

本資料のうち、枠囲みの内容は、機密事項に属しますので公開できません。

柏崎刈羽原子力発電所第7号機 工事計画審査資料	
資料番号	KK7補足 - 019 - 3 改7
提出年月日	2020年 7月13日

資料3

竜巻への配慮に関する説明書に係る補足説明資料

2020年 7月

東京電力ホールディングス株式会社

補足説明資料目次

．はじめに

1. 設計竜巻の最大風速 92m/s の設定について
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抽出について
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
4. 建屋開口部の調査結果について
5. 飛来物の選定について
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について
7. 屋外の重大事故等対処設備の竜巻防護設計について
8. フジタモデルを適用した場合における竜巻感度解析の K6/7 原子炉設置変更許可への影響確認について

補足説明資料	設置許可まとめ資料『第6条 外部からの衝撃による損傷の防止』 引用内容	通しページ番号
1. 設計竜巻の最大風速92m/sの設定について	別添2-1 竜巻影響評価について ・2. 基準竜巻・設計竜巻の設定	6
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抽出について	別添2-1 竜巻影響評価について ・添付資料1.2 外部事象防護対象施設及び評価対象施設の抽出について	47
別紙1 タービン建屋機器配置	-	55
別紙2 竜巻飛来物による7号機SGTS排気管損傷時の事故時被ばく評価への影響について	-	61
別紙3 竜巻飛来物による主排気筒損傷時の影響について	-	64
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	別添2-1 竜巻影響評価について ・添付資料1.4 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について	65
4. 建屋開口部の調査結果について	-	77
別紙1 防護対策施設の設置方針について	-	98
5. 飛来物の選定について	-	109
別紙1 飛散評価方法について	-	115
別紙2 竜巻影響評価におけるフジタモデルの適用について	別添2-2 竜巻影響評価におけるフジタモデルの適用について	123
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について	-	166
別紙1 BRL式について	-	174
7. 屋外の重大事故等対処設備の竜巻防護設計について	-	177
8. フジタモデルを適用した場合における竜巻感度解析のK6/7原子炉設置変更許可への影響確認について	-	198
別紙1 流入層高さの感度解析範囲の考え方	-	208
別紙2 竜巻感度解析結果	-	210
別紙3 地表面付近の風速の不確かさに関する考察	-	216
別紙4 感度解析に用いた風速分布について	-	223

・ 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ものである。

本補足説明資料と添付書類との関連を表 - 1 に示す。

- ・ -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、
-1-1-3-3「竜巻への配慮に関する説明書」

表 - 1 補足説明資料と添付書類との関連

工事計画添付書類に係る補足説明資料（竜巻） 資料 3	該当添付書類
竜巻への配慮に関する説明書に係る補足説明資料 1. 設計竜巻の最大風速 92m/s の設定について 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抽出について 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 4. 建屋開口部の調査結果について 5. 飛来物の選定について 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について 7. 屋外の重大事故等対処設備の竜巻防護設計について 8. フジタモデルを適用した場合における竜巻感度解析の K6/7 原子炉設置変更許可への影響確認について	-1-1-3-3 竜巻への配慮に関する説明書 -1-1-3-3-1 竜巻への配慮に関する基本方針 -1-1-3-3-1 竜巻への配慮に関する基本方針 -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 -1-1-3-3-3 竜巻防護に関する施設的设计方針 -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 の設定について

1. 設計竜巻の最大風速 92m/s の設定について

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。

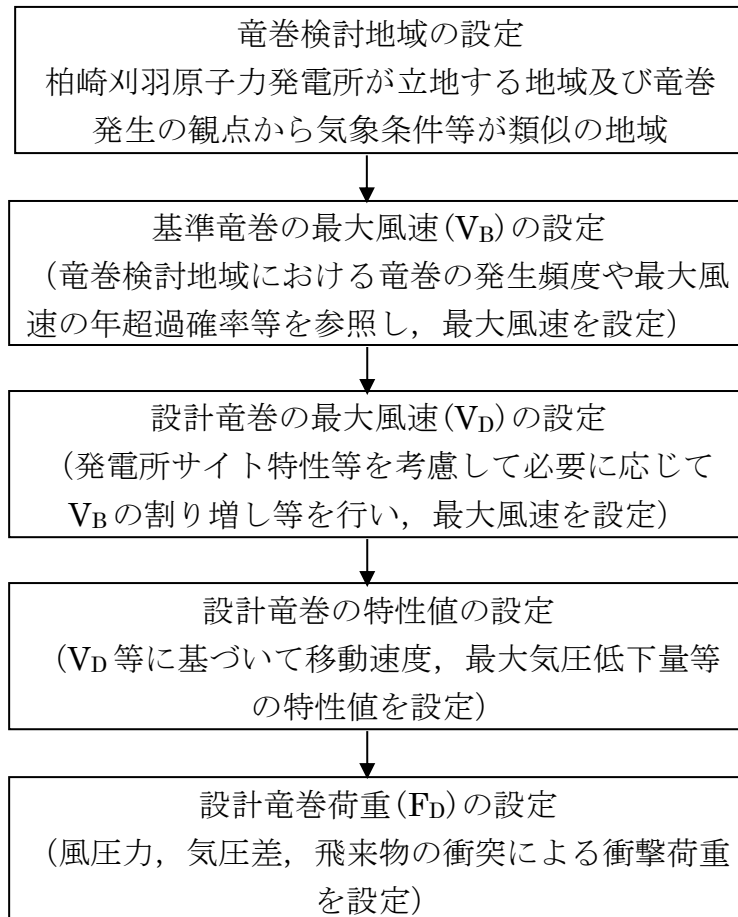


図1.1.1 基準竜巻・設計竜巻の設定に係る基本フロー

1.2 竜巻検討地域の設定

柏崎刈羽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、柏崎刈羽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 33,395km²）。以下にその妥当性確認の結果を示す。

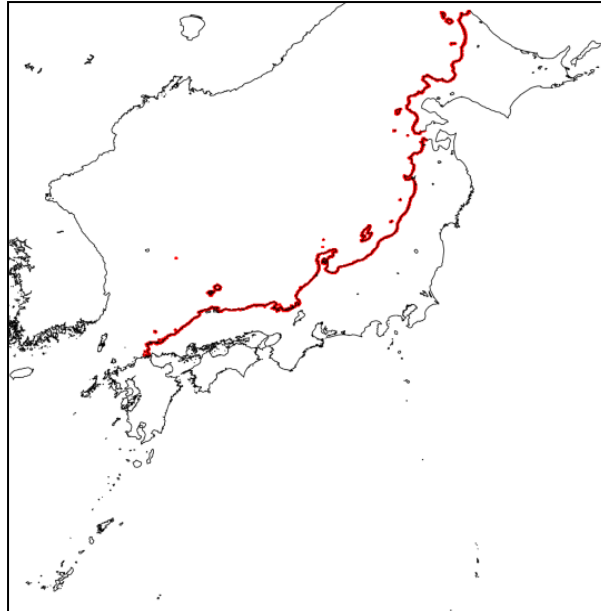


図1.2.1 竜巻検討地域（赤線部）

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

「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。

水平スケール	1ヶ月	1日	1時間	1分	1秒
10000km	定常波 プラネタリー波	超長波 潮汐波 赤道波			マクロαスケール
2000km		長波 傾圧波 低気圧 高気圧			マクロβスケール
200km		前線 台風 熱帯低気圧			メソαスケール
20km		スコールライン 内部波 山岳波	集中豪雨/豪雪 マルテセル		メソβスケール
2km			(雷雨)セル 内部重力波 晴天乱流	対流	メソγスケール
200m				竜巻 短い重力波 積乱雲	マイクロαスケール
20m				つむじ風 サーマル	マイクロβスケール
				プルーム 乱流 粗度	マイクロγスケール

図 1.2.1.1 竜巻とその関連気象の時空間スケール

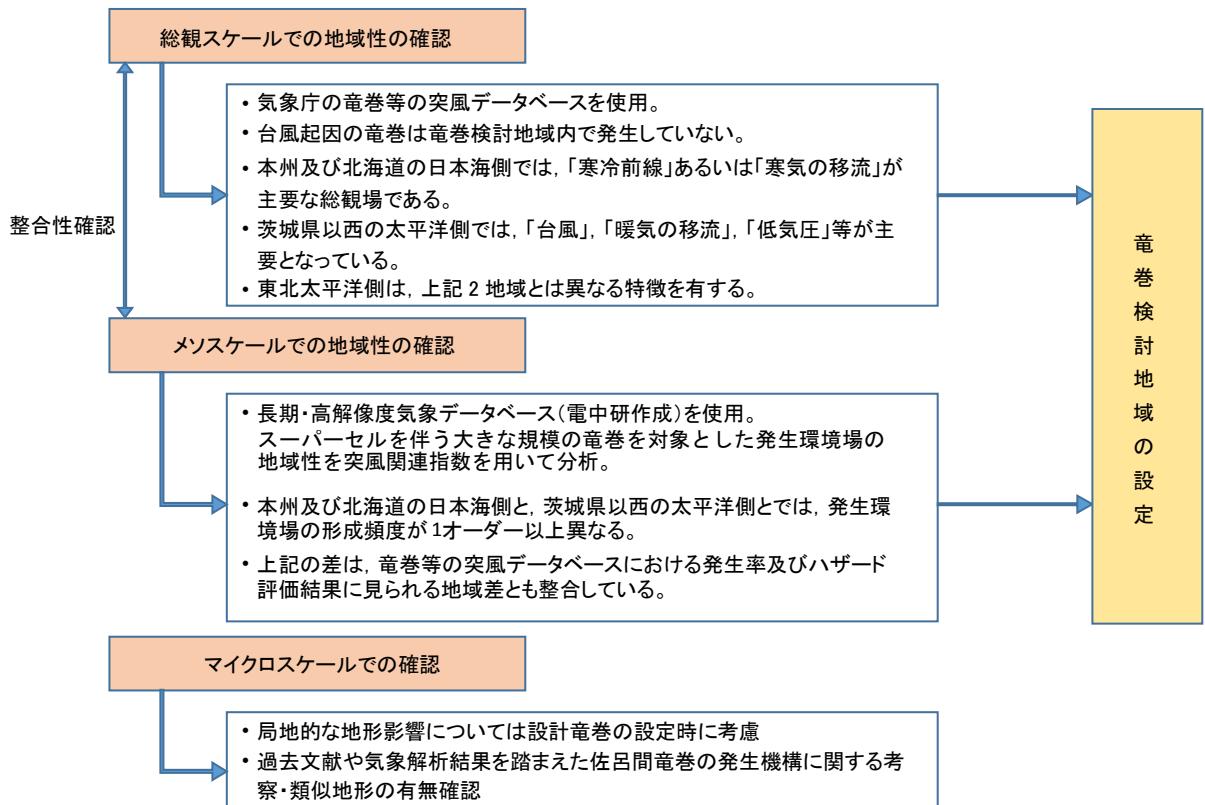


図 1.2.1.2 竜巻検討地域の検討フロー

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、「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の発生した場合も、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、東北地方の日本海側及び北陸地方ではF2竜巻が1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 DB 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低め。
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 of 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	局地性擾乱, 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。

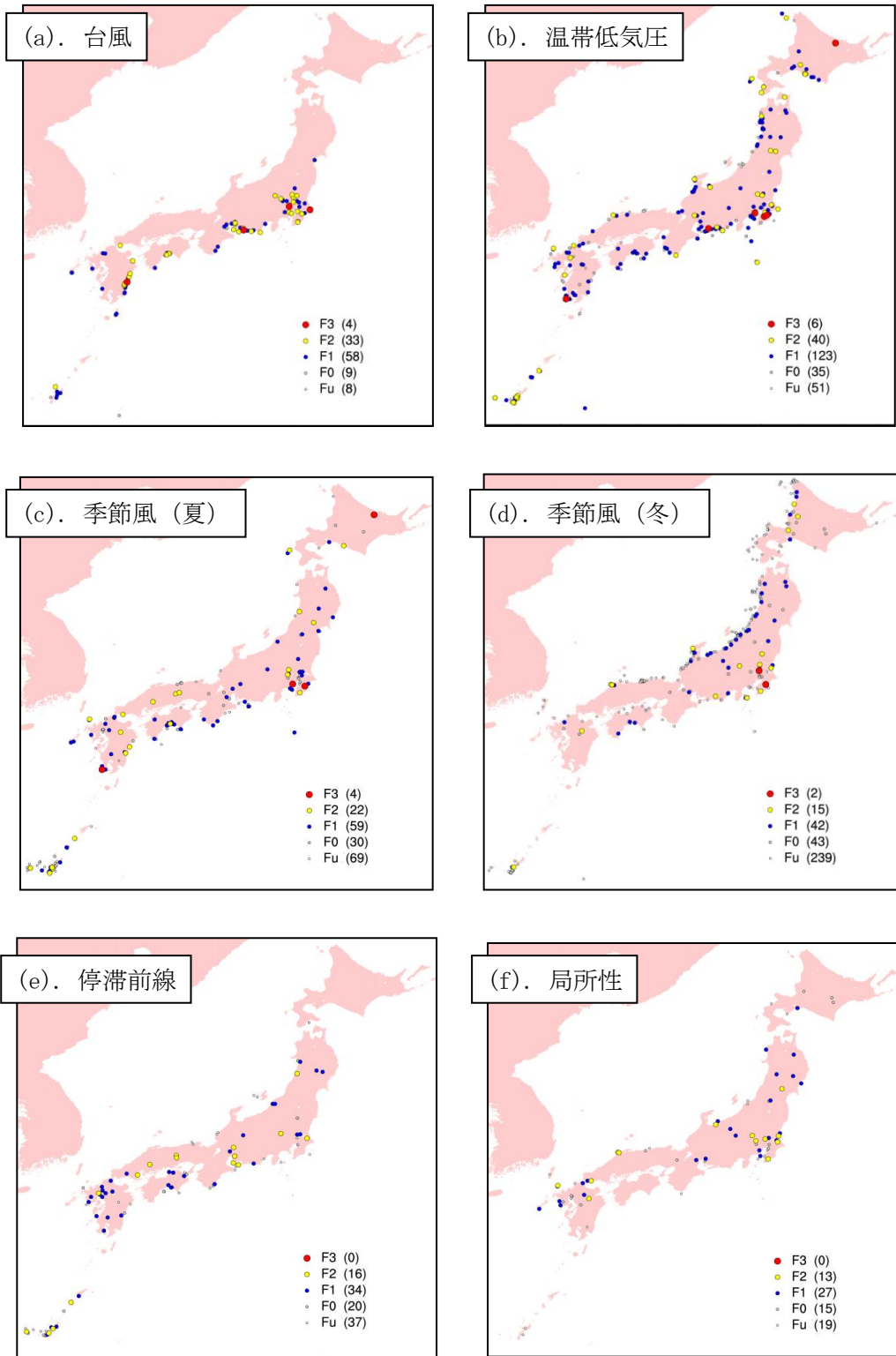


図 1.2.2.1 総観場ごとの竜巻発生地点の分布(1961年～2012年)
 (気象庁竜巻等の突風データベースのデータをもとに作成)

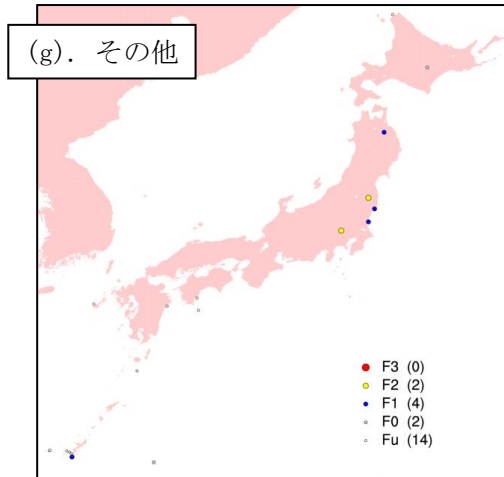


図 1.2.2.1(続き) 総観場ごとのスケール別竜巻発生地点の分布 (1961年～2012年)
(気象庁竜巻等の突風データベースのデータをもとに作成)

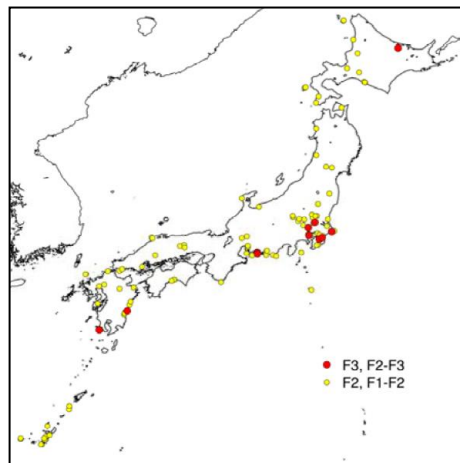
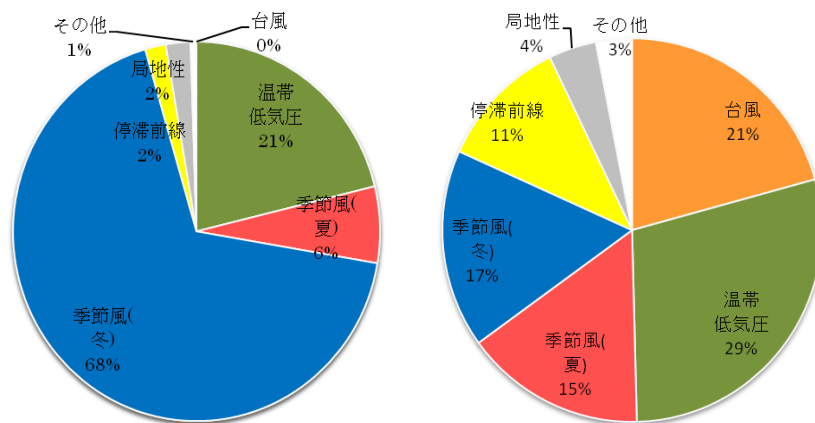


図 1.2.2.2 F2以上の竜巻発生箇所
(気象庁竜巻等の突風データベースのデータをもとに作成)



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、独立行政法人原子力安全基盤機構の「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個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、柏崎刈羽原子力発電所は、竜巻集中地域④(新潟県・富山県)に立地している。したがって、基本的な考え方としては柏崎刈羽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④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④で45事例であり、この期間に④で観測されているもっとも強い竜巻はF1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く、また竜巻集中地域④以外の日本海沿岸ではF2規模の竜巻も発生しているため、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、観測されたもっとも強い竜巻は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④のF1以上の竜巻発生確率は、 2.9×10^{-5} 、 2.5×10^{-5} (個/年/km²)であることから、竜巻検討地域は単位面積あたりの竜巻発生数が大きくなるよう、かつ藤田スケール(以下「Fスケール」という。)が大きな竜巻が含まれるような設定となっている。

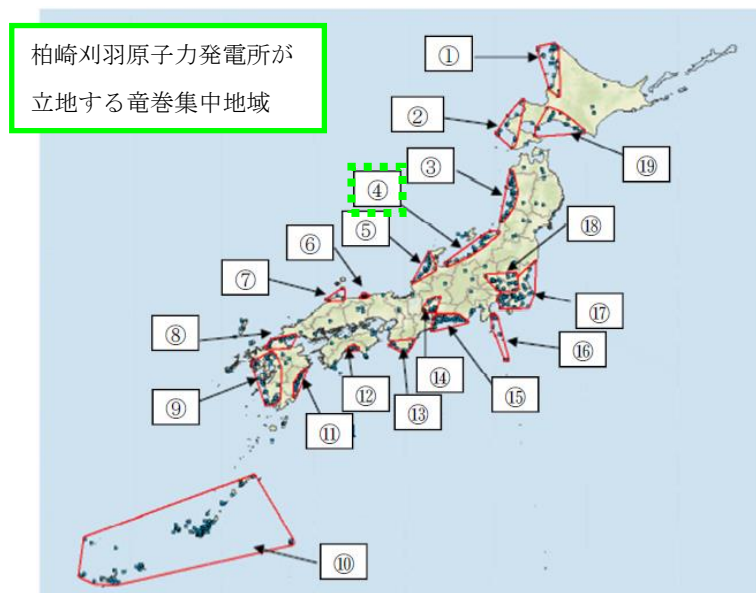
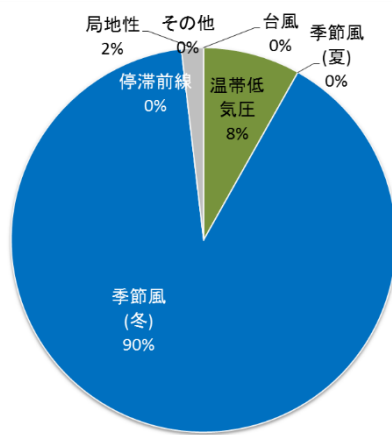


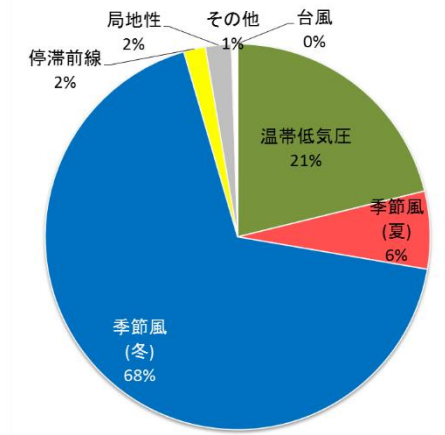
図1.2.3.1 竜巻の発生する地点と竜巻が集中する19個の地域
(JNES「原子力発電所の竜巻影響評価ガイド(案)及び解説」より引用)

竜巻の地域特性を検討するため、竜巻集中地域④と竜巻検討地域、及び竜巻集中地域④に隣接する竜巻集中地域③（青森県日本海側～山形県）と⑤（石川県西部～福井県北西部）における総観場の比較を行った。

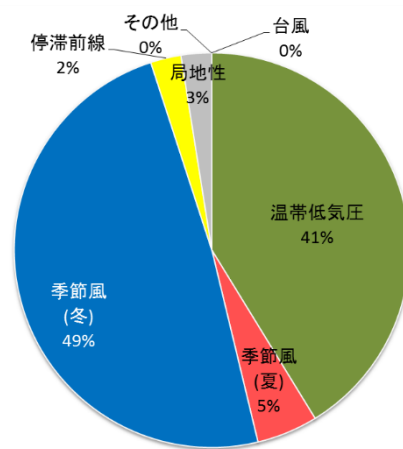
図 1.2.3.2 に各地域の竜巻発生要因に関する総観場の特徴を示す。また、表 1.2.3.1 に総観場の特徴を示す。



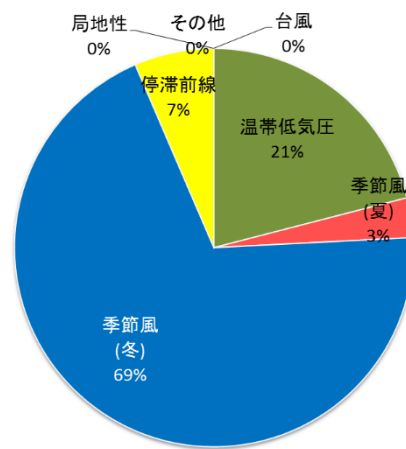
竜巻集中地域④（新潟県・富山県）



竜巻検討地域（日本海沿岸）



竜巻集中地域③
（青森県日本海側～山形県）



竜巻集中地域⑤
（石川県西部～福井県北西部）

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④で発生した竜巻の総観場は、「季節風（冬）」が90%、「温帯低気圧」が8%を占める。竜巻検討地域では、竜巻集中地域と同様に「季節風（冬）」と「温帯低気圧」の比率が高い。これらの地域では、寒気にもよ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源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④に隣接する竜巻集中地域③と⑤については、温帯低気圧の割合は竜巻検討地域④よりもやや高いものの、やはりどちらの地域も「季節風（冬）」と「温帯低

気圧」が竜巻発生的主要原因となっている。

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 全体	45	季節風 (冬) 90%	温帯低気圧 8%	局地性 2%	東 32%
中 F1	7	季節風 (冬) 88%	局地性 7%	温帯低気圧 5%	東北東 43%
地 F0	7	季節風 (冬) 86%	温帯低気圧 14%		東, 東北東 33%
④ F 不明	31	季節風 (冬) 91%	温帯低気圧 8%	局地性 1%	北東 43%
F0 以上	14	季節風 (冬) 87%	温帯低気圧 9%	局地性 4%	東北東 38%
検 全体	192	季節風 (冬) 68%	温帯低気圧 21%	季節風 (夏) 6%	東 39%
討 F2	10	温帯低気圧 63%	季節風 (冬) 23%	局地性 9%	北東 50%
地 F1	40	温帯低気圧 51%	季節風 (冬) 42%	局地性 6%	東 35%
域 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 全体	40	季節風 (冬) 49%	温帯低気圧 41%	季節風 (夏) 5%	東 36%
中 ③					
集 全体	31	季節風 (冬) 69%	温帯低気圧 21%	停滞前線 7%	東 55%
中 ⑤					
太 全体	337	温帯低気圧 29%	台風 21%	季節風 (冬) 17%	北東 23%
平					
洋					

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)

現象区別	発生日時	発生場所	F スケール*	総観場
竜巻	1962/09/28 14:20	北海道宗谷支庁 東利尻町	(F2)	寒冷前線
竜巻	1971/10/17 05:00	北海道留萌支庁 羽幌町	(F2)	寒気の移流
竜巻	1974/10/03 19:05	北海道檜山支庁 奥尻郡奥尻町	(F1～F2)	温暖前線
竜巻	1974/10/20 15:00	北海道檜山支庁 檜山郡上ノ国町	(F1～F2)	寒冷前線
竜巻	1975/05/31 18:10	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
竜巻	1975/09/08 01:30	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
竜巻	1979/11/02 01:58	北海道渡島支庁 松前郡松前町	(F2)	日本海低気圧・温暖前 線
竜巻	1989/03/16 19:20	島根県簸川郡大社 町	(F2)	局地性じょう乱・寒気 の移流
竜巻	1990/04/06 02:55	石川県羽咋郡富来 町	F2	オホーツク海低気圧・ 気圧の谷
竜巻	1999/11/25 15:40	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

総観場での確認に加え、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、竜巻の発生しやす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、ドップラーレーダー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。

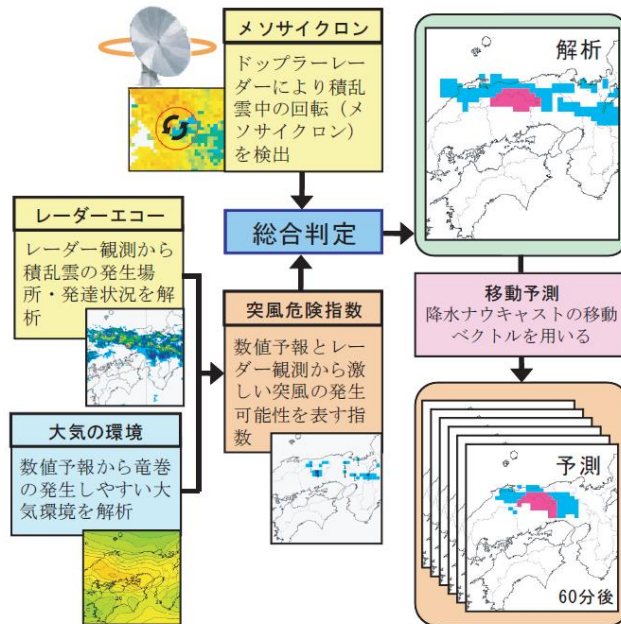


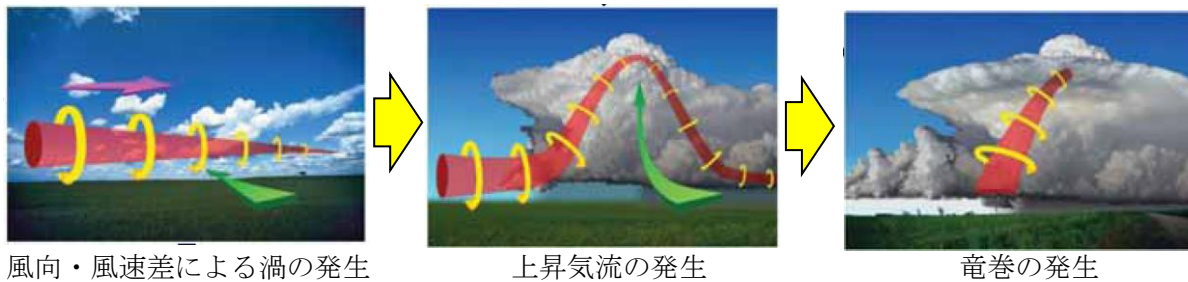
図 1.2.4.1.1 竜巻発生確度ナウキャストの解析・予測技術

(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つて気象庁等でも活用されていることを述べてきた。ここでは、本検討に用いる突風関連指数について説明する。

図 1.2.4.2.1 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、大気不安定度を表す指標として、「CAPE」、鉛直シアに伴って発生する水平渦度が親雲に取り込まれる度合いを表す指標として「SReH」を採用し、両者の指標が同時に高くなる頻度について、地域的な特徴を確認する分析を行った。また、両者を掛け合わせた指標である EHI による分析も行い、SReH・CAPE の同時超過頻度分析との比較を行った。SReH、CAPE、EHI については、竜巻の発生実態を解明する研究において国内外で広く利用され、竜巻発生環境場との関連づけ等の知見が多く蓄積されており、気象庁での竜巻予測に用いる突風関連指数の中でも主な指標として紹介されているため、本検討を行う上でも妥当なものと考えられる。

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



風向・風速差による渦の発生

上昇気流の発生

竜巻の発生

図 1.2.4.2.1 竜巻の発生メカニズム*

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

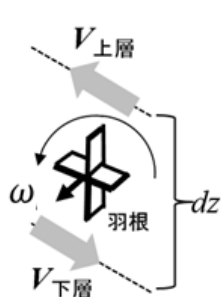
- a. SReH (Storm Relative Helicity：ストームの動きに相対的なヘリシティ)

風向・風速差により発生した渦度が親雲に取り込まれる度合いを示し，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)

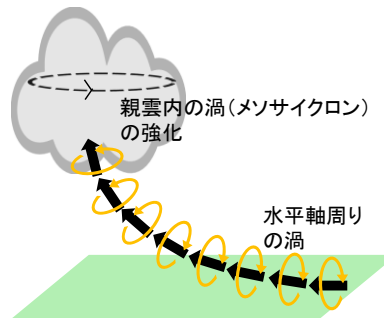
$$SReH = \int_{\text{地上}}^{\text{高度3km}} (\mathbf{V} - \mathbf{C}) \cdot \boldsymbol{\omega} dz$$

V：水平風速ベクトル C：ストームの移動速度

ω：鉛直シアに伴う水平渦度



水平渦度生成に関する模式図



水平渦度の親雲への輸送に関する模式図

図 1.2.4.2.2 SReH の算出概念

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

上昇気流の発達しやすさを表し、値が大きいほど背の高い積乱雲に発達し得るため、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

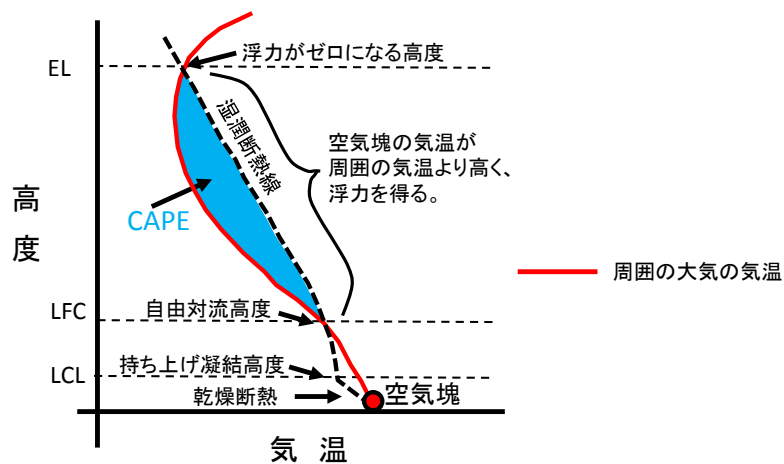


図 1.2.4.2.3 CAPE の算出概念

c. EHI (Energy Helicity Index)

SReH と CAPE の複合的な突風関連指数。スーパーセルや竜巻の発生しやすさを経験的に指標化したもので、米国では CAPE 単独や SReH 単独に比べると竜巻発生との相関関係が高いとされている。

$$EHI = \frac{SReH \times CAPE}{160000}$$

(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 1000 hPa に戻したときの絶対温度である。

2 つの空気塊を比較した場合、温位の高い空気塊は軽く上昇しやすく (不安定であり)、単位体積中に含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の持っている潜熱 (水蒸気が凝結する際に空気塊の温度が上昇) の影響も考慮された温位である。

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

(3) 突風関連指数の地域特性

これまでに発生した F3 竜巻に対する突風関連指数の分析結果を図 1.2.4.3.1 に示す。WRF モデル (Weather Research and Forecasting model) と呼ばれる数値気象モデルを用いて当時の気象場を解析 (再現) し, それをもとに突風関連指数を算出している。図 1.2.4.3.1 をみると, 季節によって CAPE の値が大きくなるものの, F3 竜巻事例では共通して SReH と CAPE の両方が大きくなる傾向が見られた。

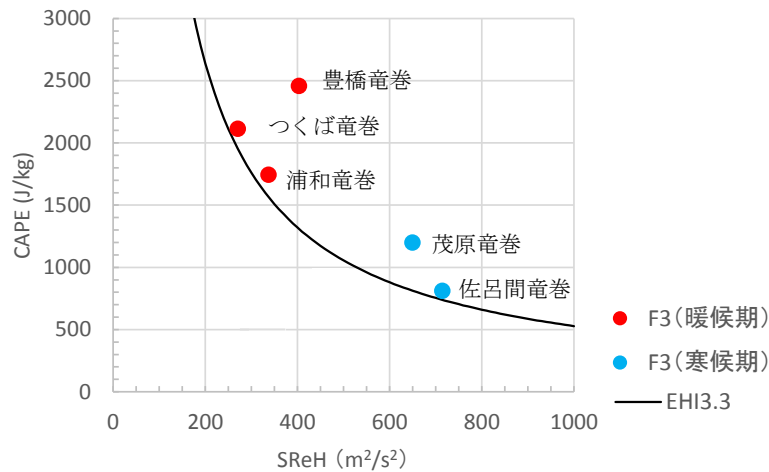


図 1.2.4.3.1 F3 竜巻における SReH と CAPE の関係

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

したがって, SReH と CAPE それぞれに対して閾値を設け, その閾値を同時に超える頻度 (以下, 同時超過頻度と呼ぶ。) 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考えられる。

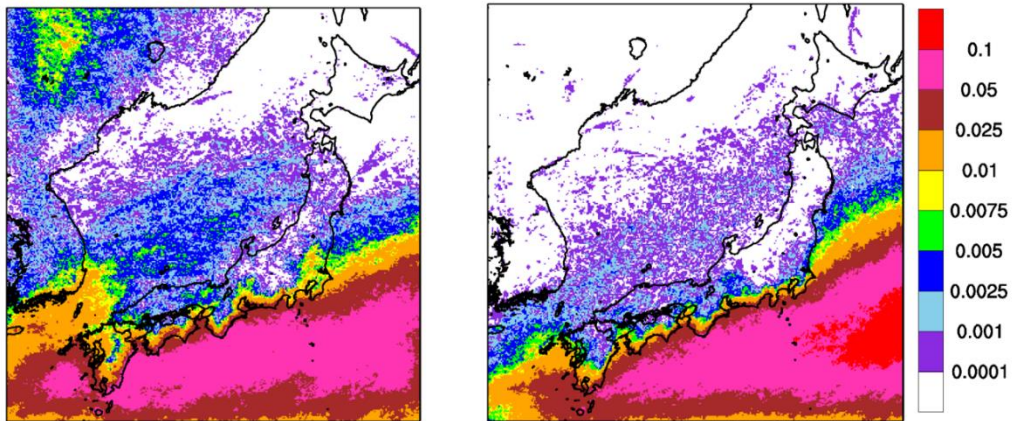
(4) 突風関連指数の同時超過頻度による地域性の検討

SReH と CAPE の閾値については, 図 1.2.4.4.1 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, CAPE の閾値については, 緯度・季節で絶対値が大きく変わるため, 5月~10月 (暖候期) 及び 11月~4月 (寒候期) に分けて閾値を設定した。

[5月-10月 (暖候期)] SReH : 250 m²/s², CAPE : 1600 J/kg

[11月-4月 (寒候期)] SReH : 250 m²/s², CAPE : 600 J/kg

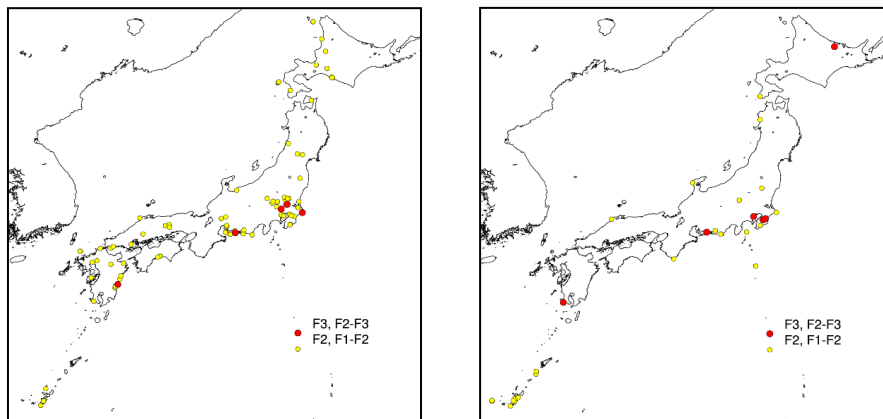
図 1.2.4.4.1 は, 1961年~2010年までの50年間にわたって1時間ごとに解析されたデータをもとに, SReH と CAPE の同時超過頻度分布をマップ化したものである。また, 気象庁竜巻等の突風データベースで確認された F2-F3 竜巻及び F3 竜巻の発生箇所を図 1.2.4.4.2 に示す。



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: %)



暖候期5月～10月

寒候期11月～4月

図1.2.4.4.2 F2規模以上の発生箇所
(気象庁「竜巻等の突風データベース」より作成)

また、EHI についても、SReH と CAPE と同様に閾値を設け超過頻度について分析した。EHI の閾値については、過去のいずれの F3 事例においても EHI が 3.5 程度を越えていることから、それを包含する値として EHI:3.3 を設定した（暖候期と寒候期は分けない）。

EHI の超過頻度分布をマップ化したものについても図 1.2.4.4.3 に示す。SReH, CAPE の同時超過頻度分布（図 1.2.4.4.1）に対応した結果となっており、EHI を用いて通年レベルの評価を行った場合でも地域特性がはっきり表れている。

以上により、CAPE, SReH, EHI について F3 以上を想定した特定の閾値を設けた場合の分析を実施したが、突風関連指数については不確実性が存在するため、EHI:3.0 及び 3.6 を設定した場合についても同様の地域性が現れることを確認した。（図 1.2.4.4.4）

ただし、閾値を大きくした場合、実際に F3 が発生した関東平野内を包含できなくなる。また閾値を小さくした場合、小さな竜巻が発生する環境場をカウントすることから、地域性は薄れていくことがわかる。

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

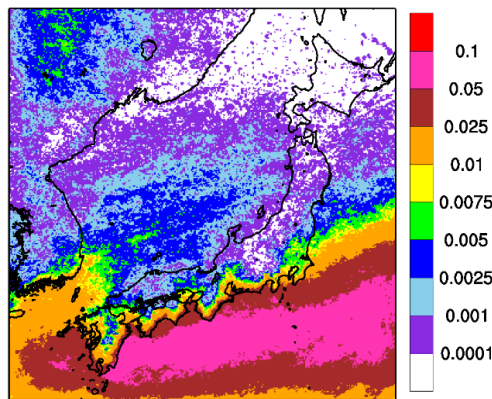


図1.2.4.4.3 EHIの超過頻度分布（単位：%，EHI閾値:3.3）

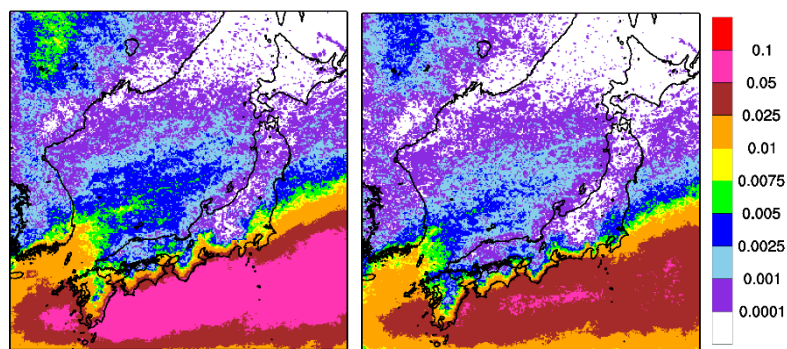


図 1.2.4.4.4 EHI の超過頻度分布（単位：%，EHI 閾値は左から，3.0，3.6）

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、柏崎刈羽原子力発電所の立地地域は、茨城県以西の太平洋沿岸よりも1~2 オーダー以下の頻度となることが分かった。

スーパーセルに伴って発生する大規模な竜巻形成につながる環境場の発生頻度分布の観点からも、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。

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

[5月-10月 (暖候期)] SReH : 200 m²/s², CAPE : 1000 J/kg

[11月-4月 (寒候期)] SReH : 200 m²/s², CAPE : 350 J/kg

EHI を用いる場合の閾値 EHI:1.5

SReH, CAPE の同時超過頻度分析の結果を図 1.2.4.4.5 に、EHI の超過頻度分布を図 2.2.4.4.6 に示す。

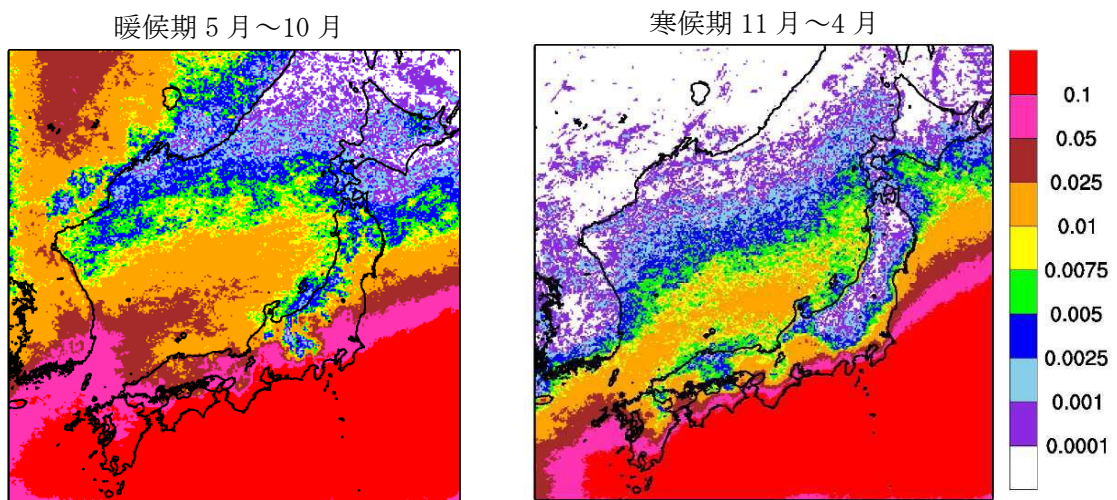


図1.2.4.4.5 F2規模のSReH, CAPE同時超過頻度分布 (単位: %)

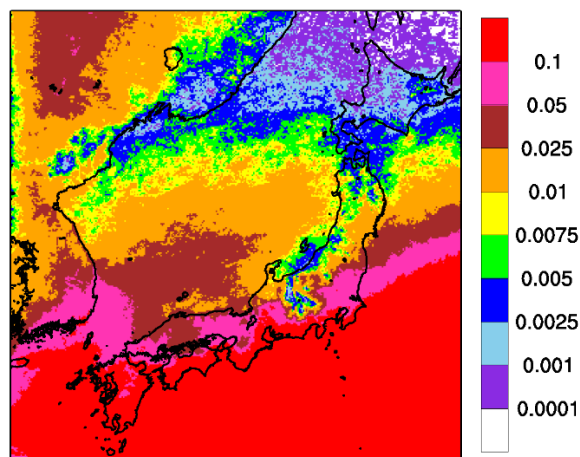


図1.2.4.4.6 EHIの超過頻度分布 (単位: %, EHI閾値:1.5)

F2 規模相当の閾値での同時超過頻度を解析した結果をみても、柏崎刈羽原子力発電所が立地する地域は、太平洋側と比較して頻度が低くなっていることが確認できる。

日本海側で大きな竜巻が発生しにくい原因の一つとしては、太平洋側から暖かく湿った空気が、日本列島の中央部に存在する高く複雑な山岳域を湿潤不安定な状態のまま乗り越えてくる事が出来ないため、日本海側では大きな竜巻を引き起こす環境場が形成しにくくなっていることが考えられる。

(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。

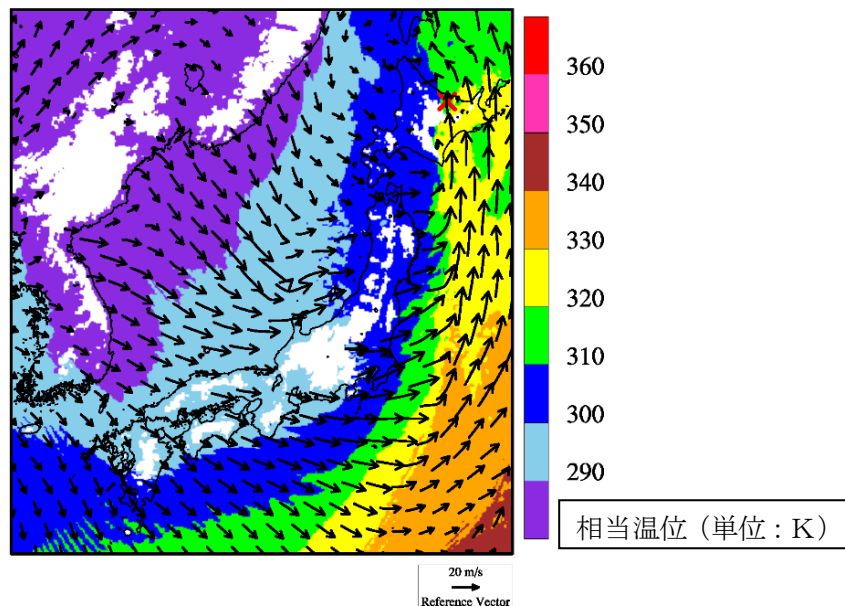
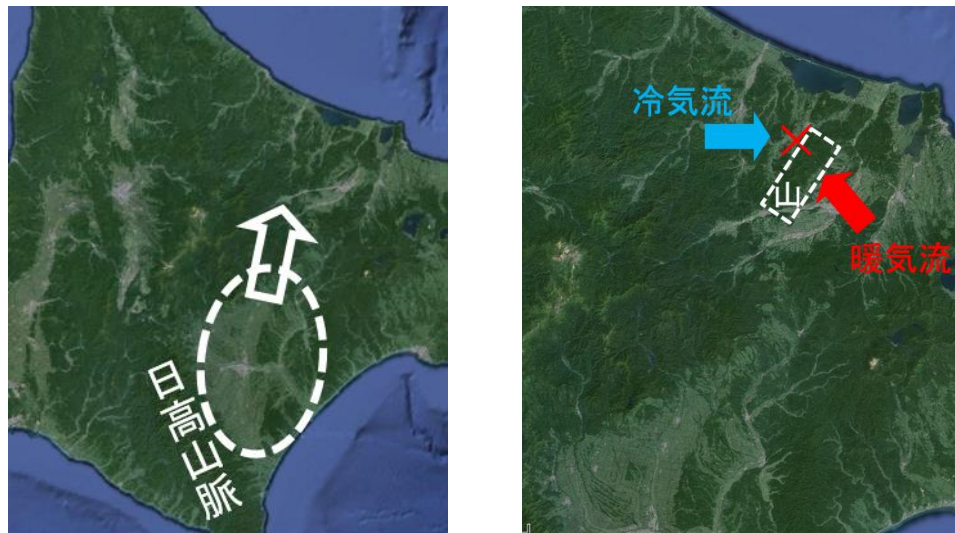


図 1.2.4.5.1 佐呂間竜巻発生時の風向・風速及び相当温位の分布（海拔 500m 高度）



親雲の発生位置（点線内）と移動方向 竜巻の発生位置（×）と影響が指摘される山（点線部）

図 1. 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）*

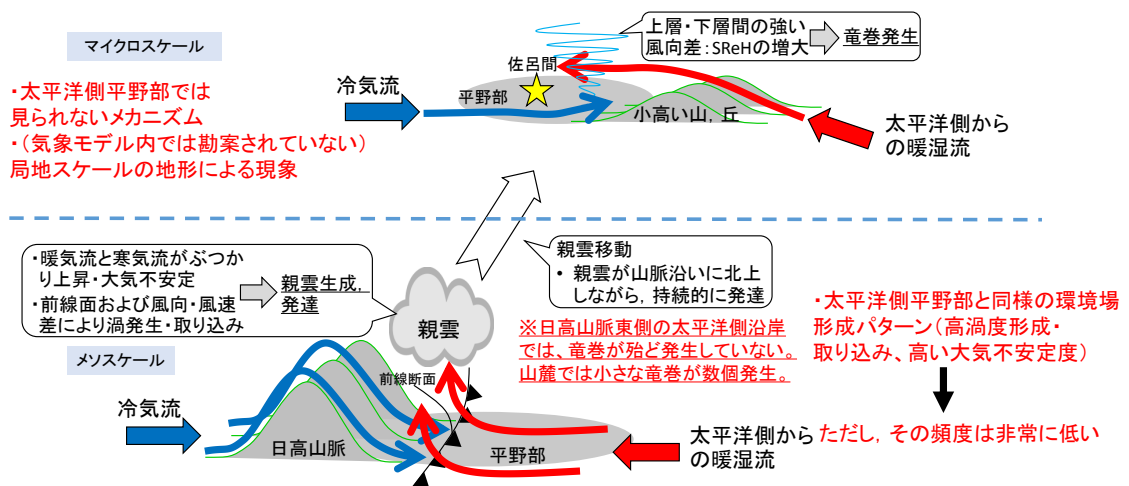


図 1. 2. 4. 5. 3 佐呂間竜巻の発生メカニズムに関する模式図*

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, 平成 27 年 1 月

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

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

考慮する際のポイントは、以下の 2 点である。

- ・太平洋側からの暖湿流が高標高山岳等に遮断されずに直接流入し得る地域である。
- ・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。

その観点で柏崎刈羽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、柏崎刈羽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、その観点から柏崎刈羽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。

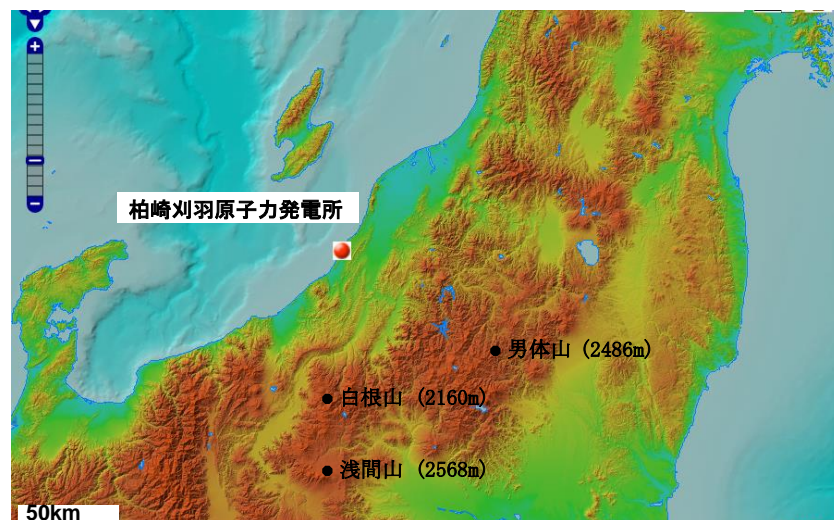


図1. 2. 4. 5. 4 柏崎刈羽原子力発電所周辺地形図

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より竜巻検討地域における過去最大竜巻は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)

現象区別	発生日時	発生場所	Fスケール*	総観場
竜巻	1962/09/28 14:20	北海道宗谷支庁 東利尻町	(F2)	寒冷前線
竜巻	1971/10/17 05:00	北海道留萌支庁 羽幌町	(F2)	寒気の移流
竜巻	1974/10/03 19:05	北海道檜山支庁 奥尻郡奥尻町	(F1～F2)	温暖前線
竜巻	1974/10/20 15:00	北海道檜山支庁 檜山郡上ノ国町	(F1～F2)	寒冷前線
竜巻	1975/05/31 18:10	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
竜巻	1975/09/08 01:30	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
竜巻	1979/11/02 01:58	北海道渡島支庁 松前郡松前町	(F2)	日本海低気圧・温暖前 線
竜巻	1989/03/16 19:20	島根県 簸川郡大 社町	(F2)	局地性じょう乱・寒気 の移流
竜巻	1990/04/06 02:55	石川県 羽咋郡富 来町	F2	オホーツク海低気圧・ 気圧の谷
竜巻	1999/11/25 15:40	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のものが、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、JNES 委託研究成果報告書*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することにより、竜巻発生確認数のばらつきやFスケールの偏りの影響も検討した。

注記*：東京工芸大学「平成 21～22 年度原子力安全基盤調査研究（平成 22 年度）竜巻による原子力施設への影響に関する調査研究」，独立行政法人原子力安全基盤機構委託研究成果報告書，平成 23 年 2 月

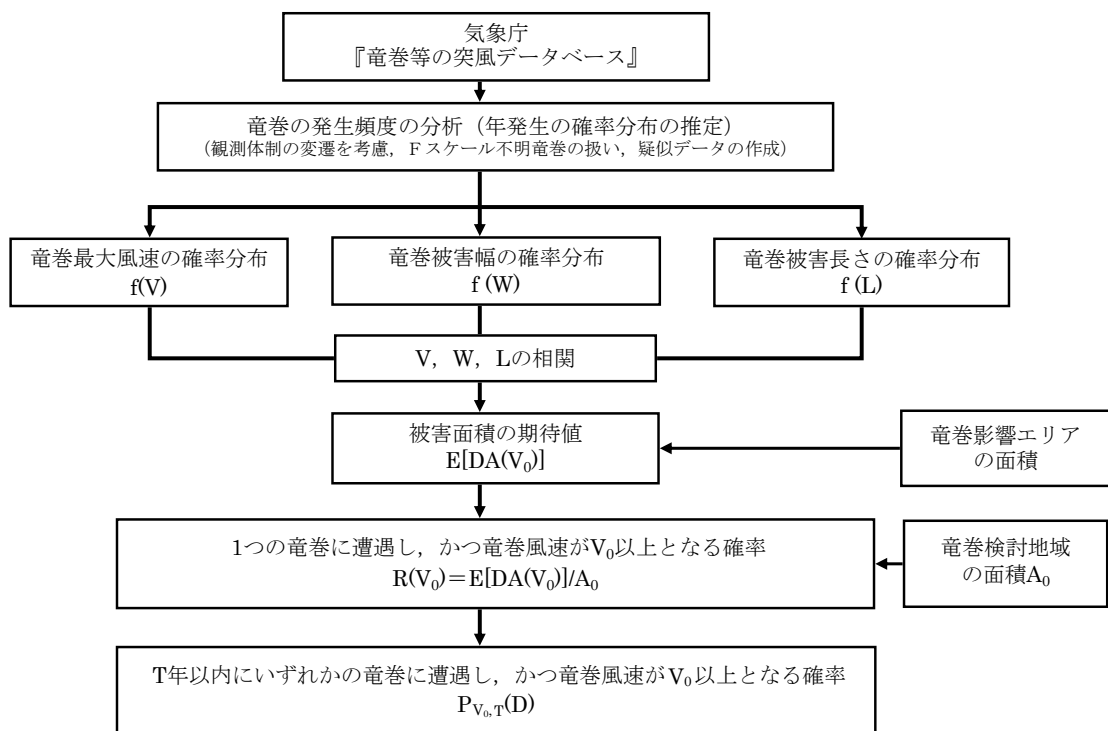


図 1.3.2.1 竜巻最大風速ハザード曲線の算定フロー

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スケール不明竜巻に対しては、観測体制が強化された2007年以降の年間発生数や標準偏差を用いる。
- (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用いる。
- (3) 被害が比較的大きく見逃されることがないと考えられるF2及びF3竜巻に対しては、観測記録が整備された1961年以降の全期間の年間発生数や標準偏差を用いる。

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、陸上での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。

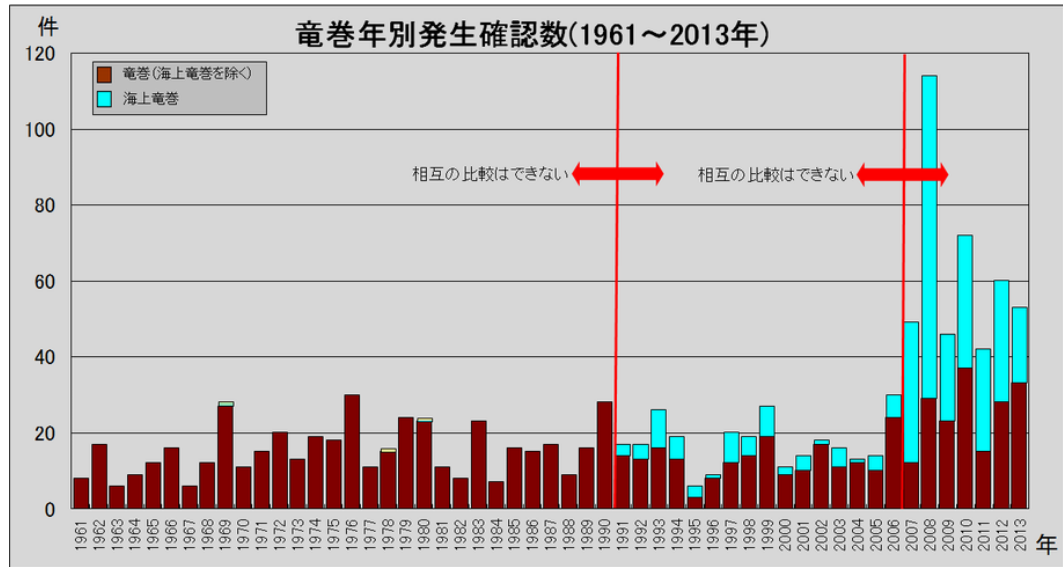


図 1.3.4.1 竜巻の年別発生確認数（気象庁 HP より）

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
	CV(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
	CV(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
	CV(年)	1.13	1.08	1.36	—	—	1.33	0.69	0.66
疑似 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
	CV(年)	0.74	1.08	0.93	2.52	—	1.33	0.69	0.54
疑似 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
	CV(年)	0.39	0.47	0.49	1.32	—	—	—	0.39

1.3.5 竜巻風速，被害幅，被害長さの確率分布及び相関係数

竜巻ハザードを評価するためには，一つの竜巻が発生した際の，竜巻風速，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 JNES 委託研究成果報告書を参照し，対数正規分布に従うものとする。(図 1.3.5.1～図 1.3.5.6)

なお，疑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 変量の確率分布関数を対象とするため，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。

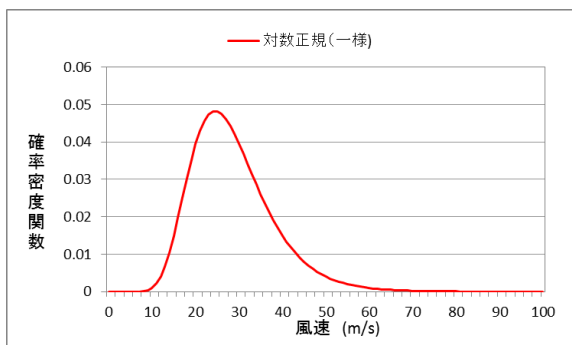


図1.3.5.1 竜巻風速の確率密度分布

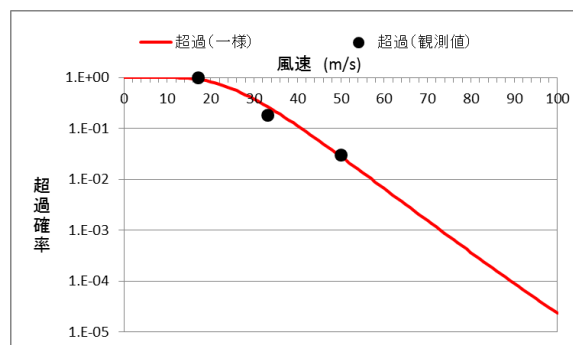


図1.3.5.2 竜巻風速の超過確率分布

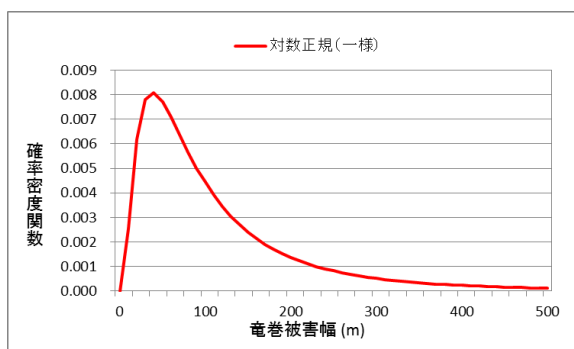


図1.3.5.3 被害幅の確率密度分布

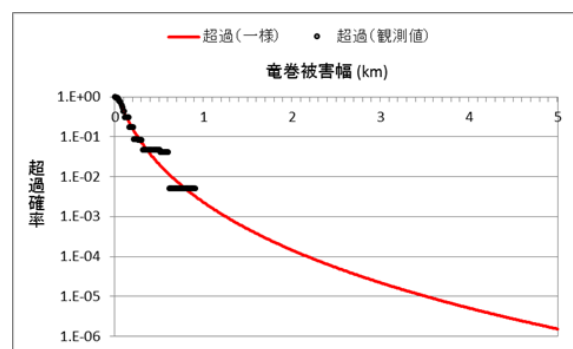


図1.3.5.4 被害幅の超過確率分布

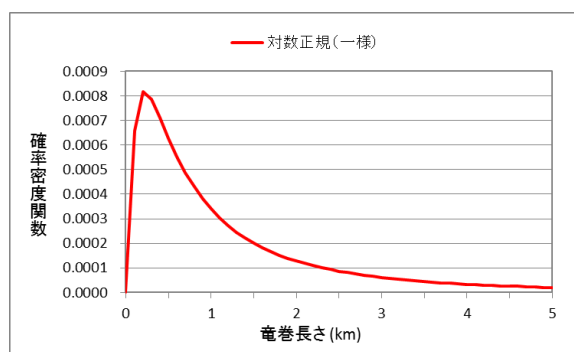


図1.3.5.5 被害長さの確率密度分布

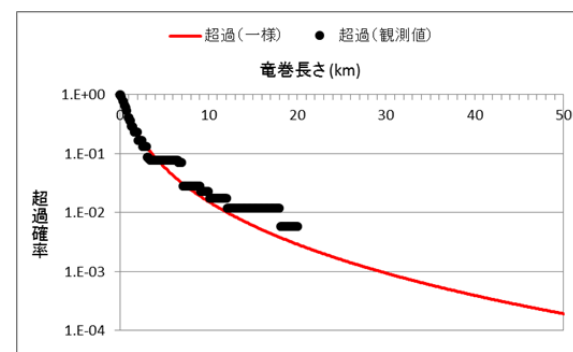


図1.3.5.6 被害長さの超過確率分布

表 1.3.5.1 竜巻風速，被害幅，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、柏崎刈羽原子力発電所の号機ごとに設定する。号機ごとのすべての評価対象施設の設置面積の合計値及び推定される竜巻被害域(被害幅、被害長さから設定)に基づいて、竜巻影響エリアを設定する。

図 1.3.6.1 に柏崎刈羽原子力発電所 7 号機の竜巻影響エリアを示す。また、設置変更許可申請時に合わせて設定した柏崎刈羽原子力発電所 6 号機の竜巻影響エリアを図 1.3.6.2 に示す。竜巻影響エリアは、柏崎刈羽原子力発電所 7 号機又は 6 号機の評価対象施設を含む長方形エリアの対角線長さが約 260m であることを考慮して、各号機の評価対象施設を包絡する円形のエリア(直径 300m, 面積約 $7.1 \times 10^4 \text{m}^2$)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。

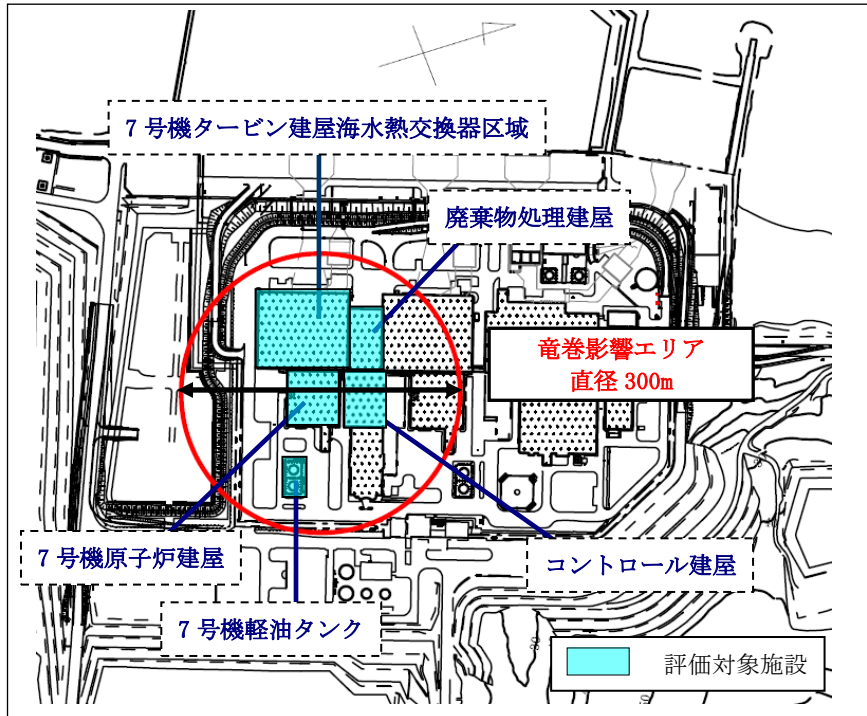


図1.3.6.1 7号機 竜巻影響エリア

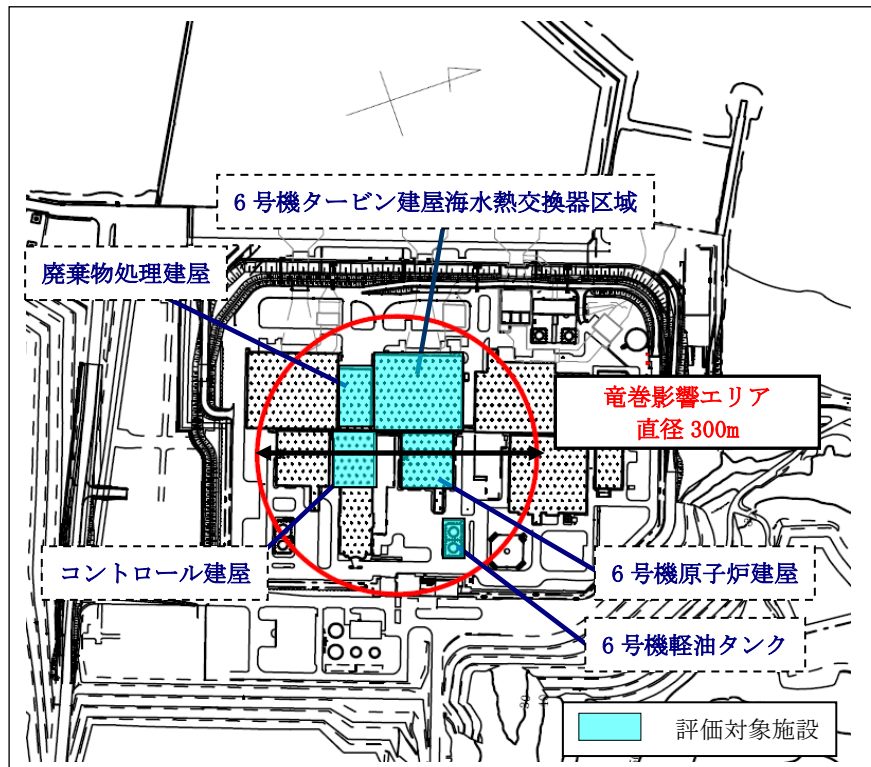


図1.3.6.2 6号機 竜巻影響エリア

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。

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

この $R(V_0)$ は、竜巻影響評価の対象地域の面積を A_0 (つまり竜巻検討地域の面積約33,395km²)、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。

