

泊発電所 3 号炉審査資料	
資料番号	DB062T r. 3. 0
提出年月日	令和3年10月1日

泊発電所 3 号炉

設置許可基準規則等への適合状況について
(設計基準対象施設等)

令和 3 年 1 0 月
北海道電力株式会社

枠囲みの内容は機密情報に属しますので公開できません。

目 次

第4条	地震による損傷の防止（後日提出）	
第5条	津波による損傷の防止（後日提出）	
第6条	自然現象 外部からの衝撃による損傷の防止（自然現象）	
第6条	竜巻 外部からの衝撃による損傷の防止（竜巻）	
第6条	外部火災 外部からの衝撃による損傷の防止（外部火災）	
第6条	火山 外部からの衝撃による損傷の防止（火山）	
第7条	不法な侵入等の防止	
第8条	火災による損傷の防止	
第9条	溢水による損傷の防止	
第10条	誤操作の防止	
第11条	安全避難通路等	
第12条	安全施設	
第14条	全交流動力電源喪失対策設備	
第16条	燃料体等の取扱施設及び貯蔵施設	
第17条	原子炉冷却材圧力バウンダリ	
第24条	安全保護回路	
第26条	原子炉制御室等	（第59条 原子炉制御室等）
第31条	監視設備	（第60条 監視測定設備）
第33条	保安電源設備	
第34条	緊急時対策所	（第61条 緊急時対策所）
第35条	通信連絡設備	（第62条 通信連絡を行うために必要な設備）

注：（ ）内は重大事故等対処施設の該当条文

第六条：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（手順等含む）

(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（竜巻）

（別添 1）設置許可基準規則等への適合状況説明資料（竜巻影響評価結果）

3. 技術的能力説明資料

（別添 2）外部からの衝撃による損傷の防止（竜巻）

4. 現場確認プロセス

（別添 3）竜巻影響評価における飛来物発生防止対策を実施する対象物の選定プロセスについて

< 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、それら要求事項に対する泊発電所3号炉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。
3. において、追加要求事項に適合するための技術的能力（手順等）を抽出し、必要となる運用対策等を整理する。
4. において、設計にあたって実施する各評価に必要な入力条件等の設定を行うため、設備等の設置状況を現場にて確認した内容について整理する。

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 第6条 (外部からの衝撃による損傷の防止)	技術基準規則 第7条 (外部からの衝撃による損傷の防止)	備考
<p>安全施設は、想定される自然現象（地震及び津波を除く。次項において同じ。）が発生した場合においても安全機能を損なわないものでなければならない。</p>	<p>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>	追加要求事項
<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>		追加要求事項
<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>	追加要求事項

1.2 追加要求事項に対する適合性（手順等含む）

(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。）又はその組合せに遭遇した場合において、自然現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、安全機能を損なうことのない設計とする。

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、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ずる応力をそれぞれの因果関係及び時間的变化を考慮して、適切に組み合わせる。

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飛来物（航空機落下等）、ダムの崩壊、爆発、近隣工場等の火災、有毒ガス、船舶の衝突又は電磁的障害により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うことのない設計とする。

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、飛来物（航空機落下等）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、立地的要因により設計上考慮する必要はない。

ここで、想定される自然現象及び原子炉施設の安全性を損なわせる原因となるおそれがある事象であって人為によるもの（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、竜巻が発生した場合においても、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合せた設計竜巻荷重、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合せた設計荷重に対して、安全機能を損なうことのない設計とする。また、安全施設は、過去の竜巻被害の状況及び泊発電所のプラント配置から想定される竜巻随件事象に対して安全機能を損なうことのない設計とする。

安全施設の安全機能を損なうことの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の構造健全性の維持、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。

【別添1(4.(3),(4):6竜-別1-34~89)、(5.:6竜-別1-90,91)】

飛来物の発生防止対策として、資機材等の設置状況を踏まえ、飛来物となる可能性のある物のうち、飛来した場合の運動エネルギー又は貫通力が設定する設計飛来物である鋼製材(長さ4.2m×幅0.3m×奥行0.2m、質量135kg、飛来時の水平速度57m/s、飛来時の鉛直速度38m/s)よりも大きな物の固縛や竜巻襲来が予想される場合の車両の退避等を実施する。また、防護ネットや防護鋼板等の竜巻飛来物防護対策設備により、飛来物の衝撃荷重による影響から防護する対策を行う。

【別添1(6.:6竜-別1-92~110)】

(2) 安全設計方針

1. 安全設計

1.8 外部からの衝撃による損傷の防止に関する基本方針

安全施設は、想定される自然現象（地震及び津波を除く。）及び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設計とする。安全機能が損なわれないことを確認する必要がある施設を、「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」で規定されている重要度分類（以下 1.8 では「安全重要度分類」という。）のクラス 1、クラス 2 及びクラス 3 に属する構築物、系統及び機器とする。

その上で、上記構築物、系統及び機器の中から、発電用原子炉を停止するため、また、停止状態にある場合は引き続きその状態を維持するために必要な異常の発生防止の機能又は異常の影響緩和の機能を有する構築物、系統及び機器並びに使用済燃料プールの冷却機能及び給水機能を維持するために必要な異常の発生防止の機能又は異常の影響緩和の機能を有する構築物、系統及び機器を有する安全重要度分類のクラス 1、クラス 2 に属する構築物、系統及び機器を外部事象から防護する対象（以下「クラス 1、クラス 2 に属する構築物等」という。）とし、機械的強度を有すること等により、安全機能を損なわない設計とする。

また、クラス 1、クラス 2 に属する構築物等を内包する建屋（クラス 1、クラス 2 に属する構築物等となる建屋を除く。）は、機械的強度を有すること等により、内包するクラス 1、クラス 2 に属する構築物等の安全機能を損なわない設計及びクラス 1、クラス 2 に属する構築物等へ波及的影響を及ぼさない設計とする。

上記に含まれない構築物、系統及び機器は、機能を維持すること若しくは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を行うこと又はそれらを適切に組み合わせることにより、その安全機能を損なわない設計とする。

1.8.2 竜巻防護に関する基本方針

1.8.2.1 設計方針

1.8.2.1.1 竜巻に対する設計の基本方針

安全施設は、竜巻に対して、原子炉施設の安全性を確保するために必要な機能（以下「安全機能」という。）を損なうことのないよう、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、安全機能を損なうことのない設計とする。

また、安全施設が設計竜巻による波及的影響によって、その安全機能を損なうことのない設計とする。

(1) 飛来物の衝突による施設の貫通及び裏面剥離

(2) 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、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）を適切に組合せた設計荷重

- (3) 竜巻による気圧の低下
- (4) 外気と繋がっている箇所への風の流入
- (5) 砂等の粒子状の飛来物による目詰まり、閉塞及び噛み込み

設計竜巻から防護する施設としては、安全施設が設計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」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。

設計竜巻から防護する施設のうち、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、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により、安全機能を損なうことのない設計とすることから、クラス1及びクラス2に属する施設を竜巻防護施設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。

竜巻防護施設の安全機能を損なうことの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実施するとともに、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。

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防護ネットや防護鋼板等の竜巻飛来物防護対策設備により、飛来物から竜巻防護施設を防護できる設計とする。

【別添1(1. :6 竜-別 1-1)、(2. :6 竜-別 1-2~8)、(4. (3) :6 竜-別 1-34~39)、(4. (4)b. :6 竜-別 1-46~50)、(4. (4)d. :6 竜-別 1-87~89)、補足説明資料 32。】

1.8.2.1.2 設計竜巻の設定

「添付書類六 9. 竜巻」において設定した設計竜巻の最大風速は92m/sとする。

ただし、竜巻に対する設計に当たっては、設計竜巻の最大風速92m/sを安全側に数字を切り上げて、最大風速100m/sの竜巻の特性値に基づく設計荷重に対して、安全施設が安全機能を損なうことのない設計とする。

なお、設計竜巻については、今後も継続的に観測データや増幅に関する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。

【別添1(3. (4)d. :6 竜-別 1-32)、(3. (5) :6 竜-別 1-32, 33)】

1.8.2.1.3 竜巻防護施設

竜巻防護施設は、建屋又は構築物（以下「建屋等」という。）に内包され、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施設（外気と繋がっている施設を除く。以下「建屋等に内包され防護される施設（外気と繋がっている施設を除く。）」という。）、建屋等に内包されるが、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が期待できない施設（以下「建屋等に内包されるが防護が期待できない施設」という。）、建屋等に内包され、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施設のうち、外気と繋がっており設計竜巻による気圧差による荷重の影響を受ける施設（以下「建屋内の施設で外気と繋がっている施設」という。）、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。

なお、津波防護施設、浸水防止設備及び津波監視設備については、竜巻は気象現象、津波は地震、地滑り等を原因とする事象であり、同時に発生することは考えられず、事象の組合せは考慮しないことから、竜巻防護施設として抽出しない。

- ・ 建屋等に内包され防護される施設（外気と繋がっている施設を除く。）
- ・ 建屋等に内包されるが防護が期待できない施設
- ・ 屋外施設及び建屋内の施設で外気と繋がっている施設

竜巻防護施設のうち、屋外施設及び建屋内の施設で外気と繋がっている主な施設を、以下のとおり抽出する。

<屋外施設>

- ・ 排気筒（建屋外）

<建屋内の施設で外気と繋がっている施設>

- ・ 排気筒（建屋内）
- ・ 換気空調設備（アニュラス空気浄化設備、格納容器空調装置、補助建屋空調装置、試料採取室空調装置、中央制御室空調装置、電動補助給水ポンプ室換気装置、制御用空気圧縮機室換気装置、ディーゼル発電機室換気装置及び安全補機開閉器室空調装置の外気と繋がるダクト・ファン・空調ユニット及び外気との境界となるダンパ・バタフライ弁）

【別添1(2.(1):6 竜-別1-2~4,7)】

1.8.2.1.4 竜巻防護施設を内包する施設

竜巻防護施設を内包する主な施設を、以下のとおり抽出する。

- ・ 原子炉建屋（外部遮へい建屋）（原子炉容器他を内包する施設）
- ・ 原子炉建屋（周辺補機棟）（主蒸気管他を内包する施設）
- ・ 原子炉建屋（燃料取扱棟）（使用済燃料ピット他を内包する施設）

- ・ 原子炉補助建屋（余熱除去ポンプ他を内包する施設）
- ・ ディーゼル発電機建屋（ディーゼル発電機他を内包する施設）
- ・ 燃料油貯油槽（ディーゼル発電機燃料油貯油槽を内包する施設）
- ・ 取水ピットポンプ室（原子炉補機冷却海水ポンプ他を内包する施設）
- ・ ストレーナ室（原子炉補機冷却海水ポンプ出口ストレーナ他を内包する施設）

【別添 1(2. (1):6 竜-別 1-5～7)】

1.8.2.1.5 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は、当該施設の破損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否定できない施設、又はその施設の特定の区画とする。

具体的には、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。

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。

また、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施設及び竜巻防護施設を内包する区画の外気と繋がっている換気空調設備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。

(1) 竜巻防護施設に機械的影響を及ぼし得る主な施設

＜竜巻防護施設を内包する施設に隣接している施設＞

- ・ タービン建屋（原子炉建屋に隣接する施設）
- ・ 電気建屋（原子炉建屋、原子炉補助建屋に隣接する施設）
- ・ 出入管理建屋（原子炉補助建屋に隣接する施設）

＜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＞

- ・ 循環水ポンプ建屋

(2) 竜巻防護施設に機能的影響を及ぼし得る主な施設

＜屋外にある竜巻防護施設の附属施設＞

- ・ ディーゼル発電機排気消音器（ディーゼル発電機の附属施設）
- ・ 主蒸気逃がし弁消音器（主蒸気逃がし弁の附属施設）
- ・ 主蒸気安全弁排気管（主蒸気安全弁の附属施設）
- ・ タービン動補助給水ポンプ排気管（タービン動補助給水ポンプの附属施設）
- ・ ディーゼル発電機燃料油貯油槽ベント管（ディーゼル発電機燃料油貯油槽の附属施設）

＜竜巻防護施設を内包する区画の外気と繋がっている換気空調設備＞

- ・ 換気空調設備（蓄電池室排気装置の外気と繋がるダクト・ファン及び外気との境界となるダンパ）

【別添1(2.(1):6 竜-別1-4, 5, 7)】

1.8.2.1.6 設計飛来物の設定

プラントウォークダウンによる敷地全体を俯瞰した調査・検討を行い、発電所構内の資機材等の設置状況を踏まえ、竜巻防護施設等に衝突する可能性のある飛来物を抽出する。抽出した飛来物の寸法、重量及び形状から飛来の有無を判断し、設計飛来物のうち最も高い運動エネルギー及び貫通力を考慮して、竜巻防護対策によって防護ができない可能性がある物は固縛、固定、竜巻防護施設からの隔離又は撤去等の対策を実施する。

竜巻防護施設等に衝突する可能性がある飛来物のうち、「原子力発電所の竜巻影響評価ガイド」(平成25年6月19日 原規技発第13061911号 原子力規制委員会決定)を参考にして、鋼製材（長さ4.2m×幅0.3m×奥行0.2m、質量135kg、飛来時の水平速度57m/s、飛来時の鉛直速度38m/s）を設計飛来物として設定する。さらに、防護ネットや防護鋼板等の竜巻飛来物防護対策設備の形状、寸法を考慮して、鋼製材より小さく竜巻飛来物防護対策設備を通過する可能性がある砂利、及び竜巻飛来物防護対策設備を通過しないが、竜巻防護施設である使用済燃料ピット等に侵入した場合に燃料集合体に直接落下する可能性がある鋼製パイプを設計飛来物として設定する。

なお、砂利の寸法は、防護ネットの網目の寸法を考慮して設定する。

第1.8.2.1表に泊発電所における設計飛来物を示す。

【別添1(4.(3)a.:6 竜-別1-36~38)】

1.8.2.1.7 荷重の組合せと許容限界

(1) 竜巻防護施設等に作用する設計竜巻荷重

設計竜巻により竜巻防護施設等に作用する荷重を以下に示す。

a. 設計竜巻の風圧力による荷重

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)及び「日本建築学会建築物荷重指針・同解説(2004)」に準拠して、下式により算定する。

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

ここで、

W_w : 設計竜巻の風圧力による荷重

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

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

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脆弱と考えられる竜巻防護施設等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。

【別添 1(4. (3)a. :6 竜-別 1-34, 35)】

b. 設計竜巻による気圧差による荷重

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竜巻防護施設等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、下式により算定する。

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

ここで、

W_P : 設計竜巻による気圧差による荷重

ΔP_{\max} : 最大気圧低下量

A : 施設の受圧面積

【別添 1(4. (3)a. :6 竜-別 1-35)】

c. 設計飛来物による衝撃荷重

衝撃荷重が大きくなる向きで設計飛来物である砂利、鋼製パイプ又は鋼製材が竜巻防護施設等に衝突した場合の衝撃荷重を算定する。

また、貫通評価においても、設計飛来物の貫通力が大きくなる向きで衝突することを考慮して評価を行う。

【別添 1(4. (3)a. :6 竜-別 1-35~38)】

(2) 設計竜巻荷重の組合せ

竜巻防護施設等の設計に用いる設計竜巻荷重は、設計竜巻の風圧力による荷重 (W_W)、設計竜巻による気圧差による荷重 (W_P) 及び設計飛来物による衝撃荷重 (W_M) を組合せた複合荷重とし、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、下式により算定する。

$$W_{T1} = W_P$$

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

なお、竜巻防護施設等には W_{T1} 及び W_{T2} の両荷重をそれぞれ作用させる。

【別添 1(4. (3)a. :6 竜-別 1-38)】

(3) 設計竜巻荷重と組合せる荷重の設定

設計竜巻荷重と組合せる荷重は以下のとおりとする。

a. 竜巻防護施設等に常時作用する荷重、運転時荷重

竜巻防護施設等に作用する荷重として、自重等の常時作用する荷重及び運転時荷重を適切に組合せる。

【別添1(4.(3)b.:6竜-別1-38)】

b. 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⁽⁹⁾、積乱雲の発達時に竜巻と同時に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。

①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。

②雪

泊発電所が立地する地域においては、冬期、竜巻が襲来する場合は竜巻通過前後に降雪を伴う可能性はあるが、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や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るため、雪による荷重は十分小さく、設計竜巻荷重に包絡される。

③雹

雹は積乱雲から降る直径5mm以上の氷の粒であり、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、10cm程度の雹の終端速度は59m/s⁽¹⁰⁾、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て十分小さく、雹の衝突による荷重は設計竜巻荷重に包絡される。

④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。

【別添1(4.(3)b.:6竜-別1-39)】

c. 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、竜巻防護施設等のうち設計基準事故時荷重が生じる設備としては、動的機器である原子炉補機冷却海水ポンプが考えられるが、設計基準事故時においても海水ポンプの圧力、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。

【別添1(4.(3)b.:6章-別1-39)】

(4) 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の有無の評価については、貫通及び裏面剥離が発生する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、規準及び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規準・指針類
- ・ 原子力発電所耐震設計技術指針 JEAG4601-1987 (日本電気協会)
- ・ 日本機械学会の規準・指針類
- ・ 原子力エネルギー協会 (NEI) の規準・指針類

【別添1(4.(4)b.,c.:6章-別1-40~52)】

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、規準及び指針類に準拠し算定した許容限界を下回る設計とする。

- ・ 日本工業規格
- ・ 日本機械学会の規準・指針類
- ・ 原子力発電所耐震設計技術指針 JEAG4601-1987 (日本電気協会)

【別添1(4.(4)d.:6章-別1-53~89)】

1.8.2.1.8 竜巻防護設計

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の設計竜巻からの防護設計方針を以下に示す。

- (1) 竜巻防護施設のうち、建屋等に内包され防護される施設 (外気と繋がっている施設を除く。)

竜巻防護施設のうち、建屋等に内包され防護される施設 (外気と繋がっている施設を除く。) は、建屋等による防護により設計荷重及び設計飛来物の衝突による影響を受けない設計とする。

ただし、建屋等による防護が期待できない場合には(2)のとおりとする。

【別添1(2.(1):6 竜-別1-2~4)】

(2) 竜巻防護施設のうち、建屋等に内包されるが防護が期待できない施設

建屋等に内包される竜巻防護施設のうち、建屋等が設計竜巻による影響により損傷する可能性があるために、設計竜巻による影響から防護できない可能性のある施設は、設計荷重又は設計飛来物の衝突による影響に対して安全機能を損なうことのない設計とするが、安全機能を損なう可能性がある場合には、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、安全機能を損なうことのない設計とする。

【別添1(4.(4)b.:6 竜-別1-48~50)】

(3) 竜巻防護施設のうち、屋外施設及び建屋内の施設で外気と繋がっている施設

屋外の竜巻防護施設は、設計荷重又は設計飛来物の衝突による影響により安全機能を損なうことのない設計とする。安全機能を損なう場合には、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、安全機能を損なうことのない設計とする。

建屋等に内包され防護される竜巻防護施設のうち、外気と繋がっている施設は、設計荷重の影響を受けても、安全機能を損なうことのない設計とする。

【別添1(4.(4)d.:6 竜-別1-53~89)】

(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は、設計荷重に対して主架構の構造健全性が維持されるとともに、個々の部材の破損により施設内の竜巻防護施設が安全機能を損なうことのない設計とする。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施設内の竜巻防護施設が安全機能を損なうことのない設計とする。

【別添1(4.(4)b.:6 竜-別1-40~50)】

(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は、設計荷重又は設計飛来物の衝突による影響により、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。

【別添1(4.(4)c.:6 竜-別1-51, 52)、(4.(4)d.:6 竜-別1-79~89)】

なお、竜巻飛来物防護対策設備を設置するものについて、防護ネットは鋼製材の運動エネルギーを吸収し貫通しない設計とし、防護鋼板は鋼製材又は鋼製パイプが、防護コンクリートは鋼製材が貫通しない厚みとする。

以上の竜巻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対策等を第1.8.2.2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対策等を第1.8.2.3表に、竜巻防護施設を内包する施設及び竜巻対策等を第1.8.2.4表に、竜巻飛来物防護対策設備の概念図を第1.8.2.1図に示す。

【別添1(4.(4)b.~d.:6 竜-別1-40~89)】

1.8.2.1.9 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は、設計竜巻の風圧力による荷重、設計竜巻による気圧差による荷重、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、主架構の構造健全性が維持されるとともに、個々の部材の破損により施設内の竜巻防護施設が安全機能を損なうことのない設計とする。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うことのない設計とする。

【別添1(4.(4)b.:6竜-別1-40~50)】

(1) 原子炉建屋（外部遮へい建屋・周辺補機棟）、原子炉補助建屋、ディーゼル発電機建屋

設計竜巻の風圧力による荷重、設計竜巻による気圧差による荷重、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、主架構の構造健全性が維持されるとともに、個々の部材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うことのない設計とする。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うことのない設計とする。

ただし、設計荷重又は設計飛来物の衝突による影響を受け、開口部建具等が損傷し当該建屋内の竜巻防護施設が安全機能を損なう可能性がある場合には、当該建屋内の竜巻防護施設が安全機能を損なわないかを評価し、安全機能を損なう可能性がある場合には、設備又は運用による竜巻防護対策を実施する。

【別添1(4.(4)b.:6竜-別1-40~50)】

(2) 原子炉建屋（燃料取扱棟）

設計竜巻の風圧力による荷重、設計竜巻による気圧差による荷重、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、主架構の構造健全性が維持されるとともに、個々の部材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うことのない設計とする。

ただし、設計荷重又は設計飛来物の衝突による影響を受け、壁及び開口部建具が損傷し当該建屋内の竜巻防護施設が安全機能を損なう可能性がある場合には、当該建屋内の竜巻防護施設が安全機能を損なわないかを評価し、安全機能を損なう可能性がある場合には、設備又は運用による竜巻防護対策を実施する。

【別添1(4.(4)b.:6竜-別1-40~50)】

(3) 燃料油貯油槽

設計飛来物が衝突した際に、設計飛来物の貫通を防止するとともに、当該施設内の竜巻防護施設が安全機能を損なうことのない設計とする。

【別添1(4.(4)b.:6竜-別1-46~50)】

(4) 取水ピットポンプ室、ストレーナ室

設計飛来物が衝突した際に、設計飛来物の貫通を防止するとともに、当該施設内の竜巻防護施設が安全機能を損なうことのない設計とする。

ただし、取水ピットポンプ室、ストレーナ室は上部に開口を設けた設計とするため、設計飛来物の侵入に対して、当該室内の竜巻防護施設が安全機能を損なう可能性がある場合には、当該室内の竜巻防護施設が安全機能を損なわないかを評価し、安全機能を損なう可能性がある場合には、設備又は運用による竜巻防護対策を実施する。

【別添1(4.(4)b.:6 竜-別1-46~50)】

1.8.2.1.10 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・補修が可能なことにより、安全機能を損なうことのない設計とする。また、竜巻防護施設に波及的影響を及ぼし得る施設は、構造健全性を維持すること、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に修復することにより、竜巻防護施設が安全機能を損なうことのない設計とする。

【別添1(6.(3):6 竜-別1-98,99)】

(1) 竜巻防護施設のうち、建屋等に内包され防護される施設（外気と繋がっている施設を除く。）

建屋等に内包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、原子炉補助建屋、ディーゼル発電機建屋、燃料油貯油槽に内包され、設計荷重又は設計飛来物の衝突から防護されることによって、安全機能を損なうことのない設計とする。

【別添1(4.(4)b.:6 竜-別1-40~50)、(6.(3):6 竜-別1-95,96)】

(2) 竜巻防護施設のうち、建屋等に内包されるが防護が期待できない施設

原子炉建屋（燃料取扱棟）は、設計飛来物の衝突に対して壁及び開口部建具に貫通が発生することを考慮し、当該建屋内部の竜巻防護施設のうち、設計飛来物の衝突により安全機能を損なう可能性がある使用済燃料ピット、使用済燃料ラック、新燃料ラック、燃料移送装置、使用済燃料ピットクレーンが、安全機能を損なうことのない設計とする。

原子炉建屋（周辺補機棟）は、設計飛来物の衝突による影響により、開口部建具及び開口部である換気口周りのガラリに貫通が発生することを考慮し、開口部建具付近等の竜巻防護施設のうち、設計飛来物の衝突により安全機能を損なう可能性がある原子炉補機冷却水サージタンク他、配管・弁（主蒸気管内）が、安全機能を損なうことのない設計とする。

原子炉補助建屋は、設計飛来物の衝突による影響により、開口部建具に貫通が発生することを考慮し、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安全機能を損なう可能性がある制御用空気系統配管が、安全機能を損なうことのない設計とする。

ディーゼル発電機建屋は、設計飛来物の衝突による影響により、開口部建具及び開口部である換気口周りの換気フードに貫通が発生することを考慮し、開口部建具付近等の竜巻防護施設のうち、設計飛来物の衝突により安全機能を損なう可能性がある蓄熱室加熱器が、安全機能を損なうことのない設計とする。

取水ピットポンプ室及びストレーナ室は上部に開口を設けた設計とするため、設計飛来物の侵入を考慮し、当該室内部の竜巻防護施設のうち、設計荷重又は設計飛来物の衝突による影響により安全機能を損なう可能性がある原子炉補機冷却海水ポンプ、原子炉補機冷却海水ポンプ出口ストレーナ、配管・弁（原子炉補機冷却海水系統）が、安全機能を損なうことのない設計とする。

【別添 1(4. (4)b. :6 竜-別 1-46~50)、(6. (3) :6 竜-別 1-96, 97】

a. 使用済燃料ピット

設計飛来物である鋼製材及び鋼製パイプが原子炉建屋（燃料取扱棟）の壁を貫通し使用済燃料ピットに侵入する場合でも、設計飛来物である鋼製材及び鋼製パイプの衝撃荷重により、使用済燃料ピットのライニング及びコンクリートの一部が損傷して、ピット水が漏えいすることはほとんどなく、使用済燃料ピットの冷却機能及び遮蔽機能が維持されることにより、安全機能を損なうことのない設計とする。

【別添 1(4. (4)d. :6 竜-別 1-56~60)】

b. 使用済燃料ラック

設計飛来物である鋼製材及び鋼製パイプが原子炉建屋（燃料取扱棟）の壁を貫通して、使用済燃料ピットに侵入し使用済燃料ラックに衝突する場合でも、設計飛来物である鋼製材及び鋼製パイプが、使用済燃料ラックに貯蔵している燃料の燃料有効部に達することはなく、使用済燃料ラックに貯蔵している燃料の構造健全性が維持されることにより、安全機能を損なうことのない設計とする。

【別添 1(4. (4)d. :6 竜-別 1-56~60)】

c. 新燃料ラック

設計飛来物である鋼製材及び鋼製パイプが原子炉建屋（燃料取扱棟）の壁を貫通して、新燃料貯蔵庫に侵入し新燃料ラックに衝突する場合でも、設計飛来物である鋼製材及び鋼製パイプが、新燃料ラックに貯蔵している燃料の燃料有効部に達することはなく、新燃料ラックに貯蔵している燃料の構造健全性が維持されることにより、安全機能を損なうことのない設計とする。

また、設計飛来物である鋼製パイプが新燃料ラックに貯蔵している燃料に直接衝突し、燃料の構造健全性が損なわれることを考慮して、竜巻飛来物防護対策設備に

よる竜巻防護対策を行い、設計飛来物である鋼製パイプが燃料に直接衝突することを防止することにより、燃料の構造健全性が維持され安全機能を損なうことのない設計とする。

【別添 1(4. (4)d. :6 竜-別 1-60~64)、(6. (3):6 竜-別 1-97, 102)】

d. 燃料移送装置

設計飛来物である鋼製材及び鋼製パイプが原子炉建屋（燃料取扱棟）の壁を貫通して燃料移送装置に衝突し安全機能を損なうことを考慮して、竜巻襲来が予想される場合には、燃料取扱棟における燃料取扱作業を中断することにより、燃料の構造健全性が維持され安全機能を損なうことのない設計とする。

【別添 1(6. (3):6 竜-別 1-103)】

e. 使用済燃料ピットクレーン

設計飛来物である鋼製材及び鋼製パイプが原子炉建屋（燃料取扱棟）の壁又は開口部建具である扉を貫通して使用済燃料ピットクレーンに衝突し安全機能を損なうことを考慮して、竜巻襲来が予想される場合には、燃料取扱棟における燃料取扱作業を中断することにより、燃料の構造健全性が維持され安全機能を損なうことのない設計とする。

【別添 1(6. (3):6 竜-別 1-104)】

f. 原子炉補機冷却海水ポンプ

設計飛来物である鋼製材及び鋼製パイプが取水ピットポンプ室の上部開口部から侵入して原子炉補機冷却海水ポンプに衝突し安全機能を損なうことを考慮して、竜巻飛来物防護対策設備による竜巻防護対策を行う。竜巻防護対策を行う原子炉補機冷却海水ポンプが設計竜巻の風圧力による荷重、設計竜巻による気圧差による荷重、竜巻飛来物防護対策設備によって防護できない砂利による衝撃荷重及び自重に対して、構造健全性が維持され安全機能を損なうことのない設計とする。

【別添 1(4. (4)d. :6 竜-別 1-64~67)、(6. (3):6 竜-別 1-97~102)】

g. 原子炉補機冷却海水ポンプ出口ストレーナ

設計飛来物である鋼製材及び鋼製パイプがストレーナ室の上部開口部から侵入して原子炉補機冷却海水ポンプ出口ストレーナに衝突し安全機能を損なうことを考慮して、竜巻飛来物防護対策設備による竜巻防護対策を行う。竜巻防護対策を行う原子炉補機冷却海水ポンプ出口ストレーナが設計竜巻の風圧力による荷重、設計竜巻による気圧差による荷重、竜巻飛来物防護対策設備によって防護できない砂利による衝撃荷重及び活荷重に対して、構造健全性が維持され安全機能を損なうことのない設計とする。

【別添 1(4. (4)d. :6 竜-別 1-68, 69)、(6. (3):6 竜-別 1-97~102)】

h. 配管・弁（原子炉補機冷却海水系統）

設計飛来物である鋼製材及び鋼製パイプが取水ピットポンプ室及びストレーナ室の上部開口部から侵入して配管・弁（原子炉補機冷却海水系統）に衝突し安全機能を損なうことを考慮して、竜巻飛来物防護対策設備による竜巻防護対策を行う。竜巻防護対策を行う配管・弁（原子炉補機冷却海水系統）が設計竜巻の風圧力による荷重、設計竜巻による気圧差による荷重、竜巻飛来物防護対策設備によって防護できない砂利による衝撃荷重、自重及び活荷重に対して、構造健全性が維持され安全機能を損なうことのない設計とする。

【別添 1(4. (4)d. :6 竜-別 1-69, 70)、(6. (3):6 竜-別 1-97~102)】

i. 原子炉補機冷却水サージタンク他

設計飛来物である鋼製材及び鋼製パイプが原子炉建屋の開口部建具である扉を貫通して原子炉補機冷却水サージタンク他に衝突し安全機能を損なうことを考慮して、竜巻飛来物防護対策設備による竜巻防護対策を行うことにより、設計飛来物の原子炉補機冷却水サージタンク他への衝突を防止し、原子炉補機冷却水サージタンク他の構造健全性が維持され安全機能を損なうことのない設計とする。

【別添 1(6. (3):6 竜-別 1-97, 102, 103)】

j. 配管・弁（主蒸気管室内）

設計飛来物である鋼製材及び鋼製パイプが原子炉建屋の開口部建具であるブローアウトパネル又は開口部である換気口周りのガラリを貫通して配管・弁（主蒸気管室内）に衝突し安全機能を損なうことを考慮して、竜巻飛来物防護対策設備による竜巻防護対策を行うことにより、設計飛来物の配管・弁（主蒸気管室内）への衝突を防止し、配管・弁（主蒸気管室内）の構造健全性が維持され安全機能を損なうことのない設計とする。

【別添 1(6. (3):6 竜-別 1-97, 102)】

k. 制御用空気系統配管

設計飛来物である鋼製材及び鋼製パイプが原子炉補助建屋の開口部建具である扉を貫通して制御用空気系統配管に衝突し安全機能を損なうことを考慮して、竜巻飛来物防護対策設備による竜巻防護対策を行うことにより、設計飛来物の制御用空気系統配管への衝突を防止し、制御用空気系統配管の構造健全性が維持され安全機能を損なうことのない設計とする。

【別添 1(6. (3):6 竜-別 1-97, 102, 103)】

l. 蓄熱室加熱器

設計飛来物である鋼製材及び鋼製パイプがディーゼル発電機建屋の開口部建具である扉又は開口部である換気口周りの換気フードを貫通して蓄熱室加熱器に衝突し安全機能を損なうことを考慮して、竜巻飛来物防護対策設備による竜巻防護対

策を行うことにより、設計飛来物の蓄熱室加熱器への衝突を防止し、蓄熱室加熱器の構造健全性が維持され安全機能を損なうことのない設計とする。

【別添 1(6. (3):6 竜-別 1-97, 102, 103)】

(3) 竜巻防護施設のうち、屋外施設及び建屋内の施設で外気と繋がっている施設

a. 排気筒

排気筒は竜巻防護施設を内包する施設である原子炉建屋に内包されている部分と、原子炉建屋に内包されていない部分がある。原子炉建屋に内包されている部分については、原子炉建屋に内包されていることを考慮すると、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は作用しないため、設計竜巻による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うことのない設計とする。また、原子炉建屋に内包されていない部分については、設計飛来物である鋼製材及び鋼製パイプが衝突により貫通し構造健全性を損なうことを考慮して、補修が可能な設計とすることにより、設計基準事故時における安全機能を損なうことのない設計とする。

【別添 1(4. (4)d. :6 竜-別 1-70~73)、(6. (3):6 竜-別 1-103)、(6. (4):6 竜-別 1-105)、(6. (6):6 竜-別 1-110)】

b. 換気空調設備（アニュラス空気浄化設備、格納容器空調装置、補助建屋空調装置、試料採取室空調装置、中央制御室空調装置、電動補助給水ポンプ室換気装置、制御用空気圧縮機室換気装置、ディーゼル発電機室換気装置、安全補機開閉器室空調装置の外気と繋がるダクト・ファン・空調ユニット及び外気との境界となるダンパ・バタフライ弁）

換気空調設備が竜巻防護施設を内包する原子炉建屋等に内包されていることを考慮すると、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は作用しないため、設計竜巻による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うことのない設計とする。

【別添 1(4. (4)d. :6 竜-別 1-70~81)】

(4) 竜巻防護施設に波及的影響を及ぼし得る施設

a. 循環水ポンプ建屋、タービン建屋、電気建屋及び出入管理建屋

循環水ポンプ建屋、タービン建屋、電気建屋及び出入管理建屋は、設計竜巻の風圧力による荷重、設計竜巻による気圧差による荷重、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 1(4. (4)c. :6 竜-別 1-51, 52)】

b. 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、設計飛来物である鋼製材及び鋼製パイプの衝突により損傷することを考慮して、補修が可能な設計とする。また、設計竜巻の風圧

力による荷重及び設計竜巻による気圧差による荷重に対して、構造健全性が維持されることにより、竜巻防護施設であるディーゼル発電機に機能的影響を及ぼさず、ディーゼル発電機の安全機能を損なうことのない設計とする。

【別添 1(4. (4)d. :6 竜-別 1-79, 80)】

c. 主蒸気逃がし弁消音器

主蒸気逃がし弁消音器は、設計飛来物である鋼製材及び鋼製パイプの衝突により損傷することを考慮して、補修が可能な設計とする。また、設計竜巻の風圧力による荷重及び設計竜巻による気圧差による荷重に対して、構造健全性が維持されることにより、竜巻防護施設である主蒸気逃がし弁に機能的影響を及ぼさず、主蒸気逃がし弁の安全機能を損なうことのない設計とする。

【別添 1(4. (4)d. :6 竜-別 1-80, 81)】

d. 主蒸気安全弁排気管

主蒸気安全弁排気管は、設計飛来物である鋼製材及び鋼製パイプの衝突により損傷することを考慮して、補修が可能な設計とする。また、設計竜巻の風圧力による荷重及び設計竜巻による気圧差による荷重に対して、構造健全性が維持されることにより、竜巻防護施設である主蒸気安全弁に機能的影響を及ぼさず、主蒸気安全弁の安全機能を損なうことのない設計とする。

【別添 1(4. (4)d. :6 竜-別 1-82, 83)】

e. タービン動補助給水ポンプ排気管

タービン動補助給水ポンプ排気管は、設計飛来物である鋼製材及び鋼製パイプの衝突により損傷することを考慮して、補修が可能な設計とする。また、設計竜巻の風圧力による荷重及び設計竜巻による気圧差による荷重に対して、構造健全性が維持されることにより、竜巻防護施設であるタービン動補助給水ポンプに機能的影響を及ぼさず、タービン動補助給水ポンプの安全機能を損なうことのない設計とする。

【別添 1(4. (4)d. :6 竜-別 1-82, 83)】

f. ディーゼル発電機燃料油貯油槽ベント管

ディーゼル発電機燃料油貯油槽ベント管は、設計飛来物である鋼製材及び鋼製パイプの衝突により損傷することを考慮して、補修が可能な設計とする。また、設計竜巻の風圧力による荷重及び設計竜巻による気圧差による荷重に対して、構造健全性が維持されることにより、竜巻防護施設であるディーゼル発電機燃料油貯油槽に機能的影響を及ぼさず、ディーゼル発電機燃料油貯油槽の安全機能を損なうことのない設計とする。

【別添 1(4. (4)d. :6 竜-別 1-83, 84)】

g. 換気空調設備（蓄電池室排気装置の外気と繋がるダクト・ファン及び外気との境界となるダンパ）

換気空調設備が竜巻防護施設を内包する原子炉補助建屋に内包されていることを考慮すると、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は作用しないため、設計竜巻による気圧差による荷重に対して、構造健全性が維持されることにより、竜巻防護施設である蓄電池に機能的影響を及ぼさず、蓄電池の安全機能を損なうことのない設計とする。

【別添 1(4. (4)d. :6 竜-別 1-85, 86)】

1.8.2.1.11 竜巻随件事象に対する設計

竜巻随件事象は、過去の竜巻被害状況及び泊発電所のプラント配置から想定される以下の事象を抽出し、これらの事象が発生する場合においても、竜巻防護施設が安全機能を損なうことのない設計とする。

(1) 火災

竜巻防護施設を内包する建屋内については、設計竜巻により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性を損なう可能性のある発火性又は引火性物質を内包する機器はなく、火災防護計画により適切に管理することから、建屋内の竜巻防護施設が安全機能を損なうことはない。

建屋外については、設計竜巻により危険物タンク等に火災が発生する場合でも、外部火災防護施設の安全機能を損なうことのない設計とすることを「1.10 外部火災防護に関する基本方針」にて考慮する。

なお、建屋外の火災については、消火用水、化学消防自動車及び水槽付き消防ポンプ自動車等による消火活動を行う。

【別添 1(5. :6 竜-別 1-90)】

(2) 溢水

竜巻防護施設を内包する建屋内については、設計竜巻により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性を損なう可能性のある溢水源はないことから、建屋内の竜巻防護施設が安全機能を損なうことはない。

建屋外については、設計竜巻により屋外タンク等に溢水が発生する場合でも、溢水に対する防護対象設備の安全機能を損なうことのない設計とすることを「1.7 溢水防護に関する基本方針」にて考慮する。

【別添 1(5. :6 竜-別 1-90)】

(3) 外部電源喪失

設計竜巻と同時に発生する雷又はダウンバーストの影響により外部電源喪失が発生する場合でも、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うことのない設計とする。

い設計とする。

【別添 1(5. :6 竜-別 1-90, 91)】

1.8.2.2 手順等

- (1) 飛来物となる可能性のある物のうち、飛来時の運動エネルギー又は貫通力が設計飛来物である鋼製材よりも大きな物については、管理規定を定め、設置場所等に応じて固縛、固定、竜巻防護施設からの離隔又は撤去により飛来物とならない管理を行う手順等を整備し、的確に実施する。
- (2) 車両については入構を管理するとともに、上記(1)項に加え、竜巻襲来が予想される場合の退避又は固縛により飛来物とならない管理を行う手順等を整備し、的確に実施する。
- (3) 竜巻飛来物防護対策設備の取付け・取外し手順、飛来物発生防止対策に使用する資機材の操作手順等を整備し、的確に実施する。
- (4) 竜巻襲来が予想される場合には、原子炉建屋及びディーゼル発電機建屋の扉を閉止する、又は閉止状態を確認する手順等を整備し、的確に実施する。
- (5) 竜巻襲来が予想される場合には、換気空調系統のダンパ等を閉止する、又は閉止状態を確認する手順等を整備し、的確に実施する。
- (6) 竜巻襲来が予想される場合の原子炉建屋（燃料取扱棟）における燃料取扱作業中断については、手順等を整備し、的確に実施する。
- (7) 安全施設のうち、竜巻に対して構造健全性が維持できない場合の代替設備又は予備品の確保においては、運用等を整備し、的確に実施する。
- (8) 竜巻飛来物防護対策設備に要求される機能を維持するため、適切に保守管理を実施するとともに、必要に応じ補修を行う。
- (9) 建屋開口部付近に飛来物が衝突し、原子炉施設の安全性を損なう可能性がある発火性又は引火性物質を内包する機器の設置については、火災防護計画により適切に管理するとともに、必要に応じ防護対策を行う。
- (10) 竜巻襲来後においては、巡視点検により損傷の有無を確認する手順等を整備し、的確に実施する。
- (11) 竜巻襲来後の巡視点検により、排気筒に損傷を確認した場合には、プラントを停止して補修する手順等を整備し、的確に実施する。
- (12) 竜巻の襲来後、建屋外において火災を発見した場合、消火用水、化学消防自動車及び水槽付き消防ポンプ自動車等による消火活動を行う手順等を整備し、的確に実施する。
- (13) 竜巻に対する運用管理を確実に実施するために必要な技術的能力を維持・向上させることを目的とし、竜巻に対する運用管理に関する教育及び訓練を実施する。

【別添1(6. :6 竜-別 1-92~110)】

第 1.8.2.1 表 泊発電所における設計飛来物

飛来物の種類	砂利	鋼製パイプ	鋼製材
サイズ(m)	長さ×幅×奥行 0.04×0.04×0.04	長さ×直径 2×0.05	長さ×幅×奥行 4.2×0.3×0.2
質量(kg)	0.17	8.4	135
最大水平速度(m/s)	62	49	57
最大鉛直速度(m/s)	42	33	38

【別添 1(4.(3)a.:6 章-別 1-37, 38)】

第 1.8.2.2 表 設計竜巻から防護する施設及び竜巻対策等

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	防護施設	想定する設計飛来物	手順等
<ul style="list-style-type: none"> 原子炉補機冷却海水ポンプ 原子炉補機冷却海水ポンプ出口ストレーナ 配管・弁（原子炉補機冷却海水系統） 	<ul style="list-style-type: none"> 100m/s 	<ul style="list-style-type: none"> 飛来物となる可能性のある物（車両含む）の固縛、固定、竜巻防護施設からの離隔又は撤去 車両の入構管理 竜巻襲来が予想される場合の車両の退避又は固縛 	<ul style="list-style-type: none"> 竜巻飛来物防護対策設備 	<ul style="list-style-type: none"> 砂利 	—
<ul style="list-style-type: none"> 原子炉補機冷却水サージタンク他 配管・弁（主蒸気管室内） 			<ul style="list-style-type: none"> 施設を内包する施設 竜巻飛来物防護対策設備 	—	—
<ul style="list-style-type: none"> 制御用空気系統配管 			<ul style="list-style-type: none"> 施設を内包する施設 竜巻飛来物防護対策設備 	—	—
<ul style="list-style-type: none"> 排気筒（建屋外） 			—	<ul style="list-style-type: none"> 鋼製材 鋼製パイプ 砂利 	<ul style="list-style-type: none"> 補修
<ul style="list-style-type: none"> 蓄熱室加熱器 			<ul style="list-style-type: none"> 施設を内包する施設 竜巻飛来物防護対策設備 	—	—

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	防護施設	想定する設計飛来物	手順等
<ul style="list-style-type: none"> 使用済燃料ピット 使用済燃料ラック 	<ul style="list-style-type: none"> 100m/s 	<ul style="list-style-type: none"> 飛来物となる可能性のある物（車両含む）の固縛、固定、竜巻防護施設からの離隔又は撤去 車両の入構管理 竜巻襲来が予想される場合の車両の退避又は固縛 	<ul style="list-style-type: none"> 施設を内包する施設 	<ul style="list-style-type: none"> 鋼製材 鋼製パイプ 砂利 	—
<ul style="list-style-type: none"> 新燃料ラック 			<ul style="list-style-type: none"> 施設を内包する施設 竜巻飛来物防護対策設備 	<ul style="list-style-type: none"> 鋼製材 鋼製パイプ 砂利 	—
<ul style="list-style-type: none"> 燃料移送装置 使用済燃料ピットクレーン 			<ul style="list-style-type: none"> 施設を内包する施設 	<ul style="list-style-type: none"> 鋼製材 鋼製パイプ 砂利 	<ul style="list-style-type: none"> 竜巻襲来が予想される場合の燃料取扱作業の中断
<ul style="list-style-type: none"> 排気筒（建屋内） 換気空調設備（アニュラス空気浄化設備、格納容器空調装置、補助建屋空調装置、試料採取室空調装置、中央制御室空調装置、電動補助給水ポンプ室換気装置、制御用空気圧縮機室換気装置、ディーゼル発電機室換気装置及び安全補機開閉器室空調装置） 			<ul style="list-style-type: none"> 施設を内包する施設 	—	—

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	防護施設	想定する設計飛来物	手順等
<ul style="list-style-type: none"> 安全機能の重要度分類クラス1及びクラス2に属する施設のうち上記以外の施設 	<ul style="list-style-type: none"> 100m/s 	<ul style="list-style-type: none"> 飛来物となる可能性のある物（車両含む）の固縛、固定、竜巻防護施設からの離隔又は撤去 車両の入構管理 竜巻襲来が予想される場合の車両の退避又は固縛 	<ul style="list-style-type: none"> 施設を内包する施設 	—	<ul style="list-style-type: none"> 竜巻襲来が予想される場合の原子炉建屋及びディーゼル発電機建屋の扉閉止又は閉止状態確認
<ul style="list-style-type: none"> クラス3に属する施設 			—	—	<ul style="list-style-type: none"> 代替設備、予備品の確保及び補修、取替等

【別添1(2.:6竜-別1-2~4,7)、(4.:6竜-別1-34~50,53~79)、(6.:6竜-別1-95~110)】

第 1.8.2.3 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

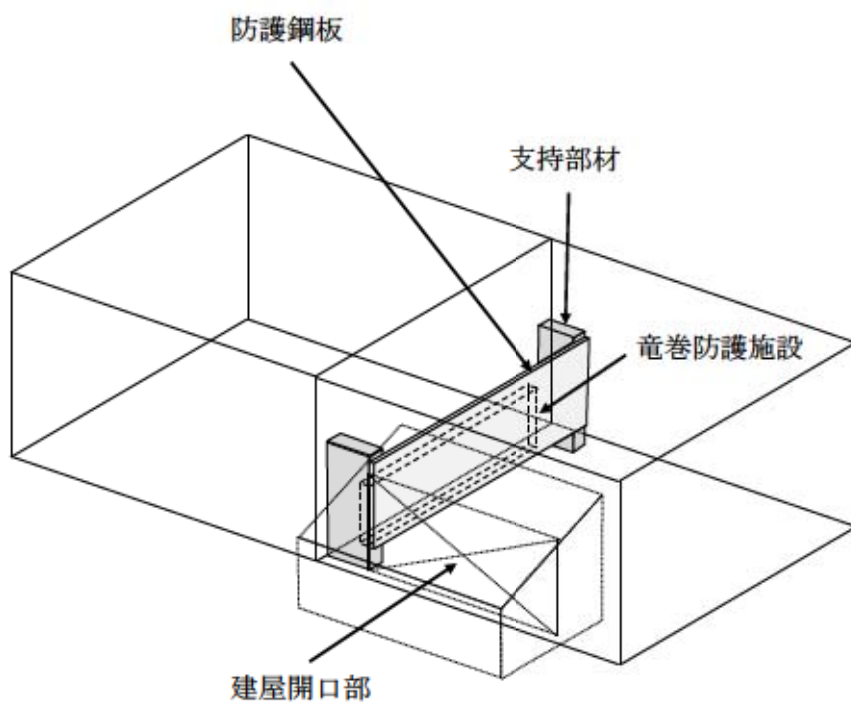
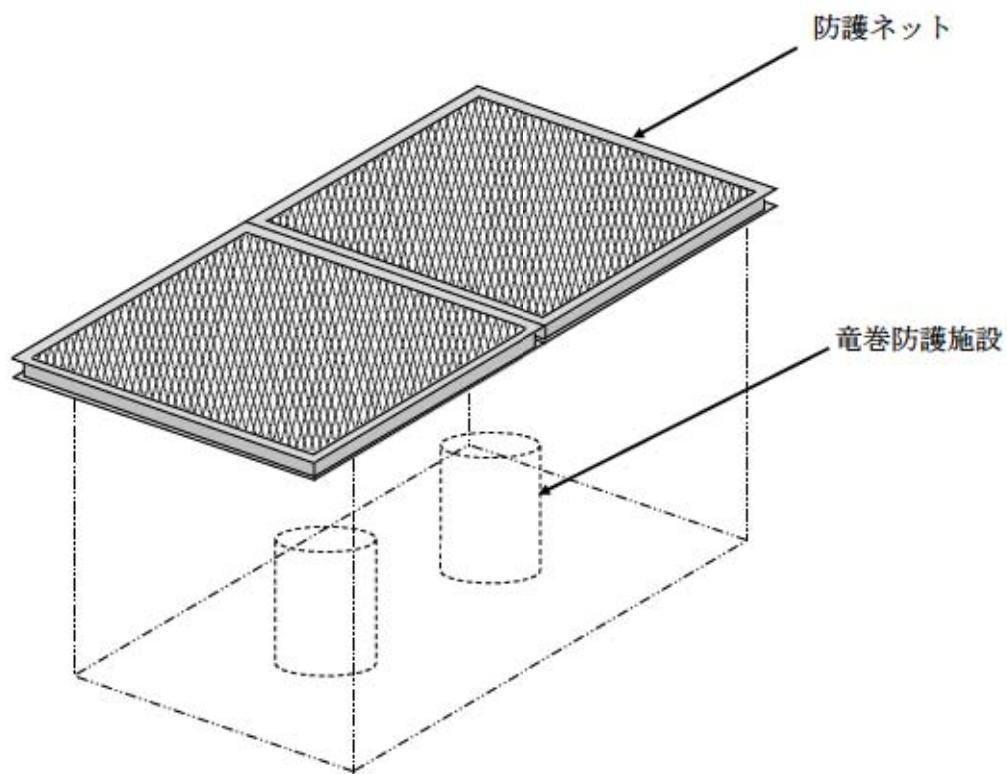
竜巻防護施設に波及的影響を及ぼし得る施設	竜巻の最大風速条件	飛来物発生防止対策	防護施設	想定する設計飛来物	手順等
<ul style="list-style-type: none"> ・ 循環水ポンプ建屋 ・ タービン建屋 ・ 電気建屋 ・ 出入管理建屋 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 100m/s 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 飛来物となる可能性のある物（車両含む）の固縛、固定、竜巻防護施設からの離隔又は撤去 ・ 車両の入構管理 ・ 竜巻襲来が予想される場合の車両の退避又は固縛 	—	<ul style="list-style-type: none"> ・ 鋼製材 ・ 鋼製パイプ ・ 砂利 	—
<ul style="list-style-type: none"> ・ ディーゼル発電機排気消音器 ・ 主蒸気逃がし弁消音器 ・ 主蒸気安全弁排気管 ・ タービン動補助給水ポンプ排気管 ・ ディーゼル発電機燃料油貯油槽ベント管 			—	<ul style="list-style-type: none"> ・ 鋼製材 ・ 鋼製パイプ ・ 砂利 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 補修
<ul style="list-style-type: none"> ・ 換気空調設備（蓄電池室排気装置） 			<ul style="list-style-type: none"> ・ 施設を内包する施設 	—	—

【別添 1(2. :6 竜-別 1-4, 5, 7)、(4. :6 竜-別 1-51, 52, 79~86)、(6. :6 竜-別 1-92~95, 104~109)】

第 1.8.2.4 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	防護施設	想定する設計飛来物	手順等
<ul style="list-style-type: none"> ・ 原子炉建屋（外部遮へい建屋、周辺補機棟、燃料取扱棟） ・ 原子炉補助建屋 ・ ディーゼル発電機建屋 ・ 燃料油貯油槽 ・ 取水ピットポンプ室 ・ スクリーン室 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 100m/s 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 飛来物となる可能性のある物（車両含む）の固縛、固定、竜巻防護施設からの離隔又は撤去 ・ 車両の入構管理 ・ 竜巻襲来が予想される場合の車両の退避又は固縛 	<p style="text-align: center;">—</p>	<ul style="list-style-type: none"> ・ 鋼製材 ・ 鋼製パイプ ・ 砂利 	<p style="text-align: center;">—</p>

【別添 1(2. :6 竜-別 1-5~7)、(4. :6 竜-別 1-34~50)、(6. :6 竜-別 1-92~95, 105~109)】



第 1.8.2.1 図 竜巻飛来物防護対策設備概念図

【別添 1(6. (3)a. :6 竜-別 1-96~103)】

(3) 適合性説明

第六条 外部からの衝撃による損傷の防止

- 1 安全施設は、想定される自然現象（地震及び津波を除く。次項において同じ。）が発生した場合においても安全機能を損なわないものでなければならない。
- 2 重要安全施設は、当該重要安全施設に大きな影響を及ぼすおそれがあると想定される自然現象により当該重要安全施設に作用する衝撃及び設計基準事故時に生ずる応力を適切に考慮したものでなければならない。
- 3 安全施設は、工場等内又はその周辺において想定される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

第1項について

安全施設は、発電所敷地で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うことのない設計とする。ここで、発電所敷地で想定される自然現象に対して、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。また、発電所敷地で想定される自然現象又はその組合せに遭遇した場合において、自然現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を考慮する。

自然現象を網羅的に抽出するために国内外の基準等や文献^{(16)~(28)}に基づき事象を収集し、海外の選定基準⁽¹⁸⁾も考慮の上、敷地又はその周辺の自然環境を基に、発電所敷地で想定される自然現象を選定する。

発電所敷地で想定される自然現象は、洪水、風（台風）、竜巻、凍結、降水、積雪、落雷、地滑り、火山の影響、生物学的事象、森林火災又は高潮である。また、これらの自然現象による影響は、関連して発生する可能性がある自然現象及び敷地周辺地域で得られる過去の記録等を考慮し決定する。

以下にこれら自然現象に対する設計方針を示す。

(3) 竜巻

安全施設は、最大風速 100m/s の竜巻が発生した場合においても、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合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。

【別添 1(3.(5): 6 竜-別 1-32, 33)、(6.: 6 竜-別 1-92~105)】

a. 飛来物の発生防止対策

竜巻により発電所敷地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。

- ・ 飛来物となり竜巻防護施設に影響を及ぼす可能性のある物の固縛、固定、竜巻防護施設からの隔離又は撤去を行う。
- ・ 車両については上記に加え、車両の入構管理、竜巻襲来が予想される場合の車両の退避又は固縛を行う。

【別添1 (6. (2):6 竜-別 1-92~95)、(6. (4):6 竜-別 1-105)、
(6. (5):6 竜-別 1-106~109)】

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物が飛来し、安全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うことのない設計とする。
- ・ 竜巻防護施設の構造健全性が維持できない場合には、代替設備又は予備品の確保、損傷した場合の取替又は補修が可能な設計とすることにより、安全機能を損なうことのない設計とする。

竜巻の発生に伴い、雹の発生が考えられるが、雹による影響は竜巻防護設計にて想定している設計飛来物の影響に包絡される。

さらに、竜巻の発生に伴い、雷の発生も考えられるが、雷は電氣的影響を及ぼす一方、竜巻は機械的影響を及ぼすものであり、竜巻と雷が同時に発生するとしても、個別に考えられる影響と変わらないことから、各々の事象に対して安全施設が安全機能を損なうことのない設計とする。

【別添1(6. (3):6 竜-別 1-95~104)、(6. (4):6 竜-別 1-105) 、(6. (6):6 竜-別 1-110)】

1.13 参考文献

- (1) 「実用発電用原子炉施設への航空機落下確率に対する評価基準について」
総合資源エネルギー調査会 原子力安全・保安部会 原子炉安全小委員会, 平成 14 年 7 月 22 日
- (2) 「静的地震力の見直し(建築編)に関する調査報告書(概要)」(社)日本電気協会 電気技術調査委員会原子力発電耐震設計特別調査委員会建築部会 平成 6 年 3 月
- (3) 「原子力発電所の火災防護指針 JEAG4607-2010」
(社)日本電気協会 2010
- (4) 「電気盤内機器の防火対策実証試験(その1)」
MHI-NES-1061, 三菱重工業, 平成 25 年 5 月
- (5) 「電気盤内機器の防火対策実証試験(その2)」
MHI-NES-1062, 三菱重工業, 平成 25 年 5 月
- (6) 「原子力プラント安全系監視操作システム火災防護実証試験報告書」
JEJP-3101-6024, 三菱電機, 平成 28 年 1 月
- (7) 「難燃性制御・計装ケーブルのトレイ内分離性実証試験」
MHI-NES-1058, 三菱重工業, 平成 25 年 5 月
- (8) 「原子力プラント常用系監視操作システム火災防護実証試験報告書」
JEJS-H3AM89, 三菱電機, 平成 29 年 3 月
- (9) 「雷雨とメソ気象」大野久雄 東京堂出版 2001 年
- (10) 「一般気象学」小倉義光 東京大学出版会 1984 年
- (11) 「広域的な火山防災対策に係る検討会(第3回)(資料2)」平成 24 年
- (12) 「シラスコンクリートの特徴とその実用化の現状」 武若耕司, コンクリート工学,
vol. 42, 2004
- (13) 「火山環境における金属材料の腐食」出雲茂人, 末吉秀一他, 防食技術 Vol. 39, 1990
- (14) 「建築火災のメカニズムと火災安全設計」
原田和典 財団法人 日本建築センター 平成 19 年
- (15) 「石油コンビナートの防災アセスメント指針」
消防庁特殊災害室, 平成 25 年 3 月
- (16) Specific Safety Guide(SSG-3) "Development and Application of Level 1 Probabilistic Safety Assessment for Nuclear Power Plants" IAEA, April 2010
- (17) NUREG/CR-2300 "PRA Procedures Guide", NRC, January 1983
- (18) ASME/ANS RA-Sa-2009 "Addenda to ASME/ANS RA-S-2008 Standard for Level 1/Large Early Release Frequency Probabilistic Risk Assessment for Nuclear Power Plant Applications"
- (19) DIVERSE AND FLEXIBLE COPING STRATEGIES(FLEX) IMPLEMENTATION GUIDE (NEI-12-06 August 2012)

- (20) 「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の解釈」
(制定: 平成 25 年 6 月 19 日)
- (21) 「実用発電用原子炉及びその附属施設の技術基準に関する規則の解釈」 (制定: 平成 25 年 6 月 19 日)
- (22) 「日本の自然災害」国会資料編纂会 1998 年
- (23) B. 5. b Phase 2 & 3 Submittal Guideline
(NEI-06-12 December 2006) -2011.5 NRC 公表
- (24) Safety Requirements No. NS-R-3
“Site Evaluation for Nuclear Installations”, IAEA, November 2003
- (25) NUREG -1407
“Procedural and Submittal Guidance for the Individual Plant Examination of External Events (IPEEE) for Severe Accident Vulnerabilities”, NRC, June 1991
- (26) 「産業災害全史」
日外アソシエーツ, 2010 年 1 月
- (27) 「日本災害史辞典 1868-2009」
日外アソシエーツ, 2010 年 9 月
- (28) 「航空機落下事故に関するデータ」
原子力規制委員会, 平成 28 年 6 月

1.3 気象等

9. 竜巻

9.1 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日原規技発第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1(3.(1):6竜-別1-9)】

9.1.1 竜巻検討地域の設定

泊発電所が立地する地域と、竜巻発生に関する気象条件の類似性の観点及び局所的な地域性の観点から検討を行い、竜巻検討地域を設定する。

(1) 竜巻総観場の発生数に関する相関係数を用いた類似性の抽出

気象庁の予報区分図を基に国内全域を16に分類した地域区分ごとの竜巻が発生した際の気象条件(総観場)の出現頻度を整理したのち、泊発電所が立地する「北海道日本海側」と他の地域区分間の総観場出現頻度に関する相関係数から2つの地域区分間の総観場出現に関する関連性を評価し、泊発電所と類似の地域を抽出する。第9.1.1表に地域区分ごとの総観場の集計結果を、また、第9.1.2表に北海道日本海側と他の地域区分との間の各総観場の出現頻度に関する相関係数を示す。求めた相関係数については無相関検定を行い、有意水準1%で無相関について確認した。

評価の結果、「北海道日本海側」と相関が認められた地域区分は、「北海道太平洋側」、「東北日本海側」、「北陸地方」、「近畿日本海側」及び「山陰地方」となった。

【別添1(3.(2)a(a):6竜-別1-9~12)】

(2) 抽出した地域を対象とした竜巻の発生頻度の分析

北海道日本海側と相関が認められた地域区分のうち、北海道太平洋側の襟裳岬から東側の海岸線及び陸奥湾の海岸線においては、竜巻がほとんど発生していない。このため、この地域を竜巻検討地域に含めた場合には、ハザード曲線評価において、竜巻発生個数の増加に比べリスク評価対象面積の増加の割合が大きくなり、ハザードが過小評価されることになるため、この地域を竜巻検討地域から除く。これにより、北海道から本州の日本海側及び北海道太平洋側の襟裳岬以西の海岸線を竜巻検討地域の候補地とする。第9.1.3表に北海道太平洋側の襟裳岬から東側及び陸奥湾から竜飛岬にかけての海岸線における竜巻発生数を示す。

【別添1(3.(2)a(b):6竜-別1-13)】

(3) 集中地域における竜巻発生頻度の確認

泊発電所は、第 9.1.1 図に示すように、独立行政法人原子力安全基盤機構が東京工芸大学に委託した研究の成果「竜巻による原子力施設への影響に関する調査研究」（以下「東京工芸大学委託成果」という。）⁽¹⁾に記載のある竜巻集中地域に位置していることから、この地域の竜巻の年発生頻度を、(2)で設定した竜巻検討地域候補地の年発生頻度と比較する。竜巻集中地域と竜巻検討地域候補地それぞれの竜巻発生頻度を第 9.1.4 表に示す。両地域の竜巻発生頻度はほぼ同一と見なせることから、竜巻発生個数を多く確保できる竜巻検討地域候補地の方が、竜巻検討地域に適していると判断できる。

【別添 1(3. (2)b:6 竜-別 1-13~14)】

(4) 竜巻検討地域

気象条件の類似性の観点と局所的な地域性の観点から検討した結果、竜巻検討地域は、北海道から本州の日本海側及び北海道の襟裳岬以西の海岸に沿った海側 5km と陸側 5km を竜巻検討地域に設定する（面積 38,895km²）。第 9.1.2 図に竜巻検討地域を示す。

【別添 1(3. (2)c:6 竜-別 1-14~15)】

9.1.2 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、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 (V_{B1}) の設定に当たっては、現時点で竜巻検討地域で過去に発生した竜巻の最大風速を十分な信頼性のあるデータ等に基づいて評価できるだけの知見を有していないことから、日本で過去に発生した竜巻の観測データを用いて設定する。なお、今後も地域特性に関する検討、新たな知見の収集やデータの拡充等に取り組み、より信頼性のある評価が可能ないように努力する。

日本で過去（1961 年から 2012 年 6 月）に発生した最大の竜巻は、F3 スケールである。F3 スケールにおける風速は、70m/s~92m/s であることから、過去に発生した最大の竜巻の最大風速 V_{B1} を 92m/s とする。第 9.1.5 表に日本における F3 スケールの竜巻一覧を示す。

【別添 1(3. (3)a. :6 竜-別 1-16)】

(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、東京工芸大学委託成果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及び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) での評価及び竜巻検討地域を海岸線に沿って 1km 範囲ごとに細分化した評価の 2 通りで算定し、そのうち大きな風速を設定する。

【別添 1(3. (3)b. : 6 竜-別 1-16~17)】

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 1(3. (3)c. : 6 竜-別 1-18)】

b. 竜巻の発生頻度の分析

気象庁の「竜巻等の突風データベース」⁽²⁾ をもとに、1961 年から 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。第 9.1.3 図に気象庁の「竜巻等の突風データベース」による 1961 年～2012 年までの竜巻年別発生確認数を示す。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 F0 及び F スケール不明竜巻に対しては、観測体制が強化された 2007 年以降の年間発生数や標準偏差を用いる。

(b) 被害が比較的軽微な F1 竜巻に対しては、観測体制が整備された 1991 年以降の年間発生数や標準偏差を用いる。

(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 F2 竜巻は、観測データが整備された 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 スケール不明竜巻は、被害が少ない F0 竜巻と見なす。

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。

上記の考え方に基づく各年代別の竜巻発生数の分析結果を第 9.1.6 表に示す。

また、同表の分析結果に基づき竜巻最大風速のハザード曲線の算出に使用する竜巻の発生数を第 9.1.7 表に示す。

なお、分析結果は F スケール不明の海上竜巻の取扱いにより、観測実績に対して保守性を高めた評価としている。

【別添 1(3. (3)d. : 6 竜-別 1-18~19)】

c. 年発生数の確率密度分布の設定

ガイドにて、 V_{B2} 算定の参考になるとされている東京工芸大学委託成果によれば、Wen and Chu⁽³⁾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分布はポアソン分布若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稀な現象の場合に有用な分布である。一方、ポリヤ分布は、発生状況が必ずしも独立でない稀現象（ある現象が生ずるのは稀であるが、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。

なお、国内を対象とした竜巻の年発生数の分布の適合性に関する検討結果は、東京工芸大学委託成果に示されており、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。

今回、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結果を第9.1.4図に示す。同図より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。

以上より、ハザード曲線の評価に当たって使用する竜巻の年発生数の確率密度分布は、ポリヤ分布を採用する。

【別添1(3.(3)d. : 6竜-別1-20)】

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東京工芸大学委託成果を参照し、対数正規分布に従うものとする。第9.1.5図～第9.1.7図にそれぞれ風速、被害幅、被害長さの確率密度分布と超過確率を示す。

なお、擬似的な竜巻の作成に伴う被害幅又は被害長さの情報が無い竜巻には、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。その結果を第9.1.8表に示す。

【別添1(3.(3)e. : 6竜-別1-21～22)】

e. 竜巻影響エリアの設定

竜巻影響エリアは、保守的に竜巻防護施設を包絡する円形エリアを竜巻影響エリアの面積及び評価対象施設を包絡する円形エリア（直径425m、面積約142,000m²）として設定する。第9.1.9表に評価対象施設の面積、第9.1.8図に評価対象施設を包絡する竜巻影響エリアを示す。

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1(3.(3)f. : 6竜-別1-22~23)】

f. ハザード曲線の設定

東京工芸大学委託成果によれば、Wen and 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ている。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分布は、(a)式に示すポリヤ分布の適合性が良いとされている。本ハザード曲線の算定においても、東京工芸大学委託成果にならって適合性の良いポリヤ分布により設定する。

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

ここで、Nは竜巻の年発生数、vは竜巻の年平均発生数、Tは年数である。βは分布パラメータであり、式(b)で示される。

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

ここで、σは竜巻の年発生数の標準偏差である。

Dを対象とする構造物が風速V₀以上の竜巻風速に遭遇する事象と定義し、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V₀以上となる確率をR(V₀)とした時、T年以内にいずれかの竜巻に遭遇し、かつ竜巻風速がV₀以上となる確率は、以下の式(c)となる。

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

このR(V₀)は、竜巻影響評価の対象地域の面積をA₀（つまり竜巻検討地域の面積=38,895km²）、1つの竜巻に遭遇し、竜巻風速がV₀以上となる面積をDA(V₀)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(V₀)]はDA(V₀)の期待値を意味する。

本評価では、以下のようにして、 $DA(V_0)$ の期待値を算出し、式(d)により、 $R(V_0)$ を推定して、式(c)により、 $P_{V_0,T}(D)$ を求める。風速を V 、被害幅を w 、被害長さを l 、移動方向を α 、及び構造物の寸法を A, B とし、 $f(V, w, l)$ 等の同時確率密度関数を用いると、 $DA(V_0)$ の期待値は式(e)で示される (Garson et al. ⁽⁴⁾)。

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

ここで、式(e)の右辺第1項は、竜巻の被害幅と被害長さの積、つまり被害面積を表しており、いわゆる点構造物に対する被害、第2項及び第3項は、被害長さ・被害幅と構造物の寸法の積、つまり構造物の被害面積を示す。第4項は構造物面積 AB に依存する項を示す。

また、 $H(\alpha)$ 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。e項にて竜巻影響エリアを円形で設定しているため、 H, G ともに竜巻影響エリアの直径425mで一定（竜巻の移動方向に依存しない）となる。 S は第9.1.8図に示す竜巻影響エリアの面積（直径425mの円の面積：約142,000 m^2 ）を表す。円の直径を L とした場合の計算式は式(f)で示される。

$$\begin{aligned}
 E[DA(V_0)] &= \int_0^\infty \int_0^\infty \int_0^\infty W(V_0) l f(V, w, l) dV dw dl \\
 &+ L \int_0^\infty \int_0^\infty l f(V, l) dV dl + L \int_0^\infty \int_0^\infty W(V_0) f(V, w) dV dw + S \int_{V_0}^\infty f(V) dV
 \end{aligned} \tag{f}$$

なお、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。

また、 $W(V_0)$ は、竜巻の被害幅のうち風速が V_0 以上となる幅であり、式(g)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ことが考慮されている (Garson et al. ⁽⁴⁾、Garson et al. ⁽⁵⁾)。

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

ここで、係数の1.6について、既往の研究で例えば0.5や1.0等の値も提案されている。ガイドにて参照しているGarson et al.⁽⁵⁾では、観測値が不十分であるため1.6を用いることが推奨されており、本検討でも1.6を用いる。また、泊発電所の竜巻影響評価では、ランキン渦モデルによる竜巻風速分布に基づいて設計竜巻の特性値等を設定している。ランキン渦モデルは高さ方向によって風速及び気圧が変化しないため、地表から上空まで式(g)を適用できる。なお、式(g)において係数を1.0とした場合がランキン渦モデルに該当する。

また、 V_{min} は、Gale intensity Velocityと呼ばれ、被害が発生し始める風速に位置付けられる。米国気象局NWS(National Weather Service)では、34~47ノット(17.5~24.2m/s)とされている。なお、日本の気象庁が使用している風力階級では、風力8が疾強風(gale: 17.2~20.7m/s)、風力9は大強風(strong gale: 20.8~24.4m/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。

以上を参考に、 $V_{min}=25\text{m/s}$ とする。なお、この値はF0(17~32m/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} における竜巻風速 V_{B2} を求めると、59m/sとなる。第9.1.9図に海岸線から陸側及び海側それぞれ5km全域における竜巻最大風速のハザード曲線を示す。

【別添1(3.(3)g.: 6竜-別1-24~25)】

g. 1km範囲ごとに細分化した評価

1km範囲ごとの評価は、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、竜巻検討地域外で発生して竜巻検討地域内に移動した竜巻である通過竜巻も発生数としてカウントしている。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算定したハザード曲線より、年超過確率 10^{-5} における竜巻風速 V_{B2} を求めると、海側0~1kmを対象とした場合の65m/sが最大となる。第9.1.10図に1km範囲ごとに細分化した評価における竜巻最大風速のハザード曲線を示す。

【別添1(3.(3)h.: 6竜-別1-26)】

h. 竜巻最大風速のハザード曲線による最大風速(V_{B2})

海側及び陸側それぞれ5km全域の評価と、1km範囲ごとの評価を比較して、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、65m/sとする。第9.1.11図に海岸線から陸側及び海側それぞれ5km全域における竜巻最大風速のハザード曲線と1km範囲ごとに細分化した評価における竜巻最大風速のハザード曲線のうち、最も風速が大きくなる海側0~1kmのハザード曲線を示す。

【別添1(3.(3)i.: 6竜-別1-27)】

(3) 基準竜巻の最大風速

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 $V_{B2}=65\text{m/s}$ より、泊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1(3.(3)j. : 6竜-別1-28)】

9.1.3 設計竜巻の最大風速の設定

泊発電所が立地する地形の特性として、周辺の地形や竜巻の移動方向を考慮して、基準竜巻の最大風速の割り増しを検討し、設計竜巻の最大風速を設定する。

【別添1(3.(4) : P30)】

(1) 泊発電所周辺の地形

泊発電所敷地の形状は、おおむね半円状であり、敷地前面（北西～南西方向）は日本海に面し、背後は積丹半島中央部の山嶺に続く標高40mから130mの丘陵地である。泊発電所周辺の地形図を第9.1.12図に示す。

竜巻の渦は地表面粗度の影響を受けやすい。力学的な知見からは、風洞を用いた竜巻状流れ場の可視化実験（松井・田村⁽⁶⁾）等において、旋回流のパラメータの一つであるスワール比（上昇流の運動量に対する角運動量の比）に応じて、地表面粗度が旋回流速度の低下に影響を与えることが分かっている。

最近の知見として、ラージ・エディ・シミュレーション（LES）による非定常乱流解析（Lewellen, D. C., and Lewellen W. S.⁽⁷⁾）で得られたスワール比に依存した竜巻の渦構造に関する知見が妥当であることが実際の竜巻近くで行った観測結果から示唆されている（Karstens et al.⁽⁸⁾）。LESを用いた非定常乱流場の数値解析結果では、スワール比が下がるのと同様の効果として、地表面粗度が旋回流の接線風速を弱める効果を有することが示唆されている（Natarajan and Hangan⁽⁹⁾）。

したがって、竜巻が地表面粗度の大きい丘陵地を超えてくることは考えにくく、丘陵地以外は平坦な地形であることから、泊発電所が立地する地形では、竜巻が発生したとしても竜巻が増幅することを考慮する必要はないと考えられる。

一方、斜面における竜巻の増幅については、下り斜面で増幅するという知見と、上り斜面で増幅するという知見の両方が存在しており、現時点で、地形効果による竜巻の増幅を十分に評価できるだけの信頼性を有する知見は存在しない。泊発電所の場合、背後に急峻な傾斜地をもつ地形に立地しており、山側から進入する竜巻については、Forbes⁽¹⁰⁾が増幅している下り斜面に該当する。

そこで、敷地東側の山側から竜巻が泊発電所に進入することについては、地表面粗度が大きい丘陵地を越えてくることになるので考えにくいものの、下り斜面で増幅する可能性があることから、竜巻の移動方向について分析を行う。

【別添1(3.(4)a : P30) , (3.(4)b : P30, 31)】

(2) 泊発電所の竜巻検討地域における竜巻の移動方向

泊発電所の竜巻検討地域における過去の発生竜巻について、移動方向の傾向を整理した。

観測されている発生竜巻の実績は全 206 個であり、そのうち 143 個の竜巻について移動方向が判明しており、これらを整理した結果を第 9.1.13 図に示す。

その結果、東側方向に向けて移動する竜巻が大半を占めており、北東～南東までの範囲に 121 個が集中している。これは全個数のおよそ 85%である。

特に、泊発電所が位置する北海道後志支庁沿岸部の発生竜巻については、すべて東側（北東～南東までの範囲）方向への移動が確認されている。

これらを踏まえると、泊発電所における竜巻の到来方向の傾向としては、海側から進入してくる可能性が高く、山側から進入してくる可能性は低いと考えられる。

【別添 1(3. (4)c : P31, 32)】

(3) 設計竜巻の最大風速

泊発電所では竜巻は地形が平坦な海側から発電所敷地に進入してくる可能性が高く、発電所を含む敷地も平坦なため、地形効果による竜巻風速の増幅を考慮する必要はないと考えられることから、基準竜巻の最大風速に対する割り増しは行わず、設計竜巻の最大風速 V_0 は 92m/s とする。

なお、今後も継続的に新たな知見等の収集に取組み、必要な事項については適切に反映を行う。

【別添 1(3. (4)d : P32)】

第9.1.1表 地域区分毎の総観場の集計

地域区分	台風	南岸低気圧	日本海低気圧	二つ玉低気圧	気圧の谷	局地性低気圧	東シナ海低気圧	その他低気圧	温暖前線	寒冷前線	閉塞前線	停滞前線	不安定線	梅雨前線	太平洋高気圧	その他高気圧	季節風	雷雨(熱帯)	雷雨(熱帯を除く)	寒気の移流	暖気の移流	計	藤田スケールの最大	
北海道日本海側	0	0	3	0	29	1	0	0	1	7	2	0	0	0	0	0	1	1	0	34	3	82	F2	
北海道オホーツク海側	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	2	F3
北海道太平洋側	0	0	2	0	12	2	0	0	1	13	2	0	2	0	0	1	0	1	1	7	4	48	F2	
東北日本海側	0	0	14	0	35	7	0	4	2	28	0	5	0	0	1	0	1	3	0	17	3	120	(F2)	
東北太平洋側	2	0	1	1	2	2	0	1	0	10	1	1	2	1	0	1	0	3	1	8	4	41	(F2)	
関東甲信地方	49	16	11	0	17	15	0	8	7	22	2	14	2	5	0	0	1	6	7	30	22	243	F3	
北陸地方	0	0	12	1	27	3	0	2	0	27	0	3	4	0	0	0	8	0	2	82	2	173	F2	
東海地方	27	4	11	9	7	3	0	1	7	10	2	11	1	3	0	0	1	0	0	5	10	112	F3	
近畿日本海側	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	7	1	10	F0	
近畿太平洋側	3	4	5	0	1	1	0	0	0	6	0	3	0	1	0	0	1	1	0	3	3	34	F1~F2	
山陽地方	0	0	5	0	5	5	0	1	0	9	0	0	0	0	0	0	1	1	1	28	7	63	F1	
山陰地方	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	2	0	0	0	0	0	0	2	8	F2	
四国地方	18	3	9	2	2	0	0	4	1	1	2	10	0	3	1	1	0	0	0	9	26	92	F2	
九州北部地方	11	0	1	0	8	18	0	8	2	22	0	10	2	7	2	0	1	5	1	8	13	119	F2	
九州南部地方	45	3	1	0	4	6	15	11	4	22	0	7	5	3	2	0	0	1	0	1	22	152	F2~F3	
沖縄地方	20	0	0	0	39	2	13	6	1	26	0	22	0	10	17	8	0	5	0	2	30	201	F2	
全地域	175	30	75	13	188	65	28	46	26	204	11	89	18	35	25	11	15	27	13	250	155	1500	F3	

(注) 総観場の分類は、気象庁(出典:気象庁HP 竜巻等の突風データベース(2013年9月))に従った。

全地域の出現が10個未満の総観場は集計から除外し、35種類の総観場の中から21種類を対象とした。

【別添1(3. (2)a. (a) : 6竜-別1-12)】

第9.1.2表 北海道日本海側と他地域区分間の相関係数一覧

地域区分	北海道日本海側との相関	
	相関係数	有意水準1% 相関の有○、無×
北海道日本海側	1.00	-
北海道オホーツク海側	0.04	×
北海道太平洋側	0.73	○
東北日本海側	0.75	○
東北太平洋側	0.54	×
関東甲信地方	0.47	×
北陸地方	0.90	○
東海地方	0.07	×
近畿日本海側	0.70	○
近畿太平洋側	0.20	×
山陰地方	0.81	○
山陽地方	-0.17	×
四国地方	0.10	×
九州北部地方	0.22	×
九州南部地方	-0.10	×
沖縄地方	0.32	×

【別添1(3.(2)a.(b) : 6竜-別1-12)】

第9.1.3表 襟裳岬から東側の海岸線等における竜巻発生数

- ・襟裳岬から知床半島までの海岸線における竜巻の発生実績

番号	発生日時	発生場所	藤田スケール
1	1969/10/11 09:25	北海道根室支庁(海上)	不明

- ・竜飛岬までの陸奥湾西側海岸線における竜巻の発生実績

番号	発生日時	発生場所	藤田スケール
1	1966/10/05 16:02	青森県 青森市	—

※詳細な発生場所データがないことから、海岸10km範囲での発生かどうか不明

(出典：気象庁 HP 竜巻等の突風データベース (2013年9月))

【別添1(3.(3)a. : 6竜-別1-13)】

第9.1.4表 竜巻集中地域及び竜巻検討地域候補地の竜巻発生頻度の比較

	対象面積(km ²)	竜巻発生個数(個) (観測期間51.5年)	発生頻度(個/km ² /年)
竜巻集中地域	3,850	19	9.6×10^{-5}
竜巻検討地域候補地	38,895	206	1.1×10^{-4}

【別添1(3.(3)a. : 6竜-別1-14)】

第9.1.5表 F3の竜巻発生リスト (1961年～2012年6月)

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

【別添1(3.(3)a. : 6竜-別1-16)】

第9.1.6表 竜巻発生数の分析結果

竜巻検討地域 (沿岸±5km)	発生数の統計	小計	竜巻スケール				不明		総数 含む不明
			F0	F1	F2	F3	陸上	海上	
1961～ 2012/6 (51.5年間)	期間内総数	90	30	47	13	0	3	113	206
	平均値 (年)	1.748	0.583	0.913	0.252	0	0.058	2.194	4.000
	標準偏差 (年)	2.526	2.003	1.020	0.522	0	0.309	5.862	7.687
1991～ 2012/6 (21.5年間)	期間内総数	60	30	27	3	0	3	112	175
	平均値 (年)	2.791	1.395	1.256	0.140	0	0.140	5.209	8.140
	標準偏差 (年)	3.467	2.956	1.124	0.356	0	0.473	8.294	10.683
2007～ 2012/6 (5.5年間)	期間内総数	32	26	6	0	0	0	93	125
	平均値 (年)	5.818	4.727	1.091	0.000	0	0	16.909	22.727
	標準偏差 (年)	6.087	4.814	1.337	0.000	0	0	10.661	14.700
疑似 51.5年間 (陸上竜巻)	期間内総数	322	244	65	13	0	0	871	1193
	平均値 (年)	6.236	4.727	1.256	0.252	0	0	16.909	23.145
	標準偏差 (年)	4.970	4.814	1.124	0.522	0	0	10.661	11.762
疑似 51.5年間 (全竜巻)	期間内総数	1195	905	241	49	0	0	0	1195
	平均値 (年)	23.102	17.514	4.653	0.935	0	0	0	23.102
	標準偏差 (年)	9.567	9.265	2.163	1.004	0	0	0	9.567

注1：切り上げの関係で総計数が一致していない箇所がある。

注2：色塗り部分については、竜巻発生頻度の分析に用いるデータを示している。

【別添1(3.(3)d. : 6竜-別1-19)】

第9.1.7表 分析結果に基づいて整理した竜巻の発生数

疑似 51.5年間 (全竜巻)	統計	F0	F1	F2	F3	F不明	小計
	期間内総数	905	241	49	0	0	1195
	平均値(年)	17.573	4.680	0.951	0.000	0.000	23.204
	標準偏差(年)	9.265	2.163	1.004	0.000	0.000	9.567

【別添1(3.(3)d. : 6竜-別1-19)】

第9.1.8表 竜巻風速、被害幅及び被害長さの相関係数

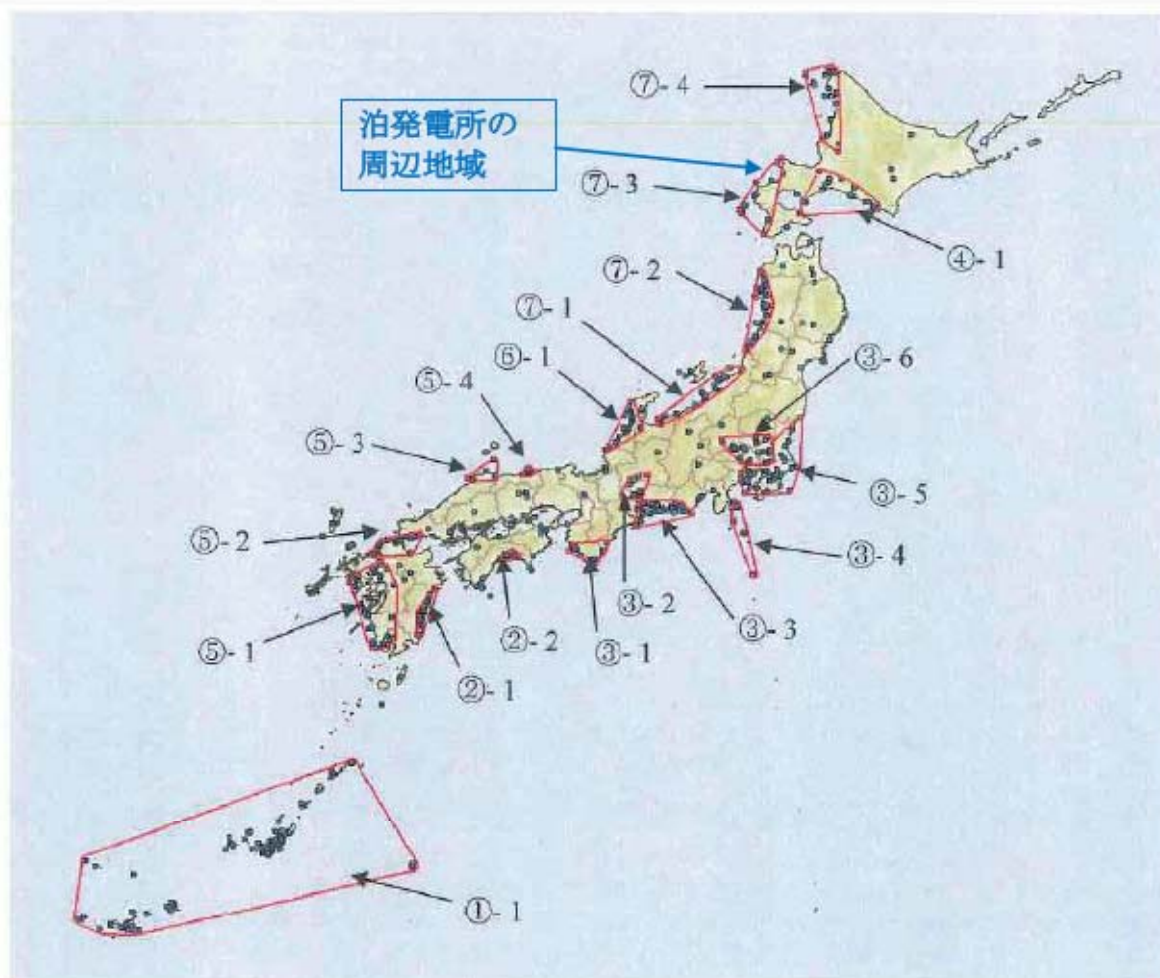
相関係数 (対数)	風速 (m/s)	被害幅 (m)	被害長さ (m)
風速 (m/s)	1.000	0	0.301
被害幅 (m)	-	1.000	0.458
被害長さ (m)	-	-	1.000

【別添1(3.(3)e. : 6 竜-別 1-22)】

第9.1.9表 評価対象施設の面積

評価対象施設	設置面積 (m ²)
原子炉建屋 (R/B)	4,889
原子炉補助建屋 (A/B)	3,689
ディーゼル発電機建屋 (DG/B)	493
タービン建屋 (T/B)	5,225
電気建屋 (EL/B)	1,214
出入管理建屋 (AC/B)	1,603
循環水ポンプ建屋 (CWP/B)	2,748
合 計	19,861

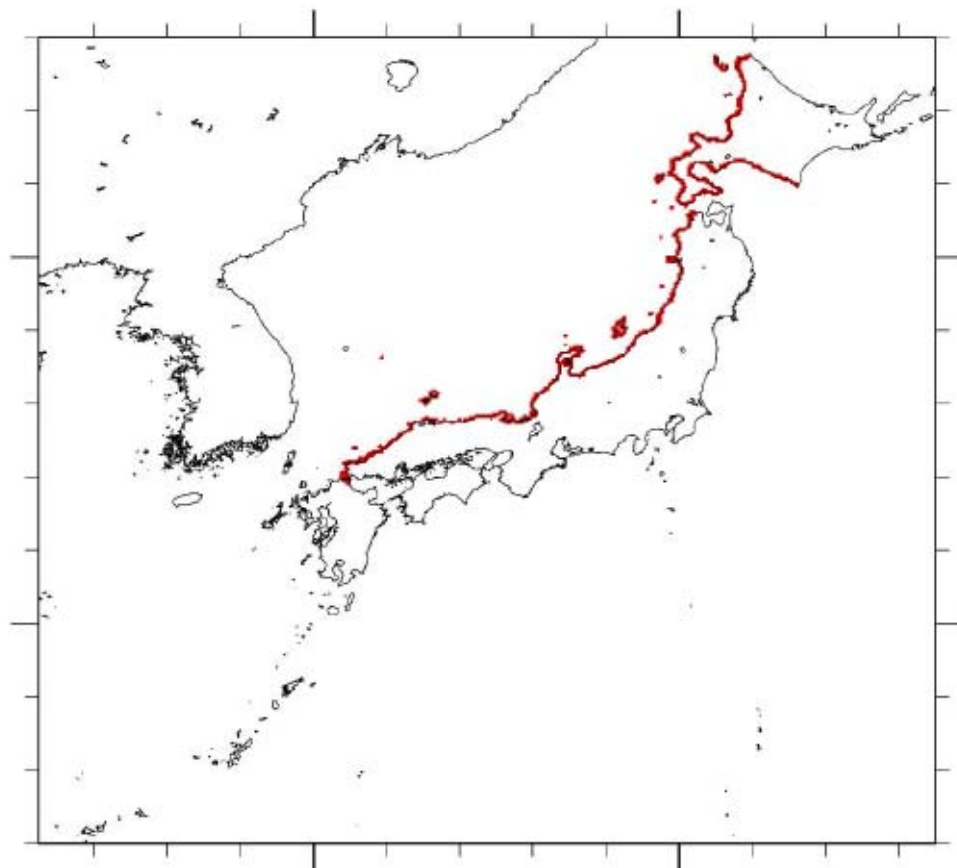
【別添1(3.(3)f. : 6 竜-別 1-23)】



第9.1.1図 竜巻の発生地点と竜巻が集中する19個の地域*

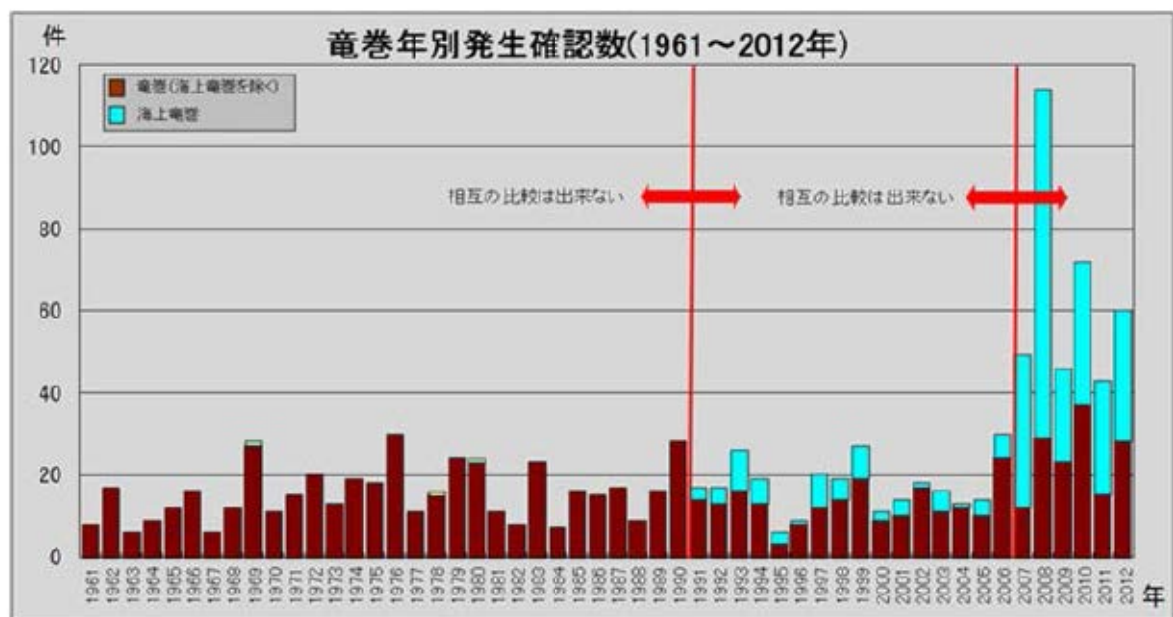
※出典：東京工芸大学、「竜巻による原子力施設への影響に関する調査研究（平成22年度）」、
独立行政法人原子力安全基盤機構委託研究

