

本資料のうち、枠囲みの内容は
商業機密の観点や防護上の観点
から公開できません。

女川原子力発電所第2号機 工事計画審査資料	
資料番号	02-補-E-01-0150-1_改3
提出年月日	2021年4月13日

補足-150-1 竜巻への配慮に関する説明書の補足説明資料

2021年4月

東北電力株式会社

添付書類に係る補足説明資料

「竜巻への配慮に関する説明書」に係る添付書類の記載内容を補足するための説明資料を以下に示す。

工認添付書類	補足説明資料
VI-1-1-2-3 竜巻への配慮に関する説明書	補足-150-1 竜巻への配慮に関する説明書の補足説明資料

目 次

1. 竜巻の影響を考慮する施設について
 - 1.1 外部事象防護対象施設等のうち竜巻の影響を考慮する施設の抽出について
 - 1.2 外部事象防護対象施設等に波及的影響を及ぼし得る施設の選定について
 - 1.3 建屋開口部の調査結果について
 - 1.4 飛来物の選定について
 - 1.5 砂利等の極小飛来物による外部事象防護対象施設への影響について
 - 1.6 屋外重大事故等対処設備の竜巻防護設計について
 - 1.7 竜巻影響評価の風速場モデルの適用について
 - 1.8 飛散評価における竜巻の不確かさを踏まえた評価条件の設定について
 - 1.9 設計竜巻の最大風速 100m/s の設定について

1.1 外部事象防護対象施設等のうち竜巻の影響を考慮する施設の
抽出について

1.1 外部事象防護対象施設等のうち竜巻の影響を考慮する施設の抽出について

1.1.1 抽出方針

女川原子力発電所構内の構築物，系統及び機器から，以下の手順により外部事象防護対象施設等のうち竜巻の影響を考慮する施設を抽出した。抽出フローを図 1.1-1 及び図 1.1-2 に示す。

Step1：安全施設（安全重要度クラス 1，2，3）及び安全施設以外の施設から外部事象防護対象施設*を抽出する。

注記*：外部事象に対し必要な構築物，系統及び機器（発電用原子炉を停止するため，また停止状態にある場合は引き続きその状態を維持するために必要な異常の発生防止の機能又は異常の影響緩和の機能を有する構築物，系統及び機器）として，「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」（以下「重要度分類指針」という。）における安全重要度クラス 1，2 に属する施設，安全評価上期待する安全重要度クラス 3 に属する構築物，系統及び機器並びにそれを内包する区画を含む。

また，外部事象防護対象施設を内包する建屋（外部事象防護対象施設となる建屋を除く。）は，機械的強度を有すること等により，内包する外部事象防護対象施設の安全機能を損なわない設計及び外部事象防護対象施設へ波及的影響を及ぼさない設計とする。ここで，外部事象防護対象施設及び外部事象防護対象施設を内包する建屋を併せて，外部事象防護対象施設等という。

上記以外の「その他の施設」については，竜巻及びその随伴事象に対して機能維持，又は，竜巻及びその随伴事象による損傷を考慮して，代替設備により必要な機能を確保すること，必要に応じプラントを停止し，安全上支障のない期間に修復すること等の対応を行うこと又はそれらを適切に組み合わせることにより，安全機能を損なわない設計とすることから評価完了とする。

Step2：屋外施設

外部事象防護対象施設等として抽出された設備の設置場所を確認し，竜巻襲来時に風圧，気圧差及び飛来物衝突の影響を受ける屋外施設（外部事象防護対象施設を内包する区画を含む。）を外部事象防護対象施設等のうち竜巻の影響を考慮する施設とする。

Step3：外気と繋がる設備

外気との接続があるため，竜巻襲来時に気圧差荷重の影響を受ける換気空調設備等を外部事象防護対象施設等のうち竜巻の影響を考慮する施設とする。

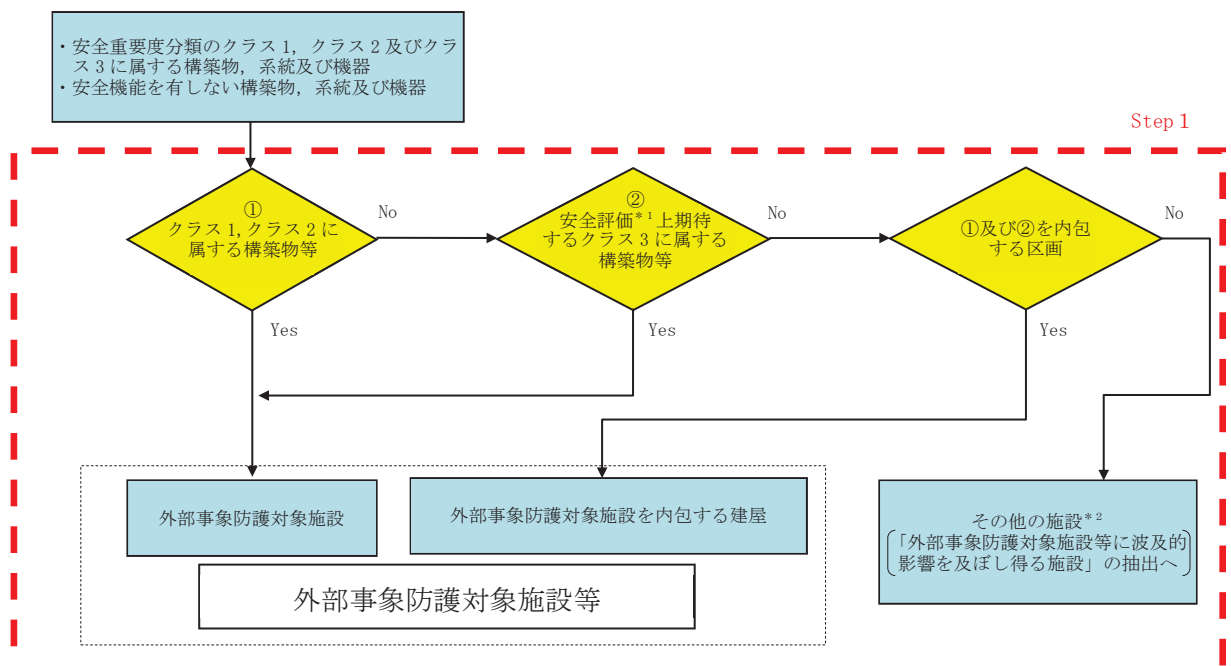
Step4：外殻となる施設による防護が期待できない設備

外部事象防護対象施設が設置されている施設等の外殻による防護機能が期待できないものを外部事象防護対象施設等のうち竜巻の影響を考慮する施設とする。

なお、外殻による防護に期待できるかは、外殻となる建屋・構築物等の竜巻荷重に対する健全性の確認結果による。

1.1.2 抽出結果

外部事象防護対象施設等のうち竜巻の影響を考慮する施設の抽出結果を表 1.1-1 に示す。



注記 *1：運転時の異常な過渡変化及び設計基準事故解析

*2：竜巻及びその随伴事象に対して機能維持すること，竜巻及びその随伴事象による損傷を考慮して，代替設備により必要な機能を確保すること又は安全上支障のない期間に修復すること等の対応が可能であることを確認する。

図 1.1-1 外部事象防護対象施設等の抽出フロー

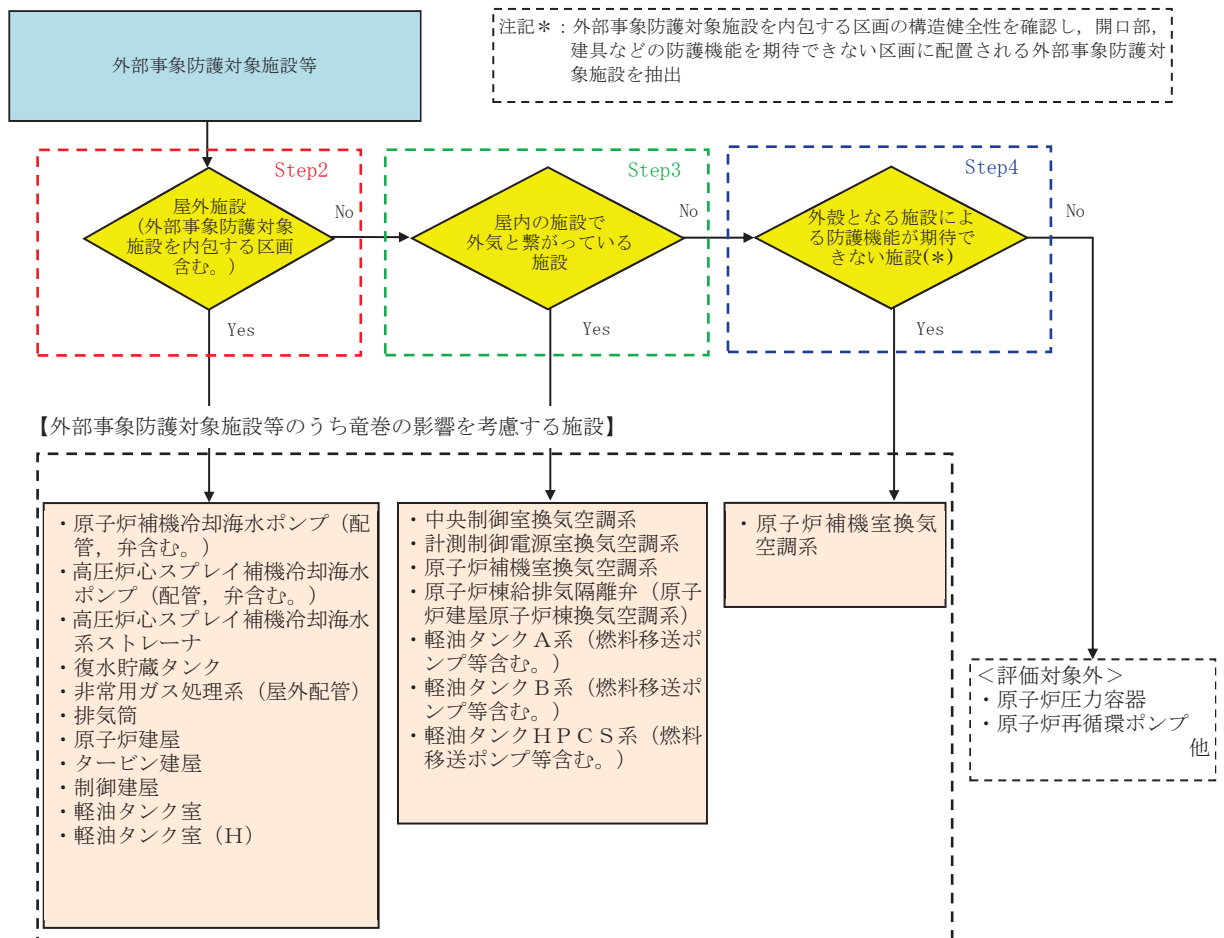


図 1.1-2 外部事象防護対象施設等のうち竜巻の影響を考慮する施設の抽出フロー

表 1.1-1-1 外部事象防護対象施設等のうち竜巻の影響を考慮する施設の抽出結果 (1/7)

○ : Yes × : No - : 該当せず*3

分類	定義	機能	重要度分類指針	抽出の観点*1		設置場所*2	抽出結果	備考		
				女川原子力発電所第2号機						
				1	2				3	4
PS-1	その損傷又は故障により発生する事象によって、(a)炉心の著しい損傷、又は(b)燃料の大量の破損を引き起こすおそれのある構築物、系統及び機器	機能 1) 原子炉冷却材圧力パウンダリ機能 2) 過剰反応度の印加防止機能 3) 炉心形状の維持機能	構築物、系統又は機器 原子炉冷却材圧力パウンダリを構成する機器・配管系(計装等の小口径配管・機器は除く。) 制御棒カップリング	構築物、系統又は機器	原子炉圧力容器	○	×	×	×	
					原子炉再循環ポンプ	○	×	×	×	
					配管、弁	○	×	×	×	
					原子炉冷却材圧力パウンダリ隔離弁	○	×	×	×	
					制御棒駆動機構ハウジング	○	×	×	×	
					中性子束計装ハウジング	○	×	×	×	
					制御棒カップリング	○	×	×	×	
					制御棒駆動機構カップリング	○	×	×	×	
					炉心シュラウド	○	×	×	×	
					シュラウドサポート	○	×	×	×	
MS-1	1) 異常状態発生時に原子炉を緊急に停止し、残留熱を除去し、原子炉冷却材圧力パウンダリの過圧を防止し、敷地周辺公衆への過度の放射線の影響を防止する構築物、系統及び機器	機能 1) 原子炉の緊急停止機能 2) 未臨界維持機能 3) 原子炉冷却材圧力パウンダリの過圧防止機能	炉心支持構造物(炉心シュラウド、シュラウドサポート、上部格子板、炉心支持板、制御棒案内管)、燃料集合体(ただし、燃料を除く。) 原子炉停止系の制御棒及び制御棒駆動系(スクラム機能) 原子炉停止系の制御棒による系(制御棒及び制御棒駆動水圧系) 制御棒カップリング 制御棒カップリング 直接関連系(制御棒駆動水圧系) ほう酸水注入系(ポンプ、注入弁、タンク出口弁、貯蔵タンク、ポンプ吸込配管及び弁、注入配管及び弁) 主蒸気逃がし安全弁(安全弁としての開機能)	構築物、系統又は機器 制御棒カップリング 制御棒カップリング 直接関連系(制御棒駆動水圧系) ほう酸水注入系(ポンプ、注入弁、タンク出口弁、貯蔵タンク、ポンプ吸込配管及び弁、注入配管及び弁) 主蒸気逃がし安全弁(安全弁としての開機能)	直接関連系(燃料集合体)	○	×	×	×	
					制御棒カップリング	○	×	×	×	
					制御棒カップリング	○	×	×	×	
					直接関連系(制御棒駆動水圧系)	○	×	×	×	
					ほう酸水注入系(ポンプ、注入弁、タンク出口弁、貯蔵タンク、ポンプ吸込配管及び弁、注入配管及び弁)	○	×	×	×	
					主蒸気逃がし安全弁(安全弁としての開機能)	○	×	×	×	
					制御棒カップリング	○	×	×	×	
					制御棒カップリング	○	×	×	×	
					直接関連系(制御棒駆動水圧系)	○	×	×	×	
					ほう酸水注入系(ポンプ、注入弁、タンク出口弁、貯蔵タンク、ポンプ吸込配管及び弁、注入配管及び弁)	○	×	×	×	

注記*1: 1=外部事象防護対象施設等, 2=屋外設備, 3=外気と繋がる設備, 4=外殻となる施設による防護が期待できない設備
 *2: R=原子炉建屋, C=制御建屋, T=タービン建屋, L0=軽油タンク室, L0H=軽油タンク室(H), D=固体廃棄物貯蔵所, IB=補助ボイラー建屋, TSC=緊急時対策建屋
 *3: 抽出の観点1~4の評価の結果, 該当せず
 *4: 屋外にある外部事象防護対象施設の付属設備(波及的影響(機能的影響)を及ぼし得る施設)として抽出

○：Yes ×：No -：該当せず*3

表 1.1-1 外部事象防護対象施設等のうち竜巻の影響を考慮する施設の抽出結果 (2/7)

分類	定義	機能	構築物、系統又は機器	抽出の観点*1					設置場所*2	抽出結果	備考
				重要度分類指針							
				1	2	3	4				
MS-1	1) 異常状態発生時に原子炉を緊急に停止し、残留熱を除去し、原子炉格納圧力バウンダリの過圧を防止し、敷地周辺公衆への過度の放射線の影響を防止する構築物、系統及び機器 4) 原子炉停止後の除熱機能		残留熱を除去する系統 (残留熱除去系 (原子炉停止時冷却モード)、原子炉隔離時冷却系、高圧炉心スプレイ系、主蒸気逃がし機能)、自動減圧系 (手動逃がし機能)	残留熱除去系 (ポンプ、熱交換器、原子炉停止時冷却モードのルーフトとなる配管及び弁) 直接関連系 (残留熱除去系) 原子炉隔離時冷却系 (ポンプ、サブレーションチェンバ、タービン、サブレーションチェンバから注水先までの配管、弁) タービンへの蒸気供給配管、弁 ポンプミニマムフローラインの配管、弁 サブレーションチェンバ内のストレーナ 復水貯蔵タンク ポンプの復水貯蔵タンクからの吸込弁 ポンプの復水貯蔵タンクからの吸込配管、弁 潤滑油冷却器及びその冷却器までの冷却水供給配管	○	×	×	×	R	-	
				直接関連系 (原子炉隔離時冷却系) 高圧炉心スプレイ系 (ポンプ、サブレーションチェンバ、サブレーションチェンバからスプレイ先までの配管、弁、スプレイスパージャ) 直接関連系 (高圧炉心スプレイ系) 主蒸気逃がし安全弁 (手動逃がし機能)	○	×	×	×	R	-	
				直接関連系 (主蒸気逃がし安全弁 (手動逃がし機能)) 自動減圧系 (手動逃がし機能)	○	×	×	×	R	-	
				直接関連系 (自動減圧系 (手動逃がし機能))	○	×	×	×	R	-	
				原子炉圧力容器から主蒸気逃がし安全弁までの主蒸気配管 駆動用蒸気源 (アキユムレータ、アキユムレータから主蒸気逃がし安全弁までの配管、弁)	○	×	×	×	R	-	
				原子炉圧力容器から主蒸気逃がし安全弁までの主蒸気配管 駆動用蒸気源 (アキユムレータ、アキユムレータから主蒸気逃がし安全弁までの配管、弁)	○	×	×	×	R	-	
				原子炉圧力容器から主蒸気逃がし安全弁までの主蒸気配管 駆動用蒸気源 (アキユムレータ、アキユムレータから主蒸気逃がし安全弁までの配管、弁)	○	×	×	×	R	-	
				原子炉圧力容器から主蒸気逃がし安全弁までの主蒸気配管 駆動用蒸気源 (アキユムレータ、アキユムレータから主蒸気逃がし安全弁までの配管、弁)	○	×	×	×	R	-	
				原子炉圧力容器から主蒸気逃がし安全弁までの主蒸気配管 駆動用蒸気源 (アキユムレータ、アキユムレータから主蒸気逃がし安全弁までの配管、弁)	○	×	×	×	R	-	
				原子炉圧力容器から主蒸気逃がし安全弁までの主蒸気配管 駆動用蒸気源 (アキユムレータ、アキユムレータから主蒸気逃がし安全弁までの配管、弁)	○	×	×	×	R	-	

注記*1: 1=外部事象防護対象施設等, 2=屋外設備, 3=外気と繋がる設備, 4=外殻となる施設による防護が期待できない設備
 *2: R=原子炉建屋, C=制御建屋, T=タービン建屋, LO=軽油タンク室, LH=軽油タンク室, D=固体廃棄物貯蔵所, IB=補助ボイラー建屋, TSC=緊急時対策建屋
 *3: 抽出の観点1~4の評価の結果, 該当せず
 *4: 屋外にある外部事象防護対象施設の付属設備 (波及的影響 (機能的影響) を及ぼし得る施設) として抽出

○：Yes ×：No -：該当せず*3

表 1.1-1 外部事象防護対象施設等のうち竜巻の影響を考慮する施設の抽出結果 (5/7)

分類	定義	機能	構築物、系統又は機器	抽出の観点*1					抽出結果	備考	
				設置場所*2							
				1	2	3	4				
MS-1	2)安全上必須なその他の構築物、系統及び機器	重要度分類指針	構築物、系統又は機器	女川原子力発電所第2号機	○	×	×	×	C	-	
				中央制御室及び中央制御室遮蔽	○	×	×	×	C	○	
				中央制御室換気空調系 (放射線防護機能及び有毒ガス防護機能) (再循環送風機、再循環フィルタ装置、空気調和装置、送風機、排風機、ダクト及びダンパ)	○	×	×	×	R	-	
				原子炉補機冷却水系 (ポンプ、熱交換器、非常用系負荷冷却ライン配管、弁 (MS-1 関連))	○	×	×	×	R	-	
				直接関連系 (原子炉補機冷却水系)	○	×	×	×	R	-	
				高圧炉心スプレイ補機冷却水系 (ポンプ、熱交換器、配管、弁)	○	×	×	×	R	-	
				直接関連系 (高圧炉心スプレイ補機冷却水系)	○	×	×	×	R	-	
				原子炉補機冷却海水系 (ポンプ、配管、弁、ストレートナ (MS-1 関連))	○	×	×	×	R 屋外	○	屋外設備であるポンプ、一部の配管及び弁には竜巻防護対策を実施
				直接関連系 (原子炉補機冷却海水系)	○	×	×	×	R	-	
				取水路 (屋外トレンチ含む)	○	×	×	×	屋外	-	地下埋設
PS-2	1) その損傷又は故障により発生する事象に よって、炉心の著しい損傷又は燃料の大量の破損を直ちに引き起こすおそれはないが、敷地外への過度の放射性物質の放出のおそれのある構築物、系統及び機器	1) 原子炉冷却材を内蔵する機能 (ただし、原子炉冷却材圧力バウンダリから除外されている計装等の小口径のもの及びバウンダリに直接接続され ていないものは除く。)	非常用系内電源系、制御室及びその遮へい、非常用換気空調系、非常用補機冷却水系、直 流電源系 (いずれも、MS-1 関連のもの)	原子炉冷却材圧力バウンダリ (ポンプ、配管、弁、ストレートナ)	○	○	×	×	R 屋外	○	屋外設備であるポンプ、一部の配管及び弁には竜巻防護対策を実施
				直接関連系 (高圧炉心スプレイ補機冷却海水系)	○	○	×	×	R 屋外	○	
				ストレーナ (異物除去機能をつかさどる部分)	○	○	×	×	R 屋外	○	
				取水路 (屋外トレンチ含む)	○	×	×	×	屋外	-	地下埋設
				非常用直流電源設備 (蓄電池、蓄電池から非常用負荷までの配電設備及び電路 (MS-1 関連))	○	×	×	×	R, C	-	
				計測制御用電源設備 (蓄電池から非常用計測制御装置までの配電設備及び電路 (MS-1 関連))	○	×	○	×	R, C	○	関連設備として計測制御電源室換気空調系を抽出
				原子炉冷却材浄化系 (原子炉冷却材圧力バウンダリ以外の部分)	○	×	×	×	R	-	
				主蒸気系 (原子炉冷却材圧力バウンダリ以外の部分)	○	×	×	×	R, T	-	
				原子炉隔離時冷却系 (原子炉冷却材圧力バウンダリ以外の部分でタービン止め弁まで)	○	×	×	×	R	-	

注記*1：1＝外部事象防護対象施設等、2＝屋外設備、3＝外気と繋がる設備、4＝外殻となる施設による防護が期待できない設備
 *2：R＝原子炉建屋、C＝制御建屋、T＝タービン建屋、L0＝軽油タンク室、L0H＝軽油タンク室、H＝D＝固体廃棄物貯蔵所、HB＝補助ボイラー建屋、TSC＝緊急時対策建屋
 *3：抽出の観点1～4の評価の結果、該当せず
 *4：屋外にある外部事象防護対象施設の付属設備 (波打的影響 (機能的影響) を及ぼし得る施設) として抽出

表 1.1-1 外部事象防護対象施設等のうち竜巻の影響を考慮する施設の抽出結果 (6/7)

分類	定義	機能	構造物、系統又は機器	抽出の観点*				抽出結果	備考
				重要度分類指針					
				1	2	3	4		
PS-2	1) その損傷又は故障により発生する事象によつて、炉心の著しい損傷又は燃料の大量の破損を直ちに引き起こすおそれはないが、敷地外への過度の放射性物質の放出のおそれのある構造物、系統及び機器	機能	構造物、系統又は機器	構造物、系統又は機器	構造物、系統又は機器	構造物、系統又は機器	構造物、系統又は機器	構造物、系統又は機器	構造物、系統又は機器
			放射性廃棄物処理施設 (放射能インベントリの大きいもの)、使用済燃料プール (使用済燃料貯蔵ラックを含む。)	放射性廃棄物処理施設 (放射能インベントリの大きいもの)、使用済燃料プール (使用済燃料貯蔵ラックを含む。)	放射性廃棄物処理施設 (放射能インベントリの大きいもの)、使用済燃料プール (使用済燃料貯蔵ラックを含む。)	放射性廃棄物処理施設 (放射能インベントリの大きいもの)、使用済燃料プール (使用済燃料貯蔵ラックを含む。)	放射性廃棄物処理施設 (放射能インベントリの大きいもの)、使用済燃料プール (使用済燃料貯蔵ラックを含む。)	放射性廃棄物処理施設 (放射能インベントリの大きいもの)、使用済燃料プール (使用済燃料貯蔵ラックを含む。)	放射性廃棄物処理施設 (放射能インベントリの大きいもの)、使用済燃料プール (使用済燃料貯蔵ラックを含む。)
PS-2	2) 通常運転時及び過渡変化時の異常な過渡変化時に作動を要求されるものであつて、その故障により、炉心冷却が損なわれる可能性の高い構造物、系統及び機器	機能	燃料を安全に取り扱う機能	燃料を安全に取り扱う機能	燃料を安全に取り扱う機能	燃料を安全に取り扱う機能	燃料を安全に取り扱う機能	燃料を安全に取り扱う機能	燃料を安全に取り扱う機能
			燃料交換機	燃料交換機	燃料交換機	燃料交換機	燃料交換機	燃料交換機	燃料交換機
PS-2	3) 燃料を安全に取り扱う機能	機能	燃料取扱設備	燃料取扱設備	燃料取扱設備	燃料取扱設備	燃料取扱設備	燃料取扱設備	燃料取扱設備
			原子炉建屋クレーン	原子炉建屋クレーン	原子炉建屋クレーン	原子炉建屋クレーン	原子炉建屋クレーン	原子炉建屋クレーン	原子炉建屋クレーン
PS-2	1) 安全弁及び逃がし弁の吹き止まり機能	機能	逃がし安全弁 (吹き止まり機能) に関連する部分)	逃がし安全弁 (吹き止まり機能) に関連する部分)	逃がし安全弁 (吹き止まり機能) に関連する部分)	逃がし安全弁 (吹き止まり機能) に関連する部分)	逃がし安全弁 (吹き止まり機能) に関連する部分)	逃がし安全弁 (吹き止まり機能) に関連する部分)	逃がし安全弁 (吹き止まり機能) に関連する部分)
			主蒸気逃がし安全弁 (吹き止まり機能)	主蒸気逃がし安全弁 (吹き止まり機能)	主蒸気逃がし安全弁 (吹き止まり機能)	主蒸気逃がし安全弁 (吹き止まり機能)	主蒸気逃がし安全弁 (吹き止まり機能)	主蒸気逃がし安全弁 (吹き止まり機能)	主蒸気逃がし安全弁 (吹き止まり機能)
MS-2	1) PS-2 の構造物、系統及び機器の損傷又は故障により敷地周辺公衆に与える放射線の影響を十分小さくするようにする構造物、系統及び機器	機能	非常用補給水系	非常用補給水系	非常用補給水系	非常用補給水系	非常用補給水系	非常用補給水系	非常用補給水系
			放射性気体廃棄物処理系の隔離弁、排気筒 (非常用ガス処理系排気筒の支持機能以外)	放射性気体廃棄物処理系の隔離弁、排気筒 (非常用ガス処理系排気筒の支持機能以外)	放射性気体廃棄物処理系の隔離弁、排気筒 (非常用ガス処理系排気筒の支持機能以外)	放射性気体廃棄物処理系の隔離弁、排気筒 (非常用ガス処理系排気筒の支持機能以外)	放射性気体廃棄物処理系の隔離弁、排気筒 (非常用ガス処理系排気筒の支持機能以外)	放射性気体廃棄物処理系の隔離弁、排気筒 (非常用ガス処理系排気筒の支持機能以外)	放射性気体廃棄物処理系の隔離弁、排気筒 (非常用ガス処理系排気筒の支持機能以外)
MS-2	2) 放射性物質放出の防止機能	機能	燃料プール水の補給機能	燃料プール水の補給機能	燃料プール水の補給機能	燃料プール水の補給機能	燃料プール水の補給機能	燃料プール水の補給機能	燃料プール水の補給機能
			燃料プール冷却浄化系の燃料プール注入逆止弁	燃料プール冷却浄化系の燃料プール注入逆止弁	燃料プール冷却浄化系の燃料プール注入逆止弁	燃料プール冷却浄化系の燃料プール注入逆止弁	燃料プール冷却浄化系の燃料プール注入逆止弁	燃料プール冷却浄化系の燃料プール注入逆止弁	燃料プール冷却浄化系の燃料プール注入逆止弁

注記 *1: 1=外部事象防護対象施設等, 2=屋外設備, 3=外気と繋がる設備, 4=外殻となる施設による防護が期待できない設備
 *2: R=原子炉建屋, C=制御建屋, T=タービン建屋, L0=軽油タンク室, L0H=軽油タンク室 (H), D=固体廃棄物貯蔵所, RB=補助ボイラー建屋, TSC=緊急時対策建屋
 *3: 抽出の観点 1~4 の評価の結果, 該当せず
 *4: 屋外にある外部事象防護対象施設付属設備 (波及的影響 (機能的影響) を及ぼし得る施設) として抽出

表 1.1-1 外部事象防護対象施設等のうち竜巻の影響を考慮する施設の抽出結果 (7/7)

○ : Yes × : No - : 該当せず*3

分類	定義	重要度分類指針		女川原子力発電所第2号機					抽出結果	備考		
		機能	構築物、系統又は機器	抽出の観点*1				設置場所*2				
				STEP	1	2	3				4	
MS-2	2) 異常状態への対応上特に重要な構築物、系統及び機器	1) 事故時のプラント状態の把握機能 2) 異常状態の緩和機能 3) 制御室外からの安全停止機能	構築物、系統又は機器	構築物、系統又は機器	○	×	×	×	R,C	-		
				<ul style="list-style-type: none"> 中性子束 (起動領域モニタ) 原子炉スクラム用電磁接触器の状態 制御棒位置 原子炉水位 (広帯域) 原子炉水位 (燃料域) 原子炉圧力 ドライウェル圧力 圧力抑制室圧力 サブレーションポンプール水温度 格納容器内雰囲気放射線モニタ [低温停止への移行] <ul style="list-style-type: none"> 原子炉圧力 原子炉水位 (広帯域) [ドライウェルスペースブレイ] <ul style="list-style-type: none"> 原子炉水位 (広帯域) 原子炉水位 (燃料域) ドライウェル圧力 圧力抑制室圧力 [サブレーションチェーンバ冷却] <ul style="list-style-type: none"> 原子炉水位 (広帯域) 原子炉水位 (燃料域) サブレーションポンプール水温度 [可燃性ガス濃度制御系起動] <ul style="list-style-type: none"> 格納容器内雰囲気酸素濃度 格納容器内雰囲気酸素濃度 (対象外) 	○	×	×	×	R,C	-		
MS-3	2) 異常状態への対応上必要な構築物、系統及び機器	BWR には対象機能なし 制御室外原子炉停止装置 (安全停止に関連するもの) 原子力発電所緊急時対策所、試料採取系、通信連絡設備、放射線監視設備、事故時監視計器の一部、消火系、安全避難通路、非常用照明	構築物、系統又は機器	中央制御室外原子炉停止装置	○	×	×	×	C	-		
				放射線監視設備 (気体廃棄物処理設備エリア排気放射線モニタ)	○	×	×	×	T	-		
外殻となる施設			構築物、系統又は機器	制御建屋	○	○	×	×	○	○	○	外殻施設
				タービン建屋	○	○	×	×	○	○	○	外殻施設
				軽油タンク室	○	○	×	×	○	○	○	外殻施設
				軽油タンク室(H)	○	○	×	×	○	○	○	外殻施設

注記*1: 1=外部事象防護対象施設等, 2=屋外設備, 3=外気と繋がる設備, 4=外殻となる施設による防護が期待できない設備
 *2: R=原子炉建屋, C=制御建屋, T=タービン建屋, L0=軽油タンク室, L0H=軽油タンク室 (H), D=固体廃棄物貯蔵所, RB=補助ボイラー建屋, TSC=緊急時対策建屋
 *3: 抽出の観点1~4の評価の結果, 該当せず
 *4: 屋外にある外部事象防護対象施設の付属設備 (波及的影響 (機能的影響) を及ぼし得る施設) として抽出

竜巻飛来物による非常用ガス処理系屋外配管損傷時の影響について

1. 概要

非常用ガス処理系（以下「SGTS」という。）の屋外配管が、竜巻飛来物により損傷したと仮定した場合の設計基準事故時の被ばく評価への影響について確認する。

2. 評価対象事故

環境への放射性物質の異常な放出を伴う設計基準事故とその事故における SGTS の放射性物質の濃度低減機能の扱いについて整理した結果を表 1 に示す。このうち、SGTS の機能に期待している設計基準事故は、「原子炉冷却材喪失」及び「燃料集合体の落下」であり、表 2 に示すとおり、実効線量が大きい「燃料集合体の落下」を代表して、屋外 SGTS 配管が損傷した場合の被ばく評価への影響を確認する。

表 1 事故時被ばく評価における SGTS の放射性物質の濃度低減機能の扱いについて

設計基準事故	事象の進展	SGTS の放射性物質の濃度低減機能の扱い
放射性気体廃棄物処理施設の破損	原子炉の通常運転時に、蒸気式空気抽出器出口配管が破損し、放射性物質がタービン建屋内に放出される。タービン建屋内に放出された放射性物質は、換気空調系を通じて排気筒から大気中に放出される。	同施設の破損箇所の想定は原子炉建屋外であり、SGTS の濃度低減機能には期待していない。
主蒸気管破断	原子炉の出力運転中に、原子炉格納容器外で主蒸気管が破断した場合に、放射性物質が破断口からタービン建屋内に流出する。タービン建屋内に流出した放射性物質は、ブローアウトパネルより大気中に放出される。	タービン建屋内に流出した放射性物質は、ブローアウトパネルを通じて大気中に放出されるため、SGTS の濃度低減機能には期待していない。
燃料集合体の落下	原子炉の燃料交換時に、燃料取扱設備の故障、破損等により燃料集合体が落下して破損し、放射性物質が原子炉建屋原子炉棟内に放出される。原子炉建屋原子炉棟内に放出された放射性物質は、SGTS を通じて大気中に放出される。	破損した燃料集合体から放出した放射性物質は、SGTS を通じて大気中に放出されるため、SGTS の濃度低減機能に期待している。
原子炉冷却材喪失	原子炉の出力運転中に、原子炉冷却材圧力バウンダリを構成する配管あるいはこれに付随する機器等の破損等により、破断箇所から放射性物質が原子炉格納容器内に放出される。原子炉格納容器内に放出された放射性物質は、原子炉建屋原子炉棟内に漏えいし、SGTS を通じて大気中に放出される。	原子炉格納容器から漏えいした放射性物質は、SGTS を通じて大気中に放出されるため、SGTS の濃度低減機能に期待している。
制御棒落下	原子炉が臨界又は臨界近傍にあるときに、制御棒が炉心から落下し、放射性物質が原子炉冷却材中に放出される。原子炉冷却材中に放出された放射性物質は、主蒸気とともに復水器へ移行し、復水器から漏えい、換気空調系を通じて大気中に放出される。	放射性物質の漏えい箇所は原子炉建屋外であり、SGTS の濃度低減機能には期待していない。

表2 「原子炉冷却材喪失」及び「燃料集合体の落下」の実効線量

設計基準事故	敷地境界における実効線量 (mSv)
原子炉冷却材喪失	約 8.0×10^{-5}
燃料集合体の落下	約 3.9×10^{-2}

3. 評価方法と評価条件

3.1 評価方法

SGTS 配管は、原子炉建屋側壁面から屋外に露出し、その後地下に設置されている主排気ダクトを介して排気筒に導かれている。そのため、SGTS 配管の屋外露出部分に対して、竜巻飛来物が直接衝突し貫通した場合の被ばく評価を行う。

3.2 評価条件

被ばく評価において用いる数値等は、以下のとおりとする。

なお、添付書類「VI-1-1-6 安全設備及び重大事故等対処設備が使用される条件の下における健全性に関する説明書」において、静的機器の単一故障が発生した場合の影響評価として、屋外配管の損傷も含めた SGTS 単一設計部に対して、環境への放射性物質の放出の観点から最も過酷な条件での故障を想定した被ばく評価を実施していることから、これと同じ条件とする。

- ・評価対象とする屋外 SGTS 配管は、地表面よりも上方で屋外に露出しているが、本評価においては、放出点として考慮する竜巻飛来物による損傷部位を保守的に地表面とした場合の被ばく影響について確認する。
- ・竜巻飛来物による屋外 SGTS 配管の損傷によって SGTS のフィルタが閉塞することは無いが、保守的に事故発生から 24 時間以降、フィルタの閉塞を考慮する。
- ・その他、評価に必要な条件を表 3 に示す。

表 3 屋外 SGTS 配管損傷時影響評価条件

項目	影響評価	(参考) 設置許可申請書 添付書類十記載の評価条件
燃料取替 作業開始	原子炉停止 3 日後	原子炉停止 1 日後
原子炉建屋 からの換気率	0～24 時間 : 0.5[回/day] (SGTS) 24 時間以降 : 0.5[回/day] (建屋漏えい)	0.5[回/day] (SGTS)
よう素 除去効率	0～24 時間 : 99% (非常用ガス処理系) 24 時間以降 : 0% (—)	99% (SGTS)
実効放出 継続時間	0～24 時間 (SGTS の排気口放出) 相対濃度 χ/Q [s/m ³] : 10 時間 相対線量 D/Q [Gy/Bq] : 10 時間 24 時間以降 (地上放出) 相対濃度 χ/Q [s/m ³] : 40 時間 相対線量 D/Q [Gy/Bq] : 30 時間	相対濃度 χ/Q [s/m ³] : 1 時間 相対線量 D/Q [Gy/Bq] : 1 時間
環境に放出さ れた放射性物 質の大気中の 拡散条件 (気象データ (2012 年 1 月 ～2012 年 12 月))	0～24 時間 (SGTS の排気口放出) 相対濃度 χ/Q [s/m ³] : 2.9×10^{-6} 相対線量 D/Q [Gy/Bq] : 1.1×10^{-19} 24 時間以降 (地上放出) 相対濃度 χ/Q [s/m ³] : 4.9×10^{-5} 相対線量 D/Q [Gy/Bq] : 9.5×10^{-19}	相対濃度 χ/Q [s/m ³] : 5.5×10^{-6} 相対線量 D/Q [Gy/Bq] : 1.3×10^{-19}
呼吸率	5.16[m ³ /day] (事故全体としての実効放出継続時 間が 24 時間以上であるため、呼吸率 は小児の 1 日平均の呼吸率を使用)	0.31[m ³ /h] (小児の活動時の呼吸率)

4. 評価結果

竜巻飛来物による屋外 SGTS 配管の損傷を考慮した場合における、燃料集合体の落下事故時の被ばくを評価した結果を表 4 に示す。評価結果は、設計基準事故の判断基準である 5mSv を満足する結果となった。

表 4 竜巻飛来物による屋外 SGTS 配管の損傷を考慮した場合における
燃料集合体の落下事故時における被ばく評価結果

項目	敷地境界における実効線量 (mSv)
燃料集合体の落下	約 1.5×10^0
(参考) 設置許可申請書添付書 類十記載値	約 3.9×10^{-2}

竜巻飛来物による排気筒損傷時の影響について

1. 概要

排気筒について、筒身に損傷が生じた場合は安全上支障のない期間に補修することとしている。

通常時及びプラント停止時においても、気体廃棄物等を排気筒から高所放出していることから、排気筒の筒身に損傷が生じた場合の被ばく影響について示すものである。

2. 評価条件

- ・実際には、筒身に損傷が認められた場合には、安全上支障のない期間に修復する等の対応を行うが、本評価においては、プラントが通常運転を1年間継続すると保守的に仮定し、排気筒の補修に必要な期間として、筒身に想定される局所的な損傷モード（貫通）に対しては保守的と考えられる6ヶ月を想定し、補修完了までの6ヶ月を地上放出、補修完了後の6ヶ月を高所放出とする。
- ・地上放出は放出源有効高さ0mとし、気象データは地上観測データとする。
- ・その他の条件は、設置変更許可申請書と同じとする。

3. 評価結果

通常時において損傷した排気筒から放出した場合の被ばくを評価した結果を表1に示す。実際には、排気筒に損傷が認められた場合には、安全上支障のない期間に修復する等の対応を行うため、被ばく量に対する影響はほとんどないと考えられるが、本評価においては、保守的な設定（プラントが通常運転を継続し、かつ補修に時間を要する）を用いた場合においても、通常時における線量目標値を満足することを確認した。

表1 通常時における排気筒損傷時の被ばく評価結果

(単位： $\mu\text{Sv/y}$)

被ばく経路	排気筒損傷時の 1年間の累積線量	排気筒健全時の 1年間の累積線量	目標値
希ガス	約 27	約 13	—
よう素	約 13	約 2.0	—
液体（よう素除く）	約 0.9	約 0.9	—
合計	約 41	約 16	50

1.2 外部事象防護対象施設等に波及的影響を及ぼし得る施設
の選定について

1.2 外部事象防護対象施設等に波及的影響を及ぼし得る施設の選定について

1.2.1 抽出方針

女川原子力発電所構内の構築物、系統及び機器のうち外部事象防護対象施設等を除く施設（以下「その他の施設」という。）より、外部事象防護対象施設等に対する波及的影響として、以下の観点から波及的影響を及ぼし得る施設を抽出する。

なお、別紙1に示すとおり、女川原子力発電所の津波防護施設等については、基準津波の高さや防護範囲の広さ等、その重要性に鑑み自主的に機能維持のための配慮を行う。

(1) 機械的影響の観点での抽出

外部事象防護対象施設等に対して、機械的影響の観点から、施設が倒壊することにより、外部事象防護対象施設等の機能を喪失させる可能性がある施設及び隣接する施設を抽出する。

図1.2-1に示すとおり、隣接施設及び施設の高さが外部事象防護対象施設等との距離以上である施設を抽出した。

抽出フローを図1.2-2に、抽出結果を表1.2-1及び図1.2-3に示す。また、抽出結果の詳細を、別紙2に示す。

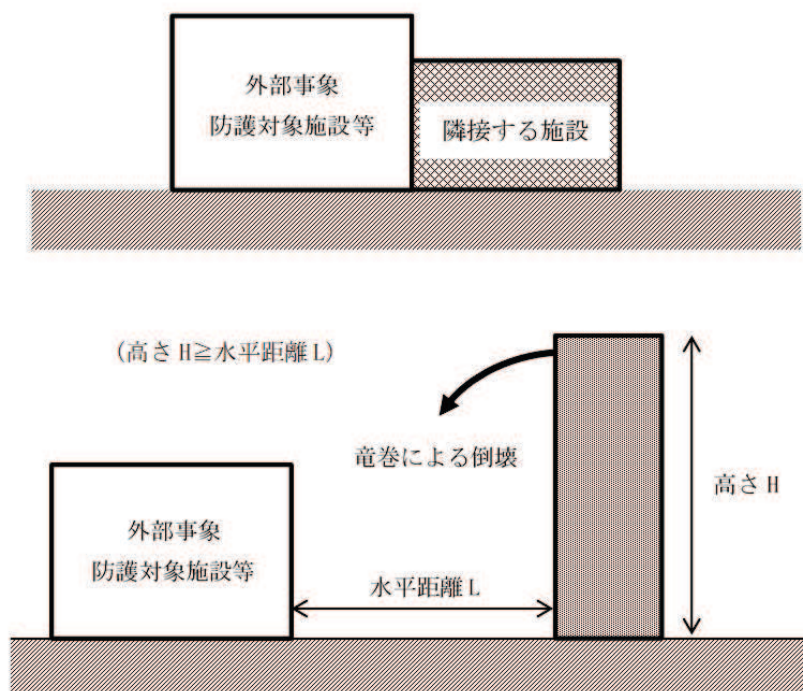


図 1.2-1 隣接する施設及び倒壊により外部事象防護対象施設等に損傷を及ぼし得る施設

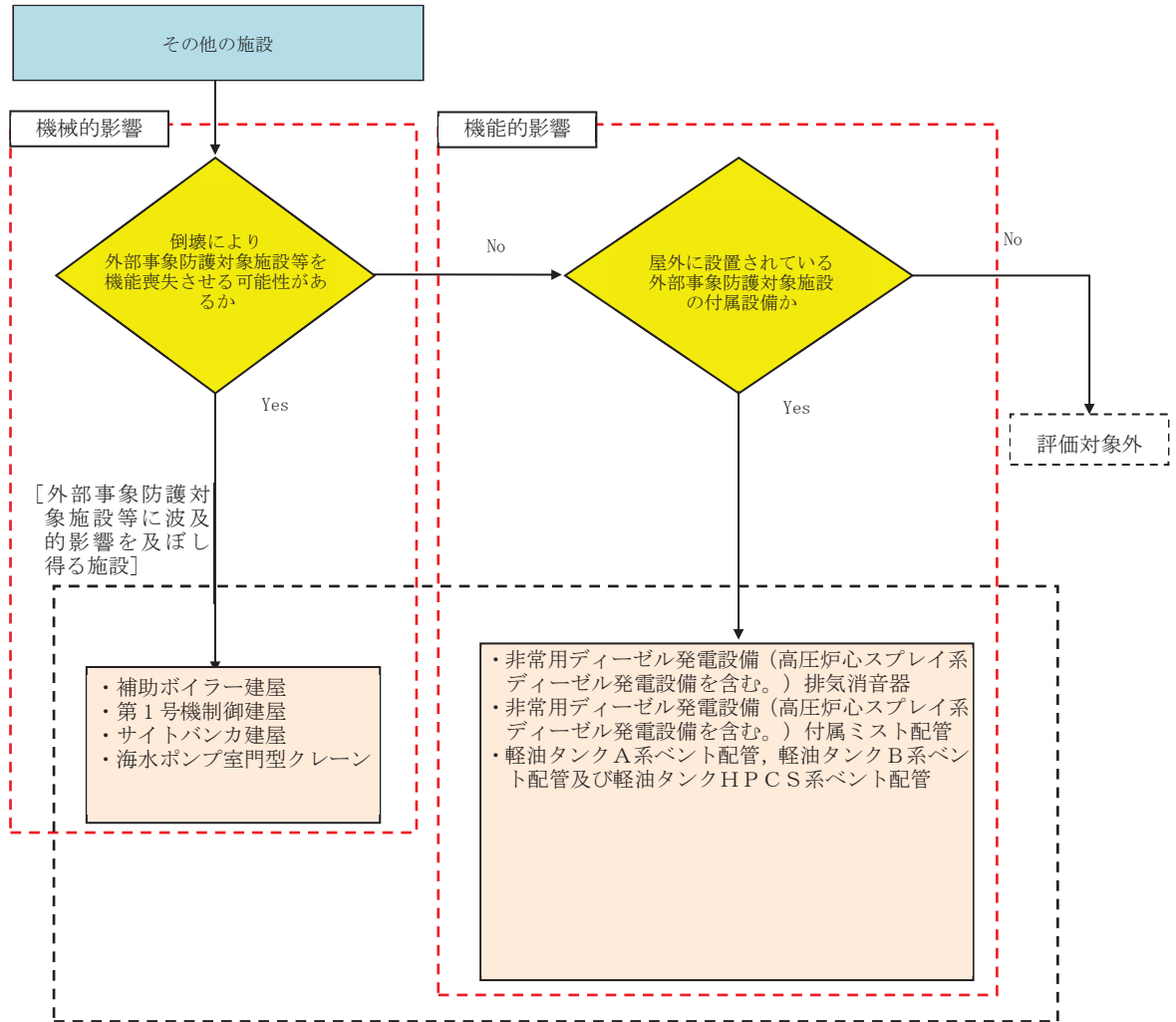


図 1.2-2 外部事象防護対象施設等に波及的影響を及ぼし得る施設の抽出フロー

表 1.2-1 機械的影響の観点からの抽出結果

外部事象防護対象施設等に波及的影響を及ぼし得る施設	外部事象防護対象施設等	地上高 (m)	外部事象防護対象施設等までの最短距離 (m)
第1号機制御建屋	制御建屋	—	隣接
補助ボイラー建屋	制御建屋 タービン建屋	—	隣接
サイトバンカ建屋	タービン建屋	約 44	約 22
海水ポンプ室門型クレーン	原子炉補機冷却海水ポンプ等	約 23	約 36 ^{*1*2}

(注) 機械的影響の観点からの主な抽出結果を記載している。

注記 *1: 通常待機位置における最短距離

*2: 海水ポンプ室門型クレーンはストッパーにより固定されているが、破損した場合には竜巻の風圧を受け移動し、原子炉補機冷却海水ポンプ等に隣接する可能性があるため抽出する

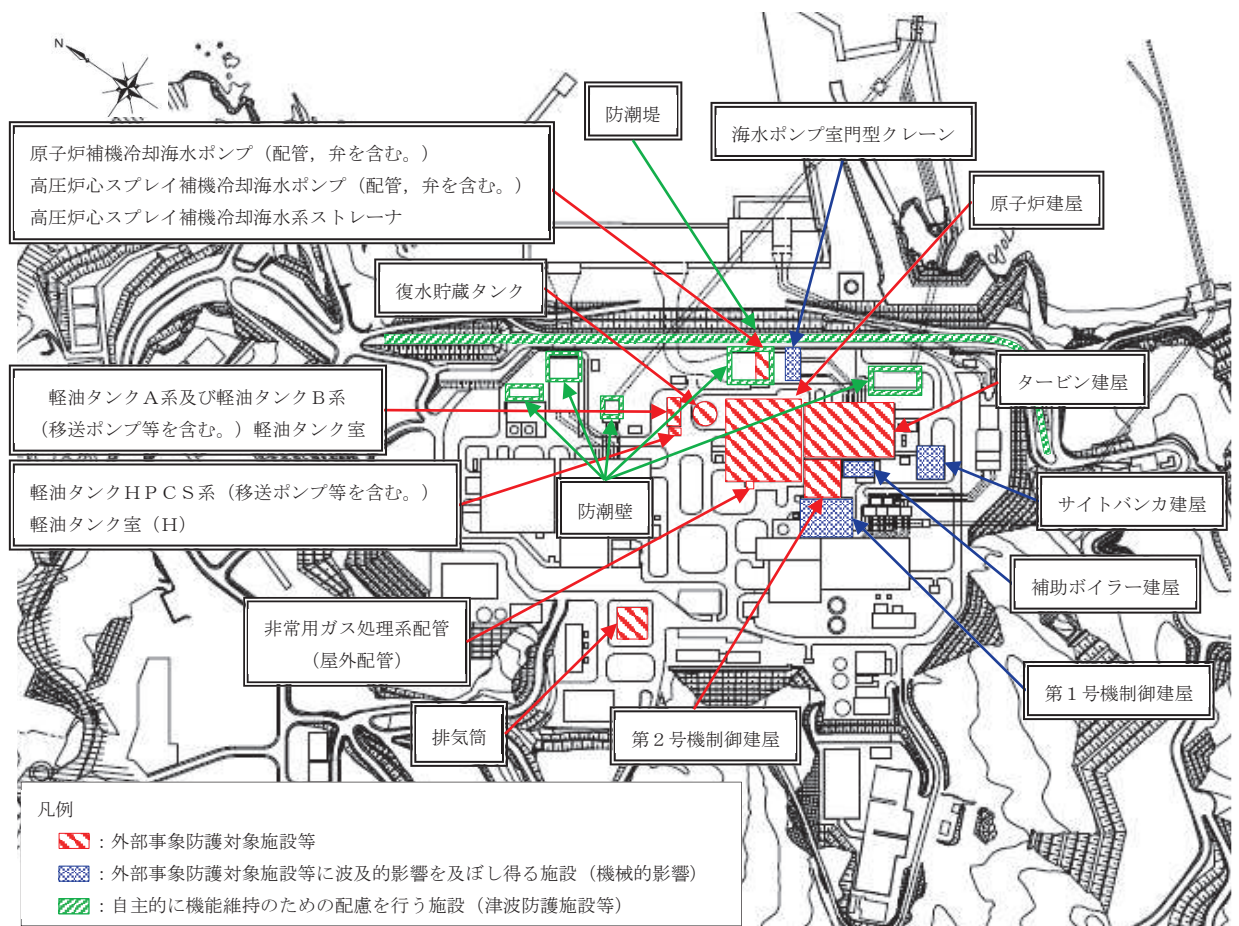


図 1.2-3 機械的影響の観点からの抽出結果

(2) 機能的影響の観点での抽出

a. 外部事象防護対象施設の付属設備のうち屋外にある設備

外部事象防護対象施設に対して、機能的影響の観点（「屋外にある外部事象防護対象施設の付属設備」）から、機能喪失に陥った場合に外部事象防護対象施設も機能喪失する可能性がある施設を抽出した。抽出結果を表 1.2-2 及び図 1.2-4 に示す。

表 1.2-2 機能的影響の観点からの抽出結果

外部事象防護対象施設	屋外にある外部事象防護対象施設の付属設備
非常用ディーゼル発電設備	排気消音器
	機関ミスト配管
	潤滑油サンプタンクミスト配管
	燃料デイタンクミスト配管
	燃料油ドレンタンクミスト配管
高圧炉心スプレイ系ディーゼル発電設備	排気消音器
	機関ミスト配管
	潤滑油補給タンクミスト配管
	燃料デイタンクミスト配管
	燃料油ドレンタンクミスト配管
軽油タンク A 系	軽油タンク A 系ベント配管
軽油タンク B 系	軽油タンク B 系ベント配管
軽油タンク H P C S 系	軽油タンク H P C S 系ベント配管

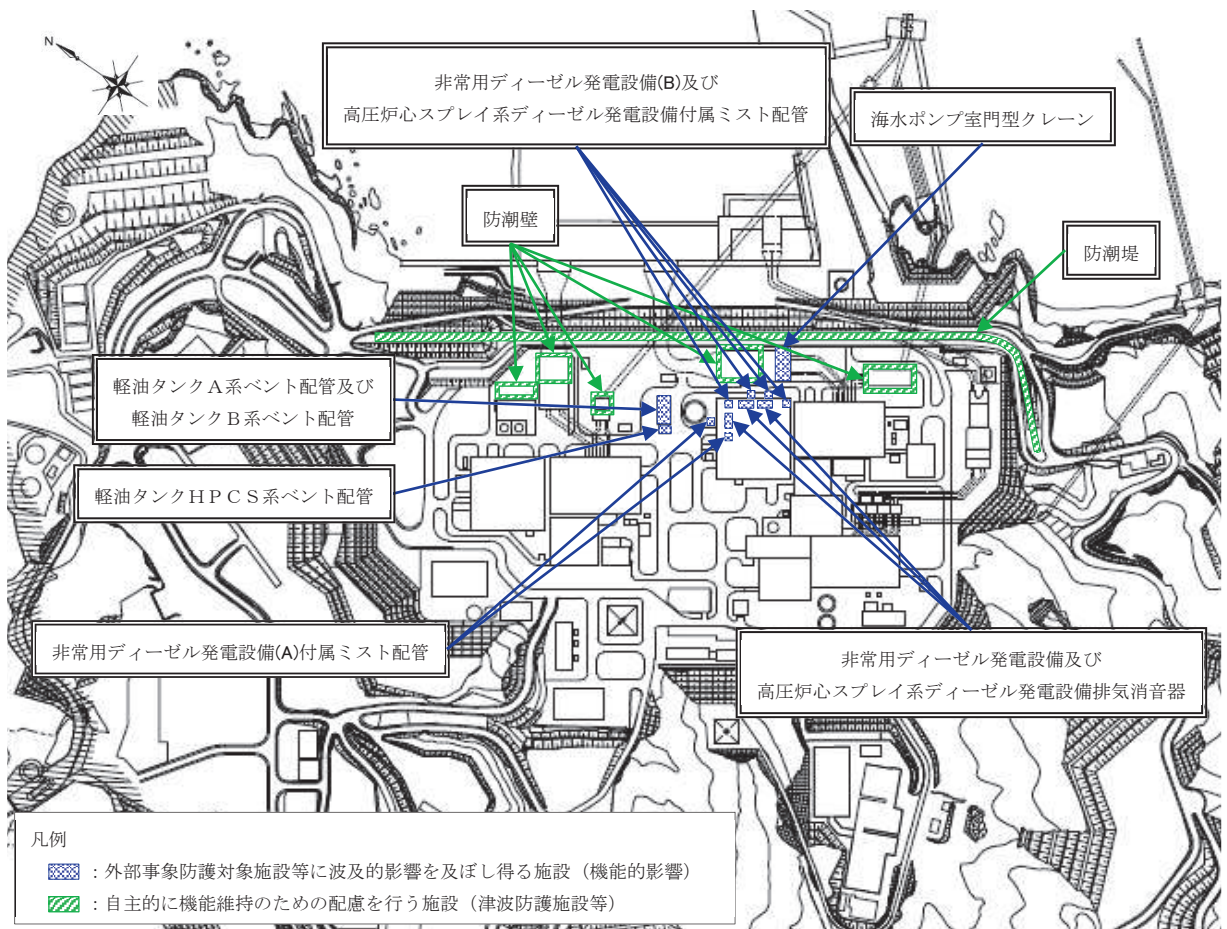


図 1.2-4 機能的影響の観点からの抽出結果

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

1. 概要

津波防護施設，浸水防止設備及び津波監視設備（以下「津波防護施設等」という。）の外部事象
津波防護施設，浸水防止設備及び津波監視設備（以下「津波防護施設等」という。）の外部事象に
対する防護方針を以下に示す。

2. 防護に関する考え方

以下の考え方に基づき，女川原子力発電所において設計上考慮すべき外部事象に対する津波防
護施設等の機能維持のための対応の要否について整理した。

外部事象に対する津波防護施設等の機能維持対応要否判断フローを図1に示す。

- (1) 設計上考慮すべき事象が，津波若しくは津波の随伴，重畳が否定できない事象に該当するかを
確認する。定量的な重畳確率が求められない事象については，保守的にその影響を考慮する。
- (2) 津波の随伴，重畳が否定できない場合は，当該事象による津波防護施設等の機能喪失モードの
有無を確認する。機能喪失モードが認められる場合は，設計により健全性を確保する。
- (3) 津波の随伴，重畳が有意でないと評価される事象についても，女川原子力発電所の津波防護施
設等については，基準津波の高さや防護範囲の広さ等その重要性に鑑み，自主的に機能維持の
ための配慮を行う。

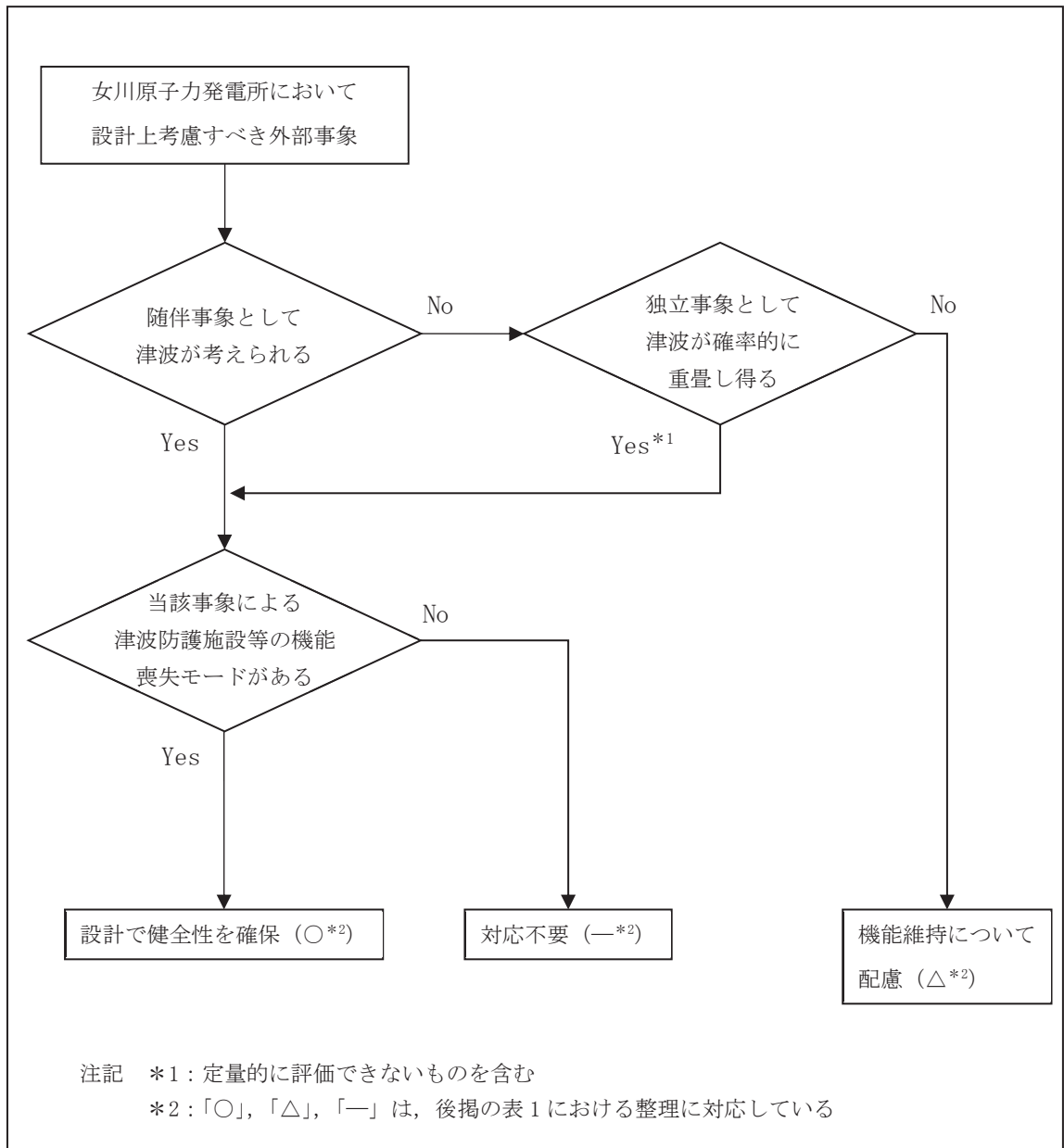


図1 外部事象に対する津波防護施設等の機能維持対応要否判断フロー

3. 検討結果

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

(1) 津波の随伴、重畳が否定できない事象*に対する防護方針

これらの外部事象に対しては、津波との随伴若しくは重畳の可能性を否定できないため、荷重の重ね合わせのタイミングも考慮した上で設計への反映の要否を検討し、津波防護施設等への影響が考えられる事象に対しては、津波防護施設等の機能を維持する設計とする。

注記 *：地震，風（台風），凍結，降水，積雪，落雷，森林火災

(2) 津波の随伴、重畳が有意ではない事象（竜巻、火山の影響）に対する防護方針

「竜巻」、「火山の影響」の2つの外部事象に津波は随伴せず、また、基準津波との重畳の確率も有意ではないため、津波防護施設等を防護対象施設とはしないものの、津波防護施設等の機能が要求される時にはその機能を期待できるように以下の対応を自主的に実施する。

a. 竜巻

設計竜巻と基準津波が重畳する年超過確率は約 $1.9 \times 10^{-12} \sim 1.9 \times 10^{-13}$ (/年) であり、竜巻と津波の重畳は有意ではないと評価されるが、竜巻が襲来した場合には必ず作用する風荷重に対しては、津波防護施設等の健全性を維持する設計とする。また、竜巻が襲来した場合でも、必ずしも津波防護施設に作用するとは限らない竜巻飛来物の衝撃荷重に対しては、大規模な損傷に至り難い構造とする。

b. 火山の影響

設計で想定する降下火砕物の噴火と基準津波が重畳する年超過確率は約 $1.2 \times 10^{-10} \sim 1.2 \times 10^{-11}$ (/年) * であり、火山の影響と基準津波の重畳は有意ではないと評価されるが、降下火砕物の堆積荷重について長期荷重に対する構造健全性を確保するとともに、降灰後に適宜除去が可能な設計とする。

注記 *：噴火については約1万2千年前の肘折尾花沢噴火を考慮

4. 自主的に機能維持のための配慮を行う施設について

女川原子力発電所の津波防護施設（防潮堤、防潮壁、取放水路流路縮小工及び貯留堰）、浸水防止設備（逆流防止設備、水密扉、浸水防止蓋、浸水防止壁、逆止弁付ファンネル及び貫通部止水処置）及び津波監視設備（取水ピット水位計及び津波監視カメラ）のうち防潮堤及び防潮壁については、基準津波の高さや防護範囲の広さ等、津波防護上重要な施設であること、また、形状、配置を考慮し、受圧面積が大きく竜巻の風圧力による荷重の影響を受けやすい施設であることから、自主的に機能維持のための配慮として、竜巻の風圧力に対しては健全性を維持する設計とし、飛来物については、大規模な損傷に至り難い構造設計とする。

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

表 1 外部事象に対する津波防護施設等の対応方針整理表 (1/2)

設計上考慮すべき外部事象	① 随伴事象として津波を考慮要	② 独立事象として津波が重畳し得る	津波との重畳を考慮要 (①か②が○)	津波防護施設の機能喪失による安全施設等の機能喪失の可能性	設計への反映要否	機能維持のための対応方針
地震	○	—	○	あり 地震荷重により損傷した場合, 安全施設等への津波の到達, 浸水による機能喪失が想定される。	○	耐震Sクラスとして基準地震動Ssに対し健全性を維持し, 津波に対する防護機能を維持する。 また, 津波と余震の組み合わせも考慮する。
風 (台風)	—	○	○	あり 風荷重により損傷した場合, 安全施設等への津波の到達, 浸水による機能喪失が想定される。	○	・風荷重, 津波荷重を考慮した設計とする。
竜巻	—	—	—	なし 以下のとおり, 重畳の頻度は無視し得る。 ・設計竜巻の確率: 約 1.9×10^{-6} /年 ・基準津波の年超過確率: $1 \times 10^{-6} \sim 1 \times 10^{-7}$ /年 ⇒ 重畳確率: 約 $1.9 \times 10^{-12} \sim 1.9 \times 10^{-13}$ /年 年超過確率が 1×10^{-7} /年未満であり, 有意ではない。	△	防潮堤・防潮壁の設計においては, 自主的に以下の配慮を行い, 信頼性を高める。 ・風圧力に対しては, 健全性を維持する設計とする。 ・飛来物については, 大規模な損傷に至り難い構造とする。
凍結	—	○	○	あり 凍害により止水目地が損傷した場合, 安全施設への津波の到達, 浸水による機能喪失が想定される。	○	止水目地は最低気温を考慮した設計とする。

注記 *1: 噴火については約1万2千年前の肘折尾尾花沢噴火を考慮

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

表 1 外部事象に対する津波防護施設等の対応方針整理表 (2/2)

設計上考慮すべき外部事象	① 随伴事象として津波を考慮要	② 独立事象として津波が重量し得る	津波との重量を考慮要 (①か②が○)	津波防護施設の機能喪失による安全施設等の機能喪失の可能性	設計への反映要否	機能維持のための対応方針
降水	—	○	○	なし 降雨による海水面の上昇の影響は無視し得る。	—	—
積雪	—	○	○	あり 積雪荷重により損傷した場合, 安全施設等への津波の到達, 浸水による機能喪失が想定される。	○	積雪荷重と津波荷重を考慮した設計とする。
落雷	—	○	○	あり 落雷による津波監視設備の機能喪失が想定される。	○	津波監視設備については, 既設避雷設備の遮へい範囲内への設置を行う。
火山	—	—	—	なし 以下のとおり, 重量の頻度は無視し得る。 ・想定する火山の確率: 約 1.2×10^{-4} /年*1 ・基準津波の年超過確率: $1 \times 10^{-6} \sim 1 \times 10^{-7}$ /年 ⇒重量確率: 約 $1.2 \times 10^{-10} \sim 1.2 \times 10^{-11}$ /年 年超過確率が 1×10^{-7} /年未満であり, 有意ではない。	△	設計にて長期荷重に対する構造健全性を確保するとともに, 降灰後に降下火砕物を適宜除去が可能な設計とする。
生物学的事象	—	—	—	なし 生物による影響(閉塞, 侵入)による機能喪失モードを有しない。	—	—
森林火災	—	○	○	なし 防火帯により森林との離隔距離が確保されるため, 熱影響を受けることはない。	—	—

注記 *1: 噴火については約1万2千年前の肘折尾尾花沢噴火を考慮

外部事象防護対象施設等に波及的影響を及ぼし得る施設に係る調査結果について

女川原子力発電所における波及的影響を及ぼし得る施設に係るウォークダウンは、平成 25 年 9 月 10 日～12 日、平成 27 年 2 月 12 日～13 日に実施した。

調査では、外部事象防護対象施設及び外部事象防護対象施設の外壳に波及的影響を及ぼし得る施設を抽出し、倒壊による影響を及ぼす可能性について確認を行った。

1. 調査範囲

外部事象防護対象施設等の周りの最も高い建物である事務建屋の高さを基準として、約 40m の範囲とした。

2. 調査方法

調査範囲内にある施設について、外部事象防護対象施設等の周辺の状態を確認し、隣接施設及び比較的近接している施設を抽出するとともに、倒壊による影響の可能性の観点から寸法測定、設置場所の確認、写真撮影等を行った。具体的な内容については以下のとおり。

(1) 寸法測定

外部事象防護対象施設等からの離隔距離の測定、対象物の平面寸法及び高さを、計測器による測定及び図面等により確認した。

(2) 設置場所

確認した施設について、配置図の作成及び、写真撮影を実施した。

その他、現地で確認できない情報（重量、寸法等）については、設計図書等により確認した。

3. 調査結果

本調査で抽出された、波及的影響を及ぼし得る施設を図 1～図 3 及び表 1～表 3 に示す。外部事象防護対象施設等から約 40m の範囲内に設置されている設備及び建物・構築物として 106 施設を抽出し、それらについて図 4 のフローに基づいて評価を行った。

その結果、外部事象防護対象施設に波及的影響を及ぼし得る施設の評価対象として、第 1 号機制御建屋、第 2 号機補助ボイラー建屋、サイトバンカ建屋及び海水ポンプ室門型クレーンに加え、基準津波の高さや防護範囲の広さ等の重要性に鑑み自主的に機能維持のための配慮を行う防潮堤及び防潮壁の 6 施設を選定した。