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

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ときの長さであり、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

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

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300 m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。

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

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59m/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} *における風速である76m/sを V_{B2} とする。

なお、1km範囲ごとに短冊状に細分化した場合のハザード曲線については、算出を実施したものの、その技術的説明性が乏しいと考え、 V_{B2} の設定には使用しないものとした。

注記*：設計基準事故の発生頻度が 10^{-3} /年～ 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ている。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。

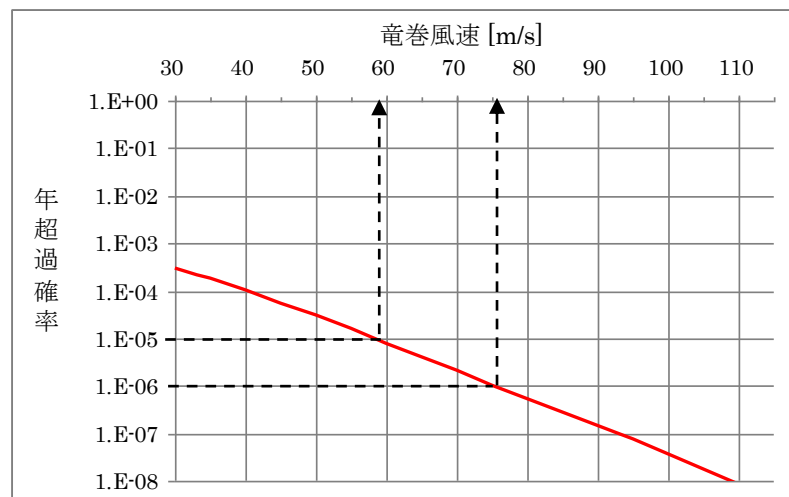
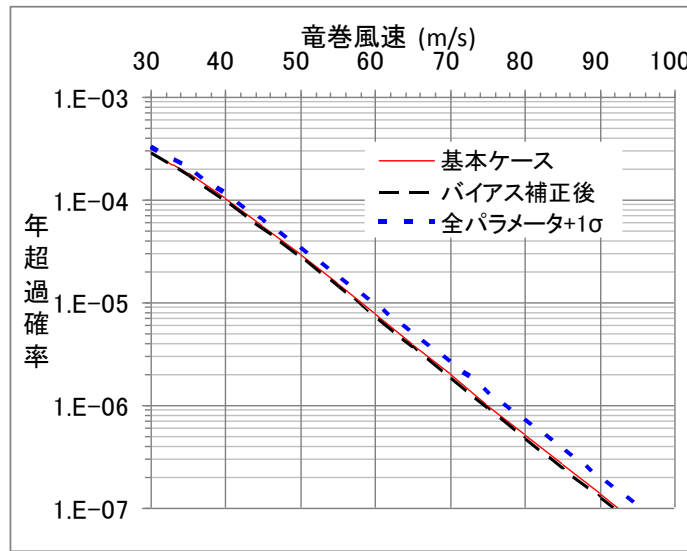


図1.3.8.1 竜巻最大風速のハザード曲線（海側，陸側5km範囲）

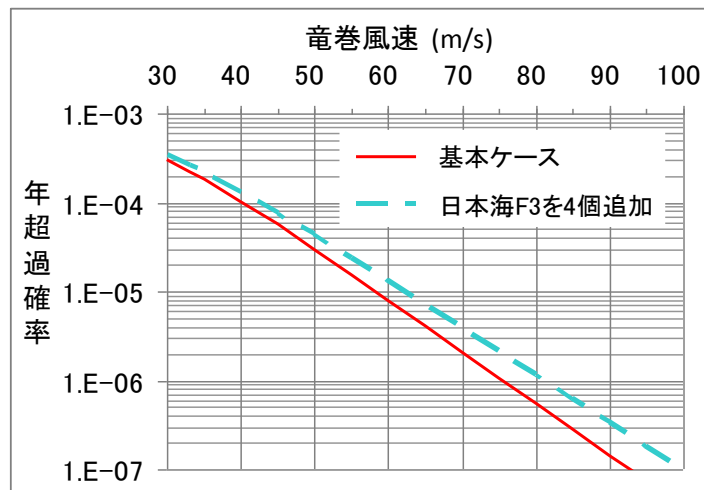
また、不確かさ要素のハザード算定結果への影響を検討した。

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、疑似データに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62.2m/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

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 $V_{B2}=76\text{m/s}$ のうち、大きい風速である 76m/s を柏崎刈羽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}	76
基準竜巻の最大風速 V_B	76

1.4 設計竜巻の最大風速 (V_D) の設定

柏崎刈羽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、柏崎刈羽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とき（渦 1 から渦 2 へ移動する場合）、基本的には渦は弱まり、下り斜面を移動するときには強まる。

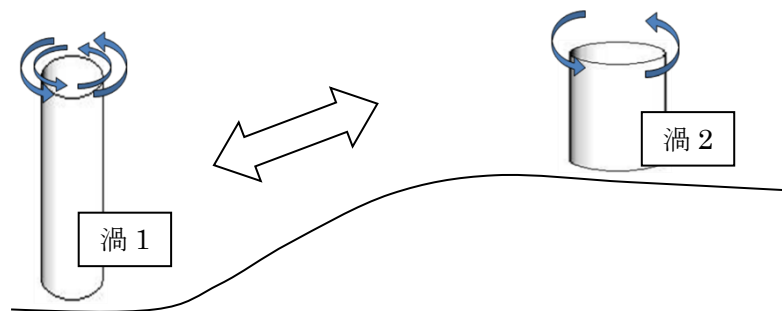


図 1.4.1.1 竜巻旋回流の地形影響に関する模式図

(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 柏崎刈羽原子力発電所周辺の地形

柏崎刈羽原子力発電所敷地周辺の地形を図 1.4.2.1 に、柏崎刈羽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 に、柏崎刈羽原子力発電所敷地周辺の地表面粗度を図 1.4.2.3 に示す。柏崎刈羽原子力発電所が立地する敷地は、北西が日本海に面し、三方を森林に囲まれた標高 60m 前後のなだらかな丘陵地である。

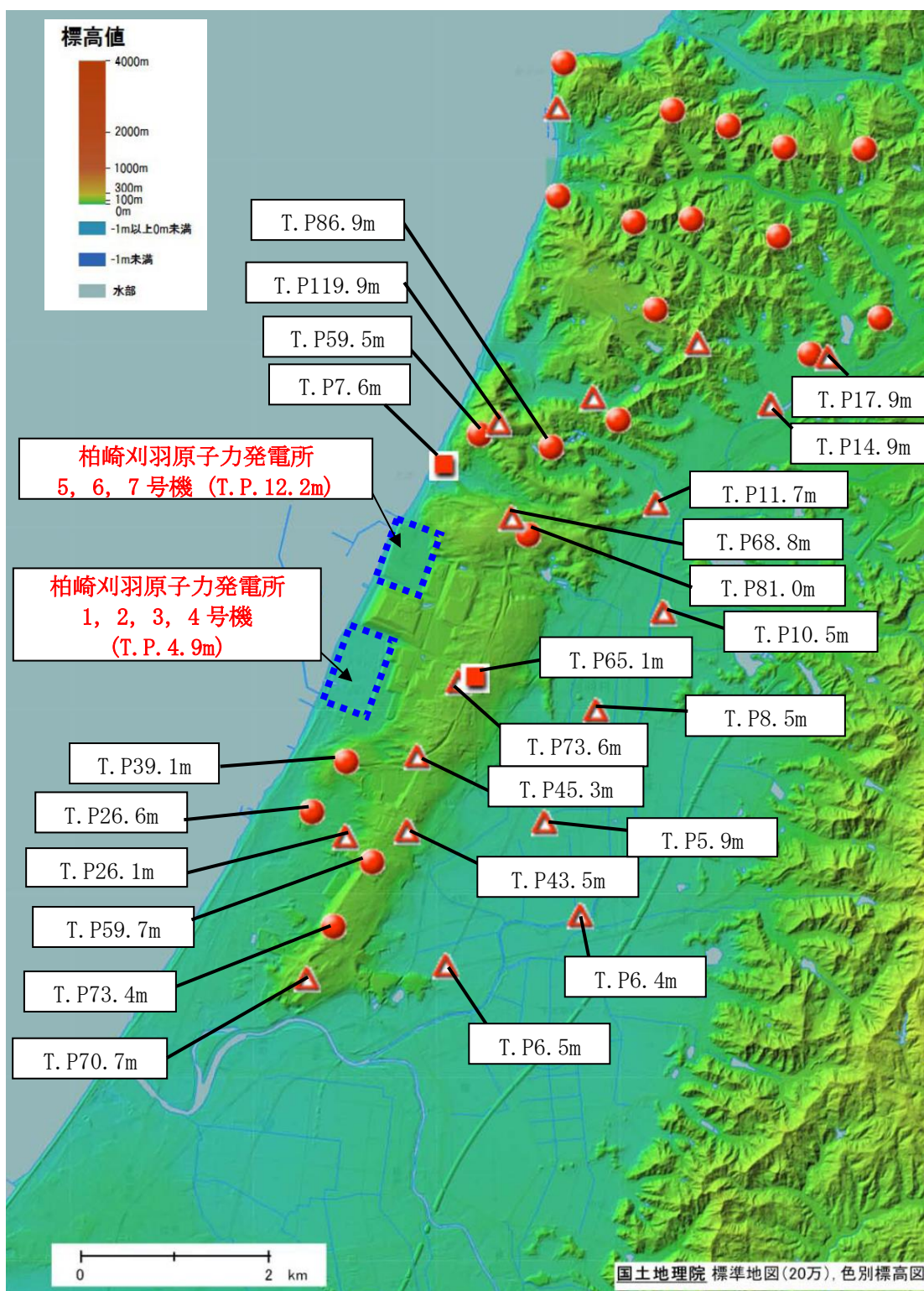


図 1. 4. 2. 1 柏崎刈羽原子力発電所周辺の地形
(国土地理院「電子国土 Web」より作成)

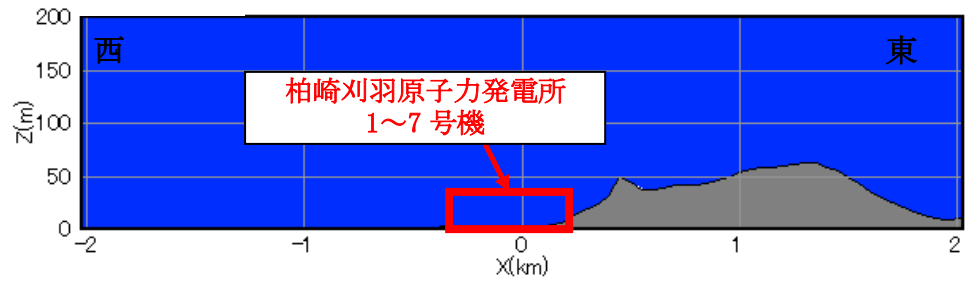


図 1. 4. 2. 2 柏崎刈羽原子力発電所東西方向の鉛直断面での地形起伏

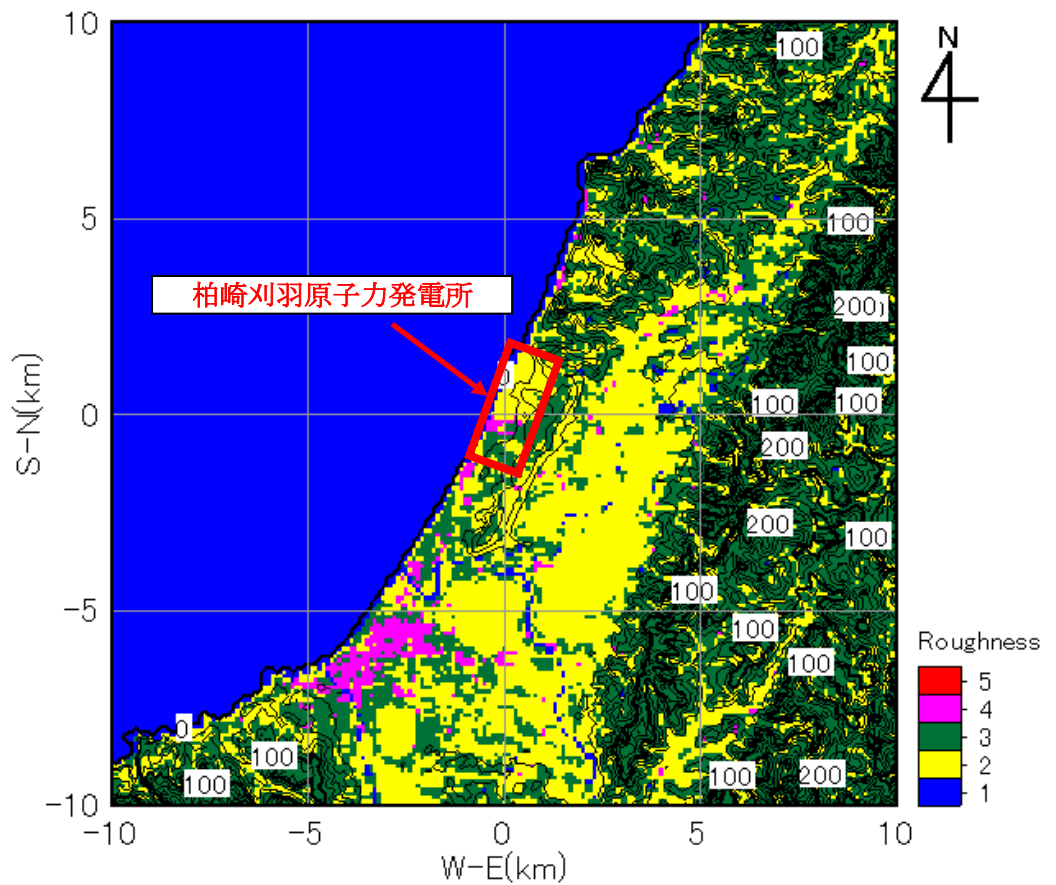


図 1. 4. 2. 3 柏崎刈羽原子力発電所周辺の地表面粗度

1. 4. 3 竜巻の移動方向の分析

柏崎刈羽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、JNES「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、集中地域③（青森県日本海側～山形県）、④（新潟県・富山県）及び⑤（石川県西部～福井県北西部）とした。

図 1. 4. 3. 1 に竜巻集中地域④周辺で発生した竜巻の移動方向、図 1. 4. 3. 2 に竜巻集中地域③、④及び⑤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、柏崎刈羽原子力発電所周辺で発生する竜巻は、陸側から海側（東から西）に向かう竜巻は極めて少なく、発電所西方の海上から東方向（陸側）へ向かう方向が多い。

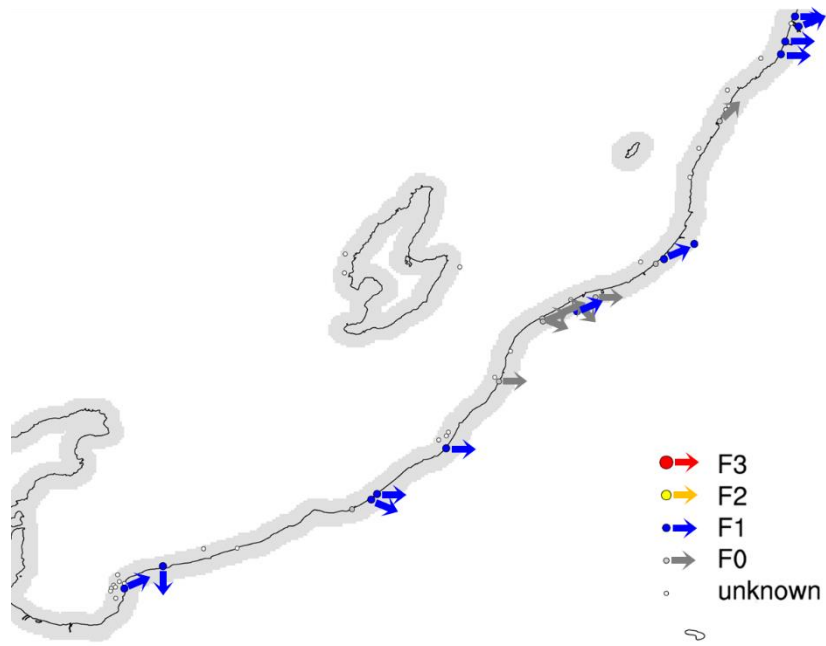


図1.4.3.1 竜巻集中地域④における竜巻移動方向 (F0以上のみ)

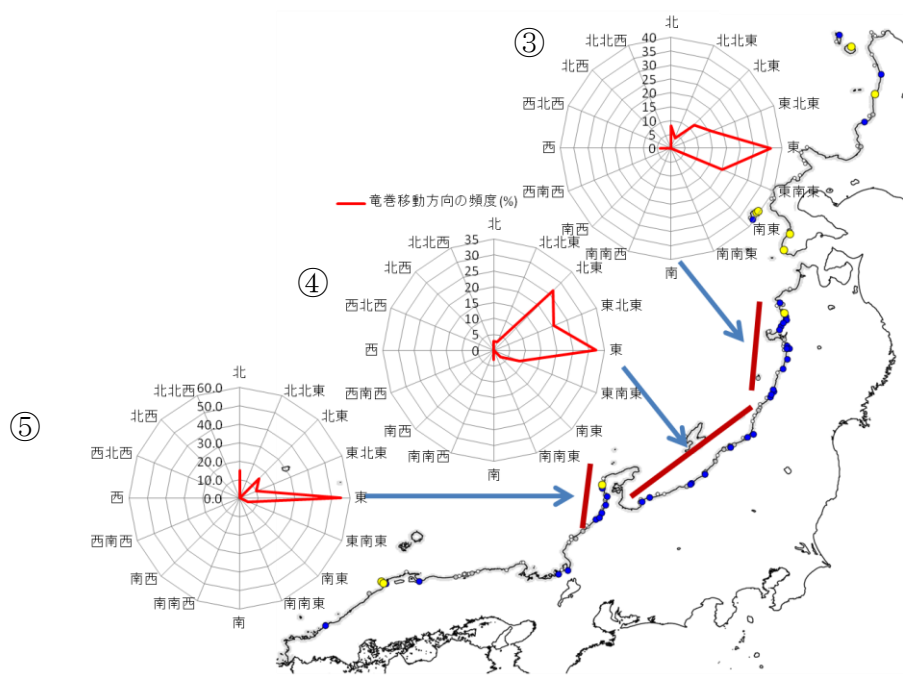


図 1.4.3.2 竜巻集中地域③, ④及び⑤における竜巻移動方向の頻度

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

柏崎刈羽原子力発電所周辺で発生する竜巻は、地形が平坦な海側から発電所敷地に進入する可能性が高く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。万が一発電所敷地外の東側（例えば刈羽村の平地）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、竜巻はなだらかな丘陵を通過する。この場合、丘陵がなだらかであるため、地形効果による竜巻の増幅はない。

(2) 地表面粗度による竜巻増幅

柏崎刈羽原子力発電所周辺では、発電所西方の海上から東方向（陸側）へ向かう竜巻の発生が極めて多く、竜巻が海上から陸側に移動する際には、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、柏崎刈羽原子力発電所では、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、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うち竜巻の影響を考慮する施設の抽出
について

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抽出について

柏崎刈羽原子力発電所7号機における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抽出フローを図2-1、抽出結果を表2-1に示す。具体的には、以下のStepにて抽出した。

Step1：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、系統及び機器のうち、外部事象防護対象施設*を抽出する。

注記*：外部事象に対し必要な構築物、系統及び機器（安全重要度分類のクラス1、クラス2及び安全評価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）並びにそれらを内包する建屋を抽出する。

また、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、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、若しくは、安全上支障のない期間に修復すること等の対応が可能な場合、安全機能を損なわないことから評価完了とする。

Step2：Step1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、気圧差及び飛来物衝突の影響を受ける屋外設備（当該設備を内包する建屋含む）を抽出する。

Step3：屋内設備だが外気との接続があるため、竜巻襲来時に気圧差荷重の影響を受ける設備を抽出する。

Step4：外部事象防護対象施設が設置されている施設等の外殻による防護機能が期待できないものを竜巻の影響を考慮する施設とする。なお、外殻による防護に期待できるかは、建屋・構築物等の竜巻荷重に対する健全性の確認結果より、設計飛来物の衝突による開口部の開放又は開口部建具の貫通の観点から、設備を抽出する。

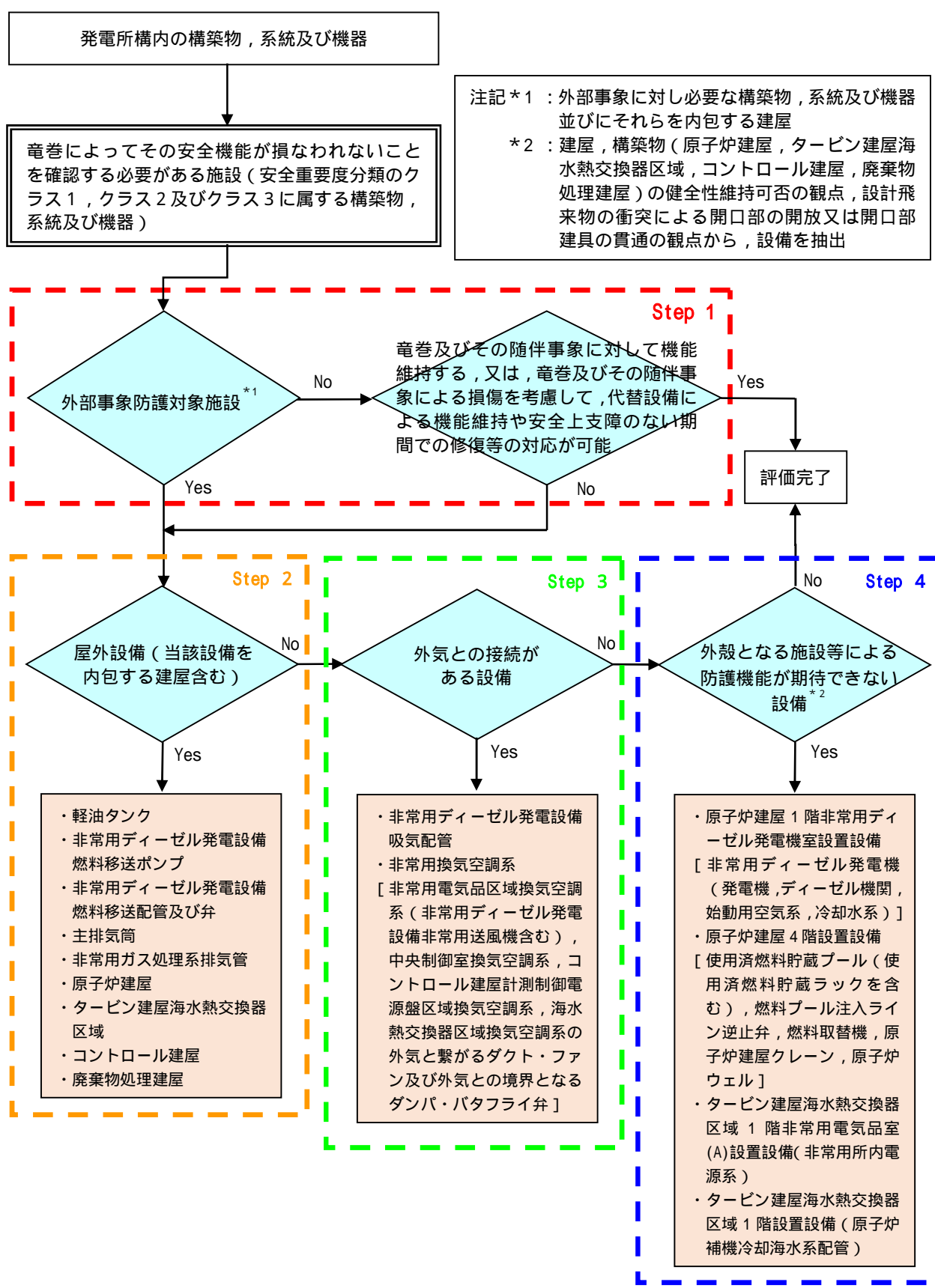


図2 - 1 外部事象防護対象施設のうち竜巻の影響を考慮する施設の抽出フロー

表 2-1 外部事象防護対象施設のつち竜巻の影響を考慮する施設の抽出結果 (1/5)

評価対象施設
 : YES X : No
 : 該当せず又は評価完了

分類	機能	配置場所	STEP1		STEP2		STEP3	STEP4	評価上の留意点	
			外部事象防護対象施設	機能維持する、又は、損傷を考慮して、代替設備による機能維持や安全上支障のない期間での修復等の対応が可能	屋外設備	外部事象防護対象施設を内包する施設 (原子炉建屋、タービン建屋、海水熱交換器区域、コントロール建屋、廃棄物処理建屋)				
PS-1	原子炉冷却材圧力バウンダリ機能	<ul style="list-style-type: none"> 原子炉冷却材圧力バウンダリを構成する機器・配管系 	R/B		X		X			
	過剰反応度の印加防止機能	<ul style="list-style-type: none"> 制御棒カップリング 制御棒駆動機構 	R/B		X		X			
	炉心形状の維持機能	<ul style="list-style-type: none"> 炉心支持構造物 燃料集合体 	R/B		X		X			
	原子炉の緊急停止機能	<ul style="list-style-type: none"> 原子炉停止系の制御棒による系 (制御棒、制御棒駆動系) 	R/B		X		X			
	未臨界維持機能	<ul style="list-style-type: none"> 原子炉停止系 (制御棒による系、ほう酸水注入系) 	R/B		X		X			
	原子炉冷却材圧力バウンダリの過圧防止機能	<ul style="list-style-type: none"> 主蒸気逃がし安全弁 (安全弁としての閉機能) 	R/B		X		X			
	原子炉停止後の除熱機能	<ul style="list-style-type: none"> 残留熱を除去する系統 (残留熱除去系 (原子炉停止時冷却モード)、原子炉隔離時冷却系、高圧炉心注水系、主蒸気逃がし安全弁 (手動逃がし機能)、自動減圧系 (手動逃がし機能)) サブレッションプール 	R/B		X		X			
	炉心冷却機能	<ul style="list-style-type: none"> 復水補給水系 (復水貯蔵槽) 非常用炉心冷却系 (残留熱除去系 (低圧注水系モード)、原子炉隔離時冷却系、高圧炉心注水系、自動減圧系 (主蒸気逃がし安全弁)) サブレッションプール 	Rw/B		X		X			
				R/B		X		X		
				Rw/B		X		X		
MS-1	放射性物質の閉じ込め機能、放射線の遮蔽及び放出低減機能	<ul style="list-style-type: none"> 原子炉格納容器 原子炉格納容器隔離弁及び原子炉格納容器バウンダリ配管 主蒸気流量制限器 残留熱除去系 (格納容器スプレイ冷却モード) 	R/B		X		X			
		<ul style="list-style-type: none"> 原子炉建屋原子炉区域 (ブローアウトパネル付き) 	屋外 (建屋)				X		ブローアウトパネルが気圧差で開放した場合、閉止を実施し、損傷した場合、補修を実施。原子炉建屋の構造強度評価にて、機能に対する影響を評価する。	
		<ul style="list-style-type: none"> 非常用ガス処理系 	R/B, 屋外 (主排気筒)				X		損傷を考慮し被ばく評価を実施。損傷した場合、補修を実施。	
		<ul style="list-style-type: none"> 可燃性ガス濃度制御系 	R/B		X		X		損傷を考慮し被ばく評価を実施。損傷した場合、補修を実施。	
		<ul style="list-style-type: none"> 主排気筒 (非常用ガス処理系非気管の支持機能) 	屋外				X			
		<ul style="list-style-type: none"> 遮蔽設備 (原子炉遮蔽壁、一次遮蔽壁) 	R/B		X		X			
		<ul style="list-style-type: none"> 遮蔽設備 (二次遮蔽壁) 	屋外 (建屋)				X		原子炉建屋の構造強度評価にて、機能に対する影響を評価する。	
							X			
							X			
							X			

表 2 - 1 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抽出結果 (2/5)

□ : 評価対象施設
 : YES X : No
 : 該当せず又は評価完了

分類	機能	配置場所	STEP1		STEP2		STEP3	STEP4	評価上の留意点	
			外部事象防護対象施設	機能維持する、又は、損傷を考慮して、代替設備による機能維持や安全上支障のない期間での修復等の対応が可能	屋外設備	外部事象防護対象施設を内包する施設 (原子炉建屋、タービン建屋、海水熱交換器区域、コントロール建屋、廃棄物処理建屋)				
MS-1	工学的安全施設及び原子炉停止系への作動信号の発生機能 安全上特に重要な関連機能	・安全保護系 ・非常用交流電源系 (発電機から非常用負荷までの配電設備及び電路) ・非常用交流電源系 (発電機、ディーゼル発電機、始動用空気系、冷却水系) ・非常用交流電源系 (非常用ディーゼル発電機吸気系) ・軽油タンク	R/B、C/B R/B、T/B、C/B R/B R/B 屋外		X X X X		X X X X	X X X X		
		・中央制御室及び遮蔽 ・中央制御室換気空調系 ・原子炉補機冷却水系 ・原子炉補機冷却海水系 ・非常用直流電源系 ・計測制御用電源設備 ・原子炉冷却材浄化系 (原子炉冷却材圧カバウンドリから外れる部分) ・主蒸気系 ・原子炉隔離時冷却系タービン蒸気供給ライン	C/B C/B R/B、T/B、C/B R/B、C/B R/B R/B		X X X X X		X X X X		X X X X	
		・使用済燃料貯蔵プール (使用済燃料貯蔵ラックを含む) ・新燃料貯蔵設備 (境界を防止する機能) ・気体廃棄物処理系 (活性炭式希ガスホルドアップ塔)	R/B R/B T/B		X X X		X X X		X X X	
PS-2	原子炉冷却材圧カバウンドリに直接接続されていないものによって放射線物質を貯蔵する機能									

表 2-1 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抽出結果 (3/5)

□ : 評価対象施設
 ○ : YES X : No
 : 該当せず又は評価完了

分類	機能	配置場所	STEP1		STEP2		STEP3	STEP4	評価上の留意点
			外部事象防護対象施設	機能維持する、又は、損傷を考慮して、代替設備による機能維持や安全上支障のない期間での修復等の対応が可能	屋外設備	外部事象防護対象施設を内包する施設 (原子炉建屋、タービン建屋海水熱交換器区域、コントロール建屋、廃棄物処理建屋)			
PS-2	燃料を安全に取り扱う機能 安全弁及び遮かし弁の吹き止まり機能	R/B	R/B	X	X	X	X	X	原子炉建屋のうちオベフロへの飛来物の侵入を考慮し、防護対策に対する影響を評価する。
MS-2	安全上特に重要な関連機能の間 接関連系 使用済燃料貯蔵プール水の補給機能 放射性物質放出の防止機能	R/B, T/B, C/B	R/B	X	X	X	X	X	原子炉建屋、コントロール建屋、タービン建屋のうち、換気空調系への飛来物の衝突を考慮し、防護対策に対する影響を評価する。
MS-2	放射線物質放出の防止機能	R/B	R/B	X	X	X	X	X	原子炉建屋のうちオベフロへの飛来物の侵入を考慮し、防護対策に対する影響を評価する。
MS-2	放射性物質放出の防止機能	R/B	屋外 (建屋)	X	X	X	X	X	原子炉建屋のうちオベフロへの飛来物の侵入を考慮し、防護対策に対する影響を評価する。 ブローアウトパネルが気圧差で開放した場合、閉止を実施し、損傷した場合、補修を実施。 原子炉建屋の構造強度評価にて、機能に対する影響を評価する。
		R/B	R/B	X	X	X	X	X	損傷を考慮し被ばく評価を実施、損傷した場合、補修を実施。
		C/B	C/B	X	X	X	X	X	
		R/B	R/B	X	X	X	X	X	

表 2-1 外部事象防護対象施設のつち竜巻の影響を考慮する施設の抽出結果 (4/5)

評価対象施設
 : YES X : No : 該当せず又は評価完了

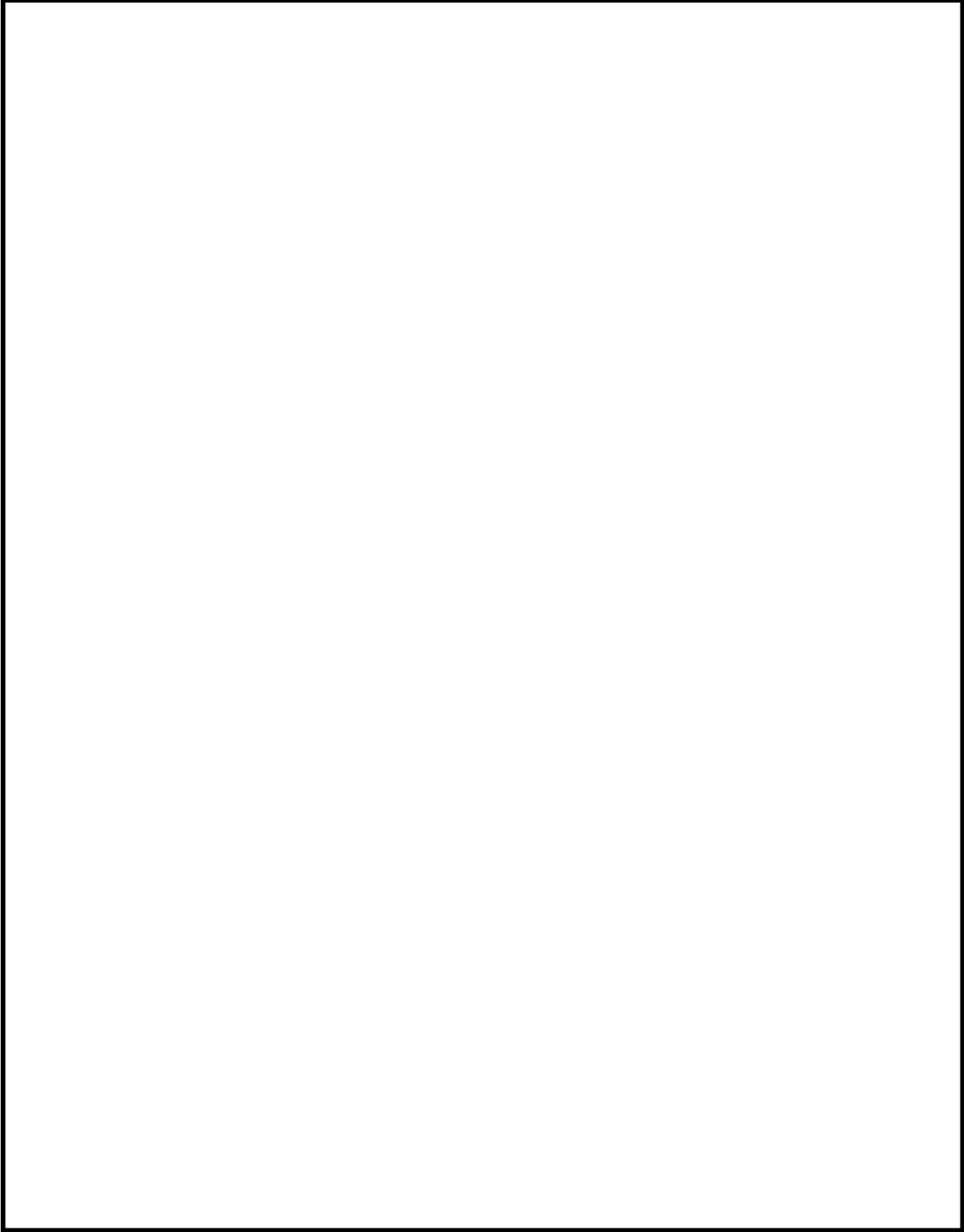
分類	機能	構築物、系統又は機器	配置場所	STEP1		STEP2	STEP3	STEP4	評価上の留意点	
				外部事象防護対象施設	機能維持する、又は、損傷を考慮して、代替設備による機能維持や安全上支障のない期間での修復等の対応が可能					
PS-3	原子炉冷却材保持機能 (PS-1, PS-2 以外のもの) 原子炉冷却材の循環機能	・原子炉冷却材圧力バウンダリから除外される計装等の小口径配管、弁	R/B	X					屋内設備のため影響なし。	
		・原子炉冷却材再循環系 (圧力抑制室プール水排水系)	R/B	X					屋内設備のため影響なし。	
	放射性物質の貯蔵機能	・復水貯蔵槽	屋外	X						損傷した場合、補修を実施。
		・液体廃棄物処理系	Rw/B	X						屋内設備のため影響なし。
		・固体廃棄物貯蔵庫	屋外(建屋)	X						損傷した場合、補修を実施。
		・固体廃棄物処理建屋	屋外(建屋)	X						損傷した場合、補修を実施。
	電源供給機能 (非常用を除く)	・燃料貯蔵設備	屋外(建屋)	X						損傷した場合、補修を実施。
		・新燃料貯蔵ラック	R/B	X						屋内設備のため影響なし。
		・使用済燃料輸送容器保管建屋	屋外(建屋)	X						損傷した場合、補修を実施。
		・タービン	T/B	X						損傷した場合、補修を実施。
プラント計測・制御機能 (安全保護機能を除く)	・発電機及び励磁装置	屋外	X						代替設備(非常用ディーゼル発電機)により機能維持可能。	
	・復水系(復水器を含む)	屋外	X						代替設備(非常用ディーゼル発電機)により機能維持可能。	
	・給水系	屋外	X						屋内設備のため影響なし。	
	・循環水系	C/B	X						屋内設備のため影響なし。	
プラント運転補助機能	・送電線	屋外	X						損傷した場合、補修を実施。	
	・変圧器	屋外	X						損傷した場合、補修を実施。	
	・開閉所	屋外	X						損傷した場合、補修を実施。	
	・原子炉制御系(制御棒価値ミニマイザ含む)	C/B	X						損傷した場合、補修を実施。	
核分裂生成物の原子炉冷却材中の放散防止機能	・原子炉プラントプロセス計装の一部	補助ボイラ建屋	X						損傷した場合、補修を実施。	
	・原子炉冷却材再循環系	R/B, T/B, Rw/B	X						損傷した場合、補修を実施。	
	・所内蒸気系及び戻り系	R/B, T/B, C/B	X						損傷した場合、補修を実施。	
	・計装用圧縮空気系	R/B, T/B, C/B	X						損傷した場合、補修を実施。	
原子炉冷却材の浄化機能	・原子炉補機冷却水系 (MS-1 関連以外) (配管 / 弁)	R/B, T/B, Rw/B	X						損傷した場合、補修を実施。	
	・タービン補機冷却水系	T/B	X						損傷した場合、補修を実施。	
	・タービン補機冷却海水系	Rw/B	X						屋内設備のため影響なし。	
	・復水補給水系(復水貯蔵槽)	R/B	X						屋内設備のため影響なし。	
		・燃料被覆管	R/B	X					屋内設備のため影響なし。	
		・原子炉冷却材浄化系	R/B	X					屋内設備のため影響なし。	
		・復水浄化系	T/B	X					損傷した場合、補修を実施。	

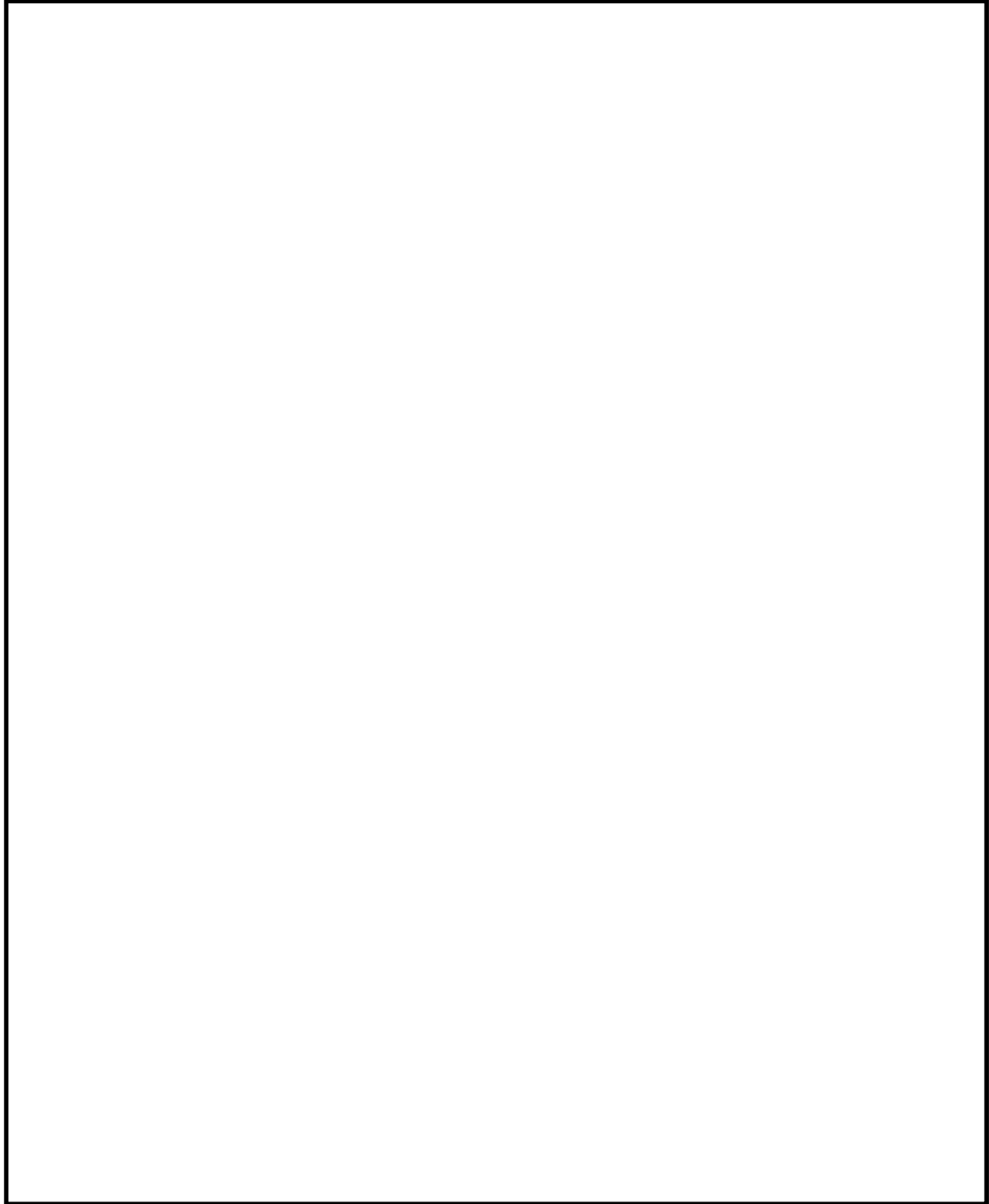
表 2-1 外部事象防護対象施設のつち竜巻の影響を考慮する施設の抽出結果 (5/5)

: 評価対象施設
 : YES X : No : 該当せず又は評価完了

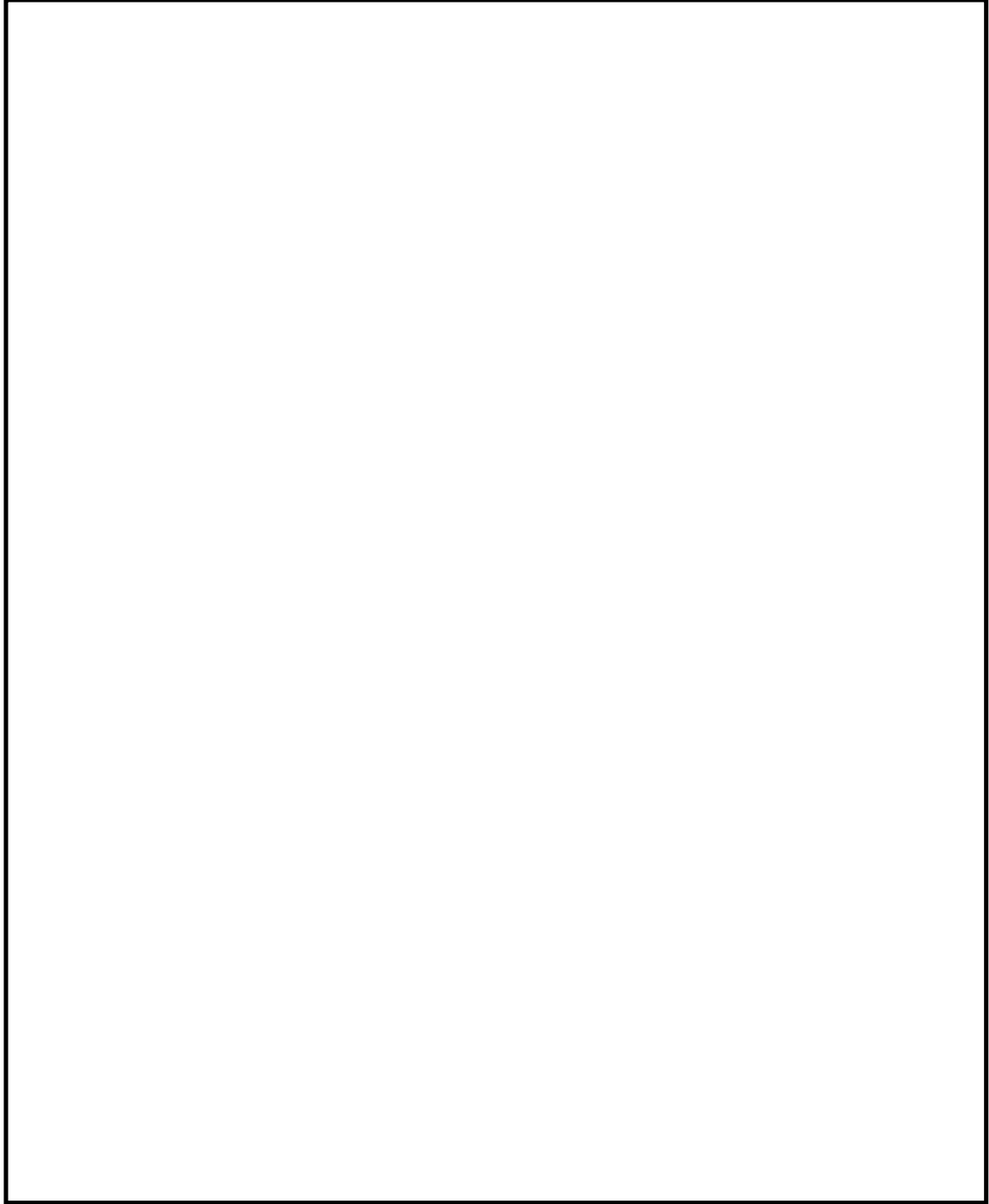
分類	機能	構築物、系統又は機器	配置場所	STEP1		STEP2		STEP3	STEP4	評価上の留意点	
				外部事象防護対象施設	機能維持する、又は、損傷を考慮して、代替設備による機能維持や安全上支障のない期間での修復等の対応が可能	屋外設備	外部事象防護対象施設を内包する施設 (原子炉建屋、タービン建屋、海水熱交換器区域、コントロール建屋、廃棄物処理建屋)				
緊急時対策上重要なもの及び異常状態の把握機能	原子炉圧力上昇の緩和機能	・主蒸気逃がし安全弁 (逃がし弁機能)	R/B			X		X			
		・タービンバイパス弁	T/B			X	(*)	X		注記*: 別紙 1 に示すとおり、タービン建屋の屋根及び外壁、更に複数の壁及び床があることから影響なし。	
	出力上昇の抑制機能	・原子炉冷却材再循環流量制御系 (再循環ポンプトリップ機能)	R/B				X		X		
		・制御棒引抜監視装置	R/B								
	原子炉冷却材の補給機能	・制御棒駆動水圧系	R/B								
	原子炉冷却材の再循環流量低下の緩和機能	・原子炉隔離時冷却系	Rw/B						X		
		・原子炉冷却材再循環ポンプ MG セット	R/B (5号機)						X	屋内設備のため影響なし。	
	試料採取系	・5号機原子炉建屋内緊急時対策所	R/B								
		・燃料採取系	R/B								
	通信連絡設備	・所外通信	・有線系	各建屋 (地下設備含む)							
		・所内通信	・有線系	送電鉄塔							
	放射線監視設備	・モニタリングポスト		各建屋 (地下設備含む)							
		・移動式モニタリング設備		屋外							
	事故時監視計器の一部	・放射線監視設備		可搬型 SA 設備 備置場所							
・気体廃棄物処理系設備エリア非放射線モニタ			T/B					X			
津波監視カメラ	・事故時監視計器の一部		R/B, T/B, C/B, Rw/B								
	・津波監視カメラ		気象観測設備								
消火系	・津波監視カメラ		R/B, 屋外 (主排気筒)								
	・消火系		給水建屋 水処理建屋								
安全避難通路・非常用照明	・消火系		ろ過水タンク (屋外配管含む)								
	・安全避難通路・非常用照明		池消火設備								
			各建屋内								

MS-3

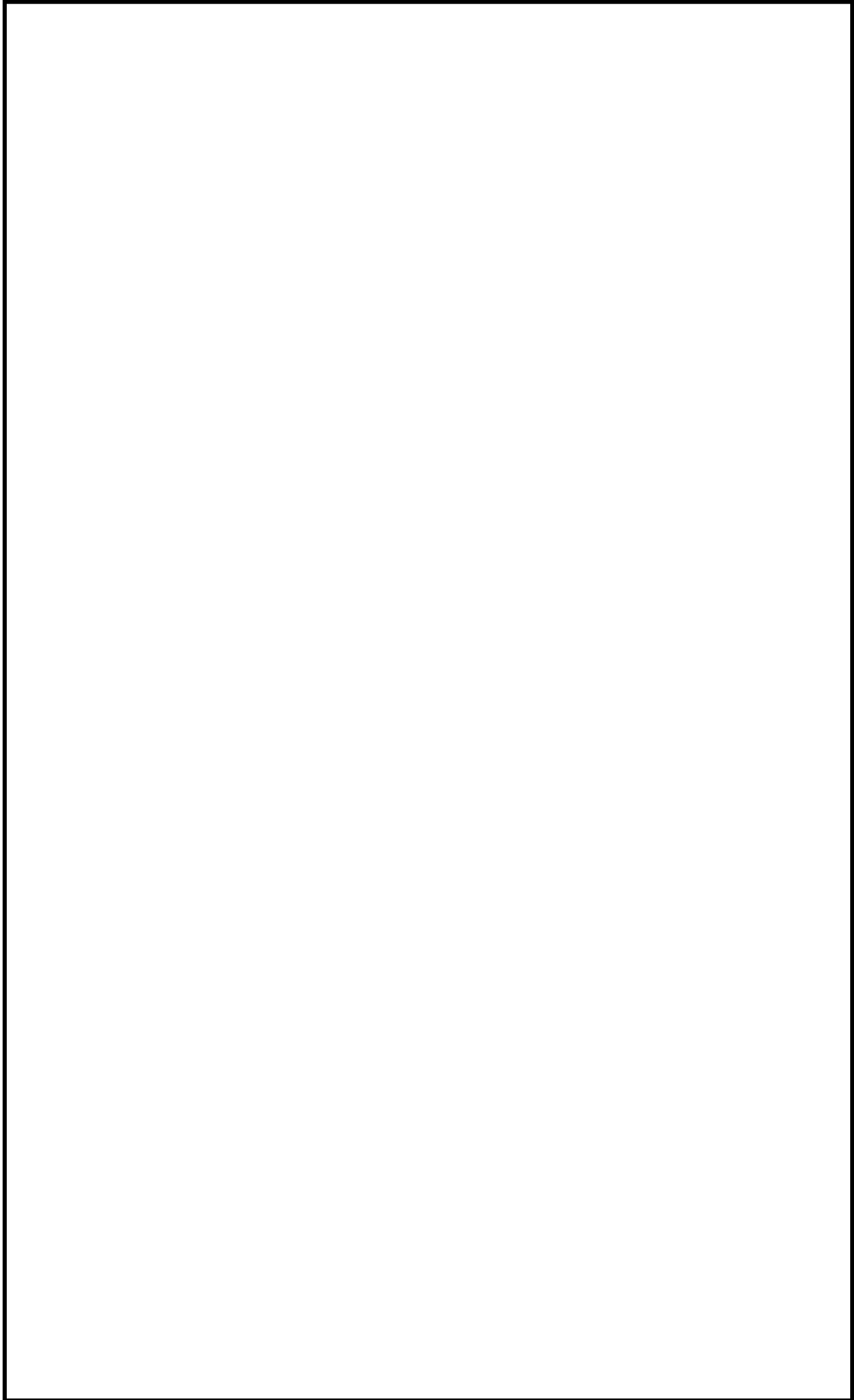




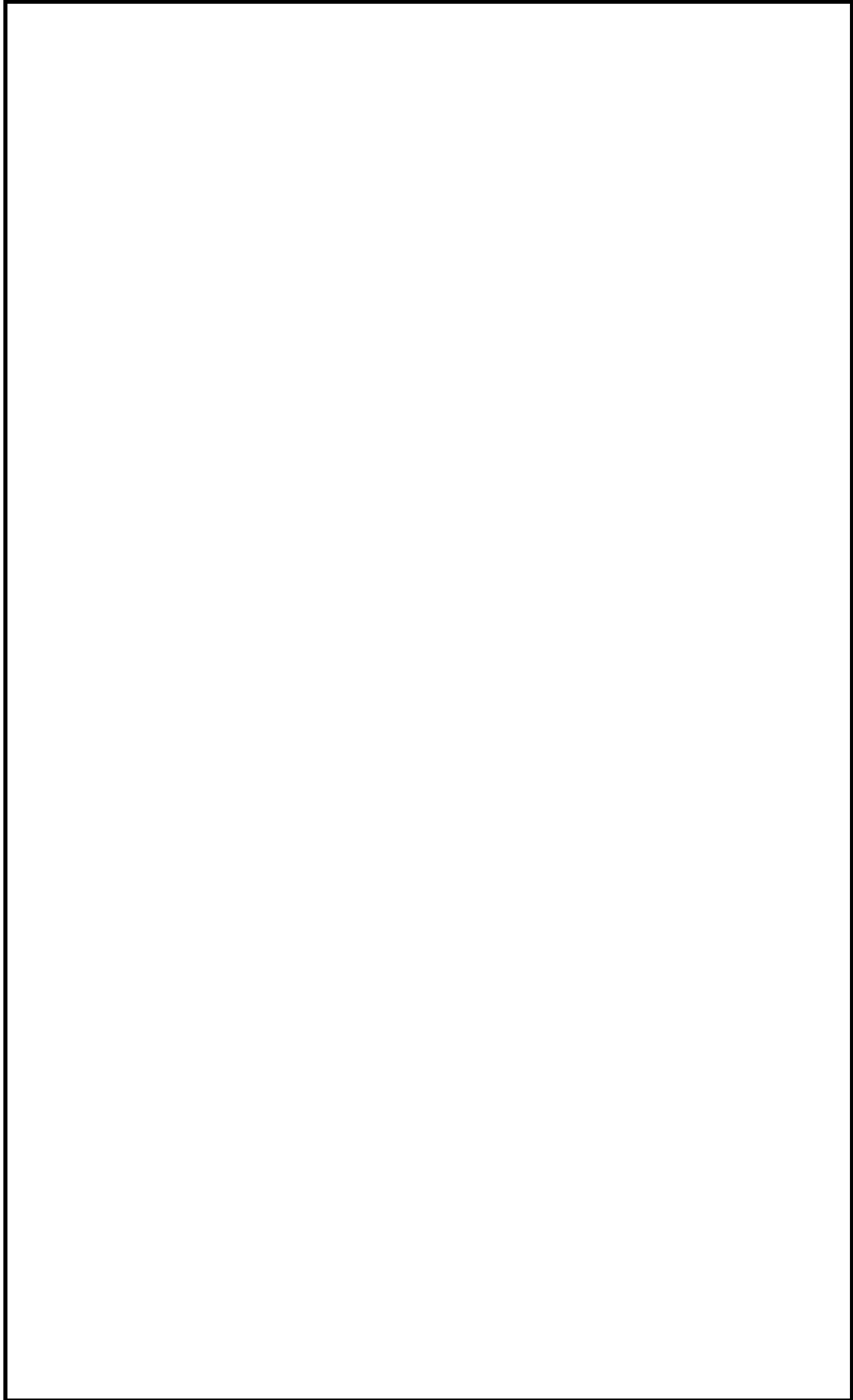
タービン建屋 T.M.S.L.12300 平面図



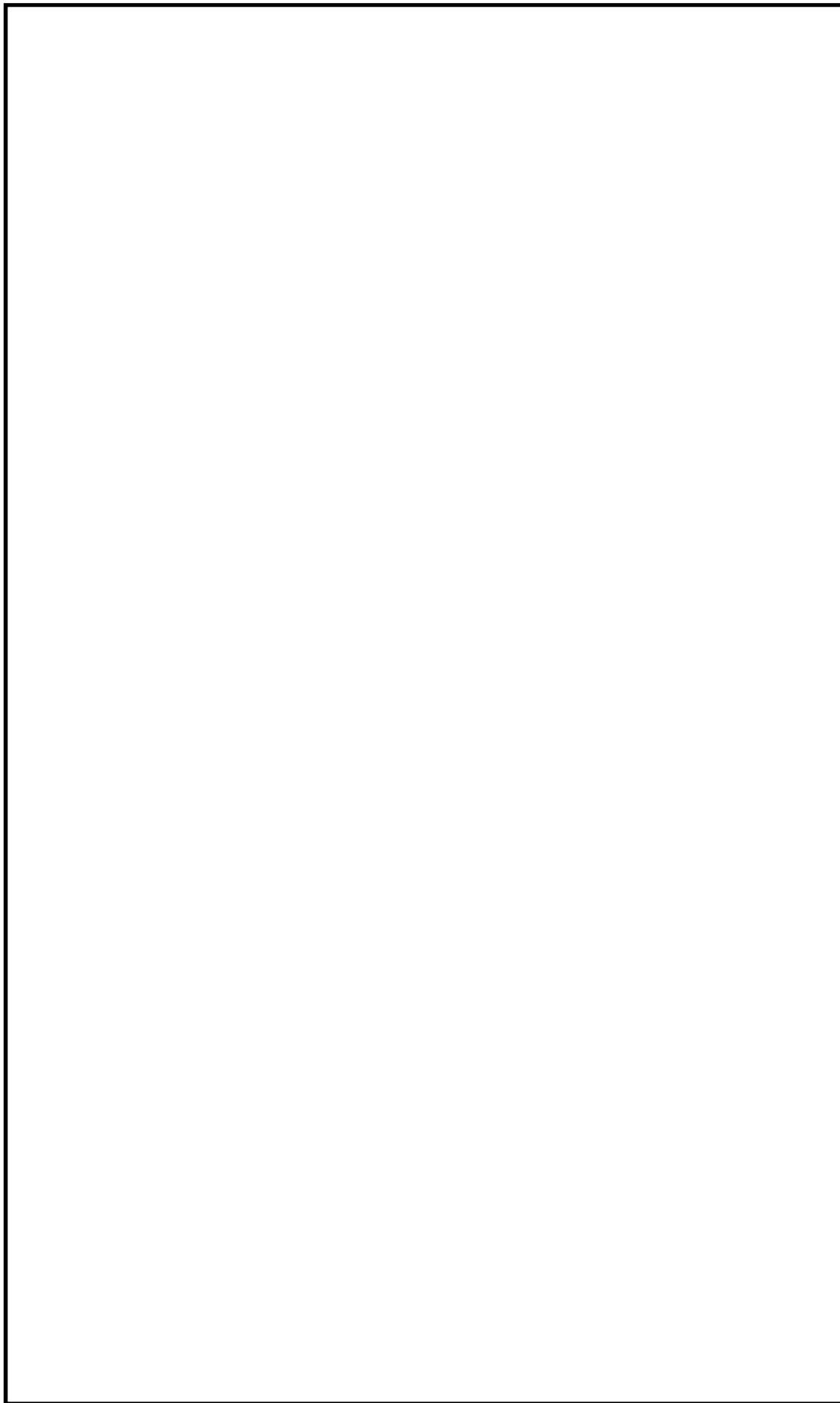
タービン建屋 T.M.S.L.17000 平面図



タービン建屋 東西方向断面図



タービン建屋 南北方向断面図 (1/2)



タービン建屋 南北方向断面図 (2/2)

竜巻飛来物による 7 号機 SGTS 排気管損傷時の事故時被ばく評価への影響について

1. 概要

7 号機非常用ガス処理系（以下「SGTS」という。）の排気管が竜巻による飛来物により損傷したと仮定した場合の設計基準事故時の被ばく評価への影響について確認する。

2. 評価対象事故

環境への放射性物質の異常な放出を伴う設計基準事故とその事故における原子炉建屋の閉じ込め機能（原子炉建屋原子炉区域及び SGTS）の扱いについて整理した結果を表 1 に示す。このうち、SGTS の機能に期待している設計基準事故は、「燃料集合体の落下」及び「原子炉冷却材喪失」である。

表 2 に示す通り、実効線量が大きい「燃料集合体の落下」を代表させ、SGTS 排気管が損傷した場合の被ばく評価への影響を確認する。

表 1 事故時被ばく評価における原子炉建屋の閉じ込め機能の扱いについて（1/2）

設計基準事故	事象の進展	原子炉建屋の閉じ込め機能の扱い
放射性気体廃棄物処理施設の破損	原子炉の通常運転時に、蒸気式空気抽出器及び起動停止用蒸気式空気抽出器出口配管が破損し、放射性物質がタービン建屋内に放出される。タービン建屋内に放出された放射性物質は、原子炉区域・タービン区域換気空調系を通じて主排気筒から大気中に放出される。	同施設の破損箇所の想定は原子炉建屋外であり、原子炉建屋の閉じ込め機能には期待していない。
主蒸気管破断	原子炉の出力運転中に、原子炉格納容器外で主蒸気管が破断した場合に、放射性物質が破断口から建屋内に流出する。建屋内に流出した放射性物質は、ブローアウトパネルより大気中に放出される。	建屋内に流出した放射性物質は、ブローアウトパネルを通じて大気中に放出されるため、原子炉建屋の閉じ込め機能には期待していない。
燃料集合体の落下	原子炉の燃料交換時に、燃料取替機の故障、破損等により燃料集合体が落下して破損し、放射性物質が原子炉建屋原子炉区域内に放出される。原子炉建屋原子炉区域内に放出された放射性物質は、SGTS を通じて大気中に放出される。	破損した燃料集合体から放出した放射性物質は原子炉建屋に移行し、SGTS を通じて大気中へ放出されるため、原子炉建屋の閉じ込め機能に期待している。

表 1 事故時被ばく評価における原子炉建屋の閉じ込め機能の扱いについて (2/2)

設計基準事故	事象の進展	原子炉建屋の閉じ込め機能の扱い
原子炉冷却材喪失	原子炉の出力運転中に、原子炉冷却材圧力バウンダリを構成する配管あるいはこれに付随する機器等の破損等により、破断箇所から放射性物質が原子炉格納容器内に放出される。原子炉格納容器内に放出された放射性物質は、原子炉建屋原子炉区域内に漏えいし、SGTS を通じて大気中に放出される。	原子炉格納容器から漏えいした放射性物質は原子炉建屋に移行し、SGTS を通じて大気中へ放出するため、原子炉建屋の閉じ込め機能に期待している。
制御棒落下	原子炉が臨界又は臨界近傍にあるときに、制御棒が炉心から落下し、放射性物質が原子炉冷却材中に放出される。原子炉冷却材中に放出された放射性物質は、主蒸気とともに復水器へ移行し、復水器から漏えい、原子炉区域・タービン区域換気空調系を通じて大気中に放出される。	放射性物質の漏えい箇所は原子炉建屋外であり、原子炉建屋の閉じ込め機能には期待していない。

表 2 「燃料集合体の落下」及び「原子炉冷却材喪失」の実効線量

設計基準事故	敷地境界における実効線量(mSv)
燃料集合体の落下	約 1.1×10^{-2}
原子炉冷却材喪失	約 1.5×10^{-5}

3. 評価方法と評価条件

3.1 評価方法

7号機の屋外 SGTS 排気管は、原子炉建屋屋上面から主排気筒に導かれ、鉛直上方に立ち上がっている。当該配管は主排気筒の筒身等に包囲されているが、それらによる防護効果には期待せず、当該配管に竜巻による飛来物が直接衝突し貫通した場合の被ばく評価を行う。

また、SGTS 排気管に飛来物が衝突し貫通部が生じたとしても、放出される放射性物質の一定量は、通常の SGTS の排気口から上方に放出されると考えられるが、本評価においては、保守的に SGTS 排気管の損傷箇所から全量が放出されることを想定する。

3.2 評価条件

被ばく評価において用いる数値等は、以下の通りとする。

- ・7号機の屋外 SGTS 排気管は、原子炉建屋の屋上面 (T. M. S. L. 38200) から上方に設置されているが、本評価においては、保守的に地表面 (0m) を放出点とし被ばく影響について確認する。

- ・評価に用いる大気拡散条件は表3上段に示すものを用いる。

表3 7号機燃料集合体落下時の相対濃度及び相対線量

項目	実効放出 継続時間 (h)	相対濃度及び相対線量	
SGTS 排気管の損傷箇所から 放出した場合の拡散条件	30	χ/Q (s/m ³)	1.1×10^{-5}
	30	D/Q (Gy/Bq)	2.1×10^{-19}
(参考) 設置許可申請書 における拡散条件	30	χ/Q (s/m ³)	1.5×10^{-6}
	30	D/Q (Gy/Bq)	7.0×10^{-20}