【別添1(3.(3)f. : 6竜-別1-14)】



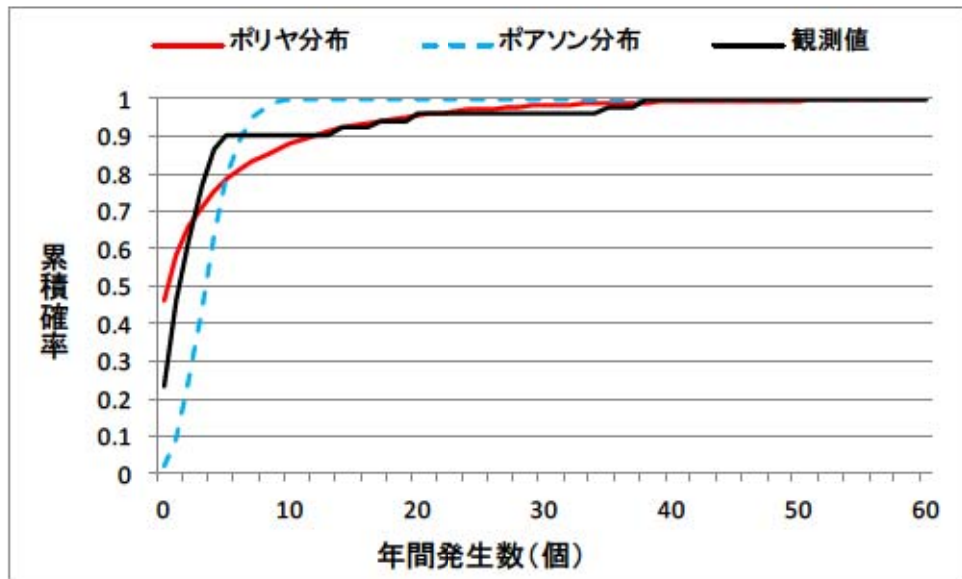
第9.1.2図 竜巻検討地域

【別添1(3.(2)c. : 6竜-別1-15)】



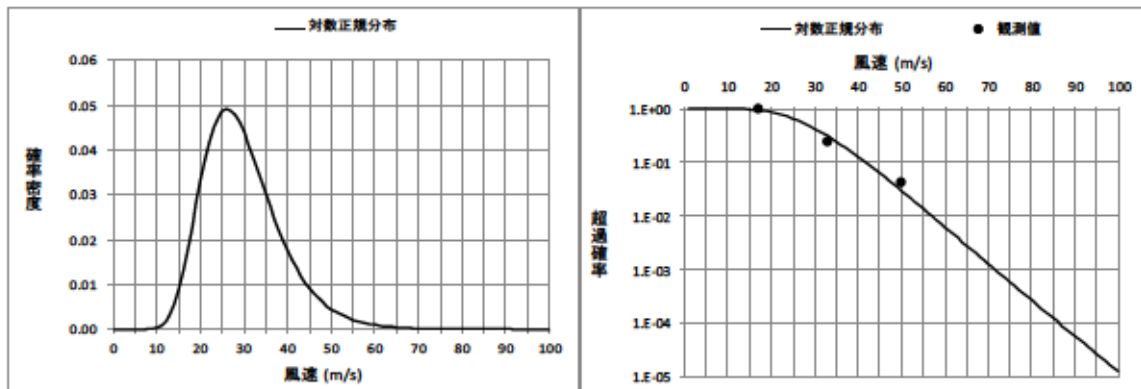
第9.1.3図 竜巻年別発生確認数 (1961年～2012年 (出典：気象庁HP))

【別添1(3.(3)d. : 6竜-別1-19)】



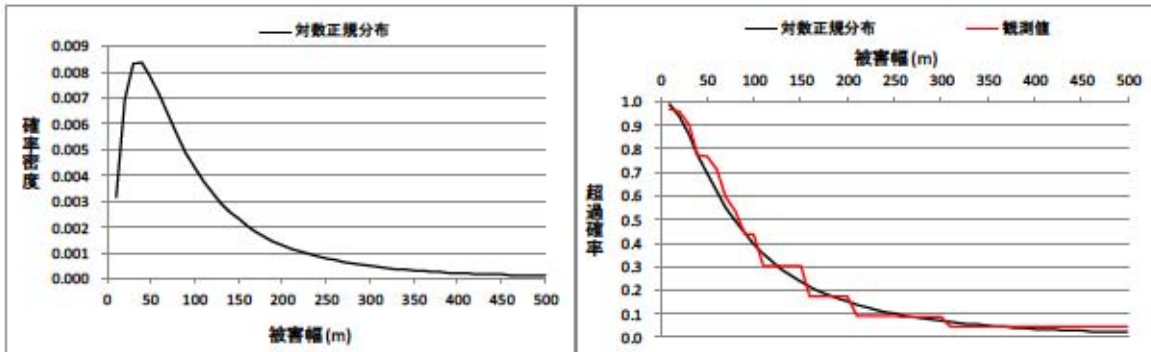
第9.1.4図 竜巻検討地域における竜巻の年発生数の累積頻度

【別添1(3.(3)d. : 6竜-別1-20)】



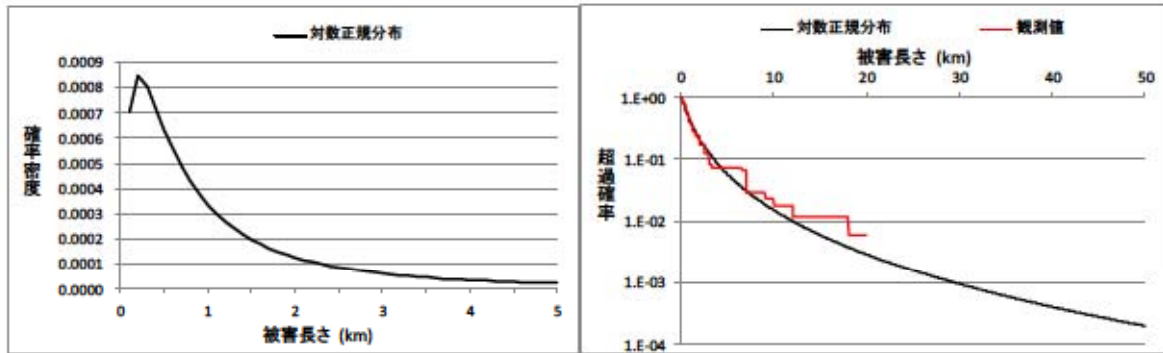
第9.1.5図 風速の確率密度分布 (左) と超過確率 (右)

【別添1(3.(3)e. : 6竜-別1-21)】



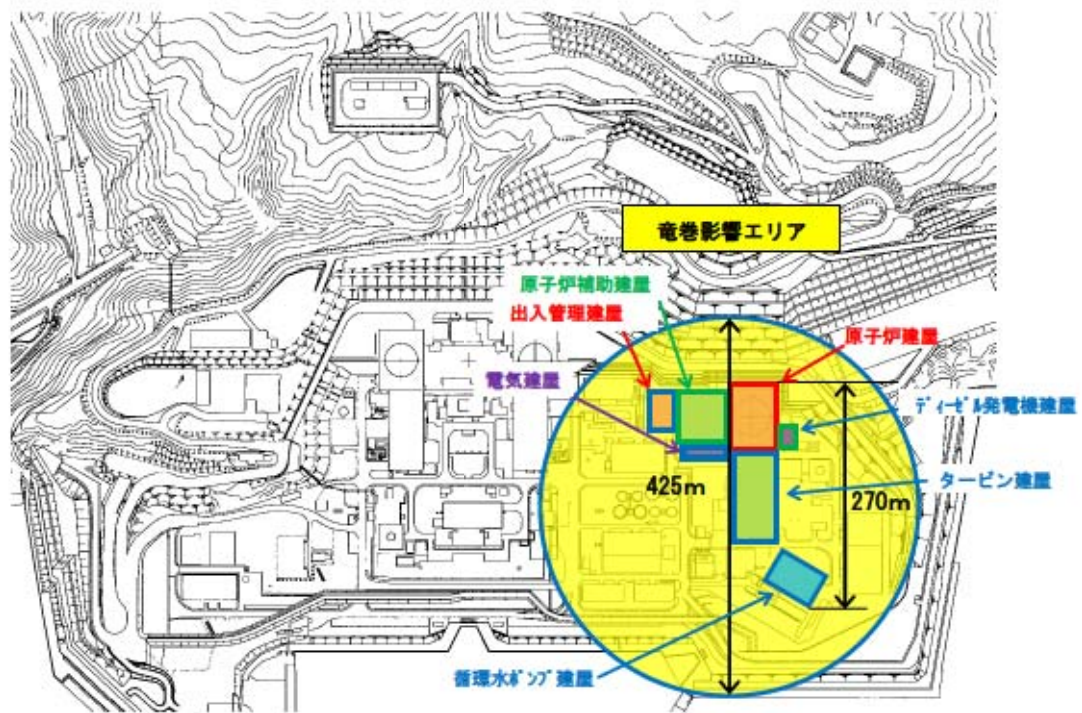
第9.1.6図 被害幅の確率密度分布（左）と超過確率（右）

【別添1(3.(3)e. : 6竜-別1-22)】



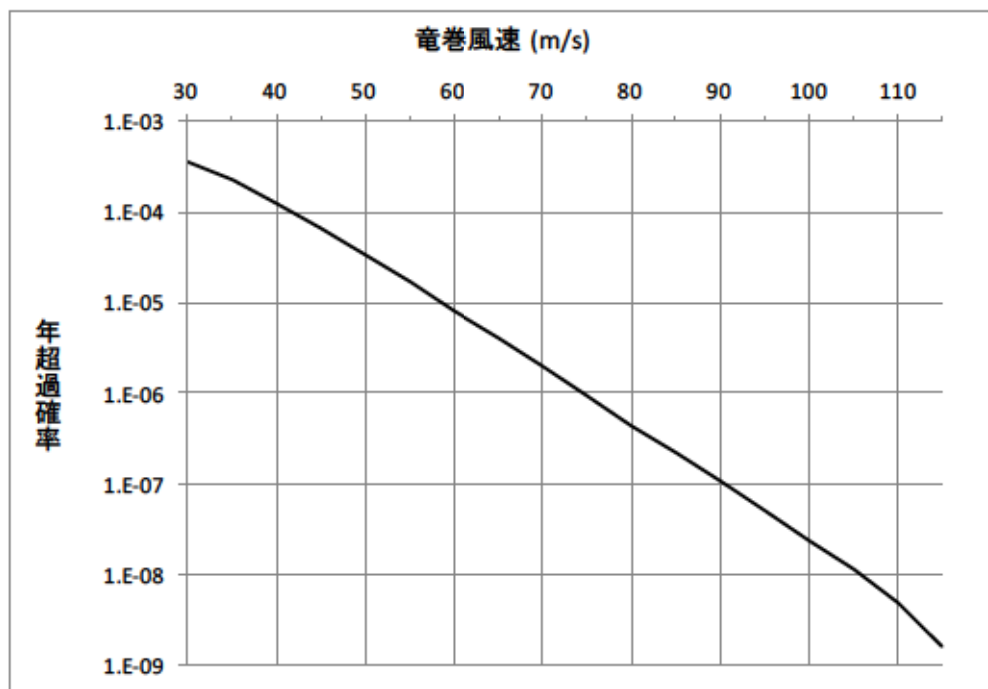
第9.1.7図 被害長さの確率密度分布（左）と超過確率（右）

【別添1(3.(3)e. : 6竜-別1-22)】



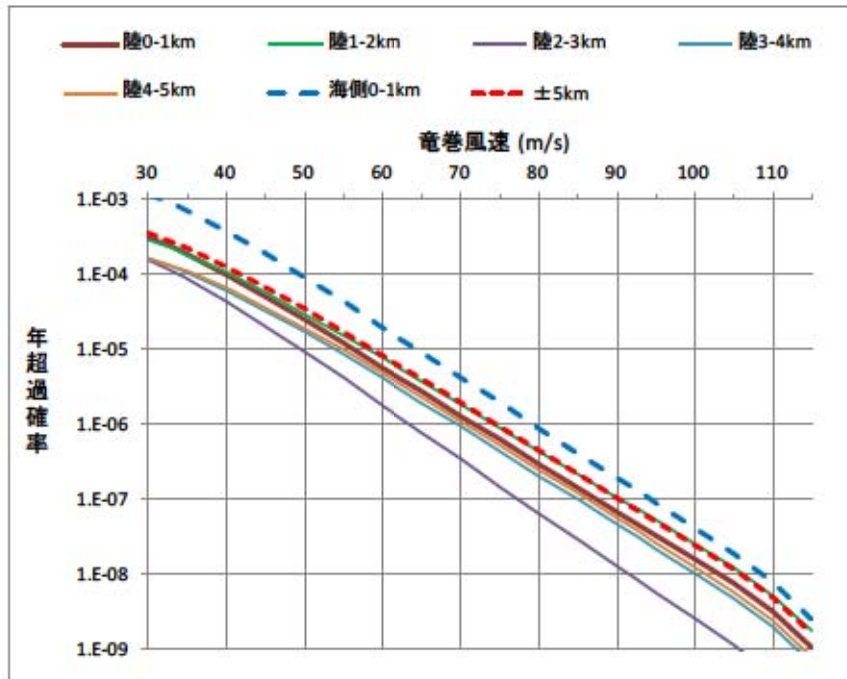
第9.1.8図 竜巻影響エリア

【別添1(3.(3)f. : 6竜-別1-23)】



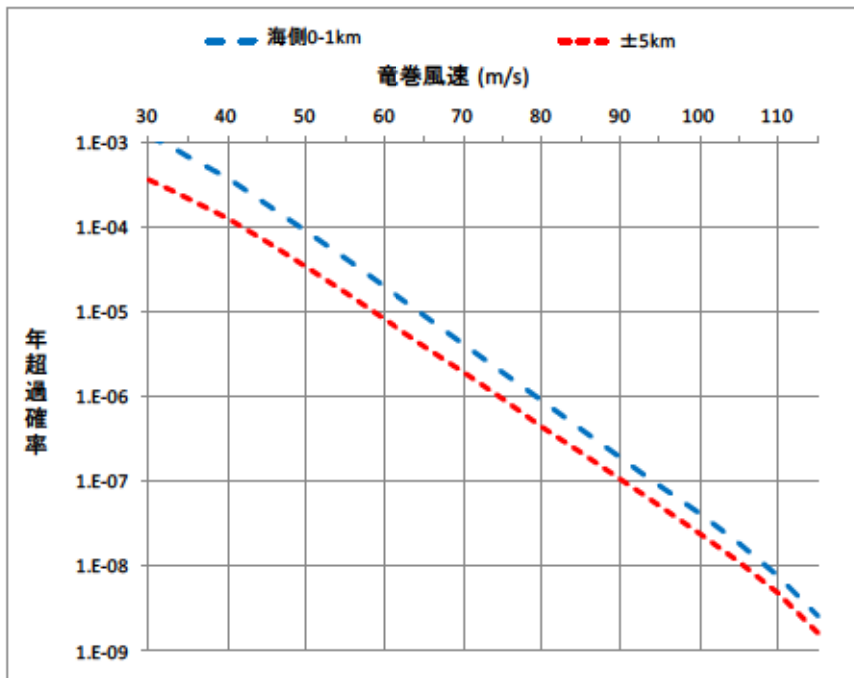
第9.1.9図 竜巻最大風速のハザード曲線
(海側、陸側±5km全域の評価)

【別添1(3.(3)g. : 6竜-別1-25)】



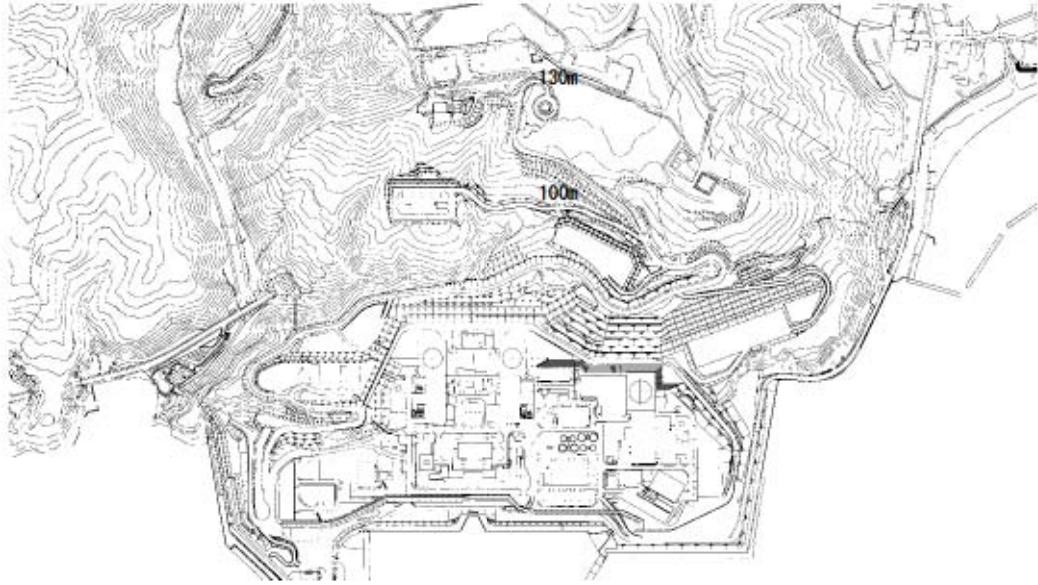
第9. 1. 10図 竜巻最大風速のハザード曲線
(1km範囲ごとの評価)

【別添1(3.(3)h. : 6竜-別1-26)】



第9. 1. 11図 竜巻最大風速のハザード曲線
(海側、陸側±5km全域及び海側0-1kmにおける評価)

【別添1(3.(3)i. : 6竜-別1-27)】

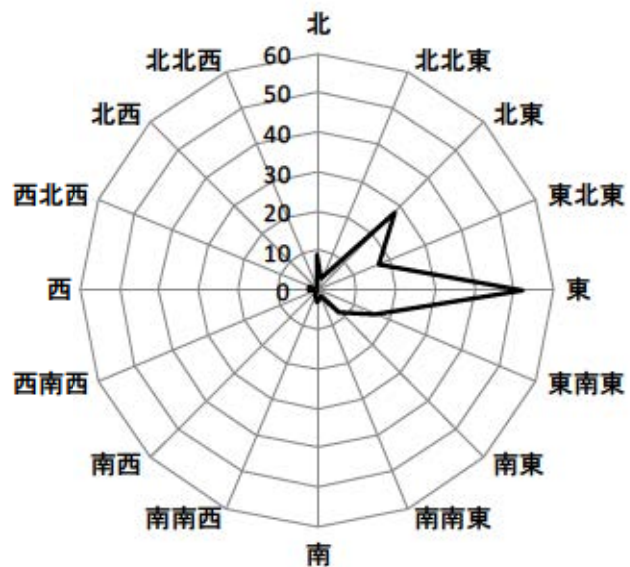


第9.1.12図 泊発電所周辺地形図

【別添1(3.(4)a : 6竜-別1-30)】

【個】

北	9
北北東	3
北東	28
東北東	17
東	52
東南東	16
南東	8
南南東	2
南	3
南南西	1
南西	0
西南西	0
西	2
西北西	2
北西	0
北北西	0
計	143



第9.1.13図 移動方向別の竜巻発生個数

【別添1(3.(4)c : 6竜-別1-31)】

9.2 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委託研究報告書
- (2) 気象庁 竜巻等の突風データベース
- (3) Wen. Y. K and Chu. S. L. (1973) : Tornado Risks and Design Wind Speed. Journal of the
Structural Division, ASCE, Vol. 99, No. ST12, pp. 2409-2421.
- (4) Garson. R. C., Morla-Catalan J. and Cornell C. A. (1975) : Tornado Design Winds Based
on Risk. Journal of the Structural Division, ASCE, Vol. 101, No. ST9, pp. 1883-1897.
- (5) Garson. R. C., Morla-Catalan J. and Cornell C. A. (1975) : Tornado Risk Evaluation using
Wind Speed Profiles. Journal of the Structural Division, ASCE, Vol. 101, No. ST5,
pp. 1167-1171.
- (6) 松井正宏、田村幸雄 (2005) : 竜巻状流れ場の可視化実験および流速計測によるスワール比、
粗度の影響、東京工芸大学工学部紀要、28、pp. 113-119.
- (7) Lewellen. D. C., and Lewellen W. S. (2007): Near-surface intensification of tornado
vortices. J. Atmos. Sci., 64, 2176-2194.
- (8) Karstens. C. D., Samaras T. M., Lee B. D., Gallus Jr W. A., and Finley C. A. (2010):
Near-ground pressure and wind measurements in tornadoes. Mon. Wea. Rev., 138, 2570-2588.
- (9) Natarajan. D., and Hangan H. (2012) : Large eddy simulations of translation and surface
roughness effects on tornado-like vortices, journal of wind engineering and industrial
aerodynamics, 104-106, pp. 577-584.
- (10) Forbes. G. S. (1998) : Topographic Influences on Tornadoes in Pennsylvania, 19th
Conference on Severe Local Storms, American Meteorological Society, Minneapolis, MN,
pp. 269-272.

1.4 設備等

(該当なし)

泊発電所 3 号炉

設置許可基準規則等への適合状況説明資料
(竜巻影響評価結果)

第六条：外部からの衝撃による損傷の防止
(竜巻)

<目 次>

1. はじめに
2. 評価の基本方針
3. 基準竜巻・設計竜巻の設定
4. 竜巻影響評価
5. 竜巻随件事象に対する評価
6. 竜巻対策

(添付資料)

1. 泊発電所3号機 竜巻影響評価結果 補足説明資料

1. はじめに

「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6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規定されており、この自然現象の一つとして竜巻が挙げられている。

このため、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原子炉施設の安全性を損なうことのない設計であることを確認するための「原子力発電所の竜巻影響評価ガイド」（以下、「評価ガイド」という。）を参照して竜巻影響評価を以下について実施し、竜巻防護施設の安全機能が維持されることを確認する。

- ・ 設計竜巻及び設計荷重（設計竜巻荷重及びその他組合せ荷重を適切に組合わせた荷重）の設定
- ・ 泊発電所における飛来物に係る調査
- ・ 飛来物発生防止対策
- ・ 飛来物に対する竜巻防護施設の防護対策
- ・ 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、必要に応じて対策を行うことで安全機能が維持されることの確認

また、第四十三条の要求を踏まえ、設計竜巻によって、設計基準対象施設の安全機能と重大事故等対処設備の機能が同時に損なわれることがないことを確認するとともに、重大事故等対処設備の機能が喪失した場合においても、位置的分散又は頑健性のある外殻となる建屋による防護に期待できるといった観点から、代替手段により必要な安全機能を維持できることを確認する。（補足説明資料3 6 参照）

2. 評価の基本方針

(1) 評価対象施設の抽出

以下の a. 項～ c. 項に示す施設を竜巻影響評価の対象施設とする。

評価対象施設の抽出フローを図 2.1 に示す。

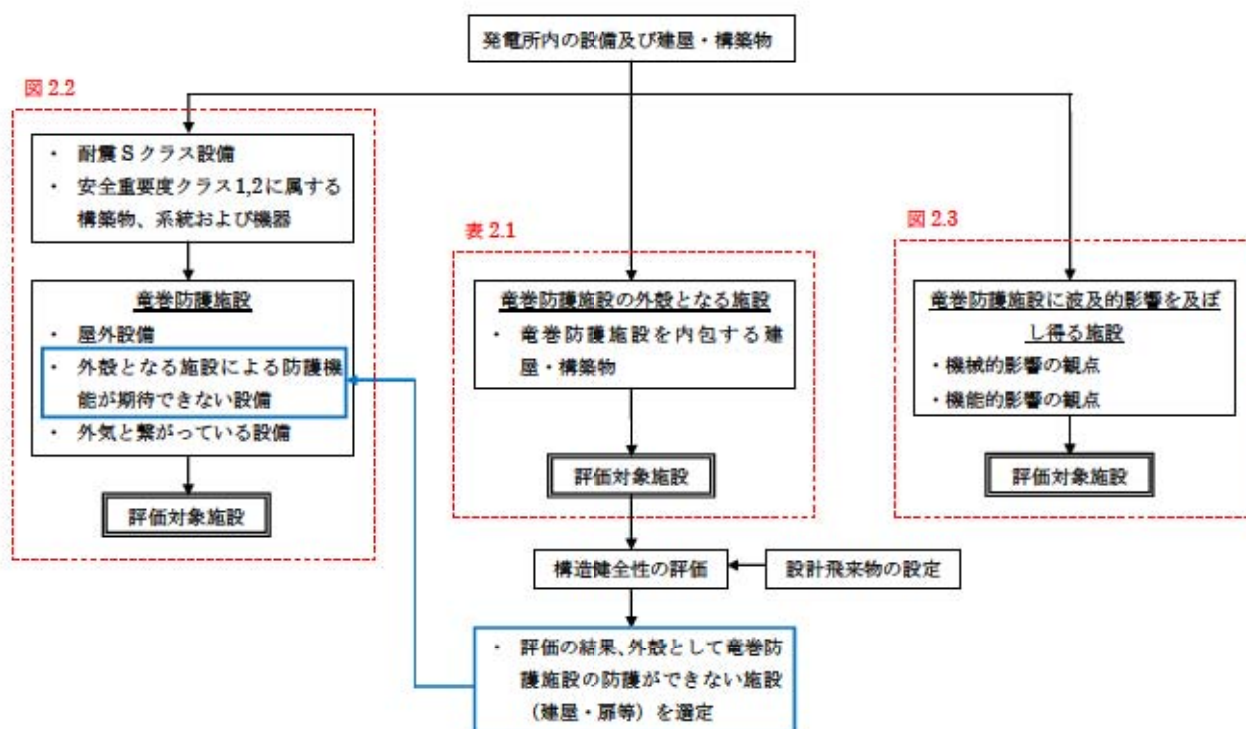


図 2.1 評価対象施設の抽出フロー

a. 竜巻防護施設

評価ガイドにおいて、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」の耐震設計上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）、建屋及び構築物等とされている。また、「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 6 条において、「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。」とされている。

以上を踏まえ、「基準地震動及び耐震設計方針に係る審査ガイド」の耐震設計上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）、建屋及び構築物に加え、「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」に基づくクラス 1 及びクラス 2 に属する構築物、系統及び機器を竜巻防護施設とする。

クラス 3 に属する構築物、系統及び機器については、設計竜巻により損傷したとしても、代替設備により必要な機能を確保する、安全上支障のない期間に修復する等の対応が可能とすることにより、安全機能を損なわない設計としていることから、竜巻防護施設として抽出

しない。

また、耐震 S クラスの設計を要求される設備である津波防護施設、浸水防止設備及び津波監視設備については、竜巻は気象現象、津波は地震、地滑り等を原因とする事象であり、同時に発生することは考えられず、事象の組合せは考慮しないことから、竜巻防護施設として抽出しない。

竜巻防護施設の評価対象施設については、評価ガイドの解説 2.1 において、竜巻防護施設の外殻となる施設等（竜巻防護施設を内包する建屋・構築物等）による防護機能によって、設計竜巻による影響を受けないことが確認された施設については、設計対象から除外できる旨記載されていることを踏まえ、屋外設備、建屋内の施設で外気と繋がっている設備及び外殻となる施設による防護機能が期待できない設備として、以下を抽出し評価を実施する。

なお、外殻となる施設による防護機能が期待できない設備については、「4.（4）施設の構造健全性の確認」の結果に基づいて抽出している。

また、原子炉建屋、原子炉補助建屋、ディーゼル発電機建屋、燃料油貯油槽（既設、新設）、取水ピットポンプ室及びストレーナ室については、竜巻防護施設を内包する建屋・構築物であり、後述の「c. 竜巻防護施設の外殻となる施設」として抽出する。

竜巻防護施設の評価対象施設抽出フローを図 2.2 に示す。（補足説明資料 10 参照）

（屋外設備）

- ・ 排気筒（建屋外）

（外殻となる施設による防護機能が期待できない設備）

- ・ 原子炉補機冷却海水ポンプ
- ・ 蓄熱室加熱器
- ・ 原子炉補機冷却海水ポンプ出口ストレーナ
- ・ 配管および弁（原子炉補機冷却海水系統）
- ・ 原子炉建屋の原子炉補機冷却水サージタンク・空調用冷水膨脹タンク室に設置されている原子炉補機冷却水サージタンクおよび原子炉補機冷却水系統の配管・弁（以下、「原子炉補機冷却水サージタンク他」という。）
- ・ 原子炉建屋の主蒸気管室に設置されている主蒸気系統、主給水系統、補助給水系統および制御用空気系統の配管・弁（以下、「配管および弁（主蒸気管室内）」という。）
- ・ 制御用空気系統配管
- ・ 使用済燃料ピット（使用済燃料ラック含む）
- ・ 新燃料ラック
- ・ 燃料移送装置
- ・ 使用済燃料ピットクレーン

（建屋内の施設で外気と繋がっている設備）

- ・ 排気筒（建屋内）

- ・ 換気空調設備（アニュラス空気浄化設備、格納容器空調装置、補助建屋空調装置、試料採取室空調装置、中央制御室空調装置、電動補助給水ポンプ室換気装置、制御用空気圧縮機室換気装置、ディーゼル発電機室換気装置、安全補機開閉器室空調装置の外気と繋がるダクト・ファン・空調ユニット及び外気との境界となるダンパ・バタフライ弁）

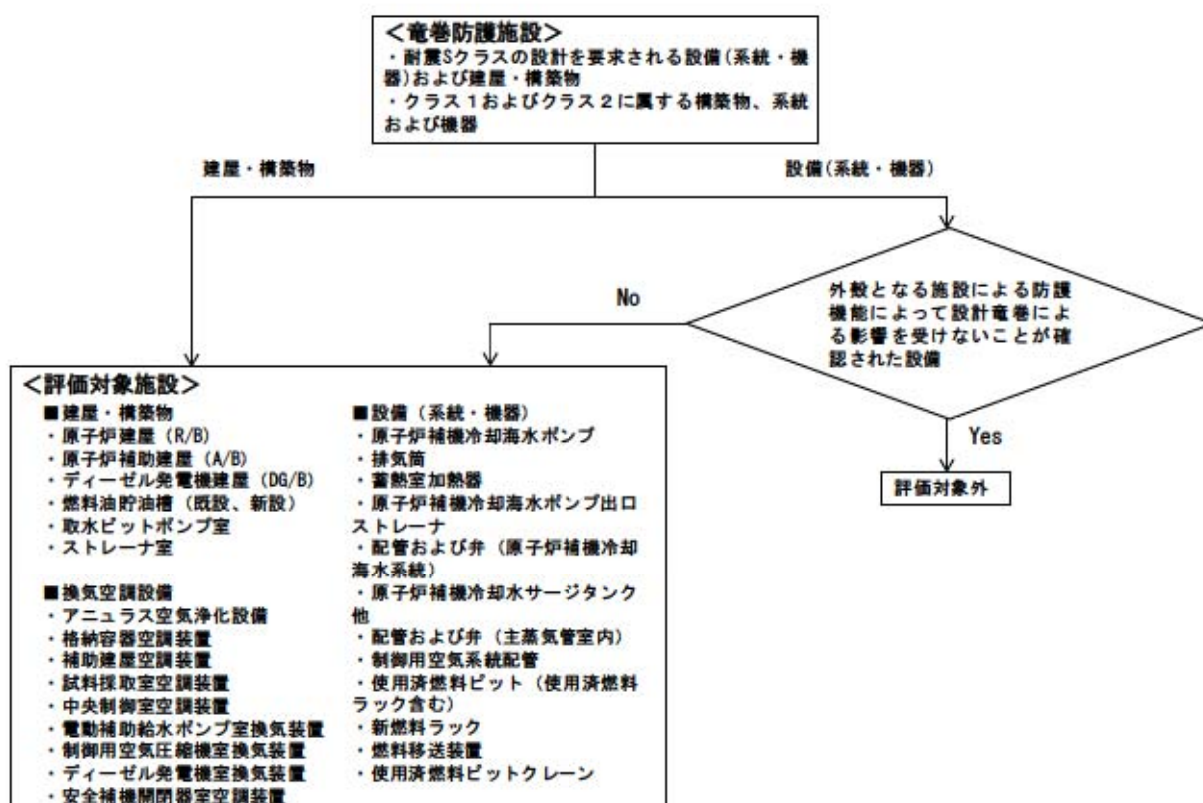


図 2.2 竜巻防護施設の評価対象施設抽出フロー

b. 竜巻防護施設に波及的影響を及ぼし得る施設

評価ガイドにおいて、竜巻防護施設に波及的影響を及ぼし得る施設は「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喪失させる可能性が否定できない施設、又はその施設の特定の区画(竜巻防護施設を内包する区画)」とされていることを踏まえ、以下の (a) 項及び (b) 項に示す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。

竜巻防護施設に波及的影響を及ぼし得る施設(評価対象施設)抽出フローを図 2.3 に示す。(補足説明資料 1 1 参照)

(a) 竜巻防護施設への機械的影響の観点から抽出

竜巻防護施設の外殻となる施設に隣接している施設及び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として、以下を抽出し評価を実施する。

(竜巻防護施設の外殻となる施設に隣接している施設)

- ・ タービン建屋 (T/B) (原子炉建屋に隣接する施設)
- ・ 電気建屋 (EL/B) (原子炉建屋、原子炉補助建屋に隣接する施設)
- ・ 出入管理建屋 (AC/B) (原子炉補助建屋に隣接する施設)

(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)

- ・ 循環水ポンプ建屋 (CWP/B)

(b) 竜巻防護施設への機能的影響の観点から抽出

屋外にある竜巻防護施設の附属設備および竜巻防護施設を内包する区画の外気と繋がっている換気空調設備として、以下を抽出し評価を実施する。

(屋外にある竜巻防護施設の附属設備)

- ・ ディーゼル発電機排気消音器 (ディーゼル発電機の附属設備)
- ・ 主蒸気逃がし弁消音器 (主蒸気逃がし弁の附属設備)
- ・ 主蒸気安全弁排気管 (主蒸気安全弁の附属設備)
- ・ タービン動補助給水ポンプ排気管 (タービン動補助給水ポンプの附属設備)
- ・ ディーゼル発電機燃料油貯油槽ベント管 (ディーゼル発電機燃料油貯油槽の附属設備)

(竜巻防護施設を内包する区画の外気と繋がっている換気空調設備)

- ・ 換気空調設備 (蓄電池室排気装置の外気と繋がるダクト・ファン及び外気との境界となるダンパ)

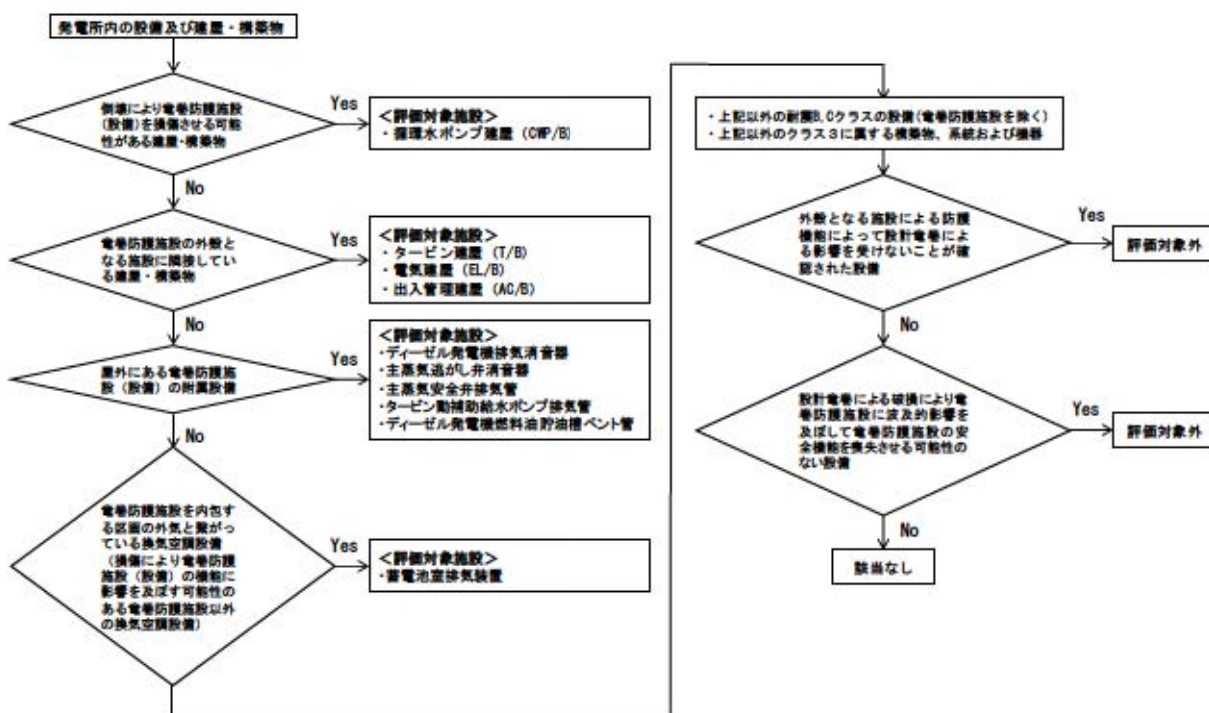


図 2.3 竜巻防護施設に波及的影響を及ぼし得る施設 (評価対象施設) 抽出フロー

c. 竜巻防護施設の外殻となる施設

竜巻防護施設の外殻となり得る施設（竜巻防護施設を内包する建屋・構築物）として、以下を抽出し評価を実施する。

- ・原子炉建屋（R/B）
 - 外部遮へい建屋（O/S）
 - 周辺補機棟（E/B）
 - 燃料取扱棟（FH/B）
- ・原子炉補助建屋（A/B）
- ・ディーゼル発電機建屋（DG/B）
- ・燃料油貯油槽（既設、新設）
- ・取水ピットポンプ室
- ・ストレーナ室

表 2.1 竜巻防護施設の外殻となる施設の抽出

竜巻防護施設の外殻となる施設(評価対象施設)		内包する竜巻防護施設
原子炉建屋(R/B)	外部遮へい建屋(O/S)	原子炉容器、1次冷却材ポンプ他
	周辺補機棟(E/B)	主蒸気管、主蒸気安全弁他
	燃料取扱棟(FH/B)	使用済燃料ピット、使用済燃料ラック他
原子炉補助建屋(A/B)		余熱除去ポンプ、ほう酸タンク他
ディーゼル発電機建屋(DG/B)		ディーゼル発電機、蓄熱室加熱器他
燃料油貯油槽(既設、新設)		ディーゼル発電機燃料油貯油槽
取水ピットポンプ室		原子炉補機冷却海水ポンプ他
ストレーナ室		原子炉補機冷却海水ポンプ出口ストレーナ他

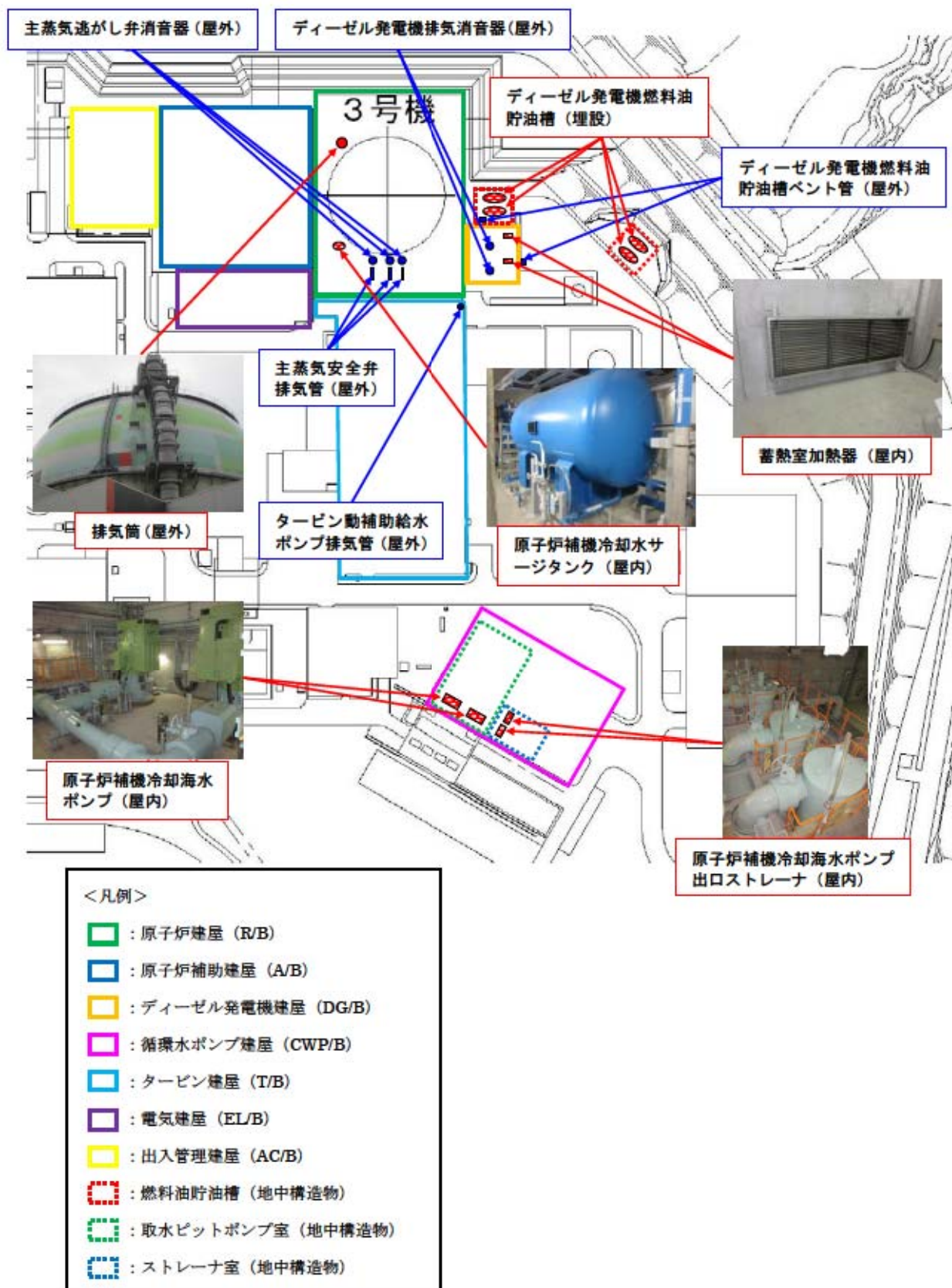


図 2.4 主な評価対象施設

(2) 評価の基本的な考え方

a. 評価の基本フロー

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検討を行い、必要に応じて対策を行うことで竜巻防護施設の安全機能が維持されることを確認する。

b. 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。

(a) 設計竜巻荷重

設計竜巻荷重を以下に示す。

①風圧力

設計竜巻の最大風速による風圧力

②気圧差による圧力

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圧力

③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(以下「設計飛来物」という。)が評価対象施設に衝突する際の衝撃荷重

(b) 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。

①評価対象施設に常時作用する荷重、運転時荷重等

②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(b)の②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(b)の①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、4.(3)b.に示す。

(3) 施設の安全性の確認方針

設計竜巻荷重及びその他組み合わせ荷重(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評価を行い、必要に応じて対策を行うことで竜巻防護施設の安全機能が維持されることを確認する。

3. 基準竜巻・設計竜巻の設定

(1) 概要

ガイドに基づき、設計竜巻荷重を設定するまでの基本的な流れを図3.1に示す。

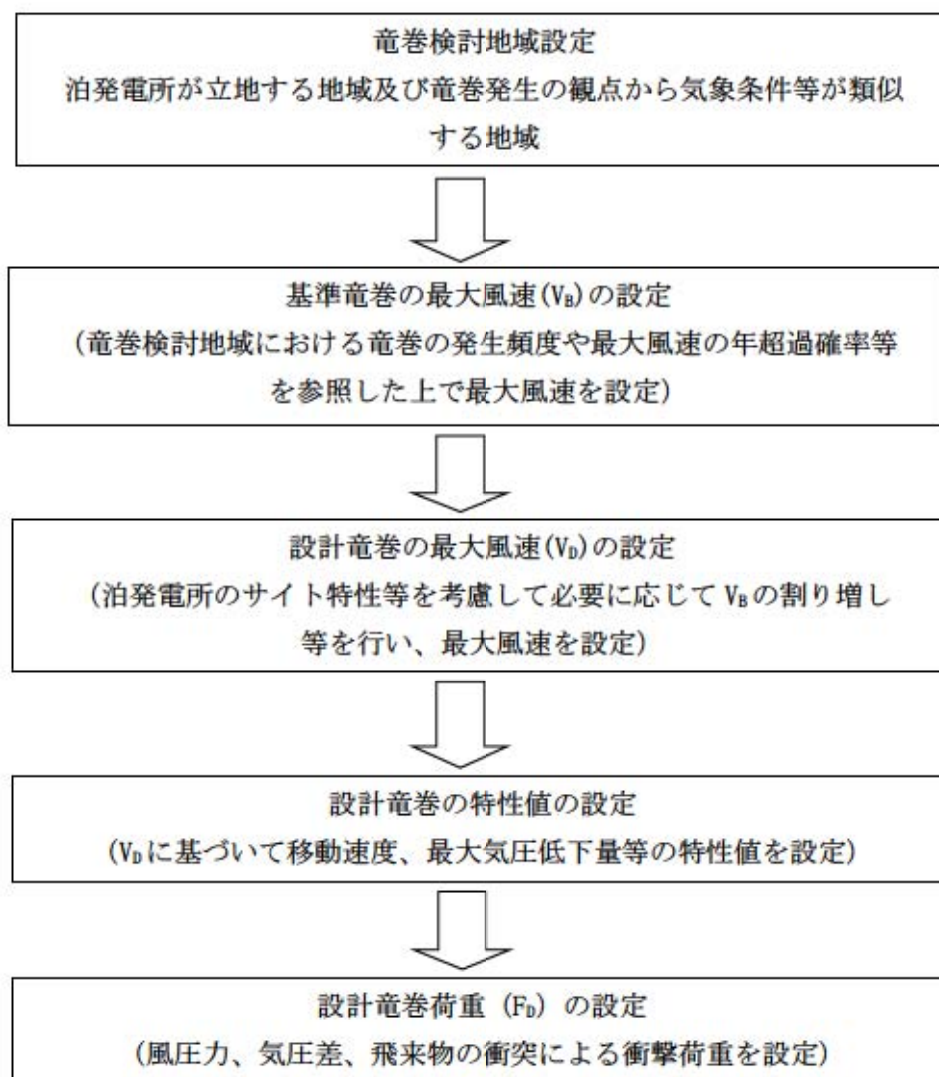
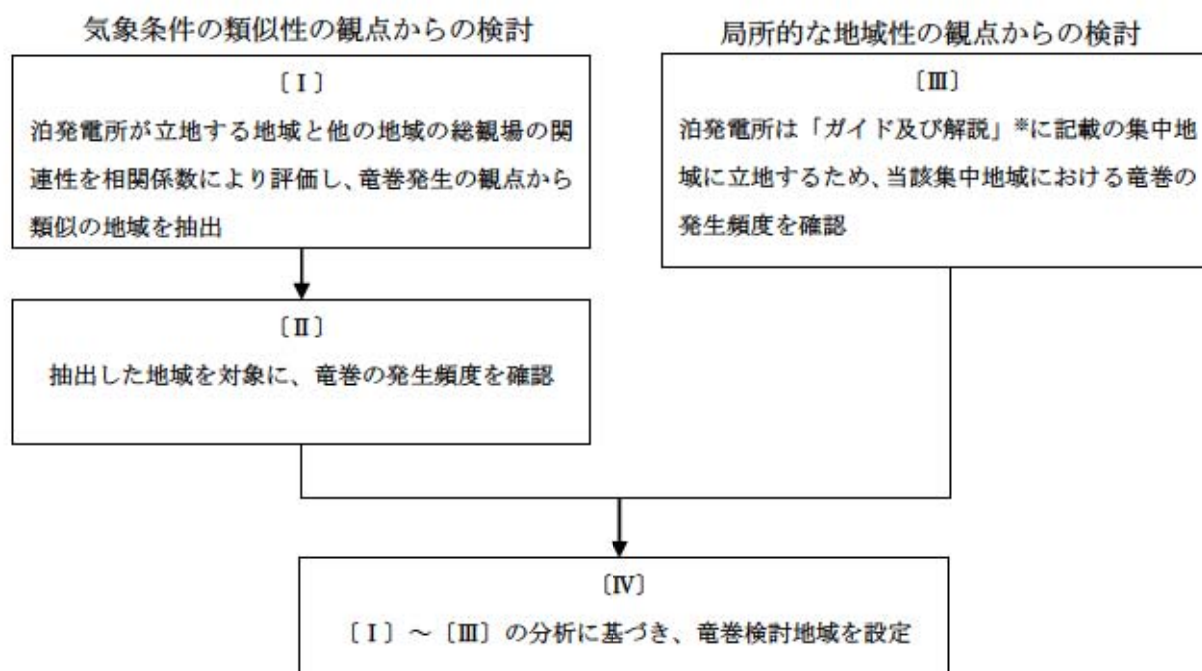


図 3.1 基準竜巻・設計竜巻の設定に係る基本フロー

(2) 竜巻検討地域の設定

竜巻検討地域は、原子力発電所が立地する地域及び竜巻発生
の観点から原子力発電所が立
地する地域と気象条件等が類似の地域から設定する。竜巻検討地域の設定フローを図3.2に示
す。



※原子力発電所の竜巻影響評価ガイド及び解説
 (平成 25 年 6 月 19 日原規技発第 13061911 号原子力規制委員会決定)

図 3.2 竜巻検討地域の設定フロー

a. 気象条件の類似性の観点からの検討

(a) 竜巻総観場の出現数に関する相関係数を用いた類似性の抽出

独立行政法人原子力安全基盤機構が東京工芸大学に委託した研究の成果、(以下、「東京工芸大学委託成果」という)においては、「竜巻等突風の気象的発生要因はいくつかあるが、明らかに地域性が見られる。」としている。また、竜巻の発生分布性状は総観場に大きく影響を受けることから、総観場による解析は重要であると考えられる。このため、国内全域を気象の傾向が類似する地域として区分した 16 の地域区分の総観場を解析することにより、竜巻検討地域を設定する。

総観場の地域性の概要を把握するため、国内全域と泊発電所が含まれる北海道日本海側、東日本の関東甲信地方及び西日本の九州南部について比較した。図 3.3 に示す総観場の集計結果によると、国内全地域を対象とした集計では「暖気の移流」、「寒気の移流」、「寒冷前線」、「気圧の谷」、「停滞前線」及び「台風」の総観場の出現頻度が高い。北海道日本海側では、上記総観場のうち「寒気の移流」及び「気圧の谷」の出現頻度が高いが、九州南部ではこれらの総観場は竜巻発生時の主要な気象特性とはなっていない。一方で、国内全域で出現頻度の高い総観場である「暖気の移流」、「停滞前線」及び「台風」は北海道日本海側ではほとんど出現しておらず、関東甲信地方及び九州南部で多い傾向が見られる。一

部地域の比較からではあるが、竜巻の成因となる総観場の出現には地域性があるものと考えられる。

このように、竜巻発生に関する総観場には地域特性があると考えられることから、地域特性について相関係数を用いて検討した。相関係数は、2組のデータがどれだけ関連性があるかを示す係数で、2組のデータの関連性が強ければ相関係数は1に近づき、関連性が低ければ0に近づく。相関係数を利用して、2つの地域の総観場の関連性を評価し、関連性が強ければ、2つの地域は総観場の出現の観点から類似の地域であると判断した。

具体的には、表3.1の総観場の集計結果から、北海道日本海側とその他地域間の、総観場の出現数に関する相関係数を求め、出現する総観場の種類及び出現頻度の関連性の強さを評価した。なお、相関係数については、無相関検定を行い有意水準1%で無相関について確認している。

相関係数を算出した結果は、表3.2のとおりであり、「北海道日本海側」と相関が認められる地域は、「北海道太平洋側」、「東北日本海側」、「北陸地方」、「近畿日本海側」及び「山陰地方」となった。

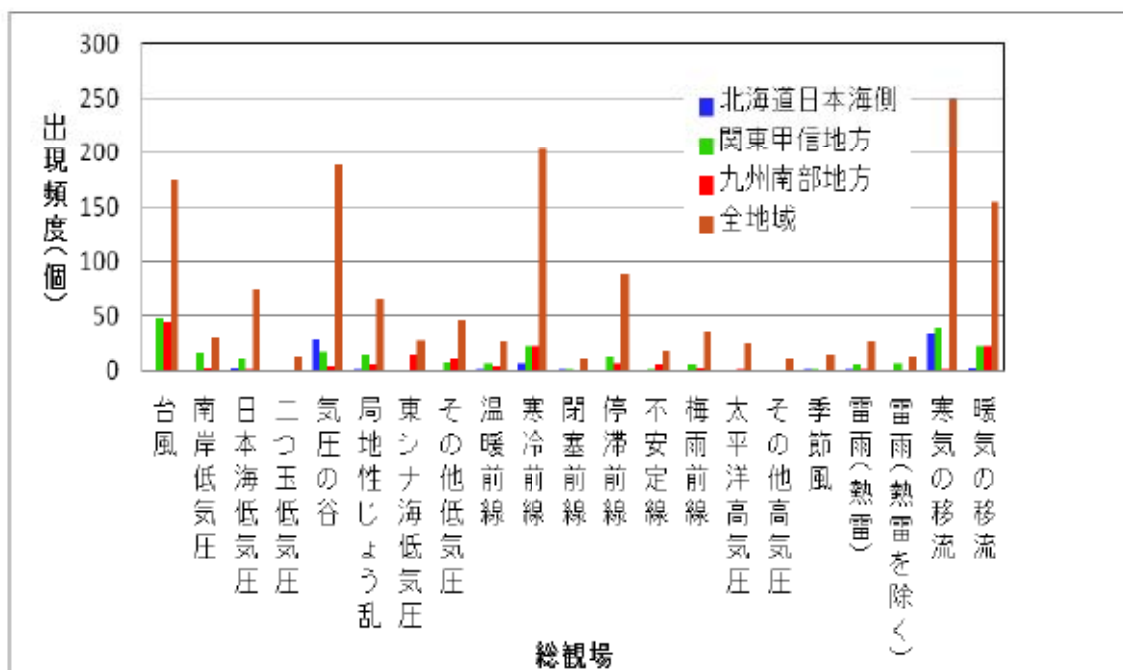


図 3.3 各地域の総観場の出現頻度
(出典：気象庁 HP 竜巻等の突風データベース (2013年9月))

表 3.1 地域区分毎の総観場の集計*

地域区分	台風	南岸低気圧	日本海低気圧	二つ玉低気圧	気圧の谷	局地性じょう乱	東シナ海低気圧	その他低気圧	温暖前線	寒冷前線	閉塞前線	停滞前線	不安定前線	梅雨前線	太平洋高気圧	その他高気圧	季節風	雷雨(熱雷を除く)	雷雨(熱雷)	寒気の移流	暖気の移流	計	前田スケールの最大
北海道日本海側	0	0	3	0	29	1	0	0	1	7	2	0	0	0	0	0	1	1	0	34	3	82	F2
北海道オホーツク海側	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	2	F3
北海道太平洋側	0	0	2	0	12	2	0	0	1	13	2	0	2	0	0	1	0	1	1	7	4	48	F2
東北日本海側	0	0	14	0	35	7	0	4	2	28	0	5	0	0	1	0	1	3	0	17	3	120	(F2)
東北太平洋側	2	0	1	1	2	2	0	1	0	10	1	1	2	1	0	1	0	3	1	8	4	41	(F2)
関東甲信地方	49	16	11	0	17	15	0	8	7	22	2	14	2	5	0	0	1	6	7	39	22	243	F3
北陸地方	0	0	12	1	27	3	0	2	0	27	0	3	4	0	0	0	8	0	2	82	2	173	F2
東海地方	27	4	11	9	7	3	0	1	7	10	2	11	1	3	0	0	1	0	0	5	10	112	F3
近畿日本海側	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	7	1	10	F0
近畿太平洋側	3	4	5	0	1	1	0	0	6	0	3	0	1	0	0	1	1	0	3	5	34	F1~F2	
山陰地方	0	0	5	0	5	5	0	1	0	9	0	0	0	0	0	0	1	1	1	28	7	63	F1
山陽地方	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	2	2	0	0	0	0	0	2	8	F2
四国地方	18	3	9	2	2	0	0	4	1	1	2	10	0	3	1	1	0	0	0	9	26	92	F2
九州北部地方	11	0	1	0	8	18	0	8	2	22	0	10	2	7	2	0	1	5	1	8	13	119	F2
九州南部地方	45	3	1	0	4	6	15	11	4	22	0	7	5	3	2	0	0	1	0	1	22	152	F2~F3
沖縄地方	20	0	0	0	39	2	13	6	1	26	0	22	0	10	17	8	0	5	0	2	30	201	F2
全地域	175	30	75	13	188	65	28	46	26	204	11	89	19	35	25	11	15	27	13	250	155	1500	F3

※総観場の分類は、気象庁（出典：気象庁 HP 竜巻等の突風データベース（2013年9月））に従った。

また、全地域の出現が10個未満の総観場は解析から除外し、35種類の総観場の中から21種類を解析対象とした。なお、竜巻発生1事例に対し複数の総観場があるため、合計は竜巻発生個数より多い。

表 3.2 北海道日本海側と他地域区分間の相関係数一覧

地域区分	北海道日本海側との相関	
	相関係数	有意水準1%相関の有○、無×
北海道日本海側	1.00	-
北海道オホーツク海側	0.04	×
北海道太平洋側	0.73	○
東北日本海側	0.75	○
東北太平洋側	0.54	×
関東甲信地方	0.47	×
北陸地方	0.90	○
東海地方	0.07	×
近畿日本海側	0.70	○
近畿太平洋側	0.20	×
山陰地方	0.81	○
山陽地方	-0.17	×
四国地方	0.10	×
九州北部地方	0.22	×
九州南部地方	-0.10	×
沖縄地方	0.32	×

注：有意水準1%で、相関が認められるものに黄色を付している。

(b) 抽出した地域を対象とした竜巻の発生頻度の分析

「北海道日本海側」と相関が認められる地域の竜巻発生数を考慮し、ハザード曲線が保守的なものとなるよう、以下のとおり竜巻検討地域を絞り込む。相関が認められる地域のうち、北海道太平洋側の襟裳岬から東側の海岸線及び陸奥湾の海岸線においては、表 3.3 のとおり竜巻はほとんど発生していない。このため、この地域を竜巻検討地域に含めた場合には、ハザード曲線評価において竜巻発生個数が極端に少ない割りに、リスク対象評価面積が大きくなり、ハザードが過小評価されることになるため、北海道太平洋側の襟裳岬から東側の海岸線及び陸奥湾から竜飛岬にかけての海岸線を竜巻検討地域から除く。更に、日本海側は同様の気候区分に分類されることを考慮し、「山陰地方」を山口県までとする。

表 3.3 襟裳岬から東側の海岸線等における竜巻発生数

- ・ 襟裳岬から知床半島までの海岸線における竜巻の発生実績

番号	発生日時	発生場所	藤田スケール
1	1969/10/11 09:25	北海道根室支庁(海上)	不明

- ・ 竜飛岬までの陸奥湾西側海岸線における竜巻の発生実績

番号	発生日時	発生場所	藤田スケール
1	1966/10/05 16:02	青森県 青森市	—

※詳細な発生場所データがないことから、海岸 10km 範囲での発生かどうか不明

(出典：気象庁 HP 竜巻等の突風データベース (2013 年 9 月))

b. 局所的な地域性の観点からの検討

独立行政法人原子力安全基盤機構「原子力発電所の竜巻影響評価ガイド(案)及び解説」においては、竜巻集中地域に原子力発電所が立地している場合、当該地域の竜巻の年発生頻度(単位面積当たりの年発生数)を調査して総観スケールの気象条件から設定した地域の年発生頻度と比較し、発生頻度の高い方を竜巻検討地域とする、としている。

泊発電所は図 3.4 に示すように竜巻集中地域に位置していることから、この地域の竜巻の年発生頻度を、a. で総観スケールの気象条件から設定した地域の竜巻の年発生頻度と比較する。

2 つの地域の竜巻発生頻度は、表 3.4 に示すとおり同一と見なせる。このため、竜巻発生個数を多く確保できる総観スケールの気象条件から設定した地域の方が、竜巻検討地域に適しているものと判断される。

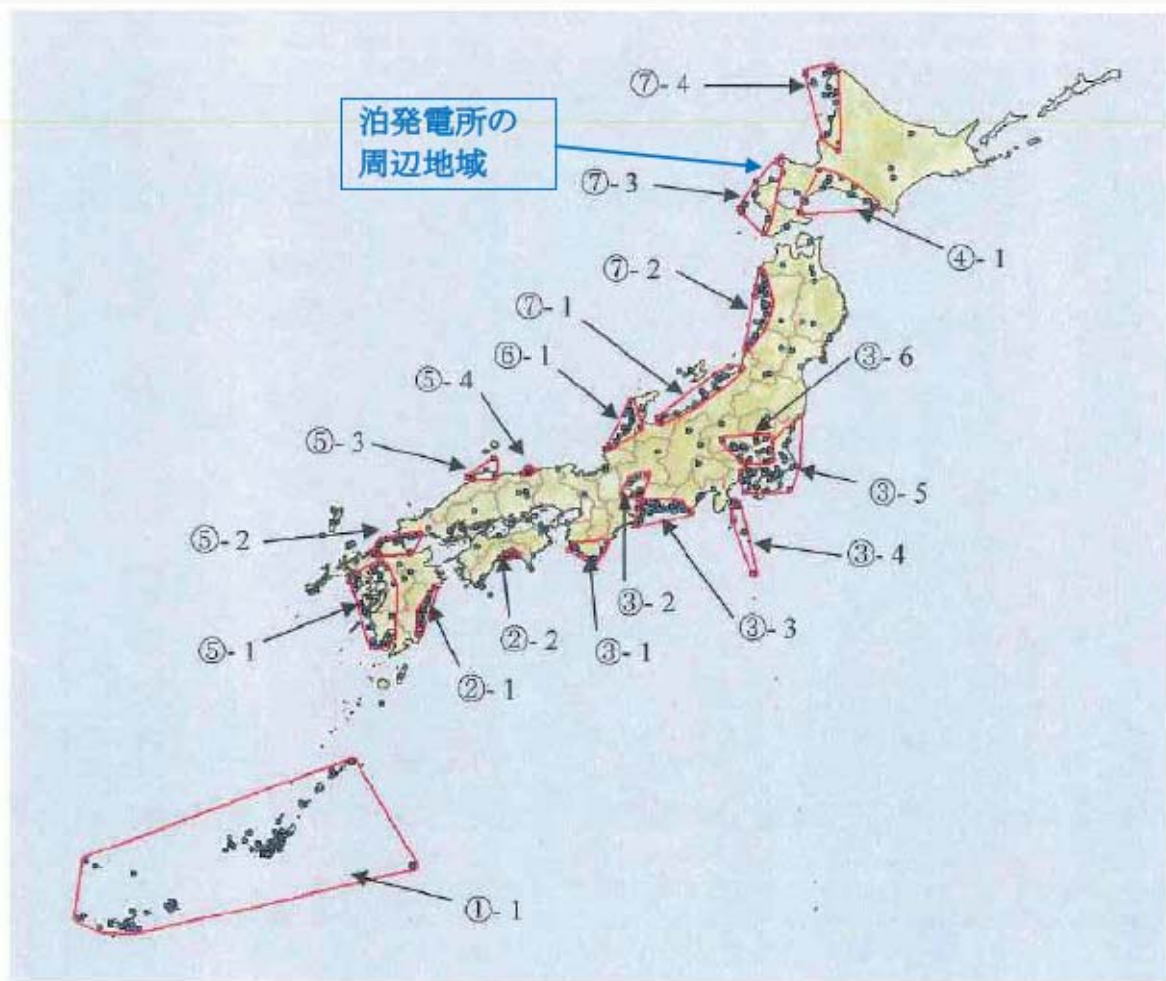


図3.4 竜巻の発生地点と竜巻が集中する19個の地域*

※出典：東京工芸大学、「竜巻による原子力施設への影響に関する調査研究（平成22年度）」、独立行政法人原子力安全基盤機構委託研究

表 3.4 竜巻集中地域及び竜巻検討地域候補地の竜巻発生頻度の比較

	対象面積 (km ²)	竜巻発生個数(個) (観測期間 51.5 年)	発生頻度(個/km ² /年)
竜巻集中地域	3,850	19	9.6×10^{-5}
竜巻検討地域候補地	38,895	206	1.1×10^{-4}

c. 竜巻検討地域

竜巻検討地域は、竜巻発生 viewpoint から泊発電所が立地する地域と気象条件が類似する地域を基に、北海道から本州の日本海側及び北海道の襟裳岬以西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（面積約 38,895km²）に設定する。図 3.5 に竜巻検討地域を示す。

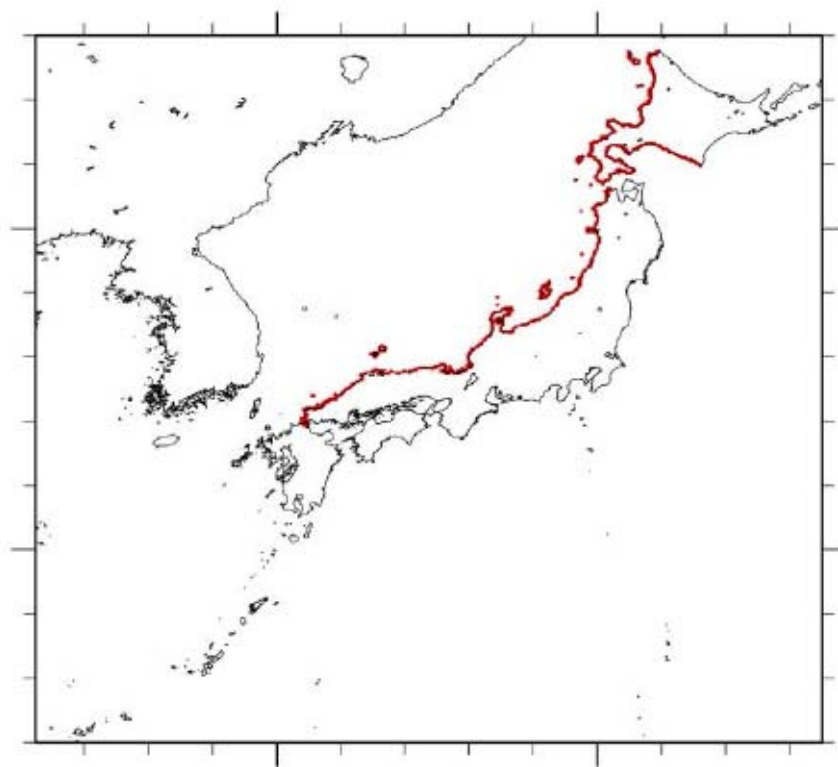


図 3.5 竜巻検討地域

(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。

a. 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 (V_{B1}) の設定にあたっては、現時点で当社は竜巻検討地域で過去に発生した竜巻の最大風速を十分な信頼性のあるデータ等に基づいて評価できるだけの知見を有していないことから、日本で過去に発生した竜巻の観測データを用いて V_{B1} を設定する。なお、今後も地域特性に関する検討、新たな知見の収集やデータの拡充などに取組み、より信頼性のある評価が可能ないように努力する。

日本で過去に発生した最大の竜巻はF3スケールである。F3スケールにおける風速は70m/s～92m/sであることから、その最大風速を基に過去に発生した最大の竜巻の最大風速 V_{B1} を92m/sとする。表3.5に日本におけるF3スケールの竜巻一覧を示す。

表3.5 F3の竜巻発生リスト (1961年～2012年6月)

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

b. 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、東京工芸大学委託成果を参照して算定する。図3.6に算定の流れを示す。

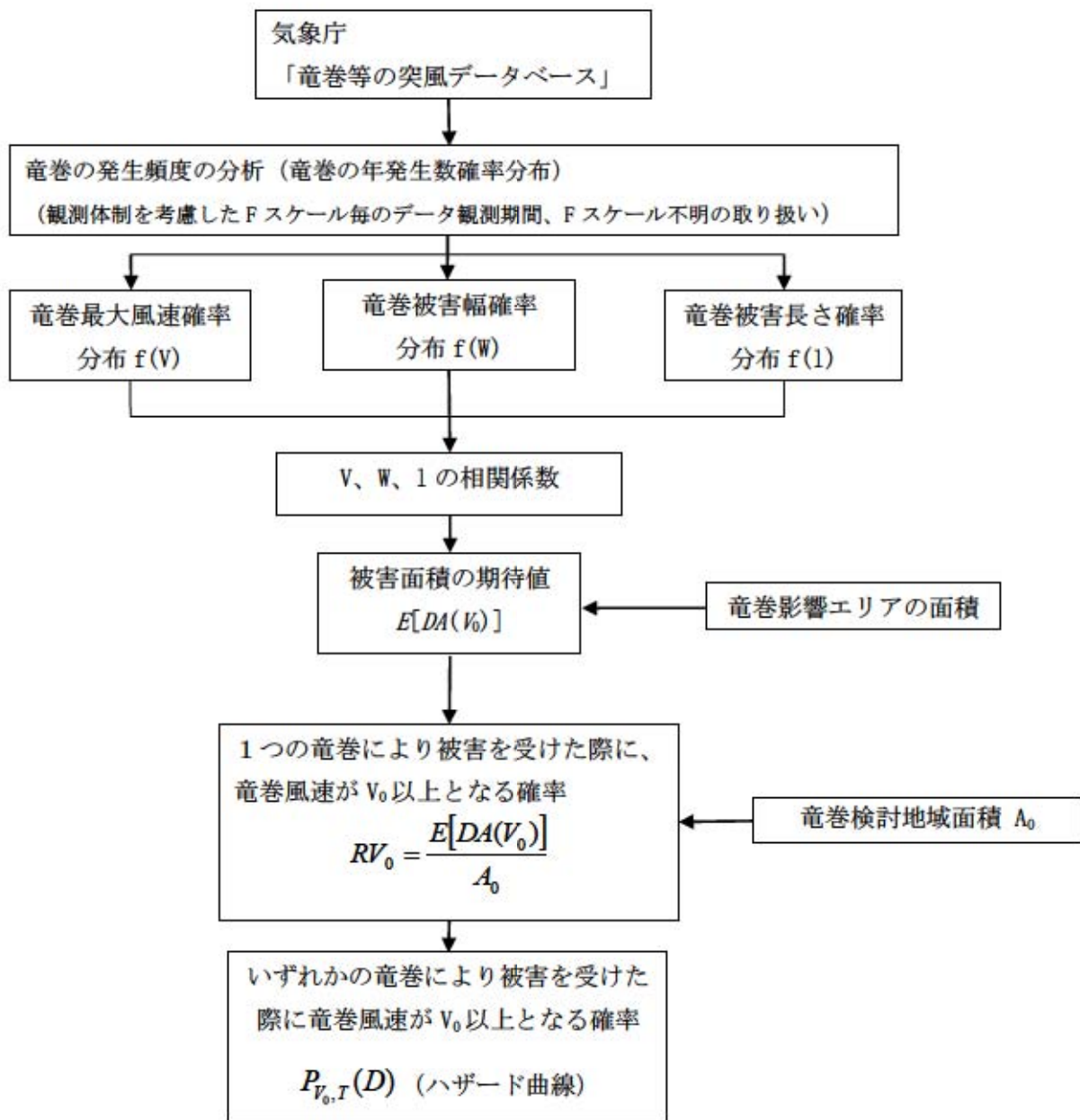


図 3.6 竜巻最大風速のハザード曲線算定フロー

竜巻最大風速のハザード曲線の算定に当たっては、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）で評価、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評価にて算定し、そのうち保守的な設定となる V_{B2} を設定する。

c. 海岸線から陸側及び海側それぞれ5km全域の評価

海岸線から陸側及び海側それぞれ5km全域の評価条件を表3.6に示す。

情報の信頼性が高い陸上竜巻も発生数にカウントする。

表3.6 海側陸側それぞれ5kmの評価条件

項目	発生数	被害幅	被害長さ
評価条件	陸上進入竜巻 [※] もカウント	全幅	全長

※：今回の検討において、陸上進入竜巻は観測されていない。

d. 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スケール別に算出した。なお、観測体制の変遷（図3.7参照）による観測データ品質のばらつきを踏まえ、以下の①～③の基本的な考え方に基づいて整理した。分析結果に基づいて整理した竜巻の発生数を表3.8に示す。

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

また、Fスケール不明竜巻については、以下の取扱いを行うこととする。

- ・陸上で発生した竜巻（以下、陸上竜巻）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スケール不明竜巻は、被害が少ないF0竜巻と見なした。
- ・Fスケール不明の海上竜巻については、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スケールに分類した。

その結果、Fスケール不明の海上竜巻の取扱いにより、表3.7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。

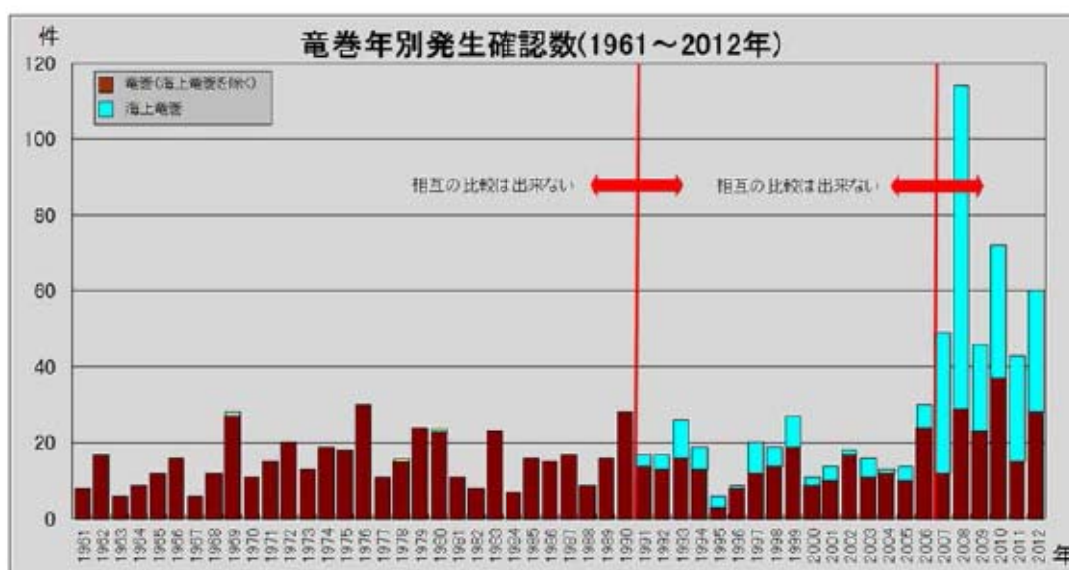


図 3.7 竜巻年別発生確認数 (1961 年～2012 年 (出典：気象庁 HP))

表 3.7 竜巻発生数の分析結果

竜巻検討地域 (沿岸±5km)	発生数の統計	小計	竜巻スケール			不明		総数 含む不明	
			F0	F1	F2	F3	陸上		海上
1961～ 2012/6 (51.5年間)	期間内総数	90	30	47	13	0	3	113	206
	平均値 (年)	1.748	0.583	0.913	0.252	0	0.068	2.194	4.000
	標準偏差 (年)	2.526	2.003	1.020	0.522	0	0.309	5.862	7.687
1991～ 2012/6 (21.5年間)	期間内総数	60	30	27	3	0	3	112	175
	平均値 (年)	2.791	1.395	1.256	0.140	0	0.140	5.209	8.140
	標準偏差 (年)	3.467	2.956	1.124	0.356	0	0.473	8.294	10.683
2007～ 2012/6 (5.5年間)	期間内総数	32	26	6	0	0	0	93	125
	平均値 (年)	5.818	4.727	1.091	0.000	0	0	16.909	22.727
	標準偏差 (年)	6.087	4.814	1.337	0.000	0	0	10.661	14.700
疑似 51.5年間 (陸上竜巻)	期間内総数	322	244	65	13	0	0	871	1193
	平均値 (年)	6.236	4.727	1.256	0.252	0	0	16.909	23.145
	標準偏差 (年)	4.970	4.814	1.124	0.522	0	0	10.661	11.762
疑似 51.5年間 (全竜巻)	期間内総数	1195	905	241	49	0	0	0	1195
	平均値 (年)	23.102	17.514	4.653	0.935	0	0	0	23.102
	標準偏差 (年)	9.567	9.265	2.163	1.004	0	0	0	9.567

注1：切り上げの関係で総計数が一致していない箇所がある。

注2：色塗り部分については、竜巻発生頻度の分析に用いるデータを示している。

表3.8 分析結果に基づいて整理した竜巻の発生数

疑似 51.5年間 (全竜巻)	統計	F0	F1	F2	F3	F不明	小計
	期間内総数	905	241	49	0	0	1195
	平均値 (年)	17.573	4.680	0.951	0	0	23.204
	標準偏差 (年)	9.265	2.163	1.004	0	0	9.567

(参考) ポリヤ分布の適用について (詳細は補足説明資料1, 1.4参考1)

- ・ガイドにて、 V_{R2} 算定の参考になるとされている東京工芸大学委託成果によれば、Wen and 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稀な現象の場合に有用な分布である。一方、ポリヤ分布は、発生状況が必ずしも独立でない稀現象（ある現象が生ずるのは稀であるが、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）。台風や前線により竜巻が発生した場合、同時多発的に複数の竜巻が発生する状況が考えられるため、ポリヤ分布の方が実現象をより反映できると考えられる。
- ・なお、国内を対象とした竜巻の年発生数の分布の適合性に関する検討結果は、上述の東京工芸大学委託成果に示されており、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。
- ・今回、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。図3.8に竜巻検討地域における竜巻の年発生数の累積頻度を示す。
- ・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。

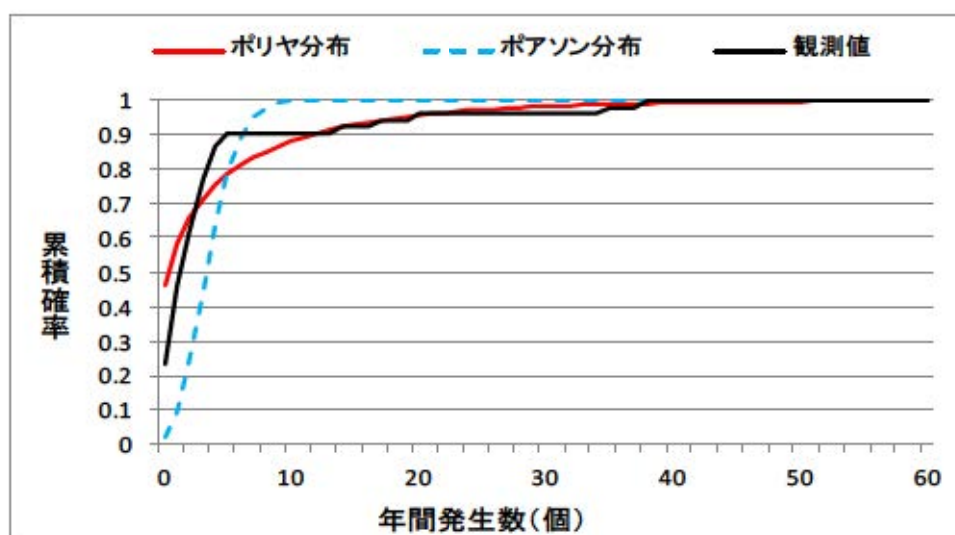


図3.8 竜巻検討地域における竜巻の年発生数の累積頻度

e. 竜巻風速、被害幅、被害長さの確率分布及び相関係数

竜巻検討地域における51.5年間の竜巻の発生数、被害幅、被害長さを基に確率密度分布については、ガイド並びにガイドが参考としている東京工芸大学委託成果を参照し、対数正規分布に従うものとした。

なお、竜巻風速については、観測値であるFスケールの超過確率に適合させるため、表1.3.5に記載のFスケールの各区分の中央値により竜巻風速の対数正規分布を算出している。

また、疑似的な竜巻の作成に伴う被害幅・長さの情報がない竜巻には、被害幅・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・長さが大きい方から優先的に用いることで、被害幅・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・長さ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。

表3.9に竜巻検討地域における竜巻パラメータ（51.5年間の推定結果）を、表3.10に竜巻風速、被害幅、被害長さの相関係数を、図3.9～図3.14に風速、被害幅、被害長さの確率分布密度及び超過確率を示す。

表3.9 竜巻検討地域における竜巻パラメータ（51.5年間の推定結果）

	パラメータ	統計量	小計	竜巻スケール			
				F0	F1	F2	F3
竜巻検討地域 (沿岸±5km)	発生数	期間内総数	1195	905	241	49	0
		平均値(年)	23.204	17.573	4.680	0.951	0
		標準偏差(年)	9.567	9.265	2.163	1.004	0
疑似 51.5年間 (全竜巻)	被害幅	期間内総数	1195	905	241	49	0
		平均値(m)	117.7	116.2	113.5	167.1	0
		標準偏差(m)	130.8	121.5	103.1	303.4	0
被害長	期間内総数	1195	905	241	49	0	
	平均値(km)	1.572	1.084	3.156	2.812	0	
	標準偏差(km)	2.680	1.427	4.741	3.043	0	

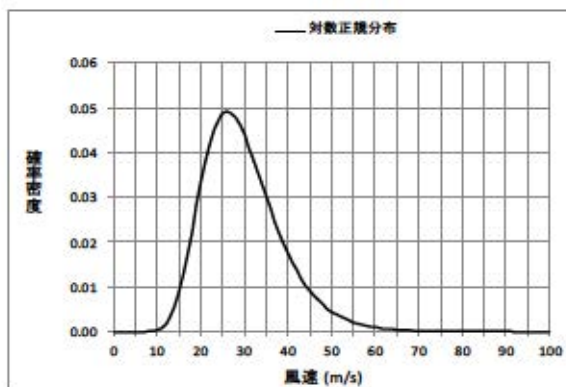


図3.9 風速の確率分布密度

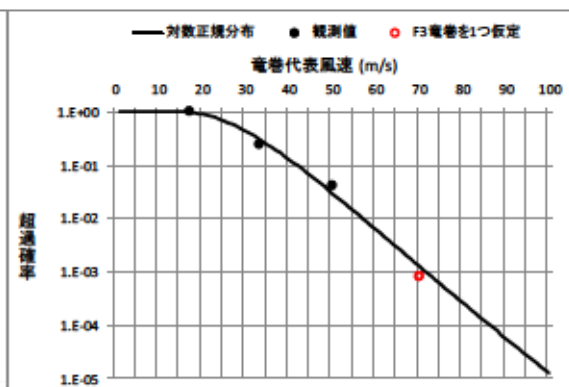


図3.10 風速の超過確率

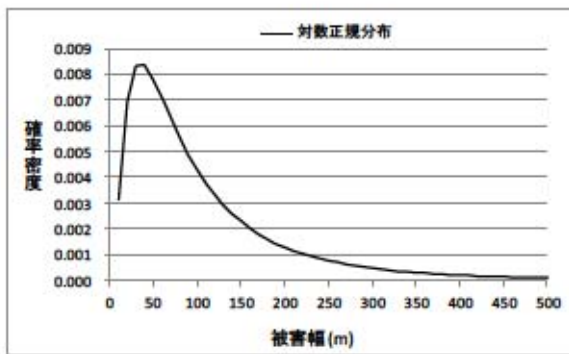


図3.11 被害幅の確率密度分布

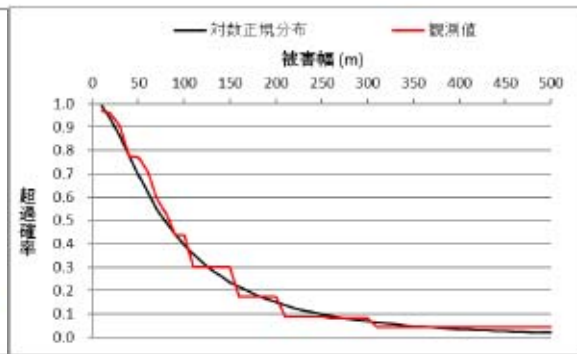


図3.12 被害幅の超過確率

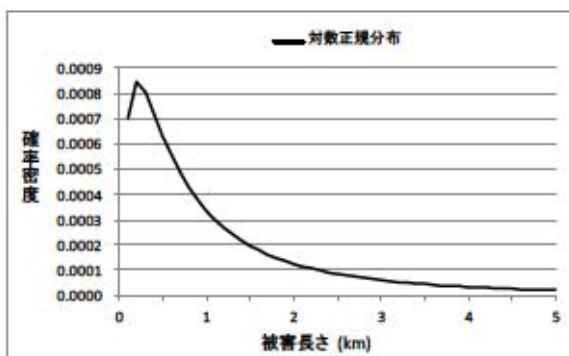


図3.13 被害長さの確率密度分布

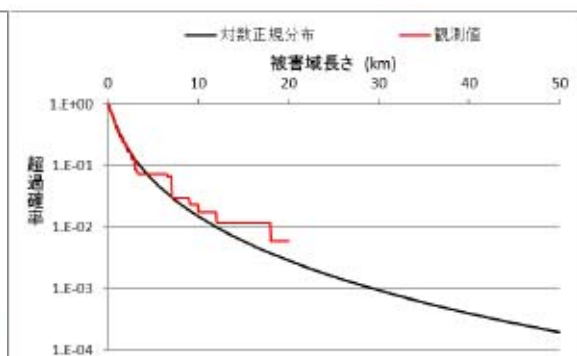


図3.14 被害長さの超過確率

表3.10 竜巻風速、被害幅、被害長さの相関係数※

相関係数(対数)	風速 (m/s)	被害幅 (m)	被害長さ (m)
風速 (m/s)	1.000	0	0.301
被害幅 (m)	—	1.000	0.458
被害長さ (m)	—	—	1.000

※：観測データのみを用いて算定

なお、竜巻検討地域における風速と被害幅の相関係数は-0.057と弱い負の相関を示していた。風速が大きくなるほど被害幅が小さくなる負の相関をそのまま使用することは非保守的との判断から、検定を行い、無相関であることが否定されないことを確認した後、相関係数を0と置いた。

f. 竜巻影響エリアの設定

竜巻影響エリアは、泊発電所3号炉の評価対象施設の面積（表3.11）及び設置位置を考慮して、図3.15に示すとおり評価対象施設を包絡するエリア（直径425m、面積約142,000m²）として設定する。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。

表3.11 評価対象施設の面積

評価対象施設	設置面積 (m ²)
原子炉建屋 (R/B)	4,889
原子炉補助建屋 (A/B)	3,689
ディーゼル発電機建屋 (DG/B)	493
タービン建屋 (T/B)	5,225
電気建屋 (EL/B)	1,214
出入管理建屋 (AC/B)	1,603
循環水ポンプ建屋 (CWP/B)	2,748
合 計	19,861

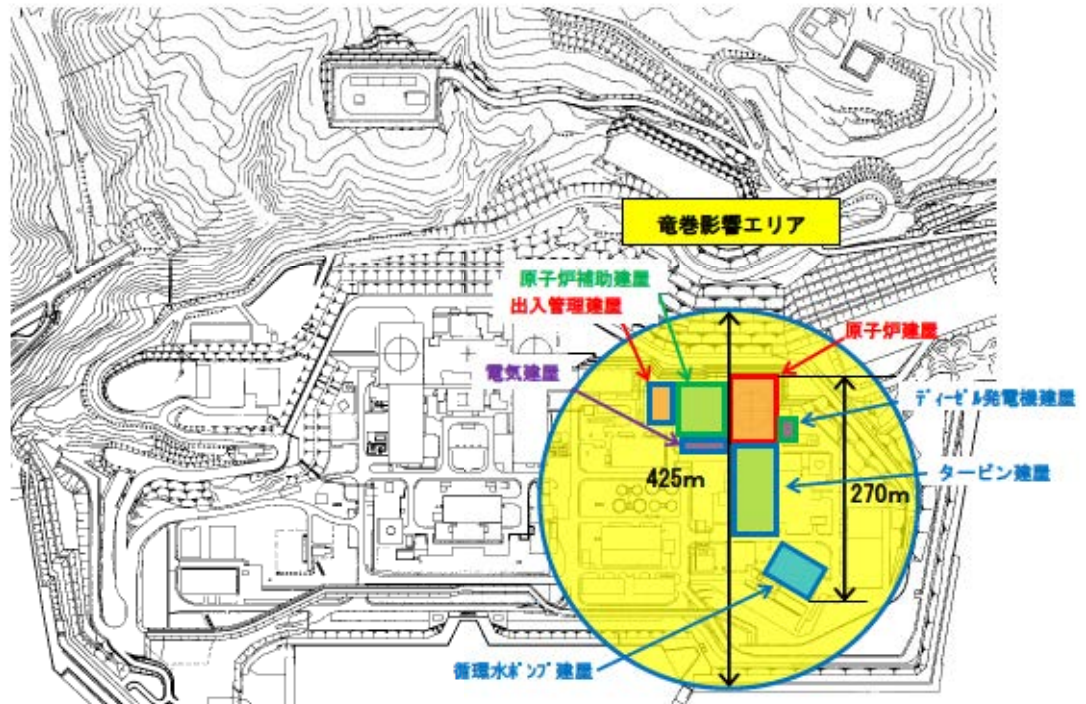


図3.15 竜巻影響エリア

g. ハザード曲線の算定

以下に示す式により、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。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、58.7m/sとなるため、小数点を切り上げ、59m/sとした。

図3.16に竜巻検討地域における竜巻最大風速のハザード曲線を示す。

T年以内にいずれかの竜巻に遭遇し、かつ竜巻風速が V_0 以上となる確率

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

$$\beta = \left(\frac{\sigma^2}{v} - 1 \right) \times \frac{1}{v} \quad : \text{竜巻の年発生数の平均値と標準偏差で表されるパラメータ}$$

$$R(V_0) = \frac{E[DA(V_0)]}{A_0} \quad : \text{評価対象構造物が1つの竜巻に遭遇し、竜巻風速が } V_0 \text{ 以上となる確率}$$

$$E[DA(V_0)] = \int_0^\infty \int_0^\infty \int_0^\infty W(V_0) l f(V, w, l) dV dw dl \quad : \text{被害面積の期待値}$$

$$+ L \int_0^\infty \int_0^\infty l f(V, l) dV dl + L \int_0^\infty \int_0^\infty W(V_0) f(V, w) dV dw + S \int_{V_0}^\infty f(V) dV$$

