

島根原子力発電所第2号機 審査資料	
資料番号	NS2-補-018-03
提出年月日	2022年1月11日

竜巻への配慮に関する説明書に係る補足説明資料

2022年1月

中国電力株式会社

本資料のうち、枠囲みの内容は機密に係る事項のため公開できません。

補足説明資料目次

I. はじめに

1. 設計竜巻の最大風速 92m/s の設定
2. 外部事象防護対象施設の選定
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の選定
4. 建物開口部の調査結果
5. 飛来物の選定
6. 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
7. 屋外の重大事故等対処設備の竜巻防護設計
8. 竜巻影響評価の風速場モデルの適用

I. はじめに

本補足説明資料は、以下の説明書についての内容を補足するためのものである。
 本補足説明資料と添付書類との関係を表1に示す。

- ・ VI-1-1-3「発電用原子炉施設の自然現象等による損傷の防止に関する説明書」のうち、
 VI-1-1-3-3「竜巻への配慮に関する説明書」

表 1

工事計画添付書類に係る補足説明資料（竜巻）	該当添付書類
添付 竜巻への配慮に関する説明書に係る補足説明資料	VI-1-1-3-3 竜巻への配慮に関する説明書
1 設計竜巻の最大風速 92m/s の設定	VI-1-1-3-3-1 竜巻への配慮に関する基本方針
2 外部事象防護対象施設の選定 3 外部事象防護対象施設に波及的影響を及ぼす可能性のある施設の選定 4 建物開口部の調査結果 5 飛来物の選定	VI-1-1-3-3-1 竜巻への配慮に関する基本方針 VI-1-1-3-3-2 竜巻の影響を考慮する施設及び固縛対象物の選定
6 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 7 屋外の重大事故等対処設備の竜巻防護設計	VI-1-1-3-3-3 竜巻防護に関する施設の設計方針
8 竜巻影響評価の風速場モデルの適用	VI-1-1-3-3-1 竜巻への配慮に関する基本方針

1. 設計竜巻の最大風速 92m/s の設定

1. 設計竜巻の最大風速 92m/s の設定

1.1 概要

基準竜巻及び設計竜巻の設定は、図 1.1-1 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。

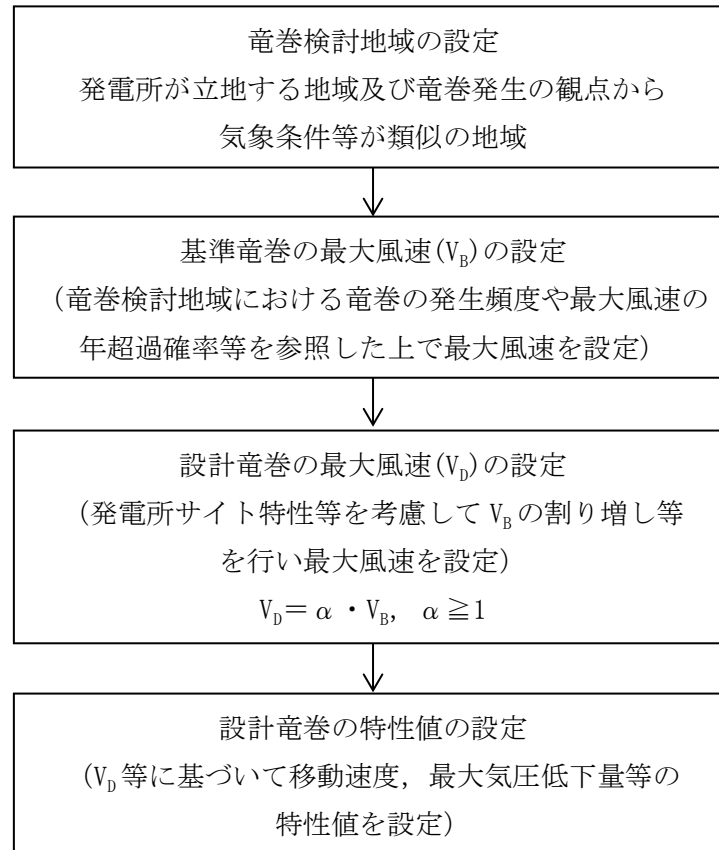


図 1.1-1 基準竜巻・設計竜巻の設定に係る基本フロー

1.2 竜巻検討地域の設定

島根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、島根原子力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 1.2-1 に示すとおり北海道から山陰地方にかけての日本海沿岸の海岸線から陸側及び海側それぞれ 5km の範囲を竜巻検討地域に設定した（面積約 33395km²）。以下にその妥当性確認の結果を示す。



図 1.2-1 竜巻検討地域（赤線部）

1.2.1 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。

- (1) 総観場の分析に基づく地域特性の確認
- (2) 過去の竜巻集中地域に基づく地域特性の確認
- (3) 突風関連指数に基づく地域特性の確認

独立行政法人原子力安全基盤機構（以下、「JNES」という。）「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、(1)、(2)の分析により地域特性を確認し、竜巻検討地域を設定した。

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、(3)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 1.2.1-1 に、検討の流れを示したフローを図 1.2.1-2 に示す。

なお、(3)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、(3)の分析結果のみで竜巻検討地

域を設定するのではなく、(1)、(2)の分析により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 1.2.1-1 竜巻とその関連気象の時空間スケール*

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, 2015

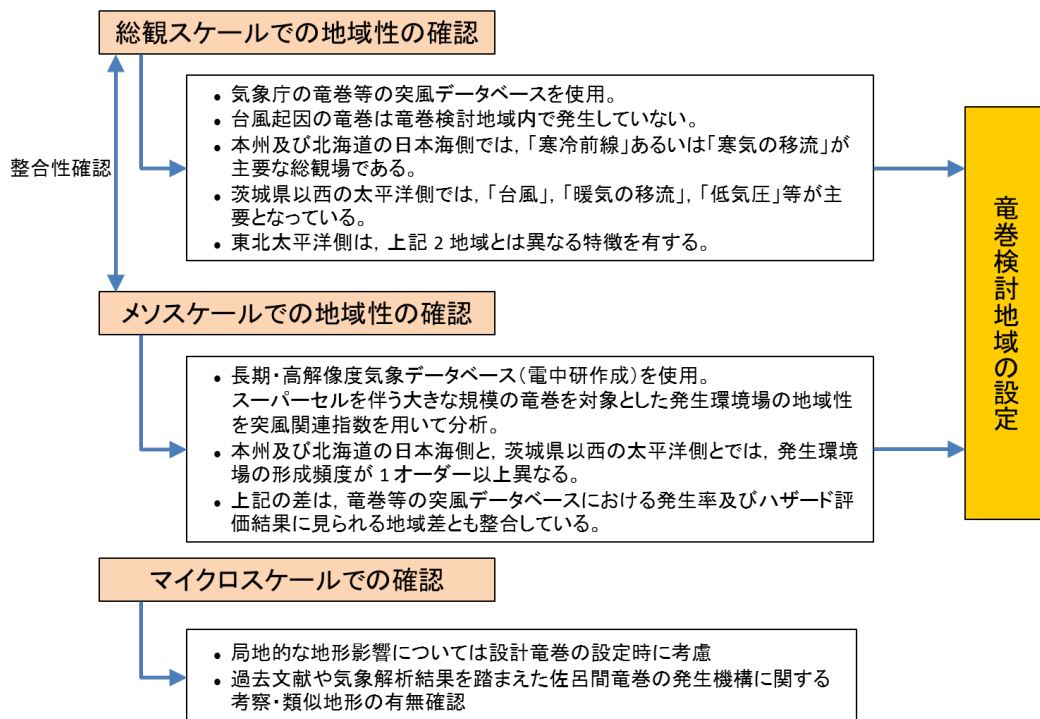


図 1.2.1-2 竜巻検討地域の検討フロー

1.2.2 総観場の分析に基づく地域特性の確認

気象庁「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、JNES「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7種に再編し、発生分布の特徴を分析した。表 1.2.2-1 に総観場の分類法と発生分布の特徴を示す。

また、図 1.2.2-1 に総観場ごとの竜巻発生地点の分布、図 1.2.2-2 に F2 以上の竜巻発生箇所を示す。

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 太平洋側では台風起因の大きな竜巻が多く発生しているのに対し、九州を除く日本海側地域や北海道では発生していない。（図1.2.2-1(a）
また、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ことから、仮に台風起因の竜巻が発生した場合も、規模の大きな竜巻の発生可能性は低いと考えられる。
- ② 温帯低気圧や季節風(夏)起因の竜巻は全国で発生しているが、規模的には太平洋側でF3が発生しているのに対し、日本海側ではF2が最大となっている。（図1.2.2-1(b), (c)）
- ③ 季節風(冬)起因の竜巻は、九州を除く日本海側地域に多く発生している。規模的には、山陰地方ではF2竜巻が2件発生しているのみで、F3竜巻は発生していない。（図1.2.2-1(d)）

図 1.2.2-3 にも示すとおり、日本海側と太平洋側では竜巻発生要因となる気象条件（総観場）が大きく異なっており、竜巻検討地域を日本海側とすることの妥当性が確認できた。

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>)

表 1.2.2-1 総観場の分類法

総観場	気象庁竜巻データベースの分類	特徴
台風	台風	台風を取り巻く雲が竜巻を発生させる。関東以西の太平洋側で発生頻度が高く、F3 竜巻も多くみられる。
温帯低気圧	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), 寒冷前線, 温暖前線, 閉塞前線	寒気と暖気が接し傾圧不安定による組織的な雲が形成する環境場。主に南からの下層の暖湿流が親雲の発達に重要な働きをするため、暖湿流が山岳等で遮られない関東以西の太平洋側で発生頻度が高く、F3 竜巻も見られる。 日本海側での頻度は比較的low。
季節風 (夏)	暖気の移流, 熱帯低気圧, 湿舌, 太平洋高気圧	暖湿流が主要因で親雲を形成する環境場。 関東以西の太平洋側や内陸で多く確認されている。
季節風 (冬)	寒気の移流, 気圧の谷, 大陸高気圧, 季節風	大気上層に寒気が流入することで大気が不安定になり、竜巻の親雲が形成する環境場。寒気は北～西から移流することが多いため、日本海側や関東以北で発生頻度が高い。
停滞前線	停滞前線, 梅雨前線, 前線帯, 不安定線, その他 (前線)	南からの暖湿流により親雲が形成されやすく、関東以西の太平洋側や内陸で発生頻度が高い。
局地性	局地性じょう乱, 雷雨 (熱雷), 雷雨 (熱雷を除く), 地形効果, 局地性降水	局地的な循環により親雲が形成する環境場。内陸で発生頻度が高い。
その他	移動性高気圧, 中緯度高気圧, オホーツク海高気圧, 帯状高気圧, その他 (高気圧), 大循環異常, その他	上記に当てはまらない環境場。 全体的に個数は少ない。

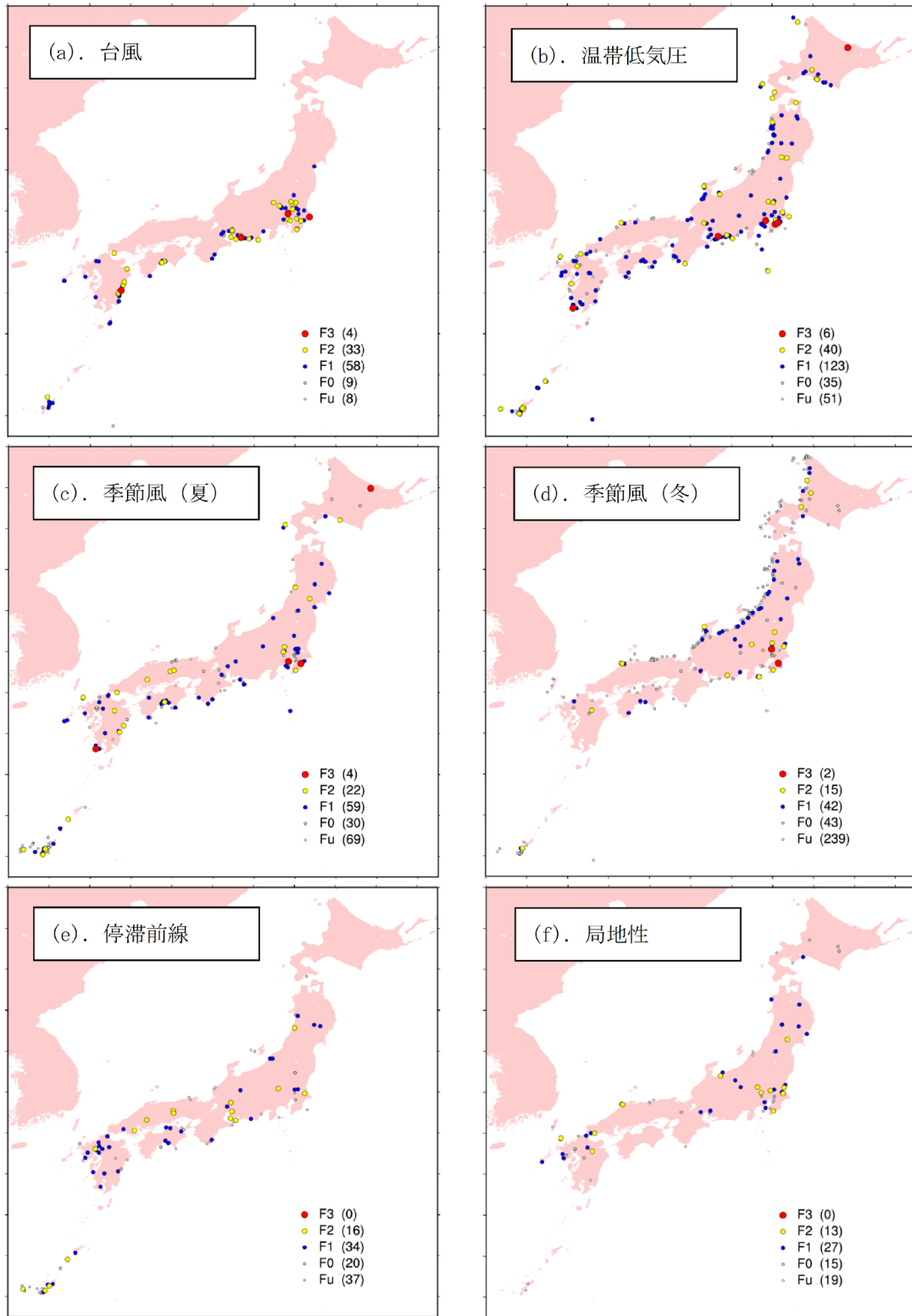


図 1.2.2-1 総観場ごとの竜巻発生地点の分布 (1961年～2012年)
 (気象庁「竜巻等の突風データベース」をもとに作成)

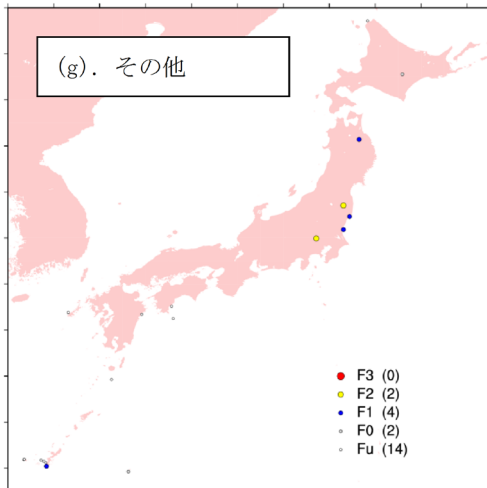


図 1.2.2-1 (続き) 総観場ごとの竜巻発生地点の分布 (1961年～2012年)
(気象庁「竜巻等の突風データベース」をもとに作成)

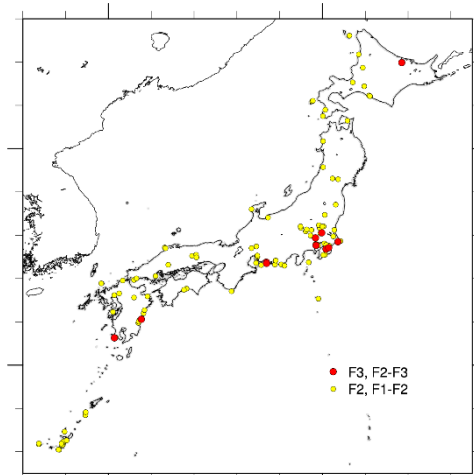
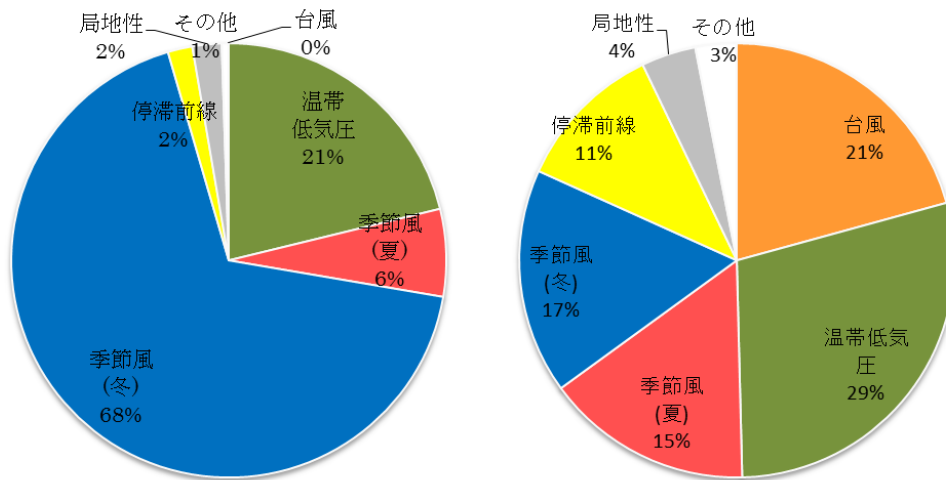


図 1.2.2-2 F2以上の竜巻発生箇所

(気象庁「竜巻等の突風データベース」をもとに作成)



竜巻検討地域 (日本海沿岸)

太平洋側地域

図 1.2.2-3 竜巻の総観場の特徴の比較

1.2.3 過去の竜巻集中地域に基づく地域特性の確認

日本で竜巻が集中する地域については、JNES「原子力発電所の竜巻影響評価ガイド（案）及び解説」に、全国19箇所の竜巻集中地域が示されている。

図1.2.3-1に示すとおり、島根原子力発電所は、竜巻集中地域⑦（島根県の一部）に立地している。したがって、基本的な考え方としては島根原子力発電所における竜巻検討地域は、この竜巻集中地域⑦とすることが考えられる。

ただし、気象庁「竜巻等の突風データベース」によると、1961年1月から2012年6月の51.5年間に発生が確認された竜巻の個数は竜巻集中地域⑦で8個であり、この期間に竜巻集中地域⑦で観測されている最も強い竜巻は藤田スケール（以下、「Fスケール」という。）でF2となる。（表1.2.3-1）

竜巻発生の影響評価の観点からすると、データ数は多い方がよいため、竜巻検討地域として北海道から山陰地方にかけての日本海沿岸を設定し、その妥当性を検討する。

なお、設定した竜巻検討地域の竜巻個数は192個、観測された最も強い竜巻はF2となる。表1.2.3-2に竜巻検討地域内でのF1を超える竜巻の観測記録を示す。

竜巻検討地域と竜巻集中地域⑦の竜巻発生確率は、 1.1×10^{-4} 、 1.3×10^{-4} （個/年/ km^2 ）であり、単位面積当たりの竜巻発生数は竜巻集中地域⑦の方がやや大きくなるものの、両者はおおむね同程度である。竜巻集中地域⑦における竜巻は8事例とかなり少なく、影響評価を行うにはデータ数が乏しいため、192個の竜巻個数がある竜巻検討地域を評価対象とすることは妥当な設定である。

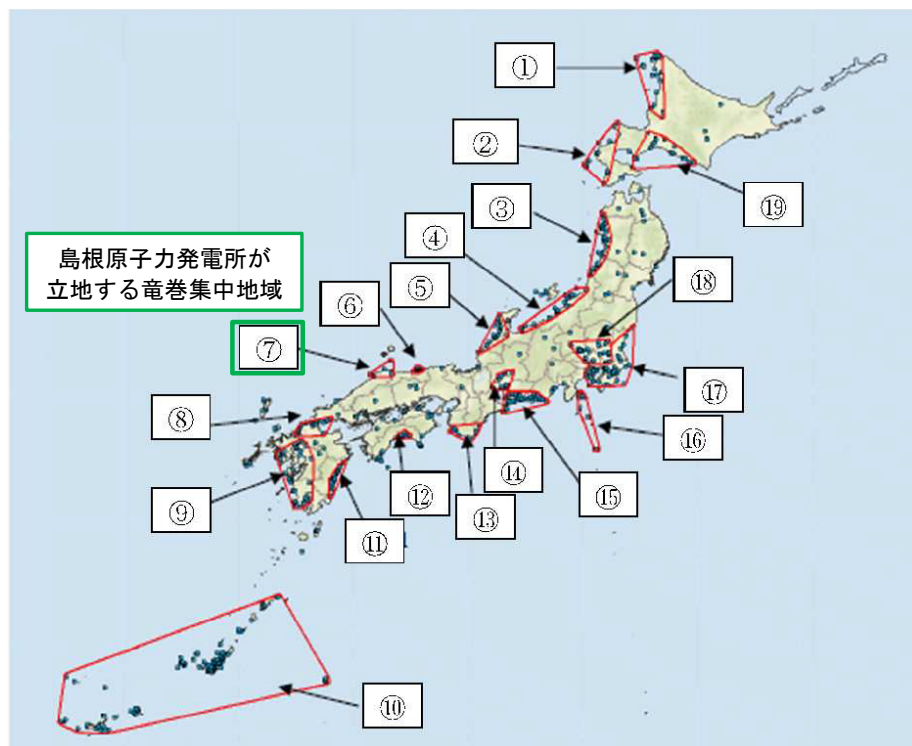


図1.2.3-1 竜巻の発生地点と竜巻が集中する19個の地域
（JNES「原子力発電所の竜巻影響評価ガイド（案）及び解説」より引用）

竜巻の地域特性を検討するため、竜巻集中地域⑦と竜巻検討地域、竜巻集中地域⑦に隣接する竜巻集中地域⑥（鳥取県の一部）における総観場の比較を行った。

図 1.2.3-2 に各地域の竜巻発生要因に関する総観場の特徴を示す。

また、表 1.2.3-1 に総観場の特徴を示す。

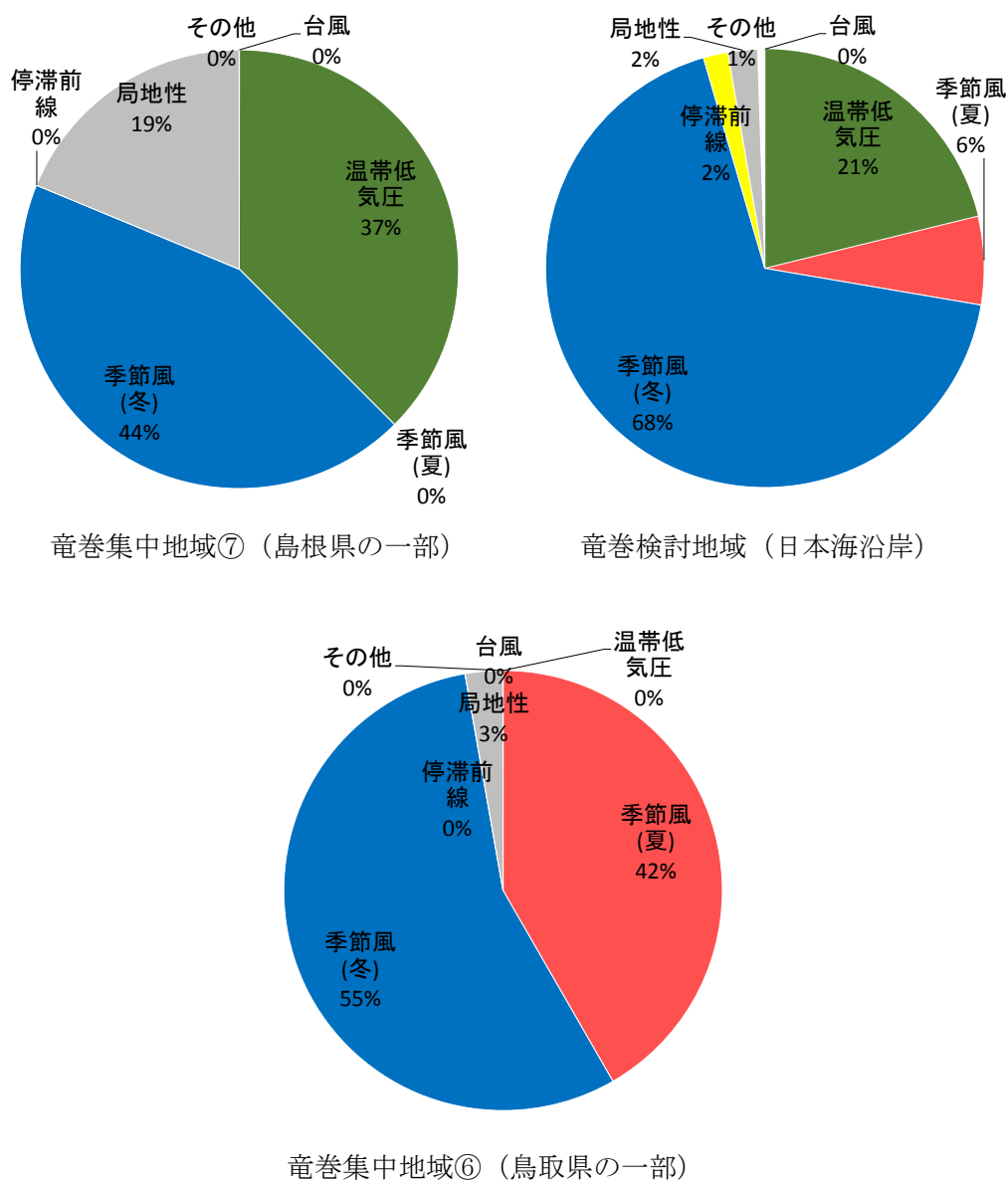


図 1.2.3-2 各地域の竜巻発生要因に関する総観場の特徴

竜巻集中地域⑦で発生した竜巻の総観場は、“季節風(冬)”が44%，“温帯低気圧”が37%を占める。竜巻検討地域では、竜巻集中地域⑦と同様に“季節風(冬)”と“温帯低気圧”の比率が高い。これらの地域では、寒気ともなって発生した親雲に起因した竜巻が多いと推測できる。また、両地域とも、太平洋側で多くみられる台風起因の竜巻は今のところ確認されていない。

また、竜巻集中地域⑦に隣接する竜巻集中地域⑥については、“季節風(夏)”の割合が高いものの、“季節風(冬)”が竜巻発生の主要因となっている。

以上の分析結果より, 北海道から山陰地方にかけての日本海沿岸を竜巻検討地域に設定することは竜巻集中地域における地域特性の観点からも妥当であると考えられる。

表 1.2.3-1 F スケールごとの総観場のまとめ

	個数	総観場 1 位 (比率%)	総観場 2 位 (比率%)	総観場 3 位 (比率%)	主移動方向 (比率%)	
集 中 地 域 ⑦	全体	8	季節風(冬) 44%	温帯低気圧 37%	局地性 19%	南 40%
	F2	2	季節風(冬) 42%	局地性 42%	温帯低気圧 16%	南 100%
	F1	4	季節風(冬) 42%	温帯低気圧 42%	局地性 16%	南, 東, 南南西, 南東: 各 25%
	F0	1	温帯低気圧 100%	-	-	-
	F 不明	1	季節風(冬) 100%	-	-	-
	F1 以上	6	季節風(冬) 42%	温帯低気圧 33%	局地性 25%	南 40%
	F0 以上	7	温帯低気圧 43%	季節風(冬) 36%	局地性 21%	南 40%
検 討 地 域	全体	192	季節風(冬) 68%	温帯低気圧 21%	季節風(夏) 6%	東 39%
	F2	10	温帯低気圧 63%	季節風(冬) 23%	局地性 9%	北東 50%
	F1	40	温帯低気圧 51%	季節風(冬) 42%	局地性 6%	東 35%
	F0	24	季節風(冬) 65%	温帯低気圧 27%	停滞前線 4%	東 33%
	F 不明	118	季節風(冬) 81%	季節風(夏) 9%	温帯低気圧 6%	東 46%
	F1 以上	50	温帯低気圧 54%	季節風(冬) 38%	局地性 6%	東 30%
F0 以上	74	季節風(冬) 47%	温帯低気圧 45%	局地性 5%	東 31%	
集 中 ⑥	全体	18	季節風(冬) 55%	季節風(夏) 42%	局地性 3%	東 73%
太 平 洋	全体	337	温帯低気圧 29%	台風 21%	季節風(冬) 17%	北東 23%

表 1.2.3-2 竜巻検討地域における竜巻の観測記録 (F1 より大きい竜巻)
(気象庁「竜巻等の突風データベース」より作成)

発生日時	発生場所		F スケール*	総観場
	都道府県	市町村		
1962年09月28日 14時20分	北海道 宗谷支庁	東利尻町	(F2)	寒冷前線
1971年10月17日 05時00分	北海道 留萌支庁	羽幌町	(F2)	寒気の移流
1974年10月03日 19時05分	北海道 檜山支庁	奥尻郡奥尻町	(F1~F2)	温暖前線
1974年10月20日 15時00分	北海道 檜山支庁	檜山郡上ノ国町	(F1~F2)	寒冷前線
1975年05月31日 18時10分	島根県	簸川郡大社町	(F2)	日本海低気圧 局地性 じょう乱 寒気の移流
1975年09月08日 01時30分	北海道 檜山支庁	奥尻郡奥尻町	(F1~F2)	日本海低気圧 暖気の 移流
1979年11月02日 01時58分	北海道 渡島支庁	松前郡松前町	(F2)	日本海低気圧 温暖前 線
1989年03月16日 19時20分	島根県	簸川郡大社町	(F2)	局地性じょう乱 寒気 の移流
1990年04月06日 02時55分	石川県	羽咋郡富来町	F2	オホーツク海低気圧 気圧の谷
1999年11月25日 15時40分	秋田県	八森町	(F1~F2)	日本海低気圧 寒冷前 線

注記* : Fスケールは、ア) 被害の詳細な情報等から推定できたもの、イ) 文献等からの引用
又は被害のおおまかな情報等から推定したもの、があり、F2 以上の事例ではア) と
イ) を区別し、イ) の場合には値を括弧で囲んでいる。

1.2.4 突風関連指数による地域特性の確認

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ついての地域特性を確認するため、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確認を行った。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特性が異なることを示すために実施し、特定規模の竜巻発生の可能性を評価するものではない。

(1) 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もと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として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1.2.4.1-1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。

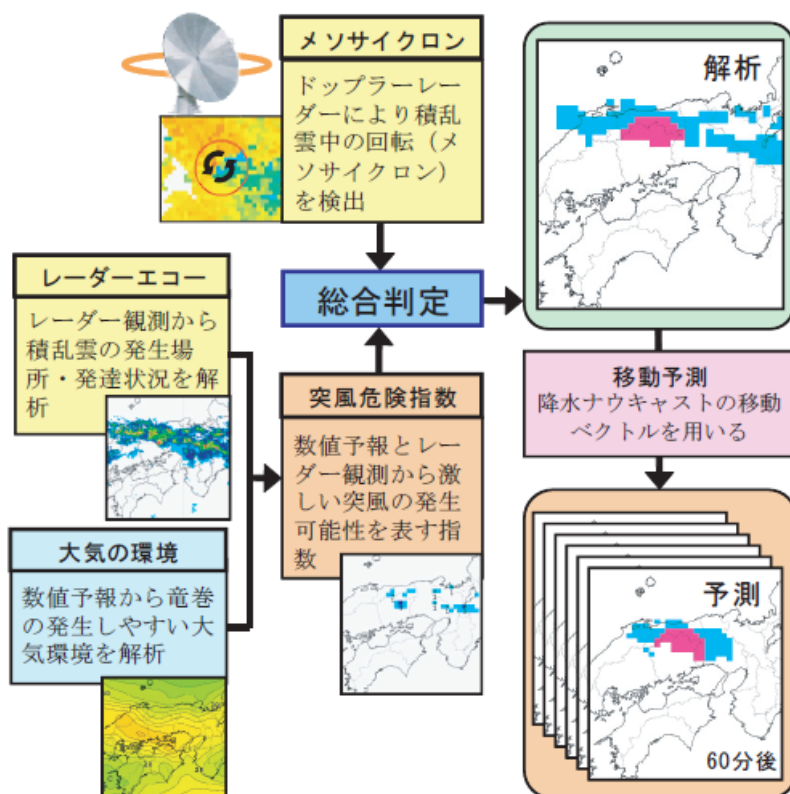


図 1.2.4.1-1 竜巻発生確度ナウキャストの解析・予測技術*

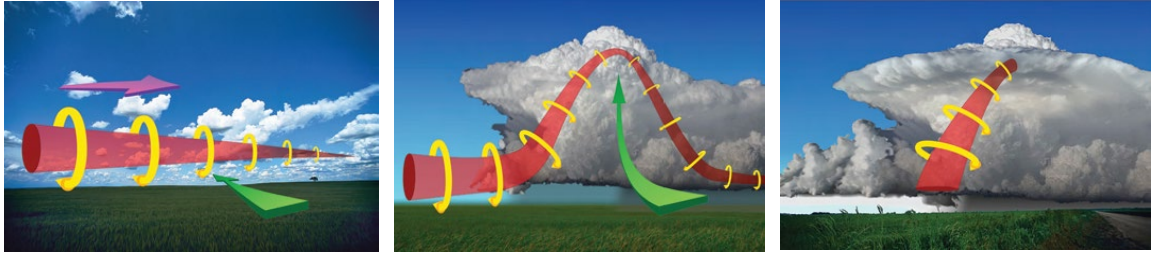
注記*：竜巻発生確度ナウキャスト・竜巻注意情報について-突風に関する防災気象情報の改善-，瀧下洋一，測候時報，2011

(2) 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っ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 1.2.4.2-1 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、大気的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。

SR e H及びCAPE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 1.2.4.2-1 竜巻の発生メカニズム*

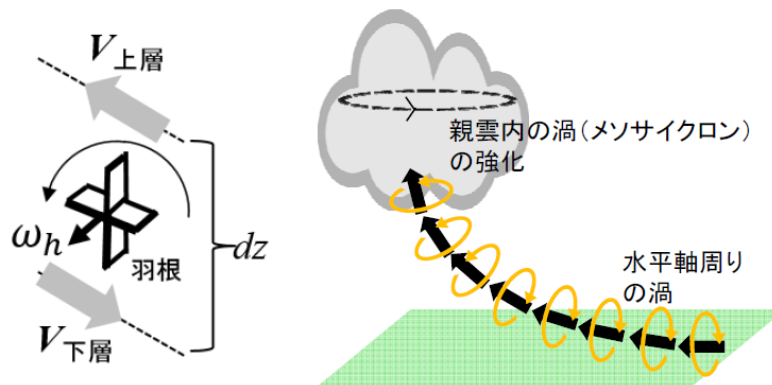
注記* : U.S. DEPARTMENT OF COMMERCE (National Oceanic and Atmospheric Administration, National Weather Service), A Preparedness Guide Including Tornado Safety Information for Schools

- 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いを示し、値が大きいほど、積乱雲がスーパーセルに発達しやすい。(図 1.2.4.2-2)

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

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 1.2.4.2-2 SReHの算出概念*

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, 2015

- b. CAPE (Convective Available Potential Energy : 対流有効位置エネルギー)
 上昇気流の発達し易さを表し、値が大きいほど背の高い積乱雲に発達し得るため、
 大気不安定度の指標となる。(図 1.2.4.2-3)

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

g : 重力加速度 θ'_e : 下層の空気塊を持ち上げた際の相当温位
 θ_e : ストーム周囲の相当温位 dz : 鉛直方向の層厚

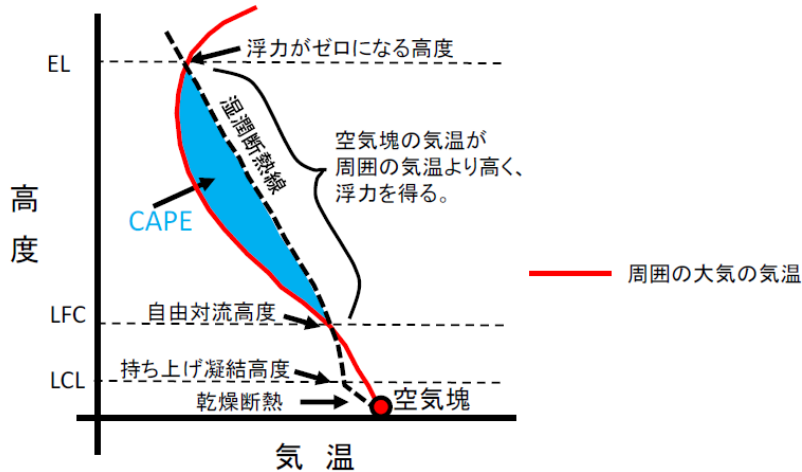


図 1.2.4.2-3 CAPEの算出概念*

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, 2015

(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 1000hPa に戻した時の絶対温度である。

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）、単位体積中に含み得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を持っている潜熱（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。

$$\theta = T \left(\frac{1000}{p} \right)^{\frac{R}{C_p}} \quad (R : \text{気体定数}, C_p : \text{定圧比熱})$$

(3) 突風関連指数の地域性

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 1.2.4.3-1 に示す。WR F 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 1.2.4.3-1 をみると, 季節によって C A P E の値が大きく異なるものの, F3 竜巻事例では共通して S R e H と C A P E の両方が大きくなる傾向が見られた。

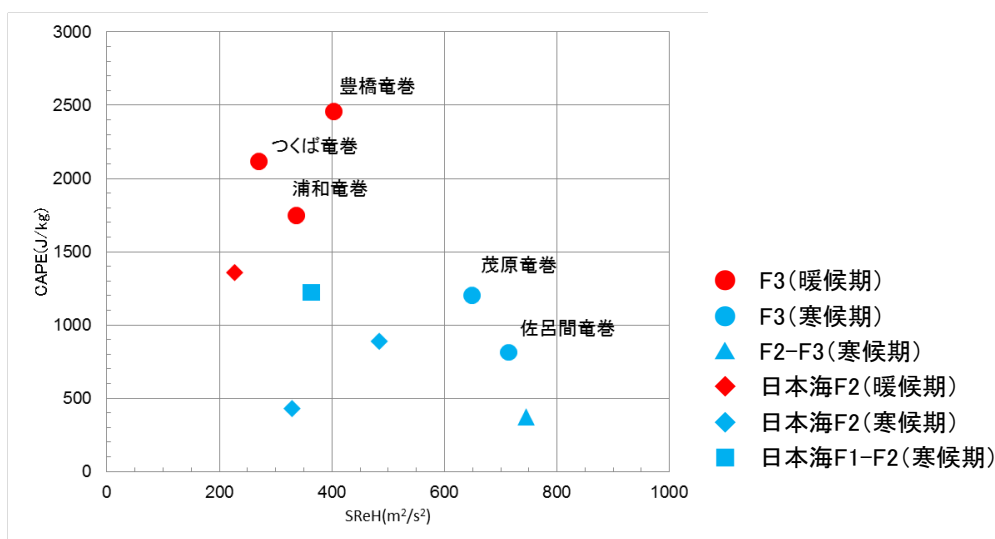


図 1.2.4.3-1 F3 竜巻に対する突風関連指数の分析結果

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 S R e H と C A P E について, 国内で (太平洋側で) 発生した F3 竜巻では, S R e H と C A P E の両方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 を含めたすべての F3 竜巻 (6 個) 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, S R e H と C A P E 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, 同時超過頻度と呼ぶ。) 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思われる。

(4) 突風関連指数の同時超過頻度による地域特性の検討

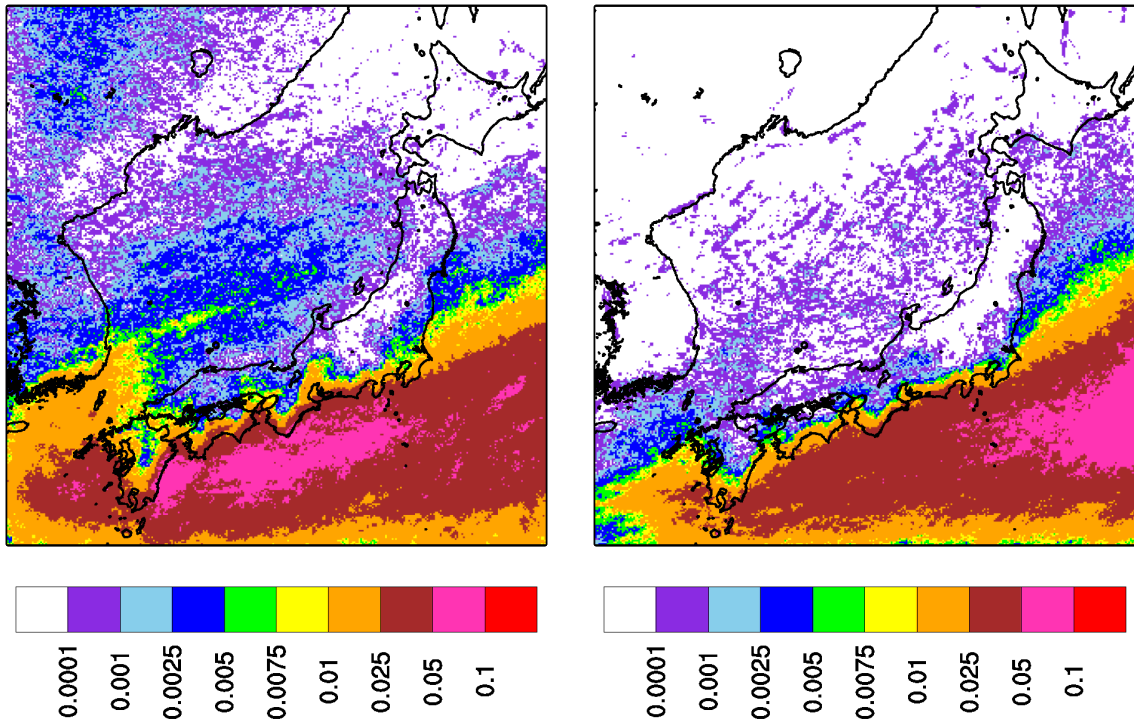
S R e H と C A P E の閾値については, 図 1.2.4.4-1 の F3 竜巻のデータをもとに, 実際の竜巻発生地点と対応するよう, 下記のように設定した。また, C A P E の閾値については, 緯度・季節で絶対値が大きく変わるため, 5 月~10 月 (暖候期) 及び 11 月~4 月 (寒候期) に分けて閾値を設定した。また, 竜巻発生時には少なからず降水がもたらされるため, 降水量の閾値を設定した。

設定した閾値は, 以下のとおりとした。

[5 月-10 月 (暖候期)] SReH : 350m²/s² 最大 CAPE : 1200J/kg 降水量 : 4mm/hr

[11月～4月 (寒候期)] SReH : 350m²/s² 最大CAPE : 500J/kg 降水量 : 4mm/hr

図 1.2.4.4-1 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 1.2.4.4-2 に示す。



暖候期 5 月～10 月

寒候期 11 月～4 月

図 1.2.4.4-1 F3 規模以上を対象とした SReH, CAPE 同時超過頻度分布 (単位 : %)

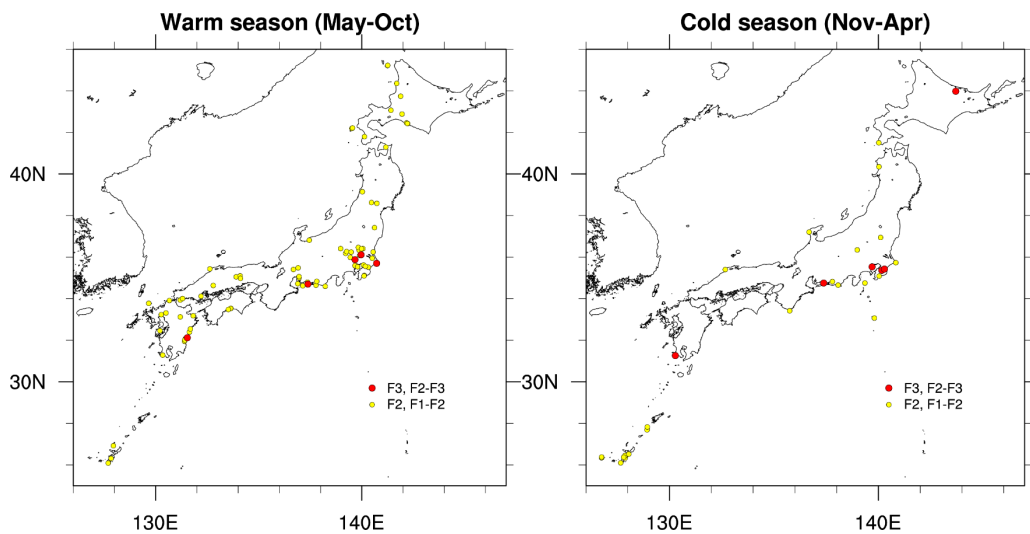


図 1.2.4.4-2 F2 規模以上の竜巻の発生箇所

(左 : 暖候期, 右 : 寒候期 ; 気象庁「竜巻等の突風データベース」による)

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、太平洋側、九州太平洋側・東シナ海側で頻度が高くなっているのに比べて、日本海側の値は1~2 オーダー以下の頻度となることが分かった。

以上より、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、太平洋側と竜巻検討地域で大きな地域特性の違いがあることを確認した。

(5) 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 1.2.4.5-1、図 1.2.4.5-2）

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 1.2.4.5-3 に模式的に示す。

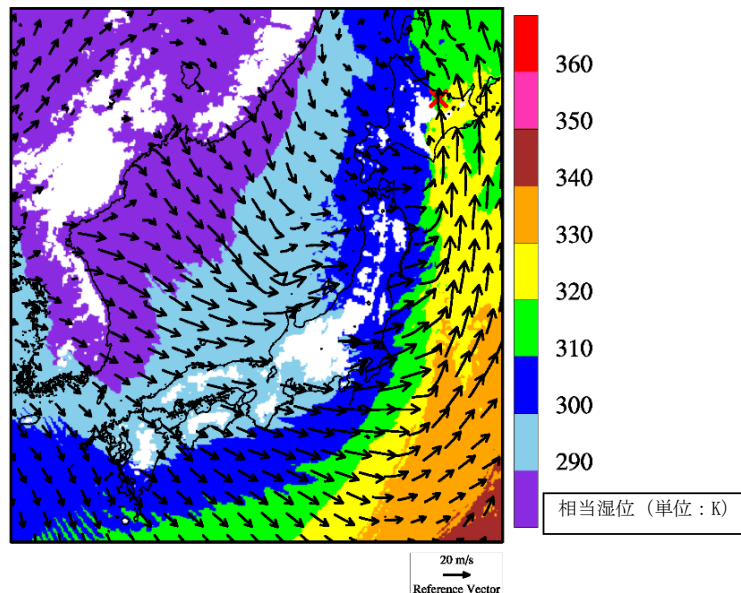
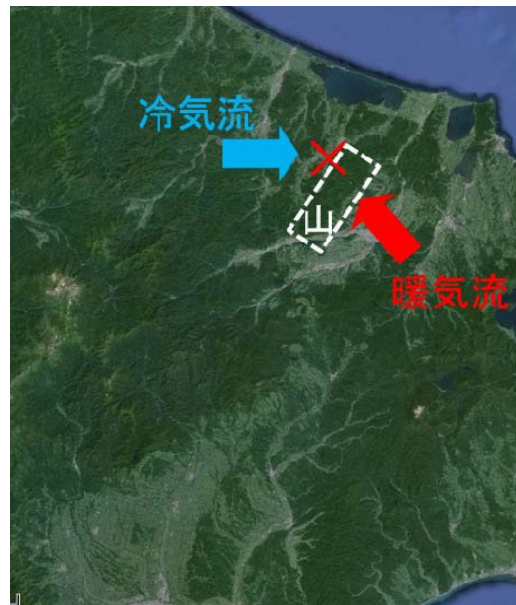


図 1.2.4.5-1 佐呂間竜巻発生時の風向・風速及び相当湿位の分布（海拔 500m 高度）



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 1.2.4.5-2 親雲の発生箇所と移動方向（左）及び竜巻の発生箇所（右）*

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，2015

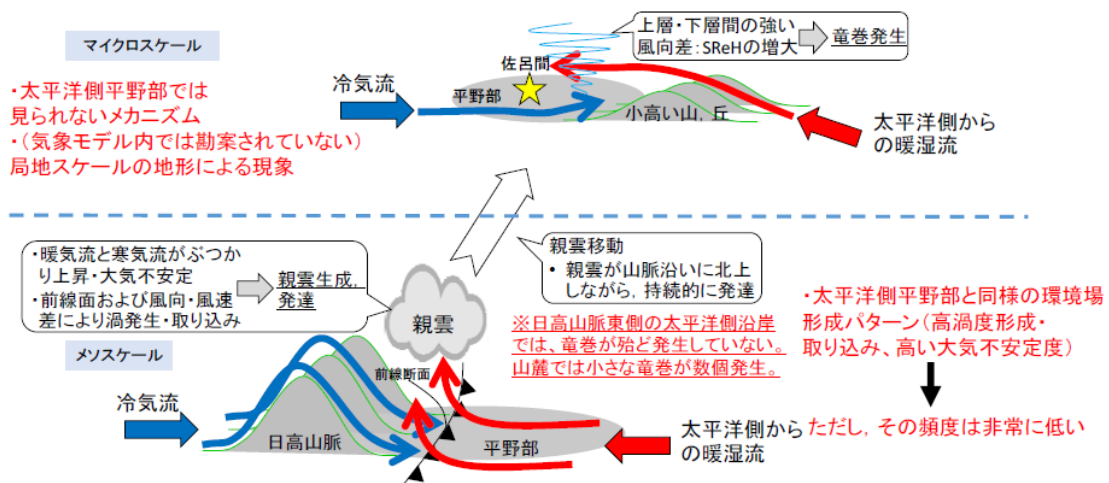


図 1.2.4.5-3 佐呂間竜巻の発生メカニズムに関する模式図*

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，2015

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得る地域である。
- ・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。

その観点で島根原子力発電所の地形を確認すると、以下のように整理できる。

- ・本州中央部及び四国に高標高山岳が存在するため、太平洋側から暖湿流が直接流入しない。（図 1.2.4.5-4）
- ・日本海側で発達する気流は、主に西から東へ移動する傾向が強く、気流の流入する風上側（海側）に尾根状の丘、山が存在しない。

したがって、島根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。

以上の検討結果より、竜巻発生要因及び発生する竜巻の規模には地域性があることが示され、その観点から島根原子力発電所の竜巻検討地域として、北海道から山陰地方にかけての日本海沿岸を竜巻検討地域として設定することが妥当であることが確認できた。

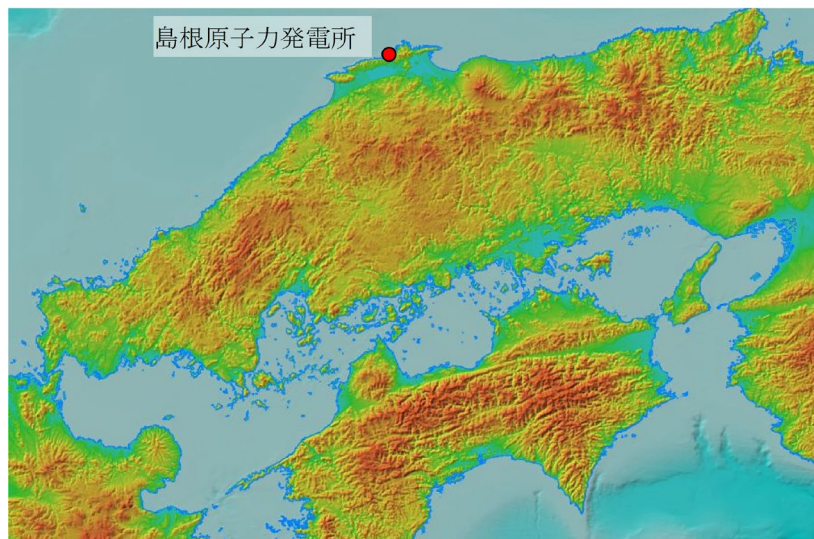


図 1.2.4.5-4 島根原子力発電所周辺地形図
（国土地理院「電子国土Web」より作成）

1.3 基準竜巻の最大風速 (V_B) の設定

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

1.3.1 過去に発生した竜巻による最大風速 (V_{B1})

表 1.3.1-1 に竜巻検討地域で過去に発生した F1 より大きい竜巻の観測記録を示す。表 1.3.1-1 より竜巻検討地域で発生した過去最大竜巻は F2 であり、F スケールと風速の関係より風速は 50~69m/s であることから、 V_{B1} は F2 の風速範囲の上限値 69m/s とする。

表 1.3.1-1 竜巻検討地域における竜巻の観測記録 (F1 より大きい竜巻)
(気象庁「竜巻等の突風データベース」より作成)

発生日時	発生場所		F スケール*	総観場
	都道府県	市町村		
1962年09月28日 14時20分	北海道 宗谷支庁	東利尻町	(F2)	寒冷前線
1971年10月17日 05時00分	北海道 留萌支庁	羽幌町	(F2)	寒気の移流
1974年10月03日 19時05分	北海道 檜山支庁	奥尻郡奥尻町	(F1~F2)	温暖前線
1974年10月20日 15時00分	北海道 檜山支庁	檜山郡上ノ国町	(F1~F2)	寒冷前線
1975年05月31日 18時10分	島根県	簸川郡大社町	(F2)	日本海低気圧 局地性 じょう乱 寒気の移流
1975年09月08日 01時30分	北海道 檜山支庁	奥尻郡奥尻町	(F1~F2)	日本海低気圧 暖気の 移流
1979年11月02日 01時58分	北海道 渡島支庁	松前郡松前町	(F2)	日本海低気圧 温暖前 線
1989年03月16日 19時20分	島根県	簸川郡大社町	(F2)	局地性じょう乱 寒気 の移流
1990年04月06日 02時55分	石川県	羽咋郡富来町	F2	オホーツク海低気圧 気圧の谷
1999年11月25日 15時40分	秋田県	八森町	(F1~F2)	日本海低気圧 寒冷前 線

