


図－9 泊発電所3号機における建屋開口部 (T.P.43.6m)

 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。



建屋開口部⑰

当該開口部から侵入してきた設計飛来物が竜巻防護施設である原子炉補機冷却水サージタンク他に衝突しないよう、当該開口部前面（建屋内）にコンクリート製の防護壁を設置する。

図－10 泊発電所3号機における建屋開口部周辺の屋内写真他（T.P.40.3m,T.P.43.3m）

3 1. 極小飛来物の衝突に対する設備への影響について

1. 極小飛来物衝突時の衝撃荷重

衝撃にて伝達される荷重については、機械工学便覧（基礎編 α 2 編 機械力学）の「過渡応答・衝撃」に、衝突時間と応答加速度の関係が示されている（図-1参照）。

図-1では、横軸を衝突時間（ t_r ）と衝突される設備の固有周期（ T ）との比（ t_r/T ）、縦軸を応答最大加速度（ \ddot{x}_{max} ）と入力最大加速度（ \ddot{x}_{0max} ）の応答加速度比（ $\ddot{x}_{max}/\ddot{x}_{0max}$ ）として、その関係がまとめられており、衝突時間が非常に短く設備の固有周期との比（ t_r/T ）が非常に小さいと、応答加速度比（ $\ddot{x}_{max}/\ddot{x}_{0max}$ ）は非常に小さい値となることから、衝突時間が非常に短いと、設備に有意な変位（応力）が生じないことを表している。

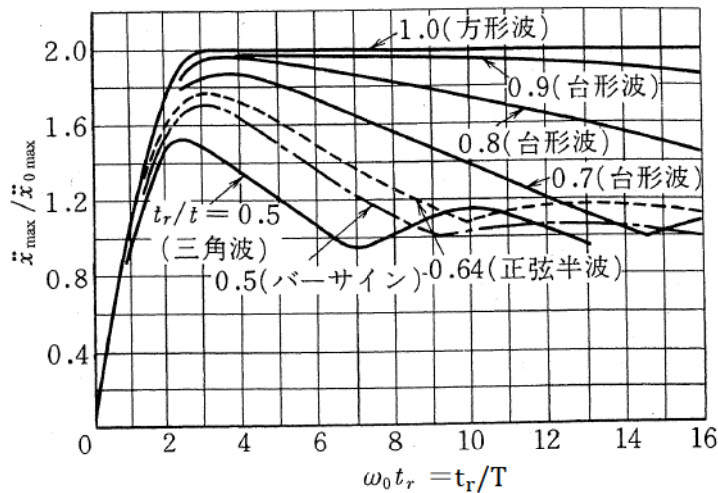


図 7.22 代表的理想衝撃パルスによる加速度衝撃スペクトル⁽¹⁾⁽⁴⁾

（出展：機械工学便覧）

図-1 衝突時間と応答加速度の関係

この図から、飛来物の速度が速くて、衝撃パルス（衝撃荷重）の作用時間が設備の固有周期より短い場合（横軸が1より小さい場合）には、入力最大加速度と応答最大加速度の比は1を下回り、エネルギーの伝達は小さくなることが判る。

\ddot{x}_{0max} : 飛来物による衝撃パルスの入力最大加速度（設備に伝えようとした加速度）

\ddot{x}_{max} : 設備の応答最大加速度（設備に伝わった加速度）

t_r : 衝撃パルスの作用時間（飛来物の衝突時間）

T : 設備の固有周期

砂利や雹等の極小飛来物の衝突は瞬間的で衝突時間が極めて短いため、設備全体に影響を及ぼす荷重はごくわずかしか発生しない（荷重に継続性がないため、設備全体を押し倒すような応答には繋がらない）ことから、極小飛来物の衝突による影響はないと考える。

以上より、設計竜巻による複合荷重による影響評価においては、極小飛来物の衝突による衝撃荷重（ W_u ）は含めていない。

なお、極小飛来物の衝突による設備（評価対象施設）への局所的な影響については、貫通評

価で確認している。

2. 極小飛来物（コンクリートブロック）の衝突解析例

(1) コンクリートブロック衝突解析条件

極小飛来物として図-2のコンクリートブロックを想定し，計算機コード（LS-DYNA）を用いて壁面への衝突解析を行い，衝撃荷重の作用時間について確認した。

以下に飛来物条件を示す。

<飛来物条件>

- ・サイズ : $0.04 \times 0.04 \times 0.04\text{m}$
- ・質量 : 0.18kg
- ・最大水平速度 : 62m/s



図-2 飛来物（コンクリートブロック）形状

(2) 計算結果

図-3に飛来物衝突時の衝突解析結果を示す。

当該解析結果より，衝突時間 t_r は $36 \mu\text{sec}$ 程度であることが確認される。仮に衝突される側の固有周期 T を 0.01sec (100Hz ※) とすると，図-1の t_r/T は， 0.0036 となり非常に小さなオーダーとなる。

※：設備の固有振動数は一般的に数Hz～30Hz程度

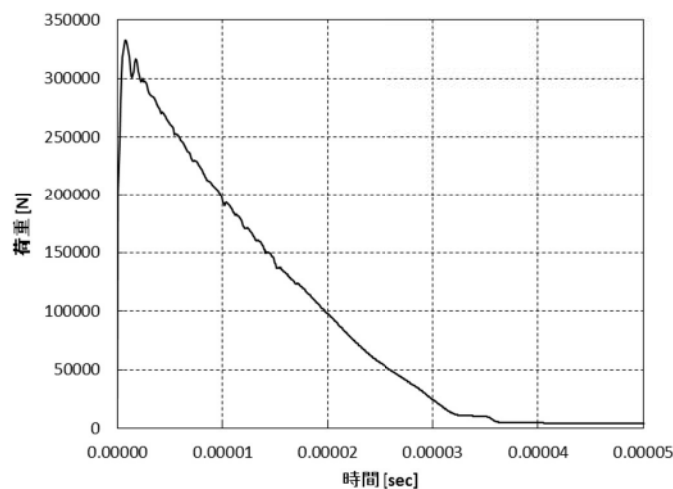


図-3 荷重時刻履歴（ひずみ速度依存性なし）

3 2. 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

竜巻による飛来物に対しては，設計飛来物による影響評価として貫通評価を実施しているが，これ以外に砂（粒径2mm～0.075mm：地盤工学会基準「地盤材料の工学的分類方法」（JGS0051-2009）引用）等の粒子状の飛来物による目詰まり，閉塞，噛み込みの影響が考えられる。

評価対象施設のうち，目詰まり，閉塞，噛み込みの影響を受ける可能性がある施設（下表参照）について評価した結果，安全機能維持への影響はないことを確認した。

また，外気を吸入して運転するディーゼル発電機については，砂等の侵入により，運転に影響を与える可能性があるため，合わせて評価を行い，安全機能への影響はないことを確認した。

影響を受ける可能性がある評価対象施設		想定される影響
原子炉補機冷却海水ポンプ	ポンプ	海水取水により砂等が侵入し軸固着が生じる。
	モータ	当該モータが設置されている取水ピットポンプ室の上屋（循環水ポンプ建屋）は，設計竜巻により外壁の損傷が考えられるため，モータ内部に砂等が侵入し運転に影響を与える。
換気空調設備		外気の取り入れにより砂等が侵入し，給気を提供する設備に対して影響を与える。
屋外にある竜巻防護施設（設備）の附属設備 ・主蒸気安全弁排気管 ・主蒸気逃がし弁消音器 ・ディーゼル発電機排気消音器 ・ディーゼル発電機燃料油貯油槽ベント管 ・タービン動補助給水ポンプ排気管		当該設備に砂等が侵入し，竜巻防護施設（設備）の排気機能等に影響を与える。

評価結果を以下に示す。

（1）原子炉補機冷却海水ポンプ

a. ポンプ

原子炉補機冷却海水ポンプの軸受部には異物逃がし溝（約 4.2mm 以上）を設けており，砂等の噛み込みによる軸固着は発生しないと考えられることから，原子炉補機冷却海水ポンプの運転に支障をきたすことはない。

＜異物逃がし溝寸法＞

- ・軸受部（上部・中間）：約 4.2mm
- ・軸受部（ボウル部）：6.5mm 以上
- ・軸受部（下部）：4.5mm 以上

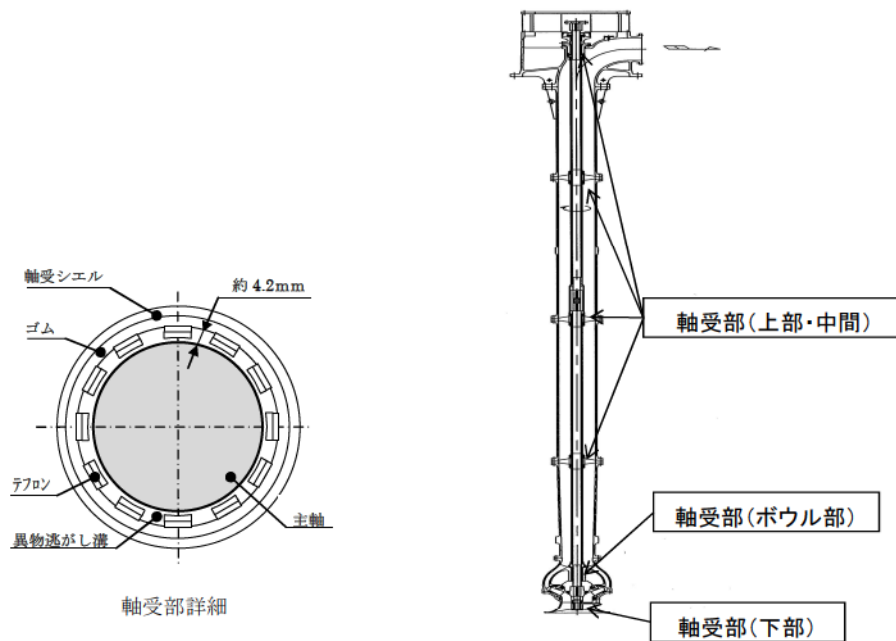


図-1 原子炉補機冷却海水ポンプ構造図

b. モータ

原子炉補機冷却海水ポンプモータは、モータ本体を全閉構造とし、空気冷却器をモータの側面に設置して外気を直接モータ内部に取り込まない全閉外扇型の冷却方式であるため、砂等がモータ内部に侵入することはない。また、空気冷却器冷却管の内径は約 24mm であるため、砂等により閉塞することはないことから、原子炉補機冷却海水ポンプモータの運転に支障をきたすことはない。

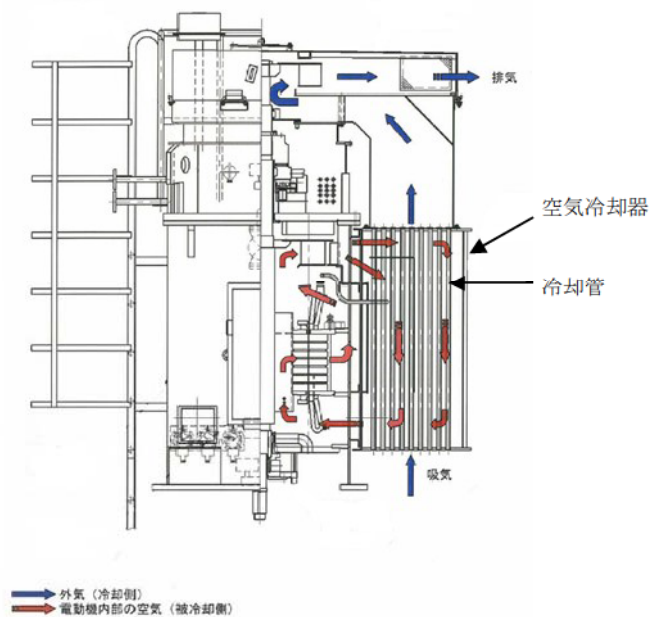


図-2 原子炉補機冷却海水ポンプモータの冷却方式

(2) 換気空調設備

換気空調設備の外気取入口には下向きの防雪フードなどが設置されており、砂等は侵入し難い構造である。また、外気取入口には平型フィルタが設置されており、砂等が外気取入口に侵入した場合であっても、平型フィルタは数 μm オーダの粒子に対し除塵効率が9割程度あるため、粒径 $2\text{mm}\sim 0.075\text{mm}$ の砂等は大部分が除去されることから、給気を供給する設備に対して、影響を及ぼすことはないと考えられる。

なお、各フィルタについては、建屋内からのアクセス通路が設置されており、アクセス性が良く、必要に応じて清掃及び交換することにより、目詰まり、閉塞を取り除くことができる。

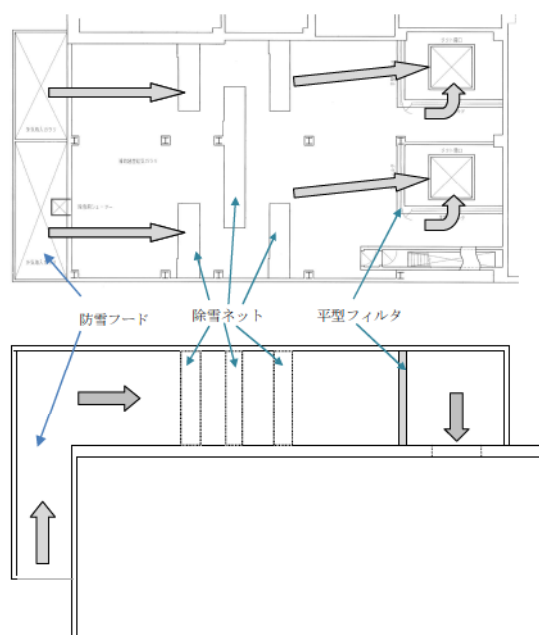


図-3 外気取入口の空気の流れ（補助建屋給気ガラリーの場合）

(3) 主蒸気安全弁排気管

当該排気管は屋外に開口しているが、竜巻は長期間停滞することなく短時間（数秒～数十秒のオーダー）で通過するため、当該排気管が閉塞する程の砂等が侵入することは考え難いことから、主蒸気安全弁の機能に影響を与えることはない。

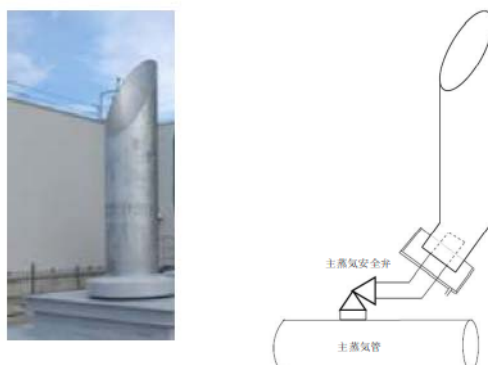


図-4 主蒸気安全弁排気管の形状

(4) 主蒸気逃がし弁消音器

当該消音器の上部は多孔板によって構成されており、また下部にはディフューザーが設置されているため、砂等が侵入しにくい構造である。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）で通過するため、仮に砂等が直接配管内に侵入した場合でも閉塞することは考え難いことから、主蒸気逃がし弁の機能に影響を与えることはない。

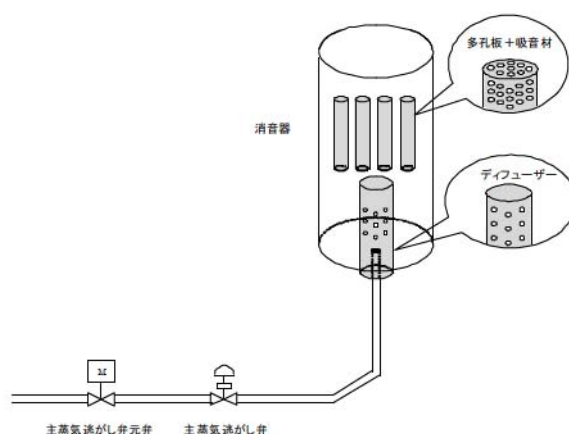


図-5 主蒸気逃がし弁出口配管形状及び消音器の構造

(5) ディーゼル発電機排気消音器

当該消音器は屋外に開口しているが、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）で通過するため、排気系統の配管が閉塞する程の砂等が侵入することは考え難いことから、ディーゼル発電機の運転に支障をきたすことはない。



図-6 ディーゼル発電機排気消音器の形状

(6) ディーゼル発電機燃料油貯油槽ベント管

当該ベント管は屋外に開口しているが、開口部は下向きとなっており、砂等が侵入し難い構造である。また、仮に砂等が燃料油系統に侵入した場合でも、当該系統には油こし器（ろ過精度 $5\mu\text{m}$ （実効値））が設置されており、ディーゼル発電機の運転に支障をきたす大きさの異物は除去されることから、ディーゼル発電機の運転に支障をきたすことはない。

なお、油こし器には、エレメントが2台設置されており、切換も可能である。

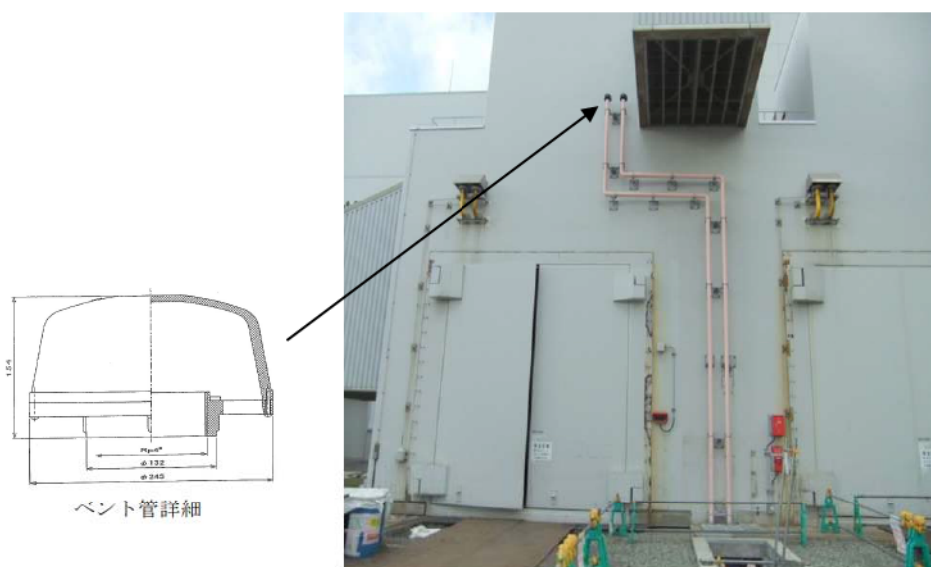


図-7 ディーゼル発電機燃料油貯油槽ベント管の形状

(8) タービン動補助給水ポンプ排気管

当該排気管は屋外に開口しているが、開口部は下向きとなっており、砂等が侵入し難い構造である。また、竜巻は長期間停滞することなく短時間（数秒～数十秒のオーダー）で通過するため、仮に砂等が侵入した場合でも閉塞することは考え難いことから、タービン動補助給水ポンプの運転に支障をきたすことはない。



図-8 タービン動補助給水ポンプ排気管の形状

(9) ディーゼル発電機

ディーゼル機関の吸入空気の流れは、下からガラリ内に吸い上げ、そのガラリ内に設置された吸入口から吸い込む構造となっており、砂等は侵入し難い構造である。

吸気消音器には層状フィルタ（粒径 0.12mm 以上において約 90%捕獲）が設置されており、仮に過給機および空気冷却器に侵入した場合でも、当該フィルタによりディーゼル発電機の運転に支障をきたす大きさの砂等は捕獲されるため、砂等により閉塞することはないと考えられる（過給機および空気冷却器の間隙は図-9 参照）。また、機関シリンダ内に送気された場合でも、定期検査毎に行うシリンダライナー及びピストンリングの点検において、砂等による有意な摩耗影響は確認されていないため、ディーゼル発電機の運転に支障をきたすことはないと考えられる。

なお、層状フィルタについては、必要に応じて交換することにより、目詰まり、閉塞を取り除くことができる。

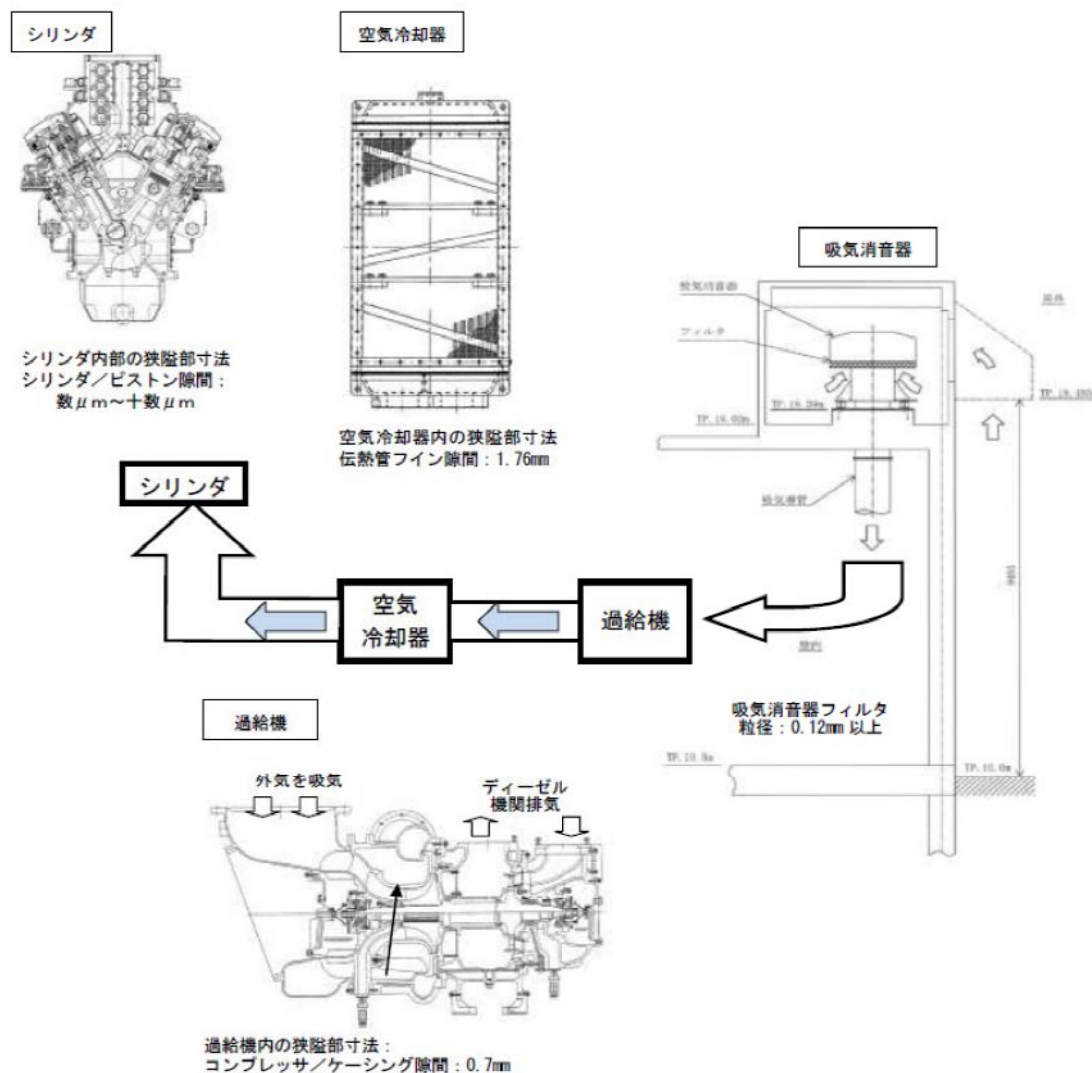


図-9 ディーゼル機関の吸入空気の流れ

3.3. 竜巻随件事象として想定される事象の抽出について

竜巻防護施設（設備）については、「原子力発電所の竜巻影響評価ガイド」を踏まえ、竜巻随件事象として想定される事象に対して安全機能が維持されることを確認することとしていることから、竜巻随件事象として想定される事象を、①過去の竜巻被害状況、②泊発電所のプラント配置を参考に抽出した。

(1) 過去の竜巻被害状況

日本で過去に発生した最大の藤田スケールとなるF3スケールの竜巻は表-1のとおりであり、このうち1990年以降に発生した竜巻による被害状況を調査した文献等に掲載されている被害状況写真を確認した結果、竜巻によって住宅、車両、電柱等への被害の他、停電事象も発生している。

このため、泊発電所においては、竜巻によって送電線等が被害を受けることにより、外部電源喪失が発生する可能性がある。

主な被害状況写真を図-1～4に示す。

表-1 日本で過去に発生したF3スケールの竜巻

発生日時	発生場所	被害状況				
		死者	負傷者	住家被害	非住家被害	停電戸数
2012/5/6 12:35	茨城県常総市	1	37	634	424	—
2006/11/7 13:23	北海道佐呂間町	9	31	39	70	631
1999/9/24 11:07	愛知県豊橋市	0	415	2329	382	7200
1990/12/11 19:13	千葉県茂原市	1	73	1747	不明	14600
1971/7/7 7:50	埼玉県浦和市	1	11	118	不明	—

(出典：気象庁 HP 竜巻等の突風データベース)



倒壊した木造構築物



5階建て集合住宅南面の被害状況



電柱の折損・傾斜



乗用車の横転等

図-1 茨城県常総市で発生した F3 スケールの竜巻による主な被害状況写真

(出典：国土交通省 国土技術政策総合研究所 HP 平成 24 年(2012 年) 5 月 6 日に茨城県つくば市で発生した建築物等の竜巻被害調査報告, 平成 25 年 1 月)



屋根全体が飛散した住宅



飛来物による損傷の激しい店舗併用住宅



道路標識の折損



電柱の折損

図-2 北海道佐呂間町で発生した F3 スケールの竜巻による主な被害状況写真

(出典：独立行政法人 建築研究所 HP 2006 年佐呂間町竜巻 被害調査報告, 2006 年 11 月 21 日)



激しく損壊してしまった民家



電柱の倒壊と竜巻によって激しく損壊された民家



飛散物で窓が割れてしまった車



歩道に倒れた自動販売機

図-3 愛知県豊橋市で発生した F3 スケールの竜巻による被害状況写真

(出典：1999年9月24日(金)豊橋市で発生した竜巻災害)



竜巻被害状況 (損傷した建物)



竜巻被害状況 (損傷した建物)



竜巻被害状況 (損傷した車両)



竜巻被害状況 (横転した車両)

図-4 千葉県茂原市で発生した F3 スケールの竜巻による被害状況写真

(出典：茂原の竜巻被害について)

(2) 泊発電所のプラント配置

竜巻による被害を受けると考えられるものとして、屋外設備が挙げられるが、泊発電所においては、屋外に燃料タンク、水タンクが設置されており、竜巻によって火災事象および溢水事象が発生する可能性がある。

泊発電所のプラント配置図を図-5に示す。

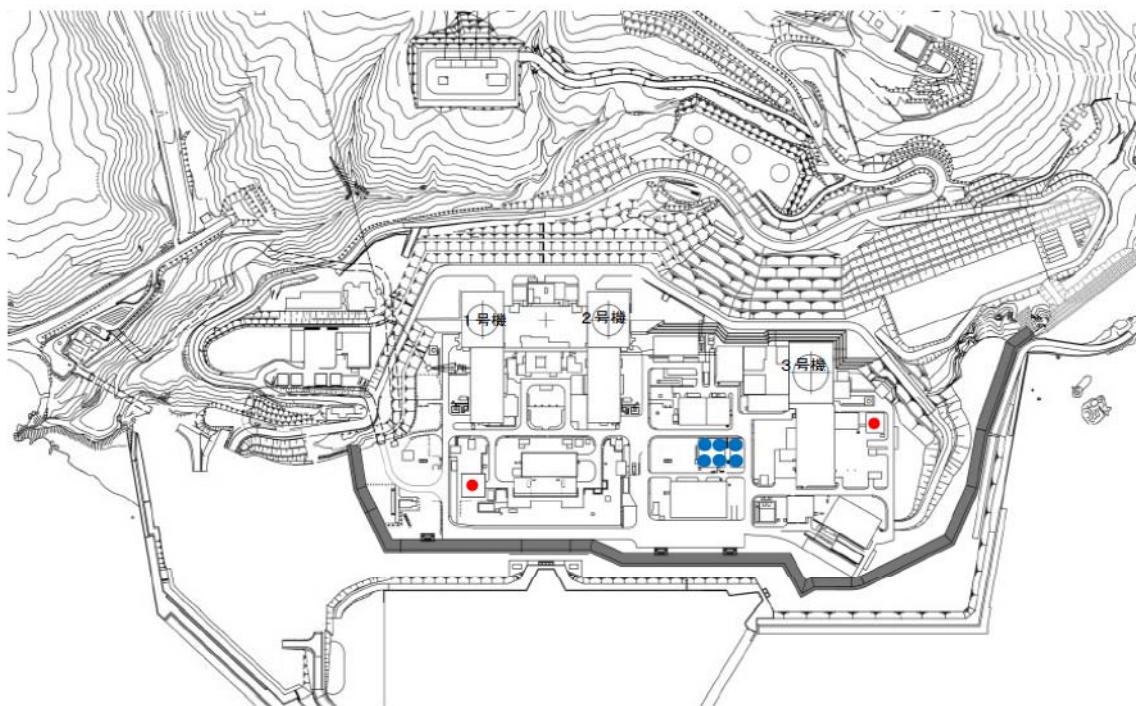


図-5 泊発電所のプラント配置図

- : 燃料タンク
- : 水タンク

以上より、竜巻随伴事象として想定される事象として、火災、溢水、外部電源喪失を抽出する。

3 4. 送電鉄塔への竜巻襲来時における影響について

1. 検討対象

送電鉄塔への最大風速 100m/s の竜巻襲来時における 3 号機の竜巻防護施設を内包する建屋（原子炉建屋等）への影響を確認するため、当該建屋に最も近い鉄塔（66kV 泊支線 No. 7）の強度検討を実施した。

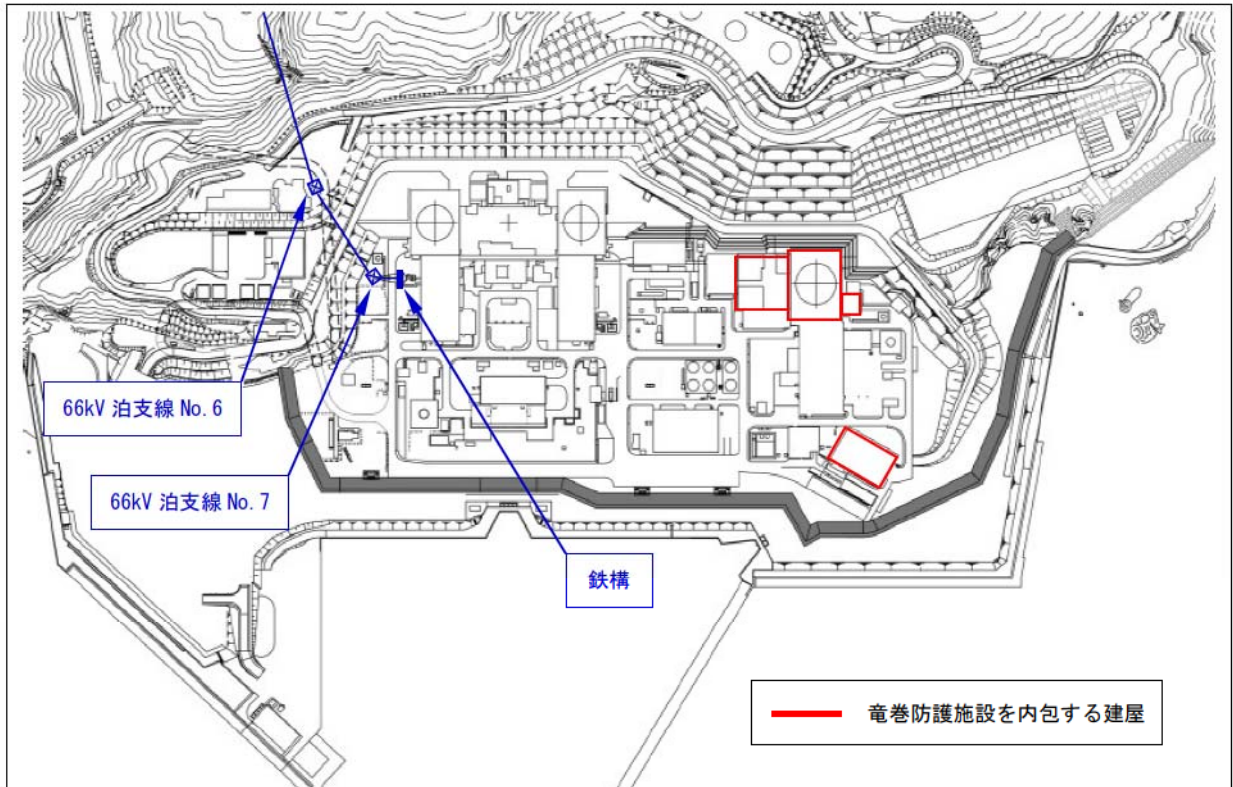


図 1 検討対象平面図

2. 検討方法

送電鉄塔の設計は、経済産業省の「電気設備に関する技術基準を定める省令」に基づき、平均風速 40m/s（10 分間平均風速）に耐えうるよう設計している。

強度検討における竜巻の想定については、ランキン渦モデルにて風速を想定し、送電鉄塔位置が最大風速となる最大接線風速半径 30m の位置として、送電鉄塔及び架渉線（電力線及び架空地線）に作用する風荷重を以下のとおり設定した。

(1) 鉄塔に対して

送電鉄塔における風圧は一般に $P=1/2 \rho V^2 C$ の理論式によって求められ、風速の 2 乗に比例する。

よって、 $V=100\text{m/s}$ の場合における風圧荷重は表 1 の設計風圧値を用いて算出し、この竜巻を想定した設計風圧値については、表 2 の設計等価風圧値（風速 40m/s 時）に対する設計用速度圧の比である 6.25 ($100^2/40^2$) を乗じて算出した。

表 1 最大風速 100m/s の竜巻を想定した設計風圧値

	鉄塔風圧値 (Pa)
塔高 40m 以下 普通鉄塔	17,750

表 2 鉄塔における設計等価風圧値

	鉄塔風圧値 (Pa)
塔高 40m 以下 普通鉄塔	2,840

(2) 架渉線に対して

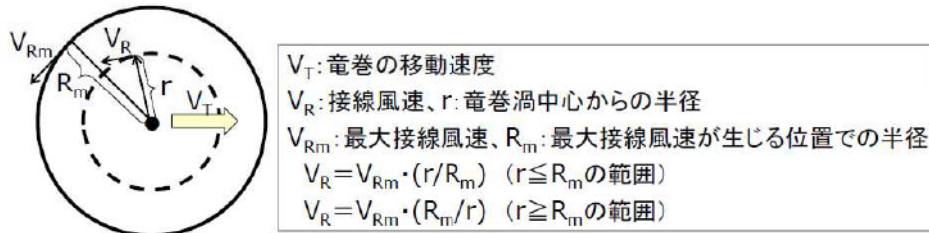
架渉線については、風速 40m/s 時の電線 1m 当りの電線風圧値 (H_c) を設定し、この風圧値が作用した際に耐えられるよう送電鉄塔の設計を行っている。

最大風速 100m/s の竜巻襲来時に架渉線へ作用する風圧値を算定するにあたっては、40m/s 時の風圧値 H_c との比較による換算係数と架渉線の作用範囲について、次項に述べる計算方法に基づき算定した。

<架渉線に作用する風荷重の算出方法>

① 竜巻の中心距離からの風速分布

原子力発電所の竜巻影響評価ガイドに記載されている風速 100m/s の竜巻特性値より，風速分布を作成した。以下の図 2 ランキン渦モデルにおける風速分布の考え方に基づき，竜巻風速 100m/s 時の風速分布を図 3 のとおり作成した。



最大竜巻風速	移動速度 V_T	最大接線風速 V_{Rm}	最大接線風速半径 R_m
100m/s	15m/s	85m/s	30m

図 2 ランキン渦モデルによる風速分布の考え方

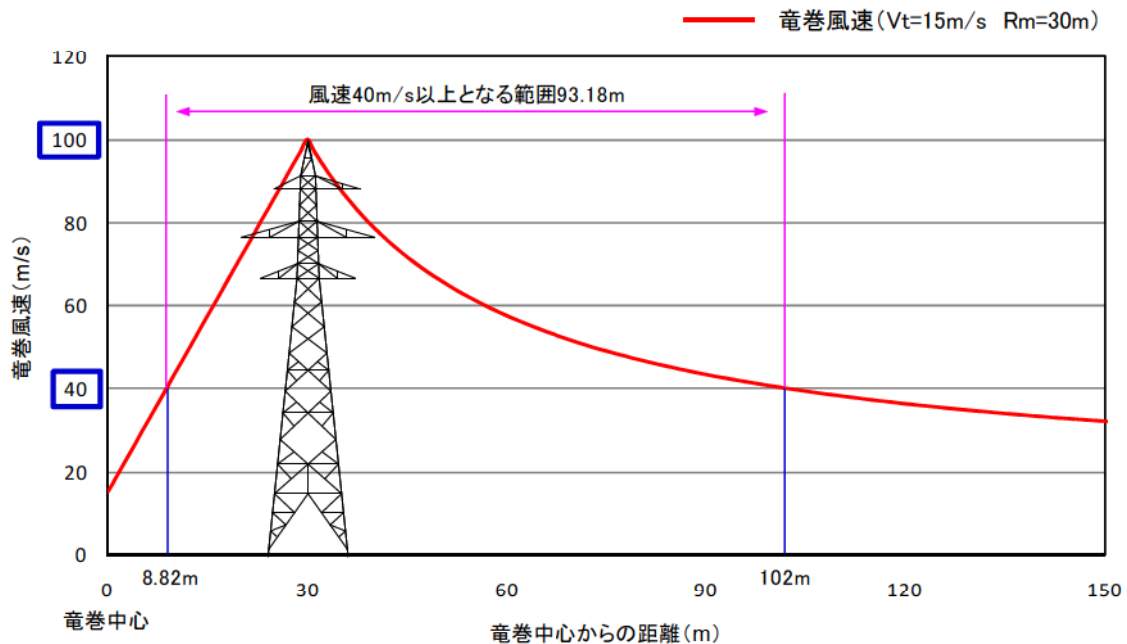


図 3 竜巻風速 100m/s 時の風速分布

② 竜巻影響範囲の決定

架渉線に作用する竜巻影響範囲は，風荷重が架渉線の設計風速である 40m/s に相当する風圧値を超える範囲とした。風圧値が 40m/s 以上となる範囲は，竜巻渦中心からの距離 8.82m から 102m までの 93.18m となる。

③ 架渉線における風圧値の比較

架渉線に作用する風圧荷重は以下の関係で表される。

$$H_c = P \times A$$

H_c : 架渉線風圧荷重 (kN)

P : 架渉線風圧 (Pa)

A : 受風面積 (m²)

ここで、架渉線の太さは一様であるため、架渉線風圧荷重は風圧Pの架渉線長さ方向の積分値に比例することとなる。

図3から算出した竜巻影響範囲において、次式のとおり、竜巻風圧値と40m/s風圧値の積分による面積比較を行った結果、竜巻風圧値は40m/s風圧値の2.5倍と計算される。

$$\frac{\int_{8.82}^{30} \{V_{Rm} \cdot (r/R_m) + V_T\}^2 dr + \int_{30}^{102} \{V_{Rm} \cdot (R_m/r) + V_T\}^2 dr}{40^2 \times (102 - 8.82)} \div 2.5$$

したがって、竜巻の影響を受ける範囲の架渉線には、風速40m/s時の架渉線1m当りの架渉線風圧をHcとした場合、Hc×2.5倍の風圧が作用するものとした。

④ 竜巻襲来時の架渉線に作用する風荷重

以上の①～③から、93.18mの範囲には風速40m/sにおける風圧値の2.5倍が作用し、それ以外の範囲には、風速40m/sの風圧値が作用することとなり、架渉線に作用する風荷重は図4のとおりとなる。

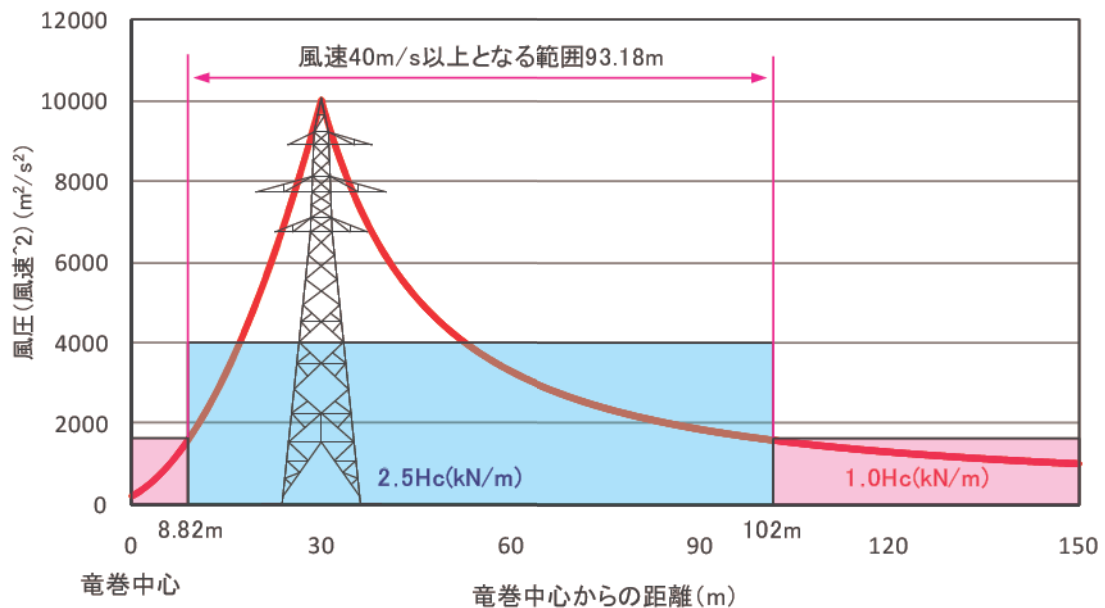


図4 架渉線に作用する風荷重の算定結果

⑤ 泊支線 No. 7 鉄塔の前後径間における架渉線風荷重分布

④にて算出した架渉線に作用する風荷重を泊支線 No. 7 鉄塔の前後径間に適用した場合の風荷重分布を表すと図 5 のとおりとなる。

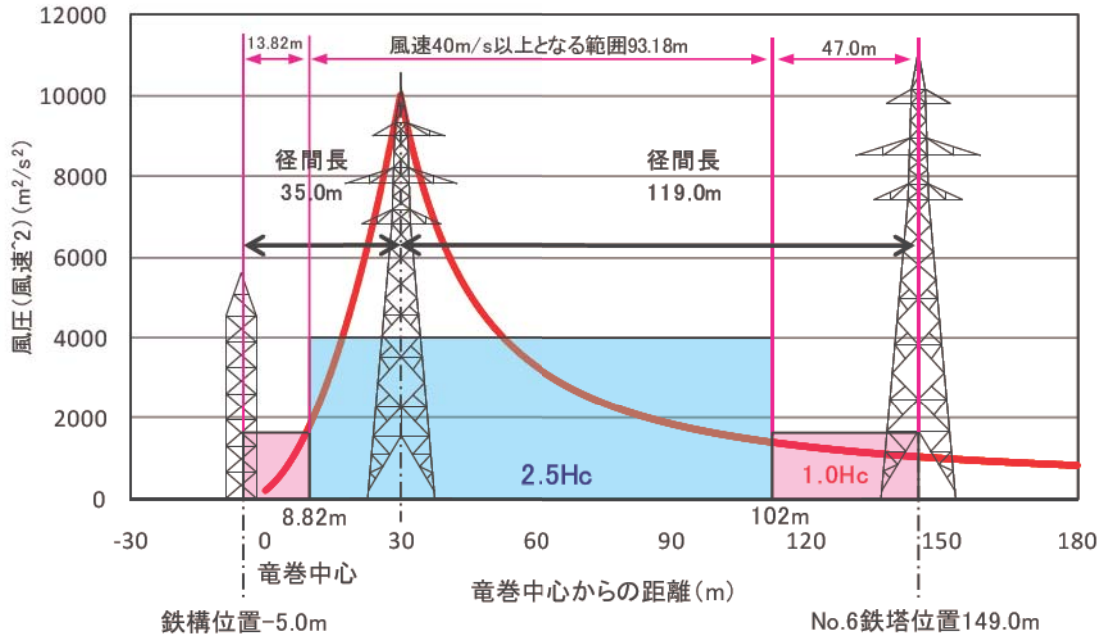


図 5 泊支線 No. 7 鉄塔前後の架渉線に作用する風荷重

⑥ 本検討における架渉線風圧荷重分布について

鉄塔の強度計算を行うにあたり、66kV 泊支線 No. 7 鉄塔が架渉線風圧荷重を分担する径間長は前後径間の 1/2 径間ずつであり、図 6 のとおり、竜巻影響範囲に含まれる。

本検討においては、架渉線の径間長が短いことを勘案し、図 6 のとおり前後径間全ての架渉線風圧を 2.5 倍として検討した。

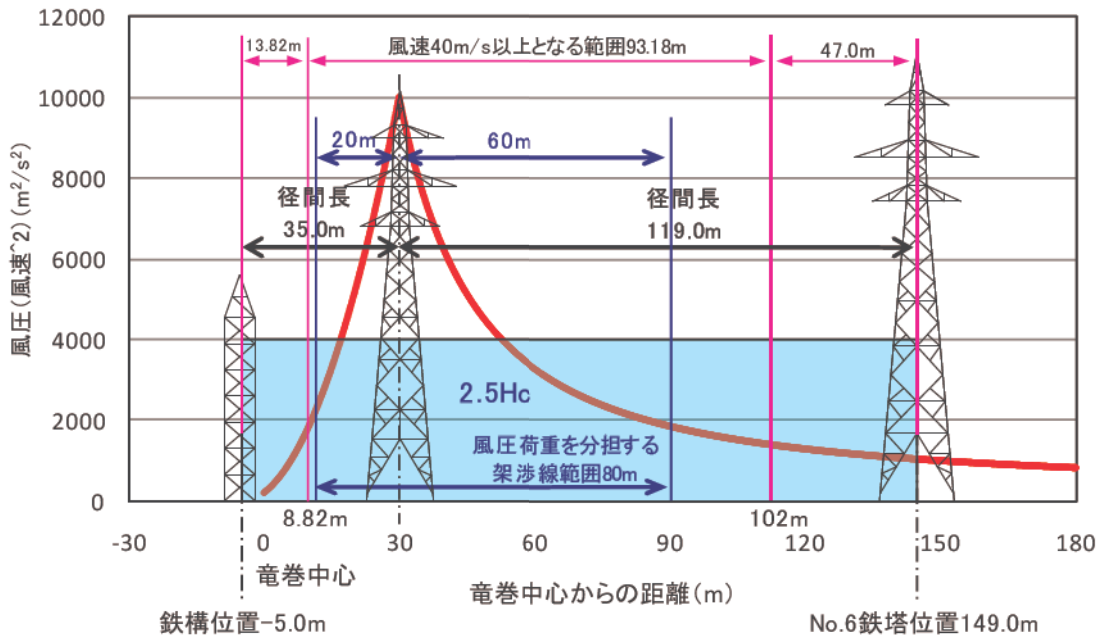


図 6 本検討における架渉線風荷重分布

3. 使用材料および許容応力度

送電鉄塔の材質および強度区分別の許容応力度は、表3のとおりである。

なお、終局時の検討であることから、鋼材は平成12年建設省告示第2464号の第3に基づきF値を1.1倍した。

表3 鋼材の許容応力度

種別	材質	板厚 t ・ 径 (mm)	降伏点または 耐力 σ_y (N/mm ²)	引張強さ σ_B (N/mm ²)
山形鋼	SS400	$t \leq 16$	245	400
		$16 < t \leq 40$	235	400
	SS540	$t \leq 16$	400 (378)	540
		$16 < t \leq 40$	390 (378)	540
ボルト	SS400	$\phi = 16$	420 (364)	520
	SS540	$\phi = 20$	480 (420)	600
		$\phi = 22$	720 (630)	900

