。

第 3-1 表 被害幅の統計量

| | | F3 | F2 | F1 | F0 | 計 |
|---------------------------------|----------|-----|-----|-----|-----|------|
| 1961.1-2012.6 51.5 年間 観測値 | 期間内個数 | 6 | 36 | 84 | 37 | 163 |
| | 平均値 (m) | 525 | 206 | 115 | 55 | 137 |
| | 標準偏差 (m) | 741 | 367 | 173 | 45 | 265 |
| 疑似 51.5 年間 | 期間内個数 | 12 | 82 | 345 | 749 | 1188 |
| | 平均値 (m) | 525 | 250 | 124 | 56 | 94 |
| | 標準偏差 (m) | 706 | 408 | 187 | 45 | 179 |

第 3-2 表 被害長さの統計量

| | | F3 | F2 | F1 | F0 | 計 |
|---------------------------------|-----------|----|------|------|------|------|
| 1961.1-2012.6 51.5 年間 観測値 | 期間内個数 | 6 | 38 | 88 | 38 | 170 |
| | 平均値 (km) | 14 | 5.02 | 2.38 | 1.17 | 3.11 |
| | 標準偏差 (km) | 15 | 4.55 | 3.03 | 0.98 | 4.70 |
| 疑似 51.5 年間 | 期間内個数 | 12 | 82 | 345 | 749 | 1188 |
| | 平均値 (km) | 14 | 5.63 | 2.43 | 1.18 | 1.98 |
| | 標準偏差 (km) | 14 | 4.94 | 3.03 | 0.97 | 3.10 |

4. 竜巻風速，被害幅及び被害長さの確率密度分布及び相関係数

(1) 最大風速，被害幅及び被害長さの確率密度分布

最大風速，被害幅及び被害長さは，前記で評価した統計量を有する対数正規分布に従うものとする。第 4-1 表に統計量を示す。それぞれが独立であるとした場合の確率密度分布について，第 4-1 図～第 4-6 図に示す。

最大風速の超過確率は，観測結果がトレースでき，風速の大きいエリアにおいても不自然な形となっていないことが確認できる。竜巻の被害幅及び長さの超過確率からは，観測結果をおおむねトレースしていることが確認できる。

(2) 最大風速、被害幅及び被害長さの相関係数

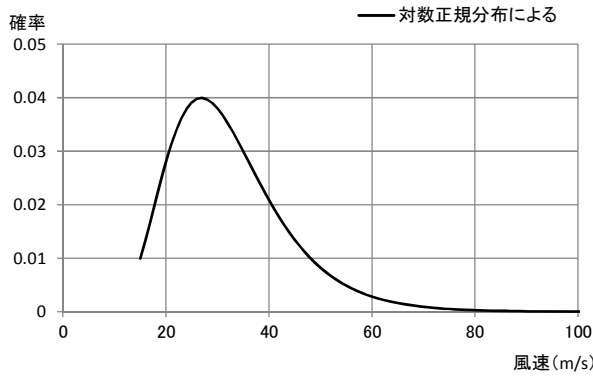
相関係数は、過去に発生した竜巻の最大風速、被害幅及び被害長さの関係を評価することから、繰り返しサンプリングを行った推定 51.5 年間ではなく、観測データを基に、その対数値の相関係数を算出した。観測データのみを用いるのは、F スケール不明や F 0 の竜巻では、被害規模が小さいために、被害幅や被害長さの観測データが F 2、F 3 の竜巻と比べ観測値として示されている場合が少なく、そのようなデータを繰り返しサンプリングにより増やすと、F 2、F 3 の竜巻で見られる相関性が反映されない結果が懸念されるためである。

また、相関係数を算出する際には、竜巻の最大風速、被害幅及び被害長さの 3 変量が同時に観測されているデータを用いるのが理想であるが、3 変量が揃っているデータは少ないので、データ数を極力確保することを目的として、例えば最大風速と被害幅のみが観測されている等、少なくとも 2 変量の比較が行えるデータを用いた。

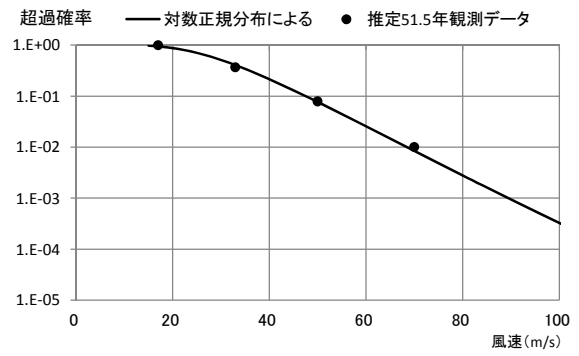
相関係数の算出結果を、第 4-2 表に示す。

第 4-1 表 発生数、被害幅及び被害長さの統計量

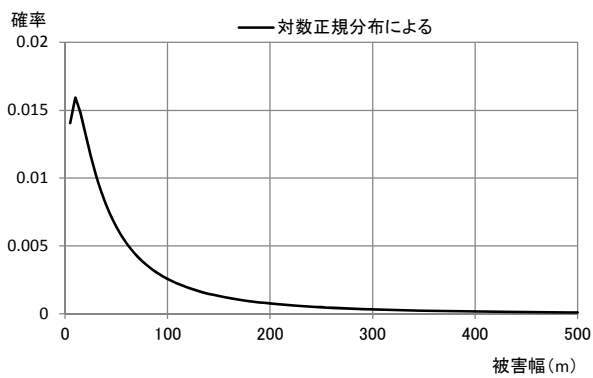
| | | | F3 | F2 | F1 | F0 | 計 |
|---------------|------|------------|------|------|------|-------|-------|
| 疑似 51.5 年間 | 発生数 | 期間内個数 | 12 | 82 | 345 | 749 | 1188 |
| | | 平均値 (個/年) | 0.23 | 1.59 | 6.70 | 14.54 | 23.07 |
| | | 標準偏差 (個/年) | 0.46 | 1.33 | 2.87 | 6.69 | 7.42 |
| | 被害幅 | 期間内個数 | 12 | 82 | 345 | 749 | 1188 |
| | | 平均値 (m) | 525 | 250 | 124 | 56 | 94 |
| | | 標準偏差 (m) | 706 | 408 | 187 | 45 | 179 |
| | 被害長さ | 期間内個数 | 12 | 82 | 345 | 749 | 1188 |
| | | 平均値 (km) | 14 | 5.63 | 2.43 | 1.18 | 1.98 |
| | | 標準偏差 (km) | 14 | 4.94 | 3.03 | 0.97 | 3.10 |



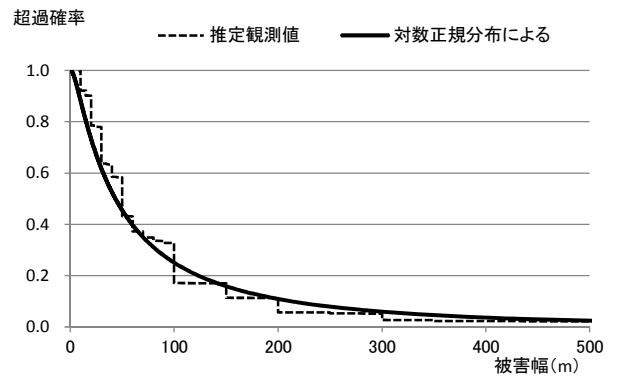
第4-1図 最大風速の確率密度分布



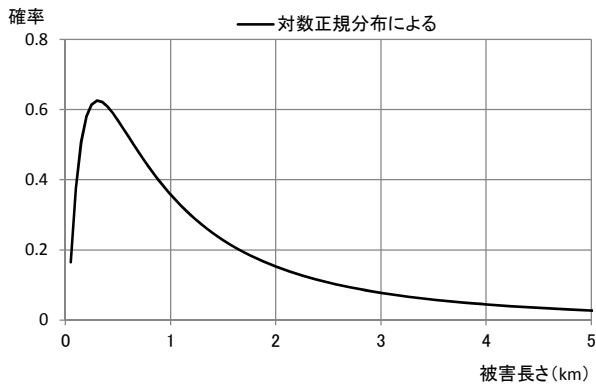
第4-2図 最大風速の超過確率



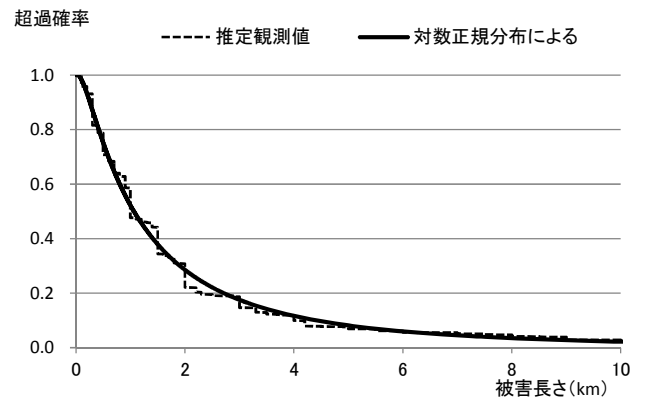
第4-3図 被害幅の確率密度分布



第4-4図 被害幅の超過確率



第4-5図 被害長さの確率密度分布



第4-6図 被害長さの超過確率

第4-2表 最大風速，被害幅及び被害長さの対数値の相関係数

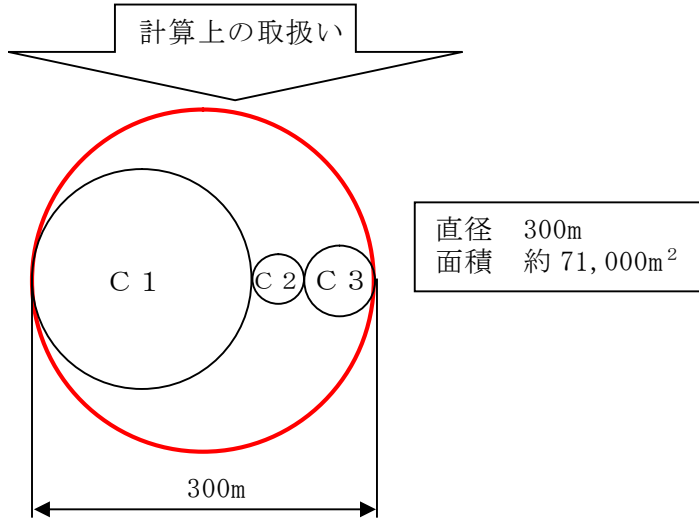
| 相関係数の値 | 最大風速 | 被害幅 | 被害長さ |
|--------|-------|-------|-------|
| 最大風速 | 1.000 | 0.381 | 0.452 |
| 被害幅 | — | 1.000 | 0.381 |
| 被害長さ | — | — | 1.000 |

5. 竜巻影響エリアの設定

東海第二発電所の構築物，系統及び機器のうち，竜巻防護施設を包絡する円形領域を竜巻影響エリアとして設定した。竜巻影響エリアを第5-1図に示す。

なお，竜巻影響エリアは，原子炉建屋周辺，海水ポンプ室及び使用済燃料乾式貯蔵建屋が離れているため，それぞれをまず直径188m，直径44m及び直径60mの円形領域に包絡させ，さらにこれらの領域を包絡させた直径300mの円形領域(面積約71,000m²)として設定した。

また，竜巻影響エリアを円形としたため，ハザード計算において竜巻の移動方向に対する依存性は生じない。



第 5-1 図 竜巻影響エリア

6. ハザード曲線の算定方法

前記で設定した竜巻の年発生数の確率分布及び最大風速の確率分布をもとに、以下に示すとおり「竜巻影響評価ガイド」の解説 3.3.2 に例示された Wen & Chu 及び Garson et al. の方法に沿って、ハザード曲線を算定する。

(1) 評価方法

D を評価対象構造物が風速 V_0 以上の竜巻に遭遇する事象とし、ある竜巻が評価対象構造物を襲い、その竜巻の風速が V_0 以上となる確率を $R(V_0)$ とする。また、ある竜巻の風速が V_0 以上となる面積を $DA(V_0)$ とする。また、その期待値を $E[DA(V_0)]$ にて表す。

a. 前記に基づき、竜巻の最大風速 V 、被害幅 w 及び被害長さ l の統計値から、次式の対数正規分布型の確率密度分布を与える。

$$f(V, w, l) = \frac{1}{(\sqrt{2\pi})^3 |\Sigma|^{1/2}} \frac{1}{Vwl} \exp\left(-\frac{1}{2}(\mathbf{x} - \boldsymbol{\mu})^T \Sigma^{-1}(\mathbf{x} - \boldsymbol{\mu})\right)$$

ここで、 $\mathbf{x} = \begin{Bmatrix} \ln(V) \\ \ln(w) \\ \ln(l) \end{Bmatrix}$, $\boldsymbol{\mu} = \begin{Bmatrix} \mu_V \\ \mu_w \\ \mu_l \end{Bmatrix}$, $\Sigma = \begin{bmatrix} \sigma_V^2 & \sigma_V \sigma_w \rho_{Vw} & \sigma_V \sigma_l \rho_{Vl} \\ \sigma_V \sigma_w \rho_{Vw} & \sigma_w^2 & \sigma_w \sigma_l \rho_{wl} \\ \sigma_V \sigma_l \rho_{Vl} & \sigma_w \sigma_l \rho_{wl} & \sigma_l^2 \end{bmatrix}$

\mathbf{X} は最大風速、被害幅及び被害長さの対数値 $\ln(V)$ 、 $\ln(w)$ 、 $\ln(l)$ によるベクトル、 $\boldsymbol{\mu}$ は各統計値から評価した最大風速、被害幅及び被害長さの対数値の平均からなるベクトル、 Σ は $\ln(V)$ 、 $\ln(w)$ 、 $\ln(l)$ から評価した標準偏差 σ_V 、 σ_w 、 σ_l と相関係数 ρ_{Vw} 、 ρ_{wl} 、 ρ_{Vl} からなる分散共分散行列である。

b. 被災領域内には、竜巻の被害幅のうち風速が V_0 を超える部分の幅を与える次式を考慮する。

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

ここで、 V_{\min} は、Gale intensityと呼ばれ（Galeは「非常に強い風」という意味）、被害が発生し始める風速に位置づけられる。米国気象局NWS（National Weather Service）では、34～47ノット（17.5～24.2 m/s）とされ、また、気象庁が使用している風力階級では、風力9は大強風（strong gale：20.8～24.4m/s）と分類され、「屋根瓦が飛ぶ。人家に被害が出始める。」とされていることを参考に、 $V_{\min} = 25\text{m/s}$ とした。

なお、この値はF0（17～32m/s）のほぼ中央値に相当する。

- c. 得られた平均と分散共分散行列を基に、竜巻影響エリアの代表幅 D_0 を考慮し、次式にて、被災面積期待値 $E[DA(V_0)]$ を算定する。

$$E[DA(V_0)] = \int_0^{\infty} \int_0^{\infty} \int_0^{\infty} W(V_0) l f(V, w, l) dV dw dl + \int_0^{\infty} \int_0^{\infty} \int_0^{2\pi} H(\alpha) l f(V, l, \alpha) dV dl d\alpha + \int_0^{\infty} \int_0^{\infty} \int_0^{2\pi} W(V_0) G(\alpha) f(V, w, \alpha) dV dw d\alpha + S \int_{V_0}^{\infty} f(V) dV$$

ここで、 $H(\alpha)$ 及び $G(\alpha)$ 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。

$$H(\alpha) = B|\sin \alpha| + A|\cos \alpha|$$

$$G(\alpha) = A|\sin \alpha| + B|\cos \alpha|$$

ここで、 α : 竜巻の移動方向

竜巻影響エリアを円形で設定しているため、 H 及び G ともに竜巻影響エリアの直径で一定（竜巻の移動方向に依存しない。）となる。

S は竜巻影響エリアの面積（約71,000km²）を表わす。円の直径を D_0 とした場合は、以下の式にて表わされる。

$$E[DA(V_0)] = \int_0^\infty \int_0^\infty \int_0^\infty W(V_0) l f(V, w, l) dV dw dl + D_0 \int_0^\infty \int_0^\infty l f(V, l) dV dl \\ + D_0 \int_0^\infty \int_0^\infty W(V_0) f(V, w) dV dw + S \int_{V_0}^\infty f(V) dV$$

ここで、 $f(V, l)$ 、 $f(V, w)$ 、 $f(V)$ は $f(V, w, l)$ をもとに各成分を抽出した関数

- d. 竜巻検討地域の面積 A_0 (約 57,000km²) 及び上記の被災面積期待値 $E[DA(V_0)]$ から、評価対象構造物が竜巻による被害を受け、その竜巻の風速が V_0 以上となる確率 $R(V_0)$ を次式にて算定する。

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

- e. 前述のとおり、竜巻の年発生数の確率密度分布としては、ポリヤ分布の適合性が高い。ポリヤ分布は次式で示される。

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

ここで、 N : 竜巻の年発生数

ν : 竜巻の年平均発生数

T : 年数

β : 分布パラメータであり次式で示される。

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

σ : 竜巻の年発生数の標準偏差

発生数がポリヤ分布に従うものとし、年超過確率 P_{V_0} を以下の式により算出する。なお、年超過確率 P_{V_0} は、年被災確率が十分小さいことより、Garson et al. が示す近似式を用いて表すことができる。

$$P_{V_0} = 1 - [1 + \beta v R(V_0)]^{-1/\beta} = 1 - [1 - \frac{1}{\beta} (\beta v R(V_0)) + \dots]$$
$$\approx v R(V_0) = \frac{V}{A_0} E[DA(V_0)] = p E[DA(V_0)]$$

ここで、 p : 単位面積当たりの年被災確率

以上のことから、竜巻のように被災確率が非常に小さな現象に対しては、年超過確率は竜巻発生数の平均値のみに依存し、発生数の確率密度分布形状にはほとんど無関係であることがわかる。【添付資料 5 別紙 2】

(2) ハザード曲線

前項で示した評価方法に基づいて、竜巻影響評価の対象構造物が、 T 年以内にいずれかの竜巻に遭遇し、かつ竜巻風速が V_0 以上となる確率 $P_{V_0,T}$ を次式によって算出し、ハザード曲線を算定する。

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

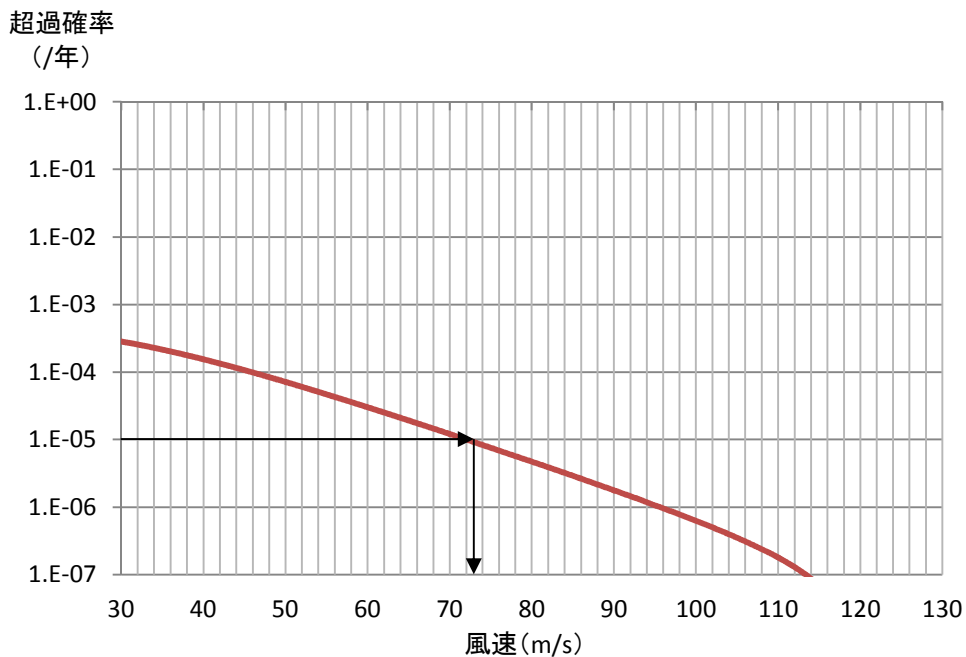
また、ハザード曲線の算定において、風速の積分範囲の上限値はハザード曲線の形状が不自然にならない程度に大きな値として 120m/s に設定する。

7. 竜巻最大風速のハザード曲線

算定した竜巻最大風速のハザード曲線を，第7-1図に示す。

得られたハザード曲線より，年超過確率 10^{-5} での風速を読み取り，ハザード曲線による最大風速は，以下のとおりとする。

竜巻検討地域全域（10 km幅）でのハザード曲線による最大風速：73m/s



第7-1図 竜巻検討地域全域（10 km幅）でのハザード曲線

竜巻検討地域全域（10 km幅）に加え，「竜巻影響評価ガイド」解説 3.3.2 では，少なくとも1km幅ごとに竜巻の年発生数の確率分布を算定するとしている。ここでは，ハザード曲線の保守性を持たせるために，竜巻検討地域を1 km幅に細分化した場合について算定した。

なお，海側の1km以遠については，全てがFスケール不明であるため，ハザード曲線の算定は不可能である。

算定に用いた諸元を第 7-1 表から第 7-6 表に示す。相関係数は、全て竜巻検討地域全域（10 km幅）内で発生した竜巻で評価した第 4-2 表の値とする。

算定したハザード曲線を、竜巻検討地域全域（10 km幅）でのハザード曲線と重ね、第 7-2 図に示す。

得られたハザード曲線において、年超過確率 10^{-5} での風速値を読み取り、第 7-7 表にあわせて示す。

第7-1表 海側1-0kmでの統計量

(a) 発生数

| | | | F3 | F2 | F1 | F0 | 小計 | 陸上不明 | 海上不明 | 合計 |
|------------|-------------------------|-----------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| 過去に観測された竜巻 | 1961.1-2012.6 51.5年間 | 期間内個数 | 1 | 12 | 30 | 10 | 53 | 8 | 28 | 89 |
| | | 平均値(個/年) | 0.02 | 0.23 | 0.58 | 0.19 | 1.03 | 0.16 | 0.54 | 1.73 |
| | | 標準偏差(個/年) | 0.14 | 0.47 | 1.04 | 0.63 | 1.48 | 0.37 | 1.55 | 2.79 |
| | 1991.1-2012.6 21.5年間 | 期間内個数 | 0 | 5 | 24 | 10 | 39 | 7 | 27 | 73 |
| | | 平均値(個/年) | 0.00 | 0.23 | 1.12 | 0.47 | 1.81 | 0.33 | 1.26 | 3.40 |
| | | 標準偏差(個/年) | 0.00 | 0.53 | 1.31 | 0.92 | 1.88 | 0.48 | 2.22 | 3.65 |
| | 2007.1-2012.6 5.5年間 | 期間内個数 | 0 | 0 | 5 | 7 | 12 | 3 | 18 | 33 |
| | | 平均値(個/年) | 0.00 | 0.00 | 0.91 | 1.27 | 2.18 | 0.55 | 3.27 | 6.00 |
| | | 標準偏差(個/年) | 0.00 | 0.00 | 1.37 | 1.50 | 2.57 | 0.55 | 3.74 | 5.91 |

| | | | F3 | F2 | F1 | F0 | 計 |
|-------------|--------------------|-----------|------|------|------|------|------------|
| 疑似51.5年間の竜巻 | 疑似51.5年間 (陸上竜巻) | 期間内個数 | 1 | 12 | 58 | 95 | 166 |
| | | 平均値(個/年) | 0.02 | 0.23 | 1.13 | 1.84 | 3.22 |
| | | 標準偏差(個/年) | 0.14 | 0.47 | 1.31 | 1.80 | 2.28 |
| | 疑似51.5年間 (全竜巻) | 期間内個数 | 3 | 25 | 118 | 192 | 338 |
| | | 平均値(個/年) | 0.06 | 0.49 | 2.29 | 3.73 | 6.56 |
| | | 標準偏差(個/年) | 0.24 | 0.68 | 1.87 | 2.55 | 3.25 |

(b) 被害幅

| | | F3 | F2 | F1 | F0 | 計 |
|-------------------------|---------|------|-----|-----|-----|-----|
| 1961.1-2012.6 51.5年間 | 期間内個数 | 1 | 11 | 27 | 6 | 45 |
| | 平均値(m) | 2000 | 133 | 100 | 38 | 142 |
| | 標準偏差(m) | 0 | 77 | 124 | 38 | 303 |
| 疑似51.5年間 (全竜巻) | 期間内個数 | 3 | 25 | 118 | 192 | 338 |
| | 平均値(m) | 2000 | 145 | 108 | 38 | 88 |
| | 標準偏差(m) | 0 | 79 | 129 | 35 | 203 |

(c) 被害長さ

| | | F3 | F2 | F1 | F0 | 計 |
|-------------------------|----------|----|------|------|------|------|
| 1961.1-2012.6 51.5年間 | 期間内個数 | 1 | 12 | 29 | 9 | 51 |
| | 平均値(km) | 8 | 0.91 | 0.59 | 0.24 | 0.75 |
| | 標準偏差(km) | 0 | 1.71 | 0.67 | 0.33 | 1.43 |
| 疑似51.5年間 (全竜巻) | 期間内個数 | 3 | 25 | 118 | 192 | 338 |
| | 平均値(km) | 8 | 1.09 | 0.61 | 0.25 | 0.51 |
| | 標準偏差(km) | 0 | 1.88 | 0.69 | 0.31 | 1.02 |

※ 被害長さの統計量は、各竜巻の発生地点と消滅地点をもとに1km幅に掛かる長さをもとに評価

第7-2表 陸側0-1kmでの統計量

(a) 発生数

| | | | F3 | F2 | F1 | F0 | 小計 | 陸上不明 | 海上不明 | 合計 |
|------------|-------------------------|-----------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| 過去に観測された竜巻 | 1961.1-2012.6 51.5年間 | 期間内個数 | 4 | 34 | 75 | 33 | 146 | 16 | 0 | 162 |
| | | 平均値(個/年) | 0.08 | 0.66 | 1.46 | 0.64 | 2.83 | 0.31 | 0.00 | 3.15 |
| | | 標準偏差(個/年) | 0.27 | 0.93 | 1.71 | 1.58 | 2.47 | 0.65 | 0.00 | 2.86 |
| | 1991.1-2012.6 21.5年間 | 期間内個数 | 0 | 11 | 55 | 33 | 99 | 14 | 0 | 113 |
| | | 平均値(個/年) | 0.00 | 0.51 | 2.56 | 1.53 | 4.60 | 0.65 | 0.00 | 5.26 |
| | | 標準偏差(個/年) | 0.00 | 0.81 | 1.88 | 2.17 | 2.45 | 0.79 | 0.00 | 2.92 |
| | 2007.1-2012.6 5.5年間 | 期間内個数 | 0 | 0 | 10 | 23 | 33 | 8 | 0 | 41 |
| | | 平均値(個/年) | 0.00 | 0.00 | 1.82 | 4.18 | 6.00 | 1.45 | 0.00 | 7.45 |
| | | 標準偏差(個/年) | 0.00 | 0.00 | 1.87 | 2.70 | 2.79 | 0.98 | 0.00 | 3.63 |

| | | | F3 | F2 | F1 | F0 | 計 |
|-------------|--------------------|-----------|------|------|------|------|------------|
| 疑似51.5年間の竜巻 | 疑似51.5年間 (陸上竜巻) | 期間内個数 | 4 | 34 | 132 | 291 | 461 |
| | | 平均値(個/年) | 0.08 | 0.66 | 2.56 | 5.65 | 8.95 |
| | | 標準偏差(個/年) | 0.27 | 0.93 | 1.88 | 3.13 | 3.78 |
| | 疑似51.5年間 (全竜巻) | 期間内個数 | 4 | 34 | 132 | 291 | 461 |
| | | 平均値(個/年) | 0.08 | 0.66 | 2.56 | 5.65 | 8.95 |
| | | 標準偏差(個/年) | 0.27 | 0.93 | 1.88 | 3.13 | 3.78 |

(b) 被害幅

| | | F3 | F2 | F1 | F0 | 計 |
|-------------------------|---------|-----|-----|-----|-----|-----|
| 1961.1-2012.6 51.5年間 | 期間内個数 | 4 | 29 | 66 | 27 | 126 |
| | 平均値(m) | 613 | 116 | 126 | 62 | 114 |
| | 標準偏差(m) | 926 | 106 | 190 | 49 | 207 |
| 疑似51.5年間 (全竜巻) | 期間内個数 | 4 | 34 | 132 | 291 | 461 |
| | 平均値(m) | 613 | 143 | 126 | 63 | 92 |
| | 標準偏差(m) | 926 | 126 | 190 | 48 | 148 |

(c) 被害長さ

| | | F3 | F2 | F1 | F0 | 計 |
|-------------------------|----------|----|------|------|------|------|
| 1961.1-2012.6 51.5年間 | 期間内個数 | 4 | 31 | 67 | 28 | 130 |
| | 平均値(km) | 3 | 1.54 | 1.02 | 0.76 | 1.18 |
| | 標準偏差(km) | 3 | 1.43 | 0.93 | 0.59 | 1.16 |
| 疑似51.5年間 (全竜巻) | 期間内個数 | 4 | 34 | 132 | 291 | 461 |
| | 平均値(km) | 3 | 1.84 | 1.03 | 0.78 | 0.95 |
| | 標準偏差(km) | 3 | 1.75 | 0.93 | 0.59 | 0.93 |

※ 被害長さの統計量は、各竜巻の発生地点と消滅地点をもとに1km幅に掛かる長さをもとに評価

第7-3表 陸側1-2kmでの統計量

(a) 発生数

| | | | F3 | F2 | F1 | F0 | 小計 | 陸上不明 | 海上不明 | 合計 |
|------------|-------------------------|-----------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| 過去に観測された竜巻 | 1961.1-2012.6 51.5年間 | 期間内個数 | 4 | 19 | 42 | 16 | 81 | 3 | 0 | 84 |
| | | 平均値(個/年) | 0.08 | 0.37 | 0.82 | 0.31 | 1.57 | 0.06 | 0.00 | 1.63 |
| | | 標準偏差(個/年) | 0.27 | 0.63 | 1.01 | 1.17 | 1.60 | 0.24 | 0.00 | 1.62 |
| | 1991.1-2012.6 21.5年間 | 期間内個数 | 0 | 6 | 30 | 16 | 52 | 1 | 0 | 53 |
| | | 平均値(個/年) | 0.00 | 0.28 | 1.40 | 0.74 | 2.42 | 0.05 | 0.00 | 2.47 |
| | | 標準偏差(個/年) | 0.00 | 0.46 | 1.13 | 1.74 | 1.85 | 0.22 | 0.00 | 1.85 |
| | 2007.1-2012.6 5.5年間 | 期間内個数 | 0 | 0 | 6 | 13 | 19 | 1 | 0 | 20 |
| | | 平均値(個/年) | 0.00 | 0.00 | 1.09 | 2.36 | 3.45 | 0.18 | 0.00 | 3.64 |
| | | 標準偏差(個/年) | 0.00 | 0.00 | 0.57 | 2.99 | 2.88 | 0.43 | 0.00 | 2.80 |

| | | | F3 | F2 | F1 | F0 | 計 |
|-------------|--------------------|-----------|------|------|------|------|------------|
| 疑似51.5年間の竜巻 | 疑似51.5年間 (陸上竜巻) | 期間内個数 | 4 | 19 | 72 | 132 | 227 |
| | | 平均値(個/年) | 0.08 | 0.37 | 1.40 | 2.56 | 4.41 |
| | | 標準偏差(個/年) | 0.27 | 0.63 | 1.13 | 3.11 | 3.38 |
| | 疑似51.5年間 (全竜巻) | 期間内個数 | 4 | 19 | 72 | 132 | 227 |
| | | 平均値(個/年) | 0.08 | 0.37 | 1.40 | 2.56 | 4.41 |
| | | 標準偏差(個/年) | 0.27 | 0.63 | 1.13 | 3.11 | 3.38 |

(b) 被害幅

| | | F3 | F2 | F1 | F0 | 計 |
|-------------------------|---------|-----|-----|-----|-----|-----|
| 1961.1-2012.6 51.5年間 | 期間内個数 | 4 | 19 | 40 | 14 | 77 |
| | 平均値(m) | 613 | 163 | 140 | 54 | 155 |
| | 標準偏差(m) | 926 | 234 | 233 | 42 | 297 |
| 疑似51.5年間 (全竜巻) | 期間内個数 | 4 | 19 | 72 | 132 | 227 |
| | 平均値(m) | 613 | 163 | 153 | 56 | 105 |
| | 標準偏差(m) | 926 | 234 | 241 | 41 | 205 |

(c) 被害長さ

| | | F3 | F2 | F1 | F0 | 計 |
|-------------------------|----------|----|------|------|------|------|
| 1961.1-2012.6 51.5年間 | 期間内個数 | 4 | 19 | 40 | 12 | 75 |
| | 平均値(km) | 1 | 1.29 | 0.94 | 0.85 | 1.03 |
| | 標準偏差(km) | 0 | 1.00 | 0.89 | 0.50 | 0.86 |
| 疑似51.5年間 (全竜巻) | 期間内個数 | 4 | 19 | 72 | 132 | 227 |
| | 平均値(km) | 1 | 1.29 | 1.03 | 0.85 | 0.95 |
| | 標準偏差(km) | 0 | 1.00 | 0.89 | 0.48 | 0.70 |

※ 被害長さの統計量は、各竜巻の発生地点と消滅地点をもとに1km幅に掛かる長さをもとに評価

第7-4表 陸側2-3kmでの統計量

(a) 発生数

| | | | F3 | F2 | F1 | F0 | 小計 | 陸上不明 | 海上不明 | 合計 |
|------------|-------------------------|-----------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| 過去に観測された竜巻 | 1961.1-2012.6 51.5年間 | 期間内個数 | 3 | 14 | 25 | 8 | 50 | 2 | 0 | 52 |
| | | 平均値(個/年) | 0.06 | 0.27 | 0.49 | 0.16 | 0.97 | 0.04 | 0.00 | 1.01 |
| | | 標準偏差(個/年) | 0.24 | 0.63 | 0.76 | 0.42 | 1.07 | 0.20 | 0.00 | 1.09 |
| | 1991.1-2012.6 21.5年間 | 期間内個数 | 0 | 4 | 15 | 8 | 27 | 0 | 0 | 27 |
| | | 平均値(個/年) | 0.00 | 0.19 | 0.70 | 0.37 | 1.26 | 0.00 | 0.00 | 1.26 |
| | | 標準偏差(個/年) | 0.00 | 0.40 | 0.84 | 0.59 | 1.01 | 0.00 | 0.00 | 1.01 |
| | 2007.1-2012.6 5.5年間 | 期間内個数 | 0 | 0 | 3 | 4 | 7 | 0 | 0 | 7 |
| | | 平均値(個/年) | 0.00 | 0.00 | 0.55 | 0.73 | 1.27 | 0.00 | 0.00 | 1.27 |
| | | 標準偏差(個/年) | 0.00 | 0.00 | 0.55 | 0.83 | 0.68 | 0.00 | 0.00 | 0.68 |

| | | | F3 | F2 | F1 | F0 | 計 |
|-------------|--------------------|-----------|------|------|------|------|-----------|
| 疑似51.5年間の竜巻 | 疑似51.5年間 (陸上竜巻) | 期間内個数 | 3 | 14 | 36 | 38 | 91 |
| | | 平均値(個/年) | 0.06 | 0.27 | 0.70 | 0.74 | 1.77 |
| | | 標準偏差(個/年) | 0.24 | 0.63 | 0.84 | 0.83 | 1.36 |
| | 疑似51.5年間 (全竜巻) | 期間内個数 | 3 | 14 | 36 | 38 | 91 |
| | | 平均値(個/年) | 0.06 | 0.27 | 0.70 | 0.74 | 1.77 |
| | | 標準偏差(個/年) | 0.24 | 0.63 | 0.84 | 0.83 | 1.36 |

(b) 被害幅

| | | F3 | F2 | F1 | F0 | 計 |
|-------------------------|---------|------|-----|-----|----|-----|
| 1961.1-2012.6 51.5年間 | 期間内個数 | 3 | 14 | 24 | 7 | 48 |
| | 平均値(m) | 750 | 327 | 177 | 41 | 237 |
| | 標準偏差(m) | 1083 | 550 | 277 | 49 | 445 |
| 疑似51.5年間 (全竜巻) | 期間内個数 | 3 | 14 | 36 | 38 | 91 |
| | 平均値(m) | 750 | 327 | 218 | 44 | 180 |
| | 標準偏差(m) | 1083 | 550 | 307 | 47 | 360 |

(c) 被害長さ

| | | F3 | F2 | F1 | F0 | 計 |
|-------------------------|----------|----|------|------|------|------|
| 1961.1-2012.6 51.5年間 | 期間内個数 | 3 | 14 | 24 | 7 | 48 |
| | 平均値(km) | 1 | 1.82 | 1.20 | 0.69 | 1.32 |
| | 標準偏差(km) | 1 | 1.94 | 0.85 | 0.30 | 1.26 |
| 疑似51.5年間 (全竜巻) | 期間内個数 | 3 | 14 | 36 | 38 | 91 |
| | 平均値(km) | 1 | 1.82 | 1.39 | 0.71 | 1.18 |
| | 標準偏差(km) | 1 | 1.94 | 0.87 | 0.28 | 1.03 |

※ 被害長さの統計量は、各竜巻の発生地点と消滅地点をもとに1km幅に掛かる長さをもとに評価

第7-5表 陸側3-4kmでの統計量

(a) 発生数

| | | | F3 | F2 | F1 | F0 | 小計 | 陸上不明 | 海上不明 | 合計 |
|------------|-------------------------|-----------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| 過去に観測された竜巻 | 1961.1-2012.6 51.5年間 | 期間内個数 | 5 | 12 | 16 | 2 | 35 | 0 | 0 | 35 |
| | | 平均値(個/年) | 0.10 | 0.23 | 0.31 | 0.04 | 0.68 | 0.00 | 0.00 | 0.68 |
| | | 標準偏差(個/年) | 0.30 | 0.55 | 0.51 | 0.20 | 0.84 | 0.00 | 0.00 | 0.84 |
| | 1991.1-2012.6 21.5年間 | 期間内個数 | 1 | 5 | 10 | 2 | 18 | 0 | 0 | 18 |
| | | 平均値(個/年) | 0.05 | 0.23 | 0.47 | 0.09 | 0.84 | 0.00 | 0.00 | 0.84 |
| | | 標準偏差(個/年) | 0.22 | 0.43 | 0.51 | 0.30 | 0.85 | 0.00 | 0.00 | 0.85 |
| | 2007.1-2012.6 5.5年間 | 期間内個数 | 0 | 1 | 4 | 1 | 6 | 0 | 0 | 6 |
| | | 平均値(個/年) | 0.00 | 0.18 | 0.73 | 0.18 | 1.09 | 0.00 | 0.00 | 1.09 |
| | | 標準偏差(個/年) | 0.00 | 0.43 | 0.49 | 0.43 | 0.57 | 0.00 | 0.00 | 0.57 |

| | | | F3 | F2 | F1 | F0 | 計 |
|-------------|--------------------|-----------|------|------|------|------|-----------|
| 疑似51.5年間の竜巻 | 疑似51.5年間 (陸上竜巻) | 期間内個数 | 5 | 12 | 24 | 10 | 51 |
| | | 平均値(個/年) | 0.10 | 0.23 | 0.47 | 0.19 | 0.99 |
| | | 標準偏差(個/年) | 0.30 | 0.55 | 0.51 | 0.43 | 0.91 |
| | 疑似51.5年間 (全竜巻) | 期間内個数 | 5 | 12 | 24 | 10 | 51 |
| | | 平均値(個/年) | 0.10 | 0.23 | 0.47 | 0.19 | 0.99 |
| | | 標準偏差(個/年) | 0.30 | 0.55 | 0.51 | 0.43 | 0.91 |

(b) 被害幅

| | | F3 | F2 | F1 | F0 | 計 |
|-------------------------|---------|-----|-----|-----|----|-----|
| 1961.1-2012.6 51.5年間 | 期間内個数 | 5 | 12 | 14 | 2 | 33 |
| | 平均値(m) | 590 | 363 | 149 | 15 | 285 |
| | 標準偏差(m) | 809 | 590 | 99 | 7 | 484 |
| 疑似51.5年間 (全竜巻) | 期間内個数 | 5 | 12 | 24 | 10 | 51 |
| | 平均値(m) | 590 | 363 | 166 | 15 | 224 |
| | 標準偏差(m) | 809 | 590 | 95 | 5 | 402 |

(c) 被害長さ

| | | F3 | F2 | F1 | F0 | 計 |
|-------------------------|----------|----|------|------|------|------|
| 1961.1-2012.6 51.5年間 | 期間内個数 | 5 | 12 | 13 | 2 | 32 |
| | 平均値(km) | 2 | 1.38 | 0.94 | 0.84 | 1.33 |
| | 標準偏差(km) | 3 | 0.64 | 0.49 | 0.71 | 1.23 |
| 疑似51.5年間 (全竜巻) | 期間内個数 | 5 | 12 | 24 | 10 | 51 |
| | 平均値(km) | 2 | 1.38 | 1.01 | 0.84 | 1.20 |
| | 標準偏差(km) | 3 | 0.64 | 0.43 | 0.53 | 1.02 |

※ 被害長さの統計量は、各竜巻の発生地点と消滅地点をもとに1km幅に掛かる長さをもとに評価

第7-6表 陸側4-5kmでの統計量

(a) 発生数

| | | | F3 | F2 | F1 | F0 | 小計 | 陸上不明 | 海上不明 | 合計 |
|------------|-------------------------|-----------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| 過去に観測された竜巻 | 1961.1-2012.6 51.5年間 | 期間内個数 | 4 | 10 | 14 | 2 | 30 | 1 | 0 | 31 |
| | | 平均値(個/年) | 0.08 | 0.19 | 0.27 | 0.04 | 0.58 | 0.02 | 0.00 | 0.60 |
| | | 標準偏差(個/年) | 0.27 | 0.53 | 0.53 | 0.20 | 0.87 | 0.14 | 0.00 | 0.87 |
| | 1991.1-2012.6 21.5年間 | 期間内個数 | 1 | 4 | 7 | 2 | 14 | 0 | 0 | 14 |
| | | 平均値(個/年) | 0.05 | 0.19 | 0.33 | 0.09 | 0.65 | 0.00 | 0.00 | 0.65 |
| | | 標準偏差(個/年) | 0.22 | 0.40 | 0.57 | 0.30 | 0.96 | 0.00 | 0.00 | 0.96 |
| | 2007.1-2012.6 5.5年間 | 期間内個数 | 0 | 0 | 1 | 1 | 2 | 0 | 0 | 2 |
| | | 平均値(個/年) | 0.00 | 0.00 | 0.18 | 0.18 | 0.36 | 0.00 | 0.00 | 0.36 |
| | | 標準偏差(個/年) | 0.00 | 0.00 | 0.43 | 0.43 | 0.53 | 0.00 | 0.00 | 0.53 |

| | | | F3 | F2 | F1 | F0 | 計 |
|-------------|--------------------|-----------|------|------|------|------|------|
| 疑似51.5年間の竜巻 | 疑似51.5年間 (陸上竜巻) | 期間内個数 | 4 | 10 | 17 | 10 | 41 |
| | | 平均値(個/年) | 0.08 | 0.19 | 0.33 | 0.19 | 0.80 |
| | | 標準偏差(個/年) | 0.27 | 0.53 | 0.57 | 0.43 | 0.93 |
| | 疑似51.5年間 (全竜巻) | 期間内個数 | 4 | 10 | 17 | 10 | 41 |
| | | 平均値(個/年) | 0.08 | 0.19 | 0.33 | 0.19 | 0.80 |
| | | 標準偏差(個/年) | 0.27 | 0.53 | 0.57 | 0.43 | 0.93 |

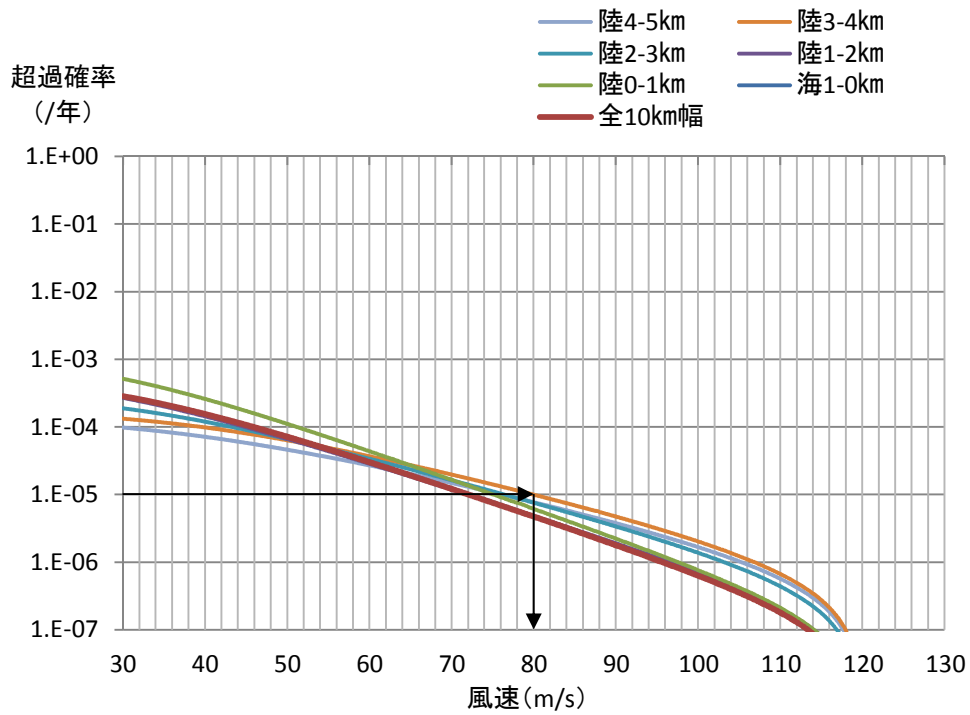
(b) 被害幅

| | | F3 | F2 | F1 | F0 | 計 |
|-------------------------|---------|-----|-----|-----|----|-----|
| 1961.1-2012.6 51.5年間 | 期間内個数 | 4 | 10 | 12 | 1 | 27 |
| | 平均値(m) | 713 | 391 | 118 | 50 | 305 |
| | 標準偏差(m) | 879 | 610 | 85 | 0 | 518 |
| 疑似51.5年間 (全竜巻) | 期間内個数 | 4 | 10 | 17 | 10 | 41 |
| | 平均値(m) | 713 | 391 | 142 | 50 | 236 |
| | 標準偏差(m) | 879 | 610 | 86 | 0 | 431 |

