

参考資料4：地形と粗度との重畳について

ここでは、本資料で示した粗度による竜巻の減衰について、別資料で示した地形効果との重畳について言及する。地表面粗度と地形効果との重畳について、Lewellen (2012) により実施された LES が一つの知見を与えている。この LES では、高さ 100m の尾根を越える竜巻の減衰を 2 種類の地表面粗度 ($z_0=2\text{cm}$ と 20cm) に対して調べている。それにより得られた最大風速のカラーコンタを以下に示す。

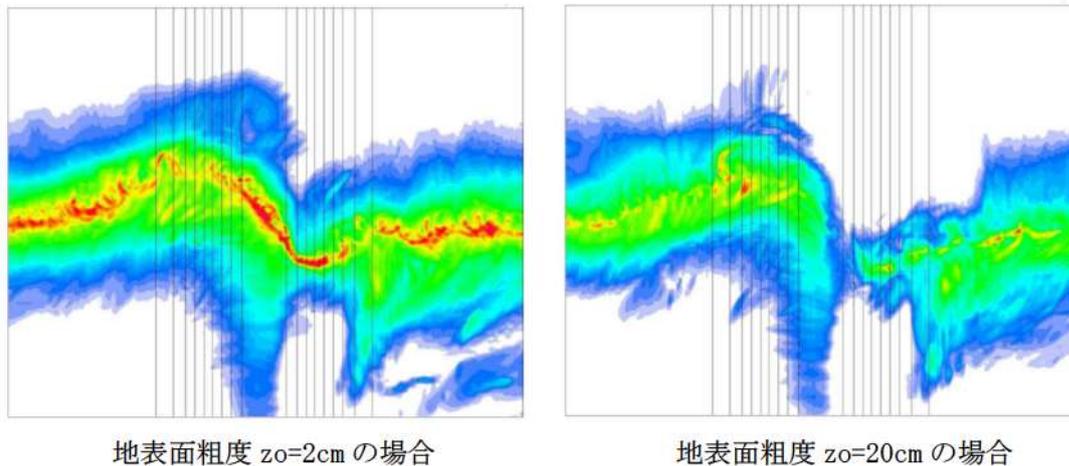


図1 最大風速のカラーコンタ

地表面粗度の値によらず、地形の起伏に伴う竜巻進路は蛇行している。竜巻の移動に伴う、最大瞬間風速の値の強弱は、地表面粗度に伴い異なる挙動を呈するが、地表面粗度の増加は、最大風速の低下に寄与していることを確認できる。

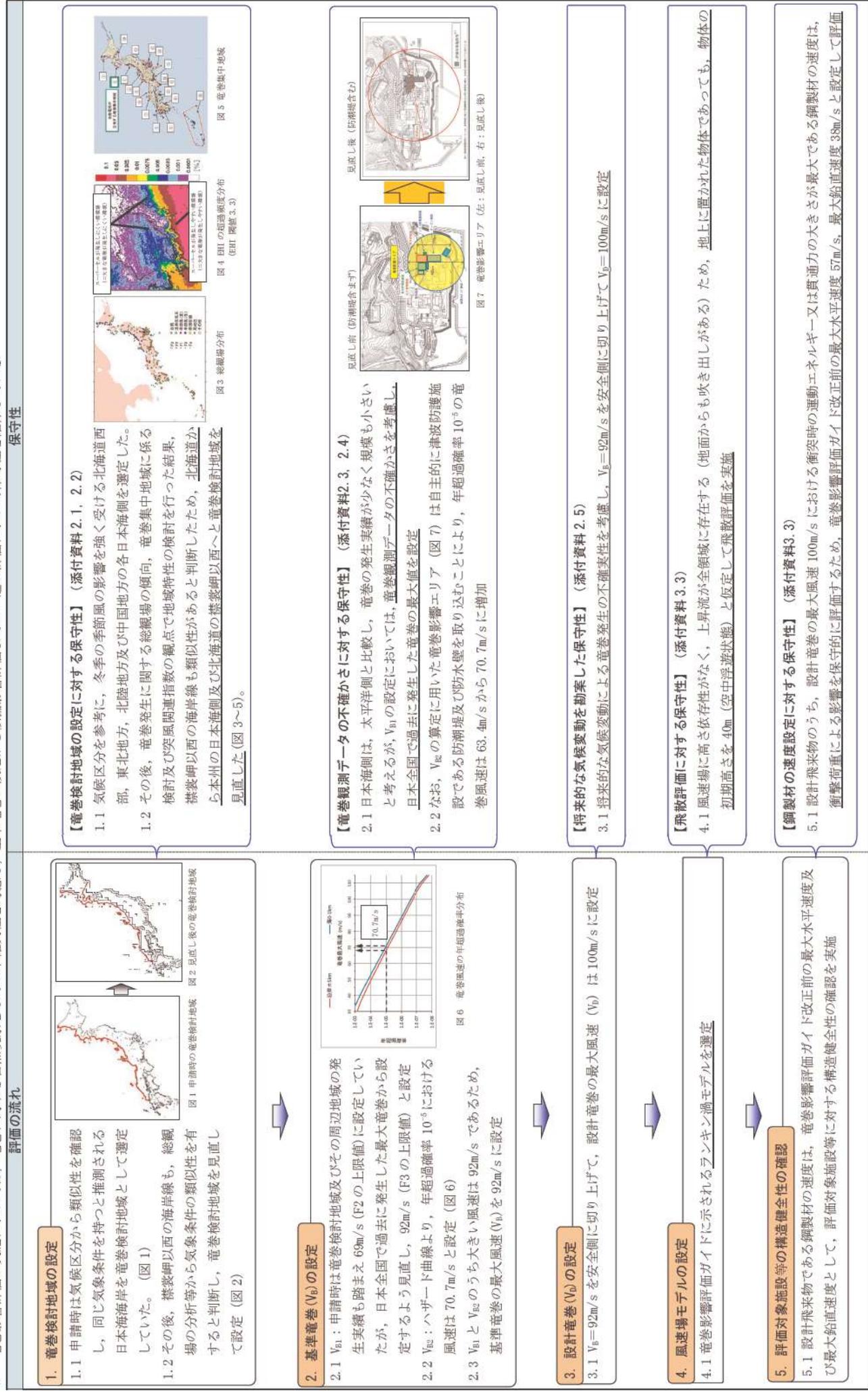
この結果は、本資料が説明した地表面粗度による竜巻風速の減衰について、地形の起伏が重畳する場合も同様の結論となることを示唆する。

参考文献

- ・ Lewellen, D. C. (2012) Effects of topography on tornado dynamics: A simulation study. 26th Conference on Severe Local Storms, Amer. Meteorol. Soc., Nashville, TN, 4B. 1.

竜巻影響評価の概要及び保守性について

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



【竜巻検討地域の設定に対する保守性】 (添付資料2.1, 2.2)

1.1 気候区分を参考に、冬季の季節風の影響を強く受ける北海道西部、東北地方、北陸地方及び中国地方の各日本海側を選定した。

1.2 その後、竜巻発生に関する総観測場の傾向、竜巻集中地域に係る検討及び突風関連指数の観点で地域特性の検討を行った結果、襟裳岬以西の海岸線も類似性があると判断したため、北海道から本州の日本海側及び北海道の襟裳岬以西へと竜巻検討地域を見直した(図3~5)。

図3 総観測場分布

図4 B11の超過確率分布 (EHT 関数3.3)

図5 竜巻集中地域

【竜巻観測データの不確かさに対する保守性】 (添付資料2.3, 2.4)

2.1 日本海側は、太平洋側と比較し、竜巻の発生実績が少なく規模も小さいと考え、V₀₁の設定においては、竜巻観測データの不確かさを考慮し、日本全国で過去に発生した竜巻の最大値を設定

2.2 なお、V₀₂の算定に用いた竜巻影響エリア(図7)は自主的に津波防護施設である防潮堤及び防水壁を取り込むことにより、年超過確率10⁻⁵の竜巻風速は63.4m/sから70.7m/sに増加

図6 竜巻風速の年超過確率分布

図7 竜巻影響エリア (左: 見直し前、右: 見直し後)

【将来的な気候変動を勘案した保守性】 (添付資料2.5)

3.1 将来的な気候変動による竜巻発生の不確実性を考慮し、V_d=92m/sを安全側に切り上げてV_d=100m/sに設定

【飛散評価に対する保守性】 (添付資料3.3)

4.1 風速場に高さ依存性がなく、上昇流が全領域に存在する(地面からも吹き出しがある)ため、地上に置かれた物体であっても、物体の初期高さを40m(空中浮遊状態)と仮定して飛散評価を実施

【鋼製材の速度設定に対する保守性】 (添付資料3.3)

5.1 設計飛来物のうち、設計竜巻の最大風速100m/sにおける衝突時の運動エネルギー又は貫通力の大きさが最大である鋼製材の速度は、衝突荷重による影響を保守的に評価するため、竜巻影響評価ガイド改正前の最大水平速度57m/s、最大鉛直速度38m/sと設定して評価

図3 総観測場分布

図4 B11の超過確率分布 (EHT 関数3.3)

図5 竜巻集中地域

【設計竜巻荷重、設計荷重の設定】

竜巻影響評価ガイドに基づき、設計竜巻荷重は、設計竜巻の風圧力による荷重 (W_w)、気圧差による荷重 (W_p)、及び飛来物による衝撃荷重 (W_o) を適切に組み合わせた荷重を設定するとともに、設計竜巻荷重と組み合わせる荷重 (竜巻以外の自然現象による荷重等) は、設計竜巻荷重に包絡されるもしくは考慮すべき荷重ではないことを確認する。 W_w , W_p , W_o は、設計竜巻の最大風速 $V_{50}=100\text{m/s}$ 、風速場モデルをランキン渦モデルとした場合の荷重を設定する。

【設計飛来物の選定】

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

【竜巻影響評価】

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

(1) 施設の評価

① 評価対象施設 (外部遮へい建屋、周辺補機棟、燃料取扱棟、原子炉補助建屋、ディーゼル発電機建屋、燃料油貯油槽タンク室、取水ピットポンプ室、原子炉補機冷却海水ポンプ出口ストレーナ室) の構造骨組評価、局部評価、設計飛来物の衝突に関する評価及び建屋外周部建具 (扉等) に関する評価を及ぼさないことを確認し、影響がある場合には、防護対策を実施する。

② 外部事象防護対象施設等に波及的影響を及ぼし得る施設 (タービン建屋、電気建屋、出入管理建屋、循環水ポンプ建屋) の構造骨組評価を実施し、倒壊により外部事象防護対象施設等が影響を受けないことを確認する。

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

(2) 設備の評価

評価対象施設 (排気筒、換気空調設備 (アニュラス空気浄化設備、格納容器空調装置、補助建屋空調装置、試験採取室空調装置、燃料採取室換気装置、電動補助給水ポンプ室換気装置、制御用空気圧縮機室換気装置、ディーゼル発電機室換気装置及び安全補機閉器室空調装置)、使用済燃料ピット、新燃料ラック、新燃料ラック、燃料移送装置、使用済燃料ピットクレーン、燃料取扱クレーン、燃料取扱キャナル、キヤスクピット、燃料検査ピット、原子炉補機冷却海水ポンプ、原子炉補機冷却海水ポンプ出口ストレーナ、配管及び弁 (原子炉補機冷却水サージタンク (配管及び弁含む)、主蒸気系統配管他)、制御用空気系統配管、蓄熱室加熱器) に対して、設計荷重に対する強度評価及び必要に応じて設計飛来物による貫通評価を実施し、評価対象施設の安全機能に影響を及ぼさないことを確認する。評価対象施設に影響がある場合には、防護対策を実施する。

外部事象防護対象施設等に波及的影響を及ぼし得る設備 (ディーゼル発電機排気消音器、主蒸気逃がし弁消音器、主蒸気安全弁排気管、タービン動補助給水ポンプ排気管、ディーゼル発電機燃料油貯油槽ベント管、換気空調設備 (蓄電池室排気装置)) は、設計荷重に対する強度評価を実施し、外部事象防護対象施設等の安全機能に波及的影響を及ぼさないことを確認する。

【飛散防止対策】

設計飛来物に選定した鋼製材より運動エネルギー及び貫通力が大きいものについては、設置場所等に応じて固縛等を実施する。

(1) 資機材・車両

- ・ 飛散影響・横滑りを考慮するエリア内に設置する資機材等 (発電機、コンテナ等) は、飛散防止の観点から、移設・撤去を行う。また、移設や撤去が困難なものについては、浮き上がりや横滑りを考慮し固縛等を行う運用とする。
- ・ 車両の飛散防止対策としては、移設、撤去、固縛に加え、作業中車両について竜巻発生確度ナウキヤスト等を活用し即座に車両を移動できる体制を整え、飛散影響・横滑りを考慮するエリア外への回避を行う運用とする。

(2) 仮設足場

- ・ 竜巻による風圧力の影響により仮設足場の各部分が容易に飛散しないよう、足場材の緊結等の適切な飛散防止対策を行う運用とする。

【防護対策】

設計飛来物によって損傷する可能性がある外部事象防護対象施設について、下記のとおり防護対策を実施する。

- (1) 竜巻防護ネットによる防護
原子炉補機冷却海水ポンプ、原子炉補機冷却海水ポンプ出口ストレーナ、配管及び弁 (原子炉補機冷却海水系統) を防護するため、当該設備が設置されている取水ピットポンプ室及び原子炉補機冷却海水ポンプ出口ストレーナ室の上部開口部に、すり抜け防止用鋼材、架台及びネットを構成した竜巻防護ネットを設置することで、設計飛来物 (鋼製材) の侵入を防止する。
竜巻防護ネットは設計飛来物 (鋼製材) の運動エネルギーを吸収可能な設計にする。
- (2) 竜巻防護鋼板等による防護
原子炉補機冷却水サージタンク (配管及び弁含む)、主蒸気系統配管他、制御用空気系統配管、蓄熱室加熱器、新燃料ラックを防護するため、竜巻防護鋼板、竜巻防護壁又は竜巻防護扉を設置することで、設計飛来物 (鋼製材) が当該設備に衝突することを防止する。
竜巻防護鋼板等は設計飛来物 (鋼製材) の貫通を防止できる設計にする。

項目	飛来物の種類		鋼製材
	砂利	鋼製パイプ	
サイズ (m)	長さ×幅×飛行	長さ×直径	長さ×幅×飛行
	0.01×0.01×0.04 ^{※1}	2×0.05	4.2×0.3×0.2
質量 (kg)	0.18	8.4	135
	42 ^{※2}	49 ^{※3}	57 ^{※4}
最大初速度 (m/s)	62 ^{※5}	43 ^{※6}	38 ^{※7}

※1 砂利のサイズは、竜巻が通過する10mの高さの風速は、 100m/s を仮定し、 100m/s を仮定した風速の風速、 4.2m とした。
※2 設計飛来物の質量は、当該飛来物に作用する風速を仮定し、 100m/s を仮定した風速を用いて、竜巻飛行による風速、 100m/s を仮定し、当該飛来物の質量を算出した。
※3 鋼製パイプの質量は、当該飛来物の質量を算出した。
※4 鋼製パイプの質量は、当該飛来物の質量を算出した。
※5 鋼製パイプの質量は、当該飛来物の質量を算出した。
※6 鋼製パイプの質量は、当該飛来物の質量を算出した。
※7 鋼製パイプの質量は、当該飛来物の質量を算出した。



図1 泊発電所の設計飛来物 (イメージ)

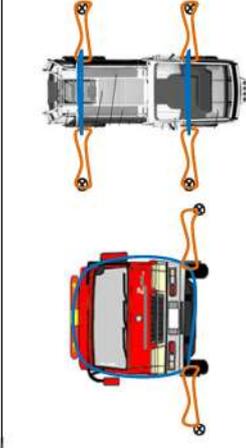


図2 車両の固縛イメージ



図3 資機材管理エリア 車両管理エリア

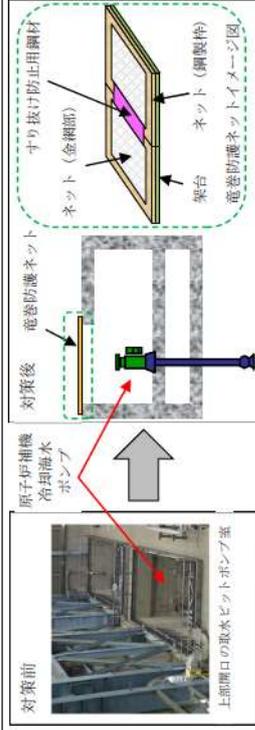
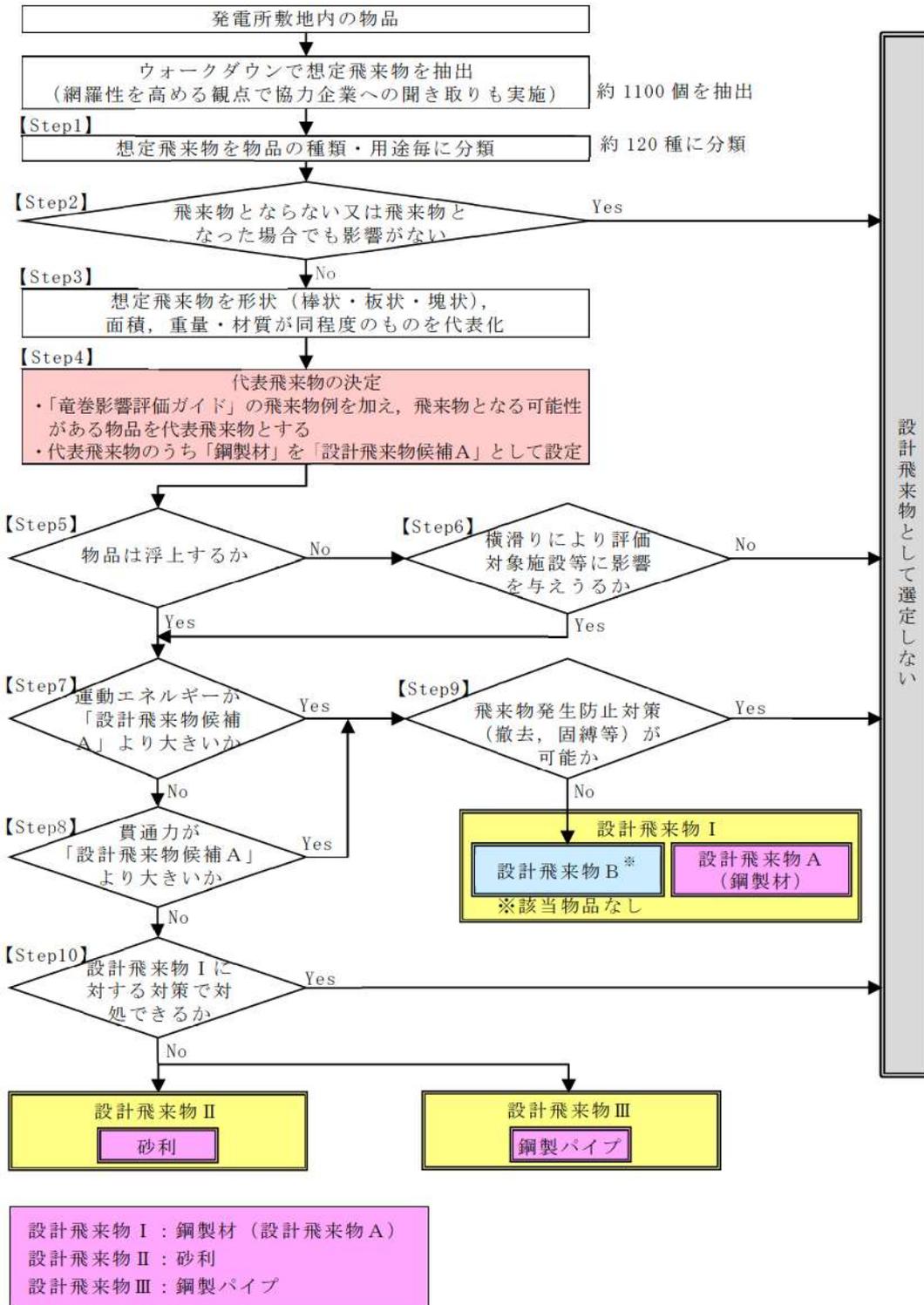


図4 竜巻防護ネットの設置イメージ

設計飛来物の選定について

発電所構内における竜巻飛来物となり得る物品を網羅的に調査し、それらの中から代表性をもたせた設計飛来物を、第 3.3.1 図のフローに基づき選定した。



第 3.3.1 図 設計飛来物の選定フロー

1. 飛来物調査

泊発電所における飛来物に関するウォークダウンは、平成25年6月24,25日、平成27年7月24日～11月17日及び令和4年7月15日～8月4日に実施した。調査では、常設物、仮設物のうち飛来物となりうる物品、及び二次飛来物となりうる物品（設置状況等から風圧や飛散による被害を受けて飛来物となり得る物）を抽出した（詳細は別紙1「飛来物及び固定状況に係る調査結果について」）。

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

2. 固定状況等を踏まえた抽出

上記1.で抽出した結果を踏まえ、過去の被害事例等（別紙2「分解し小型軽量となる物品及び倒壊するが飛来物とはならない物品等について」）を参考に、以下の観点のいずれにも当てはまらない物品を抽出した。

①飛来物化しない（風の影響を受けにくい形状（網状）、または頑健に固定されている）

（詳細は別紙1「飛来物及び固定状況に係る調査結果について」）

②分解し小型軽量となる物品

③竜巻の影響により倒壊するが、飛来物とはならない物品

3. 飛来物の形状等による分類

上記2.で抽出した物品に対して、形状（棒状、板状、塊状）、サイズ（大、中、小）及び柔^{※1}、剛^{※2}などの特徴から同程度のものを代表化し、竜巻影響評価ガイドに示される飛来物例を追加した結果を第3.3.1表に示す。また、第3.3.2図～第3.3.4図に調査で確認した代表位置を示す。

※1：柔（木製又は中空状、複数の材からなる）

※2：剛（コンクリート又は鋼製で密実、単体からなる）

第 3.3.1 表 代表的な飛来物の抽出結果

(代表飛来物)

	棒状			板状			塊状				
	大	中	小	大	中	小	大	中	小	小	極小
常設物	剛	—	—	—	—	マンホール蓋	—	—	—	—	—
	柔	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
仮設物	剛	・(ガイド)鋼製材※ ・鋼管	・(ガイド)鋼製パイプ※	—	・鋼材 ・鋼板 ・コンクリート板 ・(ガイド)コンクリート板※	—	・除塵設備予備品	・コンクリートブロック ・発電機 ・カードル	—	—	・砂利
	柔	—	—	—	—	—	・コンテナ ・(ガイド)コンテナ※ ・発電機車 ・トラック ・重機 ・ポンプ車 ・放水砲 ・タンクローリー ・乗用車 ・バス ・(ガイド)トラック※	・ドラム缶 ・プレハブ小屋 ・自動販売機	—	—	
	柔(一部剛)	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—

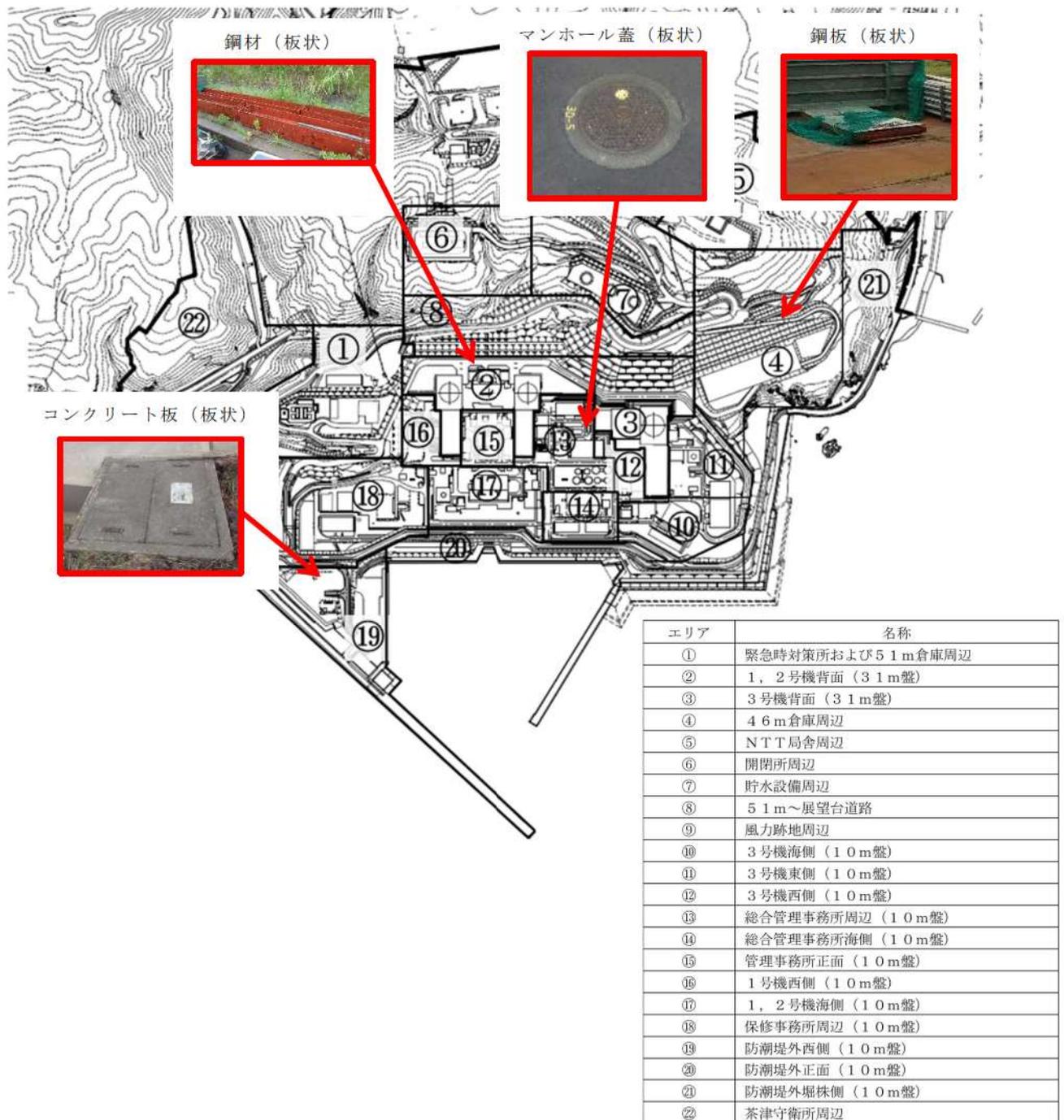
(二次飛来物)

	棒状			板状			塊状			
	大	中	小	大	中	小	大	中	小	小
二次飛来物	剛	—	—	・外壁	・扉 ・ガラス窓	—	・鋼製階段	—	—	—
	柔	—	—	・屋根(鋼板) ・シャッター	・手すり	—	—	—	—	・照明器具 ・アンテナ

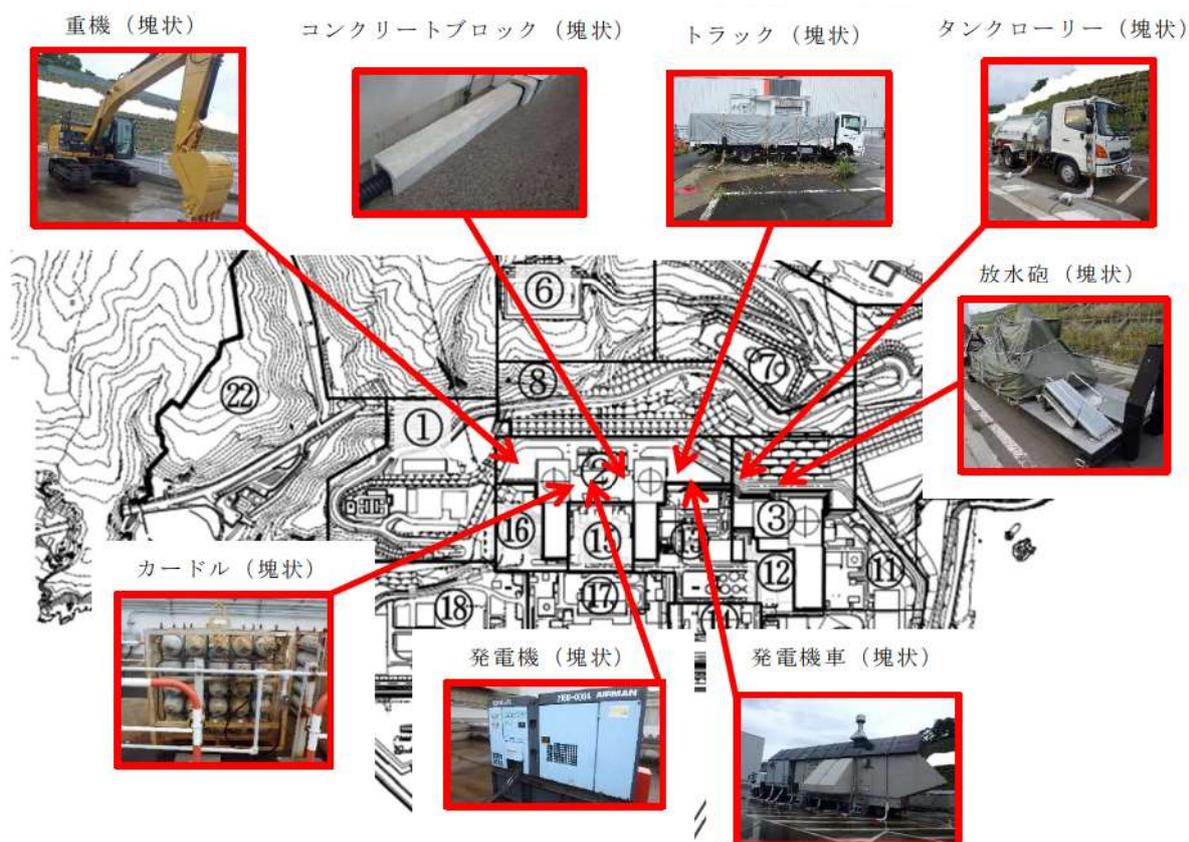
※：竜巻影響評価ガイドにおいてサイズ及び質量が記載されている物品



第 3.3.2 図 代表飛来物（棒状）

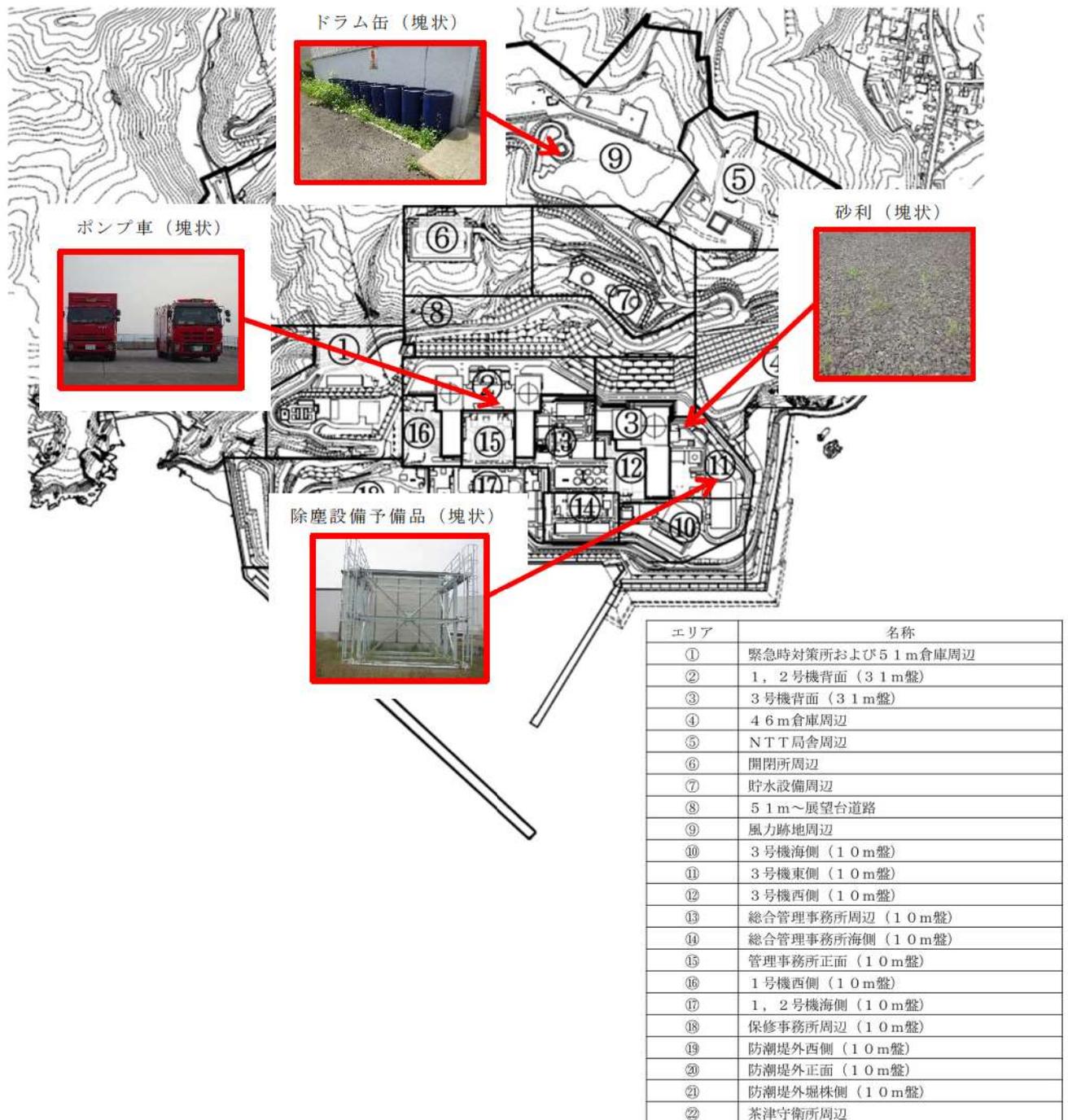


第 3.3.3 図 代表飛来物 (板状)

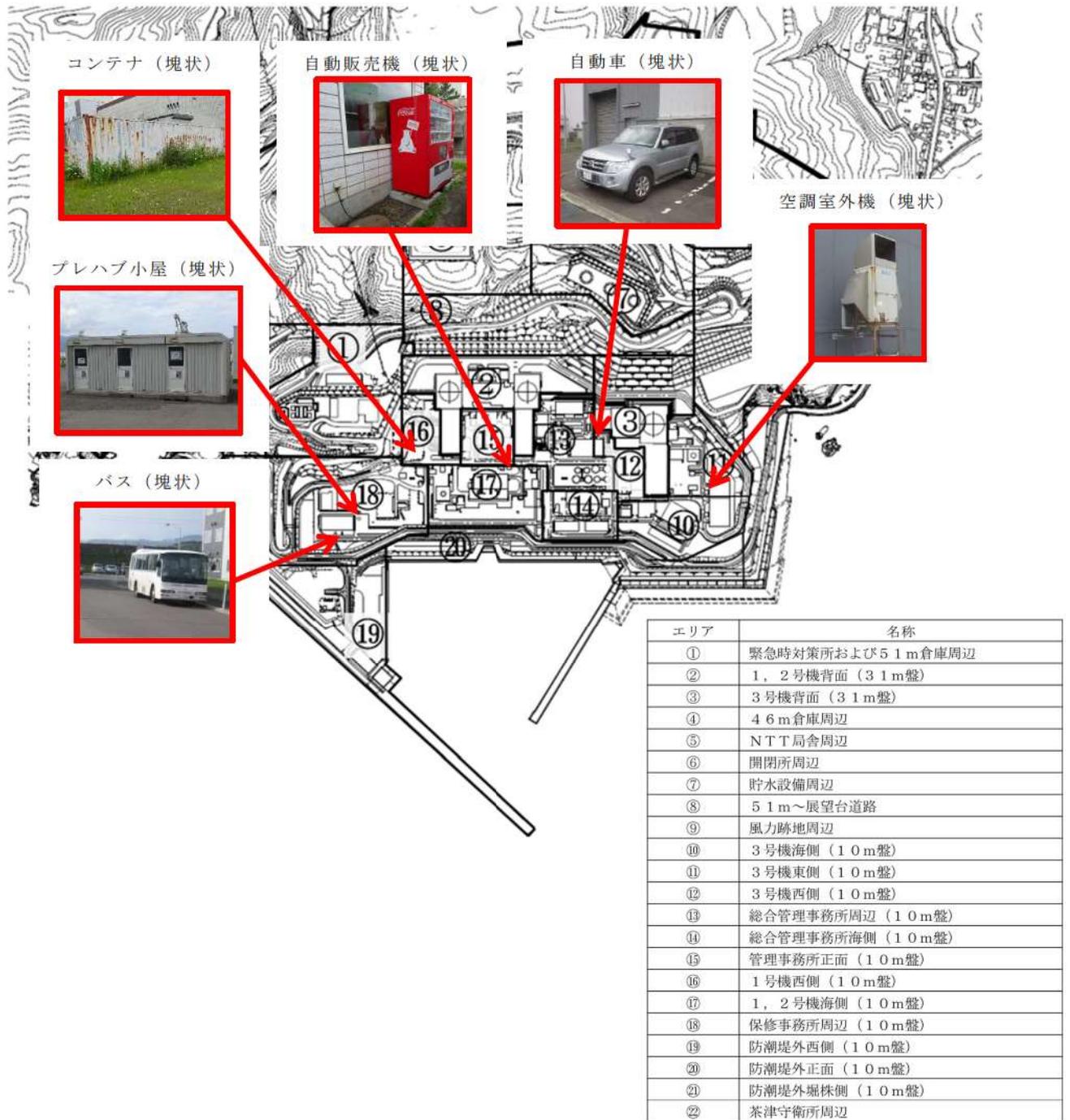


エリア	名称
①	緊急時対策所および51m倉庫周辺
②	1, 2号機背面 (31m盤)
③	3号機背面 (31m盤)
④	46m倉庫周辺
⑤	NTT局舎周辺
⑥	開閉所周辺
⑦	貯水設備周辺
⑧	51m～展望台道路
⑨	風力跡地周辺
⑩	3号機海側 (10m盤)
⑪	3号機東側 (10m盤)
⑫	3号機西側 (10m盤)
⑬	総合管理事務所周辺 (10m盤)
⑭	総合管理事務所海側 (10m盤)
⑮	管理事務所正面 (10m盤)
⑯	1号機西側 (10m盤)
⑰	1, 2号機海側 (10m盤)
⑱	保守事務所周辺 (10m盤)
⑲	防潮堤外西側 (10m盤)
⑳	防潮堤外正面 (10m盤)
㉑	防潮堤外堀株側 (10m盤)
㉒	茶津守衛所周辺

第 3.3.4 図 代表飛来物 (塊状) (1/3)



第 3.3.4 図 代表飛来物 (塊状) (2/3)



第 3.3.4 図 代表飛来物 (塊状) (3/3)

4. 代表的な飛来物の飛散評価

上記3. で抽出した代表的な飛来物に対し、寸法、重量、形状により空力パラメータを算出し、ランキン渦モデルの風速場（設計竜巻風速 100m/s）を適用した場合における飛散評価を実施し、飛来物の浮上の有無について確認を行った。飛散評価結果を第3.3.2表に示す。

5. 飛来物発生防止対策の可否を踏まえた抽出

上記4. で抽出した結果を踏まえ、固縛、撤去等の飛来物発生防止対策が可能かどうかを考慮し、設計飛来物を抽出した。

第 3.3.2 表 代表的な飛来物の飛散評価結果及び飛散防止対策・固定状況等を踏まえた選定結果 (1/3)

(常設・仮設物)

分類	名称	長さ [m]	幅 [m]	高さ [m]	質量 [kg]	空力パラメータ [m ² /kg]	最大水平速度 [m/s]	最大鉛直速度 [m/s]	運動エネルギー (水平) [kJ]	運動エネルギー (鉛直) [kJ]	最大飛距離 [m]	最大飛散高さ [m]	コンクリートの貫通限界厚さ ^{※2} [cm]		コンクリートの裏面剥離限界厚さ ^{※2} [cm]		鉄筋の貫通限界厚さ ^{※3} [mm]		浮き上がりの有無	以下の点で飛来物とならないが ^{※4} ・飛来物発生防止対策 (撤去、固縛等) が可能か、 ・他の飛来物に包絡されるか
													水平	鉛直	水平	鉛直	水平	鉛直		
柔 (一部剛)	重機	9.53	2.8	3.16	20800	0.0021	38.1	25.5	15123	6784	119.9	0.0	95.7	67.1	167.1	127.8	14.3	8.4	×	
柔 (一部剛)	(ガイド)ト ラック ^{※1}	5	1.9	1.3	4750	0.0026	39.9	25.3	3776	1524	163.5	0.0	61.2	41.0	108.4	80.0	10.7	5.9	×	
剛	発電機	0.98	2.09	1.55	1690	0.0027	40.2	25.3	1368	541.5	171.5	0.0	40.7	27.0	75.7	55.5	6.9	3.7	×	
剛	カードル	1.01	1.39	1.41	1500	0.0021	38.2	25.5	1095	488.4	122.0	0.0	37.2	26.0	70.	53.6	6.2	3.6	×	
剛	(ガイド)コ ンクリート 板 ^{※1}	1.5	1	0.15	540	0.0021	38.2	25.5	394.2	175.8	122.0	0.0	33.8	23.9	58.4	44.6	9.6	5.6	×	
剛	板状 コンクリー ト板	1.35	0.66	0.2	410	0.0021	38.1	25.5	298.0	133.7	119.9	0.0	30.2	21.4	52.9	40.5	8.5	5.0	×	
剛	板状 鋼材	2.5	0.25	0.25	250	0.0022	38.3	25.5	183.6	81.1	126.1	0.0	27.1	19.1	46.9	35.7	9.0	5.2	×	
柔 (一部剛)	塊状 発電機車	20.1	7.5	8.25	58120	0.0043	44.6	24.6	57815	17605	256.1	8.3	126.0	74.1	230.5	154.8	13.2	6.0	○	
柔 (一部剛)	塊状 除塵設備予 備品	6	5	5.6	14000	0.0043	44.6	24.6	13952	4236	257.0	8.5	72.6	42.6	141.3	94.8	7.6	3.4	○	
柔 (一部剛)	塊状 ポンプ車	8.79	2.49	3.16	13050	0.0029	40.9	25.1	10910	4123	189.7	0.1	82.8	53.8	147.1	106.1	12.2	6.4	○	
柔 (一部剛)	塊状 バス (大型)	11.1	2.48	3.07	9890	0.0046	45.4	24.7	10173	3025	268.7	11.9	79.7	46.5	141.6	94.3	11.8	5.3	○	
柔 (一部剛)	塊状 バス (中型)	8.99	2.34	3.03	7410	0.0049	46.0	25.2	7834	2353	277.1	14.9	70.9	41.5	128.2	85.7	10.3	4.6	○	
柔 (一部剛)	塊状 トラック	8.21	2.5	2.46	7410	0.0042	44.3	24.7	7285	2260	251.9	7.0	70.5	41.9	126.9	85.7	10.5	4.8	○	
柔	塊状 コンテナ	12.2	2.6	2.44	5500	0.0052	46.5	25.6	5957	1798	282.6	17.4	63.2	37.1	116.0	77.6	9.1	4.1	○	

※1：電巻影響評価ガイドにおいてサイズ及び重量が記載されている物品

※2：修正NDRCS式、Degen式及びChang式を用いて算出

※3：原子炉施設のタービンミサイルの評価に用いられているBRL式にて算出

※4：評価対象施設に想定される損傷モードにより、評価パラメータを設定

第 3.3.2 表 代表的な飛来物の飛散評価結果及び飛散防止対策・固定状況等を踏まえた選定結果 (2/3)

(常設・仮設物)

分類	名称	長さ [m]	幅 [m]	高さ [m]	質量 [kg]	空力 パラメータ [m ² /kg]	最大 水平 速度 [m/s]	最大 鉛直 速度 [m/s]	運動 エネルギー [kJ] (水平)	運動 エネルギー [kJ] (鉛直)	最大 飛散 高さ [m]	コンクリートの 貫通限界厚さ ^{※2} [cm]		コンクリートの裏 面剥離限界厚さ ^{※2} [cm]		鋼板の貫通限界 厚さ ^{※3} [mm]		浮き 上がり の有無	以下の点で飛来物とならないか ^{※4} ・飛来物発生防止対策(撤去、 固縛等)が可能か、 ・他の飛来物に包絡されるか
												水平 t _{p,h}	鉛直 t _{p,v}	水平 t _{s,h}	鉛直 t _{s,v}	水平 T _h	鉛直 T _v		
柔 (一部剛)	タンクロー リー	6.28	2.2	2.41	4380	0.0052	46.5	25.5	4734	1429	282.2	58.4	34.3	107.7	72.1	8.5	3.8	○	
柔	(ガイド)コ ンテナ ^{※1}	2.4	2.6	6	2300	0.0105	54.5	25.5	3416	748.4	340.3	47.4	24.1	91.1	54.8	6.3	2.3	○	
柔	プレハブ小 屋 ^{※3}	6	3.06	2.08	2000	0.0123	56.5	24.0	3194	575.2	346.7	45.5	21.2	88.1	49.6	6.0	1.9	○	
柔 (一部剛)	放水砲	2	4.7	1	3000	0.0036	42.8	24.8	2742	924	226.3	54.1	33.4	96.5	67.0	9.6	4.7	○	
柔 (一部剛)	乗用車(セガ ン)	4.89	1.8	1.47	1760	0.0070	49.8	26.7	2182	629.3	313.5	45.2	26.0	84.0	55.4	7.2	3.1	○	外部事象防護対象施設等との 離隔をとる、又は、固縛等を 実施することから設計飛来物 として選定しない。
剛	鋼板	6.1	1.54	0.021	1900	0.0033	42.1	25.1	1683	597.1	212.3	72.3	50.3	120.2	84.9	54.7	27.4	○	
柔 (一部剛)	乗用車(軽)	3.39	1.47	1.51	720	0.0113	55.5	24.8	1107	222.0	343.6	33.1	16.2	64.2	37.5	5.0	1.7	○	
柔	空調室外機	0.77	0.86	1.33	220	0.0085	51.9	26.6	296.7	77.7	327.6	21.9	12.1	43.2	27.6	3.8	1.6	○	
柔	自動販売機	0.85	1.4	1.9	450	0.0080	51.3	26.7	593.2	160.5	324.9	27.6	15.4	53.8	34.7	4.5	1.9	○	
柔	ドラム缶	0.6	0.6	0.9	245	0.0039	43.5	24.8	232.1	75.3	241.4	22.1	13.5	42.6	29.2	4.4	2.1	○	
剛	(ガイド)鋼 製材 ^{※1}	4.2	0.3	0.2	135	0.0089	57 ^{※5}	38 ^{※5}	219.3	97.5	331.5	28.5	20.2	48.4	36.9	36.1	21.0	○	設計飛来物に選定する
剛	コンクリー トブロック	1	0.25	0.22	55	0.0041	44.0	24.7	53.3	16.8	247.7	15.2	9.2	28.5	19.4	4.2	1.9	○	エネルギー、貫通力が設計飛 来物(鋼製材)に含まれる。
剛	マンホール 蓋	0.65	0.65	0.01	32	0.0089	52.5	26.4	44.1	11.2	331.2	18.4	10.7	31.9	20.2	10.8	4.3	○	

※1：竜巻影響評価ガイドにおいてサイズ及び重量が記載されている物品

※2：修正NDR式、Degen式及びChang式を用いて算出

※3：原子炉施設のタービンサイルの評価に用いられているBRL式にて算出

※4：評価対象施設に想定される損傷モードにより、評価パラメータを設定

※5：最大水平速度及び最大鉛直速度については、衝撃荷重による影響を保守的に評価するため、竜巻影響評価ガイドに示される竜巻の最大風速(V_D) = 100m/s の場合と同じ値とする。また、鋼製材の最大水平速度及び最大鉛直速度については、竜巻影響評価ガイド改正前の値とする。

第 3.3.2 表 代表的な飛来物の飛散評価結果及び飛散防止対策・固定状況等を踏まえた選定結果 (3/3)

(常設・仮設物)

分類	名称	長さ [m]	幅 [m]	高さ [m]	質量 [kg]	空力 パラメータ [m ² /kg]	最大 水平 速度 [m/s]	最大 鉛直 速度 [m/s]	運動 エネルギー [kJ] (水平)	運動 エネルギー [kJ] (鉛直)	最大 飛散 高さ [m]	コンクリートの貫通限界厚さ*2 [cm]		コンクリートの裏 面剥離限界厚さ*2 [cm]		鉄筋の貫通限界 厚さ*3 [mm]			浮き 上がり の有無	以下の点で飛来物とならぬか*4 ・飛来物発生防止対策(撤去、 固縛等)が可能か、 ・他の飛来物に包絡されるか
												水平 t _{p,h}	鉛直 t _{p,v}	水平 t _{e,h}	鉛直 t _{e,v}	水平 T _h	鉛直 T _v			
剛	(ガイド)鋼 製パイプ*1	2	0.05	0.05	8.4	0.0057	49*5	33*5	10.1	4.6	293.3	21.8	11.0	8.2	20.3	15.6	17.1	10.1	○	設計飛来物に選定する
剛	鋼管	2.5	0.05	0.05	6.825	0.0087	52.1	26.5	9.3	2.4	329.2	45.0	10.6	6.3	19.3	12.3	6.9	2.8	○	エネルギー、貫通力が設計飛 来物(鋼製材及び鋼製パイプ) に包含される。
剛	塊状 砂利	0.04	0.04	0.04	0.18	0.0185	62	42*6	0.3	0.2	397.7	87.3	2.3	1.7	5.1	3.9	0.8	0.5	○	設計飛来物に選定する

※1：竜巻影響評価ガイドにおいてサイズ及び重量が記載されている物品

※2：修正NDR式、Degen式及びChang式を用いて算出

※3：原子炉施設のタービンサイルの評価に用いられているBRL式にて算出

※4：評価対象施設に想定される損傷モードにより、評価パラメータを設定

※5：最大水平速度及び最大鉛直速度については、衝撃荷重による影響を保守的に評価するため、竜巻影響評価ガイドに示される竜巻の最大風速(V_D)=100m/sの場合と同じ値とする。また、鋼製材の最大水平速度及び最大鉛直速度については、竜巻影響評価ガイド改正前の値とする。

※6：竜巻影響評価ガイドに基づき最大水平速度の2/3として算出

6. 設計飛来物の選定結果

上記1. から5. より、泊発電所における設計飛来物は、第3.3.3表及び第3.3.5図に示す。

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

また、砂利については、原子炉補機冷却海水ポンプ等への防護対策として設置する竜巻防護ネットを通過する可能性があること、鋼製パイプについては、使用済燃料ピット及び新燃料貯蔵庫に侵入した場合に燃料集合体に直接落下する可能性があることから、飛来物の影響を鋼製材にて包含できないため、設計飛来物として選定した。

第3.3.3表 泊発電所における設計飛来物

項目	飛来物の種類		
	砂利	鋼製パイプ	鋼製材
サイズ[m]	長さ×幅×奥行 0.04×0.04×0.04 ^{※1}	長さ×直径 2×0.05	長さ×幅×奥行 4.2×0.3×0.2
質量[kg]	0.18	8.4	135
最大水平速度[m/s]	62 ^{※2}	49 ^{※4}	57 ^{※4}
最大鉛直速度[m/s]	42 ^{※3}	33 ^{※4}	38 ^{※4}
浮き上がり高さ[m] ^{※2}	87.3	21.8	46.6
飛散距離[m] ^{※2}	397.7	293.3	331.5

※1 砂利のサイズは、竜巻防護ネットの金網が目開き5cm×5cmを2枚重ね、4cm×4cmを1枚重ねの構造、又は4cm×4cmを3枚重ねの構造となっていることを考慮して選定

※2 設計竜巻風速100m/s、当社が実施するランキン渦モデルの風速場を用いた飛散評価手法による結果

※3 竜巻影響評価ガイドに基づき最大水平速度の2/3として算出

※4 衝撃荷重による影響を保守的に評価するため、竜巻影響評価ガイドに示される竜巻の最大風速(V_D)=100m/sの場合と同じ値とする。また、鋼製材については、竜巻影響評価ガイド改正前の値とする。



(砂利)



(鋼製パイプ)



(鋼製材)

第3.3.5図 選定した設計飛来物の形状 (イメージ)

飛来物及び固定状況に係る調査結果について

泊発電所における飛来物及び固定状況に係るワークダウンは、平成 25 年 6 月 24, 25 日、平成 27 年 7 月 24 日～11 月 17 日及び令和 4 年 7 月 15 日～8 月 4 日に実施した。調査では、常設物、仮設物のうち飛来物となりうる物品（以下「想定飛来物」という。）、二次飛来物となりうる物品（設置状況等から風圧や飛散による被害を受けて飛来物となり得る物）及び常設物の設置状況の確認を行った。

1. 調査範囲

調査範囲は、竜巻影響評価ガイドを参考にするとともに、前述の代表的な飛来物の飛散評価結果において、代表的な飛来物の飛散距離は最大でも 400m 程度であることを踏まえ、原子炉建屋から約 550m（最短距離）～約 1100m（最長距離）の範囲（図 1）とした。

2. 調査方法

(1) 飛来物に対する調査

調査範囲を図 1 に示す区画に分割して、想定飛来物の寸法、設置場所及び設置状況を網羅的に確認した。具体的な内容については以下のとおり。

(a) 設置場所

想定飛来物が確認された設置場所を、各エリアの区画图毎に記録した。

(b) 設置状況

目視にて想定飛来物の設置状況を確認し、写真により記録した。

(c) 寸法測定

想定飛来物の平面寸法、高さを計測器を用いて測定した。

なお、同一区画にて同類の対象物があった場合は、寸法の大きなものを代表として測定した。

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

(2) 常設物の固定状況に対する調査

調査範囲内のうち、外部事象防護対象施設等から約 45m の範囲内に設置されている常設物については、固定状況を確認した。

具体的な内容については以下のとおり。

(a) 設置場所

常設物が確認された設置場所を記録した。

(b) 固定状況確認

外部事象防護対象施設等から約 45m の範囲内に設置されている常設物に対し、目視にて以下の観点で固定状況等の確認を行った。別添 1 に固定状況確認フロー及び確認結果を示す。

- ・ボルト固定により固定されているか
- ・溶接により固定されているか
- ・コンクリート一体構造により固定されているか
- ・ストッパ及びクランプ等により固定されているか

3. 調査結果

(1) 飛来物に対する調査

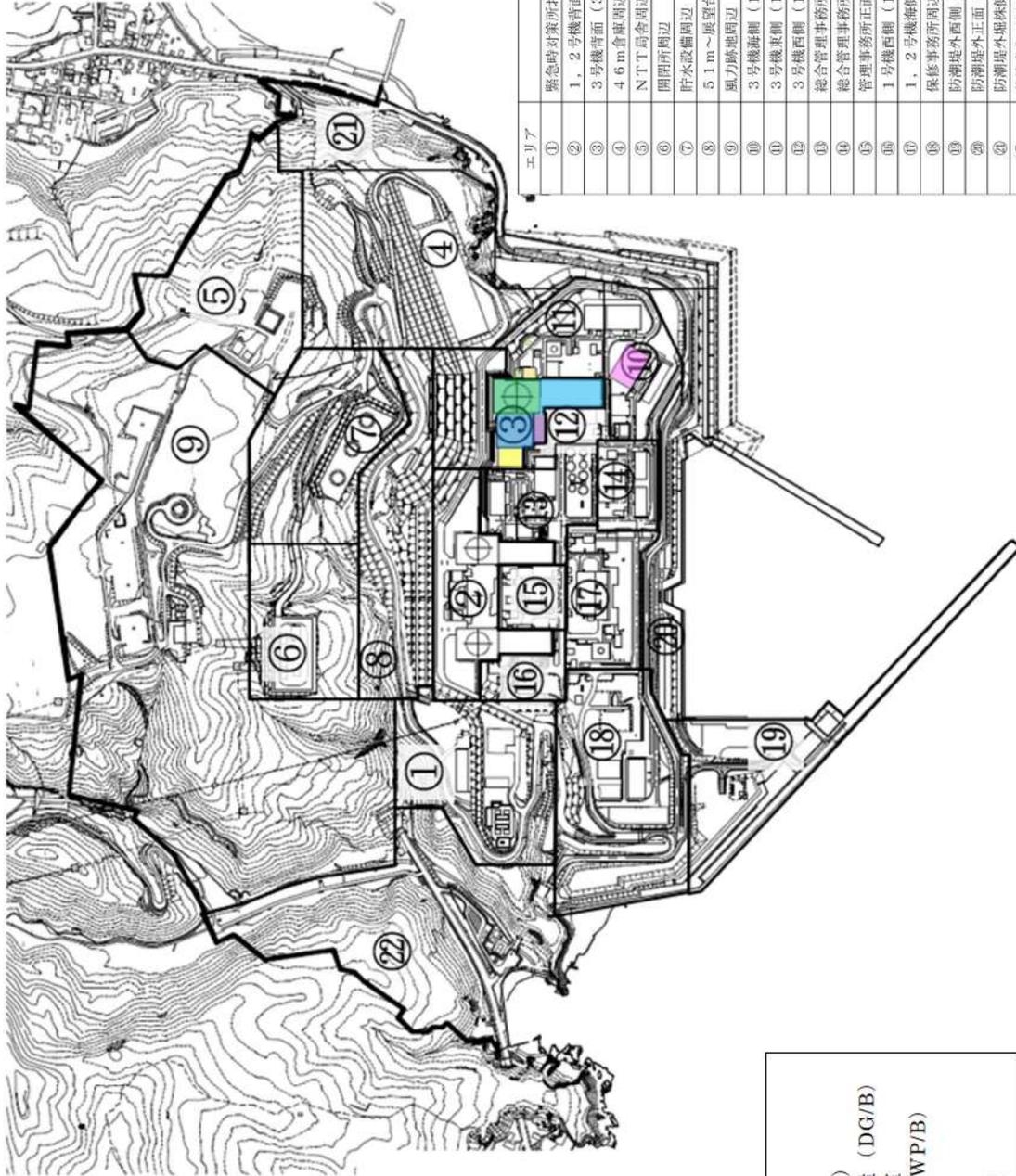
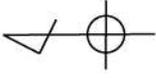
各エリアの区画図毎の飛来物(想定飛来物及び二次飛来物)調査結果を図 2 に示す。

(2) 常設物の固定状況に対する調査

外部事象防護対象施設等から約 45m の範囲内に設置されている常設物に対する固定状況について確認した結果を別添 1 に示す。

抽出された常設物はいずれも頑健に固定されていることを確認した。

P.N



- < 評価対象施設等 >
- : 原子炉建屋 (R/B)
 - : 原子炉補助建屋 (A/B)
 - : デイゼル発電機建屋 (DG/B)
 - : 燃料油貯油槽タンク室
 - : 循環水ポンプ建屋 (CWP/B)
 - : タービン建屋 (T/B)
 - : 電気建屋 (EL/B)
 - : 出入管理建屋 (AC/B)

エリア	名称
①	緊急時対策所および51m倉庫周辺
②	1, 2号機背面 (31m盤)
③	3号機背面 (31m盤)
④	46m倉庫周辺
⑤	NTT鳥舎周辺
⑥	開閉所周辺
⑦	貯水設備周辺
⑧	51m~展望台道路
⑨	風力除地周辺
⑩	3号機並側 (10m盤)
⑪	3号機東側 (10m盤)
⑫	3号機西側 (10m盤)
⑬	総合管理事務所周辺 (10m盤)
⑭	総合管理事務所海側 (10m盤)
⑮	管理事務所正面 (10m盤)
⑯	1号機西側 (10m盤)
⑰	1, 2号機海側 (10m盤)
⑱	保安事務所周辺 (10m盤)
⑲	防潮堤外西側 (10m盤)
⑳	防潮堤外正面 (10m盤)
㉑	防潮堤外東側 (10m盤)
㉒	茶津守衛所周辺