() 内は σ_B を示す。

4. 強度検討結果

強度検討の結果、鉄塔下部の部材（腹材）の余裕度が1.00を下回る結果となった。

万一、鉄塔が損壊した場合においても、架渉線の径間長が長く高張力側である No.6 鉄塔方向に倒壊し、竜巻防護施設を内包する建屋側に倒壊するリスクは極めて低い。また、鉄塔の高さ（約29m）に対して、鉄塔から竜巻防護施設を内包する建屋までの距離は約400m確保されているため、鉄塔が倒壊したとしても竜巻防護施設を内包する建屋に衝突することはない。


さらに当該部材が破断したとしても、当該部材を支柱材に連結しているボルトの余裕度が1.00以上確保されており、少なくとも部材の片端は他の部材と連結されていると考えられるため、飛散することは考え難いことから、送電鉄塔への竜巻襲来時における影響はないことを確認した。

以上

<参考資料>

【塔体部の余裕度が 1.00 を下回る箇所】



 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。

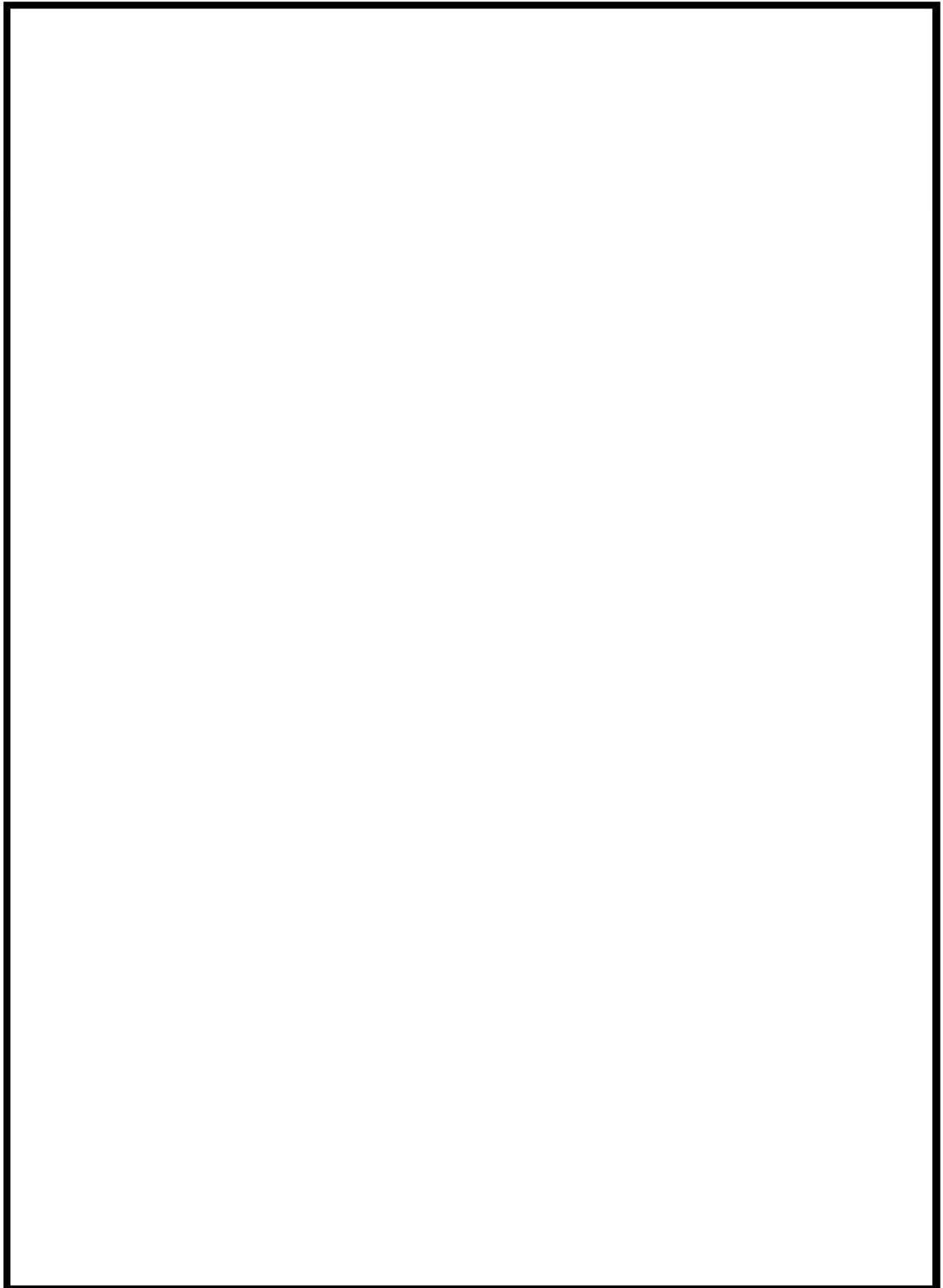
【鉄塔部材の強度検討結果】




※使用鋼材・ボルト : L45×4~L100×10 (SS400), L120×8 以上 (SS540), M16 (SS400), M20・M22 (SS540)

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。

【余裕度が 1.00 を下回る部材と設計飛来物の比較】



 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。

35. 解析コードについて

「竜巻最大風速のハザード曲線による最大風速 (V_{B2}) の評価」及び「竜巻により発生する飛来物の速度及び飛散距離の評価」に当たっては、以下の解析コードを用いているため、次ページ以降に解析コードの概要及び検証と妥当性確認の内容を記す。

表1 使用した解析コード

使用目的	解析コード名
(1) 竜巻最大風速のハザード曲線による最大風速 (V_{B2}) の評価	竜巻ハザード評価プログラム
(2) 竜巻により発生する飛来物の速度及び飛散距離等の評価	TOMBOS

(1) 竜巻最大風速のハザード曲線による最大風速 (V_{B2}) の評価

項目	コード名	竜巻ハザード評価プログラム
開発機関		一般財団法人 電力中央研究所
開発時期		2014 年
使用したバージョン		Ver. 1.2 選定理由：解析時の最新バージョン
使用目的		竜巻最大風速ハザード曲線作成
コードの概要		一般財団法人電力中央研究所にて開発・保守されているプログラムである。 所定の地域における竜巻の発生数、竜巻風速、被害長さ・幅の確率分布を解析できるとともに、発電所等の構造物が所定の風速以上の竜巻に遭遇する確率などのハザード評価が実施できる。
検証及び妥当性確認の内容		竜巻ハザード評価プログラムは、竜巻最大風速のハザード曲線による最大風速の算定に使用している。 【検証の内容】 本解析コードの検証の内容は次の通りである。 ・統計量や確率分布について、他機関の算定例と同等の数値や分布形が得られることでコードの検証を行っている。 ・ハザード曲線について、理論解と同等の分布形が得られること、及び他機関が算定したハザード曲線と同傾向の曲線が得られることでコードの検証を行っている。 【妥当性確認】 本解析コードは、竜巻最大風速のハザード曲線の算定を目的に開発されたコードであり、使用目的が合致している。また、竜巻最大風速 110m/s 程度の範囲において算定結果が妥当であることを確認している。以上より、本計算機コードを用いることは妥当である。
その他（工認実績等）		既工認での使用実績はない。 なお、最新バージョンまでに解析に影響のある変更がないことを確認している。

計算機コードの概要及び検証と妥当性確認の内容説明

竜巻ハザード評価プログラム

1. 一般事項

本書は、一般財団法人電力中央研究所にて開発・保守されている計算機コード「竜巻ハザード評価プログラム」の概要である。

竜巻ハザード評価プログラムは、竜巻最大風速のハザード曲線を算定することを目的として、今回初めて使用する解析コードである。

2. 本計算機コードの特徴

- (1) 気象庁「竜巻等の突風データベース」を基に、所定の地域における竜巻の発生数、竜巻風速、被害長さ・幅の確率分布を解析できるとともに、気象庁のデータを統合して疑似データを作成し、ハザード評価に用いることができる。なお、竜巻については、竜巻の観測数のデータ数が少ないこと、観測体制が年代により変遷していること、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ことを考慮して、保守的な取り扱いを行っている。
- (2) 構造物寸法などを与えることで、その構造物が所定の風速以上の竜巻に遭遇する確率などのハザード評価が実施できる。

3. 理論式

3. 1 統計解析

発生数、竜巻風速、被害長さ、被害幅の平均値 μ 、標準偏差 σ 、共分散 s 、相関係数 ρ は、次式により求める。

$$\begin{aligned}\mu_x &= \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i & \sigma_x &= \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \mu_x)^2} = \sqrt{s_{xx}} \\ s_{xy} &= \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \mu_x)(y_i - \mu_y) & \rho_{xy} &= \frac{s_{xy}}{\sqrt{s_{xx} \times s_{yy}}}\end{aligned}\quad (1)$$

ここで、竜巻の観測数の少なさと、観測体制が年代により変遷していることを考慮して、観測データを基に疑似的な51.5年間のデータを作成しているが、疑似データの作成に当たっては、確率分布の再生性を利用している。即ち、独立な2つの確率変数 X, Y があつた場合、確率変数の和 $X+Y$ はそれぞれのパラメータ（例えば平均値や分散）の和をパラメータに持つ同型の分布形に従うことを利用する。ポアソン分布、ポリヤ分布、正規分布ではこの再生性が成り立つ。

$$P(\mu_x, \sigma_x^2), P(\mu_y, \sigma_y^2) \Rightarrow P(\mu_x + \mu_y, \sigma_x^2 + \sigma_y^2)$$

なお、疑似データの作成に当たっては、Fスケール不明竜巻を次のとおり取り扱い保守性を高めている。陸上で発生した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竜巻と見なしている。一方、Fスケール不明の海上竜巻（水上で発生しその後上陸しなかった竜巻）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。そこで、「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」という考え方にもとづいて各Fスケールに配分することで、例えば、F3竜巻など規模が大きな竜巻が観測数より多くなる取り扱いとしている。

また、疑似的な竜巻の作成に伴う被害幅・長さの情報が無い竜巻には、被害幅・長さを有する竜巻の観測値を与えているが、その際は、被害幅・長さが大きいほう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ない取り扱いとしている。

次に、竜巻特性のそれぞれの確率分布は次式により求める。

(1) 発生数の確率分布

$$\text{ポアソン分布} : P_T(N) = \frac{(\mu T)^N}{N!} \exp(-\mu T) \quad (2)$$

$$\text{ポリヤ分布} : P_T(N) = \frac{(\mu T)^N}{N!} (1 + \beta \mu T)^{-N-1/\beta} \prod_{k=1}^{N-1} (1 + \beta k) \quad (3)$$

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

ここに、Nは竜巻の年発生数、 μ は竜巻の年平均発生数、Tは年数、 σ は竜巻の年発生数の標準偏差である。今回は、東京工芸大学委託成果等に基づき、ポリヤ分布を採用している。

(2) 竜巻風速，竜巻被害長さ，竜巻被害幅の確率分布

「原子力発電所の竜巻影響評価ガイド」（以下、ガイドという）やガイドに参照されている上記の東京工芸大学委託成果に従い、対数正規分布を用いる。

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_{\ln}^2}} \frac{1}{x} \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{\ln(x) - \mu_{\ln}}{\sigma_{\ln}} \right)^2 \right] \quad (4)$$

ここに、 μ_{\ln} 、 σ_{\ln} は $\ln(x)$ の平均値と標準偏差であり、変数xの平均値 μ や標準偏差 σ とは以下の関係にある。

$$\sigma_{\ln}^2 = \ln \left(\left(\frac{\sigma}{\mu} \right)^2 + 1 \right) \quad (5)$$

$$\mu_{\ln} = \ln(\mu) - \frac{\sigma_{\ln}^2}{2} \quad (6)$$

3. 2ハザードの評価

(1) 被害面積の期待値

1個の竜巻の風速が V_0 以上となる面積 $DA(V_0)$ の期待値は以下のように表される。

$$\begin{aligned}
 E[DA(V_0)] &= \int_0^\infty \int_0^\infty \int_0^\infty W(V_0) l f(V, w, l) dV dw dl \\
 &+ \int_0^{2\pi} \int_0^\infty \int_0^\infty H(\alpha) l f(V, l, \alpha) dV dl d\alpha + \int_0^{2\pi} \int_0^\infty \int_0^\infty W(V_0) G(\alpha) f(V, w, \alpha) dV dw d\alpha \\
 &+ S \int_{V_0}^\infty f(V) dV
 \end{aligned} \tag{7}$$

ここに、 w は竜巻の被害幅、 W は風速が V_0 以上となる被害幅、

$$W(V_0) = \left(\frac{V_{min}}{V_0} \right)^{1/1.6} w \tag{8}$$

V_{min} は被害が発生する最小風速 (=25m/s) , l は被害長さ, α は竜巻の移動方向, $H(\alpha)$ と $G(\alpha)$ は竜巻の被害幅や長さ方向への竜巻影響エリア (あるいは構造物) の投影長さ, S は竜巻影響エリアの面積である。竜巻影響エリアを直径 D_0 の円形とした場合, $H(\alpha)$ や $G(\alpha)$ は竜巻の移動方向には依存せず, 一定値となる。

$$H(\alpha) = G(\alpha) = D_0 \tag{9}$$

更に, α と V, W, l の相関係数は $-0.09 \sim 0.01$ の範囲内にあり, ほとんど相関が認められないと言う参考文献1の研究成果を考慮すると, $DA(V_0)$ の期待値は以下ようになる。

$$\begin{aligned}
 E[DA(V_0)] &= \int_0^\infty \int_0^\infty \int_0^\infty W(V_0) l f(V, w, l) dV dw dl \\
 &+ D_0 \int_0^\infty \int_0^\infty l f(V, l) dV dl + D_0 \int_0^\infty \int_0^\infty W(V_0) f(V, w) dV dw \\
 &+ (D_0^2 \pi / 4) \int_{V_0}^\infty f(V) dV
 \end{aligned} \tag{10}$$

ここに, 2変量・3変量の対数正規分布は次式で表される。

$$f(x, y) = \frac{1}{2\pi\sigma_x\sigma_y\sqrt{1-\rho^2}} \frac{1}{xy} \exp \left[-\frac{1}{2(1-\rho^2)} \left\{ \left(\frac{\ln(x) - \mu_x}{\sigma_x} \right)^2 - 2\rho \left(\frac{\ln(x) - \mu_x}{\sigma_x} \right) \left(\frac{\ln(y) - \mu_y}{\sigma_y} \right) + \left(\frac{\ln(y) - \mu_y}{\sigma_y} \right)^2 \right\} \right] \tag{11}$$

$$f(x,y,z) = \frac{1}{(2\pi)^{3/2} \begin{vmatrix} \sigma_x^2 & \sigma_x\sigma_y\rho_{xy} & \sigma_x\sigma_z\rho_{xz} \\ \sigma_x\sigma_y\rho_{xy} & \sigma_y^2 & \sigma_y\sigma_z\rho_{yz} \\ \sigma_x\sigma_z\rho_{xz} & \sigma_y\sigma_z\rho_{yz} & \sigma_z^2 \end{vmatrix}^{1/2}} \times \frac{1}{xyz} \times \exp \left[-\frac{1}{2} \begin{pmatrix} \ln(x) - \mu_x & \ln(y) - \mu_y & \ln(z) - \mu_z \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \sigma_x^2 & \sigma_x\sigma_y\rho_{xy} & \sigma_x\sigma_z\rho_{xz} \\ \sigma_x\sigma_y\rho_{xy} & \sigma_y^2 & \sigma_y\sigma_z\rho_{yz} \\ \sigma_x\sigma_z\rho_{xz} & \sigma_y\sigma_z\rho_{yz} & \sigma_z^2 \end{pmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} \ln(x) - \mu_x \\ \ln(y) - \mu_y \\ \ln(z) - \mu_z \end{pmatrix} \right] \quad (12)$$

(2) 遭遇確率（ハザード曲線）

T 年以内にいずれかの竜巻に遭遇し、 V_0 以上の竜巻風速に遭遇する確率は、竜巻の発生分布に応じて次式で表される。

$$\text{ポアソン分布} : P_{V_0,T} = 1 - \exp[-\mu R(V_0)T] \quad (13)$$

$$\text{ポリヤ分布} : P_{V_0,T} = 1 - [1 + \beta \mu R(V_0)T]^{-1/\beta} \quad (14)$$

ここに、 $R(V_0)$ は竜巻影響エリアが1つの竜巻に遭遇し、そのときの竜巻風速が V_0 以上となる確率であり、竜巻検討地域の面積を A_0 とすると、次式で表される。

$$R(V_0) = \frac{E[DA(V_0)]}{A_0} \quad (15)$$

(3) 被害面積期待値の数値積分

式(10)の数値積分に際しては、合成台形則を用いる。合成台形則は、関数 $f(x)$ を区間 $[a, b]$ を m 個の小区間に等分し、小区間ごとに面積の台形近似を行う。

$$\int_a^b f(x)dx = \frac{h}{2} \left(f(a) + f(b) + 2 \sum_{j=1}^{m-1} f(x_j) \right) - \frac{(b-a)}{12} h^2 f''(\mu) \quad (16)$$

$$h = \frac{(b-a)}{m} \quad (17)$$

$$x_j = a + jh$$

式(10)の幅・長さの積分については、有限な範囲で打ち切らざるを得ないため、誤差に注意しながら、既往最大値および相関係数も勘案して、 $3 \sim 4 \sigma_{\ln}$ を目安に積分範囲を設定する。

なお、風速については、F4竜巻（93～116m/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。

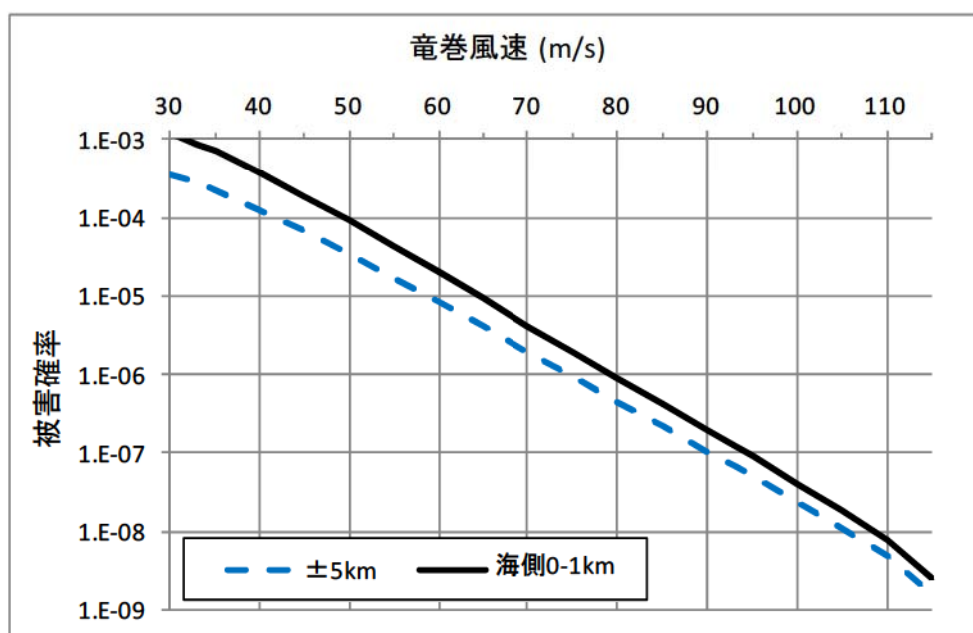


図1 竜巻最大風速のハザード曲線（泊）

(参考) 誤差に関する考察

今回の評価において、被害長さは $3.5\sigma_{ln}$ を積分範囲に設定している。被害長さの積分範囲を $0.5\sigma_{ln}$ 拡げて $4\sigma_{ln}$ とした場合、被害面積の期待値は約1.4%大きくなる。仮に $1\sigma_{ln}$ 拡げて $4.5\sigma_{ln}$ とした場合でも、被害面積の期待値は約1.7%大きくなる程度であり、 $3.5\sigma_{ln}$ とすることで概ねカバーできていることが分かる。

この被害面積の期待値の変動が、竜巻風速のハザード曲線に与える影響(感度)を分析した。その結果、被害面積の期待値が仮に2%変わったとしても、ハザード(風速)は0.2m/s変動する程度であり、求めている風速値に対する影響はごく小さいと考えられる。

なお、竜巻最大風速のハザード曲線算定に関する保守性については、疑似データ作成におけるFスケール不明竜巻の取扱いにより、例えばF2スケールの竜巻の発生数について、観測実績のおよそ4倍に見積もっている。

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が、その際は、被害幅・長さが大きいほう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ないなど、保守性を高めた評価としている。

4. 解析フローチャート

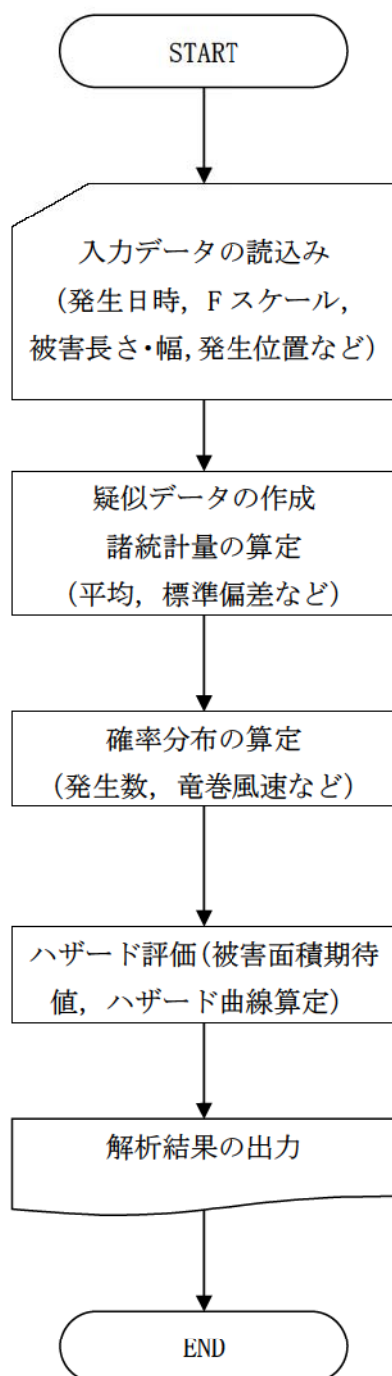


図2 解析フローチャート

5. コード検証

5. 1 統計解析

(1) 諸統計量

竜巻最大風速のハザード曲線の算定に当っては、式(11), (12)に示したように、竜巻風速、被害長さ、被害幅それぞれの平均値と標準偏差、及び竜巻風速と被害長さ、竜巻風速と被害幅、被害長さ と被害幅の相関係数が必要となる。そこで、本解析コードにおいて、これらの統計量が正しく算定されることを下記のとおり確認する。

参考文献2 (豊川・柳井編著「医学・保健学の例題による統計学」現代数学社) には、実験用ハツカネズミに与えた催眠剤と睡眠時間の関係として、図3のデータが示されている。

このデータをサンプルとして、本解析コードによる平均値、共分散、相関係数を求め、参考文献2の結果と比較した結果を表2に示す。本解析コードの結果は、文献の結果と一致することを確認した。

個体	催眠剤 ($\mu\text{g}/\text{体重g}$)	睡眠時間 (hrs)
A	1	1
B	2	6
C	5	3
D	7	7
E	8	10
F	11	6
G	12	10
H	12	7
I	13	9
J	15	15

表 4・1 催眠剤と睡眠時間

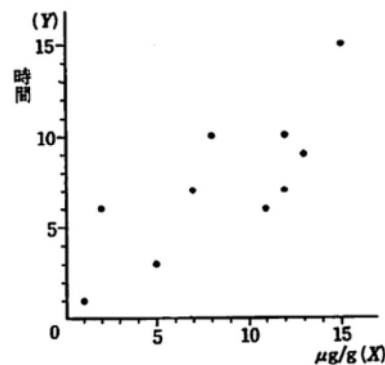


図 4・1 催眠剤投与量と睡眠時間の散布図

図 3 参考文献 2 における睡眠剤投与量と睡眠時間の関係

表2 統計処理の検証結果

統計量	参考文献2		本解析コード	
	催眠剤 ($\mu\text{g}/\text{体重g}$)	睡眠時間 (hrs)	催眠剤 ($\mu\text{g}/\text{体重g}$)	睡眠時間 (hrs)
平均値	8.6	7.4	8.60	7.40
分散	22.93	15.38	22.933	15.378
共分散	14.73		14.733	
相関係数	0.785		0.7846	

(2) 確率分布

参考文献2には、ある都市の1年間（365日）の交通事故死亡者の分布（架空の例）を、ポアソン分布とポリヤ分布（文献では、ポリア型の負の二項分布と記載）に当てはめた例が示されているため、これをサンプルデータとして計算コードの検証を行った（表3参照）。なお、前述のとおり竜巻影響評価ではポリヤ分布を採用しているが、参考文献2にはポアソン分布のデータも記載されているため、ポリヤ分布と合わせてポアソン分布の検証も行う。

表3に示す実測数の平均値2.989と分散3.759（参考文献2に記載）を用いて、ポリヤ分布（式(3)）及びポアソン分布（式(2)）を本解析コードで求めた。結果を表4及び表5に示す。また、参考文献2に示されたグラフを図4、本解析コードで求めたグラフを図5に示す。表4及び図4と図5の比較より、両者は概ね一致していることが分かる。

表3 ある都市の交通事故死亡者数の分布（参考文献2の表5.3より）

死亡者数	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9以上	計
実測数	27	61	77	71	54	35	20	11	6	3	365
ポアソン分布	18.4	54.9	82.1	81.8	61.1	36.5	18.2	7.8	2.9	1.3	365
ポリア型 負の2項分布	25.5	60.7	78.4	72.8	54.4	34.8	19.7	10.2	4.8	3.7	365

表4 ポリヤ分布の検証結果

上表掲載	死亡者数	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9以上	計
	実測数	27	61	77	71	54	35	20	11	6	3	365
	ポリア(①)	25.5	60.7	78.4	72.8	54.4	34.8	19.7	10.2	4.8	3.7	365
本解析コード(②)		25.54	60.71	78.36	72.79	54.43	34.79	19.72	10.16	4.84	3.66	365
差(②/①)		1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.01	0.99	1.00

表5 ポアソン分布の検証結果

上表掲載	死亡者数	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9以上	計
	実測数	27	61	77	71	54	35	20	11	6	3	365
	ポアソン(①)	18.4	54.9	82.1	81.8	61.1	36.5	18.2	7.8	2.9	1.3	365
本解析コード(②)		18.37	54.92	82.07	81.77	61.11	36.53	18.20	7.77	2.90	1.36	365
差(②/①)		1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.05	1.00

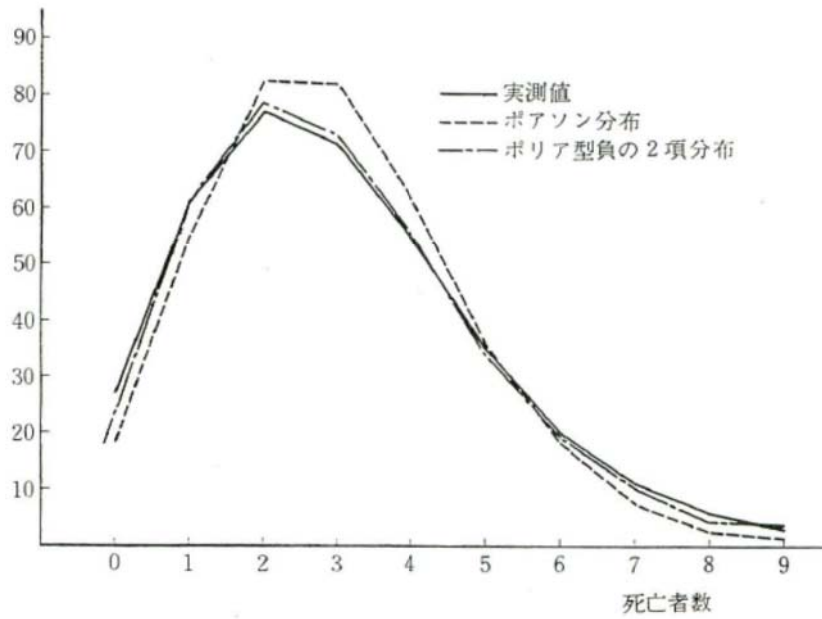


図4 分布形 (参考文献2)

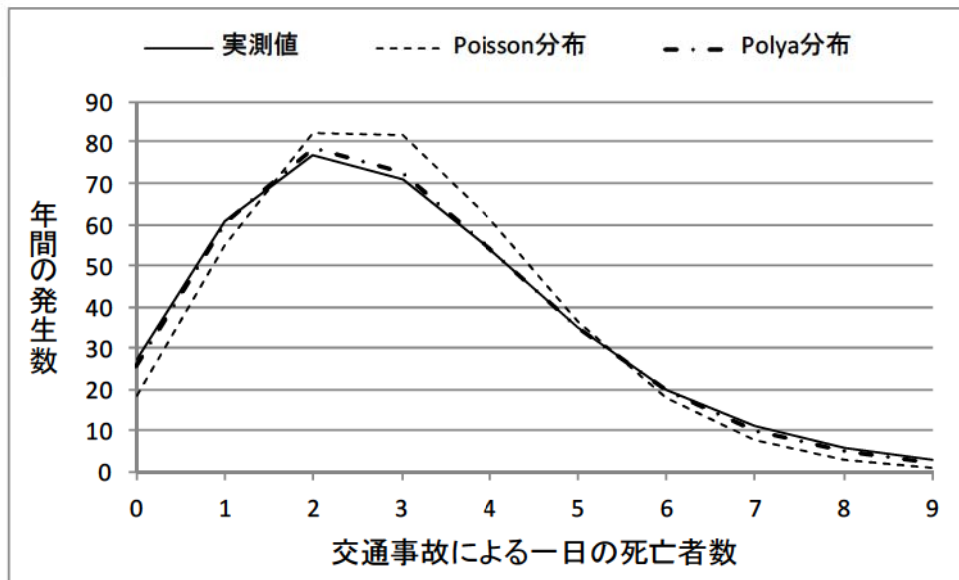


図5 分布形 (本解析コード)

5. 2ハザード評価

(1) 簡略化した条件での検証

竜巻風速，被害幅，被害長さ，および移動方向はそれぞれ無相関だと仮定し，理論解と本解析コードの計算結果を比較する。

この場合，竜巻被害面積の期待値 $E[DA(V_0)]$ は，式(10a)のように近似できる。

$$E[DA(V_0)] \approx (1-F(V_0)) \times [W \bar{w} \bar{l} + D_0 \bar{l} + W' \bar{w} D_0 + (D_0^2 \pi / 4)] \quad (10a)$$

ここに， $(1-F(V_0))$ は風速の超過確率， \bar{w} ， \bar{l} は平均被害域幅および平均被害域長さ， W' は幅補正に関する項 $(= (V_{\min}/V_0)^{1/1.6})$ である。なお， $F(V_0)$ は対数正規分布で表されるため，次式のとおりとなる。

$$F(V_0) = \int_0^{V_0} f(v) dv = \int_0^{V_0} \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_v} \frac{1}{v} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{\ln(v)-\mu_v}{\sigma_v}\right)^2\right] dv \quad (10b)$$

日本海側の海岸線から海側・陸側各5km範囲で発生した竜巻を対象として，式(10a)の近似式から被害面積期待値を求めた結果と，本解析コードにおいて無相関として数値積分を実施した結果を図6に示す。なお，図6の実線で示した式(10a)の近似は，竜巻風速を1m/s間隔で離散的に求めた面積期待値を結んだものである。この図より，両者は概ね一致していることが分かる。

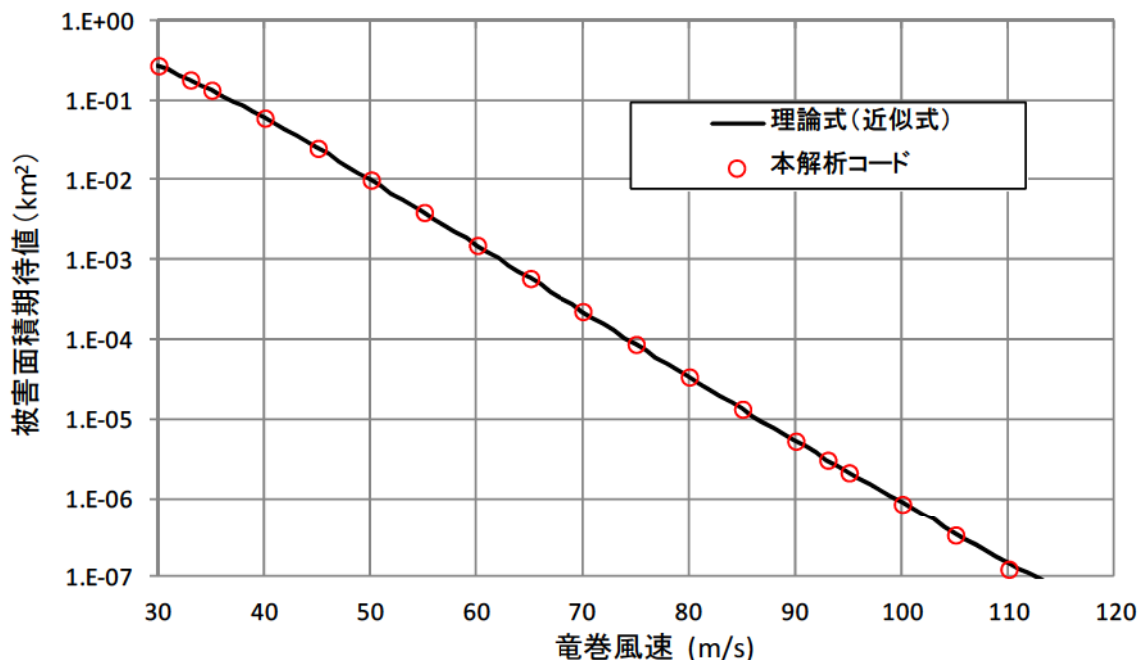


図6 被害面積の期待値の比較

(2) ハザード曲線

参考文献1では、全国のデータ（1961年1月～2009年12月）を用いて海岸からの距離別のハザード曲線を算定しており、その結果が同報告書の図2.1.2.14-15（92頁）に掲載されている。なお、ポリヤ分布を採用して計算を行っている。

本検証では、海岸から1km以内の陸地（CASE-A）と海岸から5km以上離れた陸地（CASE-B）の2ケースについて検証計算を行った。なお、参考文献1では、式(8)の V_{min} の値が不明であるため、ここでは25.0m/sを用いる。

参考文献1では、竜巻の移動方向に関して4～5次のフーリエ級数で近似するのが妥当（p. 47）と指摘すると共に、i)北東の頻度が高い、ii)海岸からの距離による違いは見られない（p. 89）、と述べられているだけで、具体的な数値の記載は無い。本検証では、移動方向と風速・幅・長さなどとの相関はほとんど無いことから、方向は一樣だと仮定した。

発電所施設の規模は、参考文献1の表2.1.2.1（p. 65）（表6参照）に記載されているが、具体的な設定方法に関する記述は見当らない。そこで同表を参考に、建屋の総面積（約11万 m^2 ）程度となる一辺333mの正方形構造物とした（参考文献1では、原子炉建屋、タービン建屋、海水熱交換機建屋はそれぞれ4棟、コントロール建屋は2棟としている）。

なお、参考文献1では、風速積分範囲を116.2m/sまでとして後に示す図5-5を求めている。一方、本解析コードでは120m/sまでを積分範囲としている。これらのハザード計算に関する条件を表7に示す。

表6 施設の寸法（参考文献1）

表 2.1.2.1 竜巻リスクの計算に用いた代表的な原子力発電所の主要施設の寸法

	平面寸法 (m)			平面寸法 (m)	
	南北	東西		南北	東西
原子炉建屋	80	79	活性炭式希ガス・ホール ドアップ装置建屋	39	38
タービン建屋	109	66	500kV 超高压開閉所	105	126
コントロール建屋	39	66	事務本館	48	108
サービス建屋	25	73	事務本館（厚生棟）	17	83
海水熱交換器建屋	97	40	事務本館（情報棟）	18	49
排気筒	49	49	高放射性固体廃棄物貯 蔵庫設備建屋	40	27
固体廃棄物貯蔵庫	29	120	使用済燃料輸送容器保 管設備建屋	56	19
廃棄物処理建屋	104	41			

表7 ハザード計算に関する条件

項目	CASE-A		CASE-B		備考	
	参考文献	本コード	参考文献	本コード		
元データ	気象庁「竜巻等の突風データベース」					
期間	1962年1月～2009年12月					
年発生数 (個)	平均	11.0	11.0	7.6	7.6	
	標準偏差	7.3	7.3	2.6	2.6	
風速 (m/s)	平均	31.5	31.5	33.7	33.7	
	標準偏差	10.4	10.4	12.1	12.1	
被害長さ (km)	平均	2.83	2.83	4.61	4.61	
	標準偏差	4.39	4.39	5.49	5.49	
被害幅 (m)	平均	101.8	101.8	161.8	161.8	
	標準偏差	158.8	158.8	205.5	205.5	
相関係数	風速と被害長さ	0.323	0.323	0.268	0.268	
	風速と被害幅	0.183	0.183	0.223	0.223	
	被害長さ と被害幅	0.471	0.471	0.363	0.363	
確率分布	発生数	ポリヤ	ポリヤ	ポリヤ	ポリヤ	
	風速	対数正規	対数正規	対数正規	対数正規	
	被害長さ	対数正規	対数正規	対数正規	対数正規	
	被害幅	対数正規	対数正規	対数正規	対数正規	
竜巻検討地域面積(km ²)	17,185.3	17,185.3	316,267.2	316,267.2		
移動方向	不明	一様	不明	一様	※	
施設規模	不明	333m四方 の 正方形	不明	333m四方 の正 方形	※	
V _{min} (m/s)	不明	25	不明	25	※	
積分範囲	風速	116.2m/s	120m/s	116.2m/s	120m/s	※
	被害長さ	不明	60km	不明	60km	
	被害幅	不明	6km	不明	6km	

参考文献1に示された結果を図7に、検証ケース CASE-A, -Bの結果を図8に示す。また、表8に年超過確率 10^{-5} に相当する風速値を整理した。図7, 8及び表8より、参考文献1の詳細な計算条件には不明な点もあることを考慮すると、ハザード曲線の傾向は概ね一致している。

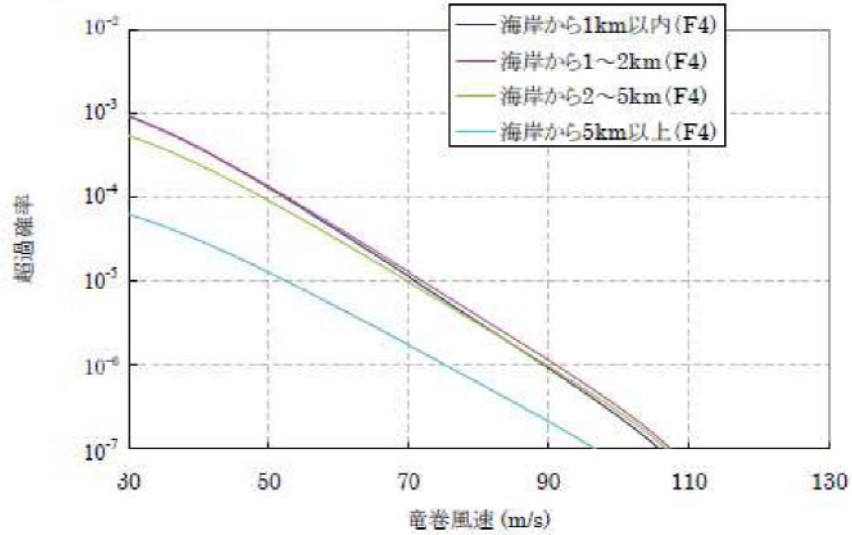


図7 ハザード算定結果 (参考文献1)

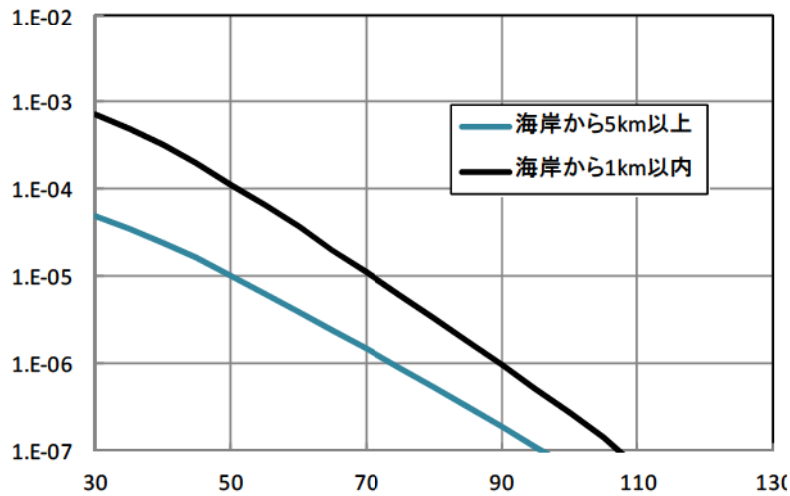


図8 ハザード算定結果 (本解析コード)

表8 検証結果の比較

ケース		年超過確率 10^{-5} 相当風速		差 (②/①)
		①参考文献1	②本解析コード	
CASE-A	海岸から1km以内	70.9m/s	70.7m/s	0.997
CASE-B	海岸から5km以上	52.0m/s	50.1m/s	0.963

ただし、表7に示すとおり、計算条件の一部は不明であることから、検証結果の妥当性について考察する。

まず、移動方向については、例えば移動方向と竜巻風速に相関があるとすると、ある特定の方向から移動してくる竜巻は強い（風速が大きい）傾向にあるということになるが、実際には参考文献1に記載のとおり、移動方向との相関は見受けられない。従って、移動方向の取り扱いの差異がハザードに与える影響はほとんど無いと考えられる。

次に、ハザードへの寄与という観点で、竜巻パラメータの評価を行う。移動方向を考慮しない場合の被害面積の期待値の算定式が、上述した式(10)であり再掲する。

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

ここで、

$$\text{第1項} : \int_0^{\infty} \int_0^{\infty} \int_0^{\infty} W(V_0) l f(V, w, l) dV dw dl$$

$$\text{第2項} : D_0 \int_0^{\infty} \int_0^{\infty} l f(V, l) dV dl$$

$$\text{第3項} : D_0 \int_0^{\infty} \int_0^{\infty} W(V_0) f(V, w) dV dw$$

$$\text{第4項} : (D_0^2 \pi / 4) \int_{V_0}^{\infty} f(V) dV$$

として、泊発電所の竜巻影響評価における、被害面積期待値の算定結果を図9に示す。この図より、例えば、竜巻風速70m/sのところを見ると、第1～4項に対応する面積がそれぞれ、 $5.48 \times 10^{-4} \text{ km}^2$ 、 $2.47 \times 10^{-3} \text{ km}^2$ 、 $3.38 \times 10^{-5} \text{ km}^2$ 、 $1.82 \times 10^{-4} \text{ km}^2$ 、第1～4項を足し合わせて $3.24 \times 10^{-3} \text{ km}^2$ 、となっており、第1項及び第2項が支配的な要因であることがわかる。

これは、第1項と第2項には被害長さが関係していることに起因している。被害長さはkm単位の

数値であり、第3項及び第4項に関係する被害幅や施設規模など100m単位の数値とオーダーが異なるため、寄与度に差が生じている。従って、表7において条件の整合が確認できない V_{min} （被害幅のパラメータの一つ）や施設規模の差異がハザードに与える影響は小さいと考えられる。

以上より、風速と被害長さに関する条件は合致していることから、ハザード計算は一定の再現性は有していると考えられる。

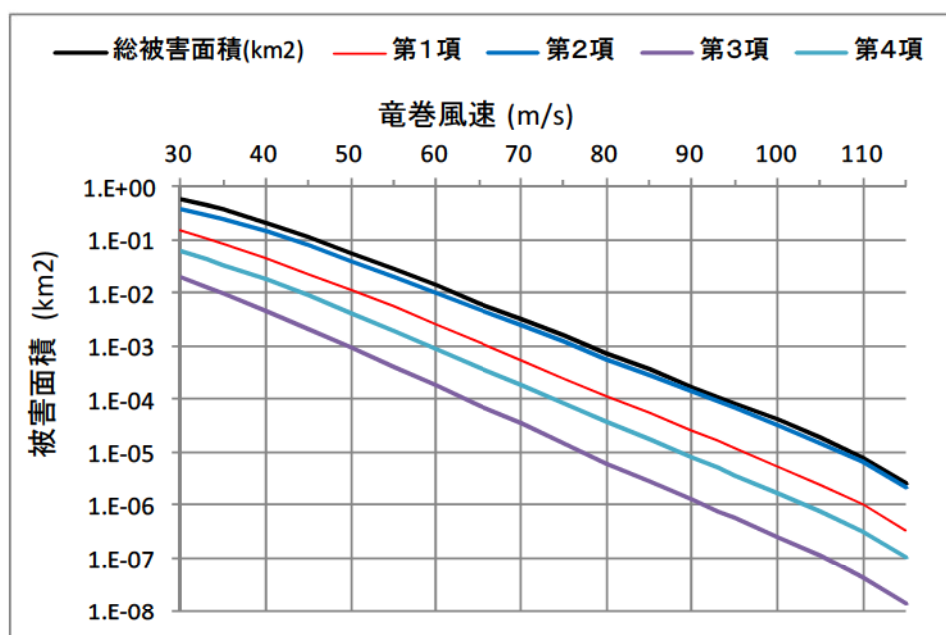


図9 被害面積期待値（海岸線から陸側海側それぞれ5kmを対象としたケース）

（参考）当社竜巻影響評価に基づく V_{min} と施設規模の影響度について

V_{min} と施設規模の影響度について、当社の竜巻影響評価をもとに評価すると、泊発電所の竜巻影響評価では、 V_{min} を25m/sにて検討しているが、 V_{min} を17m/sとした場合に例えば、海岸線から陸側海側それぞれ5kmを対象としたケースでは、ハザード曲線の 10^{-5} 相当風速は、58.4m/s（ V_{min} =17m/sの場合）、58.7m/s（ V_{min} =25m/sの場合）であり、 V_{min} の8m/sの差異がハザードでは0.3m/s程度の影響を与えている。