(c) 被害長さ

| | | F3 | F2 | F1 | F0 | 計 |
|-------------------------|----------|----|------|------|------|------|
| 1961.1-2012.6 51.5年間 | 期間内個数 | 4 | 10 | 12 | 1 | 27 |
| | 平均値(km) | 3 | 1.28 | 0.93 | 0.20 | 1.34 |
| | 標準偏差(km) | 1 | 0.48 | 0.41 | 0.00 | 0.93 |
| 疑似51.5年間 (全竜巻) | 期間内個数 | 4 | 10 | 17 | 10 | 41 |
| | 平均値(km) | 3 | 1.28 | 1.03 | 0.20 | 1.08 |
| | 標準偏差(km) | 1 | 0.48 | 0.40 | 0.00 | 0.89 |

※ 被害長さの統計量は、各竜巻の発生地点と消滅地点をもとに1km幅に掛かる長さをもとに評価



第7-2図 竜巻検討地域を1 km幅ごとに細分化した場合のハザード曲線
(10 km幅でのハザード曲線も合わせて記載)

第7-7表 評価結果のまとめ

| 領域 | 10 km幅 | 海 1-0 km | 陸 0-1 km | 陸 1-2km | 陸 2-3km | 陸 3-4km | 陸 4-5 km |
|--------------------------------------|--------|-------------|-------------|------------|------------|------------|-------------|
| 10 ⁻⁵ /年での 最大風速* (m/s) | 73 | 73 | 76 | 72 | 77 | <u>80</u> | 77 |

*太字下線ありの値は最大値

8. 竜巻最大風速のハザード曲線による最大風速 (V_{B2})

前記の第7-7表に示すとおり、竜巻検討地域全域(10 km幅)、及び1 km幅毎のハザード曲線において、年超過確率 10^{-5} での風速の最大値は 80m/s であり、これを最大風速 V_{B2} とする。最大風速評価結果を第8-1表に示す。

第8-1表 ハザード曲線による最大風速評価結果

| ハザード曲線の算定範囲 | 年超過確率 10^{-5} での最大風速 |
|------------------|--------------------------|
| 竜巻検討地域全域(10 km幅) | 73m/s |
| 1 km幅ごとの最大 | 80m/s (陸側3-4km) |

9. 竜巻ハザードの不確かさの検討

竜巻検討地域は竜巻についての過去観測データが少なく、統計処理として必ずしも十分ではない可能性も考えられることから、竜巻ハザードの不確かさ要素について、以下の検討を実施した。

① 確率分布形選択に伴う不確かさ（認識論的不確かさ）

確率分布形選択に伴うパラメータ不確かさ

…Jackknife 法を用いたハザードの推定誤差の検討

② データ量が少ないことに伴う不確かさ（認識論的不確かさ）

データ収集期間が 51.5 年間分であることから、地震等と比較するとデータ量が少ないことに伴うパラメータ不確かさ

…F 3 竜巻が 1 つ見落とされていたと仮定した場合のハザードへ与える影響の検討

③ データの不確かさ

今後データ収集が進み、疑似データ同様のデータが収集されたとした場合でも残る、データそのものの不確かさ

…疑似データ無しの場合の解析

(1) Jackknife 法を用いたハザードの推定誤差の検討

a. Jackknife 法について

Jackknife 法は母集団分布を仮定しないノンパラメトリックな方法であり、高い適用性をもつ。また、国土交通省が定める河川行政の技術分野に関する基準である「河川砂防技術基準」においても、確率分布モデルのバイアスを補正するのに用いられている。

Jackknife 法は大きさ n 個の標本のうち i 番目の 1 データのみを欠いたデータ数 $n-1$ 個の標本を全ての i について作成し、これらの標本から求めた統計量をもとに不偏推定値及びそのまわりの推定誤差を算定する手法である。算定式を以下に示す。

$$P^* = P_0 + \frac{(n-1)(P_0 - \bar{P})}{1} \quad (1)$$

$$\Delta P^* = \sqrt{n-1} \Delta P \quad (2)$$

- P_0 : n 個の全データを使って求められた再現期待値
(例えば風速平均値の場合 n セットの風速平均の平均)
- P^* : バイアス補正した推定値 (以下「Jackknife 推定値」という。)
- ΔP^* : P^* の標準偏差の推定値 (以下「Jackknife 推定幅」という。)
- \bar{P} : 分布を仮定した場合の推定値 (以下「推定値」という。)
- ΔP : n セットの風速平均データの標準偏差
- (1) 式の下線部 : バイアス (母数の真の値と推定値の差)

b. 検討結果

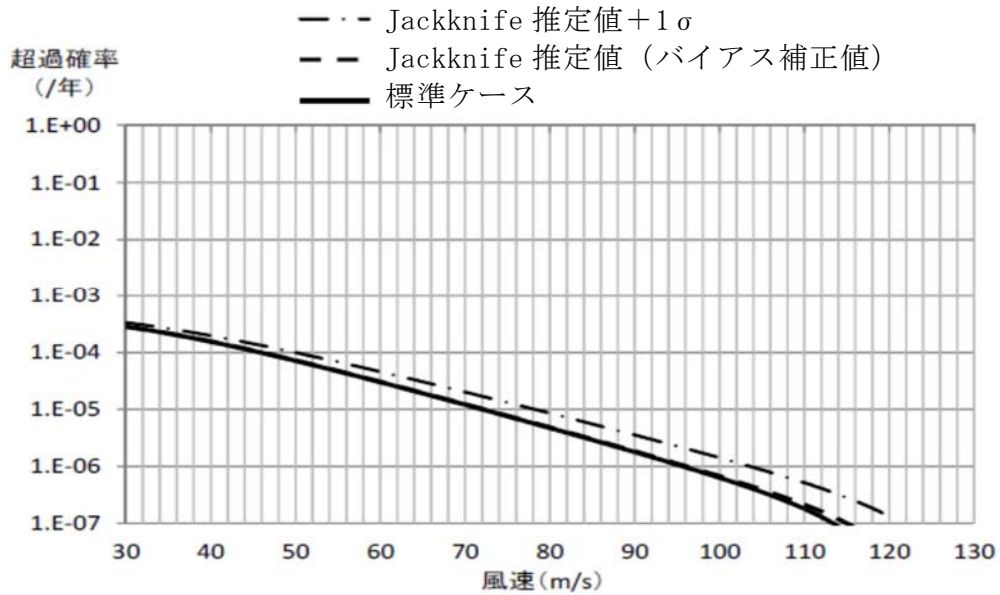
Jackknife 法を適用した特性値及びこれらの平均値と標準偏差及びそれぞれの推定幅を基に全てのパラメータを $+1\sigma$ とした場合のハザードを計算した。特性値の評価結果を第 9-1 表に、また、ハザードの推定結果を第 9-2 表及び第 9-1 図に示す。

ここで、標準ケースとは、ここまでに評価した 10 km 幅のハザード評価結果を示す。

ハザード評価の結果、年超過確率 10^{-5} に相当する風速は、Jackknife 法によるバイアス補正後で 73m/s となり、標準ケースの 73m/s と同じ風速になった。また、サンプリング誤差に伴う不確実さについては (バイアス補正值 $+1\sigma$)、年超過確率 10^{-5} において 79m/s となった。

第9-1表 Jackknife法による特性値の評価結果

| 項目 | 平均値 | | | 標準偏差 | | | 相関係数 | | |
|---|-----------------|--------------|----------------|-----------------|--------------|----------------|--------|--------|--------|
| | 最大風速 V (m/s) | 被害幅 W (m) | 被害長さ L (km) | 最大風速 V (m/s) | 被害幅 W (m) | 被害長さ L (km) | V-W | V-L | W-L |
| サンプル数 | 1188 | 1188 | 1188 | 1188 | 1188 | 1188 | 163 | 170 | 161 |
| 全データによる値 P_0 | 32.28 | 93.8 | 1.98 | 11.63 | 179.1 | 3.10 | 0.381 | 0.452 | 0.381 |
| 標本を一つ抜いた 平均値 ΔP | 32.28 | 93.8 | 1.98 | 11.63 | 179.1 | 3.10 | 0.381 | 0.452 | 0.381 |
| バイアス値 | 0.00 | 0.0 | 0.00 | -0.01 | -1.4 | -0.02 | -0.002 | -0.001 | -0.003 |
| Jackknife 推定値 P^* (バイアス補正值) | 32.28 | 93.8 | 1.98 | 11.64 | 180.5 | 3.12 | 0.382 | 0.453 | 0.385 |
| Jackknife 推定幅 ΔP^* | 0.34 | 5.2 | 0.09 | 0.36 | 21.8 | 0.34 | 0.065 | 0.057 | 0.077 |
| $P^* + \Delta P^*$ (バイアス補正值+1 σ) | 32.62 | 99.0 | 2.07 | 12.00 | 203.0 | 3.47 | 0.447 | 0.510 | 0.462 |



第9-1図 標準ケースと Jackknife 推定値ケース,
Jackknife 推定値+1 σ ケースのハザード算定結果の比較

第9-2表 ハザードの推定結果の比較表

| ケース | 標準ケース | Jackknife 推定値 P* (バイアス補正值) | P* + ΔP* (バイアス補正值 + σ) |
|--------------------------------|----------|-------------------------------|---------------------------|
| 領域面積 (km ²) | 57000 | 57000 | 57000 |
| 想定総数 (個) | 1188 | 1188 | 1188 |
| 被災確率 (個/年/km ²) | 4.05E-04 | 4.05E-04 | 4.05E-04 |
| 風速平均値 (m/s) | 32.28 | 32.28 | 32.62 |
| 風速標準偏差 (m/s) | 11.64 | 11.64 | 12.00 |
| 被害幅平均 (km) | 0.094 | 0.094 | 0.099 |
| 被害幅標準偏差 (km) | 0.179 | 0.181 | 0.203 |
| 被害長さ平均 (km) | 1.98 | 1.98 | 2.07 |
| 被害長さ標準偏差 (km) | 3.10 | 3.12 | 3.47 |
| 相関係数 V-W | 0.381 | 0.382 | 0.447 |
| 相関係数 V-L | 0.452 | 0.453 | 0.510 |
| 相関係数 W-L | 0.381 | 0.385 | 0.462 |
| 10 ⁻⁵ 年での最大風速 (m/s) | 73 | 73 | 79 |

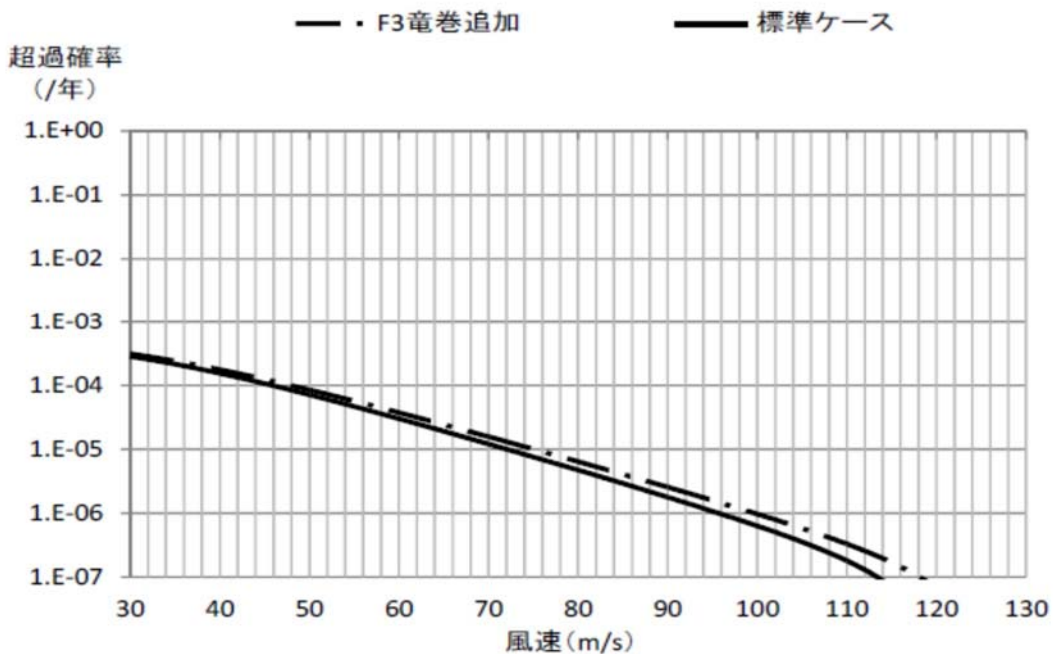
(2) F 3 竜巻の見落としを仮定した場合のハザードに与える影響

竜巻検討地域で、F 3 竜巻が 1 つ見落とされていたと仮定した場合のハザードへの影響を検討した。

データに、竜巻検討地域内で観測された F 3 竜巻のうち最も被害幅、被害長さの大きい竜巻（被害幅 2000m，被害長さ 42 km：1978 年川崎市）を 1 つ加えて疑似データを作成した。これを基にハザードを推定したところ、年超過確率 10^{-5} に相当する風速は 76m/s となった。

ハザードの推定結果を、第 9-2 図に示す。

標準ケースと比較して、年超過確率 10^{-5} に相当する風速との差は 3m/s であり、2 つのケースに対して、有意な差は認められない。



第 9-2 図 標準ケースと F 3 竜巻発生を仮定した場合のハザード算定結果の比較

(3) 疑似データ無しの場合の解析

疑似データ有とした場合，Fスケールの小さな竜巻の割合が多くなり，幅や長さの変動が小さくなる傾向がある。そのため，3種類の竜巻パラメータ（最大風速，被害幅及び被害長さ）がすべて判明している161個の竜巻観測データのみを用いて同様の検討を実施した。

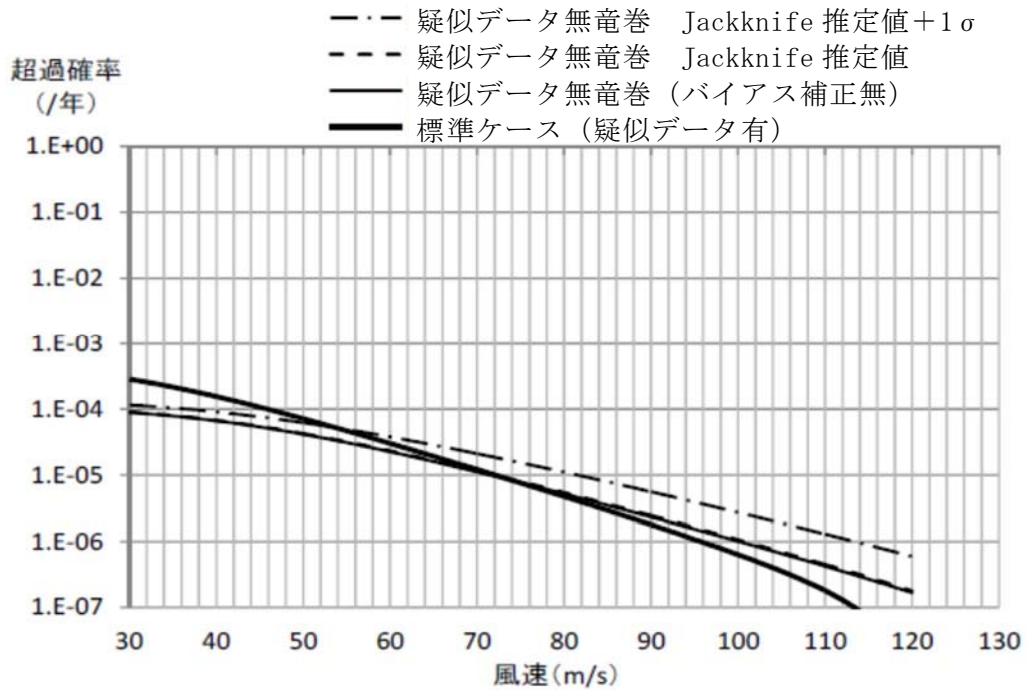
特性値の評価結果を第9-3表，ハザードの推定結果を第9-4表及び第9-3図に示す。疑似データ無竜巻での年超過確率 10^{-5} に相当する風速は，72m/sとなり，標準ケースの73m/sと有意な差は認められない。

第9-3表 Jackknife法による特性値の評価結果（疑似データ無）

| 項目 | 平均値 | | | 標準偏差 | | | 相関係数 | | |
|--|-----------------|--------------|----------------|-----------------|--------------|----------------|--------|--------|--------|
| | 最大風速 V (m/s) | 被害幅 W (m) | 被害長さ L (km) | 最大風速 V (m/s) | 被害幅 W (m) | 被害長さ L (km) | V-W | V-L | W-L |
| サンプル数 | 161 | 161 | 161 | 161 | 161 | 161 | 161 | 161 | 161 |
| 全データによる値 P_0 | 42.94 | 137.9 | 3.22 | 13.90 | 265.7 | 4.79 | 0.381 | 0.467 | 0.381 |
| 標本を一つ抜いた 平均値 ΔP | 42.94 | 137.9 | 3.22 | 13.90 | 265.6 | 4.78 | 0.381 | 0.467 | 0.381 |
| バイアス値 | 0.00 | 0.0 | 0.00 | -0.07 | -9.0 | -0.15 | -0.002 | -0.001 | -0.003 |
| Jackknife 推定値 P^* (バイアス補正值) | 42.94 | 137.9 | 3.22 | 13.97 | 274.6 | 4.94 | 0.382 | 0.468 | 0.385 |
| Jackknife 推定幅 ΔP^* | 1.10 | 21.0 | 0.38 | 0.83 | 65.8 | 1.14 | 0.066 | 0.057 | 0.077 |
| $P^* + \Delta P^*$ (バイアス補正值 + 1σ) | 44.04 | 158.9 | 3.60 | 14.81 | 340.4 | 6.08 | 0.448 | 0.525 | 0.462 |

第9-4表 ハザードの推定結果の比較表

| ケース | 不明竜巻含む | 疑似データ無竜巻 | | |
|-----------------------------------|----------|----------|-------------------------------|---------------------------|
| | 標準ケース | バイアス補正無 | Jackknife 推定値 P* (バイアス補正值) | P* + ΔP* (バイアス補正值 + σ) |
| 領域面積 (km ²) | 57000 | 57000 | 57000 | 57000 |
| 想定総数 (個) | 1188 | 161 | 161 | 161 |
| 被災確率 (個/年/km ²) | 4.05E-04 | 5.48E-05 | 5.48E-05 | 5.48E-05 |
| 風速平均値 (m/s) | 32.28 | 42.94 | 42.94 | 44.04 |
| 風速標準偏差(m/s) | 11.64 | 13.95 | 13.97 | 14.81 |
| 被害幅平均 (km) | 0.094 | 0.138 | 0.138 | 0.159 |
| 被害幅標準偏差 (km) | 0.179 | 0.266 | 0.275 | 0.340 |
| 被害長さ平均 (km) | 1.98 | 3.22 | 3.22 | 3.60 |
| 被害長さ標準偏差 (km) | 3.10 | 4.80 | 4.94 | 6.08 |
| 相関係数 V-W | 0.381 | 0.381 | 0.382 | 0.448 |
| 相関係数 V-L | 0.452 | 0.467 | 0.468 | 0.525 |
| 相関係数 W-L | 0.381 | 0.381 | 0.385 | 0.462 |
| 10 ⁻⁵ 年での最大風速 (m/s) | 73 | 72 | 72 | 82 |



第9-3図 標準ケース（疑似データ有）と疑似データ無竜巻のバイアス補正無しと Jackknife 推定値（バイアス補正值），Jackknife 推定値 + 1 σ のハザード算定結果の比較

以上のことから、竜巻ハザードの不確かさについて、確率分布形の選択、データ量が少ないこと及びデータの不確かさによる、ハザードへの影響はほとんどないことから、データの高い安定性を確認した。

<参考文献>

- (1) 井上博登, 福西史郎, 鈴木哲夫, (2013):原子力発電所の竜巻影響評価ガイド(案)及び解説, 独立行政法人原子力安全基盤機構,
JNES-RE-2013-9009.
- (2) Wen. Y. K and Chu. S. L. (1973) : Tornado risks and design wind speed, Proceedings of American Society of Civil Engineering, Journal of the Structural Division 99, 2409-2421
- (3) Garson. R. C., Morla-Catalan J. and Cornell C. A. (1975) : Tornado risk evaluation using wind speed profiles, Journal of the Structural. Division, Proceedings of American Society of Civil Engineering, pp.1167-1171
- (4) Garson. R. C., Morla-Catalan J. and Cornell C. A. (1975) : “Tornado Design Winds Based on Risk,” Journal of the Structural Division, Proceedings of the American Society of Civil Engineers, Vol. 101, No. 9, pp.1883-1897
- (5) 東京工芸大学 (2011) : 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
- (6) 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>)

海上のFスケール不明竜巻の按分方法の妥当性について

51.5年間の疑似データを推定する際に、海上で発生したFスケール不明竜巻（非上陸竜巻）をFスケールが判明している陸上竜巻（上陸竜巻含む）のFスケール毎の発生比率で按分している。ここでは、「沿岸部近傍での竜巻の発生特性は陸上と海上とでは類似している」と仮定している。他の合理的な按分方法もないのが実情ではあるが、観測結果を基に、この仮定の妥当性について考察する。

ここでは、陸上で発生した竜巻（以下「陸上竜巻」という。）と海上で発生しその後上陸した竜巻（以下「上陸竜巻」という。）を区別して考える。

別表1-1及び別図1-1は、陸上竜巻、上陸竜巻及び（陸上＋上陸）竜巻のそれぞれの竜巻区分に対して、F0、F1、F2以上の竜巻が占める割合である。全国の上陸竜巻の場合、Fスケール毎の割合はそれぞれ30、45、24%となっており、陸上竜巻との間に大きな差はない（数%以内）。上陸竜巻は海上で発生した竜巻であることから、海上でのFスケール不明竜巻のFスケール毎の発生割合は、上陸竜巻の発生割合と同様だと考えられる。

上陸竜巻と陸上竜巻の発生割合に大きな差は見られないことは、海側と陸側のFスケール毎の発生割合が類似していることを示唆している。従って、海上でのFスケール不明竜巻を、陸上竜巻（あるいは（陸上＋上陸）竜巻）の発生割合で按分する手法は妥当な方法だと考えられる。

一方、東海第二発電所の上陸竜巻の場合は、Fスケール毎の割合はそれぞれ、26、49、25%であり、全国と同様、陸上竜巻との間に大きな差は無い。また、陸上竜巻、上陸竜巻、及び（陸上＋上陸）竜巻のいずれにおいても、全国沿岸竜巻の発生数の割合と大きな差はない（5%以内）。以上より、全国沿岸と東海第二発電所の竜巻検討地域との間には地域特性による影響はないことが確認できた。

したがって、海上のFスケール不明竜巻を（陸上＋上陸）竜巻の割合で按分する本手法は、データ数が少ない場合にも有効な手法だと考えられる。

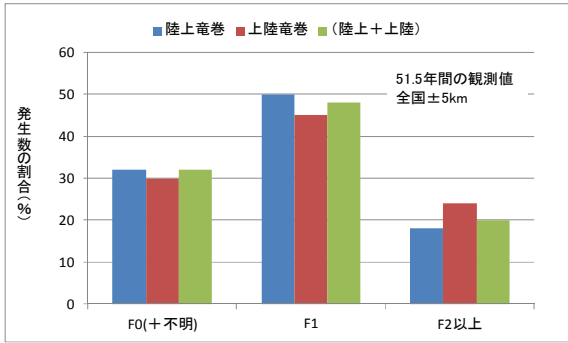
別表 1-1 Fスケール毎の竜巻発生数の割合

① 全国沿岸±5km

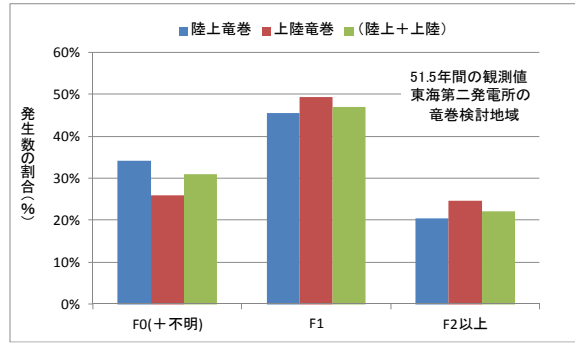
| 発生数の割合 (%) | F 0 (+不明) | F 1 | F 2以上 |
|------------|-----------|-----|-------|
| 陸上竜巻 | 32 | 50 | 18 |
| 上陸竜巻 | 30 | 45 | 24 |
| (陸上＋上陸) | 32 | 48 | 20 |

② 東海第二発電所の竜巻検討地域

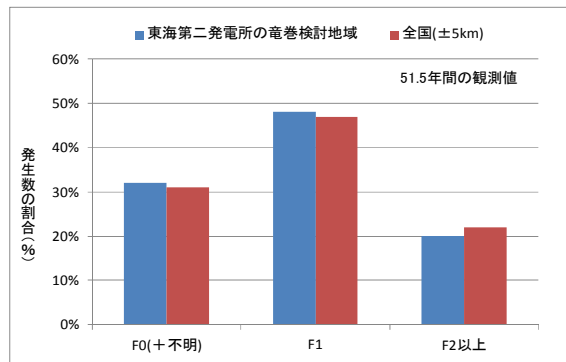
| 発生数の割合 (%) | F 0 (+不明) | F 1 | F 2以上 |
|------------|-----------|-----|-------|
| 陸上竜巻 | 34 | 45 | 21 |
| 上陸竜巻 | 26 | 49 | 25 |
| (陸上＋上陸) | 31 | 47 | 22 |



① 全国沿岸±5km



② 東海第二発電所の竜巻検討地域



③ (陸上+上陸) 竜巻

別図 1-1 F スケール毎の発生数の割合

竜巻発生数の確率分布(ポアソン, ポリヤ分布)が
ハザード結果に及ぼす影響について

1. 竜巻発生確率とハザード曲線

Wen & Chu⁽¹⁾は、竜巻に遭遇し、かつ竜巻風速がある値以上となり確率の推定法を対案している。それによれば、竜巻の発生がポアソン過程に従うと仮定した場合、竜巻の年発生数の確率密度分布はポアソン分布もしくはポリヤ分布に適合する。

$$\text{ポアソン分布: } P_T(N) = \frac{(\nu T)^N}{N!} \exp(-\nu T) \quad (1)$$

$$\text{ポリヤ分布: } P_T(N) = \frac{(\nu T)^N}{N!} (1 + \beta \nu T)^{-(N+1/\beta)} \prod_{k=1}^{N-1} (1 + \beta k) \quad (2)$$

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。また、 T 年以内にいずれかの竜巻に遭遇し、 V_0 以上の竜巻風速に見舞われる確率 $P_{V_0,T}(D)$ は次式で表される。

$$\text{ポアソン分布: } P_{V_0,T}(D) = 1 - \exp[-\nu R(V_0)T] \quad (3)$$

$$\text{ポリヤ分布: } P_{V_0,T}(D) = 1 - [1 + \beta \nu R(V_0)T]^{-1/\beta} \quad (4)$$

ここで、 $R(V_0)$ は、評価対象とする構造物が、ある一つの竜巻に遭遇し、竜巻風速が V_0 以上となる確率である。

2. ポアソン分布とポリヤ分布

ポアソン過程とは、ある現象がランダムに起こる場合に、今までの発生状況がそれ以降の発生に影響を与えず、かつ発生が時間的に一様に推移する現象を表す数学的モデルであり、以下のような仮定に基づいている。

- ① 事象は時間・空間のいかなる場所でもランダムに発生する。
- ② 与えられた時間・空間の区間内で、事象の発生は他の任意の区間に対して独立である
- ③ 微小区間 Δt における事象発生確率は Δt に比例する。 Δt の間に事象が 2 回以上発生する確率は無視できる。

ポアソン分布に従う現象例としては、交通事故件数、大量生産の不良品数、火災件数、遺伝子の突然変異など数多くある。ポアソン分布の分散は平均値に等しいが、観測される現象の中には、その分散が平均値から外れている現象もある。

ポリヤ分布は、分散と平均値が異なるような現象への適合度が高く、 β が大きい場合は分散の大きな分布形を表し、 $\beta \rightarrow 0$ のときにはポアソン分布に近づく。Thom(1963)⁽²⁾は、米国中部を対象とした竜巻発生数の分析を行い、ポアソン過程が実態と乖離する可能性があることを指摘するとともに、ポリヤ分布による適合性が高いことを示した。また、東京工芸大学委託成果⁽³⁾では、陸上竜巻（含む上陸竜巻）及び海上竜巻のいずれに対しても、ポリヤ分布の適合度が高いことを示した。

ポリヤ分布は、疫病の流行、ある単語を含む文書数を数える文書頻度などの言語処理などに活用されており、ある事象が起こった場合に、それによって周囲にも現象が起こりやすくなる現象（弱い伝播性）が考慮されている。竜巻の場合では、前線や台風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 (tornado outbreak と呼ばれる) 状況が考えられる。

(Wen & Chu, 1973) ⁽¹⁾

3. 確率論から見た近似式

前項にて示した (3) (4) 式に基づき、ポアソン分布とポリヤ分布に基づく竜巻ハザードを実際に計算すると、両者にほとんど違いが見られない。以下では、その理由について考察する。

ある一つの竜巻に遭遇し、竜巻風速が V_0 以上となるような被害を受ける確率を $R(V_0)$ とすると、このような竜巻被害を受けない確率は次式で表される。

$$\text{(被害を受けない確率)} = 1 - R(V_0) \quad (5)$$

同様に、 N 個の竜巻が発生したときに、いずれの竜巻に対しても被害を受けない確率は次式で表される。(独立性を仮定)。

$$\text{(} N \text{ 個の竜巻で被害を受けない確率)} = [1 - R(V_0)]^N \quad (6)$$

逆に、 N 個の竜巻が発生したときに、いずれかの竜巻により被害 (最低 1 回, 最大 N 回) を受ける確率は次式となる。

$$\text{(} N \text{ 個のいずれかの竜巻で被害を受ける確率)} = 1 - [1 - R(V_0)]^N \quad (7)$$

従って、一年間に N 個の竜巻が発生する確率を $P(N)$ とすると、これによる被害確率は、

$$\{1 - [1 - R(V_0)]^N\} P(N) \quad (8)$$

となる。 $R(V_0)$ が十分小さければ、上式は次のように近似できる。

$$\{1 - [1 - R(V_0)]^N\} P(N) \approx R(V_0) \times N \times P(N) \quad (9)$$

ここで、次の近似を用いている。

$$[1 - R(V_0)]^N \approx 1 - N \times R(V_0) \quad (10)$$

竜巻被害の場合，は通常 10^{-3} 以下であるから，式の近似は非常に良い精度で成り立つ。

以上のことから，式より 1 年間にいずれかかの竜巻により被害を受ける確率は次式で近似できる。

$$P_{Vo}(D) \approx \sum_{N=1}^{\infty} [R(Vo) \times N \times P(N)] = R(Vo) \sum_{N=1}^{\infty} \{N \times P(N)\} = \nu R(Vo) \quad (11)$$

即ち，被害確率は竜巻発生数の平均値のみに依存し，標準偏差は勿論，確率分布にも無関係であり，ポリヤ分布とポアソン分布によるハザードの結果は一致することが理解できる。

4. ポアソン分布とポリヤ分布のハザードの近似式

3. では，確率論的な観点だけで近似式を誘導したが，ここでは，(3) (4) の近似式を直接求め，上記の結果を検証する。

式(8)の $P(N)$ としてポアソン分布を仮定し，

$$\begin{aligned} \{1 - [1 - R(Vo)]^N\} P(N) &= P(N) - [1 - R(Vo)]^N P(N) \\ &= P(N) - [1 - R(Vo)]^N \frac{\nu^N}{N!} \exp(-\nu) = P(N) - \frac{(\nu - \nu R(Vo))^N}{N!} \exp(-\nu) \end{aligned} \quad (12)$$

となることを考慮すると，(11) 式の厳密な式は以下のとおりである。

$$\begin{aligned} P_{Vo}(D) &= \sum_{N=1}^{\infty} \left\{ P(N) - \frac{(\nu - \nu R(Vo))^N}{N!} \exp(-\nu) \right\} \\ &= 1 - \exp(\nu - \nu R(Vo)) \exp(-\nu) \\ &= 1 - \exp(-\nu R(Vo)) \end{aligned} \quad (13)$$

即ち，ポアソン分布によるハザード評価の(3)式が導かれる。ここで，次の関係式を用いている。

$$\exp(x) = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{x^n}{n!} \quad (14)$$

従って、式(3)（あるいは式(13)）は、式(14)を用いると、

$$P_{V_0}(D) = 1 - \exp(-\nu R(V_0)) = 1 - \left[1 + \frac{(-\nu R(V_0))}{1!} + \frac{(-\nu R(V_0))^2}{2!} + \dots \right] \quad (15)$$

と表され、 $R(V_0)$ が小さい場合は、次式で近似できる。

$$P_{V_0}(D) \approx \nu R(V_0) \quad (16)$$

ポリヤ分布の場合も同様に、一般の2項定理を用いると、次式で近似できる。

$$P_{V_0}(D) = 1 - [1 + \beta \nu R(V_0)]^{-1/\beta} = 1 - \left(1 + \left(\frac{-1}{\beta} \right) \beta \nu R(V_0) + \dots \right) \quad (17)$$
$$\approx \nu R(V_0)$$

以上のことから、竜巻のように一つの竜巻に対する被害確率が非常に小さな現象に対しては、年被害確率は竜巻発生数の平均値にのみ依存し、発生数の確率密度分布形状にはほとんど無関係であることがわかる。

<参考文献>

- (1) Wen, Y. K and Chu, S. L. (1973) : Tornado risks and design wind speed, Proceedings of American Society of Civil Engineering, Journal of the Structural Division 99, 2409-2421
- (2) Thom H. CS., 1963: Tornado probabilities. Mon. Wea. Rev., 91, 730-736
- (3) 東京工芸大学 (2011) : 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

地形効果による竜巻の増幅の可能性について

1. 概要

「竜巻影響評価ガイド」では、丘陵等による地形効果によって竜巻が増幅する可能性があると考えられることから、原子力発電所が立地する地域において、評価対象施設の周辺地形等によって竜巻が増幅される可能性について検討を行い、その検討結果に基づいて設計竜巻の最大風速（ V_D ）を設定することが求められている。

ここでは、既往の研究に基づく地形の竜巻風速への影響に関する知見を取りまとめ、東海第二発電所における、地形効果による竜巻増幅の可能性について検討した。

2. 考慮対象となる地形のスケール

竜巻に対する地形の効果は、スーパーセルスケールへの関与によるメソスケールでの「発生」などへの影響と、渦の旋回流への関与によるマイクロスケールでの「風速」などへの影響とに大別できる。このうち、設計竜巻の最大風速 V_D を設定する際には、タッチダウンした漏斗雲により発生する旋回流及びそれに随伴して生じる強風への地形影響を検討すべきであり、マイクロスケール（数百 m）規模の地形の起伏を考慮すべきと考えられる⁽¹⁾⁽²⁾。

3. マイクロスケールの地形起伏が竜巻の旋回流強度及び強風に与える影響

マイクロスケールの地形の起伏が竜巻の旋回流及び強風に与える影響について、定性的な知見を与える研究で用いられる主な手法としては、以下の 3 つが挙げられる。

(1) 被害状況調査⁽¹⁾⁽³⁾

実際の竜巻の被害を精査し，被害状況と地形特性との関係を調べることにより，被害が発生しやすい地形特性を分析し，そこから旋回流強度及び風速の強弱を類推する。

(2) 風洞実験⁽¹⁾

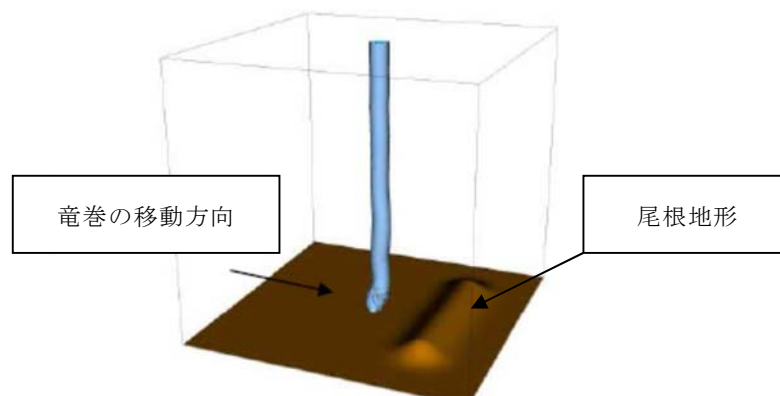
風洞実験の測定部に尾根や斜面といった地形模型を入れ，その上部に竜巻発生装置を設置し，それを移動させたときの，地表面近傍の圧力，風速の分布を調べる。



第3-1図 風洞実験の様子(Karstens 2012)⁽¹⁾

(3) 数値シミュレーション⁽²⁾

竜巻の旋回流や移動及び地形の起伏を模擬した流体解析により，旋回流の強度や風速及び竜巻の構造に関連する圧力分布を調べる。



第3-2図 数値シミュレーションのモデル例

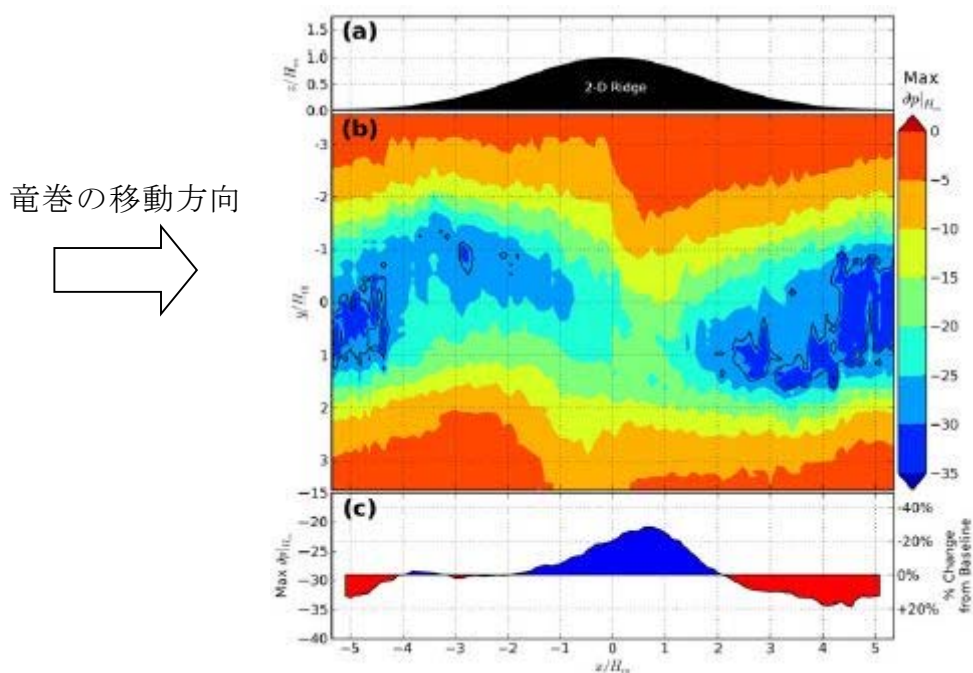
被害状況調査によれば、竜巻の強化が下り斜面や尾根の裾で生じる可能性が示唆されている⁽¹⁾⁽³⁾。

また、実被害調査の知見を支持する結果が風洞実験及び数値シミュレーションにおいても確認されている。二次元尾根地形を対象とした場合の風洞実験⁽¹⁾及び数値シミュレーション⁽²⁾の結果を、それぞれ第3-3図及び第3-4図に示す。

風洞実験の結果である第3-3図においては、竜巻を模擬した旋回流が(a)に示す二次元尾根地形※を図の左から右に移動する時に地表面で測定された圧力の最大値を(b)に、圧力勾配（風の駆動力になり、風速に相当する）を(c)に示しており、(c)から以下のことが分かる。

※：過去の竜巻被害を受けた斜面の傾斜等を考慮し、尾根高さHに対し前後5Hの領域を模擬している。

- ① 圧力勾配は、斜面において正及び負の値を持つ（旋回流が強弱する）
- ② 圧力勾配は、尾根の上流及び下流の平坦部ではほぼフラットとなる（旋回流の強度が変化しない）

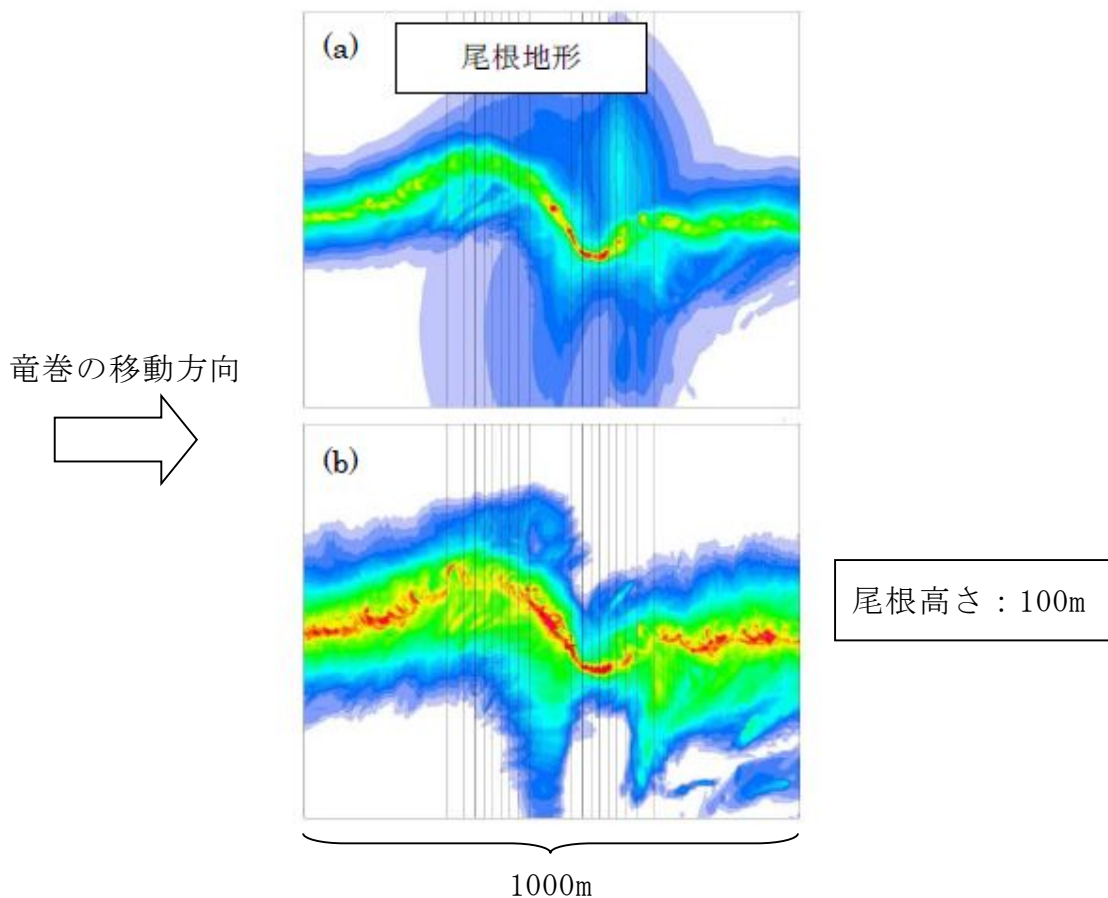


第3-3図 尾根地形を竜巻が通過するときの地表面圧力(b)及び圧力勾配(c)⁽¹⁾

数値シミュレーションの結果である第3-4図においては、(a)にピーク圧力を、(b)に風速を示す。図中の黒色実線は等高線を意味し、以下に示すように、風洞実験の結果（第3-3図）と整合している。

- ・ 上り斜面では圧力が増加し（緑色→赤色）、下り斜面では圧力が減少（赤色→緑色）する（前述の風洞実験の知見①に対応）
- ・ ピーク圧力の高い領域は尾根頂部に限定され、平坦部の圧力は上流及び下流側と同レベルとなる。（前述の風洞実験の知見②に対応）

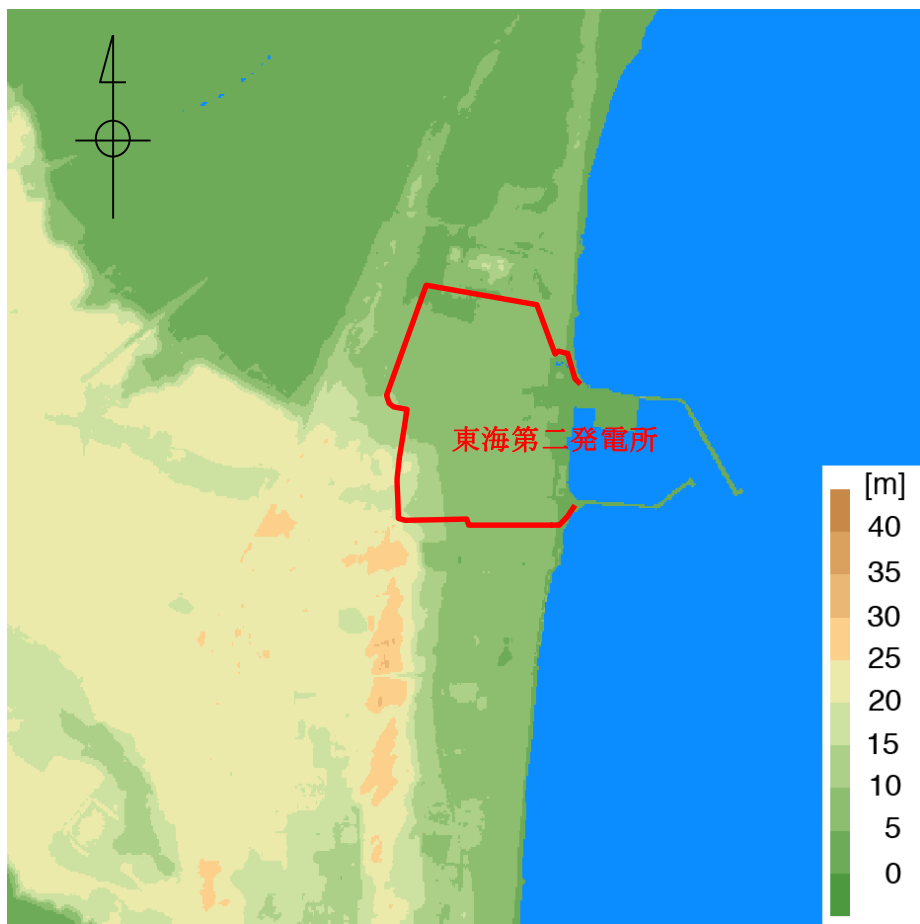
また、これらの研究結果は、地形の起伏の影響範囲が、斜面及び尾根、山の頂、裾部に限定されることを示唆しており、地形の下流側の平坦部における風速や圧力の値は、地形を乗り越える前の上流部の値に相当する。