注記* : F スケールは、ア) 被害の詳細な情報等から推定できたもの、イ) 文献等からの引用又は被害のおおまかな情報等から推定したもの、があり、F2 以上の事例ではア) とイ) を区別し、イ) の場合には値を括弧で囲んでいる。

1.3.2 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&Chu及びGarson et al.)に基づき算定した。具体的な算定方法は、東京工芸大学委託成果を参考とし、図1.3.2-1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、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、海上発生 of Fスケール不明の竜巻が半数以上を占める偏った発生となっていることや竜巻発生確認数にばらつきがあることを踏まえ、竜巻影響評価ガイドに基づき、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。

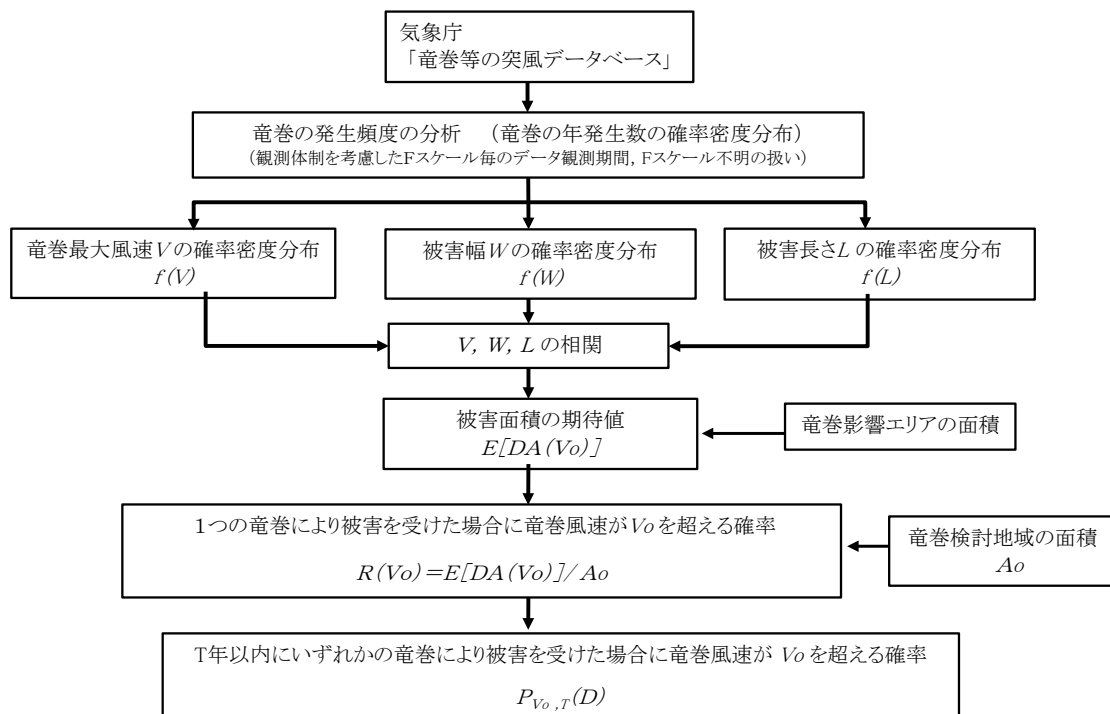


図 1.3.2-1 竜巻最大風速ハザード曲線の算定フロー

1.3.3 海岸線から陸側及び海側それぞれ 5km 全域での評価

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、それぞれ被害全幅及び被害全長を用いる。

1.3.4 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」をもとに、1961年1月～2012年6月までの51.5年間の統計量をFスケール別に算出する。なお、観測体制の変遷による観測データ品質のばらつき(図 1.3.4-1 参照)を踏まえ、以下の①～③の基本的な考え方に基づいて整理を行う。

- ① 被害が小さくて見過ごされやすいF0及びFスケール不明竜巻は、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竜巻に対しては、観測体制が整備された1991年以降の年間発生数や標準偏差を採用する。
- 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年以降の全期間の年間発生数や標準偏差を採用する。

また、Fスケール不明の竜巻については、以下の取扱いを行う。

陸上で発生した竜巻(以下、「陸上竜巻」という。)及び海上で発生して陸上へ移動した竜巻については、被害があつて初めてそのFスケールが推定されるため、陸上でFスケール不明の竜巻は、被害が少ないF0竜巻に分類した。海上で発生しその後上陸しなかった竜巻(以下、「海上竜巻」という。)については、その竜巻のスケールを推定することは困難であることから、「海岸線から海上5kmの範囲における海上竜巻の発生特性が、海岸線から内陸5kmの範囲における陸上竜巻の発生特性と同様である。」という仮定に基づいて各Fスケールに分類する。

上記の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 1.3.4-1 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。

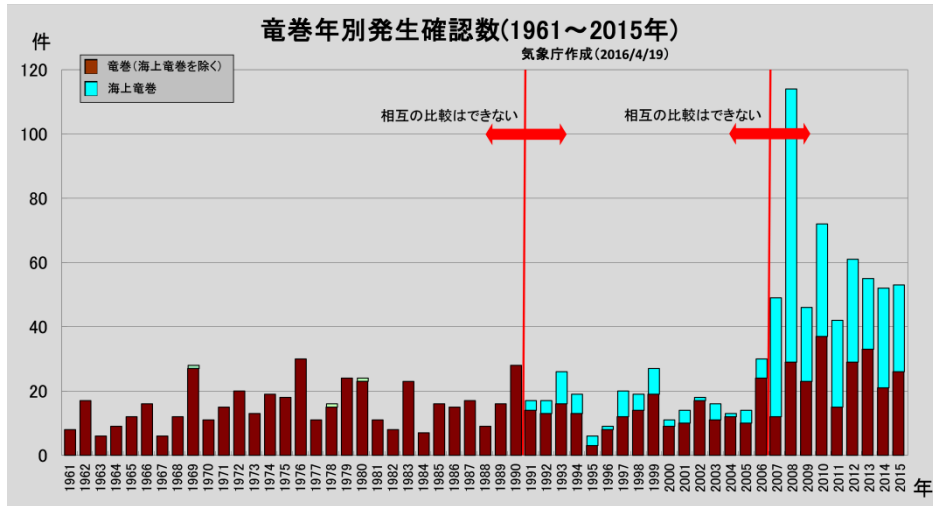


図 1.3.4-1 竜巻の年別発生確認数（気象庁 HP より）

表 1.3.4-1 竜巻発生数の解析結果

竜巻検討地域 (沿岸±5km)	発生数の統計	小計	竜巻スケール				不明		総数 (含む不明)
			F0	F1	F2	F3	(陸上)	(海上)	
1961～ 2012/6 (51.5年間)	期間内総数	74	24	40	10	0	13	105	192
	平均値(年)	1.44	0.47	0.78	0.19	—	0.25	2.04	3.73
	標準偏差(年)	2.25	1.75	0.90	0.49	—	0.71	5.92	7.81
	C V(年)	1.56	3.76	1.16	2.52	—	2.83	2.90	2.09
1991～ 2012/6 (21.5年間)	期間内総数	46	24	21	1	0	12	105	163
	平均値(年)	2.14	1.12	0.98	0.05	—	0.56	4.88	7.58
	標準偏差(年)	3.11	2.61	0.91	0.22	—	1.02	8.49	11.07
	C V(年)	1.45	2.34	0.93	4.64	—	1.83	1.74	1.46
2007～ 2012/6 (5.5年間)	期間内総数	27	22	5	0	0	7	91	125
	平均値(年)	4.91	4.00	0.91	—	—	1.27	16.55	22.73
	標準偏差(年)	5.55	4.32	1.24	—	—	1.69	11.41	15.10
	C V(年)	1.13	1.08	1.36	—	—	1.33	0.69	0.66
擬似 51.5年間 (陸上竜巻)	期間内総数	333	206	51	10	0	66	853	1186
	平均値(年)	6.44	4.00	0.98	0.19	—	1.27	16.55	22.99
	標準偏差(年)	4.75	4.32	0.91	0.49	—	1.69	11.41	12.36
	C V(年)	0.74	1.08	0.93	2.52	—	1.33	0.69	0.54
擬似 51.5年間 (全竜巻)	期間内総数	1187	969	182	36	0	0	0	1187
	平均値(年)	23.05	18.82	3.53	0.70	—	—	—	23.05
	標準偏差(年)	8.97	8.76	1.72	0.92	—	—	—	8.97
	C V(年)	0.39	0.47	0.49	1.32	—	—	—	0.39

1.3.5 竜巻風速，被害幅及び被害長さの確率分布並びに相関係数

竜巻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もとに，確率密度分布についてはガイド及びガイドが参考としている東京工芸大学委託成果を参照し，対数正規分布に従うものとする。(図1.3.5-1～図1.3.5-6)

なお，擬似的な竜巻の作成において被害幅又は被害長さの情報がない竜巻には，観測された竜巻と同程度の竜巻を想定し，それに相当する被害幅又は被害長さを与えている。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により，保守的に評価を行う。

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変量の確率分布を対象とするため，竜巻風速，被害幅及び被害長さについての相関係数を求めた。

表1.3.5-1に1961年以降の観測データのみを用いて，竜巻風速，被害幅及び被害長さについて相関係数を求めた結果を示す。

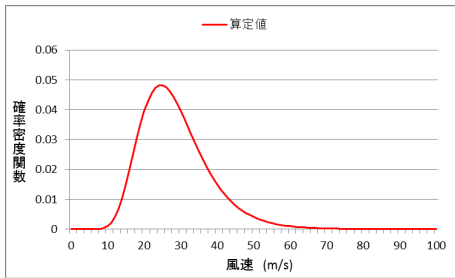


図 1.3.5-1 竜巻風速の確率密度分布

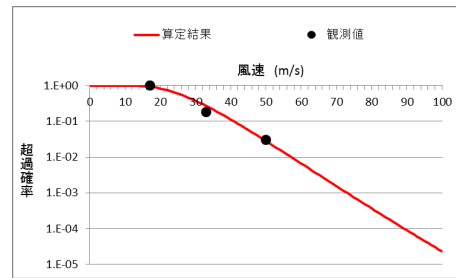


図 1.3.5-2 竜巻風速の超過確率分布

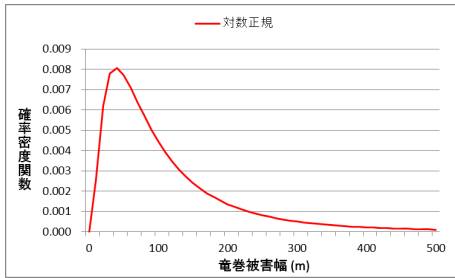


図 1.3.5-3 被害幅の確率密度分布

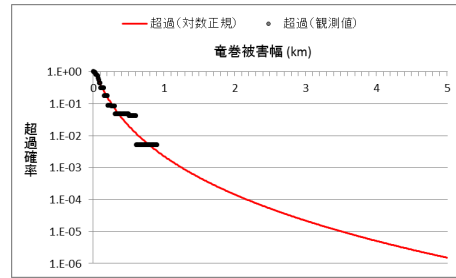


図 1.3.5-4 被害幅の超過確率分布

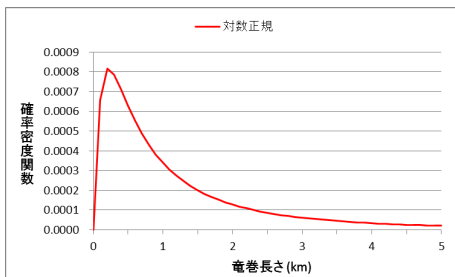


図 1.3.5-5 被害長さの確率密度分布

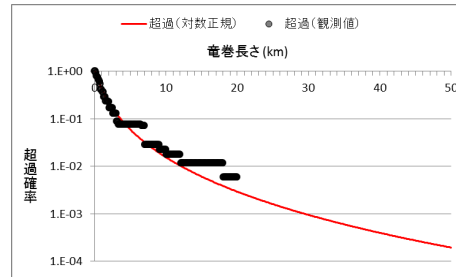


図 1.3.5-6 被害長さの超過確率分布

表 1.3.5-1 竜巻風速，被害幅及び被害長さの相関係数（単位なし）

相関係数	風速	被害幅	被害長さ
風速	1.000	-0.050*	0.312
被害幅	-0.050*	1.000	0.462
被害長さ	0.312	0.462	1.000

注記*：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

1.3.6 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、島根原子力発電所第2号機の竜巻影響評価対象施設を十分な余裕をもって包絡するエリアとして設定する。

図1.3.6-1に島根原子力発電所第2号機の竜巻影響エリアを示す。竜巻影響エリアは、島根原子力発電所第2号機の評価対象施設を包絡する円形のエリア(直径450m, 面積約 $1.6 \times 10^5 \text{m}^2$)として設定する。なお、竜巻影響エリアを円形とするため、竜巻の移動方向には依存性は生じない。

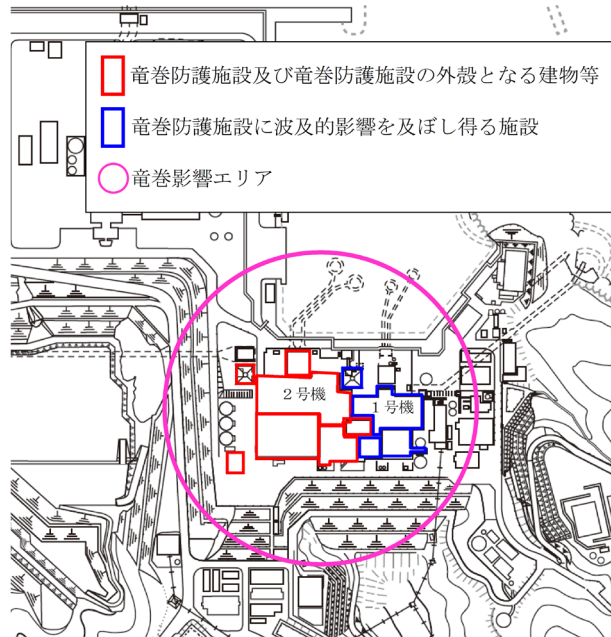


図 1.3.6-1 竜巻影響エリア

1.3.7 ハザードの算定

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。

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

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 33395km²)、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。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。

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

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。

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

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

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

$$G(\alpha) = A|\sin \alpha| + B|\cos \alpha| \quad (7)$$

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 450m 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。

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

1.3.8 竜巻最大風速のハザード曲線による最大風速 (V_{B2})

海岸線から陸側及び海側それぞれ 5km 全域 (竜巻検討地域) を対象に算定したハザード曲線, 1km 範囲ごとに短冊状に細分化して算定したハザード曲線より, 年超過確率 10^{-5} * における風速を求めると図 1.3.8-1 に示すとおりそれぞれ 60.8m/s, 61.4m/s となった。

また, 使用した竜巻の統計データの不確実性については検討を実施しており, F スケール不明の海上竜巻の発生数は, 陸上竜巻の F スケール別発生比率で按分して取り扱っているが, 竜巻検討地域を「北海道から山陰地方にかけての日本海沿岸」にすることに伴う竜巻ハザード曲線算出のためのデータの不確実性 (日本海側は F スケール不明の海上竜巻が多い) を踏まえ, 参照する年超過確率を 10^{-5} から一桁下げた年超過確率 10^{-6} * における風速とすると, 陸側及び海側 5km 全域での評価, 1km 範囲ごとに細分化した評価ともに 78.0m/s となる。以上より, 竜巻最大風速のハザード曲線による最大風速 V_{B2} は 78m/s とする。

注記* : 設計基準事故の発生頻度が 10^{-3} /年 \sim 10^{-4} /年 (発電用軽水型原子炉施設に係る新安全基準骨子案に対する意見募集の結果について: 平成 25 年 4 月 3 日技術基盤課) であることから, 設計基準として考慮する竜巻の最大風速は年超過確率 10^{-4} に設定することが妥当であると考え。ただし, ガイドで竜巻最大風速のハザード曲線による最大風速 (V_{B2}) の年超過確率は, 10^{-5} を上回らないことが要求されていること, ハザードの不確実性があることを踏まえて保守的に 10^{-4} より 1 桁下げて, 参照する年超過確率は 10^{-5} とするが, 統計データの不確実性の検討を踏まえて保守的に 10^{-5} より 1 桁下げて, 竜巻最大風速のハザード曲線による最大風速 (V_{B2}) の年超過確率は 10^{-6} とする。

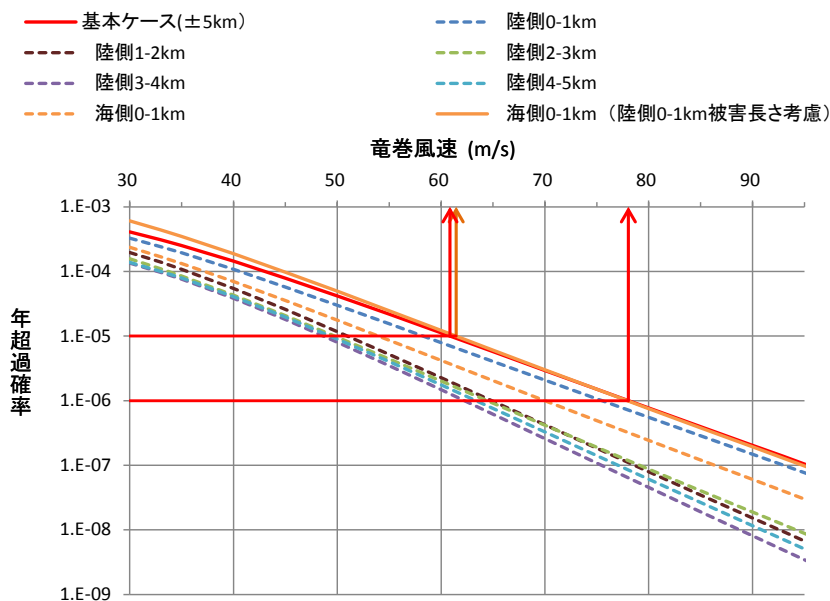
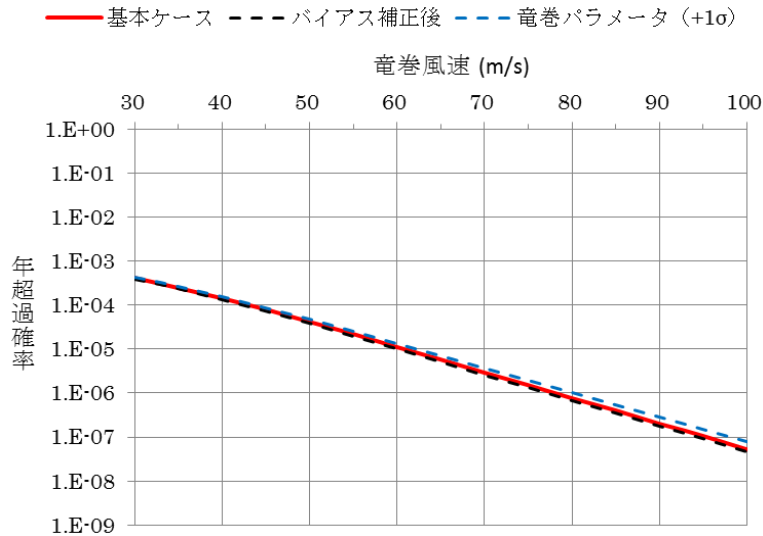


図 1.3.8-1 竜巻最大風速のハザード曲線
(海側, 陸側 5km 範囲及び 1km 範囲ごとに細分化した評価)

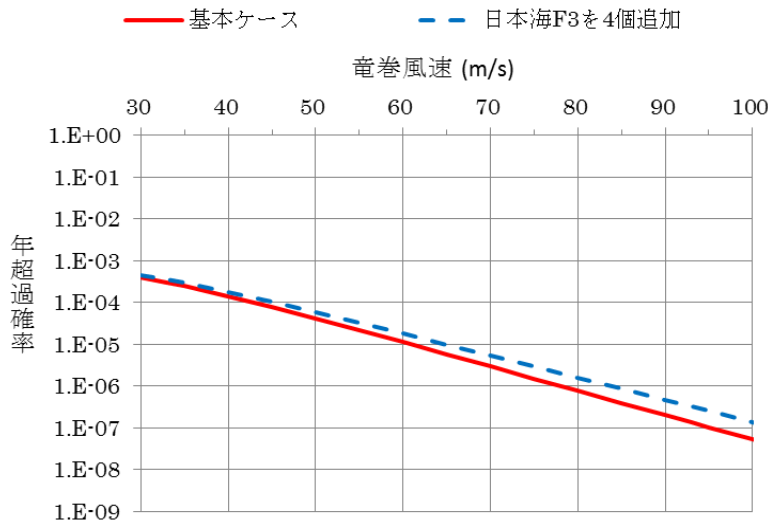
また、不確かさ要素のハザード算定結果への影響を検討した。

図 1.3.8-2(a)に示した、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十分小さいことを確認した。

さらに、擬似データに F3 竜巻を 4 個追加した感度解析結果を図 1.3.8-2(b)に示す。この場合の年超過確率 10^{-5} に相当する竜巻風速は 64.9m/s となり、かなり保守的な仮定をおいてもハザードへの影響は限定的であることから、データの高い安定性を確認した。



(a) バイアス補正後及び全パラメータ + 1 σ のハザード



(b) 竜巻風速の年超過確率分布

図 1.3.8-2 ハザード不確かさ検討結果

<擬似データ無しの場合の解析>

擬似データの場合、F スケールの小さな竜巻の割合が多く、幅や長さの変動が小さくなる傾向がある。そのため、3 種類の竜巻パラメータがすべて判明している 52 個

の竜巻観測データのみを用いて同様の検討を実施した。すなわち、観測データは均質なデータから成り、擬似データは存在しない。パラメータの推定結果を表 1.3.8-1、計算条件の一覧を表 1.3.8-2、ハザードの算定結果を図 1.3.8-3、図 1.3.8-4、及び表 1.3.8-3 に示す。擬似データの場合と比較して、Jackknife 推定値は大きくなっていることがわかる。したがってハザードの算定結果についても大きくなる傾向があるものの、発生数の違いを考慮し年超過確率 10^{-6} の最大風速を見ても、風速値の差は 10m/s 程度であることが確認できる。

表 1.3.8-1 Jackknife 法により得られた竜巻パラメータの推定結果
(擬似データ無し)

日本海(不明無し) 52個	風速		被害幅		被害長さ		相関係数		
	平均値	標準偏差	平均値	標準偏差	平均値	標準偏差	U~W	U~L	W~L
平均	36.337	11.655	129.8	154.8	1815.4	2227.7	0.0023	0.3210	0.4399
標準偏差	0.226	0.143	3.0	6.5	43.3	59.7	0.0090	0.0168	0.0171
全データ	36.337	11.656	129.8	154.9	1815.4	2228.5	0.0000	0.3210	0.4399
min	35.873	11.277	114.7	111.3	1654.9	1923.5	0.0000	0.2714	0.3840
max	36.559	11.749	132.3	156.4	1849.0	2250.7	0.0590	0.3692	0.4879
バイアス	0.002	-0.045	0.0	-7.0	0.0	-40.7	0.1154	-0.0022	0.0006
Jackknife 推定値	36.335	11.700	129.8	162.0	1815.4	2269.3	-0.1154	0.3232	0.4393
Jackknife 推定幅	1.616	1.021	21.5	46.7	309.0	426.1	0.0645	0.1198	0.1221

表 1.3.8-2 ハザードの計算条件 (擬似データ無し)

ケース名	統計量	発生数	風速	被害幅	被害長さ	U~W	U~L	W~L
基本(全データ)	平均	1.010	36.3365	129.769	1815.385	0.0023	0.3210	0.4399
	標準偏差		11.6550	154.791	2227.749			
バイアス補正後	平均	1.010	36.3346	129.759	1815.400	-0.1154	0.3232	0.4393
	標準偏差		11.7004	161.961	2269.288			
風速・幅・長さ・相関 (+1σ)	平均	1.010	37.9509	151.243	2124.444	-0.0510	0.4429	0.5614
	標準偏差		12.7212	208.638	2695.378			

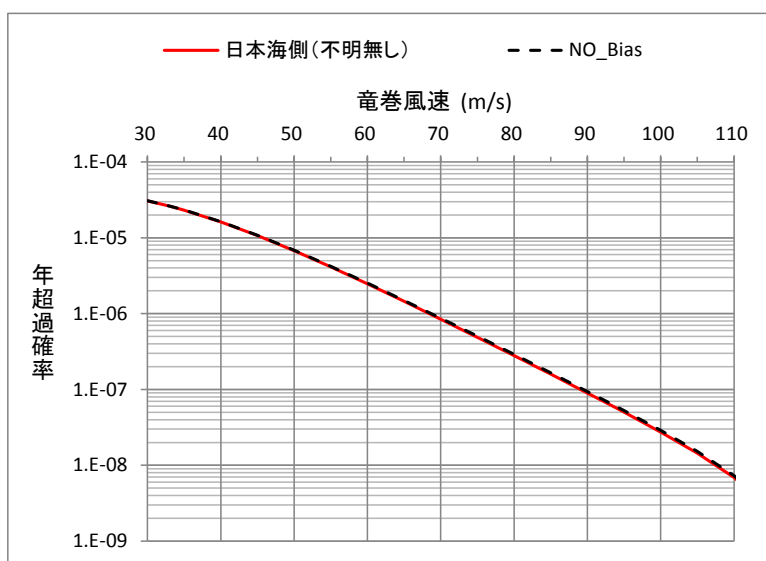


図 1.3.8-3 基本ケースとバイアス補正後ケースのハザード算定結果比較
(擬似データ無し)

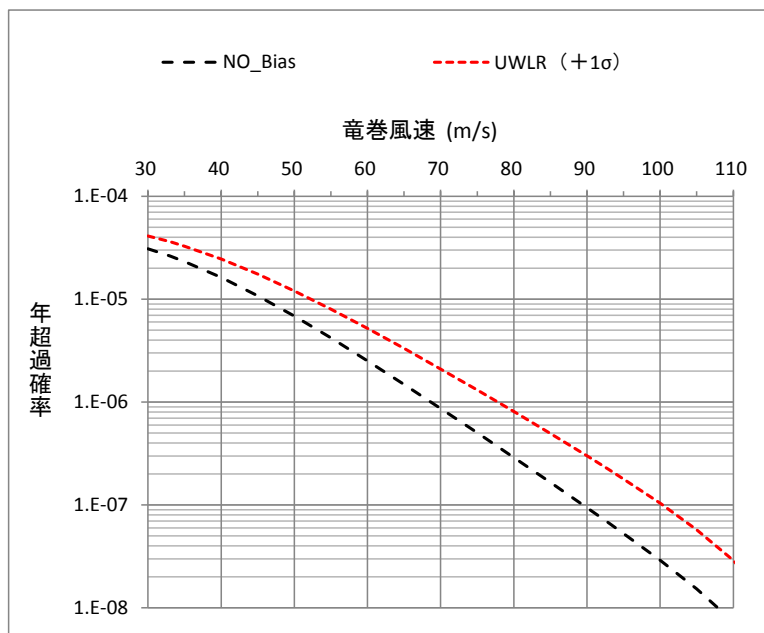


図 1.3.8-4 バイアス補正後ケースと全パラメータ+1σケースのハザード算定結果比較
(擬似データ無し)

表 1.3.8-3 ハザード算定結果 (擬似データ無し)

ケース名	超過確率に対応する竜巻風速				バイアス補正後の竜巻風速との差		
	1.E-05	1.E-06	1.E-07	1.E-08	1.E-05	1.E-06	1.E-07
基本(全データ)	45.73	68.45	89.07	107.48	-0.12	-0.26	-0.40
バイアス補正後	45.85	68.71	89.47	107.88	-	-	-
風速・幅・長さ・相関(+1σ)	52.30	77.80	100.34		6.45	9.09	10.87

1.3.9 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 $V_{B1}=69\text{m/s}$ 及び竜巻最大風速のハザード曲線による最大風速 $V_{B2}=78\text{m/s}$ のうち、大きい風速である 78m/s を島根原子力発電所における基準竜巻の最大風速 V_B とする。(表 1.3.9-1)

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、将来的な気候変動により規模や発生数の増加傾向となることは否定できない。

将来的な気候変動として現時点でも予想されるものとしては地球温暖化が挙げられる。地球温暖化が進行した際には台風の強度が強まる傾向が考えられ、現時点の経験データでは台風起因の竜巻は日本海側では観測されていないものの将来的には日本海側においても発生する可能性がある。ただし台風は北上するにつれて、山岳での暖湿流遮断による安定化や海水温度低下による水蒸気供給量低下により衰弱しやすい特性を有していることから、仮に発生するとしても規模の大きな竜巻の発生は考えにくい。

将来的な気候変動についての現時点での予想は上記のとおりとなるが、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、必要に応じて見直しを実施していくものとする。

表 1.3.9-1 竜巻の最大風速の算定結果

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}	69
竜巻最大風速のハザード曲線による最大風速 V_{B2}	78
基準竜巻の最大風速 V_B	78

1.3.10 評価時点以降のデータ更新分について

上記の基準竜巻の検討には、検討実施時点での最新であった 1961 年 1 月～2012 年 6 月までの竜巻データベースを用いているが、その後、気象庁により継続的にデータベースが更新されている*。本状況においても、以下の理由より、最新データを参照した場合でも基準竜巻の最大風速は上記の評価結果を上回るものではなく、現時点での見直しは不要と判断している。

- ・2012 年 6 月以降、竜巻検討地域において現時点での V_{B1} の風速 69m/s を超える竜巻が報告されていない。
- ・2012 年 6 月以降、竜巻検討地域で観測された竜巻は F スケール不明を除き F0 若しくは F1 相当のものであり、データベースの更新がハザードへ与える影響は軽微と考えられる。

注記* : 2019 年 3 月末時点で、2016 年 3 月までのデータ及び 2016 年 4 月以降の速報データが掲載されている。

1.4 設計竜巻の最大風速 (V_D) の設定

島根原子力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、基準竜巻の最大風速の割り増しを検討し、設計竜巻の最大風速を設定する。

1.4.1 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、(1)地形起伏による影響、(2)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、島根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。

(1) 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 1.4.1-1 に示すとおり竜巻の渦が上り斜面を移動する時（渦 1 から渦 2 へ移動する場合）、基本的に渦は弱まり、下り斜面を移動する時には強まる。

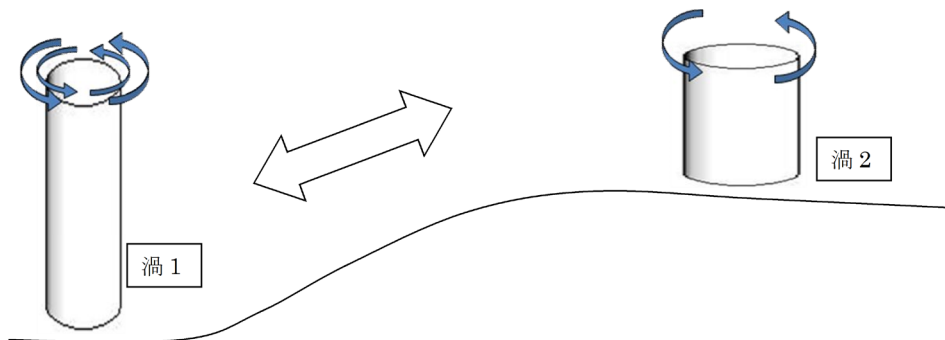


図 1.4.1-1 竜巻旋回流の地形影響に関する模式図

(2) 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。

1.4.2 島根原子力発電所周辺の地形

島根原子力発電所周辺の地形を図 1.4.2-1、島根原子力発電所東西方向の鉛直断面での地形起伏を図 1.4.2-2、島根原子力発電所周辺の地表面粗度を図 1.4.2-3 に示す。島根原子力発電所が立地する敷地は、北側を輪谷湾に面し、他の三方を山で囲まれている。

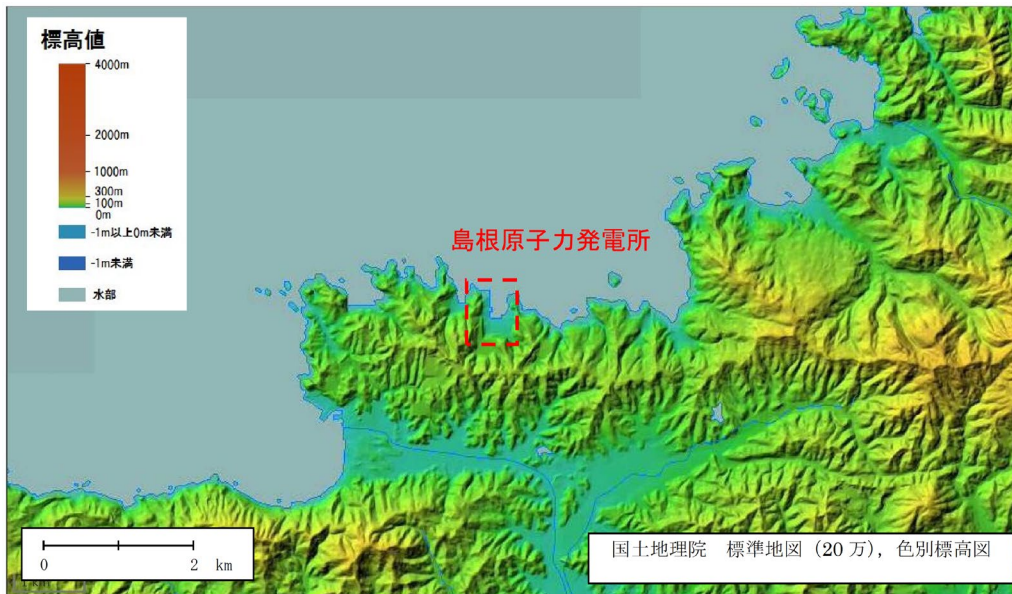


図 1. 4. 2-1 島根原子力発電所周辺の地形
(国土地理院「電子国土Web」より作成)

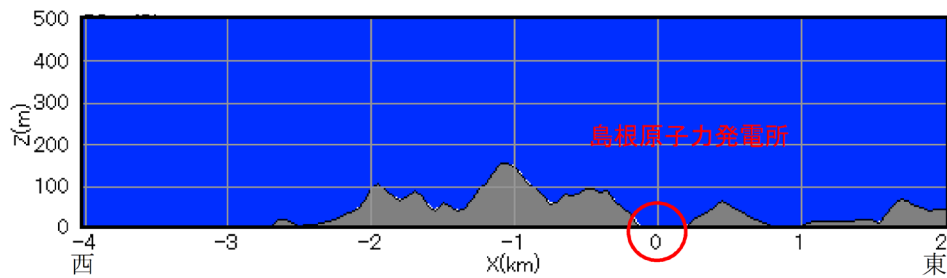


図 1. 4. 2-2 島根原子力発電所東西方向の鉛直断面での地形起伏

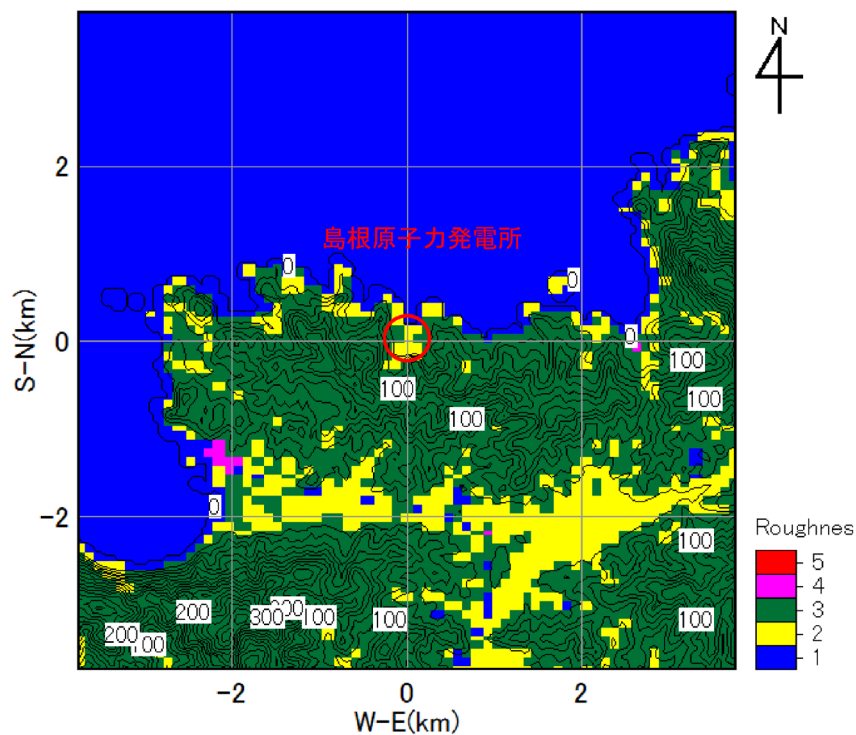


図 1. 4. 2-3 島根原子力発電所周辺の地表面粗度

1.4.3 竜巻の移動方向の分析

島根原子力発電所の周辺地域を対象に竜巻の移動方向に関する分析を行う。なお、分析の対象とする地域は、「原子力発電所の竜巻影響評価ガイド（案）及び解説」に示されている竜巻集中地域を参考に、竜巻集中地域⑥（鳥取県の一部）及び⑦（島根県の一部）とした。図1.4.3-1に竜巻集中地域⑥及び⑦で発生した竜巻の移動方向、図1.4.3-2に竜巻集中地域⑥及び⑦において過去に発生した竜巻の移動方向の頻度を分析した結果を示す。竜巻の移動方向の分析の結果、島根原子力発電所周辺で発生する竜巻は、その大部分が海上又は沿岸部で発生しており、その移動方向は東に向かう頻度が高いことが確認できる。また、島根原子力発電所が立地する竜巻集中地域⑦では、発電所北方の海上から南（陸側）へ向かう頻度が高いことが確認できる。

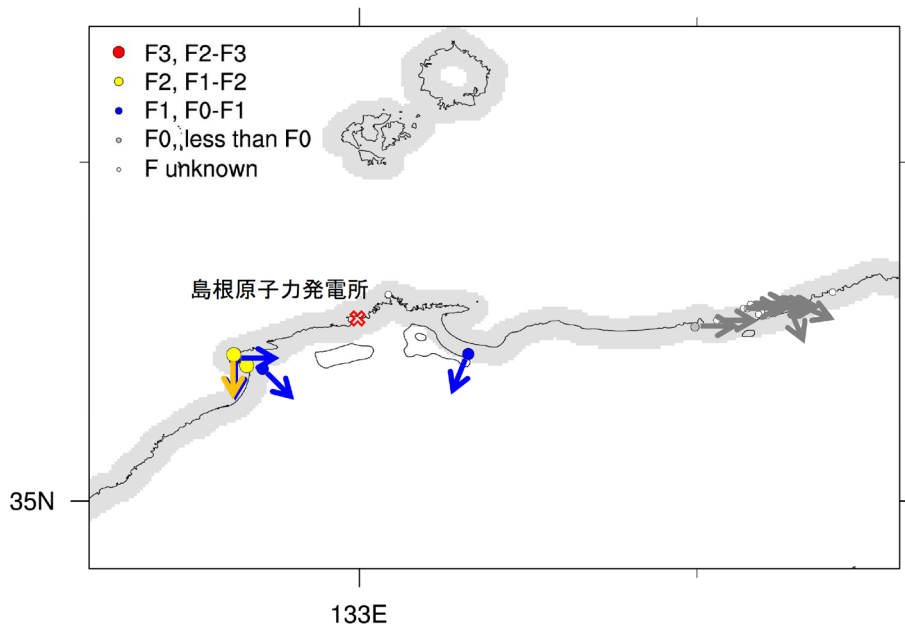


図1.4.3-1 竜巻集中地域⑥及び⑦における竜巻移動方向

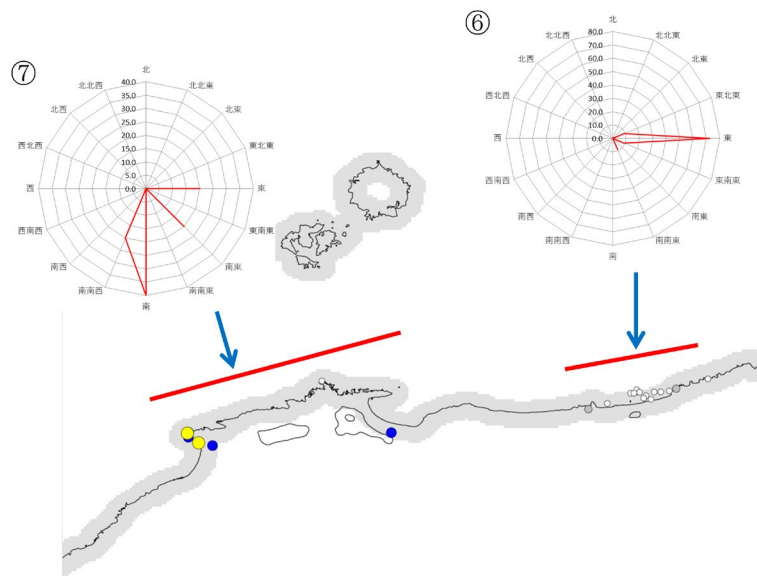


図1.4.3-2 竜巻集中地域⑥及び⑦における竜巻移動方向の頻度

1.4.4 竜巻風速の増幅に関する検討

(1) 地形起伏による竜巻増幅

島根原子力発電所周辺で発生する竜巻は、発電所北方又は西方の海上あるいは沿岸部で発生し、竜巻が発電所の北方で発生し南方向（陸側）へ移動する場合には、地形が平坦な海側から発電所敷地に進入することとなり、発電所敷地自体も平坦であるため竜巻が増幅することはないと考えられる。また、発電所西方で発生する竜巻は、上り斜面・下り斜面の影響をほぼ同程度受け発電所敷地に進入する可能性が高く発電所敷地はほぼ平坦であるため竜巻が増幅することはないと考えられる。万が一発電所敷地外の南側（例えば鹿島町の平地）で竜巻が発生し、その竜巻が海側に向かって移動し、発電所敷地内に進入した場合、竜巻は山を越える必要がある。この場合の地形効果による増幅は、山の上り勾配と下り勾配で相殺される。

(2) 地表面粗度による竜巻増幅

島根原子力発電所周辺では、竜巻の移動経路となり得る発電所西方に着目すると森林などに相当する粗度区分Ⅲの領域が2km以上にわたり存在していることから、粗度による減衰効果が期待できる。発電所北方又は西方の海上あるいは沿岸から南又は東方向へ向かう竜巻が極めて多く、発電所北方の海上で発生した竜巻が南方向へ移動する場合には、地表面粗度の小さい海上から粗度の大きな陸上に上陸するため、粗度により減衰するものと考えられる。

1.4.5 設計竜巻の最大風速 (V_D)

以上のことから、島根原子力発電所では、地形効果による竜巻の増幅を考慮しない。一方、将来的な気候変動による竜巻発生の不確実性を踏まえ、 V_B の値がF3の風速範囲(70~92m/s)にあることから設計竜巻の最大風速 V_D はF3の風速範囲の上限値92m/sとする。

2. 外部事象防護対象施設の選定

2. 外部事象防護対象施設のうち竜巻の影響を考慮する施設の選定について

外部事象防護対象施設の中から、屋外施設及び外気と接続する建物内の外部事象防護対象施設を抽出した。

具体的な抽出フローを図 2-1 に、屋外施設及び外気と接続する建物内の外部事象防護対象施設の抽出結果を表 2-1 に示す。

Step 1 : 安全重要度分類のクラス 1, クラス 2 及びクラス 3 に属する構築物, 系統及び機器並びに安全機能を有しない構築物, 系統及び機器のうち外部事象防護対象施設*¹を抽出する。

また, 外部事象防護対象施設を内包する建物 (外部事象防護対象施設となる建物を除く。) 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。

上記以外の安全施設については, 竜巻及びその随件事象に対して機能維持すること若しくは竜巻及びその随件事象による損傷を考慮して代替設備により必要な機能を確保すること, 安全上支障のない期間での修復等の対応を行うこと又はそれらを適切に組み合わせることにより, その安全機能を損なわないことを確認する。

Step 2 : Step 1 で抽出された設備の設置場所を確認し, 竜巻襲来時に風圧, 気圧差及び設計飛来物等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。) を評価対象施設とする。

Step 3 : 屋内施設であるが外気と繋がっているため, 竜巻襲来時に気圧差の影響を受ける施設を評価対象施設とする。

Step 4 : 外殻となる施設による防護機能が期待できない区画の内部に配置されている外部事象防護対象施設は, 竜巻襲来時に風圧, 気圧差及び設計飛来物衝突の影響を受けるため, 評価対象施設とする。

なお, 外殻による防護機能に期待できるかは, 外殻となる施設の竜巻荷重に対する構造健全性の確認結果により, 設計飛来物の衝突等による開口部の開放又は開口部建具の貫通の観点から, 評価対象施設を抽出する。

注記*1 : 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, 安全重要度分類のクラス 1, クラス 2 及び安全評価*²上その機能に期待するクラス 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

*2 : 運転時の異常な過渡変化及び設計基準事故解析

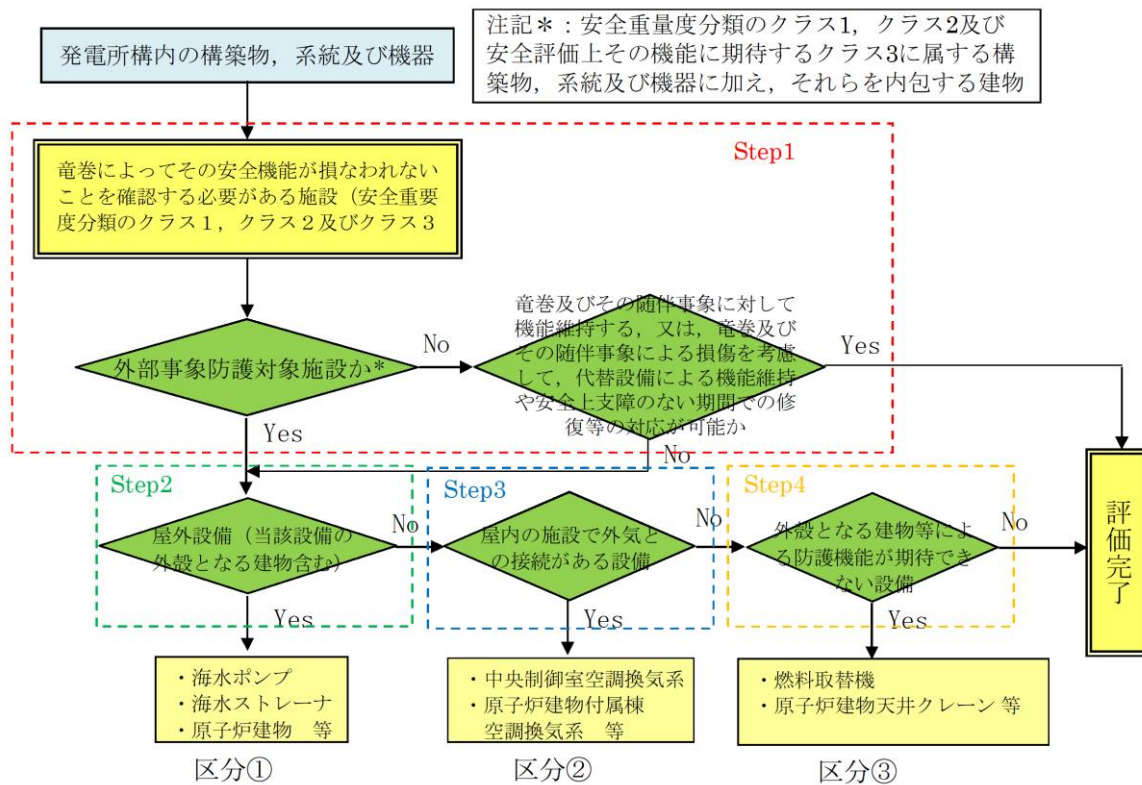


図 2-1 外部事象防護対象施設のうち評価対象施設の抽出フロー

表 2-1 外部事象防護対象施設の抽出結果 (12/12)

重要度分類	機能		系統	系統・機器		設置場所		外設となる建物の防護機能により 電巻の影響を受けないことの確認	評価対象施設	備考
	定義			機器・設備	屋外 ^{*1} (建物名)	屋内 ^{*1} (建物名)	外設となる建物の 電巻の影響を受けないことの確認 ^{*2}			
MS-3	2) 異常事態への対応上特に重要な機器、系統及び機器の把握機能	原子力発電所緊急時対応用重要機器、放射線監視設備、放射線監視設備、事故時監視設備の一部、消火器、安全避難通路、非常用電源	放射線監視設備	排気筒モニタ	○	—	—	○		
		外設となる施設		原子炉建物 制御室建物 タービン建物 廃棄物処理建物 排気筒モニタ室 A-デイズール燃料貯蔵タンク室 HPCS-デイズール燃料貯蔵タンク室 B-デイズール燃料貯蔵タンク室	○	—	—	○		

注記*1：外消事象防護対象施設を内包する建物等を「外設となる建物等」として抽出。建物名は、R/A：原子炉建物、Rv/B：廃棄物処理建物、C/B：制御室建物を示す。
*2：設計電巻の気圧差による荷重の影響を受ける機器・設備を外気との接続「あり」とする。

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
ある施設の選定

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の選定について

外部事象防護対象施設に波及的影響を及ぼし得る施設として、倒壊により外部事象防護対象施設に損傷を及ぼし得る施設及び外部事象防護対象施設の附属施設のうち屋外にある施設を抽出し、外部事象防護対象施設に波及的影響を及ぼし得る評価対象施設とした。外部事象防護対象施設に波及的影響を及ぼし得る評価対象施設の抽出フローを図 3-1 に示す。

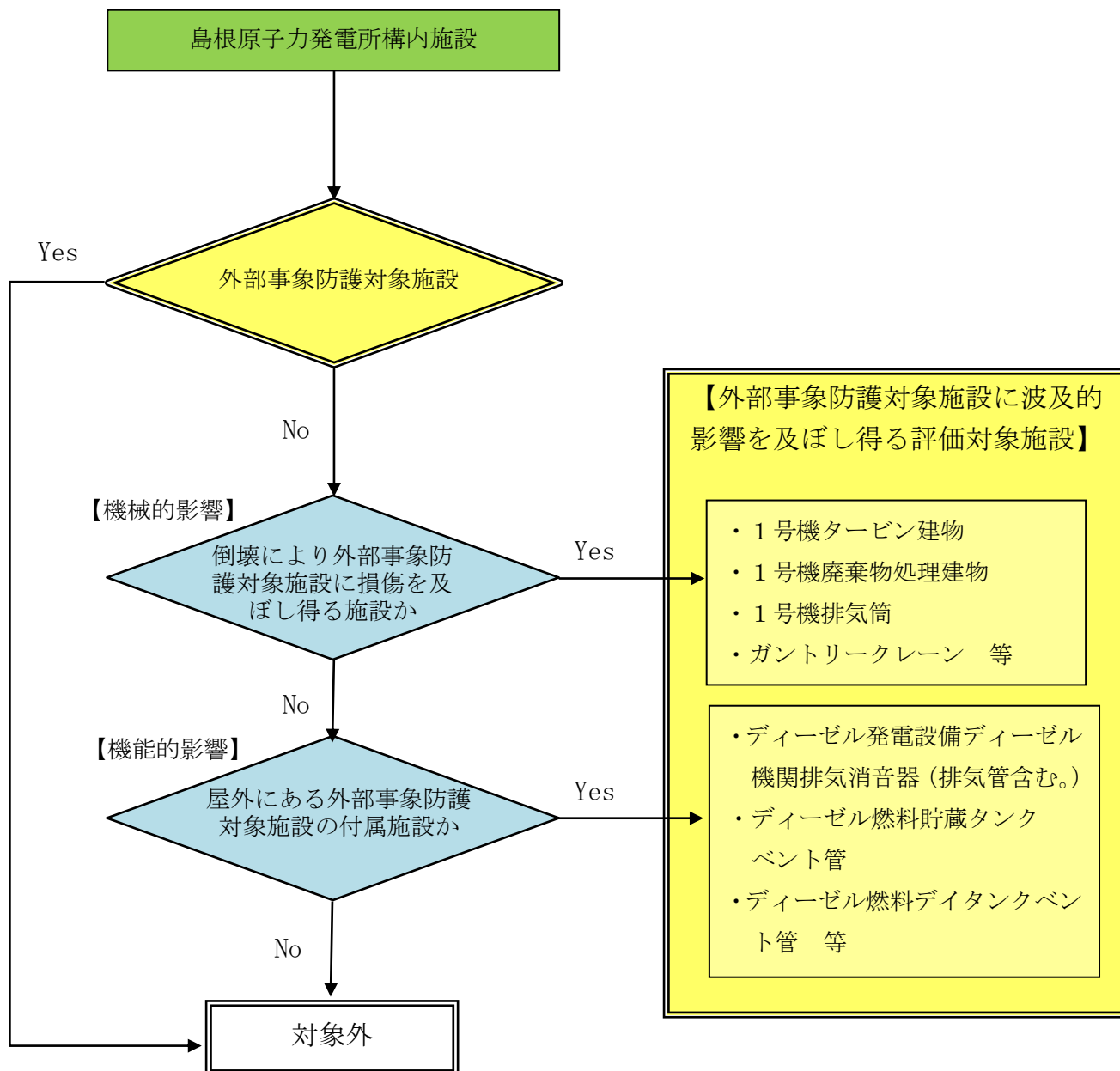


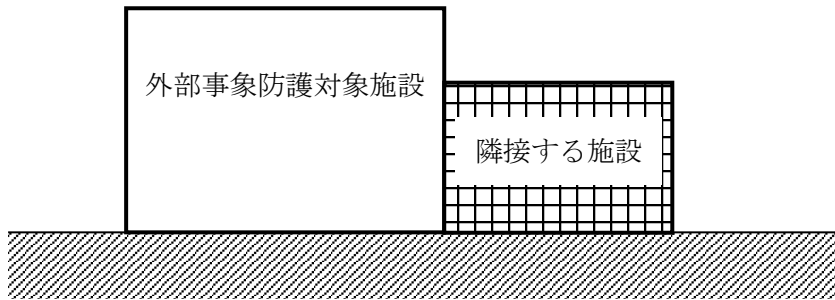
図 3-1 外部事象防護対象施設に波及的影響を及ぼし得る評価対象施設の抽出フロー