施設規模の影響については、泊発電所は D_0 =425mで評価を行っているが上記と同様に例えば D_0 =445mとした場合、海岸線から陸側海側それぞれ5kmを対象としたケースのハザード曲線の 10^{-5} 相当風速と比較すると、58.7m/s（ D_0 =425mの場合）、59.0m/s（ D_0 =445mの場合）であり、 D_0 の20mの差異がハザードでは0.3m/s程度の影響を与えている。

V_{min} と施設規模の差異を定量的に評価することは困難であるものの、これらの評価結果から類推すると、 10^{-5} 相当風速で数m/s程度の差異が生じる可能性があると考えられる。

6. 妥当性確認

「竜巻ハザード評価プログラム」は、竜巻最大風速のハザード曲線を算定するために使用している。

本解析コードは、竜巻最大風速のハザード曲線の算定を目的に開発されたコードであり、使用目的が合致している。また、竜巻最大風速110m/s程度の範囲においては算定結果が妥当であることを確認している。以上より、本計算機コードを用いることは妥当である。

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
- (2) 豊川裕之・柳井晴夫編著：医学・保健学の例題による統計学，現代数学社，1982

(2) 竜巻により発生する飛来物の速度及び飛散距離等の評価

項目	コード名 TONBOS
開発機関	一般財団法人 電力中央研究所
開発時期	2013年
使用したバージョン	Ver.3 選定理由：解析時の最新バージョン
使用目的	竜巻により発生する飛来物の速度及び飛散距離等の評価
コードの概要	<p>一般財団法人電力中央研究所にて開発・保守されているプログラムである。</p> <p>空気中の物体が受ける抗力による運動を計算することで、竜巻による風速場の中での飛来物の軌跡を解析することができる解析コードであり、飛来物の速度、飛散距離及び飛散高さ等の算出が実施できる。</p> <p>仮定する風速場は、鉛直方向には構造が変化しないランキン渦としている。</p>
検証及び妥当性確認の内容	<p>TONBOSは、竜巻により発生する飛来物の速度及び飛散距離等の評価に使用している。</p> <p>【検証の内容】</p> <p>本解析コードの検証の内容は次の通りである。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ Simiu & Scanlan[※]による解析結果と同じ条件下で、竜巻風速場での飛来物軌跡の解析を実施し、概ね一致した結果を得ていることから、本解析コードの妥当性を確認した。 <p>※：E. Simiu & R.H. Scanlan: Wind Effect on Structures, Wiley, 1977</p> <p>【妥当性確認】</p> <p>TONBOSを、竜巻により発生する飛来物の速度及び飛散距離等の評価に使用することは、次のとおり妥当である。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ 本解析コードは、竜巻により発生する飛来物の速度、飛散距離及び飛散高さ等の評価を目的に開発されたコードであり、使用目的が合致している。 ・ 評価は妥当性を確認している範囲内で行うようにしている。
その他（工認実績等）	<p>既工認での実績はない。</p> <p>なお、最新バージョンまで算出に影響のある変更がないことを確認している。</p>

計算機コードの概要及び検証と妥当性確認の内容説明

TONBOS

目 次

1. 概要	資料35-23
2. 本計算機コードの特徴	資料35-23
3. 解析手法	資料35-24
3. 1 基礎方程式	資料35-24
3. 2 飛来物運動方程式の時間積分法	資料35-25
3. 3 評価条件	資料35-27
3. 4 適用範囲	資料35-28
4. 解析フローチャート	資料35-29
5. コードの検証	資料35-29
5. 1 移動する竜巻での検証	資料35-30
5. 2 国内最大級相当条件での比較	資料35-31
5. 3 飛散距離及び飛散高さについて	資料35-32
6. 妥当性確認	資料35-32
7. その他	資料12-34
7. 1 飛来物の速度及び飛散距離等の評価について	資料12-34
8. 参考文献	資料12-36
9. 付録	資料12-37

1. 概要

本資料は、一般財団法人電力中央研究所にて開発・保守されている計算機コード「TONBOS」の概要である。

TONBOSは、新規制基準で新たに評価を要することとなった竜巻影響評価のうち、飛来物の速度及び飛散距離等を算出することを目的として使用する解析コードである。

本解析は、新規制基準で新たに評価を要することとなった竜巻影響評価のうち、飛来物の速度及び飛散距離等の評価を行うものであり、竜巻による風速場は鉛直方向には構造が変化しないランキン渦が移動するものとして定め、飛来物を質点系モデルとして、飛来物が（流体）抗力と重力を受けて運動する軌跡に対する運動方程式を解くことが可能な計算機コードを適用したものである。

2. 本計算機コードの特徴

TONBOS は、竜巻による風速場は鉛直方向には構造が変化しないランキン渦が移動するものとして定め、飛来物を質点系モデルとして、飛来物が（流体）抗力と重力を受けて運動する軌跡に対する運動方程式を解くことにより、飛来物の速度、飛散距離及び飛散高さ等を算定する計算機コードである。

3. 解析手法

3. 1 基礎方程式

(a) 竜巻の風速場

竜巻の風速場は x 軸方向に一定速度 V_{tr} で移動するランキン渦でモデル化する。ランキン渦の接線風速（周方向風速） V_θ 、径方向（中心方向）風速 V_r 、上昇風速 V_z は E. Simiu and M. Cordes⁽¹⁾ と同様に以下の式で定義する（図1）。

$$V_r = af(r) \quad (1a)$$

$$V_\theta = bf(r) \quad (1b)$$

$$V_z = cf(r) \quad (1c)$$

ただし、 $a=1/\sqrt{5}$ 、 $b=2/\sqrt{5}$ 、 $c=4/3\sqrt{5}$ と定義し、周方向風速 V_θ と径方向風速 V_r を合成した渦の水平速度 $f(r)=(V_\theta^2 + V_r^2)^{1/2}$ は、以下の式で定義される。

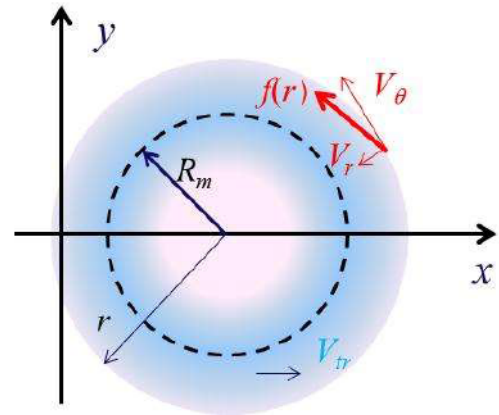


図1 移動ランキン渦モデル

$$f(r) = \begin{cases} \frac{r}{R_m} V_m & \text{if } 0 \leq r \leq R_m \\ \frac{R_m}{r} V_m & \text{if } R_m \leq r \end{cases} \quad (2)$$

ここで、 r は渦中心からの距離、 R_m は最大風速半径（渦の水平風速が最大となる半径）、 V_m は渦の最大水平風速である。

時刻 $t=0$ で竜巻中心は原点に位置するものとし、竜巻の風速場は飛来物の影響を受けないと仮定すると、時刻 t における竜巻の風速場 V_w の各風速成分 (u, v, w) は式(1a)-(1c)、(2)などから以下のようなになる。

$$\begin{pmatrix} u \\ v \\ w \end{pmatrix} = \frac{f(r)}{r} \begin{pmatrix} -a(x - V_{tr}t) - by \\ -ay + b(x - V_{tr}t) \\ cr \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} V_{tr} \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \quad (3)$$

ただし、渦中心からの距離 r は以下で与えられる。

$$r = \sqrt{(x - V_{tr}t)^2 + y^2} \quad (4)$$

なお、静止する観測者からみた最大風速 V_D は、以下で計算される。

$$V_D = V_m + V_r \quad (5)$$

(b) 飛来物の運動

飛来物の運動は、既往研究^{(1)・(6)}と同様に方向性がない平均的な抗力（抗力係数一定）と重力のみが外力として作用すると仮定する。この場合の飛来物の運動方程式は以下のようになる。

$$\frac{d\mathbf{V}_M}{dt} = \frac{1}{2} \rho \frac{C_D A}{m} |\mathbf{V}_w - \mathbf{V}_M| (\mathbf{V}_w - \mathbf{V}_M) - g\mathbf{k} \quad (6)$$

ここで、各変数は以下で定義する。

\mathbf{V}_M : 飛来物の速度ベクトル

\mathbf{V}_w : 風速ベクトル（ランキン渦風速と移動速度の和）

ρ : 空気密度

C_D : 飛来物の平均抗力係数

A : 飛来物の代表見附面積

m : 飛来物の質量

g : 重力加速度

\mathbf{k} : 鉛直上向き単位ベクトル

3. 2 飛来物運動方程式の時間積分法

時刻 t における竜巻の風速場 $\mathbf{V}_w = (u, v, w)$ は式(3)で与えられるので、式(6)を時間積分することによって、飛来物の速度と位置の時刻歴を求めることができる。

線形加速度法では、時刻 τ から時刻 $\tau + \Delta\tau$ における加速度が線形に変化するものと仮定する。つまり、式(6)において、以下の式が成立する。

$$\frac{d\mathbf{V}_M(t)}{dt} = -\mathbf{A}(\tau) \frac{t - \tau - \Delta\tau}{\Delta\tau} + \mathbf{A}(\tau + \Delta\tau) \frac{t - \tau}{\Delta\tau} \quad (7)$$

ここで、ベクトル $\mathbf{A}(\tau)$ は式(6)の右辺を表す。

式(7)を時間積分すると、以下を得る。

$$\begin{aligned} \mathbf{V}_M(t) = & \mathbf{V}_M(\tau) + \mathbf{A}(\tau) \frac{\Delta\tau}{2} \\ & - \mathbf{A}(\tau) \frac{(t-\tau-\Delta\tau)^2}{2\Delta\tau} + \mathbf{A}(\tau+\Delta\tau) \frac{(t-\tau)^2}{2\Delta\tau} \end{aligned} \quad (8)$$

さらに、式(8)を時間積分すると、以下を得る。

$$\begin{aligned} \mathbf{X}_M(t) = & \mathbf{X}_M(\tau) - \mathbf{A}(\tau) \frac{(\Delta\tau)^2}{6} \\ & + \left[\mathbf{V}_M(\tau) + \mathbf{A}(\tau) \frac{\Delta\tau}{2} \right] (t-\tau) \\ & - \mathbf{A}(\tau) \frac{(t-\tau-\Delta\tau)^3}{6\Delta\tau} + \mathbf{A}(\tau+\Delta\tau) \frac{(t-\tau)^3}{6\Delta\tau} \end{aligned} \quad (9)$$

したがって、時刻 $t = \tau + \Delta\tau$ における速度と位置は以下で与えられる。

$$\mathbf{V}_M(\tau+\Delta\tau) = \mathbf{V}_M(\tau) + \frac{\Delta\tau}{2} [\mathbf{A}(\tau) + \mathbf{A}(\tau+\Delta\tau)] \quad (10)$$

$$\begin{aligned} \mathbf{X}_M(\tau+\Delta\tau) = & \mathbf{X}_M(\tau) + \mathbf{V}_M(\tau)\Delta\tau \\ & + \mathbf{A}(\tau) \frac{\Delta\tau^2}{3} + \mathbf{A}(\tau+\Delta\tau) \frac{\Delta\tau^2}{6} \end{aligned} \quad (11)$$

式(10),(11)の右辺は以下の時刻 $\tau + \Delta\tau$ における加速度 $\mathbf{A}(\tau + \Delta\tau)$ を含んでいる。

$$\begin{aligned} \mathbf{A}(\tau+\Delta\tau) = & k \left| \mathbf{V}_w(\tau+\Delta\tau) - \mathbf{V}_M(\tau+\Delta\tau) \right| \\ & \times \{ \mathbf{V}_w(\tau+\Delta\tau) - \mathbf{V}_M(\tau+\Delta\tau) \} - \mathbf{g}\mathbf{k} \end{aligned} \quad (12)$$

ここで、 $\mathbf{k} = \rho C_D A / 2m$ を表す。

このため、非線形式(12)では竜巻風速場も未知であるので、これも同時に連成させる必要がある。これらの方程式をNewton-Raphson法で求解し、時間積分を実施する。

時刻 $\tau + \Delta\tau$ において飛来物速度 $\mathbf{V}_M(\tau + \Delta\tau)$ とその位置 $\mathbf{X}_M(\tau + \Delta\tau) = (X_M, Y_M, Z_M)$ を求めるために満足すべき式は、式(10),(11),(12)及び以下の竜巻の風速場のモデル方程式である。

$$\mathbf{V}_w = \frac{f(r_M)}{r_M} \begin{pmatrix} -a\{x_M - V_r(\tau+\Delta\tau)\} - by_M \\ -ay_M + b\{x_M - V_r(\tau+\Delta\tau)\} \\ cr_M \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} V_r \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \quad (13)$$

$$r_M = \sqrt{\{x_M - (\tau + \Delta\tau)V_r\}^2 + y_M^2} \quad (14)$$

3. 3 評価条件

以下の初期条件を設定する。

- 竜巻風速場 (図3.1)

竜巻の最大水平風速 (V_m) が85m/sとなる風速場を設定する。

竜巻移動速度 (V_{tr}) は15m/sとする。

最大風速半径 (R_m) は30mとする。

高さ40mに51×51ケの物体を配置する。

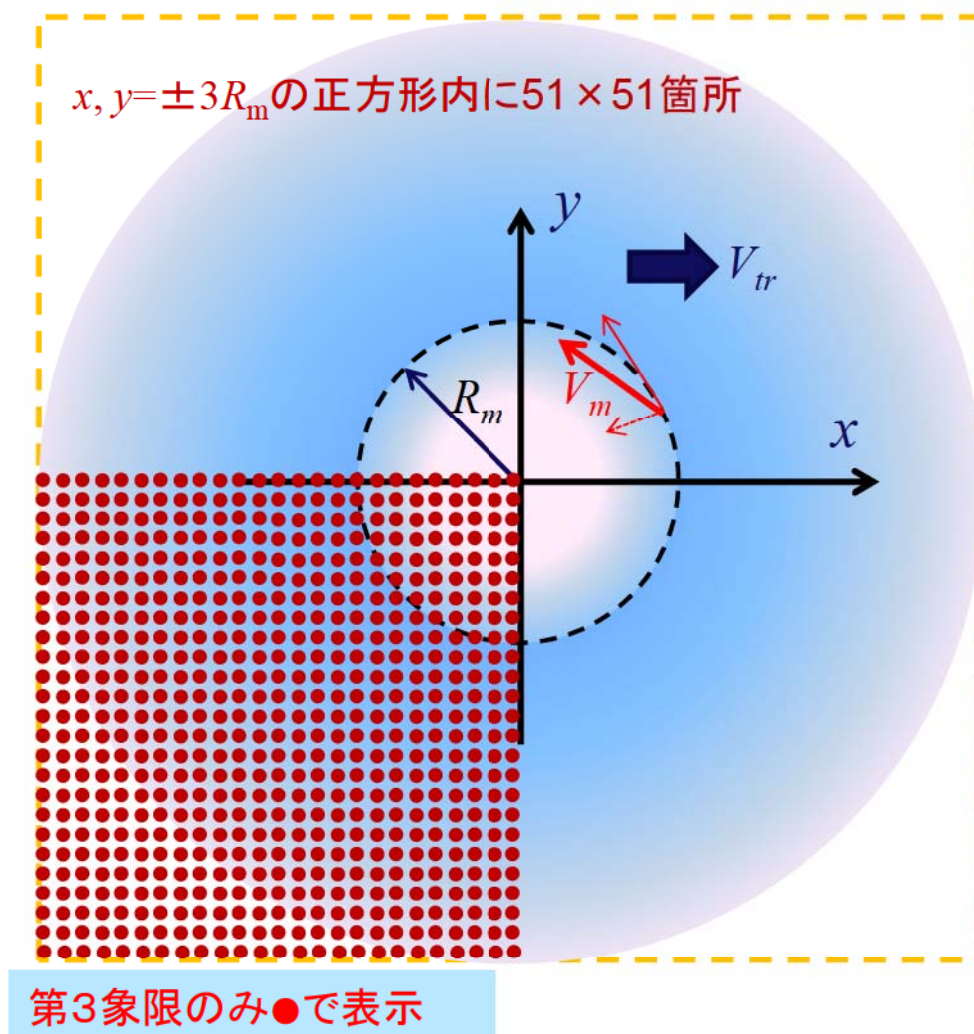


図3.1 竜巻の風速場及び初期物体位置

・飛散距離及び飛散高さ

図3.2に示すとおり、飛散距離は初期位置からの距離とし、飛来物が地表面に落ちた場合は、それ以上移動しないものとする。飛散高さは40m以上の位置に上がる場合は40mからの相対高さとし、40mより上がらない場合は0mとする。

2,601ケ (51×51) の算出結果のうち、飛来物の速度及び飛散距離の最大値を解析結果として採用する。

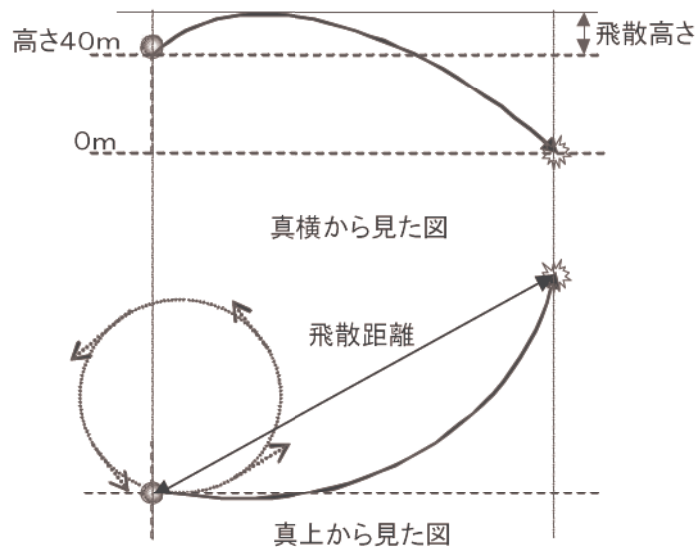


図3.2 飛散距離及び飛散高さ

3. 4 適用範囲

解析は以下の条件で実施することとする。

- ・最大風速：150m/sを原則とする。
- ・最大水平風速：本解析では最大風速との比を0.85とする。(これに限定する必要はない。)
- ・竜巻中心の移動速度：本解析では最大風速の比を0.15とする。(これに限定する必要はない。)
- ・最大風速半径：本解析では30mとする。(これに限定する必要はない。)
- ・空力パラメータ：制限はない。
- ・解析時間刻み：0.01秒以下
- ・重力加速度：9.8m/s²
- ・空気密度：1.22kg/m³

4. 解析フローチャート

図4.1に解析フローチャートを示す。

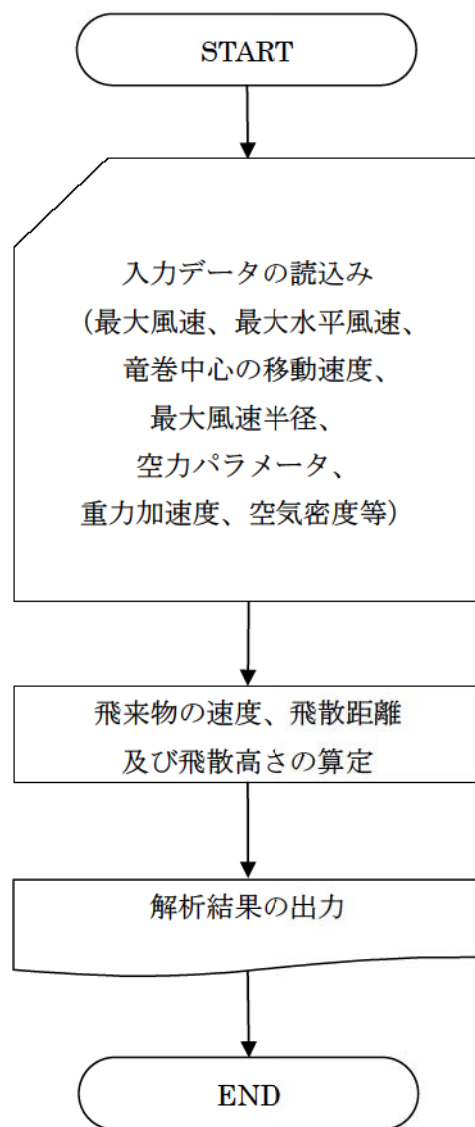


図4.1 解析フローチャート

5. コードの検証

5.1 移動する竜巻での検証

Simiu and Scanlan⁽²⁾は、初速ゼロの飛来物が座標($R_m, 0, 40$)[単位：m]に位置するものとして飛来物の運動を計算し、飛来物が地上に落下するまでに達した最大の水平速度を「飛来物最大水平速度」と定義して数値解析結果を得ている。そこで、これと同様に表5.1に示す3種類の竜巻条件 (Tornado Type-I, -II, -III) を与えて、TONBOSによって「飛来物最大水平速度」 V_{hmax} を求めた。

なお、表5.1の各条件は文献(2)のTable 3.5.1(p.127)に記載されている値を[mph]から[m/s]へ、[ft]から[m]に換算したものである。

物体特性値 $C_D A/m$ については、文献(2)のTable 16.3.1 (p.565)に掲載されている値 ($C_D A/m=0.0033, 0.0040, 0.0043, 0.0052, 0.0070, 0.0270[m^2/kg]$) 及びTable 16.3.2 (p.567, Tornado Type-I)のケース(a)に掲載されている値 ($C_D A/m=0.001, 0.01[m^2/kg]$) を選定して検証した。なお、全ケースで時間ステップ $\Delta\tau$ を0.01[s]に設定した。また、空気密度 ρ は $1.226[kg/m^3]$ 、重力加速度 g は $9.8[m/s^2]$ とした。

図5.1に物体特性 $C_D A/m$ の各値に対する「飛来物最大水平速度」 V_{hmax} を文献(2)の結果と比較して示す。本数値解析の V_{hmax} の結果は文献(2)よりもやや大きい傾向*にある。評価においては保守側となる。

表5.1 3種類の竜巻条件 (Tornado Type-I, -II, -III)

竜巻条件	最大水平風速 V_m [m/s]	竜巻中心の移動速度 V_{tr} [m/s]	最大風速半径 R_m [m/s]
Tornado Type-I	129.6	31.3	45.7
Tornado Type-II	107.3	26.8	45.7
Tornado Type-III	84.9	22.4	45.7

※：数値解析法の違いによる相違と考えられる。

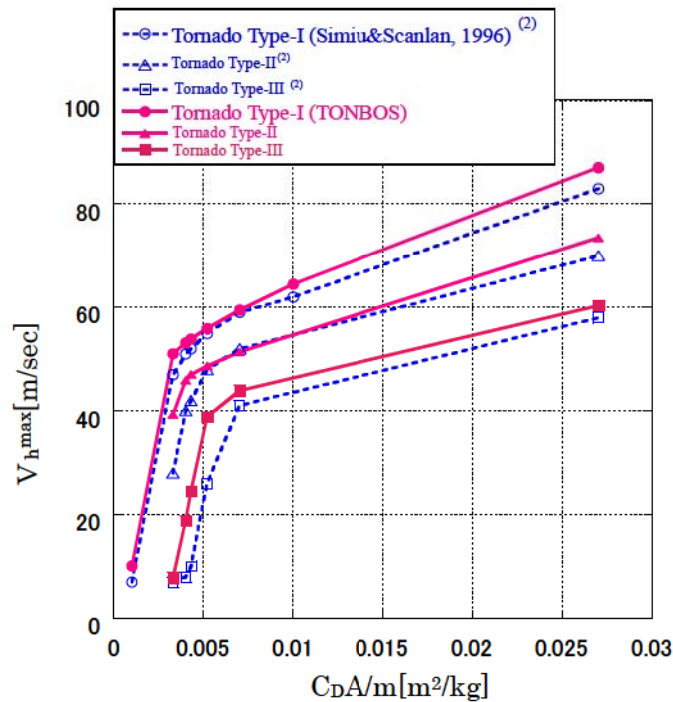


図5.1 Simiu&Scanlanとの比較

5. 2 国内最大級相当条件での比較

『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．(以下、「文献(4)」という。)』のp.237に示されている竜巻条件に相当する計算条件(表5.2)をTONBOSに与えて、「飛来物最大水平速度」 V_h^{\max} を求めた。文献(4)の竜巻風速場の生成方法は文献(3)と同様にLES解析結果に基づくものであるが、高さ40[m]のx, y方向に $\pm 3R_m$ の正方形の25×25箇所から飛来物を複数回、放出して V_h^{\max} を求めている。TONBOSでも、同様の位置から飛来物を放出して V_h^{\max} を計算した。図5.2に物体特性 $C_D A/m$ の各値に対する V_h^{\max} を文献(4)の結果と比較して示す。物体特性 $C_D A/m$ が小さい条件では、文献(4)の V_h^{\max} は本数値解析の V_h^{\max} の結果よりも小さい傾向にあるが、物体特性 $C_D A/m$ が大きい条件では逆の傾向となる。しかしながら、両者は良く整合することが分かる。

物体特性 $C_D A/m$ の大小によって V_h^{\max} の相対的な大小が逆転する理由としては、 $C_D A/m$ が小さい場合は、LES解析の風速場の上昇速度がランキン渦に比べ小さく、水平方向に十分加速される前に早く落下するが、 $C_D A/m$ が大きい場合は、物体が飛散しやすいため気流

中の滞在時間が長くなり、LES解析の風速場の乱れの影響を受けて大きな飛来物速度となるためと考えられる。

表5.2 竜巻条件

最大接線風速 [m/s]	竜巻移動速度 V_{tr} [m/s]	最大風速半径 R_m [m/s]
84	16	30

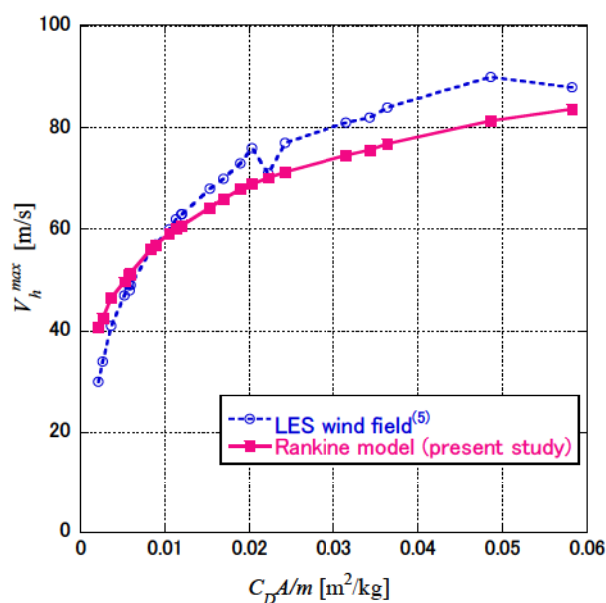


図5.2 文献(4)との比較

(備考)「日本流体力学会年会、江口譲、杉本聡一郎、服部康男、平口博丸：移動ランキン渦モデルによる竜巻飛来物の速度の評価、2013。」より抜粋。

5. 3 飛散距離及び飛散高さについて

飛散距離及び飛散高さについては、米国の解析結果では示されていないが、飛来物速度を積分することによりそれぞれの位置（飛散距離及び飛散高さ）が算出できる。飛来物速度が5.1及び5.2項で妥当であると検証していることから、飛散距離及び飛散高さについても妥当であると考えられる。

6. 妥当性確認

TONBOSを竜巻により発生する飛来物の速度及び飛散距離等の評価に使用することは次の

とおり妥当である。

- ・本解析コードは、竜巻により発生する飛来物の速度、飛散距離及び飛散高さの評価を目的に開発されたコードであり、使用目的が合致している。
- ・評価は妥当性を確認している範囲内で行うようにしている。

7. その他

7. 1 飛来物の速度及び飛散距離等の評価について

TONBOSを用いた解析により、空力パラメータと飛来物が地上に落下するまでに達した最大の水平速度 V_{h-max} 、最大飛散距離（x-y平面での初期位置と落下位置の距離で最大のもの）、最大高さ（全飛来物のうちで上昇量が最大のもの）の相関を算出している。（図7.1～7.2(a),(b)）

この相関を用いて発電所構内にある物品の飛来物の速度及び飛散距離等の評価を実施している。（詳細は「別添3：固定、固縛又は竜巻防護施設から離隔する対象物の選定プロセスについて」参照）

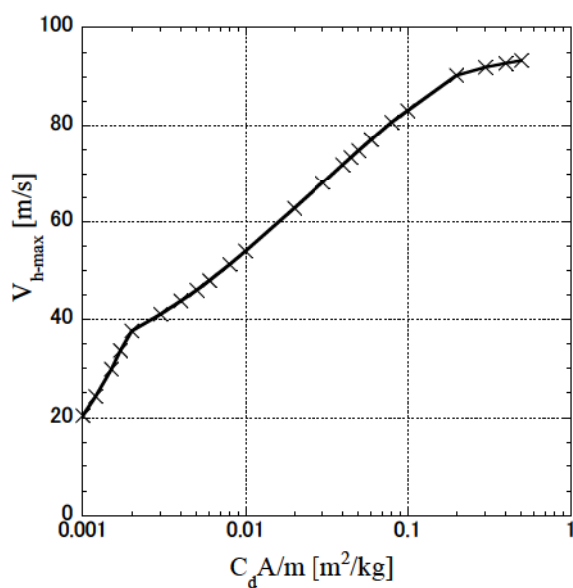
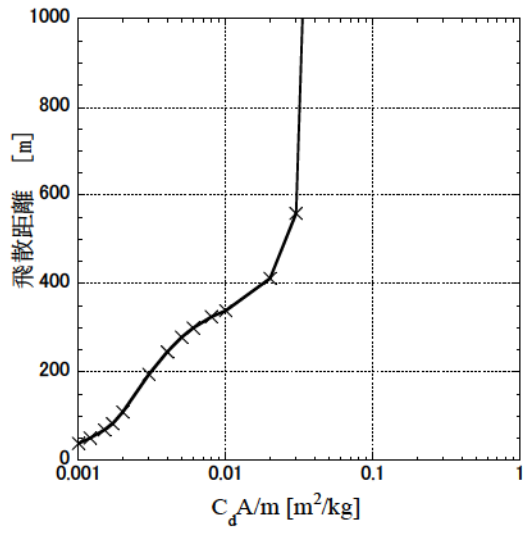
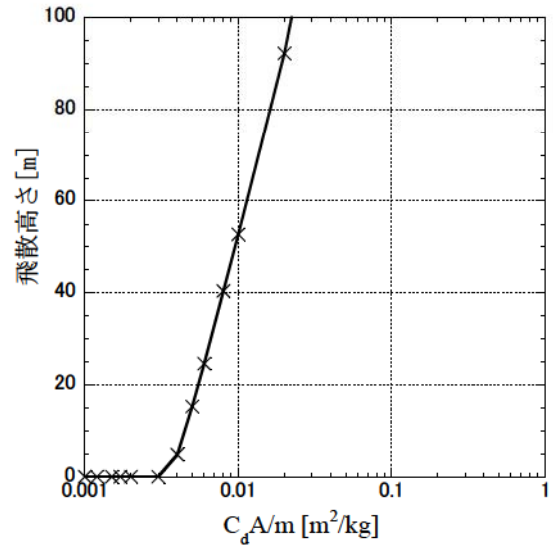


図7.1 100m/s竜巻条件での飛来物最大水平速度



(a)最大飛散距離



(b)最大飛散高さ

図7.2 100m/s竜巻条件でのx-y平面上での最大飛散距離と最大飛散高さ

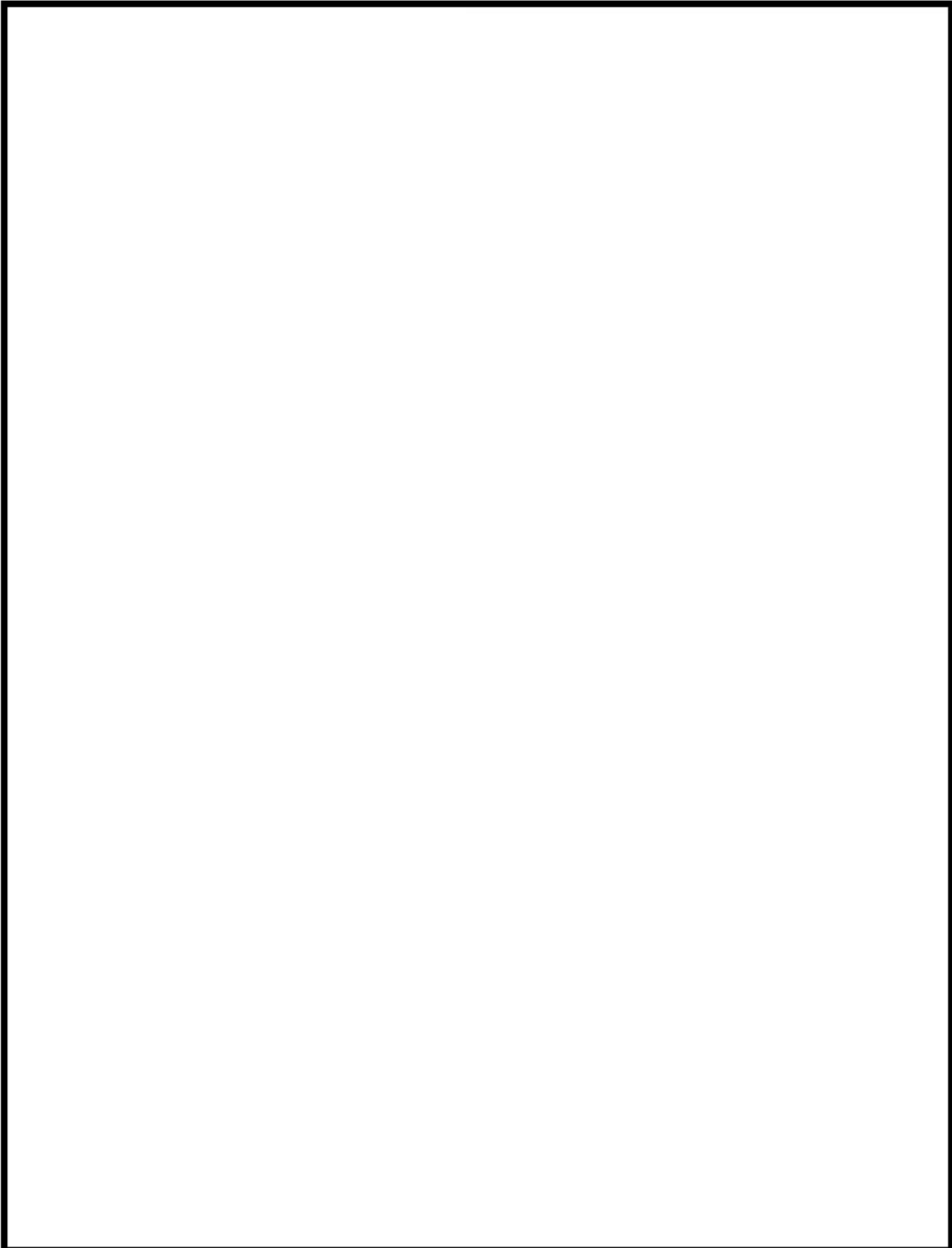
8. 参考文献

- (1) Simiu, E. and Cordes, M., NBSIR 76-1050. Tornado-Borne Missile Speeds, 1976.
- (2) Simiu, E. and Scanlan, R. H., Wind Effects on Structures: Fundamentals and Applications to Design, 3rd Edition, John Wiley & Sons, Hoboken, NJ, August 1996.
- (3) Maruyama, T., Simulation of flying debris using a numerically generated tornado-like vortex. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, vol.99(4), pp.249-256, 2011.
- (4) 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.
- (5) U.S. NUCLEAR REGULATORY COMMISSION: REGULATORY GUIDE 1.76, Design-Basis Tornado and Tornado Missiles for Nuclear Power Plants, Revision 1, March 2007.
- (6) 丸山敬, “数値的に生成された竜巻状の渦の性質”, 京都大学防災研究所年報, 第53号B, 平成22年6月.

9. 付録


- (付録1) E. Simiu & R.H. Scanlan: Wind Effects on Structures, Wiley, 1977, (3rd. Edition 1996).
- (付録2) 東京工芸大学、“平成21～22 年度原子力安全基盤調査研究（平成22 年度）竜巻による原子力施設への影響に関する調査研究”、独立行政法人原子力安全基盤機構委託研究成果報告書、平成23 年2 月
- (付録3) 日本流体力学会年会、江口譲、杉本聡一郎、服部康男、平口博丸：移動ランキン渦モデルによる飛来物の速度の評価、2013

(付録1)




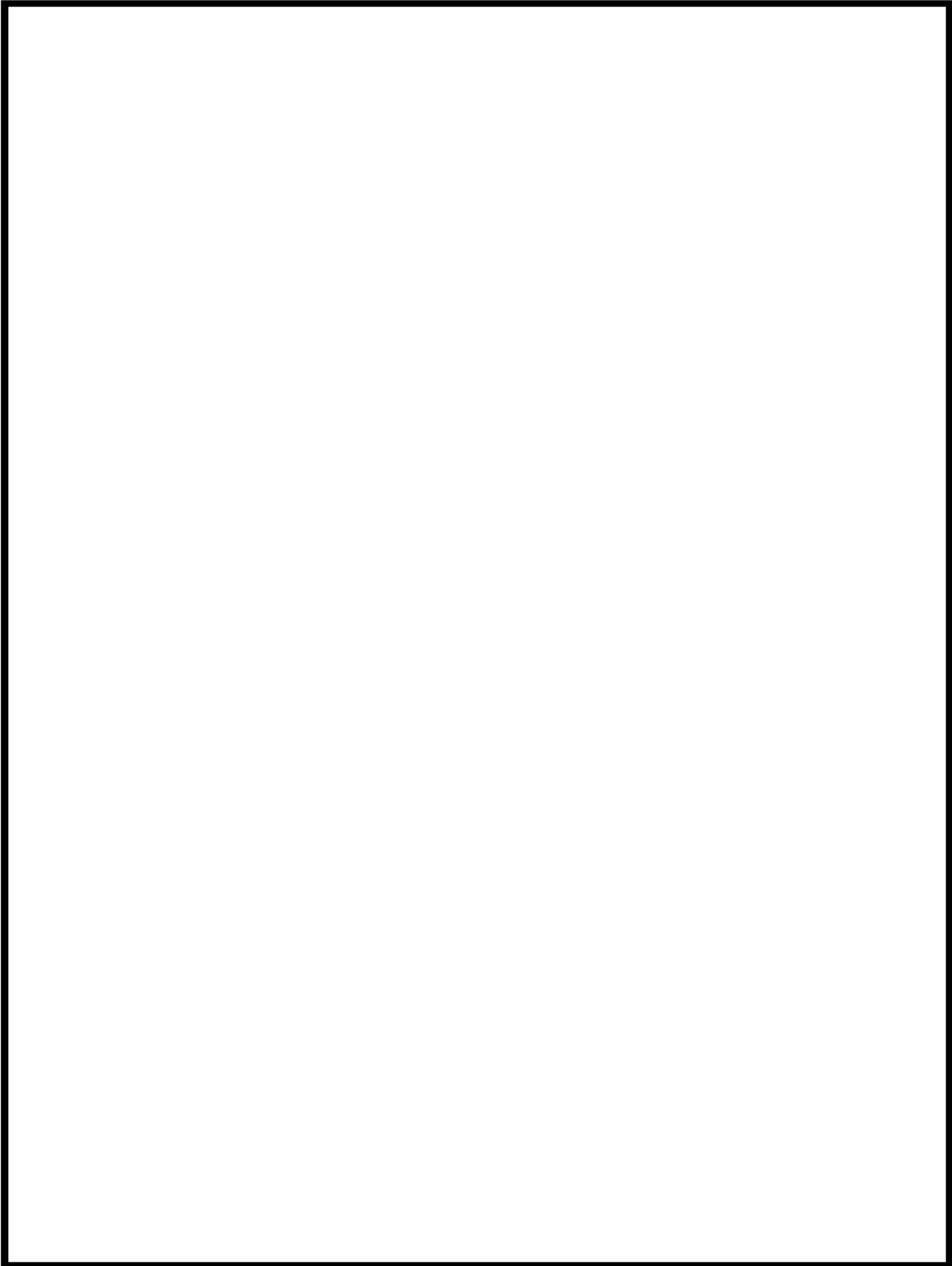
枠囲みの内容は機密情報に属しますので公開できません。



 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。




 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。




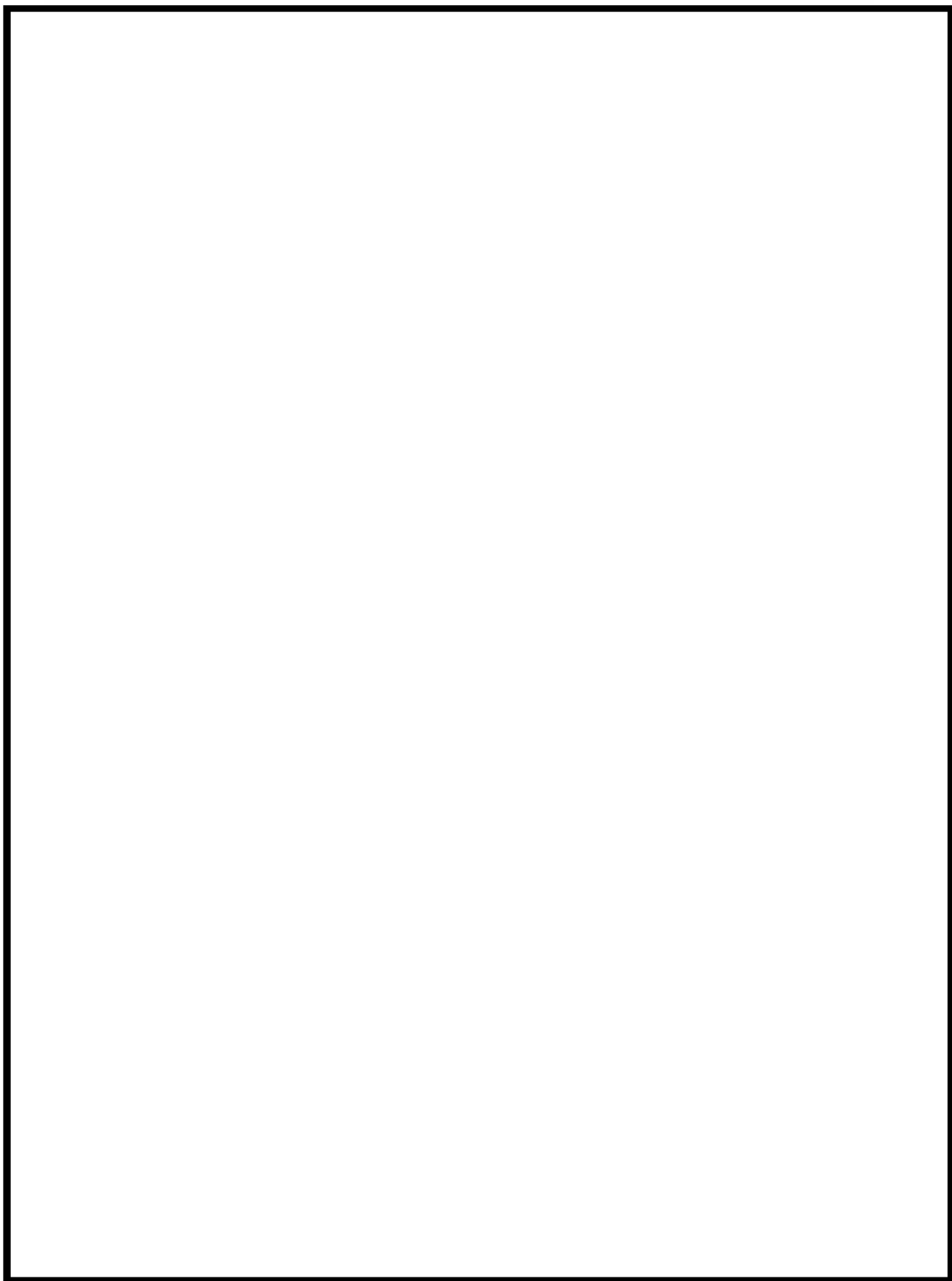
枠囲みの内容は機密情報に属しますので公開できません。




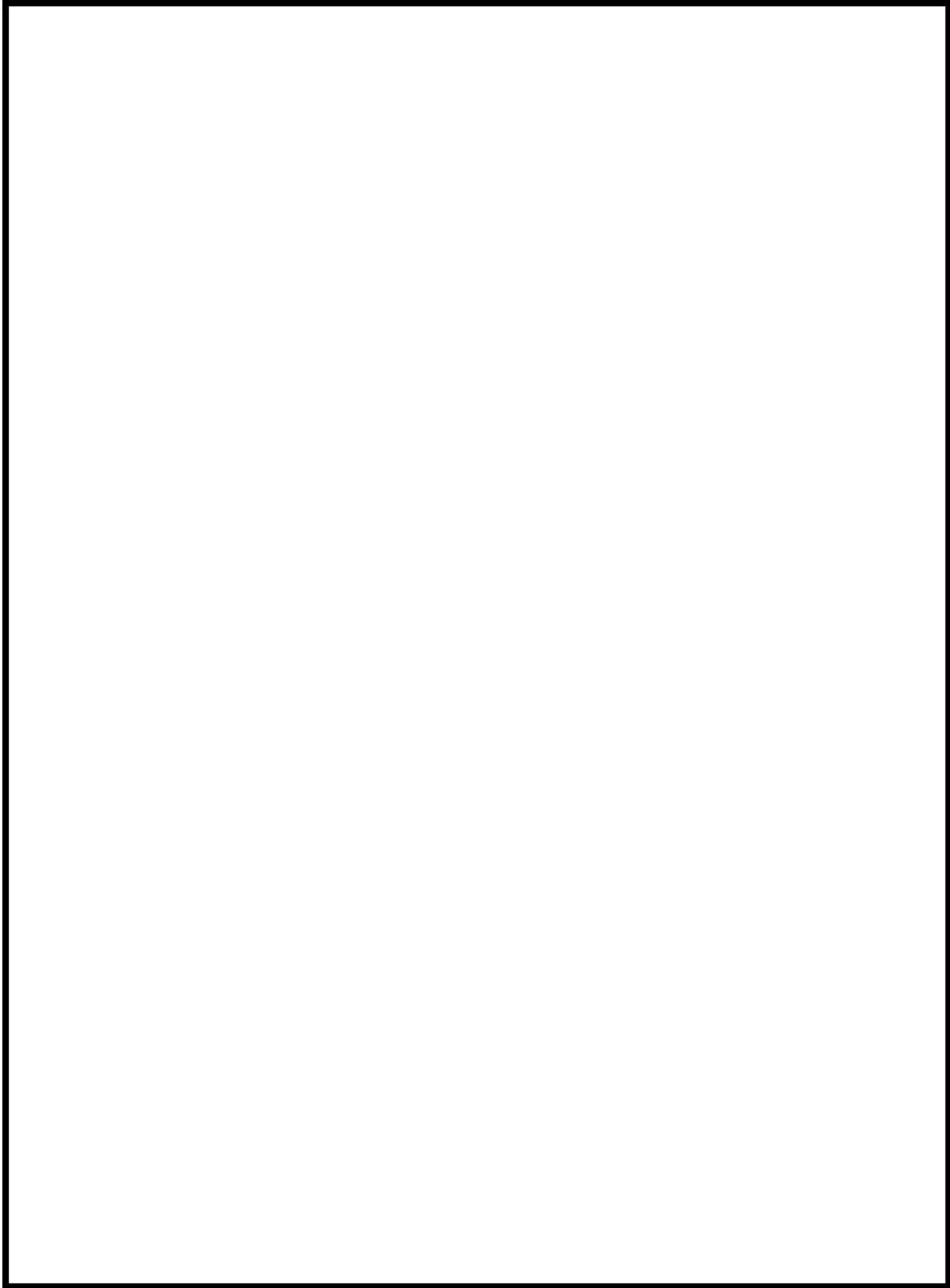
 枠囲みの内容は機密情報に属しますので公開できません。




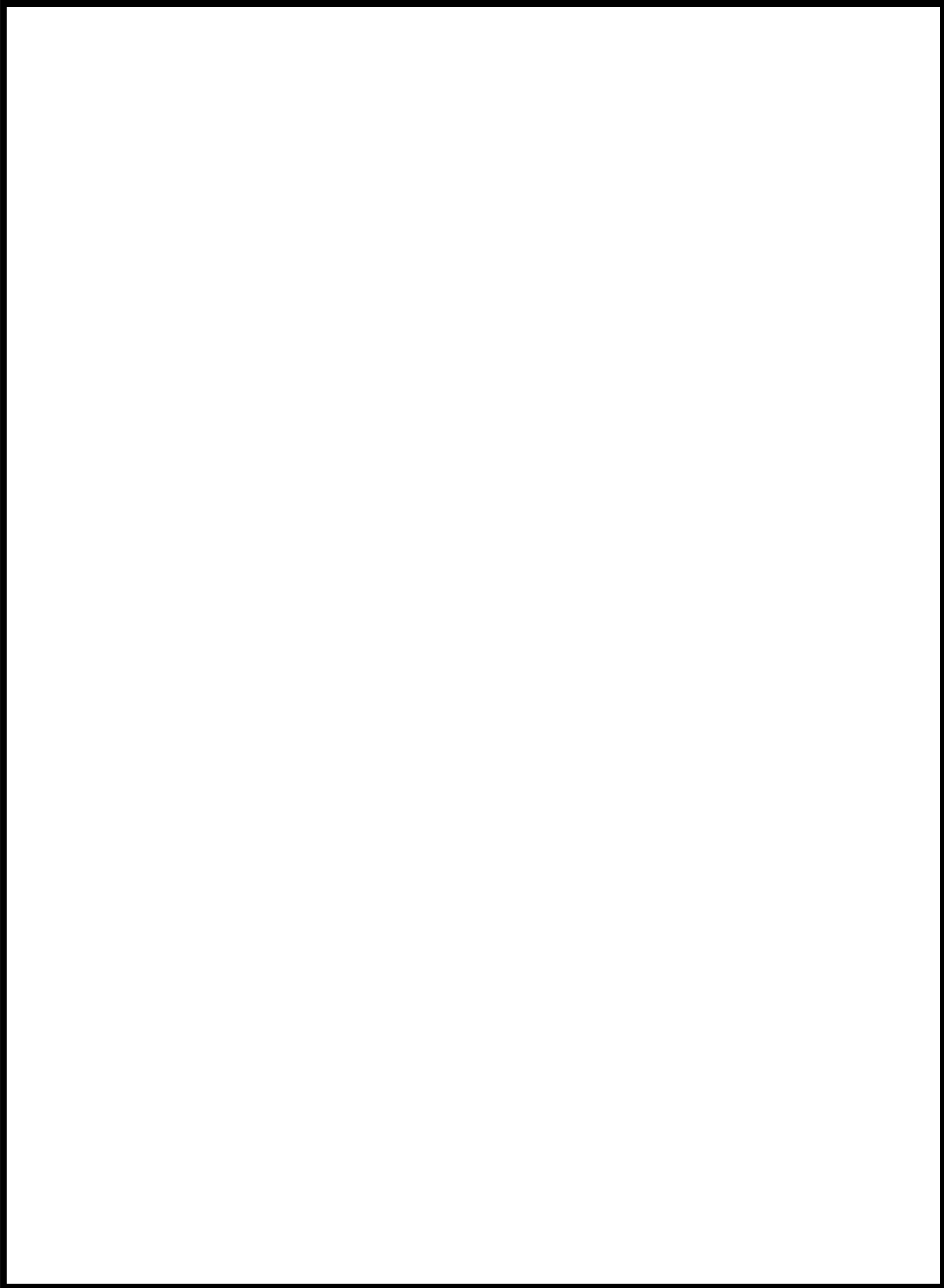
 枠囲みの内容は機密情報に属しますので公開できません。




 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。



 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。



 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。

(付録2)