第3-4図 尾根地形を竜巻が通過するときの地表面ピーク圧力(a)及び風速(b)⁽²⁾

4. 東海第二発電所敷地周辺の地形効果の考慮要否

東海第二発電所敷地周辺の地形を第4-1図に示す。敷地周辺は最大でも標高40m程度のなだらかな地形であり、地形効果の影響の研究において想定するようなマイクロスケール（数百m）規模の起伏は認められないことから、地形効果による竜巻の増幅の可能性は低く、考慮不要と判断した。



第4-1図 東海第二発電所を中心とした東西3km×南北3kmの地形標高

(国土地理院5mメッシュ標高データに**加筆**)

<参考文献>

- (1) Karstens, C.D. Observations and laboratory simulations of tornadoes in complex topographical regions, Graduate theses and dissertations of Iowa state univ, paper12778, 2012
- (2) Lewellen, D. C., Effects of Topography on Tornado Dynamics: A Simulation Study, 26th Conference on Severe Local Storms, American Meteorological Society, 4B.1., 2012
- (3) Forbes, G. S. Topographic Influences on Tornadoes in Pennsylvania, Proc 19th Conf Severe local storms American Meteorological Society, pp.269-272, 1998

参考資料：地形の起伏に起因する竜巻の旋回流の強弱に対する物理的解釈

ここでは、本資料で示した地形の起伏による竜巻の旋回流の強弱に対する物理的解釈を示す。なお、ここで示す角運動量保存則に基づく解釈の妥当性を、被害状況調査 (Forbes 1998, Karstens 2012) や風洞実験 (Karstens 2012) の結果も支持している。

一般的に、回転する流れでは、「回転の中心からの距離」と「周方向の回転速度」の積が一定になるという性質 (角運動量保存則) がある。角運動量保存則と Holton (1992) を参考に、竜巻旋回流が形成された後における、渦の伸長・収縮に伴う旋回風速の増速・減速機構を以下に導く。

竜巻のコア部分を1つの鉛直軸を有する気柱と仮定すると、上り坂を越える場合 (第1図の渦1から渦2へ移動する場合) には渦の長さが短くなる。その際、角運動量の保存則は次式のように表される。

$$\int_0^{2\pi} \int_0^{r_1} \int_0^{h_1} (\rho r^2 \omega_1) dh \cdot r dr d\phi = \int_0^{2\pi} \int_0^{r_2} \int_0^{h_2} (\rho r^2 \omega_2) dh \cdot r dr d\phi \quad \textcircled{1}$$

$$\frac{1}{4} r_1^4 \omega_1 h_1 = \frac{1}{4} r_2^4 \omega_2 h_2 \quad \textcircled{2}$$

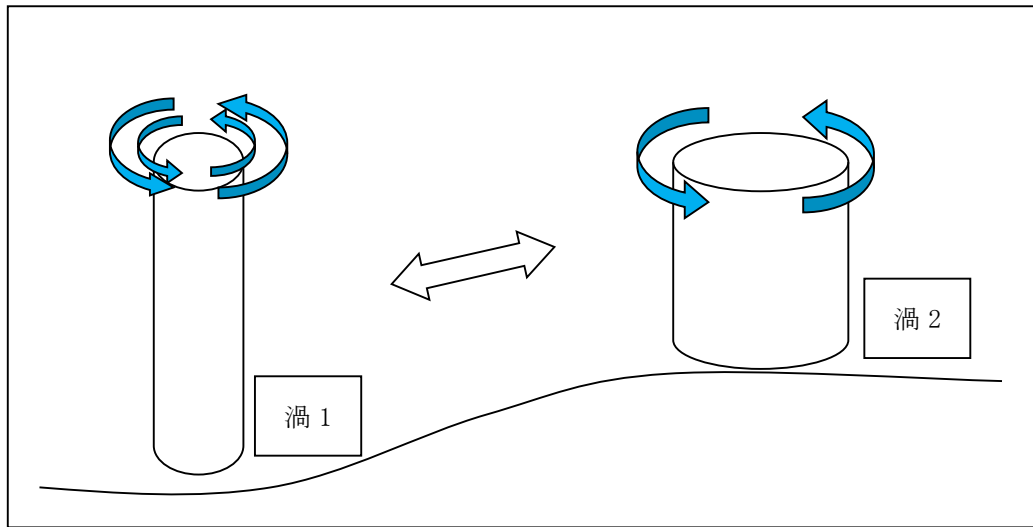
ここで、 ω は角速度、 r は渦コア (気柱) の半径、 h は渦コア (気柱) の高さ、 ρ は空気密度であり、添字の1と2はそれぞれ渦1と渦2を示す。また、気柱の体積が保存されるので、式③が成立する。

$$\pi r_1^2 h_1 = \pi r_2^2 h_2 \quad \Rightarrow \quad r_2^2 = \frac{h_1}{h_2} r_1^2 \quad \textcircled{3}$$

この関係を式②に代入すると、式④が得られる。

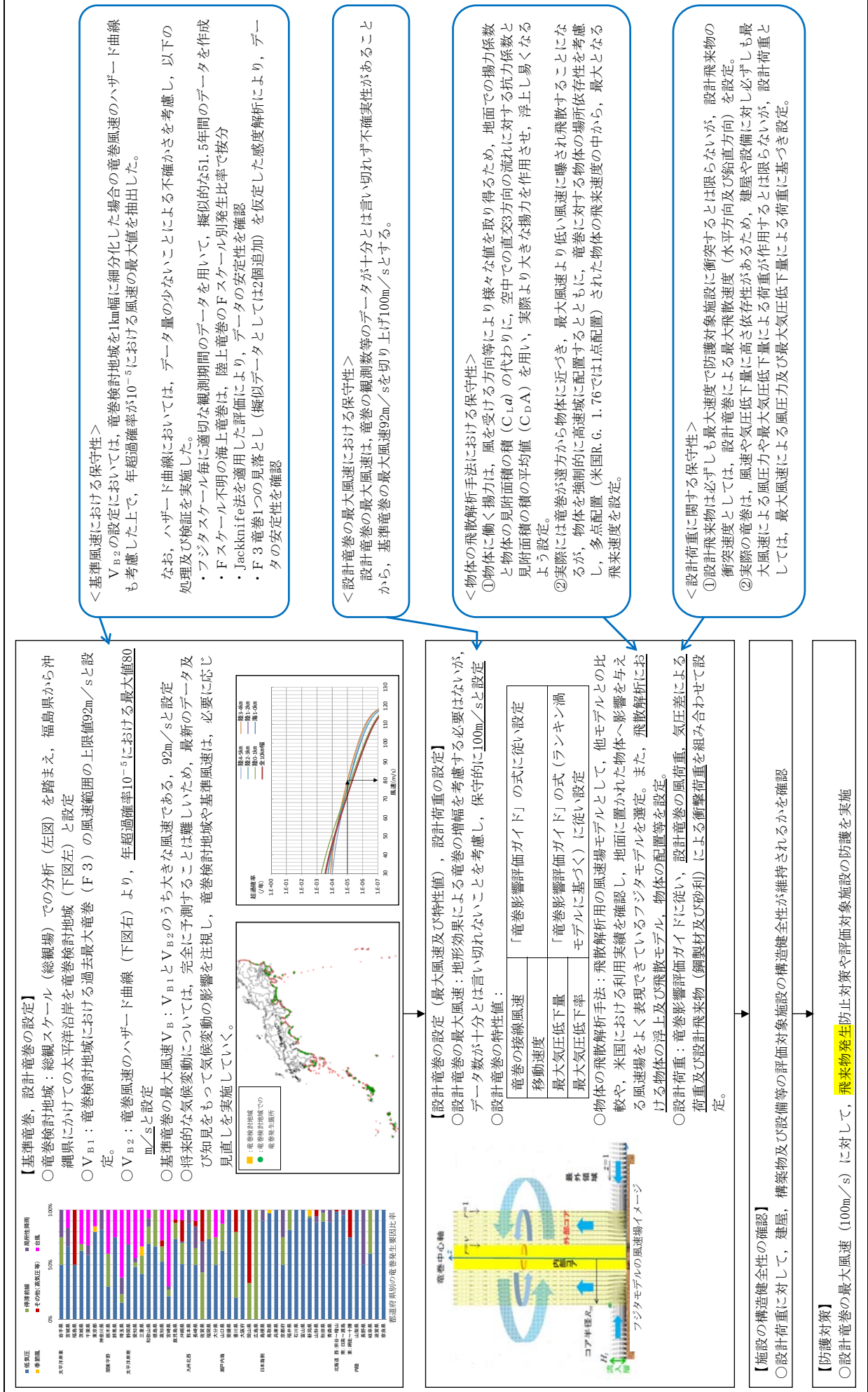
$$\frac{\omega_1}{h_1} = \frac{\omega_2}{h_2} \quad \Rightarrow \quad \frac{d}{dt} \left(\frac{\omega}{h} \right) = 0 \quad \textcircled{4}$$

④の関係式は「渦位（ポテンシャル渦度）の保存式」に相当するものであり、角速度は地上高さ h に比例することが分かる。また、③より、渦の半径 r は $h^{1/2}$ に反比例するので、竜巻の最大接線風速 ($\omega \times r$) は $h^{1/2}$ に比例する。そのため、竜巻の渦が上り斜面を移動する時、基本的に渦は弱まり、下り斜面を移動する時には強まる。



第 1 図 竜巻の旋回流の地形影響に関する模式図

第 7-1 図に竜巻影響評価の概要及び保守性の確保の状況を示す。竜巻影響評価については、その不確実性を踏まえて、各ステップに対し保守性を考慮している。



第 7-1 図 竜巻影響評価の概要及び保守性の確保の状況

添付資料 8. 竜巻影響評価及び竜巻防護対策の概要

【1. 設計竜巻荷重, 設計荷重の設定】(別紙-1参照)

○「竜巻影響評価ガイド」に基づき, 設計竜巻荷重は, 設計竜巻の風圧力による荷重 (W_p), 気圧差による荷重 (W_w) 及び設計飛来物による衝突荷重 (W_c) を適切に組み合わせた荷重を設定するとともに, 設計竜巻荷重と組み合わせた荷重 (竜巻以外の自然現象による荷重等) は, 設計竜巻荷重に包絡される若しくは考慮すべき荷重ではないことを確認する。

○ W_p, W_w, W_c, W_M は, 設計竜巻の最大風速 $V_D=100\text{m/s}$, 風速場モデルをランキン渦モデル(「竜巻影響評価ガイド」に例示)とした場合の荷重を設定する。

【設計飛来物の設定】

○東海第二発電所の飛来物に係る現地調査を行い, 発電所構内の常設物(マンホール蓋等), 仮設物(資機材等)及び建築物附属物(屋根等)の中から, それらの飛来物発生防止対策の可否, 固定状況, 過去の被害事例や評価パラメータ(運動エネルギー及び貫通力)を踏まえ, 第1-1図のとおり設計飛来物を設定した。



鋼製材 (イメージ)

第1-1図 東海第二発電所の設計飛来物



砂利

【2. 竜巻影響評価】

○設計荷重に対し, 第2-1表の評価対象施設(構築物, 系統及び機器)の構造安全性が維持され安全機能が維持されていることを確認する。

<竜巻防護施設の評価>

○評価対象施設(屋外施設) (竜巻防護施設を内包する施設を除く), 屋内の施設で外気と繋がっている施設: 第2-1表(□)に対する設計飛来物による貫通評価, 設計荷重に対する強度評価を実施し, 評価対象施設の構造健全性が維持されることを確認し, 評価対象施設の安全機能維持に影響を及ぼす場合には, 防護対策を実施する。

○評価対象施設(竜巻防護施設を内包する施設: 第2-1表(□)の構造骨組評価, 設計飛来物の衝突に関する貫通及び裏面剥離評価, 局部評価及び建屋外周部建具(扉等)に関する評価を実施し, 内包する竜巻防護施設が影響を受けないことを確認し, 竜巻防護施設の安全機能維持に影響を及ぼす場合には, 評価対象施設の補強, 防護対策を実施する。

○評価対象施設(外殻となる施設)による防護機能が期待できない施設: 第2-1表(□)の外殻となる施設の外周部建具(扉等)に関する評価結果より, 評価対象施設が影響を受けないことを確認し, 評価対象施設の安全機能維持に影響を及ぼす場合には, 外殻となる施設の建具の補強, 防護対策及び運用による対策を実施する。

<竜巻防護施設に波及的影響を及ぼし得る施設の評価>

○評価対象施設(倒壊により竜巻防護施設を機能喪失させる可能性がある施設: 第2-1表(□)の構造骨組評価を実施し, 竜巻防護施設及び竜巻防護施設を内包する施設に影響を及ぼすことがないことを確認し, 竜巻防護施設を機能喪失させる可能性がある場合には, 防護対策を実施する。

○評価対象施設(屋外に設置されている竜巻防護施設の附属施設: 第2-1表(□)に対する設計飛来物による貫通評価, 設計荷重に対する強度評価を実施し, 評価対象施設の構造健全性が維持されることを確認する。竜巻防護施設を機能喪失させる可能性がある場合には, 損傷箇所の補修及び取替等の対策を実施するものとし, 手順と必要部材の整備を実施する。

【3. 飛来物発生防止対策】

○設計飛来物に設定した鋼製材より運動エネルギー又は貫通力が上回る飛来物源については, 竜巻防護施設及び竜巻防護施設に波及的影響を及ぼさないよう, 別紙-2に基づき, 飛来物発生防止対策を実施する。

<対策方針>

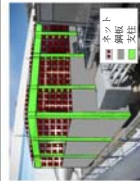
- ・対策エリア内に設置した資機材等の飛来物発生防止対策としては, 移設, 撤去又は浮き上がりや横滑りを考慮した固縛等を実施する。
- ・対策エリア内の車両は, 浮き上がり, 横滑り及び転倒を考慮した固縛等に加え, 可能な限りエリア外への退避を実施する。

【4. 飛来物防護対策】

○設計飛来物の衝突によって損傷する可能性がある竜巻防護施設について, 下記のとおり飛来物防護対策を実施する。

<防護ネット等による飛来物防護対策>

- ・設計飛来物に対する防護として, 竜巻防護施設及び竜巻防護施設を内包する施設に対し防護ネット等を設置する。
- ・防護ネットは設計飛来物の運動エネルギーを吸収可能な設計とするともに小径の飛来物(設計飛来物である砂利を除く)の通り抜けを防止する設計とする。



第4-1図 MCR換気系冷凍機防護壁(案)



第4-2図 海水ポンプ室防護壁(案)

<鋼製扉追込による防護対策>

- ・設計飛来物の衝突により既設扉建具が破損し, 竜巻防護施設への影響を及ぼし得ることから, 鋼製扉を新たに追設し, 外殻としての防護機能対策を実施する。

第2-1表 評価対象施設

| 施設 | 評価対象施設 |
|-------------------------------|--|
| 屋外施設 | <ul style="list-style-type: none"> ・ディーゼル発電機風フィルター ・ディーゼル発電機室ルーフベントファン ・中央制御室換気系冷庫機 ・海水ポンプ室内設備 ・非常用ガス処理系排気管 ・排気筒 |
| 竜巻防護施設を内包する施設 | <ul style="list-style-type: none"> ・原子炉建屋, タービン建屋, 使用済燃料乾式貯蔵建屋 ・船舶防護タンククランプ室 |
| 屋内の施設で外気に繋がっている施設 | <ul style="list-style-type: none"> ・中央制御室換気系排気筒, ファン(ダクト含む) ・ディーゼル発電機換気系ダクト ・原子炉建屋換気系排気筒 ・原子炉建屋換気系ファン ・中央制御室換気系ファン ・非常用電源機 |
| 外殻となる施設による防護機能が期待できない施設 | <ul style="list-style-type: none"> ・非常用ガス処理系設備, 非常用ガス再循環気設備 ・使用済燃料プール, 燃料プール冷却浄化系真空破砕弁 |
| 倒壊により, 竜巻防護施設を機能喪失させる可能性がある施設 | <ul style="list-style-type: none"> ・使用済燃料乾式貯蔵建屋 ・サービス建屋 ・海水ポンプ室 ・排気筒 |
| 屋外に設置されている竜巻防護施設の附属施設 | <ul style="list-style-type: none"> ・ディーゼル発電機排気消音器 ・ディーゼル発電機附属設備配管 ・海水ポンプ室内設備附属配管 |

第4-3図 鋼製扉追込(案)

第8-1-1図 竜巻影響評価及び竜巻防護対策(飛来物発生防止対策, 飛来物防護対策)の概要

評価対象施設の設計荷重について

1. 概要

設計竜巻に対し，評価対象施設の構造健全性の安全機能が維持されることの確認を行った結果を整理する。

2. 評価結果

2.1 評価荷重の設定

竜巻防護施設の評価に用いる評価荷重について別表1-2-1に，竜巻防護施設に波及的影響を及ぼし得る施設の評価に用いる評価荷重について別表1-2-2に整理する。

別表 1-2-1 電巻防護施設の評価に用いる評価荷重一覧表 (1/3)

| 評価対象施設 | 設計電巻荷重 | | | | | | | | | | その他の 評価荷重 ^{※1} |
|-----------------------------|--|------------------------------|------------------------------|------------------------------|-----------------------|----------------|-----------------------------------|-----------------|---|---|----------------------------|
| | W _w , W _M , W _P の選定 | | | | 複合荷重の設定 ^{※2} | | | | | | |
| | 設置 場所 | W _w ^{※1} | W _M ^{※1} | W _P ^{※1} | W _{T1} | W _w | W _w +0.5W _P | W _{T2} | W _w +0.5W _P +W _M | | |
| <屋外施設> | | | | | | | | | | | |
| 非常用ディーゼル発電機吸気フィルタ | 屋外 | ○ | × | ○ | ○ | — | ○ | — | — | — | 無し |
| 高圧炉心スプレイ系ディーゼル発電機吸気フィルタ | 屋外 | ○ | × | ○ | ○ | — | ○ | — | — | — | 無し |
| 非常用ディーゼル発電機室ルーフバントファン | 屋外 | ○ | × | × | — | ○ | — | — | — | — | 自重 |
| 高圧炉心スプレイ系ディーゼル発電機室ルーフバントファン | 屋外 | ○ | × | × | — | ○ | — | — | — | — | 自重 |
| 中央制御室換気系冷凍機 | 屋外 | ○ | × | × | — | ○ | — | — | — | — | 自重 |
| 残留熱除去系海水系ポンプ | 屋外 | ○ | × | ○ | ○ | — | ○ | — | — | — | 無し |
| 残留熱除去系海水系ストレーナ | 屋外 | ○ | × | ○ | ○ | — | ○ | — | — | — | 自重 |
| 非常用ディーゼル発電機海水ポンプ | 屋外 | ○ | × | ○ | ○ | — | ○ | — | — | — | 無し |
| 非常用ディーゼル発電機海水ストレーナ | 屋外 | ○ | × | ○ | ○ | — | ○ | — | — | — | 自重 |
| 高圧炉心スプレイ系ディーゼル発電機海水ポンプ | 屋外 | ○ | × | ○ | ○ | — | ○ | — | — | — | 無し |
| 高圧炉心スプレイ系ディーゼル発電機海水ストレーナ | 屋外 | ○ | × | ○ | ○ | — | ○ | — | — | — | 自重 |
| 非常用ガス処理系排気配管 | 屋外 | ○ | × | ○ | ○ | — | ○ | — | — | — | 自重, 内圧 |
| 排気筒 | 屋外 | ○ | ○ | × | — | ○ | — | — | — ^{※3} | — | 自重 |

注記) ※1 表中記号について対象とする荷重の考慮の有無を示す。 ○: 考慮する ×: 考慮しない, その他の荷重は評価で使用するものを記載する。
 ※2 複合荷重の構成について, ○のついた構成で評価を実施。 ○: 実施ケース —: 該当しないケース

別表 1-2-1 竜巻防護施設の評価に用いる評価荷重一覧表 (2/3)

| 評価対象施設 | 設計竜巻荷重 | | | | | | | その他の 評価荷重※1 |
|-----------------------|--|-------------------|-------------------|-------------------|-----------------------------------|---|----|----------------|
| | W _w , W _M , W _P の選定 | | | | 複合荷重の設定※2 | | | |
| | 設置 場所 | W _w ※1 | W _M ※1 | W _P ※1 | W _{T1} | W _{T2} | | |
| | | | | W _w | W _w +0.5W _P | W _w +0.5W _P +W _M | | |
| <屋外施設 (竜巻施設を内包する施設) > | | | | | | | | |
| 原子炉建屋 | 屋外 | ○ | ○ | ○ | — | ○ | 無し | |
| タービン建屋 | 屋外 | ○ | ○ | ○ | — | ○ | 無し | |
| 使用済燃料乾式貯蔵建屋 | 屋外 | ○ | ○ | ○ | — | ○ | 無し | |
| 軽油貯蔵タンクタンク室 | 屋外 (埋設) | × | × | ○ | — | — | | |

注記) ※1 表中記号について対象とする荷重の有無を示す。 ○：考慮する ×：考慮しない
 ※2 複合荷重の構成について、○のついた構成で評価を実施。 ○：実施ケース —：該当しないケース

別表 1-2-1 電巻防護施設評価に用いる評価荷重一覧表 (3/3)

| 評価対象施設 | 設計電巻荷重 | | | | | | | その他の 評価荷重 ^{※1} |
|---------------------------|--|------------------------------|------------------------------|------------------------------|-----------------|-----------------|---|----------------------------|
| | W _w , W _M , W _P の選定 | | | 複合荷重の設定 ^{※2} | | | | |
| | 設置 場所 | W _w ^{※1} | W _M ^{※1} | W _P ^{※1} | W _{T1} | W _{T2} | W _w +0.5W _P +W _M | |
| <屋内の施設で外気と繋がっている施設> | | | | | | | | |
| 中央制御室換気系隔離弁, ファン | 屋内 | × | × | ○ | ○ | — | — | 自重, 運転圧力 |
| 非常用ディーゼル発電機室換気系ダクト | 屋内 | × | × | ○ | ○ | — | — | 自重, 運転圧力 |
| 高圧炉心スプレイスディーゼル発電機室換気系ダクト | 屋内 | × | × | ○ | ○ | — | — | 自重, 運転圧力 |
| 原子炉建屋換気系隔離弁, ダクト | 屋内 | × | × | ○ | ○ | — | — | 自重, 運転圧力 |
| <外設となる施設による防護機能が期待できない施設> | | | | | | | | |
| 中央制御室換気系ファン | 屋内 | × | × ^{※3} | ○ | ○ | — | — | 無し |
| 中央制御室換気系フィルタユニット | 屋内 | × | × | ○ | ○ | — | — | 無し |
| 非常用電源盤 | 屋内 | × | × ^{※3} | × | — | — | — | 無し |
| 非常用ガス処理系設備, 非常用ガス再循環系設備 | 屋内 | × | × ^{※3} | × | — | — | — | 無し |
| 使用済燃料プール | 屋内 | × | × ^{※3} | × | — | — | — | 無し |
| 燃料プール冷却浄化系真空破壊弁 | 屋内 | × | × ^{※3} | × | — | — | — | 無し |
| 使用済燃料乾式貯蔵容器 | 屋内 | × | ○ | × | — | — | ○ | 無し |

注記) ※1 表中記号について対象とする荷重の有無を示す。 ○：考慮する ×：考慮しない
 ※2 複合荷重の構成について、○のついた構成で評価を実施。 ○：実施ケース —：該当しないケース
 ※3 W_Mに対して、防護対策を実施するため、衝撃荷重は作用しない。

別表 1-2-2 竜巻防護施設に波及的影響を及ぼし得る施設の評価に用いる評価荷重一覧表 (1/2)

| 評価対象施設 | 設計竜巻荷重 | | | | | | | | | | その他の 評価荷重 ^{※1} |
|--------------------------|--|------------------------------|------------------------------|------------------------------|-----------------------|----------------|-----------------------------------|-----------------|---|---|----------------------------|
| | W _w , W _M , W _P の選定 | | | | 複合荷重の設定 ^{※2} | | | | | | |
| | 設置 場所 | W _w ^{※1} | W _M ^{※1} | W _P ^{※1} | W _{T1} | W _w | W _w +0.5W _P | W _{T2} | W _w +0.5W _P +W _M | | |
| <機械的影響の観点> | | | | | | | | | | | |
| サービス建屋 | 屋外 | ○ | ○ | ○ | ○ | — | — | ○ | ○ | — | 無し |
| 海水ポンプ室 | 屋外 | ○ | ○ | × | — | — | — | ○ | ○ | — | 無し |
| 鋼製防護壁 | 屋外 | ○ | ○ | × | — | — | — | ○ | ○ | — | 無し |
| 排気筒 | 屋外 | ○ | ○ | × | — | ○ | — | — ^{※3} | — | — | 自重 |
| <機能的影響の観点> | | | | | | | | | | | |
| 非常用ディーゼル発電機排気消音器 | 屋外 | ○ | × ^{※3} | ○ | ○ | — | ○ | ○ | — | — | 無し |
| 非常用ディーゼル発電機排気配管 | 屋外 | ○ | × ^{※3} | ○ | ○ | — | ○ | ○ | — | — | 自重, 内圧 |
| 非常用ディーゼル発電機燃料ダイヤタンクベント管 | 屋外 | ○ | × ^{※3} | ○ | ○ | — | ○ | ○ | — | — | 自重, 内圧 |
| 非常用ディーゼル発電機機関ベント管 | 屋外 | ○ | × ^{※3} | ○ | ○ | — | ○ | ○ | — | — | 自重, 内圧 |
| 非常用ディーゼル発電機潤滑油サンプタンクベント管 | 屋外 | ○ | × ^{※3} | ○ | ○ | — | ○ | ○ | — | — | 自重, 内圧 |

注記) ※1 表中記号について対象とする荷重の有無を示す。 ○：考慮する ×：考慮しない
 ※2 複合荷重の構成について、○のついた構成で評価を実施。 ○：実施ケース —：該当しないケース
 ※3 W_Mに対して、防護対策を実施するため、衝撃荷重は作用しない。

別表 1-2-2 竜巻防護施設に波及的影響を及ぼし得る施設の評価に用いる評価荷重一覧表 (2/2)

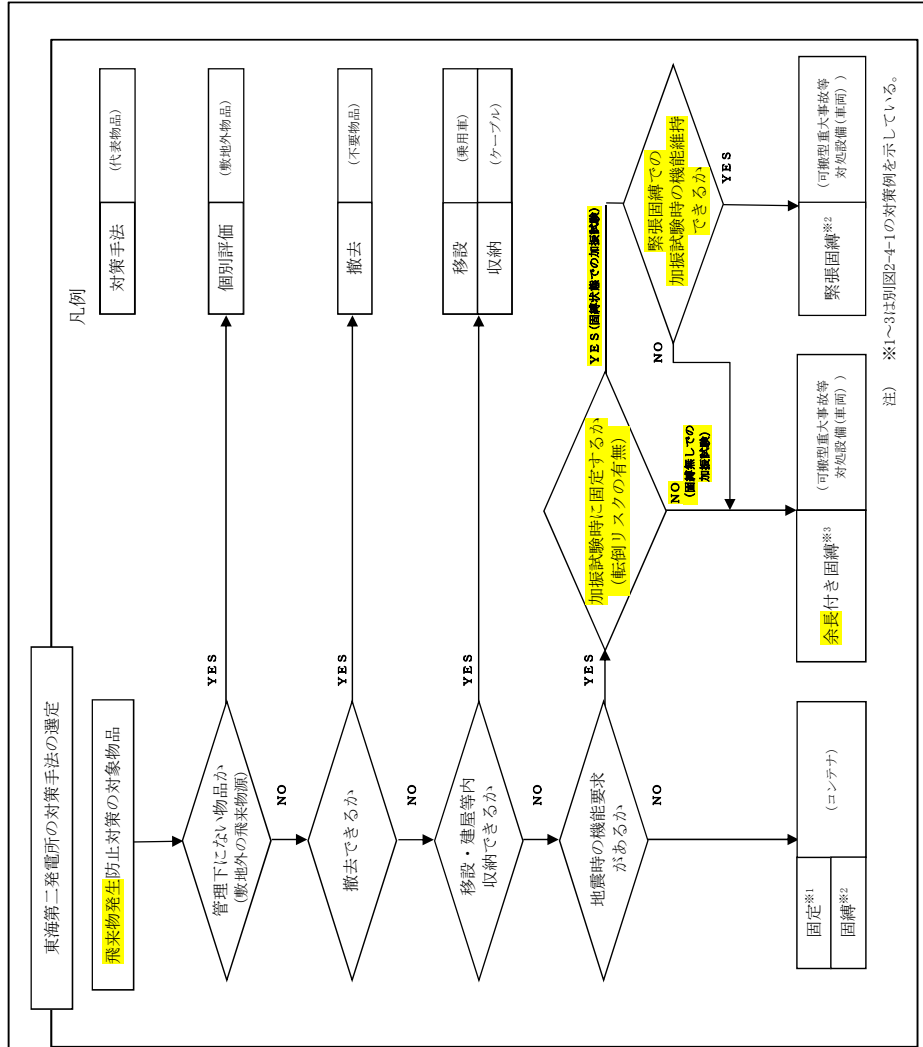
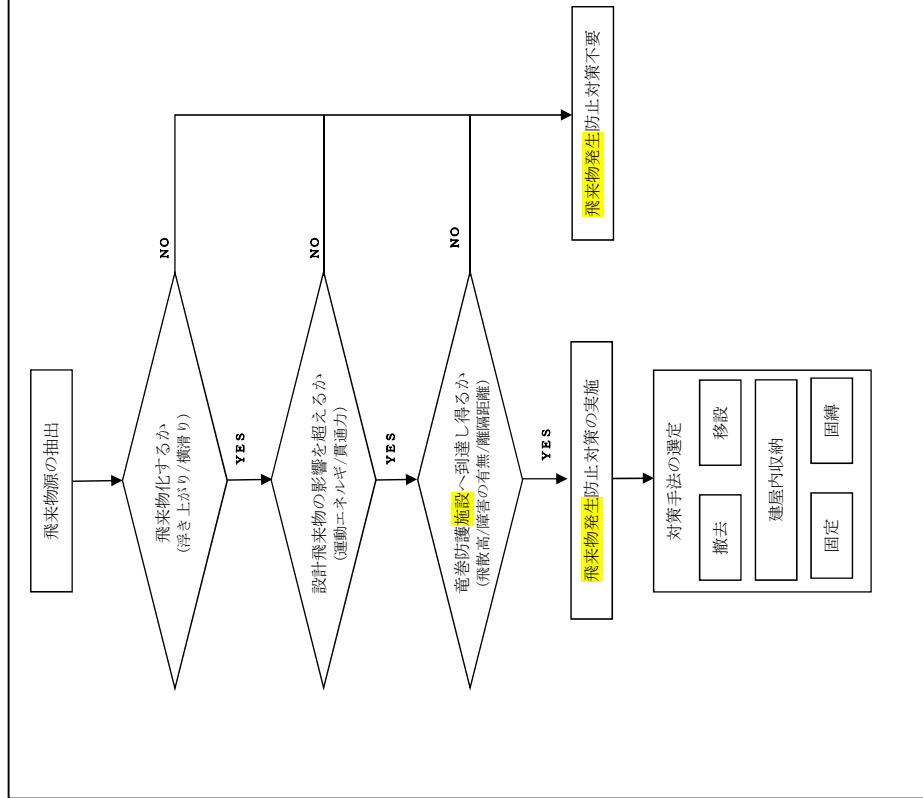
| 評価対象施設 | 設計竜巻荷重 | | | | | | | | その他の 評価荷重 ^{※1} |
|--------------------------------------|--|------------------------------|------------------------------|------------------------------|-----------------|----------------|-----------------------------------|---|----------------------------|
| | W _w , W _M , W _P の選定 | | | 複合荷重の設定 ^{※2} | | | | | |
| | 設置 場所 | W _w ^{※1} | W _M ^{※1} | W _P ^{※1} | W _{T1} | W _w | W _w +0.5W _P | W _w +0.5W _P +W _M | |
| <機能的影響の観点> | | | | | | | | | |
| 高圧炉心スプレイスライ系ディーゼル発電機排気消音器 | 屋外 | ○ | × ^{※4} | ○ | ○ | — | ○ | — | 自重 |
| 高圧炉心スプレイスライ系ディーゼル発電機排気配管 | 屋外 | ○ | × ^{※4} | ○ | ○ | — | ○ | — | 自重, 内圧 |
| 高圧炉心スプレイスライ系ディーゼル発電機燃料ダイヤタンク ベント管 | 屋外 | ○ | × ^{※4} | ○ | ○ | — | ○ | — | 自重, 内圧 |
| 高圧炉心スプレイスライ系ディーゼル発電機機関ベント管 | 屋外 | ○ | × ^{※3} | ○ | ○ | — | ○ | — | 自重, 内圧 |
| 高圧炉心スプレイスライ系ディーゼル発電機潤滑油タンク ベント管 | 屋外 | ○ | × ^{※3} | ○ | ○ | — | ○ | — | 自重, 内圧 |
| 残留熱除去系海水配管 (放出側) | 屋外 | ○ | × ^{※3} | ○ | ○ | — | ○ | — | 自重, 内圧 |
| 非常用ディーゼル発電機海水配管 (放出側) | 屋外 | ○ | × ^{※3} | ○ | ○ | — | ○ | — | 自重, 内圧 |
| 高圧炉心スプレイスライ系ディーゼル発電機海水配管 (放出側) | 屋外 | ○ | × ^{※3} | ○ | ○ | — | ○ | — | 自重, 内圧 |

注記) ※1 表中記号について対象とする荷重の有無を示す。 ○：考慮する ×：考慮しない
 ※2 複合荷重の構成について、○のついた構成で評価を実施。 ○：実施ケース —：該当しないケース
 ※3 W_Mにより、対象が破損することを想定するため、設計荷重としては考慮しない。
 ※4 W_Mに対して、防護対策を実施するため、衝撃荷重は作用しない。

竜巻防護対策のうち飛来物発生防止対策の概要について

【1】 飛来物発生防止対策のフロー図

・現地調査による飛来物源に対して、飛来物発生防止対策の選定フローを別図2-1-1-1に示す。



注) ※1～3は別図2-4-1の対策例を示している。

別図2-1-1-1 東海第二発電所の飛来物発生防止対策の選定フロー図

【2. 飛来物発生防止対策の基本方針】

- ・ 竜巻防護施設及び竜巻防護施設に波及的影響を及ぼす可能性のある飛来物源に対して飛来物発生防止対策を実施する。

飛来物発生防止対策の実施条件：①～③を全て満たす飛来物源

- ① 飛散（浮き上がり、横滑り）する
- ② 設計飛来物（鋼製材）の運動エネルギー及び貫通力を上回る
- ③ 竜巻防護施設及び竜巻防護施設に波及的影響を及ぼす施設に到達する

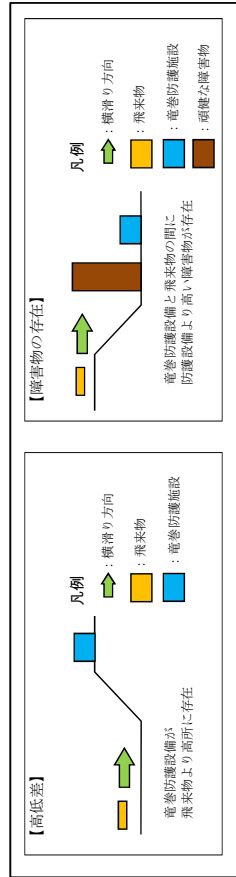
【3. 竜巻防護施設等への到達、離隔】

- ・ 竜巻防護施設及び竜巻防護施設に波及的影響を及ぼす施設に到達しないケースを下記に示す。

- ① 竜巻防護施設等に到達できない距離を確保した配置とする。（離隔距離の確保）
（別図2-3-1に車両の場合の離隔（退避）範囲を示す。）
- ② 竜巻防護施設等に対して高低差や到達できない障害物が配置されている。
（別図2-3-2に横滑りする飛来物に対して未到達となる例を示す。）



別図2-3-1 車両管理エリア図



別図2-3-2 横滑りに対して未到達となる例

【4. 飛来物発生防止対策（固定、固縛）の例】

- ・ 飛来物発生防止対策のうち、固定及び固縛である一例を別図2-4-1に示す。

| 飛散防止対策 | 対策の概要図 | 別図2-1-1の記載 |
|--------|--------|------------|
| 固定 | | 対策例① |
| 緊張固縛 | | 対策例② |
| | | 対策例③ |
| 余長付き固縛 | | |

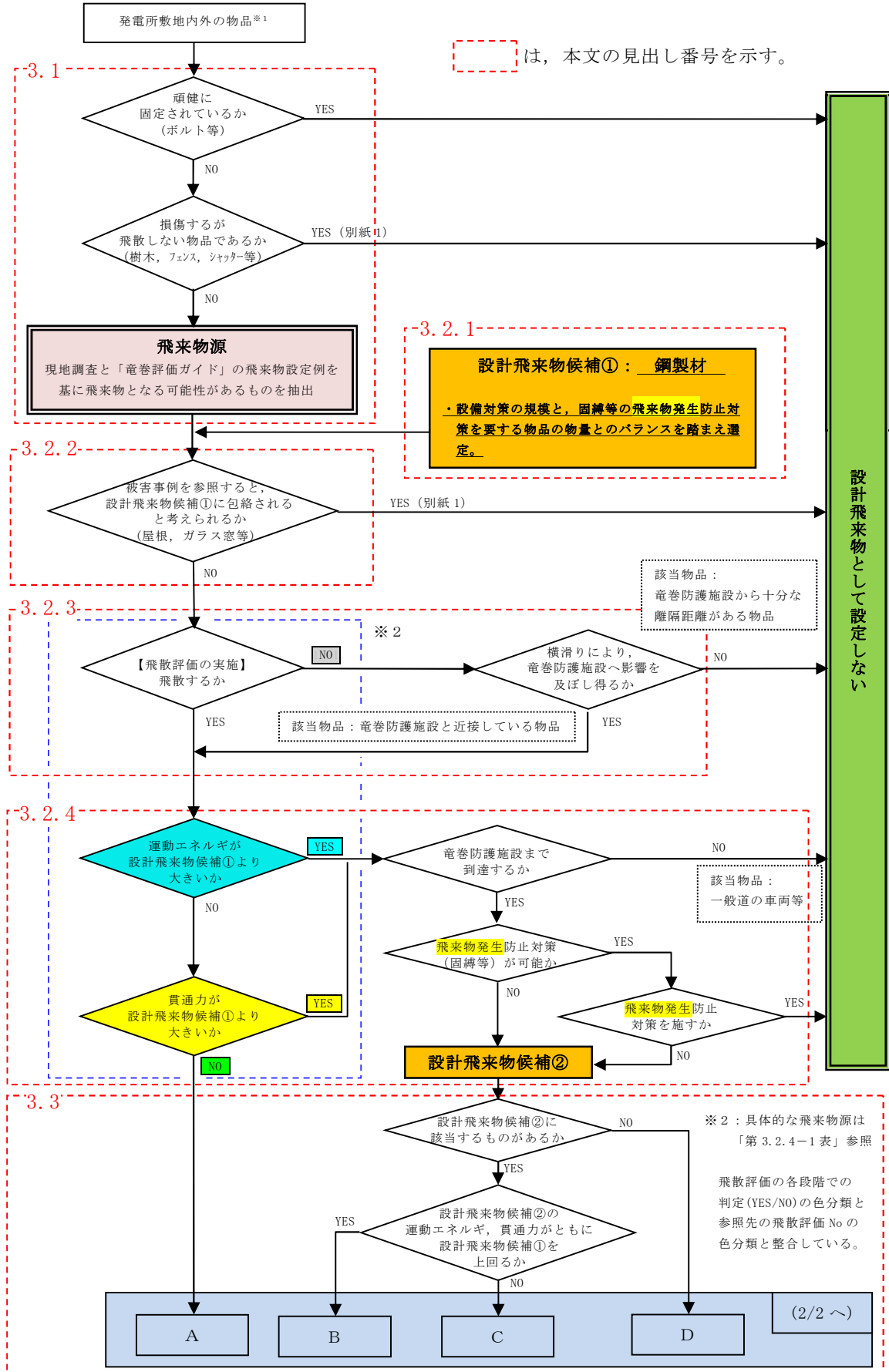
別図2-4-1 飛来物発生防止対策（固定・固縛）の一例

設計飛来物の設定について

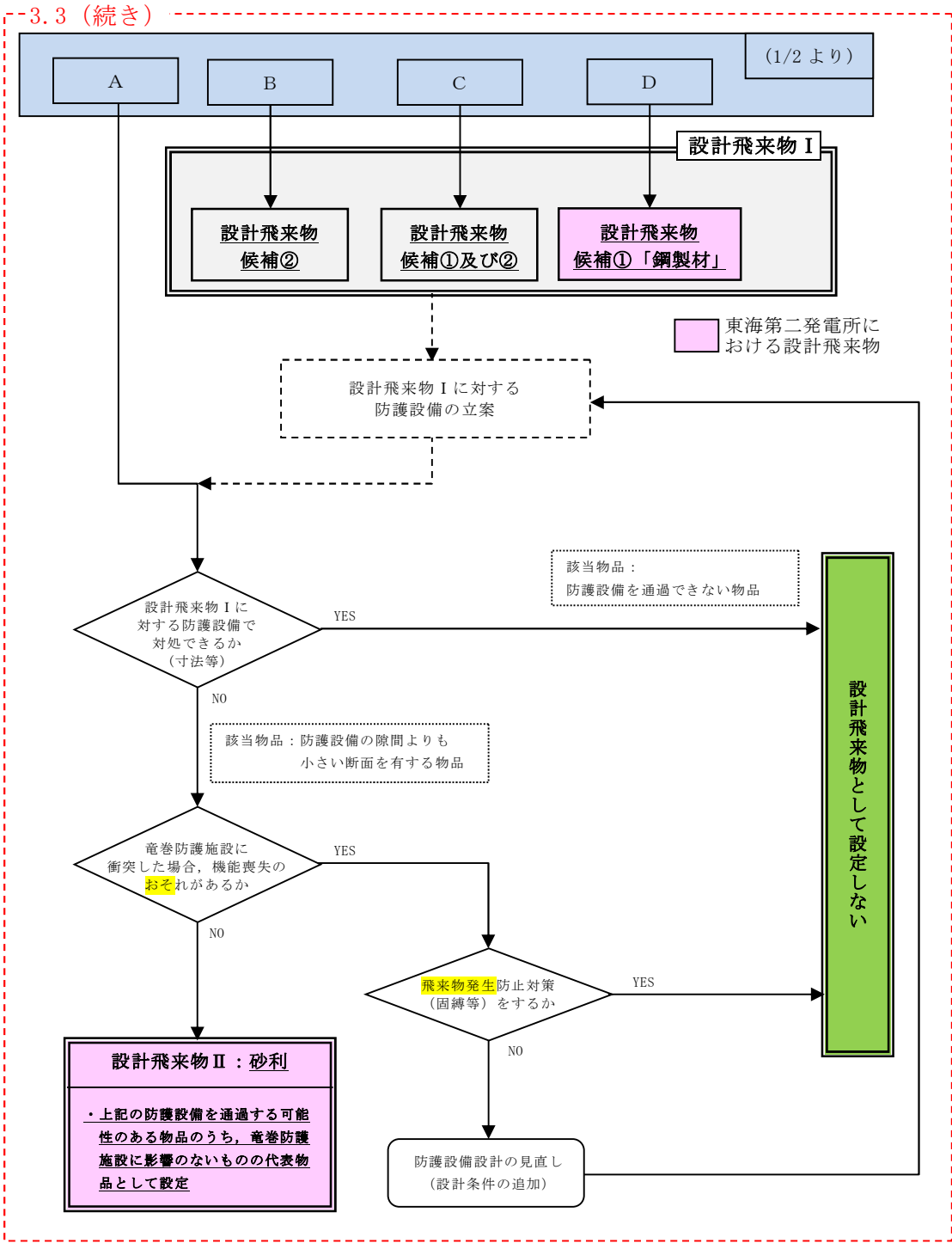
1. 設計飛来物の設定方針

東海第二発電所の竜巻影響評価に用いる設計飛来物を、第 1-1 図に示すフローに基づき設定した。

※1：発電所敷地内及び周辺の現地調査等を踏まえ抽出



第1-1図 設計飛来物の設定フロー(1/2)



第 1-1 図 設計飛来物の設定フロー (2/2)