3.1 倒壊により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抽出結果

倒壊により外部事象防護対象施設に損傷を及ぼし得る施設については、外部事象防護対象施設に対する機械的な影響を考慮し、外部事象防護対象施設に波及的影響を及ぼし得る評価対象施設として抽出した。

具体的には、図 3.1-1 に示すとおり、外部事象防護対象施設に隣接する施設及び地上高さが外部事象防護対象施設との距離以上である施設を抽出した。抽出結果を表 3.1-1 に示す。

【外部事象防護対象施設に隣接する施設】



【地上高さが外部事象防護対象施設との距離以上である施設】（高さ $H \geq$ 水平距離 L の場合）

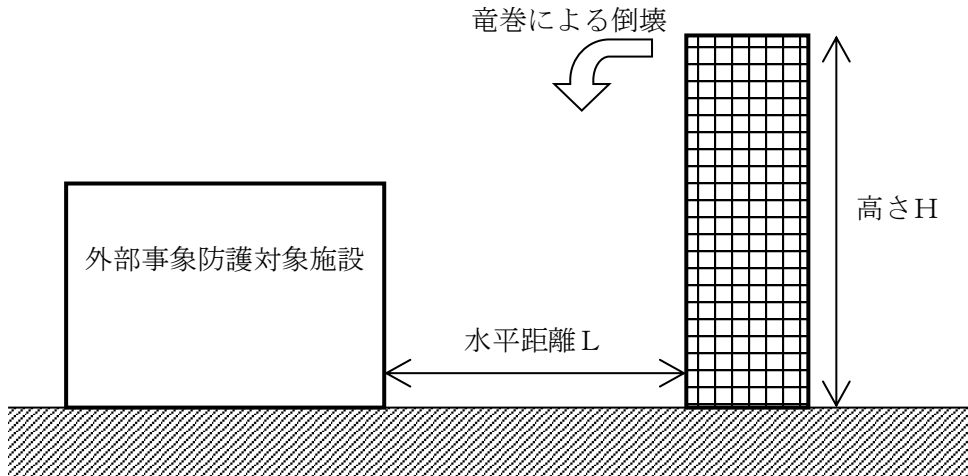


図 3.1-1 倒壊により外部事象防護対象施設に損傷を及ぼし得る施設

表 3.1-1 外部事象防護対象施設に波及的影響を及ぼし得る評価対象施設の抽出結果
(倒壊により外部事象防護対象施設に損傷を及ぼし得る施設)

施設名	損傷を受ける可能性のある外部事象防護対象施設	外部事象防護対象施設との距離	地上高さ
1号機原子炉建物	制御室建物	約 15m	47m
1号機タービン建物	2号機タービン建物 制御室建物	隣接	—
1号機廃棄物処理建物	2号機廃棄物処理建物 制御室建物	隣接	—
1号機排気筒	2号機タービン建物	約 10m	120m
ガントリークレーン	原子炉補機海水ポンプ等	約 3 m	21m
排気筒モニタ室	2号機排気筒	隣接	—
復水貯蔵タンク遮蔽壁	B-ディーゼル燃料貯蔵 タンク格納槽	約 5m	12m

3.2 外部事象防護対象施設の屋外にある付属施設の抽出

外部事象防護対象施設の付属施設のうち屋外にある施設について、外部事象防護対象施設に対する機能的な影響を考慮し、外部事象防護対象施設に波及的影響を及ぼし得る評価対象施設として抽出した。抽出結果を表 3.2-1、表 3.2-2 に示す。

表 3.2-1 外部事象防護対象施設に波及的影響を及ぼし得る評価対象施設の抽出結果
(外部事象防護対象施設の付属施設のうち屋外にある施設)

外部事象防護対象施設	屋外にある付属施設
非常用ディーゼル発電設備ディーゼル機関	排気消音器 (排気管含む。)
高圧炉心スプレイ系ディーゼル発電設備ディーゼル機関	排気消音器 (排気管含む。)
ディーゼル燃料貯蔵タンク	ベント管
ディーゼル燃料デイトンク	ベント管
潤滑油サンプルタンク	ベント管

表 3.2-2 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の抽出結果 (1/8)

系統	系統・機器	機器・設備	設置場所		外部事象防護対象施設と配管、ダクト等が接続されている屋外施設	影響有無	機能喪失による影響		外部事象防護対象施設に波及的影響を及ぼし得る施設	備考
			屋外	屋内*			判断理由			
原子炉圧力容器	原子炉圧力容器		—	なし	なし	—	—	—	—	
	炉心シュラウド		—	R/B	なし	—	—	—	—	
	上部炉子版		—	R/B	なし	—	—	—	—	
	炉心支持板		—	R/B	なし	—	—	—	—	
	燃料支持金具		—	R/B	なし	—	—	—	—	
	制御棒案内管		—	R/B	なし	—	—	—	—	
	制御棒駆動機構ハウジング		—	R/B	なし	—	—	—	—	
	チェーンホルボックス		—	R/B	なし	—	—	—	—	
	燃料集合体		—	R/B	なし	—	—	—	—	
	原子炉格納容器		—	R/B	なし	—	—	—	—	
原子炉格納容器	真空乾燥装置		—	R/B	なし	—	—	—	—	
	ベント管		—	R/B	なし	—	—	—	—	
	スプレッド管		—	R/B	なし	—	—	—	—	
	クエンチャ		—	R/B	なし	—	—	—	—	
	配管		—	R/B	なし	—	—	—	—	
	弁		—	R/B	なし	—	—	—	—	
	原子炉補機制御盤 (2-904-2)		—	R/B	なし	—	—	—	—	
	T1P制御盤 (2-912)		—	R/B	なし	—	—	—	—	
	A-原子炉保護継電器盤 (2-924A)		—	C/B	なし	—	—	—	—	
	B-原子炉保護継電器盤 (2-924B)		—	Rw/B	なし	—	—	—	—	
原子炉格納容器隔離弁	空調機制御盤 (2-929-1)		—	C/B	なし	—	—	—	—	
	蒸発ガス制御盤 (2-929-2)		—	C/B	なし	—	—	—	—	
	A-格納容器H2/O2濃度計盤 (2-973A-1)		—	C/B	なし	—	—	—	—	
	B-格納容器H2/O2濃度計盤 (2-973B-1)		—	C/B	なし	—	—	—	—	
	A-格納容器H2/O2濃度計液算器盤 (2-973A-2)		—	Rw/B	なし	—	—	—	—	
	B-格納容器H2/O2濃度計液算器盤 (2-973B-2)		—	Rw/B	なし	—	—	—	—	
	AM防振制御盤 (2-974)		—	C/B	なし	—	—	—	—	
	計装手回離計表盤 (2-977)		—	C/B	なし	—	—	—	—	
	サブプレッジョン・チェーンバ		—	R/B	なし	—	—	—	—	
	原子炉再循環系	原子炉再循環ポンプ		—	R/B	なし	—	—	—	—
ジェットポンプ			—	R/B	なし	—	—	—	—	
配管			—	R/B	なし	—	—	—	—	
弁			—	R/B	なし	—	—	—	—	
P1Rポンプ計器ラック (2-R1R-1-2-2)			—	R/B	なし	—	—	—	—	
P1Rポンプ計器ラック (2-R1R-1-2-4)			—	R/B	なし	—	—	—	—	
アレーメント			—	R/B	なし	—	—	—	—	
主蒸気流量制限器			—	R/B	なし	—	—	—	—	
配管			—	R/B	なし	—	—	—	—	
逃がし安全弁			—	R/B	なし	—	—	—	—	
主蒸気系	主蒸気隔離弁		—	R/B	なし	—	—	—	—	
	弁		—	R/B	なし	—	—	—	—	
	安全設備制御盤 (2-903)		—	R/B	なし	—	—	—	—	
	A-主蒸気流量計器ラック (2-R1R-1-3A)		—	R/B	なし	—	—	—	—	
	B-主蒸気流量計器ラック (2-R1R-1-3B)		—	R/B	なし	—	—	—	—	
	C-主蒸気流量計器ラック (2-R1R-1-3C)		—	R/B	なし	—	—	—	—	
	D-主蒸気流量計器ラック (2-R1R-1-3D)		—	R/B	なし	—	—	—	—	
	配管		—	R/B	なし	—	—	—	—	
	弁		—	R/B	なし	—	—	—	—	
	給水系	配管		—	R/B	なし	—	—	—	—
弁			—	R/B	なし	—	—	—	—	
配管			—	R/B	なし	—	—	—	—	
弁			—	R/B	なし	—	—	—	—	
配管			—	R/B	なし	—	—	—	—	
弁			—	R/B	なし	—	—	—	—	
配管			—	R/B	なし	—	—	—	—	
弁			—	R/B	なし	—	—	—	—	
配管			—	R/B	なし	—	—	—	—	
弁			—	R/B	なし	—	—	—	—	

注記*: 外部事象防護対象施設を内包する建物等を「外殻となる建物等」として抽出。建物名は、R/B: 原子炉建物, T/B: タービン建物, Rw/B: 廃棄物処理建物, C/B: 制御室建物を示す。

表 3.2-2 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の抽出結果(2/8)

系統	系統・機器		設置場所		外部事象防護対象施設と配管、ダクト等で接続されている屋外施設	影響有無	機能喪失による影響 判断理由	外部事象防護対象施設に波及的影響を及ぼし得る施設	備考
	機器・設備	屋外	屋内* (建物名)						
制御棟駆動水圧系	制御棟	—	—	なし	—	—	—	—	—
	制御棟駆動機構	—	R/B	なし	—	—	—	—	—
	制御棟カップリング	—	R/B	なし	—	—	—	—	—
	制御棟駆動機構カップリング	—	R/B	なし	—	—	—	—	—
	制御棟駆動機構ラッチ機構	—	R/B	なし	—	—	—	—	—
	制御棟駆動機構ハウジング	—	R/B	なし	—	—	—	—	—
	制御棟案内管	—	R/B	なし	—	—	—	—	—
	配管	—	R/B	なし	—	—	—	—	—
	弁	—	R/B	なし	—	—	—	—	—
	アキュムレータ	—	R/B	なし	—	—	—	—	—
原子炉浄化系	蓄積容器	—	R/B	なし	—	—	—	—	—
	原子炉浄化循環ポンプ	—	R/B	なし	—	—	—	—	—
	原子炉浄化循環ポンプ電動機	—	R/B	なし	—	—	—	—	—
	原子炉浄化補助ポンプ	—	R/B	なし	—	—	—	—	—
	原子炉浄化補助ポンプ電動機	—	R/B	なし	—	—	—	—	—
	配管	—	R/B	なし	—	—	—	—	—
	弁	—	R/B	なし	—	—	—	—	—
	再生熱交換器	—	R/B	なし	—	—	—	—	—
	非再生熱交換器	—	R/B	なし	—	—	—	—	—
	補助熱交換器	—	R/B	なし	—	—	—	—	—
原子炉補機冷却系	原子炉浄化クーリング	—	R/B	なし	—	—	—	—	—
	冷却水ポンプ	—	R/B	なし	—	—	—	—	—
	配管	—	R/B	なし	—	—	—	—	—
	弁	—	R/B	なし	—	—	—	—	—
	原子炉補機冷却系熱交換器	—	R/B	なし	—	—	—	—	—
	クーリングタワー	—	R/B	なし	—	—	—	—	—
	原子炉補機冷却系ポンプ	—	R/B	なし	—	—	—	—	—
	配管	—	R/B	なし	—	—	—	—	—
	弁	—	R/B	なし	—	—	—	—	—
	原子炉補機海水系	—	R/B	なし	—	—	—	—	—
燃料プール冷却系	燃料プール	—	R/B	なし	—	—	—	—	—
	燃料プール冷却系	—	R/B	なし	—	—	—	—	—
	燃料プール冷却系ポンプ	—	R/B	なし	—	—	—	—	—
	配管	—	R/B	なし	—	—	—	—	—
	弁	—	R/B	なし	—	—	—	—	—
	燃料プール冷却系熱交換器	—	R/B	なし	—	—	—	—	—
	燃料プール冷却系ポンプ	—	R/B	なし	—	—	—	—	—
	配管	—	R/B	なし	—	—	—	—	—
	弁	—	R/B	なし	—	—	—	—	—
	燃料プール冷却系熱交換器	—	R/B	なし	—	—	—	—	—
原子炉ウエル	原子炉ウエル	—	R/B	なし	—	—	—	—	—
	原子炉ウエルポンプ	—	R/B	なし	—	—	—	—	—
	配管	—	R/B	なし	—	—	—	—	—
	弁	—	R/B	なし	—	—	—	—	—
	原子炉ウエルポンプ電動機	—	R/B	なし	—	—	—	—	—
	配管	—	R/B	なし	—	—	—	—	—
	弁	—	R/B	なし	—	—	—	—	—
	原子炉ウエルポンプ	—	R/B	なし	—	—	—	—	—
	配管	—	R/B	なし	—	—	—	—	—
	弁	—	R/B	なし	—	—	—	—	—
高圧炉心スプレッド補機冷却系	高圧炉心スプレッド	—	R/B	なし	—	—	—	—	—
	高圧炉心スプレッドポンプ	—	R/B	なし	—	—	—	—	—
	配管	—	R/B	なし	—	—	—	—	—
	弁	—	R/B	なし	—	—	—	—	—
	高圧炉心スプレッドポンプ電動機	—	R/B	なし	—	—	—	—	—
	配管	—	R/B	なし	—	—	—	—	—
	弁	—	R/B	なし	—	—	—	—	—
	高圧炉心スプレッドポンプ	—	R/B	なし	—	—	—	—	—
	配管	—	R/B	なし	—	—	—	—	—
	弁	—	R/B	なし	—	—	—	—	—

注記※：外部事象防護対象施設を内包する建築物等「外殻となる建築物」として抽出。建物名は、R/B：原子炉建物、T/B：タービン建物、Rw/B：廃棄物処理建物、C/B：制御室建物を示す。

表 3.2-2 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の抽出結果 (3/8)

系統	系統・機器		設置場所		外部事象防護対象施設と配管、 タクト等で接続されている 屋外施設	影響有無	機能喪失による影響		外部事象防護対象施設に 波及的影響を 及ぼし得る施設	備考
	機器・設備	屋内* (建築物)	屋外	判断理由						
高圧初心スプレイ補機海水系	高圧初心スプレイ補機海水ポンプ	—	—	—	なし	—	—	—	—	—
	高圧初心スプレイ補機海水ポンプ電動機	—	—	—	なし	—	—	—	—	—
	配管	—	○	R/B, T/B	なし	—	—	—	—	—
	弁	—	○	R/B	なし	—	—	—	—	—
	ストレーナ	—	○	—	なし	—	—	—	—	—
	弁	—	—	—	なし	—	—	—	—	—
	原子炉隔離時冷却ポンプ	—	—	—	なし	—	—	—	—	—
	原子炉隔離時冷却ポンプ駆動用タービン	—	—	—	なし	—	—	—	—	—
	タービン油ポンプ	—	—	—	なし	—	—	—	—	—
	配管	—	—	—	なし	—	—	—	—	—
原子炉隔離時冷却系	ストレーナ	—	—	—	なし	—	—	—	—	—
	弁	—	—	—	なし	—	—	—	—	—
	主油タンク	—	—	—	なし	—	—	—	—	—
	潤滑油クーラ	—	—	—	なし	—	—	—	—	—
	油冷却器	—	—	—	なし	—	—	—	—	—
	R/C I Cタービン制御盤 (SII) (2-2360)	—	—	—	なし	—	—	—	—	—
	R/C I Cタービン排気圧力計器タック (2-RIR-B1-3)	—	—	—	なし	—	—	—	—	—
	残留熱除去ポンプ	—	—	—	なし	—	—	—	—	—
	残留熱除去ポンプ電動機	—	—	—	なし	—	—	—	—	—
	配管	—	—	—	なし	—	—	—	—	—
残留熱除去系	ストレーナ	—	—	—	なし	—	—	—	—	—
	弁	—	—	—	なし	—	—	—	—	—
	残留熱除去系熱交換器	—	—	—	なし	—	—	—	—	—
	A-RHR計器タック (2-RIR-B2-3A)	—	—	—	なし	—	—	—	—	—
	B-RHR計器タック (2-RIR-B2-3B)	—	—	—	なし	—	—	—	—	—
	C-RHR計器タック (2-RIR-B2-3C)	—	—	—	なし	—	—	—	—	—
	低圧初心スプレイ・ポンプ	—	—	—	なし	—	—	—	—	—
	低圧初心スプレイ・ポンプ電動機	—	—	—	なし	—	—	—	—	—
	配管	—	—	—	なし	—	—	—	—	—
	低圧初心スプレイ系	ストレーナ	—	—	—	なし	—	—	—	—
弁		—	—	—	なし	—	—	—	—	—
高圧初心スプレイ・ポンプ		—	—	—	なし	—	—	—	—	—
高圧初心スプレイ・ポンプ電動機		—	—	—	なし	—	—	—	—	—
配管		—	—	—	なし	—	—	—	—	—
弁		—	—	—	なし	—	—	—	—	—
ストレーナ		—	—	—	なし	—	—	—	—	—
HPCS継電器盤 (2-921)		—	—	—	なし	—	—	—	—	—
HPCSトリップ設定器盤 (2-921A)		—	—	—	なし	—	—	—	—	—
HPCS計器タック (2-RIR-B1-4)		—	—	—	なし	—	—	—	—	—
ほう酸水注入系	ほう酸水注入ポンプ	—	—	—	なし	—	—	—	—	—
	ほう酸水注入ポンプ電動機	—	—	—	なし	—	—	—	—	—
	ほう酸水注入ポンプ潤滑油ポンプ	—	—	—	なし	—	—	—	—	—
	ほう酸水注入ポンプ潤滑油ポンプ電動機	—	—	—	なし	—	—	—	—	—
	配管	—	—	—	なし	—	—	—	—	—
	弁	—	—	—	なし	—	—	—	—	—
	ほう酸水貯蔵タンク	—	—	—	なし	—	—	—	—	—
	ほう酸水注入系系操作盤 (2-RGB-51)	—	—	—	なし	—	—	—	—	—
	原子炉制御盤 (2-905)	—	—	—	なし	—	—	—	—	—
	残留熱除去系熱交換器 (2-RGB-51)	—	—	—	なし	—	—	—	—	—

注記※：外部事象防護対象施設を内包する建物等を「外取となる建物等」として抽出。建物名は、R/B：原子炉建物、T/B：タービン建物、Rw/B：廃棄物処理建物、C/B：制御室建物を示す。

表 3. 2-2 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の抽出結果 (4/8)

系統	系統・機器	設置場所		外部事象防護対象施設と配管、ダクト等が接続されている屋外施設	影響有無	機能喪失による影響		外部事象防護対象施設に波及的影響を及ぼし得る施設	備考
		屋外	屋内* (建物名)			判断理由	判断理由		
非常用ガス処理系	非常用ガス処理排風機	—	R/B	なし	—	—	—	—	
	非常用ガス処理排風機電動機	—	R/B	なし	—	—	—	—	
	非常用ガス処理前置ガス処理装置	—	R/B	なし	—	—	—	—	
	非常用ガス処理後置ガス処理装置	—	R/B	なし	—	—	—	—	
	配管	○	R/B、T/B	なし	—	—	—	—	
	弁	—	R/B	なし	—	—	—	—	
	安全設備補助制御盤 (2-909)	—	C/B	なし	—	—	—	—	
	A-SGT計器ラック (2-RIR-3-2 A)	—	R/B	なし	—	—	—	—	
	B-SGT計器ラック (2-RIR-3-2 B)	—	R/B	なし	—	—	—	—	
	配管	—	R/B	なし	—	—	—	—	
	弁	—	R/B	なし	—	—	—	—	
	アキムレータ	—	R/B	なし	—	—	—	—	
	原子炉種機制御盤 (2-904-1)	—	C/B	なし	—	—	—	—	
	可燃性ガス濃度制御系再結合装置 (7'可含む)	—	R/B	なし	—	—	—	—	
自動減圧系	事故時サンプリングポンプ	—	R/B	なし	—	—	—	—	
	通常時サンプリングポンプ電動機	—	R/B	なし	—	—	—	—	
	通常時サンプリングポンプ	—	R/B	なし	—	—	—	—	
	通常時サンプリングポンプ電動機	—	R/B	なし	—	—	—	—	
	事故時サンプリングポンプ	—	R/B	なし	—	—	—	—	
	事故時サンプリングポンプ電動機	—	R/B	なし	—	—	—	—	
	通常時サンプリングポンプ	—	R/B	なし	—	—	—	—	
	通常時サンプリングポンプ電動機	—	R/B	なし	—	—	—	—	
	配管	—	R/B	なし	—	—	—	—	
	弁	—	R/B	なし	—	—	—	—	
	冷却器	—	R/B	なし	—	—	—	—	
	除塵機	—	R/B	なし	—	—	—	—	
	A-原子炉プロセス計測盤 (2-934A)	—	Rw/B	なし	—	—	—	—	
	B-原子炉プロセス計測盤 (2-934B)	—	Rw/B	なし	—	—	—	—	
可燃性ガス濃度制御系	A-原子炉格納容器H2/O2分祈計ラック (2-RSR-3-3 A)	—	R/B	なし	—	—	—	—	
	B-原子炉格納容器H2/O2分祈計ラック (2-RSR-3-3 B)	—	R/B	なし	—	—	—	—	
	注記*：外部事象防護対象施設を内包する建物を「外設となる建物等」として抽出。建物名は、R/B：原子炉建物、T/B：タービン建物、Rw/B：廃棄物処理建物、C/B：制御室建物を示す。								

表 3.2-2 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の抽出結果 (5/8)

系統	系統・機器		設置場所 (建物名)	外部事象防護対象施設と配管、 ダクト等が接続されている 屋外施設	影響有無	機能喪失による影響 判断理由	外部事象防護対象施設に 波及的影響を 及ぼし得る施設	備考
	機器・設備	屋外						
非常用所内電源系	非常用メタラクラ機(2C-M/C)	—	—	なし	—	—	—	—
	2C-動力変圧器	—	R/B	なし	—	—	—	—
	非常用メタラクラ機(2D-M/C)	—	R/B	なし	—	—	—	—
	2D-動力変圧器	—	R/B	なし	—	—	—	—
	高圧和心スワレイ系メタラクラ機(2HPCS-M/C)	—	R/B	なし	—	—	—	—
	2HPCS-動力変圧器	—	R/B	なし	—	—	—	—
	非常用ロードセントラ機(2C-L/C)	—	R/B	なし	—	—	—	—
	非常用ロードセントラ機(2D-L/C)	—	R/B	なし	—	—	—	—
	非常用コントロールセントラ機(2C1, 2, 3-R/B-C/C)	—	R/B	なし	—	—	—	—
	非常用コントロールセントラ機(2D1, 2, 3-R/B-C/C)	—	R/B	なし	—	—	—	—
	非常用コントロールセントラ機(2A-DG-C/C)	—	R/B	なし	—	—	—	—
	非常用コントロールセントラ機(2B-DG-C/C)	—	R/B	なし	—	—	—	—
	高圧和心スワレイ系コントロールセントラ機(2HPCS-C/C)	—	R/B	なし	—	—	—	—
	計表用コントロールセントラ機(2A-計表-C/C)	—	Rv/B	なし	—	—	—	—
	計表用コントロールセントラ機(2B-計表-C/C)	—	Rv/B	なし	—	—	—	—
	A-中央分電盤	—	Rv/B	なし	—	—	—	—
	B-中央分電盤	—	Rv/B	なし	—	—	—	—
	高圧和心スワレイ系-中央分電盤	—	Rv/B	なし	—	—	—	—
	A-計表分電盤	—	Rv/B	なし	—	—	—	—
	B-計表分電盤	—	Rv/B	なし	—	—	—	—
A-計表用無停電交流電源装置	—	Rv/B	なし	—	—	—	—	
B-計表用無停電交流電源装置	—	Rv/B	なし	—	—	—	—	
A-デイズール発電機制御盤(2-2220A1)	—	R/B	なし	—	—	—	—	
B-デイズール発電機制御盤(2-2220B1)	—	R/B	なし	—	—	—	—	
HPCS-デイズール発電機制御盤(2-2220H1)	—	C/B	なし	—	—	—	—	
220V系発電機	—	Rv/B	なし	—	—	—	—	
A-115V系発電機	—	Rv/B	なし	—	—	—	—	
B-115V系発電機	—	Rv/B	なし	—	—	—	—	
高圧和心スワレイ系-系発電機	—	Rv/B	なし	—	—	—	—	
A-原子炉中性子計表用蓄電池	—	Rv/B	なし	—	—	—	—	
B-原子炉中性子計表用蓄電池	—	Rv/B	なし	—	—	—	—	
直流コントロールセントラ機(2-RCL直流-C/C)	—	R/B	なし	—	—	—	—	
A-原子炉中性子計表用充電器盤	—	Rv/B	なし	—	—	—	—	
B-原子炉中性子計表用充電器盤	—	Rv/B	なし	—	—	—	—	
220V系充電器盤	—	Rv/B	なし	—	—	—	—	
A-115V系充電器盤	—	Rv/B	なし	—	—	—	—	
B-115V系充電器盤	—	Rv/B	なし	—	—	—	—	
高圧和心スワレイ系-充電器盤	—	Rv/B	なし	—	—	—	—	
A-原子炉中性子計表用分電盤	—	Rv/B	なし	—	—	—	—	
B-原子炉中性子計表用分電盤	—	Rv/B	なし	—	—	—	—	
220V系直流機	—	Rv/B	なし	—	—	—	—	
A-115V系直流機	—	Rv/B	なし	—	—	—	—	
B-115V系直流機	—	Rv/B	なし	—	—	—	—	
高圧和心スワレイ系直流機	—	Rv/B	なし	—	—	—	—	
A-主蒸気圧力計器ラック(2-TIR-1-1A)	—	T/B	なし	—	—	—	—	
B-主蒸気圧力計器ラック(2-TIR-1-1B)	—	T/B	なし	—	—	—	—	
A-復水器真空計器ラック(2-TIR-3-9A)	—	T/B	なし	—	—	—	—	
B-復水器真空計器ラック(2-TIR-3-9B)	—	T/B	なし	—	—	—	—	

注記*：外部事象防護対象施設を内包する建築物を「外殻となる建築物等」として抽出。建物名は、R/B：原子炉建物、T/B：タービン建物、Rv/B：廃棄物処理建物、C/B：間接室建物を示す。

表 3.3.2-2 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の抽出結果 (6/8)

系統	系統・機器		設置場所		外部事象防護対象施設と配管、ダクト等にて接続されている屋外施設	影響有無	機能喪失による影響 判断理由	外部事象防護対象施設に波及的影響を及ぼし得る施設	備考
	機器・設備	屋外	屋内* (建物名)						
気体廃棄物処理系	活性炭式希ガスホールドアップ塔	—	Rw/B	なし	—	—	—	—	—
	ろ種弁	—	Rw/B	なし	—	—	—	—	—
	タービン補助機 (2-906)	—	T/B	なし	—	—	—	—	—
	タービン補助機 (2-943)	—	C/B	なし	—	—	—	—	—
	空気抽出高圧・温度計器ラック (2-TIR-2-9)	—	T/B	なし	—	—	—	—	—
	排ガス処理系計器ラック (2-TIR-3-10)	—	T/B	なし	—	—	—	—	—
	原子炉棟換気系	—	R/B	なし	—	—	—	—	—
	原子炉棟換気系ダクト	—	R/B	なし	—	—	—	—	—
	中央制御室送風機	—	Rw/B	なし	—	—	—	—	—
	中央制御室送風機電動機	—	Rw/B	なし	—	—	—	—	—
中央制御室非常用再循環送風機	—	Rw/B	なし	—	—	—	—	—	
中央制御室非常用再循環送風機電動機	—	Rw/B	なし	—	—	—	—	—	
中央制御室排風機	—	Rw/B	なし	—	—	—	—	—	
中央制御室排風機電動機	—	Rw/B	なし	—	—	—	—	—	
中央制御室空気調和装置 (加湿器含む)	—	Rw/B	なし	—	—	—	—	—	
中央制御室非常用再循環処理装置	—	Rw/B	なし	—	—	—	—	—	
中央制御室送風機	—	Rw/B	なし	—	—	—	—	—	
中央制御室送風機ポンプ	—	Rw/B	なし	—	—	—	—	—	
中央制御室送風機ポンプ電動機	—	Rw/B	なし	—	—	—	—	—	
中央制御室冷媒ポンプ	—	Rw/B	なし	—	—	—	—	—	
中央制御室冷媒ポンプ電動機	—	Rw/B	なし	—	—	—	—	—	
中央制御室冷媒ポンプ電動機	—	Rw/B	なし	—	—	—	—	—	
中央制御室冷媒ポンプ電動機	—	Rw/B, C/B	なし	—	—	—	—	—	
ダクト	—	Rw/B, C/B	なし	—	—	—	—	—	
ダンパ	—	Rw/B	なし	—	—	—	—	—	
手	—	Rw/B	なし	—	—	—	—	—	
A-中央制御室送風機電動機 (2-2256A)	—	Rw/B	なし	—	—	—	—	—	
B-中央制御室送風機電動機 (2-2256B)	—	Rw/B	なし	—	—	—	—	—	
共通盤 (2-965-2)	—	C/B	なし	—	—	—	—	—	
中央制御室A-冷凍機計器ラック (2-WIR-2-6A)	—	Rw/B	なし	—	—	—	—	—	
中央制御室B-冷凍機計器ラック (2-WIR-2-6B)	—	Rw/B	なし	—	—	—	—	—	
非常用ディーゼル室送風機	—	R/B	なし	—	—	—	—	—	
非常用ディーゼル室送風機電動機	—	R/B	なし	—	—	—	—	—	
高圧中心スプレイ系ディーゼル室送風機	—	R/B	なし	—	—	—	—	—	
高圧中心スプレイ系ディーゼル室送風機電動機	—	R/B	なし	—	—	—	—	—	
残留熱除去ポンプ室冷却機	—	R/B	なし	—	—	—	—	—	
残留熱除去ポンプ室冷却機電動機	—	R/B	なし	—	—	—	—	—	
低圧中心スプレイ・ポンプ室冷却機	—	R/B	なし	—	—	—	—	—	
低圧中心スプレイ・ポンプ室冷却機電動機	—	R/B	なし	—	—	—	—	—	
高圧中心スプレイ・ポンプ室冷却機	—	R/B	なし	—	—	—	—	—	
高圧中心スプレイ・ポンプ室冷却機電動機	—	R/B	なし	—	—	—	—	—	
非常用電気室送風機	—	R/B	なし	—	—	—	—	—	
非常用電気室送風機電動機	—	R/B	なし	—	—	—	—	—	
高圧中心スプレイ系電気室送風機	—	R/B	なし	—	—	—	—	—	
高圧中心スプレイ系電気室送風機電動機	—	R/B	なし	—	—	—	—	—	
非常用電気室外気処理装置	—	R/B	なし	—	—	—	—	—	
高圧中心スプレイ系電気室外気処理装置	—	R/B	なし	—	—	—	—	—	
ダクト	—	R/B	なし	—	—	—	—	—	
ダンパ	—	R/B	なし	—	—	—	—	—	

注記*：外部事象防護対象施設を内包する建築物等「外設となる建築物等」として抽出。建物名は、R/B：原子炉建物、T/B：タービン建物、Rw/B：廃棄物処理建物、C/B：制御室建物を示す。

表 3.2-2 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の抽出結果 (7/8)

系統	系統・機器		設置場所		外部事象防護対象施設と配管、ダクト等が接続されている屋外施設	影響有無	機能喪失による影響		外部事象防護対象施設に波及的影響を及ぼし得る施設	備考
	屋内* (建物名)	屋外	判断理由	機能喪失による影響						
非常用内電源系	非常用ディーゼル発電機	—	—	排気消音器 (排気管含む)	あり	閉塞した場合、ディーゼル機関への排気に影響を及ぼす可能性がある。	—	—	○	—
	空冷給油機	—	—	なし	—	—	—	—	—	—
	排気消音器フィルタ	—	—	なし	—	—	—	—	—	—
	潤滑油冷却機	—	—	なし	—	—	—	—	—	—
	潤滑油サブタンク	—	—	ベント管	あり	閉塞した場合、タンクが加圧される可能性がある。	—	—	—	—
	潤滑油フィルタ	—	—	なし	—	—	—	—	—	—
	シリンダ油タンク	—	—	ベント管	あり	閉塞した場合、タンクが加圧される可能性がある。	—	—	—	ベント管は潤滑油サブタンクベント管と共用
	シリンダ油フィルタ	—	—	なし	—	—	—	—	—	—
	1次水冷却器	—	—	なし	—	—	—	—	—	—
	1次水空気抜タンク	—	—	なし	—	—	—	—	—	—
	1次水膨張タンク	—	—	なし	—	—	—	—	—	—
	ディーゼル燃料ディタンク	—	—	ベント管	あり	閉塞した場合、燃料の移送に影響を及ぼす可能性がある。	—	—	—	—
	A-ディーゼル燃料移送ポンプ	○	—	なし	—	—	—	—	—	—
	A-ディーゼル燃料移送ポンプ電動機	○	—	なし	—	—	—	—	—	—
	B-ディーゼル燃料移送ポンプ	—	—	なし	—	—	—	—	—	—
	B-ディーゼル燃料移送ポンプ電動機	—	—	なし	—	—	—	—	—	—
	燃料フィルタ	—	—	なし	—	—	—	—	—	—
	配管 (給気管、通給機含む)	—	—	なし	—	—	—	—	—	—
	弁	○	—	なし	—	—	—	—	—	—
	HPCS-ディーゼル発電機	—	—	排気消音器 (排気管含む)	あり	閉塞した場合、ディーゼル機関への排気に影響を及ぼす可能性がある。	—	—	—	○
	HPCS-空冷給油機	—	—	なし	—	—	—	—	—	—
	HPCS-給気消音器フィルタ	—	—	なし	—	—	—	—	—	—
	HPCS-潤滑油冷却機	—	—	なし	—	—	—	—	—	—
	HPCS-潤滑油サブタンク	—	—	ベント管	あり	閉塞した場合、タンクが加圧される可能性がある。	—	—	—	○
	HPCS-潤滑油フィルタ	—	—	なし	—	—	—	—	—	—
	HPCS-シリンダ油タンク	—	—	ベント管	あり	閉塞した場合、タンクが加圧される可能性がある。	—	—	—	○
	HPCS-シリンダ油フィルタ	—	—	なし	—	—	—	—	—	—
	HPCS-1次水冷却器	—	—	なし	—	—	—	—	—	—
	HPCS-1次水空気抜タンク	—	—	なし	—	—	—	—	—	—
	HPCS-1次水膨張タンク	—	—	なし	—	—	—	—	—	—
HPCS-ディーゼル燃料ディタンク	—	—	ベント管	あり	閉塞した場合、燃料の移送に影響を及ぼす可能性がある。	—	—	—	○	
HPCS-ディーゼル燃料移送ポンプ	○	—	なし	—	—	—	—	—	—	
HPCS-ディーゼル燃料移送ポンプ電動機	○	—	なし	—	—	—	—	—	—	
HPCS-燃料フィルタ	—	—	なし	—	—	—	—	—	—	
高圧炉心スプレイス系ディーゼル発電機配管 (給気管、通給機含む)	○	—	なし	—	—	—	—	—	—	
高圧炉心スプレイス系ディーゼル発電機弁	○	—	なし	—	—	—	—	—	—	
燃料取扱設備	—	—	ディーゼル燃料貯蔵タンク	ベント管	あり	閉塞した場合、燃料の移送に影響を及ぼす可能性がある。	—	—	○	—
原子炉建物天井クレーン	—	—	なし	なし	—	—	—	—	—	
中央制御室外原子炉停止制御器 (2-2215-1)	—	—	なし	なし	—	—	—	—	—	
中央制御室外原子炉停止制御器 (2-2215-2)	—	—	なし	なし	—	—	—	—	—	
RCL記号タンク (2-RIR-B2-1)	—	—	なし	なし	—	—	—	—	—	
RCL記号タンク (2-RIR-B2-2)	—	—	なし	なし	—	—	—	—	—	

注記※：外部事象防護対象施設を内包する建物等を「外蔵となる建物等」として抽出。建物名は、R/B：原子炉建物、T/B：タービン建物、Rw/B：廃棄物処理建物、C/B：制御室建物を示す。

表 3.2-2 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の抽出結果 (8/8)

系統	系統・機器	機器・設備	設置場所 (建物名)	外部事象防護対象施設と配管、 ダクト等で接続されている 屋外施設	影響有無	機能喪失による影響 判断理由	外部事象防護対象施設に 波及的影響を 及ぼし得る施設	備考
原子炉保護系		A-原子炉圧力容器計器ラック (2-RIR-1-8A)	屋外 R/B	なし	—	—	—	—
		B-原子炉圧力容器計器ラック (2-RIR-1-8B)	R/B	なし	—	—	—	—
		C-原子炉圧力容器計器ラック (2-RIR-1-8C)	R/B	なし	—	—	—	—
		D-原子炉圧力容器計器ラック (II-RIR-1-8D)	R/B	なし	—	—	—	—
		A-原子炉格納容器圧力計器ラック (2-RIR-2-8A)	R/B	なし	—	—	—	—
		B-原子炉格納容器圧力計器ラック (2-RIR-2-8B)	R/B	なし	—	—	—	—
		C-原子炉格納容器圧力計器ラック (2-RIR-2-8C)	R/B	なし	—	—	—	—
		D-原子炉格納容器圧力計器ラック (2-RIR-2-8D)	R/B	なし	—	—	—	—
		A1-原子炉保護トリップ設定器盤 (2-924A1)	Rw/B	なし	—	—	—	—
		A2-原子炉保護トリップ設定器盤 (2-924A2)	Rw/B	なし	—	—	—	—
		B1-原子炉保護トリップ設定器盤 (2-924B1)	Rw/B	なし	—	—	—	—
		B2-原子炉保護トリップ設定器盤 (2-924B2)	Rw/B	なし	—	—	—	—
	原子炉中性子計装ハウジング		原子炉中性子計装ハウジング	—	—	—	—	—
原子炉核計装の一部		A-起動領域モニタ盤 (2-910A) B-起動領域モニタ盤 (2-910B) プロセス放射線モニタ盤 (2-914)	C/B C/B Rw/B	なし なし なし	— — —	— — —	— — —	— — —
原子炉圧力容器計装系		SI-1-1字的安全施設トリップ設定器盤 (2-976A) SI-1-1字的安全施設トリップ設定器盤 (2-976B)	Rw/B Rw/B	なし なし	— —	— —	— —	— —
原子炉棟		原子炉棟	○	なし	—	—	—	—
原子炉建物		原子炉建物	○	なし	—	—	—	—
中央制御室		中央制御室	○	なし	—	—	—	—
取水塔		取水塔	○	なし	—	—	—	—
排水塔		排水塔	○	なし	—	—	—	—
遮蔽設備		生体シールド装置	—	なし	—	—	—	—

注記*：外部事象防護対象施設を内包する建物等を「外設となる建物等」として抽出。建物名は、R/B：原子炉建物、T/B：タービン建物、Rw/B：廃棄物処理建物、C/B：制御室建物を示す。

3.3 評価対象施設の構内配置について

抽出した主な外部事象防護対象施設のうち評価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し得る評価対象施設の構内配置を図 3.3-1 に示す。

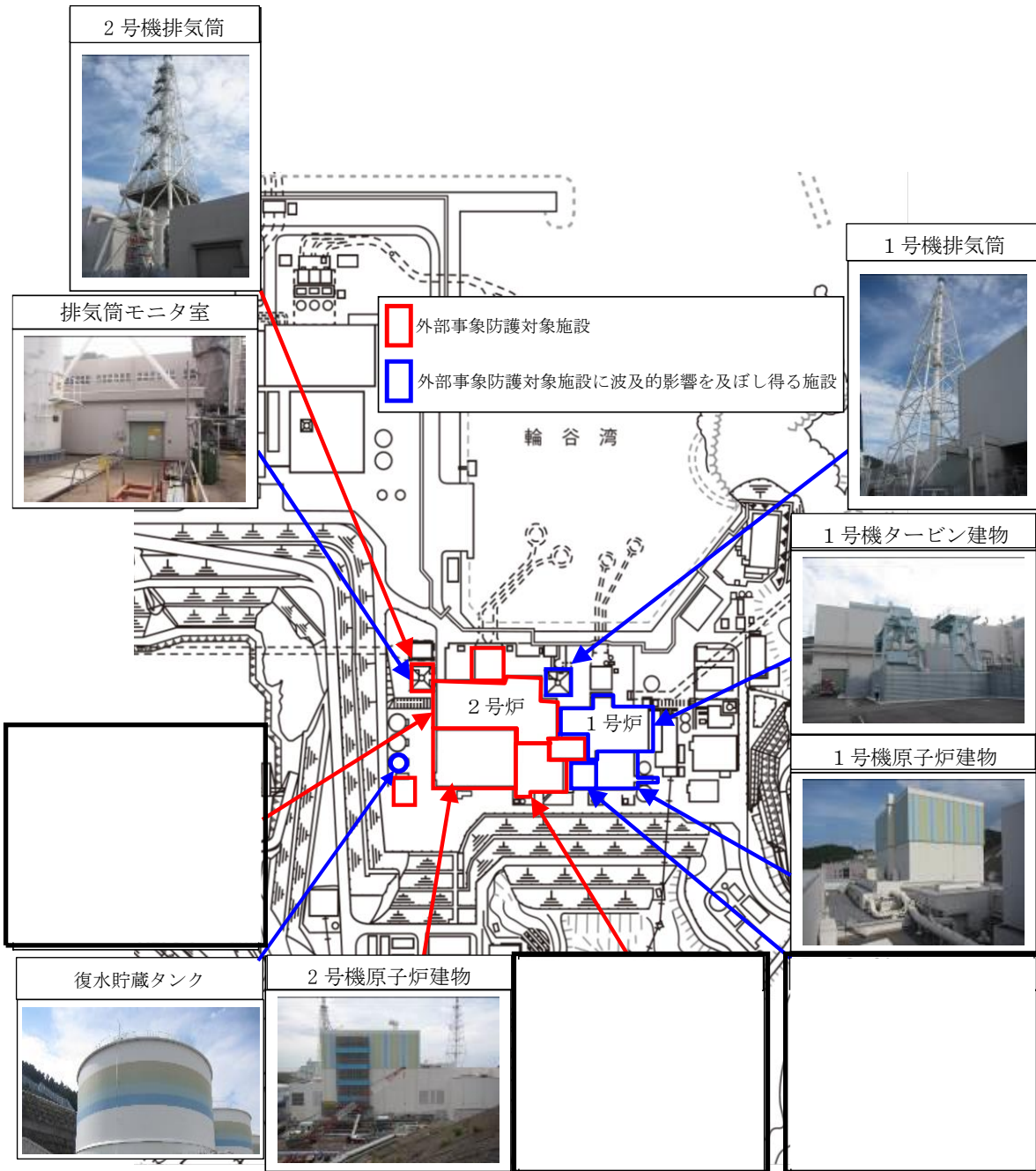


図 3.3-1 外部事象防護対象施設のうち評価対象施設及び外部事象防護対象施設に波及的影響を及ぼし得る評価対象施設の構内配置

4. 建物開口部の調査結果

4. 建物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物（原子炉建物，タービン建物及び廃棄物処理建物）の開口部を調査した結果を以下に示す。

調査の結果，表 4-1 に示す開口部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否定できないため，竜巻防護対策を実施する。

調査した建物開口部を図 4-1～図 4-12 に示す。

なお，他の開口部付近には，外部事象防護対象施設又は飛来物の衝突により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から，対策は不要である。

表 4-1 外部事象防護対象施設に影響を与える可能性が否定できない建物開口部
(建物開口部に防護対策を実施)

建物	図番号	開口部番号
原子炉建物	図 4-1	No. 1~3
	図 4-2	No. 7~9
	図 4-3	No. 10, 11
	図 4-4	No. 14~16
タービン建物	図 4-5	なし
	図 4-6	なし
	図 4-7	なし
廃棄物処理建物	図 4-8	なし
	図 4-9	No. 31
	図 4-10	なし
	図 4-11	なし
	図 4-12	なし