図1 調査範囲及び区分

泊発電所 想定飛来物

エリア①：緊急時対策所および51m倉庫周辺（1/2）

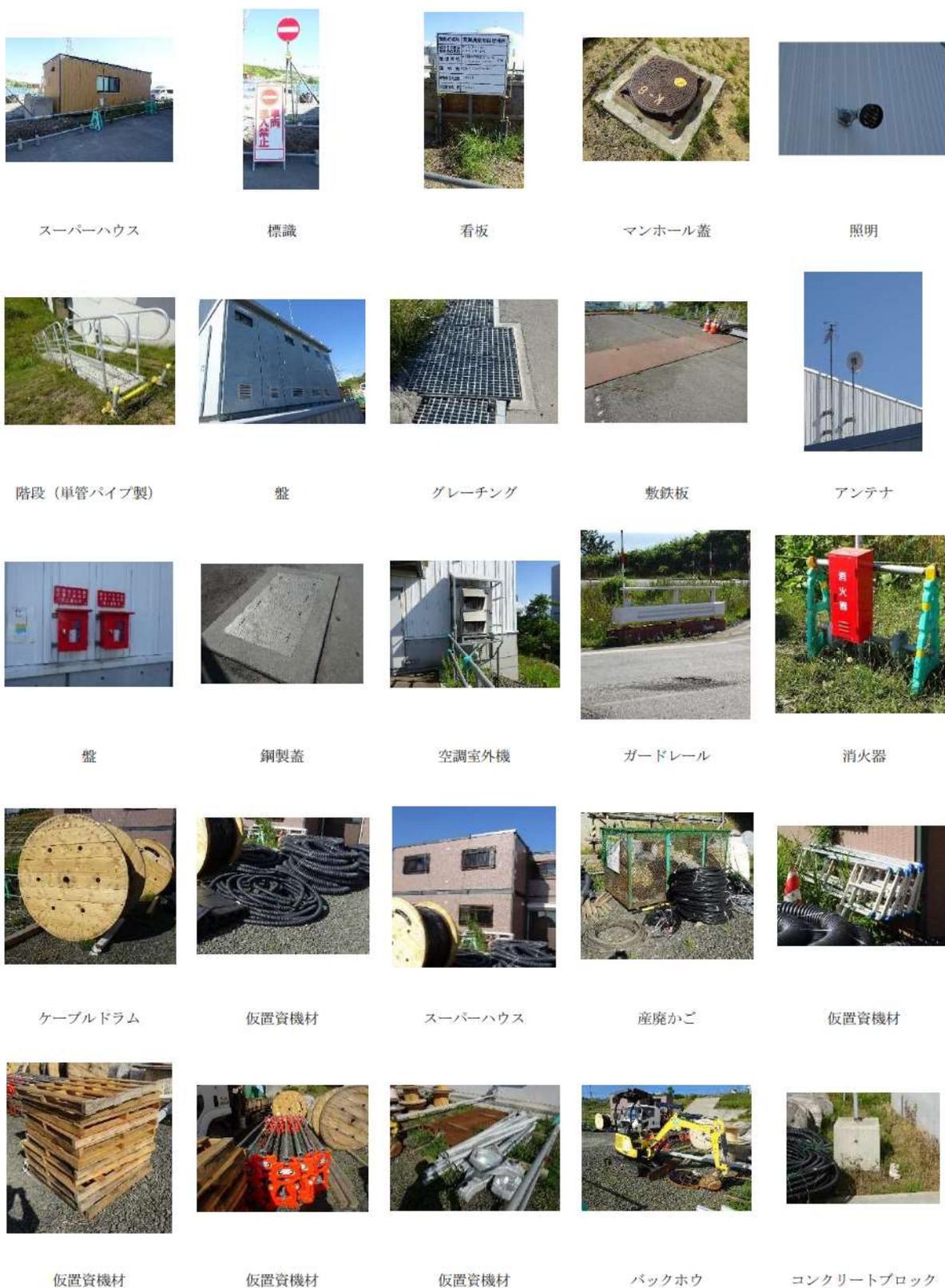


図2 飛来物（想定飛来物及び二次飛来物）の写真記録（1/36）

泊発電所 想定飛来物

エリア①：緊急時対策所および51m倉庫周辺（2/2）



消火栓



A型バリケード



コンクリート蓋



仮置資機材



仮置資機材



発電機



盤



分電盤



プレハブ車庫



コンクリートブロック



仮置資機材



表示器



カーブミラー



コンクリートブロック



砂箱

図2 飛来物（想定飛来物及び二次飛来物）の写真記録（2/36）

泊発電所 想定飛来物

エリア②：1，2号機背面（31m盤）（1／3）



盤



コルゲートチューブ



マンホール蓋



グレーチング



踏み台



標識



盤



砂利



鋼製蓋



照明



グレーチング



グレーチング



鋼管



盤



盤



盤



スピーカー



シルトフェンス車（4 t 車）



代替非常用発電機



可搬型代替電源車



ホイールローダ



バックホウ



ガードレール

図2 飛来物（想定飛来物及び二次飛来物）の写真記録（3／36）

泊発電所 想定飛来物
 エリア②：1，2号機背面（31m盤）（2／3）



発電機



木材



消火栓（ホース格納箱）



消火栓



標識



コンクリートブロック



鋼板



コンクリートブロック



鋼板



踏み台



階段（単管パイプ製）



発電機



カードル



手すり



スーパーハウス



柵（ポール）



可搬型タンクローリー



ブルドーザ



手すり



ユニック車



仮置資機材



鋼製箱



仮置資機材



仮置資機材



仮置資機材

図2 飛来物（想定飛来物及び二次飛来物）の写真記録（4／36）

泊発電所 想定飛来物

エリア②：1，2号機背面（31m盤）（3／3）



仮置資機材



鋼管



投光器



鋼製材



かご



鋼板



標識



敷鉄板



鋼製蓋



鋼管

図2 飛来物（想定飛来物及び二次飛来物）の写真記録（5／36）

泊発電所 想定飛来物

エリア③：3号機背面（31m盤）（1／2）

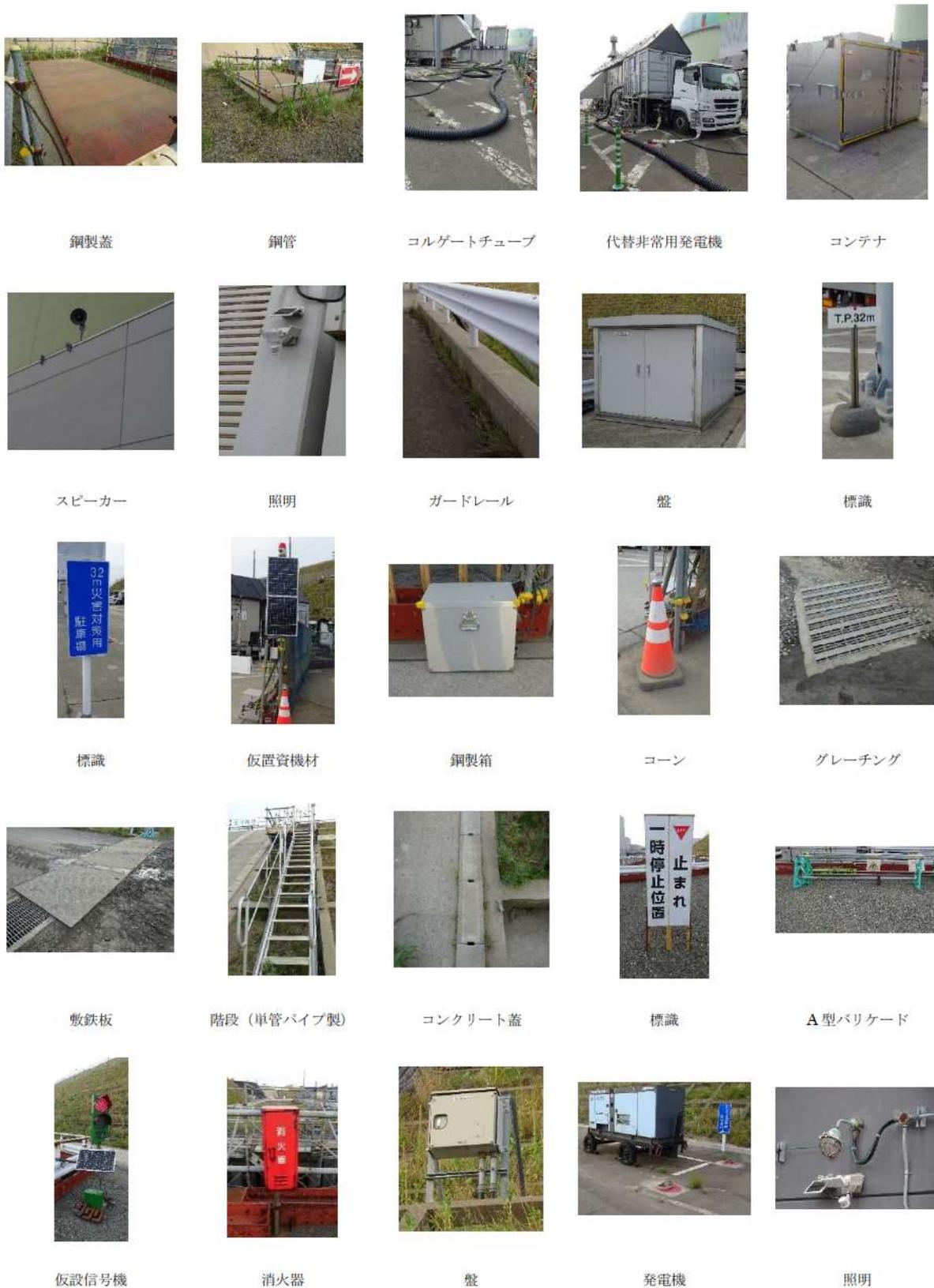


図2 飛来物（想定飛来物及び二次飛来物）の写真記録（6／36）

泊発電所 想定飛来物
 エリア③：3号機背面（31m盤）（2/2）



盤



可搬型大型送水ポンプ車



柵（ベース）



空調室外機



スロープ



盤



消火器



発電機



放水砲



可搬型タンクローリー



車両進入防止バリケード



盤



コンクリート蓋



発電機



コンテナ

図2 飛来物（想定飛来物及び二次飛来物）の写真記録（7/36）

泊発電所 想定飛来物
 エリア④：46m倉庫周辺（1/2）



照明



階段（H鋼製）



木材



マンホール蓋



グレーチング



標識



コーン



盤



踏み台



ガードレール



コンクリート蓋



鋼製蓋



鋼製箱



鋼管



砂利



仮置資機材



仮置資機材



消火器



カーブミラー



コーン



仮置資機材



仮置資機材



鋼板



盤



コンクリート蓋

図2 飛来物（想定飛来物及び二次飛来物）の写真記録（8/36）

泊発電所 想定飛来物
 エリア④：46m倉庫周辺（2/2）



仮置資機材



敷鉄板



コーン



鋼製材



A型バリケード



バックホウ



消火器



仮置資機材



パレット



仮置資機材



仮置資機材



空調室外機



仮設タンク



グレーチング



鋼製材



仮置資機材



仮置資機材



コルゲートチューブ



かご



プレハブ小屋



アンテナ

図2 飛来物（想定飛来物及び二次飛来物）の写真記録（9/36）

泊発電所 想定飛来物
 エリア⑤：NTT局舎周辺（1／1）



図2 飛来物（想定飛来物及び二次飛来物）の写真記録（10/36）

泊発電所 想定飛来物
 エリア⑥：開閉所周辺（1 / 1）

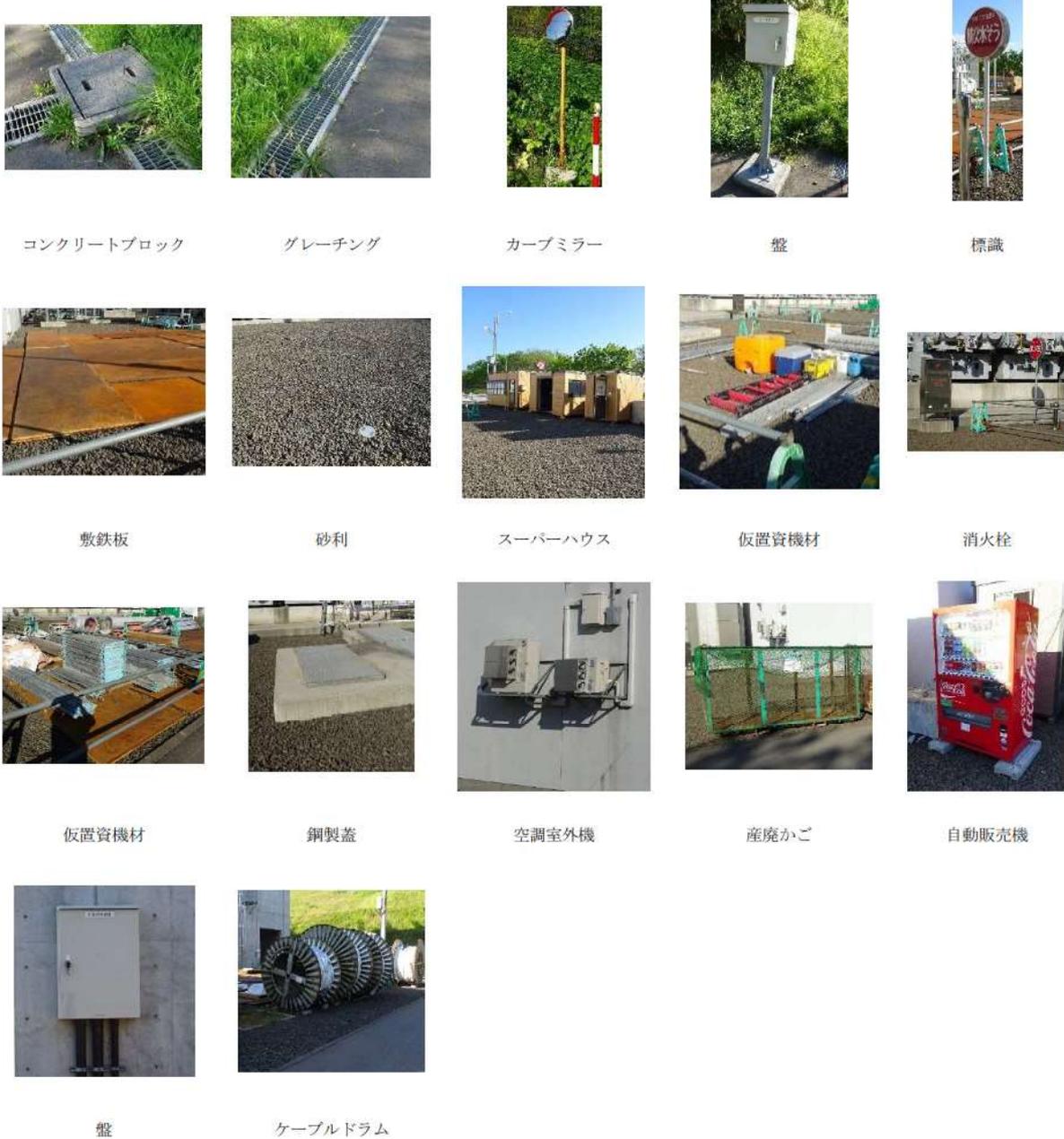


図2 飛来物（想定飛来物及び二次飛来物）の写真記録（11/36）

泊発電所 想定飛来物
 エリア⑦：貯水設備周辺（1 / 1）



標識



投光器



コンクリート蓋



マンホール蓋



ガードレール



グレーチング



標識



仮置資機材



仮置資機材



グレーチング



コンクリートブロック



コンクリートブロック



コンクリートブロック



仮置資機材



A型バリケード



盤



盤



仮置資機材



階段（単管パイプ製）

図2 飛来物（想定飛来物及び二次飛来物）の写真記録（12/36）

泊発電所 想定飛来物
 エリア⑧：51m～展望台道路（1/1）



コンクリートブロック



柵（木）



ガードレール



マンホール蓋



銅板



ユニック車



可搬型タンクローリー



トラック



大規模損壊対応用変圧器車



コンテナ



コンテナ式運搬車



コーン



標識



階段（単管パイプ製）



盤



クッションドラム



スーパーハウス

図2 飛来物（想定飛来物及び二次飛来物）の写真記録（13/36）

泊発電所 想定飛来物
 エリア⑨：風力跡地周辺（1 / 2）



図2 飛来物（想定飛来物及び二次飛来物）の写真記録（14/36）

泊発電所 想定飛来物
エリア⑨：風力跡地周辺（2 / 2）



発電機



物置



可搬型大容量海水送水ポンプ車



ガードレール

図2 飛来物（想定飛来物及び二次飛来物）の写真記録（15/36）

泊発電所 想定飛来物
 エリア⑩：3号機海側（10m盤）（1/2）

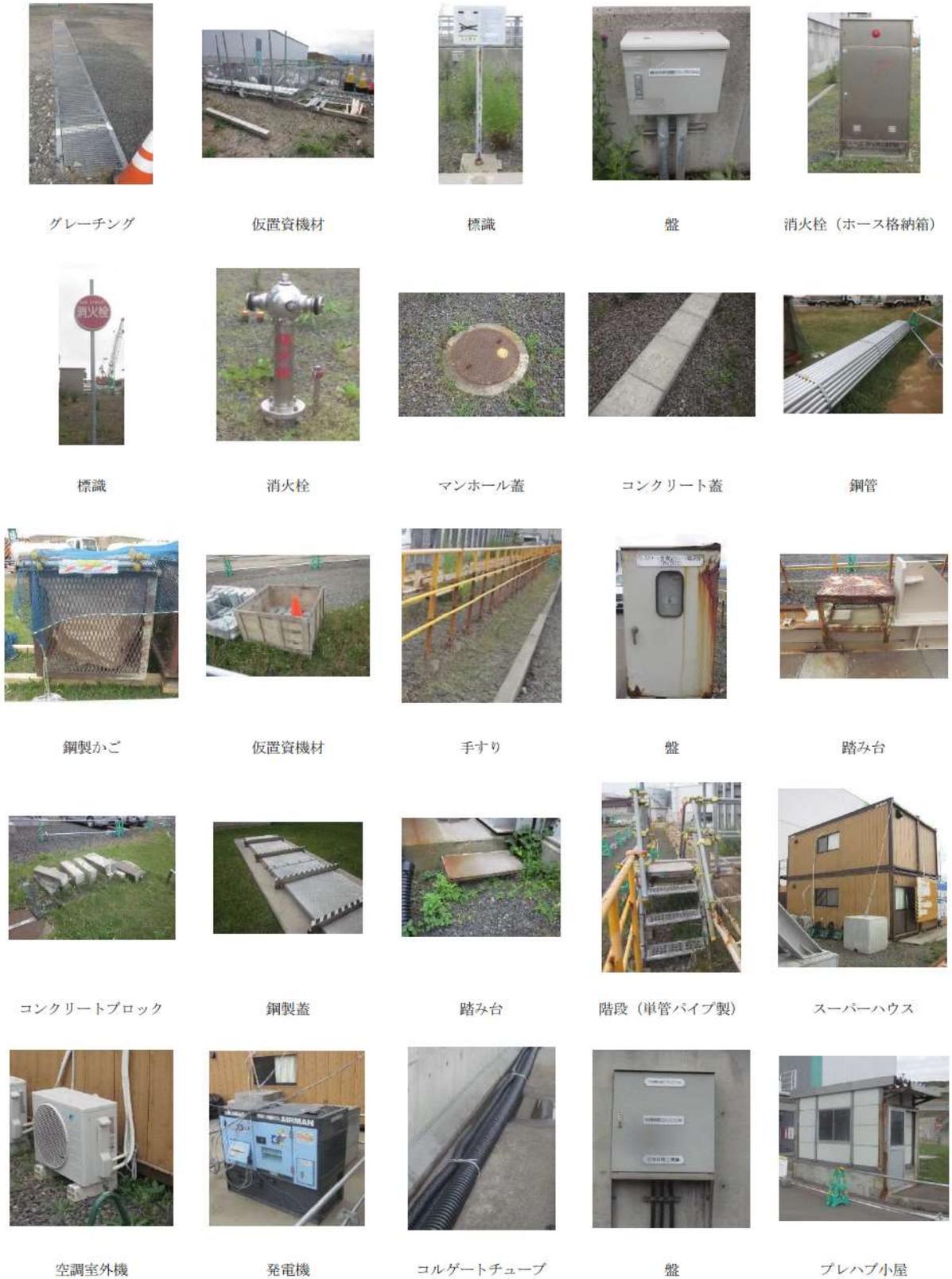


図2 飛来物（想定飛来物及び二次飛来物）の写真記録（16/36）

泊発電所 想定飛来物
エリア⑩：3号機海側（10m盤）（2/2）



パレット



かご



鋼管



盤



鋼製蓋



盤



標識



コンクリートブロック



空調室外機



盤

図2 飛来物（想定飛来物及び二次飛来物）の写真記録（17/36）

泊発電所 想定飛来物

エリア⑩：3号機東側（10m盤）（1/2）



図2 飛来物（想定飛来物及び二次飛来物）の写真記録（18/36）

泊発電所 想定飛来物

エリア⑩：3号機東側（10m盤）（2／2）



A型バリケード



コンクリート蓋



鋼管



仮置資機材



プレハブ車庫



空調室外機

図2 飛来物（想定飛来物及び二次飛来物）の写真記録（19/36）

泊発電所 想定飛来物
 エリア⑫：3号機西側（10m盤）（1／2）

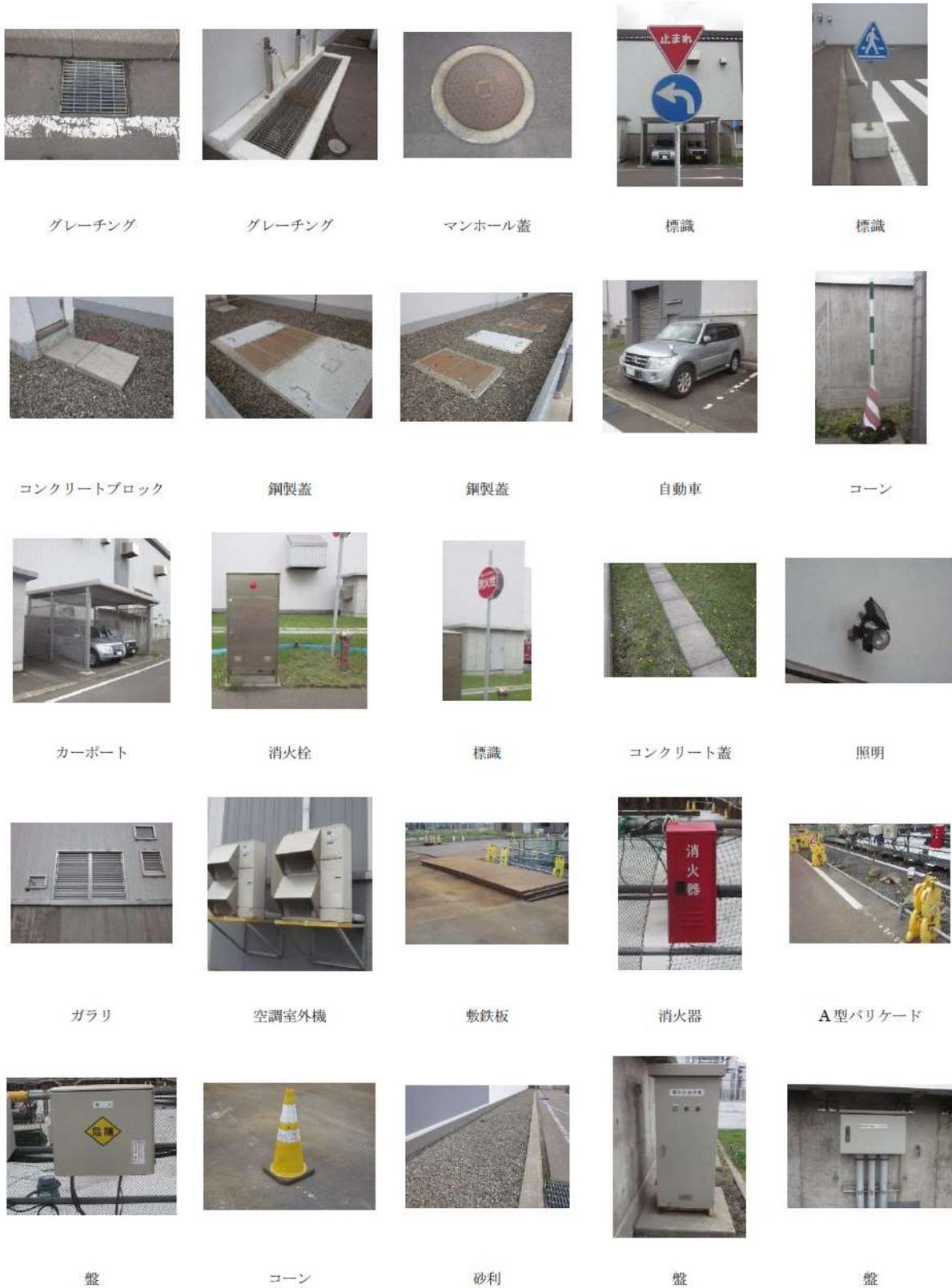


図2 飛来物（想定飛来物及び二次飛来物）の写真記録（20/36）

泊発電所 想定飛来物
 エリア⑫：3号機西側（10m盤）（2/2）



図2 飛来物（想定飛来物及び二次飛来物）の写真記録（21/36）

泊発電所 想定飛来物

エリア⑬：総合管理事務所周辺（10m盤）（1／2）



標識



鋼製蓋



マンホール蓋



グレーチング



標識



消火栓（ホース格納箱）



盤



鋼製蓋



コンクリート蓋



マンホール蓋



グレーチング



鋼製蓋



コンクリートブロック



盤



スーパーハウス



発電機



敷鉄板



空調室外機



コーン



発電機



クッションドラム



アーケード屋根



レンガ

図2 飛来物（想定飛来物及び二次飛来物）の写真記録（22/36）

泊発電所 想定飛来物

エリア⑬：総合管理事務所周辺（10m盤）（2/2）



銅製蓋



照明



標識



コンクリート蓋



スーパーハウス



仮置資機材



アンテナ



アンテナ



空調室外機



盤



スピーカー

図2 飛来物（想定飛来物及び二次飛来物）の写真記録（23/36）

泊発電所 想定飛来物

エリア⑭：総合管理事務所海側（10m盤）（1/1）



標識



クッションドラム



コーン



空調室外機



看板



仮置資機材



敷鉄板



仮置資機材



仮置資機材



鋼製蓋



産廃庫



空調室外機



アーケード屋根



発電機



標識



スーパーハウス



マンホール蓋



鋼製蓋



消火栓



H鋼



仮置資機材



砂利



グレーチング

図2 飛来物（想定飛来物及び二次飛来物）の写真記録（24/36）

泊発電所 想定飛来物

エリア⑮：管理事務所正面（10m盤）（1/1）



アーケード屋根



標識



消火栓



A型バリケード



鋼管



柵（木）



マンホール蓋



コンクリートブロック



コンクリートブロック



コーン



空調室外機



コンクリート蓋



砂利



盤



看板



標識



グレーチング



鋼製蓋



プレハブ車庫



標識



スロープ



スーパーハウス

図2 飛来物（想定飛来物及び二次飛来物）の写真記録（25/36）

泊発電所 想定飛来物

エリア⑩：1号機西側（10m盤）（1／1）



図2 飛来物（想定飛来物及び二次飛来物）の写真記録（26/36）

泊発電所 想定飛来物

エリア⑩：1, 2号機海側（10m盤）（1/2）



A型バリケード



産廃かご



発電機



砂利



スーパーハウス



階段（H鋼製）



標識



グレーチング



鋼製蓋



空調室外機



ガードレール



消火栓



看板



鋼製箱



看板



盤



盤



自動販売機



プレハブ小屋



空調室外機



クッションドラム



標識



階段（単管パイプ製）



アーケード屋根



看板

図2 飛来物（想定飛来物及び二次飛来物）の写真記録（27/36）

泊発電所 想定飛来物

エリア⑰：1, 2号機海側（10m盤）（2/2）



鋼製蓋



盤



踏み台

図2 飛来物（想定飛来物及び二次飛来物）の写真記録（28/36）

泊発電所 想定飛来物

エリア⑱： 保守事務所周辺（10m盤）（1/3）



標識



グレーチング



看板



標識



階段（単管パイプ製）



照明



手すり



鋼管



照明



ガードレール



マンホール蓋



コンクリート蓋



消火栓



スピーカー



プレハブ小屋



踏み台



プレハブ小屋



標識



スーパーハウス



空調室外機



鋼製蓋



アーケード屋根



スーパーハウス



空調室外機



柵（ボール）

図2 飛来物（想定飛来物及び二次飛来物）の写真記録（29/36）

泊発電所 想定飛来物
 エリア⑱： 保守事務所周辺（10m盤）（2 / 3）



コーン



踏み台



産廃かご



鋼管



標識



空調室外機



消火栓（ホース格納箱）



標識



消火栓



盤



ホイールローダ



バックホウ



かご



標識



空調室外機



仮置資機材



敷鉄板



盤



かご



コンクリート蓋



靴泥落とし



仮置資機材



角ふた



梯子



仮置資機材

図2 飛来物（想定飛来物及び二次飛来物）の写真記録（30/36）

泊発電所 想定飛来物
 エリア⑱： 保守事務所周辺（10m盤）（3 / 3）

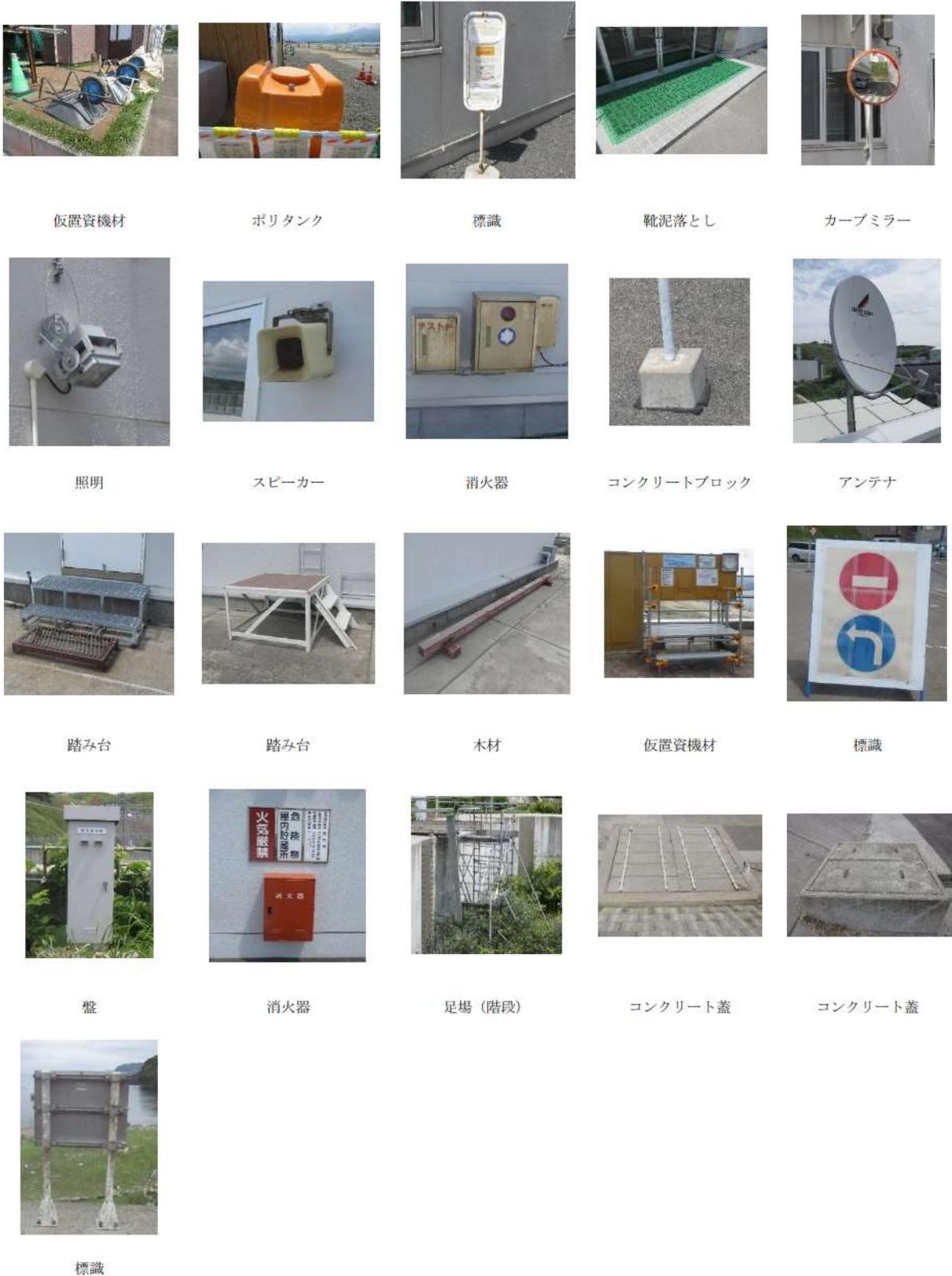


図2 飛来物（想定飛来物及び二次飛来物）の写真記録（31/36）

泊発電所 想定飛来物
 エリア⑱：防潮堤外西側（10m盤）（1／1）



図2 飛来物（想定飛来物及び二次飛来物）の写真記録（32/36）

泊発電所 想定飛来物
 エリア⑳：防潮堤外正面（10m盤）（1／1）



図2 飛来物（想定飛来物及び二次飛来物）の写真記録（33/36）

泊発電所 想定飛来物
 エリア②：防潮堤掘株側（10m盤）（1/1）



鋼管



A型バリケード



鋼材



マンホール蓋



仮置資機材



仮置資機材



ポリタンク



スーパーハウス



産廃かご



仮置資機材



仮置資機材



階段



仮設信号機



グレーチング



標識



看板



マンホール蓋



標識



盤



アンテナ



階段（単管パイプ製）



車両進入防止バリケード



空調室外機



スロープ

図2 飛来物（想定飛来物及び二次飛来物）の写真記録（34/36）

泊発電所 想定飛来物
 エリア②：茶津守衛所周辺（1 / 1）



手すり



マンホール蓋



コーン



A型バリケード



コンクリート蓋



空調室外機



コンクリートブロック



踏み台



標識



アーケード屋根



標識



グレーチング



標識



標識



標識



クッションドラム



ガードパイプ



表示器



電話ボックス



看板



鋼板

図2 飛来物（想定飛来物及び二次飛来物）の写真記録（35/36）

泊発電所 二次飛来物



扉, 屋根



扉, 手すり



扉, 屋根



扉



シャッター, 屋根



シャッター



シャッター, 扉



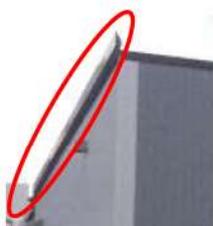
屋根



屋根



ガラス窓



雪庇止め



ガラス窓



ガラス窓



ガラス窓



雨どい



雨どい



外壁, 屋根



外壁, 屋根



ポリカーボネート窓, 屋根



照明器具



鋼製階段



鋼製階段



配管

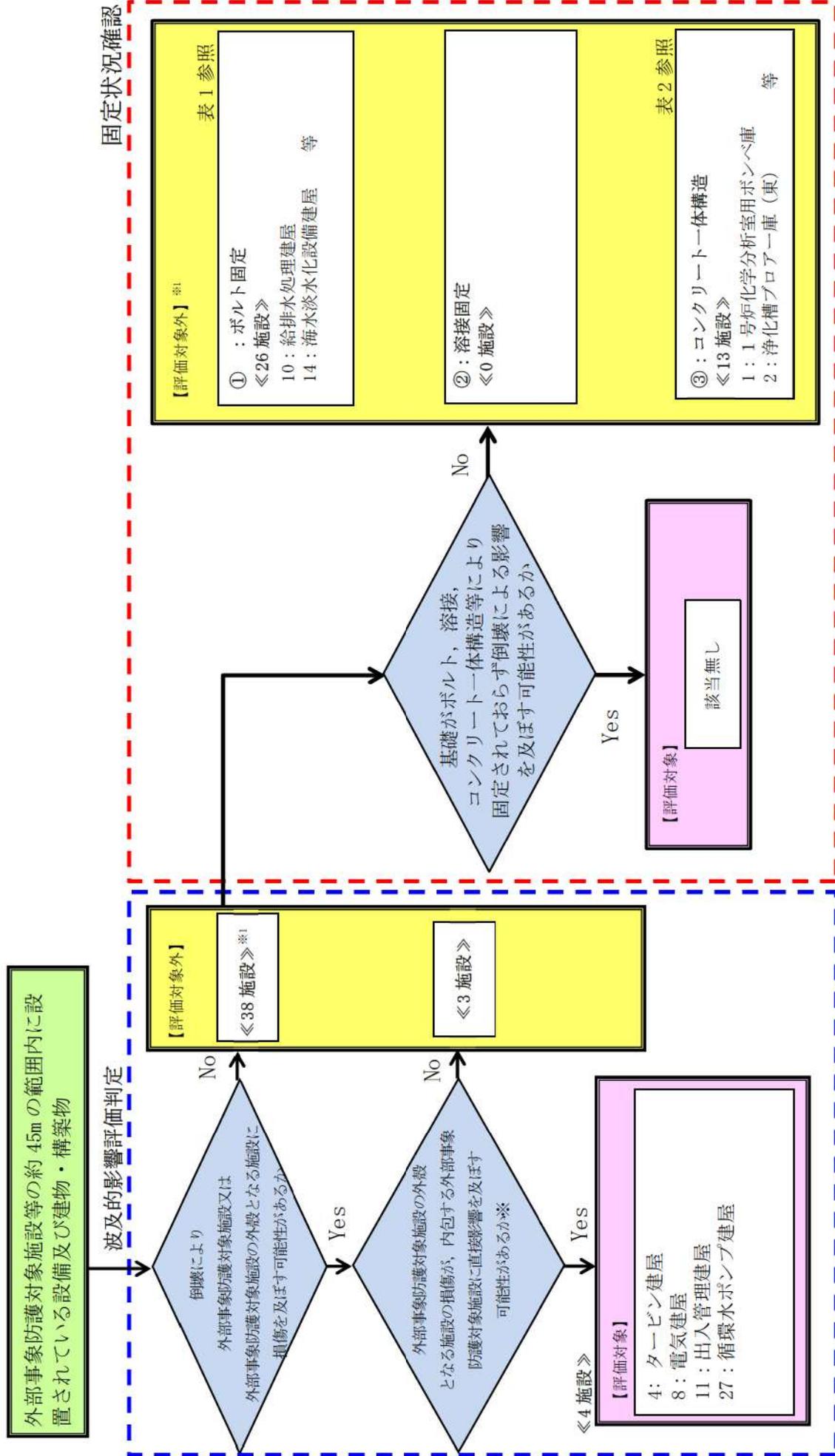


アンテナ



外壁 (セメント板)

図2 飛来物 (想定飛来物及び二次飛来物) の写真記録 (36/36)



※1 津波防護施設等については、基礎津波の高さや防護範囲の広さ等の重要性を鑑み、自主的に機能維持のための配慮を行う

表1 固定状況確認による評価対象一覧表（ボルト固定）【26施設】

No.	施設名	No.	施設名	No.	施設名
3	電気防食装置	23	油計量タンク	35	副制御盤（PPA256）
10	給排水処理建屋	24	副制御盤（PPA217）	36	副制御盤（PPA253）
14	海水淡水化設備建屋	25	連絡装置収納盤（ST222）	37	中継盤（PPJ201）
17	電気防食装置	26	小屋	39	Hダクト排気塔（タービン建屋南）
18	3号機発電機ガスボンベ貯蔵庫	30	3-スクリーン室橋形クレーン電源盤	42	電気盤
19	電気防食装置	31	代替給電用接続盤3(1)(2)	43	タービン建屋避雷針
20	3号機補助ボイラー燃料タンク	32	代替給電用接続盤3(3)(4)	44	循環水ポンプ建屋避雷針
21	補助ボイラー煙突	33	3-代替非常用発電機保守分電盤(1)	45	原子炉建屋避雷針
22	補助ボイラー建屋	34	3号機移動用発電機車用保守分電盤		

表2 固定状況確認による評価対象一覧表（コンクリート一体構造）【13施設】

No.	施設名	No.	施設名	No.	施設名
1	Aダクト給気塔	9	Fダクト給気塔	38	Hダクト給気塔（タービン建屋南）
2	浄化槽ブローアーク（東）	12	洞道冷却ファン建屋	40	Fダクト排気塔（出入管理建屋南）
5	Dダクト排気塔	13	Eダクト給気塔	41	旧3号出入管理建屋
6	Aダクト排気塔	15	Gダクト排気塔		
7	CVケーブルダクト排気塔	16	Gダクト給気塔		

分解し小型軽量となる物品及び倒壊するが飛来物とはならない物品等について

設計飛来物の抽出において、「分解し小型軽量となる物品」は設計飛来物のうち鋼製材に包絡されること、また「倒壊するが飛来物とはならない物品」は飛散しないことから、設計飛来物として選定しないこととしている。

これは、過去の主な竜巻の被害概要の調査結果等から、このような物品の状況について検討を行った結果より判断している。

以下に平成2年以降の主な竜巻による被害概要を調査した文献から検討を行った結果を示す。「分解し小型軽量となる物品」、「倒壊するが飛来物とはならない物品」は泊発電所におけるウォークダウン結果を念頭に状況を示す。

1. 分解し小型軽量となる物品（確認対象：屋外屋根、シャッター、ガラス窓、仮設足場）

泊発電所におけるウォークダウンの結果、過去の竜巻の被害概要調査結果において、分解し小型軽量となり得た物品に類似するものとして、屋外屋根、シャッター、ガラス窓、仮設足場を確認した。過去の実績における屋外屋根、シャッター、ガラス窓、仮設足場の被害状況は以下のとおり。

(1) 屋外屋根の被害状況

図1～5に屋外屋根の被害状況を示す。これらより、屋外屋根については、F0～F3の被害状況において形を保ったままではなく、分解された状態で飛来していることが分かる。また、厚みが薄く、受風面積が大きいいため風の影響を受けやすいことから形状が変形（柔飛来物）しており、剛飛来物に比べ、貫通等の影響が小さくなると考えられる。



牛舎の屋根東方向、柱・トタン板は西方向に飛散している

図1 平成16年6月27日 佐賀県で発生したF2竜巻による野外屋根の被害状況⁽¹⁾



カーポート屋根の飛散及び骨組の損傷



カーポート屋根の破損



屋外トイレ屋根の損傷

図2 平成18年9月17日 宮崎県延岡市で発生したF2 竜巻による屋外屋根の被害状況⁽²⁾



折板の損傷



カーポートの被害

図3 平成21年10月8日 茨城県土浦市で発生したF1 竜巻による屋外屋根の被害状況⁽³⁾



周囲の田に散乱した屋根ふき材

図4 平成24年2月1日 島根県出雲市で発生したF0 竜巻による屋外屋根の被害状況⁽⁴⁾



飛散した鋼板製屋根材



飛散した折板屋根の状況



電線等に引っ掛かった飛来物（鋼板製屋根材）



図5 平成24年5月6日 茨城県つくば市で発生したF3 竜巻による屋外屋根の被害状況⁽⁵⁾

(2) シャッターの被害状況

図6～10にシャッターの被害状況を示す。これらより、シャッターについては、F1～F3、EF5※1の竜巻において形状は変形しているが、固定部が外れていないことが確認できる。

※1 改良藤田スケール (Enhanced Fujita scale)。EF5は風速90m/s以上。



シャッターの被害

図6 平成20年5月25日 米国アイオワ州で発生したEF5 竜巻によるシャッター被害状況⁽⁶⁾



シャッターの破損

図7 平成21年10月8日 茨城県土浦市で発生したF1 竜巻によるシャッターの被害状況⁽³⁾



シャッターの外れ

図8 平成21年7月27日 群馬県館林市で発生したF1(F2)竜巻によるシャッターの被害状況⁽⁷⁾



消防団施設のシャッターの被害状況

図9 平成24年5月6日 茨城県つくば市で発生したF3竜巻によるシャッターの被害状況⁽⁵⁾



シャッターの被害

図10 平成25年9月2日 埼玉県で発生したF2竜巻によるシャッターの被害状況⁽⁸⁾

(3) ガラス窓の被害状況

図1 1～1 6にガラス窓の被害状況を示す。これらより、ガラス窓については、F0～F3、EF5の竜巻において損壊し、分解されていることが確認できる。分解された状態では、小型軽量となっており、設計飛来物である鋼製材、鋼製パイプ又は砂利に包含されることが考えられる。



エントランスの窓ガラスの破損



破損した窓ガラス片の屋内
(壁面への突き刺さり)

図1 1 平成18年9月17日 宮崎県延岡市で発生したF2 竜巻によるガラス窓の被害状況⁽²⁾



バスの窓ガラス破損

図1 2 平成20年5月25日 米国アイオワ州で発生したEF5 竜巻によるガラス窓の被害状況⁽⁶⁾



窓ガラスの損壊



窓ガラスの飛来物衝突痕

図13 平成21年7月27日 群馬県館林市で発生したF1(F2)竜巻によるガラス窓の被害状況⁽⁷⁾



エントランスのガラス破損



倉庫の窓ガラスと屋根の被害状況



窓ガラスの破損

図14 平成21年10月8日 茨城県土浦市で発生したF1竜巻によるガラス窓の被害状況⁽³⁾



体育館窓ガラスの破損



(1) 教室 (2) 廊下 (3) 屋外に面した窓ガラス

本館 4 階の廊下と教室内のガラス破片の散乱状況

図 1 5 平成 24 年 2 月 1 日 島根県出雲市で発生した F0 竜巻によるガラス窓の被害状況⁽⁴⁾



店舗の窓ガラスの被害状況

ガラスへの飛来物の衝突痕

図 1 6 平成 24 年 5 月 6 日 茨城県つくば市で発生した F3 竜巻によるガラス窓の被害状況⁽⁵⁾

(4) 仮設足場の被害状況

図17に仮設足場の被害状況を示す。これらより、仮設足場については、F2の竜巻において倒壊していることが確認できる。各足場パイプはクランプで固定されているため、足場パイプは容易に分解せず、仮設足場はほぼ組まれた状態で倒壊している。



仮設足場の倒壊

図17 平成18年9月17日 宮崎県延岡市で発生したF2竜巻による仮設足場の被害状況⁽⁹⁾

2. 泊発電所の屋外屋根、シャッター、ガラス窓、仮設足場の状況

泊発電所における屋外屋根の状況を図18、シャッターの状況を図19、ガラス窓の状況を図20、仮設足場の状況を図21に示す。泊発電所におけるこれらの物品の構造については、上記1.の被害にあった物品の構造と大きく変わらないことから、竜巻通過時には、同様の被害状況になると考えられる。

そのため、上記1.の被害状況からこれらの物品については、飛散をしていないシャッターを除き、二次飛来物となる可能性があるが、ガラス窓は設計飛来物である鋼製材、鋼製パイプ又は砂利に包含される。仮設足場はほぼ組まれた状態で倒壊していることを踏まえ、仮設足場の各部材が容易に飛散しないよう、足場材の緊結等の適切な飛散防止対策を行う運用とする。屋外屋根については、現場調査の結果等において、容易に飛散する状況でないことを確認している。屋外屋根は飛散したとしても変形し柔飛来物となるため、貫通等の影響は小さいと考えられる。



図18 泊発電所における屋外屋根の状況



図 1 9 泊発電所におけるシャッターの状況



図 2 0 泊発電所におけるガラス窓の状況



図 2 1 泊発電所における仮設足場の状況

3. 倒壊するが飛来物とならない物品（確認対象：樹木，フェンス）

泊発電所におけるウォークダウンの結果，過去の竜巻の被害概要調査結果において，倒壊するが飛来物とならない物品に類似するものとして，樹木，フェンスを確認した。過去の実績における樹木，フェンスの被害状況は以下のとおり。

(1) 樹木

図2 2～2 8に樹木の被害状況を示す。これらより，樹木については，F1～F3 及びEF5 の被害状況において幹の折損，根の引き抜き等が見られるが折れた場合，引き抜かれた場合どちらにおいてもその場で横倒れしているのみである。



倒木（南から見る）



倒木（北西から見る）

倒れなかった樹木も点在している。

図2 2 平成14年7月26日 群馬県境町で発生したF2 竜巻による樹木被害状況⁽¹⁰⁾



樹木の転倒



樹木の転倒（緑ヶ丘）

図2 3 平成18年9月17日 宮崎県延岡市で発生したF2 竜巻による樹木被害状況⁽²⁾



樹木の折損

図24 平成20年5月25日 米国アイオワ州で発生したEF5 竜巻による樹木被害状況⁽⁶⁾



倒木 (火打谷地区)

図25 平成21年7月19日 岡山県美作市で発生したF2 竜巻による樹木被害状況⁽¹¹⁾



倒木の被害

図26 平成21年10月8日 茨城県土浦市にて発生したF1 竜巻による樹木被害状況⁽³⁾



倒木の折損



倒木の折損と鳥居の被害



樹木の倒木



倒木による社の倒壊

図27 平成24年5月6日 茨城県つくば市で発生したF3竜巻による樹木被害状況⁽⁵⁾



樹木の倒壊



樹木の倒壊による小屋組の被害



樹木の被害



樹木の被害



樹木の被害



樹木の被害



樹木の被害

図 2 8 平成 25 年 9 月 2 日 埼玉県で発生した F2 竜巻による樹木被害状況⁽⁸⁾⁽¹²⁾

(2) フェンス

図29～31にフェンスの被害状況を示す。これらよりフェンスについては、F1～F3の被害状況において傾き、倒壊等が見られるが、樹木と同様にその場で倒壊しているのみである。



フェンスの著しい変形



フェンスの変形

図29 平成21年7月27日 群馬県館林市で発生したF1(F2)竜巻によるフェンスの被害状況⁽⁷⁾



フェンスの被害状況

図30 平成24年5月6日 茨城県つくば市で発生したF3竜巻によるフェンスの被害状況⁽⁵⁾



フェンスの倒壊



屋上フェンスの被害



フェンスの倒壊



支柱部の破断



フェンスの被害（工事中の建築物）



フェンスの被害

図 3 1 平成 25 年 9 月 2 日 埼玉県で発生した F2 竜巻によるフェンスの被害状況⁽⁸⁾

4. 泊発電所の樹木、フェンスの状況

泊発電所における樹木の状況を図32、フェンスの状況を図33に示す。

上記3. のとおり、被害にあった樹木・フェンスと規模、構造等に大きな差はないことから、竜巻通過時には同様の被害状況になり、折損等によりその場で横倒れすると考えられる。また、被害状況からも分かるが、樹木等は竜巻により倒壊するものの、竜巻はすでに通り過ぎているため、巻き上げ等により飛来物となることは考えにくいことから、樹木及びフェンスは設計飛来物として選定しない。



図32 泊発電所における樹木の状況



図33 泊発電所におけるフェンスの状況

参考文献

- (1) 「佐賀市・鳥栖市竜巻現地被害調査報告」(平成 16 年 7 月 13 日)
- (2) 「2006 年台風 13 号被害調査報告－延岡市の竜巻被害と飯塚市文化施設の屋根被害－」(平成 18 年 10 月 10 日)
- (3) 「平成 21 年 10 月 8 日茨城県土浦市竜巻被害調査」(平成 21 年 10 月 13 日)
- (4) 「平成 24 年 2 月 1 日島根県出雲市で発生した突風被害調査報告」(平成 24 年 2 月 14 日)
- (5) 「平成 24 年(2012 年)5 月 6 日に茨城県つくば市で発生した建築物等の竜巻被害調査報告」(ISSN1346-7328 国総研資料第 703 号 ISSN0286-4630 建築研究資料第 141 号平成 25 年 1 月)
- (6) 「米国アイオワ州におけるトルネード被害調査報告」(平成 20 年 6 月 9 日)
- (7) 「平成 21 年 7 月 27 日群馬県館林市竜巻被害調査報告」(平成 21 年 8 月 17 日一部修正)
- (8) 「平成 25 年 9 月 2 日に発生した竜巻による埼玉県越谷市, 北葛飾郡松伏町及び千葉県野田市での建築物等被害(速報)」(国土交通省国土技術政策総合研究所独立行政法人建築研究所平成 25 年 9 月 10 日一部修正)
- (9) 「2006 年台風 13 号に伴って発生した竜巻による延岡市の建物被害」
- (10) 「群馬県境町で発生した突風による建築物等の被害について」(平成 14 年 7 月 26 日独立行政法人建築研究所)
- (11) 「平成 21 年 7 月 19 日岡山県美作市竜巻被害調査報告」(平成 21 年 8 月 4 日)
- (12) 「現地災害調査速報」(平成 25 年 9 月 13 日熊谷地方気象台・銚子地方気象台東京管区気象台)

(参考)

竜巻時に発生するひょうの影響について

竜巻時はひょうを伴うこともあるため、ひょうに関する文献を参考にひょうの影響について検討を行った。

ひょうはあられが大きく成長したもので、直径 0.5cm 以上の氷の粒子である。ひょうの大きさは、通常は直径が 0.5~5cm である⁽¹⁾。このことから、直径 5cm のひょうを対象に影響評価を行う。なお、ひょうの大きさの変化に対する影響を確認するため、比較対象として、参考文献⁽²⁾に記載のひょうで最大である 10cm のひょうにて評価を実施した。

空中を落下する物体は空気抵抗を受けるので、時間が経てば空気抵抗と重力が釣り合い等速運動となり、一定の速度（終端速度）となる。空中を落下するひょうもこの終端速度で落下する。ひょうの粒径毎の終端速度を表 1 に示す。

表 1 ひょうの粒径毎の終端速度⁽²⁾

粒径 (cm)	終端速度 (m/s)
1	9
2	16
5	33
10	59

ひょうの大きさの変化に対する影響を確認するため、粒径 5 cm 及び 10 cm のひょう並びに設計飛来物（鋼製材）について、運動エネルギー、貫通力（貫通限界厚さ）の評価を行った。結果を表 2 に示す。

ひょうの影響は設計飛来物（鋼製材）と比較し十分小さく、包含できると言える。

表 2 粒径 5cm 及び 10cm ひょう並びに設計飛来物（鋼製材）の影響評価

		粒径 5cm ひょう	粒径 10cm ひょう	設計飛来物 (鋼製材) ※
運動エネルギー		0.04kJ	0.91kJ	97.5kJ
貫通限界 厚さ	コンクリート $F_c=24\text{N}/\text{mm}^2$	0.8cm	2.9cm	20.2cm
	鋼板	0.2mm	0.7mm	21.0mm

※ 衝撃荷重による影響を保守的に評価するため、改正前の竜巻影響評価ガイドに示される最大鉛直速度を適用して計算した結果

[参考文献]

(1)：白木正規，百万人の天気教室，成山堂書店

(2)：小倉義光，一般気象学，東京大学出版会

竜巻随件事象の抽出について

過去の竜巻被害を参考に竜巻の随件事象を検討し、泊発電所のプラント配置から考慮する必要がある事象として、火災、溢水及び外部電源喪失事象を抽出した。

1. 過去の竜巻被害について

過去の竜巻被害について、1990年以降の主な竜巻による被害概要を調査した文献から検討を行った。竜巻の被害の状況写真から日本国内での竜巻被害では、風圧力及び飛来物の衝突により発生している建築物、電柱及び電線等の損傷がみられ、竜巻の随件事象としては、電柱や電線の損傷による停電事象が発生している。(第3.4.1図, 第3.4.2図)



(建物の被害)



(ガラスへの飛来物衝突痕)



(電柱の折損, 傾斜)

第3.4.1図 2012年茨城県つくば市で発生したF3竜巻による被害状況⁽¹⁾



(電柱の折損, 傾斜)



(建築物への飛来物の衝突痕)



(電柱, 道路標識の折損)

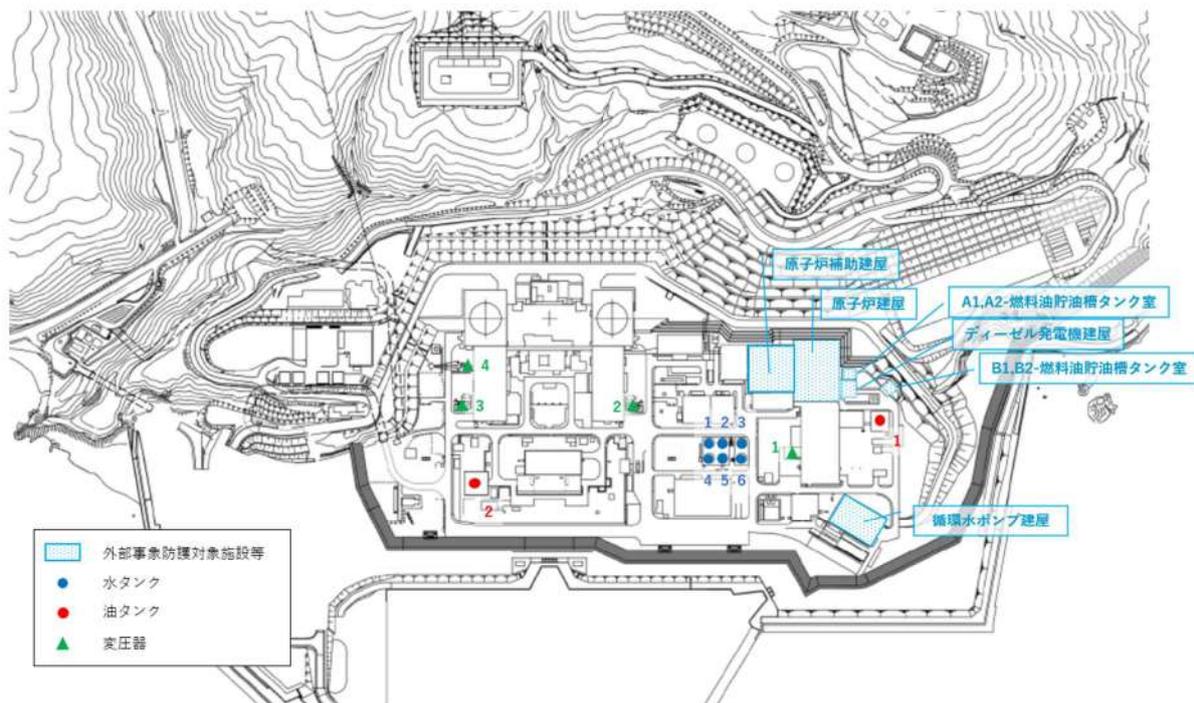
第 3.4.2 図 2006 年に北海道佐呂間町で発生した F3 竜巻による被害状況⁽²⁾⁽³⁾

2. 泊発電所のプラント配置を踏まえた竜巻随件事象について

上記1. の過去の竜巻被害の状況から、泊発電所においても送電線等が竜巻により被害を受け、外部電源喪失事象が発生することが考えられる。

また、泊発電所に設置している屋外水タンク等及び軽油タンク・変圧器等についても、飛来物の衝突影響を受けることで、溢水事象及び火災事象が発生することが考えられる。(第3.4.3図)

このため、竜巻随件事象として外部電源喪失、火災事象、溢水事象を抽出する。



水タンク	1 : A-2次系純水タンク	2 : 3A-ろ過水タンク
	3 : 3B-ろ過水タンク	4 : A-ろ過水タンク
	5 : B-ろ過水タンク	6 : B-2次系純水タンク
油タンク	1 : 3-補助ボイラー燃料タンク	2 : 補助ボイラー燃料タンク
変圧器	1 : 3号主変圧器・所内変圧器	2 : 2号主変圧器, 2号起動変圧器, 2号所内変圧器
	3 : 1号主変圧器, 1号起動変圧器, 1号所内変圧器	4 : 予備変圧器

第3.4.3図 泊発電所の屋外タンク等の配置図

参考文献

- (1) 「平成 24 年（2012）5 月 6 日に茨城県つくば市で発生した建築物等の竜巻被害状況調査報告」(ISSN1346-7328 国総研資料 第 703 号 ISSN0286-4630 建築研究資料 第 141 号 平成 25 年 1 月)
- (2) 2006 年佐呂間町竜巻被害調査報告（2006 年 11 月 21 日）
- (3) 佐呂間竜巻災害の記録—若佐地区—（平成 19 年 10 月佐呂間町）

飛来物化する可能性がある物品等の管理について

1. 概要

発電所内の飛来物となる可能性があるものについては、設計飛来物である鋼製材又は鋼製パイプが設計竜巻により飛来した場合の運動エネルギー及び貫通力を基準として、鋼製材又は鋼製パイプより運動エネルギー又は貫通力が大きい場合は固縛対策（運用管理）を実施する。

2. 運用管理方針

2.1 運用管理の基準

気象庁が発表する竜巻関連の気象情報を踏まえ、運用管理の基準（竜巻警戒レベル）を定める。

竜巻警戒レベル	発令条件（案）	運用対策（案）
竜巻監視対応（STEP1）	<ul style="list-style-type: none"> 後志西部地方のうち岩内町、共和町、泊村、神恵内村の4町村のうち、いずれかに「雷注意報（竜巻）」又は「雷注意報（ひょう）」が発表された場合 又は 「竜巻注意情報（石狩・空知・後志地方）」が発表された場合 	<ul style="list-style-type: none"> レーダーナウキャストによる監視（監視範囲は下図A）
竜巻退避準備対応（STEP2）	<ul style="list-style-type: none"> レーダーナウキャストにより、発電所上空（下図B）に「竜巻発生確度2」が発生したことを確認した場合、又は予測値からその恐れがある場合 又は レーダーナウキャストにより、発電所上空（下図B）に「雷活動度2以上」が発生したことを確認した場合、又は予測値からその恐れがある場合 	<ul style="list-style-type: none"> 車両、人の退避準備
竜巻退避対応（STEP3）	<ul style="list-style-type: none"> レーダーナウキャストにより、発電所上空（下図B）に「竜巻発生確度2」かつ「雷活動度3以上」が発生したことを確認した場合、又は予測値からその恐れがある場合 	<ul style="list-style-type: none"> 車両、人の退避

