

27. 竜巻襲来時において排気筒に求められる機能について

1. 竜巻襲来時において求められる機能

「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。』旨規定されており、設置許可基準規則第2条第2項第5号において、「安全機能」とは次のとおり定義されている。

＜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（抜粋）＞

第二条

2

五 「安全機能」とは、発電用原子炉施設の安全性を確保するために必要な機能であつて、次に掲げるものをいう。

イ その機能の喪失により発電用原子炉施設に運転時の異常な過渡変化又は設計基準事故が発生し、これにより公衆又は従事者に放射線障害を及ぼすおそれがある機能

ロ 発電用原子炉施設の運転時の異常な過渡変化又は設計基準事故の拡大を防止し、又は速やかにその事故を収束させることにより、公衆又は従事者に及ぼすおそれがある放射線障害を防止し、及び放射性物質が発電用原子炉を設置する工場又は事業所（以下「工場等」という。）外へ放出されることを抑制し、又は防止する機能

排気筒は「事故時における環境への放射線影響軽減機能」と、「平常時における環境への放射線影響軽減機能」を有しており、このうち「事故時における環境への放射線影響軽減機能」は、「発電用原子炉施設の運転時の異常な過渡変化又は設計基準事故の拡大を防止し、又は速やかにその事故を収束させることにより、公衆又は従事者に及ぼすおそれがある放射線障害を防止し、及び放射性物質が発電用原子炉を設置する工場又は事業所外へ放出されることを抑制し、又は防止する機能」に該当する。

しかしながら、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。

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（貫通穴）を確認した場合は、放射性物質の放出低減機能喪失（アニュラス空気浄化系が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行うことにより、設置許可基準規則第6条に適合していると考えている。

ここで、仮に鋼製材が長手方向に衝突し排気筒上部に全周破断が生じたケースを想定した場合（鋼製材のサイズは0.2×0.3mであることから破断幅は0.3mを想定）の応急処置方法の例を下記に示す。

＜応急処置方法の例＞

①-1* 材料手配、当て板製作・・・約2週間

①-2* 排気筒上部まで足場設置・・・約2週間

※：①-1と①-2は並行して実施

②当て板溶接・・・約1週間

応急処置期間：①+②=約3週間

なお、排気筒の損傷により本来排気筒を通して高所から放出される放射性物質が低所から放出されることになるため、保守的に放射性物質の全量が地上放出されるとして、平常時の敷地等境界外における実効線量を評価した。また、参考に事故時（原子炉冷却材喪失（設計基準事故）を想定）の敷地等境界外における実効線量も合わせて評価した。

<評価結果>

①平常時

解析条件および評価結果の比較を、それぞれ表-1 および表-2 に示す。

飛来物による排気筒の損傷により、放射性物資の全量が地上放出されるとした場合の敷地等境界外における実効線量は年間約 $8.1 \mu\text{Sv}$ であり、排気筒放出時の実行線量は年間約 $7.9 \mu\text{Sv}$ であること、また、線量目標値である年間 $50 \mu\text{Sv}$ に対しても十分な裕度があることから、排気筒損傷による被ばく影響は小さいと考える。

なお、排気筒上部の全周破断（破断幅 0.3m ）を想定した場合の応急処置期間は約3週間であり、実際の被ばく影響は更に小さくなると考える。

②事故時【参考】

解析条件および評価結果の比較を、それぞれ表-3 および表-4 に示す。

飛来物による排気筒の損傷により、放射性物資の全量が地上放出されるとした場合の敷地等境界外における最大の実効線量は約 0.23mSv であり、排気筒放出時の実行線量と同等であること、また、判断基準である 5mSv に対しても十分な裕度があることから、排気筒損傷による被ばく影響は小さいと考える。

表-1 平常時被ばく解析条件の比較

項 目	設置許可添付9章の解析条件	影響評価における解析条件
気象データ (拡散)	排気筒風 (1, 2, 3号機とも)	排気筒風 (1, 2号機) 地上風 (3号機)
放出源高さ	排気筒放出 (1, 2, 3号機とも)	排気筒放出 (1, 2号機) 地上放出: 0 m (3号機)

※ どちらの解析も建屋拡散を考慮していない。

※ その他評価条件については、設置許可申請書添付9と同様。

表-2 平常時被ばく評価結果の比較

項 目	設置許可添付9章の評価結果	影響評価における評価結果
希ガスのγ線からの外部 被ばくによる実効線量	約3.6 $\mu\text{Sv/y}$	約3.7 $\mu\text{Sv/y}$
液体廃棄物中の放射性物質 摂取に伴う内部被ばくによ る実効線量	約2.6 $\mu\text{Sv/y}$	同 左
よう素の摂取に伴う内部 被ばくによる実効線量	約1.7 $\mu\text{Sv/y}$	約1.8 $\mu\text{Sv/y}$
合 計	約7.9 $\mu\text{Sv/y}$	約8.1 $\mu\text{Sv/y}$

※ 上記の値は、「発電用軽水型原子炉施設周辺の線量目標値に関する指針」に示される線量目標値の年間50 μSv を下回る。

表-3 事故時被ばく解析条件の比較

項目	設計基準事故(原子炉冷却材喪失)の解析条件	影響評価における解析条件
環境への放射性物質の放出	排気筒放出で評価	地上放出で評価
環境に放出された放射性物質の大気中の拡散条件	1997年1月～1997年12月の気象データに基づき「発電用原子炉施設の安全解析に関する気象指針」に従って評価された相対濃度及び相対線量 <排気筒放出> 相対濃度 (χ/Q) $4.3 \times 10^{-5} \text{ s/m}^3$ 相対線量 (D/Q) $3.1 \times 10^{-19} \text{ Gy/Bq}$	1997年1月～1997年12月の気象データに基づき「発電用原子炉施設の安全解析に関する気象指針」に従って評価された相対濃度及び相対線量 <地上放出> 相対濃度 (χ/Q) $4.5 \times 10^{-5} \text{ s/m}^3$ 相対線量 (D/Q) $3.1 \times 10^{-19} \text{ Gy/Bq}$

※ 解析条件の異なっている項目について記載。

表-4 事故時被ばく評価結果の比較

項目		設計基準事故(原子炉冷却材喪失)の評価結果	影響評価結果
環境に放出されるよう素量 (I-131等価量－小児実効線量係数換算)	現行評価経路(排気筒放出)	約 2.7×10^{11} Bq	—
	排気筒破損により地上放出とした場合	—	約 2.7×10^{11} Bq
環境に放出される希ガス量 (γ 線エネルギー0.5MeV換算)	現行評価経路(排気筒放出)	約 6.1×10^{13} Bq	—
	排気筒破損により地上放出とした場合	—	約 6.1×10^{13} Bq
実効線量 ^(注1)		0.23mSv	0.23mSv

(注1) 直接線量及びスカイシャイン線量 約0.086mSvを含む

2. 竜巻襲来後の点検手順
竜巻襲来後の点検手順を下記に示す。

<点検手順>

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

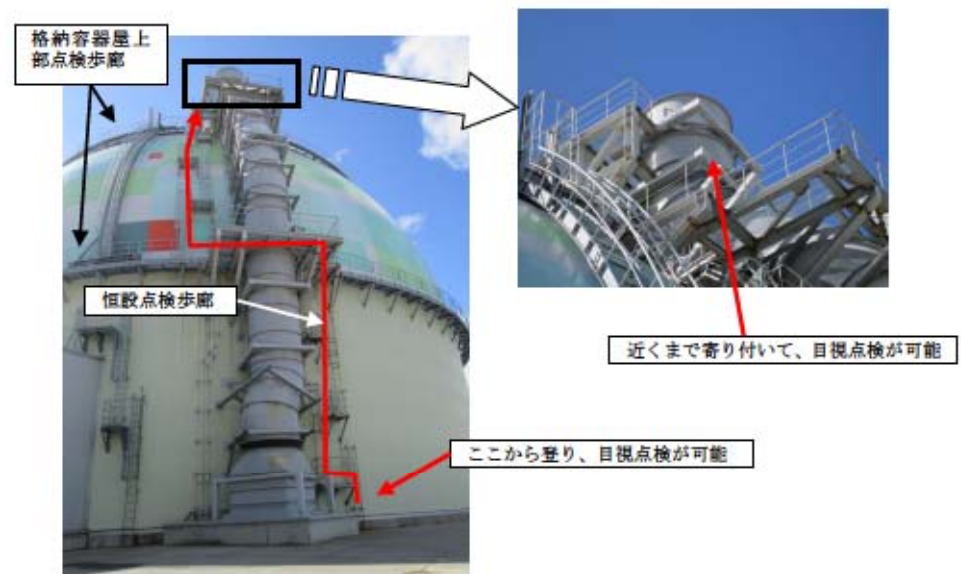


図-1 排気筒外観

28. 気圧差の影響を受けることが想定される設備の影響評価について

1. はじめに

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

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

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

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

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

2. 評価結果

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

設計竜巻により外壁の損傷が考えられる鉄骨造建屋は循環水ポンプ建屋（CWP/B）とタービン建屋（T/B）であり、CWP/B、T/B（以下「当該エリア」という）内に設置されている計器については、気圧差の影響を受ける可能性がある。

当該エリアに設置されている計器を含め、気圧差が計測に影響を与えるものとしては、①圧力計、②水位計、③流量計が考えられるが、以下のとおり気圧差による安全機能維持への影響はないことを確認した。

①圧力計

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

②水位計

<開放タンクの場合>

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

<密閉タンクの場合（高圧側、低圧側ともにタンク内圧を受圧）>

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

③流量計

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

なお、当該エリア内に設置されている耐震Sクラスおよびクラス1、2に属する計器の

評価結果を表-1に示す。

表-1 当該エリア内に設置されている計器の気圧差影響評価

計器名称	設置場所	評価結果
3 A - 原子炉補機冷却海水供給母管圧力	CWP/B	圧力計の高压側（プロセス圧）は変化せず、低压側（大気）のみ変化することとなり、圧力計測信号が見かけ上高めを示すこととなるが、計測範囲に対しては微小な値であり（通常指示値 0.5MPa（計測レンジ 0～1.0MPa）に対し、設計竜巻による気圧差（気圧低下）は 89hPa）、計測への影響はほとんどない。
3 B - 原子炉補機冷却海水供給母管圧力	CWP/B	

(2) 外気に繋がっている換気空調設備（排気筒含む）

竜巻防護施設および竜巻防護施設に波及的影響を及ぼし得る施設として抽出した換気空調設備（ダンパ、バタフライ弁、ダクト、ファン、空調ユニット）および排気筒について、気圧差に対する健全性を評価した結果、構造健全性が維持され安全機能が維持できることを確認した（補足説明資料 2 5. (2) 項参照）。

(3) 外気を吸入して運転する非常用ディーゼル発電機

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

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

①吸気口側が気圧低下した場合に想定される現象

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

②排気口側が気圧低下した場合に想定される現象

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

③吸気口側および排気口側の双方が気圧低下した場合に想定される現象

吸・排気口側の双方が気圧低下した場合は双方の気圧差は生じないが、吸気側が気圧

低下することから、上記①と同じ結果となる。

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



図-1 非常用ディーゼル発電機の吸排気口

29. 2次飛来物の抽出について

2次飛来物は、以下の観点により抽出を行うとともに、抽出された2次飛来物については、設計飛来物に包絡されているかについて確認を行った。

- ・竜巻防護施設に波及的影響を及ぼす可能性がある建物・構築物及び設備等の損壊等により主要な部材（壁及び屋根等）が2次飛来物となるか。
- ・竜巻による過去の建築物の被害事例により、竜巻による風荷重の影響を受けやすいと考えられる部位であるか。

具体的な2次飛来物の評価手順は、以下の通りである。

- ①竜巻防護施設に波及的影響を及ぼす可能性がある建物・構築物及び設備であり、損壊等により主要な部材が2次飛来物となる可能性が考えられるかについて、鉄骨造である循環水ポンプ建屋（CWP/B）及びタービン建屋（T/B）並びに送電鉄塔について評価を実施した。
- ②上記で抽出された部材に加え、過去に発生した竜巻による建築物の被害状況等により、竜巻による風荷重の影響を受けやすいと考えられる部材について、2次飛来物となった場合にも設計飛来物である鋼製材に包絡されるかについて検討を実施した。
- ③コンテナが破損した場合に、コンテナ内保管物が飛散することにより2次飛来物となった場合にも設計飛来物である鋼製材に包絡されるかについて検討を実施した。

評価手順に従った評価結果を第29-1表に示す。

抽出された2次飛来物については、設計飛来物に包絡されていることを確認した。

第 29-1 表 2 次飛来物評価結果

	施設の倒壊等の有無	飛散部材の設計飛来物への包絡性
CWP/B	無 ^{*1}	建屋のシャッター及びガラス窓等の飛散可能性は否定できないものの、設計飛来物に包絡されることを確認した。(別紙参照)
T/B	無 ^{*1}	
コンテナ	飛散防止対策は実施しているが、破損の可能性があることから、コンテナ内保管物について評価する。	コンテナが破損し、保管物が飛散することが否定できないものの、設計飛来物に包絡されることを確認した。(別紙参照)
送電鉄塔	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。 ^{*2}	(余裕度が 1.00 を下回る結果となった部材は、設計飛来物に包絡されることを確認した。)

※1：評価結果は補足説明資料 16 に記載

※2：評価結果は補足説明資料 34 に記載

以上より、シャッター、ガラス窓、給気用ガラリ及びコンテナ内保管物については 2 次飛来物となる可能性を否定できないものの、これらについては設計飛来物である鋼製材に包絡されることを確認した。

以 上

< 2次飛来物の設計飛来物への包絡性について >

泊発電所において、竜巻による風圧荷重等や飛来物の影響を受けやすいと考えられる部位について、過去に発生した竜巻による被害事例を参考に抽出した。

抽出された部位は、竜巻により飛散する可能性が否定できないことから2次飛来物として選定し、設計飛来物に包絡されることを確認した。

また、コンテナ内保管物についても、飛散することにより2次飛来物となった場合にも設計飛来物に包絡されることを同様に確認した

選定された主な2次飛来物を別 29-1 図に、確認結果を別 29-1 表に示す。



(給気用ガラリ)



(ガラス窓)



(シャッター)



(工具箱)



(台車)

別 29-1 図 2次飛来物

別 29-1 表 2 次飛来物と設計飛来物の比較結果

	仕様				運動エネルギー (kJ)
	長さ (m)	幅 (m)	高さ (m)	質量 (kg)	
鋼製材	4.2	0.3	0.2	135	219
給気用ガラリ	1.0	2.0	0.12	20	88
ガラス窓	0.8	1.0	0.005	10	37
シャッター*	8.3	0.1	0.002	16	45
工具箱	0.6	0.3	0.5	21	40
台車	0.9	0.6	0.2	26	55

※被害状況から分解すると仮定

30. 竜巻防護施設（設備）に影響を及ぼす可能性のある建屋開口部について

竜巻防護施設を内包している原子炉建屋、原子炉補助建屋およびディーゼル発電機建屋については、鉄筋コンクリート造であり、当該建屋内の竜巻防護施設は、当該建屋によって設計荷重または設計飛来物の衝突から防護される。

しかしながら、当該建屋には扉等の建屋開口部が存在しているため、設計飛来物が侵入した場合に竜巻防護施設（設備）に影響を及ぼす可能性のある建屋開口部の有無を評価した結果、以下の建屋開口部については、設計飛来物が侵入した場合、設計飛来物の衝突により、当該建屋開口部周辺に設置されている竜巻防護施設（設備）の安全機能を喪失させる可能性があることから、設備による竜巻防護対策（飛来物防護対策）または運用による竜巻防護対策を実施する（飛来物防護対策については、補足説明資料26.参照）。

<飛来物防護対策を実施する建屋開口部>

No.	建屋開口部	建屋開口部周辺の竜巻防護施設（設備）	参照図面
1	A, B-吸気ガラリ室扉 A, B-吸気ガラリ室吸気口	A, B-蓄熱室加熱器	図-3
2	主蒸気管室ブローアウトパネル	配管および弁（主蒸気管室内）	図-5
3	トラックアクセスエリア（2）扉	制御用空気系統配管	図-5
4	主蒸気管室上部換気口	配管および弁（主蒸気管室内）	図-7
5	原子炉補機冷却水サージタンク・空調用冷水膨張タンク室扉	原子炉補機冷却水サージタンク他	図-9

なお、上記以外の建屋開口部については、当該開口部周辺に竜巻防護施設（設備）がないこと等から、設備または運用による竜巻防護対策は不要である。

また、これらの建屋開口部周辺に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および溢水源がないことを確認した。

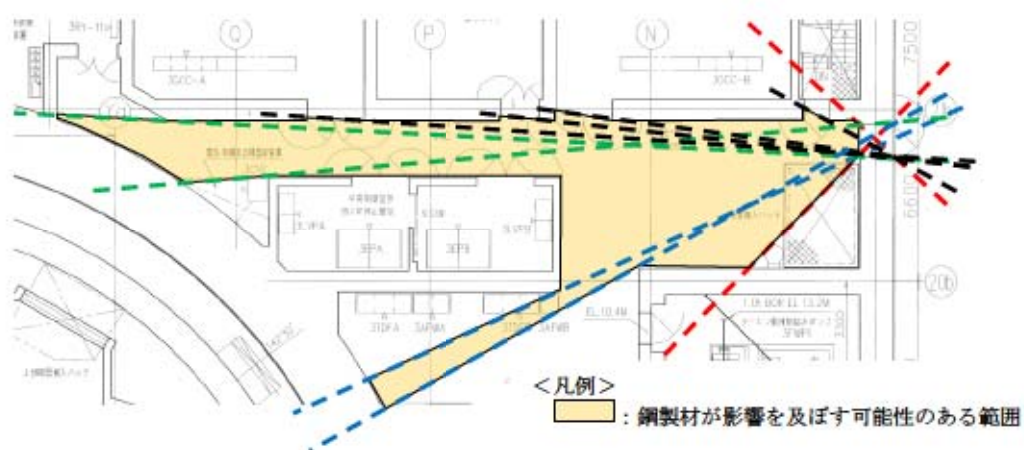
<評価方針>

- ①全体機器配置図から建屋開口部（扉等）を抽出する。
- ②建屋開口部（扉等）の貫通評価（設計飛来物の貫通を生じないために必要な鋼板の最小厚さと建屋開口部（扉等）の最小板厚を比較することにより、設計飛来物の貫通有無を確認する）にあたっては、設計飛来物（砂利、鋼製パイプ、鋼製材）のうち、飛来物の貫通を生じないために必要な鋼板の最小厚さが最も厚い鋼製材を飛来物として想定する（鋼製材の貫通を生じないために必要な鋼板の最小厚さは37mm）。
- ③上記①で抽出した建屋開口部（扉等）に対して、当該開口部に繋がる区画に竜巻防

護施設が設置されているか否かを確認するとともに、竜巻防護施設が設置されている建屋開口部の中から、飛来物の侵入方向にある建屋、構築物及び設備等の障害物や敷地形状を考慮し、鋼製材が建屋内に侵入する可能性のある建屋開口部（扉等）を抽出する。

④上記③で抽出した建屋開口部（扉等）に対して貫通評価を行い、鋼製材が建屋内に侵入する可能性がある場合は、建屋内に侵入した鋼製材が影響を及ぼす可能性のある範囲を以下の考え方に基づいて設定する（下図の例を参照）。

- ・鋼製材が影響を及ぼす可能性のある範囲の検討にあたっては、建屋開口部から繋がる建屋内の壁および扉等で仕切られた区画を検討範囲とする。ただし、当該の壁および扉等に対する設計飛来物の貫通有無を考慮する。
- ・鉛直方向の影響を及ぼす可能性のある範囲は床から扉等の高さまでの範囲とする。
- ・水平方向の影響を及ぼす可能性のある範囲は扉等からの侵入角度を考慮する。



⑤全体機器配置図、配管製作図等から、上記④で設定した影響範囲内にある（鋼製材が衝突する可能性のある）竜巻防護施設（設備）を抽出する。

⑥上記より、竜巻防護施設（設備）に影響を及ぼす可能性のある建屋開口部を抽出する。

以下に原子炉建屋、原子炉補助建屋およびディーゼル発電機建屋におけるフロア毎の建屋開口部の位置および竜巻防護施設（設備）への影響を評価した結果を示す。



図－1 泊発電所3号機における建屋開口部（T.P.10.3m（中間床含む））

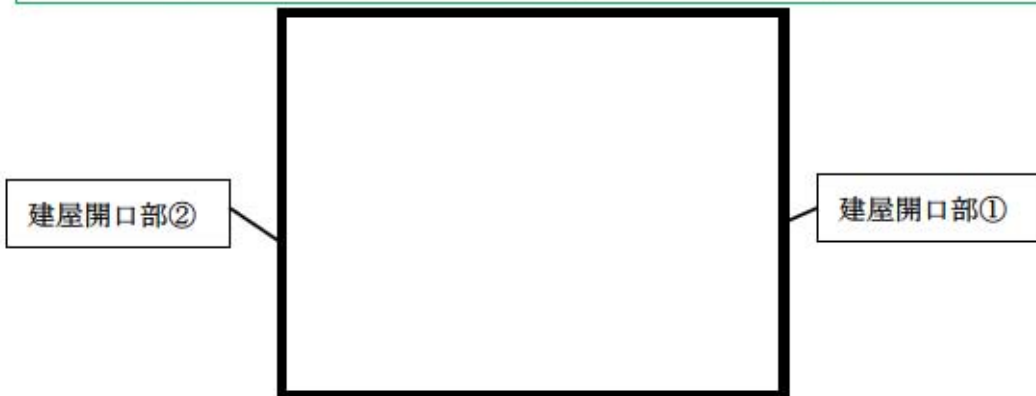


建屋開口部①



建屋開口部②

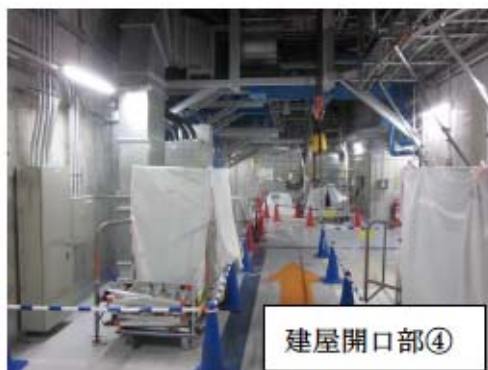
当該開口部（扉）は、設計飛来物の貫通を防止する厚さを確保した扉に交換するため、ディーゼル発電機建屋内に設計飛来物が侵入することはない。なお、当該開口部（扉）から設計飛来物が侵入し、竜巻防護施設である A,B-ディーゼル発電機に衝突して当該設備の安全機能を損なわないよう、竜巻襲来が予想される場合は当該扉を閉止する運用とする。



建屋開口部③



（扉）は、設計飛来物を防止する厚さを確保した扉に交換するため、原子力発電機建屋内に設計飛来物が侵入することはない。なお、当該開口部（扉）から設計飛来物が侵入し、竜巻防護施設である配管に衝突して当該設備の安全機能を損なわないよう、竜巻襲来が予想される場合は当該扉を閉止する運用とする。



