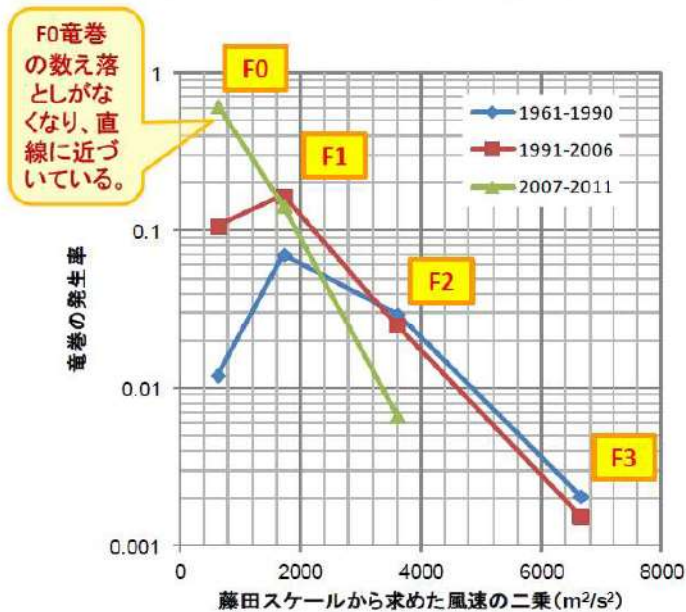


第 2.1 表 年代による竜巻の発生確認数の違い

年代	竜巻の発生確認数
1961年～1990年	<ul style="list-style-type: none"> ・ 当時から気象庁が竜巻として公表していたものに、災害報告、調査・研究報告、新聞などの資料からあらためて収集した事例のうち一定規模以上のものから、気象庁が竜巻と判定したものを加えた数。(当時存在が明らかでなかったダウンバーストも本事例に含まれている可能性がある)。 ・ <u>被害のない海上竜巻は含んでいない。</u>
1991年～2006年	<ul style="list-style-type: none"> ・ 災害報告、調査・研究報告、新聞などの資料からあらためて収集した全ての事例から、気象庁が竜巻と判定したものの数。 ・ <u>被害のない海上竜巻も含んでいるが、目撃情報のうち集約できているものは一部に限られている。</u>
2007年～	<ul style="list-style-type: none"> ・ <u>気象庁が突風事例の調査体制を強化し、評価の精度が向上。</u> ・ 報道や目撃情報等も含めた広範な情報源から収集した事例から、気象庁が竜巻と判定したものの数。 ・ <u>幅広く情報を入手していることから、海上竜巻の発生確認数が格段に増加。</u>

第 2.2 表 竜巻発生数の分析結果

竜巻検討地域 (沿岸±5km)	発生数の統計	小計	竜巻スケール				不明		総数 (含む不明)
			F0	F1	F2	F3	(陸上)	(海上)	
1961～ 2012/6 (51.5年間)	期間内総数	87	29	45	13	0	12	110	209
	平均値(年)	1.69	0.56	0.87	0.25	-	0.23	2.14	4.06
	標準偏差(年)	2.53	1.99	1.03	0.52	-	0.68	5.89	7.91
1991～ 2012/6 (21.5年間)	期間内総数	58	29	26	3	0	11	110	179
	平均値(年)	2.70	1.35	1.21	0.14	-	0.51	5.12	8.33
	標準偏差(年)	3.49	2.95	1.15	0.36	-	0.98	8.37	10.98
2007～ 2012/6 (5.5年間)	期間内総数	31	25	6	0	0	5	92	128
	平均値(年)	5.64	4.55	1.09	-	-	0.91	16.73	23.27
	標準偏差(年)	6.22	4.94	1.34	-	-	1.69	10.96	15.13
疑似 51.5年間 (陸上竜巻)	期間内総数	358	235	63	13	0	47	862	1220
	平均値(年)	6.92	4.55	1.21	0.25	-	0.91	16.73	23.64
	標準偏差(年)	5.37	4.94	1.15	0.52	-	1.69	10.96	12.21
疑似 51.5年間 (全竜巻)	期間内総数	1222	962	215	45	0	0	0	1222
	平均値(年)	23.57	18.59	4.12	0.86	-	-	-	23.57
	標準偏差(年)	9.91	9.63	2.13	0.96	-	-	-	9.91



竜巻強度分布とは

- 縦軸に竜巻等の発生率、横軸に風速の二乗をとってグラフにしたもの。
- 突風の覚知もれがなく、かつ理想的な突風の強さのスケールを用いると縦軸に対数をとった場合に直線状になる (Dotzek *et al.* 2005)。
- 竜巻等突風の発生状況の実態把握や調査体制・スケールの改善に広く利用される (Brooks *et al.* 2001; Feuerstein *et al.* 2005)。

Dotzek et al., 2005: *GRL* **32**, DOI:10.1029/2005GL024583.
 Brooks and Doswell III, 2001: *Atmos. Res.* **56**, 191-202.
 Feuerstein et al., 2005: *J. Climate* **18**, 585-596.