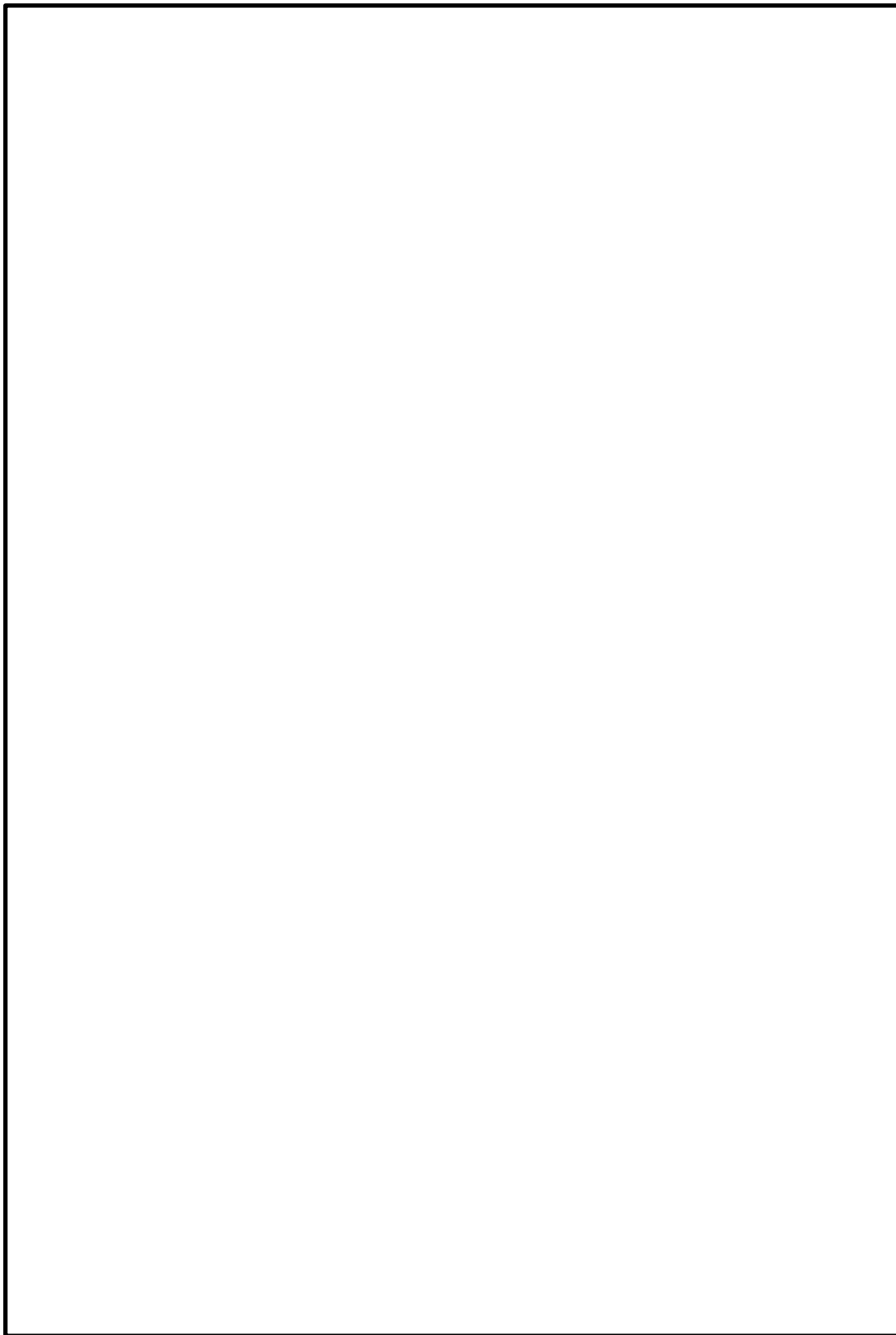


図 4-1 外部事象防護対象施設を内包する施設の開口部調査結果

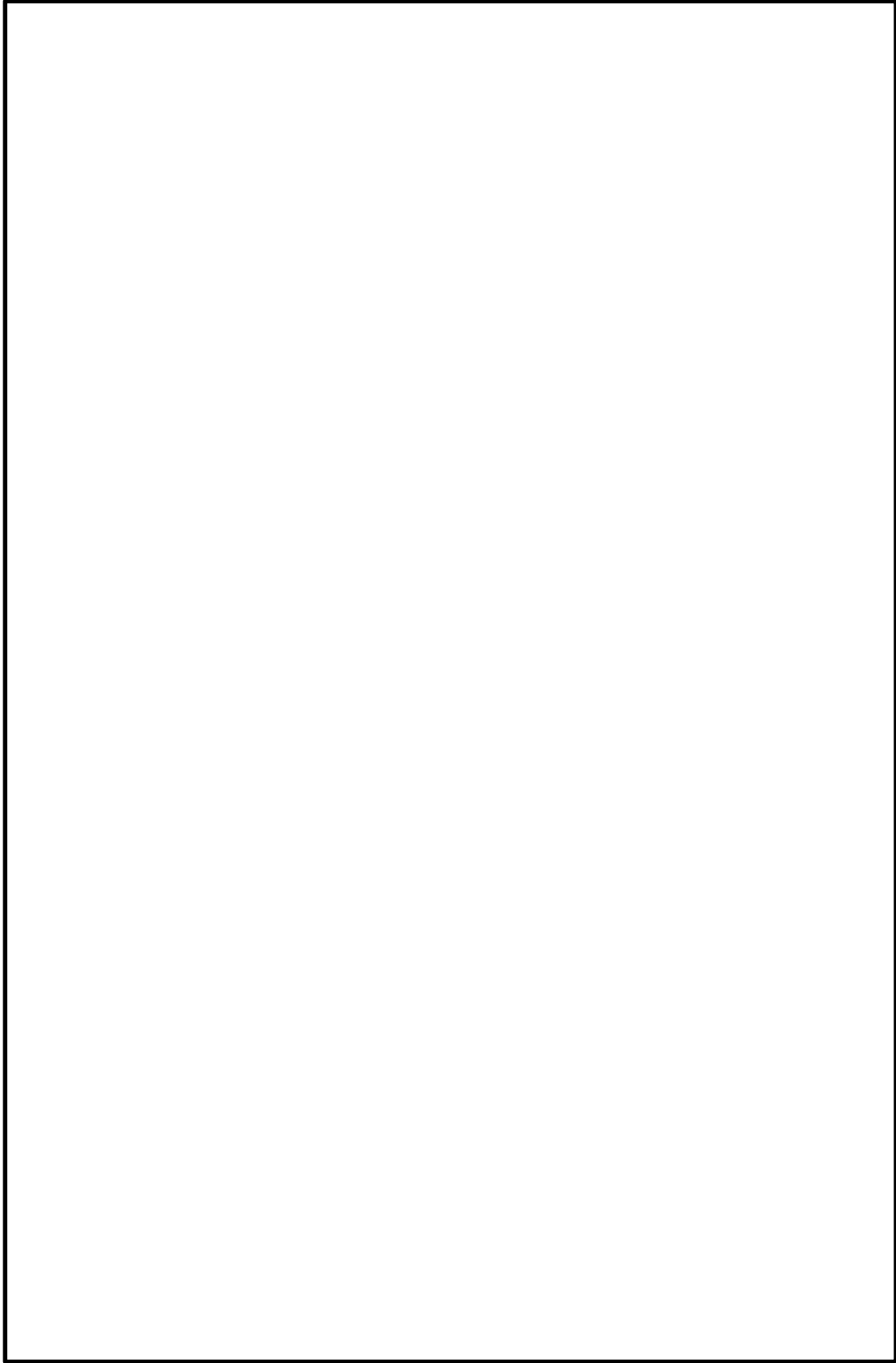


図 4-2 外部事象防護対象施設を内包する施設の開口部調査結果

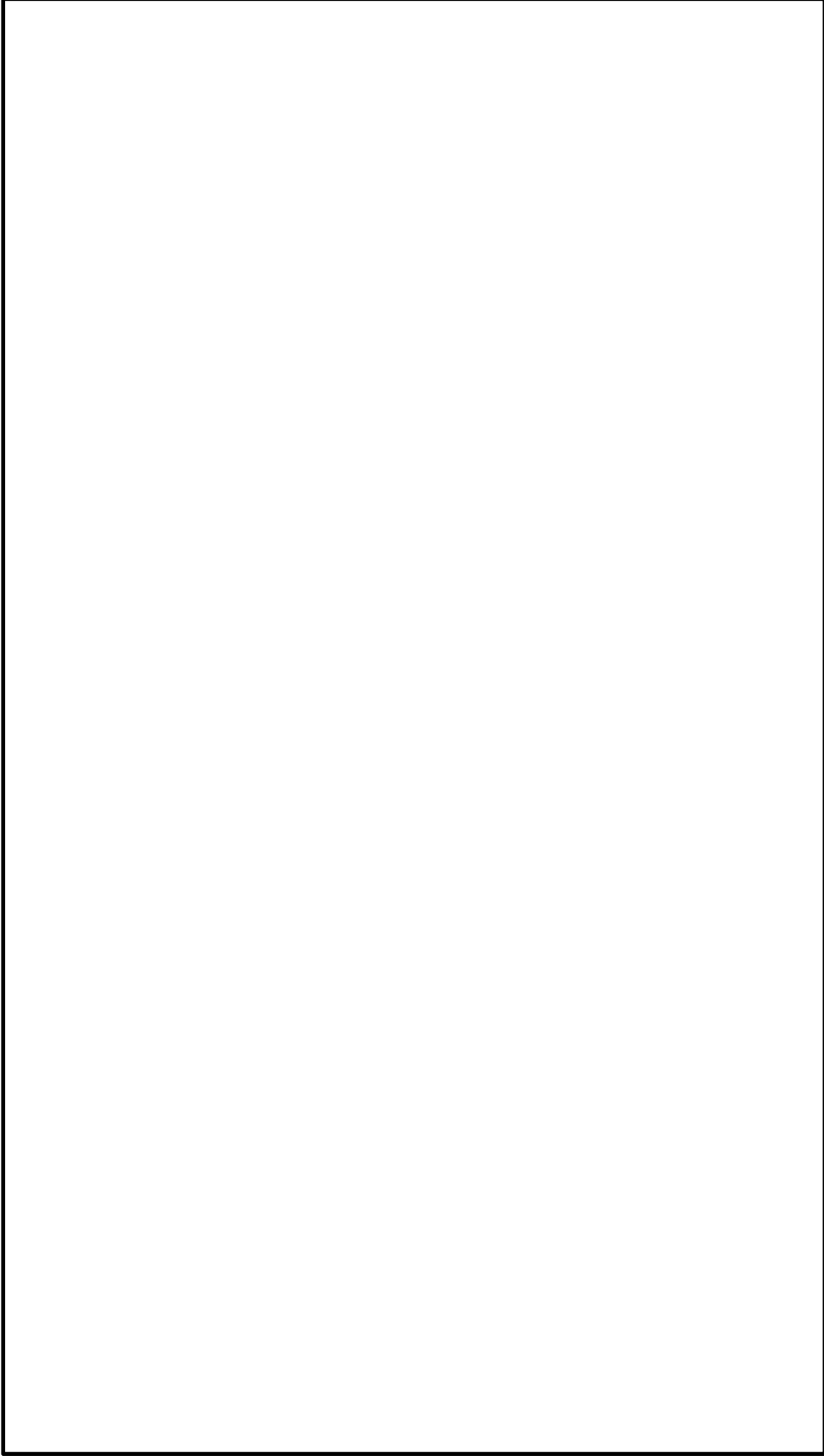


図 4-3 外部事象防護対象施設を内包する施設の開口部調査結果

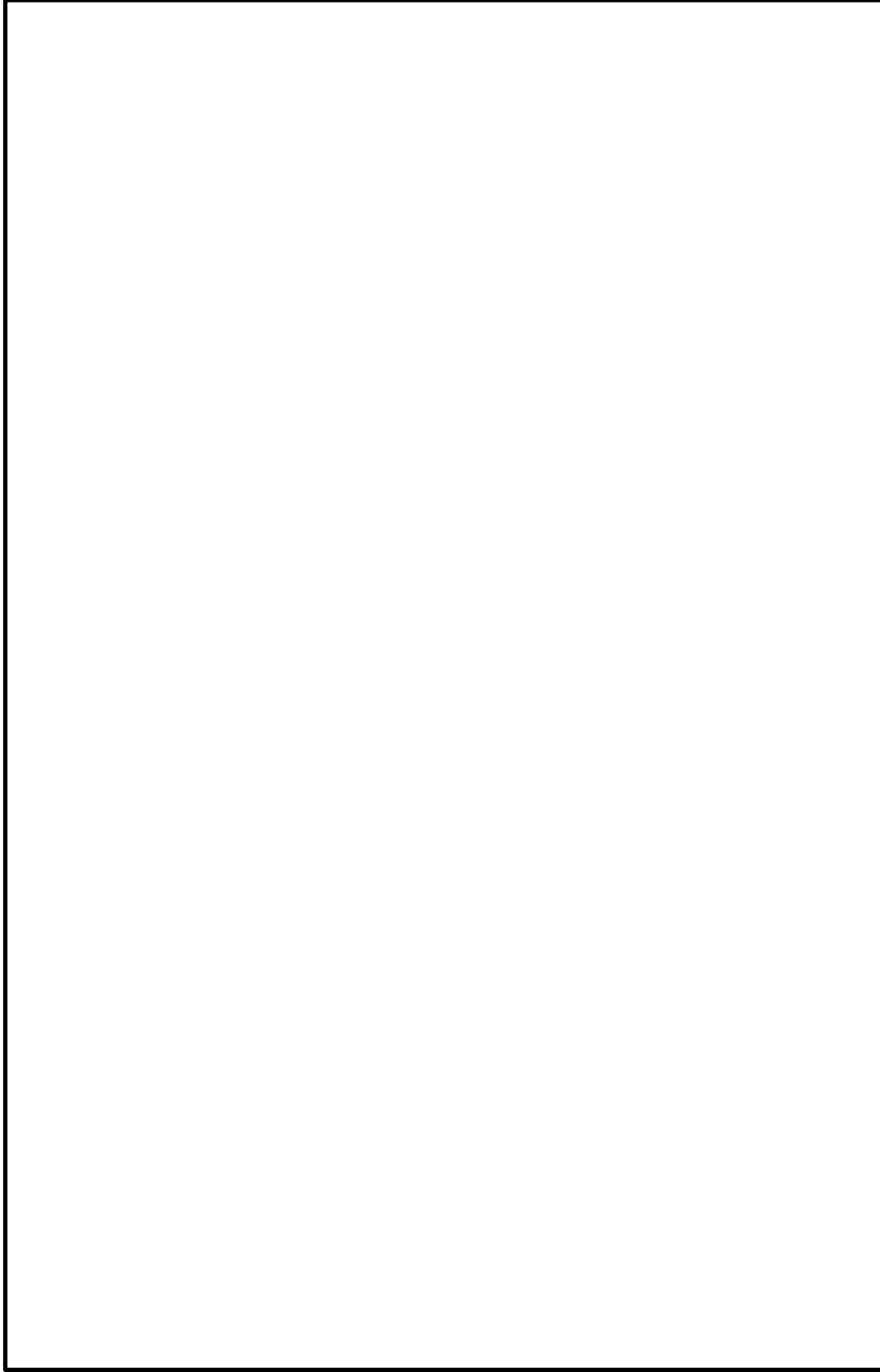


図 4-4 外部事象防護対象施設を内包する施設の開口部調査結果

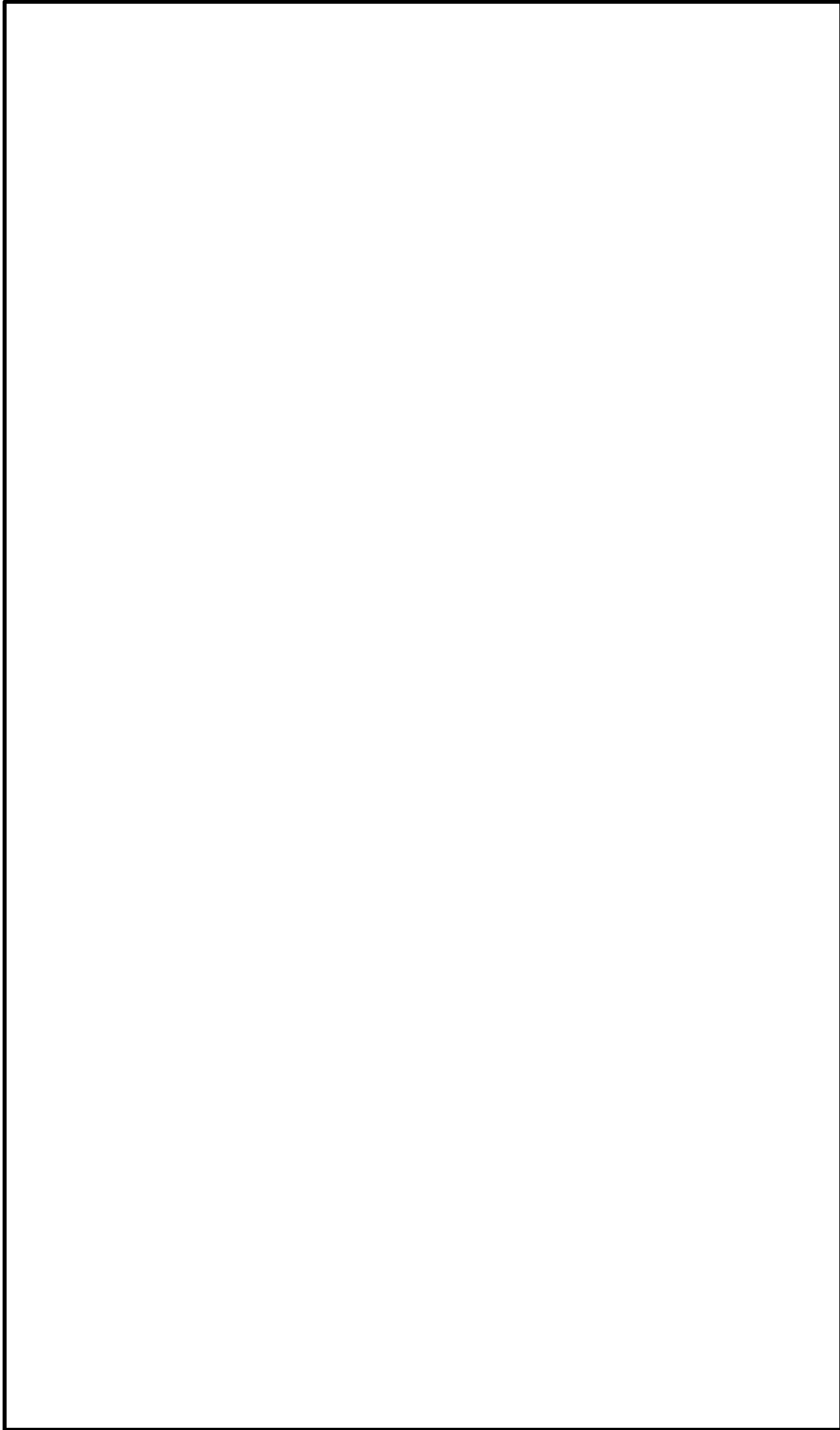


図 4-5 外部事象防護対象施設を内包する施設の開口部調査結果

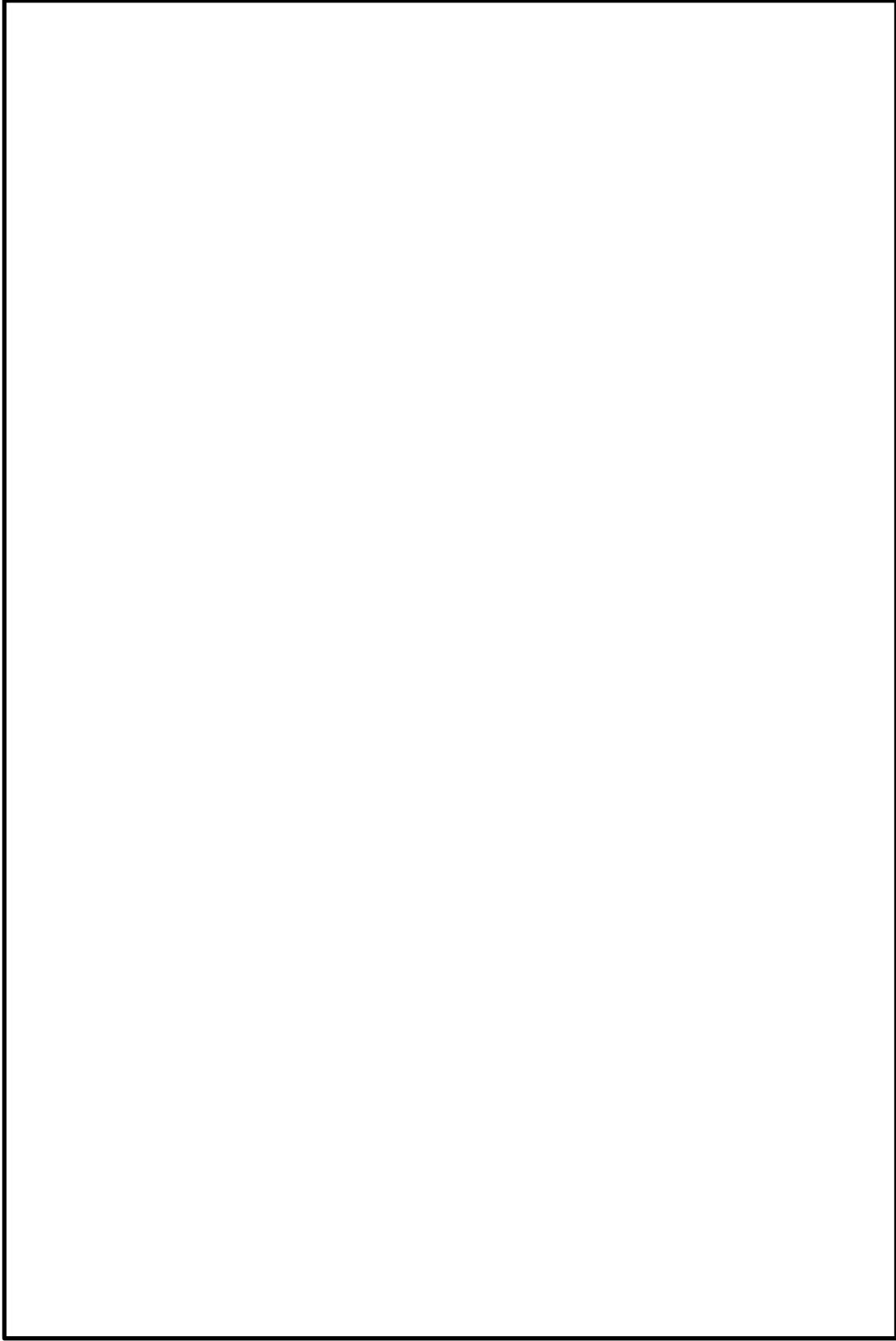


図 4-6 外部事象防護対象施設を内包する施設の開口部調査結果

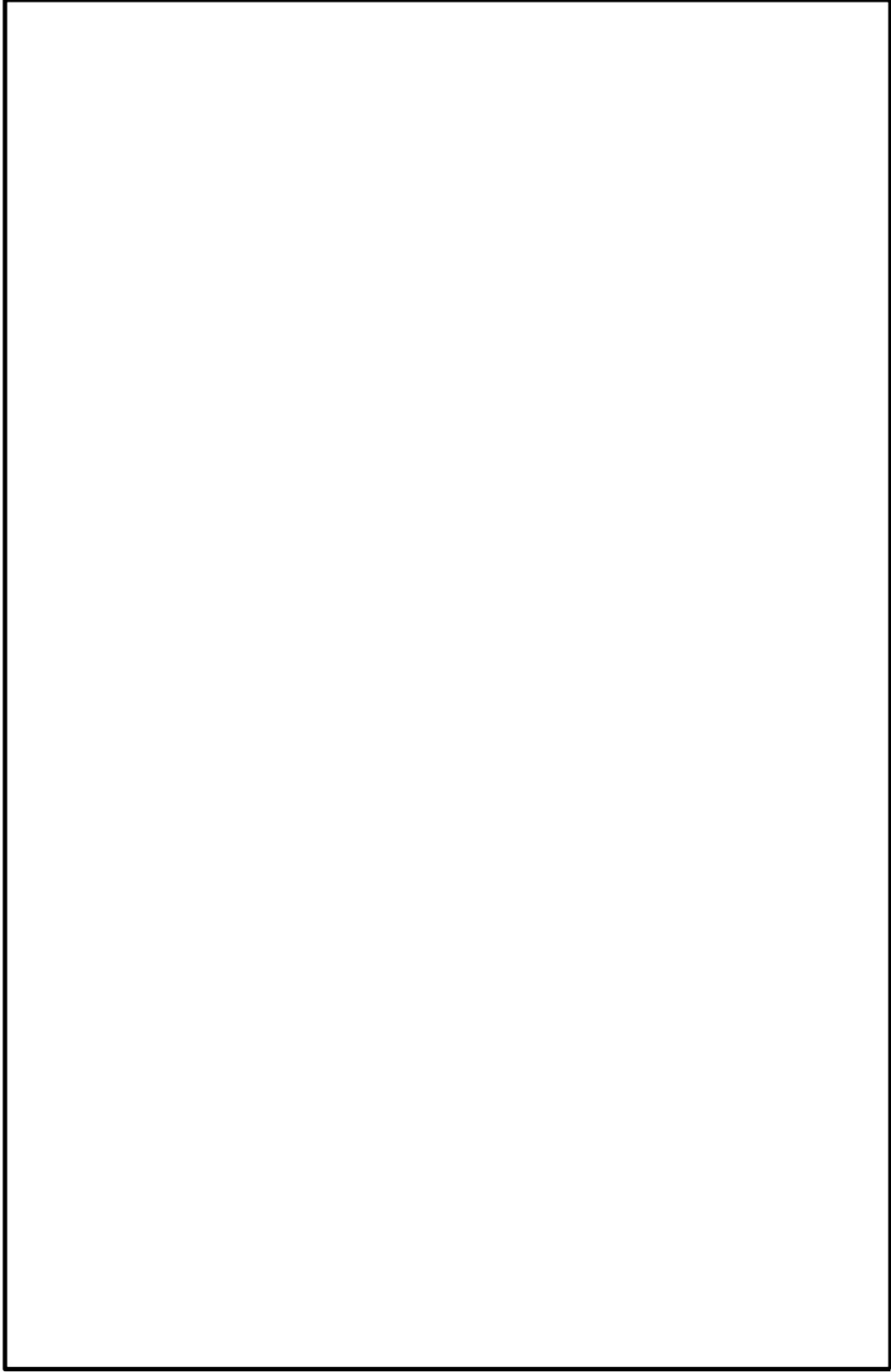


図 4-7 外部事象防護対象施設を内包する施設の開口部調査結果

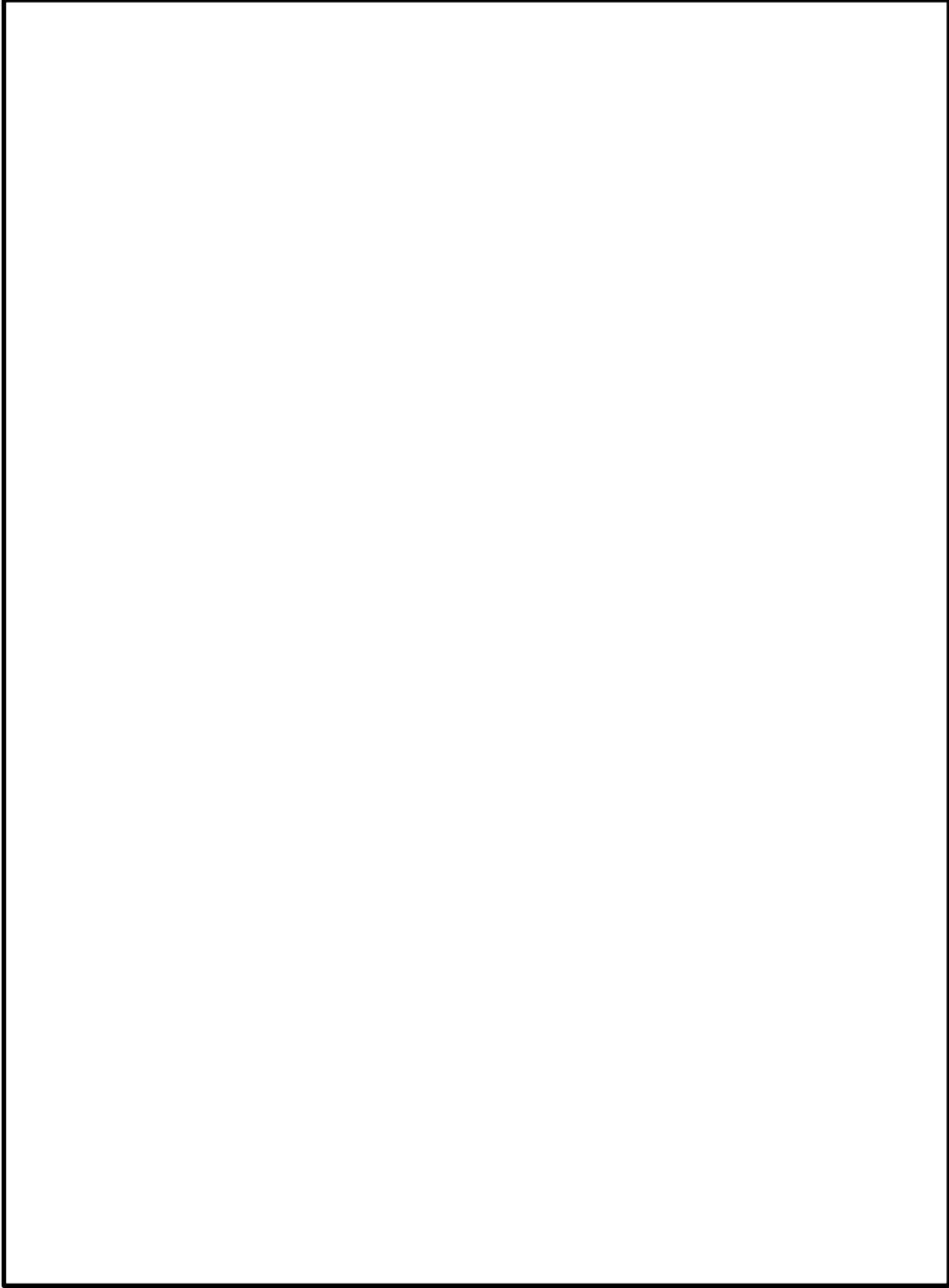


図 4-8 外部事象防護対象施設を内包する施設の開口部調査結果

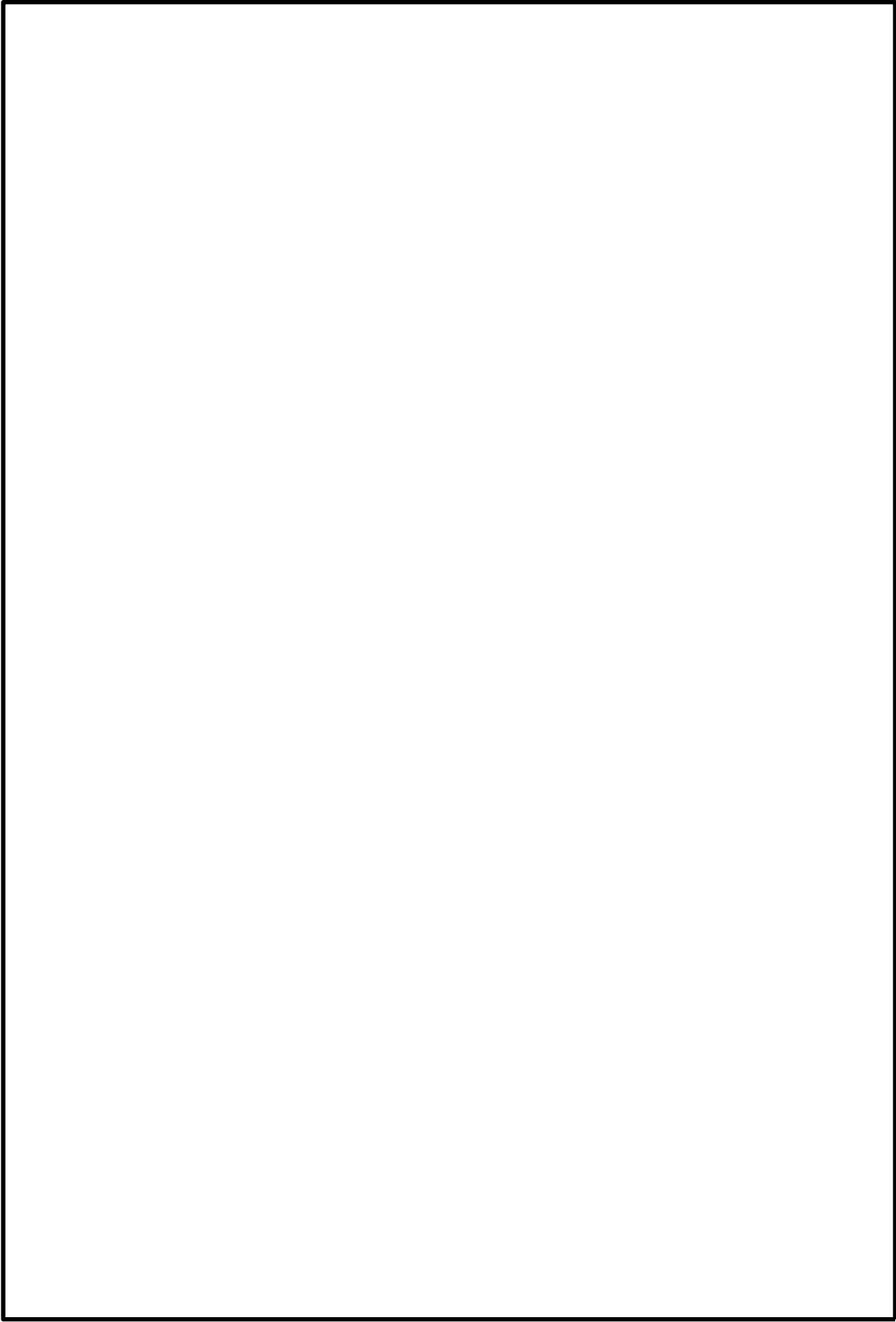


図 4-9 外部事象防護対象施設を内包する施設の開口部調査結果

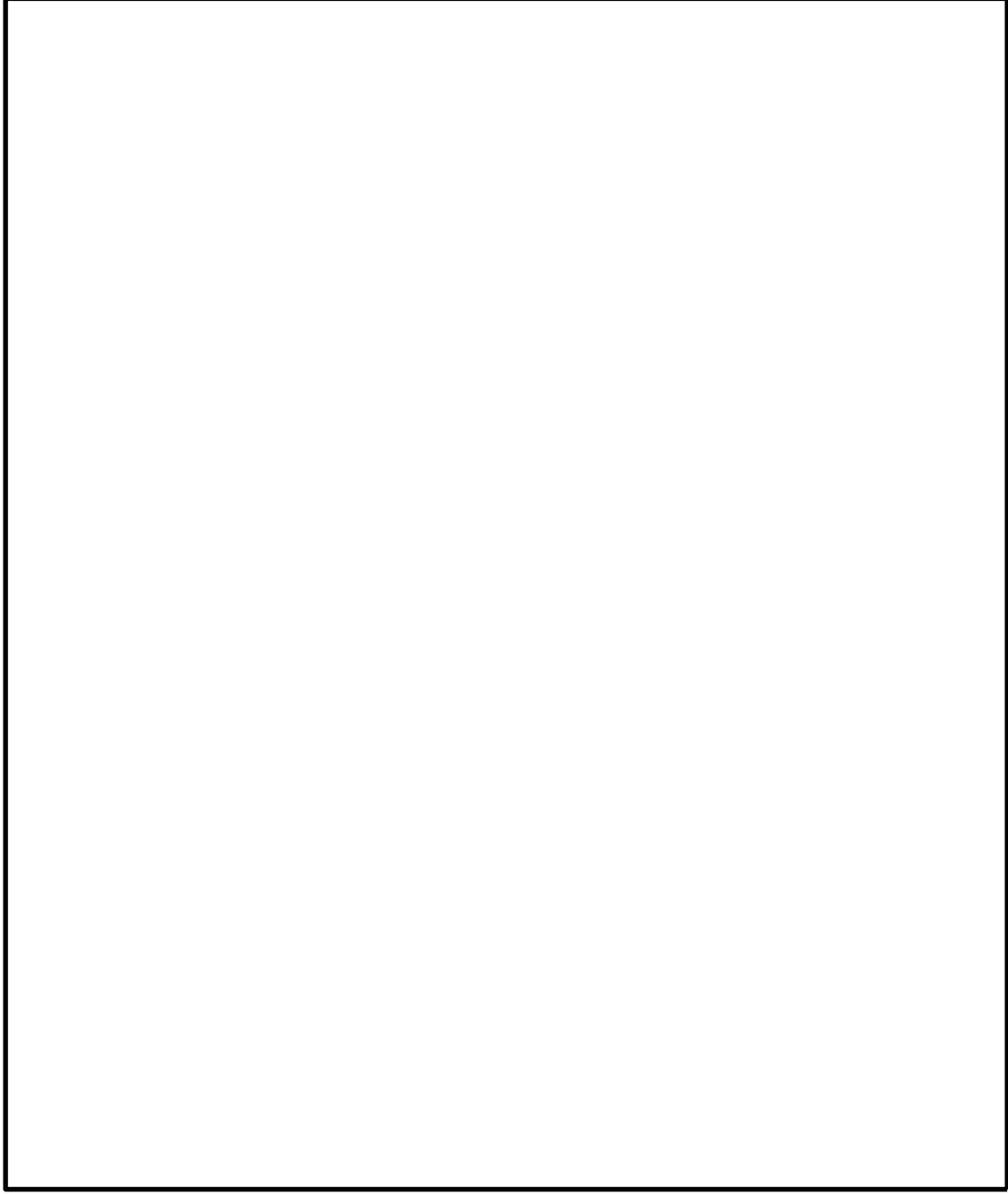


図 4-10 外部事象防護対象施設を内包する施設の開口部調査結果

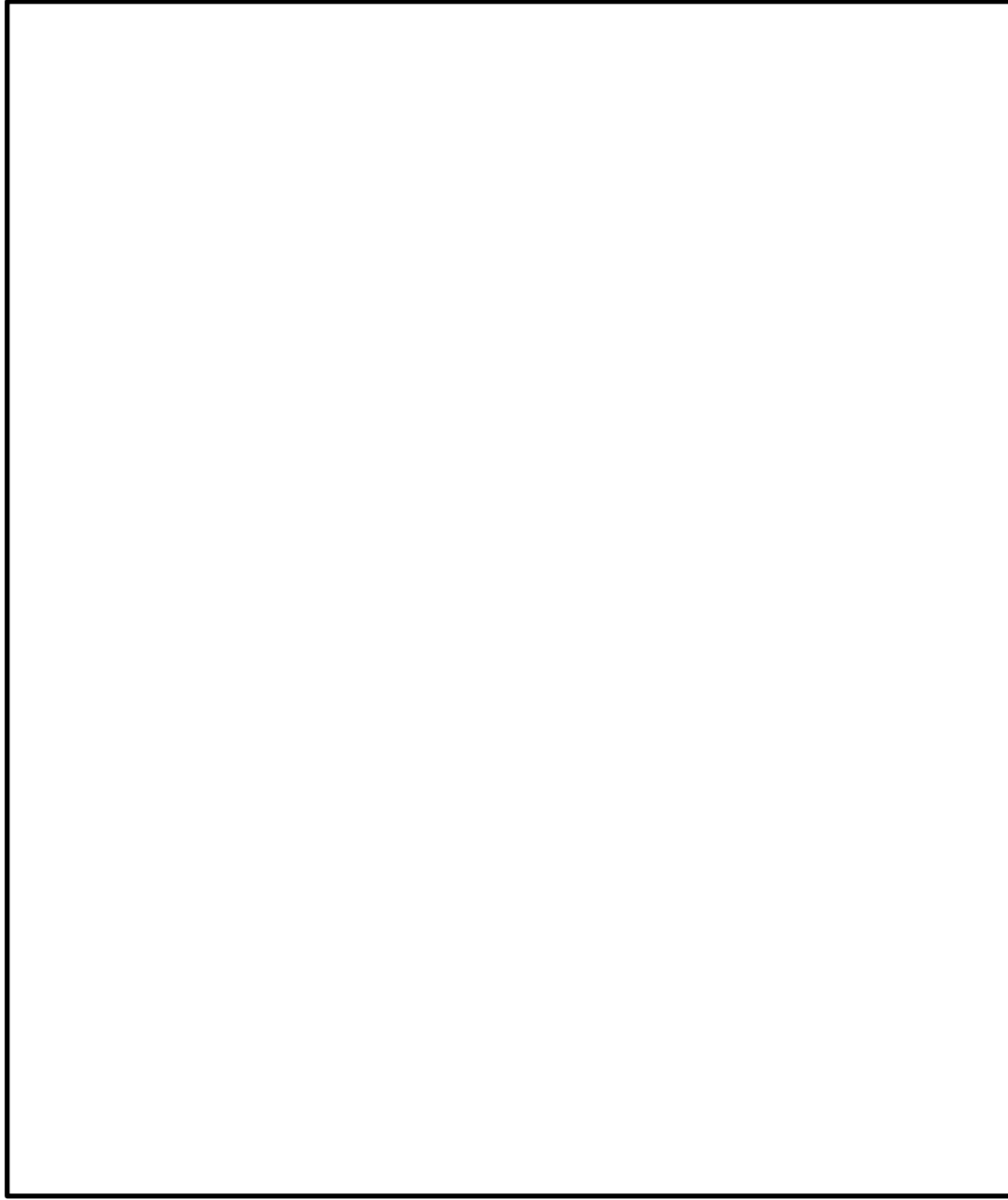


図 4-11 外部事象防護対象施設を内包する施設の開口部調査結果

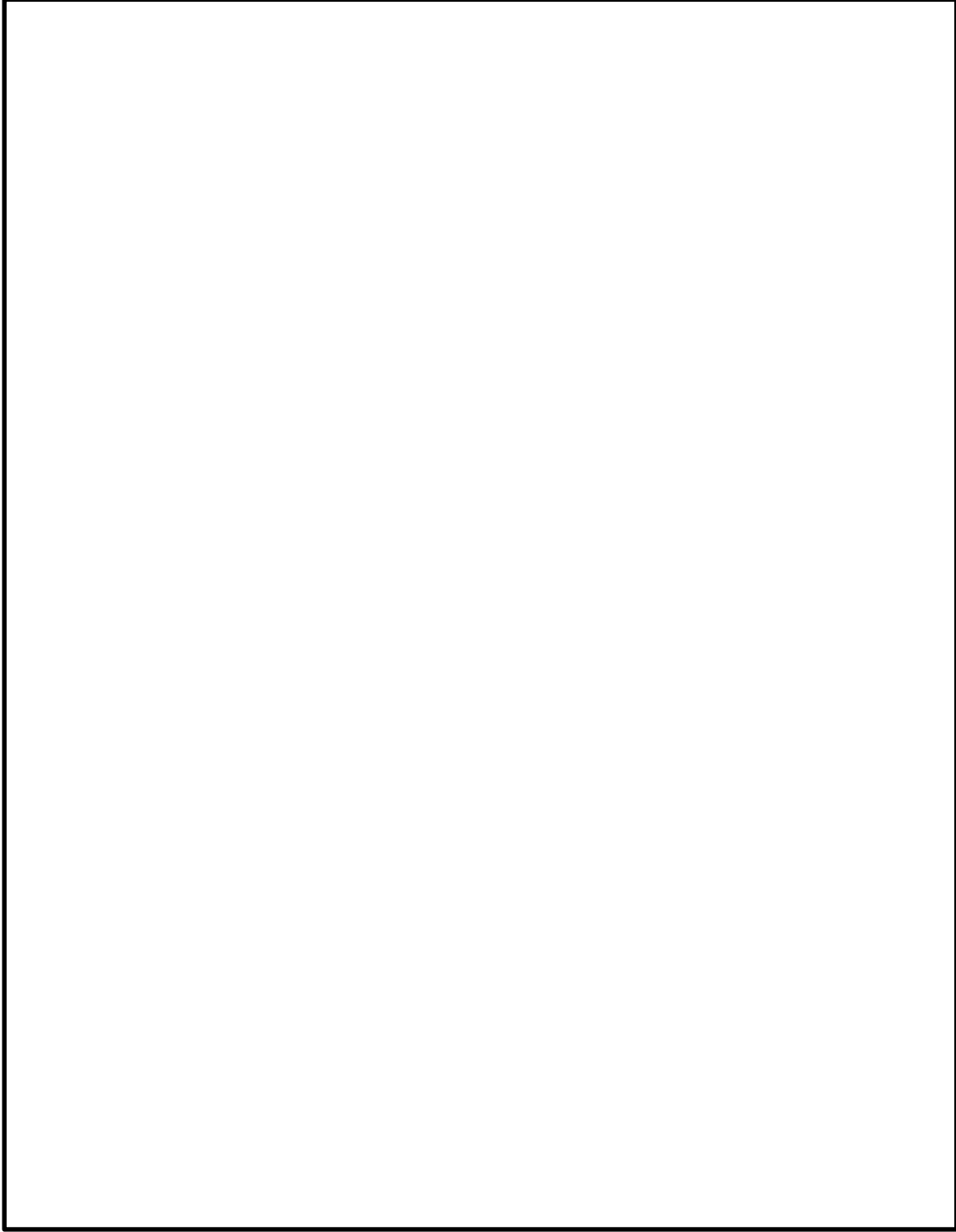


図 4-12 外部事象防護対象施設を内包する施設の開口部調査結果

竜巻防護対策設備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の安全機能を損なう恐れがある場合は、防護措置として竜巻防護対策設備を設置する。

島根原子力発電所 2 号機の屋外及び建物開口部に設置する竜巻防護対策設備の設置方針について、以下のとおり説明する。

2. 概要

2.1 竜巻防護対策設備について

屋外及び建物開口部に設置する竜巻防護対策設備を表 2.1-1 に示す。

表 2.1-1 屋外及び建物開口部に設置する竜巻防護対策設備

分類	竜巻防護対策設備
屋外に設置する竜巻防護対策設備	<ul style="list-style-type: none"> ・ 取水槽海水ポンプエリア竜巻防護対策設備（竜巻防護ネット，竜巻防護鋼板及び架構） ・ 取水槽循環水ポンプエリア竜巻防護対策設備（竜巻防護鋼板及び架構） ・ 燃料移送ポンプエリア竜巻防護対策設備（竜巻防護鋼板及び架構）
建物開口部に設置する竜巻防護対策設備	<ul style="list-style-type: none"> ・ 建物開口部竜巻防護対策設備（竜巻防護ネット又は竜巻防護鋼板及び架構並びに鋼製扉）

2.2 設置場所

(1) 屋外に設置する竜巻防護対策設備

取水槽海水ポンプエリア竜巻防護対策設備，取水槽循環水ポンプエリア竜巻防護対策設備及び燃料移送ポンプエリア竜巻防護対策設備の設置場所を図 2.2-1，図 2.2-2 に示す。

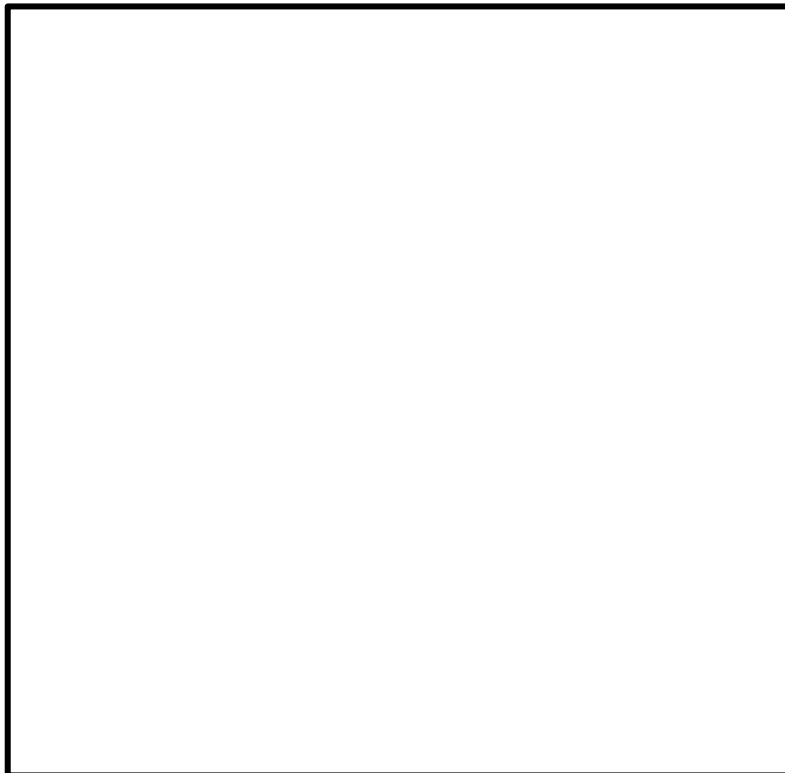


図 2.2-1 取水槽海水ポンプエリア竜巻防護対策設備及び取水槽循環水ポンプエリア竜巻防護対策設備の位置図

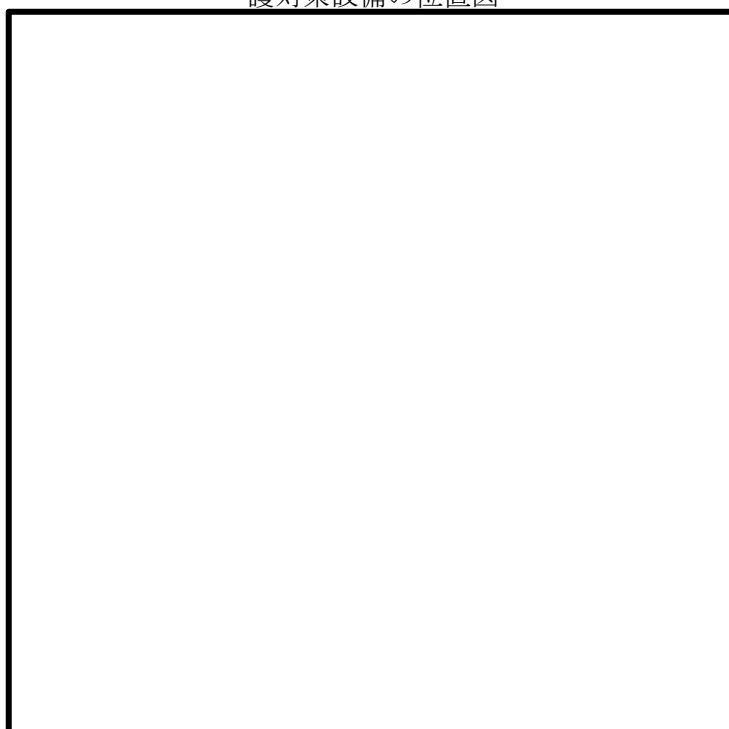


図 2.2-2 燃料移送ポンプエリア竜巻防護対策設備の位置図

(2) 建物開口部に設置する竜巻防護対策設備

建物開口部竜巻防護対策設備及び鋼製扉の設置場所は「4. 建物開口部の調査結果について」に示す。

2.3 設備構成について

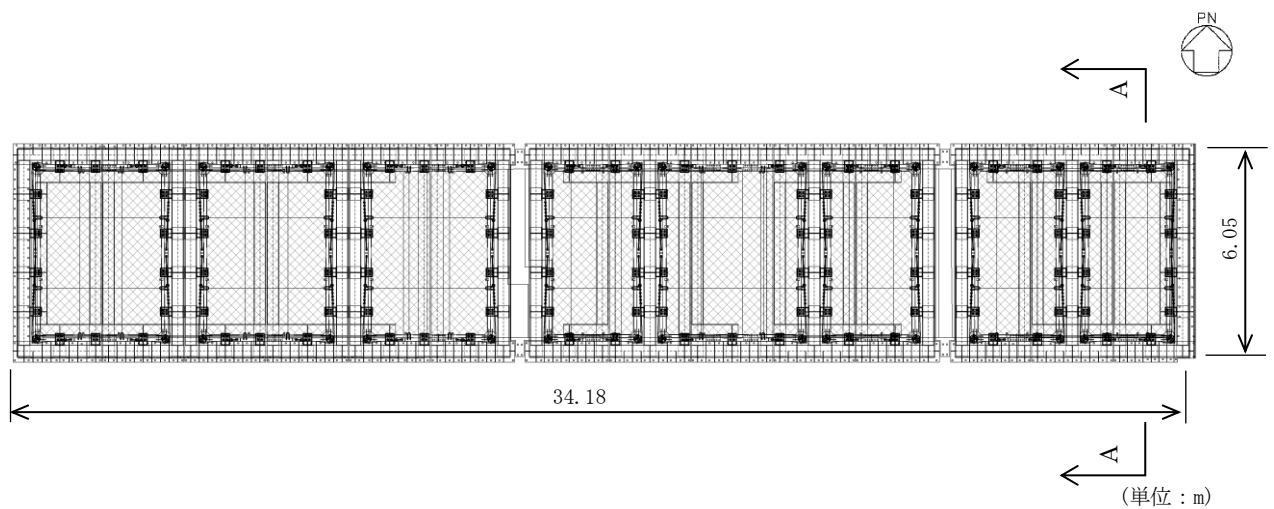
屋外及び建物開口部に設置する竜巻防護対策設備の設備構成を下記に示す。

(1) 屋外に設置する竜巻防護対策設備

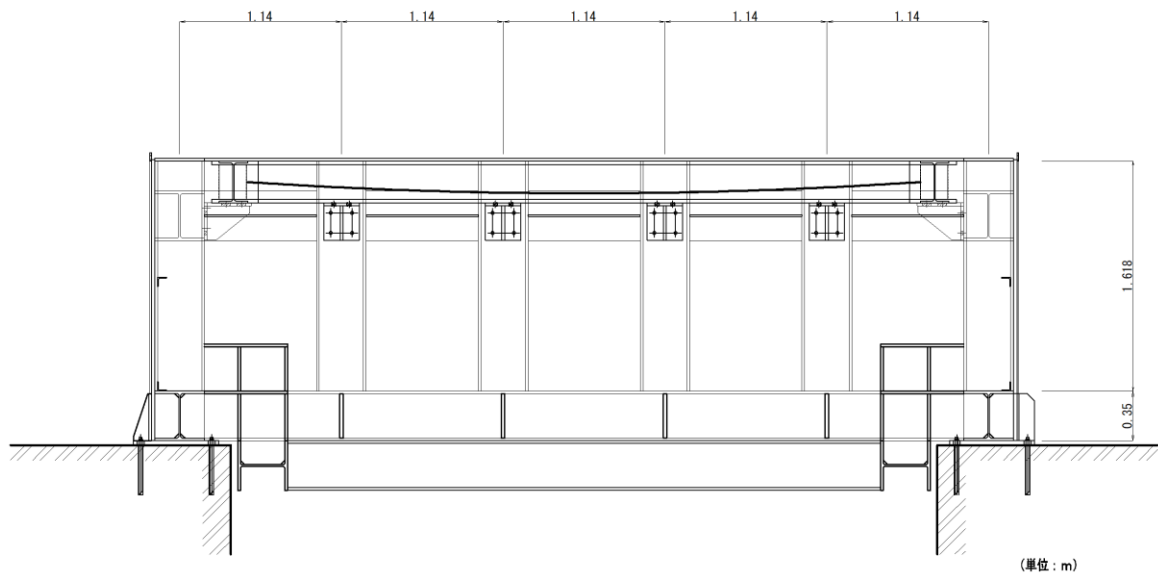
a. 取水槽海水ポンプエリア竜巻防護対策設備

取水槽海水ポンプエリア竜巻防護対策設備は竜巻防護ネット、竜巻防護鋼板及び架構で構成する鋼製構造物である。

取水槽海水ポンプエリア竜巻防護対策設備の概略構造図を図 2.3-1 に示す。



平面図



A-A断面図

図 2.3-1 取水槽海水ポンプエリア竜巻防護対策設備の概略構造図

b. 取水槽循環水ポンプエリア竜巻防護対策設備

取水槽循環水ポンプエリア竜巻防護対策設備は竜巻防護鋼板及び架構で構成する鋼製構造物である。

取水槽循環水ポンプエリア竜巻防護対策設備の概略構造図を図 2.3-2 に示す。

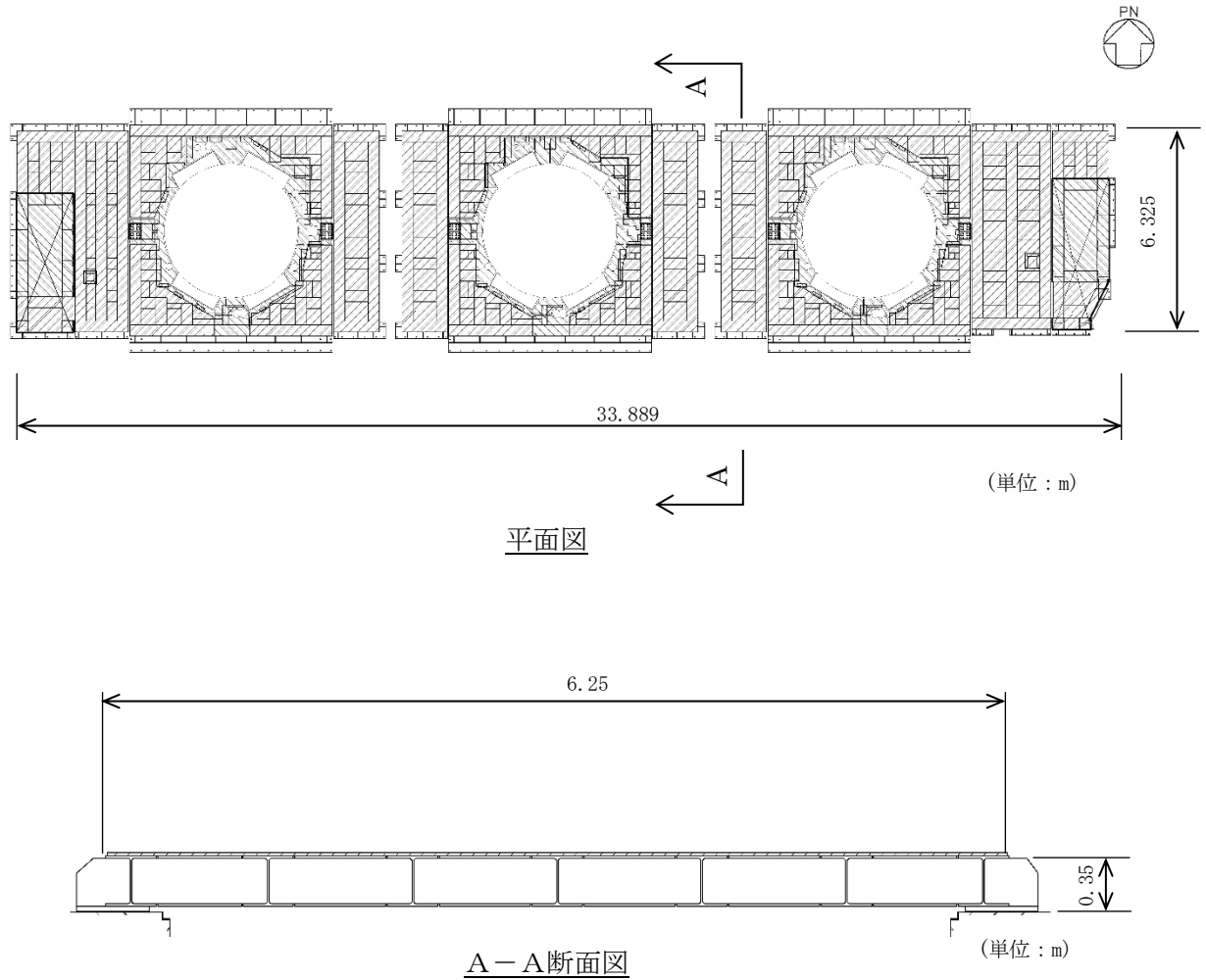
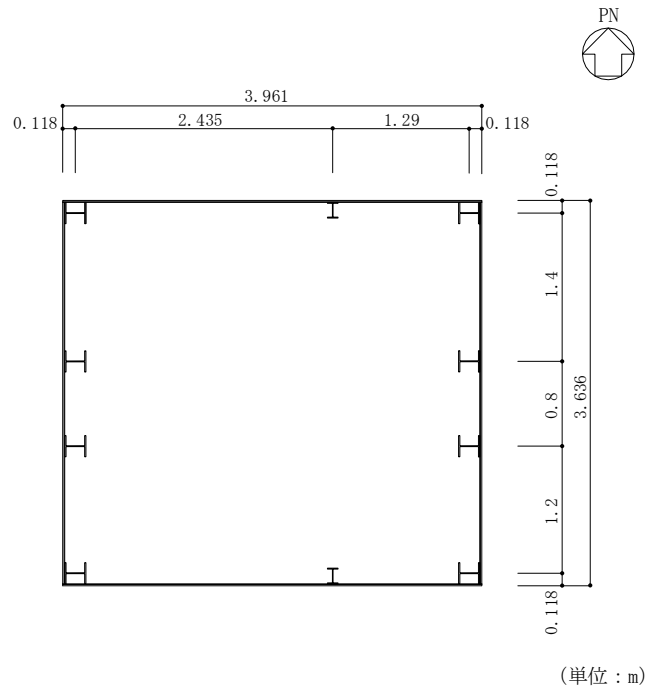


図 2.3-2 取水槽循環水ポンプエリア竜巻防護対策設備の概略構造図

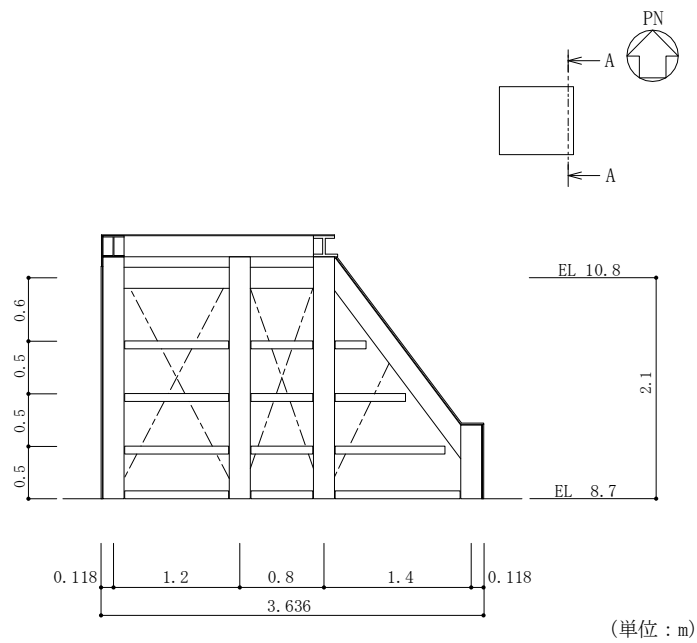
c. 燃料移送ポンプエリア竜巻防護対策設備

燃料移送ポンプエリア竜巻防護対策設備は竜巻防護鋼板及び架構で構成する鋼製構造物である。

燃料移送ポンプエリア竜巻防護対策設備の概略構造図を図 2.3-3 に示す。

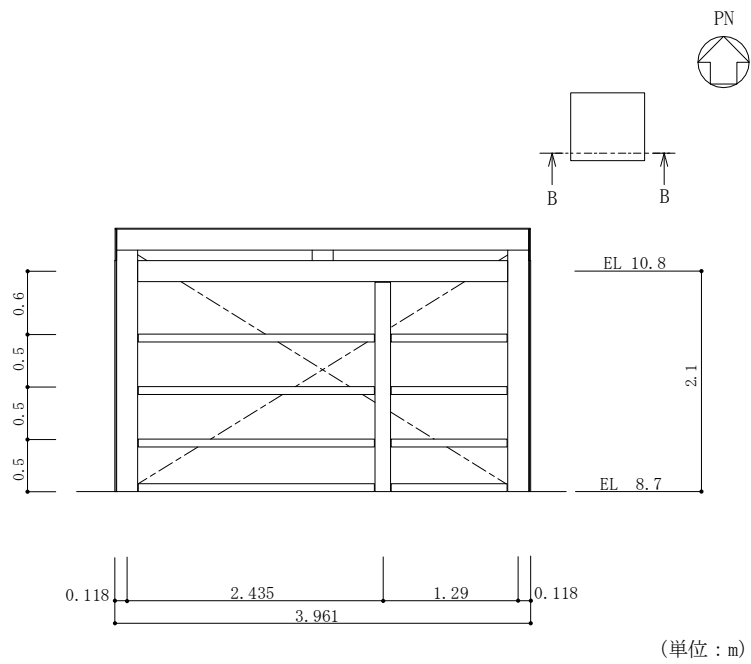


平面図



A-A断面図

図 2.3-3 燃料移送ポンプエリア竜巻防護対策設備の概略構造図(1/2)