建屋開口部④

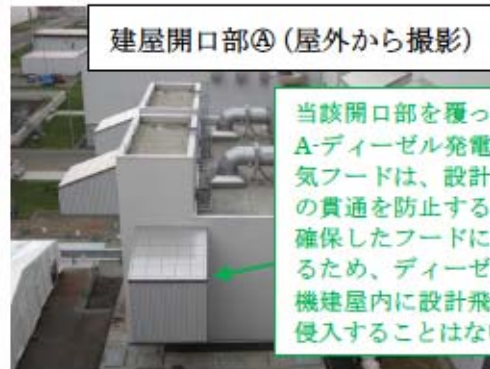


（扉）は、設計飛来物を防止する厚さを確保した扉に交換するため、原子力発電機建屋内に設計飛来物が侵入することはない。なお、当該開口部（扉）から設計飛来物が侵入し、竜巻防護施設である配管に衝突して当該設備の安全機能を損なわないよう、竜巻襲来が予想される場合は当該扉を閉止する運用とする。

図-2(1) 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.10.3m (中間床含む))



建屋開口部A



建屋開口部A (屋外から撮影)

当該開口部を覆っているA-ディーゼル発電機室排気フードは、設計飛来物の貫通を防止する厚さを確保したフードに交換するため、ディーゼル発電機建屋内に設計飛来物が侵入することはない。



建屋開口部B



建屋開口部B (屋外から撮影)

当該開口部を覆っているB-ディーゼル発電機室排気フードは、設計飛来物の貫通を防止する厚さを確保したフードに交換するため、ディーゼル発電機建屋内に設計飛来物が侵入することはない。

図-2(2) 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.10.3m (中間床含む))

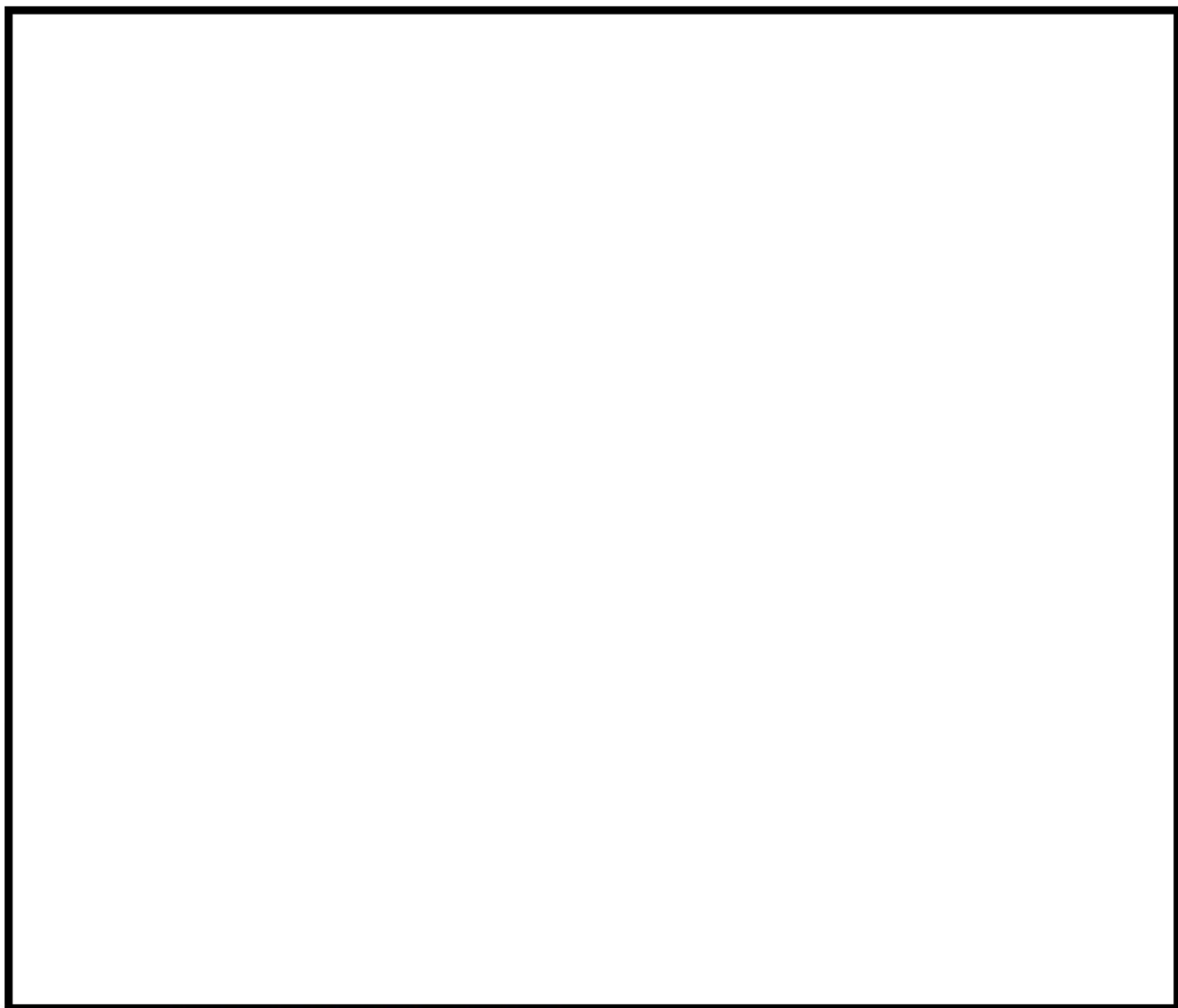
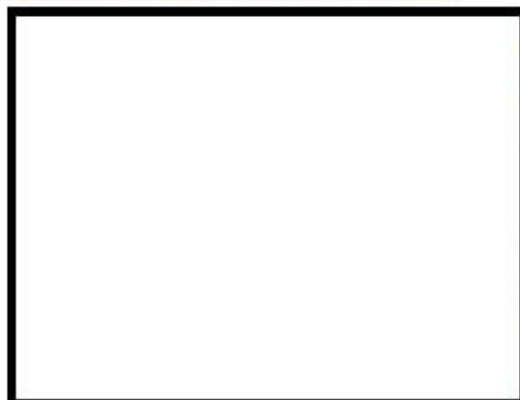


図-3 泊発電所3号機における建屋開口部 (T.P.17.8m (中間床含む))



は、設計飛来物の貫通を防止する厚さを確保したため、ディーゼル発電機建屋（B-蓄熱室）内に設計飛来物が侵入することはない。なお、当該開口部（扉）から設計飛来物が侵入し、竜巻防護施設である蓄熱室加熱器に衝突して当該設備の安全機能を損なわないよう、竜巻襲来が予想される場合は当該扉を閉止する運用とする。



当該開口部（扉）は、設計飛来物の貫通を防止する厚さを確保した扉に交換するため、ディーゼル発電機建屋（B-蓄熱室）内に設計飛来物が侵入することはない。なお、当該開口部（扉）から設計飛来物が侵入し、竜巻防護施設である蓄熱室加熱器に衝突して当該設備の安全機能を損なわないよう、竜巻襲来が予想される場合は当該扉を閉止する運用とする。

図-4(1) 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.17.8m (中間床含む))

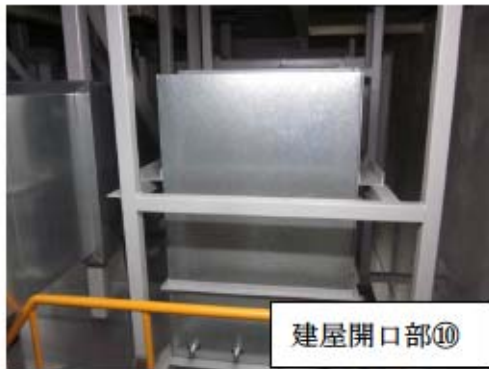


図-4(2) 泊発電所3号機における建屋開口部周辺の屋内写真他 (T.P.17.8m (中間床含む))

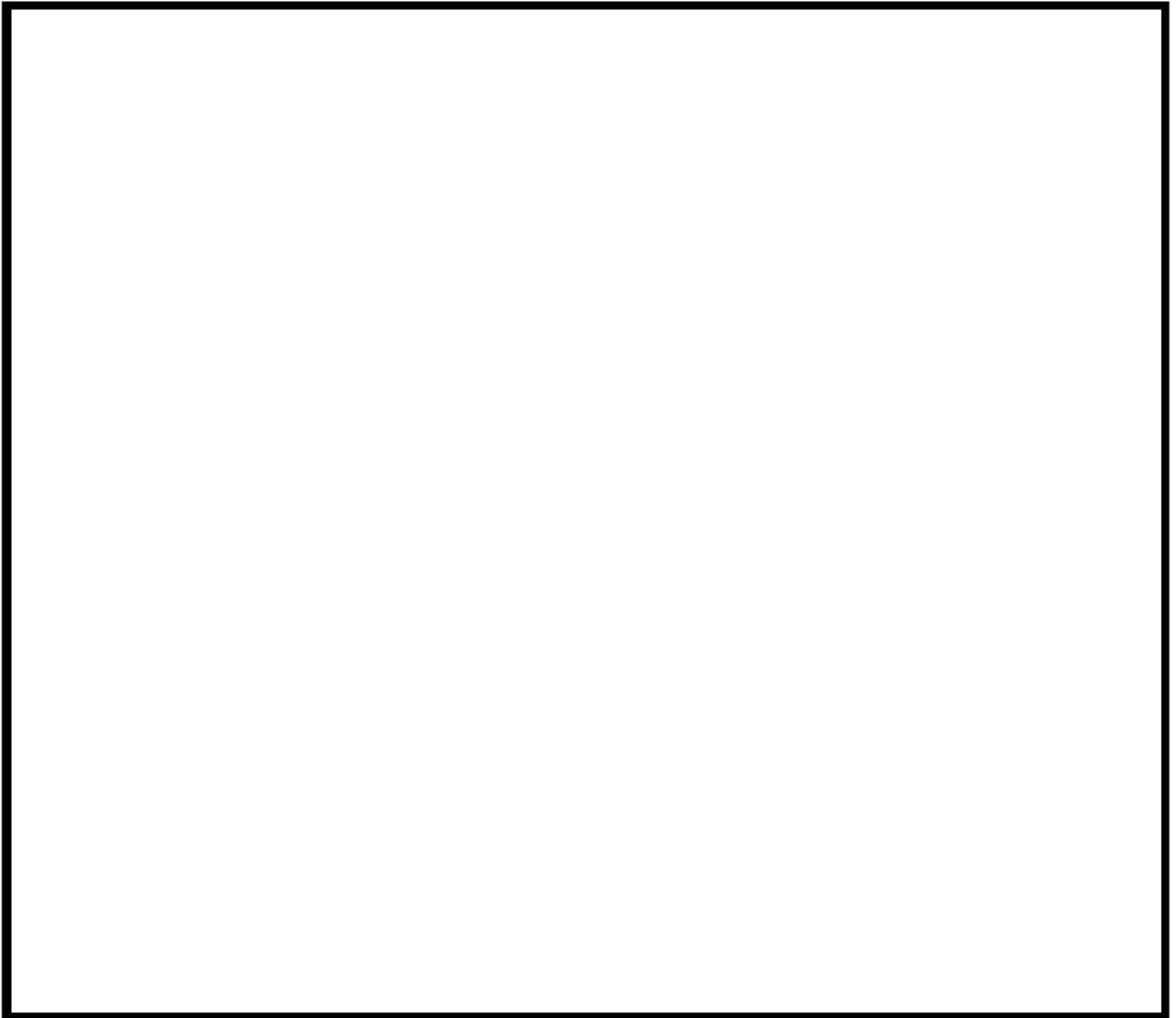


図-5 泊発電所3号機における建屋開口部 (T.P.33.1m)



当該開口部（扉）から侵入してきた設計飛来物が竜巻防護施設である使用済燃料ピットクレーンに衝突して当該設備の安全機能を損なわないよう、竜巻襲来が予想される場合は燃料取扱棟における燃料取扱作業を中断する運用とする。



図-6(1) 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.33.1m)



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制御用空気系統配管に衝突しないよう、当該配管設置場所前面にコンクリート製の防護壁を設置する。



図-6(2) 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.33.1m)



図-6(3) 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.33.1m)



図-7 泊発電所3号機における建屋開口部 (T.P.40.3m,T.P.43.3m)



建屋開口部⑯



当該開口部を覆っている格納容器排気希釈用外気取入ガラリフードは、設計飛来物の貫通を防止する厚さを確保したフードに交換するため、原子炉建屋内に設計飛来物が侵入することはない。

建屋開口部⑯（屋外から撮影）

ガラリ（タービン建屋屋上）



建屋開口部⑰（屋外から撮影）

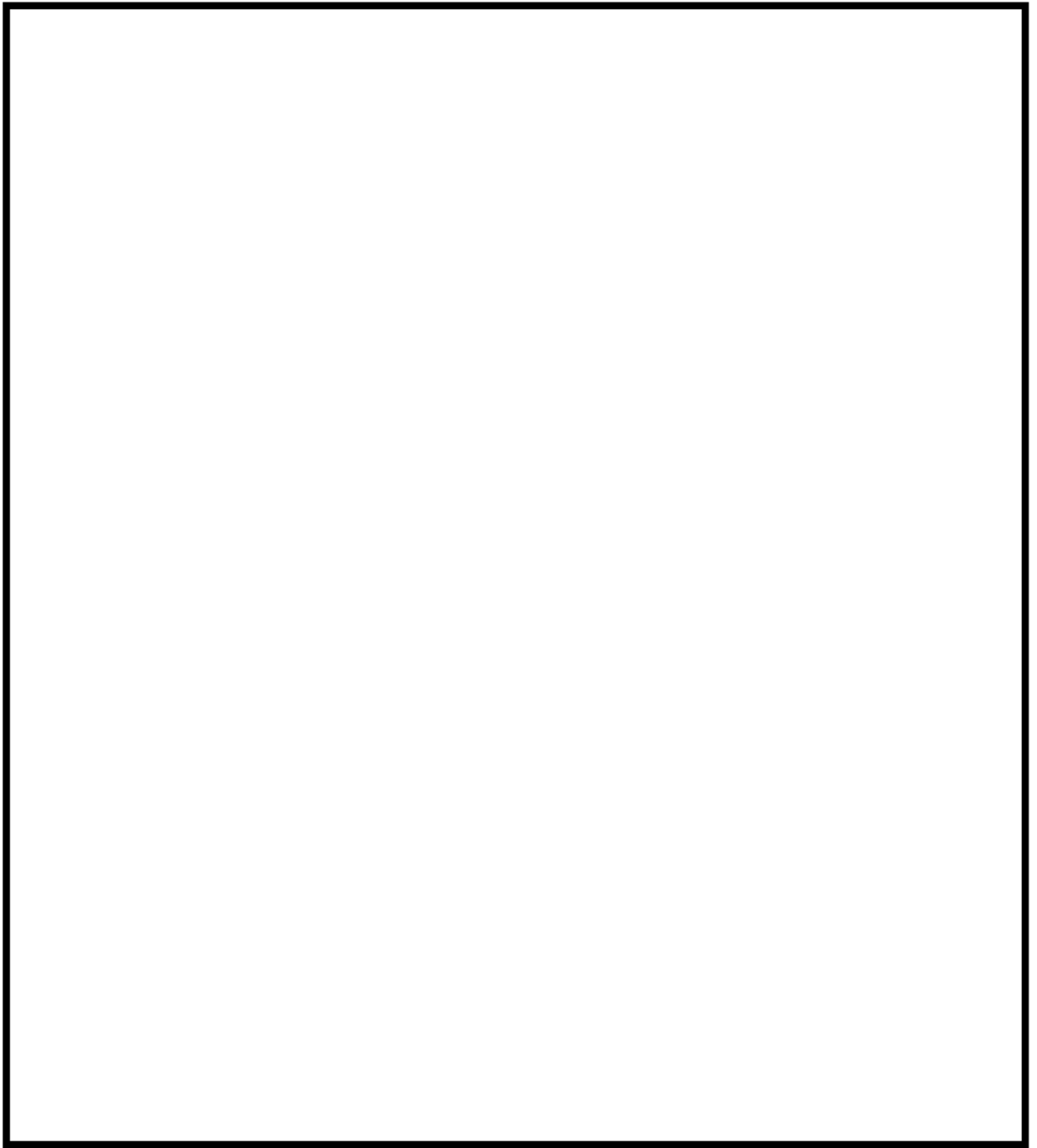
ガラリ内



建屋開口部⑰

原子炉建屋に隣接しているタービン建屋屋上のガラリを貫通した設計飛来物が原子炉建屋（主蒸気管室）に侵入することを防ぐため、当該開口部前面（室外）に防護鋼板を設置する。

図ー 8 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）



図－9 泊発電所3号機における建屋開口部 (T.P.43.6m)



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。

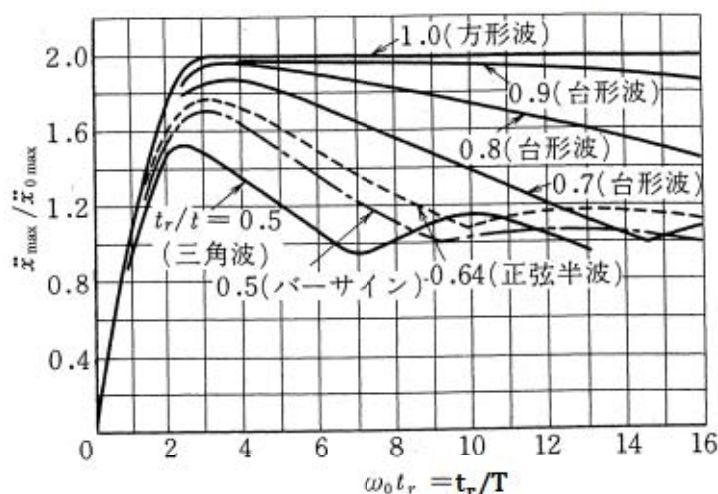


図 7.22 代表的理想衝撃パルスによる加速度衝撃スペクトル⁽¹⁾⁽⁴⁾

（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_q ）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

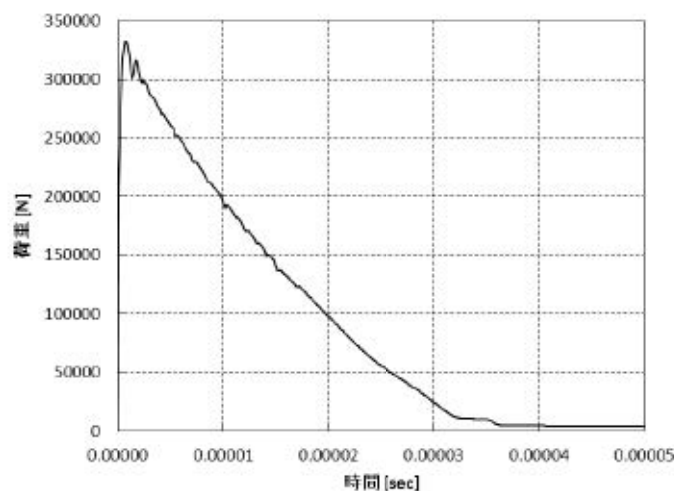


図-3 荷重時刻履歴（ひずみ速度依存性なし）

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、給気を供給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

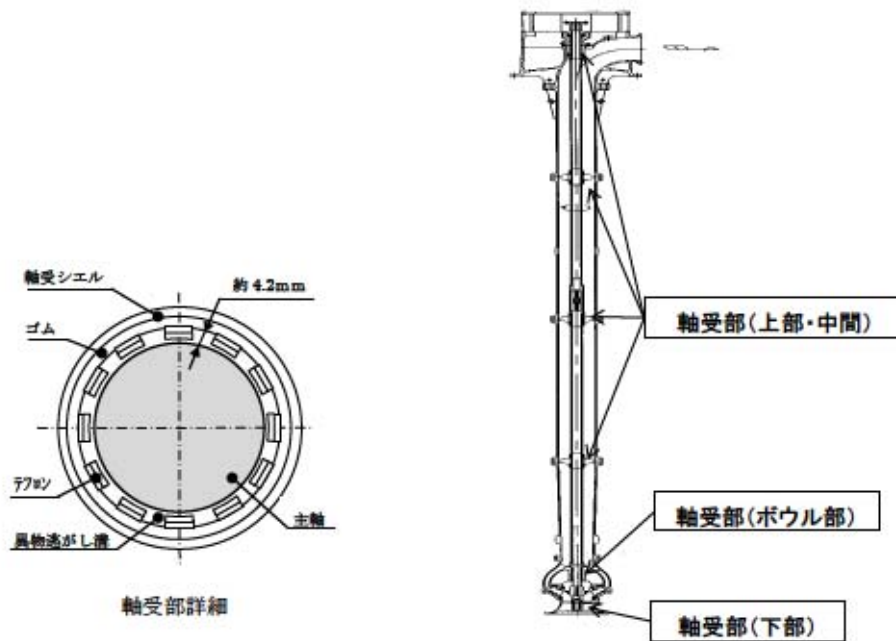


図-1 原子炉補機冷却海水ポンプ構造図

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。

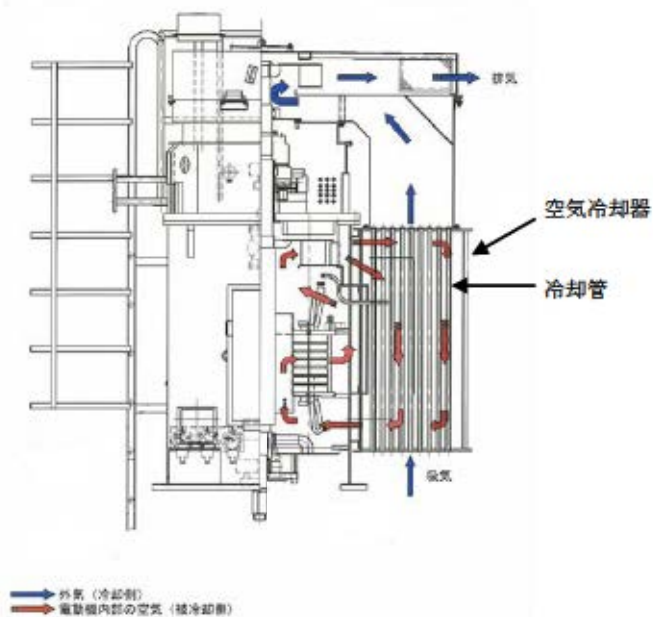


図-2 原子炉補機冷却海水ポンプモータの冷却方式

(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。

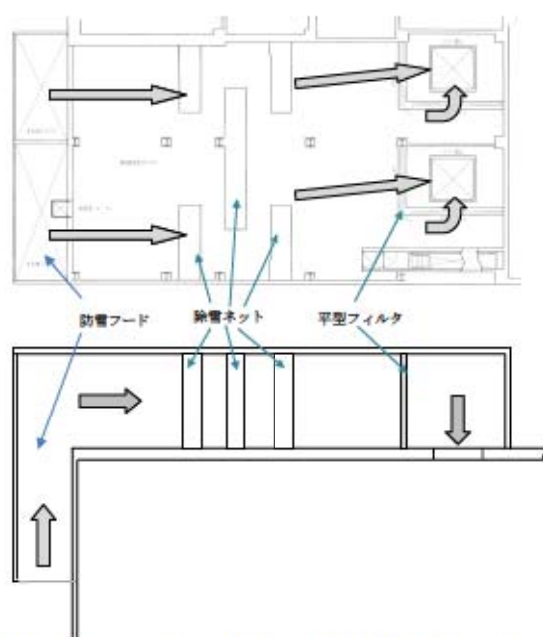


図-3 外気取入口の空気の流れ（補助建屋給気ガラリーの場合）

(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。

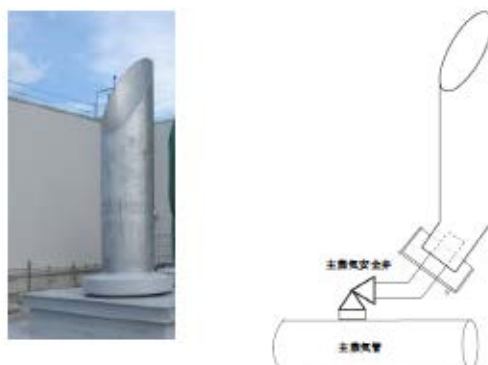


図-4 主蒸気安全弁排気管の形状

(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ではなく短時間（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。