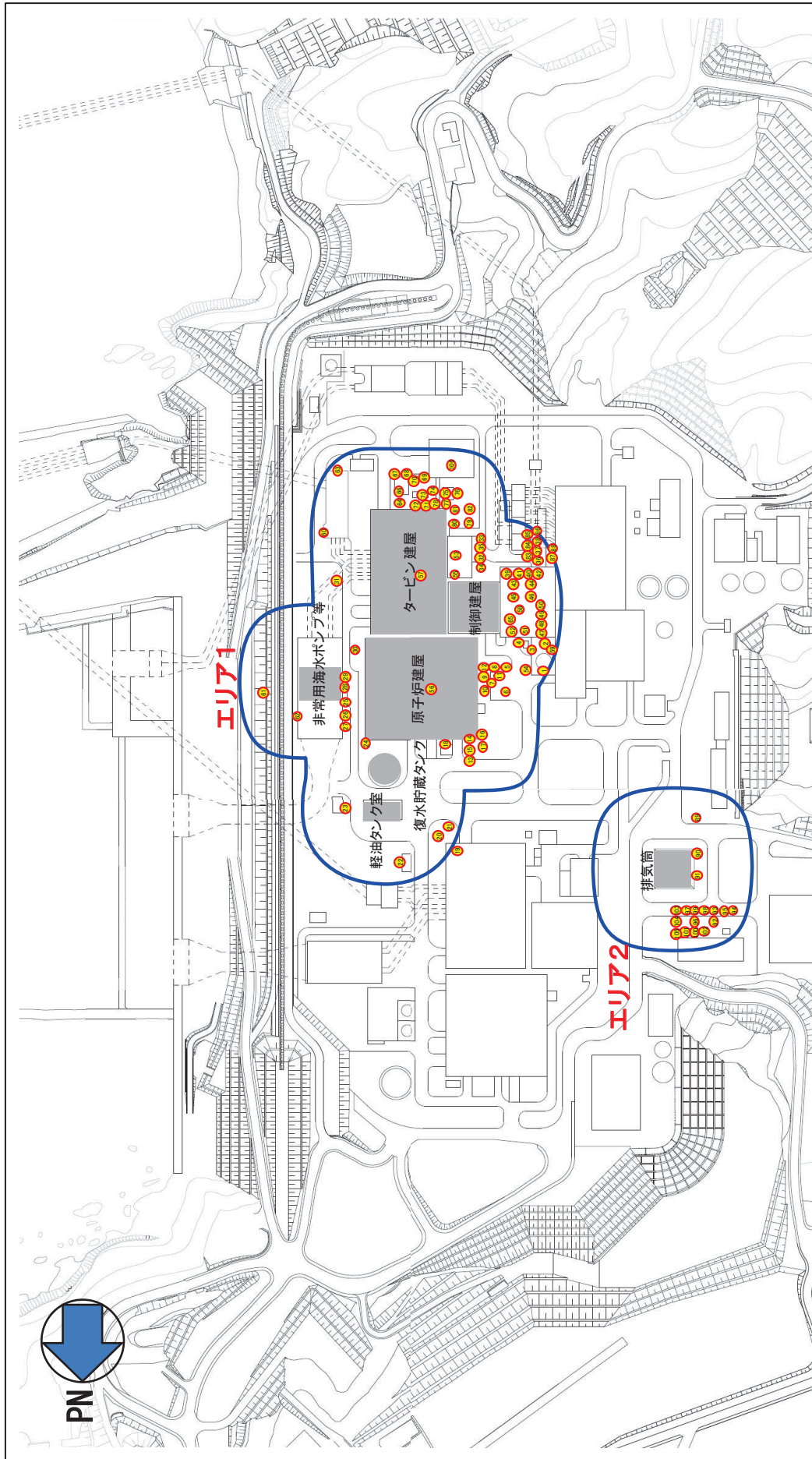


図1 波及的影響を及ぼし得る可能性のある施設配置図（調査エリア）

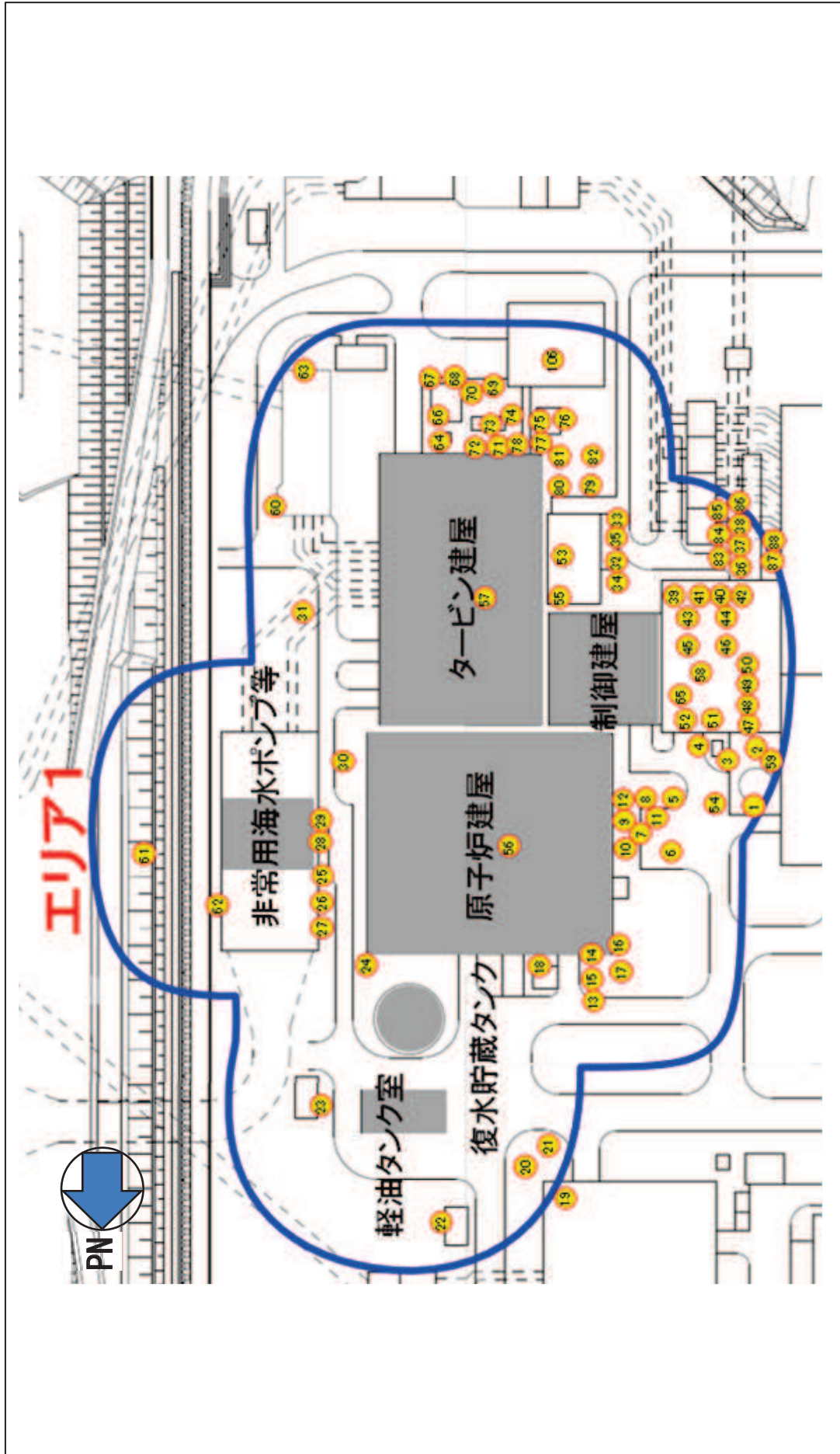


図2 波及的影響を及ぼし得る可能性のある施設配置図（エリア1）

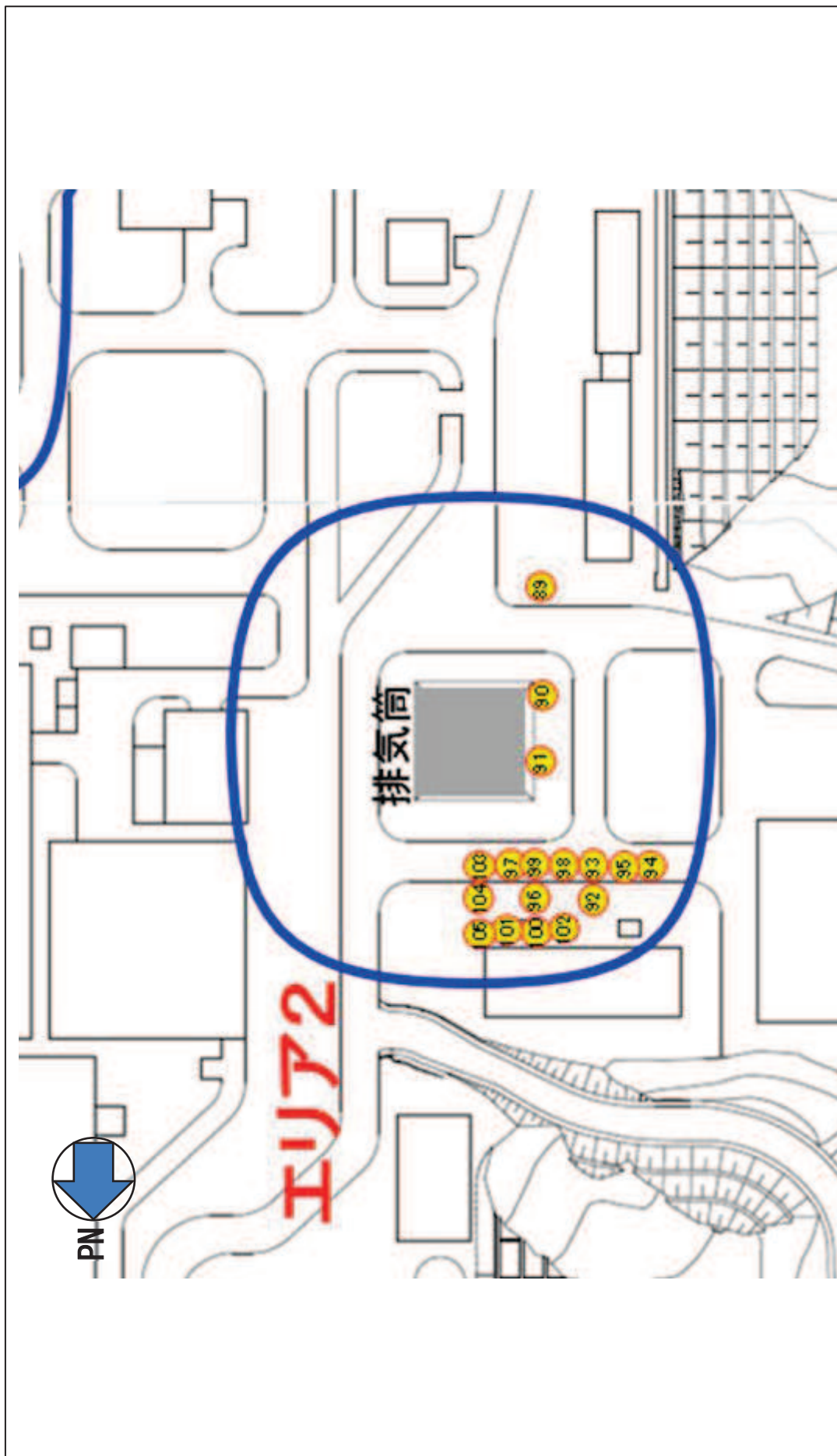
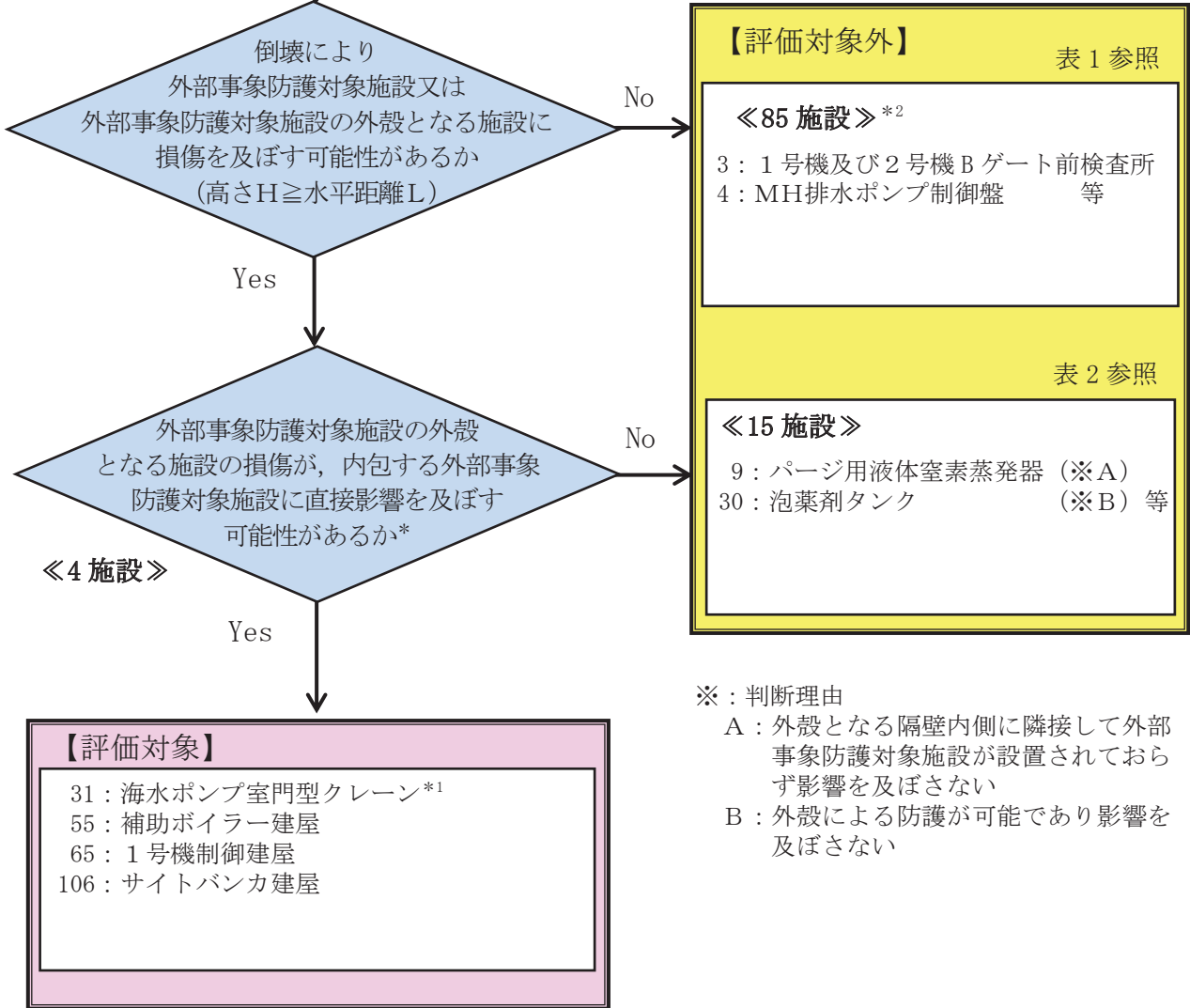


図3 波及的影響を及ぼし得る可能性のある施設配置図（エリア2）

外部事象防護対象施設等の約 40m の範囲内に設置されている設備及び建物・構築物

波及的影響評価判定



※：判断理由

- A：外壳となる隔壁内側に隣接して外部事象防護対象施設が設置されておらず影響を及ぼさない
- B：外壳による防護が可能であり影響を及ぼさない

注記 *1：海水ポンプ室門型クレーンについては、ストッパーにより固定されるが、ストッパーが破損した場合には竜巻の風により移動し、原子炉補機冷却海水ポンプ等に隣接する可能性があるため抽出する

*2：津波防護施設等については、基準津波の高さや防護範囲の広さ等の重要性に鑑み、自主的に機能維持のための配慮を行う

図 4 倒壊による波及的影響を及ぼし得る可能性のある施設の評価判定フロー

表1 倒壊により外部事象防護対象施設又は外部事象防護対象施設の外壳となる施設に
 損傷を及ぼす可能性がある施設 評価対象外一覧表【85施設*】

No.	施設名	No.	施設名	No.	施設名
1	第1号機再生純水タンク	35	補助ボイラー用変圧器(B)	79	復水脱塩装置薬液貯槽現場盤
2	第1号機化学分析室用ポンベ庫	36	第1号機主復水器電解鉄イオン注入装置電解槽A	80	苛性ソーダ貯槽
3	第1号及び第2号機Bゲート前検査所	37	第1号機主復水器電解鉄イオン注入装置電解槽B	81	硫酸計量槽
4	MH排水ポンプ制御盤	38	第1号機主復水器電解鉄イオン供給装置直流電源装置盤	82	硫酸貯槽
5	窒素ガス供給装置制御盤	39	第1号機吸気フィルタサイレンサ(A)	83	第1号機鉄イオン供給装置現場盤
6	窒素貯槽	40	第1号機吸気フィルタサイレンサ(B)	84	第1号機主復水器連続洗浄装置電気防食装置直流電源盤
7	常時補給用液体窒素蒸発器(送ガス)	41	第1号機吸気フィルタサイレンサ(C)	85	第1号機主復水器電解鉄イオン供給装置制御盤
8	常時補給用液体窒素蒸発器(加圧用)	42	第1号機吸気フィルタサイレンサ(D)	86	第1号機主復水器連続洗浄装置制御盤
10	計器収納箱(A)	43	第1号機排気サイレンサ(A)	87	第1号機No.8揚水井戸制御盤
11	計器収納箱(B)	44	第1号機排気サイレンサ(B)	88	第1号機ガスポンベ庫
13	固化系固化剤タンク	46	第1号機中央制御室用凝縮機(B)	89	事務本館
14	固化系固化剤ポンプ(A)	47	第1号機CVCF設置エリア用屋外機(A-1)	90	スタック放射線モニタ建屋
15	固化系固化剤ポンプ(B)	48	第1号機CVCF設置エリア用屋外機(A-2)	91	第3号機スタック放射線モニタ建屋
16	SOL固化剤タンク水位計架台	49	第1号機CVCF設置エリア用屋外機(B-1)	92	第3号機起動変圧器A
17	屋外作業用分電盤	50	第1号機CVCF設置エリア用屋外機(B-2)	93	第3号機起動変圧器3A冷却制御盤
18	PLR-VVVF入力変圧器	51	第1号機給湯系統高置水槽	94	第3号機起動変圧器3A中性点接地装置(2次側)
19	第3号機タービン建屋	52	第1号機給水系統高置水槽	95	第3号機起動変圧器3A中性点接地装置(3次側)
20	第3号機硫酸貯槽	53	補助ボイラーサイレンサー	96	第3号機起動変圧器B
21	第3号機苛性ソーダ貯槽	54	渡り廊下	97	第3号機起動変圧器3B冷却制御盤
22	第3号機ガスポンベ庫	59	空冷チリングユニット	98	第3号機起動変圧器3B中性点接地装置(2次側)
23	除塵装置電源室	60	主復水器連続洗浄装置制御盤	99	第3号機起動変圧器3B中性点接地装置(3次側)
25	揚水ポンプ操作盤(No.8)	63	放水路サンプリング建屋	100	第3号機GIS2号送電線ユニット制御盤
26	揚水ポンプ操作盤(No.9)	67	主変圧器制御盤	101	第3号機GIS主変圧器ユニット制御盤
27	揚水ポンプ操作盤(No.11)	68	屋外変圧器消火制御盤	102	第3号機GIS起動変圧器3Bユニット制御盤
28	No.9揚水ポンプ遠方操作盤	69	所内変圧器2A冷却器制御盤	103	第3号機開閉所電源盤
29	屋外作業用電源盤	70	所内変圧器2B冷却器制御盤	104	第3号機CVケーブル洞道出入口
32	補助ボイラー変圧器クロー制御盤(A)	74	屋外作業用分電盤	105	第3号機CVケーブル洞道冷却制御盤
33	補助ボイラー変圧器クロー制御盤(B)	76	起動変圧器制御盤		
34	補助ボイラー用変圧器(A)	77	起動変圧器中性点接地装置 2-1		

注記 *：防潮堤及び防潮壁については、基準津波の高さや防護範囲の広さ等の重要性を鑑み、自主的に機能維持のための配慮を行う

表2 外部事象防護対象施設の外壳の損傷が、内包する外部事象防護対象施設に直接影響を
 及ぼす可能性がある施設 評価対象外一覧表【15施設】

No.	施設名	No.	施設名	No.	施設名
9	バージ用液体窒素蒸発器(※A)	56	原子炉建屋避雷針(※B)	71	所内変圧器2A中性点接地装置(※A)
12	空冷チラーユニット(※A)	57	タービン建屋避雷針(※B)	72	所内変圧器2B中性点接地装置(※A)
24	泡消火設備現場盤(※B)	58	制御建屋避雷針(※B)	73	所内変圧器(※A)
30	泡薬剤タンク(※B)	64	励磁電源変圧器(※A)	75	起動変圧器(※A)
45	第1号機中央制御室用凝縮機(A)(※B)	66	主変圧器(※A)	78	起動変圧器中性点接地装置 2-2(※A)

※：判断理由

A：外壳となる隔壁内側に隣接して外部事象防護対象施設が設置されておらず影響を及ぼさない。

B：外壳による防護が可能であり影響を及ぼさない。

表 3 現地調査結果における波及的影響を及ぼし得る施設の抽出結果(1/5)

No.	設備名称	安全 重要度 クラス	波及的影響を及ぼす対 象(外部事象防護対象施 設の外殻となる建屋及 び構築物等)	地上高(m) H	外部事象防護対象施 設の外殻となる建 屋及び構築物等主 での最短距離(m) L	L-H(m)	波及的影響		評価対象
							倒壊により外部事象防護 対象施設又は外部事象防護 対象施設の外殻となる施 設に損傷を及ぼす可能性 があるか (高さH≧水平距離L)	外部事象防護対象施設の外 殻となる施設の損傷が、 内包する外部事象防護対 象施設に直接影響を及ぼ す可能性があるか	
1	第1号機再生純水タンク	NON	制御建屋	11.8	27.0	15.2	-	-	-
2	第1号機化学分析室用ボンベ庫	NON	制御建屋	2.6	22.0	19.4	-	-	-
3	第1号及び第2号機Bゲート前検査所	NON	制御建屋	3.6	16.0	12.4	-	-	-
4	MH排水ポンプ制御盤	NON	制御建屋	1.7	11.0	9.3	-	-	-
5	窒素ガス供給装置制御盤	MS-3	原子炉建屋	2.7	13.0	10.3	-	-	-
6	窒素貯槽	MS-3	原子炉建屋	4.0	9.0	5.0	-	-	-
7	常時補給用液体窒素蒸発器(送ガス)	MS-3	原子炉建屋	2.8	7.0	4.2	-	-	-
8	常時補給用液体窒素蒸発器(加圧用)	NON	原子炉建屋	2.7	5.8	3.1	-	-	-
9	バーン用液体窒素蒸発器	NON	原子炉建屋	3.4	0.8	-2.6	○	-	-
10	計器収納箱(A)	NON	原子炉建屋	1.8	4.0	2.2	-	-	-
11	計器収納箱(B)	MS-3	原子炉建屋	1.8	10.0	8.2	-	-	-
12	空冷チラーユニット	NON	原子炉建屋	3.7	0.6	-3.1	○	-	-
13	固化系固化剤タンク	NON	原子炉建屋	6.5	10.0	3.5	-	-	-
14	固化系固化剤ポンプ(A)	NON	原子炉建屋	0.6	4.3	3.7	-	-	-
15	固化系固化剤ポンプ(B)	NON	原子炉建屋	0.6	6.1	5.5	-	-	-
16	SOL固化剤タンク水位計架台	NON	原子炉建屋	1.8	10.0	8.2	-	-	-
17	屋外作業用分電盤	NON	原子炉建屋	1.6	1.7	0.1	-	-	-
18	PLR-VWVF 入力変圧器	PS-3	原子炉建屋	3.3	8.0	4.7	-	-	-
19	第3号機タービン建屋	PS-2	軽油タンク室	24.5	35.0	10.5	-	-	-
20	第3号機硫酸貯槽	NON	軽油タンク室	2.5	30.0	27.5	-	-	-
21	第3号機苛性ソーダ貯槽	NON	軽油タンク室	2.7	35.0	32.3	-	-	-
22	第3号機ガスボンベ庫	NON	軽油タンク室	4.7	34.0	29.3	-	-	-

○：該当
-：該当せず

表 3 現地調査結果における波及的影響を及ぼし得る施設の抽出結果(2/5)

No.	設備名称	安全 重要度 クラス	波及的影響を及ぼす対 象(外部事象防護対象施 設の外殻となる建屋及 び構築物等)	地上高(m) H	外部事象防護対象施 設の外殻となる建 屋及び構築物等主 での最短距離(m) L	L-H(m)	波及的影響		評価対象
							倒壊により外部事象防護 対象施設又は外部事象防護 対象施設の外殻となる施 設に損傷を及ぼす可能性 があるか (高さH≧水平距離L)	外部事象防護対象施設の外 殻となる施設の損傷が、 内包する外部事象防護対 象施設に直接影響を及ぼ す可能性があるか	
23	除塵装置電源室	NON	軽油タンク室	4.8	13.0	8.2	-	-	-
24	泡消火設備現場盤	MS-3	原子炉建屋	2.3	2.0	-0.3	○	-	-
25	揚水ポンプ操作盤 (No.8)	NON	原子炉建屋	2.4	15.0	12.6	-	-	-
26	揚水ポンプ操作盤 (No.9)	NON	原子炉建屋	2.4	15.0	12.6	-	-	-
27	揚水ポンプ操作盤 (No.11)	NON	原子炉建屋	2.4	15.0	12.6	-	-	-
28	No.9 揚水ポンプ遠方操作盤	NON	非常用海水ポンプ	1.6	3.5	1.9	-	-	-
29	屋外作業用電源盤	NON	非常用海水ポンプ	2.7	3.0	0.3	-	-	-
30	泡薬剤タンク	MS-3	原子炉建屋	2.2	1.1	-1.1	○	-	-
31	海水ポンプ室門型クレーン*	NON	タービン建屋	22.7	19.6	-3.1	○	-	○*
32	補助ボイラー変圧器クーラ制御盤 (A)	PS-3	制御建屋	1.7	19.0	17.3	-	-	-
33	補助ボイラー変圧器クーラ制御盤 (B)	PS-3	制御建屋	1.7	29.0	27.3	-	-	-
34	補助ボイラー用変圧器 (A)	PS-3	制御建屋	5.7	13.0	7.3	-	-	-
35	補助ボイラー用変圧器 (B)	PS-3	制御建屋	5.7	23.0	17.3	-	-	-
36	第1号機主復水器電解鉄イオン注入装置電解槽 A	NON	制御建屋	4.0	33.0	29.0	-	-	-
37	第1号機主復水器電解鉄イオン注入装置電解槽 B	NON	制御建屋	4.0	34.0	30.0	-	-	-
38	第1号機主復水器電解鉄イオン供給装置直流通源装置	NON	制御建屋	2.4	35.0	32.6	-	-	-
39	第1号機吸気フィルタサイレンサ (A)	MS-1	制御建屋	5.2	9.0	3.8	-	-	-
40	第1号機吸気フィルタサイレンサ (B)	MS-1	制御建屋	5.2	15.0	9.8	-	-	-
41	第1号機吸気フィルタサイレンサ (C)	MS-1	制御建屋	5.2	12.0	6.8	-	-	-
42	第1号機吸気フィルタサイレンサ (D)	MS-1	制御建屋	5.2	18.0	12.8	-	-	-
43	第1号機排気サイレンサ (A)	MS-3	制御建屋	10.6	5.0	5.6	-	-	-
44	第1号機排気サイレンサ (B)	MS-3	制御建屋	10.6	15.0	5.6	-	-	-

注記 *：海水ポンプ室門型クレーンについては、ストッパーにより固定されるが、ストッパーが破損した場合には竜巻の風により移動し、原子炉補機冷却海水ポンプ等に隣接する可能性があるため抽出する。

○：該当
-：該当せず

表 3 現地調査結果における波及的影響を及ぼし得る施設の抽出結果(3/5)

No.	設備名称	安全 重要度 クラス	波及的影響を及ぼす対 象(外部事象防護対象施 設の外殻となる建屋及 び構築物等)	地上高(m) H	外部事象防護対象施 設の外殻となる建 屋及び構築物等ま での最短距離(m) L	L-H(m)	波及的影響		評価対象
							倒壊により外部事象防護 対象施設又は外部事象防護 対象施設の外殻となる施 設に損傷を及ぼす可能性 があるか (高さH≧水平距離L)	外部事象防護対象施設の外 殻となる施設の損傷が、 内包する外部事象防護対 象施設に直接影響を及ぼ す可能性があるか	
45	第1号機中央制御室用凝縮機(A)	MS-1	制御建屋	4.6	4.0	-0.6	○	-	-
46	第1号機中央制御室用凝縮機(B)	MS-1	制御建屋	4.6	10.0	5.4	-	-	-
47	第1号機CVC F設置エリア用屋外機(A-1)	NON	制御建屋	0.8	24.0	23.2	-	-	-
48	第1号機CVC F設置エリア用屋外機(A-2)	NON	制御建屋	0.8	24.0	23.2	-	-	-
49	第1号機CVC F設置エリア用屋外機(B-1)	NON	制御建屋	0.8	24.0	23.2	-	-	-
50	第1号機CVC F設置エリア用屋外機(B-2)	NON	制御建屋	0.8	24.0	23.2	-	-	-
51	第1号機給湯系統高置水槽	NON	制御建屋	2.2	7.0	4.8	-	-	-
52	第1号機給水系統高置水槽	NON	制御建屋	2.2	4.0	1.8	-	-	-
53	補助ボイラーサイレンサー	NON	タービン建屋	0.9	10.5	9.6	-	-	-
54	渡り廊下	NON	原子炉建屋	5.2	37.7	32.5	-	-	-
55	補助ボイラー建屋	PS-3	制御建屋, タービン建屋	-	隣接	-	○	○	○
56	原子炉建屋避雷針	NON	原子炉建屋	10.4	屋上	-	○	-	-
57	タービン建屋避雷針	NON	タービン建屋	10.4	屋上	-	○	-	-
58	制御建屋避雷針	NON	制御建屋	13.0	10.0	-3.0	○	-	-
59	空冷チリングユニット	NON	制御建屋	2.3	22.0	19.7	-	-	-
60	主復水器連続洗浄装置制御盤	NON	タービン建屋	2.4	35.0	32.6	-	-	-
61	防潮堤	NON (津波防護施設)	基準津波の高さや防護範囲の広さ等の重要性を鑑み、自主的に機能維持のための配慮を行う						
62	防潮壁	NON (津波防護施設)	基準津波の高さや防護範囲の広さ等の重要性を鑑み、自主的に機能維持のための配慮を行う						
63	放水路サンプリング建屋	NON	タービン建屋	4.8	34.0	29.2	-	-	-
64	励磁電源変圧器	PS-3	タービン建屋	4.8	3.0	-1.8	○	-	-
65	第1号機制御建屋	NON	制御建屋	-	隣接	-	○	○	○

○：該当
-：該当せず

表 3 現地調査結果における波及的影響を及ぼし得る施設の抽出結果(4/5)

No.	設備名称	安全 重要度 クラス	波及的影響を及ぼす対 象(外部事象防護対象施 設の外殻となる建屋及 び構築物等)	地上高(m) H	外部事象防護対象施 設の外殻となる建 屋及び構築物等主 での最短距離(m) L	L-H(m)	波及的影響		評価対象
							倒壊により外部事象防護 対象施設又は外部事象防護 対象施設の外殻となる施 設に損傷を及ぼす可能性 があるか、 (高さH≧水平距離L)	外部事象防護対象施設の外 殻となる施設の損傷が、 内包する外部事象防護対 象施設に直接影響を及ぼ す可能性があるか、	
66	主変圧器	PS-3	タービン建屋	9.5	8.6	-0.9	○	-	-
67	主変圧器制御盤	PS-3	タービン建屋	2.7	22.0	19.3	-	-	-
68	屋外変圧器消火制御盤	MS-3	タービン建屋	2.6	22.3	19.7	-	-	-
69	所内変圧器2 A 冷却器制御盤	PS-3	タービン建屋	2.7	11.5	8.8	-	-	-
70	所内変圧器2 B 冷却器制御盤	PS-3	タービン建屋	2.7	11.5	8.8	-	-	-
71	所内変圧器2 A 中性点接地装置	PS-3	タービン建屋	2.2	1.8	-0.4	○	-	-
72	所内変圧器2 B 中性点接地装置	PS-3	タービン建屋	2.2	1.8	-0.4	○	-	-
73	所内変圧器	PS-3	タービン建屋	5.8	4.5	-1.3	○	-	-
74	屋外作業用分電盤	NON	タービン建屋	1.6	19.0	17.4	-	-	-
75	起動変圧器	PS-3	タービン建屋	7.5	4.8	-2.7	○	-	-
76	起動変圧器制御盤	PS-3	タービン建屋	2.7	14.0	11.3	-	-	-
77	起動変圧器中性点接地装置 2-1	PS-3	タービン建屋	2.2	4.2	2.0	-	-	-
78	起動変圧器中性点接地装置 2-2	PS-3	タービン建屋	2.2	2.2	0.0	○	-	-
79	復水脱塩装置薬液貯槽現場盤	NON	タービン建屋	2.0	13.0	11.0	-	-	-
80	苛性ソーダ貯槽	NON	タービン建屋	4.2	5.5	1.3	-	-	-
81	硫酸計量槽	NON	タービン建屋	1.4	5.5	4.1	-	-	-
82	硫酸貯槽	NON	タービン建屋	2.9	8.5	5.6	-	-	-
83	第1号機鉄イオン供給装置現場盤	NON	制御建屋	1.7	18.0	16.3	-	-	-
84	第1号機主復水器連続洗浄装置電気防食装置直 流電源盤	NON	制御建屋	2.4	25.0	22.6	-	-	-
85	第1号機主復水器電解鉄イオン供給装置制御盤	NON	制御建屋	2.7	19.0	16.3	-	-	-
86	第1号機主復水器連続洗浄装置制御盤	NON	制御建屋	2.7	28.0	25.3	-	-	-

○：該当
-：該当せず

表 3 現地調査結果における波及的影響を及ぼし得る施設の抽出結果(5/5)

No.	設備名称	安全 重要度 クラス	波及的影響を及ぼす対 象(外部事象防護対象施 設の外殻となる建屋及 び構築物等)	地上高(m) H	外部事象防護対象施 設の外殻となる建 屋及び構築物等主 での最短距離(m) L	L-H(m)	波及的影響		評価対象
							倒壊により外部事象防護 対象施設又は外部事象防護 対象施設の外殻となる施 設に損傷を及ぼす可能性 があるか (高さH≧水平距離L)	外部事象防護対象施設の外 殻となる施設の損傷が、 内包する外部事象防護対 象施設に直接影響を及ぼ す可能性があるか	
87	第1号機No.8揚水井戸制御盤	NON	制御建屋	2.1	7.0	4.9	-	-	-
88	第1号機ガスボンベ庫	NON	制御建屋	2.6	9.0	6.4	-	-	-
89	事務本館	NON	排気筒	20.0	28.0	8.0	-	-	-
90	スタック放射線モニタ建屋	MS-3	排気筒	4.3	4.6	0.3	-	-	-
91	第3号機放射線モニタ建屋	MS-3	排気筒	4.7	5.1	0.4	-	-	-
92	第3号機起動変圧器A	PS-3	排気筒	6.9	33.6	26.7	-	-	-
93	第3号機起動変圧器3A冷却制御盤	PS-3	排気筒	2.7	29.9	27.2	-	-	-
94	第3号機起動変圧器3A中性点接地装置(2次側)	PS-3	排気筒	2.2	32.4	30.2	-	-	-
95	第3号機起動変圧器3A中性点接地装置(3次側)	PS-3	排気筒	2.2	30.1	27.9	-	-	-
96	第3号機起動変圧器B	PS-3	排気筒	6.9	26.7	19.8	-	-	-
97	第3号機起動変圧器3B冷却制御盤	PS-3	排気筒	2.7	22.8	20.1	-	-	-
98	第3号機起動変圧器3B中性点接地装置(2次側)	PS-3	排気筒	2.2	24.0	21.8	-	-	-
99	第3号機起動変圧器3B中性点接地装置(3次側)	PS-3	排気筒	2.2	23.5	21.3	-	-	-
100	第3号機GIS2号送電線ユニット制御盤	PS-3	排気筒	2.0	36.0	34.0	-	-	-
101	第3号機GIS主変圧器ユニット制御盤	PS-3	排気筒	2.0	35.3	33.3	-	-	-
102	第3号機GIS起動変圧器3Bユニット制御盤	PS-3	排気筒	2.0	36.7	34.7	-	-	-
103	第3号機開閉所電源盤	PS-3	排気筒	2.4	23.5	21.1	-	-	-
104	第3号機CVケーブL洞道出入口	NON	排気筒	2.3	26.7	24.4	-	-	-
105	第3号機CVケーブL洞道冷却制御盤	PS-3	排気筒	2.4	29.8	27.4	-	-	-
106	サイトバンカ建屋	PS-3	タービン建屋	28.9	22.0	-6.9	○	○	○

○：該当
-：該当せず

1.3 建屋開口部の調査結果について

1.3 建屋開口部の調査結果について

外部事象防護対象施設に影響を及ぼす可能性がある建屋開口部を調査した結果を以下に示す。調査の結果、表 1.3-1 に示す建屋開口部のうち、No. 12～17 について設計飛来物が衝突した場合に貫通し、外部事象防護対象施設に影響を及ぼす可能性があるため、竜巻防護対策を実施する。表 1.3-1 に示す No. 5～10 については、水密扉への交換を行うものであり、設計飛来物が貫通しないことを確認している。

なお、他の貫通、裏面剥離するおそれのある箇所については、周辺に外部事象防護対象施設、外部事象防護対象施設の安全機能を損なう可能性がある発火性又は引火性物質を内包する機器及び溢水源がないことが調査により確認できたことから、対策は不要である。

表 1.3-1 外部事象防護対象施設に影響を及ぼす可能性がある建屋開口部 (1/2)

建屋	図番号	開口部 番号	外部事象防護対象施設	開口部の 貫通の有無	竜巻防護対策 の要否
原子炉建屋	図 1.3-1	1	非常用ガス処理系 (屋外配管)	有	不要 (非常用ガス処理系 (屋外配管) を損傷させた場合でも閉塞することはないことから, 安全機能を損なわない)
	図 1.3-1	5	原子炉建屋 (原子炉建屋大物搬入口)	無	不要
	図 1.3-1	6	非常用ディーゼル発電機 (A)	無	不要
	図 1.3-1	7, 8	非常用ディーゼル発電機 (A) 制御盤	無	不要
	図 1.3-1	9	高圧炉心スプレイ系ディーゼル発電機	無	不要
	図 1.3-1	10	非常用ディーゼル発電機 (B)	無	不要
	図 1.3-1	2~4, 11	無	—	不要
	図 1.3-2	12	原子炉補機室換気空調系 (原子炉補機 (A) 室排風機)	有	要 (竜巻防護鋼板の設置)
	図 1.3-2	13	原子炉補機室換気空調系 (原子炉補機 (B) 室排風機)	有	要 (竜巻防護鋼板の設置)
	図 1.3-3	14	原子炉補機室換気空調系 (非常用ディーゼル発電機 (A) 室排気ダンパ)	有	要 (竜巻防護鋼板の設置)
	図 1.3-3	15	原子炉補機室換気空調系 (原子炉補機 (HPCS) 室排風機)	有	要 (竜巻防護鋼板の設置)
	図 1.3-3	16	原子炉補機室換気空調系 (高圧炉心スプレイ系ディーゼル発電機室排気ダンパ)	有	要 (竜巻防護鋼板の設置)
	図 1.3-3	17	原子炉補機室換気空調系 (非常用ディーゼル発電機 (B) 室排気ダンパ)	有	要 (竜巻防護鋼板の設置)
	図 1.3-4	無	無	—	不要
	図 1.3-5	30	原子炉建屋 (原子炉建屋ブローアウトパネル)	有	不要 (貫通した場合には速やかにプラント停止し, 補修を実施することから, 安全機能を損なわない)

表 1.3-1 外部事象防護対象施設に影響を及ぼす可能性がある建屋開口部 (2/2)

建屋	図番号	開口部 番号	外部事象防護対象施設	開口部の 貫通の有無	竜巻防護対策 の要否
原子炉建屋	図 1.3-5	18~29, 31, 32	無	—	不要
	図 1.3-6	無	無	—	不要
タービン 建屋	図 1.3-7	1~3	無	—	不要
	図 1.3-8	無	無	—	不要
	図 1.3-9	無	無	—	不要
制御建屋	図 1.3-10	1, 2	無	—	不要
	図 1.3-11	無	無	—	不要
	図 1.3-12	3	無	—	不要
	図 1.3-13	4~15	無	—	不要

- : 建屋開口部を貫通する場合には設計飛来物が外部事象防護対象施設に衝突し、影響を及ぼすおそれがある
(建屋開口部に対する設計飛来物による貫通評価を実施し、貫通の有無を確認する。外部事象防護対象施設等への影響を確認し、必要に応じて防護対策を実施)
- : 建屋開口部を貫通する場合でも、周辺に外部事象防護対象施設がないため影響を及ぼさない(防護対策不要)
- : 外部事象防護対象施設

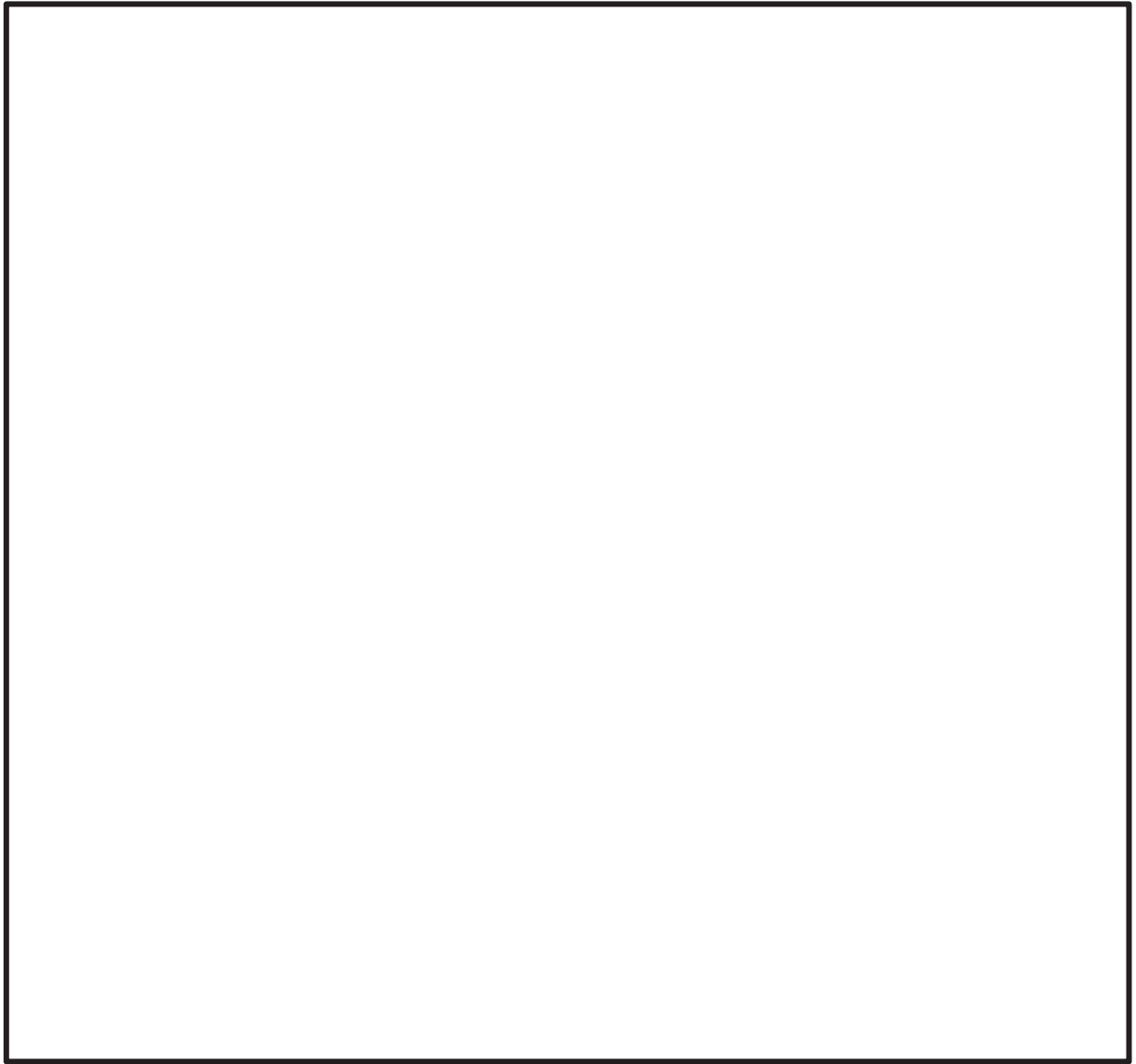
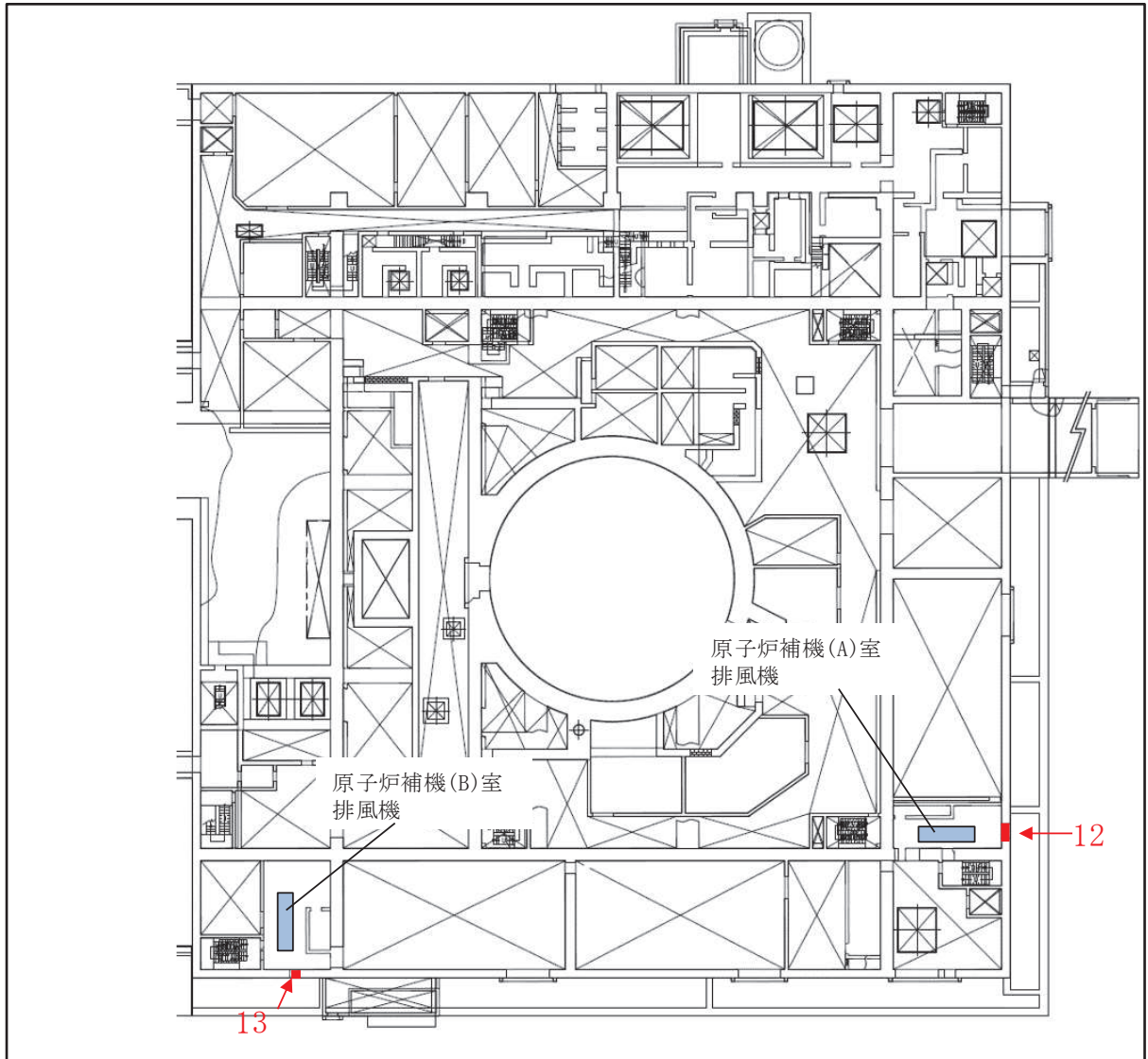


図 1.3-1 原子炉建屋 0.P. 15.00m における開口部

枠囲みの内容は防護上の観点から公開できません。

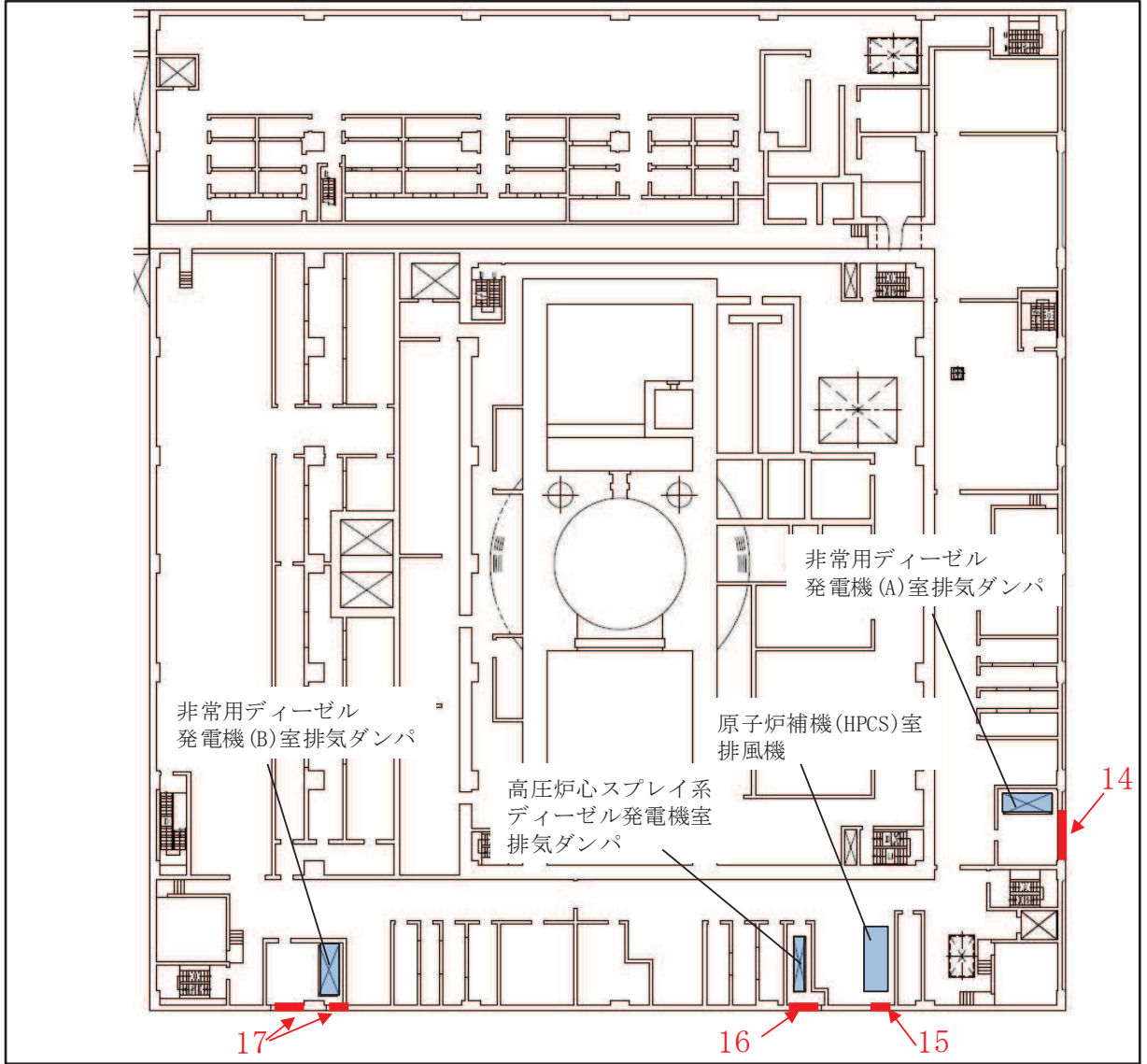
- : 建屋開口部を貫通する場合には設計飛来物が外部事象防護対象施設に衝突し、影響を及ぼすおそれがある
(建屋開口部に対する設計飛来物による貫通評価を実施し、貫通の有無を確認する。外部事象防護対象施設等への影響を確認し、必要に応じて防護対策を実施)
- : 建屋開口部を貫通する場合でも、周辺に外部事象防護対象施設がないため影響を及ぼさない (防護対策不要)
- : 外部事象防護対象施設



注：建屋開口部 12, 13 については、防護対策施設である竜巻防護鋼板を設置

図 1.3-2 原子炉建屋 中 2 階 (O.P. 17.60m~O.P. 23.10m) における開口部

- : 建屋開口部を貫通する場合には設計飛来物が外部事象防護対象施設に衝突し、影響を及ぼすおそれがある
(建屋開口部に対する設計飛来物による貫通評価を実施し、貫通の有無を確認する。外部事象防護対象施設等への影響を確認し、必要に応じて防護対策を実施)
- : 建屋開口部を貫通する場合でも、周辺に外部事象防護対象施設がないため影響を及ぼさない(防護対策不要)
- : 外部事象防護対象施設



注：建屋開口部 14～17 については、防護対策施設である竜巻防護鋼板を設置

図 1.3-3 原子炉建屋 O.P. 22.5m における開口部

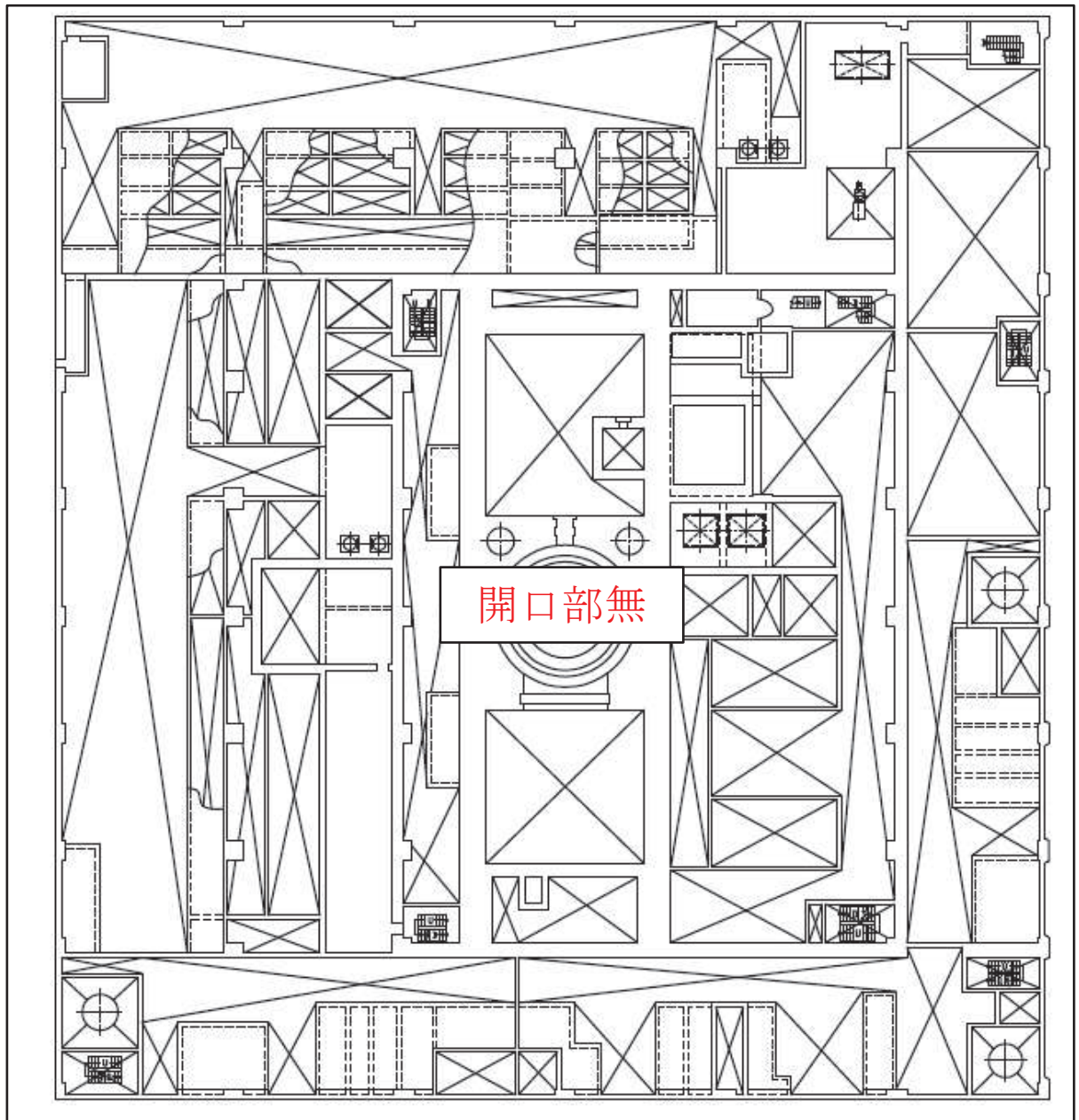


図 1.3-4 原子炉建屋 中3階 (O. P. 26.30m~O. P. 31.70m) における開口部

- : 建屋開口部を貫通する場合には設計飛来物が外部事象防護対象施設に衝突し、影響を及ぼすおそれがある
(建屋開口部に対する設計飛来物による貫通評価を実施し、貫通の有無を確認する。外部事象防護対象施設等への影響を確認し、必要に応じて防護対策を実施)
- : 建屋開口部を貫通する場合でも、周辺に外部事象防護対象施設がないため影響を及ぼさない (防護対策不要)
- : 外部事象防護対象施設

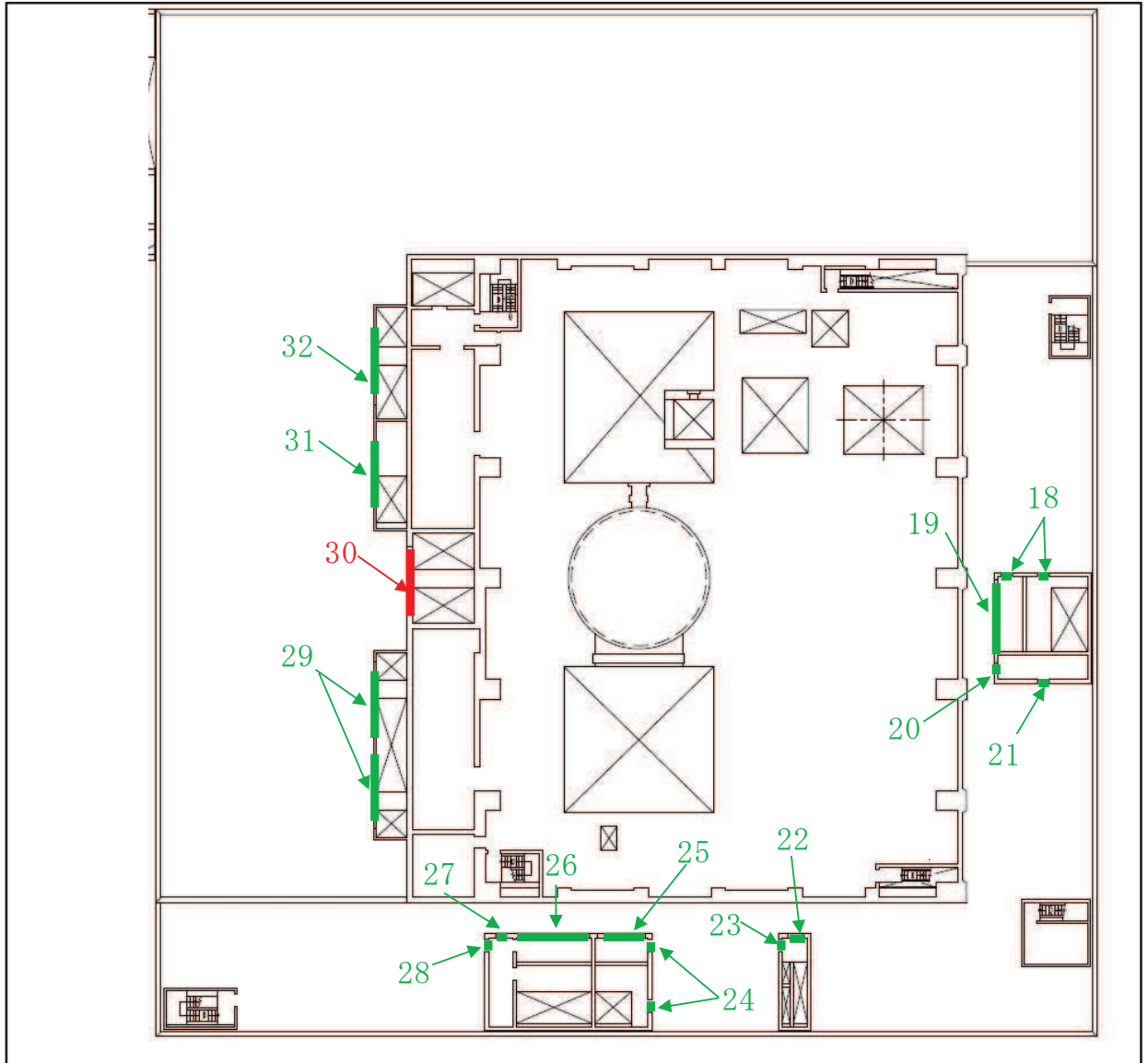


図 1.3-5 原子炉建屋 O.P. 33.20m における開口部

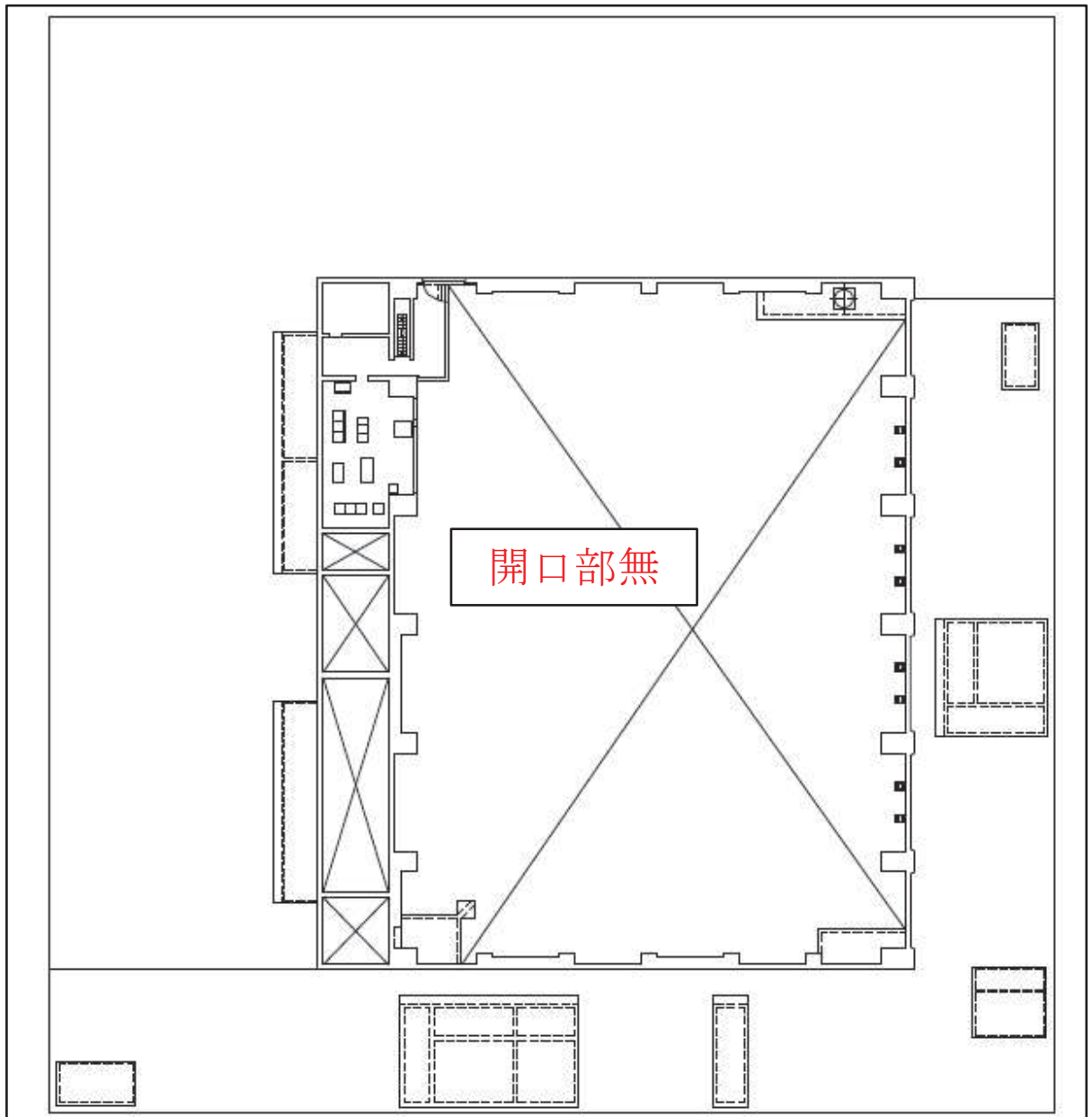


図 1.3-6 原子炉建屋 中4階 (O.P. 35.20m~O.P. 39.00m) における開口部

- : 建屋開口部を貫通する場合には設計飛来物が外部事象防護対象施設に衝突し、影響を及ぼすおそれがある
(建屋開口部に対する設計飛来物による貫通評価を実施し、貫通の有無を確認する。外部事象防護対象施設等への影響を確認し、必要に応じて防護対策を実施)
- : 建屋開口部を貫通する場合でも、周辺に外部事象防護対象施設がないため影響を及ぼさない(防護対策不要)
- : 外部事象防護対象施設

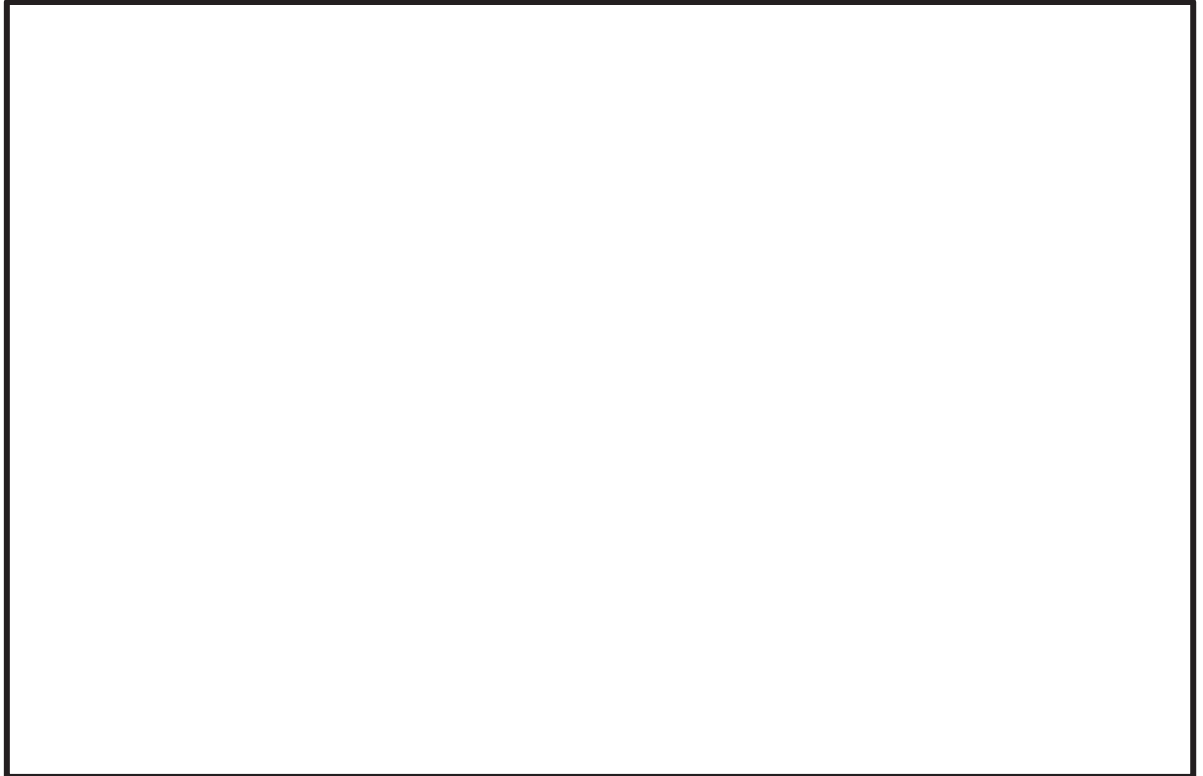


図 1.3-7 タービン建屋 0. P. 15.00m における開口部

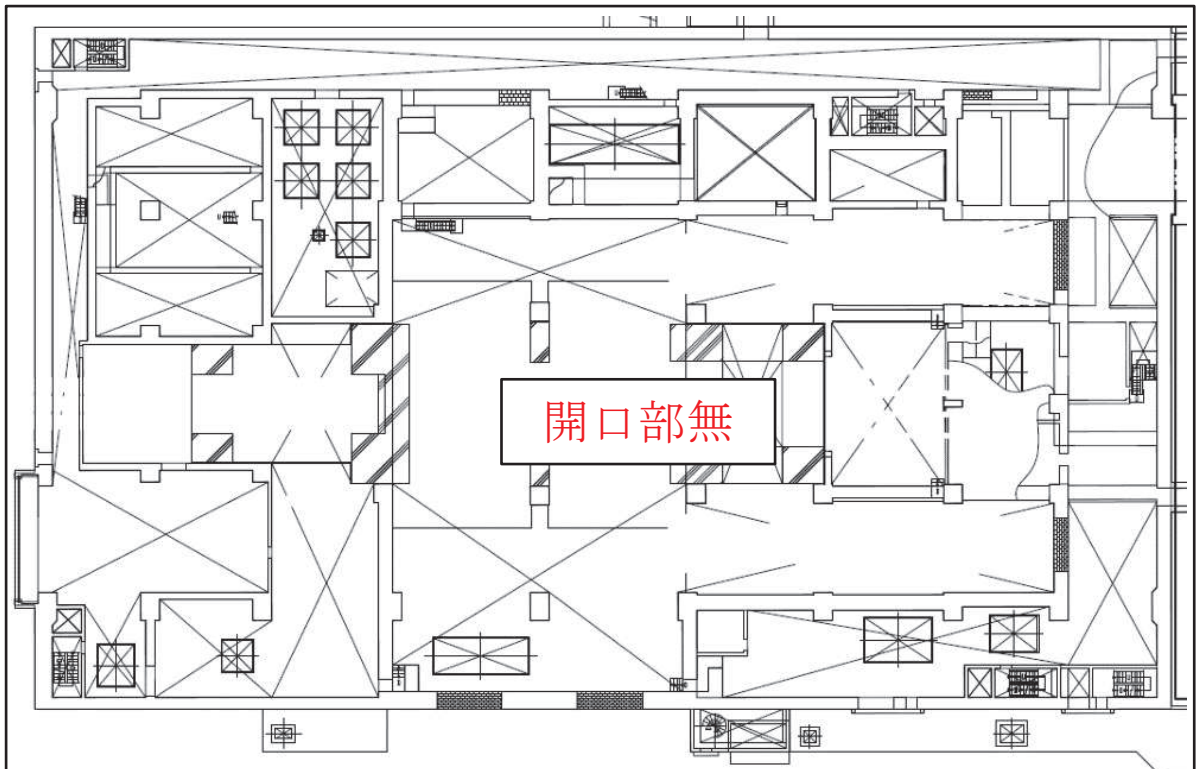


図 1.3-8 タービン建屋 中2階 (0. P. 17.00m~0. P. 22.40m) における開口部

枠囲みの内容は防護上の観点から公開できません。

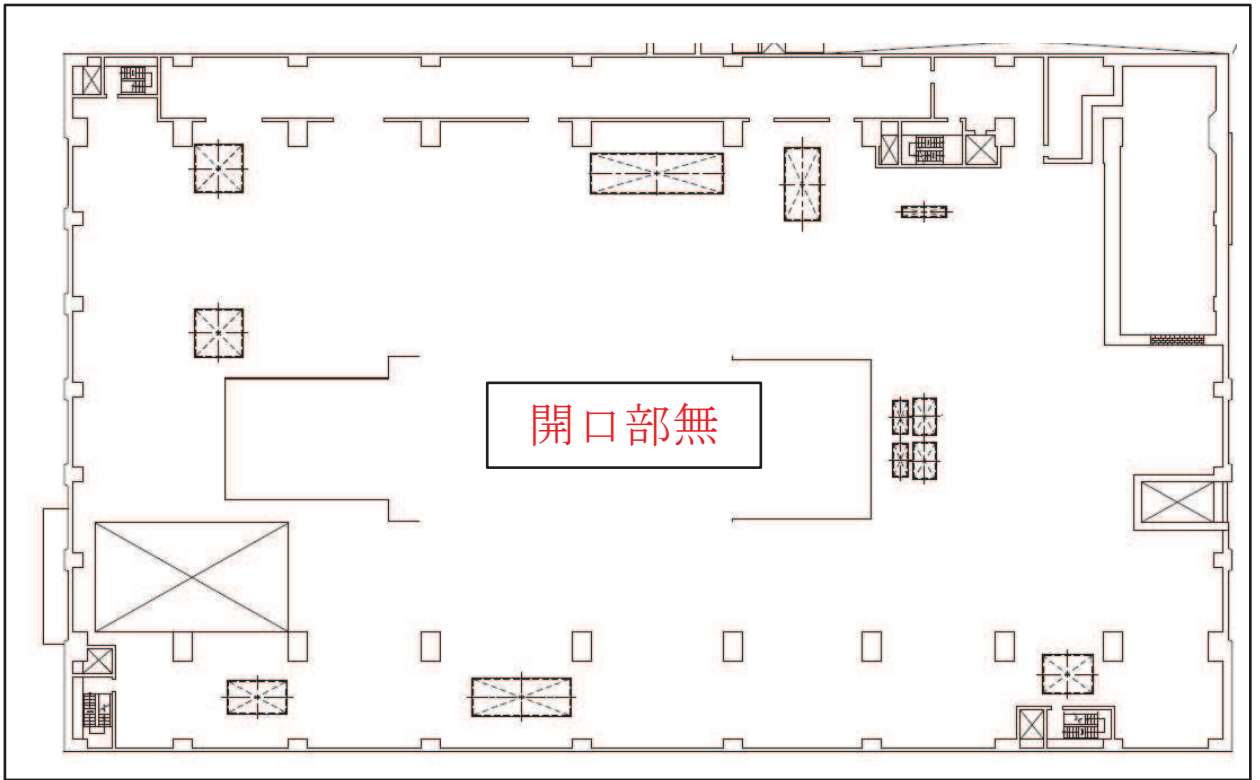


図 1.3-9 タービン建屋 O.P. 24.80m における開口部

- : 建屋開口部を貫通する場合には設計飛来物が外部事象防護対象施設に衝突し、影響を及ぼすおそれがある
(建屋開口部に対する設計飛来物による貫通評価を実施し、貫通の有無を確認する。外部事象防護対象施設等への影響を確認し、必要に応じて防護対策を実施)
- : 建屋開口部を貫通する場合でも、周辺に外部事象防護対象施設がないため影響を及ぼさない (防護対策不要)
- : 外部事象防護対象施設

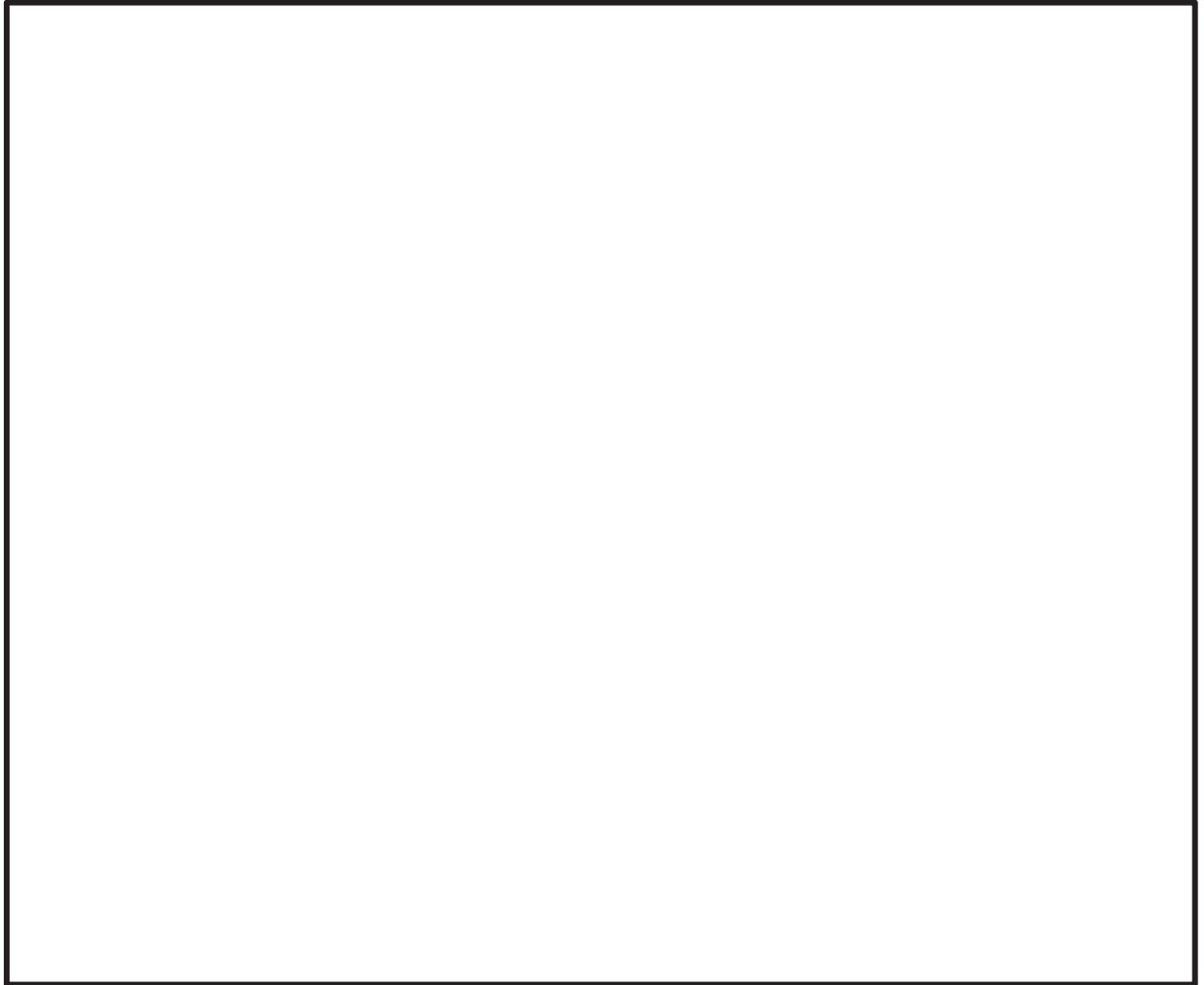


図 1.3-10 制御建屋 0.P. 15.00m における開口部

枠囲みの内容は防護上の観点から公開できません。

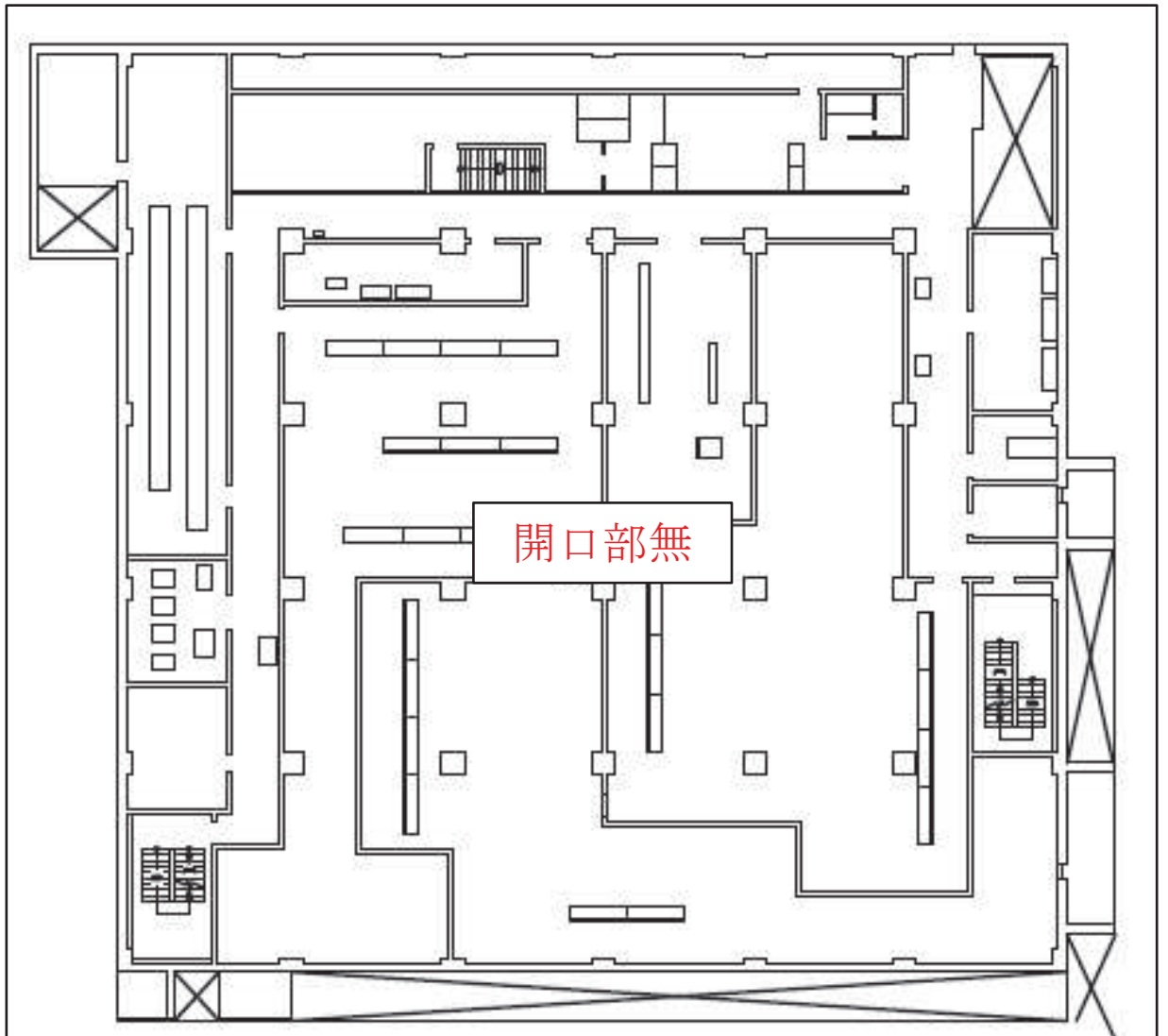


図 1.3-11 制御建屋 O.P. 19.50m における開口部

- : 建屋開口部を貫通する場合には設計飛来物が外部事象防護対象施設に衝突し、影響を及ぼすおそれがある
(建屋開口部に対する設計飛来物による貫通評価を実施し、貫通の有無を確認する。外部事象防護対象施設等への影響を確認し、必要に応じて防護対策を実施)
- : 建屋開口部を貫通する場合でも、周辺に外部事象防護対象施設がないため影響を及ぼさない (防護対策不要)
- : 外部事象防護対象施設