2. 発電所構内の物品調査

2.1 調査範囲

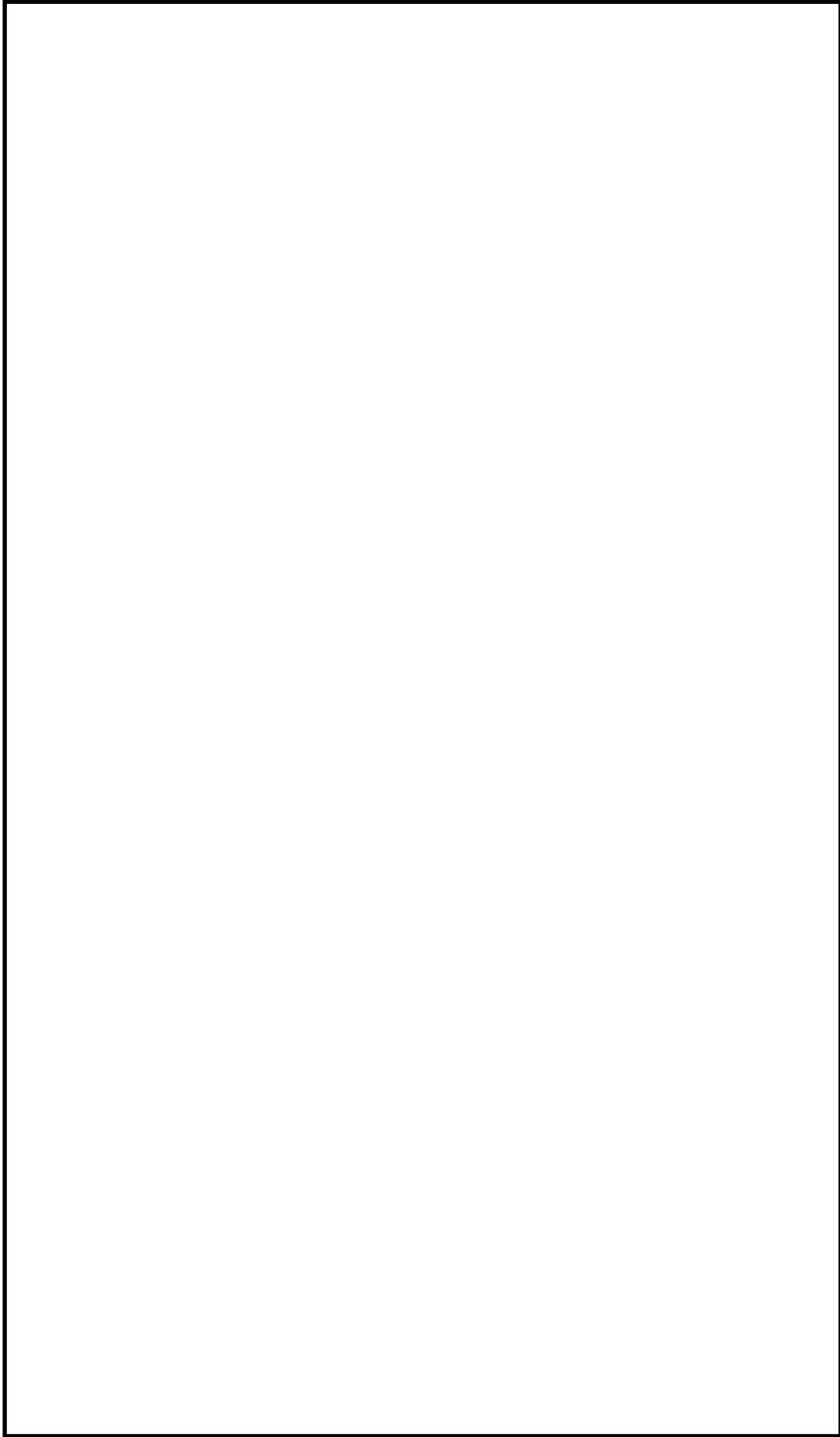
東海第二発電所構内の物品調査は、1回目を平成26年1月15日～16日（発電所敷地内）、及び2回目を平成28年7月22日に実施した。調査範囲は、米国 Regulatory Guide を参考に、第2.1-1図に示すとおり、原子炉建屋から半径800mの範囲とした。なお、後述の代表的な飛来物源の飛散評価結果において、飛散距離は最大でも400m程度であることから、調査範囲は十分と考えられる。

2回の調査において認められた物品の種類に有意な違いは認められなかったことから、定期検査の有無や季節性を加味しても、考慮すべき物品の種類としては、今回認められたものの中に包絡されるものと考えられる。

なお、今後も飛来物源について継続的に確認し、新たに考慮すべき物品の種類が認められた場合は、新たな飛来物源として評価する。

第2.1-1表 調査エリア区分

| エリア番号 | エリア内の主な施設 |
|-------|--|
| ① | 東海発電所 タービン建屋 使用済燃料乾式貯蔵建屋 屋外開閉所，事務本館 |
| ② | 資材置場，駐車場 |
| ③ | 東海発電所 取水口，放水口 資材倉庫 |
| ④ | 固体廃棄物貯蔵庫 東海第二発電所 取水口，放水口，海水ポンプ室 |
| ⑤ | 東海発電所 原子炉建屋 東海第二発電所 原子炉建屋，タービン建屋 廃棄物処理建屋 |



第2.1-1 図 物品調査エリア

2.2 発電所構内の物品の調査結果

調査の結果、第 2.2-1 表に示す種類の物品が東海第二発電所において確認された。調査エリア毎の主な物品を以降に示す。

第 2.2-1 表 東海第二発電所における主な飛来物源の種類

| 棒状※ | 板状※ | 塊状※ | |
|---|--|--|--|
| <ul style="list-style-type: none"> ・バリアード ・ベンチ（常設） ・樹木（倒木，伐採木），材木 ・鉄骨 ・鋼管 ・ボンベ ・樹脂製パイプ | <ul style="list-style-type: none"> ・樹脂製蓋 ・コンクリート製蓋 ・マンホール蓋 ・グレーチング ・カーブミラー ・看板，標識 ・鋼製敷板 ・鋼製スロープ ・鋼製蓋 ・ベンチ（仮設） ・足場板，足場枠 ・パレット（鋼製） ・パレット（木製，樹脂製） ・時計 ・仮囲い板，仮設フェンス | <ul style="list-style-type: none"> ・ドラム缶 ・消防車 ・トラック ・社用バス ・乗用車 ・コンテナ ・物置 ・洗濯機 ・仮設電源 ・建設機械 ・運搬台車 ・鋼製ボックス ・下駄箱 ・カラーコーン ・消火器 ・消火設備格納箱 | <ul style="list-style-type: none"> ・フォークリフト ・バイク，自転車 ・土のう ・自動販売機 ・ケーブルドラム ・仮設トイレ ・オブジェ ・鋼製ブロック ・コンクリート製ブロック ・木片，木製品 ・プレハブ小屋 ・プラスチック容器 ・什器類 ・ホース，ケーブル類 ・空調室外機 ・鋼製ステップ |

※：各ジャンルにおける代表的な形状にて整理した表であり，ジャンル内の物品全てが同一の形状となる訳ではない。

エリア①で確認された主な飛来物源



#1 乗用車



#2 プレハブ小屋



#6 パレット（木製又は樹脂製）



#8 鋼管



#9 ポンペ



#11 ドラム缶



#13 ケーブルドラム



#17 ケーブルドラム



#19 物置



#20 物置



#21 コンテナ



#22 トラック



#27 フォークリフト



#28 乗用車



#32 消火器

#33 消火設備格納箱



#34 鋼製スロープ



#46 洗濯機



#47 プラスチック容器



#49 マンホール蓋



#50 バイク, 自転車



#51 カーブミラー



#53 看板, 標識



#54 コンクリート製蓋



#56 バリケード



#58 樹脂製蓋



#61 鋼製敷板



#62 鋼製ボックス



#63, #64 仮設電源



#65 フレコンバッグ入資材



#66 プレハブ小屋



#68 プラスチック容器



#69 鉄骨



#73 コンテナ



#74 空調室外機



#75 プレハブ小屋



#76 ケーブルドラム



#77 建設機械



#79 消防車



#81 コンクリート製蓋



#121 コンクリート製ブロック



#122 コンクリートブロック

エリア②で確認された主な飛来物源



#84 鋼製蓋



#87 グレーチング



#89 鋼製ステップ



#90 ケーブルドラム



#92 仮設電源



#93 ドラム缶



#97 鉄骨



#100 ケーブルドラム



#101 ホース, ケーブル類



#102 鋼製ボックス



#106 コンテナ



#107 樹木 (倒木, 伐採木), 材木



#110 鉄骨



#112 鋼管



#115 トラック



#117 バイク, 自転車

エリア③で確認された主な飛来物源



#131 コンテナ



#138 鋼管



#139 仮設電源



#141 建設機械



#142 仮設トイレ



#143 鋼管



#144 空調室外機



#145 空調室外機



#152 消火設備格納箱



#153 消火設備格納箱



#155 プレハブ小屋



#156 資機材類



#163 鉄骨



#164 鋼製蓋



#165 バリケード

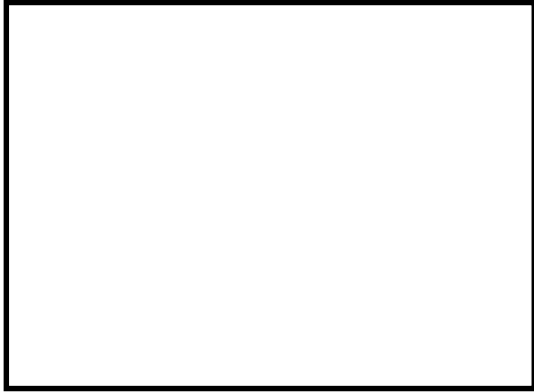


#176 ドラム缶



#177 鋼製ステップ

エリア④で確認された主な飛来物源



#181 バリケード



#182 消防車



#183 消防車



#186 マンホール蓋



#188 カラーコーン



#190 ベンチ (常設)



#194 看板, 標識



#198 プラスチック容器



#199 オブジェ (タービン)



#201 コンクリート製ブロック



#203 ベンチ (常設)



#204 下駄箱



#205 自動販売機



#210 空調室外機



#215, #216 社用バス



#217 鋼製ステップ



#219 乗用車



#220 カーブミラー



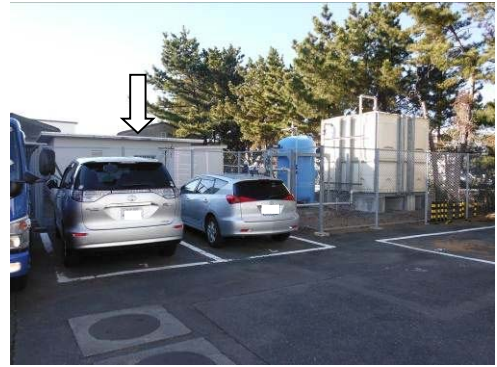
#222 物置



#225 鋼製ステップ



#226 トラック



#228 プレハブ小屋



#347 物置



#350 鋼製ボックス



#351 木片, 木製品



#352 鋼管



#370 プレハブ小屋



#371 物置



#372 フォークリフト



#373 物置



#376 鋼管



#379 パレット (木製又は樹脂製)



#380, #381 鋼製ブロック



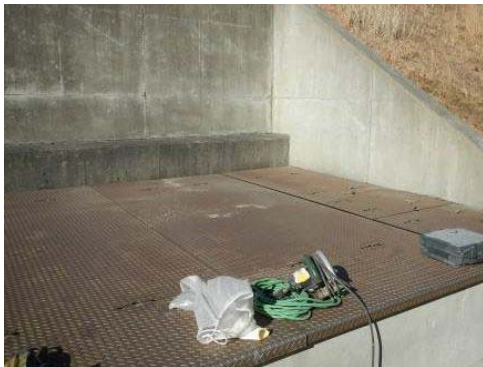
#382 看板, 標識



#383 物置



#388 コンクリート製蓋



#392 鋼製蓋



#394 鋼製敷板



#398 仮設トイレ



#400 鋼製ボックス



#405 樹脂製パイプ



#409 倉庫, #410 自動販売機



#411 鋼製蓋



#412 鋼製蓋



#413 鋼製蓋



#414 プレハブ小屋



#417 コンクリート製ブロック



#418 コンクリート製蓋



#421 ケーブルドラム



#422 鋼製ボックス



#423 鋼製ステップ



#424 プレハブ小屋



#431 樹脂製蓋



#435 コンテナ



#436 鋼製ボックス



#437 鋼製ボックス



#469 鋼管



#472 運搬台車



#475 鋼製ステップ



#478 物置



#479 プレハブ小屋



#483 ベンチ (仮設)



#485 樹木 (倒木, 伐採木), 材木



#486 バイク, 自転車



#487 バイク，自転車



#488 バイク，自転車



#490 空調室外機

エリア⑤で確認された主な飛来物源



#244 グレーチング



#246 マンホール蓋



#247 プレハブ小屋



#250 運搬台車



#251 ベンチ（仮設）



#252 トラック



#253 鋼製蓋



#258 プラスチック容器



#259 物置



#260 プレハブ小屋



#262 仮設電源



#267 物置



#272 足場材, 足場枠



#276 建設機械



#279 プレハブ小屋



#281 空調室外機



#284 鋼製敷板



#286 鋼管



#287, #288 鋼製ボックス



#289 空調室外機



#293 ポンプ



#295 ホース, ケーブル類



#298 鋼製スロープ



#301 足場板, 足場枠



#305 鋼製敷板



#307 プレハブ小屋



#309 プラスチック容器



#314 コンクリートブロック



#316 マンホール蓋



#320 パレット (鋼製)



#330 物置



#335 鋼製スロープ



#336 什器類



#337 敷鉄板



#338 ケーブルドラム



#339 パレット (木製又は樹脂製)



#340 プレハブ小屋



#495 仮設電源

3. 設計飛来物の設定

3.1 固定状況等を踏まえた飛来物源の抽出

現地調査にて確認された物品のうち以下に示すもののうち、過去の竜巻被害事例（【添付資料9 別紙1】）も参考とし、以下の観点のいずれにも当てはまらない物品を飛来物源として抽出した。

- (1) 溶接やボルト等により頑健に固定されている物品
- (2) 竜巻の影響により損傷はするが、飛散しない物品

3.2 飛来物源の飛散評価

3.2.1 設計飛来物候補の設定

設備対策の規模と、固縛等の飛散防止対策を要する物品の物量等のバランスを考え、竜巻影響評価ガイドに例示される鋼製材を、設計飛来物候補として設定した。

3.2.2 評価不要物品の抽出

飛来物源のうち、過去の竜巻被害事例（添付資料9 別紙1）を参考とし、設計飛来物候補である鋼製材の影響を下回ると判断した物品については、設計飛来物にならないものとして、飛散評価を不要とした。

3.2.3 飛来物源の飛散評価

3.2.2にて抽出された飛来物源に対し、設計竜巻の最大風速 100m/s、風速場モデルとしてフジタモデルを適用した場合における飛散評価を実施した。

(1) 初期高さ

フジタモデルを使用した飛散評価においては、評価対象物品の配置位置と敷地高さとの高低差を示す初期高さの設定が必要となる。評価対象物品の初期高さは現地調査結果を踏まえて設定するものとし、基本は地表からの飛散を想定した評価を行うものとする。

ただし、仮設材のように設置場所が特定できず、高所に置かれる可能性を有する飛来物源に対しては、この様な物品を持ち込む場合は、使用場所が地表高さであるか高所であるかを考慮の上、適切な初期高さからの飛散評価結果を踏まえ、固縛等の要否を判断する。

(2) 空力パラメータ

飛散評価に用いる空力パラメータは、疎な物品の場合においては、見付面の充実率に応じた割増係数を抗力係数に乗じたうえで算出する。【添付資料 9 別紙 2】

(3) 飛散速度の選定と横滑りの考慮

飛来物源の飛散速度については、「竜巻影響評価ガイド」に基づき、飛散評価により算出される際の最大水平速度及び最大鉛直速度を設定した。

なお、浮上しないが横滑りにより竜巻防護施設に影響を与え得る物品については、浮上する物品同様、3.3の結果を踏まえ設計飛来物として選定する必要があるかを判断する。

3.2.4 飛来物発生防止対策の可否を踏まえた飛来物源のスクリーニング

飛散評価の結果を踏まえ、設計飛来物候補である鋼製材に対し、その影響（運動エネルギーもしくは貫通力）を上回るパラメータを有する飛来物源に対し、固縛あるいは離隔及び撤去等の飛来物発生防止対策の可否を考慮し、新たに設計飛来物候補とする必要の有無を評価した。

代表的な飛来物源の飛散評価結果とスクリーニングの結果を、第3.2.4-1表に示す。

第3.2.4-1表 代表的な飛来物源の飛散評価結果整理表

| No. | カテゴリ (品目に則った整理) | 寸法(m) | | C _D A/m (m ² /kg) | 最大 水平 速度 (m/s) | 最大 飛散 距離 (m) | 最大 浮上 高さ (m) | 質量 (kg) | 運動エネルギー | | 貫通力(コンクリート) | | 貫通力(鋼板) | | 飛来物発生 防止対策の 検討が必要 【①,②,③の 何れかが“○”】 | |
|-----------------------------------|--------------------|-------|-------|--|-------------------------|-----------------------|-----------------------|------------|-------------------|----------------------------|------------------------|-----------------------------|------------------------|---------------------------|--|--|
| | | 高さ | 高さ以外 | | | | | | 最大 運動E (kJ) | 鋼製材超 (E>176kJ) 【条件①】 | 貫通 限界 厚さ (mm) | 鋼製材超 (T>25.9mm) 【条件②】 | 貫通 限界 厚さ (mm) | 鋼製材超 (T>9*mm) 【条件②】 | | |
| <運動エネルギーが鋼製材より大きいもの> | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 340 | プレハブ小屋 | 2.2 | 6 | 10 | 56 | 185.1 | 15.786 | 5500 | 8624 | ○ | 64.4 | ○ | 9 | × | ○ | |
| 19 | 物置 | 2.3 | 3.2 | 6.5 | 43 | 88.5 | 4.726 | 5000 | 4623 | ○ | 54.4 | ○ | 8 | × | ○ | |
| 252 | トラック | 2.24 | 2.445 | 7.54 | 48 | 120.2 | 6.56 | 3700 | 4263 | ○ | 54.7 | ○ | 8 | × | ○ | |
| 260 | プレハブ小屋 | 2.6 | 2.86 | 6.05 | 52 | 172.2 | 13.803 | 3000 | 4056 | ○ | 49.9 | ○ | 7 | × | ○ | |
| 216 | 社用バス | 2.34 | 2.96 | 8.99 | 28 | 37.3 | 1.675 | 9910 | 3885 | ○ | 52.7 | ○ | 7 | × | ○ | |
| 414 | プレハブ小屋 | 2.3 | 2.7 | 5.5 | 49 | 146.8 | 7.625 | 3000 | 3602 | ○ | 49 | ○ | 7 | × | ○ | |
| 115 | トラック | 2.22 | 3.16 | 7.56 | 30 | 42.1 | 1.97 | 7970 | 3587 | ○ | 50.2 | ○ | 7 | × | ○ | |
| 182 | 消防車 | 2.49 | 3.04 | 8 | 25 | 30.7 | 1.216 | 10620 | 3319 | ○ | 48.4 | ○ | 6 | × | ○ | |
| 155 | プレハブ小屋 | 2.5 | 3.6 | 5 | 59 | 210.8 | 21.932 | 1800 | 3133 | ○ | 41.8 | ○ | 5 | × | ○ | |
| 215 | 社用バス | 2.08 | 2.82 | 6.99 | 30 | 41.3 | 1.907 | 6605 | 2973 | ○ | 47.3 | ○ | 6 | × | ○ | |
| 183 | 消防車 | 2.28 | 2.8 | 7.15 | 23 | 26.6 | 1.008 | 8635 | 2284 | ○ | 42 | ○ | 5 | × | ○ | |
| 20 | 物置 | 2.3 | 3.05 | 3.05 | 54 | 176.9 | 14.187 | 1500 | 2187 | ○ | 37.1 | ○ | 5 | × | ○ | |
| 66 | プレハブ小屋 | 2.4 | 2.7 | 5.4 | 65 | 227.2 | 27.502 | 1000 | 2113 | ○ | 36.3 | ○ | 5 | × | ○ | |
| 75 | プレハブ小屋 | 2.4 | 2.7 | 5.4 | 65 | 227.2 | 27.502 | 1000 | 2113 | ○ | 36.3 | ○ | 5 | × | ○ | |
| 247 | プレハブ小屋 | 2.3 | 2.8 | 4.4 | 63 | 220.3 | 24.49 | 1000 | 1985 | ○ | 35.4 | ○ | 5 | × | ○ | |
| 2 | プレハブ小屋 | 2.3 | 2.6 | 4.6 | 63 | 219.9 | 24.347 | 1000 | 1985 | ○ | 35.9 | ○ | 5 | × | ○ | |
| 237 | プレハブ小屋 | 2 | 3 | 4 | 61 | 209.6 | 20.915 | 1000 | 1861 | ○ | 34.8 | ○ | 5 | × | ○ | |
| 373 | 物置 | 1.9 | 2.2 | 4.4 | 36 | 53.4 | 2.951 | 2836 | 1838 | ○ | 39.1 | ○ | 6 | × | ○ | |
| 259 | 物置 | 1.9 | 2.2 | 4.4 | 36 | 53.4 | 2.951 | 2836 | 1838 | ○ | 39.1 | ○ | 6 | × | ○ | |
| 228 | 物置 | 2.4 | 2.65 | 3.5 | 60 | 213.9 | 22.626 | 1000 | 1800 | ○ | 33.9 | ○ | 5 | × | ○ | |
| 479 | プレハブ小屋 | 2.4 | 2.4 | 3.6 | 60 | 211.9 | 22.074 | 1000 | 1800 | ○ | 34.6 | ○ | 5 | × | ○ | |
| 370 | プレハブ小屋 | 2.4 | 2.4 | 3.6 | 60 | 211.9 | 22.074 | 1000 | 1800 | ○ | 34.6 | ○ | 5 | × | ○ | |
| 28 | 乗用車 | 1.69 | 1.81 | 4.39 | 43 | 73.9 | 3.801 | 1825 | 1688 | ○ | 39.1 | ○ | 6 | × | ○ | |

※ 鋼板貫通評価においても、コンクリートと同様に
衝突方向の断面は中実断面として評価している。

第3.2.4-1表 代表的な飛来物源の飛散評価結果整理表

| No. | カテゴリー (品目に則った整理) | 寸法(m) | | C _D A/m (m ² /kg) | 最大 水平 速度 (m/s) | 最大 飛散 距離 (m) | 最大 浮上 高さ (m) | 質量 (kg) | 運動エネルギー | | 貫通力(コンクリート) | | 貫通力(鋼板) | | 飛来物発生 防止対策の 検討が必要 【①,②,③の 何れかが“○”】 |
|-----|---------------------|-------|-------|--|-------------------------|-----------------------|-----------------------|------------|-------------------|----------------------------|------------------------|-----------------------------|------------------------|---------------------------|--|
| | | 高さ | 高さ以外 | | | | | | 最大 運動E (kJ) | 鋼製材超 (E>176kJ) 【条件①】 | 貫通 限界 厚さ (mm) | 鋼製材超 (T>25.9mm) 【条件②】 | 貫通 限界 厚さ (mm) | 鋼製材超 (T>9*mm) 【条件②】 | |
| 22 | トラック | 1.695 | 1.9 | 4.69 | 37 | 55.2 | 3.007 | 2340 | 1602 | ○ | 38.3 | ○ | 6 | × | ○ |
| 106 | コンテナ | 1.8 | 1.8 | 3.7 | 55 | 170.1 | 12.251 | 950 | 1437 | ○ | 34.9 | ○ | 5 | × | ○ |
| 73 | コンテナ | 1.5 | 2.1 | 3.7 | 54 | 163.1 | 8.195 | 950 | 1386 | ○ | 34.5 | ○ | 5 | × | ○ |
| 219 | 乗用車 | 1.39 | 1.86 | 4.615 | 42 | 63.4 | 3.28 | 1570 | 1385 | ○ | 36.7 | ○ | 6 | × | ○ |
| 307 | プレハブ小屋 | 1.85 | 2.6 | 3.65 | 62 | 211.5 | 21.333 | 720 | 1384 | ○ | 31.4 | ○ | 4 | × | ○ |
| 1 | 乗用車 | 1.6 | 2 | 4.5 | 33 | 44.3 | 2.293 | 2500 | 1362 | ○ | 35.8 | ○ | 5 | × | ○ |
| 424 | プレハブ小屋 | 1.7 | 2.5 | 2.6 | 59 | 186.9 | 15.804 | 685 | 1193 | ○ | 30 | ○ | 4 | × | ○ |
| 383 | 物置 | 1.9 | 1.9 | 2.25 | 53 | 165.3 | 10.111 | 801 | 1126 | ○ | 30.4 | ○ | 4 | × | ○ |
| 371 | 物置 | 2 | 2 | 2.3 | 58 | 194.1 | 17.348 | 640 | 1077 | ○ | 28.9 | ○ | 4 | × | ○ |
| 347 | 物置 | 1.9 | 2.05 | 2.4 | 61 | 208.6 | 20.542 | 500 | 931 | ○ | 26.9 | ○ | 4 | × | ○ |
| 330 | 物置 | 1.9 | 2.3 | 2.9 | 69 | 222.9 | 30.192 | 360 | 857 | ○ | 24.9 | × | 4 | × | ○ |
| 177 | 鋼製ステップ | 1 | 1.3 | 4.3 | 60 | 164.2 | 9.74 | 400 | 720 | ○ | 29.3 | ○ | 5 | × | ○ |
| 409 | 物置 | 1.4 | 2.1 | 3 | 68 | 212.9 | 24.183 | 300 | 694 | ○ | 24.3 | × | 4 | × | ○ |
| 222 | 物置 | 1.8 | 2 | 3 | 71 | 220.9 | 33.633 | 270 | 681 | ○ | 23 | × | 3 | × | ○ |
| 21 | コンテナ | 1 | 1.4 | 3.2 | 54 | 141.3 | 4.521 | 450 | 657 | ○ | 27.9 | ○ | 5 | × | ○ |
| 85 | 物置 | 2 | 2.1 | 3.5 | 78 | -515.9 | -44.356 | 210 | 639 | ○ | 21.5 | × | 3 | × | ○ |
| 79 | 消防車 | 2.5 | 2.5 | 8 | 10 | 4.9 | 0.068 | 12500 | 625 | ○ | 24.1 | × | 3 | × | ○ |
| 63 | 仮設電源 | 1.68 | 2.12 | 3.69 | 19 | 17.8 | 0.574 | 3460 | 625 | ○ | 25.2 | × | 3 | × | ○ |
| 145 | 空調室外機 | 1 | 2.1 | 2.9 | 35 | 40.3 | 2.065 | 1000 | 613 | ○ | 26 | ○ | 4 | × | ○ |
| 435 | コンテナ | 1.2 | 1.712 | 3.7 | 23 | 23.2 | 0.886 | 1960 | 519 | ○ | 25.1 | × | 4 | × | ○ |
| 398 | 仮設トイレ | 0.9 | 1.4 | 2.5 | 52 | 128.8 | 3.795 | 350 | 474 | ○ | 24.3 | × | 4 | × | ○ |
| 279 | プレハブ小屋 | 1.3 | 2.2 | 2.4 | 74 | 210.3 | 33.081 | 156 | 428 | ○ | 19 | × | 3 | × | ○ |
| 485 | 樹木(倒木,伐採木),材木 | 1 | 1 | 14.2 | 73 | 202.3 | 28.145 | 151 | 403 | ○ | 23.7 | × | 5 | × | ○ |

※ 鋼板貫通評価においても、コンクリートと同様に衝突方向の断面は中美断面として評価している。

第3.2.4-1表 代表的な飛来物源の飛散評価結果整理表

| No. | カテゴリ (品目に則った整理) | 寸法(m) | | C _D A/m (m ² /kg) | 最大 水平 速度 (m/s) | 最大 飛散 距離 (m) | 最大 浮上 高さ (m) | 質量 (kg) | 運動エネルギー | | 貫通力(コンクリート) | | 貫通力(鋼板) | | 飛来物発生 防止対策の 検討が必要 【①,②,③の 何れかが“○”】 | |
|-----|--------------------|-------|-------|--|-------------------------|-----------------------|-----------------------|------------|-------------------|----------------------------|------------------------|-----------------------------|------------------------|---------------------------|--|---|
| | | 高さ | 高さ以外 | | | | | | 最大 運動E (kJ) | 鋼製材超 (E>176kJ) 【条件①】 | 貫通 限界 厚さ (mm) | 鋼製材超 (T>25.9mm) 【条件②】 | 貫通 限界 厚さ (mm) | 鋼製材超 (T>9*mm) 【条件②】 | | |
| 217 | 鋼製ステップ | 1 | 1 | 4 | 0.0192 | 61 | 161.3 | 10.533 | 200 | 373 | ○ | 22.2 | × | 4 | × | ○ |
| 286 | 鋼管 | 0.8 | 1 | 3.4 | 0.0092 | 38 | 40.3 | 2.005 | 500 | 361 | ○ | 23.9 | × | 4 | × | ○ |
| 143 | 鋼管 | 0.65 | 0.65 | 8 | 0.0138 | 46 | 98.7 | 2.467 | 320 | 339 | ○ | 25.6 | × | 6 | × | ○ |
| 437 | 鋼製ボックス | 1.05 | 1.35 | 1.35 | 0.0154 | 57 | 157.9 | 6.793 | 200 | 325 | ○ | 19.6 | × | 3 | × | ○ |
| 262 | 仮設電源 | 1.05 | 1.2 | 1.5 | 0.0153 | 57 | 157.2 | 6.695 | 200 | 325 | ○ | 20 | × | 3 | × | ○ |
| 478 | 物置 | 1.1 | 1.3 | 2 | 0.0288 | 67 | 200.3 | 19.881 | 143 | 321 | ○ | 19.1 | × | 3 | × | ○ |
| 89 | 鋼製ステップ | 1 | 1.8 | 2.4 | 0.0469 | 73 | 202.3 | 28.025 | 120 | 320 | ○ | 18.1 | × | 3 | × | ○ |
| 90 | ケーブールドラム | 0.9 | 1.5 | 1.5 | 0.0165 | 56 | 151.9 | 5.244 | 199 | 313 | ○ | 19.4 | × | 3 | × | ○ |
| 421 | ケーブールドラム | 0.9 | 1.5 | 1.5 | 0.0183 | 59 | 163.7 | 7.113 | 179 | 312 | ○ | 19.3 | × | 3 | × | ○ |
| 210 | 空調室外機 | 0.9 | 1.3 | 1.8 | 0.01 | 42 | 53.2 | 2.69 | 340 | 300 | ○ | 20.1 | × | 3 | × | ○ |
| 486 | バイク, 自転車 | 0.76 | 1.2 | 2.1 | 0.016 | 53 | 128.8 | 3.615 | 209 | 294 | ○ | 20.4 | × | 4 | × | ○ |
| 142 | 仮設トイレ | 0.876 | 1.598 | 2.572 | 0.0458 | 72 | 207.1 | 25.417 | 112 | 291 | ○ | 18.1 | × | 3 | × | ○ |
| 17 | ケーブールドラム | 0.8 | 1.5 | 1.5 | 0.0218 | 61 | 164.4 | 8.387 | 141 | 263 | ○ | 18 | × | 3 | × | ○ |
| 144 | 空調室外機 | 1 | 1 | 1.3 | 0.0114 | 50 | 126.7 | 3.592 | 210 | 263 | ○ | 19.1 | × | 3 | × | ○ |
| 350 | 鋼製ボックス | 0.98 | 1.65 | 1.8 | 0.042 | 72 | 201.5 | 25.554 | 100 | 260 | ○ | 16.7 | × | 3 | × | ○ |
| 84 | ケーブールドラム | 0.8 | 1.5 | 1.5 | 0.0218 | 61 | 164.4 | 8.387 | 141 | 263 | ○ | 18 | × | 3 | × | ○ |
| 488 | バイク, 自転車 | 0.74 | 1.09 | 1.915 | 0.0219 | 61 | 160.7 | 6.681 | 130 | 242 | ○ | 18.7 | × | 4 | × | ○ |
| 487 | バイク, 自転車 | 0.725 | 1.07 | 2.04 | 0.0146 | 49 | 111.2 | 3.049 | 201 | 242 | ○ | 19.3 | × | 4 | × | ○ |
| 422 | 鋼製ボックス | 0.9 | 1 | 1.9 | 0.0082 | 36 | 39.3 | 2.041 | 366 | 238 | ○ | 19.1 | × | 3 | × | ○ |
| 205 | 自動販売機 | 0.9 | 1.2 | 1.8 | 0.0064 | 30 | 30 | 1.438 | 508 | 229 | ○ | 18.5 | × | 3 | × | ○ |
| 225 | 鋼製ステップ | 0.6 | 1.2 | 2.2 | 0.0155 | 47 | 101.4 | 2.478 | 200 | 221 | ○ | 18.8 | × | 3 | × | ○ |
| 475 | 鋼製ステップ | 0.6 | 1.2 | 2.2 | 0.0155 | 47 | 101.4 | 2.478 | 200 | 221 | ○ | 18.8 | × | 3 | × | ○ |
| 287 | 鋼製ボックス | 0.75 | 1.3 | 1.6 | 0.0094 | 37 | 38 | 1.887 | 300 | 206 | ○ | 17.5 | × | 3 | × | ○ |
| 410 | 自動販売機 | 0.7 | 1.4 | 1.8 | 0.009 | 34 | 32.5 | 1.638 | 350 | 203 | ○ | 17.5 | × | 3 | × | ○ |

※ 鋼板貫通評価においても、コンクリートと同様に
衝突方向の断面は中実断面として評価している。

第3.2.4-1表 代表的な飛来物源の飛散評価結果整理表

| No. | カテゴリ (品目に則った整理) | 寸法(m) | | C _D A/m (m ² /kg) | 最大 水平 速度 (m/s) | 最大 飛散 距離 (m) | 最大 浮上 高さ (m) | 質量 (kg) | 運動エネルギー | | 貫通力(コンクリート) | | 貫通力(鋼板) | | 飛来物発生 防止対策の 検討が必要 【①,②,③の 何れかが“○”】 |
|--|--------------------|-------|------|--|-------------------------|-----------------------|-----------------------|------------|-------------------|----------------------------|------------------------|-----------------------------|------------------------|---------------------------|--|
| | | 高さ | 高さ以外 | | | | | | 最大 運動E (kJ) | 鋼製材超 (E>176kJ) 【条件①】 | 貫通 限界 厚さ (mm) | 鋼製材超 (T>25.9mm) 【条件②】 | 貫通 限界 厚さ (mm) | 鋼製材超 (T>9*mm) 【条件②】 | |
| 258 | プラスチック容器 | 0.9 | 1.2 | 0.0238 | 63 | 163.9 | 12.946 | 100 | 199 | ○ | 16 | × | 3 | × | ○ |
| 138 | 鋼管 | 0.65 | 0.65 | 0.0116 | 40 | 52.1 | 2.007 | 247 | 198 | ○ | 20 | × | 4 | × | ○ |
| 165 | バリケード | 1.1 | 1.1 | 0.0354 | 70 | 205 | 23.884 | 80 | 196 | ○ | 15.4 | × | 3 | × | ○ |
| 436 | 鋼製ボックス | 0.8 | 1.05 | 0.0112 | 43 | 58.5 | 2.565 | 200 | 185 | ○ | 16.8 | × | 3 | × | ○ |
| 236 | 仮設トイレ | 0.8 | 1.1 | 0.0436 | 71 | 200.7 | 22.91 | 71 | 179 | ○ | 15.6 | × | 3 | × | ○ |
| 76 | ケーブルドラム | 0.8 | 1.12 | 0.021 | 61 | 161.8 | 7.538 | 96 | 179 | ○ | 15.8 | × | 3 | × | ○ |
| 77 | 建設機械 | 0.99 | 1.65 | 0.0037 | 15 | 10.1 | 0.26 | 1570 | 177 | ○ | 16.1 | × | 2 | × | ○ |
| <p><運動エネルギーは鋼製材を下回るが、貫通力が鋼製材より大きいもの> …該当なし</p> | | | | | | | | | | | | | | | |
| <p><飛散するが、鋼製材の影響を超えないため、設計飛来物として考慮不要なもの></p> | | | | | | | | | | | | | | | |
| 102 | 鋼製ボックス | 0.8 | 1.1 | 1.4 | 0.0293 | 66 | 167.4 | 80 | 175 | × | 15.5 | × | 3 | × | × |
| 288 | 鋼製ボックス | 0.75 | 0.8 | 4.3 | 0.0061 | 25 | 22.2 | 500 | 157 | × | 17.4 | × | 3 | × | × |
| 423 | 鋼製ステップ | 0.6 | 0.9 | 1.8 | 0.0264 | 62 | 157.2 | 81 | 156 | × | 16.2 | × | 3 | × | × |
| 281 | 空調室外機 | 0.75 | 0.9 | 1.4 | 0.0104 | 40 | 43.8 | 190 | 152 | × | 16.1 | × | 3 | × | × |
| 62 | 鋼製ボックス | 1 | 1.5 | 1.6 | 0.004 | 18 | 13.6 | 923 | 150 | × | 14.8 | × | 2 | × | × |
| 74 | 空調室外機 | 0.7 | 1.2 | 1.3 | 0.0078 | 31 | 28 | 283 | 136 | × | 14.9 | × | 3 | × | × |
| 121 | コンクリートブロック | 0.6 | 1.2 | 1.2 | 0.0381 | 69 | 173.4 | 50 | 120 | × | 13.3 | × | 2 | × | × |
| 56 | バリケード | 0.635 | 0.82 | 6.5 | 0.1301 | 86 | 244.3 | 31.4 | 117 | × | 13.7 | × | 3 | × | × |
| 53 | 看板, 標識 | 0.2 | 0.85 | 4.85 | 0.0318 | 48 | 149.6 | 100 | 116 | × | 17.8 | × | 4 | × | × |
| 101 | ホース, ケーブル類 | 0.4 | 1.5 | 1.5 | 0.0456 | 68 | 197.2 | 50 | 116 | × | 13.6 | × | 3 | × | × |
| 472 | 運搬台車 | 0.765 | 0.9 | 1.215 | 0.0407 | 70 | 195 | 44 | 108 | × | 12.8 | × | 2 | × | × |
| 117 | バイク, 自転車 | 0.5 | 0.55 | 1.915 | 0.0159 | 45 | 114.4 | 95 | 97 | × | 15 | × | 3 | × | × |
| 490 | 空調室外機 | 0.6 | 0.7 | 1.45 | 0.0102 | 35 | 31.3 | 150 | 92 | × | 13.9 | × | 3 | × | × |
| 376 | 鋼管 | 0.55 | 0.55 | 2.4 | 0.0233 | 58 | 142.6 | 53.7 | 91 | × | 14 | × | 3 | × | × |

※ 鋼板貫通評価においても、コンクリートと同様に衝突方向の断面は中実断面として評価している。

第3.2.4-1表 代表的な飛来物源の飛散評価結果整理表

| No. | カテゴリー (品目に則った整理) | 寸法(m) | | C _D A/m (m ² /kg) | 最大 水平 速度 (m/s) | 最大 飛散 距離 (m) | 最大 浮上 高さ (m) | 質量 (kg) | 運動エネルギー | | 貫通力(コンクリート) | | 貫通力(鋼板) | | 飛来物発生 防止対策の 検討が必要 【①,②,③の 何れかが“○”】 | |
|-----|---------------------|-------|-------|--|-------------------------|-----------------------|-----------------------|------------|-------------------|----------------------------|------------------------|-----------------------------|------------------------|---------------------------|--|---|
| | | 高さ | 高さ以外 | | | | | | 最大 運動E (kJ) | 鋼製材超 (E>176kJ) 【条件①】 | 貫通 限界 厚さ (mm) | 鋼製材超 (T>25.9mm) 【条件②】 | 貫通 限界 厚さ (mm) | 鋼製材超 (T>9*mm) 【条件②】 | | |
| 267 | 物置 | 0.75 | 1.08 | 1.5 | 18 | 14 | 0.484 | 500 | 81 | × | × | 12.3 | × | 2 | × | × |
| 194 | 看板, 標識 | 0.6 | 0.6 | 1.4 | 71 | 202.9 | 18.726 | 30 | 76 | × | × | 12.1 | × | 3 | × | × |
| 68 | プラスチック容器 | 0.6 | 0.7 | 1.3 | 72 | 238.9 | 20.237 | 29 | 76 | × | × | 11.7 | × | 2 | × | × |
| 382 | 看板, 標識 | 0.1 | 1.8 | 2 | 45 | 147 | 0.533 | 72 | 73 | × | × | 14.2 | × | 3 | × | × |
| 164 | 鋼製蓋 | 0.15 | 2.3 | 2.3 | 17 | 12.5 | 0.193 | 441 | 64 | × | × | 12.9 | × | 2 | × | × |
| 495 | 仮設電源 | 0.6 | 0.9 | 1.1 | 24 | 19.8 | 0.867 | 216 | 63 | × | × | 11.3 | × | 2 | × | × |
| 152 | 消火設備格納箱 | 0.5 | 0.5 | 1.2 | 49 | 132.9 | 2.372 | 50 | 61 | × | × | 12 | × | 3 | × | × |
| 13 | ケープドラム | 0.5 | 0.9 | 0.9 | 29 | 24.1 | 1.096 | 122 | 52 | × | × | 10.5 | × | 2 | × | × |
| 11 | ドラム缶 | 0.6 | 0.6 | 0.89 | 72 | 214 | 19.804 | 20 | 52 | × | × | 10.1 | × | 2 | × | × |
| 93 | ドラム缶 | 0.6 | 0.6 | 0.89 | 71 | 210.3 | 19.251 | 20.5 | 52 | × | × | 10.1 | × | 2 | × | × |
| 131 | コンテナ | 1 | 2.1 | 3.4 | 6 | 1.4 | 0.017 | 2746 | 50 | × | × | 8.9 | × | 1 | × | × |
| 253 | 鋼製蓋 | 0.1 | 1.3 | 3.7 | 20 | 15.4 | 0.24 | 241 | 49 | × | × | 13.4 | × | 3 | × | × |
| 181 | バリケード | 0.5 | 0.5 | 1.1 | 70 | 196.3 | 14.822 | 20 | 49 | × | × | 10.5 | × | 2 | × | × |
| 338 | ケープドラム | 0.7 | 0.95 | 0.95 | 18 | 14.7 | 0.495 | 302 | 49 | × | × | 10 | × | 2 | × | × |
| 153 | 消火設備格納箱 | 0.3 | 0.7 | 1.2 | 47 | 143.4 | 1.442 | 40 | 45 | × | × | 10.8 | × | 2 | × | × |
| 201 | コンクリートブロック | 0.5 | 0.8 | 0.8 | 30 | 24.6 | 1.139 | 100 | 45 | × | × | 10 | × | 2 | × | × |
| 46 | 洗濯機 | 0.5 | 0.5 | 0.8 | 43 | 84.2 | 1.855 | 47 | 44 | × | × | 10.4 | × | 2 | × | × |
| 203 | ベンチ(常設) | 0.4 | 0.6 | 0.9 | 47 | 119.9 | 1.786 | 38.7 | 43 | × | × | 10.3 | × | 2 | × | × |
| 392 | 鋼製蓋 | 0.055 | 1.5 | 3.5 | 17 | 12.3 | 0.099 | 283 | 41 | × | × | 13.6 | × | 3 | × | × |
| 190 | ベンチ(常設) | 0.4 | 0.4 | 1.2 | 46 | 119.5 | 1.769 | 38.4 | 41 | × | × | 10.9 | × | 3 | × | × |
| 320 | パレット(鋼製) | 0.17 | 1.3 | 1.3 | 49 | 144.7 | 1.06 | 33.8 | 41 | × | × | 10.2 | × | 2 | × | × |
| 139 | 仮設電源 | 0.598 | 0.687 | 0.713 | 24 | 19.8 | 0.84 | 134 | 39 | × | × | 9.5 | × | 2 | × | × |
| 92 | 仮設電源 | 0.3 | 0.7 | 0.9 | 44 | 113.6 | 1.227 | 37.8 | 37 | × | × | 9.9 | × | 2 | × | × |
| 122 | コンクリートブロック | 0.45 | 0.5 | 0.8 | 38 | 71.5 | 1.394 | 50 | 37 | × | × | 9.8 | × | 2 | × | × |

※ 鋼板貫通評価においても、コンクリートと同様に衝突方向の断面は中実断面として評価している。

第3.2.4-1表 代表的な飛来物源の飛散評価結果整理表

| No. | カテゴリ (品目に則った整理) | 寸法(m) | | C _D A/m (m ² /kg) | 最大 水平 速度 (m/s) | 最大 飛散 距離 (m) | 最大 浮上 高さ (m) | 質量 (kg) | 運動エネルギー | | 貫通力(コンクリート) | | 貫通力(鋼板) | | 飛来物発生 防止対策の 検討が必要 【①,②,③の 何れかが“○”】 |
|-----|--------------------|-------|------|--|-------------------------|-----------------------|-----------------------|------------|-------------------|----------------------------|------------------------|-----------------------------|------------------------|---------------------------|--|
| | | 高さ | 高さ以外 | | | | | | 最大 運動E (kJ) | 鋼製材超 (E>176kJ) 【条件①】 | 貫通 限界 厚さ (mm) | 鋼製材超 (T>25.9mm) 【条件②】 | 貫通 限界 厚さ (mm) | 鋼製材超 (T>9*mm) 【条件②】 | |
| 483 | ベンチ(常設) | 0.5 | 0.75 | 1.8 | 86 | 268.8 | 38.374 | 10 | 37 | × | 8.3 | × | 2 | × | × |
| 204 | 下駄箱 | 0.4 | 0.6 | 1 | 30 | 21.3 | 0.979 | 76 | 35 | × | 9.7 | × | 2 | × | × |
| 6 | パレット(木製または樹 脂製) | 0.15 | 1.1 | 1.1 | 45 | 144.1 | 0.723 | 33 | 34 | × | 9.9 | × | 2 | × | × |
| 339 | パレット(木製または樹 脂製) | 0.14 | 1.1 | 1.1 | 44 | 139.6 | 0.661 | 33 | 32 | × | 9.8 | × | 2 | × | × |
| 301 | 足場板,足場枠 | 0.24 | 0.36 | 3 | 32 | 41.4 | 0.66 | 57 | 30 | × | 10.8 | × | 3 | × | × |
| 379 | パレット(木製または樹 脂製) | 0.13 | 1.1 | 1.1 | 48 | 146.7 | 0.774 | 23.7 | 28 | × | 9.1 | × | 2 | × | × |
| 251 | ベンチ(仮設) | 0.3 | 0.42 | 1.8 | 57 | 147.5 | 2.329 | 15.1 | 25 | × | 8.7 | × | 2 | × | × |
| 298 | 鋼製スロープ | 0.12 | 0.5 | 1.5 | 39 | 103.2 | 0.439 | 27.7 | 22 | × | 9.6 | × | 3 | × | × |
| 176 | ドラム缶 | 0.6 | 0.6 | 0.89 | 14 | 9.1 | 0.259 | 211 | 21 | × | 7.5 | × | 1 | × | × |
| 220 | カーブミラー | 0.084 | 1 | 1 | 44 | 148.7 | 0.453 | 19.7 | 20 | × | 8.5 | × | 2 | × | × |
| 47 | プラスチック容器 | 0.6 | 0.6 | 0.7 | 87 | 256.7 | 39.584 | 5 | 19 | × | 6 | × | 1 | × | × |
| 405 | 樹脂製パイプ | 0.3 | 0.3 | 6 | 14 | 8.1 | 0.21 | 150 | 15 | × | 8.7 | × | 2 | × | × |
| 33 | 消火設備格納箱 | 0.3 | 0.3 | 0.7 | 54 | 147.3 | 1.997 | 10 | 15 | × | 7.2 | × | 2 | × | × |
| 272 | 足場板,足場枠 | 0.04 | 0.25 | 4 | 43 | 126.1 | 0.278 | 12.5 | 12 | × | 9.8 | × | 4 | × | × |
| 188 | カーコーション | 0.4 | 0.4 | 0.7 | 86 | 283.2 | 34.391 | 3 | 12 | × | 5.4 | × | 1 | × | × |
| 351 | 木片,木製品 | 0.26 | 0.26 | 0.77 | 29 | 35 | 0.632 | 26 | 11 | × | 7 | × | 2 | × | × |
| 87 | グレーチング | 0.065 | 1 | 1 | 15 | 8.8 | 0.101 | 63.3 | 8 | × | 6.1 | × | 2 | × | × |
| 295 | ホース,ケープル類 | 0.35 | 0.6 | 0.6 | 12 | 7 | 0.169 | 100 | 8 | × | 5 | × | 1 | × | × |
| 51 | カーブミラー | 0.05 | 0.6 | 0.6 | 38 | 102.4 | 0.21 | 8.8 | 7 | × | 6.1 | × | 2 | × | × |
| 107 | 樹木(倒木,伐採 木),材木 | 0.1 | 0.1 | 4 | 22 | 17.5 | 0.277 | 20 | 5 | × | 6.9 | × | 3 | × | × |