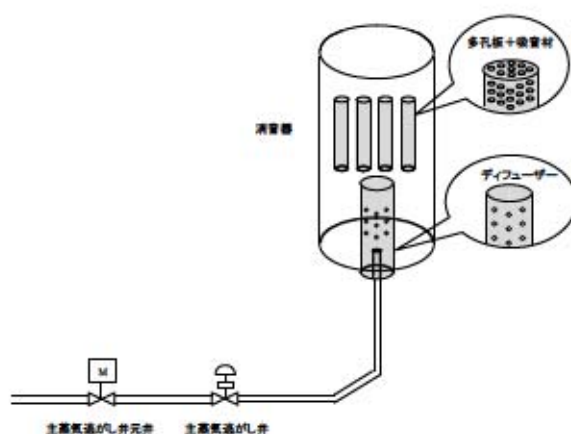


図-5 主蒸気逃がし弁出口配管形状及び消音器の構造

(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ではなく短時間（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。

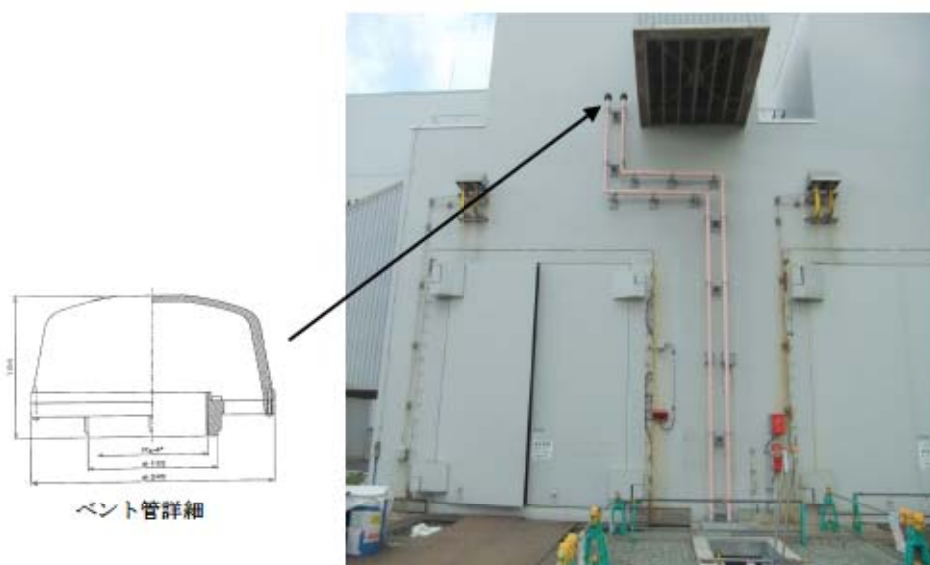


図-7 ディーゼル発電機燃料油貯油槽ベント管の形状

(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。

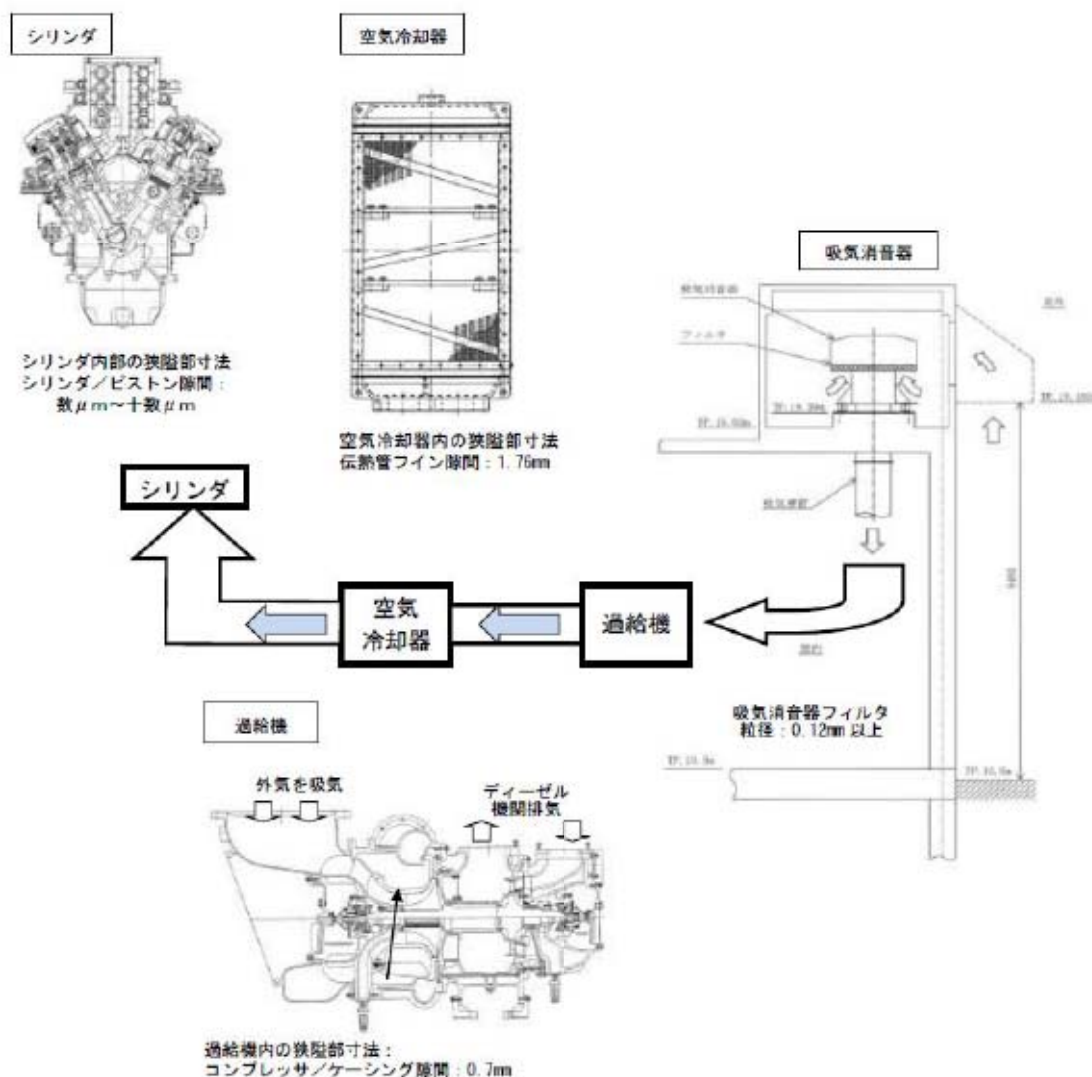


図-9 ディーゼル機関の吸入空気の流れ

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。

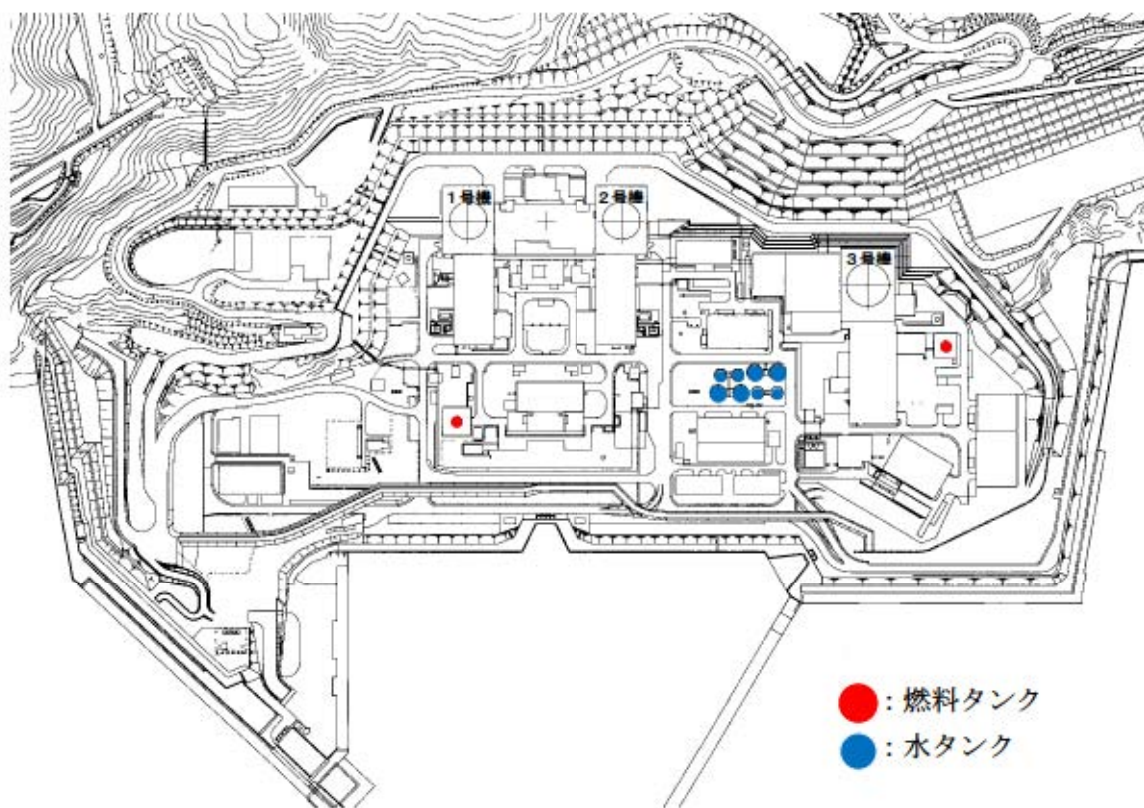


図-5 泊発電所のプラント配置図

以上より、竜巻随件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。

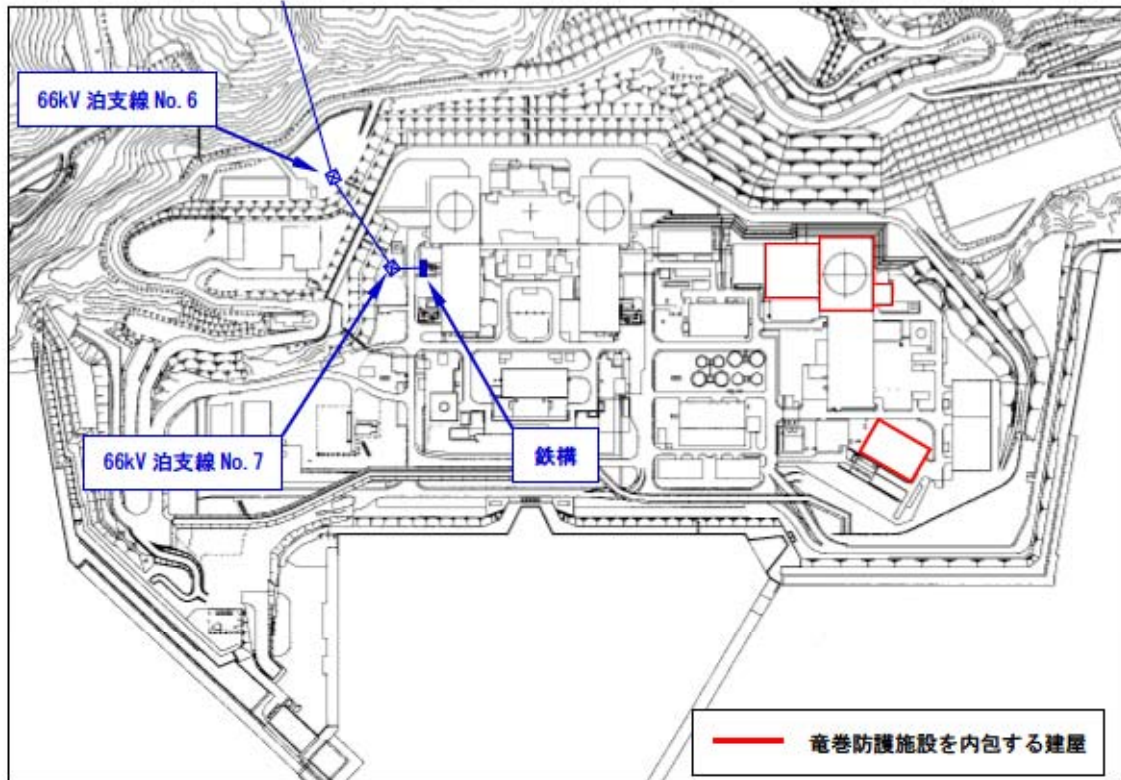


図 1 検討対象平面図

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

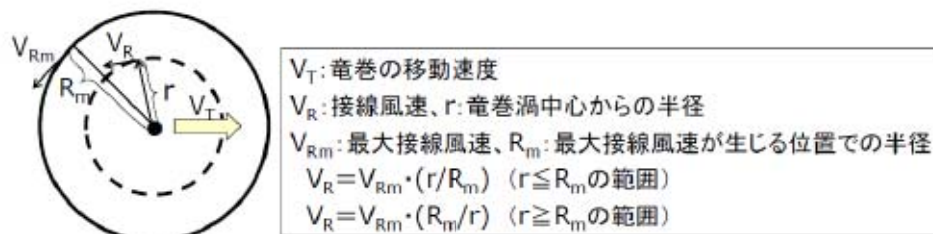
架渉線については、風速 40m/s 時の電線 1m 当りの電線風圧値 (H_c) を設定し、この風圧値が作用した際に耐えられるよう送電鉄塔の設計を行っている。

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

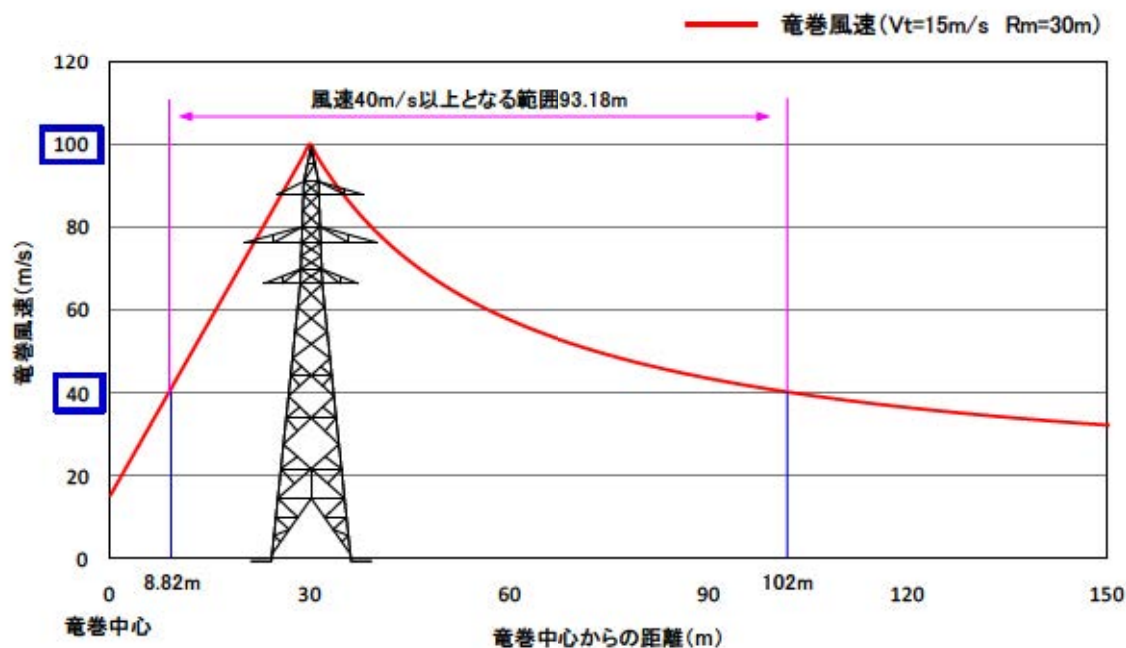


図 3 竜巻風速 100m/s 時の風速分布

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 (m^2)

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 H_c とした場合、 $H_c \times 2.5$ 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。