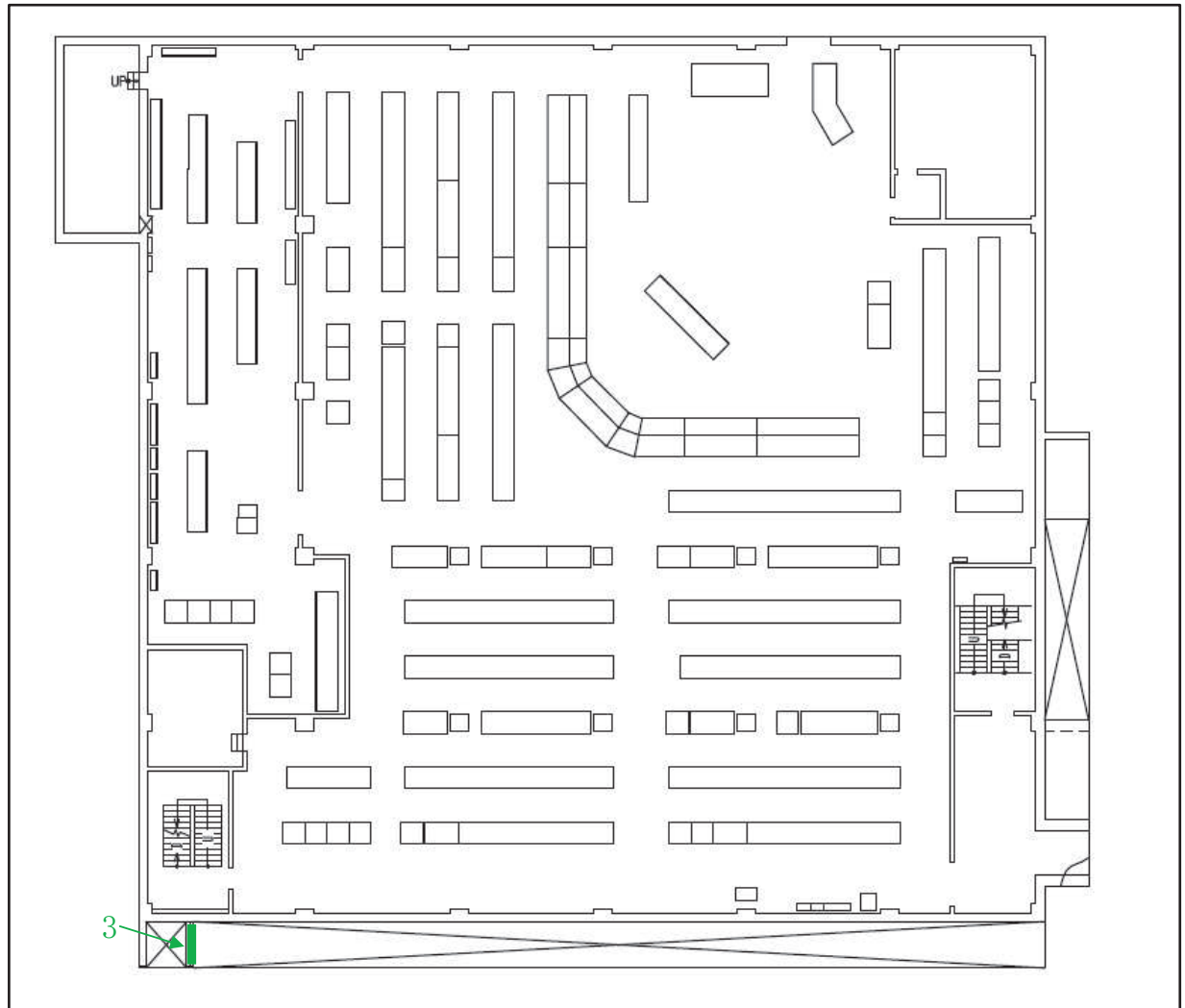


図 1.3-12 制御建屋 O.P. 23.50m における開口部

- : 建屋開口部を貫通する場合には設計飛来物が外部事象防護対象施設に衝突し、影響を及ぼすおそれがある
(建屋開口部に対する設計飛来物による貫通評価を実施し、貫通の有無を確認する。外部事象防護対象施設等への影響を確認し、必要に応じて防護対策を実施)
- : 建屋開口部を貫通する場合でも、周辺に外部事象防護対象施設がないため影響を及ぼさない(防護対策不要)
- : 外部事象防護対象施設

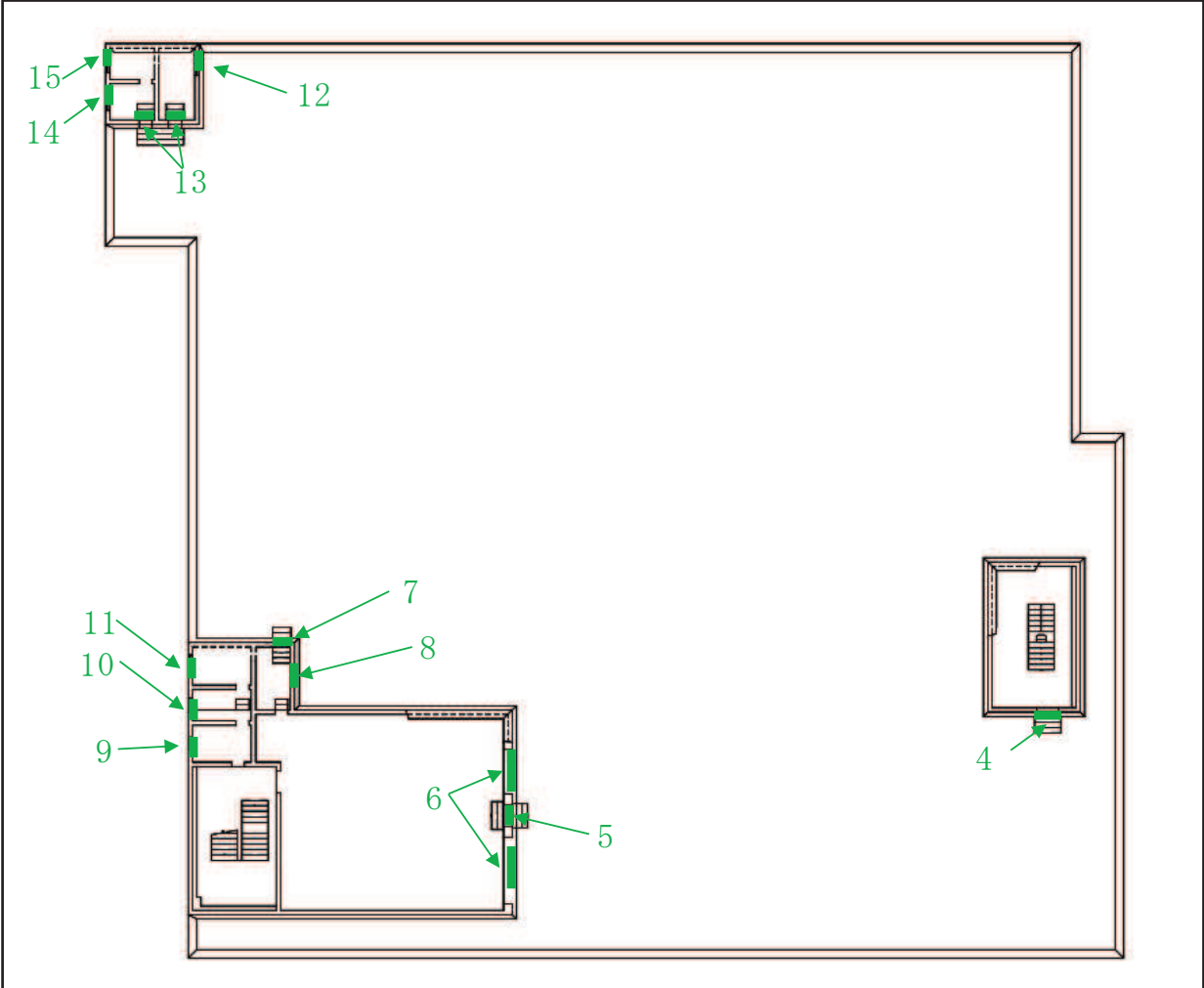


図 1.3-13 制御建屋 O.P. 29. 15m における開口部

防護対策施設の設置方針について

1. はじめに

設計飛来物が外部事象防護対象施設に衝突し外部事象防護対象施設が安全機能を損なうおそれがある場合は、防護措置として防護対策施設を設置する。

女川原子力発電所第2号機の屋外及び建屋開口部に設置する防護対策施設の設置方針について、以下のとおり説明する。

2. 概要

2.1 防護対策施設について

屋外及び建屋開口部に設置する防護対策施設を表1に示す。

表1 屋外及び建屋開口部に設置する防護対策施設

分類	防護対策施設
屋外に設置する防護対策施設	竜巻防護ネット（ネット、防護板及び支持部材）
建屋開口部に設置する防護対策施設	竜巻防護鋼板（防護鋼板及び架構）

2.2 設置場所

(1) 屋外に設置する防護対策施設

竜巻防護ネットは、屋外の海水ポンプ室補機ポンプエリアに設置する。設置場所を図1に示す。

竜巻防護ネット
(海水ポンプ室補機ポンプエリアに設置)

PN 

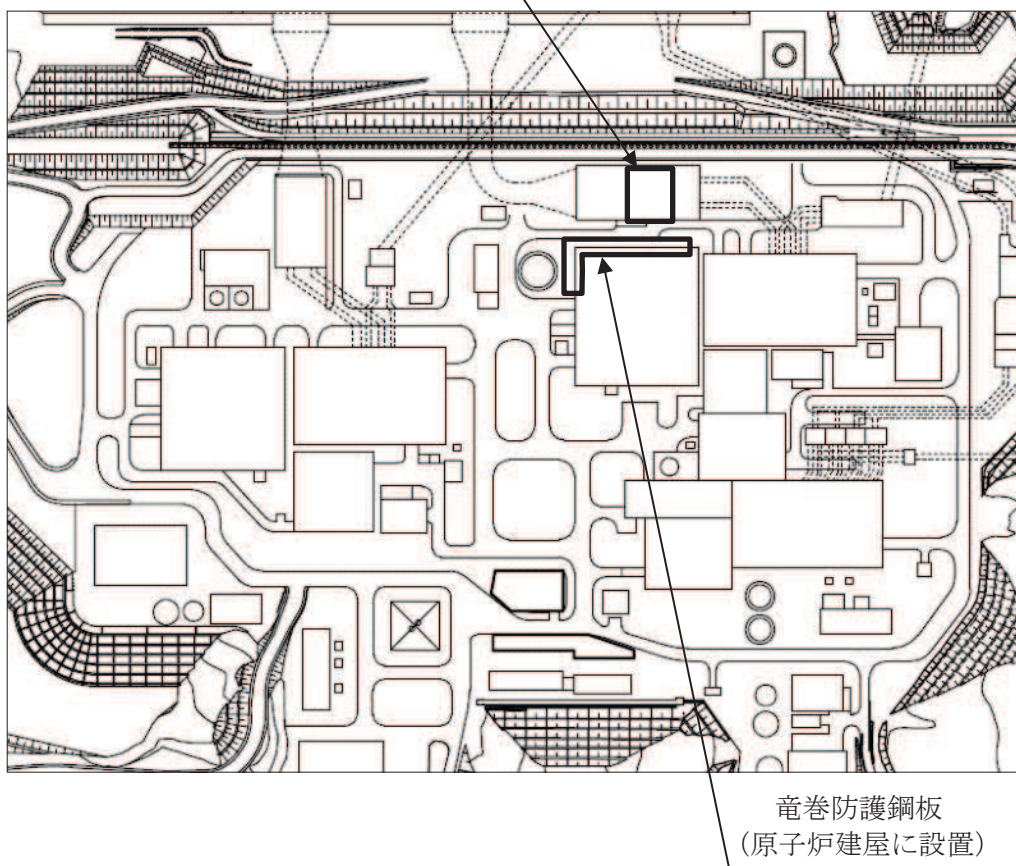


図1 防護対策施設の設置場所

(2) 建屋開口部に設置する防護対策施設

竜巻防護鋼板は、原子炉建屋の開口部に設置する。設置場所を図1に示す。

2.3 設備構成について

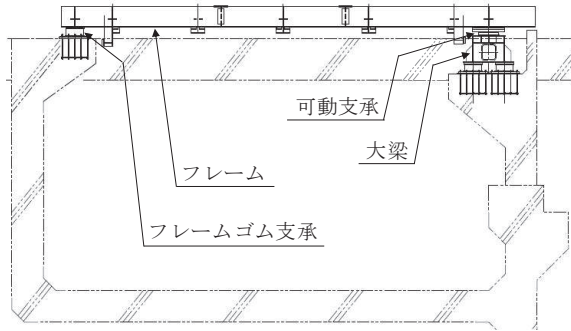
屋外及び建屋開口部に設置する防護対策施設の設備構成を以下に示す。

(1) 屋外に設置する防護対策施設

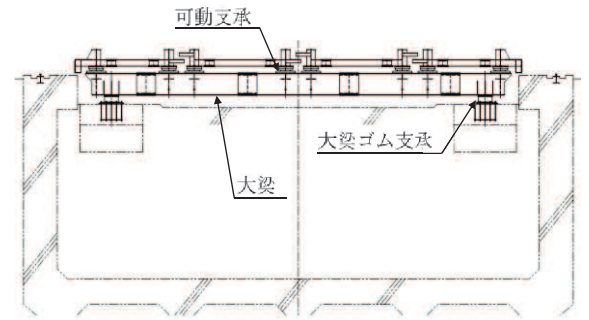
a. 竜巻防護ネット

竜巻防護ネットは、ネット、防護板及び支持部材で構成する。

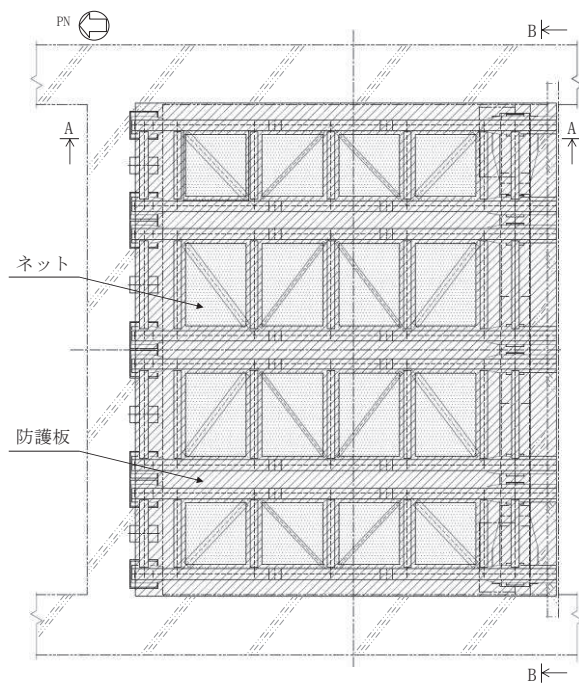
竜巻防護ネットの構造図を図2に示す。



(A-A 矢視)



(B-B 矢視)



(平面図)

図2 竜巻防護ネットの概略構造図

b. 竜巻防護鋼板

竜巻防護鋼板は、防護鋼板及び架構で構成する鋼製構造物である。

竜巻防護鋼板の構造図を図3に示す。

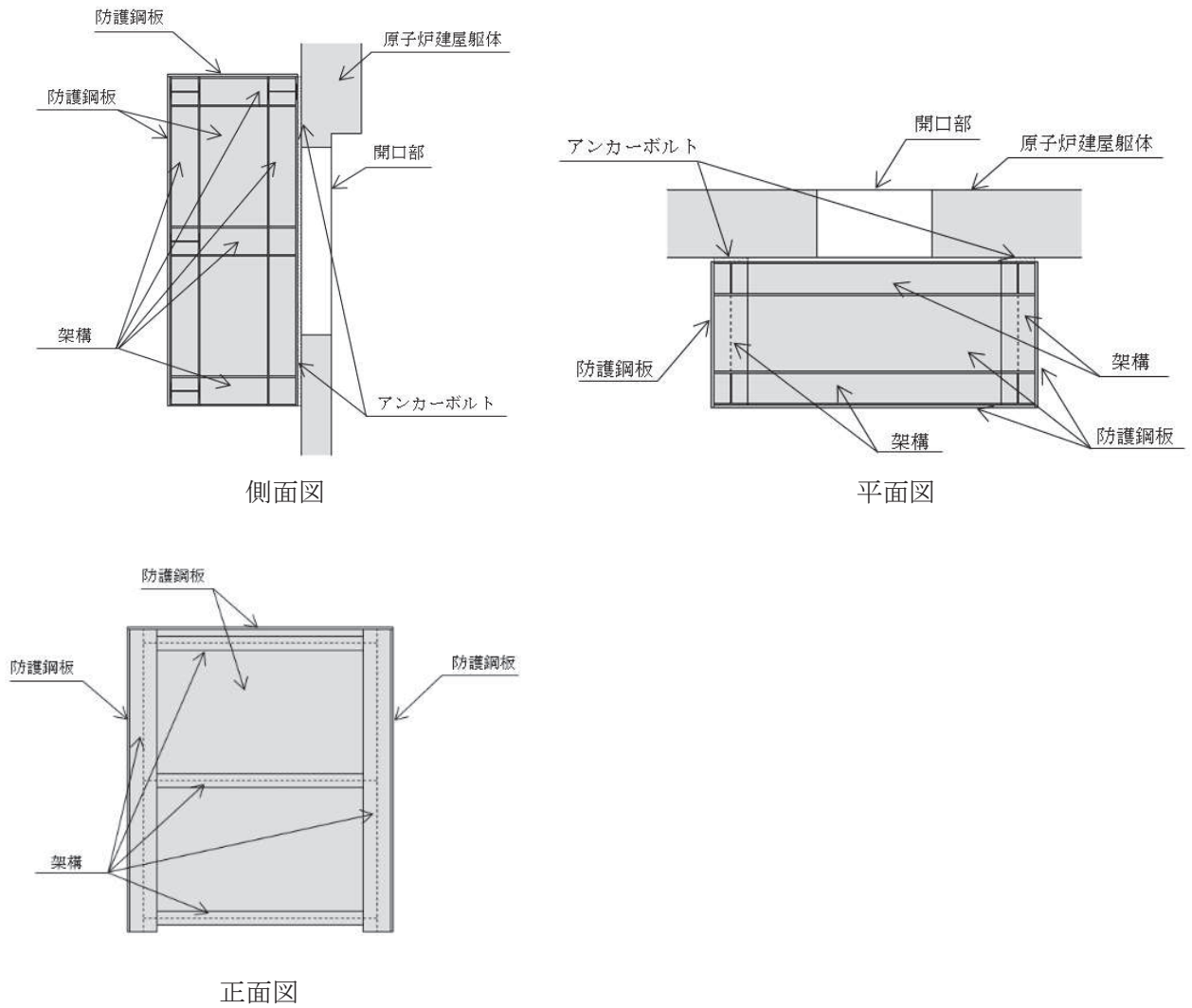


図3 竜巻防護鋼板の概略構造図

1.4 飛来物の選定について

1.4 飛来物の選定について

発電所構内において屋外に保管している資機材及び駐車している車両については、外部事象防護対策施設及び外部事象防護対象施設を内包する建屋（以下「外部事象防護対象施設等」という。）への影響の有無を確認し、影響を及ぼすおそれがあるものについては、飛来物として選定し、固定、固縛又は外部事象防護対象施設等から離隔する等の飛来物発生防止対策を講じる必要がある。

以下に、飛来物の選定及び飛来物発生防止対策の要否を判定する手順について説明する。

1.4.1 飛散評価

飛来物源である資機材及び車両が、設計竜巻により飛来物化し、飛散した評価を行う。

飛散評価は、寸法、質量、形状及びこれらの値より算出する空力パラメータ、並びに初期高さにより、解析コード「TONBOS」によって最大飛来速度、飛散高さ、水平飛散距離を算出する。以下に飛散評価に用いる数値を説明する。

なお、「TONBOS」で用いる設計竜巻の風速場モデルはフジタモデルとし、竜巻影響評価へのフジタモデルの適用については、別紙1に示す。

(1) 空力パラメータの算出 ($C_D A/m$ (m^2/kg))

空力パラメータは飛来物の各寸法（長さ×幅×奥行き（高さ））より受圧面積を算出し、飛来物の質量及び抗力係数より算出する。a. 項に算出式、b. 項に計算例を示す。

a. 算出式

空力パラメータの算出は (1.1) 式により算出する。

$$\frac{C_D A}{m} = \frac{c(C_{D1}A_1 + C_{D2}A_2 + C_{D3}A_3)}{m} \quad \dots (1.1)$$

m : 質量 (kg)

c : 1/3

C_{D1} , C_{D2} , C_{D3} : 抗力係数 (表 1.4-1, 図 1.4-1)

A_1 , A_2 , A_3 : 受圧面積 (m^2) (図 1.4-1)

表 1.4-1 飛来物の抗力係数

飛来物形状	c	C_{D1}	C_{D2}	C_{D3}
① 棒状物体	1/3	2.0	0.7 (円形断面) 1.2 (矩形断面)	0.7 (円形断面) 1.2 (矩形断面)
② 板状物体	1/3	1.2	1.2	2.0
③ 塊状物体	1/3	2.0	2.0	2.0

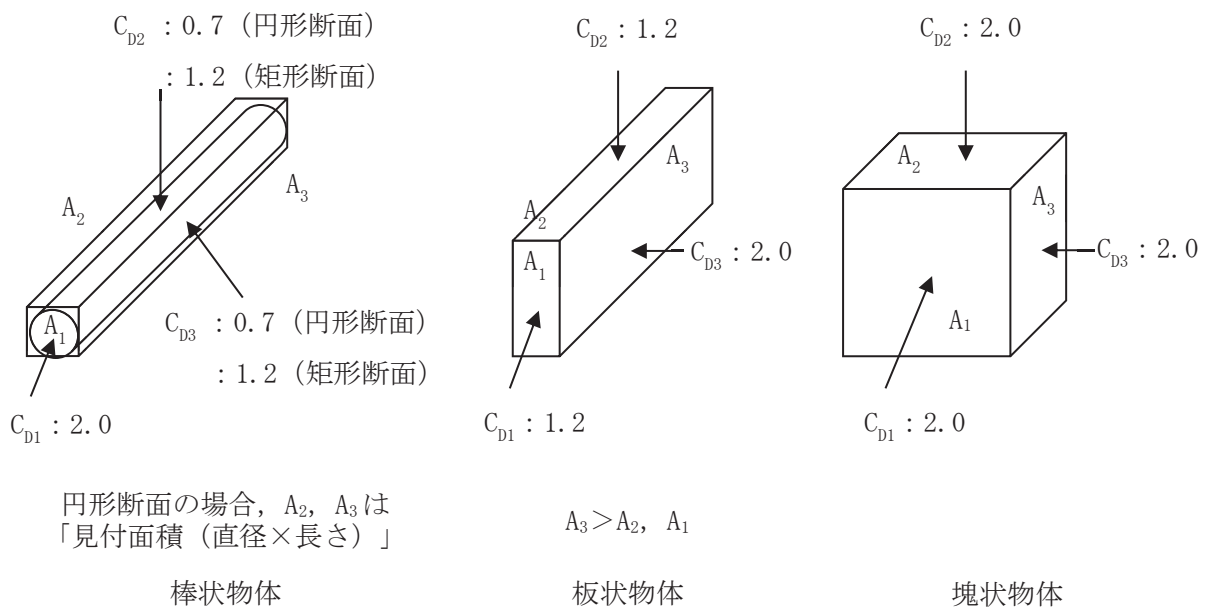


図 1.4-1 飛来物の形状と抗力係数の関係

b. 計算例

(a) 鉄パイプ (棒状物体) (図 1.4-2)

長さ : 2.0m 直径 : 0.05m 質量 : 8.4kg

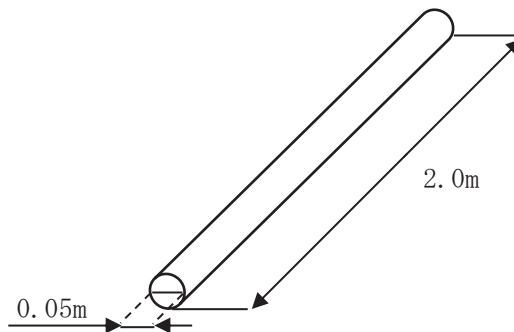


図 1.4-2 鉄パイプ

円形断面であるので, 抗力係数 C_D は, $C_{D1}=2.0, C_{D2}=0.7, C_{D3}=0.7$ である。

$$\frac{C_D A}{m} = \frac{c(C_{D1}A_1 + C_{D2}A_2 + C_{D3}A_3)}{m} \quad \text{より, 空力パラメータは,}$$

$$\frac{C_D A}{m} = \frac{1/3 \times (2.0 \times \pi/4 \times 0.05 \times 0.05 + 0.7 \times 2.0 \times 0.05 + 0.7 \times 2.0 \times 0.05)}{8.4} = 0.0058 \quad [\text{m}^2/\text{kg}]$$

(b) コンクリート板 (板状物体) (図 1.4-3)

長さ : 1.5m 幅 : 1.0m 高さ : 0.15m 質量 : 540kg

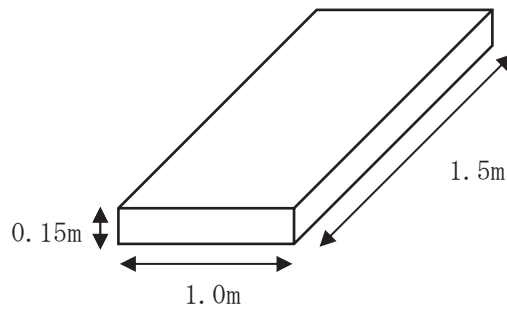


図 1.4-3 コンクリート板

板状物体であるので、抗力係数 C_D は、 $C_{D1}=1.2$, $C_{D2}=1.2$, $C_{D3}=2.0$ である。

$\frac{C_D A}{m} = \frac{c(C_{D1}A_1 + C_{D2}A_2 + C_{D3}A_3)}{m}$ より、空力パラメータは、

$$\frac{C_D A}{m} = \frac{1/3 \times (1.2 \times 1.0 \times 0.15 + 1.2 \times 0.15 \times 1.5 + 2.0 \times 1.5 \times 1.0)}{540} = 0.0022 \text{ [m}^2/\text{kg]}$$

(c) 車両 (塊状物体) (図 1.4-4)

長さ : 4.36m 幅 : 1.695m 高さ : 1.46m 質量 : 1140kg

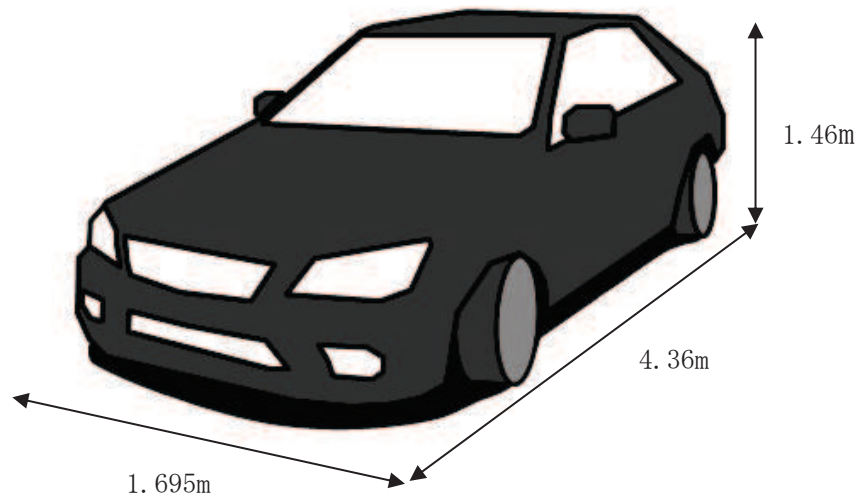


図 1.4-4 車両

塊状物体であるので、抗力係数 C_D は、 $C_{D1}=2.0$, $C_{D2}=2.0$, $C_{D3}=2.0$ である。

$\frac{C_D A}{m} = \frac{c(C_{D1}A_1 + C_{D2}A_2 + C_{D3}A_3)}{m}$ より、空力パラメータは、

$$\frac{C_D A}{m} = \frac{1/3 \times (2.0 \times 1.695 \times 1.46 + 2.0 \times 1.46 \times 4.36 + 2.0 \times 4.36 \times 1.695)}{1140} = 0.0095 \text{ [m}^2/\text{kg]}$$

(2) 初期高さ

飛散評価に必要な初期高さは、図 1.4-5 に示すとおり評価対象の飛来物と地表面との高低差である。現地調査結果を踏まえて設定するか、配置位置が特定できず、高所にも配置される可能性のある評価対象は、発電所の配置等を考慮し適切に設定する。

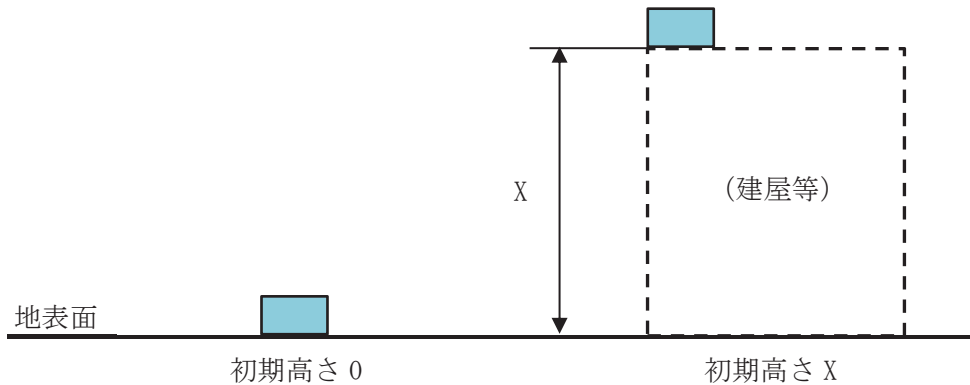


図 1.4-5 初期高さのイメージ図

(3) 飛来物の最大速度、飛散高さ及び飛散距離の算出

飛来物の仕様による入力条件をもとに、解析コード「TONBOS」を用いて、飛来物の最大速度、飛散高さ及び飛散距離を求める。図 1.4-6 に飛散距離及び飛散高さの飛跡のイメージを示す。

解析コード「TONBOS」の詳細については、添付書類「VI-5 計算機コード概要」に示す。

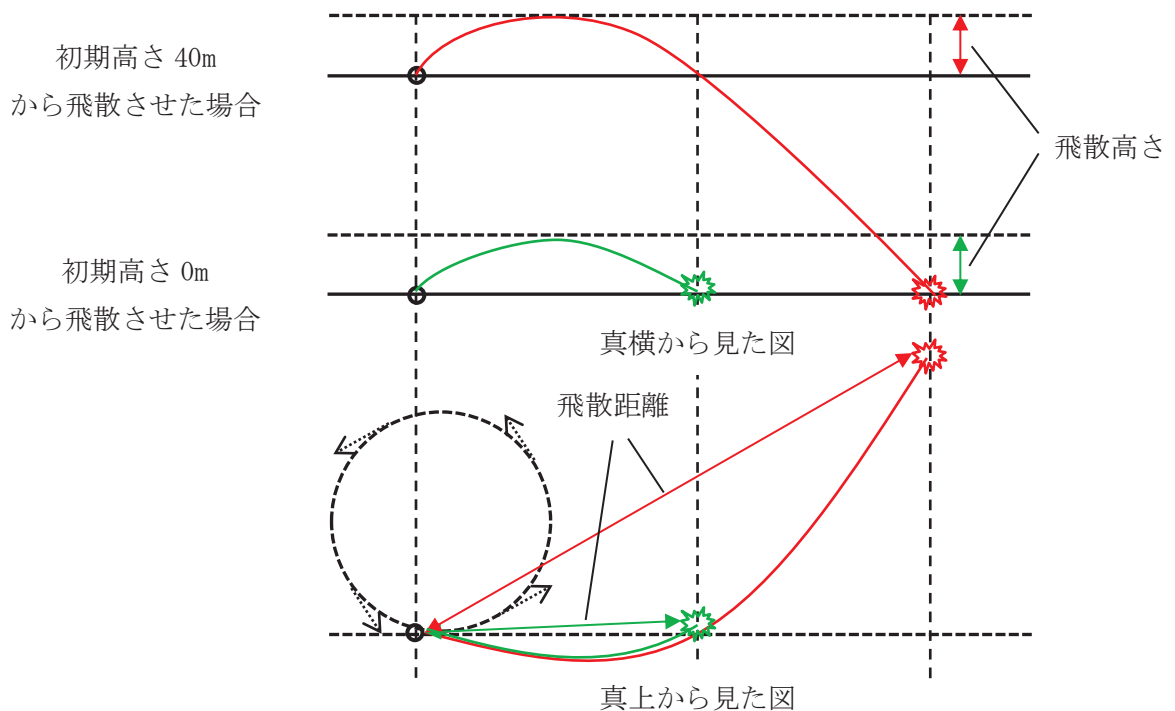


図 1.4-6 飛散評価における飛跡イメージ

表 1.4-2 に、(1) b. 項の計算例に示した、鉄パイプ、コンクリート板及び車両の飛散評価による各数値の算出結果を示す。

表 1.4-2 飛来物例の最大速度等の算出結果

飛来物の種類	棒状物体 (円形断面)	板状物体	塊状物体
	鉄パイプ	コンクリート板	車両
寸法(m)	長さ×直径 2.0×0.05	長さ×幅×高さ 1.5×1.0×0.15	長さ×幅×高さ 4.36×1.695×1.46
質量 (kg)	8.4	540	1140
空力パラメータ (m ² /kg)	0.0058	0.0022	0.0095
初期高さ (m)	10.1	40	0
飛来物の 最大水平速度 (m/s)	43.7	31.4	49.5
飛来物の 最大鉛直速度 (m/s)	13.6	27.0	7.8
飛散高さ (m)	0	0	5.2
飛散距離 (m)	91.3	71.9	139.8

(4) 運動エネルギーの算出

飛散評価によって算出された飛来物の最大速度より、運動エネルギーを算出する。

a. 運動エネルギーの算出式

飛来物の運動エネルギーEは下式によって算出する。

$$E = \frac{1}{2}M \cdot V^2$$

M：飛来物の質量(kg)

V：飛来物の最大速度(m/s)

b. 計算例

(a) 鉄パイプ (棒状物体)

質量：8.4kg 最大速度：43.7m/s

運動エネルギー (水平) = $(8.4 \times 43.7^2) / 2 = 8.0$ [kJ]

(b) コンクリート板 (板状物体)

質量 : 540kg 最大速度 : 31.4m/s

運動エネルギー (水平) = $(540 \times 31.4^2) / 2 = 266.2$ [kJ]

(c) 車両 (塊状物体)

質量 : 1140kg 最大速度 : 49.5m/s

運動エネルギー (水平) = $(1140 \times 49.5^2) / 2 = 1397$ [kJ]

(5) 貫通厚さの算出

飛来物の貫通厚さを、以下のコンクリートに対する貫通限界厚さの算出式に使用されている修正 NDRC 式 (1.2), Degen 式 (1.3) 及び鋼板に対する貫通限界厚さの算出式に使用されている BRL 式から算出する。

<修正 NDRC 式及び Degen 式>

$$\begin{aligned} \frac{x_c}{\alpha_c d} \leq 2 \text{ の場合 } \quad \frac{x_c}{d} &= 2 \left\{ \left(\frac{12145}{\sqrt{F_c}} \right) N d^{0.2} \frac{M}{d^3} \left(\frac{V}{1000} \right)^{1.8} \right\}^{0.5} \\ \frac{x_c}{\alpha_c d} \geq 2 \text{ の場合 } \quad \frac{x_c}{d} &= \left(\frac{12145}{\sqrt{F_c}} \right) N d^{0.2} \frac{M}{d^3} \left(\frac{V}{1000} \right)^{1.8} + 1 \\ \frac{x_c}{\alpha_c d} \leq 1.52 \text{ の場合 } \quad t_p &= \alpha_p d \left\{ 2.2 \left(\frac{x_c}{\alpha_c d} \right) - 0.3 \left(\frac{x_c}{\alpha_c d} \right)^2 \right\} \\ 1.52 \leq \frac{x_c}{\alpha_c d} \leq 13.42 \text{ の場合 } \quad t_p &= \alpha_p d \left\{ 0.69 + 1.29 \left(\frac{x_c}{\alpha_c d} \right) \right\} \end{aligned} \quad \left. \begin{array}{l} (1.2) \\ (1.3) \end{array} \right\}$$

t_p : 貫通限界厚さ (cm)

x_c : 貫入深さ (cm)

F_c : コンクリートの設計基準強度 (kgf/cm²) *

注記* : コンクリート強度は、被衝突物毎に設定する。

d : 飛来物の直径 (cm) (飛来物の衝突面の外形の最小投影面積に等しい円の直径)

M : 飛来物の質量 (kg)

V : 飛来物の最大水平速度 (m/s)

N : 飛来物の先端形状係数 (=1.14)

α_c : 飛来物の低減係数 (=1.0)

α_p : 飛来物の低減係数 (=1.0)

<BRL 式>

$$T^3 = \frac{0.5mv^2}{1.4396 \times 10^9 \cdot K^2 \cdot d^2}$$

T : 貫通限界厚さ (m)

d : 飛来物が衝突する衝突断面の等価直径 (m)

(最も投影面積が小さくなる衝突断面の等価直径)

K : 鋼板の材質に関する係数 (=1.0)

m : 飛来物の質量 (kg)

v : 飛来物の飛来速度 (m/s)

表 1.4-3 に、(1) b. 項の計算例に示した、鉄パイプ、コンクリート板及び車両の貫通厚さの算出結果を示す。

表 1.4-3 飛来物例の貫通厚さの算出結果

飛来物の種類	棒状物体 (円形断面)	板状物体	塊状物体
	鉄パイプ	コンクリート板	車両
寸法 (m)	長さ×直径 2.0×0.05	長さ×幅×高さ 1.5×1.0×0.15	長さ×幅×高さ 4.36×1.695×1.46
質量 (kg)	8.4	540	1140
飛来物の 最大水平速度 (m/s)	43.7	31.4	49.5
飛来物の 最大鉛直速度 (m/s)	13.6	27.0	7.8
コンクリートの 貫通限界厚さ (水平) (cm)	9.6	26.6	34.2
コンクリートの 貫通限界厚さ (鉛直) (cm)	3.7	23.3	6.6
鋼板の貫通限界厚さ (水平) (mm)	14.4	7.5	5.6
鋼板の貫通限界厚さ (鉛直) (mm)	3.1	6.1	0.5

1.4.2 設計飛来物の運動エネルギー及び貫通力

女川原子力発電所2号炉原子炉設置変更許可申請書で設計飛来物として選定した鋼製材及び砂利のうち、鋼製材の貫通厚さ等の算出結果を表1.4-4に示す。

設計飛来物の選定については、別紙2に示す。

なお、設計飛来物のうち砂利の影響については、補足説明資料「1.5 砂利等の極小飛来物による外部事象防護対象施設への影響について」にて説明する。

表 1.4-4 鋼製材の貫通厚さ等の算出結果

飛来物の種類	鋼製材
分類	棒状物体（矩形断面）
寸法(m)	縦×横×高さ 4.2×0.3×0.2
質量(kg)	135
空力パラメータ(m ² /kg)	0.0066
飛来物の最大水平速度(m/s)	46.6
飛来物の最大鉛直速度(m/s)	16.7～34.7
運動エネルギー*(kJ)	146.4
コンクリートの貫通限界厚さ*(cm)	22.5
鋼板の貫通限界厚さ*(mm)	27.6

注記 *：評価結果のうち最大のものを記載

1.4.3 対策要否の判定

1.4.1 項の算出方法により算出した運動エネルギーが、1.4.2 項に示す設計飛来物の運動エネルギーに含まれていない物品については、飛来物発生防止対策（固縛，固定又は外部事象防護対象施設等から離隔）を行う。

図 1.4-7 に、飛来物発生防止対策の例として車両に対する固縛対策の概要図を示す。

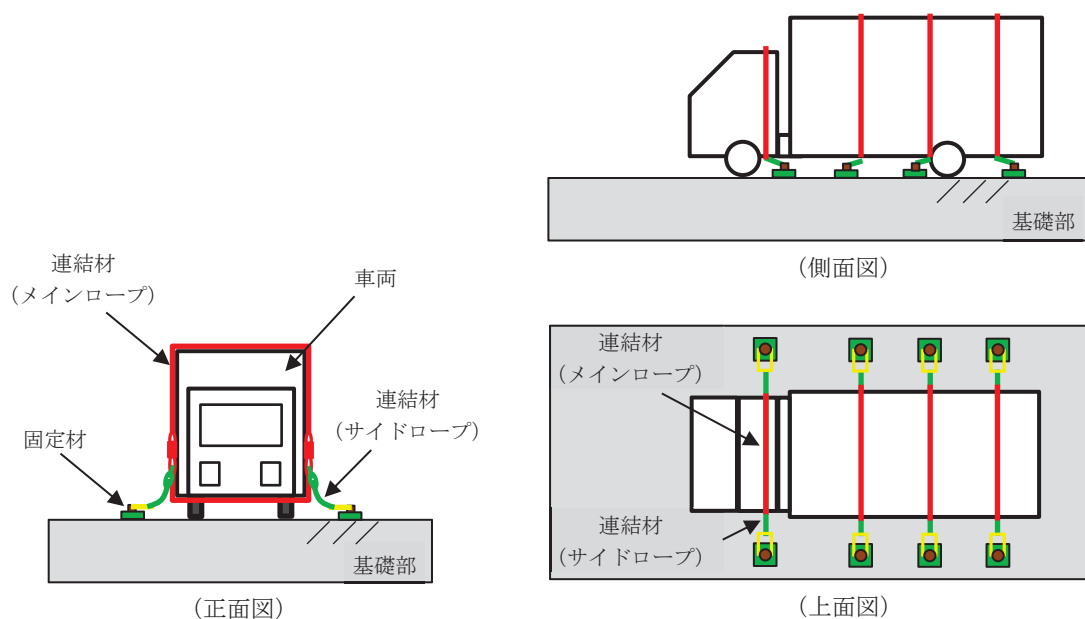


図 1.4-7 飛来物発生防止対策のうち車両に対する固縛対策の概要図

飛来物源である資機材及び車両に対して、飛来物として選定し、飛来物発生防止対策の要否の判定をするフローを図 1.4-8 に示す。

[飛来物発生防止対策要否の観点]

- ・設計飛来物（鋼製材）の運動エネルギー146.4kJより大きいもの。
- ・コンクリートの貫通厚さとして貫通厚さが22.5cm*よりも大きいもの。
- ・鋼板の貫通厚さとして貫通厚さが27.6mmよりも大きいもの。

注記 *：コンクリート基準強度330kgf/cm²の場合の例

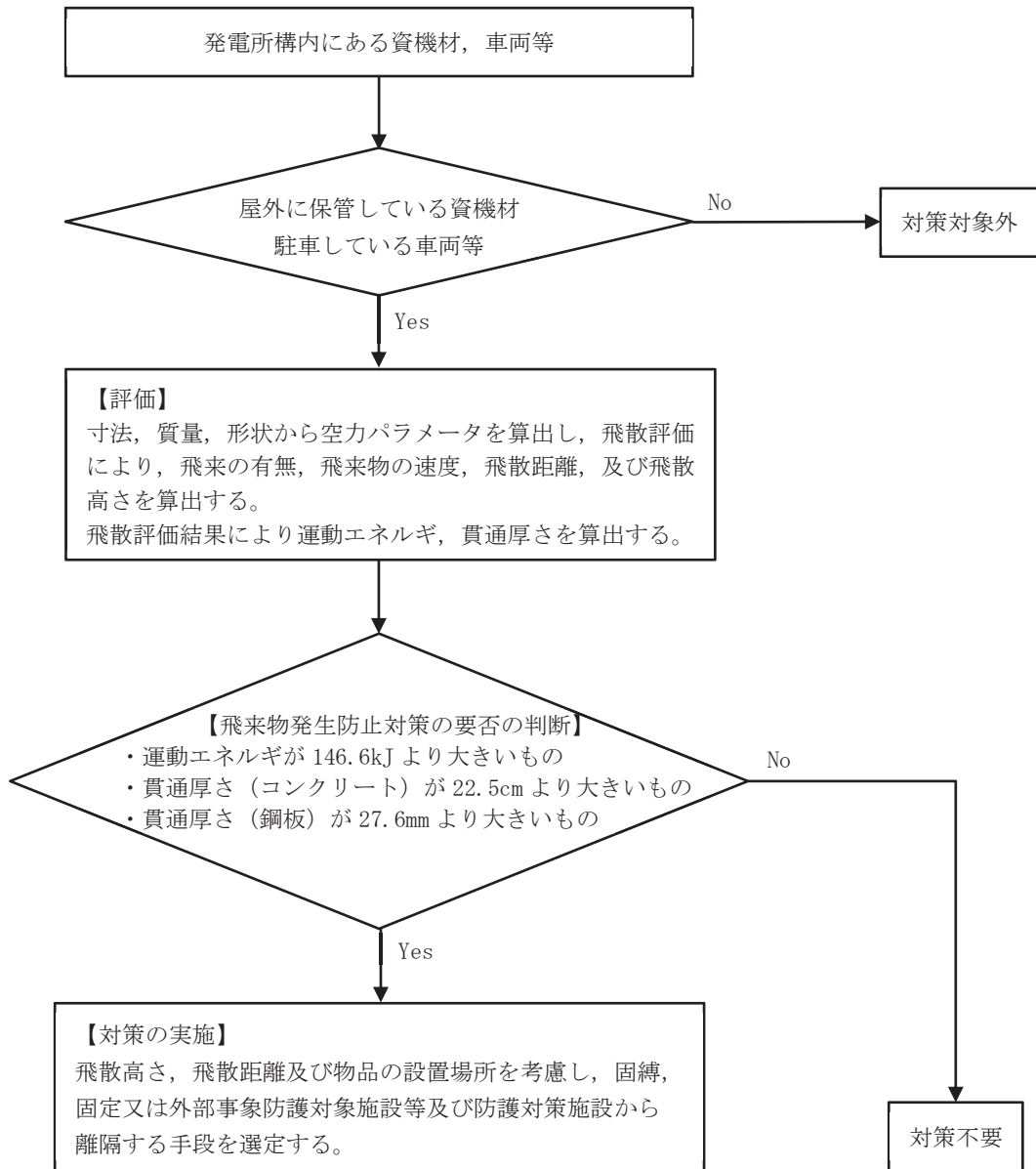


図 1.4-8 飛来物の選定及び飛来物発生防止対策の要否の判定フロー

竜巻影響評価におけるフジタモデルの適用について

1. はじめに

「原子力発電所の竜巻影響評価ガイド」⁽¹⁾（以下「ガイド」という。）に従い竜巻影響評価を行う上で、設計飛来物の飛来速度を設定するための風速場モデルを選定する必要がある。

これまでの竜巻飛来物評価において用いられている風速場モデルとして、米国 NRC の基準類に記載されている「ランキン渦モデル⁽²⁾⁽³⁾」、原子力安全基盤機構の調査研究報告書に記載されている「LES (Large-eddy simulation)」の数値解析⁽⁴⁾があるが、当社の竜巻影響評価においては、藤田博士が考案した竜巻渦の工学モデル DBT-77 (DBT : Design Basis Tornado)⁽⁵⁾（以下「フジタモデル」という。）を用いた飛散評価手法*により飛来物の飛散評価を実施することとした。

図 1 に風速場モデルの選定及び飛来物評価方法に関する検討フローを示す。また、図 2 に竜巻影響評価の基本フローと、フジタモデルを適用する箇所を示す。

次節以降において、フジタモデルの詳細や、フジタモデルを適用した理由等を説明する。

注記*：フジタモデルの風速場と物体の浮上・飛来モデルを実装した数値解析コード⁽⁶⁾

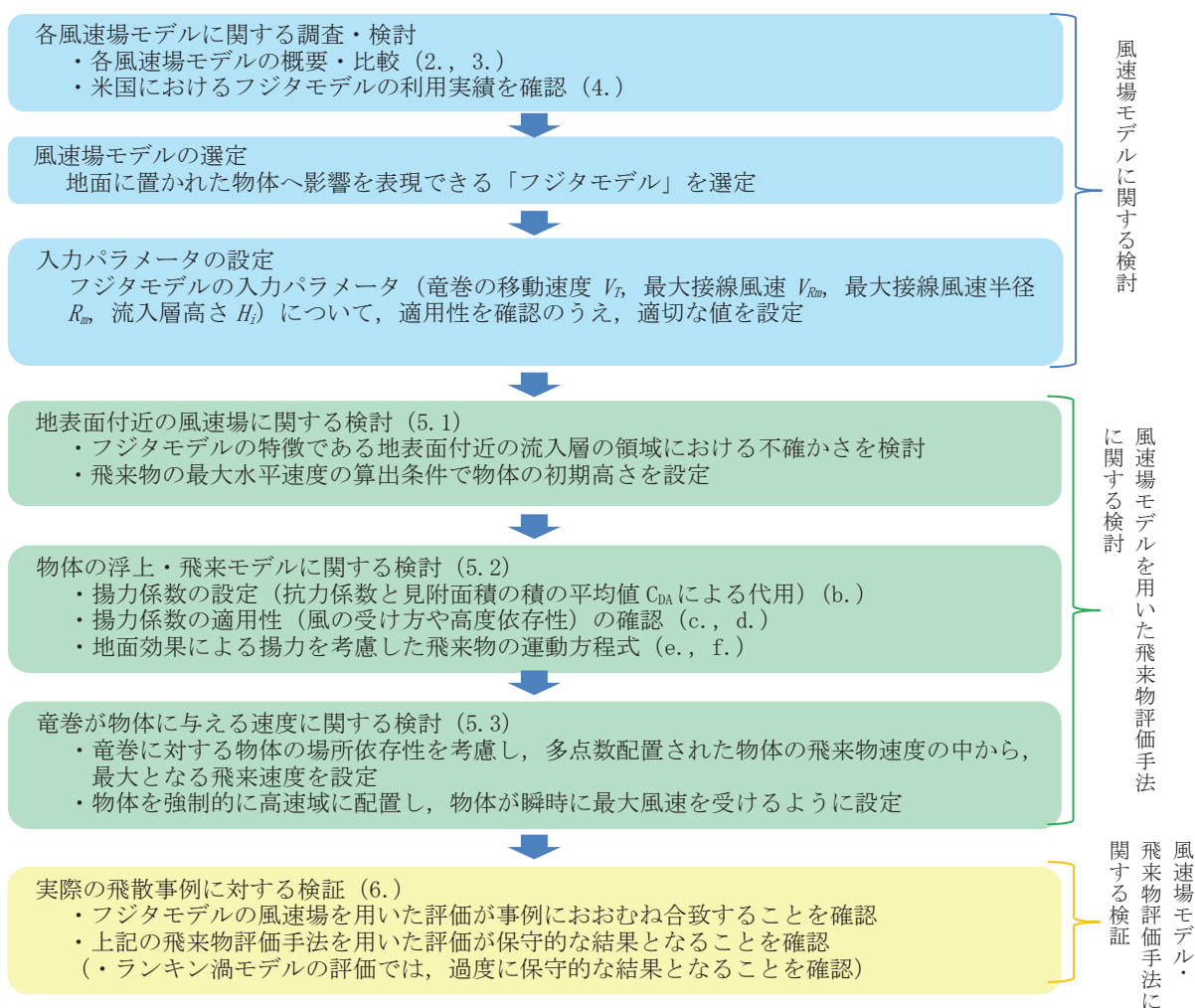


図 1 風速場モデルの選定及び飛来物評価方法に関する検討フロー
(括弧内の数字は、本資料の節番号)

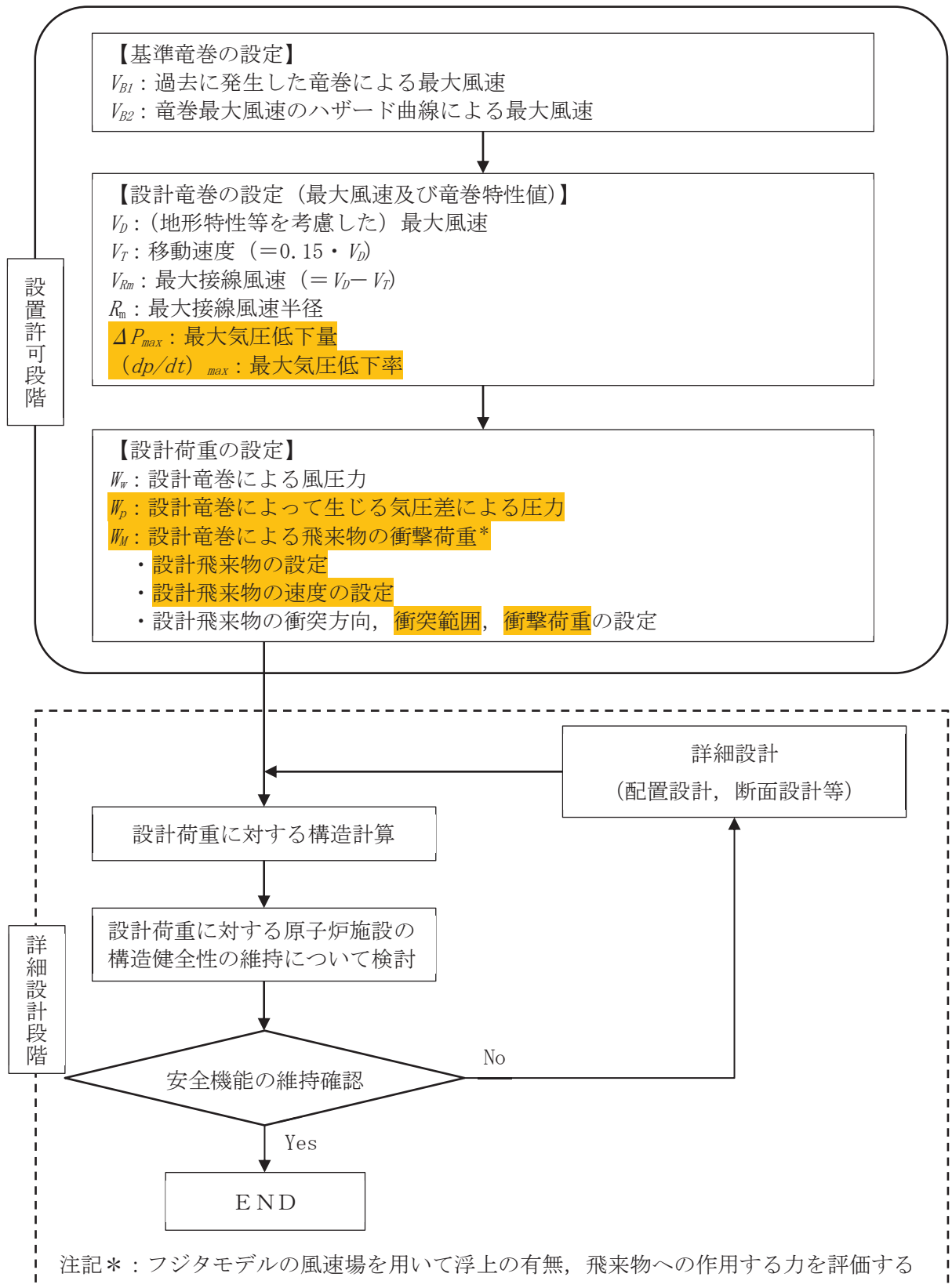


図2 竜巻影響評価フローとフジタモデルの関連箇所

2. 各風速場モデルの概要

2.1 フジタモデル

フジタモデルは、米国 NRC が実際の竜巻風速場をモデル化したいという要望により、藤田博士が 1978 年に竜巻観測記録を基に考案した工学モデルである⁽⁵⁾。

このフジタモデルの作成に当たっては、1974 年 8 月の米国カンザス州 Ash Valley 等で発生した竜巻のビデオ画像（図 3）を写真図化分析し、竜巻の地上痕跡調査及び被災状況調査結果と照合することで、図 4（左）に示すような風速ベクトルを作成している。このベクトル図を基に作成された流線モデル（図 4（右））から、竜巻風速場を代数式で表わすようにしている。

フジタモデルの特徴は、地表面付近における竜巻中心に向かう強い水平方向の流れ及び外部コアにおける上昇流といった、実際の竜巻風速場を表現できる点にある。



図 3 Ash Valley 竜巻（1974. 8. 30）のビデオ画像

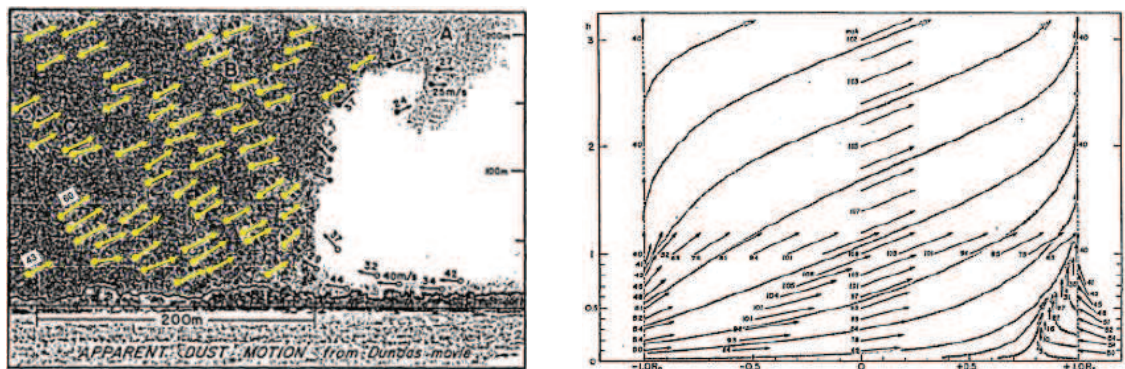


図 4 分析によって作成した風速ベクトル（左）、ベクトル図より作成したフジタモデル流線（右）

フジタモデルの風速場は図5に示すように半径方向に3つの領域（内部コア、外部コア及び最外領域）で構成され、内部コアと外部コアの接線（周）方向風速 V_θ は半径に比例し、その外側の最外領域では周方向風速は半径に反比例するモデルとなっている。内部コアには上昇風速 V_z や半径方向風速 V_r は存在しないが、外部コアには存在する。高さ方向には地面から高さ H_i までを流入層としてモデル化しており、竜巻中心に向かう半径方向風速 V_r があり、この空気の流れ込みが外部コアないでの上昇流となる。流入層より上部では外向きの半径方向風速が存在し、各風速成分は高さとともに減衰する流れとなっている。フジタモデルは流体の連続式（質量保存式）を満たす形で定式化されており、力学的に根拠のある風速場となっている。

フジタモデル DBT-77 における接線風速等の関係式については、Fujita Workbook⁽⁵⁾のChapter6に下記のとおり記載されている（Chapter6では、単一渦型のモデルであるフジタモデル DBT-77 を引用しているが、多重渦型のモデルであるフジタモデル DBT-78 は引用されていない）。

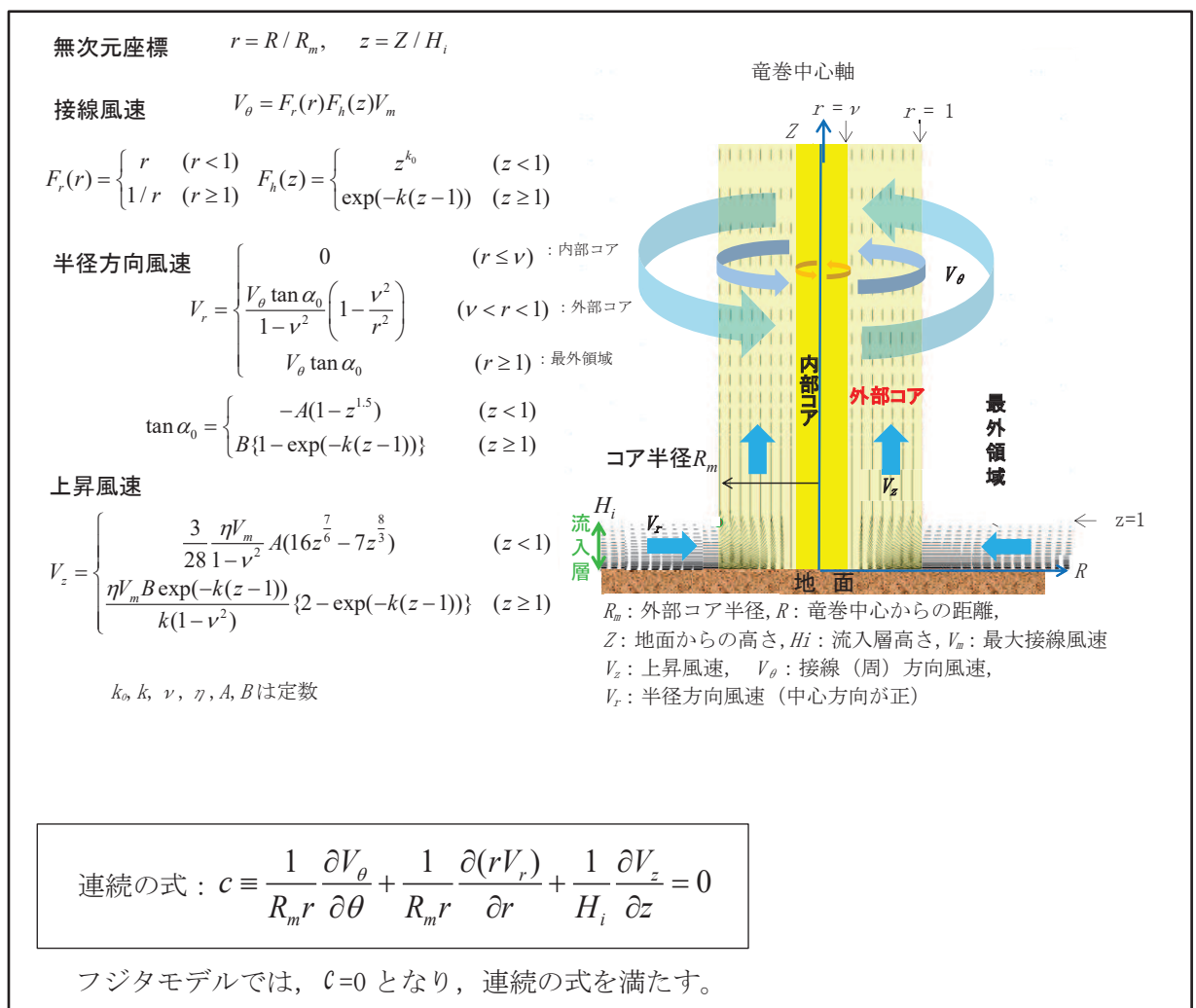


図5 フジタモデルの概要

内部コアの半径 R_ν と外部コアの半径 R_m の比 $\nu = R_\nu/R_m$ については、Fujita⁽⁵⁾が以下の経験式を提案しているので、これを用いた。

$$\nu = 0.9 - 0.7 \exp(-0.005 R_m) \tag{1}$$

また、流入層は、地面との摩擦により低下した遠心力と圧力分布のバランスが崩れ、流体が竜巻中心方向の低圧部に引き込まれることにより形成されることから、摩擦の影響が及ぶ範囲のみで形成される。Fujita⁽⁵⁾は流入層高さ H_i を竜巻中心の低圧部の大きさ（外部コア半径） R_m に比例するものとして、以下の経験式を提案しており、これを用いた。

$$H_i = \eta R_m \quad (2)$$

ここで、 η は1以下の正の値であり、Fujita Workbook⁽⁵⁾の(6.4)式より $\eta = 0.55(1 - \nu^2)$ で定義される。

上記式において、外部コア半径 $R_m = 30\text{m}$ の場合、 $\eta = 0.501$ ($H_i = 15\text{m}$) となり、原子力安全基盤機構の調査研究報告書⁽⁴⁾の第2.2.3.10図における流入層高さと同巻半径の比 ($\eta = 0.4$ 程度) や、Kosiba⁽¹⁴⁾により示されている流入層高さ ($H_i = 10 \sim 14\text{m}$ 以下) とおおむね同じである。

また、Fujita Workbook⁽⁵⁾では竜巻事例を可視化して分析しており、外部コア半径 (R_m) が約120m と大きな竜巻に対して、流入層高さ (H_i) は約70m と観測していることから、 η は約0.58 ($120/70 = 0.583$) と推測される。この場合、 R_m が30m の場合には H_i は17.5m と算定される。

なお、その他の定数についても、Fujita⁽⁵⁾の提案している値として、 $k_0 = 1/6$, $k = 0.03$, $A = 0.75$, $B = 0.217$ を用いた。

フジタモデルでは、図6に示すとおり、流入層高さ未満の接線風速をモデル化する際に、高さのべき乗に比例するとしており、そのべき乗の指数を k_0 としている。 k_0 は地表面粗度と関係があり、フジタモデルで用いている1/6乗の曲線を、図7の対数表示の図中に表現しようとした場合、 $10^{-3} \sim 10^{-2}$ の間に相当する計算結果となることから、海水や積雪面などの凹凸の小さい地面状態の地表面粗度に相当する(表1)。

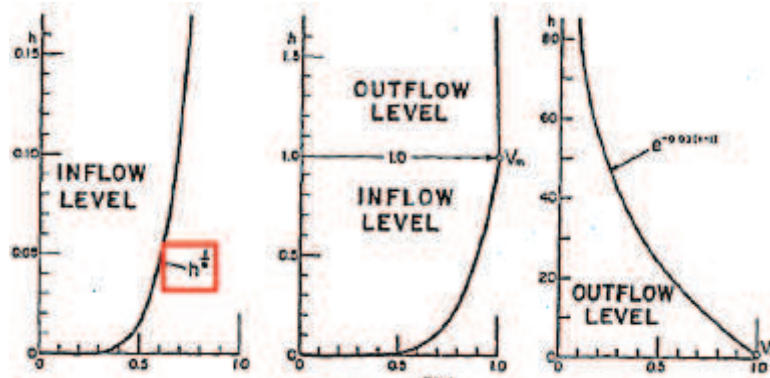


図6 フジタモデルにおける流入層高さ未満の風速分布（左）と流入層高さ以上の風速分布（右）

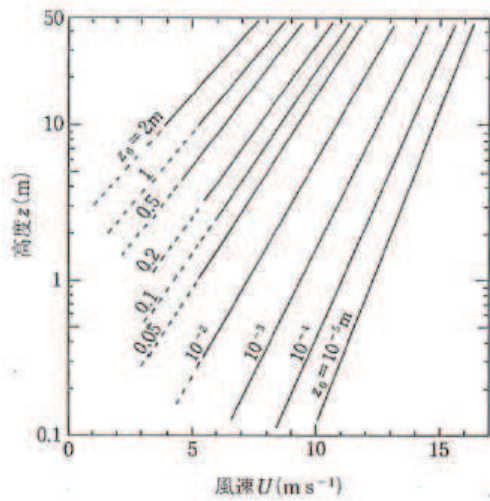


表 1 代表的な地表面状態の地表面粗度 z_0 の概略値

地面状態	地表面粗度 (m)
大都市	1~3
森林	0.3~1
田園集落	0.2~0.5
畑や草地 (草丈 1 m)	0.1~0.3
同 (草丈 0.1 m)	0.01~0.03
水田	0.01~0.05
海水や積雪面	$10^{-4} \sim 10^{-2}$
湖や海面	$10^{-5} \sim 10^{-3}$

出典：近藤純正 「地表面に近い大気の科学」

図 7 地表面粗度 z_0 による風速と高度の関係

一方で、女川原子力発電所の敷地内には、建屋等の構造物や樹木が林立しており、海水や積雪面などの地表面粗度よりも大きく、地表面付近の減速も大きい (図 8)。

これらを踏まえると、女川原子力発電所にフジタモデルを適用するに当たり、 k_0 は $1/6$ より大きい値を入力する方がより現実に近いと考えられるが、不確かさを考慮し、実際より地表面付近での減速の小さい $1/6$ を用いるのは妥当である。

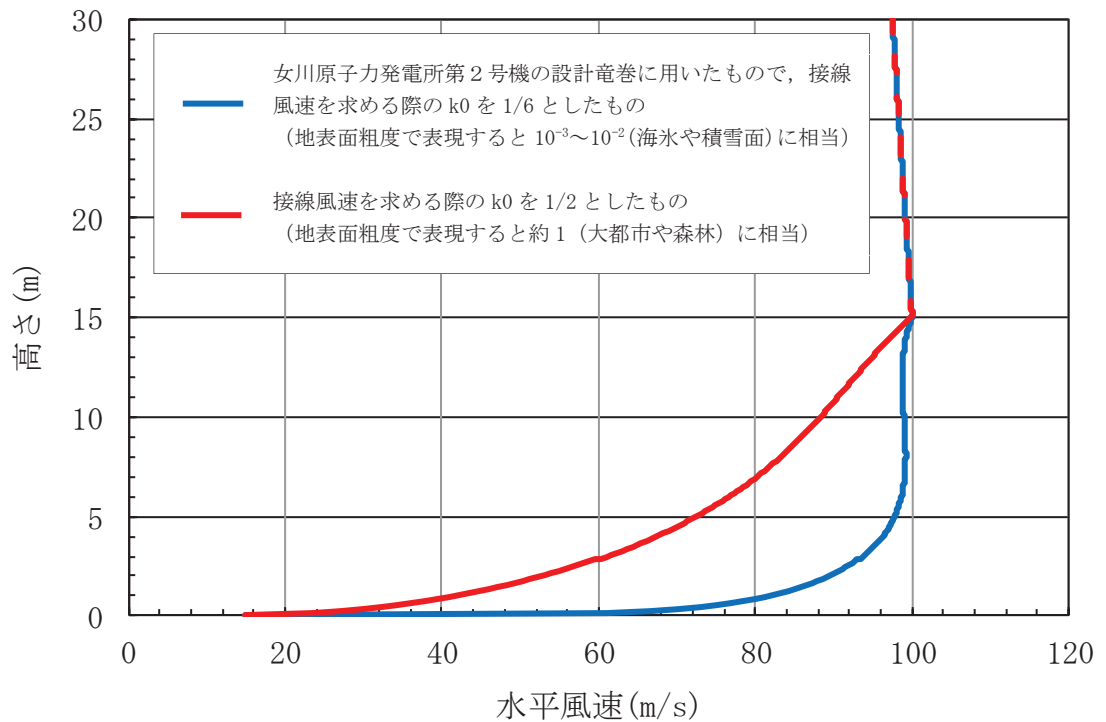


図 8 地表面粗度による高さ と 水平風速の関係

2.2 ランキン渦モデル

ランキン渦モデルは、米国 NRC ガイドでも採用されており、設計竜巻の特性値を設定する際に用いられている。しかし、米国で開発された飛来物速度評価用のランキン渦モデル⁽³⁾は、竜巻中心に向かう半径方向風速 V_r と上昇風速 V_z を特別に付加している(図9)。そのため、流れの連続の式(質量保存式)を満たしておらず、図10に示すように地面から吹き出しが生じるような流れとなっており、地上からの物体の浮上・飛散を現実的に模擬することができない。ランキン渦モデルを用いて飛散評価を行う場合、地上の物体であっても空中浮遊状態を仮定して評価することになる。

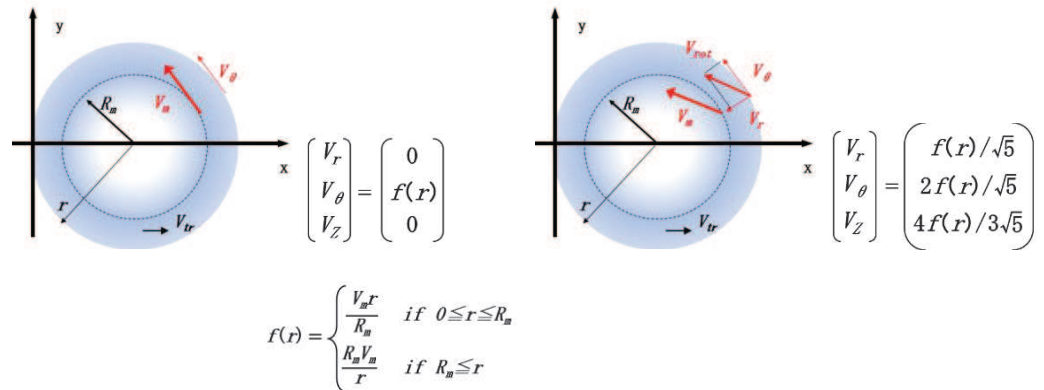


図9 設計竜巻圧力用のランキン渦モデル(左)と飛来物速度評価用のランキン渦モデル(右)