第 2.1 図 日本における竜巻強度分布の変遷
 (出典：気象庁「竜巻等突風の強さの評定に関する検討会」第一回資料 3)

2.3 年発生数の確率密度分布の設定

設定に当たっては、竜巻は気象事象の中でも極めてまれに発生する事象であり、発生数の変動（標準偏差）が大きい分布であることから、東京工芸大学委託成果にならってポリヤ分布により設定した。

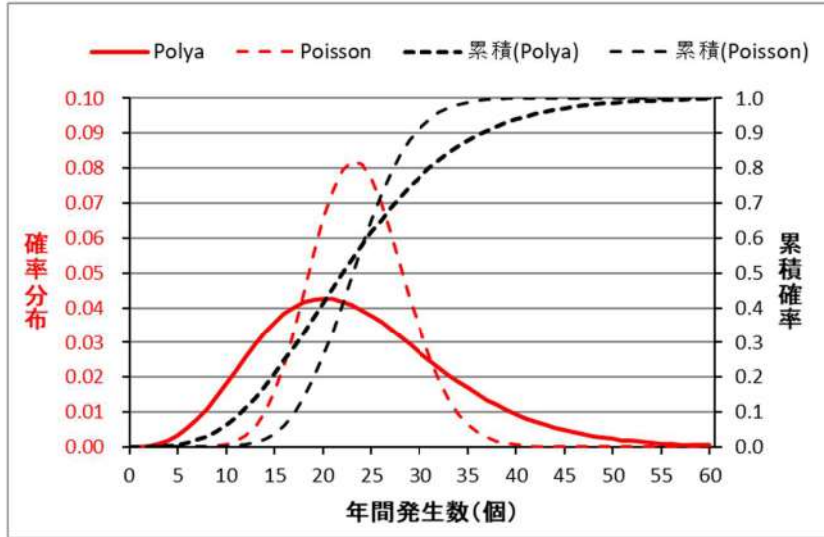
第2.2図は、求められた発生数の平均値（23.73個）と標準偏差（9.91個）に対するポアソン分布とポリヤ分布である。ポアソン分布（破線）は平均値のみで決まるが、ポリヤ分布（実線）は標準偏差の影響を受けるため、かなり幅の広い分布形となっている。なお、これらの分布形に関しては【参考資料2】で述べる（式(1)、(2)参照）。

さらに、擬似データを作成した時の基本的な考え方に則り、発生数のシミュレーションを行い、どのような竜巻発生数の推移を想定しているかを検討した。

具体的には、Fスケール毎に採用した期間内の観測値及び不明な陸上・海上竜巻が、繰り返しランダムに現れるものとして、各年の発生数をシミュレーションし、52年間の発生数データを作成する。そのデータを観測値と見なした場合に、関数形を推定し第2.2図の結果と比較する。

例えばF0の場合、信頼できるデータは最近5～6年間のデータしかないため、この内の一個のデータを乱数により抽出し、その年のF0の発生数のデータとする。F0に加えるべき陸上の不明や、海上竜巻についても、乱数を発生させて毎年の発生数をシミュレーションする。F1～F3についても同様であり、これら全ての発生数を合算し、その年の発生数とする。

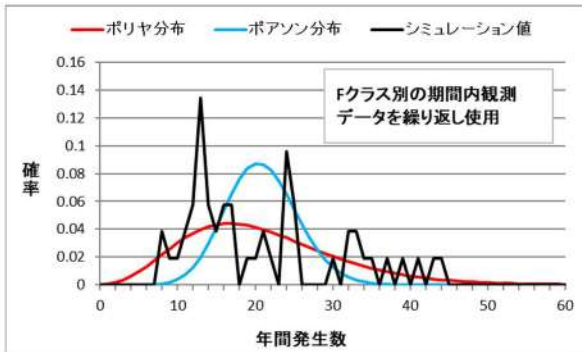
第2.3図(a)は、このようにして作成した52年間の発生数時系列の一例である。F0や不明竜巻に関する最近の増加特性を反映させている。同図(b)(c)は、シミュレーションされた発生数の確率分布を推定した結果である。この結果は、第2.2図の結果と非常に類似していることがわかる。また、ポアソン分布に比べて、ポリヤ分布の方が発生数への適合度は高いと言える。