- ・その他, 評価に必要な条件は設置許可申請書の条件を用いる。

4. 評価結果

燃料集合体落下事故時の被ばくを評価した結果を表4に示す。評価結果は, 設計基準事故の判断基準である5mSvを満足する結果となった。

表4 7号機燃料集合体落下事故時における主排気筒損傷時の被ばく評価結果

項目	敷地境界における実効線量(mSv)
SGTS 排気配管の損傷を 想定した場合	約 3.2×10^{-2}
(参考) 設置許可申請書 添付書類十記載値	約 1.1×10^{-2}

竜巻飛来物による主排気筒損傷時の影響について

1. 概要

6号機主排気筒及び7号機主排気筒について、筒身に損傷が生じた場合は安全上支障のない期間に補修することとしている。

通常時及びプラント停止時においても、気体廃棄物等を主排気筒から高所放出していることから、6号機主排気筒及び7号機主排気筒それぞれの筒身に損傷が生じた場合の被ばく影響について示すものである。

2. 評価条件

- ・実際には、筒身に損傷が認められた場合には、安全上支障のない期間に修復する等の対応を行うが、本評価においては、プラントが通常運転を一年間継続すると保守的に仮定し、主排気筒の補修に必要な期間として、筒身に想定される局所的な損傷モード（貫通）に対しては保守的と考えられる6ヶ月を想定し、補修完了までの6ヶ月を地上放出、補修完了後の6ヶ月を高所放出とする。
- ・地上放出は放出源有効高さ0mとし、気象データは地上観測データとする。
- ・その他の条件は、設置変更許可申請書と同様とする。

3. 評価結果

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

表1 通常時における主排気筒損傷時の被ばく評価結果

単位： $\mu\text{Sv/y}$

被ばく経路	6号機主排気筒 破損時の1年間の 累積線量	7号機主排気筒 破損時の1年間の 累積線量	主排気筒健全時の 1年間の累積線量	目標値
希ガス	約7.5	約7.5	約7.1	—
よう素	約4.4	約3.4	約1.3	—
液体（よう素除く）	約4	約4	約4	—
合計	約16	約15	約13	50

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

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

3.1 概要

外部事象防護対象施設に対する波及的影響として、機械的影響、機能的影響及び二次的影響について、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を以下の観点から抽出する。

(1) 機械的影響

外部事象防護対象施設周辺の施設が倒壊することにより、外部事象防護対象施設を機能喪失させる可能性がある。

(2) 機能的影響

屋外にある外部事象防護対象施設の付属設備が機能喪失に陥った場合に、外部事象防護対象施設も機能喪失する可能性がある。

(3) 二次的影響

竜巻随件事象（火災，溢水，外部電源喪失）の影響により、外部事象防護対象施設を機能喪失させる可能性がある。

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。

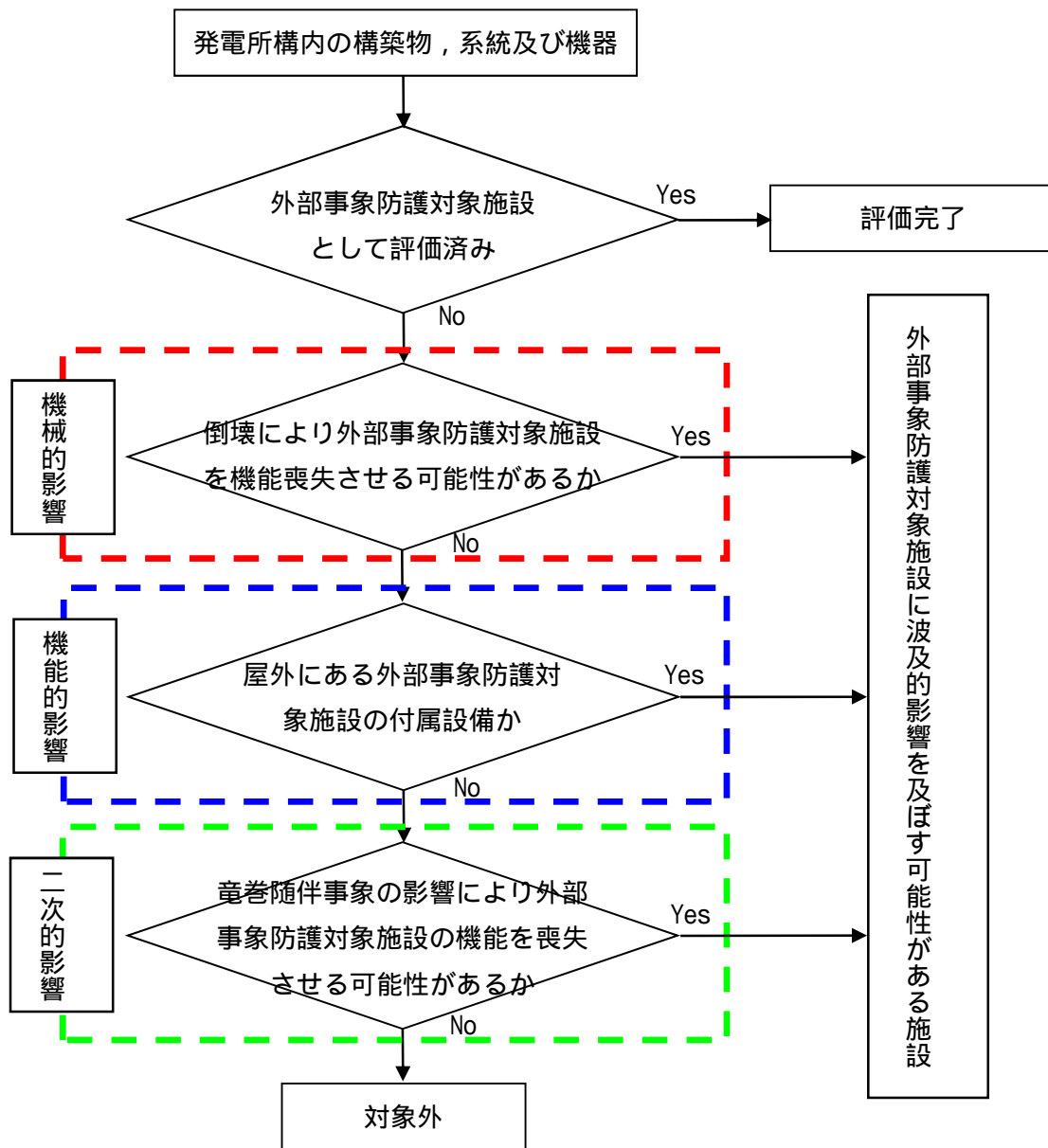


図 3 - 1 外部事象防護対象施設に波及的影響を及ぼす可能性がある施設の選定フロー

3.2 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について

(1) 機械的影響の観点での抽出について

発電所構内の構築物、系統及び機器のうち、機械的影響の観点から、外部事象防護対象施設周辺の施設が倒壊することにより、外部事象防護対象施設を機能喪失させる可能性がある施設を抽出する。

具体的には、図3 - 2に示すとおり、施設の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。

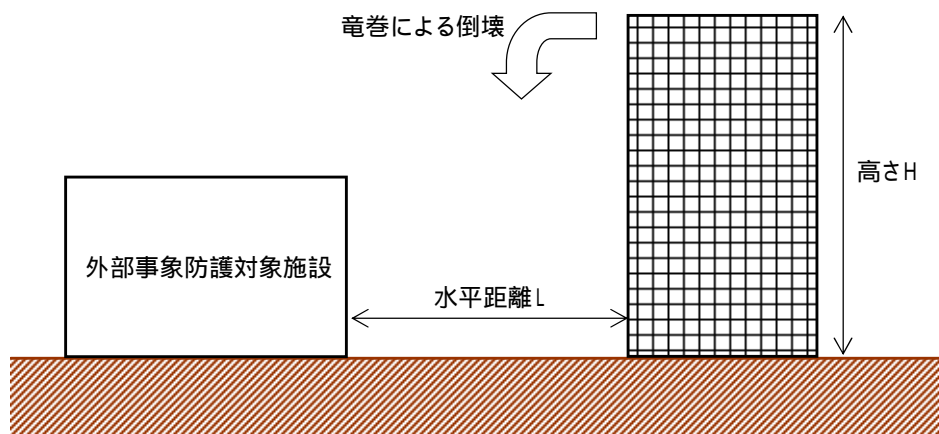


図3 - 2 機械的影響を及ぼす可能性がある施設抽出の概念図（高さH 水平距離L）

外部事象防護対象施設を機能喪失させる可能性がある建屋及び構築物について確認した結果を表3 - 1、設備について確認した結果を表3 - 2に示す。

確認の結果、倒壊により外部事象防護対象施設を機能喪失させる可能性がある施設として、以下を抽出した。

- ・サービス建屋
- ・6号機及び7号機主排気筒

図3 - 3に、機械的影響を及ぼす可能性がある施設並びに主排気筒の倒壊範囲を示す。

(2) 機能的影響の観点での抽出について

発電所構内の構築物，系統及び機器のうち，機能的影響の観点（「屋外にある外部事象防護対象施設の付属設備か」）から，機能喪失に陥った場合に，外部事象防護対象施設も機能喪失する可能性がある施設を確認した結果を表3 - 2に示す。

確認の結果，機能喪失に陥った場合に，外部事象防護対象施設も機能喪失する可能性がある屋外の外部事象防護対象施設の付属設備として，以下を抽出した。

- ・非常用ディーゼル発電設備排気消音器
- ・非常用ディーゼル発電設備排気管
- ・ミスト管（燃料ディタンク，非常用ディーゼル発電設備機関本体，潤滑油補給タンク，燃料ドレンタンク）

図3 - 3に，機能的影響を及ぼす可能性がある施設を示す。

(3) 二次的影響の観点での抽出について

発電所構内の構築物，系統及び機器のうち，二次的影響の観点から，竜巻随件事象の影響により外部事象防護対象施設を機能喪失させる可能性がある施設を確認した結果を表3 - 2に示す。

建屋内においては，外気との接続がある外部事象防護対象施設の開口部より，飛来物の侵入が想定される場合には，防護鋼板等による竜巻防護対策を実施する。そのため，飛来物の侵入による溢水や火災は発生しないことから，外部事象に対し必要な構築物，系統及び機器の安全機能に影響は与えない。

また，建屋外においては，外部事象防護対象施設の安全機能に影響がないことを確認するため，発電所敷地内の外部事象防護対象施設の周辺にある発火源，溢水源となる設備として，以下を抽出した。

なお，7号機の軽油タンクについては，外部事象防護対象施設として抽出済であることから，本項目では抽出しない。

- ・火災発生により外部事象防護対象施設の機能を喪失させる可能性がある設備（変圧器，5号機及び6号機軽油タンク，第一ガスタービン発電機用燃料タンク）
- ・溢水により外部事象防護対象施設を機能喪失させる可能性のある設備（純水タンク，ろ過水タンク，非放射性ストームドレン収集タンク）
- ・竜巻随件事象により外部電源を喪失させる可能性がある設備（送電線等）

図3 - 4に，二次的影響を及ぼす可能性がある施設を示す。

表3 - 1 機械的影響の観点の抽出結果（建屋，構築物）

建屋，構築物	近傍の外部事象防護対象施設	高さ	外部事象防護対象施設までの最短距離	影響可否
サービス建屋	コントロール建屋	17m	隣接	
6号機 主排気筒	コントロール建屋	46.8m ^{*1}	隣接	
7号機 主排気筒	7号機 原子炉建屋 7号機 タービン建屋（海水熱交換器区域）	46.8m ^{*2}	隣接	
給水建屋	7号機 軽油タンク	10m以下	約90m	×
予備品倉庫	7号機 軽油タンク	10m以下	約65m	×
発電倉庫	7号機 軽油タンク	10m以下	約85m	×
避雷鉄塔 ^{*3}	7号機 タービン建屋（海水熱交換器区域）	149.5m	約250m	×

注記 *1 : 6号機 原子炉建屋の屋上T.M.S.L.38.2m（地表から26.2m）からの高さ

*2 : 7号機 原子炉建屋の屋上T.M.S.L.38.2m（地表から26.2m）からの高さ

*3 : 発電所構内における鉄塔のうち，外部事象防護対象施設の最寄り鉄塔として記載した。

□ : 波及的影響を及ぼす可能性がある施設
 : YES X : No

表3-2 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 (1/5)

分類	機能	構築物、系統又は機器	配置場所	外部事象防護対象施設として 評価済みか	機械的影響		二次的影響	
					倒壊により外部事象防護対象 施設を機能喪失させる可能性 があるか	屋外にある外部事象防護対象 施設の付属設備か	外部事象防護対象施設により外 部事象防護対象施設の機能を 喪失させる可能性があるか	二次的影響
PS-1	原子炉冷却材圧力バウンダリ機能	・原子炉冷却材圧力バウンダリを構成する機器・ 配管系	R/B	X	X	X	X	
	過剰反応度の印加防止機能	・制御棒カッピング ・制御棒駆動機構	R/B	X	X	X	X	
	炉心形状の維持機能	・炉心支持構造物 ・燃料集合体	R/B	X	X	X	X	
	原子炉の緊急停止機能	・原子炉停止系の制御棒による系 (制御棒、制御棒駆動系)	R/B	X	X	X	X	
	未臨界維持機能	・原子炉停止系 (制御棒による系、ほう酸水注入系)	R/B	X	X	X	X	
	原子炉冷却材圧力バウンダリの 過圧防止機能	・主蒸気逃がし安全弁 (安全弁としての閉機能)	R/B	X	X	X	X	
	原子炉停止後の除熱機能	・残留熱を除去する系統 (残留熱除去系(原子炉停止時冷却モード)、 原子炉隔離時冷却系、高圧炉心注水系、主蒸 気逃がし安全弁(手動逃がし機能)、自動減 圧系(手動逃がし機能)) ・サブレッションプール	R/B	X	X	X	X	
	炉心冷却機能	・復水補給水系(復水貯蔵槽) ・非常用炉心冷却系 (残留熱除去系(低圧注水モード)、原子炉隔 離時冷却系、高圧炉心注水系、自動減圧系(主 蒸気逃がし安全弁)) ・サブレッションプール	Rw/B	X	X	X	X	
MS-1	放射線物質の閉じ込め機能 放射 線の遮蔽及び放出低減機能	・原子炉格納容器 ・原子炉格納容器隔離弁及び原子炉格納容器バ ウンダリ配管	R/B	X	X	X	X	
		・主蒸気流量制限器 ・残留熱除去系(格納容器スプレイ冷却モード) ・原子炉建屋原子炉区域(ブローアウトハネル付 き)	屋外(建 屋)	X	X	X	X	
	工学的安全施設及び原子炉停止 系への作動信号の発生機能	・非常用ガス処理系 ・可燃性ガス濃度制御系	R/B、屋外 (主排気 筒)	X (被ばく評価と補修運用)	X	X	X	
		・主排気筒(非常用ガス処理系排気管の支持機 能) ・遮蔽設備(原子炉遮蔽壁、一次遮蔽壁)	屋外	X (被ばく評価と補修運用)	X	X	X	
		・遮蔽設備(二次遮蔽壁)	R/B	X	X	X	X	
		・安全保護系	屋外(建 屋)	X	X	X	X	
			R/B、C/B	X	X	X	X	

表3-2 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 (2/5)

□: 波及的影響を及ぼす可能性がある施設
 : YES X: No

分類	機能	建築物、系統又は機器	配置場所	外部事象防護対象施設として評価済みか	機械的影響 倒壊により外部事象防護対象施設を機能喪失させる可能性があるか	機能的影響 屋外にある外部事象防護対象施設の付属設備か	二次的影響 著者随伴事象の影響により外部事象防護対象施設の機能を喪失させる可能性があるか
MS-1	安全上特に重要な関連機能	・非常用交流電源系 (発電機から非常用負荷までの配電設備及び電路)	R/B, T/B, C/B		X	X	X
		・非常用交流電源系 (発電機、ディーゼル機関、始動用空気系、冷却水系)	R/B		X	非常用ディーゼル発電設備排気消音器、非常用ディーゼル発電設備排気管、ミスト管(燃料ディタンク、非常用ディーゼル発電設備機関本体、潤滑油補給タンク、燃料トレニングタンク)	X
		・非常用交流電源系 (非常用ディーゼル発電設備吸気系)	R/B		X	X	X
		・軽油タンク	屋外	(7号機軽油タンク)	X	X	5号機及び6号機軽油タンク
		・非常用ディーゼル発電設備燃料移送系	屋外		X	X	X
		・中央制御室及び遮蔽	C/B	X	X	X	X
		・中央制御室換気空調系	C/B		X	X	X
		・原子炉補機冷却水系	R/B, T/B, C/B		X	X	X
		・原子炉補機冷却海水系	R/B, C/B		X	X	X
		・非常用直流電源設備 ・計測制御用電源設備	R/B, C/B		X	X	X
PS-2	原子炉冷却材を内蔵する機能 (ただし原子炉冷却材圧力バウダリから除外されている計装等の小口径のもの及びバウダリに直接接続されていないものは除く。)	・原子炉冷却材浄化系 (原子炉冷却材圧力バウダリから外れる部分) ・主蒸気系	R/B	X	X	X	X
		・原子炉隔離時冷却系タービン蒸気供給ライン	R/B	X	X	X	X
		・使用済燃料貯蔵プール (使用済燃料貯蔵ラックを含む)	R/B		X	X	X
		・新燃料貯蔵設備 (臨界を防止する機能)	R/B	X	X	X	X
		・気体廃棄物処理系 (活性炭式希ガスホルドアップ塔)	T/B	X	X	X	X

:波及的影響を及ぼす可能性がある施設
 : YES X ; No

表3-2 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 (3/5)

分類	機能	構築物、系統又は機器	配置場所	外部事象防護対象施設として評価済みか	機械的影響 倒壊により外部事象防護対象施設を機能喪失させる可能性があるか	機能的影響 屋外にある外部事象防護対象施設の付属設備か	二次的影響 著者随伴事象の影響により外部事象防護対象施設の機能を喪失させる可能性があるか	
PS-2	燃料を安全に取り扱う機能	<ul style="list-style-type: none"> 燃料取扱機 原子炉建屋クレーン 	R/B	■	X	X	X	
	安全弁及び逃がし弁の吹き止まり機能	<ul style="list-style-type: none"> 主蒸気逃がし安全弁 (吹き止まり機能に関連する部分) 非常用交流電源系空調 	R/B	■	X	X	X	
MS-2	安全上特に重要な関連機能の間の関連系	<ul style="list-style-type: none"> 非常用電気品区域換気空調系 (非常用ディーゼル発電機非常用送風機含む)、コントロール建屋計測制御電源磁気空調系、海水熱交換器区域換気空調系) 	R/B, T/B, C/B		X	X	X	
	使用済燃料貯蔵プール水の補給機能	<ul style="list-style-type: none"> 残留熱除去系 (使用済燃料貯蔵プール水の補給) サブプレッションプール 	R/B	X	X	X	X	
	放射性物質放出の防止機能		燃料プール冷却浄化系の燃料プール入口逆止弁	R/B		X	X	X
			原子炉建屋原子炉区域(ブローアウトハネル付き)	屋外(建物)		X	X	X
			気体廃棄物処理系 (OS系) 隔離弁	T/B	X	X	X	X
			主排気筒	屋外	X	6号機及び7号機主排気筒 (補修と評価と補修運用)	X	X
	事故時のプラント状態の把握機能	<ul style="list-style-type: none"> 非常用ガス処理系 事故時監視計器の一部 (格納容器エリアモニタ等) 	R/B	X	X	X	X	
	制御室からの安全停止機能	<ul style="list-style-type: none"> 制御室外原子炉停止装置 (安全停止に関連するもの) 	C/B	X	X	X	X	
			制御室外原子炉停止装置 (安全停止に関連するもの)	R/B	X	X	X	X

表3-2 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 (4/5)

: 波及的影響を及ぼす可能性がある施設
 : YES X : No

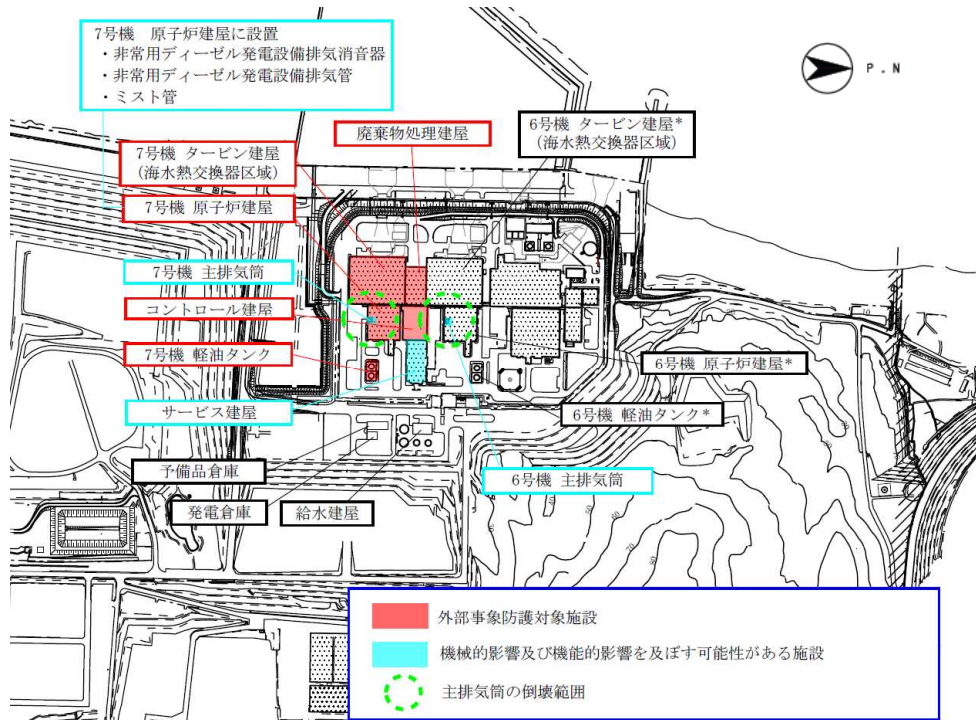
分類	機能	構築物, 系統又は機器	配置場所	外部事象防護対象施設として評価済みか	機能的影響 倒壊により外部事象防護対象施設を機能喪失させる可能性があるか	機能的影響 屋外にある外部事象防護対象施設の付属設備か	二次的影響 著者随伴事象の影響により外部事象防護対象施設の機能を喪失させる可能性があるか	
PS-3	原子炉冷却材保持機能 (PS-1, PS-2以外のもの)	・原子炉冷却材圧力バウンダリから除外される計装等の小口径配管,弁	R/B	×	×	×	×	
		・原子炉冷却材再循環系	R/B	×	×	×	×	
	原子炉冷却材の循環機能	・圧力抑制室プール水排水系 (圧力抑制室プール水サージタンク)	屋外	×	×	×	×	×
		・復水貯蔵槽	Rw/B	×	×	×	×	×
		・液体廃棄物処理系	屋外(建屋)	×	×	×	×	×
		・固体廃棄物処理系	屋外(建屋)	×	×	×	×	×
	放射性物質の貯蔵機能	・固体廃棄物貯蔵庫	屋外(建屋)	×	×	×	×	×
		・固体廃棄物処理建屋	屋外(建屋)	×	×	×	×	×
		・焼却炉建屋	屋外(建屋)	×	×	×	×	×
		・新燃料貯蔵設備 ・新燃料貯蔵ラック	R/B	×	×	×	×	×
電源供給機能 (非常用を除く)	・使用済燃料輸送容器保管建屋	屋外(建屋)	×	×	×	×	×	
	・タービン	T/B	×	×	×	×	×	
	・発電機及び励磁装置							
	・復水系(復水器を含む)							
	・給水系							
	・循環水系							
	・送電線	屋外	×	×	×	×	送電線等	
	・変圧器	屋外	×	×	×	×	変圧器	
	・開閉所							
	プラント計測・制御機能 (安全保護機能を除く)	・原子炉制御系(制御棒価値ミニマイザ含む)	C/B	×	×	×	×	×
・原子炉核計装の一部 ・原子炉プラントプロセス計装の一部								
プラント運転補助機能	・所内ボイラ設備	補助ボイラ建屋	×	×	×	×	×	
	・所内蒸気系及び戻り系	R/B, T/B, Rw/B	×	×	×	×	×	
	・計装用圧縮空気系	R/B, T/B, C/B	×	×	×	×	×	
	・原子炉補機冷却水系(NS-1 関連以外)(配管/弁)	R/B, T/B, Rw/B	×	×	×	×	×	
	・タービン補機冷却水系	T/B	×	×	×	×	×	
	・タービン補機冷却海水系							
	・復水補給水系(復水貯蔵槽)	Rw/B	×	×	×	×	×	
	・燃料被覆管	R/B	×	×	×	×	×	
	・原子炉冷却材浄化系	R/B	×	×	×	×	×	
	・復水浄化系	T/B	×	×	×	×	×	

・波及的影響を及ぼす可能性がある施設
: YES X : No



表3-2 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(5/5)

分類	機能	構築物、系統又は機器	配置場所	外部事象防護対象施設として評価済みか	機能的影響 倒壊により外部事象防護対象施設を機能喪失させる可能性があるか	機能的影響 屋外にある外部事象防護対象施設の付属設備か	二次的影響 電着降件事象の影響により外部事象防護対象施設の機能を喪失させる可能性があるか	
								機能的影響
MS-3	原子炉圧力上昇の緩和機能 出力上昇の抑制機能 原子炉冷却材の補給機能 原子炉冷却材の再循環流量低下の緩和機能	<ul style="list-style-type: none"> ・主蒸気逃がし安全弁(逃がし弁機能) ・タービンバイパス弁 ・原子炉冷却材再循環流量抑制系(再循環ポンプトリップ機能) ・制御棒引抜監視装置 ・制御棒駆動水圧系 ・原子炉隔離時冷却系 ・原子炉冷却材再循環ポンプAGセット ・5号機原子炉建屋内緊急時対策所 ・試料採取系 ・通信連絡設備 ・放射線監視設備 ・モニタリングポスト ・移動式モニタリング設備 ・事故時監視計器の一部 ・津波監視カメラ 	R/B	X	X	X	X	
			T/B	X	X	X	X	X
			R/B	X	X	X	X	X
			R/B	X	X	X	X	X
			Rw/B	X	X	X	X	X
			R/B(5号機)	X	X	X	X	X
			R/B	X	X	X	X	X
			各建屋(地下設備含む)	X	X	X	X	X
			送電鉄塔	X	X	X	X	X
			右建屋(地下設備含む)	X	X	X	X	X
			屋外	X	X	X	X	X
			屋外	X	X	X	X	X
			可搬型SA設備保管場所	X	X	X	X	X
			R/B, T/B, C/B, Rw/B	X	X	X	X	X
			気象観測設備	X	X	X	X	X
R/B, 屋外(主排気筒)	X	X	X	X	X			
給水建屋	X	X	X	X	X			
水処理建屋	X	X	X	X	X			
ろ過水タンク	X	X	X	X	X			
ろ過水タンク(屋外配管含む)	X	X	X	X	X			
池消火設備	X	X	X	X	X			
各建屋内	X	X	X	X	X			
その他	屋外	X	X	X	X	X		



注記* : 図中の6号機原子炉建屋, 6号機タービン建屋(海水熱交換器区域), 6号機軽油タンクの竜巻影響評価については, 6号機工事計画認可申請にて説明する。

図3 - 3 機械的影響及び機能的影響を及ぼす可能性がある施設

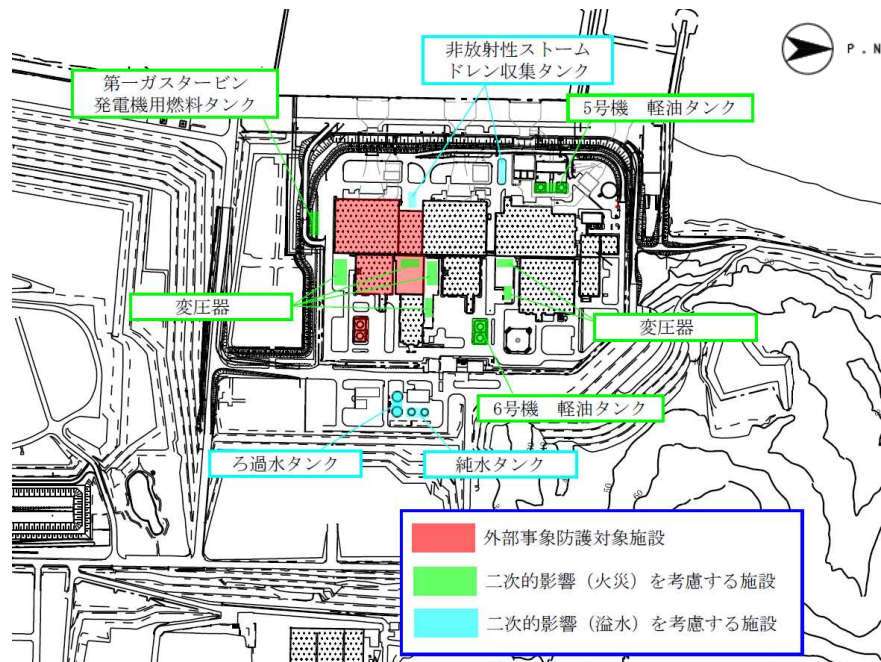


図3 - 4 二次的影響(火災, 溢水)を及ぼす可能性がある施設

4. 建屋開口部の調査結果について

4. 建屋開口部の調査結果について

外部事象防護対象施設に影響を及ぼす可能性がある建屋（原子炉建屋，タービン建屋，コントロール建屋及び廃棄物処理建屋）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与える可能性が否定できないため，建屋開口部にて防護対策を実施する。また，表4-2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与える可能性が否定できないため，建屋内にて個別に防護対策を実施する。

調査した建屋開口部を図4-1～図4-18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屋開口部
(建屋開口部にて防護対策を実施)

建屋	図番号	開口部番号
原子炉建屋	図 4-1	No. 1~6, 8~13
	図 4-2	No. 14~16
	図 4-3	No. 17~24
	図 4-4	No. 25, 26
	図 4-5	なし
	図 4-6	なし
	図 4-7	No. 29~32
タービン建屋	図 4-8	No. 33
	図 4-9	No. 34
	図 4-10	No. 35
	図 4-11	No. 26, 28
	図 4-12	なし
コントロール建屋	図 4-13	No. 1~3
	図 4-14	なし
	図 4-15	No. 7, 9
廃棄物処理建屋	図 4-16	なし
	図 4-17	なし
	図 4-18	なし

表4-2 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屋開口部
(建屋内にて個別に防護対策を実施)

建屋	図番号	開口部番号
原子炉建屋	図 4-5	No. 27
	図 4-6	No. 28
タービン建屋	図 4-10	No. 7~13
	図 4-11	No. 17~21, 27, 29
コントロール建屋	図 4-15	No. 6, 8



P . N

凡例



…外部事象防護対象施設



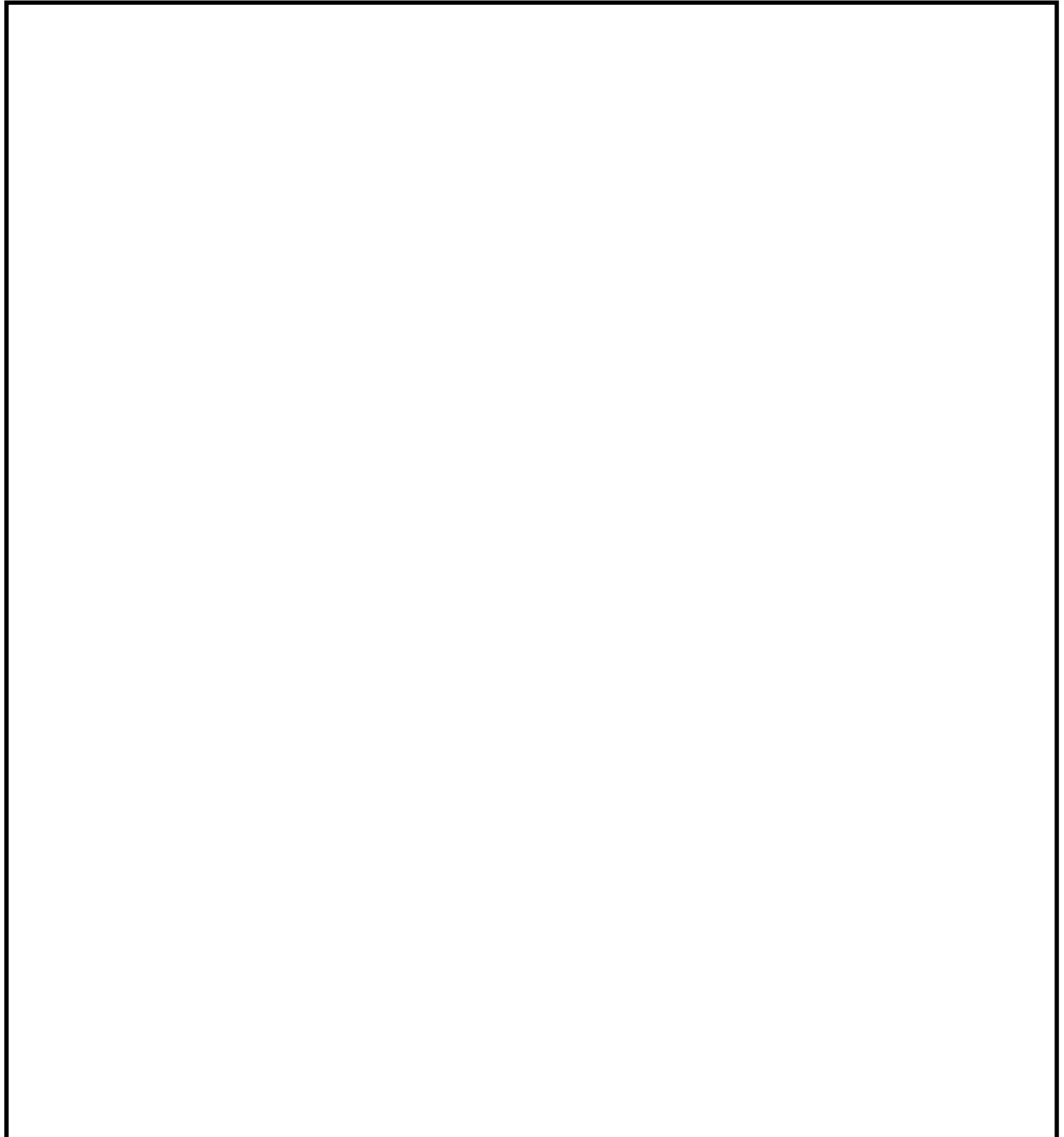
…開口部 (防護対策実施箇所)



…開口部 (防護対策不要箇所)



…建屋内 (防護対策実施箇所)



T. M. S. L. 12300

注記*1 : 当該開口部は大物搬入口建屋躯体耐震強化工事に合わせて無くなる。

図4-1 原子炉建屋 T. M. S. L. 12300における開口部



P . N

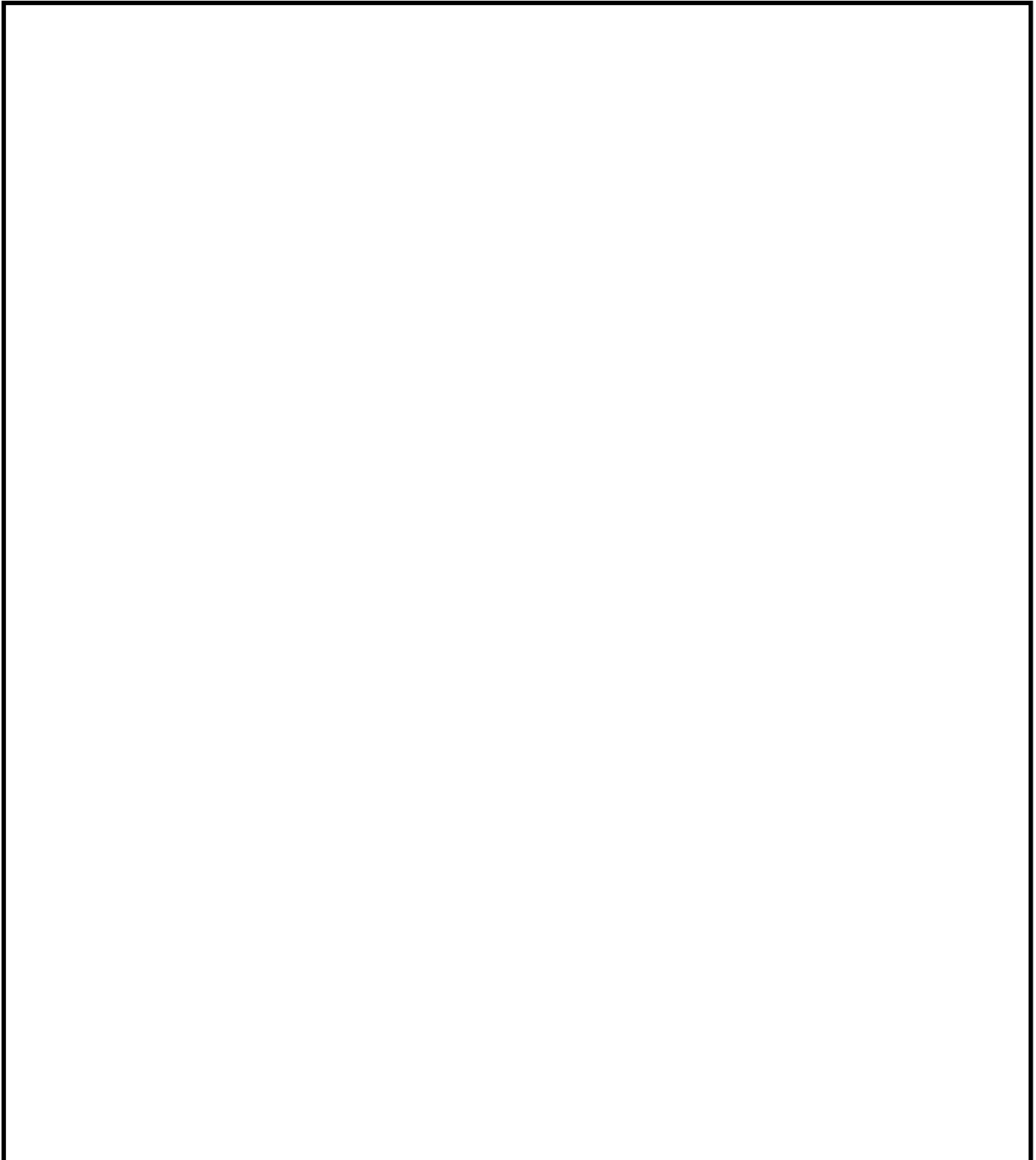
凡例

 …外部事象防護対象施設

 …開口部 (防護対策実施箇所)

 …開口部 (防護対策不要箇所)

 …建屋内 (防護対策実施箇所)



T. M. S. L. 18100

注記*1 : T. M. S. L. 12300 非常用ディーゼル発電機への影響を防止するための対策

図4-2 原子炉建屋 T. M. S. L. 18100における開口部



P . N

凡例



…外部事象防護対象施設



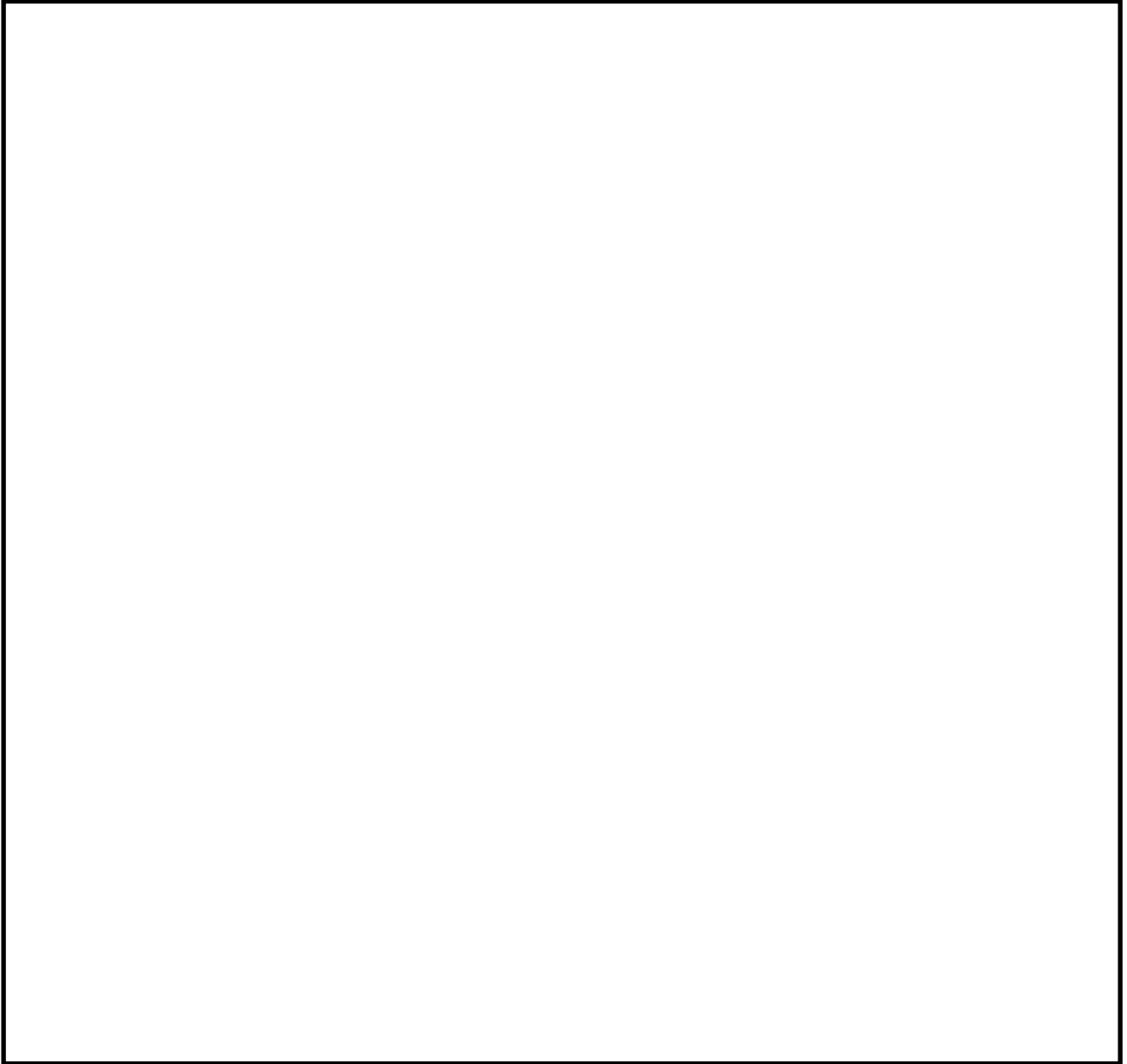
…開口部 (防護対策実施箇所)



…開口部 (防護対策不要箇所)



…建屋内 (防護対策実施箇所)



T. M. S. L. 23500

図4-3 原子炉建屋 T. M. S. L. 23500における開口部



P . N

凡例



…外部事象防護対象施設



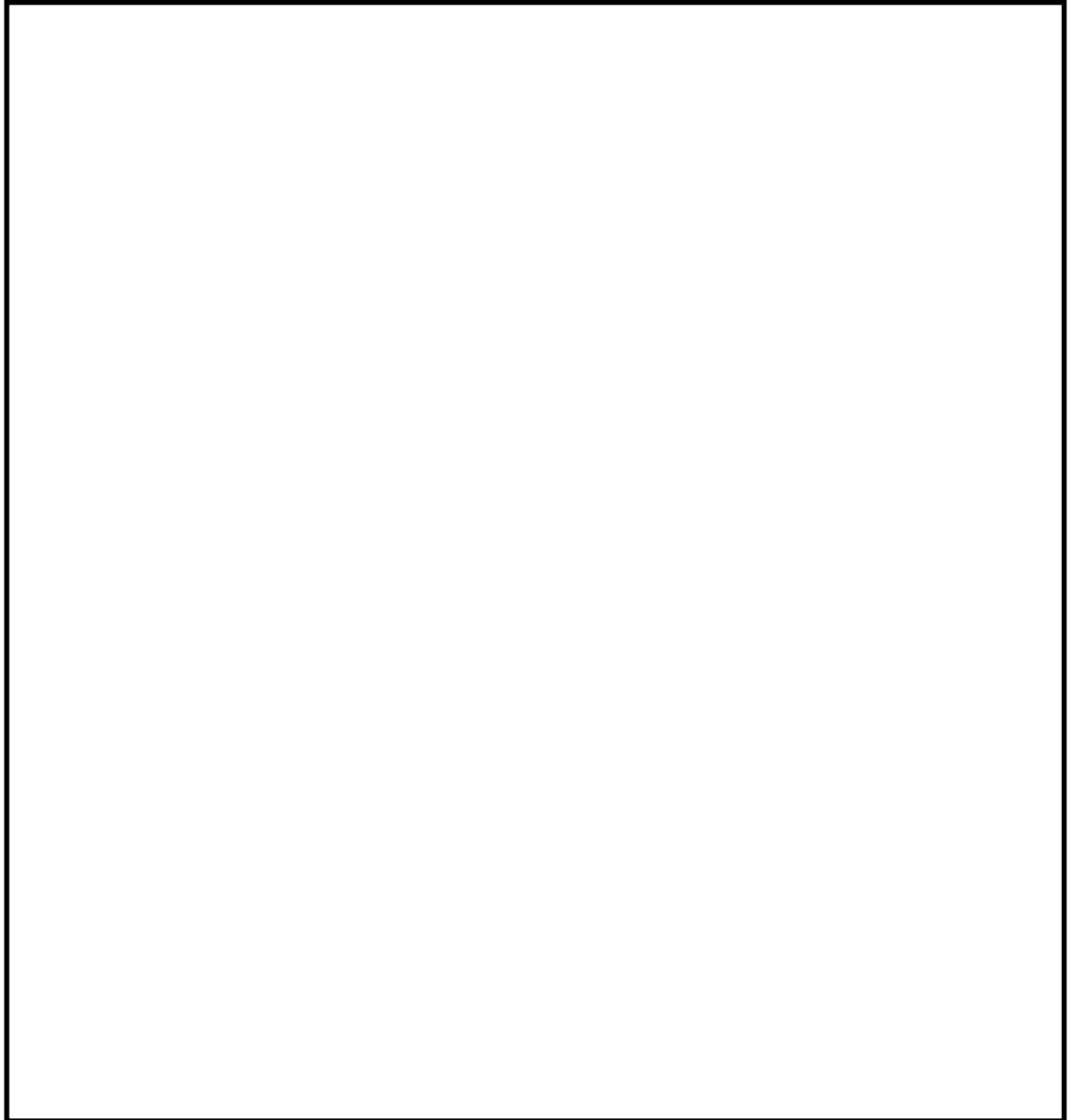
…開口部 (防護対策実施箇所)



…開口部 (防護対策不要箇所)



…建屋内 (防護対策実施箇所)



T. M. S. L. 27200

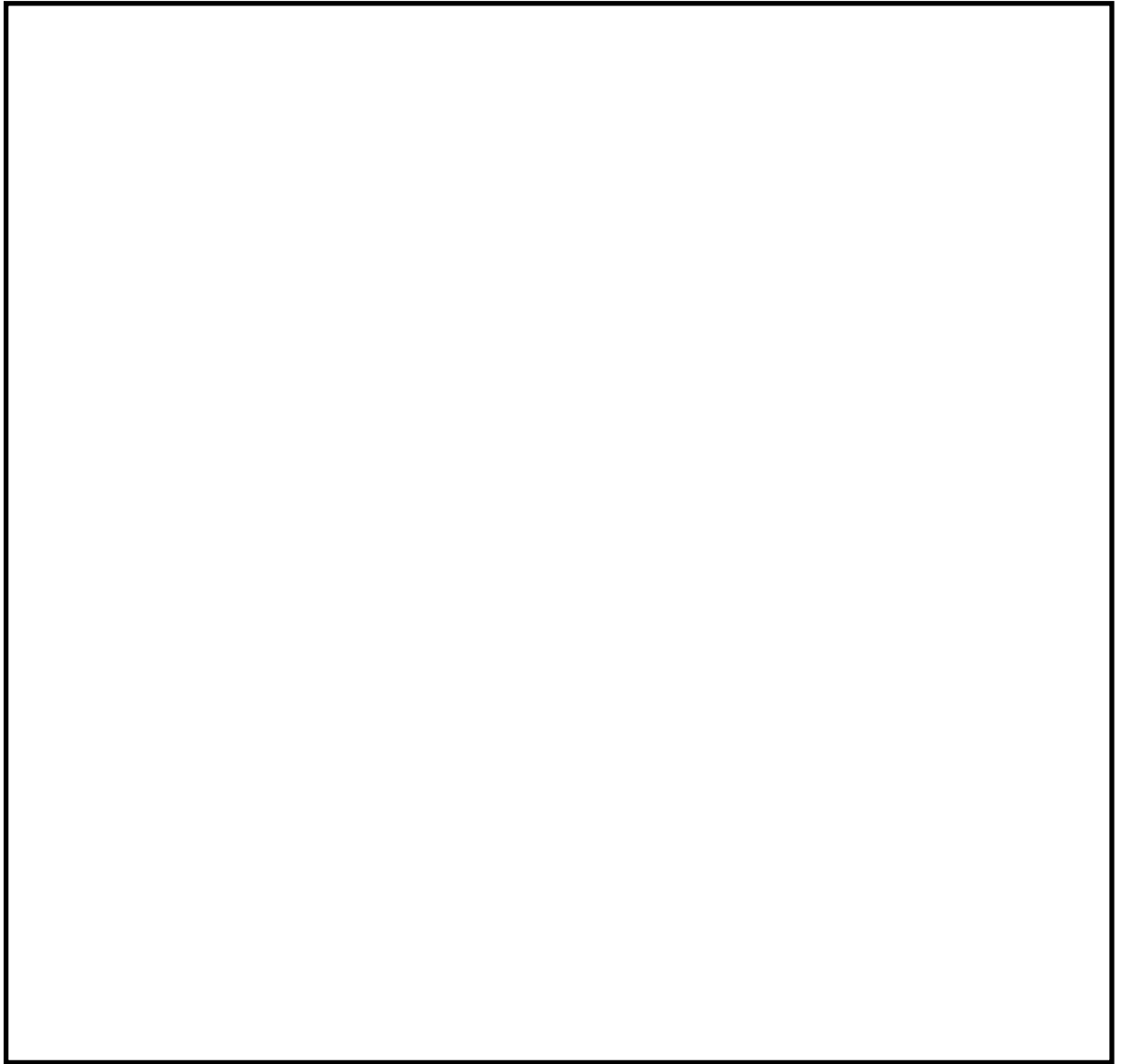
図4-4 原子炉建屋 T. M. S. L. 27200における開口部



P . N

凡例

-  …外部事象防護対象施設
-  …開口部 (防護対策実施箇所)
-  …開口部 (防護対策不要箇所)
-  …建屋内 (防護対策実施箇所)



T. M. S. L. 31700

- 注記*1 : T. M. S. L. 38200 開口部⑳㉑㉒㉓からの飛来物により安全機能を喪失する恐れのある設備
- *2 : 非常用ディーゼル発電機(C)電気品区域排風機への影響を防止するために個別対策を実施

図4-5 原子炉建屋 T. M. S. L. 31700における開口部



凡例



…外部事象防護対象施設



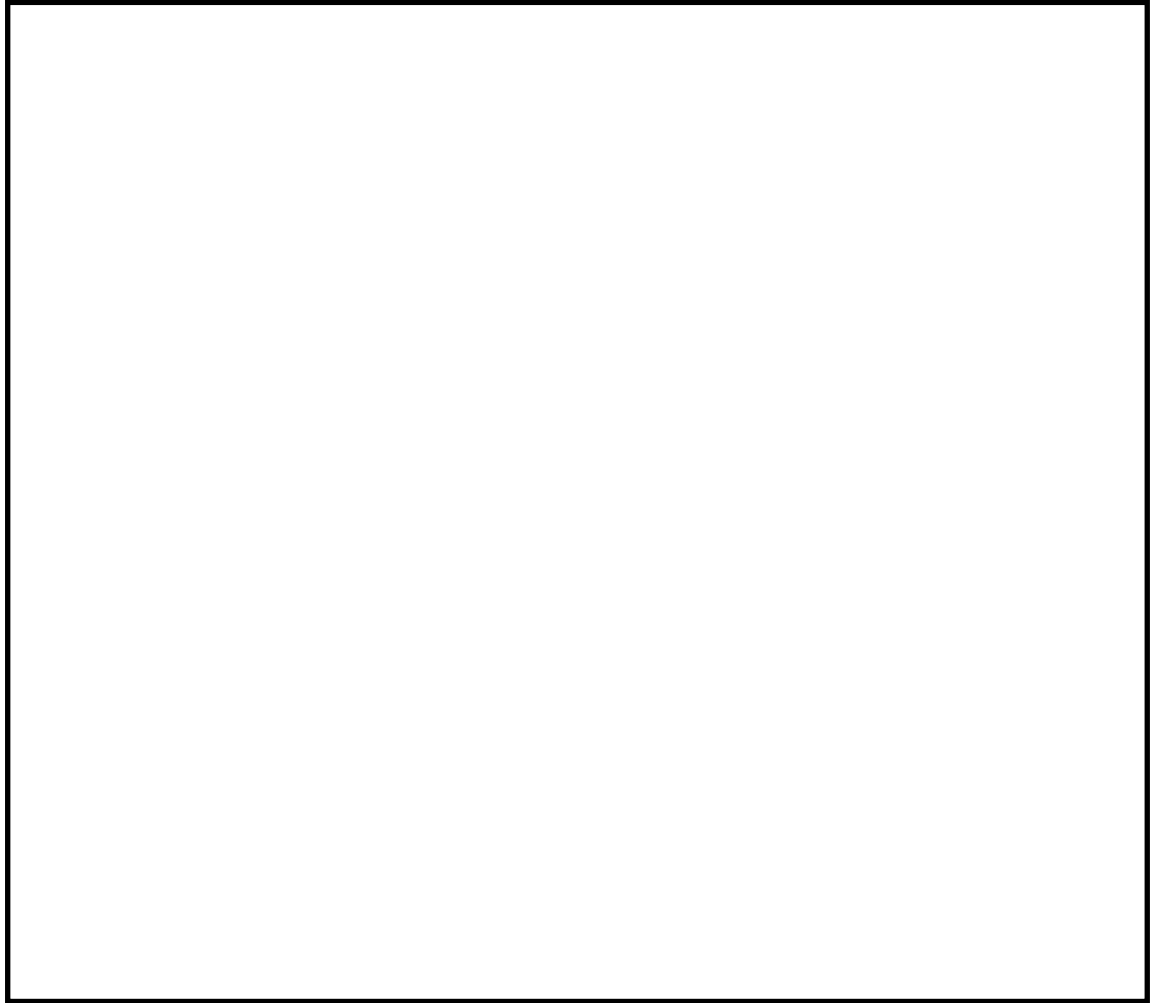
…開口部 (防護対策実施箇所)



…開口部 (防護対策不要箇所)



…建屋内 (防護対策実施箇所)



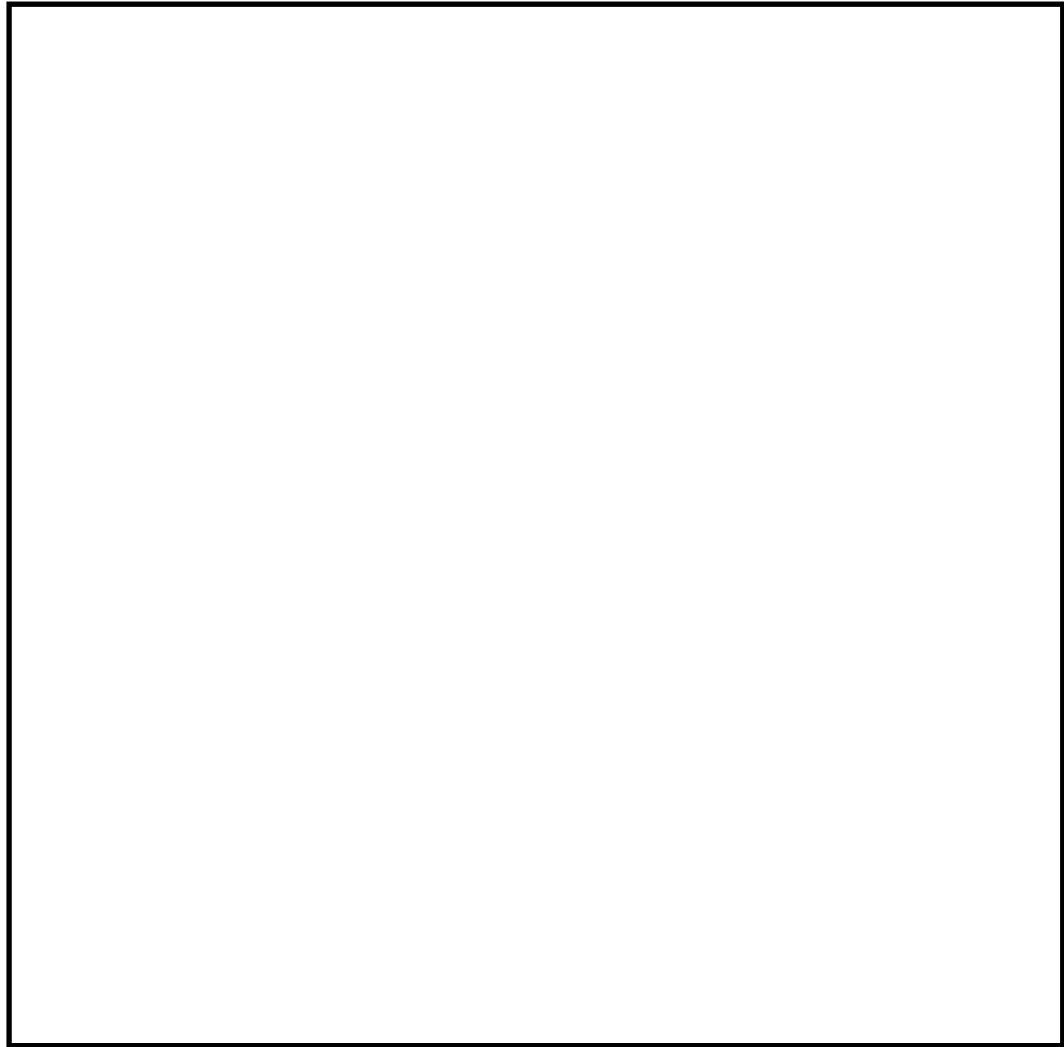
T. M. S. L. 34300

注記*1 : 非常用ディーゼル発電機(C)電気品区域排気ダクトへの影響を防止するために個別対策を実施

図4-6 原子炉建屋 T. M. S. L. 34300における開口部



- 凡例
- 外部事象防護対象施設
 - 開口部 (防護対策実施箇所)
 - 開口部 (防護対策不要箇所)
 - 建屋内 (防護対策実施箇所)



T. M. S. L. 38200

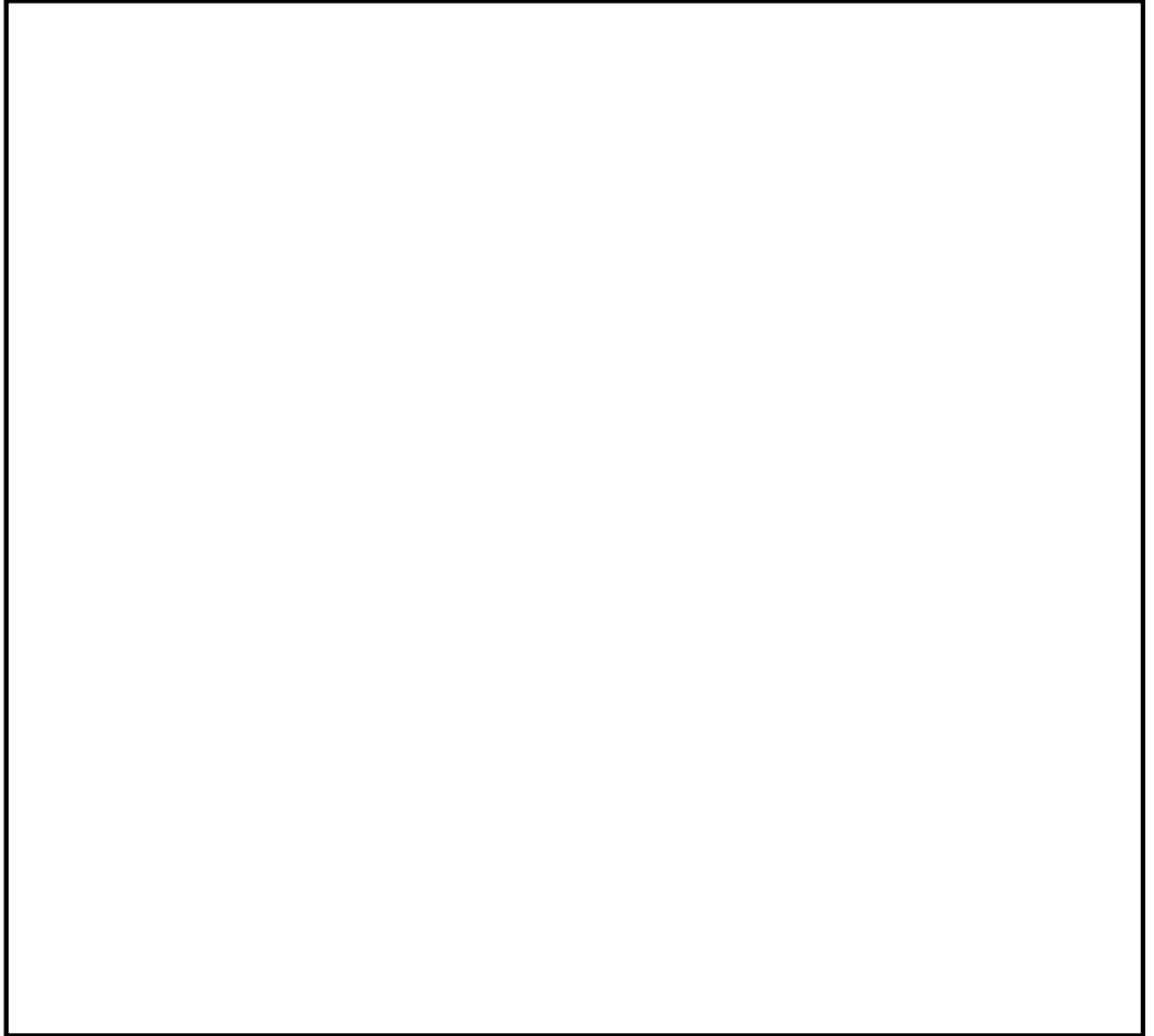
注記*1 : T. M. S. L. 31700 使用済燃料貯蔵プールへの影響を防止するための対策

図4-7 原子炉建屋 T. M. S. L. 38200における開口部



P・N

- 凡例
- …外部事象防護対象施設
 - …開口部 (防護対策実施箇所)
 - …開口部 (防護対策不要箇所)
 - …建屋内 (防護対策実施箇所)



T. M. S. L. 12300

- 注記*1 : T. M. S. L. 20400 開口部⑦⑧⑨⑩⑪⑫⑬, T. M. S. L. 30900 開口部⑰⑱⑲からの飛来物により安全機能を喪失する恐れのある設備
- *2 : T. M. S. L. 30900 開口部⑳㉑からの飛来物により安全機能を喪失する恐れのある設備
- *3 : 原子炉補機冷却海水系配管への影響を防止するために個別対策を実施
- *4 : タービン建屋海水熱交換器区域換気空調系(B)非常用給気ダクトへの影響を防止するために個別対策を実施

図4-8 タービン建屋 T. M. S. L. 12300における開口部



凡例

外部事象防護対象施設

開口部 (防護対策実施箇所)

開口部 (防護対策不要箇所)

建屋内 (防護対策実施箇所)

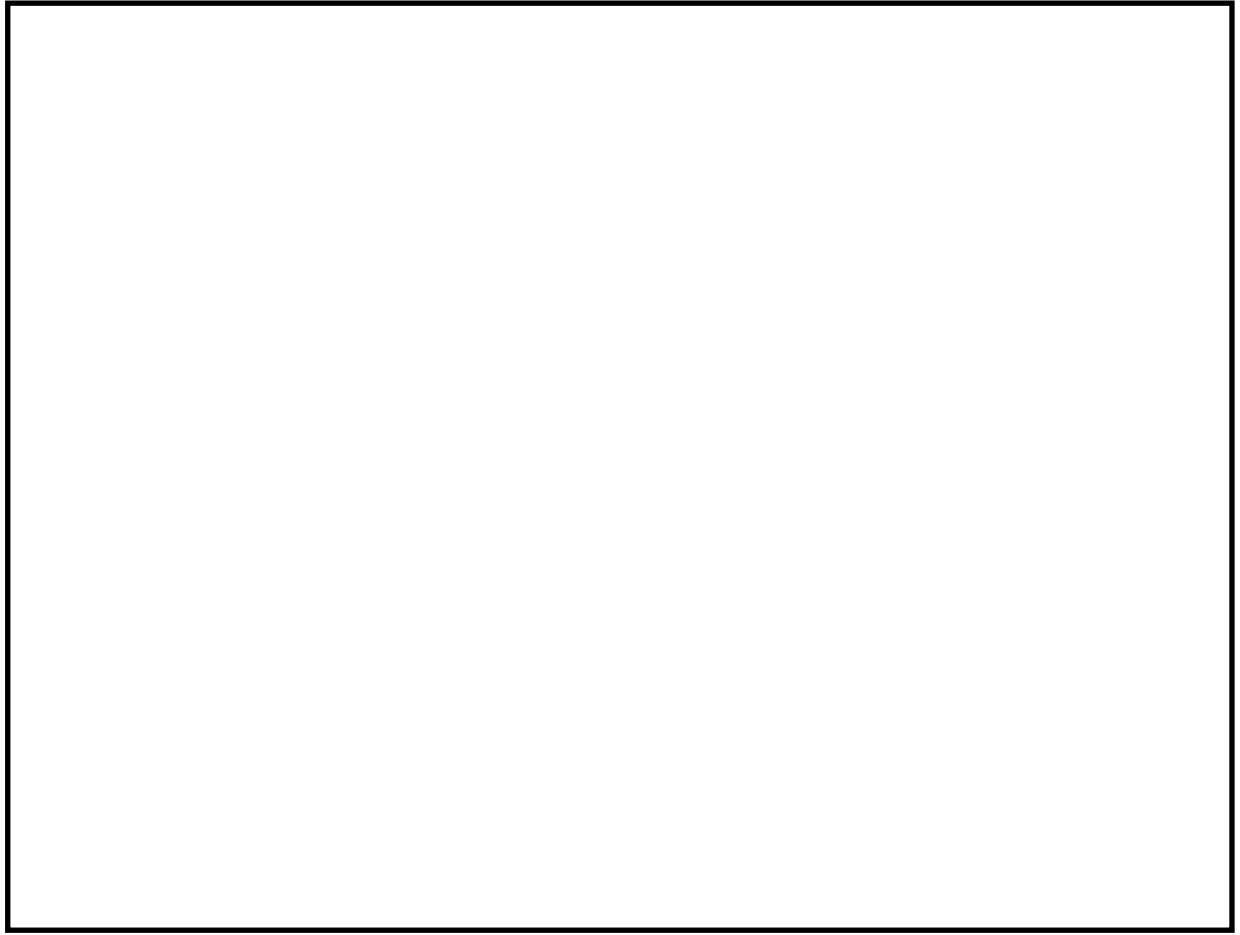


T.M.S.L. 17000

図4-9 タービン建屋 T.M.S.L. 17000における開口部



- 凡例
- 外部事象防護対象施設
 - 開口部 (防護対策実施箇所)
 - 開口部 (防護対策不要箇所)
 - 建屋内 (防護対策実施箇所)