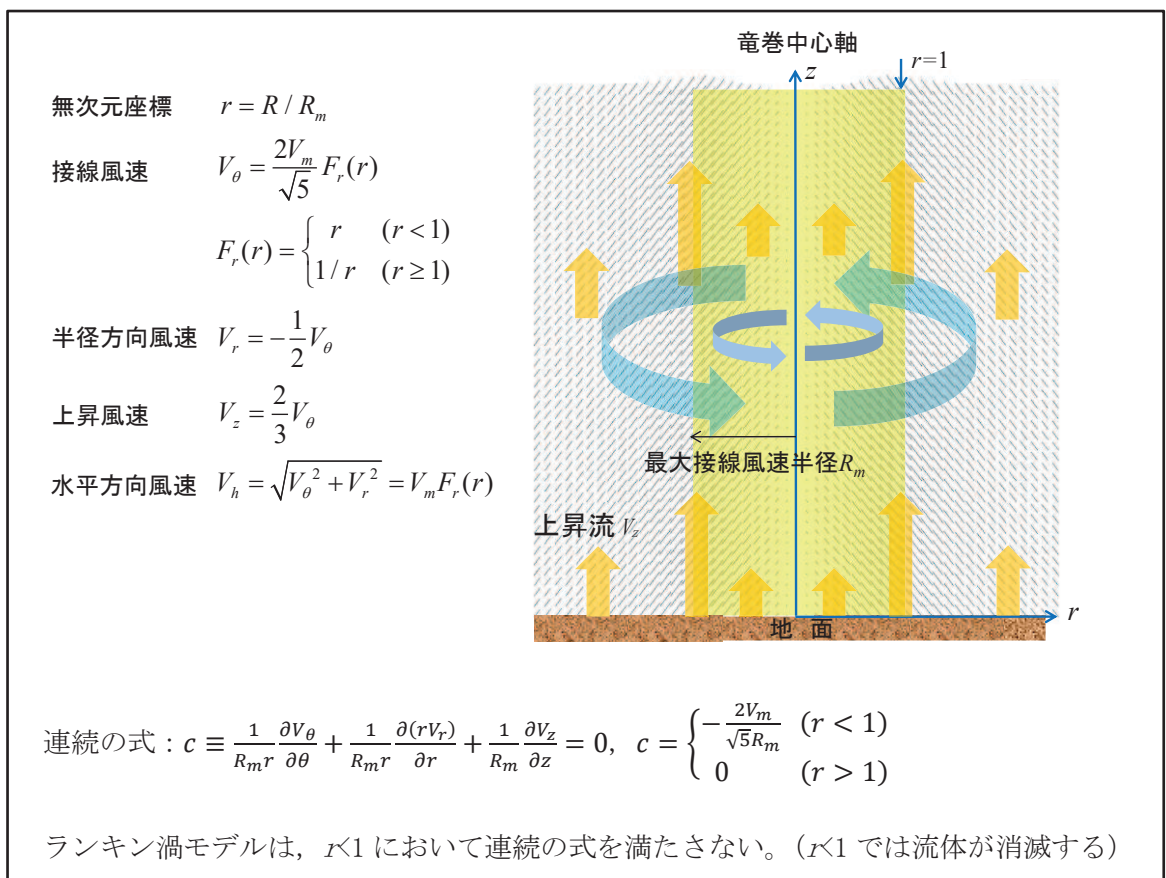


図10 飛来物速度評価用のランキン渦モデルの概要

2.3 非定常乱流渦モデル (LES による数値解析)

LES は、非定常な乱流場を数値的に計算する手法として、ガイドにおける飛来物の最大速度の設定例にも活用されている。図 11 に LES による渦の発生状況を示す。

古典的な Smagorinsky モデルに基づく LES の基礎方程式 (運動量保存式及び質量保存式) は、流体が非圧縮性であると仮定する場合、以下ようになる。

$$\frac{\partial U_i}{\partial t} + U_1 \frac{\partial U_i}{\partial x_1} + U_2 \frac{\partial U_i}{\partial x_2} + U_3 \frac{\partial U_i}{\partial x_3} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x_i} + (\nu + \nu_s) \left(\frac{\partial^2 U_i}{\partial x_1^2} + \frac{\partial^2 U_i}{\partial x_2^2} + \frac{\partial^2 U_i}{\partial x_3^2} \right) - f_i \quad (i=1, 2, 3) \quad (3)$$

$$\frac{\partial U_1}{\partial x_1} + \frac{\partial U_2}{\partial x_2} + \frac{\partial U_3}{\partial x_3} = 0 \quad (4)$$

ここで、 U_i 及び P は i 方向の流速ベクトル及び圧力を表し、 ν は動粘性係数を、 f_i は i 方向の外力加速度を表す。また x_i は i 方向の座標を表す。

一方、Smagorinsky モデルの渦粘性係数 ν_s は以下のように定義される。

$$\nu_s = (C_s h)^2 \sqrt{\sum_{i,j=1}^3 2S_{ij}^2} \quad (5)$$

ここで、 h は解像スケール (メッシュ幅相当)、 C_s は Smagorinsky 定数を表し、ひずみ速度テンソル S_{ij} は $S_{ij} = 0.5 (\partial U_i / \partial x_j + \partial U_j / \partial x_i)$ で定義される。

以上のとおり、LES は風速の時間的な変動 (乱流) を考慮できる点が特長となっている。

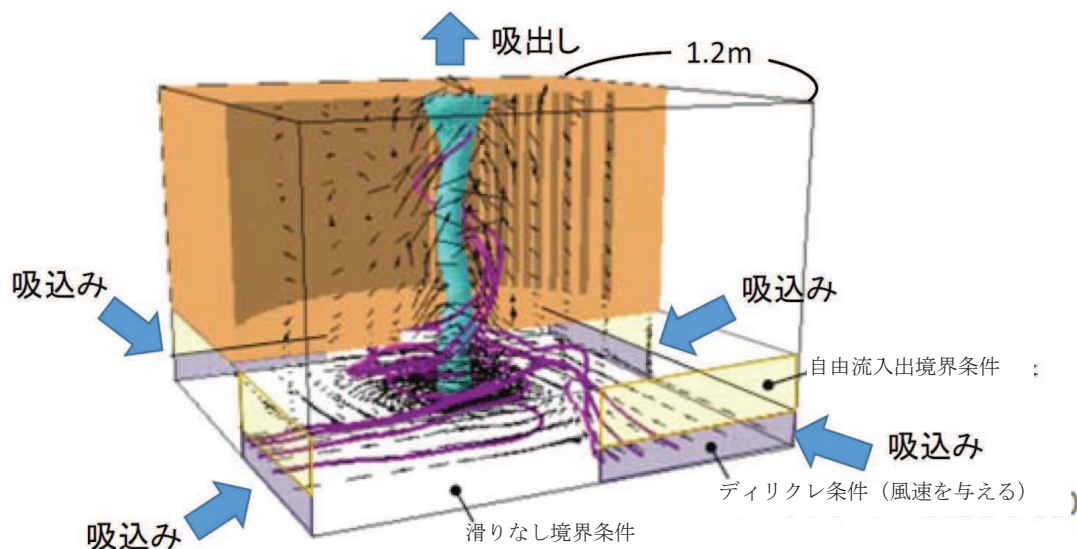


図 11 LES 計算領域内での竜巻状の渦の発生状況

以上が一般的な LES の説明となる。LES の手法自体は、広く活用されているものであるが、実スケールでの精緻な評価を行うためには、必要なメッシュ解像度の確保に膨大な計算機資源が必要となる。

また、ガイドで例示されている LES による数値解析については、条件設定等に関して下記のような問題点がある。

ガイドで例示されている LES による解析では、境界条件（側面からの流入風速の分布等）や解析領域の形状（流入箇所を局所的に配置等）を調整して人為的な乱れを与え、竜巻状の渦を生成している。渦の生成に当たって、以下のような条件を仮定していることから、実スケールでの評価を実施するには課題があるものと考えられる。

- ・人為的な流入境界条件（流入風速分布や流入箇所の局所的配置等）を設定していることから、流入境界条件の影響を受ける地表面付近の竜巻風速場の再現はできていないものと考えられる。
- ・小規模な計算領域によるシミュレーションであり、実スケールへの適用（飛来物評価）の際には単純に速度を規格化して飛来物評価に適用している。

⇒風速の規格化の際には、時間平均の最大風速を 100m/s（風速+移動速度）に設定している。Maruyama⁽⁷⁾によれば、瞬間的な周方向風速は 1.7 倍程度まで大きくなる場合があり、移動速度と合わせると最大 160m/s 程度まで達するため、飛来物評価の際に非常に保守的な結果が算出されることが考えられる。

⇒流速が速い場合には粘性の影響は小さくなる傾向となるが、その影響については考慮していないことから、特に地表面付近については風速場の再現はできていないものと考えられる。

（参考：フジタモデルを適用した場合の飛来物の飛跡）

図 12 にフジタモデルを適用した場合におけるコンテナの飛散解析（長さ 6m×幅 2.4m×高さ 2.6m、質量 2300kg、 $C_D A/m=0.0105$ 、最大風速 100m/s）における飛跡を示す。

また、フジタモデルの流入層高さ H_1 は、外部コア半径 $R_m=30m$ の場合、 $H_1=15m$ であり、2.1 節に記載のとおり他の文献⁽⁴⁾⁽¹⁴⁾ともおおむね整合しているが、ここでは、その不確か性を考慮し、流入層高さ H_1 を±10%変化させた場合の飛跡も示す。

$H_1=15m$ の際のコンテナの最大飛散距離 189.4m に対し、流入層高さ H_1 を±10%変化させた場合の最大飛散距離は 183.4m(-3.2%)、194.7m(+2.8%)となり、流入層高さ H_1 に対する最大飛散距離の感度は小さいことが分かる。

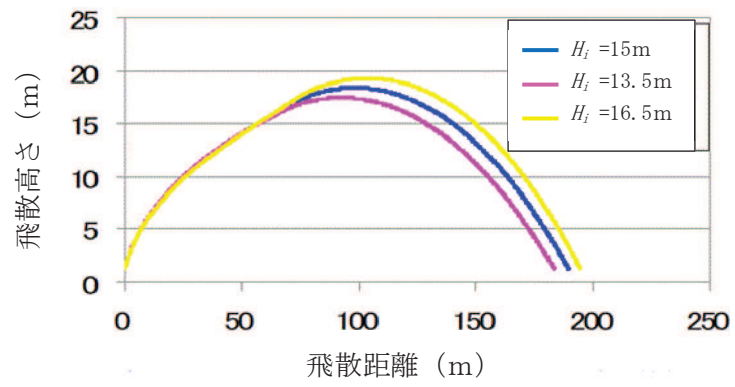


図 12 流入層高さを変化させた場合のコンテナの飛跡 (最大風速 100m/s)

3. 各風速場モデルの比較

各風速場モデルの特徴の比較を表2に示す。また、フジタモデルとランキン渦モデルの風速場構造の比較を図13に示す。フジタモデルの風速場構造の流線は、竜巻風速場に即した形で表現されており、地上からの物体の浮上・飛散解析が可能となっていることがフジタモデルの大きなメリットとなっている。それに対し、ランキン渦モデルは上空での水平方向風速の観点からは比較的よく表現できると言えるものの、地上付近では実現象と乖離しており、地上からの飛散挙動を解析するには適切ではない。ガイドで例示されているLESで生成した風速場も、2.3のとおり人為的な境界条件を設定していることや、小規模領域での計算結果を定数倍して実スケールサイズの値に変換している⁽⁴⁾⁽⁷⁾ことから、地上付近での風速場が実現象と乖離していると考えられるため、地上からの飛散挙動を解析するには適切ではない。また、他のモデルと比較して、フジタモデルは特に問題となるような点もないことから、竜巻影響評価に用いる風速場モデルとしてフジタモデルを選定することは妥当であると考えられる。

表2 各風速場モデルの特徴の比較

風速場モデル	使用実績	特徴	問題点
フジタモデル	<ul style="list-style-type: none"> 竜巻飛来物設計速度、飛散高さに関する米国(DOE)重要施設の設計基準作成に利用されている 【対象施設の例】 Pantex Plant(テキサス州), Oak Ridge(X-10, K-25, Y-12)(テネシー州), Savannah River Site(サウスカロライナ州) 	<ul style="list-style-type: none"> 実観測に基づいて考案されたモデルであり、実際に近い風速場構造を表現している 比較的簡易な代数式により風速場を表現できる 流体の連続式を満たす定式化 <p>地上に設置した状態から飛来物の挙動を解析できる</p>	<ul style="list-style-type: none"> 実際の竜巻における地表面付近の状況をモデル化することは不確かさを含むため、フジタモデルを用いる評価を行う場合には、パラメータ設定時において不確かさの考慮が必要
ランキン渦モデル	<ul style="list-style-type: none"> 米国NRC Regulatory Guide 1.76で採用されている ガイド(設計竜巻の特性値の設定)で例示されている 	<ul style="list-style-type: none"> 簡易な式で上空での水平方向の風速場を表現できる 	<ul style="list-style-type: none"> 風速場に高度依存性がなく、上昇流が全領域に存在する(地面からも吹き出しがある)ため、実現象から乖離 流体の連続式を満たしていない <p>地上からの飛散挙動を解析できない</p>
非定常乱流渦モデル(LES)	<ul style="list-style-type: none"> ガイドにおいて、飛来物及び最大速度の設定例に使用されている 	<ul style="list-style-type: none"> 風速の時間的な変動、乱れをある程度模擬できる 	<ul style="list-style-type: none"> 小規模領域での計算結果を、実スケールサイズに規格化するため、粘性の影響が実現象と乖離(特に地表面付近) 人為的な境界条件を設定しており、地面や境界近傍で実現象と乖離 実スケールに規格化した場合の平均風速が100m/sとなるため、飛来物評価が非常に保守的な場合がある(瞬間的な最大値は160m/s程度) <p>地上からの飛散挙動を解析できない</p> <ul style="list-style-type: none"> 実スケールでの解析は、膨大な計算機資源が必要になるため、現実的ではない

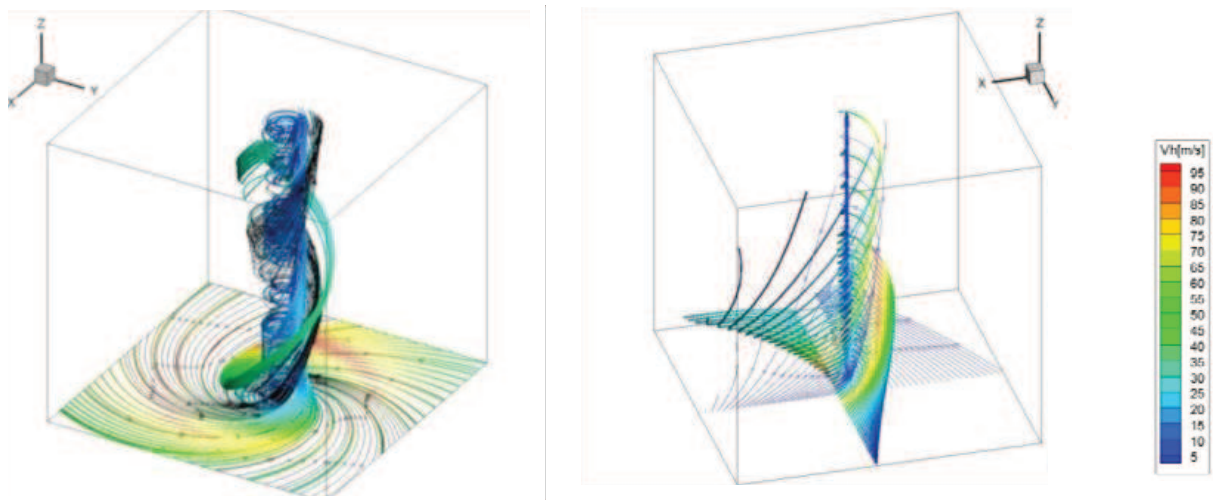


図13 フジタモデル（左）とランキン渦モデル（右）の風速場構造の比較

4. 米国におけるフジタモデルの取り扱い

4.1 フジタモデルの利用実績

米国エネルギー省 (DOE : Department of Energy) が管理するエネルギー関連施設等に適用する基準⁽⁸⁾において、竜巻飛来物速度、飛散高さの設定にフジタモデルを用いた計算結果が使用されている⁽⁹⁾⁽¹⁰⁾ (文献(8)の D.4 節 : Windborne missile criteria specified herein are based on windstorm damage documentation and computer simulation of missiles observed in the field. . . . Computer simulation of tornado missiles is accomplished using a methodology developed at Texas Tech University.)。この基準では、施設に要求される性能ごとにカテゴリ 0 から 4 まで分類し、カテゴリ 0 から 2 は一般的な建築物、カテゴリ 3, 4 は核物質や危険物質を取り扱う施設に適用される。カテゴリ 3, 4 に該当する施設として、Pantex Plant, Oak Ridge (X-10, K-25, Y-12) 及び Savannah River Site が挙げられている。フジタモデルの技術的な妥当性の検証については、米国 DOE 管轄のローレンス・リバモア国立研究所報告書⁽¹¹⁾にてまとめられている。この報告書では、フジタモデル DBT-77 を他の風速場モデルと比較検討しており、「流体力学の連続の式を満足する (Fluidmechanics equations of continuity are satisfied)」こと、「モデル流況は、竜巻の映像分析で得られる流れの空間分布と整合する (Flow patterns are consistent with the spatial distribution of flow observed in photogrammetric analysis of tornado movies)」こと等を利点として挙げている。

また、実際の事例に対するフジタモデルの検証としては、1978 年 12 月 3 日に米国ルイジアナ州 Bossier 市で発生した F4 竜巻による鋼製材の飛来について、フジタモデル DBT-77 で再現した事例⁽⁹⁾がローレンス・リバモア国立研究所報告書⁽¹¹⁾及び米国気象学会論文集⁽¹²⁾に掲載されている。

なお、米国 LES (Louisiana Energy Services) の濃縮施設 (NEF : National Enrichment Facility) では、上記の DOE 施設の基準に基づき竜巻飛来物 (鋼鉄パイプや木材の板等) を設定しており、米国 NRC は当該施設に対する安全評価報告書 (NUREG-1827)⁽¹³⁾の中で竜巻飛来物に対する LES の竜巻設計を是認している。 (“Based on the review of the information concerning tornados and tornado-generated missiles, NRC concludes: (i) the information is accurate and is from reliable sources; and (ii) the design bases tornado-generated missiles are acceptable because they were determined based on an appropriate DOE standard. The use of a DOE standard is an acceptable approach to NRC staff.”)

4.2 NRC ガイドでの取り扱い

2.1 節でも述べたとおり、フジタモデルは実際の竜巻風速場をモデル化したいという米国 NRC の要請を受けて考案されたものであるが、米国 NRC Regulatory Guide 1.76⁽²⁾では、フジタモデルについて “The NRC staff chose the Rankine combined vortex model for its simplicity, as compared to the model developed by T. Fujita (Ref.7).” と述べられており、単に数式の簡易さを理由にランキン渦モデルが選定されている。また、NRC スタッフ自身で水平方向の飛来物速度 (Simiu らの運動方程式⁽³⁾) を計算するプログラムを開発している (“The NRC staff developed a computer program to calculate the maximum horizontal missile speeds by solving these equations.”) ことが明記されている。

したがって、米国 NRC ガイドでランキン渦モデルが採用されているのは、フジタモデルより簡易であるという理由が主であり、竜巻風速場としての優劣を指摘されたものではない。

(参考)：米国におけるランキン渦モデル以外の風速場モデルの利用実績

米国 NRC は、竜巻防護対策の追加を検討している実用炉に対し、確率論的竜巻飛来物評価手法 TORMIS の利用を承認している。

TORMIS は、米国の EPRI で開発され、原子力発電所の構造物・機器への竜巻飛来物の衝突・損傷確率を予測する計算コードであり、同コードでは、ランキン渦モデル以外の風速場モデル（統合風速場モデル）が利用されている（米国 NRC においても、ランキン渦モデル以外の風速場モデルが認められていないわけではない）。

5. 飛来物評価における不確定性の考慮

フジタモデルの風速場を適用することで、より現実的な竜巻影響評価を行うことが可能と考えられるが、モデルの特徴を踏まえた不確定性を考慮する必要がある。また、竜巻による物体の飛散挙動の不確定性についても考慮する必要がある。

本節では、フジタモデルの地表面付近の風速場に関する不確定性や、物体の浮上・飛来モデルにおける不確定性、竜巻が物体に与える速度に関する不確定性について、飛来物評価の中でどのように考慮しているかという点について説明する。

5.1 地表面付近の風速場に関する不確定性の考慮

フジタモデルの風速場を用いた飛散評価手法⁽⁶⁾は、地上付近の風速分布を考慮して実施していることから、物体の初期高さが評価結果に影響がある。このため、当社で実施するフジタモデルの風速場の適用に対して以下の検討を実施した。

(1) 流入層高さの感度解析

フジタモデルの特徴として流入層があるが、図14に示すとおり、モデル化においては地表面付近の領域に対し、必ずしも十分な分析がなされていない可能性がある（飛散評価においては地表面に近づくに従い風速が減少し地表面（高さ0m）では0m/sになるようモデル化されている）。

また、当社の飛散評価においては、流入層高さを17.5mと設定しており、この流入層高さの感度解析を行った結果、表3に示すとおり、流入層が低い場合に、僅かではあるが評価結果を厳しく与えることを確認した。

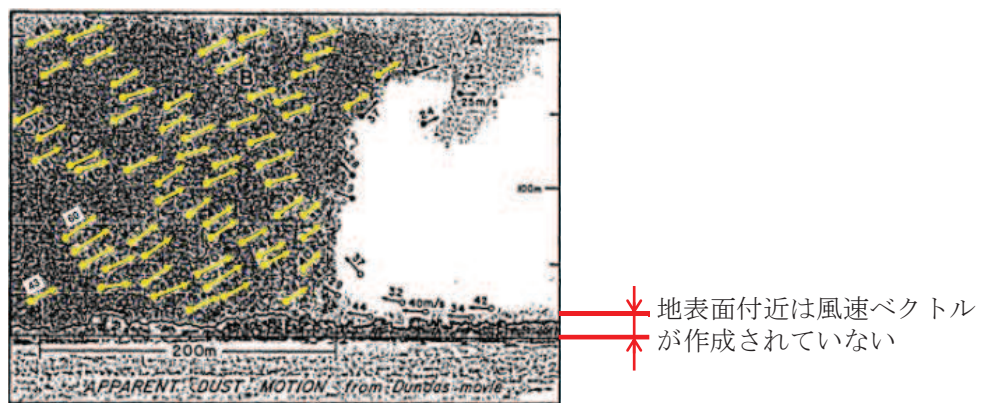


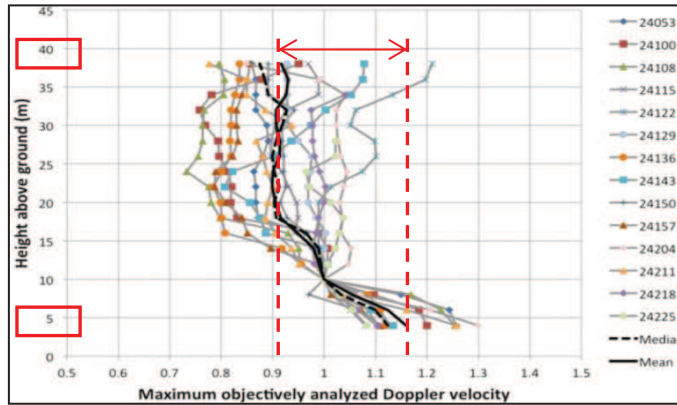
図14 写真図化分析で作成された風速ベクトル⁽⁵⁾

表3 流入層高さの感度解析結果（下線部：最大値）

【条件】 飛来物：鋼製材 風速：100m/s	流入層高さ				
	10m	12.5m	15m	17.5m	20m
最大飛散高さ[m]	<u>0.3</u>	0.2	0.2	0.2	0.2
最大飛散距離[m]	<u>8.7</u>	7.3	6.5	5.8	5.0
最大速度（水平）[m/s]	<u>14.0</u>	12.7	11.7	11.0	10.2
最大速度（鉛直）[m/s]	<u>1.1</u>	1.0	0.9	0.9	0.8

(2) 至近の研究報告

Kosiba and Wurman 2013⁽¹⁴⁾によると、図15に示すとおり地上高さ約5mにおける風速は地上高さ約40mに比べて約25%大きな値が観測されたことが報告されている。



- 14箇所の観測点における風速を観測した結果、強い風は地上5m付近で観測されており、地上10m付近では約15%減少し、地上10~40mでは約10%減少する
- 地上から3m程度は観測を行っていない
- 実線は平均値を表す

図15 地上高さと風速分布⁽¹⁴⁾

以上のことから、設備影響評価における、設計飛来物の条件としては、飛来物の速度の不確かさを考慮する必要があると判断し、当社が実施するフジタモデルの風速場を用いた飛散評価の条件（初期高さ）設定においては、飛散評価結果が厳しくなるように感度解析の結果を踏まえて、最大水平速度の算出条件を設定することで、地表面付近の風速場の不確かさを考慮した。また、女川原子力発電所の特徴である敷地の高さについても適切に考慮して飛散評価を行うこととする。

(参考) 初期高さと速度の関係（鋼製材の例）

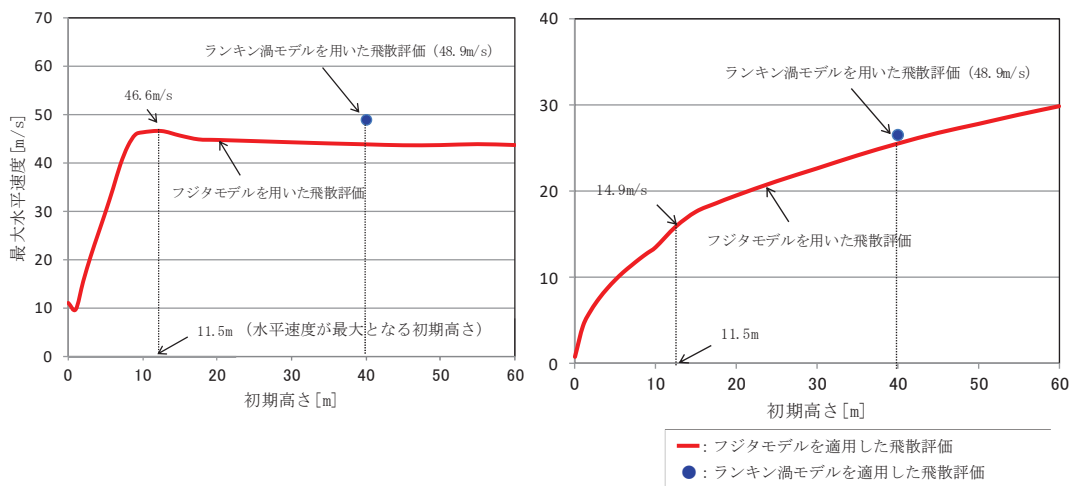


図16 設計飛来物（鋼製材）の初期高さと速度の関係

5.2 物体の浮上・飛来モデルにおける不確定性の考慮

本評価における物体の浮上・飛来モデルの考え方で、その中で保守性の観点から評価上考慮している点について説明する。

a. 物体の揚力の計算式

物体が空中にある場合、物体に作用する力は、ガイドの飛来物運動モデル⁽³⁾⁽⁴⁾と同様に、飛来物は図 17 のようにランダムに回転しているものとし、平均的な抗力（流れの速度方向に平行な力） F_D と重力のみが作用する飛行モデルを採用している。

一方、物体が地面に置かれている場合や地面に近い場合は、地面効果による揚力（次頁参照）を考慮している⁽⁶⁾。具体的には、物体の形状が流れ方向の軸に関して対称であっても、図 18 に示すように地面の存在により流れが非対称になり、物体上部の圧力が低くなることで物体を浮上させる駆動力が生じることから、これを揚力 F_L として考慮する。

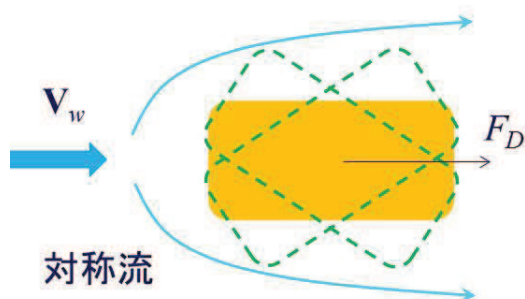


図 17 空中で飛来物へ作用する力

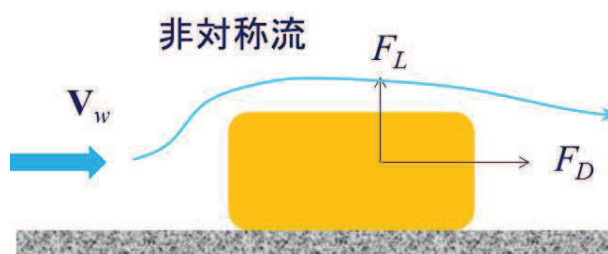


図 18 地面付近で飛来物へ作用する力

このような揚力 F_L は地面での揚力係数 C_L 、地上での物体の見附面積（風向方向から見た投影面積） a を用いて、以下のように表される⁽¹⁵⁾。

$$F_L = \frac{1}{2} \rho C_L a |V_w - V_M|_{x,y}^2 \quad (6)$$

ただし、 ρ は空気密度、 V_M は飛来物の速度ベクトル、 V_w は風速ベクトル、 $|*|_{x,y}$ は*の x, y 成分（水平成分）の大きさを表す。

(参考) 地上の物体における地面効果による揚力について

物体や地面は完全な滑面ではなく、凹凸を有しているため、完全接触と非接触の領域に区別される。物体の地面への投影面積を A とし、物体と地面の完全接触面積を s とした場合、無風時（図 19 左）は物体が流体に接する全表面で圧力は一定 (p_0) とみなせるため、鉛直方向（上向き）に作用する揚力 F_{L0} は、以下で与えられる。

$$F_{L0} = -p_0 A + p_0 (A - s) = -p_0 s \quad (7)$$

吸盤のように完全に地面に密着している場合は $s = A$ となるため、大気圧 p_0 に投影面積 A を乗じた力が下向きに作用し、物体と地面の間に僅かに空隙が生じる場合には、大気圧 p_0 に完全接触面積 s を乗じた力が下向きに作用することになるため、いずれの場合においても揚力は発生しないことが分かる。

一方、竜巻通過時（図 19 右）の物体に圧力差に伴う流体力が作用（簡単のため上面での圧力 p_1 、下面での圧力 p_2 と仮定）する場合、鉛直方向の流体力 F_L は、以下で与えられる（圧力分布がある任意形状の物体についても圧力の表面積分を用いれば同様に計算は可能）。

$$F_L = -p_1 A + p_2 (A - s) \quad (8)$$

吸盤のように完全に地面に密着している場合は $s = A$ となるため、上面の圧力 p_1 に投影面積 A を乗じた力が下向きに作用するが、物体と地面の間に僅かに空隙が生じる場合には、地面と物体の接触状態によっては上向きの力が発生することがある。実際には、地面と物体の接触状態を確認することは難しいことから、本評価においては、保守的に地上における物体に揚力が作用することとしている。

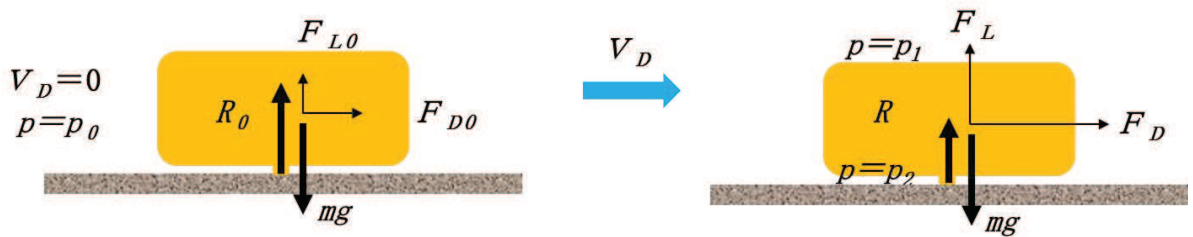


図 19 部分的に地面に接する物体に作用する力（左：無風時，右：強風時）

b. 揚力係数の設定

(6) 式の C_{La} は風洞実験から求められる値であるが、実験条件（風を受ける方向等）により様々な値を取り得るため、それを包含するような係数を設定することが望ましい。

本評価では、条件によらず保守性を確保できるように、 C_{La} に代わり以下で定義される抗力係数と見附面積の積の平均値 $C_D A$ を用いることとする。

$$C_D A = \frac{1}{3}(C_{Dx} A_x + C_{Dy} A_y + C_{Dz} A_z) \quad (9)$$

ここで、 C_{Dx} は空中での x 軸方向流れに対する抗力係数、 A_x は x 軸方向流れに対する見附面積であり、その他も同様である。

飛来物の運動モデルを図 20 に示す。上記 (9) 式の考え方は、図 20 に当てはめ整理すると以下のとおり。

- 物体がある程度浮き上がった後の状態（図 20 の B）であれば、物体はランダム回転し、物体各面に均等に風を受けるものと考えられること。
- 物体が地面におかれた状態（図 20 の A）から、実際に浮き上がる際には、物体の上面や下面での圧力が均一ではなく、傾きながら浮き上がるようなことも考えられるが、このような挙動を理論的に評価することは難しい。

そのため、これに準ずる方法として、評価に用いる係数は、地面から浮かせた状態で実測された C_{La} のうち、物体が地面に置かれた状態（図 20 の A）にできる限り近い場合の値よりも大きな係数を用いることで、保守性は確保できると考えられること。

- 物体が地面におかれた状態（図 20 の A）と物体がある程度浮き上がった状態（図 20 の B）での評価にて、共通の係数を用いることは、地上からの物体浮上・飛散評価における実用性の観点からも望ましいこと。

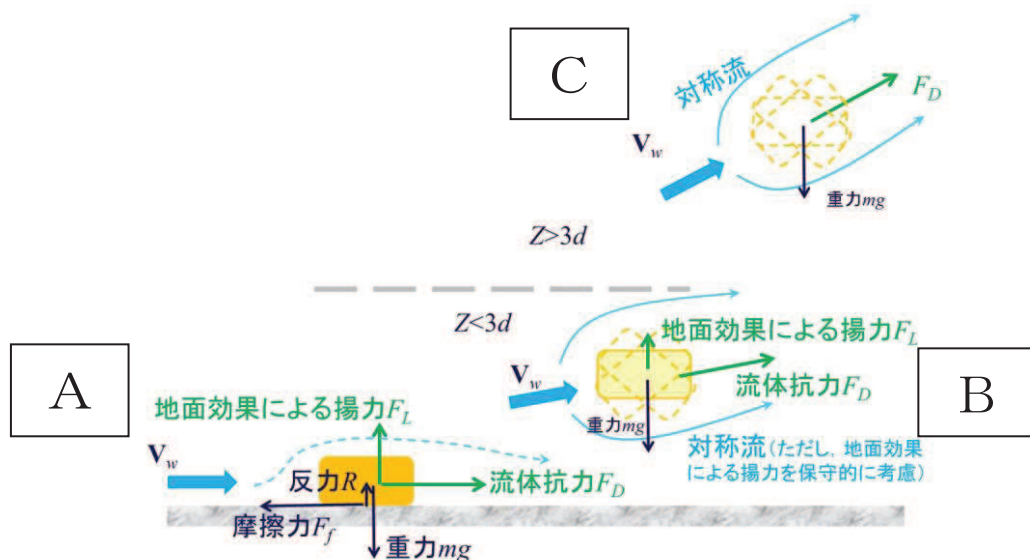


図 20 飛来物の運動モデルの模式図

(A : 地面上, B : $Z < 3d$ の高度範囲, C : $Z > 3d$ の高度範囲)

物体の飛散解析におけるモデル化の基本的な考え方は、地面における揚力係数 C_L と見附面積 a の積 $C_L a$ をより大きな値で置き換えて、浮上現象を保守的に評価できるようにすることであり、この保守的な代用値として飛行定数 $C_D A/m$ と同類の $C_D A$ の利用が適切であることを以下で説明する。

物体が風速 U を受ける場合の揚力係数 C_L は、一般にその定義により揚力 F_L と以下の関係にある。

$$F_L = \frac{1}{2} \rho U^2 C_L a \quad (10)$$

これを変形すると、 $C_L a = 2F_L / \rho U^2$ となり、風速、風向及び物体の向きが一定であれば、揚力 F_L 及び速度圧 $q = 1/2 \rho U^2$ は見附面積 a の取り方には無関係の物理量であるので、 $C_L a$ も見附面積 a の取り方（風向投影面積や揚力方向投影面積）に依存しないことが分かる。一方、同じ風速 U が同じ物体に作用する場合であっても、地面に置かれた物体の向きと風向の関係によって積 $C_L a$ は変化する（例えば、円柱の長手方向と風向が平行な場合の揚力は小さいが、直角の場合には最大となる）。

そこで、典型的な塊状物体・柱状物体・板状物体が地面に置かれた場合の $C_L a$ の最大値（又はそれに近い値）の実測結果と物体の幾何学形状のみで決定される $C_D A$ の値を比較した。（表 4）

表 4 より、 $C_D A > C_L a$ の関係が成立しており、 $C_L a$ の代用として $C_D A$ の利用が適切であることが確認できる。なお、 $C_D A$ は各方向の抗力係数と見附面積の積の平均値であり、例えば一辺 d の立方体では $C_D A = 2d^2$ 、一辺 d の平板では $C_D A = 0.66d^2$ となる。両者には約 3 倍の違いがあるが、いずれの場合も実際の $C_L a$ 値よりも大きな値であり、揚力の評価モデルとして $C_L a$ 値の代わりに $C_D A$ を用いることで保守性は確保できる。

また、以上の揚力のモデル化の説明は浮上時（図 20 の状態 A）に対するものであるが、この揚力が物体高さの 3 倍までの飛散高度の範囲で連続的に低減するように作用するようにモデル化しており、図 20 の状態 A, B, C の全領域で揚力の連続性が確保されている。

表 4 主な物体の C_{DA} と地面に置かれた物体の C_{La} (実測値) の大小関係 (1/2)

形状	物体	仕様	C_{DA}^{*1}	C_{La} (実測値)	C_{La} (実測値) に係る試験条件等
塊状	自動車	実物の Dodge Dart (長さ 16.7ft., 幅 5.8ft., 高さ 4.3ft.)	129ft. ²	48.7ft. ²	<ul style="list-style-type: none"> 風洞試験⁽¹⁶⁾ (風速 22~31m/s, Re=2.8×10⁶~4×10⁶) C_{La} が最大となる流入角での値を C_{La} (実測値) として記載
		1/6 縮尺模型 (セダン: 長さ 4.85m, 幅 1.79m, 高さ 1.69m, 質量 1633kg)	12.07 m ²	7.76 m ²	<ul style="list-style-type: none"> 風洞試験⁽²²⁾ (風速 0~150m/s, Re=0~3×10⁶) 4 つのタイヤに作用する地面からの反力のうち, 少なくとも一つがゼロとなった時点の風速 U から C_{La} 値を計算 ($C_{La} = 2mg / \rho U^2$) C_{La} が最大となる流入角での値を C_{La}(実測値) として記載
		1/6 縮尺模型 (ミニバン: 長さ 5.12m, 幅 1.94m, 高さ 1.42m, 質量 2086kg)	14.58 m ²	7.89 m ²	<ul style="list-style-type: none"> 水路試験⁽¹⁷⁾ (Re=8000~28000) 流入方向と立方体面の一面が垂直になる配置における値を C_{La}(実測値) として記載
柱状	円柱	一辺の長さ D	2D ²	0.2D ² 程度	<ul style="list-style-type: none"> 風洞試験⁽¹⁶⁾ (Re=1.3×10⁶) 流入方向と円柱の軸直角方向が垂直になる配置(円柱の軸方向は地面と平行)における値を C_{La}(実測値) として記載
		長さ λ , 直径 D	0.47D λ	0.2D λ	<ul style="list-style-type: none"> 風洞試験 (Re=3.5×10⁴~1.2×10⁶) 流入方向と円柱の軸直角方向が垂直になる配置(円柱の軸方向は地面と平行)における値を C_{La}(実測値) として記載
		長さ λ , 断面が一辺 D の正方形	0.8D λ (1.3D λ) ^{*2}	0.05D λ ~0.23D λ	<ul style="list-style-type: none"> 水路試験⁽¹⁷⁾ (Re=8000~28000) 長方形断面(アスペクト比 4:3)の角柱は地面から 0.167D 以上離れると揚力は負となる(電中研風洞実験) 流入方向と角柱の軸方向が垂直になる配置(角柱の軸方向は地面と平行)における値を C_{La}(実測値) として記載
柱状	角柱	長さ λ , 高さ D, 幅 B の長方形断面	0.4(D+B) λ	負値(地面との隙間が 0.167D 以上の場合)	<ul style="list-style-type: none"> 風洞試験 (Re=3.8×10⁴) 流入方向と角柱の軸方向が垂直になる配置(角柱の軸方向は地面と平行)

注記*1: 柱状及び平板では微少項を無視して記載

*2: 塊状をみなせる場合

表 4 主な物体の C_{DA} と地面に置かれた物体の C_{iA} (実測値) の大小関係 (2/2)

形状	物体	仕様	C_{DA}^{*1}	C_{iA} (実測値)	C_{iA} (実測値) に係る試験条件等
平板	薄い平板	長さ λ , 幅 B , 厚さ D ($B=200\text{mm}$, $D=5\text{mm}$, $\lambda=1000\text{mm}$ の場合)	0.66 $B\lambda$	0に近い値 (地面から 0.25 B 離 れた位置で $C_{iA}=0.04B\lambda$)	<ul style="list-style-type: none"> 風洞試験⁽¹⁸⁾ (幅 B に基づく $Re=2\times 10^5$) 流入方向と平板の長さ方向が垂直になる配置 (平板は地面と平行) における値を C_{iA} (実測値) として記載
	薄い翼	長さ λ , 幅 B , 厚さ D ($B=100\text{mm}$, $D=15\text{mm}$, $\lambda=300\text{mm}$) (参考文献(20)では B の代 わりに c で表記)		0.2 $B\lambda$ 程度	
	平板状 ブロック	長さ λ , 幅 B , 厚さ D	0.66 $B\lambda$ 0.66($B\lambda+D$ ($B+\lambda$))* ²	0.1 $B\lambda$ 程度	<ul style="list-style-type: none"> 水路試験(19) ($Re=5\times 10^4$ 程度) 流入方向と平板状ブロックの長さ方向が垂直になる配置 (平板状ブロックは地面と平行) における値を C_{iA} (実測値) として記載

注記*1: 柱状及び平板では微少項を無視して記載

*2: 塊状をみなせる場合

c. 設定した揚力係数の適用性の確認

地面における揚力係数 C_L と見附面積 a の積 $C_L a$ が、飛行定数 C_{DA}/m と同類の C_{DA} で代用できることについて、表 4 における $C_L a$ (実測値) が竜巻における飛来物の飛散解析に適用可能であることについて、レイノルズ数の観点から確認を行った。

表 4 の各文献中の実験でのレイノルズ数 Re は同表の備考欄に示すとおり、 10^4 から 10^6 の範囲にある。

ここで、実物の自動車 (Dodge Dart : 長さ 16.7ft., 幅 5.8ft., 高さ 4.3ft.) では風速を 30mph (13m/s) から 120mph (54m/s) まで変化させてレイノルズ数の影響を調べた結果、風速は各空力係数に対して顕著な影響がないことが確認されている⁽¹⁶⁾。

これは、剥離点が物体角部等に固定されてレイノルズ数にほとんど依存しないためであり、このような特性を有する立方体等についてもレイノルズ数依存性はないものと考えられる。

一方、円柱周りの流れのように剥離点が曲面上にある場合については、図 21 に示すようにレイノルズ数 Re が変化すると、剥離点が移動し、抗力係数等が変化することが知られている。表 4 の EPRI の円柱の風洞試験結果⁽¹⁶⁾は $Re=1.3 \times 10^6$ の高レイノルズ数条件で得られたものであり、竜巻中の円柱状の飛来物のレイノルズ数範囲に入るものと考えられる (例えば、相対風速 92 m/s の直径 0.1m のパイプのレイノルズ数は $Re=6 \times 10^5$ 程度)。また、電力中央研究所我孫子地区内の吹出式開放型風洞 (吹出口寸法 : 高さ 2.5m × 幅 1.6m, 風速 : 3.0~16.5m/s) においても、壁 (地面) 近くに設置した円柱 (直径 100mm × 模型長 1000mm) を対象として、 $Re=3 \times 10^4$ から 1×10^5 程度までの揚力係数の測定試験が行われている。

EPRI の風洞試験と電力中央研究所の風洞試験には、レイノルズ数条件に大きな違いがあるが、図 22 に示すとおり風洞試験で得られた円柱揚力係数に顕著な相違は認められない。

以上より、地面における各物体の揚力係数 C_L と見附面積 a の積 $C_L a$ はレイノルズ数にほとんど依存せず、表 4 に示す風洞試験結果に基づくモデル化は妥当であると考えられる。

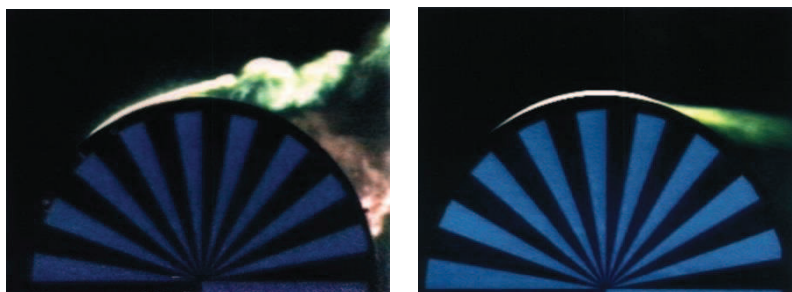


図 21 可視化した円柱周りの流れ⁽²⁰⁾ (左 : $Re \approx 4 \times 10^4$, 右 : $Re \approx 2 \times 10^5$)

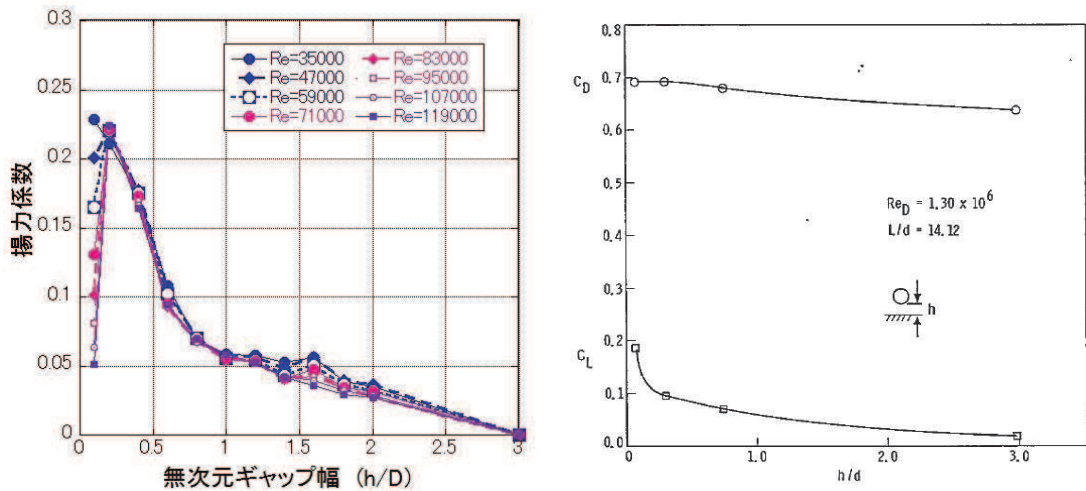


図 22 電力中央研究所の風洞試験 ($Re=3 \times 10^4 \sim 1 \times 10^5$) (左) と EPRI の風洞試験⁽¹⁶⁾ ($Re = 1.3 \times 10^6$) で得られた円柱揚力係数 (右)

d. 揚力の高さ依存性

この地面効果による揚力は高さとともに減衰するので、既往の風洞実験の結果⁽¹⁶⁾⁽²³⁾を考慮して、物体高さ d の物体にかかる揚力は、物体底面が地面から $3d$ の高度であるとき消滅すると仮定した。

具体的には、地面から z の距離 (高度) にある物体に作用する揚力加速度 L を以下の関数形でモデル化した。(Z : 物体底面の高度)

$$L = \frac{1}{2} \rho \frac{C_D A}{m} |V_w - V_M|_{x,y}^2 f(Z/d) \quad (11)$$

ただし、 $f(Z/d)$ は、EPRI の風洞実験結果⁽¹⁶⁾を参考に、以下の反比例式とした。

$$f(Z/d) = \begin{cases} \{1 - (Z/3d)\} / \{1 + (Z/d)\}, & Z = z - d/2 \quad (Z \leq 3d) \\ Z = 0 & (Z > 3d) \end{cases} \quad (12)$$

また、以下において、塊状物体 (自動車)、柱状物体 (角柱、円柱) 及び板状物体 (平板) の風洞試験結果を踏まえ、物体高さ d の物体にかかる揚力は、物体底面が地面から $3d$ の高度で消滅するとした仮定が適切であることを確認する。

(a) 塊状物体 (自動車) の揚力の高さ依存性

自動車の揚力係数は、EPRI の風洞試験⁽¹⁶⁾にて、地面及び風洞中央 ($h/d \doteq 3.5$) に設置した場合にて計測されており、図 23(a) に示すように流入角 (0° は正面、 90° は側面に風を受ける角度) に依存した揚力係数が得られている。

また、図 23(b) にて、EPRI の風洞試験によって得られた揚力係数と本モデルにて代用した揚力係数の関係を示す。EPRI の風洞試験では空中での自動車の姿勢は地面設置と同じ姿勢に保たれているため、空中においても揚力係数がゼロとはならないが、実際に飛来する自動車の姿勢はランダムに変化することから、平均的な揚力係数は本モデルでの代用揚力係数に近い物と考えられる。

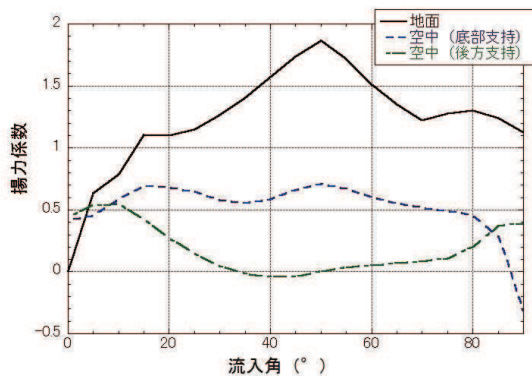


図 23(a) 地面及び風洞中央に設置した自動車の揚力係数の流入角依存性

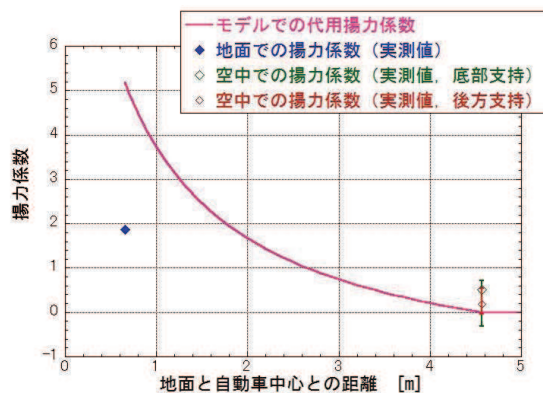


図 23(b) 自動車の風洞試験による揚力係数と本モデルで代用した揚力係数の関係

(b) 柱状物体（角柱・円柱）の揚力の高さ依存性

角柱の揚力係数は、電力中央研究所我孫子地区内の吹出式開放型風洞（吹出口寸法：高さ 2.5m×幅 1.6 m，風速：3.0～16.5m/s）にて測定しており、図 24 にその結果を示す。角柱の場合、地面から 0.167D 以上離れると揚力は負となるので、正の揚力を与える本モデルの代用揚力式（図 24 の赤線）は保守的な結果となっていることが分かる。

円柱の揚力係数は、EPRI の風洞試験⁽¹⁶⁾にて測定しており、図 25 に示すように本モデルの代用揚力係数（図 25 の赤線）は実際の円柱に働く揚力の最大揚力係数よりも大きな値となっているため、保守的な結果となっていることが分かる。3D 付近では、風洞試験による揚力係数が代用した揚力係数を上回る結果となっているが、風洞試験においては、揚力が作用しやすい姿勢で試験を行っており、実際の揚力係数は更に小さいものと考えられる。

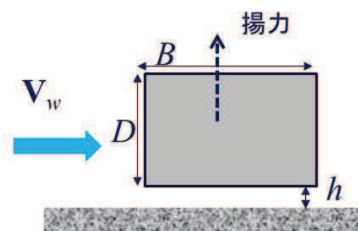
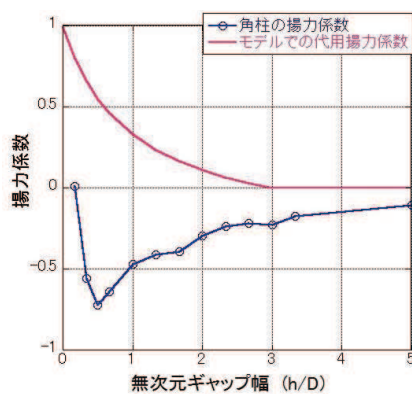


図 24 角柱の風洞試験による揚力係数と本モデルで代用した揚力係数の関係
（幅 B=80mm×高さ D=60mm×模型長 1000mm）

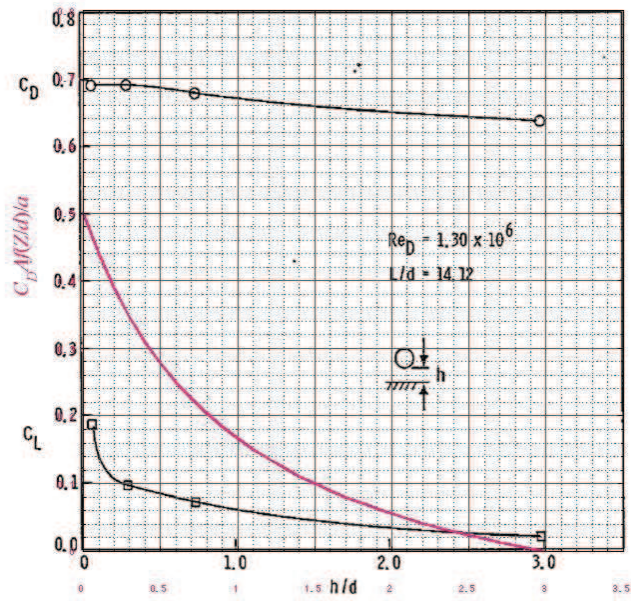


図 25 円柱の風洞試験による揚力係数と本モデルで代用した揚力係数の関係

(c) 板状物体（平板）の揚力の高さ依存性

平板の揚力係数は、平面的な形状を有する翼（迎角 0° ）の試験結果⁽²¹⁾に基づき考察すると、本モデルで代用した揚力係数（図 26 の赤線）は実際の翼に働く地面効果による揚力係数よりもおおむね大きな値となっている。また、この翼は奥行方向が長い形状で流れに直交するような配置となっており、実際の平板に比べて揚力が作用しやすいことを考慮すると、実際の平板の揚力係数はさらに小さいものと考えられる。

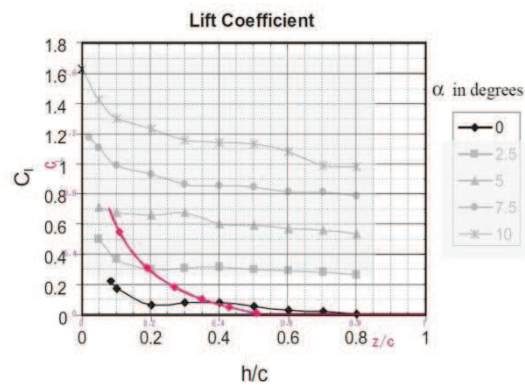


Fig. 8. Coefficient of lift at varying ground clearances for different angles of attack.

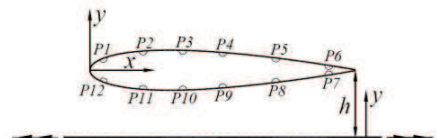


Fig. 2. Locations of pressure tappings.

図 26 翼の風洞試験による揚力係数と本モデルで代用した揚力係数の関係

e. 飛来物の運動方程式

上記 a. から d. 項を踏まえ、重力加速度 g 、上向き単位ベクトル \mathbf{k} を用いて、飛行物体の運動方程式は以下のように記述される。

$$\frac{d\mathbf{V}_M}{dt} = \frac{1}{2}\rho \frac{C_D A}{m} |\mathbf{V}_w - \mathbf{V}_M| (\mathbf{V}_w - \mathbf{V}_M) - (g - L)\mathbf{k} \quad (13)$$

飛来物の位置 $\mathbf{X}_M(t)$ と速度 $\mathbf{V}_M(t)$ の時刻歴の計算には陽解法（一定加速度法）を用いた。

具体的には、時刻 $t = \tau$ における飛来物の位置 $\mathbf{X}_M(\tau)$ と速度 $\mathbf{V}_M(\tau)$ を既知として、時刻 $t = \tau + \Delta\tau$ における飛来物の速度と位置を以下の式で求めた。ただし、 $\mathbf{A}(\tau)$ は上記運動方程式の右辺に対応する時刻 $t = \tau$ における加速度ベクトルである。

$$\mathbf{V}_M(\tau + \Delta\tau) = \mathbf{V}_M(\tau) + \mathbf{A}(\tau)\Delta\tau \quad (14)$$

$$\mathbf{X}_M(\tau + \Delta\tau) = \mathbf{X}_M(\tau) + \mathbf{V}_M(\tau)\Delta\tau + \frac{\mathbf{A}(\tau)\Delta\tau^2}{2} \quad (15)$$

$\mathbf{A}(\tau)$ の計算には、時刻 $t = \tau$ における風速場も必要であるが、初期に原点に位置する竜巻の中心が x 軸上を移動速度 V_w で移動することを仮定しており、任意の時刻での風速場を陽的に求められるため、飛来物速度・位置を算出することができる。

f. 飛来物の運動方程式（(13)式）に関する考察

地上面の物体（図 20 の状態 A）が浮上するには、地面からの反力が消滅（ $R < 0$ 、つまり $mg < F_L$ ）する条件で浮上し、浮上後は、(13) 式を成分表示した以下の飛来物の運動方程式に従って飛散する。

$$\frac{dV_{M,x}}{dt} = \frac{1}{2}\rho \frac{C_D A}{m} \sqrt{(V_{w,x} - V_{M,x})^2 + (V_{w,y} - V_{M,y})^2 + (V_{w,z} - V_{M,z})^2} (V_{w,x} - V_{M,x}) \quad (16)$$

$$\frac{dV_{M,y}}{dt} = \frac{1}{2}\rho \frac{C_D A}{m} \sqrt{(V_{w,x} - V_{M,x})^2 + (V_{w,y} - V_{M,y})^2 + (V_{w,z} - V_{M,z})^2} (V_{w,y} - V_{M,y}) \quad (17)$$

$$\frac{dV_{M,z}}{dt} = \frac{1}{2}\rho \frac{C_D A}{m} \sqrt{(V_{w,x} - V_{M,x})^2 + (V_{w,y} - V_{M,y})^2 + (V_{w,z} - V_{M,z})^2} (V_{w,z} - V_{M,z}) - g + L \quad (18)$$

ここで、飛来物速度 $\mathbf{V}_M = (V_{M,x}, V_{M,y}, V_{M,z})$ 、竜巻風速 $\mathbf{V}_w = (V_{w,x}, V_{w,y}, V_{w,z})$ であり、右辺第 1 項が流体抗力 F_D の加速度を表しており、(18) 式の右辺第 3 項が地面効果による揚力 F_L の加速度を表している。上記の式で、物体が静止している状態（上記の式(16)～(18)で飛来物速度 \mathbf{V}_M を 0）を仮定すると、以下の式となる。

$$\frac{dV_{M,x}}{dt} = \frac{1}{2} \rho \frac{C_D A}{m} \sqrt{V_{w,x}^2 + V_{w,y}^2 + V_{w,z}^2} \times V_{w,x} \quad (16')$$

$$\frac{dV_{M,y}}{dt} = \frac{1}{2} \rho \frac{C_D A}{m} \sqrt{V_{w,x}^2 + V_{w,y}^2 + V_{w,z}^2} \times V_{w,y} \quad (17')$$

$$\frac{dV_{M,z}}{dt} = \frac{1}{2} \rho \frac{C_D A}{m} \sqrt{V_{w,x}^2 + V_{w,y}^2 + V_{w,z}^2} \times V_{w,z} - g + L \quad (18')$$

フジタモデルでは、物体が地面上にある場合（図 20 の状態 A）では上昇速度はゼロに近く、地面で静止している飛来物が受ける上昇速度はほぼゼロであるため、式（18'）の右辺第 1 項は右辺第 2、第 3 項に比べてはるかに小さな量となり、以下のとおり物理的に合理的な関係式が成立する。

$$\frac{dV_{M,z}}{dt} \approx -g + L \quad (19)$$

例として、竜巻コア半径 30m、最大風速 92m/s の竜巻が原点に位置し x 方向に 14m/s で移動する場合、点 (0, -30m) における式（18'）の右辺第 1 項の値（z 方向抗力（流体抗力）による加速度）と第 3 項の値（地面効果による揚力加速度）を図 27 に示す。

図 27 より、地面上（z=0）においては、z 方向抗力による加速度は十分小さく、地面効果による揚力加速度の影響が大きいことが分かる。

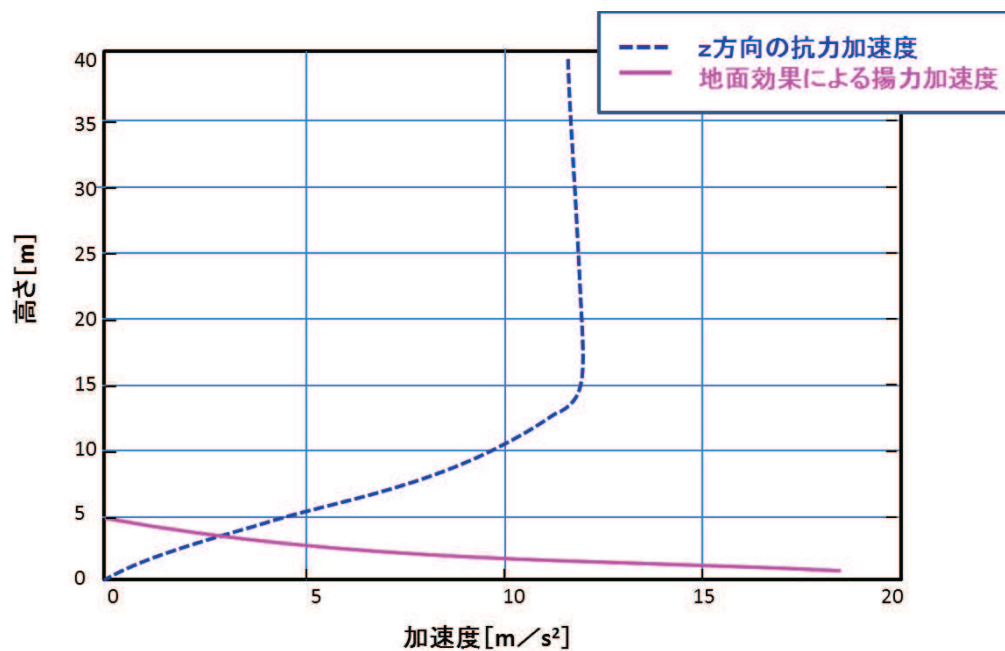


図 27 地面近傍の飛来物に作用する z 方向の加速度
(飛来物の特性： $0.5 \rho C_D A / m = 0.004 [\text{m}^{-1}]$, $d = 1.31 [\text{m}]$)

なお、高さ方向の依存性が考慮されていないランキン渦の場合は、上昇風速が水平風速の約 60%にも達するため、地面から非現実的な風の噴出が発生する。地面効果は地面の存在によって水平な風が物体付近で湾曲・剥離することによって生じるものであるが、ランキン渦の風速場では地面の有無によって物体周りの流況が大きく変化せず、地面効果は物理的に発現しにくいいため、ランキン渦モデルを用いた解析においては鉛直方向による揚力 L を付加していない（図 28）。

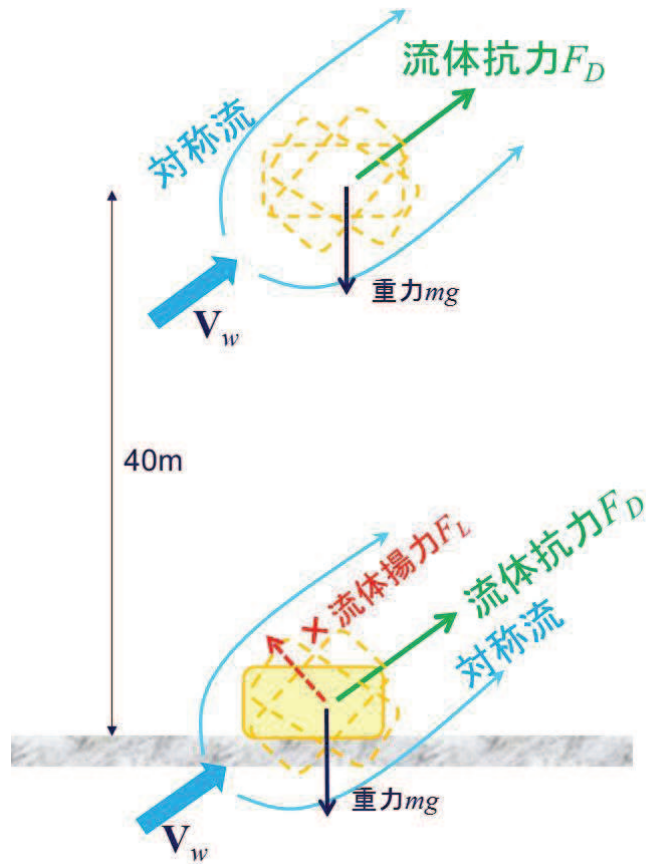


図 28 ランキン渦の場合の飛来物の運動モデルの模式図

5.3 竜巻が物体に与える速度に関する不確定性の考慮

竜巻によって飛散する物体の飛来速度や飛散距離は、同じ竜巻内であっても物体の受ける風速（物体がある位置の竜巻風速）によって大きく変動する。その影響度合いを確認するため、米国 NRC ガイド⁽²⁾に記載されている方法（物体の 1 点配置）と、物体を多点多配置した場合の飛来速度の違いを比較した。配置の違いについて、図 29 に示す。

1 点配置の場合は、特定位置（竜巻進行方向の竜巻半径の位置 $(x, y) = (R_m, 0)$ ）に物体 1 個を設置する。また多点多配置の場合は、竜巻半径の 4 倍の正方形の領域に 51×51 個の物体を配置する。その上で飛散させた物体のうち、最も速度が大きくなったものをその物体の飛来速度とする。

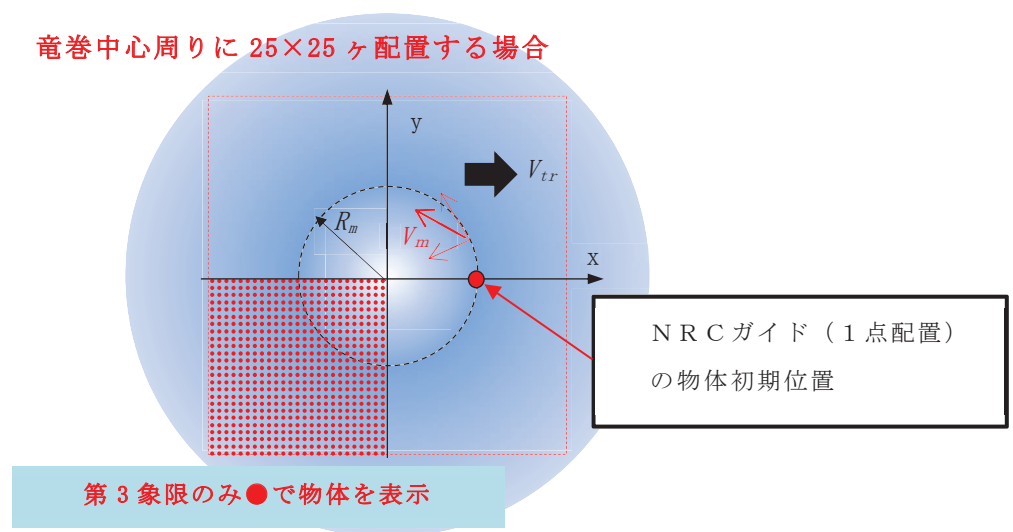
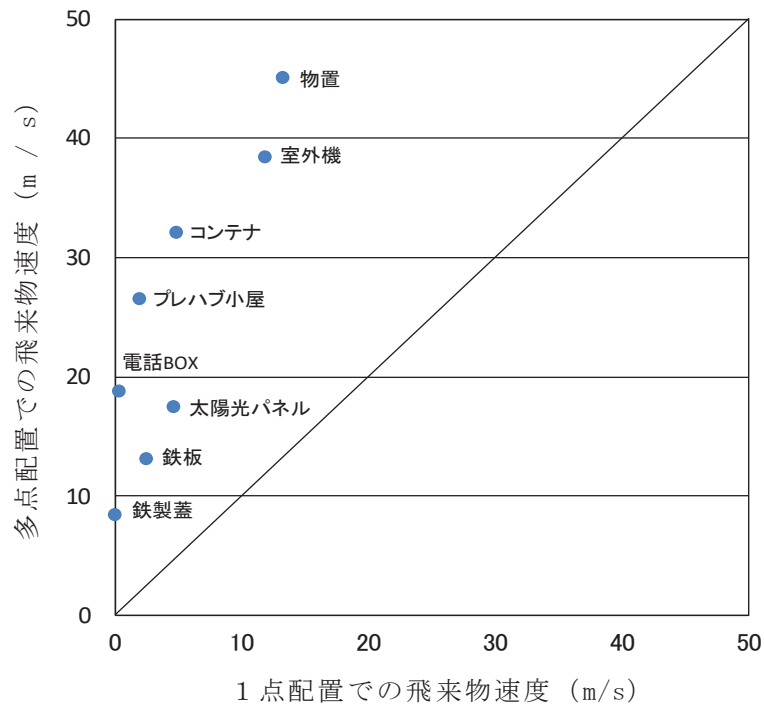


図 29 飛来物評価における竜巻と物体の位置関係

評価条件は、一例として竜巻の最大風速を 69m/s に設定し、フジタモデルの風速場を用いて地上から飛散させるものとする。また、ガイドの記載より竜巻の移動速度 V_{tr} を 10m/s 、竜巻コア半径 R_m を 30m とする。飛散させる物体のパラメータとして、原子力安全基盤機構の調査研究報告書⁽⁴⁾に掲載されている物体の飛行定数（5.2 節の $C_D A$ を質量で割った値 $C_D A/m(\text{m}^2/\text{kg})$ ）を用いた。図 30 に比較結果を示す。

米国 NRC ガイド⁽²⁾で用いられている 1 点配置の手法と比較し、多点多配置の手法では、飛行定数の大きい物体の多くが 1 点配置に比べて大きな飛来速度となった。多点多配置することで、その竜巻風速場における最大風速（最大接線風速と半径方向風速のベクトル和が竜巻移動方向と重なる点）を受ける物体が出てくるため、このような結果となったと考えられる。

したがって、物体を多点多配置することは、竜巻から受ける風速に関する不確定性を考慮できるものと考えられるため、本検討における方法として適用することとする。



物体名称	長さ	幅	高さ	質量	$C_D A/m$
	(m)	(m)	(m)	(kg)	(m^2/kg)
物置	1.80	0.90	1.50	120	0.0315
室外機	0.80	0.25	0.30	10	0.0343
コンテナ	2.40	2.60	6.00	2300	0.0105
プレハブ小屋	5.00	5.00	3.00	4400	0.0083
電話BOX	0.30	0.30	0.40	13	0.0169
太陽光パネル	1.20	1.00	0.05	14.5	0.0582
鉄板	2.00	0.25	0.04	7.6	0.0486
鉄製蓋	0.70	0.50	0.03	6.8	0.0364

図 30 1点配置時と多点配置時の最大飛来物速度の比較（上）と
物体のパラメータ（下）

図 29 に示す物体の多点配置（竜巻半径の 4 倍の正方形の領域に 51×51 個の物体を配置）を初期状態として適用したが、この手法は、物体の直上に竜巻を発生させており、竜巻発生地点の不確定についても考慮した設定となる。

図 31 に遠方から物体に接近する竜巻と、物体直上に発生する竜巻による飛散の比較イメージ図を示す。竜巻に遭遇する状況（海上で竜巻が発生して上陸する場合など）を考慮すると、竜巻は遠方から物体に近づくため、最大風速より低い風速に曝され、飛散することになる。しかし、物体の直上に竜巻を発生させる設定とすることで、実際の竜巻による飛散と比較して、より厳しい結果を与えることになる。

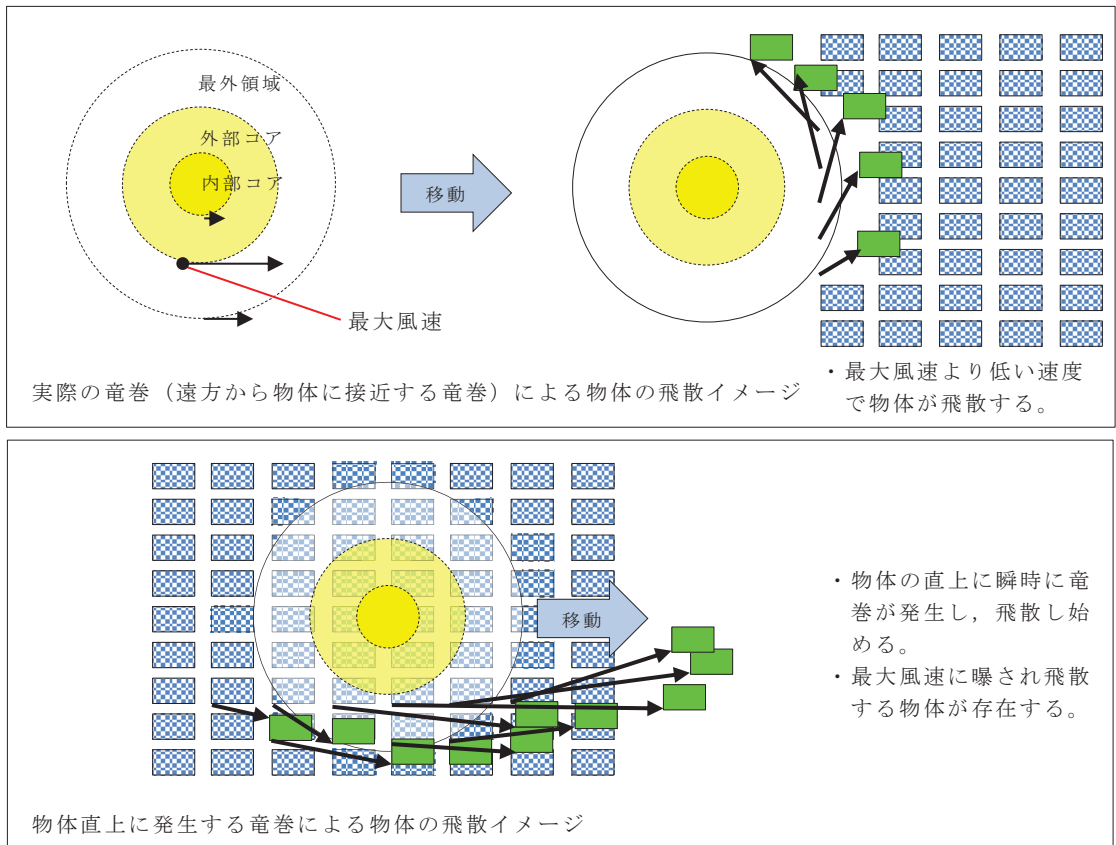


図 31 物体に接近する竜巻と物体直上に発生する竜巻の比較イメージ図

この物体を多点配置する方法と、竜巻を直上に発生させる方法を組み合わせることにより、必ずその竜巻による最大風速に曝される物体が発生するため、竜巻が物体に与える速度の不確定性を考慮することができると思う。