※ 鋼板貫通評価においても,コンクリートと同様に
衝突方向の断面は中実断面として評価している。

第3.2.4-1表 代表的な飛来物源の飛散評価結果整理表

| No. | カテゴリ (品目に則った整理) | 寸法(m) | | C _D A/m (m ² /kg) | 最大 水平 速度 (m/s) | 最大 飛散 距離 (m) | 最大 浮上 高さ (m) | 質量 (kg) | 運動エネルギー | | 貫通力(コンクリート) | | 貫通力(鋼板) | | 飛来物発生 防止対策の 検討が必要 【①,②,③の 何れかが“○”】 |
|-----------|--------------------|-------|-------|--|-------------------------|-----------------------|-----------------------|------------|-------------------|----------------------------|------------------------|-----------------------------|------------------------|---------------------------|--|
| | | 高さ | 高さ以外 | | | | | | 最大 運動E (kJ) | 鋼製材超 (E>176kJ) 【条件①】 | 貫通 限界 厚さ (mm) | 鋼製材超 (T>25.9mm) 【条件②】 | 貫通 限界 厚さ (mm) | 鋼製材超 (T>9*mm) 【条件②】 | |
| 58 | 樹脂製蓋 | 0.02 | 1 | 0.0188 | 15 | 9.2 | 0.046 | 36 | 5 | × | 5.8 | × | 2 | × | × |
| 34 | 鋼製スロープ | 0.05 | 0.55 | 0.0203 | 21 | 17.1 | 0.152 | 21.4 | 5 | × | 5.7 | × | 2 | × | × |
| 198 | プラスチック容器 | 0.7 | 0.7 | 0.0034 | 5 | 1.2 | 0.013 | 346 | 5 | × | 3.6 | × | 1 | × | × |
| 32 | 消火器 | 0.153 | 0.154 | 0.0117 | 22 | 19.7 | 0.324 | 10 | 3 | × | 4.2 | × | 1 | × | × |
| 50 | バイク, 自転車 | 0.05 | 0.51 | 0.0163 | 19 | 14 | 0.122 | 12.5 | 3 | × | 4.1 | × | 1 | × | × |
| 431 | 樹脂製蓋 | 0.015 | 0.5 | 0.0253 | 16 | 11.3 | 0.045 | 9 | 2 | × | 3.8 | × | 1 | × | × |
| 336 | 什器類 | 0.06 | 0.36 | 0.0227 | 25 | 25 | 0.207 | 4.5 | 2 | × | 3.3 | × | 1 | × | × |
| 244 | グレーチング | 0.1 | 0.9 | 0.0059 | 5 | 1.2 | 0.016 | 115 | 2 | × | 2.9 | × | 1 | × | × |
| 305 | 鋼製敷板 | 0.005 | 0.5 | 0.0181 | 8 | 2.9 | 0.007 | 16.6 | 1 | × | 3.4 | × | 1 | × | × |
| 316 | マンホール蓋 | 0.006 | 0.65 | 0.0181 | 9 | 3.6 | 0.009 | 15.6 | 1 | × | 3.4 | × | 1 | × | × |
| 232 | コンクリート製蓋 | 0.03 | 0.5 | 0.0102 | 9 | 3.3 | 0.026 | 20.7 | 1 | × | 3 | × | 1 | × | × |
| 233 | グレーチング | 0.1 | 0.5 | 0.0063 | 7 | 2 | 0.03 | 38.4 | 1 | × | 2.6 | × | 1 | × | × |
| 110 | 鉄骨 | 0.15 | 0.2 | 0.0048 | 2 | 0.1 | 0 | 179 | 1 | × | 2 | × | 1 | × | × |
| 418 | コンクリート製蓋 | 0.022 | 0.26 | 0.0144 | 12 | 6.3 | 0.035 | 3.4 | 1 | × | 1.9 | × | 1 | × | × |
| 250 | 運搬台車 | 0.29 | 0.49 | 0.0041 | 3 | 0.3 | 0.001 | 120 | 1 | × | 1.8 | × | 1 | × | × |
| 81 | コンクリート製蓋 | 0.05 | 0.2 | 0.007 | 5 | 0.9 | 0.01 | 11.5 | 1 | × | 1.5 | × | 1 | × | × |
| 246 | マンホール蓋 | 0.045 | 0.75 | 0.0063 | 1 | 0 | 0 | 64 | 1 | × | 0.7 | × | 1 | × | × |
| ＜飛散しないもの＞ | | | | | | | | | | | | | | | |
| 8 | 鋼管 | 0.17 | 0.17 | 5.5 | 0.0042 | 0 | 0 | 109 | — | — | 0 | × | 0 | × | × |
| 9 | ボンベ | 0.25 | 0.25 | 1.4 | 0.0038 | 0 | 0 | 52 | — | — | 0 | × | 0 | × | × |
| 27 | フォークリフト | 1.19 | 1.38 | 0.0011 | 0 | 0 | 0 | 3320 | — | — | 0 | × | 0 | × | × |
| 49 | マンホール蓋 | 0.05 | 1 | 0.0058 | 0 | 0 | 0 | 122 | — | — | 0 | × | 0 | × | × |
| 54 | コンクリート製蓋 | 0.13 | 0.7 | 0.0027 | 0 | 0 | 0 | 209 | — | — | 0 | × | 0 | × | × |
| 61 | 鋼製敷板 | 0.019 | 1.55 | 6 | 0.0045 | 0 | 0 | 1387 | — | — | 0 | × | 0 | × | × |

※ 鋼板貫通評価においても、コンクリートと同様に
衝突方向の断面は中実断面として評価している。

第3.2.4-1表 代表的な飛来物源の飛散評価結果整理表

| No. | カテゴリー (品目に則った整理) | 寸法(m) | | C _D A/m (m ² /kg) | 最大 水平 速度 (m/s) | 最大 飛散 距離 (m) | 最大 浮上 高さ (m) | 質量 (kg) | 最大 運動E (kJ) | 運動エネルギー | | 貫通力(コンクリート) | | 貫通力(鋼板) | | 飛来物発生 防止対策の 検討が必要 【①,②,③の 何れかが“○”】 |
|-----|---------------------|-------|-------|--|-------------------------|-----------------------|-----------------------|------------|-------------------|----------------------------|-----------------------------|------------------------|---------------------------|------------------------|---|--|
| | | 高さ | 高さ以外 | | | | | | | 鋼製材超 (E>176kJ) 【条件①】 | 鋼製材超 (T>25.9mm) 【条件②】 | 貫通 限界 厚さ (mm) | 鋼製材超 (T>9*mm) 【条件②】 | 貫通 限界 厚さ (mm) | | |
| 64 | 仮設電源 | 1.3 | 1.75 | 3.7 | 0.0022 | 0 | 0 | 4190 | — | — | 0 | 0 | × | × | × | × |
| 65 | フレコンバッグ入資材 | 1.1 | 1.1 | 1.1 | 0.0024 | 0 | 0 | 1000 | — | — | 0 | 0 | × | × | × | × |
| 69 | 鉄骨 | 0.15 | 0.15 | 1 | 0.0043 | 0 | 0 | 31.1 | — | — | 0 | 0 | × | × | × | × |
| 97 | 鉄骨 | 0.125 | 0.125 | 4.5 | 0.0043 | 0 | 0 | 106 | — | — | 0 | 0 | × | × | × | × |
| 100 | ケーブドラム | 0.9 | 1.5 | 1.5 | 0.0024 | 0 | 0 | 1399 | — | — | 0 | 0 | × | × | × | × |
| 112 | 鋼管 | 0.15 | 0.15 | 4 | 0.0034 | 0 | 0 | 86 | — | — | 0 | 0 | × | × | × | × |
| 141 | 建設機械 | 2.2 | 2.69 | 2.69 | 0.0016 | 0 | 0 | 8000 | — | — | 0 | 0 | × | × | × | × |
| 163 | 鉄骨 | 0.1 | 0.1 | 5.4 | 0.0048 | 0 | 0 | 91.3 | — | — | 0 | 0 | × | × | × | × |
| 186 | マンホール蓋 | 0.05 | 1 | 1 | 0.0058 | 0 | 0 | 122 | — | — | 0 | 0 | × | × | × | × |
| 199 | オブジェ | 2 | 2 | 4 | 0.0006 | 0 | 0 | 22000 | — | — | 0 | 0 | × | × | × | × |
| 226 | トラック | 1.695 | 2.15 | 5.14 | 0.0021 | 0 | 0 | 7635 | — | — | 0 | 0 | × | × | × | × |
| 231 | マンホール蓋 | 0.045 | 0.7 | 0.7 | 0.0062 | 0 | 0 | 57 | — | — | 0 | 0 | × | × | × | × |
| 234 | マンホール蓋 | 0.045 | 0.7 | 0.7 | 0.0062 | 0 | 0 | 57 | — | — | 0 | 0 | × | × | × | × |
| 276 | 建設機械 | 0.72 | 1.2 | 2.39 | 0.0016 | 0 | 0 | 2250 | — | — | 0 | 0 | × | × | × | × |
| 284 | 鋼製敷板 | 0.019 | 1.5 | 6 | 0.0045 | 0 | 0 | 1342 | — | — | 0 | 0 | × | × | × | × |
| 289 | 空調室外機 | 0.4 | 0.8 | 0.95 | 0.002 | 0 | 0 | 500 | — | — | 0 | 0 | × | × | × | × |
| 293 | ポンベ | 0.25 | 0.25 | 1.4 | 0.0035 | 0 | 0 | 57 | — | — | 0 | 0 | × | × | × | × |
| 309 | プラスチック容器 | 0.68 | 0.87 | 1.07 | 0.0029 | 0 | 0 | 516 | — | — | 0 | 0 | × | × | × | × |
| 314 | コンクリートブロック | 0.15 | 0.25 | 0.6 | 0.0036 | 0 | 0 | 51.8 | — | — | 0 | 0 | × | × | × | × |
| 335 | 鋼製スロープ | 0.15 | 0.5 | 1.6 | 0.0041 | 0 | 0 | 180 | — | — | 0 | 0 | × | × | × | × |
| 337 | 鋼製スロープ | 0.18 | 1.6 | 3.3 | 0.0038 | 0 | 0 | 1011 | — | — | 0 | 0 | × | × | × | × |
| 372 | フォークリフト | 1.48 | 2.07 | 2.23 | 0.001 | 0 | 0 | 7400 | — | — | 0 | 0 | × | × | × | × |
| 380 | 鋼製ブロック | 0.4 | 0.4 | 0.75 | 0.0006 | 0 | 0 | 942 | — | — | 0 | 0 | × | × | × | × |
| 381 | 鋼製ブロック | 0.4 | 0.5 | 0.75 | 0.0005 | 0 | 0 | 1178 | — | — | 0 | 0 | × | × | × | × |

※ 鋼板貫通評価においても、コンクリートと同様に
衝突方向の断面は中実断面として評価している。

第3.2.4-1表 代表的な飛来物源の飛散評価結果整理表

| No. | カテゴリー (品目に則った整理) | 寸法(m) | | C _D A/m (m ² /kg) | 最大 水平 速度 (m/s) | 最大 飛散 距離 (m) | 最大 浮上 高さ (m) | 質量 (kg) | 運動エネルギー | | 貫通力(コンクリート) | | 貫通力(鋼板) | | 飛来物発生 防止対策の 検討が必要 【①,②,③の 何れかが“○”】 |
|-----|---------------------|-------|------|--|-------------------------|-----------------------|-----------------------|------------|-------------------|----------------------------|------------------------|-----------------------------|------------------------|---------------------------|--|
| | | 高さ | 高さ以外 | | | | | | 最大 運動E (kJ) | 鋼製材超 (E>176kJ) 【条件①】 | 貫通 限界 厚さ (mm) | 鋼製材超 (T>25.9mm) 【条件②】 | 貫通 限界 厚さ (mm) | 鋼製材超 (T>9*mm) 【条件②】 | |
| 388 | コンクリート製蓋 | 0.25 | 1.25 | 5 | 0.0029 | 0 | 0 | 1655 | — | — | 0 | × | 0 | × | × |
| 394 | 鋼製敷板 | 0.016 | 1.53 | 6 | 0.0053 | 0 | 0 | 1153 | — | — | 0 | × | 0 | × | × |
| 400 | 鋼製ボックス | 1.5 | 2.1 | 2.1 | 0.0019 | 0 | 0 | 3800 | — | — | 0 | × | 0 | × | × |
| 411 | 鋼製蓋 | 0.07 | 1.2 | 3.7 | 0.0026 | 0 | 0 | 1220 | — | — | 0 | × | 0 | × | × |
| 412 | 鋼製蓋 | 0.03 | 2.1 | 2.1 | 0.0037 | 0 | 0 | 816 | — | — | 0 | × | 0 | × | × |
| 413 | 鋼製蓋 | 0.07 | 0.4 | 1.1 | 0.0014 | 0 | 0 | 242 | — | — | 0 | × | 0 | × | × |
| 417 | コンクリートブロック | 0.15 | 0.16 | 0.6 | 0.0042 | 0 | 0 | 33.1 | — | — | 0 | × | 0 | × | × |
| 469 | 鋼管 | 0.3 | 0.6 | 5.5 | 0.0028 | 0 | 0 | 745 | — | — | 0 | × | 0 | × | × |

※ 鋼板貫通評価においても、コンクリートと同様に
衝突方向の断面は中実断面として評価している。

3.3 設計飛来物の設定

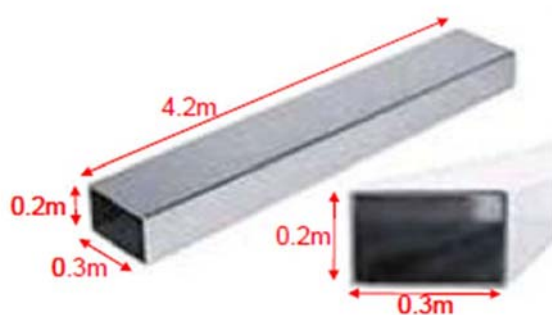
3.2におけるスクリーニングの結果，鋼製材の影響を上回る飛来物源については飛来物発生防止対策を施すことが可能であると判断したため，鋼製材を設計飛来物として決定した。

また，設計飛来物に対する竜巻飛来物防護対策設備として設置する防護ネットを通過する可能性があり，鋼製材にて包含できないものとして，砂利も設計飛来物に設定した。

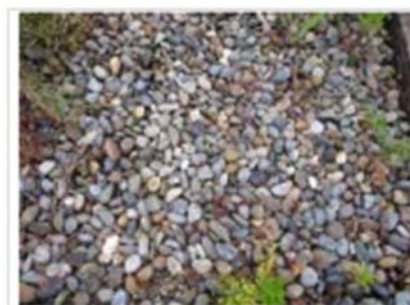
第3.3-1表に，東海第二発電所における設計飛来物の仕様を示す。

第3.3-1表 東海第二発電所における設計飛来物

| 名称 | 長さ (m) | 幅 (m) | 高さ (m) | 質量 (kg) | 空力 パラメータ (m^2/kg) | 速度 (m/s) | 運動 エネルギー (kJ) |
|-----|-----------|----------|-----------|------------|-----------------------------|-----------------|---------------------|
| 砂利 | 0.04 | 0.04 | 0.04 | 0.18 | 0.0176 | 62 | 0.35 |
| 鋼製材 | 4.2 | 0.3 | 0.2 | 135 | 0.0065 | 51 | 176 |



(鋼製材のイメージ)



(砂利)

鋼製材の水平，鉛直速度については，竜巻風速場をLES（非定常乱流渦モデル）による乱流場とし飛来物速度を求めた「竜巻影響評価ガイド」の値を用いる。

また、砂利については、「竜巻影響評価ガイド」に記載がないことから、竜巻風速場をランキン渦モデルとした場合の水平速度を求め、鉛直速度については「竜巻影響評価ガイド」に基づき水平速度の2/3とした。

分解され小型軽量となる物品

及び損傷するが飛来物とならない物品について

設計飛来物の抽出フローにおいて、「分解され小型軽量となる物品」は設計飛来物のうち鋼製材に包絡されること、また「損傷するが飛散しない物品」は飛散しないことから、いずれも設計飛来物として選定しないとしている。これは、過去の主な竜巻の被害概要の調査結果等から、このような物品の状況について検討を行った結果より判断した。

以下に、平成2年以降の主な竜巻による被害概要の調査結果等に基づく検討結果を示す。

(1) 分解され小型軽量となる物品（屋外屋根及びガラス窓）

竜巻の被害概要調査結果において、分解され小型軽量となる物品として屋外屋根及びガラス窓が確認できた。これらの被害状況を以下に示す。

a. 屋外屋根

別図 1-1～5 に屋外屋根の被害状況を示す。これらより，屋外屋根については，F 0～F 3 の竜巻において，形を保ったままではなく，分解された状態で飛来していることが分かる。また，厚みが薄いことから形状が変形しており柔飛来物と見なせると考えられることから，衝突の際に与える衝撃荷重及び貫通力については，設計飛来物である鋼製材の評価に包絡されると考えられる。



別図 1-1 平成 16 年 6 月 27 日佐賀県で発生した F 2 竜巻による
屋外屋根の被害状況⁽¹⁾



屋外トイレ屋根の損傷



カーポート屋根の飛散及び骨組の損傷



カーポート屋根の損傷

別図 1-2 平成 18 年 9 月 17 日宮崎県延岡市で発生した F 2 竜巻による
屋外屋根の被害状況⁽²⁾



折板の損傷



カーポートの被害

別図 1-3 平成 21 年 10 月 8 日茨城県土浦市で発生した F 1 竜巻による
屋外屋根の被害状況⁽³⁾



周囲の田に散乱した屋根ふき材

別図 1-4 平成 24 年 2 月 1 日島根県出雲市で発生した F 0 竜巻による
屋外屋根の被害状況⁽⁴⁾



電線等に引っ掛かった飛来物（鋼板製屋根材）



飛来物（鋼板製屋根材）の衝突



飛散した飛来物（鋼板製屋根材）



飛散した折板屋根の損傷状況



ガソリンスタンドの折板屋根の脱落



駐車場の折板屋根の著しい変形

別図 1-5 平成 24 年 5 月 6 日茨城県つくば市で発生した F 3 竜巻による
屋外屋根の被害状況⁽⁵⁾

b. ガラス窓

別図 1-6～11 にガラス窓の被害状況を示す。これらより、ガラス窓については、F 0～F 3 及び E F 5 の竜巻において損壊し、分解されていることが確認できる。分解された状態では小型軽量となっており、その影響は設計飛来物である鋼製材もしくは砂利に包絡されると考えられる。



エントランスの窓ガラスの損壊



破損した窓ガラス片の屋内壁面への突き刺さり

別図 1-6 平成 18 年 9 月 17 日宮崎県延岡市で発生した F 2 竜巻による
ガラス窓の被害状況⁽²⁾



バスの窓ガラス損壊

別図 1-7 平成 20 年 5 月 25 日米国アイオワ州で発生した E F 5 竜巻による
ガラス窓の被害状況⁽⁶⁾



窓ガラスの損壊



窓ガラスの飛来物衝突痕

別図 1-8 平成 21 年 7 月 27 日群馬県館林市での F 1 (F 2) 竜巻による
ガラス窓の被害状況⁽⁷⁾



倉庫の窓ガラスと屋根の被害状況



窓ガラスの損壊



出窓部の窓ガラスの損壊



エントランスのガラス損壊

別図 1-9 平成 21 年 10 月 8 日茨城県土浦市で発生した F 1 竜巻による
ガラス窓の被害状況⁽³⁾



出雲市立第二中学校 提供

体育館窓ガラスの損壊



出雲市立第二中学校 提供

教室



出雲市立第二中学校 提供

廊下



出雲市立第二中学校 提供

屋外に面した窓ガラス

別図 1-10 平成 24 年 2 月 1 日島根県出雲市で発生した F 0 竜巻による
ガラス窓の被害状況⁽⁴⁾



店舗の窓ガラスの被害状況



店舗の窓ガラスの被害状況（飛来物衝突痕）



ガラスの被害状況（飛来物衝突痕）



ガラスの被害状況（飛来物衝突痕）

別図 1-11 平成 24 年 5 月 6 日茨城県つくば市で発生した F 3 竜巻による
ガラス窓の被害状況⁽⁵⁾

(2) 東海第二発電所の屋外屋根及びガラス窓の状況

東海第二発電所における屋外屋根の状況を別図 1-12、ガラス窓の状況を別図 1-13 に示す。東海第二発電所におけるこれらの物品の構造については、上記の被害にあった物品の構造と大きく変わらないことから、竜巻通過時には同様の被害状況になると考えられ、飛来物としては設計飛来物の影響に包絡されると考えられる。



別図 1-12 東海第二発電所における屋外屋根の状況



別図 1-13 東海第二発電所におけるガラス窓の状況

- (3) 損傷するが飛散しない物品（樹木、フェンス、原子炉建屋ブローアウトパネル）

竜巻の被害概要調査結果等における「損傷するが飛散しない物品」に関し、東海第二発電所に存在する物品としてシャッター、樹木、フェンス及び原子炉建屋ブローアウトパネルが確認できた。これらの被害状況を以下に示す。

a. シャッター

別図 1-14～18 にシャッターの被害状況を示す。これらより、シャッターについては、F 1～F 3 及び E F 5 の竜巻において形状は変形しているが、固定部は外れていないことが確認できる。なお、外れて飛来物となったとしても、衝突の際に与える衝撃荷重及び貫通力については、上記の屋外屋根と同様、設計飛来物である鋼製材の評価で包絡されると考えられる。



シャッターの外れ

別図 1-14 平成 20 年 5 月 25 日米国アイオワ州で発生した E F 5 竜巻による
シャッター被害状況⁽⁶⁾



シャッターの変形

別図 1-15 平成 21 年 10 月 8 日茨城県土浦市で発生した F 1 竜巻による
シャッターの被害状況⁽³⁾



シャッターの外れ

別図 1-16 平成 21 年 7 月 27 日群馬県館林市で発生した F 1 (F 2) 竜巻
によるシャッターの被害状況⁽⁷⁾



消防団施設のシャッターの**変形**

別図 1-17 平成 24 年 5 月 6 日茨城県つくば市で発生した F 3 竜巻による
シャッターの被害状況⁽⁵⁾



シャッターの**外れ**

別図 1-18 平成 25 年 9 月 2 日埼玉県発生した F2 竜巻による
シャッターの被害状況⁽⁸⁾

b. 樹木

別図 1-19～25 に樹木の被害状況を示す。これらより、樹木については、F 1～F 3 及び E F 5 の竜巻において幹の折損、根の引き抜き等が見られるが、折れた場合もしくは引き抜かれた場合のいずれにおいても、その場で倒壊しているのみであることが確認できる。これは、竜巻の風荷重により樹木が損壊を受けた後では、竜巻が既に通り過ぎていたためと考えられ、樹木が折損もしくは引き抜かれた後、さらに竜巻により巻き上げられ、飛来物となることは考え難い。



倒木（南から見る）
倒れなかった樹木も点在している。



倒木（北西から見る）

別図 1-19 平成 14 年 7 月 26 日群馬県境町で発生した F 2 竜巻による
樹木被害状況⁽⁹⁾



樹木の転倒



樹木の転倒

別図 1-20 平成 18 年 9 月 17 日宮崎県延岡市で発生した F 2 竜巻による
樹木被害状況⁽²⁾



樹木の折損

別図 1-21 平成 20 年 5 月 25 日米国アイオワ州で発生した E F 5 竜巻による
樹木被害状況⁽⁶⁾



倒木

別図 1-22 平成 21 年 7 月 19 日岡山県美作市で発生した F 2 竜巻による
樹木被害状況⁽¹⁰⁾



倒木

別図 1-23 平成 21 年 10 月 8 日茨城県土浦市で発生した F 1 竜巻による
樹木被害状況⁽³⁾



樹木の折損



樹木の折損と鳥居の被害



樹木の倒木



倒木と社の被害

別図 1-24 平成 24 年 5 月 6 日茨城県つくば市で発生した F 3 竜巻による
樹木被害状況⁽⁵⁾



樹木の被害



樹木の倒壊による小屋組の被害



樹木の被害



樹木の被害



樹木の被害



樹木の被害

別図 1-25 平成 25 年 9 月 2 日埼玉県で発生した F 2 竜巻による
樹木被害状況⁽⁸⁾

c. フェンス

別図 1-26～28 にフェンスの被害状況を示す。これらより，フェンス類については，F 1～F 3 の竜巻において傾き，倒壊等が見られるが，樹木と同様にその場で倒壊しているのみであり，倒壊した後では，竜巻は既に通り過ぎていていると考えられることから，竜巻により巻き上げられ，飛来物となることは考え難い。



フェンスの著しい変形



フェンスの変形

別図 1-26 平成 21 年 7 月 27 日群馬県館林市で発生した F 1 (F 2) 竜巻によるフェンスの被害状況⁽⁷⁾



フェンスの変形



道路標識の倒壊

別図 1-27 平成 24 年 5 月 6 日茨城県つくば市で発生した F 3 竜巻によるフェンス類の被害状況⁽⁵⁾



フェンスの倒壊



屋上フェンスの**変形**



フェンスの**変形**



フェンス支柱部の**破損**



フェンスの**変形** (工事中の建築物)



フェンスの**倒壊**



電柱の倒壊



看板の**変形**

別図 1-28 平成 25 年 9 月 2 日埼玉県で発生した F 2 竜巻による
フェンス類の被害状況⁽⁸⁾

d. 原子炉建屋ブローアウトパネル

原子炉建屋ブローアウトパネルには開放時の落下を防止する機構が付
けられており、竜巻によって外れた場合でも、落下時の挙動は通常の開放
時と変わらないと考えられることから、落下防止機構が破断して飛来物と
なることはないと考えられる。また、ブローアウトパネルの開放後には竜
巻は速やかに遠ざかっていくと考えられることから、開放したブローアウ
トパネルが強風に煽られ、落下防止機構が破断し飛来物化する可能性も小
さいと考えられる。

- (4) 東海第二発電所のシャッター、樹木、フェンス及びブローアウトパネル
の状況

東海第二発電所におけるシャッターの状況を別図 1-29 に、樹木の状況を別図 1-30 に示す。上記の被害実績に示された樹木と大きく変わらない
と考えられることから、竜巻通過時には、同様の被害状況になり、幹の折
損もしくは根の引き抜きによりその場で倒壊するのみと考えられる。



別図 1-29 東海第二発電所におけるシャッターの状況



別図 1-30 東海第二発電所における樹木の状況

東海第二発電所におけるフェンスの状況を別図 1-31 に示す。上記にて示した被害にあったフェンスの構造と大きく変わらないことから、竜巻通過時には、同様の被害状況になり変形もしくは倒壊すると考えられる。



別図 1-31 東海第二発電所におけるフェンスの状況

東海第二発電所における原子炉建屋ブローアウトパネルの設置状況を別図 1-32 に示す。ブローアウトパネルには 4 本のチェーンが落下防止機構として取り付けられており、これらは落下時の衝撃荷重に対して破断しないと考えられる。また、竜巻が遠ざかるまでの短時間に 4 本のチェーンが全て破断しする可能性も小さいと考えられる。



別図 1-32 東海第二発電所における原子炉建屋ブローアウトパネルの
設置状況

以上より、シャッター、樹木、フェンス及び原子炉建屋ブローアウトパネルは、竜巻により損傷もしくは脱落するが、飛散せず設計飛来物として選定が不要と判断した。

<参考文献>

- (1) 「佐賀市・鳥栖市竜巻現地被害調査報告」 (平成 16 年 7 月 13 日)
- (2) 「2006 年台風 13 号被害調査報告 -延岡市の竜巻被害と飯塚市文化施設の屋根被害-」 (平成 18 年 10 月 10 日)
- (3) 「平成 21 年 10 月 8 日茨城県土浦市竜巻被害調査報告」 (平成 21 年 10 月 13 日)
- (4) 「平成 24 年 2 月 1 日島根県出雲市で発生した突風被害調査報告」 (平成 24 年 2 月 14 日)
- (5) 「平成 24 年 (2012 年) 5 月 6 日に茨城県つくば市で発生した建築物等の竜巻被害調査報告」 (ISSN 1346-7328 国総研資料第 703 号 ISSN 0286-4630 建築研究資料第 141 号 平成 25 年 1 月)
- (6) 「米国アイオワ州におけるトルネード被害調査報告」 (平成 20 年 6 月 9 日)
- (7) 「平成 21 年 7 月 27 日群馬県館林市竜巻被害調査報告」 (平成 21 年 8 月 17 日一部修正)
- (8) 「平成 25 年 9 月 2 日に発生した竜巻による埼玉県越谷市, 北葛飾郡松伏町及び千葉県野田市での建築物等被害 (速報)」 (国土交通省国土技術政策総合研究所独立行政法人建築研究所平成 25 年 9 月 10 日一部修正)
- (9) 「群馬県境町で発生した突風による建築物等の被害について」 (平成 14 年 7 月 26 日独立行政法人建築研究所)
- (10) 「平成 21 年 7 月 19 日岡山県美作市竜巻被害調査報告」 (平成 21 年 8 月 4 日)

空力パラメータについて

物品の飛散解析に用いる空力パラメータは「竜巻影響評価ガイド」の参考文献⁽¹⁾及び米国NRCの竜巻設計のための飛来物特性を与えるNUREG-0800(1996)⁽²⁾に引用されている文献⁽³⁾を参照し、下式により算出する。

$$\frac{C_D A}{m} = c \frac{(C_{D1} A_1 + C_{D2} A_2 + C_{D3} A_3)}{m}$$

ここで、

$\frac{C_D A}{m}$: 空力パラメータ (m²/kg)

m : 物品の質量 (kg)

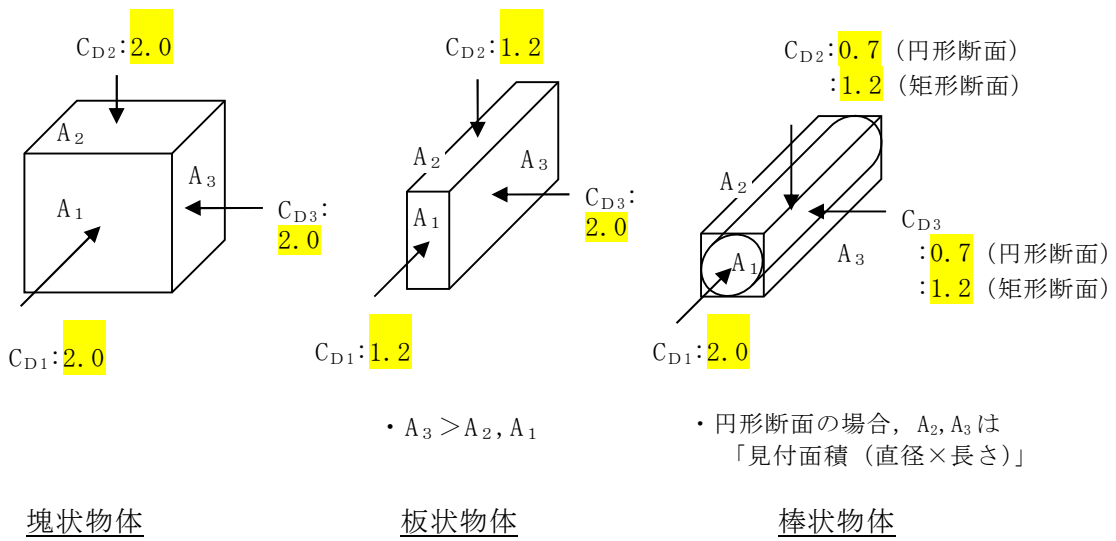
c : 係数 (0.33)

C_{D1}, C_{D2}, C_{D3} : 直交3方向における物品の抗力係数(別表2-1より選定)

A_1, A_2, A_3 : $C_{D1} \sim C_{D3}$ を定義した各方向に対する見付面積 (m²)

別表 2-1 空力パラメータ算出のための抗力係数

| 物体の形状 | C_{D1} | C_{D2} | C_{D3} |
|-------|----------|--------------------------|--------------------------|
| 塊状 | 2.0 | 2.0 | 2.0 |
| 板状 | 1.2 | 1.2 | 2.0 |
| 棒状 | 2.0 | 0.7 (円形断面) 1.2 (矩形断面) | 0.7 (円形断面) 1.2 (矩形断面) |



<参考文献>

- (1) 東京工芸大学 (2011) : 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
- (2) US-NRC: “3.5.1.4 MISSILE GENERATED BY NATURAL PHENOMENA,” Standard Review Plan, NUREG-0800, 1996.
- (3) E. Simiu, M. Cordes: “Tornado-Borne Missile Speeds,” NBSIR76-1050, National Bureau of Standards, Washington D.C., 1976.

竜巻時に発生する雹の影響について

竜巻においては雹を伴うことがあるため、雹の影響について検討を行った。

雹はあられが大きく成長したもので、直径 5mm 以上の氷の粒子である。雹の粒径の上限は、文献⁽¹⁾によれば通常は直径が 5mm～50mm とされているが、雹の粒径の変化に対する影響度を確認するため、別の文献⁽²⁾に記載の雹のうち最大の 10cm の雹までを想定した評価を実施した。

空気中を落下する物体は空気抵抗を受けるので、時間が経てば空気抵抗と重力とが釣り合い等速運動となり、一定の速度（終端速度）となる。空気中を落下する雹もこの終端速度で落下する。雹の粒径毎の終端速度を第 1 表に示す。

第 1 表 雹の粒径毎の終端速度⁽²⁾

| 粒径 (cm) | 終端速度 (m/s) |
|---------|------------|
| 1 | 9 |
| 2 | 16 |
| 5 | 33 |
| 10 | 59 |

ここで、雹の影響を評価するため、運動エネルギー、貫通のしやすさ（貫通限界厚さ）を評価した結果を設計飛来物（鋼製材）と比較し第 2 表に示す。

その結果、雹の影響は設計飛来物（鋼製材）に十分包絡できると言える。

第2表 粒径5cm及び10cm雹の影響評価及び設計飛来物との比較結果

| 評価対象 | 運動エネルギー | 貫通限界厚さ（鉛直） | |
|------------|---------|---|-------|
| | | コンクリート ($F_c = 225 \text{kgf/cm}^2$) | 鋼板 |
| 粒径5cm雹 | 0.04kJ | 0.8cm | 0.2mm |
| 粒径10cm雹 | 0.85kJ | 2.9cm | 0.8mm |
| 設計飛来物（鋼製材） | 79kJ | 18.8cm | 19mm |

<参考文献>

- (1) 白木正規, 百万人の天気教室, 成山堂書店
- (2) 小倉義光, 一般気象学, 東京大学出版会

竜巻随件事象の抽出について

1. 概要

過去の竜巻被害事例及び東海第二発電所の施設の配置から想定される竜巻の随件事象を検討し、東海第二発電所において考慮する必要がある事象として、火災、溢水及び外部電源喪失を抽出した。

2. 過去の竜巻被害について

1990 年以降の主な竜巻による被害概要を調査した文献から検討を行った。第 2-1 表に、1990 年以降に日本で発生した最大級の竜巻である F 3 クラスの竜巻を示す。

第 2-1 表 1990 年以降の F 3 クラス竜巻

| 発生日時 | 発生場所 | 藤田 スケール | 死者 | 負傷者 | 住宅 全壊 | 住宅 半壊 |
|------------------|---------|------------|----|-----|----------|----------|
| 2012 年 5 月 6 日 | 茨城県常総市 | F 3 | 1 | 37 | 76 | 158 |
| 2006 年 11 月 7 日 | 北海道佐呂間町 | F 3 | 9 | 31 | 7 | 7 |
| 1999 年 9 月 24 日 | 愛知県豊橋市 | F 3 | 0 | 415 | 40 | 309 |
| 1990 年 12 月 11 日 | 千葉県茂原市 | F 3 | 1 | 73 | 82 | 161 |

竜巻被害の状況写真（第 2-1～3 図）から、竜巻被害としては風圧力及び気圧差による被害及び飛来物の衝突による損傷のみであり、また、竜巻の随件事象として電柱や電線の損傷による停電が発生していると判断される。



全壊した家屋



飛来物により被害を受けた住宅等



倒れた電柱(復旧作業時)



倒壊電柱に直撃された家屋

第2-1 図 2012年5月6日茨城県にて発生したF3竜巻による被害⁽¹⁾



全壊した工事事務所周辺



飛来物による被害を受けた建物



倒壊した道路標識支柱



道路側へ倒壊した電柱

第2-2 図 2006年11月7日北海道にて発生したF3竜巻による被害⁽²⁾⁽³⁾



残骸(飛散物)で埋め尽された道路



吹き飛ばされた建物



横転したバス



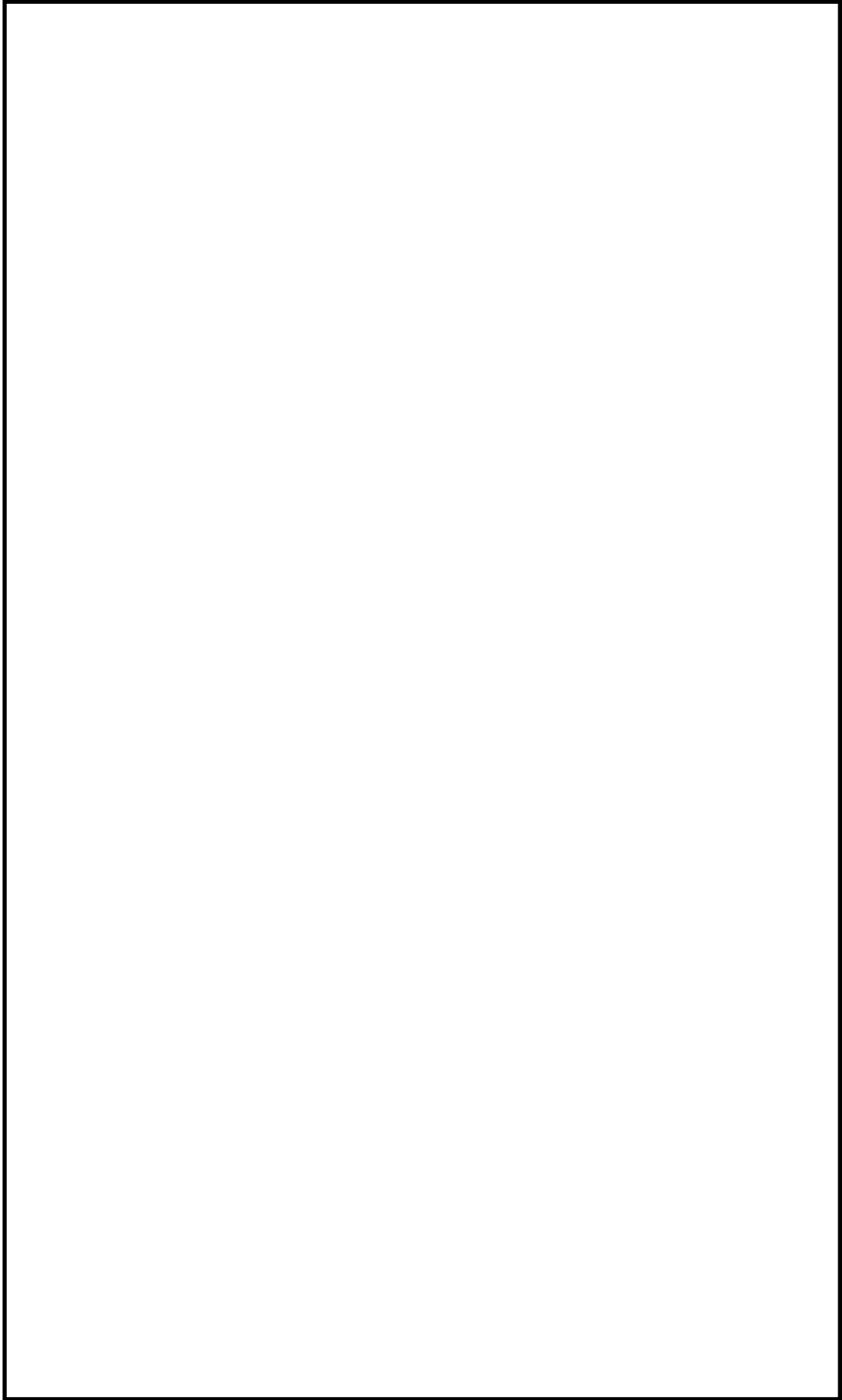
曲がった鉄筋 (工事現場)

第2-3図 1990年12月11日千葉県にて発生したF3竜巻による被害⁽⁴⁾

3. 東海第二発電所にて考慮すべき竜巻随件事象

上述の過去の竜巻による被害事例及び第3-1図に示す東海第二発電所の施設の配置から判断すると、東海第二発電所においては送電線等が竜巻による被害を受けることにより、外部電源喪失の発生が考えられる。さらに、屋外に油タンク及び水タンクが配備されていることから、飛来物の衝突により火災及び溢水が発生する可能性がある。

以上のことから、東海第二発電所における竜巻随件事象として、火災、溢水及び外部電源喪失を抽出する。



第3-1 図 東海第二発電所の評価対象施設（屋外施設）及び竜巻随伴事象の検討対象施設の配置図

<参考文献>

- (1) (財) 消防科学総合センター, 平成24年(2012年)5月6日茨城県つくば市
竜巻災害写真報告, 2012
- (2) (財) 消防科学総合センター, 平成18年11月7日北海道佐呂間町竜巻災害
写真報告, 2006
- (3) (社) 土木学会 北海道佐呂間町竜巻緊急災害調査団, 平成18年11月
北海道佐呂間町竜巻緊急災害調査, 2007年4月
- (4) 千葉県総務部消防地震防災課, 防災誌「風水害との闘い」第3章 90m
超えの突風に街が飛ばされた!ー茂原で最大スケールの竜巻が発生ー,
平成22年3月

東海第二発電所

竜巻影響評価における フジタモデルの適用について

目 次

| | |
|------------------------------------|----|
| 1. はじめに | 1 |
| 2 各風速場モデルの概要 | 4 |
| 2.1 フジタモデル | 4 |
| 2.2 ランキン渦モデル | 7 |
| 2.3 非定常乱流渦モデル（LESによる数値解析） | 8 |
| 3. 各風速場モデルの比較 | 11 |
| 4. 米国におけるフジタモデルの取扱い | 12 |
| 4.1 フジタモデルの利用実績 | 12 |
| 4.2 NRCガイドでの取扱い | 14 |
| 5. 飛散解析における保守性の考慮 | 15 |
| 5.1 物体の浮上，飛散モデルにおける保守性の考慮 | 15 |
| 5.2 物体が受ける風速における保守性の考慮 | 31 |
| 5.3 飛散解析手法まとめ | 34 |
| 6. 実際の飛散状況に対する検証 | 36 |
| 6.1 フジタスケールとの比較 | 36 |
| 6.2 米国Grand Gulf原子力発電所への竜巻来襲事例との比較 | 37 |
| 6.3 佐呂間竜巻での車両飛散事例との比較 | 39 |
| 7. 飛散以外の挙動に対する考慮 | 47 |
| 8. まとめ | 49 |
| <参考文献> | 51 |

別紙 1 「フジタモデル」及び「ランキン渦モデル」並びに「それぞれの風速場モデルを用いた際の飛散解析手法」の比較

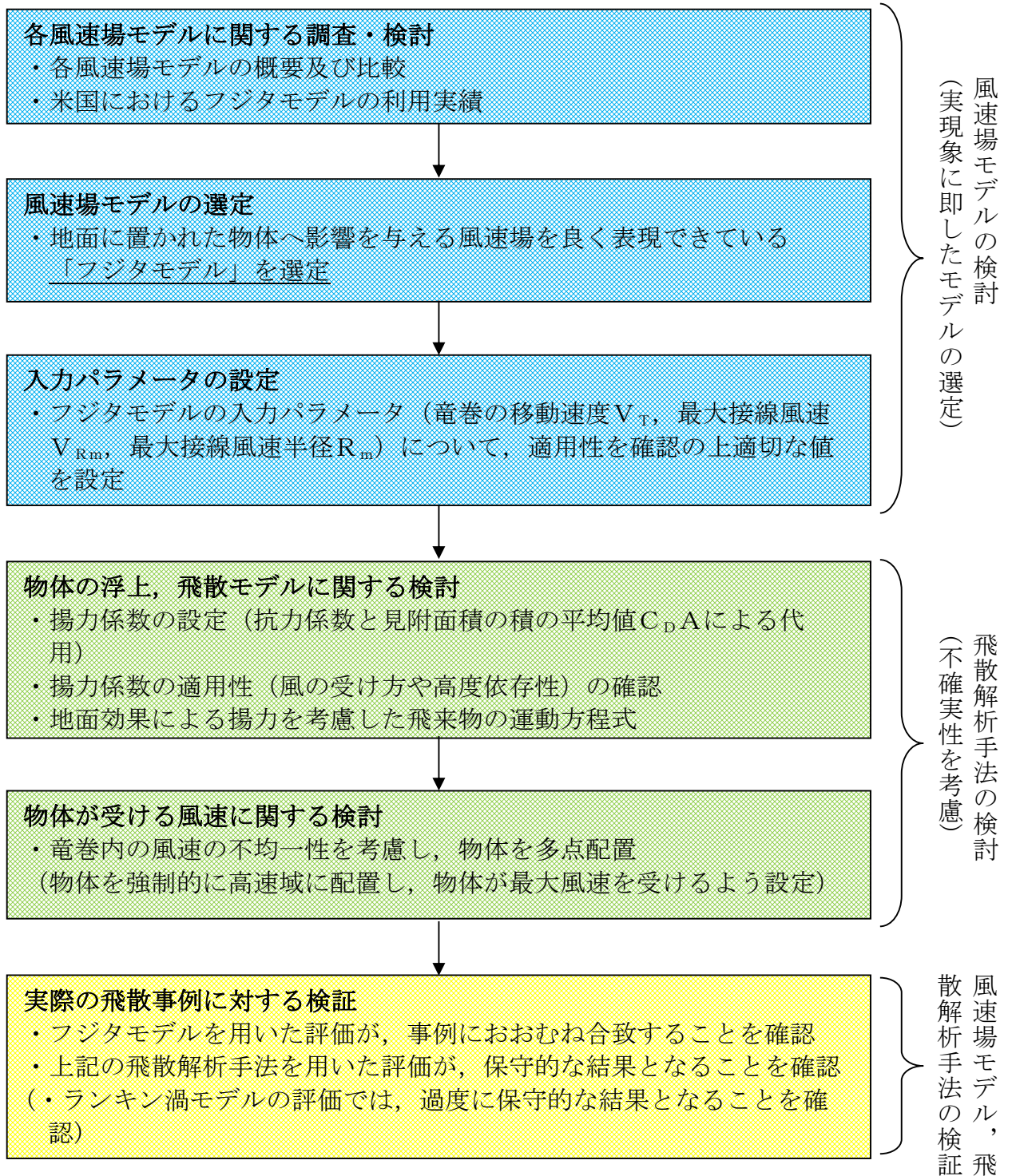
別紙 2 東海第二発電所及び先行プラントのフジタモデル及びランキン渦モデル適用状況