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

v : 竜巻の年平均発生数

T : 年数

σ : 竜巻の年発生数の標準偏差

$E[\cdot]$: 期待値

$DA(V_0)$: 1つの竜巻により被害を受け竜巻風速が V_0 以上となる面積

V : 風速、 W : 被害幅、 l : 被害長さ

$f(\cdot)$: 確率密度分布

L : 円形構造物の直径、 S : 円形構造物の面積

$W(V_0)$: 竜巻の被害幅のうち風速が V_0 以上となる部分の幅

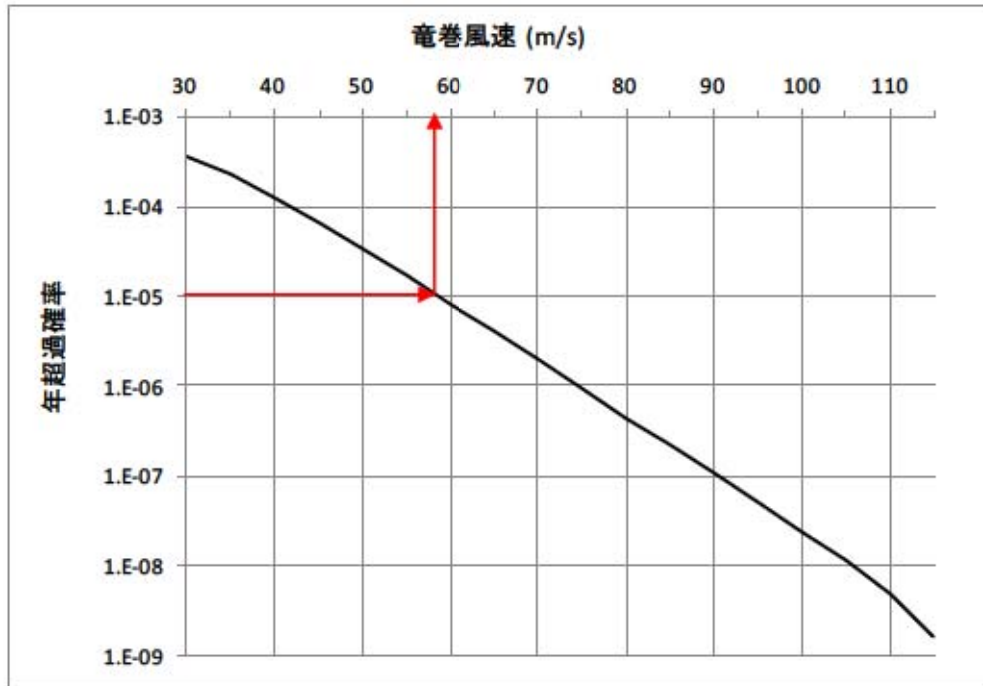


図3.16 竜巻最大風速のハザード曲線

h. 1km範囲ごとに細分化した評価

1km範囲ごとの評価は、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）を設定して評価した。その条件を表3.12に示す。

表3.12 1km範囲の解析条件

面積	<ul style="list-style-type: none"> ・竜巻検討地域の内、海側、陸側それぞれ5km範囲内を1kmの範囲に分けて検討を行う。 ・但し、海側1km以遠の海上竜巻については、全てFスケールが不明であるため、ハザード曲線の算定は不可能。
竜巻発生数	<ul style="list-style-type: none"> ・各1km範囲で発生した竜巻 ・各1km範囲からの進入竜巻 ・5km以遠からの進入竜巻 ・5km範囲内での評価と同様に年代による竜巻発生数の違いを考慮して51.5年間の擬似データを作成する（Fスケール不明上陸竜巻はF0とする。）
竜巻風速、被害幅、被害長さ	(竜巻被害面積期待値)・1kmエリア内での風速、被害幅、被害長さ (相関係数)・5km範囲内での評価で用いたものと同じ
その他	<ul style="list-style-type: none"> ・他はガイドに従い算定

上記解析条件に基づいて、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、海側0~1kmを対象とした場合の64.4m/sが最大となるため、小数点を切り上げ、65m/sとした。図3.17に竜巻検討地域における1km範囲ごとの竜巻最大風速のハザード曲線を示す。

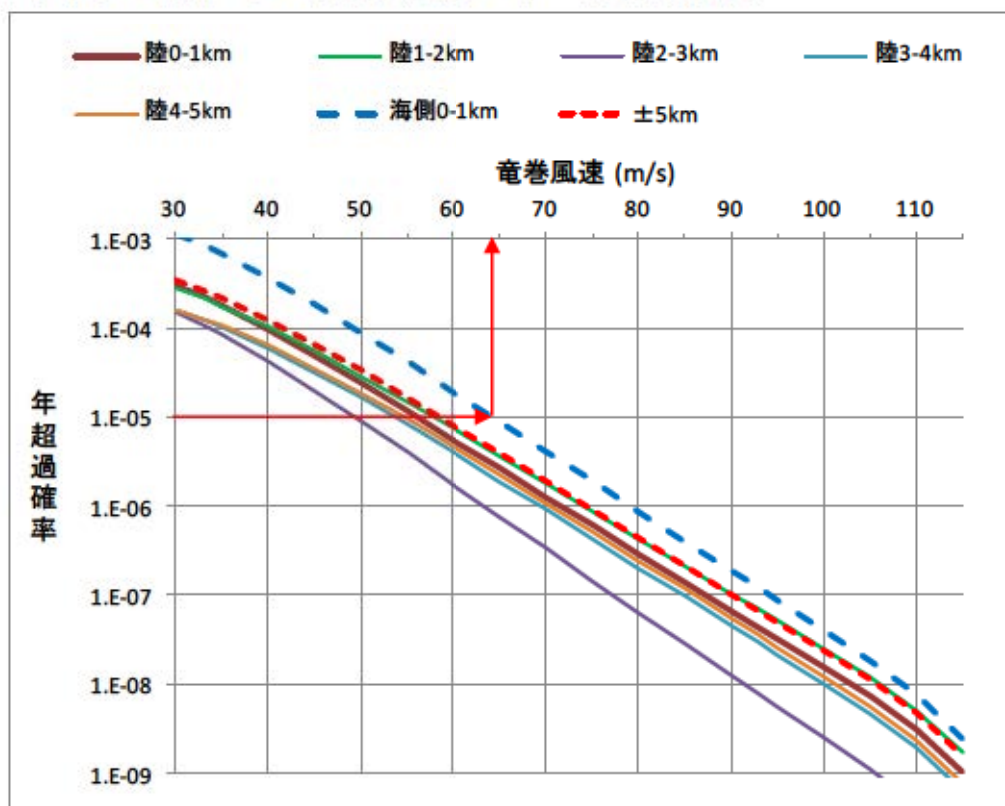


図3.17 竜巻最大風速のハザード曲線 (1km範囲の評価)

i. 竜巻最大風速のハザード曲線による最大風速 (V_{B2})

海側及び陸側それぞれ5km全域の評価と、1km範囲ごとの評価を比較して、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、65m/sとする。表3.13及び図3.18に竜巻の最大風速の算定結果を示す。

表3.13 竜巻の最大風速の算定結果

ハザード曲線算定範囲	年超過確率 10^{-5} 風速
海側・陸側5km範囲	59m/s
1km範囲毎	65m/s

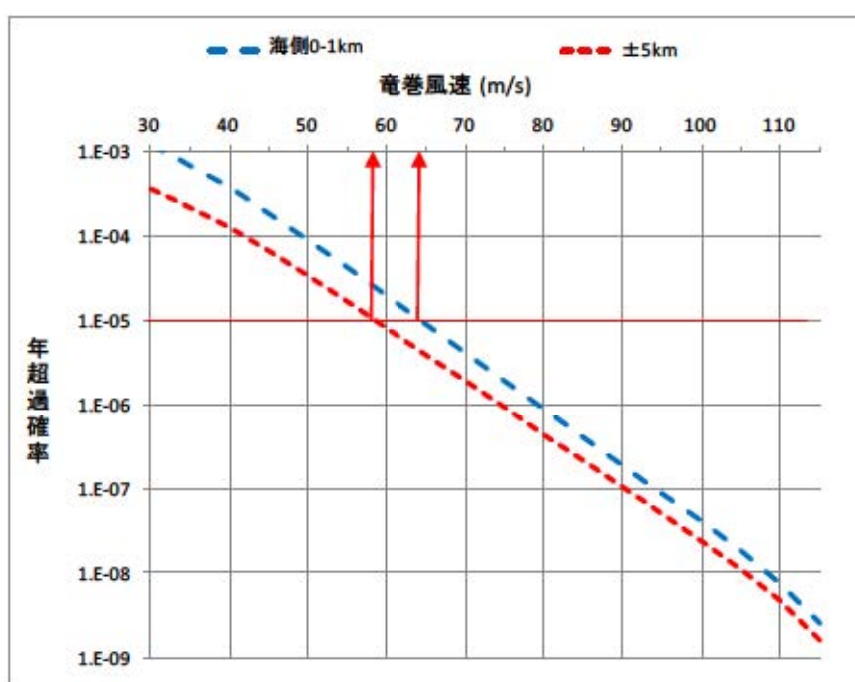


図3.18 竜巻最大風速のハザード曲線 (5km範囲と1km範囲の評価の比較)

なお、年超過確率 10^{-5} の根拠については、ガイドを参考とするとともに、設計基準事故の発生頻度が 10^{-3} /年 \sim 10^{-4} /年^{※1}であることから、設計基準として考慮する竜巻の最大風速は 10^{-4} /年に設定することが妥当であると考え。ただし、データ数が十分でないことを踏まえ保守的に 10^{-4} より1桁下げて、竜巻最大風速のハザード曲線による最大風速の年超過確率は 10^{-5} とする。

※1: 発電用軽水型原子炉施設に係る新安全基準骨子案に対する意見募集の結果について
(平成25年4月3日原子力規制庁技術基盤課)

j. 基準竜巻の最大風速 (V_B)

以上より算定した竜巻の最大風速を表3.14及び図3.19に示す。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、泊発電所における基準竜巻の最大風速 V_B は92m/sとする。

なお、 V_B の年超過確率は 1.4×10^{-7} となる。

表3.14 竜巻の最大風速の算定結果

	竜巻の最大風速
過去に発生した竜巻による最大風速 (V_{B1})	92m/s
竜巻最大風速のハザード曲線による最大風速 (V_{B2})	65m/s

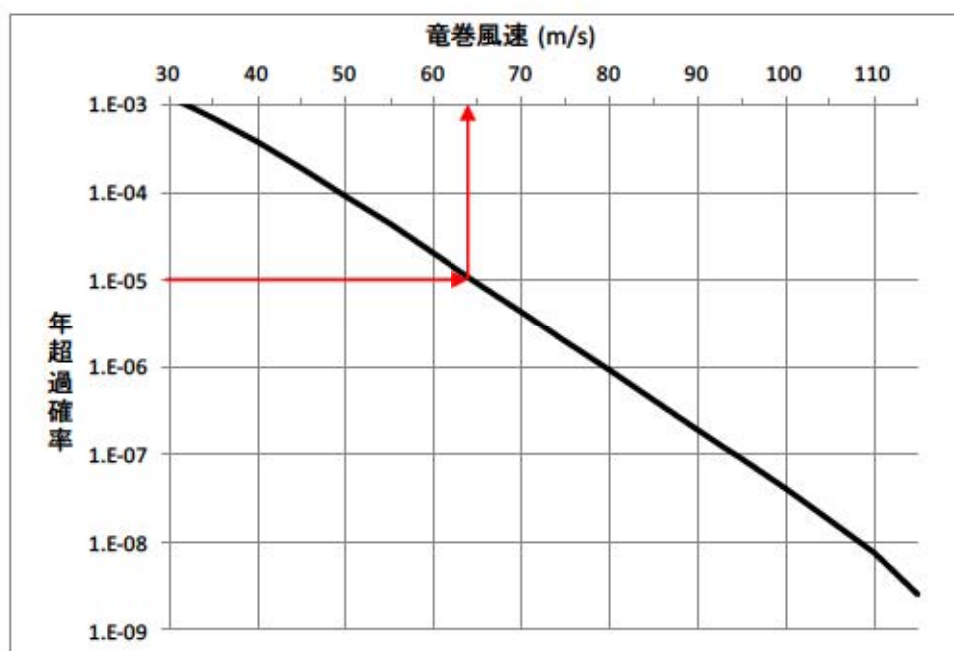


図3.19 竜巻最大風速のハザード曲線

k. 竜巻データの更新に関する対応

(a) 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、検討実施時点で最新であった1961年1月～2012年6月までの気象庁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を超える竜巻の報告はない。
- ・2012年6月以降、竜巻検討地域で観測された竜巻はF0若しくは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_{E2} が更新されることはない。

※1 : 2021年9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。

(b) 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。

(4) 設計竜巻の最大風速 (V_D) の設定

発電所のサイト特性（地形効果や竜巻の移動方向）を考慮して V_B の割り増しを検討し、設計竜巻の最大風速を設定する。

a. 地形効果による竜巻の増幅の可能性

泊発電所敷地の形状は、おおむね半円状であり、敷地前面（北西～南西方向）は日本海に面し、背後は積丹半島中央部の山嶺に続く標高 40m から 130m の丘陵地である。泊発電所周辺の地形図を図 3.20 に示す。

竜巻の渦は地表面粗度の影響を受けやすい。内陸・山岳部での竜巻発生数が海岸線付近に比べて少ないのは、この影響によるところが大きいと考えられる。

力学的な知見からは、風洞を用いた竜巻状流れ場の可視化実験（松井・田村 2005）等において、旋回流のパラメータの一つであるスワール比に応じて、地表面粗度が旋回流速度の低下に影響を与えることが分かっている。

最近の知見として、ラージ・エディ・シミュレーション（LES）による非定常乱流解析（例えば、Lewellen, D. C., and W. S. Lewellen 2007）で得られたスワール比に依存した竜巻の渦構造に関する知見が妥当であることが実際の竜巻近くで行った観測結果から示唆されている（Karstens et al. 2010）。

したがって、竜巻が地表面粗度の大きい丘陵地を超えてくることは考えにくい。

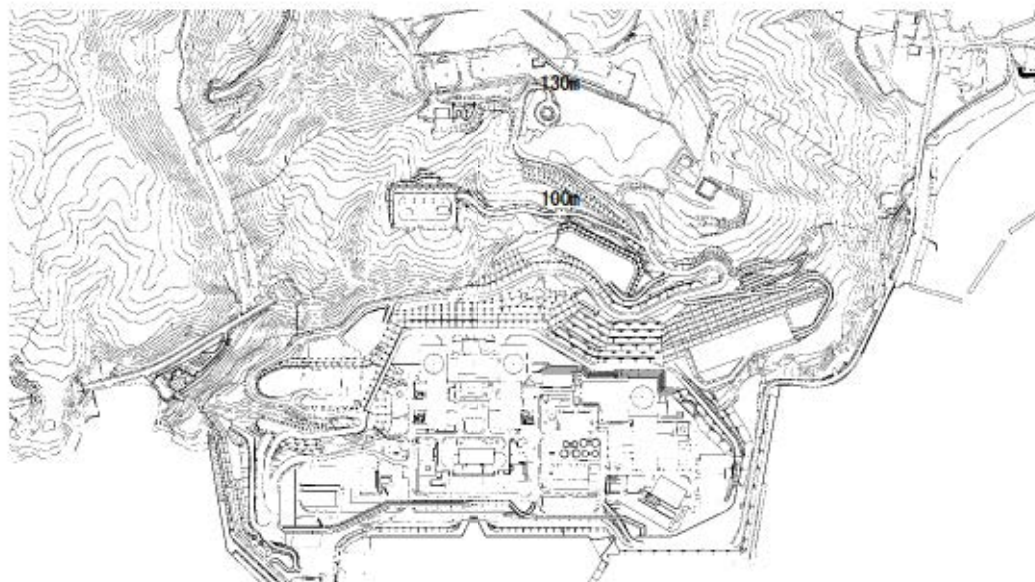


図 3.20 泊発電所周辺地形図

b. 地形効果による竜巻増幅に関する知見

これまでの地形効果による竜巻増幅に関する知見等を収集し、泊発電所が立地する地

域の周辺地形による竜巻の増幅の可能性について検討を行う。

主な知見として、Fujita (1989)やForbes (1998) の被害調査に関する文献に、下り斜面において竜巻の強さが増す傾向が見られたという報告がある。

この他にも、上りの斜面で増幅するという知見も存在しており、現時点で、地形効果による竜巻増幅を十分に評価できるだけの信頼性を有する知見は存在しない。

今後も継続的に新たな知見等の収集に取組み、必要な事項については適切に反映を行う。

c. 泊発電所の竜巻検討地域における竜巻の移動方向

泊発電所の竜巻検討地域における過去の発生竜巻について、移動方向の傾向を整理した。

観測されている発生竜巻の実績は全 206 個であり、そのうち 143 個の竜巻について移動方向が判明しており、これらを整理した結果を図 3.21 に示す。

[個]

北	9
北北東	3
北東	28
東北東	17
東	52
東南東	16
南東	8
南南東	2
南	3
南南西	1
南西	0
西南西	0
西	2
西北西	2
北西	0
北北西	0
計	143

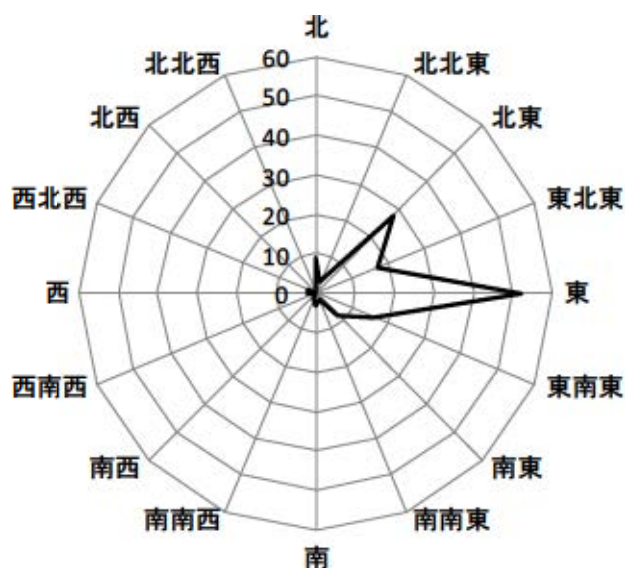


図 3.21 移動方向別の竜巻発生個数

143 個の発生竜巻のうち、東側方向に向けて移動する竜巻が大半を占めており、北東～南東までの範囲に 121 個が集中している。これは全個数のおよそ 85%である。

特に、泊発電所が位置する北海道後志支庁沿岸部の発生竜巻については、全て東側（北東～南東までの範囲）方向への移動が確認されている。

以上より、泊発電所付近の竜巻は、海上から陸側へ向かう方向が卓越している。

d. 設計竜巻の最大風速

泊発電所では竜巻は地形が平坦な海側から発電所敷地に進入してくる可能性が高く、発電所を含む敷地も平坦なため、地形効果による竜巻風速の増幅を考慮する必要はないと考えられることから、基準竜巻の最大風速に対する割り増しは行わず、設計竜巻の最大風速 V_D は 92m/s とする。

なお、設計竜巻については、今後も継続的に観測データや地形効果による竜巻風速の増幅に関する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。

(5) 評価に用いる設計竜巻の設定

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、評価ガイドに示される方法に基づいて設定する。具体的には、ランキン渦モデルを仮定し、①～⑤に従い設定する。設定した特性値を表 3.15 に示す。

なお、竜巻影響評価にあたっては、竜巻の観測数のデータ数が少ないこと、観測体制の変遷により観測データの品質が一貫していないこと、また竜巻の直接的な観測が現状困難であるため竜巻後の被害状況を調査・分析して観測結果としていることや観測の内容（Fスケール、被害長さ、被害幅、移動方向）が部分的に揃っていないという不確実性があることから、保守性を十分に確保するため、設計竜巻の最大風速（ V_D ）は $V_D=92\text{m/s}$ を安全側に数字を切り上げて、 $V_D=100\text{m/s}$ の竜巻の特性値に基づく設計荷重に対して、竜巻防護施設が安全機能を損なわない設計とする。なお、 $V_D=100\text{m/s}$ の年超過確率はハザード曲線より 4.1×10^{-8} に相当する。

① 設計竜巻の移動速度（ V_T ）

$$V_T = 0.15 \cdot V_D$$

ここで、 $V_D(\text{m/s})$: 設計竜巻の最大風速

② 設計竜巻の最大接線風速（ V_{Rm} ）

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

ここで、 $V_D(\text{m/s})$: 設計竜巻の最大風速、 $V_T(\text{m/s})$: 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})

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

ここで、 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($(dp/dt)_{max}$)

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

ここで、 V_T (m/s) : 設計竜巻の移動速度、 R_m (m/s) : 設計竜巻の最大接線風速半径

表 3.15 設計竜巻の特性値 ($V_D=100\text{m/s}$)

最大風速	移動風速	最大接線風速	最大接線風速半径	最大気圧低下量	最大気圧低下率
V_D	V_T	V_{Rm}	R_m	ΔP_{max}	$(dp/dt)_{max}$
(m/s)	(m/s)	(m/s)	(m)	(hPa)	(hPa/s)
100	15	85	30	89	45

4. 竜巻影響評価

(1) 概要

評価の概要は以下のとおりとする。

- ①設計竜巻及び設計荷重（設計竜巻荷重及びその他の組み合わせ荷重を適切に組み合わせた荷重）の設定
- ②泊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飛来物に対する竜巻防護施設の防護対策
- ⑤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、必要に応じて対策を行うことで竜巻防護施設の安全機能が維持されることを確認

(2) 評価対象施設

「2. (1) 評価対象施設」に示したとおりとする。

(3) 設計荷重の設定

a. 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」、「気圧差による圧力」及び「飛来物の衝撃荷重」について、以下のとおり設定する。

(a) 設計竜巻による風圧力の設定

設計竜巻の水平方向の最大風速によって評価対象施設（屋根を含む）に作用する風圧力（ P_D ）すなわち風圧力による荷重（ W_w ）は、「建築基準法施行令」及び「日本建築学会建築物荷重指針・同解説（2004）」に準拠して、下式により算定する。

なお、ガスト影響係数（ G ）は $G=1.0$ 、風力係数（ C ）は施設の形状や風圧が作用する部位（屋根、壁等）に応じて設定する。

$$W_w (= P_D) = q \cdot G \cdot C \cdot A$$

ここで、

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

G : ガスト影響係数 ($=1.0$)

C : 風力係数

A : 施設の受圧面積

ρ : 空気密度

V_D : 設計竜巻の最大風速

(b) 設計竜巻による鉛直方向の風圧力

建屋の底部や屋根スラブについて、鉛直方向の風圧力の影響を受けると考える。底については、評価対象施設のうち、竜巻防護施設の外壳として機能する部分には存在しない。

屋根スラブについては、鉄筋コンクリート造であることから、鉄筋コンクリート造について、鉛直方向の風圧力に対する健全性の確認を行う。

設備については、評価対象としている屋外設備には底状の形状はないため、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ないことから、鉛直方向の最大風速等に基づいて算定した鉛直方向の風圧力の考慮は行わない。

(c) 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圧力の設定
評価対象施設内外の気圧差による圧力は、最大気圧低下量(ΔP_{max})に基づき設定する。

①建物・構築物等

建屋については、気圧差による圧力荷重が最も大きくなる「閉じた施設」を想定し、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。

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

ここで、

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物・構築物等について、建屋壁、屋根等の影響評価を実施し、当該施設が破損した場合には安全機能維持への影響について確認を行う。

②設備 (系統、機器)

設備についても、上記と同様に圧力荷重 (W_P) を設定する。なお、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、圧力影響により作用する応力が許容値内であるか確認し、許容値を上回る場合には設備が破損した場合の安全機能維持への影響について確認を行う。

(d) 設計竜巻による飛来物が評価対象施設に衝突する際の衝撃荷重の設定

①泊発電所における飛来物に係る現地調査結果及び設計飛来物の妥当性について

竜巻影響評価における設計飛来物については、泊発電所における飛来物に係る現地調査結果と、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設定している。以下に、泊発電所にて実施 (平成 25 年 6 月 24~25 日、平成 27 年 7 月~11 月)

した飛来物の現地調査の結果と、その結果を元に抽出した設計飛来物の妥当性を示す。

イ. 評価に用いる設計竜巻の特性

評価に用いる竜巻の最大風速は、100m/s とする。(表 3.14 参照)

ロ. 飛来物に対する考え方

飛来物のうち、後述する設計飛来物に選定した鋼製材より運動エネルギー又は貫通力が大きなもの(コンテナ等)については、固縛等を行うことで飛散させないものとする。また、衝突時に防護施設に与えるエネルギーが鋼製材の運動エネルギーより小さいものについては、適切な飛散防止対策を行う。

ハ. 設計飛来物の選定

上記の考え方に基づき、泊発電所の飛来物になりえる物品の調査を行い、設計飛来物の選定を行った。

飛来物に係る調査の結果、泊発電所において飛来物となる可能性があるものから、浮き上がりの有無、運動エネルギー及び貫通力の大きさから鋼製材を設計飛来物として抽出した。選定した鋼製材のサイズ、質量については、評価ガイドを参考に設定した。

さらに、後述する竜巻防護対策として設置する防護ネットをすり抜ける飛来物として砂利を選定した。なお、砂利のサイズはネットの網目のサイズ(5cm)を考慮して設定した。また、防護ネットは通過しないが使用済燃料ピット及び新燃料貯蔵庫に侵入した場合に燃料集合体に直接落下するものとして、鋼製パイプを選定した。

図4.1に泊発電所における設計飛来物の選定フロー、表4.1に抽出された泊発電所における設計飛来物を示す。

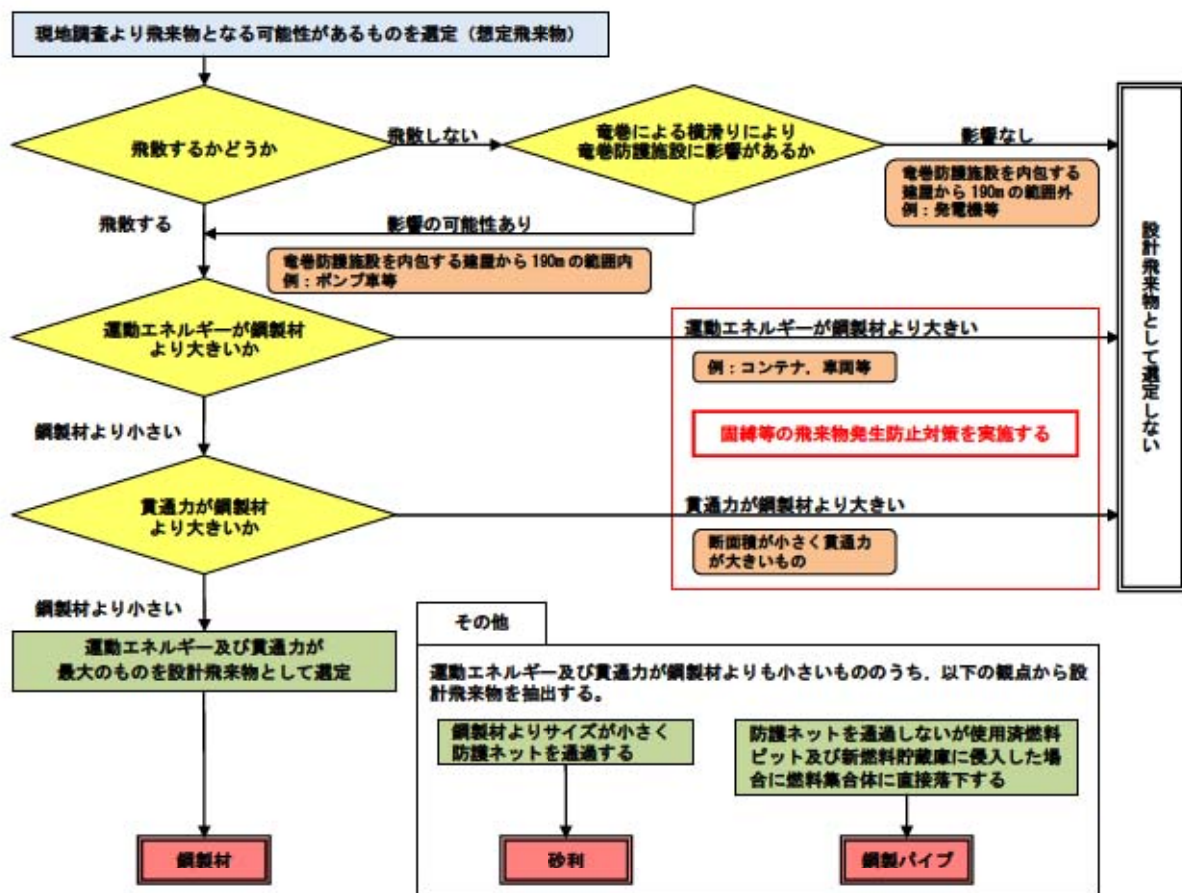


図 4.1 設計飛来物選定フロー

表 4.1 泊発電所における設計飛来物

飛来物の種類	砂利	鋼製パイプ	鋼製材
サイズ (m)	長さ×幅×奥行 0.04×0.04×0.04	長さ×直径 2×0.05	長さ×幅×奥行 4.2×0.3×0.2
質量 (kg)	0.17	8.4	135

②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及び最大鉛直速度は、衝撃荷重による影響を保守的に評価するため、評価ガイドに示される竜巻の最大風速 $V_D=100\text{m/s}$ の場合と同じ値とする。なお、評価ガイドにおける鋼製材の最大水平速度、最大鉛直速度については、平成 26 年 9 月 17 日に改正（最大水平速度が 57m/s から 51m/s に、最大鉛直速度が 38m/s から 34m/s に改正）されているが、竜巻防護設計にあたっては、より保守的な改正前の値を用いるものとし、表 4.2 のとおりとする。

ただし、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^{*}を参考に
して、ランキン渦を仮定し風速場の中での速度を算出した。

表 4.2 設計飛来物及び最大速度

飛来物の種類	砂利	鋼製パイプ	鋼製材
サイズ (m)	長さ×幅×奥行 0.04×0.04×0.04	長さ×直径 2×0.05	長さ×幅×奥行 4.2×0.3×0.2
質量 (kg)	0.17	8.4	135
最大水平速度 (m/s)	62	49	57
最大鉛直速度 (m/s)	42	33	38

※：竜巻による原子力施設への影響に関する調査研究（東京工芸大学）

E. Simiu and M. Cordes, NBSIR76-1050. Tornado-Borne Missile Speeds, 1976

③設計竜巻荷重の組み合わせ

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、下式により算定する。

$$W_{T1} = W_p$$

$$W_{T2} = W_w + 0.5 \cdot W_p + W_m$$

ここで、

W_{T1} , W_{T2} ：設計竜巻による複合荷重

W_w ：設計竜巻の風圧力による荷重

W_p ：設計竜巻による気圧差による荷重

W_m ：設計飛来物による衝撃荷重

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。

b. 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。

(a) 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、運転時荷重を適切に組み合わせる。(補足説明資料1
3参照)

(b) 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^{*}、積乱雲の発達時に竜巻と同時に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。

①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。

②雪

泊発電所が立地する地域においては、冬期、竜巻が襲来する場合は竜巻通過前後に降雪を伴う可能性はあるが、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や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るため、雪による荷重は十分小さく設計竜巻荷重に包絡される。

③雹

雹の一般的な大きさは5mm～数cmであり、仮に粒径10cm程度の大型の雹を飛来物として想定した場合の運動エネルギーは約0.9kJ程度と十分小さく、雹の衝突による荷重は設計竜巻荷重に包絡される。

④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無く、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

設計竜巻は設計基準事故の起因とはならない設計とするため、設計竜巻と設計基準事故は独立事象となる。また、設計竜巻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の組み合わせは考慮していない。

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、動的機器である原子炉補機冷却海水ポンプが考えられるが、設計基準事故時においても海水ポンプの圧力、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。(補足説明資料15参照)

※：雷雨とメソ気象 大野久雄、東京堂出版

(4) 施設の構造健全性の確認

a. 概要

設計竜巻荷重及びその他組み合わせ荷重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が維持されて安全機能が維持されることを確認する。

b. 竜巻防護施設の外殻となる施設の構造健全性の確認結果

(a) 概要

竜巻防護施設の外殻となる施設に求められる機能は、防護機能及び破損により竜巻防護施設へ影響を与えないことである。

防護機能については、竜巻防護施設の外殻となる施設の構造健全性を確認することにより、内包する竜巻防護施設が影響を受けないことを確認する。構造健全性の確認は、複合荷重 (W_{T1} 、 W_{T2}) に対する建屋の構造骨組、部位の評価及び設計飛来物の衝突による貫通・裏面剥離評価を行う。

外壁や屋根など竜巻防護施設の外殻となる施設の各部に破損が生じる場合は、破損により竜巻防護施設へ影響を与えないことを確認する。

竜巻防護施設への影響がある場合は、竜巻防護対策を実施する。

竜巻防護施設の外殻となる施設の概略配置図を図 4.2 に示す。また、評価フローを図 4.3 に、評価に関する対象荷重及び評価内容を表 4.3 に示す。

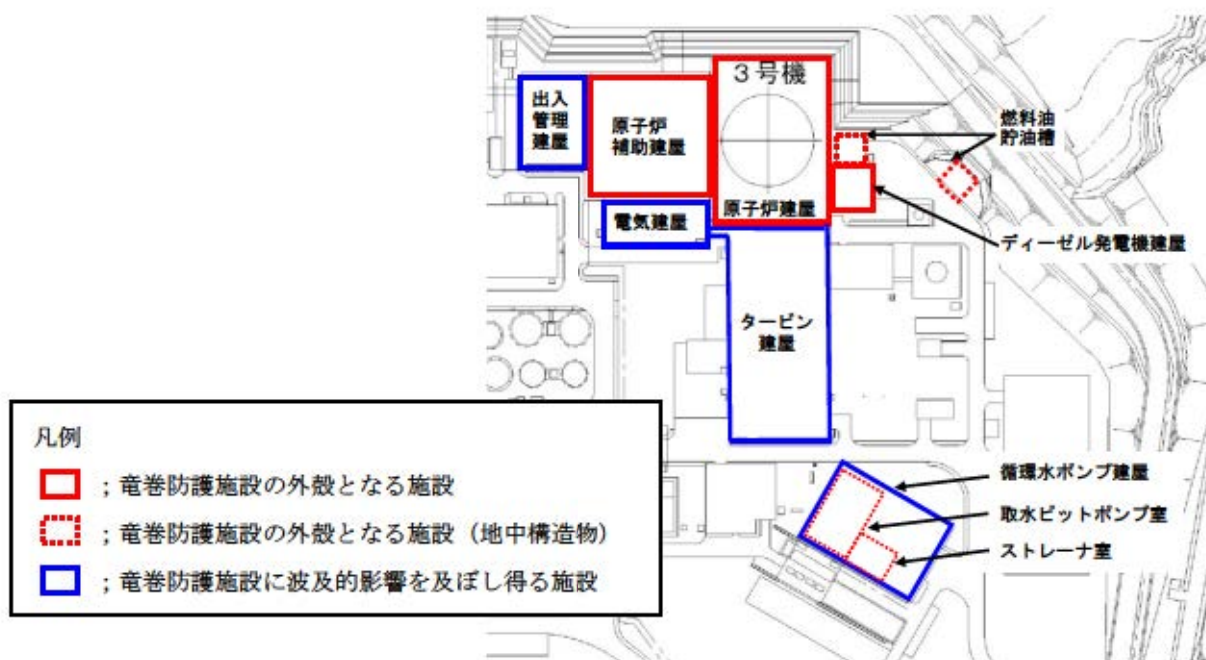
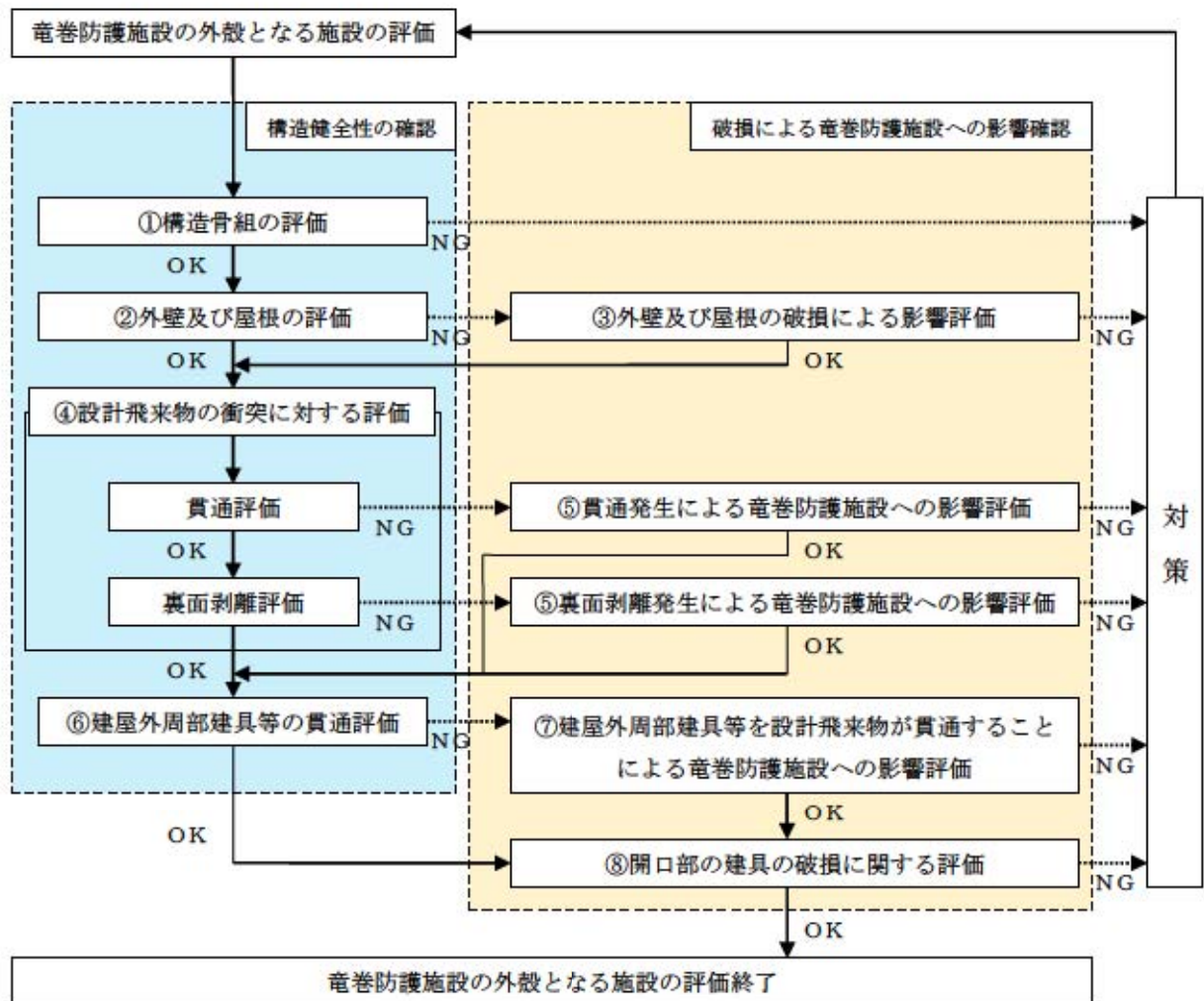


図 4.2 竜巻防護施設の外殻となる施設の概略配置図



※：燃料油貯油槽（既設及び新設）、取水ピットポンプ室及びストレーナ室については、地中構造物であることから、「④設計飛来物の衝突に対する評価」及び「⑥建屋外周部建具等の貫通評価」のみ実施。

図 4.3 竜巻防護施設の外殻となる施設の評価フロー

表 4.3 竜巻防護施設の外殻となる施設の構造健全性の評価方法 (1/2)

	評価項目	対象部位	荷 重	評価内容	
				評価対象	評価基準値
①	構造骨組の評価	鉄筋コンクリート造	W_{T1} 、 W_{T2}	せん断ひずみ	2.0×10^{-3} 以下 ^{※1}
		鉄骨造		層間変形角	1/120 以下 ^{※2}
②	外壁及び屋根の評価	外壁及び屋根	W_{T1} 、 W_{T2}	発生応力、ひずみ	許容限界以下
			W_{T1} 、 W_{T2} ^{※3}	発生応力	終局耐力以下
④	設計飛来物の衝突に対する評価	外壁及び屋根	設計飛来物 ^{※4} の衝突	部材厚さ	貫通限界厚さ
		外壁 (波板)		貫通するものとし、破損による影響評価を実施	裏面剥離限界厚さ
⑥	建屋外周部建具等の貫通評価	扉、シャッター等 ^{※5}	設計飛来物 ^{※4} の衝突	建具等の厚さ	貫通限界厚さ

※1：原子力発電所耐震設計技術指針 (JEAG4601-1987) に示されている、鉄筋コンクリート耐震壁のせん断ひずみに関する許容限界の目安値

※2：建築基準法施行令第 82 条の 2 に示されている、当該層間変位の当該各階の高さに対する割合の許容限界値

※3：衝撃荷重 W_M と逆向きの荷重に対し検討を実施するため、設計飛来物による衝撃荷重 W_M は考慮しない

※4：設計飛来物のうち鋼製材

※5：扉、シャッター、ブローアウトパネル及びディーゼル発電機燃料油貯油槽のプロテクター蓋

表 4.3 竜巻防護施設の外殻となる施設の構造健全性の評価方法 (2/2)

	評価項目	評価内容
③	外壁及び屋根の破損による影響評価	破損により建屋内の竜巻防護施設に影響を及ぼさないことを確認
⑤	貫通発生による竜巻防護施設への影響評価	貫通した飛散物及び飛散コンクリートが竜巻防護施設に衝突しないことを確認
	裏面剥離による竜巻防護施設への影響評価	飛散コンクリートが竜巻防護施設に衝突しないこと、衝突したとしても竜巻防護施設に影響がないことを確認
⑦	建屋外周部建具等を設計飛来物が貫通することによる竜巻防護施設への影響評価	貫通した飛散物が竜巻防護施設に衝突しないことを確認
⑧	開口部の建具の破損に関する評価	建屋内開口部周辺の竜巻防護施設の有無により、開口部の建具が破損したとしても建屋内の竜巻防護施設に影響を及ぼさないことを確認

(b) 構造骨組の評価

イ. 評価方針

鉄筋コンクリート造部分については、複合荷重により耐震壁に発生するせん断ひずみを、地震応答解析モデルにおける各部材のせん断力の復元力特性（ $Q-\gamma$ 関係）により算定し、鉄筋コンクリート造耐震壁の最大応答せん断ひずみの評価基準値（ 2.0×10^{-3} ）を下回ることを確認する。

鉄骨造部分については、複合荷重により発生する層間変形角を、地震応答解析モデルにおける各部材の荷重変形関係（ $Q-\delta$ 関係）から得られる水平変位より算定し、評価基準値（1/120）を下回ることを確認する。

ロ. 評価結果

鉄筋コンクリート造部分については、表 4.4 に示すとおり、複合荷重により耐震壁に発生するせん断ひずみが評価基準値を下回ることを確認した。評価結果は、各建屋について、最も応答せん断ひずみが大きくなった部材について示している。なお、評価結果には、各部材に作用するせん断力と各部材の終局耐力との比較による裕度を併記する。

鉄骨造部分については、表 4.5 に示すとおり、複合荷重により発生する層間変形角が評価基準値を下回ることを確認した。評価結果は、最も層間変形角が大きくなった部材について示している。なお、評価結果には、各部材に作用するせん断力と各部材の終局耐力との比較による裕度を併記する。

表 4.4 竜巻防護施設の外殻となる施設のうち鉄筋コンクリート造部分の構造骨組の健全性評価結果

建屋	位置 (T.P.)	荷重*	複合荷重	せん断ひずみ	裕度
原子炉建屋 (外部遮へい建屋)	41.0~47.6m	W_{T2}	16,149kN	2.28×10^{-5}	25.3
原子炉建屋 (燃料取扱棟・周辺補機棟) (NS方向)	41.0~47.6m	W_{T2}	12,552kN	2.45×10^{-5}	22.7
原子炉補助建屋 (EW方向)	38.1~42.2m	W_{T2}	4,847kN	3.16×10^{-5}	16.7
ディーゼル発電機建屋 (NS方向)	10.3~18.8m	W_{T2}	5,096kN	5.21×10^{-5}	11.0

※： W_{T1} 及び W_{T2} を算出し、大きい荷重にて評価を実施

表 4.5 竜巻防護施設の外殻となる施設のうち鉄骨造部分の構造骨組の健全性評価結果

建屋	位置 (T.P.)	荷重*	複合荷重	層間変形角	裕度
原子炉建屋 (燃料取扱棟) (NS方向)	47.6~55.0m	W_{T2}	6,170kN	1/694	6.7

※： W_{T1} 及び W_{T2} を算出し、大きい荷重にて評価を実施

(c) 外壁及び屋根の評価

(c-1) 複合荷重 (W_{T1} 、 W_{T2}) に対する評価

イ. 評価方針

外壁及び屋根について部材厚が特に薄い箇所を検討対象とし、複合荷重により各部材に発生する応力、ひずみが許容限界以下であることを確認する。

ロ. 評価結果

評価結果については、工認審査の場において説明を行う。

(c-2) 風圧力による荷重 (W_w) 及び気圧差による荷重 (W_P) に対する評価

イ. 評価方針

外壁及び屋根は、設計竜巻の風圧力による荷重 W_w 及び気圧差による荷重 W_P が衝撃荷重 W_M とは逆向きの建屋の内側から外側方向に作用する。これらの荷重に対し、鉄骨造建屋の外壁及び屋根が破損の恐れがあると考えられるため、鉄骨造である燃料取扱棟の外壁及び屋根について検討を実施する。

外壁については、構成部材である波板（厚さ 0.8mm）、間柱及び胴縁を、屋根については、屋根スラブ及び鉄骨梁を対象に検討を行い、(部材の終局耐力から算定される許容荷重) / (竜巻による荷重) を部材の裕度とし、1.0 以上あることを確認する。

ロ. 評価結果

外壁及び屋根に対する評価結果を表 4.6 に示す。いずれの部材も裕度が 1.0 を上回ることから飛散しないことを確認した。

なお、外壁に飛来物等により開口部が発生した場合、屋根に対し建屋内側から外側へ吹上げ荷重が作用することが考えられるが、その影響は評価結果における裕度に包絡される。

表 4.6 外壁及び屋根に対する影響評価

部 位		竜巻による荷重	許容荷重	裕度
外壁	波板	8.9 (kN/m ²)	30.8 (kN/m ²)	3.4
	胴縁		11.1 (kN/m ²)	1.2
	間柱		13.6 (kN/m ²)	1.5
屋根	スラブ	10.55 (kN/m ²)	70.3 (kN/m ²)	6.6
	大梁		65.2 (kN/m ²)	6.1
	小梁		39.5 (kN/m ²)	3.7

(d) 外壁及び屋根の破損による影響評価

イ. 評価方針

「(c) 外壁及び屋根の評価」を踏まえ、外壁及び屋根が破損する場合について、破損による建屋内の竜巻防護施設への影響評価を実施する。

ロ. 評価結果

評価結果については、工認審査の場において説明を行う。

(e) 設計飛来物の衝突に対する評価

イ. 評価方針

鉄筋コンクリート造部分については、設計飛来物の外壁及び屋根への衝突に対し、貫通評価及び裏面剥離によるコンクリート片の飛散の評価を実施する。

設計飛来物が鉄骨造部分の外壁（波板）に衝突した場合は、貫通するものとする。

鉄筋コンクリート造部分の外壁及び屋根における貫通または裏面剥離の有無は、設計飛来物の衝突に対し貫通及び裏面剥離が発生する限界厚さ（貫通及び裏面剥離を生じないために必要な最小厚さ）をそれぞれ算出し、評価部材の最小厚さと比較することで確認する。屋根に裏面剥離が発生する場合は、剥離したコンクリートが飛散しないことをデッキプレートの有無により確認する。貫通及び裏面剥離が発生する限界厚さの評価については、以下の式を用いる。

<貫通及び裏面剥離評価式>

修正 NDRC 式 (①式)、Degen 式 (②式) 及び Chang 式 (③式) に基づいて評価を実施する。このうち、貫通評価については、①式を用いて貫入深さ x_c を求め、②式により貫通限界厚さを求める。

また、裏面剥離評価は③式により裏面剥離限界厚さを求める。

$$x_c = \alpha_c \sqrt{4KWND \left(\frac{V}{1000D} \right)^{1.8}}, \text{ for } \frac{x_c}{\alpha_c D} < 2.0 \quad \dots \dots \text{①}$$

$$t_p = \alpha_p D \left\{ 2.2 \left(\frac{x_c}{\alpha_c D} \right) - 0.3 \left(\frac{x_c}{\alpha_c D} \right)^2 \right\}, \text{ for } \frac{x_c}{\alpha_c D} \leq 1.52 \quad \dots \dots \text{②}$$

$$t_s = \alpha_s 1.84 \left\{ \frac{200}{V} \right\}^{0.13} \frac{(MV^2)^{0.4}}{(D/12)^{0.2} (144Fc)^{0.4}} \quad \dots \dots \text{③}$$

ここで、

x_c : 貫入深さ (in)	α_c : 飛来物低減係数	$K : 180/\sqrt{Fc}$
W : 飛来物重量 (lb)	N : 形状係数	D : 飛来物直径 (in)
V : 衝突速度 (ft/s)	Fc : コンクリート強度 (psi)	
t_p : 貫通厚さ (in)	α_p : 飛来物低減係数	
t_s : 裏面剥離厚さ (ft)	α_s : 飛来物低減係数	M : 質量 (lb/ (ft/s ²))

ロ. 評価結果

各建屋の外壁及び屋根スラブ等への設計飛来物の衝突に対して貫通及び裏面剥離の発生に関する評価結果を表 4.7 に示す。

表 4.7 設計飛来物による貫通及び裏面剥離評価結果

建 屋	方向	必要最小厚さ※1		評価対象部材		評価結果		備 考
		貫通 (cm)	裏面剥離 (cm)	位置 T.P. (m)	最小厚さ (cm)	貫通	裏面剥離	
原子炉建屋 (外部遮へい建屋)	水平	28	45	41.0～60.5 (シリンダー部)	100	○	○	
	鉛直	20	34	60.5～83.1 (ドーム部)	30	○	○	デッキプレートにより剥離コンクリートは飛散しない
原子炉建屋 (周辺補機棟)	水平	29	49	10.3～49.0 (外壁)	40	○	○	建屋内壁に施工されている鋼板により剥離コンクリートは飛散しない
	鉛直	21	37	49.0 (屋根スラブ)	48	○	○	
原子炉建屋 (燃料取扱棟)	水平	—	—	47.6～55.0 (鉄骨部)	—	×	—	貫通を前提とし、使用済燃料ピット及び新燃料貯蔵庫内への設計飛来物の侵入について影響評価を実施
	鉛直	21	37	47.6、55.0	26	○	○	デッキプレートにより剥離コンクリートは飛散しない
原子炉補助建屋	水平	29	49	10.3～47.6 (外壁)	35	○	○	建屋内壁に施工されている鋼板により剥離コンクリートは飛散しない
	鉛直	21	37	33.1 (屋根スラブ)	38	○	○	
ディーゼル発電機建屋	水平	29	49	18.8～22.8 (塔屋部外壁)	29※2	○	○	建屋内壁に施工されている鋼板により剥離コンクリートは飛散しない
	鉛直	21	37	18.8 (屋根スラブ)	26	○	○	デッキプレートにより剥離コンクリートは飛散しない
燃料油貯油槽 (新設)	鉛直	20	34	地中構造物	70	○	○	
燃料油貯油槽 (既設)	鉛直	21	37	地中構造物	70	○	○	
取水ピットポンプ室	鉛直	—	—	地中構造物	—	×	—	当該室の上屋 (外壁及び屋根) の貫通を前提とし、当該室上部の開口部から当該室への設計飛来物の侵入について影響評価を実施
ストレナ室	鉛直	—	—	地中構造物	—	×	—	

※1：小数点以下を切り上げており、数値以上の部材厚さがあれば、貫通または裏面剥離を生じない厚さ。

※2：最小厚さ 29cm (コンクリート 18cm+鋼板 16mm (コンクリート換算 11cm 以上))

(f) 貫通及び裏面剥離発生による竜巻防護施設への影響評価

イ. 評価方針

「(e) 設計飛来物の衝突に対する評価」のとおり、燃料取扱棟（鉄骨造部分）の外壁に対しては設計飛来物の貫通を想定し、当該建屋内に設置されている使用済燃料ピット及び新燃料貯蔵庫内に設計飛来物が侵入した場合の影響評価を実施する。また、取水ピットポンプ室及びストレーナ室の上屋（循環水ポンプ建屋）の外壁及び屋根に対しては設計飛来物の貫通を想定し、当該室の上部開口部から当該室内に設計飛来物が侵入した場合の影響評価を実施する。

ロ. 評価結果

使用済燃料ピット及び新燃料貯蔵庫内に設計飛来物が侵入した場合の影響評価を実施し、安全機能の維持に影響を与えないよう、新燃料貯蔵庫内の新燃料ラック（貯蔵している燃料集合体）に対する竜巻防護対策を実施する。評価結果は、「d. 設備の構造健全性の確認」に示す。

また、取水ピットポンプ室及びストレーナ室内に設計飛来物が侵入した場合の影響評価を実施し、安全機能の維持に影響を与えないよう竜巻防護対策を実施する。

(g) 建屋外周部建具等の貫通評価

イ. 評価方針

建屋外周部建具等（扉、シャッター、ブローアウトパネル及びディーゼル発電機燃料油貯油槽のプロテクター蓋）は鋼製である。建屋外周部建具等の貫通評価は、設計飛来物の貫通を生じないために必要な鋼板の最小厚さをタービンミサイル評価等で用いられているBRL式^{*}を用いて算出し、各建具等の板厚と比較することで健全性を確認する。

※：原子炉施設のタービンミサイルの評価に用いられている評価式

<BRL式>

$$T^{3/2} = \frac{0.5MV^2}{17400K^2D^{3/2}}$$

ここで、

T：鋼板貫通厚さ (in) M：ミサイル質量 (lb・s²/ft) V：ミサイル速度 (ft/s)
D：ミサイル直径 (in) K：鋼板の材質に関する定数 (≒1)

参考文献：ISES7607-3「軽水炉構造機器の衝撃荷重に関する調査その3ミサイルの衝突による構造壁の損傷に関する評価式の比較検討」（高温構造安全技術研究組合）
「タービンミサイル評価について(昭和52年7月20日原子炉安全専門審査会)」
の中で、鋼板に対する貫通厚さの算出厚さの算出式に使用されている。

ロ. 評価結果

建屋外周部建具等の貫通評価結果を表4.8に示す。建屋の開口部の扉（一部を除く）、シャッター及びブローアウトパネルについては、設計飛来物の衝突により貫通が発生する。ディーゼル発電機燃料油貯油槽のプロテクター蓋については、鋼板製の蓋で覆われており、設計飛来物がプロテクター蓋を貫通することはない。

表4.8 設計飛来物の衝突による建屋外周部建具等の貫通評価結果

評価部位	必要最小厚さ	評価結果	備考
扉（ディーゼル発電機室）	37 (mm)	○	
シャッター、ブローアウトパネル、扉（上記を除く）	37 (mm)	×	竜巻防護施設への影響評価を実施
ディーゼル発電機燃料油貯油槽のプロテクター蓋	22 (mm)	○	

(h) 建屋外周部建具等を設計飛来物が貫通することによる竜巻防護施設への影響評価

イ. 評価方針

「(g) 建屋外周部建具等の貫通評価」のとおり、建屋開口部の扉（一部を除く）、シャッター及びブローアウトパネルは、設計飛来物の衝突により貫通が発生するため、貫通した設計飛来物が竜巻防護施設に衝突しないことを確認する。

ロ. 評価結果

A, B吸気ガラリ室扉、原子炉補機冷却水サージタンク・空調用冷水膨脹タンク室扉、トラックアクセスエリア（2）扉及び主蒸気管室ブローアウトパネル部については、開口部を貫通し建屋内に侵入した設計飛来物が建屋内の竜巻防護施設に衝突する可能性があるため、竜巻防護対策を実施する。

A, B吸気ガラリ室扉、原子炉補機冷却水サージタンク・空調用冷水膨脹タンク室扉、トラックアクセスエリア（2）扉及び主蒸気管室ブローアウトパネル以外の開口部については、竜巻防護施設が当該開口部周辺にないこと等から、設計飛来物が建屋内部に進入したとしても、竜巻防護施設に衝突することはないため竜巻防護施設への影響はない。

(i) 建屋外周部建具の破損に関する評価

イ. 評価方針

建屋外周部建具である扉、シャッター及びブローアウトパネルのうち、複合荷重 (W_{T1} 、 W_{T2}) により破損するものについては、建屋内開口部周辺の竜巻防護施設の有無により、当該建具が破損したとしても建屋内の竜巻防護施設へ影響を及ぼさないことを確認する。

ロ. 評価結果

A, B吸気ガラリ室扉、原子炉補機冷却水サージタンク・空調用冷水膨脹タンク室扉、トラックアクセスエリア（2）扉及び主蒸気管室ブローアウトパネル部については、開口部周辺に竜巻防護施設があるため、竜巻防護対策を実施する。

A, B吸気ガラリ室扉、原子炉補機冷却水サージタンク・空調用冷水膨脹タンク室扉、トラックアクセスエリア（2）扉及び主蒸気管室ブローアウトパネル以外の開口部については、竜巻防護施設が当該開口部周辺にないこと等から、開口部の建具が破損したとしても竜巻防護施設への影響はない。

c. 竜巻防護施設に波及的影響を及ぼし得る施設の構造健全性の確認結果

(a) 概要

竜巻防護施設に波及的影響を及ぼし得る施設のうち、建屋である循環水ポンプ建屋、タービン建屋、電気建屋及び出入管理建屋について評価を行う。

循環水ポンプ建屋は、建屋の倒壊が竜巻防護施設に直接影響するため、また、タービン建屋、電気建屋及び出入管理建屋は、竜巻防護施設の外殻となる施設に隣接するため、波及的影響の評価として設計竜巻により建屋が倒壊しないことを構造骨組の評価により確認する。

評価フローを図 4.4 に、評価に関する対象荷重及び評価内容を表 4.9 に示す。



図 4.4 竜巻防護施設に波及的影響を及ぼし得る建屋の評価フロー

表 4.9 竜巻防護施設に波及的影響を及ぼし得る建屋の評価方法

	評価項目	対象建屋	荷重	評価内容	
				評価対象	評価基準値
①	構造骨組の評価	循環水ポンプ建屋 タービン建屋	W_{T1} 、 W_{T2}	せん断力	保有水平耐力
		電気建屋 出入管理建屋		せん断ひずみ	2.0×10^{-3} 以下*
②	建屋内の機器及び 飛散物に関する評価	循環水ポンプ建屋 タービン建屋	—	建屋内機器の飛散の可能性の検討、建屋 屋根、外壁の飛散の影響評価及び建屋内 飛散物の影響評価を実施	

※：原子力発電所耐震設計技術指針（JEAG4601-1987）に示されている、鉄筋コンクリート耐震壁のせん断ひずみに関する許容限界の目安値

(b) 構造骨組の評価

波及的影響の評価として設計竜巻により建屋が倒壊しないことを構造骨組の評価により確認した。

循環水ポンプ建屋及びタービン建屋については、複合荷重によるせん断力が保有水平耐力を下回ることを確認した。

電気建屋及び出入管理建屋については、複合荷重により耐震壁に発生するせん断ひずみを、地震応答解析モデルにおける各部材のせん断力の復元力特性（ $Q-\gamma$ 関係）により算定し、鉄筋コンクリート造耐震壁の最大応答せん断ひずみの評価基準値（ 2.0×10^{-3} ）を下回ることを確認した。

(c) 建屋内の機器及び飛散物に関する評価

窓等が破損した場合、建屋内に風圧力が作用するが、建屋内の重量機器については、建屋にボルト等で固定されており、重量が受圧面積に対して十分に大きいため飛散しない。また、その他の建屋内の飛散の可能性のあるものについては、設計飛来物による影響評価で包絡できる。

d. 設備の構造健全性の確認

設計荷重に対して、評価対象施設の構造健全性が維持され安全機能が維持できることを確認する。また、設計飛来物による影響を評価し、評価対象施設の安全機能が維持できることを確認する。

評価対象施設の評価フローの概要を図 4.5 に示す。

評価フローに従って、以下の評価を実施する。

- ・設計飛来物による影響評価として、設計飛来物の貫通が発生する限界厚さ（貫通を生じないために必要な鋼板の最小厚さ）と評価対象施設の最小板厚を比較することにより、設計飛来物の貫通有無を確認する（貫通評価）。また、使用済燃料ピット内または新燃料貯蔵庫内へ侵入した設計飛来物による影響評価としては、使用済燃料ラックまたは新燃料ラックに貯蔵される燃料集合体の燃料被覆管の健全性が維持されること及び当該ラックセルの損傷範囲（貫入量）が燃料有効部に達しないことを確認する。
- ・竜巻防護対策を考慮して、評価対象施設の特徴に従い、竜巻荷重の組合せを設定し、強度評価を実施する。

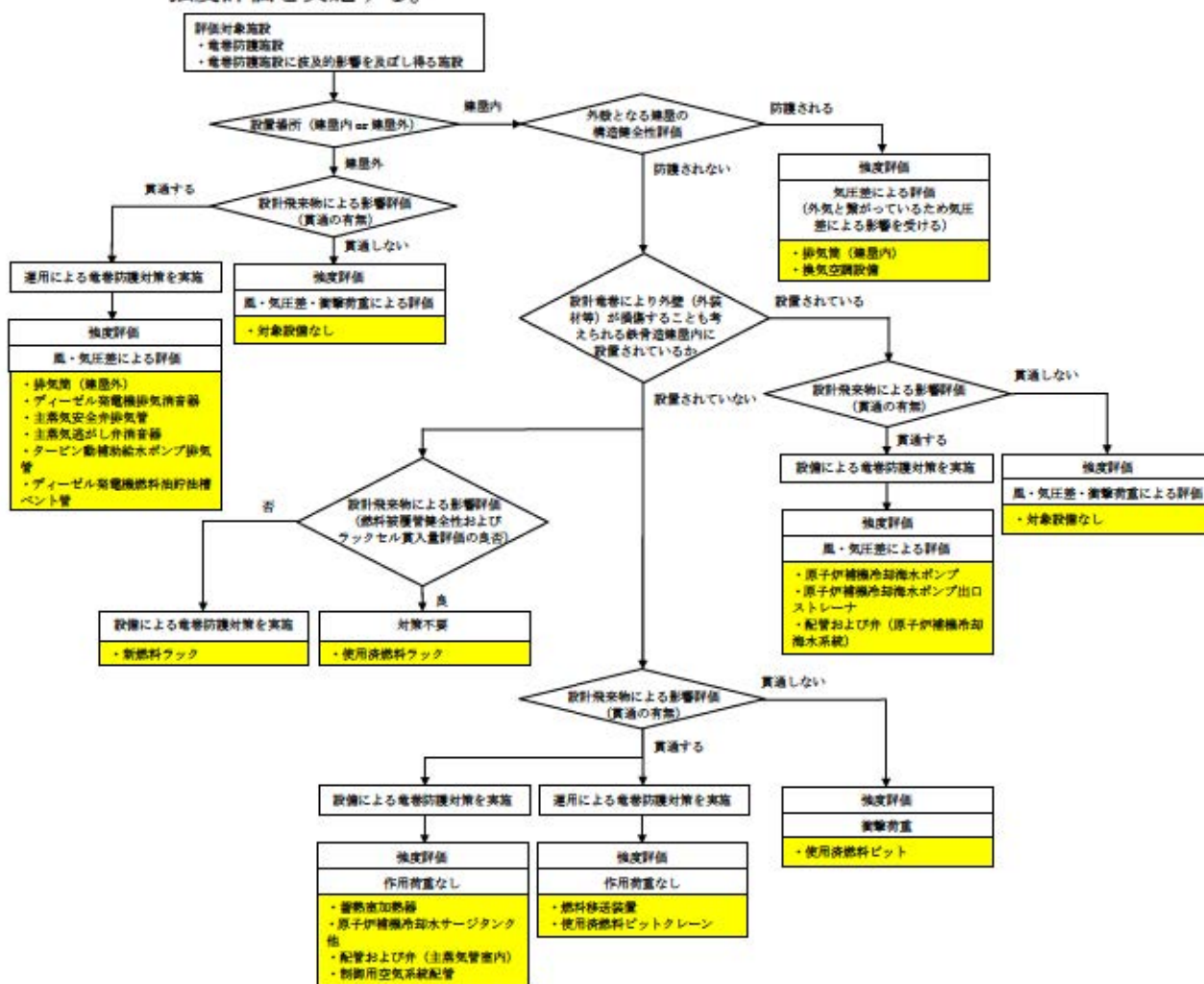


図 4.5 評価対象施設の評価フロー

(a) 貫通評価（補足説明資料 19～21、25 参照）

イ. 評価方針

設計飛来物が評価対象施設（鋼板部分）に衝突した場合の影響評価として、タービンミサイル評価で用いられている以下の BRL 式^{*}を用いて算出した、設計飛来物の貫通を生じないために必要な鋼板の最小厚さと、評価対象施設の最小板厚を比較することにより、設計飛来物の貫通有無を確認する。

$$T^{3/2} = \frac{0.5MV^2}{17400K^2D^{3/2}}$$

ここで、

T: 鋼板貫通厚さ (in) M: ミサイル質量 (lb・s²/ft) V: ミサイル速度 (ft/s)
D: ミサイル直径 (in) K: 鋼板の材質に関する定数≒1

※:「タービンミサイル評価について(昭和 52 年 7 月 20 日 原子炉安全専門審査会)」の中で、鋼板に対する貫通厚さの算出式として使用する旨規定されており、本書において、BRL 式については、「ISES7607-3 軽水炉構造機器の衝撃荷重に関する調査 その 3 ミサイルの衝突による構造壁の損傷に関する評価式の比較検討(高温構造安全技術研究組合)」を引用している。

ロ. 評価結果

設計飛来物の貫通を生じないために必要な鋼板の最小厚さは表 4.10 のとおりであり、砂利については、表 4.11 に示す評価対象施設の最小板厚と比較して一部を除き貫通しないことを確認した。

また、鋼製パイプ及び鋼製材については、後述する竜巻飛来物防護対策設備により防護する。

表 4.10 鋼板の必要最小厚さ

	砂利		鋼製パイプ		鋼製材	
	水平	鉛直	水平	鉛直	水平	鉛直
最大飛来物速度 (m/s)	62	42	49	33	57	38
必要最小厚さ (mm)	1	1	18	11	37	22

注：必要最小厚さは計算結果を切り上げた値

表 4.11 貫通評価結果

評価対象施設	最小板厚 (mm)	評価結果			竜巻対 策等
		砂利	鋼製パイプ	鋼製材	
原子炉補機冷却海水ポンプ (モータ含む)	3.2mm (モータ部ケーシング)	○	×		※1
蓄熱室加熱器	1.0mm 以下 (ヒータエレ メント発熱管: 厚さ 1mm の素管を絞り加工)		×		
原子炉補機冷却海水ポンプ出 口ストレーナ	14.0mm	○	×		
配管及び弁 (原子炉補機冷却海 水系統)	3.2mm	○	×		
原子炉補機冷却水サージタン ク他	6.0mm	○	×		
配管及び弁 (主蒸気管室内)	3.0mm	○	×		
制御用空気系統配管	3.4mm	○	×		
排気筒 (建屋外)	4.0mm	○	×		※2
燃料移送装置	9.0mm	○	×		※3
使用済燃料ピットクレーン	16.0mm	○	×		
ディーゼル発電機排気消音器	6.0mm	○	×		※4
主蒸気逃がし弁消音器	4.5mm	○	×		
主蒸気安全弁排気管	9.5mm	○	×		
タービン動補助給水ポンプ排 気管	7.8mm	○	×		
ディーゼル発電機燃料油貯油 槽ベント管	8.6mm	○	×		

※1: 設計飛来物が当該施設に衝突した場合、貫通等の損傷により安全機能を喪失する可能性があることから、設備による竜巻防護対策 (竜巻飛来物防護対策設備による防護) を実施する。

※2: 設計飛来物が当該施設に衝突した場合、貫通等の損傷が生じる可能性があるが、竜巻を起因として当該施設にその安全機能を期待する放射性物質の放出を伴う事故 (LOCA 等) は発生しないため、竜巻襲来時において当該施設に求められる安全機能要求はないと考える。また、設計飛来物による当該施設の損傷を確認した場合は、運用による竜巻防護対策 (プラントを停止して補修) を実施する。(補足説明資料 2 7 参照)

※3: 設計飛来物が評価対象施設に衝突した場合、貫通等の損傷により安全機能を喪失する可能性があることから、運用による竜巻防護対策 (燃料取扱棟における燃料取扱作業中断) を実施する。(補足説明資料 2 4 参照)

※4: 設計飛来物が当該施設に衝突した場合、貫通等の損傷により、竜巻防護施設の安全機能に影響を与える可能性があることから、運用による竜巻防護対策 (補修) を実施する。

(b) 使用済燃料ピット内へ侵入した設計飛来物による影響評価

(補足説明資料19、20、22参照)

イ. 評価方針

設計飛来物が使用済燃料ピットが設置されている建屋の上屋（燃料取扱棟）の壁を貫通することを想定して、使用済燃料ピットに対して、設計飛来物の影響を評価する。

評価においては、燃料取扱棟の屋根を考慮せずに、設計飛来物が鉛直方向と斜め方向の2方向から直接使用済燃料ピット内へ侵入するものとし、燃料集合体、使用済燃料ラック及び使用済燃料ピット（躯体）に衝突した場合の影響評価を実施する。

ただし、砂利については、鋼製材及び鋼製パイプの評価に包絡されるため、評価対象外とする。

なお、斜め方向から侵入した場合の影響評価において、設計飛来物はラックセルに衝突し、直接燃料集合体に衝突することはないが、保守的に直接燃料集合体（上部ノズル上端）に衝突するものとする。また、鋼製パイプについては、鋼製材の評価に包絡されるため評価対象外とする。

ロ. 評価条件

(イ) 評価部位

- ・燃料集合体の燃料被覆管
- ・使用済燃料ラック（ラックセル）
- ・使用済燃料ピットライニング

(ロ) 設計飛来物の衝突速度

設計飛来物の衝突速度は、設計飛来物が最大速度で使用済燃料ピット水面に到達するものとして、水中抵抗等を考慮した値とする。

設計飛来物の衝突速度を表 4.12 に示す。

表 4.12 設計飛来物の衝突速度

設計飛来物	侵入方向	使用済燃料ピット 水面到達時(m/s)	燃料集合体又は使用済燃 料ラック衝突時(m/s)	影響評価に用いる 衝突速度(m/s)
鋼製パイプ	鉛直	水平：0	水平：0	18.82
		鉛直：33	鉛直：18.82	
鋼製材	鉛直	水平：0	水平：0	24.03
		鉛直：38	鉛直：24.03	
	斜め	水平：57 鉛直：38	水平：22.54 鉛直：16.82	22.54

(ハ) 燃料被覆管への影響評価

設計飛来物が鉛直方向から燃料集合体（上部ノズル上端）に衝突した場合と、斜め方向から衝突した場合の燃料被覆管の歪量を算出し、燃料被覆管の健全性を評価する。また、評価にあたっては、次の仮定を設ける。

- ・ 設計飛来物の運動エネルギーは燃料集合体の変形エネルギーに等しいものとし、設計飛来物の運動エネルギー全てが燃料被覆管の変形に費やされるものとする（制御棒案内シンプルによる荷重の分担は考慮しない）。
- ・ 燃料被覆管は弾完全塑性体とする（塑性変形に伴う硬化を考慮しない）。(図 4.6)

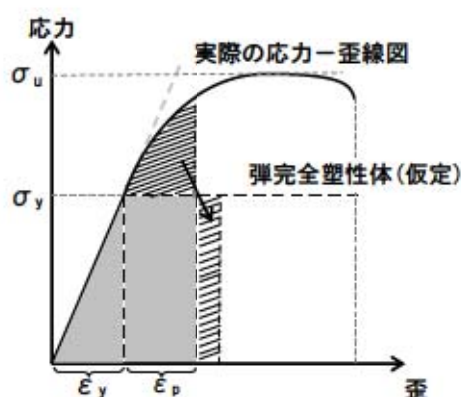


図 4.6 弾完全塑性体の保守性
(イメージ図)

なお、設計飛来物が斜め方向から燃料集合体に衝突した場合、燃料被覆管には鉛直方向の衝突速度成分による発生歪と水平方向の衝突速度成分による発生歪が生じるが、鉛直方向の衝突速度成分による発生歪については、鉛直方向から衝突した場合の影響評価に包絡されるため、設計飛来物が斜め方向から燃料集合体に衝突した場合の燃料被覆管への影響については、水平方向の衝突速度成分による発生歪を算出して評価する。

(ニ) 燃料被覆管の許容歪の設定

試験により求められる破断歪データを踏まえ、燃料被覆管の許容歪を 1% と設定し、評価値と比較する。

(ホ) 使用済燃料ラック（ラックセル）への影響評価

① 鉛直方向

設計飛来物が鉛直方向から衝突した場合のラックセルの貫入量（変形量）を算出し、許容貫入量を満足していること（ラックセルの損傷範囲が燃料有効部に達しないこと）を確認する（図 4.7）。

なお、ラックセルは近接して設置されているため、設計飛来物は複数のラックセルに同時に衝突することが考えられるが、保守的に1体のラックセルが衝突荷重を受けるものとする（図4.8）。

②斜め方向

設計飛来物が斜め方向から衝突した場合のラックセルの歪量を算出し、塑性歪を生じた場合であっても、破断伸びに対して余裕を有することを確認する。

なお、ラックセルは近接して設置されているため、設計飛来物は複数のラックセルに同時に衝突することが考えられるが、保守的に1体のラックセルが衝突荷重を受けるものとする。

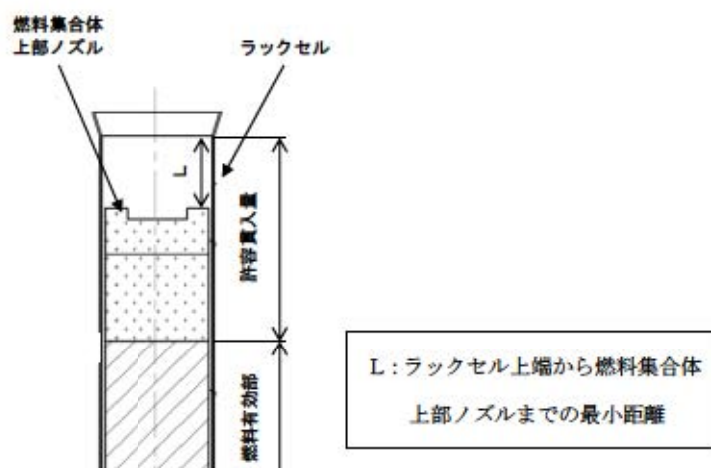


図 4.7 ラックセル概要図

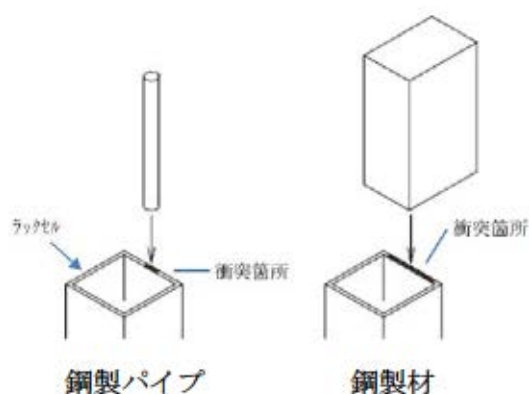


図 4.8 ラックセルの衝突箇所

ハ. 評価結果

(イ) 燃料被覆管への影響評価

設計飛来物が燃料集合体に衝突した場合の燃料被覆管に生じる歪（塑性歪）を評価した結果、燃料被覆管の許容歪を下回っており、燃料被覆管は破損せず健全性が維持できることを確認した。

評価結果を表 4.13 に示す。

表4.13 燃料被覆管への影響評価結果

評価部位	飛来物	衝突方向	発生歪（算出値）	許容歪	結果
燃料集合体の 燃料被覆管	鋼製パイプ	鉛直	発生しない（弾性範囲内）※1	1%	○
	鋼製材	鉛直	発生しない（弾性範囲内）※2		○
		斜め	0.1%		

※1：鋼製パイプのサイズはラックセルの内径より小さいため、燃料集合体に直接衝突した場合の評価結果。

※2：鋼製材のサイズはラックセルの内径より大きく、燃料集合体に直接衝突することはないが、ラックセルを押しつぶした後に燃料集合体に衝突した場合の評価結果（後述（ロ）項表 4.14 参照）。



(ロ) 使用済燃料ラック（ラックセル）への影響評価

①鉛直方向

設計飛来物が鉛直方向から衝突した場合のラックセルの貫入量を評価した結果、許容貫入量を満足しており、ラックセルの損傷範囲が燃料有効部に達しないことを確認した。

評価結果を表 4.14 に示す。

表 4.14 使用済燃料ラックへの影響評価結果（鉛直方向）

評価部位	飛来物	貫入量	ラックセル上端から燃料集合体上部ノズルまでの最小距離	許容貫入量	結果
使用済燃料ラック （ラックセル）	鋼製パイプ	31mm	 mm	 mm	○
	鋼製材	162mm			○

※：鋼製材については、貫入量がラックセル上端から燃料集合体上部ノズルまでの最小距離を上回っているため、ラックセルを押しつぶした後に燃料集合体に衝突する。

②斜め方向

設計飛来物が斜め方向から衝突した場合のラックセルの歪を評価した結果、塑性歪量は破断伸びに対して余裕を有することを確認した。

評価結果を表 4.15 に示す。

表 4.15 使用済燃料ラックへの影響評価結果（斜め方向）

評価部位	飛来物	発生応力	発生歪量	破断伸び	結果
使用済燃料ラック（ラックセル）	鋼製材	曲げ	2.3%	16%	○
		せん断	0.2%		○

（ハ）使用済燃料ピット（躯体）への影響評価

設計飛来物が衝突した場合、使用済燃料ピット内面のライニングは貫通等の損傷を受ける可能性があるが、ライニング背面のコンクリート躯体は十分な厚さを有しており、コンクリートを貫通することはない。損傷の程度は小さいことから、直ちに使用済燃料ピットの保有水が漏えいすることはない。

また、ライニングが損傷した場合、ピット保有水の漏えいが生じるが、漏えい量は使用済燃料ピットへの給水量を下回っており、ピット保有水の有意な消失は生じず、使用済燃料ピットの冷却機能及び遮へい機能は維持されることから、安全機能に影響を与えない。

なお、ライニングが損傷した場合には、補修等により対応する。

（c）新燃料貯蔵庫内へ侵入した設計飛来物による影響評価

（補足説明資料 19、20、23 参照）

イ. 評価方針

設計飛来物が新燃料貯蔵庫が設置されている建屋の上屋（燃料取扱棟）の壁を貫通することを想定して、新燃料貯蔵庫に対して、設計飛来物の影響を評価する。

評価においては、燃料取扱棟の屋根を考慮せずに、設計飛来物が鉛直方向と斜め方向の2方向から直接新燃料貯蔵庫内へ侵入するものとし、燃料集合体及び新燃料ラックに衝突した場合の影響評価を実施する。

ただし、砂利については、鋼製材及び鋼製パイプの評価に包絡されるため、評価対象外とする。

なお、斜め方向から侵入した場合の影響評価において、設計飛来物はラックセルに衝突し、直接燃料集合体に衝突することはないが、保守的に直接燃料集合体（上部ノズル上端）に衝突するものとする。また、鋼製パイプについては、鋼製材の評価に包絡されるため評価対象外とする。

ロ. 評価条件

（イ）評価部位

- ・燃料集合体の燃料被覆管

・新燃料ラック（ラックセル）

(ロ) 設計飛来物の衝突速度

設計飛来物の衝突速度は、設計飛来物の最大速度とする。

設計飛来物の衝突速度を表 4.16 に示す。

表 4.16 設計飛来物の衝突速度

設計飛来物	侵入方向	燃料集合体又は新燃料ラック衝突時 (m/s)	影響評価に用いる衝突速度 (m/s)
鋼製パイプ	鉛直	水平：0 鉛直：33	33
鋼製材	鉛直	水平：0 鉛直：38	38
	斜め	水平：57 鉛直：38	57

(ハ) 燃料被覆管への影響評価

設計飛来物が鉛直方向から燃料集合体（上部ノズル上端）に衝突した場合と、斜め方向から衝突した場合の燃料被覆管の歪量を算出し、燃料被覆管の健全性を評価する。また、評価にあたっては、次の仮定を設ける。

- ・ 設計飛来物の運動エネルギーは燃料集合体の変形エネルギーに等しいものとし、設計飛来物の運動エネルギー全てが燃料被覆管の変形に費やされるものとする（制御棒案内シンプルによる荷重の分担は考慮しない）。
- ・ 燃料被覆管は弾完全塑性体とする（塑性変形に伴う硬化を考慮しない）。(図 4.9)

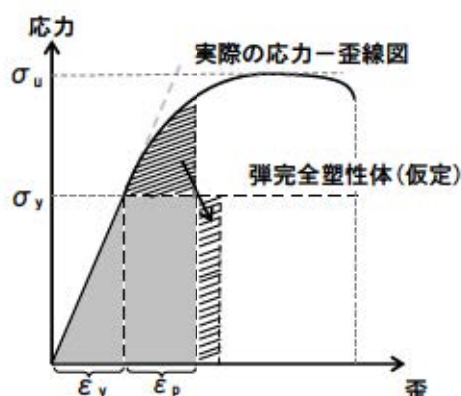


図 4.9 弾完全塑性体の保守性
(イメージ図)

なお、設計飛来物が斜め方向から燃料集合体に衝突した場合、燃料被覆管には鉛

直方向の衝突速度成分による発生歪と水平方向の衝突速度成分による発生歪が生じるが、鉛直方向の衝突速度成分による発生歪については、鉛直方向から衝突した場合の影響評価に包絡されるため、設計飛来物が斜め方向から燃料集合体に衝突した場合の燃料被覆管への影響については、水平方向の衝突速度成分による発生歪を算出して評価する。

(二) 燃料被覆管の許容歪の設定

試験により求められる破断歪データを踏まえ、燃料被覆管の許容歪を 10% と設定し、評価値と比較する。

(ホ) 新燃料ラック（ラックセル）への影響評価

①鉛直方向

設計飛来物が鉛直方向から衝突した場合のラックセルの貫入量（変形量）を算出し、許容貫入量を満足していること（ラックセルの損傷範囲が燃料有効部に達しないこと）を確認する（図 4.10）。

②斜め方向

設計飛来物が斜め方向から衝突した場合のラックセルの歪量を算出し、塑性歪を生じた場合であっても、破断伸びに対して余裕を有することを確認する。

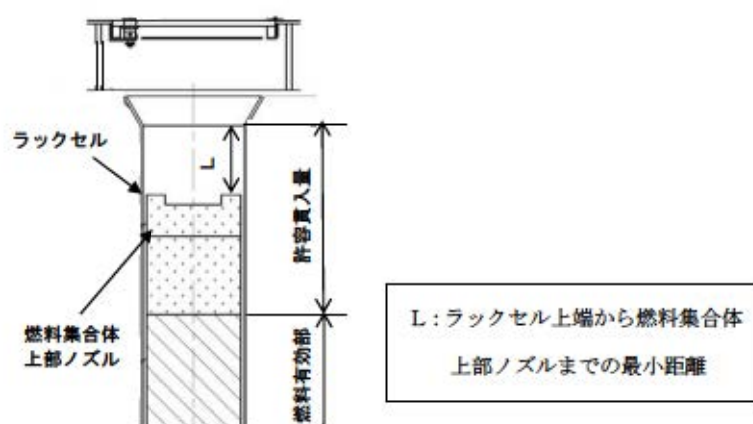


図 4.10 ラックセル概要図

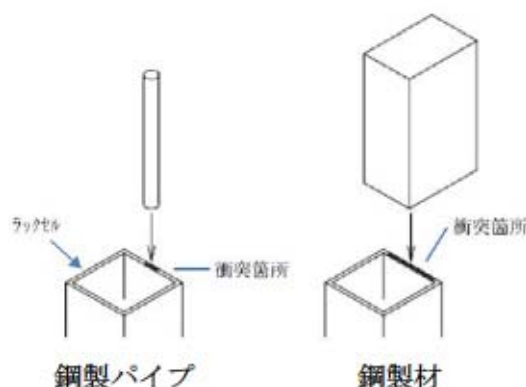


図 4.11 ラックセルの衝突箇所

ハ. 評価結果

(イ) 燃料被覆管への影響評価

設計飛来物が燃料集合体に衝突した場合の燃料被覆管に生じる歪（塑性歪）を評価した結果、鋼製パイプについては、直接燃料集合体に衝突した場合、燃料集合体上部ノズルを貫通することが考えられ、燃料被覆管が破損する可能性があることから、後述する竜巻飛来物防護対策設備により防護する。

鋼製材については、燃料被覆管に生じる歪が許容歪を下回っており、燃料被覆管は破損せず健全性が維持できることを確認した。

評価結果を表 4.17 に示す。

表4.17 燃料被覆管への影響評価結果

評価部位	飛来物	衝突方向	発生歪（算出値）	許容歪	結果
燃料集合体の 燃料被覆管	鋼製パイプ	鉛直	破損 ^{※1}	10%	×
	鋼製材	鉛直	発生しない（弾性範囲内） ^{※2}		○
		斜め	0.2%		○

※1：鋼製パイプのサイズはラックセルの内径より小さいため、燃料集合体に直接衝突した場合の評価結果。直接衝突した場合は燃料集合体上部ノズルを貫通し、燃料被覆管が破損する可能性がある。

※2：鋼製材のサイズはラックセルの内径より大きく、燃料集合体に直接衝突することはないが、ラックセルを押しつぶした後に燃料集合体に衝突した場合の評価結果（後述（ロ）項表 4.18 参照）。

(ロ) 新燃料ラック（ラックセル）への影響評価



①鉛直方向

設計飛来物が鉛直方向から衝突した場合のラックセルの貫入量を評価した結果、

許容貫入量を満足しており、ラックセルの損傷範囲が燃料有効部に達しないことを確認した。

評価結果を表 4.18 に示す。

表 4.18 新燃料ラックへの影響評価結果（鉛直方向）

評価部位	飛来物	貫入量	ラックセル上端から燃料集集体上部ノズルまでの最小距離	許容貫入量	結果
新燃料ラック (ラックセル)	鋼製パイプ	36mm			○
	鋼製材	174mm			○

※：鋼製材については、貫入量がラックセル上端から燃料集集体上部ノズルまでの最小距離を上回っているため、ラックセルを押しつぶした後に燃料集集体に衝突する。

②斜め方向

設計飛来物が斜め方向から衝突した場合のラックセルの歪を評価した結果、塑性歪量は破断伸びに対して余裕を有することを確認した。

評価結果を表 4.19 に示す。

表 4.19 新燃料ラックへの影響評価結果（斜め方向）

評価部位	飛来物	発生応力	発生歪量	破断伸び	結果
新燃料ラック (ラックセル)	鋼製材	曲げ	17%	40%	○
		せん断	0.8%		○

(d) 強度評価（設計荷重によって設備に生じる変形・応力に対する影響評価）

（補足説明資料 13、19、20、25 参照）

イ. 竜巻防護施設

(イ) 原子炉補機冷却海水ポンプ

①評価方針

原子炉補機冷却海水ポンプの電動機取合ボルト、電動機支え台取合ボルト等に対して、設計竜巻による気圧差による荷重($W_{T1}=W_P$)並びに、設計竜巻の風圧力による荷重(W_W)、設計竜巻による気圧差による荷重(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($W_{T2}=W_W+0.5W_P+W_M$)により発生する応力を算出し、各ボルトの許容応力と比較することにより、構造健全性を評価する。

ただし、「6. 竜巻対策」のとおり、設計飛来物から防護する対策として竜巻飛来物防護対策設備を設置することから、衝撃荷重 (W_M) としては、竜巻防護対策設備を通過する砂利のみを考慮することになるが、砂利については、衝突時間が極めて短く、機器に対する影響がごくわずかであることから、衝撃荷重 (W_M) については複合荷重に含めないものとする。

表4.20 原子炉補機冷却海水ポンプの影響評価結果

評価対象部位	材質	発生 応力	応力値(MPa)		許容応力 (MPa)	裕度		評価 結果
			W_{T1}	W_{T2}		W_{T1}	W_{T2}	
A 電動機取合ボルト	SS400 (M30)	引張	22	29	175	7.9	6.0	○
		せん断	7	10	135	19.2	13.5	○
B 電動機支え台 取合ボルト	SS400 (M30)	引張	30	39	172	5.7	4.4	○
		せん断	9	11	132	14.6	12.0	○
C 据付面取合ボルト	SUS304 (M36)	引張	18	24	153	8.5	6.3	○
		せん断	5	7	117	23.4	16.7	○
D 据付面基礎ボルト	SUS304 (M36)	引張	24	31	153	6.3	4.9	○
		せん断	7	10	117	16.7	11.7	○

(ロ) 原子炉補機冷却海水ポンプモータ

①評価方針

原子炉補機冷却海水ポンプモータの電動機フレーム、端子箱取付ボルト等に対して、設計竜巻による気圧差による荷重($W_{T1}=W_p$)並びに、設計竜巻の風圧力による荷重(W_w)、設計竜巻による気圧差による荷重(W_p)及び設計飛来物による衝撃荷重(W_d)を組み合わせた複合荷重($W_{T2}=W_w+0.5W_p+W_d$)により発生する応力を算出し、各部位の許容応力と比較することにより、構造健全性を評価する。

ただし、「6. 竜巻対策」のとおり、設計飛来物から防護する対策として竜巻飛来物防護対策設備を設置することから、衝撃荷重(W_d)としては、竜巻防護対策設備を通過する砂利のみを考慮することになるが、砂利については、衝突時間が極めて短く、機器に対する影響がごくわずかであることから、衝撃荷重(W_d)については複合荷重に含めないものとする。

②評価対象部位

設計竜巻による複合荷重により損傷する可能性が考えられるため、風圧力による荷重を受ける部分のうち、評価上厳しくなる構造上の不連続部(各ボルト)や強度面で相対的に弱いと想定される部位(電動機フレーム)を選定した。

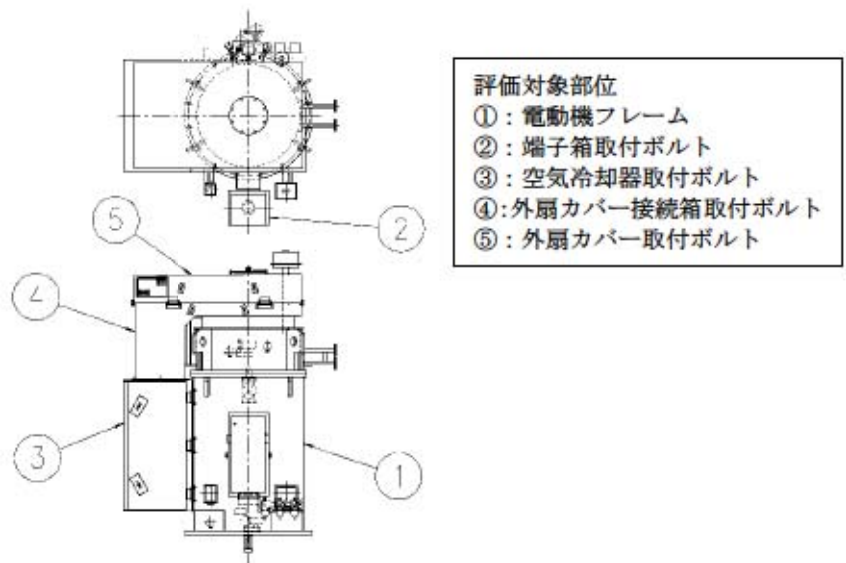


図 4.13 原子炉補機冷却海水ポンプモータの評価対象部位

③評価結果

設計竜巻による気圧差による荷重(W_{T1})並びに、設計竜巻の風圧力による荷重及び設計竜巻による気圧差による荷重を組み合わせた複合荷重(W_{T2})に対する電動機フレーム、各ボルトの評価結果を表 4.21 に示す。