5.4 飛来物評価法のまとめ

当社が実施するフジタモデルの風速場を用いた飛散評価手法では、物体の初期高さを保守的に最大水平速度の算出条件で設定することで、地上付近の風速場の不確かさを考慮した。

飛来物の浮上・飛散モデルにおいて、実際の実験結果よりも浮上しやすい係数を設定することで、浮上に関する不確定性を考慮できるような設定とした。

また、物体を多点配置し、その物体直上での竜巻が発生するという設定を組み合わせることにより、竜巻風速場内の物体が受ける風速の不確定性を考慮し、その竜巻において最大となる飛来速度が評価できるような設定とした。

以上により、フジタモデルを用いて飛来物の飛散速度評価を行う場合でも、竜巻による物体飛散の不確定性を考慮した評価結果が得られるものと考えられる。

なお、参考として図 32 に本検討の条件設定による、物体の飛散イメージを示す。同じ物体でも、受ける風速によって大きく飛散状況が変わる様子が分かる。

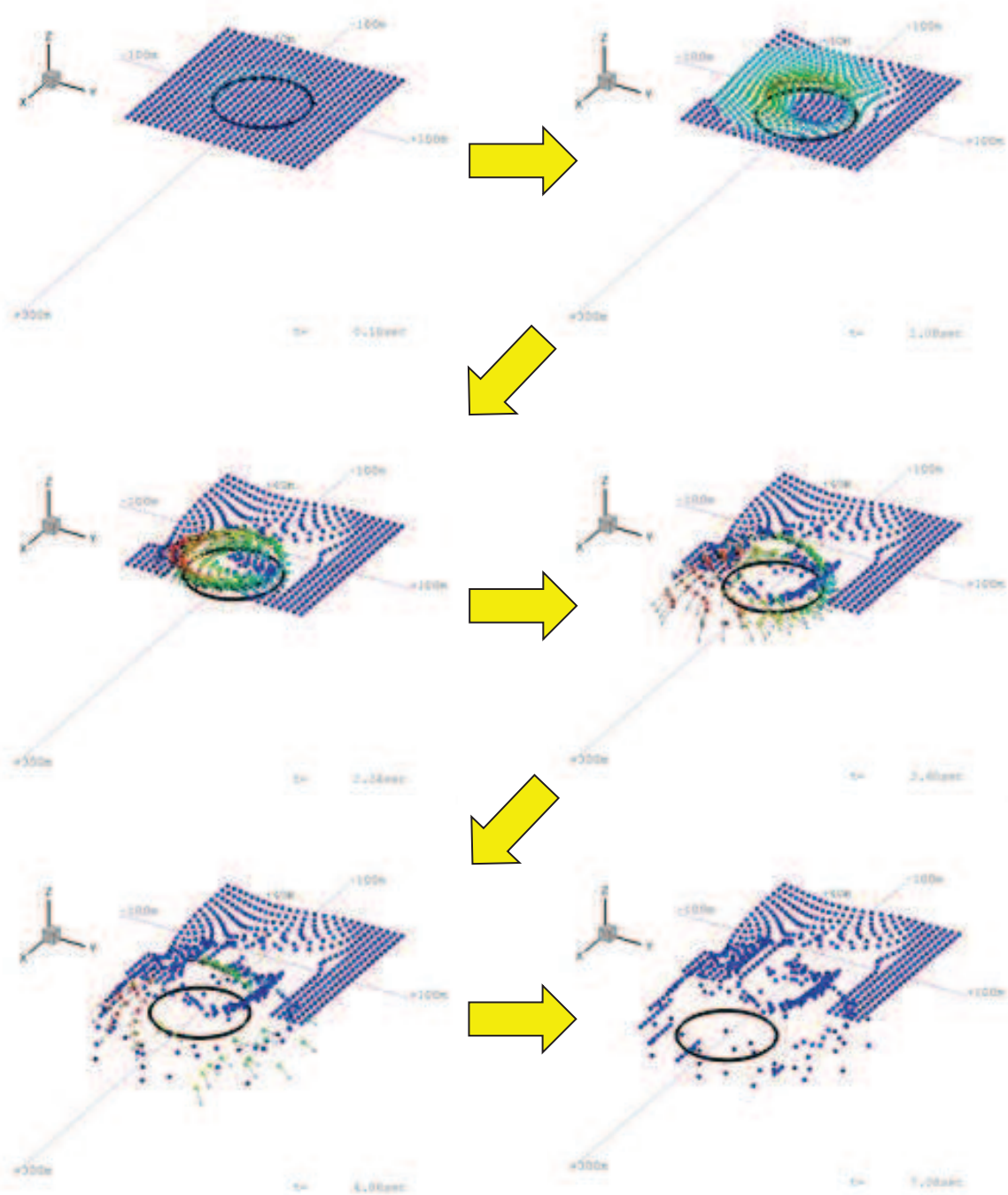


図 32 竜巻による物体の飛散イメージ

6. 実際の飛散状況に対する検証

前節までで、フジタモデルの風速場を用いる優位性や、飛来物評価を行う上で考慮している事項等について説明した。

本節では、フジタモデルの風速場や、前節の飛来物評価法を適用した場合、実際の事例等に比べて妥当な結果となるかどうかの検証を行った。

6.1 フジタモデルを用いた飛散解析結果とフジタスケールとの比較

フジタスケールは、竜巻等の突風により発生した建築物や車両等の被害状況から、当時の竜巻風速を推定するために考案された指標である。このフジタスケールで示されている自動車の被災状況を表5に示す。

ここで、各スケールに対応する最大風速（69m/s, 92m/s, 116m/s）を用いて、フジタモデルによる自動車飛散解析を行った。その結果を表6に示す。

フジタモデルによる自動車飛散解析の結果は、各スケールに対応する自動車の被災状況とおおむね合致していると考えられる。なお、ランキン渦モデルを用いた場合は、F2相当の風速（69m/s）で評価しても大きく飛散することになり、フジタスケールの定義の観点からは過度に保守的な結果となる。

表5 フジタスケールで示されている自動車の被災状況⁽²⁸⁾

フジタスケール	風速 [m/s]	自動車の被災状況
F2	50-69	cars blown off highway (自動車が道路からそれる)
F3	70-92	cars lifted off the ground (自動車が地面から浮上する)
F4	93-116	cars thrown some distances or rolled considerable distances (自動車がある距離を飛ばされる, 又は, かなりの距離を転がる)

表6 フジタモデルによる自動車の飛散解析結果

フジタスケールとの対応	最大水平風速 [m/s]	竜巻接線速度 [m/s]	竜巻飛散速度 [m/s]	計算結果		
				速度 [m/s]	距離 [m]	高さ [m]
F2	69	59	10	1	1.4	0
F3	92	79	13	23	34	1.1
F4	116	99	17	42	59	3.1

6.2 米国 Grand Gulf 原子力発電所への竜巻来襲事例

1978年4月17日に米国のミシシッピ州にて建設中の Grand Gulf 原子力発電所に F3 の竜巻が来襲した⁽²⁴⁾。主な被害として、建設中の冷却塔内部に設置されていたコンクリート流し込み用のクレーンが倒壊し、冷却塔の一部が破損したことが挙げら

れる。

また、竜巻によりトレーラーが台から剥がれ移動したことや、直径 8 から 10 インチの木が折れた事例等も確認されており、図 33 は、竜巻による飛来物の飛散状況が定量的に分かる事例として、資材置き場のパイプの飛散状況を示したものである。なお、通過時の竜巻規模は F2 であったと考えられている。このパイプはコンクリート・石綿製で、長さは 8 フィート、直径（内径）は 8 インチであった。このパイプの飛散状況に対して、フジタモデルあるいはランキン渦モデルを風速場として用いた飛来解析を行った⁽²⁹⁾。その計算条件は過去の記録に基づき表 7 のとおりとした。



“Courtesy of Hathi Trust” <http://babel.hathitrust.org/cgi/pt?id=mdp.39015037472209#view=lup;seq=65>⁽¹⁹⁾

図 33 Grand Gulf 原子力発電所資材置き場におけるパイプの散乱状況

被害状況	<ul style="list-style-type: none"> パイプを収納した木箱（一部は二段重ね）は浮上せず転倒し、パイプが周辺 7m から 9m に散乱。 <p>(Pieces of pipe were scattered over the area, but none traveled more than 25–30ft. The pipe joints are 8 in. dia x 8ft long.⁽²⁰⁾)</p>
------	--

表 7 Grand Gulf 原子力発電所の竜巻によるパイプ飛散の再現をする上での計算条件

竜巻条件	設計竜巻風速	67m/s
	最大接線風速	53.6m/s
	移動速度	13.4m/s
	コア半径	45.7m
飛来物条件	直径（外径）	9inch(0.2286m)
	物体高さ	0.229m
	密度	1700kg/m ³
	飛行定数 $C_D A/m$	0.0080m ² /kg
初期配置	<ul style="list-style-type: none"> 物体個数 51 × 51 個、竜巻半径の 4 倍を一辺とする正方形内 ($x, y = [-2Rm, +2Rm]$) に等間隔配置。 設置高さ 1m (パイプが収納されていた木箱が 2 段重ねで配置されていた状況を想定。) 	

計算結果を表 8 に示す。フジタモデルを風速場とした場合は、パイプがほとんど飛散せず、木箱が倒れた影響で散らばったと思われる状況とおおむね合致している。

なお、参考としてランキン渦モデルで評価した場合、飛散距離や最大水平速度に大きな違いがあり、実際の報告と比較して過度に保守的な評価結果となる。

表8 Grand Gulf原子力発電所のパイプの飛散計算結果

風速場モデル	初期物体高さ	計算結果 (TONBOS)		
		飛散距離	飛散高さ* ²	最大水平速度
フジタモデル	1m	1.2m	0.0m	4.9m/s
ランキン渦モデル	1m* ¹	42.6m	0.34m	30.7m/s
ランキン渦モデル	40m	227m	0.34m	40.9m/s

注記*1:ランキン渦モデルでは地上付近の風速場を模擬できていないが、フジタモデルの計算結果（飛散距離）と比較をするため、フジタモデルと同条件とした。

*2:初期物体高さからの飛散高さ。

6.3 佐呂間竜巻での車両飛散事例

2006年11月7日に北海道網走支庁佐呂間町に発生した竜巻（以下、佐呂間竜巻と言う。）により、4tトラックが約40m移動したことが報告されている⁽²⁵⁾。被災状況を図34に示す。この事例では被災時に4tトラックに乗員2名が乗車しており、4tトラックの初期位置と移動位置が分かっている（図34左上画像の②）。また、4tトラックのほかにも2台の自動車（図34左上画像の③と⑥）について、初期位置と被災後の移動位置が分かっている。このように竜巻被災前後で車両等の位置が明確になっている事例は極めてまれである。なお、竜巻飛来物の再現計算は、竜巻が頻発する米国でもほとんど実施されていない。この理由としては、来襲した実際の竜巻特性を精度よく計測・推測することが困難であることや自動車等の移動前後の位置が不明確な場合が多いことが挙げられる。



図34 佐呂間竜巻(2006.11.7)による被災状況(工事事務所敷地内の車両被災)⁽²⁵⁾

文献(24)で示されている竜巻被害の方向を で加筆

ここでは、フジタモデルを風速場として用いた車両(4tトラック、乗用車)飛散評価を行い、実際の被害状況と比べて妥当な結果となるかどうかの確認を行った。方法としては、下記のとおりとした。

- a. 竜巻特性や飛来物(4tトラック、乗用車)の状況を現実的に設定した場合の再現解析
- b. 原子力発電所に適用する飛来物評価法による検証

a. 竜巻特性や飛来物の状況を現実的に設定した場合の再現解析

(a) 4tトラックの飛散解析

再現解析の条件として、入手可能なデータ⁽²⁵⁾⁽²⁶⁾に基づき、合理的と考えられる竜巻特性条件と飛来物（4tトラック）の条件を表9のように設定した。初期配置の条件として、配置個数は1個とし、竜巻が遠方から近づく状況設定としている。また、風速60m/s以下では浮上しない設定となっている。その上で、竜巻との距離を合理的な範囲で変化させ、佐呂間竜巻の再現性を確認した。

車両と竜巻中心との距離を18m, 20m, 22mとした場合の解析結果を表10及び図35に示す。車両の軌跡は竜巻中心との相対位置関係に敏感であるが、各ケースとも飛散方向が実際の移動方向とおおむね合致しており、特に車両と竜巻中心との距離を20mとしたケース2では飛散距離もほぼ正確に再現されている。このように、フジタモデルを風速場とした飛散解析で、飛来物が地上に設置された状況からの飛散挙動が再現できることが確認できた。

表9 佐呂間竜巻の4tトラックの計算条件

竜巻条件	設計竜巻風速		92m/s
	最大接線風速		70m/s
	移動速度		22m/s
	コア半径		20m
飛来物条件	車種不明のため、三菱ふそうPA-FK71Dの仕様を採用。	車両長さ	8.1m
		車両幅	2.24m
		車両高さ	2.5m
		車両重量	4000kg
	飛行定数 C_{DA}/m		$0.0056m^2/kg$
初期配置	<ul style="list-style-type: none"> ・物体個数1個。 ・竜巻は遠方から物体に近づくが、風速60m/s以下では浮上しない。 ・フジタモデル：設置高さ0m ・ランキン渦モデル：初期高さ40m 		

表10 佐呂間竜巻での4tトラックの飛散計算結果

解析ケース	車両と竜巻中心との距離	計算結果(フジタモデル)			
		飛散距離	飛散高さ	最大水平速度	
フジタモデル	1	22m	45.4m	2.8m	25.8m/s
	2	20m	35.5m	2.3m	22.2m/s
	3	18m	25.9m	1.7m	18.8m/s
ランキン渦モデル	2	20m	70.5m	40.0m	22.1m/s

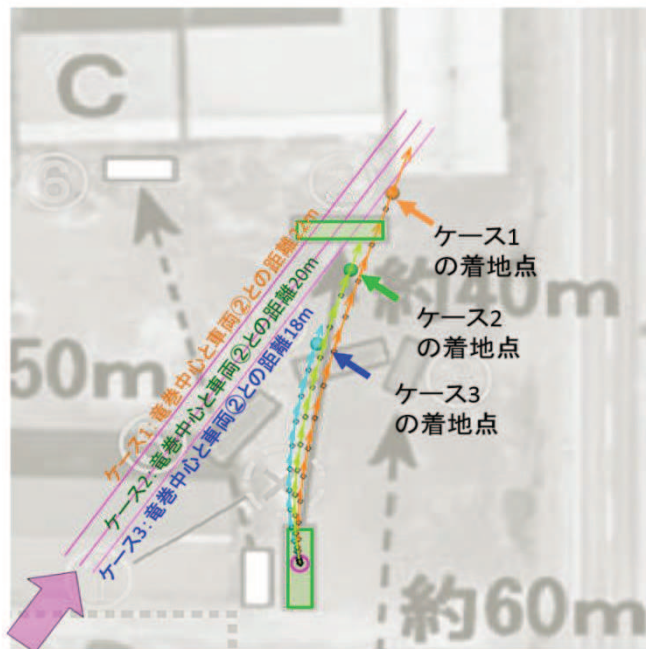


図35 フジタモデルによるトラック飛散の再現解析結果

(b) 乗用車の飛散解析

白い乗用車（図34の⑥）の被災事例を対象として，物体を1点初期配置した条件で最大水平速度等を計算した。

乗用車の計算条件について，表11に示す。

表11 佐呂間竜巻の白い乗用車の計算条件

竜巻条件	表9と同様		
飛来物条件	白い乗用車 〔トヨタカローラを仮定〕	車両長さ	4.40m
		車両幅	1.70m
		車両高さ	1.50m
	飛行定数 $C_D A / m$	0.0097m ² /kg	
初期配置	<ul style="list-style-type: none"> 物体個数1個 竜巻は遠方から物体に近づくが，風速60m/s以下では浮上しない フジタモデル：設置高さ0m ランキン渦モデル：初期高さ40m 		

乗用車と竜巻中心との距離を、18m、20m、22mとした場合の解析結果を表12及び図36に示す。飛散距離についてはケース1でおおむね合致している。

飛散方向については、飛び出し方向はおおむね合致しているものの、最終的な着地点には多少のずれが生じている。これは乗用車（白）が建物（A棟）に近接して駐車していたため、この建物の倒壊の影響を受けて飛散方向のずれが生じたものと推定される。

なお、赤い乗用車（図34の③）について評価した場合は、竜巻中心との距離が大きいため飛散しない解析結果となった。ただし、実際には、赤い乗用車は全壊・飛散したプレハブ建物（軽量鉄骨造2階建て、図34のA）の直ぐ下流側に駐車しており、その瓦礫の影響を受けて一緒に移動したものと考えられる。

車両と竜巻中心との距離を18m、20m、22mとした場合の解析結果を表12及び図36に示す。各ケースとも飛散方向が実際の移動方向とおおむね合致しており、特に、車両と竜巻中心との距離を22mとしたケース1では、飛散距離もほぼ正確に再現されている。

このように、フジタモデルを風速場とした飛散解析で、飛来物が地上に設置された状況からの飛散挙動が再現できることが確認できた。

表12 佐呂間竜巻での白い乗用車の飛散計算結果

解析ケース	乗用車と竜巻中心との距離	計算結果(フジタモデル)			
		飛散距離	飛散高さ	最大水平速度	
フジタモデル	1	22m	51.9m	3.6m	28.9m/s
	2	20m	43.5m	3.4m	24.7m/s
	3	18m	34.7m	2.9m	21.1m/s
ランキン渦モデル	1	22m	105.8m	40.0m	27.7m/s

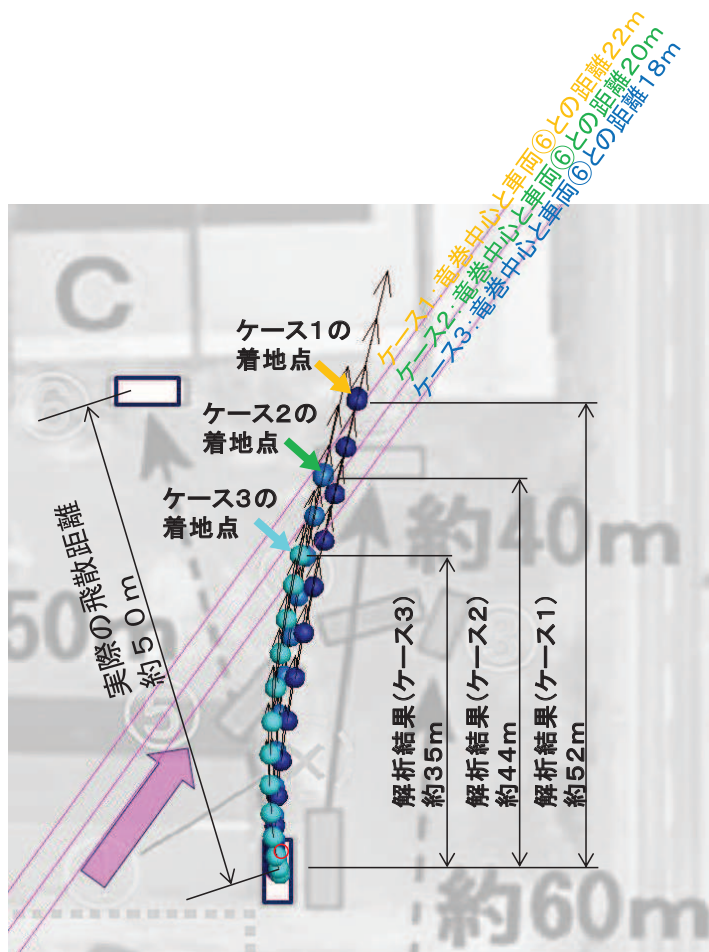


図36 フジタモデルによる白い乗用車飛散の再現解析結果

(c) 多点配置等を考慮した場合の竜巻評価の影響

前述の佐呂間竜巻の再現解析に対して、物体を多点配置した場合の影響について確認する。竜巻条件と飛来物条件を表13のとおり設定した。

表13 多点配置時の計算条件

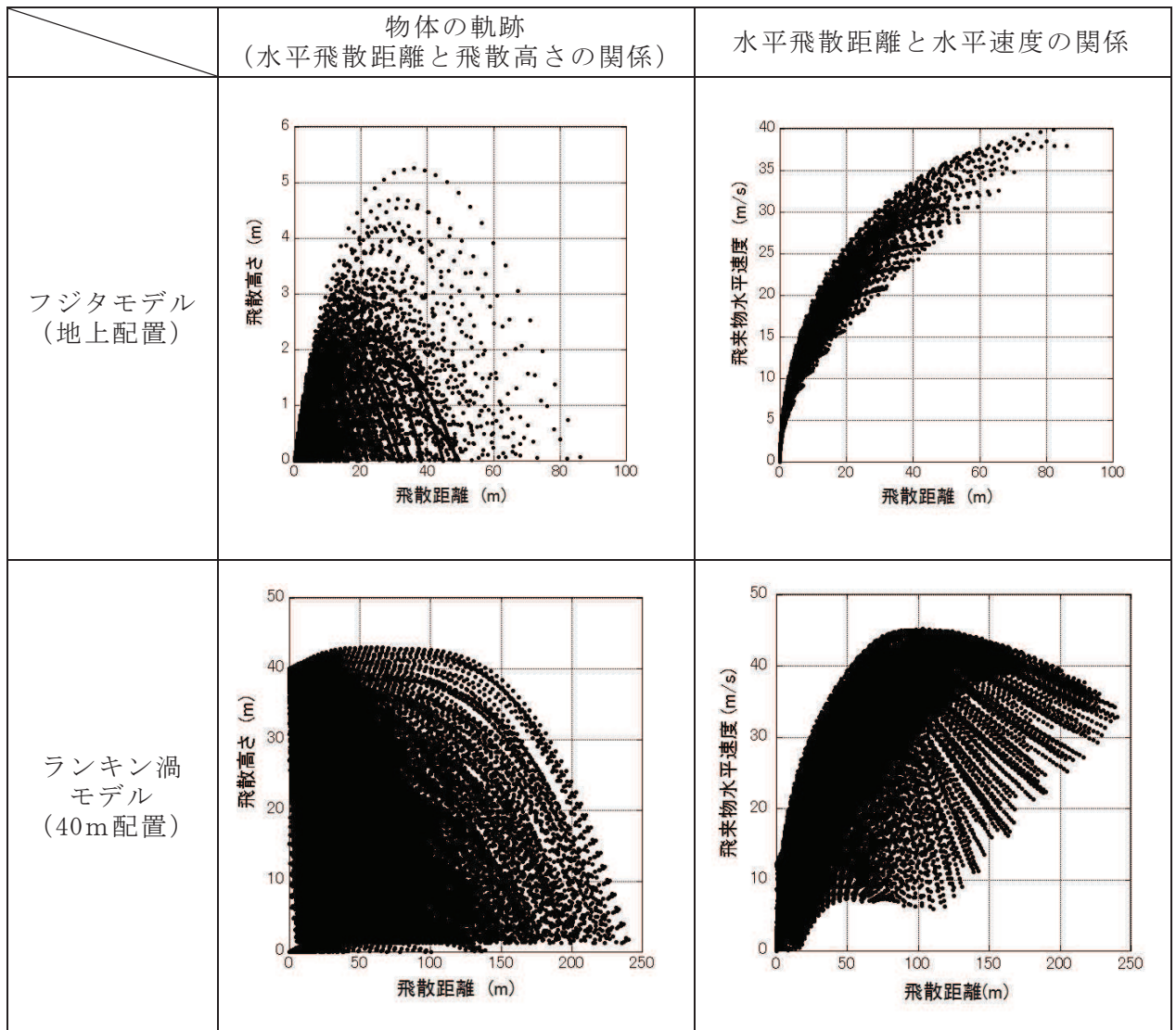
竜巻条件	表 9 と同様	
飛来物条件	4tトラック	表 10 と同様
	乗用車	表 11 と同様
初期配置	<ul style="list-style-type: none"> 物体個数 51×51 個，竜巻半径の 4 倍を一辺とする正方形内に等間隔配置 フジタモデル：初期高さ 0m ランキン渦モデル：初期高さ 40m 	

飛散解析結果として、0.1秒毎の物体の軌跡（水平飛散距離と飛散高さの関係）及び水平飛散距離と物体の水平速度の関係を表14及び表15に示す。フジタモデル及びラ

ンキン渦モデルを用いた解析結果は1点配置に比べていずれも保守的な評価となっており、特にランキン渦モデルは被災状況に対して過度に保守性があることが分かる。

表 14 多点配置を考慮した解析結果 (4tトラック)

(表 14-1 : 物体の飛跡と水平速度の関係)

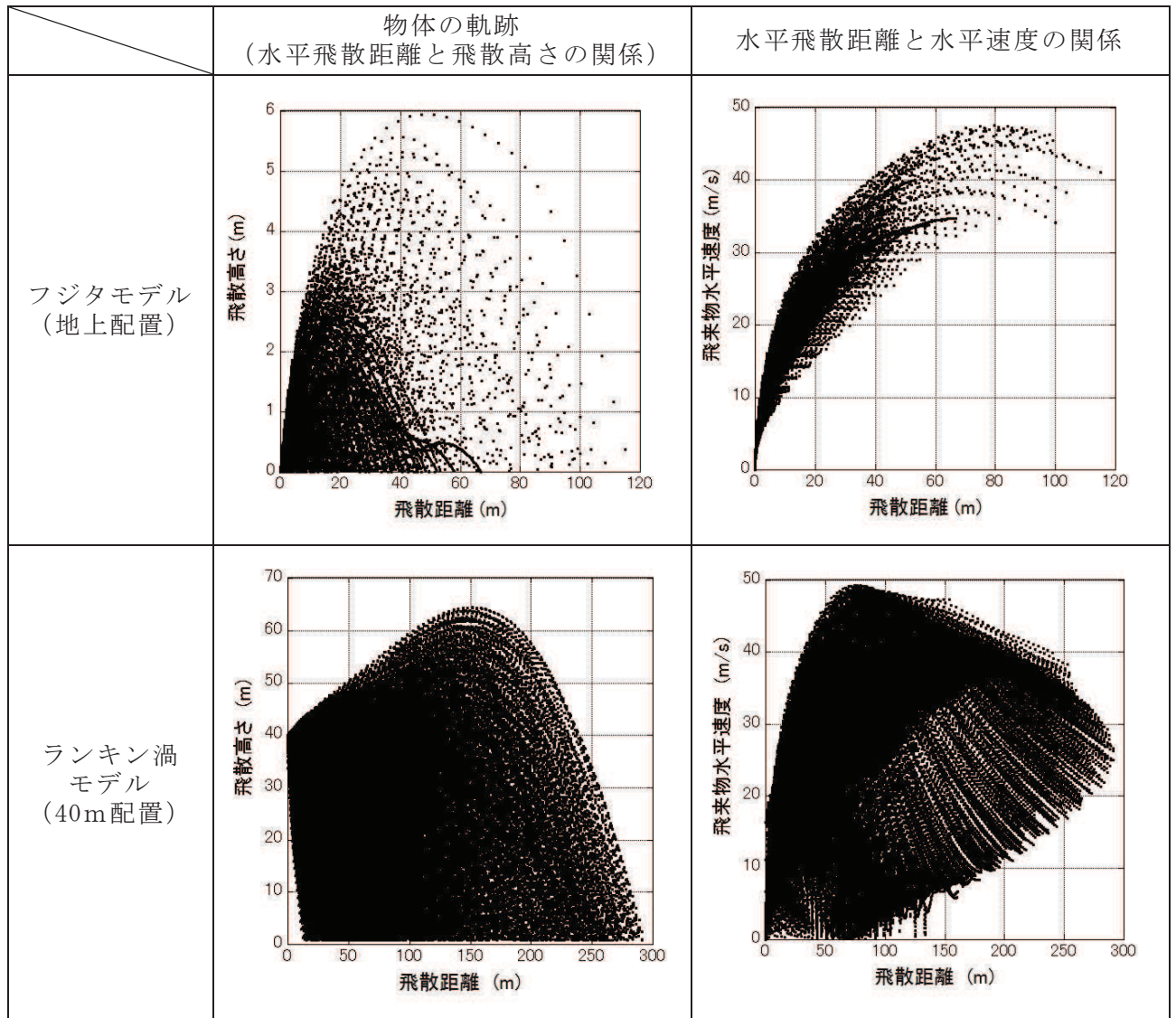


(表 14-2 : 飛跡及び水平速度の最大値)

	最大飛散距離	最大飛散高さ	最大水平速度
フジタモデル	86.5m	5.3m	39.9m/s
ランキン渦モデル	240.5m	3.1m (初期高さ 40m から)	45.2m/s

表 15 多点配置を考慮した計算結果（乗用車）

（表 15-1：物体の飛跡と水平速度の関係）



（表 15-2：飛跡及び水平速度の最大値）

	最大飛散距離	最大飛散高さ	最大水平速度
フジタモデル	116.9m	6.0m	47.6m/s
ランキン渦モデル	293.0m	24.4m (初期高さ 40m から)	49.3m/s

b. 原子力発電所に適用する飛来物評価法による検証⁽²⁷⁾

ここでは、原子力発電所に適用する飛来物評価法の竜巻条件・物体初期配置条件で前述の佐呂間竜巻における4tトラック及び白い乗用車の被災事例を評価し、佐呂間竜巻での実際の被災状況（移動距離等）との結果を比較する。

(a) 4tトラックの飛散解析

計算条件について表16に示す。竜巻条件としては、最大風速を92m/sとし、その他の特性量については、ガイドに例示されている方法に従い、移動速度 V_{tr} を14m/s（最大風速の15%）、竜巻コア半径 R_m を30mとした。

表16 原子力発電所に適用する飛来物評価法の計算条件

竜巻条件	設計竜巻風速	92m/s
	最大接線風速	78m/s
	移動速度	14m/s
	コア半径	30m
飛来物条件	表9と同様	
初期配置	<ul style="list-style-type: none"> ・物体個数51×51個，竜巻半径の4倍を一辺とする正方形内($x, y = [-2R_m, +2R_m]$)に等間隔配置。 ・設置高さ0m 	

表17に実際の被災状況と、原子力発電所に適用する飛来物評価法の結果の比較を示す。また、図37に被災後の4tトラックの状況を示す。

フジタモデルによる飛散評価結果として、4tトラックの最大飛来物速度は36m/s、最大飛散高さは3.6m、最大飛散距離は63.4mとなった。

実際の4tトラック飛散距離は約40mであり、フジタモデルによる飛散距離の評価結果はこれを上回った。また、飛散高さや最大水平速度については、直接の比較は出来ないものの、4tトラックの乗員2名が存命であったこと、被災後の4tトラックがほぼ元の外形を留めていること等から、原子力発電所に適用する飛来物評価法で飛散解析をした場合でも、実際の被災状況と比較して妥当な結果となるものと考えられる。

なお、参考として同様の検証をランキン渦モデルでも実施した。ランキン渦モデルによる評価では、最大飛散高さ、最大飛散距離ともに実際の被災状況と比較して非常に保守性が大きい結果となっていることが分かる。

表17 実際の被災状況と「原子力発電所の飛来物評価法」の結果の比較

風速場モデル	飛散距離	飛散高さ*2	最大水平速度
フジタモデル (地上)	63.4m	3.6m	36.0m/s (毎時130km)
ランキン渦モデル (地上*1)	193.7m	11.7m	43.9m/s
ランキン渦モデル (40m)	254.9m	11.7m	43.9m/s
実際の被災状況	約40m	4tトラックの運転席に 乗車していた乗員2名が 幸いにも存命で救出さ れ、搬送先の病院で聞 き取り調査に応じてお り ⁽²⁵⁾ 、被災した4tトラ ックが地面からは3.6m 以上の高所から落下し たとは考えにくい。	被災後もほぼ元の外形 を留めていることが示 されており ⁽²⁵⁾ 、実際の 飛来物速度は本解析で 得られた最大飛来物速 度(約130km/h)を遙かに 下回るものと推察でき る。

注記 *1:ランキン渦モデルでは地上付近の風速場を模擬できていないが、フジタモデルの計算結果（飛散距離）と比較をするため、フジタモデルと同条件とした。

*2:初期物体高さからの飛散高さ。



図37 竜巻による被災後の4tトラックの様子⁽²⁶⁾⁽³⁰⁾

(b) 白い乗用車の飛散解析

4tトラックの場合と同様に、原子力発電所に適用する飛来物評価条件で白い乗用車の飛散解析を行った場合の結果を表18に示す。

白い乗用車の場合も、フジタモデルによる評価が実際の被災状況を包含する結果となっている。

表18 「原子力発電所の飛来物評価法」の評価結果の比較（白い乗用車の場合）

風速場モデル	飛散距離	飛散高さ* ²	最大水平速度
フジタモデル (地上)	82.3m	4.2m	44.1m/s
ランキン渦モデル (地上* ¹)	269.6m	39.4m	49.6m/s
ランキン渦モデル (40m)	305.8m	39.4m	49.6m/s
実際の被災状況	約50m	—	—

注記 *1:ランキン渦モデルでは地上付近の風速場を模擬できていないが、フジタモデルの計算結果（飛散距離）と比較をするため、フジタモデルと同条件とした。
*2:初期物体高さからの飛散高さ。

7. 飛散以外の挙動に対する考慮

前節までで、飛来物の竜巻による挙動のうち、飛散に関する評価手法について説明をした。実際の竜巻による飛来物の挙動としては、飛散だけではなく、横滑りや転がりによる挙動が発生することも考えられるため、本節では、これらの飛来物の挙動について、下記の2点に分けて考察する。

- (a) 飛散する物体における横滑りや転がりの影響
- (b) 飛散しない物体における横滑りや転がりの影響

(a) 飛散する物体における横滑りや転がりの影響

「5.3 竜巻が物体に与える速度に関する不確定性の考慮」に記載のとおり、本検討においては、竜巻を直上に発生させる方法を採用していることから、実際には横滑りや転がりを伴い移動する物体も強制的に高速域に配置され、浮上をして飛散することになる。この場合、空中では地面の摩擦力を受けないため、実際に比べて大きな水平速度が得られることになる。

また、浮上後に地面に衝突する場合は、運動エネルギーの大部分は物体や地面の変形・破損等で消費されることから、落下後の横滑りや転がりによる移動距離は実際には小さいものと考えられる。

「6.3 佐呂間竜巻での車両飛散事例」における飛散した4tトラックや乗用車は、実際には飛散だけではなく、横滑りや転がりを伴ったものと考えられるが、飛散解析より得られた飛散距離や最大水平速度は、実際の被災状況よりも保守的な評価となっていることから、飛散過程における不確実性を裕度として包含している。

(b) 飛散しない物体における横滑りや転がりの影響

飛散しない物体においても、竜巻による風荷重が静止摩擦力より大きい場合には、横滑りをする。また、横滑りをしない場合でも、風荷重によるモーメントが自重のモーメントよりも大きい場合には転がることになる。このように、竜巻により横滑りや転がる場合には、地面での摩擦力の影響を受けながら移動することから、移動距離や水平速度は十分に小さいものと考えられる。

また、物体と評価対象施設等の間に、障害物となるフェンス等がある場合には、横滑りや転がった物体が評価対象施設等に到達することは阻止される。

以上より、飛散しない物体が横滑りや転がりにより、障害物の影響を受けず、評価対象施設等と衝突することが想定される場合については、横滑りや転がった物体の影響が設計飛来物の影響に包含されることを確認し、包含されない場合には固縛等の措置を実施する。固縛等の措置に当たっては、フジタモデルの風速場より求まる風荷重に、地面での摩擦力を適切に考慮した上で、設計用荷重を設定する。

8. まとめ

フジタモデルは、米国NRCによる要望で実際の竜巻観測記録を基に考案された風速場モデルであり、米国DOEの重要施設に対する設計基準の作成の際にも用いられている。フジタモデルは、他のモデルではできなかった地上からの物体の浮上を評価することができる点が大きなメリットである。

これは、「6.3 佐呂間竜巻での車両飛散事例」の「a. 竜巻特性や飛来物の状況を現実的に設定した場合の再現解析」において、フジタモデルを風速場とした飛散解析結果が実際の飛散状況とおおむね合致していることから、確認することができる。

また、フジタモデルにより算出される風速 (V_w) は、飛来物の飛散評価のインプットとして用いるものであり、設計竜巻の最大風速の算出に当たっては「5. 飛来物評価における不確定性の考慮」のとおり、竜巻を多数の物体の直上に瞬時に発生させて物体が最大風速を受けるような初期条件を用いる等の評価手法により、不確実性も含めて飛来物速度等を保守的に評価できるようにしている。

これにより、「6.3 佐呂間竜巻での車両飛散事例」の「b. 原子力発電所に適用する飛来物評価法による検証」では、本評価手法を用いることでフジタモデルにおいても実際の飛散状況に対して、保守性を有した妥当な結果となることを確認している。

地上からの浮上・飛散評価を行うことのメリットは、発電所敷地内に数多く存在する物の中から、竜巻による飛来物化の影響度合いを、浮上の有無の観点を含めて把握できることである。竜巻飛来物の影響（浮上の有無、飛散高さ、飛散距離、最大速度等）を適切に把握し、飛来物の発生防止対策や評価対象施設の防護対策の範囲や強度について、保守性を確保することで実効性の高い竜巻防護対策を実施することが可能となると考えられる。

評価全体として一定の保守性を確保しつつ、適切な竜巻対策によりプラント全体の安全性を向上させるため、当社の竜巻影響評価については、フジタモデルを適用することとする。

9. 参考文献

- (1) 原子力規制委員会，2013： 原子力発電所の竜巻影響評価ガイドの制定について， 原規技発第13061911号，平成25年6月19日制定，平成26年9月一部改正。
- (2) U.S.Nuclear Regulatory Commission, Regulatory Guide 1.76:Design-BasisTornado and Tornado Missiles for Nuclear Power Plants, Revision 1, March2007.
- (3) Simiu,E. and Cordes,M.,Tornado-Borne Missile Speeds,NBSIR76-1050, 1976.
- (4) 東京工芸大学，平成21～22年度原子力安全基盤調査研究（平成22年度）竜巻による原子力施設への影響に関する調査研究，独立行政法人原子力安全基盤機構委託研究成果報告書，2011.
- (5) Fujita,T.T.,Workbook of tornadoes and high winds for engineering applications, U.Chicago, 1978.
- (6) 江口讓，杉本聡一郎，服部康男，平口博丸，竜巻による物体の浮上・飛来解析コードTONBOSの開発，電力中央研究所 研究報告N14002,2014.
- (7) Maruyama, T.,Simulation of flying debris using a numerically generatedtornado-like vortex. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, vol.99 (4) ,pp.249-256, 2011.
- (8) U.S. Department of Energy, Natural Phenomena Hazards Design and Evaluation Criteria for Department of Energy Facilities, DOE-STD-1020-2002,2002. (<http://pbadupws.nrc.gov/docs/ML0302/ML030220224.pdf>)
- (9) Malaeb, D.A.,Simulation of tornado-generated missiles. M.S.thesis,Texas, Tech University, 1980
- (10) P. -H. Luan,Estimates of Missile Speeds in Tornadoes, M.S. thesis,Texas, Tech University,1987.
- (11) J. R. McDonald,Rationale for Wind-Borne Missile Criteria for DOE facilities, UCRL-CR-135687, Lawrence Livermore National Laboratory, 1999. (<https://e-reports-ext.llnl.gov/pdf/236459.pdf>)
- (12) McDonald, J.R.,T, Theodore Fujita:His contribution to tornado knowledge through damage documentation and the Fujita scale. Bull. Amer. Meteor. Soc., 82, pp. 63-72, 2001
- (13) NUREG-1827 Safety Evaluation Report for the National Enrichment Facility in Lea County,New Mexico (Docket No.70-3103)

- (14) Karen A. Kosiba and Joshua Wurman, 2013: The Three-Dimensional Structure and Evolution of a Tornado Boundary Layer. *Wea. Forecasting*, 28, 1552–1561.
- (15) 日本鋼構造協会, 構造物の耐風工学, p82
- (16) EPRI, Wind field and trajectory models for tornado-propelled objects, report NP-2898, 1978.
- (17) 林建二郎・大井邦昭・前田稔・斉藤良, 開水路中に水没設置された立方体及び棧粗度の流体力, 土木学会論文集B1 (水工学) Vol. 67, No. 4, I_1141-I_1146, 2011.
- (18) 松宮央登, 中岡宏一, 西原 崇, 木村吉郎: 太陽光発電パネルに作用する空気力の地面効果に関する風洞実験, 構造工学論文集, Vol. 60A, pp. 446-454, 2014.
- (19) 山本晃一, 林建二郎, 関根正人, 藤田光一, 田村正秀, 西村晋, 浜口憲一郎, 護岸ブロックの抗力・揚力係数, 及び相当粗度の計測方法について, 水工学論文集, 第44巻, pp1053~1058, 2000.
- (20) 江口 讓, 西原 崇, 水流动試験による電線の風荷重低減化のメカニズム解明, 電力中央研究所 研究報告U96050, 1997.
- (21) M. R. Ahmed, S. D. Sharma, An investigation on the aerodynamics of a symmetrical airfoil in ground effect, *Experimental Thermal and Fluid Science*, 29, pp. 633-647, 2005.
- (22) Schmidlin, T., Hammer, B., King, P., Ono, Y., Miller, L. S. and Thumann, G., Unsafe at any (wind) speed? -Testing the stability of motor vehicles in severe winds-, Vol. 83, No. 12, pp. 1821-1830, 2002.
- (23) Lei, C., Cheng, L. and Kavanagh, K., Re-examination of the effect of a plane boundary on force and vortex shedding of a circular cylinder, *J. of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Vol. 80, pp. 263-286, 1999.
- (24) Fujita, T. T., and J. R. McDonald, Tornado damage at the Grand Gulf, Mississippi nuclear power plant site: Aerial and ground surveys, U.S. Nuclear Regulatory Commission NUREG/CR-0383, 1978.
- (25) 札幌管区気象台: 平成18年11月7日から9日に北海道 (佐呂間町他) で発生した竜巻等の突風. 災害時気象調査報告, 災害時自然現象報告書, 2006年第1号, 2006.
(<http://www.jma-net.go.jp/sapporo/tenki/yohou/saigai/saroma/saroma.htm>にて閲覧可能。)
- (26) 奥田泰雄, 喜々津仁密, 村上知徳, 2006年佐呂間町竜巻被害調査報告. 建築研究所災害調査, 46, 2006.
(<http://www.kenken.go.jp/japanese/contents/activities/other/other.html>)
- (27) 江口讓, 杉本聡一郎, 服部康男, 平口博丸, 原子力発電所での竜巻飛来物速度の合理的評価法 (Fujitaの竜巻モデルを用いた数値解析コードの妥当性確認), 日本機械学会論文集, Vol. 81, No. 823, 2015.

- (28) Fujita, T. T., 1971: Proposed characterization of tornadoes and hurricanes by area and intensity. SMRP Research Paper 91, University of Chicago, Chicago, IL, 42 pp
- (29) 日本保全学会 原子力規制関連事項検討会, 2015: 軽水型原子力発電所の竜巻影響評価における設計竜巻風速および飛来物速度の設定に関するガイドライン (JSM-NRE-009)
- (30) 土木学会 平成 18 年 11 月北海道佐呂間町竜巻緊急災害調査報告書

設計飛来物の選定について

1. はじめに

発電所構内における竜巻飛来物となり得る物品を網羅的に調査し、それらの中から代表性をもたせた設計飛来物を、図1のフローに基づき選定した。

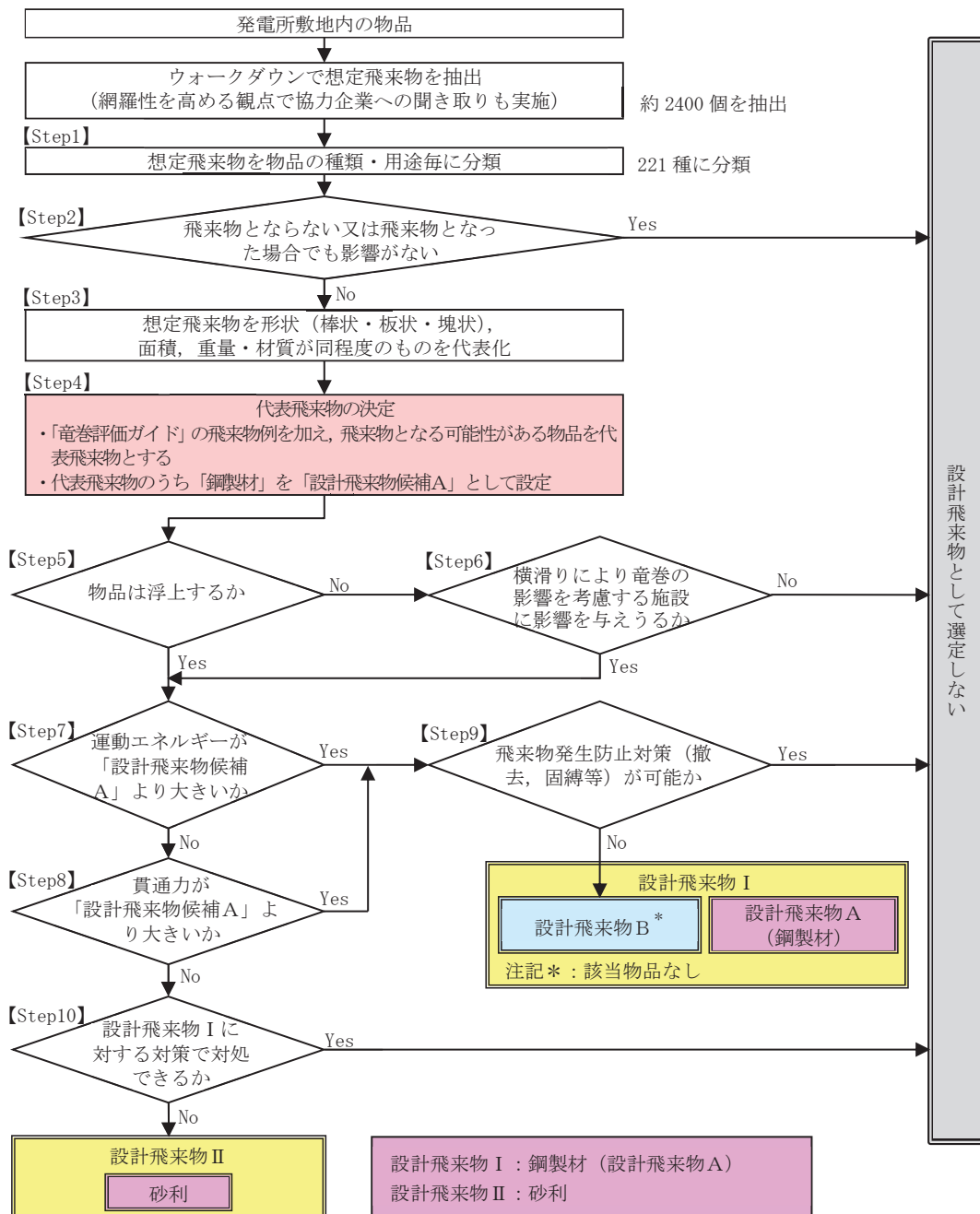


図 1 設計飛来物の選定フロー

2. 飛来物調査

女川原子力発電所における飛来物に関するウォークダウンは、平成25年9月10日～12日、平成27年2月12日～13日に実施した。調査では、常設物、仮設物のうち飛来物となりうる物品、及び二次飛来物となりうる物品（設置状況等から風圧や飛散による被害を受けて飛来物となり得る物）を抽出した（詳細は別紙1「飛来物及び固定状況に係る調査結果について」）。

また、持ち込み資機材等（夏場や冬場に屋外作業の準備のために使用する休憩所（仮設小屋）や定期検査中に使用する仮設足場材等）の仮設物について、ウォークダウンにて確認した結果の網羅性を高めることを目的に協力企業への聞き取りも実施しウォークダウンで確認した飛来物源と大きな相違がないことを確認している。飛来物調査結果を踏まえ、抽出された飛来物を種類、用途毎に分類した。

3. 固定状況等を踏まえた抽出

上記2.で抽出した結果を踏まえ、過去の被害事例等を参考に、以下の観点のいずれにも当てはまらない物品を抽出した。

- ① 飛来物化しない（風の影響を受けにくい形状（網状）、または頑健に固定されている）
- ② 分解し小型軽量となる物品
- ③ 竜巻の影響により倒壊するが、飛来物とはならない物品

4. 飛来物の形状等による分類

上記3.で抽出した物品に対して、形状（棒状、板状、塊状、その他）、サイズ（大、中、小）及び柔*1、剛*2などの特徴から同程度のものを代表化し、竜巻影響評価ガイドに示される飛来物例を追加した結果を表1に示す。また、図2～図5に調査で確認した代表位置を示す。

注記 *1：柔（木製又は中空状、複数の材からなる）

*2：剛（コンクリート又は鋼製で密実、単体からなる）

表1 代表的な飛来物の抽出結果

(代表的な飛来物)

	棒状			板状			塊状			その他		
	大	中	小	大	中	小	大	中	小	大	中	小
常設物	剛	・電柱	-	-	-	・マンホール蓋	-	-	-	-	-	-
	柔	-	-	-	-	-	-	-	・家庭用室外機	-	-	-
仮設物	剛	・形鋼	・(ガイド)鋼製材*	・大型鋼製枠	・敷き鉄板	・コンクリート板	・(ガイド)コンクリート板*	・コンクリート塊	・砂利	・循環水ポンプ	・大型鋼管	・ガスボンベ
	柔	-	-	-	-	-	-	・コンテナボックス	-	・(ガイド)トラック*	・乗用車	・バス
							・(ガイド)コンテナボックス*	・発電機		・オートレーン		
							・フオークリフト	・自動販売機		・オートレーン		

(二次飛来物)

	棒状			板状			塊状		
	大	中	小	大	中	小	大	中	小
二次飛来物	剛	・配管	-	・外壁	・扉	-	・鋼製階段	-	-
	柔	・雨どい	-	・屋根(鋼板)	・手すり	-	-	-	・照明器具
									・アンテナ

注記 * : 竜巻影響評価ガイドにおいてサイズ及び質量が記載されている物品

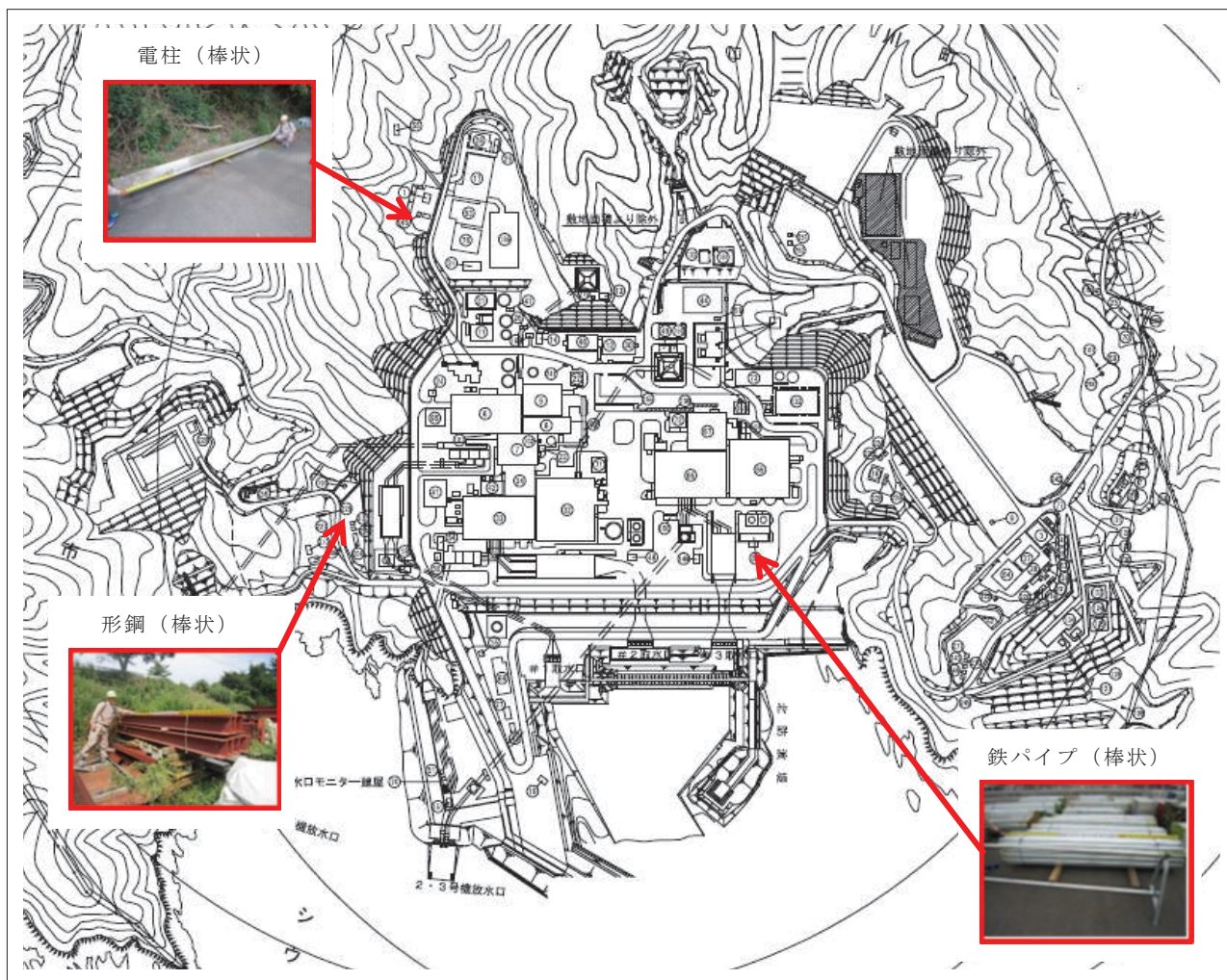


図2 代表飛来物 (棒状)

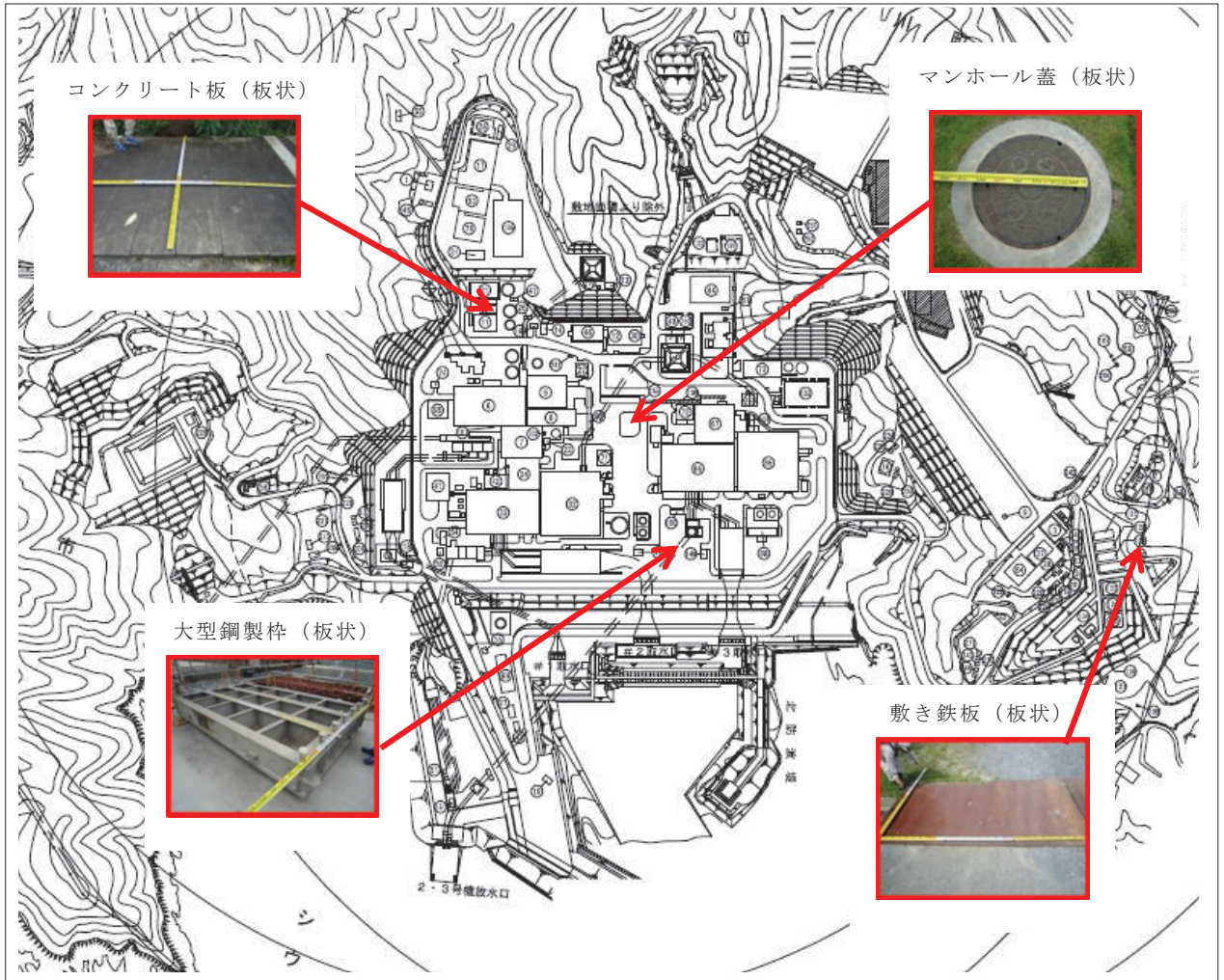


図 3 代表飛来物（板状）

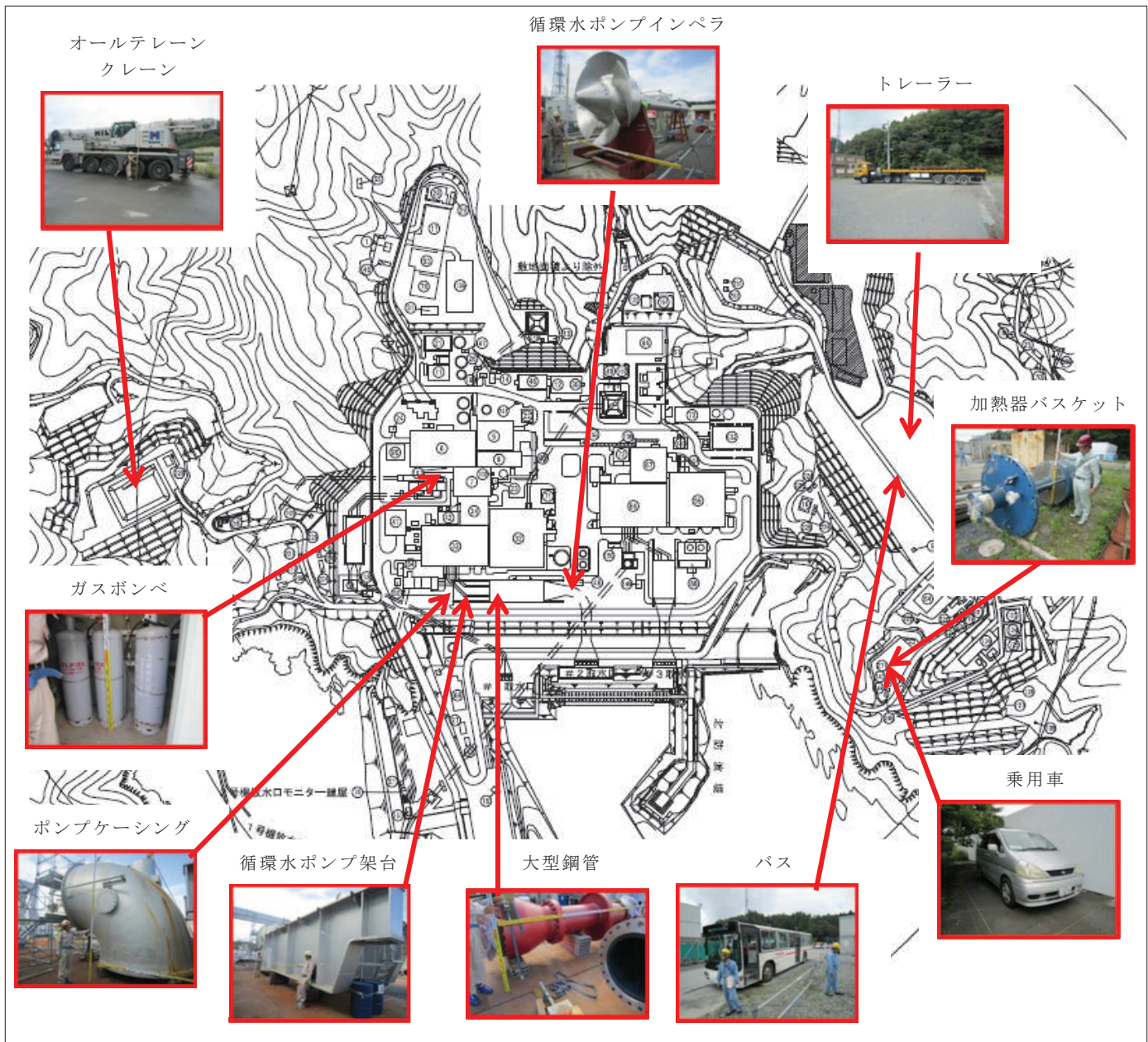


図5 代表飛来物（その他）

5. 代表的な飛来物の飛散評価

上記 4. で抽出した代表的な飛来物に対し、寸法、重量、形状により空力パラメータを算出し、フジタモデルの風速場（設計竜巻風速 100m/s）を適用した場合における飛散評価を以下の条件にて実施し、飛来物の浮上の有無について確認を行った。飛散評価結果を表 2 に示す。

(1) 流入層高さ (H_i)

- ・Fujita Workbook⁽¹⁾における工学的モデルとして、 H_i を R_m の関数として設定しており、設計竜巻の最大風速 $V_D=100\text{m/s}$ の場合、 $R_m=30\text{m}$ であり、 η が約 0.5 であることから、 $H_i=15\text{m}$ を適用する。
- ・設計飛来物に対しては、流入層高さの感度解析の結果を踏まえて、 $H_i=17.5\text{m}$ を併せて適用する。

(2) 初期高さ

- ・物体は通常地面に置かれている状態であることを考慮し、初期高さは 0m で評価した。
- ・また、設計飛来物の最大水平速度の算出条件の初期高さ（水平速度が最大となる初期高さ）の評価も併記した。

6. 飛来物発生防止対策の可否を踏まえた抽出

上記 5. で抽出した結果を踏まえ、固縛、撤去等の飛来物発生防止対策が可能かどうかを考慮し、設計飛来物を抽出した。

参考文献

- (1) Fujita, T. T., Workbook of tornadoes and high winds for engineering applications, U.Chicago, 1978.

表 2 代表的な飛来物の飛散評価結果及び飛散防止対策・固定状況等を踏まえた選定結果 (1/5)

(常設・仮設物)

分類	名称	長さ [m]	幅 [m]	高さ [m]	質量 [kg]	空力パラメータ [m ² /kg]	初期高さ [m]	最大水平速度 [m/s]	最大鉛直速度 [m/s]	運動エネルギー [kJ] (水平)	運動エネルギー [kJ] (鉛直)	最大飛距離 [m]	最大飛散高さ [m]	コンクリートの貫通限界高さ*2 [cm]		コンクリートの裏面剥離限界厚さ*2 [cm]		鉄板の貫通限界厚さ*3 [mm]		浮き上がりの有無	以下の点で飛来物とならないか*4 ・飛来物発生防止対策 (撤去、固縛等) が可能か ・他の飛来物に包絡されるか
														水平	鉛直	水平	鉛直	水平	鉛直		
柔	その他	13.43	3	4.02	40750	0.0018	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	×	
							40.0	27.2	27.1	15082	86.6	86.3	151.2	150.8	12.3	12.2					
剛	その他	4.565	4.565	3.525	20000	0.0018	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	×	
							40.0	27.6	27.1	7616	58.4	57.4	111.6	110.2	6.8	6.6					
剛	その他	8.6	3.9	2.355	29000	0.0015	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	×	
							40.0	22.9	27.3	7610	66.2	77.3	120.9	135.9	8.9	11.2					
剛	その他	9.5	3.7	3.7	20000	0.0012	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	×	
							40.0	18.7	27.4	3502	42.6	59.8	87.4	112.8	4.4	7.2					
柔	その他	5	1.9	1.3	4750	0.0026	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	×	
							40.0	34.6	26.7	2841	50.2	40.0	88.1	74.2	8.9	6.3					
剛	その他	5.4	1.4	1.4	6000	0.0019	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	×	
							40.0	29.2	27.1	2551	50.6	47.4	88.3	84.0	9.3	8.4					
剛	板状	3.7	2.3	0.4	1870.4	0.0036	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	×	
							40.0	38.4	26.4	1378	41.9	30.1	71.9	55.9	9.0	5.5					

注記 *1 : 電巻評価ガイドにおいてサイズ及び重量が記載されている物品

*2 : 修正NDR式, Degen式及びChang式を用いて算出

*3 : 原子炉施設のタービンサイルの評価に用いられているBRL式にて算出

*4 : 電巻の影響を考慮する施設に想定される損傷モードにより, 評価パラメータを設定

*5 : 設計飛来物に選定した鋼製材及び砂利については, 流入層高さの感度解析の結果を踏まえ, 流入層高さを17.5mとした場合の飛散評価結果も記載

表 2 代表的な飛来物の飛散評価結果及び飛散防止対策・固定状況等を踏まえた選定結果 (2/5)

(常設・仮設物)

分類	名称	長さ [m]	幅 [m]	高さ [m]	質量 [kg]	空力パラメータ [m ² /kg]	初期高さ [m]	最大水平速度 [m/s]	最大鉛直速度 [m/s]	運動エネルギー (水平) [kJ]	運動エネルギー (鉛直) [kJ]	最大飛距離 [m]	最大飛散高さ [m]	コンクリートの貫通限界高さ*2 [cm]		コンクリートの裏面剥離限界厚さ*2 [cm]		鉄板の貫通限界厚さ*3 [mm]		浮き上がりの有無	以下の点で飛来物とならないか*4 ・飛来物発生防止対策 (撤去、固縛等) が可能か ・他の飛来物に包絡されるか
														水平	鉛直	水平	鉛直	水平	鉛直		
剛	棒状	形鋼	9.8	0.8	0.3	2028.6	0.0023	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	×	
								40.0	32.0	27.0	1037	736.7	74.9	0.0	46.9	40.5	75.1	67.0	14.6	11.6	
剛	その他	大型鋼管	3.41	1.06	1.06	3660	0.0016	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	×	
								40.0	23.7	27.3	1024	1359	45.7	0.0	36.6	41.5	66.6	73.2	6.7	8.1	
剛	板状	コンクリート板	4	2.5	0.3	6900	0.0011	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	×	
								40.0	17.1	27.5	1007	2605	29.4	0.0	40.4	61.0	71.9	98.8	8.1	15.2	
剛	板状	敷鉄板	3.048	1.524	0.025	911	0.0035	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	×	浮上しないが、外部事象防護対象施設等との隔離をとる、又は、固縛等を実施することから設計飛来物として選定しない。
								40.0	38.1	26.4	660.1	317.5	116.6	0.0	47.3	35.9	73.7	57.7	27.0	16.6	
剛	塊状	コンクリート塊	2	1.6	1	7360	0.0007	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	×	
								40.0	9.7	27.7	346.6	2823	15.1	0.0	21.9	55.4	46.8	94.5	2.8	11.0	
剛	板状	(ガイド)コンクリート板*1	1.5	1	0.15	540	0.0022	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	×	
								40.0	31.4	27.0	265.4	196.7	71.9	0.0	26.6	23.3	45.8	41.4	7.5	6.1	
剛	棒状	電柱 (資材)	8	0.247	0.247	390	0.0025	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	×	
								40.0	33.7	26.8	220.9	140.5	84.2	0.0	29.0	24.0	47.2	40.6	11.7	8.6	

注記 *1 : 電巻評価ガイドにおいてサイズ及び重量が記載されている物品

*2 : 修正NDR式, Degen式及びChang式を用いて算出

*3 : 原子炉施設のタービンサイルの評価に用いられているBRL式にて算出

*4 : 電巻の影響を考慮する施設に想定される損傷モードにより, 評価パラメータを設定

*5 : 設計飛来物に選定した鋼製材及び砂利については, 流入層高さの感度解析の結果を踏まえ, 流入層高さを 17.5m とした場合の飛散評価結果も記載

表 2 代表的な飛来物の飛散評価結果及び飛散防止対策・固定状況等を踏まえた選定結果 (3/5)

(常設・仮設物)

分類	名称	長さ [m]	幅 [m]	高さ [m]	質量 [kg]	空力 パラメータ [m ² /kg]	初期 高さ [m]	最大 水平 速度 [m/s]	最大 鉛直 速度 [m/s]	運動 エネルギー [kJ] (水平)	運動 エネルギー [kJ] (鉛直)	最大 飛距離 [m]	最大 飛散 高さ [m]	コンクリート の貫通限界厚さ*2 [cm]		コンクリート の裏面剥離限 界厚さ*2 [cm]		鉄板の貫通限界 厚さ*3 [mm]		浮き 上が りの 有無	以下の点で飛来物とならないか*4 ・飛来物発生防止対策(撤去、 固縛等)が可能か ・他の飛来物に包絡されるか
														水平 t _{p,h}	鉛直 t _{p,v}	水平 t _{s,h}	鉛直 t _{s,v}	水平 T _h	鉛直 T _v		
剛	棒状 鉄パイプ	6	0.05	0.05	25.2	0.0057	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	×	
							10.1	43.4	13.6	23.7	2.3	88.8	0.0	14.6	6.2	25.8	11.9	29.7	6.4		
柔	その他 バス (大型)	11.99	2.49	3.75	14583	0.0039	0.0	38.8	7.7	10983	427.4	84.9	4.6	75.1	17.6	130.5	44.0	11.3	1.3		浮上しないが、外部事象防護 対象施設等との離隔をとる、 又は、固縛等を実施すること から設計飛来物として選定し ない。
							40.0	39.2	26.1	11204	4962	126.6	0.0	75.8	52.7	131.4	100.0	11.4	6.7		
柔	塊状 コンテナボ ックス	12.192	2.438	2.896	4510	0.0107	0.0	54.7	15.0	6754	506.7	197.4	19.1	60.2	19.0	105.7	44.4	9.4	1.7	○	
							0.0	44.7	8.7	6604	247.6	121.4	7.1	60.7	14.0	107.5	35.8	9.2	1.1		
柔	その他 バス (中型)	8.99	2.34	3.035	6608	0.0056	0.9	44.7	7.8	6611	200.2	113.3	4.6	60.7	12.8	107.5	33.3	9.2	0.9	○	外部事象防護対象施設等との 離隔をとる、又は、固縛等を 実施することから設計飛来物 として選定しない。
							0.0	47.0	7.3	5485	133.3	85.9	4.0	62.8	12.0	106.2	30.6	11.5	1.0		
柔	その他 トレラー	14.96	2.49	1.43	4970	0.0084	8.1	49.5	12.0	6082	359.3	123.6	1.5	65.7	18.7	109.9	42.6	12.3	1.9	○	
							0.0	44.6	8.7	5157	194.9	121.4	7.1	54.7	12.7	98.3	32.8	8.2	1.0		
柔	その他 バス (小型) (ガイド) コンテナボ ックス*1	6	2.4	2.6	2300	0.0106	0.0	54.2	14.2	3378	232.8	189.4	17.1	43.9	13.3	81.2	33.2	6.3	1.1	○	
							0.0	54.2	14.2	3378	232.8	189.4	17.1	43.9	13.3	81.2	33.2	6.3	1.1		

注記 *1: 電券評価ガイドにおいてサイズ及び重量が記載されている物品

*2: 修正NDR式, Degen式及びChang式を用いて算出

*3: 原子炉施設のタービンミサイルの評価に用いられているBR L式にて算出

*4: 原巻の影響を考慮する施設に想定される損傷モードにより、評価パラメータを設定

*5: 設計飛来物に選定した鋼製材及び砂利については、流入層高さの感度解析の結果を踏まえ、流入層高さを17.5mとした場合の飛散評価結果も記載

表 2 代表的な飛来物の飛散評価結果及び飛散防止対策・固定状況等を踏まえた選定結果 (4/5)

(常設・仮設物)

分類	名称	長さ [m]	幅 [m]	高さ [m]	質量 [kg]	空力パラメータ [m ² /kg]	初期高さ [m]	最大水平速度 [m/s]	最大鉛直速度 [m/s]	運動エネルギー (水平) [kJ]	運動エネルギー (鉛直) [kJ]	最大飛距離 [m]	最大飛散高さ [m]	コンクリートの貫通限界の貫通限界厚さ*2 [cm]		コンクリートの裏面剥離限界厚さ*2 [cm]		鉄板の貫通限界厚さ*3 [mm]		浮き上がりの有無	以下の点で飛来物とならないか*4 ・飛来物発生防止対策 (撤去、固縛等) が可能か ・他の飛来物に包絡されるか
														水平	鉛直	水平	鉛直	水平	鉛直		
柔	フォークリフト	3.465	1.15	2.11	3250	0.0029	0.0	15.3	1.0	382.4	1.6	13.0	0.2	20.3	1.8	44.0	7.0	2.4	0.1	○	
								35.8	26.6	2080	1152	97.3	0.0	43.1	33.1	77.6	63.7	7.3	5.0		
柔	乗用車 (セダン)	4.36	1.695	1.46	1140	0.0095	0.0	49.5	7.8	1399	34.8	139.8	5.2	34.2	6.6	63.3	18.4	5.6	0.5	○	
								51.3	12.0	1501	82.4	140.8	3.3	35.3	9.7	64.9	24.6	5.8	0.9		
柔	乗用車 (軽)	3.395	1.53	1.475	760	0.0110	0.0	52.9	8.6	1062	28.4	157.6	7.0	30.2	6.0	56.8	16.9	4.9	0.5	○	外部事象防護対象施設等との 離隔をとる, 又は, 固縛等を実 施することから設計飛来物 として選定しない。
								53.6	13.3	1090	67.5	161.2	6.0	30.5	8.8	57.3	22.6	5.0	0.8		
柔	発電機	1.87	0.86	1.22	1025	0.0033	0.0	11.9	0.7	73.0	0.3	7.6	0.1	10.8	0.9	25.5	4.0	1.2	0.1	○	
								37.3	26.5	714.3	359.1	109.9	0.0	29.7	21.9	54.7	43.5	5.5	3.5		
柔	自動販売機	1.362	0.74	1.83	365	0.0089	0.0	50.4	8.6	463.3	13.6	147.6	7.1	23.5	4.9	44.5	13.7	4.2	0.4	○	
								11.6	0.9	9.1	0.1	6.4	0.2	6.7	0.7	14.8	2.7	4.4	0.2		
剛	(ガイド)鋼製材*1	4.2	0.3	0.2	135	0.0066	0.0*5	11.0	0.8	8.2	0.0	5.8	0.1	6.4	0.7	14.3	2.5	4.0	0.2	○	設計飛来物に選定する
								45.7	13.7	140.8	12.7	112.9	0.4	22.1	7.8	37.1	16.6	26.9	5.4		
							11.5*5	46.6	14.9	146.4	14.9	139.4	2.6	22.5	8.4	37.0	17.6	27.6	6.1		

注記 *1: 竜巻評価ガイドにおいてサイズ及び重量が記載されている物品

*2: 修正NDR式, Deagen式及びChang式を用いて算出

*3: 原子炉施設のタービンサイルの評価に用いられているBR L式にて算出

*4: 竜巻の影響を考慮する施設に想定される損傷モードにより, 評価パラメータを設定

*5: 設計飛来物に選定した鋼製材及び砂利については, 流入層高さの感度解析の結果を踏まえ, 流入層高さを 17.5m とした場合の飛散評価結果も記載

表 2 代表的な飛来物の飛散評価結果及び飛散防止対策・固定状況等を踏まえた選定結果 (5/5)