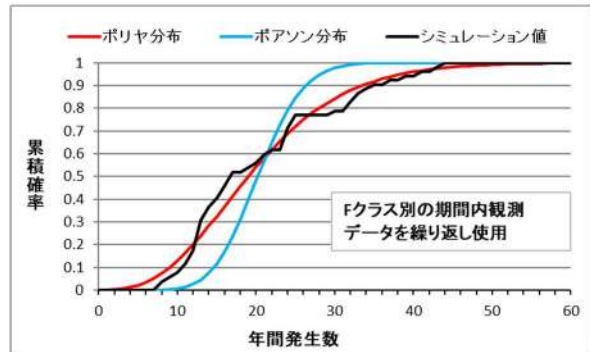
第2.2図 竜巻年発生数の確率分布（赤）と累積分布（黒）



(a) 発生数の時系列



(b) 分布関数の比較



(c) 累積確率

第2.3図 発生数シミュレーションの結果

3. 竜巻の被害幅、被害長さの分析

竜巻発生数と同様にして、3つの観測期間を対象にして、被害幅の観測データを解析した結果を第3.1表に示す。ここで記載した不明とは、被害幅とFスケールの両方若しくは片方が不明であることを表す。また、気象庁のデータベース上で、被害幅が0mと記録されている竜巻も不明扱いとし、解析対象からは除外した。

本竜巻検討地域では、51.5年間に209個の竜巻が観測されているが、Fスケールが分かっているものが87個（第2.2表の1段目の小計）、Fスケールと幅の両方が分かっているものが63個（第3.1表の1段目の小計）である。被害幅の解析に利用可能なデータ数は、発生数のデータ数に比べて少ないことが分かる。先に推定したFスケールごとの発生数（第2.2表）との整合性も確保する必要がある。そこで、以下のようにして51.5年間の被害幅の統計量を推定した。

- ① 統計量を確保するために、1961年以降の観測データを使用し、Fスケール別に被害幅データを抽出する。このデータを基に、Fスケール別に被害幅のデータや平均値・標準偏差を求める（第3.1表の上段）。
- ② 各スケール別の51.5年間のデータ数は、①で得られる観測値ではなく、第2.2表で推定された51.5年間の疑似データの発生数とする。
- ③ 具体的には、①で抽出されたFスケール別の被害幅データを大きい順に並び替え^{*}、②で設定した51.5年間の発生数分だけ繰り返し集積を行い、51.5年間の疑似データ（幅のデータ）を作成する。
- ④ 作成された疑似データの平均値や標準偏差を求める。

※：51.5年間の発生数分だけ繰り返し集積する際に、より大きな被害幅データを集積することで保守的なデータとなるように、大きい順に並べ替えた。

このようにして求めた結果を第3.1表の最下段に示す。Fスケール別の平均値や標準偏差は、繰り返し集積を行っている関係で、最上段の観測値とは若干異なっている（若干大きい）。以上により、Fスケールごとの被害幅の発生特性を保持しつつ、発生数との整合性を確保することができる。

被害長さについても、被害幅と同様の解析を行った。結果を第3.2表に示す。

第 3.1 表 被害幅の解析結果

竜巻検討地域 (沿岸±5km)	被害幅 の統計 (m)	小計	竜巻スケール				不明		総数 (含む不明)
			F0	F1	F2	F3	(陸上)	(海上)	
1961～ 2012/6 (51.5年間)	期間内総数	63	24	32	7	0	36	110	209
	平均値 (m)	118	116	109	167	-			
	標準偏差 (m)	146	124	103	324	-			
1991～ 2012/6 (21.5年間)	期間内総数	50	24	24	2	0	19	110	179
	平均値 (m)	115	116	118	65	-			
	標準偏差 (m)	115	124	113	49	-			
2007～ 2012/6 (5.5年間)	期間内総数	28	22	6	0	0	8	92	128
	平均値 (m)	119	121	113	-	-			
	標準偏差 (m)	115	128	66	-	-			
疑似 51.5年間 (全竜巻)	期間内総数	1222	962	215	45	0	0	0	1222
	平均値 (m)	118	116	112	179	-			
	標準偏差 (m)	132	122	102	314	-			

第 3.2 表 被害長さの解析結果

竜巻検討地域 (沿岸±5km)	被害長さ の統計 (km)	小計	竜巻スケール				不明		総数 (含む不明)
			F0	F1	F2	F3	(陸上)	(海上)	
1961～ 2012/6 (51.5年間)	期間内総数	67	25	34	8	0	32	110	209
	平均値 (km)	2.315	1.072	3.147	2.663	-			
	標準偏差 (km)	3.775	1.443	4.839	3.054	-			
1991～ 2012/6 (21.5年間)	期間内総数	51	25	23	3	0	18	110	179
	平均値 (km)	1.437	1.072	1.826	1.500	-			
	標準偏差 (km)	1.803	1.443	2.182	1.323	-			
2007～ 2012/6 (5.5年間)	期間内総数	28	22	6	0	0	8	92	128
	平均値 (km)	1.700	1.168	3.650	-	-			
	標準偏差 (km)	2.247	1.515	3.544	-	-			
疑似 51.5年間 (全竜巻)	期間内総数	1222	962	215	45	0	0	0	1222
	平均値 (km)	1.550	1.082	3.391	2.773	-			
	標準偏差 (km)	2.654	1.421	4.962	2.948	-			