B-B断面図

図 2.3-3 燃料移送ポンプエリア竜巻防護対策設備の概略構造図(2/2)

(2) 建物に設置する竜巻防護対策設備

a. 建物開口部竜巻防護対策設備

建物開口部竜巻防護対策設備は竜巻防護ネット又は竜巻防護鋼板及び架構で構成する鋼製構造物である。建物開口部竜巻防護対策設備の概略構造図を図 2.3-4～図 2.3-6 に示す。

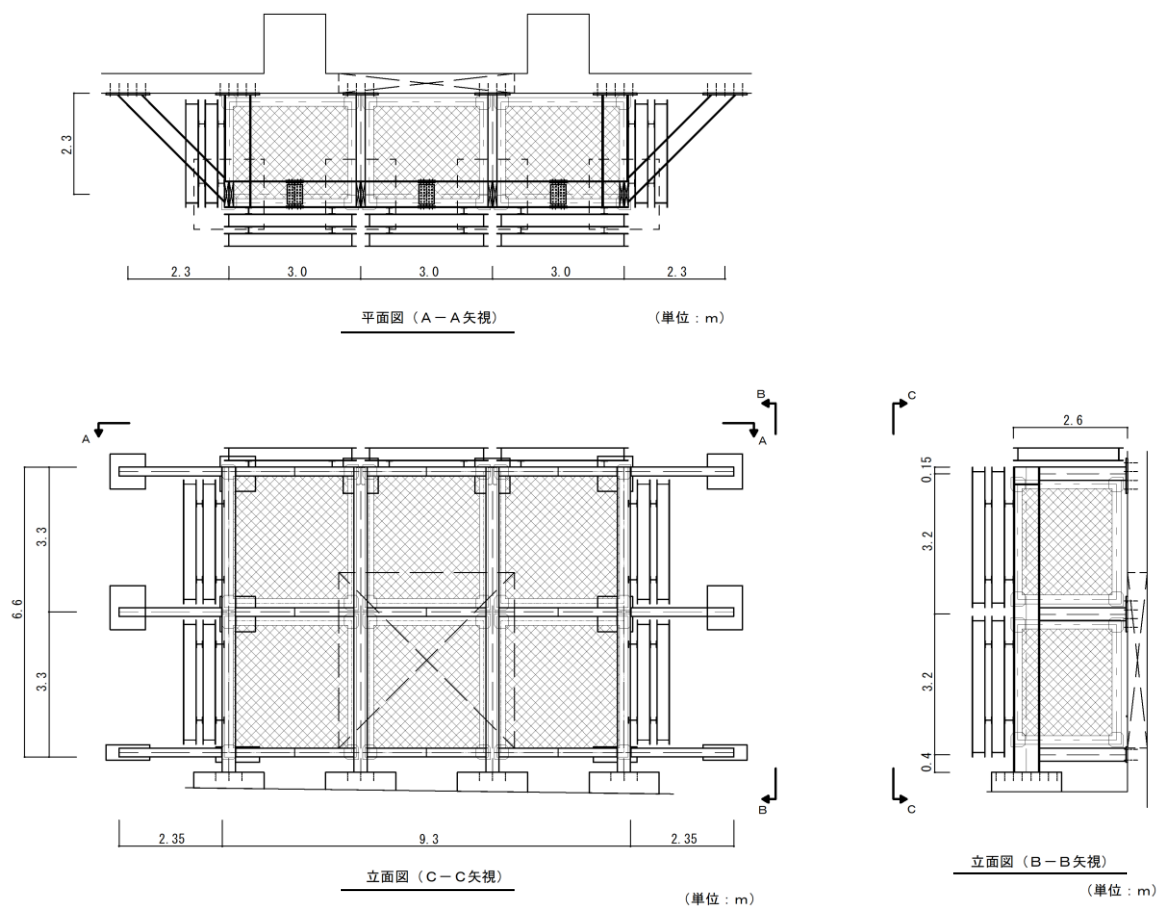


図 2.3-4 建物開口部竜巻防護対策設備の概略構造図

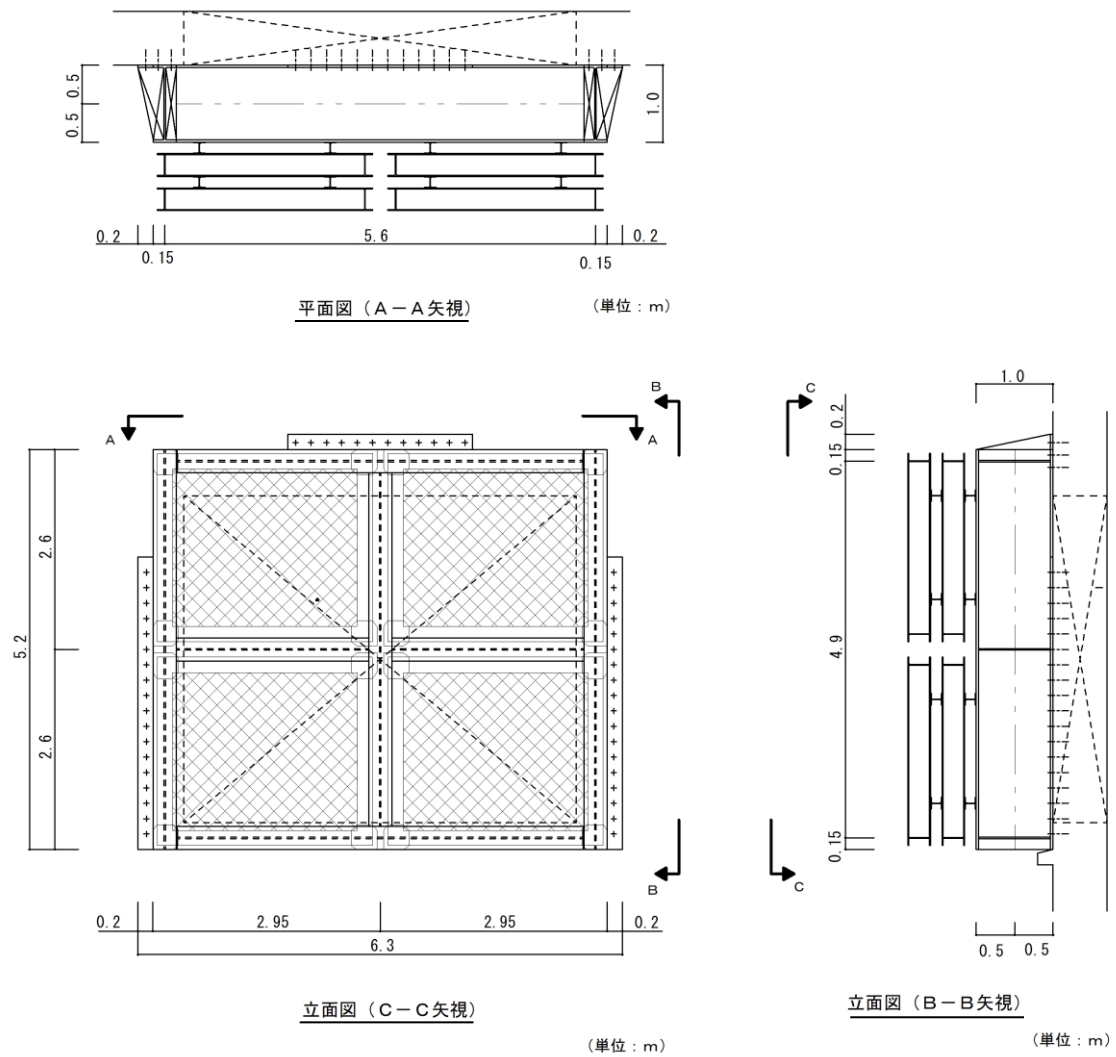


図 2.3-5 建物開口部竜巻防護対策設備の概略構造図

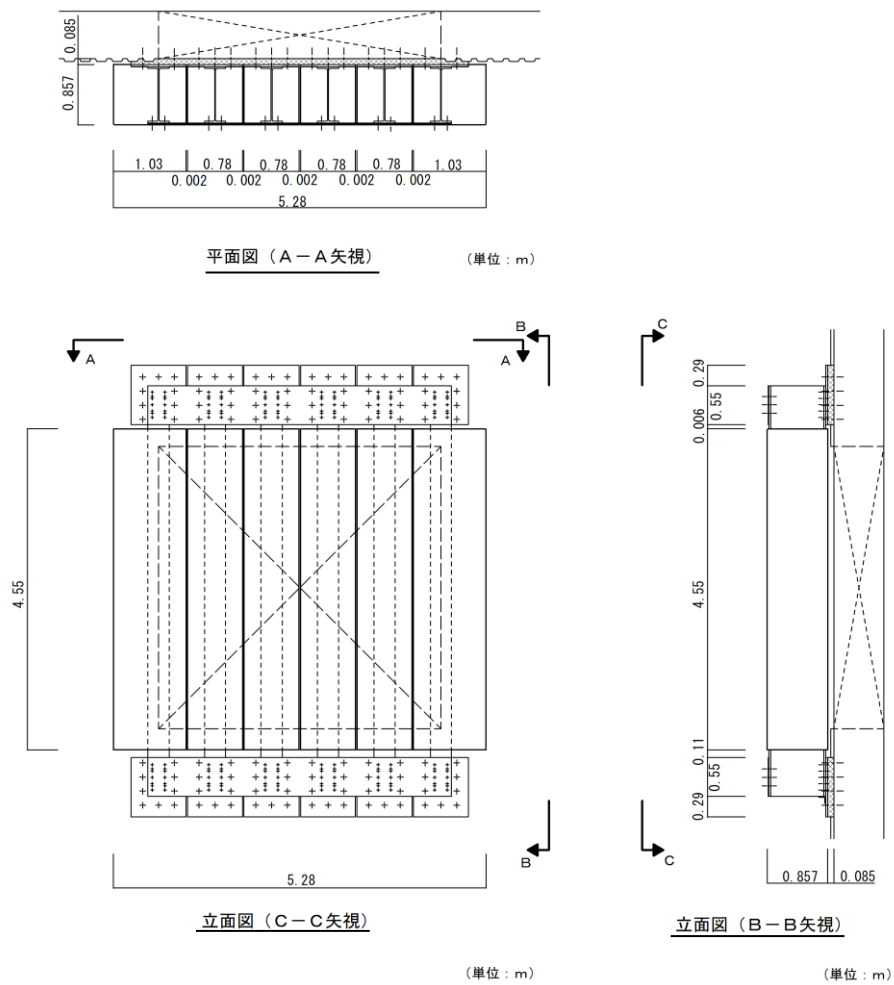


図 2.3-6 建物開口部竜巻防護対策設備の概略構造図

b. 建物開口部竜巻防護対策設備（鋼製扉）

建物開口部竜巻防護対策設備（鋼製扉）は鋼製扉で構成する鋼製構造物である。建物開口部竜巻防護対策設備（鋼製扉）の概略構造図を図 2.3-7 に示す。

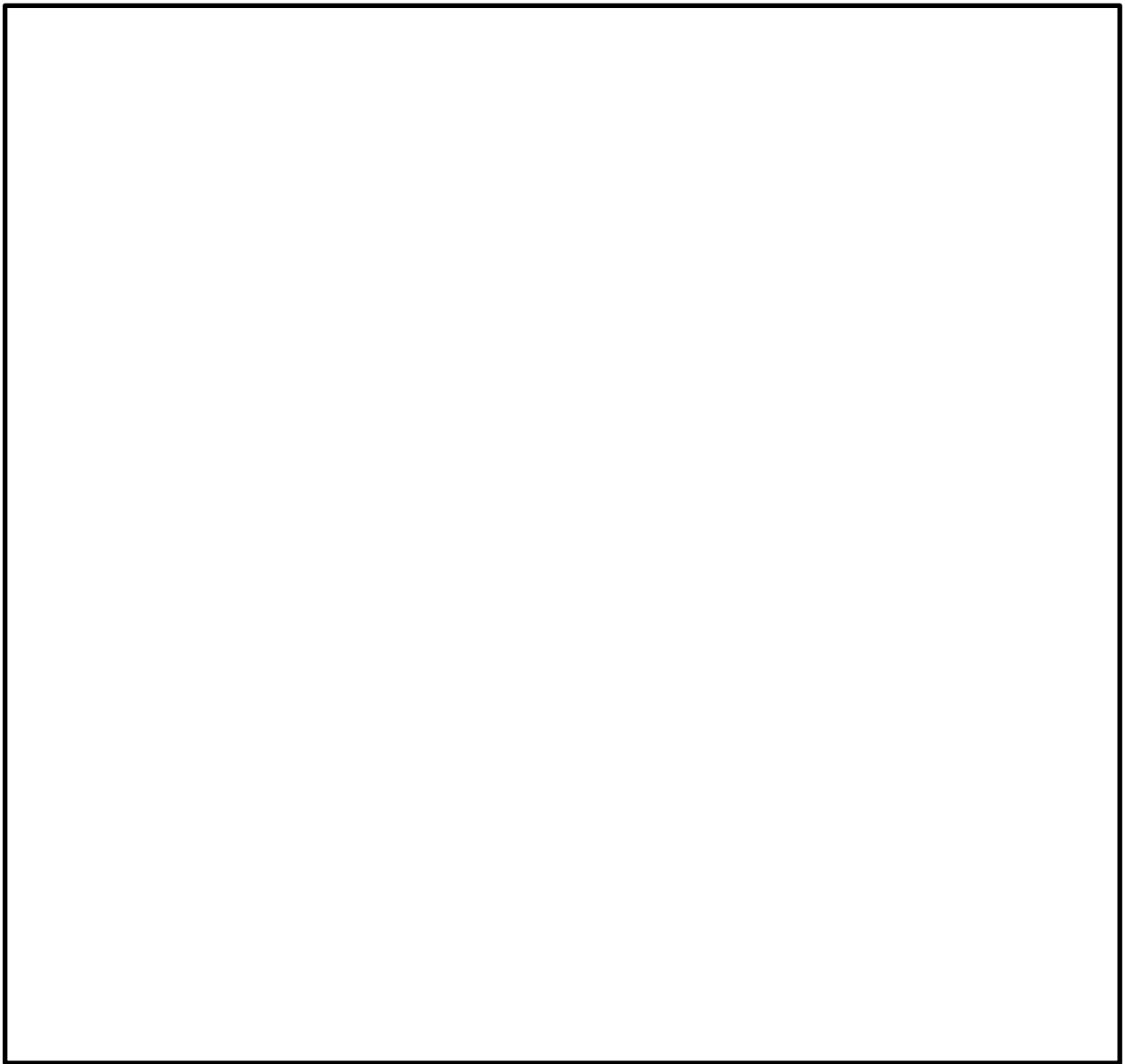


図 2.3-7 建物開口部竜巻防護対策設備（扉部）の概略構造図

5. 飛来物の選定

5. 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類については、外部事象防護対象施設（建物等）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（建物等）から離隔するなどの飛来物発生防止対策を講じる必要がある。

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。

5.1 飛来物評価

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、形状並びにこれらの値より算出する空力パラメータ、並びに地上からの初期高さにより、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される。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（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。

$$\frac{C_D A}{m} = \frac{c(C_{D1}A_1 + C_{D2}A_2 + C_{D3}A_3)}{m} \dots \textcircled{1}$$

m : 質量 (kg)

c : 0.33

C_{D1} , C_{D2} , C_{D3} : 抗力係数 (表 5.1-1, 図 5.1-1)

A_1 , A_2 , A_3 : 受圧面積 (m_2) (図 5.1-1)

表 5.1-1 飛来物の形状係数

飛来物形状	c	C_{D1}	C_{D2}	C_{D3}
①塊状物体	0.33	2.0	2.0	2.0
②板状物体	0.33	1.2	1.2	2.0
③棒状物体	0.33	2.0	0.7 (円形断面)	0.7 (円形断面)
			1.2 (矩形断面)	1.2 (矩形断面)

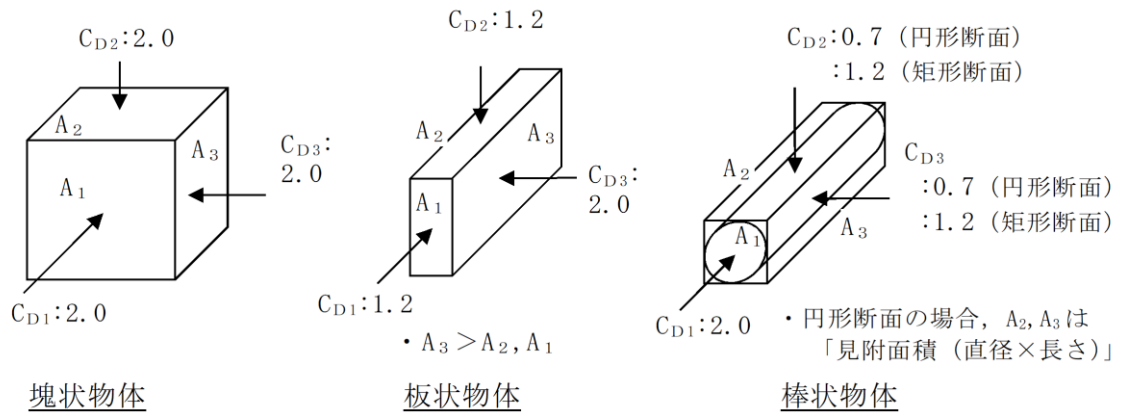


図 5.1-1 飛来物の形状と抗力係数の関係

b. 計算例

① 鋼製パイプ (棒状物体 (円形断面)) (図 5.1-2)

長さ : 2.00m 幅 : 0.05m 質量 : 8.4kg

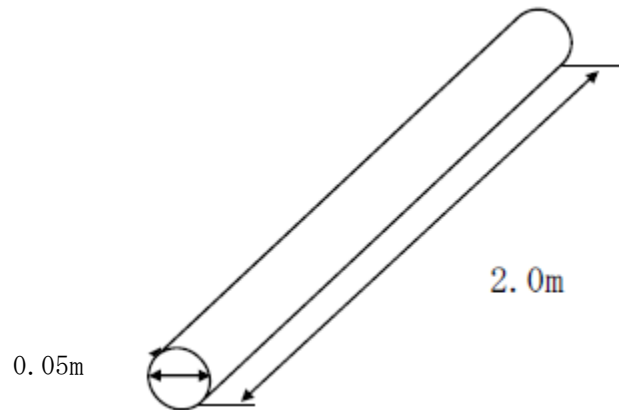


図 5.1-2 鋼製パイプ

棒状物体 (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。

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

注記* : 0.05m の正方形として算出

空力パラメータは、

$$\begin{aligned} \frac{C_D A}{m} &= \frac{0.33 \times (2.0 \times 4/\pi \times 0.05 \times 0.05 + 0.7 \times 0.05 \times 2.0 + 0.7 \times 2.0 \times 0.05)}{8.4} \\ &= 0.0057 \text{ [m}^2/\text{kg]} \end{aligned}$$

②鋼製材（棒状物体（矩形断面））（図 5.1-3）

長さ：4.20m 幅：0.30m 厚さ：0.20m 質量：135kg

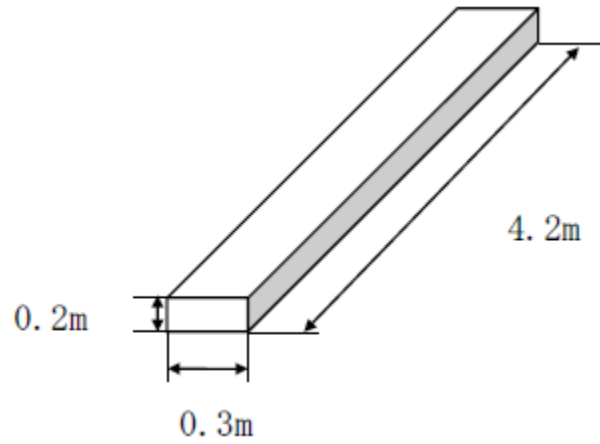


図 5.1-3 鋼製材

棒状物体（矩形断面）であるので，抗力係数 C_D は， $C_{D1} = 2.0$ ， $C_{D2} = 1.2$ ， $C_{D3} = 1.2$ である。

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

空力パラメータは，

$$\begin{aligned} \frac{C_D A}{m} &= \frac{0.33 \times (2.0 \times 0.2 \times 0.3 + 1.2 \times 0.3 \times 4.2 + 1.2 \times 0.2 \times 4.2)}{135} \\ &= 0.0065 \text{ [m}^2\text{/kg]} \end{aligned}$$

③乗用車（塊状物体）（図 5.1-4）

長さ：5.30m 幅：1.90m 高さ：2.30m 質量：1890kg

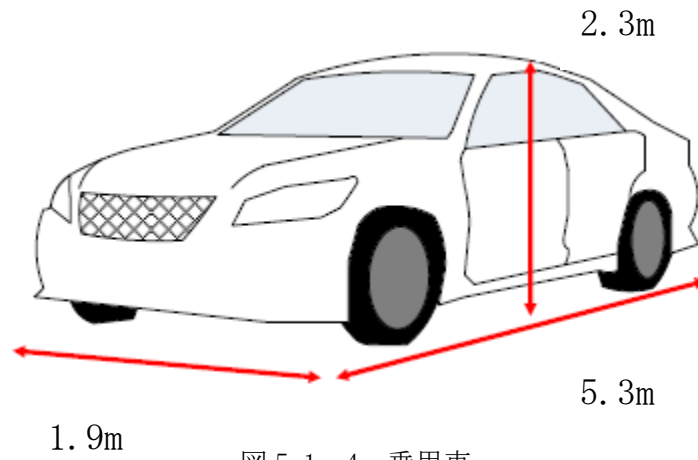


図 5.1-4 乗用車

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。

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

空力パラメータは，

$$\begin{aligned} \frac{C_D A}{m} &= \frac{0.33 \times (2.0 \times 1.9 \times 2.3 + 2.0 \times 5.3 \times 1.9 + 2.0 \times 2.3 \times 5.3)}{1890} \\ &= 0.0092 \text{ [m}^2\text{/kg]} \end{aligned}$$

(2) 地上からの初期高さ

飛散評価に必要な地上からの初期高さは、図 5.1-5 に示す評価対象の飛来物と地上との高低差となる。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、発電所の配置などを考慮し適切に設定する

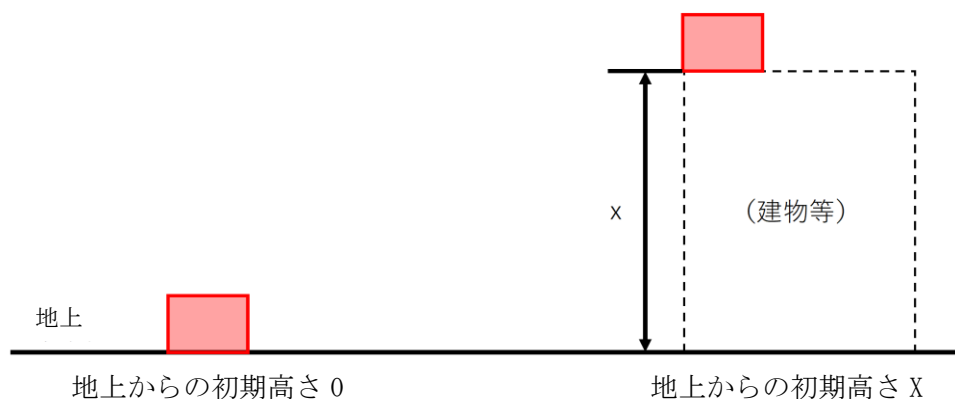


図 5.1-5 地上からの初期高さイメージ

(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 5.1-6 に飛散距離及び飛散高さの飛跡イメージを示す。

解析コード「TONBOS」の詳細については、VI-5-2「計算プログラム（解析コード）の概要・TONBOS」に示す。

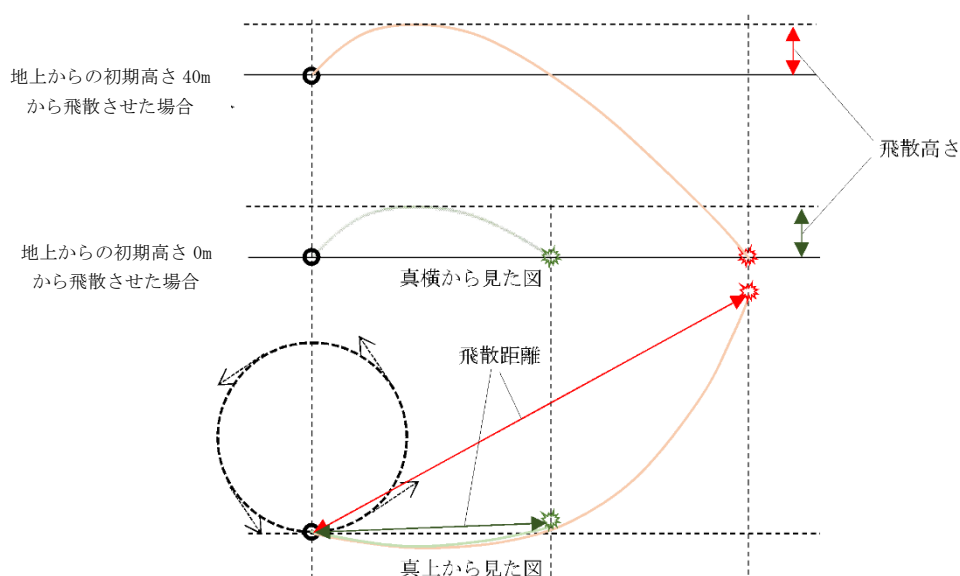


図 5.1-6 飛来物の軌跡イメージ

表 5.1-2 に、1.1(2)項の計算例に示した、及びの最大速度等の算出結果を示す。

表 5.1-2 飛来物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)	棒状物体 (矩形断面)	塊状物体
	鋼製パイプ	鋼製材	乗用車
寸法 (m)	長さ×直径 2.0×0.05	長さ×幅×奥行き 4.2×0.3×0.2	長さ×幅×高さ 5.3×1.9×2.3
質量(kg)	8.4	135	1890
空力パラメータ (m ² /kg)	0.0057	0.0065	0.0092
地上からの初期高さ (m)	0	0	0
飛来物の最大速度 (m/s)	0	8	48
飛散高さ (m)	0	0.08	7.8
飛散距離 (m)	0	3.3	145

(4) 運動エネルギーの算出

a. 算出式

運動エネルギーの算出は②, ③式により算出する。

・運動エネルギー (水平) = $MV_{max}^2/2$ [kJ] . . . ②

・運動エネルギー (鉛直) = $2/3 \cdot (= mV_{max}^2/2)$ [kJ] . . . ③

M : 飛来物の質量 (kg)

V_{max} : 飛来物の最大速度 (m/s)

b. 計算結果

① 鋼製パイプ (棒状物体 (円形断面))

質量 : 8.4kg 最大速度 : 0m/s

・運動エネルギー (水平) = $MV_{max}^2/2$ [kJ]
= $(8.4 \times 0^2) / 2 = 0$ [kJ]

・運動エネルギー (鉛直) は水平の 2/3

② 鋼製材 (棒状物体 (矩形断面))

質量 : 135kg 最大速度 : 51m/s

・運動エネルギー (水平) = $MV_{max}^2/2$ [kJ]
= $(135 \times 8^2) / 2 = 44$ [kJ]

・運動エネルギー (鉛直) は水平の 2/3

③ 乗用車 (塊状物体)

質量 : 2,000kg 最大速度 : 48m/s

・運動エネルギー (水平) = $MV_{max}^2/2$ [kJ]
= $(1,890 \times 48^2) / 2 = 2178$ [kJ]

・運動エネルギー (鉛直) は水平の 2/3

(5) 貫通力の算出

飛来物の貫通力を、以下のコンクリートに対する貫通暑さの算出式に使用されている修正 NDRC 式、Degan 式及び後半に対する貫通暑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】(コンクリートに対する貫入深さ x_c)

$$\cdot x_c = \alpha_c \left\{ 4 \left(\frac{12145}{\sqrt{F_c}} \right) W N d \left(\frac{V}{1000d} \right)^{1.8} \right\}^{0.5}, \text{ 但し, } \frac{x_c}{\alpha_c d} < 2$$

【Degen 式】(コンクリートに対する貫通限界版厚 t_p)

$$\cdot t_p = \alpha_p d \left\{ 2.2 \left(\frac{x_c}{\alpha_c d} \right) - 0.3 \left(\frac{x_c}{\alpha_c d} \right)^2 \right\}, \text{ 但し, } \frac{x_c}{\alpha_c d} \leq 1.52$$

t_p : 貫通限界版厚 (cm)

x_c : 貫入深さ (cm)

d : 飛来物直径 (cm)

F_c : コンクリートの設計基準強度 (kgf/cm²) (=240kgf/cm²)

W : 飛来物重量 (kgf)

V : 衝突速度 (m/s)

N : 飛来物先端形状係数で、以下の値を使用する。

- ・棒状の物体、板状の物体 : 1.14
- ・塊上の物体 : 0.72

α_c : 貫入評価についての飛来物低減係数で、1.00 を使用する。

α_p : 貫通評価についての飛来物低減係数で、1.00 を使用する。

【BRL 式】(鋼板に対する貫通厚さ T)

$$\cdot T^{3/2} = \frac{0.5MV^2}{1.4396 \times 10^9 K^2 D^{3/2}}$$

T : 鋼板貫通厚さ (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 : 鋼板の材料に関する係数 (≒1)

表 5.1-3 に、5.1(b)項の計算例に示した鋼製パイプ、鋼製材及び乗用車の貫通力の算出結果を示す。

表 5.1-3 飛来物の貫通力の算出結果

飛来物の種類	棒状物体 (円形断面)	棒状断面 (矩形断面)	塊状物体
	鋼製パイプ	鋼製材	乗用車
寸法	長さ×直径 2×0.05	長さ×幅×高さ 4.2×0.3×0.2	長さ×幅×高さ 5.3×1.9×2.3
飛来物の最大水平速度 (m/s)	0	8	48
飛来物の最大鉛直速度 (m/s)	0	0.6	9
コンクリートの貫通限界厚 さ(水平)(cm)	0	8.2	40.7
コンクリートの貫通限界厚 さ(鉛直)(cm)	0	0.8	9.2
鋼板の貫通限界厚さ (水平)(cm)	0	0.28	0.54
鋼板の貫通限界厚さ (鉛直)(cm)	0	0.01	0.06

5.2 対策要否の判定

5.1 項にて算出した運動エネルギーが、以下に示す観点より設計飛来物に包含されていない物品については固縛、固定又は外部事象防護対象施設から離隔する対策を行う。図に飛来物となりうる資機材及び車両の固縛等の概要図を示す。

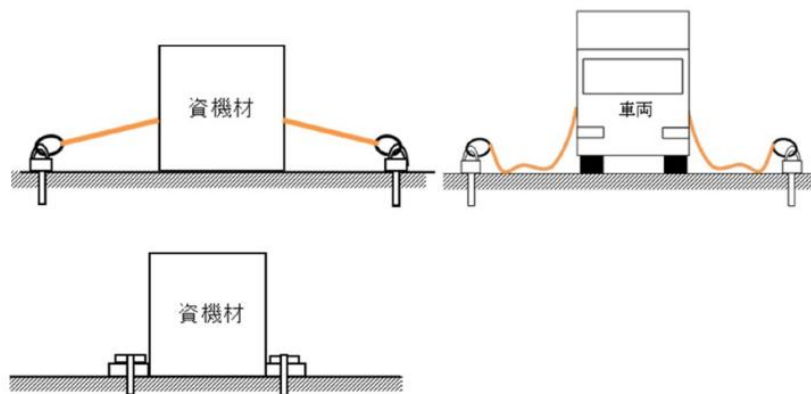


図 5.2-1 資機材固縛のイメージ

図 5.2-2 に飛来物となりうる資機材及び車両類の固定、固縛又は竜巻防護施設から離隔する対象物の選定フローを示す。

[飛来物発生防止対策要否の観点]

- ・ 運動エネルギーが設計飛来物に設定している鋼製材の 176kJ より大きいもの。
- ・ 鋼板に対する貫通力（貫通限界厚さ）が設計飛来物に設定している鋼製材の 34mm より大きいもの。
- ・ コンクリートに対する貫通力（貫通限界厚さ）が設計飛来物に設定している鋼製材の 27cm より大きいもの。

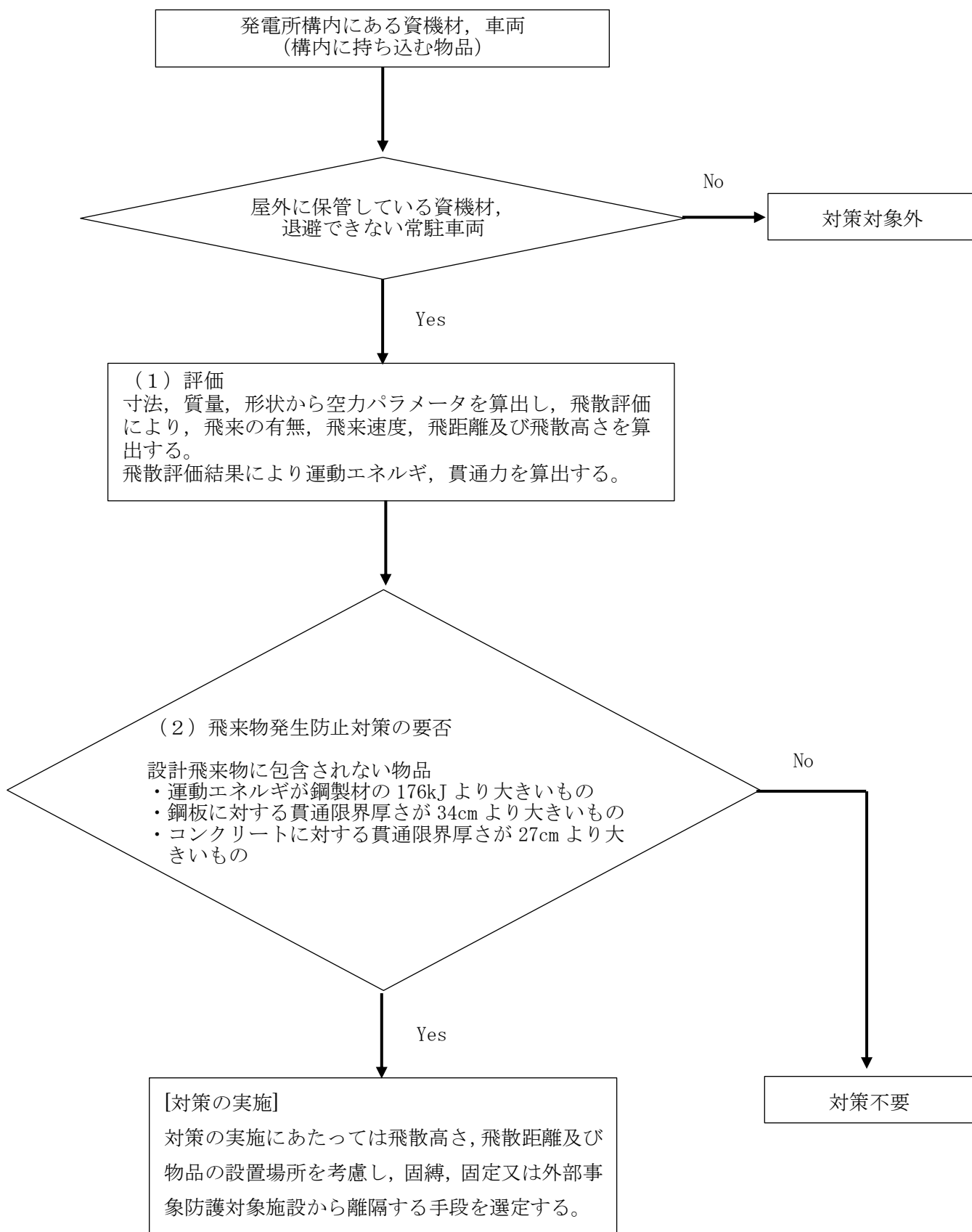


図 5.2-1 飛来物の選定及び飛来物発生防止対策の要否の判定フロー

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、地面に置かれた物体への影響をよく表現できている風速場モデルにより、評価対象施設の影響評価・防護対策を実施するため、風速場モデルとしてフジタの竜巻工学モデルDBT-77(DBT: Design Basis Tornado)⁽⁵⁾を選定する。

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に竜巻影響評価フローとフジタモデルの関連箇所を示す。

次節以降にてフジタモデルの詳細や、フジタモデルを適用した理由等を説明する。

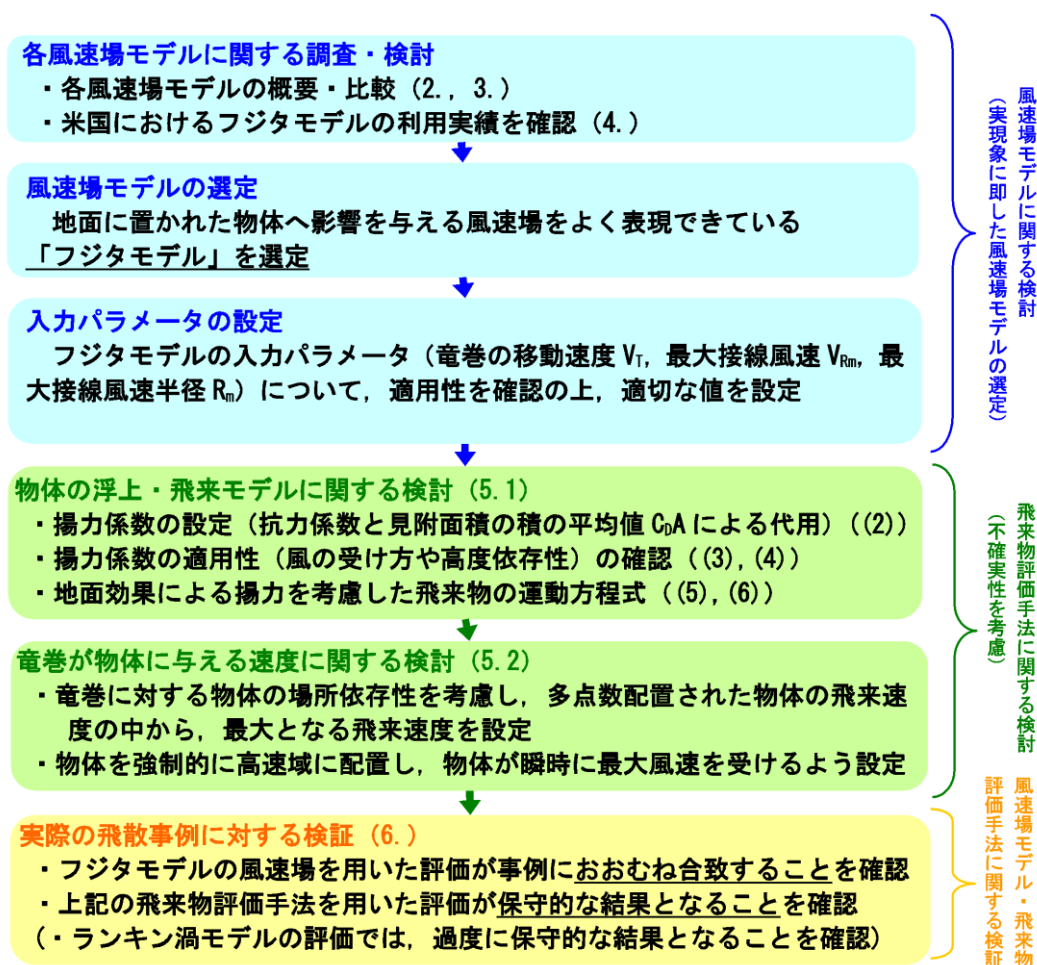


図1 風速場モデルの選定及び飛来物評価方法に関する検討フロー
(括弧内の数字は、本資料の節番号)

■ : フジタモデル関連箇所

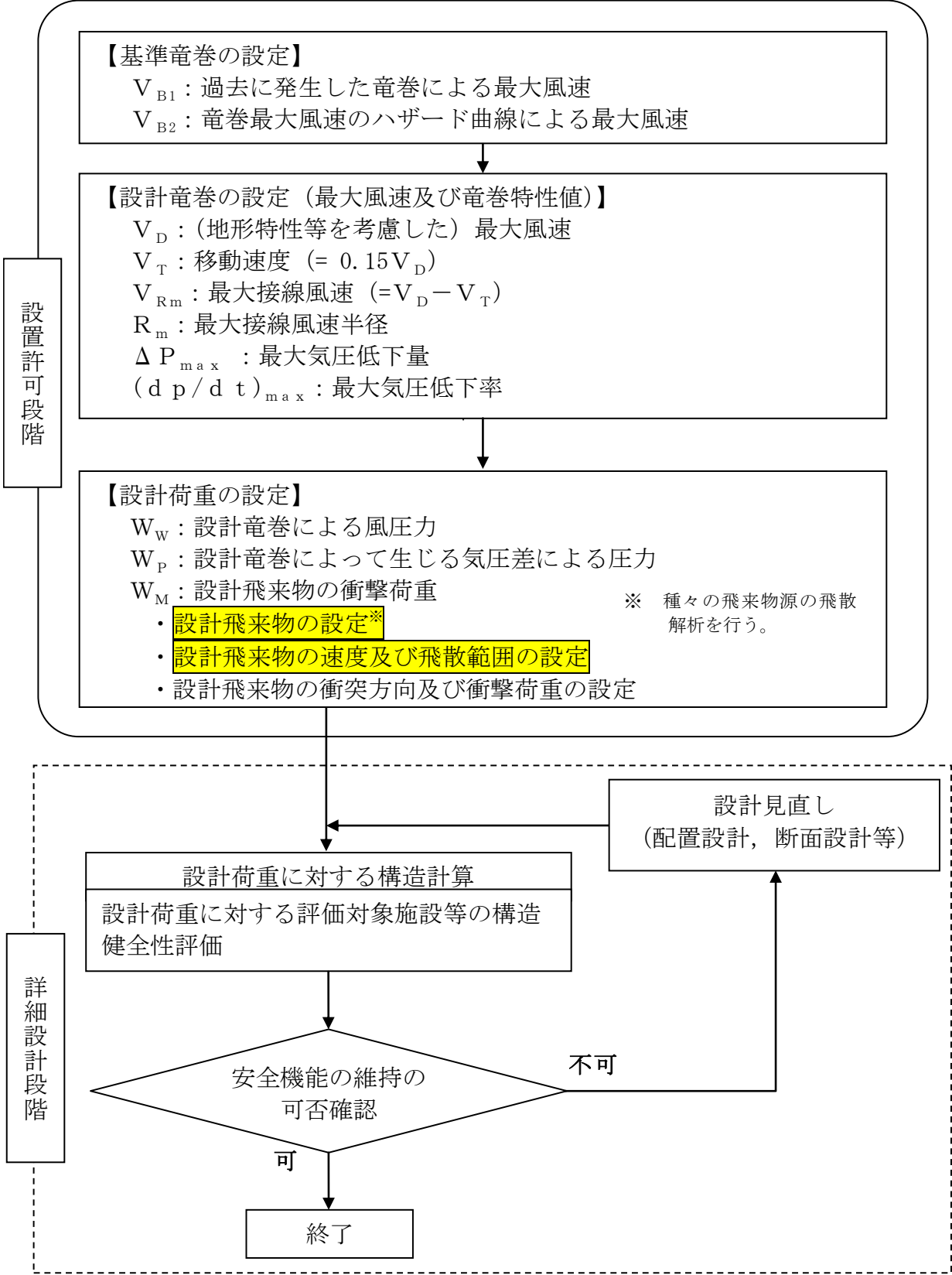


図2 竜巻影響評価フローとフジタモデルの関連箇所

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の実際の竜巻風速場をモデル化したいという要望により、藤田博士が1978年に竜巻観測記録をもとに考案した工学モデルである。モデル作成に当たっては、1974年8月に米国カンザス州Ash Valley等で発生した竜巻(図3)の記録ビデオ画像の写真図化分析を行い、竜巻の地上痕跡調査、被災状況調査結果と照合することで風速ベクトルを作成し、そのベクトル図をもとに作成した流線モデルから、竜巻風速場を代数式で表現している(図4)。

フジタモデルの特徴は、地表面付近における竜巻中心に向かう強い水平方向流れ、及び外部コアにおける上昇流といった、実際の竜巻風速場を良く表現している点にある。



図3 Ash Valley竜巻(1974. 8. 30)のビデオ画像

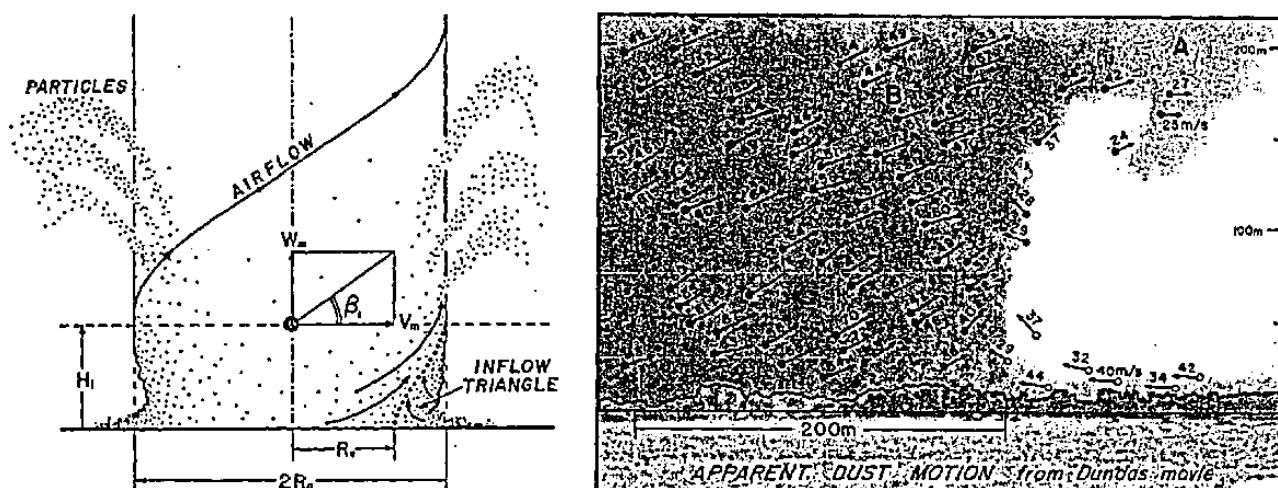
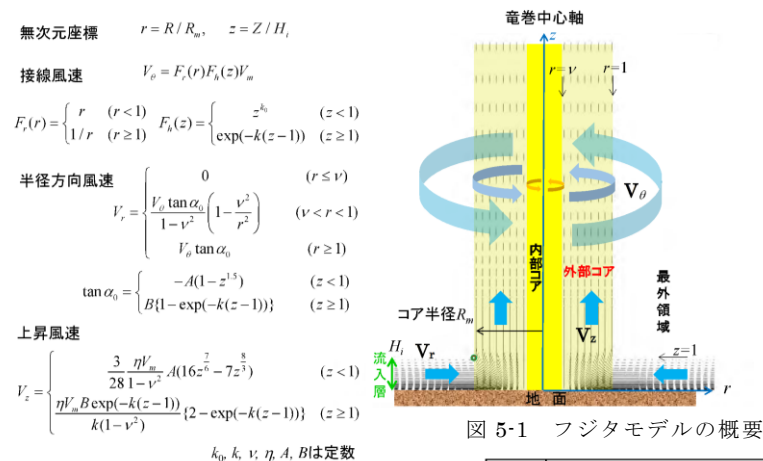


図4 フジタモデルの流線(左)と風速ベクトルの分析図(右)

フジタモデルの風速場は図5-1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、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。高さ方向には地上からの高さ H_i までを流入層としてモデル化しており、竜巻中心方向に向かう半径方向風速 V_r があり、この空気の流れ込みが外部コア内での上昇流となる。流入層より上部では外向きの半径方向風速が存在し、各風速成分は地上からの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を図5-2に示す。

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Chapter 6に下記のとおり記載されている。（Chapter 6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。）



V_θ 接線(周)方向風速
V_r 半径方向風速(中心方向が正)
V_z 上昇風速
V_m 最大接線風速
R_m 外部コア半径

連続の式: $c \equiv \frac{1}{R_m r} \frac{\partial V_\theta}{\partial \theta} + \frac{1}{R_m r} \frac{\partial (r V_r)}{\partial r} + \frac{1}{H_i} \frac{\partial V_z}{\partial z} = 0$
 フジタモデルでは $c = 0$ となり連続の式を満たす。

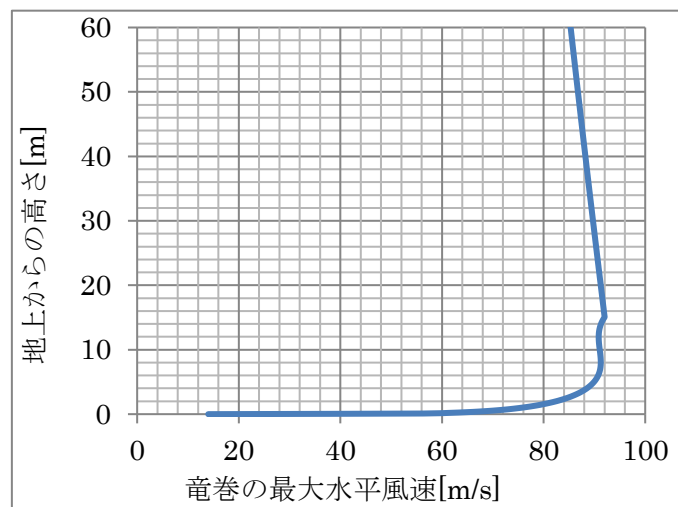


図5-2 フジタモデルの風速場における最大水平風速と地上からの高さの関係 ($r=1$)

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

$$\nu = 0.9 - 0.7 \exp(-0.005 R_m) \quad (1)$$

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、これを用いる。

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

ここで、 η は 1 以下の正の値であり、Fujita Work Book⁽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 $R_m=30$ (m) の場合、 $\eta = 0.501$ ($H_i=15$ (m)) となり、原子力安全基盤機構の調査研究報告書⁽⁴⁾の図 2.2.3.10 における流入層高さ と竜巻半径の比 ($\eta=0.4$ 程度) や、Kosiba⁽⁶⁾により示されている流入層高さ ($H_i=10\sim 14$ (m) 以下) とおおむね同じである。

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

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 6)。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 7 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。

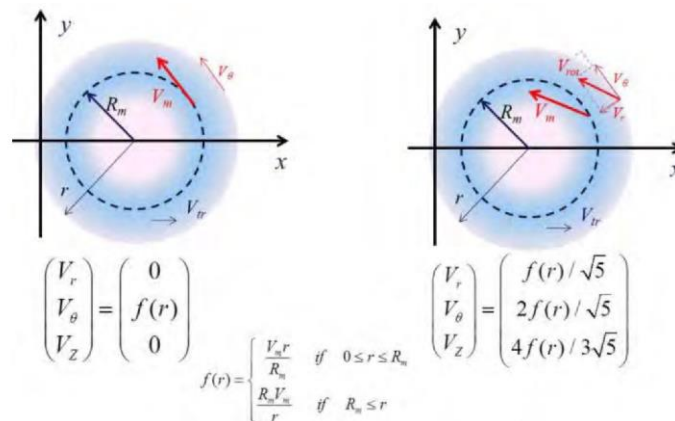


図 6 設計竜巻圧力用のランキン渦モデル (左) と
飛来物速度評価用のランキン渦モデル (右)

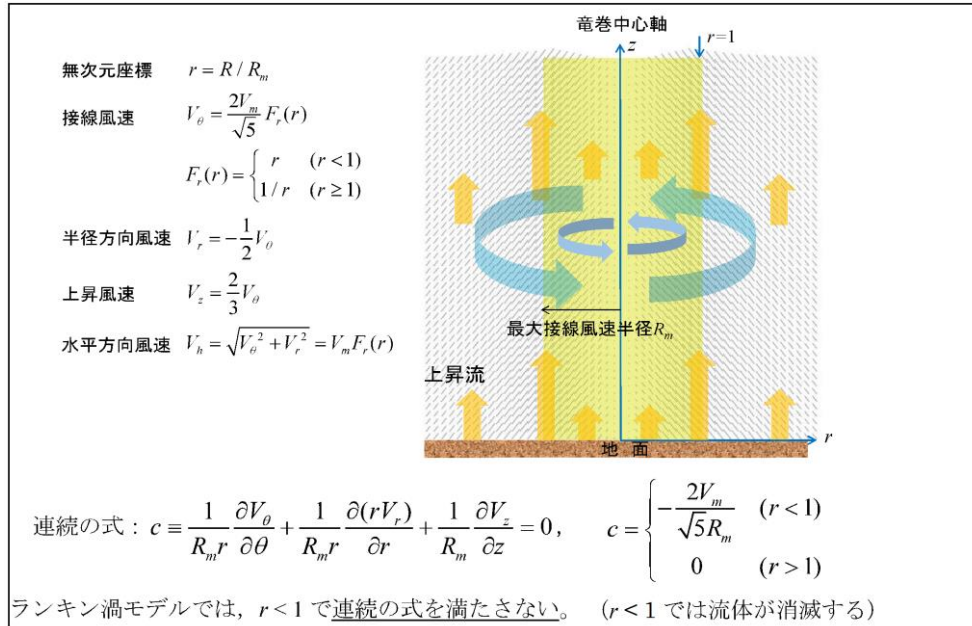


図7 飛来物速度評価用のランキン渦モデルの概要

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8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、以下のようになる。