電動機フレーム、各ボルトに発生する応力は許容応力を下回り、構造健全性が維持され、安全機能が維持できることを確認した。

表4.21 原子炉補機冷却海水ポンプモータの影響評価結果

評価対象部位	材質	発生 応力	応力値(MPa)		許容応力 (MPa)	裕度		評価 結果
			W_{T1}	W_{T2}		W_{T1}	W_{T2}	
① 電動機フレーム	SS400 (t12)	曲げ	2	3	282	141.0	94.0	○
② 端子箱取付ボルト	SS400 (M10)	引張	12	22	183	15.2	8.3	○
		せん断	5	9	141	28.2	15.6	○
③ 空気冷却器取付ボルト	SUS304 (M12)	引張	10	14	153	15.3	10.9	○
		せん断	9	14	117	13.0	8.3	○
④ 外扇カバー接続箱取付ボルト	SUS304 (M12)	引張	7	14	153	21.8	10.9	○
		せん断	3	5	117	39.0	23.4	○
⑤ 外扇カバー取付ボルト	SUS304 (M12)	引張	2	3	153	76.5	51.0	○
		せん断	4	8	117	29.2	14.6	○

(ハ) 原子炉補機冷却海水ポンプ出口ストレーナ

①評価方針

原子炉補機冷却海水ポンプ出口ストレーナの胴板、スカート及び基礎ボルトに対して、設計竜巻による気圧差による荷重($W_P=W_{T1}$)並びに、設計竜巻の風圧力による荷重(W_W)、設計竜巻による気圧差による荷重(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($W_{T2}=W_W+0.5W_P+W_M$)により発生する応力を算出し、各部位の許容応力と比較することにより、構造健全性を評価する。

ただし、「6. 竜巻対策」のとおり、設計飛来物から防護する対策として竜巻飛来物防護対策設備を設置することから、衝撃荷重 (W_M) としては、竜巻防護対策設備を通過する砂利のみを考慮することになるが、砂利については、衝突時間が極めて短く、機器に対する影響がごくわずかであることから、衝撃荷重 (W_M) については複合荷重に含めないものとする。

②評価対象部位

設計竜巻による複合荷重により転倒する可能性が考えられるため、「原子力発電所耐震設計技術指針 (JEAG4601-1987)」におけるスカート支持たて置円筒形容器の評価方法を準用して選定した。

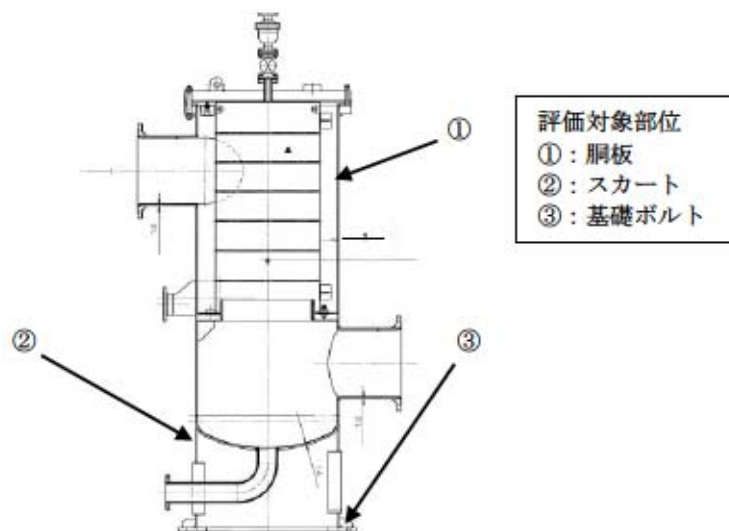


図 4.14 原子炉補機冷却海水ポンプ出口ストレーナの評価対象部位

③運転時荷重の考慮

原子炉補機冷却海水ポンプ出口ストレーナの内圧 (最高使用圧力) を考慮して評価を行う。

④評価結果

設計竜巻による気圧差による荷重(W_{T1})並びに、設計竜巻の風圧力による荷重及び設計竜巻による気圧差による荷重を組み合わせた複合荷重(W_{T2})に対する胴板等の評価結果を表 4.22 に示す。

胴板等に発生する応力は許容応力を下回り、構造健全性が維持され、安全機能が維持できることを確認した。

表4.22 原子炉補機冷却海水ポンプ出口ストレナーの影響評価結果

評価対象部位	発生応力	算出値 (MPa or -)※		許容値 (MPa or -)※	裕度		評価 結果
		W_{T1}	W_{T2}		W_{T1}	W_{T2}	
胴板	組合せ一次	29	30	220	7.5	7.3	○
	座屈	0.04	0.04	1	25	25	○
スカート	組合せ	22	28	240	10.9	8.5	○
	座屈	0.09	0.12	1	11.1	8.3	○
基礎ボルト	引張/組合せ	32	45	175	5.4	3.8	○
	せん断	9	12	135	15	11.2	○

※：座屈は「-」、それ以外は「MPa」

(二) 配管、弁（原子炉補機冷却海水系統）

①評価方針

原子炉補機冷却海水系統の配管、弁について、設計竜巻による気圧差による荷重($W_p=W_{T1}$)（自重及び内圧を考慮）並びに、設計竜巻の風圧力による荷重(W_w)、設計竜巻による気圧差による荷重(W_p)及び設計飛来物による衝撃荷重(W_u)を組み合わせた複合荷重($W_{T2}=W_w+0.5W_p+W_u$)（自重及び内圧を考慮）により発生する応力を算出し、許容応力と比較することにより、構造健全性を評価する。

ただし、「6. 竜巻対策」のとおり、設計飛来物から防護する対策として竜巻飛来物防護対策設備を設置することから、衝撃荷重 (W_u) としては、竜巻防護対策設備を通過する砂利のみを考慮することになるが、砂利については、衝突時間が極めて短く、機器に対する影響がごくわずかであることから、衝撃荷重 (W_u) については複合荷重に含めないものとする。

②評価対象部位

全口径の配管を選定した。

③運転時荷重の考慮

配管の内圧（最高使用圧力）を考慮して評価を行う。

④評価結果

設計竜巻による気圧差による荷重(W_{T1})（自重及び内圧を考慮）並びに、設計竜巻の風圧力による荷重及び設計竜巻による気圧差による荷重を組み合わせた複合荷重(W_{T2})（自重及び内圧を考慮）に対する配管の評価結果を表 4.23 に示す。

配管に発生する応力は許容応力を下回り、構造健全性が維持され、安全機能が維持できることを確認した。

なお、弁については、配管に比べて断面係数が大きく肉厚なため、配管の評価に包絡される。

表4.23 原子炉補機冷却海水系統配管の影響評価結果

評価対象			発生 応力	応力値(MPa)		許容応力 (MPa)	裕度		評価 結果
材質	口径	支持間隔(m)		W_{T1}	W_{T2}		W_{T1}	W_{T2}	
STPY400	22B	8.3	曲げ	25	41	216	8.6	5.2	○
STPG370	18B	7.9	曲げ	24	39	174	7.2	4.4	○
STPG370	2B	2.7	曲げ	15	66	174	11.6	2.6	○
STPG370	1B	2.0	曲げ	14	68	174	12.4	2.5	○

(ホ) 換気空調設備

クラス1、2の換気空調設備のうち、排気筒（建屋外・建屋内）、アニュラス空気浄化設備、格納容器空調装置、補助建屋空調装置、試料採取室空調装置、中央制御室空調装置、電動補助給水ポンプ室換気装置、制御用空気圧縮機室換気装置、ディーゼル発電機室換気装置及び安全補機開閉器室空調装置について、竜巻による影響評価を行う（各換気空調設備の評価対象設備については表 4.24 参照）。

なお、評価にあたっては、排気筒（建屋外）については、設計竜巻による気圧差による荷重(W_p)、設計竜巻の風圧力による荷重(W_w)及び設計飛来物による衝撃荷重(W_d)を、排気筒（建屋外）を除く換気空調設備については、鉄筋コンクリート造の建屋内に設置されており、設計竜巻の風圧力による荷重(W_w)及び設計飛来物による衝撃荷重(W_d)は作用しないため、設計竜巻による気圧差による荷重(W_p)を考慮する（詳細は後述のとおり）。

表 4.24 各換気空調設備の評価対象設備

換気空調設備	評価対象設備
排気筒	排気筒（建屋外・建屋内）
アニュラス空気浄化設備	外気と繋がるダクト、外気との境界となるバタフライ弁
格納容器空調装置	外気と繋がるダクト、外気との境界となるダンパ
補助建屋空調装置	外気と繋がるダクト、外気との境界となるダンパ
試料採取室空調装置	外気と繋がるダクト、外気との境界となるダンパ
中央制御室空調装置	外気と繋がるダクト、外気との境界となるダンパ
電動補助給水ポンプ室換気装置	外気と繋がるダクト、ファン、外気との境界となるダンパ
制御用空気圧縮機室換気装置	外気と繋がるダクト、ファン、外気との境界となるダンパ
ディーゼル発電機室換気装置	外気と繋がるダクト、ファン、外気との境界となるダンパ
安全補機開閉器室空調装置	外気と繋がるダクト、ファン、空調ユニット、外気との境界となるダンパ

①排気筒（建屋外・建屋内）、ダクト

①-1 評価方針

・排気筒

排気筒の建屋外に露出している部分（角ダクト及び丸ダクトの鋼板）に対しては、設計竜巻による気圧差による荷重 ($W_P=W_{T1}$) 並びに、設計竜巻の風圧力による荷重 (W_W)、設計竜巻による気圧差による荷重 (W_P) 及び設計飛来物による衝撃荷重 (W_U) を組み合わせた複合荷重 ($W_{T2}=W_W+0.5W_P+W_U$) を、建屋に内包されている部分（角ダクトの鋼板）に対しては、設計竜巻による気圧差による荷重を短期荷重とみなし、自重との重ね合わせを考慮して、長期荷重（自重）+短期荷重（竜巻）により発生する応力等を算出し、許容値と比較することにより、構造健全性を評価する。ただし、設計飛来物のうち、鋼製材及び鋼製パイプは、衝突により当該施設を貫通することから、衝撃荷重 (W_U) としては、砂利のみを考慮することになるが、砂利については、衝突時間が極めて短く、機器に対する影響がごくわずかであることから、衝撃荷重 (W_U) については複合荷重に含めないものとする。

・角ダクト

角ダクトの鋼板に対して、設計竜巻による気圧差による荷重を短期荷重とみなし、自重との重ね合わせを考慮して、長期荷重（自重）+短期荷重（竜巻）により発生する応力等を算出し、許容値と比較することにより、構造健全性を評価する。

・丸ダクト

丸ダクトの鋼板に対して、設計竜巻による気圧差による荷重を短期荷重と

みなし、自重との重ね合わせを考慮して、長期荷重（自重）＋短期荷重（竜巻）により発生する応力等を算定し、許容値と比較することにより、構造健全性を評価する。

①-2 評価対象部位

排気筒（建屋外・建屋内）及び設計竜巻による気圧差の影響を受けるダクトを選定した。

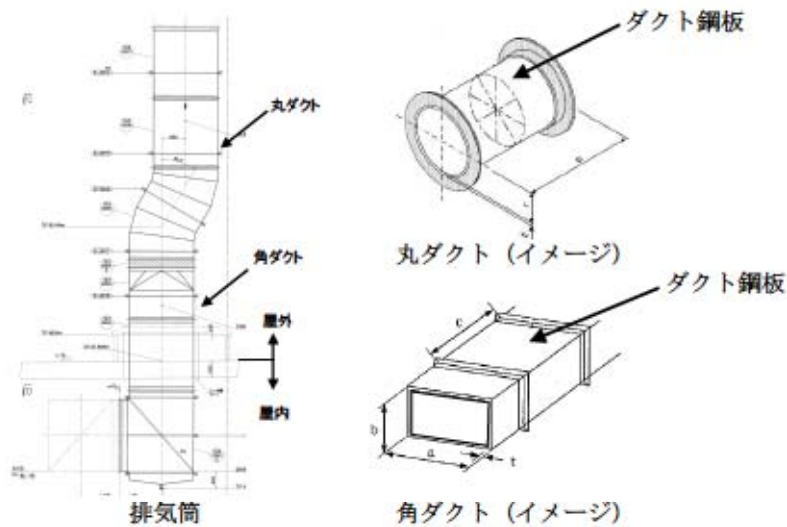


図 4.15 排気筒およびダクトの評価対象部位

①-3 評価結果

・排気筒

長期荷重（自重）＋短期荷重（竜巻）に対するダクト鋼板の評価結果を表 4.25、26 に示す。

ダクト鋼板に発生する応力等は許容値を下回り、構造健全性が維持され、安全機能が維持できることを確認した。

表4.25 排気筒（建屋外）の影響評価結果

<角ダクト>

ダクトサイズ (mm)	ダクト 材質	自重＋竜巻による複合 荷重による面外荷重に より発生する曲げ応力 (MPa)			竜巻による気圧差荷重 による面内荷重により 発生する座屈応力 (MPa)			自重＋竜巻による複合荷重 による面内荷重により発生 する曲げモーメント (kN・mm)			評価
		発生 応力	許容値	裕度	発生 応力	許容値	裕度	発生曲げ モーメント	許容値	裕度	
2300×2300× 4.0t	SUS304	110.6	165	1.4	11.5	165	14.3	76387.8	486747.3	6.3	○

<丸ダクト>

ダクトサイズ (mm)	ダクト 材質	竜巻による気圧差荷重による 周方向応力 (MPa)			自重+竜巻による複合荷重に 対する制限			評価
		発生 応力	許容値	裕度	発生値*	許容値	裕度	
φ 2300×4.0t	SUS304	2.6	21.1	8.1	0.2	0.9	4.5	○

※：発生値＝周方向応力/許容値＋曲げモーメント/許容値

表4.26 排気筒（建屋内）の影響評価結果

<角ダクト>

ダクトサイズ (mm)	ダクト 材質	自重+竜巻による気 圧差荷重による面外 荷重により発生する 曲げ応力 (MPa)			竜巻による気圧差荷 重による面内荷重に より発生する座屈応 力 (MPa)			自重+竜巻による気圧差荷 重による面内荷重により発 生する曲げモーメント (kN・ mm)			評価 結果
		発生 応力	許容値	裕度	発生 応力	許容値	裕度	発生曲げ モーメント	許容値	裕度	
2300×2600× 4.0t	SUS304	76.8	165	2.1	13	165	12.6	1110.9	468014.8	421.2	○

注：最も裕度の小さいものを記載

・角ダクト

長期荷重（自重）＋短期荷重（竜巻）に対するダクト鋼板の評価結果を表4.27に示す。

ダクト鋼板に発生する応力等は許容値を下回り、構造健全性が維持され、安全機能が維持できることを確認した。

表4.27 角ダクトの影響評価結果

ダクト種別	ダクトサイズ (mm)	ダクト 材質	自重+竜巻による気 圧差荷重による面外 荷重により発生する 曲げ応力 (MPa)			竜巻による気圧差荷 重による面内荷重に より発生する座屈応 力 (MPa)			自重+竜巻による気圧差荷 重による面内荷重により発 生する曲げモーメント (kN・ mm)			評価 結果
			発生 応力	許容値	裕度	発生 応力	許容値	裕度	発生曲げ モーメント	許容値	裕度	
ハゼ折低圧角ダ クトー保温有	700×700× 0.6t	SGCC	153.2	189	1.2	48.8	189	3.8	171.6	2933.3	17.0	○

注：最も裕度の小さいものを記載

・丸ダクト

長期荷重（自重）＋短期荷重（竜巻）に対するダクト鋼板の評価結果を表4.28に示す。

ダクト鋼板に発生する応力等は許容値を下回り、構造健全性が維持され、安全機能が維持できることを確認した。

表4.28 丸ダクトの影響評価結果

ダクト種別	ダクトサイズ (mm)	ダクト 材質	竜巻による気圧差荷重による 周方向応力 (MPa)			自重+竜巻による気圧差荷重 に対する制限			評価 結果
			発生応力	許容値	裕度	発生値*	許容値	裕度	
スパイラル低压丸 ダクトー保温有	φ250×0.6t	SGCC	1.9	2.3	1.2	0.83	0.9	1.08	○

※：発生値＝周方向応力/許容値＋曲げモーメント/許容値

注：最も裕度の小さいものを記載

②ダンパ

②-1 評価方針

ダンパの構成部材であるケーシング、ペーン及びシャフトに対して、設計竜巻による気圧差による荷重を短期荷重とみなし、自重との重ね合わせを考慮して、長期荷重（自重）＋短期荷重（竜巻）により発生する応力を算出し、許容応力と比較することにより、構造健全性を評価する。

なお、ケーシング又はペーンの長さが長いダンパの方が発生応力は大きくなるため、評価対象ダンパの中から、ダンパの種類毎（角型・丸型の別）にケーシング又はペーンの長さが最も長いダンパを代表ダンパとして選定し評価する。

・ケーシング

ケーシングの断面と同等の断面性能を持つ単純梁として曲げ応力による評価を行う。

・ペーン

ペーンの断面と同等の断面性能を持つ単純梁として曲げ応力による評価を行う。

・シャフト

ペーンが自重及び内部圧力によって受ける荷重を支持するシャフト断面について、せん断応力による評価を行う。

②-2 評価対象部位

設計竜巻による気圧差の影響を受けるダンパのケーシング、ペーン及びシャフトを選定した。

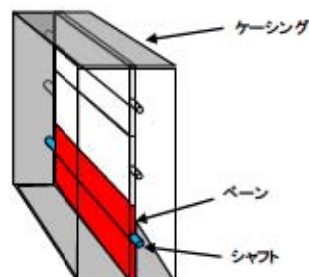


図 4.16 ダンパの評価対象部位

②-3 評価結果

長期荷重（自重）＋短期荷重（竜巻）に対するケーシング、ペーン及びシャフトの評価結果を表 4.29～31 に示す。

ケーシング、ペーン及びシャフトに発生する応力は許容応力を下回り、構造健全性が維持され、安全機能が維持できることを確認した。

表4.29 ダンパの影響評価結果（ケーシング）

種類	ダンパ名称	応力値 (MPa)	許容応力 (MPa)	裕度	評価結果
空気作動 ダンパ	3-補助建屋排気風量制御ダンパ	60	217	3.6	○
高气密 ダンパ	3-格納容器給気気密ダンパ	56	247	4.4	○
	3-格納容器排気気密ダンパ	56	247	4.4	○
逆止ダンパ	3A-安全補機開閉器室給気ファン出口逆止ダンパ	69	217	3.1	○
	3B-安全補機開閉器室給気ファン出口逆止ダンパ	69	217	3.1	○
風量調整 ダンパ	3A-補助建屋給気ガラリ出口手動ダンパ	179	217	1.2	○
	3B-補助建屋給気ガラリ出口手動ダンパ	179	217	1.2	○
	3A-安全補機開閉器室排気ファン入口手動ダンパ	89	217	2.4	○
	3B-安全補機開閉器室排気ファン入口手動ダンパ	89	217	2.4	○
防火ダンパ (防火兼風量 調整ダンパ を含む)	3A-ディーゼル発電機室排気系防火ダンパ	55	217	3.9	○
	3B-ディーゼル発電機室排気系防火ダンパ	55	217	3.9	○
	3-ディーゼル発電機室給気系Aディーゼル発電機補機室防火兼風量調節ダンパ	34	217	6.3	○
	3-ディーゼル発電機室給気系Bディーゼル発電機補機室防火兼風量調節ダンパ	34	217	6.3	○

※代表ダンパの評価結果を示す

表4.30 ダンパの影響評価結果（ベーン）

種類	ダンパ名称	応力値 (MPa)	許容応力 (MPa)	裕度	評価結果
空気作動 ダンパ	3-補助建屋非管理区域排 気・補助建屋給気連絡ダン パ	50	217	4.3	○
高気密 ダンパ	3-格納容器給気気密ダンパ	53	247	4.6	○
	3-格納容器排気気密ダンパ	53	247	4.6	○
逆止 ダンパ	3A-電動補助給水ポンプ室 排気逆止ダンパ	116	217	1.8	○
	3B-電動補助給水ポンプ室 排気逆止ダンパ	116	217	1.8	○

※代表ダンパの評価結果を示す

※評価対象ダンパのうち、「風量調整ダンパ」及び「防火ダンパ(防火兼風量調整ダンパを含む)」については、竜巻通過時は開状態であり、設計竜巻による気圧差による荷重はベーンに作用しないため、評価不要とする。一方、「空気作動ダンパ」、「高気密ダンパ」及び「逆止ダンパ」については、竜巻通過時の開閉状態が各ダンパによって異なることを考慮し、代表ダンパとして選定したダンパについては、竜巻通過時の開閉状態に拠らず、設計竜巻による気圧差による荷重がベーンに作用した場合の評価を実施。

表4.31 ダンパの影響評価結果（シャフト）

種類	ダンパ名称	応力値 (MPa)	許容応力 (MPa)	裕度	評価結果
空気作動 ダンパ	3-補助建屋非管理区域排 気・補助建屋給気連絡ダン パ	3	141	47.0	○
高気密 ダンパ	3-格納容器給気気密ダンパ	4	117	29.2	○
	3-格納容器排気気密ダンパ	4	117	29.2	○
逆止 ダンパ	3A-電動補助給水ポンプ室 排気逆止ダンパ	4	135	33.7	○
	3B-電動補助給水ポンプ室 排気逆止ダンパ	4	135	33.7	○

※代表ダンパの評価結果を示す

※評価対象ダンパのうち、「風量調整ダンパ」及び「防火ダンパ(防火兼風量調整ダンパを含む)」については、竜巻通過時は開状態であり、設計竜巻による気圧差による荷重はシャフトに作用しないため、評価不要とする。一方、「空気作動ダンパ」、「高気密ダンパ」及び「逆止ダンパ」については、竜巻通過時の開閉状態が各ダンパによって異なることを考慮し、代表ダンパとして選定したダンパについては、竜巻通過時の開閉状態に拠らず、設計竜巻による気圧差による荷重がシャフトに作用した場合の評価を実施。

③ バタフライ弁

③-1 評価方針

アニュラス全量排気弁及びアニュラス少量排気弁に対して、設計上の圧力基準と設計竜巻により生じる気圧差を比較することにより、構造健全性を評価する。

③-2 評価対象部位

設計竜巻による気圧差の影響を受ける当該弁を選定した。

③-3 評価結果

アニュラス全量排気弁及びアニュラス少量排気弁については、設計上の圧力基準 JIS10k に対し、設計竜巻により生じる気圧差は微小であることから、構造健全性が維持され、安全機能が維持できることを確認した。

評価結果を表 4.32 に示す。

表4.32 バタフライ弁の影響評価結果

機器名称	気圧低下量	設計上の圧力基準	裕度	評価結果
アニュラス全量排気弁	89hPa	9806.65hPa	110.1	○
アニュラス少量排気弁				

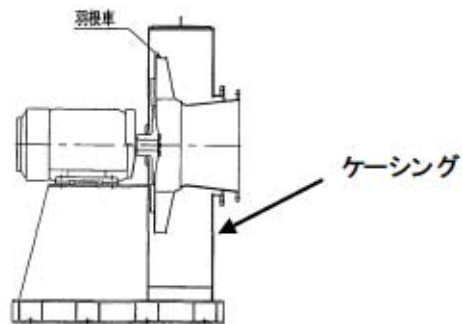
④ ファン

④-1 評価方針

電動補助給水ポンプ室給気ファン、制御用空気圧縮機室給気ファン、ディーゼル発電機室給気ファン、安全補機開閉器室給気ファン及び安全補機開閉器室排気ファンのケーシングに対して、設計竜巻による気圧差による荷重により発生する周応力（圧縮応力）を算出し、許容応力と比較することにより、構造健全性を評価する。

④-2 評価対象部位

設計竜巻による気圧差の影響を受けるファンのケーシングを選定した。



ファン外形図 (イメージ)

図 4.17 ファンの評価対象部位

④-3 評価結果

設計竜巻による気圧差荷重に対するケーシングの評価結果を表 4.33 に示す。
ケーシングに発生する周応力は許容応力を下回り、構造健全性が維持され、安全機能が維持できることを確認した。

表4.33 ファンの影響評価結果

機器名称	周応力(MPa)	許容応力(MPa)	裕度	評価結果
電動補助給水ポンプ室給気ファン	1	240	240.0	○
制御用空気圧縮機室給気ファン	1	240	240.0	○
ディーゼル発電機室給気ファン	1	240	240.0	○
安全補機開閉器室給気ファン	4	240	60.0	○
安全補機開閉器室排気ファン	1	240	240.0	○

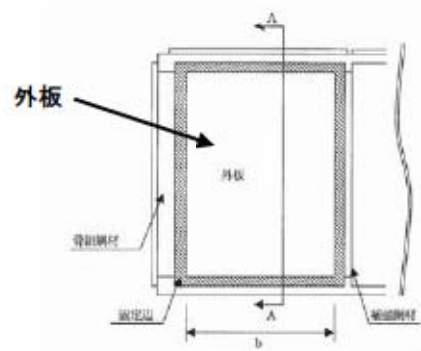
⑤空調ユニット

⑤-1 評価方針

安全補機開閉器室給気ユニットの外板に対して、設計竜巻による気圧差による荷重により発生する曲げ応力を算出し、許容応力と比較することにより、構造健全性を評価する。

⑤-2 評価対象部位

設計竜巻による気圧差の影響を受ける部分のうち、強度面で最も弱い部位を選定した。



ユニットモデル図

図 4.18 空調ユニットの評価対象部位

⑤-3 評価結果

設計竜巻による気圧差荷重に対する外板の評価結果を表 4.34 に示す。

外板に発生する曲げ応力は許容応力を下回り、構造健全性が維持され、安全機能が維持できることを確認した。

表4.34 空調ユニットの影響評価結果

機器名称	曲げ応力(MPa)	許容応力(MPa)	裕度	評価結果
安全補機開閉器室給気ユニット	207	360	1.7	○

ロ. 竜巻防護施設に波及的影響を及ぼし得る施設

(イ) ディーゼル発電機排気消音器

①評価方針

ディーゼル発電機排気消音器の取付ボルトに対して、設計竜巻による気圧差による荷重($W_P=W_{T1}$)並びに、設計竜巻の風圧力による荷重(W_W)、設計竜巻による気圧差による荷重(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($W_{T2}=W_W+0.5W_P+W_M$)により発生する応力を算出し、許容応力と比較することにより、構造健全性を評価する。

ただし、ディーゼル発電機吸気消音器(吸気口)とディーゼル発電機排気消音器(排気口)は共に大気開放されており、かつ近接して設置されているため、ディーゼル発電機排気消音器については、設計竜巻による気圧差による荷重(W_P)は考慮しない。また、設計飛来物のうち、鋼製材及び鋼製パイプは、衝突により当該施設を貫通することから、衝撃荷重(W_M)としては、砂利のみを考慮することになるが、砂利については、衝突時間が極めて短く、機器に対する影響がごくわずかであることから、衝撃荷重(W_M)については複合荷重に含めないものとする。

②評価対象部位

設計竜巻による複合荷重により転倒する可能性が考えられるため、風圧力による荷重を受ける部分のうち、評価上厳しくなる構造上の不連続部を選定した。

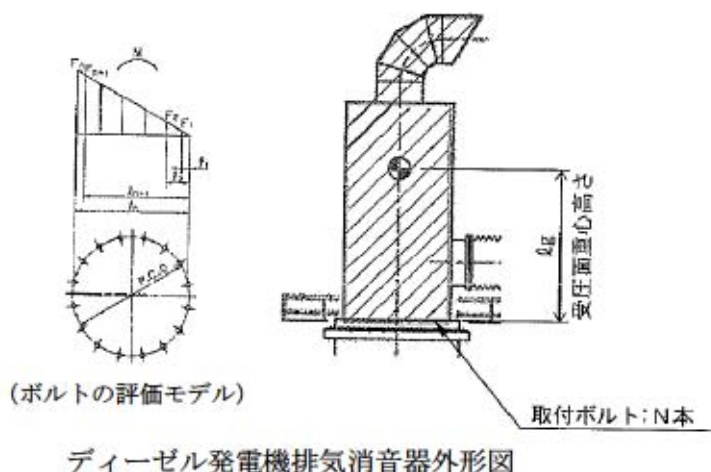


図 4.19 ディーゼル発電機排気消音器の評価対象部位

③評価結果

設計竜巻の風圧力による荷重に対するディーゼル発電機排気消音器の評価結果を表 4.35 に示す。

ディーゼル発電機排気消音器に発生する応力は許容応力を下回り、構造健全性が維持され、安全機能が維持できることを確認した。

表4.35 ディーゼル発電機排気消音器の影響評価結果

機器名称	評価対象部位	発生応力	応力値 (MPa)	許容応力 (MPa)	裕度	評価結果
ディーゼル 発電機排気 消音器	取付ボルト	引張	45	175	3.8	○
		せん断	19	135	7.1	○
		組合せ	45	175	3.8	○

(ロ) 主蒸気逃がし弁消音器

①評価方針

主蒸気逃がし弁消音器の架台の柱脚すみ肉溶接部に対して、設計竜巻による気圧差による荷重 ($W_{T1}=W_P$) 並びに、設計竜巻の風圧力による荷重 (W_W)、設計竜巻による気圧差による荷重 (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 ($W_{T2}=W_W+0.5W_P+W_M$) により発生する応力を算出し、許容応力と比較することにより、構造健全性を評価する。

ただし、主蒸気逃がし弁消音器については、大気開放されているため、設計竜巻

による気圧差による荷重(W_p)は考慮しない。また、設計飛来物のうち、鋼製材及び鋼製パイプは、衝突により当該施設を貫通することから、衝撃荷重(W_w)としては、砂利のみを考慮することになるが、砂利については、衝突時間が極めて短く、機器に対する影響がごくわずかであることから、衝撃荷重(W_w)については複合荷重に含めないものとする。

②評価対象部位

設計竜巻による複合荷重により転倒する可能性が考えられるため、風圧力による荷重を受ける部分のうち、強度面で相対的に弱いと想定される部位を選定した。

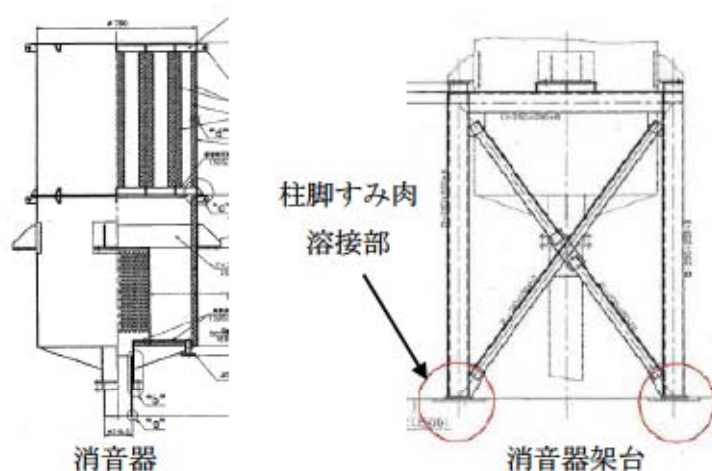


図 4.20 主蒸気逃がし弁消音器の評価対象部位

③評価結果

設計竜巻の風圧力による荷重に対する柱脚すみ肉溶接部の評価結果を表 4.36 に示す。

柱脚すみ肉溶接部に発生する応力は許容応力を下回り、構造健全性が維持され、安全機能が維持できることを確認した。

表4.36 主蒸気逃がし弁消音器の影響評価結果

機器名称	評価対象部位	発生応力	応力値(MPa)	許容応力(MPa)	裕度	評価結果
主蒸気逃がし弁消音器	柱脚すみ肉溶接部	引張	9.1	245	26.9	○
		せん断	7.0	141	20.1	○
		組合せ	15.2	245	16.1	○

(ハ) 主蒸気安全弁排気管、タービン動補助給水ポンプ排気管

①評価方針

主蒸気安全弁排気管及びタービン動補助給水ポンプ排気管に対して、設計竜巻による気圧差による荷重($W_{T1}=W_P$)並びに、設計竜巻の風圧力による荷重(W_W)、設計竜巻による気圧差による荷重(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($W_{T2}=W_W+0.5W_P+W_M$)により発生する応力を算出し、許容応力と比較することにより、構造健全性を評価する。

ただし、主蒸気安全弁排気管及びタービン動補助給水ポンプ排気管については、大気開放されているため、設計竜巻による気圧差による荷重(W_P)は考慮しない。また、設計飛来物のうち、鋼製材及び鋼製パイプは、衝突により当該施設を貫通することから、衝撃荷重(W_M)としては、砂利のみを考慮することになるが、砂利については、衝突時間が極めて短く、機器に対する影響がごくわずかであることから、衝撃荷重(W_M)については複合荷重に含めないものとする。

②評価対象部位

設計竜巻による複合荷重を受ける部位(建屋外に露出している部分)を選定した。

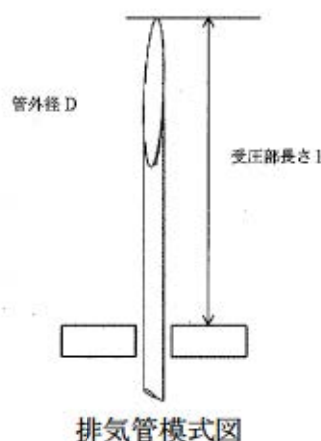


図 4.21 主蒸気安全弁排気管、タービン動補助給水ポンプ排気管の評価対象部位

③評価結果

設計竜巻の風圧力による荷重に対する主蒸気安全弁排気管及びタービン動補助給水ポンプ排気管の評価結果を表 4.37、38 に示す。

主蒸気安全弁排気管及びタービン動補助給水ポンプ排気管に発生する応力は許容応力を下回り、構造健全性が維持され、安全機能が維持できることを確認した。

表4.37 主蒸気安全弁排気管の影響評価結果

機器名称	発生応力	応力値(MPa)	許容応力(MPa)	裕度	評価結果
主蒸気安全弁排気管	曲げ	14.6	182.7	12.5	○

表4.38 タービン動補助給水ポンプ排気管の影響評価結果

機器名称	発生応力	応力値(MPa)	許容応力(MPa)	裕度	評価結果
タービン動補助給水ポンプ排気管	曲げ	34.0	182.7	5.3	○

(二) ディーゼル発電機燃料油貯油槽ペント管

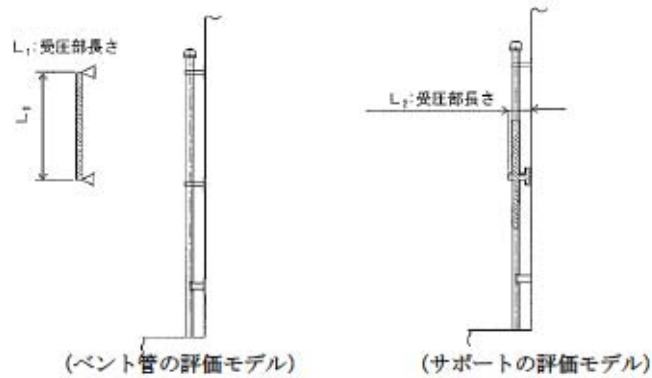
①評価方針

ディーゼル発電機燃料油貯油槽のペント管及びサポートに対して、設計竜巻による気圧差による荷重($W_{T1}=W_P$)並びに、設計竜巻の風圧力による荷重(W_W)、設計竜巻による気圧差による荷重(W_P)及び設計飛来物による衝撃荷重(W_U)を組み合わせた複合荷重($W_{T2}=W_W+0.5W_P+W_U$)により発生する応力を算出し、許容応力と比較することにより、構造健全性を評価する。

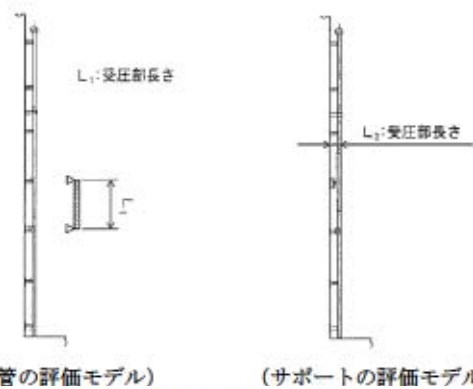
ただし、ペント管については、大気開放されているため、設計竜巻による気圧差による荷重(W_P)は考慮しない。また、設計飛来物のうち、鋼製材及び鋼製パイプは、衝突により当該施設を貫通することから、衝撃荷重(W_U)としては、砂利のみを考慮することになるが、砂利については、衝突時間が極めて短く、機器に対する影響がごくわずかであることから、衝撃荷重(W_U)については複合荷重に含めないものとする。

②評価対象部位

設計竜巻による複合荷重を受ける部位(建屋外に露出している部分)を選定した。



ディーゼル発電機燃料油貯油槽ベント管（A側）外形図



ディーゼル発電機燃料油貯油槽ベント管（B側）外形図

図 4.22 ディーゼル発電機燃料油貯油槽ベント管の評価対象部位

③評価結果

設計竜巻の風圧力による荷重に対するベント管及びサポートの評価結果を表 4.39 に示す。

ベント管及びサポートに発生する応力は許容応力を下回り、構造健全性が維持され、安全機能が維持できることを確認した。

表4.39 ディーゼル発電機燃料油貯油槽ベント管の影響評価結果

機器名称	評価部位	発生 応力	応力値 (MPa)	許容応力 (MPa)	裕度	評価結果
ディーゼル発電機燃料油 貯油槽ベント管（A側）	ベント管	曲げ	9.0	215	23.8	○
	サポート		16.0	245	15.3	○
ディーゼル発電機燃料油 貯油槽ベント管（B側）	ベント管	曲げ	5.0	215	43.0	○
	サポート		14.0	245	17.5	○

(ホ) 換気空調設備

蓄電池室排気装置について、竜巻による影響評価を行う。

具体的には、外気と繋がるダクト、ファン及び外気との境界となるダンパに対して影響評価を行う。

①ダクト

①-1 評価方針

・角ダクト

「イ.(ホ) ①ダクト」に同じ。

・丸ダクト

「イ.(ホ) ①ダクト」に同じ。

①-2 評価対象部位

設計竜巻による気圧差の影響を受けるダクトを選定した。

①-3 評価結果

・角ダクト

長期荷重(自重) + 短期荷重(竜巻) に対するダクト鋼板の評価結果を表 4.40 に示す。

ダクト本体(ダクト鋼板) に発生する応力等は許容値を下回り、構造健全性が維持され、安全機能が維持できることを確認した。

表4.40 角ダクトの影響評価結果

ダクト種別	ダクトサイズ (mm)	ダクト 材質	自重+竜巻による気 圧差荷重による面外 荷重により発生する 曲げ応力(MPa)			竜巻による気圧差荷 重による面内荷重に より発生する座屈応 力(MPa)			自重+竜巻による気圧差荷 重による面内荷重により発 生する曲げモーメント(kN・ mm)			評価 結果
			発生 応力	許容値	裕度	発生 応力	許容値	裕度	発生曲げ モーメント	許容値	裕度	
ハゼ折低圧角ダ クト	200×600× 0.6t	SGCC	141	189	1.3	12	189	15.7	20.5	885.8	43.2	○

注：最も裕度の小さいものを記載

・丸ダクト

長期荷重(自重) + 短期荷重(竜巻) に対するダクト鋼板の評価結果を表 4.41 に示す。

ダクト鋼板に発生する応力等は許容値を下回り、構造健全性が維持され、安全機能が維持できることを確認した。

表4.41 丸ダクトの影響評価結果

ダクト種別	ダクトサイズ (mm)	ダクト 材質	竜巻による気圧差荷重による 周方向応力 (MPa)			自重+竜巻による気圧差荷重 に対する制限			評価 結果
			発生応力	許容値	裕度	発生値*	許容値	裕度	
スパイラル低圧丸 ダクト	φ300×0.6t	SGCC	2.3	2.9	1.2	0.8	0.9	1.1	○

※：発生値＝周方向応力/許容値＋曲げモーメント/許容値

注：最も裕度の小さいものを記載

②ダンパ

②-1 評価方針

「イ. (ホ) ②ダンパ」に同じ。

②-2 評価対象部位

「イ. (ホ) ②ダンパ」に同じ。

②-3 評価結果

評価対象ダンパのケーシング又はペーンの長さが「イ. (ホ) ②ダンパ」において選定した代表ダンパより短いことから、代表ダンパの評価に包絡される。

③ファン

③-1 評価方針

蓄電池室排気ファンのケーシングに対して、設計竜巻による気圧差による荷重により発生する周応力（圧縮応力）を算出し、許容応力と比較することにより、構造健全性を評価する。

③-2 評価対象部位

「イ. (ホ) ④ファン」に同じ。

③-3 評価結果

設計竜巻による気圧差荷重に対するケーシングの評価結果を表 4.42 に示す。
ケーシングに発生する周応力は許容応力を下回り、構造健全性が維持され、安全機能が維持できることを確認した。

表4.42 ファンの影響評価結果

機器名称	周応力(MPa)	許容応力(MPa)	裕度	評価結果
蓄電池室排気ファン	1	240	240.0	○

(e) その他の確認事項（補足説明資料28参照）

イ. 気圧差に対する影響評価

「原子力発電所の竜巻影響評価ガイド」において、気圧差による圧力の影響を受けることが想定される設備については、気圧差による圧力の影響について検討を行い、当該設備が破損した場合の安全機能維持への影響についても確認を行う旨記載されている。

設備は基本的に建屋内に設置されているため、建屋の防護機能によって気圧差の影響は受けないと考えられるが、設計竜巻により外壁（外装材等）の損傷が考えられる鉄骨造建屋内に設置されている計器等、気圧差の影響を受けることが想定される設備が存在する。

また、竜巻は長期間停滞することはなく短時間（数秒～数十秒のオーダー）で通過すると考えられる。

以上を踏まえ、気圧差の影響を受けることが想定される設備として下記を抽出し、気圧差の影響を評価した。

- ①設計竜巻により外壁の損傷が考えられる鉄骨造建屋内に設置されている計器
- ②外気に繋がっている換気空調設備（排気筒含む）
- ③外気を吸入して運転する非常用ディーゼル発電機

(イ) 設計竜巻により外壁の損傷が考えられる鉄骨造建屋内に設置されている計器

気圧差が計測に影響を与えるものとしては、①圧力計、②水位計、③流量計が考えられるが（設計竜巻により外壁の損傷が考えられる鉄骨造建屋内に設置されている計器を含む）、以下のとおり気圧差による安全機能維持への影響はないことを確認した。

①圧力計

圧力計の高圧側（プロセス圧）は変化せず、低圧側（大気）のみ変化することとなり、圧力計測信号が見かけ上高めを示すこととなるが、一般に圧力計の計測範囲はMPaオーダーであり、気圧差のhPaオーダーよりも非常に大きいことから、安全機能維持への影響はない。

②水位計

<開放タンクの場合>

差圧計の高圧側（タンク内圧）、低圧側（大気）共に圧力が低下するため、気圧差の影響は受けないことから、安全機能維持への影響はない。

<密閉タンクの場合（高圧側、低圧側ともにタンク内圧を受圧）>

差圧計の高圧側、低圧側ともに外気の影響を受けず、気圧差の影響は受けないことから、安全機能維持への影響はない。

③流量計

差圧計の高圧側、低圧側共にプロセス配管に接続されており、気圧差の影響は受けないことから、安全機能維持への影響はない。

(ロ) 外気に繋がっている換気空調設備（排気筒含む）

竜巻防護施設および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した換気空調設備（ダンパ、バタフライ弁、ダクト、ファン、空調ユニット）および排気筒について、気圧差に対する健全性を評価した結果、構造健全性が維持され安全機能が維持できることを確認した（補足説明資料25.（2）項参照）。

(ハ) 外気を吸入して運転する非常用ディーゼル発電機

非常用ディーゼル発電機（D/G）の吸排気口に気圧差の影響（気圧低下）が生じた場合、D/Gの運転に影響を与える可能性が考えられる。

D/Gの吸気口と排気口は近接して設置されているため、竜巻が接近した場合においても、気圧差は生じ難いと考えられるが、以下のとおり①吸気口側、②排気口側、③吸気口側および排気口側の双方が気圧低下した場合に想定される現象について評価を行い、D/Gの安全機能に影響を与えないことを確認した。

①吸気口側が気圧低下した場合に想定される現象

吸気口側が気圧低下した場合は吸入空気の密度が低くなるため、過給機により送気される空気量が減少する。過給機により送気される空気は燃料油の燃焼と燃焼後の燃焼室廻りの冷却に用いられており、空気量が減少したとしても燃料油の燃焼は健全に行われるが、燃焼室廻りの冷却に必要な空気量は減少するため、徐々に排気ガス温度が上昇することになる。排気ガス温度が許容限界温度（520℃（通常運転時は400℃前後））となった場合は出力制限となるが、竜巻は長期間停滞することではなく短時間（数秒～数十秒のオーダー）で通過すると考えられるため、この程度であれば排気ガス温度が上昇したとしても許容限界温度に達することはない。また燃焼用空気は失われないため、機関の失火は発生しないことから、D/Gの運転に支障をきたすことはない。

②排気口側が気圧低下した場合に想定される現象

排気口側が気圧低下した場合は排気がし易くなると共に、吸気口側と排気口側は構造上繋がっているため吸気もし易くなるため、吸気口側と排気口側で気圧差は生じないことから、吸気と排気のバランスが崩れることはなく、D/Gの運転に支障をきたすことはない。

③吸気口側および排気口側の双方が気圧低下した場合に想定される現象

吸・排気口側の双方が気圧低下した場合は双方の気圧差は生じないが、吸気側が気圧低下することから、上記①と同じ結果となる。

ロ. 竜巻による風の流入による影響

竜巻による風が排気系統に流入した場合、系統内の背圧（抵抗）が増加することによって過給気による送気がし難くなるため、上記イ. (ハ)①同様に吸入空気量が減少して、徐々に排気ガス温度が上昇することが考えられるが、竜巻は短時間で通過すると考えられるため、D/Gの運転に支障をきたすことはない。

5. 竜巻随件事象に対する評価

(1) 概要

竜巻随件事象は、過去の竜巻被害状況及び泊発電所のプラント配置から想定される以下の事象を抽出し、これらの事象に対して、竜巻防護施設の安全機能が維持されることを確認する。(補足説明資料3 3参照)

(2) 評価結果

a. 火災

竜巻防護施設を内包する建屋内については、設計竜巻により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発電用原子炉施設の安全性を損なう可能性のある発火性又は引火性物質を内包する機器はなく、火災防護計画により適切に管理することから、建屋内の竜巻防護施設の安全機能の維持に影響を与えないことを確認した。

また、設計竜巻による発電所敷地内の危険物タンクの火災に関しては、外部火災影響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の維持に影響を与えないことを確認した。

なお、建屋外の火災については、竜巻通過後、速やかに消火用水、化学消防自動車及び水槽付き消防ポンプ自動車等による消火活動を行う。

b. 溢水

竜巻防護施設を内包する建屋内については、設計竜巻により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発電用原子炉施設の安全性を損なう可能性のある溢水源はないことから、建屋内の竜巻防護施設の安全機能の維持に影響を与えないことを確認した。

また、燃料取扱棟には使用済燃料ピットが設置されているため、設計竜巻により使用済燃料ピットの水が吸い上げられて流出することも考えられるが、設計飛来物により外壁の一部が損傷したとしても、損傷することで評価荷重は小さくなるため、当該建屋の構造健全性は維持され、屋根が崩落するようなことはないと考えられることから、設計竜巻により使用済燃料ピットの水が吸い上げられて流出することはなく、竜巻防護施設の安全機能の維持に影響を与えないことを確認した。

さらに、設計飛来物の衝突による発電所敷地内の屋外タンクの溢水に関しては、内部溢水影響評価における屋外タンクの溢水影響評価において、竜巻防護施設の安全機能の維持に影響を与えないことを確認する方針としている。

c. 外部電源喪失

設計竜巻と同時に発生する雷、ダウンバーストの影響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(D/G)はディーゼル発電機建屋内に収納してあり、設計竜巻による風圧力、気圧差による圧力及び飛来物による機関への影響はない。吸排気については外気と

繋がっているが、吸気口と排気口は近接して設置されていることから、気圧差は生じ難いと考えられるが、吸排気系統出入口で気圧差が発生することを考慮しても、吸気側が負圧となった場合、吸入空気の密度が低くなるため、過給機により送気される空気量が減少すると、排気ガス温度が徐々に上昇し、520℃を超過すれば出力制限となるが、竜巻は吸排気口設置区間を短時間で通過することから、排気ガス温度の急激な上昇はなく D/G の運転に支障をきたすことはない。

また、竜巻による風が排気系統に流入した場合、系統内の背圧（抵抗）が増加することによって過給機による送気がし難くなるため、上記同様に吸入空気量が減少して、徐々に排気ガス温度が上昇することが考えられるが、竜巻は短時間で通過すると考えられるため、D/G の運転に支障をきたすことはない。

以上から、D/G は安全機能を維持しており、設計竜巻と同時に発生する雷、ダウンバーストの影響により外部電源が喪失した場合でも、竜巻防護施設の安全機能の維持に影響を与えないことを確認した。

6. 竜巻対策（補足説明資料26参照）

泊発電所構内には、屋外に保管されている各種資機材、車両等、飛来物になり得る物が存在している。設計竜巻によりこれら飛来物が評価対象施設（竜巻防護施設または竜巻防護施設に波及的影響を及ぼし得る施設）に衝突した場合は、貫通等の損傷により安全機能の維持に影響を与えることも考えられることから、以下の対策を実施する。

（1）基本方針

a. 飛来物発生防止対策

飛来物になり得る物を極力減らすことが重要であるため、次の事項を遵守し飛散防止を図る。

（a）作業等で使用しないもの

- ・発電所構内に置かない（撤去する）。

（b）作業等で使用するもの

- ・アンカーにより建屋等堅牢な構造物等へ固縛する。
- ・十分な重さのウェイトを取付ける、または複数纏めて固縛あるいは固定する。
- ・業務車両は竜巻襲来が予想される場合に固縛する、または速やかに移動できる体制を取る。
- ・業務車両以外の車両は構内への入構を禁止する。
- ・重大事故等対処設備は必要時の利用可能性を確保しつつ、十分な重さのウェイトを取付ける、またはアンカーにより地面へ固縛する。
- ・飛散及び横滑りを考慮して、竜巻防護施設を内包する建屋および竜巻防護施設を内包する建屋の上屋である循環水ポンプ建屋（以下「竜巻防護施設を内包する建屋等」という。）から十分な離隔距離を確保する。

b. 竜巻防護対策

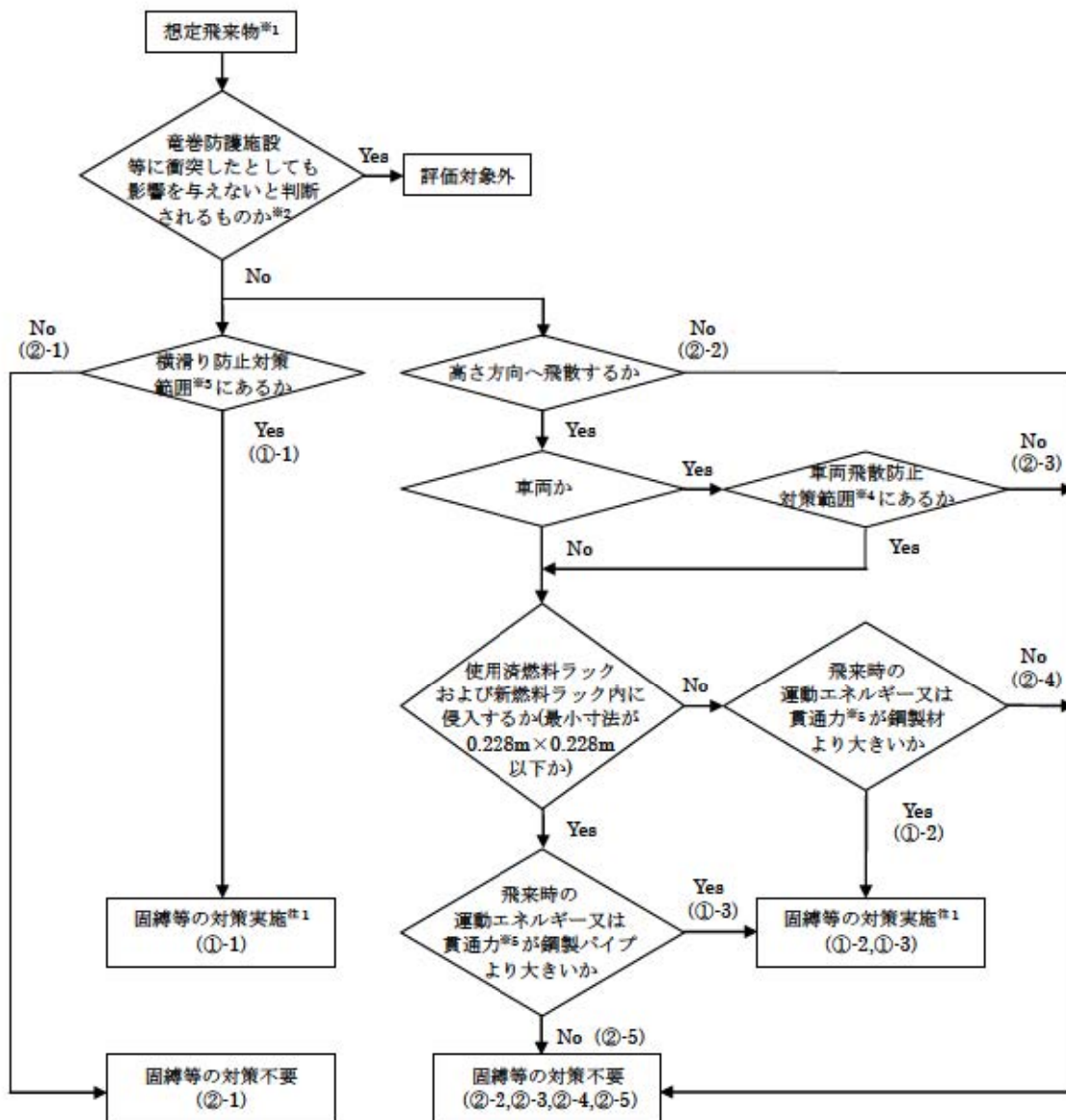
上記 a. 項の飛来物発生防止対策を確実に実施するものとするが、作業のために設置している仮設足場等、飛来物になり得る物をゼロにするのは困難と考えられるため、評価対象施設への設計飛来物による影響を評価し、設計飛来物が衝突した場合に安全機能を喪失する可能性のある場合は、安全機能の維持に影響を与えないよう、設備による竜巻防護対策として、防護鋼板、防護ネット等（竜巻飛来物防護対策設備）の設置により当該設備（以下「防護対象設備」という。）を飛来物から防護する、あるいは運用による竜巻防護対策として、竜巻襲来が予想される場合の燃料取扱作業の中断等を行う。

（2）飛来物発生防止対策

a. 対策要否評価

竜巻襲来時に泊発電所構内に保管されている屋外の各種資機材等（重大事故等対処設備含

む) の飛散・衝突により、竜巻防護施設の安全機能の維持に影響を与えないよう、図 6.1 に示す飛来物発生防止対策要否評価フローに基づいて固縛等の対策要否を評価する（今後新たに屋外に保管または設置する物についても同様に評価する）。



- ※1：今後新たに屋外に保管または設置する物を含む。
- ※2：非金属製で明らかに柔らかいものや、金属製であっても、竜巻防護施設等に衝突した際に自身（想定飛来物）が変形すると容易に予想される薄板形状（数 mm 以下）のもの等。
- ※3：竜巻防護施設を内包する建屋等から 190m(高さ方向へ飛散しないが横滑りする物の最長の移動距離を踏まえて設定)の範囲。
- ※4：竜巻防護施設を内包する建屋等から 350m（高さ方向へ飛散する車両の最長の飛散距離を踏まえて設定）の範囲。
- ※5：BRL 式から算出した想定飛来物の貫通を生じないために必要な鋼板の最小厚さ。
- 注 1：設置状況（アンカー固定や、竜巻防護施設を内包する建屋等との間に頑健な物理障壁がある等）により、飛散または横滑りしない、あるいは飛散または横滑りしても竜巻防護施設等に衝突しない場合は、固縛等の対策は不要とする。
- 注 2：作業等で使用するなど運転手が付近に常駐している車両（以下「停車車両」という。）については、上記のフローに拠らず、竜巻襲来が予想される場合は、車両飛散防止対策範囲外に退避する。

図 6.1 飛来物発生防止対策要否評価フロー

図 6.1 の評価フローに基づき、車両以外の物と車両に区分して対策要否を整理すると下表のとおりとなる。

なお、車両飛散防止対策範囲及び横滑り防止対策範囲については、以下のとおり設定している。

■車両飛散防止対策範囲

高さ方向へ飛散する車両の最長の飛散距離は 346m であるため、車両飛散防止対策範囲は竜巻防護施設を内包する建屋等から 350m の範囲とする。

■横滑り防止対策範囲

高さ方向へ飛散しないが横滑りする物の最長の移動距離は、空力パラメータが 0.0028 の時の移動距離 (181m) となるため、横滑り防止対策範囲は竜巻防護施設を内包する建屋等から 190m の範囲とする。

想定飛来物 ^{※1}	保管または設置場所 (作業場所)	飛散影響を回避する ための対策	横滑り影響を回避 するための対策
高さ方向へ飛散する物 (車両除く)	車両飛散防止対策範囲	実施 ^{※2}	考慮 ^{※2,3}
	車両飛散防止対策範囲外	実施 ^{※2}	不要
高さ方向へ飛散しない 物 (車両除く)	横滑り防止対策範囲	不要	実施 ^{※2}
	横滑り防止対策範囲外	不要	不要
高さ方向へ飛散する車 両	車両飛散防止対策範囲	実施 ^{※2}	考慮 ^{※2,3}
	車両飛散防止対策範囲外	不要	不要
高さ方向へ飛散しない 車両	横滑り防止対策範囲	不要	実施 ^{※2}
	横滑り防止対策範囲外	不要	不要
停車車両	車両飛散防止対策範囲	実施 ^{※4}	不要
	車両飛散防止対策範囲外	不要	不要

※1：図 6.1 の評価フローにより固縛等の対策が必要と評価した想定飛来物

※2：設置場所等を考慮して、①固縛（業務車両のうち、一時的に固縛を解除して使用している停車車両以外の車両（警備車両等）に対する竜巻襲来が予想される場合の固縛を含む）、②固定、③竜巻防護施設からの離隔の中から、適切な対策を行うものとする。また、作業等で使用しないものについては、発電所構内から撤去する。

※3：横滑り防止対策範囲に保管または設置する場合

※4：竜巻襲来が予想される場合は車両飛散防止対策範囲外へ退避する

b. 対策方法

図 6.1 の評価フローにより固縛等の対策が必要と評価した想定飛来物（今後新たに屋外に保管または設置する物を含む）に対して固縛等の対策を実施する。

表 6.1 に主な想定飛来物（図 6.1 の評価フローにより固縛等の対策が必要と評価した物）の飛来物発生防止対策を示す。

表 6.1 主な想定飛来物の飛来物発生防止対策

想定飛来物	飛来物発生防止対策
コンテナ	<ul style="list-style-type: none"> 十分な重さのウェイトを取付ける。 ウェイトの重量については、コンテナの自重+ウェイトの重量により空力パラメータが 0.0026 以下となる重量とする。
鋼管	<ul style="list-style-type: none"> 単品で置かず複数本を束にして固縛する。 束にする本数については、空力パラメータが 0.0026 以下となる本数とする。
鋼材	<ul style="list-style-type: none"> 単品で置かず複数本を重ねて固縛する、または十分な重さのウェイトを取付ける。 重ねる本数については、空力パラメータが 0.0026 以下となる本数とする。 ウェイトの重量については、鋼製材の自重+ウェイトの重量により空力パラメータが 0.0026 以下となる重量とする。
車両(重大事故等対処設備含む)	<p><高さ方向へ飛散する車両></p> <ul style="list-style-type: none"> 車両の飛散距離を考慮し、竜巻防護施設を内包する建屋等から 350m の範囲内について下記の対策を実施する。 アンカーにより地面へ固縛する、または十分な重さのウェイトを取付ける。 ウェイトの重量については、車両の自重+ウェイトの重量により空力パラメータが 0.0026 以下となる重量とする。 停車車両については、竜巻襲来が予想される場合に速やかに竜巻防護施設を内包する建屋等から 350m の範囲外に退避できる体制を取る旨マニュアルに反映することとしており固縛不要とする。 業務車両以外の車両については、構内への入構を禁止する。 <p><高さ方向へは飛散しないが横滑りする車両></p> <ul style="list-style-type: none"> 車両の移動距離を考慮し、竜巻防護施設を内包する建屋等から 190m の範囲内について下記の対策を実施する。 アンカーにより地面へ固縛する。

(3) 竜巻防護対策

評価対象施設のうち、設計飛来物の衝突により損傷する可能性がある施設について、竜巻防護対策実施有無の抽出フローを図 6.2 に示す。

使用済燃料ピットおよび使用済燃料ラックについては、構造健全性評価の結果、設計飛来物が衝突したとしても、使用済燃料ラックに貯蔵されている燃料集合体の燃料被覆管の健全性等は確保され、当該設備の安全機能は維持されることから竜巻防護対策は不要である。また、換気空調設備については、設計飛来物が外殻となる施設を貫通して、当該設備が損傷する可能性はないことから、竜巻防護対策は不要である。

竜巻防護対策が必要な設備については、設備または運用による対応を実施する。設備によ

る対応としては、防護ネット、防護鋼板等（竜巻飛来物防護対策設備）の設置により、設計飛来物が防護対象設備に衝突することを防止する。また、運用による対応としては、設計飛来物の衝突により損傷した場合の補修、取替等や、竜巻襲来が予想される場合の燃料取扱作業の中断等を実施する。

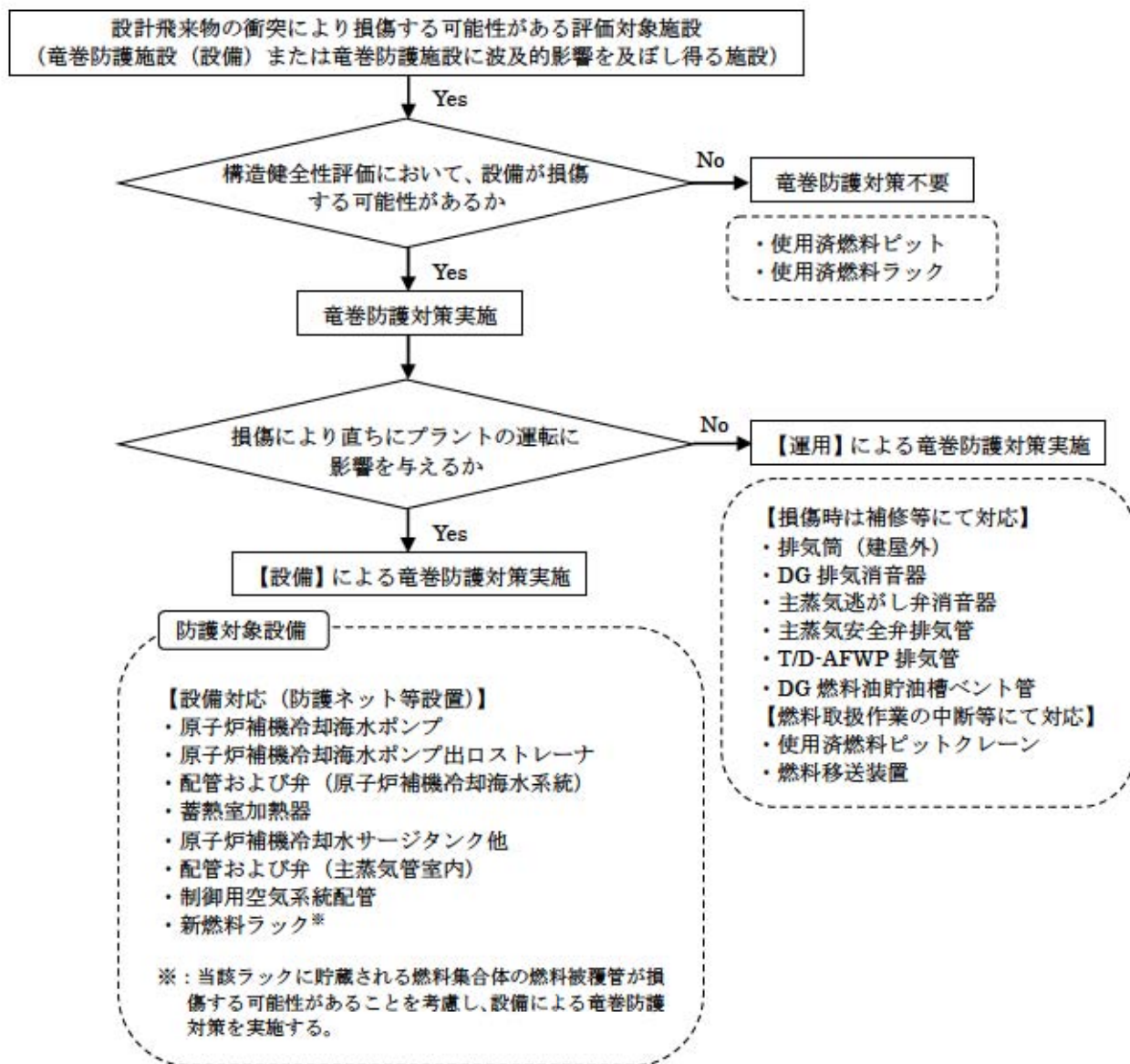


図 6.2 竜巻防護対策実施有無の抽出フロー

a. 設備による竜巻防護対策

設備による竜巻防護対策（以下「飛来物防護対策」という。）として、防護鋼板、防護ネット等の設置により、防護対象設備を飛来物から防護する対策を実施する（表 6.2 参照）。

なお、防護対策に係る設計については見直す場合があることから、設計の詳細は工認審査の場において説明する。

表 6.2 防護対象設備毎の飛来物防護対策内容一覧

防護対象設備	対策内容
原子炉補機冷却海水ポンプ(配管および弁含む)	・ 防護対象設備が設置されている取水ピットポンプ室の上部開口部に防護ネット(金網)を設置する。
原子炉補機冷却海水ポンプ出口ストレーナ(配管および弁含む)	・ 防護対象設備が設置されているストレーナ室の上部開口部に防護ネット(金網)を設置する。
蓄熱室加熱器	・ 防護対象設備が設置されている蓄熱室に隣接する吸気ガラリー室の壁面開口部(当該加熱器背面の空気口)に防護鋼板を設置する。
原子炉補機冷却水サージタンク他	・ 防護対象設備が設置されている原子炉建屋(原子炉補機冷却水サージタンク・空調用冷水膨脹タンク室)の壁面開口部(扉)前面(建屋内)に防護壁を設置する。
配管および弁(主蒸気管室内)	・ 防護対象設備が設置されている原子炉建屋(主蒸気管室)の壁面開口部(ブローアウトパネル(2箇所)および上部換気口(3箇所))前面(原子炉建屋外壁)に防護鋼板を設置する。
制御用空気系統配管	・ 防護対象設備が設置されている原子炉補助建屋(トラックアクセスエリア(2))の当該設備設置場所前面に防護壁を設置する。
新燃料ラック(貯蔵している燃料集合体)	・ 新燃料ラック内上部に防護鋼板を設置する。(当該ラックに燃料集合体を貯蔵した場合に設置)

(a) 防護ネット(金網)の設計

防護ネットは金網を2枚重ねとし、飛来物捕捉時に金網の変形を拘束しないよう、金網の四辺はワイヤーロープにて支持して、ワイヤーロープを鋼製枠に締結する構造としており、金網、ワイヤーロープ、鋼製枠が設計飛来物を捕捉するのに十分な強度を有しているかを確認するために、以下の方法にて評価を実施する。

なお、評価にあたっては、飛来物防護対策にあたって想定する設計飛来物である鋼製材、鋼製パイプ、砂利のうち、運動エネルギーが大きく、飛来物の貫通を生じないために必要な鋼板の最小厚さが厚い(貫通しやすい)鋼製材を飛来物として想定する。

イ. 金網の強度評価

金網の強度評価は、次のとおり実施する。

- ・ 金網の引張試験結果から破断時の金網の伸び量を設定する
- ・ 破断時の金網の伸び量から金網変位角を求める
- ・ 破断時の金網変位角から金網最大変位量を求める

- ・ 金網最大変位量から各列の金網変位量を求める
- ・ 各列の金網変位量から金網の吸収エネルギーを求める
- ・ 金網の吸収エネルギーが鋼製材の衝突エネルギー等より大きいことを確認する
(金網の等価剛性を等価剛性近似した場合と多直線近似した場合の吸収エネルギーの差を考慮する)

評価に係る諸元を以下に示す。

<金網の諸元>

金網の目合い 	$S=50\text{mm}$ $S_1=50 \times \sqrt{2}=70.7\text{mm}$
素線径	$d=\phi 4\text{mm}$
素線の引張強さ	$1400\text{N}/\text{mm}^2$
破断時の金網1目当たりの伸び量	$L=20\text{mm}$
材質	JIS G3506 硬鋼線材 (SWRH62A) JIS G3548 亜鉛めっき鋼線

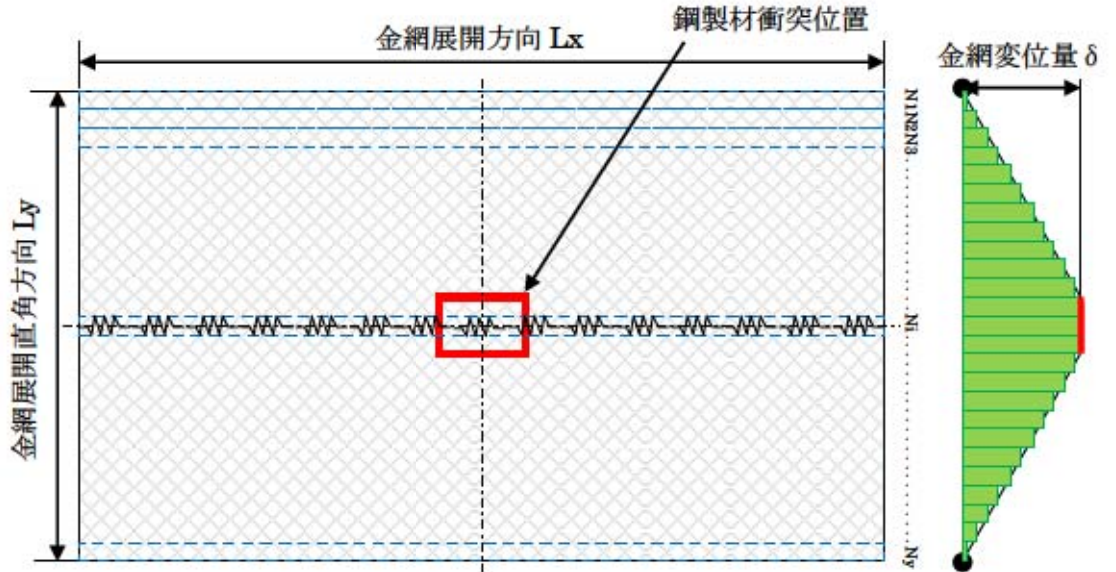
<鋼製材の諸元>

サイズ	$4.2\text{m} \times 0.3\text{m} \times 0.2\text{m}$
質量	$m=135\text{kg}$
最大水平速度	$V_h=57\text{m}/\text{s}$
最大鉛直速度	$V_v=38\text{m}/\text{s}$
衝突速度	$V=57\text{m}/\text{s}$ 又は $38\text{m}/\text{s}$ (設置方向による) ※：鋼製材は、防護ネットに局部的に作用する荷重が大きくなるよう、防護ネットに対して垂直に衝突するものとし、衝突速度については、防護ネットの設置方向に応じて、水平設置の場合は最大鉛直速度、鉛直設置の場合は最大水平速度を適用する。
金網への衝突エネルギー	$E=1/2 \times m \times V^2 / 1000 = 97.5\text{kJ} \Rightarrow 98\text{kJ}$

(イ) 金網の吸収エネルギー

金網の吸収エネルギーは、下図のとおり金網を金網展開直角方向に1目合い毎(□)で囲った形)に分割し、N1からNyまでの各列で分担する吸収エネルギーを各列の金網展開方向変位量から算出して、各列の吸収エネルギーを積算することに

より評価する。



各列の吸収エネルギーは、金網1目合いを1つのバネと考え、 $N_x (=L_x/70.7\text{mm})$ 個のバネを直列につなげた状態と模擬して評価する。

この時の1つの列の剛性(金網展開剛性)を K_x とすると、 i 番目の列における張力 P_i は、

$$P_i = 2K_x \cdot (X_i/2) = K_x \cdot X_i$$

となり、作用力 F_i は、

$$F_i = 2P_i \cdot \sin \theta = 2k_x \cdot x_i \cdot \sin \theta \\ = 2k_x \cdot L_x \cdot (\tan \theta - \sin \theta)$$

$$= 4k_x \cdot \delta_i \cdot \left(1 - \frac{L_x}{\sqrt{4\delta_i^2 + L_x^2}} \right)$$

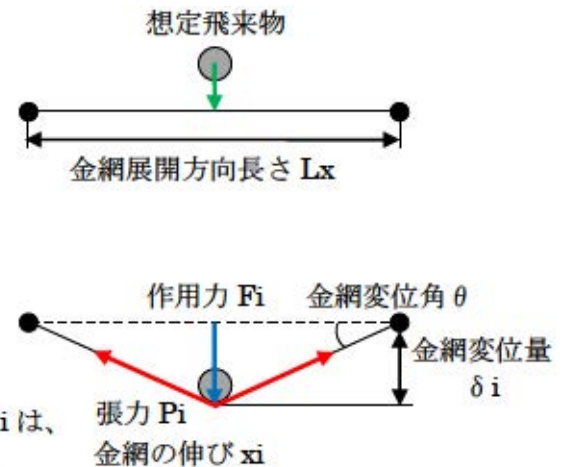
となる。

また、 i 番目の列における吸収エネルギー E_i は、

$$E_i = \int F_i d\delta_i = \int 4k_x \cdot \delta_i \cdot \left(1 - \frac{L_x}{\sqrt{4\delta_i^2 + L_x^2}} \right) d\delta_i$$

$$= 2k_x \cdot \delta_i^2 - k_x \cdot L_x \cdot (\sqrt{4\delta_i^2 + L_x^2} - L_x)$$

となり、金網の吸収エネルギー E は、 N_1 から N_y までの各列の吸収エネルギーを積算することにより求められる。



$$E = \sum_{i=N_1}^{N_2} Ei$$

(ロ) 風および自重による影響

竜巻襲来時においては、防護ネットに風圧力が作用するものと考え、設計竜巻の最大風速 $V_D (=100\text{m/s})$ の風圧力による金網への影響を評価する。

また、当該金網は水平に設置するため、自重によりたわみが発生することから、自重による金網への影響を評価する。

上記(イ)項の金網の吸収エネルギー評価と同様に、金網を金網展開直角方向に1目間合い毎に分割し、分割された1列に作用する風圧力 P_D および自重 P_V は次のとおり算出できる。

$$P_D = q \times G \times C \times A \times N = \frac{1}{2} \times \rho \times V_D^2 \times G \times C \times A \times N$$

ここで、 ρ : 空気密度

G : ガスト影響係数

C : 風力係数

$$A : \text{受圧面積} = \left\{ \left(\frac{S+2d}{1000} \right)^2 - \left(\frac{S}{1000} \right)^2 \right\} \times \frac{1000 \times Lx}{S_1}$$

ここで、 d : 素線径

S : 金網の目合い

S_1 : 金網の目合い対角寸法

Lx : 金網展開方向長さ

N : ネットの設置枚数

$$P_V = \frac{a \times m \times g \times n}{1000} \Bigg/ \frac{1000 \times Ly}{S_1}$$

ここで、ネットの面積 $a = Lx \times Ly$

ここで、 Lx : 金網展開方向長さ

Ly : 金網展開直角方向長さ

m : ネットの単位質量

g : 重力加速度

n : ネットの設置枚数

S_1 : 金網の目合い対角寸法

上記で算出した風圧力 P_D が全て金網展開方向 Lx の中央に作用したとして、上記

(イ) 項の金網に生じる作用力及び金網の吸収エネルギーの評価式から、1列に作用する風圧力により金網が受けるエネルギーを算出し、それを列数倍して、金網全体が受けるエネルギーを算出する。

$$F=P_b=4kx \cdot \delta i \cdot \left(1 - \frac{Lx}{\sqrt{4\delta i^2 + Lx^2}}\right)$$

$$E=2kx \cdot \delta i^2 - kx \cdot Lx \cdot \left(\sqrt{4\delta i^2 + Lx^2} - Lx\right)$$

また、自重 P_w により金網全体が受けるエネルギーについても、上記同様に算出する。

ロ. ワイヤロープの強度評価

ワイヤロープの強度評価は、次のとおり実施する。

- ・ 飛来物捕捉時の金網に発生する衝突荷重からワイヤロープに発生する張力を求める
- ・ ワイヤロープに発生する張力が許容荷重以内であることを確認する

ハ. 鋼製枠の強度評価

鋼製材の衝突荷重は、金網及びワイヤロープを介して鋼製枠に作用することから、鋼製枠へ作用する荷重はワイヤロープ荷重であり、評価にあたっては、ワイヤロープの許容荷重により鋼製枠に発生する応力度が許容応力度を満足することを確認する。

ニ. 評価結果

防護対象設備を飛来物から防護するために設置する防護ネット（金網）については、風圧力および自重により金網が受けるエネルギーを考慮しても、飛来物防護対策にあたって想定する飛来物である鋼製材の衝突エネルギーを吸収でき、防護対象設備（あるいは設置建屋）と防護ネット（金網）との離隔を適切に取ることにより、防護対象設備への飛来物の衝突を防止できることを確認した。

表 6.3 に防護対象設備毎の評価結果一覧を示す。

なお、鋼製枠については、ワイヤロープの許容荷重により発生する応力度が許容応力度を満足することを確認した。

表 6.3 防護対象設備毎の評価結果一覧

防護対象設備	①金網の 吸収エネ ルギー (kJ)	②衝突 エネ ルギー (kJ)	③風圧力 によるエ ネルギー (kJ)	④自重に よるエネ ルギー (kJ)	裕度 $\left(\frac{\text{①}}{\text{②}+\text{③}+\text{④}}\right)$	最大 変位量 (m)	ワイヤーロー プ張力(kN) ≤82.5kN
原子炉補機冷却海 水ポンプ（配管およ び弁含む）	327.8	98.0	12.6	0.12	2.96	2.05	25.3
原子炉補機冷却海 水ポンプ出口スト レーナ（配管および 弁含む）	169.2		5.1	0.05	1.64	1.73	30.0

(b) 防護鋼板の設計

防護鋼板が設計飛来物の貫通を防止するのに十分な強度を有しているかを確認するために、以下の方法にて評価を実施する。

イ. 防護鋼板の強度評価

BRL 式を用いて算出した設計飛来物の貫通を生じないために必要な鋼板の最小厚さと、防護鋼板の厚さを比較することにより、設計飛来物の貫通有無を確認する。

なお、評価にあたっては、飛来物防護対策にあたって想定する設計飛来物である鋼製材、鋼製パイプ、砂利のうち、運動エネルギーが大きく、飛来物の貫通を生じないために必要な鋼板の最小厚さが厚い（貫通しやすい）鋼製材を飛来物として想定する。ただし、新燃料ラックについては、燃料被覆管が破損する可能性があるとの評価結果となった鋼製パイプを飛来物として想定する。

ロ. 評価結果

防護対象設備を飛来物から防護するために設置する防護鋼板については、飛来物防護対策にあたって想定する飛来物である鋼製材あるいは鋼製パイプの貫通を生じないために必要な鋼板の最小厚さ以上の板厚を確保することにより、防護対象設備への飛来物の衝突を防止できることを確認した。

(c) 防護壁（防護コンクリート）の設計

防護壁が設計飛来物の貫通を防止するのに十分な強度を有しているかを確認するために、以下の方法にて評価を実施する。

イ. 防護壁の強度評価

修正 NDRC 式及び Degen 式を用いて算出した設計飛来物の貫通を生じないために必要な

コンクリートの最小厚さと、防護壁の厚さを比較することにより、設計飛来物の貫通有無を確認する。

なお、評価にあたっては、飛来物防護対策にあたって想定する設計飛来物である鋼製材、鋼製パイプ、砂利のうち、運動エネルギーが大きく、飛来物の貫通を生じないために必要な鋼板の最小厚さが厚い（貫通しやすい）鋼製材を飛来物として想定する。

ロ. 評価結果

防護対象設備を飛来物から防護するために設置する防護壁については、飛来物防護対策にあたって想定する飛来物である鋼製材の貫通を生じないために必要なコンクリートの最小厚さ以上の板厚を確保することにより、防護対象設備への飛来物の衝突を防止できることを確認した。

b. 運用による竜巻防護対策

設計飛来物の衝突により、構造健全性が維持できない評価対象施設については、安全機能の維持に影響を与えないよう、補修等を実施する。

また、換気空調設備については、気圧差の影響を極力回避する観点から、竜巻襲来が予想される場合は、外気との境界となるダンパ及びバタフライ弁の閉止又は閉止状態確認を行う。

(a) 排気筒

当該設備に設計飛来物が衝突した場合、貫通等の損傷が生じる可能性があるが、竜巻が原因で排気筒にその安全機能を期待する放射性物質の放出を伴う事故（LOCA等）は発生しないため、竜巻襲来時において排気筒に求められる安全機能要求はないと考える。

なお、竜巻襲来後速やかに排気筒の点検を実施し、飛来物による排気筒の損傷（貫通穴）を確認した場合は、放射性物質の放出低減機能喪失（アンユラス空気浄化システムが2系統とも動作不能）となることから、泊発電所原子炉施設保安規定に則り、速やかにプラントを停止して、補修を実施する。（補足説明資料27参照）

(b) 燃料移送装置

当該設備にて燃料集合体の取扱い作業を行っている際に設計飛来物が衝突した場合は、当該設備が貫通等の損傷を受けることにより、取扱い中の燃料集合体が損傷する可能性があることから、竜巻襲来が予想される場合は、当該設備にて移送中の燃料集合体は設計飛来物の影響を受けない原子炉格納容器（原子炉建屋）内に移動して、当該作業を一時中断する運用とする。これにより、当該設備に設計飛来物が衝突して貫通等の損傷を受けたとしても、燃料集合体の健全性は維持され安全機能に影響を与えない。（補足説明資料24参照）

(c) 使用済燃料ピットクレーン

当該設備にて燃料集合体の取扱い作業を行っている際に設計飛来物が衝突した場合は、当該設備が貫通等の損傷を受けることにより、取扱い中の燃料集合体が損傷する可能性があることから、竜巻襲来が予想される場合は、当該設備にて取扱い中の燃料集合体は使用済燃料ラック内に戻して、当該作業を一時中断する運用とする。これにより、当該設備に設計飛来物が衝突して貫通等の損傷を受けたとしても、燃料集合体の健全性は維持され安全機能に影響を与えない。(補足説明資料2 4 参照)

(d) 換気空調設備

換気空調設備（アニュラス空気浄化設備、格納容器空調装置、補助建屋空調装置、試料採取室空調装置、中央制御室空調装置、電動補助給水ポンプ室換気装置、制御用空気圧縮機室換気装置、ディーゼル発電機室換気装置、安全補機閉閉器室空調装置及び蓄電池室排気装置）については、外気と繋がっているため、設計竜巻による気圧差の影響を受ける。

このうち、アニュラス空気浄化設備、格納容器空調装置、補助建屋空調装置、試料採取室空調装置及び中央制御室空調装置については、気圧差の影響を極力回避する観点から、竜巻襲来が予想される場合は、排気筒に繋がる換気空調設備（アニュラス空気浄化設備、格納容器空調装置、補助建屋空調装置及び試料採取室空調装置）及び中央制御室空調装置の外気との境界となるダンパ及びバタフライ弁を閉止する、又は閉止状態を確認する運用とする（これに伴って排気筒に繋がる換気空調設備のファンは停止する、又は停止状態を確認する、中央制御室空調装置のファンは閉回路循環運転とする）。

なお、上記以外の換気空調設備については、竜巻防護施設の冷却等に使用されているため、冷却継続等の観点から、竜巻襲来時においてもファンは停止しない。

(e) ディーゼル発電機排気消音器、主蒸気逃がし弁消音器、主蒸気安全弁排気管、タービン動補助給水ポンプ排気管、ディーゼル発電機燃料油貯油槽ベント管

当該設備に設計飛来物が衝突した場合、貫通等の損傷により、竜巻防護施設の安全機能に影響を与える可能性があることから、竜巻襲来後の巡視点検により、飛来物による当該設備の損傷を確認した場合は補修を実施する。

(4) 竜巻防護に関する運用・手順等

竜巻防護に関する運用及び手順等については、以下の項目について社内規程類に規定し実施する。

- a. 飛来物となる可能性のある物のうち、飛来時の運動エネルギー又は貫通力が設計飛来物である鋼製材よりも大きな物については、管理規定を定め、設置場所等に応じて固縛、固定、竜巻防護施設からの離隔又は撤去により飛来物とならない管理を行う手順等を整備し、的確に実施する。
- b. 車両については入構を管理するとともに、上記 a. 項に加え、竜巻襲来が予想される場合の退避又は固縛により飛来物とならない管理を行う手順等を整備し、的確に実施する。
- c. 竜巻飛来物防護対策設備の取付け・取外し手順、飛来物発生防止対策に使用する資機材の操作手順等を整備し、的確に実施する。
- d. 竜巻襲来が予想される場合には、原子炉建屋及びディーゼル発電機建屋の扉を閉止する、又は閉止状態を確認する手順等を整備し、的確に実施する。
- e. 竜巻襲来が予想される場合には、換気空調系統のダンパ等を閉止する、又は閉止状態を確認する手順等を整備し、的確に実施する。
- f. 竜巻襲来が予想される場合の原子炉建屋（燃料取扱棟）における燃料取扱作業中断については、手順等を整備し、的確に実施する。
- g. 安全施設のうち、竜巻に対して構造健全性が維持できない場合の代替設備又は予備品の確保においては、運用等を整備し、的確に実施する。
- h. 竜巻飛来物防護対策設備に要求される機能を維持するため、適切に保守管理を実施するとともに、必要に応じ補修を行う。
- i. 建屋開口部付近に飛来物が衝突し、原子炉施設の安全性を損なう可能性がある発火性又は引火性物質を内包する機器の設置については、火災防護計画により適切に管理するとともに、必要に応じ防護対策を行う。
- j. 竜巻襲来後においては、巡視点検により損傷の有無を確認する手順等を整備し、的確に実施する。
- k. 竜巻襲来後の巡視点検により、排気筒に損傷を確認した場合には、プラントを停止して補修する手順等を整備し、的確に実施する。
- l. 竜巻の襲来後、建屋外において火災を発見した場合、消火用水、化学消防自動車及び水槽付き消防ポンプ自動車等による消火活動を行う手順等を整備し、的確に実施する。
- m. 竜巻に対する運用管理を確実に実施するために必要な技術的能力を維持・向上させることを目的とし、竜巻に対する運用管理に関する教育及び訓練を実施する。

(5) 停車車両の退避（補足説明資料2_6_添付資料-1参照）

車両の飛来物発生防止対策のうち、停車車両の退避にあたっては、以下のとおり運用する。

a. 対象車両

竜巻防護施設を内包する建屋および竜巻防護施設を内包する建屋の上屋である循環水ポンプ建屋（以下「竜巻防護施設を内包する建屋等」という。）から350mの範囲内にある車両のうち、作業等で使用するなど運転手が付近に常駐している車両とする。

なお、「運転手が付近に常駐している」とは、作業場所周辺に駐車しており運転手が速やかに車両を移動可能な場合、あるいは総合管理事務所や保修事務所内の駐車場に駐車し、運転手が事務所内にいる場合をいう。

b. 退避場所の選定

(a) 基本方針

- 竜巻防護施設を内包する建屋等から350m以上離れていること。
- 速やかに避難できるよう複数箇所を選定。
- 運転手が避難できる建物があること。

(b) 退避場所（案）

- ① 保修事務所駐車場
- ② とまりん館駐車場
- ③ ほくでん体育館駐車場
- ④ 宮丘駐車場
- ⑤ 滝ノ間駐車場

図6.3に退避場所を示す。

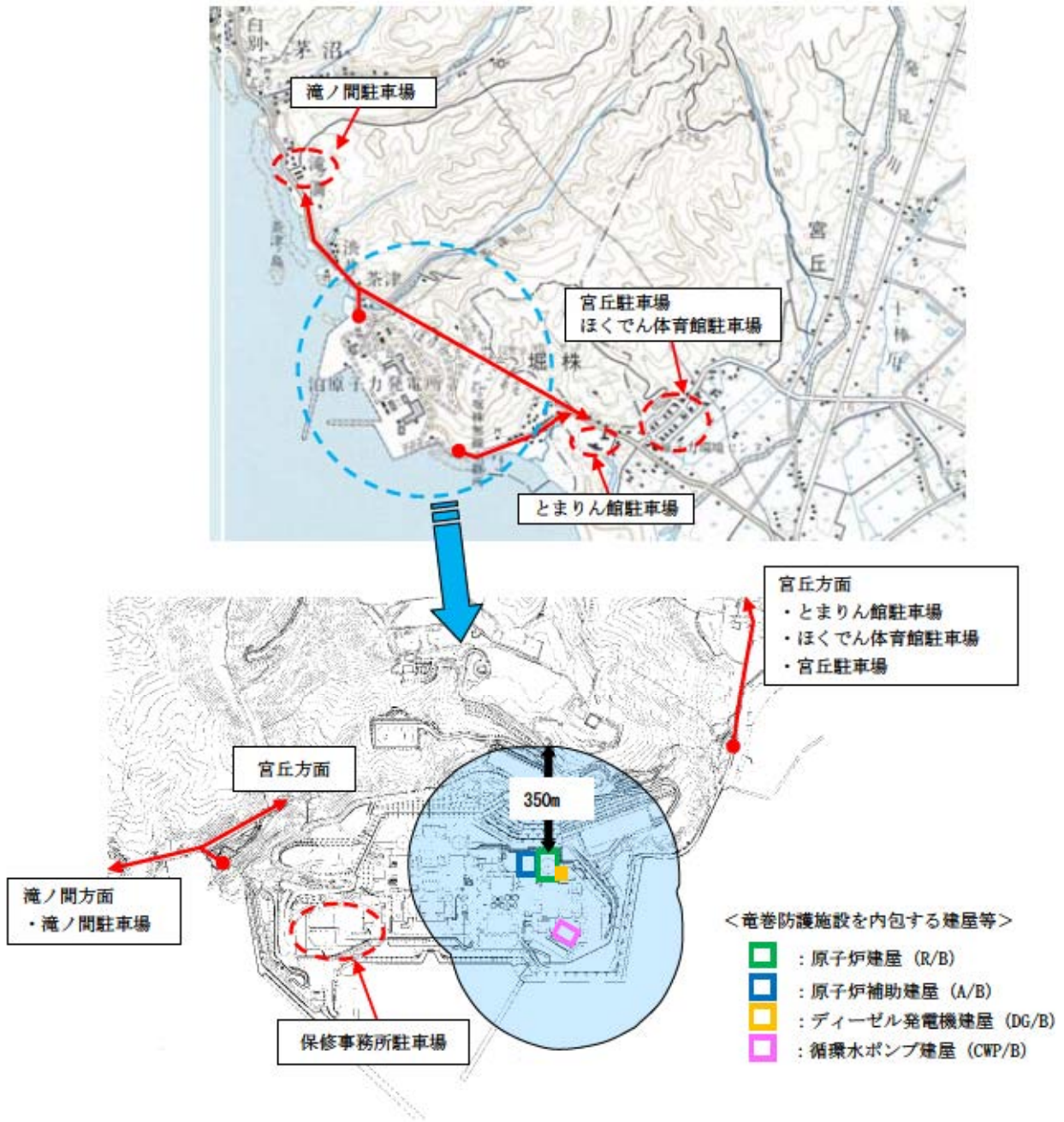


図6.3 退避場所

(c) 退避場所の周知方法（案）

- ✓ 作業者に関しては入所時教育、定検前教育等で避難方法など竜巻に対する対応方法の周知を図る。
- ✓ 一時立入者については、正門で避難ルールを記載したペーパーを手渡すことにより周知を図る。

c. 退避手順（暫定案）

停車車両については、竜巻襲来が予想される場合（竜巻が襲来する恐れが生じた場合）に速やかに退避することとしており、竜巻防護施設の安全機能維持に影響を与えないためには、竜巻襲来の恐れを早期に検知し、事前に準備を行うことが重要である。竜巻襲来の恐れを早期に検知する方法として、気象庁から発表される「竜巻注意情報」、「雷注意報（竜巻、ひょう）」、さらにレーダーナウキャストによる「竜巻発生確度」および「雷活動度」の実況値および予測値を指標として用いる。