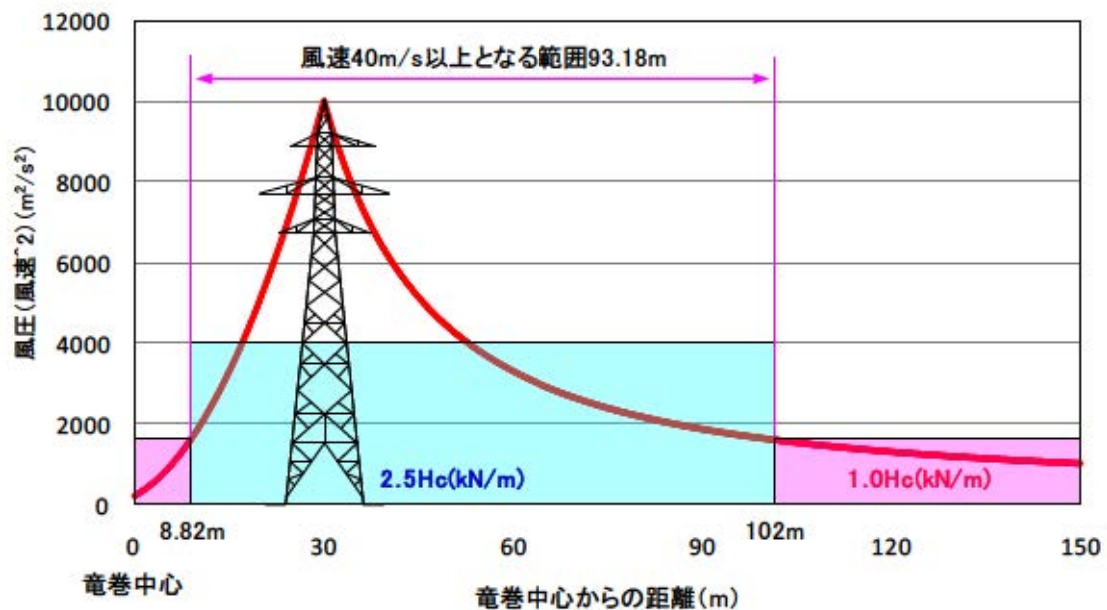


図4 架渉線に作用する風荷重の算定結果

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。

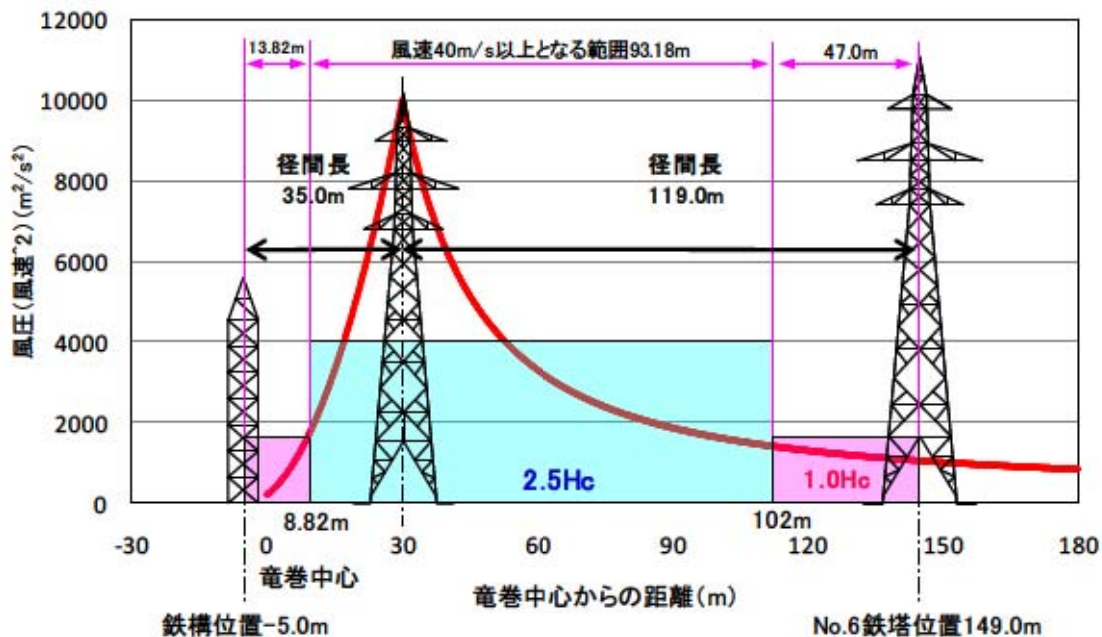


図 5 泊支線 No. 7 鉄塔前後の架渉線に作用する風荷重

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。

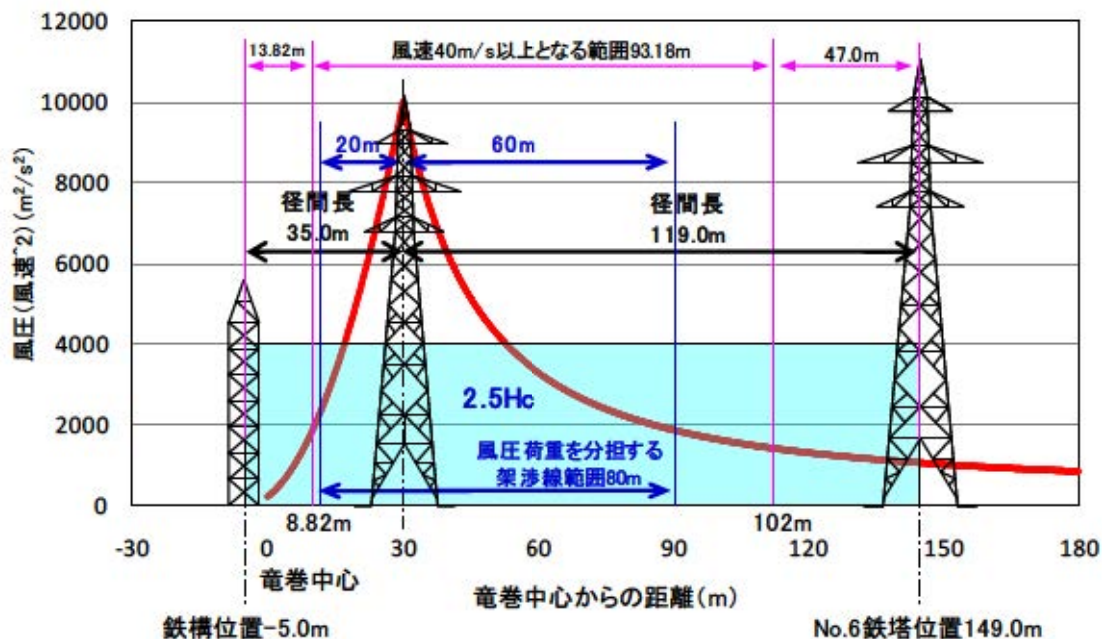


図 6 本検討における架渉線風荷重分布

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。

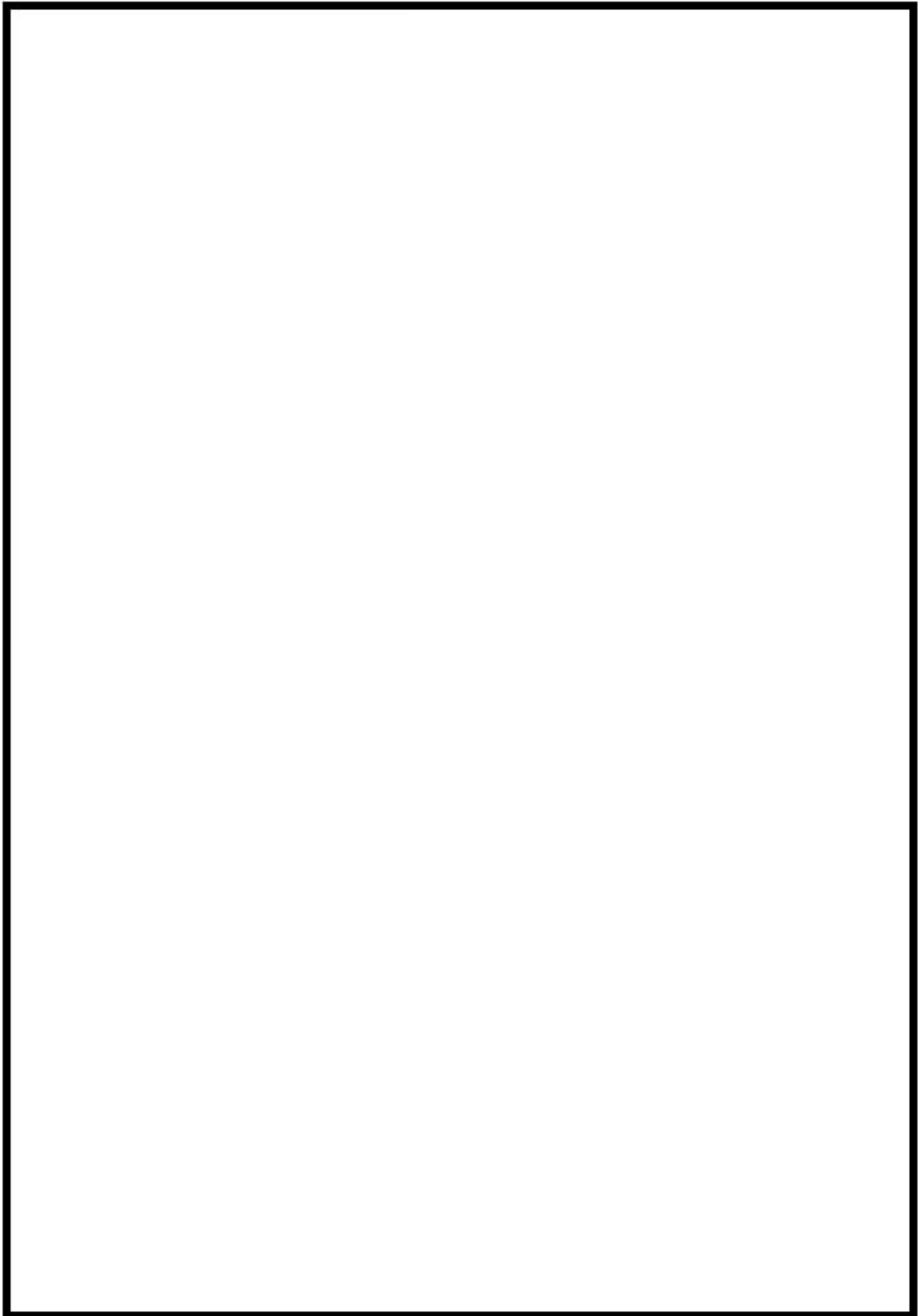
万一、鉄塔が損壊した場合においても、架渉線の径間長が長く高張力側である No.6 鉄塔方向に倒壊し、竜巻防護施設を内包する建屋側に倒壊するリスクは極めて低い。また、鉄塔の高さ（約29m）に対して、鉄塔から竜巻防護施設を内包する建屋までの距離は約400m確保されているため、鉄塔が倒壊したとしても竜巻防護施設を内包する建屋に衝突することはない。

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。

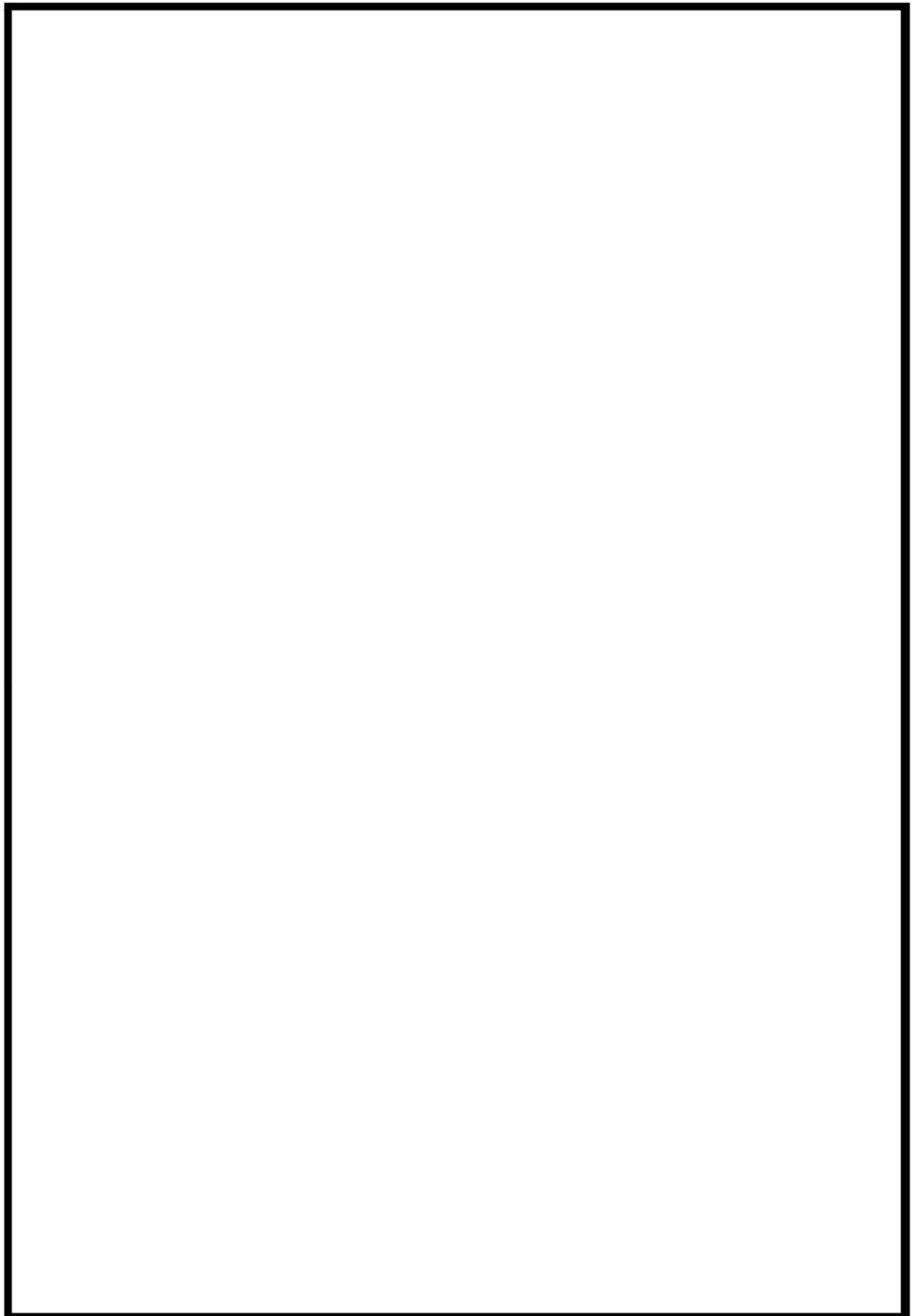
以上

<参考資料>

【塔体部の余裕度が 1.00 を下回る箇所】



【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)

【余裕度が 1.00 を下回る部材と設計飛来物の比較】



3.5. 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の評価	tornado_missile

(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		<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>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。</p>
検証及び妥当性確認の内容		<p>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。</p> <p>【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。</p> <p>【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。</p>
その他（工認実績等）		<p>既工認での使用実績はない。</p> <p>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。</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

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。

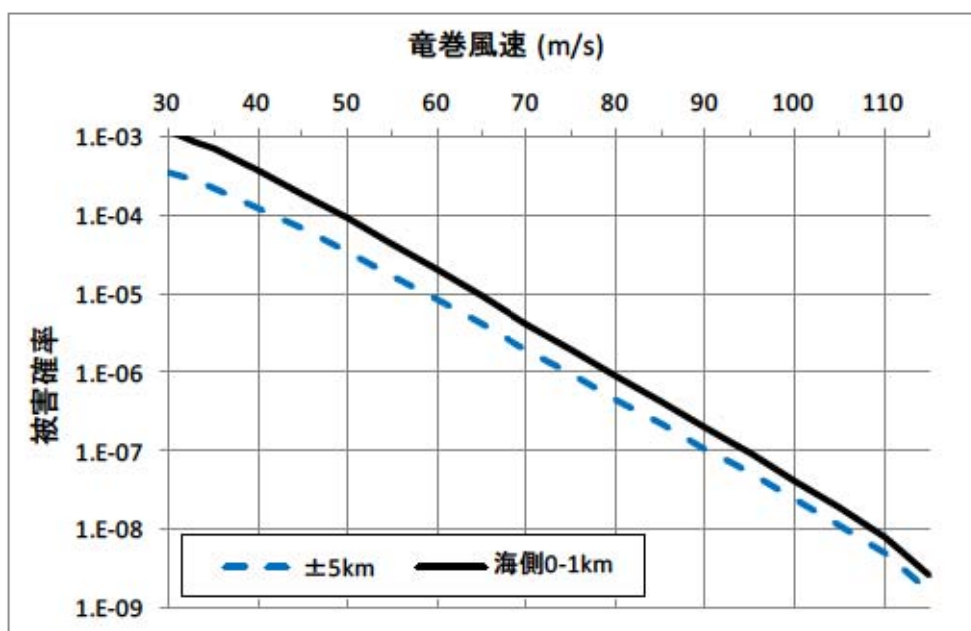


図1 竜巻最大風速のハザード曲線（泊）

(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 $0.5\sigma_{ln}$ 広げて $4\sigma_{ln}$ とした場合、被害面積の期待値は約1.4%大きくなる。仮に $1\sigma_{ln}$ 広げて $4.5\sigma_{ln}$ 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

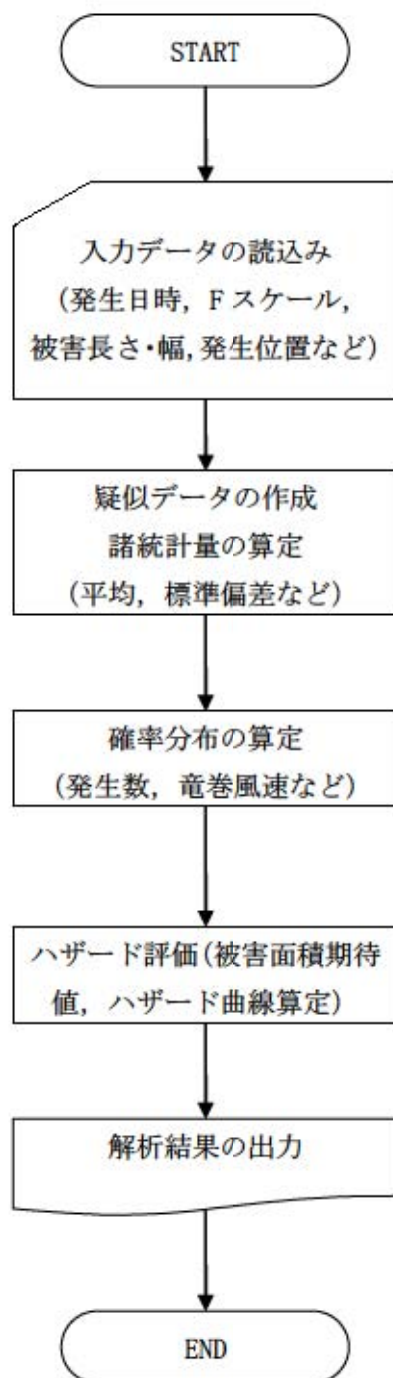


図2 解析フローチャート

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

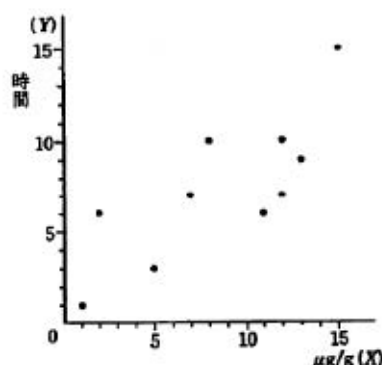


図4-1 催眠剤投与量と睡眠時間の散布図

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、ポリヤ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
ポリヤ型 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
	ポリヤ(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

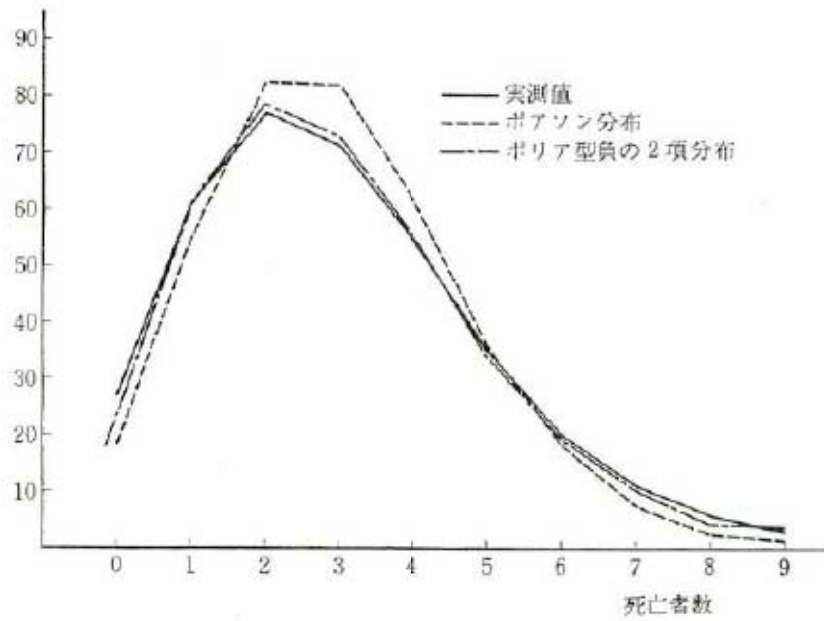


図4 分布形 (参考文献2)

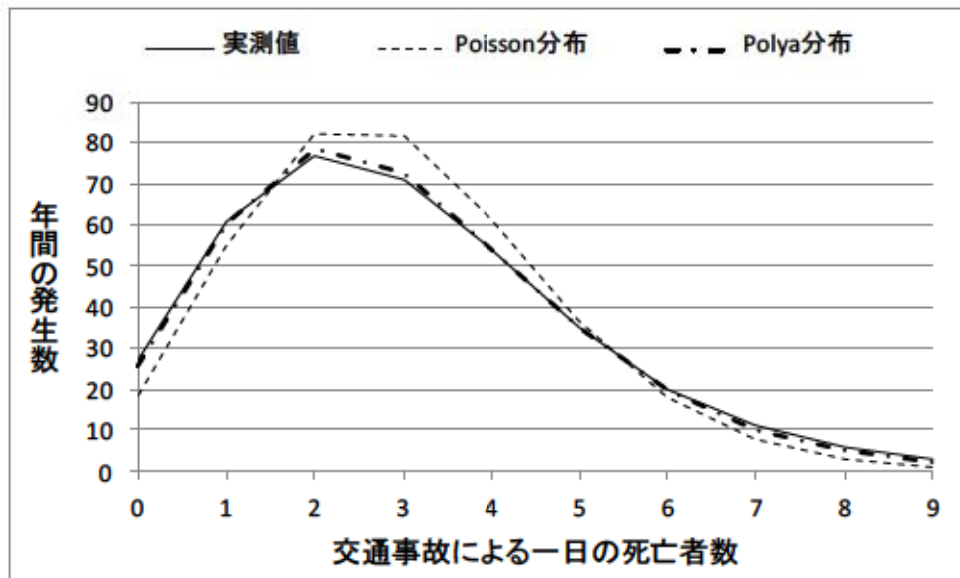


図5 分布形 (本解析コード)

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 $(= (V_{\min}/V_0)^{1.6})$ 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。

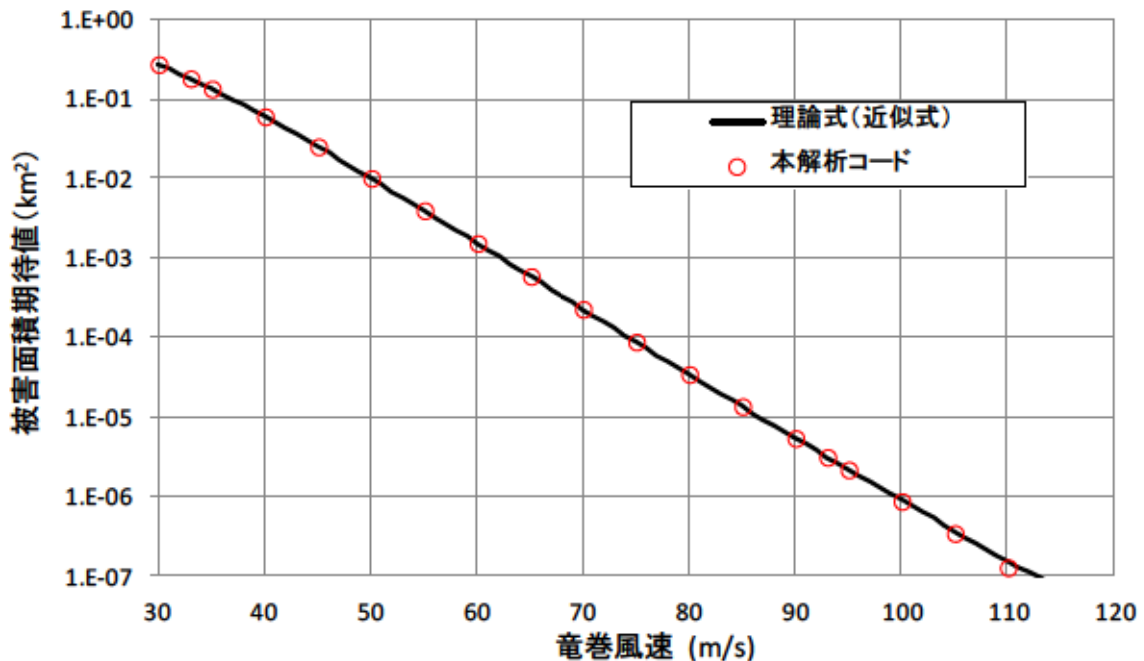


図6 被害面積の期待値の比較

(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、方向は一様だと仮定した。

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たらない。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。

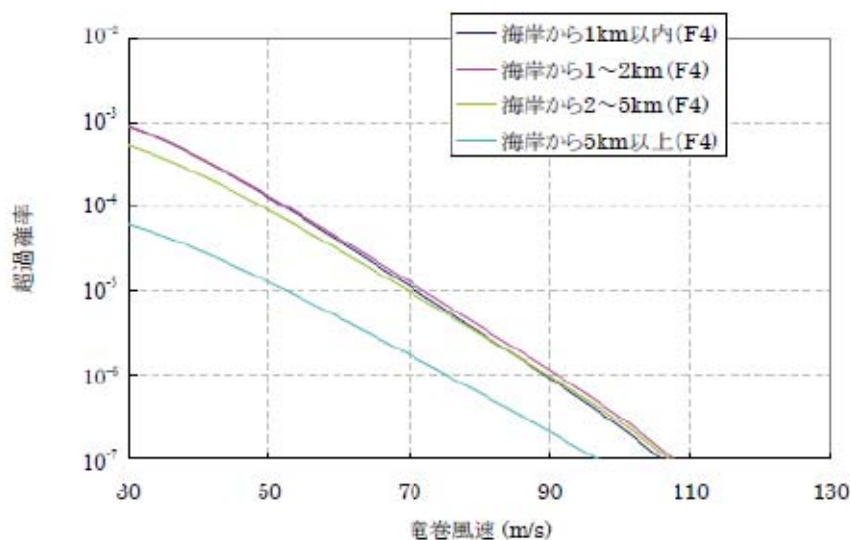


図7 ハザード算定結果 (参考文献1)

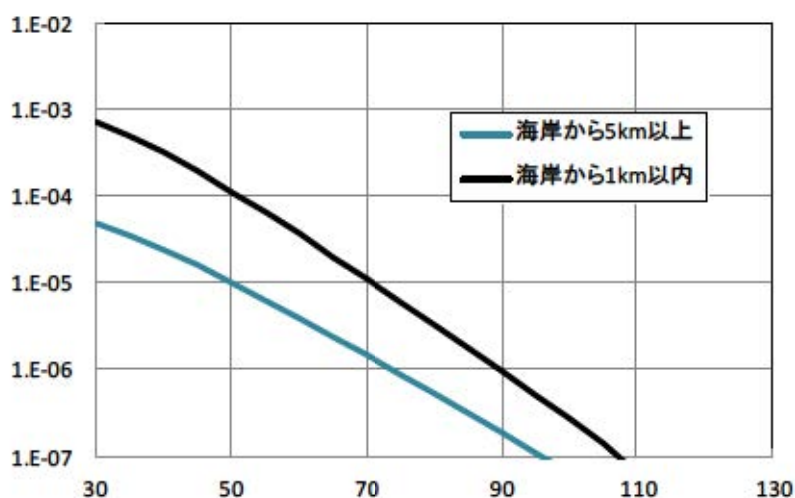


図8 ハザード算定結果 (本解析コード)