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

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

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。

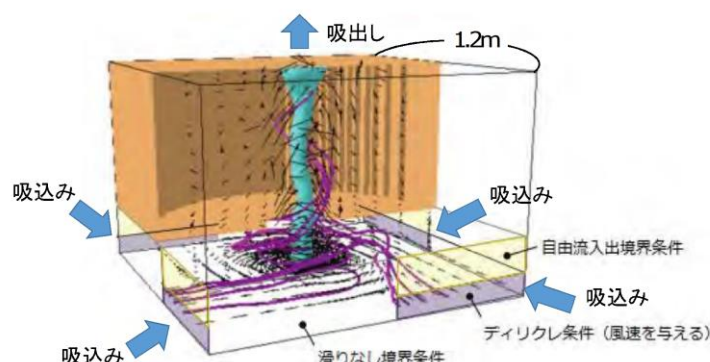


図8 LES計算領域内での竜巻状の渦の発生状況（(4)に一部加筆）

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（流入箇所を局部的に配置等）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部的配置等）を設定していることから，流入境界条件の影響を受ける地表面付近の実際の竜巻風速場の再現はできていないものと考えられる。
- ・小規模な計算領域によるシミュレーションであり，実スケールへの適用（飛来物評価）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。
⇒流速が早い場合には粘性の影響は小さくなる傾向となるが，その影響については考慮していないことから，特に地表面付近については実際の風速場の再現はできていないものと考えられる。

（参考：フジタモデルを適用した場合の物体の飛跡）

図9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（諸元：長さ6m×幅2.4m×高さ2.6m，2300kg， $CD_A/m=0.0105$ ，最大風速100m/s）における飛跡を示す。

また、フジタモデルの流入層高さ H_i は、外部コア半径 $R_m=30(m)$ の場合、 $H_i=15(m)$ であり、2.1に記載のとおり他の文献⁽⁴⁾⁽⁶⁾ともおおむね整合しているが、ここでは、その不確実性を考慮し、流入層高さ H_i を $\pm 10\%$ 変化させた場合の飛跡も示す。

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

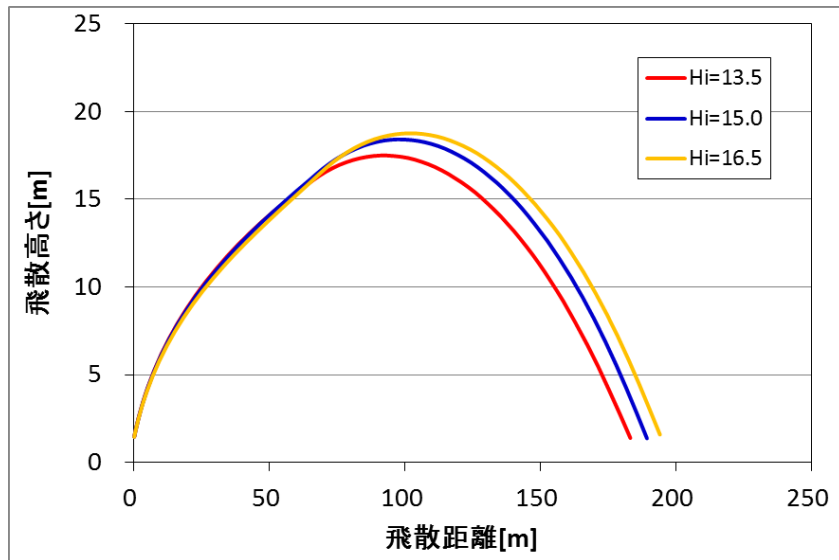


図9 流入層高さを変化させた場合のコンテナの飛跡（最大風速 100m/s）

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1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10に示す。フジタモデルの風速場構造の流線は、地面付近を含め、より実際の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は解析するには適切でない。ガイドで例示されているLESで生成した風速場も、2.3の通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1 各風速場モデルの特徴の比較

風速場モデル	使用実績	特長	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重要施設的设计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"> 特になし <p>(ランキン渦モデルと比較すると、解析プログラムが複雑になるが、計算機能力の向上、および評価ツールの高度化により問題とならない)</p>
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するには適切でない</p>
非定常乱流渦モデル(LES)	<ul style="list-style-type: none"> ガイドにおいて、飛来物およ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 	<p>ガイドに例示されているLESで生成した風速場で飛散解析を行う場合、以下の問題がある。</p> <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するには適切でない</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

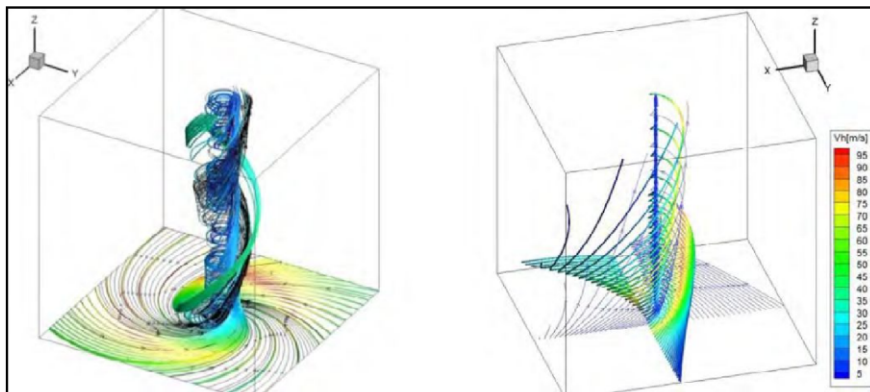


図10 フジタモデル(左)とランキン渦モデル(右)の風速場構造の比較

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 criteriaspecified 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0~2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), 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 (Fluid mechanics equations of continuity are satisfied) こと, モデル流況は, 竜巻の映像分析で得られる流れの空間分布と整合する (Flow patterns are consistent with the spatial distribution of flow observed in photogrammetric analysis of tornado movies) こと等を利点として挙げている。

また, 実際の事例に対するフジタモデルの検証としては, 1978年12月3日に米国ルイジアナ州 Bossier 市で発生した F4 竜巻による鋼製材の飛来について, 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ガイドでの取扱い

2.1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 (Simiura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では, 竜巻防護対策の追加を検討しているプラントに対し, 確率論的竜巻飛来物評価手法TORMISの利用を承認している。

TORMISは、米国のEPR I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）が利用されていることから、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

前節まででは、フジタモデルの風速場を適用することの妥当性について述べてきた。フジタモデルの風速場を適用することで、より現実的な竜巻影響評価を行うことが可能と考えられるが、一方で、実際の竜巻による風速場や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、地表面付近の風速場、フジタモデルの特長である地上からの飛散挙動及び竜巻が物体と衝突する際の竜巻風速に関する不確定性等について、飛来物評価の中でどのように考慮しているかを説明する。

5.1 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と、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。

(1) 物体の揚力の計算式

物体が空中にある場合、物体に作用する力は、ガイドの飛来物運動モデル⁽³⁾⁽⁴⁾と同様に、物体は図 11-1 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) FD 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⁽¹⁴⁾。具体的には、物体の形状が流れ方向の軸に関して対称であっても、図 11-2 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。

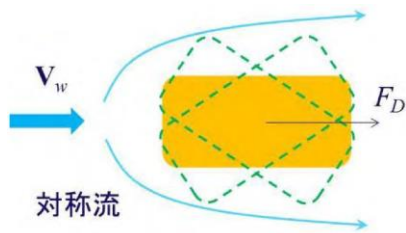


図 11-1 空中で物体へ作用する力

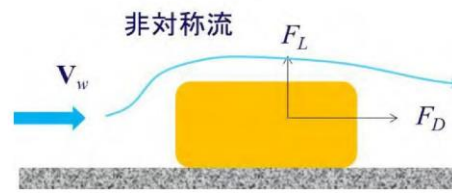


図 11-2 地面付近で物体へ作用する力

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⁾。

$$F_L = \frac{1}{2} \rho C_L a |\mathbf{V}_w - \mathbf{V}_M|_{x,y}^2 \quad (6)$$

ただし、 ρ は空気密度、 \mathbf{V}_M は物体の速度ベクトル、 \mathbf{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 12 の左）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 12 の右）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。

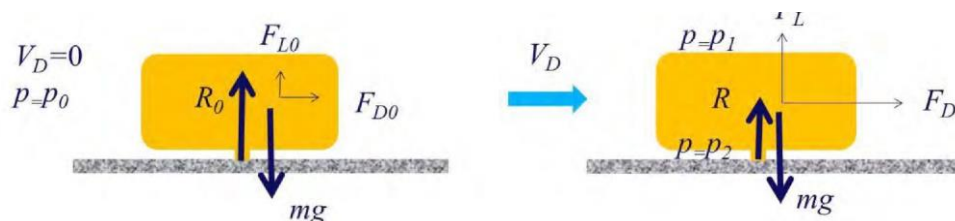


図 12 部分的に地面に接する物体に作用する力
(左：無風時，右：強風時， R_0 ， R ：無風時，強風時における垂直抗力)

(2) 揚力係数の設定

(6)式の CLa 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、 CLa 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 CDA を用いることとする。

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

ここで、 CDx 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。

物体の運動モデルを図 13 に示す。上記(9)式の考え方は、図 13 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 13 の状態 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。
- 物体が地面に置かれた状態（図 13 の状態 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 CLa のうち、物体が地面に置かれた状態（図 13 の状態 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。
- 物体が地面に置かれた状態（図 13 の状態 A）と物体がある程度浮き上がった状態（図 13 の状態 B）での評価にて、共通の係数を用いることは、地上からの物体浮上・飛散評価における実用性の観点からも望ましいこと。

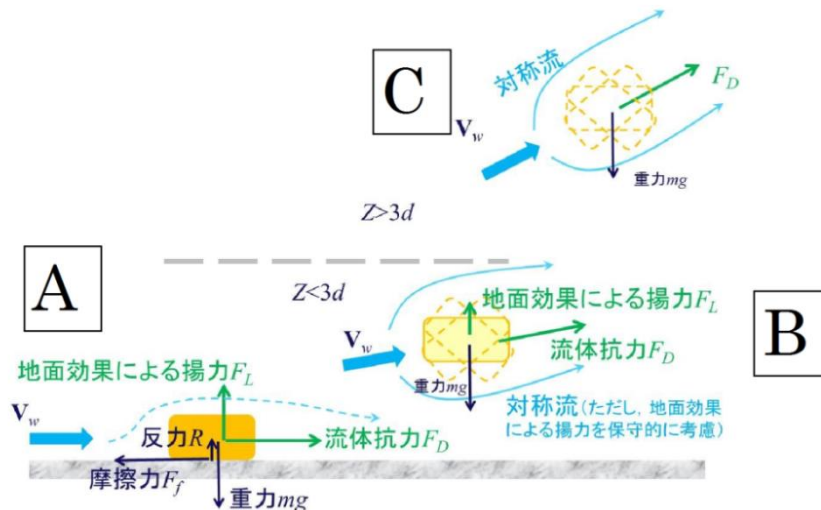


図 13 物体の運動モデルの模式図

(A : 地面上, B : $Z < 3d$ の高さの範囲, C : $Z > 3d$ の高さの範囲, ただし, $Z = z - d/2$, d : 物体高さ)

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 CDA/m と同類の CDA 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 CDA の値を比較する。（表 2）

表 2 より、 $CDA > C_L a$ の関係が成立しており、 $C_L a$ の代用として CDA の利用が適切であることが確認できる。なお、 CDA 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 $CDA = 0.66d^2$ 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 CDA 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 13 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 倍までの高さ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 13 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2 主な物体の C_{DA} と地面に置かれた物体の C_{La} (実測値) の比較

形状	物体	仕様	C_{DA}^{*1}	C_{La} (実測値)	C_{DA}/C_{La}	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 $s=16.7\text{ft.}$, 幅 $w=5.8\text{ft.}$, 高さ $d=4.3\text{ft.}$)	$2(sw+wd+ds)/3$ ($=129\text{ft.}^2$)	$1.865w_d$ ($=46.5\text{ft.}^2$)	2.65	<ul style="list-style-type: none"> 文献(16) の風洞試験 (風速 $22\sim 31\text{m/s}$, $Re=2.8\times 10^6\sim 4\times 10^6$) C_{La} が最大となる流入角での値を C_{La} (実測値) として記載
	立方体	一辺の長さ D	$2D^2$	$0.2D^2$ 程度	10 程度	<ul style="list-style-type: none"> 文献(17) の水路試験 ($Re=8000\sim 28000$) 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	長さ λ , 直径 D	$0.47D\lambda$	$0.2D\lambda$	2.35	<ul style="list-style-type: none"> 文献(16) の風洞試験 ($Re=1.3\times 10^6$) 流入方向と円柱の軸直角方向が垂直になる配置 (円柱の軸方向は地面と平行) における値を C_{La} (実測値) として記載
	角柱	長さ λ , 断面が一辺 D の正方形	$0.8D\lambda$ ($1.3D\lambda$) ^{*2}	$0.5D\lambda\sim 0.7D\lambda$ 程度	1.14~1.6	<ul style="list-style-type: none"> 文献(17) の水路試験 ($Re=8000\sim 28000$) 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直角方向が垂直となる配置 (角柱の軸方向は地面と平行) における値を C_{La} (実測値) として記載
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)	$0.66B\lambda$	0に近い値 (地面から $0.25B$ 離れた位置で $C_{La}=0.04B\lambda$)	16.5	<ul style="list-style-type: none"> 文献(18) の風洞試験 (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_{La} (実測値) として記載
	平板状 ブロック	長さ λ , 幅 B , 厚さ D	$0.66B\lambda$ $0.66(B\lambda+D(B+\lambda))^{*2}$	$0.1B\lambda$ 程度	6.6	<ul style="list-style-type: none"> 文献(19) の水路試験 ($Re=5\times 10^4$ 程度) 流入方向と平板状ブロックの長さ方向が垂直になる配置 (平板状ブロックは地面と平行) における値を C_{La} (実測値) として記載

注記*1: 柱状及び平板では微小項を無視して記載

*2: 塊状とみなせる場合

(3) 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 CLa が、飛行定数 CDA/m と同類の CDA で代用できることについて、表 2 における CLa (実測値) が竜巻における物体の飛散解析に適用可能であることについて、レイノルズ数の観点から確認を行う。

表 2 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 のオーダーにある。

ここで、実物の自動車 (Dodge Dart の諸元：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 14 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 2 の E P R I 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 92m/s の直径 0.1m のパイプのレイノルズ数は $Re=6.0 \times 10^5$ 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、 $Re=3.0 \times 10^4$ から 1.0×10^5 程度までの揚力係数の測定試験が行われている。

E P R I の風洞試験と電力中央研究所の風洞試験には、レイノルズ数条件に大きな違いがあるが、図 15 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 CL と見附面積 a の積 CLa はレイノルズ数にほとんど依存せず、表 2 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。

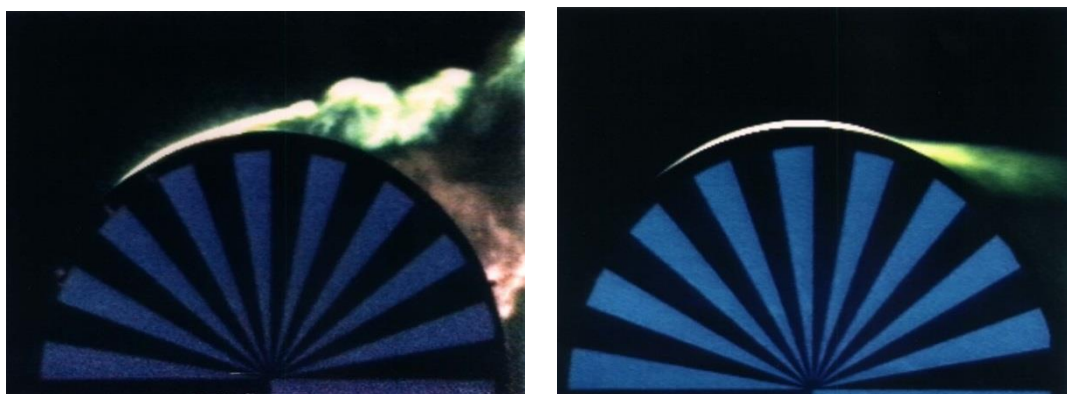


図 14 可視化した円柱周りの流れ
(左： $Re \approx 4.0 \times 10^4$ ，右： $Re \approx 2.0 \times 10^5$)

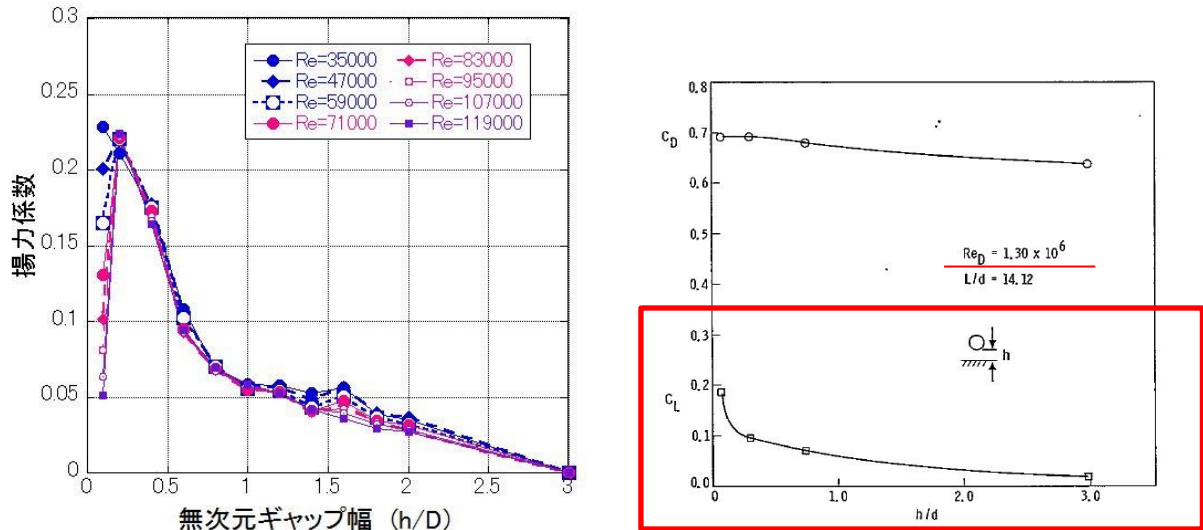


図 15 (左) 電力中央研究所の風洞試験 ($Re=3.0 \times 10^4 \sim 1.0 \times 10^5$) と (右) E P R I の風洞試験⁽¹⁶⁾ ($Re=1.3 \times 10^6$) で得られた円柱揚力係数

(4) 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⁾⁽²²⁾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 $3d$ の高さとなった時に消滅すると仮定する。

具体的には、地面から z の距離 (高さ) 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する。(Z : 物体底面の高さ ($=z-d/2$))

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

ただし、 $f(Z/d)$ は、E P R I の風洞実験結果⁽¹⁶⁾⁽²²⁾を参考に、以下の反比例式とする。

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

また、以下において、塊状物体 (自動車)、柱状物体 (角柱、円柱)、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 $3d$ の高さ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、E P R I 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 16-1 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 16-2 にて、E P R I の風洞試験によって得られた揚力係数と本モデルにて代用した揚力係数の関係を示す。E P R I の風洞試験では空中での自動車の姿勢は地面設置と同じ姿勢に保たれているため、空

中においても揚力係数が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した揚力係数に近いものと考えられる。

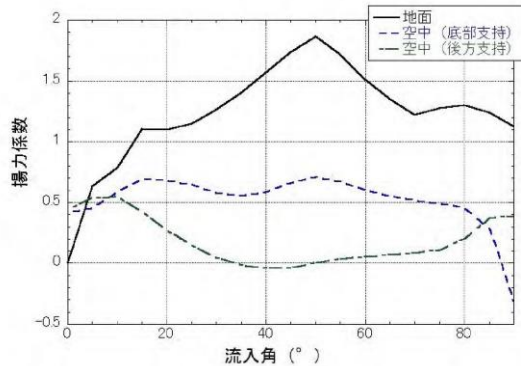


図 16-1 地面及び風洞中央に設置した自動車の揚力係数の流入角依存性

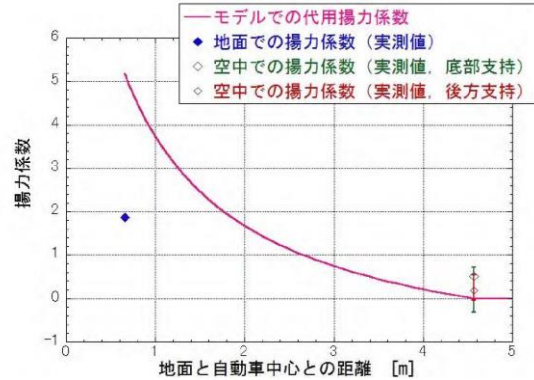


図 16-2 自動車の風洞試験による揚力係数と本モデルで代用した揚力係数の関係

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 1.6m，風速：3.0～16.5m/s）にて測定しており，図 17 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で代用した揚力式（図 17 の赤線）は保守的な結果となっていることが分かる。

円柱の揚力係数は，E P R I の風洞試験⁽¹⁶⁾にて測定しており，図 18 に示すように本モデルで代用した揚力係数（図 18 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。

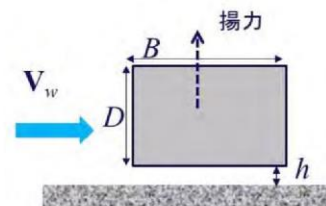
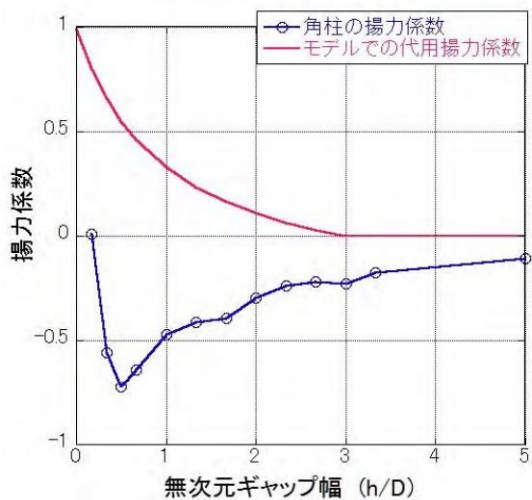


図 17 角柱の風洞試験による揚力係数と本モデルで代用した揚力係数の関係（幅 B=80mm×高さ D=60mm×模型長 1000mm）

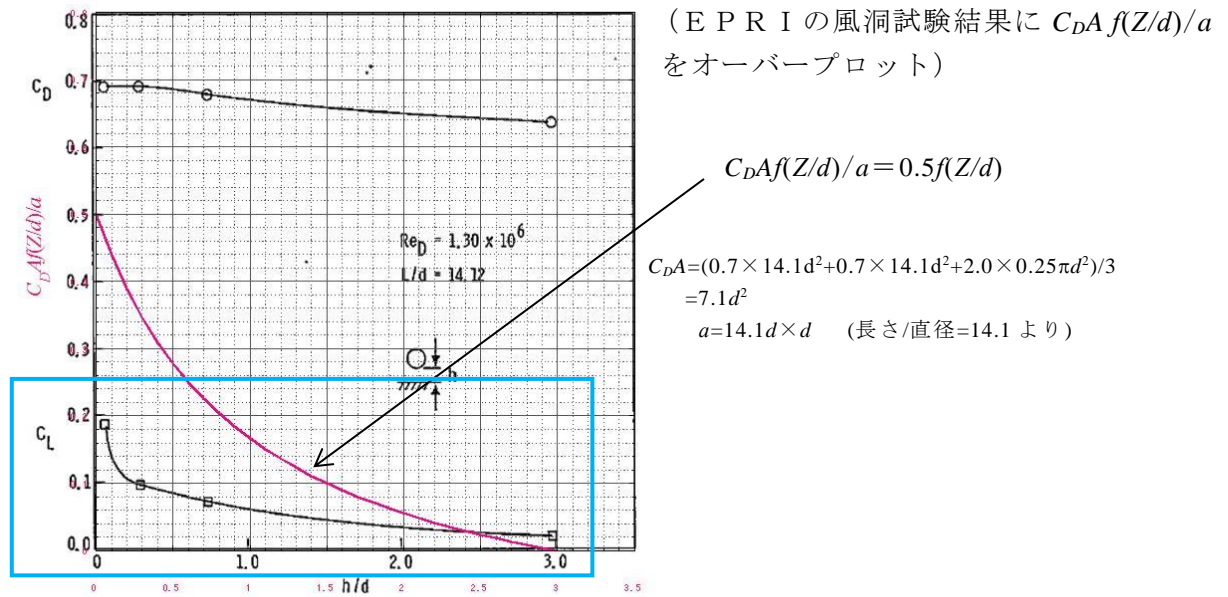


図 18 円柱の風洞試験による揚力係数と本モデルで代用した揚力係数の関係

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 19 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角の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更に小さいものと考えられる。

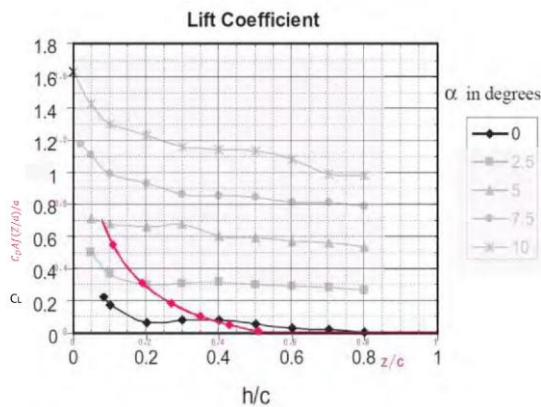


Fig. 8. Coefficient of lift at varying ground clearances for different angles of attack.

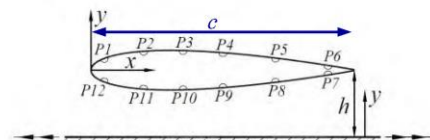


Fig. 2. Locations of pressure tappings.

図 19 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

d. 確認結果

a. ~ c. より、本モデルで代用した揚力係数は、風洞試験により得られた揚力係数よりもおおむね大きな値となっており、物体高さ d の物体にか

かる揚力は、物体底面が地面から 3 d の高さで消滅するとした仮定が適切であることが確認された。

(5) 物体の運動方程式

上記(1)～(4)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。

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

物体の位置 $\mathbf{X}_M(t)$ と速度 $\mathbf{V}_M(t)$ の時刻歴の計算には陽解法（一定加速度法）を用いる。具体的には、時刻 $t = \tau$ における物体の位置 $\mathbf{X}_M(\tau)$ と速度 $\mathbf{V}_M(\tau)$ を既知として、時刻 $t = \tau + \Delta \tau$ における物体の速度と位置を以下の式で求める。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_t で移動することを仮定しており、任意の時刻での風速場を陽的に求められるため、物体の速度 τ 位置を算出することができる。

(6) 物体の運動方程式（(13)式）に関する考察

地面上の物体（図 13 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。

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

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

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

ここで、物体の速度 $V_M=(V_{M,x}, V_{M,y}, V_{M,z})$ ，竜巻風速 $V_w=(V_{w,x}, V_{w,y}, V_{w,z})$ 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)で物体の速度 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13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物体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，設計竜巻の最大風速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20に示す。

図20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。

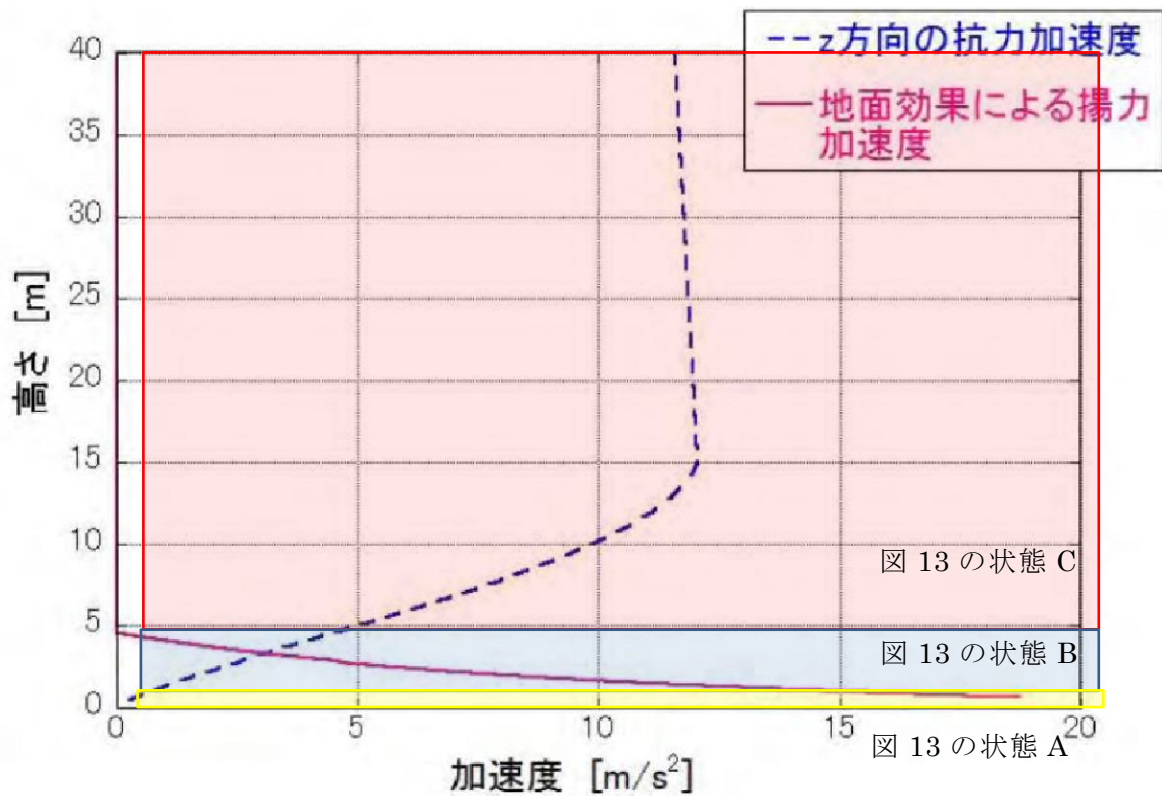


図 20 地面近傍の物体に作用する z 方向の加速度
 $(0.5 \rho C_D A / m = 0.004 \text{ [m}^{-1}\text{]}, d = 1.31 \text{ [m]})$

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 21)。

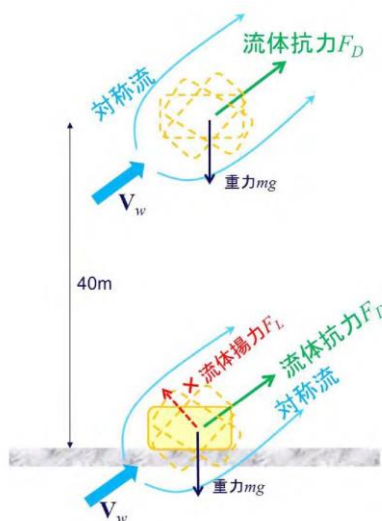


図 21 ランキン渦の場合の物体の運動モデルの模式図

5.2 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、物体を多点配置した場合の飛来速度の違いを比較する。配置の違いについて、図22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。また多点配置の場合は、竜巻半径の4倍の正方形形状の領域に 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。

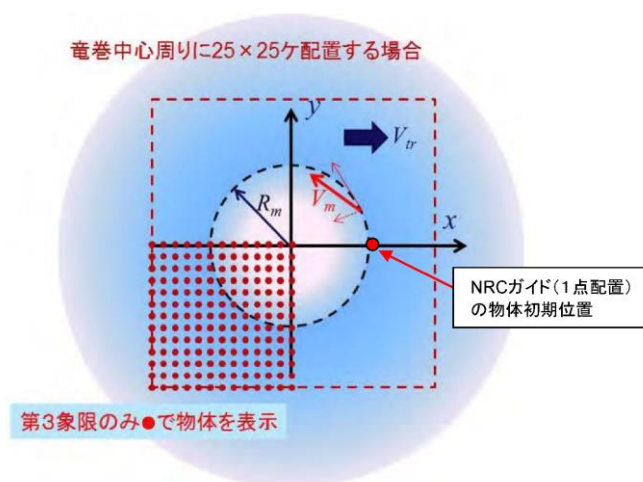


図22 飛来物評価における竜巻と物体の位置関係

評価条件として、竜巻の最大風速を 92m/s とし、フジタモデルの風速場を用いて地上から飛散させるものとする。また、ガイドの記載より竜巻の移動速度 V_t を 15m/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（5.1のCDAを質量で割った値： $\text{CDA}/\text{m}(\text{m}^2/\text{kg})$ ）を用いる。図23に比較結果を示す。

米国NRCで用いられている1点配置の手法と比較し、多点配置の手法では、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る。多点配置することで、その竜巻風速場における最大風速（最大接線風速と半径方向風速のベクトル和が竜巻移動方向と重なる点）を受ける物体が出てくるため、このような結果となったと考えられる。

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

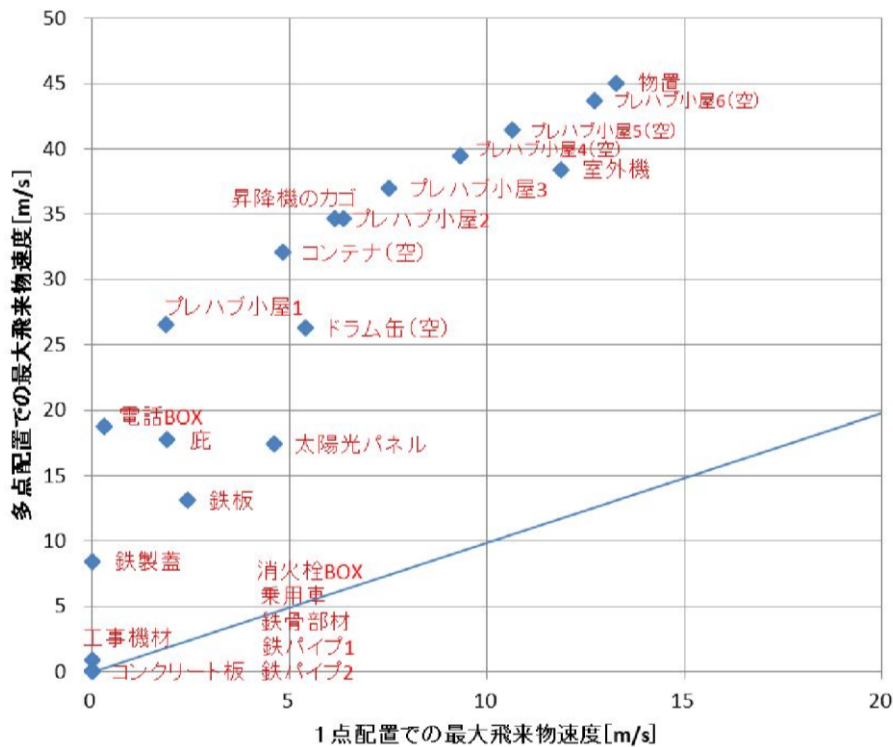


図 23 1 点配置時と多点配置時の最大飛来物速度の比較

前頁の図 22 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性についても考慮した設定となる。

図 24 に遠方から物体に接近する竜巻と、物体直上に発生する竜巻による飛散の比較イメージ図を示す。実際の竜巻に遭遇する状況（海上で竜巻が発生して上陸する場合等）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。

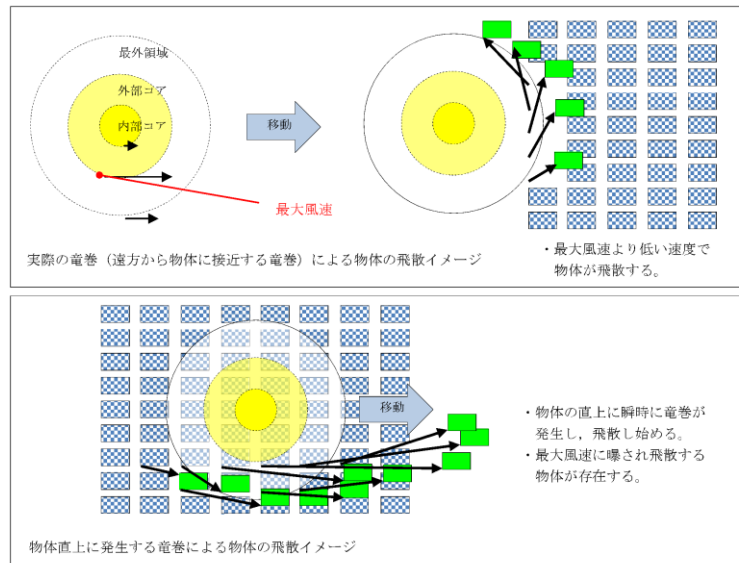


図 24 物体に接近する竜巻と物体直上に発生する竜巻の比較イメージ図

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考えられる。

5.3 フジタモデルの地表面付近の風速場に関する不確定性の考慮

(1) 至近の研究報告

竜巻の地表面付近の風速分布に関する研究として、Kosiba and Wurman 2013⁽⁶⁾は、図 25 に示すとおり地上からの高さ約 5 m における風速は地上からの高さ約 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。

ただし、地上から高さ 3 m 程度は観測していないこと等を踏まえて、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、種々の渦構造・強度の竜巻について更なる観察が必要である」としている。よって、現状では、フジタモデルの風速分布に直接関連付けられるものではないが、地表面付近の風速場の不確定性を踏まえて保守性を確保することとする。

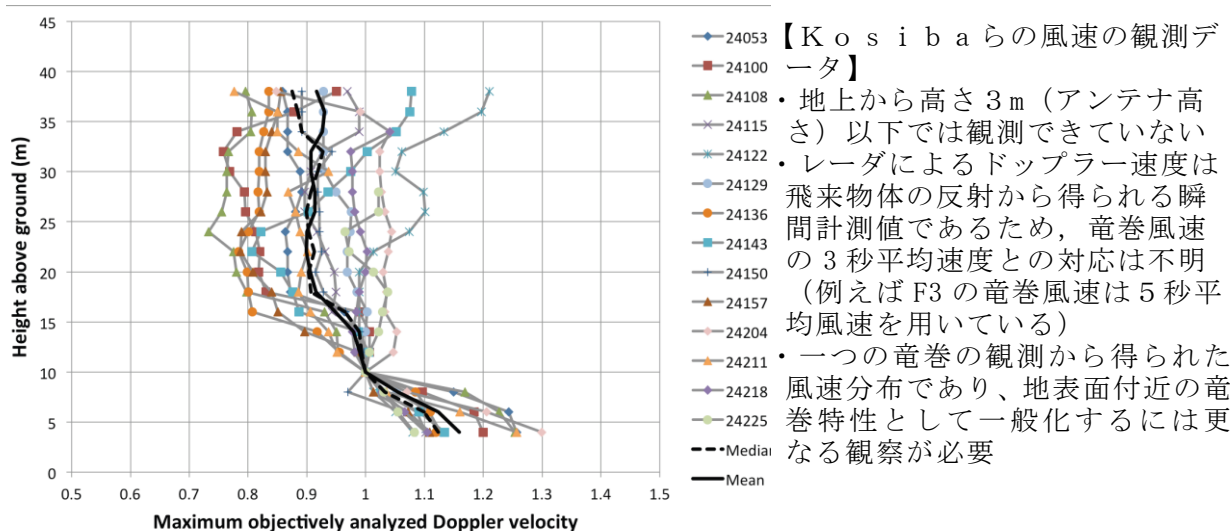


図 25 地上からの高さ（ドップラー速度）分布⁽⁶⁾

(2) 設計飛来物設定における保守性

フジタモデルを用いた飛散解析においては、物体の地上からの初期高さを高く設定したほうが地表面から解析した場合に比べて最大水平速度は高くなり、最大水平速度に依存するパラメータである運動エネルギー及び貫通力も大きくなる。

設計飛来物の設定においては、任意の地上からの高さにある鋼製材をフジタモデルを用いて飛散解析をした結果を包絡するガイド記載の鋼製材を設定しており、フジタモデルの地上付近の風速場の不確実性は考慮できている。（添付資料 3.3 別紙－6 参照。）

(3) 飛来物評価における保守性

物体の飛散距離、飛散高さ及び飛散速度についても、5.2, 5.3 に示す保守性を考慮することで実際の被災事例に対し、保守的な結果が得られることも確認している。（6.3 参照。）

(4) 地表面付近の風速場の不確実性について

フジタモデルは高さ方向に風速が変化し、地上からの高さ0mでは風速が0m/sとなるモデルである。地表面付近の風速場には不確実性があることから、物体の地上からの初期高さを変化させた感度解析を実施し、地表面に設置された物体の飛散解析の妥当性を確認する。

a. 物体の地上からの初期高さの感度解析

物体の地上からの初期高さの感度解析条件を(a), (b)に示す。

(a) 地上からの初期高さの解析範囲

地上からの初期高さの解析範囲は、フジタモデルの風速場で最大水平風速の97.7% (89.9m/s)の風速となる地上高さ5mまでの範囲とする。

(図5－2参照。)

(b) 対象飛来物について

資機材・車両及び軽量大型機材の飛来物発生防止対策エリアの設定に用いている「乗用車」及び「プレハブ小屋」を対象とする。

(c) 感度解析結果

最大飛散距離と地上からの初期高さの関係を図 26 に示す。図 26 より、乗用車、プレハブ小屋ともに、地上からの初期高さが高くなるに従い、最大飛散距離が徐々に減少する傾向にある。地上からの初期高さが増加するに従い物品に作用する初期風速も増加するが、地面効果による揚力の減少の影響のほうが大きいいため飛散距離が減少したと考えられる。以上より、飛来物発生防止対策エリアの設定に対して、地表面付近の風速場の不確定性の影響は小さく、地表面に設置した物品に対する飛散解析結果を用いることは妥当であると考えられる。

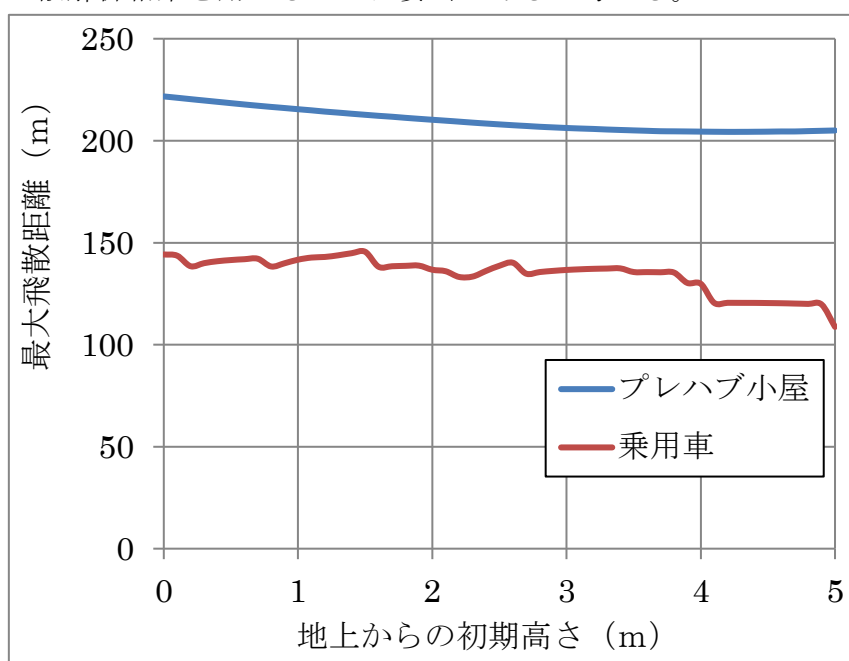


図 26 最大飛散距離と地上からの初期高さの関係

(最大風速 92m/s, 敷地の高低差: 0m, 飛来物: 乗用車 (5.2m×1.9m×2.3m, 1,890kg), プレハブ小屋 (27.0m×7.2m×3.4m, 7,500kg))

5.4 飛来物評価法のまとめ

物体の浮上・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する。

また、物体を多点配置し、その物体直上で竜巻が発生するという設定を組み合わせることにより、竜巻風速場内で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する。

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、地表面付近の風速場の不確定性を踏まえ、設計飛来物設定における保守性や飛来物評価における保守性を確保している。

以上により、フジタモデルを用いて物体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 27 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。

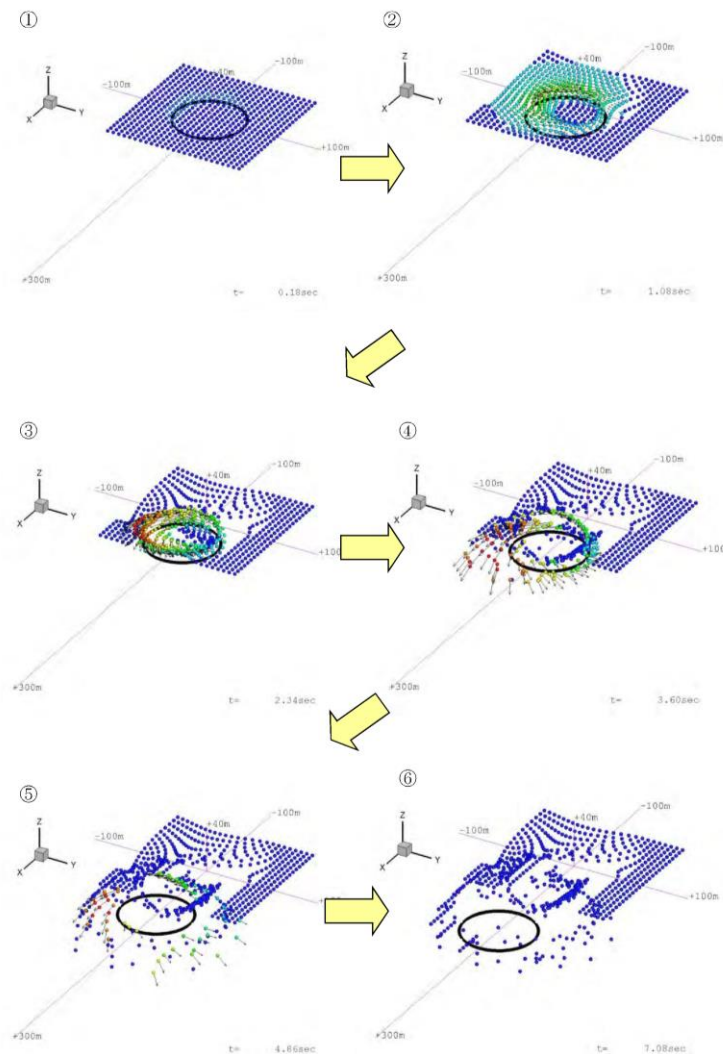


図 27 竜巻による物体の飛散イメージ

6. 実際の飛散状況に対する検証

前節までは、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の説明である。

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う。

6.1 フジタスケールとの比較

フジタスケールは、竜巻等の突風により発生した建築物や車両等の被害状況から、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被災状況を表 3 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う。その結果を表 4 に示す。

フジタモデルによる自動車飛散解析の結果は、各スケールに対応する自動車の被災状況とおおむね合致していると考えられる。なお、ランキン渦モデルを用い

た場合は、F 2 相当の風速（69m/s）で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 3 フジタスケールで示されている自動車の飛散状況

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 4 フジタモデルによる自動車の飛散解析結果

(自動車の特性：長さ 5.1m×幅 1.77m×高さ 1.31m, 質量 1814.4kg, $C_D A/m=0.0066$ m^2/kg)

フジタスケールとの対応	最大水平風速 (m/s)	竜巻接線風速 (m/s)	竜巻移動速度 (m/s)	計算結果		
				最大水平速度 (m/s)	飛散距離 (m)	飛散高さ (m)
F 2	69	59	10	8.9	4.4	0.1
F 3	92	79	13	30	35	1.8
F 4	116	99	17	51	95	4.3

6.2 米国 Grand Gulf 原子力発電所への竜巻襲来事例

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 F 3 の竜巻が襲来した⁽²³⁾。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 8～10 インチの木が折れた事例等も確認されており、図 28 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 F 2 であったと考えられている。このパイプはコンクリート・石綿製で、長さは 8 フィート、直径（内径）は 8 インチであった。このパイプの飛散状況に対して、フジタモデル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。その計算条件は過去の記録に基づき表 5 のとおりとする。



"Courtesy of HathiTrust" <http://babel.hathitrust.org/cgi/pt?id=mdp.39015037472209#view=1up;seq=65> ⁽¹⁹⁾

図 28 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）は浮上せずに転倒し、パイプが周辺 7 m～9 m に散乱。 <p>(Pieces of pipe were scattered over the area, but none traveled more than 25-30 ft. The pipe joints are 8 in. dia x 8 ft long. ⁽²³⁾)</p>
------	---

表 5 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	竜巻の最大風速	67 m/s
	最大接線風速	53.6 m/s
	移動速度	13.4 m/s
	コア半径	45.7 m
飛来物条件	直径（外径）	0.2286 m (=9 in.)
	物品高さ	0.229 m
	密度	1700 kg/m ³
	飛行定数 (C _D A/m)	0.0080 m ² /kg
初期配置	<ul style="list-style-type: none"> 物体個数：51×51本を、最大接線風速半径の4倍を1辺とする正方形内(x, y=[-2R_m, +2R_m])に等間隔配置。 設置高さ：1m（パイプ収納箱が2段重ねされた状況を想定） 	

計算結果を表6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6 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	地上からの初期高さ	計算結果		
		飛散距離	飛散高さ*2	最大水平速度
フジタモデル	1 m (地上)	1.2 m	0.0 m	4.9 m/s
ランキン渦モデル	1 m*1	42.6 m	0.34 m	30.7 m/s
	40 m	227 m		40.9 m/s

注記*1：比較のため、フジタモデルと同条件とした。

*2：初期物体高さからの飛散（浮上）高さ。

6.3 佐呂間竜巻での車両飛散事例

2006年11月7日に北海道網走支庁佐呂間町に発生した竜巻（以下「佐呂間竜巻」という。）により、4tトラックが約40m移動したことが報告されている⁽²⁴⁾。被災状況を図29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29左上画像の②）。また、4tトラックの他に2台の自動車（図29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、襲来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29 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）⁽²⁴⁾
 （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）の飛散評価を行い、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う。方法としては、下記の2通りとする。

- (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) 今回の飛散解析手法による検証

(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

(i) 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⁽²⁴⁾⁽²⁵⁾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7のように設定する。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する。

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8及び図30に示す。車両の軌跡は竜巻中心との相対位置関係に敏感であるが、各ケースとも飛散方向が実際の移動方向とおおむね合致しており、特に車両と竜巻中心との距離を20mとしたケース2では飛散距離もほぼ正確に再現されている。このように、フジタモデルを風速場とした飛散解析で、物体が地上に設置された状況からの飛散挙動が再現できることが確認できる。

表7 佐呂間竜巻の4tトラックの計算条件

竜巻条件	設計最大風速		92 m/s
	最大接線風速		70 m/s
	移動速度		22 m/s
	コア半径		20 m
飛来物条件	車種不明のため、三菱ふそう PA-FK71D の仕様を採用	長さ	8.1 m
		幅	2.24 m
		高さ	2.5 m
		重量	4000 kg
	飛行定数 ($C_D A / m$)		0.0056 m 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 地上からの初期高さ0m 		

表8 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
1	22 m	45.4 m	2.8 m	25.8 m/s
2	20 m	35.5 m	2.3 m	22.2 m/s
3	18 m	25.9 m	1.7 m	18.8 m/s

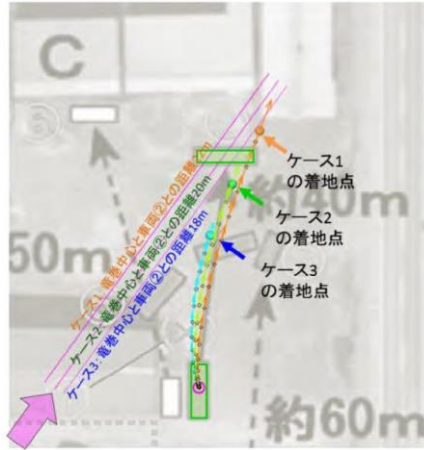


図 30 フジタモデルによるトラック飛散の再現解析結果

(ii) 乗用車の飛散解析

白い乗用車（図 29 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する。

白い乗用車の計算条件について、表 9 に示す。

表 9 佐呂間竜巻の白い乗用車の計算条件

竜巻条件	表 7 と同様	
飛来物条件	長さ*1	4.4 m
	幅*1	1.7 m
	高さ*1	1.5 m
	飛行定数 (CDA/m)	0.0097 m ² /kg
初期配置等	<ul style="list-style-type: none"> ・物体個数：1 台 ・地上からの初期高さ：0 m (地上) ・「竜巻は遠方から物体に近づくが、風速 60m/s 以下では浮上しない」ことを条件として付加 	

注記* 1：車種不明のため、トヨタカローラを仮定。

白い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 10 及び図 31 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 29 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る。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 29 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。

表 10 佐呂間竜巻での白い乗用車の飛散計算結果

解析 ケース	白い乗用車と竜巻 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
1	22m	51.9 m	3.6m	28.9 m/s
2	20m	43.5 m	3.4m	24.7 m/s
3	18m	34.7 m	2.9m	21.1 m/s

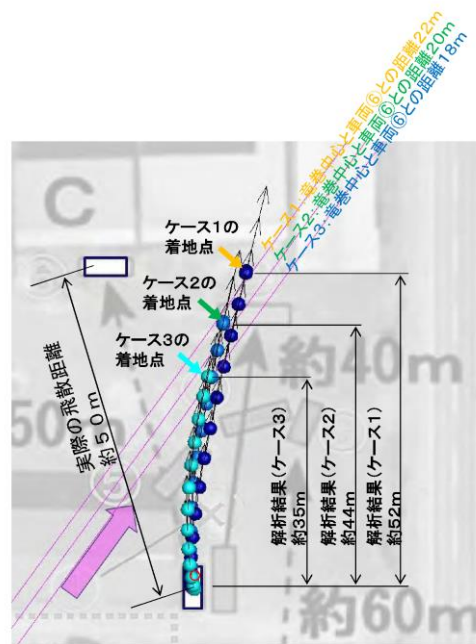


図 31 フジタモデルによる白い乗用車飛散の再現解析結果

(iii) 多点配置等を考慮した場合の竜巻評価の影響

多点配置等を考慮した場合の飛散解析手法を，前述の佐呂間竜巻における4tトラックの被災事例に適用し，佐呂間竜巻での実際の被災状況（移動距離等）の結果を比較した。

多点配置等を考慮した場合の飛散解析手法では，多数配置した物体それぞれがとる最大水平速度のうち，最も大きな値を設計値として用いる。そこで，物体個数は51×51個とし，竜巻半径の4倍を一辺とする正方形内に等間隔で地面レベルに物体を配置した。計算条件を表11に示す。