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

平成23年2月

東京工芸大学

2.2.3 竜巻等による飛散物

(1) 飛散物の衝撃速度に関する研究のレビュー

1) はじめに

竜巻中の飛散物の速度に関する研究は種々あるが、建物の壁を貫通するなど、高速の飛散物の速度をビデオ映像などの実際の飛散の様子から求めたものはほとんどない。いずれも被害の状況からの推定値であったり、飛散物を球や平板などの単純な形状と仮定した上で運動方程式をたて、物体が受ける空気力をモデル化して計算で求められたものである。その場合、飛散物の速度は物体の形状、重さ、物体の飛散開始位置（地面からの高さ、竜巻の渦に対する相対的な位置）、初期速度、また、竜巻の渦の移動速度や竜巻中の気流性状の違いによって様々に変化する。文献[1]の第16章3節には、これらについて過去の研究結果や観測結果を調べ、竜巻中の飛散物の速度の算出方法やその結果がよくまとめられているので、以下にその和訳を示す（一部省略、改変を行っている）。

2) 竜巻による飛散物の飛散速度、距離の導出方法

竜巻による空気力の作用のもとで移動する物体の速度を推定する際には、以下の点について幾つかの仮定を用いる。

- ・物体の空気力特性に関して。
- ・気流場の詳細な性状に関して。
- ・地面からの高さや竜巻中心からの物体の初期位置、および、物体の初期速度に関して。

原子力発電施設的设计に際して一般的に飛散物となる可能性のある物体は、木の厚板や網棒、網管、ボールや自動車などである。以下では、竜巻による飛散物の運動を数値シミュレーションに基づいて解く場合の問題に関する研究をレビューする。

3) 運動方程式と空気力学的モデル化

物体の運動は、通常3つの運動量の釣り合い式と3つのモーメントの釣り合い式を解くことによって記述することができる。非流線型物体（ブラフボディ）の場合、これらの6つの式を記述する際に主に問題となるのは、空気力をどのように与えればよいか判らないことである。

静的な条件下で物体に作用する空気力やモーメントを、風洞実験で平均風向に対して十分細かく風向を変えて測定することは可能である。そのような測定結果に基づき、風向角による空気力やモーメントの変化と対応する空気力係数が得られる。そして、翼理論で用いられるよく知られた方法に従って、空気力やモーメントを計算することができる。たとえば、一様流中で速度 V と風向角 α が一定で、翼が時間変化する鉛直方向の動きを $h(t)$ と

すれば、揚力係数は

$$C_L = \frac{dC_L}{d\alpha} \left(\alpha + \frac{1}{V} \frac{dh}{dt} \right) \quad (2.2.3.1)$$

と表される。空気力とモーメントを計算するこの方法は、対象となる物体の動きが小さいときに有効であると考えられるが、物体が拘束されずに気流中で運動するときにも、この方法が有効であることを示しておく必要がある。

飛散物を6自由度の剛体として空気力学的に記述するモデルとして満足できるものがないため、通常、次式で示される抗力に基づいた質点として飛散物を記述する方法がとられる。

$$D = \frac{1}{2} \rho C_D A |\mathbf{V}_w - \mathbf{V}_M| (\mathbf{V}_w - \mathbf{V}_M) \quad (2.2.3.2)$$

ここで、 ρ は空気密度、 \mathbf{V}_w は風速、 \mathbf{V}_M は飛散物の速度、 A は適切に選ばれた面積、 C_D は対応する抗力係数である。これは飛散物が運動している間、(1)相対的な速度ベクトル $\mathbf{V}_w - \mathbf{V}_M$ に対して、一定か、ほぼ一定な姿勢を保つこと、あるいは、(2)抗力 D の表現の中で、大きな誤差を伴わないで、 $C_D A$ の値としてある平均値が使えるような tumbling (回転しながら落下する) 運動をするときに適切なモデルとなる。竜巻の気流中にある非流線型物体では以下を仮定することは残念ながらほとんど無理であるが、空気力が常に物体の重心に正確に作用するか重心に対してゼロでない空力モーメントによって引き起こされる物体の回転が、物体一流体系に備わっている空気力によって抑制されるならば、流れに対して一定の姿勢を保つことが保証される。したがって、そのような力が作用するかどうかの問題となる。種々の文献をみると、この疑問に対する研究はこれまで徹底的にはなされていない。しかし、簡単な実験によると、ブラフボディの場合、空力的な減衰力は不安定化の効果をもっていることがうかがえ、文献[2]の風洞実験でもこの傾向が確かめられている。したがって、竜巻によって生じる可能性のある飛散物は tumbling 運動をするのみならずよいであろう。

式(2.2.3.2)が成り立ち、tumbling 運動をしているときに平均的に流れ直角方向の力がないとすると、飛散物の運動は3自由度系となり以下の関係に支配される。

$$\frac{d\mathbf{V}_M}{dt} = \frac{1}{2} \rho \frac{C_D A}{m} |\mathbf{V}_w - \mathbf{V}_M| (\mathbf{V}_w - \mathbf{V}_M) - g\mathbf{k} \quad (2.2.3.3)$$

ここで、 g は重力加速度、 \mathbf{k} は鉛直方向の単位ベクトル、 m は飛散物の質量である。流れ場と初期条件を与えると式(2.2.3.3)により物体の運動はパラメータ $C_D A/m$ のみに依存する。tumbling 運動をしている物体に対してはこのパラメータの値は、原理的に実験で決定することができるが、残念ながらこれに関して現在のところ使える情報はあまりない。文

文献[3]には音速 0.5 から 3.5 の気流中の tumbling 運動に関する情報が含まれている。文献[3]のデータは文献[4]で、より低い亜音速領域に外挿されている。それによると、ランダムに tumbling 運動をしている立方体に対して $C_D A$ の値は、ほぼ、“確率的に取りうる可能性のある全ての姿勢に対する投影面積と、対応する静的な抗力係数の積の平均値に等しい”と仮定できる（文献 4）。実験的な情報がこれ以上ないので、 $C_D A$ の実効的な値が次式のよ

$$C_D A = c(C_{D1} A_1 + C_{D2} A_2 + C_{D3} A_3) \quad (2.2.3.4)$$

$C_D A = c(C_{D1} A_1 + C_{D2} A_2 + C_{D3} A_3)$ ここで、 $C_{Di} A_i$ ($i=1,2,3$) は物体の主軸がベクトル $V_w - V_M$ に平行なときに各軸方向の投影面積と対応する静的な抗力係数の積、 c は係数で、厚板、ロッド、パイプ、ポールに対する値としては 0.50、自動車に対しては 0.33 の値をとるとしているが、棒、パイプ、ポールなどの円筒形物体に対する $c=0.50$ は明らかに小さい。

4) 計算結果

竜巻による飛散物の軌跡と速度を計算し描画する計算プログラムが文献 5) に述べられている。このプログラムは竜巻の風速場のモデルとレイノルズ数の関数として変化する抗力係数を組み込んだサブルーチンを含んでいる。入力文は関連するパラメータと飛散物の運動の初期条件を含んでいる。

式(2.2.3.3)において V_M と V_w は絶対座標系で与える。風速 V_w は通常 2つの速度の和として与えられる。第 1 は、定常的な竜巻の渦による風速で円筒座標系で表される。第 2 は、基準となる絶対座標系に対する竜巻の渦の移動速度である。絶対座標系において V_w を記述する変換は文献[5]で導かれており、計算プログラムに含まれている。

表 2.2.3.1 (文献[6]と表 2.2.3.2 に与えられたパラメータを使って、図 2.2.3.1 に示されるアメリカ合衆国における年間超過確率 10^{-7} に相当する竜巻強さの領域分け I, II, III (文献 6) に対応する、タイプ I, II, III (表 1 参照) の竜巻に対して、飛散物の最大水平速度 V_{Hmax} が計算され、図 2.2.3.2 にパラメータ $C_D A/m$ の関数として与えられている。

表 2.2.3.1 設計基準竜巻の特性 (文献[9]より)

領域	最大風速m/s (mph)	移動速度 m/s (mph)	最大回転風 速 m/s (mph)	最大回転風 速半径m (ft)	気圧下降mb (psi)	気圧下降率 mb/s (psi/s)
I	103 (230)	21 (46)	82 (184)	45.7 (150)	83 (1.2)	37 (0.5)
II	89 (200)	18 (40)	72 (160)	45.7 (150)	63 (0.9)	25 (0.4)
III	72 (160)	14 (32)	57 (128)	45.7 (150)	40 (0.6)	13 (0.2)

表 2.2.3.2 選ばれた飛散物の特性と最大水平速度

	大きさ	重さ (lb/ft)	重さ (kg/m)	C_{D1}	C_{D2}	C_{D3}	C_{DA}/w (ft ² /lb)	C_{DA}/m (m ² /kg)	V_{77}^{max} 竜巻タイプ		
									Type I	Type II	Type III
1 木の棒	3 $\frac{1}{2}$ " × 1 $\frac{1}{2}$ " × 12' (0.092 m × 0.289 m × 3.66m)	8.2 to 11 (e.g. 9.6)	12.2 to 16.3 (e.g. 14.3)	2.0	2.0	2.0	0.132	0.0270	272 ft/s (83 m/s)	230 ft/s (70 m/s)	190 ft/s (58 m/s)
2 鉄パイプ	6.625" (diam) × 15' (length) (0.168 m × 4.58 m)	18.97	28.18	0.7	2.0	0.7	0.0212	0.0043	171 ft/s (52 m/s)	138 ft/s (42 m/s)	33 ft/s (10 m/s)
3 自動車	16.4' × 6.6' × 4.3' (5 m × 2 m × 1.3m)	4000 lb (total wt)	1810 kg (total mass)	2.0	2.0	2.0	0.0343	0.0070	193 ft/s (59 m/s)	170 ft/s (52 m/s)	134 ft/s (41 m/s)
4 鋼棒	1" (diam) × 3' (length) (0.0254 m × 0.915 m)	2.67	4.0	1.2	2.0	1.2	0.0190	0.0040	167 ft/s (51 m/s)	131 ft/s (40 m/s)	26 ft/s (8 m/s)
5 鉄パイプ	13.5" (diam) × 35' (length) (0.343 m × 10.68 m)	27.5-36.5 (e.g. 32)	40.8-54.2 (e.g. 47.5)	0.7	2.0	0.7	0.0254	0.0052	180 ft/s (55 m/s)	157 ft/s (48 m/s)	85 ft/s (26 m/s)
6 鉄パイプ	12.75" (diam) × 15' (length) (0.32 m × 4.58 m)	49.56	73.6	0.7	2.0	0.7	0.016	0.0033	154 ft/s (47 m/s)	92 ft/s (28 m/s)	23 ft/s (7 m/s)

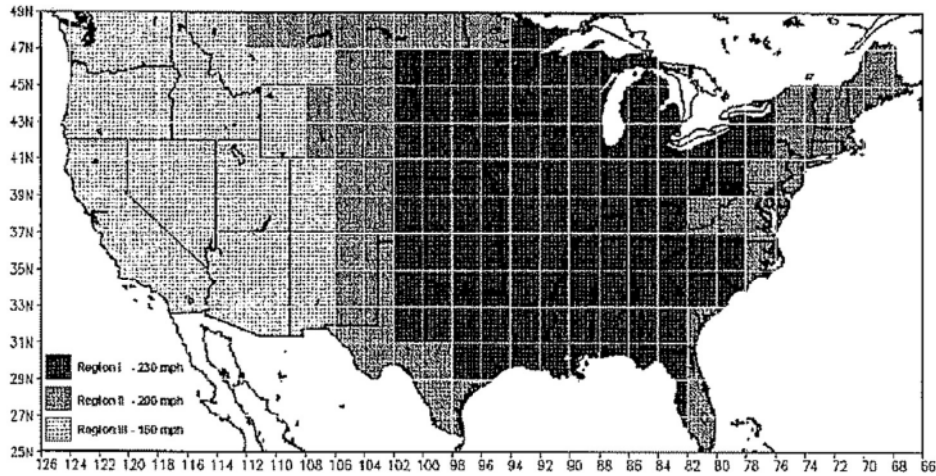


図 2.2.3.1 文献[6]よりアメリカ合衆国における年間超過確率 10^{-7} に相当する竜巻強さの領域に相当する 3つの風速の分布を示す。横軸は経度(西経 66~126 度), 縦軸は緯度(北緯 25~49 度)

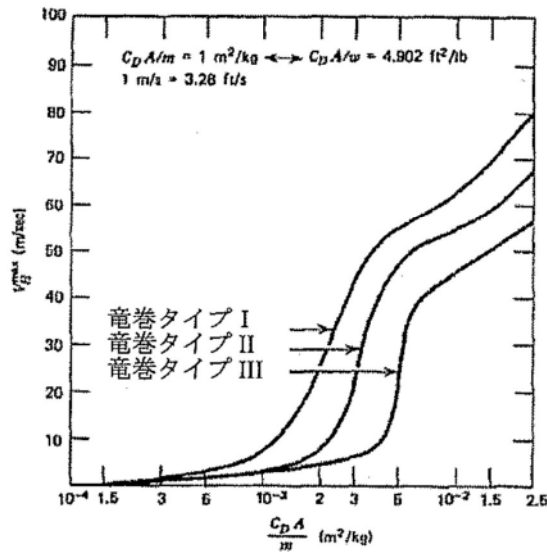


図 2.2.3.2 種々の竜巻のタイプに対して $C_D A/m$ の関数として与えられた飛散物の最大水平速度の変化.

これらの計算では以下の仮定が使われている.

- ・竜巻の接線方向風速 V_t は式(2.2.3.5)と(2.2.3.6)で記述される.

$$V_t = \frac{r}{R_m} V_m \quad (0 \leq r \leq R_m) \quad (2.2.3.5)$$

$$V_t = \frac{R_m}{r} V_m \quad (R_m < r < \infty) \quad (2.2.3.6)$$

- ・径方向風速 V_r と鉛直方向風速 V_z は次のように与える[文献 7]

$$V_r = 0.50 V_t \quad (2.2.3.7)$$

$$V_z = 0.67 V_t \quad (2.2.3.8)$$

- ・径方向成分は図 2.2.3.3 のように渦の中心方向を正とし鉛直方向成分は上方を正とする.
- ・竜巻の渦の移動速度 V_v は図 2.2.3.3 のように x 軸の正方向にとる.
- ・時刻 $t=0$ における初期条件は $x(0) = R_m$, $y(0) = 0$, $z(0) = 40\text{m}$, $V_{Mx}(0) = V_{My}(0) = V_{Mz}(0) = 0$ ここで, x, y, z は飛散物の重心を通る座標軸で, V_{Mx}, V_{My}, V_{Mz} はそれぞれ x, y, z 軸に沿う飛散物の速度である. $t=0$ における竜巻の中心は座標軸の原点にある. タイプ I の竜巻中で $C_D A/m = 0.1$ の飛散物で計算された軌跡の水平投影図を図 2.2.3.4 に示す. 表 2.2.3.2 には選ばれた飛散物の推定される特性を挙げてある. また, 図 2.2.3.2 から得られた対応する水平速度 V_{Hmax} も示す.

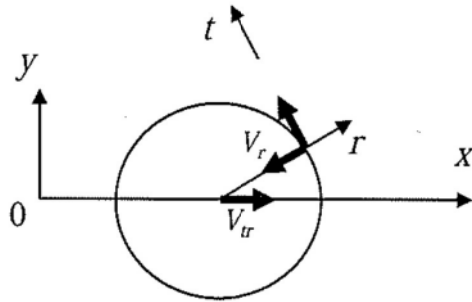


図 2.2.3.3 竜巻の風速の水平成分

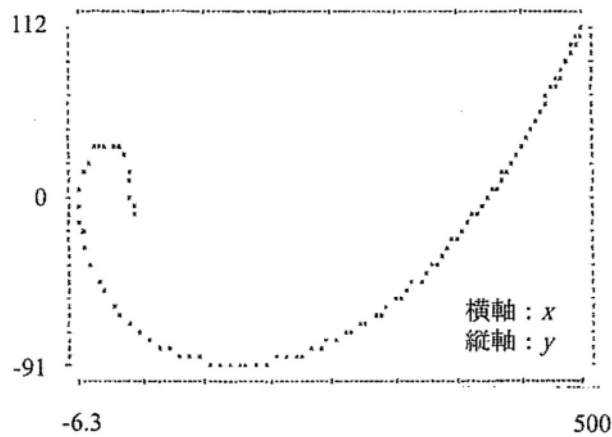


図 2.2.3.4 計算された飛散物の軌跡の水平投影図 (軸の表示は m)

5) 飛散物の最大水平速度の感度解析

運動モデルには不確実性が含まれるので、表に示された推定値の範囲で飛散物の最大水平速度 V_{Hmax} の感度を調べることは興味のあることである。以下で考察する各ケースにおいて、全ての仮定は図 2.2.3.2 の竜巻のタイプ I に対して用いられたものと同じである。

(a) 初期条件 $x(0)$ と $y(0)$

$C_D A/m=0.001$ と $C_D A/m=0.1$ で初期条件 $x(0)$, $y(0)$ に対して得られた結果を 3 種類、表 2.2.3.3 に示す。表中の矢印は接線方向と竜巻の移動方向の風速の方向を示す。 V_H^{max} の計算された最大値に対応する初期位置は $C_D A/m$ により変化し、 $C_D A/m=0.001$ では位置(c), $C_D A/m=0.1$ では位置(b)となる。

表 2.2.3.3 種々の初期条件 $x(0), y(0)$ に対する飛散物の最大水平速度 V_{Hmax} (m/s)

		$x(0)$	$y(0)$	$C_D A/m$	
		(m)	(m)	$= 0.001$	$= 0.01$
(a)		46	0	7	62
(b)		23	0	15	89
(c)		0	-46	51	67

(b) 初期高さ $x(0)$

計算によると、パラメータ $C_D A/m$ が図 2.2.3.2 の中央の S 型曲線に対応している場合には V_{Hmax} は初期高さが低くなるとともに小さくなる。しかし、飛散物が相対的に軽くてパラメータ $C_D A/m$ が左側の S 型曲線に対応している場合には V_{Hmax} は $x(0)$ には依存しない。

(c) 飛散物の初期速度

たとえば、爆発などによって飛散物が流の中に取り込まれた場合、初期速度がゼロという仮定は成り立たなくなる。他の条件が全て同じ場合、初期速度がゼロに対応した計算結果よりも初期速度がゼロでない場合が速くなることはない。表 2.2.3.4 に $V_{My}(0)=0, V_{Mz}(0)=0$ として、 $V_{Mx}(0)=0, 10, 20\text{m/s}$ の場合の結果を示す。これによると、 $C_D A/m=0.001$ では $V_{Mx}(0)=10\text{m/s}$ の方が $V_{Mx}(0)=20\text{m/s}$ の場合よりも V_{Hmax} は速くなっている。

(d) 竜巻の渦の移動速度 V_{tr}

初期位置 $x(0), y(0)$ に対して、竜巻の渦の移動速度 V_{tr} が減少するにつれて V_{Hmax} は増加したり減少したりする。たとえば、 $x(0)=46\text{m}, y(0)=0, C_D A/m=0.001$ の場合 $V_{tr}=0$ ならば $V_{Hmax}=25\text{m/s}$ となり、表 2.2.3.3 にある $V_{Hmax}=7\text{m/s}$ (このとき $V_{tr}=31\text{m/s}$) よりも速くなる。しかし、 $x(0)=0, y(0)=-46\text{m}, C_D A/m=0.001$ の場合 $V_{Hmax}=25\text{m/s}$ となり、表 2.2.3.3 にある $V_{Hmax}=51\text{m/s}$ よりも遅くなる。

表 2.2.3.4 種々の初期速度に対する飛散物の最大水平速度 V_{Hmax} (m/s)

		$x(0)$	$y(0)$	$C_D A/m = 0.001$			$C_D A/m = 0.01$		
				$V_{Mx}(0)$			$V_{Mx}(0)$		
				0	10	20	0	10	20
(a)		46	0	8	9	20	62	58	53
(b)		0	-23	35	45	35	63	59	59

(e) 渦の流のモデル

文献[8]と文献[9]に提案されている渦のモデルは、ここで使った半径 R_m が一定となるモデルとは異なっており、基本的に地面からの高さとともに直線的に半径 R_m は増加すると

仮定している。もし、このモデルが使われるならば、対応する飛散物の速度の計算結果はほとんどの場合、図 2.2.3.2 よりも速くなるということが文献[5]に示されている。

何人かの気象学者たちは、式(2.2.3.5)で示される速度よりもほとんどの竜巻の風速場において実際の竜巻の径方向の速度 V_r はかなり遅くなるという見解を示している。したがって、飛散物が多く運動量を獲得する高風速領域内の軌跡を計算するための径方向の抗力係数は相対的に小さくなり、飛散物の速度は図 2.2.3.2 の値よりもかなり遅くなる。実際の鉛直方向の風速は式(2.2.3.6)で得られるよりも遅いと考えられているので、飛散物はこの式に基づいて計算されたものより速く地面に落下しやすい。その結果として飛散物の速度も減少する(文献[5])。

竜巻による飛散物の速度の決定論的研究に関しては文献[10]から文献[16]を参照されたい。ANSI/ANS-2.3-1983 基準(文献[17])に明記された飛散物の速度を表 2.2.3.5 に示す。

表 2.2.3.5 ANSI/ANS-2.3-1983 基準(文献[17])に示された飛散物の最大水平速度を挙げる。

飛散物	重さ (pounds)	風速							
		320 mph	260 mph	250 mph	200 mph	180 mph	150 mph	140 mph	100 mph
自動車	4,000	115 mph	100 mph	95 mph	75 mph	65 mph	50 mph	45 mph	20 mph
ワイドフランジ	750	1,100 ft	850 ft	800 ft	600 ft	450 ft	200 ft	180 ft	100 ft
W 14 × 30 か同等品		100 mph	75 mph	70 mph	50 mph	45 mph	30 mph	25 mph	0 mph
		700 ft	440 ft	400 ft	200 ft	180 ft	100 ft	80 ft	0 ft

Source: Extracted from American National Standard ANSI/ANS-2.3-1983 with permission of the publisher, the American Nuclear Society.

移動ランキン渦モデルによる竜巻飛来物速度の評価

Evaluation of Tornado-borne Missile Speed using a Translating Rankine Vortex Model

○ 江口 譲, 電中研, 千葉県我孫子市我孫子 1646, eguchi@criepi.denken.or.jp
 杉本 聡一郎, 電中研, 千葉県我孫子市我孫子 1646, soichiro@criepi.denken.or.jp
 服部 康男, 電中研, 千葉県我孫子市我孫子 1646, yhattori@criepi.denken.or.jp
 平口 博丸, 電中研, 千葉県我孫子市我孫子 1646, hiromaru@criepi.denken.or.jp
 Yuzuru Eguchi, Soichiro Sugimoto, Yasuo Hattori, and Hiromaru Hirakuchi.
 Central Research Institute of Electric Power Industry, Abiko 1646, Abiko-shi, Chiba-ken, 270-1194 JAPAN

We have developed a numerical model to evaluate velocity of tornado-borne objects or missiles where wind of tornado is modeled with translating Rankine vortex and an object is assumed to be subject to drag and gravity forces in a manner similar to E. Simiu and M. Cordes (1976). In this study, effects of time integration scheme and time increment on accuracy are numerically examined and discussed. Furthermore, the results of tornado-borne missile speed are compared with those of the previous studies where tornado wind fields were defined by scaling an LES result obtained for a small experimental apparatus, to discuss the effect of the tomado wind features on the missile speed.

1. 序論

原子力発電所の安全審査においては、竜巻やその随伴事象が発生したとしても原子力発電所の安全性が維持されることが求められる。竜巻発生時には強風により浮上した物体が原子力発電施設に衝突する可能性があるため、竜巻に伴う飛来物の設計速度を定める必要がある。この竜巻飛来物評価方法として、米国の原子力規制委員会の規制ガイド⁽¹⁾では、E. Simiu⁽²⁾の方法と同様に、竜巻をランキン渦で簡易的にモデル化する方法が用いられている。一方、国内では、小規模な竜巻発生実験装置を対象とした非定常乱流解析で得られた数値解析結果に基づき、スケール則によって実規模竜巻の風速場に変換した非定常風速場を用いる方法が検討されている⁽³⁾。そこで、本研究では、まずE. Simiu and M. Cordes⁽²⁾と同様の竜巻風速モデルに基づいて飛来物速度を求めるための数値解析プログラム TONBOS を作成し、数値積分法や時間ステップ幅が飛来物速度に与える影響を明らかにする。次に、非定常風速場を用いる既往研究⁽³⁾で数値解析結果が提示されている問題を対象として、TONBOS を用いた数値解析を行い、これらの数値解析結果の比較により、竜巻風速場が飛来物速度に与える影響について議論する。

以下、2章では、本研究で開発した竜巻飛来物速度評価プログラム TONBOS の物理モデル（基礎方程式）とその数値解析スキームについて説明する。3章では、時間積分法や解析条件等が数値解析結果に与える影響について議論する。4章では、既往研究の数値解析結果⁽⁴⁾⁽⁵⁾との比較により、竜巻風速場が飛来物速度に与える影響について議論する。

2. 数値解析の物理モデルと計算スキーム

2.1 基礎方程式

(a) 竜巻の風速場

竜巻の風速場はx軸方向に一定速度 V_x で移動するランキン渦でモデル化する。ランキン渦の周方向風速 V_θ 、径方向(中心方向)風速 V_r 、上昇風速 V_z はE. Simiu and M. Cordes⁽²⁾と同様に以下の式で定義する (Fig.1 参照)。

$$V_r = af(r), V_\theta = bf(r), V_z = cf(r) \quad (1a), (1b), (1c)$$

ただし、 $a=1/\sqrt{5}$, $b=2/\sqrt{5}$, $c=4/3\sqrt{5}$ と定義し、周方向風速 V_θ と径方向風速 V_r を合成した渦の水平速度 $f(r)=(V_\theta^2+V_r^2)^{1/2}$ は、以下の式で定義される。

$$f(r) = \begin{cases} \frac{r}{R_m} V_m & \text{if } 0 \leq r \leq R_m \\ \frac{R_m}{r} V_m & \text{if } R_m \leq r \end{cases} \quad (2)$$

ここで、 r は渦中心からの距離、 R_m は渦コア半径(渦の水平風速が最大となる半径)、 V_m は渦の最大水平風速である。なお、文献(3)では渦の周方向風速 V_θ の最大値[最大径方向風速]として V_m が定義されているので、この場合は、式(1a)-(1c)で $a=1/2$, $b=1$, $c=2/3$ に設定し、 $f(r)$ は渦の周方向(接線方向)速度とみなす。

時刻 $t=0$ で竜巻中心は原点に位置するものとし、竜巻の風速場は飛来物の影響を受けないと仮定すると、時刻 t における竜巻の風速場 \mathbf{V}_w の各風速成分 (u, v, w) は式(1a)-(1c), (2)などから以下のようになる。

$$\begin{pmatrix} u \\ v \\ w \end{pmatrix} = \frac{f(r)}{r} \begin{pmatrix} -a(x - V_x t) - by \\ -ay + b(x - V_x t) \\ cr \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} V_x \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \quad (3)$$

ただし、渦中心からの距離 r は以下で与えられる。

$$r = \sqrt{(x - V_x t)^2 + y^2} \quad (4)$$

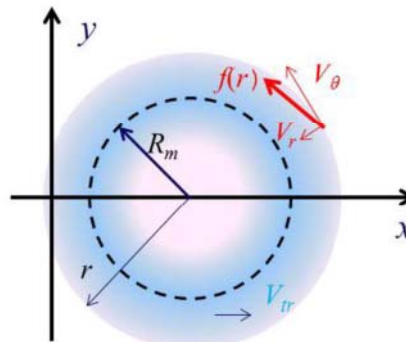


Fig. 1 Plan view of translating Rankine vortex

なお、静止する観測者からみた最大水平風速 V_D は、以下で計算される。

$$V_D = V_m + V_r \quad (5)$$

(b) 飛来物の運動

飛来物の運動は、既往研究⁽²⁾⁽⁶⁾と同様に方向性がない平均的な抗力（抗力係数一定）と重力のみが外力として作用すると仮定する。この場合の飛来物の運動方程式は以下のようになる。

$$\frac{d\mathbf{V}_M}{dt} = \frac{1}{2} \rho \frac{C_D A}{m} |\mathbf{V}_w - \mathbf{V}_M| (\mathbf{V}_w - \mathbf{V}_M) - g\mathbf{k} \quad (6)$$

ここで、各変数は以下で定義されるものである。

- \mathbf{V}_M : 飛来物の速度ベクトル
- \mathbf{V}_w : 風速ベクトル（ランキン型渦風速と移動速度の和）
- ρ : 空気密度
- C_D : 飛来物の平均抗力係数
- A : 飛来物の代表見附面積
- m : 飛来物の質量
- g : 重力加速度
- \mathbf{k} : 鉛直上向き単位ベクトル

2.2 飛来物運動方程式の時間積分法

時刻 t における竜巻の風速場 $\mathbf{V}_w = (u, v, w)$ は式(3)で与えられるので、式(6)を時間積分することによって、飛来物の速度と位置の時刻歴を求めることができる。ここでは、以下の2つの時間積分法を検討する。

(1) 一定加速度法（陽解法）

式(6)において、時刻 τ から時刻 $\tau + \Delta\tau$ における加速度が一定（時刻 τ の値で一定）と仮定する。つまり、

$$\frac{d\mathbf{V}_M(t)}{dt} = \mathbf{A}(\tau) \quad (7)$$

ただし、 $\mathbf{A}(\tau)$ は以下で定義される加速度ベクトルである。

$$\mathbf{A}(\tau) = k |\mathbf{V}_w(\tau) - \mathbf{V}_M(\tau)| \{ \mathbf{V}_w(\tau) - \mathbf{V}_M(\tau) \} - g\mathbf{k} \quad (8)$$

なお、簡単のため $k = \rho C_D A / 2m$ とした。式(7)を時間積分すると、以下の速度式を得る。

$$\mathbf{V}_M(t) = \mathbf{V}_M(\tau) + \mathbf{A}(\tau)(t - \tau) \quad (8)$$

さらに、式(9)を時間積分すると、以下の飛来物位置の時間変化式を得る。

$$\mathbf{X}_M(t) = \mathbf{X}_M(\tau) + \mathbf{V}_M(\tau)(t - \tau) + \frac{\mathbf{A}(\tau)}{2}(t - \tau)^2 \quad (10)$$

ただし、 $\mathbf{X}_M(t)$ は飛来物の位置を表す。従って、式(9)、(10)より時刻 $t = \tau + \Delta\tau$ における飛来物の速度と位置は以下で与えられる。

$$\begin{aligned} \mathbf{V}_M(\tau + \Delta\tau) &= \mathbf{V}_M(\tau) \\ &+ \left[k |\mathbf{V}_w(\tau) - \mathbf{V}_M(\tau)| (\mathbf{V}_w(\tau) - \mathbf{V}_M(\tau)) - g\mathbf{k} \right] \Delta\tau \end{aligned} \quad (11)$$

$$\begin{aligned} \mathbf{X}_M(\tau + \Delta\tau) &= \mathbf{X}_M(\tau) + \mathbf{V}_M(\tau) \Delta\tau \\ &+ \frac{\Delta\tau^2}{2} \left[k |\mathbf{V}_w(\tau) - \mathbf{V}_M(\tau)| (\mathbf{V}_w(\tau) - \mathbf{V}_M(\tau)) - g\mathbf{k} \right] \end{aligned} \quad (12)$$

式(11)、(12)の右辺は時刻 $t = \tau$ における既知の速度・位置の関数であるので、陽解法として時間積分を行うことができる。

(2) 線形加速度法（陰解法）

線形加速度法では、時刻 τ から時刻 $\tau + \Delta\tau$ における加速度が線形に変化するものと仮定する。つまり、式(6)において、以下の式が成立する。

$$\frac{d\mathbf{V}_M(t)}{dt} = -\mathbf{A}(\tau) \frac{t - \tau - \Delta\tau}{\Delta\tau} + \mathbf{A}(\tau + \Delta\tau) \frac{t - \tau}{\Delta\tau} \quad (13)$$

式(13)を時間積分すると、以下を得る。

$$\begin{aligned} \mathbf{V}_M(t) &= \mathbf{V}_M(\tau) + \mathbf{A}(\tau) \frac{\Delta\tau}{2} \\ &- \mathbf{A}(\tau) \frac{(t - \tau - \Delta\tau)^2}{2\Delta\tau} + \mathbf{A}(\tau + \Delta\tau) \frac{(t - \tau)^2}{2\Delta\tau} \end{aligned} \quad (14)$$

さらに、式(14)を時間積分すると、以下を得る。

$$\begin{aligned} \mathbf{X}_M(t) &= \mathbf{X}_M(\tau) - \mathbf{A}(\tau) \frac{(\Delta\tau)^2}{6} \\ &+ \left[\mathbf{V}_M(\tau) + \mathbf{A}(\tau) \frac{\Delta\tau}{2} \right] (t - \tau) \\ &- \mathbf{A}(\tau) \frac{(t - \tau - \Delta\tau)^3}{6\Delta\tau} + \mathbf{A}(\tau + \Delta\tau) \frac{(t - \tau)^3}{6\Delta\tau} \end{aligned} \quad (15)$$

従って、時刻 $t = \tau + \Delta\tau$ における速度と位置は以下で与えられる。

$$\mathbf{V}_M(\tau + \Delta\tau) = \mathbf{V}_M(\tau) + \frac{\Delta\tau}{2} [\mathbf{A}(\tau) + \mathbf{A}(\tau + \Delta\tau)] \quad (16)$$

$$\begin{aligned} \mathbf{X}_M(\tau + \Delta\tau) &= \mathbf{X}_M(\tau) + \mathbf{V}_M(\tau) \Delta\tau \\ &+ \mathbf{A}(\tau) \frac{\Delta\tau^2}{3} + \mathbf{A}(\tau + \Delta\tau) \frac{\Delta\tau^2}{6} \end{aligned} \quad (17)$$

式(16)、(17)の右辺は以下の時刻 $\tau + \Delta\tau$ における加速度 $\mathbf{A}(\tau + \Delta\tau)$ を含んでいる。

$$\begin{aligned} \mathbf{A}(\tau + \Delta\tau) &= k |\mathbf{V}_w(\tau + \Delta\tau) - \mathbf{V}_M(\tau + \Delta\tau)| \\ &\times \{ \mathbf{V}_w(\tau + \Delta\tau) - \mathbf{V}_M(\tau + \Delta\tau) \} - g\mathbf{k} \end{aligned} \quad (18)$$

このため、非線形式(18)では竜巻風速場も未知であるので、これも同時に連成させる必要がある。本研究では、これらの方程式を Newton-Raphson 法で求解し、時間積分を進めた。この Newton-Raphson 法に基づく求解法の詳細を以下に説明する。

時刻 $\tau + \Delta\tau$ において飛来物速度 $\mathbf{V}_M(\tau + \Delta\tau)$ とその位置 $\mathbf{X}_M(\tau + \Delta\tau) = (x_M, y_M, z_M)$ を求めるために満足すべき式は、式(16)、(17)、(18)および以下の竜巻の風速場のモデル方程式である。

$$\mathbf{V}_w = \frac{f(r_M)}{r_M} \begin{pmatrix} -a \{ x_M - V_r(\tau + \Delta\tau) \} - b y_M \\ -a y_M + b \{ x_M - V_r(\tau + \Delta\tau) \} \\ c r_M \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} V_r \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \quad (19)$$

$$r_M = \sqrt{\{ x_M - (\tau + \Delta\tau) V_r \}^2 + y_M^2} \quad (20)$$

まず、式(16)、(17)から $\mathbf{A}(\tau + \Delta\tau)$ を消去すると以下のような $\mathbf{V}_M(\tau + \Delta\tau)$ と $\mathbf{X}_M(\tau + \Delta\tau)$ の線形関係式を得ることができる。

$$\mathbf{X}_M(\tau + \Delta\tau) = \frac{\Delta\tau}{3} \mathbf{V}_M(\tau + \Delta\tau) + \mathbf{d}(\tau) \quad (21)$$

ただし、 $\mathbf{d}(\tau)$ は以下で定義する。

$$\mathbf{d}(\tau) = \mathbf{X}_M(\tau) + \frac{2\Delta\tau}{3} \mathbf{V}_M(\tau) + \frac{\Delta\tau^2}{6} \mathbf{A}(\tau) \quad (22)$$

また、式(17)、(18)から $\mathbf{A}(\tau + \Delta\tau)$ を消去すると以下のような $\mathbf{V}_M(\tau + \Delta\tau)$ と $\mathbf{X}_M(\tau + \Delta\tau)$ の非線形関係式を得ることができる。

$$\begin{aligned} \mathbf{X}_M(\tau + \Delta\tau) = & \mathbf{X}_M(\tau) + \mathbf{V}_w(\tau)\Delta\tau + \mathbf{A}(\tau)\frac{\Delta\tau^2}{3} - \frac{\Delta\tau^2}{6}g\mathbf{k} \\ & + \frac{k\Delta\tau^2}{6}|\mathbf{V}_w(\tau + \Delta\tau) - \mathbf{V}_M(\tau + \Delta\tau)|\{\mathbf{V}_w(\tau + \Delta\tau) - \mathbf{V}_M(\tau + \Delta\tau)\} \end{aligned} \quad (23)$$

また、式(21)を用いて、式(23)中の $\mathbf{V}_M(\tau + \Delta\tau)$ を消去すると以下を得る。

$$\begin{aligned} \mathbf{X}_M(\tau + \Delta\tau) = & \mathbf{h}(\tau) \\ & + \frac{k\Delta\tau^2}{6}|\mathbf{V}_w(\tau + \Delta\tau) - \frac{3}{\Delta\tau}[\mathbf{X}_M(\tau + \Delta\tau) - \mathbf{d}(\tau)]| \\ & \times \left\{ \mathbf{V}_w(\tau + \Delta\tau) - \frac{3}{\Delta\tau}[\mathbf{X}_M(\tau + \Delta\tau) - \mathbf{d}(\tau)] \right\} \end{aligned} \quad (24)$$

ただし、 $\mathbf{h}(\tau)$ は以下で定義する。

$$\mathbf{h}(\tau) = \mathbf{X}_M(\tau) + \mathbf{V}_w(\tau)\Delta\tau + \mathbf{A}(\tau)\frac{\Delta\tau^2}{3} - \frac{\Delta\tau^2}{6}g\mathbf{k} \quad (25)$$

式(24)を満たす $\mathbf{X}_M(\tau + \Delta\tau)$ を求めるために以下の関数 $\mathbf{F}(\mathbf{X}_M(\tau + \Delta\tau))$ を定義する。

$$\begin{aligned} \mathbf{F}(\mathbf{X}_M(\tau + \Delta\tau)) = & \mathbf{X}_M(\tau + \Delta\tau) - \mathbf{h}(\tau) \\ & - \frac{k\Delta\tau^2}{6}|\mathbf{G}(\mathbf{X}_M(\tau + \Delta\tau))|\mathbf{G}(\mathbf{X}_M(\tau + \Delta\tau)) \end{aligned} \quad (26)$$

ただし、 $\mathbf{G}(\mathbf{X}_M(\tau + \Delta\tau))$ は以下で定義される。

$$\mathbf{G}(\mathbf{X}_M(\tau + \Delta\tau)) = \mathbf{V}_w(\tau + \Delta\tau) - \frac{3}{\Delta\tau}[\mathbf{X}_M(\tau + \Delta\tau) - \mathbf{d}(\tau)] \quad (27)$$

$\mathbf{F}(\mathbf{X}_M(\tau + \Delta\tau))=0$ を満たす $\mathbf{X}_M(\tau + \Delta\tau)$ を求めるために、以下のNewton-Raphson法による繰り返し計算を用いる。

$$\mathbf{X}_M^{(i+1)} = \mathbf{X}_M^{(i)} - \left(\frac{\partial \mathbf{F}}{\partial \mathbf{X}_M} \right)^{-1} \mathbf{F}(\mathbf{X}_M^{(i)}) \quad (28)$$

ここで、ヤコビアン行列は式(26)より以下のように求めることができる。

$$\frac{\partial \mathbf{F}}{\partial \mathbf{X}_M} = \mathbf{I} - \frac{k\Delta\tau^2}{6} \left\{ \frac{1}{|\mathbf{G}|} \mathbf{G} \otimes \left(\left[\frac{\partial \mathbf{G}}{\partial \mathbf{X}_M} \right] \mathbf{G} \right) + |\mathbf{G}| \frac{\partial \mathbf{G}}{\partial \mathbf{X}_M} \right\} \quad (29)$$

ここで、 \mathbf{I} は3x3の単位行列、 $\mathbf{a} \otimes \mathbf{b}$ は縦ベクトル \mathbf{a} と \mathbf{b} のテンソル積を表し、その(i,j)成分は $(\mathbf{a} \otimes \mathbf{b})_i = a_i b_j$ と定義される。また、 $\mathbf{G}(\mathbf{X}_M)$ の \mathbf{X}_M に関する微分は以下のように求められる。

$$\frac{\partial \mathbf{G}(\mathbf{X}_M)}{\partial \mathbf{X}_M} = \frac{\partial \mathbf{V}_w}{\partial \mathbf{X}_M} - \frac{3}{\Delta\tau} \mathbf{I} \quad (30)$$

2.3 時間進展スキーム

竜巻の風速場を規定する条件である、渦コア半径（渦の水平風速が最大となる半径） R_m 、渦の最大水平風速 V_m および一定移動速度 V_s を与えて、以下のいずれかのスキームで時間進展させる。

(1) 一定加速度法（陽解法）

- ①初期条件の設定：時刻 $t=0$ における飛来物の初期速度と初期位置を与える。竜巻中心は原点に位置するものとする。
- ②時刻 $t=\tau$ の飛来物位置での竜巻風速を式(3)から求め、式(11)から時刻 $t=\tau+\Delta\tau$ の飛来物速度を、式(12)から飛来物位置を求める。
- ③ $t=\tau+\Delta\tau$ として、②に戻り時間積分を進める。（終了まで）