(常設・仮設物)

分類	名称	長さ [m]	幅 [m]	高さ [m]	質量 [kg]	空力パラメータ [m ² /kg]	初期高さ [m]	最大水平速度 [m/s]	最大鉛直速度 [m/s]	運動エネルギー [kJ] (水平)	運動エネルギー [kJ] (鉛直)	最大飛距離 [m]	最大飛散高さ [m]	コンクリートの貫通限界高さ*2 [cm]		コンクリートの裏面剥離限界厚さ*2 [cm]		鉄板の貫通限界厚さ*3 [mm]		浮き上がりの有無	以下の点で飛来物とならないか*4 ・飛来物発生防止対策 (撤去、固縛等) が可能か ・他の飛来物に包絡されるか
														水平	鉛直	水平	鉛直	水平	鉛直		
柔	塊状	0.94	0.32	0.99	71	0.0146	0.0	54.4	7.1	105.1	1.8	150.6	5.1	14.1	2.3	27.5	7.0	2.9	0.2	○	
								7.5	14.1	117.4	7.0	182.1	9.4	14.9	4.3	28.5	11.1	3.1	0.5		
剛	その他	1.51	0.232	0.232	57	0.0034	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	×	
								40.0	37.8	40.7	19.9	114.2	0.0	13.2	9.7	24.0	18.9	4.0	2.5		
剛	板状	0.65	0.65	0.05	33.5	0.0074	0.0	5.3	0.2	0.5	0.0	1.4	0.0	1.9	0.2	5.4	0.7	0.3	0.1	○	
								10.2	47.4	37.7	3.1	127.1	1.5	13.0	4.4	23.2	10.1	4.4	0.9		
剛	棒状	2	0.05	0.05	8.4	0.0058	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	×	
								10.1	43.7	8.0	0.8	91.3	0.0	9.6	3.7	16.7	7.7	14.4	3.1		
剛	塊状	0.04	0.04	0.04	0.2	0.0160	0.0	16.4	0.8	0.0	0.0	11.5	0.1	0.8	0.1	2.0	0.3	0.2	0.1	○	設計飛来物に選定する
								0.0*5	15.7	0.7	0.0	10.7	0.1	0.8	0.1	2.0	0.3	0.2	0.1		
							7.6	58.8	14.8	0.3	0.0	188.4	10.7	2.3	0.7	4.7	1.9	0.9	0.2		
							8.0*5	59.3	17.2	0.4	0.0	209.5	18.0	2.3	0.7	4.7	2.1	0.9	0.2		

注記 *1: 電巻評価ガイドにおいてサイズ及び重量が記載されている物品

*2: 修正NDR式, Degen式及びChang式を用いて算出

*3: 原子炉施設のタービンサイルの評価に用いられているBRL式にて算出

*4: 電巻の影響を考慮する施設に想定される損傷モードにより, 評価パラメータを設定

*5: 設計飛来物に選定した鋼製材及び砂利については, 流入層高さの感度解析の結果を踏まえ, 流入層高さを17.5mとした場合の飛散評価結果も記載

7. 設計飛来物の選定結果

上記 1. から 6. より選定した，女川原子力発電所における設計飛来物を表 3 及び図 6 に示す。

鋼製材については，設計飛来物候補の中で，運動エネルギー，コンクリート・鋼板に対する貫通力が最大である。

また，砂利については，海水ポンプへの防護対策として設置する竜巻防護ネットを通過する可能性があり，飛来物の影響を鋼製材にて包含できないことから，設計飛来物として選定した。

表 3 女川原子力発電所における設計飛来物

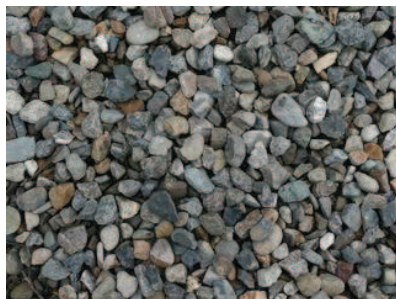
項 目	飛来物の種類		
	砂利	鋼製材	
サイズ[m]	縦×横×高さ 0.04×0.04×0.04 ^{*1}	縦×横×高さ 4.2×0.3×0.2	
質量[kg]	0.2	135	
初期高さ[m] ^{*2}	8.0	11.5	
計算結果 ^{*3}	最大水平速度[m/s]	59.3	46.6
	最大鉛直速度 [m/s]	22.6～37.9 ^{*4}	16.7～34.7 ^{*4}
	浮き上がり高さ[m]	18.0	2.6
	飛散距離[m]	209.5	139.4

注記 *1: 砂利のサイズは，竜巻防護ネットの金網が目開き 5cm×5cm を 2 枚重ね，4cm×4cm を 1 枚重ねの構造となっていることを考慮して選定

*2: 初期高さは感度解析結果を踏まえて，最大水平速度の算出条件を適用

*3: 設計竜巻風速 100m/s，当社が実施するフジタモデルの風速場を用いた飛散評価手法による結果

*4: 敷地内の高台を考慮して設定



(砂利)



(鋼製材)

図 6 選定した設計飛来物の形状 (イメージ)

1.5 砂利等の極小飛来物による外部事象防護対象施設への影響について

1.5 砂利等の極小飛来物による外部事象防護対象施設への影響について

設計飛来物に包含される砂利のような極小飛来物及び砂等の粒子状の飛来物について、外部事象防護対象施設への影響の有無を確認する。

砂利及び砂等による外部事象防護対象施設への影響としては、以下の事項が考えられることから、これらについて評価する。

- (1) 砂利のような極小飛来物による貫通及び衝突
- (2) 砂等の粒子状の飛来物による目詰まり、閉塞及び噛込み

1.5.1 砂利のような極小飛来物による貫通及び衝突

(1) 貫通について

砂利のような極小飛来物が外部事象防護対象施設（鋼板部分）に衝突した場合の貫通限界厚さを算出するような知見はないが、設計飛来物による貫通評価に示している貫通限界厚さを求めるBRL式*を用いて、砂利のデータ（サイズ、質量、速度）を用いて貫通厚さを求める。

砂利による鋼板の貫通限界厚さの算出結果は表 1.5-1 に示す。

表 1.5-1 より、貫通限界厚さは1mm未満であるため、砂利による貫通の影響はないと考える。

注記*：別紙1参照

表 1.5-1 砂利による鋼板の貫通評価結果

項目	単位	砂利
サイズ	mm	40
質量	g	200
最大水平速度	m/s	59.3
最大鉛直速度	m/s	22.6~37.9*
水平貫通限界厚さ	mm	1mm 未満
鉛直貫通限界厚さ	mm	1mm 未満

注記*：敷地内の高台を考慮して設定。

(2) 衝撃について

砂利やひょう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、設備は振動しにくく破壊は生じないと考えられる。これは高速の極小飛来物が設備に衝突した場合、設備に生じる荷重は衝突時間の非常に短い片振幅波形(図 1.5-1)となるため、設備に有意な変位(応力)は生じないためである。

この衝撃にて伝達される荷重について、機械工学便覧(基礎編α2 機械力学)の「過渡応答・衝撃」に、衝突時間と応答加速度に関係が次のとおり示されている。

図 1.5-2 では、横軸は衝突時間(t_r)と衝突される設備の固有周期(T)との比として t_r/T 、縦軸は応答加速度 \ddot{X}_{max} (設備へ伝わった加速度)と入力加速度 \ddot{X}_{0max} (設備へ伝えようとした加速度)の応答加速度比として $\ddot{X}_{max}/\ddot{X}_{0max}$ の関係としてまとめられている。

図 1.5-2 より衝突時間が非常に短く設備の固有周期との比 $2\pi t_r/T$ 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。これは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。

$$\ddot{X}_{max}/\ddot{X}_{0max} \Leftrightarrow 2\pi t_r/T$$

\ddot{X}_{0max} : 飛来物による衝撃パルスを入力最大加速度

\ddot{X}_{max} : 設備の応答最大加速度

t_r : 衝撃パルスの作用時間(飛来物と設備との接触時間)

T : 設備の固有周期

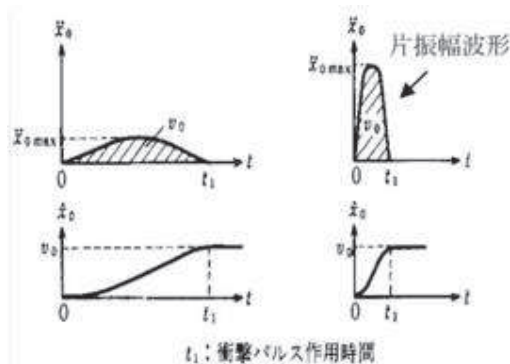


図 1.5-1 片振幅波形 他

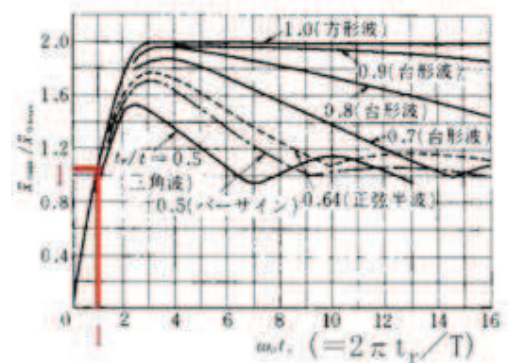


図 1.5-2 衝突時間と応答加速度の関係
(機械工学便覧(基礎編α2 機械力学))

図 1.5-2 より、飛来物の速度が速くて衝撃パルスの作用時間 (t_r) が設備の固有周期 (T) の $1/(2\pi)$ 倍より短い場合 (横軸が 1 より小さい場合) には、入力加速度と応答加速度の比は 1 を下回り、エネルギーの伝達は小さくなることがわかる。

砂利やひょう等の極小飛来物による荷重は、このような短時間の衝突となるため、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ため、衝撃による影響はないと考える。

1.5.2 砂等の粒子状の飛来物による目詰まり、閉塞及び嘯込み

砂等の粒子状の飛来物による目詰まり、閉塞及び嘯込みの影響を受ける施設として、表 1.5-2 に示す屋外の外部事象防護対象施設、外気と繋がっている屋内の外部事象防護対象施設及び外部事象防護対象施設に波及的影響を及ぼす可能性がある施設について評価する。

表 1.5-2 目詰まり、閉塞、嘯込みの影響を受ける施設

分類	評価施設
屋外の外部事象防護対象施設	<ul style="list-style-type: none"> ・原子炉補機冷却海水ポンプ ・高圧炉心スプレイ補機冷却海水ポンプ ・排気筒 ・非常用ガス処理系 (屋外配管)
外気と繋がっている屋内の外部事象防護対象施設	<ul style="list-style-type: none"> ・中央制御室換気空調系 ・計測制御電源室換気空調系 ・原子炉補機室換気空調系
外部事象防護対象施設に波及的影響を及ぼす可能性がある施設	<ul style="list-style-type: none"> ・非常用ディーゼル発電設備 (高圧炉心スプレイ系ディーゼル発電設備を含む。) 排気消音器 ・非常用ディーゼル発電設備 (高圧炉心スプレイ系ディーゼル発電設備を含む。) 付属ミスト配管 ・軽油タンク A 系ベント配管, 軽油タンク B 系ベント配管, 軽油タンク H P C S 系ベント配管

(1) 屋外の外部事象防護対象施設

a. 原子炉補機冷却海水ポンプ及び高圧炉心スプレイ補機冷却海水ポンプ

(a) 換気系、電気系及び計装制御系に対する機械的影響

原子炉補機冷却海水ポンプ電動機及び高圧炉心スプレイ補機冷却海水ポンプ電動機は、外気を直接電動機内部に取り込まない冷却方式であり、電動機内部に砂等の粒子状の飛来物の侵入はない。（図 1.5-3 及び図 1.5-4）

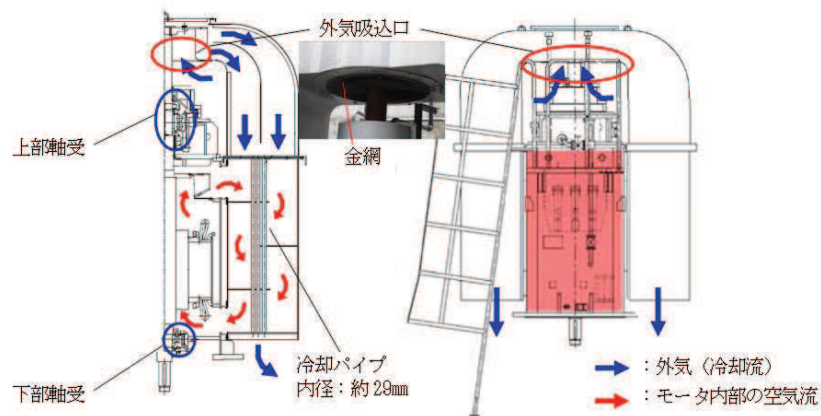


図 1.5-3 原子炉補機冷却海水ポンプ電動機の冷却方式

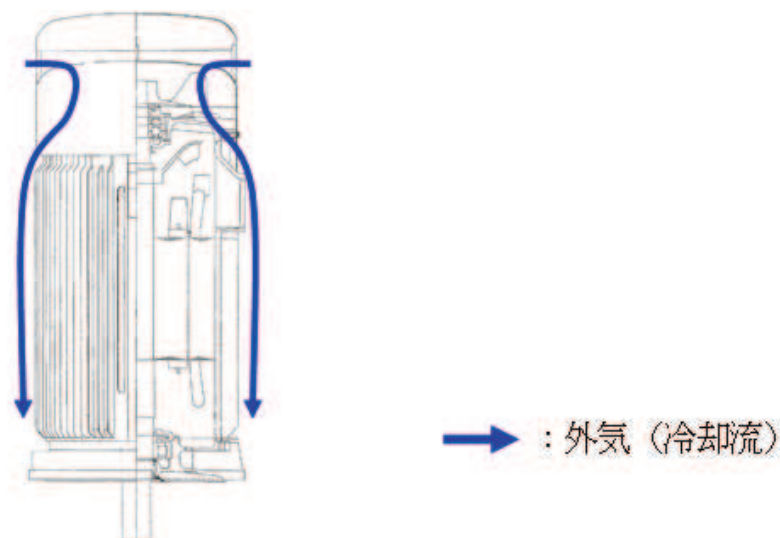


図 1.5-4 高圧炉心スプレイ補機冷却海水ポンプ電動機の冷却方式

b. 排気筒及び非常用ガス処理系（屋外配管）

排気筒は常時排気があることから、砂等の粒子状の飛来物は排気筒及び非常用ガス処理系（屋外配管）内に侵入し難い。（図 1.5-5）

また、竜巻の通過に要する時間は短時間であるため、排気筒及び非常用ガス処理系（屋外配管）が閉塞する量の飛来物は侵入し難い。

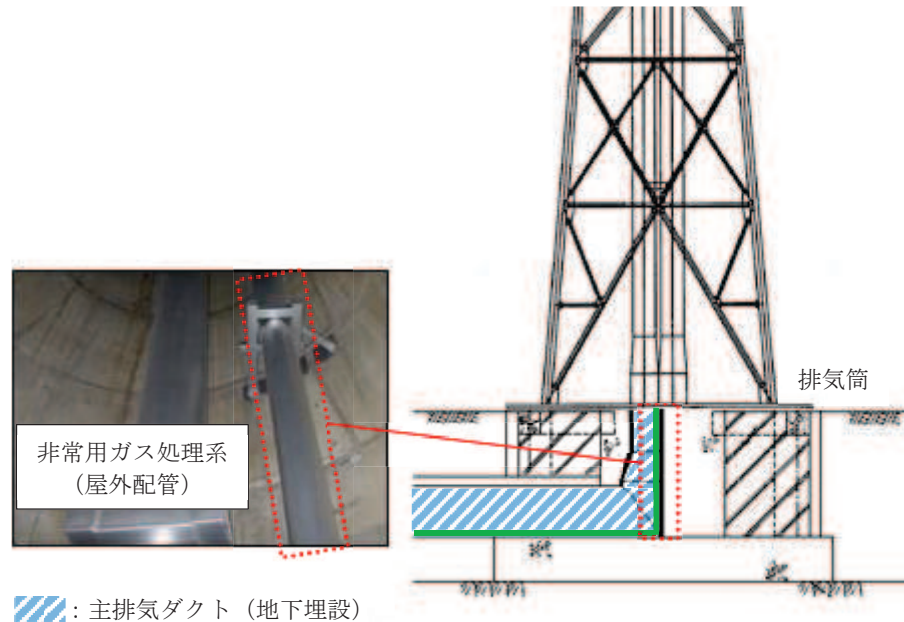


図 1.5-5 排気筒及び非常用ガス処理系（屋外配管）

(2) 外気と繋がっている屋内の外部事象防護対象施設

a. 中央制御室換気空調系，計測制御電源室換気空調系及び原子炉補機室換気空調系

中央制御室換気空調系，計測制御電源室換気空調系及び原子炉補機室換気空調系の外気取口にはルーバが取り付けられており，下方から吸い込む構造となっていることから，上方より降下してくる砂等の粒子状の飛来物に対し，取り込み難い構造となっている。また，外気取入口にはバグフィルタが設置されており，砂等の粒子状の飛来物が外気取入口に侵入した場合であっても，バグフィルタの捕集効率は粒径約 $2\mu\text{m}$ に対して 80%以上であるため，給気を供給する設備に対して影響はない。

また，各フィルタについては，建屋等からのアクセス性が良く，必要に応じて，取替え又は清掃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 1.5-6 及び図 1.5-7）



図 1.5-6 原子炉補機（A）室換気空調系の外気取入口

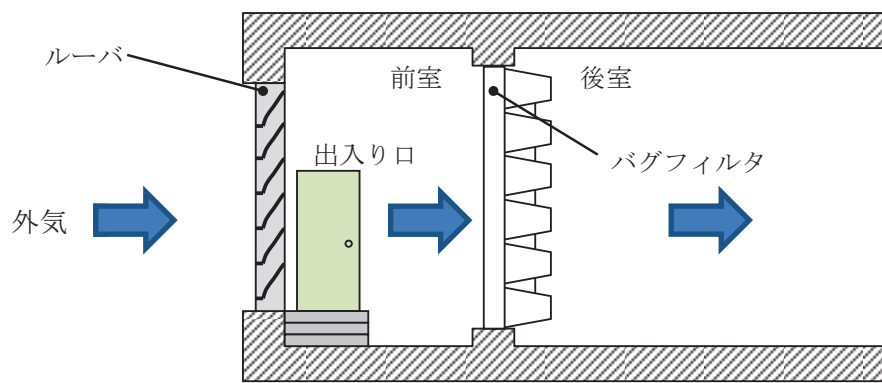


図 1.5-7 換気空調系の外気取入口イメージ図

(3) 外部事象防護対象施設に波及的影響を及ぼす可能性がある施設

- a. 非常用ディーゼル発電設備（高圧炉心スプレイ系ディーゼル発電設備を含む。）排気消音器

非常用ディーゼル発電設備（高圧炉心スプレイ系ディーゼル発電設備を含む。）排気消音器の開口部は横方向であり，砂等の粒子状の飛来物が侵入し難い構造となっている。また，竜巻の通過に要する時間は短時間であるため，閉塞する量の粒子状の飛来物は侵入し難い。（図 1.5-8）



図 1.5-8 非常用ディーゼル発電設備排気消音器

- b. 非常用ディーゼル発電設備（高圧炉心スプレイ系ディーゼル発電設備を含む。）付属ミスト配管

非常用ディーゼル発電設備（高圧炉心スプレイ系ディーゼル発電設備を含む。）付属ミスト配管は下向きの構造となっており，砂等の粒子状の飛来物が侵入し難い構造となっている。（図 1.5-9）



図 1.5-9 非常用ディーゼル発電設備付属ミスト配管

- c. 軽油タンク A系ベント配管，軽油タンク B系ベント配管，軽油タンク H P C S系ベント配管

軽油タンクは大気開放タンクであり，開口部であるベント配管は下向きの構造となっており，砂等の粒子状の飛来物が侵入し難い構造となっている。（図 1.5-10）



図 1.5-10 軽油タンクベント配管

BRL 式について

BRL 式は ISES7607-3 「軽水炉構造機器の衝撃荷重に関する調査 その3 ミサイルの衝突による構造壁の損傷に関する評価式の比較検討」 (昭和 51 年 10 月 高温構造安全技術研究組合) に引用されており, 「タービンミサイル評価について」 (昭和 52 年 7 月 20 日 原子炉安全専門審査会) の中で, 鋼板に対する貫通厚さの算出式に使用されている。

$$T^3 = \frac{0.5 \times M \times V^2}{1.4396 \times 10^9 \times K^2 \times d^2}$$

T : 鋼板貫通限界厚さ (m)

M : ミサイル質量 (kg)

V : ミサイル速度 (m/s)

d : ミサイル直径 (m)

K : 鋼板の材質に関する係数 (≒1.0)

1.6 屋外重大事故等対処設備の竜巻防護設計について

1.6 屋外重大事故等対処設備の竜巻防護設計について

1.6.1 女川原子力発電所における重大事故等対処設備の具体的な竜巻防護設計方針

(1) 設計の考え方について

女川原子力発電所の屋外重大事故等対処設備においては、技術基準規則第 54 条の要求事項を踏まえた設計方針に従って、位置的分散による機能維持に加え、技術基準規則第 7 条の要求事項を踏まえた設計方針に従って、浮き上がり又は横滑りによって外部事象防護対象施設等又は防護対策施設に衝突し、外部事象防護対象施設等の機能に影響を及ぼす可能性がある場合には、飛来物とならないよう固縛する設計とする。

位置的分散による重大事故等対処設備の機能維持設計は、VI-1-1-6「安全設備及び重大事故等対処設備が使用される条件の下における健全性に関する説明書」にて示すため、以下では、固縛等に関する設計の考え方を示す。

1.6.2 固縛の設計方針

固縛については、浮き上がり又は横滑りによって外部事象防護対象施設等又は防護対策施設に衝突し、外部事象防護対象施設等又は防護対策施設の機能に影響を及ぼさない設計とするため、全ての屋外重大事故等対処設備を検討の対象とする。

ただし、屋外重大事故等対処設備のうち、重大事故等に対処するために必要な機能を損なわないよう、風荷重の作用しない場所に配置する設計又は設計竜巻の風圧力による荷重を考慮した設計とする設備は、竜巻防護が実施されていることから、固縛対象設備の選定候補から除外する。(表 1.6-1 参照)

1.6.3 固縛対象設備の選定

屋外重大事故等対処設備を対象に、浮き上がり又は横滑りによって外部事象防護対象施設等又は防護対策施設に衝突し、外部事象防護対象施設等又は防護対策施設を損傷させる可能性の有無を確認し、表 1.6-1 に示した屋外重大事故等対処設備から固縛対象設備を選定する。

固縛対象として選定した屋外重大事故等対処設備及びその保管場所を表 1.6-2、図 1.6-1 に示す。

表 1.6-1 固縛対象設備の選定候補 (1/2)

	固縛対象設備の選定方針	常設／可搬	設備
(1)	<p>外部事象防護対象施設等又は防護対策施設に衝突し損傷させる可能性の有無を確認し、固縛対象設備を選定する。</p> <p>また、同じ機能を有する他の重大事故用対処設備に衝突し損傷させる可能性の有無を確認し、固縛対象設備を選定する。</p>	可搬	<ul style="list-style-type: none"> ・大容量送水ポンプ (タイプⅠ) ・大容量送水ポンプ (タイプⅡ) ・ホース延長回収車 ・取水用ホース*1 ・送水用ホース*1 ・注水用ヘッダ ・原子炉補機代替冷却水系熱交換器ユニット ・耐熱ホース*1 ・除熱用ヘッダ*2 ・可搬型窒素ガス供給装置 ・窒素供給用ホース*1 ・窒素供給用ヘッダ*1 ・放水砲 ・泡消火薬剤混合装置 ・シルトフエンス*1 ・小型船舶 ・可搬型モニタリングポスト*1 ・ブルドーザ ・バックホウ ・電源車 ・電源車 (緊急時対策所用) ・タンクローリ ・給油用ホース*3 ・軽油払出用ホース*3 ・代替気象観測設備*1
注記	<p>*1：保管用のコンテナに格納されているため、設備を内包するコンテナの評価で代表する。</p> <p>*2：原子炉補機代替冷却水系熱交換器ユニットの車内に格納されているため、同車両の評価で代表する。</p> <p>*3：タンクローリの車内に格納されているため、同車両の評価で代表する。</p>		

表 1.6-1 固縛対象設備の選定候補 (2/2)

	固縛対象設備の選定方針	常設／可搬	設備
(2)	固定されている設備であり、竜巻の風圧力による荷重の影響を受けにくく、飛来物化しないと考えられるため、固縛対象設備として選定しない。	常設	<ul style="list-style-type: none"> ・ガスタービン発電機 ・ガスタービン発電設備燃料移送ポンプ ・緊急時対策所遮蔽 ・原子炉建屋ブローアウトパネル
(3)	外部事象防護対象施設を兼ねており、設計竜巻の風圧力による荷重、気圧差による荷重及びその他考慮すべき荷重に耐えうる設計であるため、固縛対象設備として選定しない。	常設	<ul style="list-style-type: none"> ・復水貯蔵タンク ・原子炉補機冷却海水ポンプ ・高圧炉心スプレイ補機冷却海水ポンプ
(4)	竜巻の風圧力による荷重の影響を受けにくい構造物であり、飛来物化しないと考えられるため、固縛対象設備として選定しない。	常設	<ul style="list-style-type: none"> ・海水ポンプ室 ・取水口 ・貯留堰 ・取水路

注記

- *1：保管用のコンテナに格納されているため、設備を内包するコンテナの評価で代表する。
- *2：原子炉補機代替冷却水系熱交換器ユニットの車内に格納されているため、同車両の評価で代表する。
- *3：タンクローリーの車内に格納されているため、同車両の評価で代表する。

表 1.6-2 固縛対象として選定した屋外重大事故等対処設備の保管場所一覧

設備	保管場所*1
大容量送水ポンプ（タイプⅠ）	①②③④
大容量送水ポンプ（タイプⅡ）	①②④
ホース延長回収車	②③④
取水用ホース*2	①②③④
送水用ホース*2	①②③④
注水用ヘッダ	②③④
原子炉補機代替冷却水系熱交換器ユニット	①③④
耐熱ホース*2	①③④
除熱用ヘッダ*3	①③④
可搬型窒素ガス供給装置*4	①④
窒素供給用ホース*2	①④
窒素供給用ヘッダ*2	①④
放水砲	①④
泡消火薬剤混合装置	①④
シルトフェンス*2	①④
小型船舶	①④
可搬型モニタリングポスト*2	①②④
ブルドーザ	①④
バックホウ	①④
電源車	②③④
電源車（緊急時対策所用）	⑤
タンクローリ	②③④
給油用ホース*4	②③④
軽油払出用ホース*4	②③④
代替気象観測設備*2	②④

注記 *1：図 1.6-1 における保管場所の番号を示す。

*2：保管用のコンテナに格納されているため、設備を内包するコンテナの評価で代表する。

*3：原子炉補機代替冷却水系熱交換器ユニットの車内に格納されるため、原子炉補機代替冷却水系熱交換器ユニットを固縛対象とする。

*4：タンクローリの車内に格納されるため、タンクローリを固縛対象とする。

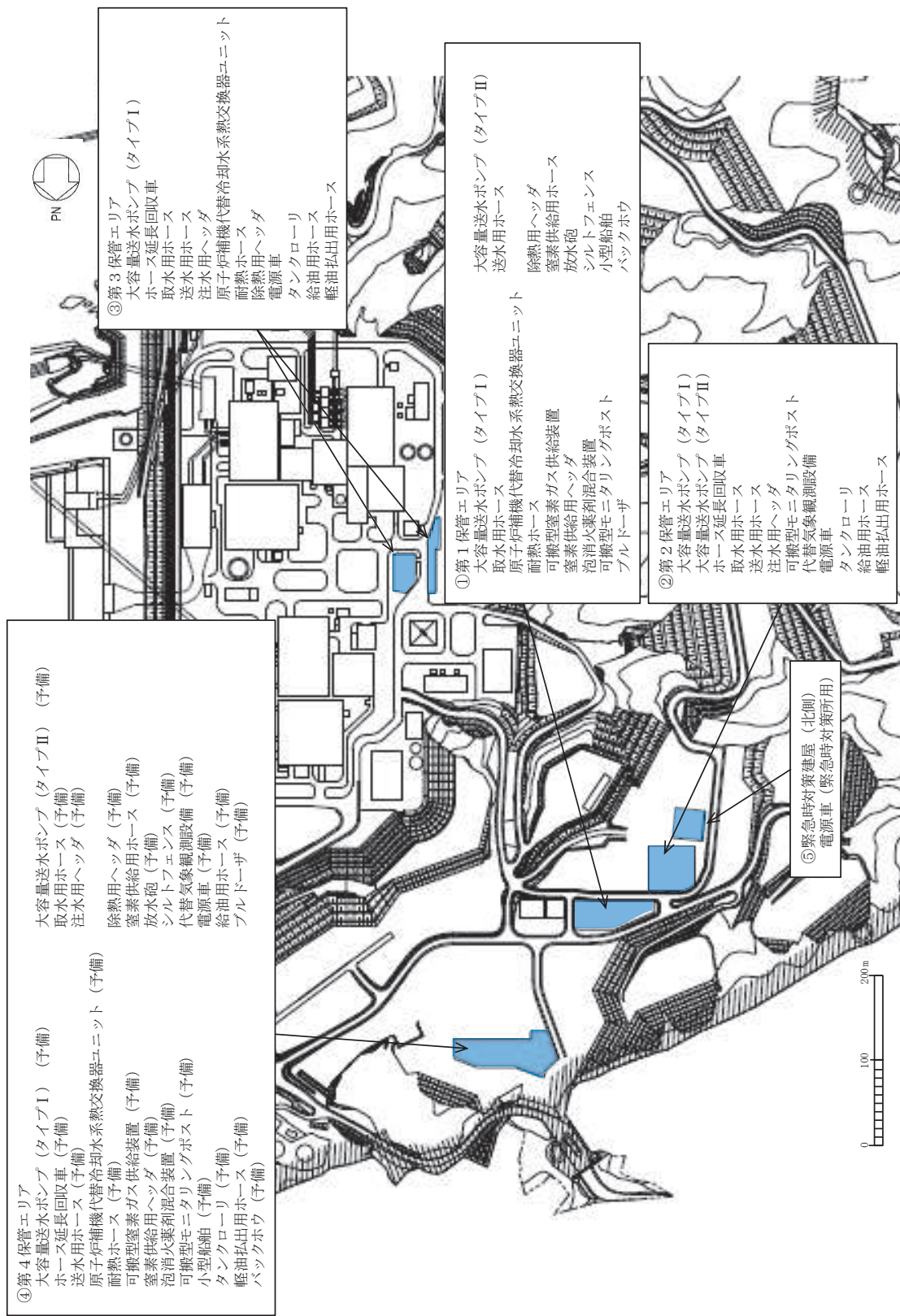


図 1.6-1 固縛対象として選定した屋外重大事故等対処設備の保管場所

1.7 竜巻影響評価の風速場モデルの適用について

1.7 竜巻影響評価の風速場モデルの適用について

1.7.1 女川原子力発電所の竜巻影響評価における風速場モデル

女川原子力発電所の竜巻影響評価の風速場モデルは、地上からの物体の浮上・飛散解析が可能であり、多数の飛来物源が想定される地上付近で竜巻の中心に向かう流れを考慮した 3次元の風速場を持つ、フジタモデル DBT-77 (DBT:Design Basis Tornado) (以下「フジタモデル」という。)を採用した。

風速場モデルの適用状況について表 1.7-1 に整理する。

また、設計飛来物の速度設定における評価条件については、「1.8 飛散評価における竜巻の不確かさを踏まえた評価条件の設定について」に示す。

1.7.2 屋外の重大事故等対処設備の固縛装置設計の風速

屋外の重大事故等対処設備に設置する固縛装置は、固縛対象となる重大事故等対処設備(以下「固縛対象設備」という。)が受ける設計竜巻の水平風速を基に設計するが、この際の竜巻の風速分布はフジタモデルを採用し、図 1.7-1 の検討モデルにて算出する。

フジタモデルの風速場における、固縛対象設備に作用する水平方向の風速は、固縛対象設備が地表面に設置されるため、設計竜巻の水平風速の最大値に対し、地表面付近における竜巻と地面との摩擦の影響を考慮した値となる。

設計竜巻を固縛対象設備が受けるときの最大水平風速について、可搬型窒素ガス供給装置の例を図 1.7-2 に示す。

表 1.7-1 女川原子力発電所の竜巻風速場モデルの適用状況 (1/2)

竜巻評価に影響する要素		女川原子力発電所の竜巻風速場モデルの設定値		備考
基本の風速場モデル		フジタモデル		
最大風速	V_D	100m/s		
最大接線風速	V_{Rm}	85m/s		
移動速度	V_T	15m/s		
設計竜巻 の特性値	最大接線風速半径	R_m	30m	
	流入層高さ	H_i	15m	
	最大気圧低下量	ΔP_{max}	76hPa	
	最大気圧低下率	$\left(\frac{dp}{dt}\right)_{max}$	53hPa/s	評価には用いない
設計飛来物の速度 (最大水平風速)		鋼製材	46.6m/s	流入層高さ(H_i) : 17.5m 初期高さ : 11.5m
		砂利	59.3m/s	流入層高さ(H_i) : 17.5m 初期高さ : 8.0m

表 1.7-1 女川原子力発電所の竜巻風速場モデルの適用状況 (2/2)

竜巻評価に影響する要素		女川原子力発電所の設定値	備考
飛散解析	飛来物源の初期高さ	h	
	最大水平速度	$M V_{Hmax}$	解析コード：TONBOS
	最大鉛直速度	$M V_{Vmax}$	解析コード：TONBOS
	最大飛散距離	$M D$	解析コード：TONBOS
飛来物発生 対策の要否	運動エネルギー	E	
	貫通限界厚さ	t_p^*	*鋼板：BRL 式, コンクリート：修正 NDRC 式, Degen 式
	離隔距離	D_{req}	
固縛設計	風速分布	—	フジタモデルの風速場での固縛対象設備の中心位置の風速
	初期高さ	h	固縛対象設備の設置面と地面との高さ

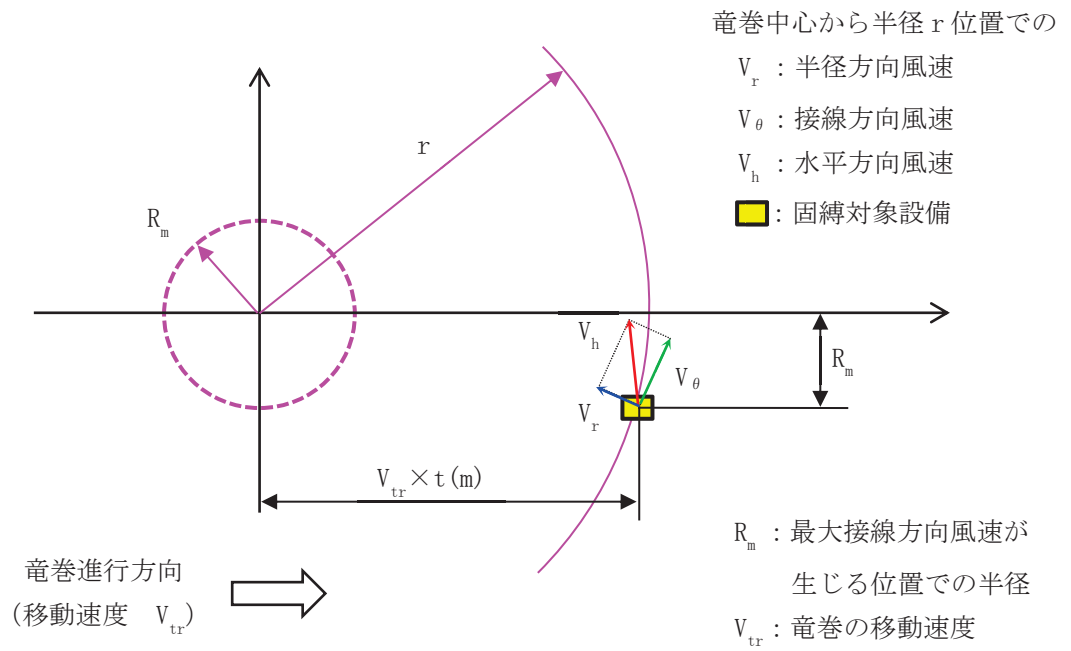


図 1.7-1 固縛対象設備に作用する風速分布の検討モデル

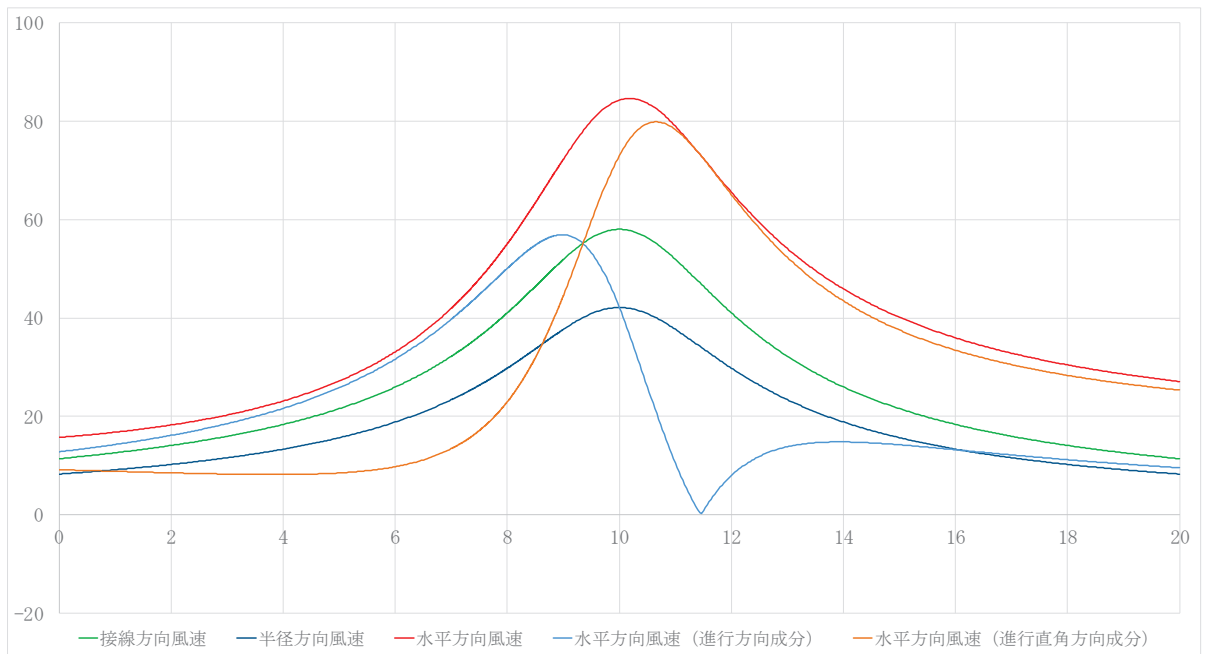


図 1.7-2 可搬型窒素ガス供給装置に作用する設計竜巻の風速の時刻歴分布

1.8 飛散評価における竜巻の不確かさを踏まえた評価条件の設定について

1.8 飛散評価における竜巻の不確かさを踏まえた評価条件の設定について

1.8.1 飛散評価に影響を及ぼすパラメータについて

(1) 風速場モデルの特徴と課題

a. フジタモデルの特徴

当社が採用する竜巻風速場モデルであるフジタモデルは、実際の竜巻の風速場をモデル化したいという米国 NRC の要望を受けて、藤田博士が竜巻観測記録に基づき考案したモデルであり、「地表面付近における竜巻中心に向かう強い水平方向の流れの風速場を流入層としてモデル化している」という他のモデルにはない特徴を持っている。

このように地表面の風速場をモデル化することで、地面からの浮上・飛散評価を行うことが可能となり、発電所敷地内に数多く存在する物品に対する竜巻による影響度合いを把握できる。

竜巻飛来物について、浮上の有無、飛散高さ、飛散距離、最大速度等を適切に把握することで、飛来物の発生防止対策や竜巻の影響を考慮する施設に対する防護対策の範囲や強度について、保守性を確保しつつ実効性の高い竜巻防護対策を実施することが可能となると考えられる。

b. フジタモデルの適用における課題

フジタモデルでは、地表面において水平風速に境界層型の分布がある流入層があり、竜巻コアに向かう強い水平方向の流れが発生する。また、この流れが竜巻コア内では上昇流となる。

この流入層のモデルは、地表面に近づくに従い風速が減少していき、地表面（高さ0m）では0m/sとなるような風速分布となっている。

しかしながら、図1.8-1の写真図化分析に示すとおり、フジタモデルの作成に当たっては、地表面付近の風速ベクトルが作成されていないため、地表面付近の領域に対し、必ずしも十分な分析がなされていない可能性がある。

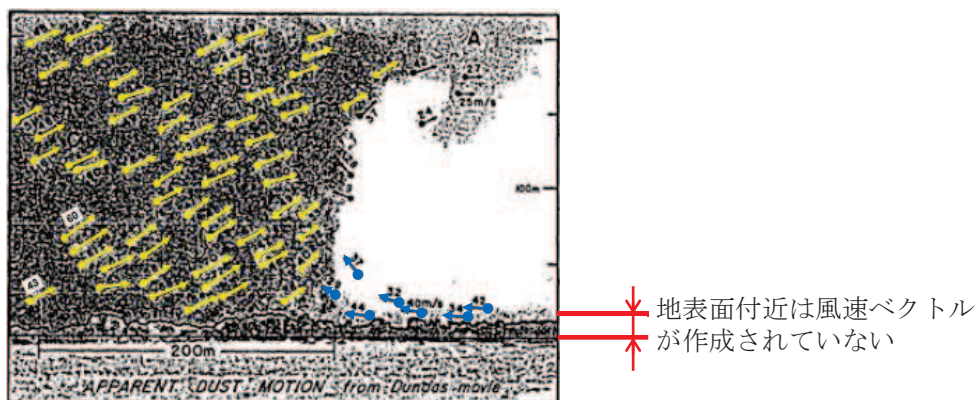
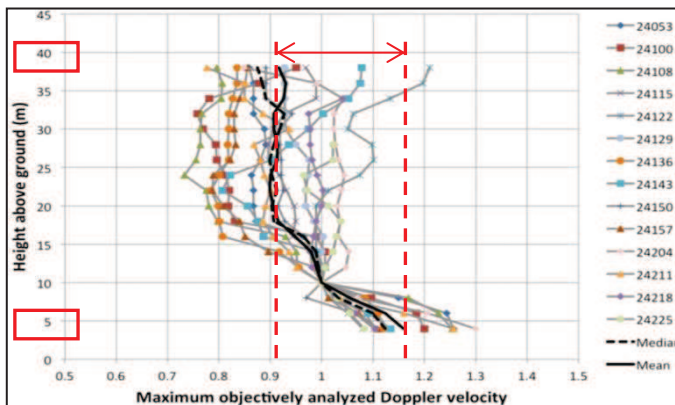


図1.8-1 写真図化分析で作成された風速ベクトル (2)に一部加筆

(2) 至近の研究報告

Kosiba and Wurman 2013⁽³⁾ (図1.8-2) によると、地上高さ約5mにおける風速は地上高さ約40mに比べて約25%大きな値が観測されたことが報告されている。



- 14箇所の観測点における風速を観測した結果、強い風は地上5m付近で観測されており、地上10m付近では約15%減少し、地上10~40mではさらに約10%減少する
- 地上から3m程度は観測を行っていない
- 実線は平均値を表す

図 1.8-2 地上高さと風速分布 ⁽³⁾ に一部加筆

ただし、地上から高さ3m程度は観測していないこと等も踏まえて、本研究の結論としては、地表面付近の竜巻特性として一般化するには更なる観察が必要であるとしている。

よって、現状では、実際の竜巻における地表面付近の状況をモデル化することには、不確かさを含んでいるものとする。

(3) 地表面付近における竜巻風速の不確かさが飛散評価に与える影響

(1)及び(2)で述べたとおり、地表面付近における竜巻風速の不確かさを踏まえると、フジタモデルの流入層高さの設定が飛散評価に影響を及ぼすと考えられることから、飛来物の初期高さを地表面(0m)とし、流入層高さを変化させて設計飛来物(鋼製材)の飛散評価を行った結果、表1.8-1に示すとおり、基本ケースである15m(Fujitaにより提案された算出式による値)に比べて、流入層高さが低い場合には、僅かではあるが評価結果が大きくなることを確認した。これは、地表面付近では流入層高さが小さくなるにつれて流入風の影響を大きく受けることになるためである。

このように、流入層高さは飛散評価結果に影響を与えることが確認された(添付1参照)。

また、フジタモデルは高さ方向に分布をもつ渦モデルであるため、飛来物の初期高さの設定が飛散評価に影響を及ぼすことが考えられる。以上より、飛散評価に影響を及ぼすパラメータである流入層高さ及び飛来物の初期高さの影響について検討を行う必要があると判断した。

表1.8-1 流入層高さの感度解析結果(鋼製材)

風速100m/s 初期高さ0m	流入層高さ(15m:基本ケース)				
	10m	12.5m	15m	17.5m	20m
最大飛散高さ[m]	<u>0.3</u>	0.2	0.2	0.2	0.2
最大飛散距離[m]	<u>8.7</u>	7.3	6.5	5.8	5.0
最大速度(水平)[m/s]	<u>14.0</u>	12.7	11.7	11.0	10.2
最大速度(鉛直)[m/s]	<u>1.1</u>	1.0	0.9	0.9	0.8

1.8.2 フジタモデルにおける流入層高さと初期高さの影響について

(1) 流入層高さと初期高さの感度解析

フジタモデルの飛散評価においては、流入層高さと飛来物の初期高さが飛散評価結果に影響を及ぼすことから、設計飛来物（鋼製材，砂利）に対して、これらを変化させた感度解析を行い、関係性を確認した。

鋼製材及び砂利の流入層高さは、最新の研究（Kosiba⁽³⁾ら，2013）においては、流入層高さは約6m～9mと低く推測されているものの、以下に示すような様々な知見を幅広く確認した結果を踏まえ、流入層高さの感度解析の範囲を6m～17.5mと設定して確認を行うこととした。

- ・Kosiba⁽³⁾らの観測結果から算定：6～9m
- ・原子力安全基盤機構の調査研究報告書⁽³⁾による解析：12m
- ・Fujita Workbook⁽²⁾の竜巻事例で示されている条件で算定：17.5m
- ・工学的モデルによる流入層高さの算出方法による算定：15m

範囲の考え方の詳細は添付2に示す。

(2) 流入層高さと飛来物の初期高さが飛散評価結果に与える影響の感度解析結果

流入層高さ及び飛来物の初期高さの感度解析結果については、添付1に示すとおりであり、初期高さが0m（地表面）付近では、流入層高さが低い場合に僅かに値が大きくなる傾向になるものの、初期高さが高く、流入層高さも高い場合に大きな値が算出されることを確認した。

また、「算出した鉛直速度」に対して、「最大飛散高さ（初期高さを含む）からの自由落下時の最大鉛直速度」は流入層高さの影響を受けず、大きな値が算出されることを確認した。

流入層高さ及び飛来物の初期高さが飛散評価結果に与える影響の感度解析結果の整理結果を表1.8-2に示す。

表 1.8-2 流入層高さ及び飛来物の初期高さが飛散評価結果に与える影響の感度解析結果のまとめ

			初期高さ			
			鋼製材：約 11m まで（地表面除く） 砂利：約 5m まで（地表面除く）		鋼製材：約 11m 以上 砂利：約 5m 以上	
			水平速度	鉛直速度	水平速度	鉛直速度
流入層高さ H_i	H_i 範囲①	鋼製材：6～15m 砂利：6～10m	初期高さの増加に従い値が大きくなる	初期高さの増加に従い値が増加	<ul style="list-style-type: none"> ・最大値が算出される ・最大値となった後は初期高さが増えることによる変化は緩やか 	物品は浮上せず、初期高さの増加に従い値が増加
	H_i 範囲②	鋼製材：15～17.5m 砂利：10～17.5m	H_i 範囲①と同様の傾向であるが、わずかに値が小さい	H_i が大きくなっても、物品が浮上しないため、値に影響しない	<ul style="list-style-type: none"> ・最大値が算出される ・H_i 範囲①と同様の傾向であるが、<u>わずかに値は大きい</u> 	<ul style="list-style-type: none"> ・H_i が大きくなることで、物品が浮上し、<u>値が大きくなる</u> ・「自由落下時の鉛直速度」は「算出した鉛直速度」より<u>大きい</u>

(3) 不確かさを踏まえた設計飛来物の飛散評価条件の設定

感度解析結果を踏まえて、飛散評価条件は以下のとおり設定した。

a. 流入層高さ

飛散評価結果が厳しくなるよう、感度解析における流入層高さの上限である 17.5m と設定した。

b. 設計飛来物の初期高さ

現場ウォークダウンの結果、仮設資材の設置状況は最大でも約 1.2m 程度である (図 1.8-3) ことが確認されたが、感度解析の結果を踏まえて、飛散評価結果が厳しくなるように、鋼製材の初期高さは約 11m 以上、砂利の初期高さは約 5m 以上とし、水平速度の算出条件の初期高さとして、鋼製材は 11.5m、砂利は 8.0m を適用する。

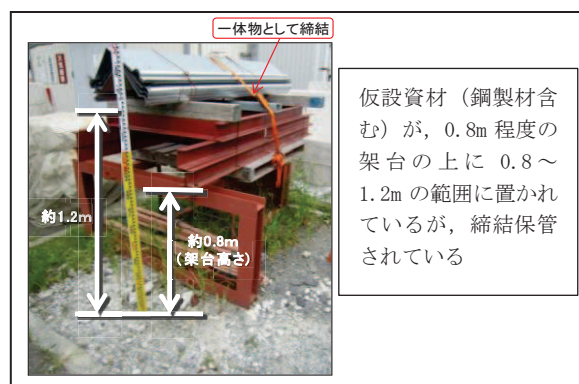


図 1.8-3 仮設資材の配置状況 (例)

c. 高台高さ

女川原子力発電所は海に面し、三方を丘陵地に囲まれた地形となっていることから、各高台からの飛散解析 (高台高さに加えて、初期高さも考慮) を行い、高台から到達する (飛散範囲内に含まれる) 竜巻の影響を考慮する施設に対しては、高台を考慮した飛散評価条件とする。また、以下の事項についても考慮する。

- ・実際は構築物や地形による障壁が考えられるが、これらは考慮せず飛散評価を行い、飛散範囲を設定する。
- ・複数の高台から設計飛来物が到達する場合は、設計飛来物が到達する高台のうち最も高い高台から飛散した場合の飛散評価を適用する。
- ・砂利は、竜巻防護ネットの金網を通過した場合に、非常用海水ポンプ (原子炉補機冷却海水ポンプ、高圧炉心スプレイ補機冷却海水ポンプ) に影響を及ぼすため、ポンプ室の地上面からピット底面までの深さも考慮した飛散評価条件とする。

1.8.3 設計飛来物の条件について

前項で示した飛散評価条件に基づき飛散評価した結果を踏まえ、設計飛来物の速度等については、以下のとおり設定する。

(1) 最大水平速度

流入層高さ、初期高さが飛散評価結果に与える影響の感度解析結果における水平速度の最大値を適用する。

- ・鋼製材：46.6m/s
- ・砂利：59.3m/s

(2) 最大鉛直速度

飛散高さから地面まで自由落下した場合の最大鉛直速度を適用する。

- ・鋼製材：16.7m/s～34.7m/s
- ・砂利：22.6m/s～37.9m/s

敷地の高台から設計飛来物が到達する竜巻の影響を考慮する施設に対しては、高台を考慮した鉛直速度を設定する。

(3) 飛散高さ、飛散距離

飛散評価条件に基づき設定する。

(4) 設計飛来物の諸元

女川原子力発電所における設計飛来物の諸元を表 1.8-3 に示す。

表 1.8-3 女川原子力発電所における設計飛来物の諸元

項目	飛来物の種類		
	砂利	鋼製材	
サイズ (m)	縦×横×高さ 0.04×0.04×0.04 ^{*1}	縦×横×高さ 4.2×0.3×0.2	
質量 (kg)	0.2	135	
初期高さ (m) ^{*2}	8.0	11.5	
計算結果 ^{*3}	最大水平速度 (m/s)	59.3	46.6
	最大鉛直速度 (m/s)	22.6～37.9 ^{*4}	16.7～34.7 ^{*4}
	浮き上がり高さ (m)	18.0	2.6
	飛散距離 (m)	209.5	139.4

注記*1：砂利のサイズは、竜巻防護ネットの金網が目開き 5cm×5cm を 2 枚重ね、4cm×4cm を 1 枚重ねの構造となっていることを考慮して選定

*2：初期高さは感度解析結果を踏まえて最大水平速度の算出条件を適用

*3：設計竜巻風速 100m/s、当社が実施するフジタモデルの風速場を用いた飛散評価手法による結果

*4：敷地内の高台を考慮して設定

図 1.8-4 に、敷地内の高台①～⑯からの設計飛来物（鋼製材，砂利）の飛散範囲，表 1.8-4 及び表 1.8-5 に設計飛来物の最大水平速度，最大鉛直速度を示す。

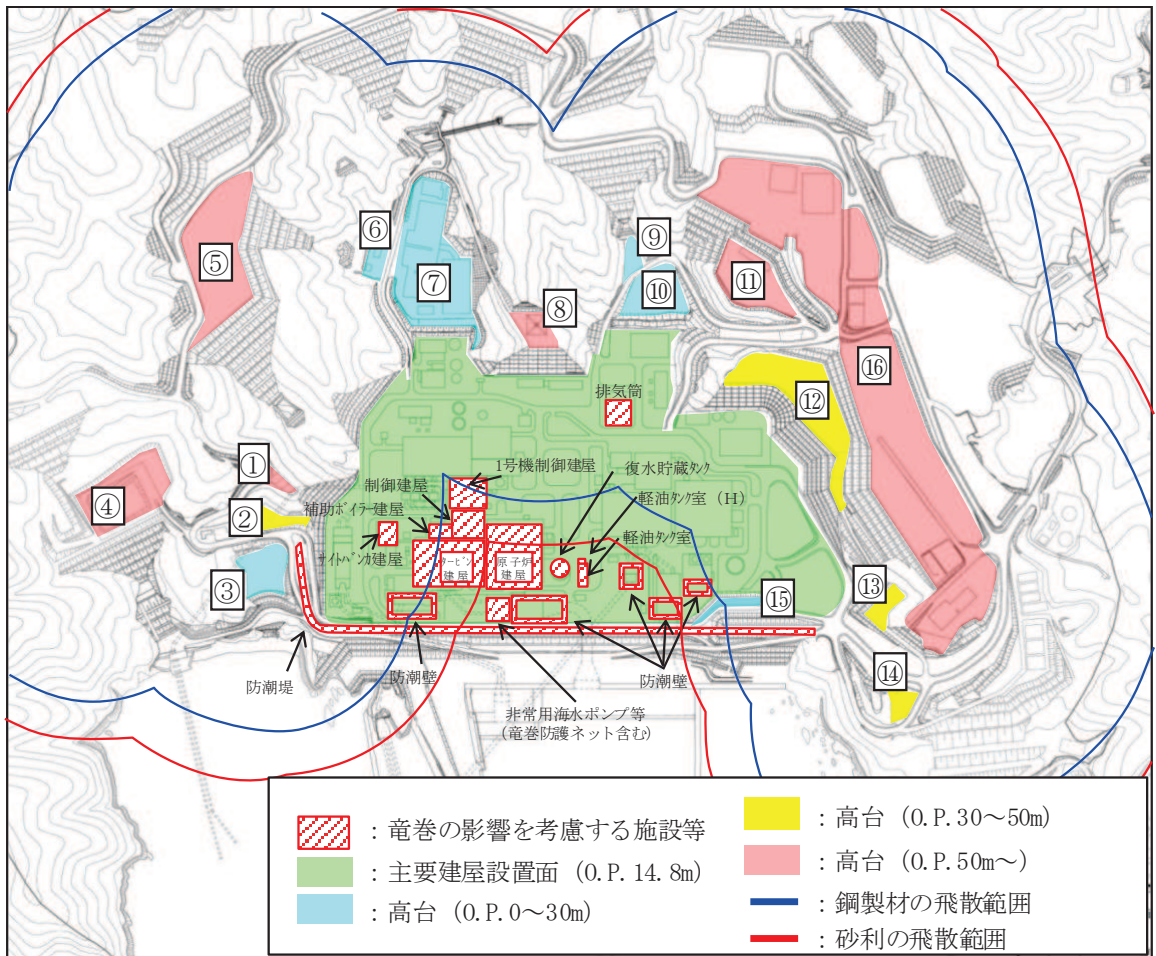


図 1.8-4 各高台からの設計飛来物（鋼製材，砂利）の飛散範囲

表 1.8-4 竜巻の影響を考慮する施設の飛来物評価条件（鋼製材）

主な竜巻の影響を考慮する施設*	設計飛来物（鋼製材）が到達する高台のうち最大鉛直速度が最も大きくなる高台* ¹		鋼製材	
			最大水平速度 [m/s]	最大鉛直速度 [m/s]* ²
防潮堤	⑯	0. P. 62m	46.6	34.7
タービン建屋	①	0. P. 56m		32.9
補助ボイラー建屋	①	0. P. 56m		32.9
サイトバンカ建屋	①	0. P. 56m		32.9
防潮壁	①	0. P. 56m		32.9
排気筒	⑧	0. P. 50m		31.1
1号機制御建屋	⑧	0. P. 50m		31.1
制御建屋	無		16.7	
原子炉建屋				
軽油タンク室				
軽油タンク室（H）				
復水貯蔵タンク				
竜巻防護ネット* ³				

注記*1：番号は図 1.8-4 の高台の位置を示す

*2：高台の上空 11.5m の高さからの飛散評価結果（飛散高さからの自由落下速度）

*3：非常用海水ポンプの竜巻防護対策

表 1.8-5 竜巻の影響を考慮する施設の飛来物評価条件（砂利）

主な竜巻の影響を考慮する施設	設計飛来物（鋼製材）が到達する高台のうち最大鉛直速度が最も大きくなる高台* ¹		砂利	
			最大水平速度 [m/s]	最大鉛直速度 [m/s]* ²
防潮堤	⑯	0. P. 62m	59.3	37.9
タービン建屋	①	0. P. 56m		36.3
補助ボイラー建屋	①	0. P. 56m		36.3
サイトバンカ建屋	①	0. P. 56m		36.3
防潮壁	①	0. P. 56m		36.3
排気筒	⑧	0. P. 50m		34.6
1号機制御建屋	①	0. P. 56m		36.3
制御建屋	①	0. P. 56m		36.3
原子炉建屋	①	0. P. 56m		36.3
軽油タンク室	無			22.6
軽油タンク室（H）				
復水貯蔵タンク				
非常用海水ポンプ				
竜巻防護ネット* ⁴			27.2* ³	
			22.6	

注記*1：番号は図 1.8-4 の高台の位置を示す

*2：高台の上空 8.0m の高さからの飛散評価結果（飛散高さからの自由落下速度）

*3：海水ポンプ室の地上面からピット底面までの深さ（11.8m）を考慮

*4：非常用海水ポンプの竜巻防護対策

1.8.4 最大鉛直速度に対する保守性の確認

(1) 原子力発電所の竜巻影響評価ガイドに対する考え方

原子力発電所の竜巻影響評価ガイド（以下「NRA ガイド」という。）では、設計飛来物の最大鉛直速度を以下のとおり設定できると示されている。

【NRAガイドより抜粋】

解説 4.3.1.3.3 設計飛来物の速度の設定

(1) 基本的な考え方

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

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

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

ここで、 ${}_M V_{Hmax}$ は、設計飛来物の最大水平速度を表す。

(2) NRA ガイドに対する考え方

設計飛来物の最大鉛直速度については、NRA ガイドで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し、LES (Large-eddy-simulation) を用いた飛来物の飛散評価結果が例示されている。しかしながら、LES を実際の竜巻スケールの評価に適用するには、境界条件の設定等の様々な課題がある。

このため、当社は藤田博士が実観測に基づき考案し、実際の被害状況（飛散距離）に対しても再現性がある竜巻渦モデルであるフジタモデルを用いた飛散評価を行っている。

(3) 最大鉛直速度の設定における保守性

最大鉛直速度の設定においては、フジタモデルの風速場を用いて飛散評価を実施するに当たり、風速場モデルの不確かさ及び実際の竜巻現象に対する不確かさを「流入層高さ」及び「飛来物の初期高さ」の設定において考慮している。

また、当社の竜巻影響評価においては、「基準竜巻の設定」から「竜巻の影響を考慮する施設の構造健全性の確認」までの評価全体において不確かさを考慮した設定としていることから、竜巻影響評価全体としての保守性が確保されている。

1.8.5 竜巻の影響を考慮する施設に対する評価条件の設定

設備影響評価において、飛来物の衝突を想定する範囲（影響範囲）は、保守的に「設計飛来物が到達する高さ」以上の範囲もカバーする観点から、図 1.8-5 に示すとおり、竜巻の影響を考慮する施設の全面に設計飛来物が影響を及ぼすものとして評価する。これにより、飛散速度の設定から設備影響評価までの一連の評価において保守性を考慮している。

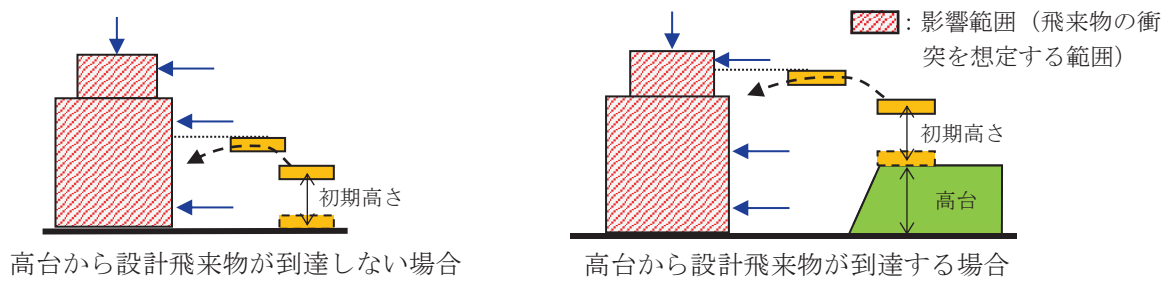


図1.8-5 影響範囲

以上

(添付資料)

1. 流入層高さが地表面付近の物体に与える影響
2. 流入層高さの感度解析範囲の考え方
3. 鉛直速度に対する流入層高さの影響
4. 流入層高さを変化させた場合の感度解析結果

参考文献

- (1) 江口讓, 杉本聡一郎, 服部康男, 平口博丸, 竜巻による物体の浮上・飛来解析コード TONBOS の開発, 電力中央研究所 研究報告 N14002, 2014.
- (2) Fujita, T.T., Workbook of tornadoes and high winds for engineering applications, U.Chicago, 1978.
- (3) Karen A. Kosiba and Joshua Wurman: The Three-Dimensional Structure and Evolution of a Tornado Boundary Layer. Weather and Forecasting, 28, 1552-1561, 2013.
- (4) 東京工芸大学, 平成 21~22 年度原子力安全基盤調査研究 (平成 22 年度) 竜巻による原子力施設への影響に関する調査研究, 独立行政法人原子力安全基盤機構委託研究成果報告書, 2011.

流入層高さが地表面付近の物体に与える影響

フジタモデルを用いた飛散評価では、竜巻の流入層と地表面付近の物体の初期高さが影響する。ここでは、流入層のモデル化の概要及び設計飛来物の飛散評価に対する流入層高さ(範囲:6m~17.5m)の感度解析結果を示す。

1. フジタモデルにおける流入層高さのモデル化

(1) 風速場の概要

フジタモデルを用いた飛散評価における風速場は図 1 に示すように、半径方向に 3 つの領域(内部コア、外部コア、最外領域)で構成され、鉛直方向は流入層と非流入層で構成される。

流入層では竜巻中心方向に向かう強い流れ(流入風)があり、この空気の流れ込みが外部コア内での上昇風となる。

流入風の最大風速は流入層の上限で発生するようにモデル化しており、地表面に近づくにつれて連続的に減衰する(図 2 参照)。

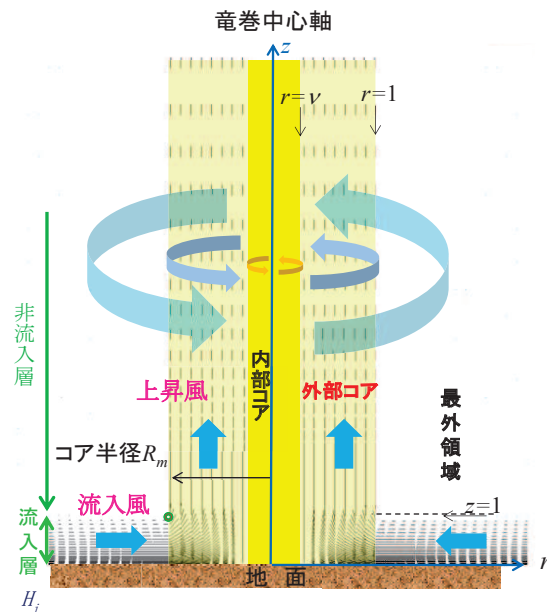


図 1 フジタモデルの飛散評価手法を用いた風速場 (イメージ)

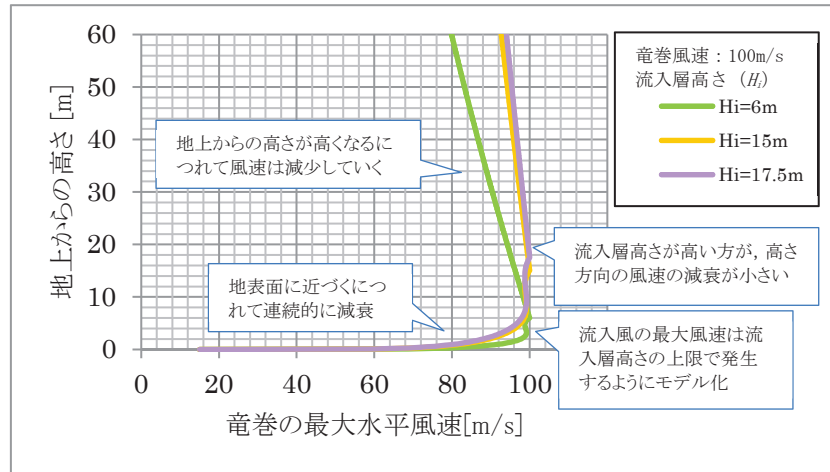


図2 フジタモデルの風速場における最大水平風速と地上からの高さの関係
($H_i=6m, 15m, 17.5m$ の場合)

(2) 地面効果の影響

地表面付近の物品については、保守的に物品が浮上しやすくするために、物品の形状に応じた揚力（地面効果）を加えている。揚力は空力パラメータに応じて決定され、物体高さの3倍までの高さの範囲で連続的に減衰するように作用する。

(3) 風速場における上昇風及び流入風

流入層高さが異なる場合でも、竜巻の規模（風速、外部コア半径等）が同じ場合には、流入風速の最大値は変わらないことから、流入層内における同一の高さの物品は、流入層高さが高い場合に比べて、低い場合の方が大きな流入風速の影響を受ける（図3参照）

また、流入層高さが高い場合の方が、流入層内の流量が大きいため、流入層高さが低い場合に比べて、外部コア内の上昇風速が大きくなる（図3参照）

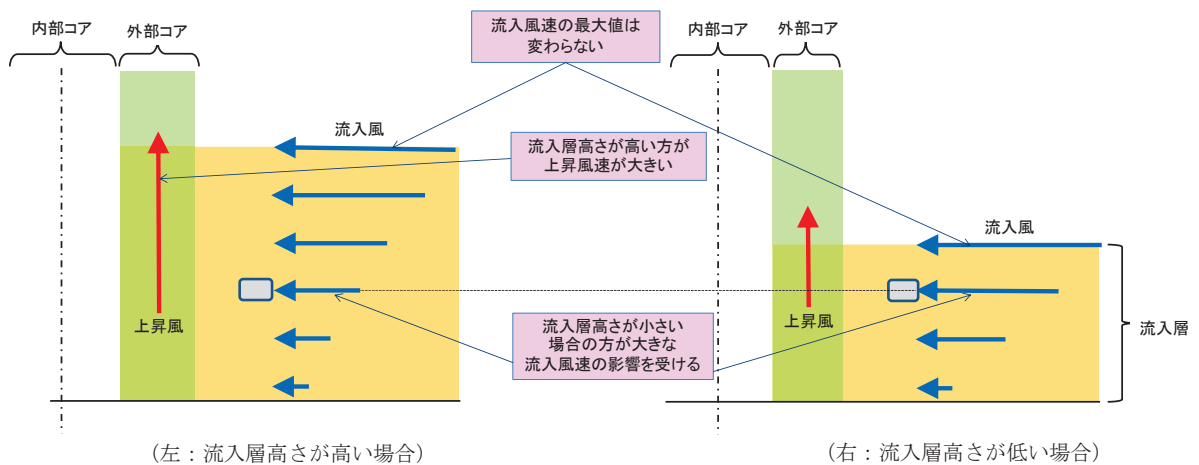


図3 風速場における流入風と上昇風のイメージ

2. 流入層高さが飛散評価に与える影響の感度解析結果

設計飛来物（鋼製材，砂利）に対し，流入層高さの感度解析の範囲を6m～17.5mとした場合の感度解析結果及び考察を示す。

2.1 鋼製材の感度解析結果の傾向及び影響

(1) 最大水平速度に対する影響

特徴的な傾向として，初期高さが増加するに従い，約11mまでは水平速度が大きく増加し，その後の変化は緩やかとなる。（図4，5参照，a.～c.は物品の初期高さを示す）

- a. 初期高さが0m（地表面）では，地面効果による大きな揚力を受けて，わずかに浮上する。また，流入層高さが低い方が流入風は大きく，地面効果により高く浮上する。このため，高い流入風の影響を受けることとなり，流入層高さが低い方が水平速度はわずかに大きくなる。
- b. 初期高さが低い場合（約11mまでの範囲（地表面除く））は，流入層高さが低い方が，流入層内で相対的に大きな流入風を受けるため，わずかであるが値が大きくなる。
- c. 初期高さが高い場合（約11m以上の範囲）は，図4に示すように流入層高さが高い方が大きな竜巻の水平風速の影響を受けることから，水平速度は大きくなる。初期高さが高くなるにつれて，竜巻の水平風速は緩やかに減少していくようにモデル化していることから，水平速度も同様に低下していく。

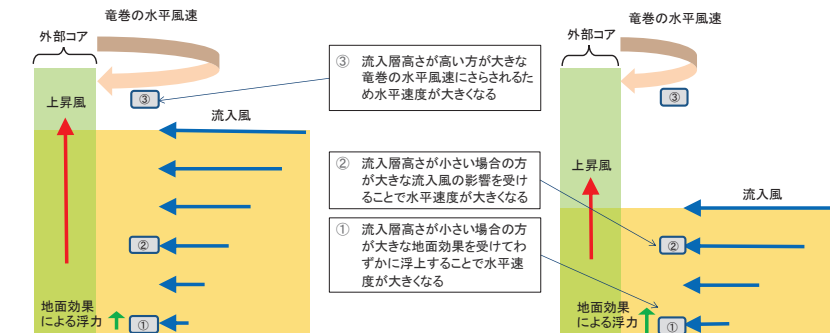


図4 飛散イメージ（水平速度，左：流入層高さが高い，右：流入層高さが低い）

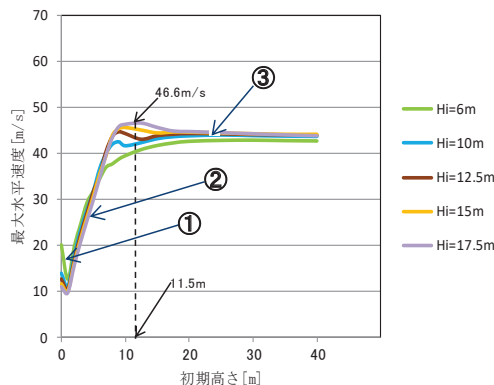


図5 水平速度の感度解析結果（鋼製材）

(2) 最大鉛直速度に対する影響

特徴的な傾向として、鋼製材の浮上条件に到達しない初期高さ約 11m までは、ほぼ同じ鉛直速度となる。(図 6, 7 参照, a. ~d. は物品の初期高さを示す)

- a. 初期高さが 0m (地表面) では、地面効果による大きな揚力を受けて、わずかに浮上する。流入層高さが低い方が、より大きい流入風によって地面効果を大きく受けるようにモデル化しているため、わずかに高く浮上する。このため、高い流入風の影響を受けて、鉛直速度がわずかに大きくなる。
- b. 初期高さが低い場合 (約 11m までの範囲 (地表面除く)) では、流入層高さが高い場合でも浮上条件に到達せず、飛散高さが変わらないことから、鉛直速度は流入層高さの影響を受けない。
- c. 初期高さが約 11m からは、流入層高さが高い方が浮上するため、鉛直速度が増加する。(図 7 右参照)
- d. 初期高さが高い場合 (約 11m 以上の範囲) では、流入層高さが高くなるに連れ、竜巻コア内の上昇風の影響を受けて浮上するため、鉛直速度が増加する傾向となる。

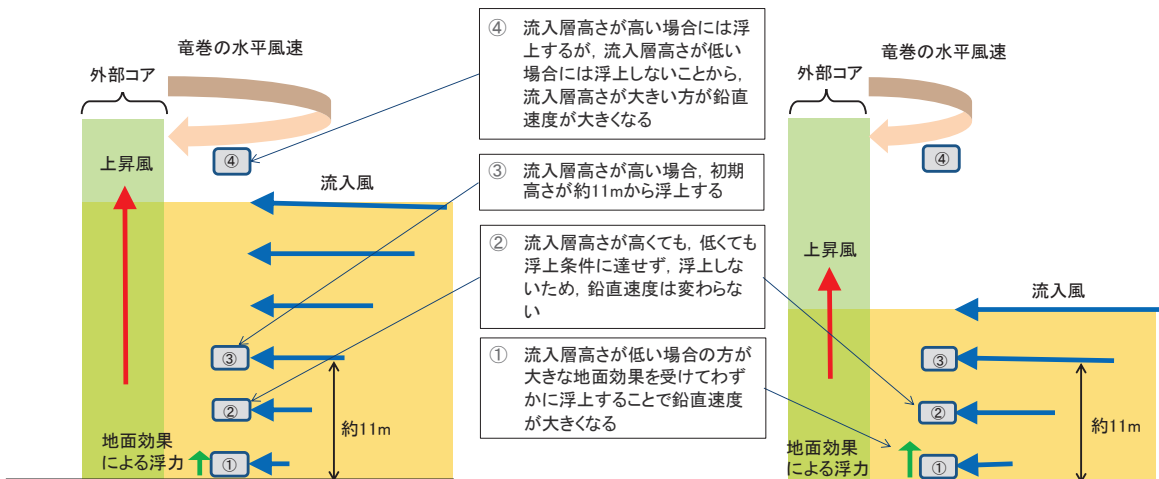


図 6 飛散イメージ (鉛直速度, 左: 流入層高さが高い, 右: 流入層高さが低い)