T. M. S. L. 20400



T. M. S. L. 26800

注記*1 : 飛来物によりT. M. S. L. 12300 原子炉補機冷却海水系配管の安全機能を喪失する恐れのある開口部 (建屋内にて個別に防護対策を実施)

図4-10 タービン建屋 T. M. S. L. 20400, T. M. S. L. 26800における開口部



P . N

凡例



…外部事象防護対象施設



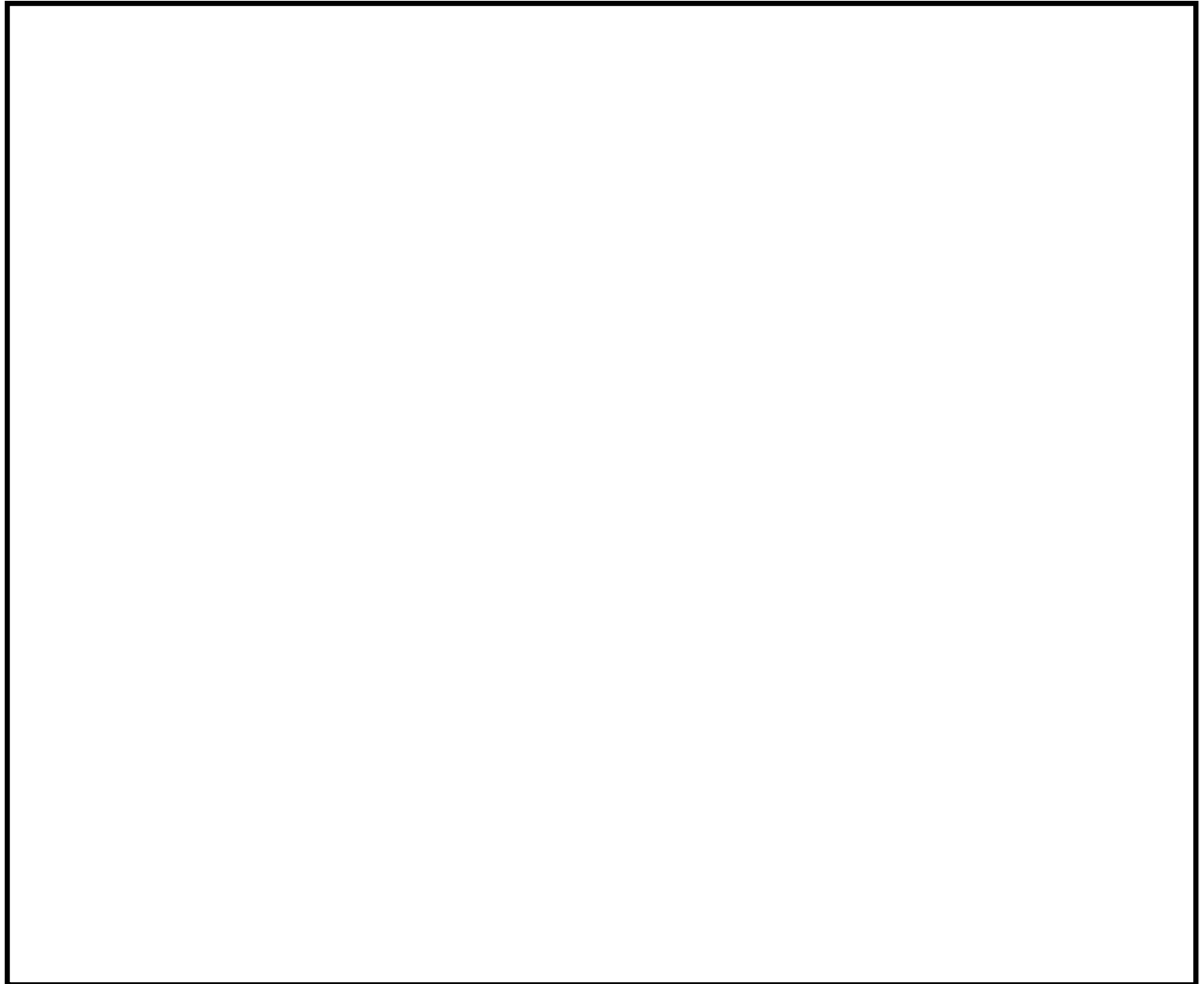
…開口部 (防護対策実施箇所)



…開口部 (防護対策不要箇所)



…建屋内 (防護対策実施箇所)



T. M. S. L. 30900

- 注記*1 : 飛来物によりT. M. S. L. 12300 原子炉補機冷却海水系配管の安全機能を喪失する恐れのある開口部 (建屋内にて個別に防護対策を実施)
- *2 : 飛来物によりT. M. S. L. 12300 タービン建屋海水熱交換器区域換気空調系(B)非常用給気ダクトの安全機能を喪失する恐れのある開口部 (建屋内にて個別に防護対策を実施)
- *3 : タービン建屋海水熱交換器区域換気空調系(A)非常用給気ダクトへの影響を防止するために個別対策を実施
- *4 : タービン建屋海水熱交換器区域換気空調系(A)非常用排気ダクトへの影響を防止するために個別対策を実施

図4-11 タービン建屋 T. M. S. L. 30900における開口部



P . N

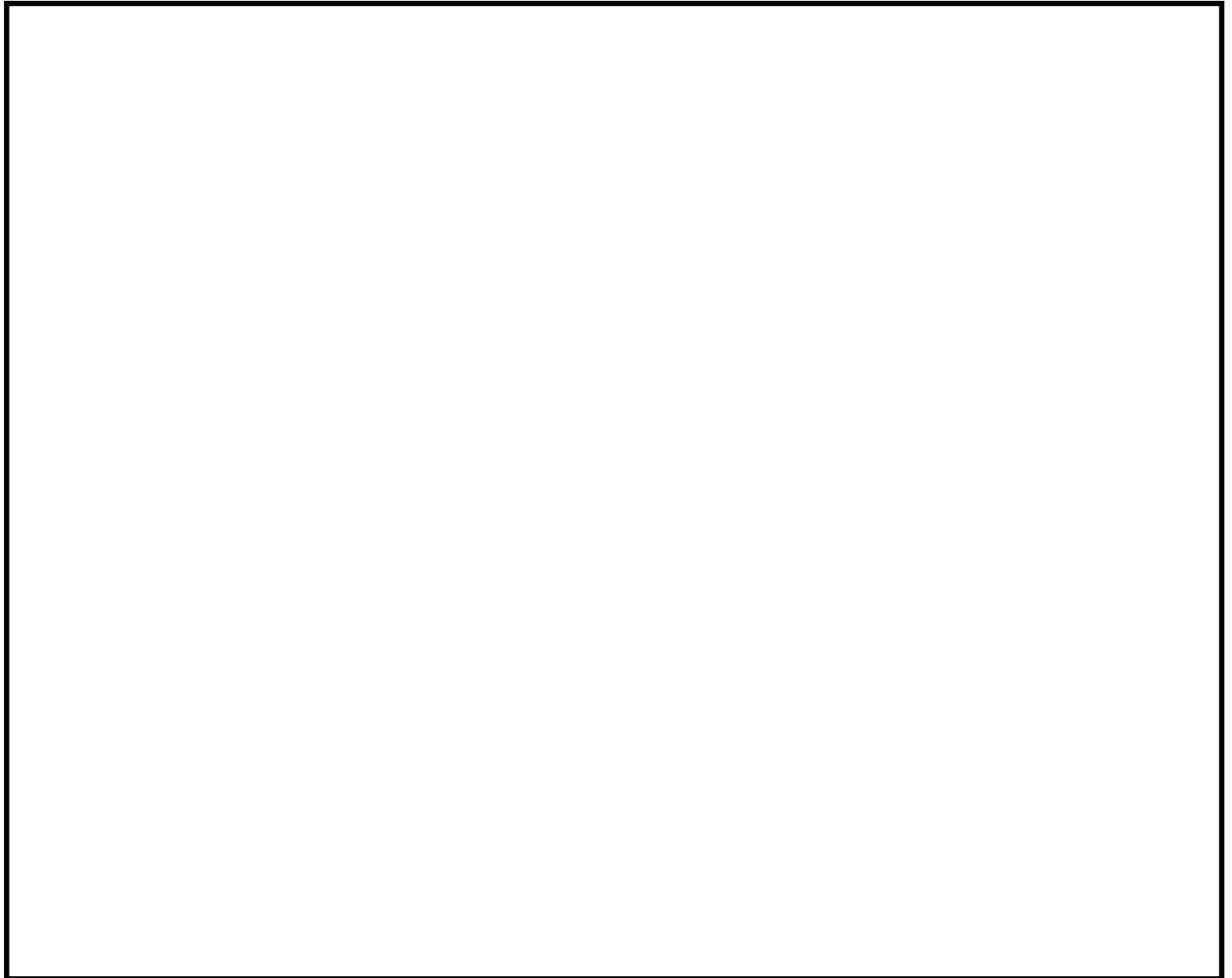
凡例

 …外部事象防護対象施設

 …開口部 (防護対策実施箇所)

 …開口部 (防護対策不要箇所)

 …建屋内 (防護対策実施箇所)



T. M. S. L. 38600

図4-12 タービン建屋 T. M. S. L. 38600における開口部



P . N

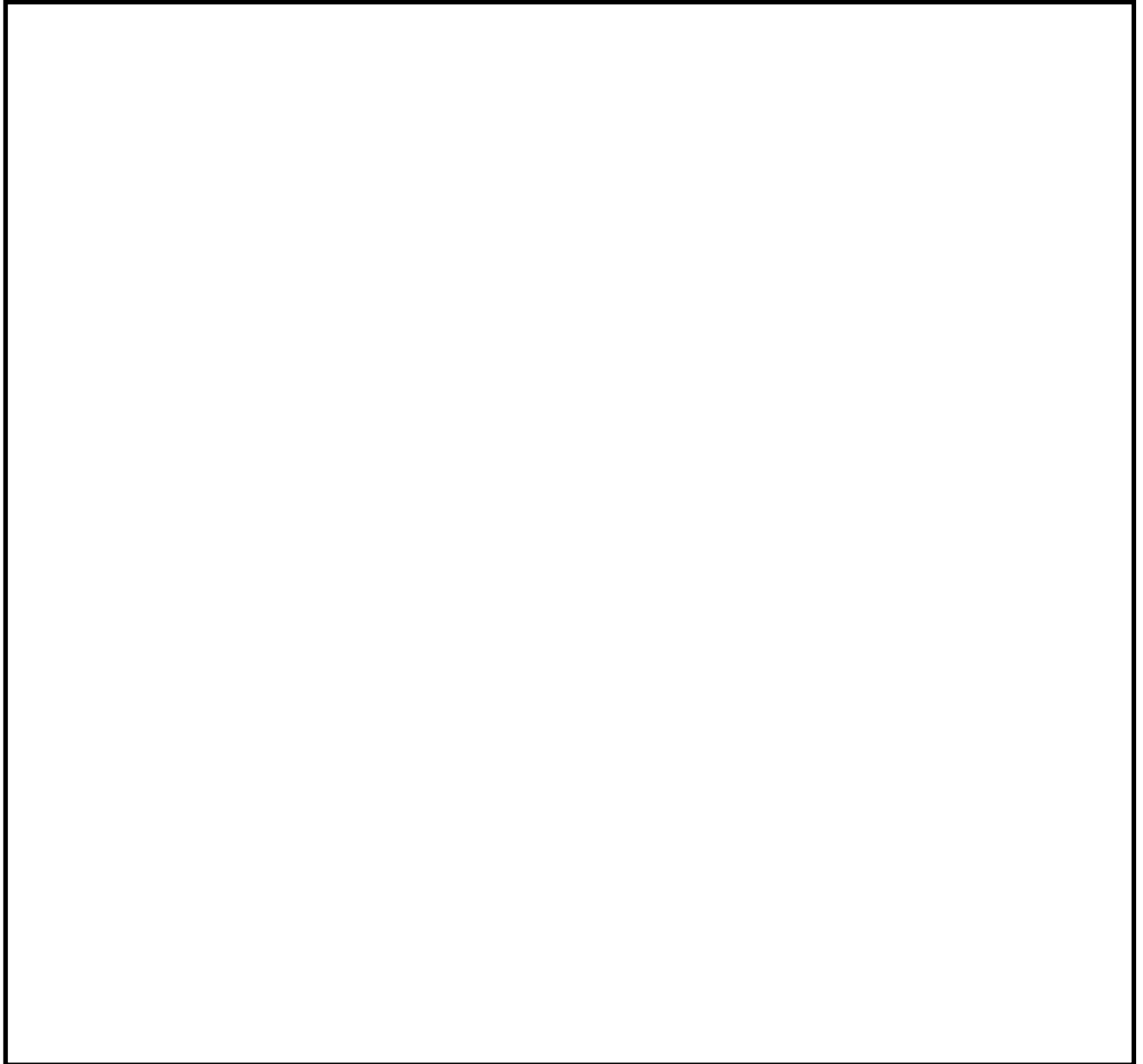
凡例

 …外部事象防護対象施設

 …開口部 (防護対策実施箇所)

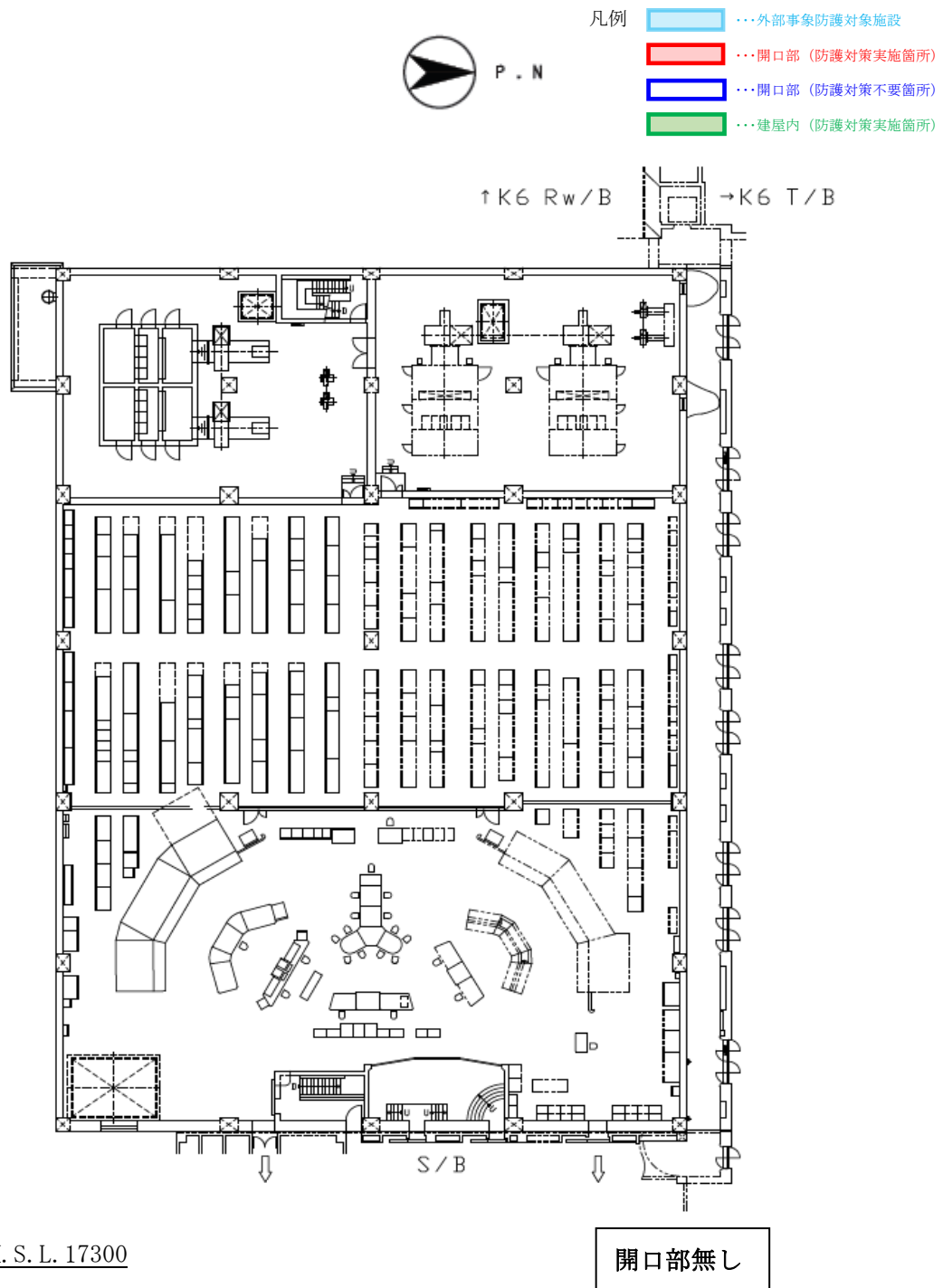
 …開口部 (防護対策不要箇所)

 …建屋内 (防護対策実施箇所)



T.M.S.L. 12300

図4-13 コントロール建屋 T.M.S.L. 12300における開口部





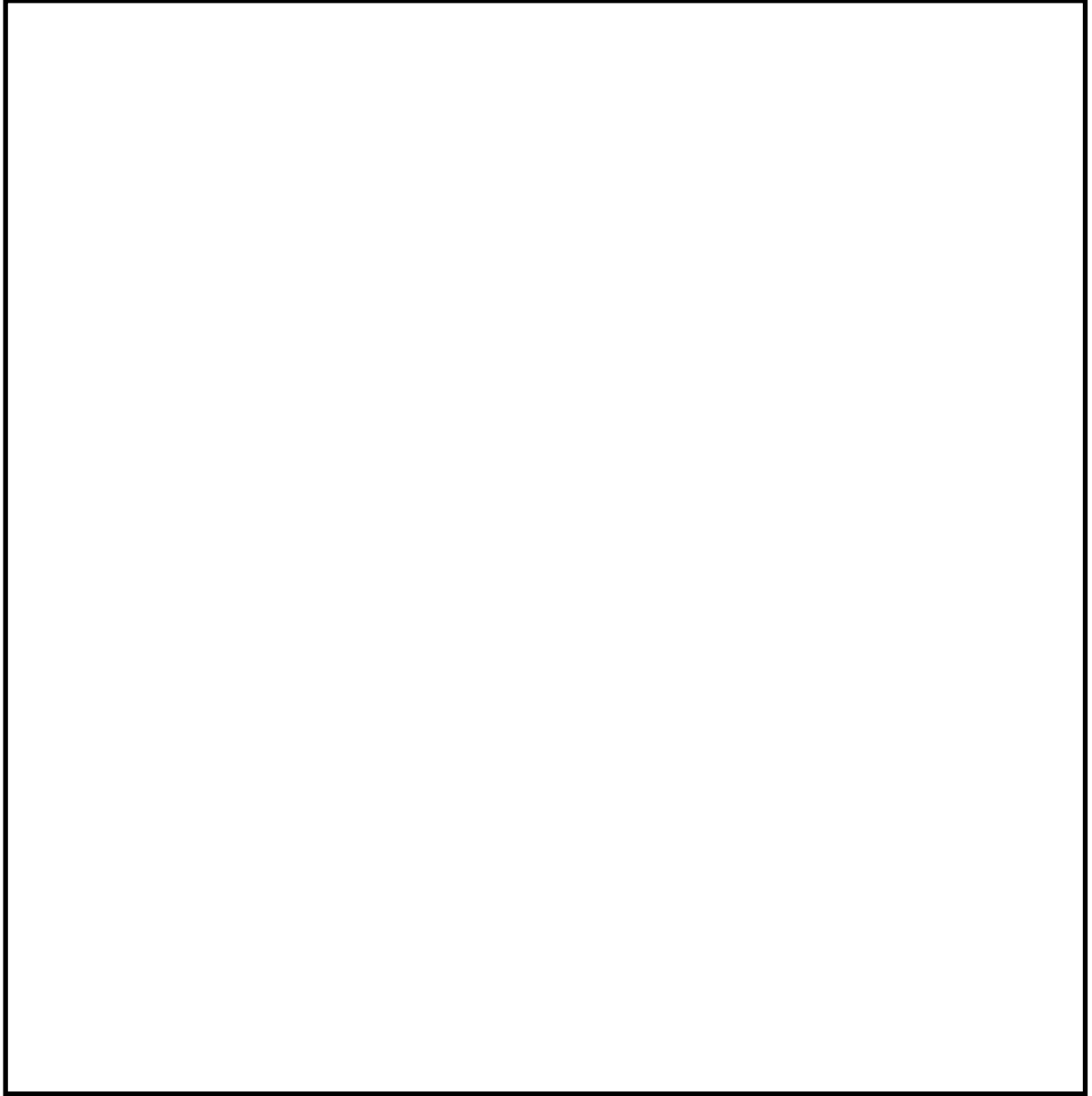
T. M. S. L. 17300

図4-14 コントロール建屋 T. M. S. L. 17300における開口部



P . N

- 凡例
-  …外部事象防護対象施設
 -  …開口部 (防護対策実施箇所)
 -  …開口部 (防護対策不要箇所)
 -  …建屋内 (防護対策実施箇所)



T. M. S. L. 24100

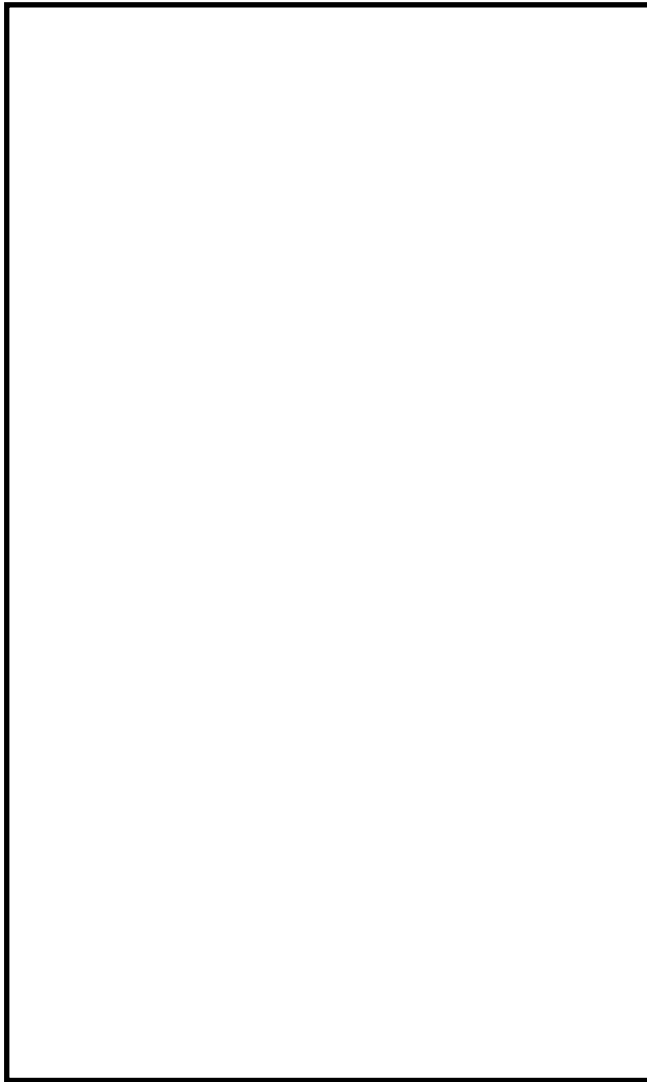
- 注記*1 : 7号機 中央制御室及びコントロール建屋計測制御電源盤区域排気ダクトへの影響を防止するために個別対策を実施
- *2 : 7号機 中央制御室及びコントロール建屋計測制御電源盤区域給気ダクトへの影響を防止するために個別対策を実施

図4-15 コントロール建屋 T. M. S. L. 24100における開口部



P . N

- 凡例
- 外部事象防護対象施設
 - 開口部 (防護対策実施箇所)
 - 開口部 (防護対策不要箇所)
 - 建屋内 (防護対策実施箇所)



T. M. S. L. 12300

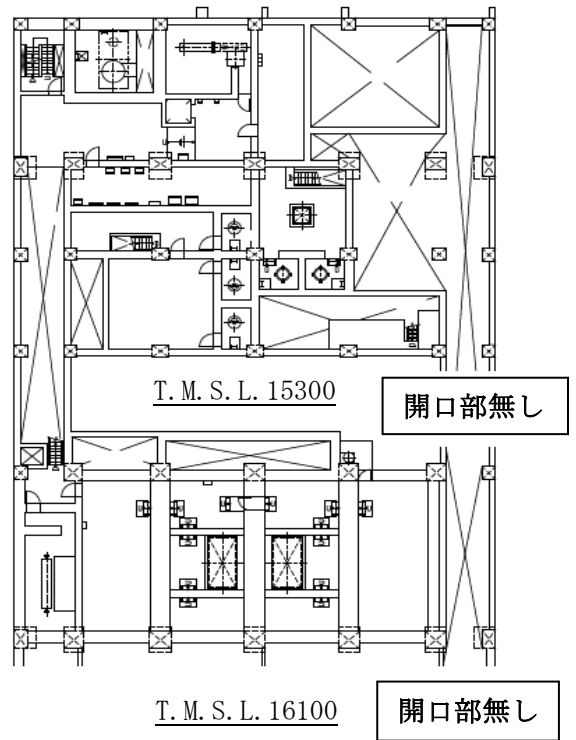
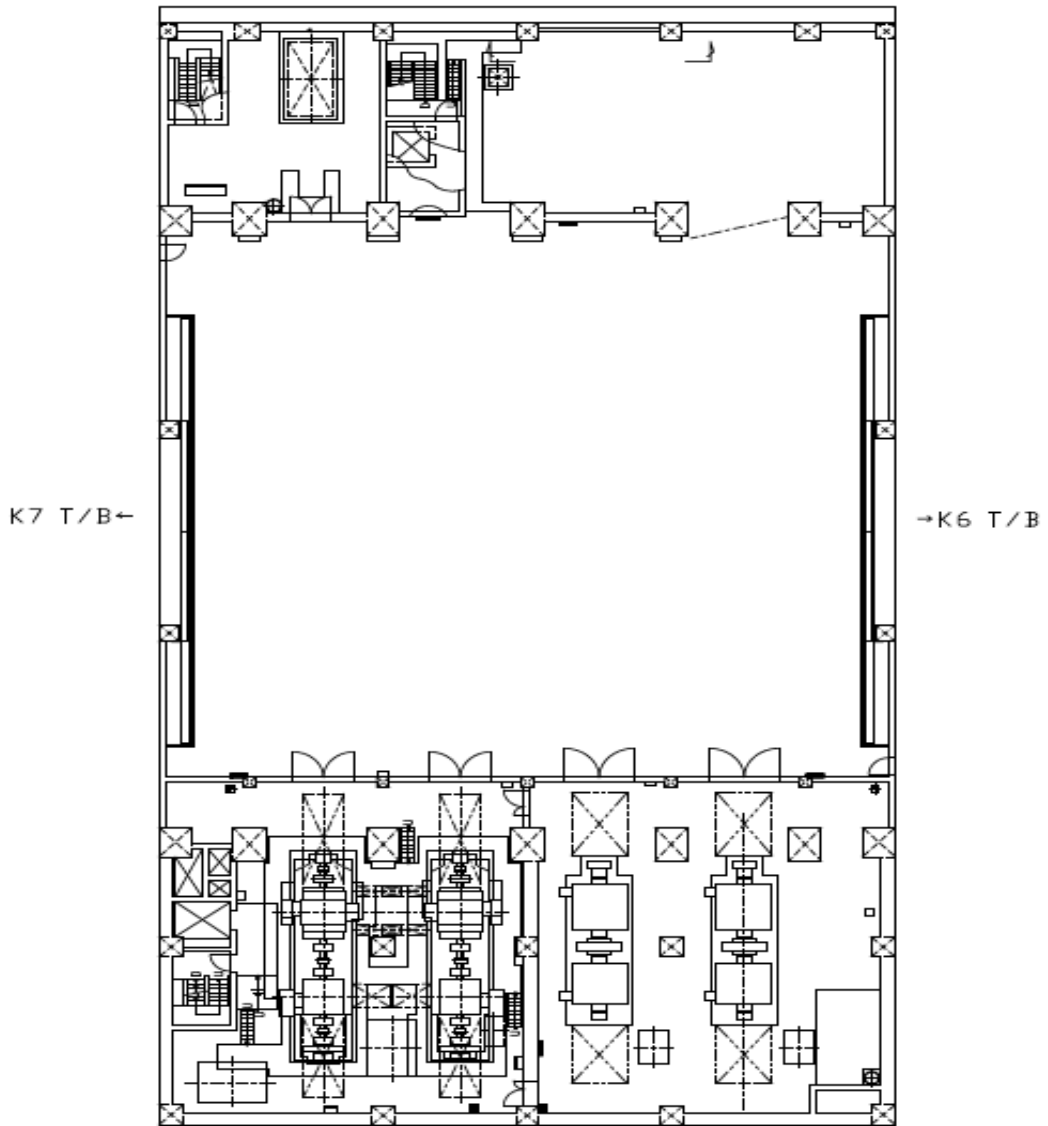


図4-16 廃棄物処理建屋 T. M. S. L. 12300, T. M. S. L. 15300, T. M. S. L. 16100における開口部



- 凡例
- 外部事象防護対象施設
 - 開口部 (防護対策実施箇所)
 - 開口部 (防護対策不要箇所)
 - 建屋内 (防護対策実施箇所)



T. M. S. L. 20400

開口部無し

図4-17 廃棄物処理建屋 T. M. S. L. 20400における開口部



P . N

- 凡例
- 外部事象防護対象施設
 - 開口部 (防護対策実施箇所)
 - 開口部 (防護対策不要箇所)
 - 建屋内 (防護対策実施箇所)

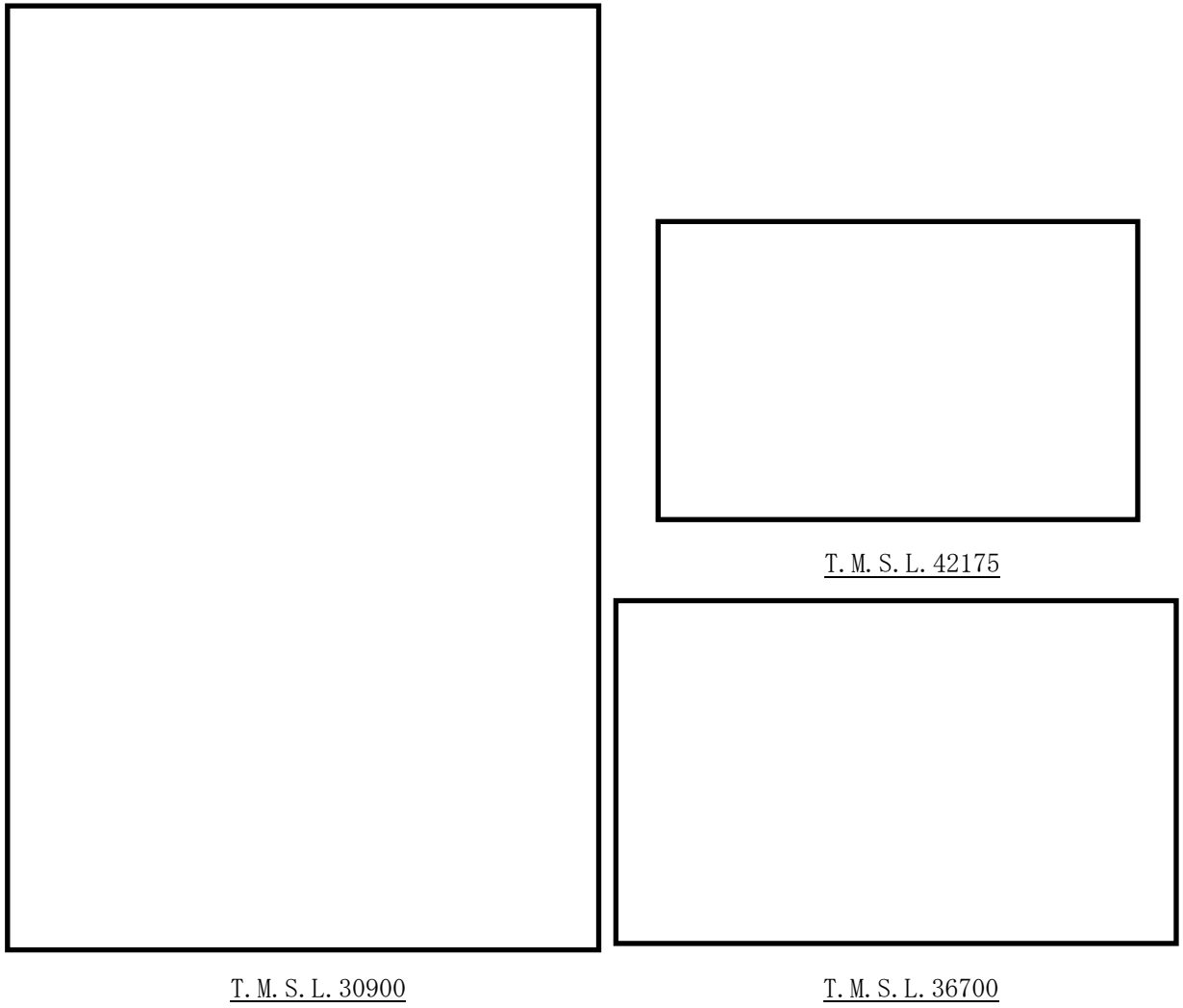


図4-18 廃棄物処理建屋 T.M.S.L. 30900, T.M.S.L. 36700, T.M.S.L. 42175における開口部

防護対策施設の設置方針について

1. はじめに

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

柏崎刈羽原子力発電所第7号機の屋外、建屋開口部及び建屋内に設置する防護対策施設の設置方針について、以下のとおり説明する。

2. 概要

2.1 防護対策施設について

屋外、建屋開口部及び建屋内に設置する防護対策施設を表1に示す。

表1 建屋開口部及び建屋内に設置する防護対策施設

分類	防護対策施設
屋外に設置する防護対策施設	<ul style="list-style-type: none"> ・非常用ディーゼル発電設備燃料移送ポンプ防護板（防護鋼板及び架構） （以下「DGFOポンプ防護板」という。） ・非常用ディーゼル発電設備燃料移送配管防護板（防護鋼板及び架構） （以下「DGFO配管防護板」という。）
建屋開口部に設置する防護対策施設	<ul style="list-style-type: none"> ・建屋開口部竜巻防護ネット（防護ネット及び架構） （以下「竜巻防護ネット」という。） ・建屋開口部竜巻防護フード（防護鋼板及び架構又は防護壁（鉄筋コンクリート）） （以下「竜巻防護フード（防護鋼板及び架構）」を「竜巻防護鋼製フード」といい、「竜巻防護フード（防護壁（鉄筋コンクリート）」を「竜巻防護鉄筋コンクリート製フード」という。） ・竜巻防護扉
建屋内に設置する防護対策施設	<ul style="list-style-type: none"> ・原子炉補機冷却海水系配管防護壁（防護鋼板及び架構） （以下「RSW配管防護壁」という。） ・換気空調系ダクト防護壁（防護鋼板及び架構） （以下「換気空調系ダクト防護壁」という。）

2.2 設置場所

(1) 屋外に設置する防護対策施設

DGFO ポンプ防護板及び DGFO 配管防護板は、屋外の軽油タンクエリアに設置する。
設置場所を図 1 に示す。

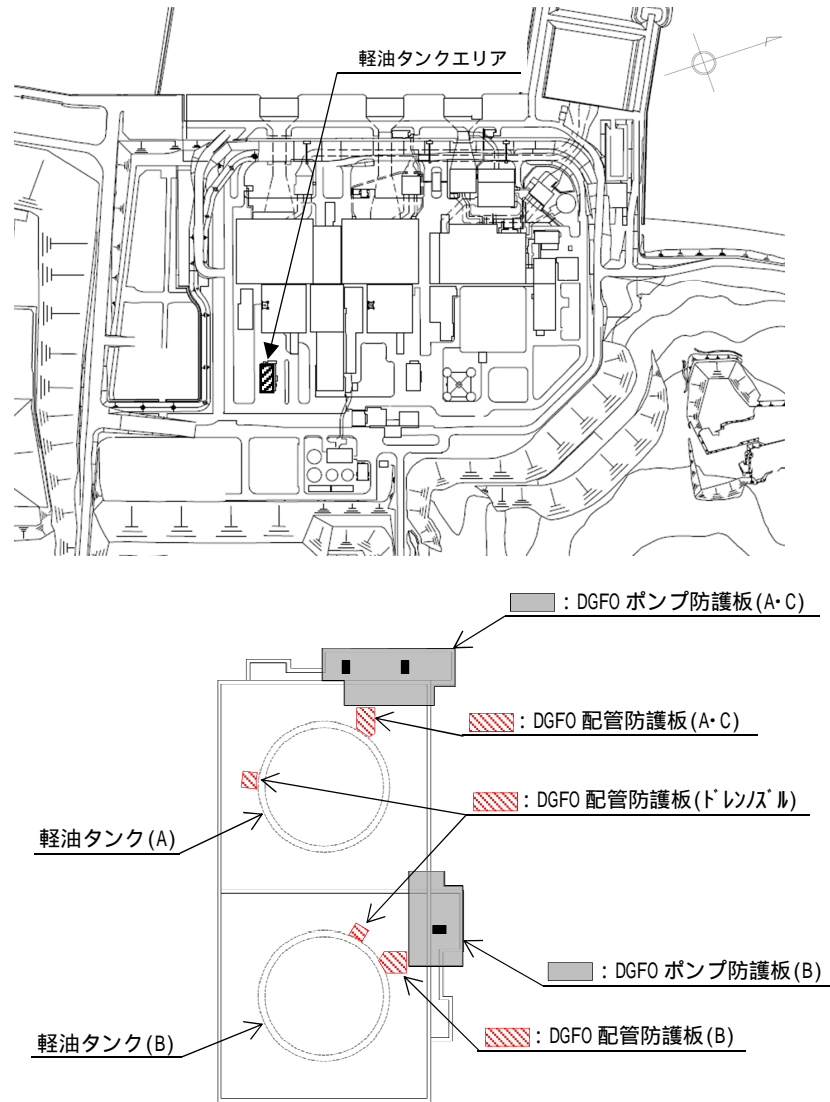


図 1 DGFO ポンプ防護板及び DGFO 配管防護板の設置場所

(2) 建屋開口部及び建屋内に設置する防護対策施設

竜巻防護ネット,竜巻防護鋼製フード,竜巻防護鉄筋コンクリート製フード,竜巻防護扉,RSW 配管防護壁及び換気空調系ダクト防護壁の設置場所は「4. 建屋開口部の調査結果について」に示す。

なお,建屋開口部及び建屋内に設置する防護対策施設の選定方法は以下のとおり。

建屋開口部への飛来物防護において,小さい開口部については,竜巻防護鋼製フード又は竜巻防護鉄筋コンクリート製フードを設置する。

比較的開口が大きい箇所については,フード状の防護対策施設の場合は重量が大きくなり建屋躯体への影響が大きくなることから比較的軽量となる竜巻防護ネットを開口部に設置する。

建屋開口部で対策することが困難な箇所については,建屋内に防護壁を設置する。

なお,建屋開口部のうち扉については竜巻防護扉を設置する。

2.3 設備構成について

屋外，建屋開口部及び建屋内に設置する防護対策施設の設備構成を下記に示す。

(1) 屋外に設置する防護対策施設

a. DGFO ポンプ防護板

DGFO ポンプ防護板は，防護鋼板及び架構で構成する鋼製構造物である。なお，竜巻防護扉を有する。

DGFO ポンプ防護板の構造図を図 2 に示す。

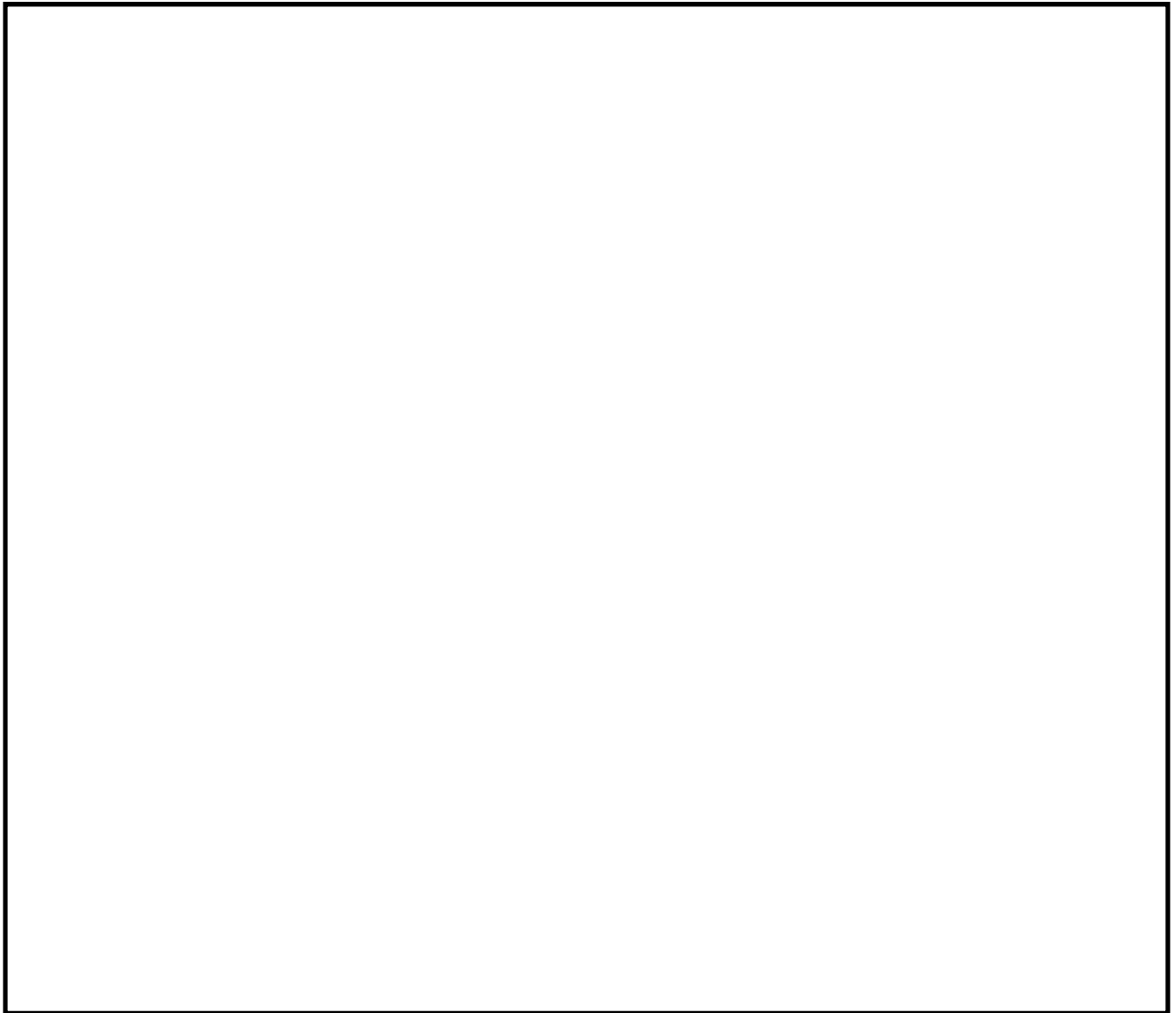


図 2 DGFO ポンプ防護板の構造図（例）

b. DGFO 配管防護板

DGFO 配管防護板は、防護鋼板及び架構で構成する鋼製構造物である。

DGFO 配管防護板の構造図を図 3 に示す。

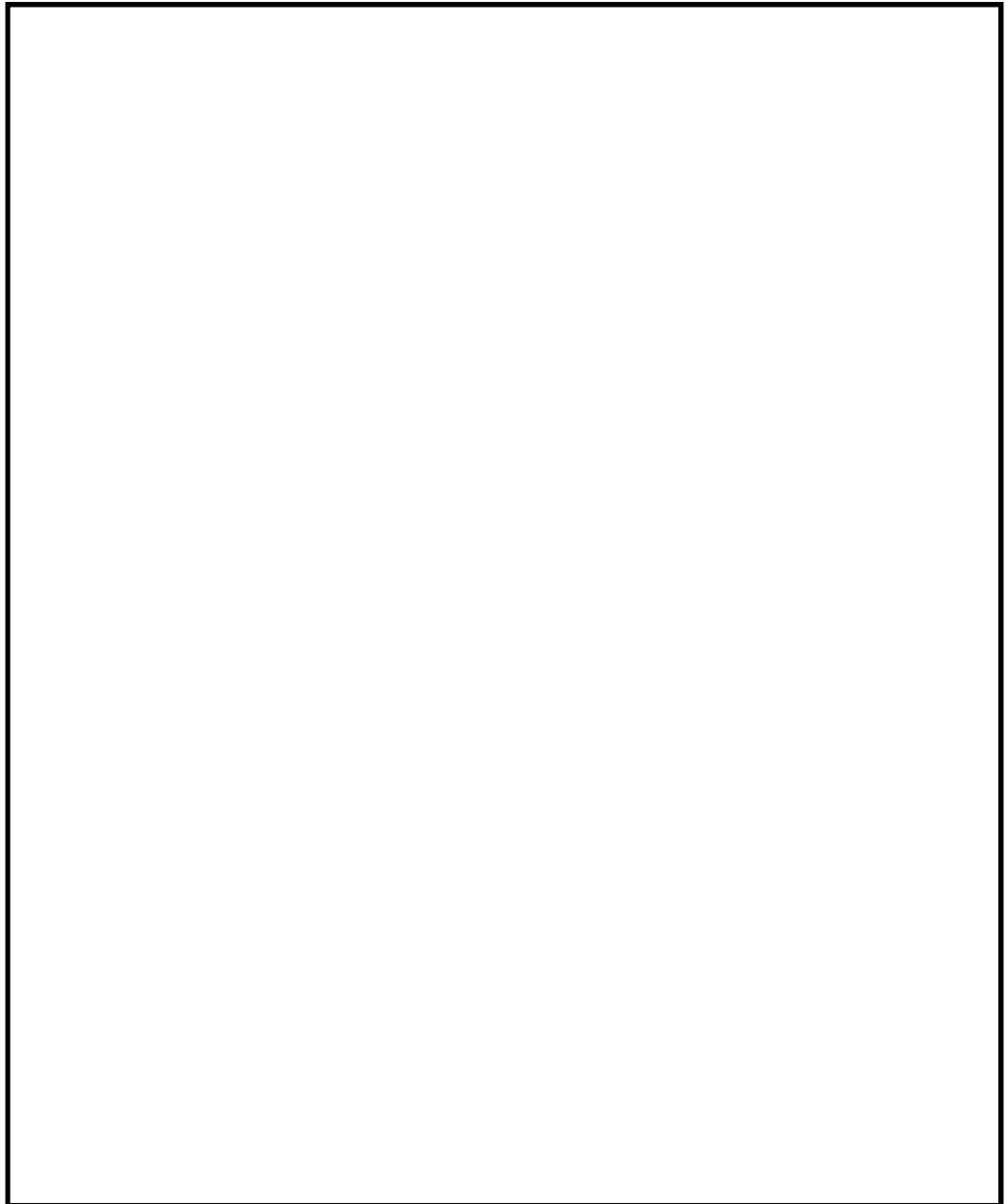


図 3 DGFO 配管防護板の構造図（例）

(2) 建屋開口部に設置する防護対策施設

a. 竜巻防護ネット

竜巻防護ネットは、防護ネット(構成部品としてはネット、ワイヤロープ、シャックル、接続用の治具(支持部、固定部))及び架構で構成する鋼製構造物である。

建屋開口部のうち原子炉建屋のプロアウトパネル部(4箇所)に設置する竜巻防護ネットは建屋開口部の屋内側に設置し、その他の箇所に設置する竜巻防護ネットは建屋開口部の屋外側に設置する。

竜巻防護ネットの構造図を図4に示す。

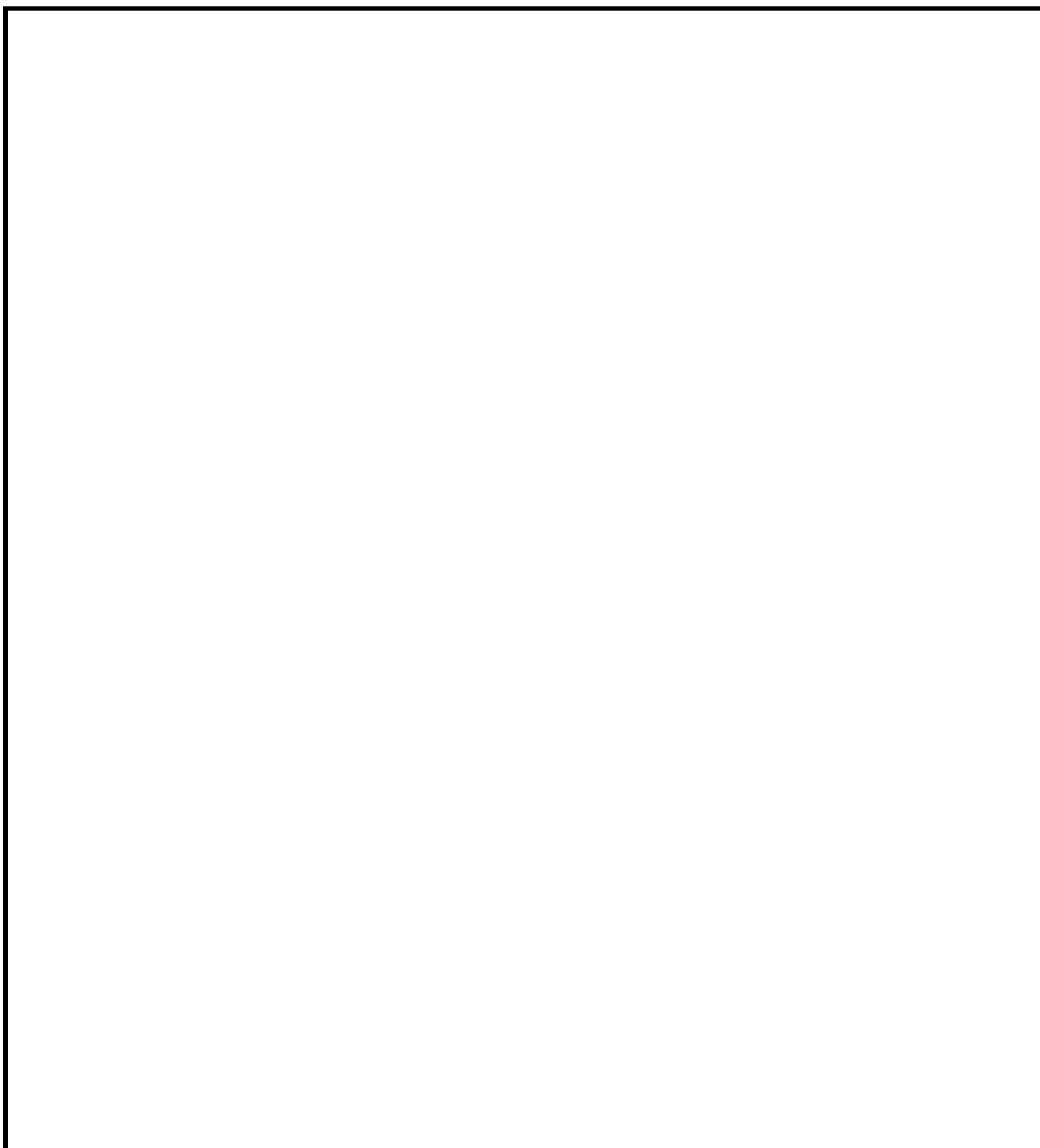


図4 竜巻防護ネットの構造図(例)

b. 竜巻防護鋼製フード

竜巻防護鋼製フードは、防護鋼板及び架構で構成する鋼製構造物である。

竜巻防護鋼製フードの構造図を図5に示す。

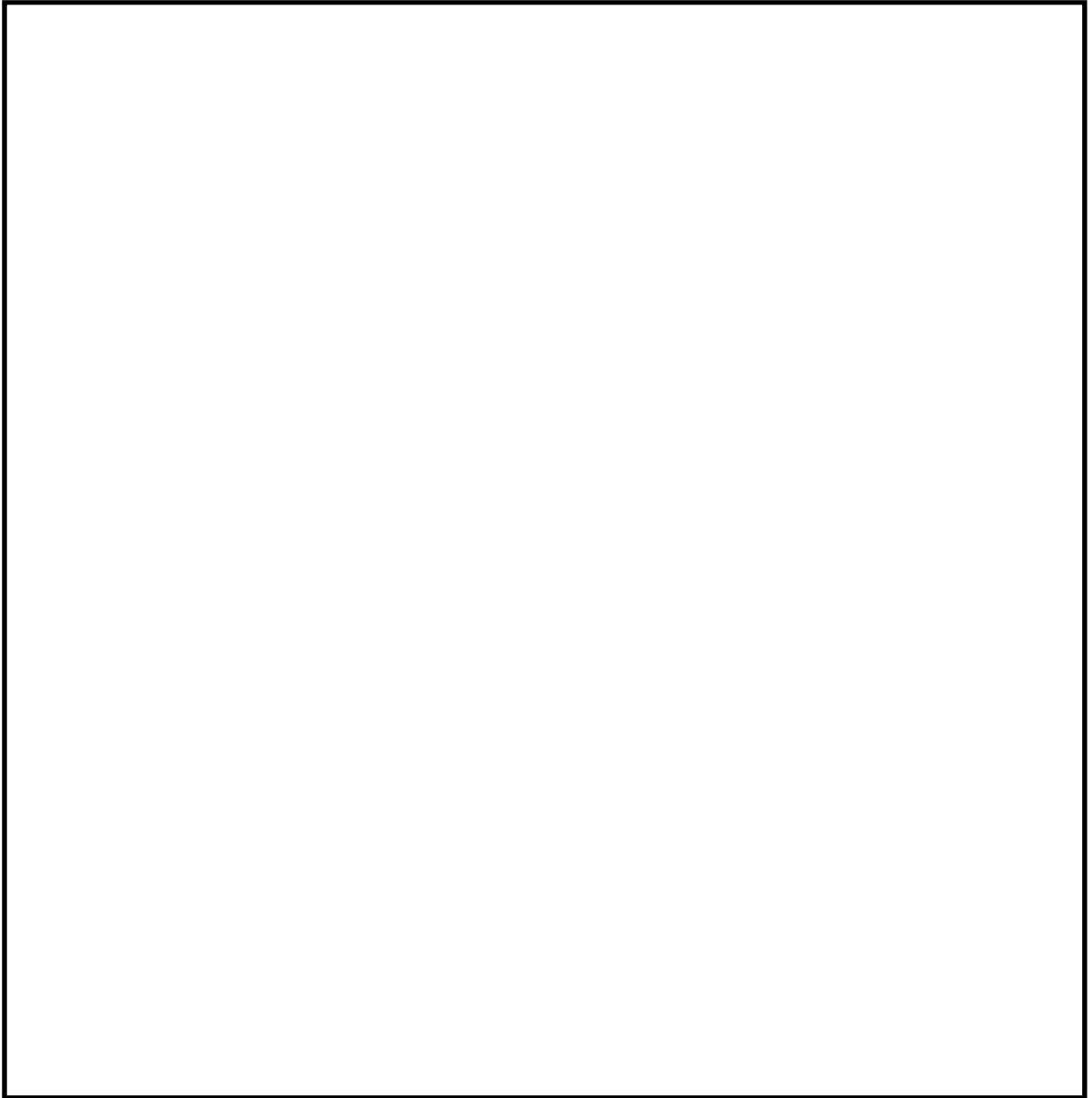


図5 竜巻防護鋼製フードの構造図（例）

c. 竜巻防護鉄筋コンクリート製フード

竜巻防護鉄筋コンクリート製フードは、鉄筋コンクリート製構造物である。

竜巻防護鉄筋コンクリート製フードの構造図を図6に示す。

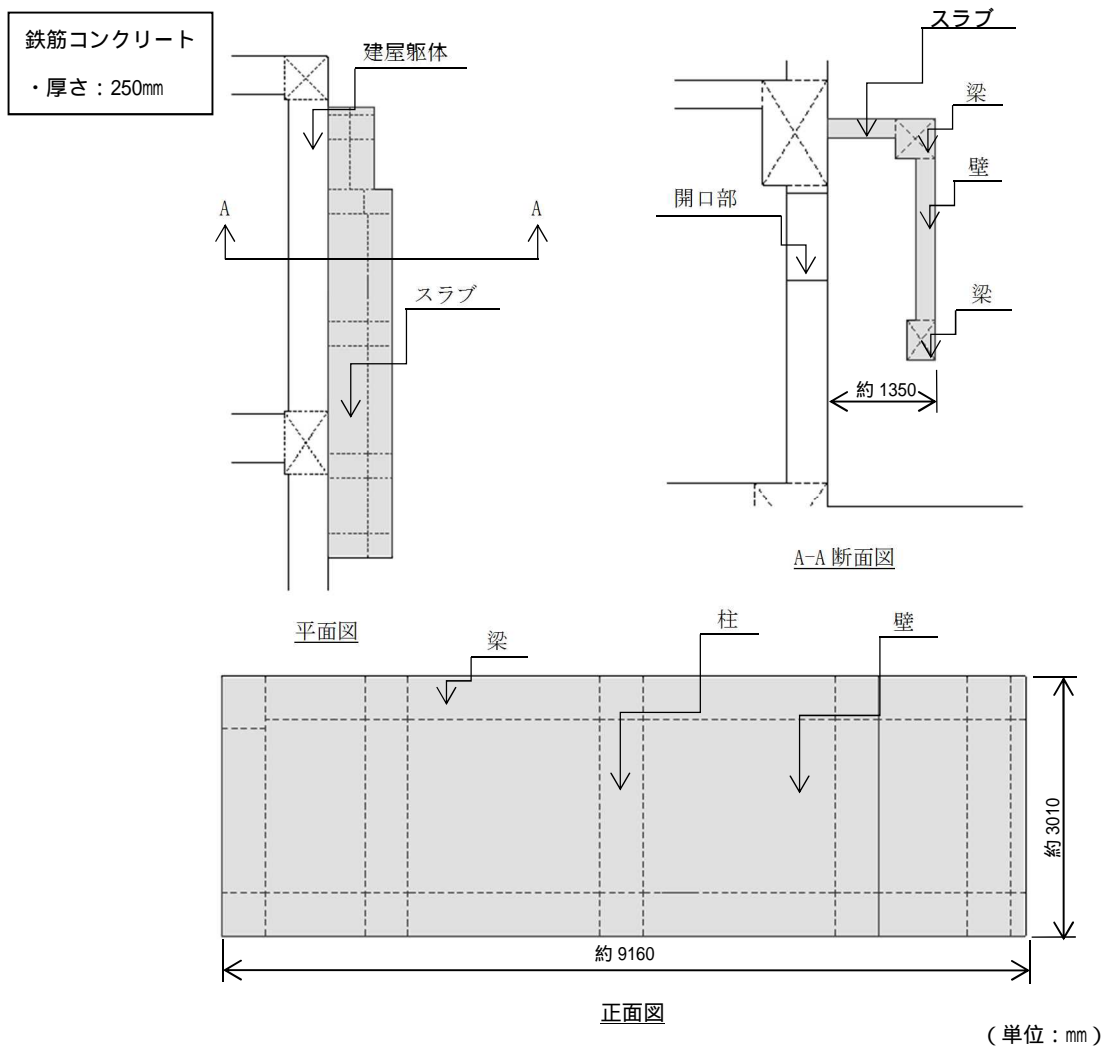


図6 竜巻防護鉄筋コンクリート製フードの構造図(例)

d. 竜巻防護扉

竜巻防護扉は、表側鋼板、芯材、扉枠等の部品で構成する鋼製構造物である。

竜巻防護扉の構造図を図7に示す。

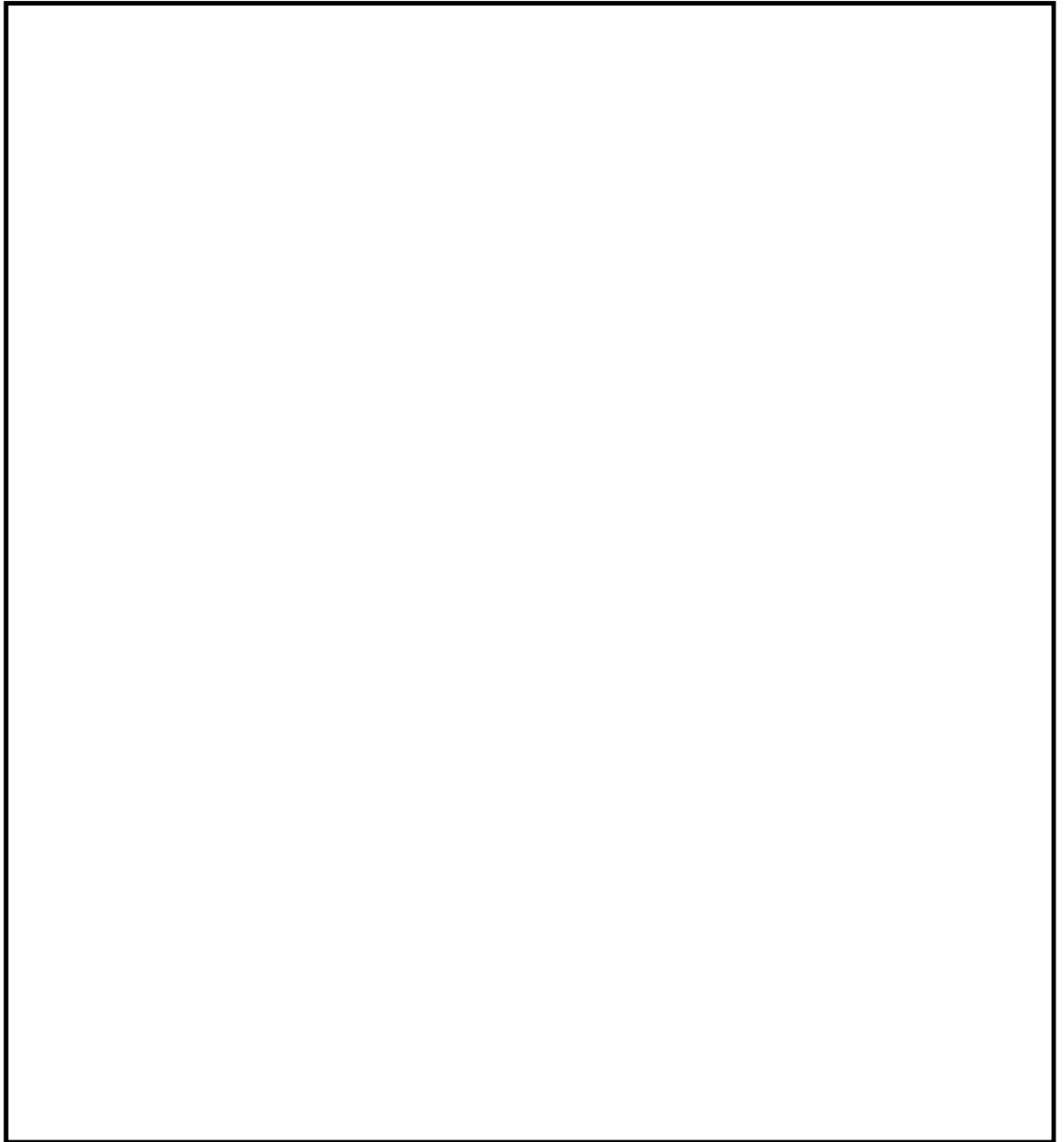


図7 竜巻防護扉の構造図（例）

(3) 建屋内に設置する防護対策施設

a. RSW 配管防護壁

RSW 配管防護壁は、防護鋼板及び架構で構成する鋼製構造物である。

RSW 配管防護壁の構造図を図 8 に示す。

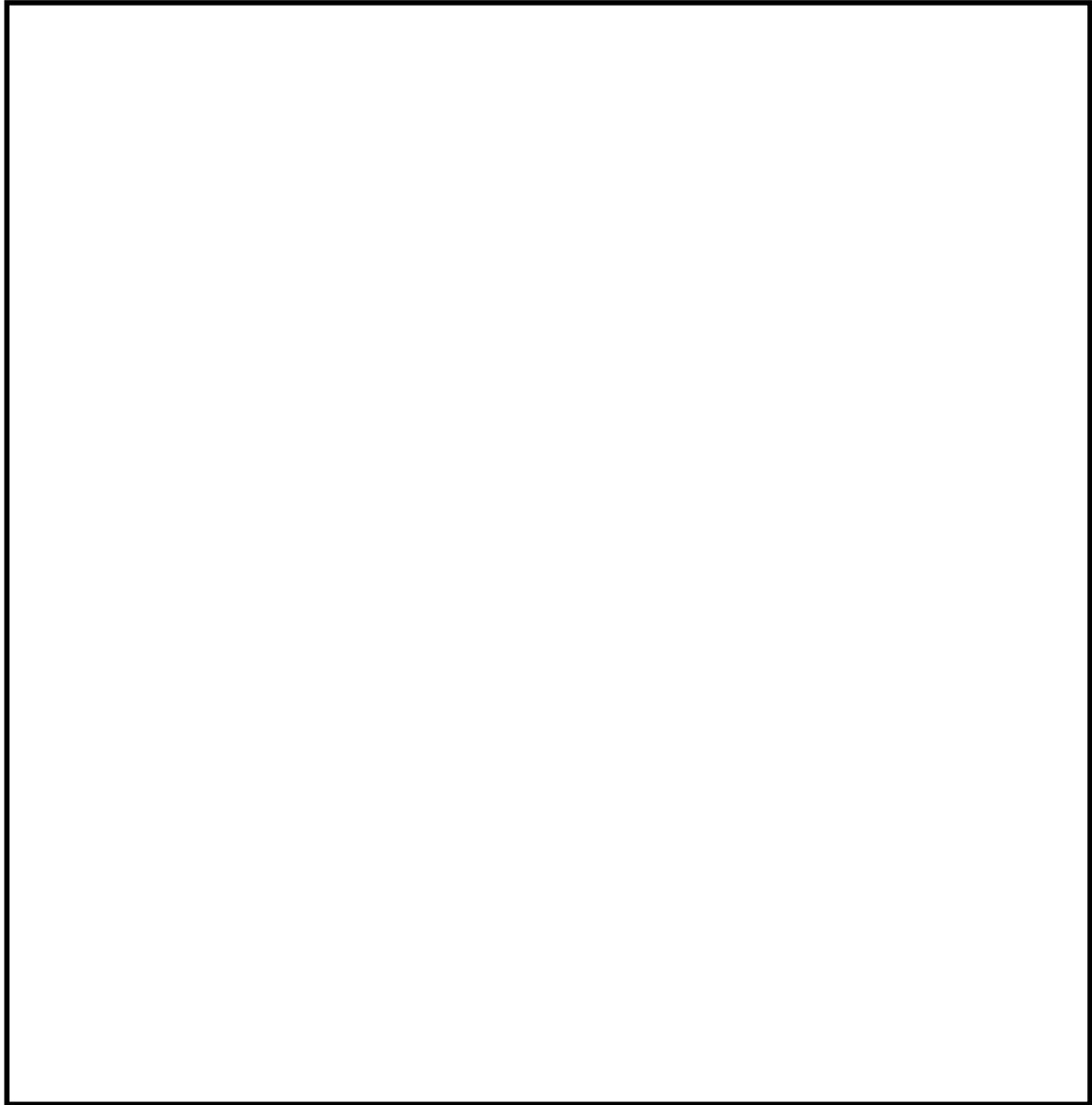


図 8 RSW 配管防護壁の構造図（例）

b. 換気空調系ダクト防護壁

換気空調系ダクト防護壁は、防護鋼板及び架構で構成する鋼製構造物である。

換気空調系ダクト防護壁の構造図を図9に示す。

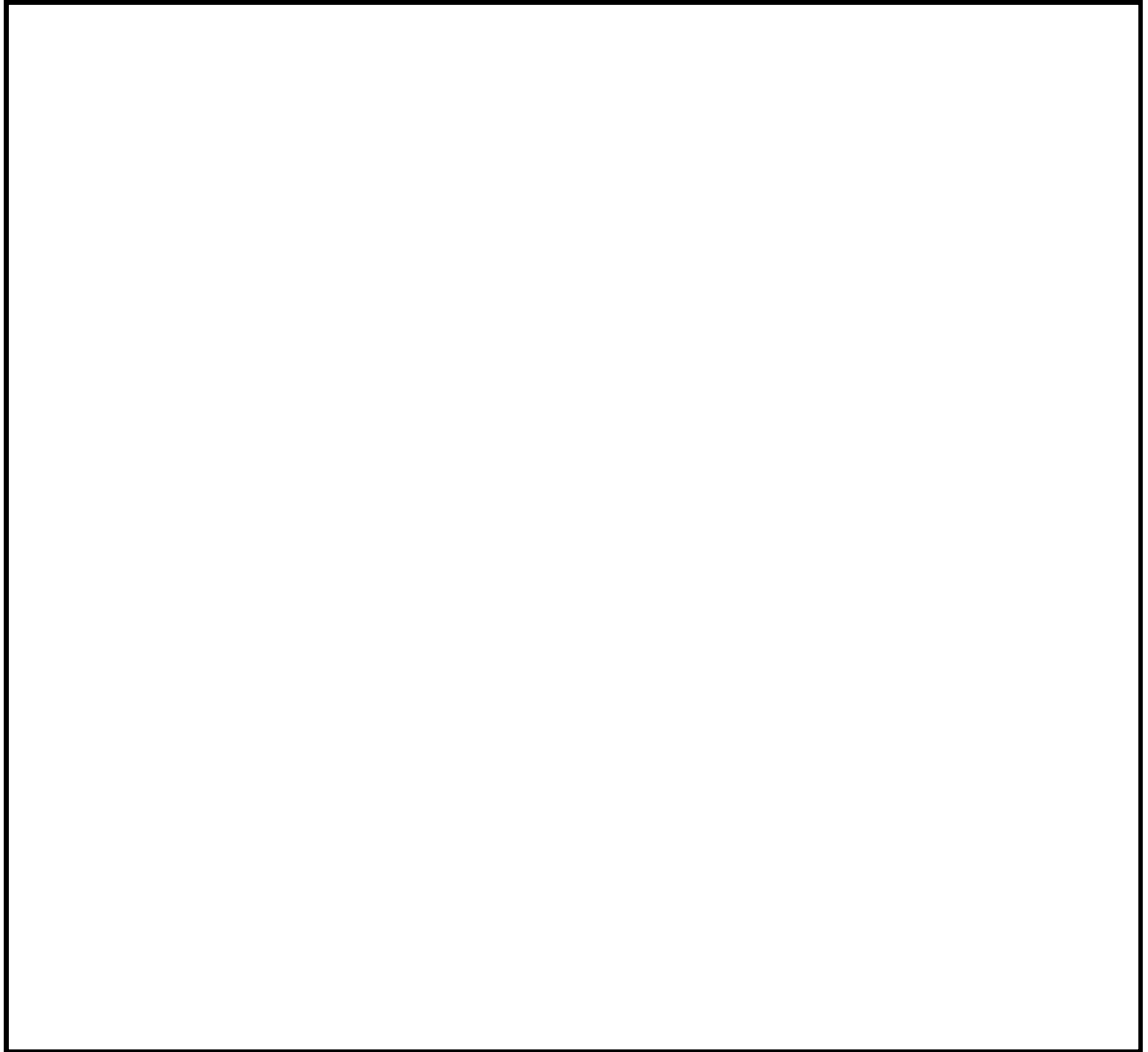


図9 換気空調系ダクト防護壁の構造図（例）

5. 飛来物の選定について

5. 飛来物の選定について

5.1 概要

柏崎刈羽原子力発電所 6/7 号炉 原子炉設置変更許可申請書(以下、「K6/7 設置許可」という。)では、設計飛来物を、浮き上がりの有無、運動エネルギー及び貫通力の大きさから、鋼製材、角形鋼管(大)、足場パイプ及び鋼製足場板を飛来物の発生防止対策に応じて選定した。