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。

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

ここで、

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

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

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

$$\text{第4項} : (D_0^2 \pi / 4) \int_0^{\infty} f(V) dV$$

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。

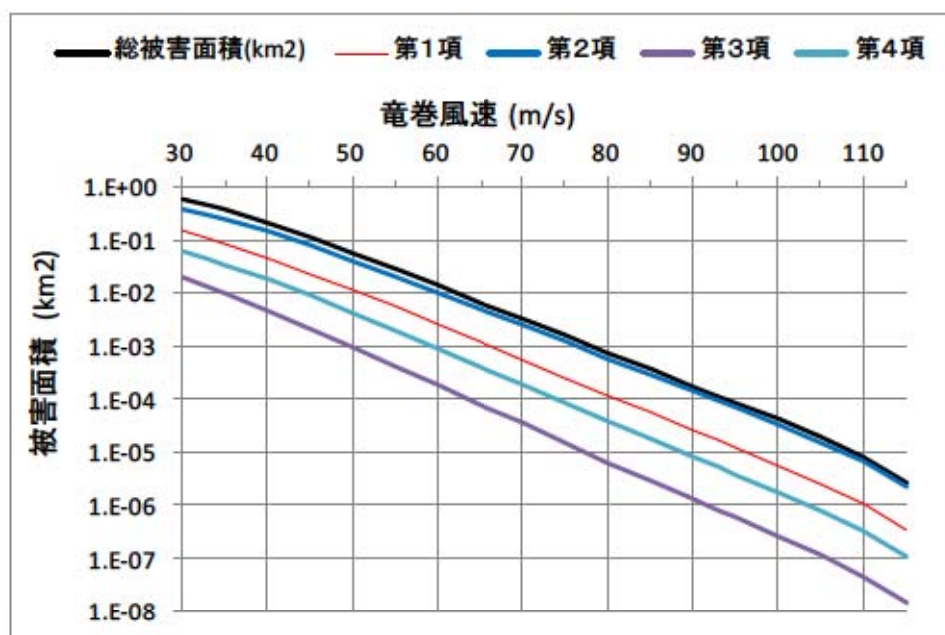


図9 被害面積期待値（海岸線から陸側海側それぞれ5kmを対象としたケース）

（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（ $V_{min}=17$ m/sの場合）、58.7m/s（ $V_{min}=25$ m/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 $D_0=425$ mで評価を行っているが上記と同様に例えば $D_0=445$ m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（ $D_0=425$ mの場合）、59.0m/s（ $D_0=445$ m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・柳井春夫編著：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の評価

項目	コード名 tornado_missile
開発機関	鹿島建設株式会社
開発時期	2013年
使用したバージョン	Ver. 1.1.0 (選定理由：解析時の検証済みの最新バージョンであるため)
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の評価
コードの概要	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。飛来物の速度、飛散距離及び飛散高さ等を算出する。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する。
検証及び妥当性確認の内容	tornado_missile は、鹿島建設株式会社で開発されたコードであり、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。 ・ Simiu & Scanlan による解析結果及び江口ほか（電中研）による解析結果と、同じ条件下の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。 【妥当性確認】 tornado_missile を、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使用することは次の通り妥当である。 ・ 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。 なお、一部の飛来物について空力パラメータの値が適用範囲を上回るものがあるが、個別に飛来物の速度から得られる飛来時の運動エネルギー、貫通力等を評価し、竜巻防護施設に影響がないことを確認している。
その他（工認実績等）	既工認での使用実績はない。 なお、今回使用しているバージョンは最新バージョンと一致している。

計算機コードの概要及び検証と妥当性確認の内容説明

tornado_missile

1. 概要

本資料は、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使用する計算機コード `tornado_missile` の概要を説明したものである。

本解析は、新規制基準で新たに評価を要する事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、飛来物が抗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. 特徴

`tornado_missile` は、鹿島建設株式会社にて開発され保守されており、空気中の物体が受ける抗力による運動を計算し、飛来物の速度、飛散距離及び飛散高さを算定する計算機コードである。

`tornado_missile` での解析手法は、Simiu & Scanlan^[1]及び Simiu & Cordes^[2]をもとにしており、鉛直方向には構造が変化しないランキン渦が移動する風速場を仮定し、時刻 t における竜巻中心位置 $X_T(t)$ より $r(t)$ の位置における風速場の中で、質点系にモデル化した飛来物が抗力を受けて運動する状態の軌跡を計算することで、飛来物の速度、飛散距離及び飛散高さを評価する事が可能である。

3. 解析手法

3.1 風速場評価の理論式

風速場は鉛直方向に構造が変化しないランキン渦とする。

最大接線風速半径 R_m 、最大接線風速 V_{Rm} 、竜巻中心の移動速度 V_T をもとに、時刻 t において竜巻中心 $X_T(t)$ から $r(t)$ の位置での竜巻による風速場を、Simiu & Cordes 及び Simiu & Scanlan をもとに式 (1) ~ (5) のように与える。

$$\text{接線風速} \quad : \quad V_s(r(t)) = (r(t)/R_m)V_{Rm} \quad (r(t) < R_m \text{ の範囲}) \quad (1)$$

$$V_s(r(t)) = (R_m/r(t))V_{Rm} \quad (r(t) \geq R_m \text{ の範囲}) \quad (2)$$

$$\text{半径方向成分} \quad : \quad V_r(r(t)) = \frac{1}{\sqrt{5}}V_s(r(t)) \quad (3)$$

$$\text{接線方向成分} \quad : \quad V_\theta(r(t)) = \frac{2}{\sqrt{5}}V_s(r(t)) \quad (4)$$

$$\text{鉛直方向成分} \quad : \quad V_z(r(t)) = \frac{4}{3\sqrt{5}}V_s(r(t)) \quad (\text{接線方向成分の } 2/3) \quad (5)$$

ここで、時刻 t での飛来物位置を $X(t) = (x(t), y(t), z(t))$ で与えた場合、竜巻の中心と飛来物位置との関係は式 (6) ~ (8) で示される。

$$\text{竜巻の中心} \quad : \quad (X_T(t), 0, Z) = (t \cdot V_T, 0, Z) \quad (Z \text{ は全ての高さ}) \quad (6)$$

$$\text{竜巻中心と飛来物位置の距離} \quad : \quad r(t)^2 = (x(t) - X_T(t))^2 + y(t)^2 \quad (7)$$

$$\text{竜巻中心と飛来物位置がなす角度} \quad : \quad \cos\theta(t) = \frac{x(t) - X_T(t)}{r(t)}, \sin\theta(t) = \frac{y(t)}{r(t)} \quad (8)$$

これらをもとに、時刻 t に飛来物が受ける X 方向風速、 Y 方向風速、 Z 方向風速は式 (9) ~ (11) にて与えられる。

$$X \text{ 方向風速} \quad : \quad V_x(x(t), y(t)) = -V_\theta(t)\sin\theta(t) - V_r(t)\cos\theta(t) + V_T \quad (9)$$

$$Y \text{ 方向風速} \quad : \quad V_y(x(t), y(t)) = +V_\theta(t)\cos\theta(t) - V_r(t)\sin\theta(t) \quad (10)$$

$$Z \text{ 方向風速} \quad : \quad V_z(x(t), y(t)) = \frac{4}{3\sqrt{5}}V_s(r(t)) \quad (11)$$

3.2 飛来物評価の理論式

質点系にモデル化した飛来物は相対速度の2乗に比例した抗力を受けるものとする。

3.1項にて与えた風速場の中での飛来物の運動は式(12)で示される。

$$m\ddot{X}(t) = \frac{1}{2}\rho C_D A (V(X(t)) - \dot{X}(t)) |V(X(t)) - \dot{X}(t)| - mgJ \quad (12)$$

ここで、飛来物の質量 m 、代表面積 A 、抗力係数 C_D 、時刻 t での飛来物位置 $X(t)$ 、速度 $\dot{X}(t)$ 、加速度 $\ddot{X}(t)$ 、時刻 t での飛来物位置での風速 $V(X(t))$ 、空気密度 ρ 、重力加速度 g 、ベクトル J は Z 方向のみ1とする。

尚、抗力係数 C_D は3方向の面積で重みづけした平均とする。

上式の各成分を表示すると式(13)～(15)となる。

$$\ddot{x}(t) = \frac{1}{2} \frac{\rho C_D A}{m} (V_x(t) - \dot{x}(t)) |V(X(t)) - \dot{X}(t)| \quad (13)$$

$$\ddot{y}(t) = \frac{1}{2} \frac{\rho C_D A}{m} (V_y(t) - \dot{y}(t)) |V(X(t)) - \dot{X}(t)| \quad (14)$$

$$\ddot{z}(t) = \frac{1}{2} \frac{\rho C_D A}{m} (V_z(t) - \dot{z}(t)) |V(X(t)) - \dot{X}(t)| - g \quad (15)$$

$$\text{ここで、} |V(X(t)) - \dot{X}(t)| = \sqrt{(V_x(t) - \dot{x}(t))^2 + (V_y(t) - \dot{y}(t))^2 + (V_z(t) - \dot{z}(t))^2} \quad (16)$$

飛散距離及び飛散高さの評価においては、時間刻みを設定し、上式を離散化することで計算を行う。離散化表示は式(17)～(19)となる。計算は陽解法で実施している。

$/_{n-1}$ は $n-1$ ステップでの値、 $/_n$ は n ステップでの値を示す。

$$\dot{x}/_n = \dot{x}/_{n-1} + \Delta t \left\{ \frac{1}{2} \frac{\rho C_D A}{m} (V_{x/n-1} - \dot{x}/_{n-1}) |V_{rel}| \right\} \quad (17)$$

$$\dot{y}/_n = \dot{y}/_{n-1} + \Delta t \left\{ \frac{1}{2} \frac{\rho C_D A}{m} (V_{y/n-1} - \dot{y}/_{n-1}) |V_{rel}| \right\} \quad (18)$$

$$\dot{z}/_n = \dot{z}/_{n-1} + \Delta t \left\{ \frac{1}{2} \frac{\rho C_D A}{m} (V_{z/n-1} - \dot{z}/_{n-1}) |V_{rel}| - g \right\} \quad (19)$$

$$\text{ここで、} V_{rel} = \sqrt{(V_{x/n-1} - \dot{x}/_{n-1})^2 + (V_{y/n-1} - \dot{y}/_{n-1})^2 + (V_{z/n-1} - \dot{z}/_{n-1})^2} \quad (20)$$

位置の更新は式 (21) ~ (23) となる。

$$x_{/n} = x_{/n-1} + \Delta t \cdot \dot{x}_{/n} \quad (21)$$

$$y_{/n} = y_{/n-1} + \Delta t \cdot \dot{y}_{/n} \quad (22)$$

$$z_{/n} = z_{/n-1} + \Delta t \cdot \dot{z}_{/n} \quad (23)$$

飛散距離は式 (24) となる。

$$H_{/n} = \sqrt{(x_n - x_1)^2 + (y_n - y_1)^2} \quad (24)$$

3.3 評価条件

以下の初期条件を設定する。

- ・初期位置

図 1 に示すとおり、水平方向には竜巻の中心より $2R_m$ の円領域内で、半径方向については 20 分割、円周方向については 360 度を 72 分割した位置の 1,440 か所とし、鉛直方向については高さ 40m にあるものとする。

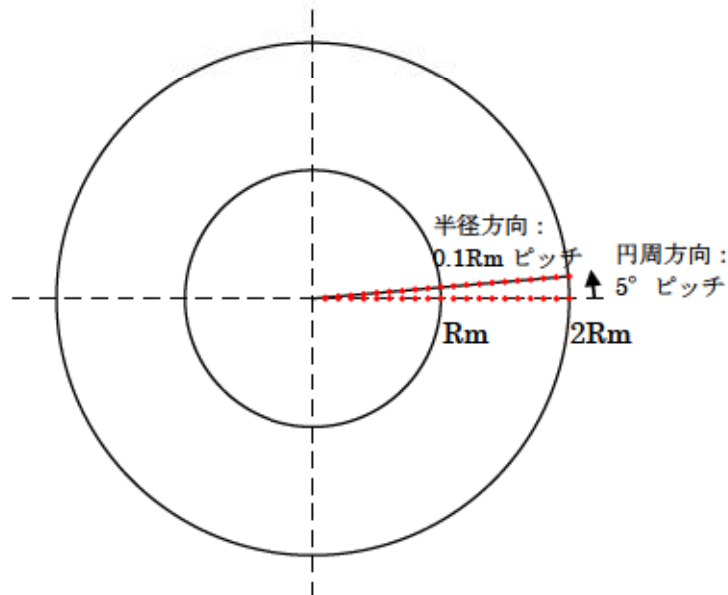


図 1 初期位置 (平面)

- ・初期速度

0m/s とする。

・飛散距離及び飛散高さ

図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。

1,440か所の算出結果のうち、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。

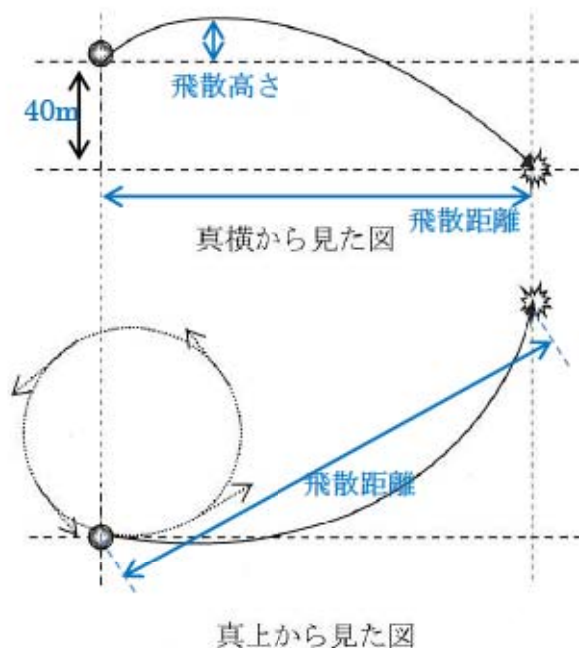


図2 飛散距離及び飛散高さ

3.4 適用範囲

解析は、以下の条件下で実施することとする。

- ・最大風速：150m/s以下を原則とする。
- ・最大接線風速：最大風速との比が0.85を原則とする。
- ・竜巻中心の移動速度：最大風速との比が0.15を原則とする。
- ・最大接線風速半径：30mを原則とする。
- ・空力パラメータ： $0.025\text{m}^2/\text{kg}$ 以下。
- ・解析時間刻み：0.01秒以下。
- ・重力加速度、空気密度は、それぞれ 9.80665m/s^2 、 1.22kg/m^3 を原則とする。

なお、空力パラメータの値が非常に大きくなれば、飛来物の速度は最大風速に収束し、飛散距離は発散し無限大に近づいていく。このような場合、飛来物は、竜巻の移動とともに動く状態であると考えられる。

4. 解析フローチャート

解析フローチャートを図3に示す。

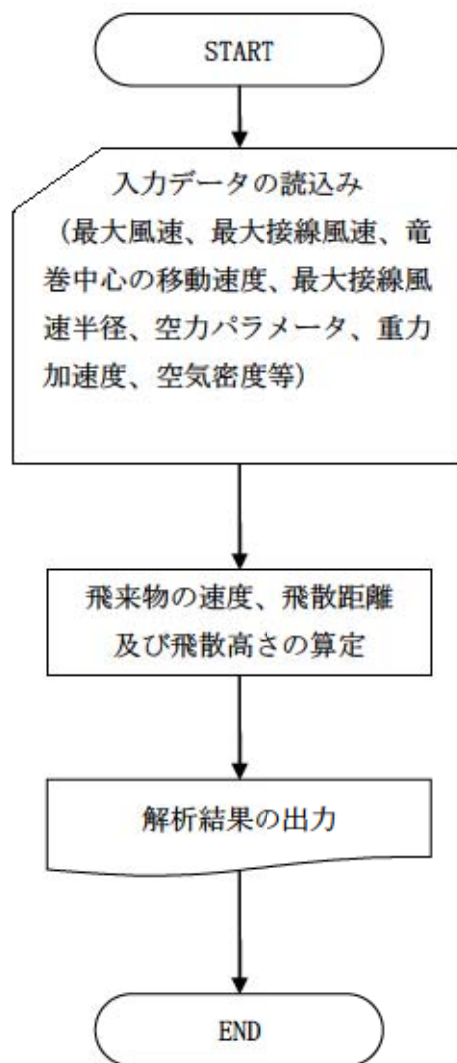


図3 解析フローチャート

5. 検証と妥当性確認

5.1 コードバージョン

検証と妥当性確認に使用したコードバージョンを以下に示す。

tornado_missile Ver.1.1.0

5.2 検証結果

前記(12)式で示した運動方程式は、流体中の質点が相対速度の2乗に比例した抗力を受けることを示すごく一般的なものであり、一定風速下では理論解が得られるが、竜巻のような移動する渦の風速場では理論解を得ることはできず、数値解析によって求めることとなる。また、現状の竜巻の研究において、竜巻の風速場等の実態は正確には解明されていないがランキン渦状の風速分布を示すことは広く認められている。一方で、竜巻内の飛来物の速度や飛散距離を実験等にて実証した例は殆どなく、十分に信頼できる段階には至っていない。

しかし、本解析の目的は、飛来物の速度や飛散距離を算出し、その値をもとに竜巻から防護すべき施設の評価や防護に必要となる対策内容を判断するためのものであることから、本解析の結果については実現象に対する精度よりも、保守性を示すことで計算機コードの妥当性を確認することが重要である。

そこで、実績がある計算機コードによる結果と比較することで、本コードの妥当性を検証した。

具体的には、tornado_missile の検証及び妥当性確認について Simiu & Scanlan による解析結果及び江口ほか(電中研)^[3]による解析結果に対し、同じ条件下の竜巻風速場での飛来物軌跡の解析を実施し、飛来物の速度、飛散距離の解析結果が概ね一致することを確認した。なお、Simiu & Scanlan では飛来物の速度の解析結果のみが示されていることから、Simiu & Scanlan に対しては飛来物の速度の比較のみを行った。また、江口ほか(電中研)に対しては飛来物の速度及び飛散距離の比較を行った。Simiu & Scanlan 及び江口ほか(電中研)の飛来物の速度の解析結果との比較検証を図4、また、江口ほか(電中研)の飛散距離の解析結果との比較検証を図5に示す。

(1) 飛来物の速度の比較検証

a. Simiu & Scanlan の飛来物の速度との比較検証

(a) Simiu & Scanlan の信頼性について

Simiu は、米国原子力学会による「原子力発電所での竜巻、ハリケーン及び直進性の突風の特徴を定める米国内基準」(ANSI/ANS-2.3-2011)^[4]作成のワーキンググループのメンバーであり、また、FEMA による「公共安全室のための設計と建設」^[5]の第一版作成時に参画する等、米国において竜巻等の突風に対する基準・指針策定に関与してきた人物である。

米国原子力規制委員会の NRC-SRP-3.5.1.4 (1981 年)^[6]では、竜巻飛来物に考慮すべき速度として、米国商務省国立標準局 (National Bureau of Standards) 在籍の Simiu & Cordes (1976 年) による飛来物の速度の評価結果を引用している。その後、米国原子力規制委員会では、設計竜巻の最大風速と飛来物の速度について見直し、Regulatory Guide 1.76 (2007 年、NRC-RG-1.76)^[7]として、原子力発電所のための設計竜巻と竜巻飛来物を示しなおした。その NRC-RG-1.76 では、飛来物の速度の評価法については、Simiu & Scanlan による著書(第三版 1996 年)を引用している。すなわち、Simiu & Cordes、Simiu & Scanlan による飛来物の速度の評価法は、米国のように大きな竜巻が発生する地域における原子力発電所に対しても、考慮すべき飛来物の速度評価に十分信頼度がある結果をもたらすものとする。

Simiu & Scanlan による著書は、風が受ける構造物に対する影響評価法を示す代表的な書籍である。その中で、竜巻による構造物の影響評価方法を示しており、竜巻による風速場について本資料の 3.1 項に示すランキン渦でモデル化し、その風速場で飛来物が受ける力の釣り合いについて本資料の 3.2 項に示す相対速度の 2 乗に比例した抗力を受けて定式化することを示している。また、これらの定式化に従って評価した結果については、Simiu & Cordes の結果を引用し、360mph、300mph、240mph の最大風速を有する竜巻に対して、空力パラメータと飛来物の速度の関係を示している。

竜巻による飛来物の速度について、Simiu & Scanlan によると、文献^{[8]~[14]}をもとに、実際の風速場ではランキン渦モデルで定式化する場合よりも最大接線風速半径内では半径方向の風速は遅く、鉛直方向の風速についても彼らが設定した風速よりも遅い。そのため、実際の飛来物は計算結果より早く落下し、飛来物の速度も小さいとしている。これらから、tornado_missile によって得られる飛来物の速度等についても、実際よりも保守側であるとする。

なお、Simiu & Scanlan による著書では、評価の概要とある条件 (最大風速が 360mph、300mph、240mph 時で、最大接線風速半径が 45.7m (推定値) の場合、等) における飛来物の速度の算出結果が示されているが、その解析コード等の詳細が公開されていないため、設計に用いる設計竜巻の最大風速 100m/s の評価には用いることができない。よって、Simiu & Scanlan で示されている風速場や飛来物が受ける力の釣り合い等の考え方に基き開発した tornado_missile を用いた評価を行った。

(b) Simiu & Scanlan と tornado_missile の飛来物の速度の比較結果について

tornado_missile と Simiu & Scanlan の解析結果を比較するために、Simiu & Scanlan が示す飛来物の速度の評価時と同等の条件を tornado_missile に与えて解析を実施し、両者の解析結果を比較することで、妥当性検証を実施した。評価条件を表 1 に、比較の結果を図 4 に示す。

Simiu & Scanlan において、空気密度等の評価条件が明らかとなっていないが、日本

と米国で大きな差はないと考えられることから、tornado_missile では一般的な値を採用した。

図 4 に示すように、tornado_missile の空力パラメータに対する飛来物の速度の解析結果である青●及び青■は、Simiu & Scanlan による結果である青点線と比較し、例えば、竜巻の最大風速が 107.3m/s の場合において、空力パラメータ $0.006\text{m}^2/\text{kg}$ では飛来物の速度が 40~45m/s となること、空力パラメータが $0.02\text{m}^2/\text{kg}$ では、飛来物の速度が 50~55m/s になること等、空力パラメータと飛来物の速度の非線形な特性が、両者で概ね一致することを確認している。