気象庁による監視体制も強化^{*}され、さらに研究も進んでいることから、今後更なる予測精度の向上が見込まれる。図 6.4 の対応フローに示す判断基準等については、今後もデータ・知見等の収集に努め、より信頼度の高い判断基準となるよう検討を継続し、改善を図っていくものとする。

※：2013年3月に気象レーダーのドップラーレーダー化が完了

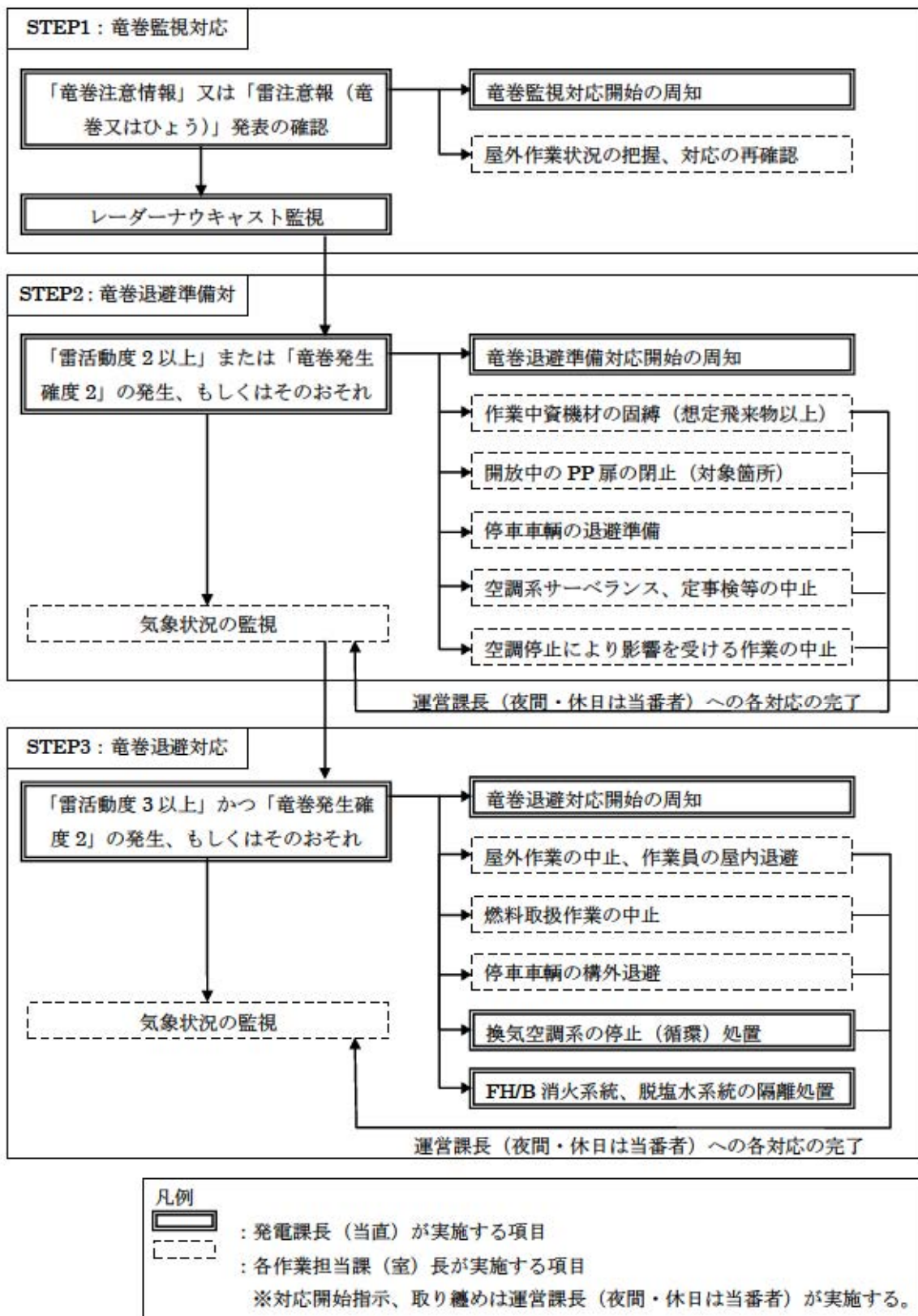


図 6.4 竜巻対応フロー

(6) 竜巻襲来時の排気筒に関する運用（補足説明資料 2.7 参照）

排気筒は建屋外に露出している部分があるため（図 6.5 参照）、竜巻襲来時の飛来物によって損傷する可能性がある。

竜巻襲来後速やかに排気筒の点検を実施し、飛来物による排気筒の損傷を確認した場合は、放射性物質の放出低減機能喪失（アニュラス空気浄化系統が 2 系統とも動作不能）となることから、泊発電所原子炉施設保安規定に則り、速やかにプラントを停止して、補修を実施することとしている。

以下に竜巻襲来後の点検手順を示す。

<点検手順>

- ① 双眼鏡を用いて排気筒全体の塗膜の剥離状況（上塗りと下塗りでは塗装色が異なる）および凹みの有無を確認する。
- ② ①で異常を確認した部位については、恒設点検歩廊および格納容器屋上部点検歩廊を用いて目視により点検（貫通穴の有無を確認）する。また、恒設点検歩廊等から確認できにくい部分は仮設足場などを設置して点検する。

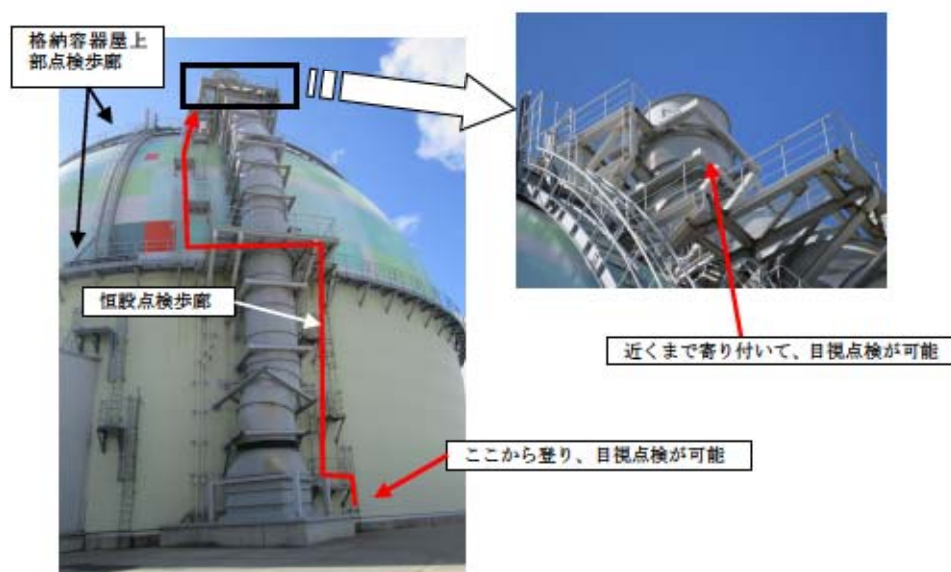


図 6.5 排気筒外観

泊発電所 3 号機

竜巻影響評価結果

補足説明資料

目 次

I. 竜巻影響評価について

1. 基準竜巻の設定について
2. 相関係数の算出及び検定方法について
3. 総観係数の分布図
4. 襟裳岬から東側の海岸線等における竜巻発生数
5. 円形構造物に対する竜巻移動方向の依存性について
6. 竜巻発生個数の補正方法の妥当性について
7. 竜巻集中地域の評価について
8. ポアソン分布を用いたハザード曲線の評価
9. 地形効果による竜巻風速の増幅について
10. 竜巻防護施設の評価対象施設の抽出について
11. 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
12. 想定飛来物の抽出及び設計飛来物の設定について
13. 設計竜巻荷重と組み合わせる荷重について
14. 雹を飛来物として想定した場合の影響評価について
15. 設計基準事故時荷重の組み合わせを考慮していない理由について
16. 建物・構築物等の構造健全性の確認内容について
17. 評価式の妥当性及び評価方法について
18. デッキプレート等によるコンクリート片の飛散防止について
19. 評価対象施設の評価実施項目および考え方について
20. 評価対象施設の評価方法について
21. BRL 式の妥当性および評価内容について
22. 使用済燃料ピット内へ設計飛来物が進入した場合の影響評価に係る評価条件等について
23. 新燃料貯蔵庫内へ設計飛来物が進入した場合の影響評価に係る評価条件等について
24. 燃料移送装置および使用済燃料ピットクレーンへの設計飛来物による影響評価について
25. 評価対象施設の評価結果について
26. 飛来物対策について
 - 添付資料－1 停車車両の退避について
 - 添付資料－2 停車車両退避訓練の状況について
 - 添付資料－3 防護ネット等の設置による防護対象設備のメンテナンス性への影響について

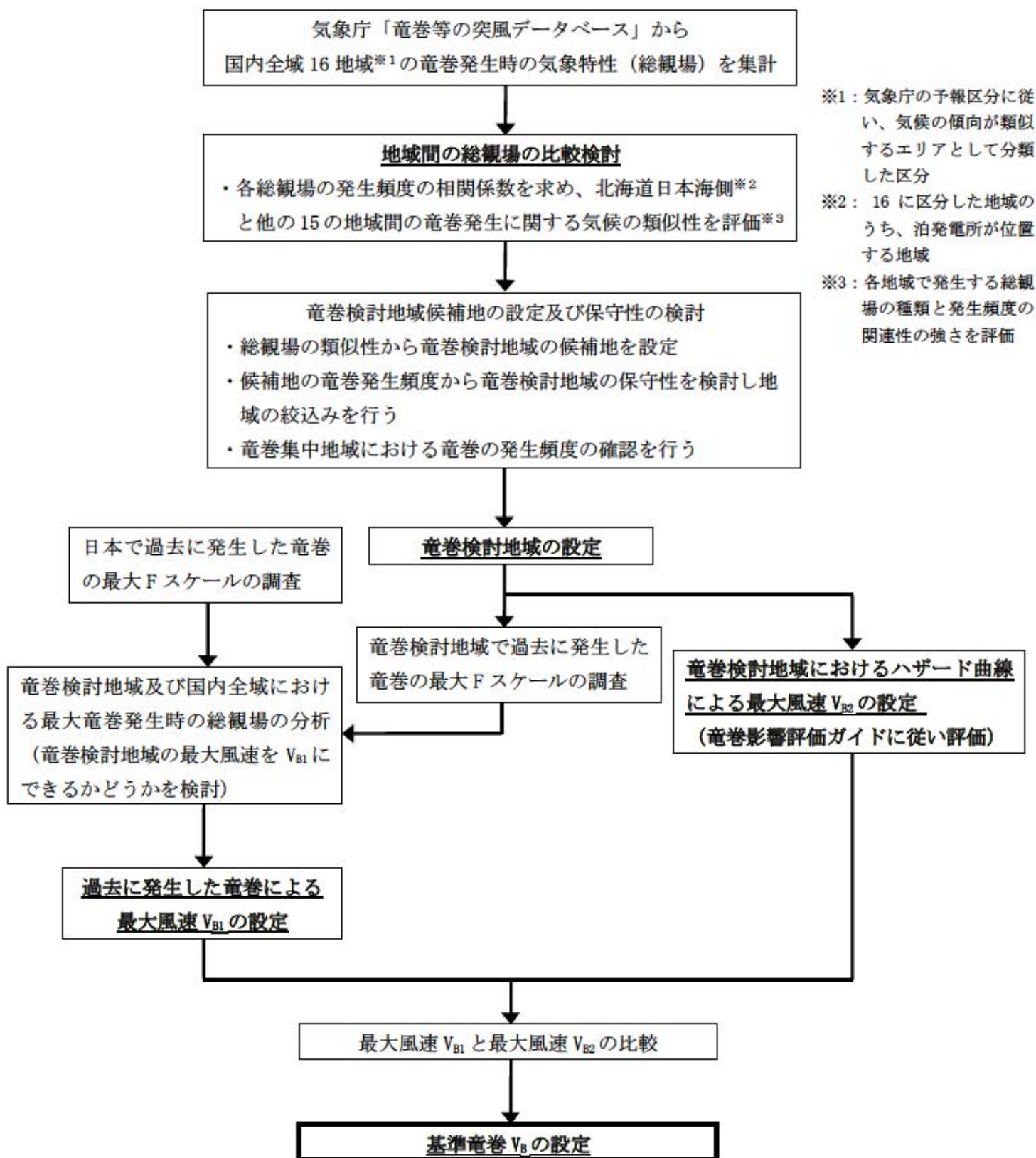
27. 竜巻襲来時において排気筒に求められる機能について
28. 気圧差の影響を受けることが想定される設備の影響評価について
29. 2次飛来物の抽出について
30. 竜巻防護施設（設備）に影響を及ぼす可能性のある建屋開口部について
31. 極小飛来物の衝突に対する設備への影響について
32. 砂等の粒子状の飛来物による目詰まり、閉塞、噛み込みに対する影響評価について
33. 竜巻随件事象として想定される事象の抽出について
34. 送電鉄塔への竜巻襲来時における影響について
35. 解析コードについて
36. 竜巻発生時における重大事故等対処設備の考慮について

II. 原子力発電所の竜巻影響評価ガイドへの適合状況について

I. 竜巻影響評価について

1. 基準竜巻の設定について

1.1 基準竜巻の設定フロー



1.2 竜巻検討地域の設定

竜巻影響評価ガイドでは、以下の方針に基づいて基準竜巻の最大風速 (V_B) を設定することとしている。

- ・基準竜巻の最大風速 (V_B) は、下記に示す V_{B1} と V_{B2} のうちの大きな風速とする。

①過去に発生した竜巻による最大風速 (V_{B1})

日本で過去に発生した竜巻による最大風速を V_{B1} として設定することを原則とする。ただし、竜巻検討地域で過去に発生した竜巻の最大風速を十分な信頼性のあるデータ等に基づいて評価できる場合においては、「日本」を「竜巻検討地域」に読み替えることができる。

②竜巻最大風速のハザード曲線による最大風速 (V_{B2})

竜巻検討地域における竜巻の観測記録等に基づいて作成した竜巻最大風速のハザード曲線上において、年超過確率に対応する竜巻最大風速を V_{B2} とする。

以上より、 V_{B1} 及び V_{B2} を求めるために竜巻検討地域を設定する。

(1) 竜巻の発生状況

国内全域の竜巻の発生状況は図 1.2.1 のとおりである。竜巻は国内全域で発生しているが、その発生には地域特性がある。

発生が多い地域は、北海道西部、関東及び愛知の平野部、日本海及び関東以南の太平洋に面する沿岸部並びに南西諸島となっている。

泊発電所は、北海道西部（後志地方）の日本海側に面しているが、後志地方で発生した竜巻は、表 1.2.1 のとおり 11 個（1961～2012 年）と少なく、いずれの事例も藤田スケールについては不明である。

このため、より多くの竜巻の大きさ等の検討資料を得るために、「原子力発電所の竜巻影響評価ガイド」（以下、「竜巻影響評価ガイド」という）に従い、泊発電所が立地する地域及び竜巻発生の観点から当該地域と気象条件が類似する地域より竜巻検討地域を設定する。

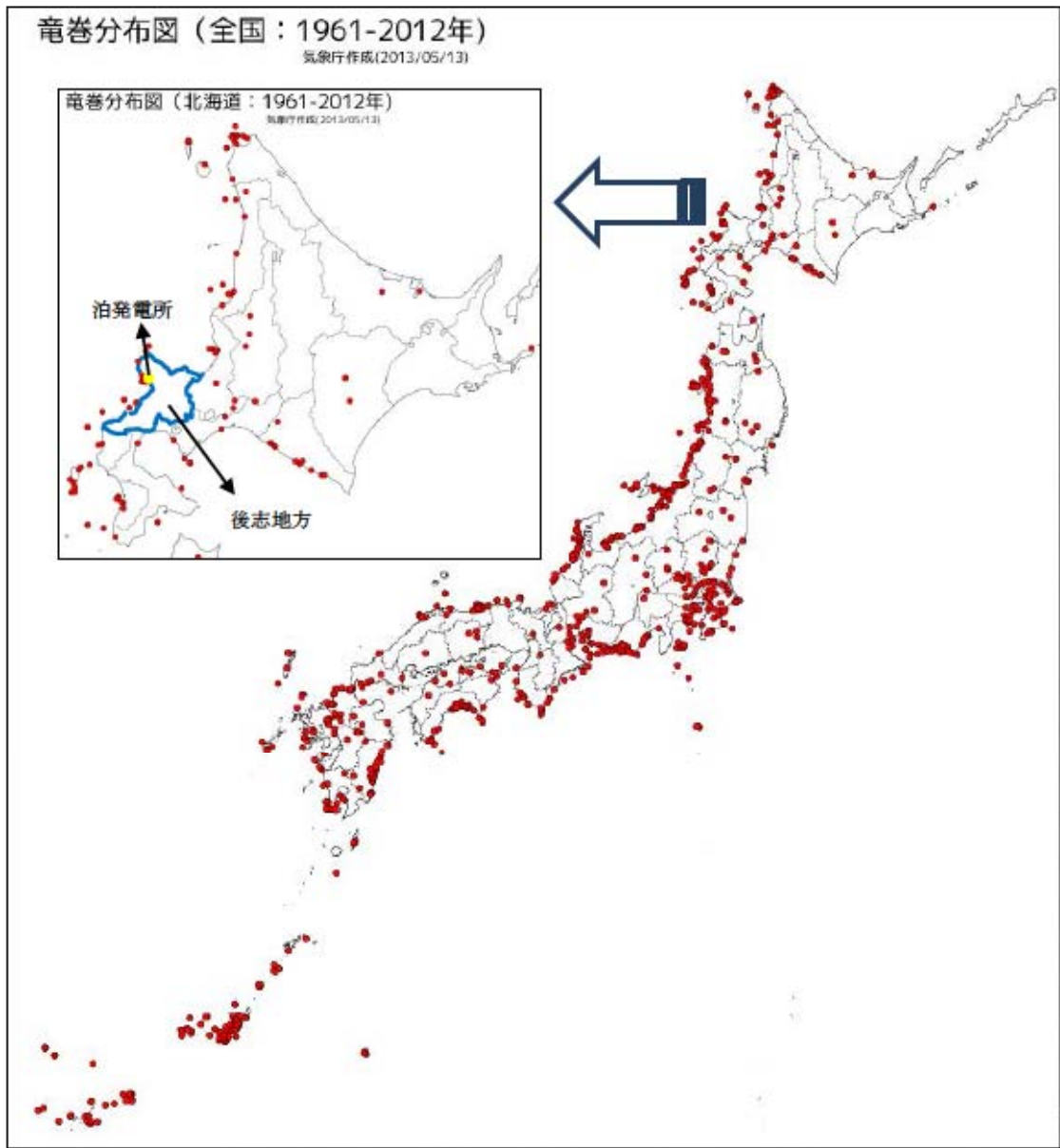


図 1.2.1 竜巻の発生状況（出典：気象庁 HP 竜巻等の突風データベース）

表 1.2.1 北海道後志地方で発生した竜巻（出典：気象庁 HP 竜巻等の突風データベース
(2013年9月))

現象区別	発生日時	発生場所	藤田 スケール	総観場
竜巻	2011/08/20 18:45 頃	後志地方 (海上)	不明	気圧の谷
竜巻	2011/08/20 18:40 頃	後志地方 (海上)	不明	気圧の谷
竜巻	2011/08/20 18:30 頃	後志地方 (海上)	不明	気圧の谷
竜巻	2010/12/17 10:20 頃	後志地方 (海上)	不明	気圧の谷
竜巻	2010/10/26 08:10 頃	後志地方 (海上)	不明	寒気の移流
竜巻	2010/10/26 07:05 頃	後志地方 (海上)	不明	寒気の移流
竜巻	2007/10/01 14:27	後志支庁 (海上)	不明	気圧の谷・寒気の移流
竜巻	2007/10/01 14:25 頃	後志支庁 (海上)	不明	気圧の谷・寒気の移流
竜巻	2007/10/01 14:10 頃	後志支庁 (海上)	不明	気圧の谷・寒気の移流
竜巻	1991/09/17 08:50 頃	後志支庁 (海上)	不明	寒気の移流・気圧の谷・局 地性じょう乱
竜巻	1989/10/06 21:00 頃	後志支庁 小樽市		寒冷前線

(2) 地域区分の設定

独立行政法人原子力安全基盤機構が東京工芸大学に委託した研究の成果（以下、「東京工芸大学委託成果」という）においては、「竜巻等突風の気象的発生要因はいくつかあるが、明らかに地域性が見られる。」としている。このため、国内の各地域の竜巻発生の観点からの気候特性をもとに竜巻検討地域を検討した。

検討にあたり国内全域を、図 1.2.2 に示す気象庁資料（気象庁 HP 季節予報で用いる予報区分）を参考に、表 1.2.2 に示すとおり、日本を 16 の地域に区分し、これらの地域の、竜巻発生時の気象特性をもとに竜巻検討地域を検討した。

なお、図 1.2.2 の予報区分図は、気候の傾向が類似する地域として設定されたものである。



図 1.2.2 地方季節予報の予報区分図
 (出典：気象庁 HP 季節予報で用いる予報区分)

表 1.2.2 日本の地域区分一覧

(出典：気象庁 HP 過去の地域平均気象データ検索：地域選択)

No	地域区分	No	地域区分
1	北海道日本海側 宗谷（北部）、空知 上川、留萌、石狩、 後志、松山	10	近畿太平洋側 奈良、和歌山、大阪、 兵庫（南部）、京都（南部） 滋賀（南部）
2	北海道オホーツク海側 宗谷（南部）、網走 北見、紋別	11	山陰 鳥取、島根
3	北海道太平洋側 根室、釧路 十勝、日高 胆振、渡島	12	山陽 広島、岡山
4	東北日本海側 青森（津軽）、秋田 山形、福島（会津）	13	四国 徳島、香川、愛媛、高知
5	東北太平洋側 青森（下北）、岩手 宮城、福島（浜通り、 中通り）	14	九州北部 山口、福岡、佐賀 長崎、大分、熊本
6	関東甲信 茨城、千葉、栃木 群馬、埼玉、東京 神奈川、山梨、長野	15	九州南部・奄美 宮崎、鹿児島 奄美
7	北陸 新潟、富山、石川、福井	16	沖縄 沖縄
8	東海 静岡、愛知、岐阜、三重		
9	近畿日本海側 滋賀（北部）、京都（北部） 兵庫（北部）		

(3) 日本の竜巻発生状況の総観場による解析

a. 日本の竜巻発生状況の総観場^{※1}の集計

竜巻の発生分布性状は総観場に大きく影響を受けることから、総観場による解析は重要であると考えられる。このため、先に設定した16の地域区分の総観場を解析することにより、竜巻検討地域を設定する。

1961年から2012年6月までの総観場の数を、16の地域区分毎・21種類の総観場毎に表1.2.3に集計した。

また、総観場の地域性の概要を把握するため、国内全域と泊発電所が含まれる北海道日本海側、東日本の関東甲信地方及び西日本の九州南部について図1.2.3で比較した。

図1.2.3に示す総観場の集計結果によると、国内全域を対象とした集計では「暖気の移流」、「寒気の移流」、「寒冷前線」、「気圧の谷」及び「台風」の出現頻度が高い。北海道日本海側では、上記のうち「寒気の移流」及び「気圧の谷」の出現が多く見られるが、九州南部ではこれらの総観場は竜巻発生時の主要な気象特性とはなっていない。一方で、国内全域で出現頻度の高い「暖気の移流」、「停滞前線」及び「台風」は、北海道日本海側ではほとんど出現しておらず、関東甲信地方及び九州南部で多い傾向が見られる。

このように、一部地域の比較からではあるが、竜巻の成因となる総観場の出現には地域性があるものと考えられる。

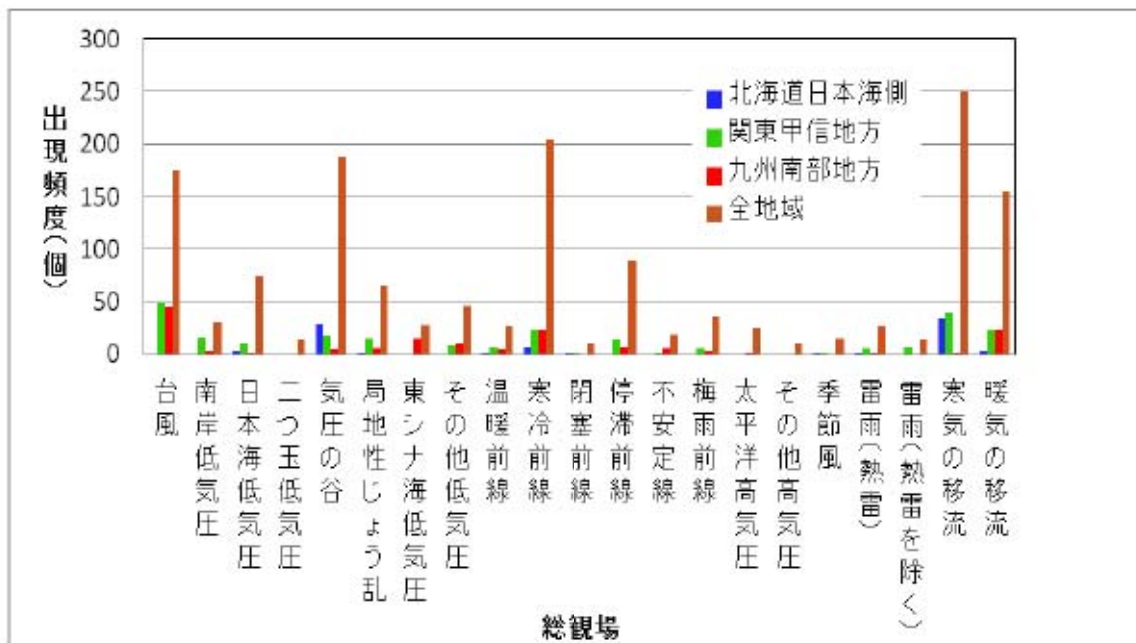
※1 総観場：竜巻発生時の気象特性（東京工芸大学委託成果より引用）

表 1.2.3 地域区分毎の総観場の集計※2

地域区分	台風	南岸低気圧	日本海低気圧	二つ玉低気圧	気圧の谷	局地的じょう乱	東シナ海低気圧	その他低気圧	温暖前線	寒冷前線	閉塞前線	停滞前線	不安定前線	梅雨前線	太平洋高気圧	その他高気圧	季節風	雷雨(熱雷)	雷雨(熱雷を除く)	寒気の移流	暖気の移流	計	藤田スケールの最大
北海道日本海側	0	0	3	0	29	1	0	0	1	7	2	0	0	0	0	0	1	1	0	34	3	82	F2
北海道オホーツク海側	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	2	F3
北海道太平洋側	0	0	2	0	12	2	0	0	1	13	2	0	2	0	0	1	0	1	1	7	4	48	F2
東北日本海側	0	0	14	0	35	7	0	4	2	28	0	5	0	0	1	0	1	3	0	17	3	120	(F2)
東北太平洋側	2	0	1	1	2	2	0	1	0	10	1	1	2	1	0	1	0	3	1	8	4	41	(F2)
関東甲信地方	49	16	11	0	17	15	0	8	7	22	2	14	2	5	0	0	1	6	7	39	22	243	F3
北陸地方	0	0	12	1	27	3	0	2	0	27	0	3	4	0	0	0	8	0	2	82	2	173	F2
東海地方	27	4	11	9	7	3	0	1	7	10	2	11	1	3	0	0	1	0	0	5	10	112	F3
近畿日本海側	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	7	1	10	F0
近畿太平洋側	3	4	5	0	1	1	0	0	0	6	0	3	0	1	0	0	1	1	0	3	5	34	F1~F2
山陰地方	0	0	5	0	5	5	0	1	0	9	0	0	0	0	0	0	1	1	1	28	7	63	F1
山陽地方	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	2	2	0	0	0	0	0	2	8	F2
四国地方	18	3	9	2	2	0	0	4	1	1	2	10	0	3	1	1	0	0	0	9	26	92	F2
九州北部地方	11	0	1	0	8	18	0	8	2	22	0	10	2	7	2	0	1	5	1	8	13	119	F2
九州南部地方	45	3	1	0	4	6	15	11	4	22	0	7	5	3	2	0	0	1	0	1	22	152	F2~F3
沖縄地方	20	0	0	0	39	2	13	6	1	26	0	22	0	10	17	8	0	5	0	2	30	201	F2
全地域	175	30	75	13	188	65	28	46	26	204	11	89	19	35	25	11	15	27	13	250	155	1500	F3

※2 : 総観場の分類は、気象庁(出典:気象庁HP 竜巻等の突風データベース(2013年9月))に従った。また、国内全域の出現が10個未満の総観場は解析から除外し、35種類の総観場の中から21種類を解析の対象とした。

竜巻発生の1事例に対し複数の総観場があるため、合計は竜巻発生個数より多い。



注：総観場の分類は、気象庁（出典：気象庁 HP 竜巻等の突風データベース（2013年9月））に従い、国内全域の出現が10個未満の総観場は解析から除外した。（35種類の総観場の中から21の総観場を解析の対象とした。）

図 1.2.3 各地域の総観場の出現頻度

b. 日本の竜巻発生状況の相関係数による検討

竜巻発生に関する総観場には地域特性があると考えられることから、この地域特性について相関係数を用いて検討した。

相関係数は、2組のデータがどれだけ関連性があるかを示す係数で、2組のデータの関連性が強ければ相関係数が1に近づき、関連性が低ければ0に近づく。

相関係数を利用して、2つの地域の総観場の関連性を評価し、関連性が強ければ、2つの地域は総観場の出現の観点から類似の地域であると判断した。

具体的には、表 1.2.3 の総観場の集計結果から、泊発電所が位置する北海道日本海側とその他地域間の、総観場の出現数に関する相関係数を求め、出現する総観場の種類及び出現頻度の関連性の強さを評価した。

また、求めた相関係数については、無相関検定を行い有意水準 1%で無相関について確認している。（補足説明資料2. 参照）

相関係数を算出した結果は、表 1.2.4 のとおりであり、「北海道日本海側」と相関が認められる地域は、「北海道太平洋側」、「東北日本海側」、「北陸地方」、「近畿日本海側」及び「山陰地方」となった。

表 1.2.4 北海道日本海側と他地域区分間の相関係数一覧

地域区分	北海道日本海側との相関	
	相関係数	有意水準1% 相関の有○、無×
北海道日本海側	1.00	-
北海道オホーツク海側	0.04	×
北海道太平洋側	0.73	○
東北日本海側	0.75	○
東北太平洋側	0.54	×
関東甲信地方	0.47	×
北陸地方	0.90	○
東海地方	0.07	×
近畿日本海側	0.70	○
近畿太平洋側	0.20	×
山陰地方	0.81	○
山陽地方	-0.17	×
四国地方	0.10	×
九州北部地方	0.22	×
九州南部地方	-0.10	×
沖縄地方	0.32	×

注：有意水準1%で、相関が認められるものに黄色を付している。

また、北海道日本海側を基準（横軸）とした総観場の分布図の例を図 1.2.4 に示す。

相関が見られる例（北陸地方：左図）では、相関係数は0.90と大きく、北海道日本海側で出現が多い「気圧の谷」と「寒気の移流」に対して、北陸地方でも出現が多くなっている。

一方、相関がみられない例（九州南部地方：右図）では、相関係数は-0.10と小さく、北海道日本海側で出現が多い「気圧の谷」と「寒気の移流」に対して九州南部地方での出現が少なく、九州南部地方で出現が多い「台風」に対しては北海道日本海側での出現がない。（他の地域区分の分布図については補足説明資料3．参照）

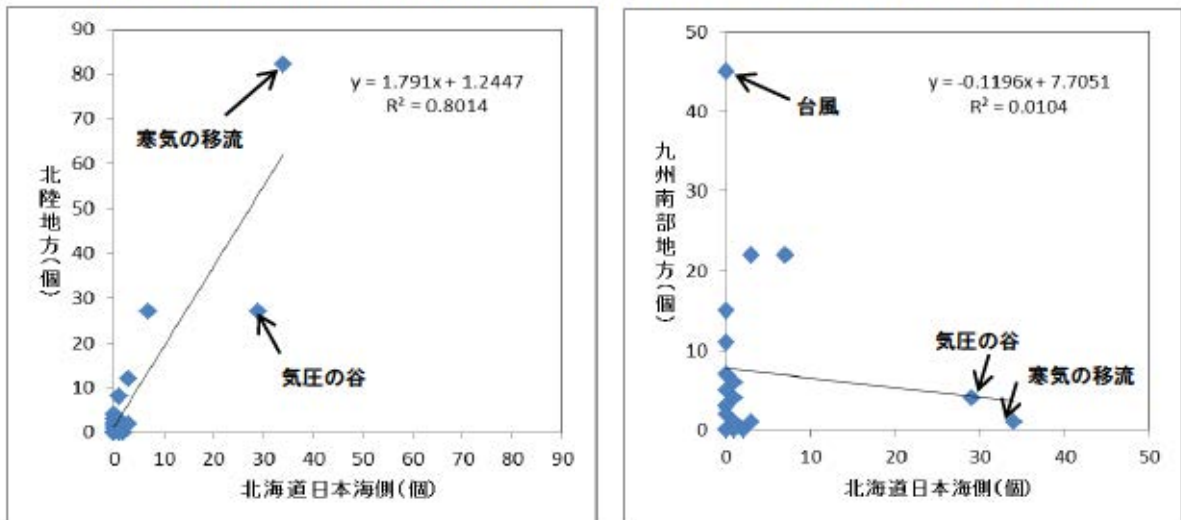


図 1.2.4 総観場の分布図

(4) 竜巻検討地域の設定

発電所が海岸線付近に立地することから竜巻影響評価ガイドに従い、北海道日本海側と総観場の出現の観点から類似であると判断された地域の海岸線から、陸側及び海側それぞれ 5km の範囲を竜巻検討地域の候補地とする。候補地の範囲を図 1.2.5 に示す。



図 1.2.5 北海道日本海側と相関係数に有意性が認められた地域（候補地）

次に、竜巻検討地域候補地の竜巻発生数を考慮し、ハザード曲線が保守的なものとなるよう、以下のとおり竜巻検討地域を絞り込む。

候補地のうち、北海道太平洋側の襟裳岬から東側の海岸線及び陸奥湾の海岸線においては、竜巻がほとんど発生していないことから、この地域を竜巻検討地域に含めた場合には、ハザード曲線評価において竜巻発生個数が極端に少ないわりにリスク対象評価面積が大きくなり、ハザードが過小評価されることになるため、北海道太平洋側の襟裳岬から東側の海岸線及び陸奥湾から竜飛岬にかけての海岸線を竜巻検討地域から除くこととする。（補足説明資料4．参照）

更に、日本海側は同様の気候区分に分類されることを考慮し、泊発電所の竜巻検討地域は、図 1.2.6 に示すとおり、北海道から山口県を含む本州にかけての日本海側及び北海道の襟裳岬以西とした。（竜巻検討地域の面積 38,895km²）

なお、泊発電所は竜巻集中地域に位置しているが、この地域の竜巻の年発生頻度と上記で設定した地域の竜巻の年発生頻度は同程度であることを踏まえ、竜巻発生個数を多く確保できる観点から上記で設定した地域の方が竜巻検討地域に適していると判断している。(補足説明資料7.参照)

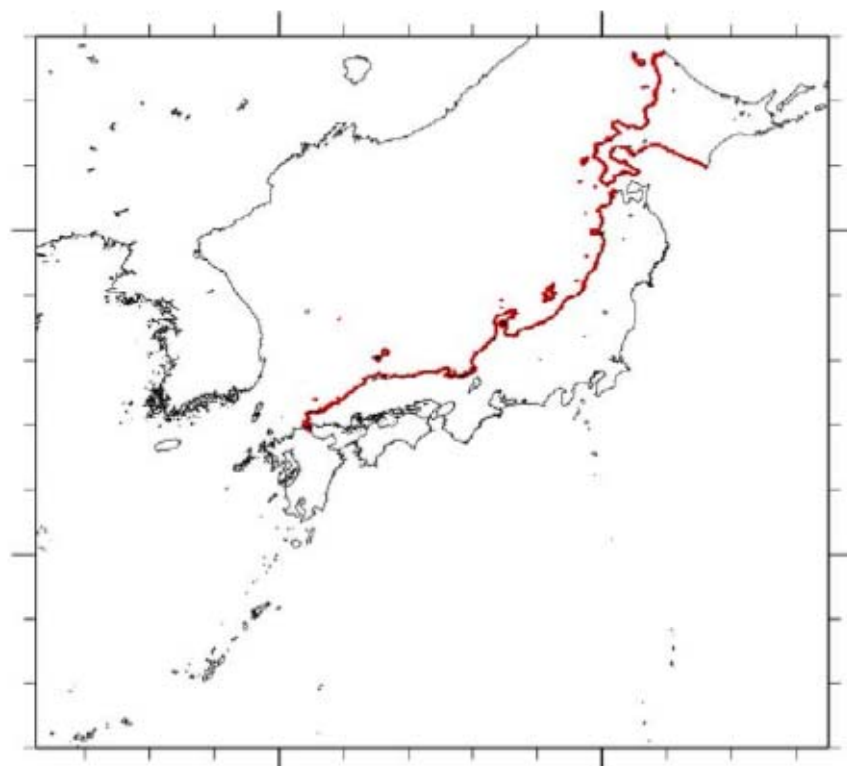


図 1.2.6 泊発電所の竜巻検討地域

1.3 過去に発生した竜巻による最大風速 (V_{91}) の設定

(1) 竜巻検討地域で発生した最大スケールの竜巻及び国内全域で発生した最大スケールの竜巻の総観場の解析

表 1.3.1 に、竜巻検討地域において過去に発生した最大の竜巻の F スケールと総観場を示す。これによれば、F2 が最大の F スケールであり、当該 F スケールが出現する際の主な総観場は日本海低気圧、寒気の移流、及び寒冷前線となっている。

表 1.3.2 に、日本で過去に発生した最大の F スケールとなる、F3 スケール竜巻発生時の総観場を示す。太平洋側では台風が主な総観場となっているが、日本海側では発生がない。また、寒冷前線は国内全域各地で発生しており、その発生については地域が限定されないものと考えられる。

以上の結果から、将来にわたって日本海側において台風起因の F3 スケールの竜巻が発生する可能性は小さいと考えられるが、気圧の谷や寒冷前線起因で発生する竜巻のような低気圧起因とみなされる竜巻^{※1} は、竜巻検討地域においても F3 スケールのものが発生し得ると考えられる。

※1：独立行政法人原子力基盤機構作成の「原子力発電所の竜巻影響評価ガイド（案）及び解説」より

表 1.3.1 竜巻検討地域で過去に発生した最大の竜巻スケールと総観場

発生年月	発生場所	Fスケール	総観場
1990年4月	石川県富来町	F2	オホーツク海低気圧、気圧の谷
1962年9月	北海道宗谷支庁	(F2)	寒冷前線
1971年10月	北海道留萌支庁	(F2)	寒気の移流
1975年5月	島根県大社町	(F2)	日本海低気圧、局地性じょう乱、寒気の移流
1979年11月	北海道渡島支庁	(F2)	日本海低気圧、温暖前線
1989年3月	島根県大社町	(F2)	局地性じょう乱、寒気の移流
1974年10月	北海道檜山支庁	(F1~F2)	温暖前線
1974年10月	北海道檜山支庁	(F1~F2)	寒冷前線
1975年9月	北海道檜山支庁	(F1~F2)	日本海低気圧、暖気の移流
1999年11月	秋田県八森町	(F1~F2)	日本海低気圧、寒冷前線

表 1.3.2 日本で過去に発生した F2 を超える竜巻の総観場

発生年月	発生場所	Fスケール	総観場
2006年11月	北海道 佐呂間町	F3	寒冷前線・暖気の移流
2012年5月	茨城県 常総市	F3	気圧の谷・寒気の移流
1971年7月	埼玉県 浦和市	(F3)	台風
1990年12月	千葉県 茂原市	F3	暖気の移流・気圧の谷・寒冷前線
1967年10月	千葉県 飯岡町	(F2~F3)	台風
1966年1月	千葉県 南総町	(F2~F3)	南岸低気圧・寒冷前線
1978年2月	神奈川県 川崎市	F2~F3	寒冷前線・暖気の移流
1999年/9月	愛知県 豊橋市	F3	台風
1969年12月	愛知県 豊橋市	(F2~F3)	二つ玉低気圧
1968年9月	宮崎県 高鍋町	(F2~F3)	台風
1990年2月	鹿児島県 枕崎市	(F2~F3)	寒冷前線・暖気の移流・その他(低気圧)

(2) 過去に発生した竜巻による最大風速 (V_{B1}) の設定

竜巻影響評価ガイドでは、 V_{B1} は、竜巻検討地域で過去に発生した竜巻の最大風速を十分な信頼性のあるデータ等に基づいて評価できる場合は、竜巻検討地域で過去に発生した竜巻の最大風速にできるとしている。

しかし、(1) で解析した結果からは、竜巻検討地域では、これまでに国内全域で発生した最大の竜巻と同様の総観場を成因として F3 スケールの竜巻が発生する可能性があることから、竜巻検討地域で過去に発生した竜巻の最大風速を V_{B1} とすることはできないと判断される。

また、「原子力発電所の竜巻影響評価ガイド(案)及び解説」では、竜巻が発生した際の気象条件(総観場)のうち低気圧は全国どこでも発生し得る条件であるため、これまで佐呂間等で発生している低気圧が成因の F3 竜巻を、設計に用いる最低限の風速の設定において考慮すべきとしている。

以上より、将来における竜巻検討地域における F3 スケール竜巻の発生の可能性を考慮し、竜巻影響評価ガイドの原則に従い、過去に発生した竜巻による最大風速 (V_{B1}) は、日本で過去に発生した竜巻による最大風速とする。

先に述べたとおり、日本で過去に発生した竜巻のうち最大のものは、藤田スケールで「F3」となっている。藤田スケールと風速の関係は、表 1.3.3 のとおりであることから、過去に発生した最大竜巻による最大風速 (V_{B1}) は、竜巻影響評価ガイドに従い、F3 スケールの最大風速である 92m/s とする。

過去最大竜巻による最大風速 (V_{B1}) = 92 m/s

表 1.3.3 藤田スケールと風速の関係(出典：気象庁 HP より)

スケール	風速	被害状況
F0	17～32m/s (約15秒間の平均)	テレビのアンテナなどの弱い構造物が倒れる。小枝が折れ、根の浅い木が傾くことがある。非住家が壊れるかもしれない。
F1	33～49m/s (約10秒間の平均)	屋根瓦が飛び、ガラス窓が割れる。ビニールハウスの被害甚大。根の弱い木は倒れ、強い木は幹が折れたりする。走っている自動車が横風を受けると、道から吹き落とされる。
F2	50～69m/s (約7秒間の平均)	住家の屋根がはぎとられ、弱い非住家は倒壊する。大木が倒れたり、ねじ切られる。自動車が道から吹き飛ばされ、汽車が脱線することがある。
F3	70～92m/s (約5秒間の平均)	壁が押し倒され住家が倒壊する。非住家はバラバラになって飛散し、鉄骨づくりでもつぶれる。汽車は転覆し、自動車はもち上げられて飛ばされる。森林の大木でも、大半折れるか倒れるかし、引き抜かれることもある。
F4	93～116m/s (約4秒間の平均)	住家がバラバラになって辺りに飛散し、弱い非住家は跡形なく吹き飛ばされてしまう。鉄骨づくりでもベシャンコ。列車が吹き飛ばされ、自動車は何十メートルも空中飛行する。1トン以上ある物体が降ってきて、危険この上もない。
F5	117～142m/s (約3秒間の平均)	住家は跡形もなく吹き飛ばされるし、立木の皮がはぎとられてしまったりする。自動車、列車などがもち上げられて飛行し、とんでもないところまで飛ばされる。数トンもある物体がどこからともなく降ってくる。

<参考> 竜巻検討地域において発生した竜巻

竜巻検討地域において1961年～2012年6月に発生した竜巻の一覧を下表に示す。

表1 竜巻検討地域において1961年～2012年6月に発生した竜巻

	発生日時	発生場所緯度	発生場所経度	Fスケール	現象区別
1	1961年01月24日13時50分	33度54分8秒	130度56分12秒	F1	竜巻
2	1962年09月28日14時20分	45度13分30秒	141度15分25秒	F2	竜巻
3	1965年09月30日02時35分	39度44分33秒	140度4分46秒	F1	竜巻
4	1965年09月30日03時00分	39度19分29秒	140度0分10秒	F0～F1	竜巻または ダウンバースト
5	1968年01月08日09時50分	37度13分48秒	138度19分22秒	F1	竜巻
6	1969年06月22日09時00分	34度37分30秒	131度36分10秒	F1	竜巻
7	1969年11月18日07時08分	38度54分31秒	139度50分7秒	F1	竜巻
8	1971年02月01日00時20分	36度41分10秒	136度40分30秒	F1	竜巻
9	1971年10月17日05時00分	44度21分23秒	141度41分30秒	F0～F1	竜巻
10	1971年10月17日05時00分	44度21分23秒	141度41分30秒	F2	竜巻
11	1972年11月21日17時05分	36度53分27秒	137度24分57秒	F1	竜巻
12	1973年05月21日16時30分	36度49分56秒	136度44分45秒	F0～F1	竜巻
13	1973年09月27日23時00分	45度26分20秒	141度2分10秒	F1	竜巻
14	1973年10月22日13時20分	39度41分41秒	140度4分20秒	F1	竜巻
15	1974年08月08日05時05分	40度16分53秒	140度3分24秒	F0～F1	竜巻
16	1974年10月03日19時05分	42度11分20秒	139度31分0秒	F1～F2	竜巻
17	1974年10月20日15時00分	41度47分45秒	140度7分47秒	F1～F2	竜巻
18	1975年05月31日18時10分	35度26分6秒	132度37分57秒	F0～F1	竜巻
19	1975年05月31日18時10分	35度25分57秒	132度37分42秒	F2	竜巻
20	1975年05月31日18時40分	35度25分8秒	132度37分53秒	F0～F1	竜巻
21	1975年09月08日01時30分	42度12分52秒	139度32分58秒	F1～F2	竜巻
22	1977年01月13日01時30分	36度34分5秒	136度34分0秒	F0～F1	竜巻
23	1978年08月14日10時40分	45度5分0秒	141度38分0秒	不明	竜巻
24	1979年10月31日13時00分	37度8分21秒	136度41分2秒	F0～F1	竜巻
25	1979年11月02日01時58分	41度30分7秒	140度1分6秒	F2	竜巻
26	1980年10月31日09時30分	42度25分30秒	142度13分24秒	F1～F2	竜巻
27	1984年11月19日22時00分	35度26分4秒	133度19分22秒	F1	竜巻
28	1987年01月11日01時32分	40度2分27秒	139度56分19秒	F0～F1	竜巻
29	1987年01月11日02時00分	40度6分9秒	139度57分57秒	F1	竜巻
30	1989年03月16日19時20分	35度24分0秒	132度40分0秒	F2	竜巻

	発生日時	発生場所緯度	発生場所経度	Fスケール	現象区別
31	1990年04月06日02時55分	37度12分10秒	136度40分56秒	F2	竜巻
32	1991年01月13日14時48分	38度1分25秒	138度12分20秒	不明	竜巻
33	1991年02月15日11時00分	35度33分54秒	135度52分53秒	F1	竜巻
34	1991年09月17日08時50分	42度49分12秒	140度12分50秒	不明	竜巻
35	1991年12月11日20時10分	36度35分59秒	136度38分0秒	F1	竜巻
36	1992年09月13日08時50分	45度26分50秒	141度40分0秒	不明	竜巻
37	1992年09月17日09時05分	43度50分50秒	141度29分55秒	F1	竜巻
38	1992年09月17日09時05分	43度50分50秒	141度29分55秒	不明	竜巻
39	1993年09月26日15時52分	43度57分17秒	141度36分54秒	不明	竜巻
40	1993年10月17日09時30分	36度55分9秒	136度43分51秒	不明	竜巻
41	1993年10月23日17時00分	38度5分30秒	138度12分30秒	不明	竜巻
42	1993年11月24日13時50分	37度13分27秒	138度12分49秒	不明	竜巻
43	1994年03月26日11時40分	38度48分32秒	139度46分19秒	F1	竜巻
44	1994年09月01日16時00分	37度59分6秒	139度2分56秒	不明	竜巻
45	1994年10月05日06時15分	42度27分43秒	142度9分39秒	F1	竜巻
46	1994年10月05日06時35分	42度27分29秒	142度10分23秒	F1~F2	竜巻
47	1995年12月01日13時51分	36度26分13秒	136度25分3秒	不明	竜巻
48	1996年09月05日10時20分	39度15分18秒	139度54分1秒	不明	竜巻
49	1996年10月08日23時07分	44度43分7秒	141度48分15秒	F1	竜巻
50	1996年11月30日07時05分	37度23分39秒	138度34分14秒	F1	竜巻
51	1997年01月22日09時20分	37度54分58秒	139度2分0秒	F0	竜巻
52	1997年10月07日12時50分	42度36分13秒	141度29分9秒	F1	竜巻
53	1998年09月24日15時00分	35度38分26秒	134度55分31秒	不明	竜巻
54	1998年10月31日08時40分	37度19分6秒	136度42分10秒	不明	竜巻
55	1998年11月15日22時30分	38度56分40秒	139度49分22秒	F1	竜巻
56	1999年10月08日09時30分	36度43分56秒	136度40分18秒	不明	竜巻
57	1999年10月29日21時25分	40度13分10秒	140度4分11秒	F0~F1	竜巻
58	1999年11月25日15時40分	40度20分50秒	140度1分37秒	F1~F2	竜巻
59	2000年07月25日06時20分	36度8分1秒	136度4分13秒	不明	竜巻
60	2000年07月25日06時30分	36度13分26秒	136度8分2秒	不明	竜巻
61	2001年06月01日13時20分	40度32分7秒	139度56分44秒	F1	竜巻
62	2001年06月19日14時50分	35度37分58秒	136度3分11秒	F1	竜巻
63	2002年09月23日14時30分	36度58分15秒	137度33分15秒	F0~F1	竜巻
64	2002年09月24日13時15分	39度30分6秒	140度4分56秒	F1	竜巻
65	2002年11月04日11時20分	36度21分14秒	136度19分32秒	F0	竜巻
66	2002年11月05日10時30分	35度38分45秒	135度56分16秒	不明	竜巻

	発生日時	発生場所緯度	発生場所経度	Fスケール	現象区別
67	2003年09月29日14時40分	42度11分0秒	142度43分21秒	不明	竜巻
68	2003年10月18日16時25分	36度11分51秒	136度7分2秒	不明	竜巻
69	2004年08月15日12時10分	45度27分22秒	141度2分1秒	F0未満	竜巻
70	2004年09月16日14時00分	33度53分13秒	130度53分24秒	F1	竜巻
71	2004年10月22日16時50分	42度25分53秒	142度12分42秒	F2	竜巻
72	2005年01月12日07時50分	35度32分0秒	134度3分30秒	不明	竜巻
73	2005年10月02日19時30分	42度29分25秒	140度49分52秒	F0	竜巻
74	2005年11月18日13時00分	36度38分59秒	136度38分52秒	不明	竜巻
75	2005年12月05日11時50分	35度23分26秒	132度42分50秒	F1	竜巻または ダウンバースト
76	2005年12月25日19時10分	38度51分16秒	139度47分16秒	F1	竜巻
77	2006年10月11日22時15分	42度16分40秒	142度36分21秒	F1	竜巻
78	2006年10月11日22時30分	42度16分34秒	142度30分32秒	F1	竜巻
79	2006年11月07日11時20分	42度25分43秒	142度13分28秒	不明	竜巻
80	2006年11月07日11時20分	42度25分37秒	142度13分22秒	F1	竜巻
81	2006年11月09日12時05分	42度3分31秒	139度26分50秒	F1	竜巻
82	2007年08月24日08時20分	38度47分40秒	139度42分0秒	不明	竜巻
83	2007年08月24日08時20分	38度47分40秒	139度42分0秒	不明	竜巻
84	2007年10月01日14時25分	43度23分0秒	140度26分30秒	不明	竜巻
85	2007年10月01日14時27分	43度17分8秒	140度20分16秒	不明	竜巻
86	2007年10月01日15時30分	42度26分26秒	139度47分30秒	不明	竜巻
87	2007年10月04日07時50分	42度18分10秒	140度58分40秒	不明	竜巻
88	2007年10月04日13時36分	44度53分0秒	141度41分0秒	不明	竜巻
89	2007年10月04日16時30分	42度27分15秒	139度50分20秒	不明	竜巻
90	2007年10月11日09時55分	40度47分21秒	140度7分54秒	不明	竜巻
91	2007年10月11日10時25分	40度47分21秒	140度7分54秒	不明	竜巻
92	2007年10月16日15時23分	35度36分35秒	133度5分10秒	不明	竜巻
93	2007年10月17日07時45分	42度0分0秒	140度56分00秒	不明	竜巻
94	2007年11月22日09時00分	36度54分32秒	137度24分56秒	不明	竜巻または 漏斗雲
95	2007年12月02日01時30分	38度54分26秒	139度50分18秒	F0	竜巻
96	2008年06月01日12時50分	40度23分20秒	139度58分55秒	不明	竜巻
97	2008年07月30日08時03分	35度34分20秒	134度13分5秒	不明	竜巻
98	2008年07月30日08時28分	35度33分5秒	134度10分56秒	不明	竜巻または 漏斗雲

	発生日時	発生場所緯度	発生場所経度	Fスケール	現象区別
99	2008年07月30日08時28分	35度33分5秒	134度10分56秒	不明	竜巻または漏斗雲
100	2008年07月30日08時41分	35度33分36秒	134度11分26秒	不明	竜巻または漏斗雲
101	2008年07月30日08時55分	35度34分48秒	134度9分30秒	不明	竜巻
102	2008年07月30日09時01分	35度34分16秒	134度9分26秒	不明	竜巻
103	2008年07月30日09時18分	35度34分6秒	134度8分16秒	不明	竜巻
104	2008年08月14日11時25分	38度55分10秒	139度48分31秒	不明	竜巻
105	2008年08月15日16時20分	35度30分51秒	133度59分38秒	F0以下	竜巻
106	2008年09月14日08時33分	45度28分53秒	141度50分14秒	不明	竜巻
107	2008年09月14日08時47分	45度29分22秒	141度37分30秒	不明	竜巻
108	2008年09月21日11時07分	38度28分16秒	139度28分39秒	不明	竜巻
109	2008年10月01日11時55分	40度1分15秒	139度45分45秒	不明	竜巻
110	2008年10月01日11時55分	40度0分37秒	139度44分9秒	不明	竜巻
111	2008年10月10日09時05分	39度47分5秒	140度0分55秒	不明	竜巻
112	2008年10月10日10時20分	39度44分36秒	140度0分23秒	不明	竜巻
113	2008年10月10日12時07分	39度40分20秒	140度1分7秒	不明	竜巻
114	2008年10月11日00時45分	41度51分7秒	140度7分37秒	F0	竜巻
115	2008年10月15日13時48分	37度51分36秒	138度54分57秒	F0	竜巻
116	2008年10月15日14時47分	38度40分48秒	139度34分48秒	不明	竜巻
117	2008年10月15日16時10分	38度22分2秒	139度26分44秒	不明	竜巻
118	2008年10月26日18時30分	37度56分11秒	139度6分24秒	F0	竜巻
119	2008年10月27日14時55分	36度9分11秒	136度4分16秒	不明	竜巻
120	2008年10月30日12時33分	35度32分51秒	134度12分26秒	不明	竜巻
121	2008年10月30日12時38分	35度35分1秒	134度17分35秒	F0	竜巻
122	2008年10月30日12時50分	35度34分34秒	134度16分10秒	不明	竜巻
123	2008年10月31日07時30分	37度7分33秒	136度42分25秒	不明	竜巻
124	2008年11月02日16時20分	37度44分35秒	138度48分7秒	不明	竜巻
125	2008年11月07日08時50分	42度8分1秒	142度52分21秒	F0～F1	竜巻
126	2008年11月19日08時36分	36度27分26秒	136度23分41秒	不明	竜巻または漏斗雲
127	2008年11月19日11時45分	37度55分41秒	139度1分4秒	不明	竜巻
128	2008年11月20日08時30分	37度26分19秒	138度34分17秒	不明	竜巻
129	2008年11月20日08時40分	36度56分37秒	136度44分33秒	不明	竜巻
130	2008年11月20日08時42分	36度56分37秒	136度44分33秒	不明	竜巻
131	2008年11月20日08時42分	36度56分37秒	136度44分33秒	不明	竜巻

	発生日時	発生場所緯度	発生場所経度	Fスケール	現象区別
132	2008年11月20日09時40分	37度27分8秒	138度34分43秒	不明	竜巻
133	2008年11月23日10時20分	36度59分16秒	136度46分25秒	F0～F1	竜巻
134	2009年01月24日11時05分	42度5分27秒	139度23分57秒	不明	竜巻
135	2009年01月24日11時15分	42度0分27秒	139度27分46秒	不明	竜巻
136	2009年02月07日20時15分	39度41分6秒	140度5分11秒	F0	竜巻
137	2009年03月14日17時26分	35度35分53秒	134度13分28秒	不明	竜巻または 漏斗雲
138	2009年08月23日18時37分	38度36分36秒	139度34分27秒	不明	竜巻
139	2009年08月23日18時51分	38度37分26秒	139度35分7秒	不明	竜巻
140	2009年09月10日13時30分	37度25分26秒	138度32分38秒	不明	竜巻
141	2009年09月10日13時35分	37度25分26秒	138度32分38秒	不明	竜巻
142	2009年09月13日03時40分	38度34分7秒	139度33分9秒	F0	竜巻
143	2009年10月04日12時50分	39度39分55秒	140度4分26秒	不明	竜巻
144	2009年10月27日13時10分	37度2分7秒	137度49分14秒	不明	竜巻
145	2009年10月30日07時26分	40度30分18秒	139度59分57秒	F0	竜巻
146	2009年10月30日09時20分	40度9分56秒	140度0分26秒	F1	竜巻
147	2009年11月03日06時25分	36度52分52秒	137度21分58秒	不明	竜巻または 漏斗雲
148	2009年11月03日06時37分	36度54分8秒	137度22分38秒	不明	竜巻
149	2009年11月03日06時38分	36度54分8秒	137度22分38秒	不明	竜巻
150	2009年11月03日06時39分	36度53分27秒	137度22分8秒	不明	竜巻
151	2009年11月03日06時43分	36度54分56秒	137度23分51秒	不明	竜巻
152	2009年12月18日02時00分	36度34分20秒	136度33分53秒	F0	竜巻
153	2009年12月18日11時03分	35度34分22秒	134度14分26秒	不明	竜巻または 漏斗雲
154	2010年08月25日12時30分	43度57分25秒	141度35分10秒	不明	竜巻
155	2010年08月25日13時05分	43度59分0秒	141度39分15秒	F0未満	竜巻
156	2010年09月07日03時45分	39度46分12秒	140度3分59秒	F0	竜巻
157	2010年09月16日14時30分	35度37分0秒	134度24分5秒	不明	竜巻
158	2010年09月17日10時45分	37度38分56秒	138度44分42秒	不明	竜巻
159	2010年09月17日10時55分	37度38分3秒	138度45分37秒	F0以下	竜巻
160	2010年10月15日04時30分	37度10分5秒	136度40分32秒	F0	竜巻
161	2010年10月15日17時00分	38度3分23秒	139度19分23秒	F0	竜巻
162	2010年10月15日17時05分	38度4分24秒	139度21分9秒	F1	竜巻
163	2010年10月17日12時40分	40度22分52秒	139度59分42秒	F0	竜巻
164	2010年10月17日13時20分	39度51分44秒	140度1分32秒	F0	竜巻

	発生日時	発生場所緯度	発生場所経度	Fスケール	現象区別
165	2010年10月26日07時00分	43度24分30秒	141度22分0秒	不明	竜巻
166	2010年10月26日07時05分	43度8分28秒	140度23分6秒	不明	竜巻
167	2010年10月26日07時10分	43度24分0秒	141度24分40秒	不明	竜巻
168	2010年10月26日07時10分	43度23分40秒	141度25分50秒	F0未満	竜巻
169	2010年10月26日07時38分	43度22分30秒	141度24分15秒	不明	竜巻
170	2010年10月26日08時10分	43度8分38秒	140度23分6秒	不明	竜巻
171	2010年10月26日15時50分	41度51分39秒	140度6分25秒	不明	竜巻
172	2010年11月12日13時15分	40度19分0秒	140度1分47秒	F0	竜巻
173	2010年11月29日09時20分	37度0分3秒	136度46分18秒	F0	竜巻
174	2010年11月29日12時18分	36度15分21秒	136度6分51秒	不明	竜巻または 漏斗雲
175	2010年11月29日12時24分	36度15分23秒	136度6分59秒	不明	竜巻
176	2010年11月29日12時25分	36度15分17秒	136度6分37秒	不明	竜巻
177	2010年12月03日15時30分	37度50分58秒	138度55分4秒	F0	竜巻
178	2010年12月03日15時36分	37度52分15秒	138度58分57秒	F0未満	竜巻
179	2010年12月03日15時45分	37度53分11秒	139度2分24秒	F1	竜巻
180	2010年12月09日17時10分	37度12分36秒	138度18分7秒	F0～F1	竜巻
181	2010年12月15日07時56分	36度51分20秒	137度23分5秒	不明	竜巻
182	2010年12月16日08時00分	38度2分43秒	138度37分10秒	不明	竜巻
183	2010年12月17日10時20分	42度52分12秒	140度18分46秒	不明	竜巻
184	2010年12月18日07時18分	35度34分17秒	134度10分6秒	不明	竜巻または 漏斗雲
185	2010年12月24日15時57分	35度34分17秒	134度10分4秒	不明	竜巻
186	2010年12月27日01時30分	37度1分3秒	136度44分37秒	F0	竜巻
187	2010年12月29日13時50分	35度46分56秒	135度14分0秒	不明	竜巻
188	2010年12月29日14時00分	35度46分54秒	135度12分6秒	不明	竜巻
189	2011年01月03日14時52分	38度3分48秒	139度16分7秒	不明	竜巻
190	2011年03月09日11時30分	36度13分1秒	136度11分51秒	F0未満	竜巻または 漏斗雲
191	2011年03月09日17時25分	35度34分6秒	134度8分57秒	不明	竜巻
192	2011年03月31日09時50分	37度10分31秒	138度13分58秒	F0未満	竜巻または 漏斗雲
193	2011年08月13日17時32分	40度29分8秒	139度53分20秒	不明	竜巻
194	2011年08月20日18時40分	43度4分56秒	140度23分57秒	不明	竜巻
195	2011年08月20日18時45分	43度4分52秒	140度24分37秒	不明	竜巻

	発生日時	発生場所緯度	発生場所経度	Fスケール	現象区別
196	2011年08月22日12時05分	45度19分0秒	140度58分47秒	不明	竜巻または 漏斗雲
197	2011年09月20日05時50分	45度25分27秒	141度41分35秒	不明	竜巻
198	2011年11月15日16時10分	37度2分0秒	137度42分0秒	不明	竜巻
199	2011年11月15日16時12分	37度2分0秒	137度42分0秒	不明	竜巻
200	2011年11月15日16時14分	37度2分0秒	137度42分0秒	不明	竜巻
201	2011年11月15日16時15分	37度2分0秒	137度42分0秒	不明	竜巻
202	2011年11月15日16時20分	37度2分0秒	137度42分0秒	不明	竜巻
203	2011年11月24日12時10分	36度56分25秒	137度23分30秒	不明	竜巻または 漏斗雲
204	2011年11月25日06時27分	36度53分45秒	137度23分0秒	不明	竜巻または 漏斗雲
205	2011年12月24日12時10分	36度48分30秒	136度42分0秒	不明	竜巻
206	2012年02月01日04時15分	35度21分41秒	132度40分40秒	F0	竜巻

気象庁 「竜巻等の突風データベースより作成」

1.4 ハザード曲線に基づく最大風速 (V_{B2}) の設定

(1) ハザード曲線の評価方針

竜巻影響評価ガイドに従い、既往の算定方法 (Wen and Chu 及び Garson et. al : 竜巻に遭遇しかつ竜巻がある風速以上になる確率モデルの推定法) に基づいて竜巻最大風速のハザード曲線を算定し、 V_{B2} を評価する。

具体的には竜巻影響評価ガイドに、 V_{B2} 算定の参考になると示されている東京工芸大学委託成果」を参考に次頁のフローに従い算定する。

ハザード曲線は、竜巻影響評価ガイドに従い竜巻検討地域の海岸線から陸側及び海側 5km の範囲を 1km に刻んだエリアと、竜巻検討地域全域について評価する。

1.2 で設定した竜巻検討地域の竜巻発生数のデータ等に基づきハザード曲線の評価する。

ハザード曲線の算定に当たっては、以下の理由から、竜巻年発生数の確率密度分布としてポリヤ分布を用いる。

(竜巻年発生数の確率密度分布の設定)

竜巻影響評価ガイドでは、「竜巻の年発生数の確率分布は、竜巻検討地域で過去に発生した竜巻の記録等に基づいてポアソン過程等により設定することを基本とする。」としている。

また、竜巻影響評価ガイドに、 V_{B2} 算定の参考になるとされている東京工芸大学委託成果によれば、Wen and 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。

更に、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としては、先に述べた東京工芸大学委託成果に示されており、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。

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、ポリヤ分布を使用するものとする。

(2) ハザード曲線算定の流れ

ハザード曲線の算定は、竜巻発生数の解析、竜巻風速・被害幅・被害長さの確率密度分布、平均、標準偏差及び相関係数の算定ならびにハザード曲線の算出で構成される。

1.2 で設定した竜巻検討地域の竜巻発生数のデータ等に基づきハザード曲線进行评估する。

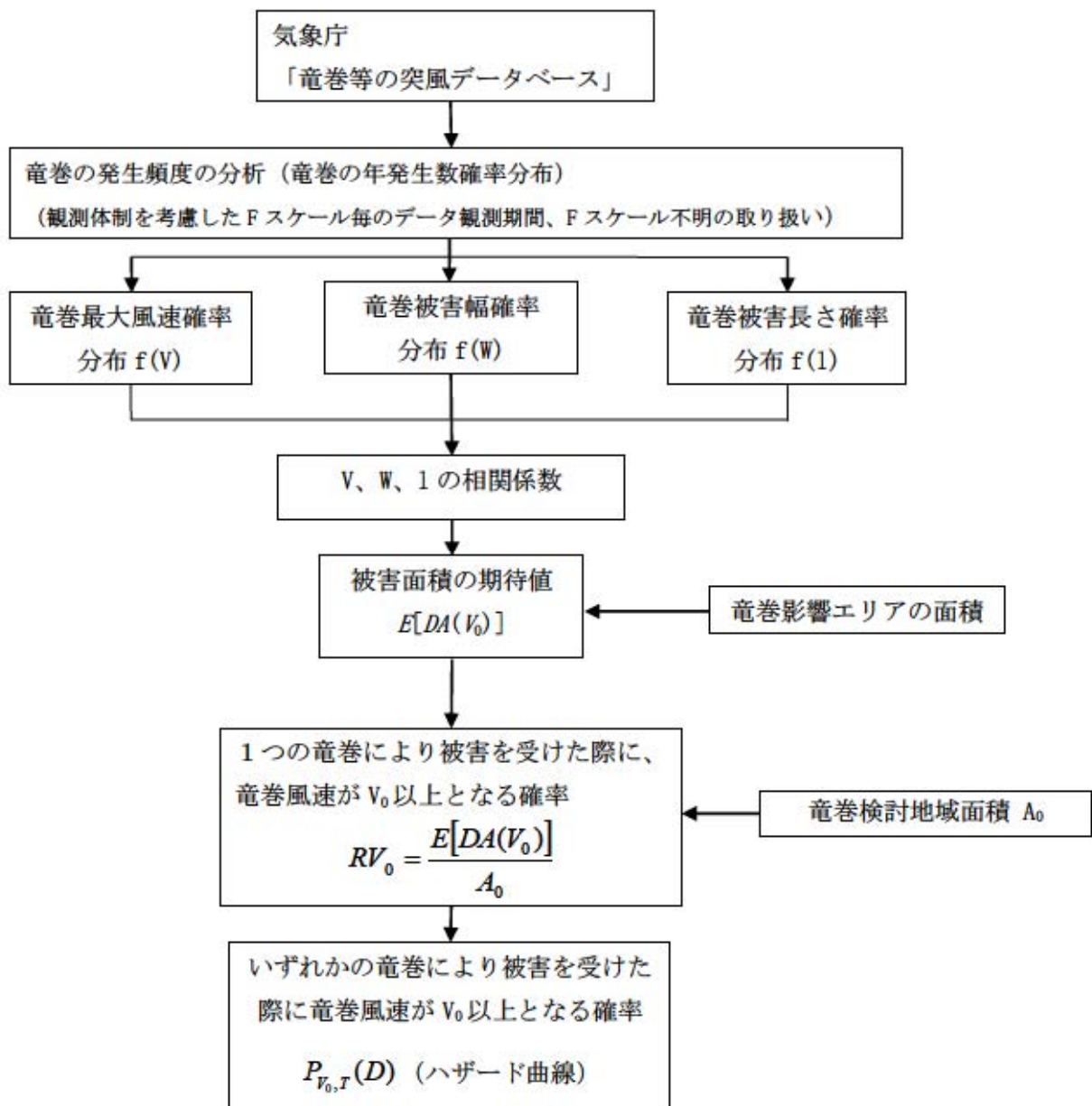


図 1.4.1 評価フロー

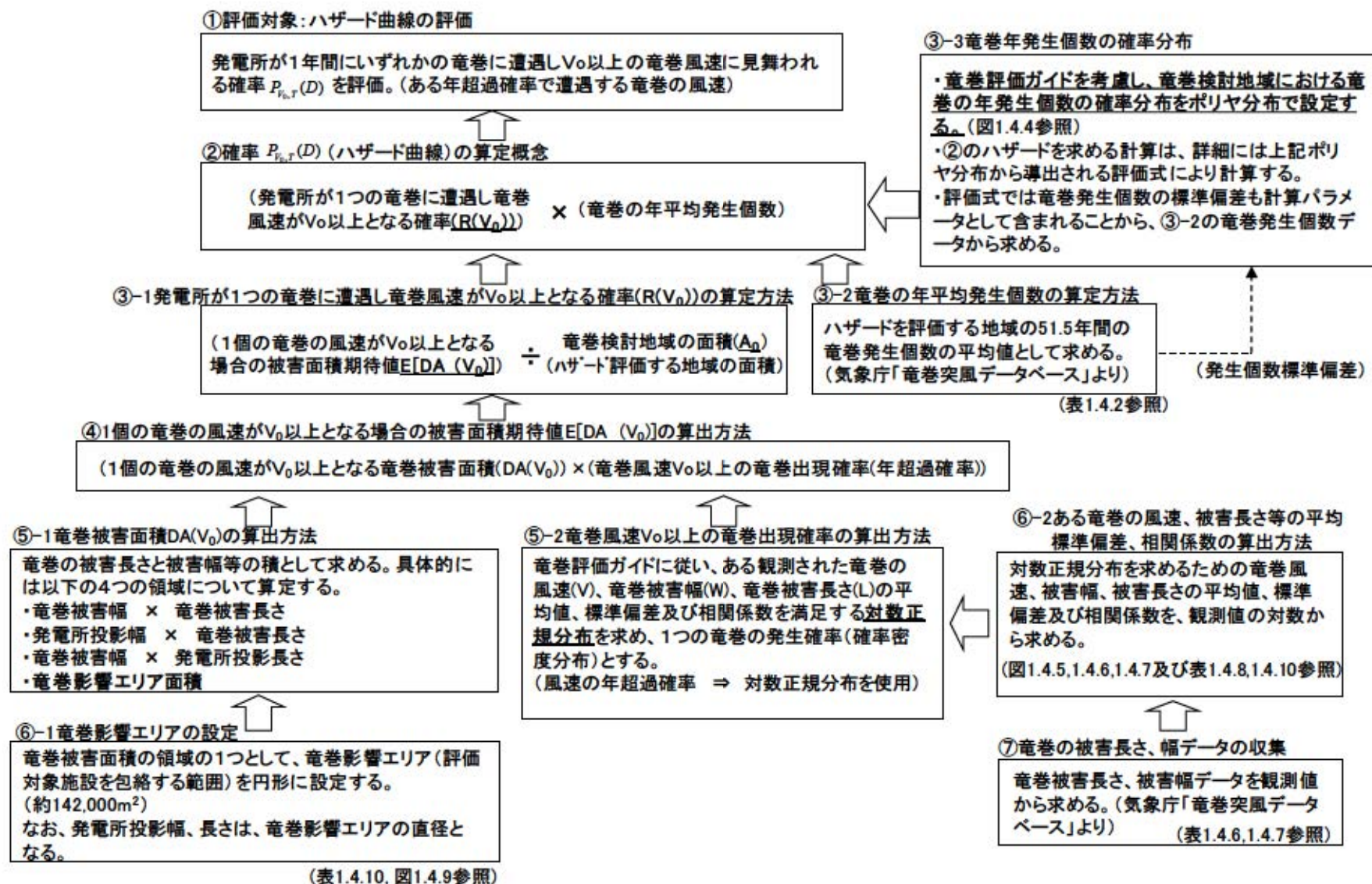


図 1.4.2 詳細評価フロー

(3) 竜巻発生数の解析

①適用データ

気象庁「竜巻等の突風データベース」より竜巻検討地域における1961年～2012年6月までの竜巻発生データを用いた。

②竜巻の発生頻度

気象庁の「竜巻等の突風データベース」は1961年以降のデータがデータベース化されているが、表1.4.1に示すとおり、観測体制は近年になるほど強化されており、年代により竜巻の発生確認数にばらつきがある。特に、観測体制が強化された2007年以降は、発生数が非常に多くなっており、海上竜巻の増加も顕著である。ただし、これら海上竜巻の多くは、その詳細が“不明”となっているのも特徴である。

観測体制の変遷や観測された竜巻の特徴を考慮し、ハザード評価に用いるデータの観測期間を以下のa～cの3期間に分けて設定した。

- a. 2007年～2012年6月 (5.5年間)
- b. 1991年～2012年6月 (21.5年間)
- c. 1961年～2012年6月 (51.5年間)

上記3つ(a～c)の観測期間について、泊発電所の竜巻検討地域における竜巻発生数、年間平均発生数及びその標準偏差をFスケール毎に調査した結果を表1.4.2に示す。同表の1～3段目までは、1961年～、1991年～、2007年～2012年6月の結果をそれぞれ示し、小計はF0からF3スケール竜巻の発生数の合計、総数は不明(陸上・海上)も含めた合計を表す。

1961年以降の51.5年間で、206個の竜巻が観測されているが、そのうちの約23%(47個)をF1竜巻が占め、不明は半数以上(116個)となっている。不明竜巻の多く(93個)は2007年以降の5.5年間に観測されており、全て海上竜巻である。F0竜巻についても、その9割弱が2007年以降の観測である。また、F1竜巻は、半数以上が1991年以降に観測されている。

一方、F2竜巻については、51.5年間で13個観測されているが、2007年以降の発生例は無く、観測体制の強化に伴う影響をそれほど受けていないことがわかる。また、F3竜巻の観測例が無いことも、本竜巻検討地域の特徴である。

以上の結果を踏まえ、各観測期間のデータを統合して、疑似的な51.5年間のデータや統計量をFスケール毎に作成した。その基本的な考え方は以下のとおりである。

- (a)被害が小さくて見過ごされやすいF0および不明竜巻は、観測体制が強化された2007年以降の年間発生数や標準偏差を採用する。
- (b)被害が比較的軽微なF1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年以降の年間発生数や標準偏差を採用する。
- (c)被害が比較的大きく見逃されることが少ないF2竜巻については、観測データが整備された1961年以降の全期間の年間発生数や標準偏差を採用する。
- (d)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。

このようにして得られた結果を表1.4.2の4段目に示す。ここでの小計には、陸上での不明竜巻を含めた。その結果、51.5年間に発生した竜巻1193個のうち、不明も含む陸上竜巻が322個、海上竜巻は871個と推定された。

竜巻は、被害があつて初めてそのFスケールが推定されるため、海上のFスケール不明の竜巻については、そのFスケールを推定することは困難であるが、沿岸部近傍での竜巻の発生特性は陸上と海上で類似していると仮定し、Fスケール不明な海上竜巻の発生数を陸上竜巻のFスケール別発生比率で按分した。本仮定の妥当性について陸上発生竜巻と海上発生の上陸竜巻の特性から説明する。51.5年間に竜巻検討地域において206個の竜巻が観測されているが、陸上発生は61個、海上発生は145個で内、上陸竜巻が40個（海上発生竜巻の約28%）である。竜巻検討地域と国内全域における陸上発生竜巻および海上発生の上陸竜巻のFスケール毎の観測数と割合の比較を表1.4.3に示す。陸上発生竜巻と海上発生の上陸竜巻共に、Fスケールが小さい竜巻(F0、F1)は大きい竜巻(F2以上)より観測割合が多く、陸上発生竜巻と海上発生の上陸竜巻の発生特性は同じ傾向であると言える。更に、Fスケール毎の割合は、陸上発生竜巻と海上発生の上陸竜巻で割合は少し異なるがほぼ同等と見なせる。陸上発生竜巻は、観測数=発生数と見なすことができるが、海上発生の上陸竜巻は観測数=海岸線を通じた数を示し、単純に海上での発生数ではない。例えば海岸近傍で発生した竜巻はFスケールに拠らず海岸線を通じた数が発生数にほぼ等しくなると考えられる。一方、海岸から離れた位置で発生した竜巻の場合、Fスケールが大きくて移動距離の長い竜巻ほど海岸に到達し易いため、海岸線を通じた数と海上での発生数に乖離が生じると考えられる。これがFスケール毎の陸上発生と海上発生の上陸割合が少し異なる理由と言える。

以上より、年代による竜巻の発生確認数の違いやFスケール不明の竜巻を考慮した、本竜巻検討地域における疑似的な51.5年間の竜巻発生を表1.4.2の5段目に示す51.5年間の竜巻の発生総数は1195個、その8割弱がF0、約2割がF1と推定された。また、F2竜巻は、観測数は13個であったが、Fスケール不明の海上竜巻を考慮したため、49個に増加している。

今回は、年代により竜巻の発生確認数が異なるため疑似的なデータを作成したが、最も信頼できるデータは観測体制が強化された2007年以降のデータである。疑似的な51.5年間のデータが2007年以降のデータと比べて問題ないかをFスケール毎に2007年～2012年6月までの発生確認数の割合と比較し表1.4.4に示す。疑似的な51.5年間の方がFスケールの大きい竜巻の発生確認数の割合が多く、小さい竜巻の発生確認数の割合が少なく妥当な推定ができていると言える。

また、図1.4.3に示す日本における竜巻強度分布の変遷より、理想的な竜巻強度分布（縦軸：竜巻の発生率、横軸：風速の二乗）は直線状になることから、今回実施した疑似的な51.5年間のデータを作成したFスケール毎の観測期間は竜巻強度分布が直線となる期間を選定しており妥当であると言える。

表 1.4.1 年代による竜巻の発生確認数の違い

年代	竜巻の発生確認数
1961年～1990年	<ul style="list-style-type: none"> ・ 当時から気象庁が竜巻として公表していたものに、災害報告、調査・研究報告、新聞などの資料からあらためて収集した事例のうち一定規模以上のものから、気象庁が竜巻と判定したものを加えた数。（当時存在が明らかでなかったダウンバーストも本事例に含まれている可能性がある）。 ・ <u>被害のない海上竜巻は含んでいない。</u>
1991年～2006年	<ul style="list-style-type: none"> ・ 災害報告、調査・研究報告、新聞などの資料からあらためて収集した全ての事例から、気象庁が竜巻と判定したものの数。 ・ <u>被害のない海上竜巻も含んでいるが、目撃情報のうち集約できているものは一部に限られている。</u>
2007年～	<ul style="list-style-type: none"> ・ <u>気象庁が突風事例の調査体制を強化し、評定の精度が向上。</u> ・ 報道や目撃情報等も含めた広範な情報源から収集した事例から、気象庁が竜巻と判定したものの数。 ・ <u>幅広く情報を入手していることから、海上竜巻の発生確認数が格段に増加。</u>

表 1.4.2 竜巻発生数の解析結果

竜巻検出地域 (沿岸±5km)	発生数の統計	小計	竜巻スケール				不明		総数 含む不明
			F0	F1	F2	F3	陸上	海上	
1961～ 2012/6 (51.5年間)	期間内総数	90	30	47	13	0	3	113	206
	平均値 (年)	1.748	0.583	0.913	0.252	0	0.058	2.194	4.000
	標準偏差 (年)	2.526	2.003	1.020	0.522	0	0.309	5.862	7.687
1991～ 2012/6 (21.5年間)	期間内総数	60	30	27	3	0	3	112	175
	平均値 (年)	2.791	1.395	1.256	0.140	0	0.140	5.209	8.140
	標準偏差 (年)	3.467	2.956	1.124	0.356	0	0.473	8.294	10.683
2007～ 2012/6 (5.5年間)	期間内総数	32	26	6	0	0	0	93	125
	平均値 (年)	5.818	4.727	1.091	0.000	0	0	16.909	22.727
	標準偏差 (年)	6.087	4.814	1.337	0.000	0	0	10.661	14.700
疑似 51.5年間 (陸上竜巻)	期間内総数	322	244	65	13	0	0	871	1193
	平均値 (年)	6.236	4.727	1.256	0.252	0	0	16.909	23.145
	標準偏差 (年)	4.970	4.814	1.124	0.522	0	0	10.661	11.762
疑似 51.5年間 (全竜巻)	期間内総数	1195	905	241	49	0	0	0	1195
	平均値 (年)	23.102	17.514	4.653	0.935	0	0	0	23.102
	標準偏差 (年)	9.567	9.265	2.163	1.004	0	0	0	9.567

注1：切り上げの関係で総計数が一致していない箇所がある。

注2：色塗り部分については、竜巻発生頻度の分析に用いるデータを示している。

表 1.4.3 陸上発生竜巻と海上発生の上陸竜巻の比較

		陸上 5km 以内で発生した竜巻				海上で発生して上陸した竜巻			
		F0*	F1	F2 以上	合計	F0	F1	F2 以上	合計
竜巻検討地域	観測数(個)	22	33	6	61	19	14	7	40
	割合(%)	36	54	10	—	48	35	18	—
国内全域	観測数(個)	72	110	37	219	39	55	29	123
	割合(%)	33	50	17	—	32	45	24	—

※ F スケール不明竜巻を含む

表 1.4.4 2007 年以降と疑似 51.5 年間の観測数の比較

		F0	F1	F2	合計
2007 年～2012 年 6 月 (5.5 年間)	観測数 (個)	26	6	0	32
	割合 (%)	91	19	0	—
疑似 51.5 年間 (全竜巻)	観測数 (個)	905	241	49	1195
	割合 (%)	76	20	4	—

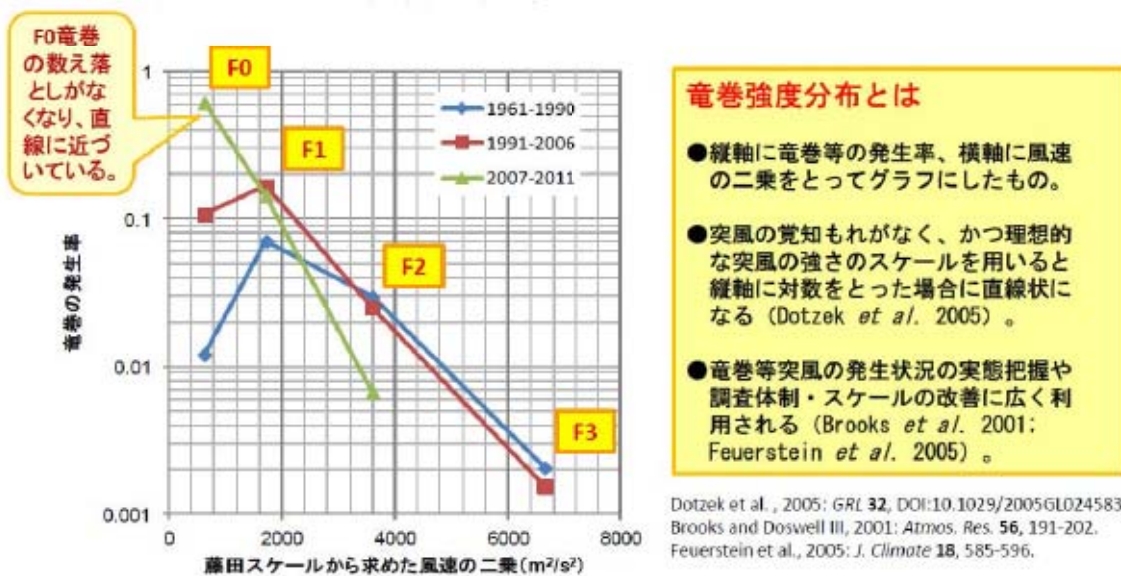


図 1.4.3 日本における竜巻強度分布の変遷

出典：気象庁「竜巻等突風の強さの評定に関する検討会」平成 25 年 7 月 3 日

③. 年発生数の確率密度分布の設定

設定にあたっては、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）が大きい分布であることから、東京工芸大学委託成果になってポリヤ分布により設定した。なお、ポリヤ分布は、竜巻影響評価ガイドにおいて推奨されているポアソン分布を一般化したものであり、年発生数の年々変動の実態をポアソン分布よりも適合性が高い形で表現できることを確認している。図 1.4.4 に年平均値と標準偏差に対するポリヤ分布を示す。

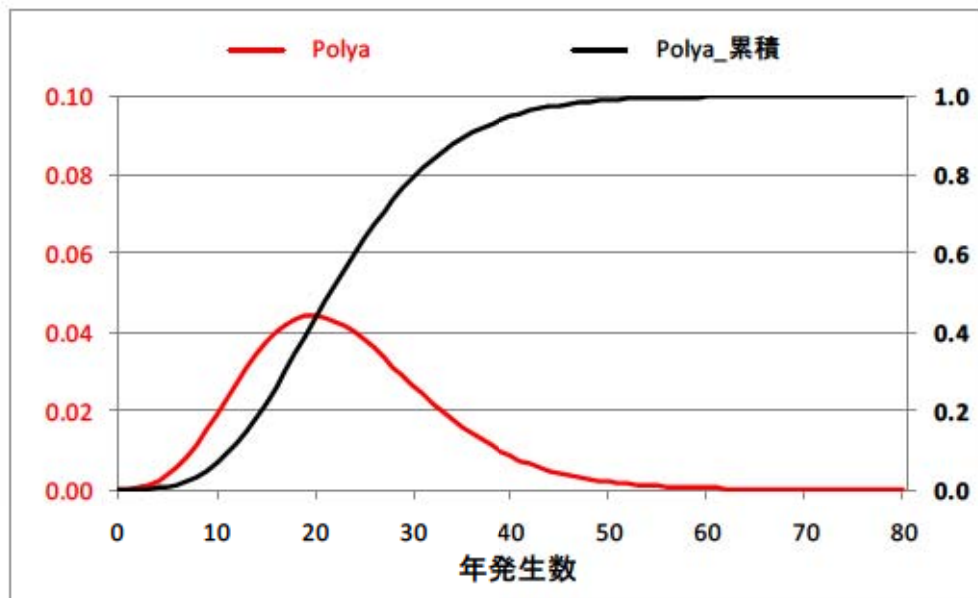


図 1.4.4 竜巻の年発生数をポリヤ分布で適合させた結果

なお、竜巻影響評価ガイドでは、少なくとも1km範囲毎に竜巻の年発生数の確率分布を算定することが求められている。しかし、1km範囲に分けると表1.4.5に示すとおり、各範囲における竜巻発生数が少なくなり、結果的にハザード曲線の算定精度の低下が懸念される。

さらに、竜巻の被害特性として、発生地点から数km以上離れた地点で最大風速に達するものもあるため、ある1km範囲の被害は他の1km範囲で発生した竜巻によりもたらされるといった齟齬が生じうる。

一方、本検討では、前述のとおり、今回採用したF スケール不明の海上竜巻に対する取扱いにより、陸上での観測でF2竜巻が5個であったのに対して49個として評価しており、評価結果の保守性を高めている。

以上を考慮した結果、竜巻検討地域を陸上5km範囲と海上5km範囲に分けて年発生数を求め、両者の総数をもとに確率密度分布を求めることが妥当であると判断した。竜巻風速の確率密度分布についても同様の扱いとする。

表 1.4.5 竜巻検討地域における 1km 範囲ごとの陸上竜巻年発生数

	F0	F1	F2	F3
0km～1km	10	16	5	0
1km～2km	4	7	1	0
2km～3km	4	3	0	0
3km～4km	0	7	0	0
4km～5km	1	1	0	0

(4) 竜巻被害幅、被害長さのデータ

竜巻発生数と同様に、被害幅の観測データを解析した結果を表 1.4.6 に示す。不明とは、被害幅と F スケールの両方もしくは片方が不明であることを表す。被害幅の解析に利用可能なデータ数は、64 個と少ない。

安定した統計値を算出するために、データ数を確保する必要がある。また、先に推定した 51.5 年間の擬似竜巻発生数との整合性も確保する必要がある。そこで、以下のように 51.5 年間の被害幅の統計量を推定した。

- ① 1961 年以降の観測データを使用し、F スケール別に被害幅データを抽出する。このデータをもとに、F スケール別に被害幅のデータや平均値・標準偏差を求める（表 1.4.6 の上段）。
- ② 各スケール別の 51.5 年間の発生数(期間内総数)を、①で得られた観測値から、表 1.4.2 で推定した 51.5 年間の擬似発生数に置き換える。(F2 の場合、7 個を 49 個に置き換える。)
- ③ ①で抽出された F スケール別の被害幅データを大きい順に並び替え②で設定した 51.5 年間の擬似発生数分だけ繰り返しサンプリングを行い、被害幅の疑似データを作成する。(例えば、F2 の場合、被害幅が観測されている 7 個のデータを大きい順に並べ、これを順に 49 個のデータに繰り返し当てはめデータを作成する。)
- ④ ③で作成した疑似データをもとに、平均値と標準偏差を求める。

竜巻被害長さについても、被害幅と同様の解析を行った。結果を表 1.4.7 に示す。

表 1.4.6 竜巻被害域幅の解析結果

竜巻検討地域 (沿岸±5km)	竜巻被害幅 の統計(m)	小計	竜巻スケール				不明		総数 (含む不明)
			F0	F1	F2	F3	(陸上)	(海上)	
1961～ 2012/6 (51.5年間)	期間内総数	64	24	33	7	0	21	121	206
	平均値(m)	117.6	115.5	108.6	167.1	0			
	標準偏差(m)	144.7	123.8	101.7	324.4	0			
疑似 51.5年間 (全竜巻)	期間内総数	1195	905	241	49	0	0	0	1195
	平均値(m)	117.7	116.2	113.5	167.1	0			
	標準偏差(m)	130.8	121.5	103.1	303.4	0			