(2) 線形加速度法（陰解法）

- ①初期条件の設定：時刻 $t=0$ における飛来物の初期速度と初期位置を与える。竜巻中心は原点に位置するものとする。
- ②式(28)の繰り返し計算を収束させ、時刻 $t=\tau+\Delta\tau$ の飛来物位置を求め、次に、時刻 $t=\tau+\Delta\tau$ の飛来物速度を、式(21)から求める。
- ③ $t=\tau+\Delta\tau$ として、②に戻り時間積分を進める。（終了まで）

3. 数値解析コードの検証

3.1 一様風での検証

時刻 $t=0$ において初期速度ゼロで原点に静止する物体が x 方向の一様風 $\mathbf{V}_w=(V_w, 0, 0)$ によって発生する抗力のみを外力として受ける問題について、本研究で開発した解析コード TONBOS を検証する。この問題では、物体の運動に関しては理論解が存在し、時刻 t における物体位置は以下で記述される²⁾。

$$x_M(t) = V_w t - \frac{1}{k} \ln(kV_w t + 1) \quad (31)$$

なお、前述と同様に $k=\rho C_D A/2m$ である。この問題を、前節で説明した2つの時間進展スキームで数値解析し、理論解と比較する。解析条件は $V_w=10[\text{m/s}]$ 、 $k=0.01[\text{m}^{-1}]$ とし、時間ステップ $\Delta\tau$ を0.01, 0.1, 1, 10[s]の4種類で計算した。時刻 $t=10[\text{s}]$ における物体位置および物体速度の相対誤差を“(計算値-理論値)/理論値”で評価したところ、物体位置に関してはFig.2(a)に示す結果が、物体速度に関してはFig.2(b)に示す結果が得られた。

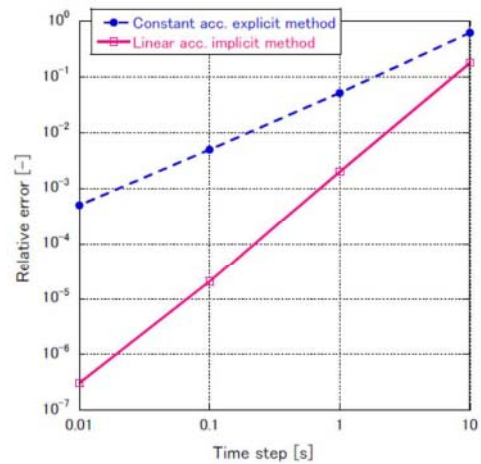


Fig.2(a) Relative error of position, $x_M(t)$, of an object subject to uniform wind at $t=10$ [s] in variation with time step

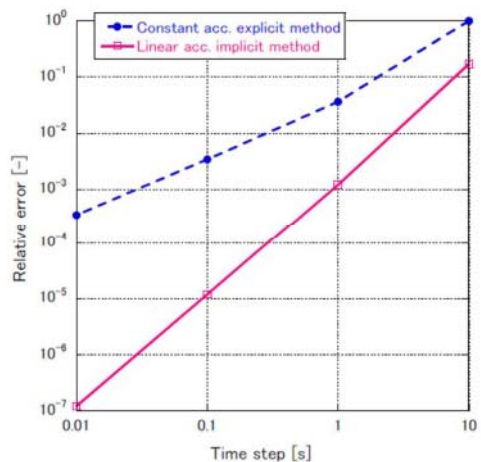


Fig.2(b) Relative error of velocity, $u_M(t)$, of an object subject to uniform wind at $t=10$ [s] in variation with time step

Fig.2(a)および Fig.2(b)より一定加速度法（陽解法）よりも線形加速度法（陰解法）の方が精度が良く、一定加速度法は時間ステップに関して1次精度、線形加速度法は2次精度を有することが確認された。なお、この例では一定加速度法（陽解法）を用いても時間ステップ Δt を0.1[s]以下に設定すれば、物体位置および物体速度の相対誤差は1%以下に抑えることができる。

3.2 移動する竜巻での検証

Simiu and Scanlan⁽³⁾は、初速ゼロの飛来物が座標($R_m, 0, 40$) [単位: m]に位置するものとして飛来物の運動を計算し、飛来物が地上に落下するまでに達した最大の水平速度を「飛来物最大水平速度」と定義して数値解析結果を得ている。そこで、これと同様に Table 1 に示す3種類の竜巻条件 (Tomado Type-I, -II, -III) を与えて、TONBOS によって「飛来物最大水平速度」 V_h^{max} を求めた。なお、Table 1 の各条件は文献(3)の Table 3.5.1(p.127)に記載されている値を[mph]から[m/s]へ、[ft]から[m]に換算したものである。

物体特性値 $C_D A/m$ については、文献(3)の Table 16.3.1 (p.565)に掲載されている値 ($C_D A/m=0.0033, 0.0040, 0.0043, 0.0052, 0.0070, 0.0270$ [m²/kg]) および Table 16.3.2 (p.567, Tomado Type-I)のケース(a)に掲載されている値 ($C_D A/m=0.001, 0.01$ [m²/kg]) を選定して検証問題とした。なお、時間進展スキームには線形加速度法（陰解法）を用い、全ケースで時間ステップ Δt を0.01[s]に設定した。また、空気密度 ρ は1.226[kg/m³]、重力加速度 g は9.8[m/s²]とした。

Fig.3 に物体特性 $C_D A/m$ の各値に対する「飛来物最大水平速度」 V_h^{max} を文献(3)の結果と比較して示す。本数値解析の V_h^{max} の結果は文献(3)よりもやや大きい傾向にあるが、両者は整合する結果となっている。なお、一定加速度法（陽解法）を用いても、線形加速度法（陰解法）と同様の解が得られる。文献(3)との相違の原因としては、数値解析スキームの違いや空気密度などの物性値の違いが考えられるが、文献(3)などでは詳しい説明はなされていない。

Table 1 Computational condition of three types of tomadoes

	V_m [m/s]	V_p [m/s]	R_m [m]
Tomado Type-I	129.6	31.3	45.7
Tomado Type-II	107.3	26.8	45.7
Tomado Type-III	84.9	22.4	45.7

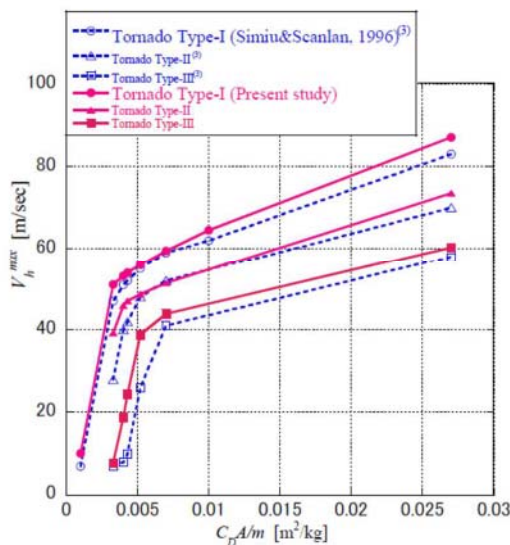


Fig.3 Maximum horizontal missile speed in variation with $C_D A/m$

4. 竜巻風速場の影響

4.1 米国竜巻相当条件での比較

Manuyama⁽⁴⁾は竜巻実験装置（時間および周方向に平均化した接線風速の最大値 V_{max} とその発生半径 R_{max} で定義される Re 数は760）を対象とした LES 解析結果⁽⁴⁾⁽⁶⁾に基づき、一定速度 V_p で移動する実規模の竜巻風速場を生成して飛来物速度を求めている。その一例として $V_{max}=82$ [m/s], $R_{max}=45.7$ [m], $V_p=21$ [m/s]の竜巻条件に相当する非定常風速場を生成し、この非定常風速場の中の座標 ($0, -R_{max}, 40$) [m]から初速ゼロの飛来物を放出する数値解析を多数 (5100 ケース) 行い、飛来物の「飛来物最大水平速度」 V_h^{max} の確率分布を求めている (文献(4)の Fig.11)。その結果によると、 V_h^{max} の平均値は48[m/s]、標準偏差は7[m/s]、最高値は62[m/s]となっている。この解析例に対応する問題を移動ランキン渦モデルで評価するために、TONBOS において $R_m=45.7$ [m], $V_m=82$ [m/s], $V_p=21$ [m/s] (時間積分法, ρ, g は3.2節と同様) の条件で初速ゼロの飛来物を座標($0, -R_{max}, 40$) [m]から放出する数値解析を行った。なお、周方向風速 V_p の最大値を82[m/s]に設定するため、式(1a)-(1c)で $a=1/2, b=1, c=2/3$ とした。その結果、 $V_h^{max}=47.22$ [m/s]が得られ、Manuyama⁽⁴⁾が得た V_h^{max} の平均値48[m/s]と良く一致した。

さらに、文献(4)では米国規制ガイド⁽⁵⁾を参考にして選定した3種類の竜巻条件について、高さ40[m]の位置から飛来物を広範囲かつ密に多数、放出して V_h^{max} を求めている。一方、本数値解析では、これに相当する条件 (Table2 に示す Vortex Type-I, -II, -III) を TONBOS に与えて、飛来物を高さ40[m] (x, y 方向に $\pm 3R_m$ の正方形の範囲の51 \times 51箇所) から放出して「飛来物最大水平速度」を得た。Fig.4 に物体特性 $C_D A/m$ の各値に対する V_h^{max} を文献(4)の結果と比較して示す。文献(4)の V_h^{max} は本数値解析で得られた V_h^{max} よりも大きい傾向にあるが、両者は良く整合することが分かる。

Table 2 Computational condition of three types of vortices

	V_m^* [m/s]	V_p [m/s]	R_m [m]
Vortex Type-I	82	21	45.7
Vortex Type-II	72	18	45.7
Vortex Type-III	57	14	45.7

* circumferential speed

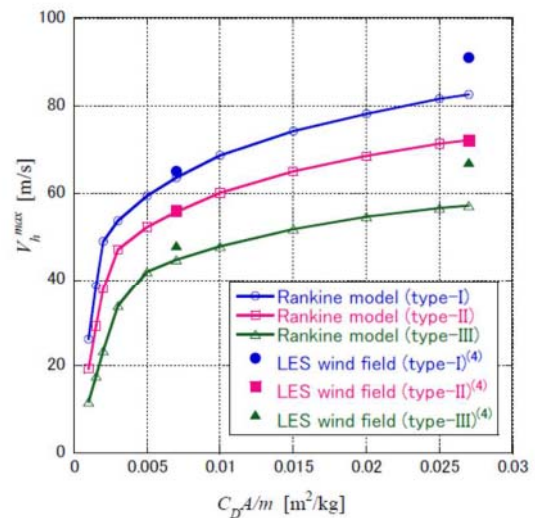


Fig.4 Maximum horizontal missile speed in variation with $C_D A/m$ for Vortex Types-I, II and III shown in Table 2

4.2 国内最大級相当条件での比較

文献(5)の p.237 に示されている竜巻条件に相当する計算条件 (Table3) を TONBOS に与えて、「飛来物最大水平速度」 V_h^{max} を求めた。文献(5)の竜巻風速場の生成方法は文献(4)と同様に LES 解析結果に基づくものであるが、高さ 40[m] の x, y 方向に $\pm 3R_m$ の正方形の 25×25 箇所から飛来物を複数回、放出して V_h^{max} を求めている。本研究でも、同様の位置から飛来物を放出して V_h^{max} を計算した。Fig.5 に物体特性 $C_{D4/m}$ の各値に対する V_h^{max} を文献(5)の結果と比較して示す。物体特性 $C_{D4/m}$ が小さい条件では、文献(5)の V_h^{max} は本数値解析の V_h^{max} の結果よりも小さい傾向にあるが、物体特性 $C_{D4/m}$ が大きい条件では逆の傾向となる。しかしながら、両者は良く整合することが分かる。

物体特性 $C_{D4/m}$ の大小によって V_h^{max} の相対的な大小が逆転する理由としては、 $C_{D4/m}$ が小さい場合は、LES 解析の風速場の上昇速度がランキン渦に比べ小さく、水平方向に十分加速される前に早く落下するが、 $C_{D4/m}$ が大きい場合は、物体が飛散しやすいため気流中の滞在時間が長くなり、LES 解析の風速場の乱れの影響を受けて大きな飛来物速度となるためと考えられる。

5. 結論

本研究では、竜巻の風速場をランキン渦で簡易的にモデル化し、飛来物速度の運動を求めるための数値解析スキームについて説明した。この数値解析スキームに基づく竜巻飛来物評価ソフト TONBOS を用いた計算結果等より以下の結論を得た。

- (1) 飛来物の運動方程式の数値積分法としては、同一の時間ステップ条件下では、線形加速度法 (陰解法) が一定加速度法 (陽解法) よりも高精度である。ただし、時間ステップ幅が十分に小さい場合は飛来物速度に与える影響は小さい。
- (2) LES 解析結果に基づく非定常風速場を用いる既往研究結果⁽⁴⁾⁽⁵⁾との比較により、竜巻風速場が飛来物速度に与える影響について評価したところ、物体特性 $C_{D4/m}$ の大小によって V_h^{max} の相対的な大小関係が逆転する傾向が見られるが、竜巻の風速場をランキン渦でモデル化した場合の結果は LES 解析結果に基づく結果と良く整合することが判明した。

謝辞

本研究の4章 (竜巻風速場の影響) をとりまとめるに当たり、京都大学防災研究所 気象・水象災害研究部門 耐風構造研究分野 丸山 敬 教授から貴重なご意見を頂きましたので、ここに謝意を表します。

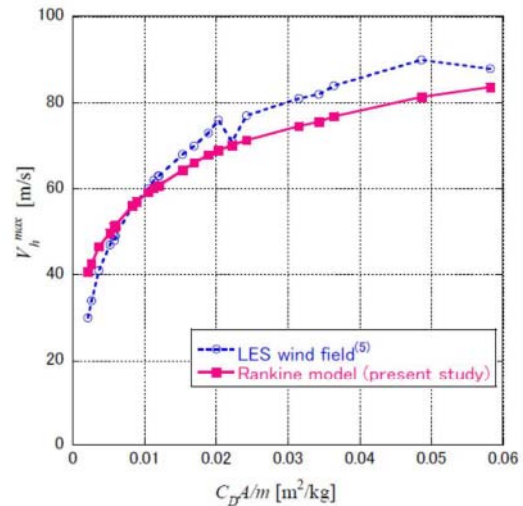
参考文献

- (1) U.S. NUCLEAR REGULATORY COMMISSION: REGULATORY GUIDE 1.76. Design-Basis Tomado and Tomado Missiles for Nuclear Power Plants, Revision 1, March 2007.
- (2) Simiu, E. and Cordes, M., NBSIR 76-1050. Tomado-Bome Missile Speeds, 1976.
- (3) Simiu, E. and Scanlan, R. H., Wind Effects on Structures: Fundamentals and Applications to Design, 3rd Edition, John Wiley & Sons, Hoboken, NJ, August 1996.
- (4) Manuyama, T., Simulation of flying debris using a numerically generated tomado-like vortex. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, vol.99(4), pp.249-256, 2011.
- (5) 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.
- (6) 丸山敬, “数値的に生成された竜巻状の渦の性質”, 京都大学防災研究所年報, 第 53 号 B, 平成 22 年 6 月.

Table 3 Computational condition of tomado assumed for a nuclear power plant site

V_m^* [m/s]	V_p [m/s]	R_m [m]
84	16	30

* circumferential speed

Fig.5 Maximum horizontal missile speed in variation with $C_{D4/m}$ for tomado assumed for a nuclear power plant site shown in Table 3.

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

重大事故等対象設備については、以下の理由から、竜巻防護施設として抽出しない。

- 『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。）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』の重要度分類における耐震Sクラスの設計を要求される設備（系統・機器）及び建屋・構築物等とする。」（以下「耐震Sクラスの設計を要求される設備（系統・機器）及び建屋・構築物」という。）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」（以下「設置許可基準規則」という。）第6条第1項において、「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、「耐震Sクラスの設計を要求される設備（系統・機器）及び建屋・構築物」および「外部事象防護対象施設」を竜巻防護施設とし、竜巻発生時においても竜巻防護施設の安全機能が維持できることを確認していることから、竜巻を起因とした重大事故等が発生することは考え難い。
- 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} ）、竜巻と重大事故等が同時に発生することは考え難い。

一方、設置許可基準規則の解釈第6条第1項に「第6条は、設計基準において想定される自然現象（地震及び津波を除く。）に対して、安全施設が安全機能を損なわないために必要な安全施設以外の施設又は設備等（重大事故等対処設備を含む。）への措置を含む。」旨規定されているため、設計飛来物による影響評価にあたっては、重大事故等対処設備も想定飛来物として抽出し、設計飛来物の設定を行う。

設置許可基準規則（抜粋）	設置許可基準規則の解釈（抜粋）
<p>（外部からの衝撃による損傷の防止）</p> <p>第六条 安全施設は、想定される自然現象（地震及び津波を除く。次項において同じ。）が発生した場合においても安全機能を損なわないものでなければならない。</p>	<p>第6条（外部からの衝撃による損傷の防止）</p> <p>1 第6条は、設計基準において想定される自然現象（地震及び津波を除く。）に対して、安全施設が安全機能を損なわないために必要な安全施設以外の施設又は設備等（重大事故等対処設備を含む。）への措置を含む。</p>

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

第43条の要求を踏まえ、設計竜巻によって、設計基準事故対処設備等の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郭となる建屋による防護に期待できる代替手段等により必要な機能を維持できることを確認する。

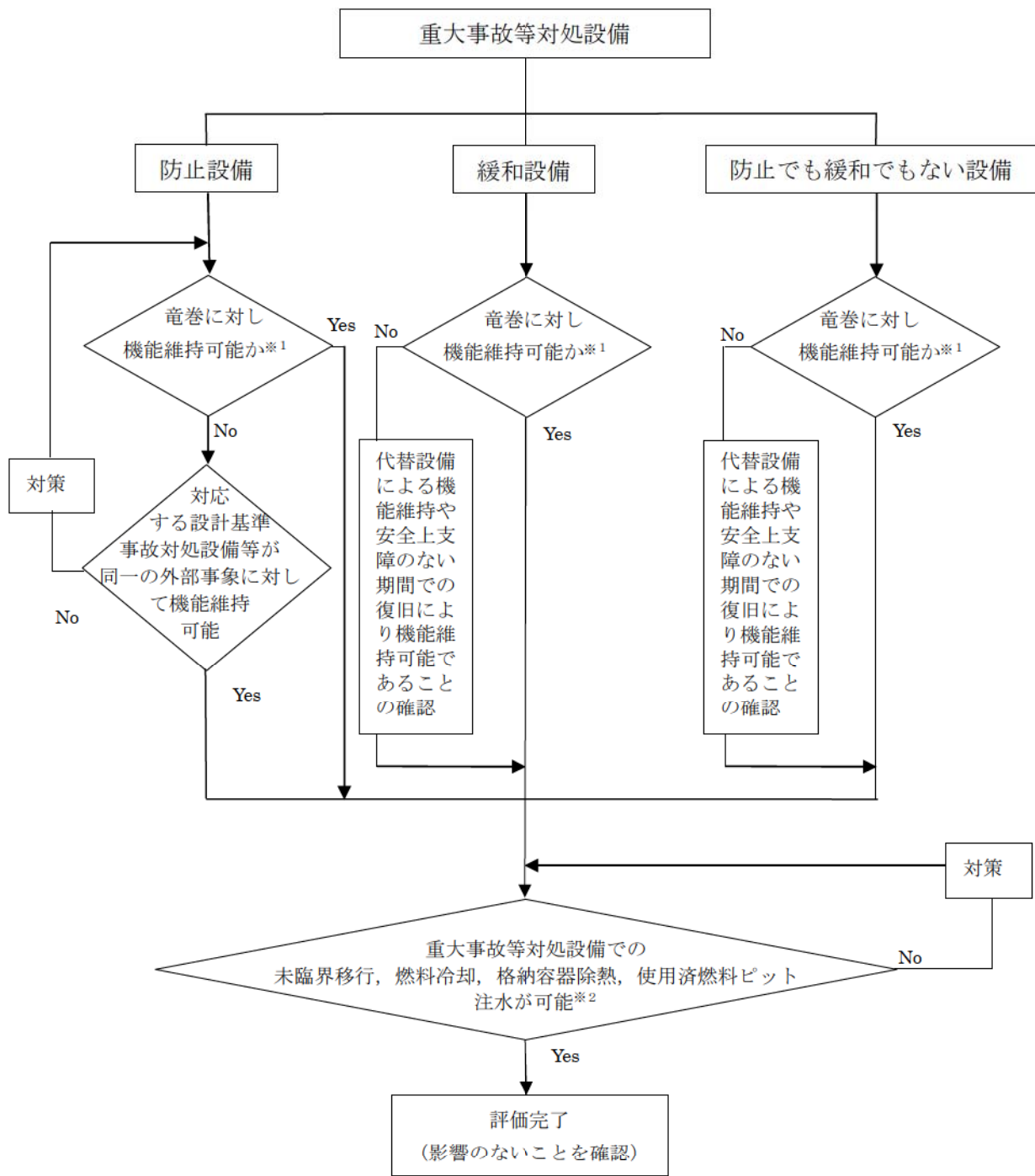
重大事故等対処設備の機能維持は、以下の方針に従い評価を実施する。

- (1) 重大事故防止設備は、竜巻によって対応する設計基準事故対処設備等の機能と同時にその機能が損なわれるおそれのないこと
- (2) 重大事故等対処設備であって、重大事故防止設備でない設備は、代替設備若しくは安全上支障のない期間内での復旧により機能維持可能であること
- (3) 竜巻が発生した場合においても、重大事故等対処設備によりプラント安全性に関する主要な機能（未臨界移行機能、燃料冷却機能、格納容器除熱機能、使用済燃料ピット注水機能）が維持できること（各外部事象により重大事故等対処設備と設計基準事故対処設備等の機能が同時に損なわれることはないが、安全上支障のない期間内での復旧により機能維持可能であることを確認する）

竜巻による重大事故等対処設備への影響評価フロー並びに方針(1)及び(2)に対する評価結果をそれぞれ第1図、第1表に示す。方針(3)に示した、プラント安全性に関する主要な機能は、以下に例示するとおり重大事故等対処設備により維持される。

- ・未臨界移行機能：手動による原子炉緊急停止，原子炉出力抑制（自動），原子炉出力抑制（手動），ほう酸水注入
- ・燃料冷却機能：代替炉心注水（代替格納容器スプレイポンプ）
- ・格納容器除熱機能：格納容器内自然対流冷却
- ・使用済燃料ピット注水機能：使用済燃料ピットへの注水（可搬型大型送水ポンプ車）

なお、重大事故等対処設備の設計方針は、設置許可基準規則第43条（重大事故等対処設備）にて考慮する。



※1 屋内設備については、当該設備を内包する建屋の影響評価を実施し、安全機能が維持されるかを確認。

※2 竜巻により重大事故等対処設備と設計基準対処施設が同時に損なわれることはないが、安全支障のない期間内での復旧により機能維持可能であることを確認。

第1図 竜巻に対する重大事故等対処設備の影響評価フロー

第1表 竜巻に対する重大事故等対処設備の影響評価 (1/13)

設置許可基準	対応手段	重大事故等対処設備	分類	保管設置箇所	竜巻	
					評価	防護方法
第37条 (重大事故等の拡大の防止等)	—	—	—	—	—	—
第38条 (重大事故等対処施設の地盤)	—	—	—	—	—	—
第39条 (地震による損傷の防止)	—	—	—	—	—	—
第40条 (津波による損傷の防止)	—	—	—	—	—	—
第41条 (火災による損傷の防止)	—	—	—	—	—	—
第42条 (特定重大事故等対処施設)	—	特定重大事故等対処施設	申請範囲外		—	—
第43条 (重大事故等対処設備)	—	ホイールローダ, バックホウ	防止でも緩和でもない設備	屋外	○	分散配置
第44条 (緊急停止失敗時に発電用原子炉を未臨界にするための設備)	手動による原子炉緊急停止	制御棒クラスタ, 原子炉トリップ遮断器	防止設備	R/B	○	建屋内
		原子炉トリップスイッチ	防止設備	A/B	○	建屋内
	原子炉出力制御 (自動)	共通要因故障対策盤 (自動制御盤) (ATWS 緩和設備)	防止設備	A/B	○	建屋内
		電動補助給水ポンプ, 蒸気発生器等	防止設備	R/B	○	建屋内
	原子炉出力制御 (手動)	電動補助給水ポンプ, 蒸気発生器等	防止設備	R/B	○	建屋内
	ほう酸水注入 (ほう酸タンク→充てんライン)	ほう酸ポンプ, ほう酸タンク等	防止設備	A/B	○	建屋内
		再生熱交換器	防止設備	R/B	○	建屋内
	ほう酸水注入 (燃料取替用水ピット→充てんライン)	充てんポンプ	防止設備	A/B	○	建屋内
		燃料取替用水ピット等	防止設備	R/B	○	建屋内
	ほう酸水注入 (燃料取替用水ピット→安全注入ライン)	高圧注入ポンプ等	防止設備	A/B	○	建屋内
燃料取替用水ピット		防止設備	R/B	○	建屋内	
第45条 (原子炉冷却材圧力バウンダリ高圧時に発電用原子炉を冷却するための設備)	1次系のフィードアンドブリード (高圧注入ポンプ)	高圧注入ポンプ等	防止設備	A/B	○	建屋内
		燃料取替用水ピット, 格納容器再循環サンプ等	防止設備	R/B	○	建屋内
	蓄圧注入	蓄圧タンク, 蓄圧タンク出口弁	防止設備	R/B	○	建屋内
	蒸気発生器2次側による炉心冷却 (タービン動補助給水ポンプの機能回復)	タービン動補助給水ポンプ, 補助給水ピット等	防止設備	R/B	○	建屋内
	蒸気発生器2次側による炉心冷却 (電動補助給水ポンプの機能回復)	電動補助給水ポンプ, 補助給水ピット等	防止設備	R/B	○	建屋内

・評価

- : 竜巻に対して安全機能を維持できる
又は竜巻による損傷を考慮した場合でも, 対応する設計基準事故対処設備が竜巻に対して安全機能を維持できる (防止設備)
又は竜巻による損傷を考慮して, 代替設備による機能維持や安全上支障のない期間での修復等の対応が可能 (緩和設備, 防止でも緩和でもない設備)

・建屋名

R/B: 原子炉建屋 (原子炉格納容器を含む), A/B: 原子炉補助建屋

第1表 竜巻に対する重大事故等対処設備の影響評価 (2/13)

設置許可基準	対応手段	重大事故等対処設備	分類	保管設置箇所	竜巻	
					評価	防護方法
第46条 (原子炉冷却材圧力バウンダリを減圧するための設備)	1次系のフィードアンドブリード (高圧注入ポンプ)	高圧注入ポンプ等	防止設備	A/B	○	建屋内
		燃料取替用水ピット、格納容器再循環サンプ等	防止設備	R/B	○	建屋内
	蓄圧注入	蓄圧タンク、蓄圧タンク出口弁	防止設備	R/B	○	建屋内
	蒸気発生器2次側による炉心冷却	電動補助給水ポンプ、タービン動補助給水ポンプ、補助給水ピット等	防止設備	R/B	○	建屋内
	蒸気発生器2次側による炉心冷却 (タービン動補助給水ポンプの機能回復)	タービン動補助給水ポンプ、補助給水ピット等	防止設備	R/B	○	建屋内
	蒸気発生器2次側による炉心冷却 (電動補助給水ポンプの機能回復)	電動補助給水ポンプ、補助給水ピット等	防止設備	R/B	○	建屋内
		加圧器逃がし弁の機能回復	加圧器逃がし弁操作バッテリー	防止設備	A/B	○
		加圧器逃がし弁操作可搬型窒素ポンベ等	防止設備	R/B	○	建屋内
	加圧器逃がし弁による1次冷却系統の減圧	加圧器逃がし弁	緩和設備	R/B	○	建屋内
	1次冷却系統の減圧 (SG伝熱管破損発生時、IS-LOCA発生時)	主蒸気逃がし弁、加圧器逃がし弁	防止設備	R/B	○	建屋内
余熱除去系統の隔離 (IS-LOCA発生時)	余熱除去ポンプ入口弁	防止設備	A/B	○	建屋内	
第47条 (原子炉冷却材バウンダリ低圧時に発電用原子炉を冷却するための設備)	炉心注水 (CHP) (1次冷却材喪失事象が発生している場合、フロントライン系機能喪失時)	充てんポンプ	防止設備	A/B	○	建屋内
		燃料取替用水ピット等	防止設備	R/B	○	建屋内
	代替炉心注水 (B-CSP) (1次冷却材喪失事象が発生している場合、フロントライン系機能喪失時)	B-格納容器スプレイポンプ等	防止設備	A/B	○	建屋内
		燃料取替用水ピット	防止設備	R/B	○	建屋内
	代替炉心注水 (代替CSP) (1次冷却材喪失事象が発生している場合、フロントライン系機能喪失時)	代替格納容器スプレイポンプ、燃料取替用水ピット等	防止設備	R/B	○	建屋内
	代替炉心注水 (可搬型ポンプ車) (1次冷却材喪失事象が発生している場合、フロントライン系機能喪失時)	可搬型大型送水ポンプ車	防止設備	屋外	○	分散配置
	再循環運転 (SIP) (1次冷却材喪失事象が発生している場合、フロントライン系機能喪失時)	高圧注入ポンプ等	防止設備	A/B	○	建屋内
		格納容器再循環サンプ等	防止設備	R/B	○	建屋内
代替再循環運転 (B-CSP) (1次冷却材喪失事象が発生している場合、フロントライン系機能喪失時)	B-格納容器スプレイポンプ等	防止設備	A/B	○	建屋内	
	B-格納容器再循環サンプ等	防止設備	R/B	○	建屋内	
炉心注水 (SIP) (1次冷却材喪失事象が発生している場合、フロントライン系機能喪失時)	高圧注入ポンプ等	防止設備	A/B	○	建屋内	
	燃料取替用水ピット	防止設備	R/B	○	建屋内	

・評価

- : 竜巻に対して安全機能を維持できる
又は竜巻による損傷を考慮した場合でも、対応する設計基準事故対処設備が竜巻に対して安全機能を維持できる (防止設備)
又は竜巻による損傷を考慮して、代替設備による機能維持や安全上支障のない期間での修復等の対応が可能 (緩和設備, 防止でも緩和でもない設備)

・建屋名

R/B: 原子炉建屋 (原子炉格納容器を含む), A/B: 原子炉補助建屋

第1表 竜巻に対する重大事故等対処設備の影響評価 (3/13)

設置許可基準	対応手段	重大事故等対処設備	分類	保管設置箇所	竜巻	
					評価	防護方法
第47条 (原子炉冷却材バウンダリ低圧時に発電用原子炉を冷却するための設備)	炉心注水 (CHP) (1次冷却材喪失事象が発生している場合, フロントライン系機能喪失時)	充てんポンプ	防止設備	A/B	○	建屋内
		燃料取替用水ピット等	防止設備	R/B	○	建屋内
	代替炉心注水 (B-CSP) (1次冷却材喪失事象が発生している場合, フロントライン系機能喪失時)	B-格納容器スプレイポンプ等	防止設備	A/B	○	建屋内
		燃料取替用水ピット	防止設備	R/B	○	建屋内
	代替炉心注水 (代替CSP) (1次冷却材喪失事象が発生している場合, フロントライン系機能喪失時)	代替格納容器スプレイポンプ, 燃料取替用水ピット等	防止設備	R/B	○	建屋内
	代替炉心注水 (可搬型ポンプ車) (1次冷却材喪失事象が発生している場合, フロントライン系機能喪失時)	可搬型大型送水ポンプ車	防止設備	屋外	○	分散配置
	代替炉心注水 (代替CSP) (代替電源) (1次冷却材喪失事象が発生している場合, サポート系機能喪失時)	代替格納容器スプレイポンプ, 燃料取替用水ピット等	防止設備	R/B	○	建屋内
	代替炉心注水 (可搬型ポンプ車:海) (1次冷却材喪失事象が発生している場合, サポート系機能喪失時)	可搬型大型送水ポンプ車	防止設備	屋外	○	分散配置
	代替炉心注水 (CHP (自己冷却)) (1次冷却材喪失事象が発生している場合, サポート系機能喪失時)	B-充てんポンプ	防止設備	A/B	○	建屋内
		燃料取替用水ピット等	防止設備	R/B	○	建屋内
	代替再循環運転 (A-SIP (海水冷却)) (1次冷却材喪失事象が発生している場合, サポート系機能喪失時)	A-高圧注入ポンプ等	防止設備	A/B	○	建屋内
		A-格納容器再循環サンプ等	防止設備	R/B	○	建屋内
		可搬型大型送水ポンプ車	防止設備	屋外	○	分散配置
格納容器スプレイ (CSP) (格納容器水張り) (1次冷却材喪失事象が発生している場合, 熔融デブリが原子炉容器に残存する場合)	格納容器スプレイポンプ等	緩和設備	A/B	○	建屋内	
	燃料取替用水ピット	緩和設備	R/B	○	建屋内	
代替格納容器スプレイ (代替CSP) (格納容器水張り) (1次冷却材喪失事象が発生している場合, 熔融デブリが原子炉容器に残存する場合)	代替格納容器スプレイポンプ, 燃料取替用水ピット等	緩和設備	R/B	○	建屋内	

評価

- : 竜巻に対して安全機能を維持できる
又は竜巻による損傷を考慮した場合でも, 対応する設計基準事故対処設備が竜巻に対して安全機能を維持できる (防止設備)
又は竜巻による損傷を考慮して, 代替設備による機能維持や安全上支障のない期間での修復等の対応が可能 (緩和設備, 防止でも緩和でもない設備)

建屋名

R/B: 原子炉建屋 (原子炉格納容器を含む), A/B: 原子炉補助建屋

第1表 竜巻に対する重大事故等対処設備の影響評価 (4/13)

設置許可基準	対応手段	重大事故等対処設備	分類	保管設置箇所	竜巻	
					評価	防護方法
第47条 (原子炉冷却材バウンダリ低圧時に発電用原子炉を冷却するための設備)	蒸気発生器2次側による炉心冷却 (補助給水ポンプ) (1次冷却材喪失事象が発生していない場合, フロントライン系機能喪失時)	電動補助給水ポンプ, 補助給水ピット等	防止設備	R/B	○	建屋内
	蒸気発生器2次側による炉心冷却 (補助給水ポンプ) (代替電源) (1次冷却材喪失事象が発生していない場合, サポート系機能喪失時)	電動補助給水ポンプ, 補助給水ピット等	防止設備	R/B	○	建屋内
	炉心冷却 (CHP) (運転停止中の場合, フロントライン系機能喪失時)	充電ポンプ	防止設備	A/B	○	建屋内
		燃料取替用水ピット等	防止設備	R/B	○	建屋内
	炉心冷却 (SIP) (運転停止中の場合, フロントライン系機能喪失時)	高圧注入ポンプ等	防止設備	A/B	○	建屋内
		燃料取替用水ピット	防止設備	R/B	○	建屋内
	代替炉心注水 (B-CSP) (運転停止中の場合, フロントライン系機能喪失時)	B-格納容器スプレイポンプ等	防止設備	A/B	○	建屋内
		燃料取替用水ピット	防止設備	R/B	○	建屋内
	代替炉心注水 (代替CSP) (運転停止中の場合, フロントライン系機能喪失時)	代替格納容器スプレイポンプ, 燃料取替用水ピット等	防止設備	R/B	○	建屋内
	代替炉心注水 (可搬型ポンプ車) (運転停止中の場合, フロントライン系機能喪失時)	可搬型大型送水ポンプ車	防止設備	屋外	○	分散配置
	再循環運転 (SIP) (運転停止中の場合, フロントライン系機能喪失時)	高圧注入ポンプ等	防止設備	A/B	○	建屋内
		格納容器再循環サンプ等	防止設備	R/B	○	建屋内
	代替再循環運転 (B-CSP) (運転停止中の場合, フロントライン系機能喪失時)	B-格納容器スプレイポンプ等	防止設備	A/B	○	建屋内
B-格納容器再循環サンプ等		防止設備	R/B	○	建屋内	
蒸気発生器2次側による炉心冷却 (補助給水ポンプ) (運転停止中の場合, フロントライン系機能喪失時)	電動補助給水ポンプ, 補助給水ピット等	防止設備	R/B	○	建屋内	
代替炉心注水 (代替CSP) (代替電源) (運転停止中の場合, サポート系機能喪失時)	代替格納容器スプレイポンプ, 補助給水ピット等	防止設備	R/B	○	建屋内	
代替炉心注水 (可搬型ポンプ車) (運転停止中の場合, サポート系機能喪失時)	可搬型大型送水ポンプ車	防止設備	屋外	○	分散配置	

・評価

- : 竜巻に対して安全機能を維持できる
又は竜巻による損傷を考慮した場合でも, 対応する設計基準事故対処設備が竜巻に対して安全機能を維持できる (防止設備)
又は竜巻による損傷を考慮して, 代替設備による機能維持や安全上支障のない期間での修復等の対応が可能 (緩和設備, 防止でも緩和でもない設備)

・建屋名

R/B: 原子炉建屋 (原子炉格納容器を含む), A/B: 原子炉補助建屋

第1表 竜巻に対する重大事故等対処設備の影響評価 (5/13)

設置許可基準	対応手段	重大事故等対処設備	分類	保管設置箇所	竜巻	
					評価	防護方法
第47条 (原子炉冷却材バウンダリ低圧時に発電用原子炉を冷却するための設備)	代替炉心注水 (CHP (自己冷却)) (運転停止中の場合, サポート系機能喪失時)	B-充てんポンプ	防止設備	A/B	○	建屋内
		燃料取替用水ピット等	防止設備	R/B	○	建屋内
	代替再循環運転 (A-SIP (海水冷却)) (運転停止中の場合, サポート系機能喪失時)	A-高圧注入ポンプ等	防止設備	A/B	○	建屋内
		A-格納容器再循環サンプ等	防止設備	R/B	○	建屋内
		可搬型大型送水ポンプ車	防止設備	屋外	○	分散配置
	蒸気発生器2次側による炉心冷却 (補助給水ポンプ) (代替電源) (運転停止中の場合, サポート系機能喪失時)	電動補助給水ポンプ, 補助給水ピット等	防止設備	R/B	○	建屋内
			炉心注水 (SIP) (溶融炉心の原子炉格納容器下部への落下遅延及び防止, 交流動力電源及び原子炉補機冷却機能が健全である場合)	高圧注入ポンプ等	緩和設備	A/B
	炉心注水 (RHRP) (溶融炉心の原子炉格納容器下部への落下遅延及び防止, 交流動力電源及び原子炉補機冷却機能が健全である場合)	燃料取替用水ピット	緩和設備	R/B	○	建屋内
			余熱除去ポンプ等	緩和設備	A/B	○
	炉心注水 (CHP) (溶融炉心の原子炉格納容器下部への落下遅延及び防止, 交流動力電源及び原子炉補機冷却機能が健全である場合)	燃料取替用水ピット等	緩和設備	R/B	○	建屋内
			充てんポンプ	緩和設備	A/B	○
	代替炉心注水 (B-CSP) (溶融炉心の原子炉格納容器下部への落下遅延及び防止, 交流動力電源及び原子炉補機冷却機能が健全である場合)	燃料取替用水ピット	緩和設備	R/B	○	建屋内
			B-格納容器スプレイポンプ等	緩和設備	A/B	○
	代替炉心注水 (代替CSP) (溶融炉心の原子炉格納容器下部への落下遅延及び防止, 交流動力電源及び原子炉補機冷却機能が健全である場合)	燃料取替用水ピット等	緩和設備	R/B	○	建屋内
			代替格納容器スプレイポンプ, 燃料取替用水ピット等	緩和設備	R/B	○
炉心注水 (CHP (自己冷却)) (溶融炉心の原子炉格納容器下部への落下遅延及び防止, 全交流動力電源喪失又は原子炉補機冷却機能喪失時)	燃料取替用水ピット等	緩和設備	R/B	○	建屋内	
		B-充てんポンプ	緩和設備	A/B	○	建屋内
代替炉心注水 (代替CSP) (代替電源) (溶融炉心の原子炉格納容器下部への落下遅延及び防止, 全交流動力電源喪失又は原子炉補機冷却機能喪失時)	燃料取替用水ピット等	緩和設備	R/B	○	建屋内	
		代替格納容器ポンプ, 燃料取替用水ピット等	緩和設備	R/B	○	建屋内
低圧時再循環, 余熱除去運転	格納容器再循環サンプ等	防止設備	A/B	○	建屋内	
		防止設備	R/B	○	建屋内	

・評価

- : 竜巻に対して安全機能を維持できる
又は竜巻による損傷を考慮した場合でも, 対応する設計基準事故対処設備が竜巻に対して安全機能を維持できる (防止設備)
又は竜巻による損傷を考慮して, 代替設備による機能維持や安全上支障のない期間での修復等の対応が可能 (緩和設備, 防止でも緩和でもない設備)

・建屋名

R/B: 原子炉建屋 (原子炉格納容器を含む), A/B: 原子炉補助建屋

第1表 竜巻に対する重大事故等対処設備の影響評価 (6/13)

設置許可基準	対応手段	重大事故等対処設備	分類	保管設置箇所	竜巻	
					評価	防護方法
第48条 (最終ヒートシンクへ熱を輸送するための設備)	蒸気発生器2次側による炉心冷却 (補助給水ポンプ) (フロントライン系機能喪失時)	電動補助給水ポンプ, 補助給水ピット等	防止設備	R/B	○	建屋内
	格納容器内自然対流冷却 (C/V再循環ユニット: 海水) (フロントライン系機能喪失時)	C, D-格納容器再循環ユニット	防止設備	R/B	○	建屋内
		可搬型大型送水ポンプ車	防止設備	屋外	○	分散配置
	代替補機冷却 (SIP (海水冷却)) (フロントライン系機能喪失時)	A-高压注入ポンプ	防止設備	A/B	○	建屋内
		可搬型大型送水ポンプ車	防止設備	屋外	○	分散配置
	蒸気発生器2次側による炉心冷却 (補助給水ポンプ) (代替電源) (サポート系機能喪失時)	電動補助給水ポンプ, 補助給水ピット等	防止設備	R/B	○	建屋内
	格納容器内自然対流冷却 (C/V再循環ユニット: 海水) (サポート系機能喪失時)	C, D-格納容器再循環ユニット	防止設備	R/B	○	建屋内
可搬型大型送水ポンプ車		防止設備	屋外	○	分散配置	
代替補機冷却 (SIP (海水冷却)) (代替電源) (サポート系機能喪失時)	A-高压注入ポンプ	防止設備	A/B	○	建屋内	
	可搬型大型送水ポンプ車	防止設備	屋外	○	分散配置	
第49条 (原子炉格納容器内の冷却等のための設備)	格納容器内自然対流冷却 (C/V再循環ユニット: CCW) (炉心の著しい損傷防止, フロントライン系機能喪失時)	C, D-格納容器再循環ユニット, 原子炉補機冷却水サージタンク加圧用可搬型窒素ガスポンプ等	防止設備	R/B	○	建屋内
		C, D-原子炉補機冷却海水ポンプ, C, D-原子炉補機冷却海水ポンプ出口ストレーナ	防止設備	取水ピットポンプ室, ストレーナ室	○	防護対策実施
	代替格納容器スプレイ (代替CSP) (炉心の著しい損傷防止, フロントライン系機能喪失時)	代替格納容器スプレイポンプ, 燃料取替用水ピット等	防止設備	R/B	○	建屋内
	代替格納容器スプレイ (代替CSP) (代替電源) (炉心の著しい損傷防止, サポート系機能喪失時)	代替格納容器スプレイポンプ, 燃料取替用水ピット等	防止設備	R/B	○	建屋内
	格納容器内自然対流冷却 (C/V再循環ユニット: 海水) (炉心の著しい損傷防止, サポート系機能喪失時)	C, D-格納容器再循環ユニット	防止設備	R/B	○	建屋内
		可搬型大型送水ポンプ車	防止設備	屋外	○	分散配置
	格納容器内自然対流冷却 (C/V再循環ユニット: CCW) (格納容器破損防止, フロントライン系機能喪失時)	C, D-格納容器再循環ユニット, 原子炉補機冷却水サージタンク加圧用可搬型窒素ガスポンプ等	緩和設備	R/B	○	建屋内
		C, D-原子炉補機冷却海水ポンプ, C, D-原子炉補機冷却海水ポンプ出口ストレーナ	緩和設備	取水ピットポンプ室, ストレーナ室	○	防護対策実施
	代替格納容器スプレイ (代替CSP) (格納容器破損防止, フロントライン系機能喪失時)	代替格納容器スプレイポンプ, 燃料取替用水ピット等	緩和設備	R/B	○	建屋内
	代替格納容器スプレイ (代替CSP) (代替電源) (格納容器破損防止, サポート系機能喪失時)	代替格納容器スプレイポンプ, 燃料取替用水ピット等	緩和設備	R/B	○	建屋内
	格納容器内自然対流冷却 (C/V再循環ユニット: 海水) (格納容器破損防止, サポート系機能喪失時)	C, D-格納容器再循環ユニット	緩和設備	R/B	○	建屋内
		可搬型大型送水ポンプ車	緩和設備	屋外	○	分散配置
	格納容器スプレイ, 格納容器スプレイ再循環	格納容器スプレイポンプ等	防止設備	A/B	○	建屋内
燃料取替用水ピット, 格納容器再循環タンク等		防止設備	R/B	○	建屋内	

・評価

- : 竜巻に対して安全機能を維持できる
又は竜巻による損傷を考慮した場合でも, 対応する設計基準事故対処設備が竜巻に対して安全機能を維持できる (防止設備)
又は竜巻による損傷を考慮して, 代替設備による機能維持や安全上支障のない期間での修復等の対応が可能 (緩和設備, 防止でも緩和でもない設備)