図32(a)に0.1s毎の物体の軌跡（水平移動距離と飛散高さの関係）を，図32(b)に水平移動距離と物体の水平速度の関係を示す。これらの図から，物体の最大水平速度は39.9m/s，最大飛散高さは5.3m，最大飛散距離は86.5mとなっている。実際の被災状況と多点配置等を考慮した場合の飛散解析手法による解析結果の比較を表12に示す。解析

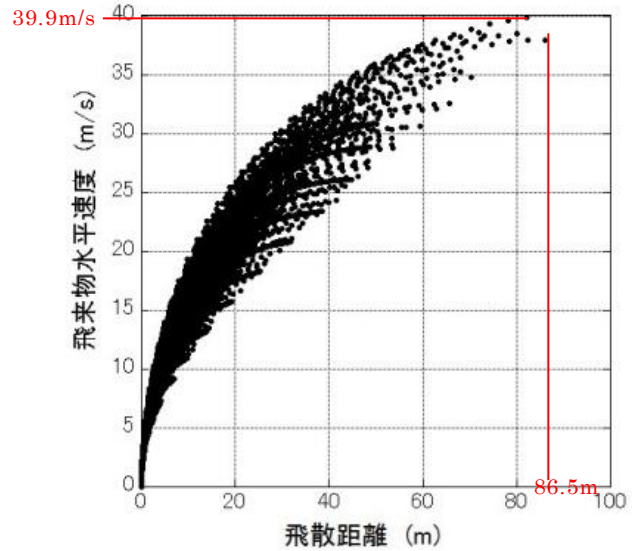
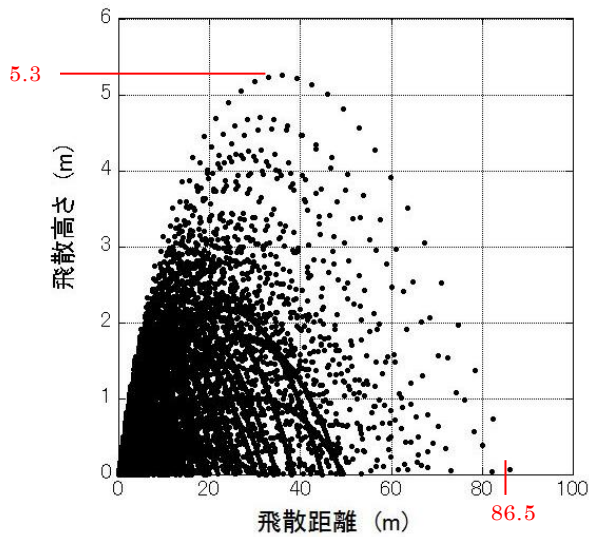
結果は佐呂間竜巻でのトラックの被災状況に対して保守性があることが確認できる。

表 11 多点配置時の計算条件

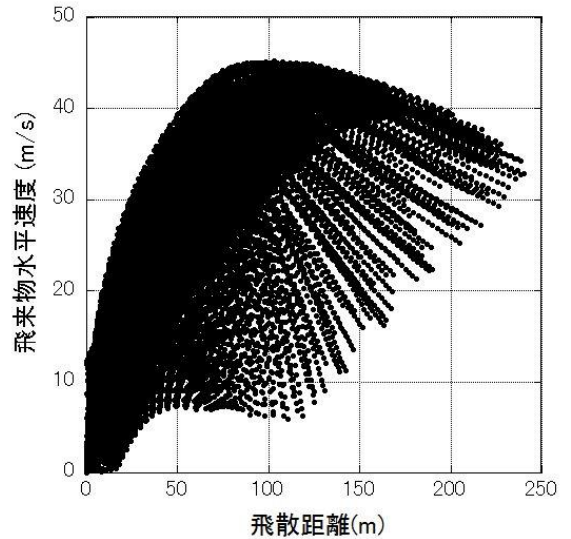
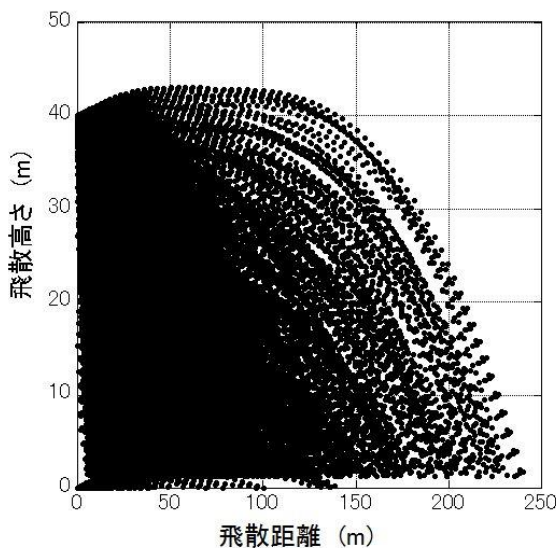
竜巻条件	表 7 と同様
飛来物条件	表 7 と同様
初期配置等	<ul style="list-style-type: none"> ・ 物体個数：51×51 台を，最大接線風速半径の 4 倍を 1 辺とする正方形内（$x, y = [-2R_m, +2R_m]$）に等間隔配置。 ・ 地上からの初期高さ：0m（地上）

表 12 実際の被災状況と多点配置等を考慮した場合の飛散解析手法の結果の比較

	飛散距離	飛散高さ	最大水平速度
計算結果 (TONBOS)	86.5 m	5.3 m	39.9 m/s (約 144 km/hr)
実際の被災 状況	約 40 m	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 ⁽²⁴⁾ ，被災したトラックが地面から 5.3 m 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 ⁽²⁴⁾ ，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 144 km/hr）を遙かに下回るものと推察できる。



(a) 物体の軌跡（水平移動距離と飛散高さの関係） (b) 水平移動距離と水平速度の関係（フジタモデル，地上）



(a) 物体の軌跡（水平移動距離と飛散高さの関係） (b) 水平移動距離と水平速度の関係（参考：ランキン渦モデル，地上 40 m）

図 32 多点配置等を考慮した場合の飛散解析手法による解析結果

(b) 今回の飛散解析手法による検証⁽²⁶⁾

ここでは、今回の飛散解析手法で、前述の佐呂間竜巻における 4 t 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。

(i) 4 t トラックの飛散解析

計算条件について表 13 に示す。竜巻条件としては、設計竜巻の最大風速を 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_f を 14m/s（最大風速の 15%）、竜巻コア半径 R_m を 30m とする。

表 13 島根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	92 m/s
	最大接線風速	78 m/s
	移動速度	14 m/s
	コア半径	30 m
飛来物条件	表 7 と同様	
初期配置	<ul style="list-style-type: none"> ・ 物体個数：51×51 台を，最大接線風速半径の 4 倍を 1 辺とする正方形内 ($x, y = [-2R_m, +2R_m]$) に等間隔配置。 ・ 地上からの初期高さ：0 m (地上) 	

表 14 に実際の被災状況と，今回の飛散解析手法による結果の比較を示す。また，図 33 に被災後の 4 t 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，4 t 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 となる。

実際の 4 t 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る。また，飛散高さや最大水平速度については，直接の比較はできないものの，4 t トラックの乗員 2 名が存命であったこと，被災後の 4 t トラックがほぼ元の外形をとどめていること等から，今回の飛散解析手法で評価をした場合でも，実際の被災状況と比較して妥当な結果となるものと考えられる。

なお，参考として同様の検証をランキン渦モデルでも実施しており，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 14 実際の被災状況と今回の飛散解析手法による評価結果の比較（4 t トラックの場合）

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)	63.4 m	3.6 m	36.0 m/s (約 130 km/hr)
ランキン渦モデル (地上*1)	193.7 m	11.7 m	43.9 m/s
ランキン渦モデル (40 m)	254.9 m	11.7 m	43.9 m/s
実際の被災状況	約 40 m	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 ⁽²⁴⁾ 、被災したトラックが地面から3.6 m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 ⁽²⁴⁾ 、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 130 km/hr）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する。

*2：初期物体高さからの飛散高さ



図 33 竜巻による被災後の 4 t トラックの様子^{(24) (25)}

(ii) 乗用車（白）の飛散解析

4 t トラックの場合と同様に、今回の飛散解析手法で白い乗用車の飛散解析を行った場合の結果を表 15 に示す。

表 15 実際の被災状況と今回の飛散解析手法による評価結果の比較（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
ランキン渦モデル (40m)	305.8m	39.4m	49.6m
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）と比較するため、フジタモデルと同条件とする。

* 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

「5.2 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、物体と外部事象防護対象施設の間に、障害物となるフェンス等がある場合には、横滑りや転がった物体が外部事象防護対象施設に到達することは阻止される。

以上より、飛散しない物体が横滑りや転がりにより、障害物の影響を受けず、外部事象防護対象施設と衝突することが想定される場合については、横滑りや転がった物体の影響が設計飛来物の影響に包含されることを確認し、包含されない場合には固縛等の措置を実施する。固縛等の措置に当たっては、フジタモデルの風速場より求まる風荷重に、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もとに考案された風速場モデルであり、米国DOEの重要施設に対する設計基準の作成の際にも用いられている。フジタモデルは、他のモデルではできなかった地上からの物体の浮上を現実的に評価することができる点が大きなメリットである。

これは、「6.3 佐呂間竜巻での車両飛散事例」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保守性を確保した上で、「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) 今回の飛散解析手法による検証」では、本評価手法を用いることでフジタモデルにおいても実際の飛散状況に対して、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、より正確に把握できることである。竜巻飛来物の影響（浮上の有無、飛散高さ、飛散距離、最大速度等）を正確に捉えることにより、飛来物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、適切な保守性を確保した上で実効性の高い竜巻防護対策を実施することが可能となると考えられる。

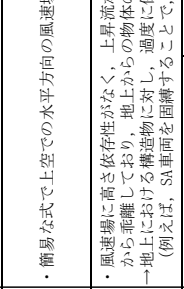




評価全体として一定の保守性を確保しつつ、適切な竜巻対策によりプラント全体の安全性を向上させるため、当社の竜巻影響評価については、フジタモデルを適用することとする。

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 30 年 11 月一部改正.
- (2) U. S. NUCLEAR REGULATORY COMMISSION: REGULATORY GUIDE 1.76, 2007: Design-Basis Tornado and Tornado Missiles for Nuclear Power Plant, Revision 1.
- (3) Simiu, E. and Cordes, M., Tornado-Borne Missile Speeds, NBSIR 76-1050, 1976.
- (4) 東京工芸大学 (2011) :平成 21~22 年度原子力安全基盤調査研究(平成 22 年度)竜巻による原子力施設への影響に関する調査研究, 独立行政法人原子力安全基盤機構.
- (5) Fujita, T. T. (1978) Workbook of tornadoes and high winds for engineering applications. SMRP Research Paper 165, Department of Geophysical Sciences, University of Chicago, 142pp.
- (6) Karen A. Kosiba and Joshua Wurman, 2013: The Three-Dimensional Structure and Evolution of a Tornado Boundary Layer. Wea. Forecasting, 28, 1552-1561.
- (7) Maruyama, T. (2011) Simulation of flying debris using a numerically generated tornado-like vortex. J. Wind Eng. Ind. Aerodyn., 99, 249-256.
- (8) U. S. Department of Energy, Natural Phenomena Hazards Design and Evaluation Criteria for Department of Energy Facilities, DOE-STD-1020-2002, 2002. (<https://www.standards.doe.gov/standards-documents/1000/1020-astd-2002/@@images/file>)
- (9) Malaeb, D. A., Simulation of tornado-generated missiles. M.S. thesis, Texas Tech University, 1980.
- (10) P.-H. Luan, Estimates of Missile Speeds in Tornadoes, M.S. thesis, Texas Tech University, 1987.
- (11) J. R. McDonald, Rationale for Wind-Borne Missile Criteria for DOE facilities, UCRL-CR-135687, Lawrence Livermore National Laboratory, 1999. (<https://e-reports-ext.llnl.gov/pdf/236459.pdf>)
- (12) McDonald, J. R., T. Theodore Fujita: His contribution to tornado knowledge through damage documentation and the Fujita scale. Bull. Amer. Meteor. Soc., 82, pp.63-72, 2001.
- (13) NUREG-1827 Safety Evaluation Report for the National Enrichment Facility in Lea County, New Mexico (Docket No. 70-3103)
- (14) 江口譲, 杉本聡一郎, 服部康男, 平口博丸, 竜巻による物体の浮上・飛来解析コード TONBOS の開発, 電力中央研究所 研究報告 N14002, 2014.
- (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, ReportNP-748, 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および棧粗度の流体力, 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、およ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 譲, 西原 崇, 水流動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) 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. Wind Eng. Ind. Aerodyn.*, Vol.80, pp.263-286, 1999.
- (23) 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.
- (24) 札幌管区气象台: 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.html> にて閲覧可能。)
- (25) 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, 49, 2006.
(<http://www.kenken.go.jp/japanese/contents/activities/other/other.html>)
- (26) 江口譲, 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.

「フジタモデル」及び「ランキン渦モデル」並びに「それぞれの風速場モデルを用いた際の飛来物評価手法」の比較

風速場モデル	フジタモデル（及び同モデルを用いた際の飛来物評価手法）	ランキン渦モデル（及び同モデルを用いた際の飛来物評価手法）																								
<p>各風速場モデルの概要</p>	<p>フジタモデル</p>  <ul style="list-style-type: none"> • Fujitaにより実観測に基づき考案された竜巻風速場モデルであり、実際に近い風速場構造を有する • 半径方向に（内部コア、外部コア、最外領域）の3つの領域で構成され、外部コアに上昇風速を有する • 接線風速や上昇風速に蓋さ依存性がある • 米国D0E重要施設の基準において、竜巻飛来物速度、飛散高さの設定に使用 	<p>ランキン渦モデル</p>  <ul style="list-style-type: none"> • 簡易な式で上空での水平方向の風速場を表現 • 上昇流は全領域に存在 • 接線風速や上昇風速に蓋さ依存性がなく、地面から吹き出しが生じる流れとなっている • 飛散評価を行う場合、地上からの物体の浮上・飛散挙動を表現できないうえに、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 • 米国NRC Regulatory Guide 1.76にて採用 																								
<p>メリット</p>	<ul style="list-style-type: none"> • 地面に置かれた物体へ影響を与える風速場をよく表現でき、地上からの物体の浮上・飛散解析が可能 →地上における構造物に対する力や運動を表現するのに適しているモデルであり、防護対策や固縛処置の範囲や強度について、柔軟性の高い対策とすることが可能 	<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可能 																								
<p>デメリット</p>	<ul style="list-style-type: none"> • 地表付近の風速場に不確定性があるため、飛来物評価において不確定性の考慮が必要。 	<ul style="list-style-type: none"> • 風速場に高さ依存性がなく、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、実現象から乖離しており、地上からの物体の浮上・飛散挙動を表現できない →地上における構造物に対し、過度に保守的な防護対策や固縛対策が必要となる。（例えば、SA車両を固縛することで、機動性が損なわれる） 																								
<p>主なパラメータ (設計竜巻の最大風速92m/sの場合)</p>	<table border="1"> <tr><td>竜巻の移動速度 V_T</td><td>14 (m/s)</td></tr> <tr><td>最大接線風速 V_{Rm}</td><td>78 (m/s)</td></tr> <tr><td>最大接線風速半径 R_m</td><td>30 (m)</td></tr> <tr><td>最大気圧低下量 ΔP_{max}</td><td>64 (hPa)</td></tr> <tr><td>最大気圧低下率 $(dp/dt)_{max}$</td><td>42 (hPa/s)</td></tr> <tr><td>内部コア半径と外部コア半径の比 v</td><td>0.3</td></tr> <tr><td>流入層高さ H_I</td><td>15 (m)</td></tr> </table> <p>評価ガイドの値や式より算出</p>	竜巻の移動速度 V_T	14 (m/s)	最大接線風速 V_{Rm}	78 (m/s)	最大接線風速半径 R_m	30 (m)	最大気圧低下量 ΔP_{max}	64 (hPa)	最大気圧低下率 $(dp/dt)_{max}$	42 (hPa/s)	内部コア半径と外部コア半径の比 v	0.3	流入層高さ H_I	15 (m)	<table border="1"> <tr><td>竜巻の移動速度 V_T</td><td>14 (m/s)</td></tr> <tr><td>最大接線風速 V_{Rm}</td><td>78 (m/s)</td></tr> <tr><td>最大接線風速半径 R_m</td><td>30 (m)</td></tr> <tr><td>最大気圧低下量 ΔP_{max}</td><td>75 (hPa)</td></tr> <tr><td>最大気圧低下率 $(dp/dt)_{max}$</td><td>35 (hPa/s)</td></tr> </table> <p>評価ガイドの値や式より算出</p>	竜巻の移動速度 V_T	14 (m/s)	最大接線風速 V_{Rm}	78 (m/s)	最大接線風速半径 R_m	30 (m)	最大気圧低下量 ΔP_{max}	75 (hPa)	最大気圧低下率 $(dp/dt)_{max}$	35 (hPa/s)
竜巻の移動速度 V_T	14 (m/s)																									
最大接線風速 V_{Rm}	78 (m/s)																									
最大接線風速半径 R_m	30 (m)																									
最大気圧低下量 ΔP_{max}	64 (hPa)																									
最大気圧低下率 $(dp/dt)_{max}$	42 (hPa/s)																									
内部コア半径と外部コア半径の比 v	0.3																									
流入層高さ H_I	15 (m)																									
竜巻の移動速度 V_T	14 (m/s)																									
最大接線風速 V_{Rm}	78 (m/s)																									
最大接線風速半径 R_m	30 (m)																									
最大気圧低下量 ΔP_{max}	75 (hPa)																									
最大気圧低下率 $(dp/dt)_{max}$	35 (hPa/s)																									
<p>飛来物評価手法</p>	<p>物体の浮上・飛来モデル</p>  <ul style="list-style-type: none"> • 竜巻が物体に与える速度等に関する設定 →飛来物発生防止対策においては、物体の地上からの初期高さ0m及び15mとした場合の飛散解析を基に、1. 地表面に設置された物体の飛散解析結果を用いたエリア設定の妥当性を確認 	 <ul style="list-style-type: none"> • 竜巻に対する物体の場所依存性を考慮し、風速場における物体の中から、最大の飛来物速度や飛来距離を設定 →実際に竜巻が遠方から近づき、低い風速に曝され飛来することになるが、物体を強制的に高速域に配置し、物体が瞬間に最大風速を受けるよう設定 																								
	<p>物体の浮上・飛来モデル</p>  <ul style="list-style-type: none"> • 物体が地面に置かれている状態 • 物体が地面に近い状態 ($z < 30$) • 物体が空中にある状態 ($z > 30$) <p>物体に働く揚力・抗力</p> <ul style="list-style-type: none"> • 地面の存在により物体上面と下面の流れが非対称となること • 生じる地面効果による揚力を考慮 (左図A/B) • 流れの速度方向に平均抗力を考慮 (左図A~C、揚力係数) • 但し地面付近では抗力の影響は小さい • 地面から浮き上がる際の物体挙動を理論的に評価することは困難であるため、翼のような既知な形状を除き保守的となるよう、風洞実験の結果を踏まえ、代用の揚力係数を設定 • 揚力係数は風の受け方や高さによって異なることを踏まえ、流体力学レイノルズ数や高度を変化させた場合でも、代用揚力係数が実測値より保守的に設定されていることを確認 	<p>物体の浮上・飛来モデル</p>  <ul style="list-style-type: none"> • 物体が地面に置かれている状態 • 物体が空中にある状態 <p>物体に働く揚力・抗力</p> <ul style="list-style-type: none"> • 物体に働く揚力・抗力 • 地面より非現実的な風の噴出が発生し、地面効果は整理しにくい • 流れの速度方向に平均抗力を考慮 (左図D/E) • 揚力係数 • 揚力効果による揚力は考慮していないことから、揚力係数の設定はしていない 																								

フジタモデルのパラメータ設定等について

1. 適用するフジタモデルについて

フジタモデルのパラメータ設定については、フジタワークブック（文献(1)）において、単一渦型のDBT-77モデル（文献(1)第6章）と複数の小さな吸込渦（suction vortices）を有する多重渦型のDBT-78モデル（文献(1)第7章）について記載されている（図1参照）。

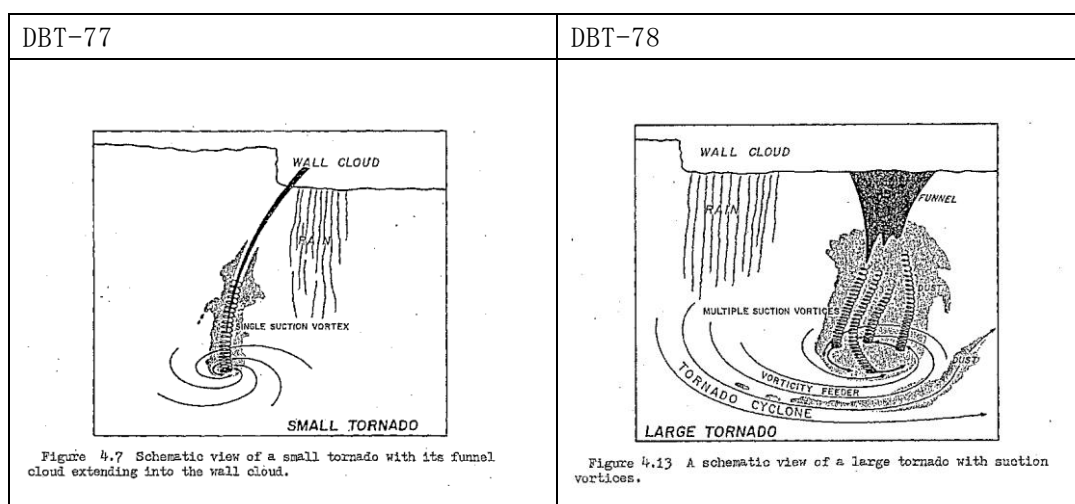


図1 フジタモデル「DBT-77」と「DBT-78」のモデル図（文献(1)）

米国エネルギー省の管理するエネルギー施設（DOE施設）に対する竜巻飛来物の検証を行ったローレンス・リバモア国立研究所報告書（文献(2)）においては、「多重渦型のDBT-78モデルで考慮されている吸込渦はすぐに減衰するので、大多数の専門家は竜巻被災の重要因子ではないと考えている」と述べており、単一渦型のフジタモデルDBT-77を飛来物評価の竜巻風速場として選定している。以上のことから、今回の竜巻影響評価においてもDBT-77モデルを用いている。（なお、文献(1)において、DBT-78モデルは、最大風速や発生率がモデル化されているのみであり、飛散解析に必要となる風速場に関する数式が明確となっていない。）

また、米国REG 1.76（文献(3)）はDBT-78モデルの竜巻半径を採用した場合は、改訂前（2007年以前）から米国REG 1.76で採用されている竜巻半径（45.7m）よりも大きな半径となり、圧力の時間変化率は半径に反比例して大きくなるため、改訂前の半径（45.7m）のままするとの記述があるが、今回の竜巻影響評価では外部コア半径を30mとしているため、米国REG 1.76よりも圧力の時間変化率を保守的に評価している。

最大風速が同じ場合、DBT-78モデルはDBT-77モデルに比べ竜巻半径は大きくなるが、高速域の大きさはDBT-77モデルの方がDBT-78モデルに比べ大きくなるため物体は加速されやすく、飛散解析においては保守的である

ことから、当社の竜巻影響評価においては、単一渦型のDBT-77モデルを適用している。

2. 入力パラメータの設定について

文献(1)において、単一渦型のDBT-77の入力パラメータは、最大接線風速 V_{Rm} 、外部コア半径 R_m 及び移動速度 V_T の3つであり、これらの入力値の制約に係る記載はなく、竜巻影響評価ガイドに基づき、 $V_{Rm}=85\text{m/s}$ 、 $R_m=30\text{m}$ 、 $V_T=15\text{m/s}$ を設定している。

竜巻影響評価ガイドにおいては、ランキン渦モデルを仮定して、観測された被害幅から最大接線風速半径 R_m を推定している。竜巻によって被害が生じる風速を V_0 とした場合、 R_m を超えた範囲では、風速 $V_0=V_{Rm} \cdot (R_m/r_0)$ と表せるため、 V_0 と、被害幅 r_0 、及び最大接線風速 V_{Rm} が分かれば最大接線風速半径 R_m を得ることができる。(図2)

フジタモデルでは、ランキン渦モデルと異なり高さによって風速が変化するが、ある任意の高さの風速分布はランキン渦モデルと同様となる(図2と同じ)ため、ランキン渦を仮定して設定した外部コア半径を用いても問題ないと考える。

例えば、東京工芸大報告書⁽⁴⁾p.163の仮定2より、F3あるいはF3に近いF2竜巻(最大風速 $V_m=70\text{m/s}$)の被害幅250mを基にランキン渦モデルを仮定する場合、竜巻半径の外側では $V=V_m R_m/r$ が成立するので、 V に被害をもたらす風速である 17m/s を、 r に被害幅(250m)に接する円の半径である 125m を代入すると $R_m=30\text{m}$ を得る。

一方、フジタモデルの水平風速 V は接線風速と径方向風速を合成したものであるので、外部コア半径の外側では水平風速 V は以下で与えられる。

$$V = \sqrt{V_\theta^2 + V_r^2}$$

$$= F_r(r)F_h(z)V_m \sqrt{1 + \tan^2 \alpha_0}$$

ここで、 $F_r(r) = \frac{R_m}{r}$ 、 $F_h(z) = \begin{cases} z^{k_0} & (z < 1) \\ \exp(-k(z-1)) & (z \geq 1) \end{cases}$

$$\tan \alpha_0 = \begin{cases} -A(1 - z^{1.5}) & (z < 1) \\ B\{1 - \exp(-k(z-1))\} & (z \geq 1) \end{cases}$$

フジタモデルでは、ランキン渦モデルと異なり高さによって風速が変化するが、外部コア半径の内側では r に比例して風速が大きくなり、外部コア半径の外側では r に反比例して小さくなる点ではランキン渦モデルと同様であり、竜巻半径と風速の関係は図2の通りとなる。

また、接線風速 V が最大となる流入層の上端 ($z=1$) では、 $F_h(z)=1$ 、 $\tan \alpha_0=0$ となり、竜巻外部コア半径の外側ではランキン渦モデルと同様に $V=V_m R_m/r$ が近似的に成立する。従って、ランキン渦と同じ竜巻半径を用いることができると考えられる。

流入層高さ H_i は、外部コア半径 $R_m=30\text{m}$ の場合、 $H_i=15\text{m}$ ($i=0.501$) となり、文献(4)の図2.2.3.10における流入層高さ と 竜巻半径の比 ($i=0.4$ 程度) や、Kosiba⁽⁵⁾により示されている流入層高さ ($H_i=10\sim 14\text{m}$ 以下) と概ね同じである。

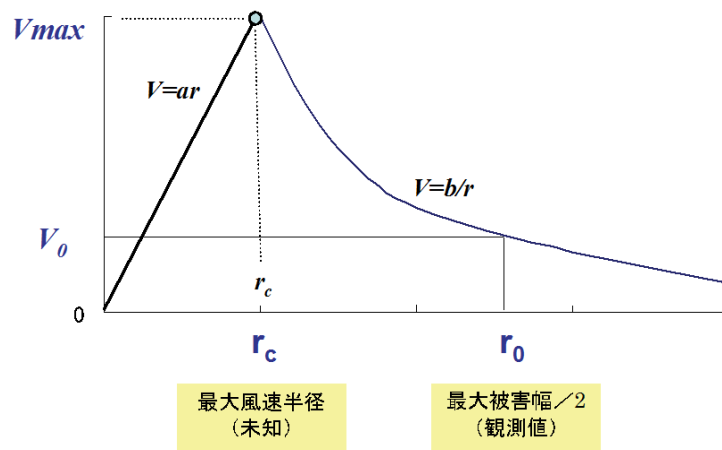


図2 ランキン渦の風速分布と竜巻スケールの関係

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

文献(2)Rationale for Wind-Borne Missile Criteria for DOE facilities, UCRL-CR-135687, Lawrence Livermore National Laboratory, 1999

文献(3)U.S. Nuclear Regulatory Commission, Design-basis tornado and tornado missiles for nuclear power plants, Regulatory Guide 1.76, Revision 1 (2007).

文献(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.

文献(5) Karen A. Kosiba Joshua Wurman The three-dimensional structure and evolution of a tornado boundary layer

竜巻影響評価と竜巻モデルの関係

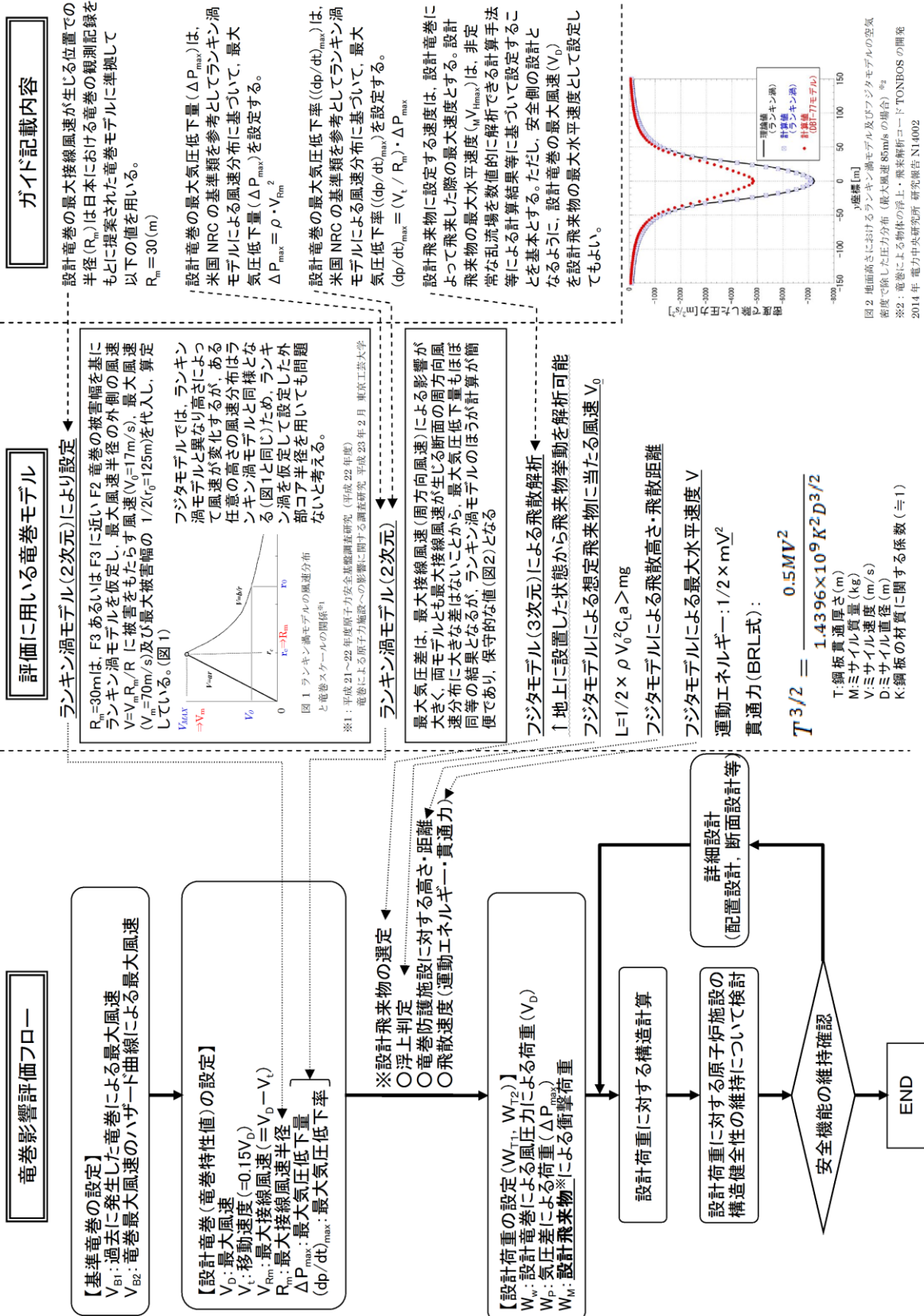


図1 竜巻影響評価と竜巻モデルの関係

6. 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

6.1 極小飛来物の衝突に対する施設への影響について

砂利等の極小飛来物及び砂等の粒子状の極小飛来物について、外部事象防護対象施設への影響の有無を確認する。

砂利及び砂等の飛来物による外部事象防護対象施設への影響としては、

- (1) 砂利の極小飛来物による貫通及び衝突
 - (2) 砂等の粒子状の極小飛来物による目詰まり、閉塞及び噛込み
- が考えられることから、これらについて評価する。

6.1.1 砂利のような極小飛来物による貫通及び衝突

(1) 極小飛来物の貫通力

砂利の極小飛来物の鋼板に対する貫通力について、以下に示す BRL 式を用いて算出し、極小飛来物の貫通力が無視し得ることを確認した。

極小飛来物として砂利を対象に、鋼板に対する貫通力を BRL 式により算出した結果を表 6.1.1-1 に示す。いずれも貫通力は 1mm 未満であり、鋼板への影響は無視し得るものである。

表 6.1.1-1 極小飛来物の鋼板貫通力

飛来物	サイズ (m)	重量 (kg)	速度 (m/s)	鋼板貫通厚さ (mm)
砂利	0.04×0.04×0.04	0.2	54	0.9

(2) 極小飛来物による衝撃荷重 W_M

砂利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極めて短い片振幅波形となるため、設備に有意な変位（応力）が生じないためである。

このような衝撃により伝達される荷重については、機械工学便覧の「過渡振動・衝撃」に、図 6.1.1-1 のとおり示されている。

図 6.1.1-1 は、横軸には衝突時間 (t_r) と衝突される設備の固有周期 (T) との比である t_r/T 、縦軸は応答加速度 \ddot{x}_{max} （設備に伝わった加速度）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 6.1.1-1 より、衝撃パルスの形状によって関数形は異なるものの、衝突物の入力加速度 \ddot{x}_{0max} と被衝突構造物の応答加速度 \ddot{x}_{max} の比 ($\ddot{x}_{max}/\ddot{x}_{0max}$) が、衝突時間 t_r と被衝突構造物の固有周期 T の比 (t_r/T) に依存していることを示している。衝突時間 t_r が被衝突構造物の固有周期 T より小さいときには、衝撃パルスの形状によらず応答加速度は入力加速度を下回っており、特に衝突時間が非常に短く衝突時間と被衝突構造物の固有周期の比 (t_r/T) が非常に小さい場合、入力加速度と被衝突構造物の応答加速度の比 ($\ddot{x}_{max}/\ddot{x}_{0max}$) は非常に小さい値となる。これは衝突時間が被衝突

構造物の固有周期に比べて小さい値をとる場合には、衝突物から非衝突物に伝達されるエネルギーが小さく、設備に有意な変位（応力）が生じないことを示している。

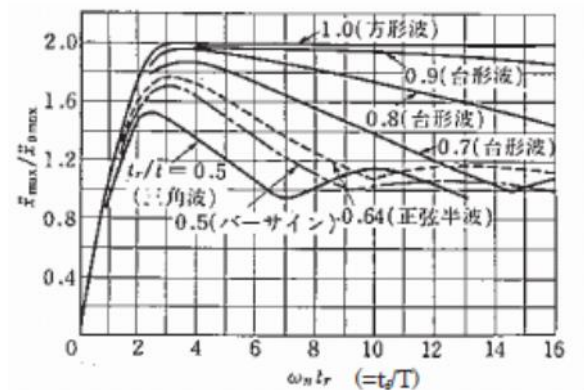


図 6.1.1-1 代表的理想衝撃パルスによる加速度衝撃スペクトル
(機械工学便覧より)

図 6.1.1-1 より、飛来物の速度が速くて、衝撃パルスの作用時間(t_r)が設備の固有周波数より短い場合（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が発生しないため、衝撃による影響はない。

6.1.2 砂などの粒子状の飛来物による目詰まり，閉塞及び嘔込み

砂等の粒子状の極小飛来物による目詰まり、閉塞及び嘔込みの影響を受ける可能性がある施設として、軸受等の狭隘部を有する屋外施設，水循環系や換気系の流路を有する屋外施設・屋内の施設で外気と繋がっている施設・屋外にある外部事象防護対象施設の付属施設について評価する。評価施設を表 6.1.2-1 に示す。

表 6.1.2-1 目詰まり、閉塞、嘔込みに対する評価施設

分類	評価施設	分類
屋外施設	・原子炉補機海水ポンプ及び高圧炉心スプレイ補機海水ポンプ	嘔込み 閉塞
	・原子炉補機海水ポンプ及び高圧炉心スプレイ補機海水ポンプ電動機	閉塞
	・原子炉補機海水ストレーナ及び高圧炉心スプレイ補機海水ストレーナ	目詰まり
	・非常用ディーゼル発電設備A-ディーゼル燃料移送ポンプ及び高圧炉心スプレイ系ディーゼル発電設備ディーゼル燃料移送ポンプ	嘔込み
	・排気筒（非常用ガス処理系配管を含む。）	閉塞
屋内の施設で外気と繋がっている施設	・換気空調設備（中央制御室空調換気系，原子炉棟空調換気系，原子炉建物付属棟空調換気系） ・給気消音器（非常用ディーゼル発電設備及び高圧炉心スプレイ系ディーゼル発電設備ディーゼル機関の付属施設）	目詰まり
屋外にある外部事象防護対象施設の付属施設	・排気消音器（排気管を含む。）（非常用ディーゼル発電設備及び高圧炉心スプレイ系ディーゼル発電設備ディーゼル機関の付属施設）	閉塞
	・ベント管（非常用ディーゼル発電設備及び高圧炉心スプレイ系ディーゼル発電設備ディーゼル燃料貯蔵タンク，ディーゼル燃料デイタンク及び潤滑油サンプルタンクの付属施設）	閉塞

(1) 屋外施設

a. 原子炉補機海水ポンプ及び高圧炉心スプレイ補機海水ポンプ

(a) 水循環系の閉塞

①流水部の閉塞

海水ポンプ流水部の狭隘部は、以下に示すとおりであり、砂等の粒子状の極小飛来物より十分大きいいため、閉塞には至らない。

- ・原子炉補機海水ポンプ 約 60mm
- ・高圧炉心スプレイ補機海水ポンプ 約 30mm

②軸受部の噛込み

海水ポンプの軸受の隙間は、約 1.38mm～1.58mm で管理している。一部の砂等の粒子状の極小飛来物は軸受の隙間より、軸受内部に入り込む可能性があるが、図 6.1.2-1 及び図 6.1.2-2 のとおり、異物逃がし溝（約 3.5mm～5.5mm）が設けられており、軸受部の閉塞には至らない。

・原子炉補機海水ポンプ

軸受部（異物逃がし溝）：

- 軸受①：3.5mm
- 軸受②，③，⑤：4.5mm
- 軸受④：5.5mm

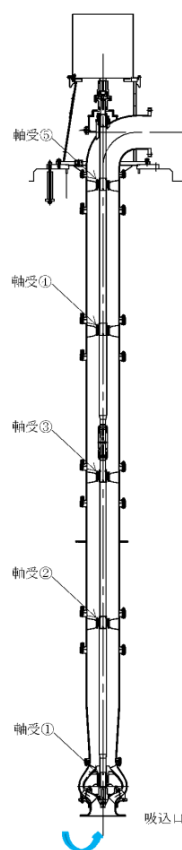
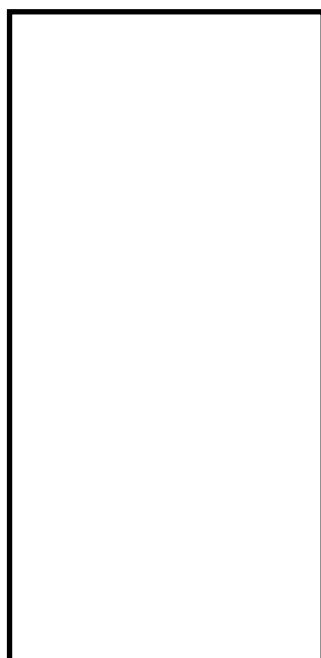


図 6.1.2-1 原子炉補機海水ポンプ軸受構造

・ 高圧炉心スプレィ補機海水ポンプ

軸受部（異物逃がし溝）：

軸受①～⑤：3.5mm

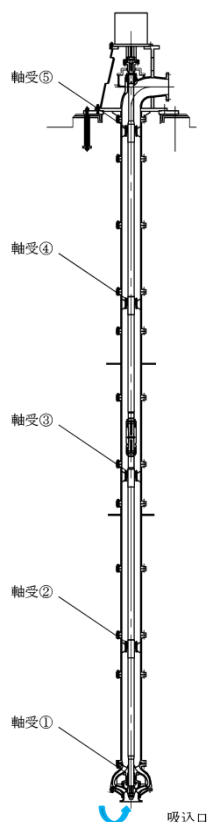


図 6.1.2-2 高圧炉心スプレィ補機海水ポンプ軸受構造

b. 原子炉補機海水ポンプ及び高圧炉心スプレィ補機海水ポンプ電動機の閉塞

(a) 原子炉補機海水ポンプ電動機

原子炉補機海水ポンプ電動機は、全閉外扇形構造の電動機に取替えを行うことから、砂等の粒子状の極小飛来物が侵入することはない。

(b) 高圧炉心スプレィ補機海水ポンプ電動機

高圧炉心スプレィ補機海水ポンプ電動機は、図 6.1.2-3 のとおり電動機本体が全閉外扇形構造となっており、電動機内部の熱は電動機の外筒に伝達され、外気を外扇により冷却フィンへ送風して放熱している。全閉外扇形の冷却方式であり砂等の粒子状の極小飛来物が侵入することはない。

また、砂等の粒子状の極小飛来物の粒径は冷却フィンの冷却経路の最小径（約 11mm）に対して小さく、運転中はファンからの通風により外部に排出されることから、閉塞に至らないため影響はない。

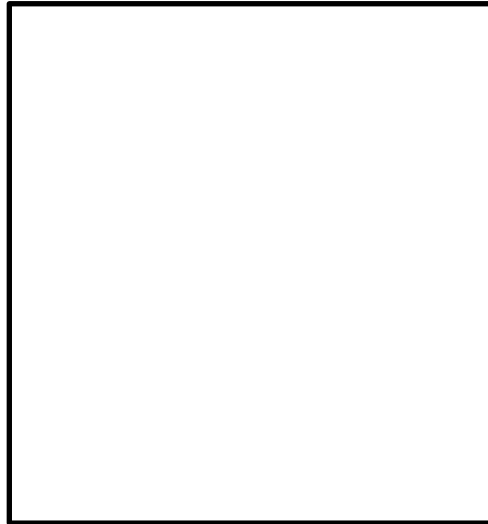


図 6.1.2-3 高圧炉心スプレイ補機海水ポンプ電動機冷却方式

- c. 原子炉補機海水ストレーナ及び高圧炉心スプレイ補機海水ストレーナの目詰まり

各海水ストレーナのフィルタ穴径を以下に示す。

- ・原子炉補機海水系 7 mm
- ・高圧炉心スプレイ補機海水系 7 mm

砂等の粒子状の極小飛来物は、海水ストレーナのエレメントのメッシュサイズより小さく、また、取水口からポンプ取水箇所までの距離が約 120m あるため、海水ストレーナは閉塞する可能性は低い。なお、海水ストレーナは 2 系統設けており、フィルタが閉塞することがないように差圧管理されており、一定の差圧（原子炉補機海水系：0.13MPa、高圧炉心スプレイ補機海水系：0.05MPa）になると切替えて、清掃を行うことも可能である。

- d. 非常用ディーゼル発電設備 A-ディーゼル燃料移送ポンプ及び高圧炉心スプレイ系ディーゼル発電設備ディーゼル燃料移送ポンプの噛込み・閉塞

非常用ディーゼル発電設備 A-ディーゼル燃料移送ポンプ及び高圧炉心スプレイ系ディーゼル発電設備ディーゼル燃料移送ポンプ本体への異物混入経路としては、軸貫通部があるが、当該部はメカニカルシール等を用いて潤滑剤や内部流体の漏えいのないよう適切に管理されていることから、砂等の粒子状の極小飛来物がポンプ本体へ侵入することはなく噛込みや摩耗による影響はない。

非常用ディーゼル発電設備 A-ディーゼル燃料移送ポンプ及び高圧炉心スプレイ系ディーゼル発電設備ディーゼル燃料移送ポンプの概略構造図を図 6.1.2-4 に示す。

動力源となる電動機については「全閉外扇屋外型」であり、ケーシングの放熱フィン等に砂等の粒子状の極小飛来物が冷却ファン側から吸入された場合でも、電動機内部に砂等の粒子状の極小飛来物が侵入することはない。

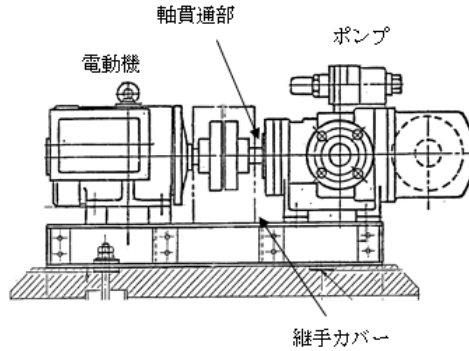


図 6. 1. 2-4 非常用ディーゼル発電設備Aーディーゼル燃料移送ポンプ及び高圧炉心スプレ
イ系ディーゼル発電設備ディーゼル燃料移送ポンプの概略構造図

e. 排気筒（非常用ガス処理系配管含む。）の閉塞

(a) 排気筒

排気筒の径は $\phi 3,300\text{mm}$ あり、短期間の竜巻による砂等の粒子状の極小飛来物により閉塞することはないと考える。

(b) 非常用ガス処理配管

非常用ガス処理配管は図 6. 1. 2-5 に示すとおり、横方向を向いており砂等の粒子状の極小飛来物が侵入しにく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、閉塞する量の飛来物は侵入し難い。

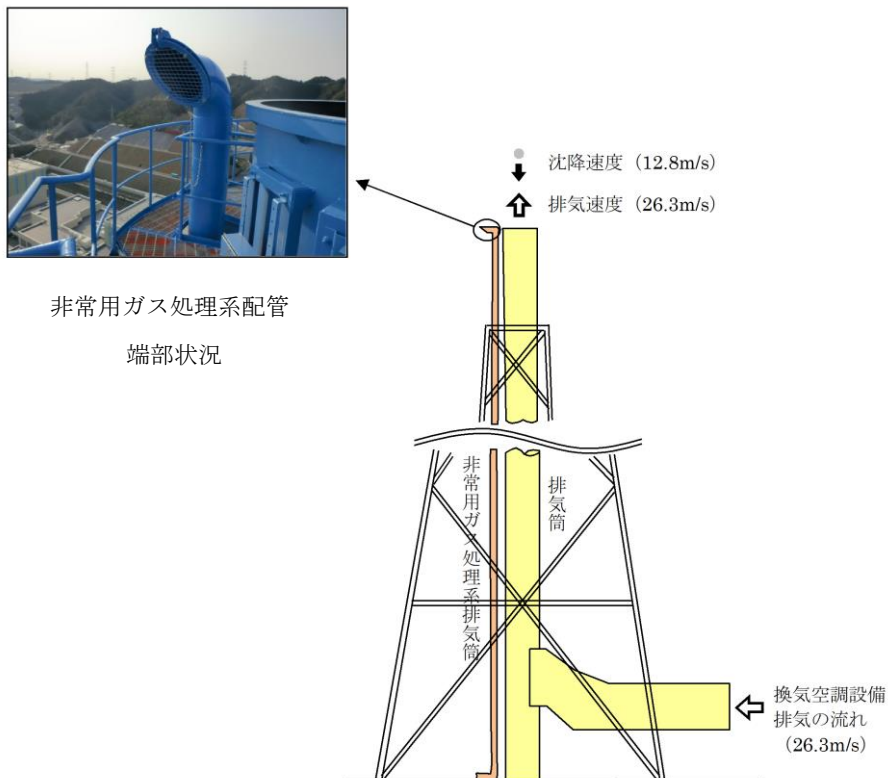


図 6. 1. 2-5 排気筒周辺の概要

(2) 屋内の施設で外気と繋がっている施設

a. 換気空調設備（外気取入口）の目詰まり

各評価対象設備の外気取入口には、図 6.1.2-6 に示すとおりルーバが取り付けられており、砂等の粒子状の極小飛来物が侵入しにくい構造となっている。

また、外気取入口には平型フィルタ（粒径 $2\mu\text{m}$ に対して 76% 以上を捕獲する性能）や袋型フィルタ（粒径 $2\mu\text{m}$ に対して 80% 以上を捕獲する性能）が設置されており、想定する砂等の粒子状の極小飛来物は十分除去されることから、給気を供給する系統及び機器に対して砂等の粒子状の極小飛来物が与える影響は少ない。また、フィルタには差圧計が設置されており、必要に応じて取替又は清掃をすることが可能である。

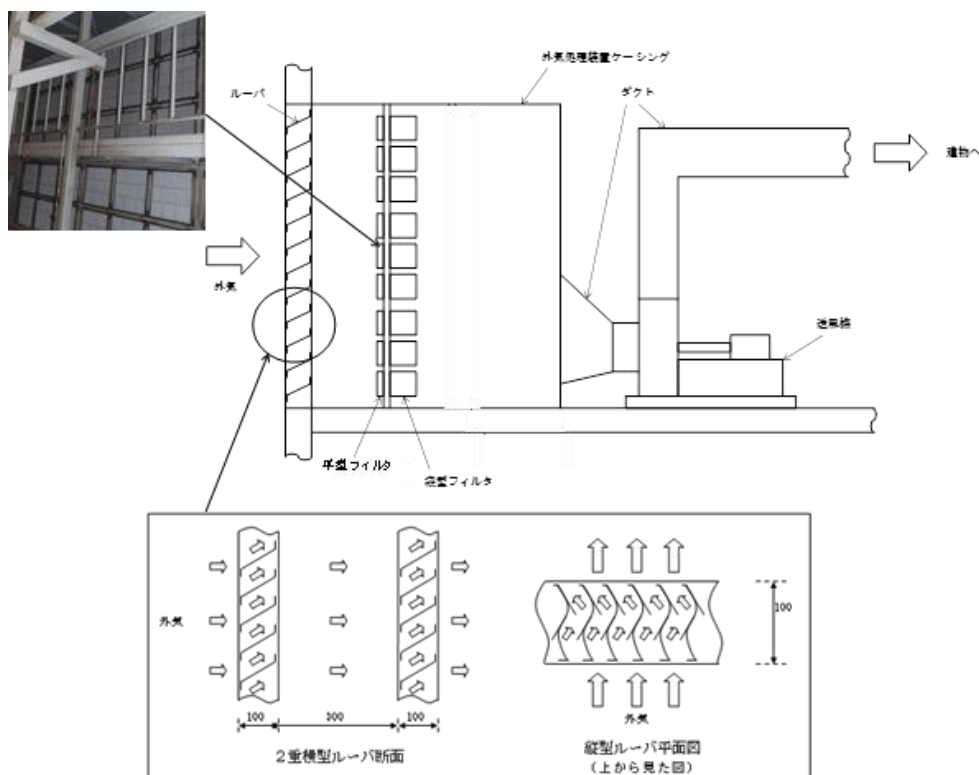


図 6.1.2-6 外気取入口の空気の流れ概要

b. 給気消音器（非常用ディーゼル発電設備及び高圧炉心スプレイ系ディーゼル発電設備ディーゼル機関の付属施設）の目詰まり

給気消音器の上流側の外気取入口にはフード又はルーバが取り付けられおり、砂等の粒子状の極小飛来物が侵入しにくい構造である。非常用ディーゼル発電機の給気空気の流れを図 6.1.2-7 に示す。

また、機関給気口の給気消音器にはフィルタ（粒径 $1\mu\text{m}$ 以上の砂等の粒子状の極小飛来物は 80% 以上捕集）が設置されており、砂等の粒子状の極小飛来物の侵入を防止している。

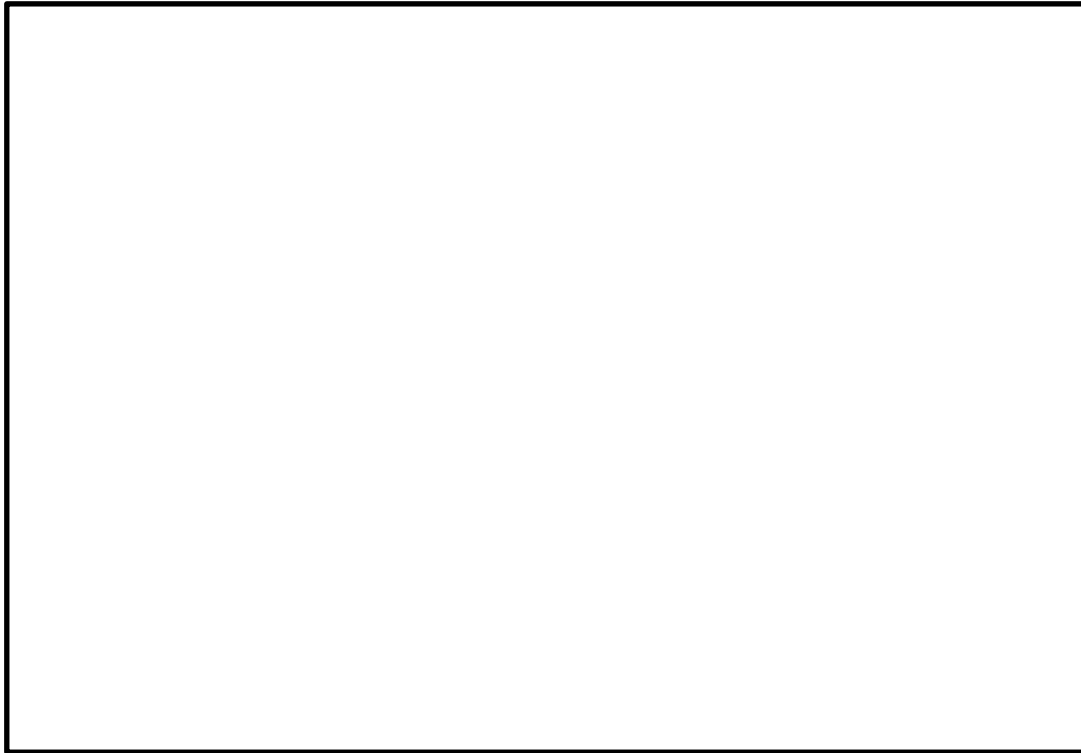


図 6.1.2-7 非常用ディーゼル発電設備及び高圧炉心スプレイ系ディーゼル発電設備ディーゼル機関の給気空気の流れ

(3) 屋外にある外部事象防護対象施設の付属施設

- a. 排気消音器（排気管を含む。）（非常用ディーゼル発電設備及び高圧炉心スプレイ系ディーゼル発電設備ディーゼル機関の付属施設）の閉塞

排気消音器は図 6.1.2-8 に示すとおり、横方向を向いており砂等の粒子状の極小飛来物が侵入しにくい構造となっている。また、運転中は排気しているため、砂等の粒子状の極小飛来物が侵入することはない。また、竜巻の通過に要する時間は短時間であるため、閉塞する量の飛来物は侵入し難い。