表 1.4.7 竜巻被害域長さの解析結果

竜巻検討地域 (沿岸±5km)	竜巻被害長さ の統計(km)	小計	竜巻スケール				不明		総数 (含む不明)
			F0	F1	F2	F3	(陸上)	(海上)	
1961～ 2012/6 (51.5年間)	期間内総数	69	25	36	8	0	15	122	206
	平均値(km)	2.278	1.072	3.031	2.663	0			
	標準偏差(km)	3.729	1.443	4.730	3.054	0			
疑似 51.5年間 (全竜巻)	期間内総数	1195	905	241	49	0	0	0	1195
	平均値(km)	1.572	1.084	3.156	2.812	0			
	標準偏差(km)	2.680	1.427	4.741	3.043	0			

(5) 竜巻風速、被害幅、被害長さの確率密度分布の設定及び相関係数の算定

ハザード曲線を算定するために、一つの竜巻が発生した際の竜巻風速、被害幅及び長さの確率密度分布が必要となる。このため表 1.4.8 に示す(3)及び(4)で求めた竜巻検討地域における 51.5 年間の竜巻の発生数、被害幅、被害長さのデータを用いて、それぞれの確率密度分布を求めた。

確率密度分布の設定にあたっては、竜巻影響評価ガイド及び東京工芸大学委託成果に示される対数正規分布に従う。

推定した竜巻被害幅、竜巻被害長さ、竜巻風速の確率密度分布は以下のとおり。

a. 竜巻風速の確率密度分布

超過確率を図 1.4.5 に示す。観測結果を適切に表現できる形となっており、風速の大きい領域でも不自然な形となっていない。

b. 被害幅の確率密度分布

確率密度分布を図 1.4.6 に示す。推定された分布形は、超過確率のグラフより適切に観測値を推定していると判断される。

c. 被害長さの確率密度分布

確率密度分布を図 1.4.7 に示す。推定された分布形は、超過確率のグラフより適切に観測値を推定していると判断される。

次に、ハザード曲線の算定において、2 変量あるいは 3 変量の確率分布関数を対象とするため、竜巻風速・被害幅・被害長さについての相関係数を求めた。本来ならば、これら 3 つが同時に観測されているデータを用いるのが望ましいが、十分なデータ数が確保されないため、1961 年以降の利用可能なデータ（風速と被害幅のみが観測されているデータ等、2 変量の比較が行える観測データ）を全て用いて相関を取った。また、風速、被害幅等の変数の確率密度分布の推定では、発生頻度が重要であるため繰り返しサンプリングを行ったデータを使用した。以下の理由から相関係数の推定ではそのような措置を行わず、観測の元データを使用した。

F スケール不明や F0 スケールの竜巻では、被害規模が小さいために被害幅や長さの観測データがより大きな F2 スケール竜巻に比べて得られる機会が少なく、ばらつきも大きいと考えられる。そのようなデータをサンプリングにより増やすと、F2 スケール竜巻で見られる相関の高さが反映されなくなることが懸念される。

表 1.4.9 に算定結果を示すが、泊発電所における竜巻検討地域では、風速-被害長さ間では 0.3 程度、被害幅-被害長さ間では 0.4 以上の相関が認められた。

表 1.4.8 竜巻検討地域における竜巻パラメータ (51.5年間の推定結果)

パラメータ	統計量	小計	竜巻スケール				
			F0	F1	F2	F3	
竜巻検討地域 (沿岸±5km)	発生数	期間内総数	1195	905	241	49	0
		平均値(年)	23.204	17.573	4.680	0.951	0
		標準偏差(年)	9.567	9.265	2.163	1.004	0
疑似 51.5年間 (全竜巻)	被害幅	期間内総数	1195	905	241	49	0
		平均値(m)	117.7	116.2	113.5	167.1	0
		標準偏差(m)	130.8	121.5	103.1	303.4	0
被害長	期間内総数	1195	905	241	49	0	
	平均値(km)	1.572	1.084	3.156	2.812	0	
	標準偏差(km)	2.680	1.427	4.741	3.043	0	

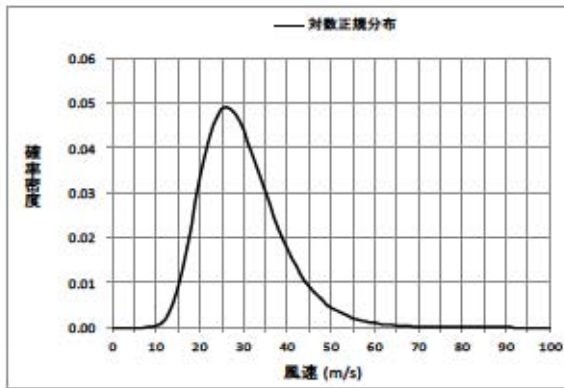


図1.4.5(1) 風速の確率密度分布

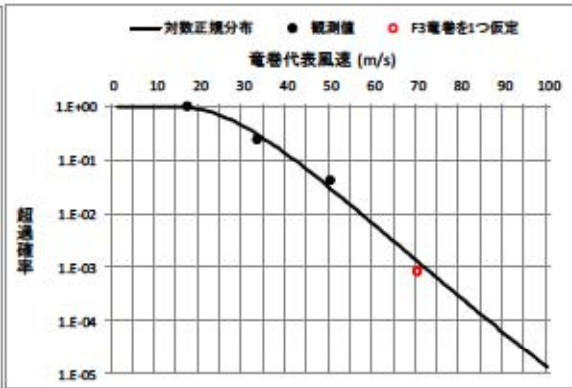


図1.4.5(2) 風速の超過確率

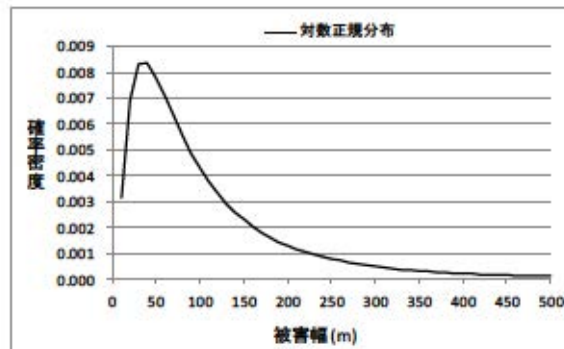


図1.4.6(1) 被害幅の確率密度分布

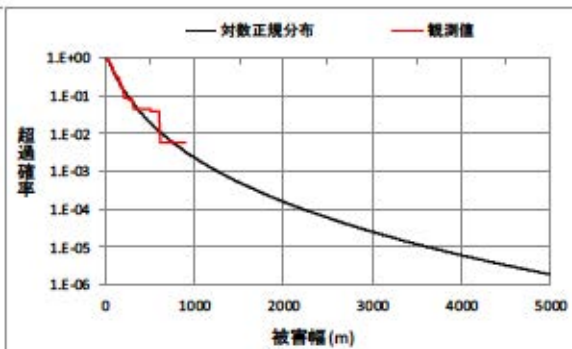


図1.4.6(2) 被害幅の超過確率

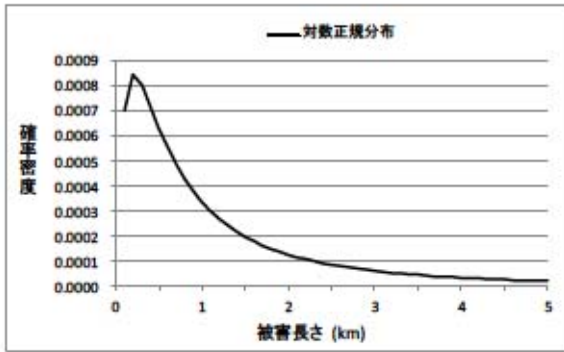


図1.4.7(1) 被害長さの確率密度分布

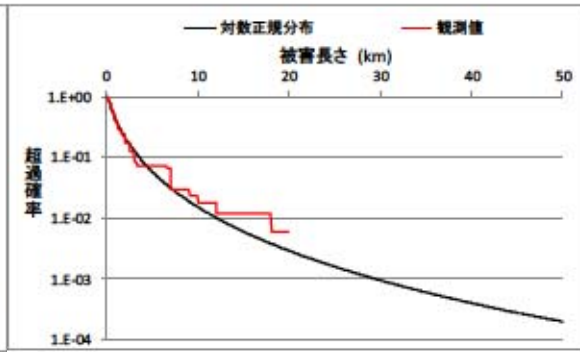


図1.4.7(2) 被害長さの超過確率

表 1.4.9(1) 相関係数算定に用いた竜巻風速、被害幅、被害長さのデータ数

データ数	風速 (個)	被害幅 (個)	被害長さ (個)
風速 (個)	90	64	69
被害幅 (個)	—	67	62
被害長さ (個)	—	—	70

表 1.4.9(2) 相関係数

相関係数(対数)	風速 (m/s)	被害幅 (m)	被害長さ (m)
風速 (m/s)	1.000	0	0.301
被害幅 (m)	—	1.000	0.458
被害長さ (m)	—	—	1.000

(6) 竜巻影響エリアの設定

竜巻影響評価ガイドに従い、竜巻影響エリアの設定にあたり泊3号炉における評価対象設備の面積を設定する。なお、評価対象設備は、図 1.4.8 及び表 1.4.10 に示すとおり、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である。

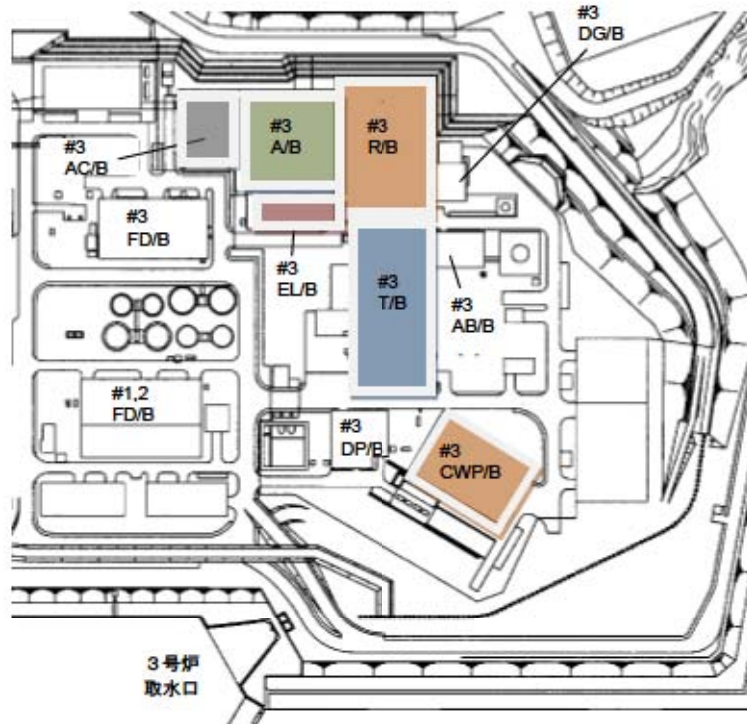


図 1.4.8 評価対象施設の設置位置概略図

表 1.4.10 評価対象施設の面積

評価対象施設	設置面積 (m ²)
原子炉建屋 (R/B)	4,889
原子炉補助建屋 (A/B)	3,689
ディーゼル発電機建屋 (DG/B)	493
タービン建屋 (T/B)	5,225
電気建屋 (EL/B)	1,214
出入管理建屋 (AC/B)	1,603
循環水ポンプ建屋 (CWP/B)	2,748
合計	19,861

泊3号炉における竜巻影響エリアを図1.4.9に示す。評価対象施設は、図1.4.8に示すとおり分散しているため、竜巻影響エリアは、保守性を考慮して3号炉施設全体を囲うように設定する。具体的には、原子炉建屋の端から循環水ポンプ建屋の端までの距離270mに余裕をみて、1辺を300mとする正方形を仮定し、更にこの正方形を囲む、直径($\sqrt{2} \times 300 \approx 425$)mの円形(面積:約142,000m²)の範囲とする。

なお、竜巻影響エリアを円形に設定するため、ハザード曲線は竜巻移動方向に対する依存性無しとして評価を行う。

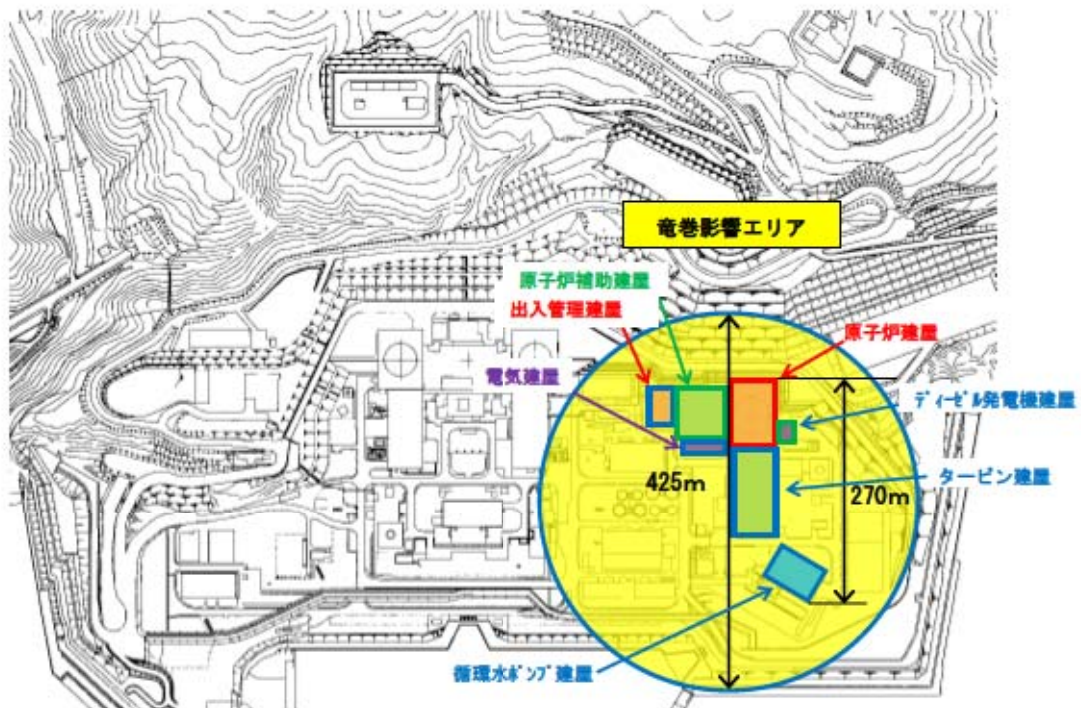


図1.4.9 泊3号炉の竜巻影響エリア

(7) ハザード曲線の算定

東京工芸大学委託成果によれば、Wen and Chu は、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方法を提案している。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分布は、1.4.1式に示すポリヤ分布に適合するとしている。このため、本ハザード曲線の算定においては上記委託成果にならって、適合性の良いポリヤ分布を用いる。

$$\text{ポリヤ分布} : P_T(N) = \frac{(vT)^N}{N!} (1 + \beta vT)^{-N-1/\beta} \prod_{k=1}^{N-1} (1 + \beta k) \quad (1.4.1 \text{ 式})$$

$$\beta = \left(\frac{\sigma^2}{v} - 1 \right) \times \frac{1}{v} \quad (1.4.2 \text{ 式})$$

ここで、

N : 竜巻の年発生数

v : 竜巻の年平均発生数

T : 年数

σ : 竜巻の年発生数の標準偏差

評価対象とする建造物が1つの竜巻に遭遇し、その竜巻の風速が V_0 以上となる確率を $R(V_0)$ とした時、 T 年以内にいずれかの竜巻に遭遇し V_0 以上の竜巻風速に見舞われる確率 $P_{V_0,T}(D)$ は、1.4.1式から導き出された1.4.3式で表される。また、必要なハザード曲線は、1.4.4式を1.4.3式に代入することにより求めることができる。

$$P_{V_0,T}(D) = 1 - [1 + \beta v R(V_0) T]^{-1/\beta} \quad (1.4.3 \text{ 式})$$

ここで、

D : 対象とする建造物が風速 V_0 以上の竜巻風速に遭遇する事象

$R(V_0)$: リスクの評価対象とする建造物が1つの竜巻に遭遇し、竜巻風速が V_0 以上となる確率

$$R(V_0) = \frac{E[DA(V_0)]}{A_0} \quad (1.4.4 \text{ 式})$$

$DA(V_0)$: 1個の竜巻の風速が V_0 以上となる面積

$E[DA(V_0)]$: $DA(V_0)$ の期待値

A_0 : リスクの評価対象とする地域の面積 (竜巻検討地域の面積 38,895km²)

次に、面積期待値 $E[DA(V_0)]$ の算出の仕方について説明する。

1個の竜巻の風速が V_0 以上となる面積 $DA(V_0)$ は1.4.5式のように表される。

$$\begin{aligned} DA(V_0) &= WL + HL + WG + AB & ; V_i \geq V_0 \\ DA(V_0) &= 0 & ; V_i < V_0 \end{aligned} \quad (1.4.5 \text{ 式})$$

ここで、 W は竜巻の被害域幅、 L は被害域長さ、 A 、 B は建造物の寸法、 H と G は竜巻

の被害域幅や長さ方向への構造物の投影長さである。

4.5 式の 4 つの項が表す面積部分の概念図を図 1.4.10 に示す。

WL (第 1 項) = ①、 HL (第 2 項) = ②

WG (第 3 項) = ③、 AB (第 4 項) = ④

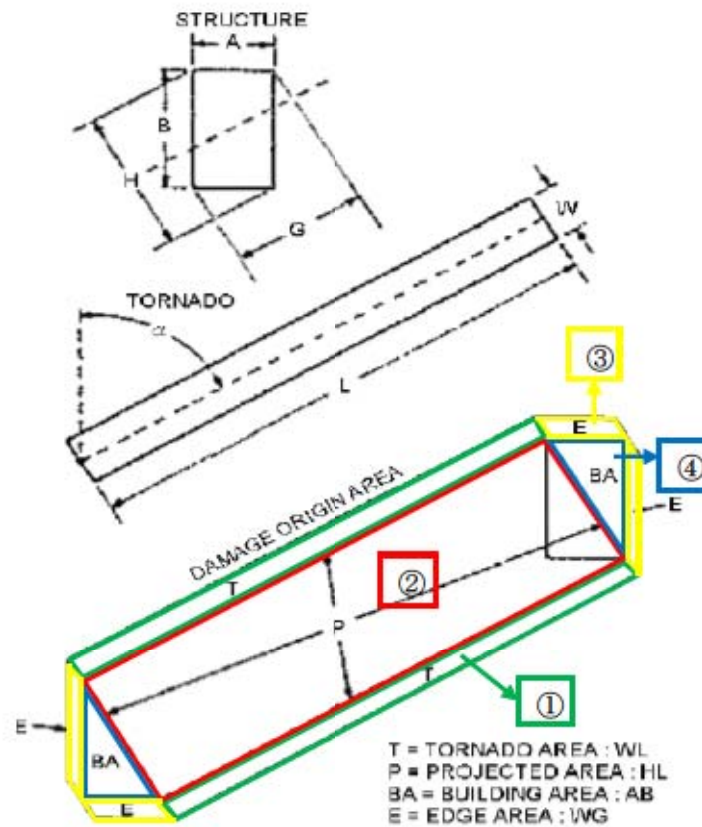


図 1.4.10 竜巻被害エリアの定義(東京工芸大学委託成果より)

1.4.5 式の右边第 1 項は、竜巻被害長さ \times 竜巻被害幅の積で被害面積を表しており点構造物に対する被害に対応する。第 2 項と第 3 項は、竜巻被害長さ \times 被害幅 \times 構造物寸法の積で構造物の被害面積を表す。第 4 項は建物面積 AB に依存する項である。

上記から、竜巻風速、被害幅、被害長さの同時確率密度分布を用い、また、建物面積を直径 L の円形構造物として $DA(V_0)$ の期待値を表すと 1.4.6 式になる。

$$E[DA(V_0)] = \int_0^{\infty} \int_0^{\infty} \int_0^{\infty} W(V_0) l f(V, w, l) dV dw dl + L \int_0^{\infty} \int_0^{\infty} l f(V, l) dV dl + L \int_0^{\infty} \int_0^{\infty} W(V_0) f(V, w) dV dw + S \int_0^{\infty} f(V) dV \quad (1.4.6 \text{ 式})$$

V : 竜巻最大風速、 w : 被害域幅、 l : 被害域長さ

α : 竜巻の移動方向、 $f(\cdot)$: 確率密度分布

L : 円形構造物の直径、 S : 円形構造物の面積

$$W(V_0) = \left(\frac{V_{\min}}{V_0} \right)^{1/1.6} w \quad (1.4.7 \text{ 式})$$

W : 竜巻の被害域幅の観測値

V_{\min} : 被害域幅 W 内の最小竜巻風速

ここで、1.4.7式は、竜巻被害幅のうち風速が V_0 以上となる幅であり、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ことが考慮されている。1.4.7式の V_{\min} は、gale intensity velocity 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付けられる。米国の気象庁(National Weather Service)では、34~47ノット(17.5~24.2m/s)とされている。また、日本の気象庁が使用している風力階級では風力8が疾強風(Gale, 17.2~20.7m/s)、風力9は大強風(Strong gale, 20.8~24.4m/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。以上を参考に、 $V_{\min}=25\text{m/s}$ とした。この値はF0(17~32m/s)のほぼ中央値に相当する。

なお、1.4.6式の風速の上限については、F4竜巻(93m/s~116m/s)を考慮して、120m/sを積分上限としている。但し、風速110m/s以上ではハザード曲線の傾向が変化する場合があることから、概ね110m/s程度がハザード評価の適用範囲と考えられる。〈参考4参照〉

また、 $H(\alpha)$ 及び $G(\alpha)$ は構造物の投影長さであるが、竜巻影響エリアを円形で設定していることから、直径425mで一定(竜巻の移動方向に依存しない)となる。(補足説明資料5.参照)

ABは先に説明したとおり建物面積ABに依存する項であり、具体的には竜巻影響エリアの面積を表す。

ここで、1.4.6式中の同時確率密度分布 f は、以下の2変量及び3変量の対数正規分布で表される。

$$f(x, y) = \frac{1}{2\pi\sigma_x\sigma_y\sqrt{1-\rho^2}} \frac{1}{xy} \exp \left[-\frac{1}{2(1-\rho^2)} \left\{ \left(\frac{\ln(x)-\mu_x}{\sigma_x} \right)^2 - 2\rho \left(\frac{\ln(x)-\mu_x}{\sigma_x} \right) \left(\frac{\ln(y)-\mu_y}{\sigma_y} \right) + \left(\frac{\ln(y)-\mu_y}{\sigma_y} \right)^2 \right\} \right] \quad (1.4.8 \text{ 式})$$

$$f(x,y,z) = \frac{1}{(2\pi)^{3/2} \begin{vmatrix} \sigma_x^2 & \sigma_x\sigma_y\rho_{xy} & \sigma_x\sigma_z\rho_{xz} \\ \sigma_x\sigma_y\rho_{xy} & \sigma_y^2 & \sigma_y\sigma_z\rho_{yz} \\ \sigma_x\sigma_z\rho_{xz} & \sigma_y\sigma_z\rho_{yz} & \sigma_z^2 \end{vmatrix}^{1/2}} \times \frac{1}{xyz} \times \exp \left[-\frac{1}{2} \begin{pmatrix} \ln(x) - \mu_x & \ln(y) - \mu_y & \ln(z) - \mu_z \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \sigma_x^2 & \sigma_x\sigma_y\rho_{xy} & \sigma_x\sigma_z\rho_{xz} \\ \sigma_x\sigma_y\rho_{xy} & \sigma_y^2 & \sigma_y\sigma_z\rho_{yz} \\ \sigma_x\sigma_z\rho_{xz} & \sigma_y\sigma_z\rho_{yz} & \sigma_z^2 \end{pmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} \ln(x) - \mu_x \\ \ln(y) - \mu_y \\ \ln(z) - \mu_z \end{pmatrix} \right]$$

(1.4.9式)

μ 、 σ 、 ρ は $\ln(x)$ 、 $\ln(y)$ 、 $\ln(z)$ の平均値、標準偏差及び相関係数であり、(5)で求めた竜巻風速、被害幅、被害長さの確率密度分布の平均値、標準偏差ならびに相関係数を用いる。

(8) ハザード曲線

以上より、ハザード曲線の算定結果を図1.4.11に示す。年超過確率 10^{-5} に相当する竜巻風速 V_{B2} は59m/sである。

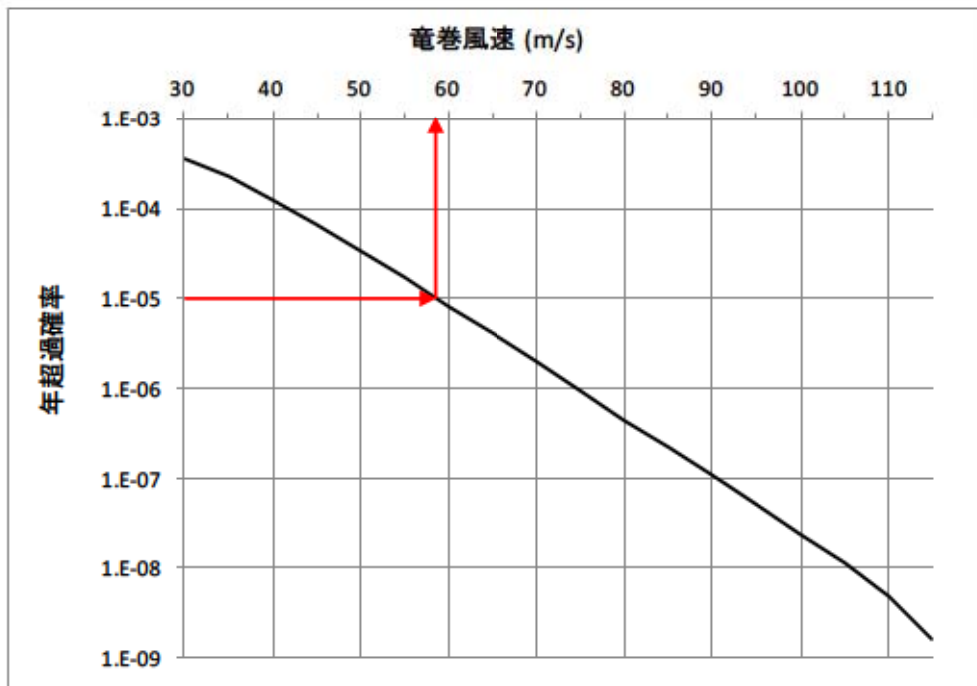


図1.4.11 竜巻最大風速のハザード曲線

(9) 保守性を考慮したハザード曲線の算定

①1km 範囲毎のデータを用いた検討

気象庁の「竜巻等の突風データベース」は1961年以降のデータがデータベース化されているが、先に述べたとおり、観測体制は近年になるほど強化されており、年代により竜巻の発生確認数にばらつきがある。また、泊発電所の竜巻検討地域における発生竜巻は、海上発生でFスケール不明の竜巻が半数以上を占める偏った発生となっている。竜巻発生確認数のばらつきや、発生の偏りがあることから、ハザード曲線に保守性をもたせるために、先に実施した海側、陸側5km範囲内でのハザード曲線の算定に加え、ハザード曲線の検討範囲を1km範囲の短冊状に細かく区切り、竜巻の発生数を発生数に通過数を加えた表1.4.11に示す解析条件で算定を行った。計算条件は表1.4.12に示す。なお、先に実施した海側、陸側5km範囲内でのハザード曲線の算定は、泊発電所の竜巻検討地域における大きい竜巻であるF2竜巻の被害長さの平均値が約2.6km、標準偏差が約3kmであることから、竜巻の特性を適切に考慮出来る方法である。〈参考2参照〉

表1.4.11 保守的なハザード曲線の解析条件

①面積	<ul style="list-style-type: none"> ・ 竜巻検討地域の内、海側、陸側それぞれ5km範囲内を1kmの範囲に分けて検討を行う。 ・ 但し、海側1km以遠の海上竜巻については、全てFスケールが不明であるため、ハザード曲線の算定は不可能。
②竜巻発生数	<ul style="list-style-type: none"> ・ 各1km範囲で発生した竜巻 ・ 各1km範囲からの進入竜巻 ・ 5km以遠からの進入竜巻 ・ 5km範囲内での評価と同様に観測年代の考慮のため観測期間51.5年間の擬似データを作成する。
③竜巻風速、被害幅、被害長さ	<p>(竜巻被害面積期待値)</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ 1kmエリア内での風速、被害幅、被害長さ (相関係数) ・ 5km範囲内での評価に用いたものと同じ
④その他	<ul style="list-style-type: none"> ・ 竜巻風速、被害幅、被害長さの確率密度分布は、ガイドに従い対数正規分布にて推定する。

表 1.4.12 保守的なハザード曲線算定のための計算条件

竜巻検討地域 (1km 毎エリア)	統計量	発生数	風速(U)	幅(W)	長さ(L)	相関係数 LN (検討地域全域)		
		(個)	m/s	m	m	U ~ W	U ~ L	W ~ L
陸側 0~1km	平均値	4.84	29.27	120.1	633	0.000	0.301	0.459
	標準偏差	3.95	9.15	146.7	472			
陸側 1~2km	平均値	2.37	30.76	185.5	944	0.000	0.301	0.459
	標準偏差	2.13	9.44	174.3	1,378			
陸側 2~3km	平均値	2.06	28.97	179.8	790	0.000	0.301	0.459
	標準偏差	1.59	8.65	192.6	331			
陸側 3~4km	平均値	1.24	32.28	214.1	882	0.000	0.301	0.459
	標準偏差	0.95	9.42	224.0	933			
陸側 4~5km	平均値	0.80	34.76	395.1	1,082	0.000	0.301	0.459
	標準偏差	0.94	9.99	257.4	447			
海側 0~1km	平均値	9.67	28.63	91.7	1,512	0.000	0.301	0.459
	標準偏差	5.36	8.69	117.3	2,245			

以上の条件で算定したハザード曲線を、海側、陸側5km範囲内のハザード曲線と併せて図1.4.12に示す。

図1.4.12より、年超過確率 10^{-5} に相当する風速が最も大きく評価されたのは、海側0~1km範囲で65m/sであった。

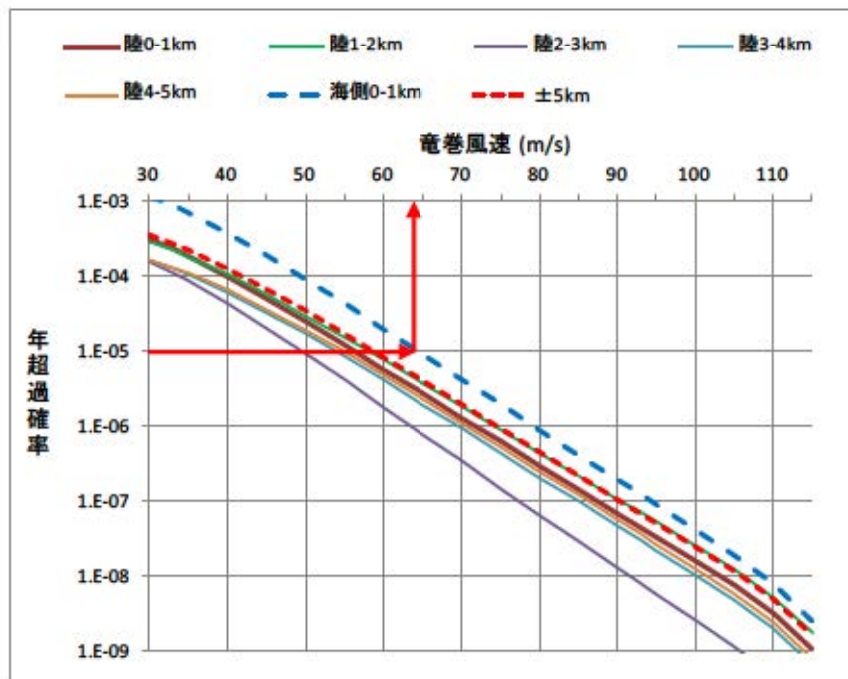


図1.4.12 1km範囲毎のハザード曲線と±5km範囲のハザード曲線

参考に、海側0～1km範囲、陸側0～1km、1～2km、2～3km、3～4km、4～5kmの竜巻発生・通過数を表1.4.13～1.4.18に示す。

表1.4.13 海側0-1km範囲の竜巻発生・通過数

竜巻検討地域 (海0-1km)	発生・通過数の統計	小計	竜巻スケール				不明		総数 (含む不明)
			F0	F1	F2	F3	(陸上)	(海上)	
1961～ 2012/6 (51.5年間)	期間内総数	32	11	14	7	0	10	43	85
	平均値(年)	0.62	0.21	0.27	0.14	0.00	0.19	0.83	1.65
	標準偏差(年)	1.11	0.90	0.53	0.35	0.00	0.63	2.63	3.54
1991～ 2012/6 (21.5年間)	期間内総数	22	11	8	3	0	9	43	74
	平均値(年)	1.02	0.51	0.37	0.14	0.00	0.42	2.00	3.44
	標準偏差(年)	1.53	1.35	0.67	0.36	0.00	0.92	3.83	4.99
2007～ 2012/6 (5.5年間)	期間内総数	12	10	2	0	0	4	36	52
	平均値(年)	2.18	1.82	0.36	0.00	0.00	0.73	6.55	9.45
	標準偏差(年)	2.59	2.38	0.86	0.00	0.00	1.72	5.96	7.73
疑似 51.5年間 (陸上竜巻)	期間内総数	159	94	20	7	0	38	338	497
	平均値(年)	3.05	1.82	0.37	0.14	0.00	0.73	6.55	9.60
	標準偏差(年)	3.03	2.38	0.67	0.35	0.00	1.72	5.96	6.69
疑似 51.5年間 (全竜巻)	期間内総数	498	413	63	22	0	0	0	498
	平均値(年)	9.54	7.96	1.16	0.42	0.00	0.00	0.00	9.54
	標準偏差(年)	5.36	5.19	1.18	0.61	0.00	0.00	0.00	5.36

表1.4.14 陸側0-1km範囲の竜巻発生・通過数

竜巻検討地域 (陸0-1km)	発生・通過数の統計	小計	竜巻スケール				不明		総数 (含む不明)
			F0	F1	F2	F3	(陸上)	(海上)	
1961～ 2012/6 (51.5年間)	期間内総数	61	20	29	12	0	11	0	72
	平均値(年)	1.18	0.39	0.56	0.23	0.00	0.21	0.00	1.40
	標準偏差(年)	1.80	1.38	0.73	0.47	0.00	0.64	0.00	1.96
1991～ 2012/6 (21.5年間)	期間内総数	39	20	16	3	0	10	0	49
	平均値(年)	1.81	0.93	0.74	0.14	0.00	0.47	0.00	2.28
	標準偏差(年)	2.46	2.05	0.78	0.36	0.00	0.92	0.00	2.63
2007～ 2012/6 (5.5年間)	期間内総数	21	17	4	0	0	4	0	25
	平均値(年)	3.82	3.09	0.73	0.00	0.00	0.73	0.00	4.55
	標準偏差(年)	4.32	3.44	1.09	0.00	0.00	1.72	0.00	4.56
疑似 51.5年間 (陸上竜巻)	期間内総数	249	160	39	12	0	38	0	249
	平均値(年)	4.80	3.09	0.74	0.23	0.00	0.73	0.00	4.80
	標準偏差(年)	3.95	3.44	0.78	0.47	0.00	1.72	0.00	3.95
疑似 51.5年間 (全竜巻)	期間内総数	249	198	39	12	0	0	0	0
	平均値(年)	4.80	3.82	0.74	0.23	0.00	0.00	0.00	0.00
	標準偏差(年)	3.95	3.85	0.78	0.47	0.00	0.00	0.00	0.00

表 1.4.15 陸側 1-2km 範囲の竜巻発生・通過数

竜巻検討地域 (陸 1-2km)	発生・通過数 の統計	小計	竜巻スケール				不 明		総数 (含む不明)
			F0	F1	F2	F3	(陸上)	(海上)	
1961～ 2012/6 (51.5年間)	期間内総数	39	11	23	5	0	2	0	41
	平均値 (年)	0.76	0.21	0.45	0.10	0.00	0.04	0.00	0.80
	標準偏差 (年)	1.21	0.78	0.67	0.30	0.00	0.20	0.00	1.22
1991～ 2012/6 (21.5年間)	期間内総数	26	11	13	2	0	1	0	27
	平均値 (年)	1.21	0.51	0.61	0.09	0.00	0.05	0.00	1.26
	標準偏差 (年)	1.64	1.16	0.74	0.30	0.00	0.22	0.00	1.65
2007～ 2012/6 (5.5年間)	期間内総数	13	9	4	0	0	0	0	13
	平均値 (年)	2.36	1.64	0.73	0.00	0.00	0.00	0.00	2.36
	標準偏差 (年)	2.71	1.98	0.86	0.00	0.00	0.00	0.00	2.71
疑似 51.5年間 (陸上竜巻)	期間内総数	122	85	32	5	0	0	0	122
	平均値 (年)	2.34	1.64	0.61	0.10	0.00	0.00	0.00	2.34
	標準偏差 (年)	2.13	1.98	0.74	0.30	0.00	0.00	0.00	2.13
疑似 51.5年間 (全竜巻)	期間内総数	122	85	32	5	0	0	0	122
	平均値 (年)	2.34	1.64	0.61	0.10	0.00	0.00	0.00	2.34
	標準偏差 (年)	2.13	1.98	0.74	0.30	0.00	0.00	0.00	2.13

表1.4.16 陸側2-3km範囲の竜巻発生・通過数

竜巻検討地域 (陸 2-3km)	発生・通過数 の統計	小計	竜巻スケール				不 明		総数 (含む不明)
			F0	F1	F2	F3	(陸上)	(海上)	
1961～ 2012/6 (51.5年間)	期間内総数	29	10	15	4	0	1	0	30
	平均値 (年)	0.56	0.19	0.29	0.08	0.00	0.02	0.00	0.58
	標準偏差 (年)	1.04	0.66	0.58	0.27	0.00	0.14	0.00	1.06
1991～ 2012/6 (21.5年間)	期間内総数	18	10	7	1	0	1	0	19
	平均値 (年)	0.84	0.47	0.33	0.05	0.00	0.05	0.00	0.88
	標準偏差 (年)	1.38	0.97	0.57	0.22	0.00	0.22	0.00	1.41
2007～ 2012/6 (5.5年間)	期間内総数	12	9	3	0	0	0	0	12
	平均値 (年)	2.18	1.64	0.55	0.00	0.00	0.00	0.00	2.18
	標準偏差 (年)	2.22	1.46	0.88	0.00	0.00	0.00	0.00	2.22
疑似 51.5年間 (陸上竜巻)	期間内総数	106	85	17	4	0	0	0	106
	平均値 (年)	2.04	1.64	0.33	0.08	0.00	0.00	0.00	2.04
	標準偏差 (年)	1.59	1.46	0.58	0.27	0.00	0.00	0.00	1.59
疑似 51.5年間 (全竜巻)	期間内総数	106	85	17	4	0	0	0	106
	平均値 (年)	2.04	1.64	0.33	0.08	0.00	0.00	0.00	2.04
	標準偏差 (年)	1.59	1.46	0.58	0.27	0.00	0.00	0.00	1.59

表 1.4.17 陸側 3-4km 範囲の竜巻発生・通過数

竜巻検討地域 (陸 3-4km)	発生・通過数 の統計	小計	竜巻スケール				不 明		総数 (含む不明)
			F0	F1	F2	F3	(陸上)	(海上)	
1961～ 2012/6 (51.5年間)	期間内総数	24	4	18	2	0	1	0	25
	平均値(年)	0.47	0.08	0.35	0.04	0.00	0.02	0.00	0.49
	標準偏差(年)	0.76	0.27	0.66	0.20	0.00	0.14	0.00	0.78
1991～ 2012/6 (21.5年間)	期間内総数	14	4	10	0	0	1	0	15
	平均値(年)	0.65	0.19	0.47	0.00	0.00	0.05	0.00	0.70
	標準偏差(年)	0.91	0.40	0.75	0.00	0.00	0.22	0.00	0.96
2007～ 2012/6 (5.5年間)	期間内総数	8	4	4	0	0	0	0	8
	平均値(年)	1.46	0.73	0.73	0.00	0.00	0.00	0.00	1.46
	標準偏差(年)	1.45	0.55	1.28	0.00	0.00	0.00	0.00	1.45
疑似 51.5年間 (陸上竜巻)	期間内総数	64	38	24	2	0	0	0	64
	平均値(年)	1.23	0.73	0.47	0.04	0.00	0.00	0.00	1.23
	標準偏差(年)	0.95	0.55	0.75	0.20	0.00	0.00	0.00	0.95
疑似 51.5年間 (全竜巻)	期間内総数	64	38	24	2	0	0	0	64
	平均値(年)	1.23	0.73	0.47	0.04	0.00	0.00	0.00	1.23
	標準偏差(年)	0.95	0.55	0.75	0.20	0.00	0.00	0.00	0.95

表1.4.18 陸側4-5km範囲の竜巻発生・通過数

竜巻検討地域 (陸 4-5km)	発生・通過数 の統計	小計	竜巻スケール				不 明		総数 (含む不明)
			F0	F1	F2	F3	(陸上)	(海上)	
1961～ 2012/6 (51.5年間)	期間内総数	19	2	15	2	0	1	0	20
	平均値(年)	0.37	0.04	0.29	0.04	0.00	0.02	0.00	0.39
	標準偏差(年)	0.66	0.20	0.64	0.20	0.00	0.14	0.00	0.69
1991～ 2012/6 (21.5年間)	期間内総数	10	2	8	0	0	1	0	11
	平均値(年)	0.47	0.09	0.37	0.00	0.00	0.05	0.00	0.51
	標準偏差(年)	0.75	0.30	0.74	0.00	0.00	0.22	0.00	0.81
2007～ 2012/6 (5.5年間)	期間内総数	6	2	4	0	0	0	0	6
	平均値(年)	1.09	0.36	0.73	0.00	0.00	0.00	0.00	1.09
	標準偏差(年)	1.16	0.55	1.28	0.00	0.00	0.00	0.00	1.16
疑似 51.5年間 (陸上竜巻)	期間内総数	41	19	20	2	0	0	0	41
	平均値(年)	0.78	0.36	0.37	0.04	0.00	0.00	0.00	0.78
	標準偏差(年)	0.94	0.55	0.74	0.20	0.00	0.00	0.00	0.94
疑似 51.5年間 (全竜巻)	期間内総数	41	19	20	2	0	0	0	41
	平均値(年)	0.78	0.36	0.37	0.04	0.00	0.00	0.00	0.78
	標準偏差(年)	0.94	0.55	0.74	0.20	0.00	0.00	0.00	0.94

②竜巻の被害長さおよび幅を国内全域のデータとした検討

国内全域（沿岸±5km）の竜巻被害長さ・幅の確率分布および相関係数を用い、その他の竜巻計算条件（風速や発生頻度）は、竜巻検討地域のデータを用いてハザード曲線を算定した。泊発電所の竜巻検討地域では、F3（F2～F3、F3）の竜巻が発生していないことから、国内全域のデータからF3を除いた場合についても検討を行った。計算条件を表1.4.19に示す。

表1.4.19 国内全域の竜巻被害長さ・幅考慮のハザード曲線の計算条件

竜巻検討地域 (±5km)	統計量	発生数	風速(V)	幅(W)	長さ(L)	相関係数 LN		
		(個)	m/s	m	m	U ~ W	U ~ L	W ~ L
竜巻検討地域(疑似 51.5 年)	平均値	23.204	29.763	117.729	1572.469	0.0000	0.3013	0.4585
	標準偏差	9.567	9.084	130.847	2679.794			
国内全域(WL)	平均値	23.204	29.763	106.779	1889.184	0.2884	0.4151	0.3998
	標準偏差	9.567	9.084	173.950	2968.306			
国内全域(F3無しWL)	平均値	23.204	29.763	103.673	1805.165	0.2403	0.3690	0.3610
	標準偏差	9.567	9.084	160.752	2549.810			

算定したハザード曲線を、竜巻検討地域の被害長さ・幅の確率分布および相関係数を用いたハザード曲線と併せて図1.4.13に示す。

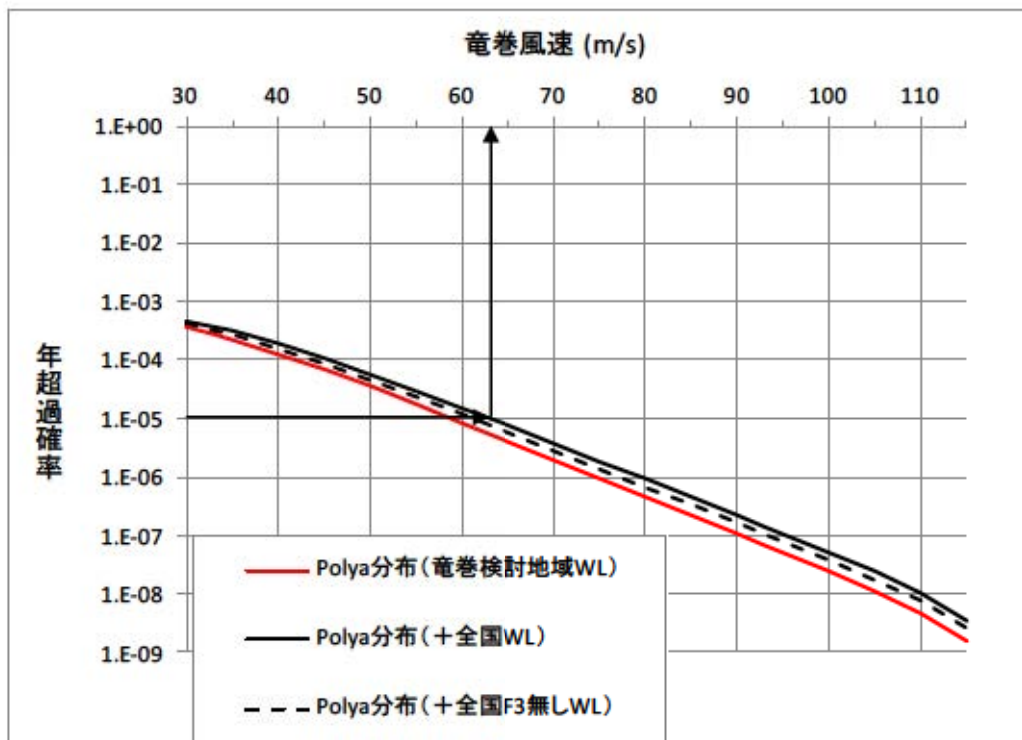


図1.4.13 国内全域WLと竜巻検討地域WLのハザード曲線

(10) 竜巻最大風速のハザード曲線による最大風速(V_{B2})

ハザード曲線の算定結果をまとめて表1.4.20に示す。

以上の検討を実施したが、竜巻発生ハザード曲線の算出にあたっては竜巻発生総観場の特徴を踏まえ、竜巻発生気象条件を観点とした類似地域として設定された竜巻検討地域でのデータを用いて算出するべきであるとする。

これは原子力発電所の竜巻影響評価ガイドにある、データには一貫性を持たせるように配慮するという考え方にも合致している。

したがって、泊発電所の竜巻最大風速ハザード曲線による V_{B2} は、竜巻検討地域のデータを用いて海側・陸側5km範囲のハザード曲線、1km範囲の短冊状に区切って算出したハザード曲線より、風速が最も大きく算出された65m/sとする。

表1.4.20 ハザード曲線の算定結果

ハザード曲線検討範囲	年超過確率 10^{-5} 風速
海側・陸側5km範囲	59m/s
(保守的条件) 海側0~1km範囲	65m/s
(保守的条件) 国内全域WL	63m/s

<参考1> ポリヤ分布について

ポアソン過程は、ランダムに起きる事象を表す基本的な確率過程で、ある一定の時間内の店への来客数や1時間に特定の交差点を通過する車両の台数など様々な現象のモデル化に使われている。式(1)に示すポアソン分布はポアソン過程に関連して発生する。

$$P_T(N) = \frac{(vT)^N}{N!} \exp(-vT) \quad (1)$$

ここで、 N は竜巻の年発生数、 v は竜巻の年平均発生数、 T は年数とする。このように、ポアソン分布では、基本的に年平均発生数のみを考慮して年発生数を表現している。

一方、ポリヤ分布は、 β を分布パラメータとして、以下の式で表される (Wen and Chu 1973)。

$$P_T(N) = \frac{(vT)^N}{N!} (1 + \beta vT)^{-(N+1/\beta)} \prod_{k=1}^{N-1} (1 + \beta k) \quad (2)$$

$$\beta = \left(\frac{\sigma^2}{v} - 1 \right) \times \frac{1}{v} \quad (3)$$

ここに、 σ は竜巻の年発生数の標準偏差である。 β を限りなくゼロに近づけるとポアソン分布に近づく。そのため、ポリヤ分布は年発生数の変動を考慮できるようにポアソン分布を拡張したものと解釈できる。

Thom(1963)は、米国中部を対象とした分析を行い、ポアソン過程が実態と乖離する場合があると指摘した。その上で、ポリヤ分布による適合性が高いことを示した。Wen and Chu(1973)は、この文献を引用するとともに、一つのストームで複数の竜巻が発生する (Tornado Outbreakと呼ばれる) 事象はよく起こるため、年発生数の平均値だけでなく、時間変動を考慮するポリヤ分布の方がより適合性が高くなると述べている。ポリヤ分布は、極めて稀にしか起きない事象に対して弱い伝播性 (ある事象が生ずるとその周囲にもその事象が生じやすくなる性質) が考慮されており、これもTornado Outbreakのような事象への表現性が高まることにつながっているものと考えられる。

国内を対象とした分布の適合性に関する検討結果は、東京工芸大学委託成果では、ポアソン分布よりもポリヤ分布の適合性が良いと示されている。

参考に、海側、陸側5km範囲内でのポアソン分布を適合させた竜巻の年発生数を参考図1.1、ポアソン分布による竜巻最大風速のハザード曲線をポリヤ分布によるものと比較する形で参考図1.2に示す。今回の算定では、ポアソン分布とポリヤ分布でほとんど差異が見られなかった。

この理由について、確率論から説明する。

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。

$$(\text{被害を受けない確率}) = 1 - R(V_0) \quad (4)$$

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（独立性を仮定する）。

$$(N\text{個の竜巻で被害を受けない確率}) = [1 - R(V_0)]^N \quad (5)$$

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。

$$(N\text{個のいずれかの竜巻で被害を受ける確率}) = 1 - [1 - R(V_0)]^N \quad (6)$$

従って、1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、

$$\{1 - [1 - R(V_0)]^N\} P(N) \quad (7)$$

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。

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

ここで、次の近似を用いている。

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

竜巻被害の場合、 $R(V_0)$ は十分小さいため（泊発電所の竜巻検討地域では最大で 10^{-5} 程度）であるから、式(9)の近似は非常に良い精度で成り立つ。

以上のことから、式(8)より、1年間にいずれかの竜巻により被害を受ける確率は次式で近似できる。

$$P_{V_0}(D) \approx \sum_{N=1}^{\infty} [R(V_0) \times N \times P(N)] = R(V_0) \sum_{N=1}^{\infty} [N \times P(N)] = \nu R(V_0) \quad (10)$$

従って、被害確率は竜巻発生数の平均値 ν のみに依存し、標準偏差はもちろん、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と言える。

さらに、 $P(N)$ としてポアソン分布またはポリヤ分布を仮定し確認する。

式(7)の $P(N)$ をポアソン分布と仮定し、

$$\begin{aligned} \{1 - [1 - R(V_0)]^N\} P(N) &= P(N) - [1 - R(V_0)]^N P(N) \\ &= P(N) - [1 - R(V_0)]^N \frac{\nu^N}{N!} \exp(-\nu) = P(N) - \frac{(\nu - \nu R(V_0))^N}{N!} \exp(-\nu) \end{aligned} \quad (11)$$

となることを考慮すると、式(10)の厳密な式は式(12)となる。

$$\begin{aligned} P_{V_0}(D) &= \sum_{N=1}^{\infty} \left\{ P(N) - \frac{(\nu - \nu R(V_0))^N}{N!} \exp(-\nu) \right\} \\ &= 1 - \exp(\nu - \nu R(V_0)) \exp(-\nu) \\ &= 1 - \exp(-\nu R(V_0)) \end{aligned} \quad (12)$$

ここで、次の関係式を用いている。

$$\exp(x) = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{x^n}{n!} \quad (13)$$

式(12)はWen and Chuの推定法における、竜巻の年発生数の確率分布をポアソン分布とした場合、 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、 $P_{V_0,T}(D)$ に一致する。

$$P_{V_0,T}(D) = 1 - \exp[-\nu R(V_0)T] \quad (14)$$

従って、式(12) (あるいは式(14)) は

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

と表され、 $R(V_0)$ が小さい場合は、次式で近似できる。

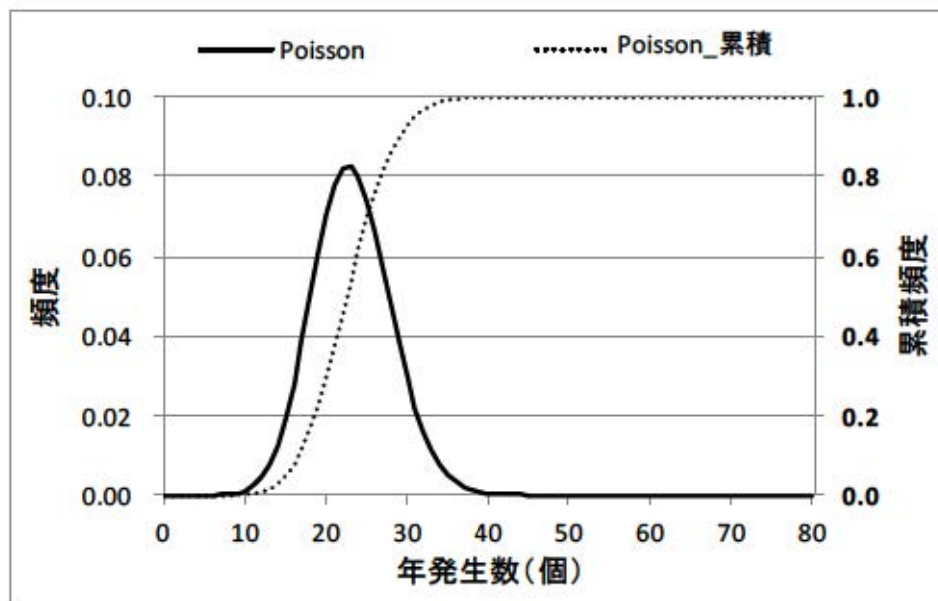
$$P_{V_0}(D) \approx \nu R(V_0) \quad (16)$$

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。

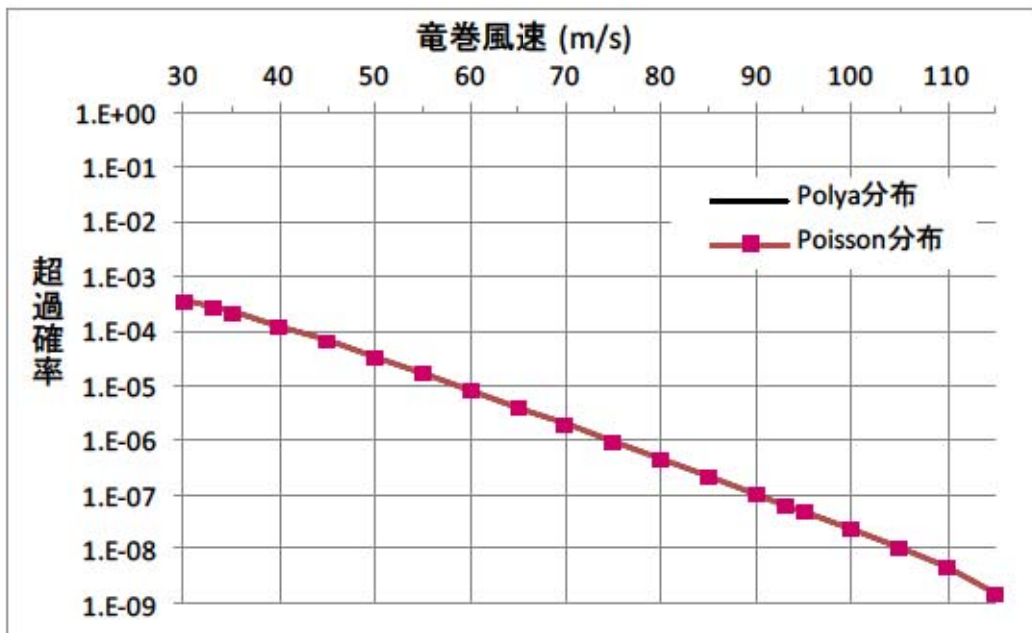
$$P_{V_0}(D) = 1 - [1 + \beta \nu R(V_0)]^{-1/\beta} = 1 - \left(1 + \left(\frac{-1}{\beta}\right) \beta \nu R(V_0) + \dots\right) \quad (17)$$

$$\approx \nu R(V_0)$$

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、発生数の確率分布形状にはほとんど無関係であると言える。



参考図 1.1 竜巻の年発生数をポアソン分布で適合させた結果



参考図 1.2 ポリヤ分布とポアソン分布によるハザード曲線

<参考2>ハザード曲線を求めるための確率的な竜巻モデルについて

竜巻最大風速のハザード曲線は、「原子力発電所の竜巻影響評価ガイド」が推奨している「構造物が竜巻に遭遇し、かつ竜巻がある風速以上になる確率モデルの推定法」として Wen and Chu(1973)および Garson et al. (1975)の提案手法を用いて算出している。

この推定法では、ハザード曲線は、竜巻による被害面積の期待値を基に算出され、面積期待値は、全ての竜巻風速、被害長さ、被害幅、竜巻の移動方向を考慮し、それらの出現頻度から計算される。

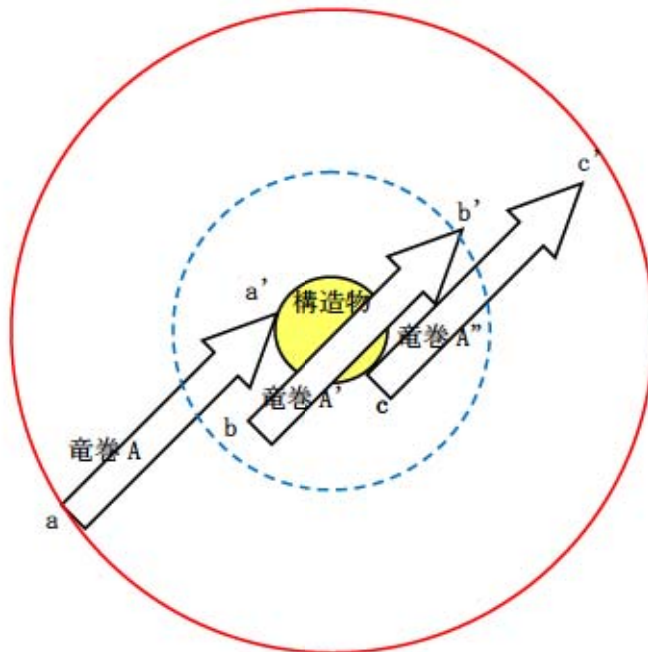
構造物を襲う竜巻の特性（Fスケール、被害長さL1、被害幅W1、移動方向）は等しいが、発生・消滅地点が異なる3つの竜巻（A、A'、A''）を考える。それぞれの竜巻の発生、消滅地点は、参考図2.1に示すとおり、竜巻Aはa点で発生し、ちょうど構造物にかかるa'点で消滅、竜巻A'はb点で発生し、b'点で消滅、竜巻A''はc点で発生、c'点で消滅しているとする。

竜巻A、A'、A''は同じ竜巻特性を有しているため、同一の構造物を襲う場合、同じ被害を与えるため、その被害面積は式(1)で評価される。

$$\text{(被害長さL1)} \times \text{(構造物幅)} \quad (1)$$

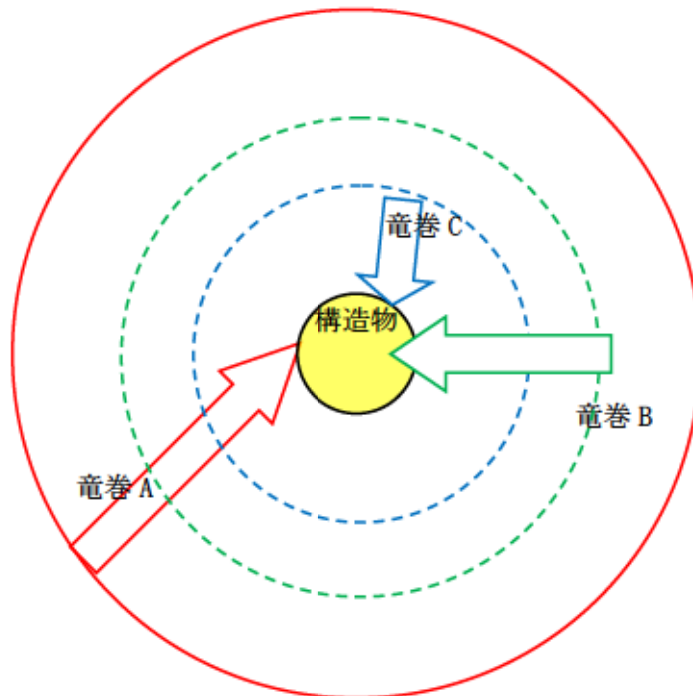
このことは、少なくとも、最も構造物から離れた地点で発生している竜巻Aの被害長さL1の円内（赤丸）では竜巻の発生数や特性は同一でなければ、正しく竜巻の特性を反映した被害面積を算定できないことを示している。

例えば、参考図2.1の青点線丸の範囲内で、同一の構造物を襲う場合の被害面積の期待値を算定すると仮定すると、竜巻Aが発生しておらず、発生数は3個から2個へ減少、モデルの中では、竜巻A、竜巻A'、竜巻A''の被害長さを考慮することになり、場を代表している算定を行っていると言えない。



参考図2.1 確率的な竜巻モデルの概念図 (その1)

次に竜巻AとFスケールおよび被害幅は等しいが、被害長さ、移動方向が異なる竜巻B、Cを考えるその概念図を参考図2.2に示す。



参考図2.2 確率的な竜巻モデルの概念図 (その2)

竜巻B、竜巻Cについても、竜巻Aの場合と同様に、ハザード曲線に用いる被害面積を正しく求めるためには、竜巻Bと同一の特性をもつ竜巻は緑点線の円、竜巻Cと同一の特性をもつ竜巻は青点線の円の範囲で発生数や特性は同一とした評価を行わなければならない。つまり、竜巻の被害長さは様々であり、竜巻の発生数や特性を同一と考えなければならない範囲も様々であることを示している。

被害面積の期待値を求めるモデル式においても、長短様々な被害長さを有する竜巻を考えており、均一的な竜巻特性を持つ無限に広い領域を想定している。逆に、上記で説明したように、十分広い領域を想定しなければ、様々な被害長さの竜巻特性を正確に考慮することができない。また、ある領域内（竜巻検討地域内）で算定した竜巻風速、被害長さ、被害幅の確率密度分布が無限に広い領域で均一であると考えられるからこそ、（実際には竜巻検討地域では観測されていない）長い被害長さを有するF3～F5クラスの竜巻が竜巻検討地域内外から構造物に襲来することを確率論的に考慮できるのである。

このように、本推定法により被害面積の期待値を理論的に正しく算定するためには、発電所を中心とした十分広い範囲で考える必要がある。

泊発電所の竜巻検討地域における大きい竜巻であるF2竜巻の被害長さの平均値は約2.6km、標準偏差が約3kmであるため、竜巻検討地域を考えている海岸線から陸側、海側5kmの範囲内で、被害面積を求めることは妥当である。

<参考文献>

Thom, H. C. S., 1963: Tornado probabilities. Mon. Wea. Rev., 91, 730-736.

Sukhatme, B. V., 1957: On certain two-sample nonparametric tests for variances. Ann. Math. Statist. 28, 188-194.

Wen, Y.-K., and S.-L. Chu, 1973: Tornado risks and design wind speed. J. Structural Div., Proc. of Amer. Soc. Civil Eng., 99, 2409-2412.

東京工芸大学, 2011: 竜巻による原子力施設への影響に関する調査研究. 平成21~22年度原子力安全基盤調査研究(平成22年度), 独立行政法人原子力安全基盤機構委託研究報告書, 424pp.

<参考3>ハザード曲線の算出において、風速と被害幅の相関を0としていることの妥当性、及び、統計処理方法について

泊発電所の竜巻検討地域（日本海側+北海道南西）の竜巻パラメータのうち、風速と竜巻被害幅の相関は弱い負の相関（-0.057）を示している。

（1）相関の算定法の妥当性について

原子力発電所の竜巻影響評価ガイド（以下、竜巻評価ガイド）の解説3.3.2 竜巻最大風速のハザード曲線を用いた最大風速（ V_{B2} ）の算定には、「竜巻による被害域幅、被害域長さ及び移動方向は、竜巻検討地域で過去に発生した竜巻の記録に基づいて対数正規分布等を仮定して設定することを基本とする。」とある。

また、東京工芸大学委託成果にも、「3変量対数正規分布によって評価することが妥当である」と記載されている。

上記の前提を元に、竜巻ハザードの計算においては、以下に示す2変量および3変量の対数正規分布を用いている。

$$f(x,y) = \frac{1}{2\pi\sigma_x\sigma_y\sqrt{1-\rho^2}} \frac{1}{xy} \exp \left[-\frac{1}{2(1-\rho^2)} \left\{ \left(\frac{\ln(x)-\mu_x}{\sigma_x} \right)^2 - 2\rho \left(\frac{\ln(x)-\mu_x}{\sigma_x} \right) \left(\frac{\ln(y)-\mu_y}{\sigma_y} \right) + \left(\frac{\ln(y)-\mu_y}{\sigma_y} \right)^2 \right\} \right]$$

$$f(x,y,z) = \frac{1}{(2\pi)^{3/2} \left| \begin{array}{ccc} \sigma_x^2 & \sigma_x\sigma_y\rho_{xy} & \sigma_x\sigma_z\rho_{xz} \\ \sigma_x\sigma_y\rho_{xy} & \sigma_y^2 & \sigma_y\sigma_z\rho_{yz} \\ \sigma_x\sigma_z\rho_{xz} & \sigma_y\sigma_z\rho_{yz} & \sigma_z^2 \end{array} \right|^{1/2}} \times \frac{1}{xyz} \times \exp \left[-\frac{1}{2} \begin{pmatrix} \ln(x)-\mu_x & \ln(y)-\mu_y & \ln(z)-\mu_z \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \sigma_x^2 & \sigma_x\sigma_y\rho_{xy} & \sigma_x\sigma_z\rho_{xz} \\ \sigma_x\sigma_y\rho_{xy} & \sigma_y^2 & \sigma_y\sigma_z\rho_{yz} \\ \sigma_x\sigma_z\rho_{xz} & \sigma_y\sigma_z\rho_{yz} & \sigma_z^2 \end{pmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} \ln(x)-\mu_x \\ \ln(y)-\mu_y \\ \ln(z)-\mu_z \end{pmatrix} \right]$$

ここに、 μ 、 σ 、 ρ は $\ln(x)$ 、 $\ln(y)$ 、 $\ln(z)$ の平均値、標準偏差および相関係数である。

多変量の相関の強さを調べる方法としては、母集団が正規分布することを仮定したパラメトリックな積率相関係数と、分布形や直線関係などを仮定しないノンパラメトリックな順位相関係数があるが、前述のように対数正規分布による評価を行うためには、パラメトリックな積率相関係数を用いて評価することが妥当であると考えられる。

（2）風速と被害幅の相関係数を0としたことの妥当性について

例えば、3変量の相関係数を推定する場合、これら3つが同時に観測されているデータを用いるのが望ましい。本竜巻検討地域では、206個の竜巻が観測されているが、Fスケールや長さ・幅が不明な竜巻も多い。そこで、解析に必要なデータ数を確保するため、1961年以降の利用可能なデータを全て用いて次式により相関係数を求めた。

$$\rho_{xy} = \frac{\sum (\log(x_i) - \mu_x)(\log(y_i) - \mu_y)}{\sqrt{\sum (\log(x_i) - \mu_x)^2 \sum (\log(y_i) - \mu_y)^2}}$$

解析に用いたデータ数を参考表3.1(a)に、相関係数の推定結果を参考表3.1(b)に示す。また、相関係数を求めた際の風速・幅・長さの散布図を参考図3.1に示す。なお、突風データベースの幅や長さには、値が0mと記されたデータもあるが、これらは解析からは除外し、保守性を確保した。

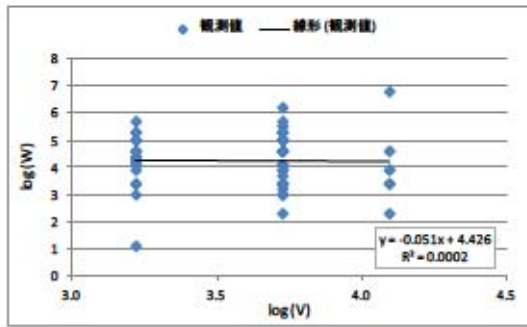
相関係数の計算に利用できるデータは観測数の1/3程度（62～69個）である。風速と幅の相関は-0.057と負値となっている。

参考表3.1(a) 相関の算定に用いたデータ数

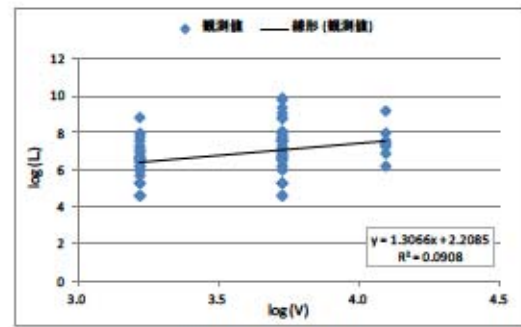
データ数	風速	幅	長さ
風速	90	64	69
幅	—	67	62
長さ	—	—	70

参考表3.1(b) 相関係数の算定結果

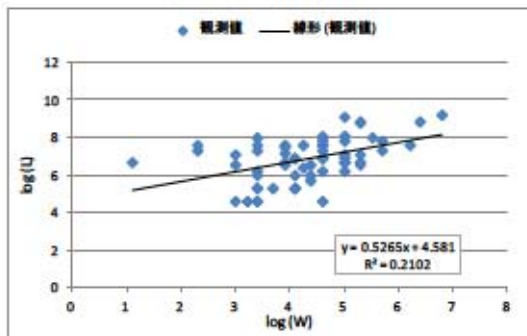
対数の相関係数	風速	幅	長さ
風速	1.000	-0.057	0.301
幅	—	1.000	0.458
長さ	—	—	1.000



(a) 風速～幅



(b) 風速～長さ



(c) 幅～長さ

参考図3.1 本竜巻検討地域の相関係数

この風速と被害幅の相関係数、すなわち、積率相関係数を0とすることの妥当性を検定を行うことにより、確認する。

前述のとおり、±5kmの竜巻データ206個のうち、Fスケールと竜巻被害幅の両方が分かっているデータ64個を対象に、積率相関係数を求めると $r = -0.057$ であった。このデータに関して、母相関係数が0であるかどうかを検定する。

母相関係数が0であるという帰無仮説を立てる。検定統計量は次式で表される。

$$t_0 = \frac{|r|\sqrt{n-2}}{\sqrt{1-r^2}} = 0.4503$$

有意確率を $P = \Pr\{|t| \geq t_0\}$ とすると、t分布の両側確率は、

$$P = \Pr\{|t| \geq 0.4503\} = 0.6540$$

となる。自由度62のt分布において、

$$\Pr\{|t| \geq 1.9990\} = 0.05$$

であるから、

$$P = \Pr\{|t| \geq 0.4503\} = 0.6540 > 0.05$$

となる。有意水準5%で検定を行うとすると、 $P > 0.05$ であるから、帰無仮説を採択する。

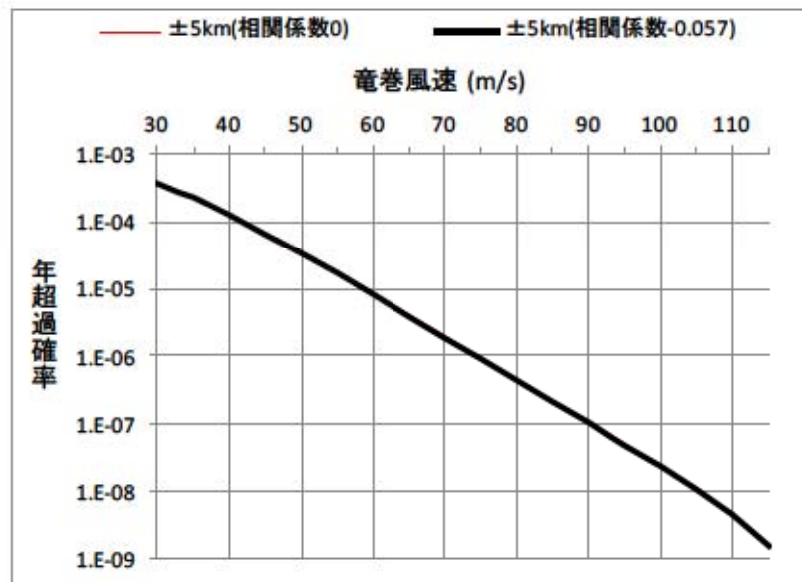
即ち、母相関係数は0で無いとは言えない。

つまり、本相関係数 $r=-0.057$ を無相関とすることは否定されない。

負の相関は、風速が大きくなるほど竜巻の被害幅が狭くなることを意味する。よって、負の相関をそのまま使用することはせず、実際のハザードの計算では無相関（相関係数=0）とおき、保守性を確保した。

参考表3.2 相関係数によるハザード推定結果比較

竜巻検討地域	超過確率 (Polya) に対応する風速				
	1. E-04	1. E-05	1. E-06	1. E-07	1. E-08
±5km (相関係数0)	41.82	58.70	74.49	90.27	105.60
±5km (相関係数-0.057)	41.68	58.53	74.31	90.08	105.43



参考図3.2 相関係数によるハザード曲線の比較

<参考 4>竜巻風速の積分範囲（～120m/s）について

竜巻ハザードの計算では、下記の式を数値積分して、一つの竜巻が発生したときに、風速 V_0 以上となる被害面積の期待値を求める。風速に関しては、 $V_0 \sim \infty$ までが積分範囲（ V_0 以上の超過確率）であるが、実際には無限大まで積分できないため、ある風速（ V_{\max} ）で打ち切らざるを得ない。その場合、 $V_{\max} \sim \infty$ の超過確率が打ち切りに伴う誤差になる。

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

東京工芸大成果では、この積分の打ち切り風速をF3の上限（92.6m/s）とした場合と、F4の上限（116.2m/s）とした場合のハザードが比較されている（参考図4.1参照）。参考図4.1から分かるように、打ち切り風速により、高風速域でのハザードに違いが見られる。

東京工芸大成果では、日本で発生する竜巻の風速が100m/s程度と見積もり、積分の上限も100m/s程度が妥当であろうとしている。一方、米国のガイドによる風速を踏まえ、日本で起こりうる竜巻最大風速を103m/sと想定し、積分の上限を92.5m/sとした場合と116.2m/sとした場合のハザードの竜巻風速を加重平均している（参考図4.2参照）。

一方で、大きな打ち切り風速を設定すると、数値積分上の誤差が蓄積し、ハザードの推定精度に影響を及ぼすことが懸念される。

ここで、風速の対数正規分布の超過確率評価における積分精度を確認するために、現行評価の計算結果と別の計算手法を用いた計算結果との比較を行うことで、現行評価手法の妥当性を確認した。現行評価では超過確率を求めるために、積分手法として一般的に用いられる台形公式を使用した数値積分を行っている。また、対数正規分布の積分式は、数学的手法により特定の関数形に置換することで近似解が得られることから、精度確認の比較計算として、この近似解を求める計算を行った。両計算によって得られる超過確率の比較を行うことで、現行評価の積分精度に問題がないことを確認している。（参考図4.3参照）

参考図4.3より、風速の対数正規分布（風速のみの1次元分布）は、120m/s程度までは正確に積分できることを確認した上で、ハザードの積分の上限を120m/sに設定し、110～115m/s程度までのハザードを評価対象とした。

竜巻影響評価ガイドでは、「竜巻最大風速の確率密度分布の積分の上限値を設定する場合は、竜巻最大風速の評価を行うハザード曲線が不自然な形状にならないように留意する」と記されているが、本検討で得られたハザード曲線は、参考図4.1に示されたような問題点はほとんど無いものと考えられる。

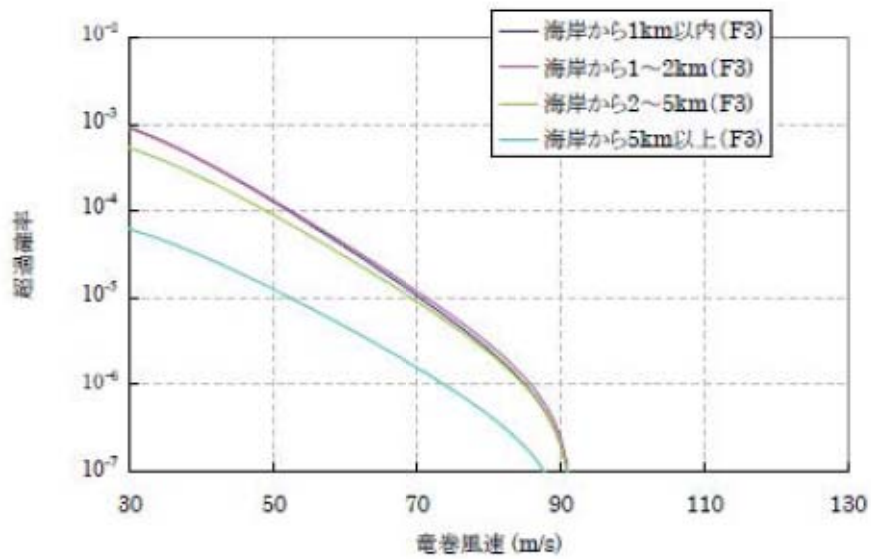


図 2.1.2.14 電巻風速の確率密度の積分の上限を 92.6m/s (F3 の上限値) にした場合の電巻リスクの計算結果 (全国平均)

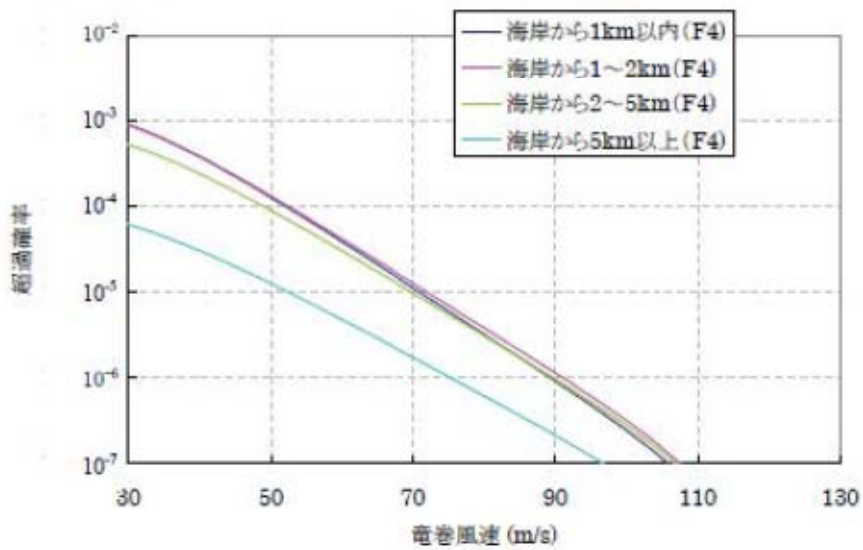


図 2.1.2.15 電巻風速の確率密度の積分の上限を 116.2m/s (F4 の上限値) にした場合の電巻リスクの計算結果 (全国平均)

気象庁の突風データベースに残されている最大の竜巻は F3 である。しかし、1990 年 12 月 11 日に千葉県茂原市で発生した竜巻の最大竜巻風速は 100m/s と予想され、F4 と判定すべきではないかという見解もある。そのため、本節で示した竜巻リスクの計算を行う場合、竜巻風速の確率密度分布を積分する上限値も 100m/s 程度にするのが妥当と思われる。

一方、米国の Regulatory Guide [12]では、超過確率が 10^{-7} に相当する竜巻風速を原子力施設のガイドラインとして設定しており、その値は下記の通りである。

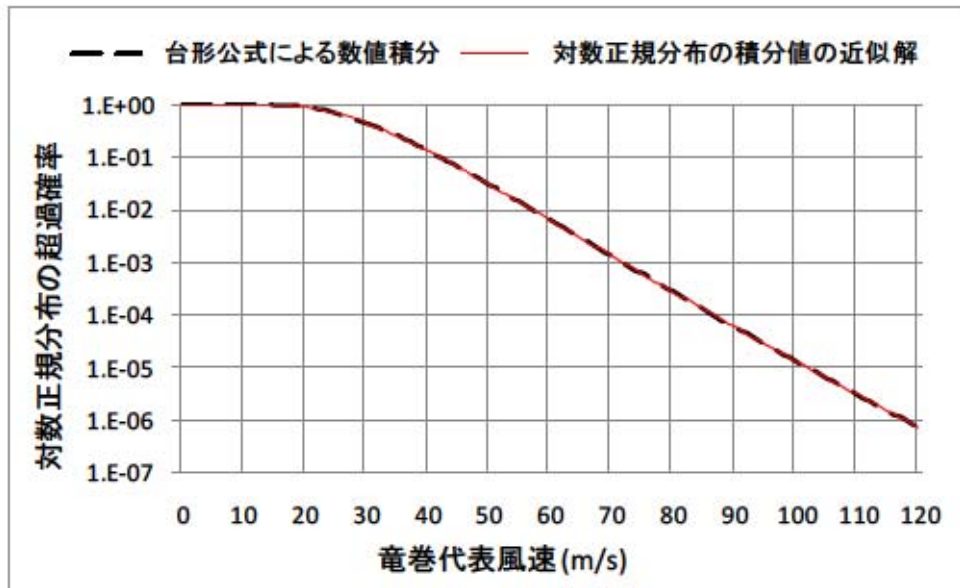
- i) Region I (アメリカ中央部) : 103m/s (230mph)
- ii) Region II (東海岸、北部国境およびグレートプレーンズの西部) : 89m/s (200mph)
- iii) Region III (合衆国西部) : 72m/s (160mph)

米国の Regulatory Guide [12]に設定されている竜巻風速は、Region I では F4 に相当し、Region II および Region III では F3 に相当する。

この傾向を踏まえ、日本で起こりうる竜巻風速の最大値を 103m/s と想定し、竜巻風速の確率密度分布を積分する上限を 92.5m/s とした場合と 116.2m/s とした場合の竜巻風速を加重平均化した。そうして計算した超過確率が 10^{-5} 、 10^{-6} 、および 10^{-7} に相当する竜巻風速（全国平均）を表 2.1.2.22 および図 2.1.2.20 に示す。Regulatory Guide と同じ超過確率が 10^{-7} に相当する竜巻風速は、海岸から 5km 以内の陸地では 98m/s 程度で海岸から 5km 以上離れた陸地では 91m/s となり、米国の場合と大きな違いが見られない結果となっている。

図 2.1.2.1 に示した 7 個の地域の場合も、発生しうる最大の竜巻風速が 103m/s を想定した場合の超過確率が 10^{-5} 、 10^{-6} 、および 10^{-7} に相当する竜巻風速を、加重平均によって計算した。その結果を表 2.1.2.23 および図 2.1.2.21 に示す。海岸から 5km 以内の地域では、地域④の一部と地域⑤を除いて全て F4 の竜巻に相当する風速である。前述したように、地域④と地域⑤では人口密度が小さいため竜巻の単位面積あたりの観測数が実際よりも小さい可能性がある。その点を考慮すると、海岸から 5km 以内の超過確率が 10^{-7} に相当する竜巻風速は日本全国全ての地域で 100m/s 程度になると思われる。海岸から 5km 以上離れた地域では、地域に関係なく 10^{-7} に相当する竜巻風速は 80 から 90m/s である。

図 2.1.2.2 に示した 19 個の地域では、竜巻の発生頻度が顕著に高くなっている（図 2.1.2.5）。この 19 個の地域の 92.5m/s と 116.2m/s を積分の上限とした場合の竜巻リスクを計算した。その結果から超過確率が 10^{-5} 、 10^{-6} 、および 10^{-7} に相当する竜巻風速を取り出し、上記と同様の加重平均化した竜巻風速を計算した。その結果を表 2.1.2.24～表 2.1.2.26 および図 2.1.2.22～図 2.1.2.24 に示す。図 2.1.2.1 に示した 7 個の地域に分けた場合に比べて、図 2.1.2.2 に示した 19 個の地域の竜巻風速が大きくなる傾向にある。その傾向は超過確率が 10^{-6} と 10^{-5} の場合に、よりはっきりと表れている。特に、高知県南部 (②-2)、静岡県 (③-3)、北海道南部 (④-1)、鳥取県の一部 (⑤-4)、秋田県 (⑦-2) の海岸地域のリスクは高い傾向にある。



参考図4.3 風速の確率分布の積分精度の検証（近似解との比較）

1.5 基準竜巻の最大風速(V_B)の設定

これまでに評価した、竜巻の最大風速の結果は以下のとおり。

- (1) 過去に発生した竜巻による最大風速(V_{B1}) ⇒ 92m/s
- (2) 竜巻最大風速のハザード曲線による最大風速(V_{B2})⇒ 65m/s

竜巻影響評価ガイドに従い、基準竜巻の最大風速(V_B)は V_{B1} と V_{B2} のうち大きい方とし、92m/s とする。

基準竜巻の最大風速(V_B) 92 m/s
--

なお、1.4 で求めたハザード曲線より、基準竜巻の最大風速 92m/s の年超過確率を求めると、約 1.4×10^{-7} /年となる。

2. 相関係数の算出及び検定方法について

相関係数の算出及び相関係数の検定方法は、下記のとおりである。

i) 相関係数の算出

$$r = \frac{\sum(x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum(x_i - \bar{x})^2} \cdot \sqrt{\sum(y_i - \bar{y})^2}} \quad (1 \text{ 式})$$

r	: 相関係数
$\sum(x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})$: 資料 x と資料 y の共分散
$\sum(x_i - \bar{x})^2$: 資料 x の分散
$\sum(y_i - \bar{y})^2$: 資料 y の分散
x, y	: 地域区分 (16 区分)
i	: 総観場 (21 種類)

ii) 相関係数の検定方法 (無相関検定)

母集団の相関係数 ($\rho = 0$) を帰無仮説として、相関係数 r を用いて以下の統計量を計算したとき、この値は自由度 $n-2$ (n は標本数) の t 分布に従うことが知られている。

$$t = \frac{r\sqrt{n-2}}{\sqrt{1-r^2}} \quad (2 \text{ 式})$$

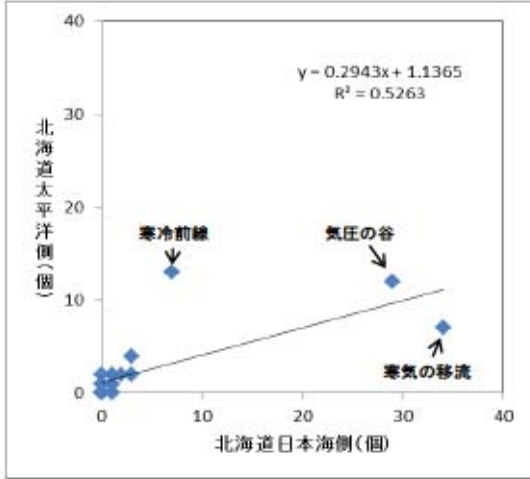
有意水準 α のときの t 値を t_α とすれば、そのときの相関係数 r_α は次式で与えられる。

$$r_\alpha = \frac{t_\alpha}{\sqrt{n-2+t_\alpha^2}} \quad (3 \text{ 式})$$

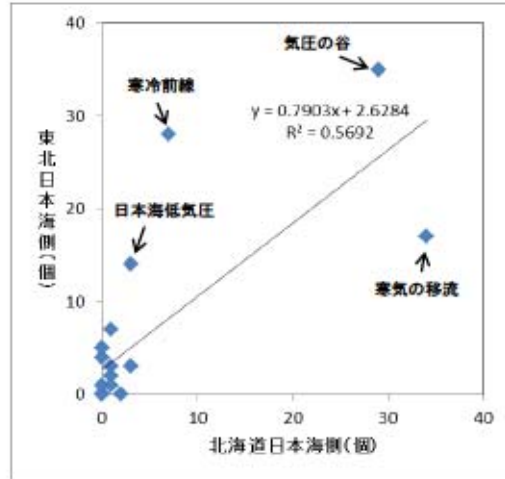
有意水準 $\alpha = 0.01$ (1%) としたとき、 $r > r_{0.01}$ であれば、「母集団の相関係数 ($\rho = 0$) の仮説」が棄却され、危険率 1% で有意な相関があるといえる (無相関であるという仮説は棄却せざるを得ない)。

3. 総観場の分布図

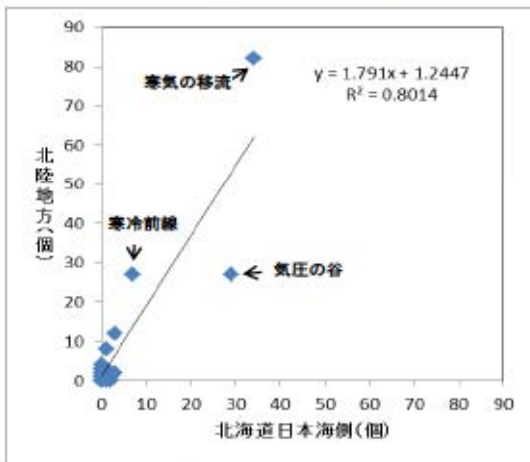
(1) 相関の優位性が認められた地域の分布図



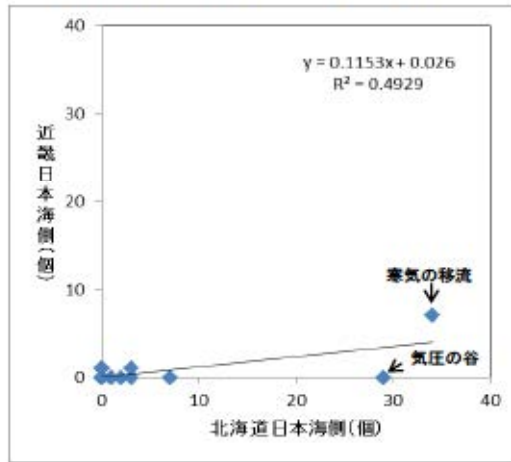
(北海道日本海側⇔北海道太平洋側)



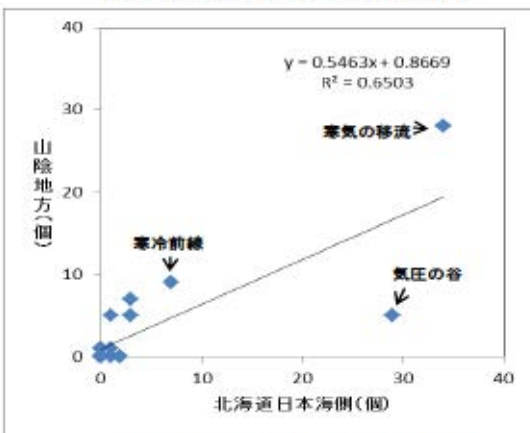
(北海道日本海側⇔東北日本海側)



(北海道日本海側⇔北陸地方)