4. 竜巻最大風速，被害幅，被害長さの確率分布，相関係数

竜巻ハザードを評価するためには，一つの竜巻が発生した際の，竜巻最大風速・被害幅・被害長さの確率分布が必要となる。そこで，本竜巻検討地域における51.5年間の竜巻の発生数・被害幅・被害長さのデータ（第4.1表）を用いて各確率密度分布を求める。その際，竜巻影響評価ガイド並びに東京工芸大学委託成果を参照して，確率密度関数が対数正規分布に従うものとした。

①竜巻最大風速の確率密度分布

Fスケールの竜巻風速には幅があるため，具体的な風速の設定方法には任意性があり，Fスケールの範囲内のある値（中央値等）に設定する方法やFスケールの風速範囲内で一様に分布すると仮定する方法等が考えられる。

第4.1図に竜巻最大風速が中央値に集中した場合（黒い実線）及び一様に分布するとした場合（赤い実線）について，風速の分布形（超過確率）を推定した結果を示す。

●印は，各Fスケール下限値における観測値（疑似51.5年間データ）の超過確率を表しており，例えば，F0の下限値(17m/s)以上となる確率は1.0，F1の下限値(33m/s)以上となる確率は約0.2である。また，○印は，F3が1個観測された場合を仮定してプロットをした。

ハザード解析においては，特定の風速以上となる確率が重要であることから，●印で表された観測値ベースの超過確率と適合度が高い分布形が望ましい。第4.1図(a)の○印も含めて評価すると，中央値の方が一様分布の場合よりも適合度が良いと言える。

一方，後述のハザード解析において，竜巻最大風速が中央値に集中した場合及び一様分布するとした場合で計算した結果，第4.2図のとおり一様分布とした場合の方が中央値で代表させる場合よりも厳しいハザード曲線となっている。

以上より，ハザードを保守的に評価するとの観点から，風速分布としては一様分布を採用した。風速分布を一様分布とした場合の竜巻最大風速の確率密度分布，年超過確率分布の算定結果を第4.3図に示す。算定結果は，超過確率の図より観測結果を適切に推定できており，風速の大きいエリアにおいても不自然な形となっていないことがわかる。

②竜巻の被害幅の確率密度分布

竜巻の被害幅は，竜巻最大風速とは異なり具体的な値が直接観測されていることから，任意性はなく，観測値から作成した疑似データに基づき，確率密度分布を推定する。

竜巻の被害幅の確率密度分布，年超過確率分布の算定結果を第4.4図に示す。算定結果は，超過確率の図より観測結果を適切に推定できていることがわかる。

③竜巻の被害長さの確率密度分布

竜巻の被害長さは、竜巻最大風速とは異なり具体的な値が直接観測されていることから、任意性はなく、観測値から作成した疑似データに基づき、確率密度分布を推定する。

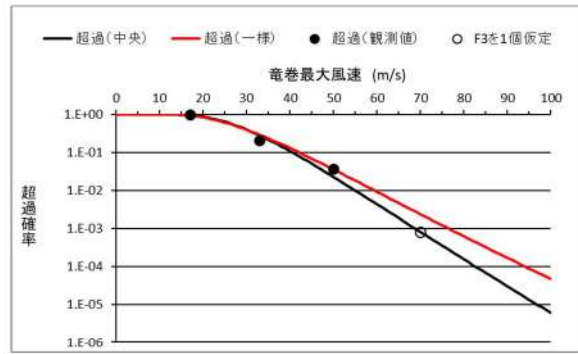
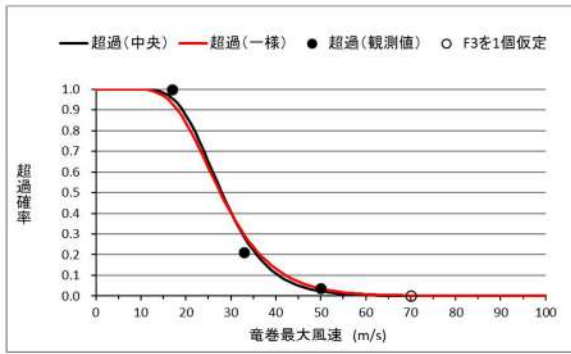
竜巻の被害長さの確率密度分布、超過確率分布の算定結果を第4.5図に示す。算定結果は、超過確率の図より観測結果を適切に推定できていることがわかる。

ハザード曲線を算定する際、2変量又は3変量の確率分布関数を対象とするため、竜巻最大風速、被害幅、被害長さの相関係数の検討を実施した。相関係数は、1961年以降の観測データで、3変量が同時に観測されているデータを用いるのが理想的であるが、十分なデータ数を確保するため、風速と幅のみが観測されているデータ等、2変量の比較が行える観測データも併せて用いて相関係数を算定した。