・建屋名

R/B: 原子炉建屋 (原子炉格納容器を含む), A/B: 原子炉補助建屋

第1表 竜巻に対する重大事故等対処設備の影響評価（7/13）

設置許可基準	対応手段	重大事故等対処設備	分類	保管設置箇所	竜巻	
					評価	防護方法
第50条（原子炉格納容器の過圧破損を防止するための設備）	格納容器スプレイ（CSP）（交流動力電源及び原子炉補機冷却機能が健全である場合）	格納容器スプレイポンプ等	緩和設備	A/B	○	建屋内
		燃料取替用水ピット	緩和設備	R/B	○	建屋内
	格納容器内自然対流冷却（C/V再循環ユニット：CCW）（交流動力電源及び原子炉補機冷却機能が健全である場合）	C、D-格納容器再循環ユニット、原子炉補機冷却水サージタンク加圧用可搬型窒素ガスポンプ等	緩和設備	R/B	○	建屋内
		C、D-原子炉補機冷却海水ポンプ、C、D-原子炉補機冷却海水ポンプ出口ストレーナ	緩和設備	取水ピットポンプ室、ストレーナ室	○	防護対策実施
	代替格納容器スプレイ（代替CSP）（交流動力電源及び原子炉補機冷却機能が健全である場合）	代替格納容器スプレイポンプ、燃料取替用水ピット等	緩和設備	R/B	○	建屋内
	格納容器内自然対流冷却（C/V再循環ユニット：海水）（全交流動力電源又は原子炉補機冷却機能喪失時）	C、D-格納容器再循環ユニット	緩和設備	R/B	○	建屋内
可搬型大型送水ポンプ車		緩和設備	屋外	○	分散配置	
代替格納容器スプレイ（代替CSP）（代替電源）（全交流動力電源又は原子炉補機冷却機能喪失時）	代替格納容器スプレイポンプ、燃料取替用水ピット等	緩和設備	R/B	○	建屋内	
第51条（原子炉格納容器下部の溶融炉心を冷却するための設備）	格納容器スプレイ（CSP）（交流動力電源及び原子炉補機冷却機能が健全である場合）	格納容器スプレイポンプ等	緩和設備	A/B	○	建屋内
		燃料取替用水ピット	緩和設備	R/B	○	建屋内
	代替格納容器スプレイ（代替CSP）（交流動力電源及び原子炉補機冷却機能が健全である場合）	代替格納容器スプレイポンプ、燃料取替用水ピット等	緩和設備	R/B	○	建屋内
	代替格納容器スプレイ（代替CSP）（代替電源）（全交流動力電源又は原子炉補機冷却機能喪失時）	代替格納容器スプレイポンプ、燃料取替用水ピット等	緩和設備	R/B	○	建屋内
第52条（水素爆発による原子炉格納容器の破損を防止するための設備）	水素濃度低減（原子炉格納容器内水素処理装置）	原子炉格納容器内水素処理装置、原子炉格納容器内水素処理装置温度	緩和設備	R/B	○	建屋内
		水素濃度低減（格納容器水素イグナイタ）	格納容器水素イグナイタ、格納容器水素イグナイタ温度計	緩和設備	R/B	○
	水素濃度監視	可搬型格納容器内水素濃度計測ユニット、可搬型代替ガスサンプリング圧縮装置等	緩和設備	R/B	○	建屋内
		可搬型大型送水ポンプ車	緩和設備	屋外	○	分散配置
第53条（水素爆発による原子炉建屋等の損傷を防止するための設備）	アニュラス空気浄化設備による水素放出（交流動力電源及び直流電源が健全である場合）	アニュラス空気浄化ファン等	緩和設備	R/B	○	建屋内
		排気筒	緩和設備	屋外	○	補修
	アニュラス空気浄化設備による水素放出（全交流動力電源又は直流電源が喪失した場合）	B-アニュラス空気浄化ファン、アニュラス全量排気弁操作可搬型窒素ガスポンプ等	緩和設備	R/B	○	建屋内
		排気筒	緩和設備	屋外	○	補修
	水素濃度監視	可搬型アニュラス水素濃度計測ユニット	緩和設備	R/B	○	建屋内

・評価

- ：竜巻に対して安全機能を維持できる
又は竜巻による損傷を考慮した場合でも、対応する設計基準事故対処設備が竜巻に対して安全機能を維持できる（防止設備）
又は竜巻による損傷を考慮して、代替設備による機能維持や安全上支障のない期間での修復等の対応が可能（緩和設備、防止でも緩和でもない設備）

・建屋名

R/B：原子炉建屋（原子炉格納容器を含む）、A/B：原子炉補助建屋

第1表 竜巻に対する重大事故等対処設備の影響評価（8/13）

設置許可基準	対応手段	重大事故等対処設備	分類	保管設置箇所	竜巻		
					評価	防護方法	
第54条（使用済燃料貯蔵槽の冷却等のための設備）	使用済燃料ピットへの注水	可搬型大型送水ポンプ車	防止設備	屋外	○	分散配置	
	使用済燃料ピットへのスプレイ	可搬型大型送水ポンプ車，可搬型スプレイノズル	緩和設備	屋外	○	分散配置	
	燃料取扱棟（貯蔵槽内燃料体等）への放水	可搬型大容量海水送水ポンプ車，放水砲	緩和設備	屋外	○	分散配置	
	使用済燃料ピットの監視	使用済燃料ピット水位（AM用），使用済燃料ピット温度（AM用）等	使用済燃料ピット水位（AM用），使用済燃料ピット温度（AM用）等	防止設備 緩和設備	R/B	○	建屋内
		使用済燃料ピット可搬型エリアモニタ	使用済燃料ピット可搬型エリアモニタ	防止設備 緩和設備	R/B，A/B	○	建屋内
		使用済燃料ピット監視カメラ	使用済燃料ピット監視カメラ	緩和設備	R/B，A/B	○	建屋内
第55条（工場等外への放射性物質の拡散を抑制するための設備）	大気への拡散抑制（炉心の著しい損傷時及び原子炉格納容器の破損時）	可搬型大容量海水送水ポンプ，放水砲	緩和設備	屋外	○	分散配置	
	海洋への拡散抑制（炉心の著しい損傷時及び原子炉格納容器の破損時）	放射性物質吸着剤	緩和設備	屋外（地下）	○	影響無し	
	大気への拡散抑制（使用済燃料ピット内燃料体等の著しい損傷時）	可搬型大型送水ポンプ車，可搬型スプレイノズル	緩和設備	屋外	○	分散配置	
	大気への拡散抑制（使用済燃料ピット内燃料体等の損傷時）	可搬型大容量海水送水ポンプ，放水砲	緩和設備	屋外	○	分散配置	
	海洋への拡散抑制（使用済燃料ピット内燃料体等の損傷時）	放射性物質吸着剤	緩和設備	屋外（地下）	○	影響無し	
	航空機燃料火災への泡消火	可搬型大容量海水送水ポンプ，放水砲，泡混合設備	緩和設備	屋外	○	分散配置	
第56条（重大事故等の収束に必要な水の供給設備）	1次系のフィードアンドブリード	高圧注入ポンプ等	防止設備	A/B	○	建屋内	
		燃料取替用水ピット等	防止設備	R/B	○	建屋内	
	海水を用いた補助給水ピットへの補給	可搬型大型送水ポンプ車	防止設備	屋外	○	分散配置	
	燃料取替用水ピットから補助給水ピットへの水源切替	補助給水ピット，代替格納容器スプレイポンプ	防止設備 緩和設備	R/B	○	建屋内	
	燃料取替用水ピットからの海水への水源切替	可搬型大型送水ポンプ車	防止設備	屋外	○	分散配置	
	海水を用いた燃料取替用水ピットへの補給	可搬型大型送水ポンプ車	防止設備 緩和設備	屋外	○	分散配置	
	代替再循環運転（B-CSP）	B-格納容器スプレイポンプ等	防止設備	A/B	○	建屋内	
		B-格納容器再循環サンプ等	防止設備	R/B	○	建屋内	
		代替再循環運転（A-SIP）	A-高圧注入ポンプ等	防止設備	A/B	○	建屋内
		A-格納容器再循環サンプ等	防止設備	R/B	○	建屋内	
		可搬型大型送水ポンプ車	防止設備	屋外	○	分散配置	
	海水を用いた使用済燃料ピットへの注水	可搬型大型送水ポンプ車	防止設備	屋外	○	分散配置	
	使用済燃料ピットへのスプレイ	可搬型大型送水ポンプ車，可搬型スプレイノズル	緩和設備	屋外	○	分散配置	
	燃料取扱棟（貯蔵槽内燃料体等）への放水	可搬型大容量海水ポンプ車，放水砲	緩和設備	屋外	○	分散配置	
	原子炉格納容器及びアニュラス部への放水	可搬型大容量海水ポンプ車，放水砲	緩和設備	屋外	○	分散配置	

・評価

- ：竜巻に対して安全機能を維持できる
又は竜巻による損傷を考慮した場合でも，対応する設計基準事故対処設備が竜巻に対して安全機能を維持できる（防止設備）
又は竜巻による損傷を考慮して，代替設備による機能維持や安全上支障のない期間での修復等の対応が可能（緩和設備，防止でも緩和でもない設備）

・建屋名

R/B：原子炉建屋（原子炉格納容器を含む），A/B：原子炉補助建屋

1表 竜巻に対する重大事故等対処設備の影響評価 (9/13)

設置許可基準	対応手段	重大事故等対処設備	分類	保管設置場所	竜巻	
					評価	評価方法
第57条(電源設備)	代替非常用発電機による代替電源(交流)からの給電	ディーゼル発電機燃料貯油槽移送ポンプ	防止設備 緩和設備	DG/B	○	建屋内
		ディーゼル発電機燃料貯油槽	防止設備 緩和設備	DGF/B (地下)	○	影響無し
		可搬型タンクローリー	防止設備 緩和設備	屋外	○	分散配置
		代替非常用発電機	防止設備 緩和設備	屋外	○	代替設備 (ディーゼル発電機)
	可搬型代替電源車による代替電源(交流)からの給電	ディーゼル発電機燃料貯油槽移送ポンプ	防止設備 緩和設備	DG/B	○	建屋内
		ディーゼル発電機燃料貯油槽	防止設備 緩和設備	DGF/B (地下)	○	影響無し
		可搬型代替電源車, 可搬型タンクローリー	防止設備 緩和設備	屋外	○	分散配置
	蓄電池(非常用)による直流電源からの給電	蓄電池(非常用)	防止設備 緩和設備	A/B	○	建屋内
	後備蓄電池による代替電源(直流)からの給電	後備蓄電池	防止設備 緩和設備	A/B	○	建屋内
	可搬型直流電源用発電機及び可搬型直流変換器による代替電源(直流)からの電源	可搬型直流変換器	防止設備 緩和設備	A/B	○	建屋内
		ディーゼル発電機燃料貯油槽	防止設備 緩和設備	DGF/B (地下)	○	影響無し
		可搬型直流電源用発電機, 可搬型タンクローリー	防止設備 緩和設備	屋外	○	分散配置
	代替所内電気設備による交流の給電	代替所内電気設備変圧器, 代替所内電気設備分電盤等	防止設備 緩和設備	A/B	○	建屋内
		ディーゼル発電機燃料貯油槽	防止設備 緩和設備	DGF/B (地下)	○	影響無し
		代替非常用発電機	防止設備 緩和設備	屋外	○	代替設備 (ディーゼル発電機)
		可搬型代替電源車等	防止設備 緩和設備	屋外	○	分散配置
	燃料の補給に用いる設備(可搬型タンクローリーによる汲み上げ)	ディーゼル発電機燃料貯油槽	防止設備 緩和設備	DGF/B (地下)	○	影響無し
		可搬型タンクローリー	防止設備 緩和設備	屋外	○	分散配置
	燃料の補給に用いる設備(ディーゼル発電機燃料油移送ポンプによる汲み上げ)	ディーゼル発電機燃料油移送ポンプ	防止設備 緩和設備	DG/B	○	建屋内
		ディーゼル発電機燃料貯油槽	防止設備 緩和設備	DGF/B (地下)	○	影響無し
		可搬型タンクローリー	防止設備 緩和設備	屋外	○	分散配置
	ディーゼル発電機による給電	ディーゼル発電機, ディーゼル発電機燃料貯油槽移送ポンプ	防止設備 緩和設備	DG/B	○	建屋内
		ディーゼル発電機燃料貯油槽	防止設備 緩和設備	DGF/B (地下)	○	影響無し

・評価

- : 竜巻に対して安全機能を維持できる
又は竜巻による損傷を考慮した場合でも, 対応する設計基準事故対処設備が竜巻に対して安全機能を維持できる(防止設備)
又は竜巻による損傷を考慮して, 代替設備による機能維持や安全上支障のない期間での修復等の対応が可能(緩和設備, 防止でも緩和でもない設備)

・建屋名

R/B: 原子炉建屋(原子炉格納容器を含む), A/B: 原子炉補助建屋, DG/B: ディーゼル発電機建屋, DGF/B: 燃料貯油槽タンク室

第1表 竜巻に対する重大事故等対処設備の影響評価 (10/13)

設置許可基準	対応手段	重大事故等対処設備	分類	保管設置箇所	竜巻	
					評価	評価方法
第58条 (計装設備)	温度計測 (原子炉容器内の温度)	1次冷却材温度 (広域-高温側) 等	防止設備 緩和設備	R/B	○	建屋内
	圧力計測 (原子炉容器内の圧力)	1次冷却材圧力 (広域)	防止設備 緩和設備	R/B	○	建屋内
	水位計測 (原子炉容器内の水位)	加圧器水位等	防止設備	R/B	○	建屋内
	注水量計測 (原子炉容器への注水量)	高圧注入流量等	防止設備 緩和設備	A/B	○	建屋内
	注水量計測 (原子炉格納容器への注水量)	高圧注入流量等	防止設備 緩和設備	A/B	○	建屋内
	温度計測 (原子炉格納容器内の温度)	格納容器内温度	防止設備 緩和設備	R/B	○	建屋内
	圧力計測 (原子炉格納容器内の圧力)	原子炉格納容器圧力等	防止設備 緩和設備	R/B	○	建屋内
	水位計測 (原子炉格納容器内の水位)	格納容器再循環サンプ水位 (広域) 等	防止設備 緩和設備	R/B	○	建屋内
		格納容器水位, 原子炉下部水位キャビティ水位	緩和設備	R/B	○	建屋内
	水素濃度計測 (原子炉格納容器内の水素濃度)	格納容器内水素濃度	緩和設備	R/B	○	建屋内
	水素濃度計測 (アニュラス内の水素濃度)	アニュラス水素濃度	緩和設備	R/B	○	建屋内
	線量計測 (原子炉格納容器内の放射線量率)	格納容器内高レンジエリアモニタ (低レンジ) 等	防止設備 緩和設備	R/B	○	建屋内
	出力計測 (未臨界の維持又は監視)	出力領域中性子束等	防止設備	R/B	○	建屋内
	温度計測 (最終ヒートシンクの確保)	可搬型温度計測装置	防止設備 緩和設備	A/B, TSC	○	建屋内
	水位計測 (最終ヒートシンクの確保)	蒸気発生器水位 (狭域) 等	防止設備	R/B	○	建屋内
		原子炉補機冷却水サージタンク水位	防止設備 緩和設備	R/B	○	建屋内
	注水量計測 (最終ヒートシンクの確保)	補助給水流量	防止設備	R/B	○	建屋内
	圧力計測 (最終ヒートシンクの確保)	主蒸気ライン圧力	防止設備	R/B	○	建屋内
		原子炉格納容器圧力	防止設備 緩和設備	R/B	○	建屋内
		原子炉補機冷却水サージタンク圧力 (可搬型)	防止設備 緩和設備	R/B TSC	○	建屋内
	水位計測 (格納容器バイパスの監視)	蒸気発生器水位 (狭域)	防止設備	R/B	○	建屋内
	圧力計測 (格納容器バイパスの監視)	主蒸気圧力	防止設備	R/B	○	建屋内
		1次冷却材圧力 (広域)	防止設備 緩和設備	R/B	○	建屋内
水位計測 (水源の確保)	燃料取替用水ピット水位等	防止設備 緩和設備	R/B	○	建屋内	
	ほう酸タンク水位	防止設備	A/B	○	建屋内	

・評価

○: 竜巻に対して安全機能を維持できる

又は竜巻による損傷を考慮した場合でも, 対応する設計基準事故対処設備が竜巻に対して安全機能を維持できる (防止設備)

又は竜巻による損傷を考慮して, 代替設備による機能維持や安全上支障のない期間での修復等の対応が可能 (緩和設備, 防止でも緩和でもない設備)

・建屋名

R/B: 原子炉建屋 (原子炉格納容器を含む), A/B: 原子炉補助建屋, TSC: 緊急時対策所

第1表 竜巻に対する重大事故等対処設備の影響評価 (11/13)

設置許可基準	対応手段	重大事故等対処設備	分類	保管設置箇所	竜巻		
					評価	評価方法	
第58条 (計装設備)	水位計測 (使用済燃料ピットの監視)	使用済燃料ピット水位 (AM用) 等	防止設備 緩和設備	R/B	○	建屋内	
	温度計測 (使用済燃料ピットの監視)	使用済燃料ピット温度 (AM用)	防止設備 緩和設備	R/B	○	建屋内	
	線量計測 (使用済燃料ピットの監視)	使用済燃料ピット可搬型エリアモニタ	防止設備 緩和設備	A/B, R/B	○	建屋内	
	状態監視 (使用済燃料ピットの監視)	使用済燃料ピット監視カメラ	緩和設備	A/B, R/B	○	建屋内	
	温度, 圧力, 水位及び流量に係わるものの計測	可搬型計測器	防止設備 緩和設備	A/B, TSC	○	建屋内	
	パラメータ記録	可搬型温度計測装置	データ収集計算機	緩和設備	A/B	○	建屋内
			データ表示端末	緩和設備	TSC	○	建屋内
			その他 (重大事故等対処設備を活用する手順等の着手の判断基準として用いる補助的な監視パラメータ)	6-A, B母線電圧, A, B-直流コントロールセンタ母線電圧等	防止設備 緩和設備	A/B	○
			原子炉補機冷却水冷却器補機冷却海水流量, A, B-原子炉補機冷却水供給母管流量	防止設備 緩和設備	R/B	○	建屋内

・評価

- : 竜巻に対して安全機能を維持できる
又は竜巻による損傷を考慮した場合でも, 対応する設計基準事故対処設備が竜巻に対して安全機能を維持できる (防止設備)
又は竜巻による損傷を考慮して, 代替設備による機能維持や安全上支障のない期間での修復等の対応が可能 (緩和設備, 防止でも緩和でもない設備)

・建屋名

R/B: 原子炉建屋 (原子炉格納容器を含む), A/B: 原子炉補助建屋, TSC: 緊急時対策所

第1表 竜巻に対する重大事故等対処設備の影響評価 (12/13)

設置許可基準	対応手段	重大事故等対処設備	分類	保管設置箇所	竜巻	
					評価	評価方法
第59条 (原子炉制御室)	居住性の確保 (中央制御室換気空調設備)	中央制御室遮へい, 中央制御室非常用循環ファン等	防止設備 緩和設備	A/B	○	建屋内
	居住性の確保 (中央制御室の照明の確保)	可搬型証明 (SA)	防止でも緩和でもない設備	A/B	○	建屋内
	居住性の確保 (中央制御室内の酸素及び二酸化炭素濃度の測定)	酸素濃度・二酸化炭素濃度計	防止でも緩和でもない設備	A/B	○	建屋内
	汚染の持ち込み防止	可搬型照明 (SA)	防止でも緩和でもない設備	A/B	○	建屋内
	放射性物質の濃度低減 (交流動力電源及び直流電源が健全である場合)	アニュラス空気浄化ファン等排気筒	緩和設備	R/B	○	建屋内
			緩和設備	屋外	○	補修
放射性物質の濃度低減 (全交流動力電源又は直流電源が喪失した場合)	B-アニュラス空気浄化ファン等排気筒	緩和設備	R/B	○	建屋内	
		緩和設備	屋外	○	補修	
第60条 (監視測定設備)	放射線量の測定 (可搬型モニタリングポストによる放射線量の代替測定)	可搬型モニタリングポスト	防止でも緩和でもない設備	TSC	○	建屋内
	放射線量の測定 (可搬型モニタリングポストによる放射線量の測定)	可搬型モニタリングポスト	防止でも緩和でもない設備	TSC	○	建屋内
	放射性物質の濃度の測定	可搬型ダスト・よう素サンプル等	防止でも緩和でもない設備	TSC	○	建屋内
	放射性物質の濃度及び放射線量の測定	可搬型ダスト・よう素サンプル, β線サーベイメータ等	防止でも緩和でもない設備	TSC	○	建屋内
		小型船舶	防止でも緩和でもない設備	屋外	○	分散配置
	風向, 風速その他の気象条件の測定 (可搬型気象観測設備による気象観測項目の代替測定)	可搬型気象観測設備	防止でも緩和でもない設備	TSC	○	建屋内
風向, 風速その他の気象条件の測定 (可搬型気象観測設備による気象観測項目の測定)	可搬型気象観測設備	防止でも緩和でもない設備	TSC	○	建屋内	

・評価

- : 竜巻に対して安全機能を維持できる
又は竜巻による損傷を考慮した場合でも, 対応する設計基準事故対処設備が竜巻に対して安全機能を維持できる (防止設備)
又は竜巻による損傷を考慮して, 代替設備による機能維持や安全上支障のない期間での修復等の対応が可能 (緩和設備, 防止でも緩和でもない設備)

・建屋名

R/B: 原子炉建屋 (原子炉格納容器を含む), A/B: 原子炉補助建屋, TSC: 緊急時対策所

第1表 竜巻に対する重大事故等対処設備の影響評価 (13/13)

設置許可基準	対応手段	重大事故等対処設備	分類	保管設置箇所	竜巻	
					評価	防護方法
第61条 (緊急時対策所)	居住性の確保 (緊急時対策所遮蔽及び緊急時対策所換気設備)	緊急時対策所遮へい	緩和設備	屋外	○	影響なし
		可搬型新設緊急時対策所空気浄化ファン等	緩和設備	TSC	○	建屋内
		圧力計	防止でも緩和でもない設備	TSC	○	建屋内
	居住性の確保 (緊急時対策所内の酸素濃度及び二酸化炭素濃度の測定)	酸素濃度・二酸化炭素濃度計	防止でも緩和でもない設備	TSC	○	建屋内
		緊急時対策所可搬型エリアモニタ	緩和設備	TSC	○	建屋内
	情報の把握	データ収集計算機, ERSS 伝送サーバ	防止でも緩和でもない設備	A/B	○	建屋内
	データ表示端末	緩和設備	TSC	○	建屋内	
	電源の確保	緊急時対策所用発電機	緩和設備	屋外	○	分散配置
第62条 (通信連絡を行なうために必要な設備)	発電所内の通信連絡をする必要のある場所と通信連絡を行なうための設備	衛星電話設備, 衛星携帯電話	防止設備 緩和設備	A/B, TSC	○	建屋内
		トランシーバ	防止設備 緩和設備	TSC, 屋外	○	建屋内 分散配置
		携行型通話装置	防止設備 緩和設備	A/B	○	建屋内
		インターフォン, テレビ会議システム (指揮所・待機所間)	防止設備 緩和設備	TSC	○	建屋内
		データ収集計算機	緩和設備	A/B	○	建屋内
		データ表示端末	緩和設備	TSC	○	建屋内
	発電所外 (社内外) の通信連絡をする必要のある場合と通信連絡を行なうための設備	衛星電話設備, 衛星携帯電話	緩和設備	A/B, TSC	○	建屋内
		総合原子力防災ネットワークに接続する通信連絡設備	防止でも緩和でもない設備	A/B, TSC	○	建屋内
データ収集計算機, ERSS 伝送サーバ		防止でも緩和でもない設備	A/B	○	建屋内	

・評価

- : 竜巻に対して安全機能を維持できる
又は竜巻による損傷を考慮した場合でも, 対応する設計基準事故対処設備が竜巻に対して安全機能を維持できる (防止設備)
又は竜巻による損傷を考慮して, 代替設備による機能維持や安全上支障のない期間での修復等の対応が可能 (緩和設備, 防止でも緩和でもない設備)

・建屋名

A/B: 原子炉補助建屋, TSC: 緊急時対策所

3.7. 竜巻影響評価の概要及び保守性について

竜巻影響評価の実施においては、竜巻に対する自然現象としての不確実性を考慮し、基準竜巻の設定から設備影響評価までの一連の評価において保守性を確保している。

評価の流れ

1. 竜巻検討地域の設定

○竜巻発生に関する気象条件の類似性の観点からの検討として、泊発電所が立地する地域と竜巻総観場の出現数が類似する地域を抽出し、この抽出した地域に対して保守的なものとなるよう地域を絞り込むことで、竜巻検討地域候補地を設定（図1）。

○局地的な地域性からの検討としては、泊発電所は竜巻集中地域に立地するため、上記で設定した竜巻検討地域候補地と泊発電所が立地する竜巻集中地域の竜巻発生頻度（単位面積当たりの年発生数）を比較した結果、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を竜巻検討地域と設定（表1）。

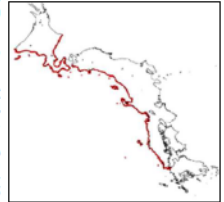


図1 竜巻検討地域

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)	発生頻度 (個/km ² /年)
竜巻集中地域	3,833	19
竜巻検討地域候補地	38,835	206
		9.6×10^{-5}
		1.1×10^{-4}

2. 基準竜巻(V_B)の設定

○V_{B1}：日本における過去最大竜巻 F3 の風速範囲の上限値 92m/s と設定。

○V_{B2}：ハザード曲線より、年超過確率 10⁻⁵ における風速を 65m/s と設定（図3）。

○V_B：V_{B1} と V_{B2} のうち大きい風速である 92m/s と設定。

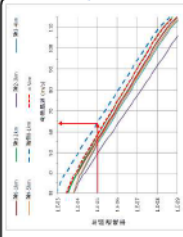


図3 竜巻風速の年超過確率

3. 評価に用いる最大風速の設定

○設計竜巻の最大風速 V₀ は、92m/s とする。なお、竜巻影響評価にあたっては、V_B = 92m/s を安全側に数字を切り上げて、最大風速 100m/s とする。

4. 風速場モデルの設定

○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モデルとしてモデル化する。

5. 鋼製材の速度設定

○設計飛来物の鋼製材の速度については、竜巻影響評価ガイド改正前の最大水平速度 57m/s、最大鉛直速度 38m/s とし、より保守的な値を使用している。

保守性

【竜巻検討地域の設定に対する保守性】（補足説明資料1 1.2(4)、4）

○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竜巻総観場の出現数に関する相関係数を用いて、総観場出現に関する関連性を評価し、泊発電所が立地する地域と類似の地域を抽出した（図2）。

○上記で抽出した地域に対して、ハザードが過少評価されないように竜巻がほとんど発生していない地域（北海道太平洋側の樺太側から東側の海岸線及び陸奥湾の海岸線）を除いた。

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」を山口県の日本海側までとする（図1）。

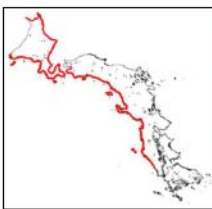


図2 泊発電所が立地する地域と類似の地域

【基準竜巻 (V_B) の設定に対する保守性】（補足説明資料1 1.3~1.5）

○V_{B1}：竜巻検討地域における過去最大竜巻は F2 であるが、日本における過去最大竜巻は F3 であるため、将来における竜巻検討地域での F3 竜巻の発生の可能性を考慮して、F3 の風速範囲の上限値 92m/s と設定。

○V_{B2}：ハザード曲線算出における主な保守性を以下に示す。

- ・疑似的な 51.5 年間のデータからデジタル不明の海上竜巻の発生数は、陸上竜巻の F スケール別発生比率で按分）
- ・疑似データ作成に伴い、被害幅・長さの情報が無い竜巻には、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等し、保守的な評価を実施

- ・竜巻検討地域を 1km 幅に細分化した場合を考慮し、V_{B2} が最も大きくなるものを設定

○V_B：V_{B1} (92m/s) と V_{B2} (65m/s) のうち、日本全国の過去最大竜巻 F3 により設定した V_{B1} を基準竜巻の最大風速 (V₀) として設定した結果、V₀ の年超過確率は 1.4×10^{-7} となる。

【評価に用いる最大風速の設定に対する保守性】（別添1 3.(5)）

○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、V₀ = 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わない設計とする。

【風速場モデルの設定に対する保守性】（補足説明資料12）

○飛散評価における飛来物の初期位置は、鉛直方向には初期高さ 40m として、水平方向には物体を風速場の中に多点配置し飛散評価を実施し、算出結果のうち飛散速度及び飛散距離の最大値を採用する。

【鋼製材の速度設定に対する保守性】（補足説明資料12）

○設計飛来物の鋼製材の速度については、竜巻影響評価ガイドでは、平成 26 年 9 月 17 日の改正により最大水平速度が 51m/s、最大鉛直速度が 34m/s となっているが、泊3号炉では、竜巻影響評価をするにあたり、竜巻ガイド改正前の最大水平速度 57m/s、最大鉛直速度 38m/s とし、より保守的な値を使用している。

3.8. 竜巻影響評価及び竜巻対策の概要

【設計竜巻荷重、設計荷重の設定】

竜巻影響評価ガイドに基づき、設計竜巻荷重は、設計竜巻の風圧力による荷重 (W_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_{fd}) を適切に組み合わせた荷重を設定するとともに、設計竜巻荷重と組み合わせる荷重 (竜巻以外の自然現象による荷重等) は、設計竜巻荷重に包絡されるもしくは考慮すべき荷重ではないことを確認する。 W_w 、 W_p 及び W_{fd} は、最大風速 100m/s 、風速場モデルをランキン渦モデルとした場合の荷重を設定する。

【設計飛来物の設定】

泊発電所の飛来物に係るウォークダウンを行い、発電所構内の常設物、仮設物及び二次飛来物の中から、それらの飛来物発生防止対策の可否、固定状況、過去の被害事例や代表性 (運動エネルギー、貫通力等) を踏まえ、設計飛来物を表1のとおり選定した。

表1 設計飛来物の諸元

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



【竜巻影響評価】

設計荷重に対して、評価対象施設等 (施設、設備) の構健全性評価を行い、必要に応じて対策を行うことで、構健全性を維持すること、または損傷した場合は、補修、取替が可能なこと、波及的影響も考慮した上で安全機能が維持されていることを確認を行う。

(1) 施設の評価

① 評価対象施設の構造骨組評価、外壁及び屋根の評価、設計飛来物の衝突による評価、建屋外周部建具等の貫通評価を実施し、内包する竜巻防護施設の安全機能に影響を及ぼさないことを確認し、影響がある場合には、防護対策を実施する。

② 竜巻防護施設に波及的影響を及ぼす施設 (循環水ポンプ建屋、タービン建屋、電気建屋、出入管理建屋) の構造骨組評価を実施し、倒壊により竜巻防護施設が影響を受けないことを確認する。

(2) 設備の評価

① 評価対象施設 (原子炉補機冷却海水ポンプ等) に対して、設計荷重に対して、設計飛来物による貫通評価を実施し、評価対象施設の安全機能に影響を及ぼさないことを確認する。

評価対象施設に影響がある場合には、防護対策を実施する。

② 竜巻防護施設に波及的影響を及ぼし得る施設 (ディーゼル発電機排気消音器等) は、設計荷重に対する強度評価を実施し、竜巻防護施設の安全機能に影響を及ぼさないことを確認する。

〈評価対象施設〉

- 建屋・構築物
 - ・原子炉建屋
 - ・原子炉補助建屋
 - ・ディーゼル発電機建屋
 - ・A1、A2-燃料油貯油槽タンク室
 - ・B1、B2-燃料油貯油槽タンク室
 - ・取水ピットポンプ室
 - ・ストレーナ室
- 設備 (系統・機器)
 - ・原子炉補機冷却海水ポンプ
 - ・排気筒
 - ・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)
 - ・原子炉補機冷却水サージタンク他
 - ・配管および弁 (主蒸気管内)
 - ・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
- 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
 - ・燃料採取室空調装置
 - ・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
 - ・安全補機間閉室温空調装置

〈波及的影響を及ぼし得る施設〉

- 竜巻防護施設への機械的影響の観点から抽出 (竜巻防護施設の外設となる施設に隣接している施設)
 - ・タービン建屋
 - ・電気建屋
 - ・出入管理建屋
 - ・循環水ポンプ建屋
 - ・タービン建屋
- 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)
 - ・ディーゼル発電機排気消音器
 - ・主蒸気速がし弁消音器
 - ・主蒸気安全弁排気管
 - ・タービン電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ペント管
 - ・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)
 - ・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

【飛散防止対策】

設計飛来物に選定した鋼製材より運動エネルギーが大きいもの、または貫通力が大きいものは固縛力が大きいものは固縛等が重要であるため、下記の事項を遵守し飛散防止を図る。

- (1) 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）。
- (2) 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。
 - ・作業中の車両は竜巻襲来が予想される場合に速やかに車両飛散防止対策範囲から移動できる体制をとる。
 - ・業務車両以外の車両は構内への入構を禁止する。
 - ・飛散および横滑りを考慮して、竜巻防護施設を内包する建屋から十分な離隔距離を確保する。

表2 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パパラメータが0.0026以下となる重量とする。
鋼管	<ul style="list-style-type: none"> ・単品で覆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、空パパラメータが0.0026以下となる本数とする。
鋼材	<ul style="list-style-type: none"> ・単品で覆かず複数本を束にして固縛する、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、空パパラメータが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パパラメータが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)	<ul style="list-style-type: none"> ＜高さ方向へ飛散する車両＞ <ul style="list-style-type: none"> ・竜巻防護施設を内包する建屋から350mの範囲内について下記の対策を実施する。 ・十分な重さのウェイトを取付ける。 ・ウェイトについては、車両の自重+ウェイトの重量により空パパラメータが0.0026以下となる重量とする。 ・軽車両については、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。 ＜高さ方向へは飛散しないが横滑りする車両＞ <ul style="list-style-type: none"> ・竜巻防護施設を内包する建屋から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。



図1 コンテナの飛散防止対策例

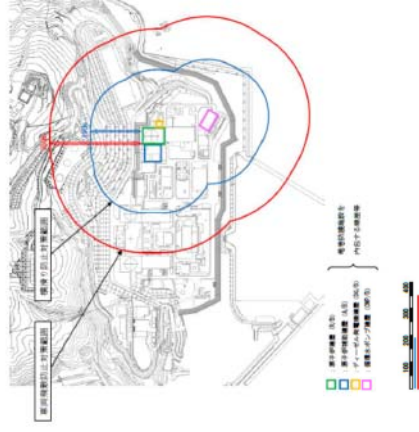


図2 車両飛散防止対策範囲と横滑り対策範囲について

【防護対策】

設計飛来物の衝突により竜巻防護施設の安全機能を損なう可能性のある施設については、下記のとおり対策を行う。

- ・防護ネットによる防護
 - 原子炉補機冷却海水ポンプ及び原子炉補機冷却海水ポンプ出口ストレーナが設置される室内上部開口部に防護ネットを設置し、鋼製材が衝突することを防止する。防護ネットは、鋼製材の運動エネルギーを吸収し、鋼製材の衝突箇所において破断が生じない設計とする（図3参照）
- ・防護壁等による防護
 - 防護対象施設が安全機能を損なうことのないよう、防護対象施設に鋼製材等が衝突することを防止するために、防護壁は鋼製材が貫通しない設計とする。

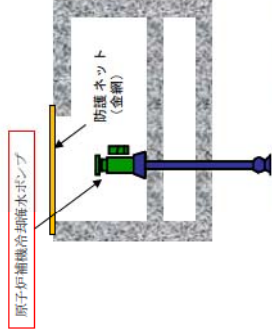


図3 原子炉補機冷却海水ポンプの飛来物防護対策イメージ図

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

泊発電所3号機竜巻影響評価結果	原子力発電所の竜巻影響評価ガイド
<p>1. はじめに</p> <p>「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ぬと規定されており、この自然現象の一つとして竜巻が挙げられている。</p> <p>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伴現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参照して「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。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ 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）の確定 ・ 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 <p>また、第43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。</p>	<p>1. 総則</p> <p>1.1 目的</p> <p>原子力規制委員会の定める「実用発電用原子炉及びその附属施設の位置、構造及び設備の基準に関する規則」第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ぬとしており、敷地周辺の自然環境を基に想定される自然現象の一つとして、竜巻の影響を挙げている。本ガイドは、当該規定に関連して、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伴現象^(注1.1)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設置許可段階において確認する一例として安全審査に活用することを目的とする。また、本評価ガイドは、竜巻影響評価の妥当性を審査官が判断する際に、参考とするものである。</p> <p>設置許可段階の安全審査においては、以下の2点について確認する。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ 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^(注1.2)）が、本ガイドに示す基本的な方針を満足した上で適切に設定されていること。 ・ 設計荷重に対して、竜巻防護施設の構造健全性等が維持されて安全機能が維持される方針であること。 <p>(注1.1) 竜巻及び竜巻と同時に発生する可能性のある雷、大雨、雹^{ひょう}等、あるいはダウンバースト等に伴って発生し得る事象</p> <p>(注1.2) 2.2.2 (2) 参照</p> <p>1.2 適用範囲</p> <p>本ガイドは、設計で想定する竜巻及びその随伴現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設置許可段階において確認する安全審査に適用する。</p> <p>1.3 関連法規等</p> <p>本ガイドは、以下の法律や基準類を参考としている。</p> <p>(1) 国内</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ 核原料物質、核燃料物質及び原子炉の規制に関する法律（昭和32年6月10日法律第166号） ・ 核原料物質、核燃料物質及び原子炉の規制に関する法律施行令（昭和32年11月21日政令第324号） ・ 建築基準法（昭和25年5月24日法律第201号） ・ 建築基準法施行令（昭和25年11月16日政令第338号） ・ 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（平成25年原子力規制委員会規則第5号） ・ 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（原規技発第1306193号（平成25年6月19日原子力規制委員会決定）） ・ 基準地震動及び耐震設計方針に係る審査ガイド（原管地発第1306192号（平成25年6月19日原

子力規制委員会決定)

- ・ 日本産業規格
- ・ 日本電気協会：原子力発電所耐震設計技術指針 JEAG4601-1987
- ・ 日本電気協会：原子力発電所耐震設計技術指針 JEAG4601-1991 追補版
- ・ 日本機械学会：発電用原子力設備規格 設計・建設規格 (2008 年版) JSME S NC1-2008
- ・ 日本機械学会：発電用原子力設備規格 設計・建設規格 (2009 年追補版) JSME S NC1-2009
- ・ 日本機械学会：発電用原子力設備規格 設計・建設規格 (2010 年追補版) JSME S NC1-2010
- ・ 日本機械学会：発電用原子力設備規格 設計・建設規格 (2012 年版) JSME S NC1-2012
- ・ 日本機械学会：発電用原子力設備規格 材料規格 (2012 年版) JSME S NJ1-2012
- ・ 日本建築学会：建築物荷重指針・同解説 (2004)
- ・ 日本建築学会：原子力施設鉄筋コンクリート構造計算規程・同解説 (2005)
- ・ 日本建築学会：鉄筋コンクリート構造計算規程・同解説 (2010 年6 月)
- ・ 日本建築学会：鋼構造設計規程—許容応力度設計法— (2005 年9 月)
- ・ 日本建築学会：鋼構造塑性設計指針 (2010 年2 月)
- ・ 土木学会：構造工学シリーズ22 防災・安全対策技術者のための衝撃作用を受ける土木構造物の性能設計—基準体系の指針— (2013 年1 月)

(2) 海外

- ・ IAEA : IAEA Safety Standards, Meteorological and Hydrological Hazards in Site Evaluation for Nuclear Installations, Specific Safety Guide No. SSG-18, 2011
- ・ U. S. NUCLEAR REGULATORY COMMISSION : Appendix A to Part 50-General Design Criteria for Nuclear Power Plants
- ・ U. S. NUCLEAR REGULATORY COMMISSION : REGULATORY GUIDE 1.76, DESIGN-BASIS TORNADO AND TORNADO MISSILES FOR NUCLEAR POWER PLANTS, Revision 1, March 2007
- ・ U. S. NUCLEAR REGULATORY COMMISSION : STANDARD REVIEW PLAN, 3.3.2 TORNADO LOADS, NUREG-0800, Revision 3 - March 2007
- ・ U. S. NUCLEAR REGULATORY COMMISSION : STANDARD REVIEW PLAN, 3.5.1.4 MISSILES GENERATED BY TORNADOES AND EXTREME WINDS, NUREG-0800, Revision 3 - March 2007

ほか

1.4 用語の定義

本ガイドで用いている用語の定義を以下に示す。

- ・ 竜巻防護施設：「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。
- ・ 安全機能：「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Sクラスの施設に要求される機能。
- ・ 原子炉施設：発電用軽水型原子炉施設。
- ・ 設計対象施設：本ガイドで設計の対象とする原子炉施設。
- ・ 基準竜巻：設計対象施設の供用期間中に極めてまれではあるが発生する可能性があり、設計対

原子力発電所の竜巻影響評価ガイド

泊発電所3号機竜巻影響評価結果

- 象施設の安全性に影響を与えるおそれがある竜巻。
- ・設計竜巻：原子力発電所が立地する地域の特性（地形効果による竜巻の増幅特性等）等を考慮して、科学的見地等から基準竜巻に対して最大風速の割り増し等を行った竜巻。
 - ・設計竜巻荷重：設計竜巻によって設計対象施設に作用する荷重。
 - ・設計荷重：設計竜巻荷重及びその他の組み合わせ荷重。
 - ・竜巻検討地域：原子力発電所が立地する地域及び竜巻発生を観点から気象条件等が類似の地域。
 - ・藤田スケール：1971年にシカゴ大学の藤田哲也博士が考案した竜巻等の規模を表す指標。藤田スケールは、通常、F0～F5までの区分が用いられ、区分ごとに風速の範囲が定義されている。
 - ・竜巻影響エリア：原子力発電所の号機ごとすべての設計対象施設の設置面積の合計値及び推定される竜巻被害域に基づいて設定されるエリア。
 - ・日本版改良藤田スケール：藤田スケールを改良した竜巻等の規模を表す指標。日本版改良藤田スケールは、JEF0～JEF5の階級が用いられ、当該階級は、被害指標ごとに設定された被害度に対応する風速のうち最大のものにより決定される。
 - ・設計飛来物：設計竜巻によって設計対象施設に衝突し得る飛来物。
 - ・竜巻随伴事象：設計竜巻等に伴い発生が想定され得る事象。
 - ・ダウンバースト：積乱雲等から強い下降気流が生じて、竜巻と同様に局地的に突風を発生させる自然現象。
 - ・スーパーセル：上昇気流域における顕著な回転を伴う気流によって生じる巨大積乱雲。単一巨大積乱雲とも呼ばれ、竜巻、雹、大雨及びダウンバースト等を発生させる。

泊発電所3号機竜巻影響評価結果	原子力発電所の竜巻影響評価ガイド
<p>2. 評価の基本方針</p> <p>2.1 評価対象施設</p> <p>以下の(1)～(3)に示す施設を評価対象施設とする。</p> <p>(1) 竜巻防護施設</p> <p>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つて人為によるもの(故意によるものを除く。)に対して、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造物、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造物、系統及び機器として安全重要度分類のクラス1、クラス2に属する構造物、系統及び機器を外部事象から防護する対象(以下「外部事象防護対象施設」という。)</p> <p>竜巻に対する防護として、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審査ガイドの設計を要求される設備(系統、機器)に加え、外部事象防護対象施設を竜巻防護施設とする。</p> <p>なお、「発電用軽水炉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3に属する構造物、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。</p> <p>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。</p> <p>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・構造物等)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。</p> <p>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。</p> <p>また、原子炉建屋、原子炉補助建屋、ディーゼル発電機建屋、A1、A2-燃料油貯油槽タンク室、B1、B2-燃料油貯油槽タンク室、取水ピットポンプ室及びボイラ室については、竜巻防護施設を内包する建屋・構造物であり、後述の「(3) 竜巻防護施設の外殻となる施設」として抽出する。</p> <p>(屋外設備) ・排気筒(建屋外)</p>	<p>2. 設計の基本方針</p> <p>2.1 設計対象施設</p> <p>以下の(1)及び(2)に示す施設を設計対象施設とする。</p> <p>(1) 竜巻防護施設</p> <p>「基準地震動及び耐震設計方針に係る審査ガイド」の重要度分類における耐震Sクラスの設計を要求される設備(系統・機器)及び建屋・構造物等とする。</p>

泊発電所3号機竜巻影響評価結果	原子力発電所の竜巻影響評価ガイド
<p>(外殻となる施設による防護機能が期待できない設備)</p> <ul style="list-style-type: none"> ・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) ・原子炉補機冷却水サージタンク他 ・配管および弁 (主蒸気管内) ・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 <p>(建屋内の施設で外気と繋がっている設備)</p> <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, 安全補機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) <p>(2) 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。</p> <p>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。</p> <p>(竜巻防護施設の外殻となる施設に隣接している施設)</p> <ul style="list-style-type: none"> ・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) <p>(倒壊により竜巻防護施設を損傷させる可能性のある施設)</p> <ul style="list-style-type: none"> ・循環水ポンプ建屋 (CWP/B) <p>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。</p> <p>(屋外にある竜巻防護施設の附属設備)</p>	<p>(2) 竜巻防護施設に波及的影響を及ぼし得る施設 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 (註2.1)。</p>

<p>設計竜巻荷重は、基準地震動S_sによる地震荷重と同様に施設に作用するものと捉え、設計対象施設は、耐震設計上の重要度分類を引用して、耐震Sクラス施設及び耐震Sクラス施設に波及的影響を及ぼし得る施設とした。ただし、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）については、設計対象から除外できる。</p> <p>竜巻防護施設の例としては、原子炉格納容器や安全機能を有する系統・機器（配管を含む）等が考えられる。外殻となる施設等による防護機能が期待できる設計対象施設の例としては、原子炉格納容器に内包された安全機能を有する設備等が考えられる。</p> <p>(注2.1) 竜巻防護施設を内包する区画。</p>	<ul style="list-style-type: none"> ・ディーゼル発電機排気消音器（ディーゼル発電機の附属設備） ・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） <p>（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）</p> <ul style="list-style-type: none"> ・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クト） <p>(3) 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。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・原子炉建屋 (R/B) <ul style="list-style-type: none"> 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) <ul style="list-style-type: none"> A1, A2-燃料油貯油槽タンク室 B1, B2-燃料油貯油槽タンク室 ・取水ピットポンプ室 ・ストレーナ室 <p>解説2.1 評価対象施設 評価ガイドに基づき、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、評価対象から除外する。</p>
---	--

2.2 設計の基本的な考え方

2.2.1 設計の基本フロー

図2.1に設計の基本フローを示す。設置許可段階では、基準竜巻、設計竜巻及び設計荷重が適切に設定されていること、並びに設計荷重に対して、機能・配置・構造計画等を経て抽出された設計対象施設の安全機能が維持される方針であることを確認する。ただし、設計荷重については、設置許可段階において、その基本的な種類や値等が適切に設定されていることを確認する。

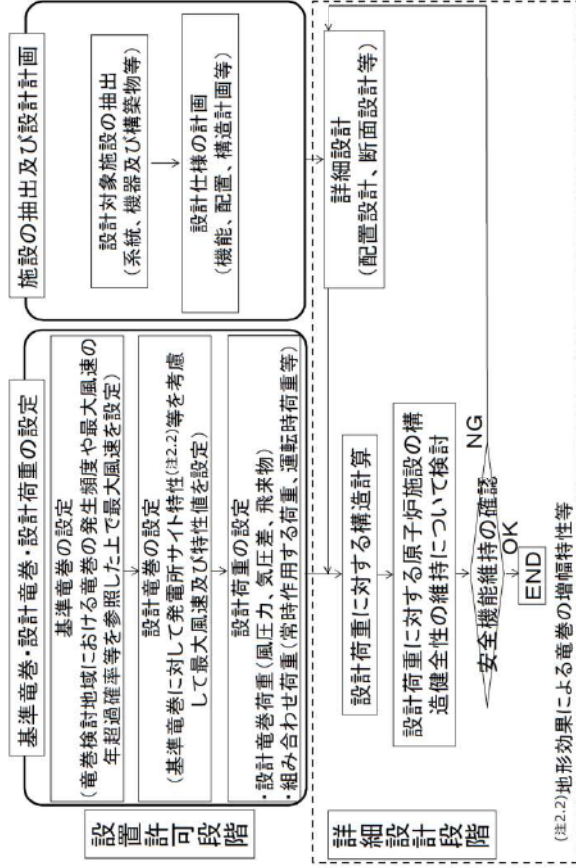


図2.1 設計の基本フロー

解説2.2.1 設計の基本フロー

詳細設計段階においては、配置・断面設計等を経て詳細な仕様が設定された施設を対象に、設計荷重の詳細を設定し、設計荷重に対する構造計算等を実施し、その結果得られた施設の変形や応力等が構造健全性評価基準を満足すること等を確認して、安全機能が維持されることが確認されることを想定している。