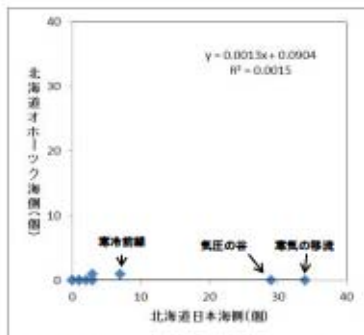


(北海道日本海側⇔近畿日本海側)

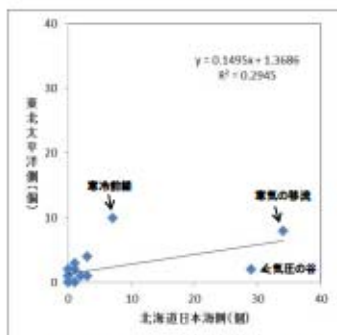


(北海道日本海側⇔山陰地方)

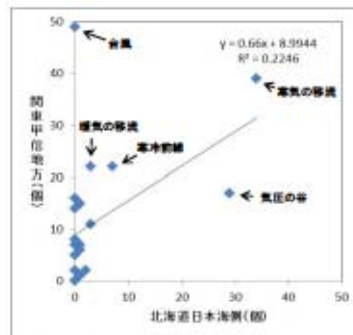
(2) 相関の優位性が認められない地域の分布図



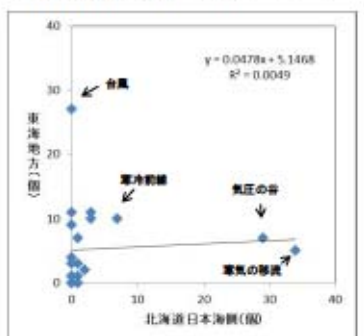
(北海道日本海⇄オホーツク)



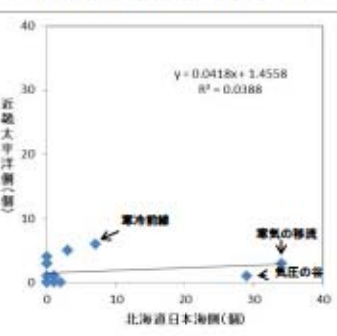
(北海道日本海⇄東北太平洋)



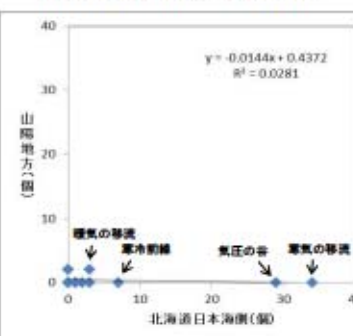
(北海道日本海⇄関東甲信)



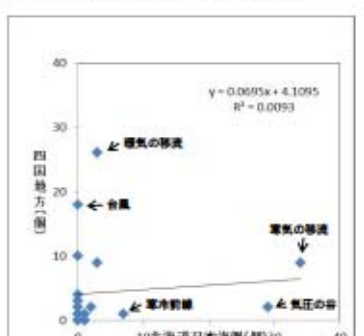
(北海道日本海⇄東海地方)



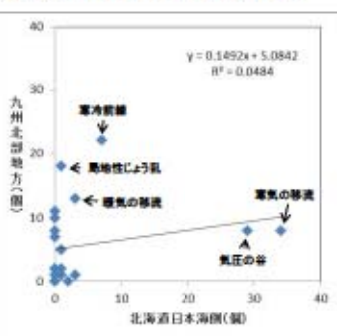
(北海道日本海⇄近畿太平洋)



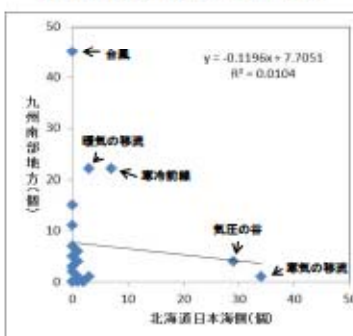
(北海道日本海⇄山陽地方)



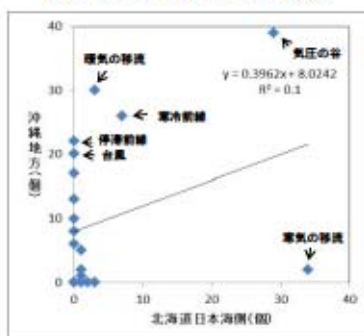
(北海道日本海⇄四国地方)



(北海道日本海⇄九州北部)



(北海道日本海⇄九州南部)



(北海道日本海⇄沖縄地方)

4. 襟裳岬から東側の海岸線等における竜巻発生数

- ・ 襟裳岬から知床半島までの海岸線における竜巻の発生実績

番号	発生日時	発生場所	藤田スケール
1	1969/10/11 09:25	北海道根室支庁(海上)	不明

- ・ 竜飛岬までの陸奥湾西側海岸線における竜巻の発生実績

番号	発生日時	発生場所	藤田スケール
1	1966/10/05 16:02	青森県 青森市	—

※詳細な発生場所データがないことから、海岸線 10km 範囲での発生かどうか不明。

(出典：気象庁 HP 竜巻等の突風データベース (2013 年 9 月))

5. 円形構造物に対する竜巻移動方向の依存性について

原子力発電所の竜巻影響評価ガイドでは、竜巻の移動方向を考慮するよう求めている。竜巻移動方向と、竜巻風速、長さ、幅に相関がない場合には、竜巻の移動方向を α 、移動方向の確率分布を $p(\alpha)$ 、建物寸法を A、B とすると、例えば、1 個の竜巻の風速が V_0 以上となる面積の期待値 $E[DA(V_0)]$ に関する式の、第 2 項内の方向に関する項は、以下で与えられる。

$$\int_0^{2\pi} H(\alpha) p(\alpha) d\alpha = \int_0^{2\pi} (B|\sin(\alpha)| + A|\cos(\alpha)|) p(\alpha) d\alpha \quad (1 \text{ 式})$$

ここで、建物を直径 D の円形構造物と考える。円形構造物の場合、被害域長さ方向に沿った面への構造物の投影長さ $H(\alpha)$ は、次式で与えられる。

$$H(\alpha) = D \quad (2 \text{ 式})$$

即ち、竜巻の移動方向によらず常に定数となる。従って、1 式も定数となり、竜巻移動方向がどのような分布形でも方向依存性は生じない。これは、下記 3 式より、移動方向の確率分布 $p(\alpha)$ を 2π まで積分した場合に 1 となることから説明できる。

$$\int_0^{2\pi} H(\alpha) p(\alpha) d\alpha = D \int_0^{2\pi} p(\alpha) d\alpha = D \quad (3 \text{ 式})$$

以上のことは、 $E[DA(V_0)]$ に関する式の第 3 項の $G(\alpha)$ についても成り立つ。

6. 竜巻発生個数の補正方法の妥当性について

ハザード曲線の評価にあたっては、竜巻発生個数は、気象庁の各年代の調査業務の精度の違いを考慮し、各年代の発生数と観測期間を基に補正を行っている。補正結果を表1に示す。

各年代の竜巻調査方法の特徴は以下のとおりであり、1991年と2007年を基点に2度にわたり竜巻等突風の評定の改善を図っている。このため、近年スケールの小さい竜巻の観測精度が上がっている。これは、表1に示すとおり、F0スケールの竜巻の約90%が2007年以降に、また、F1スケールの竜巻の約60%が1991年以降に確認されていることから類推される。

【日本におけるこれまでの竜巻等突風の評定の改善】

- 1961～1990年
 - ✓一定規模・被害以上の突風について収集
 - ✓被害のない海上竜巻は含まない
- 1991～2006年
 - ✓竜巻等突風の発生に関する情報収集を強化
 - ✓被害のない海上竜巻も区別して収集
- 2007年以降
 - ✓竜巻等突風の現地調査を強化
 - ✓海上竜巻の確認数が格段に増加

(出典：気象庁 竜巻等突風の強さの評定に関する検討会第1回資料)

表1 竜巻発生数の補正結果

竜巻検討地域 (沿岸±5km)	発生数の統計	小計	竜巻スケール				不明		総数 含む不明
			F0	F1	F2	F3	陸上	海上	
1961～ 2012/6 (51.5年間)	期間内総数	90	30	47	13	0	3	113	206
	平均値 (年)	1.748	0.583	0.913	0.252	0	0.058	2.194	4.000
	標準偏差 (年)	2.526	2.003	1.020	0.522	0	0.309	5.962	7.687
1991～ 2012/6 (21.5年間)	期間内総数	60	30	27	3	0	3	112	175
	平均値 (年)	2.791	1.395	1.256	0.140	0	0.140	5.209	8.140
	標準偏差 (年)	3.467	2.956	1.124	0.356	0	0.473	8.294	10.683
2007～ 2012/6 (5.5年間)	期間内総数	32	26	6	0	0	0	93	125
	平均値 (年)	5.818	4.727	1.091	0.000	0	0	16.909	22.727
	標準偏差 (年)	6.087	4.814	1.337	0.000	0	0	10.661	14.700
疑似 51.5年間 (陸上竜巻)	期間内総数	322	244	65	13	0	0	871	1193
	平均値 (年)	6.236	4.727	1.256	0.252	0	0	16.909	23.145
	標準偏差 (年)	4.970	4.814	1.124	0.522	0	0	10.661	11.762
疑似 51.5年間 (全竜巻)	期間内総数	1195	905	241	49	0	0	0	1195
	平均値 (年)	23.102	17.514	4.663	0.935	0	0	0	23.102
	標準偏差 (年)	9.567	9.265	2.183	1.004	0	0	0	9.567

ここで、補正を全く行わない観測期間 51.5 年間の発生個数 90 個の竜巻のデータ (F スケールがわかっているもののみ：表 1 の 1 段目のデータ) を用いてハザード曲線进行评估する。結果、先に述べたとおり観測精度の違いから F0、F1 の小さなスケールの竜巻の個数が最近の観測結果を反映して評価されておらず、F スケールの大きい竜巻の割合が相対的に高い出現頻度を持つため、風速の大きい領域で年超過確率が大きく評価される。

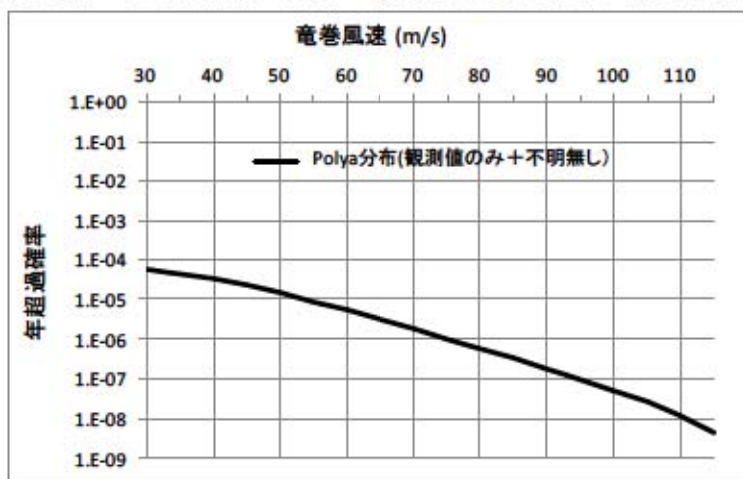


図 1 発生個数 90 個で評価したハザード曲線

次に、観測精度の違いを考慮し、各観測年代(1961～2012 年、1991～2012 年、2007～2012年)の竜巻発生数と観測期間を基に補正を行った擬似発生数 322 個の竜巻データ (表 1 の 4 段目のデータ) を用いて評価したハザード曲線を図 2 に示す。なお、不明竜巻については按分補正していない。

F0、F1 の発生個数を補正したことから、風速の大きいエリアの年超過確率が図 1 と比較し小さく評価されている。最近の観測精度の向上を考慮した評価という観点からは、図 2 の結果の方が実態に即しているものと考えられる。

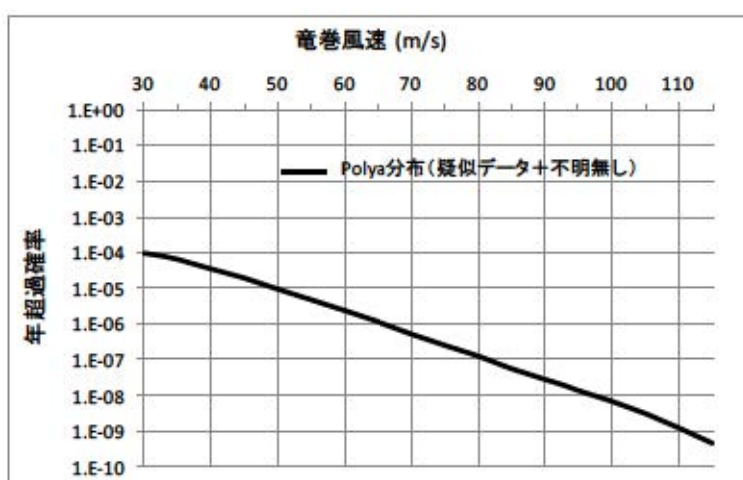


図 2 擬似発生個数 322 個で評価したハザード曲線

F0、F1 スケールの竜巻発生個数の補正方法を以下に示す。

①F0 スケール竜巻の補正

- ・先に述べたとおり観測精度の向上により、F0 スケールの竜巻の約 90%が 2007 年以降に確認されていると考えられる。このため、2007 年以降の年平均発生数が現実に近いものと類推されることから、この期間の発生数と観測期間から補正する。

$$(26 \text{ 個} \times 51.5 \text{ 年} / 5.5 \text{ 年} \approx 244 \text{ 個})$$

②F1 スケール竜巻の補正

- ・F0 スケールと同様の理由から、F1 スケールの竜巻の約 60%が 1991 年以降に確認されていると考えられる。このため、1991 年以降の年平均発生数が現実に近いものであると類推されることから、この期間の発生数と観測期間から補正する。

$$(27 \text{ 個} \times 51.5 \text{ 年} / 21.5 \text{ 年} \approx 65 \text{ 個})$$

なお、F2 スケール竜巻については、被害が大きく見逃されることが少ないため、1961 年以降の全期間の発生数 13 個のままとする。

最後に、今回のハザード評価で行った F スケール不明の竜巻を按分補正した場合の、擬似発生数 1195 個の場合(表 1 の 5 段目のデータ)のハザード曲線を図 3 に示す。補正にあたっては、最近の観測で著しく増加している F スケール不明の海上竜巻の発生数を、F スケールが分かっている竜巻の比率で按分した。具体的には、F スケール不明の竜巻を、最近の F スケール毎の陸上竜巻の発生割合を用いて按分補正した。結果、表 2 に示すとおり、観測値のみから評価したケースと比較し、年超過確率が 10^{-5} オーダーでほぼ同程度の竜巻風速を示している。以上より、当該ハザードを用いることは問題ないものと考えられる。

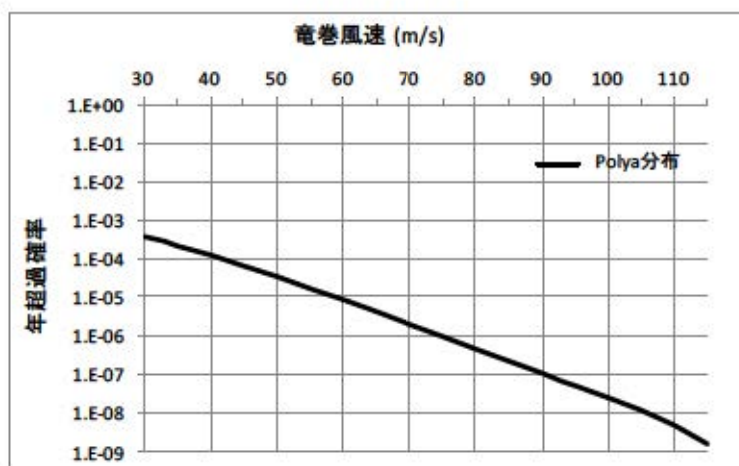


図 3 擬似発生個数 1195 個で評価したハザード曲線

表 2 に、各評価ケースにおける、各超過確率に対する風速を示す。

表 2 各超過確率に対する風速(m/s)

竜巻検討地域	超過確率 (Polya)に対応する風速(m/s)			
	1. E-05	1. E-06	1. E-07	1. E-08
観測値のみ(不明補正無し)	54.1	75.3	94.6	110.9
(疑似 322 個)	49.6	65.7	81.3	97.0
(疑似 1195 個)	58.7	74.5	90.3	105.6

7. 竜巻集中地域の評価について

独立行政法人原子力安全基盤機構「原子力発電所の竜巻影響評価ガイド（案）及び解説」においては、竜巻集中地域に原子力発電所が立地している場合、当該地域の竜巻の年発生頻度（単位面積当たりの年発生数）を調査し、総観スケールの気象条件から設定した地域の年発生頻度と比較し、発生頻度の高い方を竜巻検討地域とする、としている。

泊発電所は、図1に示すように、竜巻集中地域に位置していることから、この地域の竜巻の年発生頻度を、今回、総観スケールの気象条件から設定した竜巻検討地域の年発生頻度と比較する。

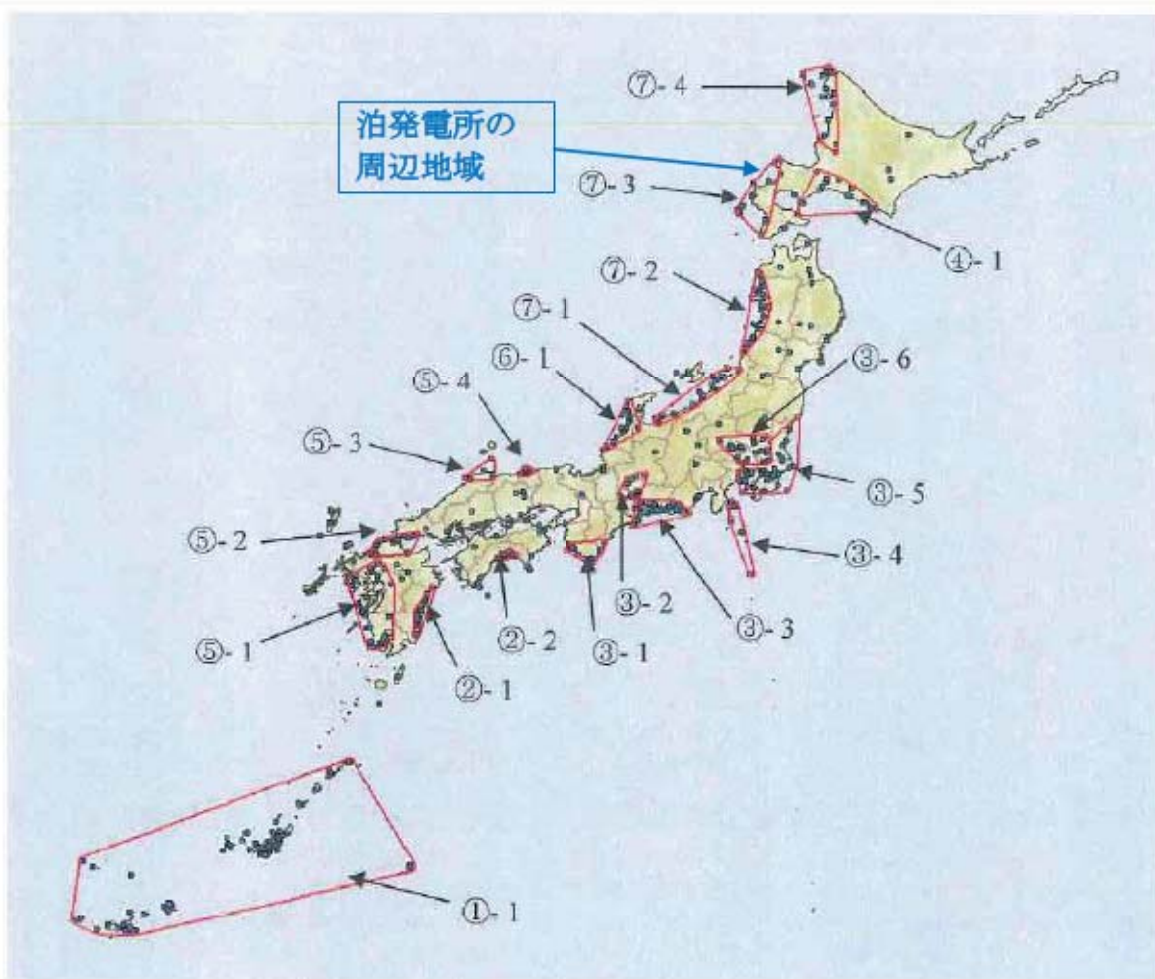


図1 竜巻の発生地点と竜巻が集中する19個の地域*

※出典：東京工芸大学、「竜巻による原子力施設への影響に関する調査研究（平成22年度）」、独立行政法人原子力安全基盤機構委託研究

竜巻集中地域と竜巻検討地域候補地それぞれの、発生頻度を表 1 に示す。結果、両地域の竜巻発生頻度は同一と見なせる。このため、竜巻発生個数を多く確保できる、総観スケールの気象条件から設定した地域を竜巻検討地域とすることは妥当であると判断される。

表 1 竜巻集中地域及び竜巻検討地域候補地の竜巻発生頻度の比較

	対象面積 (km ²)	竜巻発生個数(個) (観測期間 51.5 年)	発生頻度(個/km ² /年)
竜巻集中地域	3,850	19	9.6×10^{-5}
竜巻検討地域候補地	38,895	206	1.1×10^{-4}

8. ポアソン分布を用いたハザード曲線の評価

竜巻影響評価ガイドに、 V_{50} 算定の参考になるとされている東京工芸大学委託成果によれば、Wen and 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。

東京工芸大学委託成果によれば、国内を対象とした竜巻発生個数の分布の適合性に関する検討結果としては、海上及び陸上竜巻ともポリヤ分布の方が優れているとしているが、比較を行うためにポアソン分布についてもハザード曲線を評価した。

評価は、陸側 5km から海側 1km までの 1km 刻みの 6 つのエリアと竜巻検討地域全域について実施した。評価結果を図 1 に示す。

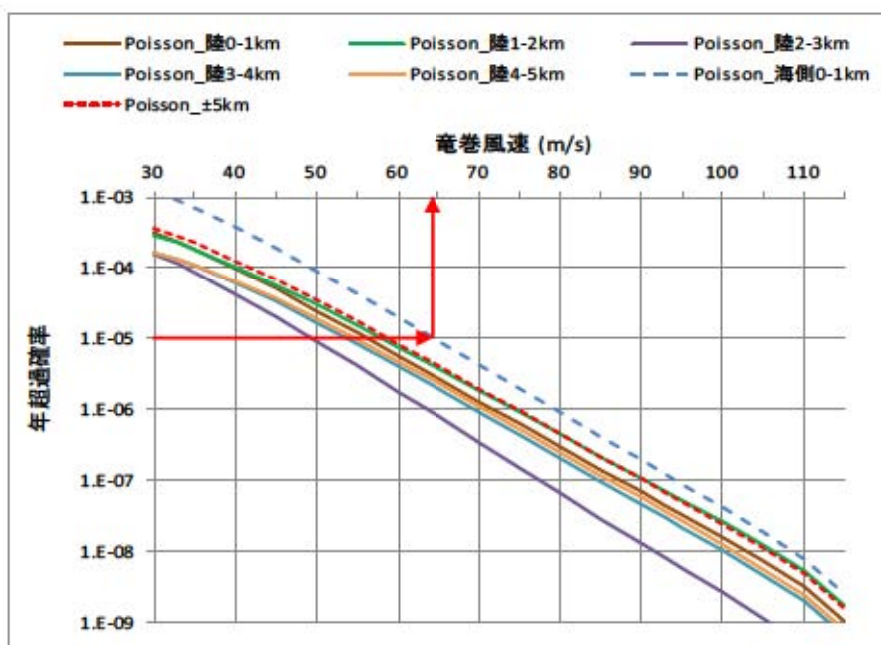


図 1 ポアソン分布によるハザード曲線

上記ハザード曲線から求めた、各エリアの年超過確率 10^{-5} /年における竜巻風速を表 3 に示す。合わせて、ポリヤ分布のハザード曲線から求めた、竜巻風速についても記載する。結果、ポアソン分布及びポリヤ分布とも有効数字 2 桁目を切り捨てた値であるが、両者とも同じ評価値となった。

表1 年超過確率 10^{-5} /年の場合の竜巻風速

竜巻検討地域	竜巻風速(m/s) 年超過確率 1. E-05	
	ポリヤ分布	ポアソン分布
±5km 範囲内	58.7	58.7
陸側 0～1km	56.2	56.2
陸側 1～2km	57.9	57.9
陸側 2～3km	49.4	49.4
陸側 3～4km	53.7	53.7
陸側 4～5km	54.6	54.6
海側 0～1km	64.4	64.4

9. 地形効果による竜巻風速の増幅について

1. はじめに

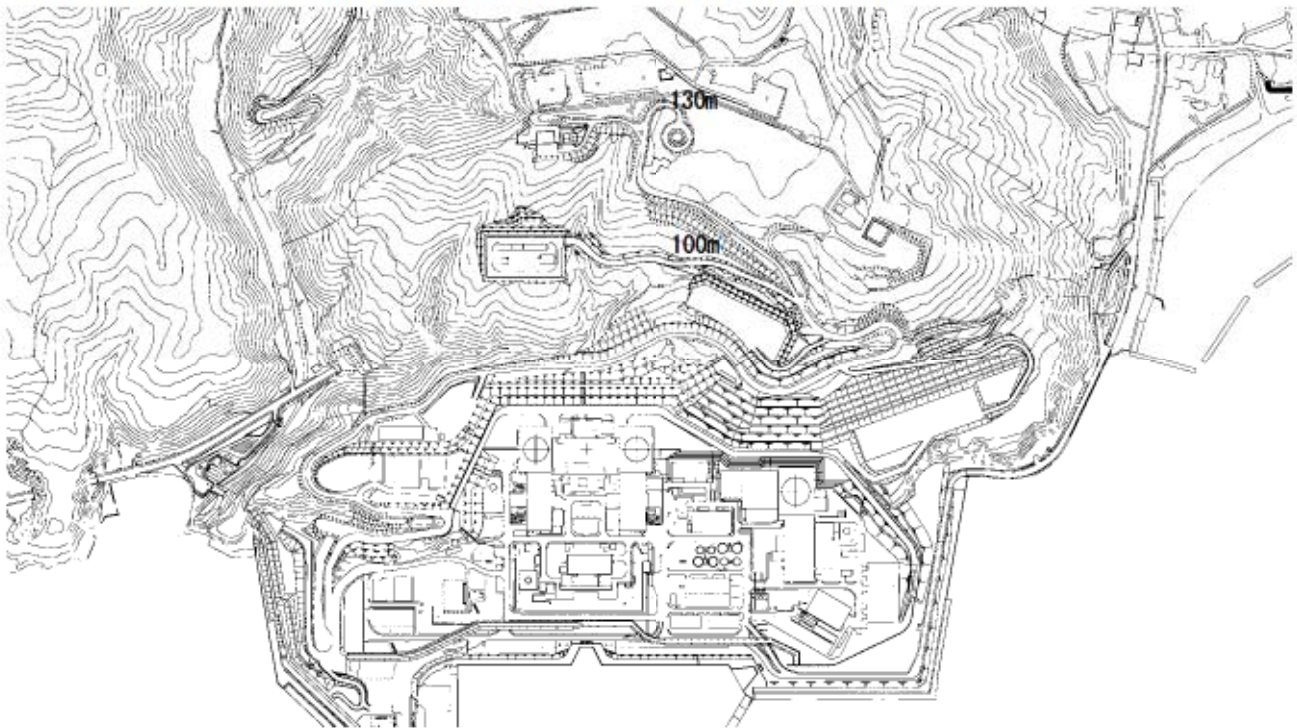
設計竜巻の設定にあたっては、丘陵等による地形効果によって竜巻が増幅する可能性があると考えられることから、原子力発電所が立地する地域において、設計対象施設の周辺地形等によって竜巻が増幅される可能性について検討を行い、その検討結果に基づいて設計竜巻の最大風速を設定することとされている。

これを踏まえ、泊発電所における地形効果による竜巻風速の増幅の可能性について検討する。

2. 泊発電所周辺の地形

泊発電所周辺の地形図を第9-1図に示す。

泊発電所敷地の形状は、おおむね半円状であり、敷地前面（北西～南西方向）は日本海に面し、背後は積丹半島中央部の山嶺に続く標高40mから130mの丘陵地である。



第9-1図 泊発電所周辺地形図

3. 泊発電所における地形効果による竜巻風速の増幅の可能性

(1) 地形効果に関する既往の知見

地形効果による竜巻及び風速の増幅に関する知見として以下のものがある。

① 建築物荷重指針・同解説^{※1}

傾斜地や尾根状地形を風が流れるとき、傾斜地や尾根状地形の風上側では、風は傾斜地や尾根状地形によってせき止められ、平均風速は平坦な地形上よりも小さくなるが、風は斜面を上がるにつれて加速するため、斜面の中程よりも上の地表面付近の平均風速は平坦な地形よりも大きくなるとしている。

② 佐々ほか (2007) ^{※2}

2006年11月7日に北海道佐呂間町で発生した竜巻の地形効果に関する模型実験を行っており、この竜巻の発生には、南西側丘陵の存在と、南風や西からのガスト（突風）に伴い生じた正の鉛直渦度が上昇気流により伸張されて発達したものであるとしている。

③ Forbes (1998) ^{※3}

米国で発生した竜巻に関する被害調査を行い、地形による影響を以下のとおり整理している。

- ・竜巻による被害の痕跡は下り斜面で幅が狭まるとともに強さが増すことが、たびたび確認されている。
- ・たまに、非常に強い旋回が下り斜面や山のかげの特定の地点で生じる。
- ・上り斜面で竜巻の強度は弱められる。
- ・しばしば、強い竜巻のコアが後ろに続く高台の上に再出現する。

④ Lewellen (2012) ^{※4}

竜巻における地形効果を把握するため、山及び谷を単純モデル化したシミュレーションを行い、地形による影響を以下のとおり整理している。

- ・上り斜面で渦の強度が増し、下り斜面で渦の強度が弱まる。
- ・尾根の頂部で強い痕跡が渦の再構成に伴って現れる傾向を示す。

⑤ Selvam et al. (2013) ^{※5}

米国で発生した竜巻に関する被害調査を行い、地形による影響を以下のとおり整理している。

- ・上り斜面ではより大きな被害をもたらす、下り斜面では被害が少ない。
- ・竜巻は、標高の低い所よりも、高い場所へと移動する傾向にある。
- ・丘に囲まれた場所では被害が小さい、もしくは、ないことが認められるが、周辺の丘の上では被害が大きい。

上記のとおり様々な知見が存在しており、地形効果による竜巻風速の増幅についても、上り斜面及び下り斜面で竜巻の強度が弱まる場合と増す場合の両方の知見がみられる。

(2) 泊発電所の竜巻検討地域における竜巻の移動方向

泊発電所の竜巻検討地域における過去の発生竜巻について、移動方向の傾向を整理した。

観測されている発生竜巻の実績は全 206 個であり、そのうち 143 個の竜巻について移動方向が判明しており、これらを整理した結果を第 9-1 表及び第 9-2 図に示す。

その結果、東側方向に向けて移動する竜巻が大半を占めており、北東～南東までの範囲に 121 個が集中している。これは全個数のおよそ 85%である。

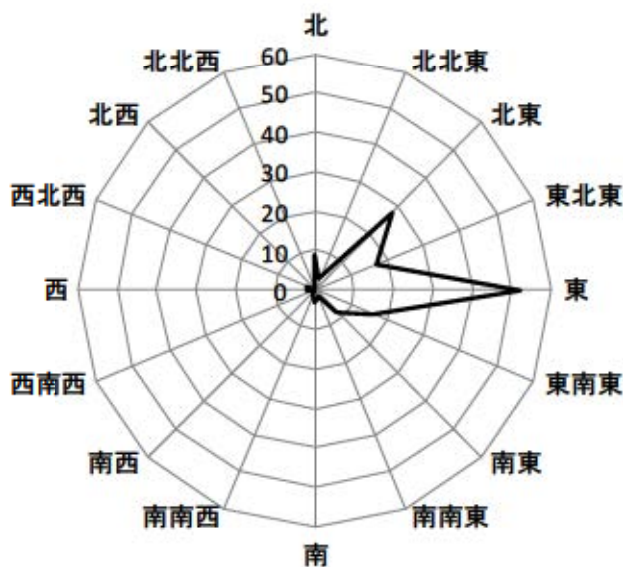
特に、泊発電所が位置する北海道後志支庁沿岸部の発生竜巻については、全て東側（北東～南東までの範囲）方向への移動が確認されている。

これらを踏まえると、泊発電所における竜巻の到来方向の傾向としては、海側から進入してくる可能性が高く、山側から進入してくる可能性は低いと考えられる。

第 9-1 表 移動方向別の竜巻発生個数

[個]

北	9
北北東	3
北東	28
東北東	17
東	52
東南東	16
南東	8
南南東	2
南	3
南南西	1
南西	0
西南西	0
西	2
西北西	2
北西	0
北北西	0
計	143



第 9-2 図 移動方向別の竜巻発生個数

4. まとめ

竜巻が傾斜地を通過する場合には風速が増幅する可能性があるものの、泊発電所は背後に急峻な傾斜地をもつ地形に立地しており、海側から進入する竜巻については、発電所を含む敷地が平坦なため地形効果による風速の増幅条件には当てはまらないものと考えられる。

また、竜巻が山側から進入した場合には、泊発電所背後の傾斜地を竜巻が下ってくることにより竜巻風速が増幅する可能性はあるものの、泊発電所で考えられる到来方向の傾向を踏まえると山側から進入する可能性は低いと考えられる。

以上より、泊発電所では地形による影響は小さいことから、風速の割り増しは行わない。

なお、念のため実施した、泊発電所周辺の地形を考慮した数値シミュレーションにおいては、発電所敷地内に竜巻が進入した場合で竜巻風速が増幅する傾向はみられなかった。(別紙-1)

今後も継続的に地形効果による竜巻風速の増幅に関する新たな知見や情報の収集に取り組み、必要な事項については適切に対応していく。

※1：建築物荷重指針・同解説，日本建築学会，2004

※2：佐々浩司・山下賢介，佐呂間竜巻の地形効果に関する模擬実験，日本気象学会大会講演予稿集 92 号，2007

※3：Forbes, G. S., Topographic Influences on Tornadoes in Pennsylvania, 19th Conference on Severe Local Storms, American Meteorological Society, Sep. 14-18, 1998

※4：Lewellen, D. C., Effects of Topography on Tornado Dynamics: A Simulation Study, 26th Conference on Severe Local Storms, American Meteorological Society, Nov. 5-8, 2012

※5：Selvam R. P. and Ahmed, N., The Effect of Terrain Elevation on Tornado Path, The 12th Americas Conference on Wind Engineering (12AVWE), June 16-20, 2013

泊発電所周辺の地形を考慮した数値シミュレーションについて

片岡ほか (2013) ※⁶では、地形を単純化したモデルを用いて、数値流体計算により竜巻状気流を再現して移動させ、地形を通過する際の渦構造の変化や最大瞬間風速分布等を評価している。

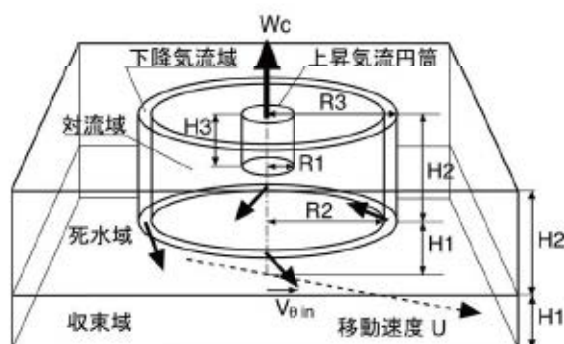
上記文献の手法を参考に、竜巻状旋回気流を泊発電所周辺の地形を模擬した領域に発生させ、最大瞬間風速の変化から地形効果の影響を確認する。

1. 数値流体計算の概要

竜巻状旋回気流の発生機構の解析モデルを第9-3図に、同機構の形状及び速度パラメータを第9-2表に示す。

検討ケースは、竜巻が発電所東側の山側から斜面を下ってくるケース（以下、「山側ケース」）及び発電所西側の海側から進入してくるケース（以下、「海側ケース」）の2ケースとする。なお、比較のため平坦な地形を移動するケース（以下、「平坦ケース」）についても結果を確認している。

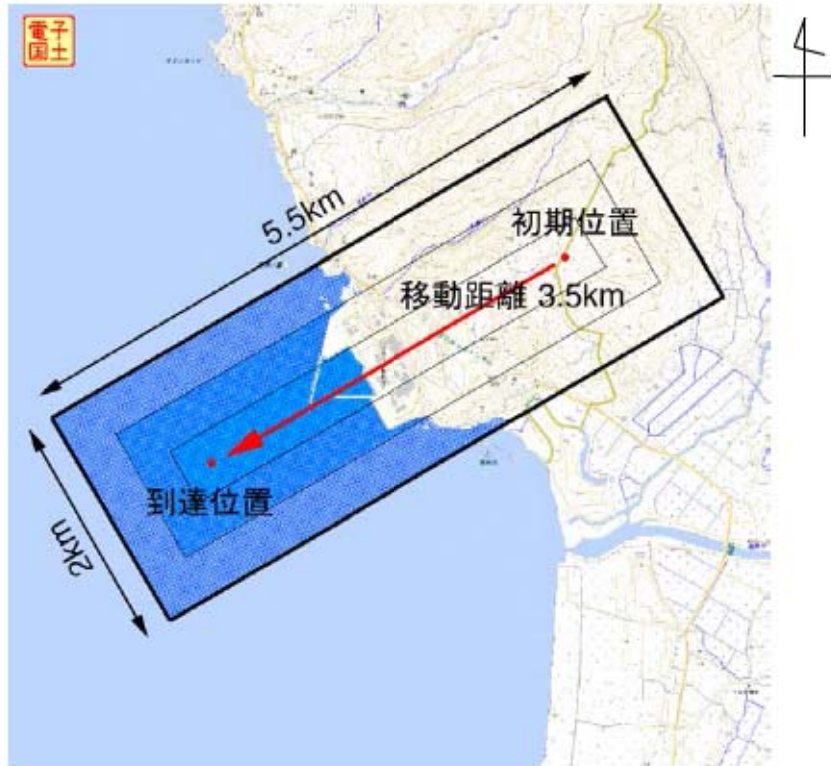
計算領域は、竜巻の移動方向に沿った泊発電所を含む矩形領域とし、進行方向を5.5km、進行直交方向を2km、高さを810mとした。山側ケース及び海側ケースの計算領域を第9-4図に、計算領域内の地形モデルと初期条件を第9-5図に示す。



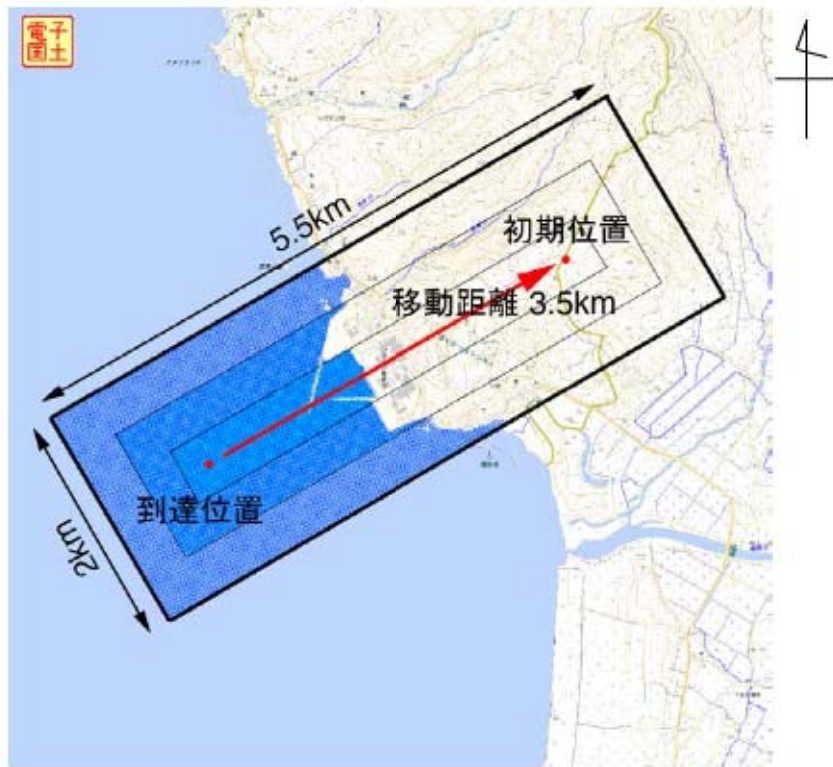
第9-3図 竜巻状旋回気流の解析モデル

第9-2表 竜巻状旋回気流発生機構の形状及び速度パラメータ

形状パラメータ						速度パラメータ		
R1	R2	R3	H1	H2	H3	$V_{\theta in}$	W_c	U
[m]	[m]	[m]	[m]	[m]	[m]	[m/s]	[m/s]	[m/s]
250	620	740	730	80	60	11.4	28.5	20

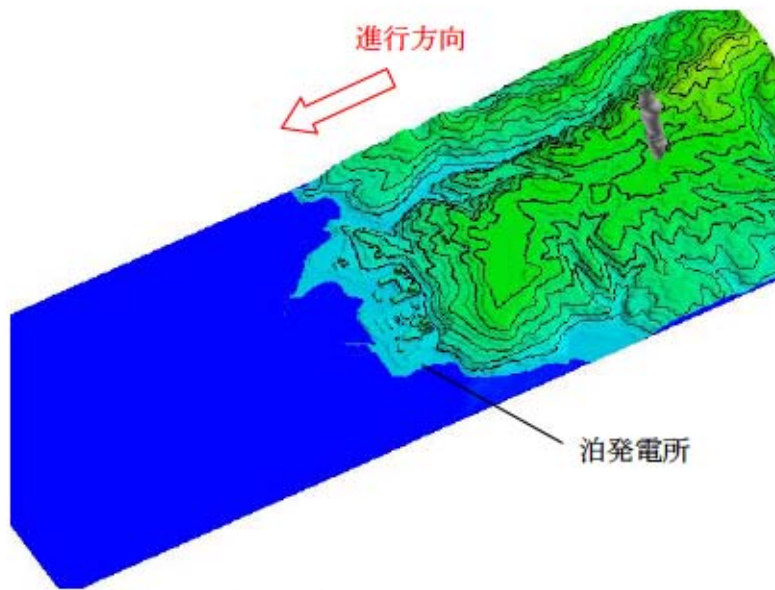


第9-4図(1) 計算領域※(山側ケース)

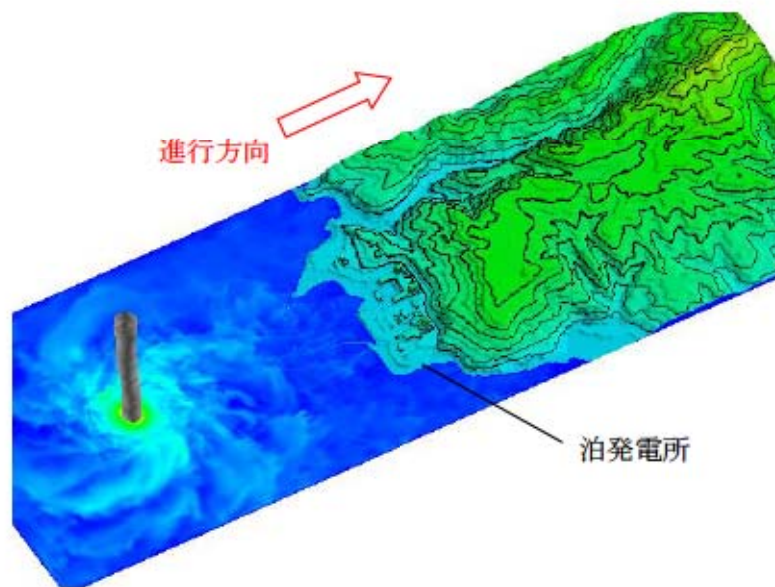


第9-4図(2) 計算領域※(海側ケース)

※地形図は、国土地理院地図閲覧サービスより引用



第9-5図(1) 計算領域内の地形モデルと初期条件(山側ケース)



第9-5図(2) 計算領域内の地形モデルと初期条件(海側ケース)

2. 計算結果

(1) 平坦ケースの場合

平坦ケースにおける最大瞬間風速分布を、第9-6図に示す。

移動中の最大瞬間風速は約80m/sであり、渦中心の進行方向右側にライン上に現れる。また、経路に沿った最大瞬間風速の分布は明瞭であり、竜巻は多少の蛇行はあるものの初期位置からそのまま到達位置に至っている。

(2) 山側ケースの場合

山側ケースにおける最大瞬間風速分布を、第9-7図に示す。

尾根の上では地形の影響により、平坦地形を進行する平坦ケースと比べると強風域の分布が乱れがちで、移動後の最大瞬間風速は約70m/sとなる。

一方、発電所後背地の斜面を下る際に最大瞬間風速は低下しており、標高130m付近で30m/s程度、敷地レベルである標高10m付近では10m/s程度まで低下する。

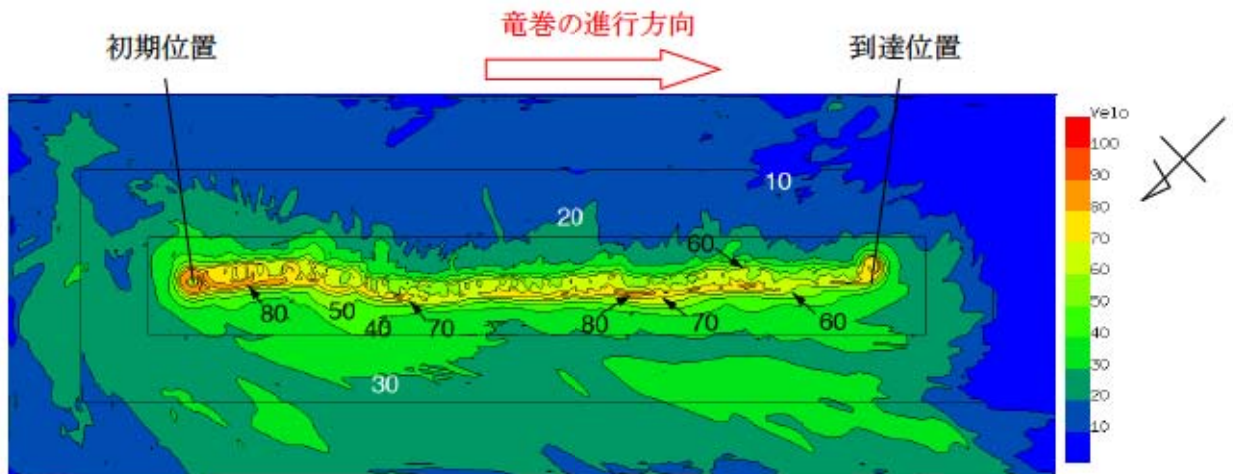
(3) 海側ケースの場合

海側ケースにおける最大瞬間風速分布を、第9-8図に示す。

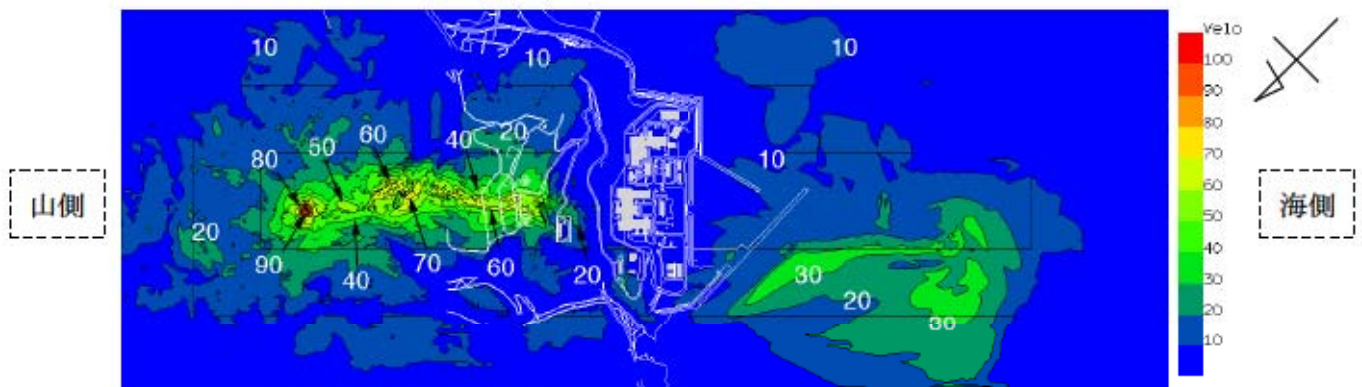
海上では、平坦ケースと同様の最大瞬間風速分布となるが、発電所敷地に上陸後、建屋周囲では風速が低下して60m/s以下となる。

その後、発電所後背地にある斜面を上るに従い再び最大瞬間風速が増加し、斜面上端の標高130m付近で、初期位置の速度と同程度の80m/s程度となっている。

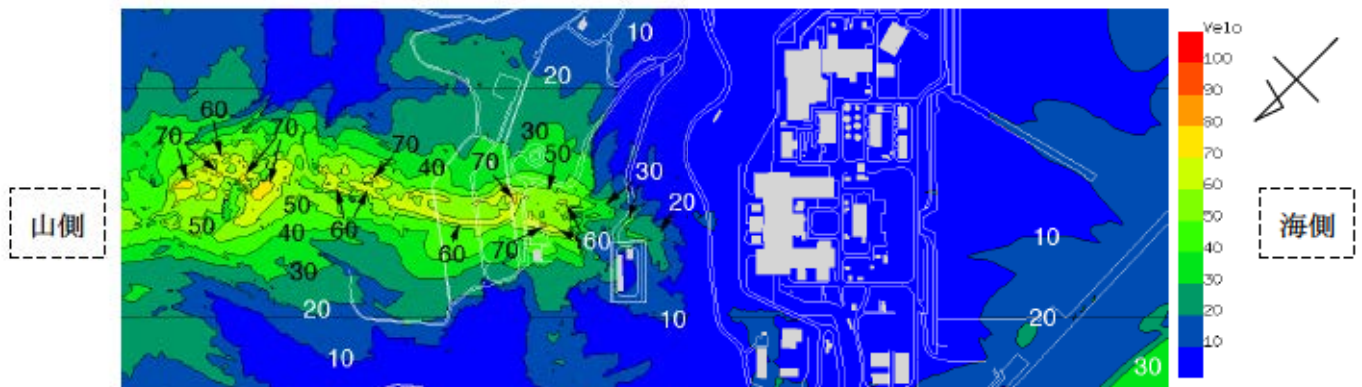
以上の結果より、本シミュレーションにおいては、発電所敷地内に竜巻が進入した場合で竜巻風速が増幅する傾向はみられなかった。



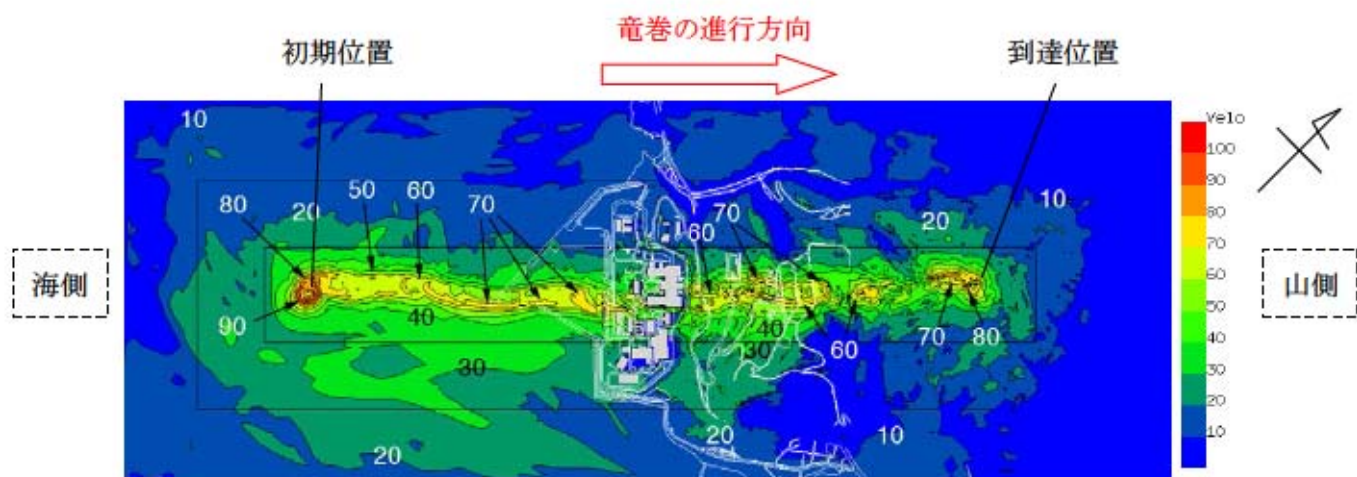
第9-6図 平坦ケースの最大瞬間風速分布（計算領域全体）



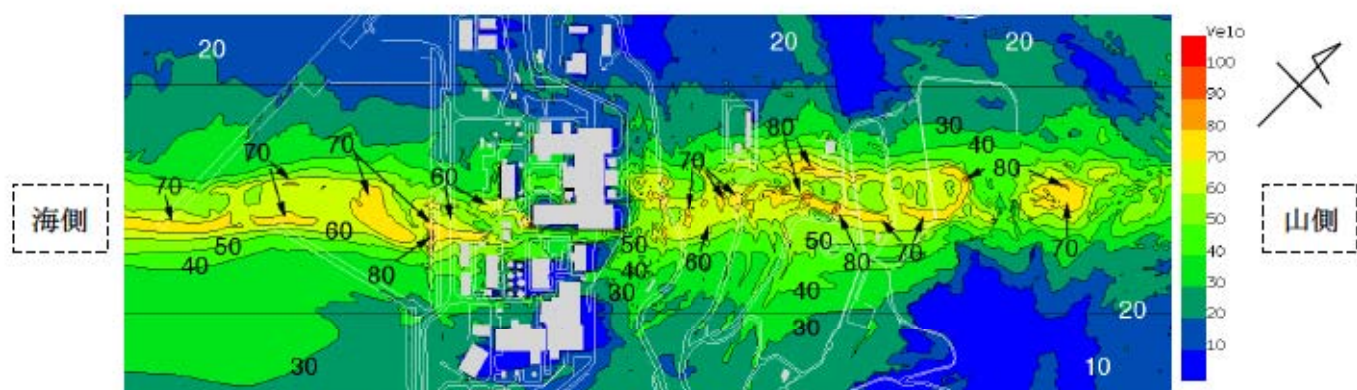
第9-7図（1） 山側ケースの最大瞬間風速分布（計算領域全体）



第9-7図（2） 山側ケースの最大瞬間風速分布（発電所近傍）



第9-8図(1) 海側ケースの最大瞬間風速分布(計算領域全体)



第9-8図(2) 海側ケースの最大瞬間風速分布(発電所近傍)

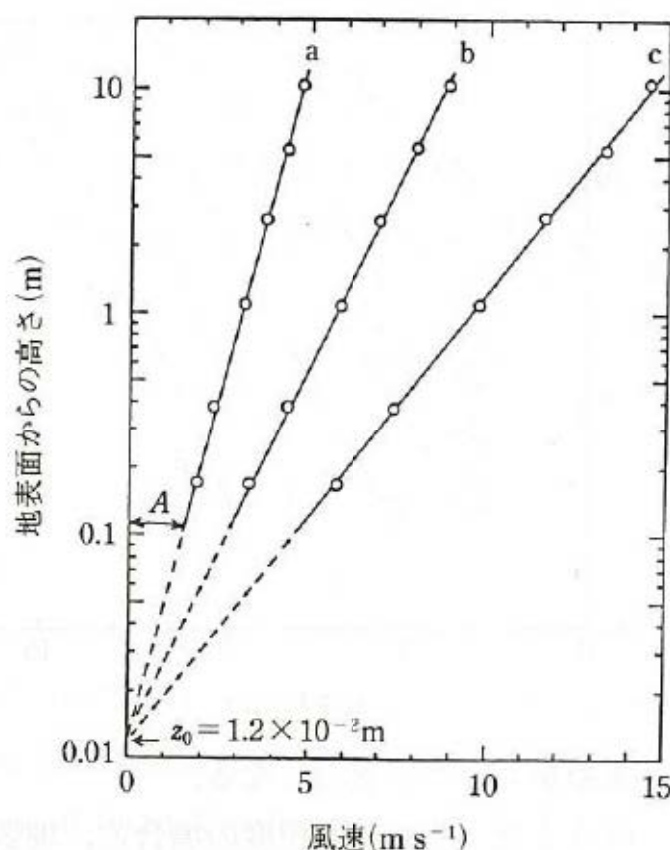
※6：片岡浩人・足立高雄・吉田伸一・橋本尚之，数値流体計算による狭隘地形が竜巻状旋回気流に与える影響の評価，日本建築学会大会講演予稿集，2013

地表面粗度について

風は地表面上を流れるうちに地表面の粗さや建物群から摩擦抵抗を受けて減速させられる。これが空気力学的粗度（地表面粗度）による効果である。一般に、接地境界層においては、地表面に近づくほど空気抵抗が働くため風速 U は小さくなる。

横軸を風速、縦軸を対数軸とした場合の地上面からの高度としたときに、風速観測値を直線で結んで地面の方に延長した際に、風速がゼロとなる地表面の高さが空気力学的粗度である。（第1図参照）

なお、地表面粗度が大きいほど、風の減速に対する影響が大きくなる。



第1図 観測された風速の鉛直分布例*

※：『「地表面に近い大気科学」近藤純正（東京大学出版会：2000年）』からの抜粋。この例では、地表面の粗度は1.2cmである。

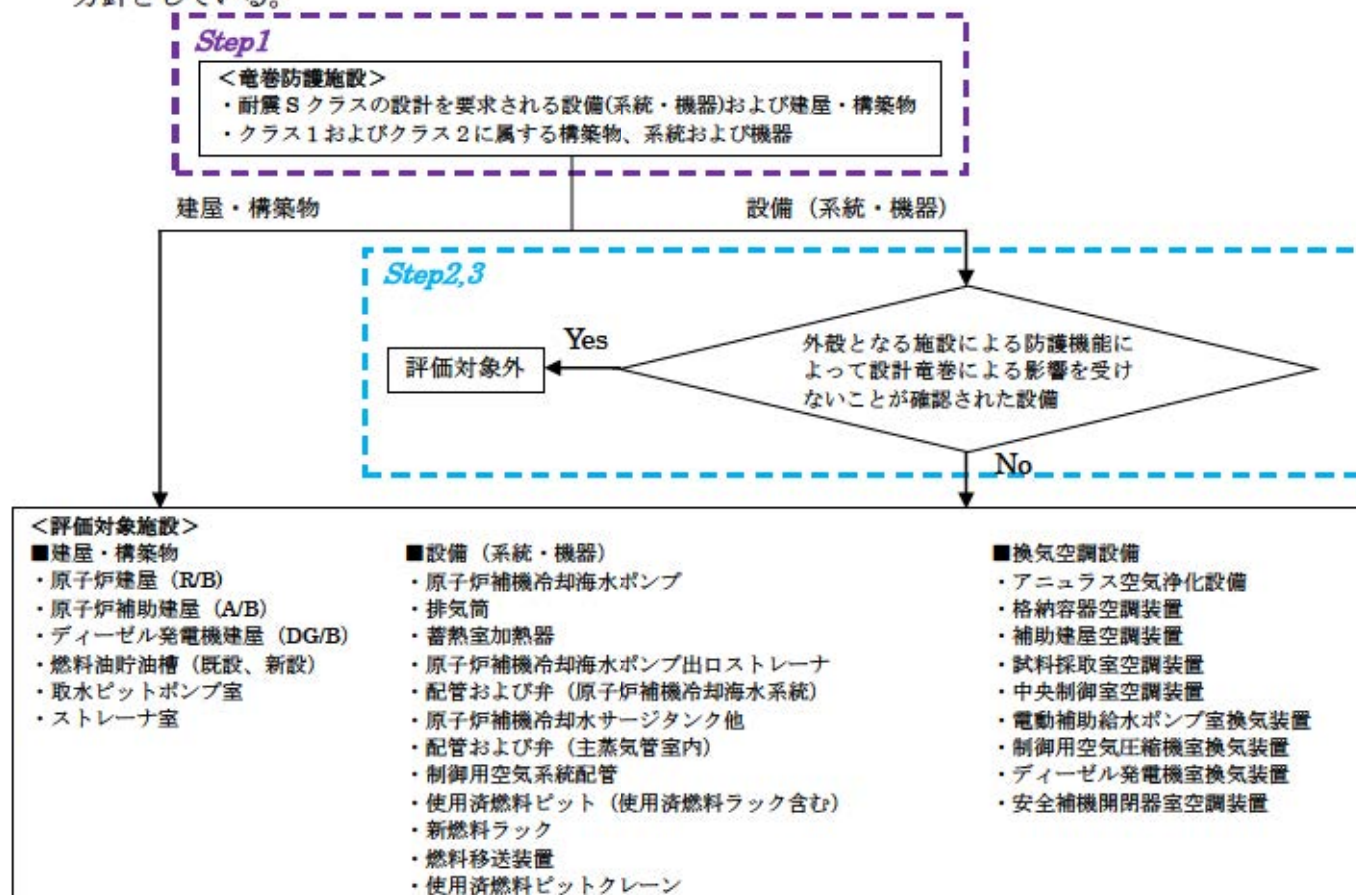
10. 竜巻防護施設の評価対象施設の抽出について

「原子力発電所の竜巻影響評価ガイド」において、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」の耐震設計上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）、建屋及び構築物等とされている。また、同ガイドの解説 2.1 では、竜巻防護施設の外殻となる施設等（竜巻防護施設を内包する建屋・構築物等）による防護機能によって、設計竜巻による影響を受けないことが確認された施設については、設計対象から除外できる旨記載されている。さらに、「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 6 条において、「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。」とされていることから、「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」に基づくクラス 1 およびクラス 2 に属する構築物、系統および機器についても竜巻防護施設とする。

クラス 3 に属する構築物、系統及び機器が設計竜巻により損傷した場合については、代替設備により必要な機能を確保する、安全上支障のない期間に修復する等の対応を行うことから、竜巻防護施設として抽出しない方針としている。

また、耐震 S クラスの設計を要求される設備である津波防護施設、浸水防止設備及び津波監視設備については、竜巻は気象現象、津波は地震、地滑り等を原因とする事象であり、同時に発生することは考えられず、事象の組合せは考慮しないことから、竜巻防護施設として抽出しない。なお、当該施設等が設計竜巻により損傷した場合については、代替設備により必要な機能を確保する、安全上支障のない期間に修復する等の対応を行う。

以上を踏まえ、竜巻防護施設の評価対象施設については、以下のフローに基づき抽出する方針としている。



具体的には、次の Step にて評価対象施設を抽出しており、抽出結果を別紙－1 に示す。

Step1：工事計画認可申請書（新規制基準で工認対象に変更となった設備を含む）の耐震重要度分類より耐震 S クラスの設備およびこれらの間接支持構造物（竜巻防護施設の外殻となる建屋・構築物）ならびに設置許可申請書の安全上の機能別重要度分類よりクラス 1（PS-1, MS-1）およびクラス 2（PS-2, MS-2）に属する構築物、系統および機器を抽出

Step2：上記 Step1 で抽出した設備の設置場所を確認

Step3：上記 Step1 で抽出した設備のうち、設置建屋等による防護機能によって設計竜巻による影響を受けないことが確認された設備を評価対象施設から除外

なお、配管・弁の支持構造物については、以下の理由により、設計竜巻に対して構造健全性は維持されることから、評価対象施設としては抽出していない。

- ・ 設計竜巻と地震による発生応力（配管に発生する応力）を比較した結果、一部の小口径配管を除き、設計竜巻による発生応力は地震による発生応力以下であった。
- ・ 上記から設計竜巻による反力（支持構造物に作用する反力）は地震による反力よりも小さくなる。
- ・ 支持構造物は地震による反力を考慮して設計されているため、設計竜巻による反力に対して構造健全性は維持される。
- ・ 一部の小口径配管においては、設計竜巻による発生応力が地震による発生応力より大きくなったが、発生応力のオーダーに大きな差はないことから、支持構造物は設計竜巻による反力に対して十分な強度を有している。

竜巻防護施設の評価対象施設の抽出結果

1. 抽出方法

次のStepにて評価対象施設を抽出した。

Step1: 工事計画認可申請書(新規制基準で工認対象に変更となった設備を含む)の耐震重要度分類より耐震Sクラスの設備およびこれらの間接支持構造物(竜巻防護施設の外皮となる建屋・構築物)ならびに設置許可申請書の安全上の機能別重要度分類よりクラス1(PS-1,MS-1)およびクラス2(PS-2,MS-2)に属する構築物、系統および機器を抽出

Step2: 上記Step1で抽出された設備の設置場所を確認

Step3: 上記Step1で抽出した設備のうち、設置建屋等による防護機能によって設計竜巻による影響を受けないことが確認された設備を評価対象施設から除外

2. 抽出結果

(1) 建屋・構築物(Step1)

- ① R/B(O/S, E/B, FH/B)
- ② A/B
- ③ DG/B
- ④ 燃料油貯油槽(既設、新設)
- ⑤ 取水ピットポンプ室
- ⑥ ストレーナ室

(2) 設備(系統・機器)

a. 耐震Sクラス

第1回工認

設備名称	Sクラス設備	Step1		Step2							Step3			
		屋内	屋外	屋内設置の場合(具体的な設置建屋等)							除外可否	考え方	評価対象施設	
				R/B		A/B	DG/B	DG/B (塔屋部)	燃料油 貯油槽	取水ピットポンプ 室・ストレーナ室				その他
O/S(C/V)	O/S以外													
原子力設備														
1. 原子炉冷却系統設備														
(1) 冷却材貯蔵槽	燃料取替用水ピット	✓			✓							可	①	x
2. 燃料設備														
(1) 燃料取扱設備	なし													
(2) 使用済燃料貯蔵設備	使用済燃料ピット	✓			✓							否	⑨	○
3. 蒸気タービン														
(1) 蒸気タービンに附属する給水設備	補助給水ピット	✓			✓							可	①	x

第2回工認

設備名称	Sクラス設備	Step1		Step2							Step3			
		屋内	屋外	屋内設置の場合(具体的な設置建屋等)							除外可否	考え方	評価対象施設	
				R/B		A/B	DG/B	DG/B (塔屋部)	燃料油 貯油槽	取水ピットポンプ 室・ストレーナ室				その他
O/S(C/V)	O/S以外													
原子力設備														
1. 原子炉冷却系統設備														
(1) 原子炉補機冷却海水設備	原子炉補機冷却海水ポンプ	✓								✓		否	②	○
	原子炉補機冷却水冷却器海水入口ストレーナ	✓				✓						可	①	x
	原子炉補機冷却海水ポンプ出口ストレーナ	✓								✓		否	②	○
	配管	✓				✓						可	①	x
	弁	✓				✓						可	①	x
2. 放射線管理設備														
(1) 生体遮へい装置	中央制御室遮へい	✓					✓					可	①	x
3. 廃棄設備														
(1) 廃棄物貯蔵設備	なし													
a. 固体廃棄物貯蔵設備	なし													
(2) 廃棄物処理設備	なし													
a. 気体廃棄物処理設備	なし													
b. 液体廃棄物処理設備	配管	✓				✓						可	①	x
	弁	✓				✓						可	①	x
c. 固体廃棄物処理設備	なし													
d. 埋その他の設備	なし													
e. 漏えいの検出装置及び自動警報装置	なし													

第4回工認

設備名称	Sクラス設備	Step1		Step2							Step3			
		屋内	屋外	屋内設置の場合(具体的な設置建屋等)							除外可否	考え方	評価対象施設	
				R/B		A/B	DG/B	DG/B (塔屋部)	燃料油 貯油槽	取水ピットポンプ 室・ストレーナ室				その他
O/S(C/V)	O/S以外													
原子力設備														
1. 原子炉本体														
(1) 原子炉容器	原子炉容器支持構造物	✓			✓							可	①	x
2. 原子炉冷却系統設備														
(1) 主蒸気・主給水設備	配管	✓				✓						否	⑧	○
	弁	✓				✓						否	⑧	○
(2) 余熱除去設備	余熱除去冷却器	✓				✓						可	①	x
	余熱除去ポンプ	✓				✓						可	①	x
	配管	✓				✓						可	①	x
	弁	✓				✓						可	①	x
(3) 非常用炉心冷却設備	高圧注入ポンプ	✓				✓						可	①	x
	ほう酸注入タンク	✓				✓						可	①	x
	格納容器再循環サンパ	✓			✓							可	①	x
	配管	✓				✓						可	①	x
	弁	✓				✓						可	①	x
(4) 化学体積制御設備	ポンプ	✓				✓						可	①	x
	封水注入フィルタ	✓				✓						可	①	x
	配管	✓				✓						可	①	x
	弁	✓				✓						可	①	x
(5) 原子炉補機冷却水設備	原子炉補機冷却水冷却器	✓				✓						可	①	x
	原子炉補機冷却水ポンプ	✓				✓						可	①	x
	原子炉補機冷却水サージタンク	✓				✓						否	⑩	○
	配管	✓				✓						否	⑩	○
	弁	✓				✓						可	①	x
3. 燃料設備														
(1) 燃料取扱設備	なし													
(2) 使用済燃料貯蔵槽冷却浄化設備	配管	✓				✓						可	①	x
4. 放射線管理設備														
(1) 生体遮へい装置	なし													
5. 廃棄設備														
(1) 廃棄物処理設備	なし													
a. 1次冷却設備	なし													
b. 液体廃棄物処理設備	配管	✓				✓						可	①	x
	弁	✓				✓						可	①	x
c. 固体廃棄物処理設備	なし													
6. 原子炉格納施設														
(1) 原子炉格納容器	原子炉格納容器	✓			✓							可	①	x
	機器搬入口	✓			✓							可	①	x
	エアロック	✓			✓							可	①	x
	伸縮式配管貫通部	✓			✓							可	①	x
	固定式配管貫通部	✓			✓							可	①	x
	電線貫通部	✓			✓							可	①	x
(2) 二次格納施設	アニュラスシール	✓			✓							可	①	x

【凡例】

R/B: 原子炉建屋、O/S: 外部しゃへい建屋、A/B: 原子炉補助建屋、DG/B: ディーゼル発電機建屋

【考え方】

① 当該設備が設置されている建屋は鉄筋コンクリート造であり、設計竜巻による複合荷重に対して構造健全性は維持され、かつ設計飛来物は貫通しないとの結果が得られたことから、当該設備は設計竜巻による影響を受けないため除外する。

② 当該設備が設置されている取水ピットポンプ室・ストレーナ室の上屋(循環水ポンプ建屋)は鉄骨造であり、設計竜巻により外装材等は損傷することも考えられ、かつ設計飛来物は天井および外壁を貫通することが想定されることから、当該設備は設計竜巻による影響を受けるため除外不可。

③ 当該設備が設置されている建屋は鉄筋コンクリート造であり、設計竜巻による複合荷重に対して構造健全性は維持されるが、設計飛来物は当該設備が設置されている区画のブローアウトパネルおよび上部換気口周りのガラリーを貫通することが想定されることから、当該設備は設計竜巻による影響を受けるため除外不可。

④ 当該設備が設置されている建屋は鉄筋コンクリート造であり、設計竜巻による複合荷重に対して構造健全性は維持されるが、上屋(燃料取扱棟)は鉄骨造であり、設計飛来物の進入が想定されることから、当該設備は設計竜巻(設計飛来物)による影響を受けるため除外不可。

⑤ 当該設備が設置されている建屋は鉄筋コンクリート造であるため、設計竜巻による複合荷重に対して構造健全性は維持されるが、設計飛来物は当該設備が設置されている区画の扉を貫通することが想定されることから、当該設備は設計竜巻(設計飛来物)による影響を受けるため除外不可。

設備名称	Step1 Sクラス設備	屋内	屋外	Step2 屋内設置の場合(具体的な設置建屋等)							Step3			
				R/B		A/B	DG/B	DG/B (塔屋部)	燃料油 貯油槽	取水ピットポンプ 室・ストレーナ室	その他	除外可否	考え方	評価対象施設
				O/S(C/V)	O/S以外									
(3)圧力低減設備 その他の安全設備														
a.格納容器スプレイ設備	格納容器スプレイ冷却器	✓			✓							可	①	×
	格納容器スプレイポンプ	✓			✓							可	①	×
	よう素除去薬品タンク	✓			✓							可	①	×
	pH調整剤貯蔵タンク	✓			✓							可	①	×
	配管	✓		✓	✓	✓						可	①	×
b.真空逃がし装置	真空逃がし装置	✓			✓							可	①	×
	配管	✓		✓	✓							可	①	×
c.圧力逃がし装置	配管	✓		✓	✓							可	①	×
	弁	✓		✓	✓							可	①	×

設備名称	Step1 Sクラス設備	屋内	屋外	Step2 屋内設置の場合(具体的な設置建屋等)							Step3			
				R/B		A/B	DG/B	DG/B (塔屋部)	燃料油 貯油槽	取水ピットポンプ 室・ストレーナ室	その他	除外可否	考え方	評価対象施設
				O/S(C/V)	O/S以外									
原子力設備														
1.原子炉本体														
(1)炉心	炉心支持構造物	✓		✓								可	①	×
(2)原子炉容器	原子炉容器	✓		✓								可	①	×
	原子炉容器内部構造物のうち制御棒クラスター案内管	✓		✓								可	①	×
	原子炉容器内部構造物	✓		✓								可	①	×
2.原子炉冷却系統設備	熱源へい材	✓		✓								可	①	×
	蒸気発生器	✓		✓								可	①	×
(1)一次冷却材の循環設備	1次冷却材ポンプ	✓		✓								可	①	×
	加圧器	✓		✓								可	①	×
	加圧器ヒータ	✓		✓								可	①	×
	配管	✓		✓								可	①	×
	弁	✓		✓								可	①	×
(2)主蒸気・主給水設備	配管	✓		✓								可	①	×
(3)余熱除去設備	配管	✓		✓								可	①	×
	弁	✓		✓								可	①	×
(4)非常用炉心冷却設備	蓄圧タンク	✓		✓								可	①	×
	配管	✓		✓								可	①	×
(5)化学体積制御設備	弁	✓		✓								可	①	×
	配管	✓		✓								可	①	×
(6)原子炉補機冷却水設備	配管	✓		✓								可	①	×
(7)原子炉補機冷却海水設備	弁	✓		✓								可	①	×
(8)原子炉格納容器内の一次冷却材の漏えいを監視する装置	なし											可	①	×
3.計測制御系統設備														
(1)制御材	制御棒クラスター	✓		✓								可	①	×
	バーナブルポイズン	✓		✓								可	①	×
(2)制御棒駆動装置	制御棒駆動装置	✓		✓								可	①	×
	ほう酸ポンプ	✓		✓								可	①	×
(3)ほう酸注入機能を有する設備	ほう酸タンク	✓		✓								可	①	×
	ほう酸フィルタ	✓		✓								可	①	×
	配管	✓		✓								可	①	×
	弁	✓		✓								可	①	×
	配管	✓		✓								可	①	×
(4)計測装置	運転コンソール	✓		✓								可	①	×
	安全系FDPプロセッサ	✓		✓								可	①	×
	安全系マルチプレクサ	✓		✓								可	①	×
	原子炉安全保護盤	✓		✓								可	①	×
	工学的安全施設作動盤	✓		✓								可	①	×
	原子炉トリップ遮断装置	✓		✓								可	①	×
	安全系現地制御監視盤	✓		✓								可	①	×
	1次冷却材圧力検出器	✓		✓								可	①	×
	1次冷却材温度(広域)(高温側)検出器	✓		✓								可	①	×
	1次冷却材温度(広域)(低温側)検出器	✓		✓								可	①	×
	加圧器水位検出器	✓		✓								可	①	×
	蒸気発生器水位(広域)検出器	✓		✓								可	①	×
	蒸気発生器水位(狭域)検出器	✓		✓								可	①	×
	主蒸気ライン圧力検出器	✓		✓								可	①	×
	水平方向加速度検出器	✓		✓								可	①	×
	鉛直方向加速度検出器	✓		✓								可	①	×
	原子炉安全保護盤(炉外核計装信号処理部)	✓		✓								可	①	×
	1次冷却材ポンプ母線計測盤	✓		✓								可	①	×
	炉外核計測装置(中性子源領域中性子束検出器)	✓		✓								可	①	×
	炉外核計測装置(中間領域中性子束検出器)	✓		✓								可	①	×
炉外核計測装置(出力領域中性子束検出器)	✓		✓								可	①	×	
1次冷却材温度(狭域)(高温側)検出器	✓		✓								可	①	×	
1次冷却材温度(狭域)(低温側)検出器	✓		✓								可	①	×	
1次冷却材流量検出器	✓		✓								可	①	×	
加圧器圧力検出器	✓		✓								可	①	×	
格納容器圧力検出器	✓		✓								可	①	×	
(5)制御用空気設備	制御用空気圧縮装置制御用空気圧縮機	✓		✓								可	①	×
	制御用空気圧縮装置制御用空気だめ	✓		✓								可	①	×
	制御用空気除湿装置除湿塔	✓		✓								可	①	×
	配管	✓		✓								否	⑧	○
弁	✓		✓								可	①	×	
4.廃棄設備														
(1)気体、液体又は固体廃棄物処理設備														
a.液体廃棄物処理設備	なし													
附属設備														
1.非常用予備発電装置														
(1)非常用ディーゼル発電設備	ディーゼル機関	✓		✓								可	①	×
	蓄熱室加熱器*	✓		✓								否	③	○
	ディーゼル発電機空気だめ	✓		✓								可	①	×
	弁	✓		✓								可	①	×
	ディーゼル発電機燃料油サービスタンク	✓		✓								可	①	×
	ディーゼル発電機	✓		✓								可	①	×
	ディーゼル発電機励磁装置	✓		✓								可	①	×
ディーゼル発電機保護装置	✓		✓								可	①	×	

*:寒冷地におけるディーゼル機関の急速始動対策として、吸入空気加温用の蓄熱室加熱器が設置されており、当該加熱器は耐震Sクラス設備であることから、当該加熱器も含めて検討した。

設備名称	Step1 Sクラス設備	屋内	屋外	Step2 屋内設置の場合(具体的な設置建屋等)							Step3			
				R/B		A/B	DG/B	DG/B (塔屋部)	燃料油 貯油槽	取水ピットポンプ 室・ストレーナ室	その他	除外可否	考え方	評価対象施設
				O/S(C/V)	O/S以外									
原子力設備														
1.蒸気タービン	なし													

【凡例】
R/B: 原子炉建屋、O/S: 外部しゃへい建屋、A/B: 原子炉補助建屋、DG/B: ディーゼル発電機建屋
【考え方】
①当該設備が設置されている建屋は鉄筋コンクリート造であり、設計竜巻による複合荷重に対して構造健全性は維持され、かつ設計飛来物は貫通しないとの結果が得られたことから、当該設備は設計竜巻による影響は受けないため除外する。
③当該設備はディーゼル発電機建屋の塔屋部に設置されている。ディーゼル発電機建屋は鉄筋コンクリート造であるため、設計竜巻による複合荷重に対して構造健全性は維持されるが、設計飛来物は当該設備が設置されている蓄熱室に隣接する吸気ガラー室の吸気フードまたは扉を貫通することが想定されることから、当該設備は設計竜巻(設計飛来物)による影響を受けるため除外不可。
⑧当該設備が設置されている建屋は鉄筋コンクリート造であり、設計竜巻による複合荷重に対して構造健全性は維持されるが、設計飛来物は当該設備が設置されている区画の扉、ブローアウトパネルおよび上部換気口周りのガラーを貫通することが想定されることから、当該設備は設計竜巻(設計飛来物)による影響を受けるため除外不可。

設備名称	Sクラス設備	Step1		Step2							Step3			
		屋内	屋外	屋内設置の場合(具体的な設置建屋等)							除外可否	考え方	評価対象施設	
				R/B O/S(C/V)	O/S以外	A/B	DG/B	DG/B (塔屋部)	燃料油 貯油槽	取水ピットポンプ 室・ストレナ室				その他
原子力設備														
1.燃料設備														
(1)燃料取扱設備	なし													
(2)新燃料貯蔵設備	なし													
(3)使用済燃料貯蔵設備	使用済燃料ラック 破損燃料保管容器ラック	✓			✓							否	(4)	○
(4)燃料取替用水設備	燃料取替用水ポンプ 配管	✓			✓							可	(1)	x
2.放射線管理設備														
(1)放射線管理用計測装置	原子炉安全保護線(放射線監視設備信号処理部)	✓				✓						可	(1)	x
a.プロセスモニタリング設備	なし													
b.エリアモニタリング設備	格納容器高レンジエリアモニタ(低レンジ) 格納容器高レンジエリアモニタ(高レンジ)	✓		✓								可	(1)	x
(2)換気設備	中央制御室給気ファン 中央制御室循環ファン 中央制御室非常用循環ファン アニュラス空気浄化ファン 中央制御室非常用循環フィルタユニット アニュラス空気浄化フィルタユニット 配管 井	✓			✓		✓					否	(5)	○
3.排気筒														
(1)排気筒	排気筒	✓			✓							否	(5)	○
4.蒸気タービン														
(1)蒸気タービンに附属する管等	配管	✓			✓							可	(1)	x

※:当該ラックには破損燃料保管容器が収納されており、設計飛来物は当該容器に衝突することになるが、当該容器の断面積は使用済燃料ラックより大きく、発生する応力および変形は使用済燃料ラックよりも小さくなるため、使用済燃料ラックの評価に包絡されること、また、現状当該容器には破損燃料は保管されていないことから、評価対象施設として抽出していない。

設備名称	Sクラス設備	Step1		Step2							Step3			
		屋内	屋外	屋内設置の場合(具体的な設置建屋等)							除外可否	考え方	評価対象施設	
				R/B O/S(C/V)	O/S以外	A/B	DG/B	DG/B (塔屋部)	燃料油 貯油槽	取水ピットポンプ 室・ストレナ室				その他
原子力設備														
1.蒸気タービン														
(1)蒸気タービンに附属する熱交換器	なし													
(2)蒸気タービンに附属する給水ポンプ及び貯水設備並びに給水処理設備	タービン補助給水ポンプ 電動補助給水ポンプ	✓			✓							可	(1)	x
(3)蒸気タービンに附属する管等	配管	✓			✓							否	(8)	○
2.附属設備														
1.非常用予備発電装置														
(1)その他の電源装置														
a.無停電電源装置	計装用インバータ	✓				✓						可	(1)	x
b.蓄電池	蓄電池	✓				✓						可	(1)	x

設備名称	Sクラス設備	Step1		Step2							Step3			
		屋内	屋外	屋内設置の場合(具体的な設置建屋等)							除外可否	考え方	評価対象施設	
				R/B O/S(C/V)	O/S以外	A/B	DG/B	DG/B (塔屋部)	燃料油 貯油槽	取水ピットポンプ 室・ストレナ室				その他
新規制基準で工認対象に変更となった設備														
その他発電用原子炉の附属施設	ディーゼル発電機燃料油貯油槽 配管	✓							✓			可	(7)	x
		✓					✓					可	(7)	x
		✓										可	(1)	x

【凡例】
R/B: 原子炉建屋、O/S: 外部しゃへい建屋、A/B: 原子炉補助建屋、DG/B: ディーゼル発電機建屋
【考え方】
①当該設備が設置されている建屋は鉄筋コンクリート造であり、設計竜巻による複合荷重に対して構造健全性は維持され、かつ設計飛来物は貫通しないとの結果が得られたことから、当該設備は設計竜巻による影響は受けないため除外する。
④当該設備が設置されている建屋は鉄筋コンクリート造であり、設計竜巻による複合荷重に対して構造健全性は維持されるが、上屋(燃料取扱棟)は鉄骨造であり、設計飛来物の進入が想定されることから、当該設備は設計竜巻(設計飛来物)による影響を受けるため除外不可。(当該設備に貯蔵される燃料集合体を含む)
⑤当該設備が設置されている建屋は鉄筋コンクリート造であり、設計竜巻による複合荷重に対して構造健全性は維持されるが、当該設備を含めた換気空調設備および排気筒は外気と繋がっていることから、設計竜巻(気圧差)による影響を受けるため除外不可。(換気設備については、アニュラス空気浄化設備および中央制御室空調装置として評価する)
⑥当該設備は屋外に設置されており、設計竜巻による影響を受けることから除外不可。
⑦(1)ディーゼル発電機燃料油貯油槽(高層部)に設置されている燃料油貯油槽(高層部)は、燃料油貯油槽の厚さは21cm(鉛直)であり、また、燃料油貯油槽の配管は「コンクリート」に設置されているが、「コンクリート」は厚さ27cmのコンクリート蓋があり、いずれのコンクリートも設計飛来物が貫通しないコンクリートの必要最小厚さ(設計飛来物の中で必要最小厚さが最も厚い鋼製材で21cm(鉛直)必要)以上の厚さが確保されていることから、設計飛来物は貫通しない。また、地表面にあるプロテクター蓋は、防護強化蓋で覆われており、設計飛来物は貫通しない。
以上より当該設備は設計竜巻による影響は受けないため除外する。
⑧当該設備が設置されている建屋は鉄筋コンクリート造であり、設計竜巻による複合荷重に対して構造健全性は維持されるが、設計飛来物は当該設備が設置されている区画のブローアウトパネルおよび上部換気口周りのガラリを貫通することが想定されることから、当該設備は設計竜巻による影響を受けるため除外不可。

竜巻防護施設の評価対象施設の抽出結果

b. クラス1およびクラス2
分類:PS-1

定義	機能	構築物、系統又は機器	Step1		Step2							Step3		評価対象施設				
			屋内	屋外	屋内設置の場合(具体的な設置建屋等)							除外可否	考え方					
					R/B	O/S(C/V)		O/S以外	A/B	DG/B	DG/B (塔屋部)				燃料油 貯油槽	取水ピットポンプ 室・ストレーナ室	その他	
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)燃料の大量の破壊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ンダリ機能	原子炉冷却材圧力バウンダリを構成する以下の機器・配管系(計装等の小口径配管・機器は除く)																
		原子炉容器	✓		✓											可	①	×
		蒸気発生器	✓		✓											可	①	×
		1次冷却材ポンプ(原子炉冷却材圧力バウンダリになる範囲)	✓		✓											可	①	×
		加圧器	✓		✓											可	①	×
		配管及び弁(範囲はJEAC4602による)	✓		✓		✓									可	①	×
		隔離弁(範囲はJEAC4602による)	✓		✓		✓									可	①	×
	2)過剰反応度の印加防止機能	制御棒駆動装置圧力ハウジング	✓		✓											可	①	×
		炉心支持構造物																
		炉心槽	✓		✓											可	①	×
		上部炉心支持板	✓		✓											可	①	×
		上部炉心支持柱	✓		✓											可	①	×
		下部炉心板	✓		✓											可	①	×
		下部炉心支持柱	✓		✓											可	①	×
	3)炉心形状の維持機能	下部炉心支持板	✓		✓											可	①	×
		燃料集合体(燃料は除く)	✓		✓											可	①	×

【凡例】
R/B: 原子炉建屋、O/S: 外部しゃへい建屋、A/B: 原子炉補助建屋、DG/B: ディーゼル発電機建屋
【考え方】
①当該設備が設置されている建屋は鉄筋コンクリート造であり、設計竜巻による複合荷重に対して構造健全性は維持され、かつ設計飛来物は貫通しないとの結果が得られたことから、当該設備は設計竜巻による影響は受けないため除外する。

分類:MS-1

定義	機能	構築物、系統又は機器	Step1		Step2							Step3		評価対象施設				
			屋内	屋外	屋内設置の場合(具体的な設置建屋等)							除外可否	考え方					
					R/B	O/S(C/V)		O/S以外	A/B	DG/B	DG/B (塔屋部)				燃料油 貯油槽	取水ピットポンプ 室・ストレーナ室	その他	
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	原子炉停止系の制御棒による系(制御棒クラスタ及び制御棒駆動装置(トリップ機能))																
		制御棒	✓		✓											可	①	×
		制御棒クラスタ案内管	✓		✓											可	①	×
		制御棒駆動装置(トリップ機能)	✓		✓											可	①	×
		燃料集合体の制御棒案内シムル	✓		✓											可	①	×
	2)未臨界維持機能	原子炉停止系																
		制御棒	✓		✓											可	①	×
		制御棒駆動装置	✓		✓											可	①	×
		制御棒駆動装置圧力ハウジング	✓		✓											可	①	×
		(化学体積制御設備)																
		充てんポンプ	✓		✓			✓								可	①	×
		ほう酸ポンプ	✓		✓			✓								可	①	×
		ほう酸タンク	✓		✓			✓								可	①	×
		ほう酸フィルタ	✓		✓			✓								可	①	×
		再生熱交換器	✓		✓			✓								可	①	×
	3)原子炉冷却材圧力バウンダリの過圧防止機能	配管及び弁(ほう酸タンクからほう酸ポンプ、再生熱交換器を経て1次冷却系までの範囲)	✓		✓		✓		✓							可	①	×
		非常炉心冷却設備																
		燃料取替用水ピット	✓		✓											可	①	×
		高圧注入ポンプ	✓		✓			✓								可	①	×
		ほう酸注入タンク	✓		✓			✓								可	①	×
		配管及び弁(燃料取替用水ピットから高圧注入ポンプを経て1次冷却系低温側までの範囲)	✓		✓		✓		✓							可	①	×
		加圧器安全弁(開機能)	✓		✓											可	①	×
		残留熱を除去する系統																
		(余熱除去設備)																
		余熱除去ポンプ	✓		✓			✓								可	①	×
		余熱除去冷却器	✓		✓			✓								可	①	×
		配管及び弁(余熱除去運転モードのルートとなる範囲)	✓		✓		✓		✓							可	①	×
		(補助給水設備)																
電動補助給水ポンプ	✓		✓			✓								可	①	×		
電動補助給水ポンプ室換気装置*	✓		✓			✓								否	⑤	○		
タービン動補助給水ポンプ	✓		✓			✓								可	①	×		
補助給水ピット	✓		✓			✓								可	①	×		
配管及び弁(補助給水ピットから補助給水ポンプを経て主給水配管との合流部までの範囲)	✓		✓			✓								可	①	×		
蒸気発生器	✓		✓			✓								可	①	×		
(蒸気発生器から主蒸気隔離弁までの主蒸気設備)																		
主蒸気隔離弁	✓		✓			✓								否	②	○		
主蒸気安全弁	✓		✓			✓								否	②	○		
主蒸気逃がし弁(手動逃がし機能)	✓		✓			✓								否	②	○		
配管及び弁(蒸気発生器から主蒸気隔離弁の範囲)	✓		✓			✓								可	①	×		
(蒸気発生器から主給水隔離弁までの主蒸気設備)																		
主給水隔離弁	✓		✓			✓								否	②	○		
配管及び弁(蒸気発生器から主給水隔離弁の範囲)	✓		✓			✓								可	①	×		
	✓		✓			✓								否	②	○		

*: 当該換気空調設備にて供給される空気は竜巻防護施設(設備)である電動補助給水ポンプの冷却に使用されていることから合わせて検討した。

【凡例】
R/B: 原子炉建屋、O/S: 外部しゃへい建屋、A/B: 原子炉補助建屋、DG/B: ディーゼル発電機建屋
【考え方】
①当該設備が設置されている建屋は鉄筋コンクリート造であり、設計竜巻による複合荷重に対して構造健全性は維持され、かつ設計飛来物は貫通しないとの結果が得られたことから、当該設備は設計竜巻による影響は受けないため除外する。
②当該設備が設置されている建屋は鉄筋コンクリート造であり、設計竜巻による複合荷重に対して構造健全性は維持されるが、設計飛来物は当該設備が設置されている区画のブローアウトパネルおよび上部換気口周りのガタリを貫通することが想定されることから、当該設備は設計竜巻による影響を受けるため除外不可。
⑤当該換気空調設備が設置されている建屋は鉄筋コンクリート造であり、設計竜巻による複合荷重に対して構造健全性は維持され、かつ設計飛来物は貫通しないとの結果が得られているが、当該換気空調設備は外気と繋がっているため、設計竜巻(気圧差)による影響を受けるため除外不可。