1. はじめに

「竜巻影響評価ガイド」に従い竜巻影響評価を行う上で、飛来物の挙動（飛散速度、飛散距離等）を評価するための竜巻風速場モデルを選定する必要がある。これまでの竜巻飛来物評価において用いられている風速場モデルとしては、米国NRCの基準類に記載されている「ランキン渦モデル⁽¹⁾⁽²⁾」及び原子力安全基盤機構の「竜巻による原子力施設への影響に関する調査研究」書に記載されている「非定常乱流渦モデル（LES:Large Eddy Simulation）」の数値解析⁽³⁾があるが、今回の評価においては、地面に置かれた物体への影響をより良く表現できている風速場モデルとして、藤田哲也シカゴ大学名誉教授が考案した竜巻工学モデルDBT-77(DBT: Design Basis Tornado)⁽⁴⁾（以下「フジタモデル」という。）を選定した。

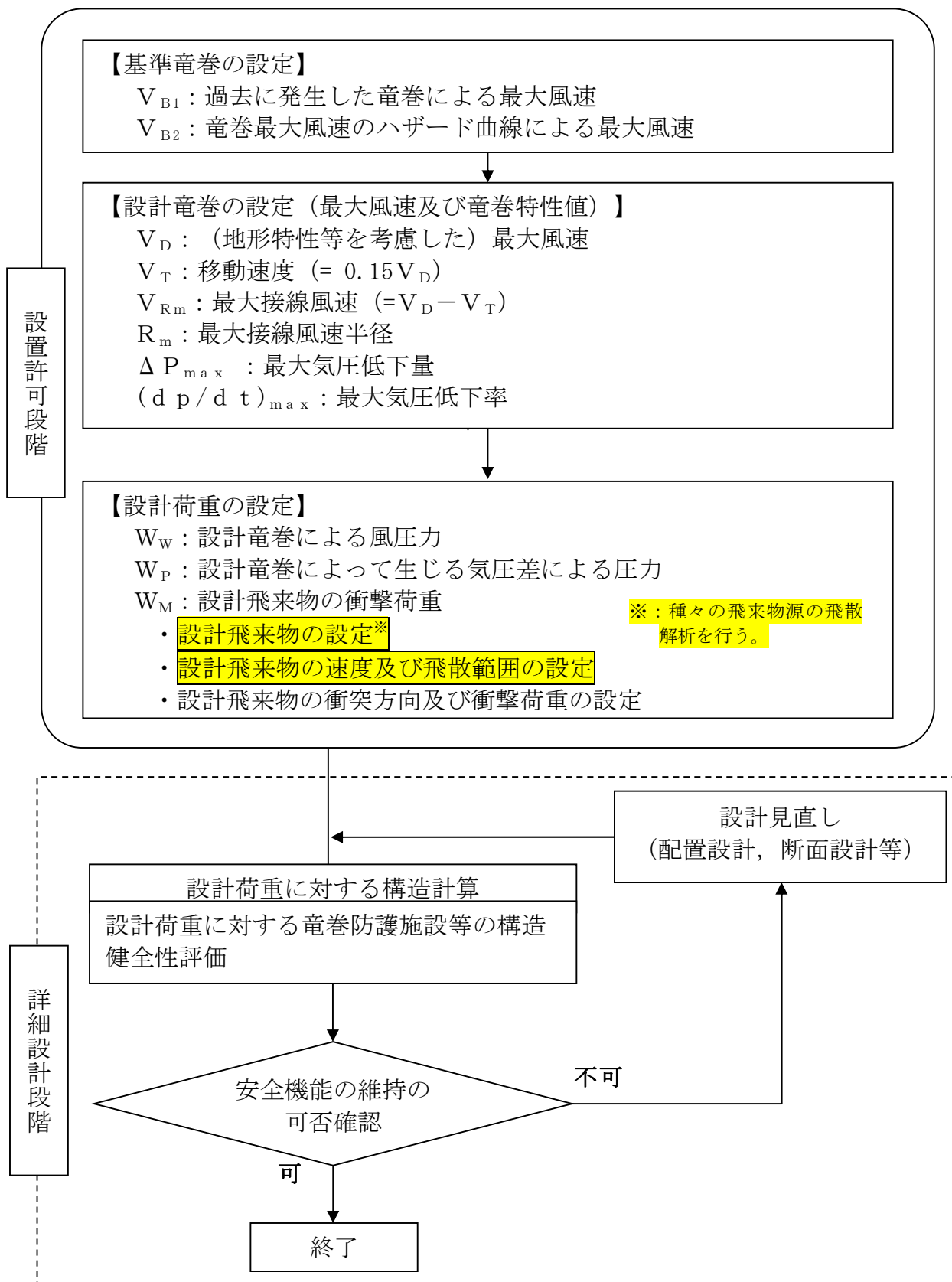
第1-1図に、風速場モデルの選定及び飛散解析手法に関する検討フローを示す。また、第1-2図に、竜巻影響評価の基本フローとフジタモデルを適用する箇所を示す。

次節以降にて、フジタモデルの詳細やフジタモデルを適用した理由等を説明する。



第1-1図 風速場モデルの選定及び飛散解析手法に関する検討フロー

フジタモデル関連箇所



第1-2図 竜巻影響評価フローとフジタモデルの関連箇所

2 各風速場モデルの概要

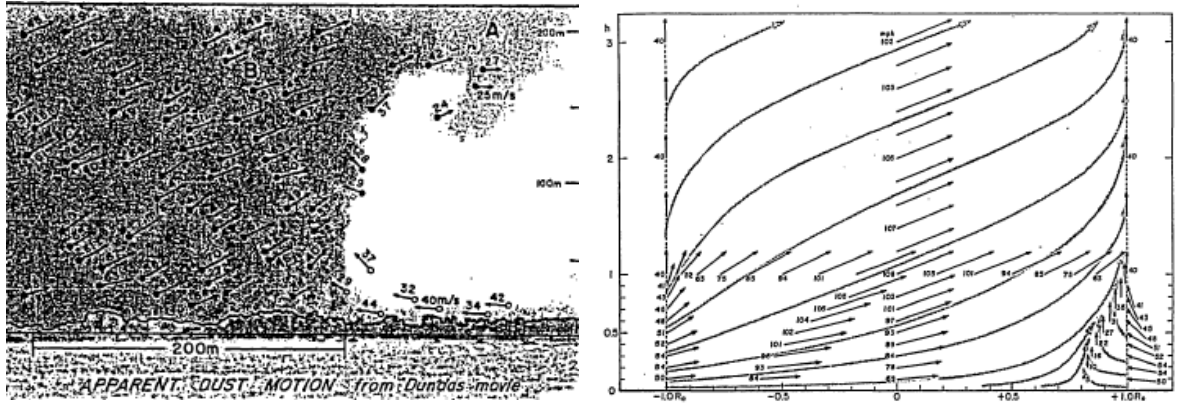
2.1 フジタモデル

フジタモデルは、米国NRCの実際の竜巻風速場をモデル化したいという要望により、藤田名誉教授が1978年に竜巻観測記録を基に考案した工学モデルである。モデル作成に当たっては、1974年8月に米国カンザス州 Ash Valley 等で発生した竜巻（第2.1-1図）のビデオ画像の写真図化分析を行い、竜巻の地上痕跡調査及び被災状況調査結果と照合することで風速ベクトルを作成し、そのベクトル図を基に作成した流線モデルから、竜巻風速場を代数式で表現している。（第2.1-2図）

フジタモデルの特徴は、地表面付近における竜巻中心に向かう強い水平方向流れ及び外部コアにおける上昇流といった、実際の竜巻風速場を良く表現している点にある。



第2.1-1図 Ash Valley 竜巻(1974.8.30)のビデオ画像



第 2.1-2 図 風速ベクトルの分析図 (左) とフジタモデルの流線 (右) ⁽⁴⁾

フジタモデルの風速場は、第 2.1-3 図に示すように半径方向に 3 つの領域 (内部コア、外部コア及び最外領域) で構成され、内部コアと外部コアの接線 (周) 方向風速 V_θ は半径に比例し、その外側の最外領域では周方向風速は半径に反比例するモデルとなっている。内部コアには上昇風速 V_z や半径方向風速 V_r は存在しないが、外部コアには存在する。高さ方向には地面から高さ H_i までを流入層としてモデル化しており、竜巻中心方向に向かう半径方向風速 V_r 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。流入層より上部では外向きの半径方向風速が存在し、各風速成分は上部に向かうにつれて減衰する。フジタモデルは、流体力学の連続の式を満たす形で定式化されており、力学的に根拠のある風速場となっている。

フジタモデル (D B T-77) における接線風速等の関係式については、Fujita Work Book⁽⁴⁾の第 6 章に、第 2.1-3 図のとおり記載されている。

無次元座標 $r = R/R_m, z = Z/H_i$

接線風速 $V_\theta = F_r(r)F_h(z)V_m$

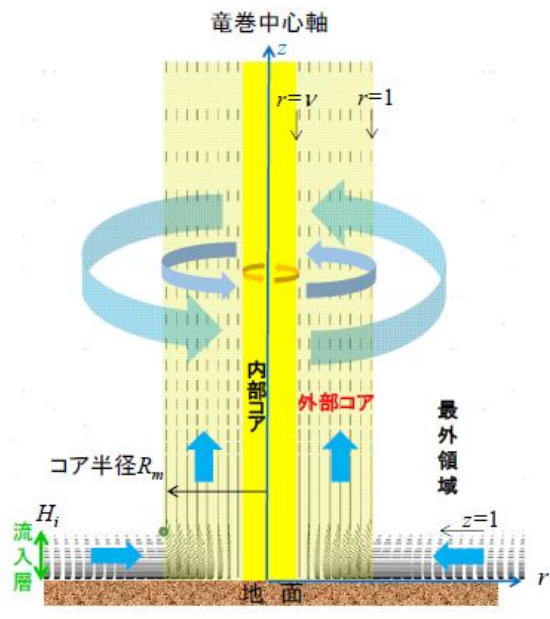
$$F_r(r) = \begin{cases} r & (r < 1) \\ 1/r & (r \geq 1) \end{cases} \quad F_h(z) = \begin{cases} z^{k_0} & (z < 1) \\ \exp(-k(z-1)) & (z \geq 1) \end{cases}$$

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

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

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

k_0, k, ν, η, A, B は定数



| | |
|------------|----------------|
| V_θ | 接線方向風速 |
| V_r | 半径方向風速 (内向きが正) |
| V_z | 上昇風速 |
| V_m | 最大接線風速 |
| R_m | 外部コア半径 |

また、以下の連続の式を満足する。

$$c \equiv \frac{1}{R_m r} \frac{\partial V_\theta}{\partial \theta} + \frac{1}{R_m r} \frac{\partial (r V_r)}{\partial r} + \frac{1}{H_i} \frac{\partial V_z}{\partial z} = 0$$

第 2.1-3 図 フジタモデルの概要

ここで、内部コアの半径 R_ν と外部コアの半径 R_m の比 $\nu (=R_\nu/R_m)$ については、Fujita⁽⁴⁾ が以下の経験式を提案しているので、これを用いた。

$$\nu = 0.9 - 0.7 \exp(-0.005 R_m) \tag{1}$$

また、流入層は、地面との摩擦により低下した遠心力と圧力分布のバランスが崩れ、流体が竜巻中心方向の低圧部に引き込まれることにより形成されることから、摩擦の影響が及ぶ範囲のみで形成される。Fujita⁽⁴⁾ は、流入層高さ H_i を竜巻中心の低圧部の大きさ (外部コア半径) R_m に比例するものとして、以下の経験式を提案しており、これを用いた。

$$H_i = \eta R_m \tag{2}$$

ここで、 η は 1 以下の正の値であり、下式で定義される。

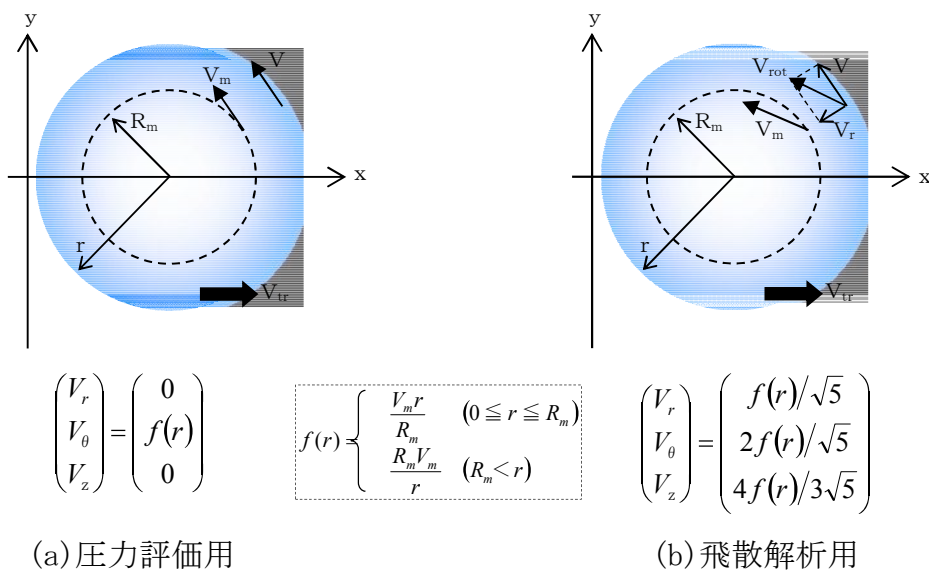
$$\eta = 0.55 (1 - \nu^2) \tag{3}$$

上式において、外部コア半径 $R_m = 30\text{m}$ の場合、 $\eta = 0.50$ ($H_i = 15\text{m}$) となり、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「竜巻による原子力施設への影響に関する調査研究」⁽³⁾の図 2.2.3.10 における流入層高さ
と竜巻半径の比 ($\eta = 0.4$ 程度) や、Kosiba⁽⁵⁾により示されている流入層高さ ($H_i = 10$ から 14m 以下) とおおむね同じである。

なお、その他の定数についても、Fujita⁽⁴⁾の提案している値として、 $k_0 = 1/6$, $k = 0.03$, $A = 0.75$, $B = 0.0217$ を用いた。

2.2 ランキン渦モデル

ランキン渦モデルは米国NRCガイドでも採用されており、設計竜巻の特性値を設定する際に用いられている。しかし、第 2.2-1 図(b)に示す飛散解析用のモデル⁽²⁾では、竜巻中心に向かう半径方向風速 V_r と上昇風速 V_z を特別に付加しているため、流体力学の連続の式を満たしておらず、第 2.2-2 図の様な地面から吹き出しが生じる流れとなっており、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解析を行う場合、地上の物体であっても空中浮遊状態を仮定して評価することになる。



第 2.2-1 図 ランキン渦モデル

無次元座標 $r = R / R_m$

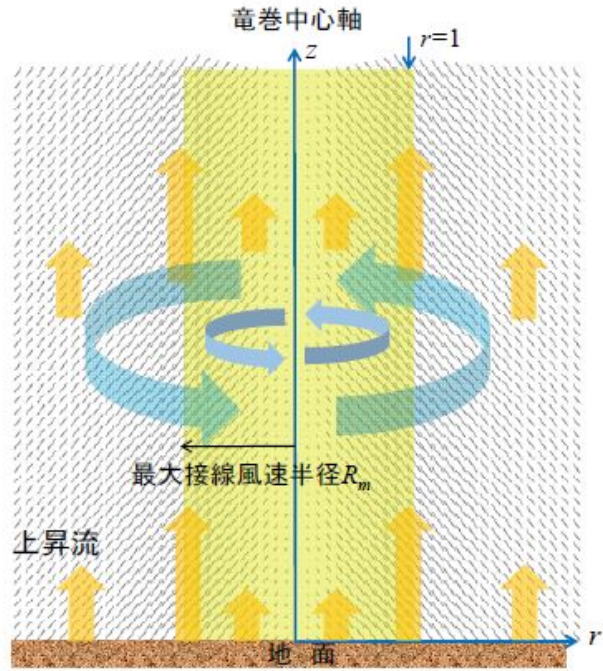
接線風速 $V_\theta = \frac{2V_m}{\sqrt{5}} F_r(r)$

$$F_r(r) = \begin{cases} r & (r < 1) \\ 1/r & (r \geq 1) \end{cases}$$

半径方向風速 $V_r = -\frac{1}{2} V_\theta$

上昇風速 $V_z = \frac{2}{3} V_\theta$

水平方向風速 $V_h = \sqrt{V_\theta^2 + V_r^2} = V_m F_r(r)$



$r < 1$ の領域では、（流体が消滅するため）以下の連続の式を満足しない。

$$c \equiv \frac{1}{R_m r} \frac{\partial V_\theta}{\partial \theta} + \frac{1}{R_m r} \frac{\partial (r V_r)}{\partial r} + \frac{1}{H_i} \frac{\partial V_z}{\partial z} = \begin{cases} -\frac{2V_m}{\sqrt{5}R_m} \cdot (r < 1) \\ 0 & (r > 1) \end{cases}$$

第 2.2-2 図 飛来物速度評価用ランキン渦モデル

2.3 非定常乱流渦モデル（LESによる数値解析）

LESは、非定常な乱流場を数値的に計算する手法として、「竜巻評価ガイド」における飛来物の最大速度の設定例にも活用されている。第 2.3-1 図に LESによる渦の発生状況を示す。

古典的な Smagorinsky モデルに基づく LESの基礎方程式（運動量保存式及び質量保存式）は、流体を非圧縮性と仮定する場合、以下のようになる。

$$\frac{\partial U_i}{\partial t} + U_1 \frac{\partial U_i}{\partial x_1} + U_2 \frac{\partial U_i}{\partial x_2} + U_3 \frac{\partial U_i}{\partial x_3} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x_i} + (\nu + \nu_s) \left(\frac{\partial^2 U_i}{\partial x_1^2} + \frac{\partial^2 U_i}{\partial x_2^2} + \frac{\partial^2 U_i}{\partial x_3^2} \right) - f_i \quad (i=1,2,3)$$

..... (4)

$$\frac{\partial U_1}{\partial x_1} + \frac{\partial U_2}{\partial x_2} + \frac{\partial U_3}{\partial x_3} = 0 \quad (5)$$

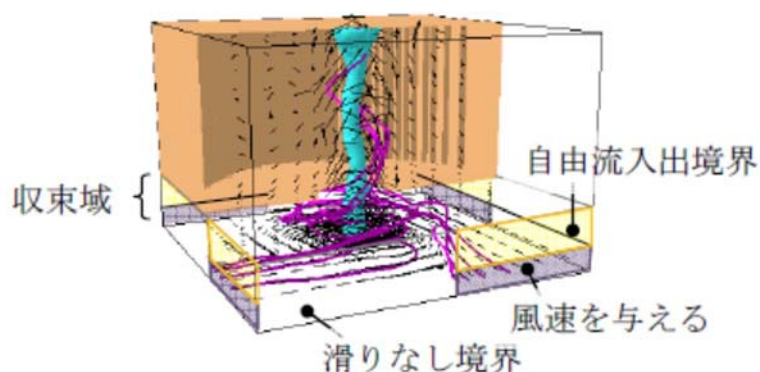
ここで、 U_i 及び P は、 i 方向の流速ベクトル及び圧力を表し、 ν は動粘性係数を、 f_i は i 方向の外力加速度を表す。また、 x_i は i 方向の座標を表す。

一方、Smagorinsky モデルの渦粘性係数 ν_s は以下のように定義される。

$$\nu_s = (C_s h)^2 \sqrt{\sum_{i,j=1}^3 2S_{ij}^2} \quad (6)$$

ここで、 h は解像スケール（メッシュ幅相当）、 C_s は Smagorinsky 定数を表し、ひずみ速度テンソル S_{ij} は $S_{ij} = 0.5(\partial U_i / \partial x_j + \partial U_j / \partial x_i)$ で定義される。

以上の通り、LES は風速の時間的な変動（乱流）を考慮できる点が特長となっている。



第 2.3-1 図 LES 計算領域内での竜巻状の渦の作成状況⁽⁶⁾

LES の手法自体は広く活用されているものであるが、実スケールでの精緻な評価を行うためには、必要なメッシュ解像度の確保に膨大な計算機資源が必要となる。また、「竜巻影響評価ガイド」で例示されている LES による数値解析については、条件設定等に関して下記のような問題点がある。

- ・「竜巻影響評価ガイド」で例示されている LES による解析では、境界条件（側面からの流入風速の分布等）や解析領域の形状（流入箇所を局所的に配

置等)を調整して人為的な乱れを与え、竜巻状の渦を生成しているが、渦の生成に当たって以下のような条件を仮定していることから、実スケールでの評価を実施するには課題があるものと考えられる。

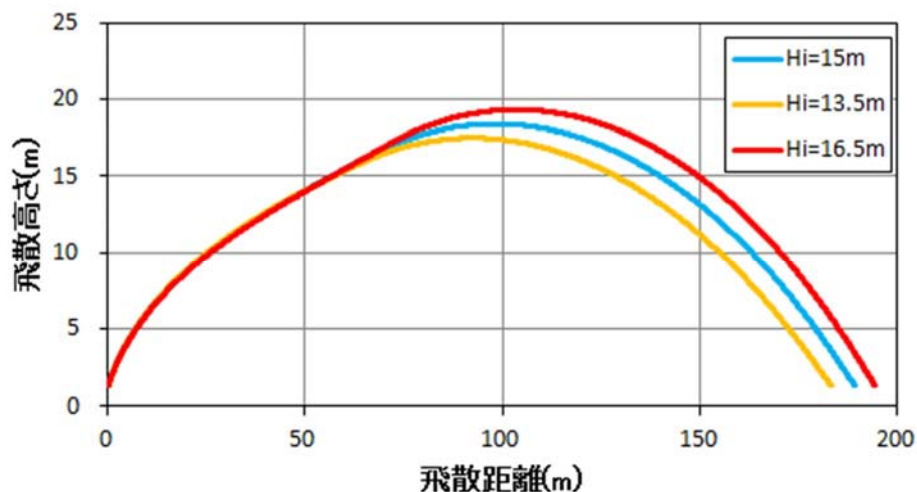
- 人為的な流入境界条件（流入風速分布や流入箇所 of 局所的配置等）を設定していることから、流入境界条件の影響を受ける地表面付近の実際の竜巻風速場の再現はできていないものと考えられる。
- 小規模な計算領域によるシミュレーションであり、実スケールへの適用（飛散解析）の際には単純に速度を規格化して適用している。
 - ⇒ 風速の規格化の際には、時間平均の最大風速を 100m/s （風速＋移動速度）に設定している。Maruyama⁽⁷⁾によれば、瞬間的な周方向風速は 1.7 倍程度まで大きくなる場合があり、移動速度と合わせると最大 160m/s 程度まで達するため、飛散解析の際に非常に保守的な結果が算出されることが考えられる。
 - ⇒ 流速が早い場合には粘性の影響は小さくなる傾向となるが、その影響については考慮していないことから、特に地表面付近については実際の風速場の再現はできていないものと考えられる。

(参考：フジタモデルを適用した場合の飛来物の飛跡)

第 2.3-2 図に、フジタモデルを適用したコンテナの飛散解析(長さ 6m ×幅 2.4m ×高さ 2.6m 、質量 $2,300\text{kg}$ 、 $C_D A/m=0.0105$ 、最大風速 100m/s)における飛跡を示す。

また、フジタモデルの流入層高さ H_i は、外部コア半径 $R_m=30\text{m}$ の場合、 $H_i=15\text{m}$ であり、2.1 に記載のとおり他の文献⁽³⁾⁽⁵⁾ともおおむね整合しているが、ここでは、その不確実性を考慮し、流入層高さ H_i を $\pm 10\%$ 変化させた場合の飛跡も示す。 $H_i=15\text{m}$ の際のコンテナの最大飛散距離 189.4m に対し、流入層高さ

H_i を±10%変化された場合の最大飛散距離は 183.4m(-3.2%)、194.7m(+2.8%)となり、流入層高さ H_i に対する最大飛散距離の感度は小さいことが分かる。



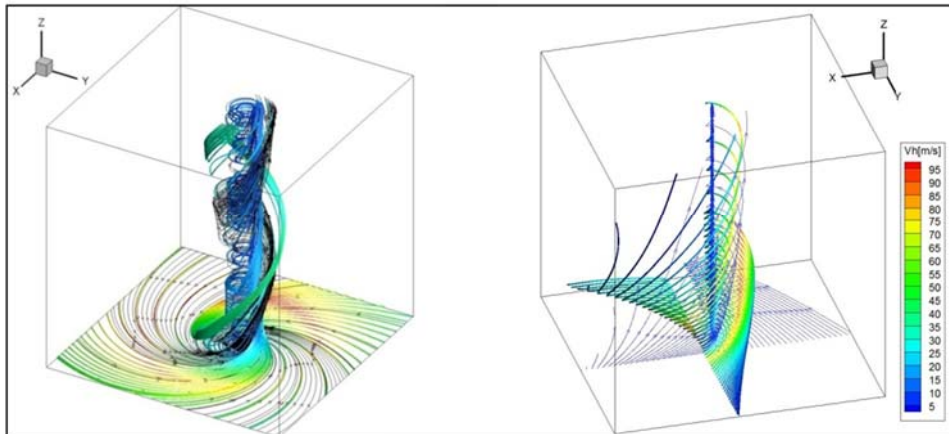
第 2.3-2 図 流入層高さを変化させた場合のコンテナの飛跡

3. 各風速場モデルの比較

上述の各風速場モデルの特徴の比較を第 3-1 表に示す。また、フジタモデルとランキン渦モデルの風速場構造の比較を第 3-1 図に示す。フジタモデルの風速場構造の流線は、地面付近を含めより実際の風速場に即した形で表現されており、これがフジタモデルの大きなメリットとなっている。それに対し、ランキン渦モデルは上空での水平方向風速の観点からは比較的良好に表現できるもの、地上付近では実現象と乖離している。LES も同様に地上付近での風速場が実現象と乖離している。また、他のモデルと比較して、フジタモデルは特に問題となるような点も無いことから、竜巻影響評価に用いる風速場モデルとしてフジタモデルを選定することは妥当であると考えられる。

第3-1表 各風速場モデルの特徴の比較

| 風速場モデル | 使用実績 | 特徴 |
|----------------|--|--|
| フジタモデル | <ul style="list-style-type: none"> ・竜巻飛来物設計速度及び飛散高さに関する，米国DOE重要施設の設計基準作成に利用されている。（「4 米国におけるフジタモデルの取扱い」参照） | <ul style="list-style-type: none"> ・実観測に基づいて考案されたモデルであり，実際に近い風速場構造を表現している。 ・比較的簡易な代数式により風速場を表現できる。（ランキン渦モデルよりは複雑だが，計算機能力の向上及び評価ツールの高度化により実用可能となった） ・流体の連続式を満足する |
| ランキン渦モデル | <ul style="list-style-type: none"> ・米国NRCのR.G 1.76に採用されている。 ・「竜巻影響評価ガイド」（竜巻の特性値の設定）において例示されている。 | <ul style="list-style-type: none"> ・簡易な式により風速場を表現できる。 ・風速場に高度依存性がなく，上昇流が全領域に存在し，地表近傍の風速場を模擬していない。 ・流体の連続式を満足しない。 |
| 非定常乱流渦モデル（LES） | <ul style="list-style-type: none"> ・「竜巻影響評価ガイド」において，飛来物の飛散速度等の評価例が示されている。 | <ul style="list-style-type: none"> ・風速の時間的な変動や乱れを，ある程度模擬できる。 ・人為的な境界条件を設定しており，地面や境界近傍で実現象と乖離している。 ・小規模領域での計算結果を実スケールに規格化した場合，最大瞬間風速が相当に保守的となる場合がある。 ・実スケールでの解析には膨大な計算機資源が必要であり，実用に供しにくい。 |



第3-1図 フジタモデル（左）とランキン渦モデル（右）の風速場の構造

4. 米国におけるフジタモデルの取扱い

4.1 フジタモデルの利用実績

米国エネルギー省DOE（Department of Energy）が管理するエネルギー関連施設等に適用する基準⁽⁸⁾において，竜巻飛来物速度，飛散高さの設定にフジタモデルを用いた計算結果が使用されている⁽⁹⁾⁽¹⁰⁾（文献⁽⁸⁾のD.4節：

Windborne missile criteria specified herein are based on windstorm

damage documentation and computer simulation of missiles observed in the field. . . . Computer simulation of tornado missiles is accomplished using a methodology developed at Texas Tech University.) 。

この基準では、施設に要求される性能ごとにカテゴリ 0 から 4 まで分類し、カテゴリ 0 から 2 は一般的な建築物、カテゴリ 3 及び 4 は核物質や危険物質を取り扱う施設に適用される。カテゴリ 3 及び 4 に該当する施設として、Pantex Plant, Oak Ridge (X-10, K-25, Y-12), Savannah River Site が挙げられている。

フジタモデルの技術的な妥当性の検証については、米国 DOE 管轄のローレンス・リバモア国立研究所報告書⁽¹¹⁾にてまとめられている。この報告書では、フジタモデル D B T-77 を他の風速場モデルと比較検討しており、「流体力学の連続の式を満足する (Fluid mechanics equations of continuity are satisfied)」こと、「モデル流況は、竜巻の映像分析で得られる流れの空間分布と整合する (Flow patterns are consistent with the spatial distribution of flow observed in photogrammetric analysis of tornado movies)」こと等を利点として挙げている。

また、実際の事例に対するフジタモデルの検証としては、1978 年 12 月 3 日に米国ルイジアナ州 Bossier 市で発生した F4 竜巻による鋼製材の飛散について、フジタモデル D B T-77 で再現した事例⁽⁹⁾がローレンス・リバモア国立研究所報告書⁽¹¹⁾及び米国気象学会論文集⁽¹²⁾に掲載されている。

なお、米国 L E S (Louisiana Energy Services) の濃縮施設 N E F (National Enrichment Facility) では、上記の DOE 施設の基準に基づき竜巻飛来物 (鋼製パイプや木材の板等) を設定しており、米国 N R C は当該施設に対する安全評価報告書 (N U R E G-1827) ⁽¹³⁾の中で竜巻飛来物に対する L

ES の設計を是認している。

(“Based on the review of the information concerning tornados and tornado-generated missiles, NRC concludes: (i) the information is accurate and is from reliable sources; and (ii) the design bases tornado-generated missiles are acceptable because they were determined based on an appropriate DOE standard. The use of a DOE standard is an acceptable approach to NRC staff.”)

4.2 NRCガイドでの取扱い

2.1 節でも述べた通り、フジタモデルは実際の竜巻風速場をモデル化したいという米国NRCの要請を受けて考案されたものであるが、米国NRCのRegulatory Guide 1.76⁽¹⁾では、フジタモデルについて “The NRC staff chose the Rankine combined vortex model for its simplicity, as compared to the model developed by T. Fujita.” と述べられており、数式の簡易さを理由にランキン渦モデルが選定されている。また、NRCスタッフ自身で水平方向の飛散速度 (Simiu らの運動方程式⁽²⁾) を計算するプログラムを開発している (“The NRC staff developed a computer program to calculate the maximum horizontal missile speeds by solving these equations.”) ことが明記されている。

したがって、米国NRCガイドでランキン渦モデルが採用されているのは、フジタモデルより簡易であるという理由が主であり、竜巻風速場としての優劣を指摘されたものではない。

(参考) 米国におけるランキン渦モデル以外の風速場モデルの利用実績

米国NRCでは、竜巻防護対策の追加を検討しているプラントに対し、確率

論的竜巻飛来物評価手法TORMISの利用を承認している。

TORMISは、米国のEPRIで開発された原子力発電所の構造物、機器への竜巻飛来物の衝突及び損傷確率を予測する計算コードであり、同コードでは、ランキン渦モデル以外の風速場モデル（統合風速場モデル）が利用されている。（米国NRCにおいても、ランキン渦モデル以外の風速場モデルが認められていないわけではない）

5. 飛散解析における保守性の考慮

前節までに述べてきたとおり、フジタモデルの風速場を適用することで、より現実的な竜巻影響評価を行うことが可能と考えられるが、一方で、実際の竜巻による物体の飛散挙動の保守性についても考慮する必要がある。

本節では、フジタモデルを用いた地上からの飛散挙動解析に関する保守性や、物体が竜巻に晒される際の風速に関する不確定性等について、飛散解析の中でどのように考慮しているかについて説明する。

5.1 物体の浮上、飛散モデルにおける保守性の考慮

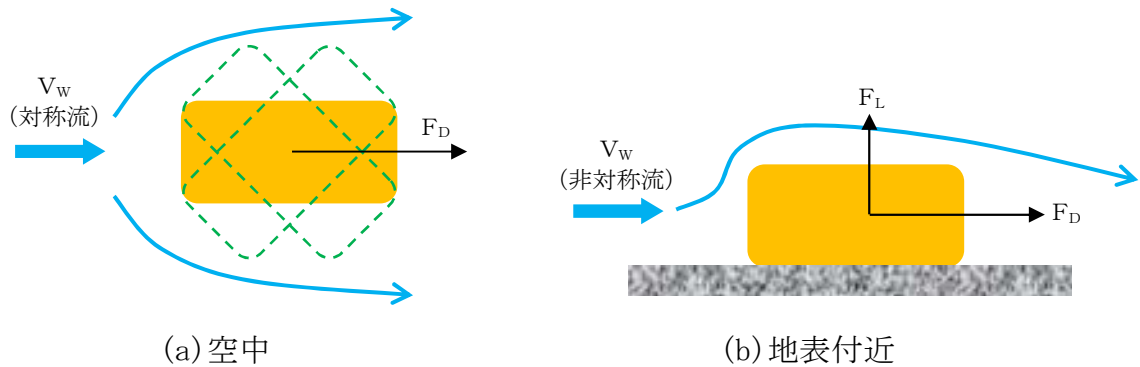
本評価における物体の浮上・飛散モデルの考え方と、その中で保守性の観点から考慮している点について説明する。

(1) 物体の揚力の計算式

物体が空中にある場合、物体に作用する力は、「竜巻影響評価ガイド」の飛来物運動モデル⁽²⁾⁽³⁾と同様に、飛来物は第5.1-1図(a)のようにランダムに回転しているものとし、平均的な抗力(流れの速度方向に平行な力) F_D と重力のみが作用する飛行モデルを採用している。

一方、物体が地面に置かれている場合や地面に近い場合は、地面効果による揚力を考慮している⁽¹⁴⁾。具体的には、物体の形状が流れ方向の軸に関し

て対称であっても、第 5.1-1 図(b)に示すように地面の存在により流れが非対称になり、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が生じることから、これを揚力 F_L として考慮する。



第 5.1-1 図 物体へ作用する力

このような揚力 F_L は、地表付近での揚力係数 C_L 及び物体の見付面積（風方向から見た投影面積） a を用いて、以下のように表される。

$$F_L = \frac{1}{2} \rho C_L a |\mathbf{V}_w - \mathbf{V}_M|_{x,y}^2 \quad (7)$$

ここで、 ρ は空気密度、 \mathbf{V}_M は飛来物の速度ベクトル、 \mathbf{V}_w は風速ベクトル、 $|\alpha|_{x,y}$ はベクトル α の x, y 成分（水平成分）の大きさを表す。

(参考) 地上の物体における地面効果による揚力について

物体や地面は完全な滑面ではなく凹凸を有しているため、完全接触と非接触の領域に区別される。物体の地面への投影面積を A とし、物体と地面の完全接触面積を s とした場合、無風時（第 5.1-2 図の(a)）は物体が流体に接する全表面で圧力は一定（ p_0 ）と見なせるため、鉛直方向（上向きを正とする）に作用する揚力 F_{L0} は以下で与えられる。

$$F_{L0} = -p_0 A + p_0 (A - s) = -p_0 s \quad (8)$$

ここで、 $0 < s \leq A$ であることから、 F_{L0} は負の値となり、揚力は発生しな

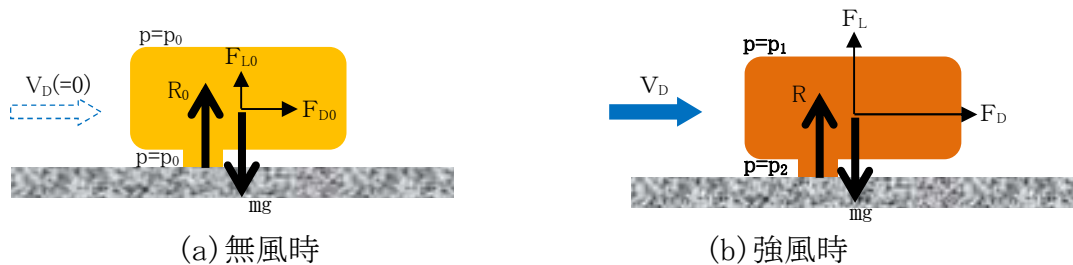
いことが分かる。

一方、竜巻通過時（第 5.1-2 図の(b)）の物体に圧力差に伴う流体力が作用（簡単のため上面での圧力を p_1 、下面での圧力を p_2 と仮定）する場合、鉛直方向の流体力 F_L は以下で与えられる（圧力分布がある任意形状の物体についても、圧力の表面積分を用いれば同様に計算可能）。

$$F_L = -p_1 A + p_2 (A - s) \quad (9)$$

吸盤の様に完全に地面に密着している場合は $s = A$ となるため、上面の圧力 p_1 に投影面積 A を乗じた力が下向きに作用するが、物体と地面の間に僅かに空隙が生じる場合には、地面と物体の接触状態によっては上向きの力が発生することがある。

実際には、地面と物体の接触状態を確認することは難しいことから、本評価においては、保守的に地上における物体に揚力が作用することとしている。



第 5.1-2 図 部分的に地面に接する物体に作用する力

(2) 揚力係数の設定

(7) 式の $C_L a$ は風洞実験から求められる値であるが、実験条件（風を受ける方向等）により様々な値を取り得るため、それを包含するような係数を設定することが望ましい。本評価では、条件によらず保守性を確保できるように、 $C_L a$ に代わり、以下で定義される抗力係数と見付面積の積の平均値 $C_D A$ を用いることとする。

$$C_D A = \frac{1}{3} (C_{D_x} A_x + C_{D_y} A_y + C_{D_z} A_z) \quad (10)$$

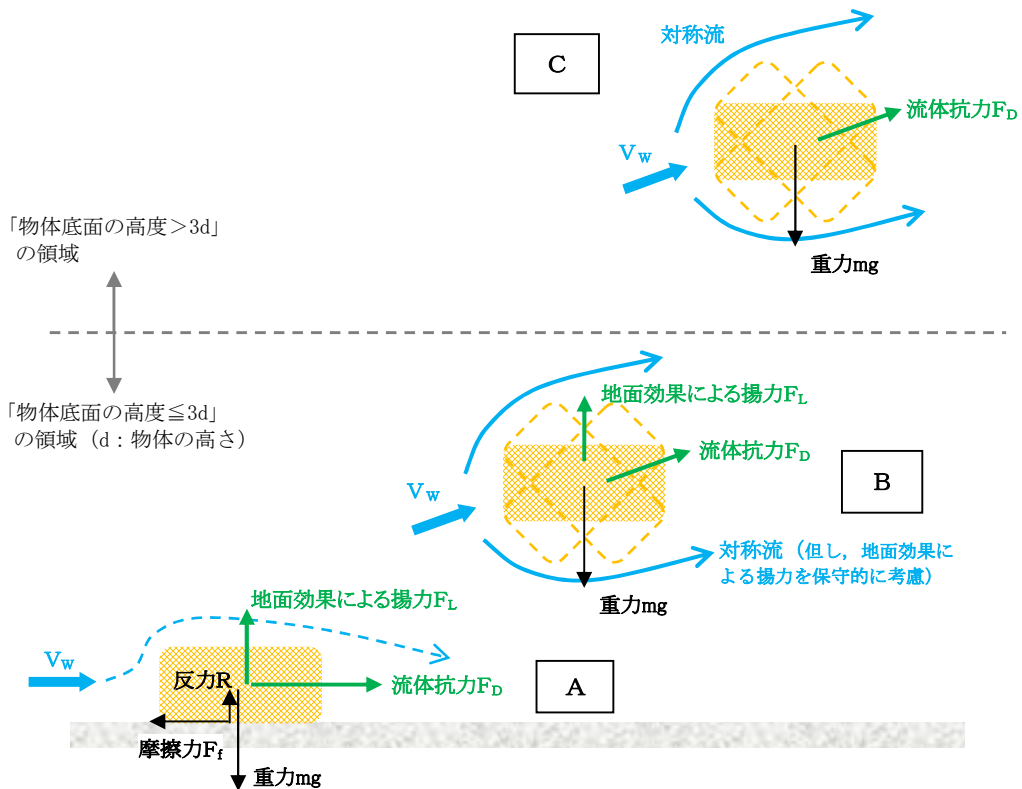
ここで、 C_{D_i} は空中での i 軸方向流れに対する抗力係数、 A_i は i 軸方向流れに対する見付面積を示す。

物体の運動モデルを第 5.1-3 図に示す。上述の、 $C_L a$ を $C_D A$ で代用する考え方を本図に基づき整理すると、以下の通りとなる。

- ・物体がある程度浮き上がった後の状態(B)であれば、物体はランダムに回転し、物体各面に均等に風を受けるものと考えられる。
- ・物体が地面に置かれた状態(A)から浮き上がる場合、実際には物体の上面や下面での圧力が均一ではなく、傾きながら浮き上がるようなことも考えられるが、このような挙動を理論的に評価することは難しい。

そのため、これに準ずる方法として、地面から浮かせた状態で実測された $C_L a$ のうち、物体が地面に置かれた状態(A)にできる限り近い場合の値よりも大きな係数 $C_D A$ を用いることで、保守性は確保できると考えられる（「 $C_D A > C_L a$ 」となることの説明は後述）。

- ・物体が地面に置かれた状態(A)と物体がある程度浮き上がった状態(B)での評価にて共通の係数を用いることは、地上からの物体浮上及び飛散解析における実用性の観点からも望ましい。



第 5.1-3 図 物体の運動モデルの模式図

物体の飛散解析におけるモデル化の基本的な考え方は、地面における揚力係数 C_L 見付面積 a の積 $C_L a$ をより大きな値で置き換えて、浮上現象を保守的に評価できるようにすることであり、この保守的な代用値として $C_D A$ の利用が適切であることを以下に説明する。

物体が風速 U を受ける場合の揚力係数 C_L は、一般にその定義により揚力 F_L と以下の関係にある。

$$F_L = \frac{1}{2} \rho U^2 C_L a$$

$$C_L a = F_L / (\rho U^2 / 2)$$

ここで、典型的な塊状物体、柱状物体及び板状物体が地面に置かれた場合の $C_L a$ の最大値（または、それに近い値）の実測結果と、物体の幾何学形状のみで決定される $C_D A$ の値を比較した。（第 5.1-1 表）

同表より、「 $C_D A > C_L a$ 」の関係が成立しており、揚力の評価モデルとして $C_L a$ の代わりに $C_D A$ を用いることで保守性は確保できる。

また、以上の揚力のモデル化の説明は浮上時（第 5.1-3 図の状態 A）に対するものであるが、この揚力が物体高さの 3 倍までの飛散高度の範囲で連続的に低減するように作用するようにモデル化しており、第 5.1-3 図の状態 A, B 及び C の全領域で揚力の連続性が確保されている。

第5.1-1表 主な物体の C_{DA} と地面に置かれた物体の C_{La} (実測値) (1/2)

| 形状 | 物体 | 仕様 | C_{DA} ※1 | C_{La} (実測値) | C_{La} (実測値)に係る試験条件等 |
|----|-----|--|---------------------------------------|------------------------------------|--|
| 塊状 | 自動車 | 実物の Dodge Dart (長さ 16.7ft., 幅 5.8ft., 高さ 4.3ft.) | 129ft. ² | 48.7ft. ² | <ul style="list-style-type: none"> 風洞試験⁽¹⁵⁾ (風速 22~31m/s, $Re=2.8 \times 10^6 \sim 4 \times 10^6$) C_{La} が最大となる流入角での値をC_{La} (実測値)として記載 |
| | | 1/6 縮尺模型 (セダン: 長さ 4.85m, 幅 1.79m, 高さ 1.42m, 質量 1633kg) | 12.07m ² | 7.76m ² | <ul style="list-style-type: none"> 風洞試験⁽¹⁶⁾ (風速 0~150m/s, $Re=0 \sim 3 \times 10^6$) 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1つが0となった時点の風速UからC_{La}値を計算 ($C_{La}=2mg/\rho U^2$) C_{La} が最大となる流入角での値をC_{La} (実測値)として記載 |
| | | 1/6 縮尺模型 (ミニバン: 長さ 5.12 m, 幅 1.94m, 高さ 1.69 m, 質量 2086kg) | 14.58m ² | 7.89m ² | <ul style="list-style-type: none"> 水路試験⁽¹⁷⁾ ($Re=8,000 \sim 28,000$) 流入方向と立方体面の一面が垂直になる配置における値をC_{La} (実測値)として記載 |
| 柱状 | 円柱 | 長さ λ , 直径 D | 0.47D λ | 0.05D $\lambda \sim 0.23D\lambda$ | <ul style="list-style-type: none"> 風洞試験⁽¹⁵⁾ ($Re=1.3 \times 10^6$) 流入方向と円柱の軸直角方向が垂直になる配置 (円柱の軸方向は地面と平行) における値をC_{La} (実測値)として記載 風洞試験 ($Re=3.5 \times 10^4 \sim 1.2 \times 10^5$) 流入方向と円柱の軸直角方向が垂直になる配置 (円柱の軸方向は地面と平行) における値をC_{La} (実測値)として記載 |
| | | 長さ λ , 断面が一边 D の正方形 | 0.8D λ (1.3D λ)※2 | 0.5D $\lambda \sim 0.7D\lambda$ 程度 | <ul style="list-style-type: none"> 水路試験⁽¹⁷⁾ ($Re=8,000 \sim 28,000$) 長方形断面 (アスペクト比 4:3) の角柱は地面から0.167D以上離れると揚力は負となる (電中研風洞実験) 流入方向と角柱の軸方向が垂直となる配置 (角柱の軸方向は地面と平行) における値をC_{La} (実測値)として記載 |
| | | 長さ λ , 高さ D , 幅 B の長方形断面 | 0.4(D+B) λ | 負値 (地面との隙間が0.167D以上の場合) | <ul style="list-style-type: none"> 風洞試験 ($Re=3.8 \times 10^4$) 流入方向と角柱の軸方向が垂直になる配置 (角柱の軸方向は地面と平行) |