2.2 評価の基本的な考え方

2.2.1 評価の基本フロー

評価ガイドに基づき、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。

泊発電所3号機竜巻影響評価結果	原子力発電所の竜巻影響評価ガイド
<p>2.2.2 評価対象施設に作用する荷重 評価ガイドに基づき、以下に示す設計荷重を適切に設定する。</p> <p>(1) 設計竜巻荷重 設計竜巻荷重を以下に示す。</p> <p>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</p> <p>(2) 設計竜巻荷重と組み合わせる荷重 設計竜巻荷重と組み合わせる荷重を以下に示す。</p> <p>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</p> <p>なお、上記 (2) 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 (2) 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。</p> <p>2.2.3 施設の安全性の確認 評価ガイドに基づき、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。</p>	<p>2.2.2 設計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。</p> <p>(1) 設計竜巻荷重 設計竜巻荷重を以下に示す。</p> <p>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設計対象施設内外の気圧差による圧力 ③飛来物の衝撃荷重 設計竜巻によって設計対象施設に衝突し得る飛来物（以下、「設計飛来物」という）が設計対象施設に衝突する際の衝撃荷重</p> <p>(2) 設計竜巻荷重と組み合わせる荷重 設計竜巻荷重と組み合わせる荷重を以下に示す。</p> <p>①設計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^(注2.3)による荷重、設計基準事故時荷重等</p> <p>なお、上記 (2) 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 (2) 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。</p> <p>2.2.3 施設の安全性の確認 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設計荷重に対して、設計対象施設、あるいはその特定の区画^(注2.4)の構造健全性等が維持されて安全機能が維持される方針であることを確認する。</p> <p>(注2.3) 竜巻との同時発生が想定される雷、雪、雹^{ひょう}及び大雨等の自然現象を含む。 (注2.4) 竜巻防護施設を内包する区画。</p>

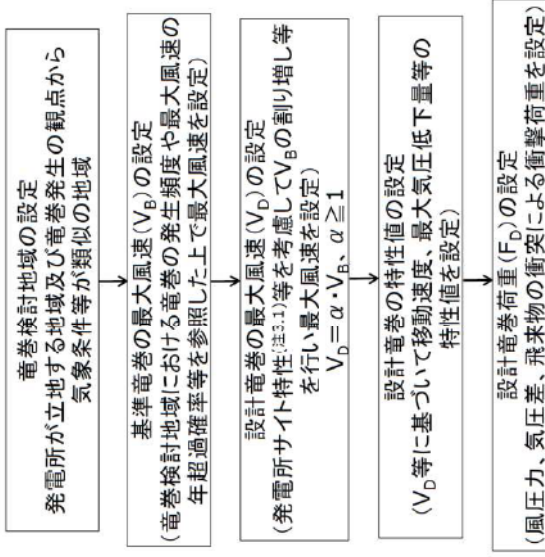
3. 基準竜巻・設計竜巻の設定

3.1 概要

設置許可段階の安全審査において、基準竜巻及び設計竜巻が適切に設定されていることを確認する。

解説3.1 基準竜巻・設計竜巻の最大風速の設定

設計竜巻荷重を設定するまでの基本的な流れは解説図3.1に示すとおりである。



解説図3.1 基準竜巻・設計竜巻の設定に係る基本フロー

(注3.1) 地形効果による竜巻の増幅特性等

3. 基準竜巻・設計竜巻の設定

3.1 概要

評価ガイド解説図3.1に示された基準竜巻・設計竜巻の設定に係る基本フローに従い、基準竜巻及び設計竜巻を評価した。

原子力発電所の竜巻影響評価ガイド

3.2 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時の観測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する地域から設定する。

解説3.2 竜巻検討地域の設定

(1) 基本的な条件

竜巻検討地域の設定にあたっては、IAEAの基準(参1)が参考になる。IAEAの基準では、ある特定の風速を超過する竜巻の年発生頻度の検討にあたって竜巻の記録を調査する範囲として、およそ10万km²を目安にあげている。このIAEAの基準を参考として、竜巻検討地域の目安を、原子力発電所を中心とする10万km²の範囲とする。しかしながら、日本では、例えば日本海側と太平洋側とで気象条件が異なる等、比較的狭い範囲で気象条件が大きく異なる場合があることから、必ずしも10万km²に拘らずに、竜巻発生時の観測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する地域を調査した結果に基づいて竜巻検討地域を設定することを基本とする。

(2) 原子力発電所が海岸線付近に立地する場合の竜巻検討地域の設定

解説図3.2に日本における竜巻の発生分布(参2)を示す。解説図3.2より日本における竜巻の発生位置は、海岸線付近に集中している傾向が伺える。解説図3.3に日本の海岸線付近における竜巻の発生状況を示す。解説図3.3をみると、海岸線から1km以内の陸上では単位面積あたりの1年間の平均発生数は 6.0×10^{-4} (個/km²/年)を少し超える程度であり、海岸線から離れるに従って竜巻の発生数が減少する傾向が伺える。例えば、解説図3.3の陸上側のグラフの分布をみると、海岸線から5km以上離れた地域では、竜巻の発生数が急激に減少する傾向がみられる。以上の傾向を踏まえ、原子力発電所が海岸線付近に立地する場合は、海岸線から陸側及び海側それぞれ5kmの範囲を目安に竜巻検討地域を設定することとする。なお、原子力発電所がこの範囲(海岸線から陸側及び海側それぞれ5kmの範囲)を逸脱する地域に立地する場合は、海岸線付近で竜巻の発生が増大する特徴を踏まえつつ竜巻検討地域の範囲を別途検討する必要がある。

泊発電所3号機竜巻影響評価結果

3.2 竜巻検討地域の設定

竜巻検討地域は、評価ガイド3.2のとおり、泊発電所が立地する地域及び竜巻発生時の観測点から原子力発電所が立地する地域と気象条件が類似する地域から設定した。

具体的には、泊発電所が位置する北海道日本海側と、竜巻発生時の気象特性である総観場の種類及び発生頻度の関連性の強い地域を選定し竜巻検討地域とした。

竜巻検討地域は、北海道から本州にかけて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の地域(面積約38,895km²)とする。図3.1に竜巻検討地域を示す。

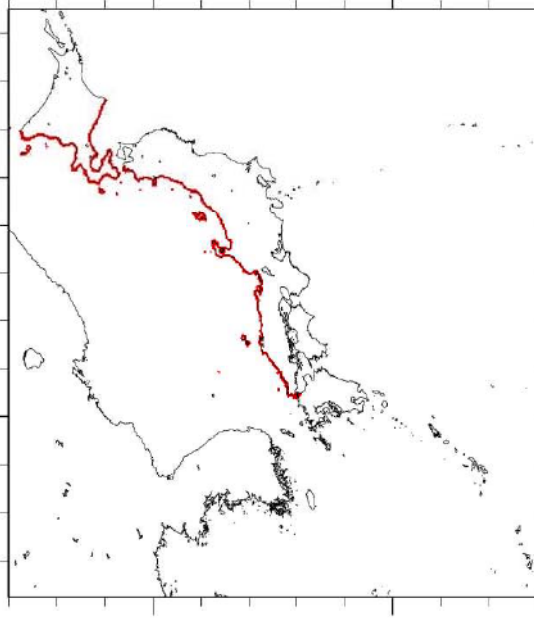
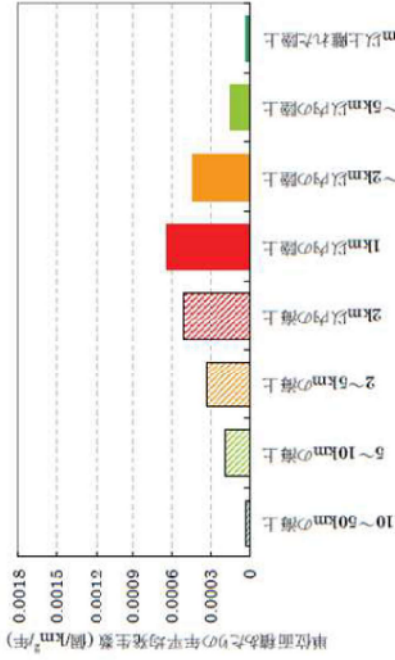


図 3.1 泊発電所における竜巻検討地域



解説図3.2 日本における竜巻の発生分布 (1961～2011年、気象庁作成) (参2)



解説図3.3 日本の海岸線付近における竜巻の発生状況(参3) (注.2)
(1961～2009年12月、規模:F0以上)

(注3.2) 被害の痕跡が残りにくい海上竜巻は、単位面積あたりの年平均発生数が、実際の発生数より特に少ない可能性が考えられる。

3.3 基準竜巻の設定

以下の基本的な方針に基づいて基準竜巻の最大風速(V_B)を設定する。ここで、 V_B は最大瞬間風速とする。

(1) 基準竜巻の最大風速(V_B)は、竜巻検討地域において、過去に発生した竜巻の規模や発生頻度、最大風速の年超過確率等を考慮して適切に設定する。

(2) 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において、年超過確率(P_{B2})に対応する竜巻最大風速を V_{B2} とする。ここで、 P_{B2} は 10^{-5} (暫定値)を上回らないものとする。

また、竜巻検討地域において基準竜巻の最大風速(V_B)が発生する可能性を定量的に確認するために、 V_B の年超過確率を算定することとする。なお、 V_B が V_{B1} から決定された場合($V_B = V_{B1}$ の場合)は、 V_{B2} の算定に用いた竜巻最大風速のハザード曲線を用いて、 V_B の年超過確率を算定する。ちなみに、米国NRCの基準類^(*)では、設計に用いる竜巻(設計基準竜巻: Design-basis tornado)の最大風速は、年超過確率 10^{-7} の風速として設定されている。

解説3.3 基準竜巻の最大風速(V_B)の設定

解説3.3.1 過去に発生した竜巻による最大風速(V_{B1})の設定

本文に記載のとおり、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。

また、過去に発生した竜巻による最大風速は、竜巻による被害状況等に基づく既往のデータベース、研究成果等について十分に調査・検討した上で設定する必要がある。

日本における過去最大級の竜巻としては、例えば、1990年12月に千葉県茂原市で発生した竜巻、2012年5月に茨城県常総市からつくば市で発生した竜巻等があげられる。竜巻検討地域の観測記録等に基づいて V_{B1} を設定する場合には、これら過去最大級の竜巻を考慮しない場合には、その明確な根拠を提示する必要がある。

竜巻による被害状況から推定された最大風速を参照して設定された藤田スケールを用いて基準竜巻の最大風速を設定する場合^(注3.3))は、藤田スケールの各階級(F0~F5)の最大風速を用いる。解説表3.1に藤田スケールと風速の関係を示す。なお、風速計等によって観測された風速記録がある場合には、その風速記録を用いてもよい。

3.3 基準竜巻の設定 (1)

評価ガイド3.3に示された基本的な方針に基づき、気象庁の「竜巻等の突風データベース」をもとに、過去に発生した竜巻による最大風速 V_{B1} および竜巻最大風速のハザード曲線による最大風速 V_{B2} を評価した上で、両者のうち大きい方を基準竜巻の最大風速 V_B として設定した。

3.3 基準竜巻の設定 (2)

① 過去に発生した竜巻による最大風速 (解説3.3.1 過去に発生した竜巻による最大風速(V_{B1})の設定)

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 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(1961年~2012年6月)に発生した最大の竜巻は、気象庁の「竜巻等の突風データベース」によるとF3スケールである。F3スケールにおける風速は、70~92m/sであることから、過去に発生した最大の竜巻による最大風速(V_{B1})を92m/sとした。

② 竜巻最大風速のハザード曲線による最大風速 (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)

竜巻の発生について統計的評価を行うため、竜巻検討地域における竜巻の観測記録等に基づいてハザード曲線を算定した。ハザード曲線の算定に当たっては、竜巻検討地域の竜巻特性を適切に考慮できる海側、陸側5km範囲内での評価、およ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した。

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)に記載の『設計基準事故に「原子炉施設の寿命期間中に予想される」頻度の運転時の異常な過渡変化よりもさらに低頻度のものであり、「プラント寿命中にまれであるが発生し得るもの」とされています。このためプラント寿命中に1回の頻度が 10^{-1} /年~ 10^{-2} /年となることを踏まえ、設計基準事故については、それよりも低頻度であることから、 10^{-3} /年~ 10^{-4} /年程度の発生頻度を念頭に置いていいます』より、設計基準として考慮する竜巻の最大風速は 10^{-4} /年を念頭に設定することが妥当であると考えるが、竜巻の観測数が十分でないことを踏まえ保守的に 10^{-4} より一桁下げ、年超過確率 10^{-5} に相当する竜巻最大風速を V_{B2} とした。

解説表3.1 藤田スケールと風速の関係 (参5)

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

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
 既往の算定方法 (Wen&Chu^(参6)及びGarson et. al^(参7, 参8)) に基づいて V_{B2} を算定する方法について、その基本的な考え方を以下に例示する。竜巻最大風速のハザード曲線の算定は、解説図3.4 に示す算定フローに沿って実施する。なお、本ガイドに示す V_{B2} の具体的な算定方法については、独立行政法人原子力安全基盤機構が東京工業大学に委託した研究の成果^(参9)が参考になる。

また、竜巻最大風速のハザード曲線の算定方法については、技術的見地等からその妥当性を示すことを条件として、いずれの方法を用いてもよいが、竜巻影響エリアの設定の基本的な考え方は、以下の「(1) 竜巻影響エリアの設定」に従うことを原則とする。

(1) 竜巻影響エリアの設定

V_{B2} の算定にあたっては、まず始めに V_{B2} の発生エリアである竜巻影響エリアを設定する。竜巻影響エリアは、原子力発電所の号機ごとに設定する。号機ごとのすべての設計対象施設の設置面積の合計値及び推定される竜巻被害域(被害幅、被害長さ、移動方向等から設定)に基づいて、竜巻影響エリアを設定する。

竜巻による被害幅、被害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。また、竜巻による被害幅、被害長さ及び移動方向の設定に使用する竜巻の観測記録や仮定条件等は、後述する竜巻の最大風速の確率密度分布の設定に用いる観測記録や仮定条件等との整合性を持たせることを原則とし、 V_{B2} の算定に使用するデータ等には一貫性を持たせるように配慮する。

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
 既往の算定方法 (Wen&Chu 及びGarson et al.) に基づいて、竜巻最大風速のハザード曲線を用いた最大風速 V_{B2} を算定した。具体的な算定方法は、独立行政法人原子力安全基盤機構が東京工業大学に委託した研究の成果を参考とした。

(1) 竜巻影響エリアの設定

竜巻影響エリアは、3号機の竜巻防護施設を保守的に包絡する円形のエリア (直径 425m, 面積 約142,000m²) として設定した。

竜巻の発生数データは気象庁「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月までのデータを用いて、観測体制の変遷やFスケール不明竜巻の取扱いを考慮した発生数とした。竜巻による被害幅、被害長さは、竜巻検討地域で過去に発生した竜巻の記録(気象庁「竜巻等の突風データベース」)に基づいて対数正規分布を仮定して設定した。

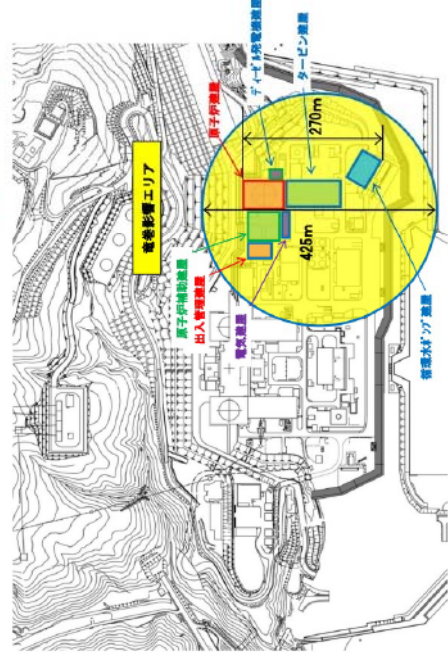


図 3.2 竜巻影響エリア

(2) 竜巻の年発生数の確率分布の設定

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。具体的には、竜巻検討地域を海岸線から陸側及び海側それぞれ5kmの範囲に設定した場合は、少なくとも1km範囲ごとに竜巻の年発生数の確率分布を算出し、そのうちの V_{B2} が最も大きな値として設定される確率分布を設計で用いることとする。

(3) 竜巻最大風速の確率密度分布の設定

竜巻最大風速の確率密度分布は、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対数正規分布等を仮定して設定することを基本とする。竜巻最大風速の確率密度分布の設定にあたっては、竜巻の年発生数の確率分布の設定と同様に、竜巻検討地域を1km範囲ごとに区切ってそれぞれ範囲で確率分布を算出し、そのうちの V_{B2} が最も大きな値として設定される確率分布を設定する等、配慮する。

竜巻最大風速の確率密度分布の設定にあたって使用する観測された竜巻の最大風速を藤田スケールに基づいて評価する場合^(注3.3)は、藤田スケールの各階級(F0~F5)の最小風速から最大風速のうち、 V_{B2} が最も大きくなる風速を用いる。ただし、風速計等によって観測された風速記録がある場合には、その風速記録を用いてもよい。

(4) 竜巻最大風速のハザード曲線の算定

上記で設定した竜巻の年発生数の確率分布及び竜巻最大風速の確率密度分布を用いて、竜巻最大風速のハザード曲線を算定する。

なお、竜巻最大風速のハザード曲線の算定において、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。

(5) 年超過確率(P_{B2})に対応する竜巻最大風速(V_{B2})の算定

上記で算定した竜巻最大風速のハザード曲線において年超過確率が P_{B2} ($\leq 10^{-5}$ (暫定値)) の竜巻最大風速を V_{B2} とする。

(2) 竜巻の年発生数の確率分布の設定

竜巻の年発生数の確率分布は、(1)で設定した竜巻の発生データに基づき、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ガイドで参照されている東京工芸大学委託成果にならいポリア分布により設定した。

なお、1kmごとの竜巻の年発生数は少なく、精度良くハザード曲線を算定できないことおよび竜巻による被害の発生特性(発生地点から数km離れた地点で最大風速に達する)を考慮し、1kmごとではなく竜巻検討地域全体(5km範囲)として、年発生数の確率分布を求めた。竜巻風速の確率密度分布も同様とした。

(3) 竜巻最大風速の確率密度分布の設定

竜巻最大風速の確率密度分布は、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、(1)、(2)より対数正規分布を仮定して設定した。

(4) 竜巻最大風速のハザード曲線の算定

(1)~(3)の設定より、図3.3のとおり竜巻最大風速のハザード曲線を算定した。

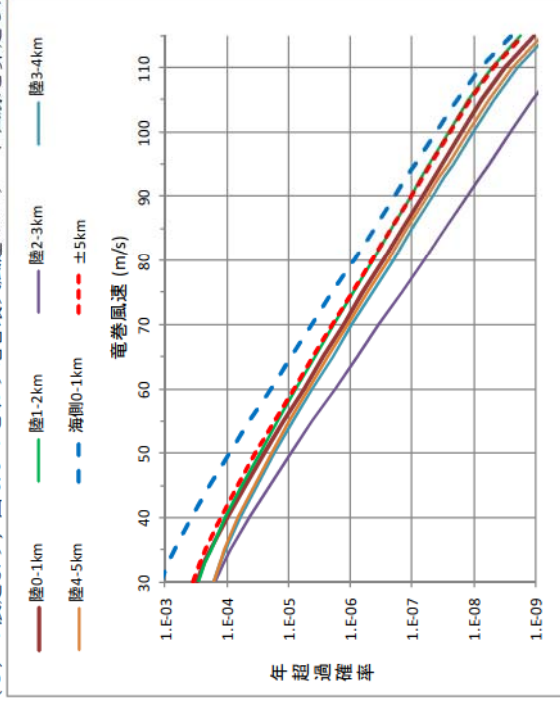
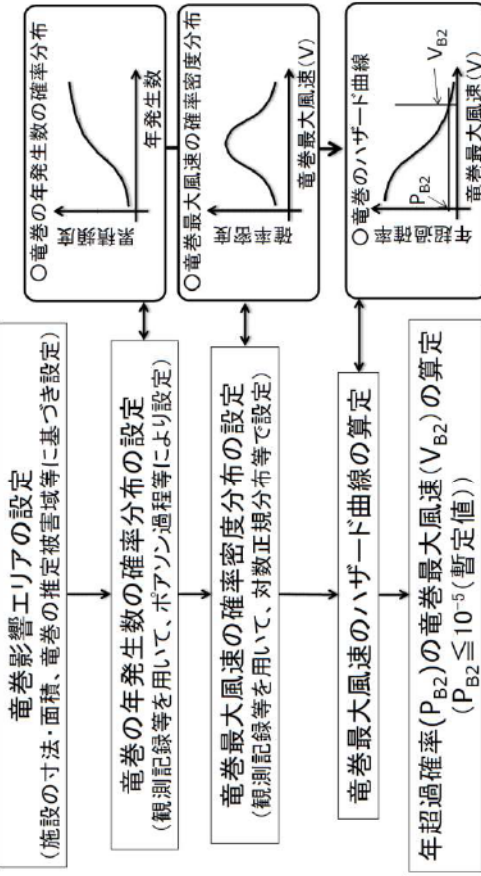


図 3.3 竜巻最大風速のハザード曲線

(5) 年超過確率に対応する竜巻最大風速 V_{B2} の算定

評価ガイドに基づき、竜巻最大風速 V_{B2} は、(4)で算定した竜巻最大風速のハザード曲線より、評価ガイド3.3を参考に年超過確率 10^{-5} に相当する 65m/s とした。



解説図3.4 竜巻最大風速のハザード曲線による最大風速 (V_{B2}) の算定フロー

解説 3.3.3 日本版改良藤田スケールの適用について

2015年12月に気象庁により策定され、2016年4月から竜巻等の突風の調査に使用されている日本版改良藤田スケール（以下「JEFスケール」という。）は、日本の建築物等の種類や特性を踏まえた被害指標及び被害度が用いられており、個別被害から求められる風速の精度の向上が図られている。一方で、2016年4月以降に蓄積されたJEFスケールにより評定された竜巻の風速等に関するデータのみで竜巻最大風速の大きさと発生頻度との関係を把握することは困難であることから、 V_0 の設定は、JEFスケールのデータで行うのではなく、2016年3月以前に藤田スケールにより評定された竜巻の風速等に関するデータを用いて行うものとする。ただし、藤田スケールの階級F3の最大風速92m/sに近い値又はそれを超える値がJEFスケールで評定された場合には、気象庁の評定等を踏まえ、その値の扱いを別途検討する。

3.4 設計竜巻の設定

以下の基本的な方針に基づいて設計竜巻の最大風速 (V_0) 及び特性値を設定する。ここで、 V_0 は最大瞬間風速とする。

- (1) 設計竜巻の最大風速 (V_0) は、原子力発電所が立地する地域の特性（地形効果による竜巻の増幅特性等）等を考慮して、科学的見地等から基準竜巻の最大風速 (V_0) の適切な割り増し等を行って設定されていること。なお、 V_0 は、 V_0 を下回らないものとする。
- (2) 設計竜巻の特性値は、設計竜巻の最大風速 (V_0)、並びに竜巻検討地域において過去に発生した竜巻の特性等を考慮して適切に設定する。

以上より、竜巻の最大風速 (V_{B1})、 (V_{B2}) は下記のとおりである。
 ・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

評価ガイド3.3に従い、基準竜巻の最大風速 V_B は、 V_{B1} と V_{B2} のうち大きな風速とすることから、泊発電所3号機に対する基準竜巻の最大風速は92m/sとした。

3.4 設計竜巻の設定

評価ガイドに基づき、以下の基本的な方針に基づいて設計竜巻の最大風速 (V_0) 及び特性値を設定した。ここで、 V_0 は最大瞬間風速とした。

- (1) 設計竜巻の最大風速 (V_0) は、原子力発電所が立地する地域の特性（地形効果による竜巻の増幅特性等）等を考慮して設定した。なお、 V_0 は、 V_0 を下回らないものとした。
- (2) 設計竜巻の特性値は、設計竜巻の最大風速 (V_0) 等を考慮して適切に設定した。

解説3.4 設計竜巻の最大風速 (V_b) 及び特性値の設定

解説3.4.1 設計竜巻の最大風速 (V_b) の設定で考慮する地形効果による竜巻の増幅特性
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 (V_b) を設定する。

なお、竜巻が丘陵や段差等の上空を通過した際には、竜巻が減衰する可能性があるが、 V_b の設定においては、そのような減衰の効果は考慮しない。

解説3.4.2 設計竜巻の特性値の設定

解説3.4.2.1 概要

竜巻検討地域で観測された竜巻に関する情報、並びに設計竜巻の最大風速 (V_b) 等に基づいて、下記(1)～(5)に示す設計竜巻の各特性値を設定する。

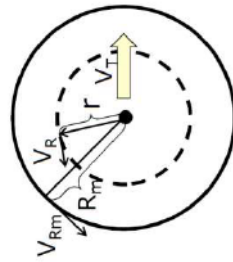
- (1) 移動速度 (V_T)
- (2) 最大接線風速 (V_{Rm})
- (3) 最大接線風速半径 (R_m)
- (4) 最大気圧低下量 (ΔP_{max})
- (5) 最大気圧低下率 (dp/dt)_{max}

(1)～(5)の各特性値については原則として、十分な信頼性を有した観測記録等に基づいて設定したものを、その根拠の明示を条件として用いる。ただし、設定に十分な信頼性を有した観測記録等がない場合には、解説3.4.2.2 及び3.4.2.3 に示す方法で各特性値を設定することができる。

解説3.4.2.2 設計竜巻の特性値の設定に係る基本的な考え方

竜巻に関する観測データが不足している等の理由により、観測データ等に基づいた十分に信頼できる数学モデルの構築が困難な場合は、米国NRCの基準類⁽⁹⁾を参考として、ランキン渦モデルを仮定して竜巻特性値を設定する。解説図3.5にランキン渦モデルの概要を示す。ランキン渦では、高さ方向によって風速及び気圧が変化する平面的な流れ場を仮定している。

なお、ランキン渦モデルに比べてより複雑な竜巻渦を仮定した数学モデル等を使用して竜巻特性値を設定する場合は、その技術的な妥当性を示す必要がある。



V_T : 竜巻の移動速度
 V_R : 接線風速、 r : 竜巻渦中心からの半径
 V_{Rm} : 最大接線風速、 R_m : 最大接線風速が生じる位置での半径
 $V_R = V_{Rm} \cdot (r/R_m)$ ($r \leq R_m$ の範囲)
 $V_R = V_{Rm} \cdot (R_m/r)$ ($r \geq R_m$ の範囲)

解説図3.5 ランキン渦モデルの概要

解説3.4 設計竜巻の最大風速 (V_b) 及び特性値の設定

解説3.4.1 設計竜巻の最大風速 (V_b) の設定で考慮する地形効果による竜巻の増幅特性
評価ガイドに基づき、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ことから、泊発電所が立地する地域において、評価対象施設の周辺地形等によって竜巻が増幅される可能性について検討を行い、その検討結果に基づいて設計竜巻の最大風速 (V_b) を設定した。

なお、竜巻が丘陵や段差等の上空を通過した際には、竜巻が減衰する可能性があるが、 V_b の設定においては、そのような減衰の効果は考慮しなかった。

解説3.4.2 設計竜巻の特性値の設定

解説3.4.2.1 概要

評価ガイドに基づき、設計竜巻の最大風速 (V_b) 等に基づいて、下記(1)～(5)に示す設計竜巻の各特性値を設定した。

- (1) 移動速度 (V_T)
- (2) 最大接線風速 (V_{Rm})
- (3) 最大接線風速半径 (R_m)
- (4) 最大気圧低下量 (ΔP_{max})
- (5) 最大気圧低下率 (dp/dt)_{max}

(1)～(5)の各特性値については設定に十分な信頼性を有した観測記録等がないことから、解説3.4.2.2 及び3.4.2.3 に示す方法で各特性値を設定した。

解説3.4.2.2 設計竜巻の特性値の設定に係る基本的な考え方

評価ガイドに基づき、ランキン渦モデルを仮定して竜巻特性値を設定した。ランキン渦では、高さ方向によって風速及び気圧が変化する平面的な流れ場を仮定している。

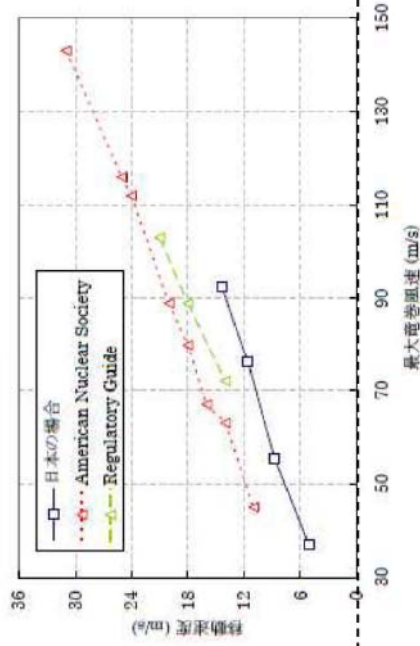
解説3.4.2.3 設計竜巻の特性値の設定

(1) 設計竜巻の移動速度 (V_T) の設定
設計竜巻の移動速度 (V_T) は、以下の算定式を用いて V_0 から V_T を算定する。

$$V_T = 0.15 \cdot V_0 \quad \dots (3.1)$$

ここで、 V_0 (m/s) は設計竜巻の最大風速を表す。(3.1)式は、解説図3.6 に示される日本の竜巻の観測記録に基づいた竜巻移動速度と最大風速との関係^(*)を参考として設定したものである。解説図3.6 をみると、青線で示す日本の竜巻による移動速度は、米国NRCの基準類等(参4)による移動速度と比べて、同じ最大竜巻風速に対して小さい。解説図3.6に示される日本の竜巻に対する移動速度の平均値であるが、日本で発生する竜巻を個別にみれば、スーパーセルに伴って発生する竜巻等、米国の竜巻に比べて移動速度が速いものも存在すると考えられる。

本ガイドでは、設計竜巻の最大速度 (V_0) が一定の場合、移動速度が遅い方が、最大気圧低下量 (ΔP_{max}) が大きな値になる ((3.2)式、(3.4)式) ことを考慮して、スーパーセルに伴って発生する竜巻等の移動速度が速い竜巻の特性は採用せずに、観測記録の平均値に基づいた解説図3.6 の日本の竜巻における移動速度と最大竜巻風速の関係に基づき (3.1)式を採用することにした。



解説図3.6 竜巻の移動速度と最大風速の関係^(*)

解説3.4.2.3 設計竜巻の特性値の設定

(1) 設計竜巻の移動速度 (V_T) の設定
評価ガイドに基づき、設計竜巻の移動速度 (V_T) は、以下の算定式を用いて算定した。

$$V_T = 0.15 \cdot V_0$$

泊発電所3号機竜巻影響評価結果	原子力発電所の竜巻影響評価ガイド
<p>(2) 設計竜巻の最大接線風速 (V_{lm}) の設定 評価ガイドに基づき、設計竜巻の最大接線風速 (V_{lm}) は、以下の算定式を用いて算定した。</p> $V_{lm} = V_0 - V_T$ <p>ここで、V_0 (m/s) 及び V_T (m/s) は、設計竜巻の最大風速及び移動速度である。</p> <p>(3) 設計竜巻の最大接線風速が生じる位置での半径 (R_m) の設定 評価ガイドに基づき、設計竜巻の最大接線風速が生じる位置での半径 (R_m) は、以下の値を用いた。</p> $R_m = 30 \text{ (m)}$ <p>(4) 設計竜巻の最大気圧低下量 (ΔP_{max}) の設定 評価ガイドに基づき、設計竜巻の最大気圧低下量 (ΔP_{max}) は、ランキン渦モデルによる風速分布に基づいて設定した。</p> $\Delta P_{max} = \rho \cdot V_{lm}^2$ <p>ここで、ρ 及び V_{lm} は、それぞれ空気密度、設計竜巻の最大接線風速を示す。</p> <p>(5) 設計竜巻の最大気圧低下率 ($(dp/dt)_{max}$) の設定 評価ガイドに基づき、設計竜巻の最大気圧低下率 ($(dp/dt)_{max}$) は、ランキン渦モデルによる風速分布に基づいて設定した。</p> $(dp/dt)_{max} = (V_T/R_m) \cdot \Delta P_{max}$ <p>ここで、V_T 及び R_m は、それぞれ設計竜巻の移動速度及び最大接線風速が生じる位置での半径を表す。</p> <p>評価ガイド 3.4 に従い、地形効果による風の増幅について評価した結果、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こととし、泊発電所の設計竜巻の最大風速 (V_0) は、92m/s とした。</p> <p>ただし、竜巻影響評価にあたっては、設計竜巻の最大風速 92m/s を安全側に数字を切り上げ、設計竜巻の最大風速 (V_0) を、$V_0=100\text{m/s}$ とした。</p>	<p>(2) 設計竜巻の最大接線風速 (V_{lm}) の設定 設計竜巻の最大接線風速 (V_{lm}) は、米国NRC の基準類 (参4) を参考として、以下の算定式を用いて V_{lm} を算定する。</p> $V_{lm} = V_0 - V_T \dots (3.2)$ <p>ここで、V_0 (m/s) 及び V_T (m/s) は、設計竜巻の最大風速及び移動速度である。</p> <p>(3) 設計竜巻の最大接線風速が生じる位置での半径 (R_m) の設定 設計竜巻の最大接線風速が生じる位置での半径 (R_m) は、日本における竜巻の観測記録をもとに提案された竜巻モデル (参3) に準拠して以下の値を用いる。</p> $R_m = 30 \text{ (m)} \dots (3.3)$ <p>(4) 設計竜巻の最大気圧低下量 (ΔP_{max}) の設定 設計竜巻の最大気圧低下量 (ΔP_{max}) は、米国NRC の基準類 (参4) を参考として、ランキン渦モデルによる風速分布に基づいて、最大気圧低下量 (ΔP_{max}) を設定する。</p> $\Delta P_{max} = \rho \cdot V_{lm}^2 \dots (3.4)$ <p>ここで、ρ 及び V_{lm} は、それぞれ空気密度、設計竜巻の最大接線風速を示す。</p> <p>(5) 設計竜巻の最大気圧低下率 ($(dp/dt)_{max}$) の設定 設計竜巻の最大気圧低下率 ($(dp/dt)_{max}$) は、米国NRC の基準類 (参4) を参考として、ランキン渦モデルによる風速分布に基づいて、最大気圧低下率 ($(dp/dt)_{max}$) を設定する。</p> $(dp/dt)_{max} = (V_T/R_m) \cdot \Delta P_{max} \dots (3.5)$ <p>ここで、V_T 及び V_{lm} は、それぞれ設計竜巻の移動速度及び最大接線風速が生じる位置での半径を表す。</p>

泊発電所3号機竜巻影響評価結果	原子力発電所の竜巻影響評価ガイド
<p>4. 竜巻影響評価</p> <p>4.1 概要</p> <p>評価の概要は以下のとおりとする。</p> <p>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</p> <p>②泊発電所における飛来物に係る調査</p> <p>③飛来物発生防止対策</p> <p>④飛来物に対する竜巻防護施設の防護対策</p> <p>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</p> <p>4.2 評価対象施設</p> <p>評価ガイドに基づき、「2.1 評価対象施設」に示した評価対象施設を抽出した。</p> <p>4.3 設計荷重の設定</p> <p>4.3.1 設計竜巻荷重の設定</p> <p>評価ガイドに基づき、「2.2.2 評価対象施設に作用する荷重」の「(1) 設計竜巻荷重」で示した「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、それぞれ技術的見地等から妥当な荷重を設定した。</p> <p>解説4.3.1 設計竜巻荷重の設定 解説4.3.1.1 設計竜巻の最大風速による風圧力の設定 解説4.3.1.1.1 概要 設計竜巻の最大風速(V_b)等に基づいて、設計竜巻によって評価対象施設に作用する風圧力を設定した。</p> <p>解説4.3.1.1.2 基本的な考え方 (1) 風圧力の算定に用いる風力係数 本評価における風圧力の算定には、通常の強風等を対象とした風力係数を用いた。</p>	<p>4. 施設的设计</p> <p>4.1 概要</p> <p>設置許可段階の安全審査において以下を確認する。</p> <p>①設計荷重（設計竜巻荷重及びその他の組み合わせ荷重）が適切に設定されていること。</p> <p>ただし、設置許可段階においては、その基本的な種類や値等が適切に設定されていることを確認する。（設計対象施設の各部位に作用させる設計荷重の詳細は、詳細設計段階において確認する）</p> <p>②設計荷重に対して、設計対象施設の構造健全性等が維持されて安全機能が維持される方針であること。</p> <p>4.2 設計対象施設</p> <p>「2.1 設計対象施設」に示したとおりとする。</p> <p>4.3 設計荷重の設定</p> <p>4.3.1 設計竜巻荷重の設定</p> <p>「2.2.2 設計対象施設に作用する荷重」の「(1) 設計竜巻荷重」で示した「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、それぞれ技術的見地等から妥当な荷重を設定する。</p> <p>解説4.3.1 設計竜巻荷重の設定 解説4.3.1.1 設計竜巻の最大風速による風圧力の設定 解説4.3.1.1.1 概要 設計竜巻の最大風速(V_b)等に基づいて、設計竜巻によって設計対象施設に作用する風圧力を設定する。</p> <p>解説4.3.1.1.2 基本的な考え方 (1) 風圧力の算定に用いる風力係数 竜巻によって生じた被害状況と対応する最大風速は、一般的には、竜巻等の非定常な流れ場の気流性状を考慮した風力係数を用いるのではなく、いわゆる通常の強風等を対象とした風力係数を用いて、波算により推定されることから、本ガイドにおける風圧力の算定には、通常の強風等を対象とした風力係数を用いることを基本とする。</p>

(2) 設計竜巻による鉛直方向の風圧力
竜巻による最大風速は、一般的には、竜巻によって生じた被害状況と対応する水平方向の風速として算定される。しかしながら、実際の竜巻によって生じた被害は、少なからず鉛直方向の風速の影響も受けていると考えられる。
よって、本ガイドでは、設計竜巻の水平方向の最大風速(V₀)には、鉛直方向の風速の影響も基本的には含まれているとみなす。
ただし、鉛直方向の風圧力に対して特に脆弱と考えられる設計対象施設が存在する場合は、V₀を入力値とした竜巻の数値解析結果等から推定される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を考慮した設計を行う。

解説4.3.1.1.3 設計竜巻による風圧力の設定

設計竜巻の最大風速(V₀)による風圧力(P₀)の算定について以下に示す。

設計竜巻の水平方向の最大風速によって設計対象施設(屋根を含む)に作用する風圧力(P₀)は、「建築基準法施行令」、「日本建築学会 建築物荷重指針・同解説(2004)」等を準用して、下式により算定する。

なお、(4.2)式のV₀は最大瞬間風速であり、「建築基準法施行令」、「日本建築学会 建築物荷重指針・同解説(2004)」の最大風速と定義が異なることに留意する。

$$P_0 = q \cdot G \cdot C \cdot A \quad \dots (4.1)$$

ここで、q は設計用速度圧、G はガスト影響係数、C は風力係数、A は施設の受圧面積を表し、q は下式による。

$$q = (1/2) \cdot \rho \cdot V_0^2 \quad \dots (4.2)$$

ここで、ρ は空気密度、V₀ は設計竜巻の最大風速である。

(4.1)式に示すように、風圧力(P₀)は、(4.2)式で求められる設計用速度圧(q)に、ガスト影響係数(G)、風力係数(C)及び施設の受圧面積(A)を乗じて算定する。
ガスト影響係数Gは、風の乱れによる建築物の風方向振動の荷重効果を表すパラメータであり、強風中における建築物の最大変位と平均変位の比で定義される。本ガイドの最大竜巻風速(V₀)は、最大瞬間風速として扱うことからG=1.0を基本とする。
風力係数(C)は、「建築基準法施行令」、「日本建築学会 建築物荷重指針・同解説(2004)」等を参考として、施設の形状や風圧力が作用する部位(屋根、壁等)に応じて適切に設定する。

(2) 設計竜巻による鉛直方向の風圧力
本評価では、設計竜巻の水平方向の最大風速(V₀)には、鉛直方向の風速の影響も基本的には含まれているとみなした。

解説4.3.1.1.3 設計竜巻による風圧力の設定

設計竜巻の最大風速(V₀)による風圧力(P₀)の算定について以下に示す。

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(P₀)は、「建築基準法施行令」、「日本建築学会 建築物荷重指針・同解説(2004)」等を準用して、下式により算定した。

$$P_0 = q \cdot G \cdot C \cdot A \quad \dots (4.1)$$

ここで、q は設計用速度圧、G はガスト影響係数(1.0)、C は風力係数、A は施設の受圧面積を表し、q は下式による。

$$q = (1/2) \cdot \rho \cdot V_0^2 \quad \dots (4.2)$$

ここで、ρ は空気密度、V₀ は設計竜巻の最大風速である。

泊発電所3号機竜巻影響評価結果	原子力発電所の竜巻影響評価ガイド
<p>解説 4. 3. 1. 2 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</p> <p>解説 4. 3. 1. 2. 1 概要 前記において設定した設計竜巻による最大気圧低下量 (ΔP_{max}) 及び最大気圧低下率 (dP/dt)_{max} に基づいて評価対象施設に作用する気圧差による圧力を設定した。</p> <p>解説 4. 3. 1. 2. 2 基本的な考え方 設計竜巻によって引き起こされる最大気圧低下量によって評価対象施設に作用する圧力を算定する際には、閉じた施設を想定した。</p> <p>解説 4. 3. 1. 2. 3 気圧差による圧力を作用させる施設の設定 気圧差による圧力を作用させる対象は、泊発電所の図面等を参照して十分に検討した上で設定した。</p> <p>(1) 建屋・構築物等 建屋・構築物等の主要な部材 (壁、屋根等)、開口部及び外気と隔離されているとみなせる区画の隔壁について、圧力の影響について検討を行い、当該施設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った。</p> <p>(2) 設備 気圧差による圧力の影響を受けることが想定される以下の設備について、気圧差による圧力の影響を評価し、安全機能維持に影響を与えないことを確認した。 ・外気と隔離されているとみなせる区画の境界部 (空調系ダクト類等) ・圧力差の影響を受け得る計器類</p>	<p>解説 4. 3. 1. 2 設計竜巻における気圧低下によって生じる設計対象施設内外の気圧差による圧力の設定</p> <p>解説 4. 3. 1. 2. 1 概要 前記において設定した設計竜巻による最大気圧低下量 (ΔP_{max}) 及び最大気圧低下率 (dP/dt)_{max} に基づいて設計対象施設に作用する気圧差による圧力を設定する。</p> <p>解説 4. 3. 1. 2. 2 基本的な考え方 設計竜巻によって引き起こされる最大気圧低下量及び最大気圧低下率によって設計対象施設に作用する圧力を算定する際の基本的な考え方を以下に示す。なお、以下の考え方は、米国NRC 基準類 (8.12) を参考としている。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・完全に開かれた構築物等の施設が竜巻に曝されたとき、施設の内圧と外圧は竜巻通過中に急速に等しくなる。したがって、施設内外の気圧の変化はゼロに近づくこととみなせる。 ・閉じた施設 (通気がない施設) では、施設内部の圧力は竜巻通過以前と以後で等しいとみなせる。他方、施設の外側の圧力は竜巻の通過中に変化し、施設内外に圧力差を生じさせる。この圧力差により、閉じた施設の隔壁 (構築物等の屋根・壁及びタンクの頂部・胴部等) に外向きに作用する圧力が生じるとみなせる。 ・部分的に閉じた施設 (通気がある施設等) については、竜巻通過中の気圧変化により施設に作用する圧力は複雑な過程により決定される。また、部分的に閉じた設計対象施設への圧力値・分布の精緻な設定が困難な場合は、施設の構造健全性を評価する上で厳しくなるように作用する圧力を設定することとする。 <p>解説 4. 3. 1. 2. 3 気圧差による圧力を作用させる施設の設定 気圧差による圧力を作用させる対象は、原子力発電所の図面等を参照して十分に検討した上で設定する。</p> <p>(1) 建屋・構築物等 建屋・構築物等の主要な部材 (壁、屋根等) に気圧差による圧力を作用させることは当然であるが、気圧差による圧力の影響を受けることが容易に想定される以下の施設については、気圧差による圧力の影響について検討を行い、当該施設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こととする。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・建屋・構築物等の開口部に設置された窓、扉、シャッター等 ・外気と隔離されているとみなせる区画の隔壁等 (天井等) <p>(2) 設備 設備の主要な部材に気圧差による圧力を作用させることは当然であるが、気圧差による圧力の影響を受けることが容易に想定される以下の設備については、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こととする。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・外気と隔離されているとみなせる区画の境界部 (空調系ダクト類等) ・圧力差の影響を受け得る計器類や空調装置等

解説4.3.1.3 設計竜巻による飛来物が設計対象施設に衝突する際の衝撃荷重の設定

解説4.3.1.3.1 概要

設計竜巻の最大風速 (V_0) 及び特性値等に基づいて、設計飛来物を選定あるいは設定し、それら設計飛来物の飛来速度を設定する。そして、設計飛来物が設定した飛来速度で設計対象施設に衝突することを想定して、飛来物の衝突による設計対象施設への衝撃荷重を設定する。

解説4.3.1.3.2 基本的な考え方

竜巻等の突風による被害は、風圧力によって引き起こされるだけでなく、飛来物による被害もかなり部分占める。また、竜巻による飛来物は上昇気流の影響もあって比較的遠方まで運ばれる可能性がある。これらの事項に留意して、設計対象施設に到達する可能性のある飛来物について検討を行った上で、設計飛来物を選定あるいは設定する。

一般的には、遠方からの飛来物は相対的に重量が軽いものが多く、仮に衝突した場合でも衝撃荷重は相対的に小さいと考えられることから、設計対象施設に到達する可能性のある飛来物を検討する範囲は、原子力発電所の敷地内を原則とする。ただし、原子力発電所の敷地外からの飛来物による衝撃荷重が、原子力発電所の敷地内からの飛来物による衝撃荷重を上回ると想定される場合は、原子力発電所の敷地外からの飛来物も考慮する。