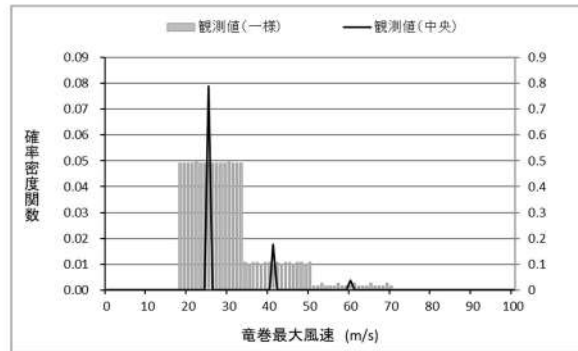
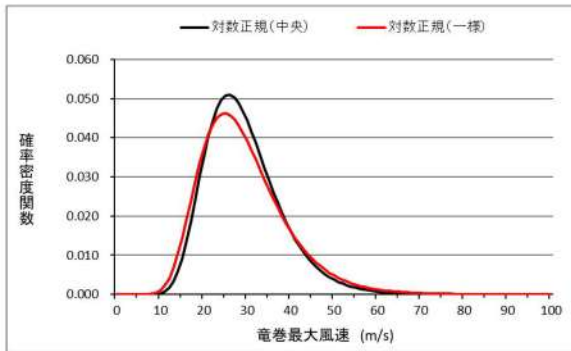
なお、竜巻最大風速、被害幅、被害長さの確率密度分布の推定では、発生頻度が重要であるために繰り返しサンプリングを行ったデータを用いたが、以下の理由により、相関係数の推定ではそのような措置を行わず、観測の元データを基に推定した。

Fスケール不明やF0竜巻では、被害規模が小さいために被害幅や被害長さの観測データがF2竜巻に比べて得られる機会が少なく、ばらつきも大きいものと考えられる。そのようなデータをサンプリングにより増やすと、F2竜巻で見られる相関の高さが反映されない算定結果になることが懸念される。

第4.2表に示す算定結果によれば、本竜巻検討地域では、竜巻最大風速と被害長さには0.32程度、被害幅と被害長さには、0.46程度の相関が認められた。相関を求めた際のデータ数、平均値、標準偏差及び相関係数を第4.2表に示す。

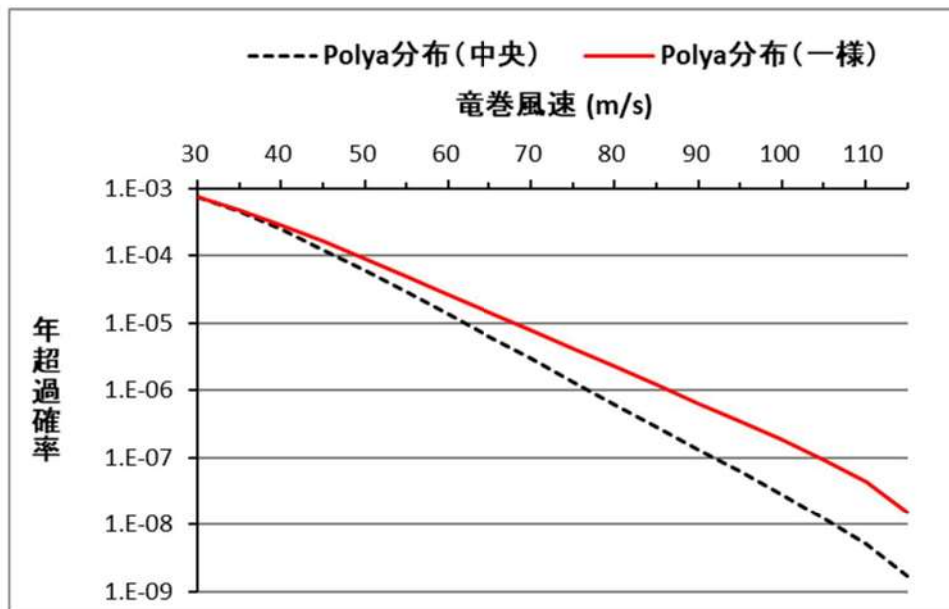


(a) 超過確率



(b) 確率密度関数 (左：推定値, 右：観測値)

第4.1図 竜巻最大風速の確率分布の推定結果と観測値の比較



第4.2図 風速分布の違いによる竜巻最大風速のハザード曲線の比較 (陸側及び海側それぞれ5 kmの範囲)

第 4.1 表 竜巻検討地域における竜巻パラメータ (51.5 年間の推定結果)

	パラメータ	統計量	小計	竜巻スケール			
				F0	F1	F2	F3
疑似 51.5年間 (全竜巻)	発生数	期間内総数	1222	962	215	45	0
		年平均(個)	24	19	4	1	-
		標準偏差(個)	10	10	2	1	-
	被害幅	期間内総数	1222	962	215	45	0
		平均値(m)	118	116	112	179	-
		標準偏差(m)	132	122	102	314	-
	被害長	期間内総数	1222	962	215	45	0
		平均値(km)	1.550	1.082	3.391	2.773	-
		標準偏差(km)	2.654	1.421	4.962	2.948	-