これらのうち、柏崎刈羽原子力発電所 7 号機 工事計画認可申請書(以下、「K7 工認」という。)に用いる設計飛来物の選定について説明する。

また、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等については、外部事象防護対象施設及び防護対策施設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、固縛又は離隔するなどの飛来物発生防止対策を講じることから、飛来物発生防止対策の要否判定について説明する。

なお、鋼製材、角形鋼管(大)、足場パイプ及び鋼製足場板に包含できない砂利については、補足説明資料「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について」にて説明する。

5.2 設計飛来物の選定について

K7 工認に用いる設計飛来物は、K6/7 設置許可で選定した鋼製材、角形鋼管（大）、足場パイプ及び鋼製足場板から、飛来物の発生防止対策に応じて選定する。K6/7 設置許可の添付資料八に記載している設計飛来物及び諸元（砂利を除く。）を表 5-1 に示す。

表 5-1 K6/7 設置許可の添付資料八に記載している設計飛来物及び諸元

	鋼製材	角形鋼管（大）	足場パイプ	鋼製足場板
飛来物の種類				
サイズ (m)	長さ×幅×奥行き 4.2×0.3×0.2	長さ×幅×奥行き 4×0.1×0.1	長さ×幅×奥行き 4×0.05×0.05	長さ×幅×奥行き 4×0.25×0.04
質量 (kg)	135	28	11	14
最大水平速度 (m/s)	10	16	42	55
最大鉛直速度 (m/s)	7	7	38	18
浮き上がり高さ (m)	0.08	0.15	0.57+(148) ^{*1,*2}	52+(148) ^{*1,*2}
飛散距離 (m)	9	20	261	373

注記*1：（ ）内の値は飛来物初期高さ（地面からの物品の高さ）

*2：5～7号機側で最も高所の5号機主排気筒頂部に設置されている状況を想定し設定

K6/7 設置許可における設計飛来物（表 5-1）の選定理由として、仮設足場板（足場パイプ、鋼製足場板）については、設計飛来物候補の中で、足場パイプが運動エネルギー（鉛直）、コンクリートに対する貫通力（鉛直）及び鋼板に対する貫通力が最大であり、鋼製足場板が、運動エネルギー（水平）及びコンクリートに対する貫通力（水平）が最大であることから選定した。

また、仮設足場に飛散防止対策を講じる場合を考慮し、運動エネルギー及び貫通力が仮設足場材（足場パイプ、鋼製足場板）に次ぐ飛来物として、鋼製材については、運動エネルギー及びコンクリートに対する貫通力が最大であり、角形鋼管（大）については、鋼板に対する貫通力が最大であることから選定した。

表 5-1 に記載の諸元から算出した運動エネルギー及び貫通力を表 5-2 に示す。

なお、算出方法については、別紙 1 に示す。

表 5-2 運動エネルギー及び貫通力の算出結果

飛来物の種類	仮設足場材		仮設足場材に次ぐ飛来物	
	足場パイプ	鋼製足場板	鋼製材	角型鋼管（大）
運動エネルギー （水平）（kJ）	10	21	6	4
運動エネルギー （鉛直）（kJ）	8	3	3	0.55
コンクリートの 貫通限界厚さ （水平）（cm）	11	12	6	6
コンクリートの 貫通限界厚さ （鉛直）（cm）	10	5	4	3
鋼板の 貫通限界厚さ （水平）（mm）	17	6	4	6
鋼板の 貫通限界厚さ （鉛直）（mm）	15	2	2	2

注記：色塗り箇所は最大値を示す。

柏崎刈羽原子力発電所における飛散防止対策の運用において、仮設足場に飛散防止対策を講じないことから、K7 工認に用いる設計飛来物は、足場パイプ及び鋼製足場板とする。

なお、K6/7 設置許可において、高所の建屋開口部等への影響を及ぼす飛散高さについて、鋼製材及び角形鋼管（大）は原則地上高 10m まで飛散するものとし、足場パイプ及び鋼製足場板は 5～7 号機側で最も高所の 5 号機主排気筒頂部に設置されている状況を想定し設定していることから、K7 工認における竜巻防護設計については、足場パイプ及び鋼製足場板が高所の建屋開口部等へ飛散するものとして影響評価及び防護対策を講じる設計とする。

5.3 対策要否の判定について

以下に示す観点から設計飛来物に含まれていない物品については、5.2 項にて示した設計飛来物の運動エネルギー又は貫通力との比較により、飛来物発生防止対策（固縛，固定又は離隔）を行う。

飛来物源である資機材及び車両等に対して、飛来物として選定し、飛来物発生防止対策の要否を判定するフローを、図 5-1 に示す。

[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足場板の 21kJ（水平方向）、又は足場パイプの 8kJ（鉛直方向）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足場板の 12cm（水平方向）又は足場パイプの 10cm（鉛直方向）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足場パイプの 17mm（水平方向）又は 15mm（鉛直方向）より大きいもの。

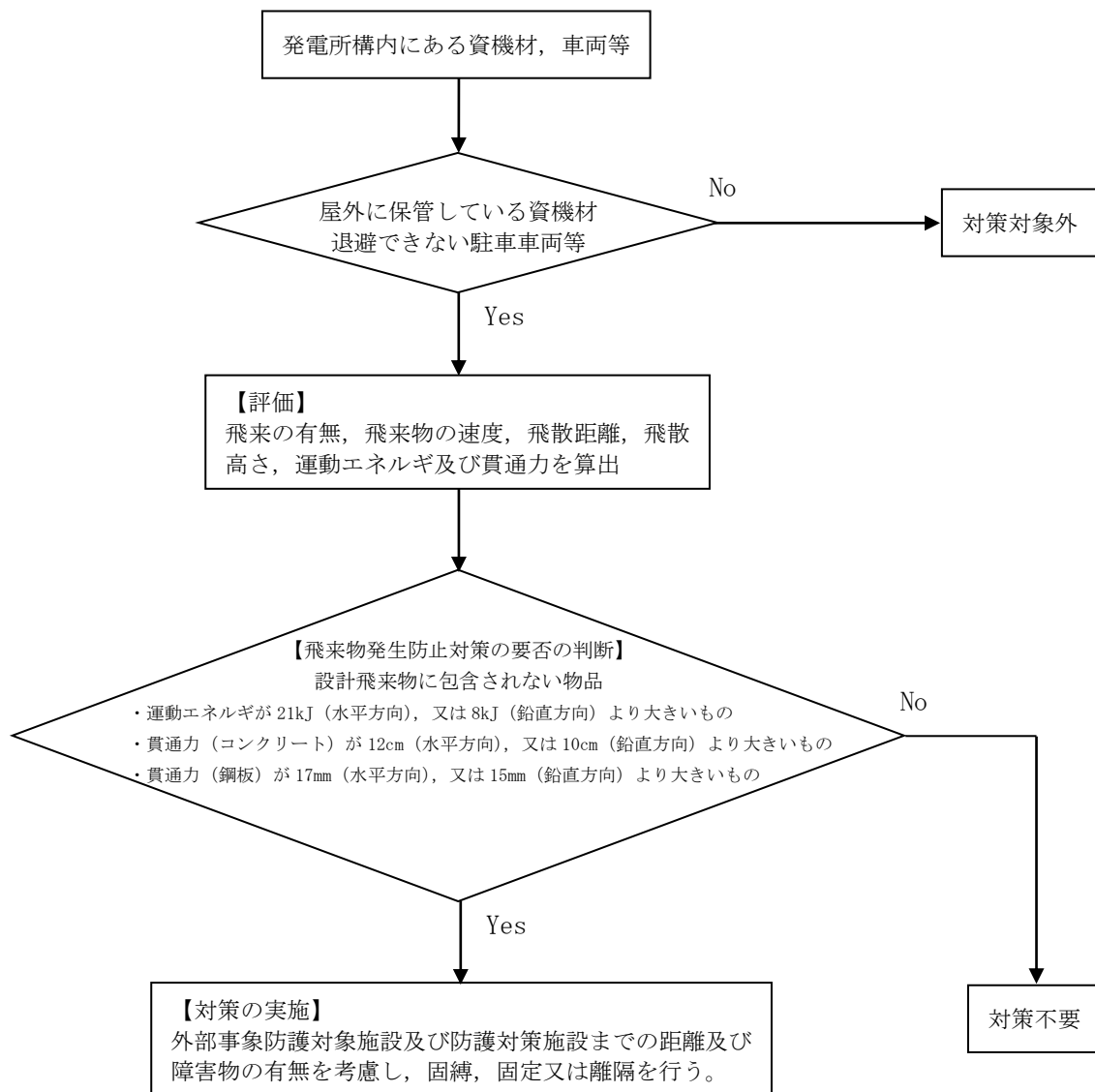


図 5-1 飛来物の選定及び飛来物発生防止対策の要否の判定フロー

飛散評価方法について

1. はじめに

飛来物源である資機材及び車両等が、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、並びに初期高さにより、解析コード「TONBOS」によって最大飛来速度、飛散高さ、水平飛散距離を算出する。以下に飛散評価に用いる数値を説明する。

なお、「TONBOS」で用いる設計竜巻の風速場モデルはフジタモデルとし、竜巻影響評価へのフジタモデルの適用については、別紙 2 に示す。

1.1 空力パラメータの算出 ($C_D A/m$ (m^2/kg))

空力パラメータは飛来物の各寸法（長さ×幅×奥行き(高さ)）より受圧面積を算出し、飛来物の質量及び抗力係数より算出する。(1)項に算出式、(2)項に計算例を示す。

(1) 算出式

空力パラメータの算出は下式によって算出する。

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

m : 質量 (kg)

c : 1/3

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

A_1 , A_2 , A_3 : 受圧面積 (m^2) (図 1)

表1 飛来物の抗力係数

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

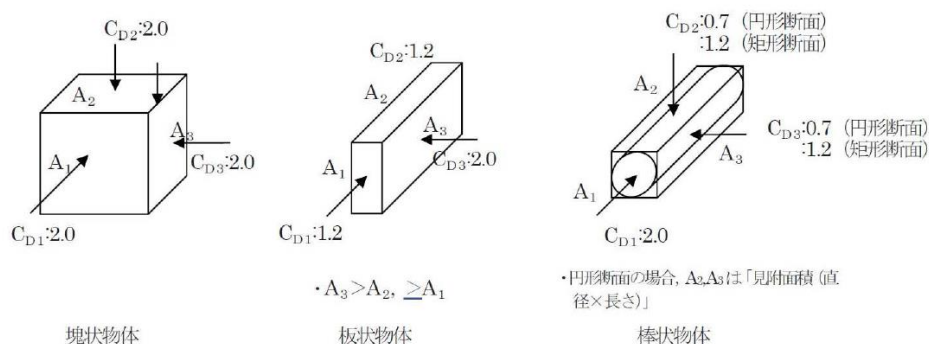


図1 飛来物形状と受圧面積，抗力係数の関係

(2) 計算例

a. 足場パイプ (棒状物体) (図 2)

長さ : 4m 幅 : 0.05m 高さ : 0.05m 質量 : 11kg

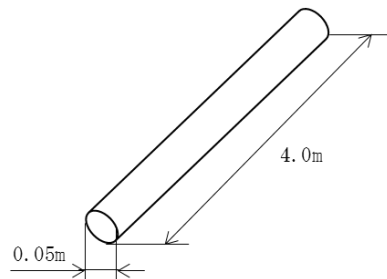


図 2 足場パイプ

円形断面なので、抗力係数 C_D は、 $C_{D1}=2.0$ 、 $C_{D2}=0.7$ 、 $C_{D3}=0.7$ である。

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

空力パラメータは,

$$\frac{C_D A}{m} = \frac{1/3 \times (2.0 \times \pi/4 \times 0.05 \times 0.05 + 0.7 \times 4 \times 0.05 + 0.7 \times 4 \times 0.05)}{11} = 0.0087 \quad [m^2/kg]$$

b. 鋼製足場板 (板状物体) (図 3)

長さ : 4m 幅 : 0.25m 高さ : 0.04m 質量 : 14kg

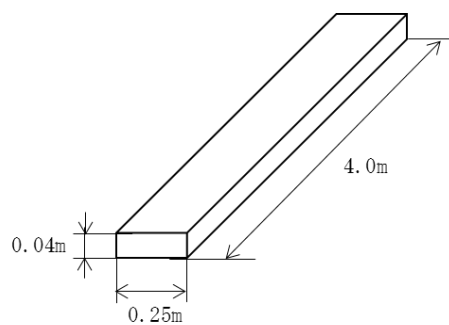


図 3 鋼製足場板

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

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

空力パラメータは,

$$\frac{C_D A}{m} = \frac{1/3 \times (1.2 \times 0.04 \times 0.25 + 1.2 \times 4 \times 0.04 + 2.0 \times 4 \times 0.25)}{14} = 0.0525 \quad [m^2/kg]$$

c. 車両（塊状物体）（図4）

長さ：4.9m 幅：1.88m 高さ：1.87m 質量：2150kg

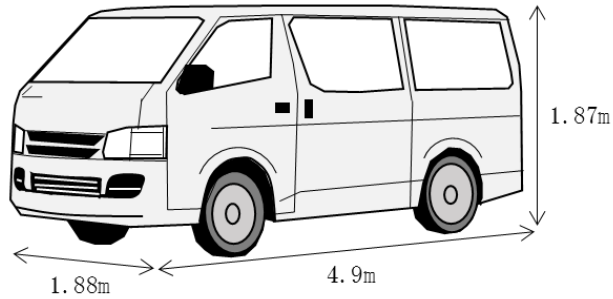


図4 車両

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

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

空力パラメータは,

$$\frac{C_D A}{m} = \frac{1/3 \times (2.0 \times 1.88 \times 1.87 + 2.0 \times 4.9 \times 1.87 + 2.0 \times 4.9 \times 1.88)}{2150} = 0.0068 \quad [m^2 / kg]$$

1.2 初期高さ

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

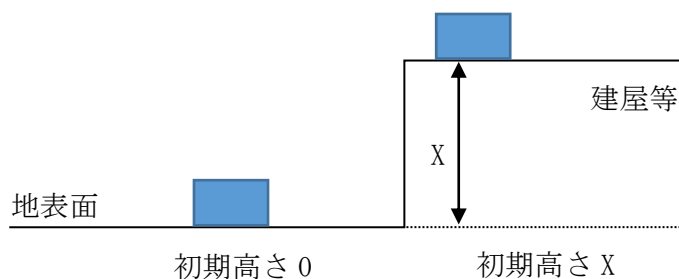


図5 初期高さのイメージ図

1.3 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6に飛散距離及び飛散高さの飛跡のイメージを示す。

解析コード「TONBOS」の詳細については、V-1-1-3-3 別紙1「計算機プログラム（解析コード）の概要」に示す。

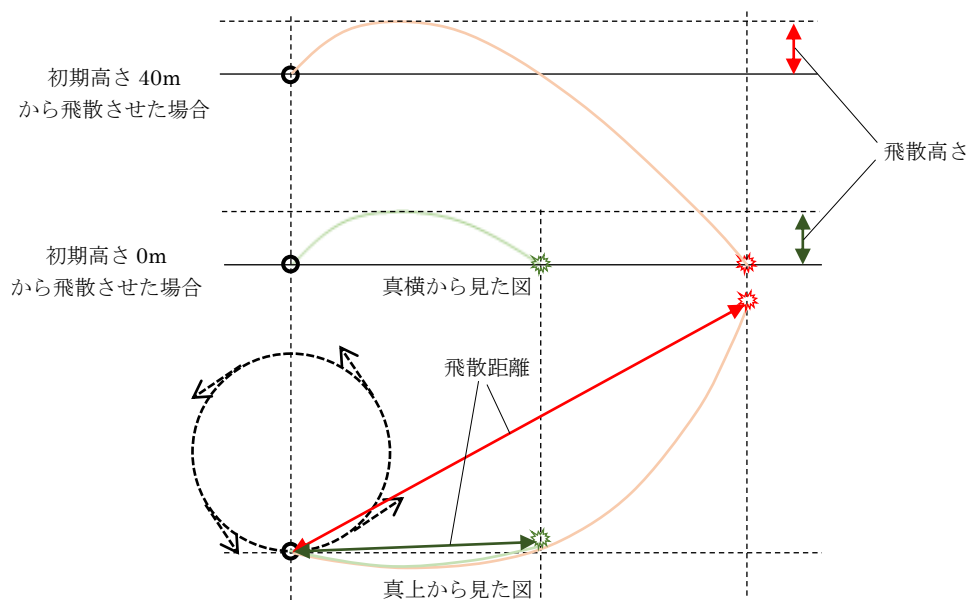


図6 飛散評価における飛跡イメージ

表 2 に、1.1(2)項の計算例に示した、足場パイプ、鋼製足場板及び車両の最大速度等の算出結果を示す。

表 2 飛来物例の最大速度等の算出結果

飛来物の種類	棒状物体 (円形断面)	板状物体	塊状物体
	足場パイプ	鋼製足場板	車両
寸法 (m)	長さ×幅×高さ 4×0.05×0.05	長さ×幅×高さ 4×0.25×0.04	長さ×幅×高さ 4.9×1.88×1.87
質量 (kg)	11	14	2150
空力パラメータ (m ² /kg)	0.0087	0.0525	0.0068
初期高さ (m)	148	148	0
飛来物の 最大水平速度 (m/s)	41.309	54.806	38.181
飛来物の 最大鉛直速度 (m/s)	37.642	17.298	23.148
飛散高さ* (m)	0.57+ (148)	52+ (148)	4
飛散距離 (m)	261	373	143

注記* : () 内の値は飛来物初期高さ (地面から物品の高さ)

1.4 運動エネルギーの算出

飛散評価によって算出された飛来物の最大速度により、運動エネルギーを算出する。

(1)項に算出式、(2)項に表2に示した足場パイプ、鋼製足場板及び車両の諸元を用いた計算例を示す。

(1) 運動エネルギーの算出式

飛来物の運動エネルギーEは下式によって算出する。

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

M：飛来物の質量 (kg)

V：飛来物の最大速度 (m/s)

(2) 計算例

a. 足場パイプ (棒状物体)

質量：11kg 最大水平速度 41.309m/s

$$\cdot E = 1/2 \cdot 11 \cdot (41.309)^2 = 10 \text{ [kJ]}$$

b. 鋼製足場板 (板状物体)

質量：14kg 最大水平速度 54.806m/s

$$\cdot E = 1/2 \cdot 14 \cdot (54.806)^2 = 21 \text{ [kJ]}$$

c. 車両 (塊状物体)

質量：2150kg 最大水平速度 38.181m/s

$$\cdot E = 1/2 \cdot 2150 \cdot (38.181)^2 = 1568 \text{ [kJ]}$$

1.5 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限界厚さの算出式に使用されている修正 NDRC 式 (①) 及び Degen 式 (②)、鋼板に対する貫通限界厚さの算出式に使用されている BRL 式から算出する。

<修正NDRC式及びDegen式>

$$\left. \begin{array}{l} \frac{X_c}{\alpha_c d} \leq 2 \quad \text{の場合} \quad \frac{X_c}{d} = 2 \left\{ \left(\frac{1.21}{\sqrt{F_c}} \right) 4.5 N d^{0.2} \frac{M}{d^3} \left(\frac{V}{1.0} \right)^{1.8} \right\}^{0.5} \\ \frac{X_c}{\alpha_c d} \geq 2 \quad \text{の場合} \quad \frac{X_c}{d} = \left(\frac{1.21}{\sqrt{F_c}} \right) 4.5 N d^{0.2} \frac{M}{d^3} \left(\frac{V}{1.0} \right)^{1.8} + 1 \end{array} \right\} \text{①}$$

$$\left. \begin{array}{l} \frac{X_c}{\alpha_c d} \leq 1.52 \quad \text{の場合} \quad t_p = \alpha_p d \left\{ 2.2 \left(\frac{X_c}{\alpha_c d} \right) - 0.3 \left(\frac{X_c}{\alpha_c d} \right)^2 \right\} \\ 1.52 \leq \frac{X_c}{\alpha_c d} \leq 13.42 \quad \text{の場合} \quad t_p = \alpha_p d \left\{ 0.69 + 1.29 \left(\frac{X_c}{\alpha_c d} \right) \right\} \end{array} \right\} \text{②}$$

t_p : 貫通限界厚さ (cm)

X_c : 貫入深さ (cm)

F_c : コンクリートの設計基準強度 (=330kgf/cm²)

d : 飛来物の直径 (cm)

(飛来物の衝突面の外形の最小投影面積に等しい円の直径)

M : 飛来物の重量 (kg)

V : 飛来物の最大水平速度 (m/s)

N : 飛来物の先端形状係数 (=1.14)

(保守的な評価となる、非常に鋭い場合の数値を使用)

α_c : 飛来物の低減係数 (=1.0)

α_p : 飛来物の低減係数 (=1.0)

<BRL式>

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

T : 貫通限界厚さ (m)

d : 飛来物が衝突する衝突断面の等価直径 (m)

(最も投影面積が小さくなる衝突断面の等価直径)

K : 鋼板の材質に関する係数 (=1.0)

m : 飛来物の質量 (kg)

v : 飛来物の飛来速度 (m/s)

表3に、1.1(2)項の計算例に示した足場パイプ、鋼製足場板及び車両の貫通力の算出結果を示す。

表3 飛来物例の貫通力の算出結果

飛来物の種類	棒状物体 (円形断面)	板状物体	塊状物体
	足場パイプ	鋼製足場板	車両
寸法(m)	長さ×幅×高さ 4×0.05×0.05	長さ×幅×高さ 4×0.25×0.04	長さ×幅×高さ 4.9×1.88×1.87
飛来物の最大水平速度 (m/s)	41.309	54.806	38.181
飛来物の最大鉛直速度 (m/s)	37.642	17.298	23.148
コンクリートの貫通限界厚さ (水平)(cm)	11	12	35
コンクリートの貫通限界厚さ (鉛直)(cm)	10	5	23
鋼板の貫通限界厚さ (水平)(mm)	17	6	5
鋼板の貫通限界厚さ (鉛直)(mm)	15	2	3

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⁾」及び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。

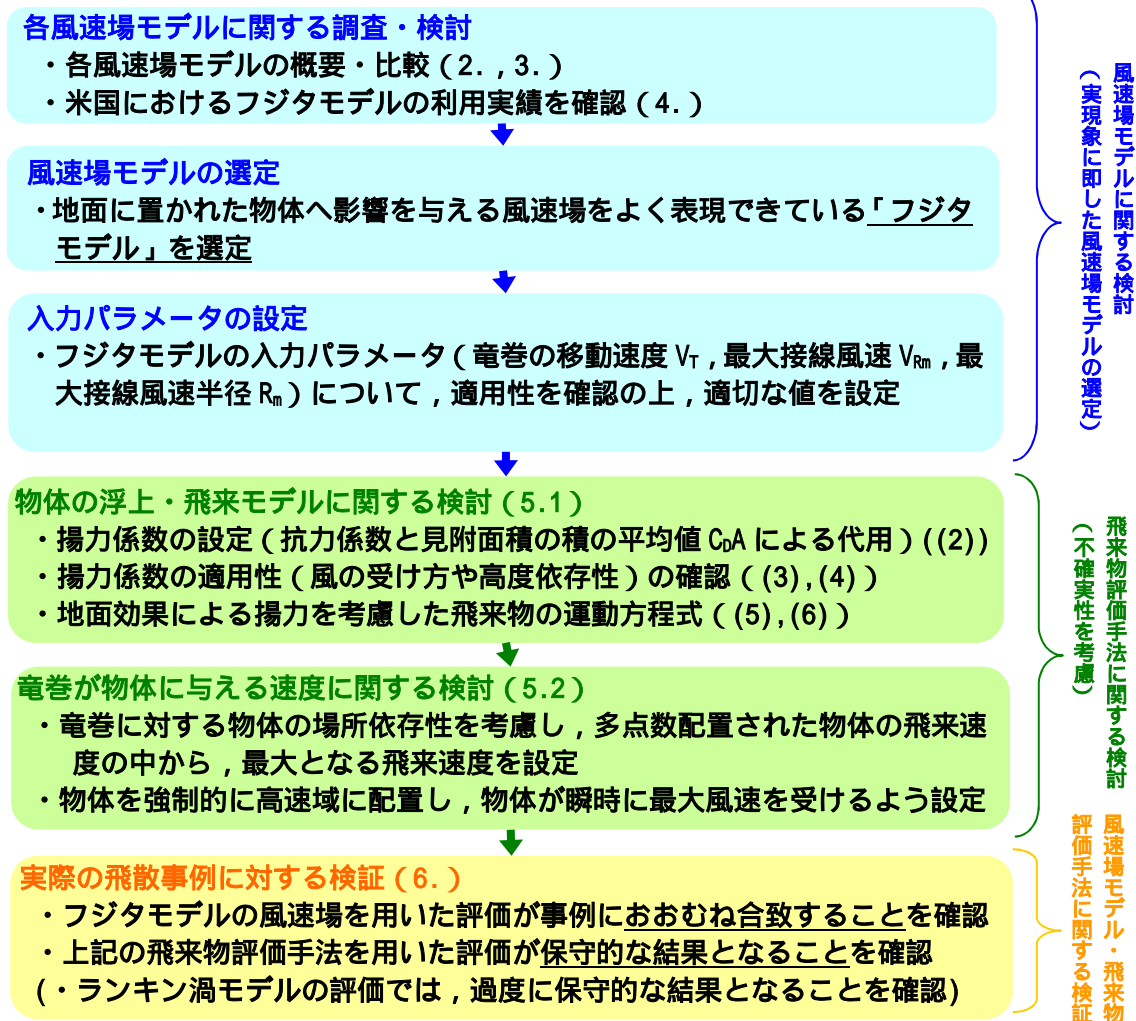


図 1 風速場モデルの選定及び飛来物評価方法に関する検討フロー
(括弧内の数字は、本資料の節番号)

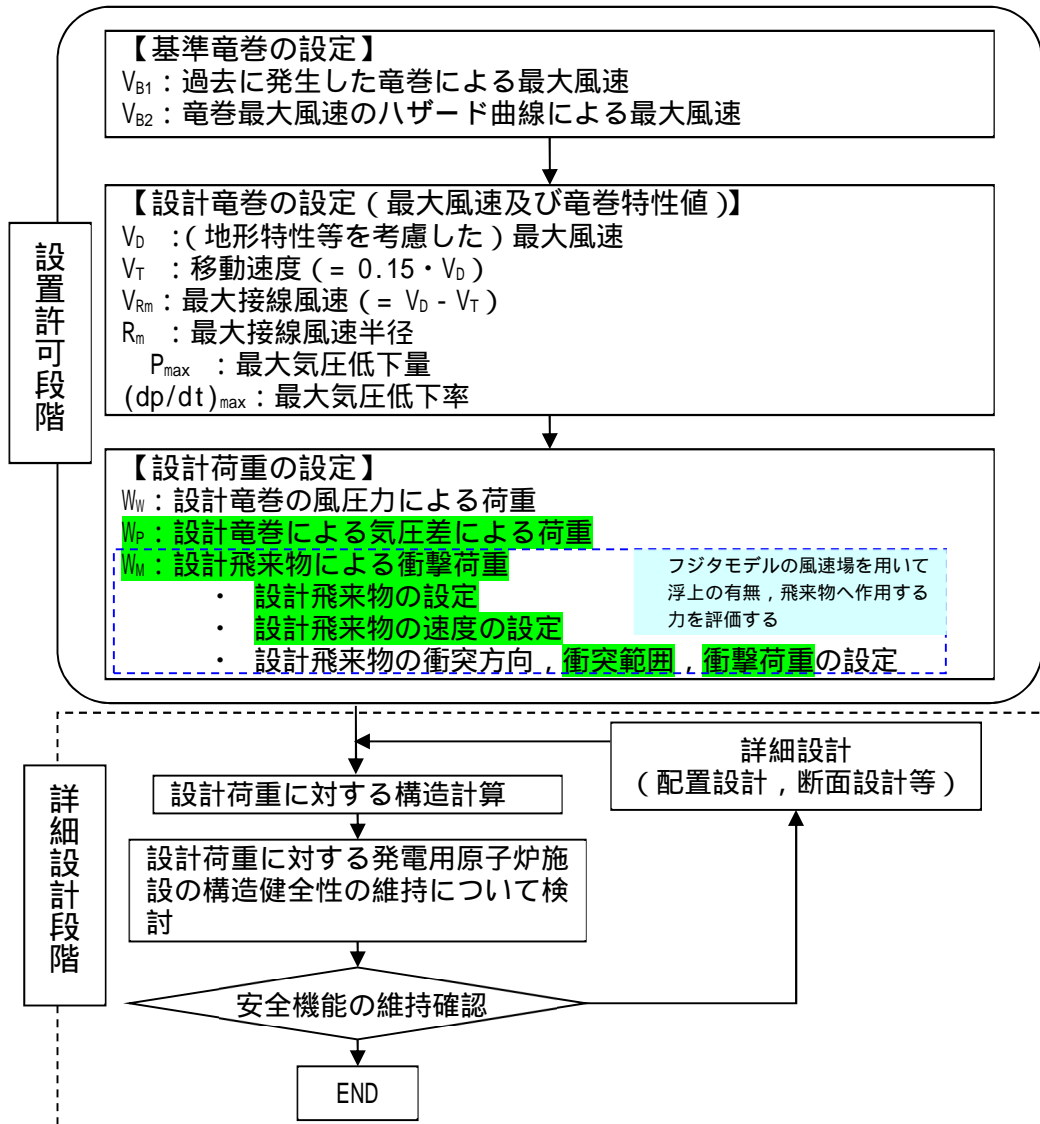


図2 竜巻影響評価フローとフジタモデルの関連箇所

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

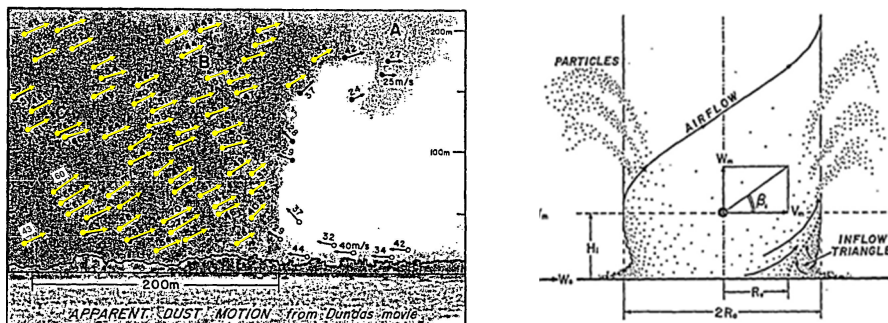


図 4 分析によって作成した風速ベクトル（左）、ベクトル図より作成したフジタモデル流線（右）（5）に一部加筆）

フジタモデルの風速場は図 5 に示すように半径方向に 3 つの領域（内部コア、外部コア、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 は半径に比例し、その外側の最外領域では周方向風速は半径に反比例するモデルとなっている。内部コアには上昇風速 V_z や半径方向風速 V_r は存在しないが、外部コアには存在する。高さ方向には地面から高さ H_i までを流入層としてモデル化しており、竜巻中心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 DBT-77 における接線風速等の関係式については、Fujita Work Book⁽⁵⁾の

Chapter6 に下記のとおり記載されている。(Chapter6 では、単一渦型のモデルであるフジタモデル DBT-77 を引用しているが、多重渦型のモデルであるフジタモデル DBT-78 は引用されていない。)

無次元座標 $r = R/R_m, \quad z = Z/H_i$

接線風速 $V_\theta = F_r(r)F_h(z)V_m$

$$F_r(r) = \begin{cases} r & (r < 1) \\ 1/r & (r \geq 1) \end{cases} \quad F_h(z) = \begin{cases} z^{k_0} & (z < 1) \\ \exp(-k(z-1)) & (z \geq 1) \end{cases}$$

半径方向風速 $V_r = \begin{cases} 0 & (r \leq \nu) \\ \frac{V_\theta \tan \alpha_0}{1-\nu^2} \left(1 - \frac{\nu^2}{r^2}\right) & (\nu < r < 1) \\ V_\theta \tan \alpha_0 & (r \geq 1) \end{cases}$

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

上昇風速 $V_z = \begin{cases} \frac{3}{28} \frac{\eta V_m}{1-\nu^2} A(16z^6 - 7z^3) & (z < 1) \\ \frac{\eta V_m B \exp(-k(z-1))}{k(1-\nu^2)} \{2 - \exp(-k(z-1))\} & (z \geq 1) \end{cases}$

k_0, k, ν, η, A, B は定数

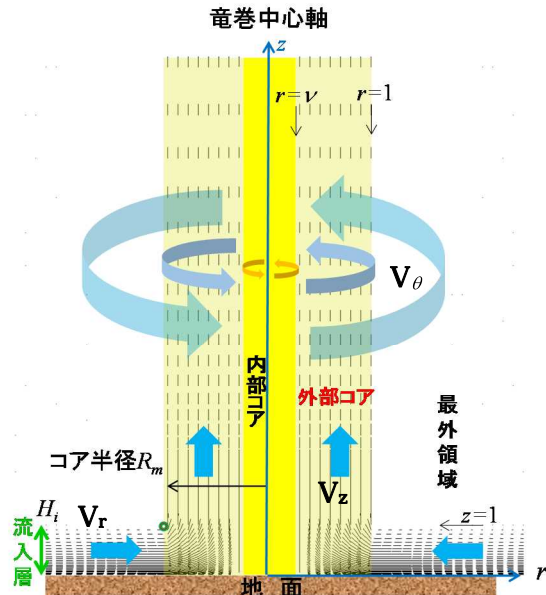


図5 フジタモデルの概要

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。

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

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

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

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 $R_m = 30(\text{m})$ の場合, $\eta = 0.501(H_i = 15(\text{m}))$ となり, 原子力安全基盤機構の調査研究報告書⁽⁴⁾ の図 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 ($H_i = 10 \sim 14(\text{m})$ 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, $k_0 = 1/6, k = 0.03, A = 0.75, B = 0.0217$ を用いる。

フジタモデルでは, 図 6 に示す通り, 流入層高さ未満の接線風速をモデル化する際に, 高さのべき乗に比例するとしており, そのべき乗の指数を k_0 としている。 k_0 は地表面粗度と関係が

あり、フジタモデルで用いている 1/6 乗の曲線を、図 7 の対数表示の図中に表現しようとした場合、 $10^{-3} \sim 10^{-2}$ の間に相当する計算結果となることから、海水や積雪面などの凹凸の小さい地面状態の地表面粗度に相当する（表 1）。

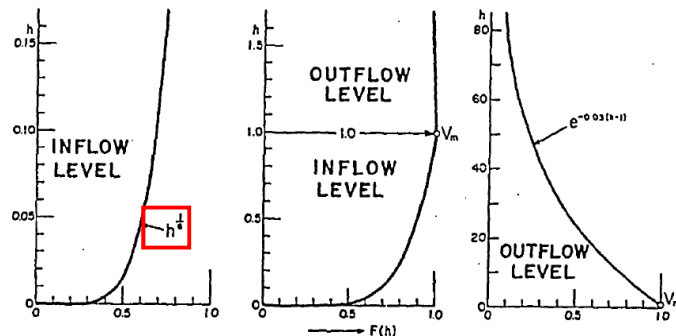


図 6 フジタモデルにおける流入層高さ未満の風速分布（左）と
流入層高さ以上の風速分布（右）

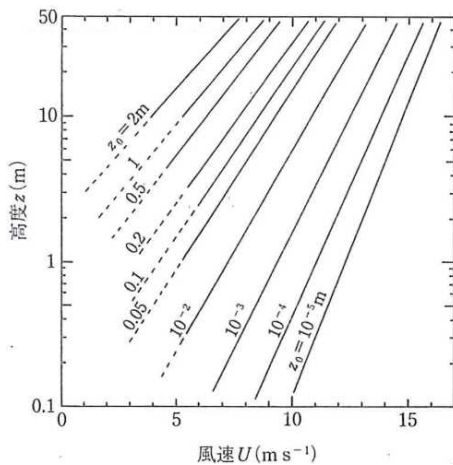


図 7 地表面粗度 z_0 による風速と高度の関係

一方で、柏崎刈羽原子力発電所の敷地内には、建屋等の構造物や樹木が林立しており、海水や積雪面などの地表面粗度よりも大きく、地表面付近の減速も大きい(図 8)。これらを踏まえると、柏崎刈羽原子力発電所にフジタモデルを適用するにあたり、 k_0 は 1/6 より大きい値を入力の方がより現実に近いと考えられるが、不確かさ等を考慮し実際より地表面付近での減速の小さい 1/6 を用いるのは妥当と考える。

表 1 代表的な地表面状態の地表面粗度 z_0 の概略値

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

近藤純正 地表面に近い大気の科学より

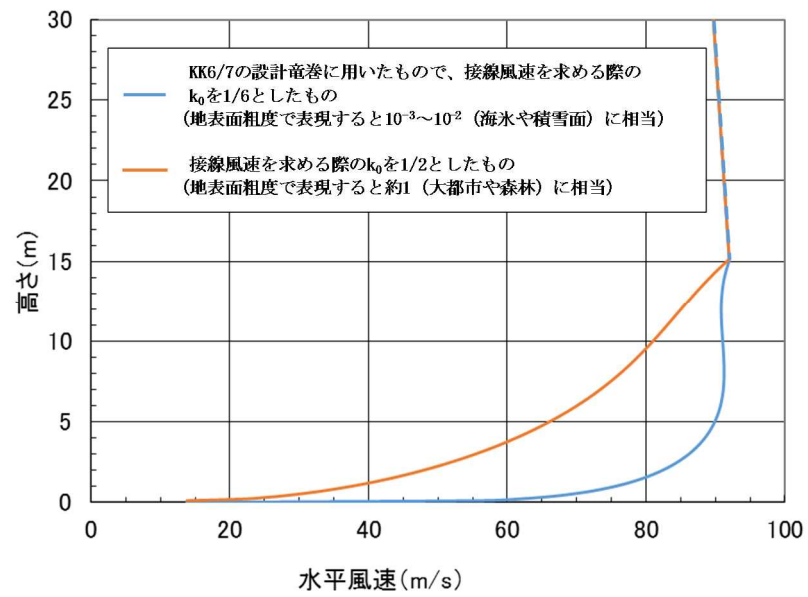


図8 地表面粗度による高さ と水平風速の関係

2.2 ランキン渦モデル

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

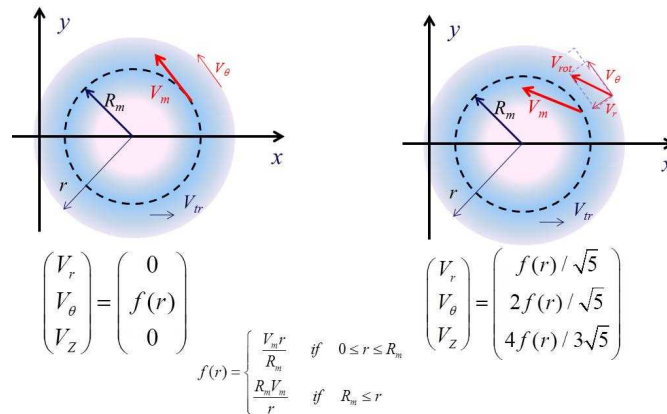


図 9 設計竜巻圧力用のランキン渦モデル(左)と飛来物速度評価用のランキン渦モデル(右)

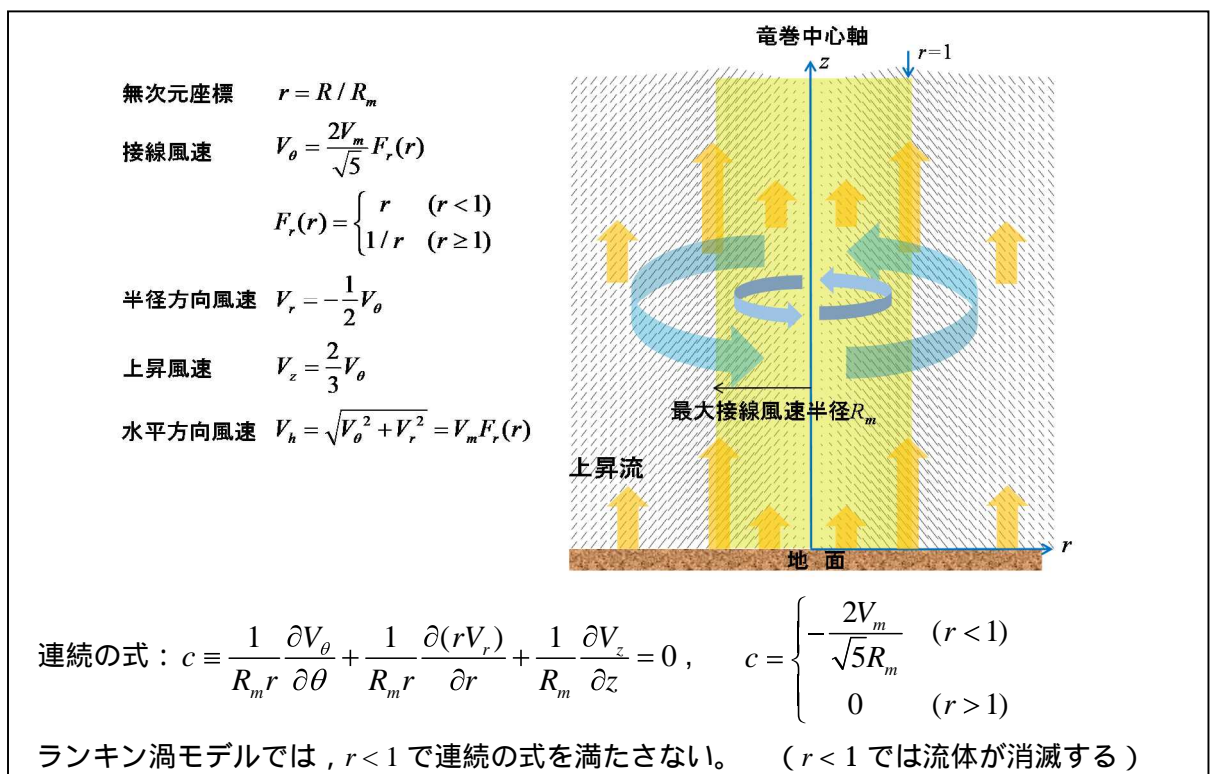


図 10 飛来物速度評価用のランキン渦モデルの概要

2.3 非定常乱流渦モデル (LES による数値解析)

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

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

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

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

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

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

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

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

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

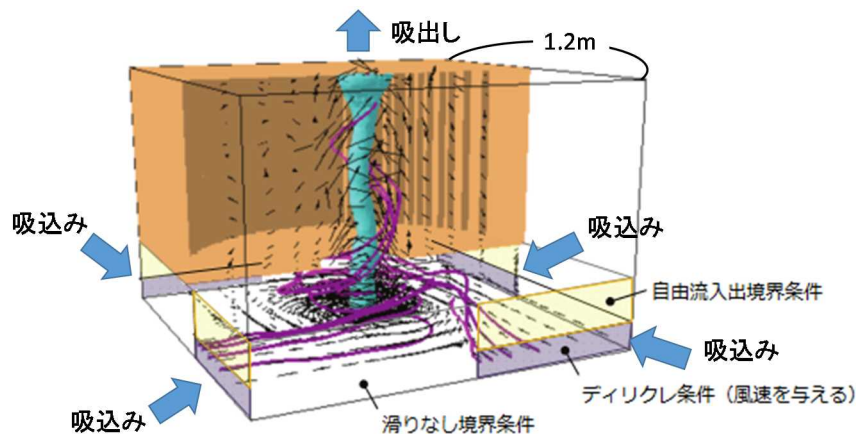


図 11 LES 計算領域内での竜巻状の渦の発生状況 ((4) に一部加筆)

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 (流入箇所を局所的に配置等) を調整して人為的な乱れを与え、竜巻状の渦を

生成している。渦の生成に当たって、以下のような条件を仮定していることから、実スケールでの評価を実施するには課題があるものと考えられる。

- ・人為的な流入境界条件（流入風速分布や流入箇所・局所的配置等）を設定していることから、流入境界条件の影響を受ける地表面付近の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飛来物の飛跡）

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

また、フジタモデルの流入層高さ H_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 ±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 ±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。

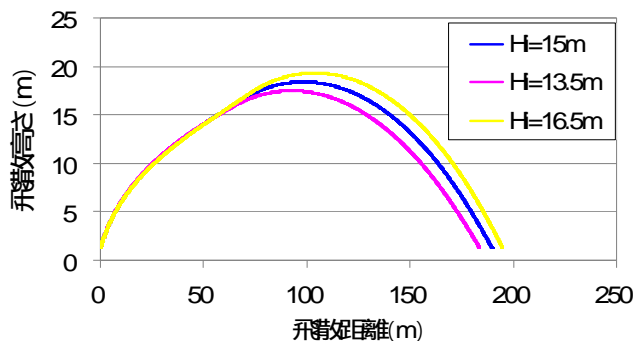


図 12 流入層高さを変化させた場合のコンテナの飛跡（最大風速 100m/s）

3. 各風速場モデルの比較

各風速場モデルの特徴の比較を表2に示す。また、フジタモデルとランキン渦モデルの風速場構造の比較を図13に示す。フジタモデルの風速場構造の流線は、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良好に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2 各風速場モデルの特徴の比較

風速場モデル	使用実績	特長	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重要施設の設計基準作成に利用されている【対象施設の例】Pantex Plant(テキサス州)、Oak Ridge(X-10, K-25,Y-12)(テネシー州)、Savannah River Site(サウスカロライナ州) 	<ul style="list-style-type: none"> 実観測に基づいて考案されたモデルであり、実際に近い風速場構造を表現している 比較的簡易な代数式により風速場を表現できる 流体の連続式を満たす定式化 <p>地上に設置した状態から飛来物の挙動を解析できる</p>	<ul style="list-style-type: none"> 特になし (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)
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

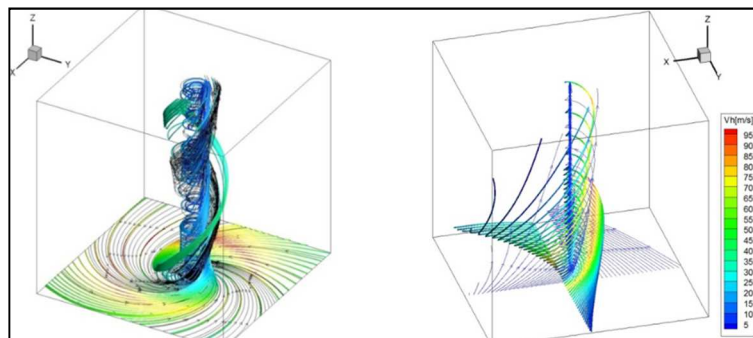


図13 フジタモデル(左)とランキン渦モデル(右)の風速場構造の比較

4. 米国におけるフジタモデルの取扱い

4.1 フジタモデルの利用実績

米国エネルギー省（DOE：Department of Energy）が管理するエネルギー関連施設等に適用する基準⁽⁸⁾において、竜巻飛来物速度、飛散高さの設定にフジタモデルを用いた計算結果が使用されている⁽⁹⁾⁽¹⁰⁾（文献(8)のD.4節：Windborne missile criteria specified herein are based on windstorm damage documentation and computer simulation of missiles observed in the field. . . . Computer simulation of tornado missiles is accomplished using a methodology developed at Texas Tech University.）。

この基準では、施設に要求される性能ごとにカテゴリ0から4まで分類し、カテゴリ0～2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 (Simiu らの運動方程式⁽³⁾) を計算するプログラムを開発している (The NRC staff developed a computer program to calculate the maximum horizontal missile speeds by solving these equations.) ことが明記されている。

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

(参考) 米国におけるランキン渦モデル以外の風速場モデルの利用実績

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

TORMIS は、米国の EPRI で開発され、原子力発電所の構造物・機器への竜巻飛来物の衝突・損傷確率を予測する計算コードであり、同コードでは、ランキン渦モデル以外の風速場モデル (統合風速場モデル) が利用されていることから、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. 飛来物評価における不確定性の考慮

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、実際の竜巻による物体の飛散挙動の不確定性についても考慮する必要がある。

本節では、フジタモデルの特長である地上からの飛散挙動に関する不確定性や、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、飛来物は図 14 - 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) F_D と重力のみが作用する飛行モデルを採用している。

一方、物体が地面に置かれている場合や地面に近い場合は、地面効果による揚力(次頁参照)を考慮している⁽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 14 - 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。

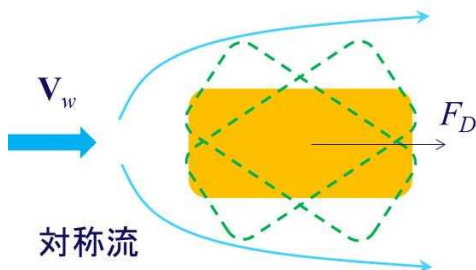


図 14 - 1 空中で飛来物へ作用する力

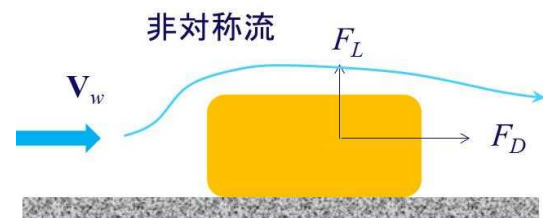


図 14 - 2 地面付近で飛来物へ作用する力

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

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

ここで、 ρ は空気密度、 \mathbf{V}_M は飛来物の速度ベクトル、 \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 15 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 15 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。

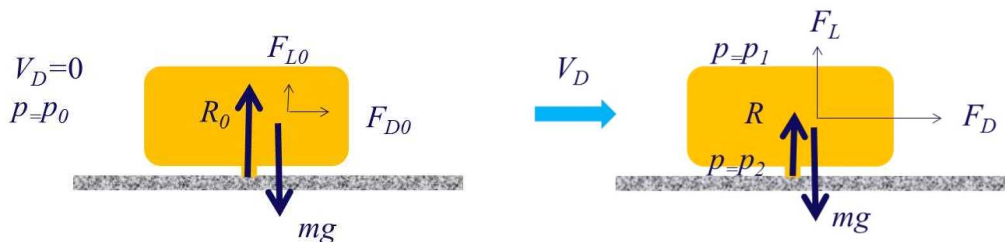


図 15 部分的に地面に接する物体に作用する力（左：無風時，右：強風時，
 R_0, R ：無風時，強風時における垂直抗力）

(2) 揚力係数の設定

(6)式の C_{La} は風洞実験から求められる値であるが、実験条件(風を受ける方向等)により様々な値を取り得るため、それを包含するような係数を設定することが望ましい。本評価では、条件によらず保守性を確保できるよう、 C_{La} に代わり以下で定義される抗力係数と見附面積の積の平均値 C_{DA} を用いることとする。

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

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

飛来物の運動モデルを図 16 に示す。上記(9)式の考え方は、図 16 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 16 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 16 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 C_{La} のうち、物体が地面に置かれた状態(図 16 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 16 の状態 A)と物体がある程度浮き上がった状態(図 16 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。

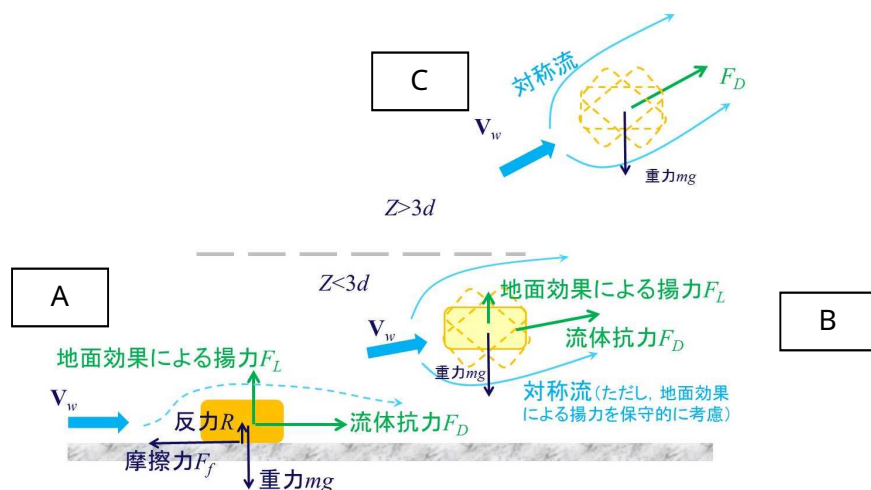


図 16 飛来物の運動モデルの模式図
(A : 地面上, B : $Z < 3d$ の高度範囲, C : $Z > 3d$ の高度範囲, ただし, $Z = z - d/2$, d : 物体高さ)

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_{La} をより大きな値で置き換えて、浮上現象を保守的に評価できるようにすることであり、この保守的な代用値として飛行定数 C_{DA}/m と同類の C_{DA} 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。

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

これを変形すると、 $C_{La} = 2F_L / \rho U^2$ 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 $q = \frac{1}{2} \rho U^2$ 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_{La} 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_{La} 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_{La} の最大値（又は、それに近い値）の実測結果と物体の幾何学形状のみで決定される C_{DA} の値を比較する。（表3）

表3より、 $C_{DA} > C_{La}$ の関係が成立しており、 C_{La} の代用として C_{DA} の利用が適切であることが確認できる。なお、 C_{DA} 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 $C_{DA} = 2d^2$ 、一辺 d の平板では $C_{DA} = 0.66d^2$ 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_{La} 値よりも大きな値であり、揚力の評価モデルとして C_{La} 値の代わりに C_{DA} 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16の状態A）に対するものであるが、この揚力が物体高さの3倍までの飛散高度の範囲で連続的に低減するように作用するようにモデル化しており、図16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3 主な物体の $C_D A$ と地面に置かれた物体の C_{La} (実測値) の大小関係(1/2)

形状	物体	仕様	$C_D A^{*1}$	C_{La} (実測値)	C_{La} (実測値) に係る試験条件等
塊状	自動車	実物の Dodge Dart (長さ 16.7ft. , 幅 5.8ft. , 高さ 4.3 ft.)	129ft. ²	48.7ft. ²	<ul style="list-style-type: none"> 風洞試験⁽¹⁶⁾ (風速 22 ~ 31m/s , $Re=2.8 \times 10^6 \sim 4.0 \times 10^6$) 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
		1/6 縮尺模型 (セタン:長さ 4.85m , 幅 1.79m , 高さ 1.42m , 質量 1633kg)	12.07m ²	7.76m ²	<ul style="list-style-type: none"> 風洞試験⁽²²⁾ (風速 0 ~ 150m/s , $Re=0 \sim 3.0 \times 10^6$) 4 つのタイヤに作用する地面からの反力のうち , 少なくとも一つがゼロとなった時点の風速 U から C_{La} 値を計算 ($C_{La}=2mg/ U^2$) C_{La} が最大となる流入角での値を C_{La} (実測値) として記載
		1/6 縮尺模型 (ミニバン:長さ 5.12m , 幅 1.94m , 高さ 1.69m , 質量 2086kg)	14.58m ²	7.89m ²	<ul style="list-style-type: none"> 水路試験⁽¹⁷⁾ ($Re=8.0 \times 10^3 \sim 2.8 \times 10^4$) 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	立方体	一辺の長さ D	2D ²	0.2D ² 程度	<ul style="list-style-type: none"> 風洞試験⁽¹⁶⁾ ($Re=1.3 \times 10^6$) 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
		長さ λ , 直径 D	0.47D λ	0.05D $\lambda \sim 0.23D\lambda$	<ul style="list-style-type: none"> 風洞試験 ($Re=3.5 \times 10^4 \sim 1.2 \times 10^5$) 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 (電力中央研究所風洞実験)
		長さ λ , 断面が一辺 D の正方形	0.8D λ (1.3D λ) ^{*2}	0.5D $\lambda \sim 0.7D\lambda$ 程度	<ul style="list-style-type: none"> 水路試験⁽¹⁷⁾ ($Re=8.0 \times 10^3 \sim 2.8 \times 10^4$) 流入方向と角柱の軸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
柱状	角柱	長さ λ , 高さ D , 幅 B の長方形断面	0.4(D+B) λ	負値(地面との隙間が 0.167D 以上の場合)	<ul style="list-style-type: none"> 風洞試験 ($Re=3.8 \times 10^4$) 流入方向と角柱の軸方向が垂直になる配置(角柱の軸方向は地面と平行) 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 (電力中央研究所風洞実験)

表3 主な物体の C_{DA} と地面に置かれた物体の C_{La} (実測値) の大小関係(2/2)

形状	物体	仕様	C_{DA}^{*1}	C_{La} (実測値)	C_{La} (実測値) に係る試験条件等
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 λ	0に近い値 (地面から 0.25B離れた 位置で $C_{La}=0.04B\lambda$)	<ul style="list-style-type: none"> 風洞試験⁽¹⁸⁾ (幅 B に基づく $Re=2.0 \times 10^5$) 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
	薄い翼	長さ λ , 幅 B , 厚さ D ($B=100\text{mm}$, $D=15\text{mm}$, $\lambda=300\text{mm}$) (参考文献 (20)では B の代わりに c で表記)		0.2B λ 程度	<ul style="list-style-type: none"> 風洞試験⁽²¹⁾ (幅 B (参考文献(20)では c) に基づく $Re=2.2 \times 10^5$) 流入方向と翼の長さ方向が垂直になる配置 (翼面は地面と平行)
	平板状 ブロック	長さ λ , 幅 B , 厚さ D	0.66B λ 0.66(B λ +D(B+ λ)) ^{*2}	0.1B λ 程度	<ul style="list-style-type: none"> 水路試験⁽¹⁹⁾ ($Re=5.0 \times 10^4$ 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少項を無視して記載

*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 C_{La} が、飛行定数 C_{DA}/m と同類の C_{DA} で代用できることについて、表 3 における C_{La} (実測値) が竜巻における飛来物の飛散解析に適用可能であることについて、レイノルズ数の観点から確認を行う。

表 3 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 : 長さ 16.7 ft. , 幅 5.8 ft. , 高さ 4.3 ft.) では風速を 30 mph (13m/s) から 120 mph (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 17 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 3 の EPRI の円柱の風洞試験結果⁽¹⁶⁾は $Re=1.3 \times 10^6$ の高レイノルズ数条件で得られたものであり、竜巻中の円柱状の飛来物のレイノルズ数範囲に入るものと考えられる(例えば、相対風速 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。

EPRI の風洞試験と電力中央研究所の風洞試験には、レイノルズ数条件に大きな違いがあるが、図 18 に示すとおり風洞試験で得られた円柱揚力係数に顕著な相違は認められない。

以上より、地面における各物体の揚力係数 C_L と見附面積 a の積 C_{La} はレイノルズ数にほとんど依存せず、表 3 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。

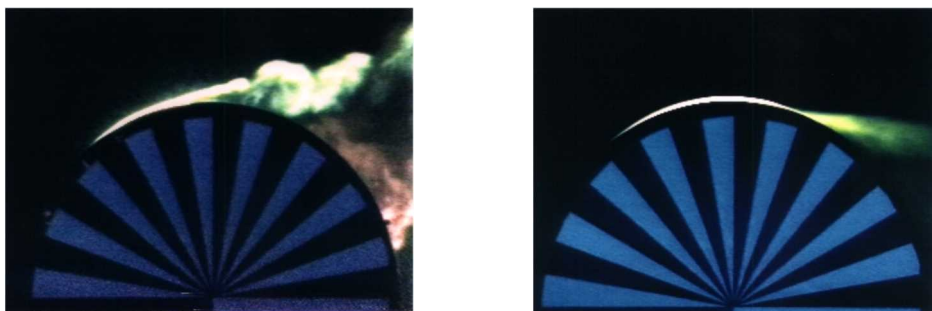


図 17 可視化した円柱周りの流れ (左 : $Re = 4.0 \times 10^4$, 右 : $Re = 2.0 \times 10^5$)

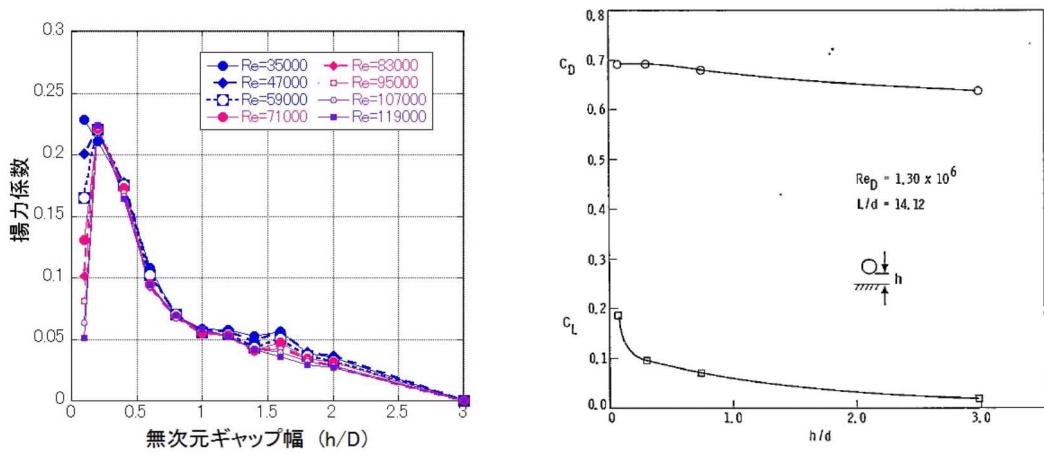


図 18 (左) 電力中央研究所の風洞試験 (Re=3.0 × 10⁴ ~ 1.0 × 10⁵) と (右) EPRI の風洞試験⁽¹⁶⁾ (Re=1.3 × 10⁶) で得られた円柱揚力係数

(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⁾⁽²³⁾を考慮して、物体高さ d の物体にかかる揚力は、物体底面が地面から $3d$ の高度であるとき消滅すると仮定する。

具体的には、地面から z の距離 (高度) にある物体に作用する揚力加速度 L を以下の関数形でモデル化する。(Z : 物体底面の高度 (= $z - d/2$))

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

ただし、 $f(Z/d)$ は、EPRI の風洞実験結果⁽¹⁶⁾⁽²³⁾を参考に、以下の反比例式とする。

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

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 $3d$ の高度で消滅するとした仮定が適切であることを確認する。

a. 塊状物体 (自動車) の揚力の高さ依存性

自動車の揚力係数は、EPRI の風洞試験⁽¹⁶⁾にて、地面及び風洞中央 ($h/d = 3.5$) に設置した場合にて計測されており、図 19 - 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 19 - 2 にて、EPRI の風洞試験によって得られた揚力係数と本モデルにて代用した揚力係数の関係を示す。EPRI の風洞試験では空中での自動車の姿勢は地面設置と同じ姿勢に保たれているため、空中においても揚力係数がゼロとはならないが、実際に飛来する自動車の姿勢はランダムに変化することから、平均的な揚力係数は本モデルでの代用した揚力係数に近いものと考えられる。

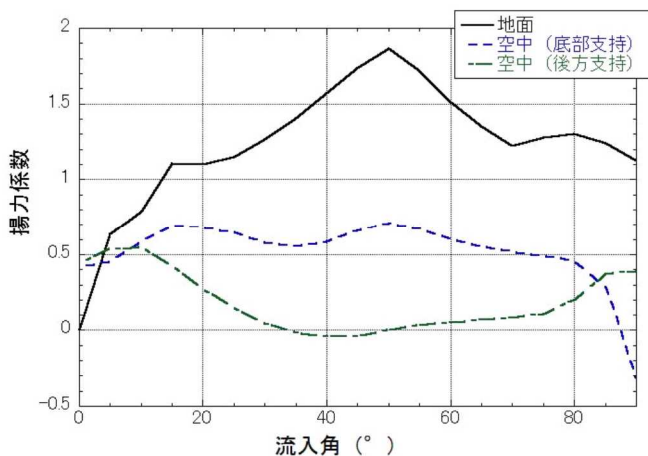


図 19 - 1 地面及び風洞中央に設置した自動車の揚力係数の流入角依存性

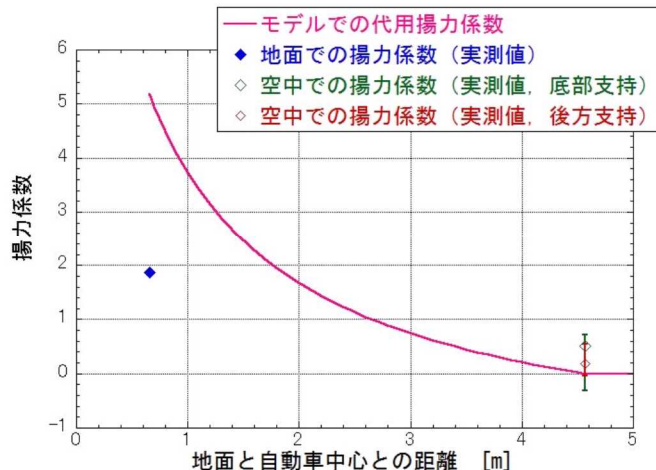


図 19 - 2 自動車の風洞試験による揚力係数と本モデルで代用した揚力係数の関係

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 20 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 20 の赤線) は保守的な結果となっていることが分かる。

円柱の揚力係数は, EPRI の風洞試験⁽¹⁶⁾にて測定しており, 図 21 に示すように本モデルで代用した揚力係数 (図 21 の赤線) は概ね実際の円柱に働く揚力の最大揚力係数よりも大きな値となっているため, 保守的な結果となっていることが分かる。3D 付近では, 風洞試験による揚力係数が代用した揚力係数を上回る結果となっているが, 風洞試験においては, 揚力が作用しやすい姿勢で試験を行っており, 実際の揚力係数は更に小さいものと考えられる。

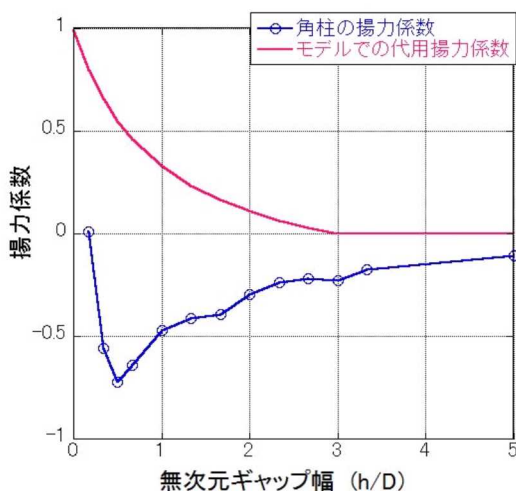
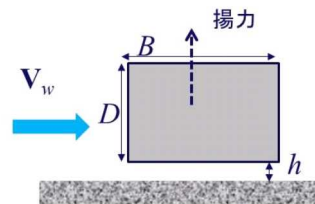


図 20 角柱の風洞試験による揚力係数と本モデルで代用した揚力係数の関係 (幅 $B=80\text{mm}$ × 高さ $D=60\text{mm}$ × 模型長 1000mm)



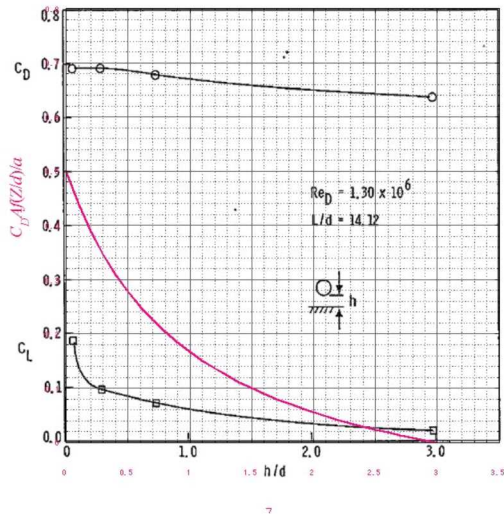


図 21 円柱の風洞試験による揚力係数と本モデルで代用した揚力係数の関係

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 22 の赤線）は実際の翼に働く地面効果による揚力係数よりもおおむね大きな値となっている。また、この翼は奥行方向が長い形状で流れに直交するような配置となっており、実際の平板に比べて揚力が作用しやすいことを考慮すると、実際の平板の揚力係数は更に小さいものと考えられる。

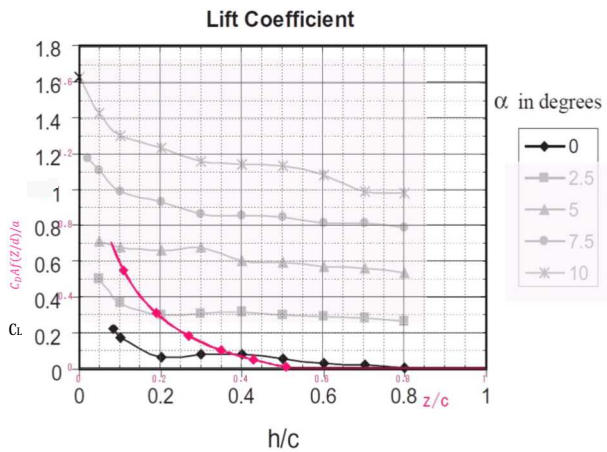


Fig. 8. Coefficient of lift at varying ground clearances for different angles of attack.