また、設計飛来物として、最低限以下の①～③を選定あるいは設定することとする。なお、以下の①～③の設定にあたっては、米国NRCの基準類(※10)を参考とした。

- ① 大きな運動エネルギーをもつ飛来物 (自動車等)
- ② 施設の貫入抵抗を確保するための固い飛来物 (鉄骨部材等)
- ③ 開口部等を通過することができず程度に小さくて固い飛来物 (砂利等)

解説4.3.1.3.3 設計飛来物の速度の設定

(1) 基本的な考え方

設計飛来物に設定する速度は、設計竜巻によって飛来した際の最大速度とする。設計飛来物の最大水平速度 (V_{hmax}) は、非定常な乱流場を数値的に解析できる計算手法等による計算結果等に基づいて設定することを基本とする。ただし、安全側の設計になるように、設計竜巻の最大風速 (V_0) を設計飛来物の最大水平速度として設定してもよい。

解説4.3.1.3 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

解説4.3.1.3.1 概要

設計竜巻の最大風速 (V_0) 及び特性値等に基づいて、設計飛来物を設定し、それら設計飛来物の飛来速度を設定した。そして、設計飛来物が設定した飛来速度で評価対象施設に衝突することを想定して、飛来物の衝突による評価対象施設への衝撃荷重を設定した。

解説4.3.1.3.2 基本的な考え方

評価対象施設に到達する可能性のある飛来物について検討を行った上で、設計飛来物を設定した。

評価対象施設に到達する可能性のある飛来物を検討する範囲は、泊発電所の敷地内とした。

解説4.3.1.3.3 設計飛来物の速度の設定

(1) 基本的な考え方

(2) 設計飛来物の設定例

設計飛来物は、泊発電所における現地調査等に基づき、表4.1のとおり設定した。設計飛来物の最大速度は、解説表4.1の最大速度とした。ただし、鋼製材の最大速度については、「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)における改正前の値とした。

原子力発電所の竜巻影響評価ガイド

泊発電所3号機竜巻影響評価結果

設計飛来物の最大鉛直速度 (w_{Vmax}) は、最大水平速度と同様に計算等により求めても良いし、米
 国NRCの基準類(※1)を参考に設定した下式により算定してもよい。

$$w_{Vmax} = (2/3) \cdot w_{Hmax} \dots (4.3)$$

ここで、 w_{Hmax} は、設計飛来物の最大水平速度を表す。

(2) 設計飛来物の設定例

設計飛来物の選定あるいは設定、並びに設計飛来物の最大速度を設定する際の参考として、解説
 表4.1に飛来物及びその最大速度の設定例を示す。解説表4.1の棒状物、板状物及び塊状物の最大
 水平速度 (w_{Hmax}) は、設計竜巻の最大風速 ($V_D=100$ (m/s)) とした条件下で解析的に算定した結果(※3)で
 ある。また、解説表4.1の最大鉛直速度 (w_{Vmax}) は、米NRCの基準類(※4)を参考として設定した
 (4.3)式を用いて算定した結果である。

なお、解説表4.1に示した飛来物よりも小さな開口部を飛来物が通過することの影響等を確認す
 る場合は、さらに小さな飛来物を設定する必要がある。

表 4.1 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

解説表4.1 飛来物及び最大速度の設定例 ($V_D=100$ (m/s) の場合)

飛来物の種類	棒状物		塊状物	
	鋼製パイプ	鋼製材	コンクリート板	トラック
サイズ (m)	長さ×直径 2×0.05	長さ×幅×奥行 4.2×0.3×0.2	長さ×幅×厚さ 1.5×1×0.15	長さ×幅×奥行 5×1.9×1.3
質量 (kg)	8.4	135	540	4750
最大水平速度 (w_{Hmax}) (m/s)	49	51	30	34
最大鉛直速度 (w_{Vmax}) (m/s)	33	34	20	23

解説4.3.1.3.4 設計飛来物の衝突方向、衝突範囲及び衝撃荷重の設定
 設計飛来物が設計対象施設に衝突する方向は、安全側の設計になるように設定する。設計飛来物が到達する範囲について解析結果等から想定される場合は、その技術的根拠を示した上で設計飛来物が到達しない範囲を設定することができる。

各設計飛来物による衝撃荷重は、設計飛来物の形状及び剛性等の機械的特性を適切に設定した衝撃解析等の計算結果に基づいて設定するか、あるいは、安全側の設計となるように配慮して設計飛来物を剛体と仮定して設定してもよい。

解説4.3.1.4 設計竜巻荷重の組み合わせ

設計対象施設の設計に用いる設計竜巻荷重は、設計竜巻による風圧力による荷重(W_w)、気圧差による荷重(W_p)、及び設計飛来物による衝撃荷重(W_M)を組み合わせた複合荷重とし、複合荷重 W_{T1} 及び W_{T2} は、米NRCの基準類(§10)を参考として設定した下式により算定する。

$$W_{T1} = W_p \dots (4.4)$$

$$W_{T2} = W_w + 0.5 \cdot W_p + W_M \dots (4.5)$$

ここで、(4.4)式及び(4.5)式の各変数は下記のとおり。

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

4.3.2 設計竜巻荷重と組み合わせる荷重の設定

「2.2.2 設計対象施設に作用する荷重」の「(2) 設計竜巻荷重と組み合わせる荷重」に示した各荷重について、それぞれ技術的見地等から妥当な荷重として設定し、設計竜巻荷重と組み合わせる。

解説4.3.1.3.4 設計飛来物の衝突方向、衝突範囲及び衝撃荷重の設定
 設計飛来物が評価対象施設に衝突する方向は、安全側の評価になるように設定した。設計飛来物の評価においては、設計飛来物を剛体と仮定した。

解説4.3.1.4 設計竜巻荷重の組み合わせ

評価対象施設の設計に用いる設計竜巻荷重は、設計竜巻による風圧力による荷重(W_w)、気圧差による荷重(W_p)、及び設計飛来物による衝撃荷重(W_M)を組み合わせた複合荷重とし、複合荷重 W_{T1} 及び W_{T2} は、下式により算定した。

$$W_{T1} = W_p \dots (4.4)$$

$$W_{T2} = W_w + 0.5 \cdot W_p + W_M \dots (4.5)$$

ここで、(4.4)式及び(4.5)式の各変数は下記のとおり。

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た。

4.3.2 設計竜巻荷重と組み合わせる荷重の設定

評価ガイドに基づき、「2.2.2 評価対象施設に作用する荷重」の「(2) 設計竜巻荷重と組み合わせる荷重」に示した各荷重について、それぞれ技術的見地等から妥当な荷重として設定し、設計竜巻荷重と組み合わせる。

泊発電所3号機竜巻影響評価結果	原子力発電所の竜巻影響評価ガイド
<p>4.4 施設の構造健全性の確認</p> <p>4.4.1 概要</p> <p>評価ガイドに基づき、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が維持されて安全機能が維持されることを確認する。</p> <p>4.4.2 建屋、構築物等の構造健全性の確認</p> <p>評価ガイドに基づき、設計荷重に対して、建屋・構築物等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。</p> <p>(1) 設計荷重によって施設に生じる変形・応力等の算定 建屋・構築物等の形状や特徴等を反映して設定した設計荷重によって評価対象施設に生じる変形や応力等を、その技術的な妥当性を確認した上で、現行の法律及び基準類等に準拠して算定した。</p> <p>(2) 構造健全性の確認</p> <p>「(1) 設計荷重によって施設に生じる変形・応力等の算定」で算定される変形・応力等に基づいて、評価対象施設（建屋・構築物等）が以下の構造健全性評価基準を満足することを確認した。</p> <p>① 竜巻防護施設の外殻となる施設 評価対象施設が終局耐力等の許容限界に対して十分な安全余裕を有している。</p> <p>② 竜巻防護施設に波及的影響を及ぼし得る施設</p> <p>1) 評価対象施設あるいはその特定の区画が、終局耐力等の許容限界に対して十分な安全余裕を有している。</p> <p>2) 設計飛来物が評価対象施設あるいはその特定の区画に衝突した際に、竜巻防護施設の安全機能の維持に影響を与えない。</p>	<p>4.4 施設の構造健全性の確認</p> <p>4.4.1 概要</p> <p>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、設計対象施設、あるいはその特定の区画^(注4.1)の構造健全性が維持される方針であることを確認する。</p> <p>4.4.2 建屋、構築物等の構造健全性の確認</p> <p>設計荷重に対して、建屋・構築物等の構造健全性が維持されて安全機能が維持される方針であることを確認する。</p> <p>(1) 設計荷重によって施設に生じる変形・応力等の算定 建屋・構築物等の形状や特徴等を反映して設定した設計荷重によって設計対象施設に生じる変形や応力等を算定する方針である。設計対象施設に生じる変形や応力等は、その技術的な妥当性を確認した上で、原則として、現行の法律及び基準類^(注4.2)等に準拠して算定する。</p> <p>(2) 構造健全性の確認</p> <p>「(1) 設計荷重によって施設に生じる変形・応力等の算定」で算定される変形・応力等に基づいて、設計対象施設（建屋・構築物等）が以下の構造健全性評価基準を満足する方針であることを確認する。</p> <p>① 竜巻防護施設（外殻となる施設等）による防護機能が確認された竜巻防護施設を除く）設計対象施設が終局耐力等の許容限界^(注4.2)に対して十分な安全余裕を有している。</p> <p>② 竜巻防護施設に波及的影響を及ぼし得る施設</p> <p>1) 設計対象施設あるいはその特定の区画^(注4.3)が、終局耐力等の許容限界^(注4.2)に対して十分な安全余裕を有している。</p> <p>2) 設計飛来物が設計対象施設あるいはその特定の区画^(注4.3)に衝突した際に、竜巻防護施設の安全機能の維持に影響を与えない。^(注4.4)</p> <p>(注4.1) 竜巻防護施設を内包する区画。 (注4.2) 建築基準法、日本産業規格、日本建築学会及び土木学会等の規程・指針類、並びに日本電気協会の原子力発電所耐震設計技術指針（JEAG4601-1987）等に準拠する。 (注4.3) 竜巻防護施設を内包する区画。 (注4.4) 貫通及び裏面剥離（コンクリート等の部材に衝突物が衝突した際に、衝突面の裏側でせん断破壊等に起因した剥離が生じる破壊現象）に対して、施設の構造健全性を確認することを基本とする。</p>

泊発電所3号機竜巻影響評価結果	原子力発電所の竜巻影響評価ガイド
<p>4.4.3 設備の構造健全性の確認 評価ガイドに基づき、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ていることを確認する。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ていることを確認する。</p> <p>(1) 竜巻防護施設 設計荷重によって評価対象施設に生じる応力を算定し、許容値に対して安全余裕を有していることを確認した。</p> <p>設計飛来物による影響を評価し、安全機能を喪失する可能性のある設備については、設備による竜巻防護対策（以下、「飛来物防護対策」という。）または運用による竜巻防護対策を実施する。評価結果は以下のとおり。</p> <p>また、発電所構内の屋外に保管されている資機材等については、固縛する等の飛来物発生防止対策を実施する</p> <p>①原子炉補機冷却海水ポンプ 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安全機能を喪失する可能性があることから、飛来物防護対策として、当該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）を設置し、飛来物から防護する。</p> <p>②排気筒（建屋外） 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、竜巻を起因として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。</p> <p>また、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、放射線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。</p> <p>③蓄熱室加熱器 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安全機能を喪失する可能性があることから、飛来物防護対策として、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壁面開口部（当該加熱器背面空気口）前面に防護鋼板を設置し、飛来物から防護する。</p> <p>④原子炉補機冷却海水出口ストレーナ 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安全機能を喪失する可能性があることから、飛来物防護対策として、当該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）を設置し、飛来物から防護する。</p> <p>⑤配管および弁（原子炉補機冷却海水系統） 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安全機能を喪失する可能性があることから、飛来物防護対策として、当該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</p>	<p>4.4.3 設備の構造健全性の確認 設計荷重に対して、設備（系統・機器）の構造健全性が維持されて安全機能が維持される方針であることを確認する。</p> <p>(1) 設計荷重によって施設に生じる変形・応力等の算定 設備の形状や特徴等を反映して設定した設計荷重によって設計対象施設に生じる変形や応力等を算定する方針である。設計対象施設に生じる変形や応力等は、その技術的な妥当性を確認した上で、原則として、現行の法律及び基準類^(注4.5)等に準拠して算定する。</p> <p>(2) 構造健全性の確認 「(1) 設計荷重によって施設に生じる変形・応力等の算定」で算定される変形・応力等に基づいて、設計対象施設（設備）が以下の構造健全性評価基準を満足する方針であることを確認する。</p> <p>① 竜巻防護施設（外殻となる施設等による防護機能が確認された竜巻防護施設を除く） 設計対象施設が許容応力度等に基づく許容限界^(注4.5)に対して妥当な安全余裕を有している。</p> <p>② 竜巻防護施設に波及的影響を及ぼし得る施設 1) 設計対象施設あるいはその特定の区画^(注4.6)が、許容応力度等に基づく許容限界^(注4.5)に対して妥当な安全余裕を有している。 2) 設計飛来物が設計対象施設あるいはその特定の区画^(注4.6)に衝突した際に、竜巻防護施設の安全機能の維持に影響を与えない。^(注4.7)</p> <p>(注4.2) 日本産業規格、日本電気協会の原子力発電所耐震設計技術指針（JEG4601-1987）及び日本機械学会の規格・指針等に準拠する。</p> <p>(注4.6) 竜巻防護施設を内包する区画。 (注4.7) 貫通及び裏面剥離（コンクリート等の部材に衝突した際に、衝突面の裏側でせん断破壊等に起因した剥離が生じる破壊現象）に対して、施設の構造健全性を確認することを基本とする。</p>

室の上部開口部に防護ネット（金網）を設置し、飛来物から防護する。

⑥原子炉補機冷却水サージタンク他

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安全機能を喪失する可能性があることから、飛来物防護対策として、当該設備が設置されている原子炉建屋（T.P.43.6m）の壁面開口部（扉）前面（建屋内）に防護壁を設置し、飛来物から防護する。

⑦配管および弁（主蒸気管室内）

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安全機能を喪失する可能性があることから、飛来物防護対策として、当該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）前面（原子炉建屋外壁）および壁面開口部（上部換気口：3箇所）前面（原子炉建屋外壁）に防護鋼板を設置し、飛来物から防護する。

⑧制御用空気系統配管

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安全機能を喪失する可能性があることから、飛来物防護対策として、原子炉補助建屋（T.P.33.1m）の当該設備設置場所前面に防護壁を設置し、飛来物から防護する。

⑨使用済燃料ピット

当該設備に設計飛来物が衝突した場合、コンクリート躯体は貫通しないが、内面のライニングは損傷するものの、保有水の有意な消失は生じず、当該設備の冷却およ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。

⑩使用済燃料ラック

当該設備に設計飛来物が衝突した場合、当該設備に貯蔵される燃料集合体の健全性が維持されることおよび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した。

⑪新燃料ラック

当該設備に設計飛来物が衝突した場合、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したが、鋼製パイプが燃料集合体に直接衝突した場合は燃料被覆管の健全性を損なう恐れがあることから、飛来物防護対策として当該ラック内上部に防護鋼板を設置し飛来物から防護する。

⑫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。

⑬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。

(2) 竜巻防護施設に波及的影響を及ぼし得る施設
設計荷重によって評価対象施設に生じる応力を算定し、許容値に対して安全余裕を有していることを確認した。
また、設計飛来物による影響を評価し、竜巻防護施設の安全機能に影響を与えないことを確認した。評価結果は以下のとおり。

①ディーゼル発電機排気消音器

当該設備に設計飛来物が衝突した場合、貫通する等の損傷により、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、補修を実施する。
なお、砂等の粒子状の飛来物に対しては、閉塞することではなく、竜巻防護施設の安全機能に影響を与えないことを確認した。

②主蒸気逃がし弁消音器

当該設備に設計飛来物が衝突した場合、貫通する等の損傷により、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、補修を実施する。
なお、砂等の粒子状の飛来物に対しては、閉塞することではなく、竜巻防護施設の安全機能に影響を与えないことを確認した。

③主蒸気安全弁排気管

当該設備に設計飛来物が衝突した場合、貫通する等の損傷により、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、補修を実施する。
なお、砂等の粒子状の飛来物に対しては、閉塞することではなく、竜巻防護施設の安全機能に影響を与えないことを確認した。

④タービン動補助給水ポンプ排気管

当該設備に設計飛来物が衝突した場合、貫通する等の損傷により、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、補修を実施する。
なお、砂等の粒子状の飛来物に対しては、閉塞することではなく、竜巻防護施設の安全機能に影響を与えないことを確認した。

⑤ディーゼル発電機燃料油貯槽ベント管

当該設備に設計飛来物が衝突した場合、貫通する等の損傷により、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、補修を実施する。

原子力発電所の竜巻影響評価ガイド	泊発電所3号機竜巻影響評価結果
<p>4.5 その他の確認事項</p> <p>4.4 に示す以外の確認事項については、原子力発電所の図面等を参照して十分に検討した上で設定する。例えば、中央制御室等の重要な区画等や非常用発電機等の重要な設備等に繋がる給排気ダクト類へ作用する風圧力が安全機能維持に与える影響等、安全機能維持の観点から重要と考えられる確認事項を設定する。そして、それぞれの項目について検討を行い、安全機能が維持される方針であることを確認する。</p>	<p>なお、砂等の粒子状の飛来物に対しては、閉塞することはなく、竜巻防護施設の安全機能に影響を与えないことを確認した。</p> <p>4.5 その他の確認事項</p> <p>評価ガイドに基づき、4.4 に示す以外の確認事項として、非常用ディーゼル発電機の吸排気口へ作用する気圧差による運転への影響について確認し、安全機能が維持されることを確認した。</p>

原子力発電所の竜巻影響評価ガイド	泊発電所3号機竜巻影響評価結果
<p>5. 竜巻随伴事象に対する考慮</p> <p>5.1 概要</p> <p>竜巻随伴事象に対して、竜巻防護施設の安全機能が維持される方針であることを確認する。</p> <p>5.2 基本的な考え方及び検討事項</p> <p>検討対象とする竜巻随伴事象は、原子力発電所の図面等を参照して十分に検討した上で設定する。</p> <p>ただし、竜巻随伴事象として容易に想定される以下の事象については、その発生の可能性について検討を行い、必要に応じてそれら事象が発生した場合においても安全機能が維持される方針であることを確認する。</p> <p>(1) 火災</p> <p>設計竜巻等により燃料タンクや貯蔵所等が倒壊して、重油、軽油及びガソリン等の流出等に起因した火災が発生した場合においても、竜巻防護施設の安全機能の維持に影響を与えない。</p> <p>(2) 溢水等</p> <p>設計竜巻等による気圧低下等に起因した使用済燃料プール等の水の流出、屋外給水タンク等の倒壊による水の流出等が発生した場合においても、竜巻防護施設の安全機能の維持に影響を与えない。</p> <p>(3) 外部電源喪失</p> <p>設計竜巻、設計竜巻と同時発生する雷・雹^氷等、あるいはダウンバースト等により、送電網に関する施設等が損傷する等して外部電源喪失に至った場合においても、竜巻防護施設の安全機能の維持に影響を与えない。</p>	<p>5. 竜巻随伴事象に対する考慮</p> <p>5.1 概要</p> <p>竜巻随伴事象は、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。</p> <p>5.2 基本的な考え方及び検討事項</p> <p>竜巻随伴事象として想定される火災、溢水および外部電源喪失事象が発生した場合においても安全機能が維持されることを確認した。</p> <p>(1) 火災</p> <p>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入る場合でも、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。</p> <p>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。</p> <p>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。</p> <p>(2) 溢水</p> <p>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入る場合でも、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。</p> <p>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、損傷することによって評価荷重が小さくなり当該建屋の構造健全性は維持され、屋根が崩落するようになら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いと、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。</p> <p>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水の溢水に関しては、内部溢水影響評価における屋外タンクの水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。</p> <p>(3) 外部電源喪失</p> <p>設計竜巻と同時に発生する雷、ダウンバースト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おり、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</p>

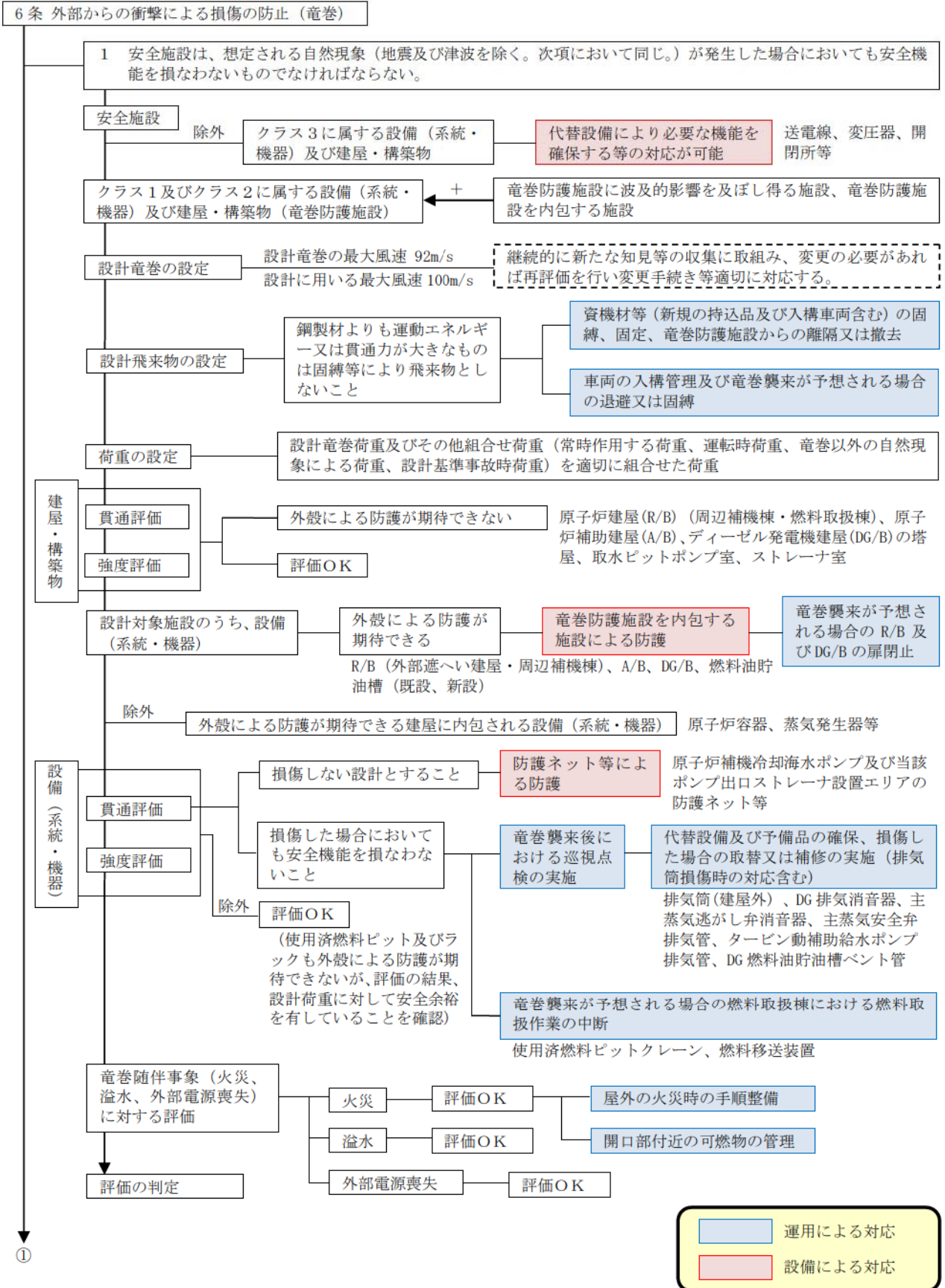
原子力発電所の竜巻影響評価ガイド	泊発電所3号機竜巻影響評価結果
<p>6. 附則</p> <p>この規定は、平成25年7月8日より施行する。 本ガイドに記載されている以外の計算方法等を設計で使用する場合は、技術的見地等からその妥当性を示す必要がある。</p> <p>また、竜巻等の発生頻度、特性及びメカニズム等に関する情報、並びに竜巻等による被害の実情に関する情報等が不足している現在の日本の状況では、竜巻等に係る最新情報の調査・入手に努めるとともに、本ガイドは、最新情報を反映して適宜見直しを行うものとする。</p> <p>なお、将来に観測された竜巻の最大風速が、過去に観測された竜巻の最大風速を上回った場合は、本設計の妥当性について再度見直すこととする。</p>	<p>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。</p> <p>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。</p> <p>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。</p>

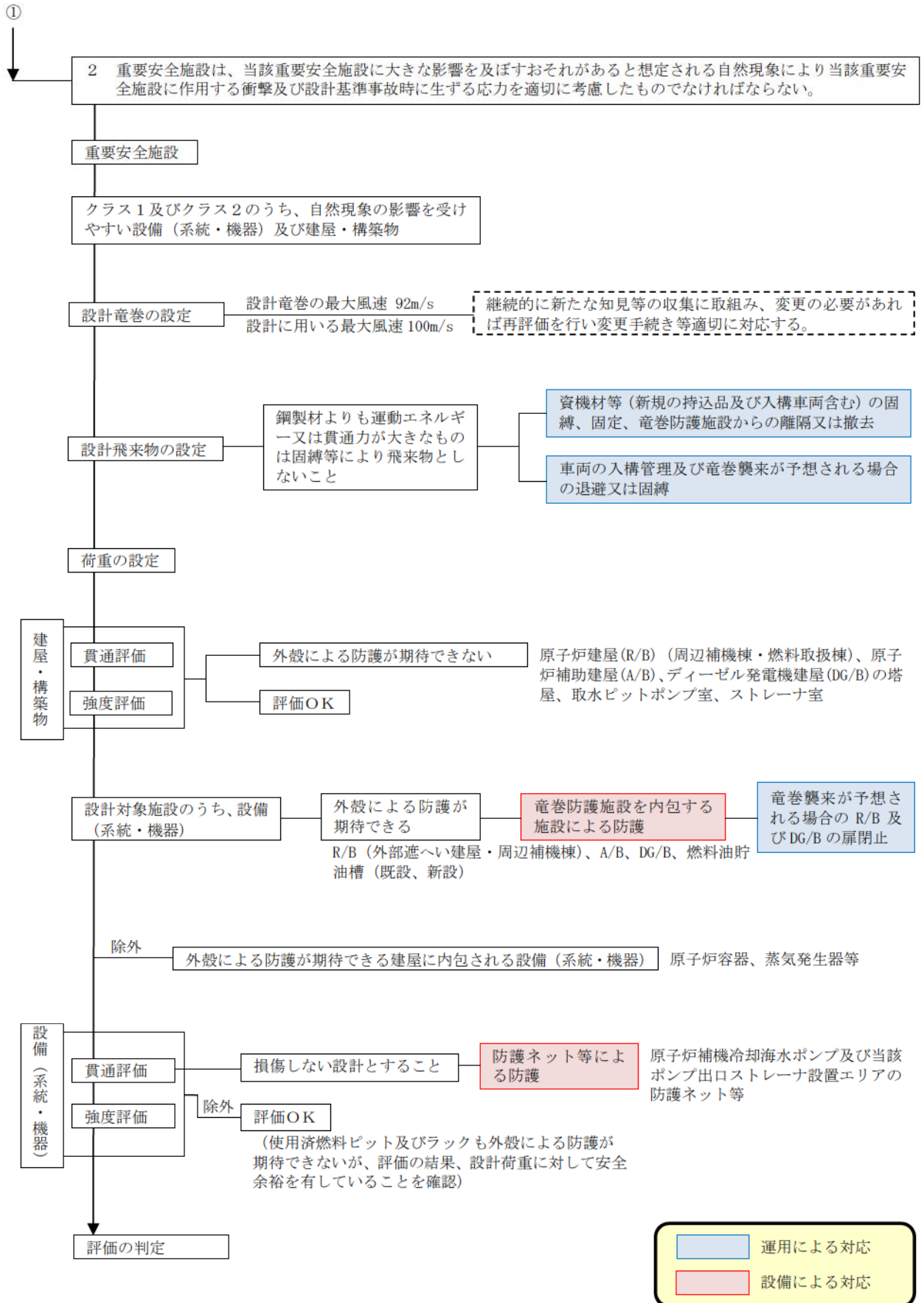
泊発電所 3 号炉

技術的能力説明資料

外部からの衝撃による損傷の防止（竜巻）

6条 外部からの衝撃による損傷の防止（竜巻）





技術的能力に係る運用対策等（設計基準）

【6条 外部からの衝撃による損傷の防止（竜巻）】

対象項目	区分	運用対策等
竜巻防護施設を内包する施設による防護	運用・手順	—
	体制	(通常体制)
	保守・点検	・竜巻防護施設を内包する施設について、定期的に点検することにより適切な保守管理を行う。
	教育・訓練	・保守・点検に関する教育
防護ネット等による防護	運用・手順	・竜巻飛来物防護対策設備（防護ネット等）の取付け・取り外しに関する手順
	体制	(通常体制)
	保守・点検	・竜巻飛来物防護対策設備（防護ネット等）について、定期的に点検することにより適切な保守管理を行う。
	教育・訓練	・運用・手順、保守・点検に関する教育
資機材等（新規の持込品及び入構車両含む）の固縛、固定、竜巻防護施設からの離隔又は撤去	運用・手順	<ul style="list-style-type: none"> ・資機材等（車両含む）の寸法、質量、形状から評価した高さ方向への飛散の有無、飛来時の運動エネルギー及び設置場所等を考慮した飛来物発生防止対策（固縛等の対策）要否評価手順及び評価結果の管理 ・竜巻に関する情報入手及び情報入手後の対応に関する運用・手順（周知、体制判断、竜巻襲来に備えた監視等の対応） ・竜巻襲来が予想される場合の対応に関する運用・手順（竜巻襲来に備えた屋外で使用中の資機材の飛来物発生防止対策の対応）
	体制	(通常体制 [飛来物発生防止対策要否評価、評価結果管理、保守・点検]、トラブル対応体制)
	保守・点検	・固縛状況を定期的に点検することにより適切な保守管理を行う。
	教育・訓練	<ul style="list-style-type: none"> ・運用・手順、保守・点検に関する教育 ・固縛に関する訓練
車両の入構管理及び竜巻襲来が予想される場合の退避又は固縛	運用・手順	<ul style="list-style-type: none"> ・竜巻襲来が予想される場合の車両の退避又は固縛に関する運用・手順（退避ルート、退避場所等） ・車両の入構管理に関する運用・手順（入構車両の制限等） ・竜巻に関する情報入手及び情報入手後の対応に関する運用・手順（周知、体制判断、竜巻襲来に備えた監視等の対応） ・竜巻襲来が予想される場合の対応に関する運用・手順（竜巻襲来に備えた屋外で使用中の資機材の飛来物発生防止対策の対応）
	体制	(通常体制 [車両入構管理]、トラブル対応体制)
	保守・点検	—
	教育・訓練	<ul style="list-style-type: none"> ・運用・手順、保守・点検に関する教育 ・車両の退避及び固縛に関する訓練

対象項目	区分	運用対策等
竜巻襲来が予想される場合のR/B及びDG/Bの扉閉止	運用・手順	<ul style="list-style-type: none"> ・竜巻襲来が予想される場合の原子炉建屋(R/B)及びディーゼル発電機建屋(DG/B)の扉閉止又は閉止状態確認に関する運用・手順 ・竜巻に関する情報入手及び情報入手後の対応に関する運用・手順(周知、体制判断、竜巻襲来に備えた監視等の対応) ・竜巻襲来が予想される場合の対応に関する運用・手順(竜巻襲来に備えた屋外で使用中の資機材の固縛等の対応)
	体制	(通常体制 [保守・点検]、トラブル対応体制)
	保守・点検	・DG/Bの扉について、定期的に点検することにより適切な保守管理を行う。
	教育・訓練	・運用・手順、保守・点検に関する教育
竜巻襲来が予想される場合の燃料取扱棟における燃料取扱作業の中断	運用・手順	<ul style="list-style-type: none"> ・竜巻襲来が予想される場合の燃料取扱棟における燃料取扱作業の中断に関する運用・手順 ・竜巻に関する情報入手及び情報入手後の対応に関する運用・手順(周知、体制判断、竜巻襲来に備えた監視等の対応) ・竜巻襲来が予想される場合の対応に関する運用・手順(竜巻襲来に備えた屋外で使用中の資機材の飛来物発生防止対策の対応)
	体制	(トラブル対応体制)
	保守・点検	—
	教育・訓練	・運用・手順に関する教育
竜巻襲来後における巡視点検の実施	運用・手順	・竜巻襲来後の巡視点検に関する運用・手順
	体制	(通常体制)
	保守・点検	—
	教育・訓練	・運用・手順に関する教育
代替設備及び予備品の確保、損傷した場合の取替又は補修の実施	運用・手順	<ul style="list-style-type: none"> ・必要な予備品、代替設備の管理手順 ・設備が損傷した場合の取替・補修に関する運用、手順
	体制	(通常体制)
	保守・点検	・代替設備について、定期的に点検することにより適切な保守管理を行う。
	教育・訓練	<ul style="list-style-type: none"> ・運用・手順、保守・点検に関する教育 ・設備損傷時の代替設備の使用訓練
排気筒損傷時の対応	運用・手順	・竜巻襲来後の巡視点検にて排気筒の損傷を確認した場合のプラント停止及び補修に関する運用・手順
	体制	(通常体制)
	保守・点検	・排気筒について、定期的に点検することにより適切な保守管理を行う。
	教育・訓練	・運用・手順、保守・点検に関する教育

対象項目	区分	運用対策等
開口部付近の可燃物の管理	運用・手順	・ 開口部付近の持ち込み可燃物の管理
	体制	(通常体制)
	保守・点検	—
	教育・訓練	・ 火災防護に関する教育
屋外の火災時の手順整備	運用・手順	・ 火災発生現場の確認、中央制御室への連絡 ・ 化学消防自動車等を用いた初期消火活動
	体制	(通常体制、初期消火要員)
	保守・点検	・ 化学消防自動車、水槽付き消防ポンプ自動車、消火設備（消火器、消火栓等）、消防用資機材（防火服、空気呼吸器等）について、定期的に点検することにより適切な保守管理を行う。
	教育・訓練	・ 火災防護に関する教育（初期消火活動含む） ・ 初期消火対応要員による総合的な初期消火訓練 ・ 消防訓練

泊発電所3号炉

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

1. はじめに

設置許可基準規則第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、この想定される自然現象の一つとして竜巻が挙げられている。

当該規定を満足することを確認するため、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」を参照して竜巻影響評価を実施し、竜巻防護施設が安全機能を損なわないことを確認している。

当該評価にあたっては、竜巻により発電所敷地内の屋外にある各種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、竜巻防護施設に影響を及ぼす可能性のある物に対して、固縛、固定、竜巻防護施設からの離隔又は撤去等の飛来物発生防止対策を実施することとしていることから、当該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以下に記載する。

2. 現地確認項目及び内容

発電所敷地内の屋外にある各種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は、飛来物となる可能性のある物の中から、飛来物発生防止対策を実施する対象物を選定する必要がある。

具体的には下記(1)～(4)のプロセス（添付資料1参照）により、飛来物発生防止対策を実施する対象物を選定することとし、選定にあたっては、現地において飛来物となる可能性のある物の調査を行った。

(1) 飛来物となる可能性のある物の評価

飛来物となる可能性のある物について、寸法、質量、形状から、高さ方向への飛散の有無、飛来時の運動エネルギー及び貫通力を評価する。

(2) 車両飛散防止対策範囲の設定

高さ方向へ飛散する車両の最長の飛散距離を算出して車両飛散防止対策範囲を設定する。

(3) 横滑り防止対策範囲の設定

空力パラメータが0.0028の時の移動距離（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）を算出して横滑り防止対策範囲を設定する。

(4) 飛来物発生防止対策要否の評価

a. 高さ方向へ飛散する物

(a) 上記(1)から算出した運動エネルギー又は貫通力が設計飛来物である鋼製材又は鋼製

パイプ※より大きい物は飛来物発生防止対策を実施する。

- (b) 運動エネルギー及び貫通力が鋼製材又は鋼製パイプ※より小さい物についても、竜巻防護施設への影響を軽減する観点から、適切に飛来物発生防止対策を実施する。
- (c) 上記(a)で飛来物発生防止対策を実施する物のうち、上記(3)で設定した範囲にある物については、横滑り防止も考慮する。
- (d) 上記(2)で設定した範囲外にある車両については、飛来物発生防止対策は不要とする。また、停車車両については、竜巻襲来が予測される場合は上記(2)で設定した範囲外に退避する運用とする。

※:使用済燃料ラック及び新燃料ラック内に侵入する可能性のある物(衝突面の最小寸法が0.228m×0.228m以下)の場合は鋼製パイプと比較する。

b. 高さ方向へ飛散しないが横滑りする物

上記(3)で設定した範囲にある場合は、横滑りを防止する観点から、飛来物発生防止対策を実施する。

<現地調査>

発電所敷地内の屋外にある各種資機材等を調査し、地盤・建物に固定されていない物及び固定されているが竜巻によって飛散が考えられる物を対象として、飛来物となる可能性のある物を抽出した。

抽出した飛来物となる可能性のある物について、上記(1)～(4)に従って飛来物発生防止対策の要否を評価した。

3. 記録の取り扱い

発電所敷地内の屋外にある飛来物となる可能性のある物について、高さ方向への飛散の有無、飛来時の運動エネルギー、貫通力等をまとめた「飛来物管理表」(添付資料2参照)を作成する(当該管理表に従って、飛来物発生防止対策を実施する対象物については、固縛、固定、竜巻防護施設からの離隔又は撤去等を実施する)。

4. 今後の対応

(1) 「飛来物管理表」による物品管理

今後、発電所敷地内に新たに持ち込まれる物品、新規に入構する車両等については、2.(1)～(4)のプロセスに基づいて評価し、管理を行う予定としている。

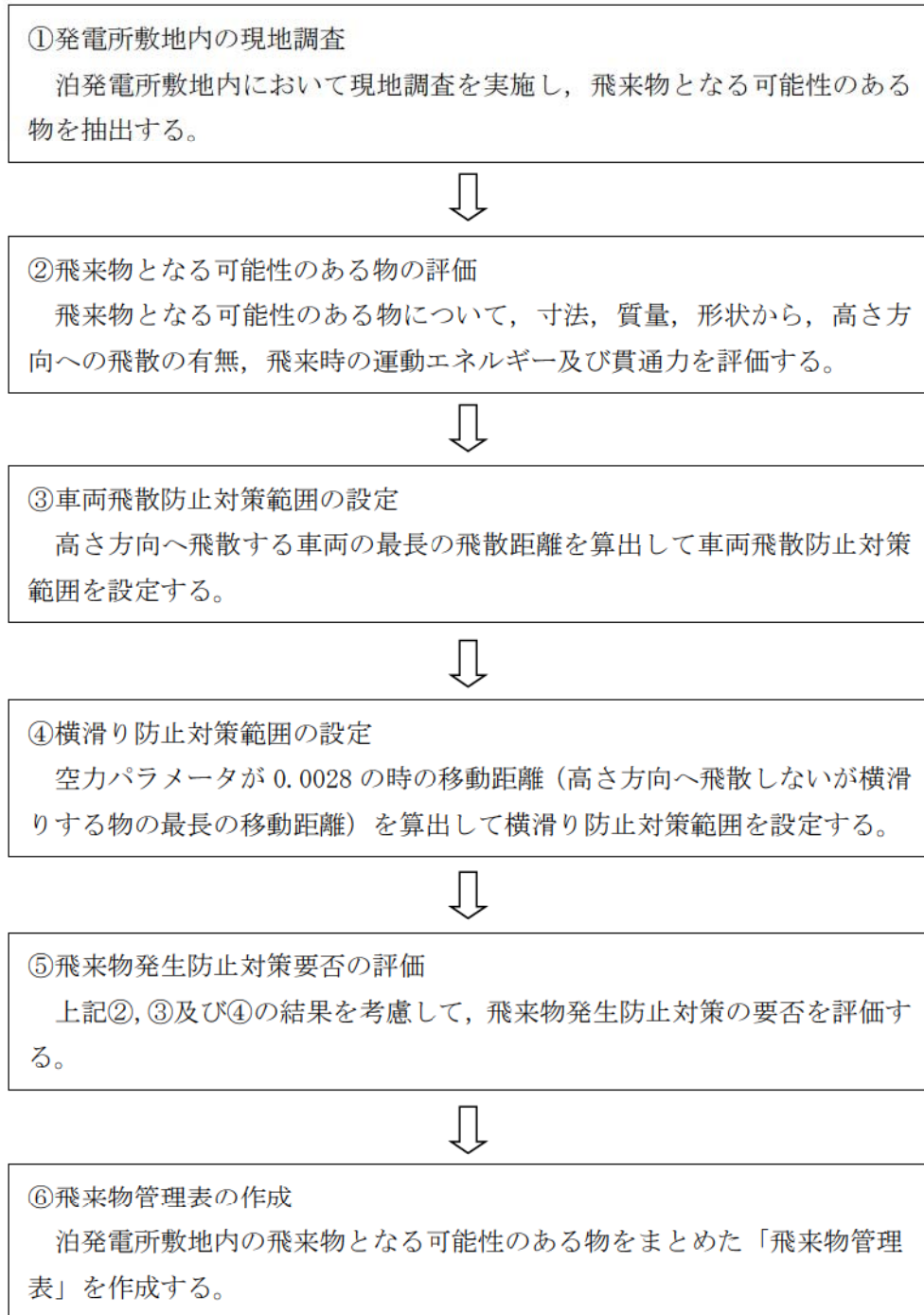
(2) 車両飛散防止対策範囲の管理

今後、新たに車両が入構する等により、車両飛散防止対策範囲が変更となる場合には、

2. (2), (4)のプロセスに基づいて飛来物発生防止対策の可否を再評価する。

(3) 横滑り防止対策範囲の管理

今後、竜巻防護施設が追加されること等により、横滑り防止対策範囲が変更となる場合には、2. (3), (4)のプロセスに基づいて飛来物発生防止対策の可否を再評価する。



注 1) 新たに持ち込まれる物品等については、上記②以降のプロセスを実施する。

注 2) 車両飛散防止対策範囲が変更となる場合には、上記③及び⑤以降のプロセスを実施する（再評価）。

注 3) 横滑り対策範囲が変更となる場合には、上記④以降のプロセスを実施する（再評価）。

図-1 飛来物発生防止対策を実施する対象物の選定プロセス

表-1 飛来物管理表

No.	品名	保管又は設置場所	長さ (m)	幅 (m)	高さ (m)	質量 (kg)	空力パラメータ (m ² /kg)	最大水平速度 ^{※1} (m/s)	衝突した場合に影響を与えないと判断されるものか ^{※1}	運動エネルギー (kJ)	貫通力 (mm)	横滑り影響回避対策			飛散影響回避対策			備考
												対策範囲 ^{※3} にあるか	実施 ^{※2}	固縛等の対策 ^{※3} の実施 ^{※2}	高さ方向へ飛散する ^{※4}	車両か	車両飛散防止対策範囲 ^{※5} にあるか	
1	自転車	総合事務所周辺 (10m盤)	1.90	1.10	0.60	25	0.0837	-	○	125	3	○	○	×	-	×	×	×
2	照明	3号機背面 (31m盤)	0.50	0.50	0.46	6	0.0781	-	○	30	2	○	○	×	-	×	×	×
3	スピーカー	緊急時対策所および5号倉庫周辺	0.60	0.60	0.60	4	0.1782	-	○	20	1	×	×	×	-	×	×	×
4	コーン	保修事務所周辺 (10m盤)	0.47	0.84	1.10	39	0.0311	-	×	-	-	-	-	-	-	-	-	-
5	アンテナ	1, 2号機背面 (31m盤)	1.00	1.00	1.50	7	0.3771	-	○	35	1	×	×	×	-	×	×	×
6	バリケード	1, 2号機海側 (10m盤)	0.45	1.20	0.45	30	0.0282	-	○	150	5	○	○	×	-	×	×	×
7	アーケード屋根	茶津守衛所周辺	2.91	2.40	0.0008	20	0.2306	-	×	-	-	-	-	-	-	-	-	-
8	柵	3号機背面 (31m盤)	2.33	0.50	0.004	38.8	0.0199	63	○	77	29	○	○	×	-	×	×	×
9	鋼製かご	防潮堤外正面 (10m盤)	0.64	1.84	1.20	150	0.0183	62	○	83	4	○	○	×	-	×	○	○
10	ドラム缶	風力跡地周辺	0.60	0.60	0.90	245	0.0039	4	○	23	5	×	×	×	-	×	×	○
11	コンクリート板	51m~展望台道路	1.34	0.67	0.10	210	0.0032	9	○	186	9	×	×	×	-	×	×	×
12	コンクリートブロック	1, 2号機背面 (31m盤)	0.25	1.00	0.22	55	0.0063	49	○	67	5	×	×	×	-	×	×	×
13	発電機	1, 2号機背面 (31m盤)	0.98	2.09	1.55	1690	0.0027	41	○	1421	8	×	×	×	-	×	○	○
14	コンテナ	保修事務所周辺 (10m盤)	2.44	12.20	2.60	5500	0.0081	52	○	7436	11	×	×	×	-	×	○	○
15	電気盤	3号機背面 (31m盤)	3.50	2.40	2.20	1830	0.0077	51	○	2380	6	○	○	×	-	×	○	○
16	タンク	1, 2号機背面 (31m盤)	3.08	9.20	3.46	95504.8	0.0005	10	○	4776	7	○	○	×	-	-	×	×
17	鋼製ステップ	1, 2号機海側 (10m盤)	3.00	3.00	2.00	200	0.0693	-	○	1000	3	×	×	×	-	×	○	○
18	トラック	51m~展望台道路	11.93	2.49	2.66	15764	0.0028	41	○	13250	16	×	×	×	×	○	×	×
19	自動車	3号機東側 (10m盤)	5.50	1.88	2.90	2770	0.0076	51	○	3603	7	○	○	○	-	-	○	○
20	発電機車	1, 2号機背面 (31m盤)	20.10	7.50	8.25	58120	0.0043	41	○	58847	14	○	○	○	-	-	○	○

※1: 非金属製で明らかに柔らかいものや、金属製であっても、竜巻防護施設等へ衝突した際に自身(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
 ※2: BRL式から算出した飛来物の貫通力を生じないために必要な鋼板の最小厚さ
 ※3: 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: 空力パラメータが0.0026より大きいものは高さ方向に飛散するとして評価
 ※5: 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
 ※6: 最小寸法が0.228m×0.228m以下の場合は、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パイプ(飛来時の運動エネルギー:11kJ、貫通力:18mm)より大きいものは固縛等の対策を実施する。一方、最小寸法が0.228m×0.228mを超える場合は、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(飛来時の運動エネルギー:220kJ、貫通力:37mm)より大きいものは固縛等の対策を実施する。
 注1: 空力パラメータが0.025より大きいものについては、解折領域外のため「-」とするが、飛来時の運動エネルギーおよび貫通力の算出にあたっては、設計竜巻の最大風速(100m/s)を用いる。
 注2: 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硬質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。