図 6.1.2-8 非常用ディーゼル発電設備ディーゼル機関排気消音器及び排気管

- b. ベント管(非常用ディーゼル発電設備及び高圧炉心スプレイ系ディーゼル発電設備ディーゼル燃料貯蔵タンク, ディーゼル燃料デイトンク, 潤滑油サンプタンクの付属施設)の閉塞

(a) ディーゼル燃料貯蔵タンク

ディーゼル燃料貯蔵タンク本体は, ディーゼル燃料貯蔵タンク室内(地下埋設式)であり, 砂等の粒子状の極小飛来物からの影響は受けないが, ディーゼル燃料貯蔵タンクのベント管は屋外に設置していることから影響について確認する。

ディーゼル燃料貯蔵タンクのベント管先端には図 6.1.2-9 のとおり, カバーが取り付けられており, 開口部の閉塞には至らない。

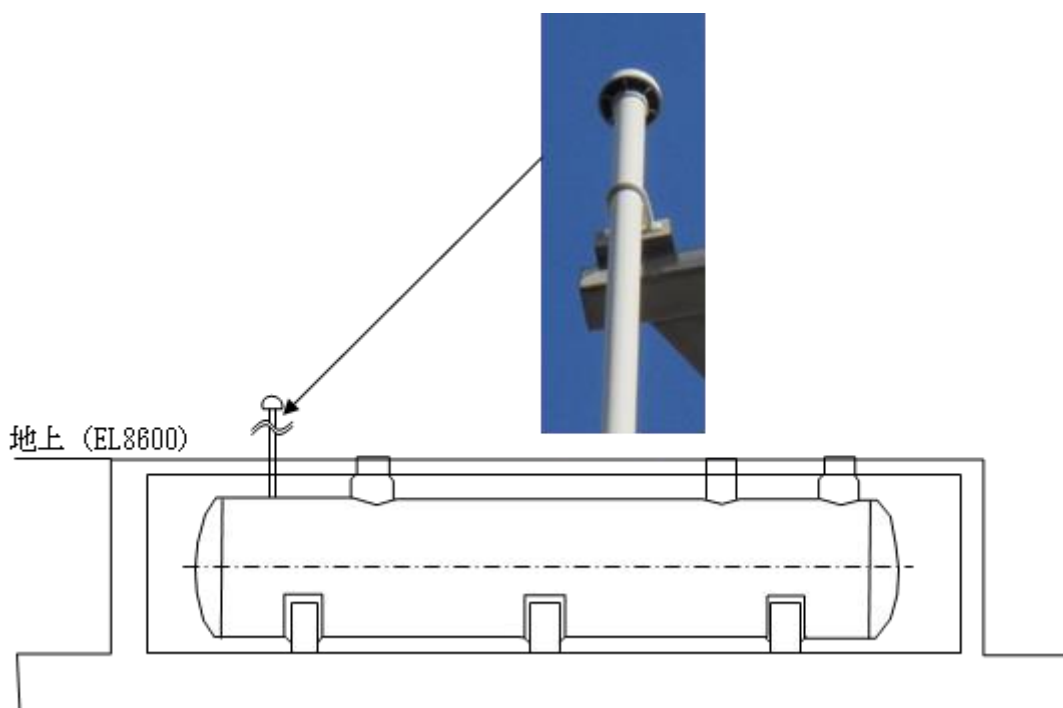


図 6.1.2-9 ディーゼル燃料貯蔵タンク及びベント管の概要

(b) ディーゼル燃料デイトンク, 潤滑油サンプタンク

ディーゼル燃料デイトンク, 潤滑油サンプタンクのベント管は, 下方向を向いており砂等の粒子状の極小飛来物が侵入しにく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, 閉塞する量の飛来物は侵入し難い。

1. 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（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。

$$T^{3/2} = \frac{0.5MV^2}{1.4396 \times 10^9 K^2 D^{3/2}}$$

T : 鋼板貫通厚さ (m)

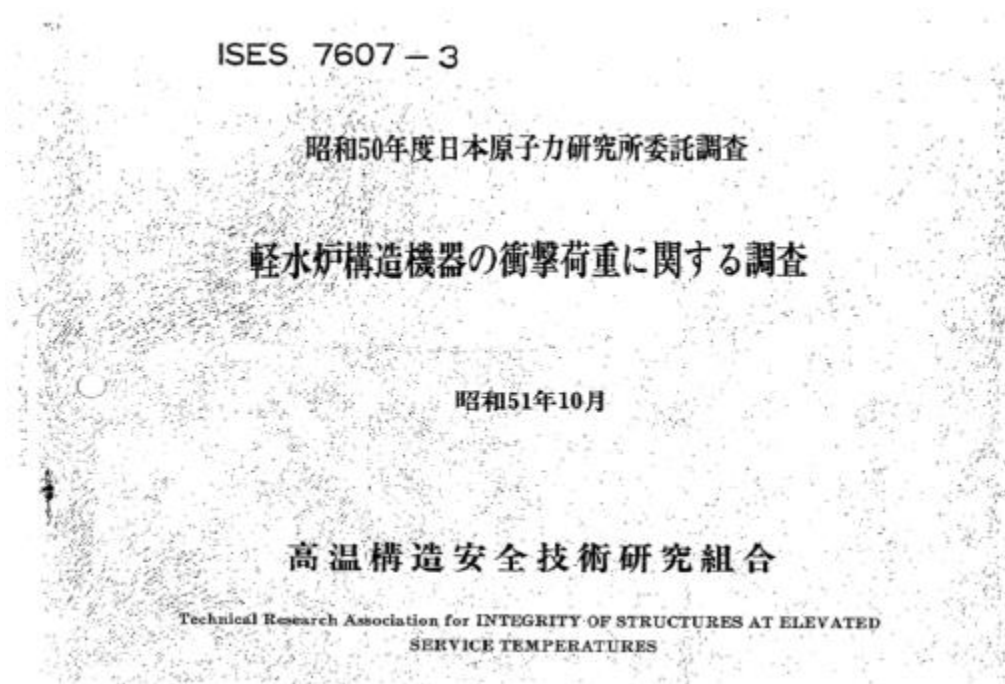
M : ミサイル質量 (kg)

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)

ISES7607-3「軽水炉構造機器の衝撃荷重に関する調査 その3 ミサイルの衝突による構造壁の損傷に関する評価式の比較検討（高温構造安全技術研究組合）」



鋼板に対する評価

(2) BRL 式⁽³⁾ (Ballistic Research Laboratories Formula)

$$T^{3/2} = \frac{0.5 M V^2}{17400 K^2 d^{3/2}} \quad (17)$$

ここで、

T = 鋼板貫通厚さ (in)

M = ミサイル質量 (lb-sec²/ft)

V = ミサイル速度 (ft/sec)

d = ミサイル直径 (in)

K = 鋼板の grade に関する定数 (≒1.0) である。

(K=鋼板の grade に関する定数 (≒1.0) である。)

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

4. 貫通厚さ (T) の算出について

以下に示す式及び係数を使用する。

- (1) コンクリートに対しては修正NDR Cの式⁽¹⁾⁽⁴⁾を使用する。

形状係数 (N) については

タービン羽根	N=1.14
T-Gカップリング	N=0.72
ディスク	N=0.84
ロータ	N=0.84

- (2) 鋼板に対してはBRL⁽¹⁾⁽⁴⁾の式を使用する。

参 考 文 献

- (1) R. G. 1.115 Rev 1. Working Paper "B" 27 Jan 1977 "Protection Low Trajectory Turbine Missiles"
- (2) Standard Review Plan SEC 3.5.1.3 "Turbine Missiles" Against
- (3) Nuclear Safety Vol 14 No. 3 May-June 1973 "Probability of Damage to Nuclear Components Due to Turbine Failure" by Spencer H. Bush
- (4) ISES 7607-3 高温構造安全技術研究組合

軽水炉構造機器の衝撃荷重に関する調査

その8 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

7. 屋外の重大事故等対処設備の竜巻防護設計

7. 屋外の重大事故等対処設備の竜巻防護設計

7.1 はじめに

本資料は、島根原子力発電所の屋外の重大事故等対処設備の竜巻に対する設計方針について補足する資料である。

7.2 島根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

7.2.1 設計の考え方について

島根原子力発電所の屋外の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及び竜巻防護対策設備（以下「外部事象防護対象施設等」という。）に衝突し、外部事象防護対象施設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-1-1-7「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検算性に関する説明書」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。

7.2.2 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に衝突し、外部事象防護対象施設等の機能に影響を及ぼさない設計とするため、すべての屋外の重大事故等対処設備を検討の対象とする。

ただし、屋外の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に、風荷重の作用しない場所に配置する設計又は竜巻の風荷重を考慮した設計とする設備は、竜巻防護がされていることから、以降に示す固縛対象設備の選定候補から除外する。

屋外の重大事故等対処設備及び固縛対象設備の選定方針を表7.2.2-1に、固縛対象設備の選定候補及び保管場所を表7.2.2-2、図7.2.2-1に示す。

表 7.2.2-1 屋外の重大事故等対処設備及び固縛対象設備の選定方針(1/2)

	固縛対象設備の選定方針	常設/可搬	設備
(1)	<p>浮き上がり又は横滑り発生の有無,保管場所からの飛散距離算出,外部事象防護対象施設及び竜巻防護対策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> <p>また,同じ機能を有する常設重大事故防止設備及び可搬型重大事故防止設備について,浮き上がり又は横滑り発生の有無,保管場所からの飛散距離の算出,同じ機能を有する設重大事故防止設備及び可搬型重大事故防止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>	<p>可搬</p>	<p>ホイールローダ 大量送水車 移動式代替熱交換設備 大型送水ポンプ車 可搬型ストレーナ 可搬式窒素供給装置 小型船舶 放水砲 泡消火薬剤容器 高圧発電機車 タンクローリ 第1ベントフィルタ出口水素濃度 可搬式モニタリング・ポスト 可搬式気象観測装置 放射性物質吸着材 シルトフェンス 緊急時対策所用発電機 ホース [流路] (300A) ホース [流路] (250A) ホース [流路] (150A) ホース [流路] (移動式代替熱交換設備) ホース [燃料流路] 可搬型ケーブル</p>

表 7.2.2-1 屋外の重大事故等対処設備及び固縛対象設備の選定方針(2/2)

	固縛対象設備の選定方針	常設/可搬	設備
(2)	固定されている又は遮蔽壁内に囲まれた設備のため竜巻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	原子炉建物燃料取替階ブローアウトパネル 圧力開放板 ガスタービン発電機用軽油タンク 緊急時対策所遮蔽 構内監視カメラ (ガスタービン発電機建物屋上) 等
(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設計飛来物衝撃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	原子炉補機冷却系 配管・弁・海水ストレーナ [流路] 高圧炉心スプレイ補機冷却系 配管・弁・海水ストレーナ [流路] 原子炉補機海水ポンプ 高圧炉心スプレイ補機海水ポンプ 非常用ディーゼル発電設備A-ディーゼル燃料移送ポンプ 高圧炉心スプレイ系ディーゼル発電設備ディーゼル燃料移送ポンプ 非常用ガス処理系配管 等
(4)	竜巻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	取水槽 等

表 7.2.2-2 固縛対象設備の選定候補及び保管場所 (1/2)

設備	保管場所*
ホイールローダ	①
	③
	④
大量送水車	①
	②
	③
	④
移動式代替熱交換設備	①
	③
	④
大型送水ポンプ車	①
	③
	④
可搬型ストレーナ	②
	③
	④
可搬式窒素供給装置	①
	④
小型船舶	①
	④
放水砲	①
	④
泡消火薬剤容器	①
	④
高圧発電機車	①
	③
	④
タンクローリ	①
	③
	④
可搬型モニタリング・ポスト	①
	④
可搬式気象観測装置	①
	④

注記* : 図 7.2.2-1 における保管場所の番号を示す。

表 7.2.2-2 固縛対象設備の選定候補及び保管場所 (2/2)

設備	保管場所*1
第1 ベントフィルタ出口水素濃度	①
	④
放射性物質吸着材	①
	④
シルトフェンス	①
	④
緊急時対策所用発電機	①
	④
ホース [流路] (300A) *2	①
ホース [流路] (250A) *2	④
ホース [燃料流路] *2	
ホース [流路] (150A) *2	①
	④
ホース [流路] (移動式代替熱交換設備) *2	①
	④
可搬型ケーブル	①
	④

注記*1：図 7.2.2-1 における保管場所の番号を示す。

*2：保管用コンテナに格納されているため、コンテナの評価で代表する。

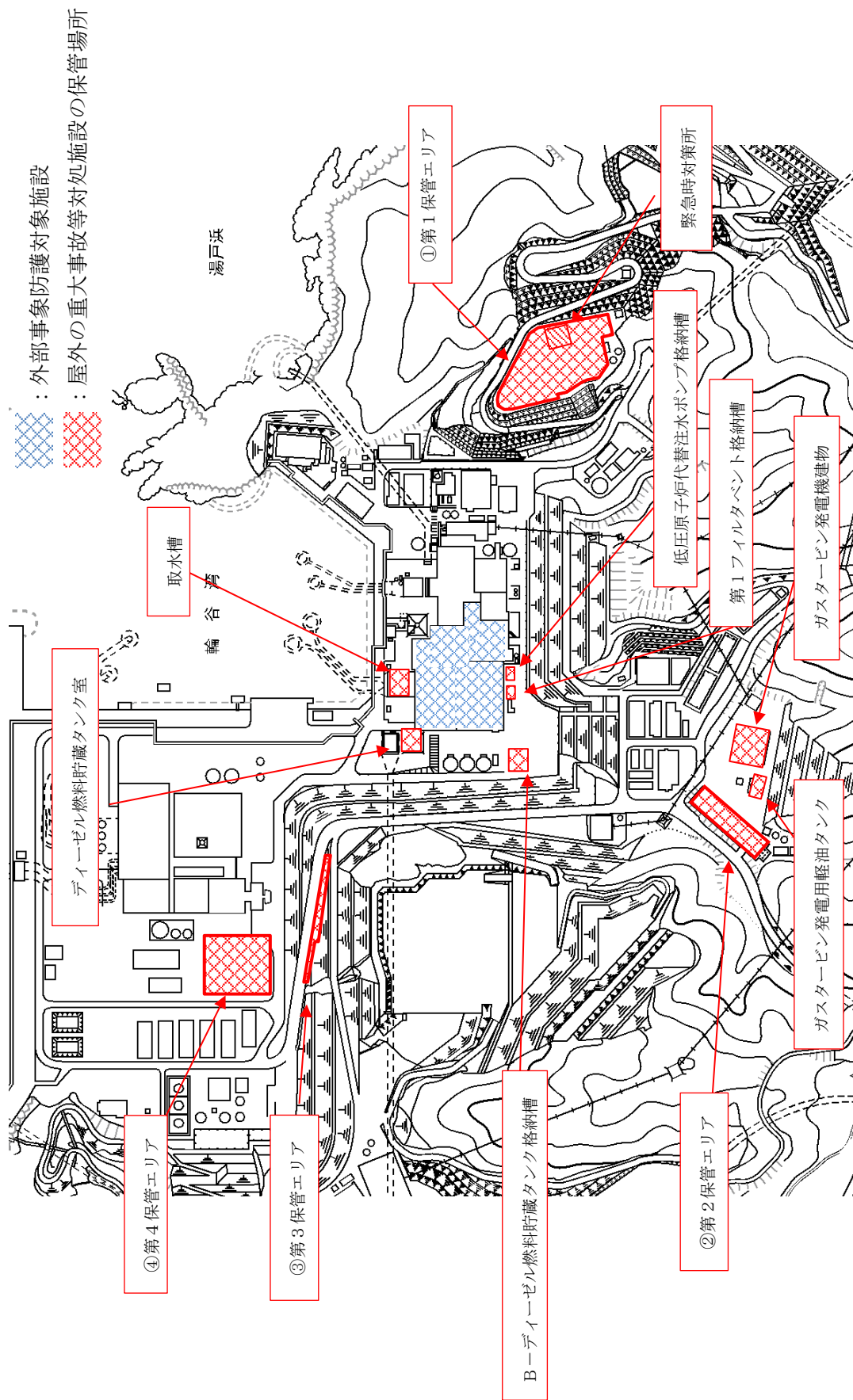


図 7.2.2-1 固縛対象設備の選定候補及び保管場所並びに外部事象防護対象施設の配置

7.2.3 固縛対象設備の選定

表 7.2.2-2 に示した固縛対象設備の選定候補を対象に、浮き上がり又は横滑りの発生有無、保管場所からの飛散距離、外部事象防護対象施設に衝突し損傷させる可能性の有無を判定した結果、屋外の重大事故等対処設備に、飛散して外部事象防護対象施設や同じ機能を有する他の重大事故等対処設備に影響を与えるものはないことを確認した。

屋外の重大事故等対処設備の固縛要否判定結果を表 7.2.3-1 に示す。また、屋外の重大事故等対処設備の保管場所及び飛散距離を図 7.2.3-1~4 に示す。

表 7.2.3-1 屋外の重大事故等対処設備の固縛要否判定結果 (1/3)

設備	保管場所*	飛散距離 [m]	外部事象防護対象施設との距離 [m]	隔離	固縛対象設備	選定根拠	関連図面
ホイールローダ	①	0	250	○	—	—	図 7.2.3-1
	③	0	172	○	—	—	図 7.2.3-3
	④	0	286	○	—	—	図 7.2.3-4
	①	91	250	○	—	—	図 7.2.3-1
大量送水車	②	91	260	○	—	—	図 7.2.3-2
	③	91	172	○	—	—	図 7.2.3-3
	④	29	286	○	—	—	図 7.2.3-4
	①	0	250	○	—	—	図 7.2.3-1
移動式代替熱交換設備	③	0	172	○	—	—	図 7.2.3-3
	④	0	286	○	—	—	図 7.2.3-4
	①	0	250	○	—	—	図 7.2.3-1
	③	0	172	○	—	—	図 7.2.3-3
大型送水ポンプ車	④	0	286	○	—	—	図 7.2.3-4
	①	0	250	○	—	—	図 7.2.3-1
	③	0	172	○	—	—	図 7.2.3-3
	④	0	286	○	—	—	図 7.2.3-4
可搬型ストレーナ	②	113	260	○	—	—	図 7.2.3-2
	③	113	172	○	—	—	図 7.2.3-3
	④	32	286	○	—	—	図 7.2.3-4
	①	37	250	○	—	—	図 7.2.3-1
可搬式窒素供給装置	④	4	286	○	—	—	図 7.2.3-4

注記*：図 7.2.2-1 における保管場所の番号を示す。

表 7.2.3-1 屋外の重大事故等対処設備の固縛要否判定結果 (2/3)

設備	保管場所*	飛散距離 [m]	外部事象防護対象施設との離隔距離 [m]	離隔	固縛対象設備	選定根拠	関連図面
小型船舶	①	196	250	○	—	—	図 7.2.3-1
	④	99	286	○	—	—	図 7.2.3-4
放水砲	①	140	250	○	—	—	図 7.2.3-1
	④	53	286	○	—	—	図 7.2.3-4
泡消火薬剤容器	①	0	250	○	—	—	図 7.2.3-1
	④	0	286	○	—	—	図 7.2.3-4
高圧発電機車	①	115	250	○	—	—	図 7.2.3-1
	③	115	172	○	—	—	図 7.2.3-3
タンクローリ	④	42	286	○	—	—	図 7.2.3-4
	①	110	250	○	—	—	図 7.2.3-1
可搬型モニタリング・ポスト	③	110	172	○	—	—	図 7.2.3-3
	④	36	286	○	—	—	図 7.2.3-4
可搬式気象観測装置	①	203	250	○	—	—	図 7.2.3-1
	④	115	286	○	—	—	図 7.2.3-4
可搬式気象観測装置	①	179	250	○	—	—	図 7.2.3-1
	④	85	286	○	—	—	図 7.2.3-4

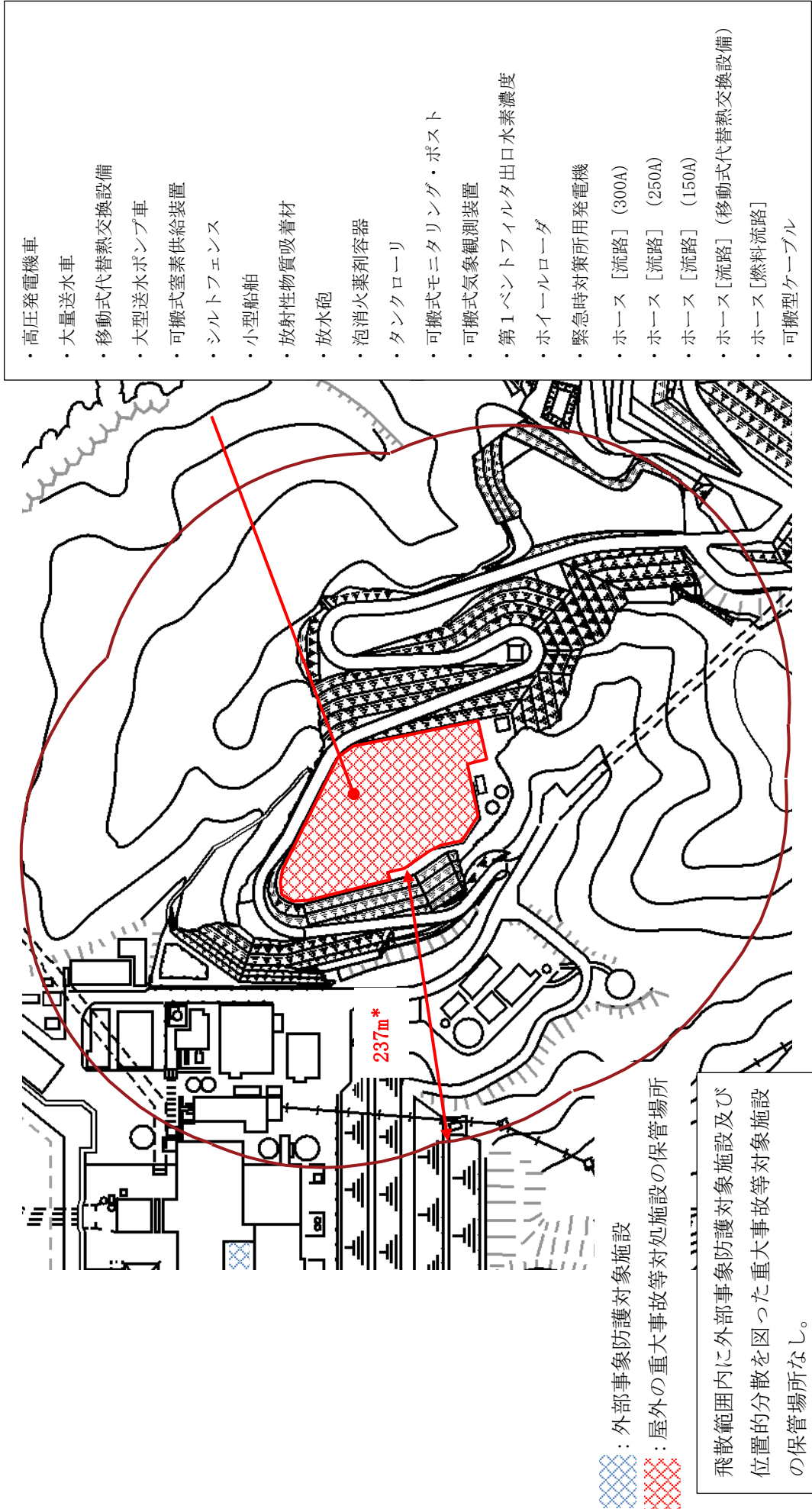
注記*：図 7.2.2-1 における保管場所の番号を示す。

表 7.2.3-1 屋外の重大事故等対処設備の固縛要否判定結果 (3/3)

設備	保管場所*	飛散距離 [m]	外部事象防護対象施設との 離隔距離 [m]	離隔	固縛対象設備	選定根拠	関連図面
第1ベントフィルタ出口水素濃度	①	165	250	○	—	—	☒ 7.2.3-1
	④	70	286	○	—	—	☒ 7.2.3-4
放射性物質吸着材	①	201	250	○	—	—	☒ 7.2.3-1
	④	110	286	○	—	—	☒ 7.2.3-4
シルトフェンス	①	189	250	○	—	—	☒ 7.2.3-1
	④	90	286	○	—	—	☒ 7.2.3-4
緊急時対策所用発電機	①	128	250	○	—	—	☒ 7.2.3-1
	④	49	286	○	—	—	☒ 7.2.3-4
ホース [流路] (300A) *2 ホース [流路] (250A) *2 ホース [燃料流路] *2	①	237	250	○	—	—	☒ 7.2.3-1
	④	160	286	○	—	—	☒ 7.2.3-4
	①	129	250	○	—	—	☒ 7.2.3-1
ホース [流路] (150A) *2	④	48	286	○	—	—	☒ 7.2.3-4
	①	0	250	○	—	—	☒ 7.2.3-1
ホース [流路] (移動式代替熱交換設備) *2	④	0	286	○	—	—	☒ 7.2.3-4
	①	201	250	○	—	—	☒ 7.2.3-1
可搬型ケーブル	④	110	286	○	—	—	☒ 7.2.3-4
	①	201	250	○	—	—	☒ 7.2.3-1

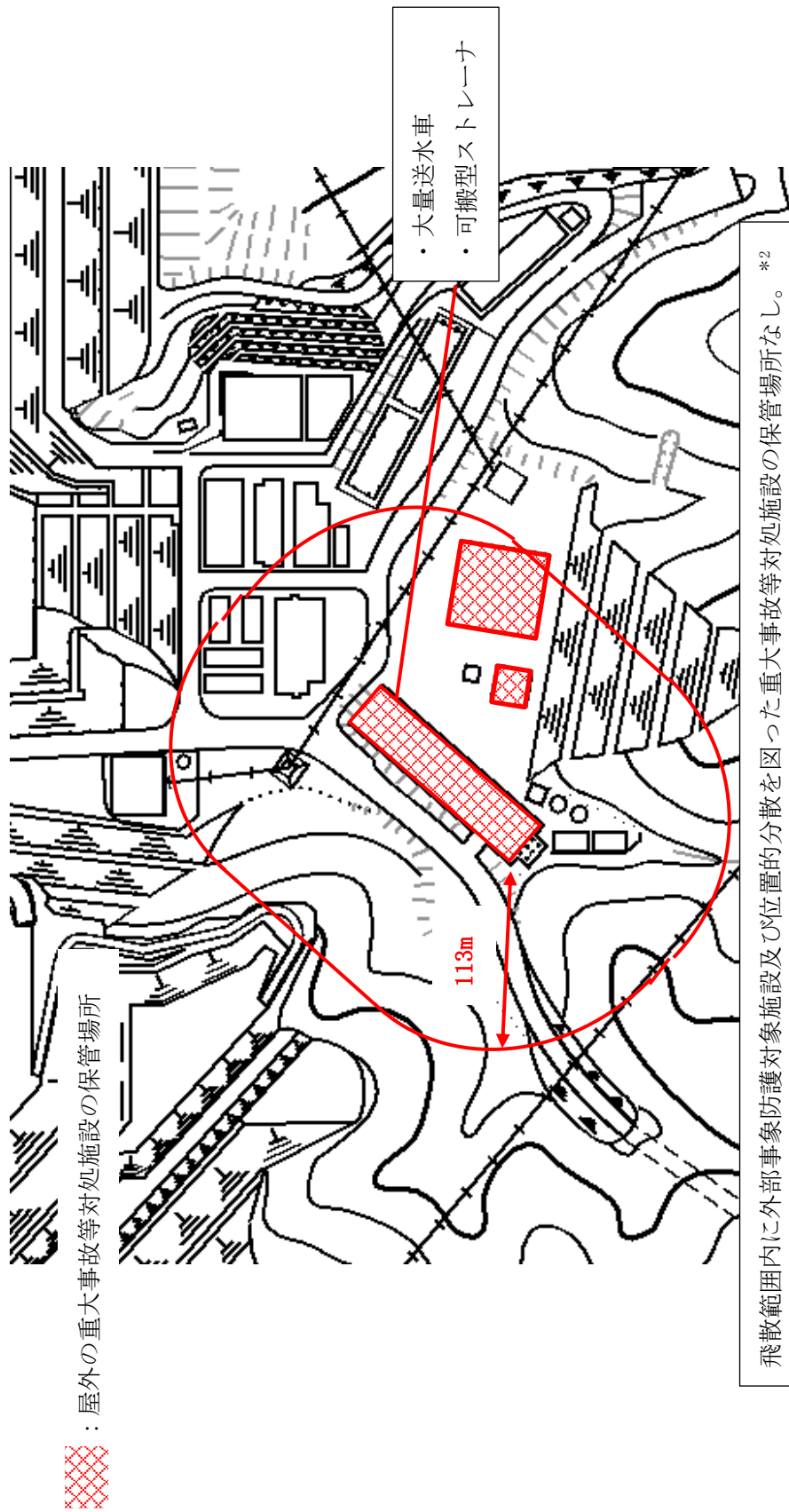
注記*1：☒ 7.2.2-1 における保管場所の番号を示す。

*2：保管用コンテナに格納されているため、コンテナの評価で代表する。



注記*：保管場所内の設備のうち、最大の飛散距離を示す。

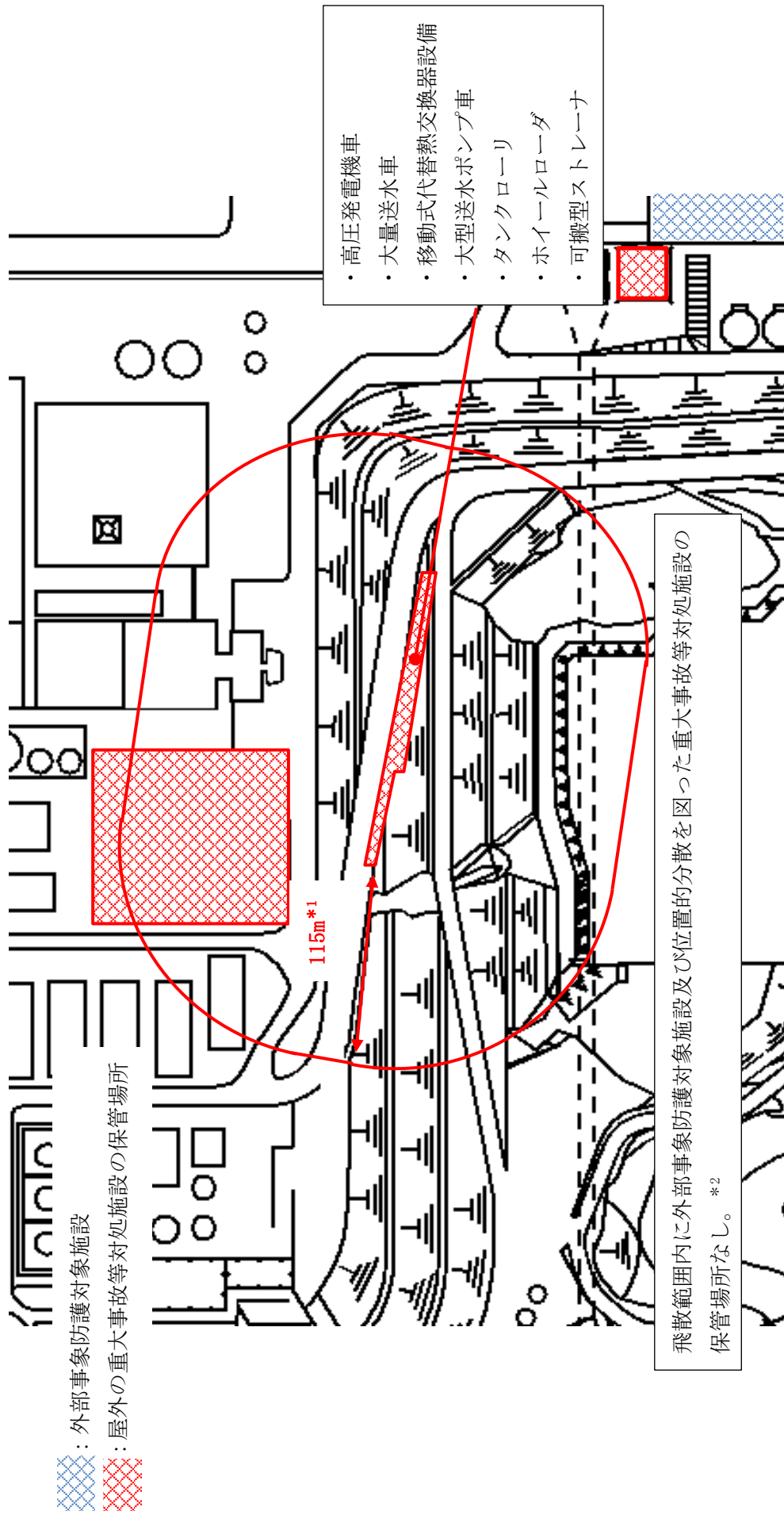
図 7.2.3-1 屋外の重大事故等対処設備の保管場所及び飛散距離 (第1保管エリア)



注記*1：保管場所内の設備のうち、最大の飛散距離を示す。

*2：第2保管エリアとガスタービン発電機建物及びガスタービン発電機軽油タンクは、同じ機能を有する2セットある可搬型設備を互いに配置しない設計としている。

図 7.2.3-2 屋外の重大事故等対処設備の保管場所及び飛散距離 (第2保管エリア)



注記*1：保管場所内の設備のうち、最大の飛散距離を示す。

*2：第3保管エリアと第4保管エリアは、同じ機能を有する2セットある可搬型設備を互いに配置しない設計としている。

図 7.2.3-3 屋外の重大事故等対処設備の保管場所及び飛散距離（第3保管エリア）

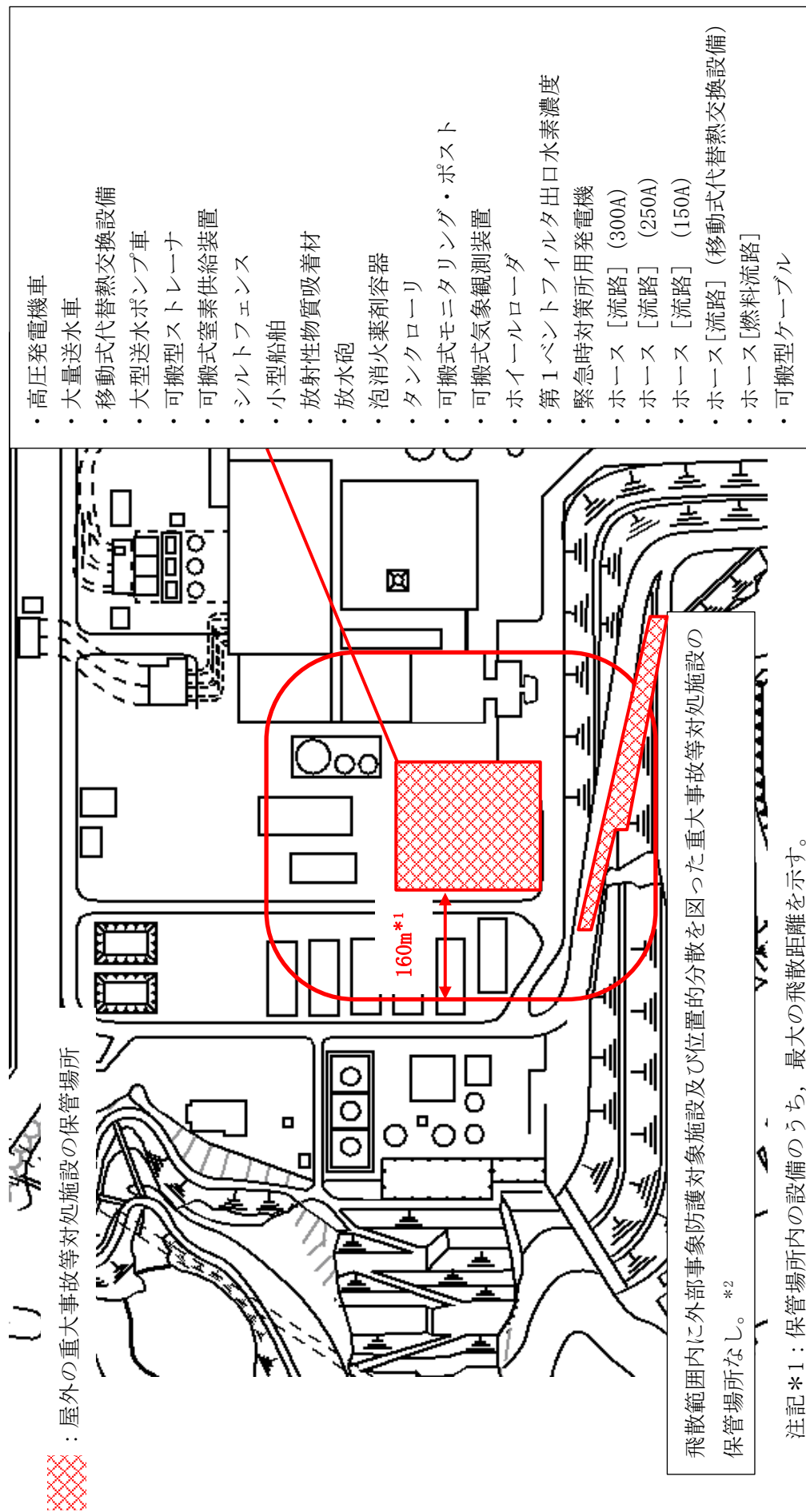


図 7.2.3-4 屋外の重大事故等対処施設の保管場所及び飛散距離 (第4保管エリア)

8. 竜巻影響評価の風速場モデルの適用

8. 竜巻影響評価の風速場モデルの適用

島根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てある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。なお、島根原子力発電所の竜巻影響評価においては、評価及び運用の簡便性を念頭に、保守性を確保した上で、一部についてフジタモデル以外の竜巻モデルから得られる設定を採用している。

風速場モデルの適用状況について表 8-1 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、添付 1 「設計飛来物の最大水平速度の妥当性について」に補足する。

表 8-1 島根原子力発電所の竜巻風速場モデルの適用状況 (1/2)

竜巻に影響する要素		島根原子力発電所 2 号機の設定値		風速場モデルによる違いの有無	備考
基本風速場モデル		フジタモデル		—	
設計竜巻 の特性値	最大風速	V_D	92 m/s	×	
	最大接線方向風速	V_{Rm}	78 m/s	×	
	移動速度	V_T	14 m/s	×	
	最大接線風速半径	R_m	30 m/s	×	
	流入層高さ	H_i	15 m/s	○	ランキン渦モデルには無し
	最大気圧低下量	ΔP_{max}	75 hPa 【ガイドの評価式による】 フジタモデル (解析が必要) に対する算出の簡便性を踏まえ採用		○
最大気圧低下率	$\left(\frac{dp}{dt}\right)_{max}$	35 hPa/s 【ガイドの評価式による】 同上		○	評価には用いない
設計飛来物の速度		鋼製材	51 m/s 任意の初期高さにおけるフジタモデルの解析結果を包含する, ガイドの値	○	
		砂利	54 m/s 任意の初期高さにおけるフジタモデルの解析結果の値	○	

表 8-1 島根原子力発電所の竜巻風速場モデルの適用状況 (2/2)

竜巻に影響する要素		島根原子力発電所 2号機の設定値	風速場モデルによる違いの有無	備考
飛散解析	地上からの初期高さ	h	○	
	最大水平速度	MV_{Hmax}	○	解析コード：TO NBOS
	最大鉛直速度	MV_{Vmax}	○	
	最大飛散距離	MD	○	解析コード：TO NBOS
飛来物発生対策の 要否	運動エネルギー	E	○	
	貫通力	t_p^*	○	*鋼板：BR L式 コンクリート：修正 NDR C式, D e g a n式
	離隔距離	D_{rcp}	○	
固縛設計	風速分布		○	
	地上からの初期高さ	h	○	

1. 設計飛来物の最大水平速度の妥当性について

1.1 鋼製材の最大水平速度の妥当性について

発電所の竜巻影響評価に用いる設計飛来物である鋼製材は、「竜巻影響評価ガイド」に示されている数値を採用しているが、その最大水平速度（51m/s）は非定常乱流渦モデルによるシミュレーション（LES）にて導出されている。

一方、発電所の竜巻影響評価における物体の飛散解析にはフジタモデルを適用する方針としており、フジタモデルでは風速が地上からの高さによって変化するため、飛来物源の地上からの初期高さにより飛散時の挙動が異なる。

このため、任意の地上からの初期高さにある鋼製材をフジタモデルで飛散させた場合でも、その最大水平速度が51m/sを超えることがないことを確認した。結果を図1.1-1に示す。また、図1.1-1には参考としてランキン渦モデルによる最大水平速度も記す。

図1.1-1から、いずれの地上からの初期高さから飛散した場合でも、その最大水平速度は51m/sを上回ることはないことが分かる。よって、フジタモデルを採用する場合においても、設計飛来物の最大水平速度には「竜巻影響評価ガイド」の数値である51m/sを用いることは問題なく、かつ保守性を有すると判断している。

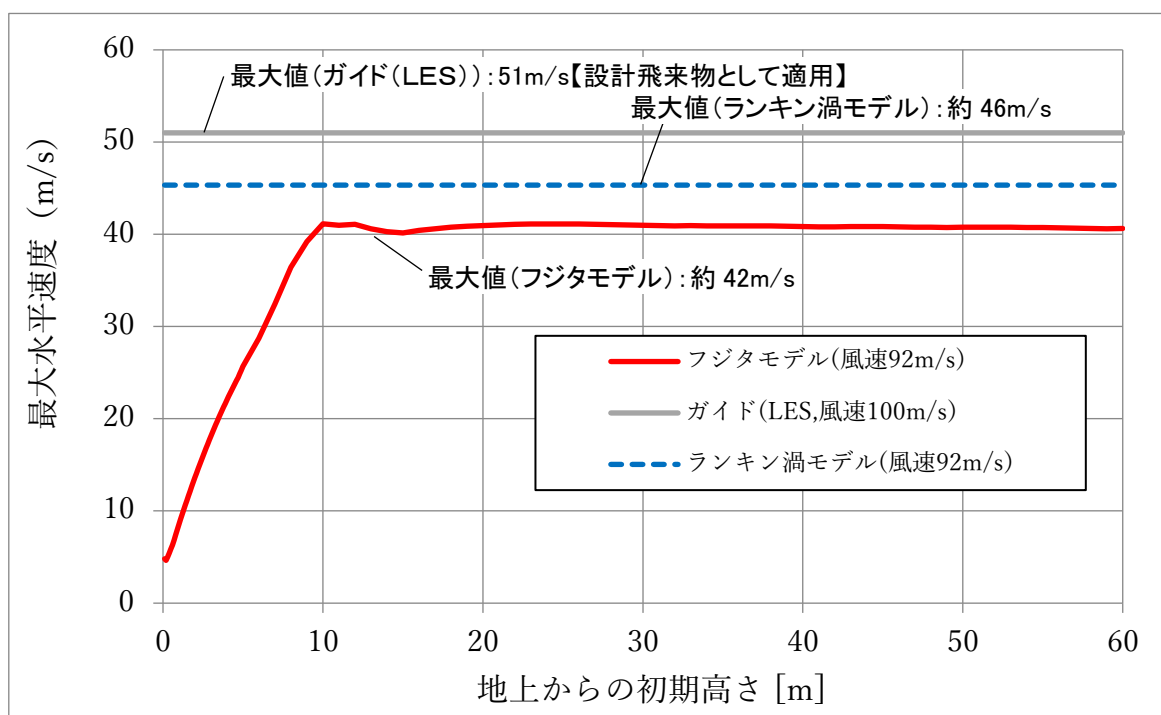


図 1.1-1 各風速場モデルにおける鋼製材の飛散解析結果

(鋼製材：300mm×200mm×4, 200mm, 135kg)

1.2 砂利の最大水平速度の妥当性について

「竜巻影響評価ガイド」に記載のない設計飛来物である砂利の速度については、フジタモデルを適用した風速場の中で地上付近の不確定性を考慮し、地上からの初期高さの感度解析の結果から最大となる水平速度（54m/s）を算出した。結果を図 1.2-1 に示す。

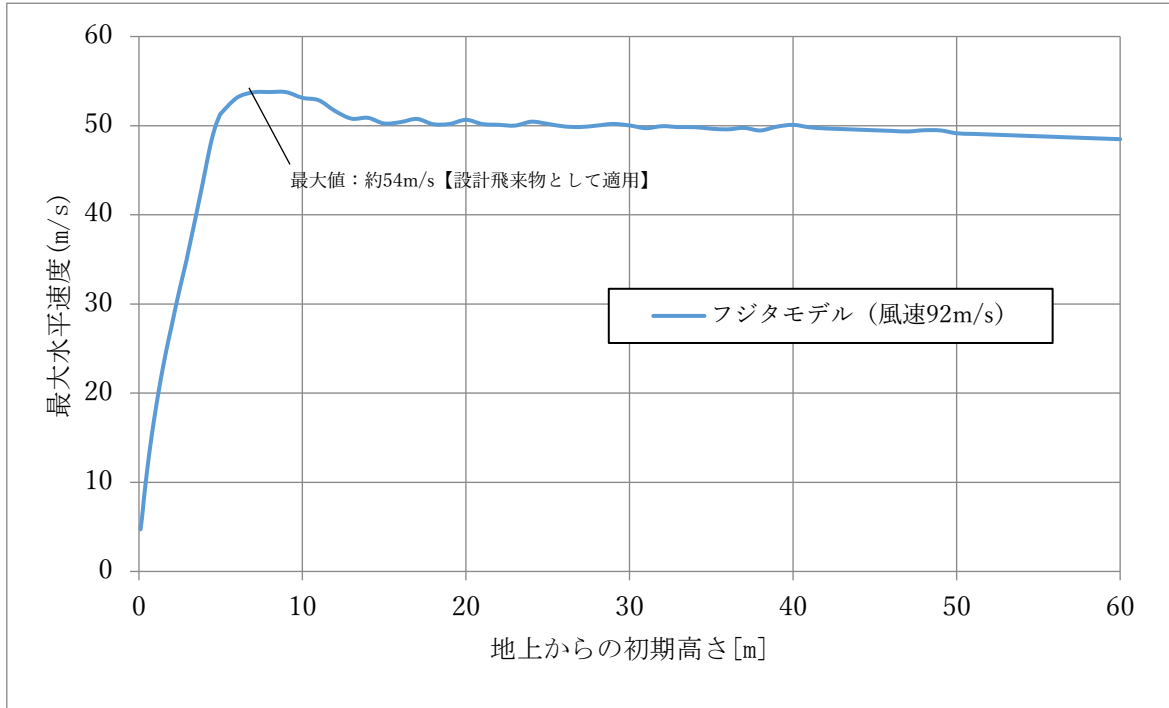


図 1.2-1 砂利の飛散解析結果
(砂利：40mm×40mm×40mm, 0.2kg)

フジタモデルによる飛散解析の特徴について

1. はじめに

フジタモデルを用いた飛散解析では、物体の地上からの初期高さが飛散速度や飛散距離に影響する。ここでは、フジタモデルの風速場の概要及びフジタモデルを用いた飛散解析の特徴について、設計飛来物（鋼製材）に対する飛散解析結果を例に説明する。

2. フジタモデルの風速場のモデル化

(1) 風速場の概要

フジタモデルを用いた飛散解析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されており、地表面に近づくにつれて連続的に減衰する。水平風速は、周方向の風速と流入風の風速を合成することで得られ、最大水平方向風速は最大周方向風速に竜巻の移動速度を足したものと一致する。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を図2に示す。

フジタモデルにおける最大水平風速は、地表面（0m）から流入層高さ（15m）までは大きく上昇し、流入層高さにおいて最大風速が発生する。流入層高さを超えると、地上からの高さが高くなるにつれて最大水平風速は緩やかに減少するモデルとなっている。

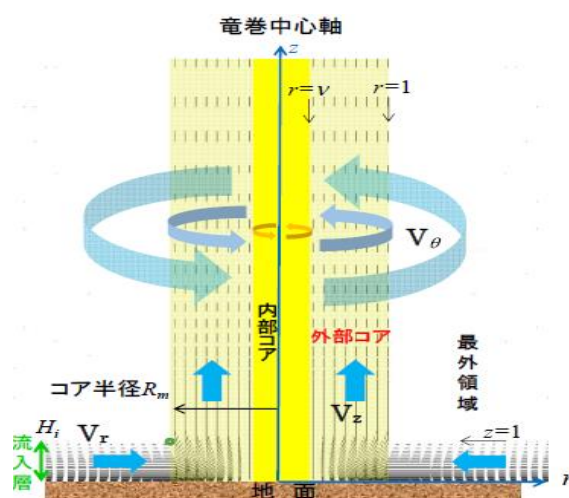


図1 フジタモデルの風速場（イメージ）

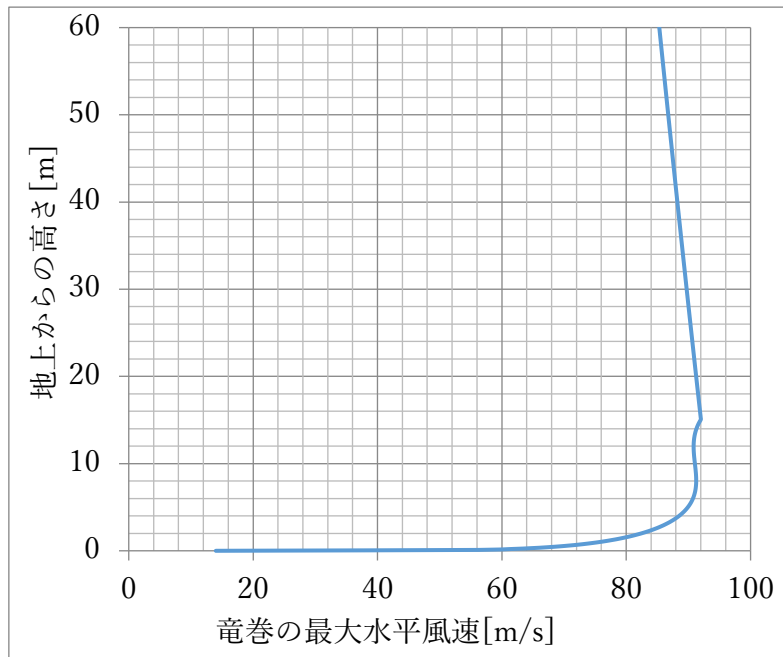


図2 フジタモデルの風速場における最大水平風速と地上からの高さの関係 (r=1)

(2) 地面効果の影響

地表面付近の物体については、物体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倍までの範囲で連続的に減衰するように作用する。

3. フジタモデルによる飛散解析の特徴について

フジタモデルによる飛散解析の特徴的な傾向として、地上からの初期高さが増加するに従い、約10mまでは飛来物の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3参照)

- ① 地上からの初期高さが増加するに従い（約10mまでの範囲（図3中の①））、風速場に滞空する時間が長くなり、飛来物の水平速度は増加する傾向となる。
- ② 地上からの初期高さが高い場合（約10m以上の範囲（図3中の②））は、図2に示す通り、地上からの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モデルとなっていることから、飛来物の水平速度も同様に低下していく。

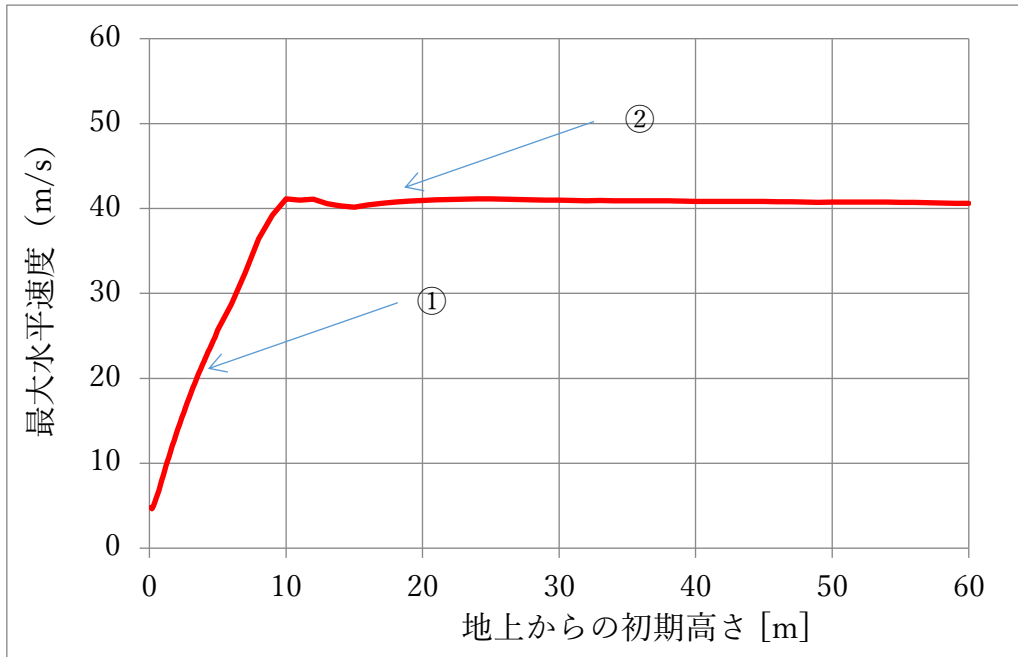


図3 フジタモデルを用いた飛散解析における地上からの初期高さと飛来物の水平速度の関係（鋼製材）