分類:MS-1

定義	機能	Step1		Step2							Step3							
		構築物、系統又は機器		屋内	屋外	屋内設置の場所(具体的な設置建屋等)							除外可否	考え方	評価対象施設			
		R/B	O/S以外			A/B	DG/B	DG/B(塔屋部)	燃料油貯油槽	取水ピットポンプ室・ストレーナ室	その他							
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	非常炉心冷却設備(低圧注入系)																
		燃料取替用水ピット	✓											可	①	×		
		余熱除去ポンプ	✓											可	①	×		
		余熱除去冷却器	✓											可	①	×		
		配管及び弁(燃料取替用水ピット及び格納容器再循環サンプから余熱除去ポンプ、余熱除去冷却器を経て1次冷却系までの範囲)	✓			✓	✓	✓							可	①	×	
		(高圧注入系)																
		燃料取替用水ピット	✓												可	①	×	
		高圧注入ポンプ	✓												可	①	×	
		配管及び弁(燃料取替用水ピット及び格納容器再循環サンプから高圧注入ポンプを経て1次冷却系までの範囲)	✓			✓	✓	✓							可	①	×	
		格納容器再循環サンプ	✓												可	①	×	
	(蓄圧注入系)																	
	蓄圧タンク	✓												可	①	×		
	配管及び弁(蓄圧タンクから1次冷却系低温側配管合流部までの範囲)	✓			✓	✓								可	①	×		
	原子炉格納容器	✓												可	①	×		
	原子炉格納容器貫通部	✓												可	①	×		
	エアロック	✓												可	①	×		
	機器搬入口	✓												可	①	×		
	アニュラス	✓												可	①	×		
	原子炉格納容器隔離弁及び原子炉格納容器バウンダリ配管系(範囲はJEAC4602による)	✓												可	①	×		
	原子炉格納容器スプレイ設備																	
	燃料取替用水ピット	✓												可	①	×		
	格納容器スプレイポンプ	✓												可	①	×		
	格納容器スプレイ冷却器	✓												可	①	×		
	よう素除去薬品タンク	✓												可	①	×		
	スプレイエダクタ	✓												可	①	×		
	スプレイング	✓												可	①	×		
	スプレイズル	✓												可	①	×		
	配管及び弁(燃料取替用水ピット及び格納容器再循環サンプから格納容器スプレイポンプ、格納容器スプレイ冷却器を経てスプレイングヘッダーまでの範囲、よう素除去薬品タンクからスプレイエダクタを経て格納容器スプレイ配管までの範囲)	✓			✓	✓	✓							可	①	×		
	アニュラス空気浄化設備																	
	アニュラス空気浄化フィルタユニット	✓												否	③	○		
アニュラス空気浄化ファン	✓												否	③	○			
ダクト、ダンパ及び弁	✓												否	③	○			
排気筒	✓												否	③	○			
格納容器空調装置 ^{※1}	✓												否	④	○			
補助建屋空調装置 ^{※1}	✓												否	⑤	○			
燃料採取室空調装置 ^{※1}	✓												否	⑤	○			
2)安全上必要なその他の構築物、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																
		原子炉保護設備及び工学的安全施設作動設備(範囲はJEAG4611による)	✓			✓	✓	✓						可	①	×		
		非常用所内電源系																
		ディーゼル機関	✓											可	①	○		
		ディーゼル発電機	✓											可	①	○		
		蓄熱室加熱器 ^{※3}	✓											否	⑩	○		
		ディーゼル発電機室換気装置 ^{※2}	✓											否	⑤	○		
		非常用所内電源設備(ディーゼル発電機から非常用負荷までの範囲)	✓			✓	✓	✓						可	①	×		
		中央制御室及び中央制御室遠へい	✓												可	①	×	
		中央制御室空調装置																
	中央制御室給気ユニット	✓												否	③	○		
	中央制御室給気ファン	✓												否	③	○		
	中央制御室循環ファン	✓												否	③	○		
	中央制御室非常用循環フィルタユニット	✓												否	③	○		
	中央制御室非常用循環ファン	✓												否	③	○		
	ダクト及びダンパ	✓												否	③	○		
	原子炉補機冷却水設備																	
	原子炉補機冷却水ポンプ	✓												可	①	×		
	原子炉補機冷却水冷却器	✓												可	①	×		
	原子炉補機冷却水サージタンク ^{※4}	✓												否	⑪	○		
	配管及び弁(MS-1関連補機への冷却水ラインの範囲)	✓			✓	✓	✓							可	①	×		
	原子炉補機冷却海水設備																	
	原子炉補機冷却海水海水ポンプ	✓												否	⑥	○		
	原子炉補機冷却海水海水ポンプ出口ストレーナ	✓												否	⑥	○		
	原子炉補機冷却水冷却器入口ストレーナ	✓												可	①	×		
	原子炉補機冷却水冷却器	✓												可	①	×		
	配管及び弁(MS-1関連補機への海水供給ラインの範囲)	✓			✓	✓	✓							可	①	×		
	取水設備(取水路)	✓												可	⑦	×		
	直流電源設備																	
	蓄電池	✓												可	①	×		
安全補機開閉器室空調装置 ^{※2}	✓												否	⑤	○			
直流電源設備(蓄電池から非常用負荷までの範囲)(MS-1関連)	✓			✓	✓	✓							可	①	×			
計測制御用電源設備																		
計測制御用電源設備(電源装置から非常用計測制御装置までの範囲)(MS-1関連)	✓			✓	✓	✓							可	①	×			
制御用圧縮空気設備																		
制御用空気圧縮装置	✓												可	①	×			
制御用空気圧縮機室換気装置 ^{※2}	✓												否	⑤	○			
配管及び弁(MS-1関連補機(主蒸気送がし弁、アニュラス空気浄化系及び中央制御室空調系、燃料採取室排気系のMS-1の空気作動弁)への制御用空気供給ラインの範囲)	✓			✓	✓	✓							可	①	×			

※1:排気筒に繋がる当該換気空調設備(アニュラス空気浄化設備除く)も含めて検討した。
 ※2:当該換気空調設備にて供給される空気は電線防護施設(設備)の冷却に使用されていることから合わせて検討した。
 ※3:寒冷地におけるディーゼル機関の急速始動対策として、吸入空気加温用の蓄熱室加熱器が設置されており、当該加熱器はクラス1(MS-1)であることから、当該加熱器も含めて検討した。
 ※4:当該タンクはクラス1(MS-1)であることから合わせて検討した。

【凡例】
 R/B:原子炉建屋、O/S:外部しゃへい建屋、A/B:原子炉補助建屋、DG/B:ディーゼル発電機建屋
 【考え方】
 ①当該設備が設置されている建屋は鉄筋コンクリート造であり、設計竜巻による複合荷重に対して構造健全性は維持され、かつ設計飛来物は貫通しないとの結果が得られたことから、当該設備は設計竜巻による影響は受けないため除外する。
 ②当該設備が設置されている建屋は鉄筋コンクリート造であり、設計竜巻による複合荷重に対して構造健全性は維持されるが、設計飛来物は当該設備が設置されている区画の扉、ブローアウトパネルおよび上部換気口周りのガラリを貫通することが想定されることから、当該設備は設計竜巻による影響を受けるため除外不可。
 ③当該換気空調設備が設置されている建屋は鉄筋コンクリート造であり、設計竜巻による複合荷重に対して構造健全性は維持されるが、当該換気空調設備および排気筒は外気と繋がっていることから、設計竜巻(気圧差)による影響を受けるため除外不可。
 ④当該設備は屋外に設置されており、設計竜巻による影響を受けることから除外不可。
 ⑤当該換気空調設備が設置されている建屋は鉄筋コンクリート造であり、設計竜巻による複合荷重に対して構造健全性は維持されるが、当該換気空調設備は外気と繋がっているため、設計竜巻(気圧差)による影響を受けるため除外不可。
 ⑥当該設備が設置されている取水ピットポンプ室・ストレーナ室の上屋(循環水ポンプ建屋)は鉄骨造であり、設計竜巻により外装材等は損傷することも考えられ、かつ設計飛来物は天井および外壁を貫通することが想定されることから、当該設備は設計竜巻による影響を受けるため除外不可。
 ⑦当該設備はコンクリート構造の地下1階に設置されているため、設計飛来物による影響は受けないため除外不可。
 ⑧当該設備はコンクリート構造の地下1階に設置されているため、設計飛来物による影響は受けないため除外不可。
 ⑨当該設備はコンクリート構造の地下1階に設置されているため、設計飛来物による影響は受けないため除外不可。
 ⑩当該設備はディーゼル発電機建屋の塔屋部に設置されている。ディーゼル発電機建屋は鉄筋コンクリート造であるため、設計竜巻による複合荷重に対して構造健全性は維持されるが、設計飛来物は当該設備が設置されている蓄熱室に隣接する吸気ガラリ室の吸気フードまたは扉を貫通することが想定されることから、当該設備は設計竜巻(設計飛来物)による影響を受けるため除外不可。
 ⑪当該設備が設置されている建屋は鉄筋コンクリート造であるため、設計竜巻による複合荷重に対して構造健全性は維持されるが、設計飛来物は当該設備が設置されている区画の扉を貫通することが想定されることから、当該設備は設計竜巻(設計飛来物)による影響を受けるため除外不可。

分類:PS-2

定義	機能	構築物、系統又は機器	Step1		Step2							Step3											
			屋内	屋外	屋内設置の場合(具体的な設置建屋等)							除外可否	考え方	評価対象施設									
					R/B O/S(C/V)	O/S以外	A/B	DG/B	DG/B (塔屋部)	燃料油 貯油槽	取水ピットポンプ 室・ストレーナ室				その他								
1)その損傷又は故障により発生する事象によって、炉心の著しい損傷又は燃料の大量の破壊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)	化学体積制御設備の抽出ライン、浄化ライン																					
		再生熱交換器	✓		✓															可	①	x	
		糸割抽出冷却器	✓		✓																可	①	x
		非再生冷却器	✓			✓															可	①	x
		冷却材湿床式脱塩塔	✓				✓														可	①	x
		冷却材陽イオン脱塩塔	✓				✓														可	①	x
		冷却材脱塩塔入口フィルタ	✓				✓														可	①	x
		冷却材フィルタ	✓				✓														可	①	x
		体積制御タンク	✓				✓														可	①	x
		赤てんポンプ	✓				✓														可	①	x
	封水注入フィルタ	✓				✓														可	①	x	
	封水ストレーナ	✓				✓														可	①	x	
	封水冷却器	✓				✓														可	①	x	
	配管及び弁	✓			✓	✓														可	①	x	
	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	気体廃棄物処理設備																			可	①	x
		ガスサージタンク	✓			✓															可	①	x
		活性炭式ガスホールドアップ装置	✓			✓															可	①	x
		使用済燃料ピット	✓			✓															否	⑧	○
	3)燃料を安全に取り扱う機能	燃料取替クレーン	✓		✓																可	①	x
		燃料移送装置	✓		✓																可	①	x
使用済燃料ピットクレーン		✓		✓																否	⑧	○	
新燃料ラック		✓		✓																否	⑨	○	
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って、その故障により、炉心冷却が損なわれる可能性の高い構築物、系統及び機器	1)安全弁及び逃がし弁の吹き止まり機能	加圧器安全弁(吹き止まり機能)	✓		✓															可	①	x	
	加圧器逃がし弁(吹き止まり機能)	✓		✓																可	①	x	

分類:MS-2

定義	機能	構築物、系統又は機器	Step1		Step2							Step3											
			屋内	屋外	屋内設置の場合(具体的な設置建屋等)							除外可否	考え方	評価対象施設									
					R/B O/S(C/V)	O/S以外	A/B	DG/B	DG/B (塔屋部)	燃料油 貯油槽	取水ピットポンプ 室・ストレーナ室				その他								
1)PS-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)燃料プール水の補給機能	燃料取替用水ピットからの使用済燃料ピット水補給ライン																					
		燃料取替用水ピット	✓		✓																可	①	x
		燃料取替用水ポンプ	✓		✓																可	①	x
	配管及び弁(燃料取替用水ピットから燃料取替用水ポンプを経て使用済燃料ピットまでの範囲)	✓		✓																可	①	x	
2)異常状態への対応上特に重要な構築物、系統及び機器	2)放射性物質放出の防止機能	気体廃棄物処理設備の隔離弁	✓		✓																可	①	x
	1)事故時のプラント状態の把握機能	原子炉計装の一部(範囲はJEAG4611による)	✓		✓		✓														可	①	x
		プロセス計装の一部(範囲はJEAG4611による)	✓		✓		✓														可	①	x
	2)異常状態の緩和機能	加圧器逃がし弁(手動閉鎖機能)	✓		✓																可	①	x
		加圧器後備ヒータ	✓		✓																可	①	x
加圧器逃がし弁元弁(閉鎖機能)		✓		✓																可	①	x	
3)制御室外からの安全停止機能	中央制御室外原子炉停止装置(安全停止に関連するもの)(範囲はJEAG4611による)	✓		✓																可	①	x	

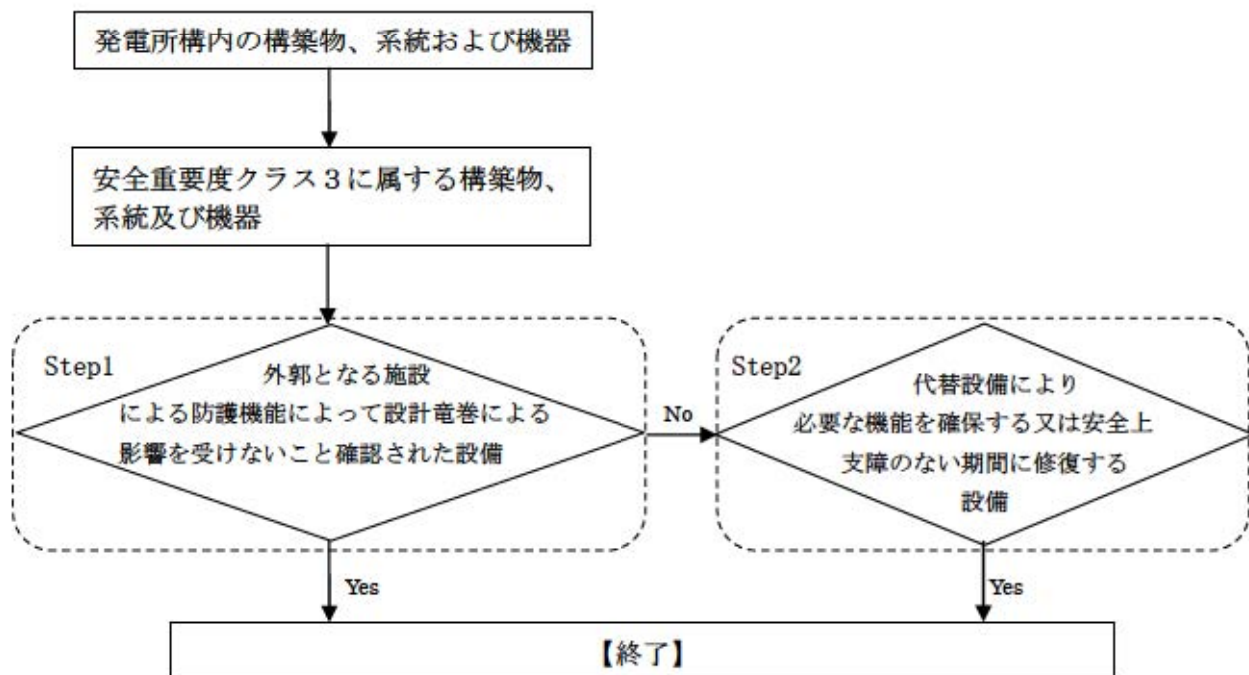
【凡例】
R/B: 原子炉建屋、O/S: 外部しゃへい建屋、A/B: 原子炉補助建屋、DG/B: ディーゼル発電機建屋
【考え方】
①当該設備が設置されている建屋は鉄筋コンクリート造であり、設計竜巻による複合荷重に対して構造健全性は維持され、かつ設計飛来物は貫通しないとの結果が得られたことから、当該設備は設計竜巻による影響は受けたいため除外する。
⑧当該設備が設置されている建屋は鉄筋コンクリート造であり、設計竜巻による複合荷重に対して構造健全性は維持されるが、上屋(燃料取扱棟)は鉄骨造であり、設計飛来物の進入が想定されることから、当該設備は設計竜巻(設計飛来物)による影響を受けるため除外不可。
⑨当該設備が設置されている建屋は鉄筋コンクリート造であり、設計竜巻による複合荷重に対して構造健全性は維持されるが、上屋(燃料取扱棟)は鉄骨造であり、設計飛来物の進入が想定されることから、当該設備は設計竜巻(設計飛来物)による影響を受けるため除外不可。(当該設備に貯蔵される燃料集合体を含む)

クラス3に属する構築物、系統および機器の竜巻防護について

「原子力発電所の竜巻影響評価ガイド」において、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」の耐震設計上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）、建屋及び構築物等とされている。また、同ガイドの解説2.1では、竜巻防護施設の外殻となる施設等（竜巻防護施設を内包する建屋・構築物等）による防護機能によって、設計竜巻による影響を受けないことが確認された施設については、設計対象から除外できる旨記載されている。さらに、「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6条において、「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。」とされていることから、「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」に基づくクラス1およびクラス2に属する構築物、系統および機器についても竜巻防護施設としている。

クラス3に属する構築物、系統及び機器が設計竜巻により損傷した場合については、代替設備により必要な機能を確保する、安全上支障のない期間に修復する等の対応を行うことから、竜巻防護施設としていない。

本資料では、クラス3に属する構築物、系統及び機器の竜巻防護に関して、外郭となる施設による防護機能によって設計竜巻による影響を受けない又は代替設備により必要な機能を確保する等の具体的な対応を下記のフローに基づいて確認する。



第1図 クラス3に属する構築物、系統及び機器の竜巻防護フロー

Step1 : クラス 3 に属する構築物、系統及び機器のうち、設置場所を確認し、竜巻襲来時に風圧、気圧差及び飛来物衝突の影響を受けない屋内設置であることを確認する。

Step2 : クラス 3 に属する構築物、系統及び機器のうち、代替設備により必要な機能を確保すること、必要に応じプラントを停止し、安全上支障のない期間に修復すること等の対応が可能であることを確認する。

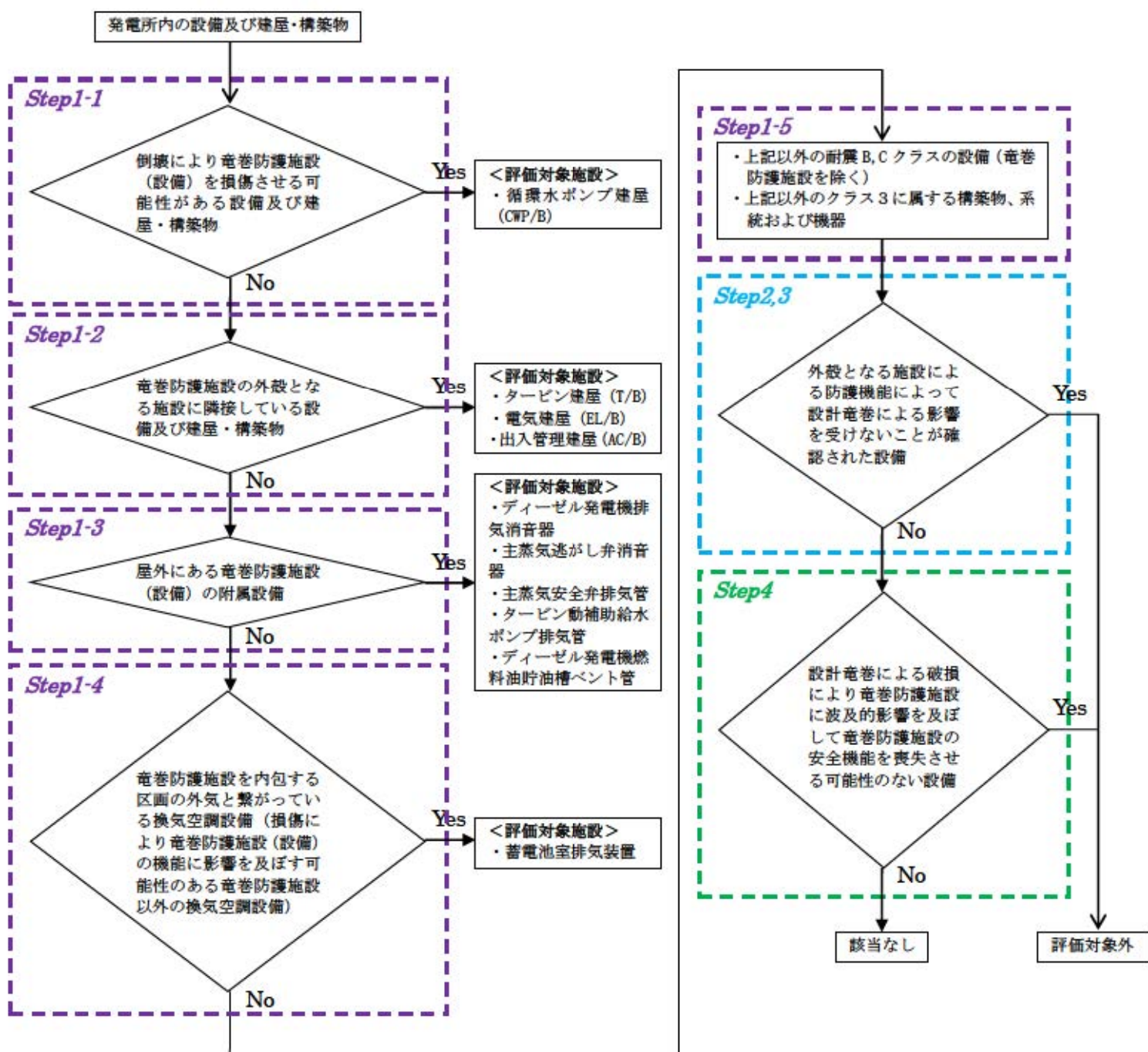
上記の Step に基づき、確認した結果を表 1 に示す。

定義	機能	構築物、系統又は機器	Step1	設置場所								Step2	備考			
				電機防塵施設を内包している箇所				左記以外								
				R/B	A/B	DG/B	取水ピットポンプ室・ストレナ室	T/B	EL/B	AB/B	屋外					
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)原子炉圧力の上昇の緩和機能	加圧器過し弁(自動操作)	○	✓									—			
	2)出力上昇の抑制機能	タービンランバックインターロック(範囲はJEA46111による)	○	✓		✓								—		
		制御棒引抜阻止インターロック(範囲はJEA46111による)	○	✓		✓								○	措置を実施	
	3)原子炉冷却材の補給機能	化学体積制御設備の充てんライン及びほう酸補給ライン														
		ほう酸補給タンク	○			✓									—	
		ほう酸混合器	○			✓									—	
		ほう酸補給設備配管及び弁	○	✓	✓	✓									—	
		給水処理設備の1次系補給水ライン														
		1次系補水タンク	○			✓									—	
		配管及び弁	○			✓									—	
	4)タービントリップ機能	タービン保安装置	×											○	措置を実施	
		主蒸気止め弁(併用能)	×							✓				○	措置を実施	
	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	原子炉格納容器蒸気発生器	○			✓								—	
			蒸気発生器ブローダウンライン(サンプリング機能を有する範囲)													
			配管及び弁	○	✓	✓	✓									—
試料採取設備(事故時に必要な1次冷却材放射性物質濃度及び原子炉格納容器蒸気発生器放射性物質濃度のサンプリング分析機能を有する範囲)																
配管及び弁			○	✓	✓	✓									—	
放射線検出器			×											○	措置を実施	
放射線監視設備の一部(範囲はJEA46111による)			○	✓		✓									—	
原子炉計装の一部(範囲はJEA46111による)			○	✓		✓									—	
プロセス計装の一部(範囲はJEA46111による)			○	✓	✓	✓									—	
消火設備																
水消火設備			○	✓	✓	✓	✓							○	措置を実施	
			×								✓			○	措置を実施	
			×									✓		○	措置を実施	
ろ過水タンク			×										✓	○	措置を実施	
消泡火設備			×										✓	○	措置を実施	
二酸化炭素消火設備	○				✓							○	措置を実施			
安全避難通路	×								✓			○	措置を実施			
非常用照明	×											○	措置を実施			

1.1. 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) 抽出方法について

「原子力発電所の竜巻影響評価ガイド」において、竜巻防護施設に波及的影響を及ぼし得る施設は「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喪失させる可能性が否定できない施設、又はその施設の特定の区画（竜巻防護施設を内包する区画）」とされていることを踏まえ、竜巻防護施設に波及的影響を及ぼし得る施設（評価対象施設）については、以下のフローに基づき抽出する方針としている。



具体的には、次の Step にて竜巻防護施設に波及的影響を及ぼし得る施設を抽出しており、抽出結果を別紙-1 に示す。

Step1-1：倒壊により竜巻防護施設（設備）を損傷させる可能性がある設備及び建屋・構築物を抽出^{※1}

Step1-2：竜巻防護施設の外殻となる施設に隣接している設備及び建屋・構築物を抽出^{※1}

※1：設計竜巻により当該設備及び建屋・構築物が倒壊した場合、竜巻防護施設（設備）を損傷させる可能性が考えられるため、竜巻防護施設（設備）への機械的影響の観点から設けた。「倒壊により竜巻防護施設を損傷させる可能性がある設備及び建屋・構築物」（竜巻防護施設（設備）を内包している竜巻防護施設以外の建屋・構築物含む）および「竜巻防護施設の外殻となる施設に隣接している設備及び建屋・構築物」については、3号機周辺の設備及び建屋・構築物の高さや竜巻防護施設（設備）または竜巻防護施設の外殻となる施設までの最短距離を考慮して抽出した（表-1 参照）。

表-1 3号機周辺の設備又は建屋・構築物の高さや竜巻防護施設（設備）または竜巻防護施設の外殻となる施設までの最短距離

設備又は建屋・構築物	高さ	近接の竜巻防護施設（設備）または竜巻防護施設の外殻となる施設 ^{※2} までの最短距離		評価結果	評価対象施設
		近接の設備または建屋	最短距離		
循環水ポンプ建屋 (CWP/B)	—	原子炉補機冷却海水ポンプ 原子炉補機冷却海水ポンプ出口ストレーナ 配管および弁 (原子炉補機冷却海水系統)	建屋内設置	当該建屋は、竜巻防護施設（設備）が設置されている取水ピットポンプ室およびストレーナ室の上屋であり、波及的影響を及ぼす可能性がある。	○
タービン建屋 (T/B)	—	R/B	隣接	隣接しており、波及的影響を及ぼす可能性がある。	○
電気建屋 (EL/B)	—	R/B, A/B	隣接	同上	○
出入管理建屋 (AC/B)	—	A/B	隣接	同上	○
総合管理事務所	約 25m	A/B	約 57m	当該建屋・構築物の高さ以上の離隔距離が確保されているため、倒壊したとしても波及的影響を及ぼす可能性はないと考える。	×
給排水処理建屋	約 14m	R/B	約 75m	同上	×
ろ過水タンク	約 20m	A/B	約 57m	当該設備の高さ以上の離隔距離が確保されているため、倒壊したとしても波及的影響を及ぼす可能性はないと考える。	×
2次系純水タンク	約 16m	A/B	約 80m	同上	×
ろ過水タンク (1, 2号機)	約 20m	A/B	約 90m	同上	×
2次系純水タンク (1, 2号機)	約 16m	A/B	約 77m	同上	×
給排水処理建屋 (1, 2号機)	約 14m	CWP/B ^{※3}	約 140m	当該建屋・構築物の高さ以上の離隔距離が確保されているため、倒壊したとしても波及的影響を及ぼす可能性はないと考える。	×

設備又は建屋・構築物	高さ	近接の竜巻防護施設（設備）または竜巻防護施設の外壳となる施設 ^{※2} までの最短距離		評価結果	評価対象施設
		近接の設備または建屋	最短距離		
給排水補助建屋（1, 2号機）	約16m	CWP/B ^{※3}	約122m	同上	×
1号倉庫	約10m	CWP/B ^{※3}	約116m	同上	×
2号倉庫	約10m	CWP/B ^{※3}	約181m	同上	×
主変圧器・所内変圧器	約10m	R/B	約57m	当該設備の高さ以上の離隔距離が確保されているため、倒壊したとしても波及的影響を及ぼす可能性はないと考える。	×
海水淡水化設備建屋	約15.4m	CWP/B ^{※3}	約16.8m	当該建屋・構築物の高さ以上の離隔距離が確保されているため、倒壊したとしても波及的影響を及ぼす可能性はないと考える。	×
スクリーン室橋型クレーン	—	CWP/B ^{※3}	近接（CWP/Bと並行して走行レールが敷設）	当該設備の定位置は、当該設備が倒壊したとしてもCWP/Bに衝突しない位置として設計されていることから、波及的影響を及ぼす可能性はないと考える。	×
3号倉庫	約8m	CWP/B ^{※3}	約23m	当該建屋・構築物の高さ以上の離隔距離が確保されているため、倒壊したとしても波及的影響を及ぼす可能性はないと考える。	×
発電機ガスボンベ貯蔵庫	約6m	CWP/B ^{※3}	約41m	同上	×
油庫	約4m	CWP/B ^{※3}	約72m	同上	×
泡消火設備建屋	約5m	CWP/B ^{※3}	約106m	同上	×
補助ボイラー建屋	約13m	DG/B	約16m	同上	×
補助ボイラー煙突	約38m	DG/B	約44m	同上	×
補助ボイラー燃料タンク	約11m	DG/B	約38m	当該設備の高さ以上の離隔距離が確保されているため、倒壊したとしても波及的影響を及ぼす可能性はないと考える。	×
油計量タンク	約6m	DG/B	約20m	同上	×
送電鉄塔 No.7（最も距離が近いもの）	約29m	A/B	約400m	当該建屋・構築物の高さ以上の離隔距離が確保されているため、倒壊したとしても波及的影響を及ぼす可能性はないと考える。	×

※2：原子炉建屋(R/B)、原子炉補助建屋(A/B)、ディーゼル発電機建屋(DG/B)

※3：原子炉補機冷却海水ポンプ、原子炉補機冷却海水ポンプ出口ストレーナ、配管および弁（原子炉補機冷却海水系統）が設置されている取水ピットポンプ室およびストレーナ室の上屋

Step1-3：屋外にある竜巻防護施設（設備）の附属設備を抽出^{※4}

※4：屋外に露出している竜巻防護施設（設備）に繋がる排気管等については、設計竜巻により損傷した場合、竜巻防護施設（設備）の機能に影響を及ぼす可能性が考えられるため、竜巻防護施設（設備）への機能的影響の観点から設けた。

Step1-4: 竜巻防護施設を内包する区画の外気と繋がっている換気空調設備（損傷により竜巻防護施設（設備）の機能に影響を及ぼす可能性のある竜巻防護施設以外の換気空調設備）を抽出※5

※5: 換気空調設備は外気と繋がっているため、竜巻防護施設を内包する区画の換気空調設備（損傷により竜巻防護施設（設備）の機能に影響を及ぼす可能性のある竜巻防護施設以外の換気空調設備）のうち、竜巻防護施設（設備）の冷却等に必要設備については、設計竜巻により損傷した場合、竜巻防護施設（設備）の機能に影響を及ぼす可能性が考えられるため、竜巻防護施設（設備）への機能的影響の観点から設けた。損傷により竜巻防護施設（設備）の機能に影響を及ぼす可能性のある換気空調設備の抽出結果を表-2 に示す。

表-2 損傷により竜巻防護施設（設備）の機能に影響を及ぼす可能性のある換気空調設備の抽出結果

竜巻防護施設を内包する区画の換気空調設備（竜巻防護施設を除く）	評価結果	評価対象施設
タービン動補助給水ポンプ室換気装置	タービン動補助給水ポンプ室の雰囲気温度維持機能を有しているが、竜巻防護施設の冷却には必須な設備ではないため、設計竜巻により損傷したとしても、竜巻防護施設の機能に影響を与えない。	×
主蒸気管室換気装置	主蒸気管室の雰囲気温度維持機能を有しているが、竜巻防護施設の冷却には必須な設備ではないため、設計竜巻により損傷したとしても、竜巻防護施設の機能に影響を与えない。	×
蓄電池室排気装置	竜巻防護施設である安全系蓄電池等の冷却機能および当該蓄電池から発生する水素の換気機能を有しており、設計竜巻により損傷した場合、竜巻防護施設の機能に影響を与える可能性がある。	○

Step1-5: 上記以外の工事計画認可申請書の耐震重要度分類における耐震 B, C クラス設備（竜巻防護施設を除く）および設置許可申請書の安全上の機能別重要度分類よりクラス 3（PS-3, MS-3）に属する構築物、系統および機器を抽出※6

※6: 竜巻防護施設（設備）を工事計画認可申請書の耐震重要度分類における耐震 S クラス設備および設置許可申請書の安全上の機能別重要度分類クラス 1, 2 に属する構築物、系統および機器としていることを踏まえ、Step1-1~1-4 で抽出した設備以外に竜巻防護施設に波及的影響を及ぼし得る施設がないことを確認する観点から設けた。

Step2 : 上記 Step1-5 で抽出した設備の設置場所を確認

Step3 : 上記 Step1-5 で抽出した設備のうち、設置建屋による防護機能によって設計竜巻による影響を受けないことが確認された設備を除外

Step4 : 上記 Step3 で除外されなかった設備のうち、設計竜巻による損傷により竜巻防護施設（設備）に波及的影響を及ぼして竜巻防護施設の安全機能を喪失させる可能性のない設備を除外

(2) 共用設備の取り扱いについて

固体廃棄物貯蔵庫等の共用設備^{※3}については、3号機の竜巻防護施設に隣接していない建屋や、3号機の竜巻防護施設を内包している建屋以外の場所に設置されている設備であり、設計竜巻によって当該設備が破損等した場合でも竜巻防護施設に波及的影響を及ぼして竜巻防護施設の安全機能を喪失させる可能性はないため、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していない。表-3に共用設備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していない理由を示す。

※3：工事計画認可申請書から抽出した。

表-3 共用設備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していない理由

建屋・設備名	設置場所	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していない理由
固体廃棄物貯蔵庫	図-1 参照	当該建屋は3号機の竜巻防護施設（建屋）に隣接している建屋ではない。また、竜巻防護施設を内包している建屋でもないことから、設計竜巻により当該建屋が倒壊した場合でも、竜巻防護施設の機能に影響を与えることはない。
雑固体焼却設備	放射性廃棄物処理建屋 (図-1 参照)	当該設備は3号機の竜巻防護施設を内包している建屋以外の場所に設置しているため、設計竜巻により当該設備が破損した場合でも、竜巻防護施設の機能に影響を与えることはない。
ペイラ	2号機原子炉補助建屋 (図-1 参照)	当該設備は3号機の竜巻防護施設を内包している建屋以外の場所に設置しているため、設計竜巻により当該設備が破損した場合でも、竜巻防護施設の機能に影響を与えることはない。
モニタリングポスト	図-1 参照	同上
モニタリングステーション	図-1 参照	同上
放射能観測車とう載機器	放射能観測車内 (図-1 参照)	同上

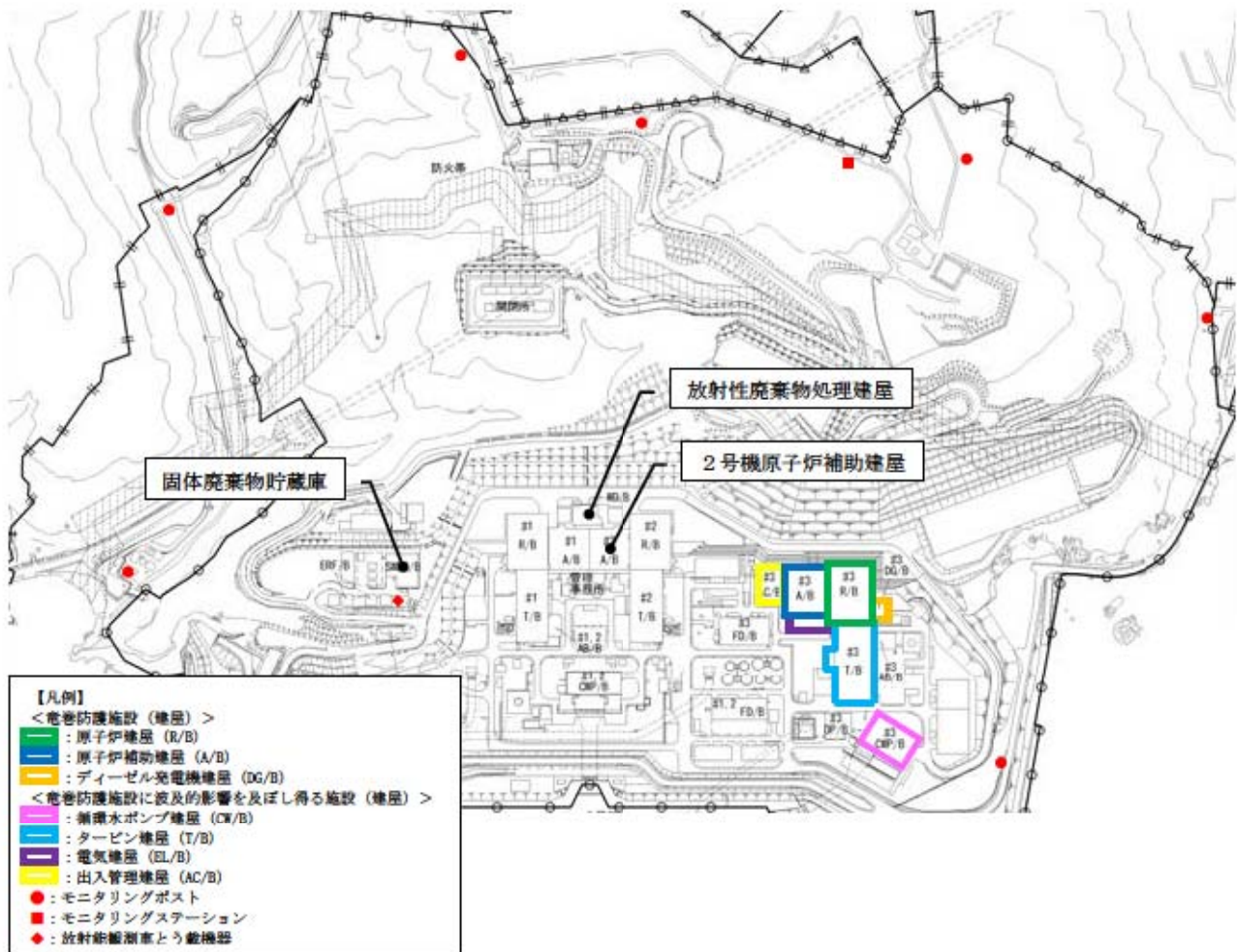


図-1 共用設備等の設置場所

(3) 今回設置する竜巻飛来物防護対策設備の取扱いについて

評価対象施設（竜巻防護施設または竜巻防護施設に波及的影響を及ぼし得る施設）への設計飛来物による影響を評価した結果、設計飛来物の衝突により竜巻防護施設（設備）の安全機能を損なう可能性のある設備のうち、防護対象設備については、安全機能の維持に影響を与えないよう、防護ネット、防護鋼板等の竜巻飛来物防護対策設備を設置して、飛来物から防護することとしている（表-4 参照）。

竜巻飛来物防護対策設備については、防護対象設備近傍に設置するため、防護対象設備（竜巻防護施設）の安全機能への影響を評価し、安全機能の維持に影響を与えないよう、基準地震動に対して耐震性を確保する等の対応を行うこととしていることから（補足説明資料 2 6. 参照）、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していない。

表-4 防護対象設備毎の飛来物防護対策内容一覧

防護対象設備	対策内容
原子炉補機冷却海水ポンプ（配管および弁含む）	<ul style="list-style-type: none"> 防護対象設備が設置されている取水ピットポンプ室の上部開口部に防護ネット（金網）を設置する。
原子炉補機冷却海水ポンプ出口ストレーナ（配管および弁含む）	<ul style="list-style-type: none"> 防護対象設備が設置されているストレーナ室の上部開口部に防護ネット（金網）を設置する。
蓄熱室加熱器	<ul style="list-style-type: none"> 防護対象設備が設置されている蓄熱室に隣接する吸気ガラリ室の壁面開口部（当該加熱器背面の空気口）に防護鋼板を設置する。
原子炉補機冷却水サージタンク他	<ul style="list-style-type: none"> 防護対象設備が設置されている原子炉建屋（原子炉補機冷却水サージタンク・空調用冷水膨脹タンク室）の壁面開口部（扉）前面（建屋内）に防護壁を設置する。
配管および弁（主蒸気管室内）	<ul style="list-style-type: none"> 防護対象設備が設置されている原子炉建屋（主蒸気管室）の壁面開口部（ブローアウトパネル（2箇所）および上部換気口（3箇所））前面（原子炉建屋外壁）に防護鋼板を設置する。
制御用空気系統配管	<ul style="list-style-type: none"> 防護対象設備が設置されている原子炉補助建屋（トラックアクセスエリア（2））の当該設備設置場所前面に防護壁を設置する。
新燃料ラック（貯蔵している燃料集合体）	<ul style="list-style-type: none"> 新燃料ラック内上部に防護鋼板を設置する。（当該ラックに燃料集合体を貯蔵した場合に設置）

12. 想定飛来物の抽出及び設計飛来物の設定について

1. はじめに

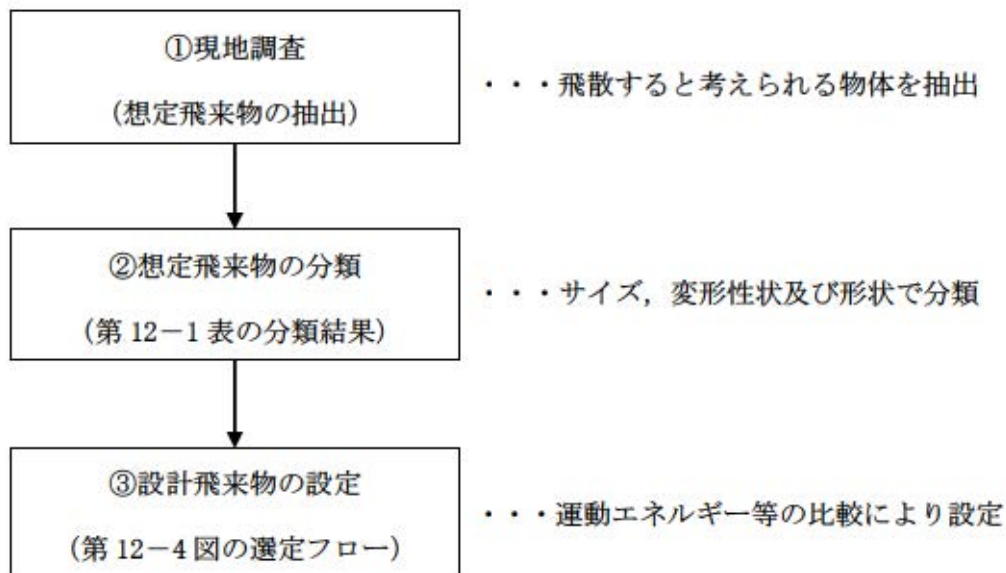
設計飛来物の設定にあたっては、泊発電所敷地内において現地調査を実施し、竜巻によって飛散し竜巻防護施設に影響を与えると想定される物体（想定飛来物）を抽出するとともに、これらの中から竜巻影響評価に用いる代表となる飛来物を選定している。ここでは、現地調査に基づく想定飛来物の抽出結果と選定方法及び設計飛来物の設定結果について示す。

2. 設計飛来物の設定フロー

泊発電所における設計飛来物は、以下の3段階の手順を踏まえて設定している。

- ① 現地調査（想定飛来物の抽出）
- ② 想定飛来物の分類
- ③ 設計飛来物の設定

設計飛来物の設定全般に係る概略フローを第12-1図に示す。なお、各手順の詳細については、以降の各項目において記載する。



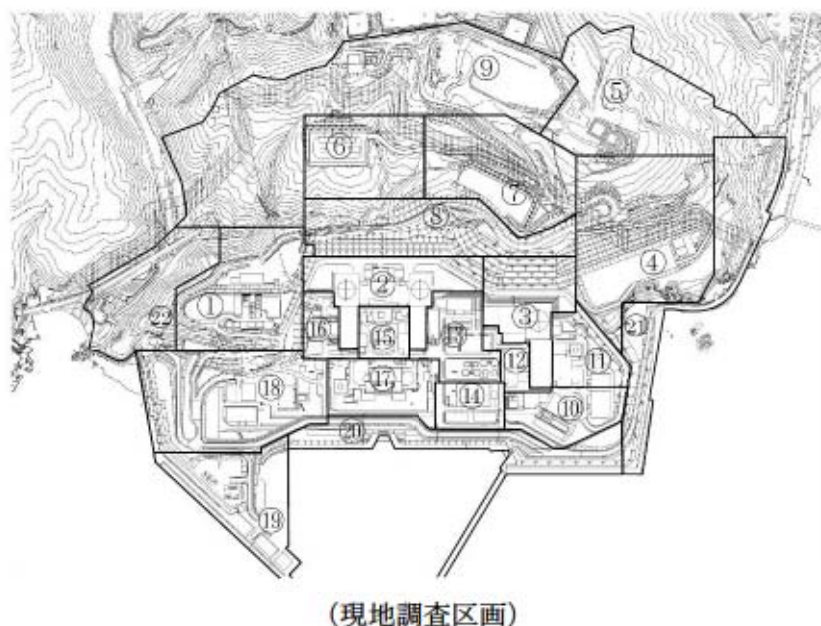
第12-1図 設計飛来物の設定に係る概略フロー

3. 設計飛来物の設定

(1) 現地調査（想定飛来物の抽出）

現地調査は平成 25 年 6 月に実施し、その後、平成 27 年 7 月～11 月にかけて、数度にわたり追加調査を実施している。追加調査では、泊発電所敷地内全域を第 12-2 図に示すとおり 22 のエリアに区画するとともに、それぞれのエリアで想定飛来物を調査し、現地調査後に新たに配置または撤去した資機材（重大事故等対処設備等）の反映を行っている。

想定飛来物としては、地盤・建物に固定されていないもの及び固定されているが竜巻によって飛散が考えられるものを対象として抽出している。エリア毎の調査結果を第 12-3 図に示す。



エリア	名称
①	緊急時対策所および51m倉庫周辺
②	1, 2号機室 (31m壁)
③	3号機室 (31m壁)
④	4.6m倉庫周辺
⑤	NTT局舎周辺
⑥	集電所周辺
⑦	貯水設備周辺
⑧	51m～扇型台道路
⑨	風力断地周辺
⑩	3号機室側 (10m壁)
⑪	3号機室側 (10m壁)
⑫	3号機室側 (10m壁)
⑬	総合管理事務所周辺 (10m壁)
⑭	総合管理事務所側 (10m壁)
⑮	管理事務所正面 (10m壁)
⑯	1号機室側 (10m壁)
⑰	1, 2号機室側 (10m壁)
⑱	保修事務所周辺 (10m壁)
⑲	防衛場外側 (10m壁)
⑳	防衛場外正面 (10m壁)
㉑	防衛場外側 (10m壁)
㉒	茶室守衛所周辺

第 12-2 図 構内配置と現地調査区画

エリア①：緊急時対策所および51m倉庫周辺



鋼製ステップ



屋外カメラ



スピーカー



アンテナ



ケーブルドラム

エリア②：1, 2号機背面（31m盤）



発電機



コンクリートブロック



タンク



発電機車



タンクローリー



プレハブ小屋



鋼管



アンテナ

エリア③：3号機背面（31m盤）



照明



電気盤



カードル



ポンプ車



柵

第12-3図(1) 想定飛来物の抽出結果 その1

エリア④：46m倉庫周辺



看板



鋼製ステップ



カーブミラー



プレハブ小屋



電気盤

エリア⑤：NTT局舎周辺



電気盤



コンクリートブロック



看板

エリア⑥：開閉所周辺



ケーブルドラム



空調室外機



看板



発電機車



電気盤

第12-3図(2) 想定飛来物の抽出結果 その2

エリア⑦：貯水設備周辺



電気盤



電気盤

エリア⑧：51m～展望台道路



鋼板



放水砲



トラック



グレーチング



コンクリート板

エリア⑨：風力跡地周辺



ドラム缶



トラック



ポンプ車



プレハブ小屋



重機

第12-3図(3) 想定飛来物の抽出結果 その3

エリア⑩：3号機海側（10m盤）



空調室外機



鋼板



仮置資機材



コンクリート板



看板

エリア⑪：3号機東側（10m盤）



自動車



消火栓



鋼製ステップ



鋼管



スピーカー

エリア⑫：3号機西側（10m盤）



コンクリート板



消火栓



電気盤



看板



空調室外機

第12-3図(4) 想定飛来物の抽出結果 その4

エリア⑬：総合管理事務所周辺（10m盤）



自転車



ベンチ



コンクリート板



砂利



自動車

エリア⑭：総合管理事務所海側（10m盤）



仮置資機材



空調室外機



ドラム缶



消火栓



看板

エリア⑮：管理事務所正面（10m盤）



消火栓



電気盤



コーン



看板



ベンチ

第 12-3 図 (5) 想定飛来物の抽出結果 その 5

エリア⑯：1号機西側（10m盤）



鋼管



プレハブ小屋



消火器



電気盤



看板

エリア⑰：1, 2号機海側（10m盤）



踏み台



鋼製ステップ



グレーチング



バリケード



マンホール蓋

エリア⑱：保修事務所周辺（10m盤）



看板



コンテナ



コーン



照明



鋼製かご

第12-3図(6) 想定飛来物の抽出結果 その6

エリア⑱：防潮堤外西側（10m盤）



プレハブ小屋



脚立



鋼材



電気盤



コーン

エリア㉑：防潮堤外正面（10m盤）



看板



電気盤



鋼板



プレハブ小屋



鋼製かご

エリア㉒：防潮堤外堀株側（10m盤）



プレハブ小屋



看板



鋼材



鋼製かご



電気盤

第 12-3 図 (7) 想定飛来物の抽出結果 その 7

エリア②：茶津守衛所周辺



ドラム缶



アンテナ



看板



アーケード屋根



電気盤

第 12-3 図 (8) 想定飛来物の抽出結果 その 8

(2) 想定飛来物の分類

現地調査の結果抽出された想定飛来物を、サイズ及び変形状による基準に基づいて7つに区分するとともに、形状による基準に基づいて3種類に分類する。

分類結果を第12-1表に示す。

【サイズによる分類】

飛散時の形状や重量の観点から、飛来物のサイズを分類する。

小(極小)：飛散する形態にて、概ね人力で持ち上げられる程度のもの。

中：飛散する形態にて、人力で持ち上がらないもの又は飛散・衝突時に分離・分散すると考えられるもの。

大：飛散する形態にて、構造体として分散しない塊状のもの。

【変形状による分類】

衝突時の変形状の観点から、飛来物が衝突した際の影響を分類する。

柔：非金属のもの、金属であっても薄板、足場や架台のような衝突時に変形が予想されるもの。

剛：金属のもの等であって、飛来物自身の変形が予想されず、運動エネルギーを伝達するもの。

【形状による分類】

飛散し易さは飛来物の形状に依存するため、この観点から、飛来物の形状を分類する。

塊状：複数の部材で構成される飛来物で、平面(板状)や線(棒状)ではなく、立体形状のもの。

なお、超重量物では飛散しないものもある。

板状：厚さが薄く、平面(板状)のもの。

棒状：細長く、線(棒状)で小さな断面を持つもの。

第12-1表 想定飛来物の分類結果

サイズ	極小	小		中		大		
剛 柔	剛	柔	剛	柔	剛	柔	柔(一部剛)	
区 分	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	
形状	棒状	—	—	<u>鋼製パイプ</u>	—	<u>鋼管</u> <u>鋼製材</u>	—	—
	板状	—	自転車	グレーチング マンホール蓋	アーケード屋根 ベンチ 看板 カーブミラー 柵	<u>鋼板</u> <u>コンクリート板</u> 鋼材	—	—
	塊状	砂利	脚立・踏み台 照明 スピーカー コーン アンテナ 屋外カメラ	バリケード	空調室外機 プレハブ小屋 消火器・消火栓 鋼製かご ドラム缶	カードル コンクリートブ ロック ケーブルドラム 発電機	<u>コンテナ</u> <u>電気盤</u> タンク	鋼製ステップ 重機 放水砲 <u>トラック</u> タンクローリー 自動車 発電機車 ポンプ車 仮置資機材

※ガイド記載の飛来物についても想定飛来物とすることとし、下線を付けて示す。

(3) 設計飛来物の選定

分類した想定飛来物について、空力パラメータ（高さ方向への飛散の有無）、運動エネルギー及び貫通力（BRL 式から算出した想定飛来物の貫通を生じないために必要な鋼板の最小板厚）の大きさを考慮して設計飛来物を選定する。想定飛来物の物性諸元の設定にあたっては、「原子力発電所の竜巻影響評価ガイド」（以下、「ガイド」という。）及びカタログ等を参考にしている。

泊発電所における設計飛来物の選定結果を第 12-2 表に示す。

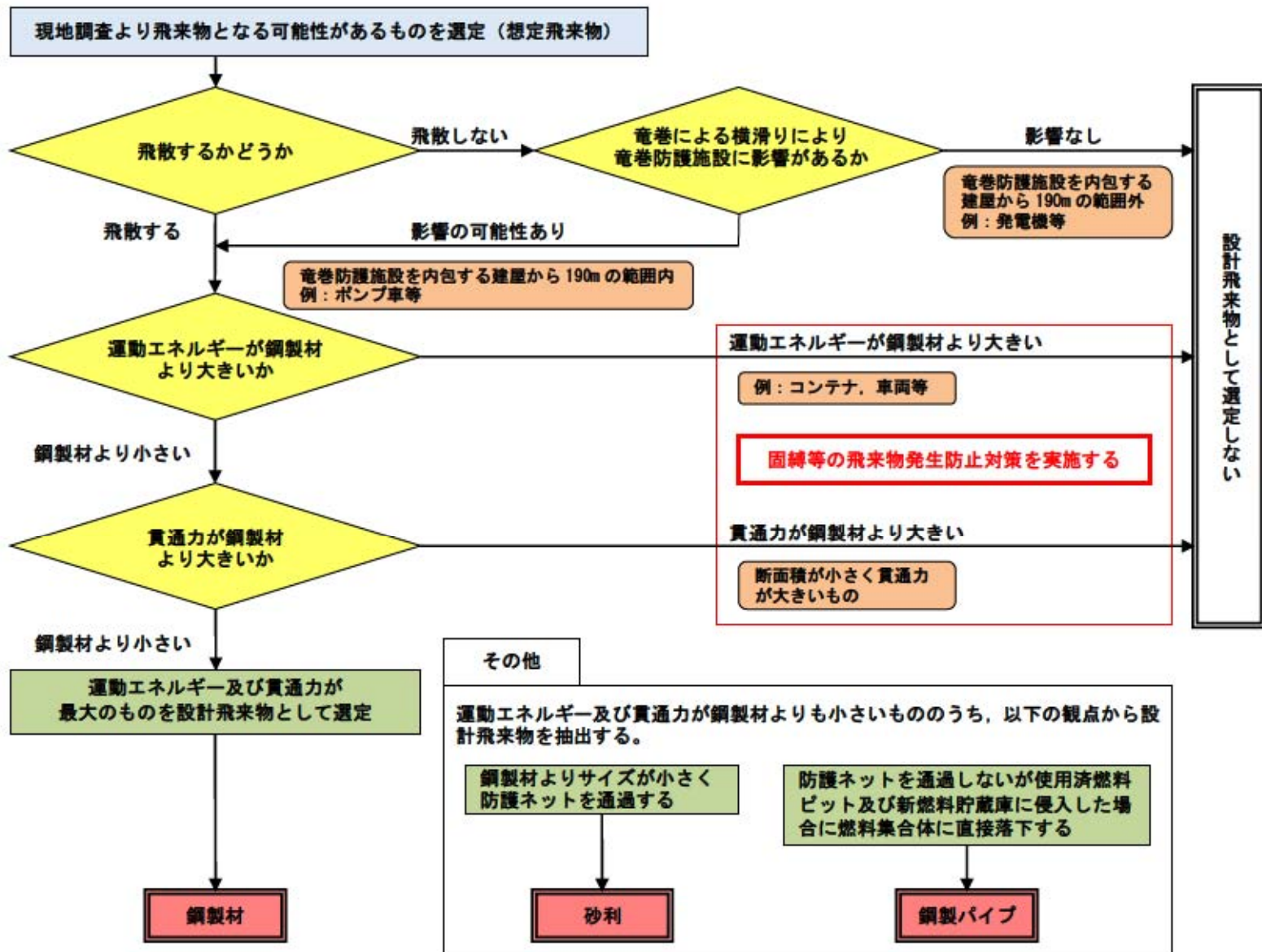
想定飛来物のうち、ガイドを参考にして、鋼製材を設計飛来物として選定する。また、鋼製パイプについては、使用済燃料ピット及び新燃料貯蔵庫に侵入した場合に燃料集合体に直接落下する可能性があること、砂利については、飛来物防護対策として設置する予定の防護ネットを通過する可能性があることから、設計飛来物として選定する。

設計飛来物の選定フローを第 12-4 図に、選定フローに基づいた想定飛来物の評価結果を第 12-3 表に示す。

なお、空力パラメータは、物体の抗力係数を基に算出する飛来物毎の物性値であり、飛来物に設計竜巻を作用させた時に、高さ方向に飛散するかどうかの判断基準となる指標である。空力パラメータの算出方法を別紙-1 に示す。また、空力パラメータに基づく想定飛来物の飛散速度及び飛散高さの評価概要を別紙-2 に示す。

第 12-2 表 設計飛来物の選定結果

飛来物の種類	砂利	鋼製パイプ	鋼製材
サイズ (m)	長さ×幅×奥行 0.04×0.04×0.04	長さ×直径 2×0.05	長さ×幅×奥行 4.2×0.3×0.2
質量 (kg)	0.17	8.4	135



第12-4図 設計飛来物の選定フロー

第12-3表 想定飛来物の評価結果 (1/2)

分類	形状	名称	長さ	幅	高さ (厚さ)	質量	空力 パラメータ C _D A/m	飛散 ^{※1}	水平速度 ^{※2}	運動 エネルギー	必要 板厚	備考
			m	m	m	kg	m ² /kg		m/s	kJ	mm	
① (極小・剛)	塊状	砂利	0.04	0.04	0.04	0.17	0.0185	○	62	1	1	設計飛来物
② (小・柔)	板状	自転車	1.9	1.1	0.6	25	0.0837	○	-	125	3	
	塊状	脚立・踏み台	0.59	0.49	0.32	30	0.0140	○	59	53	3	
		照明	0.5	0.5	0.46	6	0.0781	○	-	30	2	
		スピーカー	0.6	0.6	0.6	4	0.1782	○	-	20	1	
		コーン	0.47	0.84	1.1	39	0.0311	○	-	195	4	
		アンテナ	1	1	1.5	7	0.3771	○	-	35	1	
		屋外カメラ	0.3	0.2	0.7	10	0.0271	○	-	50	4	
③ (小・剛)	棒状	鋼製パイプ ^{※3}	2	0.05	0.05	8.4	0.0057	○	49	11	18	設計飛来物
	板状	グレーチング	3.6	2.3	0.2	200	0.0297	○	-	1000	11	固縛等の対策実施
		マンホール蓋	0.65	0.65	0.01	32	0.0089	○	53	45	11	
	塊状	バリケード	0.45	1.2	0.45	30	0.0282	○	-	150	5	
④ (中・柔)	板状	アーケード屋根	2.91	2.4	0.0008	20	0.2306	○	-	100	35	
		ベンチ	3	3	0.04	115	0.0525	○	-	575	14	固縛等の対策実施
		看板	4	1	0.003	32.4	0.0817	○	-	162	38	固縛等の対策実施
		カーブミラー	1.2	1.2	0.04	25	0.0395	○	-	125	8	
		柵	2.33	0.5	0.004	38.8	0.0199	○	63	77	29	
	塊状	空調室外機	0.77	0.86	1.33	220	0.0085	○	53	309	4	固縛等の対策実施
		プレハブ小屋 ^{※4}	4.5	3.5	2.5	1735	0.0136	○	58	2919	5	固縛等の対策実施
		消火器・消火栓	0.3	0.7	1.5	50	0.0226	○	65	106	4	
		鋼製かご ^{※4}	0.64	1.84	1.2	150	0.0183	○	62	289	4	固縛等の対策実施
		ドラム缶	0.6	0.6	0.9	245	0.0039	○	44	238	5	固縛等の対策実施
⑤ (中・剛)	棒状	鋼管	28.15	0.265	0.265	600	0.0058	○	48	692	21	固縛等の対策実施
		鋼製材 ^{※3}	4.2	0.3	0.2	135	0.0089	○	57 ^{※5}	220	37	設計飛来物
	板状	鋼板	6.1	1.54	0.021	1900	0.0033	○	43	1757	57	固縛等の対策実施
		コンクリート板	1.34	0.67	0.1	210	0.0032	○	42	186	9	

第12-3表 想定飛来物の評価結果 (2/2)

分類	形状	名称	長さ	幅	高さ (厚さ)	質量	空力 パラメータ C _D A/m	飛散 ^{※1}	水平速度 ^{※2}	運動 エネルギー	必要 板厚	備考
			m	m	m	kg	m ² /kg		m/s	kJ	mm	
⑤ (中・剛)	板状	コンクリート板 ^{※3}	1.5	1	0.15	540	0.0021	×	30	243	7	ガイド記載の飛来物
		鋼材	7.1	3.05	0.63	4340	0.0039	○	44	4202	14	固縛等の対策実施
	塊状	カードル	1.01	1.39	1.41	1500	0.0021	×	39	1141	7	固縛等の対策実施
		コンクリートブロック	0.25	1	0.22	55	0.0063	○	49	67	5	
		ケーブルドラム	2.42	2.42	1.16	2650	0.0029	○	41	2228	8	固縛等の対策実施
	発電機	0.98	2.09	1.55	1690	0.0027	○	41	1421	8	固縛等の対策実施	
⑥ (大・柔)	塊状	コンテナ	2.44	12.2	2.6	5500	0.0081	○	52	7436	11	固縛等の対策実施
		コンテナ ^{※3}	2.4	2.6	6	2300	0.0105	○	60	4140	8	ガイド記載の飛来物
		電気盤	3.5	2.4	2.2	1830	0.0077	○	51	2380	6	固縛等の対策実施
		タンク	3.08	9.2	3.46	95504.8	0.0005	×	10	4776	7	固縛等の対策実施
⑦ (大・柔) (一部剛)	塊状	鋼製ステップ	3	3	2	200	0.0693	○	-	1000	3	固縛等の対策実施
		重機	12.8	2.8	3.2	20700	0.0027	○	41	17399	16	固縛等の対策実施
		放水砲	2	4.7	1	3000	0.0035	○	43	2774	10	固縛等の対策実施
		トラック	11.93	2.49	2.66	15764	0.0028	○	41	13250	16	固縛等の対策実施
		トラック ^{※3}	5	1.9	1.3	4750	0.0026	×	34	2746	9	ガイド記載の飛来物
		タンクローリー	6.27	2.2	2.4	7730	0.0029	○	41	6498	11	固縛等の対策実施
		自動車	5.5	1.88	2.9	2770	0.0076	○	51	3603	7	固縛等の対策実施
		発電機車	20.1	7.5	8.25	58120	0.0043	○	45	58847	14	固縛等の対策実施
		ポンプ車	8.79	2.5	2.88	12450	0.0029	○	41	10465	13	固縛等の対策実施
仮置資機材	6	5	5.6	14000	0.0043	○	45	14175	8	固縛等の対策実施		

※1：空力パラメータが0.0026より大きいものについては、高さ方向に飛散する評価としている。なお、この数値は、飛来物が浮いている状態を仮定して設計竜巻を作用させた時に、上向きの加速度が発生する閾値である。

※2：空力パラメータが0.025より大きいものについては、解析領域外のため「-」とするが、運動エネルギーおよび必要板厚の算出にあたっては、設計竜巻の最大風速(100m/s)を用いる。

※3：構内の想定飛来物の他、ガイド記載の飛来物についても想定飛来物として考慮する。

※4：質量は、内容物が無い空の状態として評価する。

※5：鋼製材の最大水平速度については、「原子力発電所の竜巻影響評価ガイドの一部改正について」(平成26年9月17日 原子力規制庁)において、57m/sから51m/sに改正されているが改正前の値とする。

(4) 設計飛来物の設定

設計竜巻による設計飛来物の最大水平速度及び最大鉛直速度は、衝撃荷重による影響を保守的に評価するため、原子力発電所の竜巻影響評価ガイドに示される竜巻の最大風速 (V_D) = 100m/s の場合と同じ値とする。なお、評価ガイドにおける鋼製材の最大水平速度、最大鉛直速度については、平成 26 年 9 月 17 日に改正 (最大水平速度が 57m/s から 51m/s に、最大鉛直速度が 38m/s から 34m/s に改正) されているが、竜巻防護設計にあたっては、より保守的な改正前の値を用いるものとし、第 12-4 表のとおりとする。

ただし、原子力発電所の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については、別紙-2 に示すランキン渦を仮定した風速場の中で水平速度を算出し、鉛直速度を原子力発電所の竜巻影響評価ガイドに基づき水平速度の 2/3 として算出した。

評価に用いる設計飛来物の設定結果を第 12-4 表に示す。

第 12-4 表 設計飛来物の設定結果

飛来物の種類	砂利	鋼製パイプ	鋼製材
サイズ (m)	長さ×幅×奥行 0.04×0.04×0.04	長さ×直径 2×0.05	長さ×幅×奥行 4.2×0.3×0.2
質量 (kg)	0.17	8.4	135
最大水平速度 (m/s)	62	49	57
最大鉛直速度 (m/s)	42	33	38

4. まとめ

以上の通り、設計飛来物を設定したが、厳密には質量及び寸法の異なる想定飛来物も敷地内には存在する。しかしながら、設定した設計飛来物は、抽出した種々の想定飛来物の中から、高さ方向への飛散の有無、運動エネルギー及び貫通力の大きさ等を考慮して選定しており、設定した設計飛来物の中で運動エネルギー及び貫通力が最大である鋼製材より、運動エネルギー又は貫通力が大きなものについては、固縛等の飛来物発生防止対策を実施することから、これらの設計飛来物によって泊発電所において考えられる想定飛来物の影響を包絡できると考える。

したがって、竜巻防護施設に対する影響評価等の検討にあたっての設計飛来物としては妥当であると考えられる。

なお、今後発電所内に搬入される物品を含め、設計飛来物の代表性が失われないよう、適切に固縛等の飛来物発生防止対策を実施していく。

想定飛来物の飛散速度及び飛散高さの評価について

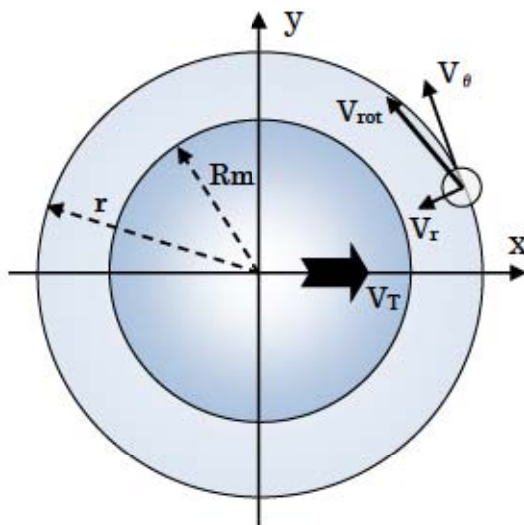
想定飛来物の飛散速度及び飛来高さは、竜巻による風速場の中の飛来物の飛散軌跡を計算することで評価している。評価概要を以下に示す。

1. 評価条件

竜巻の風速場は、ガイドを参考にして鉛直方向には風速・気圧といった構造が変化しないランキン渦としてモデル化する。

竜巻評価に用いる竜巻の風速分布は、下図に示すように原点から時刻 t 毎に x 軸方向に V_T の速度で移動するとし、その時の飛来物の初期位置を竜巻中心（原点）から任意の距離（ r ）に設定して算定する。^{※1※2}

この時の接線方向風速 V_θ 、半径方向風速 V_r 及び上昇風速 V_z は、①～③式で定義される。



$V_\theta = \frac{2}{\sqrt{5}} V_{rot}$	①										
$V_r = \frac{1}{\sqrt{5}} V_{rot}$	②										
$V_z = \frac{4}{3\sqrt{5}} V_{rot}$	③										
	($V_z = \frac{2}{3} V_\theta$ より)											
$\left\{ V_{rot} = \frac{r}{R_m} V_{R_m} \quad (0 \leq r \leq R_m) \text{ の場合} \quad \quad \quad V_{rot} = \frac{R_m}{r} V_{R_m} \quad (R_m \leq r) \text{ の場合} \right\}$												
<p>ここで、V_{R_m} は $r = R_m$ の時の V_{rot} であり、V_{rot} の最大値である。その時、最大風速 V_D は、</p>												
$V_D = V_{R_m} + V_T$	④										
<table border="0" style="width: 100%;"> <tr> <td style="width: 50%;">V_θ : 竜巻の接線方向風速</td> <td style="width: 50%;">V_r : 竜巻の半径方向風速</td> </tr> <tr> <td>V_z : 竜巻の鉛直方向風速</td> <td>V_T : 竜巻の移動速度</td> </tr> <tr> <td>V_{rot} : 竜巻の旋回風速</td> <td>V_{R_m} : 竜巻の最大旋回風速</td> </tr> <tr> <td>V_D : 竜巻の最大風速</td> <td></td> </tr> <tr> <td>r : 竜巻中心からの飛来物位置</td> <td>R_m : 竜巻旋回風速最大値位置の半径</td> </tr> </table>			V_θ : 竜巻の接線方向風速	V_r : 竜巻の半径方向風速	V_z : 竜巻の鉛直方向風速	V_T : 竜巻の移動速度	V_{rot} : 竜巻の旋回風速	V_{R_m} : 竜巻の最大旋回風速	V_D : 竜巻の最大風速		r : 竜巻中心からの飛来物位置	R_m : 竜巻旋回風速最大値位置の半径
V_θ : 竜巻の接線方向風速	V_r : 竜巻の半径方向風速											
V_z : 竜巻の鉛直方向風速	V_T : 竜巻の移動速度											
V_{rot} : 竜巻の旋回風速	V_{R_m} : 竜巻の最大旋回風速											
V_D : 竜巻の最大風速												
r : 竜巻中心からの飛来物位置	R_m : 竜巻旋回風速最大値位置の半径											

2. 評価方法

1. に示す風速場における飛来物の運動は、相対速度の2乗に比例した抗力と重力が外力として作用するものと仮定すると、以下の⑤式で表すことができる。

飛散速度及び飛散高さの評価においては、時刻 t の時間刻みにて⑤式を離散化することで算出する。この際、抗力係数 C_D は、飛来物の3方向の面積で重み付けした平均値を用いている。^{※3}

想定飛来物の高さ方向への飛散の有無は、⑤式に基づき、空力パラメータ ($C_D A/m$) と飛来物に作用する浮き上がり力及び自重との関係から評価できる。(⑥式)

$$\ddot{x}(t) = \frac{1}{2} \rho \frac{C_D A}{m} (V(x(t)) - \dot{x}(t)) |V(x(t)) - \dot{x}(t)| - gJ \quad \dots \dots \textcircled{5}$$

$$\frac{C_D A}{m} > \frac{2g}{\rho V_z \sqrt{V_D^2 + V_z^2}} \quad \dots \dots \textcircled{6}$$

m : 飛来物の質量

$x(t)$: 時刻 t での飛来物の位置

$x''(t)$: 時刻 t での飛来物の加速度

C_D : 抗力係数

g : 重力加速度

V_D : 竜巻の最大風速

A : 代表面積

$x'(t)$: 時刻 t での飛来物の速度

$V(x(t))$: 時刻 t での飛来物位置での風速

ρ : 空気密度 (=1.22)

J : 鉛直方向成分のみ1のベクトル

V_z : 竜巻の鉛直方向風速

3. 評価結果

泊発電所の設計竜巻 (最大風速 100m/s) に対して、⑥式を用いて評価した結果、空力パラメータが 0.0028 以下の場合には高さ方向へは飛散しない評価となる。

よって、泊発電所の想定飛来物の高さ方向への飛散の有無は、0.0028 に保守性を考慮して 0.0026 を基準としている。

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

※2 : 電中研 江口護ほか, 移動ランキン渦モデルによる竜巻飛来物速度の評価, 日本流体力学会年会 2013

※3 : 東京工芸大学, 平成 21~22 年度原子力安全基盤調査研究 (平成 22 年度) 「竜巻による原子力施設への影響に関する調査研究」, 独立行政法人原子力安全基盤機構委託研究 成果報告書, 平成 23 年 2 月

空力パラメータによる浮力の保守性について

空力パラメータを用いた飛来物の浮上と飛散状況について、気象庁ホームページに掲載されている藤田（F）スケールの解説において記述されている被害状況のうち、自動車を対象として比較を行った。

なお、評価する自動車の諸元は、現地調査の結果に基づいて設定している。評価対象の諸元を第1表に示す。

第1表 評価対象の諸元

	長さ (m)	幅 (m)	高さ (m)	質量 (kg)	空力パラメータ $C_D A/m$ (m^2/kg)
自動車	5.5	1.88	2.9	2770	0.0076

【検討結果】

・ F 2 レベル（風速 69m/s）での検討

風速 69m/s における浮上条件としては、別紙-2 の⑥式より $C_D A/m=0.0059$ となり、自動車は浮き上がる評価となる。

これに対して、Fスケールの被害状況においては、F 2 レベルの竜巻においては、『自動車が道から吹き飛ばされ』という記述となっていることから、空力パラメータによる評価は保守的な評価となっている。

・ F 4 レベル（風速 100m/s）での検討

風速 100m/s における浮上条件としては、別紙-2 の⑥式より $C_D A/m=0.0028$ となり、自動車は浮き上がる評価となり、その飛散距離は約 320m となる。

これに対して、Fスケールの被害状況においては、F 4 レベルの竜巻においては、『自動車は何十メートルも空中飛行する』という記述となっていることから、空力パラメータによる評価は保守的な評価となっている。

以上のことから、空力パラメータを用いた飛来物の浮上と飛散状況に係る評価については、気象庁ホームページに掲載されている藤田（F）スケールにおける被害状況と比較して保守的な結果となると判断できる。

飛来物速度（鉛直方向）に関する保守性について

竜巻により舞い上がった物体に対して、竜巻が突然消滅した場合の飛来物落下速度について検討している。評価概要を以下に示す。

1. 評価条件

物体が竜巻により飛来を開始し、その時間から1, 3, 5, 10秒後に竜巻が突然消滅する条件で評価を行い、それぞれの最大鉛直方向速度を算出した。

評価に用いる竜巻諸元を第1表に示す。なお、物体の初期位置は高さ40mとしている。

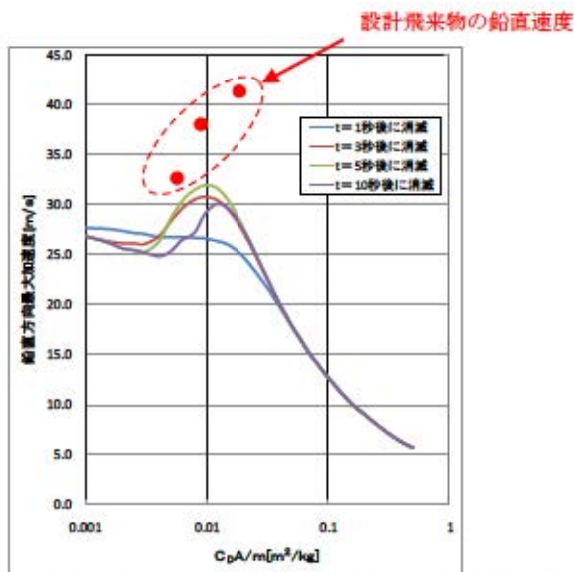
第1表 評価に用いる竜巻諸元

最大風速 (m/s)	移動風速 (m/s)	最大接線風速 (m/s)	最大風速半径 (m)	空気密度 (kg/m ³)	重力加速度 (m/s ²)
100	15	85	30	1.22	9.8

2. 評価結果

空力パラメータ ($C_D A/m$) と物体が地上に落下するまでに達した最大の鉛直速度を評価した結果を第1図に示す。

なお、グラフの各線は、竜巻が消滅した場合の鉛直方向の最大速度を示す。一方、設計飛来物の鉛直方向の速度設定は、竜巻影響ガイドに従い、第2表に示すように水平方向の2/3の速度に設定している。



第1図 竜巻風速100m/s時の飛来物の鉛直方向最大速度

第2表 設計飛来物の空力パラメータ及び飛散速度

設計飛来物	空力パラメータ 【 $C_D A/m$ 】 (m ² /kg)	水平速度 (m/s)	鉛直速度 (m/s)
砂利	0.0185	62	42
鋼製パイプ	0.0057	49	33
鋼製材	0.0089	57	38

以上のことから、本評価に用いた飛来物の鉛直速度は、ランキン渦モデルにおける上記の各時間における竜巻消滅後の飛来物鉛直速度をいずれも上回っていることから本評価は保守的であることを確認した。

1.3. 設計竜巻荷重と組み合わせる荷重について

設計竜巻荷重（以下「設計竜巻による複合荷重」という。）と組み合わせる荷重として、評価対象施設に常時作用する荷重（自重）および運転時荷重を適切に組み合わせている。

評価対象施設毎の設計竜巻による複合荷重と組み合わせる荷重の一覧を表-1に、運転時荷重の組み合わせを考慮していない理由の一覧を表-2に示す。

なお、設計竜巻による複合荷重 ($W_{T1}=W_P$, $W_{T2}=W_W+0.5\cdot W_P+W_M$) あるいは設計竜巻による気圧差による荷重 (W_P) の設定の考え方については、補足説明資料19.による。

表-1 評価対象毎の設計竜巻による複合荷重と組み合わせる荷重一覧

評価対象施設		W_W	W_P	W_M	自重	運転時荷重	備考
原子炉補機冷却海水ポンプ	ポンプ	○	○	-※7	-※1	-※5	
	モータ	○	○	-※7	○	-※5	
排気筒（建屋外）		○	○	-※7	○	-※5	
蓄熱室加熱器		-	-	-	-	-	設計飛来物による影響評価のみ実施
原子炉補機冷却海水出口ストレーナ		○	○	-※7	○	○（最高使用圧力）	
配管および弁（原子炉補機冷却海水系統）		○	○	-※7	○	○（最高使用圧力）	
原子炉補機冷却水サージタンク他		-	-	-	-	-	設計飛来物による影響評価のみ実施
配管および弁（主蒸気管室内）		-	-	-	-	-	設計飛来物による影響評価のみ実施
制御用空気系統配管		-	-	-	-	-	設計飛来物による影響評価のみ実施
使用済燃料ピット（使用済燃料ラック含む）		-	-	-	-	-	設計飛来物による影響評価のみ実施
新燃料ラック		-	-	-	-	-	設計飛来物による影響評価のみ実施
燃料移送装置		-	-	-	-	-	設計飛来物による影響評価のみ実施
使用済燃料ピットクレーン		-	-	-	-	-	設計飛来物による影響評価のみ実施
排気筒（建屋内）		-	○	-	○	-※5	
ディーゼル発電機排気消音器		○	-※8	-※7	○	-※8	
主蒸気逃がし弁消音器		○	-※8	-※7	-※1	-※8	
主蒸気安全弁排気管		○	-※8	-※7	-※1	-※8	
タービン動補助給水ポンプ排気管		○	-※8	-※7	-※1	-※8	
ディーゼル発電機燃料油貯油槽ベント管		○	-※8	-※7	-※1	-※8	
換気空調設備	ダンパ	-	○	-	○	-※5	
	バタフライ弁	-	○※6	-	-※2	-※5	
	ダクト	-	○	-	○	-※5	
	ファン	-	○	-	-※3	-※5	
空調ユニット		-	○	-	-※4	-※5	

注：表中の「○」は設計竜巻による複合荷重と組み合わせる荷重を示す。

※1：自重によって生じる転倒モーメントが、設計竜巻による複合荷重によって生じる転倒モーメントを打ち消す方向に作用するため考慮していない。

※2：パタフライ弁の自重による応力は、パタフライ弁の設計上の圧力基準による発生応力に対して十分に小さいことから考慮しない。

※3：一部のファンにおいては、評価部位であるケーシングの自重と設計竜巻による気圧差荷重が同じ方向に作用するが、ケーシングは薄板構造であり自重としては、設計竜巻による気圧差荷重に対して十分に小さいことから考慮しない。

※4：自重と設計竜巻による気圧差荷重とは、作用方向が90°ずれていること等から考慮しない。

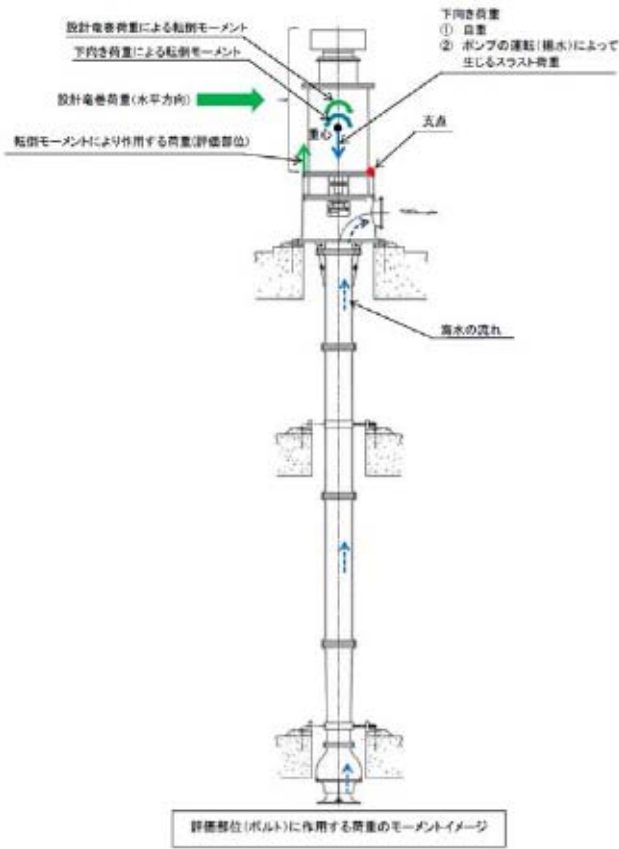
※5：表-2 参照。

※6：気圧差（内圧）と設計上の圧力基準（JIS10k）との比較にて評価を実施。

※7：設計飛来物による影響評価より貫通するとの結果が得られたことから考慮しない（貫通により安全機能を損なう可能性のある評価対象施設については飛来物防護対策を行う）。

※8：大気開放されているため考慮（作用）しない。

表-2 運転時荷重の組み合わせを考慮していない理由一覧

評価対象施設	考慮していない理由
<p>原子炉補機冷却海水ポンプ (モータ含む)</p>	<p>評価部位（ボルト）には、ポンプ（立型）の運転（揚水）によって生じる下向きスラスト荷重による転倒モーメントと、設計竜巻による複合荷重によって生じる転倒モーメント（逆向き）が作用する。これらのモーメントは、お互いに打ち消す方向に作用するため、保守的に運転時荷重（ポンプの揚水によって生じる下向きスラスト荷重）との組合せは考慮していない。</p> 

評価対象施設		考慮していない理由
排気筒		当該設備に繋がる換気空調設備（評価対象施設）については、設計竜巻による気圧差の影響を極力回避するため、泊発電所が立地する後志地方を含むエリア（石狩・空知・後志地方）に竜巻注意情報が発表され、発電所上空に「竜巻発生確度 ^{※1} 2」かつ「雷活動度 ^{※2} 3以上」が発生したことを確認した場合またはその恐れがある場合は、外気との境界となるダンパおよびバタフライ弁を閉止する、または閉止状態を確認する手順とする。これに伴って当該設備に繋がるファンを停止する、または停止状態を確認する手順とするため、運転時荷重（ファン静圧）は作用しないことから考慮していない。
換気空調設備	ダンパ	<ul style="list-style-type: none"> 当該設備のうち、アニュラス空気浄化設備、格納容器空調装置、補助建屋空調装置、試料採取室空調装置および中央制御室空調装置については、設計竜巻による気圧差の影響を極力回避するため、泊発電所が立地する後志地方を含むエリア（石狩・空知・後志地方）に竜巻注意情報が発表され、発電所上空に「竜巻発生確度^{※1}2」かつ「雷活動度^{※2}3以上」が発生したことを確認した場合またはその恐れがある場合は、外気との境界となるダンパおよびバタフライ弁を閉止する、または閉止状態を確認する手順とする。これに伴って排気筒に繋がる換気空調設備（アニュラス空気浄化設備、格納容器空調装置、補助建屋空調装置及び試料採取室空調装置）のファンは停止する、または停止状態を確認する、中央制御室空調装置のファンは閉回路循環運転とする手順とするため、運転時荷重（ファン静圧）は作用しないこと等から考慮していない。 ディーゼル発電機室換気装置、電動補助給水ポンプ室換気装置、制御用空気圧縮機室換気装置、安全補機開閉器室空調装置および蓄電池室排気装置については、竜巻防護施設の冷却等に使用されているため、冷却継続等の観点からファンは停止しないが、ファンの運転によってダクト等に生じる圧力は、竜巻による気圧低下を打ち消す方向に作用すること等から、運転時荷重との組み合わせは考慮していない。
	バタフライ弁	
	ダクト	
	ファン	
	空調ユニット	

※1：気象庁が発表する防災気象情報の一つである「竜巻発生確度ナウキャスト」において、気象ドップラーレーダーなどから、10km 間隔で竜巻などの激しい突風が発生する可能性の程度を推定した指標（10分毎に更新）。中央制御室に設置している気象端末装置（MICOS）等にて確認可能であり、竜巻などの激しい突風が発生する可能性の低い方から発生確度1→2の2つに区分されている。

※2：気象庁が発表する防災気象情報の一つである「雷ナウキャスト」において、雷監視システムによる雷放電の検知及びレーダー観測などを基に雷の激しさや雷の可能性を1km 間隔で予測した指標（10分毎に更新）。中央制御室に設置している気象端末装置（MICOS）等にて確認可能であり、雷活動度の低い方から雷活動度1→4の4つに区分されている。

14. 雹を飛来物として想定した場合の影響評価について

雹を飛来物として考えた場合の建物・構築物及び設備に与える影響については、雹の一般的な大きさ（5mm～数 cm）から設計飛来物の評価で代表できると考えるが、ここでは、雹を飛来物として想定した場合の影響評価について示す。

1. 雹の諸元（落下速度）

物体が大気中を運動する場合は空気抵抗を受けるため、時間が経過すれば空気抵抗と重力が釣り合って等速運動となり、このときの速度を終端速度という。空気中を落下する雨、雹等の粒子についても同様であることから、この終端速度で評価する。粒径ごとの雹の落下速度（出展：「一般気象学」東京大学出版）を第14-1表に示す。

第14-1表 雹の落下速度

雹の粒径	落下速度（終端速度）
1 (cm)	9 (m/s)
2 (cm)	16 (m/s)
5 (cm)	33 (m/s)
10 (cm)	59 (m/s)

2. 雹による影響評価

影響評価にあたっては、粒径10cm程度の大型の雹を想定する。なお、雹が剛飛来物とは考えられないが、剛飛来物と仮定して評価する。

コンクリート及び鋼板に対する貫通厚さについて、設計飛来物と同様に評価した結果を、設計飛来物（鋼製材）の評価結果と合わせて第14-2表に示す。

第14-2表 評価結果

	貫通厚さ	
	雹（粒径10cm）	設計飛来物（鋼製材）
コンクリート（ $F_c = 24\text{N/mm}^2$ ）	3 (cm)	21 (cm)
鋼板	1 (mm)	22 (mm)

3. まとめ

以上の結果より、雹を飛来物として想定しても、設計飛来物に十分包絡されることを確認した。

なお、コンクリートスラブの実際の最小厚さが26cmであること、また、飛来物が直接的に影響を及ぼすと想定される設備である原子炉補機冷却海水ポンプ（モータ部ケーシング）の板厚は3.2mmであることから、雹による施設への影響はない。

15. 設計基準事故時荷重の組み合わせを考慮していない理由について

「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2条第2項第4号において、「設計基準事故」とは『発生頻度が運転時の異常な過渡変化より低い異常な状態であって、当該状態が発生した場合には発電用原子炉施設から多量の放射性物質が放出するおそれがあるものとして安全設計上想定すべきものをいう。』と定義されている。

「発電用軽水型原子炉施設の安全評価に関する審査指針」において、PWRにおける「事故」の具体的な事象は以下のとおりとされており、この中で『燃料集合体の落下』以外の事故については、竜巻防護施設（設備）が設計竜巻による影響を受けない建屋内に設置され設計基準事故の原因となる配管破損等は起こり難いことから、設計竜巻荷重と設計基準事故時荷重は重畳しないと考える。

一方、『燃料集合体の落下』については、使用済燃料ピットが設置されている建屋の上屋（燃料取扱棟）は鉄骨造であり飛来物の進入が想定されることから、クレーンにて燃料集合体を取扱い中に飛来物が燃料集合体保持機構に衝突した場合は発生する可能性があるが、竜巻襲来が予想される場合に燃料集合体を使用済燃料ピット内に戻して燃料集合体の取扱い作業を一時中断する旨マニュアルに反映することとしていること、飛来物が燃料集合体保持機構にあたる可能性は非常に小さいことから、竜巻が原因で発生する確率は小さいと考える。

また、万一発生したとしても、当該事故時において設計基準事故時荷重（配管破断時の反力による荷重など）は発生しない。

以上より、設計竜巻によって設計基準事故が発生することはなく、また、設計竜巻（風速92m/s）の発生頻度は小さいため（年超過確率： 1.4×10^{-7} ）、設計竜巻と設計基準事故が同時に発生することは考え難いことから、設計基準事故時荷重との組み合わせは考慮していない。

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、動的機器である原子炉補機冷却海水ポンプが考えられるが、設計基準事故時においても海水ポンプの圧力、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み合わせは考慮しない。

- ・ 原子炉冷却材の喪失又は炉心冷却状態の著しい変化
 - (1) 原子炉冷却材喪失
 - (2) 原子炉冷却材流量の喪失
 - (3) 原子炉冷却材ポンプの軸固着
 - (4) 主給水管破断
 - (5) 主蒸気管破断
- ・ 反応度の異常な投入又は原子炉出力の急激な変化
 - (1) 制御棒飛び出し
- ・ 環境への放射性物質の異常な放出
 - (1) 放射性気体廃棄物処理施設の破損
 - (2) 蒸気発生器伝熱管破損
 - (3) 燃料集合体の落下
 - (4) 原子炉冷却材喪失
 - (5) 制御棒飛び出し

- ・原子炉格納容器内圧力、雰囲気等の異常な変化
 - (1) 原子炉冷却材喪失
 - (2) 可燃性ガスの発生

＜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（抜粋）＞

第六条

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。

＜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の解釈（抜粋）＞

第6条

6 第2項に規定する「適切に考慮したもの」とは、大きな影響を及ぼすおそれがあると想定される自然現象により当該重要安全施設に作用する衝撃及び設計基準事故が発生した場合に生じる応力を単純に加算することを必ずしも要求するものではなく、それぞれの因果関係及び時間的変化を考慮して適切に組み合わせた場合をいう。