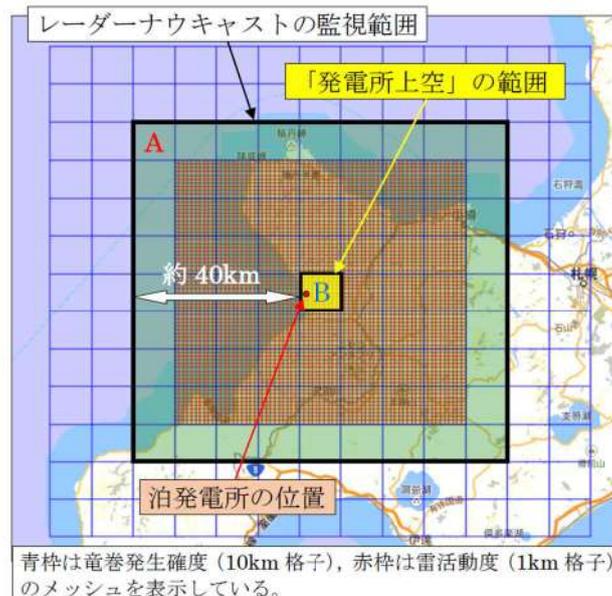


図1 竜巻運用対策の実施基準（イメージ）

2.2 運用管理の対象

運用管理の対象は、「車両」及び「車両以外の物品」に分けて管理を行う。

2.2.1 車両の管理

2.2.1.1 車両の管理に際し考慮する事項

車両については、速やかに固縛・固定することが難しい場合も想定されるため、以下の管理を行う。

- ・発電所構内での作業に関係のない車両については、原則として入構を禁止する
- ・発電所へ入構する車両については、以下のとおり、車両の飛散の可能性、車両が置かれている場所、車両の状態及び竜巻警戒レベルの発令の有無に応じて対策を行う

(1) 車両の飛散の可能性

発電所に入構する予定のある車両については、原則として事前に車両サイズ、重量から空力パラメータを算出し飛散評価を行い、飛散の可能性の有無を評価・通知する。事前の確認がなされていない場合は、確認が完了するまでは飛散するものとして取り扱う。

(2) 車両が置かれている場所

車両が飛散することによって評価対象施設等に衝突する可能性があるエリアを「車両管理エリア」と定め、車両が車両管理エリア内にある場合には、「2.2.2 管理方針」に示す管理を行う。

<車両管理エリアの考え方（具体的なエリアは図2参照）>

車両管理エリアの範囲設定は、車両が飛散し、評価対象施設等に影響の与える範囲を保守的に設定する必要がある。そのため、各々の評価対象施設等に対する飛散影響を考慮して設定する。

車両の形状によって、飛散距離が異なることから、以下の観点で車両管理エリアを設定する。

- ① ウォークダウンで確認された車両の形状を踏まえて、設計飛来物より運動エネルギーが大きく、最も飛散距離が大きい車両である「軽乗用車」を飛来物として選定する。
- ② 最も飛散距離が大きい車両である「軽乗用車」をランキン渦モデルで飛散させた場合、最大飛距離は約 350m と算出されることから、評価対象施設等から 350m の範囲を車両管理エリアと設定する。

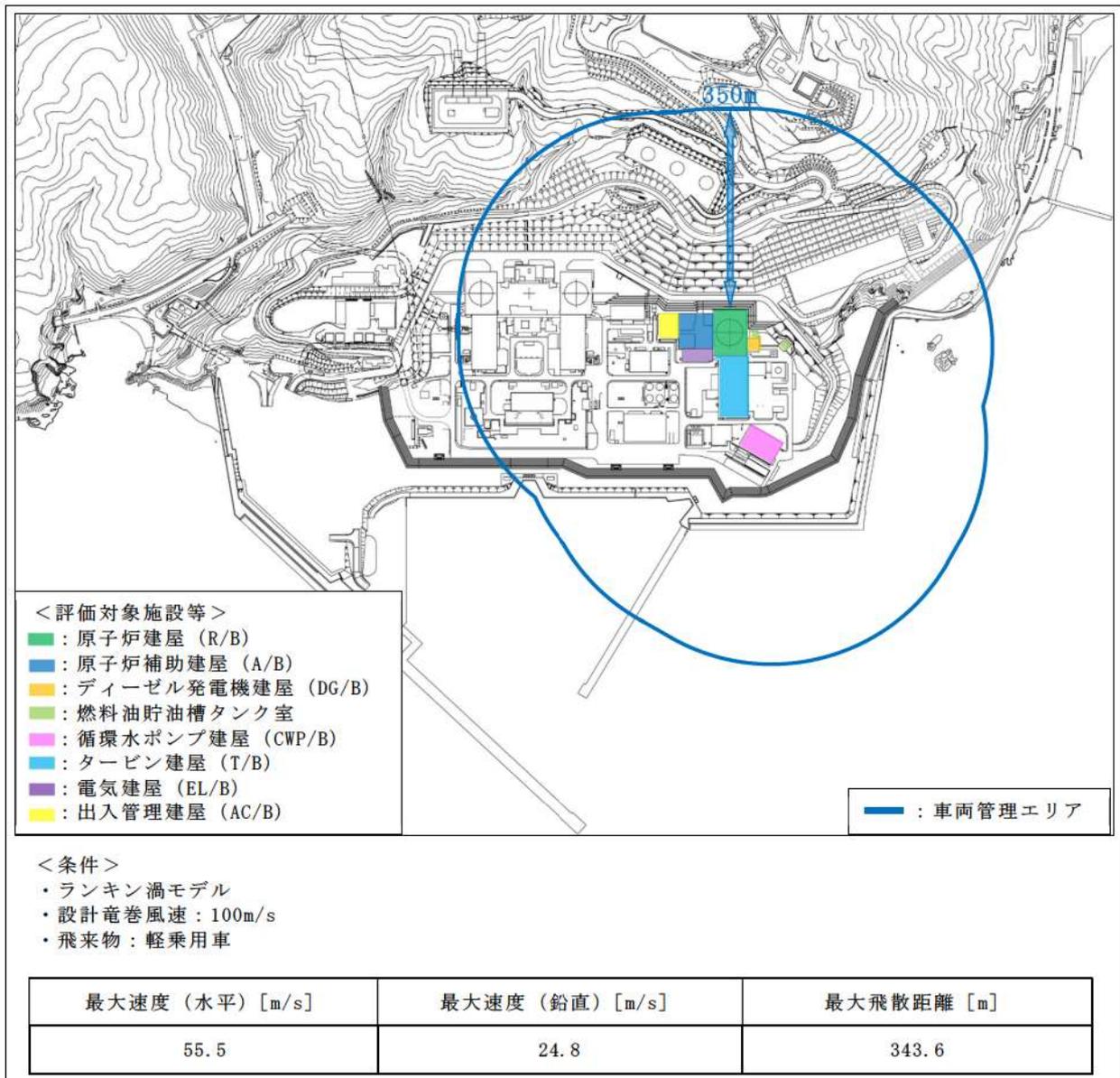


図2 車両管理エリア

飛散しない車両であっても横滑りの検討が必要であるが、フェンス等の障害物により横滑りを防止できない範囲を横滑り対策の検討対象とする。

(3) 車両の状態

停車：運転手が車両に乗っている（走行中含む）、または緊急時に車両に即座に駆けつけることができる状態。

駐車：停車時以外の状態。

(4) 竜巻襲来に対する体制の状態

「2.1 竜巻運用対策の実施基準」のとおり。

2.2.1.2 車両の管理方針

上記の考慮事項に基づき、車両の管理方針を以下のとおり定める。また、発電所への入構車両の管理方針を表1、管理イメージを図3に示す。

(1) 飛散しない車両の場合

a. 飛散も横滑りもしない車両

飛散も横滑りもしない車両は、車両管理エリアでの駐車時または停車時の対策は不要とする。

b. 飛散はしないが横滑りする車両

横滑りによる悪影響を考慮し、以下のとおりとする。

- ・駐車状態の車両は、平時、竜巻警戒レベル「竜巻監視対応」～「竜巻退避対応」時のいずれにおいても固縛する。ただし、評価対象施設等に影響を及ぼす可能性がないとされた場所（下記の①）に駐車する車両の固縛は不要とする。
- ・停車状態の車両は、平時及び竜巻警戒レベル「竜巻監視対応」時では対策不要だが、竜巻警戒レベル「竜巻退避準備対応」又は「竜巻退避対応」時には固縛する、若しくは車両退避エリアに退避する。ただし、駐車時と同様に、評価対象施設等に影響を及ぼす可能性がないと指定された場所（下記の①）に竜巻警戒レベル「竜巻監視対応」時以前より入域している場合は退避不要とする。
- ・上記の退避又は固縛を速やかに開始するため、車両管理エリア内の車両については、竜巻警戒レベル「竜巻監視対応」時の段階で、運転者が近くに待機する。

<横滑りへの対策が不要となる場所>

- ①車両管理エリア内で、竜巻の風荷重に対し構造健全性を維持することが確認された建屋、構築物の内部（竜巻警戒レベル「竜巻監視対応」時以前に、作業等で既に入域している車両が対象）

(2) 飛散する車両の場合

- ・駐車状態の車両については、固縛する
- ・停車状態の車両については、平時及び竜巻警戒レベル「竜巻監視対応」時では対策不要だが、竜巻警戒レベル「竜巻退避準備対応」又は「竜巻退避対応」時には固縛する、若しくは車両退避エリアに退避する。ただし、飛散しない車両と同様に、評価対象施設等に影響を及ぼす可能性がないと指定された場所に竜巻警戒レベル「竜巻監視対応」時以前より入域している場合は退避不要とする
- ・停車状態で作業を行っている工事車両の場合、竜巻警戒レベル「竜巻退避準備対応」又は「竜巻退避対応」時には、速やかに作業を中止し、車両、物品の固縛、離隔等の飛散防止対策を実施する。なお、作業中止及び車両、物品の固縛、離隔等を行うために時間を要する作業（クレーン車等による大型重量物の吊り上げ作業

等)を実施する場合には、事前の気象予報等を踏まえて、作業可否の判断を行う運用を行う

- ・上記の退避又は固縛を速やかに開始するため、車両管理エリア内の車両については、竜巻警戒レベル「竜巻監視対応」時の段階で、運転者が近くに待機する

表1 発電所への入構車両の管理方針

飛散の有無	配置場所	車両の状態	管理方法		
			平時	竜巻警戒レベル	
				竜巻監視対応時	竜巻退避準備対応時
飛散も横滑りもしない車両	車両管理エリア内外	駐車	対策不要		
		停車			
飛散はしないが横滑りする車両	車両管理エリア内	駐車	固縛 ^{※1}		
		停車	固縛又は退避の準備が出来ていること	固縛又は退避 ^{※1}	
	車両管理エリア外	駐車	対策不要		
		停車			
飛散する車両	車両管理エリア内	駐車	固縛		
		停車	固縛又は退避の準備が出来ていること	固縛又は退避 ^{※1}	
	車両管理エリア外	駐車	対策不要		
		停車			

※1 竜巻の風荷重に対し構造健全性を維持することが確認された建屋、構築物の内部に竜巻警戒レベル「竜巻監視対応」時以前に入域している車両は対象外

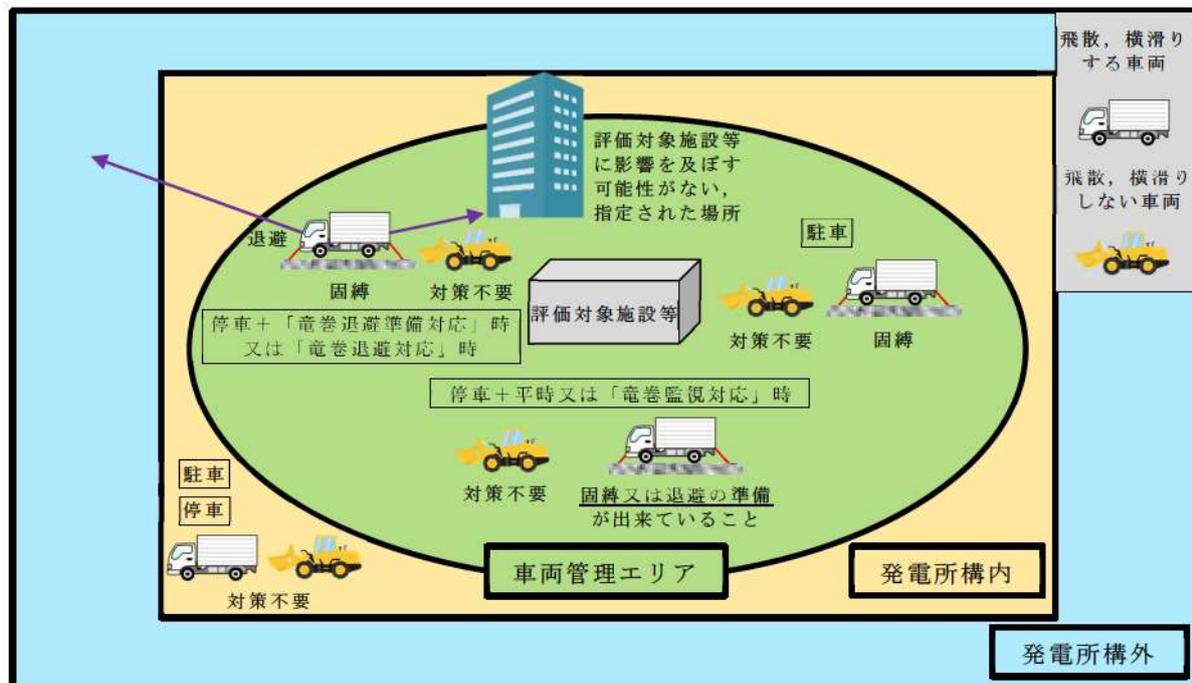


図3 発電所への入構車両の管理イメージ

2.2.1.3 車両の退避場所

車両の退避について、発電所構外の退避エリア候補地①～④へ退避する場合の退避ルートを図4で例示する。

構内へ入域する車両のうち、原子炉建屋等の外部事象防護対象施設を内包する建屋周りに駐停車する車両は、工事用車両が多く、固縛対策を行う、若しくは車両退避エリアに退避することから、評価対象施設の近辺で最も退避エリア候補地までの距離が遠くなる原子炉補助建屋屋上を基点として考える。

退避エリア候補地①～④への車両の避難に要する時間については表2のとおりであり、竜巻襲来までの時間余裕として見込んでいる60分の中で、退避は可能と判断している。今後、構内の道路状況や関連設備の整備状況を踏まえて運用面の具体的な手順化を行っていく。

表2 退避に要する所要時間

退避エリア 候補地	原子炉補助建屋屋上からの距離			想定時間※ ¹		
	構内退避 ルート	構外退避 ルート	合計	構内退避 ルート	構外退避 ルート	合計
①	約 2.4km	約 2.5km	約 4.9km	約 30分	約 15分	約 45分
②		約 3.2km	約 5.6km		約 20分	約 50分
③		約 3.7km	約 6.1km		約 23分	約 53分
④		約 1.2km	約 3.6km		約 8分	約 38分

※1 発電所構内退避ルート（図4の紫線）については、退避時の車両渋滞の可能性も考慮し、保守的に車両の移動速度を徒歩（80m/分）程度として算出した。又、発電所構外退避ルート（図4の緑線）については、車両渋滞の可能性は考え難いものの、公益財団法人 日本道路交通情報センターHPより、一般道の渋滞速度10km/hを採用して算出した。

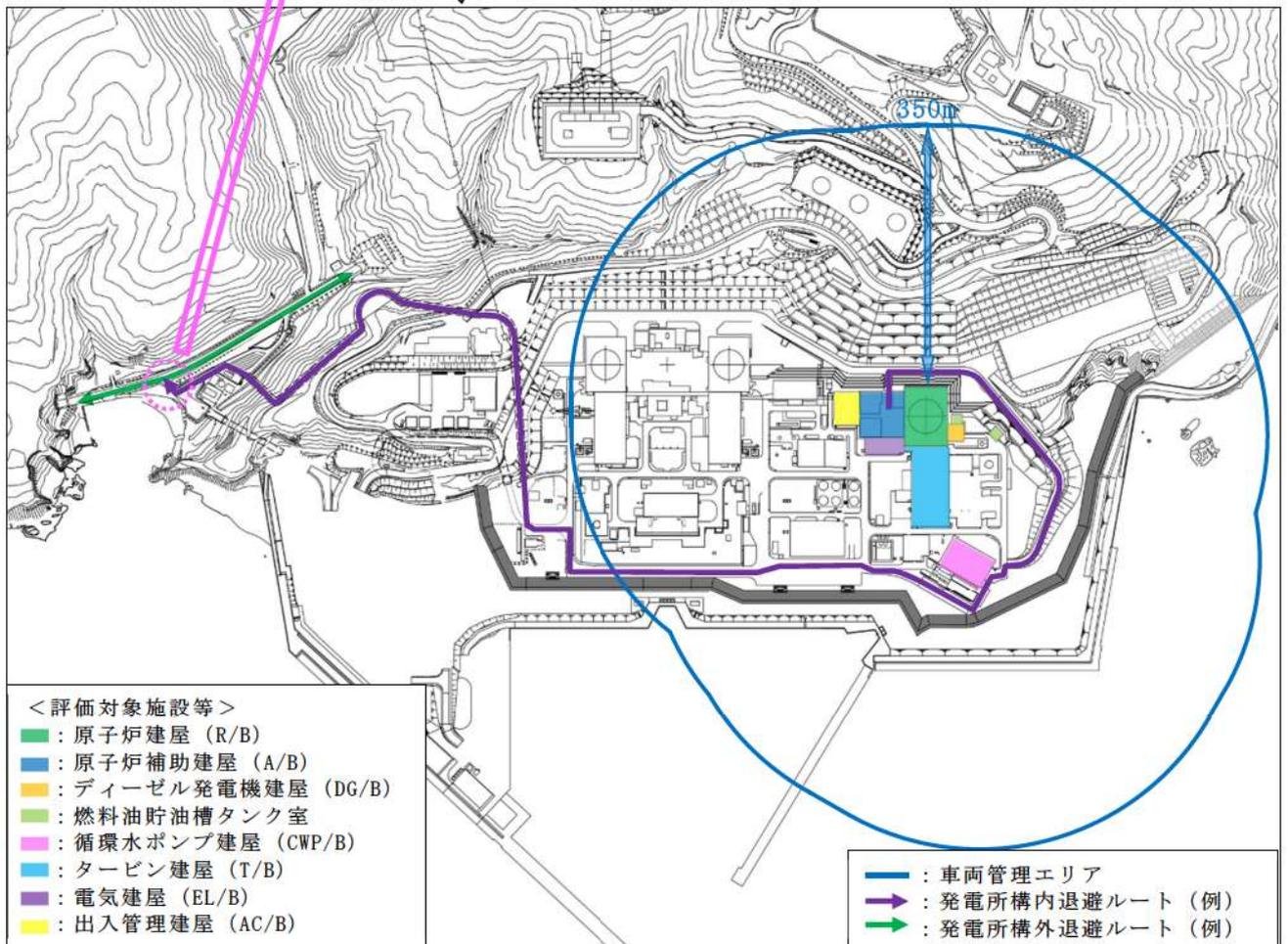
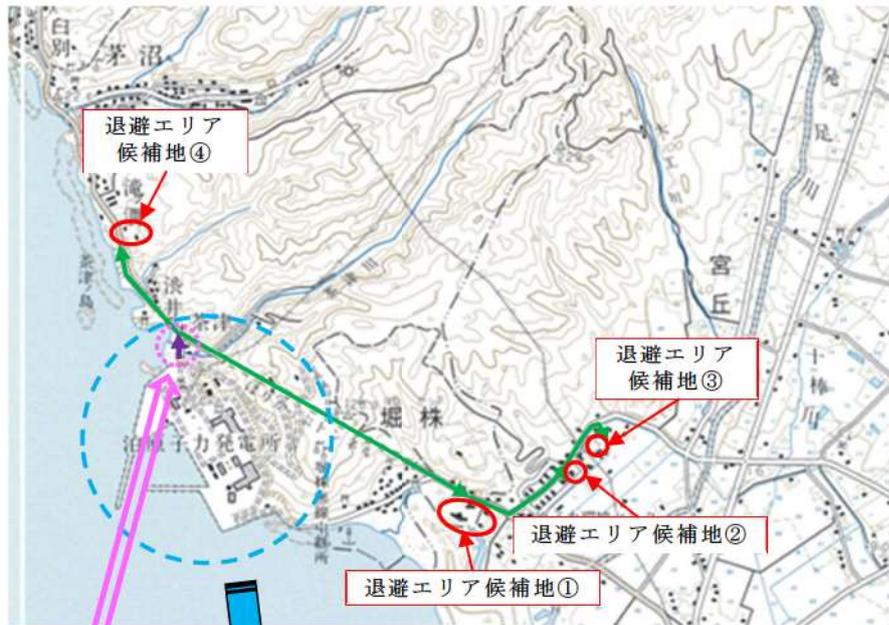


図4 車両管理エリア及び車両退避エリア

2.2.2 車両以外の物品の管理

2.2.2.1 管理に際し考慮する事項

発電所構内に持ち込まれる車両以外の物品については、以下のとおり、物品の飛散の可能性、物品の置かれている場所、竜巻襲来に対する体制の状態に応じて対策を行う。

(1)物品の飛散の可能性

発電所に持ち込まれる予定のある物品については、原則として事前にサイズ、重量から空力パラメータを算出し飛散評価を行い、飛散の可能性の有無を評価する。事前の確認がなされていない場合は、確認が完了するまでは飛散するものとして取り扱う。

(2)物品が置かれている場所

物品が飛散することによって評価対象施設等に衝突する可能性があるエリアを「物品管理エリア」と定め、物品が物品管理エリア内にある場合には、「2.3.2 管理方針」に示す管理を行う。

<物品管理エリアの考え方（具体的なエリアは図5参照）>

物品管理エリアの範囲設定は、物品が飛散し、評価対象施設等に影響の与える範囲を保守的に設定する必要がある。そのため、各々の評価対象施設等に対する飛散影響を考慮して設定する。

物品の形状によって、飛散距離が異なることから、以下の観点で物品管理エリアを設定する。

- ① ウォークダウンで確認された物品の種類を踏まえて、設計飛来物より運動エネルギーが大きく、最も飛散距離が大きい物品である「プレハブ小屋」を飛来物として選定する
- ② 最も飛散距離が大きい物品である「プレハブ小屋」をランキン渦モデルで飛散させた場合、最大飛距離は約 430mと算出されることから、評価対象施設等から 430m の範囲を物品管理エリアと設定する

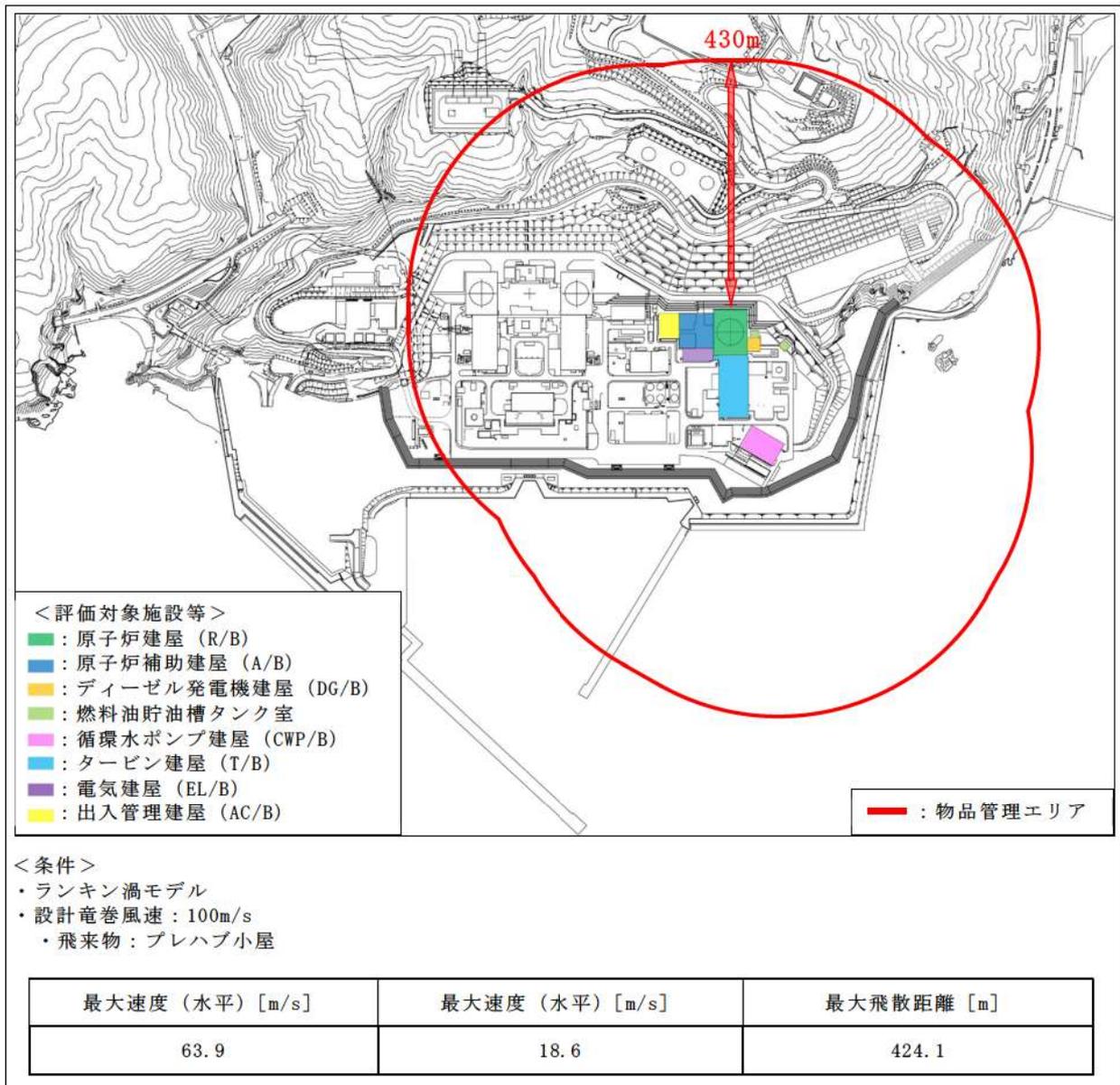


図5 物品管理エリア

飛散しない物品であっても横滑りの検討が必要であるが、フェンス等の障害物により横滑りを防止できない範囲を横滑り対策の検討対象とする。

(3) 竜巻襲来に対する体制の状態

「2.1 運用管理の基準」のとおり。

2.2.2.2 車両以外の物品の管理方針

上記の条件に基づき、車両以外の物品の管理方針を以下のとおり定める。

また、管理方針のまとめを表3に示す。

(1) 飛散しない物品の場合

a. 飛散も横滑りもしない物品

飛散も横滑りもしない物品は、物品管理エリアでの対策は不要とする。

b. 飛散はしないが横滑りする物品

横滑りによる悪影響を考慮し以下のとおりとする。

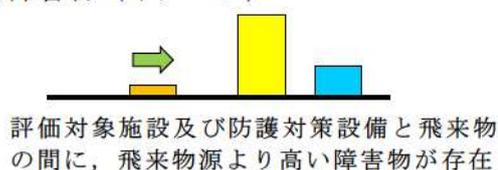
- ・ 平時及び竜巻警戒レベル「竜巻監視対応」～「竜巻退避対応」時のいずれにおいても原則として固定・固縛しておくが、作業等で一時的に固定・固縛を解除している物品は、竜巻警戒レベル「竜巻監視対応」時に移行した場合には速やかに再固定・再固縛が可能なよう、作業者が物品から離れないようにする
- ・ 評価対象施設等との間に障害物がある場所（下記の①）、評価対象施設等に影響を及ぼす可能性がないと指定された場所（下記の②）に置かれている物品については、固定・固縛は不要とする

<横滑りへの対策が不要となる場所>

- ① 評価対象施設等との間に、物品に対し一定の高さを有する障害物（地形、建屋・構築物等）が存在する場所又は、物品が評価対象施設等よりも低所にあり、横滑りにより上ることのできない急峻な上り勾配が認められる場所（図6参照）
- ② 物品管理エリア内で、竜巻の風荷重に対し構造健全性を維持することが確認された建屋、構築物の内部

ただし、竜巻警戒レベル「竜巻監視対応」時以前に、作業等で既に搬入している物品を対象とする。

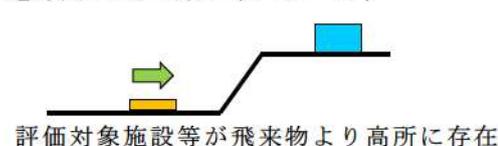
① 障害物（イメージ）



凡例

- ➡ : 横滑り方向
- : 飛来物品
- : 評価対象施設等
- : 障害物

② 急峻な上り勾配（イメージ）



凡例

- ➡ : 横滑り方向
- : 飛来物品
- : 評価対象施設等

図6 横滑り対策不要の場所のイメージ図

(2) 飛散する物品の場合

平時及び竜巻警戒レベル「竜巻監視対応」～「竜巻退避対応」時のいずれにおいても原則として固定・固縛しておくが、作業等で一時的に固定・固縛を解除している物品は、竜巻警戒レベル「竜巻退避準備対応」時に移行した場合には速やかに再固定・再固縛が可能なように、作業者が物品から離れないようにする。

ただし、飛散しない物品と同様に、評価対象施設等に影響を及ぼす可能性がないと指定された場所に、竜巻警戒レベル「竜巻監視対応」時以前より搬入している場合は、固縛・固定は不要とする。

表 3 車両以外の物品の管理方針

飛散の有無	配置場所	管理方法			
		平時	竜巻警戒レベル		
			竜巻監視対応時	竜巻退避準備対応時	竜巻退避対応時
飛散も横滑りもしない物品	物品管理エリア内外	対策不要			
飛散はしないが横滑りする物品	物品管理エリア内	固定・固縛 ^{※1, 2}		固定・固縛 ^{※2}	
	物品管理エリア外	対策不要			
飛散する物品	物品管理エリア内	固定・固縛 ^{※1, 3}		固定・固縛 ^{※3}	
	物品管理エリア外	対策不要			

- ※1 作業等で必要な場合は解除可能とするが、速やかに再固定・再固縛が可能なよう、作業者が物品から離れないようにする
- ※2 評価対象施設等との間に障害物がある場所、竜巻の風荷重に対し構造健全性を維持することが確認された建屋、構築物の内部に竜巻警戒レベル「竜巻監視対応」時以前に入域している物品は、不要とする
- ※3 竜巻の風荷重に対し構造健全性を維持することが確認された建屋、構築物の内部に竜巻警戒レベル「竜巻監視対応」時以前に入域している物品は、不要とする

3. 飛来物発生防止対策の方法

評価対象施設等に悪影響を及ぼす可能性のある飛来物源に対して、飛来物発生防止対策を実施する。

飛来物発生防止対策の実施条件は、以下の①～③を全て満たす飛来物源に対して適用する。

- ① 飛散（浮き上がり、横滑り）する
- ② 設計飛来物（鋼製材又は鋼製パイプ）の運動エネルギー又は貫通力を上回る
- ③ 評価対象施設等に到達する

これらの飛来物発生防止対策の実施フローを図7に示す。

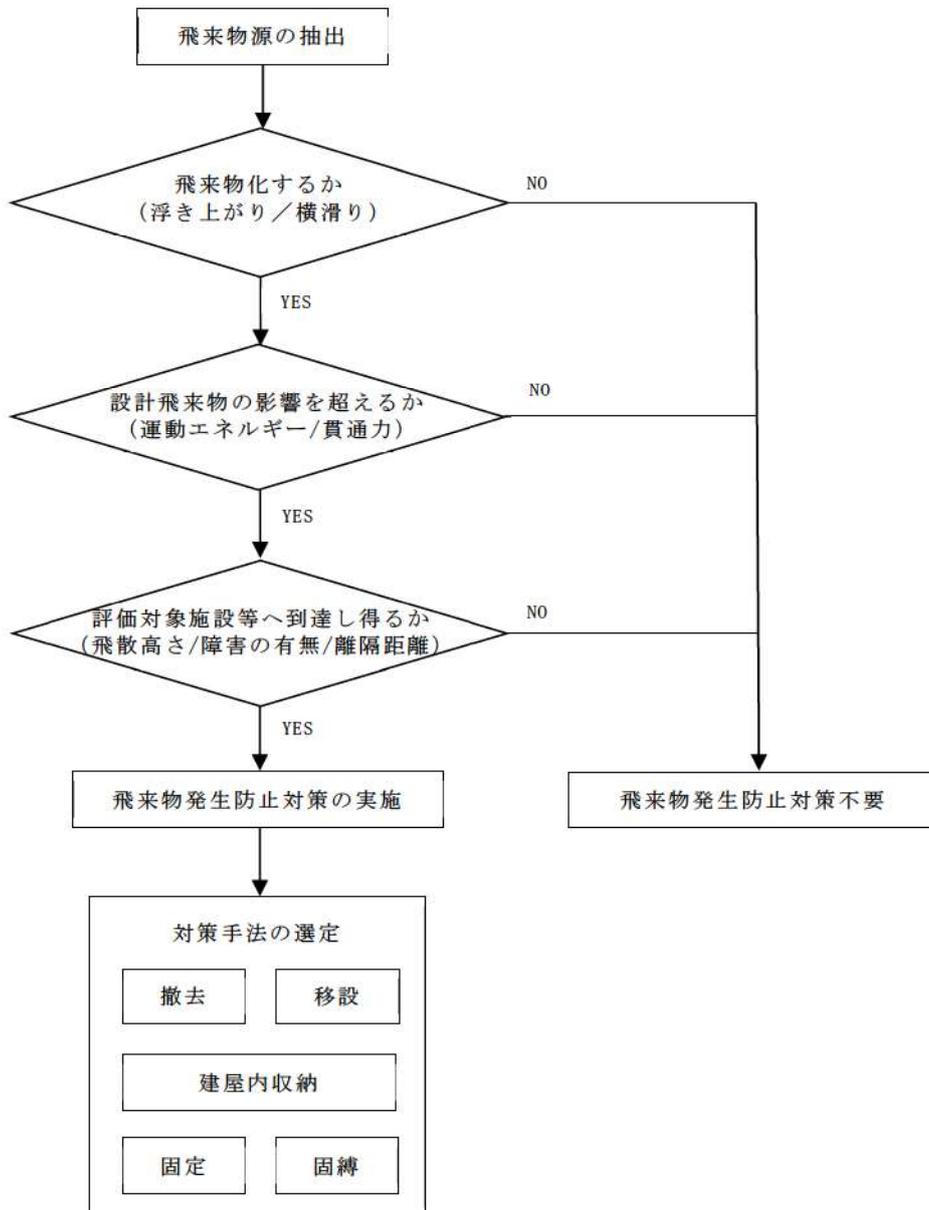


図7 飛来物発生防止対策実施フロー

3.1 竜巻の飛来物発生防止対策としての固縛の設計方針

竜巻の飛来物発生防止対策手法としては、撤去、移設、建屋内収納、固定、固縛が挙げられる。これらの対策の選定については、図8に示すフローにて判断を行うものとする。飛来物発生防止対策のうち、固縛を実施する代表的なものとして、可搬型重大事故等対処設備（発電機、車両）を例として示す。

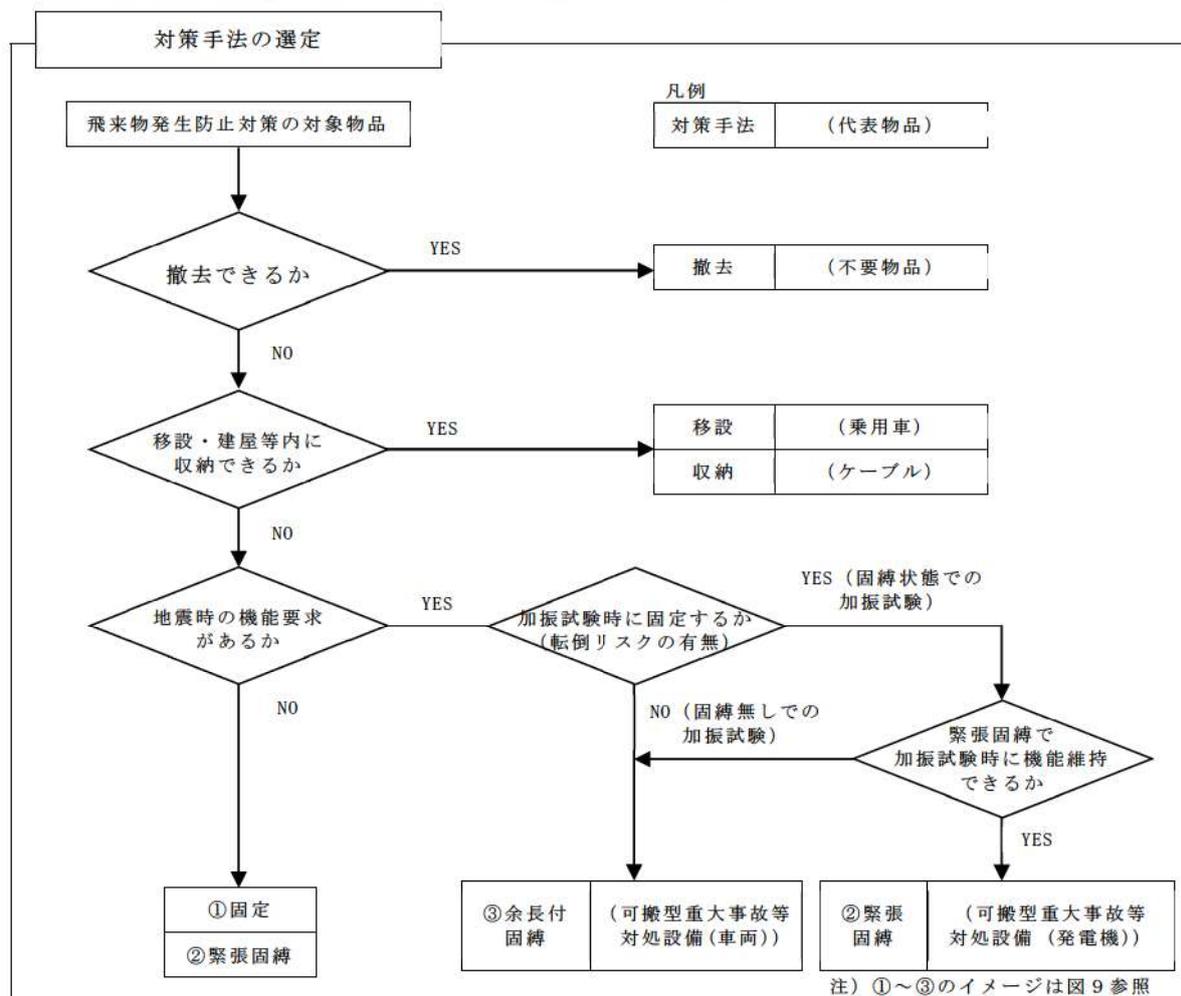


図8 飛来物発生防止対策選定フロー

<設計方針>

可搬型重大事故等対処設備は、安全施設に対する離隔の確保、固縛による飛散防止対策を施すことにより、安全施設の安全機能を損なわない設計としている。具体的な配慮としては以下のとおり。

①要求されるタイムラインに基づき、機動性を確保する必要があるため、固縛の解除時間を短くするために固縛装置の数や解除方法の配慮を行う。

(例えば、固縛装置の数を減少させることや、緊急時には固縛の連結材を切断して速やかに解除できるように、一般工具 (カッター等) で切断できるような部材 (ロープ等) の採用)

②車両の固縛は耐震設計に影響を与えないように、地震時の車両の移動変移を考慮し、余長付固縛を採用する。

3.2 固縛設計の概要

固定装置や固縛装置は、以下の構成要素を組み合わせる設計する。

- ① 連結材（ロープ、シャックル等）
- ② 固定材（固定ピース、固定金具等）
- ③ 基礎（アンカーボルト等）

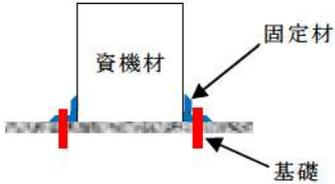
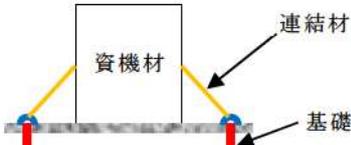
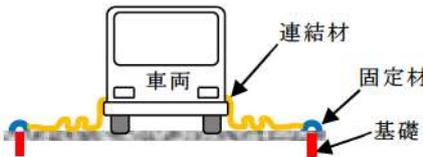
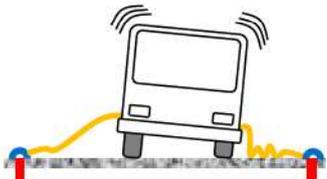
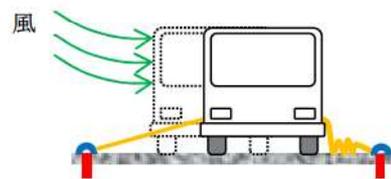
手法	対策の概要図
①固定	<p>飛来物源に固定金具を取り付けて固定</p> 
②緊張固縛	<p>飛来物源を連結材（ロープ等）を用いて固縛</p> 
③余長付固縛	<p>【通常時】 飛来物源を連結材（ロープ等）を用いて固縛（動き代がある）</p>  <p>【地震時（イメージ）】</p>  <p>飛来物源が地震の揺れを受け、連結材の余長範囲内で動く（揺れる）</p> <p>【竜巻時（イメージ）】</p>  <p>飛来物源が竜巻の風を受け、連結材の余長範囲内で動く</p>

図9 飛来物発生防止対策（固定及び固縛）の例

3.3 荷重設定

固縛対象の物品には、風圧力により浮き上がり荷重と横滑り荷重が発生する。これらの設計荷重は、荷重の方向や設置状況を踏まえて、適切に考慮して設定する。

3.4 設計上の裕度

各部材ごとに設定する許容限界に対して裕度（約2倍）を確保することとし、安全性を確保する設計とする。

3.5 固縛状況（例）

固定装置や固縛装置については、現在設計中であるが、固縛装置のイメージを以下に示す。

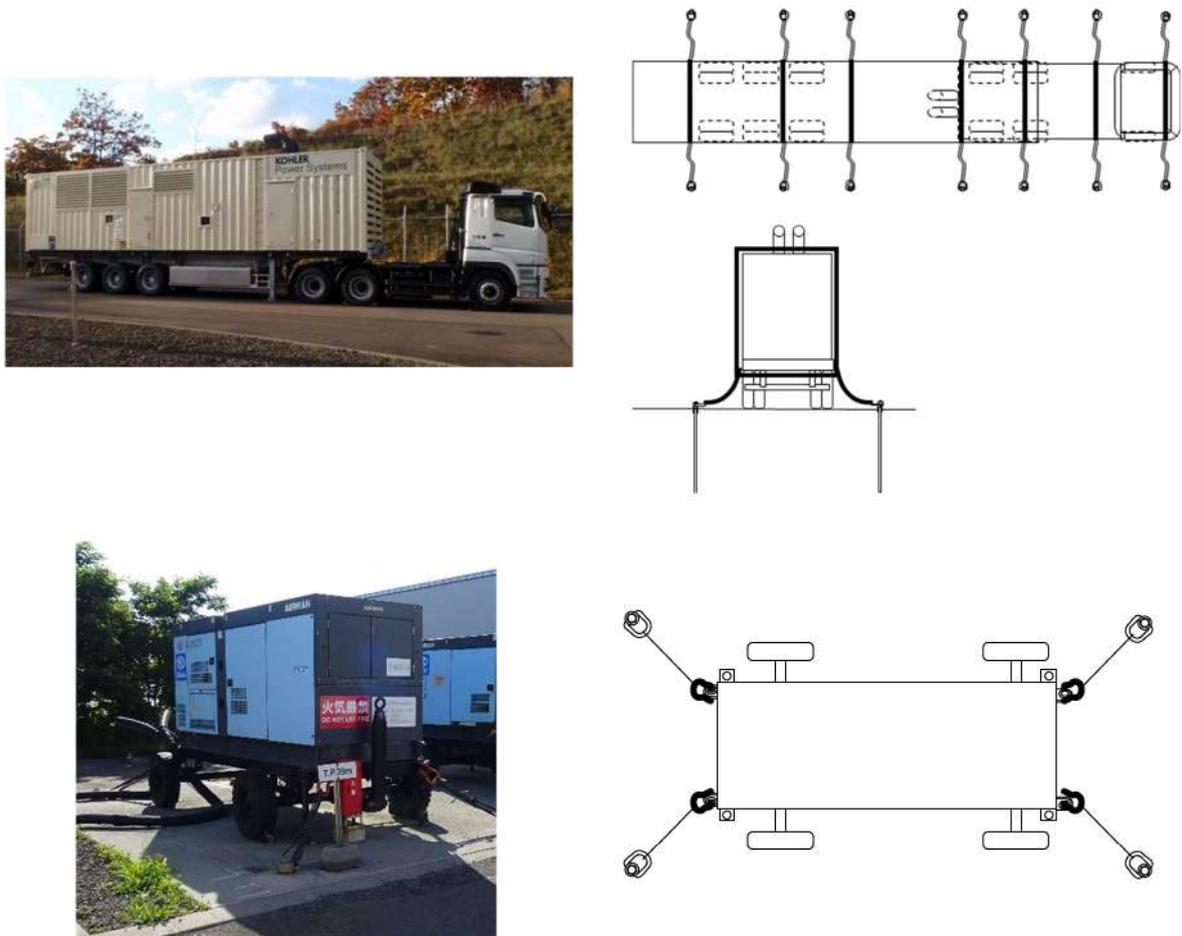


図 10 固縛装置のイメージ

車両の退避手順について（暫定案）

停車車両については、竜巻の襲来が予想される場合に速やかに退避することとしており、竜巻防護施設の安全機能維持に影響を与えないためには、竜巻襲来の恐れを早期に検知し、事前に準備を行うことが重要である。

強い竜巻は、メソサイクロン（小規模な低気圧性の循環構造）を伴う発達した積乱雲の下で発生するため、積乱雲の移動に伴って竜巻が発生しやすい状況も移動すると考えられる。そのため、レーダーナウキャストにより積乱雲の移動方向を確認することで、竜巻が発生しやすい状況の移動方向が予測できると考えられることから、レーダーナウキャストによる「竜巻発生確度」及び「雷活動度」の実況値及び予測値を指標として用いる。

気象庁による監視体制も強化※され、さらに研究も進んでいることから、今後更なる予測精度の向上が見込まれる。後述の判断基準等については、今後もデータ・知見等の収集に努め、より信頼度の高い判断基準となるよう検討を継続し、改善を図っていくものとする。

※：2013年3月に気象レーダーのドップラーレーダー化が完了

（1）竜巻監視対応（STEP1）

発電課長（当直）は、以下の条件のうち、いずれかに該当した場合は、運営課長（夜間・休日は当番者）に連絡するとともに、竜巻襲来の恐れを検知するため、適宜レーダーナウキャストの監視（60分後までの予測値含む）を行う。また、竜巻が発生する可能性があることを所内一斉放送により、発電所員、協力会社員へ周知する。

＜監視開始条件＞

- ・ 後志西部地方のうち岩内町、共和町、泊村、神恵内村の4町村のうち、いずれかに「雷注意報（竜巻）」又は「雷注意報（ひょう）」が発表された場合
- ・ 「竜巻注意情報（石狩・空知・後志地方）」が発表された場合

＜監視範囲＞

監視範囲は図1のとおり、泊発電所を含むメッシュを中心とした1辺90kmの正方形の範囲とする。

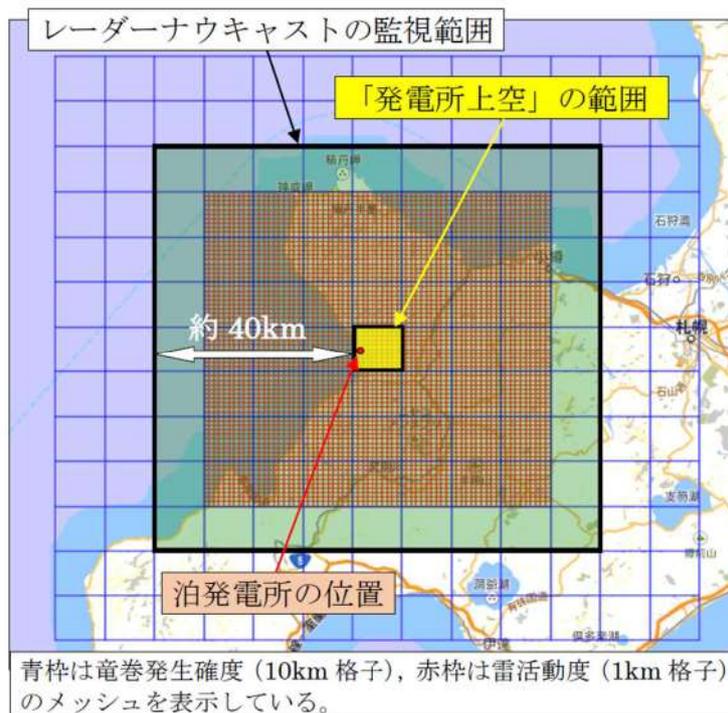


図1 レーダーナウキャスト監視範囲

(2) 竜巻退避準備対応 (STEP2)

発電課長（当直）は、STEP1 で監視を開始したレーダーナウキャストにおいて、以下の条件のうち、いずれかに該当した場合は、運営課長（夜間・休日は当番者）に連絡するとともに、竜巻の襲来が予想されるため、竜巻退避準備対応を開始することを館内放送等により、発電所員，協力会社員へ周知する。

<準備開始条件>

- ・ レーダーナウキャストにより、発電所上空に「竜巻発生確度2」が発生したことを確認した場合、又は予測値からその恐れがある場合
- ・ レーダーナウキャストにより、発電所上空に「雷活動度2以上」が発生したことを確認した場合、又は予測値からその恐れがある場合

運営課長（夜間・休日は当番者）は、各課（室・センター）長へ、竜巻退避準備対応として、作業中（固縛を解放している）資機材の固縛等を実施するよう指示する。

各課（室・センター）長は、各対応の完了について、運営課長（夜間・休日は当番者）に報告する。

(3) 竜巻退避対応 (STEP3)

発電課長（当直）は、以下の条件に該当した場合は、運営課長（夜間・休日は当

番者)に連絡するとともに、竜巻の襲来が予想されるため、竜巻退避対応を開始することを館内放送等により、発電所員、協力会社員へ周知する。また、運営課長(夜間・休日は当番者)は、発電所長に報告するとともに、自然災害等対策本部を設置する。

<避難開始条件>

- ・ レーダーナウキャストにより、発電所上空に「竜巻発生確度2」かつ「雷活動度3以上」が発生したことを確認した場合、又は予測値からその恐れがある場合

運営課長(夜間・休日は当番者)は、各課(室・センター)長へ、竜巻退避対応として、停車車両の発電所構外への退避、屋外作業の中止、作業者の屋内退避等を実施するよう指示する。

各課(室・センター)長は、各対応の完了について、自然災害等対策本部に報告する。(自然災害対策本部は、設備被害を受け復旧長期化等が発生した場合、原子力災害対策本部となる。)

(4) 竜巻対応終了

運営課長は、以下の条件に該当した場合は、竜巻監視対応、竜巻退避準備対応および竜巻退避対応の終了を関係箇所へ連絡する。

<終了条件>

- ・ 各STEP毎に定める開始条件を満たさなくなった場合

物品等飛散防止対策・車両退避フローを図2に示す。

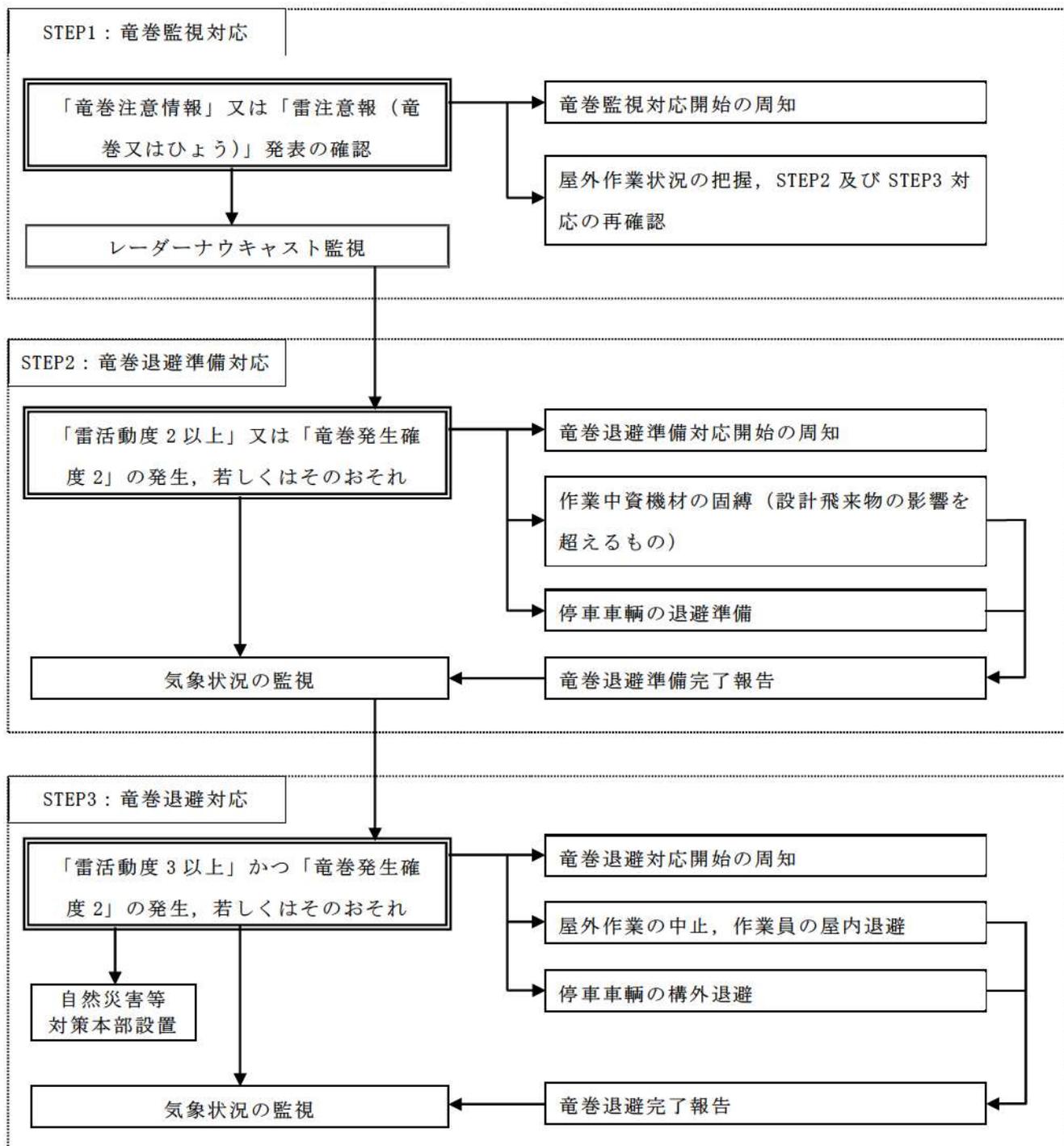


図 2 物品等飛散防止対策・車両退避フロー

竜巻に関する気象情報についての考察

(1) 竜巻対応準備開始判断基準の捕捉性

日本版改良藤田スケール（JEFスケール）1以上の竜巻に対し、判断基準である「竜巻注意情報」又は「雷注意報（竜巻又はひょう）」が竜巻を捕捉した確率を調査（気象庁HP「竜巻注意情報の発表状況」より、2016～2021年の6年間のデータにて調査）

表1 竜巻発生と注意情報等発令時間

	2016	2017	2018	2019	2020	2021	6年間合計
発令なし・遅れ	1	0	1	1	0	0	2
30分以内	1	0	0	3	1	0	5
1時間以内	1	0	1	1	1	2	6
1時間超	11	11	10	4	6	5	47
合計	14	11	12	9	8	7	60

	2016	2017	2018	2019	2020	2021	6年間合計
全捕捉率	92.9%	100%	91.7%	88.9%	100%	100%	96.7%
猶予30分超えでの捕捉率	85.7%	0	91.7%	55.6%	87.5%	100%	88.3%
猶予60分超えでの捕捉率	78.6%	100%	83.3%	44.4%	75%	71.4%	78.3%

・捕捉率96.7%（60回の竜巻発生回数に対し、捕捉出来なかったのは2回のみ）で、ほぼ100%であり、「竜巻注意情報」又は「雷注意報（竜巻又はひょう）」発令による監視強化開始は妥当であると考ええる。

(2) 竜巻対応準備，避難開始判断の妥当性

a. 判断基準：

竜巻退避準備対応：レーダーナウキャスト「竜巻発生確度2」又は「雷活動度2以上」

竜巻退避対応：レーダーナウキャスト「竜巻発生確度2」及び「雷活動度3以

上」

上記の状況が発電所上空に発生，又は，発生の恐れがある場合

(監視範囲は泊発電所を含むメッシュを中心とした1辺90kmの正方形の範囲)

b. レーダーナウキャストについて

①竜巻発生確度について^{*1}

○「発生確度1」は，下記の条件1，2のAND条件によって判定されている。

条件1：周辺100km範囲において，

- ・ 気象ドップラーレーダーにより，メソサイクロンを検出した場合
- ・ 数値シミュレーションと気象レーダー観測値から得られる「突風危険指数」の基準値を超えた場合
- ・ 上記のOR条件

条件2：気象レーダー観測による降水強度20mm/h

○「発生確度2」は，条件1，2のAND条件で，「発生確度1」と判定される。

条件1：周辺40km範囲において，

- ・ 気象ドップラーレーダーにより，メソサイクロンを検出した場合
- ・ 数値シミュレーションと気象レーダー観測値から得られる「突風危険指数」の基準値を超えた場合
- ・ 上記のAND条件

条件2：気象レーダー観測による降水強度20mm/h

○竜巻発生確度は10kmメッシュで10分ごとに60分先まで予測される。

②雷活動度について^{*2}

- ・ 「放電の検知から発雷密度を解析」，「レーダー3次元データから落雷を解析」，「レーダー観測から雨雲を解析」から解析される。
- ・ 雷活動度は1kmメッシュで10分ごとに60分先まで予測される。

c. 判断基準の妥当性について

①「発生確度2」と「雷活動度2」との重ね合わせについて

- ・ 強い竜巻は，スーパーセルと呼ばれる発達した積乱雲の下で発生する^{*1}。

発生確度2では，メソサイクロン（スーパーセル中にある水平規模数kmの小さな低気圧）の検出が条件となっている。

これはメソサイクロン付近で竜巻などの激しい突風の可能性がある^{*}と判断される¹ためである。

更に降水強度を低めに見積もることによって，発達中の積乱雲から発生する突風を

見逃さないようにしている。

- ・積乱雲は30分から60分のライフサイクル（成長期，成熟期，衰退期による3段階）で形成，消滅する^{※1}。このライフサイクル中，竜巻及び雷が発生するのは積乱雲が最も発達した成熟期であり，この成熟期の初期段階，又は，発達した成熟期の積乱雲の接近を把握する方法として，雷活動度を利用する。レーダーナウキャストの雷活動度2は，上空の放電状態や，近接する雷雲の周辺，気象レーダーによる雷雲の立体的特徴などから，落雷が間近に迫っている雷雲の状態を表している。つまり，発達しつつある積乱雲や，発達した積乱雲の周辺を表しており，竜巻が発生する可能性が高い発達した積乱雲の発生，又は接近を予告する指標として活用できると考える。

また，ナウキャストにおいては，予測だけでなく，直近の観測データの変化傾向を把握することができるため，経時変化を見ることが可能である。つまり，監視強化後にナウキャストを確認することにより，発電所周辺の積乱雲の状況を確認することが可能である

- ・以上より，「竜巻発生確度2」と「雷活動度2以上」を竜巻発生の指標とすることは，妥当であると判断した。

②「竜巻発生確度2」と「雷活動度3以上」との組み合わせについて

- ・雷は積乱雲内の上昇気流によって発生する^{※3}。つまり，落雷が発生している場所（雷活動度3以上の地域）は，強い上昇気流場であると言える。
- ・レーダーナウキャストの雷活動度の解析には，雷放電時に発生する電磁波を全国30ヶ所の検知局にある計測装置により，雷の位置，電界強度を計測した結果を用いている。実況値において雷活動度3以上の場所は，その時間において，既に対地放電が起きている強い放電密度を持った場所を表しており，強い雷雲の位置を示していることになる。
- ・雷活動度の予測には，盛衰傾向による補正が加えられており，現時点では成長期や成熟期初期にある積乱雲に対して継続時間を考慮した予測がなされている。すなわち，単純な積乱雲の移動による雷の発生の予測ではなく，積乱雲の発達も考慮に加えられている^{※1}。
- ・前述の通り，竜巻発生確度2はメソサイクロンの検出が条件であり，強い竜巻の発生する可能性が高いことを示唆している。
- ・メソサイクロンと雷活動度による積乱雲中の上昇気流場の検知を組み合わせることにより，強い竜巻の発生する可能性が高い条件の場所を推定する。
- ・以上より，「竜巻発生確度2」と「雷活動度3以上」を強い竜巻の発生の指標とすることは，妥当であると判断した。

なお、判断基準とする情報については、今後もデータ・知見等の収集に努め、より信頼度の高い判断基準となるよう検討を継続し、改善を図っていくものとする。

③監視範囲について

- ・泊発電所のレーダーナウキャストの監視範囲は図1に示すとおり、泊発電所を含むメッシュを中心とした1辺90kmの正方形とする。
- ・泊発電所からメッシュ境界線までの最短距離は西方約40kmであり、十分な監視範囲を確保。
- ・積乱雲の移動速度データ（17km/10分^{*4}）より、23分程度の裕度を確保。
- ・前述①の通り、積乱雲の成長期は10分から30分程度^{*3}であり、竜巻が発生する積乱雲の成熟期になるまでに最短で10分程度と想定^{*5}