※1: 柱状及び板状では微小頂を無視して記載

※2: 塊状と見なせる場合

第5.1-1表 主な物体の C_{DA} と地面に置かれた物体の C_{La} (実測値) (2/2)

| 形状 | 物体 | 仕様 | C_{DA} ※1 | C_{La} (実測値) | C_{La} (実測値)に係る試験条件等 |
|----|---------|--|--|---|---|
| 板状 | 薄い平板 | 長さ λ , 幅 B , 厚さ D ($B=200$ mm, $D=5$ mm, $\lambda=1000$ mmの場合) | 0.66 $B\lambda$ | 0に近い値 (地面から0.25 B 離れた位置で $C_{La}=0.04B\lambda$) | <ul style="list-style-type: none"> 風洞試験⁽¹⁸⁾ (幅Bに基づき$Re=2\times 10^5$) 流入方向と平板の長さ方向が垂直になる配置 (平板は地面と平行) における値をC_{La} (実測値)として記載 |
| | 薄い翼 | 長さ λ , 幅 B , 厚さ D ($B=100$ mm, $D=15$ mm, $\lambda=300$ mm) | | 0.2 $B\lambda$ 程度 | <ul style="list-style-type: none"> 風洞試験⁽¹⁹⁾ (幅B (参考文献(19)ではc)に基づき$Re=2.2\times 10^5$) 流入方向と翼の長さ方向が垂直になる配置 (翼面は地面と平行) |
| | 平板状ブロック | 長さ λ , 幅 B , 厚さ D | 0.66 $B\lambda$ 0.66($B\lambda+D$ ($B+\lambda$))※2 | 0.1 $B\lambda$ 程度 | <ul style="list-style-type: none"> 水路試験⁽²⁰⁾ ($Re=5\times 10^4$程度) 流入方向と平板状ブロックの長さ方向が垂直になる配置 (平板状ブロックは地面と平行) における値をC_{La} (実測値)として記載 |

※1:柱状及び板状では微小項を無視して記載

※2:塊状と見なせる場合

(3) 設定した揚力係数の適用性の確認

第 5.1-1 表における $C_L a$ (実測値) が竜巻における物体の飛散解析に適用可能であることについて、レイノルズ数の観点から確認を行った。

第 5.1-1 表の各文献中の実験におけるレイノルズ数は、同表の備考欄に示す通り、 $10^4 \sim 10^6$ の範囲にある。

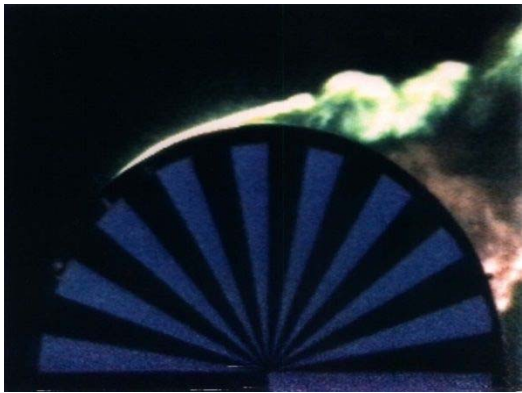
ここで、実物の自動車 (Dodge Dart : 長さ 16.7ft. , 幅 5.8ft. , 高さ 4.3ft.) では風速を 30mph (13m/s) \sim 120mph (54m/s) まで変化させてレイノルズ数の影響を調べた結果、風速は各空力係数に対して顕著な影響がないことが確認されている⁽¹⁵⁾。これは、剥離点が物体角部等に固定されてレイノルズ数にほとんど依存しないためであり、このような特性を有する立方体等についてもレイノルズ数依存性はないものと考えられる。

一方、円柱周りの流れのように剥離点が曲面上にある場合については、第 5.1-4 図に示すように、レイノルズ数が増加すると剥離点が移動し、抗力係数等が増加することが知られている。第 5.1-1 表の E P R I の円柱の風洞試験結果⁽¹⁵⁾は $Re=1.3 \times 10^6$ の高レイノルズ数条件で得られたものであり、竜巻中の円柱状の飛来物のレイノルズ数範囲に入るものと考えられる (例えば、相対風速 92m/s の直径 0.1m のパイプのレイノルズ数は 6×10^5 程度)。また、電力中央研究所の吹出式開放型風洞 (吹出口寸法 : 高さ 2.5m \times 幅 1.6m, 風速 : 3.0 \sim 16.5m/s) においても、壁 (地面) 近くに設置した円柱 (直径 100mm \times 模型長 1000mm) を対象として、 $Re=3 \times 10^4 \sim 1 \times 10^5$ 程度までの揚力係数の測定試験が行われている。

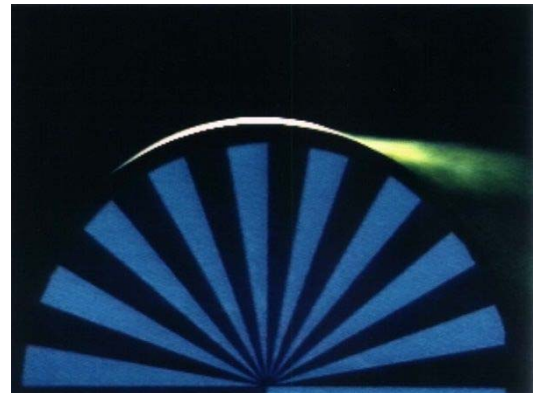
E P R I の風洞試験と電力中央研究所の風洞試験にはレイノルズ数条件に大きな違いがあるが、第 5.1-5 図に示す通り、風洞試験で得られた円柱揚力係数に顕著な相違は認められない。

以上より、地面における各物体の揚力係数 C_L と見付面積 a の積 $C_L a$ はレ

レイノルズ数にほとんど依存せず、第 5.1-1 表に示す風洞試験結果に基づくモデル化は妥当であると考えられる。

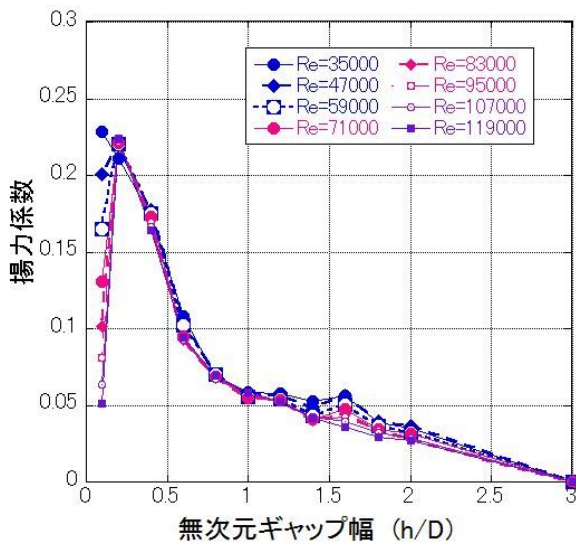


(a) $Re \approx 4 \times 10^4$

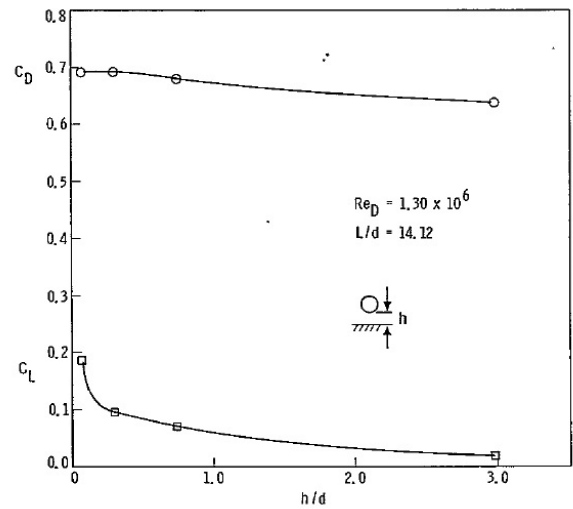


(b) $Re \approx 2 \times 10^5$

第 5.1-4 図 可視化した円柱まわりの流れ⁽²¹⁾



(a) 電力中央研究所
($Re=3 \times 10^4 \sim 1 \times 10^5$)



(b) E P R I
($Re=1.3 \times 10^6$)⁽¹⁵⁾

第 5.1-5 図 風洞実験による円柱の揚力係数

(4) 揚力の高さ依存性

地面効果による揚力は物体の上昇とともに減衰するので、既往の風洞実験の結果⁽¹⁵⁾⁽²²⁾を考慮して、高さ寸法 d の物体に働く揚力は、物体底面の高度

が地面から 3 d となった時に消滅すると設定した。

具体的には、底面が地面から Z の距離（高度）にある物体に作用する揚力加速度 L を以下の関数形でモデル化した。

$$L = \frac{1}{2} \rho \frac{C_D A}{m} |\mathbf{V}_w - \mathbf{V}_M|_{x,y}^2 f(Z/d) \quad (11)$$

f(Z/d) は、E P R I の風洞実験結果⁽¹⁵⁾を参考に、以下の反比例式とした。

$$f(Z/d) = \{1 - (Z/3d)\} / \{1 + (Z/d)\} \quad (12)$$

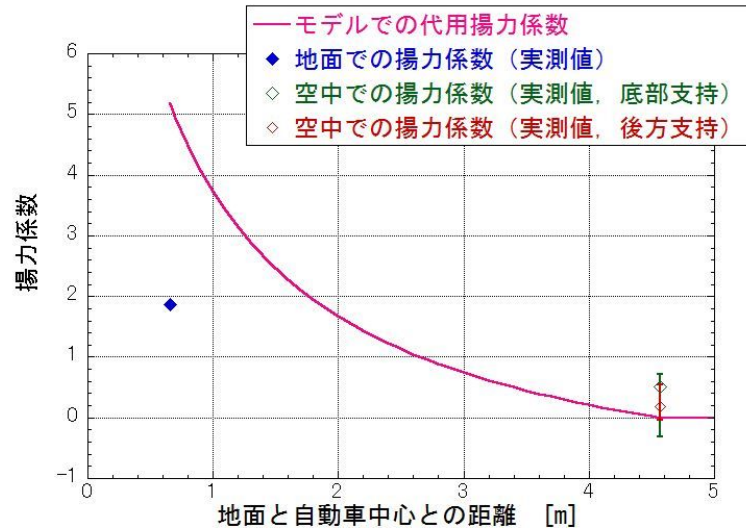
ここで、Z は下式により定義される（z : 物体中心の高度）

$$Z = \begin{cases} z - (d/2) & (d/2 \leq z \leq 7d/2) \\ 0 & (7d/2 \leq z) \end{cases} \quad (13)$$

また、以下において、塊状物体（自動車）、柱状物体（角柱及び円柱）及び板状物体（平板）の風洞試験結果を踏まえ、「高さ寸法 d の物体に働く揚力は、物体底面の高度が地面から 3 d となった時に消滅する」とした設定が適切であることを確認する。

a. 塊状物体（自動車）の揚力の高さ依存性

自動車の揚力係数は、E P R I の風洞試験⁽¹⁵⁾にて、地面及び風洞中央（h/d ≒ 3.5）に設置した場合にて計測されており、第 5.1-6 図に、E P R I の風洞試験によって得られた揚力係数と本モデルにて代用した揚力係数の関係を示す。E P R I の風洞試験では空中での自動車の姿勢は地面設置と同じ姿勢に保たれているため、空中においても揚力係数が 0 とはならないが、実際に飛散する自動車の姿勢はランダムに変化することから、平均的な揚力係数は本モデルでの代用揚力係数に近いものと考えられる。



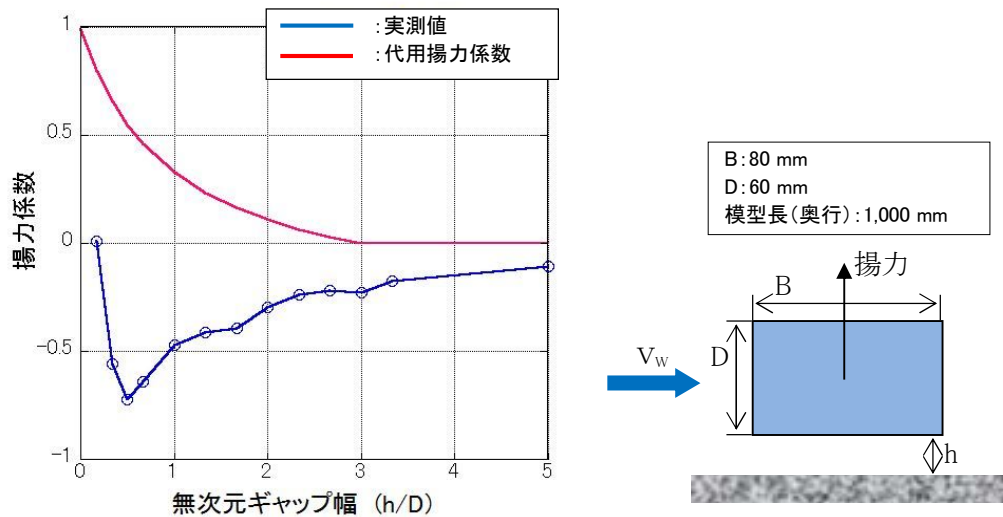
第 5.1-6 図 自動車の風洞実験による揚力係数と代用揚力係数

(文献⁽¹⁵⁾を基に作成及び代用揚力係数を加筆)

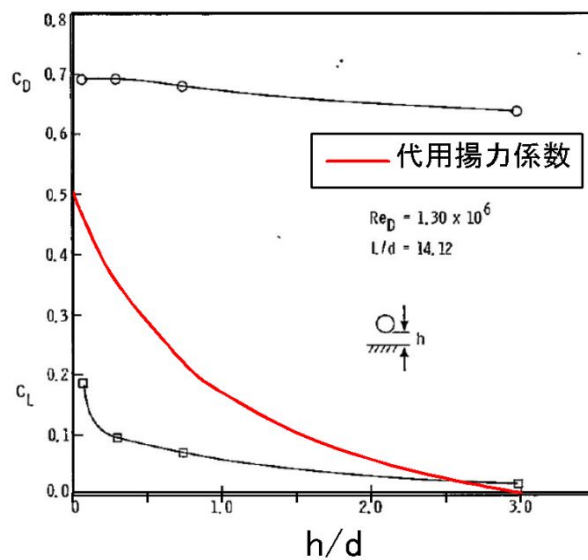
b. 柱状物体（角柱及び円柱）の揚力の高さ依存性

角柱の揚力係数は、電力中央研究所の吹出式開放型風洞（吹出口寸法：高さ 2.5m×幅 1.6m，風速：3.0～16.5m/s）にて測定しており，第 5.1-7 図に示すように，地面から 0.167D 以上離れると揚力は負となるので，正の揚力を与える本モデルの代用揚力係数（第 5.1-7 図の赤線）は保守的な結果となっていることが分かる。

円柱の揚力係数は，E P R I の風洞試験⁽¹⁵⁾にて測定しており，第 5.1-8 図に示すように，本モデルの代用揚力係数（第 5.1-8 図の赤線）は実際の円柱に働く揚力の最大揚力係数よりも大きな値となっているため，保守的な結果となっていることが分かる。



第 5.1-7 図 角柱の風洞試験による揚力係数と代用揚力係数



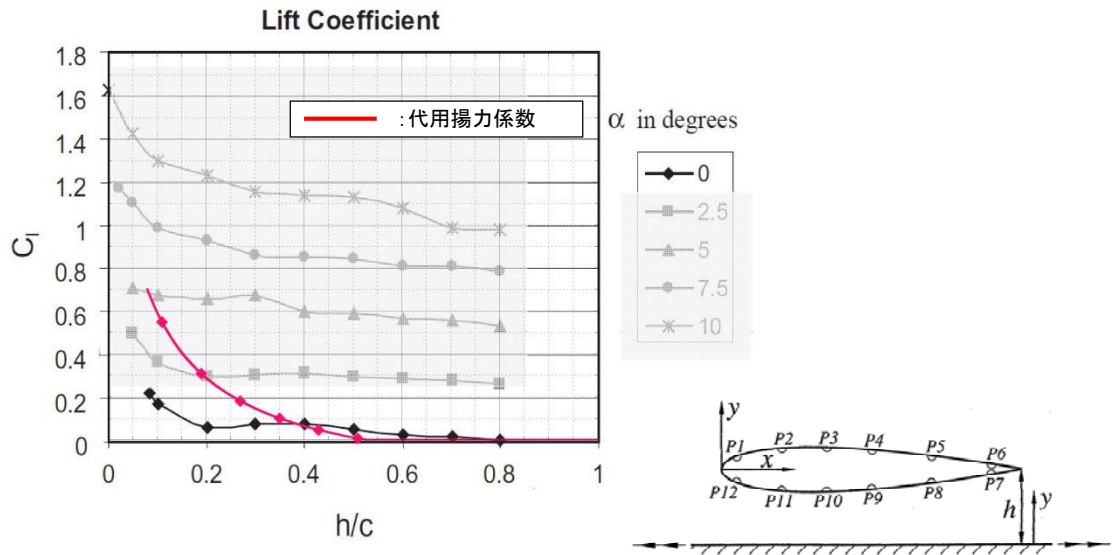
第 5.1-8 図 円柱の風洞試験による揚力係数と代用揚力係数

(文献⁽¹⁵⁾に代用揚力係数を加筆)

c. 板状物体（平板）の揚力の高さ依存性

平板の揚力係数は、平面的な形状を有する翼（迎角 0° ）の試験結果⁽¹⁹⁾に基づき考察すると、本モデルの代用揚力係数（第 5.1-9 図の赤線）は、実際の翼に働く地面効果による揚力係数よりもおおむね大きな値と

なっている。また、この翼は奥行方向が長い形状で流れに直交するような配置となっており、実際の平板に比べて揚力が作用しやすいことを考慮すると、実際の平板の揚力係数はさらに小さいものと考えられる。



第 5.1-9 図 翼の風洞試験による揚力係数と平板の代用揚力係数

(文献⁽¹⁹⁾に代用揚力係数を加筆)

(5) 物体の運動方程式

上記(1)から(4)を踏まえ、重力加速度 g 、上向きの単位ベクトル \mathbf{k} を用いて、飛行物体の運動方程式は以下のように記述される。

$$\frac{d\mathbf{V}_M}{dt} = \frac{l}{2} \rho \frac{C_D A}{m} |\mathbf{V}_w - \mathbf{V}_M| (\mathbf{V}_w - \mathbf{V}_M) - (g - L) \mathbf{k} \quad (14)$$

物体の位置 $\mathbf{X}_{M(t)}$ と速度 $\mathbf{V}_{M(t)}$ の時刻歴の計算には陽解法（一定加速度法）を用いた。具体的には、時刻 $t = \tau$ における物体の位置 $\mathbf{X}_{M(\tau)}$ と速度 $\mathbf{V}_{M(\tau)}$ を既知として、時刻 $t = \tau + \Delta \tau$ における物体の速度と位置を以下の式で求めた。ただし、 $\mathbf{A}(\tau)$ は上記運動方程式の右辺に対応する時刻 $t = \tau$ における加速度ベクトルである。

$$\mathbf{V}_M(\tau + \Delta \tau) = \mathbf{V}_M(\tau) + \mathbf{A}(\tau) \Delta \tau \quad (15)$$

$$\mathbf{X}_M(\tau + \Delta\tau) = \mathbf{X}_M(\tau) + \mathbf{V}_M(\tau)\Delta\tau + \frac{\mathbf{A}(\tau)\Delta\tau^2}{2} \quad (16)$$

$\mathbf{A}(\tau)$ の計算には、時刻 $t = \tau$ における風速場も必要であるが、初期に原点に位置する竜巻の中心が x 軸上を移動速度 V_{tr} で移動することを仮定しており、任意の時刻での風速場を陽的に求められるため、物体の速度及び位置を算出することができる。

(6) 物体の運動方程式 ((14)式) に関する考察

地上面の物体 (第 5.1-3 図 A) が浮上するには、地面からの反力が消滅する ($R < 0$, つまり $mg < F_L$) 条件で浮上し、浮上後は(14)式を成分表示した以下の運動方程式に従って飛散する。

$$\frac{dV_{Mx}}{dt} = \frac{1}{2}\rho \frac{C_D A}{m} \sqrt{(V_{w,x} - V_{M,x})^2 + (V_{w,y} - V_{M,y})^2 + (V_{w,z} - V_{M,z})^2} \times (V_{w,x} - V_{M,x}) \quad (17)$$

$$\frac{dV_{My}}{dt} = \frac{1}{2}\rho \frac{C_D A}{m} \sqrt{(V_{w,x} - V_{M,x})^2 + (V_{w,y} - V_{M,y})^2 + (V_{w,z} - V_{M,z})^2} \times (V_{w,y} - V_{M,y}) \quad (18)$$

$$\frac{dV_{Mz}}{dt} = \frac{1}{2}\rho \frac{C_D A}{m} \sqrt{(V_{w,x} - V_{M,x})^2 + (V_{w,y} - V_{M,y})^2 + (V_{w,z} - V_{M,z})^2} \times (V_{w,z} - V_{M,z}) - g + L$$

..... (19)

ここで、物体速度 $\mathbf{V}_M = (V_{M,x}, V_{M,y}, V_{M,z})$ 、竜巻風速 $\mathbf{V}_w = (V_{w,x}, V_{w,y}, V_{w,z})$ であり、右辺第 1 項が流体抗力 F_D による加速度を、(19)式の右辺第 3 項が地面効果による揚力 F_L による加速度を表している。上記の式で、物体が静止している状態 ((17)式~(19)式で物体速度 $\mathbf{V}_M = \mathbf{0}$) を仮定すると、以下の式となる。

$$\frac{dV_{Mx}}{dt} = \frac{1}{2}\rho \frac{C_D A}{m} \sqrt{V_{w,x}^2 + V_{w,y}^2 + V_{w,z}^2} \times V_{w,x} \quad (17')$$

$$\frac{dV_{My}}{dt} = \frac{1}{2} \rho \frac{C_D A}{m} \sqrt{V_{w,x}^2 + V_{w,y}^2 + V_{w,z}^2} \times V_{w,y} \quad (18')$$

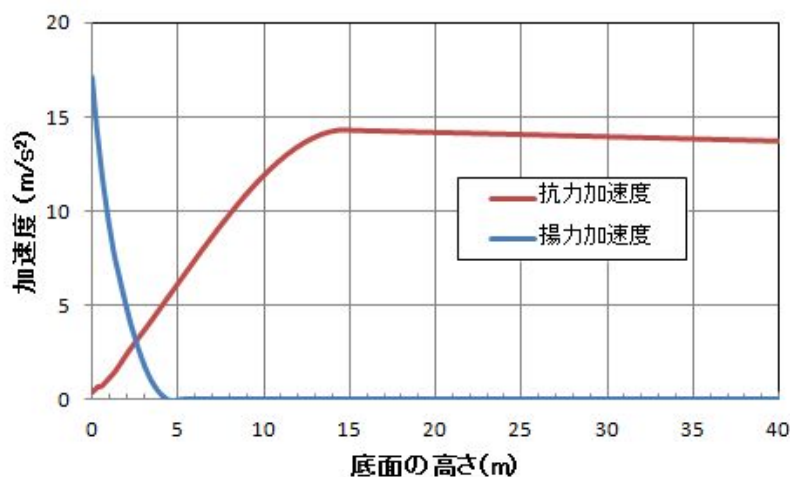
$$\frac{dV_{Mz}}{dt} = \frac{1}{2} \rho \frac{C_D A}{m} \sqrt{V_{w,x}^2 + V_{w,y}^2 + V_{w,z}^2} \times V_{w,z} - g + L \quad (19')$$

フジタモデルでは、物体が地面近傍にある場合（第 5.1-3 図(A)）では鉛直方向の風速 $V_{w,z}$ はゼロに近いので、式(19')の右辺第 1 項は右辺第 2 項及び第 3 項に比べてはるかに小さな量となり、以下のとおり物理的に合理的な関係式が成立する。

$$\frac{dV_{Mz}}{dt} \approx -g + L \quad (20)$$

例として、竜巻コア半径 30m、最大風速 100m/s の竜巻が原点に位置し、x 方向に 15m/s で移動する場合、点(0, -30m)における式(19')の右辺第 1 項の値（z 方向抗力（流体抗力）による加速度）と第 3 項の値（地面効果による揚力加速度）を第 5.1-10 図に示す。

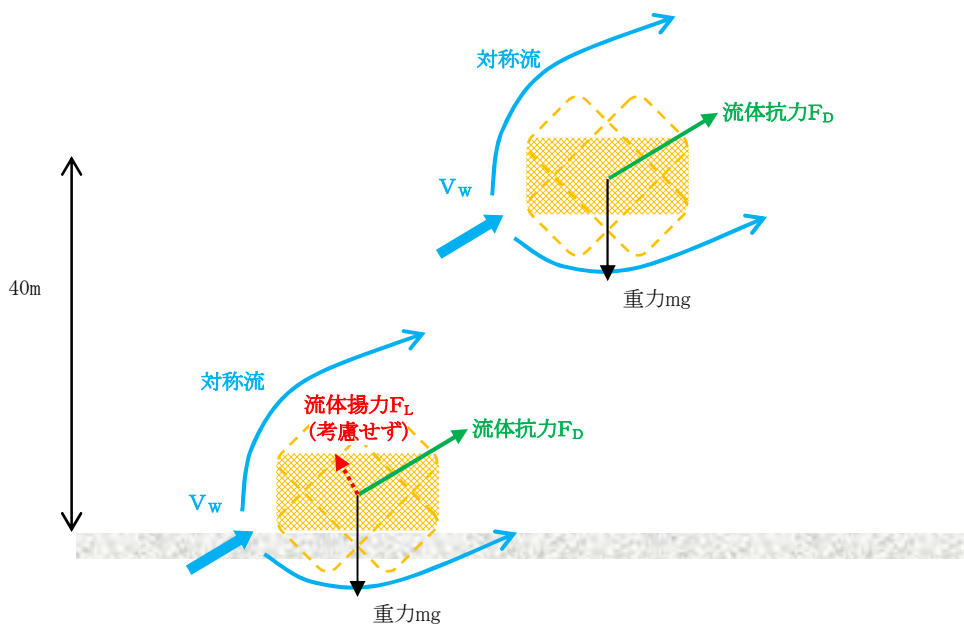
同図より、地面上（z=0）近傍においては、z 方向の抗力による加速度は十分小さく、地面効果による揚力加速度の影響が大きいことが分かる。



第 5.1-10 図 地面近傍の物体に作用する z 方向の加速度

$$\left(\frac{1}{2} \rho C_D A / m = 0.004 \text{ m}^{-1}, d = 1.31 \text{ m} \right)$$

なお、高さ方向の依存性が考慮されていないランキン渦（飛散解析用）の場合は、地面から水平風速の約 60%にも達する上昇流の噴出を設定する。地面効果は地面の存在によって水平な風が物体付近で湾曲・剥離することによって生じるものであるが、ランキン渦の風速場では地面の有無によって物体周りの流況が大きく変化せず、地面効果は物理的に発現しにくいいため、ランキン渦モデルを用いた解析においては鉛直方向の揚力 L を付加していない。 （第 5.1-11 図）

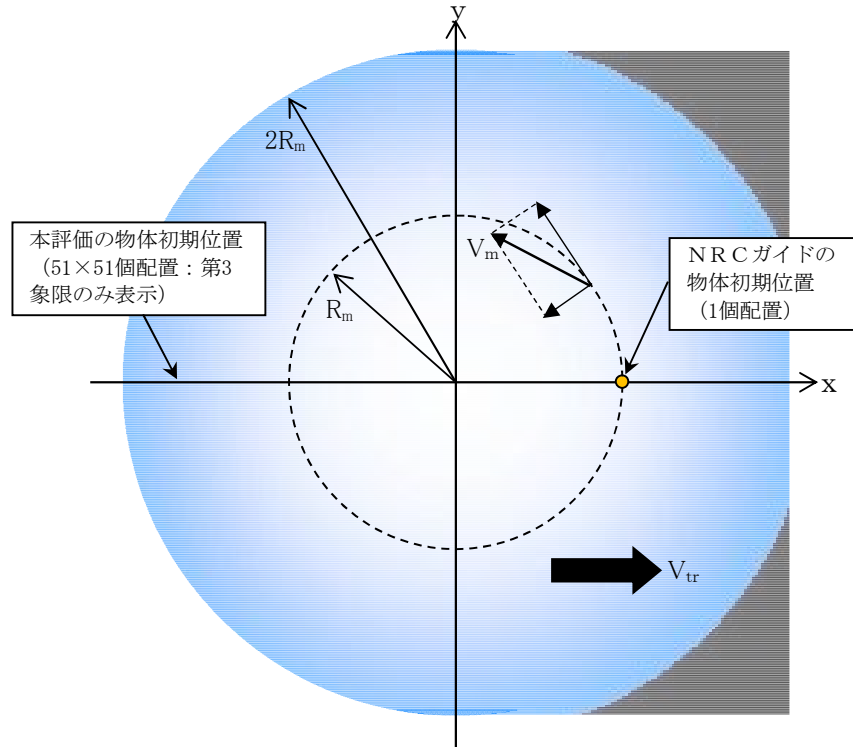


第 5.1-11 図 ランキン渦の場合の物体の運動モデルの模式図

5.2 物体が受ける風速における保守性の考慮

竜巻によって飛散する物体の飛散速度や飛散距離は、同じ竜巻内であっても物体が受ける風速（物体がある位置の竜巻風速）によって大きく変動する。その影響度合いを確認するため、米国 NRC ガイド⁽¹⁾に記載されている方法（物体の 1 点配置）と、物体を多点配置した場合の飛散速度の違いを比較した。配置の違いについて、第 5.2-1 図に示す。1 点配置の場合は、特定の位置（竜巻進行方向の最大接線風速半径の位置 $(x, y) = (R_m, 0)$ ）に物体 1 個を設置す

る。また多点配置の場合は、竜巻半径の4倍の辺長の正方形領域に51×51個の物体を配置する。その上で飛散させた物体の内、最も速度が大きくなったものをその物体の飛散速度とする。



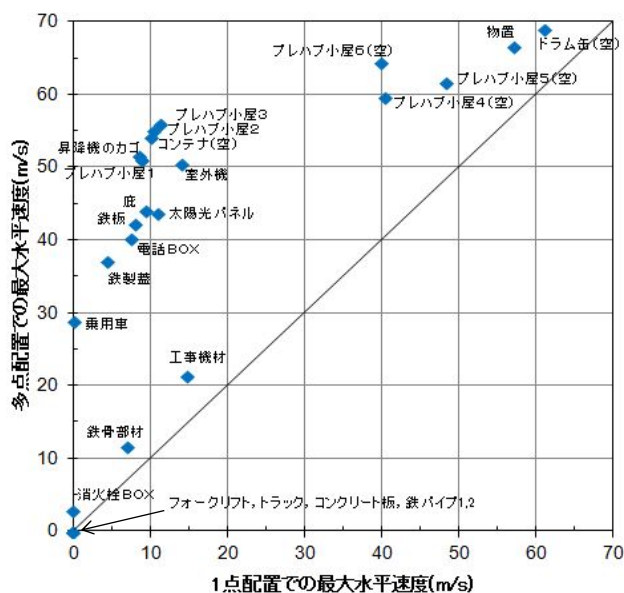
第 5.2-1 図 飛散解析における竜巻と物体の位置関係

評価条件として、竜巻の最大風速を 100m/s とし、フジタモデルの風速場を用いて地上から飛散させるものとする。また、評価ガイドの記載より竜巻の移動速度 V_{tr} を 15m/s 、竜巻コア半径 R_m を 30m とする。飛散させる物体としては、「竜巻による原子力施設への影響に関する調査研究」⁽³⁾に掲載されている物体を用いた。第 5.2-2 図に比較結果を示す。

米国 NRC で用いられている 1 点配置の手法と比較し、多点配置の手法では 1 点配置に比べて大きな飛散速度となった。多点配置することで、その竜巻風速場における最大風速（最大接線風速と半径方向風速のベクトル和が竜巻移動方向と重なる点）を受ける物体が出てくるため、このような結果になったと考えられる。

したがって、物体を多点配置することは、竜巻から受ける風速に関する不確定性を考慮できるものと考えられるため、本検討における方法として適用することとする。

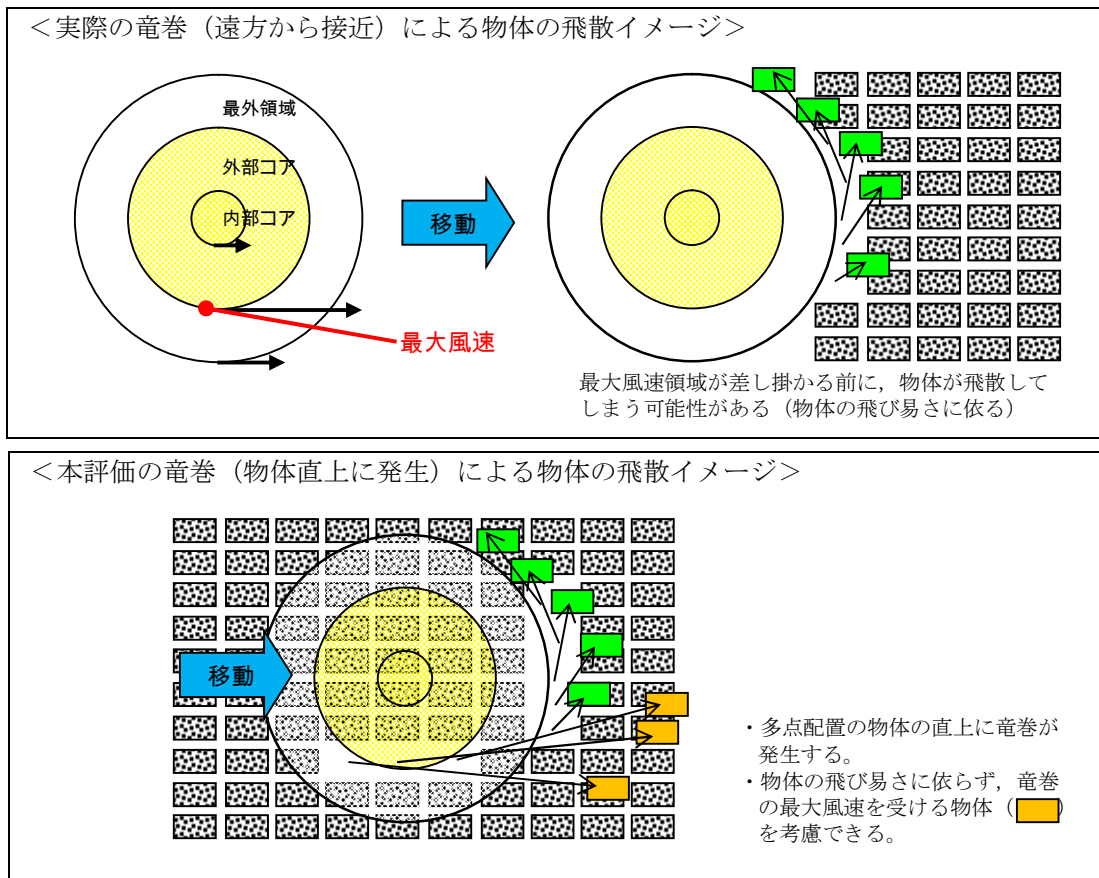
| 物品 | 高さ (m) | 他の寸法 | | C _D A/m (m ² /kg) |
|------------|-----------|------|-------|--|
| | | (m) | (m) | |
| フォークリフト | 1.10 | 1.10 | 3.60 | 0.0026 |
| トラック | 1.30 | 1.90 | 5.00 | 0.0026 |
| 消火栓BOX | 0.50 | 0.50 | 0.50 | 0.0036 |
| 乗用車 | 1.30 | 1.60 | 3.10 | 0.0052 |
| 工事機材 | 0.65 | 0.65 | 2.44 | 0.0058 |
| プレハブ小屋1 | 3.00 | 5.00 | 5.00 | 0.0083 |
| コンテナ(空) | 2.40 | 2.40 | 2.60 | 0.0105 |
| 昇降機のカゴ | 1.20 | 1.20 | 1.20 | 0.0113 |
| プレハブ小屋2 | 1.85 | 1.85 | 1.85 | 0.0119 |
| プレハブ小屋3 | 2.30 | 2.30 | 4.60 | 0.0120 |
| プレハブ小屋4(空) | 3.00 | 5.00 | 5.00 | 0.0153 |
| 電話BOX | 0.30 | 0.30 | 0.30 | 0.0169 |
| プレハブ小屋5(空) | 1.85 | 1.85 | 1.85 | 0.0189 |
| プレハブ小屋6(空) | 2.30 | 2.30 | 4.60 | 0.0222 |
| 物置 | 0.90 | 0.90 | 1.80 | 0.0315 |
| 室外機 | 0.25 | 0.25 | 0.80 | 0.0343 |
| コンクリート板 | 0.15 | 1.00 | 1.50 | 0.0021 |
| 庇 | 0.20 | 2.10 | 11.00 | 0.0242 |
| 鉄製蓋 | 0.03 | 0.50 | 0.70 | 0.0364 |
| 鉄板 | 0.04 | 0.25 | 2.00 | 0.0486 |
| 太陽光パネル | 0.05 | 1.00 | 1.20 | 0.0582 |
| 鉄骨部材 | 0.20 | 0.30 | 4.20 | 0.0065 |
| 鉄パイプ1 | 0.05 | 0.05 | 2.00 | 0.0057 |
| 鉄パイプ2 | 0.05 | 0.05 | 1.00 | 0.0059 |
| ドラム缶(空) | 0.60 | 0.60 | 0.90 | 0.0400 |



第 5.2-2 図 1 点配置時と多点配置時における物体の最大速度の比較

本評価においては第 5.2-1 図に示す物体の多点配置（竜巻半径の 4 倍の辺長の正方形領域に 51×51 個の物体を配置）を初期状態として適用したが、この手法は、物体の直上に竜巻を発生させており、竜巻発生地点の不確定性についても考慮した設定となる。

第 5.2-3 図に、遠方から物体に接近する竜巻と物体直上に発生する竜巻による飛散の比較イメージ図を示す。実際の竜巻に遭遇する状況（海上で竜巻が発生して上陸する場合など）を考慮すると、竜巻は遠方から物体に近づくため、最大風速より低い風速に曝された時点で飛散する可能性がある。しかし、物体の直上に竜巻を発生させることで、実際の竜巻による飛散と比較して、より厳しい結果を与えることになる。



第 5.2-3 図 物体に接近する竜巻と物体直上に発生する竜巻のイメージ

この物体を多点配置する方法と、竜巻を直上に発生させる方法を組み合わせることにより、必ずその竜巻の最大風速に曝される物体が発生するため、竜巻が物体に与える速度の不確定性を考慮することができると考えられる。

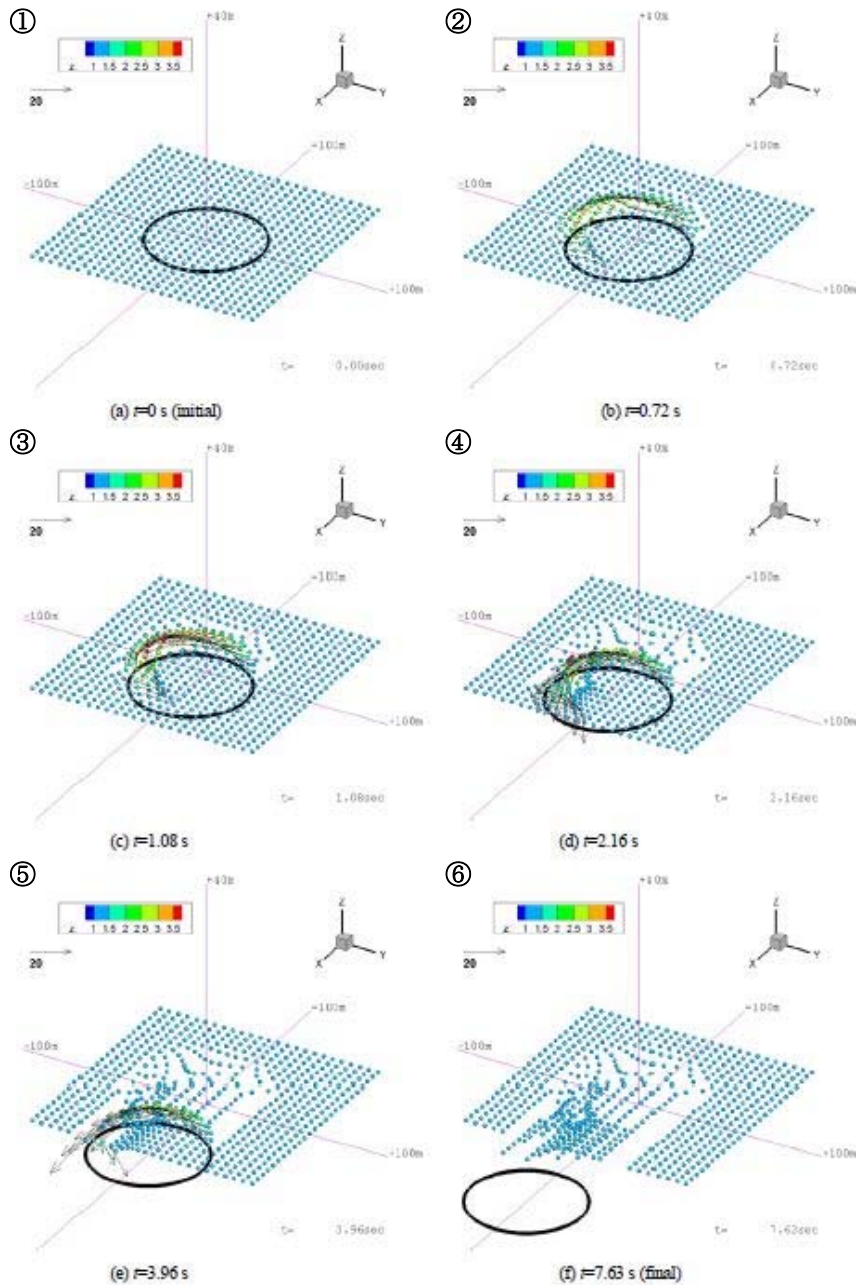
5.3 飛散解析手法まとめ

物体の浮上及び飛散モデルにおいて、実際の実験結果よりも浮上しやすい係数を設定することで、浮上に関する保守性を考慮できるような設定とした。

また、物体を多点配置し、その物体直上で竜巻が発生するという設定を組み合わせることにより、竜巻風速場内での物体が受ける風速の不確定性を考慮し、その竜巻において最大となる飛散速度が評価できるような設定とした。

以上により、フジタモデルを用いて物体の飛散解析を行う場合でも、保守性や不確定性を考慮した評価結果が得られると考えられる。

なお、参考として、第 5.3-1 図に本条件設定によるトラックの飛散イメージを示す。同じ物体でも、受ける風速によって大きく飛散状況が変わる様子分かる。



第 5.3-1 図 竜巻によるトラックの飛散イメージ^(2,3)

(第 6.3-5 表 (後述) の条件による)

6. 実際の飛散状況に対する検証

前節までで、フジタモデルの風速場を用いる利点や、飛散解析を行う上で考慮している事項等について説明した。

本節では、フジタモデルの風速場や前節の飛散解析手法を適用した場合、実際の事例等に比べて妥当な結果となるかどうかの検証を行った。

6.1 フジタスケールとの比較

フジタスケールは、竜巻等の突風により発生した建築物や車両等の被害状況から竜巻風速を推定するために考案された指標である。フジタスケールで示されている自動車の被災状況を第6.1-1表に示す。

ここで、各スケールに対応する最大風速（69m/s、92m/s、116m/s）を用いて、フジタモデルによる自動車飛散解析を行った結果を第6.1-2表に示す。

フジタモデルによる自動車飛散解析の結果は、各スケールに対応する自動車の被災状況とおおむね合致していると考えられる。なお、ランキン渦モデルを用いた場合は、F 2相当の風速（69m/s）でも大きく飛散することになり、フジタスケールの定義との比較からは過度に保守的な結果となる。

第6.1-1表 フジタスケールによる自動車の被災分類⁽²⁴⁾

| フジタスケール | 風速(m/s) | 自動車の被災状況 |
|---------|---------|---|
| F 2 | 50~69 | cars blown off highway (自動車が道路から逸れる。) |
| F 3 | 70~92 | cars lifted off the ground (自動車が地面から浮上する。) |
| F 4 | 93~116 | cars thrown some distances or rolled considerable distances (自動車がある距離を飛ばされる、またはかなりの距離を転がる。) |

第 6.1-2 表 フジタモデルによる自動車 ($C_D A/m=0.0052\text{m}^2/\text{kg}$) の

飛散評価結果⁽²⁵⁾

| フジタ スケール | 竜巻の 最大水平風速 (m/s) | 竜巻の 接線風速 (m/s) | 竜巻の 移動速度 (m/s) | 計算結果 | | |
|-------------|------------------------|----------------------|----------------------|-----------------|-------------|-------------|
| | | | | 最大水平速度 (m/s) | 飛散距離 (m) | 飛散高さ (m) |
| F 2 | 69 | 59 | 10 | 1.0 | 1, 4 | 0 |
| F 3 | 92 | 79 | 13 | 23 | 34 | 1. 1 |
| F 4 | 116 | 99 | 17 | 42 | 59 | 3. 1 |

6.2 米国 Grand Gulf 原子力発電所への竜巻来襲事例との比較

1978 年 4 月 17 日に、米国のミシシッピ州にて建設中の Grand Gulf 原子力発電所に F 3 の竜巻が来襲した。主な被害として、建設中の冷却塔内部に設置されていたクレーンが倒壊し、冷却塔の一部が破損したことが挙げられる。また、竜巻によりトレーラーハウスが荷台から剥がれ移動したことや、直径 8 から 10 インチの木が折れた事例等も確認されている。

第 6.2-1 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、資材置場のパイプの飛散状況を示したものである。なお、資材置場通過時の竜巻規模は F 2 であったと考えられている。このパイプはコンクリート・石綿製で、長さは 8 フィート、直径（内径）は 8 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⁽²⁵⁾。解析条件は、過去の記録に基づき第 6.2-1 表のとおりとした。



パイプを収納した木箱（一部 2 段重ね）は浮上せずには転倒し、パイプが周囲 7m～9m に散乱
 (Pieces of pipe were scattered over the area, but none travelled more than 25-30ft. The pipe joints are 8in. dia. x 8ft. long.)