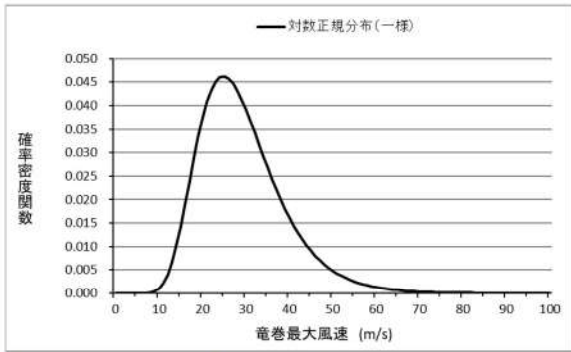
第 4.2 表(1) 相関係数算定に用いた竜巻最大風速, 被害幅, 被害長さのデータ数
(単位: 個)

データ数	竜巻最大風速	被害幅	被害長さ
竜巻最大風速	87	63	67
被害幅	63	66	61
被害長さ	67	61	68

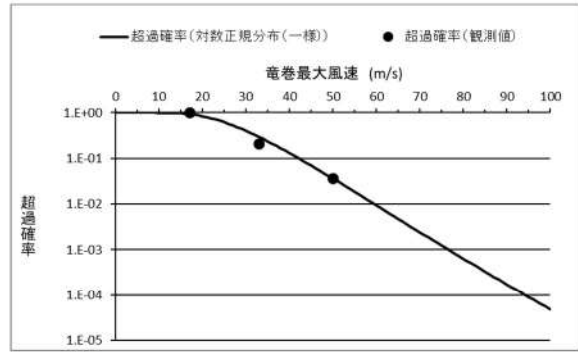
第 4.2 表(2) 竜巻最大風速, 被害幅, 被害長さの相関係数 (単位無し)

相関係数	竜巻最大風速	被害幅	被害長さ
竜巻最大風速	1.000	-0.060*	0.319
被害幅	-0.060*	1.000	0.458
被害長さ	0.319	0.457	1.000

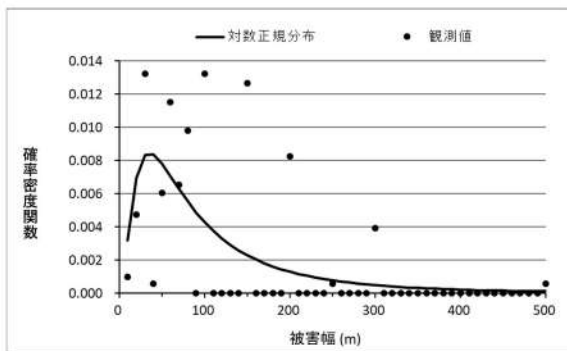
*竜巻最大風速と被害幅は無相関との知見が得られたため, ハザード算定の際には, 相関係数0として計算