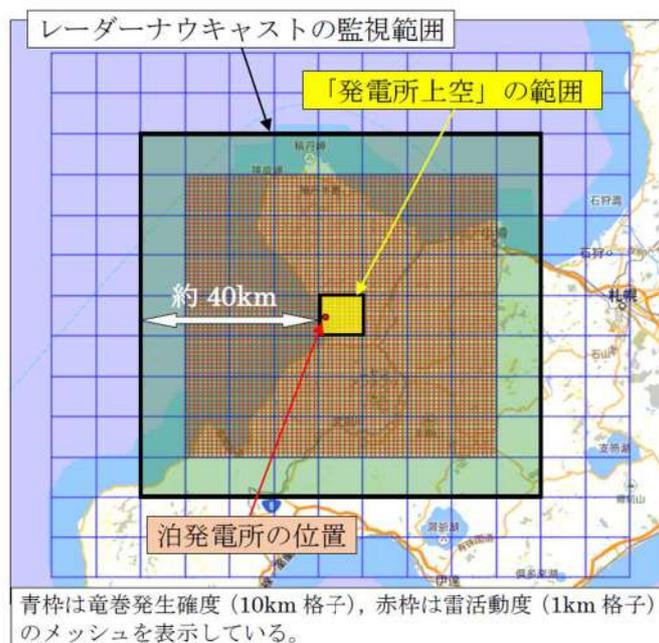


図1. レーダーナウキャスト監視範囲

- ・安全側に上記の移動速度23分と成熟期になる最短時間10分を組み合わせた33分を最短接近時間と考えた場合でも、レーダーナウキャストによる予測は60分後まで行っており、急速に発達・接近してくる積乱雲に対しても、本監視範囲で十分な監視が可能であると考えられる。
- ・また、泊発電所周辺における竜巻の移動方向は西から東が卓越しており、西側に約40kmの監視範囲を持つ本監視範囲は十分であると考えられる。
- ・判断基準については、発電所上空に達した場合に加え、実況値及び予測値による雷雲等の移動方向から、発電所上空に達する恐れがある場合とする。

(3) 竜巻襲来までの時間余裕

竜巻襲来までの時間について最も保守的な条件は、発電所上空に「竜巻発生確度2」かつ「雷活動度3以上」が発生した場合（STEP3：竜巻退避対応開始）である。

この場合における時間余裕は

- ・レーダーナウキャストが60分後の予測をしていること
- ・レーダーナウキャストは10分毎に更新すること

から、以下の通りとなる。

$$\begin{aligned} & \text{レーダーナウキャストの予測時間} - \text{レーダーナウキャストの更新時間} \\ & = 60\text{分} - 10\text{分} = 50\text{分} \end{aligned}$$

※1：雷ナウキャストにおける雷の解析・予測技術と利用方法（測候時報78.3 2011）

※2：気象庁HP：竜巻などの激しい突風に関する気象情報の利活用について（平成22年3月）

※3：大野久雄：雷雨とメソ気象（2001，東京堂出版）

※4：加藤亘、保野聡裕：気象レーダの列車運転規制への活用に関する研究（2009年 JR WEST Technical Review No26）

※5：実際には竜巻を伴うような大型の積乱雲に発達する時間は30分程度と見込まれるが、保守的に文献記載の最小値を採用した

主な想定飛来物の飛来物発生防止対策例について

泊発電所構内には、屋外に保管されている各種資機材、車両等、飛来物になりうる物品（以下「想定飛来物」という。）が存在している。

主な想定飛来物の飛来物発生防止対策例を表 1 に示す。

表 1 主な想定飛来物の飛来物発生防止対策例

想定飛来物	対策方法
プレハブ小屋	<ul style="list-style-type: none"> ・ 十分な重さのウエイトを取付ける。 ・ ウエイトの重量については、プレハブ小屋の自重+ウエイトの重量により空力パラメータが 0.0026 以下となる重量とする。 <div data-bbox="1018 757 1315 958" style="text-align: right;">  <p style="text-align: center;">対策例</p> </div>
鋼管	<ul style="list-style-type: none"> ・ 単品で置かず複数本を束にして固縛する。 ・ 束にする本数については、空力パラメータが 0.0026 以下となる本数とする。 <div data-bbox="1018 1048 1315 1272" style="text-align: right;">  <p style="text-align: center;">対策例</p> </div>
鋼材	<ul style="list-style-type: none"> ・ 単品で置かず複数本を重ねて固縛する、または十分な重さのウエイトを取付ける。 ・ 重ねる本数については、空力パラメータが 0.0026 以下となる本数とする。 ・ ウエイトの重量については、鋼製材の自重+ウエイトの重量により空力パラメータが 0.0026 以下となる重量とする。
鋼板	<ul style="list-style-type: none"> ・ 単品で置かず複数枚を重ねて固縛する。 ・ 重ねる枚数については、空力パラメータが 0.0026 以下となる枚数とする。

想定飛来物	対策方法
マンホール蓋	<ul style="list-style-type: none"> ・ 容易に飛散しないよう高さ方向への飛散防止対策を行う（マンホール蓋上面からの固定，マンホール蓋へのチェーン接続など）。  <p style="text-align: center;">対策例</p>
車両（重大事故等対処設備含む）	<p>車両管理エリア（評価対象施設等から 350m の範囲）内について下記の対策を実施する。</p> <p><飛散する車両></p> <ul style="list-style-type: none"> ・ アンカーにより地面へ固縛する，または十分な重さのウェイトを取付ける。 ・ ウェイトの重量については，車両の自重+ウェイトの重量により空力パラメータが 0.0026 以下となる重量とする。 ・ 停車車両については，竜巻襲来が予想される場合に速やかに車両退避エリア（評価対象施設等から 350m の範囲外）に退避できる体制を取る旨マニュアルに反映することとしており固縛不要とする。 ・ 業務車両以外の車両については，構内への入構を禁止する。 <p><飛散はしないが横滑りする車両></p> <ul style="list-style-type: none"> ・ アンカーにより地面へ固縛する。  <p style="text-align: center;">対策例</p>

飛散防止対策における対策耐力の考え方

1. 浮上りに対する評価方法

空力パラメータを用いて浮き上がるときに受ける全体浮力を算出し、自重より大きい場合「浮き上がり発生」と判断する。このときの正味の上向きの力（＝（空力パラメータから算出される全体浮力）－（自重））を「浮き上がり力」とし、基本設計用荷重として算出し、飛散防止対策の検討を行う。

想定飛来物の空力パラメータ値が 0.0026 となる時の質量を $m\sim$ とすると、浮き上がり力 Q_v は以下の（1）式のとおり算出される。なお、空力パラメータの算出については、添付資料 3.8 のとおり。

$$Q_v = (m\sim - m) \times g [N] \cdots (1)$$

ここで、

$m\sim$ ：想定飛来物の空力パラメータが 0.0026 となる時の質量[kg]

m ：想定飛来物の自重[kg]

g ：重力加速度（＝9.80665m/s²）

2. 横滑りを考慮する物品に対する評価方法

横滑りを考慮する物品については、浮上り及び横滑りに対する検討を行う。

建築物荷重指針・同解説等に準拠して求められる「水平方向の風荷重」にて横滑りを評価するものとし、浮き上がらない場合でも摩擦抵抗は考慮しない。

「水平方向の風荷重」と「浮き上がり力」のうちいずれか大きい値を基本設計用荷重として算出し、飛散防止対策の検討を行う。以下の図 1 に概念図を示す。

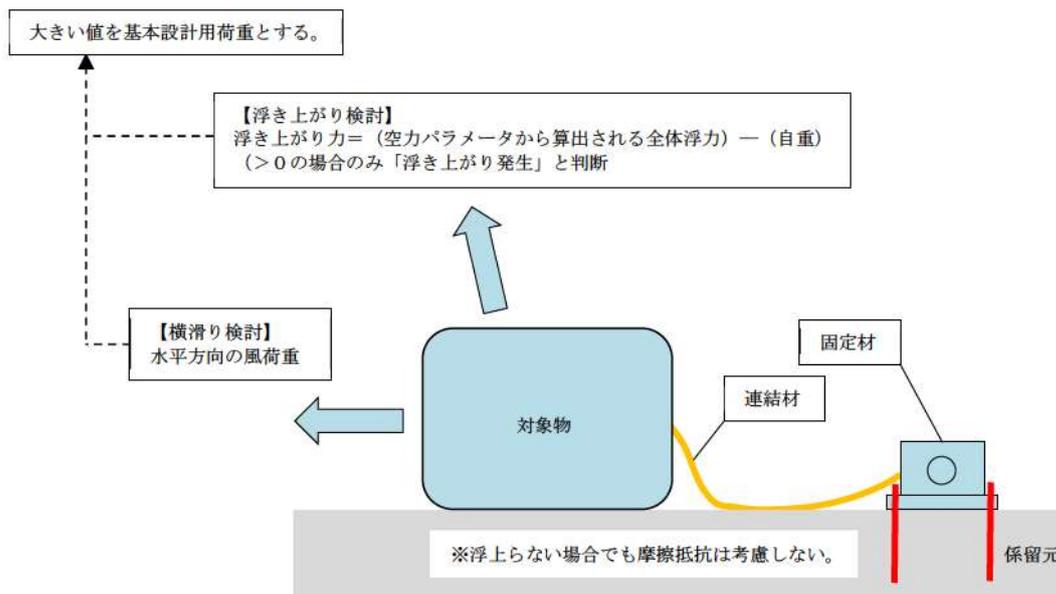


図1 横滑りを考慮する物品に対する基本設計用荷重の考え方の概念図

①浮き上がり力の算出

(1) 式のとおり。

②水平方向の風荷重 W_D の算出

建築物荷重指針・同解説に準拠し、以下の(2)のとおりとする。なお、風力係数の設定は、建築基準法施行令に準拠する。

$$W_D = q_H \times C_D \times G_D \times A[N] \cdots (2)$$

ここで、

q_H : 速度圧 (= $\rho \times V^2/2$, ρ : (=空気密度) 1.22 kg/m^3)

C_D : 風力係数

G_D : 風方向ガスト影響係数 (=1.00)

A : 受風面積 (機器・物品を直方体とした場合は、側面の最大値) [m^2]

3. 各部材の評価方法

連結材 (ワイヤー類) を経由して作用する基礎 (アンカーボルト等) への荷重は、図2のとおり、引き抜き方向とせん断方向にそれぞれ基本設計用荷重が作用するものとする。なお、部材の設計で用いる許容荷重は、許容値としてメーカーが提示する値又は破断 (終局) 強度や基準強度に対して適切に安全率を配慮した値とする。

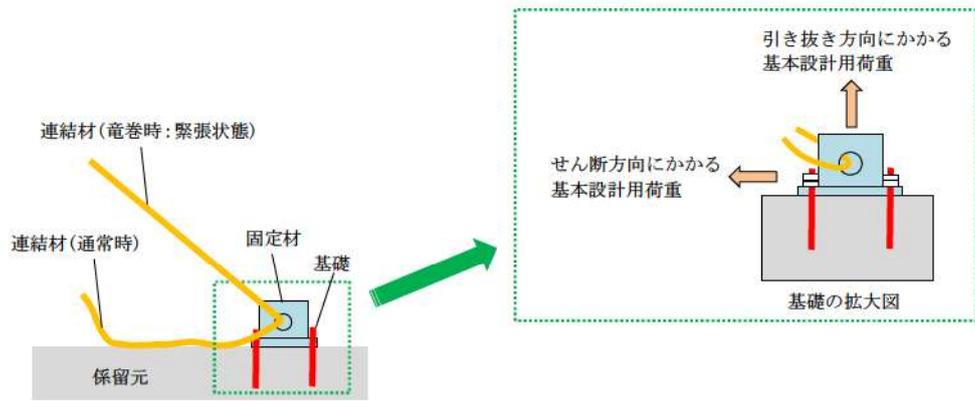


図2 アンカーボルト等に関する検討荷重（概念図）

設計竜巻荷重と積雪荷重との組み合わせについて

設置許可基準規則第6条のうち「外部事象の考慮」において、竜巻と積雪は荷重により安全施設に大きな影響を及ぼすおそれがあると想定される自然現象として抽出しており、組合せの要否の検討を実施している。

また、積雪事象は気象情報によって予測可能であることも踏まえて、積雪が確認された場合には除雪等に必要な資機材を確保するとともに手順等を整備することによって、雪を長期間堆積状態にしない方針としている。

一方、「原子力発電所の竜巻影響評価ガイド」では設計竜巻荷重と組み合わせる荷重として、竜巻以外の自然現象による荷重を挙げており、竜巻との同時発生が想定され得る雪等の発生頻度を参照し、設計対象施設に常時作用する荷重、運転時荷重等と組み合わせることの適切性や設定する荷重の大きさ等を判断するとしている。

これらの方針を踏まえて、設計竜巻荷重と積雪荷重の組合せの考え方について以下のとおり整理する。

1. 設計竜巻荷重と設計積雪荷重の組合せの考え方

竜巻及び積雪による堆積荷重は、同時に発生する場合を考慮し、設計上考慮すべき荷重評価における自然現象の組合せとして、竜巻による荷重及び積雪による荷重の組合せを設定している。荷重の組合せは、主たる作用（主事象）の最大値と、従たる作用（副事象）の任意時点の値（平均値）の和として作用の組合せを考慮する Turkstra の法則^{*1}の考え方に基づき設定している。この考え方は、日本建築学会「建築物荷重指針・同解説」や建築基準法、土木学会「性能設計における土木構造物に対する作用の指針」、国土交通省「土木・建築にかかる設計の基本」、EN1990（ユーロコード）、ASCE 7-02（米国土木学会）、ANSI（米国国家規格協会）、ISO 等でも採用されている。

竜巻は発生頻度が低い偶発荷重であるが、発生すると荷重が大きく、安全機能への影響が大きいと考えられることから、設計上の主荷重として扱う。一方、積雪は発生頻度が主荷重と比べて相対的に高いが、荷重は主荷重に比べて小さく、安全機能への影響も主荷重に比べて小さいため、従荷重として扱う。

竜巻と積雪の発生頻度、影響の程度を表1に示す。また、主荷重と従荷重の組合せを表2に示す。（表1、表2は「別添資料1 外部事象の考慮について」より抜粋）

表1 竜巻及び積雪荷重の性質

荷重の種類		荷重の大きさ	最大荷重の継続時間	発生頻度 (/年)
主荷重	竜巻	大	短 (数十秒)	2.5×10^{-7}
従荷重	積雪	中	長 (約2週間) *1	1.0×10^{-2} *2

*1 積雪は冬季の限定した期間のみ発生する。除雪を行うことで、継続期間は短縮することが可能

*2 垂直積雪量が冬季の最大積雪の100年再現期待値に相当する値

表2 竜巻 (主荷重) と積雪 (従荷重) の組合せ

		竜巻 (主荷重)	
積雪 (従荷重)	建築基準法	記載なし	
	継続時間	短 (竜巻) × 長 (積雪)	
	荷重の大きさ	大 (竜巻) + 中 (積雪)	

上記のとおり、竜巻の作用時間は極めて短時間であること、積雪の荷重は冬季の限定された期間に発生し、積雪荷重の大きさや継続時間は除雪を行うことで低減できることから、発生頻度が極めて小さい設計竜巻の風荷重と積雪による荷重が同時に発生し、設備に影響を与えることは考えにくい。また、雪が堆積した状態における竜巻の影響については、除雪により雪を長期間堆積状態にしない方針であることから、組合せを考慮しない。

2. 竜巻との同時発生が想定される雪との組合せの考え方

「原子力発電所の竜巻影響評価ガイド」で設計竜巻荷重に組み合わせる荷重として考慮することが要求される竜巻と同時発生が想定される雪は、冬期に竜巻が襲来する場合に考慮すべき事象である。

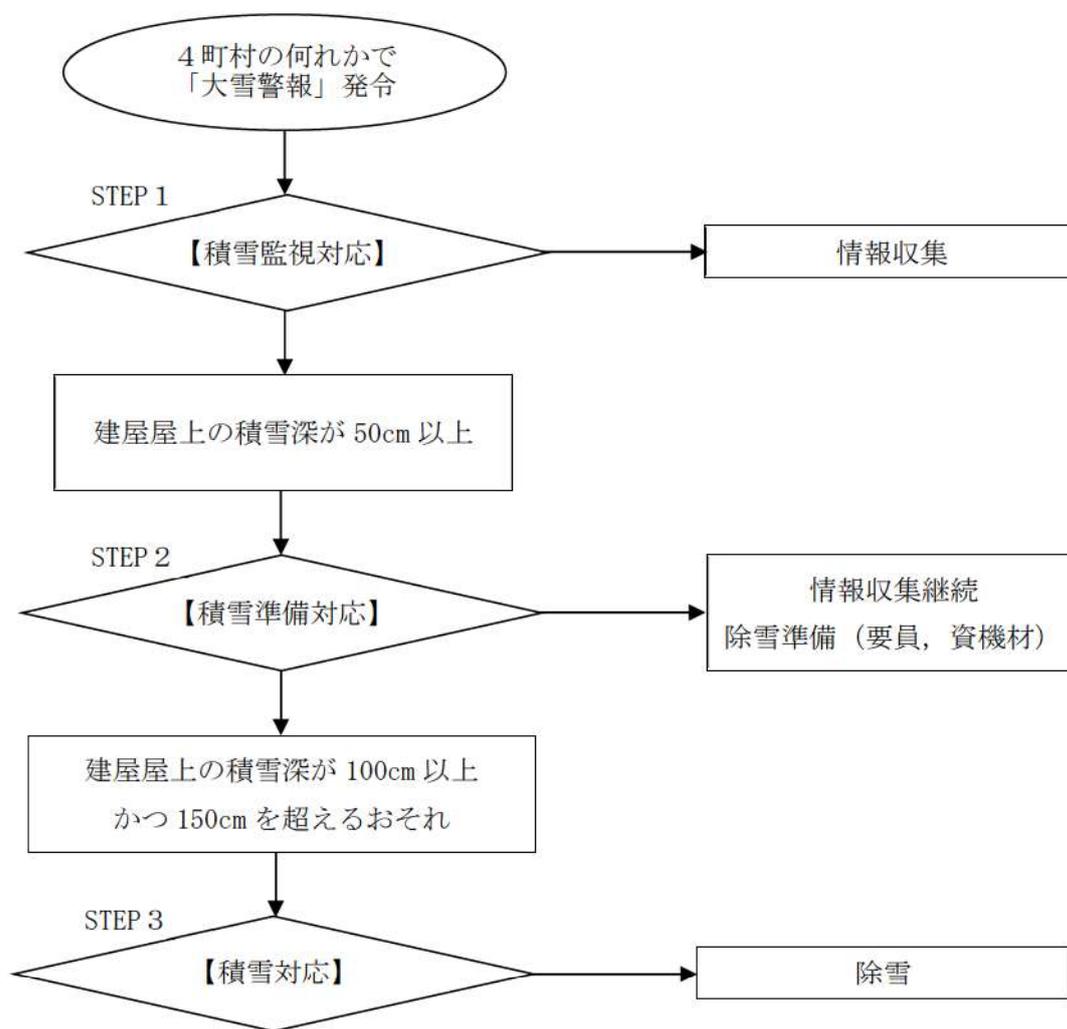
竜巻通過前後の気象条件において降雪を伴う可能性はあるが、上昇流の竜巻本体周辺では、竜巻通過時に雪は降らない。また、下降流の竜巻通過時は、竜巻通過前に積もった雪の大部分は竜巻の風により吹き飛ばされ、雪による荷重は十分小さく設計竜巻荷重に包絡される。よって、「原子力発電所の竜巻影響評価ガイド」で考慮することが要求される竜巻と同時発生が想定される雪は荷重として影響を及ぼさないことから、組合せを考慮しない。

[参考文献]

※1：建築物荷重指針・同解説（2015）（2章 荷重の種類と組合せ、付5.5 許容応力度設計に用いる組合せ荷重のための荷重係数）

原子炉建屋等の屋上の除雪運用について

外部事象防護対象施設を内包する建屋（原子炉建屋等）を含む建屋屋上の除雪については、発電所周辺 4 町村（岩内町、共和町、泊村、神恵内村）のうち、いずれかに「大雪警報」が発令された場合、建屋屋上の積雪深を監視し、100 cm 以上かつ 150 cm を超えるおそれがある場合は、150 cm を超えないように除雪を実施することとしている。（図 1 参照）



- ※ 1 情報収集は、建屋屋上の積雪深測定、気象情報の監視を行う。
- ※ 2 継続監視、除雪実施の運用については、継続的に改善していく。

図 1 原子炉建屋等の屋上除雪フロー

本運用において、建屋屋上の積雪深が 50 cm 以上となった実績はないが、150 cm を超えな

いよう除雪を実施する運用としていることを踏まえ、評価対象の建屋については、設計竜巻荷重等に積雪量 150 cmの荷重を組合せた荷重に対して構造健全性が維持されること又は倒壊しないことを確認している。

2次飛来物の抽出について

2次飛来物の選定においては、以下の観点及び選定フローにより、抽出を行った。また、抽出された2次飛来物について設計飛来物に包含されるかどうか確認を行った。

- ① 外部事象防護対象施設等に波及的影響を及ぼす可能性がある建屋、構築物、設備の損壊等により主要部材（壁、屋根等）が2次飛来物となるか。
- ② 竜巻による過去の建築物の被害事例より、竜巻による風荷重の影響を受けやすいと考えられる部位であるか。

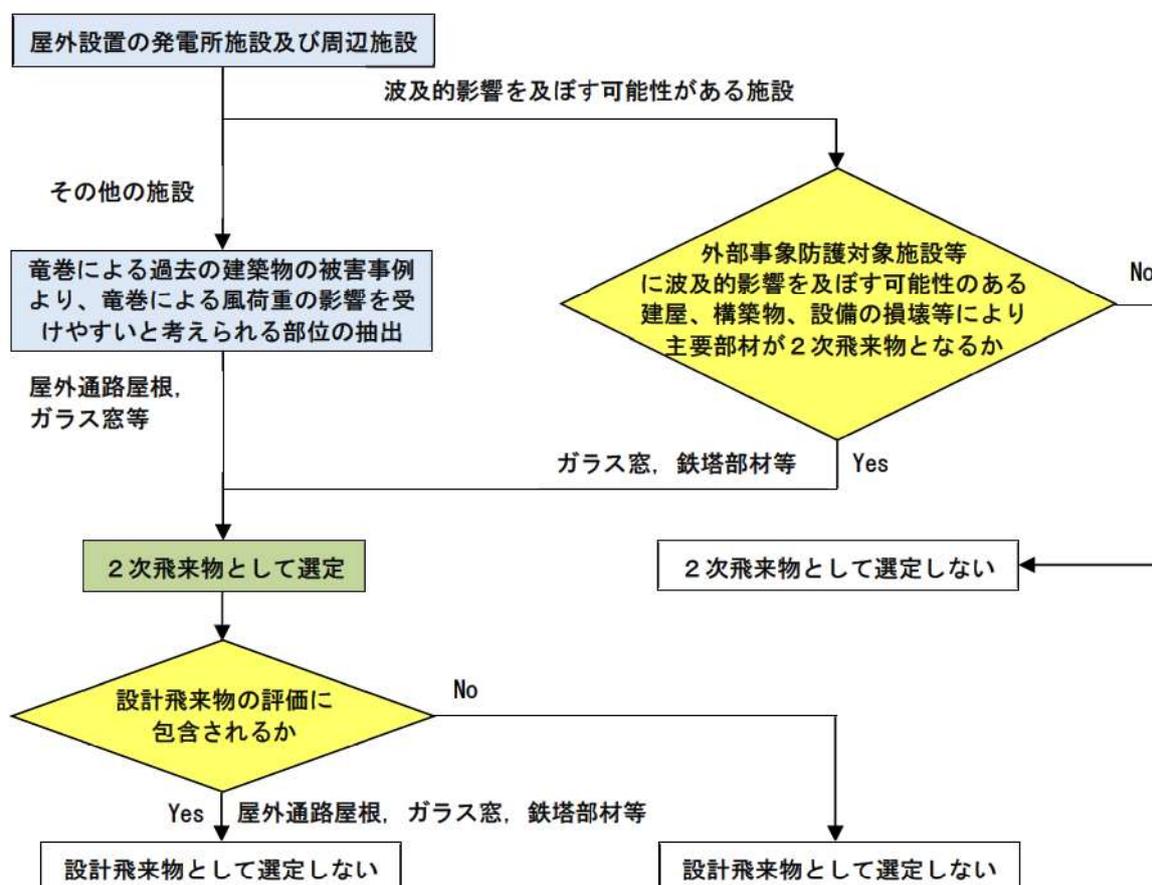


図1 2次飛来物選定フロー

以上より、まず、①外部事象防護対象施設等に波及的影響を及ぼす可能性がある建屋、構築物、設備であり、損壊等により部材（壁、屋根等）が2次飛来物となる可能性が考えられるかについて、鉄骨造である循環水ポンプ建屋、タービン建屋、燃料取扱棟、送電鉄塔について確認を行った。その結果を以下の表1に示す。

また、②の竜巻による風荷重の影響を受けやすいと考えられる部位については、過去に発生した竜巻による建築物の被害状況等により、飛散をしていないシャッターを除き、屋外通路屋根、ガラス窓、給気用ガラリについて、2次飛来物となる可能性が否定できないが、これらについては、飛来物となったとしても設計飛来物である鋼製材に包含されること確認した。検討結果を別紙1に示す。

表1 2次飛来物評価結果

	施設の倒壊有無	部材の飛散有無	部材の設計飛来物への包含性
循環水ポンプ建屋	無※1	無※1	ガラス窓等の飛散可能性は否定できないものの、設計飛来物に包絡されることを確認した。
タービン建屋	無※1	無※1	
燃料取扱棟	無※1	無※1	
送電鉄塔	<p>強度検討の結果、鉄塔下部の部材（腹材）の余裕度が1.00を下回る結果となった。万一、鉄塔が損壊した場合においても、架渉線の径間長が長く高張力側であるNo.6鉄塔方向に倒壊し、外部事象防護対象施設を内包する建屋側に倒壊するリスクは極めて低い。また、鉄塔の高さ（約29m）に対して、鉄塔から外部事象防護対象施設を内包する建屋までの距離は約400m確保されているため、鉄塔が倒壊したとしても外部事象防護対象施設を内包する建屋に衝突することはない。さらに当該部材が破断したとしても、当該部材を支柱材に連結しているボルトの余裕度が1.00以上確保されており、少なくとも部材の片端は他の部材と連結されていると考えられるため、飛散することは考え難いことから、送電鉄塔への竜巻襲来時における影響はないことを確認した。※2</p>		<p>（余裕度が1.00を下回る部材は、設計飛来物に包含されることを確認した。）</p>

※1：評価結果は設工認にて説明

※2：評価結果は別紙2に記載

以上より、屋外通路屋根、ガラス窓、給気用ガラリ、鉄塔部材については、2次飛来物となる可能性を否定できないが、これらについては、設計飛来物である鋼製材に包含できることを確認した。

主な竜巻による被害概要を調査した文献より、竜巻による被害を受けやすい建築物の部位として以下が挙げられる。



屋根材

ガラス窓

図 1 平成 24 年 5 月 6 日 茨城県つくば市で発生した F3 竜巻による建築物の被害状況※¹

屋根材

ガラス窓

給気ガラリ

図 2 泊発電所において竜巻による風荷重や飛来物の影響を受けやすいと考えられる部位

以上より、泊発電所においても竜巻により被害を受けた建築物の部位と同様な箇所については、2次飛来物として抽出し、設計飛来物に包含されることを確認した。以下の表 1 に比較結果を示す。

表 1 2次飛来物の設計飛来物への包含性について

	仕様				運動エネルギー [kJ]	コンクリート (Fc24)の貫通限 界厚さ[cm]
	長さ[m]	幅[m]	高さ[m]	質量[kg]		
鋼製材	4.2	0.3	0.2	135	220	28.6
屋根材※ ²	2.4	2.91	0.0008	20	84※ ³	27.1
ガラス窓	0.8	1.0	0.005	10	29	15.5
給気用ガラリ	1.0	2.0	0.12	20	64	13.6

※1：「平成 24 年(2012 年)5 月 6 日に茨城県つくば市で発生した建築物等の竜巻被害調査報告」(ISSN1346-7328 国総研 第 703 号 ISSN0286-4630 建築研究資料 第 141 号 平成 25 年 1 月)

※2：被害状況から分解したと仮定

※3：柔構造であるため、衝突した際に伝わる運動エネルギーは、さらに低いと考えられる。

送電鉄塔への竜巻襲来時における影響について

1. 検討対象

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

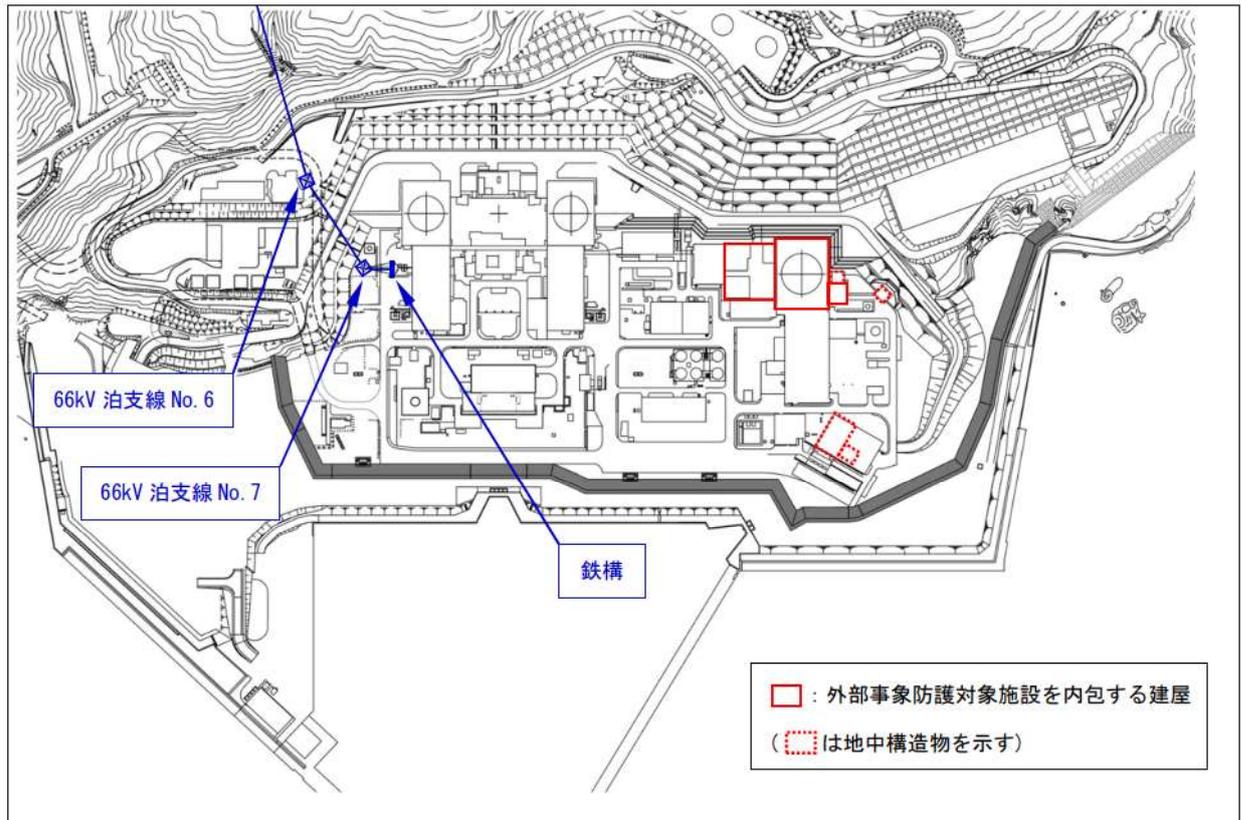


図 1 検討対象平面図

2. 検討方法

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

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

(1) 鉄塔に対して

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

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

表 1 最大風速 100m/s の竜巻を想定した設計風圧値

	鉄塔風圧値 (Pa)
塔高 40m 以下 普通鉄塔	17,750

表 2 鉄塔における設計等価風圧値

	鉄塔風圧値 (Pa)
塔高 40m 以下 普通鉄塔	2,840

(2) 架渉線に対して

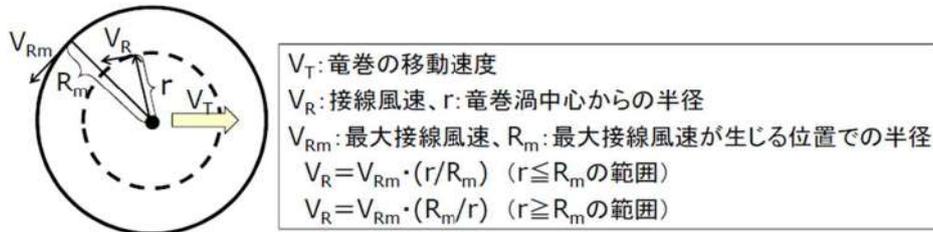
架渉線については、風速 40m/s 時の電線 1m 当りの電線風圧値 (H_c) を設定し、この風圧値が作用した際に耐えられるよう送電鉄塔の設計を行っている。

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

< 架渉線に作用する風荷重の算出方法 >

① 竜巻の中心距離からの風速分布

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



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

図 2 ランキン渦モデルによる風速分布の考え方

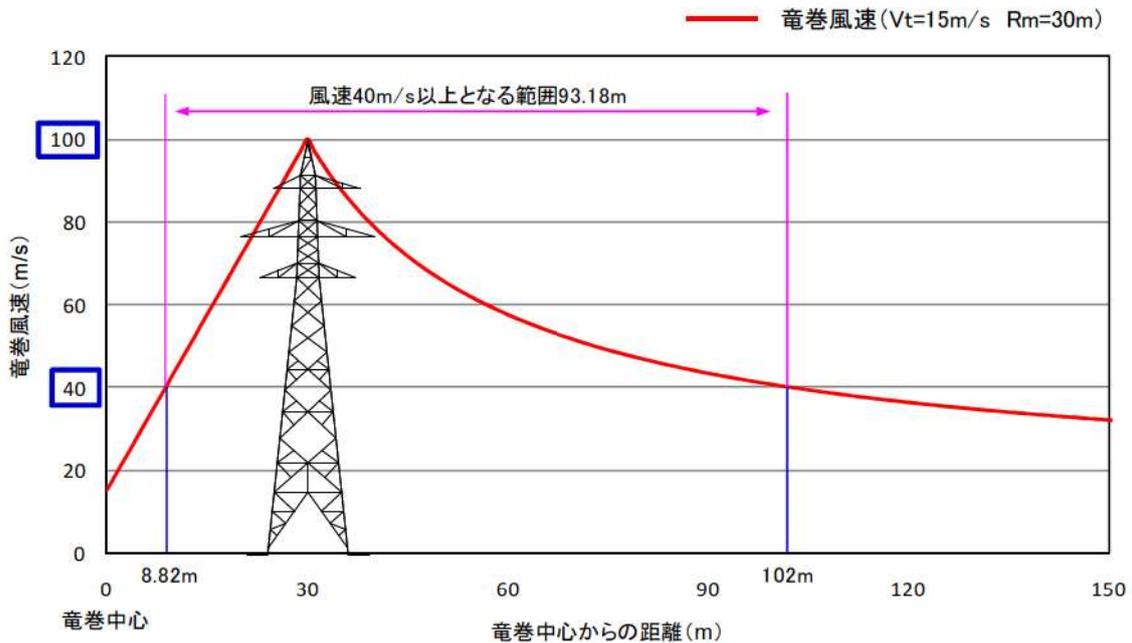


図 3 竜巻風速 100m/s 時の風速分布

② 竜巻影響範囲の決定

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

③ 架渉線における風圧値の比較

架渉線に作用する風圧荷重は以下の関係で表される。

$$H_c = P \times A$$

H_c : 架渉線風圧荷重 (kN)

P : 架渉線風圧 (Pa)

A : 受風面積 (m²)

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

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

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

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

④ 竜巻襲来時の架渉線に作用する風荷重

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

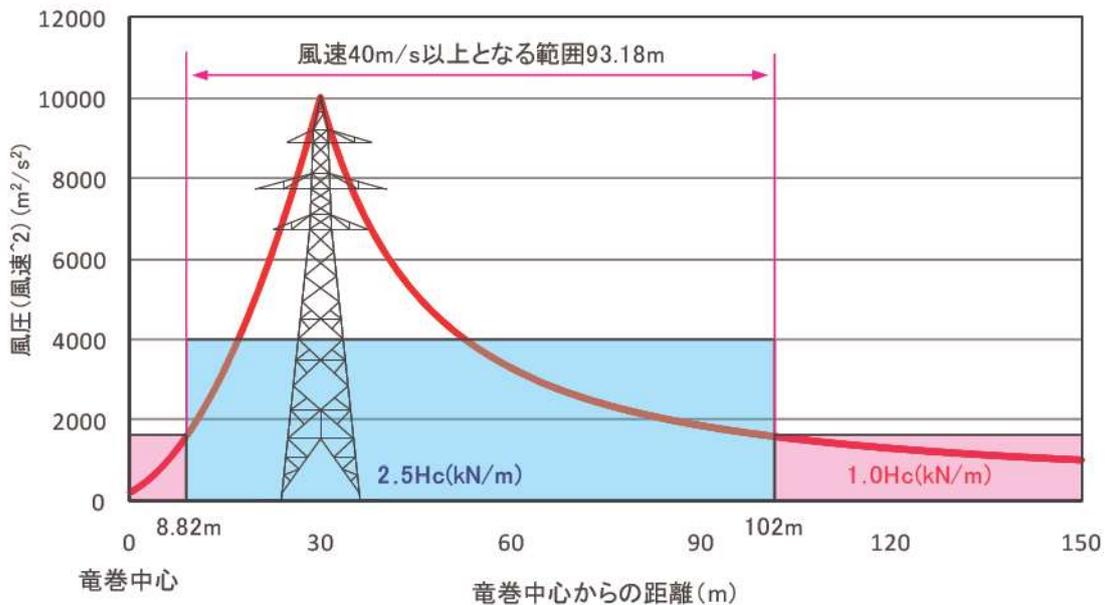


図4 架渉線に作用する風荷重の算定結果

⑤ 泊支線 No. 7 鉄塔の前後径間における架渉線風荷重分布

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

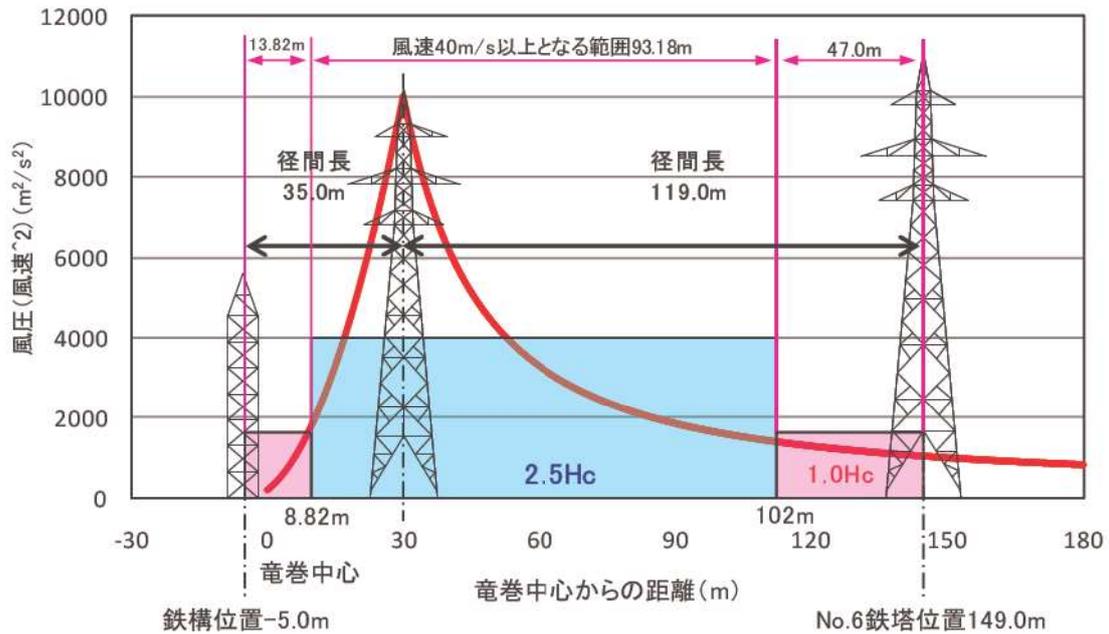


図 5 泊支線 No. 7 鉄塔前後の架渉線に作用する風荷重

⑥ 本検討における架渉線風圧荷重分布について

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

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

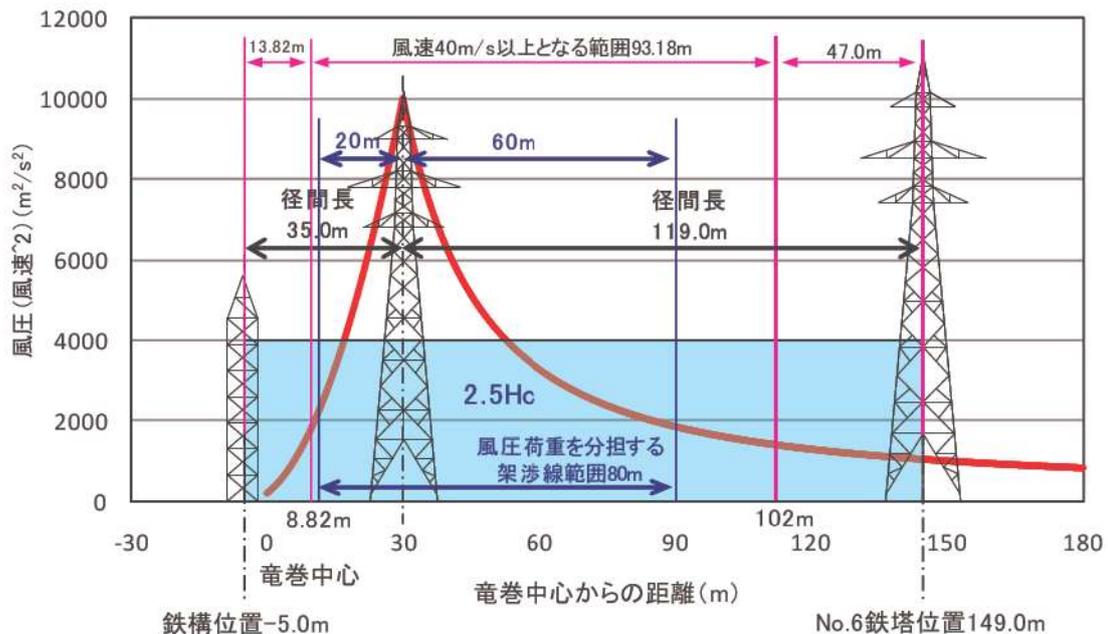


図 6 本検討における架渉線風荷重分布

3. 使用材料および許容応力度

送電鉄塔の材質および強度区分別の許容応力度は、表3のとおりである。

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

表3 鋼材の許容応力度

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

() 内は σ_B を示す。

4. 強度検討結果

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

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

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

以上

<参考資料>

【塔体部の余裕度が 1.00 を下回る箇所】



 枠囲みの内容は機密情報に属しますので公開できません。

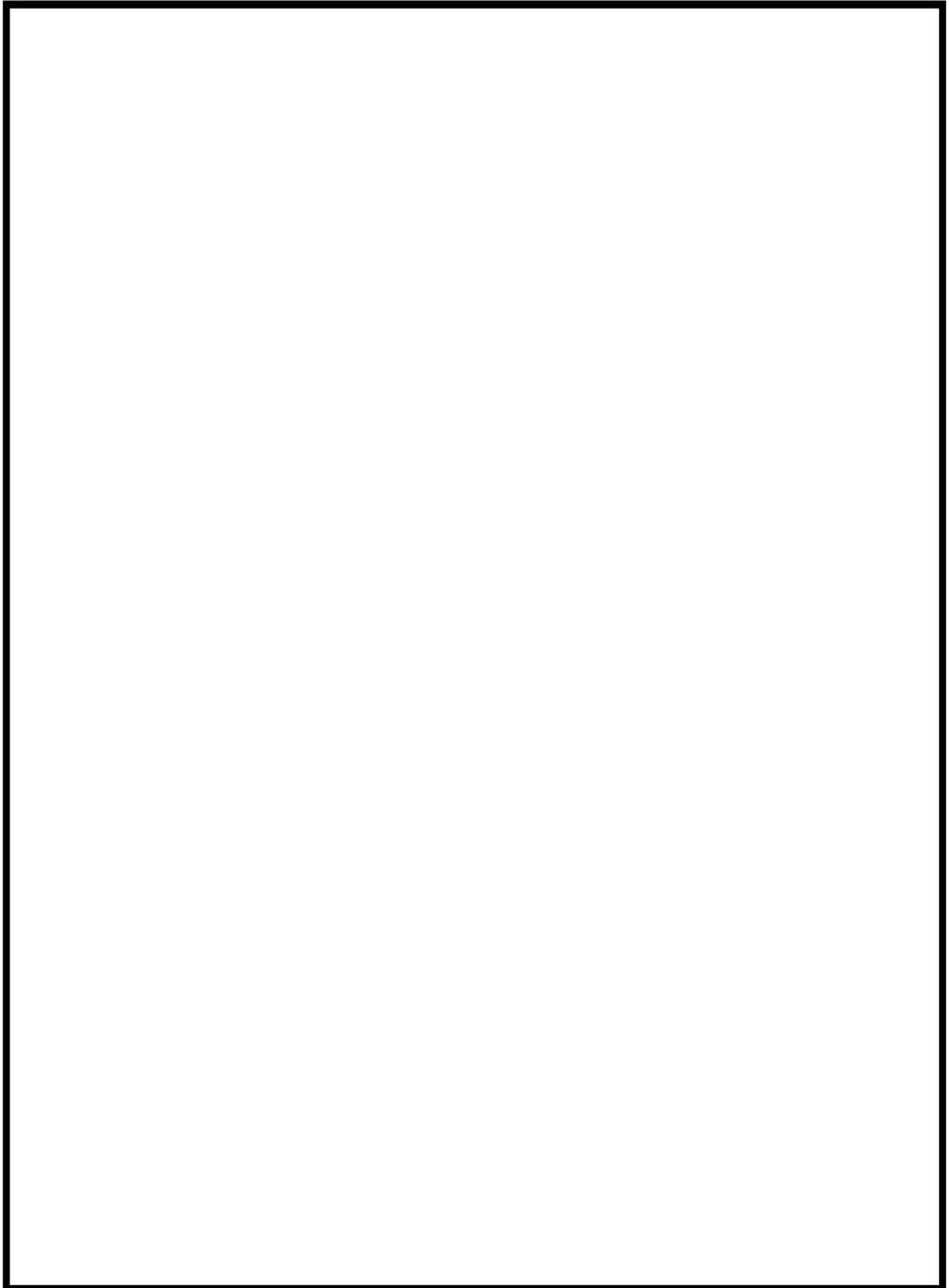
【鉄塔部材の強度検討結果】



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

枠囲みの内容は機密情報に属しますので公開できません。

【余裕度が 1.00 を下回る部材と設計飛来物の比較】



 枠囲みの内容は機密情報に属しますので公開できません。

飛来物の飛散有無の判断方法，飛散距離および高さの算定の仕方について

地上にあるものに対する竜巻による浮き上がりの有無に関する知見は少ない。一方，浮き上がったものについては，飛来物のサイズ，質量，形状から算出した空力パラメータにより，飛散の程度を算出することができる。

このため，飛来物となる可能性があるものは全て浮き上がるとして，浮き上がったものがそれ以上浮遊し継続して上昇するか否かについて，空力パラメータを用いて判断することにより，飛散有無を判断した。

以下に飛来物の飛散有無の判断方法，飛散距離及び飛散高さの算定の仕方について示す。

1. 竜巻の風速場

飛来物の軌跡評価は竜巻の風速場に地上 40m^{※1} 地点に飛来物を置き，これを起点として軌跡評価を実施する。

ランキン渦としてモデル化した竜巻について，※2の文献より周方向，半径方向，鉛直方向の速度を以下のように表せる。

$$V_r = \frac{1}{\sqrt{5}} V_{rot}$$

$$V_\theta = \frac{2}{\sqrt{5}} V_{rot}$$

$$V_z = \frac{4}{3\sqrt{5}} V_{rot}$$

$$V_r = \begin{cases} \frac{r}{R_m} V_m & \text{if } 0 \leq r \leq R_m \\ \frac{r}{R_m} V_m & \text{if } R_m \leq r \end{cases}$$

※2の文献において，以下の関係が示されている。

$$V_r = \frac{1}{2} V_\theta, \quad V_z = \frac{2}{3} V_\theta$$

したがって，

$$V_{rot} = \sqrt{V_r^2 + V_\theta^2} = \sqrt{\left(\frac{1}{2} V_\theta\right)^2 + V_\theta^2} = \frac{\sqrt{5}}{2} V_\theta \text{ より，}$$

$$V_\theta = \frac{2}{\sqrt{5}} V_{rot}$$

よって，

$$V_z = \frac{2}{3} V_\theta = \frac{4}{3\sqrt{5}} V_{rot}$$

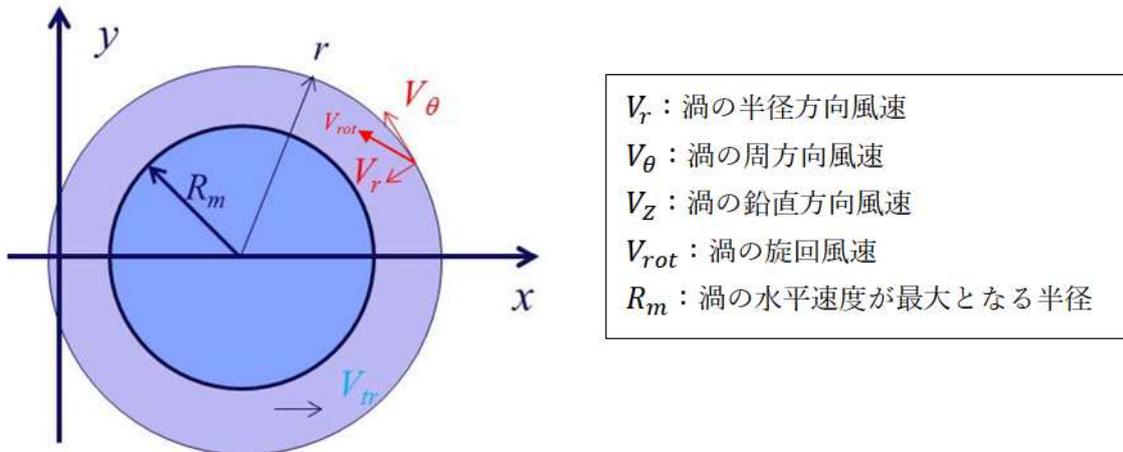


図1 風速条件の設定概略図

- ※1 : 米国の REGULATORY GUIDE や平成 21～22 年度原子力安全基盤調査研究「竜巻による原子炉施設への影響に関する調査研究」(東京工芸大学) 等でも竜巻中の高さ 40m を飛来物の初期位置としている。
- ※2 : J. R McDonald, K. C. Mehta, and J. E. Minor “Tornado-Resistant Design of nuclear Power-Plant Structures”

2. 飛来物の運動 (飛散距離, 高さの算定の仕方)

飛来物の飛散距離及び飛散高さについては, 竜巻による風速場の中での飛来物の軌跡を計算することで評価した。

仮定した風速場は 1. に示したランキン渦とした。その風速場の中で, 質点系にモデル化した飛来物が, 相対速度の 2 乗に比例した抗力を受けるものとした。この時, 飛来物の運動は式 (1) ※³にて表される。

$$m\ddot{x}(t) = \frac{1}{2}\rho C_D A \left(V(x(t)) - \dot{x}(t) \right) \left| V(x(t)) - \dot{x}(t) \right| - mgJ \dots (1)$$

ここで,

m : 飛来物の質量, A : 代表面積, C_D : 抗力係数, $x(t)$: 時刻 t での飛来物の位置

$\dot{x}(t)$: 時刻 t での飛来物の速度, $\ddot{x}(t)$: 時刻 t での飛来物の加速度,

$V(x(t))$: 時刻 t での飛来物位置での風速, ρ : 空気密度, g : 重力,

J : 重力方向成分のみ 1, 他成分は 0 のベクトル

なお, 抗力係数 C_D は, 3 方向の面積で重みづけした平均とした。

具体的な飛散距離及び飛散高さの評価においては, 式 (1) を離散化することで計算を

行った。

図2に飛来物軌跡評価のイメージを示す。

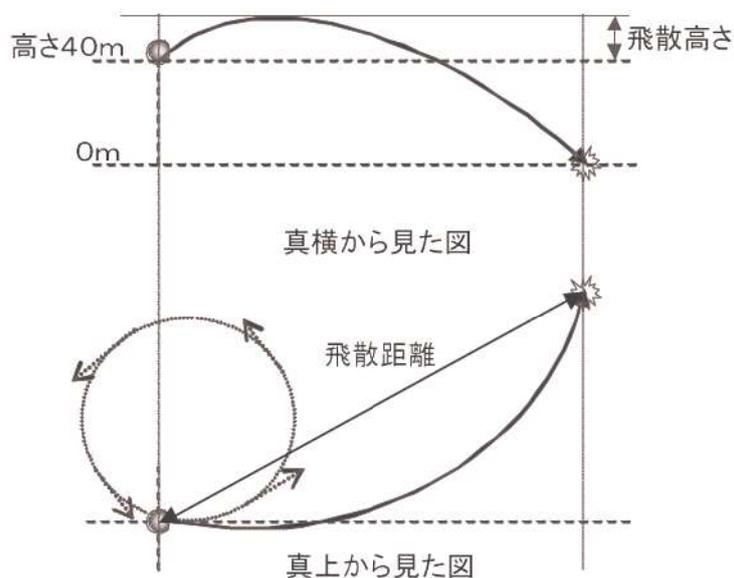


図2 飛来物の軌跡評価イメージ

なお、本評価に用いた解析条件と JNES 委託研究^{*4}における解析条件、解析結果は以下の表1、図3のとおり、よく整合している。

また、本評価のランキン渦を用いた評価方法は米国における風による建造物の影響評価のための教科書^{*6}にも示されており、本評価に用いた解析条件は妥当であると考えられる。

表1 本評価に用いた解析条件と JNES 委託研究における解析条件の比較

検討内容	本評価	JNES 委託研究	比較結果
飛来物初期高さ	40m	40m	一致
解析終了条件	0m	0m	一致
渦特性	ランキン渦	LES による乱流場	以下の図3 のとおり、竜巻風速場をランキン渦にてモデル化した場合、飛来物速度に与える影響について、LES 解析結果と良く整合することが確認されている。 ^{*5}

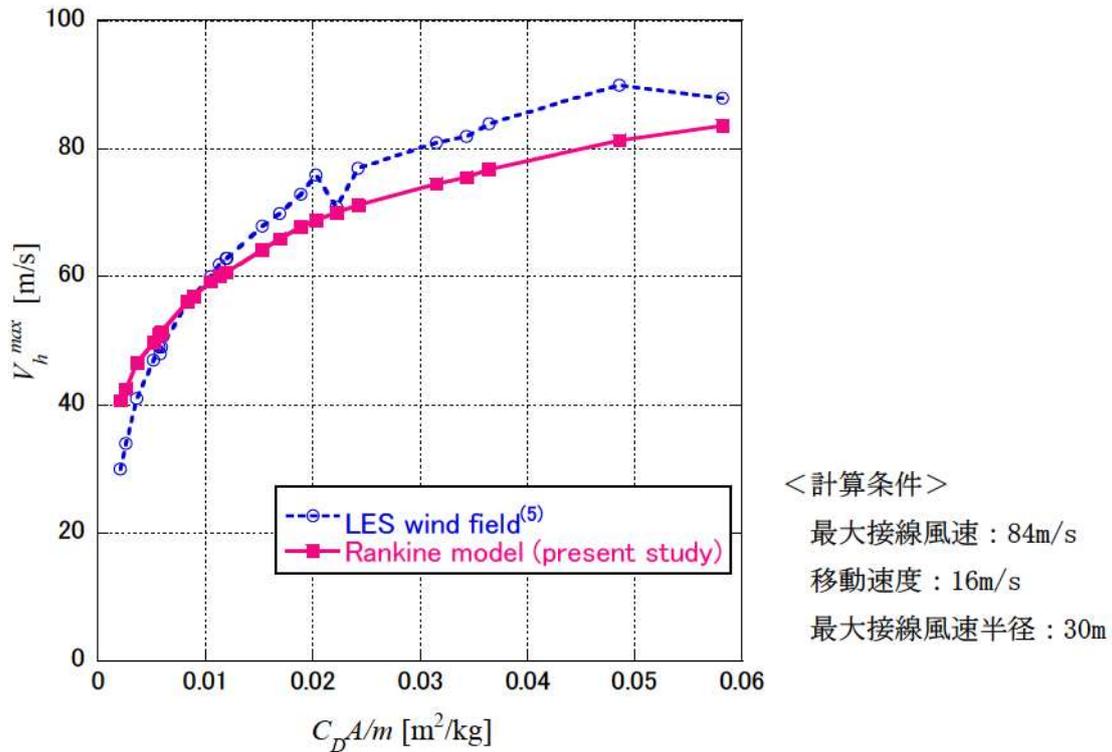


図3 空力パラメータと飛来物速度の関係

- ※3 : E. Simiu, M. Cordes : “Tornado-Borne Missile Speeds,” NBSIR 76-1050, National Bureau of Standards, Washington D. C., 1976.
- ※4 : 東京工芸大学 : 「平成 21～22 年度原子力安全基盤調査研究 (平成 22 年度) 竜巻による原子力施設への影響に関する調査研究」, 独立行政法人原子力安全基盤機構委託研究成果報告書, 平成 23 年 2 月
- ※5 : 江口讓, 杉本聡一郎, 服部康男, 平口博丸 (電力中央研究所) : 「移動ランキン渦モデルによる飛来物速度の評価」, 日本流体力学会年会, 2013. 9.
- ※6 : E. Simiu, R. H. Scanlan : “Wind Effect on Structures, An Introduction to Wind Engineering,” 1977.

3. 想定飛来物の飛来の判断基準について

想定飛来物が飛来するか否かについては, 表 2 に示す竜巻の条件下で, 想定飛来物の寸法 (長さ, 幅, 高さ), 質量, 形状 (棒状, 板状, 塊状) から算出した空力パラメータ ($C_D A/m$) の値をもとに判断している。

以下に, 飛来するか否かの判断基準とする空力パラメータの設定について示す。

<飛来するか否かの判断基準とする空力パラメータの設定について>

竜巻風速場で初速0の想定飛来物に働く力は、風速の2乗に比例するものとし、その鉛直方向成分が浮上り力Fであるとする。その時、

$$F = \frac{1}{2} \rho C_D A V_Z |V_D + V_Z|^{*7} \dots (2)$$

ここで、

F : 浮上り力[N], ρ : 空気密度[kg/m³], C_D : 抗力係数,

V_D : (水平) 竜巻風速[m/s], V_Z : 鉛直風速[m/s], A : 代表面積[m²]

上記で表される浮上り力と自重から、想定飛来物が飛来するか否かは、以下の式により判断できる。

$$\frac{1}{2} \rho C_D A V_Z |V_D + V_Z| > mg \Leftrightarrow \frac{C_D A}{m} > \frac{2g}{\rho V_Z |V_D + V_Z|} \dots (3)$$

ここで、

$\frac{C_D A}{m}$: 空力パラメータ

また、想定飛来物の飛散高さ評価時に仮定した竜巻風速場内における鉛直方向風速に関する関係式^{*7}及び表2の V_{Rm} から、

$$V_Z = \frac{4}{3\sqrt{5}} \times V_{Rm} = 50.7(m/s) \dots (4)$$

これをもとに、式(3)に表1の値を代入すると、以下のようなになる。

$$\frac{C_D A}{m} > \frac{2g}{\rho V_Z |V_D + V_Z|} = \frac{2 \times 9.8}{1.22 \times 50.7 \times \sqrt{100^2 + 50.7^2}} = 0.0028 \text{ (切り捨て)}$$

となる。

すなわち、表2の条件下で、飛来するか否かに関する空力パラメータの閾値は、0.0028と算定される。

一方、表3のガイド例示の飛来物であるトラックの空力パラメータは0.0026であり、

上記閾値より小さい。すなわち、その空力パラメータを有するトラックは、表2に示す竜巻の条件下では飛来しない。そこで、ガイド例示のトラックの空力パラメータ 0.0026 を保守的に飛来するか否かの判断基準の空力パラメータとする。

なお、厳密には空力パラメータは、空中にある物体が竜巻による風速場の中でどのような挙動を示すかを図る数値であり、上記にて述べてきた空力パラメータが 0.0028 以下の物体については、初期位置（本評価では高さ 40m）から浮上しないことを示しており、地面に置かれた物体が浮上しないことを示しているわけではない。ただし、地面に置かれた物体が竜巻による揚力等により浮上した時点でこの空力パラメータによる評価を適用することができることから空力パラメータが 0.0028 以下の物体は揚力等により浮上った瞬間に落下することが考えられるため、飛来しないとみなすことができる。

以上より、空力パラメータ 0.0026 を飛来有無の判断基準とすることは妥当であると考ええる。

表2 飛散高さ算出に係る竜巻の条件

設計風速 (V _D)	移動速度	最大接線風速 (V _{Rm})	空気密度 (ρ)
100m/s	15m/s	85m/s	1.22kg/m ³

表3 ガイド例示の飛来物の空力パラメータ及び飛散高さ

飛来物の種類	鋼製パイプ	鋼製材	コンクリート板	コンテナ	トラック
サイズ[m]	長さ×直径 2×0.05	長さ×幅×奥行 4.2×0.3×0.2	長さ×幅×厚さ 1.5×1×0.15	長さ×幅×奥行 2.4×2.6×6	長さ×幅×奥行 5×1.9×1.3
質量[kg]	8.4	135	540	2300	4750
空力パラメータ	0.0057	0.0089	0.0021	0.0105	0.0026
飛散高さ[m]	22	47	0	56	0

※7 : Simiu, E. and Cordes, M., NBSIR 76-1050. Tornado-Borne Missile Speeds, 1976.