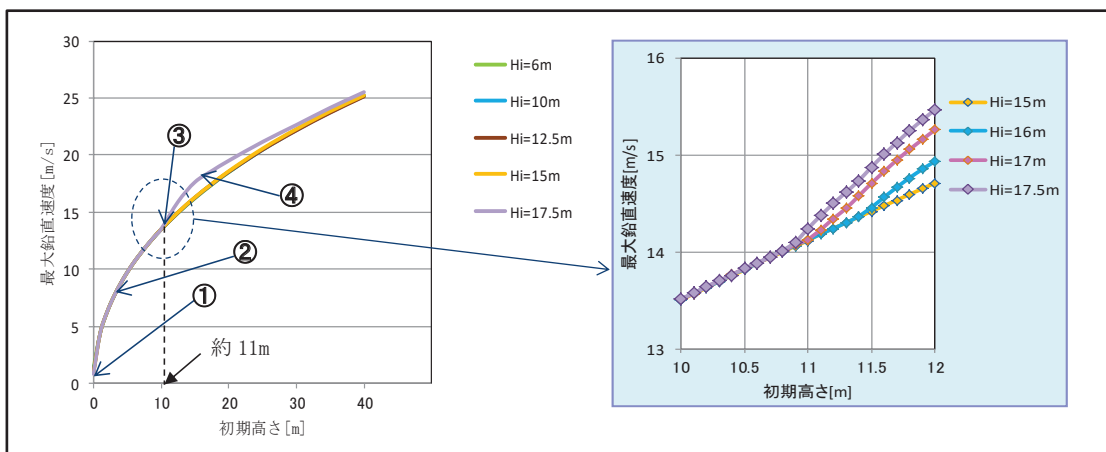


図 7 鉛直速度の感度解析結果 (鋼製材)

2.2 砂利の感度解析結果の傾向及び影響

特徴的な傾向として、鋼製材同様に初期高さが増加するに従い、約 8m までは水平速度が大きく増加し、その後の変化は緩やかとなる。

(1) 最大水平速度に対する影響 (図 8 参照)

- ・初期高さが 0m (地表面) 付近では、地面効果による大きな揚力を受けて、わずかに浮上する。流入層高さが低い方が流入風が大きく、地面効果により高く浮上する。このため、高い流入風の影響を受けて、水平速度はわずかに大きくなる。
- ・初期高さが増加するに従い、約 5m までは水平速度が大きく増加し、その後の変化は緩やかになる。
- ・流入層高さの影響は鋼製材と同様の傾向である。

(2) 最大鉛直速度に対する影響 (図 9 参照)

- ・初期高さが 0m (地表面) 付近では、地面効果による大きな揚力を受けて、わずかに浮上する。流入層高さが低い方が流入風が大きく、地面効果により高く浮上する。このため鉛直速度はわずかに大きくなる。
- ・初期高さが低い場合 (約 5m までの範囲) では、流入層高さが高い場合でも浮上条件に到達せず、飛散高さが変わらないことから、鉛直速度は影響を受けない。
- ・初期高さが高い場合 (約 5m 以上の範囲) では、流入層高さが高くなるに従い、竜巻コア内の上昇風の影響を受けて浮上することから、鉛直速度が増加する傾向となる。
- ・流入層高さの影響は鋼製材と同様の傾向である。

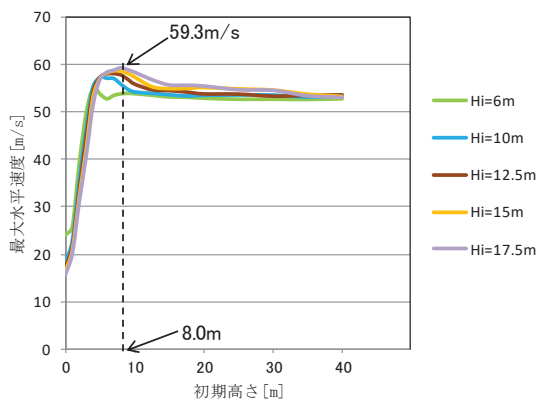


図 8 水平速度の感度解析結果 (砂利)

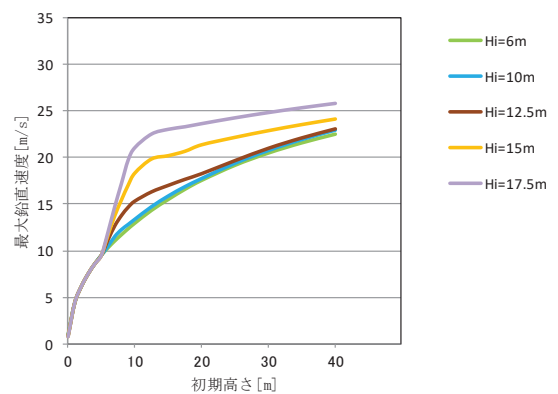


図 9 鉛直速度の感度解析結果 (砂利)

2.3 鉛直速度に対する自由落下速度の感度

物体が風速場内で落下する場合、上昇風を受けるため、純粋な自由落下と挙動が異なることから、鉛直速度における自由落下速度の影響について確認した。

(1) 自由落下速度の影響（図 10, 11 参照）

- 物品は竜巻の風速場の影響により浮上し、地表面に落下する挙動となるため、自由落下時の鉛直速度の影響が支配的となる。
- 「算出した鉛直速度」と飛散評価により得られる「最大飛散高さからの自由落下時の最大鉛直速度」を比較すると、「算出した鉛直速度」は上昇風の影響を受け、落下時に減速されるため、最大飛散高さからの自由落下時の最大鉛直速度の方が大きく算出されることを確認した。
- 流入層高さは上昇風速の大きさに影響を及ぼすことから、「算出した鉛直速度」は流入層高さの影響を受ける。

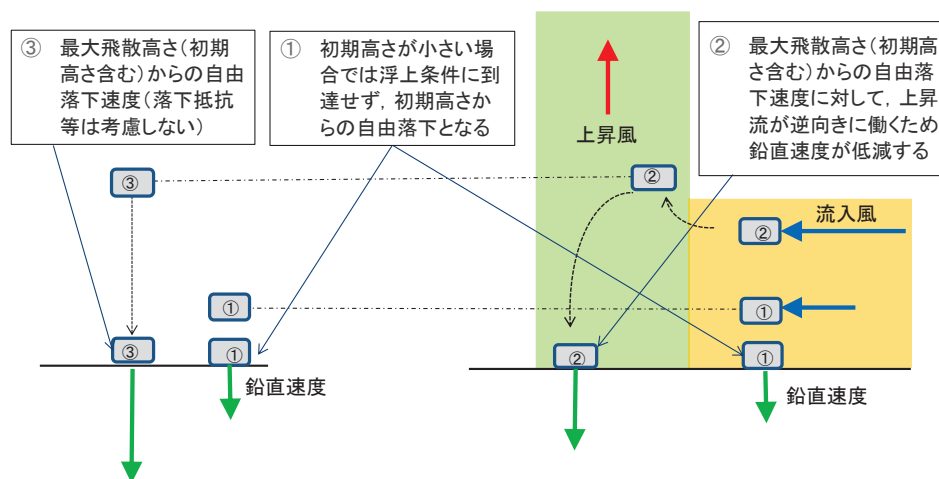
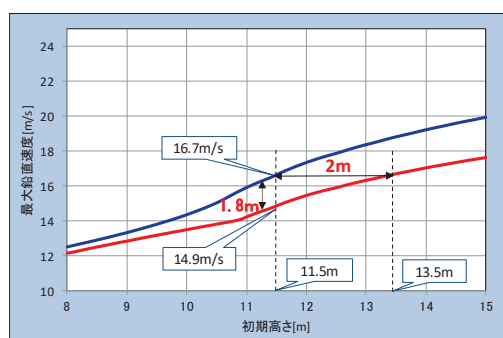


図 10 鉛直速度のイメージ

(左：自由落下による鉛直速度，右：風速場の影響を受ける鉛直速度)



・ 「自由落下による鉛直速度」の増加分（約 1.8m/s）は「算出した鉛直速度」における「初期高さ：約 2m」の増加に相当する

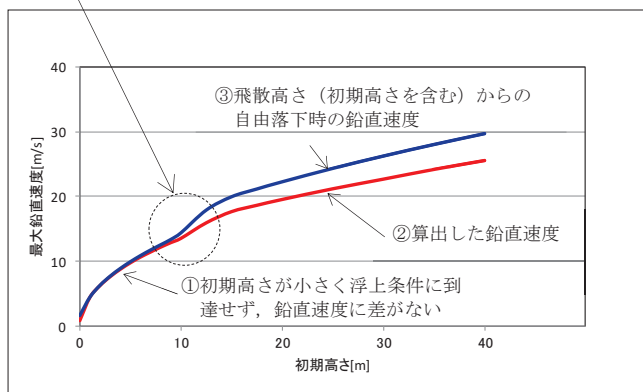


図 11 鉛直速度と初期高さの関係（鋼製材，流入層高さ：17.5m）

以上

流入層高さの感度解析範囲の考え方

流入層高さは飛散評価に影響を与えることから、適切な流入層高さで評価する必要がある。この影響を確認するにあたり、流入層高さの感度解析範囲を 6m～17.5m と設定した。

以下に流入層高さの感度解析範囲の考え方について示す。

1. 流入層高さの感度解析範囲の考え方

(1) 最新の竜巻観測・研究結果

Kosiba⁽¹⁾らの観測結果においては、外部コア半径 (R_m) が約 50m の竜巻に対して、竜巻中心方向への流入風 (1m/s～7m/s) は地面から 10～14m 以下で発生したと観測していることから、外部コア半径と流入層高さの比 (η) は 0.2～0.3 以上と推測される。この場合、 R_m が 30m の場合には流入層高さ (H_i) は 6m～9m 程度と算定される。

(2) 解析による流入層高さの推測

原子力安全基盤機構の調査研究報告書⁽²⁾による解析においては、 R_m が 30m における η は 0.4 程度であり、 H_i は 12m 程度となっている。

(3) Fujita Workbook⁽³⁾による竜巻事例に対する分析による流入層高さの推測

Fujita Workbook⁽³⁾では竜巻事例を可視化して分析しており、 R_m が約 120m と大きな竜巻に対して、 H_i は約 70m と観測していることから、 η は 0.58 (120/70=0.583) であると記載されている。文献⁽⁴⁾では流入層高さは R_m に比例するとされているが、 R_m が 30m と比較的小さな竜巻に $\eta=0.58$ を適用した場合には、 H_i は 17.5m となる。

(4) 工学的モデルによる流入層高さの設定

Fujita Workbook⁽³⁾における工学的モデルとして、 H_i を R_m の関数として以下のとおり設定しており、設計竜巻の最大風速 $V_D=100\text{m/s}$ の場合、 $R_m=30\text{m}$ であり、 η が約 0.5 であることから、 $H_i=15\text{m}$ と算出される。

$$H_i = \eta R_m \quad (1)$$

η : 流入層高さ と 外部コア半径 の比

$$\eta = 0.55(1 - \nu^2) \quad (2)$$

ν : 内部コア半径 と 外部コア半径 の比

$$\nu = 0.9 - 0.7 \exp(-0.005 R_m) \quad (3)$$

3. 流入層高さの感度解析範囲の設定について

上記の検討を踏まえると、最新の研究⁽¹⁾で流入層高さは約 6m～9m と低く推測されているものの、過去の知見を幅広く確認した結果、 R_m が 30m の竜巻に対する流入層高さの感度解析範囲は 6m～17.5m が妥当と判断した。

参考文献

- (1) Karen A. Kosiba and Joshua Wurman : The Three-Dimensional Structure and Evolution of a Tornado Boundary Layer. *Weather and Forecasting*, 28, 1552-1561, 2013 .
- (2) 東京工芸大学, 平成 21～22 年度原子力安全基盤調査研究 (平成 22 年度) 竜巻による原子力施設への影響に関する調査研究, 独立行政法人原子力安全基盤機構委託研究成果報告書, 2011.
- (3) Fujita, T. T., *Workbook of tornadoes and high winds for engineering applications*, U. Chicago, 1978.
- (4) Howard B. Bluestein, *Severe Convective Storms and Tornadoes -- Observations and Dynamics--*, Springer, 2013.

鉛直速度に対する流入層高さの影響

1. 風速場モデルの影響の確認

最大鉛直速度は自由落下による最大速度に対して、竜巻コア内の上昇風が影響を及ぼすことから、以下の評価結果の比較によって影響を確認した。

- ・ 飛散評価により得られる最大鉛直速度
- ・ 飛散評価により得られる最大飛散高さからの自由落下時の最大鉛直速度

図 1 に示すとおり、流入層高さ (H_f) が 17.5m と高い場合には、鉛直速度は大きな上昇風の影響を受けることになるが、最大飛散高さからの自由落下時の最大鉛直速度はこの影響を受けないことから、飛散高さからの自由落下時の最大鉛直速度が大きく算出されることを確認した。

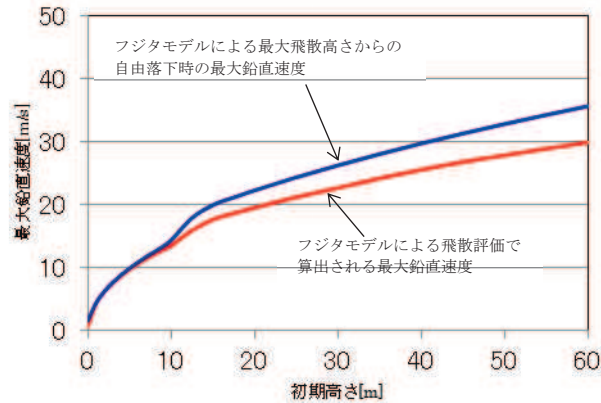


図 1 最大鉛直速度と初期高さの関係 (鋼製材, $H_f=17.5\text{m}$)

2. 流入層高さの最大鉛直速度への影響

流入層高さを変化させたときの最大鉛直速度及び最大飛散高さから自由落下した場合の鉛直速度への影響を確認した。結果を表 1 及び表 2 に示す。

鋼製材の場合には、 $H_f=17.5\text{m}$ のときの飛散高さから自由落下した場合の最大鉛直速度が最大であり、16.7m/s となった。また、砂利の場合には $H_f=17.5\text{m}$ のときの飛散高さから自由落下した場合の最大鉛直速度が最大であり、22.6m/s となった。

表 1 流入層を変化させた場合の飛散高さ及び自由落下速度 (鋼製材)

条件	風速：100m/s, 初期高さ：11.5m				
	6.0	10	12.5	15	17.5
流入層高さ (H_f) [m]	6.0	10	12.5	15	17.5
飛散評価により得られる最大鉛直速度 [m/s]	14.4	14.4	14.4	14.4	14.9
飛散高さ [m]*	11.5	11.5	11.7	12.8	14.1
飛散高さから自由落下した場合の最大鉛直速度 [m/s]	15.0	15.0	15.1	15.8	16.7

注記*：飛散高さは初期高さを含んだ値

表2 流入層を変化させた場合の飛散高さ及び自由落下速度（砂利）

条件	風速：100m/s, 初期高さ：8.0m				
	6.0	10	12.5	15	17.5
流入層高さ(H_i) [m]	6.0	10	12.5	15	17.5
飛散評価により得られる最大鉛直速度[m/s]	11.7	12.3	13.8	15.5	17.2
飛散高さ[m]*	8.2	12.0	15.6	20.2	26.0
飛散高さから自由落下した場合の最大鉛直速度[m/s]	12.7	15.4	17.5	19.9	22.6

注記*：飛散高さは初期高さを含んだ値

流入層高さを変化させた場合の感度解析結果

流入層高さが飛散評価に与える影響を確認するため、設計飛来物である鋼製材及び砂利に対する流入層高さの感度解析を実施した。

感度解析の設定条件を表 1、鋼製材に対する感度解析の結果を表 2～表 5 及び砂利に対する感度解析の結果を表 6～表 9 にそれぞれ示す。

表 1 感度解析条件

項目	設計飛来物の種類	
	砂利	鋼製材
設計竜巻風速[m/s]	100	
サイズ[m]	縦×横×高さ 0.04×0.04×0.04	縦×横×高さ 4.2×0.3×0.2
質量[kg]	0.2	135
流入層高さ(H _i) [m]	6, 10, 12.5, 15, 17.5	
飛来物評価手法	フジタモデルの風速場を用いた飛来物評価手法	
初期高さ[m]	初期高さは飛来物の地面からの高さを示す（高台からの飛散評価の場合は、「高台高さ+初期高さ」からの飛散評価を実施）	

表2 鋼製材に対する感度解析結果 (O.P. 14.8m)

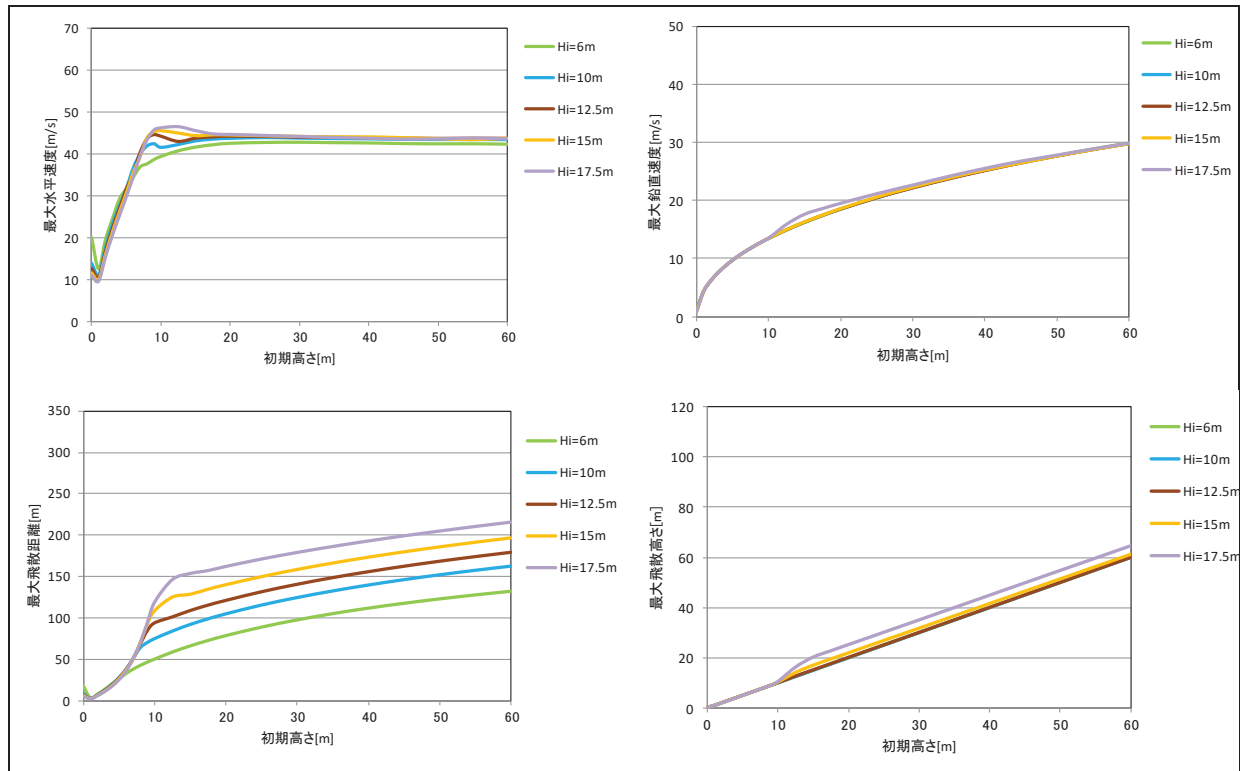


表3 鋼製材に対する感度解析結果 (O. P. 50m)

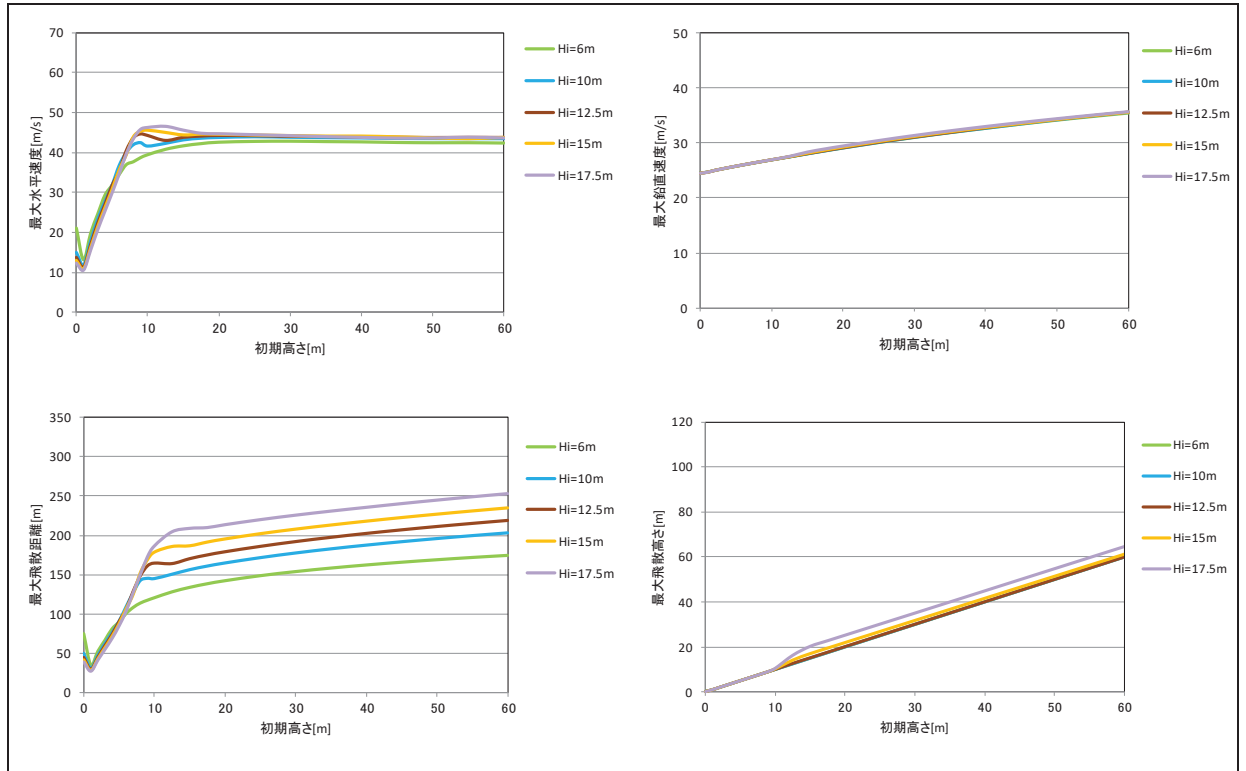


表4 鋼製材に対する感度解析結果 (O. P. 56m)

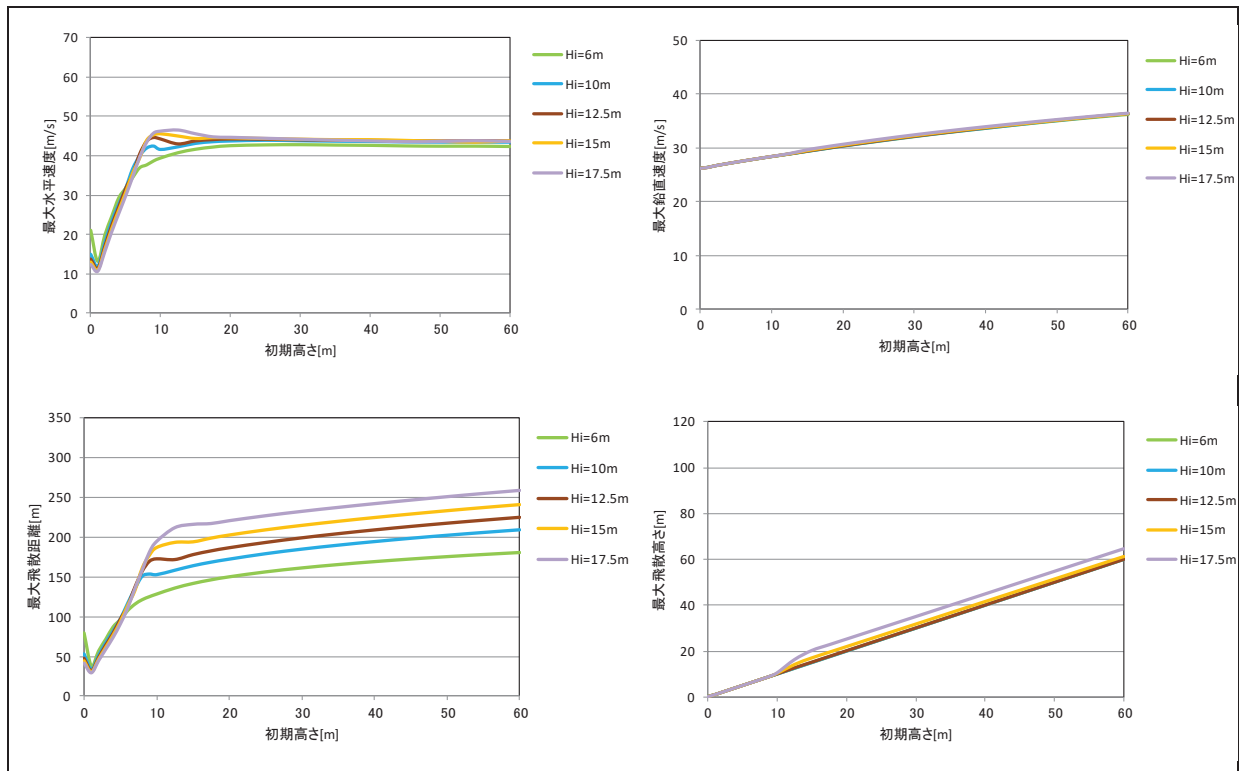


表5 鋼製材に対する感度解析結果 (O. P. 62m)

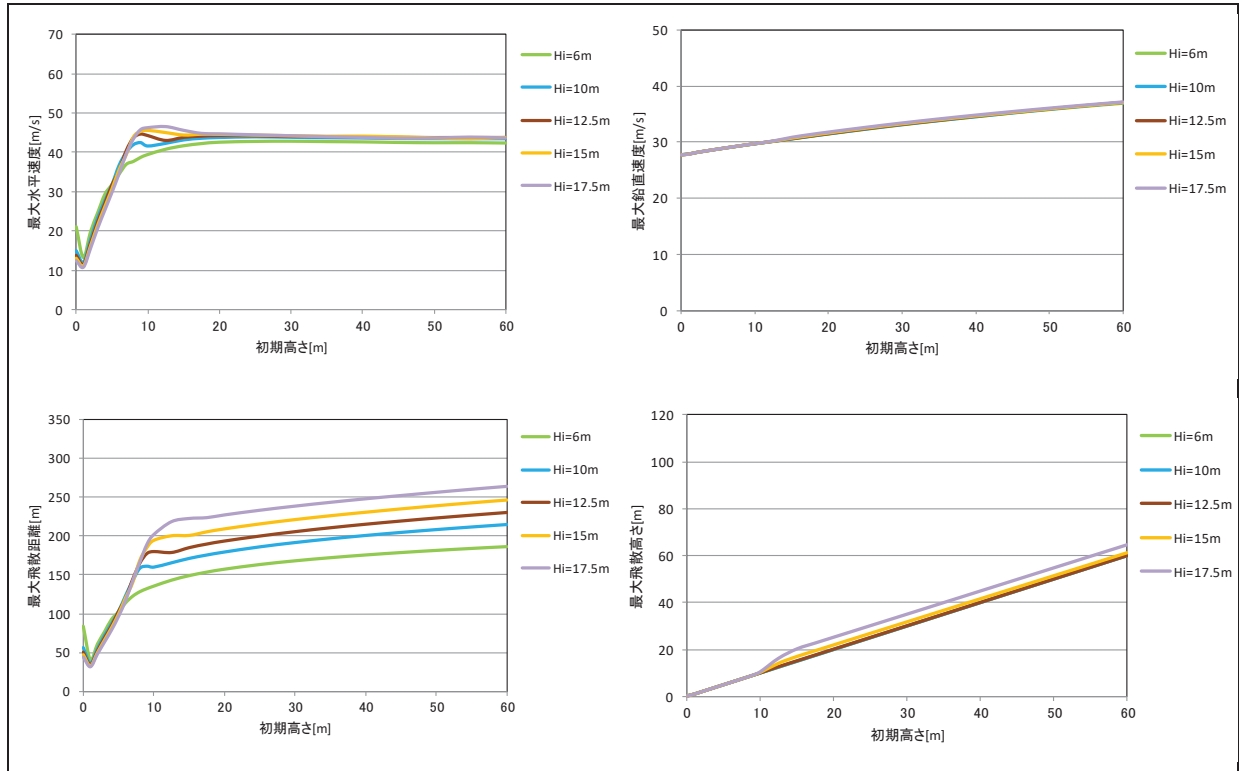


表6 砂利に対する感度解析結果 (O. P. 14. 8m)

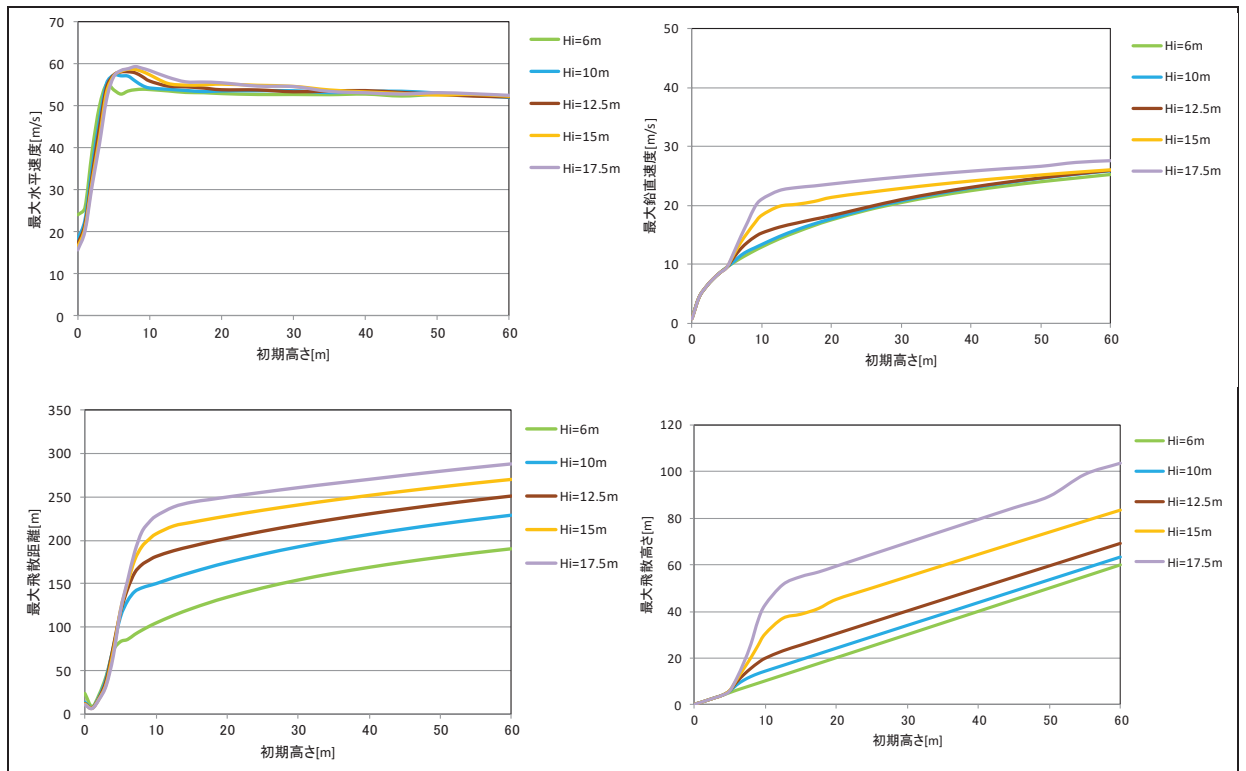


表7 砂利に対する感度解析結果 (O. P. 50m)

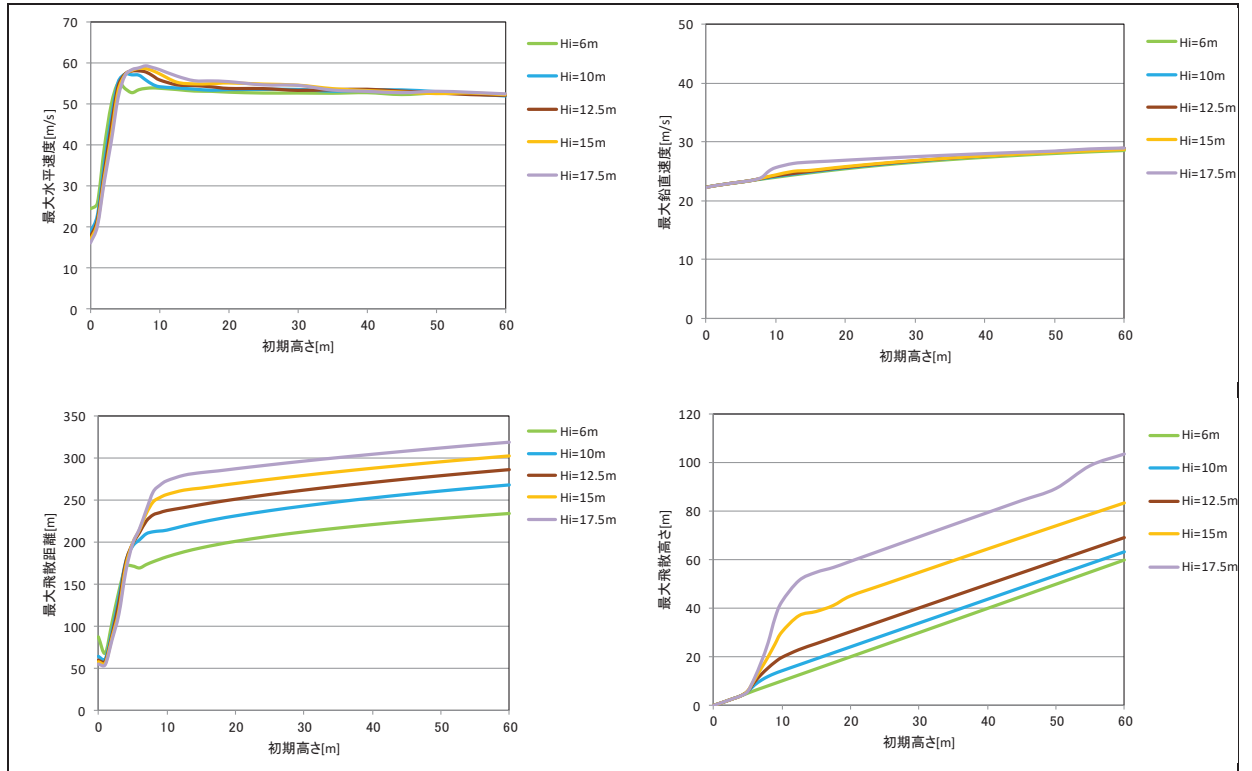


表8 感度解析結果 (砂利 O. P. 56m)

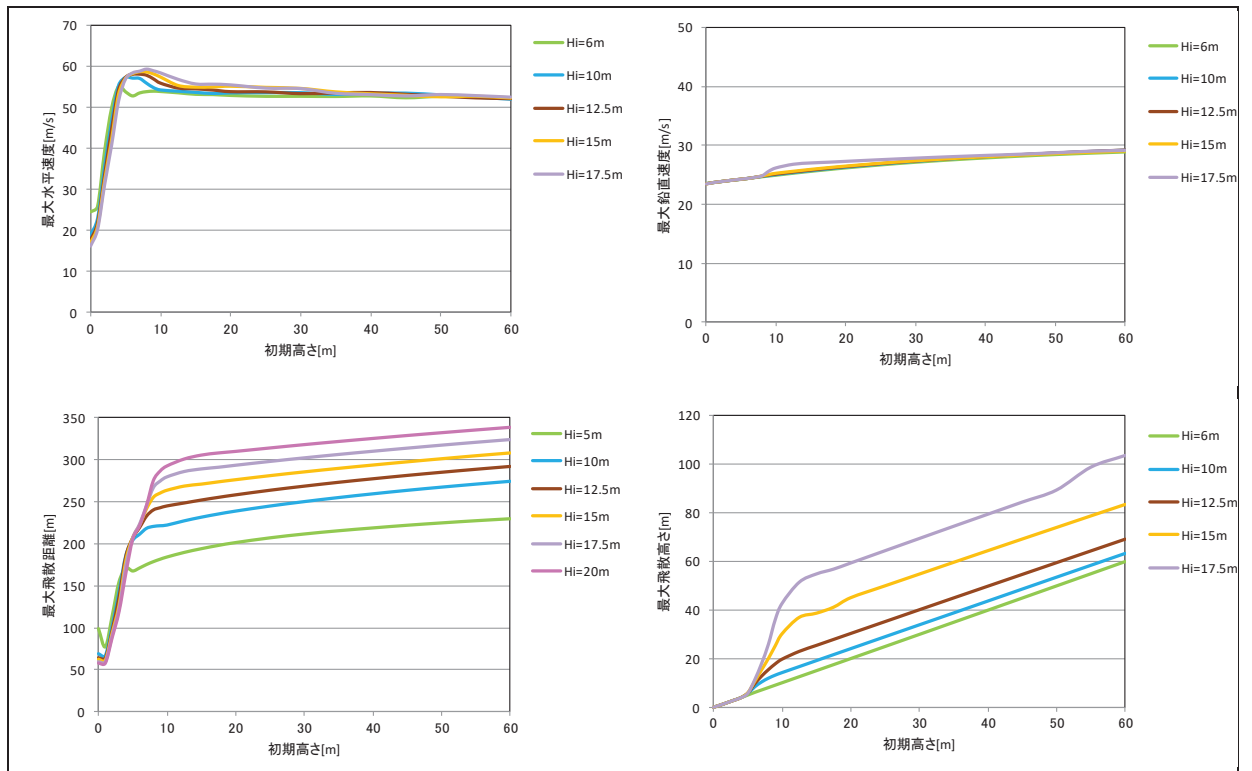
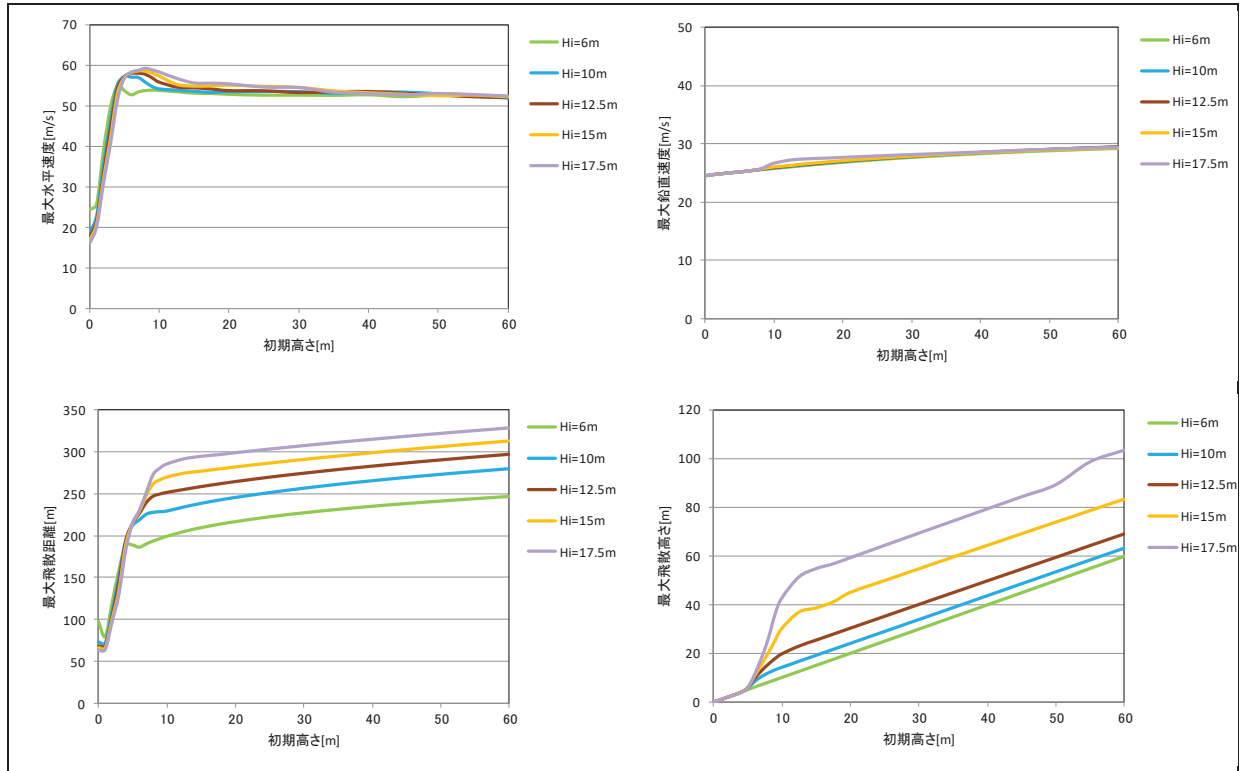


表9 感度解析結果 (砂利 O.P. 62m)



1.9 設計竜巻の最大風速 100m/s の設定について

1.9 設計竜巻の最大風速 100m/s の設定について

1.9.1 概要

基準竜巻及び設計竜巻の設定は、図 1.9.1 に示すとおり竜巻検討地域の設定、基準竜巻の最大風速の設定及び設計竜巻の最大風速の設定の流れで実施する。

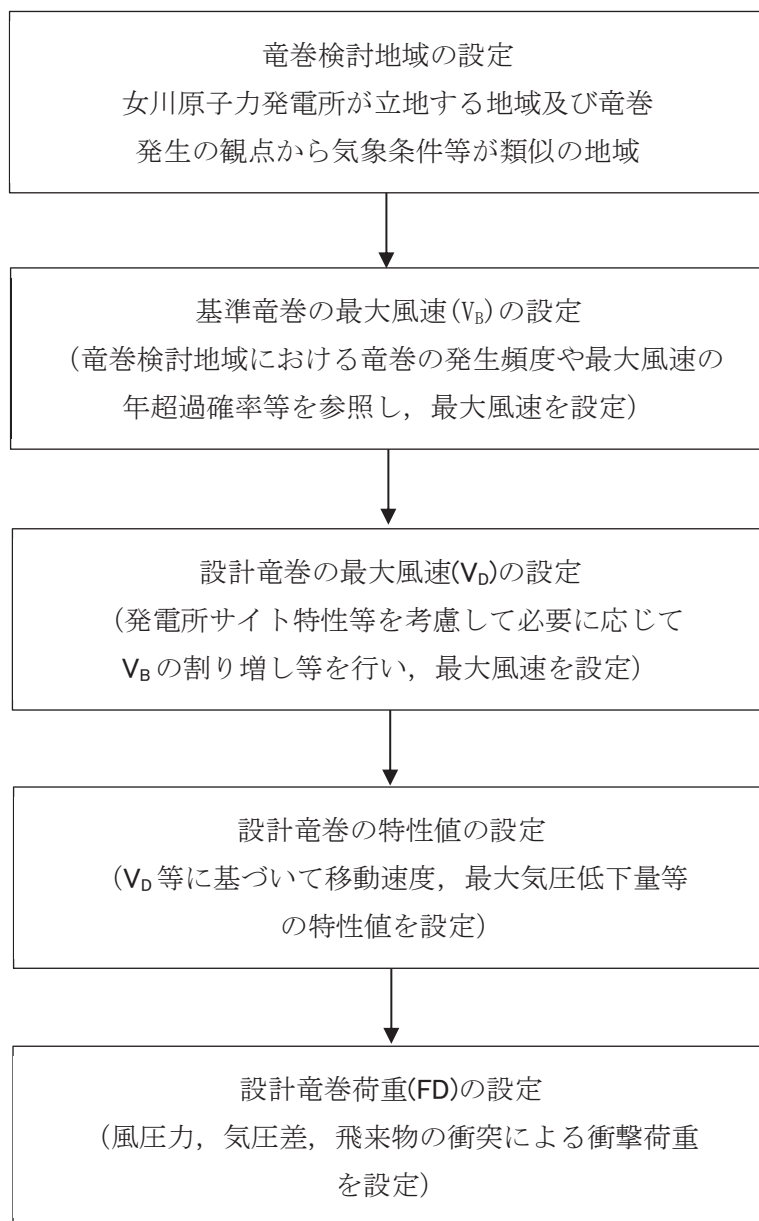


図 1.9.1 基準竜巻・設計竜巻の設定に係る基本フロー

1.9.2 竜巻検討地域の設定

女川原子力発電所に対する竜巻検討地域について、ガイドを参考に、発電所が立地する地域と気象条件の類似性の観点で検討を行い、図 1.9-2 に示すとおり北海道襟裳岬から千葉県九十九里町までの海岸線から陸側及び海側それぞれ 5km の範囲を竜巻検討地域に設定した（面積約 18,800km²）。以下にその妥当性確認の結果を示す。



図 1.9-2 竜巻検討地域

(1) 竜巻検討地域の妥当性確認

竜巻検討地域の妥当性について、以下の観点から確認を実施した。

- a. 気候区分による確認
- b. 総観場の分析に基づく地域特性の検討
- c. 突風関連指数に基づく地域特性の検討

竜巻検討地域は、a. の確認により、日本海側と太平洋側が気候特性の異なる地域に整理されることを確認するとともに、女川原子力発電所が立地する気候区分(区分IV3)を確認した。

「原子力発電所の竜巻影響評価ガイド(案)及び解説」の考え方にに基づき、竜巻発生要因となる気象条件(総観場)を確認する観点から、b. の分析により地域特性を確認した。

また、一般的に大気現象は時空間スケールの階層構造が見られ、ある大気現象はスケール

の小さな現象を内包しているため、大きな竜巻の発生要因となる環境場の形成のし易さを把握する観点から、c. の分析により、竜巻の発生スケールに近いメソスケールの気象場が有する地域性と齟齬がないことについても確認した。竜巻とその関連気象の時空間スケールを図 1.9-3 に、検討の流れを示したフローを図 1.9-4 に示す。

なお、c. の突風関連指数を用いた分析は、“大きな竜巻の発生に対する大気場の必要条件”を把握する上で有効であることを踏まえ、c. の分析結果のみで竜巻検討地域を設定するものではなく、設定した竜巻検討地域の妥当性を確認するために用いている。

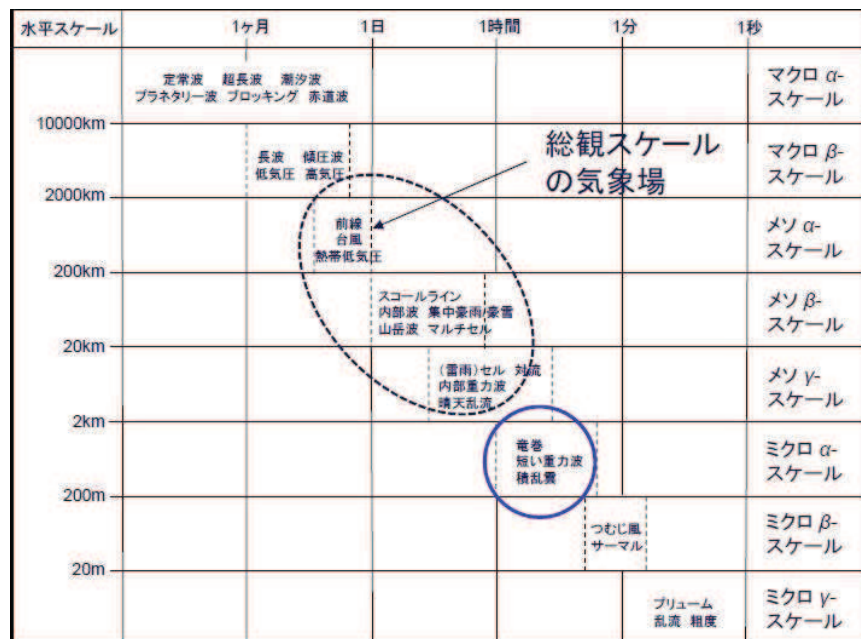


図 1.9-3 竜巻とその関係気象の時空間スケール

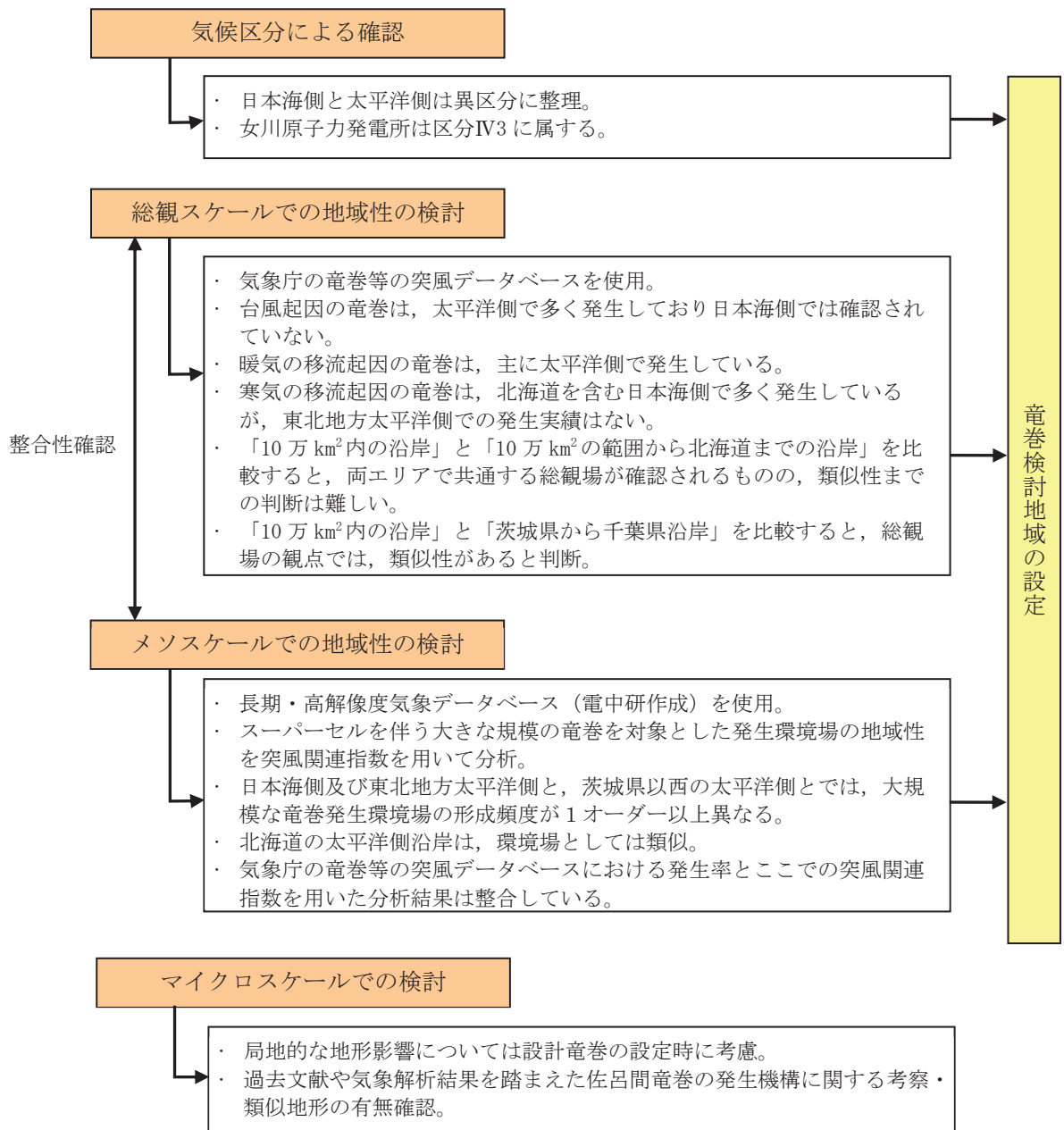


図 1.9-4 竜巻検討地域の検討フロー

(2) 気候区分による確認

女川原子力発電所が立地している宮城県の牡鹿半島は、図 1.9-5 に示す日本の気候区分において、区分IV3に属している。

区分IV3の沿岸部は、およそ宮城県から千葉県九十九里町までの広範囲な太平洋側をカバーする区域となっている。

また、ガイドにおいては、日本海側と太平洋側は気象条件が異なることが例示されており、気候区分においても日本海側と太平洋側は異なる区分であるとされている。

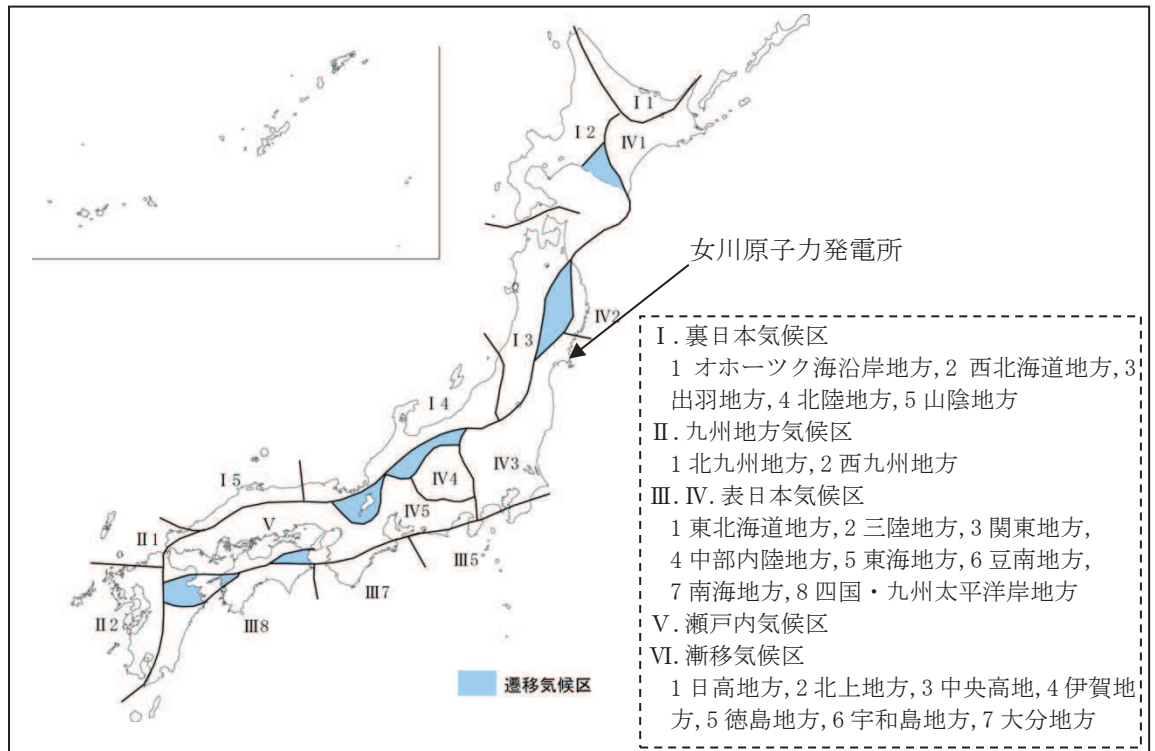


図 1.9-5 日本の気候区分

(3) 総観場の分析に基づく地域特性の検討

気象庁の竜巻等の突風データベース*では、竜巻を発生させた総観場を約 40 種に分類しているが、「原子力発電所の竜巻影響評価ガイド（案）及び解説」を参考に、竜巻を発生させる親雲の発生要因を考慮して 8 種に再編し、発生分布の特徴を分析した。表 1.9-1 に総観場の分類法と発生分布の特徴、図 1.9-6 に全国で発生した竜巻の総観場ごとの F スケール別竜巻発生分布、図 1.9-7 に F2 以上の竜巻発生箇所を示す。

注記 * : 気象庁 竜巻等の突風データベース

(<http://www.data.jma.go.jp/obd/stats/data/bosai/tornado/index.html>)

分析の結果、竜巻発生要因となる気象条件の観点で、以下のような地域特性があることを確認した。

- ① 台風起因の竜巻は、太平洋側で多く発生しており日本海側では確認されていない。規模的には、関東以西の太平洋側ではF3を含む規模の大きな竜巻が発生しているが、東北地方太平洋側ではF1が1件発生しているのみである。台風は北上するにつれて衰弱しやすい特性を有しているため、この特徴が発生傾向にも現れている（図1.9-6(a)）。
- ② 暖気の移流起因の竜巻は、主に太平洋側で発生している。規模的には、関東以西の太平洋側ではF3を含む規模の大きな竜巻が多く発生しているが、東北地方太平洋側ではF1が1件発生しているのみである。主に太平洋側で発生している要因としては、太平洋側は暖湿流が大気下層に流入することが多いためと考えられる。特に関東平野では太平洋側から流入する暖気が遮られずに内陸深くまで流入するため、内陸部でも発生が集中している（図1.9-6(b)）。
- ③ 寒気の移流起因の竜巻は、北海道を含む日本海側で多く発生しているが、東北地方太平洋側での発生実績はない。北海道を含む日本海側で発生数が多い要因としては、北からの寒気が山岳等に遮られずに直接流入するためと考えられる（図1.9-6(c)）。また、地域ごとの竜巻発生総観場及び寄与割合の比較結果（図1.9-9）より、以下の内容を確認した。
- ④ 「日本海側」と「太平洋側」を比較すると、総観場の分布が大きく異なっており、この点からも気候区分として差別化することが可能と考えられる（図1.9-9(a), (b)）。
- ⑤ 「10万km²内の沿岸」と「10万km²の範囲から北海道までの沿岸」を比較すると、両エリアで暖気の移流や局地性など共通する総観場が確認できるが、竜巻の発生実績が少ないエリアということもあり、総観場の観点から明確に差別化はできない（図1.9-9(c), (d)）。
- ⑥ 「10万km²内の沿岸」と「茨城県から千葉県沿岸」を比較すると、竜巻の発生数は少ないものの「10万km²内の沿岸」で確認された総観場全てが、「茨城県から千葉県沿岸」において確認できるため、類似性のあるエリアとして取り扱うことが適切と考えられる（図1.9-9(d), (e)）。

以上の分析結果より、発電所の立地地域より北側のエリア（竜巻集中地域を含んだ北海道までの沿岸）は、総観場的に地域性が異なると明確に差別化することはできず、また、南側のエリア（千葉県までの沿岸）については、発生数は少ないものの総観場的に類似性のあるエリアとして考慮する必要があると判断した。よって、北海道から千葉県までの太平洋側沿岸を竜巻検討地域として設定することが適切と判断した。

表 1.9-1 総観場の分析と特徴

総観場	気象庁 DB の分類	特徴
寒気の移流	寒気の移流	大気上層に寒気が流入することで大気が不安定になり竜巻の親雲を形成する環境場。下層に暖気の移流があると、親雲の更なる発達を促すため、F3 竜巻も見られる。
低気圧	熱帯低気圧(台風以外), 南岸低気圧, 日本海低気圧, 二つ玉低気圧, 東シナ海低気圧, オホーツク海低気圧, その他(低気圧)	寒気と暖気が接し傾圧不安定による組織的な雲を形成する環境場。南からの下層の暖湿流がある場合、親雲の更なる発達を促すため、F3 竜巻も見られる。
寒冷前線	寒冷前線, 気圧の谷	大気上層への寒気の移流と、それにともなう組織的な前線の形成により親雲を形成する環境場。南からの下層の暖湿流がある場合、親雲の更なる発達を促すため、F3 竜巻も見られる。
その他前線	温暖前線, 閉塞前線, 停滞前線, 梅雨前線, 前線帯, 不安定線, その他(前線)	寒冷前線以外の前線により親雲を形成する環境場。暖湿流が主要因となる場合が多い。
局地性	局地性擾乱, 雷雨(熱雷), 雷雨(熱雷を除く), 地形効果, 局地性降水	地域的な大気循環により親雲を形成する環境場。親雲の形成に地形的な影響も受けることも多い。
暖気の移流	暖気の移流, 湿舌	大気下層に暖湿流が流入することで竜巻の親雲を形成する環境場。上層の寒気の移流がある場合、親雲の更なる発達を促す。
台風	台風	台風により竜巻の親雲を形成する環境場。台風中心の北東方向では、南東からの強い暖気移流があるため、非常に活発な積乱雲が発生しやすいため、F3 竜巻も多くみられる。
その他	移動性高気圧, 中緯度高気圧, 太平洋高気圧, 大陸高気圧, オホーツク海高気圧, 帯状高気圧, その他(高気圧), 季節風, 大循環異常, その他	上記に当てはまらない環境場。気圧配置の変わり目が多いが、全体の個数は少ない。

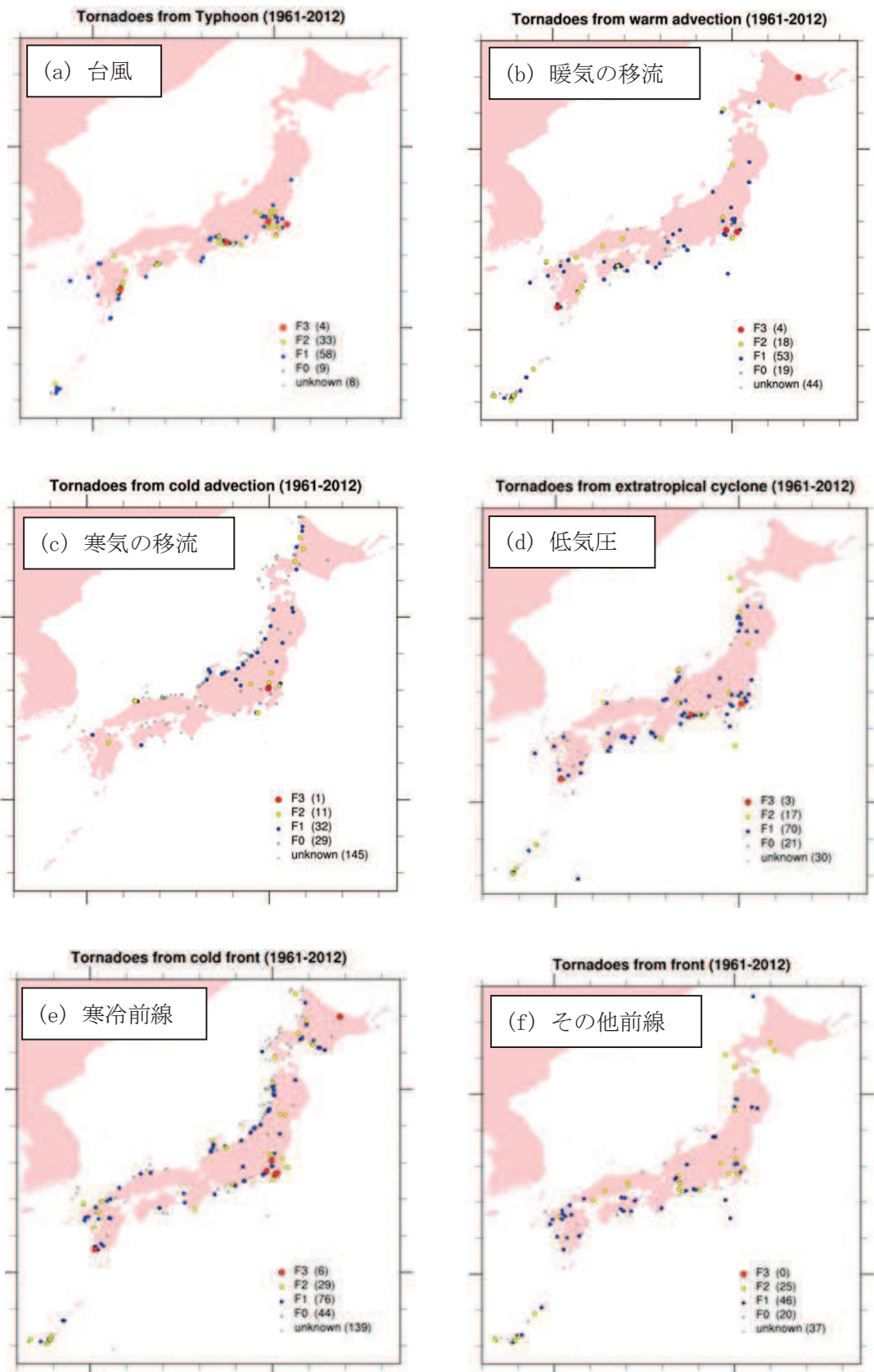


図 1.9-6 総観場ごとのFスケール別竜巻発生分布 (1/2)

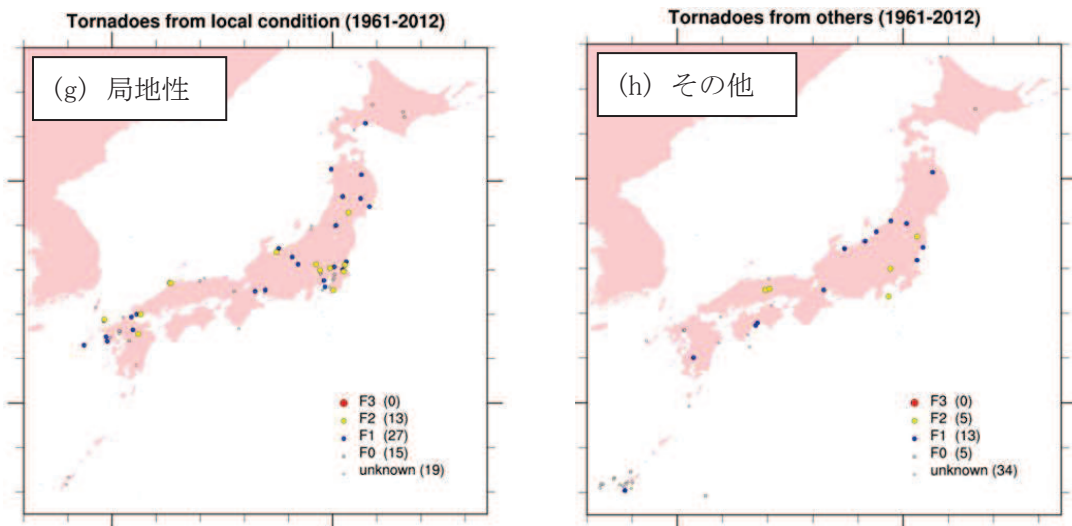


図 1.9-6 総観場ごとのFスケール別竜巻発生分布 (2/2)

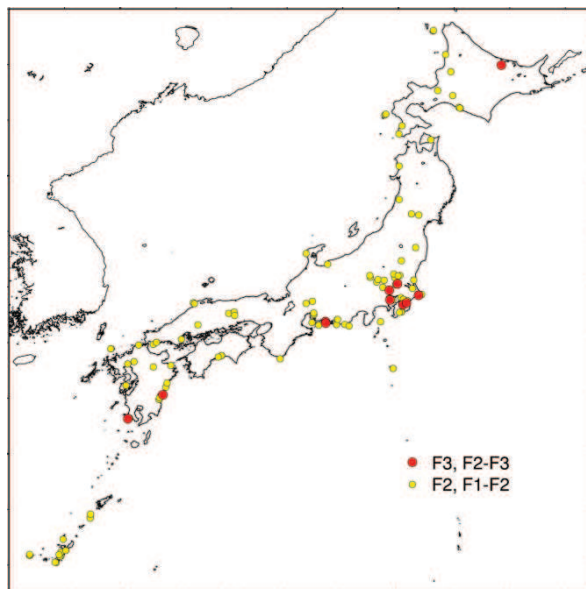


図 1.9-7 F2以上の竜巻発生箇所
(気象庁「竜巻等の突風データベース」をもとに作成)

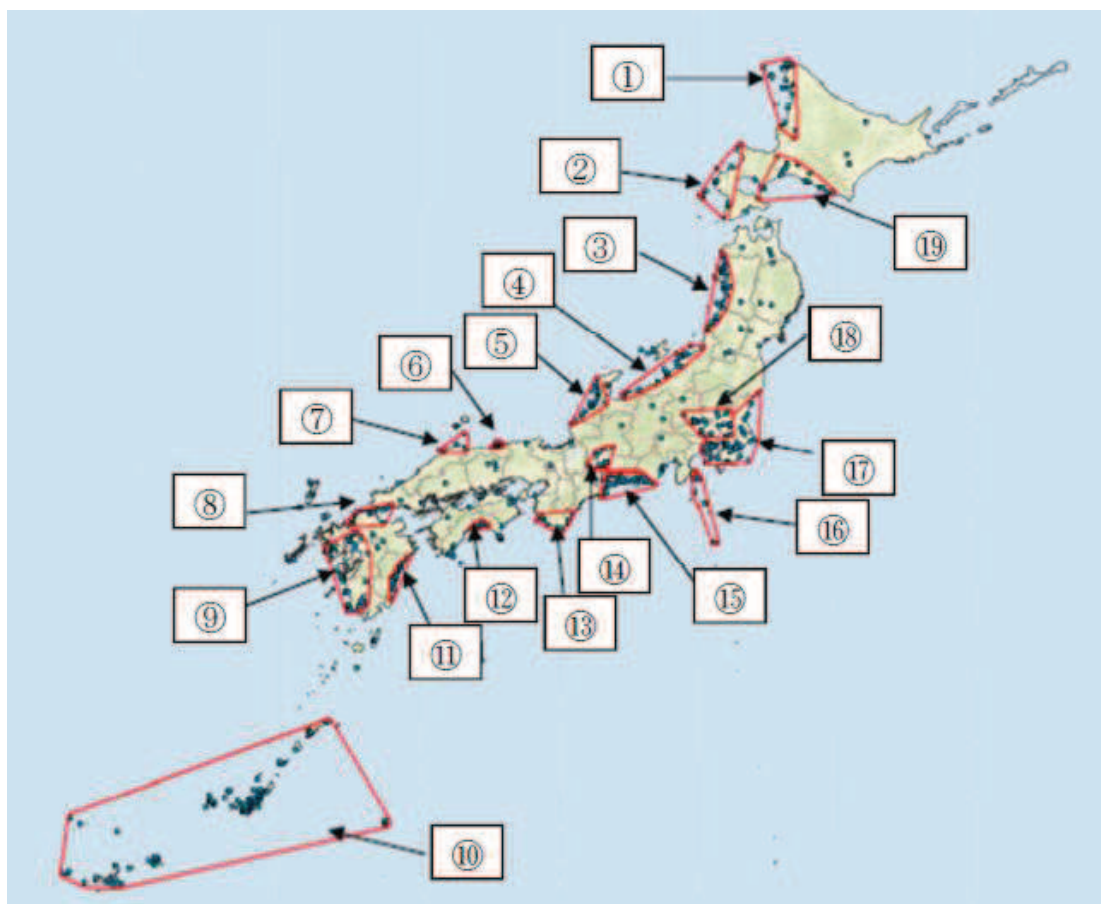
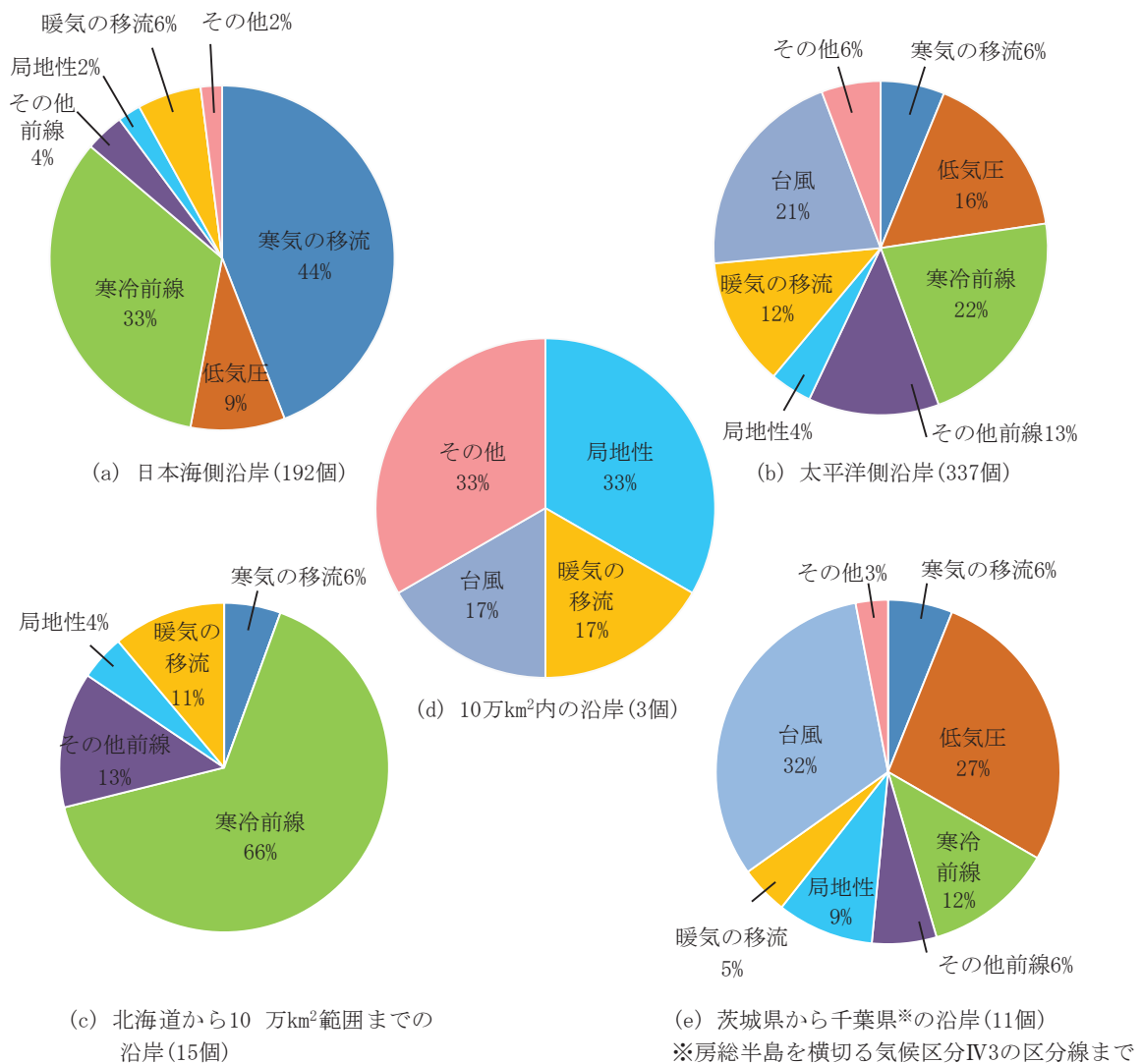


図 1.9-8 竜巻集中地域

(JNES「原子力発電所の竜巻影響評価ガイド(案)及び解説」より引用)



()は竜巻個数を示す

図 1.9-9 地域ごとの竜巻発生総観場及び寄与割合の比較

(4) 突風関連指数に基づく地域特性の検討

総観場での検討に加え、大きな被害をもたらす強い竜巻の発生要因となる環境場の形成のし易さに対する地域特性を検討するため、気象庁や米国気象局における現業においても竜巻探知・予測に活用されており、竜巻の発生し易さを数値的に示すことができる突風関連指数を用いて地域特性の検討を行った。なお、突風関連指数を用いての検討については日本海側と太平洋側の地域性が異なること、さらに立地地域とその他の地域の特性を確認するために実施したものであり、特定規模の竜巻発生の可能性を評価するものではない。

a. 突風関連指数を用いた竜巻予測の技術について

竜巻の主な発生メカニズムは、二つに大別されると考えられている。一つは局地的な前線(寒気団と暖気団との境界線)に伴って生じた渦が上昇流によって引き伸ばされて竜巻となるもので、比較的寿命が短く強い竜巻になりにくいとされている。もう一つは「スーパーセ

ル」と呼ばれる、回転する継続した上昇気流域（メソサイクロン）を伴った非常に巨大な積乱雲に伴って竜巻が発生するものである。スーパーセル内では、下降流域と上昇流域が分離されるため、巨大な積乱雲が長時間持続する傾向にある。近年、ドップラーレーダによる解析を基にした竜巻の事例調査が進んだことにより、大きな被害をもたらす強い竜巻の多くはスーパーセルに伴って発生することが判明している。現状、竜巻を直接予測することは困難であるが、大規模竜巻の発生と関係が深いスーパーセルの発生環境を予測することにより竜巻発生を間接的に予測できる。以下に、竜巻発生予測について、突風関連指数を適用している例を示す。