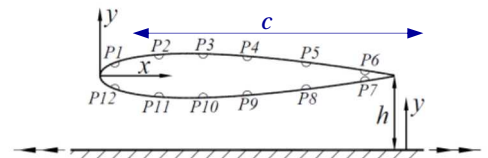


Fig. 2. Locations of pressure tappings.

図 22 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

(5) 飛来物の運動方程式

上記(1)～(4)を踏まえ，重力加速度 g ，上向きの単位ベクトル \mathbf{k} を用いて，飛行物体の運動方程式は以下のように記述される。

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

飛来物の位置 $\mathbf{X}_M(t)$ と速度 $\mathbf{V}_M(t)$ の時刻歴の計算には陽解法（一定加速度法）を用いる。具体的には，時刻 $t = \tau$ における飛来物の位置 $\mathbf{X}_M(\tau)$ と速度 $\mathbf{V}_M(\tau)$ を既知として，時刻 $t = \tau + \Delta\tau$ における飛来物の速度と位置を以下の式で求める。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，飛来物速度・位置を算出することができる。

(6) 飛来物の運動方程式（(13)式）に関する考察

地上面の物体（図16の状態A）が浮上するには，地面からの反力が消滅（ $R < 0$ ，つまり $mg < F_L$ ）する条件で浮上し，浮上後は，(13)式を成分表示した以下の飛来物の運動方程式に従って飛散する。

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

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

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

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

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

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

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

フジタモデルでは、物体が地面上にある場合(図16の状態A)では上昇速度はゼロに近く、地面で静止している飛来物が受ける上昇速度はほぼゼロであるため、式(18')の右辺第1項は右辺第2、第3項に比べてはるかに小さな量となり、以下のとおり物理的に合理的な関係式が成立する。

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

例として、竜巻コア半径30m、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23に示す。

図23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。

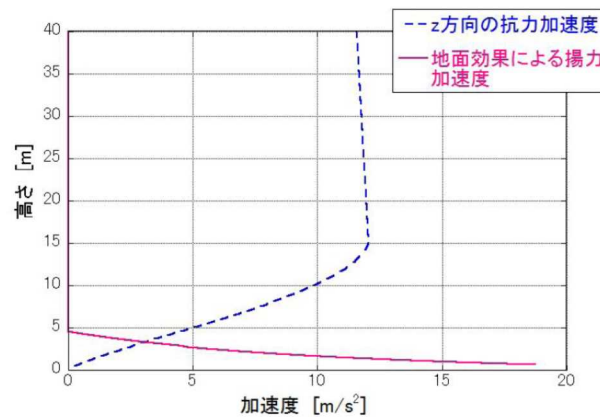


図23 地面近傍の飛来物に作用するz方向の加速度
(飛来物の特性: $0.5\rho C_D A/m=0.004 \text{ [m}^{-1}\text{]}$, $d=1.31 \text{ [m]}$)

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。そのため、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24)。

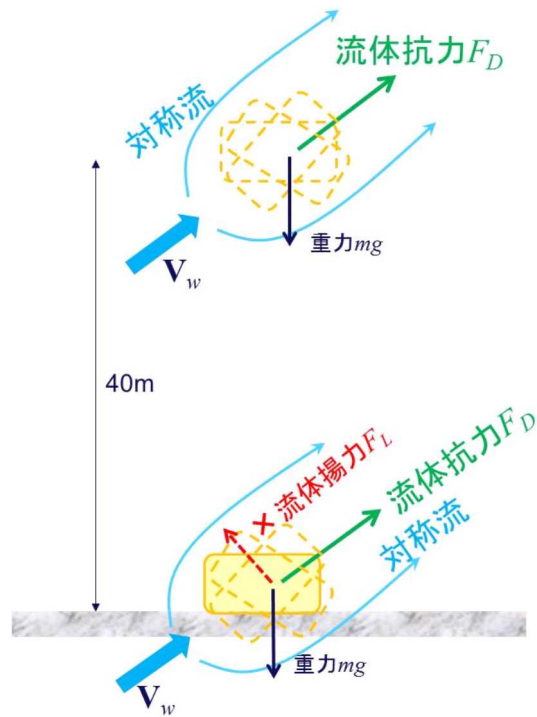


図24 ランキン渦の場合の飛来物の運動モデルの模式図

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、物体を多点数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 25 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。また多点数配置の場合は、竜巻半径の 4 倍の正方形の領域に 51×51 個の物体を配置する。その上で飛散させた物体のうち、最も速度が大きくなったものをその物体の飛来速度とする。

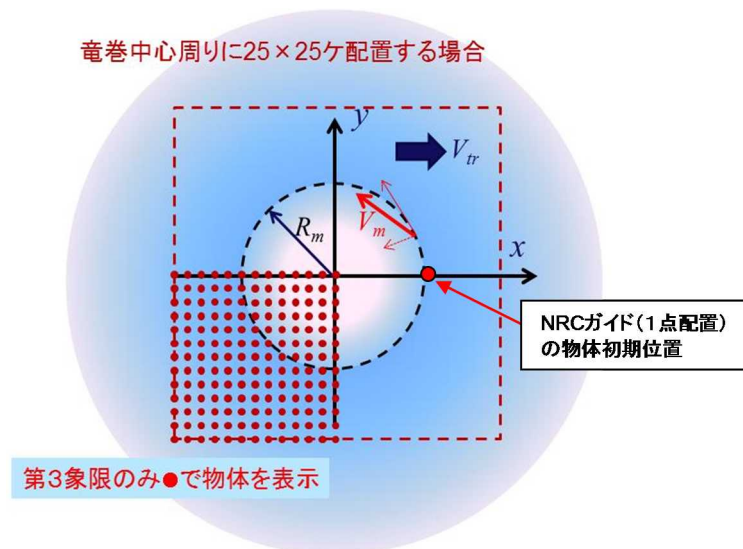
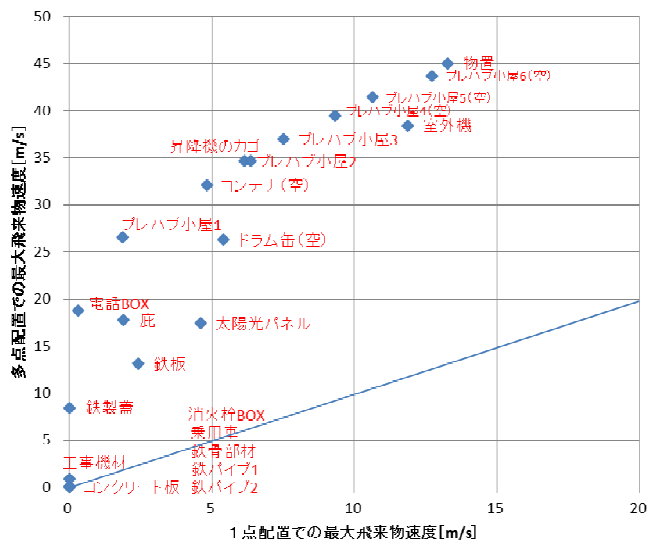


図 25 飛来物評価における竜巻と物体の位置関係

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 14m/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 C_{DA} を質量で割った値： $C_{DA}/m(\text{m}^2/\text{kg})$ ）を用いる。図 26 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、多点数配置の手法では、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。多点数配置することで、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、物体を多点数配置することは、竜巻から受ける風速に関する不確定性を考慮できるものと考えられるため、本検討における方法として適用することとする。



物体名	長さ (m)	幅 (m)	高さ (m)	飛行定数 $C_D A / m^2$ /kg
フォークリフト	3.60	1.10	2.10	0.0026
トラック	5.00	1.90	1.30	0.0026
消火栓BOX	0.50	0.50	1.10	0.0036
乗用車	3.10	1.60	1.30	0.0052
工事機材	2.44	0.65	1.20	0.0058
プレハブ小屋1	5.00	5.00	3.00	0.0083
コンテナ (空)	2.40	6.00	2.60	0.0105
昇降機のカゴ	1.20	1.20	2.80	0.0113
プレハブ小屋2	1.85	1.85	2.60	0.0119
プレハブ小屋3	4.60	2.30	3.30	0.012
プレハブ小屋4 (空)	5.00	5.00	3.00	0.0153
電話BOX	0.30	0.30	0.40	0.0169
プレハブ小屋5 (空)	1.85	1.85	2.60	0.0189
プレハブ小屋6 (空)	4.60	2.30	3.30	0.0222
物置	1.80	0.90	1.50	0.0315
室外機	0.30	0.25	0.80	0.0343
コンクリート板	1.50	1.00	0.15	0.0021
庇	11.00	2.10	0.20	0.0242
鉄製蓋	0.70	0.50	0.03	0.0364
鉄板	2.00	0.25	0.04	0.0486
太陽光パネル	1.20	1.00	0.05	0.0582
鉄骨部材	4.20	0.30	0.20	0.0089
鉄パイプ1	2.00	0.05	0.05	0.0057
鉄パイプ2	1.00	0.05	0.05	0.0059
ドラム缶 (空)	0.90	0.60	0.60	0.0203

図 26 1点配置時と多点配置時の最大飛来物速度の比較 (左) と
物体のパラメータ (右)

前頁の図 25 に示す物体の多点多数配置 (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 27 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。

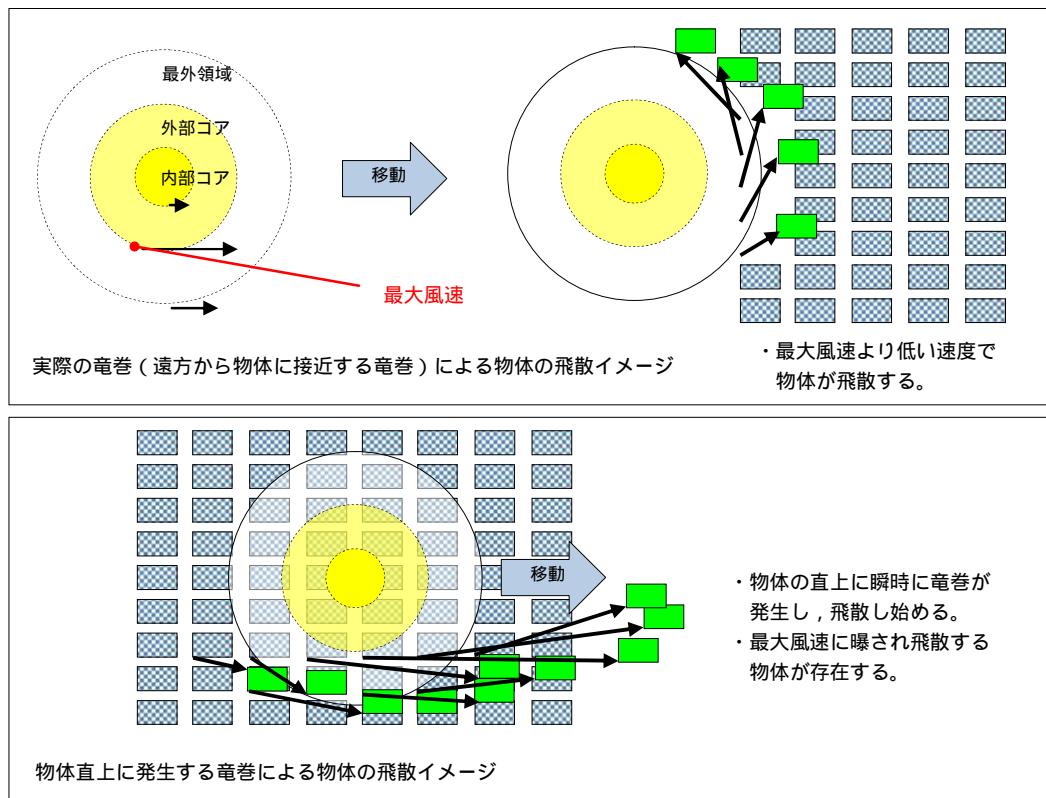


図 27 物体に接近する竜巻と物体直上に発生する竜巻の比較イメージ図

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

5.3 飛来物評価法のまとめ

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

また、物体を多点多数配置し、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。

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

なお、参考として図 28 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。

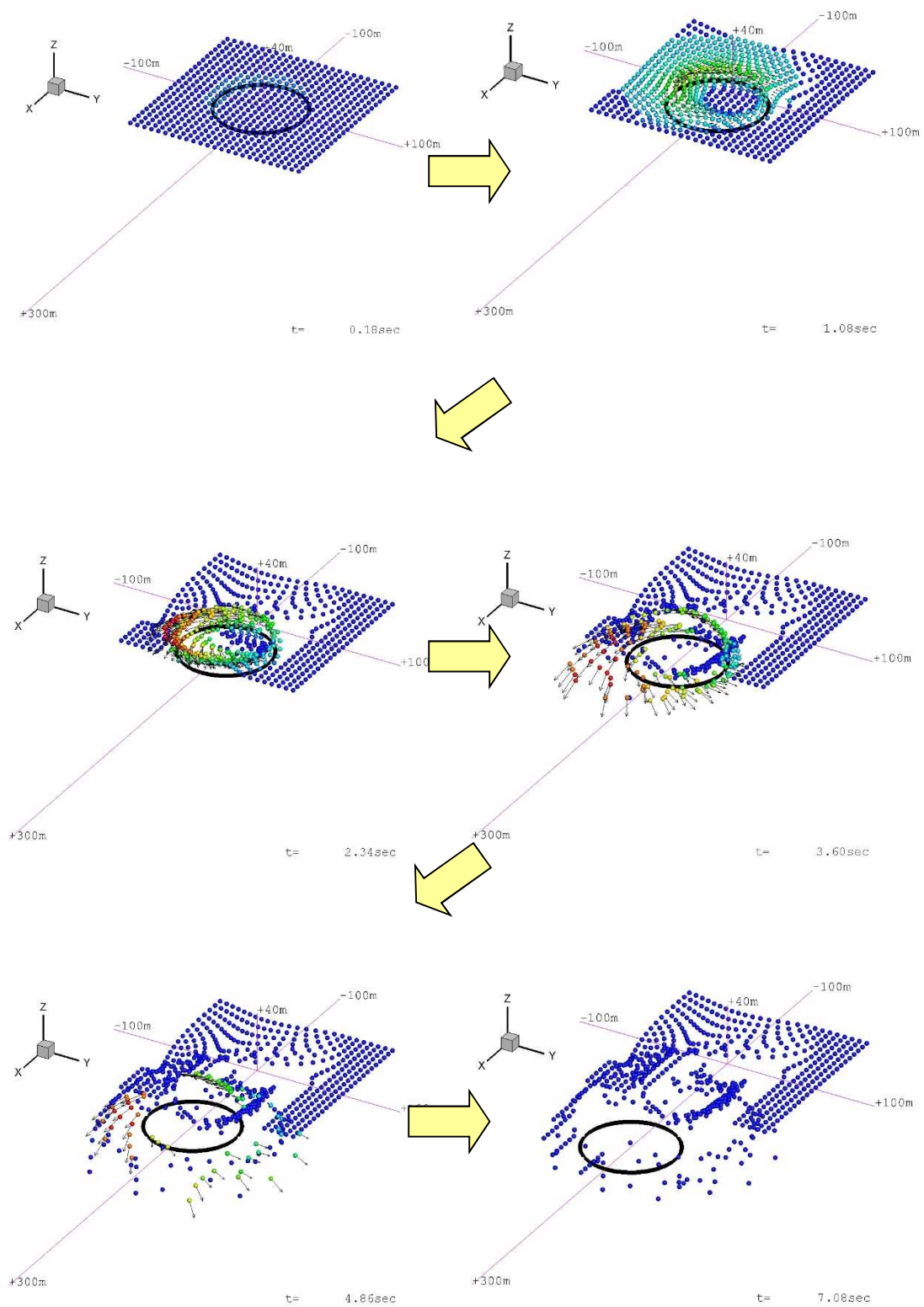


図 28 竜巻による物体の飛散イメージ

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の被災状況を表4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5に示す。

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

表4 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 (自動車は道路からそれる)
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5 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, $C_D A/m = 0.0066 \text{ m}^2/\text{kg}$)

フジタスケールとの対応	最大水平風速 [m/s]	竜巻接線速度 [m/s]	竜巻移動速度 [m/s]	計算結果		
				速度 [m/s]	距離 [m]	高さ [m]
F2	69	59	10	8.9	4.4	0.1
F3	92	79	13	30	35	1.8
F4	116	99	17	51	95	4.3

6.2 米国 Grand Gulf 原子力発電所への竜巻来襲事例

1978年4月17日に米国のミシシッピ州にて建設中の Grand Gulf 原子力発電所に F3 の竜巻が来襲した⁽²⁴⁾。主な被害として、建設中の冷却塔内部に設置されていたコンクリート流し込み用のクレーンが倒壊し、冷却塔の一部が破損したことが挙げられる。また、竜巻によりトレーラーが台から剥がれ移動したことや、直径8～10インチの木が折れた事例等も確認されており、図29は、竜巻による飛来物の飛散状況が定量的に分かる事例として、資材置き場のパイプの飛散状況を示したものである。なお、通過時の竜巻規模はF2であったと考えられている。このパイプはコンクリート・石綿製で、長さは8フィート、直径(内径)は8インチであった。このパイプの飛散状況に対して、フジタモデルあるいはランキン渦モデルを風速場として用いた飛来解析を行った。その計算条件は過去の記録に基づき表6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29 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	<p>・パイプを収納した木箱(一部は二段重ね)は浮上せず転倒し、パイプが周辺7m～9mに散乱。 (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.⁽²⁴⁾)</p>
------	---

表6 Grand Gulf 原子力発電所の竜巻によるパイプ飛散の再現をする上での計算条件

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

計算結果を表7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7 Grand Gulf 原子力発電所のパイプの飛散計算結果

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

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

*2：初期物体高さからの飛散高さ。

6.3 佐呂間竜巻での車両飛散事例

2006年11月7日に北海道網走支庁佐呂間町に発生した竜巻（以下「佐呂間竜巻」という。）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⁽²⁵⁾。被災状況を図30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30左上画像の②）。また、4tトラックの他に2台の自動車（図30左上画像の①と③）について、初期位置と被災後の移動位置が分かっている。このように竜巻被災前後で車両等の位置が明確になっている事例は極めてまれである。なお、竜巻飛来物の再現計算は、竜巻が頻発する米国でもほとんど実施されていない。この理由としては、来襲した実際の竜巻特性を精度よく計測・推測することが困難であることや自動車等の移動前後の位置が不明確な場合が多いことが挙げられる。



図30 佐呂間竜巻（2006.11.7）による被災状況（工事事務所敷地内の車両被災）⁽²⁵⁾
 （文献(25)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。

- ・ 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
- ・ 柏崎刈羽原子力発電所に適用する飛来物評価法による検証

(1) 竜巻特性や飛来物の状況を現実的に設定した場合の再現解析

a. 4tトラックの飛散解析

再現解析の条件として、入手可能なデータ⁽²⁵⁾⁽²⁶⁾に基づき、合理的と考えられる竜巻特性条件と飛来物(4tトラック)の条件を表8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9及び図31に示す。車両の軌跡は竜巻中心との相対位置関係に敏感であるが、各ケースとも飛散方向が実際の移動方向とおおむね合致しており、特に車両と竜巻中心との距離を20mとしたケース2では飛散距離もほぼ正確に再現されている。このように、フジタモデルを風速場とした飛散解析で、飛来物が地上に設置された状況からの飛散挙動が再現できることが確認できる。

表8 佐呂間竜巻の4tトラックの計算条件

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

表9 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	22m	45.4m	2.8m	25.8m/s
2	20m	35.5m	2.3m	22.2 m/s
3	18m	25.9m	1.7m	18.8 m/s

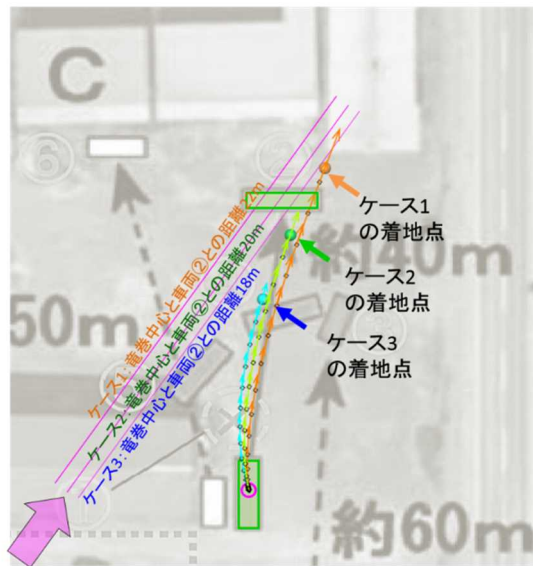


図 31 フジタモデルによるトラック飛散の再現解析結果

b. 乗用車の飛散解析

白い乗用車(図 30 の)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 10 に示す。

表 10 佐呂間竜巻の白い乗用車の計算条件

竜巻条件	表 8 と同様		
飛来物条件	白い乗用車 〔トヨタカローラ を仮定〕	車両長さ	4.40m
		車両幅	1.70m
		車両高さ	1.50m
	飛行定数 $C_D A/m$	0.0097 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 ・ 設置高さ 0m 		

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 11 及び図 32 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 30 の)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 30 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 11 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

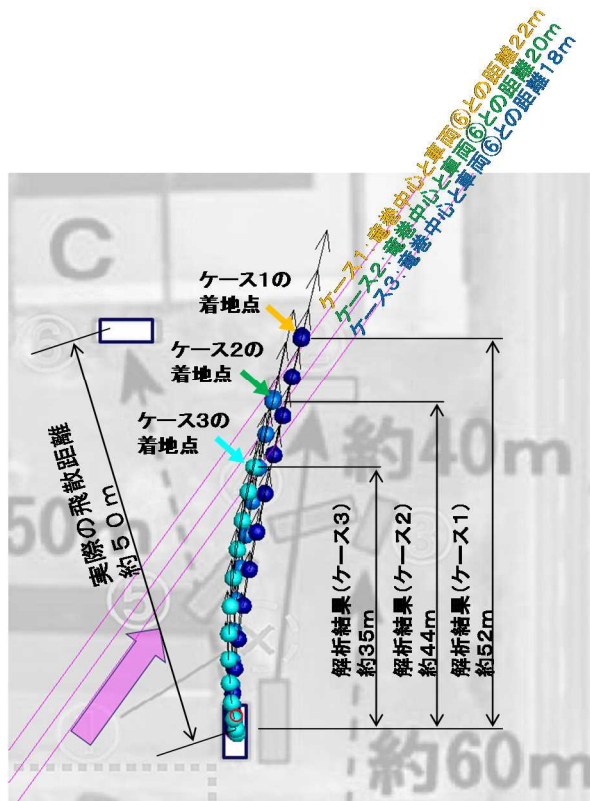


図 32 フジタモデルによる白い乗用車飛散の再現解析結果

(2) 柏崎刈羽原子力発電所に適用する飛来物評価法による検証⁽²⁷⁾

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

a. 4tトラックの飛散解析

計算条件について表 12 に示す。竜巻条件としては、設計竜巻の最大風速を 92 m/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 14 m/s（最大風速の 15%）、竜巻コア半径 R_m を 30 m とする。

表 12 柏崎刈羽原子力発電所に適用する飛来物評価法の計算条件

竜巻条件	設計竜巻風速	92m/s
	最大接線風速	78m/s
	移動速度	14m/s
	コア半径	30m
飛来物条件	表 8 と同様	
初期配置	・ 物体個数 51×51 個，竜巻半径の 4 倍を一辺とする正方形内 ($x, y = [-2R_m, +2R_m]$) に等間隔配置 ・ 設置高さ 0m	

表 13 に実際の被災状況と、柏崎刈羽原子力発電所に適用する飛来物評価法の結果の比較を示す。また、図 33 に被災後の 4tトラックの状況を示す。

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

実際の 4tトラック飛散距離は約 40m であり、フジタモデルによる飛散距離の評価結果はこれを上回る。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、4tトラックの乗員 2 名が存命であったこと、被災後の 4tトラックがほぼ元の外形をとどめていること等から、柏崎刈羽原子力発電所に適用する飛来物評価法で飛散解析をした場合でも、実際の被災状況と比較して妥当な結果となるものと考えられる。

なお、参考として同様の検証をランキン渦モデルでも実施しており、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 13 実際の被災状況と「柏崎刈羽原子力発電所の飛来物評価法」
との結果の比較（4t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)	63.4m	3.6m	36.0m/s (毎時 130 km)
ランキン渦モデル (地上*1)	193.7m	11.7m	43.9m/s
ランキン渦モデル (40m)	254.9m	11.7m	43.9m/s
実際の被災状況	約 40 m	4tトラックの運転席に 乗車していた乗員2名が 幸いにも存命で救出さ れ、搬送先の病院で聞き 取り調査に応じており (25)、被災した4tトラ ックが地面からは3.6m 以上の高所から落下した とは考えにくい。	被災後もほぼ元の外 形をとどめていること が示されており(25)、 実際の飛来物速度は 本解析で得られた最 大飛来物速度(約130 km/h)を遙かに下回る ものと推察できる。

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

*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4tトラックの様子(25)(26)

b. 乗用車(白)の飛散解析

4tトラックの場合と同様に、柏崎刈羽原子力発電所に適用する飛来物評価条件で白い乗用車の飛散解析を行った場合の結果を表14に示す。

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

表 14 実際の被災状況と「柏崎刈羽原子力発電所の飛来物評価法」
との結果の比較（白い乗用車の場合）

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

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

*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。

- ・ 飛散する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ける横滑りや転がりの影響

7.1 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。

7.2 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「(1) 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「(2) 柏崎刈羽原子力発電所に適用する飛来物評価法による検証」では、本評価手法を用いることでフジタモデルにおいても実際の飛散状況に対して、保守性を有した妥当な結果となることを確認している。

地上からの浮上・飛散評価を行うことのメリットは、発電所敷地内に数多く存在する物の中から、竜巻による飛来物化の影響度合いを、浮上の有無の観点を含め、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 26 年 9 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, Report NP-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) Schmidlin, T., Hammer, B., King, P., Ono, Y., Miller, L. S. and Thumann, G., Unsafe at any (wind) speed? -Testing the stability of motor vehicles in severe winds-, Vol. 83, No. 12, pp. 1821-1830, 2002
- (23) Lei, C., Cheng, L. and Kavanagh, K., Re-examination of the effect of a plane boundary on force and vortex shedding of a circular cylinder, J. Wind Eng. Ind. Aerodyn., Vol. 80, pp. 263-286, 1999
- (24) Fujita, T. T., and J. R. McDonald, Tornado damage at the Grand Gulf, Mississippi nuclear power plant site: Aerial and ground surveys, U.S. Nuclear Regulatory Commission NUREG/CR-0383, 1978
- (25) 札幌管区气象台: 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。)
- (26) 奥田泰雄, 喜々津仁密, 村上知徳, 2006 年佐呂間町竜巻 被害調査報告. 建築研究所災害調査, 49, 2006
(<http://www.kenken.go.jp/japanese/contents/activities/other/other.html>)
- (27) 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

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について

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について

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

砂利及び砂等による外部事象防護対象施設への影響としては、

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

が考えられることから、これらについて評価する。

6.1 砂利のような極小飛来物による貫通及び衝突

(1) 貫通について

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

注記*：別紙 1 参照。

砂利による鋼板の貫通限界厚さの算出結果は表 6-1 に示す。

表 6-1 砂利による鋼板の貫通評価結果

項目	砂利 (40mm)
サイズ ϕ (mm)	40
質量 (g)	200
水平速度 (m/s)	14
鉛直速度 (m/s)	7
水平貫通限界厚さ (mm)	1mm 未満
鉛直貫通限界厚さ (mm)	1mm 未満

表 6-1 より、貫通限界厚さは 1mm 未満であるため、砂利による貫通の影響は無いと考える。

(2) 衝撃について

砂利やひょう等の極小飛来物の衝突は瞬間的で、衝突時間が極めて短いため、設備は振動しにくく破壊は生じないと考えられる。これは高速の極小飛来物が設備に衝突した場合、設備に生じる荷重は衝突時間の非常に短い片振幅波形(図6-1)となるため、設備に有意な変位(応力)は生じないためである。

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

図6-2では、横軸は衝突時間(t_r)と衝突される設備の固有周期(T)との比として t_r/T 、縦軸は応答加速度 \ddot{x}_{max} (設備へ伝わった加速度)と入力加速度 \ddot{x}_{0max} (設備へ伝えようとした加速度)の応答加速度比として、 $\ddot{x}_{max}/\ddot{x}_{0max}$ の関係としてまとめられている。

図6-2より衝突時間が非常に短く設備の固有周期との比 t_r/T が非常に小さいと、応答加速度比 $\ddot{x}_{max}/\ddot{x}_{0max}$ は非常に小さい値となる。これは衝突時間が非常に短いと、設備に有意な変位(応力)が生じないことを表している。

$$\ddot{x}_{max}/\ddot{x}_{0max} \Leftrightarrow t_r/T$$

\ddot{x}_{0max} : 飛来物による衝撃パルスを入力最大加速度

\ddot{x}_{max} : 設備の応答最大加速度

t_r : 衝撃パルスの作用時間(飛来物と設備との接触時間)

T : 設備の固有周期

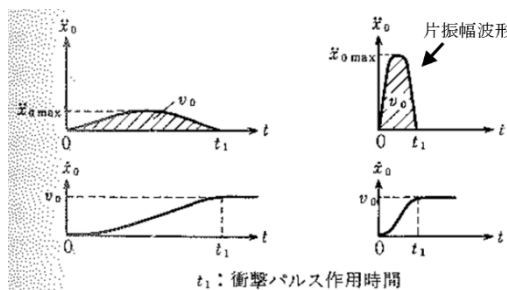


図6-1 片振幅波形 他

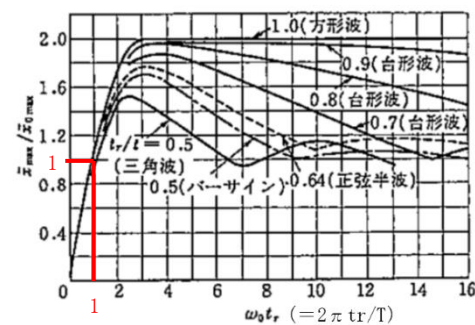


図6-2 衝突時間と応答加速度の関係

(機械工学便覧(基礎編α2 機械力学) 図7-16, 図7-22)

図6-2より飛来物の速度が速くて、衝撃パルスの作用時間(t_r)が設備の固有周期(T)の $1/(2\pi)$ 倍より短い場合(横軸が1より小さい場合)には、入力加速度と応答加速度の比は1を下回り、エネルギーの伝達は小さくなるのがわかる。

砂利やひょう等の極小飛来物による荷重は、このような短時間の衝突となるため、設備全体に影響を及ぼす荷重はごくわずかしが発生しないため、衝撃による影響はないと考える。

6.2 砂等の粒子状の飛来物による目詰まり及び閉塞

砂等の粒子状の飛来物による目詰まり及び閉塞の影響を受ける施設として、表 6-2 に示す屋外の外部事象防護対象施設、外気と繋がっている屋内の外部事象防護対象施設及び屋外に設置されている機能的影響を及ぼす可能性がある施設について評価する。

表 6-2 目詰まり，閉塞評価施設

分類	評価施設
屋外の外部事象防護対象施設	<ul style="list-style-type: none"> ・軽油タンク ・非常用ディーゼル発電設備燃料移送ポンプ
外気と繋がっている屋内の外部事象防護対象施設	<ul style="list-style-type: none"> ・非常用ディーゼル発電設備吸気配管 ・非常用換気空調系 [非常用電気品区域換気空調系 (非常用ディーゼル発電設備非常用送風機含む)，中央制御室換気空調系，コントロール建屋計測制御電源盤区域換気空調系，海水熱交換器区域換気空調系]
屋外に設置されている機能的影響を及ぼす可能性がある施設	<ul style="list-style-type: none"> ・非常用ディーゼル発電設備排気消音器 ・ミスト管 (燃料ディタンク，非常用ディーゼル発電設備機関本体，潤滑油補給タンク，燃料ドレンタンク)

(1) 屋外の外部事象防護対象施設

a. 軽油タンク

軽油タンクは大気開放タンクであり、開口部である通気口は下向きの構造となっており、砂等の粒子状の飛来物が侵入し難い構造となっている。(図 6-3)



図 6-3 軽油タンクの通気口

b. 非常用ディーゼル発電設備燃料移送ポンプ

(a) 軸貫通部の閉塞

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を用いて潤滑剤や内部流体の漏洩のないよう適切に管理されていることから、砂等の粒子状の飛来物がポンプ本体へ侵入することはなく、閉塞することはない。(図 6-4)

(b) 電動機の閉塞

動力源となる電動機については、「全閉外扇屋外型」であり、外気を直接電動機内部に取り込まない冷却方式のため、砂等の粒子状の飛来物が電動機内部に侵入することはない。(図 6-4)

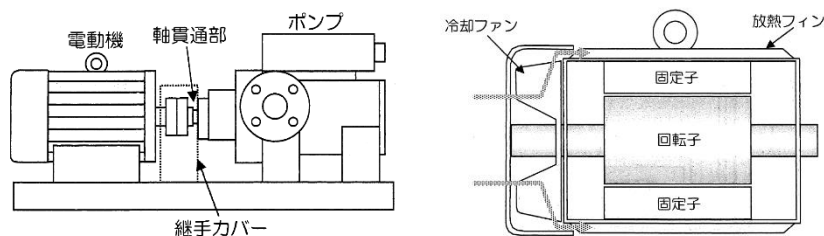


図 6-4 非常用ディーゼル発電設備燃料移送ポンプ概略構造図

(2) 外気と繋がっている屋内の外部事象防護対象施設

a. 非常用ディーゼル発電設備吸気配管

非常用ディーゼル発電設備吸気配管の外気取入口にはフィルタが設置されており、砂等の粒子状の飛来物が外気取入口に侵入した場合であっても、バグフィルタの捕集効率は粒径 $2\mu\text{m}$ に対して80%以上であるため、給気を供給する設備に対して、影響は無い。

また、各フィルタについては、建屋等からのアクセス性が良く、必要に応じて清掃及び交換することにより目詰まり、閉塞を取り除くことが出来る。(図6-5)

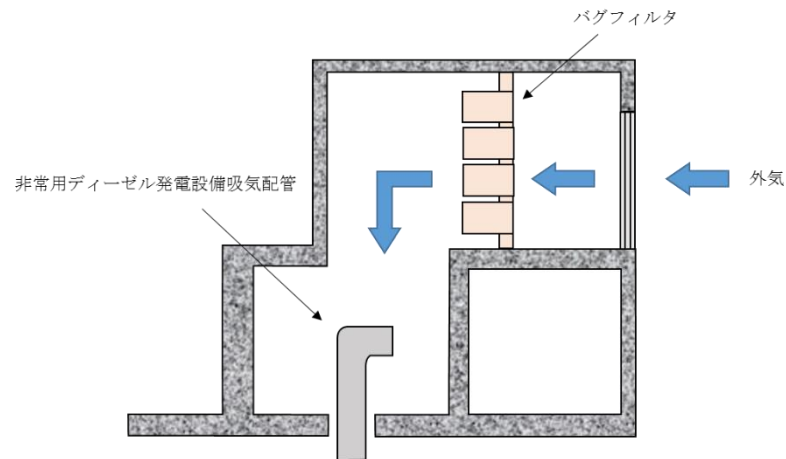


図6-5 非常用ディーゼル発電設備吸気配管の外気取入口

- b. 非常用換気空調系 [非常用電気品区域換気空調系（非常用ディーゼル発電設備非常用送風機含む）、中央制御室換気空調系、コントロール建屋計測制御電源盤区域換気空調系、海水熱交換器区域換気空調系]

非常用換気空調系の外気取入口にはフィルタが設置されており、砂等の粒子状の飛来物が外気取入口に侵入した場合であっても、バグフィルタの捕集効率は粒径 $2\mu\text{m}$ に対して80%以上であるため、給気を供給する設備に対して、影響は無い。

また、各フィルタについては、建屋等からのアクセス性が良く、必要に応じて清掃及び交換することにより目詰まり、閉塞を取り除くことが出来る。(図 6-6, 図 6-7)

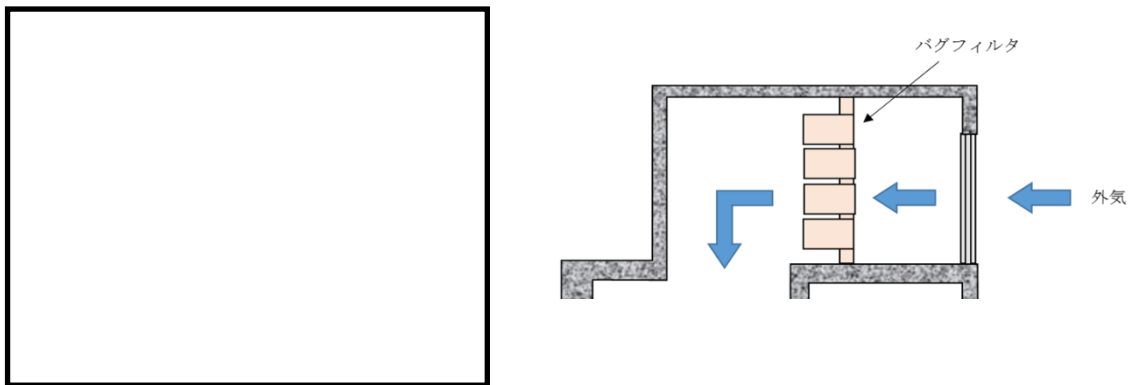


図 6-6 非常用換気空調系の外気取入口

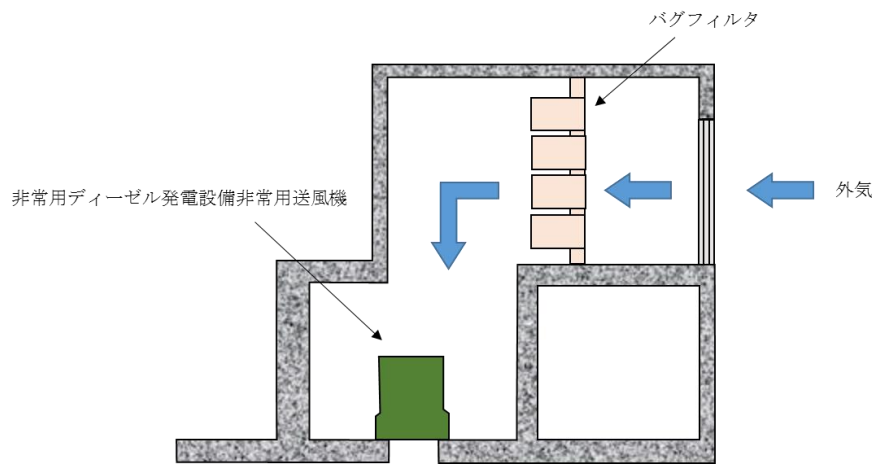


図 6-7 非常用ディーゼル発電設備非常用送風機の外気取入口

(3) 屋外に設置されている機能的影響を及ぼす可能性がある施設

a. 非常用ディーゼル発電設備排気消音器

排気消音器の開口部は横方向であり，砂等の粒子状の飛来物が侵入し難い構造となっている。また，竜巻の通過に要する時間は短時間であるため，閉塞する量の粒子状の飛来物は侵入し難い。(図6-8)

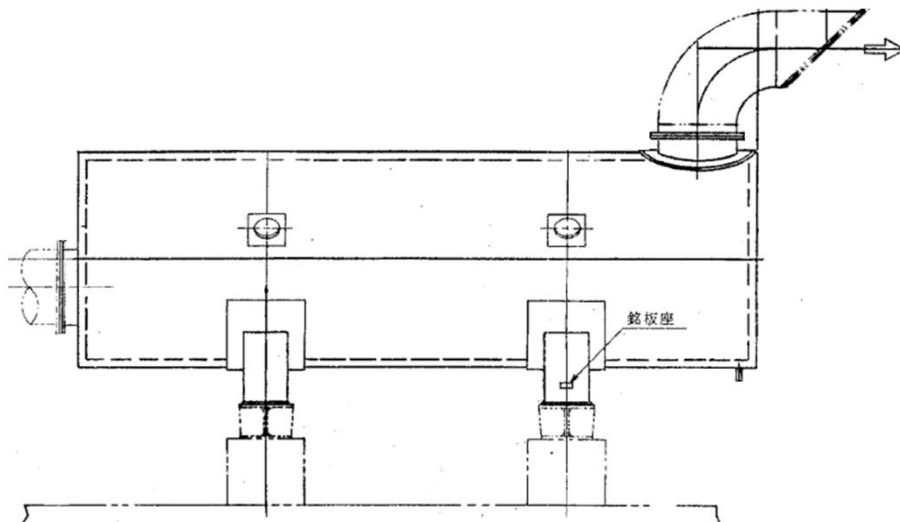


図6-8 非常用ディーゼル発電設備排気消音器

b. ミスト管（燃料ディタンク，非常用ディーゼル発電設備機関本体，潤滑油補給タンク，燃料ドレンタンク）

ミスト管（燃料ディタンク，非常用ディーゼル発電設備機関本体，潤滑油補給タンク，燃料ドレンタンク）は下向きの構造となっており，砂等の粒子状の飛来物が侵入し難い構造となっている。(図6-9)

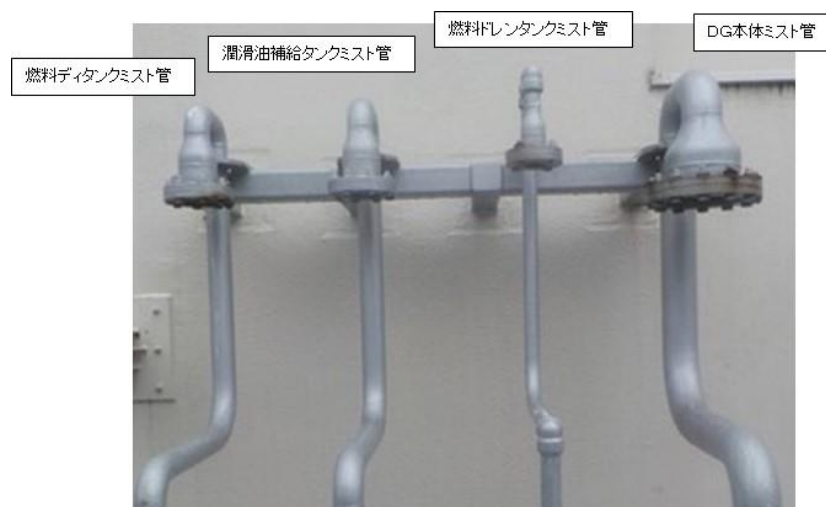


図6-9 ミスト管

BRL 式について

BRL 式は ISES7607-3「軽水炉構造機器の衝撃荷重に関する調査 その3 ミサイルの衝突による構造壁の損傷に関する評価式の比較検討」(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数式に使用されている。

$$T^{3/2} = \frac{0.5MV^2}{174K^2d^{3/2}}$$

T : 鋼板貫通限界厚さ (in)

M : ミサイル質量 (lb・s²/ft)

V : ミサイル速度 (ft/s)

d : ミサイル直径 (in)

K : 鋼板の材質に関する係数 (≒1)

なお、単位換算した BRL 式は以下のとおり。

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

T : 鋼板貫通限界厚さ (m)

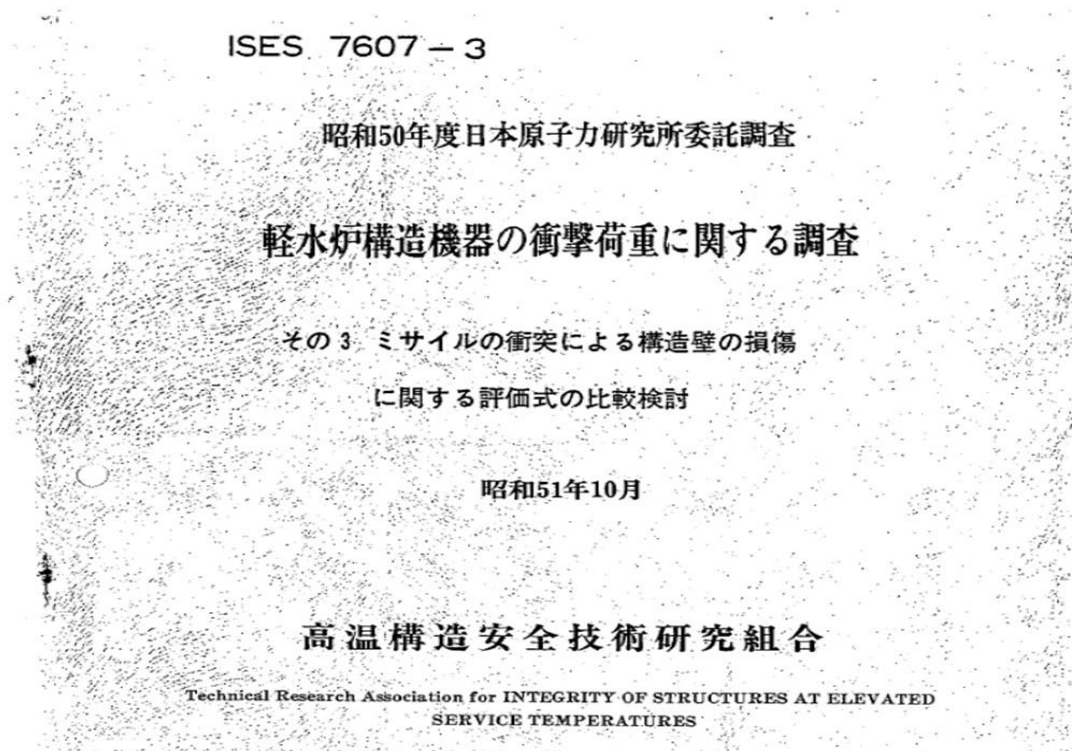
m : ミサイル質量 (kg)

v : ミサイル速度 (m/s)

d : ミサイル直径 (m)

K : 鋼板の材質に関する係数 (≒1)

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)



P 27~28

3. 鋼板に対する評価

(2) BRL 式⁽³⁾ (BaIlistic 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

P 4

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について

7. 屋外の重大事故等対処設備の竜巻防護設計について

7.1 はじめに

本資料は、柏崎刈羽原子力発電所の屋外の重大事故等対処設備（以下「SA 設備」という。）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 柏崎刈羽原子力発電所における SA 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

柏崎刈羽原子力発電所の屋外 SA 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防護対策施設（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とする。

位置的分散による SA 設備の機能維持設計は、-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健全性に関する説明書」にて示すため、以下では、固縛等に関する設計の考え方を示す。

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の機能に影響を及ぼさない設計とするため、全ての屋外 SA 設備を検討の対象とする。

ただし、屋外 SA 設備のうち、重大事故等に対処するために必要な機能を損なわないよう、風荷重の作用しない場所に配置する設計又は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。（表 7 - 1 参照）

考慮する屋外 SA 設備、及びその保管場所を表 7 - 2、図 7 - 1 に示す。

表 7 - 1 固縛対象設備の選定候補 (1/2)

固縛対象設備の選定方針	常設 / 可搬	設備
<p>(1) 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，外部事象防護対象施設及び防護対策施設に衝突し損傷させる可能性の有無を確認し，固縛対象設備を選定する。</p> <p>また，同じ機能を有する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，同じ機能を有する常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>	<ul style="list-style-type: none"> ・ホイルローダ (6,7号機共用) ・可搬型代替注水ポンプ (A-2級) (6,7号機共用) ・可搬型 Y型ストレーナ (6,7号機共用) *1 ・ホース (屋外用 20m, 放水砲用 5, 10, 50m 等) *2 ・ホース (屋内用 20m) (6,7号機共用) *2 ・スクラバ水 pH制御設備用ポンプ (6,7号機共用) ・可搬型窒素供給装置 (6,7号機共用) *3 ・可搬型代替注水ポンプ (A-1級) (6,7号機共用) ・大容量送水車 (原子炉建屋放水設備用) (6,7号機共用) ・大容量送水車 (海水取水用) (6,7号機共用) *5 ・大容量送水車 (熱交換器ユニット用) (6,7号機共用) *5 ・放水砲 (6,7号機共用) ・泡原液搬送車 (6,7号機共用) ・汚濁防止膜 (6,7号機共用) ・小型船舶 (汚濁防止膜設置用) (6,7号機共用) ・放射性物質吸着材 (6,7号機共用) *2 ・泡原液混合装置 (6,7号機共用) *2 ・タンクローリ (16kL) (6,7号機共用) ・タンクローリ (4kL) (6,7号機共用) ・電源車 (6,7号機共用) ・号炉間電力融通ケーブル (可搬型) (6,7号機共用) *2 ・可搬型気象観測装置 (6,7号機共用) *4 ・小型船舶 (海上モニタリング用) (6,7号機共用) ・熱交換器ユニット (6,7号機共用) ・5号機原子炉建屋内緊急時対策用可搬型電源設備 (6,7号機共用) ・可搬型モニタリングポスト (6,7号機共用) *4 ・可搬型窒素供給装置用可搬型電源設備 (6,7号機共用) *3
	<p>常設</p>	<ul style="list-style-type: none"> ・第一ガスタワービン発電機 (6,7号機共用) ・モニタリングポスト用発電機 (6,7号機共用)

注記 *1 : 消防車 (可搬型代替注水ポンプ (A-2級), 可搬型代替注水ポンプ (A-1級)) の車内に格納されているため，消防車の評価で代表する。
 *2 : 保管用のコンテナ，車両または収納箱に格納されているため，各設備を内包するコンテナ，車両または収納箱の評価で代表する。
 *3 : 車両型設備の可搬型窒素供給装置に格納されていることから，同車両の評価で代表する。
 *4 : 可搬型モニタリングポストを保管する車両に積載されていることから，同車両の評価で代表する。
 *5 : 大容量送水車 (原子炉建屋放水設備用) と共通の車両であることから，同車両の評価で代表する。

表 7-1 固縛対象設備の選定候補 (2/2)

	固縛対象設備の選定方針	常設 / 可搬	設備
(2)	<p>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。</p>	<p>常設</p>	<ul style="list-style-type: none"> ・ 緊急用断路器 (6,7号機共用) ・ フィルタベント遮蔽壁 ・ 配管遮蔽 ・ ドレンタンク ・ ドレン移送ポンプ ・ よう素フィルタ ・ フィルタ装置 ・ フィルタ装置水位 ・ フィルタ装置スクラバ水 pH ・ フィルタ装置金属フィルタ差圧 ・ フィルタ装置出口放射線モニタ ・ 燃料取替床ブローアアウトパネル ・ 燃料取替床ブローアアウトパネル閉止装置
(3)	<p>外部事象防護対象施設を兼ねており、設計竜巻の風荷重、気圧差荷重、及び設計飛来物の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。^{*6}</p>	<p>常設</p>	<ul style="list-style-type: none"> ・ 燃料移送ポンプ ・ 軽油タンク (重大事故等時のみ 6,7号機共用) ・ 軽油タンク (6号機設備, 重大事故等時のみ 6,7号機共用)
(4)	<p>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。</p>	<p>常設</p>	<ul style="list-style-type: none"> ・ 第一ガスタービン発電機用燃料タンク (6,7号機共用) ・ 海水貯留堰 (重大事故等時のみ 6,7号機共用) ・ 海水貯留堰 (6号機設備, 重大事故等時のみ 6,7号機共用) ・ スクリーン室 (重大事故等時のみ 6,7号機共用) ・ スクリーン室 (6号機設備, 重大事故等時のみ 6,7号機共用) ・ 取水路 (重大事故等時のみ 6,7号機共用) ・ 取水路 (6号機設備, 重大事故等時のみ 6,7号機共用) ・ 補機冷却用海水取水路

注記 *6 : 6号機の軽油タンクも7号機と同様に設置変更許可時の説明にて6号機の外部事象防護対象施設として位置づけていることから固縛対象設備として選定しない。

表7-2 屋外SA設備の保管場所一覧

設備	保管場所*
ホイールローダ(6,7号機共用)	
可搬型代替注水ポンプ(A-2級)(6,7号機共用)	
可搬型Y型ストレナ(6,7号機共用)	
ホース(屋外用20m,放水砲用5,10,50m等)	
ホース(屋内用20m)(6,7号機共用)	
スクラバ水pH制御設備用ポンプ(6,7号機共用)	
可搬型窒素供給装置(6,7号機共用)	
可搬型代替注水ポンプ(A-1級)(6,7号機共用)	
大容量送水車(原子炉建屋放水設備用)(6,7号機共用)	
大容量送水車(海水取水用)(6,7号機共用)	
大容量送水車(熱交換器ユニット用)(6,7号機共用)	
放水砲(6,7号機共用)	
泡原液搬送車(6,7号機共用)	
汚濁防止膜(6,7号機共用)	
小型船舶(汚濁防止膜設置用)(6,7号機共用)	
放射性物質吸着材(6,7号機共用)	
泡原液混合装置(6,7号機共用)	
タンクローリ(16kL)(6,7号機共用)	
タンクローリ(4kL)(6,7号機共用)	
電源車(6,7号機共用)	
号炉間電力融通ケーブル(可搬型)(6,7号機共用)	
可搬型気象観測装置(6,7号機共用)	
小型船舶(海上モニタリング用)(6,7号機共用)	
5号機原子炉建屋内緊急時対策所用可搬型電源設備(6,7号機共用)	
熱交換器ユニット(6,7号機共用)	
可搬型モニタリングポスト(6,7号機共用)	
可搬型窒素供給装置用可搬型電源設備(6,7号機共用)	
第一ガスタービン発電機(6,7号機共用)	
モニタリングポスト用発電機(6,7号機共用)	

注記*：図7-1における保管場所の番号を示す。

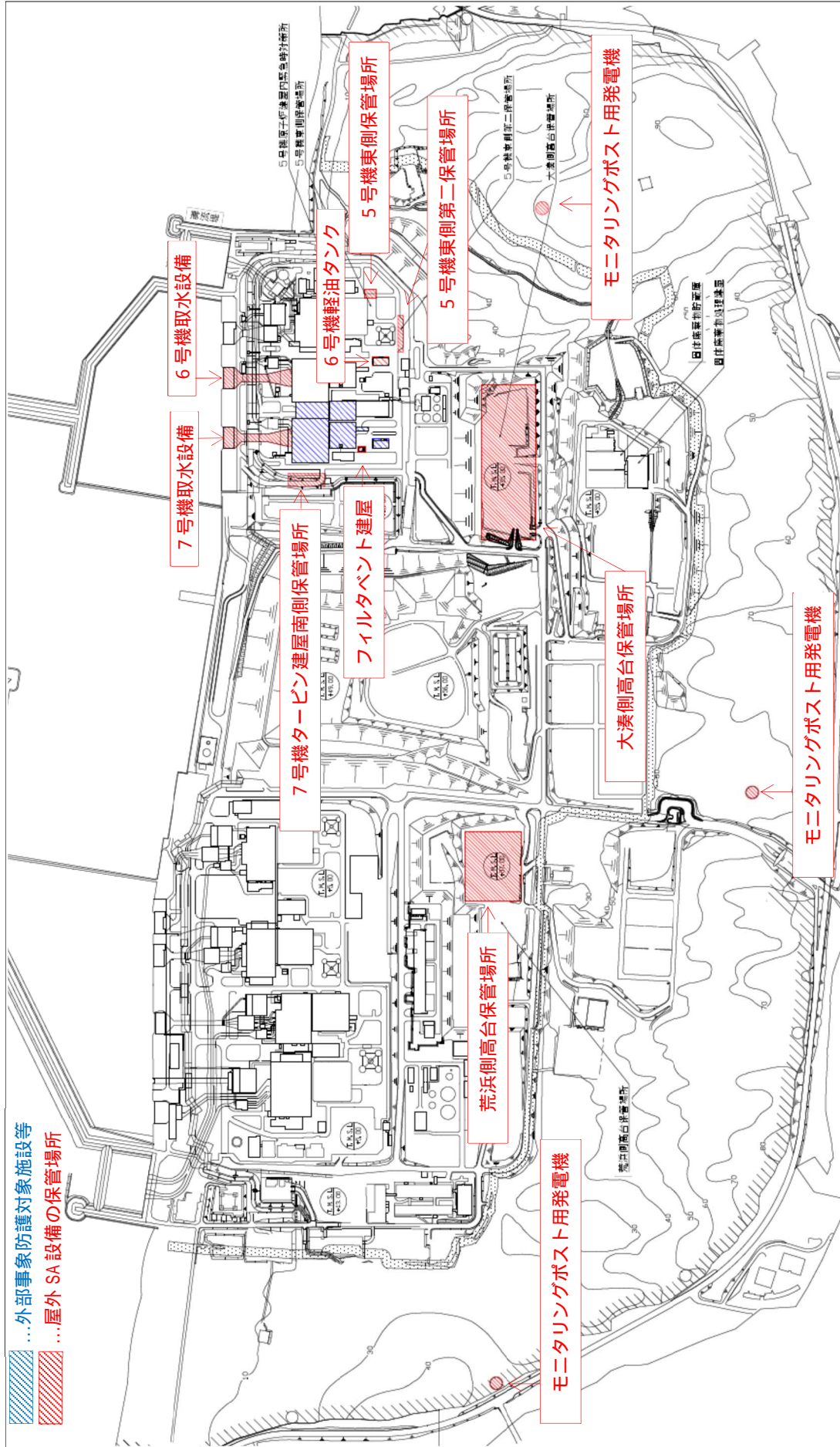


図7-1 屋外SA設備の保管場所及び外部事象防護対象施設等との配置

7.2.3 固縛対象設備の選定

屋外 SA 設備を対象に、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、外部事象防護対象施設等に衝突し損傷させる可能性の有無を確認し、表 7 - 2 に示した屋外 SA 設備から固縛対象設備を選定する。

固縛対象として選定した設備を表 7 - 3 に示す。また、屋外 SA 設備の保管場所及び飛散距離を図 7 - 2 ~ 12 に示す。

表7-3 固縛対象として選定した屋外SA設備一覧(1/3)

設備	保管場所*1	飛散距離 [m]	外部事象防護対象施設等との離隔距離 [m]	離隔	固縛対象設備	選定根拠	関連図面
ホイールローダ (6,7号機共用)		21	203	○			図7-7
		22	868	○			図7-8
可搬型代替注水ポンプ (A-2級) (6,7号機共用)		108	203	○			図7-7
		111	868	○			図7-8
可搬型Y型ストレーナ (6,7号機共用)		60	144	○	○	横滑りの影響を考慮し, 固縛対象として選定した。	図7-10
		108	203	○			図7-7
可搬型Y型ストレーナ (6,7号機共用)		111	868	○			図7-8
		60	144	○	○*2	横滑りの影響を考慮し, 固縛対象として選定した。*2	図7-10
ホース (屋外用 20m, 放水砲用 5, 10, 50m 等)		178	213	○			図7-5
		210	868	○			図7-8
ホース (屋内用 20m) (6,7号機共用)		60	144	○	○*2	横滑りの影響を考慮し, 固縛対象として選定した。*2	図7-10
		221	240	○			図7-3
スクラバ水 pH 制御設備用ポンプ (6,7号機共用)		109	203	○			図7-7
		112	868	○			図7-8
可搬型窒素供給装置 (6,7号機共用)		85	203	○			図7-7
		88	868	○			図7-8
可搬型代替注水ポンプ (A-1級) (6,7号機共用)		54	203	○			図7-7
		55	868	○			図7-8
大容量送水車 (原子炉建屋放水設備用) (6,7号機共用)		0	203	○			図7-7
		0	868	○			図7-8
大容量送水車 (海水取水用) (6,7号機共用)		0	203	○			図7-7
		0	868	○			図7-8

注記*1 : 図7-1における保管場所の番号を示す。

*2 : 可搬型代替注水ポンプ (A-2級) の車内に格納されるため, 可搬型代替注水ポンプ (A-2級) を固縛対象とする。

表7-3 固縛対象として選定した屋外SA設備一覧(2/3)