4. 空力パラメータの算出方法について

空力パラメータは、ガイドの参考文献^{※8}及び米国における竜巻設計のための飛来物特性を与える NUREG-0800(1996)^{※9}に引用されていた文献^{※10}を参照し、以下の式(5)のとおりに算出した。

$$\frac{C_D A}{m} = \frac{c(C_{D1}A_1 + C_{D2}A_2 + C_{D3}A_3)}{m} \dots (5)$$

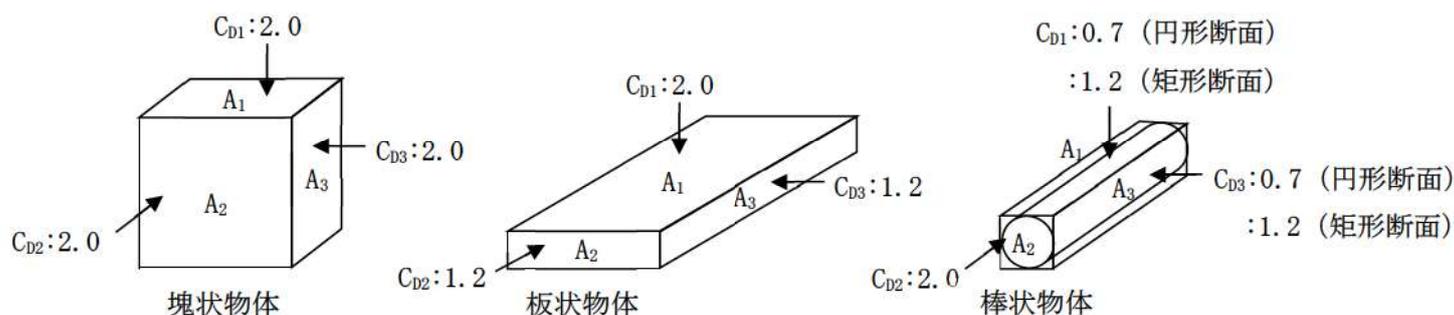
ここで、

m : 飛来物の質量, c : 係数(0.33), C_{D1} , C_{D2} , C_{D3} : 飛来物の抗力係数であり, 抗力係数は飛来物形状により, 以下の表4のとおりとする。

表4 飛来物の抗力係数

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

なお, A_1 , A_2 , A_3 は飛来物の投影面積であり, L , W , H をそれぞれ飛来物の長さ, 幅, 高さとした時, $A_1=L \times W$, $A_2=W \times H$, $A_3=H \times L$ である。ただし, 板状については, $L, W > H$, 棒状については, $L > W, H$ とする。



※8: 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

※9: US-NRC: “3.5.1.4 MISSILE GENERATED BY NATURAL PHENOMENA,” Standard Review Plan, NUREG-0800, 1996.

※10: E. Simiu, M. Cordes: “Tornado-Borne Missile Speeds,” NBSIR 76-1050, National Bureau of Standards, Washington D. C., 1976.

空力パラメータによる浮力と揚力の比較について

飛来の判断基準については、空力パラメータが 0.0026 より大か小かにより判断しているが、その考え方の保守性について竜巻風速場をランキン渦モデルとした場合に鉛直方向に作用する力と円柱状物体（直径 d 、長さ $14.1d$ ）に作用する揚力との比較により、確認を行った。以下にその確認結果を示す。

1. 竜巻風速場で初速 0 の想定飛来物に働く鉛直方向成分の力 F_D

前記の (2) 式のとおり、以下で表される。

$$F_D = \frac{1}{2} \rho C_D A V_Z |V_D + V_Z|$$

したがって、設計風速 100m/s における鉛直方向の浮上り力は、(4) 式及び表 2 より、

$$F_D = 3467 C_D A [\text{N}] \cdots (6)$$

2. 地上に置かれた物体にかかる揚力 F_L

$$F_L = \frac{1}{2} \rho C_L a V_D^2 \cdots (7)$$

ここで、

C_L : 地上での揚力係数, a : 地上での代表面積 [m^2]

したがって、上式に表 2 の条件を代入すると、

$$F_L = 6100 C_L a [\text{N}] \cdots (8)$$

以上より、(6) 式が (8) 式よりも保守的となるための条件は以下のとおり。

$$F_D > F_L \Leftrightarrow 3467 C_D A > 6100 C_L a \Leftrightarrow \frac{C_D A}{C_L a} > 1.76 \cdots (9)$$

(9) 式の条件が当てはまるかどうかを確認するために竜巻飛来物の軌跡を評価した文献^{※1}より、円柱（直径 d 、長さ $14.1d$ ）の揚力係数を参照し検討を行った。

別図 1 より、

$$C_{La} = 0.2 \times d \times 14.1d = 2.8d^2$$

と算出される。

また、

$$C_{DA} = 0.33(0.7 \times 14.1d \times d + 2.0 \times d \times d + 0.7 \times d \times 14.1d) = 7.1d^2$$

であることから、

$$C_{DA}/C_{La} = 7.1/2.8 = 2.5$$

となり、(9) 式を満たす。したがって、(3) 式は地面に置かれている円柱の浮上条件として保守的に適用できることが分かる。

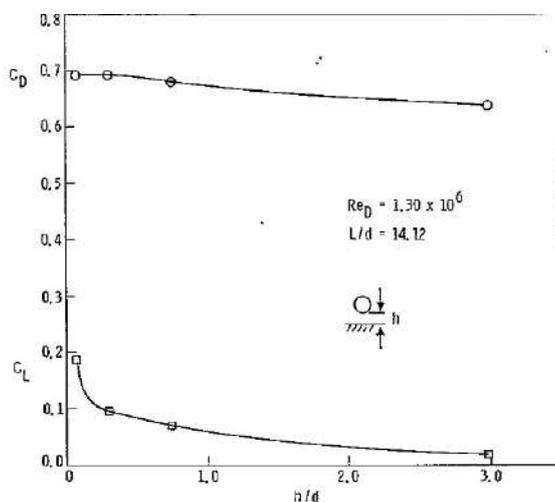


Fig. 3-19. Effect of distance from ground plane on the drag and lift coefficients of open circular cylinder (length/diameter = 14.1) normal to flow ($\psi = 90^\circ$) in supercritical Reynolds Number regime

別図 1 円柱の地面からの高さ と揚力係数の関係

※1 : Wind Field and Trajectory Models for Tornado Propelled Objects, EPRI NP-748, p. 3-23, 1978

藤田スケールに基づく被害状況との比較

空力パラメータを用いた物品の浮上と飛散状況について、気象庁ホームページに記載の藤田スケールにおける被害状況に記述されている自動車を対象として比較を行った。

評価する自動車としては、現地調査の結果から飛来物となる可能性がある乗用車(セダン)とする。

表1 評価対象の諸元

飛来物	長さ[m]	幅[m]	高さ[m]	質量[kg]	空力パラメータ $C_D A/m [m^2/kg]$
乗用車(セダン)	4.89	1.80	1.47	1760	0.00706

・F2 レベル(風速 69m/s)における評価

69m/s における浮上条件としては、前記の(3)式より $C_D A/m > 0.0059$ となり、乗用車(セダン)は評価上、浮き上がる評価となる。

これに対し、藤田スケールの被害状況においては、『自動車は道から吹き飛ばされる』という記載となっており、空力パラメータの評価は保守的な評価となっている。

・F4 レベル(風速 100m/s)における評価

100m/s における浮上条件としては、 $C_D A/m > 0.0028$ となり、乗用車(セダン)は評価上、浮き上がる評価となり、飛散距離は約 320m となる。

これに対し、藤田スケールの被害状況においては、『自動車は何十メートルも空中飛行する』という記載となっており、空力パラメータの評価は保守的な評価となっている。

以上から、空力パラメータを用いた飛散状況については、気象庁ホームページに記載の藤田スケールにおける被害状況と比較して保守的な結果になると判断できる。

飛来物速度（鉛直方向）に関する保守性について

竜巻により舞い上がった物体に対して竜巻が突然消えた場合の飛来物落下速度について検討した。

1. 評価条件

物体が竜巻により飛来開始し、その時間から $t = 1, 3, 5, 10$ 秒後に竜巻が突然消滅する条件で解析を行い、それぞれの最大鉛直方向速度を算出した。

物体の初期位置は高さ 40m としている。

竜巻の諸元を表 1 に示す。

表 1 飛来物速度評価時の竜巻諸元

項目	評価に使用する値
最大風速 [m/s]	100
移動速度 [m/s]	15
最大接線風速 [m/s]	85
最大風速半径 [m]	30
空気密度 [kg/m ³]	1.22
重力加速度 [m/s ²]	9.80665

2. 計算結果

空力パラメータ ($C_D A/m$) と物体が地上に落下するまでに達した最大の鉛直速度を評価した結果を図 1 に示す。

各線は竜巻が消滅した場合の鉛直方向の最大速度を示す。

一方、本竜巻影響評価における設計飛来物の鉛直方向の速度設定はガイドに従い、表 2 に示すように水平方向の 2/3 の速度に設定している。

表 2 設計飛来物の空力パラメータ及び飛散速度

設計飛来物	空力パラメータ $C_D A/m$ [m ² /kg]	水平速度 [m/s]	鉛直速度 [m/s]
砂利	0.0185	62	42
鋼製パイプ	0.0057	49	33
鋼製材	0.0089	57	38

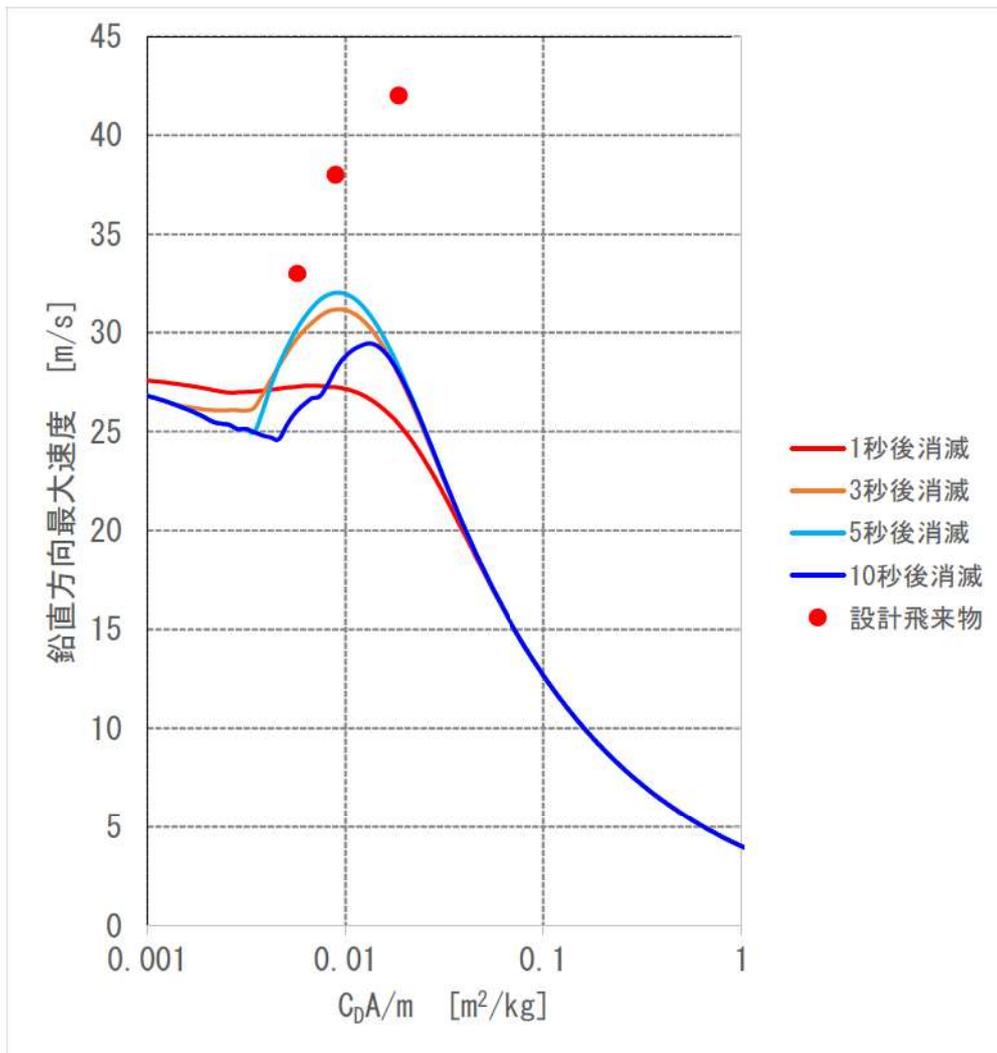


図1 竜巻風速 100m/s 時の飛来物の鉛直方向最大速度

以上、本評価に用いた飛来物の鉛直速度は、ランキン渦モデルにおける上記の各時間における竜巻消滅後の飛来物鉛直速度をいずれも上回っていることから本評価は保守的であることが確認できた。

浮き上がりに対する対策荷重の考え方について

空力パラメータから算出した浮力は、竜巻風速場をランキン渦モデルとした場合において空中から放出された飛来物に作用する浮力である。その保守性については、地上に設置された円柱（直径 d 、長さ $14.1d$ ）の地面からの高さと同揚力係数の関係から保守的に適用できることを確認している。（添付資料 3.8 別紙 1 参照）

しかしながら空力パラメータから算出した浮力については本来、空中から放出された飛来物に作用する浮力であるため、地震時の機能要求がある物品に対して飛散防止対策を実施する際には連結材（ワイヤーロープ、スリング等）に物品が空中に浮き上がることを考慮した余長を施し、対策（余長付固縛）を実施することとする。

地震時に機能要求がない物品に対して飛散防止対策を実施する際には、空力パラメータから算出した浮力に適切な裕度を考慮した対策（固定）を実施することとする。

以下に泊発電所における飛散防止対策の概要を示す。

1. 余長付固縛を実施する物品について

飛散防止対策として余長付固縛を実施する物品においては、(1) 式より算定される空力パラメータから算出した浮力に対して、物品の浮き上がりを評価した上で対策を実施する。

<空力パラメータによる浮力の算定方法>

空力パラメータを用いて浮き上がる時に受ける全体浮力を算出し、自重より大きい場合「浮き上がり発生」と判断する。このときの正味の向上きの力（＝（空力パラメータから算出される全体浮力）－（自重））を「浮力」とし、基本設計用荷重として算出し、飛散防止対策の検討を行う。

想定飛来物の空力パラメータの値が 0.0026 となる時の質量を m^{\sim} とすると、浮き上がり力 Q_v は以下の (1) 式のとおり算出される。

$$Q_v = (m^{\sim} - m) \times g [N] \cdots (1)$$

ここで、

m^{\sim} : 想定飛来物の空力パラメータが 0.0026 となる時の質量[kg],

m : 想定飛来物の自重[kg], g : 重力加速度

なお、竜巻風速場をランキン渦モデルとした場合の竜巻風速 100m/s における空中の

飛来物の浮上条件は空力パラメータ 0.0028m²/kg であるが、保守的に浮上条件を空力パラメータ 0.0026m²/kg として評価し、対策荷重について余裕をみている。

例として一般的な乗用車（全長 4.89m，全幅 1.8m，全高 1.47m，質量 1760kg）の場合、以下の表 1 のとおり空力パラメータからの浮力が算出される。

表 1 一般的な乗用車の空力パラメータから算出される浮力

対象物	長さ [m]	幅 [m]	高さ [m]	質量 [kg]	空力パラメータ C ₀ A/m[m ² /kg]	浮力[kN]		浮力の 荷重差 [kN]	浮力の 質量差 [kg]
						浮上条件が空力パラメータ 0.0028[m ² /kg]の場合	浮上条件が空力パラメータ 0.0026[m ² /kg]の場合		
乗用車	4.89	1.8	1.47	1760	0.00699	25.8	29.1	3.3	336

上記より、一般的な乗用車においては、浮上条件を空力パラメータ 0.0028m²/kg とした場合と比較し、浮上条件を空力パラメータ 0.0026m²/kg とした場合においては、約 3.3kN の余裕をみていることとなる。

飛散防止対策として余長付固縛を実施する物品については上記（1）式より物品ごとに算出される浮力に対し、各対策に用いる連結材（スリング等）、連結補助材（シャックル等）、固定材（固定金具等）及び基礎（アンカーボルト等）については、1.0 以上の裕度であれば十分であるが保守的に 2 以上の裕度を見込んで設計する。

2. 固定する物品について

飛散防止対策として固定する物品については、空力パラメータから算出した浮力に 2 倍の裕度を考慮し、対策実施することとする。その考え方を以下に示す。

<固定する物品の対策荷重の考え方>

竜巻風速 100m/s 時の空力パラメータから算出した浮力は添付資料 3.8 別紙 1 の（6）式より以下のように示される。

$$F_D = 3467C_D A - mg [N] \dots (1)$$

ここで、

C_D：抗力係数，A：代表面積，m：想定飛来物の質量，g：重力加速度

また、建築物荷重指針・同解説に準拠した屋根風荷重より算出した浮力は以下のとおり示される。

$$F_R = \frac{1}{2}\rho C_R A_R V_D^2 - mg [N] \dots (2)$$

ここで、

ρ : 空気密度 [kg/m^3] ($=1.22\text{kg}/\text{m}^3$), C_R : 屋根部に作用する風力係数,

V_D : 竜巻風速 (m/s) ($=100\text{m}/\text{s}$)

従って、浮力は以下にて示される。

$$F_R = 6100C_{RA} - mg \text{ [N]} \dots (3)$$

上記関係より、空力パラメータから算出した浮力が保守的に適用できる条件は (1) 式が (2) 式より大きい場合であるため、以下の (4) 式のようになる。

$$F_D > F_R \Leftrightarrow 3467C_{DA} - mg > 6100C_{RA} - mg \Leftrightarrow \frac{C_{DA}}{C_{LA}} > 1.76 \dots (4)$$

● 固定する物品の代表例であるチェッカープレートとの比較

上記より、(4) 式の関係について、固定する物品の代表物として厚さの薄い板状のチェッカープレート (長さ 1.7m, 幅 1.2m, 厚さ 0.015m) を例に算出すると以下のとおりとなる。

① 空力パラメータの抗力係数と代表面積の積 C_{DA} について

チェッカープレートは板状であるため、添付資料 3.8 を参照し、 C_{DA} を求めると以下のとおりとなる。

$$C_{DA} = c(C_{D1}A_1 + C_{D2}A_2 + C_{D3}A_3)$$

板状であるため、 $C_{D1}=2.0$, $C_{D2}=1.2$, $C_{D3}=1.2$ である。また、 A_1 , A_2 , A_3 はそれぞれチェッカープレート 3 面の面積であるため、 C_{DA} は以下のとおり。

$$C_{DA} = 0.33(2.0 \times 1.7 \times 1.2 + 1.2 \times 1.2 \times 0.015 + 1.2 \times 0.015 \times 1.7) = 1.36 \text{ [m}^2\text{]}$$

② 建築物荷重指針・同解説に準拠した屋根風荷重の風力係数と屋根面積の積 C_{RA} について

風力係数 C_R は以下の図 1 の建設省告示第 1454 号を参照し算出する。

以下の図 1 より風力係数 1.0 の作用する面 $0.5a = 0.5 \times 2 \times H = 0.015 \text{ [m]}$ であるため、 C_R は以下のとおり求まる。

$$C_R = 1 \times \frac{0.015}{1.2} + 0.5 \times \frac{1.2 - 0.015}{1.2} = 0.506$$

また、 A_R は屋根面の面積であるため、 $A_R = 1.7 \times 1.2 = 2.04 [\text{m}^2]$ とする。

$$C_R A_R = 0.506 \times 2.04 = 1.03 [\text{m}^2]$$

図2 閉鎖型の建築物（けた行方向に風を受ける場合。表1、表2及び表5を用いるものとする。）

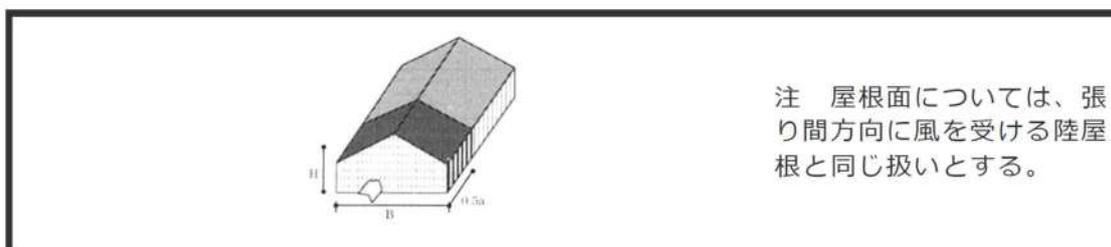


表2 陸屋根面のCpe

部位	風上端部より0.5aの領域	左に掲げる領域以外の領域
		
Cpe	-1.0	-0.5

a BとHの2倍の数値のうちいずれか小さな数値(単位 m)

図1 建設省告示第1454号(抜粋)

①, ②より $C_D A / C_R A_R$ を求めると以下となる。

$$\frac{C_D A}{C_R A_R} = \frac{1.36}{1.03} = 1.32 \dots (5)$$

したがって、(5)式が(4)式を満たすためには、 $C_D A$ を $1.76/1.32 = 1.34$ 倍以上とする必要がある。

一般的に「空力パラメータの抗力係数と代表面積の積 $C_D A$ 」については、竜巻風速場の中での飛来物の挙動を把握するために抗力係数および代表面積を3面の平均としていることから、板状物体においては、側面の面積が小さく算出される。一方、屋根部のみの面積を採用している「建築物荷重指針・同解説に準拠した屋根風荷重の風力係数と屋根面積の積 $C_R A_R$ 」については、面積が最大である屋根面の面積を採用しているため $C_D A / C_R A_R$ が小さく算出される傾向にある。

また、極端に屋根面積の大きいチェッカープレート(長さ 10.0m, 幅 10.0m, 高さ 0.015m)を想定したとしても $C_{dA}/C_{RAr}=66.1/50.1=1.32$ 程度であり、上記計算のチェッカープレートとほぼ同等となる。

以上より、その他の固定する物品であるチェッカープレート、グレーチングについても、「空力パラメータの抗力係数と代表面積の積 C_{dA} 」について「建築物荷重指針・同解説に準拠した屋根風荷重の風力係数と屋根面積の積 C_{RAr} 」の関係 $C_{dA}/C_{RAr}>1.76$ を満たすためには C_{dA} を保守的に2倍とすることで十分満足することを確認していることから固定する物品の対策荷重については、空力パラメータの2倍以上の裕度を見込んだ対策荷重にて対策実施していくものとする。

なお、今後新たに発生する固定する物品については $C_{dA}/C_{RAr}>1.76$ を満たすかどうかを確認し、万が一 $C_{dA}/C_{RAr}<1.00$ となるものがあれば、裕度を空力パラメータから算出した浮力の3倍とするなど、適切に設定していくものとする。

ただし、気圧差が発生する可能性がある箇所に設置されている場合については、現場確認を実施の上、気圧差荷重にて対策実施することとする。なお、気圧差荷重については、ガイドに基づき保守的に最も気圧差荷重が大きくなる「閉じた施設」として算出した場合、 8815N/m^2 であるが、作用する気圧差荷重を保守的に 8900N/m^2 として算出する。

以下にマンホール蓋の場合における気圧差荷重と空力パラメータにより算出した浮力の比較結果を示す。

<気圧差が発生する場合の荷重について>

100m/s の竜巻による気圧差については、ガイドによると 8815N/m^2 であるが保守的に 8900N/m^2 として評価する。以下に計算例を示す。

表3 マンホール蓋の空力パラメータによる浮力と気圧差荷重の比較例

対象物	長さ [m]	幅 [m]	高さ [m]	質量 [kg]	空力パラメータ $C_{dA}/m[\text{m}^2/\text{kg}]$	浮力[kN]		気圧差荷重 の裕度
						空力パラメータ による浮力	気圧差荷重によ る浮力	
マンホール蓋	0.65	0.65	0.01	32	0.00888	0.758	2.640	3.4

以上より、飛散防止対策においては、空力パラメータから算出する浮力に対し浮上条件を $0.0028\text{m}^2/\text{kg}$ ではなく $0.0026\text{m}^2/\text{kg}$ と保守性を考慮した上でさらに表4のとおり「余長付固縛を実施するもの」、「固定するもの(気圧差発生しない)」、「固定するもの(気圧差発生する可能性あり)」の3つの区分に分け対策荷重を設定し、設計飛来物に包含できない物品の飛散を防止していくこととする。なお、実際の飛散防止対策においては、上記にて述べてきた浮き上がりの対策荷重のみでなく、横滑りの対策荷重についても適切に考慮し対策実施していくこととする。

なお、本考え方に基づき、余長付固縛を実施する物品、固定する物品、気圧差が発生す

る可能性がある物品について適切に荷重を設定し、飛散防止対策を実施することから複数の飛来物が同一箇所に衝突する可能性は極めて小さいものと考えている。

表4 飛散防止対策における対策荷重

飛散防止対象物品	対策荷重の考え方
余長付固縛を実施するもの	空力パラメータから算出した浮力に対し2倍の裕度を確保した荷重（連結材，連結補助材，固定材及び基礎の裕度）
固定するもの（気圧差発生しない）	空力パラメータから算出した浮力に対し2倍の裕度を確保した荷重
固定するもの（気圧差発生する可能性あり）	ガイドに基づき保守的に算出した気圧差荷重

車両管理エリア及び物品管理エリアの設定について

車両管理エリア及び物品管理エリアは、ウォークダウンで確認された飛散した場合の影響が設計飛来物を超える「車両」及び「車両以外の物品」の飛散解析結果より設定しており、飛散解析はランキン渦モデルを用いて実施した。

表1及び表2に、ウォークダウンで確認された飛散した場合の影響が設計飛来物を超える「車両」及び「車両以外の物品」の種別ごとに代表的な車両等の寸法、質量、空力パラメータ及び飛散距離を示す。

表1及び表2の結果より、車両管理エリア及び物品管理エリアを、「車両」及び「車両以外の物品」のうち飛散距離が最大となる「軽乗用車」及び「プレハブ小屋」の飛散距離から、図1のとおり設定する。

ただし、今後、さらに軽量であり、受風面積の大きい車両が開発されることは否定できないため、発電所において、質量720 kgより軽い車両については、事前に飛散評価を行って入構可否を判断する等の管理を実施することとする。

表1 車両の種別ごとの飛散距離について

飛来物	長さ[m]	幅[m]	高さ[m]	質量[kg]	空力パラメータ $C_D A / m [m^2/kg]$	飛散距離[m]
乗用車(セダン1)	4.89	1.80	1.47	1760	0.00706	313
乗用車(セダン2)	4.58	1.74	1.46	1310	0.00876	329
乗用車(セダン3)	4.40	1.69	1.48	1170	0.00938	335
乗用車(ワゴン1)	4.41	1.69	1.50	1280	0.00865	328
乗用車(ワゴン2)	4.40	1.69	1.50	1190	0.00929	334
乗用車(ワゴン3)	4.40	1.69	1.50	1200	0.00921	333
乗用車(ワゴン4)	4.84	1.88	2.10	2040	0.00759	321
乗用車(ワゴン5)	4.84	1.88	2.10	2050	0.00755	321
乗用車(ワゴン6)	4.69	1.69	2.24	2350	0.00631	304
乗用車(ワゴン7)	5.46	2.15	2.57	2880	0.00725	316
乗用車(ワゴン8)	5.49	1.88	2.90	2770	0.00763	321
乗用車(ワゴン9)	4.40	1.69	1.50	1180	0.00937	335
乗用車(バン1)	4.24	1.69	1.53	1170	0.00926	334
乗用車(バン2)	4.69	1.69	1.98	1960	0.00700	312
乗用車(バン3)	4.80	1.69	2.90	2770	0.00649	307
乗用車(バン4)	4.39	1.69	1.54	1270	0.00881	330
乗用車(ミニバン1)	4.68	1.69	1.87	1740	0.00760	321
乗用車(ミニバン2)	4.69	1.69	1.86	1660	0.00795	324
乗用車(ミニバン3)	4.68	1.69	1.87	2140	0.00618	302
乗用車(ミニバン4)	4.69	1.69	1.87	1730	0.00766	322
乗用車(SUV1)	3.76	1.67	1.70	1000	0.01305	340
乗用車(SUV2)	4.61	1.79	1.71	1500	0.00854	327
乗用車(SUV3)	4.56	1.78	1.67	1450	0.00860	328
乗用車(SUV4)	4.90	1.87	1.87	2250	0.00647	306
乗用車(SUV5)	3.39	1.47	1.72	1040	0.00856	327
乗用車(SUV6)	4.64	1.82	1.71	1500	0.00867	328
乗用車(SUV7)	4.59	1.79	1.69	1470	0.00862	328
乗用車(SUV8)	4.76	1.88	1.85	2080	0.00681	310
乗用車(SUV9)	4.90	1.87	1.90	2130	0.00690	311
乗用車(SUV10)	4.36	1.79	1.56	1470	0.00790	324
乗用車(SUV11)	4.00	1.69	1.70	1200	0.00913	333
乗用車(SUV12)	3.99	1.69	1.62	1040	0.01023	339
軽乗用車1	3.39	1.47	1.51	720	0.01141	344
軽乗用車2	3.39	1.47	1.51	720	0.01141	344
発電機車1	20.10	7.50	8.25	58120	0.00430	256
ポンプ車1	7.26	2.29	2.83	7050	0.00409	249
ポンプ車2	6.93	2.31	2.82	6650	0.00418	252
ポンプ車3	7.63	2.30	3.05	10000	0.00316	204
発電機車2	11.05	2.51	3.31	24910	0.00193	104
トラック1	4.69	1.69	1.98	2750	0.00494	277
トラック2	4.67	1.69	1.98	2700	0.00501	279
トラック3	6.18	2.18	3.02	3460	0.00739	319
トラック4	6.45	2.31	3.20	5750	0.00493	277
トラック5	6.90	2.32	2.76	6350	0.00431	257
トラック6	11.93	2.49	2.66	8960	0.00321	207
トラック7	8.21	2.46	2.50	7410	0.00592	299
トラック8	8.21	2.46	2.50	5140	0.00602	300
トラック9	8.22	2.46	3.08	5180	0.00677	310
トラック10	8.22	2.46	3.08	5180	0.00677	310
トラック11	8.22	2.46	2.55	5040	0.00622	304
トラック12	8.18	2.46	2.56	3880	0.00806	325
トラック13	8.21	2.47	2.49	4870	0.00636	306
トラック14	11.98	2.49	3.41	11730	0.00446	262
トラック15	8.17	2.37	2.94	5120	0.00650	307
バス(中型)	8.99	2.34	3.03	7410	0.00494	277
バス(大型)	11.13	2.48	3.07	9890	0.00464	269
ポンプ車4	11.92	2.49	3.47	22590	0.00233	142
ポンプ車5	11.99	2.49	3.56	24750	0.00218	129
ポンプ車6	8.79	2.49	3.16	13050	0.00291	190
トラック16	9.91	2.49	3.63	9700	0.00475	272

飛来物	長さ[m]	幅[m]	高さ[m]	質量[kg]	空力パラメータ $C_D A / m [m^2/kg]$	飛散距離[m]
トラック 17	8.44	2.49	3.32	10620	0.00357	227
トラック 18	8.38	2.49	3.36	10680	0.00355	226
タンクローリー	6.28	2.20	2.41	4380	0.00517	282
重機 1	9.53	2.80	3.16	20800	0.00223	134
重機 2	7.13	3.37	3.37	10140	0.00365	231
重機 3	6.50	3.26	3.17	26600	0.00130	56
発電機車 3	16.61	2.98	4.99	48215	0.00202	112

表2 車両以外の物品の種別ごとの飛散距離について

飛来物	長さ[m]	幅[m]	高さ[m]	質量[kg]	空力パラメータ $C_D A/m^2 [m^2/kg]$	飛散距離[m]
発電機 1	0.80	1.57	1.05	1440	0.00172	85
発電機 2	0.95	2.09	1.30	4290	0.00092	34
発電機 3	1.40	3.90	1.76	5040	0.00194	105
発電機 4	0.98	2.09	1.55	1690	0.00266	172
タンク	3.08	9.20	3.46	95505	0.00049	15
発電機 5	0.98	2.09	1.55	1690	0.00266	172
鋼板 1	1.53	3.06	0.022	911	0.00344	221
プレハブ小屋 1	4.50	3.50	2.50	1735	0.01360	354
発電機 6	0.98	2.09	1.55	1690	0.00266	172
発電機 7	1.18	2.45	1.83	2750	0.00229	139
発電機 8	0.70	1.55	1.24	820	0.00312	202
発電機 9	0.98	2.09	1.55	1690	0.00266	172
ケーブルドラム 1	2.40	2.40	1.17	3050	0.00247	154
発電機 10	0.98	2.09	1.55	1690	0.00266	172
プレハブ小屋 2	1.92	1.85	2.64	500	0.01783	395
鋼板 2	6.11	1.53	0.02	1480	0.00421	253
発電機 11	0.98	2.09	1.55	1690	0.00266	172
カードル	1.01	1.39	1.41	1500	0.00211	122
発電機 12	1.74	0.88	1.35	1170	0.00286	186
発電機 13	0.65	1.48	1.11	670	0.00328	211
プレハブ小屋 3	1.94	1.94	2.16	600	0.01336	351
ケーブルドラム 2	2.01	2.01	1.00	1330	0.00400	246
ケーブルドラム 3	2.42	2.42	1.16	2650	0.00286	186
ケーブルドラム 4	2.42	2.42	1.16	2270	0.00334	215
鋼板 3	3.14	1.15	0.08	2280	0.00111	44
発電機 14	0.88	2.04	1.61	1780	0.00241	150
発電機 15	3.37	1.60	1.40	3190	0.00256	163
プレハブ小屋 4	2.23	3.15	2.67	1700	0.00831	326
プレハブ小屋 5	2.35	7.25	2.45	1480	0.01809	396
発電機 16	1.62	0.88	2.04	1780	0.00242	150
鋼板 4	3.08	1.54	0.22	802	0.00441	260
鋼板 5	3.08	1.54	0.22	802	0.00441	260
鋼板 6	1.54	6.10	0.021	1900	0.00330	212
ドラム缶	0.60	0.60	0.90	245	0.00388	241
鋼板 7	6.10	1.55	0.022	1823	0.00346	222
鋼板 8	3.08	1.55	0.022	911	0.00351	224
プレハブ小屋 6	2.35	5.45	2.45	1150	0.01832	397
空調室外機 1	0.77	0.86	1.33	220	0.00850	328
空調室外機 2	0.77	0.86	1.33	220	0.00850	328
鋼板 9	1.53	6.40	0.022	1700	0.00385	240
発電機 17	0.70	1.55	1.20	820	0.00305	198
除塵設備予備品	6.00	5.00	5.60	14000	0.00432	257
鋼板 10	1.90	1.90	0.18	5120	0.00052	16
空調室外機 3	0.77	0.86	1.33	220	0.00850	328
空調室外機 4	0.77	0.86	1.33	180	0.01038	340
発電機 18	1.08	3.33	1.31	2360	0.00263	169
発電機 19	0.65	1.49	1.11	670	0.00330	212
鋼板 11	2.00	2.00	0.008	260	0.01021	339
鋼板 12	1.20	3.58	0.01	340	0.00840	327
プレハブ小屋 7	6.15	2.30	2.50	1570	0.01483	367
空調室外機 5	0.72	0.92	1.34	179	0.01055	341
発電機 20	0.65	1.50	0.95	580	0.00344	221
コンテナ 1	2.44	12.20	2.60	5500	0.00519	283
発電機 21	0.65	1.48	0.95	580	0.00340	218
プレハブ小屋 8	2.38	7.36	2.62	1870	0.01519	370
プレハブ小屋 9	1.85	3.63	2.60	720	0.01922	403
発電機 22	1.48	0.65	1.11	670	0.00328	211
コンクリート板	0.66	1.35	0.20	409.86	0.00209	120
鋼製かご 1	0.62	1.81	1.46	170	0.01814	396
鋼製かご 2	1.30	1.30	1.00	180	0.01573	375

飛来物	長さ[m]	幅[m]	高さ[m]	質量[kg]	空力パラメータ $C_D A / m [m^2/kg]$	飛散距離[m]
プレハブ小屋10	2.47	7.20	2.68	1400	0.02061	416
鋼製かご3	0.64	1.84	1.20	150	0.01828	397
プレハブ小屋11	1.25	1.25	2.27	250	0.01911	402
プレハブ小屋12	1.84	3.64	2.45	800	0.01661	385
鋼製かご4	1.00	1.00	1.00	2000	0.00099	38
プレハブ小屋13	7.25	2.40	2.90	1400	0.02140	422
コンテナ2	1.73	3.10	1.90	1320	0.00727	318
放水砲	4.70	2.00	1.00	3000	0.00355	226
コンテナ3	4.88	2.27	2.15	1600	0.01092	342
コンテナ4	3.893	2.10	2.225	3950	0.00360	229
自動販売機	0.85	1.40	1.90	450	0.00802	325
プレハブ小屋14	6.00	3.06	2.08	2000	0.01228	347

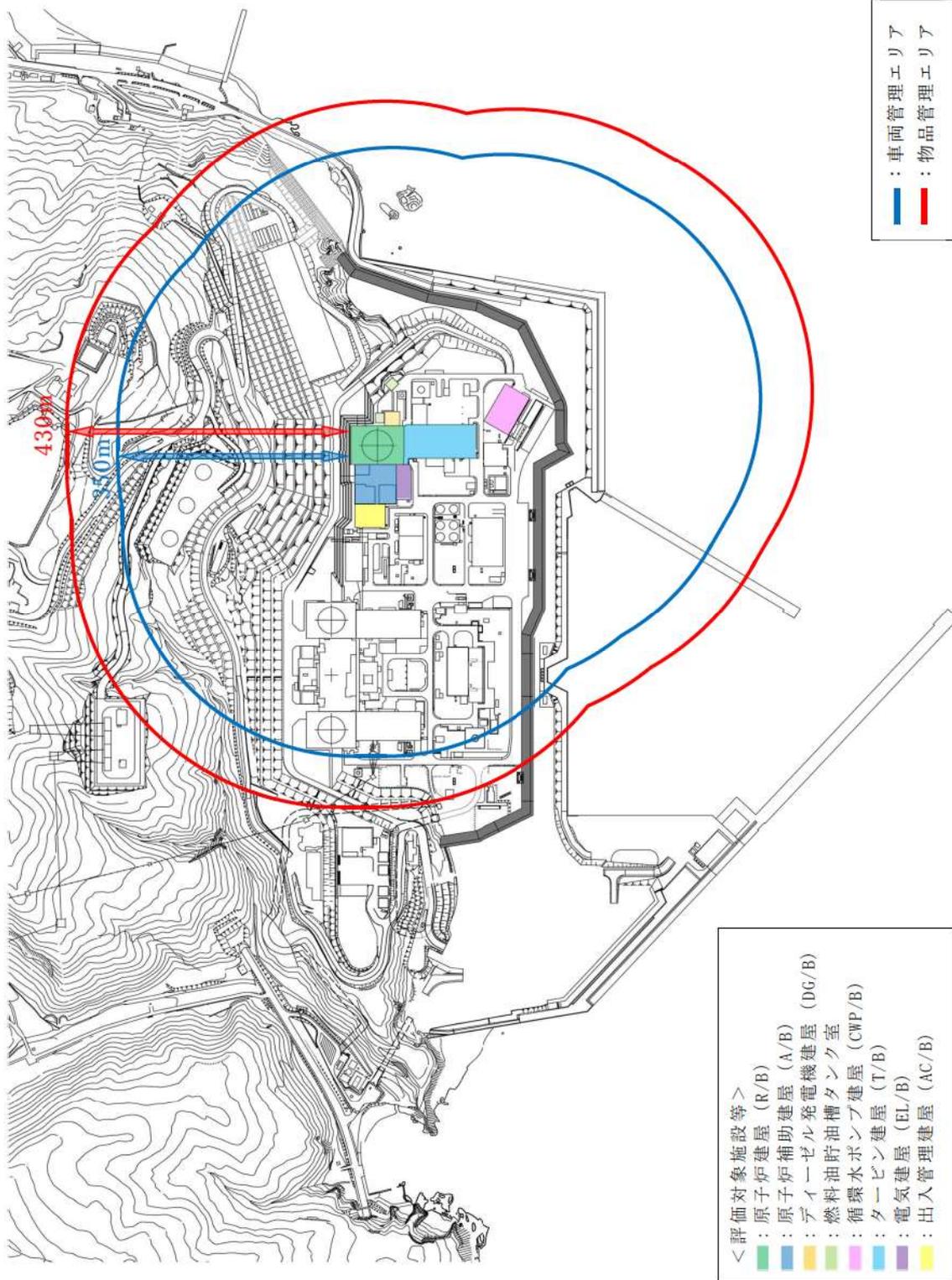


図1 泊発電所における車両及び物品管理エリア

外部事象防護対象施設に影響を及ぼす可能性がある建屋開口部について

外部事象防護対象施設に影響を及ぼす可能性がある建屋開口部の有無を評価した結果、以下の建屋開口部については、設計飛来物が貫通した場合、設計飛来物の衝突により当該建屋開口部周辺に設置されている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ことから、竜巻飛来物防護対策設備又は運用による竜巻防護対策を実施する。

表1 竜巻防護対策を実施する建屋開口部

No.	建屋開口部	建屋開口部周辺の外部事象防護対象施設	参照図面
1	①A-ディーゼル発電機室扉 ②B-ディーゼル発電機室扉 ④A-ディーゼル発電機室排気口 ⑤B-ディーゼル発電機室排気口	ディーゼル発電機設備 (A, B-ディーゼル発電機他)	図1 (T.P.10.3m)
2	③タービン建屋連絡通路扉	空調用冷水系統配管	図1 (T.P.10.3m)
3	④トラックアクセスエリア扉	原子炉補機冷却水系統配管 制御用空気系統配管 空調用冷水系統配管	図1 (T.P.10.3m)
4	⑤A-吸気ガラリ室扉 ⑥A-蓄熱室扉 ⑦B-吸気ガラリ室扉 ⑧B-蓄熱室扉 ⑨A-吸気ガラリ室吸気口 ⑩B-吸気ガラリ室吸気口	A, B-蓄熱室加熱器	図3 (T.P.17.8m)
5	⑩A-原子炉建屋給気ガラリアクセス扉	ディーゼル発電機室換気装置 (A, B-ディーゼル発電機室給気ファン他) 制御用空気圧縮機室空調装置 (ダクト)	図3 (T.P.17.8m)

No.	建屋開口部	建屋開口部周辺の外部事象防護対象施設	参照図面
6	⑪ B-原子炉建屋給気ガラリアクセス扉	ディーゼル発電機室換気装置 (C, D-ディーゼル発電機室給気ファン他) 制御用空気圧縮機室空調装置 (ダクト) 補助給水系統配管	図 3 (T.P.17.8m)
7	⑫タービン建屋連絡通路扉	補助給水系統配管	図 3 (T.P.17.8m)
8	⑬主蒸気管室ブローアウトパネル ⑭主蒸気管室ブローアウトパネル	主蒸気系統配管及び弁 主給水系統配管及び弁 補助給水系統配管及び弁 制御用空気系統配管及び弁	図 5 (T.P.33.1m)
9	⑮燃料取扱棟トラックアクセスエリア扉	使用済燃料ピットクレーン	図 5 (T.P.33.1m)
10	⑯トラックアクセスエリア (2) 扉	制御用空気系統配管	図 5 (T.P.33.1m)
11	⑰主蒸気管室上部換気口	主蒸気系統配管及び弁 制御用空気系統配管	図 7 (T.P.40.3m, T.P.43.3m)
12	⑱格納容器排気希釈用外気取入ガラリアクセス扉	排気筒 (建屋内) 格納容器排気空調装置 (ダンパ) アニュラス空気浄化設備 (ダクト)	図 7 (T.P.40.3m, T.P.43.3m)
13	⑲原子炉補機冷却水サージタンク・空調用冷水膨張タンク室扉	原子炉補機冷却水サージタンク 原子炉補機冷却水系統配管及び弁	図 9 (T.P.43.6m)

なお、他の建屋開口部については、周辺に外部事象防護対象施設、外部事象防護対象施設の安全機能を損なう可能性がある発火性又は引火性物質を内包する機器及び溢水源がないことを確認している。

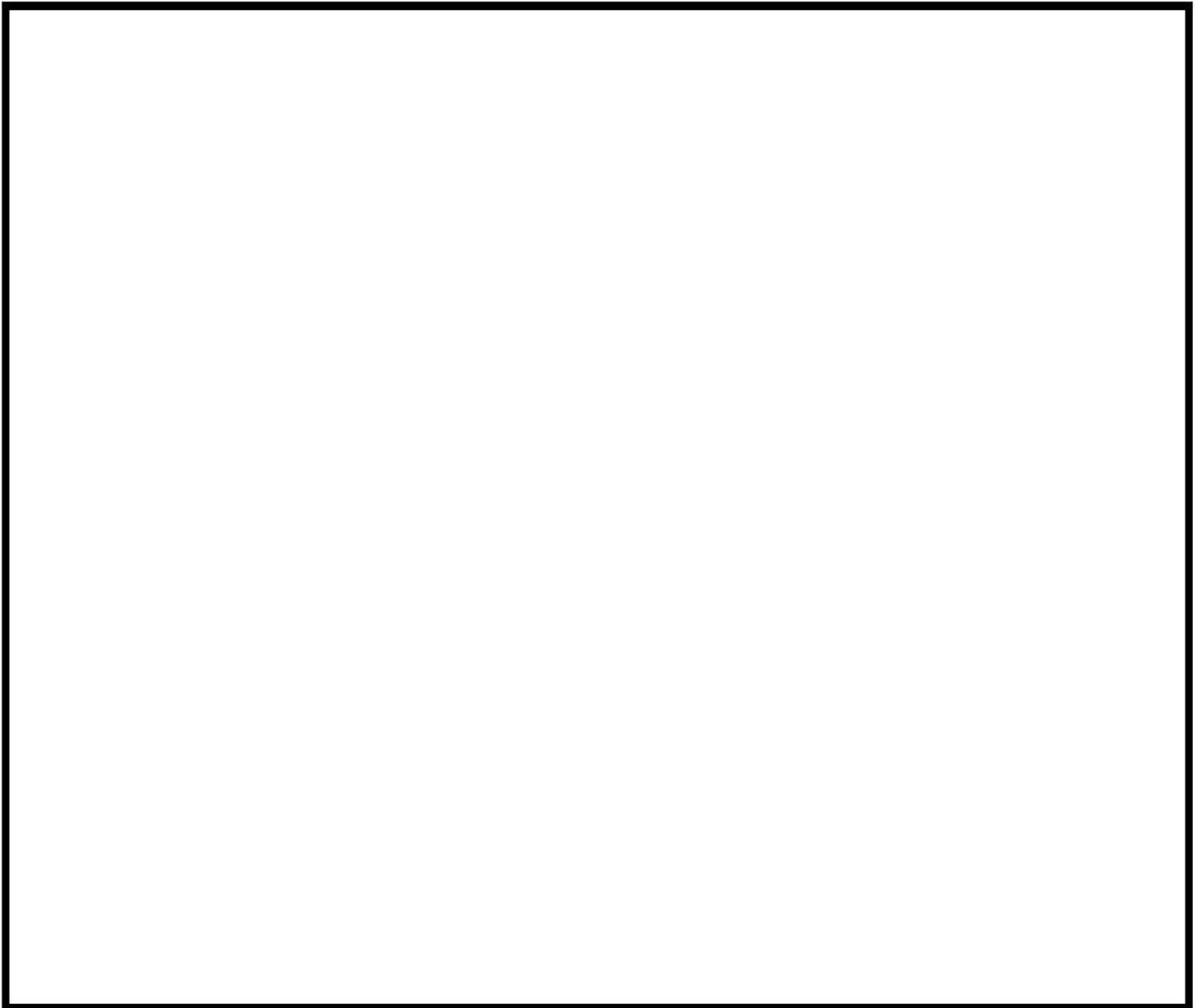


図1 泊発電所3号炉における建屋開口部 (T.P.10.3m (中間床含む))

 枠囲みの内容は機密情報に属しますので公開できません。

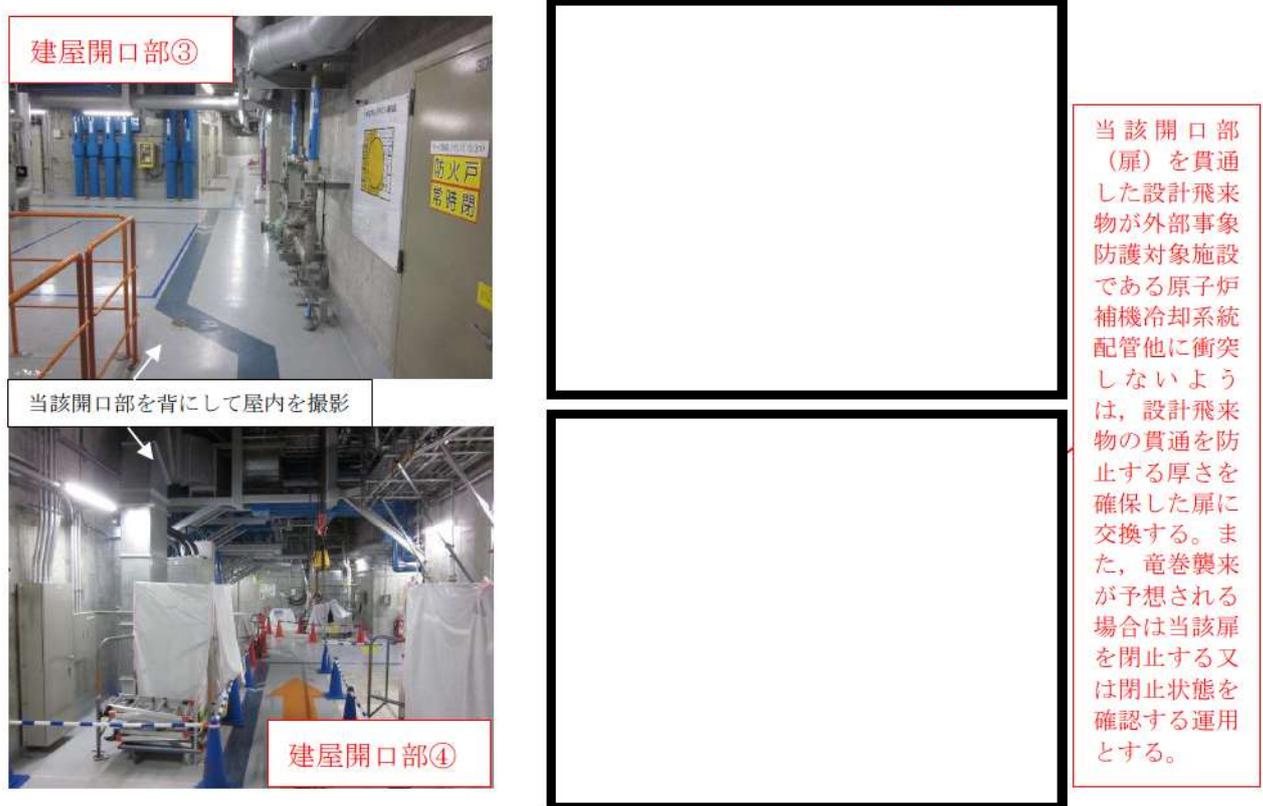
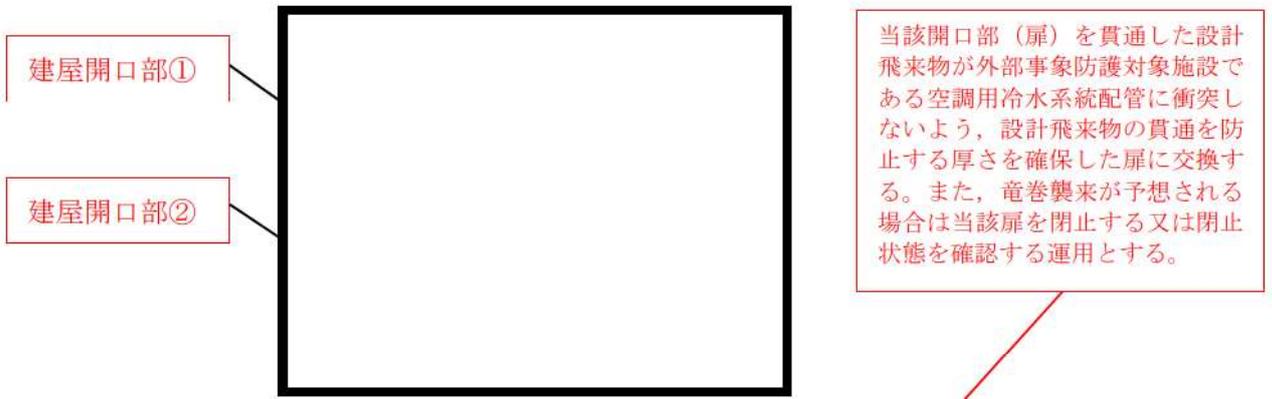


図2 泊発電所3号炉における建屋開口部周辺の屋内写真他（T.P.10.3m（中間床含む））（1/2）

枠囲みの内容は機密情報に属しますので公開できません。



図2 泊発電所3号炉における建屋開口部周辺の屋内写真他 (T.P.10.3m (中間床含む)) (2/2)

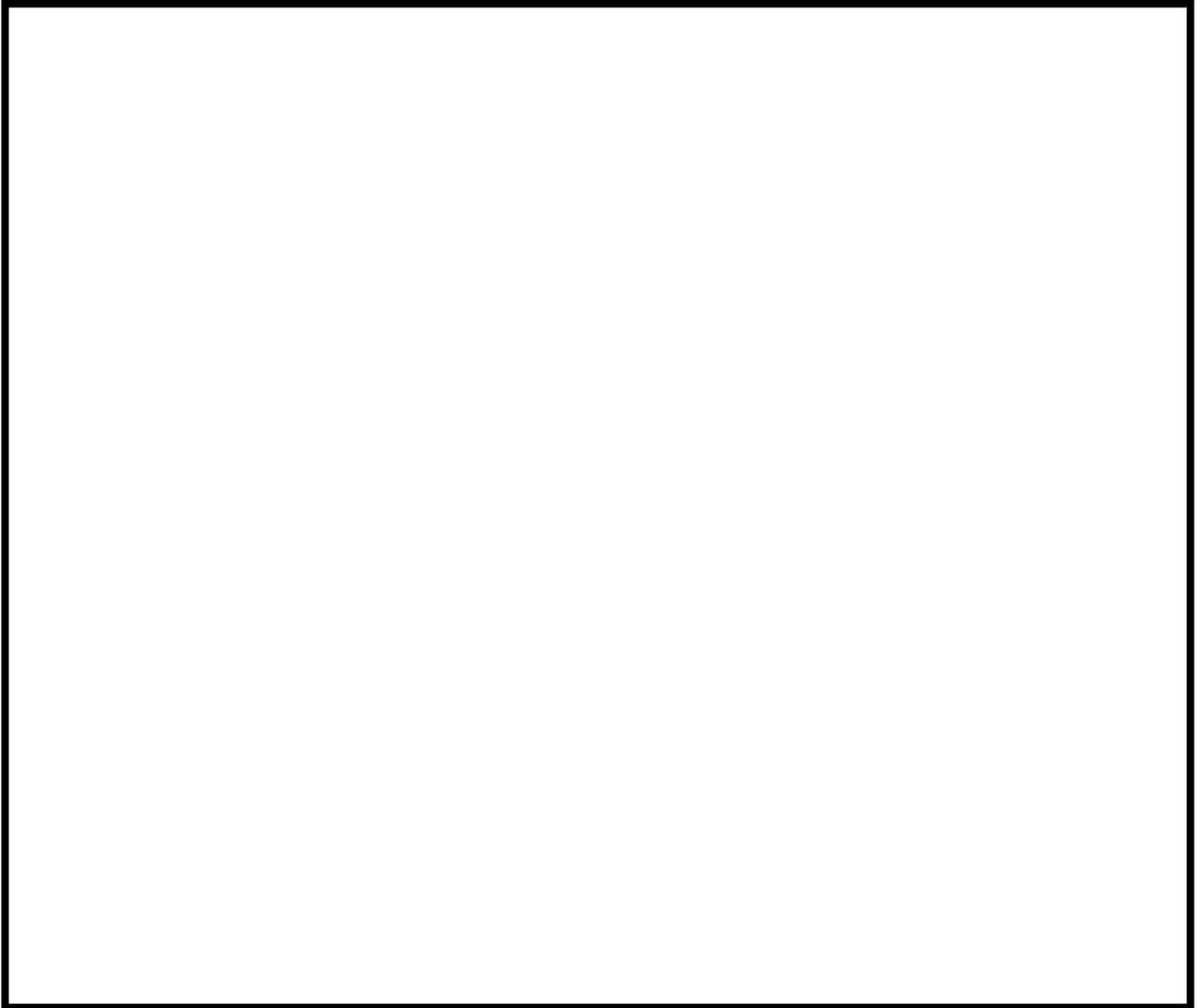


図3 泊発電所3号炉における建屋開口部 (T.P.17.8m (中間床含む))

 枠囲みの内容は機密情報に属しますので公開できません。



当該開口部（扉及び蓄熱室吸気ガラリフード）を貫通した設計飛来物が外部事象防護対象施設である蓄熱室加熱器に衝突しないよう、蓄熱室加熱器背面の空気口に防護鋼板を設置する。



当該開口部を背にして屋内を撮影



当該開口部（扉）を貫通した設計飛来物が外部事象防護対象施設である蓄熱室加熱器に衝突しないよう、設計飛来物の貫通を防止する厚さを確保した扉に交換する。また、竜巻襲来が予想される場合は当該扉を閉止する又は閉止状態を確認する運用とする。



当該開口部を背にして屋内を撮影



当該開口部（扉）を貫通した設計飛来物が外部事象防護対象施設である蓄熱室加熱器に衝突しないよう、設計飛来物の貫通を防止する厚さを確保した扉に交換する。また、竜巻襲来が予想される場合は当該扉を閉止する又は閉止状態を確認する運用とする。

図4 泊発電所3号炉における建屋開口部周辺の屋内写真他（T.P.17.8m（中間床含む））（1/2）

■ 枠囲みの内容は機密情報に属しますので公開できません。

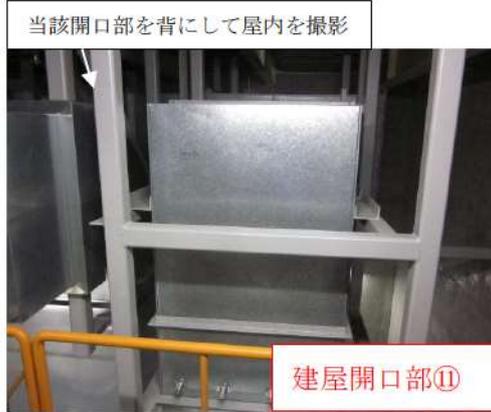


図4 泊発電所3号炉における建屋開口部周辺の屋内写真他 (T.P.17.8m (中間床含む)) (2/2)