なお、tornado_missile による結果は、Simiu & Scanlan による結果よりも、やや大きくなる傾向があり、保守側の結果を示している。その差は、表 1 に示す「不明」の条件等による差に起因していると考えられ、tornado_missile の評価結果が Simiu & Scanlan の評価結果よりやや大きめの値を示すことから、tornado_missile にて設定した評価条件は保守的であると考えられる。

b. 江口ほか（電中研）の飛来物の速度との比較検証

(a) 江口ほか（電中研）の信頼性について

江口ほか（電中研）による計算機コードは、Simiu & Cordes と同様の飛来物の速度を求めるものである。本解析コードは、非定常風速場を用いる既往研究^{[15][16]}の解析結果と概ね一致することが検証されている。

(b) 江口ほか（電中研）と tornado_missile の飛来物の速度の比較結果について

江口ほか（電中研）は Simiu & Scanlan による飛来物の速度の評価と同等の条件を与えた飛来物の速度の解析を行った。それと同等の条件を tornado_missile に与えて解析を実施し、両者の解析結果を比較することで、妥当性検証を実施した。

評価条件を表 1 に、比較の結果を図 4 に示す。図 4 に tornado_missile より算出した空力パラメータに対する飛来物の速度を示す。青●及び青■は、江口ほか（電中研）による解析結果の赤実線上にあり、両者が概ね一致することを確認している。なお、tornado_missile 及び江口ほか（電中研）による結果は、前述のとおり、Simiu & Scanlan の結果よりやや大きめの飛来物の速度となり、保守側の値を示す。

表1 評価条件

	本検討 (tornado_missile)		Simiu & Scanlan		江口ほか (電中研)	
	I :	III :	I :	III :	I :	III :
最大風速	160.9m/s	107.3m/s	360mph	240mph	160.9m/s	107.3m/s
最大接線風速	129.6m/s	84.9m/s	290mph	190mph	129.6m/s	84.9 m/s
竜巻中心の 移動速度	31.3m/s	22.4m/s	70mph	50mph	31.3 m/s	22.4 m/s
最大接線風速半径	45.7m		45.7m (推定値)		45.7m	
空気密度	1.226kg/m ³		—*		1.226kg/m ³	
飛来物初期位置 (x, y, z)	45.7m, 0, 40m		150ft, 0, 40m		45.7m, 0, 40m	
解析時間刻み	0.01s		—**		0.01s	
重力加速度	9.8m/s ²		—*		9.8m/s ²	

* 評価条件を明確にしていないが、空気密度、重力加速度については、日本と米国で大きな差がないと考える。

**数値解析法及びその評価条件については明確にしていない。

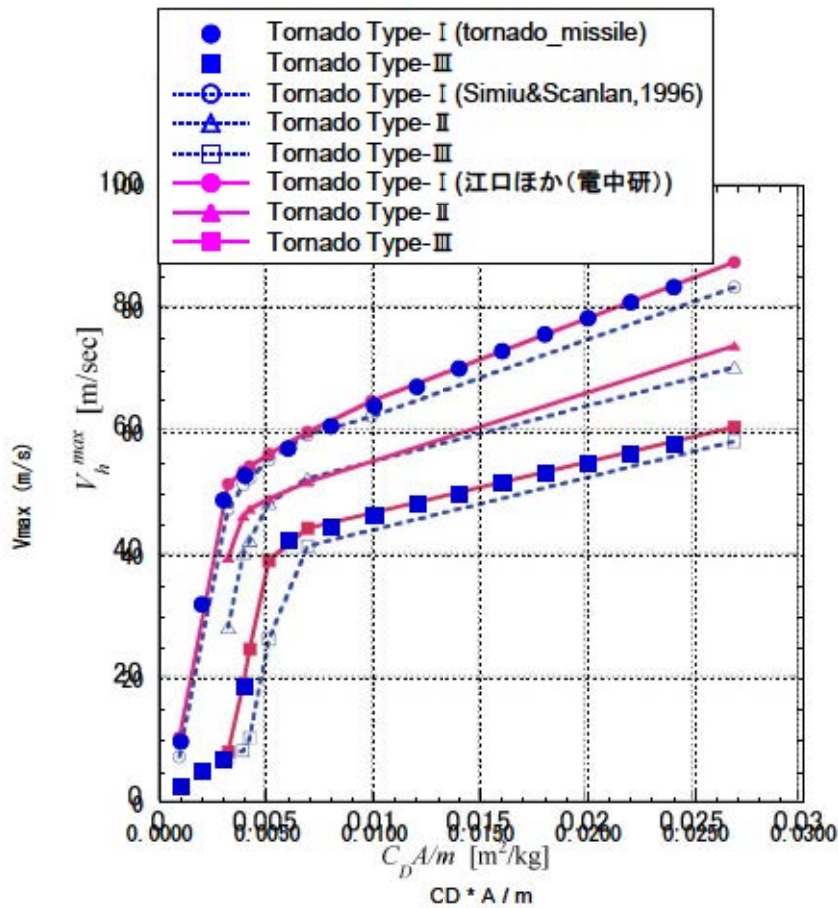


図4 Simiu & Scanlan 及び江口ほか (電中研) による解析結果との比較【飛来物の速度】*

* Type-I、II、IIIのうち、最大風速が最も大きいType-Iと最大風速が最も小さいType-IIIについて比較を行った。

(2) 飛散距離の比較検証

江口ほか（電中研）が示す飛散距離の評価時と同等の条件を tornado_missile に与えて解析を実施し、両者の解析結果を比較することで、妥当性検証を実施した。

比較の結果を図5に示す。図5に tornado_missile より算出した空力パラメータに対する飛散距離を示す。青◆は、江口ほか（電中研）による解析結果の赤実線上にあり、両者が概ね一致を示すことを確認している。

表2 評価条件

	本検討 (tornado_missile)	江口ほか (電中研)
最大風速	100m/s	100m/s
最大接線風速	85m/s	85m/s
竜巻中心の移動速度	15m/s	15m/s
最大接線風速半径	30.0m	30.0m
空気密度	1.22kg/m ³	1.22kg/m ³
飛来物初期高さ	40m	40m
解析時間刻み	0.01s	0.01s
重力加速度	9.8m/s ²	9.8m/s ²

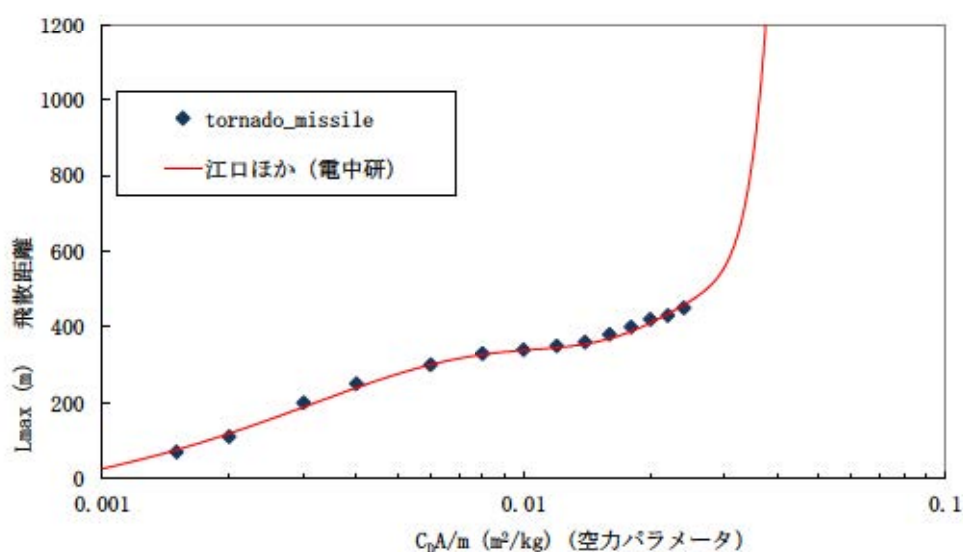


図5 江口ほか（電中研）による解析結果との比較【飛散距離】

(3) 陽解法の精度について

tornado_missile においては、時間的な変化を逐次解析する直接時間積分法として陽解法を用いた解析を行っている。

陽解法の精度については、江口ほか（電中研）でも同様に陽解法が用いられており、陽解法による解析結果と陰解法による解析結果を比較し、解析時間刻みを 0.1s 以下にすれば、陰解法に対する陽解法の相対誤差は 1% 以下に抑えることができるとしている。

従って、tornado_missile と陰解法を用いた江口ほか（電中研）による解析結果が概ね一致していること（図 4 及び図 5 参照）、及び本解析における tornado_missile の解析時間刻みは 0.01s としていることから、陽解法が起因する誤差は十分小さいと考える。

5.3 妥当性確認結果

tornado_missile を、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。

なお、一部の飛来物について空力パラメータの値が 3.4 項で示す適用範囲の $0.025\text{m}^2/\text{kg}$ を上回るものがある。空力パラメータが大きくなると飛散距離は発散する（図 5 参照）が、これに該当する飛来物は受風面積に対し質量が非常に小さいものであることから構造物への衝突による影響は小さく、個別に飛来物の速度から得られる飛来時の運動エネルギー、貫通力等々を評価し、竜巻防護施設に影響がないことを確認している。

6. 参考文献

- [1] E. Simiu & R.H. Scanlan: Wind Effects on Structures, Wiley, 1977, (3rd. Edition 1996).
- [2] E. Simiu & M. Cordes: Tornado-Borne Missile Speeds, NBSIR 76-1050, 1976.
- [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竜巻飛来物の速度の評価、2013.
- [4] 米国原子力学会 (American Nuclear Society) : American National Standard estimating tornado, hurricane, and extreme straight line wind characteristics at nuclear facility sites, ANSI/ANS-2.3-2011, 2011.
- [5] 米国連邦緊急事態管理庁 Federal Emergency Management Agency of the United States, FEMA): Design and Construction Guidance for Community Safe Rooms, FEMA 361, Second Edition, 2008.
- [6] 米国原子力規制委員会 (U.S. Nuclear Regulatory Commission) : Standard Review Plan 3.5.1.4 Missile Generated by Natural Phenomena, NUREG-0800, 1981.

- [7] 米国原子力規制委員会 (U. S. Nuclear Regulatory Commission) : Design-basis Tornado and Tornado Missiles for Nuclear Power Plants, Regulatory Guide, 1.76, 2007.
- [8] D. F. Paddleford, Characteristics of Tornado Generated Missiles, Report No. WCAP-7897, Westinghouse Electric Corp., Pittsburgh, Pa., 1969.
- [9] A. J. H. Lee, Design Parameters for Tornado Generated Missiles, Topical Report No. GAI-TR-102, Gilbert Associates, Inc., Reading, Pa., 1975.
- [10] The Generation of Missiles by Tornadoes, Report No. TVA-TR74-1, Tennessee Valley Authority, Knoxville, 1974.
- [11] R. C. Lotti, Velocities of Tornado-Generated Missiles, Report No. ETR-1003, Ebasco Services, Inc., New York, 1975.
- [12] D. R. Beeth and S. H. Hobbs, Jr., Analysis of Tornado Generated Missiles, Report No. B8R-001, Brown and Root, Inc., Houston, TX, 1975.
- [13] B. L. Meyers and W. M. Morrow, Tornado Missile Risk Model, Report No. BC-TOP-10, Bechtel Power Corp., San Francisco, CA, 1975.
- [14] A. K. Battacharya, R. C. Boritz, and P. K. Niyogi, Characteristics of Tornado Generated Missiles, Report No. VEC-TR-002-0, United Engineers and Constructors, Inc., Philadelphia, 1975.
- [15] 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
- [16] 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

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「『発電用軽水型原子炉施設の安全機能の重要度分類に関する審査指針』に基づくクラス1およびクラス2に属する構築物、系統および機器」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>

重大事故等対処設備の機能維持について

設置許可基準規則第43条（重大事故等対処設備）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、竜巻の影響を考慮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。

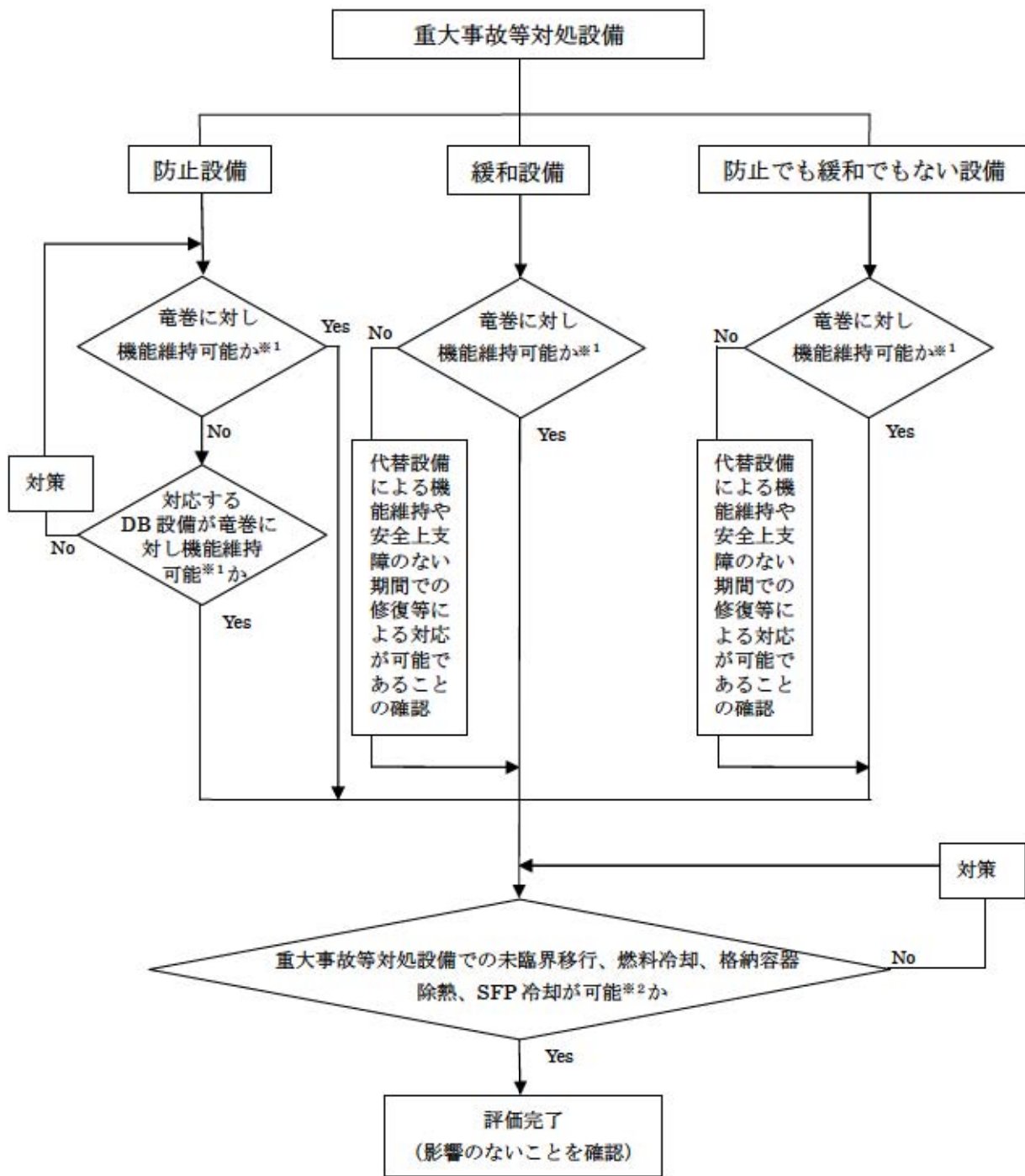
- (1) 重大事故防止設備は、竜巻によって対応する設計基準対象施設の安全機能と同時にその機能が損なわれるおそれのないこと
- (2) 重大事故等対処設備であって、重大事故防止設備でない設備は、代替設備若しくは安全上支障のない期間内での復旧により機能維持可能であること
- (3) 竜巻が発生した場合においても、重大事故等対処設備によりプラント安全性に関する主要な機能（未臨界移行機能、燃料冷却機能、格納容器除熱機能、使用済燃料ピット注水機能）が維持できること（竜巻により重大事故等対処設備と設計基準対象施設の機能が同時に損なわれることはないが、安全上支障のない期間内での復旧により機能維持可能である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

竜巻に対する重大事故等対処設備の影響評価フローを第1図に、竜巻に対する重大事故等対処設備の影響評価を第1表に示す。

また、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：ATWS緩和設備
- ・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：代替補機冷却（可搬型大型送水ポンプ車）
- ・使用済燃料ピット注水機能：使用済燃料ピットの注水（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 (1/11)

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等	防止設備	R/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。

・防護方法

分散配置：当該設備の保管場所は位置的分散を図っていることから、当該設備の安全機能は維持される。

建屋内：当該設備が設置されている建屋は鉄筋コンクリート造であり、設計竜巻による複合荷重に対して構造健全性は維持され、かつ設計飛来物は貫通しないと結果が得られたことから、当該設備は設計竜巻の影響を受けない。

・建屋名

R/B：原子炉建屋、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(2/11)

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用バッテリー	防止設備	A/B	○	建屋内
		加圧器逃がし弁操作用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次冷却システムの減圧	加圧器逃がし弁	緩和設備	R/B	○	建屋内
1次冷却システムの減圧(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	
余熱除去システムの隔離(IS-LOCA発生時)	余熱除去ポンプ入口弁	防止設備	R/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。

・防護方法
 分散配置：当該設備の保管場所は位置的分散を図っていることから、当該設備の安全機能は維持される。
 建屋内：当該設備が設置されている建屋は鉄筋コンクリート造であり、設計竜巻による複合荷重に対して構造健全性は維持され、かつ設計飛来物は貫通しないと結果が得られたことから、当該設備は設計竜巻の影響を受けない。

・建屋名
 R/B：原子炉建屋、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 (3/11)

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。

防護方法

分散配置: 当該設備の保管場所は位置的分散を図っていることから、当該設備の安全機能は維持される。

建屋内: 当該設備が設置されている建屋は鉄筋コンクリート造であり、設計竜巻による複合荷重に対して構造健全性は維持され、かつ設計飛来物は貫通しないとの結果が得られたことから、当該設備は設計竜巻の影響を受けない。

建屋名 R/B: 原子炉建屋、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(4/11)

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
	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。

・防護方法

分散配置: 当該設備の保管場所は位置的分散を図っていることから、当該設備の安全機能は維持される。

建屋内: 当該設備が設置されている建屋は鉄筋コンクリート造であり、設計竜巻による複合荷重に対して構造健全性は維持され、かつ設計飛来物は貫通しないと結果が得られたことから、当該設備は設計竜巻の影響を受けない。

・建屋名

R/B: 原子炉建屋、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 (5/11)

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ブ等	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
			防止設備	R/B	○	建屋内
	炉心注水(SIP)(熔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	○	建屋内
		燃料取替用水ピット	緩和設備	R/B	○	建屋内
	炉心注水(RHRP)(熔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)	余熱除去ポンプ等	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
	炉心注水(CHP)(熔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)	充てんポンプ	緩和設備	A/B	○	建屋内
		燃料取替用水ピット等	緩和設備	R/B	○	建屋内
	代替炉心注水(B-CSP)(熔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)	B-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	
代替炉心注水(代替CSP)(熔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)	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	
炉心注水(CHP(自己冷却))(熔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)	B-充てんポンプ	緩和設備	A/B	○	建屋内	
	燃料取替用水ピット等	緩和設備	R/B	○	建屋内	
代替炉心注水(代替CSP)(代替電源)(熔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)	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	余熱除去ポンプ等	防止設備	A/B	○	建屋内	
	格納容器再循環サンブ等	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。

・防護方法

分散配置：当該設備の保管場所は位置的分散を図っていることから、当該設備の安全機能は維持される。

建屋内：当該設備が設置されている建屋は鉄筋コンクリート造であり、設計竜巻による複合荷重に対して構造健全性は維持され、かつ設計飛来物は貫通しないと結果が得られたことから、当該設備は設計竜巻の影響を受けない。

・建屋名

R/B：原子炉建屋、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 (6/11)

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- 高圧注入ポンプ	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- 高圧注入ポンプ	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	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ブ等		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。

・防護方法

分散配置: 当該設備の保管場所は位置的分散を図っていることから、当該設備の安全機能は維持される。

建屋内: 当該設備が設置されている建屋は鉄筋コンクリート造であり、設計竜巻による複合荷重に対して構造健全性は維持され、かつ設計飛来物は貫通しないと結果が得られたことから、当該設備は設計竜巻の影響を受けない。

防護対策実施: 防護対象設備により、当該設備は設計竜巻の影響を受けない。

・建屋名

R/B: 原子炉建屋、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(7/11)

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熔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	○	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計	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	○	建屋内
	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
	—	格納容器雰囲気ガス試料採取設備	緩和設備	R/B	○	建屋内
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。

・防護方法

分散配置: 当該設備の保管場所は位置的分散を図っていることから、当該設備の安全機能は維持される。

建屋内: 当該設備が設置されている建屋は鉄筋コンクリート造であり、設計竜巻による複合荷重に対して構造健全性は維持され、かつ設計飛来物は貫通しないと結果が得られたことから、当該設備は設計竜巻の影響を受けない。

防護対策実施: 防護対象設備により、当該設備は設計竜巻の影響を受けない。

補修: 竜巻襲来後速やかに点検を行い、損傷を確認した場合、速やかにプラントを停止し、補修を行なう。

・建屋名

R/B: 原子炉建屋、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（8/11）

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 緩和設備	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	防止設備 緩和設備	屋外	○	分散配置
	燃料取扱棟への放水	可搬型大容量海水送水ポンプ車、放水砲	防止設備 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	防止設備 緩和設備	R/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	○	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）	荷揚場シルトフェンス	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	○	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）	荷揚場シルトフェンス	緩和設備	屋外	○	分散配置
	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となる水の供給設備）	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
	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。

・防護方法

分散配置：当該設備の保管場所は位置的分散を図っていることから、当該設備の安全機能は維持される。

代替設備：同機能を有する設計基準対象施設により、安全機能を維持できる。

建屋内：当該設備が設置されている建屋は鉄筋コンクリート造であり、設計竜巻による複合荷重に対して構造健全性は維持され、かつ設計飛来物は貫通しないと結果が得られたことから、当該設備は設計竜巻の影響を受けない。

・建屋名

R/B：原子炉建屋、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（9/11）

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	○	地下配置
		代替非常用発電機、可搬型タンクローリー	防止設備 緩和設備	屋外	○	分散配置
	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	○	地下配置
		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	○	地下配置
		可搬型直流電用発電機、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	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	○	地下配置
		代替非常用発電機	防止設備 緩和設備	屋外	○	分散配置
		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	○	地下配置
		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	○	地下配置
		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	○	地下配置	

・評価
○：竜巻に対して安全機能を維持できる。

・防護方法
分散配置：当該設備の保管場所は位置的分散を図っていることから、当該設備の安全機能は維持される。
建屋内：当該設備が設置されている建屋は鉄筋コンクリート造であり、設計竜巻による複合荷重に対して構造健全性は維持され、かつ設計飛来物は貫通しないと結果が得られたことから、当該設備は設計竜巻の影響を受けない。
地下配置：当該設備が設置されている地下構造物は鉄筋コンクリート造であり、設計竜巻による複合荷重に対して構造健全性は維持され、かつ設計飛来物は貫通しないと結果が得られたことから、当該設備は設計竜巻の影響を受けない。
代替設備：同機能を有する設計基準対象施設により、安全機能を維持できる。