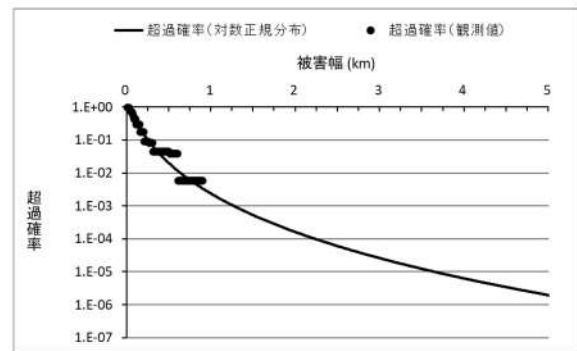
第 4.3 図(1) 竜巻最大風速の確率密度分布



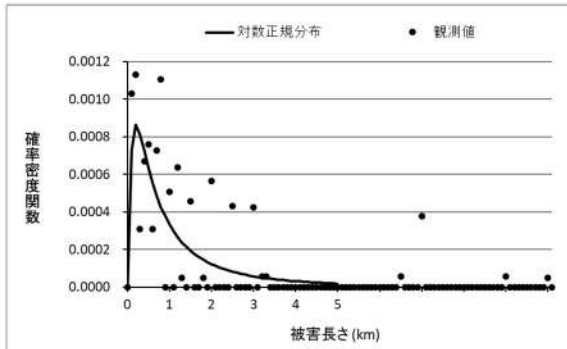
第 4.3 図(2) 竜巻最大風速の超過確率分布



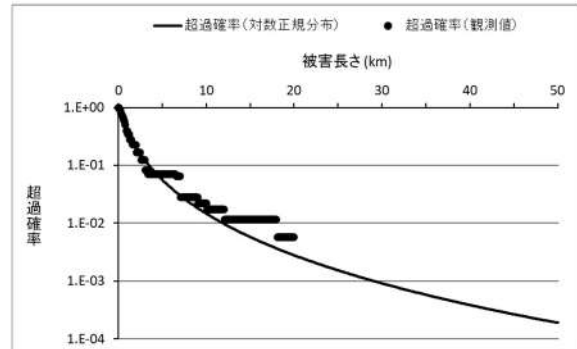
第 4.4 図(1) 被害幅の確率密度分布



第 4.4 図(2) 被害幅の超過確率分布



第 4.5 図(1) 被害長さの確率密度分布



第 4.5 図(2) 被害長さの超過確率分布

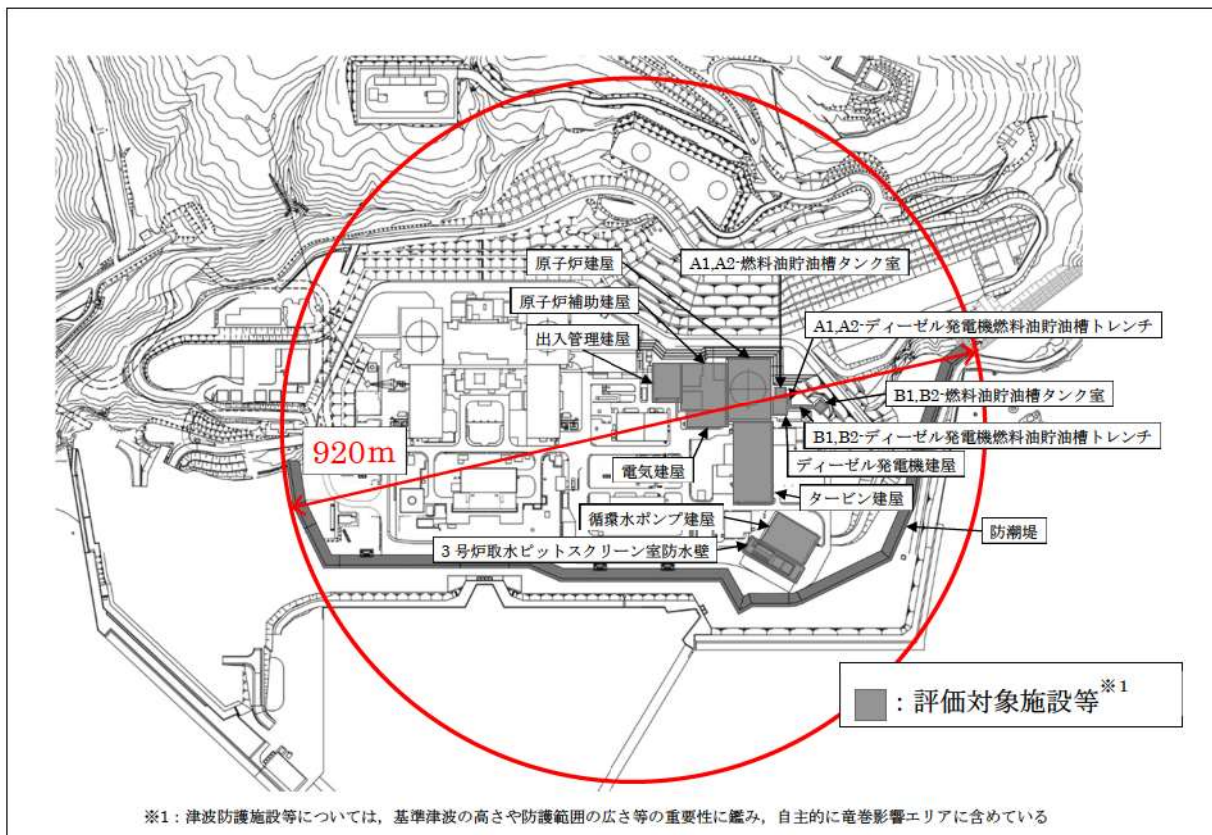
5. 竜巻影響エリア

竜巻最大風速のハザード曲線による最大風速 (V_{B2}) の算定に当たり、 V_{B2} の発生エリアである竜巻影響エリアを設定する。竜巻影響エリアは、泊発電所3号炉の評価対象施設等を十分な余裕をもって包絡するエリアとして設定する。

第5.1図に泊発電所3号炉の竜巻影響エリアを示す。

竜巻影響エリアは、泊発電所3号炉の評価対象施設を包絡する円形のエリア（直径920m、面積約664,000 m^2 ）として設定した。

なお、竜巻影響エリアを円形とするため、竜巻移動方向の依存性はない（式(6.8)及び式(6.6')参照）。



第5.1図 評価対象施設の位置

6. ハザード曲線の算定

東京工芸大学委託成果によれば、Wen and Chu は、竜巻に遭遇し、かつ竜巻風速がある値以上になる確率モデルの推定法を提案している。竜巻の発生がポアソン過程に従うと仮定した場合、竜巻の年発生数の確率分布は、式(6.1)に示すポリヤ分布の適合性が良いとされている。本ハザード曲線の算定においても、東京工芸大学委託成果にならって適合性の良いポリヤ分布により設定した。

$$P_T(N) = \frac{(\nu T)^N}{N!} (1 + \beta \nu T)^{-N-1/\beta} \prod_{k=1}^{N-1} (1 + \beta k) \quad (6.1)$$