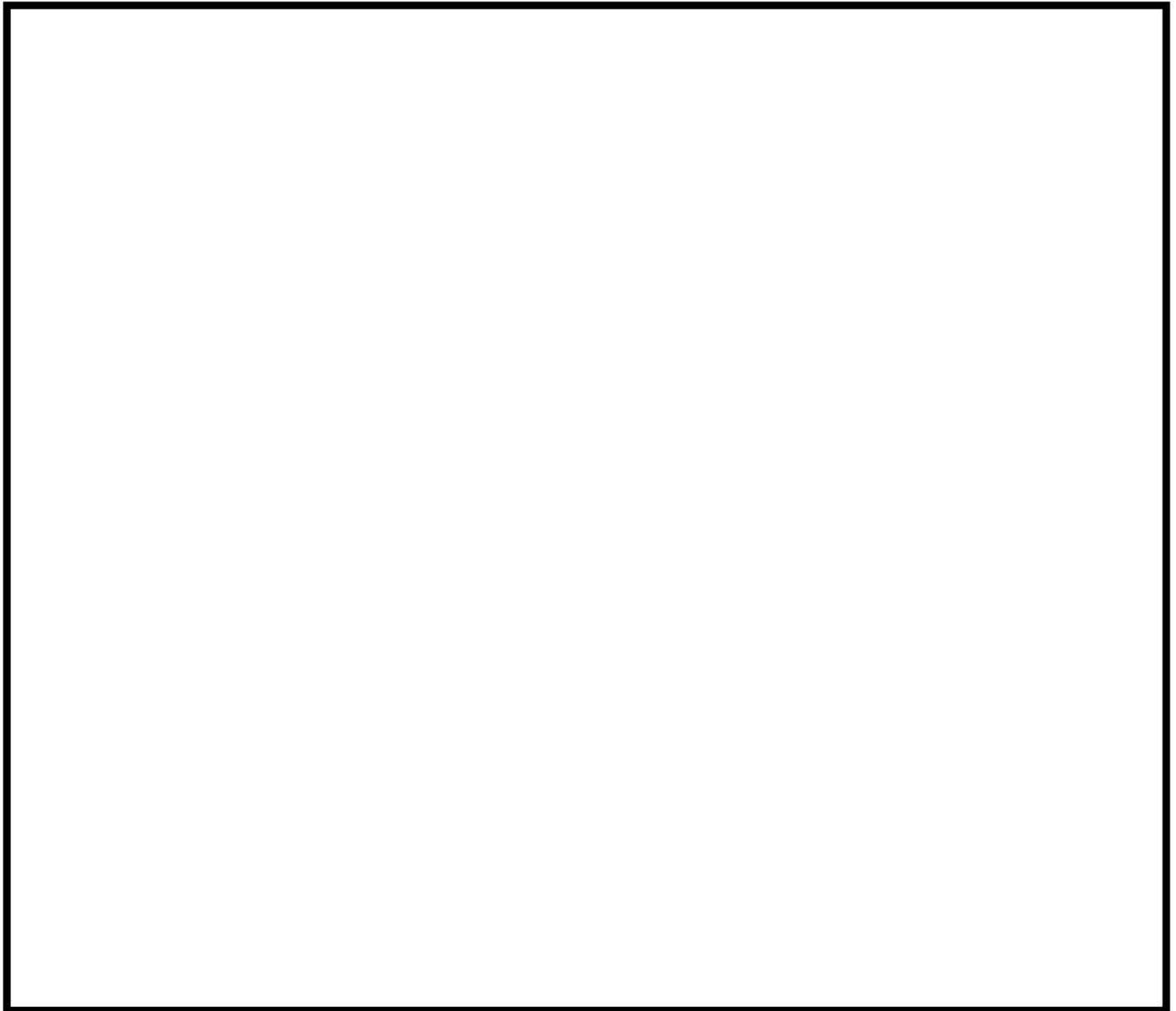


図5 泊発電所3号炉における建屋開口部 (T.P.33.1m)

 枠囲みの内容は機密情報に属しますので公開できません。

当該開口部を背にして屋内を撮影



建屋開口部⑬



建屋開口部⑭

建屋開口部⑬,⑭周辺に外部事象防護対象施設は設置されていない

建屋開口部⑮



燃料取扱棟

当該開口部(扉)を貫通した設計飛来物が外部事象防護対象施設である使用済燃料ピットクレーンに衝突して当該設備の安全機能を損なわないよう、竜巻襲来が予想される場合は燃料取扱棟における燃料取扱作業を中止する運用とする。

当該開口部を背にして屋内を撮影



建屋開口部⑱

屋内から当該開口部を撮影



建屋開口部⑲

建屋開口部⑱~⑳周辺に外部事象防護対象施設は設置されていない

屋外から当該開口部を開放して屋内を撮影

当該開口部を背にして屋内を撮影



建屋開口部㉔

当該開口部を背にして屋内を撮影



建屋開口部㉕



建屋開口部㉖

図6 泊発電所3号炉における建屋開口部周辺の屋内写真他 (T.P.33.1m) (1/3)



図6 泊発電所3号炉における建屋開口部周辺の屋内写真他 (T.P.33.1m) (2/3)

枠囲みの内容は機密情報に属しますので公開できません。



図6 泊発電所3号炉における建屋開口部周辺の屋内写真他（T.P.33.1m）（3/3）

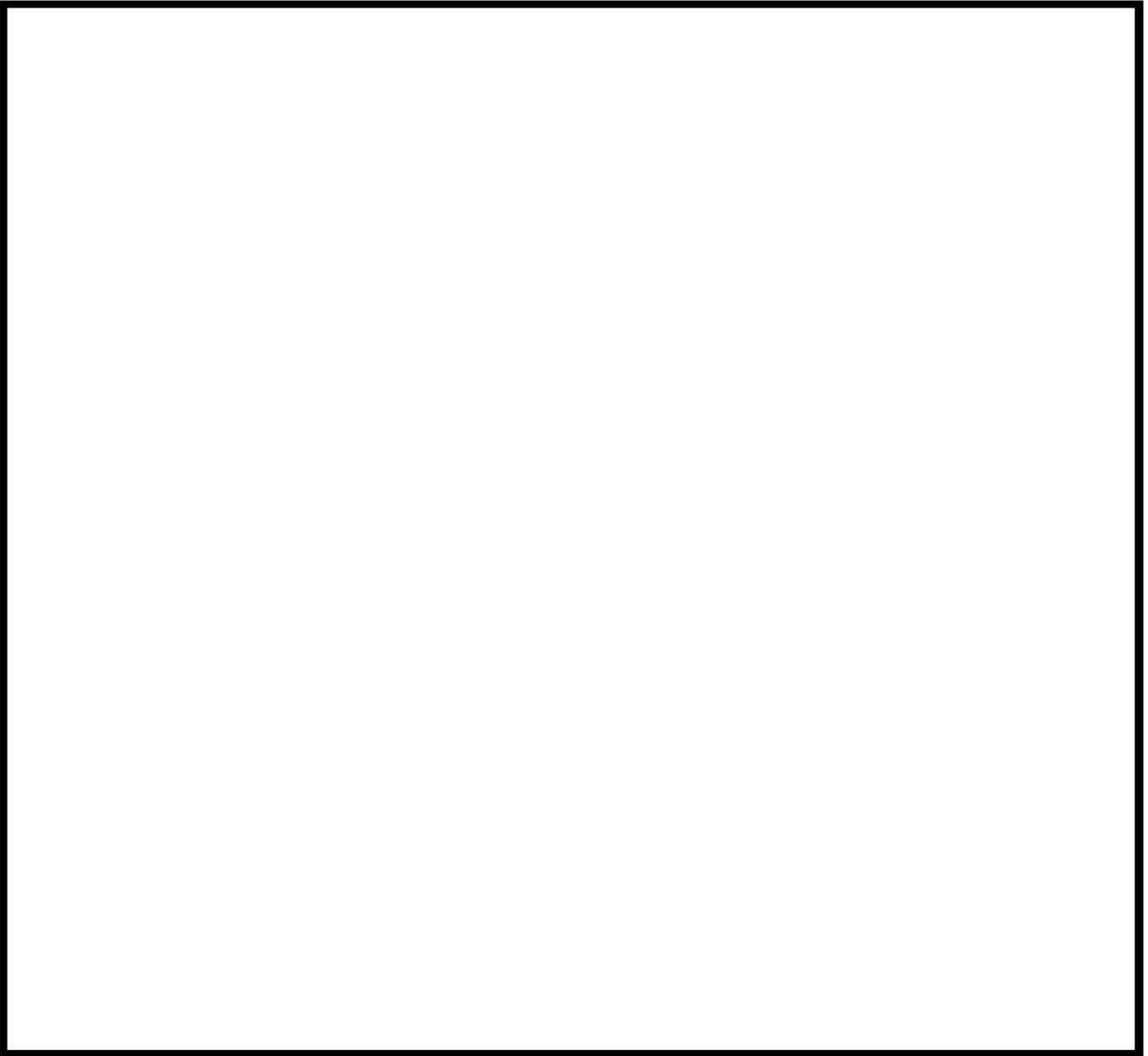


図7 泊発電所3号炉における建屋開口部 (T.P.40.3m,T.P.43.3m)

 枠囲みの内容は機密情報に属しますので公開できません。



図8 泊発電所3号炉における建屋開口部周辺の屋内写真他 (T.P.40.3m, T.P.43.3m)

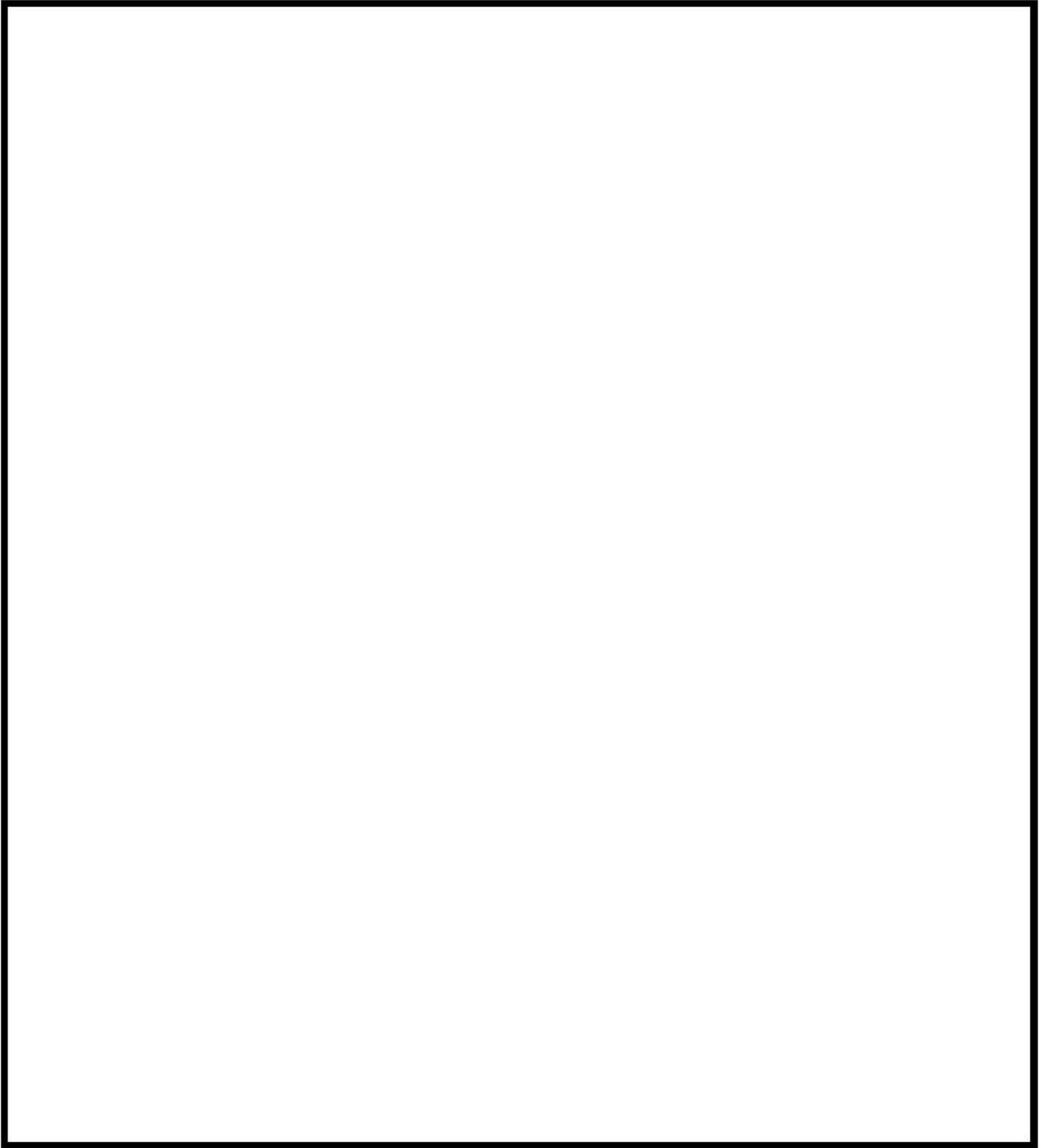


図9 泊発電所3号炉における建屋開口部 (T.P.43.6m)

 枠囲みの内容は機密情報に属しますので公開できません。



図 1 0 泊発電所 3 号炉における建屋開口部周辺の屋内写真他 (T.P.43.6m)

起因事象を竜巻とした場合の排気筒の取り扱いについて

排気筒（厚さ 4mm）については、最大風速 100m/s の竜巻において飛来物により損傷するとの評価結果となっていることから、その対応について、以下のとおり整理した。

1. 排気筒の安全機能

- ・「設置許可基準規則」において、「安全機能」は次のように定義されている。

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

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

- ・排気筒については、設計基準事故である原子炉冷却材喪失、制御棒飛び出しにおいて、格納容器等から放出される放射性物質による敷地境界での被ばくを軽減するため、排気筒を経由した高所クレジットを期待し安全解析を実施している。

このことから、排気筒の有する安全機能、つまり放射性物質の放出低減機能は「発電用原子炉施設の運転時の異常な過渡変化又は設計基準事故の拡大を防止し、又は速やかにその事故を収束させることにより、公衆又は従事者に及ぼすおそれがある放射線障害を防止し、及び放射性物質が発電用原子炉を設置する工場又は事業所外へ放出されることを抑制し、又は防止する機能」に該当することになる。

なお、設計基準事故のうち周辺環境に影響を与える事故として、原子炉冷却材喪失以外にも、放射性気体廃棄物処理施設の破損、蒸気発生器伝熱管破損並びに燃料集合体の落下が該当するが、これら事象については排気筒からの高所クレジットを期待しない地上放出にて安全解析を実施している。

- ・平常時にも排気筒からは、格納容器内の空気のページ、気体廃棄物の計画放出等を実施している。その際も排気筒からの高所放出を期待して敷地境界での被ばく評価を実施しているが、これはALARAの精神に対応するものであり、設置許可基準規則の安全機能に該当するものではない。

2. 設置許可基準第6条（外部からの衝撃による損傷の防止）及び27条（放射性廃棄物の処理施設）への適合性

- ・設置許可基準規則第6条の要求は次のようになっている。

安全施設（兼用キャスクを除く。）は、想定される自然現象（地震及び津波を除く。次項において同じ。）が発生した場合においても安全機能を損なわないものでなければならない。

- 2 重要安全施設は、当該重要安全施設に大きな影響を及ぼすおそれがあると想定される自然現象により当該重要安全施設に作用する衝撃及び設計基準事故時に生ずる応力を適切に考慮したものでなければならない。

（解釈）

- 3 第1項に規定する「想定される自然現象（地震及び津波を除く。）が発生した場合においても安全機能を損なわないもの」とは、設計上の考慮を要する自然現象又はその組み合わせに遭遇した場合において、自然事象そのものがもたらす環境条件及びその結果として施設で生じ得る環境条件において、その設備が有する安全機能が達成されることをいう。
- 5 第2項に規定する「大きな影響を及ぼすおそれがあると想定される自然現象」とは、対象となる自然現象に対応して、最新の科学的技術的知見を踏まえて適切に予想されるものをいう。なお、過去の記録、現地調査の結果及び最新知見等を参考にして、必要のある場合には、異種の自然現象を重畳させるものとする。
- 6 第2項に規定する「適切に考慮したもの」とは、大きな影響を及ぼすおそれがあると想定される自然現象により当該重要安全施設に作用する衝撃及び設計基準事故が発生した場合に生じる応力を単純に加算することを必ずしも要求するものではなく、それぞれの因果関係及び時間的変化を考慮して適切に組み合わせた場合をいう。

- ・竜巻を起因として、原子炉冷却材喪失、制御棒飛び出しに発展することがないよう、1次冷却材配管、制御棒駆動装置等は、原子炉格納容器、原子炉建屋等の頑健な建屋内に施設していること、原子炉補機冷却水海水ポンプについては竜巻防護ネットにて防護していることから、竜巻を起因としてこれら設計基準事故に発展することはない。

上記の1項で述べたように、排気筒が有する安全機能は原子炉冷却材喪失、制御棒飛び出しにおける放射性物質の放出低減機能であり、竜巻を起因としてこれらの設計基準事故に発展することはないことから、竜巻影響評価においては、設計基準事故と重ならない限りにおいて排気筒に求められる安全機能要求はない。

また、設計基準事故と最大風速 100m/s（ハザード曲線から 10^{-7} /炉・年程度）の竜巻の発生頻度、飛来物が排気筒に衝突する頻度を考えた場合、設計基準事故との重ね合わせは、その可能性が小さいものと考えている。従って、竜巻影響評価においては、3項で述べる点検、補修、原子炉停止等の対応をとることにより、第6条に求めている自然事象そのものがもたらす環境条件の結果として生じ得る環境条件において、安全機能の要求はなく第6条に適合しているものと考えている。

なお、風速約 33～53m/s（ハザード曲線から 10^{-3} ～ 10^{-4} /炉・年以下）では、飛来物として想定している鋼製材、鉄パイプ、砂利において、砂利のみが 53m/s にて 9m 舞い上がるが、砂利の貫通厚さは 1mm 程度であるので厚さ 4mm の排気筒を貫通することはない。

さらに、原子炉冷却材喪失時において排気筒に期待している高所放出の安全機能について、事故の中で被ばく上最も厳しい原子炉冷却材喪失において、排気筒機能を喪失したと仮定した場合の影響評価をした結果、添付十の結果が約 0.23mSv（高所放出）であるのに対し、地上放出の場合も約 0.23mSv と同等であることから、線量めやす値である 5mSv を超えないことを確認している。

また、排気筒の機能喪失を仮定した場合の、中央制御室等における運転員の実効線量は 3 号炉で約 28mSv であり、判断のめやすの実効線量 100mSv を超えないことを確認している。

- ・設置許可基準規則第27条の要求は次のようになっている。

工場等には、次に掲げるところにより、通常運転時において放射性廃棄物（実用炉規則第二条第二項第二号に規定する放射性廃棄物をいう。以下同じ。）を処理する施設（安全施設に係るものに限る。以下この条において同じ。）を設けなければならない。

- 一 周辺監視区域の外の空气中及び周辺監視区域の境界における水中の放射性物質の濃度を十分に低減できるよう、発電用原子炉施設において発生する放射性廃棄物を処理する能力を有するものとする。

（解釈）

- 1 第1号に規定する「放射性物質の濃度を十分に低減できる」とは、気体廃棄物処理施設にあつては、ろ過、貯留、減衰及び管理等により、液体廃棄物処理施設にあつてはろ過、蒸発処理、イオン交換、貯留、減衰及び管理等によること。
- 2 第1号に規定する「十分に低減できる」とは、As Low As Reasonably Achievable (ALARA) の考え方の下、当該工場等として「発電用軽水型原子炉施設周辺の線量目標値に関する指針」（昭和50年5月13日原子力安全委員会決定）において定める線量目標値（50マイクロシーベルト／年）が達成できるものであること。
- 3 上記2の線量目標値の評価に当たっては、「発電用軽水型原子炉施設周辺の線量目標値に対する評価指針」（昭和51年9月28日原子力安全委員会決定）等において定めるところによること。

- ・平常時の被ばく評価において、排気筒機能を喪失したと仮定（1年間）した場合の影響確認をした結果、添付九評価の結果約7.9 μ Svから約8.1 μ Svに増加するものの、線量めやす値である50 μ Svを超えないことを確認していることから、第27条に適合しているものと考えている。

3. 排気筒が破損した場合の運用面での対応

- ・発電所に竜巻襲来の恐れがある場合には、格納容器内の空気のパージ、気体廃棄物の計画放出等の操作を実施している場合には直ちに停止する。さらに、竜巻の襲来を確認した場合には、竜巻通過後速やかに排気筒の点検を実施する。

具体的な点検は、次の手順で実施する。

① 双眼鏡を用いて排気筒全体に塗膜の剥離状況（上塗りと下塗りでは塗装色が異なる）、凹みの確認、異音の有無を確認する。

② ①で確認した結果、異常を確認した部位を恒設点検歩廊、格納容器屋上部歩廊を用い重点的に双眼鏡による点検、異音の有無を確認する。恒設点検歩廊等から確認できにくい部分は仮設足場などを利用し点検する。

なお、双眼鏡による目視確認では直径 10mm 程度の貫通穴であれば確認は可能であると考えている。（別紙参照）

- ・目視確認により排気筒に破損が確認された場合には、排気筒内を流れる流体の圧力は 5kPa 以下であることから、貫通穴を確認した場合は、当て板とステンレステープあるいは紫外線硬化型 FRP シートとシール材による応急補修を実施する。

- ・貫通穴を確認し応急補修できない場合には、高所放出が期待できないものと判断し、保安規定・運転操作手順に従いプラントを停止させ原子炉冷却材喪失等発生の蓋然性が低いプラント運転状態（モード5まで移行）に移行させる。（定格出力から R C S 温度 93℃への移行時間約 27 時間）

なお、この間にプラント停止に伴う格納容器からのパージ等の平常時による影響を考慮した場合、敷地境界での被ばくは約 0.074 μ Sv である。

- ・さらに、竜巻襲来後の点検において損傷が確認されなかった場合にも、至近の定検において仮設足場等を設置して排気筒の細部点検を実施する。

以上、竜巻を起因として放射性物質の放出を伴う設計基準事故に発展することはないことから、設計基準事故と重ならない限りにおいて竜巻影響評価においては、排気筒に求められる安全機能要求はなく、また、点検、補修、原子炉停止等の対応をとることにより、設置許可基準第6条及び第27条にも適合しているものと考えている。

このため、万一排気筒が破損した場合は、原子炉冷却材喪失等が生じないプラント運転状態に短時間に移行することが可能であることから、容易に応急補修できない損傷を確認した場合は保安規定・運転操作手順に従いプラントを停止し、原子炉冷却材喪失等発生の蓋然性が低いプラント運転状態（モード5）に短時間に移行することで対応する。

なお、今後、竜巻発生後の排気筒の点検方法、点検結果を踏まえたプラント対応等の詳細を検討する。

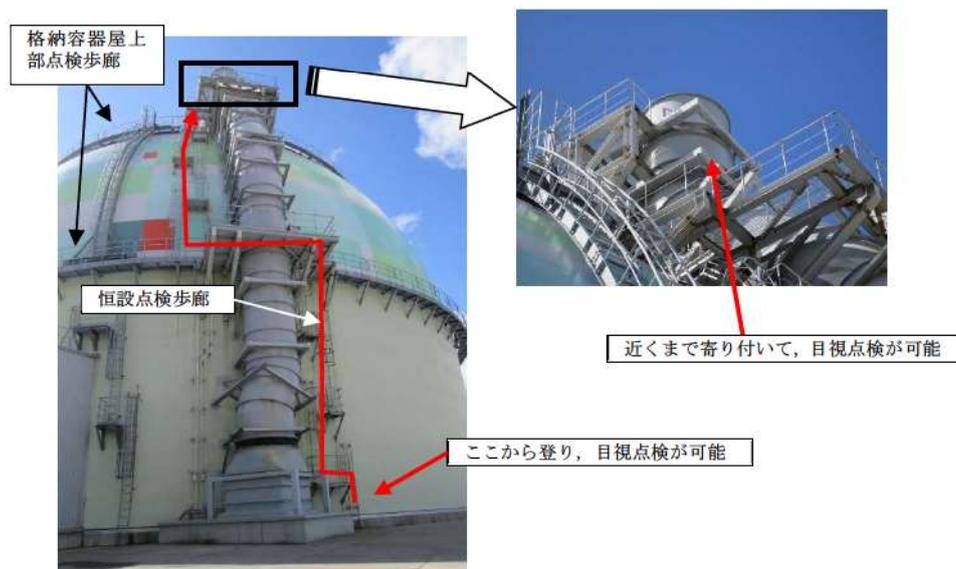
以上

別紙：排気筒の健全性確認方法

参考：地上放出時の実効線量評価

別紙：排気筒の健全性確認方法

下図のように排気筒への寄り付きは恒設点検歩廊で可能であり、また、双眼鏡での目視点検も可能である。



【参考：地上放出時の実効線量評価】

竜巻による排気筒損傷と原子炉冷却材喪失事故が重畳したと仮定した場合、本来排気筒から高所放出される気体状の放射性物質を含む内部流体は、フィルタユニット通過後、低所から放出されることになる。このため、公衆又は従業者の被ばくの増加が考えられる。

上記のような考え方を元に、公衆への影響評価として、原子炉冷却材喪失時（設計基準事故）を想定し、排気筒により高所放出されず、保守的に全量が地上放出されたとした場合の敷地境界外における実効線量の評価を実施した。

また、従事者への影響評価としては、第35回原子力発電所の新規制基準適合性に係る審査会合「資料1-1 泊発電所3号機中央制御室について」（平成25年10月22日）において排気筒による高所放出を前提とした中央制御室等の運転員の被ばくを評価していることから、保守的に全量が地上放出されたとした場合の運転員の実効線量を評価した。

公衆への影響評価での主要解析条件及び敷地境界外における実効線量の比較を、それぞれ表1及び表2に示す。

排気筒破損の影響により、地上放出として評価した結果、敷地境界外における最大の実効線量は約0.23mSvであり、判断のめやすの実効線量5mSvを超えないことを確認した。

また、従事者への影響評価での主要解析条件及び中央制御室における運転員の実効線量の比較を、それぞれ表3、表4及び表5に示す。排気筒破損の影響により、地上放出として評価した結果、中央制御室等における運転員の実効線量は約28mSvであり、判断のめやすの実効線量100mSvを超えないことを確認した。

表1 主要解析条件の比較 (1/3)

項 目	設計基準事故（原子炉冷却材喪失時） の解析条件	影響評価における解析条件
炉心熱出力	2,705MWt（定格熱出力の102%）	同 左
原子炉運転時間	最高 40,000 時間	同 左
事故後，原子炉格納容器 内に放出される核分裂生 成物の量	炉心内蓄積量の内 希ガス 1% よう素 0.5%	同 左
原子炉格納容器に放出さ れるよう素の形態	有機よう素 4% 無機よう素 96%	同 左
原子炉格納容器に放出さ れる核分裂生成物の内， 原子炉格納容器内部に沈 着する割合	希ガス 0% 有機よう素 0% 無機よう素 50%	同 左
原子炉格納容器スプレ イ水による無機よう素除 去効率	スプレイによるよう素除去に対する等 価半減期 無機よう素 50 秒 ただし，有機よう素・希ガスについて は考慮しない。	同 左
原子炉格納容器スプレ イによる除去効果が有効に なる時間	事故後5分	同 左
原子炉格納容器からの漏 えい率	次式により求めた値を下回らない値 $L = \frac{C}{V} \sqrt{\frac{\Delta P}{\rho}}$ L : 漏えい率 C : 定数 V : 原子炉格納容器気相部体積 ΔP : 差圧 ρ : 原子炉格納容器内気体密度	同 左
原子炉格納容器からの漏 えい割合	アニュラス部 97% アニュラス部以外 3%	同 左
アニュラス空気浄化設備 のよう素フィルタのよう 素除去効率	95%	同 左

表1 主要解析条件の比較 (2/3)

項 目	設計基準事故（原子炉冷却材喪失時）の解析条件	影響評価における解析条件
<p>アニュラス部の負圧達成までのよう素フィルタのよう素除去効率</p> <p>負圧達成後のアニュラス排気風量</p>	<p>(0～10分) アニュラス空気浄化設備を通じて全量排気筒放出 (フィルタの効果は考慮しない)</p> <p>(10分～30分) アニュラス空気浄化設備を通じてファン容量で排気筒放出 (フィルタの効果を検討する)</p> <p>(30分～30日) アニュラス空気浄化設備を通じてファン容量の35.5%で排気筒放出 (フィルタの効果を検討する)</p>	同 左
再循環系から安全補機室内への漏えい率	$4 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{h}$	同 左
再循環開始時間	事故後 20 分	同 左
再循環水中の放射エネルギー	炉心内よう素蓄積量の 0.5%	同 左
再循環水体積	1,400 m^3	同 左
再循環系から安全補機室内に漏えいした再循環水中のよう素の気相への移行率	5%	同 左
安全補機室内でのよう素沈着率	50%	同 左
事故の評価期間	30 日	同 左
環境に放出された放射性物質の大気中の拡散条件	<p>1997年1月～1997年12月の気象データに基づき「発電用原子炉施設の安全解析に関する気象指針」に従って評価された相対濃度 (χ/Q) 及び相対線量 (D/Q)</p> <p>・排気筒放出 $\chi/Q : 4.3 \times 10^{-5} \text{ s}/\text{m}^3$ $D/Q : 3.1 \times 10^{-19} \text{ Gy}/\text{Bq}$</p>	<p>1997年1月～1997年12月の気象データに基づき「発電用原子炉施設の安全解析に関する気象指針」に従って評価された相対濃度 (χ/Q) 及び相対線量 (D/Q)</p> <p>・地上放出 $\chi/Q : 4.5 \times 10^{-5} \text{ s}/\text{m}^3$ $D/Q : 3.1 \times 10^{-19} \text{ Gy}/\text{Bq}$</p>

表1 主要解析条件の比較 (3/3)

項 目	設計基準事故（原子炉冷却材喪失時）の解析条件	影響評価における解析条件
線量換算係数	よう素の吸入摂取に対して，小児実効線量換算係数を使用 I-131 : 1.6×10^{-7} Sv/Bq I-132 : 2.3×10^{-9} Sv/Bq I-133 : 4.1×10^{-8} Sv/Bq I-134 : 6.9×10^{-10} Sv/Bq I-135 : 8.5×10^{-9} Sv/Bq	同 左
呼吸率	小児 1 日平均の呼吸率 5.16 m ³ /d	同 左

表2 評価結果の比較

評 価 項 目		設計基準事故（原子炉冷却材喪失時）の評価結果	影 響 評 価 結 果
よう素の放出量 (I-131 等 価 量 - 小児実効線 量係数換算)	現行評価経路 (排気筒放出)	約 2.7×10^{11} Bq	—
	排気筒破損に より地上放出	—	約 2.7×10^{11} Bq
希ガスの放出量 (γ線エネルギー 0.5MeV換算)	現行評価経路 (排気筒放出)	約 6.1×10^{13} Bq	—
	排気筒破損に より地上放出	—	約 6.1×10^{13} Bq
被ばく線量 (実効線量)		約 0.23 mSv	約 0.23 mSv
上記被ばく線量のうち 直接・スカイシャイン線量		約 0.086 mSv	同 左

表3 主要解析条件の比較

項 目	中央制御室（設計基準事故）居住性評価に係る被ばく評価の解析条件	影響評価における解析条件
放出源及び放出高さ	排気筒 73.1 m	地上 0 m

表4 大気拡散条件の比較

評価対象	評価点	項目	中央制御室（設計基準事故） 居住性評価に係る被ばく評価 の相対濃度及び相対線量	影響評価における評価の 相対濃度及び相対線量
室内作業時	中央制御室中心	相対濃度 (希ガス)	$1.5 \times 10^{-4} \text{ s/m}^3$	$3.0 \times 10^{-4} \text{ s/m}^3$
		相対濃度 (よう素)	$1.6 \times 10^{-4} \text{ s/m}^3$	$3.3 \times 10^{-4} \text{ s/m}^3$
		相対線量	$1.1 \times 10^{-17} \text{ Gy/Bq}$	同 左
入退域時	出入管理建屋入口	相対濃度	$1.1 \times 10^{-4} \text{ s/m}^3$	$2.3 \times 10^{-4} \text{ s/m}^3$
		相対線量	$4.2 \times 10^{-18} \text{ Gy/Bq}$	同 左
	中央制御室入口	相対濃度	$1.7 \times 10^{-4} \text{ s/m}^3$	$3.4 \times 10^{-4} \text{ s/m}^3$
		相対線量	$1.3 \times 10^{-17} \text{ Gy/Bq}$	同 左

表5 中央制御室居住性に係る被ばく評価結果の比較 (mSv)

被ばく経路		中央制御室（設計基準事故） 居住性評価に係る被ばく評価結果	影 響 評 価 結 果
室内作業時	①建屋からのガンマ線による中央制御室内での被ばく	約 3.5×10^{-2}	同 左
	②大気中へ放出された放射性物質のガンマ線による中央制御室内での被ばく	約 1.7×10^{-1}	同 左
	③室内に外気から取り込まれた放射性物質による中央制御室内での被ばく	約 8.9×10^0	約 1.8×10^1
	小 計 (①+②+③)	約 9.2×10^0	約 1.8×10^1
入退域時	④建屋からのガンマ線による入退域時での被ばく	約 6.4×10^0	同 左
	⑤大気中へ放出された放射性物質による入退域時での被ばく	約 1.9×10^0	約 3.1×10^0
	小 計 (④+⑤)	約 8.3×10^0	約 9.5×10^0
合 計 (①+②+③+④+⑤)		約 18	約 28

注) 上記の被ばく経路①～⑤は、図-1 に示す通り被ばく経路①～⑤に対応している。

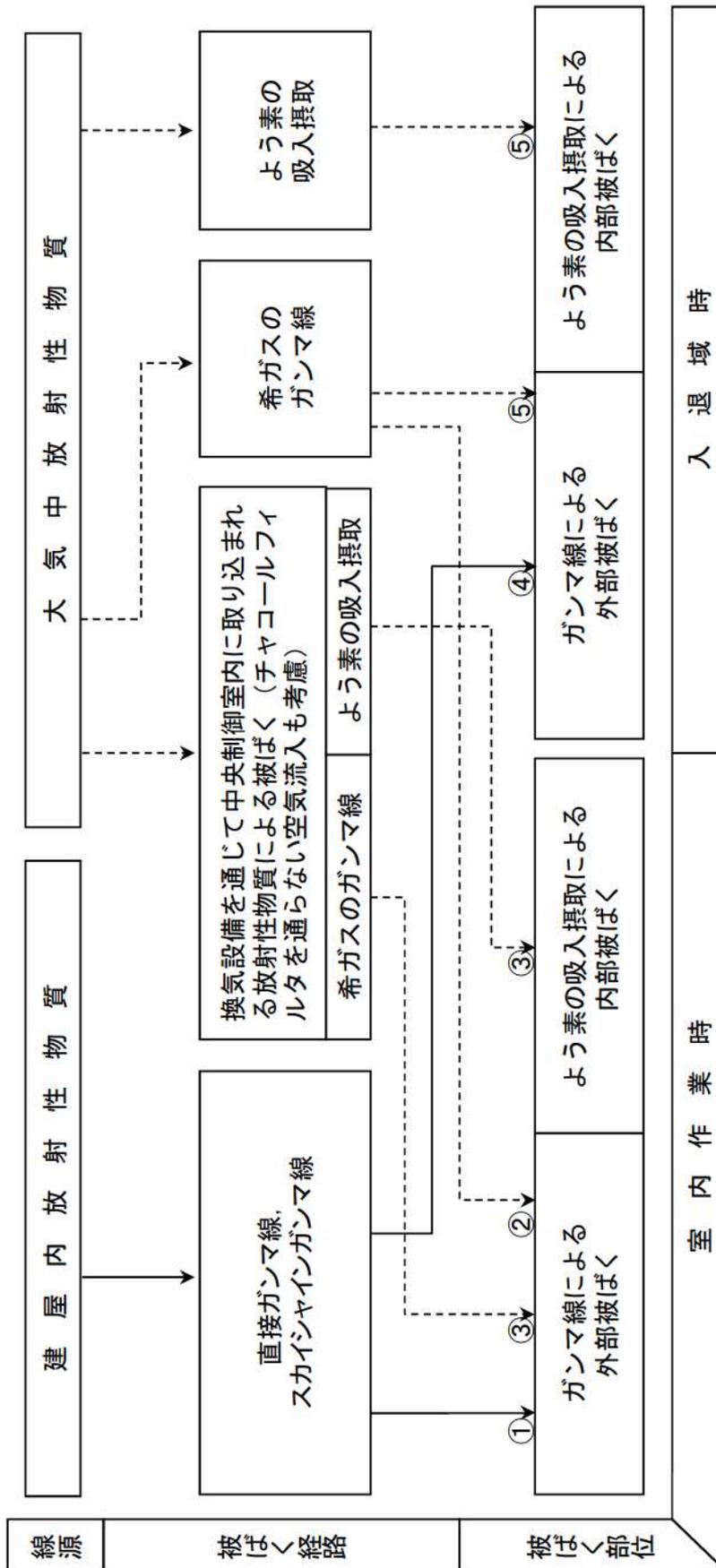


図1 事故時における中央制御室等の従事者の被ばく経路

竜巻防護ネットの構造設計について

1. 概要

設置許可基準規則第六条において、外部からの衝撃による損傷の防止として、安全施設は想定される自然現象（地震及び津波を除く。）が発生した場合においても安全機能を損なわないものでなければならないとしており、敷地周辺の自然環境を基に想定される自然現象の一つとして、竜巻の影響を挙げている。

外部事象防護対象施設である原子炉補機冷却海水ポンプ（電動機、配管等を含む）及び原子炉補機冷却海水ポンプ出口ストレーナ（配管、弁等を含む）（以下、「原子炉補機冷却海水ポンプ等」という。）は、想定される自然現象のうち、竜巻による設計飛来物の衝突により安全機能を損なうおそれがあることから、竜巻防護ネットによる防護対策を講じることで損傷を防止し、安全機能が損なわれない設計とする。

2. 竜巻防護ネットに対する要求事項

竜巻防護ネットは竜巻から原子炉補機冷却海水ポンプ等を防護する観点で、以下の要求事項を満足する必要がある。

(1) 竜巻防護に対する要求事項

- ・ 竜巻の風荷重や設計飛来物が衝突した際の衝撃力等に耐え、設計飛来物が原子炉補機冷却海水ポンプ等に到達しないこと。
- ・ 設計飛来物が衝突した際に架台等が崩壊及び落下せず、原子炉補機冷却海水ポンプ等を損傷させないこと。

(2) 竜巻以外の自然現象（地震、津波含む）に対する要求事項

- ・ 竜巻以外の自然現象によって架台等が崩壊及び落下せず、原子炉補機冷却海水ポンプ等に波及的影響を及ぼさないこと。

(3) 竜巻随件事象に対する要求事項

- ・ 竜巻随件事象として想定される事象である、火災、溢水及び外部電源喪失に対し、原子炉補機冷却海水ポンプ等に波及的影響を及ぼさないこと。
- ・ 竜巻防護ネット自体が、火災、溢水及び外部電源喪失の原因とならないこと。

3. 設計方針

3.1 竜巻防護ネットの構造

3.1.1 設置位置

竜巻防護ネットは、循環水ポンプ建屋内にある取水ピットポンプ室内の原子炉補機冷却海水ポンプエリア（以下、「海水ポンプエリア」という。）及び原子炉補機冷却海水ポンプ出口ストレーナ室ストレーナエリア（以下、「海水ストレーナエリア」という。）に設置する。

防護対象である原子炉補機冷却海水ポンプ等は、図1に示すように、ピット構造である海水ポンプエリア及び海水ストレーナエリア内の全域に及ぶことから、竜巻防護ネットはピット開口部の全面に設置する。

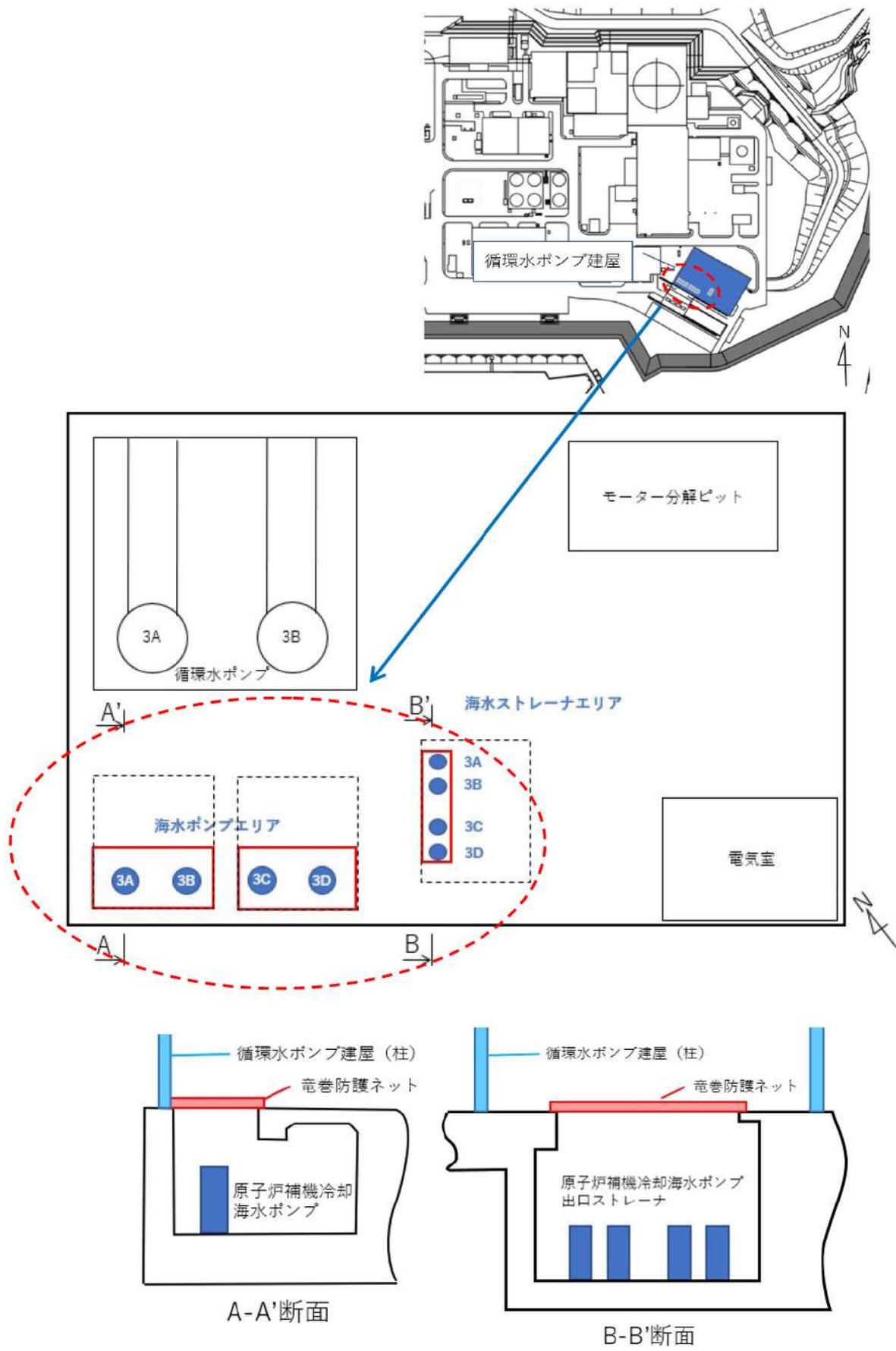


図1 海水ポンプエリア，海水ストレーナエリアの外形図

3.1.2 構造概要

竜巻防護ネットは海水ポンプエリア及び海水ストレナーエリア開口部に対し、架台に取り付けたネットを配置することで、設計飛来物の侵入を阻止し、原子炉補機冷却海水ポンプ等を防護する構造である。

ネットについては、原子炉補機冷却海水ポンプ等の設備点検時の竜巻防護ネットの取り外しの作業性等を考慮し、開口部に対して2組設置することとしており、2組のネットが接する位置に設計飛来物の鋼製材が衝突した場合は、当該部位の変形により鋼製材がすり抜ける可能性があるため、外部事象防護対象施設である原子炉補機冷却海水ポンプ等に影響を与えないよう、当該部位にすり抜け防止用鋼材（平板+アングル材）を設置する計画である。

竜巻防護ネットの構造概要を図2及び図3に示す。また、竜巻防護ネットの仕様を表1に示す。なお、仕様は詳細設計により変更もあり得る。

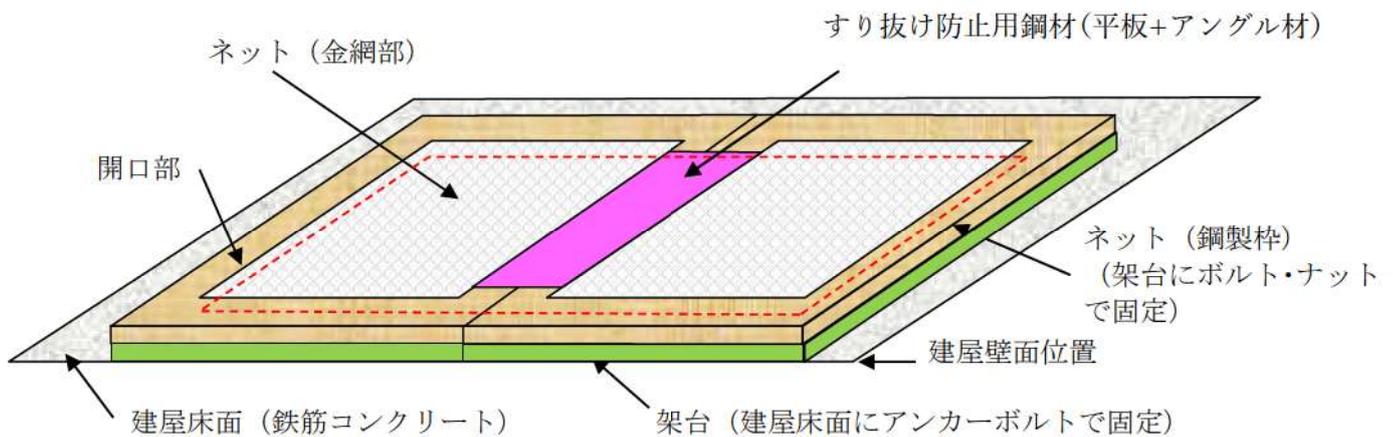
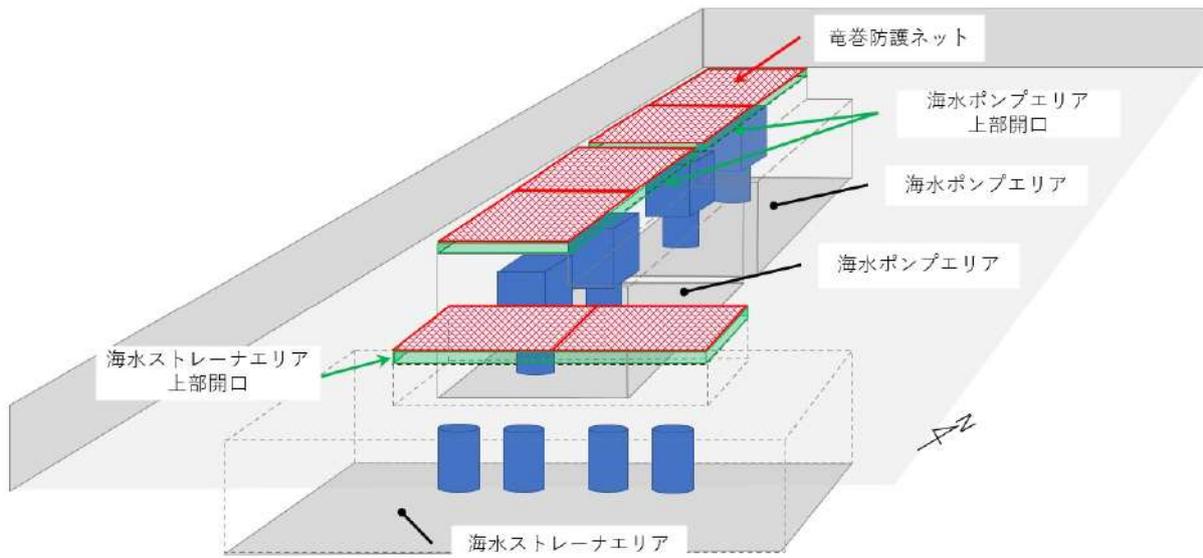
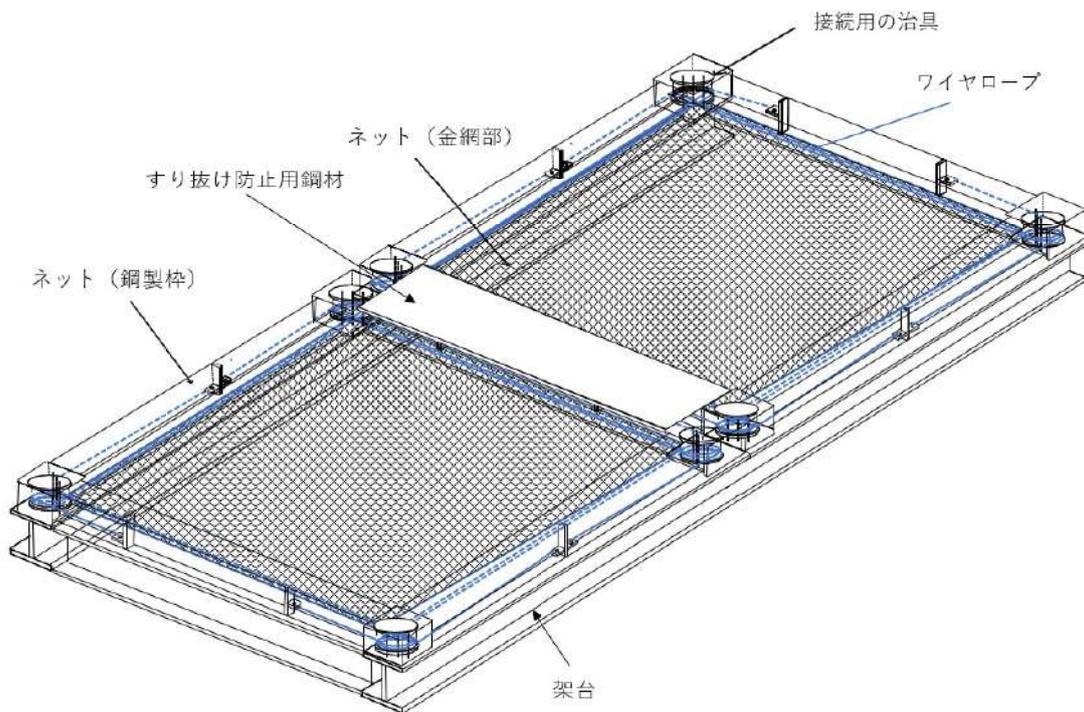


図2 海水ポンプエリア，海水ストレナーエリア開口部に設置する防護ネットのイメージ図



海水ポンプエリア，海水ストレーナエリアの竜巻防護ネット設置イメージ



竜巻防護ネットの構造イメージ

図3 竜巻防護ネットの設置イメージ図

表 1 竜巻防護ネットの仕様

海水ポンプエリア 上部	ネット (金網部)	構成	主ネット×2枚+補助ネット×1枚
		寸法	線径：φ4mm 目合い寸法：主ネット50mm，補助ネット40mm
		主要材料	硬鋼線材，亜鉛めっき鋼線
	ネット (鋼製枠)	寸法	約5.0×4.6m
		主要材料	SS400
		数量	4組
	架台	数量	2組（2開口に設置）
		寸法（高さ）	約340mm
		主要材料	SM490A，SM400A
海水ストレージエリア 上部	ネット (金網部)	構成	主ネット×2枚+補助ネット×1枚
		寸法	線径：φ4mm 目合い寸法：主ネット40mm，補助ネット40mm
		主要材料	硬鋼線材，亜鉛めっき鋼線
	ネット (鋼製枠)	寸法	約4.4m×2.6m
		主要材料	SS400
		数量	2組
	架台	数量	1組（1開口に設置）
		寸法（高さ）	約635mm
		主要材料	SM490A，SM400A
すり抜け防止用鋼材	主要材料	SM400A	
ブラケット	材料	SM490A	
耐震クラス	—	C	

3.2 設計条件

3.2.1 荷重条件

竜巻防護ネットは，設計竜巻による荷重とその他の荷重の組合せを適切に考慮した構造強度評価を実施し，各部材に発生する応力等が許容限界内にあることを確認する。構造強度評価の条件として，考慮する荷重の種類及び組合せを以下に示す。

(1) 荷重の種類

a. 常時作用する荷重

常時作用する荷重としては，竜巻防護ネットの自重を考慮する。

b. 運転時の状態で作用する荷重

竜巻防護ネットは動的機能を持たない構造であり，通常運転時及び設計基準事故時に作用する荷重はない。

c. 竜巻荷重

設計竜巻により作用する荷重は「原子力発電所の竜巻影響評価ガイド」に示すとおり，「風圧力による荷重 (W_w)」，「気圧差による荷重 (W_p)」及び「設計飛来物による衝撃荷重 (W_M)」を組み合わせた複合荷重として考慮する。複合荷重 W_{T1} 及び W_{T2} は，以下のとおり設定する。

$$W_{T1} = W_p$$

$$W_{T2} = W_w + 0.5 \cdot W_p + W_M$$

ここで、設計飛来物による衝撃荷重としては、設計飛来物が衝突する場合の荷重を設定する。なお、気圧差による荷重 (W_p) は、竜巻防護ネットの構造及び配置上考慮しない。

(a) 風圧力による荷重 (W_w)

設計竜巻風速 100 m/s の風圧力による荷重を考慮する。竜巻防護ネットの主たる形状は I 型断面であることから、風圧力による荷重の算出に使用する風力係数は「建築物荷重指針・同解説」の I 型断面部材を使用する。風圧力による荷重の算出にあたっては、風の方向によらず、I 型断面部材に対し最も大きい風力係数である $C=2.1$ を使用し算出する。

(b) 設計飛来物による衝撃荷重 (W_M)

設計竜巻の最大風速 100 m/s による設計飛来物の衝撃荷重は、砂利、鋼製パイプと比べ運動エネルギーが大きくなる鋼製材により算出する。竜巻防護ネットの形状は海水ポンプエリア上部 (約 10m×約 5.5m) 及び海水ストレーナエリアの上部 (約 10m×約 2.6m) の上部全面に配置し、地上からの高さは約 0.7m である。

竜巻防護ネットの配置状況を図 4 及び図 5 に示す。

竜巻防護ネットの形状、周囲の状況を踏まえて、飛来物の衝突方向は水平及び鉛直方向からの衝突を考慮する。

衝撃荷重は、鋼製材が衝突した場合の影響が大きくなる向きを考慮し、有限要素法により求める。飛来物の衝突速度を初速値として入力し、飛来物衝突評価により算出する。表 2 に設計飛来物の諸元を示す。

表 2 設計飛来物の諸元

設計飛来物	仕様		最大水平速度 (m/s)	最大鉛直速度 (m/s)
	サイズ (m)	質量 (kg)		
鋼製材	縦×横×高さ 4.2×0.3×0.2	135	57	38
鋼製パイプ	長さ×直径 2×0.05	8.4	49	33
砂利	縦×横×高さ 0.04×0.04×0.04	0.18	62	42

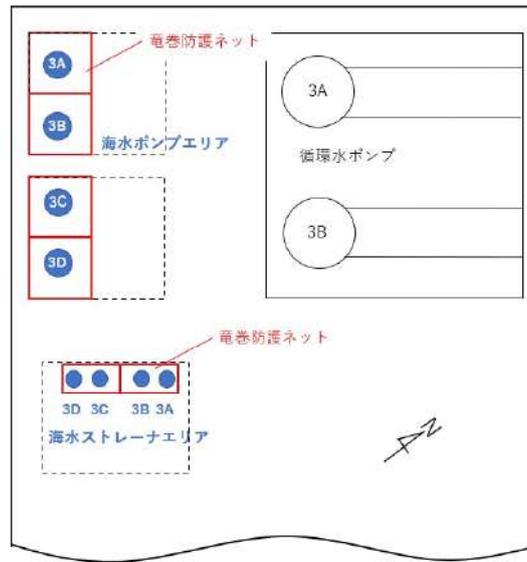


図4 竜巻防護ネットの配置（平面図）

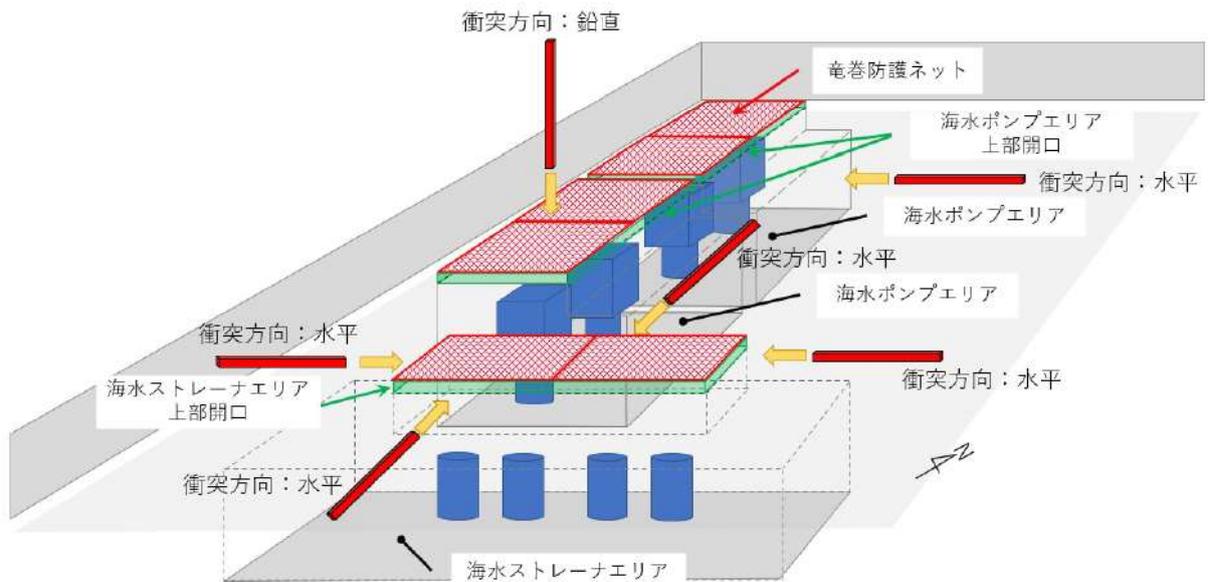


図5 竜巻防護ネットの配置（俯瞰図）

(2) 荷重の組合せ

「別添資料 1 3.3.2 設計竜巻荷重と組合せる荷重の設定」を踏まえ、荷重の組合せを表 3 に示す。

表 3 竜巻防護ネットにおいて組合せを考慮する荷重

考慮する荷重				
常時作用する荷重	運転時の状態で作用する荷重	竜巻荷重		
自重		風圧力	気圧差	設計飛来物による衝撃荷重
○	—	○	—	○

○：考慮する，—：考慮不要

3.3 竜巻防護ネットの設計方針

3.3.1 竜巻防護ネットの設計方針

「2. 竜巻防護ネットに対する要求事項」を踏まえて、設置許可基準規則の各条文（第 4 条，第 6 条）に対する竜巻防護ネットの設計方針を表 4 のとおり整理した。

表 4 竜巻防護ネットの設計方針

設置許可基準規則	竜巻防護ネットの設計方針	備考
第 4 条 地震による損傷の防止	上位クラスである原子炉補機冷却海水ポンプ等に対し、地震時において竜巻防護ネットの損傷等により波及的影響を及ぼさないよう、基準地震動 S_s に対して十分な構造強度を有すること。	設置許可基準規則第 4 条に対する適合状況説明資料『設計基準対象施設について（第 4 条 地震による損傷の防止）』で説明
第 6 条 外部からの衝撃による損傷の防止（竜巻）	竜巻防護ネットは、竜巻時及び竜巻通過後において、設計竜巻荷重及びその他考慮すべき荷重に対し、内包する原子炉補機冷却海水ポンプ等が安全機能を損なわないよう、設計飛来物が原子炉補機冷却海水ポンプ等に衝突することを防止可能な設計とする。また、竜巻防護ネットは、その他考えられる自然現象に対して、原子炉補機冷却海水ポンプ等に波及的影響を及ぼさない設計とする。	