・建屋名
R/B：原子炉建屋、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（10/11）

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（原子炉压力容器内の温度）	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（原子炉压力容器内の圧力）	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（原子炉压力容器内の水位）	加圧器水位等	防止設備	R/B	○	建屋内
	注水量計測（原子炉压力容器への注水量）	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）	代替格納容器スプレイポンプ出口積算流量等	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
	水位計測（原子炉格納容器内の水位）	格納容器水位、原子炉下部水位キャピティ水位	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
	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
	水位計測（最終ヒートシンクの確保）	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
	圧力計測（最終ヒートシンクの確保）	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	○	建屋内
	水位計測（水源の確保）	燃料取替用水ピット水位	防止設備 緩和設備	R/B	○	建屋内
	水位計測（水源の確保）	ほう酸タンク水位	防止設備	A/B	○	建屋内
水位計測（水源の確保）	補助給水ピット水位	防止設備 緩和設備	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	緩和設備	A/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	緩和設備	A/B	○	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 データ表示端末	緩和設備	A/B TSC	○	建屋内	
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）	酸素濃度計、二酸化炭素濃度計	防止設備	A/B	○	建屋内
	汚染の持ち込み防止	可搬型照明（SA）	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。

・防護方法

建屋内：当該設備が設置されている建屋は鉄筋コンクリート造であり、設計竜巻による複合荷重に対して構造健全性は維持され、かつ設計飛来物は貫通しないと結果が得られたことから、当該設備は設計竜巻の影響を受けない。

・建屋名

R/B：原子炉建屋、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 (11/11)

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	
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、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
	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)	酸素濃度計、二酸化炭素濃度計	緩和設備	TSC	○	建屋内
	居住性の確保 (放射線量の測定及び気象観測)	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 伝送サーバ等	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、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
		携行型通話装置	防止設備 緩和設備	A/B	○	建屋内
		データ収集計算機、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、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	TSC	○	建屋内

・評価

○：竜巻に対して安全機能を維持できる。

・防護方法

分散配置：当該設備の保管場所は位置的分散を図っていることから、当該設備の安全機能は維持される。

建屋内：当該設備が設置されている建屋は鉄筋コンクリート造であり、設計竜巻による複合荷重に対して構造健全性は維持され、かつ設計飛来物は貫通しないと結果が得られたことから、当該設備は設計竜巻の影響を受けない。

・建屋名

A/B：原子炉補助建屋、TSC：緊急時対策所

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

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>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ないとしており、敷地周辺の自然環境を基に想定される自然現象の一つとして、竜巻の影響を挙げている。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事象^(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）） 	<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ないと規定されており、この自然現象の一つとして竜巻が挙げられている。</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事象等によって原子炉施設の安全性を損なうことのない設計であることを確認するための「原子力発電所の竜巻影響評価ガイド」（以下、「評価ガイド」という。）を参照して竜巻影響評価を以下について実施し、竜巻に対する評価対象施設として抽出した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）の設定 ・泊発電所における飛来物に係る調査 ・飛来物発生防止対策 ・飛来物に対する竜巻防護施設の防護対策 ・考慮すべき設計荷重に対する竜巻防護施設の構造健全性等の評価を行い、必要に応じて対策を行うことで安全機能が維持されることの確認

原子力発電所の電巻影響評価ガイド	泊発電所3号機電巻影響評価結果
<ul style="list-style-type: none"> ・日本工業規格 ・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準・同解説（2005） ・日本建築学会：鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説（2010年6月） ・日本建築学会：鋼構造設計規準－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） <p>（2）海外</p> <ul style="list-style-type: none"> ・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 <p>ほか</p> <p>1.4 用語の定義</p> <p>本ガイドで用いる用語の定義を以下に示す。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・電巻防護施設：「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。 ・基準電巻：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、設計対象施設の安全性に影響を与えるおそれがある電巻。 	

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
<ul style="list-style-type: none"> ・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に基づいて設定されるエリア。 ・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。 	

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>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・構築物等とする。</p>	<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>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・構築物等とされている。また、「実用発電用原子炉及びその附属施設の位置、構造及び設備の基準に関する規則」第6条において、「安全施設は、想定される自然現象(地震及び津波を除く)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。</p> <p>以上を踏まえ、「基準地震動及び耐震設計方針に係る審査ガイド」の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・構築物等に加え、「発電用軽水型原子炉施設の安全機能の重要度分類に関する審査指針」に基づくクラス1およびクラス2に属する構築物、系統および機器を竜巻防護施設とする。</p> <p>なお、クラス3に属する構築物、系統及び機器が設計竜巻により損傷した場合については、代替設備により必要な機能を確保する、安全上支障のない期間に修復する等の対応を行うことから、竜巻防護施設として抽出していない。</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・構築物等)による防護機能によって、設計竜巻による影響を受けないことが確認された施設については、設計対象から除外できる旨記載されていることを踏まえ、屋外設備、建屋内の施設で外気と繋がっている設備及び外殻となる施設による防護機能が期待できない設備として、以下を抽出し評価を実施する。</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、燃料油貯油槽(既設、新設)、取水ピットポンプ室及びピストレーナ室については、竜巻防護施設を内包する建屋・構築物であり、後述の「(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)</p> <ul style="list-style-type: none"> ・排気筒(建屋外) <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)

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>(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^(注2.1)。</p>	<ul style="list-style-type: none"> ・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、安全補機開閉器室空調装置の外気と繋がるダクト・ファン・空調ユニット及び外気との境界となるダンパ・パタフライ弁) <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がある施設)</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> <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槽ベント管 (ディーゼル発電機燃料油貯槽の附属設備) <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

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>解説2.1 設計対象施設 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。 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。 （注2.1）竜巻防護施設を内包する区画。</p>	<p>ンバ)</p> <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） ・燃料油貯油槽（既設、新設） ・取水ピットポンプ室 ・ストレナ室 <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、基準電巻、設計電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。

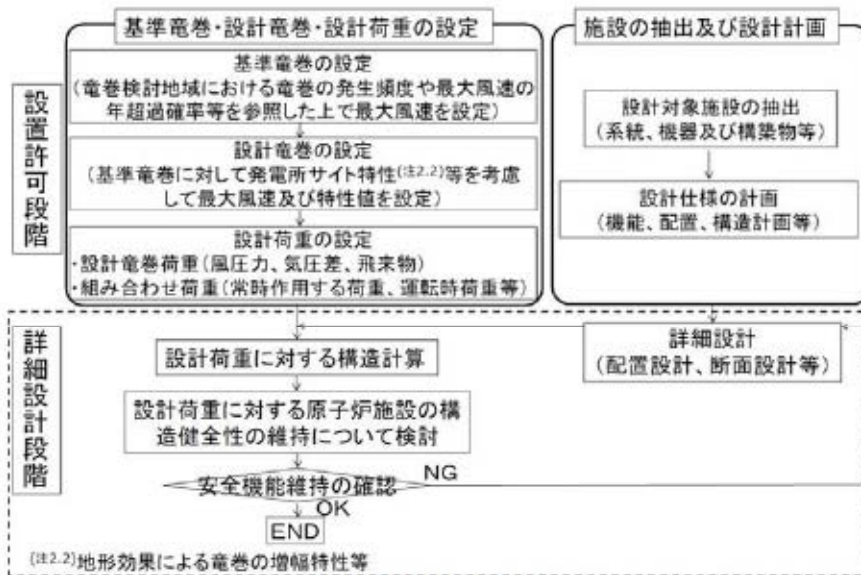


図2.1 設計の基本フロー

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、基準電巻、設計電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電巻防護施設の安全機能が維持されることを確認する。

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>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</p> <p>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</p> <p>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>	<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</p> <p>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</p> <p>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た設計荷重に対して、評価対象施設、あるいはその特定の区画の構造健全性等の評価を行い、必要に応じて対策を行うことで竜巻防護施設の安全機能が維持されることを確認する。</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>3. 基準竜巻・設計竜巻の設定</p> <p>3.1 概要</p> <p>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。</p> <p>解説3.1 基準竜巻・設計竜巻の最大風速の設定</p> <p>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。</p> <div data-bbox="358 475 907 1029" style="border: 1px dashed black; padding: 10px;"> <pre> graph TD A["竜巻検討地域の設定 発電所が立地する地域及び竜巻発生 の観点から気象条件等が類似の 地域"] --> B["基準竜巻の最大風速(V_B)の設定 (竜巻検討地域における竜巻の 発生頻度や最大風速の年超過 確率等を参照した上で最大風 速を設定)"] B --> C["設計竜巻の最大風速(V_D)の 設定 (発電所サイト特性^(注3.1)等 を考慮してV_Bの割り増し等 を行い最大風速を設定) V_D = α · V_B, α ≥ 1"] C --> D["設計竜巻の特性値の設定 (V_D等に基づいて移動速度、 最大気圧低下量等の特性値を 設定)"] D --> E["設計竜巻荷重(F_D)の設定 (風圧力、気圧差、飛来物の衝 突による衝撃荷重を設定)"] </pre> <p>解説図3.1 基準竜巻・設計竜巻の設定に係る基本フロー</p> </div> <p>(注3.1) 地形効果による竜巻の増幅特性等</p>	<p>3. 基準竜巻・設計竜巻の設定</p> <p>3.1 概要</p> <p>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。</p>

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 viewpoint 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、竜巻検討地域を目安を、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 viewpoint 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^(*)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て、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。

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 viewpoint から泊発電所が立地する地域と気象条件が類似する地域から設定した。

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。

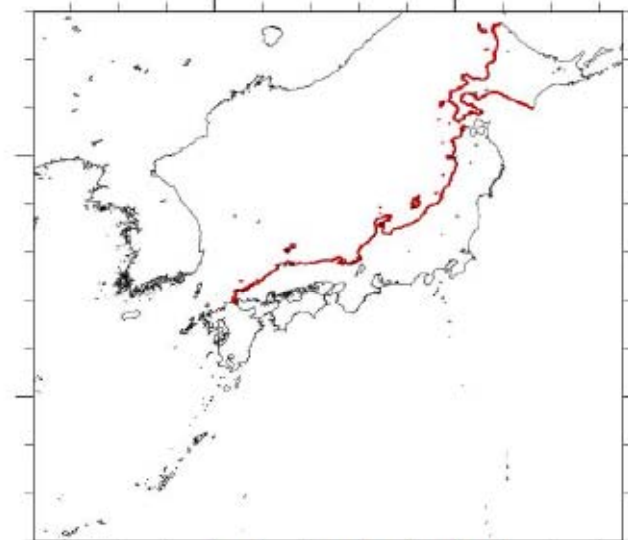
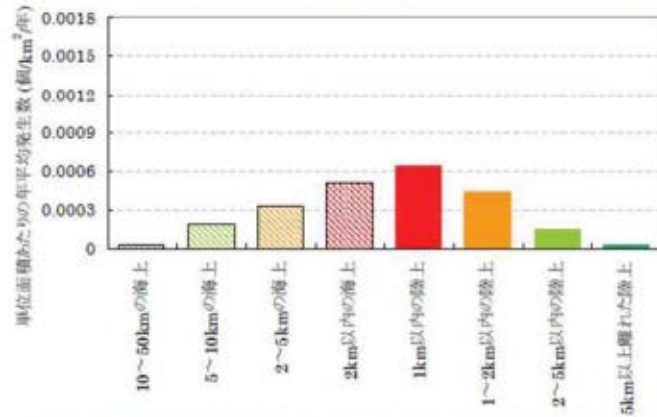


図3.1 泊発電所における竜巻検討地域



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3.2)
(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。

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>3.3 基準竜巻の設定</p> <p>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。</p> <p>(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。</p> <p>(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。</p> <p>①過去に発生した竜巻による最大風速(V_{B1})</p> <p>日本で過去に発生した竜巻による最大風速をV_{B1}として設定することを原則とする。ただし、竜巻検討地域で過去に発生した竜巻の最大風速を十分な信頼性のあるデータ等に基づいて評価できる場合においては、「日本」を「竜巻検討地域」に読み替えることができる。</p> <p>②竜巻最大風速のハザード曲線による最大風速(V_{B2})</p> <p>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。</p> <p>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。</p> <hr/> <p>解説3.3 基準竜巻の最大風速(V_B)の設定</p> <p>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</p> <p>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。</p> <p>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。</p> <p>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}を設定する場合において、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。</p> <p>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は、藤田スケールの各区分(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。</p>	<p>3.3 基準竜巻の設定 (1)</p> <p>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。</p> <p>3.3 基準竜巻の設定 (2)</p> <p>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)</p> <p>過去に発生した竜巻による最大風速(V_{B1})の設定にあたっては、現時点で当社は竜巻検討地域で過去に発生した竜巻の最大風速を十分な信頼性のあるデータ等に基づいて評価できるだけの知見を有していないことから、日本で過去に発生した竜巻の観測データを用いてV_{B1}を設定する。なお、今後も地域特性に関する検討、新たな知見の収集やデータの拡充などに取組み、より信頼性のある評価が可能となるよう努力する。</p> <p>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。</p> <p>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)</p> <p>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。</p> <p>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『設計基準事故は、「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おいています』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}より一桁下げて、年超過確率10^{-5}に相当する竜巻最大風速をV_{B2}とした。</p>

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^(*)及びGarson et. al^(*)) 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芸大学に委託した研究の成果^(*)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、被害域長さ及び移動方向は、竜巻検討地域で過去に発生した竜巻の記録に基づいて対数正規分布等を仮定して設定することを基本とする。また、竜巻による被害幅、被害域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芸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、被害域長さは、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。

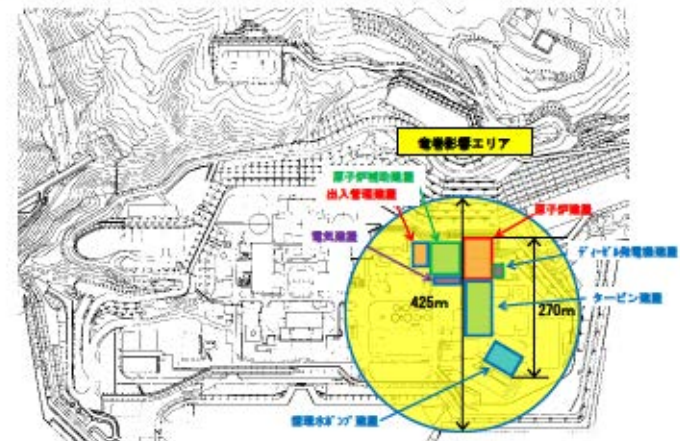


図3.2 竜巻影響エリア

(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定し、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の範囲で確率分布を算定し、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は、藤田スケールの各区分(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。

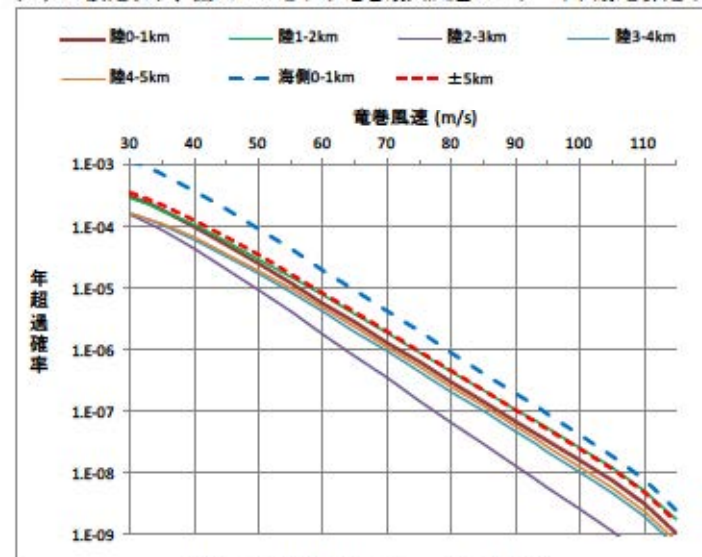
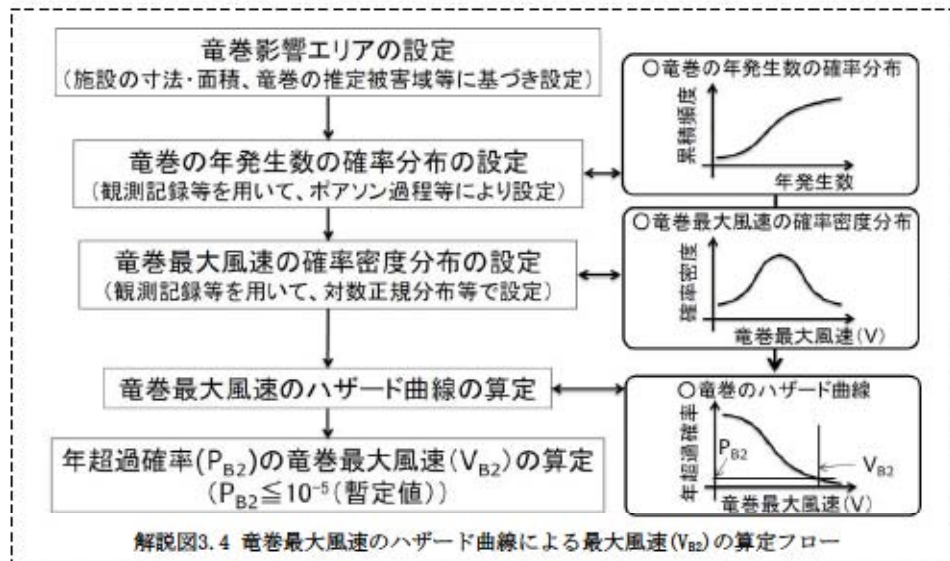


図 3.3 竜巻最大風速のハザード曲線

(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。



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_B)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_B 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。

解説3.4 設計竜巻の最大風速(V_0)及び特性値の設定

解説3.4.1 設計竜巻の最大風速(V_0)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と考えられる^(※9、12※)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_0)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指摘されている^(※10、11※)が、 V_0 の設定においては、そのような減衰の効果は考慮しない。

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_B 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_0)及び特性値の設定

解説3.4.1 設計竜巻の最大風速(V_0)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と考えられることから、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_0)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指摘されているが、 V_0 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

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_0) 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。

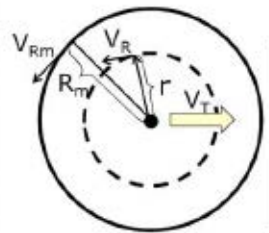
- (1) 移動速度 (V_T)
- (2) 最大接線風速 (V_{Rm})
- (3) 最大接線風速半径 (R_m)
- (4) 最大気圧低下量 (ΔP_{max})
- (5) 最大気圧低下率 (dp/dt)_{max}

(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、設定に足る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^(*)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しない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3.4.2.3 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。

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

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_0) 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足る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しない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

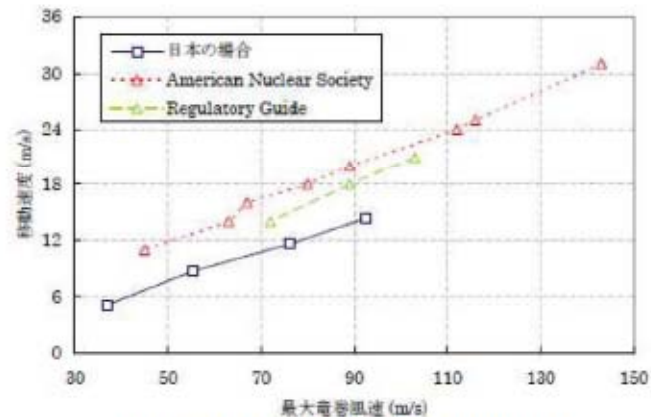
(1) 設計竜巻の移動速度(V_T)の設定

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。

$$V_T = 0.15 \cdot V_0$$

ここで、 V_D (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^(※3)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^(※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は、藤田スケールに基づいた区分(F3、F2及びF2~F3、F1及びF1~F2、F0及びF0~F1)ごとの平均値であるが、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_D)が一定の場合、移動速度が遅い方が、最大気圧低下量(ΔP_{\max})が大きくなる((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く(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^(※3)

(2) 設計竜巻の最大接線風速(V_{Rm})の設定

設計竜巻の最大接線風速(V_{Rm})は、米国NRCの基準類^(※4)を参考として、以下の算定式を用いて V_{Rm} を算定する。

$$V_{Rm} = V_D - V_T \cdots (3.2)$$

ここで、 V_D (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。

(2) 設計竜巻の最大接線風速(V_{Rm})の設定

評価ガイドに基づき、設計竜巻の最大接線風速(V_{Rm})は、以下の算定式を用いて算定した。

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

ここで、 V_D (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。

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>(3) 設計竜巻の最大接線風速が生じる位置での半径(R_w)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_w)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^(※3)に準拠して以下の値を用いる。</p> $R_w = 30 \text{ (m)} \quad \dots (3.3)$ <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(※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> $\Delta P_{max} = \rho \cdot V_{Rw}^2 \quad \dots (3.4)$ <p>ここで、ρ及びV_{Rw}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(※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})及び最大気圧低下率($(dp/dt)_{max}$)を設定する。</p> $(dp/dt)_{max} = (V_T/R_w) \cdot \Delta P_{max} \quad \dots (3.5)$ <p>ここで、V_T及びR_w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>(3) 設計竜巻の最大接線風速が生じる位置での半径(R_w)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_w)は、以下の値を用いた。</p> $R_w = 30 \text{ (m)}$ <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> $\Delta P_{max} = \rho \cdot V_{Rw}^2$ <p>ここで、ρ及びV_{Rw}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> $(dp/dt)_{max} = (V_T/R_w) \cdot \Delta P_{max}$ <p>ここで、V_T及びR_w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_D)は、92m/sとした。 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_D)を、$V_D=100\text{m/s}$とした。</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>4. 施設の設計</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</p> <p>解説4.3.1.1 設計竜巻の最大風速による風圧力の設定</p> <p>解説4.3.1.1.1 概要</p> <p>設計竜巻の最大風速(V_0)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</p> <p>(1) 風圧力の算定に用いる風力係数</p> <p>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、逆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>	<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</p> <p>解説4.3.1.1 設計竜巻の最大風速による風圧力の設定</p> <p>解説4.3.1.1.1 概要</p> <p>設計竜巻の最大風速(V_0)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</p> <p>(1) 風圧力の算定に用いる風力係数</p> <p>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>