設備	保管場所*	飛散距離 [m]	外部事象防護対象施設等との離隔距離 [m]	離隔	固縛対象設備	選定根拠	関連図面
大容量送水車(熱交換器ユニット用)(6,7号機共用)		0	203	○			図7-7
		0	868	○			図7-8
放水砲(6,7号機共用)		203	281	○			図7-4
		206	868	○			図7-8
泡原液搬送車(6,7号機共用)		97	203	○			図7-7
		99	868	○			図7-8
汚濁防止膜(6,7号機共用)		224	275	○			図7-2
		226	868	○			図7-8
小型船舶(汚濁防止膜設置用)(6,7号機共用)		224	275	○			図7-2
		226	868	○			図7-8
放射性物質吸着材(6,7号機共用)		80	200	○			図7-6
		82	868	○			図7-8
泡原液混合装置(6,7号機共用)		90	203	○			図7-7
		93	868	○			図7-8
タンクローリ(16kL)(6,7号機共用)		116	203	○			図7-7
		119	868	○			図7-8
タンクローリ(4kL)(6,7号機共用)		122	203	○			図7-7
		125	868	○			図7-8
電源車(6,7号機共用)		68	144	○	○	横滑りの影響を考慮し,固縛対象として選定した。	図7-10
		83	203	○			図7-7
号炉間電力融通ケーブル(可搬型)(6,7号機共用)		85	868	○			図7-8
		81	868	○			図7-8

注記*: 図7-1における保管場所の番号を示す。

表7-3 固縛対象として選定した屋外SA設備一覧(3/3)

設備	保管場所*	飛散距離 [m]	外部事象防護対象施設等との離隔距離 [m]	離隔	固縛対象設備	選定根拠	関連図面
可搬型気象観測装置(6,7号機共用)		134	203	○			図7-7
		137	868	○			図7-8
小型船舶(海上モニタリング用)(6,7号機共用)		238	256	○			図7-2
		241	868	○			図7-8
5号機原子炉建屋内緊急時対策所用可搬型電源設備(6,7号機共用)		57	203	○			図7-7
		26	228	○			図7-9
熱交換器ユニット(6,7号機共用)		0	203	○			図7-7
		0	868	○			図7-8
可搬型モニタリングポスト(6,7号機共用)		134	203	○			図7-7
		137	868	○			図7-8
可搬型窒素供給装置用可搬型電源設備(6,7号機共用)		85	203	○			図7-7
		88	868	○			図7-8
第一ガスタービン発電機(6,7号機共用)		76	11	x	○	外部事象防護対象施設等への離隔が十分ではないため、固縛対象として選定した。	図7-11
モニタリングポスト用発電機(6,7号機共用)		166	581	○			図7-12

注記* : 図7-1における保管場所の番号を示す。

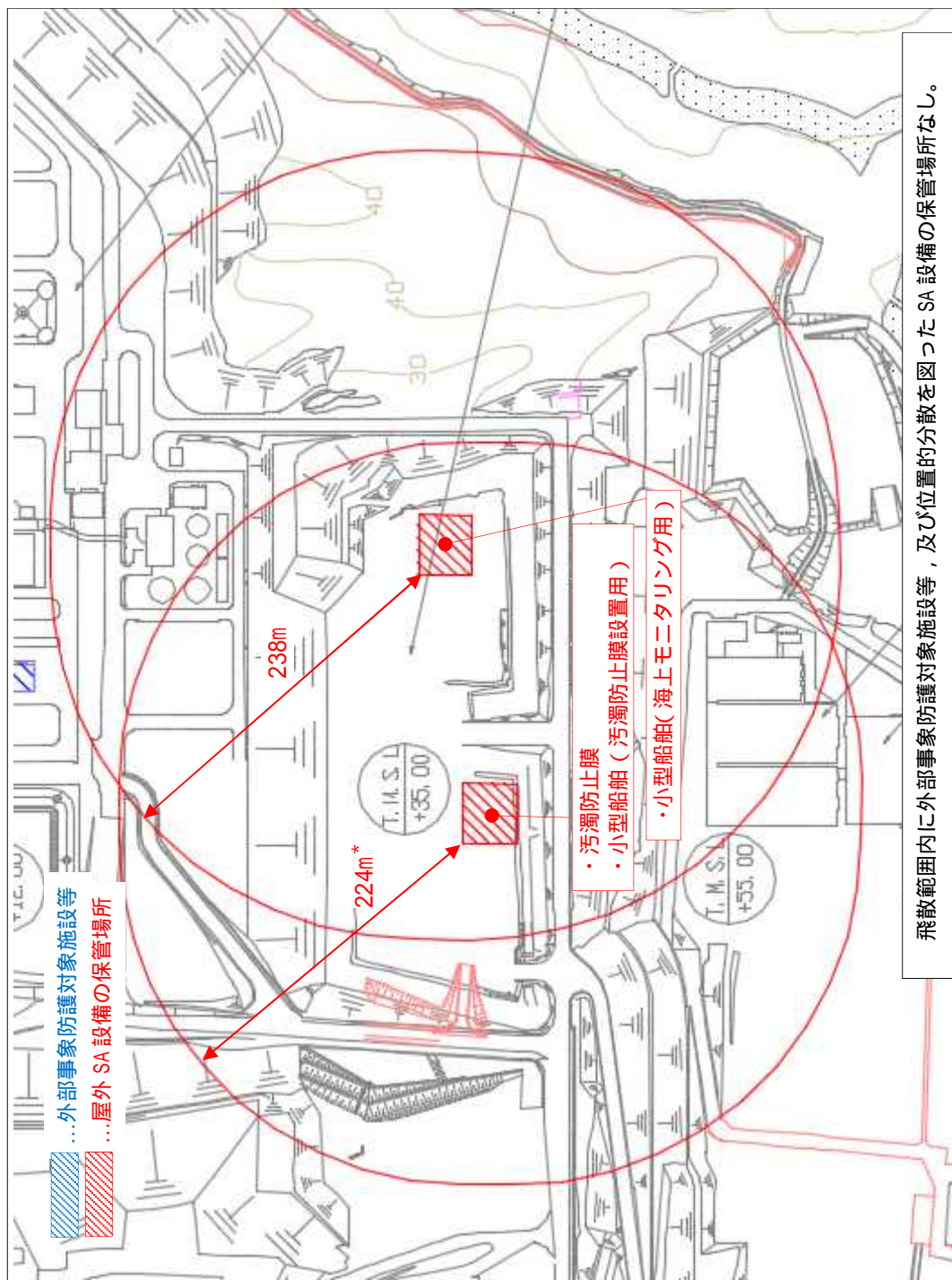


図7-2 屋外SA設備の保管場所及び飛散距離（大湊側高台保管場所 1/6）

注記*：保管場所内の設備のうち，最大の飛散距離を示す。

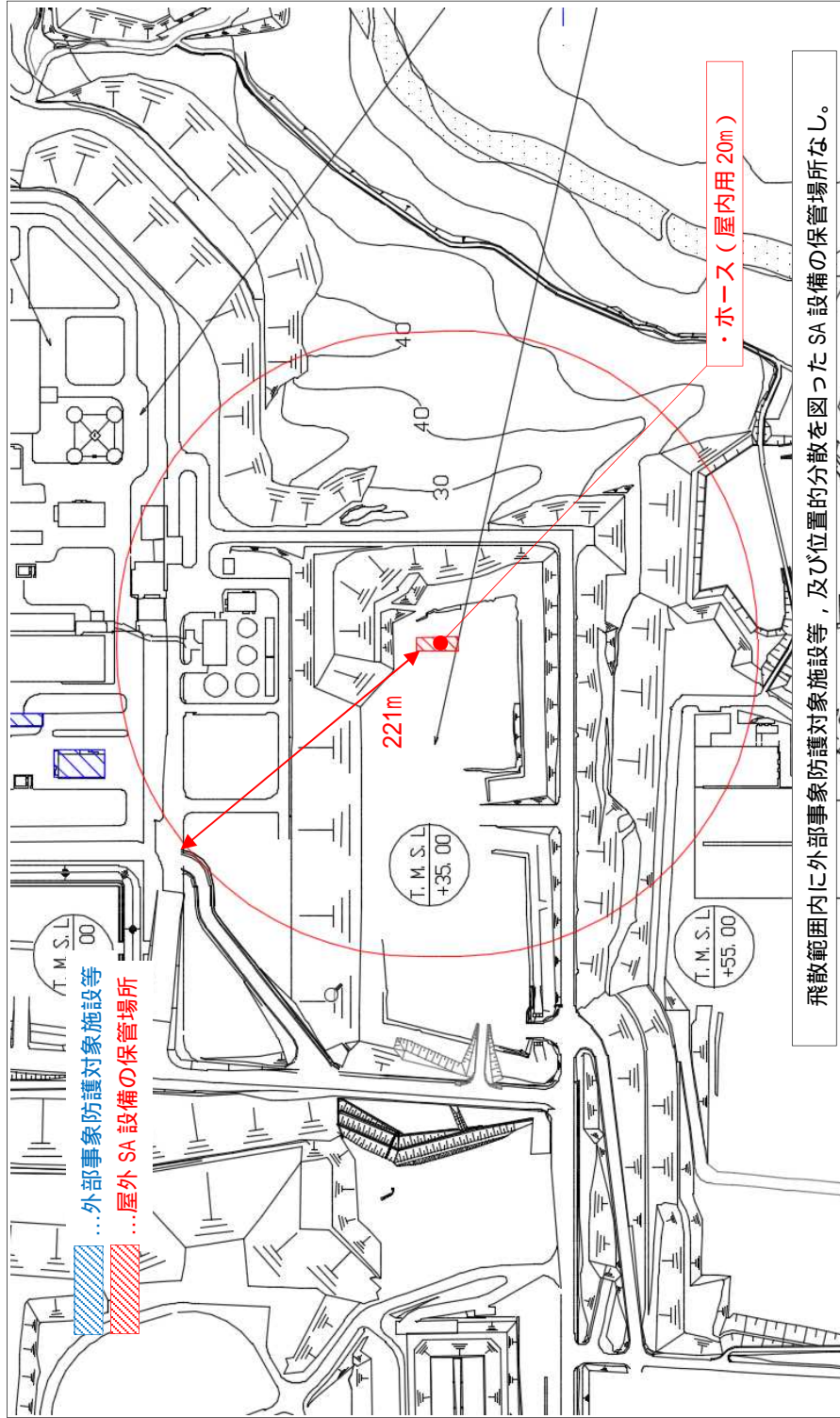


図7-3 屋外SA設備の保管場所及び飛散距離 (大湊側高台保管場所 2/5)

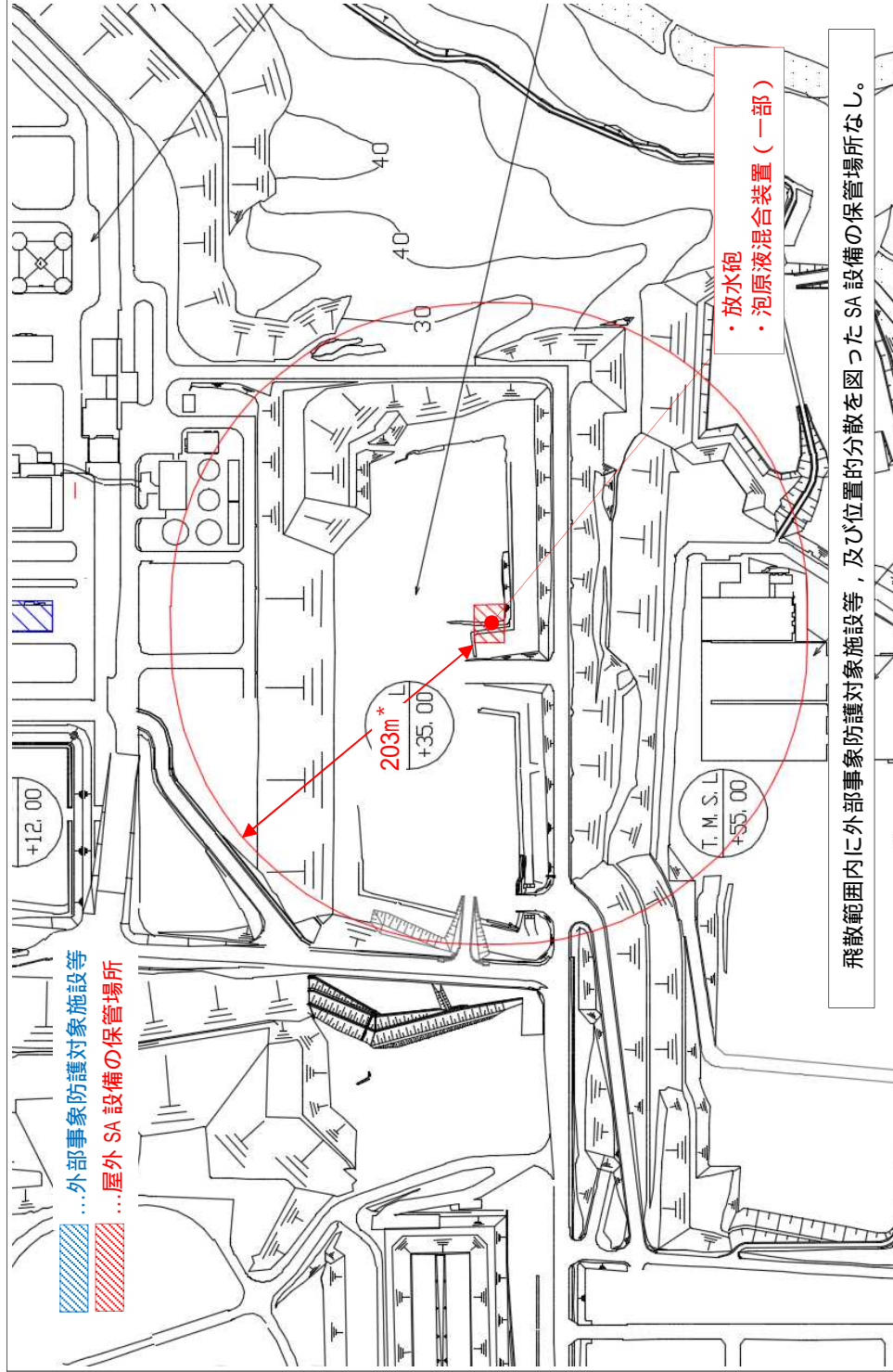


図7-4 屋外SA設備の保管場所及び飛散距離 (大湊側高台保管場所 3/6)

注記*: 保管場所内の設備のうち, 最大の飛散距離を示す。

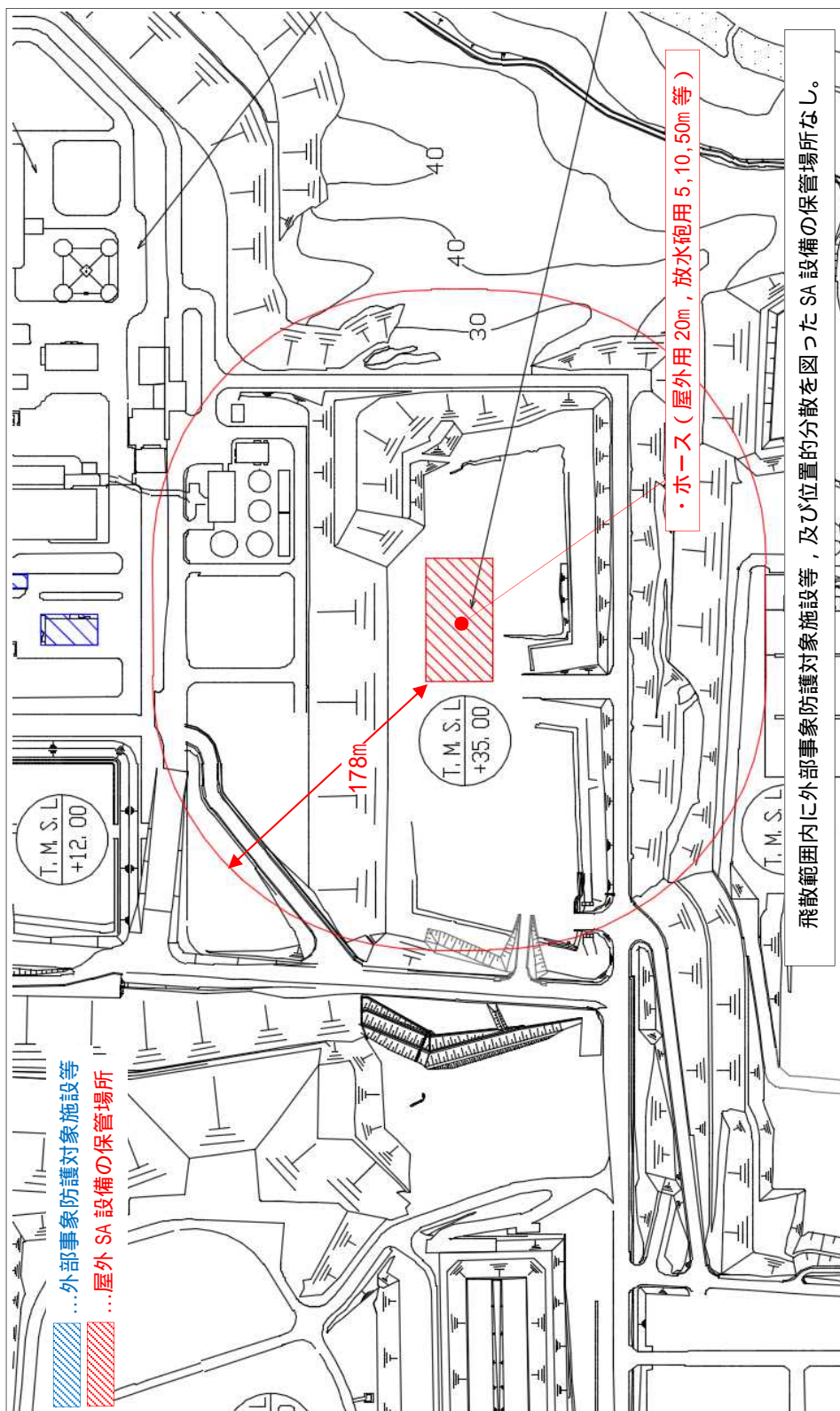


図7-5 屋外SA設備の保管場所及び飛散距離 (大湊側高台保管場所 4/6)

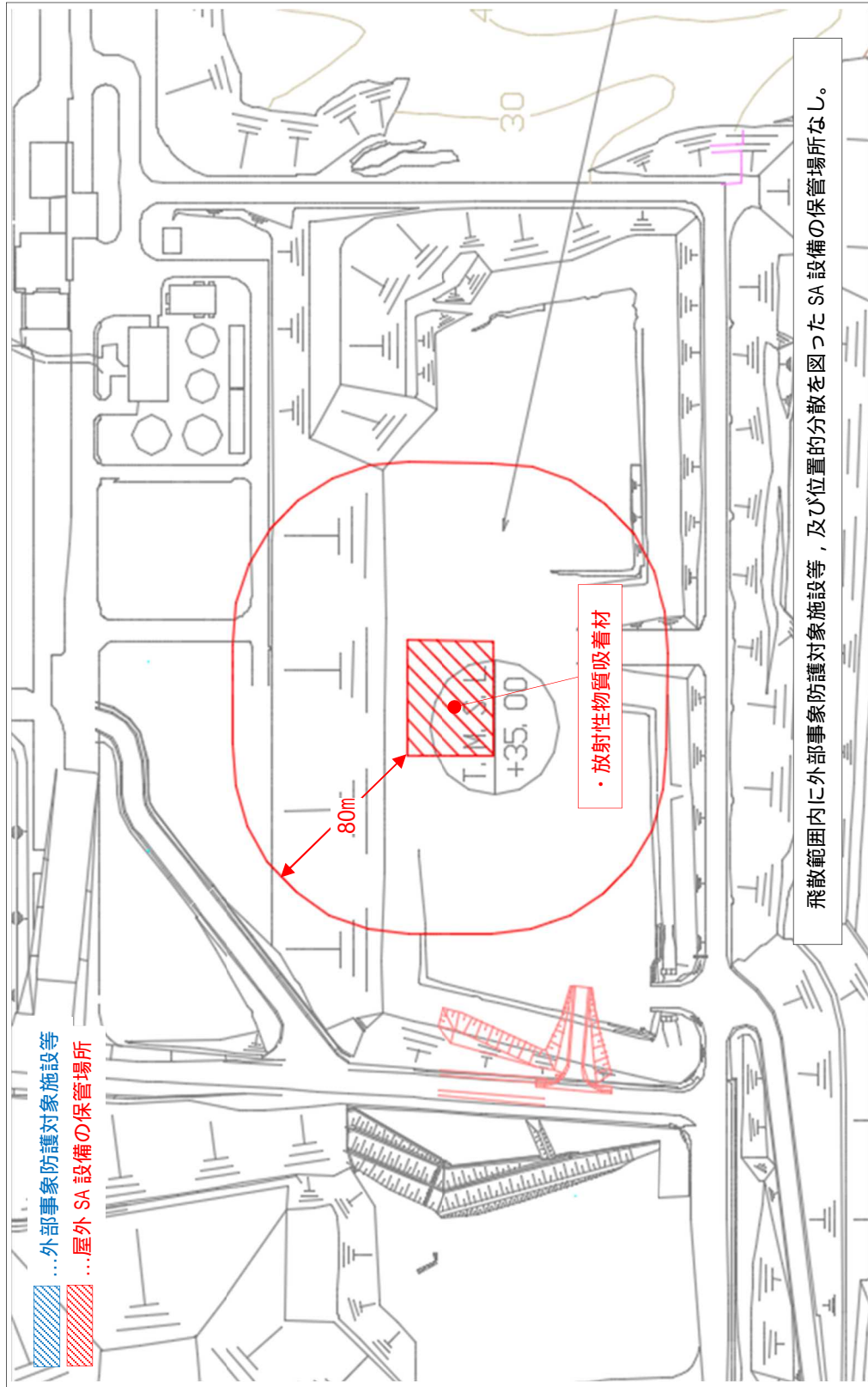


図7-6 屋外SA設備の保管場所及び飛散距離 (大湊側高台保管場所 5/6)

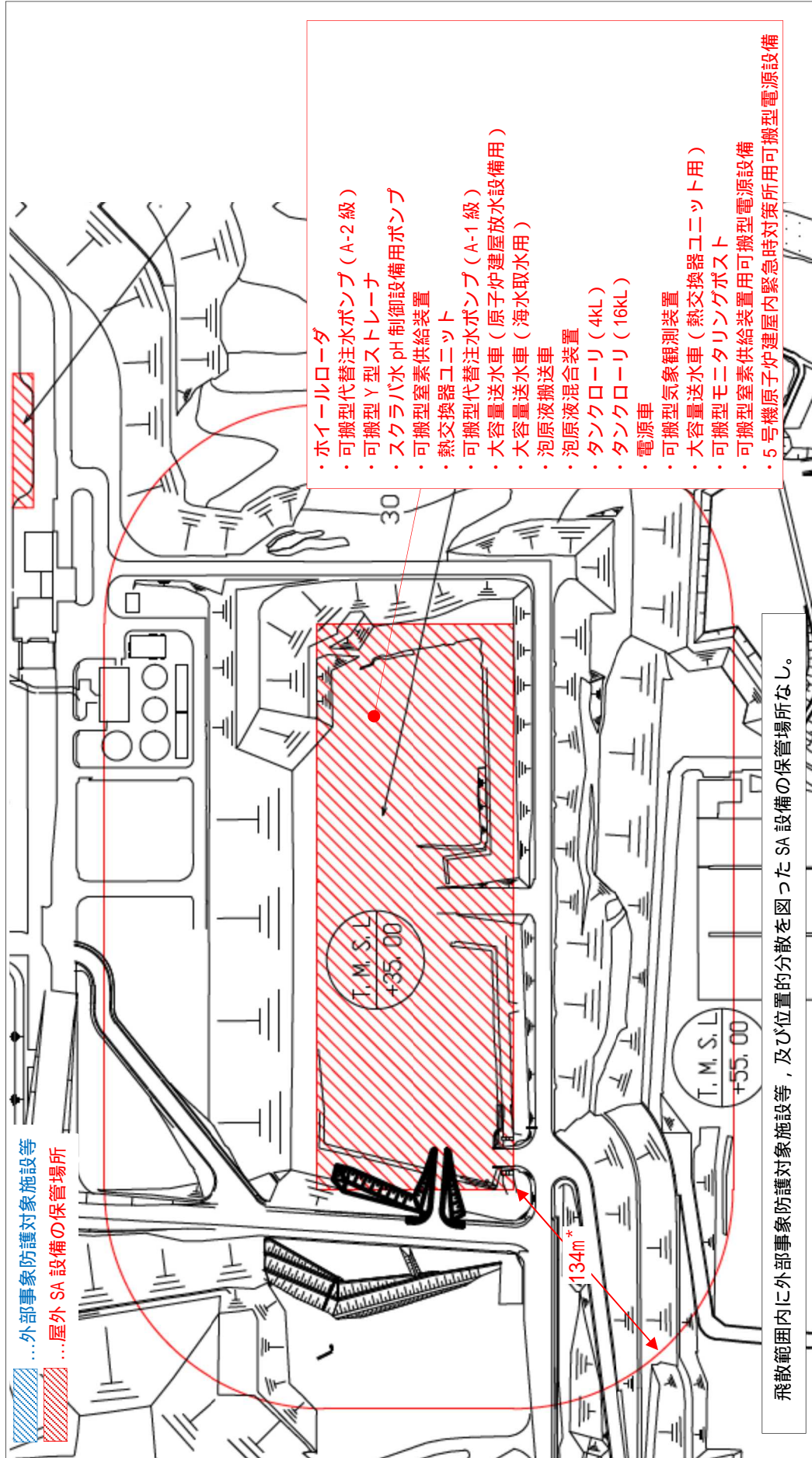
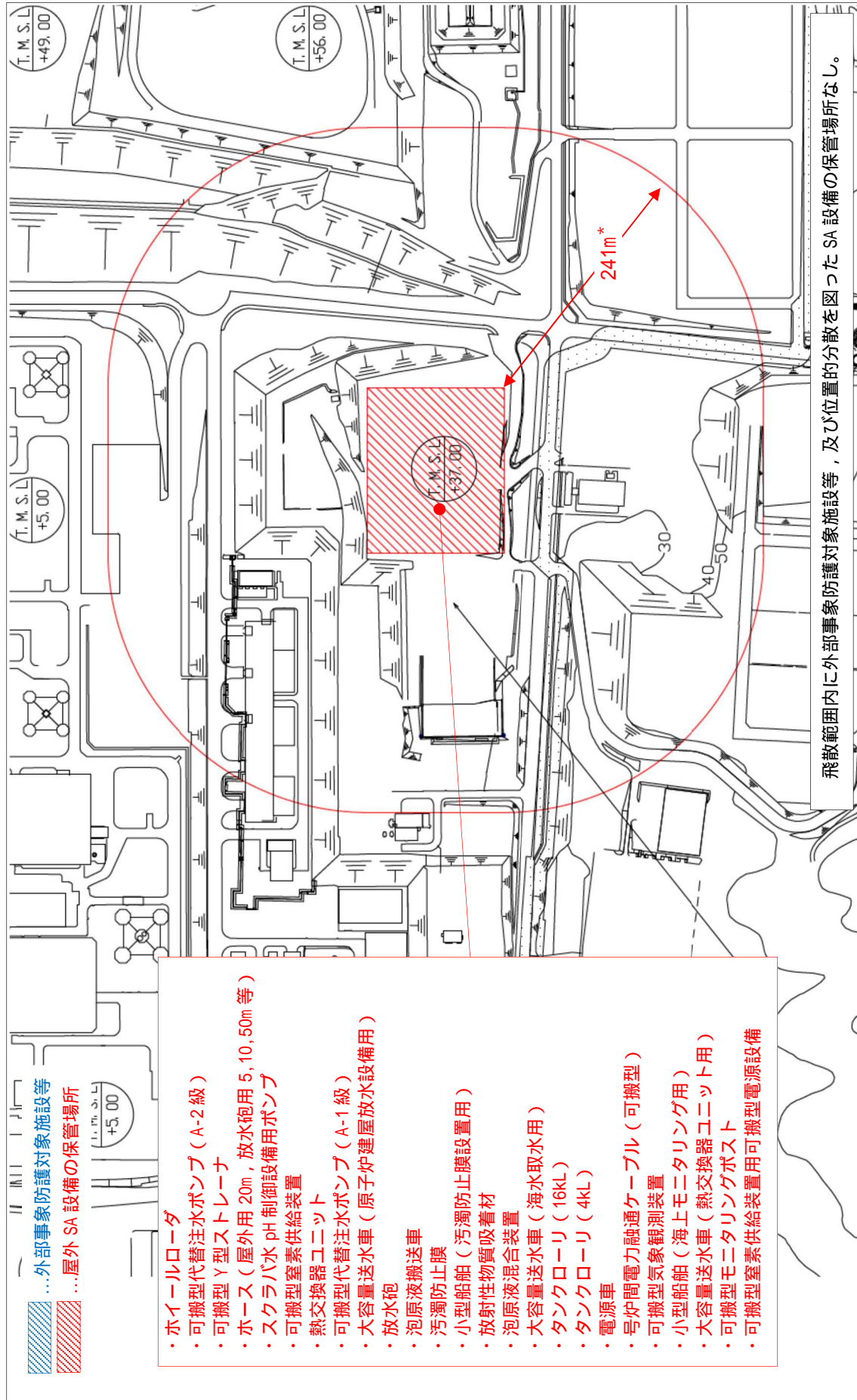


図7-7 屋外SA設備の保管場所及び飛散距離 (大湊側高台保管場所 6/6)

注記* : 保管場所内の設備のうち，最大の飛散距離を示す。



... 外部事象防護対象施設等
 ... 屋外 SA 設備の保管場所

- ・ホイルローダー
- ・可搬型代替注水ポンプ（A-2級）
- ・可搬型 Y 型ストレーナ
- ・ホース（屋外用 20m，放水砲用 5, 10, 50m 等）
- ・スクラバ水 pH 制御設備用ポンプ
- ・可搬型窒素供給装置
- ・熱交換器ユニット
- ・可搬型代替注水ポンプ（A-1級）
- ・大容量送水車（原子炉建屋放水設備用）
- ・放水砲
- ・泡原液搬送車
- ・汚濁防止膜
- ・小型船舶（汚濁防止膜設置用）
- ・放射性物質吸着材
- ・泡原液混合装置
- ・大容量送水車（海水取水用）
- ・タンクローリ（16kL）
- ・タンクローリ（4kL）
- ・電源車
- ・号炉間電力融通ケーブル（可搬型）
- ・可搬型気象観測装置
- ・小型船舶（海上モニタリング用）
- ・大容量送水車（熱交換器ユニット用）
- ・可搬型モニタリングポスト
- ・可搬型窒素供給装置用可搬型電源設備

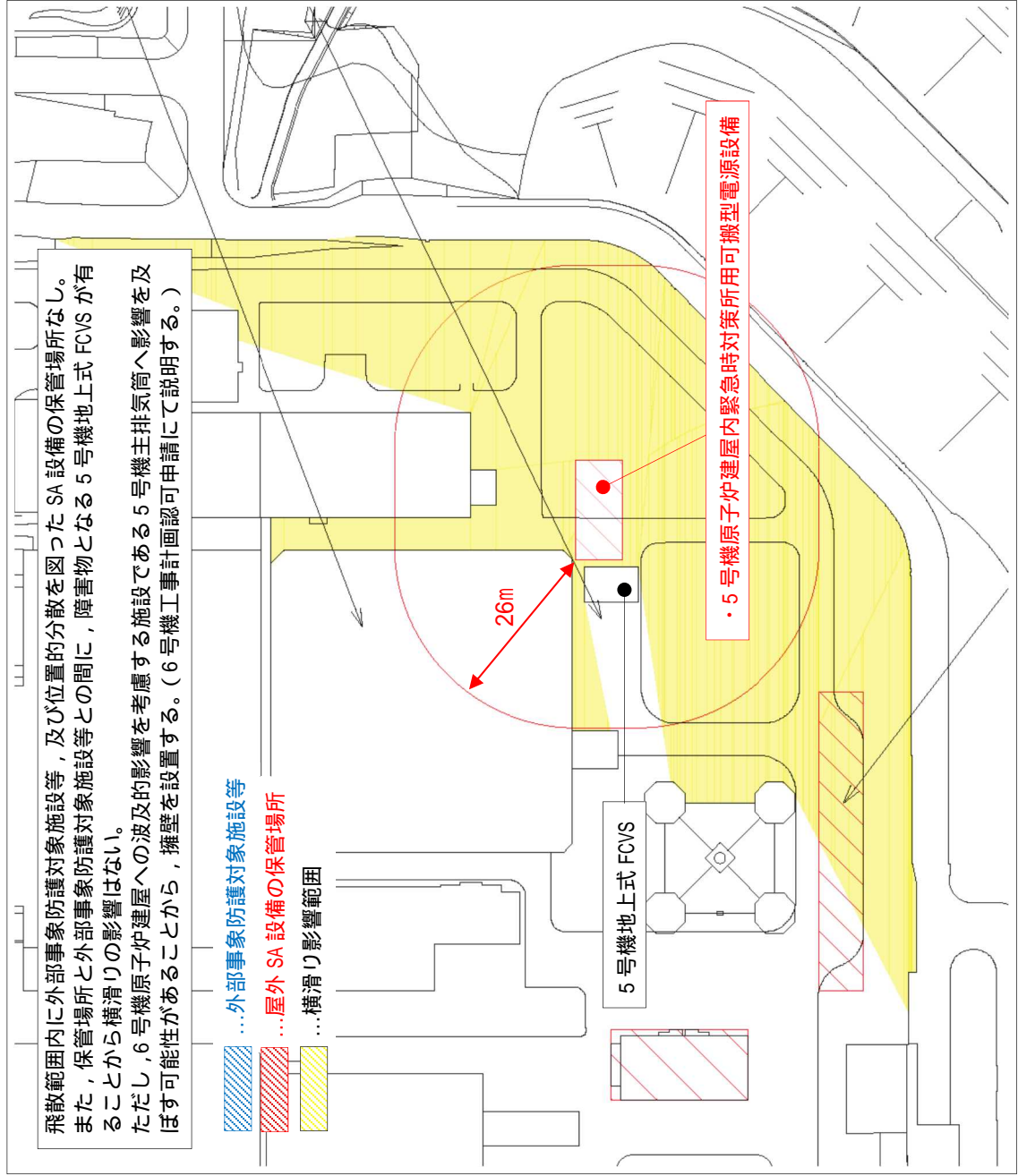


図7-9 屋外SA設備の保管場所及び飛散距離（5号機東側保管場所）

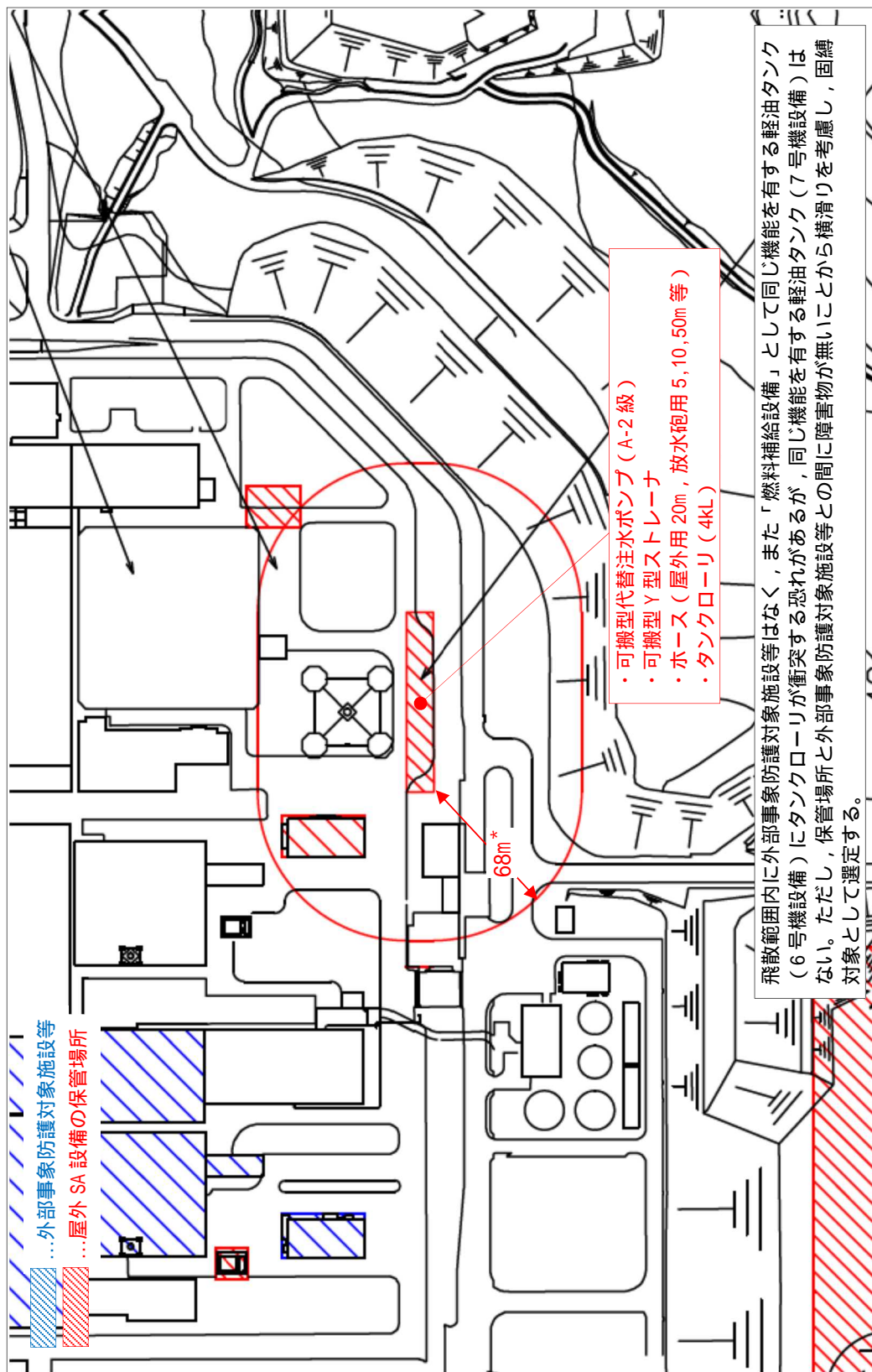


図7-10 屋外SA設備の保管場所及び飛散距離 (5号機東側第二保管場所)

注記 * : 保管場所内の設備のうち、最大の飛散距離を示す。

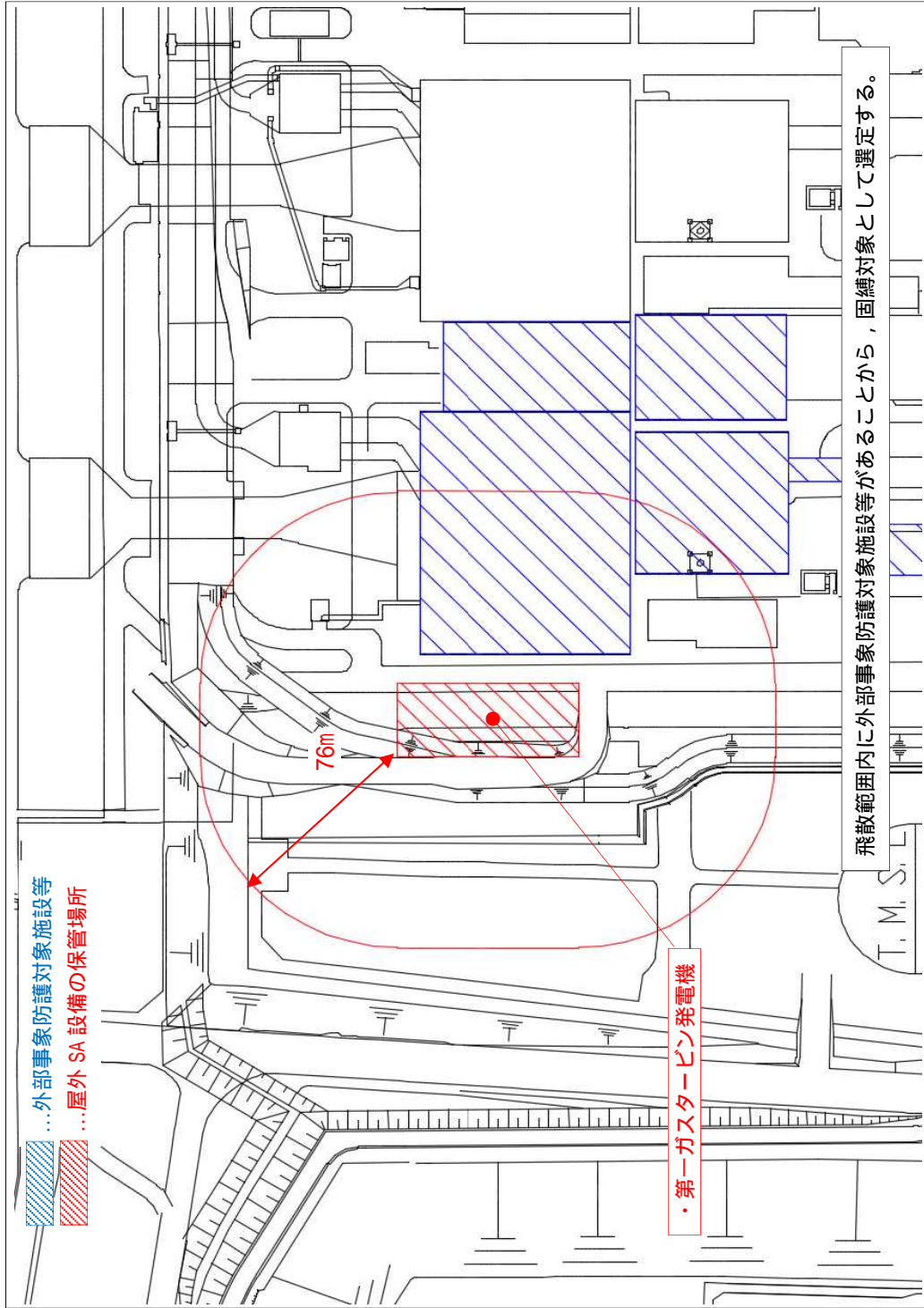


図7-11 屋外SA設備の保管場所及び飛散距離（7号機タービン建屋南側保管場所）

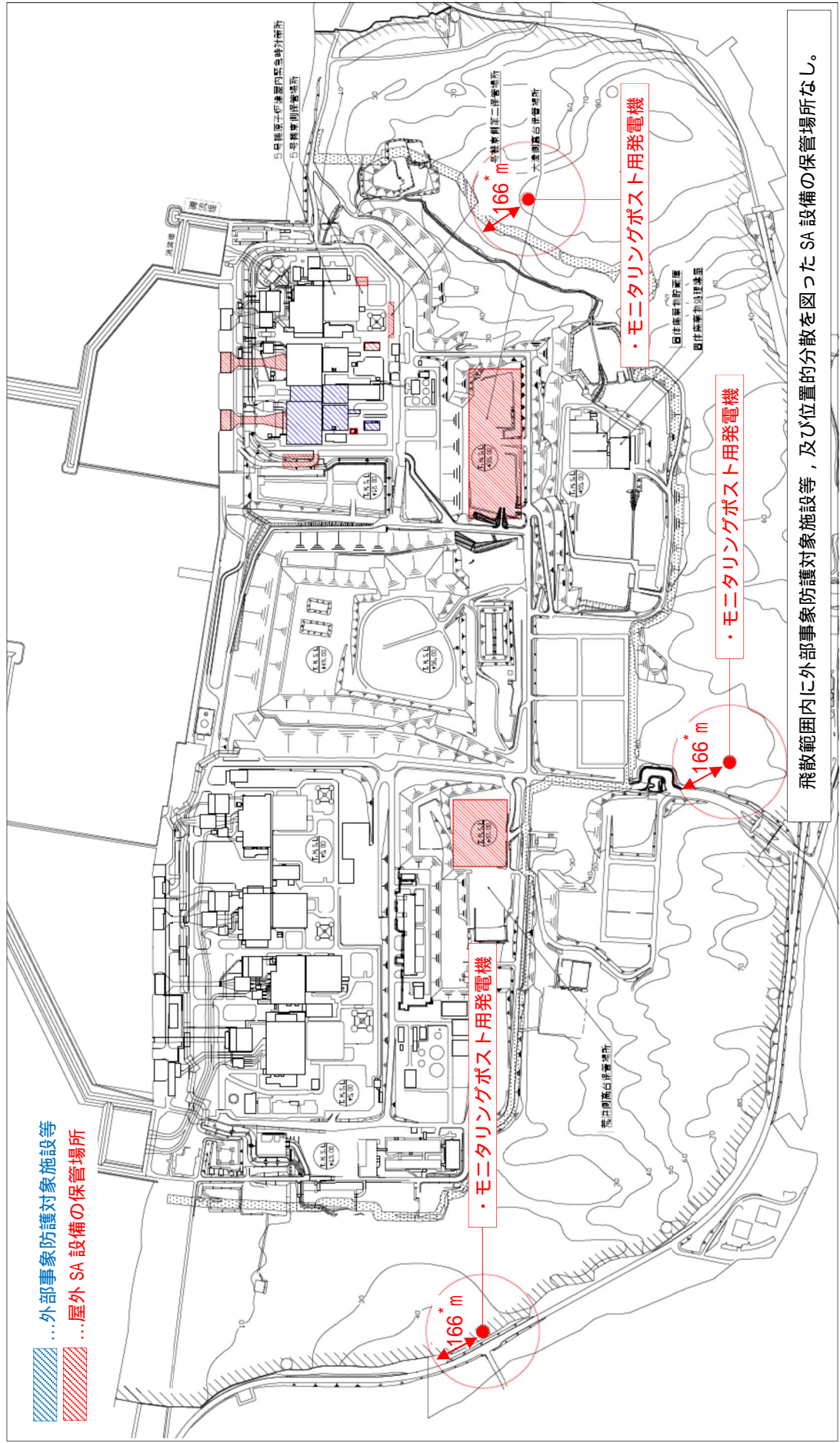


図7-12 屋外SA設備の保管場所及び飛散距離（モニタリングポスト用発電機）

注記*：設備のうち，最大の飛散距離を示す。

8. フジタモデルを適用した場合における竜巻感度解析の
K6/7 原子炉設置変更許可への影響確認について

8. フジタモデルを適用した場合における竜巻感度解析の K6/7 原子炉設置変更許可への影響確認について

8.1 はじめに

当社において考慮すべきフジタモデルを適用した場合における竜巻感度解析を検討するとともに、同解析結果より、フジタモデルの不確実性等を考慮した場合でも、K6/7 の竜巻影響評価全体としての保守性が確保され、K6/7 原子炉設置変更許可申請書の添付書類八で特定した評価対象施設の設計の前提条件（図 8 - 1）に影響を与えないことを以下の通り確認した。

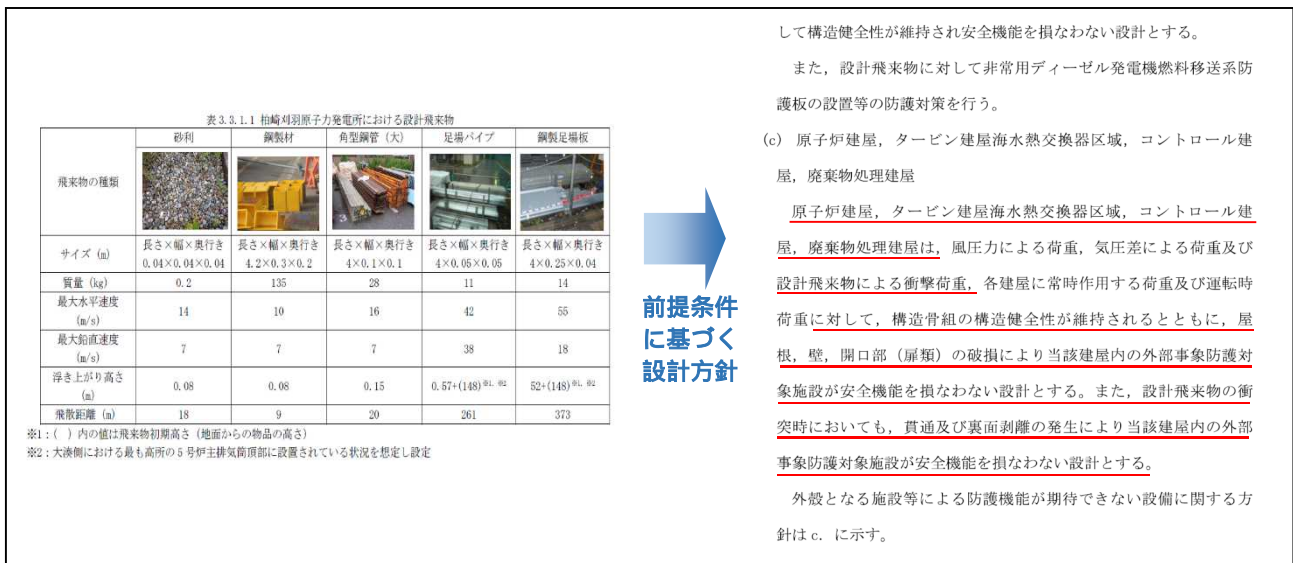


図 8 - 1 評価対象施設の設計の前提条件と設計方針（抜粋）

8.2 影響確認の方針

K6/7 では、過去に F3 竜巻が観測されていない日本海側ではあるが、設計竜巻の最大風速として、保守的に F3 の風速範囲上限値である 92m/s と設定している。

今回の感度解析においては、『原子力発電所における竜巻影響評価ガイド』を参照し、竜巻検討地域にて過去に発生した竜巻の最大風速 (V_{B1}) 及び竜巻検討地域を対象に算出したハザード曲線の年超過確率 10^{-5} における風速 (V_{B2}) のうち、大きい風速として設定した風速 69m/s をベースに不確実性評価を実施する。具体的には、インプットパラメータの不確実性を考慮しても、図 8-1 に示す風速 92m/s における飛散評価結果に包絡されることを確認する。

フジタモデルは、実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。不確かさの影響を確認するにあたり、このモデルの評価に関しては、IAEA の Safety Reports Series No.52^{(1)*1} が参考になると考えており、同レポートには、図 8-2 の通り、安全裕度の概念が示されている。この図に本感度解析を当てはめた場合には、図 8-3 のような関係性になると考えられることから、風速 69m/s をベースに不確実性評価をした結果が設計竜巻（風速 92m/s）における飛散評価結果を上回らないことを確認する方針とする。

注記 *1：IAEA の Safety Reports Series No.52 は、ベストエスティメートの安全解析に必要な

な要素として、不確実性の評価のための実用的なガイダンスを提供することを目的として作成された安全レポート。

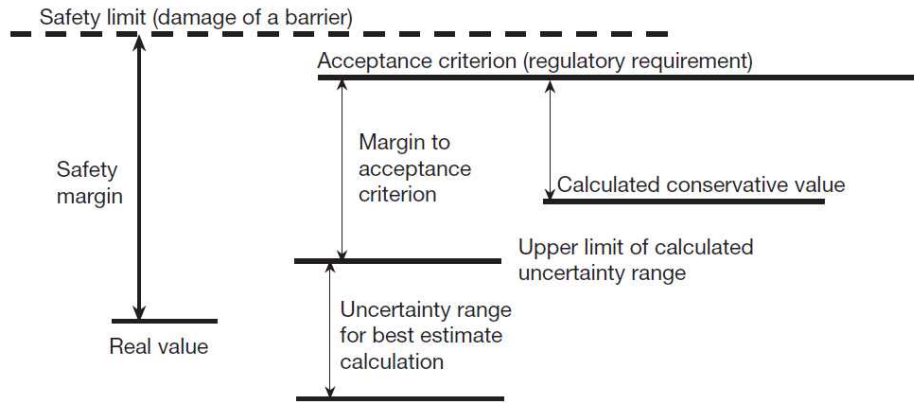


図 8-2 IAEA Safety Reports Series No.52 に示されている安全裕度の概念

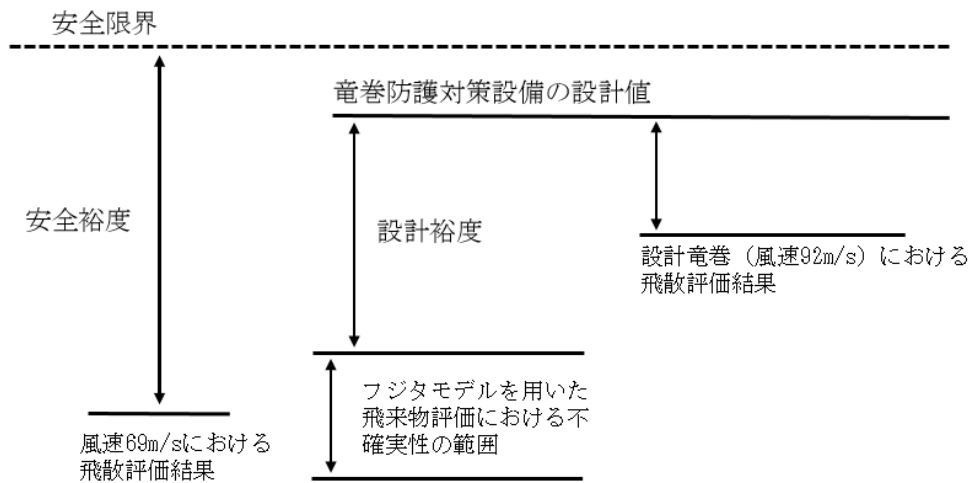


図 8-3 IAEA Safety Reports Series No.52 に示されている安全裕度の概念図に本感度解析を当てはめたイメージ図

8.3 竜巻感度解析の対象パラメータ

飛来物の飛散評価の条件は、(1)竜巻条件、(2)飛来物の浮上・飛来モデル条件、(3)飛来物条件に大別されるため、図8-4に示すフローで感度解析の対象パラメータを抽出する。

(1)の竜巻条件における風速等以外のフジタモデル固有のパラメータ(図8-4)は、Fujita Work Book⁽¹⁾等に基づき設定している。そのうち流入層高さ H_i は、他の文献で示されている値との間で差異が見られることから、それらの差異を踏まえ感度解析を実施する。

(2)の飛来物の浮上・飛来モデル条件における地上からの浮上・飛来モデル固有のパラメータ(図8-4)のうち、地面効果による揚力の消滅高さについては、物体高さの3倍とすれば様々な形状の飛来物に対しても十分保守的な設定であることを確認(資料3-5-別添2-20~22)していることから、感度解析は実施しない。物体配置の手法については、物体を多点数配置とすることは、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(資料3-5-別添2-26)としていることから、感度解析は実施しない。

(3)の飛来物条件における寸法等以外のその他飛散評価に必要なパラメータ(図8-4)のうち飛来物の初期高さは、飛来物の種類に応じ設置状況が異なることから、それらの設置状況を踏まえ感度解析を実施する。

なお、振り幅については、流入層高さ H_i は文献値、飛来物の初期高さは現場設置状況を踏まえ現実的な範囲で設定する。

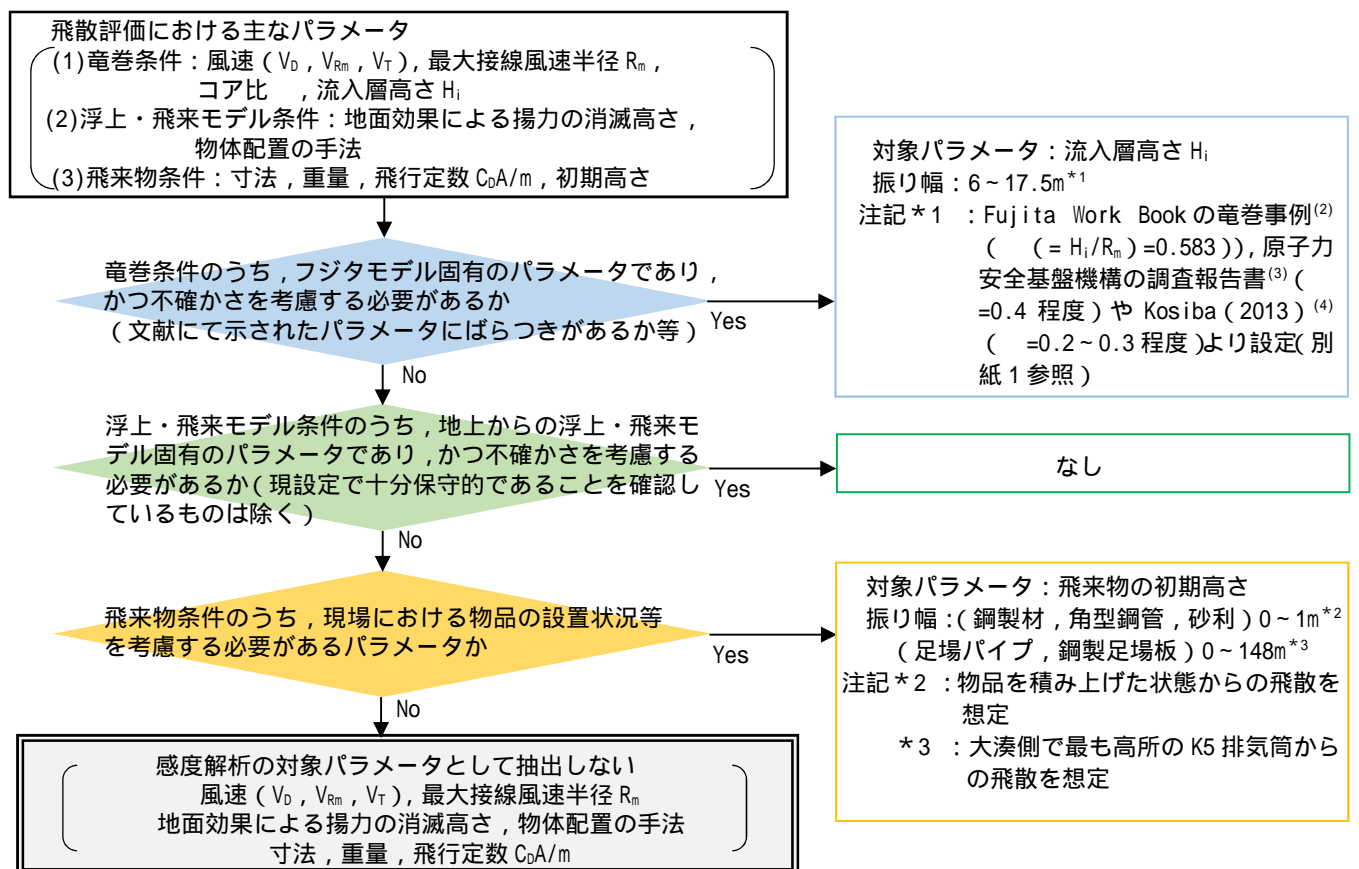


図8-4 竜巻感度解析の対象パラメータ抽出フロー

表 8 - 1 本感度解析で使用した条件

●…感度解析を行うパラメータの設定値

パラメータ	92m/s における 飛散評価の条件	69m/s における 飛散評価の条件	感度解析		
			ケース 1	ケース 2	ケース 3
竜巻風速 V_D (m/s)	92	69	69	69	69
竜巻半径 R_m (m)	30				
流入層高さ H_i (m)	15	15	6 ~ 17.5	15	6 ~ 17.5
初期高さ ^{*1} (m)	: 0 : 148	: 0 : 148	: 0 : 148	: 0 ~ 1 : 0 ~ 148	: 0 ~ 1 : 0 ~ 148
定数 k_0	1/6				
定数 k	0.03				
定数 A	0.75				
定数 B	0.0217				

注記 *1 : は鋼製材，角型鋼管（大），砂利の初期高さを示し， は足場パイプ，鋼製足場板の初期高さを示す。

ケース 1 は，流入層高さ H_i を振り幅（6 ~ 17.5m）で感度解析を実施し，ケース 2 は，初期高さを振り幅（鋼製材，角型鋼管（大），砂利の場合は 0 ~ 1m，足場パイプ，鋼製足場板の場合は 0 ~ 148m）で感度解析を実施し，ケース 3 は，流入層高さ H_i ，初期高さを組み合わせ，振り幅（ H_i : 6 ~ 17.5m，初期高さ : 鋼製材，角型鋼管（大），砂利の場合は 0 ~ 1m，足場パイプ，鋼製足場板の場合は 0 ~ 148m）で感度解析を実施する。

フジタモデルにおいては，竜巻の外側から竜巻の中心に向かう半径方向風速があり，この空気の流れ込みが外部コアでの上昇流となる。竜巻の水平風速及び上昇風速は流入層高さで極大値となり，流入層高さより上方，下方では風速が減少するモデルとなっている。竜巻の最大風速が同じ条件では，流入層高さを低く設定すると地表面付近の水平風速は大きくなる（図 8 - 5 参照）。一方，流入層高さが高い場合の方が，竜巻の中心に向かう空気の流れ込む量が大きい。そのため，流入層高さが低い場合に比べて，外部コア内の上昇風速が大きくなる。このような流入層高さの設定の影響を把握するため，流入層高さ依存性を本感度解析にて確認する。

次に，地表面から流入層高さまでの領域においては，物体の地表面からの高さが高くなるにつれて物体が受ける風速が増加していく風速分布であるため，初期高さを高くすることによ

り，物体に大きな水平風速及び上昇風速が加わることになる。一方，地表面より離れた高さでは揚力の影響が低減していくため，これらの相反する効果を見ることも含めて，初期高さ依存性を感度解析で確認する。

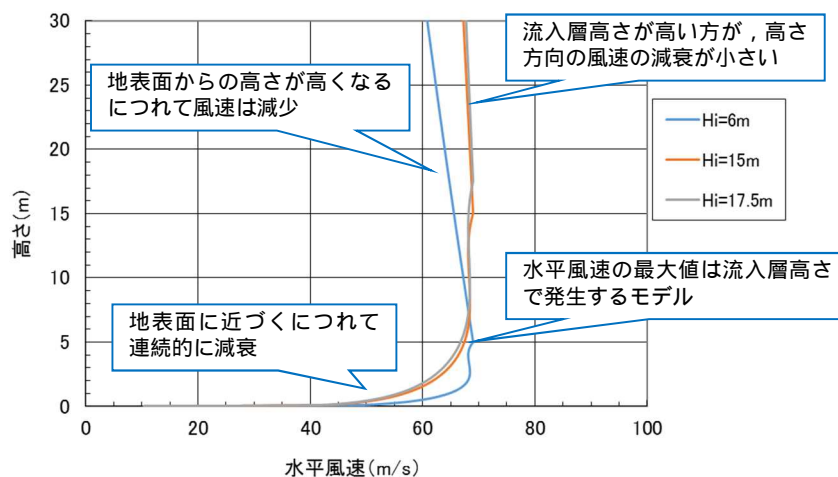


図 8 - 5 フジタモデルの風速場における水平風速の高さ依存性
(竜巻風速 69m/s の場合)

8.4 竜巻感度解析の結果（詳細は別紙(2)参照）

上記 8.3 より設定した対象パラメータ（流入層高さ H_i ，初期高さ）及び振り幅で飛散評価を実施した。表 8 - 2，3 に風速 69m/s を起点とした感度解析値（ケース 1，2）と設置変更許可申請書の添付書類八記載値の比較を示す。

表 8 - 2，3 より，流入層高さ H_i ，初期高さのいずれも，飛散評価結果に与える感度は小さく，飛来物の最大速度（水平・鉛直），最大飛散高さ，最大飛距離は，風速 69m/s を起点とした感度解析値が設置変更許可申請書の添付書類八記載値と同等程度または同等以下であることを確認した。

なお，鋼製材，角型鋼管（大），砂利の最大鉛直速度は，初期高さを付与することで落下成分が増加するため，69m/s を起点とした感度解析値（8m/s）が設置変更許可申請書の添付書類八記載値（7m/s）を僅かに上回る。しかしながら，最大鉛直速度 8m/s は，その影響（鋼製材の場合，運動エネルギー 4kJ，鋼板貫通厚さ 3mm，コンクリート貫通厚さ 5cm）は設計飛来物のうち最大の運動エネルギー（鉛直）となる足場パイプの運動エネルギー（8kJ）や貫通力（鋼板貫通厚さ 15mm，コンクリート貫通厚さ 10cm）に包絡されることを確認できたため，評価対象施設の設計の前提条件に影響を与えない。

表 8 - 2 流入層高さ H_i を変化させた場合の 69m/s を起点とした感度解析値（ケース 1）と設置変更許可申請書の添付書類に記載値の比較

■…最大値

（最大水平速度）

設計飛来物	69m/s 飛散評価結果値	69m/sを起点とした感度解析値（ケース1） （流入層高さ H_i を変化）			設置変更許可申請書 の添付書類八 記載値
	最大水平速度(m/s)	H_i (m) *1 【水平速度が 最大となる】	初期高さ (m) 【固定】	最大水平速度(m/s)	最大水平速度(m/s)
鋼製材	0	6~17.5	0	0	10
角型鋼管（大）	4	6	0	8	16
砂利	4	6	0	6	14
足場パイプ	33	17.5	148	33	42
鋼製足場板	41	6	148	44	55

（最大鉛直速度）

設計飛来物	69m/s 飛散評価結果値	69m/sを起点とした感度解析値（ケース1） （流入層高さ H_i を変化）			設置変更許可申請書 の添付書類八 記載値
	最大鉛直速度(m/s)	H_i (m) *1 【鉛直速度が 最大となる】	初期高さ (m) 【固定】	最大鉛直速度(m/s)	最大鉛直速度(m/s)
鋼製材	0	6~17.5	0	0	7
角型鋼管（大）	7	6	0	7	7
砂利	7	6	0	7	7
足場パイプ	38	6	148	38	38
鋼製足場板	18	6	148	18	18

（最大飛距離）

設計飛来物	69m/s 飛散評価結果値	69m/sを起点とした感度解析値（ケース1） （流入層高さ H_i を変化）			設置変更許可申請書 の添付書類八 記載値
	最大飛距離(m)	H_i (m) *1 【飛距離が 最大となる】	初期高さ (m) 【固定】	最大飛距離(m)	最大飛距離(m)
鋼製材	0	6~17.5	0	0	9
角型鋼管（大）	3	6	0	7	20
砂利	3	6	0	5	18
足場パイプ	184	17.5	148	194	261
鋼製足場板	271	17.5	148	282	373

（最大飛散高さ）

設計飛来物	69m/s 飛散評価結果値	69m/sを起点とした感度解析値（ケース1） （流入層高さ H_i を変化）			設置変更許可申請書 の添付書類八 記載値
	最大飛散高さ(m) *2	H_i (m) *1 【飛散高さが 最大となる】	初期高さ (m) 【固定】	最大飛散高さ(m) *2	最大飛散高さ(m) *2
鋼製材	0	6~17.5	0	0	0.08 *3
角型鋼管（大）	0.01	6	0	0.06	0.15 *3
砂利	0.01	6	0	0.04	0.08 *3
足場パイプ	0+(148)	6~17.5	148	0+(148)	0.57+(148) *4
鋼製足場板	30+(148)	17.5	148	45+(148)	52+(148) *4

注記 *1 : 6~17.5mの振り幅で確認（2.5m刻み（6mは除く））

*2 : () 内の値は飛来物初期高さ（地面からの物品の高さ）

*3 : 評価対象施設への高さ10m迄の衝突を考慮し設計しているため、69m/sを起点とした感度解析値を包絡する

*4 : 評価対象施設へのどの高さへの衝突も考慮し設計しているため、69m/sを起点とした感度解析値を包絡する

表 8 - 3 初期高さを变化させた場合の 69m/s を起点とした感度解析値（ケース 2）と
設置変更許可申請書の添付書類八記載値の比較

■・・・最大値

（最大水平速度）

設計飛来物	69m/s 飛散評価結果値	69m/sを起点とした感度解析値（ケース2） （初期高さを变化）			設置変更許可申請書 の添付書類八 記載値
	最大水平速度(m/s)	H _i (m) 【固定】	初期高さ(m) ^{*1} 【水平速度が 最大となる】	最大水平速度(m/s)	最大水平速度(m/s)
鋼製材	0	15	1	5	10
角型鋼管（大）	4	15	1	8	16
砂利	4	15	1	11	14
足場パイプ	33	15	130.2, 130.5	33	42
鋼製足場板	41	15	7.2	52	55

（最大鉛直速度）

設計飛来物	69m/s 飛散評価結果値	69m/sを起点とした感度解析値（ケース2） （初期高さを变化）			設置変更許可申請書 の添付書類八 記載値
	最大鉛直速度(m/s)	H _i (m) 【固定】	初期高さ(m) ^{*1} 【鉛直速度が 最大となる】	最大鉛直速度(m/s)	最大鉛直速度(m/s)
鋼製材	0	15	1	8	7
角型鋼管（大）	7	15	1	8	7
砂利	7	15	1	8	7
足場パイプ	38	15	148	38	38
鋼製足場板	18	15	147.8～148	18	18

（最大飛距離）

設計飛来物	69m/s 飛散評価結果値	69m/sを起点とした感度解析値（ケース2） （初期高さを变化）			設置変更許可申請書 の添付書類八 記載値
	最大飛距離(m)	H _i (m) 【固定】	初期高さ(m) ^{*1} 【飛距離が 最大となる】	最大飛距離(m)	最大飛距離(m)
鋼製材	0	15	1	3	9
角型鋼管（大）	3	15	1	5	20
砂利	3	15	1	7	18
足場パイプ	184	15	148	184	261
鋼製足場板	271	15	148	271	373

（最大飛散高さ）

設計飛来物	69m/s 飛散評価結果値	69m/sを起点とした感度解析値（ケース2） （初期高さを变化）			設置変更許可申請書 の添付書類八 記載値
	最大飛散高さ(m) ^{*2}	H _i (m) 【固定】	初期高さ(m) ^{*1} 【飛散高さが 最大となる】	最大飛散高さ(m) ^{*2}	最大飛散高さ(m) ^{*2}
鋼製材	0	15	1	0+(1)	0.08 ^{*3}
角型鋼管（大）	0.01	15	1	0+(1)	0.15 ^{*3}
砂利	0.01	15	1	0+(1)	0.08 ^{*3}
足場パイプ	0+(148)	15	148	0+(148)	0.57+(148) ^{*4}
鋼製足場板	30+(148)	15	148	30+(148)	52+(148) ^{*4}

注記 *1：鋼製材，角形鋼管（大），砂利：0～1m，足場パイプ，鋼製足場板：0～148mの振り幅で確認（0.1m刻み）
 *2：（ ）内の値は飛来物初期高さ（地面からの物品の高さ）
 *3：評価対象施設への高さ10m迄の衝突を考慮し設計しているため，69m/sを起点とした感度解析値を包絡する
 *4：評価対象施設へのどの高さへの衝突も考慮し設計しているため，69m/sを起点とした感度解析値を包絡する

次に、流入層高さ H_i 、初期高さを組み合わせて変化させた場合の風速 69m/s を起点とした感度解析値（ケース 3）と設置変更許可申請書の添付書類八記載値の比較を表 8 - 4 に示す。

表 8 - 4 より、流入層高さ H_i 、初期高さを組み合わせて変化させた場合においても、飛散評価結果に与える感度は小さく、飛来物の最大水平速度、最大鉛直速度、最大飛距離、最大飛散高さは、風速 69m/s を起点とした感度解析値が設置変更許可申請書の添付書類八記載値と同等程度または同等以下であることを確認した。

表 8 - 4 流入層高さ H_i 、初期高さを組み合わせて変化させた場合の 69m/s を起点とした感度解析値（ケース 3）と設置変更許可申請書の添付書類八記載値の比較

■・・・最大値

（最大水平速度）					
設計飛来物	69m/s 飛散評価結果値	69m/sを起点とした感度解析値（ケース3） （流入層高さ H_i 及び初期高さを変化）			設置変更許可申請書の添付書類八記載値
	最大水平速度(m/s)	H_i (m) *1 【水平速度が最大となる】	初期高さ(m) *2 【水平速度が最大となる】	最大水平速度(m/s)	最大水平速度(m/s)
鋼製材	0	6	1	6	10
角型鋼管（大）	4	6	1	10	16
砂利	4	6	1	13	14
足場パイプ	33	17.5	33.7, 33.8, 34	33	42
鋼製足場板	41	17.5	10.3	52	55

（最大鉛直速度）					
設計飛来物	69m/s 飛散評価結果値	69m/sを起点とした感度解析値（ケース3） （流入層高さ H_i 及び初期高さを変化）			設置変更許可申請書の添付書類八記載値
	最大鉛直速度(m/s)	H_i (m) *1 【鉛直速度が最大となる】	初期高さ(m) *2 【鉛直速度が最大となる】	最大鉛直速度(m/s)	最大鉛直速度(m/s)
鋼製材	0	6~15	1	8	7
角型鋼管（大）	7	6	1	8	7
砂利	7	6,7,5	1	8	7
足場パイプ	38	6	148	38	38
鋼製足場板	18	6	147.4~148	18	18

（最大飛距離）					
設計飛来物	69m/s 飛散評価結果値	69m/sを起点とした感度解析値（ケース3） （流入層高さ H_i 及び初期高さを変化）			設置変更許可申請書の添付書類八記載値
	最大飛距離(m)	H_i (m) *1 【飛距離が最大となる】	初期高さ(m) *2 【飛距離が最大となる】	最大飛距離(m)	最大飛距離(m)
鋼製材	0	6	1	4	9
角型鋼管（大）	3	6	1	7	20
砂利	3	6	1	9	18
足場パイプ	184	17.5	148	194	261
鋼製足場板	271	17.5	148	282	373

（最大飛散高さ）					
設計飛来物	69m/s 飛散評価結果値	69m/sを起点とした感度解析値（ケース3） （流入層高さ H_i 及び初期高さを変化）			設置変更許可申請書の添付書類八記載値
	最大飛散高さ(m) *3	H_i (m) *1 【飛散高さが最大となる】	初期高さ(m) *2 【飛散高さが最大となる】	最大飛散高さ(m) *3	最大飛散高さ(m) *3
鋼製材	0	6~17.5	1	0+(1)	0.08 *4
角型鋼管（大）	0.01	6~17.5	1	0+(1)	0.15 *4
砂利	0.01	6~17.5	1	0+(1)	0.08 *4
足場パイプ	0+(148)	6~17.5	148	0+(148)	0.57+(148) *5
鋼製足場板	30+(148)	17.5	148	45+(148)	52+(148) *5

注記 *1 : 6~17.5mの振り幅で確認（2.5m刻み（6mは除く））
 *2 : 鋼製材、角形鋼管（大）、砂利：0~1m、足場パイプ、鋼製足場板：0~148mの振り幅で確認（0.1m刻み）
 *3 : () 内の値は飛来物初期高さ（地面からの物品の高さ）
 *4 : 評価対象施設への高さ10m迄の衝突を考慮し設計しているため、69m/sを起点とした感度解析値を包絡する
 *5 : 評価対象施設へのどの高さへの衝突も考慮し設計しているため、69m/sを起点とした感度解析値を包絡する

8.5 まとめ

上記 8.4 より、フジタモデルの不確実性等を考慮した場合でも、風速 69m/s を起点とした感度解析値が設置変更許可申請書の添付書類八記載値と同等以下であることから、図 8-1 の評価対象施設の設計の前提条件に影響を与えないことを確認した。

8.6 参考文献

- (1) IAEA (2008): Safety Reports Series No.52, Best Estimate Safety Analysis For Nuclear Power Plants: Uncertainty Evaluation.
- (2) 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.
- (3) 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.
- (4) Kosiba, K. A. and Wurman, J. (2013) The Three-Dimensional Structure and Evolution of a Tornado Boundary Layer. Wea. Forecasting, 28, 1552 1561.