竜巻防護ネットは、上記設計方針及び「3.1.2 構造概要」で示した構造と、「3.2.1 荷重条件」で設定した荷重を踏まえて設計する。

竜巻防護ネットの設計フローを図 6 に示す。

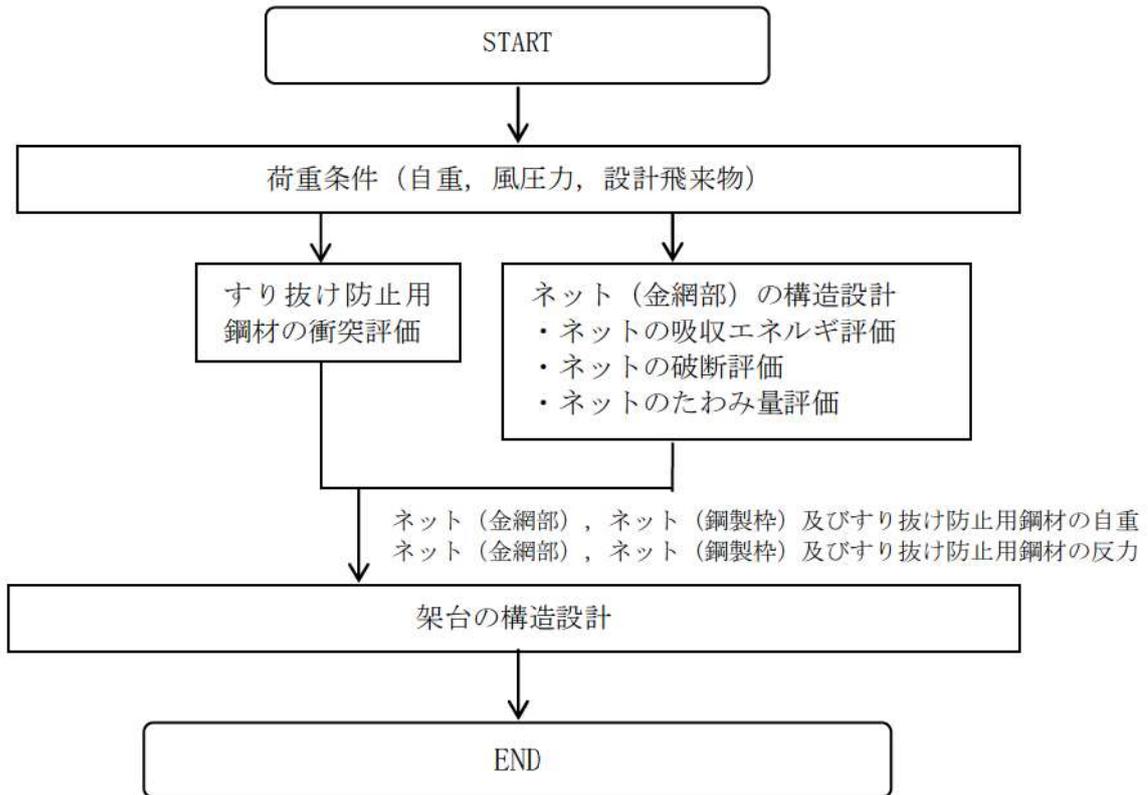


図6 竜巻防護ネットの設計フロー

3.3.2 竜巻防護ネットに対する各条文の設計方針に対応する各部位の役割

竜巻防護ネットに対する設置許可基準規則の各条文（4条及び6条）の設計方針に対する役割を表5のとおり整理した。

表5 竜巻防護ネットの各部位の役割

部位の名称		各部位の役割	
		地震 (4条)	竜巻 (6条)
	ネット (金網部)	—	設計飛来物の原子炉補機冷却海水ポンプ等への到達を防止する
	ネット (鋼製枠)		
	すり抜け防止用鋼材		
支持部材	架台	ネット (金網部) を支持する	ネット (金網部) を支持する 設計飛来物の原子炉補機冷却海水ポンプ等への到達を防止する
	ブラケット	架台を支持する	架台を支持する

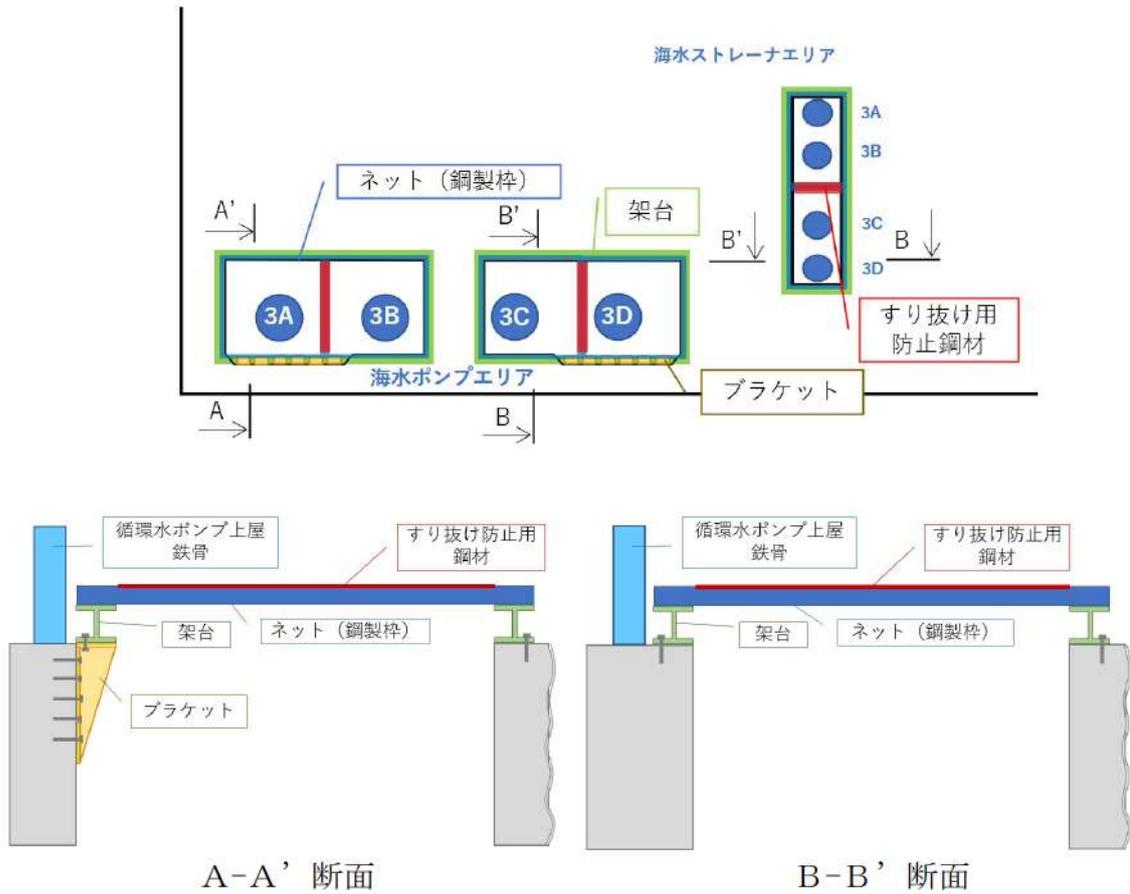


図7 竜巻防護ネットの構造 (イメージ)

3.3.3 竜巻防護ネット各部位の設計方針

各部位の役割を踏まえ、竜巻防護ネットの各部位に対する設計方針及び評価項目について表6に整理した。

表6 竜巻防護ネット各部位に対する設計方針

部位の名称		設計方針	評価項目
ネット (金網部)		金網部は、設計竜巻の風圧力による荷重、飛来物による衝撃荷重及びその他の荷重に対し、飛来物が原子炉補機冷却海水ポンプ等へ衝突することを防止するために、主要な部材が破断せず、たわみが生じても、原子炉補機冷却海水ポンプ等の機能喪失に至る可能性がある飛来物が原子炉補機冷却海水ポンプ等と衝突しないよう捕捉できる設計とする。	吸収エネルギー評価
			破断評価
			たわみ評価
ネット (鋼製枠)		鋼製枠は原子炉補機冷却海水ポンプ等へ衝突することを防止するために、ネット（金網部）及びすり抜け防止鋼材を支持する機能を維持可能な構造強度を有し、原子炉補機冷却海水ポンプ等に波及的影響を与えないために、設計飛来物の貫通及び脱落を生じない設計とする。	貫通評価
			支持機能評価
すり抜け防止用鋼材		鋼材は、設計竜巻の風圧力による荷重、飛来物による衝撃荷重及びその他の荷重に対し、飛来物が原子炉補機冷却海水ポンプ等へ衝突することを防止するために、飛来物が防護板を貫通せず、原子炉補機冷却海水ポンプ等に波及的影響を与えない設計とする。	貫通評価
支持部材	架台	架台は原子炉補機冷却海水ポンプ等へ衝突することを防止するために、ネット及びすり抜け防止鋼材を支持する機能を維持可能な構造強度を有し、原子炉補機冷却海水ポンプ等に波及的影響を与えないために、転倒及び脱落を生じない設計とする。	貫通評価
	ブラケット	ブラケットは架台を支持する機能を維持可能な構造強度を有し、原子炉補機冷却海水ポンプ等に波及的影響を与えないために、脱落を生じない設計とする。	支持機能評価

3.4 ネット（金網部）の構造設計

3.4.1 基本設計

設計飛来物が衝突した際に局部的に生じる衝撃荷重に耐え、変形することにより設計飛来物の持つ運動エネルギーを吸収し、原子炉補機冷却海水ポンプ等への衝突を防止する。

竜巻防護ネットの基本仕様は、電力中央研究所にて評価、試験を行い、検証されたものを適用し、防護性能の評価は以下のとおり実施する。設計の考え方については別紙1～7に示す。

設計飛来物の衝突位置の影響として、中央位置からずれたオフセット位置に衝突する場合の影響を考慮する。

- ・ネットの吸収エネルギー評価
- ・ネットの破断評価
- ・ネットのたわみ量評価

電中研報告^{*1}によるネットの吸収エネルギーは表7のとおりであり、当社の設計飛来物の速度条件を包絡する。

表7 竜巻防護ネット（金網部）の吸収エネルギーと設計飛来物の衝突エネルギー

設置場所	海水ポンプエリア上部開口部		海水ストレートエリア上部開口部	
	A トレン	B トレン	海側	山側
ネット				
限界吸収エネルギー ^{*2}	324.0[kJ]	327.0[kJ]	251.7[kJ]	250.9[kJ]
設計飛来物の衝突エネルギー (鋼製材：135kg, 速度 38m/s)	97 [kJ]			

※1：竜巻設計飛来物に対する防護ネットの評価手法と対策工法の提案（電力中央研究所報告書 N13014, 平成26年3月）

※2：電力中央研究所報告書O01「高強度金網を用いた竜巻設計飛来物対策工の合理的な衝撃応答評価手法」

3.4.2 構造設計

ネット（金網部）は、ひし形金網の高強度金網を使用しており、海水ポンプエリア開口部に設置するネット（金網部）は、50mm目合いの主ネット2枚と40mm目合いの補助ネット1枚を重ねて取り付ける。

海水ストレートエリア開口部に設置するネット（金網部）は、40mm目合いの主ネット2枚と40mm目合いの補助ネット1枚を重ねて取り付ける。

ネット（金網部）は、金網部の端部にワイヤロープを通すことによって支持し、ワイヤロープの端部は鋼製枠に取り付けた接続用の治具を介して、ワイヤロープ固定部に接続する。

ネット（金網部）に作用する自重や設計飛来物による衝撃荷重等の荷重は、ワ

ワイヤロープを通じて鋼製枠に伝達する。

ネットを取り付ける鋼製枠は、ピット開口部の周囲に配した架台の上に固定し、架台は床面及びブラケットに固定される。ネット（鋼製枠）の取付け概要を図 8 に示す。

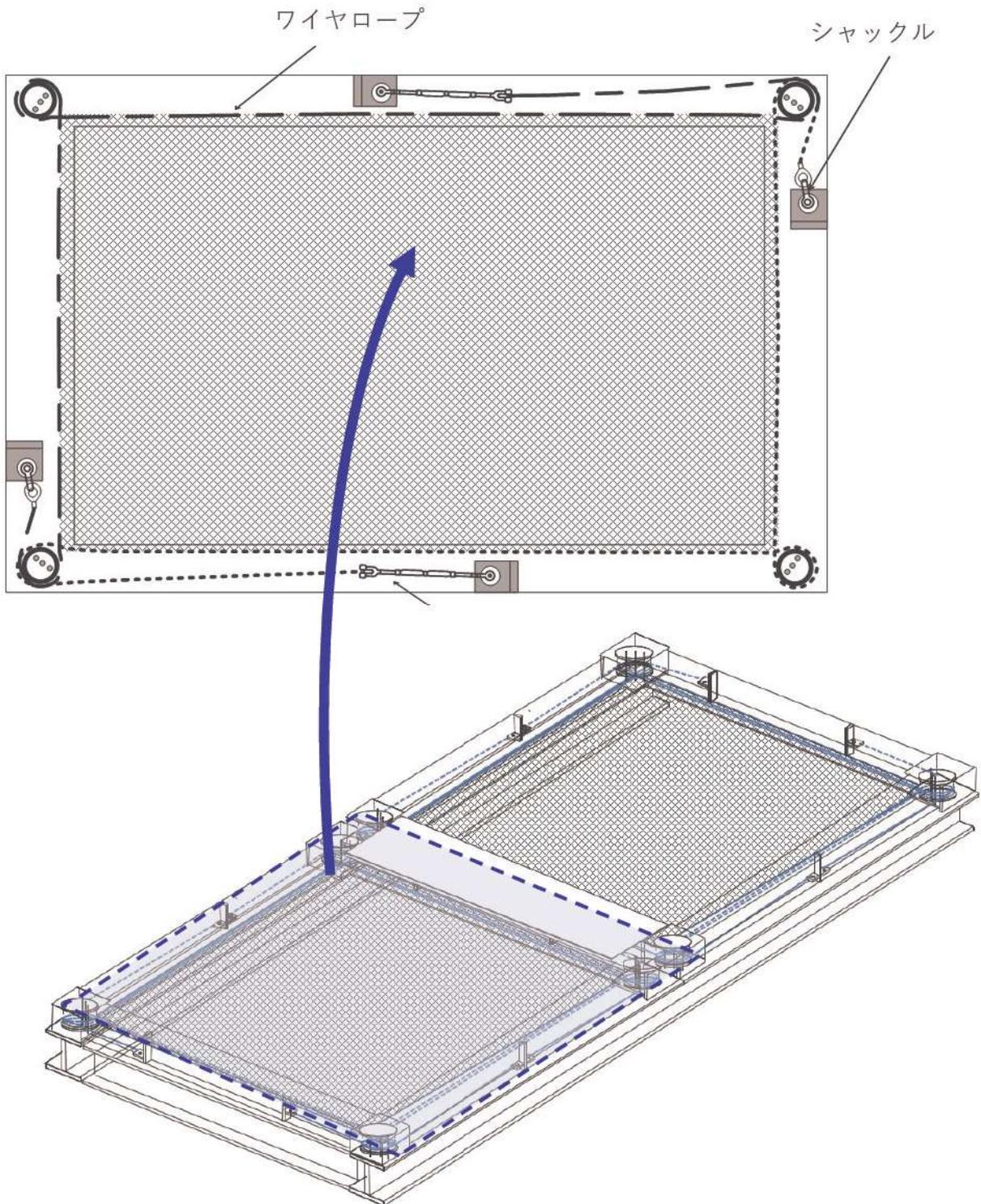


図 8 ネット（金網部）のフレーム取付け概要図

3.5 架台及びブラケットの構造設計

3.5.1 基本設計

竜巻防護ネットの架台は、設計飛来物の衝突において貫通が発生しない設計とする。

また、ネットやすり抜け防止用鋼材で受けた設計飛来物による衝撃荷重等が伝達されることから、荷重条件に対して上載するネット、すり抜け防止用鋼材を支持可能な構造強度を有する設計とする。設計飛来物の衝突位置により各部材に加わる荷重が異なることから、設計飛来物衝突位置の影響を考慮した設計を実施する。

地震に対しては、耐震Cクラスの静的地震力に耐えるとともに、基準地震動 S_s による地震力によって崩壊及び落下せず、原子炉補機冷却海水ポンプ等への波及的影響を与えることのない設計とする。

竜巻防護ネットのブラケットは、ネットやすり抜け防止用鋼材で受けた設計飛来物による衝撃荷重等が架台を介して伝達されることから、荷重条件に対して上載する架台を支持可能な構造強度を有する設計とする。

3.5.2 構造設計

ネット及び架台で発生した荷重は、循環水ポンプ建屋床面及びブラケットに伝達する構造とする。

ブラケット部の架台で発生した荷重は、ブラケットを介して海水ポンプエリア壁面に伝達する構造とする。

海水ポンプエリア開口部周囲の床面のうち、原子炉補機冷却海水ポンプエリアの南側の一部については、架台を設置するスペースが十分に確保できないため、海水ポンプエリア壁面にブラケットを取付け、ネット及び架台を支持する。

3.6 すり抜け防止用鋼材の構造設計

3.6.1 基本設計

竜巻防護ネットのうち、すり抜け防止用鋼材は、ネット（鋼製枠）間の隙間からの設計飛来物の侵入を防ぐために、防護板を設置する。

3.6.2 構造設計

すり抜け防止用鋼材は、設計飛来物である鋼製材（縦 4.2m×横 0.3m×高さ 0.2m）が通過しない構造とする。

竜巻防護ネットの損傷モードを整理した結果を表8に示す。

表8 竜巻防護ネットの損傷モード整理表 (1/2)

評価対象	作用荷重	損傷モード	評価項目	構造強度上の評価方針
ネット (金網部)	衝撃荷重 竜巻風荷重 自重	ネットの破断による設計飛来物の防護対象施設への衝突	【吸収エネルギー評価】	ネットに設計飛来物が衝突した場合に、限界吸収エネルギーが作用荷重によるエネルギー以上であることを確認する（電中研報告 ^{※1} による評価）
		ネットがたわむことによる設計飛来物の防護対象施設への衝突	【破断評価】	ネットに設計飛来物が衝突した場合に、作用する荷重がネットの素材の持つ破断強度以下であることを確認する（電中研報告 ^{※1} による評価）
ワイヤ ロープ	衝撃荷重 竜巻風荷重 自重	ネットがたわむことによる設計飛来物の防護対象施設への衝突	【たわみ評価】	ネットに設計飛来物が衝突した場合に、防護対象施設までの離隔距離が作用荷重によるワイヤロープたわみ量を含めたネット全体のたわみ量以上であることを確認する
		部材の破断による設計飛来物の防護対象施設への衝突	【破断評価】	
		部材の破断による設計飛来物の防護対象施設への衝突	【破断評価】	ネットに設計飛来物が衝突した場合に、作用する荷重が素材の持つ破断強度以下であることを確認する
ターン バックル シヤックル 接続治具	衝撃荷重	部材の破断による設計飛来物の防護対象施設への衝突	【貫通評価】 ひずみ量	設計飛来物が支持部材に衝突した場合に、衝突箇所が発生する衝撃荷重によって貫通が生じないように、ネット（鋼製枠）の鋼材が終局状態に至るようなひずみを生じないことを確認する
ネット (鋼製枠)				

※1:竜巻設計飛来物に対する防護ネットの評価手法と対策工法の提案(電力中央研究所報告 N13014, 平成26年3月), 電力中央研究所報告書O01「高強度金網を用いた竜巻設計飛来物対策工の合理的な衝撃応答評価手法」

表8 竜巻防護ネットの損傷モード整理表(2/2)

評価対象	作用荷重	損傷モード	評価項目	構造強度上の評価方針
すり抜け防止用鋼材	衝撃荷重 竜巻風荷重 自重	防護板を貫通すること による設計飛来物 の防護対象施設への 衝突 架台を貫通すること による設計飛来物 の防護対象施設への衝 突 ネット(金網部)が 破断することによる	【貫通評価】 ひずみ量	衝突箇所に発生する衝撃荷重によって貫通が生じ ないように、終局状態に至るようひずみを生じな いことを確認する
			【貫通評価】 ひずみ量	設計飛来物が支持部材に衝突した場合に、衝突箇所 に発生する衝撃荷重によって貫通が生じないよう に、架台の鋼材が終局状態に至るようひずみを生 じないことを確認する
支持部材	衝撃荷重 竜巻風荷重 ネット荷重	架台に設計飛来物が 衝突すること、破 断・落下し防護対象 施設に衝突	【支持機能評価】 ひずみ量	竜巻の風圧力による荷重及び設計飛来物による衝 撃荷重に対し、上載するネットを支持するため、架 台の鋼材が終局状態に至るようひずみを生じな いことを確認する
			【支持機能評価】 せん断応力 曲げ応力 引張応力	竜巻の風圧力による荷重及び設計飛来物による衝 撃荷重に対し、上載するネットを支持するため、ブ ラケットの鋼材が終局状態に至るようひずみを生 じないことを確認する
ブラケット	衝撃荷重 竜巻風荷重 ネット荷重 架台荷重 自重	破断による架台の落 下		
ブラケット アンカーボ ルト				

4. 竜巻防護に対する評価方針

4.1 強度評価

4.1.1 ネット（金網部）

ネット（金網部）の強度評価は「3.2.1 荷重条件」で設定した荷重及び荷重の組合せを踏まえて、評価対象部位に作用する応力等について確認するものである。

(1) 評価項目

設計荷重に対してネットは、設計飛来物を捕捉し原子炉補機冷却海水ポンプ等へ衝突させないために、破断が生じない強度を有すること及びたわみが生じても、設計飛来物が原子炉補機冷却海水ポンプ等と衝突しないよう原子炉補機冷却海水ポンプ等との離隔が確保できることを確認する。

破断が生じないことの確認として、ネットが設計飛来物のエネルギーを吸収できること及び設計飛来物の衝突箇所において、ネットの破断が生じない強度を有することを評価する。また、防護ネットが設計飛来物を捕捉可能であることを確認するために、設計荷重に対してネットを支持するワイヤロープ、ターンバックル、シャックル及び接続用の治具に破断が生じない強度を有することを評価する。

設計飛来物の衝突位置の影響として、中央位置からずれたオフセット位置に衝突する場合の影響を考慮する。

(2) 評価対象部位

ネット（金網部）の強度評価においては、その構造を踏まえて、設計竜巻による荷重とこれに組み合わせる荷重（以下「設計荷重」という。）の作用方向及び伝達過程を考慮し、評価対象部位を設定する。

① ネット

ネットには設計竜巻荷重が直接作用するため、評価対象部位とする。

② ワイヤロープ、ターンバックル及びシャックル

ネットに作用した荷重は、ワイヤロープを介してターンバックル及びシャックルに作用するため、ワイヤロープ、ターンバックル及びシャックルを評価対象部位とする。

③ 接続用の治具

接続用の治具及びワイヤロープ固定部には、ワイヤロープを介して伝達された荷重が作用するため、接続用の治具である隅角部固定ボルト、ワイヤロープ固定部を評価対象部位とする。

図9にネット（金網部）の評価対象部位、図10に設計飛来物衝突時の荷重伝達を示す。

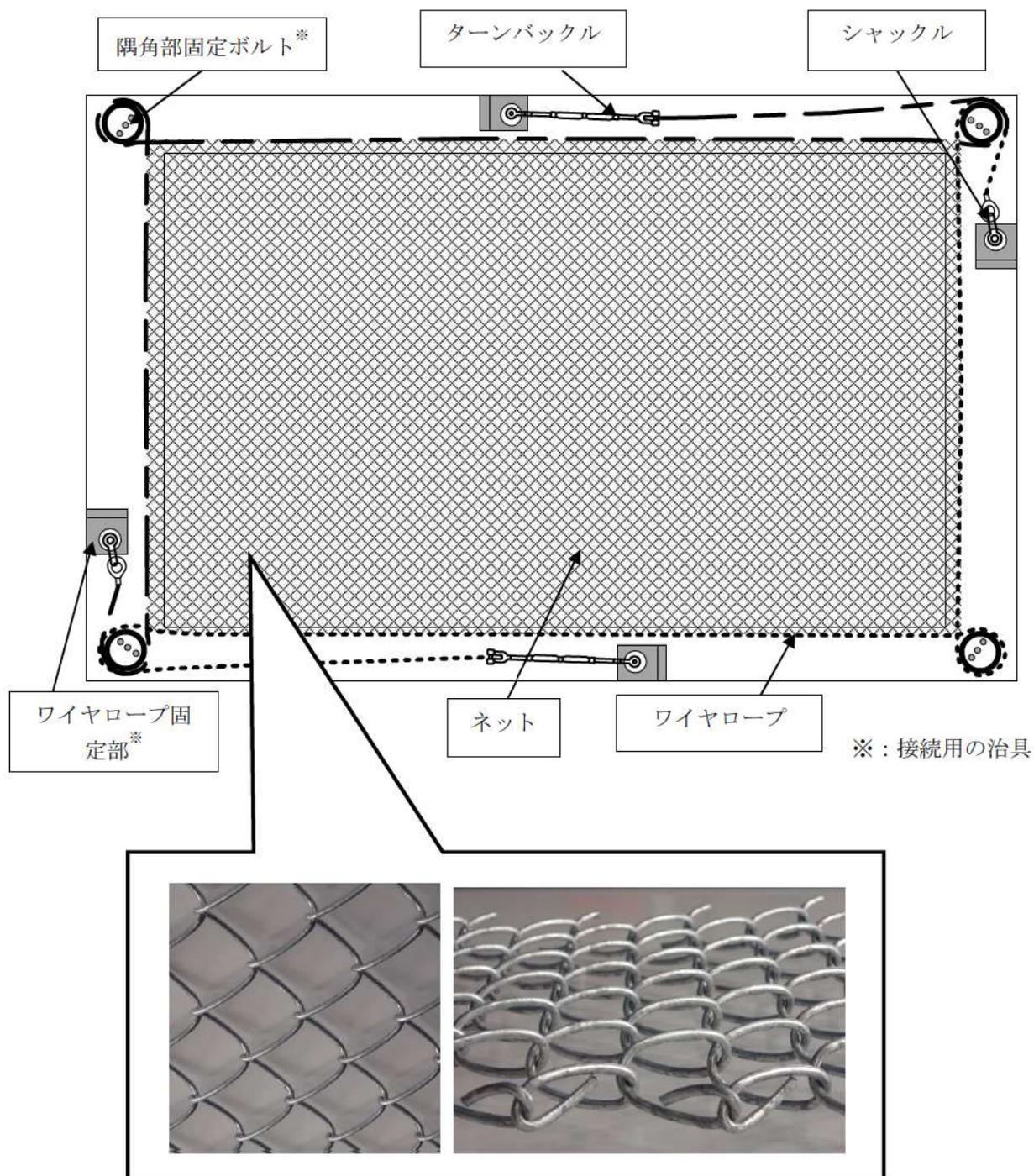
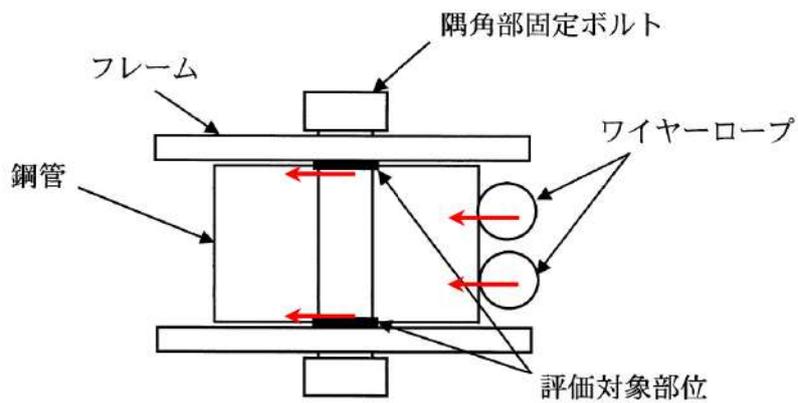
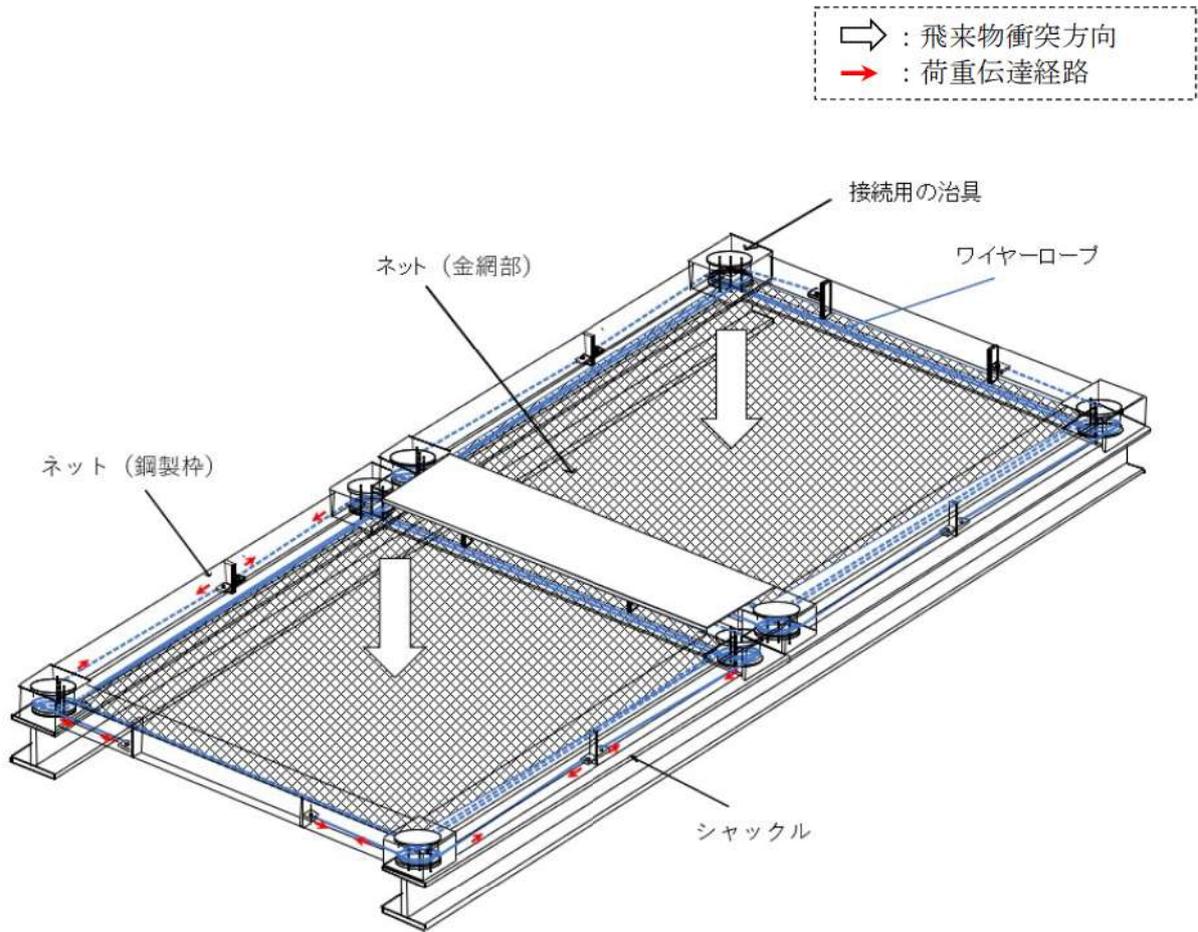


図9 ネット（金網部）の評価対象部位



接続用の治具を構成する隅角固定ボルトの荷重状態

図 10 設計飛来物衝突時の荷重伝達図 (ネット (金網部))

(3) 許容限界

① 吸収エネルギー評価

吸収エネルギー評価においては、計算により算出するネットの限界吸収エネルギーがネットに作用するエネルギー以上であることにより、ネットが破断しないことを確認する。

② 破断評価

ネット（金網部）の破断評価においては、計算により算出するネットに作用する荷重がネットの素材の持つ破断強度以下であることにより、ネットに破断が生じない強度を有することを確認する。

ワイヤロープは、ネットと一体となって設計飛来物を捕捉するため、ネットと同様に塑性変形を許容することから、破断荷重を許容限界とする。

ターンバックル及びシャックルは、破断しなければネットを設置位置に保持することができ、設計飛来物を捕捉可能である。したがって、ワイヤロープの張力に対し、破断しないことを確認する。

接続用の治具の破断評価は、計算により算出する応力により接続用の治具を破断しない強度を許容限界とする。

③ たわみ評価

竜巻防護ネット本体は、自重、設計竜巻の風圧力による荷重及び設計飛来物による衝撃荷重に対し、計算により算出する竜巻防護ネット本体の最大たわみ量がネットと原子炉補機冷却海水ポンプ等の離隔距離未満であることを確認するため、ネットと原子炉補機冷却海水ポンプ等の最小離隔距離を許容限界として設定する。

4.1.2 ネット（鋼製棒）

ネット（鋼製棒）の強度評価は、「3.2.1 荷重条件」にて設定した荷重及び荷重の組合せを踏まえて、評価対象部位に作用する応力等について確認するものである。

(1) 評価項目

設計荷重に対してネット（鋼製棒）は、設計飛来物が貫通せず原子炉補機冷却海水ポンプ等への到達を阻止できること（貫通評価）、また、原子炉補機冷却海水ポンプ等へ波及的影響を与えないよう落下が生じないこと（支持機能評価）を衝突解析により確認する。

評価においては、飛来物の衝突位置により各部材に発生する応力が変わることから、各部材に対し最も条件の厳しい衝突箇所を考慮し評価を実施する。

(2) 評価対象部位

ネット（鋼製棒）の強度評価においては、その構造を踏まえて、設計竜巻による荷重とこれに組み合わせる荷重（以下「設計荷重」という。）の作用方向及び伝達過程を考慮し、評価対象部位を設定する。

4.1.3 架台及びブラケット

架台の強度評価は、「3.2.1 荷重条件」にて設定した荷重及び荷重の組合せを踏まえて、評価対象部位に作用する応力等について確認するものである。

(1) 評価項目

設計荷重に対して架台は、設計飛来物が貫通せず原子炉補機冷却海水ポンプ等への到達を阻止できること（貫通評価）、また、原子炉補機冷却海水ポンプ等へ波及的影響を与えないよう落下が生じないこと（支持機能評価）を衝突解析により確認する。

ブラケットは、架台で受けた荷重が伝達されるため、衝突解析によって算出した荷重によって落下が生じないこと（支持機能評価）を確認する。

評価においては、飛来物の衝突位置により各部材に発生する応力が変わることから、各部材に対し最も条件の厳しい衝突箇所を考慮し評価を実施する。

(2) 評価対象部位

支持部材の強度評価においては、その構造を踏まえて、設計荷重の作用方向及び伝達過程を考慮し、鋼製棒、架台、ブラケットを評価対象として選定する。

また、図11～図13に各衝突方向からの設計飛来物衝突時の荷重伝達の例を示す。

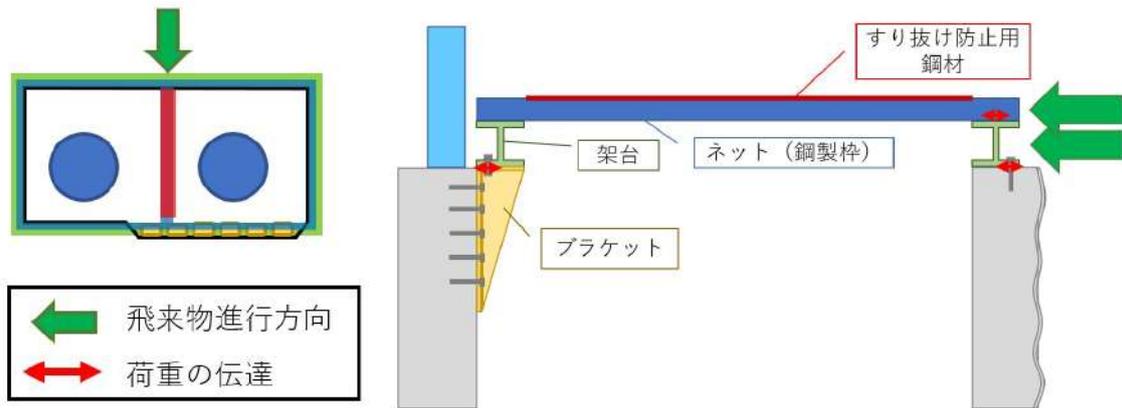


図 11 設計飛来物衝突時の荷重伝達例
 (水平方向 (北から南) から衝突した場合)

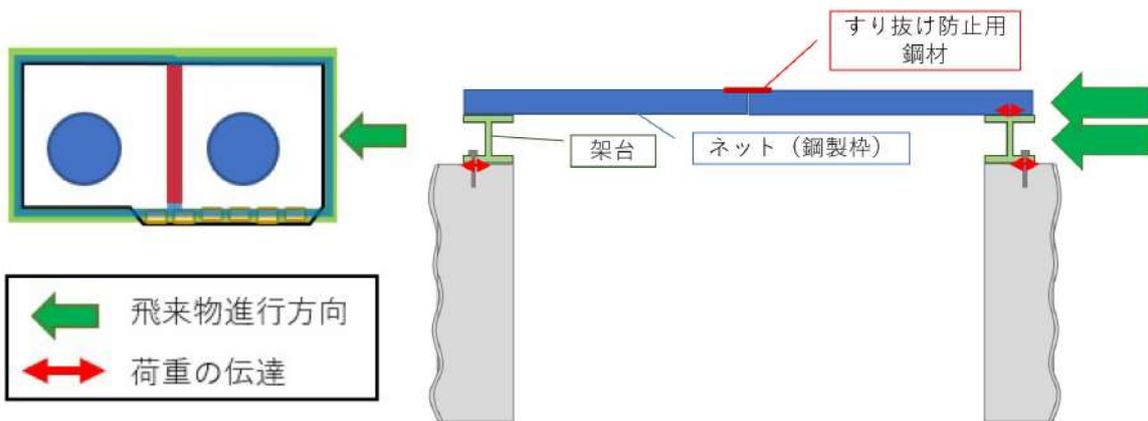


図 12 設計飛来物衝突時の荷重伝達例
 (水平方向 (東から西) から衝突した場合)

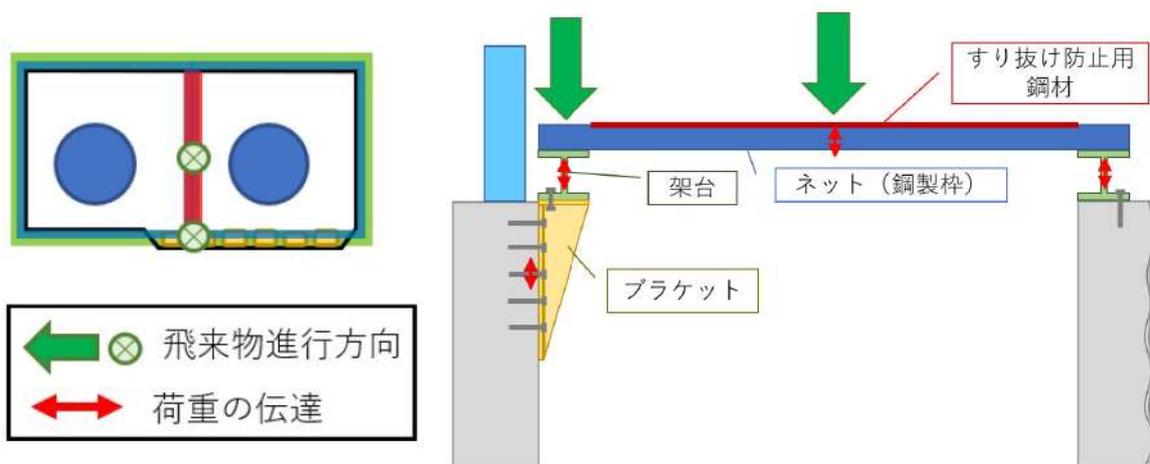


図 13 設計飛来物衝突時の荷重伝達例
(鉛直方向から衝突した場合)

(3) 許容限界

架台は、評価対象部位に発生する最大ひずみが「NEI07-13」に基づく破断ひずみの範囲内であることを確認する。最大ひずみが破断ひずみを超える場合には、破断箇所を確認し、全断面に発生しないことにより、貫通及び落下が生じないことを確認する。

(4) 支持部材に対する性能目標と評価方針

(1) ～ (3) を踏まえ、支持部材に対する構造強度上の性能目標と評価方針を表 9 に整理する。

表9 支持部材に対する構造強度上の性能目標と評価方針

評価対象	支持部材の設計方針	構造強度上の性能目標	構造強度上の評価方針	評価部材	主な機能損傷モード		許容限界
					作用荷重	限界状態	
竜巻防護ネット（支持部材）	<p>支持部材は設計竜巻の風圧力による荷重、飛来物による衝撃荷重及びその他の荷重に対し、飛来物が原子炉補機冷却海水ポンプ等へ衝突することを防止するため、飛来物が支持部材を構成する主要な構造部材を貫通せず、上載するネット及びすり抜け防止鋼材を支持する機能を維持可能な構造強度を有し、原子炉補機冷却海水ポンプ等に波及的影響を与えないために、支持部材を構成する部材自体の転倒及び脱落をしない設計とする。</p>	<p>【貫通】 設計飛来物の支持部材への衝突に対して、衝突箇所を貫通させない。</p>	<p>設計飛来物が支持部材に衝突した場合に、衝突箇所が発生する衝撃荷重によって貫通が生じないよう、ネット（鋼製枠）の鋼材が終局状態に至るようなひずみを生じないことを確認する。</p>	ネット（鋼製枠）	<ul style="list-style-type: none"> 自重 上載荷重（ネット（鋼製枠）） 竜巻風荷重 衝撃荷重 	（衝突面の）全断面欠損	<p>破断ひずみ以下。最大ひずみを超え、破断箇所を確認し、全断面に発生しないこと</p>
		<p>【支持機能】 支持部材は設計竜巻の風圧力による荷重、飛来物による衝撃荷重及びその他の荷重に対し、上載するネット及び防護板を支持する機能を維持可能な構造強度を有する。</p>	<p>竜巻の風圧力による荷重及び設計飛来物による衝撃荷重に対し、鋼製枠の鋼材が終局状態に至るようなひずみを生じないことを確認する。</p>	<p>架台</p>	<ul style="list-style-type: none"> 自重 上載荷重（ネット、すり抜け防止鋼材） 竜巻風荷重 衝撃荷重 	終局状態	<p>発生する応力が JEA 4601 の IV_{AS} 以下</p>
				<p>ブラケット 本体</p>	<ul style="list-style-type: none"> 自重 上載荷重（ネット、すり抜け防止鋼材、架台） 竜巻風荷重 衝撃荷重 		
				<p>ブラケット アンカーボルト</p>			

(4) 評価結果

評価結果については詳細設計段階で整理する。

詳細設計段階で、仕様変更等の対応を行うことで、許容値を満足させる方針とする。

4.1.4 すり抜け防止用鋼材

すり抜け防止用鋼材の強度評価は、「3.2.1 荷重条件」にて設定した荷重及び荷重の組合せを踏まえて、評価対象部位に作用する応力等の評価方針について確認するものである。

(1) 評価項目

原子炉補機冷却海水ポンプ等が安全機能を損なうことのないことの確認として、設計飛来物が防護板に衝突した場合の貫通に対する評価(以下「貫通評価」という)を実施し、原子炉補機冷却海水ポンプ等に到達しないことを確認する。

(2) 評価対象部位

すり抜け防止用鋼材は設計飛来物の衝突に対し、原子炉補機冷却海水ポンプ等を防護するための設備であることから評価対象部位とする。

(3) 許容限界

すり抜け防止用鋼材の貫通評価における許容限界は、破断ひずみの範囲内であることを確認する。最大ひずみが破断ひずみを超える場合には、破断箇所を確認し、全断面に発生しないことにより、貫通及び落下が生じないことを確認する。

5. 竜巻以外の自然現象（地震，津波含む）に対する評価方針

5.1 竜巻以外の自然現象に対する評価

(1) 竜巻以外の自然現象の影響抽出

竜巻防護ネットは、竜巻以外の自然現象によって原子炉補機冷却海水ポンプ等に波及的影響を及ぼさないことを確認する。

竜巻防護ネットに対する竜巻以外の自然現象（地震，津波含む）の影響を表10に示す。

竜巻防護ネットを設置する取水ピットポンプ室（コンクリート壁含む）及び原子炉補機冷却海水ポンプ出口ストレーナ室（コンクリート壁含む）の竜巻防護ネットの耐震評価方針については、設置許可基準規則第4条に対する適合状況説明資料『設計基準対象施設について（第4条 地震による損傷の防止）』で説明する。

表 10 竜巻防護ネットに対する竜巻以外の自然現象（地震、津波含む）の影響

事象	確認結果	考慮の 要否
風（台風）	・風（台風）の荷重を考慮する ・風による振動の影響を考慮する	—
凍結	・設備構造上、凍結の影響を受けない	—
降水	・構内排水施設により排水することで設備が浸水することはない	—
積雪	・積雪荷重を考慮する	—
落雷	・電気設備を持たないことから電氣的影響を受けない	—
地滑り	追而 （地滑りについて、当社空中写真判読、公刊の地滑りに関する知見等を踏まえ、再評価を行うため）	
火山の影響	・降下火砕物の荷重を考慮する ・腐食に対しては金属材料を用い、亜鉛メッキや外装塗装を実施していることから短期的な影響は小さい ・設備構造上、降下火砕物による閉塞・摩耗・電氣的影響を受けない	—
生物学的事象	・設備構造上、生物学的事象の影響を受けない	—
森林火災	・防火帯により、森林から約 300m の離隔がある ・設備構造上、ばい煙による影響を受けない	—
地震	・地震の荷重を考慮する （第 4 条 地震による損傷の防止）参照	○ （荷重）
津波	・基準津波は津波防護施設及び浸水防止設備により敷地内に到達することはないため、荷重・浸水の影響を受けない （第 5 条 津波による損傷の防止）	—

(2) 設計条件

竜巻以外の自然現象による波及的影響の評価の条件を以下に示す。

a. 荷重条件

(a) 地震荷重

波及的影響の評価は基準地震動 S_s による地震力に対して実施する。

b. 荷重の組合せ

荷重の組合せは「泊発電所 3 号炉外部事象の考慮について」に示す自然現象の組合せの方針に従い、以下のとおりとする。

(a) 地震荷重＋風荷重

地震と風については、ともに最大荷重の継続時間が短く、同時に発生する確率は低い。また、竜巻防護ネットは風荷重の影響が大きいと考えられるような構造や形状の施設でないため、地震荷重と風荷重との組合せは考慮しない。

6. 竜巻随件事象に対する評価

(1) 火災

竜巻随件事象として、建屋外については、発電所敷地内の屋外にある危険物

貯蔵施設等の火災がある。火災源と竜巻防護ネットの位置関係を踏まえて火災の影響を評価（「6条（外部火災）」により評価）した上で、竜巻防護ネットが原子炉補機冷却海水ポンプ等に波及的影響を及ぼさない設計とする。

また、竜巻防護ネットは発火性、引火性のある物質を使用しないため、火災の原因とはならない。

(2) 溢水

建屋外については、設計竜巻による飛来物の衝突による屋外タンク等の破損に伴う溢水を想定されるが、竜巻防護ネットは構造上、溢水により機能を損なわないため、溢水により竜巻防護ネットが原子炉補機冷却海水ポンプ等に波及的影響を及ぼすことはない。

また、竜巻防護ネットは液体を内包する構造でないため、溢水の原因とはならない。

(3) 外部電源喪失

設計竜巻又は設計竜巻と同時に発生する雷又はダウンバースト等の影響により外部電源喪失が想定されるが、竜巻防護ネットは、電源を用いておらず、外部電源喪失の影響を受けないため原子炉補機冷却海水ポンプ等に波及的影響を及ぼすことはない。また、竜巻防護ネットは飛来物化せず、送電網に関する施設等を損傷させることはないから、外部電源喪失の原因とならない。

7. 竜巻防護ネットの維持管理について

竜巻防護ネットは、原子炉補機冷却海水ポンプ等を竜巻による飛来物から防護する機能及び、原子炉補機冷却海水ポンプ等に波及的影響を与えないための設備であることから、設置環境や部材の劣化、故障モード等を踏まえた管理基準を定め、保全計画を策定し、点検を実施することにより、適切に設備の維持管理を実施する。

原子炉補機冷却海水ポンプ等の点検時には、竜巻防護ネットの取外し、取付けを実施することから、接続部の健全性を確認して据付を実施する。

また、予備品の確保等により、部材が損傷した場合であっても、速やかに補修が行えるようにする。

8. 設置許可段階と工認段階における説明内容

設置許可段階では、竜巻防護ネットの構造成立性に係る設計方針を説明した。詳細設計段階では、設置許可断面の設計方針を踏まえて詳細設計を行い、竜巻防護ネットの強度計算結果を説明する。

竜巻防護ネットの吸収エネルギーの評価

1. 竜巻防護ネット

(1) 金網の設置方法及び吸収エネルギーの評価方針

海水ポンプ室の開口部周囲に口状に架台を設置し、その上に防護ネットを設置する。竜巻防護ネットはH形鋼等を用いたフレームに取付け、フレームへの金網の取付け部については、金網の4辺をワイヤロープで支持し、ワイヤの両端をフレームにボルトで締結する構造とする。

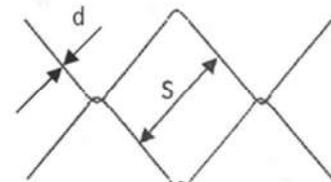
金網の吸収エネルギーの評価に当たっては、金網が捕捉可能な飛来物のエネルギーの最大値(限界吸収エネルギー)を算定し、飛来物や風荷重等によりネットに作用するエネルギーが限界吸収エネルギーを超えないことを確認する。

(2) 金網の諸元

H形鋼による鉄骨構造物の上面に海水ポンプエリア開口部には主金網として 50mm 目合の高強度金網を 2 枚重ねで設置する。

海水ストレナエリア開口部には 40mm 目合の高強度金網を 2 枚重ねで設置する。

- ・名称：高強度金網
- ・材質：JIS G3506 硬鋼線材 (SWRH62A)
- ・素線径 d ：4 mm
- ・素線の目合い (網目の大きさ) S ：40mm または 50mm
- ・素線の引張強さ：1400N/mm²
- ・耐火性：材料として鋼材使用により耐火性あり
- ・耐食性：亜鉛メッキ



(3) 防護対象飛来物

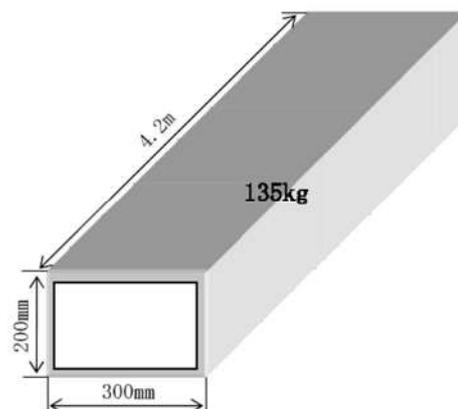
防護対象飛来物は、設計飛来物の内、最もエネルギーの大きい鋼製材とする。
諸元は以下のとおり。

鋼製材

- ・飛来物形状：0.2m × 0.3m × 4.2m
- ・飛来物質量 M ：135kg
- ・衝突速度 水平速度 V_H ：57m/s
鉛直速度 V_V ：38m/s
- ・衝突エネルギー

$$\text{水平方向：} E_H = \frac{1}{2} \times M \times V^2 = 219.4 \text{ kJ}$$

$$\text{鉛直方向：} E_H = \frac{1}{2} \times M \times V^2 = 97.5 \text{ kJ}$$



(4) 金網の強度設計

a. 金網のたわみ量算定

金網の目合い寸法(S)が50mmの場合は, 対角距離は71mmとなり, 金網1m当たりの目合い数は14個となる。

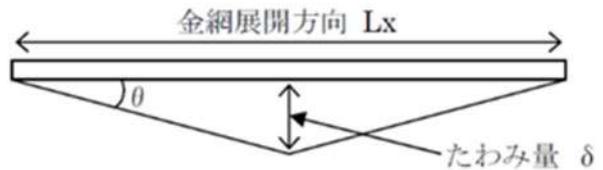
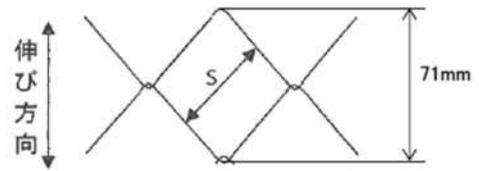
図1に示す1400N級金網の荷重試験の交点/荷重-伸び曲線より, 金網の破断荷重は15kN, 破断時の1目合い当たりの金網の伸び量は

20mmとなる。このとき, 最大たわみ量 δ_{max} は,

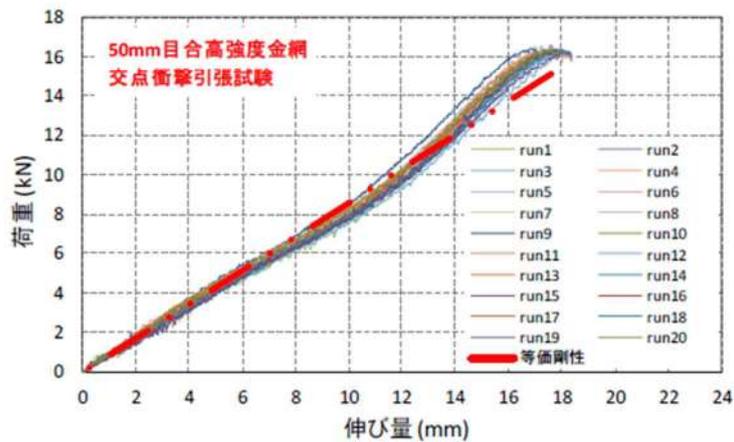
$$\delta_{max} = \frac{Lx}{2} \cdot \tan(\theta_{max})$$

$$\theta_{max} = \cos^{-1}\left(\frac{71}{71+20}\right) = 38.8 \text{ deg}$$

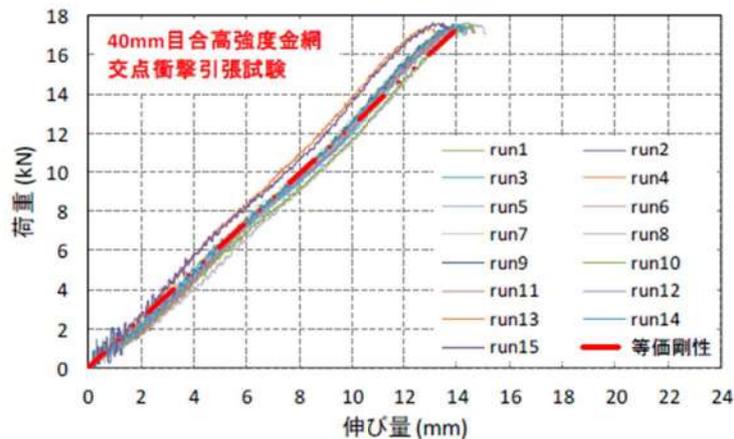
で求められる。



b. 金網の吸収エネルギーの検討



(50mm 目合金網)



(40mm 目合金網)

図1 金網の荷重-伸び曲線

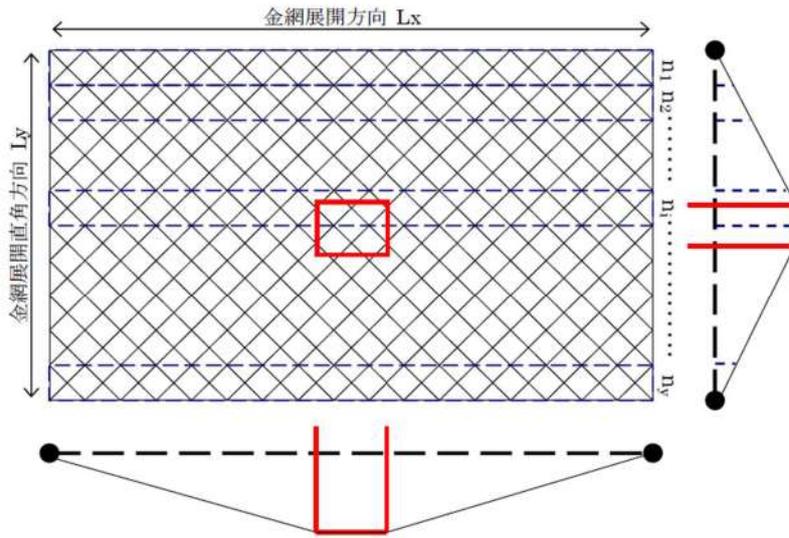


図2 金網の評価モデル

図2に示すように、金網を展開直角方向に1目合い毎に [] で囲った形に帯状に分割し、n1 から ny までの各列が分担するエネルギーを、各列のたわみ量から算定し、それらを積算することにより金網の吸収するエネルギーを評価する。

各列の吸収するエネルギーは、図1の荷重-伸び曲線から、50mm目合いの金網は1目合い毎に等価剛性 858kN/m、40mm目合いの金網は1目合い毎に等価剛性 1239kN/m を持つばねを $N_x(L_x/71\text{mm})$ 個直列につなげた状態と模擬できる。

このとき50mm目合いネット1つの列の剛性(金網展開剛性 K_x)は、
 金網展開剛性 $K_x = 858/N_x$

となる。I番目の列における張力 P_i は、

$$P_i = 2K_x \cdot \left(\frac{X_i}{2}\right) = K_x \cdot X_i$$

となり、従って作用力 F_i は、

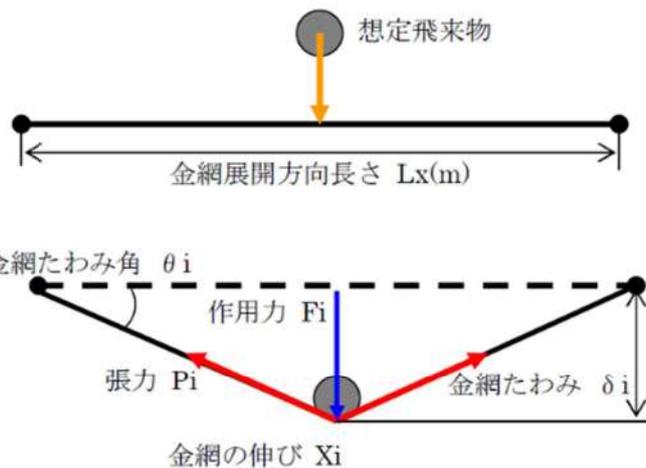
$$\begin{aligned} F_i &= 2P_i \cdot \sin(\theta_i) \\ &= 2K_x \cdot X_i \cdot \sin(\theta_i) \\ &= 2K_x \cdot X_i \cdot (\tan(\theta_i) - \sin(\theta_i)) \\ &= 4K_x \cdot \delta_i \cdot \left(1 - \frac{L_x}{\sqrt{4\delta_i^2 + L_x^2}}\right) \end{aligned}$$

となる。

i番目の列における吸収エネルギー E_i は、

$$\begin{aligned} E_i &= \int F_i d\delta_i = \int 4K_x \cdot \delta_i \cdot \left(1 - \frac{L_x}{\sqrt{4\delta_i^2 + L_x^2}}\right) d\delta \\ &= 2K_x \cdot \delta_i^2 - K_x \cdot L_x \left(\sqrt{4\delta_i^2 + L_x^2} - L_x\right) \end{aligned}$$

となり、限界吸収エネルギー E は、各列の吸収エネルギー E_i を第1列から第 n_y 列まで積算することにより求められる。



$$E = \sum_{i=1}^{n_y} E_i$$

金網は2枚重ねで使用することから、2枚重ねの金網により吸収できるエネルギーは上記を2倍したものとなる。また、防護対象物と金網の離隔距離を、金網の最大たわみ量以上確保することにより、金網と防護対象物との接触を防止する。

c. 風による影響の検討

竜巻襲来時には、竜巻防護ネットも風圧力の影響を受けた状態で飛来物を受け止める必要がある。そのため、風速 V_D (=100m/s) の風圧力により防護ネットが受ける影響を以下のとおり評価する。

金網の吸収エネルギーの評価と同様に、金網を展開直角方向に1目合い毎に帯状に分割し、その1つの列に作用する風圧力を考える。分割された1列における金網の素線の投影面積 A は、素線径 d : mm, 素線の目合い(網目の大きさ) S : 50mm であることから、分割された1列に作用する風圧力 P_D は、次の式で求められる。

$$P_D = \left(\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V_D^2\right) \cdot G \cdot C \cdot A = 62.12Lx \text{ [N/m]}$$

空気密度 $\rho = 1.22\text{kg/m}^3$

ガスト影響係数 $G = 1.0$

風力係数 $C = 0.9$

$$\text{投影面積 } A = \frac{4}{1000} \cdot \left(4 \cdot \frac{50}{1000}\right) \cdot \frac{1000Lx}{50\sqrt{2}}$$

この風圧力 P_D がすべて金網展開方向 Lx の中央に作用したとして、ネットにかかる作用力の式及びネットの吸収エネルギーの式を用いて、1列あたりの風荷重によりネットが受けるエネルギーを算出し、列数倍することでネット全体が風荷重により受けるエネルギーを算出する。

$$F = P_D = 4Kx \cdot \delta \cdot \left(1 - \frac{Lx}{\sqrt{4\delta^2 + Lx^2}}\right)$$

$$E = 2Kx \cdot \delta^2 - Kx \cdot Lx \left(\sqrt{4\delta^2 + Lx^2} - Lx\right)$$

d. 金網の最大たわみ量及び限界吸収エネルギー算定結果

原子炉補機冷却海水ポンプエリア上部開口部と原子炉補機冷却海水ポンプ出口ストレーナエリア上部開口部の防護対策の平面図を図3に示す。また、図4に示す割振りに基づき海水ポンプ室防護対策で使用するネットの寸法と最大たわみ量及び限界吸収エネルギーは、以下のとおり。

表1 竜巻防護ネットのたわみ量と限界吸収エネルギー

ネット	海水ポンプエリア上部開口部		海水ストレーナエリア上部開口部	
	A トレン	B トレン	海側	山側
展開方向	5.02[m]	5.01[m]	4.440[m]	4.435[m]
直角方向	4.635[m]	4.635[m]	2.62[m]	2.62[m]
限界吸収エネルギー	307.4[kJ]	310.3[kJ]	244.7[kJ]	244.1[kJ]
自重と風荷重によるエネルギー	9.4[kJ]	9.2[kJ]	4.1[kJ]	4.1[kJ]
設計飛来物の衝突エネルギー (鋼製材：135kg, 速度 38m/s)	97 [kJ]			
作用する全エネルギー	106.4[kJ]	106.2[kJ]	101.1[kJ]	101.1[kJ]
たわみ量	1.88[m]	1.87[m]	1.65[m]	1.65[m]
最小離隔距離	3.5[m]	3.5[m]	4.6[m]	4.6[m]