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>(2) 設計竜巻による鉛直方向の風圧力</p> <p>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。</p> <p>よって、本ガイドでは、設計竜巻の水平方向の最大風速(V_0)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。</p> <p>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、V_0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。</p> <p>解説4.3.1.1.3 設計竜巻による風圧力の設定</p> <p>設計竜巻の最大風速(V_0)による風圧力(P_0)の算定について以下に示す。</p> <p>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(P_0)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。</p> <p>なお、(4.2)式のV_0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> $P_0 = q \cdot G \cdot C \cdot A \quad \dots (4.1)$ <p>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。</p> $q = (1/2) \cdot \rho \cdot V_0^2 \quad \dots (4.2)$ <p>ここで、ρは空気密度、V_0は設計竜巻の最大風速である。</p> <p>(4.1)式に示すように、風圧力(P_0)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。</p> <p>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(V_0)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。</p> <p>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。</p>	<p>(2) 設計竜巻による鉛直方向の風圧力</p> <p>本評価では、設計竜巻の水平方向の最大風速(V_0)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。</p> <p>解説4.3.1.1.3 設計竜巻による風圧力の設定</p> <p>設計竜巻の最大風速(V_0)による風圧力(P_0)の算定について以下に示す。</p> <p>設計竜巻の水平方向の最大風速によって評価対象施設(屋根を含む)に作用する風圧力(P_0)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> $P_0 = q \cdot G \cdot C \cdot A \quad \dots (4.1)$ <p>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。</p> $q = (1/2) \cdot \rho \cdot V_0^2 \quad \dots (4.2)$ <p>ここで、ρは空気密度、V_0は設計竜巻の最大風速である。</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>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(※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、施設の内外の気圧の変化はゼロに近づくとみなせる。 ・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 	<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。</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

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>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</p> <p>解説4.3.1.3.1 概要</p> <p>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。</p> <p>解説4.3.1.3.2 基本的な考え方</p> <p>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の部分を占める。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が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。</p> <p>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が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得る場合は、原子力発電所の敷地外からの飛来物も考慮する。</p> <p>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^(*)を参考とした。</p> <p>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認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る程度に小さくて固い飛来物（砂利等）</p> <p>解説4.3.1.3.3 設計飛来物の速度の設定</p> <p>(1) 基本的な考え方</p> <p>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_{max})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。</p>	<p>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</p> <p>解説4.3.1.3.1 概要</p> <p>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。</p> <p>解説4.3.1.3.2 基本的な考え方</p> <p>評価対象施設に到達する可能性が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。</p> <p>評価対象施設に到達する可能性がある飛来物を検討する範囲は、泊発電所の敷地内とした。</p> <p>解説4.3.1.3.3 設計飛来物の速度の設定</p> <p>(1) 基本的な考え方</p> <p>(2) 設計飛来物の設定例</p> <p>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。</p> <p>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。</p>

設計飛来物の最大鉛直速度(v_{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^(#4)を参考に設定した下式により算定してもよい。

$$v_{Vmax} = (2/3) \cdot v_{Hmax} \cdots (4.3)$$

ここで、 v_{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(v_{Hmax})は、設計電巻の最大風速(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(v_{Vmax})は、米国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。

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		板状物	塊状物	
	鋼製パイプ	鋼製材	コンクリート板	コンテナ	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 2.4×2.6×6	長さ×幅×奥行 5×1.9×1.3
質量 (kg)	8.4	135	540	2300	4750
最大水平速度 v_{Hmax} (m/s)	49	51	30	60	34
最大鉛直速度 v_{Vmax} (m/s)	33	34	20	40	23

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

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>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</p> <p>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。</p> <p>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。</p> <p>解説4.3.1.4 設計竜巻荷重の組み合わせ</p> <p>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、米国NRCの基準類^(*)を参考として設定した下式により算定する。</p> $W_{T1} = W_P \quad \dots (4.4)$ $W_{T2} = W_W + 0.5 \cdot W_P + W_M \quad \dots (4.5)$ <p>ここで、(4.4)式及び(4.5)式の各変数は下記のとおり。</p> <ul style="list-style-type: none"> 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 <p>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。</p>	<p>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</p> <p>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。</p> <p>解説4.3.1.4 設計竜巻荷重の組み合わせ</p> <p>評価対象施設の評価に用いる設計竜巻荷重は、設計竜巻による風圧力による荷重(W_W)、気圧差による荷重(W_P)、及び設計飛来物による衝撃荷重(W_M)を組み合わせた複合荷重とし、複合荷重W_{T1}及びW_{T2}は、下式により算定した。</p> $W_{T1} = W_P \quad \dots (4.4)$ $W_{T2} = W_W + 0.5 \cdot W_P + W_M \quad \dots (4.5)$ <p>ここで、(4.4)式及び(4.5)式の各変数は下記のとおり。</p> <ul style="list-style-type: none"> 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 <p>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。</p>
<p>4.3.2 設計竜巻荷重と組み合わせる荷重の設定</p> <p>「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。</p>	<p>4.3.2 設計竜巻荷重と組み合わせる荷重の設定</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「(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。</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>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>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</p> <p>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。</p> <p>（注4.2）建築基準法、日本工業規格、日本建築学会及び土木学会等の規準・指針類、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。</p> <p>（注4.3）竜巻防護施設を内包する区画。</p> <p>（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>	<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</p> <p>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、原則として、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</p> <p>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>

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>4.4.3 設備の構造健全性の確認</p> <p>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</p> <p>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</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（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）</p> <p>設計対象施設が許容応力度等に基づく許容限界^(注4.6)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</p> <p>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4.6)に対して妥当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4.6)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）日本工業規格、日本電気協会の原子力発電所耐震設計技術指針（JEAG4601-1987）及び日本機械学会の規格・指針類等に準拠する。</p> <p>（注4.6）竜巻防護施設を内包する区画。</p> <p>（注4.7）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>	<p>4.4.3 設備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、評価対象施設の構造健全性が維持され安全機能が維持できることを確認する。また、設計飛来物による影響を評価し、評価対象施設の安全機能が維持できることを確認する。</p> <p>（1）竜巻防護施設</p> <p>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</p> <p>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）</p> <p>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は、放射性物質の放出低減機能喪失（アニュラス空気浄化系統が2系統とも動作不能）となることから、泊発電所原子炉施設保安規定に則り、速やかにプラントを停止して、補修を実施する。</p> <p>③蓄熱室加熱器</p> <p>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</p> <p>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）</p> <p>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>

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>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>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。</p> <p>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。</p> <p>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。</p> <p>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。</p> <p>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。</p> <p>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。</p> <p>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。</p>

原子力発電所の電巻影響評価ガイド	泊発電所3号機電巻影響評価結果
	<p>③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、電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。</p> <p>(2) 電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、電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。</p> <p>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、電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、閉塞することなく、電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>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、電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、閉塞することなく、電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>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、電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、閉塞することなく、電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、電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、閉塞することなく、電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>⑤ディーゼル発電機燃料油貯油槽ベント管 当該設備に設計飛来物が衝突した場合、貫通する等の損傷により、電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。</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>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。</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 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 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。 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 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 設計竜巻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 設計竜巻、設計竜巻と同時に発生する雷・雹等、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 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 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 竜巻防護施設を内包する建屋内については、設計竜巻により飛来物が侵入する場合でも、建屋開口部付近に飛来物が衝突し発電用原子炉施設の安全性を損なう可能性のある発火性又は引火性物質を内包する機器はなく、火災防護計画により適切に管理することから、建屋内の竜巻防護施設の安全機能の維持に影響を与えないことを確認した。 また、設計竜巻による発電所敷地内の危険物タンクの火災に関しては、外部火災影響評価における発電所敷地内の危険物タンクの火災影響評価と同様であり、竜巻防護施設の安全機能の維持に影響を与えないことを確認した。 なお、建屋外の火災については、竜巻通過後、速やかに消火用水、化学消防自動車及び水槽付き消防ポンプ自動車等による消火活動を行う。</p> <p>(2) 溢水 竜巻防護施設を内包する建屋内については、設計竜巻により飛来物が侵入する場合でも、建屋開口部付近に飛来物が衝突し発電用原子炉施設の安全性を損なう可能性のある溢水源はないことから、建屋内の竜巻防護施設の安全機能の維持に影響を与えないことを確認した。 また、燃料取扱棟には使用済燃料ピットが設置されているため、設計竜巻により使用済燃料ピットの水が吸い上げられて流出することも考えられるが、設計飛来物により外壁の一部が損傷したとしても、損傷することで評価荷重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なことはないと考えられることから、設計竜巻により使用済燃料ピットの水が吸い上げられて流出することはないと確認した。 さらに、設計飛来物の衝突による発電所敷地内の屋外タンクの溢水に関しては、内部溢水影響評価における屋外タンクの溢水影響評価において、竜巻防護施設の安全機能の維持に影響を与えないことを確認する方針としている。</p> <p>(3) 外部電源喪失 設計竜巻と同時に発生する雷、ダウンバーストにより外部電源が喪失した場合でも、非常用ディーゼル発電機 (D/G) はディーゼル発電機建屋内に収納してあり、設計竜巻による風圧力、気圧差による圧力及び飛来物による機関への影響はない。吸排気については外気と繋がっているが、吸気口と排気口は近接して設置されていることから、気圧差は生じ難いと考えられる</p>

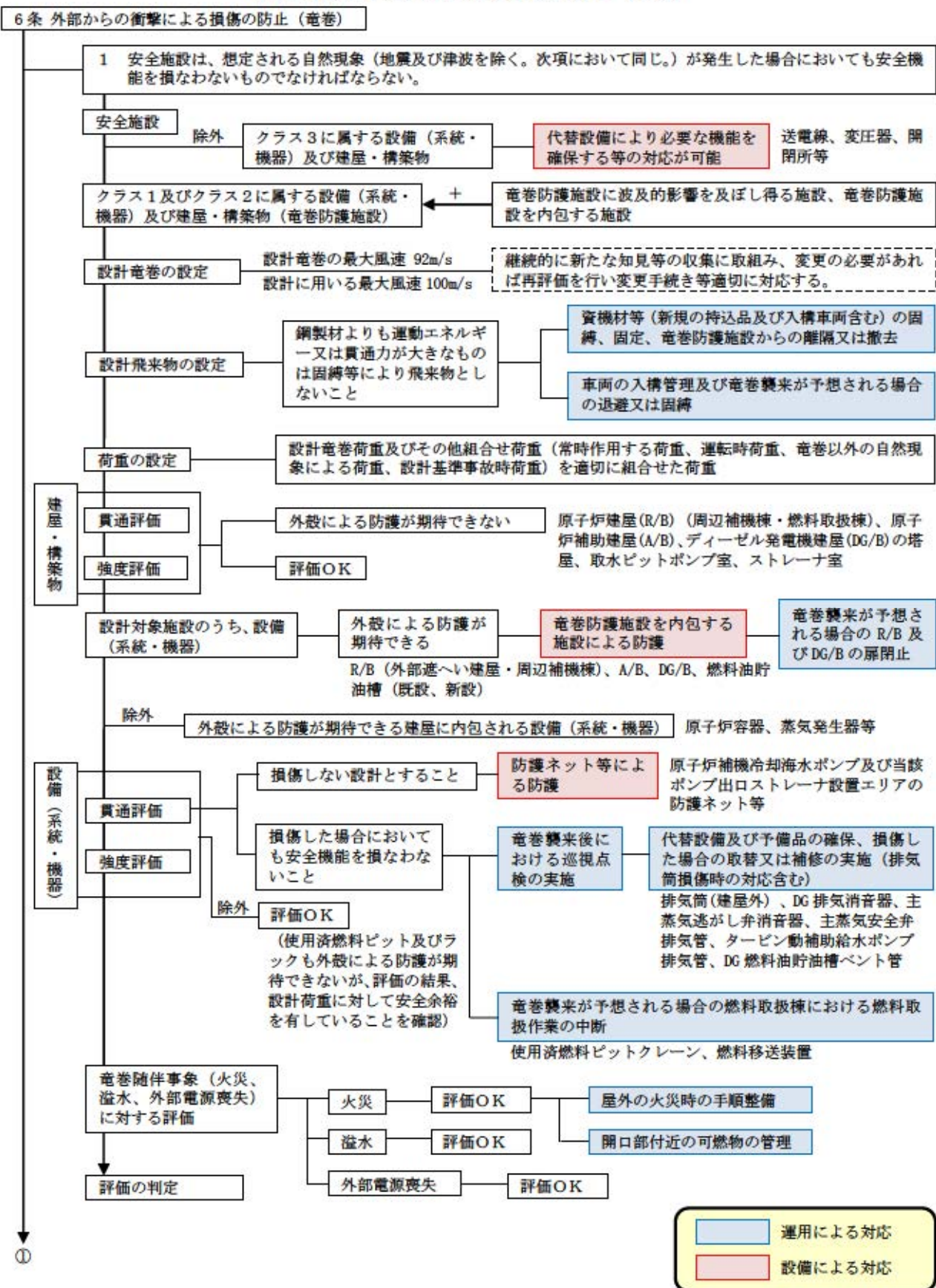
原子力発電所の竜巻影響評価ガイド	泊発電所3号機竜巻影響評価結果
<p>6. 附則</p> <p>この規定は、平成25年7月8日より施行する。</p> <p>本ガイドに記載されている以外の計算方法等を設計で使用する場合は、技術的見地等からその妥当性を示す必要がある。</p> <p>また、竜巻等の発生頻度、特性及びメカニズム等に関する情報、並びに竜巻等による被害の実情に関する情報等が不足している現在の日本の状況では、竜巻等に係る最新情報の調査・入手に努めるとともに、本ガイドは、最新情報を反映して適宜見直しを行うものとする。</p> <p>なお、将来に観測された竜巻の最大風速が、過去に観測された竜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>が、吸排気系統出入口で気圧差が発生することを考慮しても、吸気側が負圧となった場合、吸入空気の密度が低くなるため、過給機により送気される空気量が減少すると、排気ガス温度が徐々に上昇し、520℃を超過すれば出力制限となるが、竜巻は吸排気口設置区間を短時間で通過することから、排気ガス温度の急激な上昇はなくD/Gの運転に支障をきたすことはない。</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>

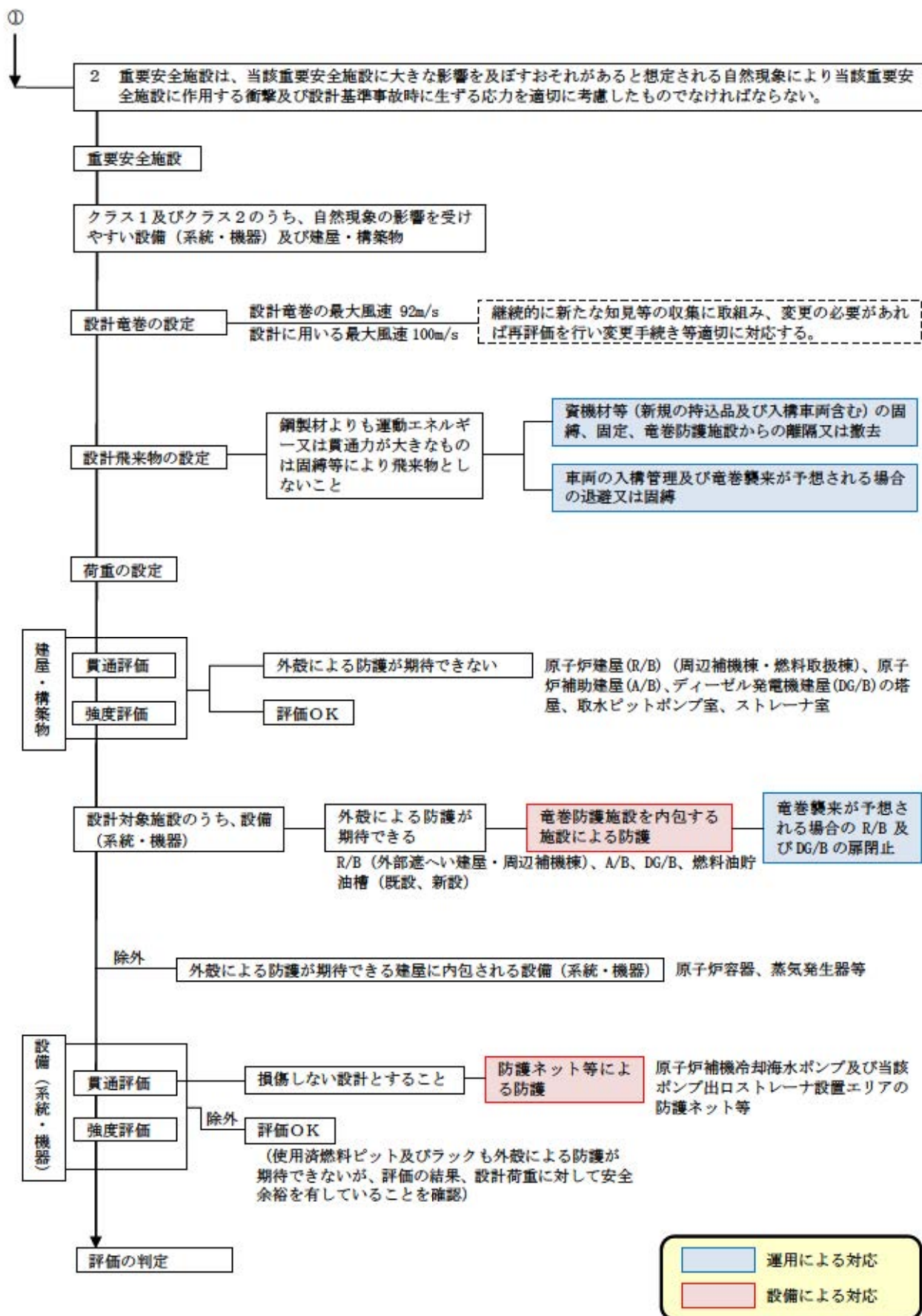
泊発電所3号炉

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隔離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。

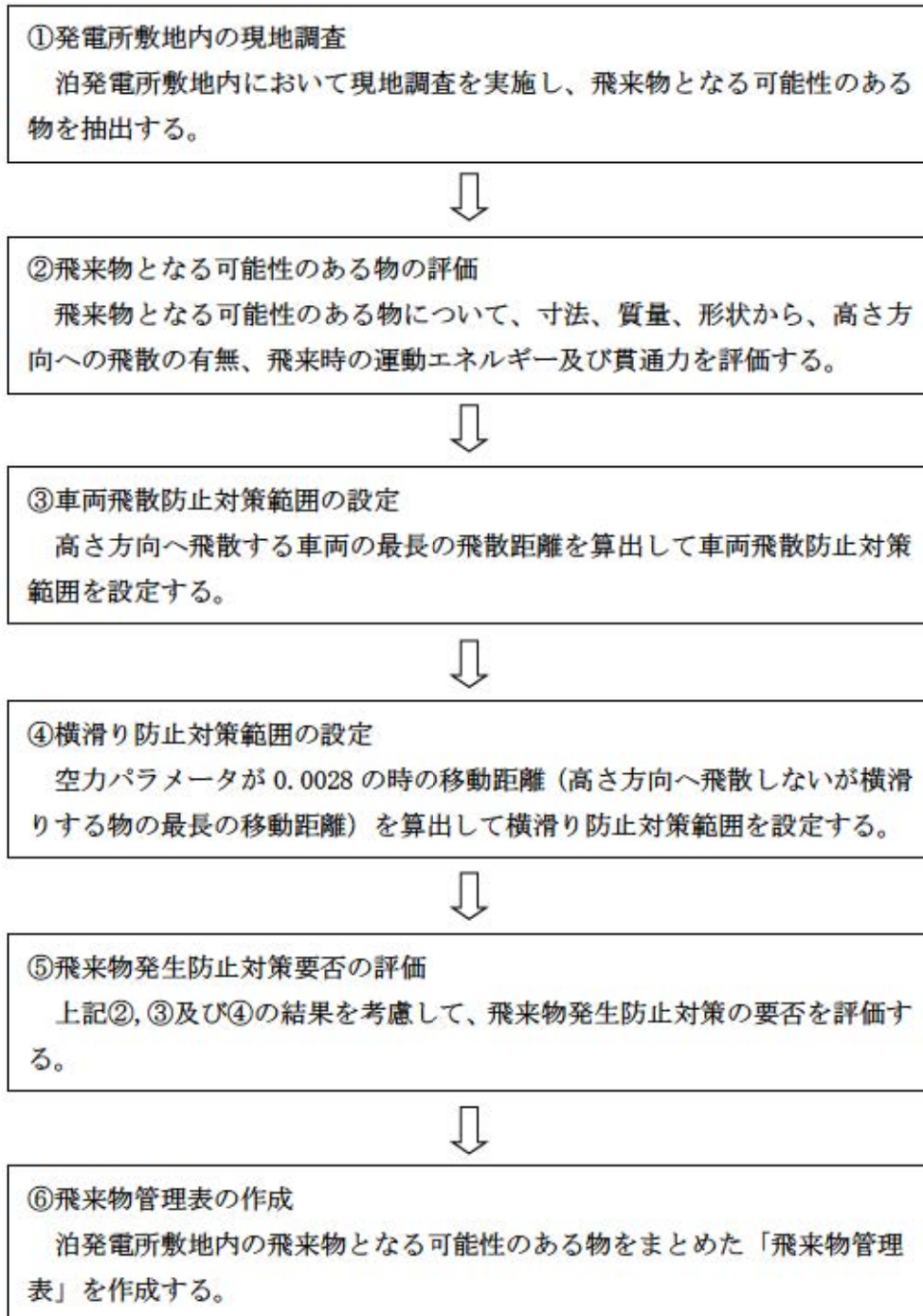
(2) 車両飛散防止対策範囲の管理

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要否を再評価する。

(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要否を再評価する。



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)	空カパラメータ (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 ^{※2} (mm)	横滑り影響回避対策		飛散影響回避対策				備考	
												横滑り防止対策範囲 ^{※3} にあるか	固縛等の対策実施 ^{※2}	高さ方向へ飛散するか ^{※4}	車両か	車両飛散防止対策範囲 ^{※5} にあるか	最小寸法 ^{※6} が0.228m×0.228m以下か ^{※6}		固縛等の対策実施 ^{※2}
1	自転車	総合管理事務所周辺 (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51m倉庫周辺	0.60	0.60	0.60	4	0.1782	—	○	20	1	×	×	○	×	—	×	×	
4	コーン	保守事務所周辺 (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	防漏堤外正面 (10m盤)	0.64	1.84	1.20	150	0.0183	62	○	8	4	○	○	○	×	—	×	○	
10	ドラム缶	風力防地周辺	0.60	0.60	0.90	245	0.0039	—	○	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	—	○	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	保守事務所周辺 (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	○	56847	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、電巻防護施設等に衝突した際に自身(想定飛来物)が変形すると容易に予想される薄板形状(数mm以下)のもの等
 ※2: BRL式から算出した飛来物の貫通を生じないために必要な鋼板の最小厚さ
 ※3: 電巻防護施設を内包する建屋および電巻防護施設を内包する建屋の上層である循環水ポンプ建屋(以下「電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: 空カパラメータが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: 電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、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: 空カパラメータが0.025より大きいものについては、解析領域外のため「—」とするが、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、設計電巻の最大風速(100m/s)を用いる。
 注2: 設置状況(アンカー固定や、電巻防護施設を内包する建屋等との間に頑健な物理障壁がある等)により、飛散または横滑りしない、あるいは飛散または横滑りしても電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。