第 6.2-1 図 Grand Gulf 原子力発電所資材置場におけるパイプの散乱状況⁽²⁶⁾

第 6.2-1 表 Grand Gulf 原子力発電所のパイプ飛散解析条件⁽²⁵⁾

| | | |
|-------|--|---------------------------|
| 竜巻条件 | 竜巻の最大風速 | 67 m/s |
| | 最大接線風速 | 53.6 m/s |
| | 移動速度 | 13.4 m/s |
| | コア半径 | 45.7 m |
| 飛来物条件 | 直径（外径） | 0.2286 m (=9 in.) |
| | 物体高さ | 0.229 m |
| | 密度 | 1700 kg/m ³ |
| | 飛行定数 (C _D A/m) | 0.0080 m ² /kg |
| 初期配置 | <ul style="list-style-type: none"> 物体個数：51×51 本を、最大接線風速半径の 4 倍を 1 辺とする正方形内(x, y=[-2R_m, +2R_m]) に等間隔配置。 設置高さ：1 m (パイプ収納箱が 2 段重ねされた状況を想定) | |

解析結果を第 6.2-2 表に示す。フジタモデルを風速場とした場合は、パイプがほとんど飛散せず、収納箱が倒れた影響で散乱したと思われる状況とおおむね合致している。

なお、ランキン渦モデルで評価した場合は、飛散距離や最大水平速度に実際の報告と大きな違いがあり、過度に保守的な評価結果となる。

第 6.2-2 表 Gland Gulf 原子力発電所のパイプ飛散解析結果⁽²⁵⁾

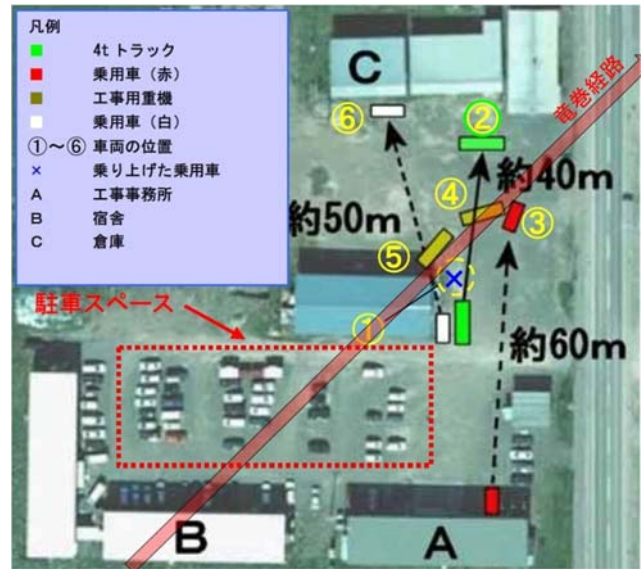
| 風速場モデル | 初期 物体高さ | 計算結果 | | |
|----------|-------------------|--------|--------------------|----------|
| | | 飛散距離 | 飛散高さ ^{※2} | 最大水平速度 |
| フジタモデル | 1 m (地上) | 1.2 m | 0.0 m | 4.9 m/s |
| ランキン渦モデル | 1 m ^{※1} | 42.6 m | 0.34 m | 30.7 m/s |
| | 40 m | 227 m | | 40.9 m/s |

※1：比較のため、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（浮上）高さ。

6.3 佐呂間竜巻での車両飛散事例との比較

2006 年 11 月 7 日に北海道網走支庁佐呂間町に発生した竜巻（以下「佐呂間竜巻」という。）により、4t トラックが約 40m 移動したことが報告⁽²⁷⁾されている。被災状況を第 6.3-1 図に示す。この事例では被災時に 4t トラックに乗員 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(②)。また、4t トラックの他に、2 台の自動車(③と⑥)の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極めて稀である。なお、竜巻による飛散物の再現計算は、竜巻が頻発する米国でもほとん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良く計測、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確な場合が多いことが挙げられる。



第 6.3-1 図 佐呂間竜巻による被災状況（工事事務所敷地内の車両被災）

（文献⁽²⁷⁾の写真に竜巻被害の方向を加筆）

ここでは、フジタモデルを風速場として用いた車両（4tトラック及び乗用車）の飛散解析を行い、実際の被害状況と比べて妥当な結果となるかどうかの確認を行った。方法としては、下記の2とおりにした。

- ・ 竜巻特性や飛来物（4tトラック及び乗用車）の状況を現実的に設定した場合の再現解析
- ・ 今回の飛散解析手法による検証

(1) 竜巻特性や飛来物（4tトラック及び乗用車）の状況を現実的に設定した場合の再現解析

a. 4tトラックの飛散解析

解析条件として、入手可能なデータ⁽²⁷⁾⁽²⁸⁾に基づき、合理的と考えられる竜巻特性条件と飛来物（4tトラック）の条件を第 6.3-1 表のとおり設定した。初期配置の条件として、配置数は 1 台とし、竜巻が遠方から近づく状況設定としている。また、風速 60m/s 以下では浮上しない設定⁽¹⁶⁾

とした。その上で、竜巻との距離を合理的な範囲で変化させ、佐呂間竜巻の再現性を確認した。

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 6.3-2 表及び第 6.3-2 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 **おおむね** 合致しており、特に車両と竜巻中心との距離を 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、物体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。

第 6.3-1 表 佐呂間竜巻による 4t トラックの飛散解析条件^(2 5)

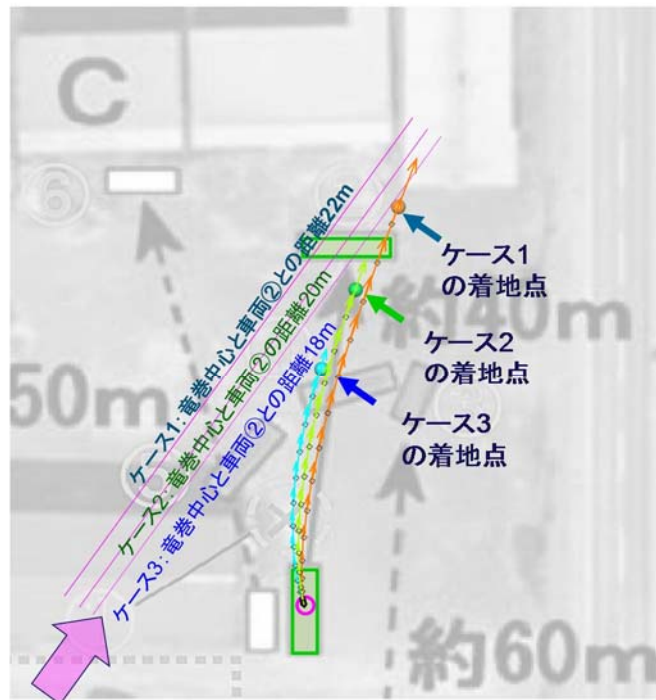
| | | |
|-------|---|---------------------------|
| 竜巻条件 | 竜巻の最大風速 | 92 m/s ^{※1} |
| | 最大接線風速 | 70 m/s |
| | 移動速度 | 22 m/s |
| | コア半径 | 20 m |
| 飛来物条件 | 車両長さ ^{※2} | 8.1 m |
| | 車両幅 [*] | 2.24 m |
| | 車両高さ [*] | 2.5 m |
| | 車両重量 | 4000 kg |
| | 飛行定数 (C _D A/m) | 0.0056 m ² /kg |
| 初期配置等 | <ul style="list-style-type: none"> ・物体個数：1 台 ・設置高さ：0 m (地上) ・「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」ことを条件として付加 | |

※1：佐呂間竜巻のフジタスケール (F 3) に基づく。

※2：車種不明のため、三菱ふそう PA-FK71D を仮定。

第 6.3-2 表 佐呂間竜巻による 4t トラックの飛散解析結果

| ケース | 車両と竜巻中心との距離 | 計算結果 | | |
|-----|-------------|--------|-------|----------|
| | | 飛散距離 | 飛散高さ | 最大水平速度 |
| 1 | 22 m | 45.4 m | 2.8 m | 25.8 m/s |
| 2 | 20 m | 35.5 m | 2.3 m | 22.2 m/s |
| 3 | 18 m | 25.9 m | 1.7 m | 18.8 m/s |



第 6.3-2 図 フジタモデルによる 4t トラックの飛散解析結果

(文献⁽²⁷⁾の写真に軌跡を加筆)

b. 乗用車の飛散解析

白い乗用車（第 6.3-1 図の⑥）の被災事例を対象として、物体を 1 点初期配置した条件で最大水平速度等を計算した。

乗用車の計算条件について、第 6.3-3 表に示す。

第 6.3-3 表 佐呂間竜巻による乗用車の飛散解析条件

| | | |
|-------|---|---------------------------|
| 竜巻条件 | トラック（第 6.3-1 表）に同じ | |
| 飛来物条件 | 車両長さ ^{※2} | 4.4 m |
| | 車両幅 [※] | 1.7 m |
| | 車両高さ [※] | 1.5 m |
| | 飛行定数（ $C_D A/m$ ） | 0.0097 m ² /kg |
| 初期配置等 | <ul style="list-style-type: none"> ・ 物体個数：1 台 ・ 設置高さ：0 m（地上） ・ 「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」ことを条件として付加 | |

※1：佐呂間竜巻のフジタスケール（F 3）に基づく。

※2：車種不明のため、トヨタカローラを仮定。

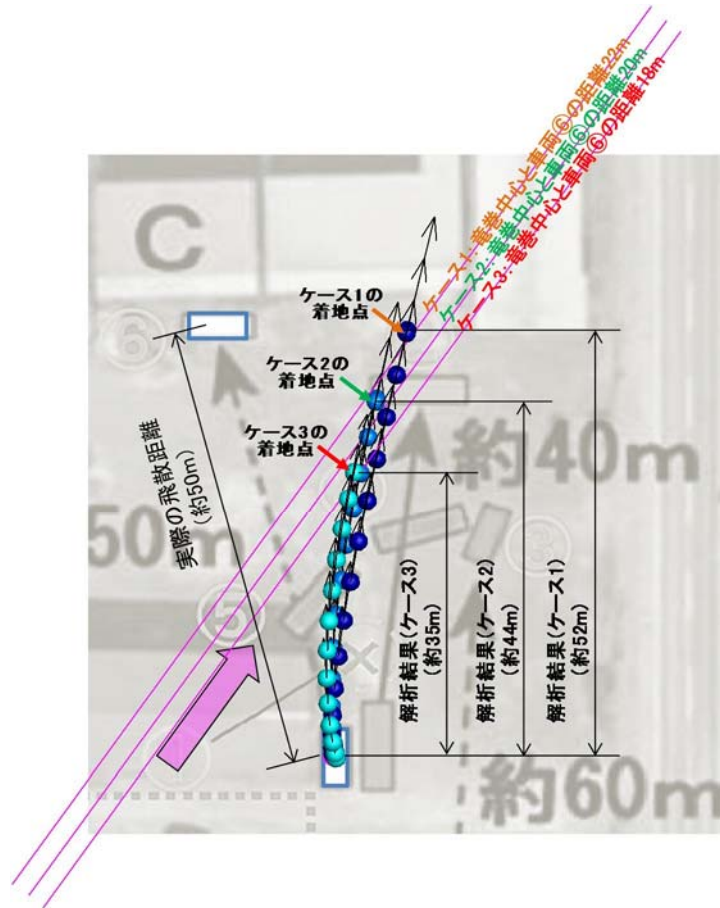
乗用車と竜巻中心との距離を 18m、20m 及び 22m とした場合の解析結果を、第 6.3-4 表及び第 6.3-3 図に示す。飛散距離については、ケース 1 でおおむね合致している。

飛散方向については、飛び出し方向はおおむね合致しているものの、最終的な着地点には多少のずれが生じている。これは乗用車（白）が建物（A 棟）に近接して駐車していたため、この建物の倒壊の影響を受けて飛散方向のずれが生じたものと推定される。

なお、赤い乗用車（第 6.3-1 図の③）について評価した場合は、竜巻中心との距離が大きいため飛散しない結果となった。ただし、実際には、赤い乗用車は全壊、飛散したプレハブ建物（軽量鉄骨造 2 階建、第 6.3-1 図の A）のすぐ下流側に駐車しており、そのがれきの影響を受けて一緒に移動したものと考えられる。

第 6.3-4 表 佐呂間竜巻による乗用車の飛散解析結果

| ケース | 車両と竜巻中心との距離 | 計算結果 | | |
|-----|-------------|--------|-------|----------|
| | | 飛散距離 | 飛散高さ | 最大水平速度 |
| 1 | 22 m | 51.9 m | 3.6 m | 28.9 m/s |
| 2 | 20 m | 43.5 m | 3.4 m | 24.7 m/s |
| 3 | 18 m | 34.7 m | 2.9 m | 21.1 m/s |



第 6.3-3 図 フジタモデルによる乗用車の飛散解析結果⁽²³⁾

(別文献⁽²⁸⁾の写真に軌跡を加筆)

(2) 今回の飛散解析手法による検証

ここでは、今回の飛散解析手法で、前述の佐呂間竜巻における 4t トラック及び乗用車の被災事例を評価し、実際の被災状況（飛散距離等）と比較する。

a. 4tトラックの飛散解析

解析条件について第 6.3-5 表に示す。竜巻条件としては、最大風速を 92m/s とし、その他の特性量については、竜巻影響評価ガイドに例示されている方法に従い、移動速度 V_{tr} を 14m/s (最大風速の 15%)、竜巻コア半径 R_m を 30m とした。

第 6.3-5 表 今回の飛散解析手法に基づく計算条件

| | | |
|-------|--|--------|
| 竜巻条件 | 設計竜巻風速 | 92 m/s |
| | 最大接線風速 | 78 m/s |
| | 移動速度 | 14 m/s |
| | コア半径 | 30 m |
| 飛来物条件 | トラック (第 6.3-1 表) に同じ | |
| 初期配置 | ・ 物体個数 : 51×51 台を、最大接線風速半径の 4 倍を 1 辺とする正方形内 ($x, y = [-2R_m, +2R_m]$) に等間隔配置。 ・ 設置高さ : 0 m (地上) | |

第 6.3-6 表に実際の被災状況と、今回の飛散解析手法による結果との比較を示す。また、第 6.3-4 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評価結果として、4t トラックの最大飛散速度は 36m/s、最大飛散高さは 3.6m、最大飛散距離は 63.4m となった。

実際の 4t トラック飛散距離は約 40m であり、フジタモデルによる評価結果はこれを上回った。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 **とど**めていることなどから、今回の飛散解析手法で評価をした場合でも、実際の被災状況と比較して妥当な結果となるものと考えられる。

なお、参考として同様の検証をランキン渦モデルでも実施した。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非常に保守的な結果となっていることが分かる。

第 6.3-6 表 実際の被災状況と今回の飛散解析手法による評価結果
(4t トラック)

| 風速場モデル | 初期 物体高さ | 計算結果 | | |
|------------------|----------------------------|---------|--|--|
| | | 飛散距離 | 飛散高さ※ ² | 最大水平速度 |
| フジタモデル | 0 m (地上) | 63.4 m | 3.6 m | 36.0 m/s |
| ランキン渦モデル 【参考】 | 0 m (地上※ ¹) | 193.7 m | 11.7 m | 43.9 m/s |
| | 40 m | 254.9 m | | |
| 実際の被災状況 | 0 m (地上) | 約 40 m | 乗員 2 名が存命で、病院にて聞き取り調査が可能であったことから ⁽²⁷⁾ 、3.6m を超える高さからトラックが落下したとは考え難い | トラックはおおむね外形をとどめていることから、36m/s (約 130km/h) を超える飛散速度であったとは考え難い。 |

※1：比較のため、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（浮上）高さ。



第 6.3-4 図 竜巻による被災後の 4 t トラックの様子⁽²⁸⁾⁽²⁹⁾

b. 乗用車（白）の飛散解析

4tトラックの場合と同様に、今回の飛散解析手法で乗用車の評価を行った結果を第6.3-7表に示す。

乗用車の場合も、フジタモデルによる評価が、実際の被災状況を包含する結果となっている。

第6.3-7表 実際の被災状況と今回の飛散解析手法による評価結果（乗用車）

| 風速場モデル | 初期 物体高さ | 計算結果 | | |
|------------------|---------------|---------|--------|----------|
| | | 飛散距離 | 飛散高さ※2 | 最大水平速度 |
| フジタモデル | 0 m（地上） | 82.3 m | 4.2 m | 44.1 m/s |
| ランキン渦モデル 【参考】 | 0 m （地上※1） | 269.6 m | 39.4 m | 49.6 m/s |
| | 40 m | 305.8 m | | |
| 実際の被災状況 | 0 m（地上） | 約50 m | — | — |

※1：比較のため、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（浮上）高さ。

7. 飛散以外の挙動に対する考慮

前節までで、飛来物の竜巻による挙動のうち、飛散に関する評価手法について説明をしたが、実際の竜巻による飛来物の挙動としては、飛散だけではなく横滑りや転がりが発生することも考えられる。

本節では、横滑りや転がりの影響について、以下2点に分けて考察する。

- ・ 飛散する物体における横滑りや転がりの影響
- ・ 飛散しない物体における横滑りや転がりの影響

(1) 飛散する物体における横滑りや転がりの影響

「5.2 物体が受ける風速における保守性の考慮」に記載の通り、本検討においては、竜巻を直上に発生させる方法を採用していることから、実際には

横滑りや転がりを伴い移動する物体も強制的に高速域に配置され、浮上をして飛散することになる。この場合、空中では地面の摩擦力を受けないため、実際に比べて大きな水平速度が得られることになる。

また、浮上後に地面に衝突する場合は、運動エネルギーの大部分は物体や地面の変形、破損等で消費されることから、落下後の横滑りや転がりによる移動距離は実際には小さいものと考えられる。

「6.3 佐呂間竜巻での車両飛散事例との比較」における飛散した4tトラックや乗用車は、実際には飛散だけではなく横滑りや転がりを伴ったものと考えられるが、飛散解析より得られた飛散距離や最大水平速度は、実際の被災状況よりも保守的な評価となっていることから、飛散過程における不確実性を裕度として包含している。

(2) 飛散しない物体における横滑りや転がりの影響

飛散しない物体においても、竜巻による風荷重が静止摩擦力より大きい場合には、横滑りをする。また、横滑りをしない場合でも、風荷重によるモーメントが自重のモーメントよりも大きい場合には転がることになる。このように、竜巻により横滑りや転がりが生じる場合には、地面での摩擦力の影響を受けながら移動することから、移動距離や水平速度は十分に小さいものと考えられる。

また、物体と竜巻防護施設の間に障害物となるフェンス等がある場合には、横滑りや転がった物体が竜巻防護施設に到達することは阻止される。

以上より、飛散しない物体が、障害物の影響を受けずに、横滑りや転がりによって竜巻防護施設と衝突することが想定される場合については、横滑りや転がった物体の影響が設計飛来物の影響に包含されることを確認し、包含されない場合には固縛等の措置を実施する。固縛等の措置に当たっては、フ

ジタモデルの風速場より求まる風荷重や地面での摩擦力を適切に考慮した上で、設計用荷重を設定する。

8. まとめ

フジタモデルは、米国NRCの要望により実際の竜巻観測記録を基に考案された風速場モデルであり、米国DOEの重要施設に対する設計基準の作成の際にも用いられている。フジタモデルは、他のモデルではできなかった地上からの物体の浮上を現実的に評価することができる点が大きなメリットである。これは、「6.3 佐呂間竜巻での車両飛散事例との比較」の「(1) 竜巻特性や飛来物(4tトラック及び乗用車)の状況を現実的に設定した場合の再現解析」において、フジタモデルを風速場とした飛散解析結果が実際の飛散状況と**おおむね**合致していることから確認できる。

また、フジタモデルにより算出される風速(V_w)は、飛来物の飛散評価のインプットとして用いるものであり、設計竜巻の最大風速の算出に**当**たっては保守性を確保したうえで、「5. 飛散解析における保守性の考慮」のとおり、竜巻を多数の物体の直上に瞬時に発生させて物体が最大風速を受けるような初期条件を用いる等の評価手法により、不確実性も含めて飛来物速度等を保守的に評価できるようにしている。

これにより、「6.3 佐呂間竜巻での車両飛散事例との比較」の「(2) 今回の飛散解析手法による検証」では、本評価手法を用いることで、フジタモデルにおいても実際の飛散状況に対し保守性を有した妥当な結果となることを確認している。

地上からの浮上、飛散評価を行うことのメリットは、発電所敷地内に数多く存在する物品の中から、竜巻による飛来物化の影響度合いを、浮上の有無の観点を含めより正確に把握できることである。竜巻飛来物の影響(浮上の有無、

飛散高さ、飛散距離、最大速度等)を正確に捉えることにより、飛来物発生防止対策や評価対象施設の防護対策の範囲や強度について、適切な保守性を確保した上で実効性の高い竜巻防護対策を実施することが可能になると考えられる。

評価全体として一定の保守性を確保しつつ、適切な竜巻対策によりプラント全体の安全性を向上させるため、竜巻影響評価における物体の浮上、飛散評価については、フジタモデルを適用することとする。

<参考文献>

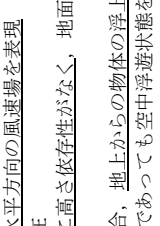
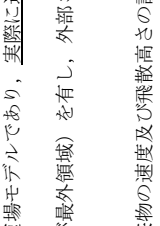

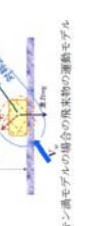
- (1) U.S. Nuclear Regulatory Commission, Regulatory Guide 1.76: Design-Basis Tornado and Tornado Missiles for Nuclear Power Plants, Revision 1, March 2007.
- (2) Simiu, E. and Cordes, M., Tornado-Borne Missile Speeds, NBSIR 76-1050, 1976.
- (3) 東京工芸大学 (2011) : 平成21~22 年度原子力安全基盤調査研究 (平成22 年度) 竜巻による原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
- (4) Fujita, T. T., Workbook of tornadoes and high winds for engineering applications, U. Chicago, 1978.
- (5) Karen A. Kosiba and Joshua Wurman, 2013: The Three-Dimensional Structure and Evolution of a Tornado Boundary Layer. *Wea. Forecasting*, 28, 1552-1561.
- (6) 数値的に生成された竜巻状の渦の性質, 平成 2 1 年度京都大学防災研究所研究発表要
- (7) Maruyama, T., Simulation of flying debris using a numerically generated tornado-like vortex. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, vol.99(4), pp.249-256, 2011.
- (8) U.S. Department of Energy, Natural Phenomena Hazards Design and Evaluation Criteria for Department of Energy Facilities, OE-STD-1020-2002, 2002.
(<http://pbadupws.nrc.gov/docs/ML0302/ML030220224.pdf>)

-
- (9) Malaeb, D. A., Simulation of tornado-generated missiles. M.S. thesis, Texas Tech University, 1980
- (10) P.-H. Luan, Estimates of Missile Speeds in Tornadoes, M.S. thesis, Texas Tech University, 1987.
- (11) J. R. McDonald, Rationale for Wind-Borne Missile Criteria for DOE facilities, UCRL-CR-135687, Lawrence Livermore National Laboratory, 1999.
(<https://e-reports-ext.llnl.gov/pdf/236459.pdf>)
- (12) McDonald, J. R., T. Theodore Fujita: His contribution to tornado knowledge through damage documentation and the Fujita scale. Bull. Amer. Meteor. Soc., 82, pp.63-72, 2001
- (13) NUREG-1827 Safety Evaluation Report for the National Enrichment Facility in Lea County, New Mexico (Docket No. 70-3103)
- (14) 江口讓, 杉本聡一郎, 服部康男, 平口博丸, 竜巻による物体の浮上・飛来解析コードTONBOSの開発, 電力中央研究所 研究報告N14002, 2014.
- (15) EPRI, Wind field and trajectory models for tornado-propelled objects, report NP-2898, 1978.
- (16) Schmidlin, T., B. Hammer, P. King, Y. Ono, L. S. Miller, and G. Thumann, 2002: Unsafe at any (wind) speed? Testing the stability of motor vehicles in severe winds. Bull. Amer. Meteor. Soc., 83, 1821-1830.
- (17) 林建二郎・大井邦昭・前田稔・斉藤良, 開水路中に水没設置された立方体及び棧粗度の流体力, 土木学会論文集B1(水工学) Vol. 67, No. 4, I_1141-I_1146, 2011.

-
- (18) 松宮央登, 中岡宏一, 西原 崇, 木村吉郎: 太陽光発電パネルに作用する空気力の地面効果に関する風洞実験, 構造工学論文集, Vol. 60A, pp. 446-454, 2014.
- (19) M.R. Ahmed, S.D. Sharma, An investigation on the aerodynamics of a symmetrical airfoil in ground effect, *Experimental Thermal and Fluid Science*, 29, pp. 633-647, 2005.
- (20) 山本晃一, 林建二郎, 関根正人, 藤田光一, 田村正秀, 西村晋, 浜口憲一郎, 護岸ブロックの抗力・揚力係数, 及び相当粗度の計測方法について, 水工学論文集, 第44 巻, pp1053~1058, 2000.
- (21) 江口 讓, 西原 崇, 水流动試験による電線の風荷重低減化のメカニズム解明, 電力中央研究所 研究報告U96050, 1997.
- (22) Lei, C., Cheng, L. and Kavanagh, K., Re-examination of the effect of a plane boundary on force and vortex shedding of a circular cylinder, *J. of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Vol. 80, pp. 263-286, 1999.
- (23) 江口讓, 杉本聡一郎, 服部康男, 平口博丸, 原子力発電所での竜巻飛来物速度の合理的評価法(Fujita の竜巻モデルを用いた数値解析コードの妥当性確認),
- (24) Fujita, T. T., 1971: Proposed characterization of tornadoes and hurricanes by area and intensity. SMRP Research Paper 91, University of Chicago, Chicago, IL, 42 pp
- (25) 日本保全学会 原子力規制関連事項検討会, 2015: 軽水型原子力発電所の竜巻影響評価における設計竜巻風速および飛来物速度の設定に関するガイドライン(JSM-NRE-009)

-
- (26) Fujita, T. T., and J. R. McDonald, Tornado damage at the Grand Gulf, Mississippi nuclear power plant site: Aerial and ground surveys, U.S. Nuclear Regulatory Commission NUREG/CR-0383, 1978.
- (27) 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.
- (28) 奥田泰雄, 喜々津仁密, 村上知徳, 2006年佐呂間町竜巻被害調査報告. 建築研究所災害調査, 46, 2006.
- (29) 土木学会 平成18年11月北海道佐呂間町竜巻緊急災害調査報告書

「フジタモデル」及び「ランキン渦モデル」並びに「それぞれの風速場モデルを用いた際の飛散解析手法」の比較

| | | | | | | | | | | | | | | | |
|--|---|---|---|-------------------------------------|----------|--|--------|--------------------------|----------|------------------------------------|------------|--|--|---|---|
| | <p>ランキン渦モデル (及び同モデルを用いた飛散解析手法)</p> <ul style="list-style-type: none"> 簡易な式で上空での水平方向の風速場を表現 上昇流は全領域に存在 接線風速や上昇風速に高さ依存性がなく、地面から吹き出しが生じる流れとなっている  <p>(飛散評価を行う場合、地上からの物体の浮上、飛散挙動を表現できないため、地上の物体であっても空中浮遊状態を仮定し評価することになる)</p> <ul style="list-style-type: none"> 米国NRC Regulatory Guide 1.76にて採用 | | <p>フジタモデル (及び同モデルを用いた飛散解析手法)</p> <ul style="list-style-type: none"> Fujitaにより実観測に基づき考案された竜巻風速場モデルであり、<u>実際に近い</u>風速場構造を有する 半径方向に3つの領域 (内部コア、外部コア及び最外領域) を有し、外部コアに上昇流が存在する 接線風速や上昇風速に高さ依存性がある 米国DOEの重要施設の基準において、竜巻飛来物の速度及び飛散高さの設定に使用  | | | | | | | | | | | | |
| モデルの概要 | <ul style="list-style-type: none"> 地面に置かれた物体へ影響を与える風速場をよく表現できており、地上からの物体の浮上、飛散解析が可能 →地上にある物体に対する力や挙動を表現するのに適しているモデルであり、<u>防護対策や固縛対策の範囲や強度について、実効性の高い対策とすることが可能。</u> | | | | | | | | | | | | | | |
| メリット | <ul style="list-style-type: none"> 地上に置かれた物体へ影響を与える風速場をよく表現できており、地上からの物体の浮上、飛散解析が可能 →地上にある物体に対する力や挙動を表現するのに適しているモデルであり、<u>防護対策や固縛対策の範囲や強度について、実効性の高い対策とすることが可能。</u> | | | | | | | | | | | | | | |
| デメリット | <p>ランキン渦モデルに比べ解析プログラムが複雑になるが、近年の計算機能力の向上や評価ツール(ランキン渦)の高度化により問題とならない)</p> <table border="1" data-bbox="654 645 861 940"> <tr> <td>竜巻の移動速度 V_T</td> <td>15 (m/s)</td> </tr> <tr> <td>最大接線風速 V_{lm}</td> <td>85 (m/s)</td> </tr> <tr> <td>最大接線風速半径 R_0</td> <td>30 (m)</td> </tr> <tr> <td>最大気圧低下量 ΔP_{max}</td> <td>76 (hPa)</td> </tr> <tr> <td>最大気圧低下率 (dp/dt) $_{max}$</td> <td>53 (hPa/s)</td> </tr> </table> | 竜巻の移動速度 V_T | 15 (m/s) | 最大接線風速 V_{lm} | 85 (m/s) | 最大接線風速半径 R_0 | 30 (m) | 最大気圧低下量 ΔP_{max} | 76 (hPa) | 最大気圧低下率 (dp/dt) $_{max}$ | 53 (hPa/s) | <p>竜巻の移動速度 V_T</p> <p>最大接線風速 V_{lm}</p> <p>最大接線風速半径 R_0</p> <p>最大気圧低下量 ΔP_{max}</p> <p>最大気圧低下率 (dp/dt) $_{max}$</p> | <p>風速場に高度依存性がなく、上昇流が全領域に存在する (地面からも吹き出しがある) ため、<u>実現象から乖離しており、地上からの物体の浮上、飛散挙動を表現できない</u></p> <p>→<u>地上における構造物に対し、過度に保守的な防護対策や固縛対策が必要となる。</u></p> | | |
| 竜巻の移動速度 V_T | 15 (m/s) | | | | | | | | | | | | | | |
| 最大接線風速 V_{lm} | 85 (m/s) | | | | | | | | | | | | | | |
| 最大接線風速半径 R_0 | 30 (m) | | | | | | | | | | | | | | |
| 最大気圧低下量 ΔP_{max} | 76 (hPa) | | | | | | | | | | | | | | |
| 最大気圧低下率 (dp/dt) $_{max}$ | 53 (hPa/s) | | | | | | | | | | | | | | |
| 主なパラメータ (設計竜巻の最大風速100m/sの場合) | <table border="1" data-bbox="877 645 957 940"> <tr> <td>評価ガイドの値や式が風速場モデルによらないことを確認のうえ、評価ガイドの値や式より算出</td> <td></td> </tr> <tr> <td>フジタモデルの圧力分布は複雑であるため、有限要素法の数値解析により算出</td> <td></td> </tr> <tr> <td>・フジタモデルは、地面との摩擦の影響を受けず回転するランキン渦に比べ、地面との摩擦の影響により回転が弱まり中心付近が低圧になりにくいモデルである。そのため、ランキン渦より最大気圧低下量が小さくなる</td> <td></td> </tr> <tr> <td>Fujitaにより提案された経験式より算出</td> <td></td> </tr> <tr> <td>・流入層高さは他の文献に示されている値とおおむね同じであることを確認</td> <td></td> </tr> <tr> <td>・その他の定数についても、Fujitaにより提案された値を採用</td> <td></td> </tr> </table> | 評価ガイドの値や式が風速場モデルによらないことを確認のうえ、評価ガイドの値や式より算出 | | フジタモデルの圧力分布は複雑であるため、有限要素法の数値解析により算出 | | ・フジタモデルは、地面との摩擦の影響を受けず回転するランキン渦に比べ、地面との摩擦の影響により回転が弱まり中心付近が低圧になりにくいモデルである。そのため、ランキン渦より最大気圧低下量が小さくなる | | Fujitaにより提案された経験式より算出 | | ・流入層高さは他の文献に示されている値とおおむね同じであることを確認 | | ・その他の定数についても、Fujitaにより提案された値を採用 | | <p>評価ガイドの値や式が風速場モデルによらないことを確認のうえ、評価ガイドの値や式より算出</p> <p>フジタモデルの圧力分布は複雑であるため、有限要素法の数値解析により算出</p> <p>・フジタモデルは、地面との摩擦の影響を受けず回転するランキン渦に比べ、地面との摩擦の影響により回転が弱まり中心付近が低圧になりにくいモデルである。そのため、ランキン渦より最大気圧低下量が小さくなる</p> <p>Fujitaにより提案された経験式より算出</p> <p>・流入層高さは他の文献に示されている値とおおむね同じであることを確認</p> <p>・その他の定数についても、Fujitaにより提案された値を採用</p> | <p>竜巻の移動速度 V_T</p> <p>最大接線風速 V_{lm}</p> <p>最大接線風速半径 R_0</p> <p>最大気圧低下量 ΔP_{max}</p> <p>最大気圧低下率 (dp/dt) $_{max}$</p> <p>最大気圧低下率 (dp/dt) $_{max}$</p> |
| 評価ガイドの値や式が風速場モデルによらないことを確認のうえ、評価ガイドの値や式より算出 | | | | | | | | | | | | | | | |
| フジタモデルの圧力分布は複雑であるため、有限要素法の数値解析により算出 | | | | | | | | | | | | | | | |
| ・フジタモデルは、地面との摩擦の影響を受けず回転するランキン渦に比べ、地面との摩擦の影響により回転が弱まり中心付近が低圧になりにくいモデルである。そのため、ランキン渦より最大気圧低下量が小さくなる | | | | | | | | | | | | | | | |
| Fujitaにより提案された経験式より算出 | | | | | | | | | | | | | | | |
| ・流入層高さは他の文献に示されている値とおおむね同じであることを確認 | | | | | | | | | | | | | | | |
| ・その他の定数についても、Fujitaにより提案された値を採用 | | | | | | | | | | | | | | | |
| 内部コア半径と外部コア半径の比 v | 0.3 | | | | | | | | | | | | | | |
| 流入層高さH | 15 (m) | | | | | | | | | | | | | | |
| 物体の浮上、飛散モデル | <p>《物体の浮上、飛散モデル》</p> <ul style="list-style-type: none"> 物体の存在により物体上面と下面の流れが非対象となることで生じる地面効果による揚力 (左図A/B) と流れの速度方向に平行な抗力 (左図A~C、但し地面付近では抗力の影響は小さい) を考慮し、地面に置かれた状態からの浮上高さや飛散速度等々を評価 《揚力係数 $C_{L\alpha}$》 ・地面から浮き上がる際の物体挙動を理論的に評価することは困難であるため、翼のような極端な形状を除き保守的となるよう、<u>風洞実験の結果を踏まえ、代用の揚力係数を設定 (物体の風の受け方や高度を変化させた場合でも、代用揚力係数が実測値より保守的になっていることを確認)</u>  | <p>物体の浮上、飛散モデル</p> <ul style="list-style-type: none"> 物体の存在により物体上面と下面の流れが非対象となることで生じる地面効果による揚力 (左図A/B) と流れの速度方向に平行な抗力 (左図A~C、但し地面付近では抗力の影響は小さい) を考慮し、地面に置かれた状態からの浮上高さや飛散速度等々を評価 《揚力係数 $C_{L\alpha}$》 ・地面から浮き上がる際の物体挙動を理論的に評価することは困難であるため、翼のような極端な形状を除き保守的となるよう、<u>風洞実験の結果を踏まえ、代用の揚力係数を設定 (物体の風の受け方や高度を変化させた場合でも、代用揚力係数が実測値より保守的になっていることを確認)</u> | <p>《物体の浮上、飛散モデル》</p> <ul style="list-style-type: none"> 物体に働く流れの速度方向に平均的な抗力 (左図D/E) と自重の関係から、物体が飛来するか否かを判定し、飛来する場合には、<u>風速場を表現できている空中浮遊状態からの浮上高さや飛散速度等々を評価</u> 《抗力係数 C_{DA}》 ・物体がランダム回転し、物体の各面に均等に力を受けるものとして、<u>抗力係数は3方向の平均値を設定</u>  | | | | | | | | | | | | |
| 竜巻が物体に与える速度に関する設定 | <ul style="list-style-type: none"> 竜巻内の物体の場所依存性 (風速場における竜巻風の不均一性) を考慮し、<u>風速場における物体の中から、最大の飛散速度や飛散距離を設定</u> ・実際に竜巻が遠方から近づくと場合により、<u>最大風速より低い風速に曝された時点で飛散する可能性</u>があるが、<u>物体を強制的に高速域に配置し、物体が瞬時に最大風速を受けるよう設定</u> | <p>同左</p> | | | | | | | | | | | | | |

東海第二発電所における竜巻風速場モデルの適用方針

東海第二発電所の竜巻影響評価における竜巻風速場モデルの適用状況を、先行審査プラントの状況と合わせ、第 2-1 表のとおり整理した。

これより、竜巻影響評価における設計荷重（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 ）の設定においては、

- ・ W_W ：竜巻風速場モデルに依存しない
- ・ W_P 、 W_M ：竜巻風速場モデルを選択する必要がある

ことが分かるが、 W_P 、 W_M の設定においては、適切な保守性を確保した上で、かつ必要な精度と実務における作業量のバランスも判断して、竜巻風速場モデルを選定する方針としている。

本方針に基づく選択の結果として、下記のとおり W_P と W_M の設定に用いる竜巻風速場モデルを使い分けた形となっているが、保守性の確保を前提とした選択であり、問題は無いと考えている。

1. W_P 、 W_M の設定に用いる竜巻風速場モデルの選定の考え方1.1 W_M について

東海第二発電所の竜巻防護施設の構造（主に鋼製、コンクリート製）を考慮すると、竜巻による損傷をもたらす主な設計荷重は飛来物の衝撃荷重 W_M と考えられるため、まず、 W_M の設定に必要な飛来物源の飛散解析に用いる竜巻風速場モデルを検討し、上記方針を踏まえた以下の理由によりフジタモデルを採用した。

- ・ フジタモデルを用いた飛散評価は、別添資料 2「竜巻影響評価におけるフジタモデルの適用について」に示すとおり保守性を確保した手法となっている。
- ・ 実際の竜巻の観測結果に基づいたフジタモデルは、多数の飛来物源が想定され

る地表付近の物品の飛来物化の影響を、より精度よく評価できるというメリットを重視した。

- ・解析に用いるパラメータは若干増えるが、直営で解析が可能であり、ランキンモデルを用いた解析に比べても作業量に大きな差はない。

1.2 W_P について

残る W_P の設定においては、 W_M の方針に合わせフジタモデルを用いる選択肢も取り得るが、上記方針を踏まえた以下の理由により、ランキン渦モデルに基づく「竜巻影響評価ガイド」に示される評価式を採用した。

- ・第2-1図に示すとおり、ランキン渦モデルの気圧低下量の分布がフジタモデルの分布を包含するため、保守性を確保出来る。
- ・フジタモデルによる気圧低下量の計算には計算機を用いた数値解析が必要で、第三者による作業を要するが、上記の評価式に基づく計算は、事業者自身が手計算で容易に実施可能。

以上

第 2-1 表 東海第二発電所と先行審査プラントにおける竜巻風速場モデルの適用状況

| 設計荷重設定要素 | 荷重設定への適用 | | | 各プラントへのモデル適用状況 (: フジタモデル, : ランキン渦モデル) | |
|--|---|----------------|-----------------------|---|-----------------------------------|
| | W _W | W _P | W _M | 東海第二 | 柏崎刈羽 6/7 【審査中】 |
| <div style="display: flex; justify-content: space-between;"> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px;"> : 風速場モデルに依存しない要素 </div> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px;"> : 風速場モデルに依存する要素 </div> </div> | 最大接線風速 V _{Rm} | ○ (○) | ○ | 85m/s | 78m/s |
| | 竜巻の移動速度 V _T | ○ | ○ | 15m/s | 14m/s |
| | 最大接線風速半径 R _m | | ○ | 30m | 30m |
| | 内部コア/外部コア半径比 v _i ^{※1} | | | 0.3 | 0.3 |
| | 流入層高さ H _i ^{※1} | | ○ | 15m | 15m |
| | 最大気圧低下量 ΔP _{max} | | ○ | 89hPa ^{※2} | 64hPa ^{※4} |
| 竜巻の基本特性 | 最大気圧低下率 (dp/dt) _{max} | ○ | 45hPa/s ^{※3} | 42hPa/s ^{※4} | 45hPa/s |
| | 設計飛来物の設定 | | ○ | 竜巻影響評価ガイドに 例示の物品 ^{※5} | 竜巻影響評価ガイドに 例示の物品 ^{※5} |
| 飛散解析設定に 関する | 飛来物源の飛散解析における 初期高さ | | ○ | 物品毎に設定 | 物品毎に設定 |
| | | | ○ | 物品毎に設定 | 40m |

注：他プラントの状況は、当社調べによる。

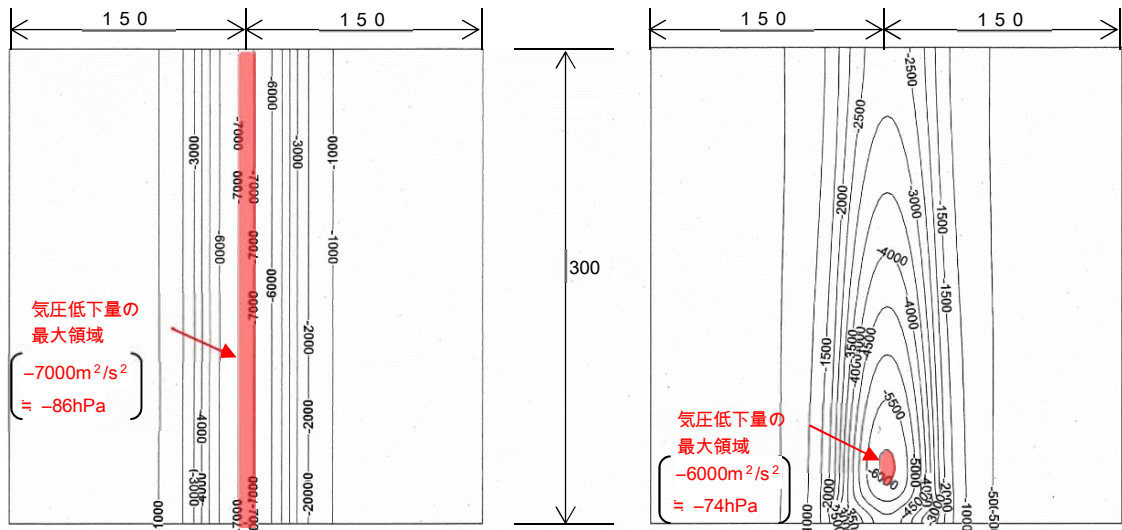
※1：フジタモデル固有のパラメータ

※2：簡便でフジタモデルの値（約 76hPa）より保守側となる、ランキン渦モデルベースの評価式（竜巻評価ガイド）を用いた。

※3：フジタモデルの値（約 53hPa/s）を下回るが、設備影響評価には用いない。

※4：フジタモデルの風速場に基づく数値解析にて算出。

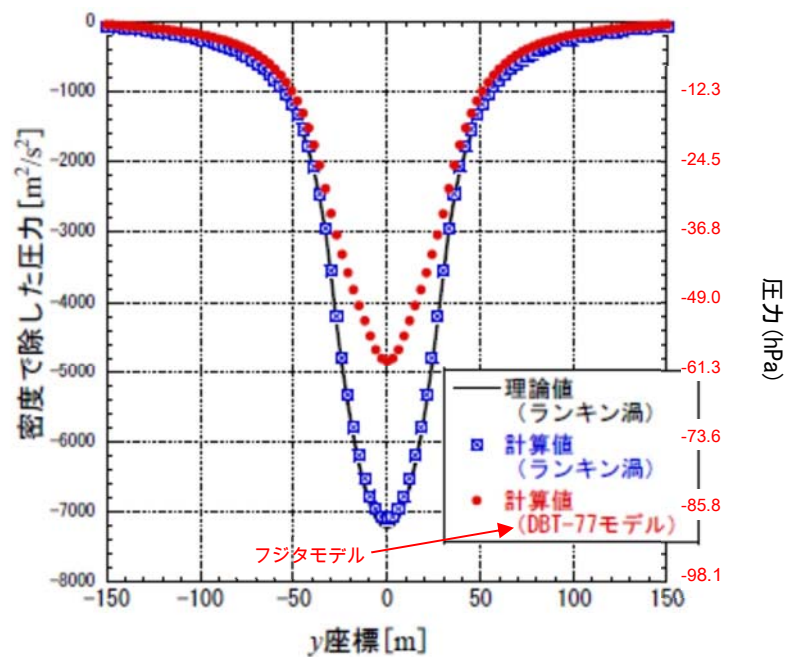
※5：柏崎刈羽では現地調査やその他想定飛来物をフジタモデルで飛散解析し、その中から設計飛来物を選定している。一方東海第二は、「竜巻影響評価ガイド」に例示された物品を採用したため、特に風速場を考慮していない。



(a) ランキン渦

(b) Fujita モデル

$x=0$ 断面 ($-150\text{m} < y < 150\text{m}$, $0 < z < 300\text{m}$) での密度で除した圧力分布
(最大接線風速 85m/s の場合)



竜巻中心軸断面での密度で除した圧力分布 (最大接線風速 85m/s の場合)

第 2-1 図 設計竜巻 (最大接線風速 V_{Rm} : 85m/s) における圧力分布

(文献⁽¹⁾の図に一部加筆)

<参考文献>

- (1) 江口譲, 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