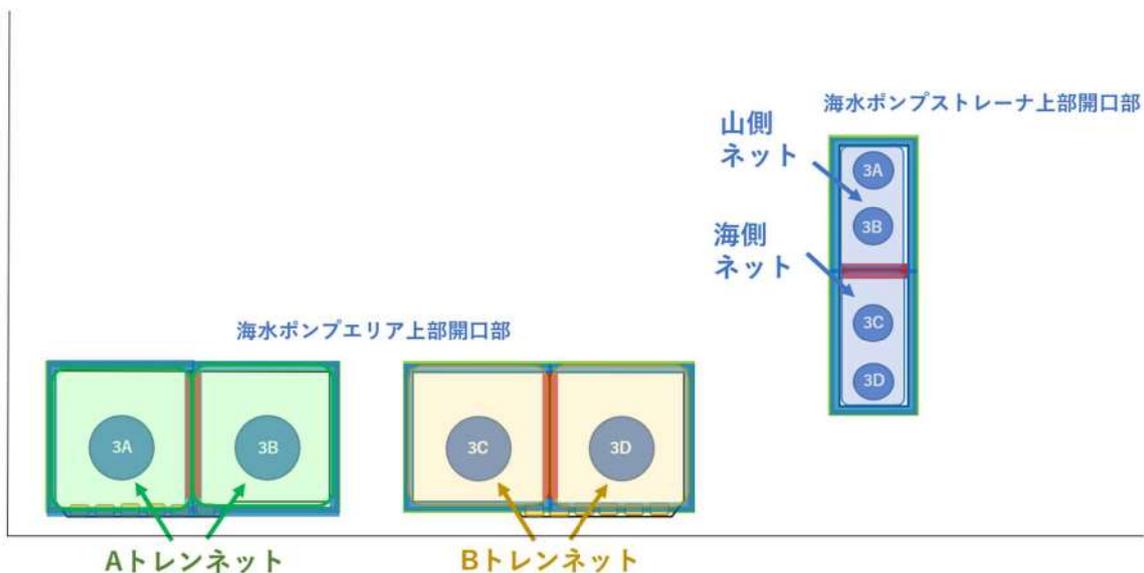


図3 竜巻防護ネット 平面図

電中研の金網強度評価試験結果

1. 試験方法

竜巻飛来物から外部事象防護対象施設を防護するためのネットに使用する金網について、図1に示す装置を用いて重錘を防護ネットに自由落下させて防護ネットの吸収エネルギーの確認を行った。

試験は1 m×1 mの金網による予備試験と、より実機形状に近い4 m×3 mの金網2枚を展開方向が直角になるように重ねた試験体による大型自由落下試験を実施した。

予備試験は、防護ネットの候補材選定も兼ねて実施し、1 m×1 mの防護ネットにおいて要求される吸収エネルギー(12kJ~13kJ)を、試験装置の最大落下高さ約40mからの自由落下で模擬するため、φ210mm、質量37.8kgの鉄球を用いて実施した。

大型自由落下試験においては、4 m×3 mの金網2枚で算定される吸収エネルギー(約250kJ)を20m程度の自由落下で模擬するため、φ500mm、質量1500kgの重錘を用いて実施した。

想定飛来物である、鋼製材、鋼製パイプが防護ネットに衝突した際には、飛来物の衝突面がネットに包み込まれ防護ネットによりエネルギーが吸収されると同時に、飛来物側もネットへの衝突の衝撃で変形しエネルギーの一部を吸収することとなるが、本試験ではネットに包み込まれる部分が球状の錘を用いて実施することにより飛来物側に変形が生じないことから、飛来物のエネルギーをすべて防護ネットで吸収させてネットの性能を確認している。

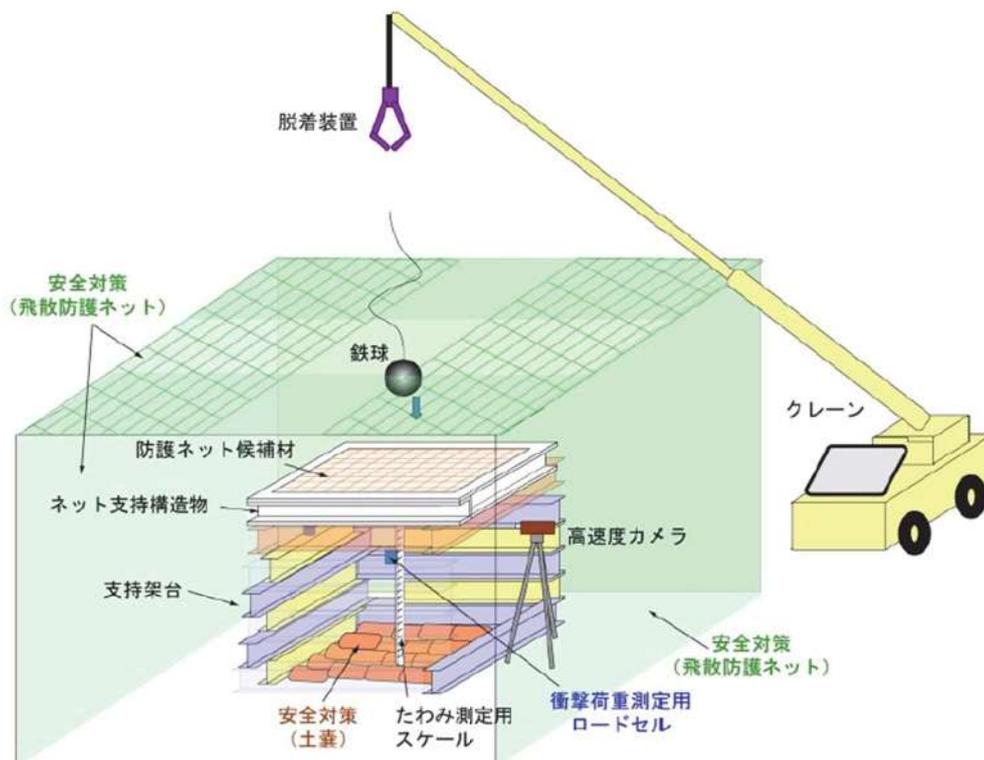


図1 自由落下試験装置

2. 予備試験条件

- ・金網緒元：名称：高強度金網
 材料：JIS G3506 硬鋼線材 (SWRH62A)
 素線径 d : 4 mm
 素線の目合い (網目の大きさ) S : 50mm
 素線の引張強さ : 1,400N/mm²
 寸法 : 1 m × 1 m
 ワイヤ支持条件 : 固定支持 (緩衝装置なし) , 可動支持 (緩衝装置なし)
- ・重錘緒元：形状 : ϕ 210mm 鉄球
 質量 : 37.8kg
 落下高さ (エネルギー) : 21m (7.8kJ) ~ 41m (15.2kJ)

3. 予備試験結果及び吸収エネルギー評価式との比較

予備試験結果と限界吸収エネルギー評価式との比較を図2に示す。限界吸収エネルギーの算定値は12.1kJとなる。試験結果では、固定支持の条件では12.6kJまで貫通しないことが確認され、可動支持の条件では15.2kJまで貫通しないことが確認されたことから、限界吸収エネルギーの評価方法は妥当であると考えられる。

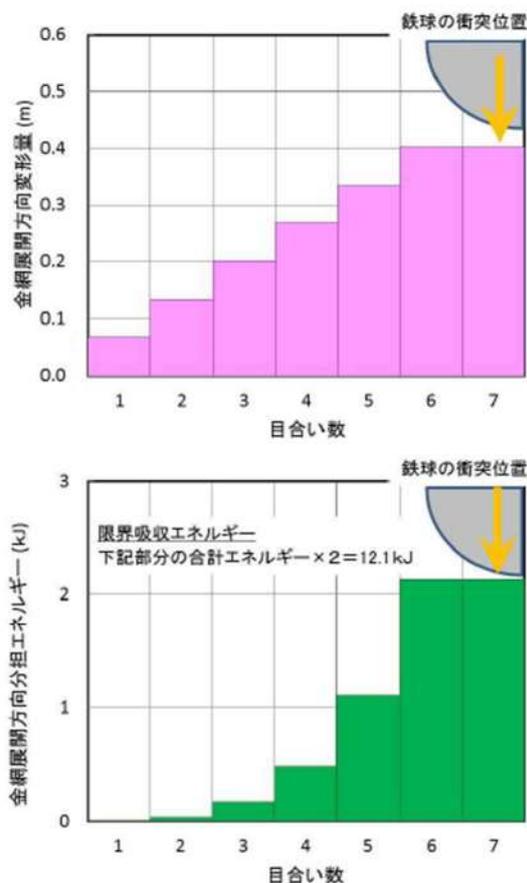


図2 予備試験結果と吸収エネルギー評価式との比較

枠囲みの内容は機密情報に属しますので公開できません。

4. 大型自由落下試験条件

- ・金網緒元：名称：高強度金網

 - 材料：JIS G3506 硬鋼線材 (SWRH62A)

 - 素線径 d : 4 mm

 - 素線の目合い (網目の大きさ) S : 50mm

 - 素線の引張強さ : 1,400N/mm²

 - 寸法 : 4 m × 3 m 及び 3 m × 4 m の 2 枚重ね

 - ワイヤ支持条件 : 可動支持 (緩衝装置あり)

- ・重錘緒元：形状： ϕ 500mm 円柱 (先端半球)

 - 質量 : 1500kg

 - 落下高さ (エネルギー) : 15.4m (252kJ) ~ 17m (279kJ)

5. 大型自由落下試験結果及び吸収エネルギー評価式との比較

図3に4m×3mの金網の限界吸収エネルギー算定の模式図を、図4に3m×4mの金網の限界吸収エネルギー算定の模式図を、図5に大型自由落下試験結果を示す。

4m×3mの金網の限界吸収エネルギーは112.6kJ、3m×4mの金網の限界吸収エネルギー103.7kJとなり、これらの金網を重ね合わせて設置したときの限界吸収エネルギーは216.3kJとなる。大型試験では、参考を示す緩衝材を4体設置して実施しており、この緩衝材による吸収エネルギーが37.6kJとなるので、限界吸収エネルギーはこれらを合計した253.9kJと算定される。試験では、257kJまで貫通しないことが確認されたことから、限界吸収エネルギーの評価方法は妥当であると考えられる。

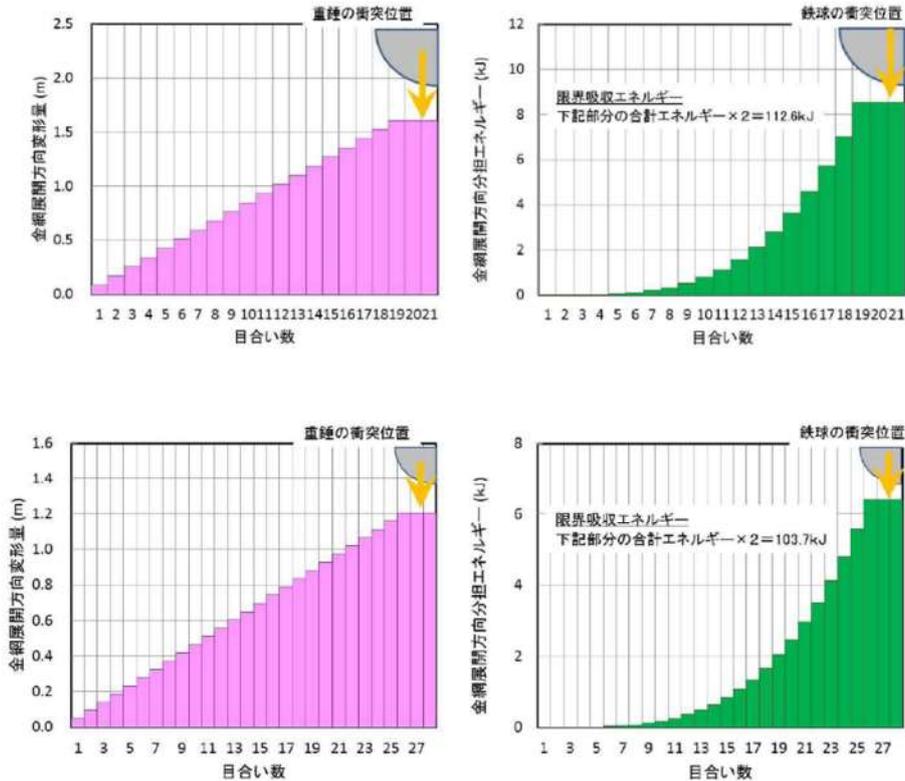


図4 3m×4m金網の限界吸収エネルギー算定模式図



図5 大型自由落下試験結果

枠囲みの内容は機密情報に属しますので公開できません。

6. まとめ

1 m×1 mの高強度金網を用いて実施した予備試験，及び3 m×4 mの高強度金網を用いて実施した大型自由落下試験の錘の落下エネルギー (E_{Drop}) と，金網の限界吸収エネルギーの評価式を用いて算定した金網の吸収エネルギー (E_{Design}) との比較を図6に示す。

$E_{\text{Design}} > E_{\text{Drop}}$ の領域においては，予備試験，大型自由落下試験のいずれの試験においてもネットの貫通はなく錘を捕捉できていることから，金網の限界エネルギーの評価式は妥当であると考えられる。



図6 E_{Design} と E_{Drop} の比較結果

 枠囲みの内容は機密情報に属しますので公開できません。

緩衝材の原理と吸収エネルギー

1. 緩衝材の構造及び設置方法

図1に示すように、金網を固定するフレームの4隅に緩衝材を設置し、金網を固定するワイヤを緩衝材に沿わせて設置することにより、緩衝材内部の部材の塑性変形によりエネルギーを吸収する。

緩衝材1体当たり 約 9.4kJ の吸収エネルギーを有しており、4体で 約 37.6kJ のエネルギーを吸収することが出来る。図2に金網、ワイヤロープ及び緩衝材の取り付けイメージ図を示す。

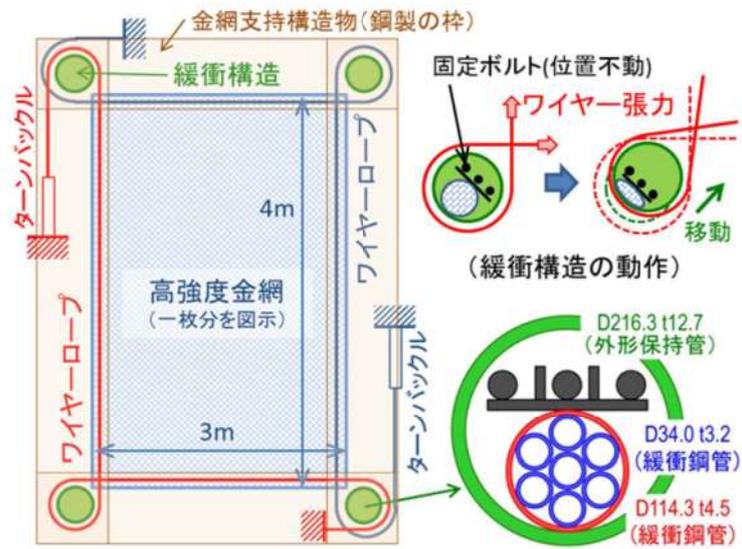


図1 緩衝材の構造及び設置方法



図2 金網、ワイヤロープ及び緩衝材の取り付けイメージ図

枠囲みの内容は機密情報に属しますので公開できません。

2. 緩衝材による地震時の影響

緩衝材を設置することにより、飛来物衝突時の金網の吸収エネルギーに余裕を与えることができるが、地震時に金網に作用する地震力により緩衝材が塑性変形すると、金網を固定しているワイヤにたるみが生じ、金網が大きく揺れることにより原子炉補機冷却海水ポンプ等に影響を及ぼす可能性がある。

緩衝材が塑性変形し動作したとき外形保持管は斜め方向に 70mm 移動するため、保守的に金網展開方向、金網展開直角方向の各々について、ワイヤ支持間隔が両側で 70mm ずつ短くなったものとして金網のたわみ量を評価した。金網展開方向長さ 5.01m、金網展開直角方向長さ 4.635 m の金網について、地震時に緩衝材が塑性変形しワイヤにたるみが生じたときの金網展開方向のたわみ量は 0.42m、展開直角方向のたわみ量は 0.40m となり、保守的にこれらのたわみ量を足し合わると 0.82m となる。防護ネットと原子炉補機冷却海水ポンプ等との離隔距離は約 2.6 m あるため、地震時に緩衝材が動作してワイヤにたるみが生じ金網が大きく揺れる状態になったとしても原子炉補機冷却海水ポンプ等に影響を与える恐れはない。

なお、地震等による緩衝材の塑性変形が確認された場合には、緩衝材の取替えを実施する。

飛来物のオフセット衝突時の影響評価

1. 展開方向オフセット衝突時の飛来物の挙動を検討する仮定

オフセット衝突による影響検討においては、衝突時の飛来物と高強度金網の挙動を以下のように仮定する。

- 1) 高強度金網展開方向の交点列の張力は常に均一である。
- 2) 衝突後の飛来物と金網は衝突点で一体となって挙動する。
- 3) 最大変形時の金網全長は破断時展開長とする。

以上の過程から、破断時の金網の全長は飛来物の衝突位置に因らず、破断時展開長で一定となり、最大変形時の衝突点 P' の軌跡は楕円形状となる。

以下の設定条件におけるオフセットの影響を試算する。

- ・ 金網諸元：50mm 目合い，素線径 4mm，破断強度 1400N/mm² 級
- ・ 破断ひずみ：0.283
- ・ 展開長：4000mm
- ・ 破断時展開長さ 513mm

2. 展開方向オフセット衝突時の吸収エネルギー評価

前項での条件とした場合に、飛来物が中央から 1.2m オフセット衝突した場合の飛来物の挙動を図 1 に示す。展開方向長さ 4 m の金網の中央を原点にして、金網固定点を座標 (-2000, 0)，(2000, 0) としたときの、Y 軸方向に飛来した飛来物により金網が最大変形したときの飛来物停止位置 P' の軌跡このときの点 P' の軌跡は楕円となり、次の式で表される。

$$\text{点 } P' \text{ の軌跡 } \frac{x^2}{2566^2} + \frac{y^2}{1607^2} = 1$$

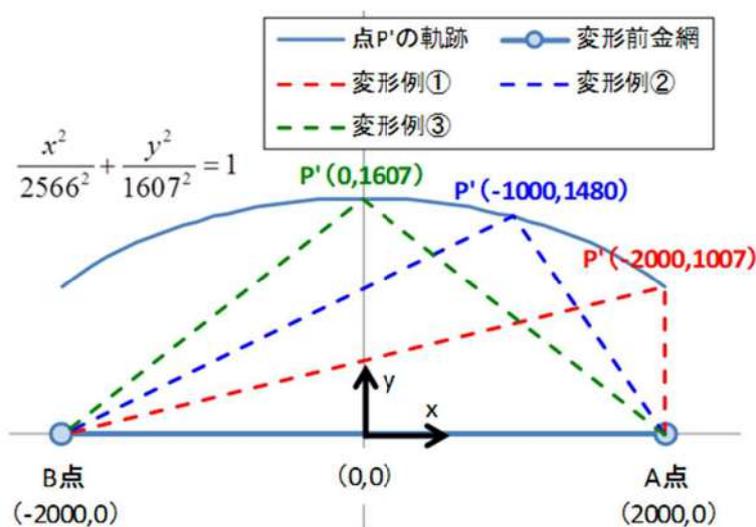


図 1 展開方向長さ 4m の金網における衝突点の軌跡

図2において、y軸方向に進行する飛来物がオフセット位置で金網に衝突し、金網がたわみ始めると、衝突位置左右の金網のx軸方向張力の差分により飛来物は金網の中心離れる方向に横方向の力を受け、図3のように飛来物は金網の中心から外れる方向に向かい、図1で示した金網が最大変形した楕円軌道上で停止する。4mの展開方向長さの金網の場合、中央に衝突したときにはy軸方向の最大たわみは1.6mであるが、オフセット長1.2mの場合には最大たわみは1.0mとなる。

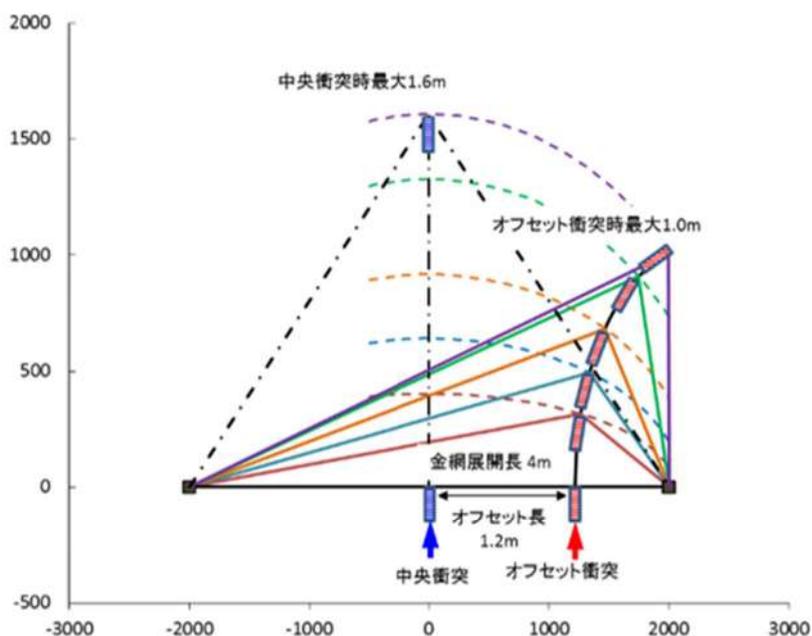


図2 オフセット衝突した飛来物の軌跡

飛来物がオフセット位置に衝突した場合、飛来物のエネルギーは、垂直方向と水平方向に分解され、その各々が金網の吸収エネルギーに変換されることとなる。オフセット衝突時の水平方向寄与分、垂直方向寄与分の各々についての金網の吸収エネルギーを4mの金網について算定したものをたわみ量を横軸にとりグラフ化したもの図4に示す。

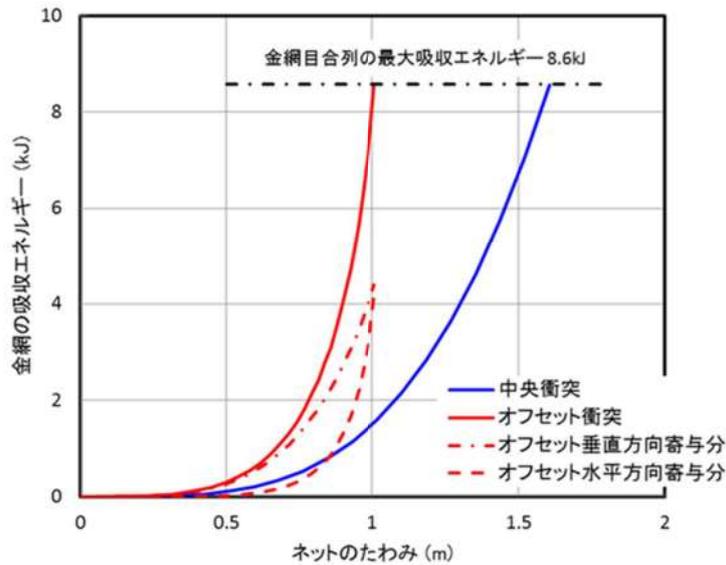


図3 オフセット衝突時の吸収エネルギー

図4から、飛来物が展開方向にオフセット位置に衝突した場合には、最大たわみ量はオフセット位置から短い側の金網の最大伸び量に制限されるが、金網の最大吸収エネルギーは、飛来物が垂直方向に金網を引っ張ることによるエネルギーと、水平方向に引っ張ることによるエネルギーとの合計となり、その値は中央部に衝突した場合の吸収エネルギーと等価になると考えられる。

3. 展開直角方向オフセット衝突時の吸収エネルギー評価

飛来物が金網展開直角方向にオフセットして衝突した場合の金網の吸収エネルギーへの影響について検討した。

検討は、金網展開方向長さ4 m、展開直角方向長さ3 mの金網について、図5に示すように金網中央に衝突した場合(①)をベースとして、展開直角方向端部(②)展開直角方向1/4オフセット(③)の3ケースを比較することで行った。

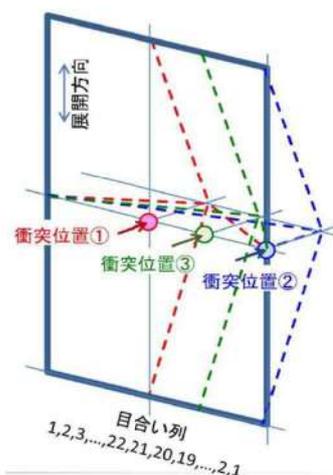
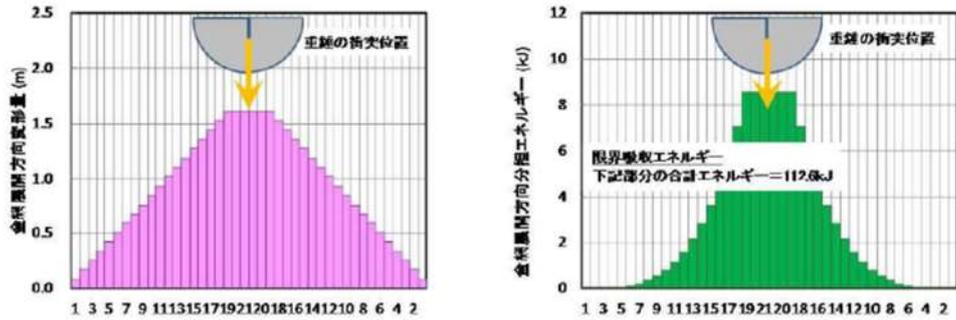
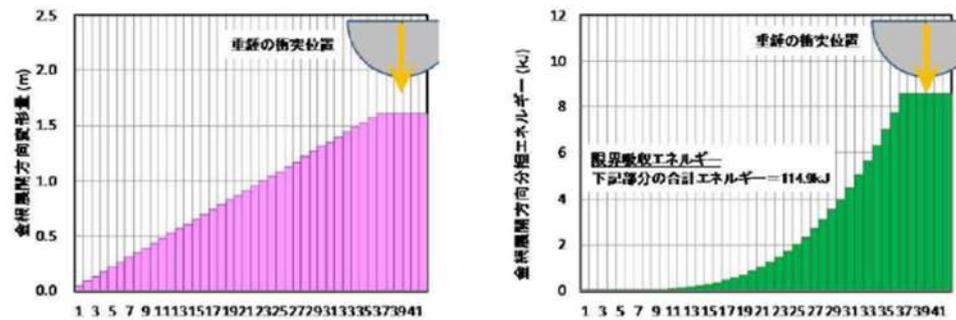


図4 金網展開直角方向オフセットの検討ケース

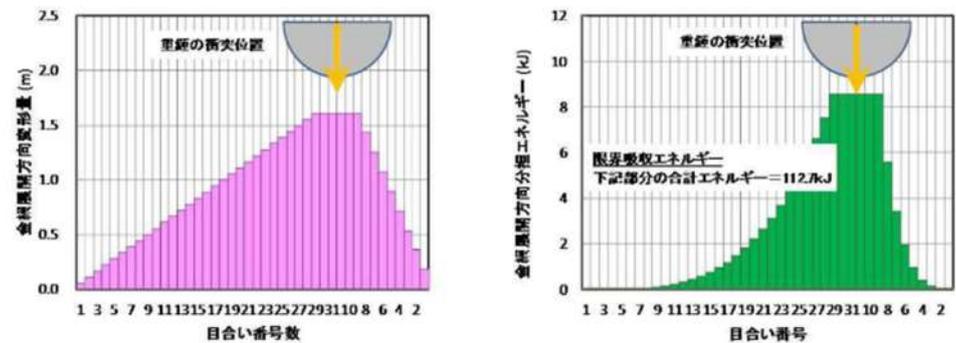
各ケースにおける金網の限界吸収エネルギーの算定結果を以下に示す。



衝突位置①（中央）



衝突位置②（端部）



衝突位置③（1/4 オフセット）

各衝突位置における金網の限界吸収エネルギーの算定の結果、僅かではあるが中央に衝突した場合より端部に衝突した場合のほうが限界吸収エネルギーは大きくなる結果となった。これは中央からオフセットしたことで、衝突位置からオフセットとは反対側の金網の固定位置（図6の赤く塗った部分）までの距離が長くなり、飛来物の衝突により金網が大きく変形する範囲が増えるため吸収エネルギーが大きくなったものと考えられる。したがって、展開直角方向のオフセットに関しては、金網の中央部が最も保守的な限界吸収エネルギーの評価値となる。

衝突位置	限界吸収エネルギー（1枚分）
①中央	112.6kJ
②端部	114.9kJ
③1/4 オフセット	112.7kJ

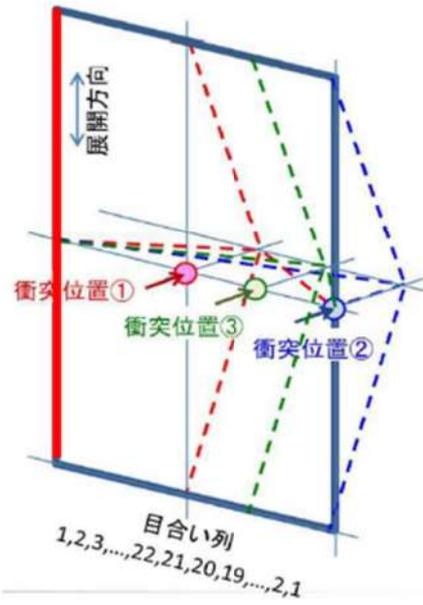


図5 衝突位置と金網固定位置の関係

飛来物衝突部における金網の局部貫通評価

竜巻防護ネット（以下、防護ネットと言う）に飛来物が衝突した際に、飛来物により金網に局部貫通が生じないことを次の手順で確認した。

- ① 飛来物衝突による衝突荷重の算定
- ② 衝突部の金網から素線一本あたりの荷重を算出
- ③ 素線一本あたりの荷重が破断荷重以下であることを確認

① 飛来物衝突による衝突荷重の算定

鋼製材が 4 m × 3 m の防護ネットに衝突したときの衝撃荷重を次のように算定した。

金網の吸収エネルギーの評価式と同様にネットをバネが直列につながったものとモデル化し、飛来物が防護ネットに衝突する際の速度を、飛来物の水平速度 57m/s を切り上げて 60m/s、飛来物の質量を m とすると、衝突後に飛来物に作用する衝撃荷重 F 、時間 t 秒後の飛来物の速度 v 及び変位量 d は以下の式で表される。

$$F = Qt$$

$$v = -\frac{1}{m} \int Qt = -\frac{Qt^2}{2m} + 60$$

$$d = \int \left(-\frac{Qt^2}{2m} + 60 \right) dt = -\frac{Qt^3}{6m} + 60t$$

ここで、最大変異 d_{max} に到達したときの飛来物の速度 $v=0$ であるから、

$$-\frac{Qt^2}{2m} + 60 = 0$$

より

$$Qt^2 = 120m$$

$$d_{max} = -\frac{Qt^3}{6m} + 60t = -\frac{120mt}{6m} + 60t = -20t + 60t = 40t$$

したがって

$$t = \frac{d_{max}}{40} \quad F = Qt = \frac{120m}{t}$$

となる

鋼製材の質量 $m = 135 \text{ kg}$ 、

4 m × 3 m の金網における最大たわみ量

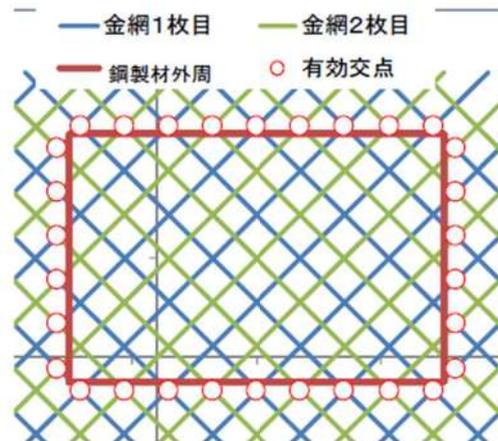
$$d_{max} = \frac{4}{2} \tan(38.8^\circ) = 1.608 \text{ [m]}$$

衝突時間： $t = 0.040 \text{ [sec]}$ ， 衝撃荷重： $F = 405 \text{ [kN]}$

② 衝突部の金網から素線一本あたりの荷重を算出

鋼製材の寸法は0.2m×0.3m×4.2m, 防護ネットは目合い長さ50mmの金網を目合いが交互になるように2枚重ねて設置することから, 右の図のように鋼製材が防護ネットに衝突したときの鋼製材外周近傍の金網交点は30点となるので, 衝撃荷重を受け止める金網の素線本数は, 30本となる。

従って, 素線1本あたりの荷重は, 13.5kNとなる。



③ 素線一本あたりの荷重が破断荷重度以下であることを確認

防護ネットに使用する金網の素線の破断荷重は, 荷重試験の交点/荷重-伸び曲線より15kNであるので, 素線1本あたりの荷重<破断荷重となり, 鋼製材による金網の局所的な貫通は発生しない。

網目より小さい飛来物の対策

飛来物は飛散防止対策を行うことから飛来の可能性は低いですが、設計飛来物のうち鋼製パイプについては、工事等の足場材として使用されており、飛散の可能性を否定しきれない。鋼製パイプは直径 50mm であるため、50mm 目合いの網目をすり抜ける可能性がある。そのため、40mm 目合い寸法の金網を設置し、鋼製パイプが竜巻飛来物防護対策設備内部に侵入することを防止する。

また、極小飛来物の設計飛来物として考えている砂利（0.04m×0.04m×0.04m）が竜巻防護施設に衝突してもその衝突時間は非常に短いため、設備に有意な応力は生じないことを確認していることから、設計飛来物より小さい砂利が衝突しても外部事象防護対象施設に影響は与えない。

竜巻防護ネットの点検，管理方法について

竜巻防護ネットは，ネットの1目合いにおける荷重－伸び曲線の試験結果を直線で近似し，ネットを1目合い毎のバネが連結したものと仮定し吸収エネルギーの評価を実施している。このため，たわみ等によるネットの大きな変形，ネットの傷，腐食があると，飛来物の衝突のエネルギーを吸収できなくなるおそれがある。このため，防護ネットの点検，管理方法について以下に検討した。

1. 防護ネットの劣化要因

ネットの飛来物捕捉性能を低下させるような劣化として，ネットの変形による吸収エネルギーの低下と，素線の傷，腐食による素線強度の低下が考えられる。

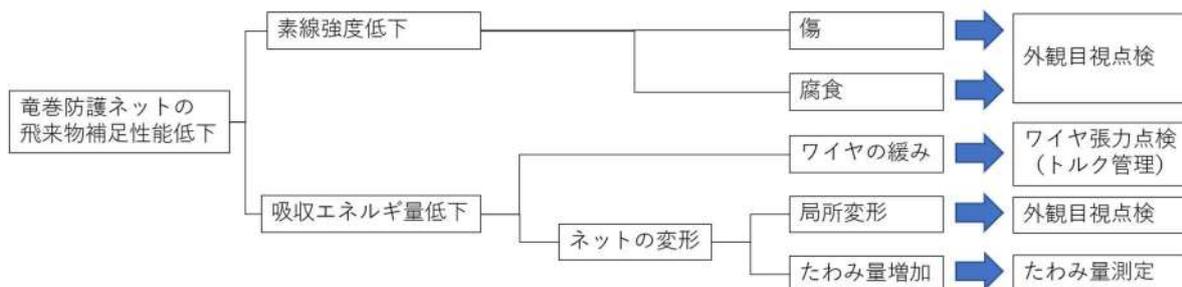
このうちのネットの変形に関しては，強風により異物が当たる等の要因で，ネットの一部に力が加わることによる局所的な変形と，ネットを固定しているワイヤの緩み，ネット自身の経年劣化によるたわみの増加が考えられる。

2. 防護ネットの点検，保守方法

素線の傷，腐食及び局所的な変形に対する点検として，定期的を目視によるネットの外観点検を実施し，素線の凹み傷や断線，腐食及び変形が見られた場合にはネットの取替えを検討する。

さらに，地震，火災によってもネットに傷，局所的な変形が生じる可能性がある。そのため，地震，火災のあとには損傷等，各部の異常の有無を点検し，素線の凹み傷や断線，局所的な変形等の異常があった場合には取替えを検討する。

ネットのたわみの増加に関しては，その要因としてネットを固定しているワイヤの緩み，ネット自身の経年劣化が考えられることから，定期的，防護ネットを固定しているワイヤの張力の点検，ネットのたわみ量の測定を実施し，管理基準を逸脱した場合にはワイヤの再緊張やネットの取替えを検討する。



3. 管理基準の検討

(1) ワイヤ張力の管理基準

ワイヤの張力に関しては、ネット設置時にワイヤロープの張力調整金具（ターンバックル）の締付けトルクをメーカー標準管理値の 20～25N・m で管理して設置することから、点検時においても管理基準値を 20～25 N・m で管理する。



ターンバックルの例

(2) ネットたわみ量の管理基準

a. 通常時にネットに作用する荷重

通常時においてネットには自重が作用することから、水平に張られたネットには自重によるたわみが発生する。

水平に張られたネットの自重によるたわみは、管理基準の検討においてネットの吸収エネルギーを低下させる要因として考慮する。

b. 竜巻襲来時にネットに作用する荷重

竜巻襲来時にネットに作用する荷重としては、竜巻の風速による荷重と飛来物の衝突による荷重が考えられる。

竜巻の風速による荷重によってネットがたわむことにより、ネットの吸収エネルギーの低下が考えられることから、風荷重によるたわみは、管理基準の検討においてネットの吸収エネルギーを低下させる要因として考慮する。

飛来物の衝突による荷重に関しては、発電所内の仮置き資材等について、できる限り発電所外での保管もしくは屋内での保管を実施すると共に、発電所内において屋外での保管が必要なものについては飛来物とならないように固縛を実施し、竜巻襲来時において、できる限り飛来物が発生しないようにすることとしている。このため、発電所に竜巻が襲来し、飛来物が防護ネットに2つ以上衝突する確率は極めて低いと考えられるが、管理基準の検討においては、水平に張られたネットについては、1つの飛来物がネットに衝突しネット上に残った状態で、2つ目の飛来物が衝突することを考慮する。

以上より、水平に張られたネットについては、自重、竜巻襲来時の風荷重、1つ目の飛来物の衝突荷重及び重量と2つ目の飛来物の衝突荷重の合計のエネルギーに相当するたわみ量を、ネットの最大たわみ量から差し引いた値を管理限界たわみ量とする。垂直に張られたネットは、竜巻襲来時の風荷重、1つ目および2つ目の飛来物の衝突荷重の合計のエネルギーに相当するたわみ量を、ネットの最大たわみ量から差し引いた値を管理限界たわみ量とする。

ネットのたわみ量の管理は、ネットを設置した時点の初期たわみ量を測定し、初期たわみ量からの増分がネットの管理限界たわみ量を超えないように適切な管理基準を定めて管理する計画である。

表1 竜巻防護ネットの管理限界たわみ量の評価結果

ネット	ネット寸法 (m)		最大たわみ 量 (m)	限界吸収エ ネルギー (kJ)	①風荷重によ るエネルギー (kJ)	②自重に相当 するエネルギー (kJ)	③衝突エネルギー [鉛直] (kJ)	④飛来物重量 に相当するエ ネルギー (kJ)	⑤合計 ①+②+③+④ (kJ)	⑥に相当す るたわみ量 (m)	管理限界た わみ量 (m)
	展開方向	× 直角方向									
海水ポンプエリア (Aトレン)	5.020	× 4.635	1.88	324.0	11.4	0.11	0.01	206.52	1.392	0.49	
海水ポンプエリア (Bトレン)	5.010	× 4.635	1.87	327.0	11.3	0.11	97.5×2	206.42	1.391	0.48	
海水ストレーナーエリア (海側)	4.440	× 2.620	1.65	251.7	5.9	0.05		200.96	1.336	0.31	
海水ストレーナーエリア (山側)	4.435	× 2.620	1.65	250.9	5.9	0.05	0.01	200.96	1.335	0.32	

解析コードについて

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

表 1 使用した解析コード

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

(1) 竜巻最大風速のハザード曲線による最大風速 (V_{B2}) の評価

項目	コード名	竜巻ハザード評価プログラム
開発機関		一般財団法人 電力中央研究所
開発時期		2014 年
使用したバージョン		Ver. 1.2 選定理由：解析時の最新バージョン
使用目的		竜巻最大風速ハザード曲線作成
コードの概要		<p>一般財団法人電力中央研究所にて開発・保守されているプログラムである。</p> <p>所定の地域における竜巻の発生数、竜巻風速、被害長さ・幅の確率分布を解析できるとともに、発電所等の構造物が所定の風速以上の竜巻に遭遇する確率等のハザード評価が実施できる。</p>
検証及び妥当性確認の内容		<p>竜巻ハザード評価プログラムは、竜巻最大風速のハザード曲線による最大風速の算定に使用している。</p> <p>【検証の内容】 本解析コードの検証の内容は次の通りである。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・統計量や確率分布について、他機関の算定例と同等の数値や分布形が得られることでコードの検証を行っている。 ・ハザード曲線について、理論解と同等の分布形が得られること、及び他機関が算定したハザード曲線と同傾向の曲線が得られることでコードの検証を行っている。 <p>【妥当性確認】 本解析コードは、竜巻最大風速のハザード曲線の算定を目的に開発されたコードであり、使用目的が合致している。また、竜巻最大風速 110m/s 程度の範囲において算定結果が妥当であることを確認している。以上より、本計算機コードを用いることは妥当である。</p>
その他（工認実績等）		<p>既工認での使用実績はない。</p> <p>なお、最新バージョンまでに解析に影響のある変更がないことを確認している。</p>

計算機コードの概要及び検証と妥当性確認の内容説明

竜巻ハザード評価プログラム

1. 一般事項

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

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

2. 本計算機コードの特徴

- (1) 気象庁「竜巻等の突風データベース」を基に、所定の地域における竜巻の発生数、竜巻風速、被害長さ・幅の確率分布を解析できるとともに、気象庁のデータを統合して疑似データを作成し、ハザード評価に用いることができる。なお、竜巻については、竜巻の観測数のデータ数が少ないこと、観測体制が年代により変遷していること、また竜巻の直接的な観測が現状困難であるため竜巻後の被害状況を調査・分析して観測結果としていることや観測の内容（Fスケール、被害長さ、被害幅、移動方向）が部分的に揃っていないことを考慮して、保守的な取扱いを行っている。
- (2) 構造物寸法等を与えることで、その構造物が所定の風速以上の竜巻に遭遇する確率等のハザード評価が実施できる。

3. 理論式

3. 1 統計解析

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

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

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

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

なお、疑似データの作成に当たっては、Fスケール不明竜巻を次のとおり取り扱い保守性を高めている。陸上で発生した竜巻及び海上で発生して陸上へ移動した竜巻については、被害があつ

て初めてそのFスケールが推定されるため、陸上でのFスケール不明竜巻は、被害が少ないF0竜巻と見なしている。一方、Fスケール不明の海上竜巻（水上で発生しその後上陸しなかった竜巻）については、その竜巻のスケールを推定することは困難である。そこで、「海岸線から海上5kmの範囲における海上竜巻の発生特性が、海岸線から内陸5kmの範囲における陸上竜巻の発生特性と同様である」という考え方にもとづいてFスケールに配分することで、例えば、F3竜巻等規模が大きな竜巻が観測数より多くなる取扱いとしている。

また、疑似的な竜巻の作成に伴う被害幅・長さの情報がない竜巻には、被害幅・長さを有する竜巻の観測値を与えているが、その際は、被害幅・長さが大きいほうから優先的に用いることで、被害幅・長さの平均値が大きくなるように工夫しているとともに、被害幅・長さ0のデータについては計算に用いない取扱いとしている。

次に、竜巻特性のそれぞれの確率分布は次式により求める。

(1) 発生数の確率分布

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

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

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

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

(2) 竜巻風速，竜巻被害長さ，竜巻被害幅の確率分布

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

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

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

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

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

3. 2ハザードの評価

(1) 被害面積の期待値

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

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

ここに、 w は竜巻の被害幅、 W は風速が V_0 以上となる被害幅、

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

V_{\min} は被害が発生する最小風速 (=25m/s) , l は被害長さ、 α は竜巻の移動方向、 $H(\alpha)$ と $G(\alpha)$ は竜巻の被害幅や長さ方向への竜巻影響エリア (あるいは構造物) の投影長さ、 S は竜巻影響エリアの面積である。

竜巻影響エリアを直径 D_0 の円形とした場合、 $H(\alpha)$ や $G(\alpha)$ は竜巻の移動方向には依存せず、一定値となる。

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

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

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

ここに、2変量・3変量の対数正規分布は次式で表される。

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

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

(2) 遭遇確率 (ハザード曲線)

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

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

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

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

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

(3) 被害面積期待値の数値積分

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

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

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

$$x_j = a + jh$$

式(10)の幅・長さの積分については、有限な範囲で打ち切らざるを得ないため、誤差に注意しながら、既往最大値及び相関係数も勘案して、 $3 \sim 4 \sigma_{1n}$ を目安に積分範囲を設定する。

なお、風速については、F4竜巻(93~116m/s)を考慮して、120m/sを積分上限としている。ただし、風速110m/s以上ではハザード曲線の傾向が変化する場合があることから、概ね110m/s程度がハザード評価の適用範囲と考えられる。

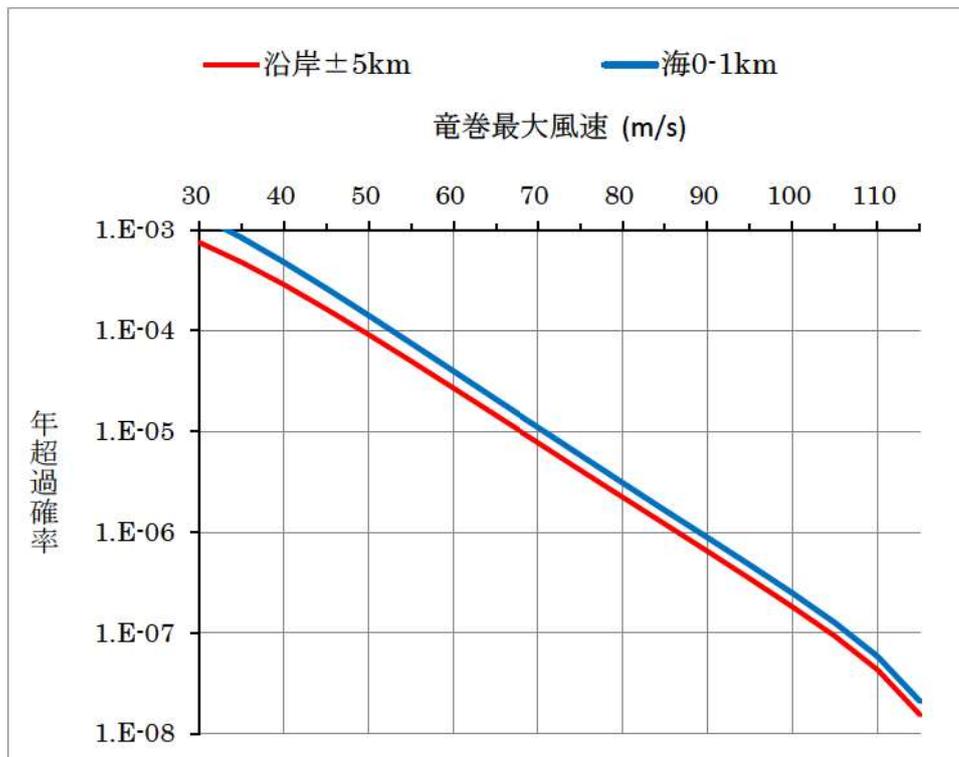


図1 竜巻最大風速のハザード曲線（泊）

(参考) 誤差に関する考察

今回の評価において、被害長さは $3.71\sigma_{ln}$ を積分範囲に設定している。被害長さの積分範囲を $4\sigma_{ln}$ とした場合、被害面積の期待値は約1.8%大きくなる。仮に $4.5\sigma_{ln}$ とした場合でも、被害面積の期待値は約3.1%大きくなる程度であり、 $3.71\sigma_{ln}$ とすることで概ねカバーできていることが分かる。

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

なお、竜巻最大風速のハザード曲線算定に関する保守性については、疑似データ作成におけるFスケール不明竜巻の取扱いにより、例えばF2スケールの竜巻の発生数について、観測実績のおよそ3.5倍に見積もっている。

また、疑似的な竜巻の作成に伴う被害幅・長さの情報がない竜巻には、被害幅・長さを有する竜巻の観測値を与えているが、その際は、被害幅・長さが大きいほうから優先的に用いることで、被害幅・長さの平均値が大きくなるように工夫しているとともに、被害幅・長さ0のデータについては計算に用いない等、保守性を高めた評価としている。

4. 解析フローチャート

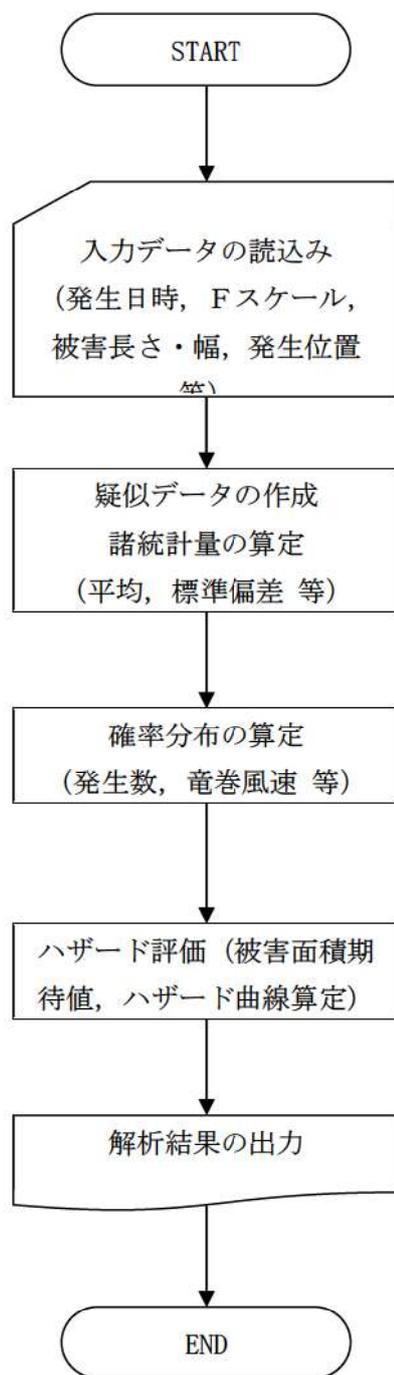


図2 解析フローチャート

5. コード検証

5. 1 統計解析

(1) 諸統計量

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

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

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

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

表 4・1 催眠剤と睡眠時間

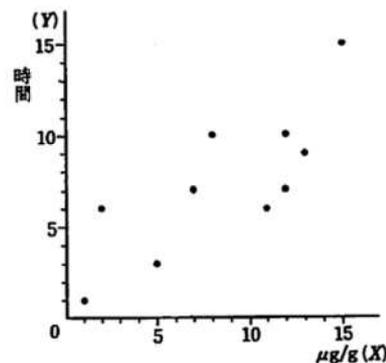


図 4・1 催眠剤投与量と睡眠時間の散布図

図 3 参考文献 2 における睡眠剤投与量と睡眠時間の関係

表2 統計処理の検証結果

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

(2) 確率分布

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

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

表3 ある都市の交通事故死亡者数の分布(参考文献2の表5.3より)

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

表4 ポリヤ分布の検証結果

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

表5 ポアソン分布の検証結果

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

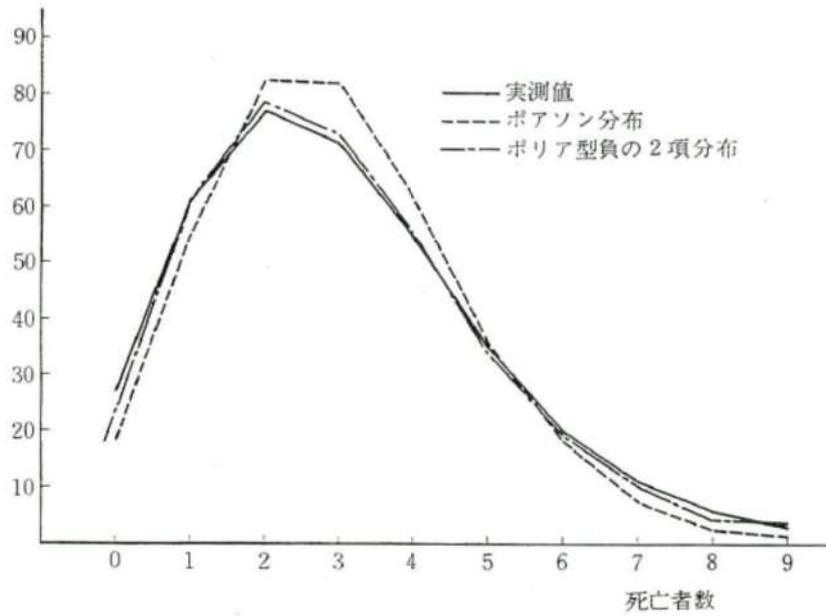


図4 分布形 (参考文献2)

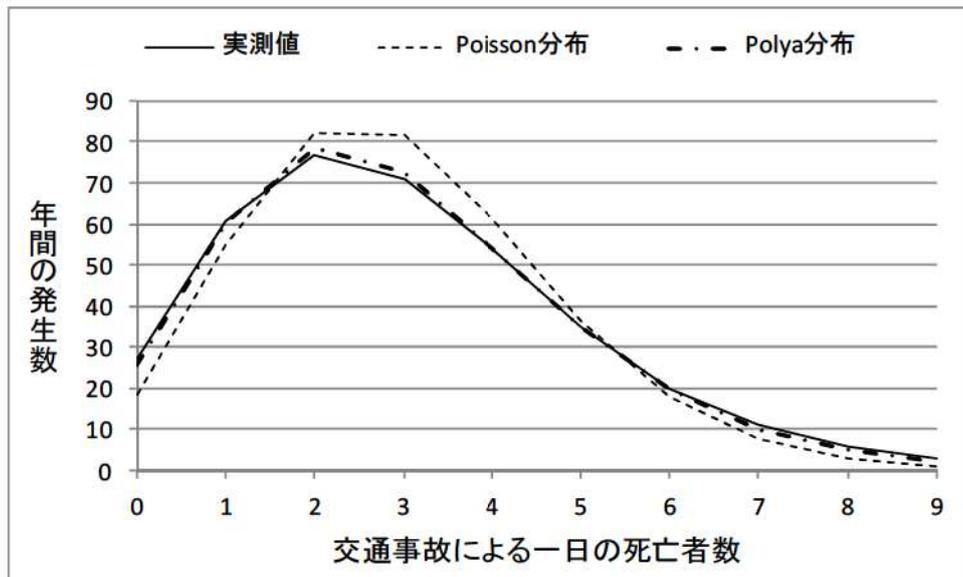


図5 分布形 (本解析コード)

5. 2ハザード評価

(1) 簡略化した条件での検証

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

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

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

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

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

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

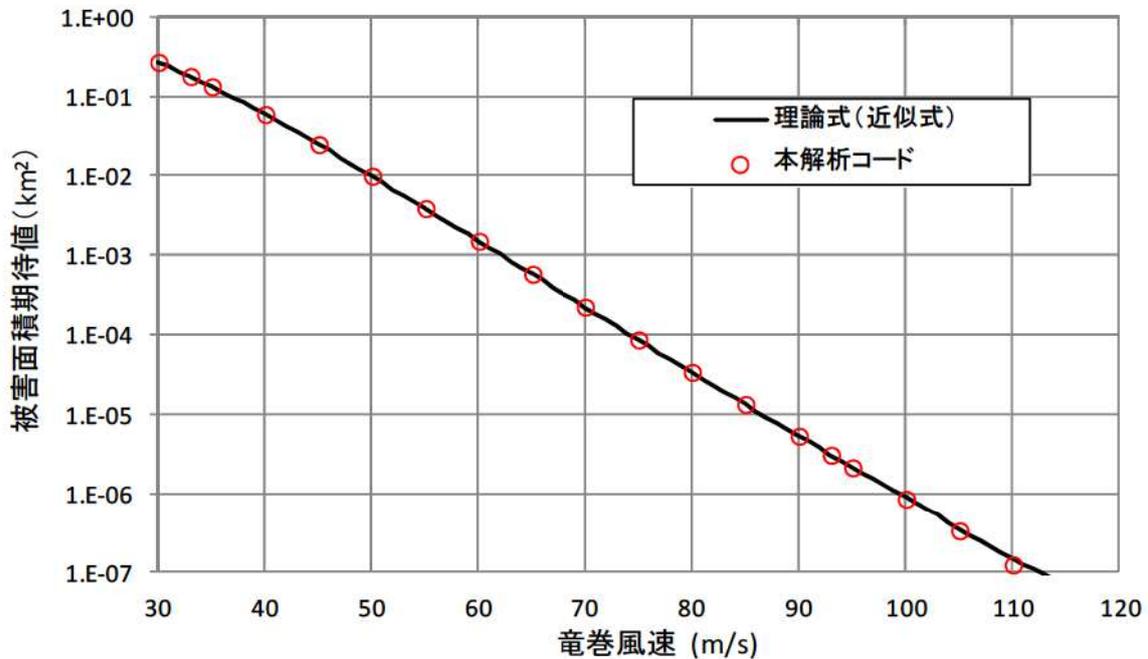


図6 被害面積の期待値の比較

(2) ハザード曲線

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

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

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

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

なお、参考文献1では、風速積分範囲を116.2m/sまでとして後に示す図5-5を求めている。一方、本解析コードでは120m/sまでを積分範囲としている。

これらのハザード計算に関する条件を表7に示す。

表6 施設の寸法（参考文献1）

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

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

表7 ハザード計算に関する条件

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

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

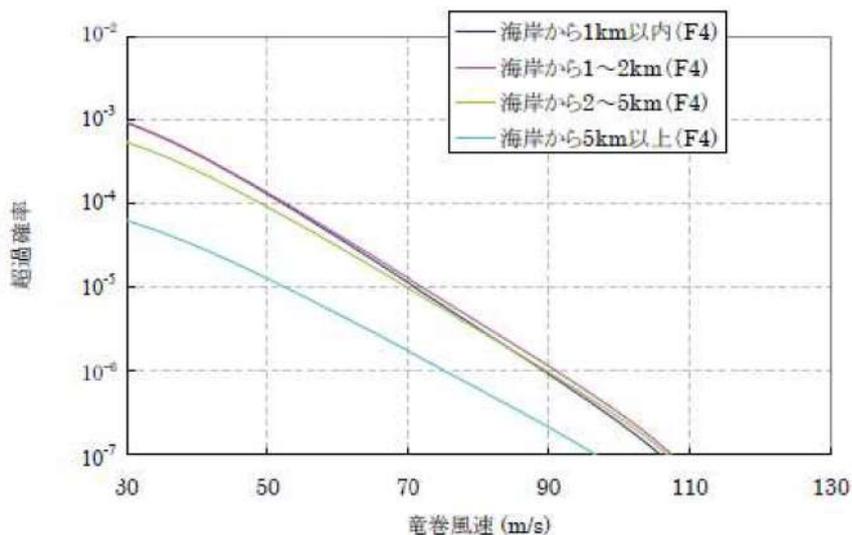


図7 ハザード算定結果 (参考文献1)

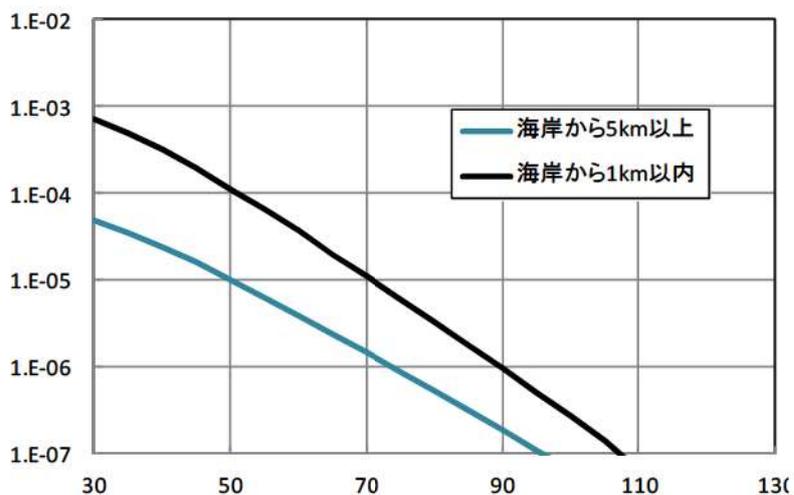


図8 ハザード算定結果 (本解析コード)

表8 検証結果の比較

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

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

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

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

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

ここで、

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

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

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

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

として、泊発電所の竜巻影響評価における、被害面積期待値の算定結果を図9に示す。この図より、例えば、竜巻風速70m/sのところを見ると、第1～4項に対応する面積がそれぞれ、 $1.01 \times 10^{-4} \text{km}^2$ 、 $9.87 \times 10^{-3} \text{km}^2$ 、 $1.37 \times 10^{-4} \text{km}^2$ 、 $1.60 \times 10^{-3} \text{km}^2$ 、第1～4項を足し合わせて $1.26 \times 10^{-2} \text{km}^2$ 、となっており、第1項が支配的な要因であることがわかる。

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