8.7 別紙

1. 流入層高さの感度解析範囲の考え方
2. 竜巻感度解析結果
3. 地表面付近の風速の不確かさに関する考察
4. 感度解析に用いた風速分布について

以上

流入層高さの感度解析範囲の考え方

1. はじめに

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

以下に流入層高さの感度解析範囲の考え方について示す。

2. 流入層高さの感度解析範囲の考え方

2.1 Fujita Workbook⁽¹⁾による竜巻事例に対する分析による流入層高さの推測

Fujita Workbook⁽¹⁾では竜巻事例を可視化して分析しており， R_m が約 120m と大きな竜巻に対して， H_i は約 70m と観測していることから， H_i/R_m は 0.583 (70/120 = 0.583) であると記載されている。文献⁽²⁾では流入層高さは R_m に比例するとされているが， R_m が 30m と比較的小さな竜巻に $H_i/R_m = 0.583$ を適用した場合には， H_i は 17.5m となる。

2.2 解析による流入層高さの推測

原子力安全基盤機構の調査報告書⁽³⁾による解析においては， R_m が 30m における H_i/R_m は 0.4 程度であり， H_i は 12m 程度となっている。

2.3 Kosiba⁽⁴⁾らによる竜巻観測・研究成果

Kosiba⁽⁴⁾らの観測結果においては，外部コア半径 (R_m) が約 50m の竜巻に対して，竜巻中心方向への流入風は地面から 10～14m 以下で発生したと観測していることから，外部コア半径と流入層高さの比 (H_i/R_m) は 0.2～0.3 程度と推測される。この場合， R_m が 30m の場合には流入層高さ (H_i) は 6～9m 程度と算定される。

2.4 工学的モデルによる流入層高さの設定

Fujita Workbook⁽¹⁾における工学的モデルとして， H_i を R_m の関数として以下のとおり設定しており， $R_m=30m$ であれば， H_i/R_m は約 0.5 であることから， $H_i=15m$ と算出される。

$$H_i = 0.5 R_m \quad (1)$$

：流入層高さ と 外部コア半径 の比

$$= 0.55 (1 - \exp(-0.005 R_m)) \quad (2)$$

：内部コア半径 と 外部コア半径 の比

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

3. 流入層高さの感度解析範囲の設定について

上記の研究等を踏まえると， R_m が 30m の竜巻に対する流入層高さは 6～17.5m とされていることから，6～17.5m を流入層高さの感度解析範囲とする。

4. 参考文献

- (1) 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.
- (2) Howard B. Bluestein, Severe Convective Storms and Tornadoes Observations and Dynamics--, Springer, 2013
- (3) 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.
- (4) Kosiba, K. A. and Wurman, J. (2013) The Three-Dimensional Structure and Evolution of a Tornado Boundary Layer. Wea. Forecasting, 28, 1552 1561.

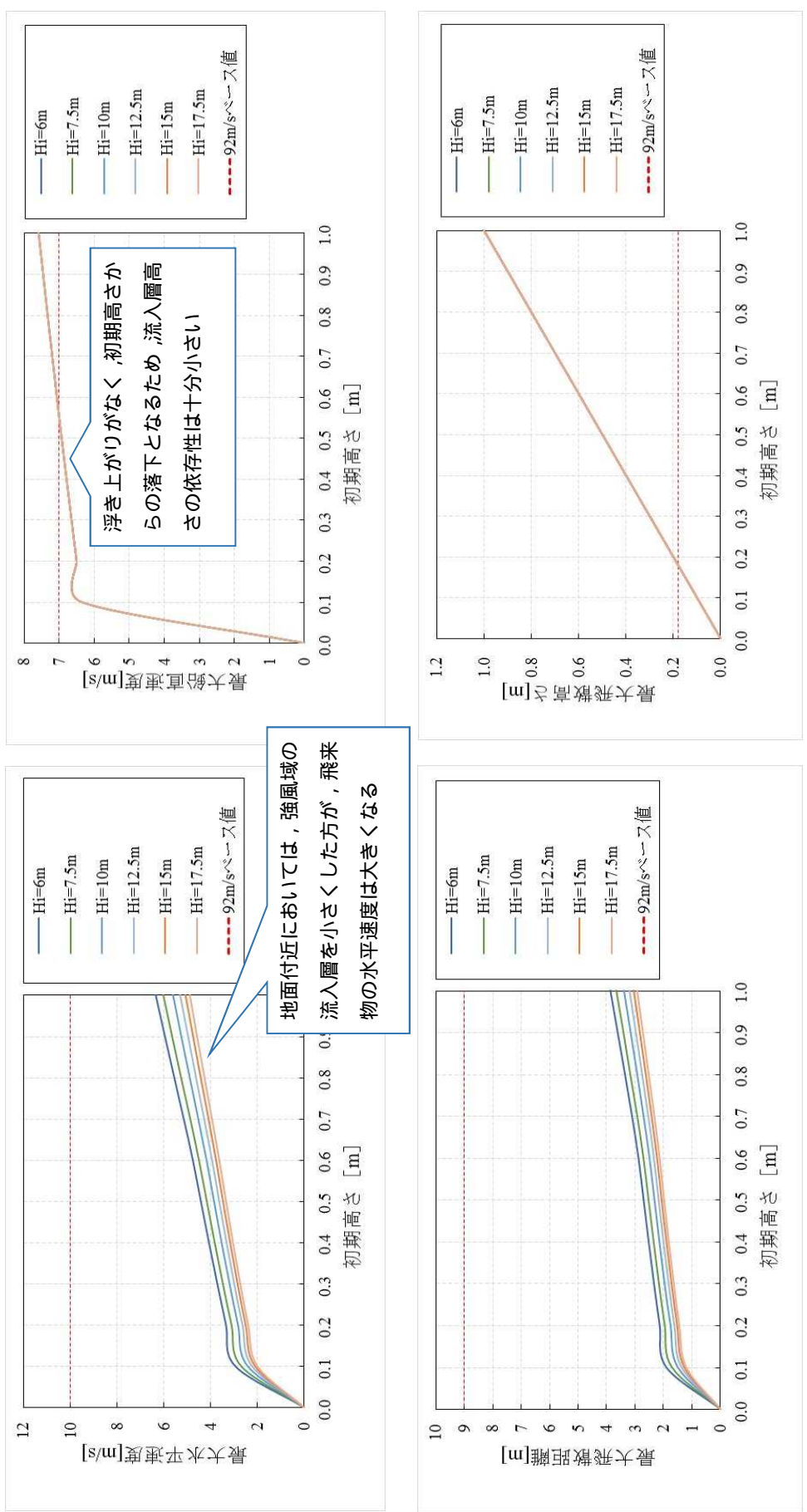
竜巻感度解析結果

1. 条件

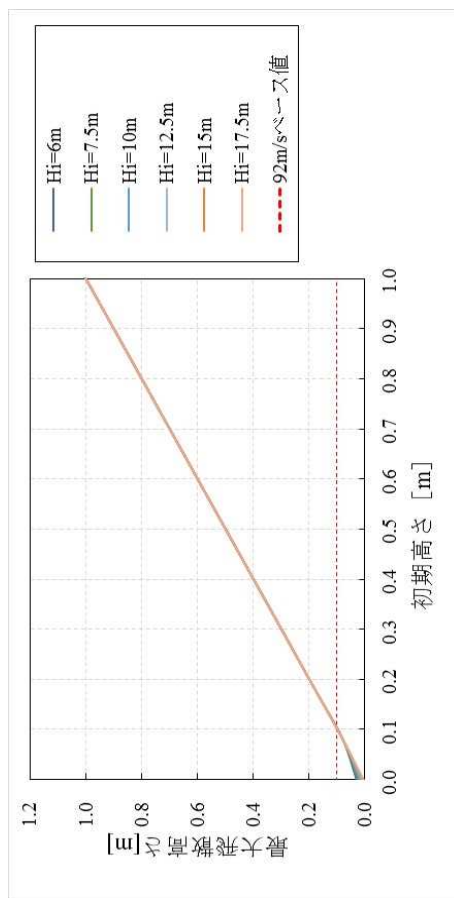
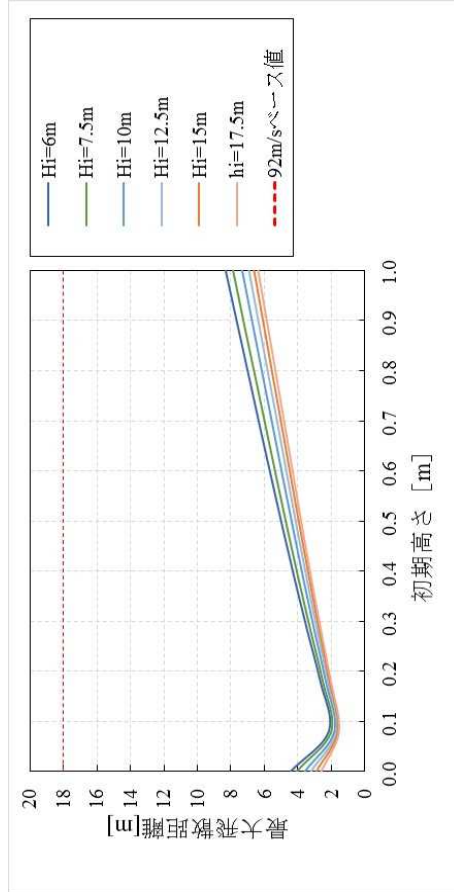
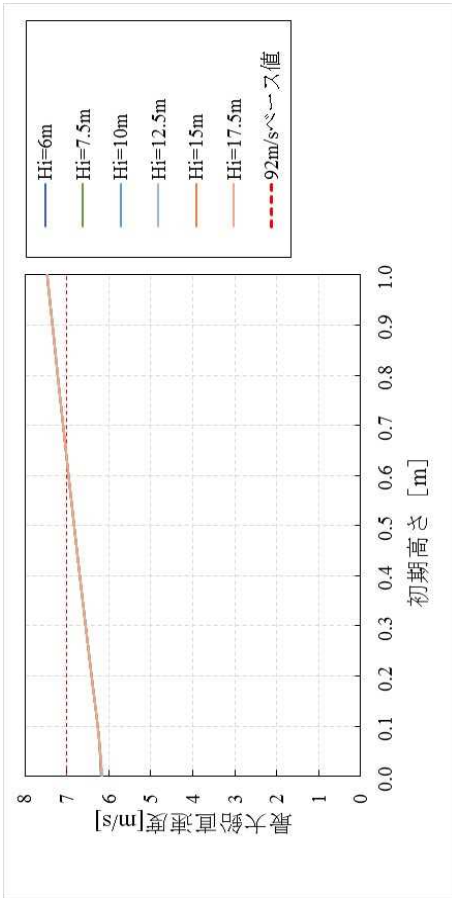
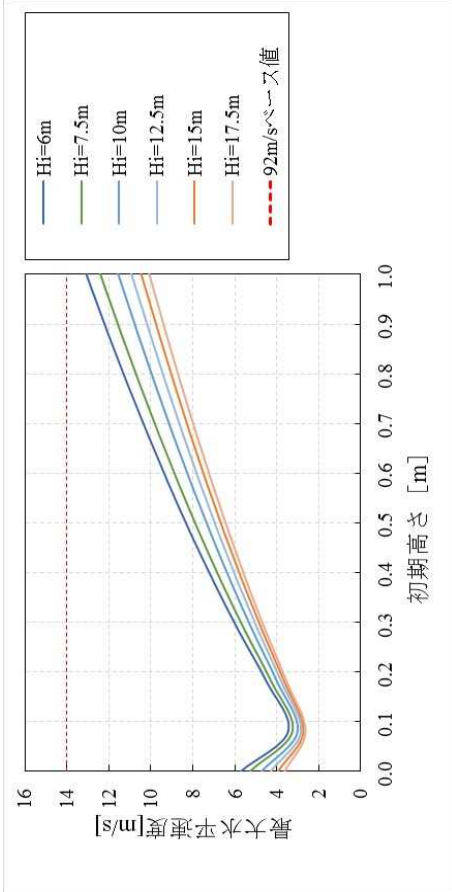
感度解析の風速	設計飛来物	飛来物評価手法	流入層高さ (H _i)	飛来物初期高さ
69m/s	鋼製材 (4.2m × 0.3m × 0.2m, 135kg) 角型鋼管 (4m × 0.1m × 0.1m, 28kg) 砂利 (0.04m × 0.04m × 0.04m, 0.2kg) 足場パイプ (4m × 0.05m × 0.05m, 11kg) 鋼製足場板 (4m × 0.25m × 0.04m, 14kg)	フジタモデルの風速場を用いた飛来物評価手法	6 ~ 17.5m (2.5m 刻み (6m は除く))	鋼製材, 角型鋼管, 砂利: 0 ~ 1m 足場パイプ, 鋼製足場板: 0 ~ 148m (0.1m 刻み)

2. 感度解析結果

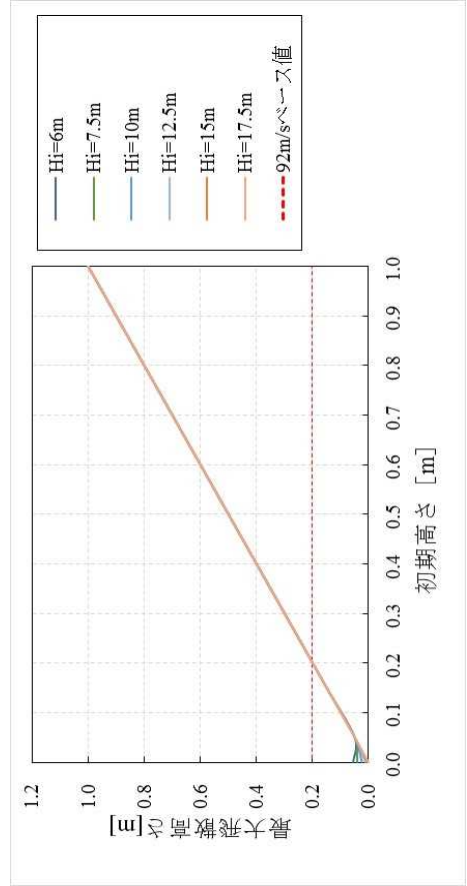
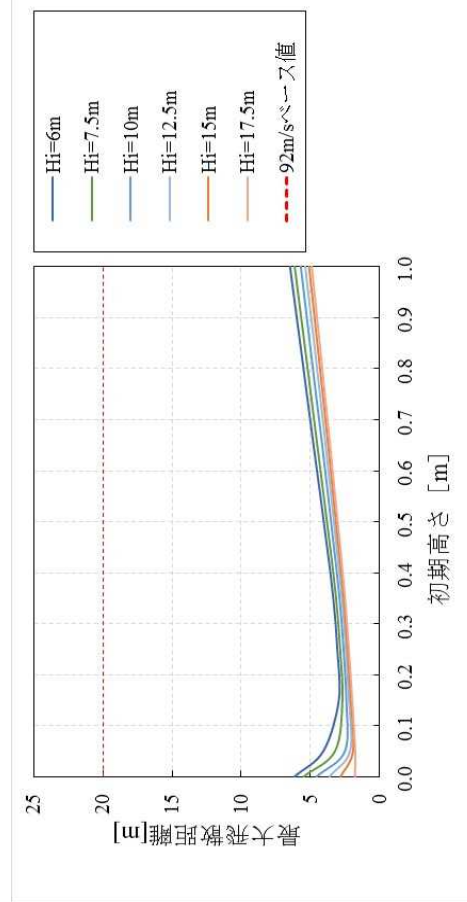
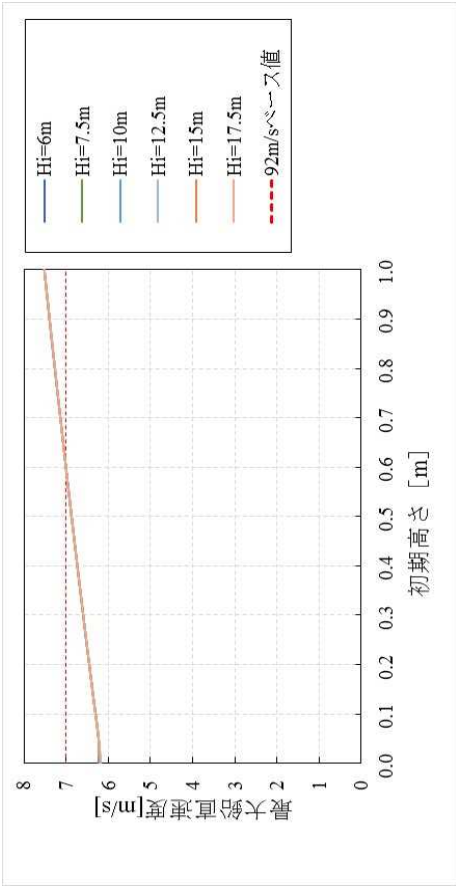
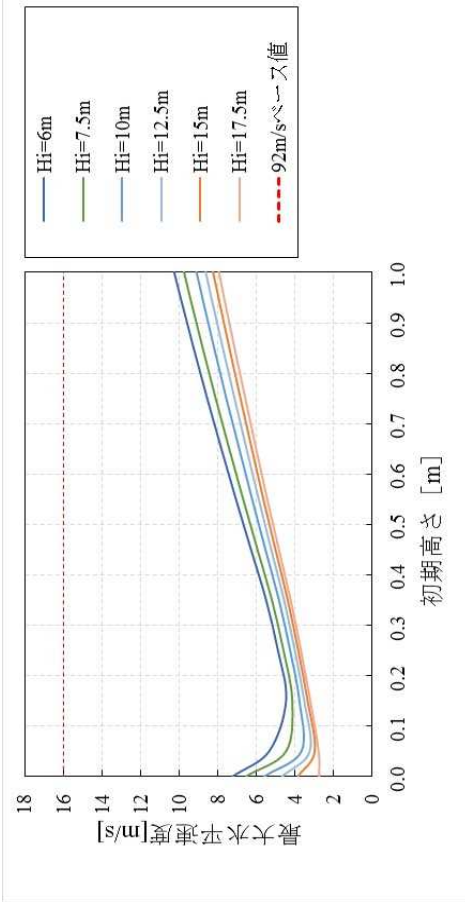
鋼製材



砂利

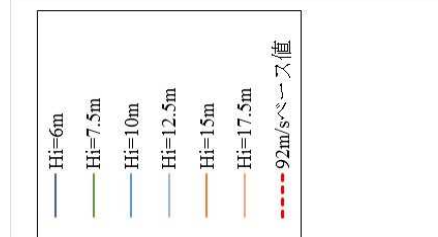
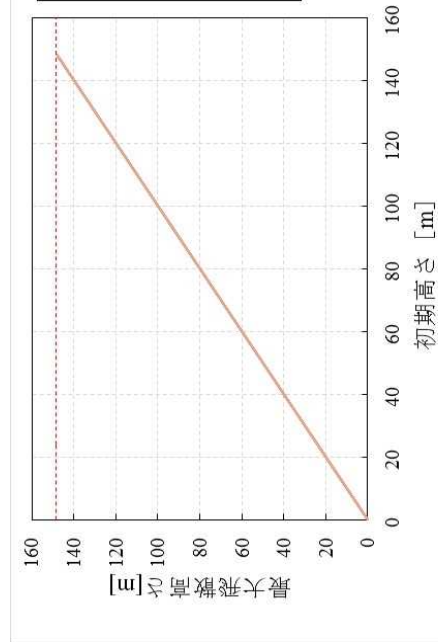
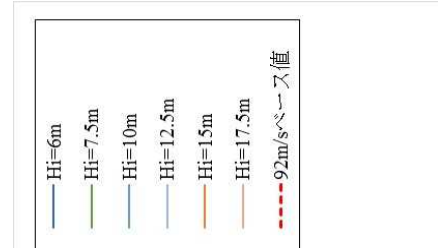
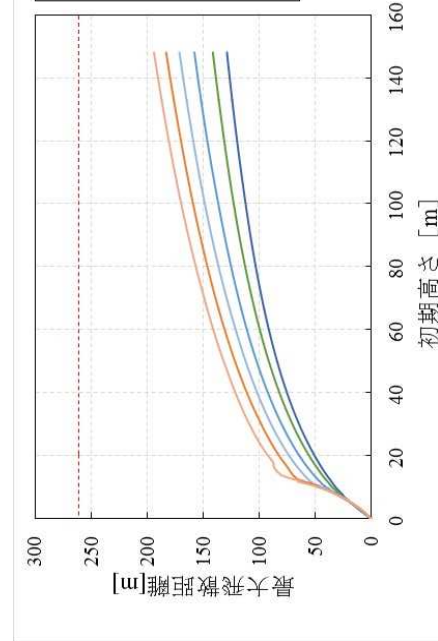
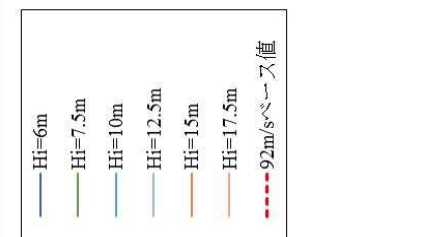
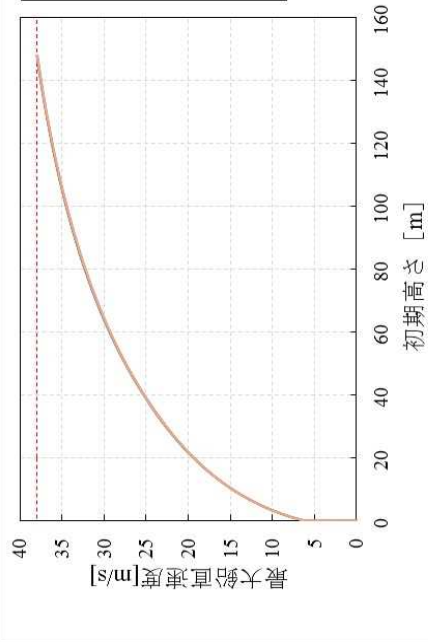
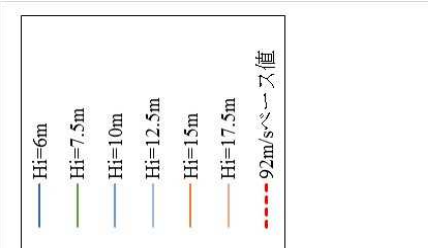
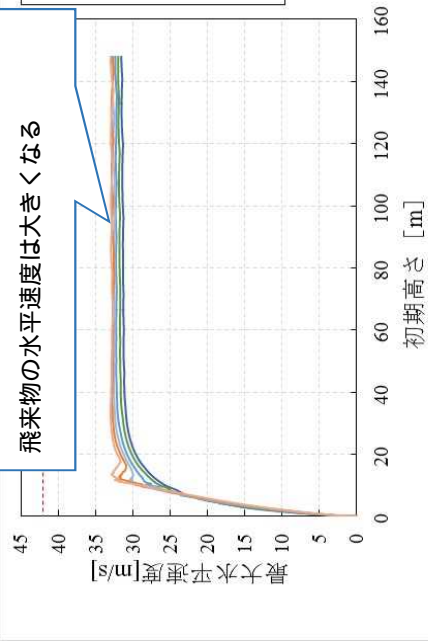


角型鋼管 (大)

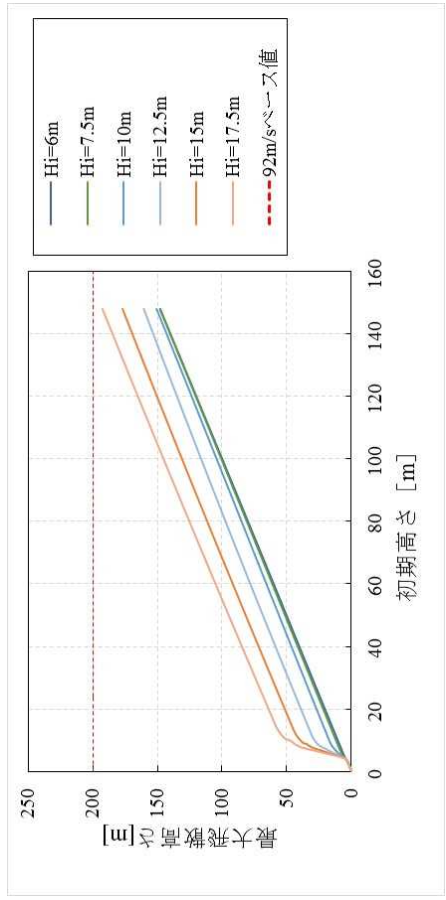
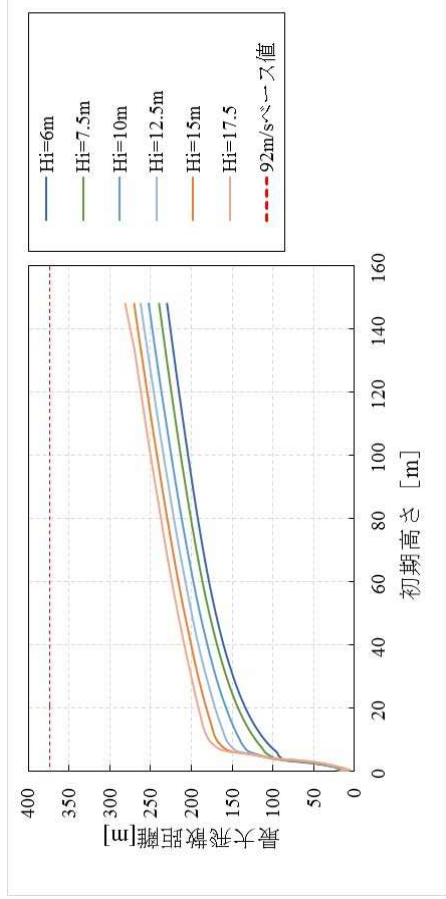
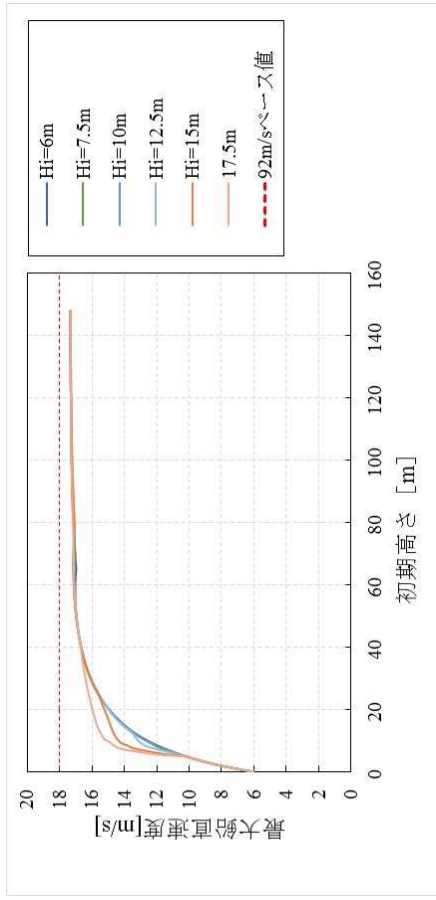
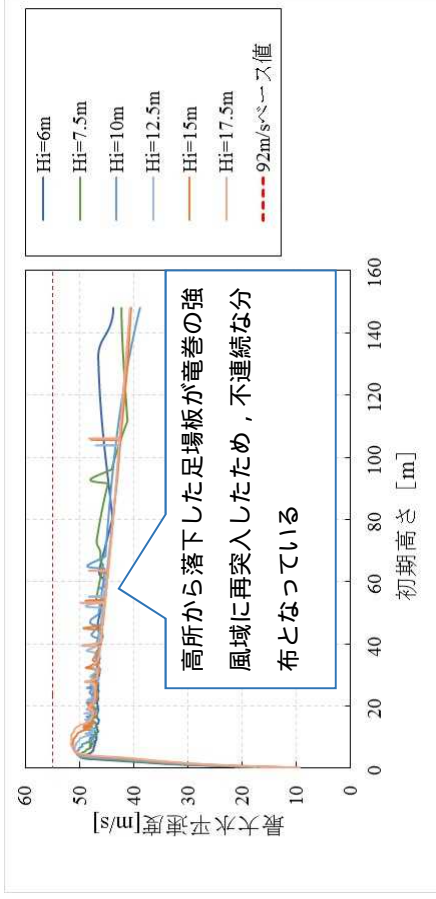


足場パイプ

強風域の流入層高さを超えるような初期高さでは、流入層を大きくした方が、飛来物の水平速度は大きくなる



鋼製足場板



地表面付近の風速の不確かさに関する考察

1. ‘The Three-Dimensional Structure and Evolution of a Tornado Boundary Layer’ について
 竜巻の地表面付近の風速分布に関する研究として、Kosiba ら⁽¹⁾は、図1の通り地上高さ約5mにおける強度は地上高さ約40mに比べて約25%大きな値が観測されたことを報告している。（文献(1)の402行目「…reveal peak wind intensity very near the surface at ~5m AGL, about 15% higher than at 10m AGL and 25% higher than at ~40m AGL.」）

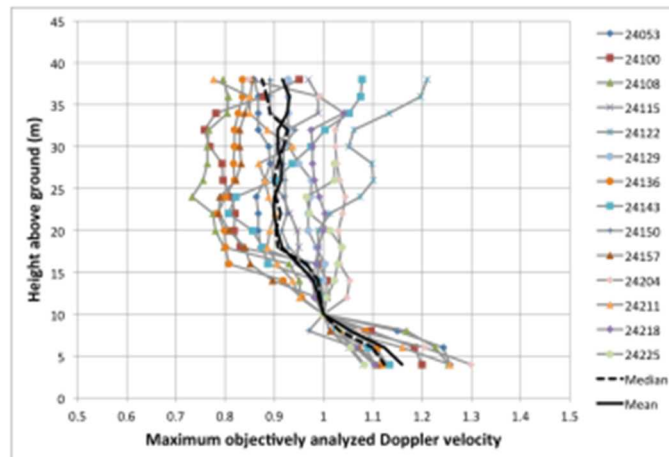


図1 地上高さとドップラー速度分布

しかしながら、図1では地上から高さ3m迄は観測を行っておらず、レーダによるドップラー速度は飛来物体の反射から得られる瞬間計測値であるため、同研究報告では竜巻風速の3秒平均速度との比較には問題があるとしている。（文献(1)の174行目「However, comparing radar-measured Vd to hypothetical ‘ ‘ standard ’ ’ 3-s-averaged anemometer-measured Vg is problematic.」）

また、同研究報告の結論として、地表面付近の竜巻特性として一般化するには、構造や強度について異なる種々の竜巻について更なる観察が必要であるとしている。（文献(1)の257行目「More observations are needed over a range of vortex structures and intensities to characterize the TBL (Tornado boundary layer) more generally.」）

以上より、同研究報告とフジタモデルの風速分布（地表面付近に近づくに従い竜巻風速が減少し地表面（高さ0m）では0m/sとなる）は、現時点では直接関連付けられるものではないと考えられる。

2. 上記の研究成果に対する考察

文献(1)では、ドップラーレーダを用いて竜巻の観測を行っている。ドップラーレーダでは、風に流される降水粒子等の物体から反射される電波のドップラー効果を用いて、レーダの照射方向の速度成分（ドップラー速度）を測定している。すなわち、レーダから見て90°の角度で吹いている風のドップラー速度は0m/sとして観測される（図2）。

なお、低位置でドップラー測定する場合、仰角の大きい高所ほど小さい速度として観測されることになる。

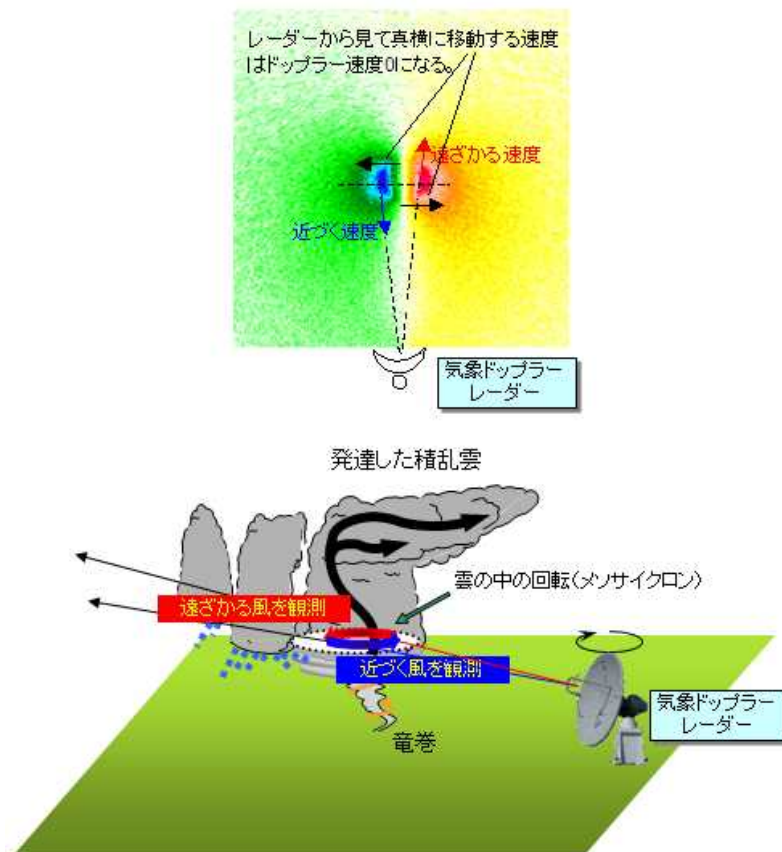


図2 ドップラーレーダによる観測

(気象庁 HP: <https://www.jma.go.jp/jma/kishou/known/toppuu/tornado2-2.html>)

図1は、竜巻をドップラーレーダを用いて測定した速度（ドップラー速度）を示しており、ドップラーレーダの照射方向の速度成分のみが抽出されたものであるため、実際に発生していた風速とは異なるものを観測していたことになる。

KK6/7の設置許可申請書において定めた設計竜巻92m/sは対地水平速度であり、これを仮にドップラーレーダで測定した場合には、異なる（小さい）速度が観測されることになる。

実際の風速場とドップラーレーダでの観測の差を把握するために、仮想的な竜巻を想定し、この竜巻の風速をドップラーレーダで測定した際に、どのようなドップラー速度が測定されるかを確認する。

仮想的な竜巻の条件としては、文献(1)に記載のある2012年5月25日にKansas州で発生した竜巻に対し、文献記載値等を参考として表1のとおり設定した。なお、風速場モデルとしてはフジタモデルを用いた。

表 1 仮想的な竜巻条件

竜巻特性パラメータ	設定条件
最大旋回風速, V_m	50 m/s
最大旋回風速半径, R	50 m
流入層高さ	15 m
移動速度, V_{tr}	10 m/s

ドップラーレーダの位置としては、文献(1)に記載のあるドップラーレーダ(RSDOW)と竜巻経路の関係(図3)を参考に、計測器の高さは3mとするとともに図4に示す点を竜巻との相対位置として設定した。竜巻位置を原点とした場合のドップラーレーダの座標点は(120m, 50m, 3m)に設定した。

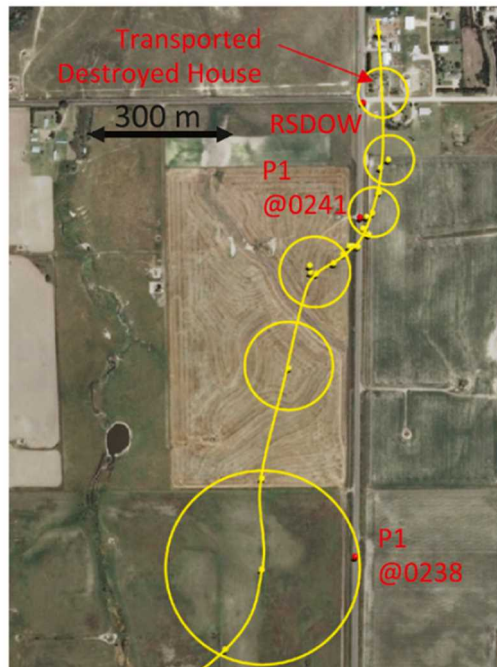


図3 文献(1)で観測された竜巻におけるドップラーレーダ(RSDOW)と竜巻経路の関係
(計測開始は@0241付近であり、最接近した距離は約130m)

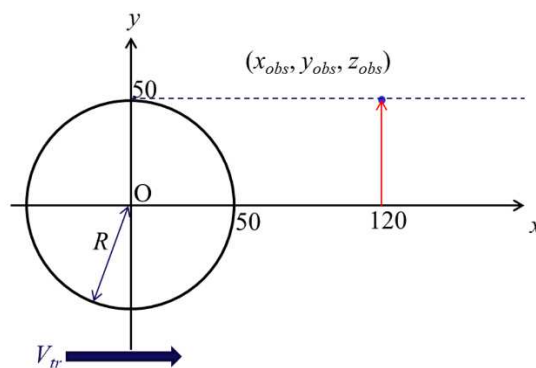


図4 仮想的な竜巻(原点)とドップラーレーダ位置との相対位置関係

点 $(x_{obs}, y_{obs}, z_{obs})$ に位置するドップラーレーダが捉える点 (x, y, z) のドップラー速度は式(1)で表される。(本解析では絶対値が大きいいためドップラーレーダに向かう方向を正と定義する。)

$$D = -(\mathbf{V}_w \cdot \mathbf{X})/|\mathbf{X}| \quad (1)$$

ここで、 \mathbf{X} は図5の水色で示すような方向ベクトル $\mathbf{X}=(x-x_{obs}, y-y_{obs}, z-z_{obs})$ を、 \mathbf{V}_w は点 (x, y, z) での風速ベクトルを表す。図6に上記の条件におけるフジタモデルの風速場 (V_x, V_y, V_z) が与えられるときの各高さでのドップラー速度の最大値と最小値を示す。

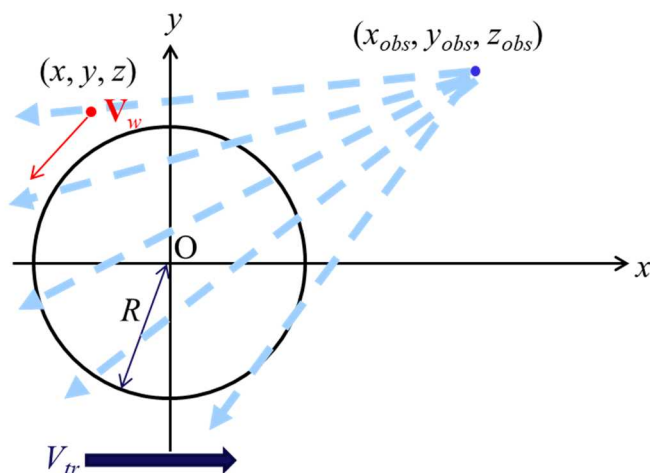


図5 x軸方向に移動速度 V_{tr} で移動する竜巻とドップラーレーダの位置関係

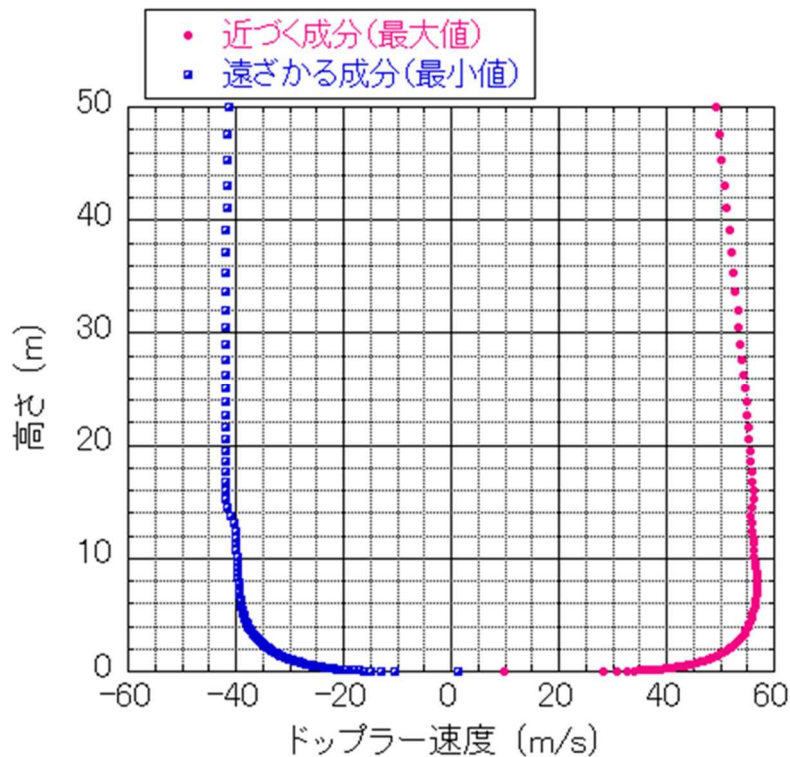


図6 仮想的な竜巻のドップラー速度の高さ方向分布

本解析での竜巻風速の極大値（最大値）は 15m の高さに設定したが、ドップラー速度は地面付近の速度が高所と比較し相対的に強調される傾向があるため、ドップラー速度の極大値が約 6m ~ 8m 付近に発生することが示された。このことは、文献(1)の Fig.4（本資料の図 1）で示されているドップラー速度の極大点が必ずしも実際の風速の極大点と一致しないことを示唆するものである。

3. 最新の研究成果

Kosiba らは、文献(1)の公表以降に文献(2)を公表しており、文献(2)では、「地上高さ 1m における風速は、地上高さ 20 ~ 30m におけるドップラーレーダで測定した風の速度の 60% ~ 70% である」と報告している。（文献(2)「…the 1-meter AGL wind speeds were ~60%-70% of the DOW-measured winds at 20-30 m AGL.」）

上記の研究成果を踏まえ、KK6/7 の設計竜巻（最大風速 92m/s）に当てはめるならば、設計竜巻（最大風速 92m/s）におけるドップラー速度は、地上高さ 25m（20 ~ 30m の中間値）で約 86m/s と算出され(図 7)、地上高さ 1m における風速は、地上高さ 20 ~ 30m におけるドップラーレーダで測定した風の速度の 60% ~ 70% であることから、水平・鉛直成分合算で約 51 ~ 60m/s となる。一方で、KK6/7 の設計竜巻における地上高さ 1m では、水平風速のみで約 76m/s となるため（図 8）、上記の値（約 51 ~ 60m/s）より大きい。したがって、文献(2)で示されている関係性よりも KK6/7 の設計竜巻の方が地上高さ 1m で大きな風速となっている。

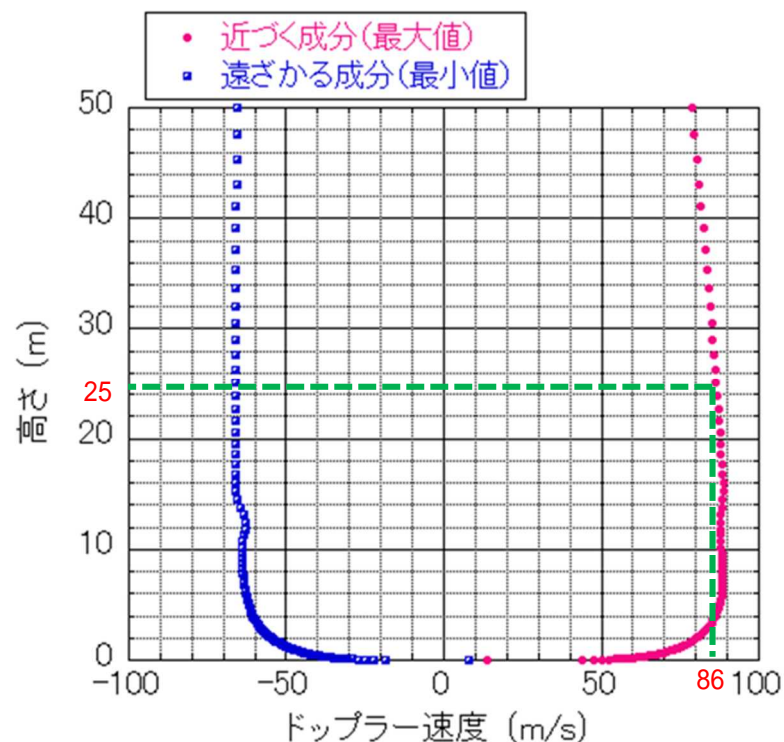


図 7 設計竜巻（最大風速 92m/s）のドップラー速度の高さ方向分布

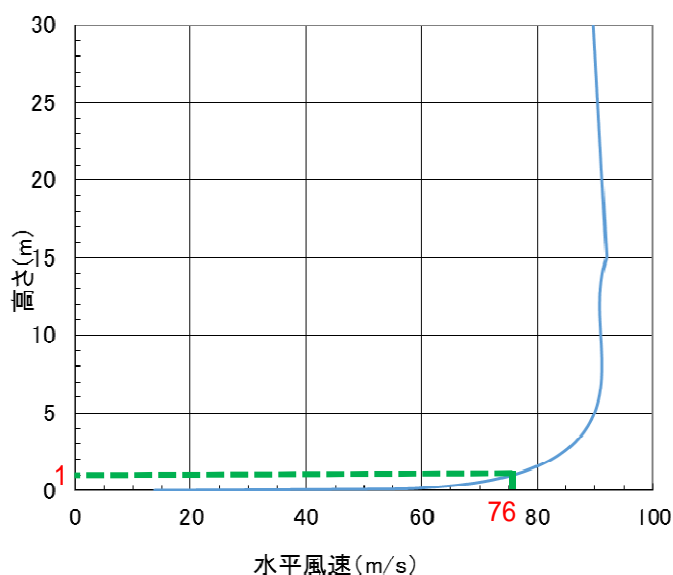


図8 設計竜巻（最大風速 92m/s）の水平風速の高さ方向分布

一般的に、風速は、地表面での摩擦により、地表面に近づくにつれ小さくなっていくことから、地上高さ 1m 未満の領域では、地上高さ 1m における風速より小さい値を示すと考えられる。

文献(2)で示されていない地上高さ 1m 未満の領域における保守性を確認する観点で、設計飛来物のうち、地表面に配置することを前提としている鋼製材、角型鋼管(大)、砂利へ加わる風速を確認する。飛散評価において、物体に与える風速は物体高さの中心値における風速を代表させており、上記に示す設計飛来物の中心高さとその高さにおける KK6/7 の設計竜巻の風速を図 9 に示す。

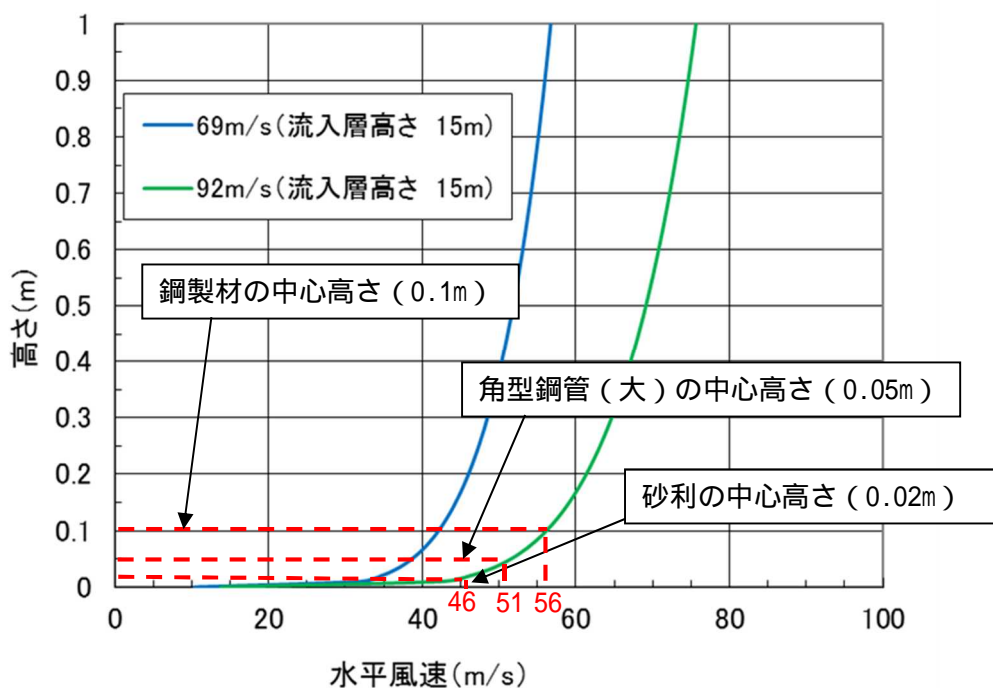


図9 水平風速の高さ方向の分布と設計飛来物（鋼製材，角型鋼管（大），砂利）の中心高さの関係

鋼製材，角型鋼管(大)に加わる風速は，それぞれ水平風速のみで 56m/s，51m/s となり，KK6/7 の設計竜巻に文献(2)で示されている関係性を当てはめた場合における地上高さ 1m の風速(水平・鉛直成分合算で約 51～60m/s)と同程度の風が吹く設定となる。このことから，鋼製材，角型鋼管(大)は，地表面に配置されているものの，地上高さ 1m と同程度の風速を与えて飛散評価を行っていることになり，風が地表面との摩擦により減衰することを踏まえると，保守的な風速を与えて飛散評価を行っていると言える。

一方で，砂利に加わる風速は 46m/s となり，上記の風速(水平・鉛直成分合算で約 51～60m/s)を下回っているが，感度解析にて最大風速 69m/s，初期高さ 1m の条件で飛散評価を行っており，このとき砂利には，水平風速のみで 56m/s の風速が加わることから(図 10)，風速(水平・鉛直成分合算で約 51～60m/s)と同程度の風を与えて飛散評価を行い，評価対象施設の設計の前提条件に影響を与えないことを確認している。

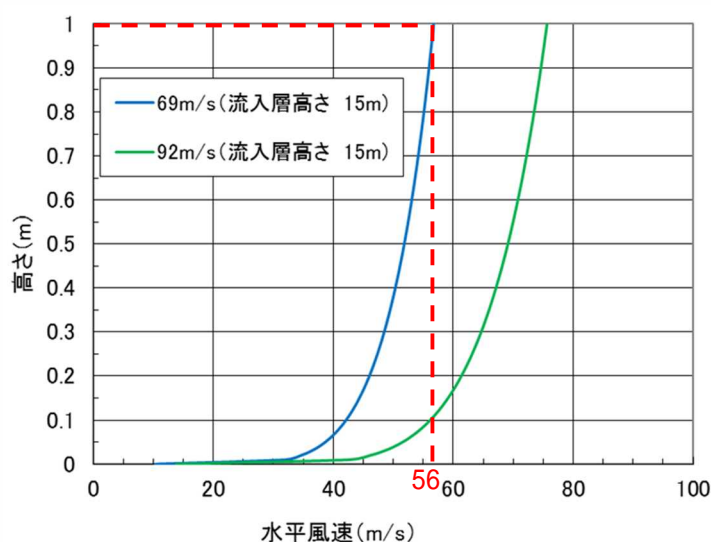


図 10 感度解析に用いた風速分布

4. 参考文献

- (1) Karen A. Kosiba and Joshua Wurman, 2013: The Three-Dimensional Structure and Evolution of a Tornado Boundary Layer. *Wea. Forecasting*, 28, 1552-1561.
- (2) Karen A. Kosiba and Joshua Wurman, 2017: The TWIRL (Tornado Winds from In-situ and Radars at Low-level) Project: Part 1: Project Overview and Combined Radar-in situ-damage analyses, 9th European Conference on Severe Storms.

感度解析に用いた風速分布について

感度解析に用いた風速(最大風速 69m/s)と KK6/7 の設計竜巻(最大風速 92m/s)の風速分布を図 1, 2 に示す。図 1 の上図に最大水平風速を示し, 図 1 の下図に最大水平風速となる位置を示す。最大水平風速となる位置は, 竜巻の外部コア半径上, かつ, 竜巻の回転方向と移動方向が重なる位置となる。

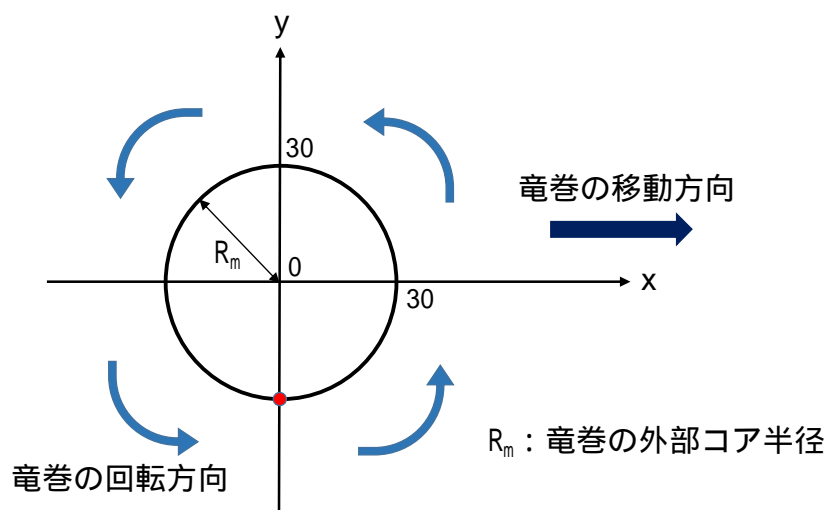
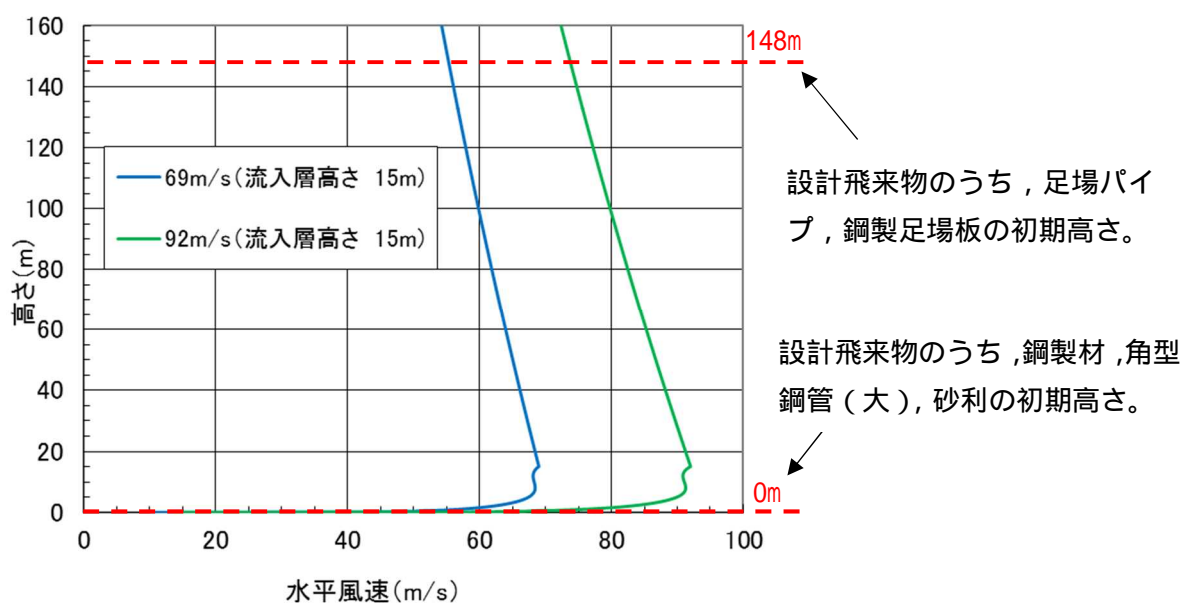


図 1 水平風速の高さ方向の分布と設計飛来物の初期高さの関係(上図)とその水平風速を示す位置(下図の赤点)

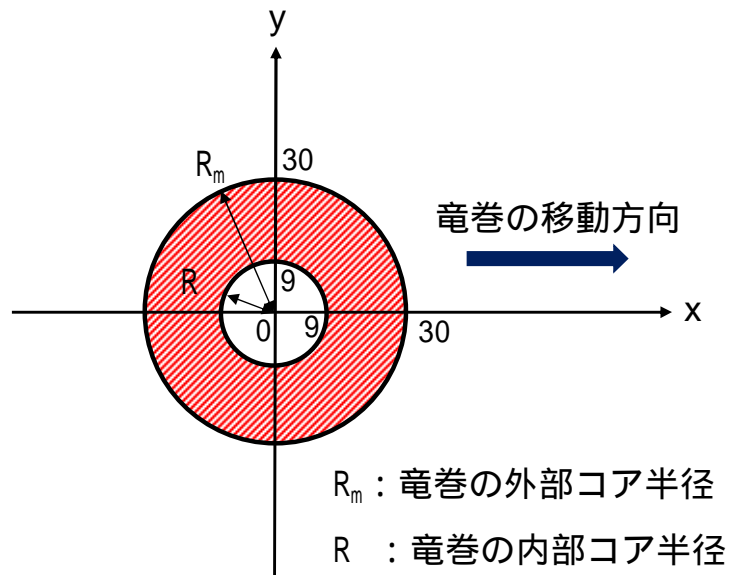
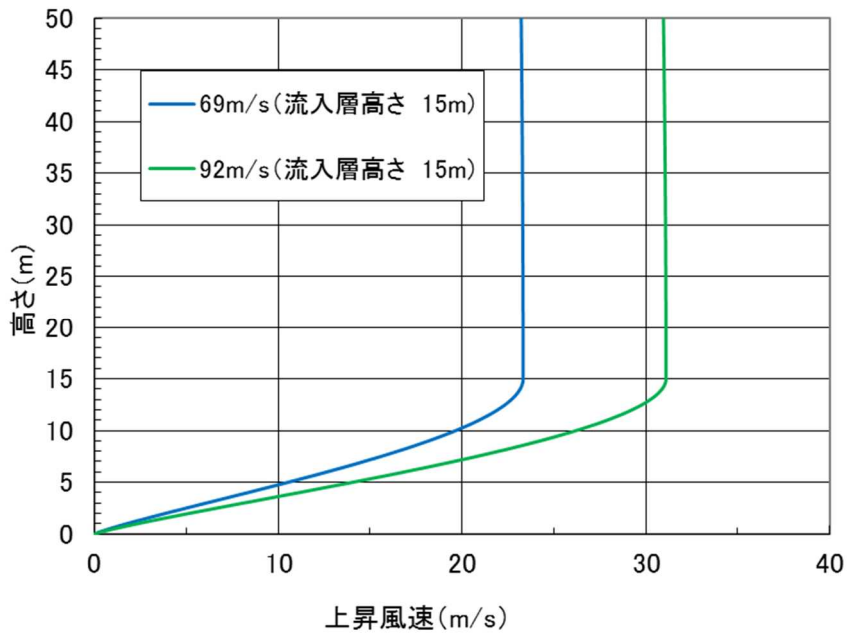


図2 上昇風速の高さ方向の分布（上図）とその上昇風速を示す位置（下図の斜線部）