気象庁での突風関連指数の適用状況

気象庁では平成 20 年 3 月から、低気圧の発達等に関して半日から 1 日程度前に発表する予告的な気象情報において、11 種類の突風関連指数を算出し、竜巻やダウンバースト等の激しい突風が発生する可能性があるると予測される場合には、当気象情報において注意喚起することとした。

その後、気象庁では竜巻等の突風の予測プロダクトとして、平成 22 年 5 月より竜巻発生確度ナウキャスト情報の提供を開始した。竜巻発生確度ナウキャストは、「竜巻が今にも発生する（又は発生している）可能性の程度」（発生確度）を 10 分ごとに解析した結果をもとに、降水域の移動ベクトル等を用いて 1 時間先まで発生確度を予測する。発生確度の解析は、以下の二つの技術を組み合わせて実施している。

- ・気象ドップラーレーダ観測によるメソサイクロン（親雲）検出技術
- ・メソ数値予測（MSM）を用いた突風危険指数の算出技術

竜巻発生確度ナウキャストにおけるデータ等の流れを図 1.9-10 に示す。竜巻発生確度ナウキャストは最新の観測・解析データをもって短いリードタイムの予測を迅速に行うことが主目的のため、レーダプロダクトに重みを置いている。また、小さな竜巻も見逃しなく予測できるような説明変数として突風関連指数を選択している。

以上のように、気象庁では竜巻の監視や様々なリードタイムに対する予測に突風関連指数を活用している。

海外での突風関連指数の適用状況

海外では、米国の気象庁にあたる NOAA の SPC（ストーム予測センター）においても気象庁と同様に、突風関連指数の情報とレーダー観測のデータが現業で活用されており、突風関連指数に関する検討も盛んに行われている。

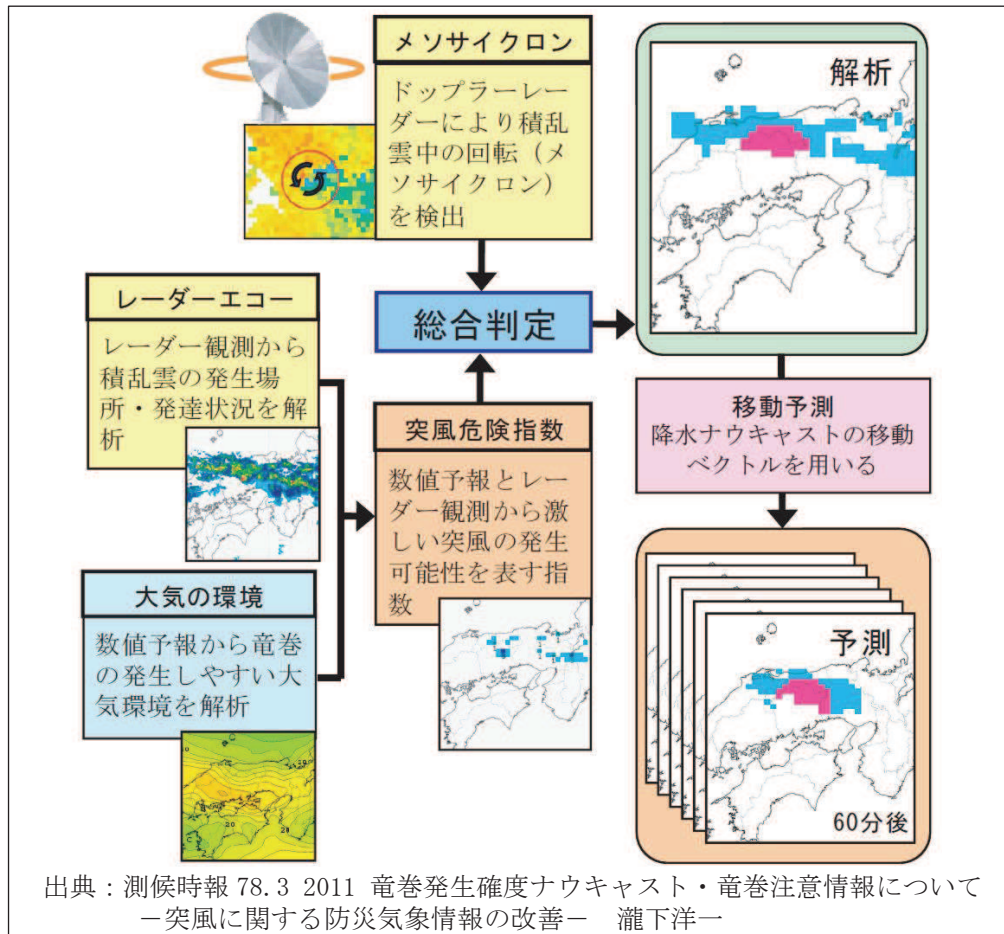


図 1.9-10 竜巻発生確度ナウキャストの解析・予測技術

b. 検討に用いる突風関連指数について

大きな被害をもたらす竜巻の親雲の多くはスーパーセルであり、スーパーセルの発生環境は予測できる技術があつて気象庁等でも活用されていることを述べてきた。ここでは、本検討に用いる突風関連指数について説明する。

図 1.9-11 に竜巻の発生メカニズムを示す。スーパーセルが発生しやすい環境場として、大気下層の鉛直シア（異なる高度間での風向・風速差）と、強い上昇気流を起こすきっかけとしての不安定な大気場が必要である。本検討では、大気不安定度を表す指標として「CAPE」、鉛直シアに伴って発生する水平渦度が親雲に取り込まれる度合いを表す指標として「SReH」を採用し、両者の指標が同時に高くなる頻度について、地域的な特徴を確認する分析を行った。また、両者を掛け合わせた指標である EHI による分析も行い、SReH・CAPE の同時超過頻度分析との比較を行った。

SReH, CAPE, EHI については、竜巻の発生実態を解明する研究において国内外で広く利用され、竜巻発生環境場との関連づけ等の知見が多く蓄積されており、気象庁での竜巻予測に用いる突風関連指数の中でも主な指標として紹介されているため、本検討を行う上でも妥当なものと考えられる。

SReH, CAPE 及びその複合指数である EHI について以下に説明する。



風向・風速差による渦の発生



上昇気流の発生



竜巻の発生

図 1.9-11 竜巻の発生メカニズム*

注記 *：江口 譲，原子力発電所の竜巻影響評価，原子力プラント機器の健全性評価に関する講習会，平成 26 年 12 月 12 日

(a) SReH (Storm Relative Helicity：ストームの動きに相対的なヘリシティ)

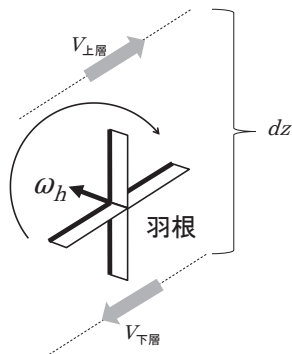
風向・風速差により発生した渦度が親雲に取り込まれる度合であり，値が大きいほど，積乱雲はスーパーセルに発達しやすい (図 1.9-12)。

$$\text{SReH} = \int_{\text{地上}}^{\text{高度3km}} (\mathbf{V} - \mathbf{C}) \cdot \boldsymbol{\omega} dz$$

V ：水平風速ベクトル

C ：ストームの移動速度

ω ：鉛直シアに伴う水平渦度



水平渦度生成に関する模式図



水平渦度の親雲への輸送に関する模式図

図 1.9-12 SReH の算出概念

(b) CAPE (Convective Available Potential Energy : 対流有効位置エネルギー)

上昇気流の発生しやすさを表し、値が大きいほど背の高い積乱雲に発達しうるため、大気的不安定度の指標となる (図 1.9-13)。

$$CAPE = \int_{LFC}^{EL} g \frac{\theta_e'(z) - \theta_e(z)}{\theta_e(z)} dz$$

g : 重力加速度

θ_e' : 持ち上げ空気塊の相当温位

θ_e : ストーム周囲の相当温位

dz : 鉛直方向の層厚

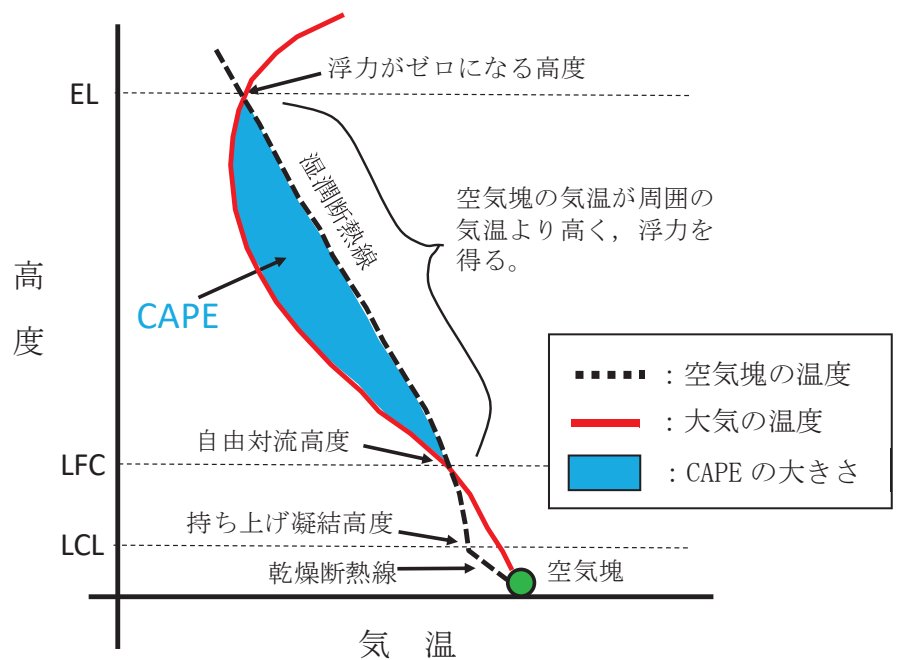


図 1.9-13 CAPE の算出概念

(c) EHI (Energy Helicity Index)

SReH 及び CAPE を用いて算出し、スーパーセルや竜巻の発生しやすさを経験的に指標化したものであり、米国では CAPE 単独又は SReH 単独に比べると、竜巻発生との相関関係が高いとされている。

$$EHI = \frac{SReH \times CAPE}{160,000}$$

(参考) 相当温位

温位とは、下式に示すように気温 T と気圧 p に関する量であり、ある空気塊を断熱的に基準圧力 1,000hPa に戻したときの絶対温度である。

2 つの空気塊を比較した場合、温位の高い空気塊は軽く上昇しやすく (不安定であり)、

単位体積中に含まれる水蒸気量が多いため、大きな積乱雲の発生につながる。

相当温位は、空気塊に含まれる水蒸気の持っている潜熱（水蒸気が凝結する際に空気塊の温度が上昇）の影響も考慮された温位である。

$$\theta = T \left(\frac{1,000}{p} \right)^{\frac{R}{C_p}} \quad (R: \text{気体定数}, C_p: \text{定圧比熱})$$

c. 突風関連指数の地域特性

これまでに発生した F3 竜巻に対する突風関連指数の分析結果を図 1.9-14 に示す。

WRF モデル (Weather Research and Forecasting model) と呼ばれる数値気象モデルを用いて当時の気象場を解析 (再現) し、それをもとに突風関連指数を算出している。図 1.9-14 をみると、季節によって CAPE の値が大きく異なるものの、F3 竜巻事例では共通して SReH と CAPE の両方が大きくなる傾向が見られた。

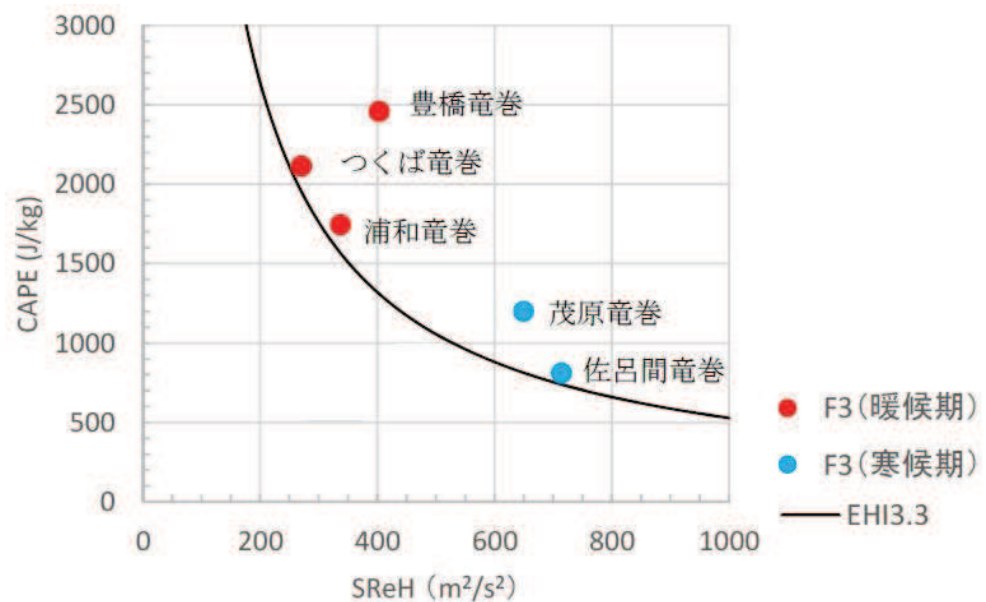


図 1.9-14 F3 竜巻における SReH と CAPE の関係

大きな竜巻を引き起こすスーパーセルの発生要因の指標である SReH と CAPE について、国内で (太平洋側で) 発生した F3 竜巻では、SReH と CAPE の両方 (あるいは複合指数である EHI) が大きな値をとる傾向が見られる。また、これまでに発生した国内における F2-F3 を含めた全ての F3 竜巻 (6 事例) は、スーパーセルを伴っていたことが報告されている。

したがって、SReH と CAPE それぞれに対して閾値を設け、その閾値を同時に超える頻度 (以下「同時超過頻度」という。) を分析することにより、スーパーセルに伴って発生するような大規模な竜巻の発生環境を観点とした地域性を見出すことができると考えられる。

d. 突風関連指数の同時超過頻度による地域性の検討

SReH と CAPE の閾値については、図 1.9-15 の F3 竜巻のデータをもとに、実際の竜巻発生地点と対応するよう、下記のように設定した。また、CAPE の閾値については、緯度・季節で絶対値が大きく変わるため、5 月～10 月（暖候期）及び 11 月～4 月（寒候期）に分けて閾値を設定した。

[5 月～10 月（暖候期）] SReH : $250\text{m}^2/\text{s}^2$, CAPE : $1,600\text{J}/\text{kg}$

[11 月～4 月（寒候期）] SReH : $250\text{m}^2/\text{s}^2$, CAPE : $600\text{J}/\text{kg}$

図 1.9-15 は、1961 年～2010 年までの 50 年間にわたって 1 時間ごとに解析されたデータをもとに、SReH と CAPE の同時超過頻度分布をマップ化したものである。

また、気象庁「竜巻等の突風データベース」で確認された F2-F3 竜巻及び F3 竜巻の発生箇所を図 1.9-16 に示す。

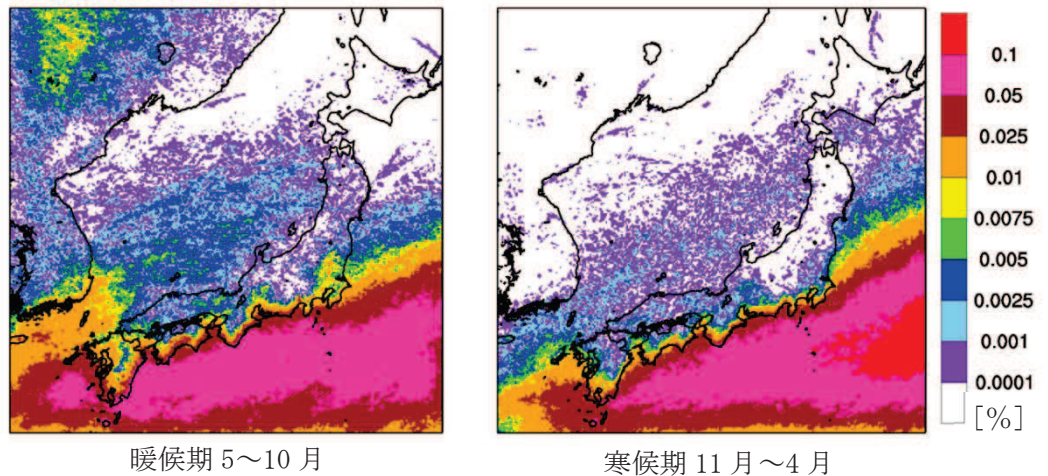


図 1.9-15 F3 規模以上を対象とした SReH, CAPE 同時超過頻度分布

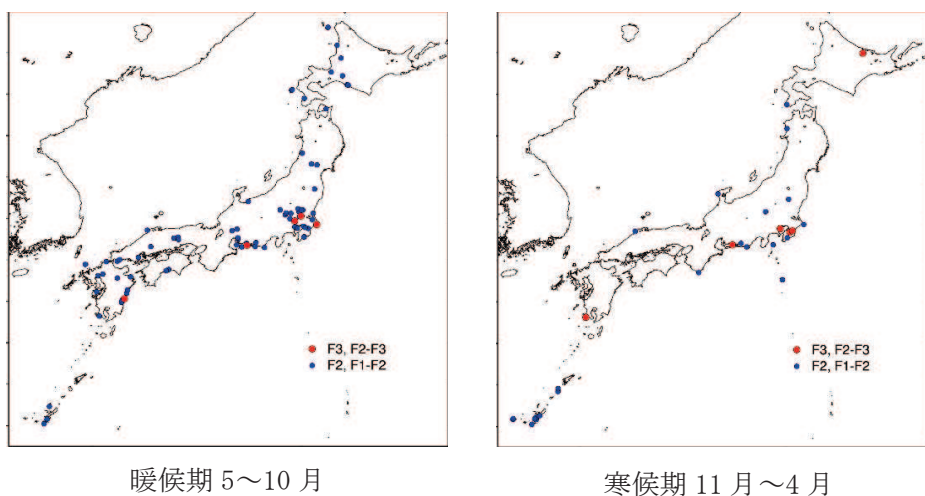


図 1.9-16 F2 規模以上の発生箇所
(気象庁「竜巻等の突風データベース」より作成)

また、EHI についても、SReH と CAPE と同様に閾値を設け超過頻度について分析した。

EHI の閾値については、過去のいずれの F3 事例においても EHI が 3.5 程度を越えていることから、それを包含する値として EHI:3.3 を設定した（暖候期と寒候期は分けない）。

EHI の超過頻度分布をマップ化したものについても図 1.9-17 に示す。

SReH, CAPE の同時超過頻度分布（図 1.9-15）に対応した結果となっており、EHI を用いて通年レベルの評価を行った場合でも地域特性がはっきり表れている。

以上により、CAPE, SReH, EHI について F3 以上を想定した特定の閾値を設けた場合の分析を実施したが、突風関連指数については不確実性が存在するため、EHI:3.0 及び 3.6 を設定した場合についても同様の地域性が現れることを確認した（図 1.9-18）。

ただし、閾値を大きくした場合、実際に F3 が発生した関東平野内を包含できなくなる。

また閾値を小さくした場合、小さな竜巻が発生する環境場をカウントすることから、地域性は薄れていくことがわかる。

なお、CAPE, SReH についても同様の感度解析を実施しており、同様の傾向が得られることを確認した。

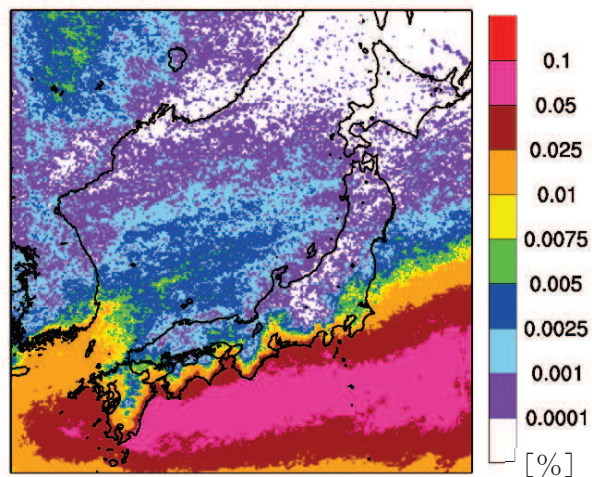
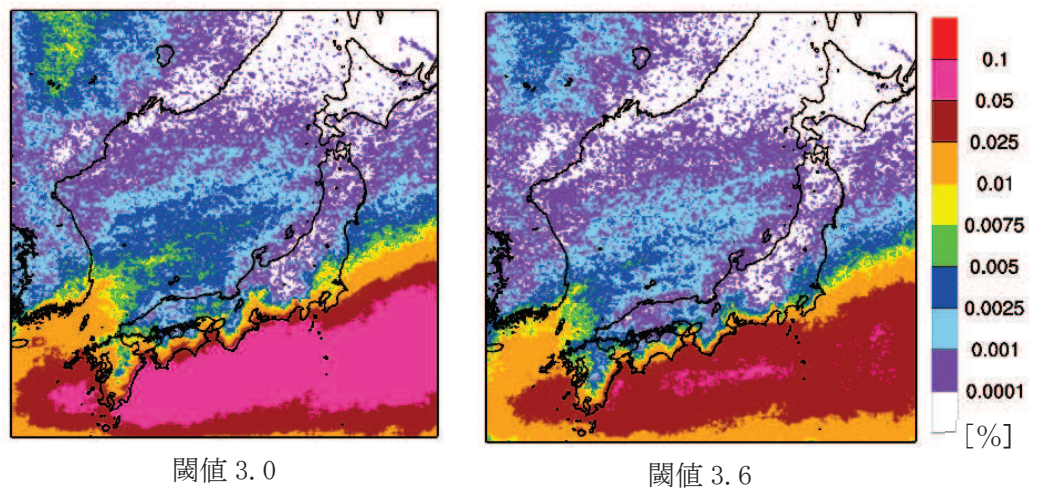


図 1.9-17 EHI の超過頻度分布（閾値 3.3）



閾値 3.0

閾値 3.6

図 1.9-18 EHI の超過頻度分布

突風関連指数による、大規模な竜巻形成につながる環境場の発生頻度分析を行った結果、福島県以北の東北地方太平洋側及び日本海側は、茨城県以西の太平洋側沿岸よりも1~2オーダー以下の頻度となることが分かった。

スーパーセルに伴って発生する大規模な竜巻形成につながる環境場の発生頻度分布の観点からも、東北地方太平洋側及び日本海側は、茨城県以西の太平洋側と地域特性の違いがあることを確認した。

参考として、F2規模の竜巻について同様の検討を行った。閾値の設定はF2規模の竜巻発生時の実績をもとに以下の様に設定した。

[5月~10月(暖候期)] SReH : $200\text{m}^2/\text{s}^2$, CAPE : $1,000\text{J}/\text{kg}$

[11月~4月(寒候期)] SReH : $200\text{m}^2/\text{s}^2$, CAPE : $350\text{J}/\text{kg}$

EHI を用いる場合の閾値 EHI : 1.5

SReH, CAPE の同時超過頻度分析の結果を図 1.9-19 に、EHI の超過頻度分布を図 1.9-20 に示す。F3 規模以上を対象とした閾値の分析結果に比べ、頻度は全体的に上がったが、概ね同様の傾向が確認できた。

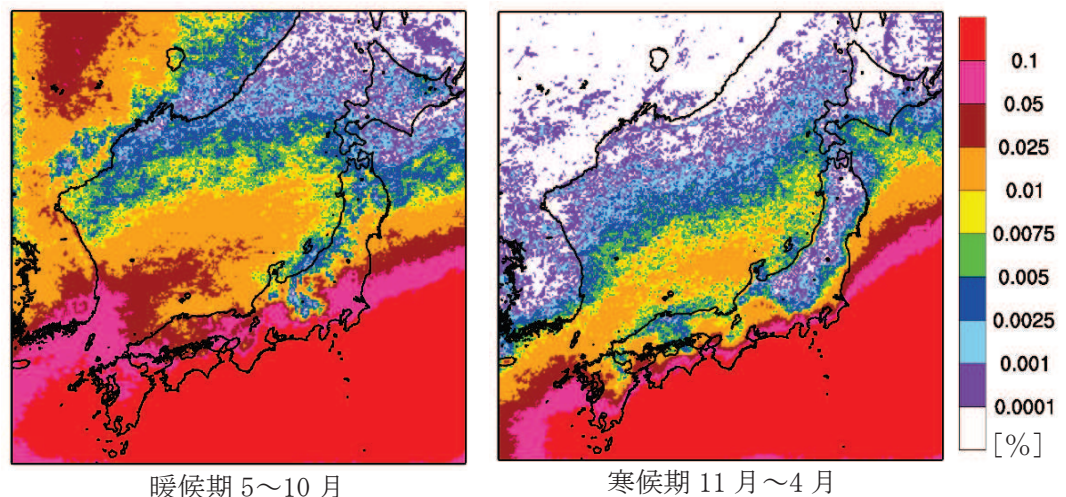


図 1.9-19 F2 規模の竜巻形成につながる環境場の閾値の同時超過頻度分布

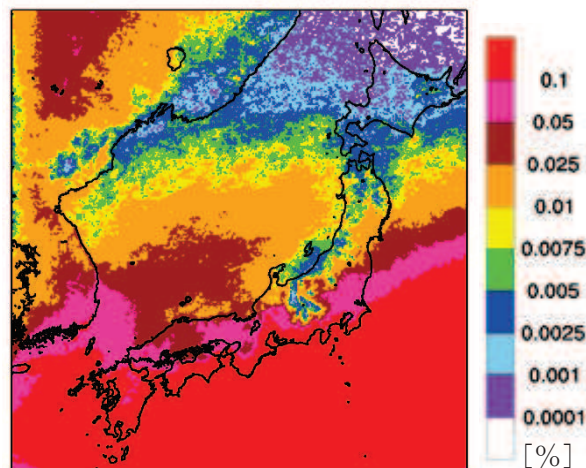


図 1.9-20 EHI の超過頻度分布 (閾値 : 1.5)

F2 規模相当の閾値での同時超過頻度を解析した結果をみても、東北地方太平洋側及び日本海側は、茨城県以西の太平洋側と比較して頻度が低くなっていることが確認できる。

日本海側で大きな竜巻が発生しにくい原因としては、太平洋側から暖かく湿った空気が、日本列島の中央部に存在する高く複雑な山岳域を湿潤不安定な状態のまま乗り越えてくることが出来ないため、日本海側では大きな竜巻を引き起こす環境場が形成しにくくなっていることが考えられる。

e. 佐呂間町で発生した竜巻について

突風関連指数を用いた解析結果から、F3 規模以上の竜巻が発生しやすいとされる地域が分かったが、そのエリアに含まれていない北海道網走支庁佐呂間町では 2006 年 11 月に F3 竜巻が発生している（以下「佐呂間竜巻」という。）。

佐呂間竜巻は、太平洋沿岸で発生した竜巻と比較すると、

- ・国内で唯一内陸部（丘陵地の麓）において発生した竜巻である。
- ・F3 竜巻としては継続時間（1 分）と移動距離（約 1.4km）が非常に短かった。

という点で異なっている。

佐呂間竜巻の発生した地域では、太平洋側からの暖湿流が小高い丘を越えて流入するような地形になっており、平野部の冷気流とぶつかることにより大きな上層・下層間の風向差が生じる環境場となっていた（図 1.9-21、図 1.9-22）。

また、日高山脈の東側では、山を越えた冷気流と太平洋側の暖気流がぶつかる地点となっており、ここで発生した親雲が山脈沿いに北上しながら持続的に発達し、佐呂間地域で F3 規模の竜巻を形成するに至ったと考えられる。これらの発生メカニズムについて、図 1.9-23 に模式的に示す。

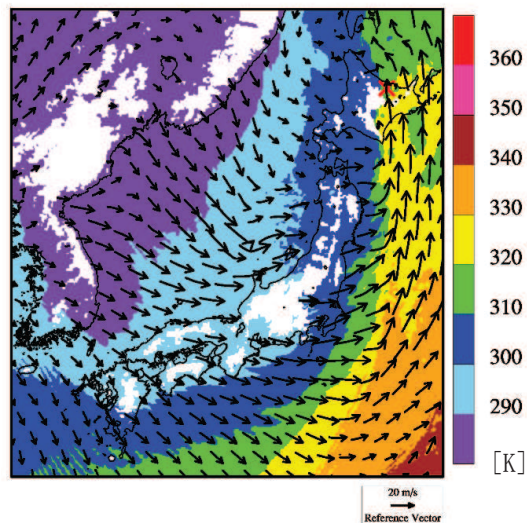
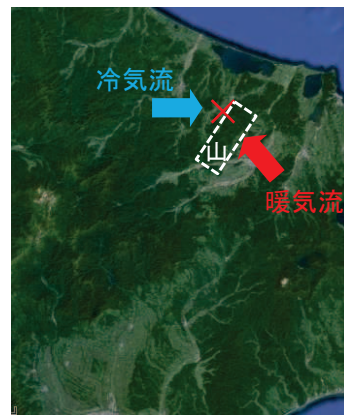


図 1.9-21 佐呂間竜巻発生時の風向・風速及び相当温位の分布（海拔 500m 高度）



親雲の発生位置（点線内）と移動方向



竜巻の発生位置（×）と影響が指摘される山（点線部）

図 1.9-22 親雲の発生箇所と移動方向（左）及び竜巻の発生箇所（右）

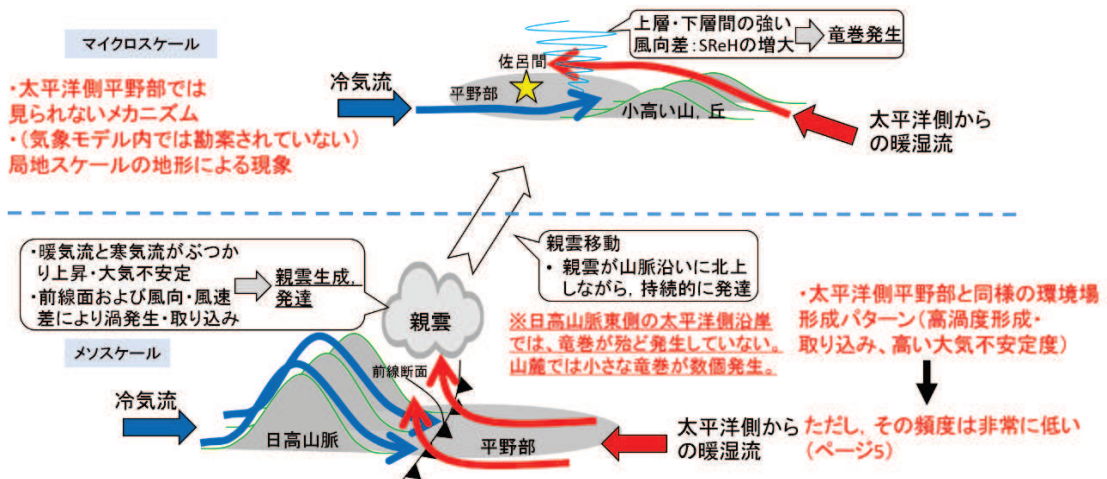


図 1.9-23 佐呂間竜巻の発生メカニズムに関する模式図*

注記 *：軽水型原子力発電所の竜巻影響評価における設計竜巻風速及び飛来物速度の設定に関するガイドライン，日本保全学会，原子力規制関連事項検討会，平成 27 年 1 月

このように、佐呂間竜巻の発生メカニズムは、太平洋側沿岸域にて発生している F3 竜巻のメカニズムとは大きく異なっており、竜巻の持続時間・被害域長さも大きく異なっている。

竜巻影響評価における取り扱いとしては、基準竜巻設定で対象としている地域性・空間スケールよりも局地的な地形影響を受けており、そういった影響については、設計竜巻 V_D の設定時に考慮するのがガイドの趣旨に沿ったものとなる。

考慮する際のポイントは、以下の 2 点である。

- ・太平洋側からの暖湿流が高標高山岳等に遮断されずに直接流入しうる地域である。
- ・近隣地形（数キロ程度四方の範囲）において、（太平洋側からの）暖気流の流入する風上側に尾根状の丘・山が存在すること。

その観点で女川原子力発電所周辺の地形を確認すると、以下のように整理できる。

- ・太平洋側沿岸部に立地しているため暖湿流が直接流入するが、気流の流入する風上側は海域であるため、尾根状の丘・山は存在しない。

したがって、女川原子力発電所で佐呂間竜巻と同様な地形条件にはなっていないことを確認した。

(5) 竜巻検討地域の妥当性確認結果

総観場ごとのFスケール別竜巻発生分布より、発生する竜巻の規模には地域差があり、また、突風関連指数の分析結果から、東北地方太平洋側は茨城県以西の太平洋側と大規模な竜巻形成につながる環境場の傾向が異なることが確認できた。

一方、総観場による分析では、北海道から千葉県にかけての太平洋側沿岸部は、地域を差別化するには至らない。以上の分析結果を踏まえれば、女川原子力発電所の竜巻検討地域として、北海道から千葉県にかけての太平洋側沿岸を設定することが妥当と判断した。

1.9.4 基準竜巻の最大風速(V_B)の設定

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

(1) 過去に発生した竜巻による最大風速(V_{B1})

女川原子力発電所が立地する東北地方太平洋側は、過去の発生実績及び突風関連指数を用いた分析結果から、大規模な竜巻は発生しにくいものと考えられる。

また、竜巻は観測の歴史が浅いこと及び気象庁における竜巻観測体制の変遷を踏まえると、他の気象観測データに比べ不確かさがあると考ええる。

上記を勘案し、日本で過去に発生した竜巻の最大風速を V_{B1} として設定する。

日本で過去に発生した最大の竜巻はF3スケールである。Fスケールと風速の関係より、F3スケールの風速は70~92m/sであるため、過去に発生した竜巻による最大風速 V_{B1} は、F3スケールの上限値である92m/sとする。

表1.9-2に日本で過去に発生したF3竜巻を示す。

表 1.9-2 日本で過去に発生したF3竜巻
(気象庁「竜巻等の突風データベース」より作成)

Fスケール	発生日時	発生場所緯度	発生場所経度	発生場所
F3	1971年07月07日07時50分	35度52分45秒	139度40分13秒	埼玉県浦和市
F3	1990年12月11日19時13分	35度25分27秒	140度17分19秒	千葉県茂原市
F3	1999年09月24日11時07分	34度42分4秒	137度23分5秒	愛知県豊橋市
F3	2006年11月07日13時23分	43度58分39秒	143度42分12秒	北海道網走支庁 佐呂間町
F3	2012年05月06日12時35分	36度6分38秒	139度56分44秒	茨城県常総市

(2) 竜巻最大風速のハザード曲線の求め方

竜巻最大風速のハザード曲線は、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竜巻の観測記録を抽出・評価し、既往の算定法(Wen and Chu 及び Garson et. al)に基づき算定した。

具体的な算定方法は、JNES 委託研究成果報告書*を参考とし、図 1.9-24 に示すフローに従いハザード曲線を算定した。

なお、ハザード曲線は、竜巻検討地域の竜巻特性を適切に考慮できる海岸線から海側及び陸側それぞれ 5km の範囲内で算定した。加えて、竜巻検討地域において過去に発生した竜巻は、竜巻発生確認数にばらつきがあることを踏まえ、ガイドに基づき、ハザード曲線に保守性をもたせるために竜巻検討地域を海岸線に沿って 1km 範囲ごとに短冊状に細分化した場合のハザード曲線も算定した。

注記 *：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

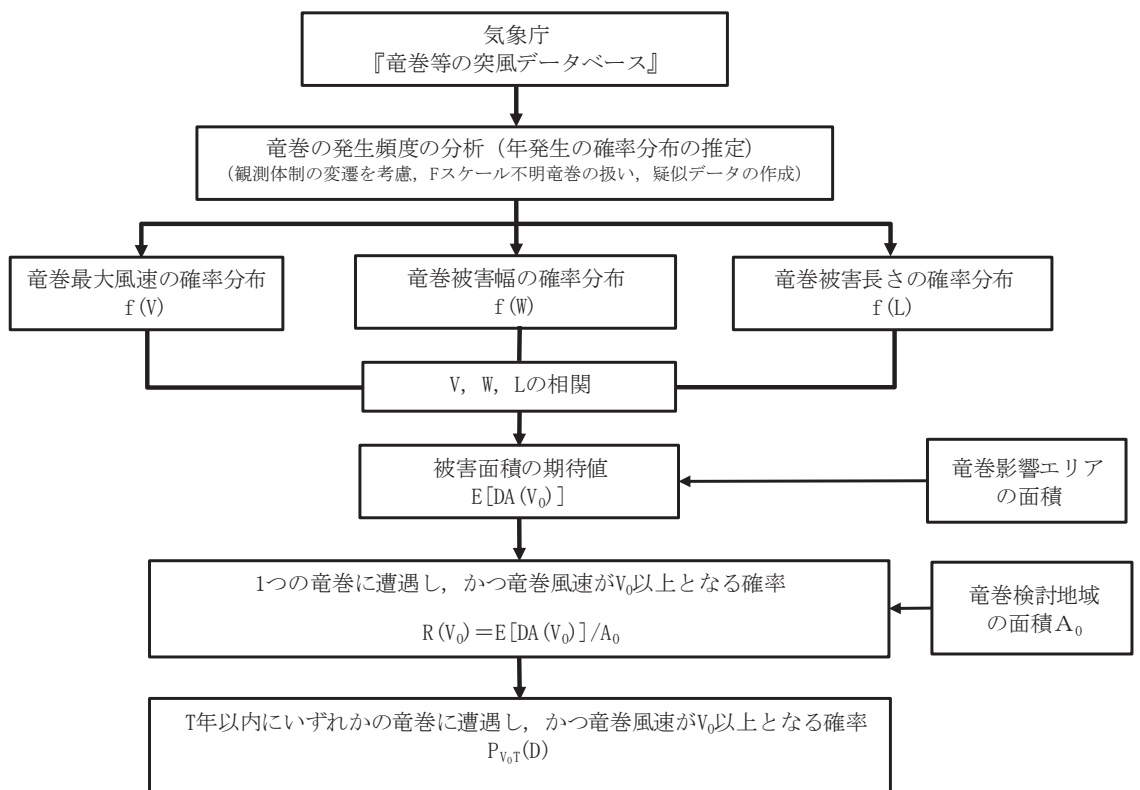


図 1.9-24 竜巻最大風速のハザード曲線の算定フロー

(3) 海岸線から陸側及び海側それぞれ 5km 全域の評価

本評価では、竜巻検討地域外で発生して竜巻検討地域内に移動した竜巻である通過竜巻も発生数にカウントする。被害幅及び被害長さは、それぞれ被害全幅および被害全長を用いる。

(4) 竜巻の発生頻度の分析

気象庁「竜巻等の突風データベース」を基に1961年1月～2012年6月までの51.5年間の統計量をFスケール別に算出した。

なお、観測体制の変遷による観測データ品質のばらつき（図1.9-25参照）を踏まえ、以下の①～④の基本的な考え方に基づいて整理を行った。

- ① 被害が小さくて見過ごされやすいF0及びFスケールが不明な竜巻は、観測体制が強化された2007年以降の年間発生数や標準偏差を採用する。
- ② 被害が比較的軽微なF1竜巻については、観測体制が整備された1991年以降の年間発生数や標準偏差を採用する。
- ③ 被害が比較的大きく見逃されることが少ないF2、F3竜巻については、観測データが整備された1961年1月以降の全期間の年間発生数や標準偏差を採用する。
- ④ 51.5年間の発生数を、①～③の観測期間との比率からFスケールごとに推計する。

また、Fスケールが不明な竜巻については、以下の考え方に基づいて分類した。

- ⑤ 陸上で発生したFスケールが不明な竜巻及び海上で発生しその後上陸したFスケール不明竜巻はF0に含める。これにより、全ての陸上竜巻をF0～F3に分類する。
- ⑥ 沿岸部近傍での海上竜巻の特性は、陸上竜巻の特性と類似しているとの仮定の下、不明な海上竜巻の発生数を陸上竜巻のFスケール別発生比率で按分する。

上記の基本的な考え方に基づいて観測記録を整理・推定した結果を表1.9-3に示す。

なお、竜巻発生の確率モデルは、ガイドに従ってポアソン過程に従うものとし、年発生数の確率分布には、ポリヤ分布を適用した。

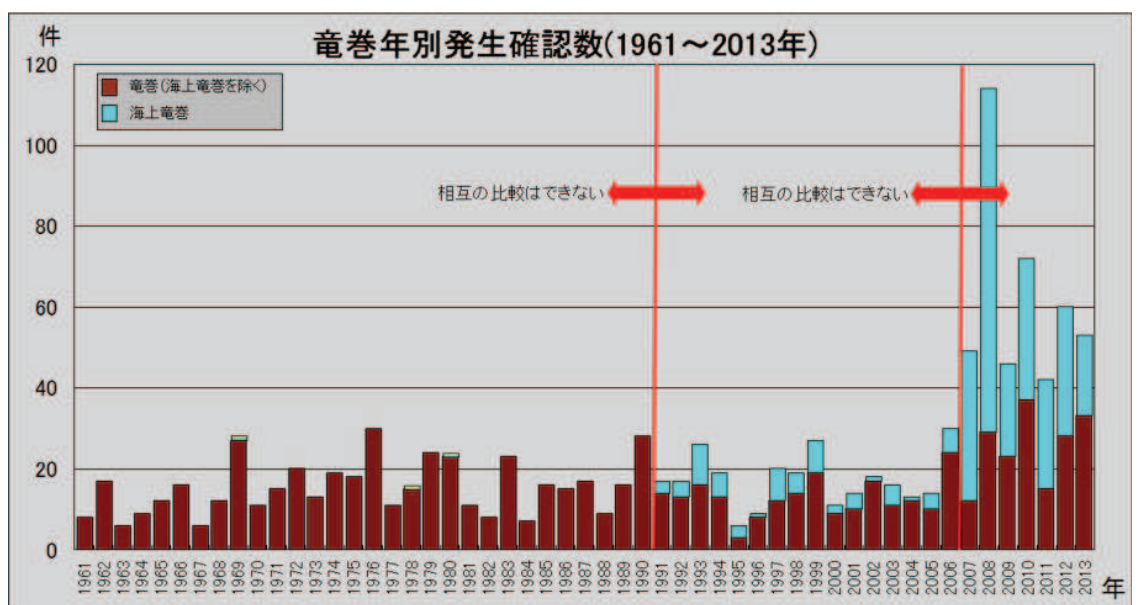


図1.9-25 竜巻の年別発生確認数（気象庁HPより）

表 1.9-3 竜巻発生数の分析結果

竜巻検討地域 (沿岸 ±5 km)	発生数の統計	小計	竜巻スケール				不明		総数 (含む不明)
			F0	F1	F2	F3	(陸上)	(海上)	
1961～ 2012/6 (51.5年間)	期間内総数	23	2	13	7	1	3	3	29
	平均値(年)	0.45	0.04	0.25	0.14	0.02	0.06	0.06	0.56
	標準偏差(年)	0.67	0.20	0.56	0.35	0.14	0.31	0.31	0.81
1991～ 2012/6 (21.5年間)	期間内総数	14	2	10	2	0	1	3	18
	平均値(年)	0.65	0.09	0.47	0.09	0.00	0.05	0.14	0.84
	標準偏差(年)	0.80	0.30	0.75	0.30	0.00	0.22	0.47	0.97
2007～ 2012/6 (5.5年間)	期間内総数	3	1	2	0	0	0	2	5
	平均値(年)	0.55	0.18	0.36	0.00	0.00	0.00	0.36	0.91
	標準偏差(年)	0.58	0.43	0.55	0.00	0.00	0.00	0.86	0.80
疑似 51.5年間 (陸上竜巻)	期間内総数	42	10	24	7	1	0	19	61
	平均値(年)	0.80	0.18	0.47	0.14	0.02	0.00	0.36	1.17
	標準偏差(年)	0.93	0.43	0.75	0.35	0.14	0.00	0.86	1.27
疑似 51.5年間 (全竜巻)	期間内総数	63	15	35	11	2	0	0	0
	平均値(年)	1.17	0.26	0.68	0.20	0.03	0.00	0.00	0.00
	標準偏差(年)	1.13	0.52	0.90	0.42	0.17	0.00	0.00	0.00

(5) 竜巻最大風速，被害幅，被害長さの確率分布及び相関係数

竜巻ハザードを評価するためには，一つの竜巻が発生した際の竜巻最大風速，被害幅及び被害長さの確率分布が必要となることから，これらの確率密度分布を求める。なお，竜巻風速の確率密度分布は，Fスケール別の竜巻発生数から求める。

竜巻検討地域における 51.5 年間の竜巻の発生数，被害幅及び被害長さを基に，確率密度分布についてはガイド及びガイドが参考としている JNES 委託研究成果報告書を参照し，対数正規分布に従うものとする（図 1.9-26～図 1.9-31）。

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

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

また，竜巻のハザードの計算においては，2 変量あるいは 3 変量の確率分布関数を対象とするため，竜巻最大風速，被害幅及び被害長さについての相関係数を求めた。表 1.9-4 に 1961 年以降の観測データのみを用いて，竜巻最大風速，被害幅及び被害長さについて相関係数を求めた結果を示す。

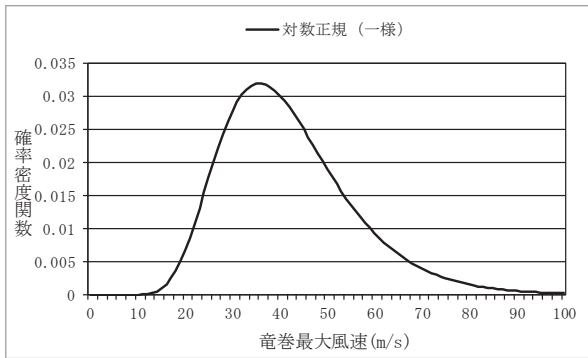


図 1.9-26 竜巻最大風速の確率密度分布

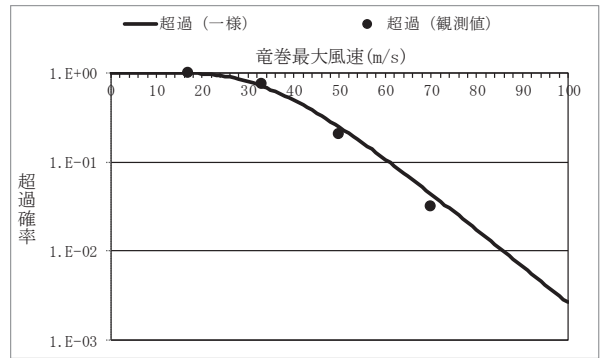


図 1.9-27 竜巻最大風速の超過確率分布

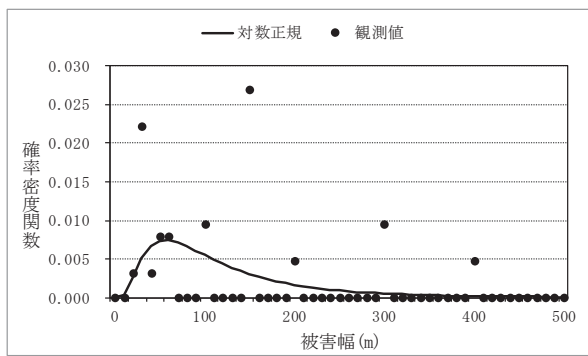


図 1.9-28 被害幅の確率密度分布

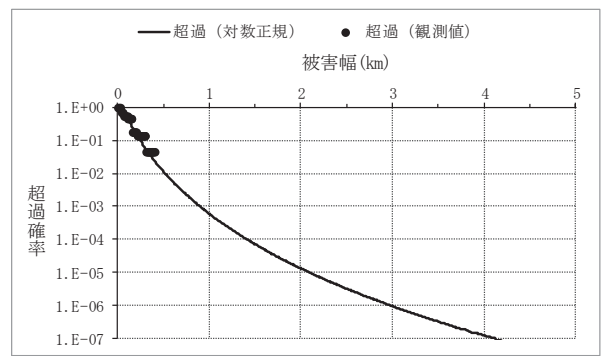


図 1.9-29 被害幅の超過確率分布

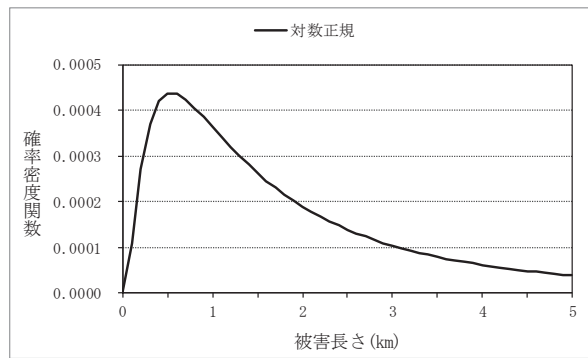


図 1.9-30 被害長さの確率密度分布

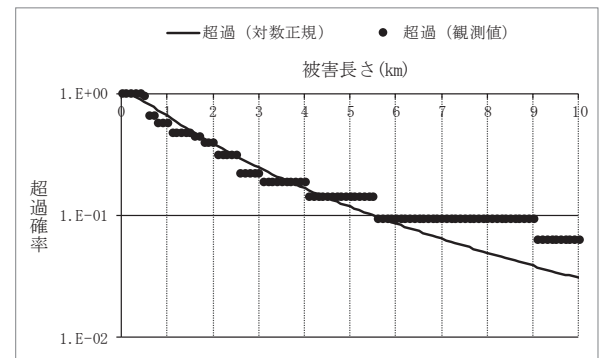


図 1.9-31 被害長さの超過確率分布

表 1.9-4 竜巻最大風速，被害幅，被害長さの相関係数（単位なし）

	竜巻最大風速	被害幅	被害長さ
竜巻最大風速	1.000	-0.073*	0.590
被害幅	-0.073*	1.000	0.173
被害長さ	0.590	0.173	1.000

注記 *：竜巻最大風速と被害幅は無相関との知見が得られたため，ハザード算定の際には，相関係数 0 として計算

(6) 竜巻影響エリアの設定

竜巻最大風速のハザード曲線による最大風速 (V_{B2}) の算定にあたり、 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、女川原子力発電所第2号機の評価対象施設等の設置面積の合計値及び推定される竜巻被害域(被害幅, 被害長さから設定)に基づいて設定する。

女川原子力発電所第2号機における評価対象施設等の位置を図1.9-32に示す。評価対象施設等の位置が分散しているため、保守的にそれぞれを包含する円形エリアを竜巻影響エリア(面積約413,000 m^2 (直径725mの円))として設定した。

なお、竜巻影響エリアを円形とするため、竜巻移動方向の依存性はない。

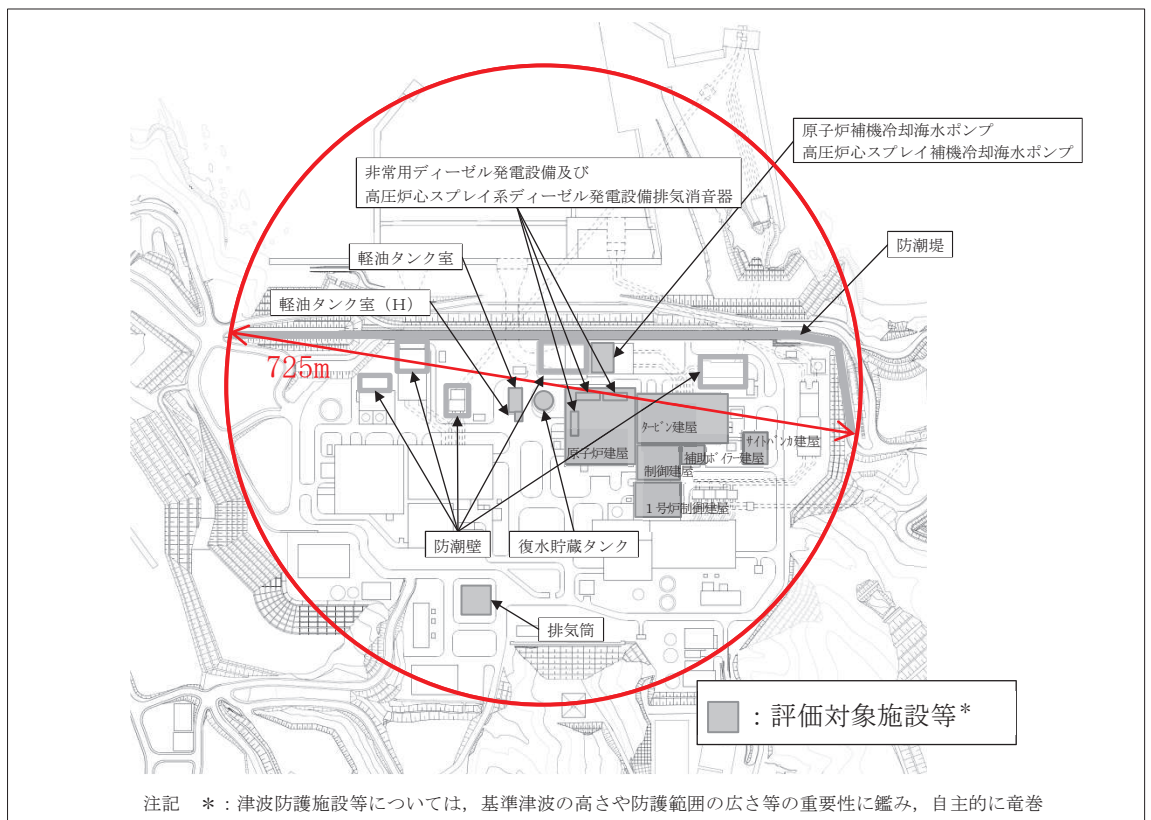


図 1.9-32 評価対象施設等の位置

(7) 竜巻最大風速のハザード曲線の算定

T年以内にいずれかの竜巻に遭遇し、かつ竜巻風速が V_0 以上となる確率を求める。竜巻の年発生数の確率密度分布としてポリヤ分布の適合性が高い。ポリヤ分布は式(1)で示される。

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

ここで、

N : 竜巻の年発生数

v : 竜巻の年平均発生数

T : 年数

β は分布パラメータであり式(2)で示される。

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

ここで、

σ : 竜巻の年発生数の標準偏差

Dをリスク評価対象構造物が風速 V_0 以上の竜巻に遭遇する事象と定義し、 $R(V_0)$ をリスク評価対象構造物が1つの竜巻に遭遇し、竜巻風速が V_0 以上となる確率と定義すると、T年以内にいずれかの竜巻に遭遇し、かつ竜巻風速が V_0 以上となる確率は式(3)で示される

$$P_{V_0,T}(D) = 1 - [1 + \beta v R(V_0) T]^{-1/\beta} \quad (3)$$

この $R(V_0)$ は、竜巻影響評価の対象地域の面積を A_0 (つまり竜巻検討地域の面積約18,800km²)、1つの竜巻の風速が V_0 以上となる面積を $DA(V_0)$ とすると式(4)で示される。

$$R(V_0) = \frac{E[DA(V_0)]}{A_0} \quad (4)$$

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

本評価では、以下のようにして $DA(V_0)$ の期待値を算出し、式(4)により $R(V_0)$ を推定して、式(3)により $P_{V_0,T}(D)$ を求める。竜巻最大風速を V 、被害幅 w 、被害長さ l 、移動方向 α 及び構造物の寸法を A, B とし、 $f(V, w, l)$ 等の同時確率密度関数を用いると、 $DA(V_0)$ の期待値は式(5)で示される。

$$\begin{aligned}
E[DA(V_0)] &= \int_0^\infty \int_0^\infty \int_{V_0}^\infty W(V_0) l f(V, w, l) dV dw dl \\
&+ \int_0^{2\pi} \int_0^\infty \int_{V_0}^\infty H(\alpha) l f(V, l, \alpha) dV dl d\alpha + \int_0^{2\pi} \int_0^\infty \int_{V_0}^\infty W(V_0) G(\alpha) f(V, w, \alpha) dV dw d\alpha \\
&+ AB \int_{V_0}^\infty f(V) dV
\end{aligned} \tag{5}$$

ここで、 $W(V_0)$ は竜巻風速が V_0 以上となる幅であり、式(6)で示される。

$H(\alpha)$ 及び $G(\alpha)$ はそれぞれ、竜巻の被害長さ及び被害幅方向に沿った面にリスク評価対象構造物を投影した時の長さであり、式(7)で示される。

$$W(V_0) = \left(\frac{V_{min}}{V_0} \right)^{1/1.6} w \tag{6}$$

ここで、

V_{min} : 被害幅 w 内の最小竜巻風速

V_0 : 被害が発生する最小風速

$$\begin{aligned}
H(\alpha) &= B |\sin \alpha| + A |\cos \alpha| \\
G(\alpha) &= A |\sin \alpha| + A |\cos \alpha|
\end{aligned} \tag{7}$$

本評価ではリスク評価対象構造物を円形構造物（竜巻影響エリア）で設定しているため、 $H(\alpha)$ 、 $G(\alpha)$ ともに竜巻影響エリアの直径725mで一定（竜巻の移動方向に依存しない）となる。円の直径を D_0 とした場合の計算式は式(8)で示される。

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

$$\begin{aligned}
E[DA(V_0)] &= \int_0^\infty \int_0^\infty \int_{V_0}^\infty W(V_0) l f(V, w, l) dV dw dl \\
&+ D_0 \int_0^\infty \int_{V_0}^\infty l f(V, l) dV dl + D_0 \int_0^\infty \int_{V_0}^\infty W(V_0) f(V, w) dV dw \\
&+ \left(D_0^2 \pi / 4 \right) \int_{V_0}^\infty f(V) dV
\end{aligned} \tag{8}$$

(8) 竜巻最大風速のハザード曲線による最大風速 (V_{B2})

図 1.9-33 に、海岸線から陸側及び海側それぞれ 5km の範囲全域（竜巻検討地域）及びガイドに従い竜巻検討地域を 1km 範囲ごとに細分化した場合の竜巻最大風速のハザード曲線を示す。

図 1.9-33 より、陸側及び海側それぞれ 5km の範囲全域を対象とした場合の年超過確率 10^{-5} における風速は 77.6m/s、竜巻検討地域を 1km 範囲ごとに細分化した場合の年超過確率 10^{-5} における風速は 86.7m/s（陸側 0～1km）となった。

よって、竜巻最大風速のハザード曲線による最大風速 (V_{B2}) は、陸側及び海側それぞれ 5km の範囲全域及び 1km 範囲の竜巻最大風速のハザード評価結果のうち大きい方を採用し、 $V_{B2} = 86.7\text{m/s}$ とする。

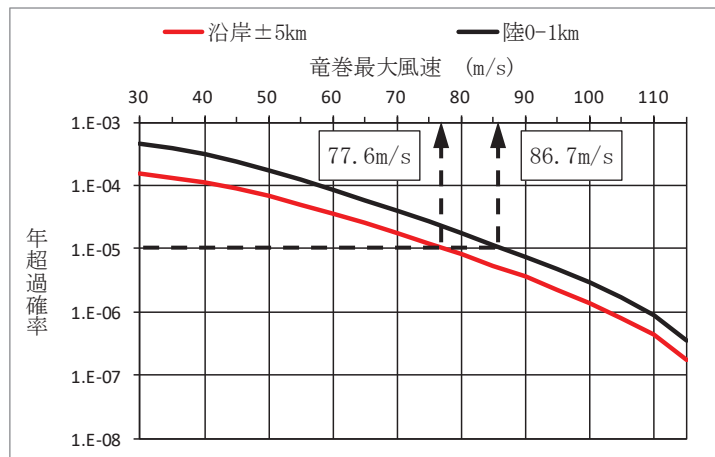


図 1.9-33 竜巻最大風速のハザード曲線
(海側及び陸側それぞれ 5km の範囲及び 1km 範囲)

また、不確かさ要素のハザード算定結果への影響を検討した結果を図 1.9-34 に示す。

図 1.9-34 より、データ、確率分布形選択及びデータ量が少ないことによる不確かさを表したハザード曲線により、これらの不確かさが小さいことを確認した。

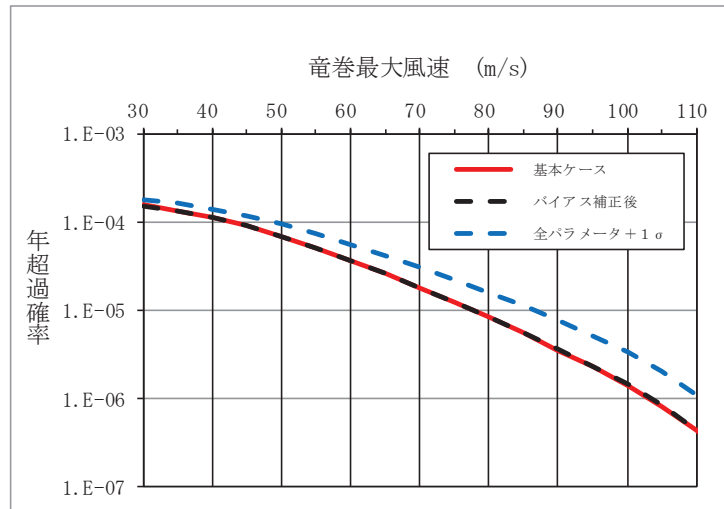


図 1.9-34 ハザード不確実さ検討結果
(バイアス補正後及び全パラメータ+1σのハザード)

(9) 基準竜巻の最大風速 (V_B)

過去に発生した竜巻による最大風速 $V_{B1}=92\text{m/s}$ 及び竜巻最大風速のハザード曲線による最大風速 $V_{B2}=86.7\text{m/s}$ のうち、大きい風速は 92m/s である (表 1.9-5)。

よって、基準竜巻の最大風速 (V_B) は 92m/s とする。

使用した竜巻の統計データの不確実性については前項までで検討を実施しているが、将来的な気候変動として予測される地球温暖化により竜巻の規模や発生数が増加する可能性も否定できない。

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

表 1.9-5 竜巻の最大風速の評価結果

項目	最大風速 [m/s]
過去に発生した竜巻による最大風速 (V_{B1})	92 (F3)
竜巻最大風速のハザード曲線による最大風速 (V_{B2})	86.7
基準竜巻の最大風速 (V_B)	92

1.9.5 設計竜巻の最大風速(V_b)の設定

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

(1) 地形効果による竜巻風速への影響

地形効果が竜巻強度に及ぼす影響に関する知見として、a. 地形起伏による影響、b. 地表面粗度による影響、について既往の研究において示されており、その知見を踏まえ、女川原子力発電所周辺の地形効果による竜巻の増幅可能性について検討する。

a. 地形起伏による影響

竜巻のような回転する流れでは、角運動量保存則により「回転の中心からの距離」及び「周方向の回転速度」の積が一定になるという性質がある。そのため、図 1.9-35 に示すとおり、竜巻の渦が上り斜面を移動する時（海側から山側へ移動する場合）、基本的に渦は弱まり、下り斜面を移動する時（山側から海側へ移動する場合）には強まる。

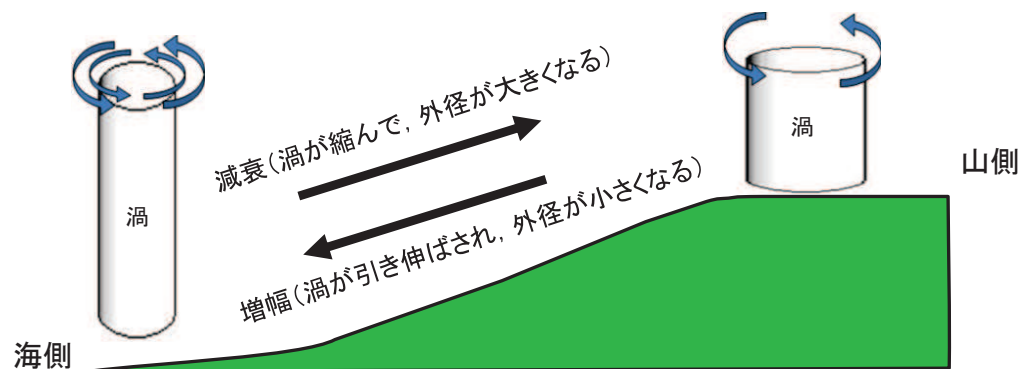


図 1.9-35 竜巻旋回流の地形影響に関する模式図

b. 地表面粗度による影響

風は地表面の細かな凸凹が与える摩擦抵抗の影響を受けやすく、風速は、地表面において0となり上空に向かうにつれて増加する。地表面粗度は竜巻の旋回流を減衰させる効果を有し、地表面粗度の構成物が飛来物として運動することで風速が減衰することも示唆されていることから、地表面粗度の増加とともに竜巻に起因する強風の風速を低下させるといえる。

(2) 女川原子力発電所周辺の地形

図 1.9-36 に女川原子力発電所周辺の地形図、図 1.9-37 に女川原子力発電所周辺の地表面粗度、図 1.9-38 に女川原子力発電所周辺の標高及び防潮堤高さを示す。発電所が立地する敷地は、北東が太平洋に面し、三方を山及び森林に囲まれた狭隘な地形である。

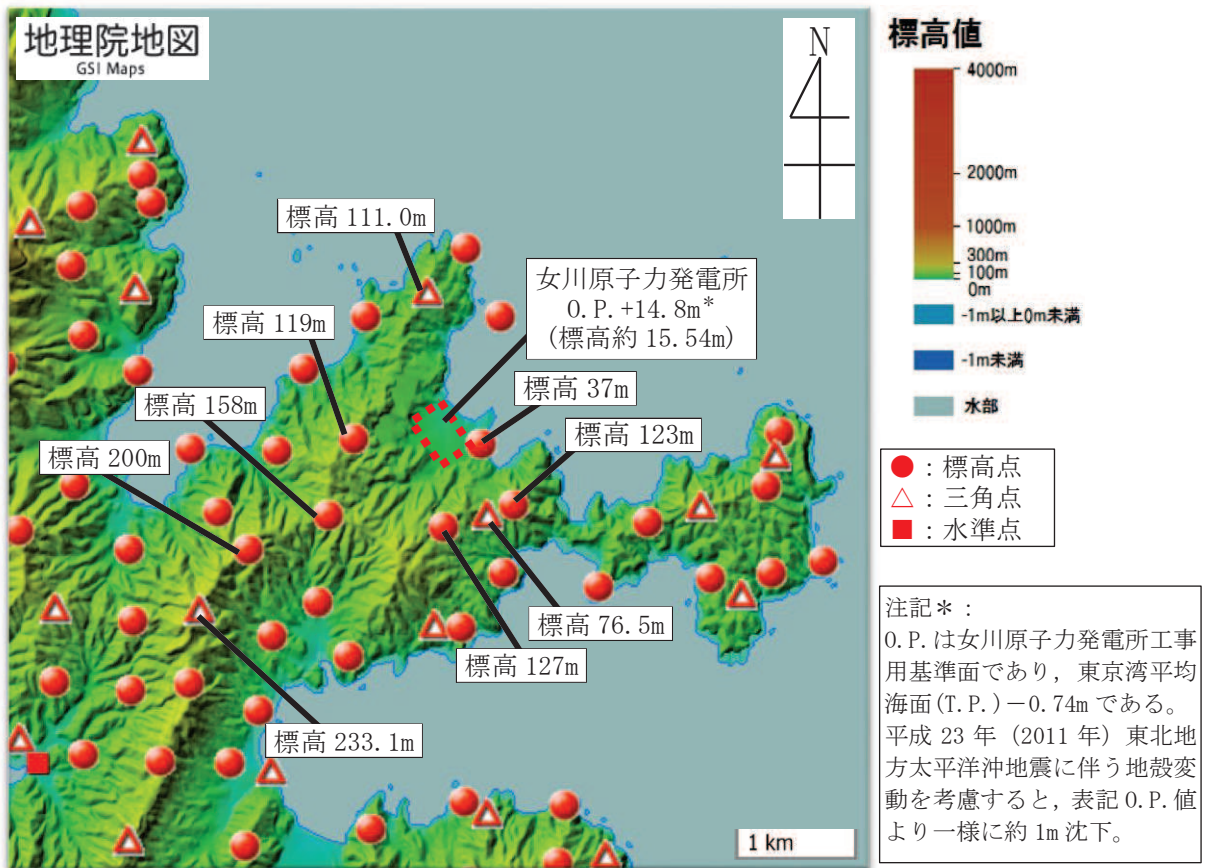


図 1.9-36 女川原子力発電所周辺の地形 (国土地理院「電子国土Web」より作成)

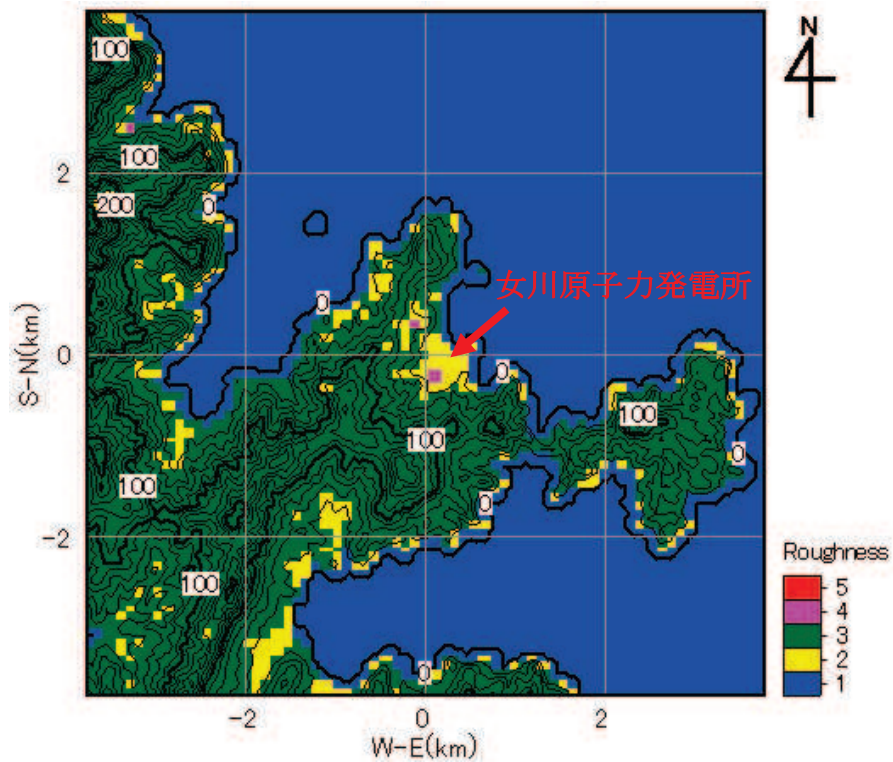


図 1.9-37 女川原子力発電所周辺の地表面粗度

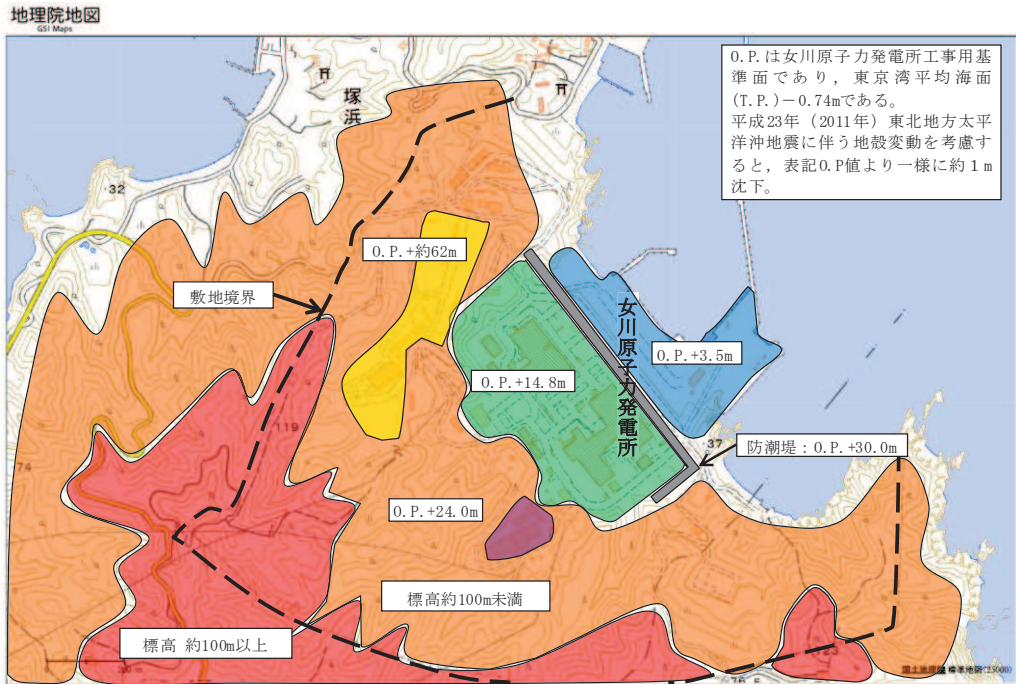


図 1.9-38 女川原子力発電所の周辺の標高及び防潮堤高さ

(3) 竜巻の移動方向の分析

竜巻検討地域で発生した竜巻のうち、移動方向が判明している竜巻の移動方向を図 1.9-39 に示す。図 1.9-39 より、竜巻検討地域で発生した竜巻は、多くが海側から陸側の方向に移動していた。

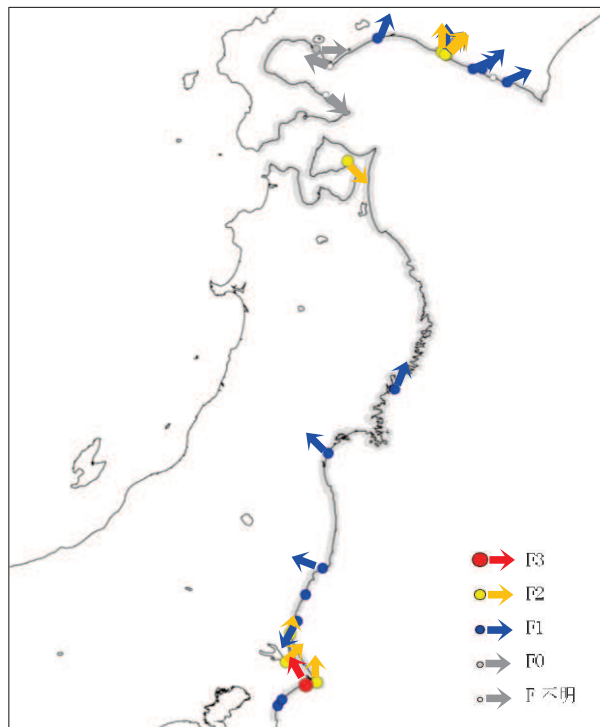


図 1.9-39 竜巻移動方向

(4) 竜巻風速の増幅に関する検討

竜巻検討地域で発生した竜巻は、海側から陸側に進入する可能性が高く、竜巻が増幅することはないと考えられる。竜巻が海上から発電所に進入してきた場合は、地表面粗度の影響を受けて竜巻は減衰した後、さらに防潮堤(0.P. 30.0m)で大幅に減衰するため、竜巻による施設への影響は限定的となると考えられる。また、山側から発電所の敷地に移動してきた場合についても、発電所周辺は広い丘陵地に森林が存在しており、森林による粗度の影響を大きく受けるため減衰する。従って、女川原子力発電所において地形効果による竜巻の増幅の影響は受けないものと考えられる。

(5) 設計竜巻の最大風速(V_D)

検討の結果、女川原子力発電所において地形効果による竜巻の増幅を考慮する必要は無いと考えられるため、基準竜巻の割増しは不要と考えるが、将来的な気候変動による竜巻発生の不確実性を考慮し、基準竜巻の92m/sを安全側に切り上げて、設計竜巻の最大風速(V_D)は100m/sとする。