ここで、

N : 竜巻の年発生数

ν : 竜巻の年平均発生数

T : 年数

σ : 竜巻の年発生数の標準偏差

$$\beta = \left(\frac{\sigma^2}{\nu} - 1 \right) \times \frac{1}{\nu} \quad (6.2)$$

対象とする構造物が、1つの竜巻に遭遇し、その竜巻の風速が V_0 以上となる確率を $R(V_0)$ とした時、 T 年以内にいずれかの竜巻に遭遇し、その竜巻の風速が V_0 以上となる確率は式(6.1)から導出され以下の式(6.3)となる。

$$P_{V_0, T}(D) = 1 - [1 + \beta \nu R(V_0) T]^{-1/\beta} \quad (6.3)$$

ここで、

D : 対象とする構造物が風速 V_0 以上の竜巻に遭遇する事象

$R(V_0)$: リスク評価対象構造物が1つの竜巻に遭遇し、竜巻風速が V_0 以上となる確率

$$R(V_0) = \frac{E[DA(V_0)]}{A_0} \quad (6.4)$$

$DA(V_0)$: 竜巻による構造物の被害面積

$E[DA(V_0)]$: $DA(V_0)$ の期待値

A_0 : リスクの評価対象とする地域の面積

次に、 $E[DA(V_0)]$ の求め方を説明する。

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

$$\begin{aligned} DA(V_0) &= WL + HL + WG + AB & ; V_i \geq V_0 \\ DA(V_0) &= 0 & ; V_i < V_0 \end{aligned} \quad (6.5)$$

ここで、 W は竜巻の被害幅、 L は被害長さ、 A 、 B は構造物の寸法、 H と G は竜巻の被害幅や長さ方向への構造物の投影長さである。

上記の関係を、竜巻最大風速・被害幅・被害長さ・竜巻移動方向の確率密度分布を用いると、 $DA(V_0)$ の期待値は式(6.6)のように表すことができる。

$$\begin{aligned}
 E[DA(V_0)] &= \int_0^\infty \int_0^\infty \int_0^\infty W(V_0) l f(V, w, l) dV dw dl \\
 &+ \int_0^{2\pi} \int_0^\infty \int_0^\infty H(\alpha) l f(V, l, \alpha) dV dl d\alpha + \int_0^{2\pi} \int_0^\infty \int_0^\infty W(V_0) G(\alpha) f(V, w, \alpha) dV dw d\alpha \quad (6.6) \\
 &+ AB \int_{V_0}^\infty f(V) dV
 \end{aligned}$$

ここで、

V : 竜巻最大風速

W : 竜巻の被害幅

l : 竜巻の被害長さ

α : 竜巻の移動方向

$f(\cdot)$: 確率密度分布

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

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

$$W(V_0) = \left(\frac{V_{\min}}{V_0} \right)^{1/1.6} w \quad (6.7)$$

式(6.6)の右辺第1項は、被害幅と被害長さの積、すなわち被害面積を表しており、いわゆる点構造物に対する被害、第2項と第3項は、被害幅・被害長さとして構造物寸法の積、すなわち面構造物あるいは線状構造物の被害面積を表す。竜巻の幅は長さに比べて短いため、第3項の寄与は第2項に比べて1オーダー小さい。第4項は建物面積 AB に依存する項である。

$W(V_0)$ は、竜巻の被害幅のうち風速が V_0 以上となる部分の幅であり、式(6.7)により算出される。この式により、被害幅内の風速分布に応じて被害様相に分布があることが考慮されている。 V_{\min} は、竜巻被害が発生する最小風速であり、Garson は gale intensity velocity と呼んでいる (gale とは非常に強い風の意)。米国の気象局 (National Weather Service) では、34~47 ノット (17.5~24.2m/s) とされている。日本の気象庁では、気象通報にも用いられている風力階級において、風力8が疾強風 (gale, 17.2~20.7m/s)、風力9は大強風 (strong gale, 20.8~24.4m/s) と分類されており、風力9では「屋根瓦が飛ぶ。人家に被害が出始める」とされている。以上を参考にして、 $V_{\min}=25\text{m/s}$ とした。この値は、F0 (17~32m/s) のほぼ中央値に相当する。なお、この値よりも小さな V_{\min} (例えば、F0 の最小風速 17m/s) を用いると、風速 V_0 以上となる被害面積は小さくなる。

また、 $H(\alpha)$ 及び $G(\alpha)$ はそれぞれ、竜巻の被害長さ及び被害幅方向に沿った面に竜巻影響評価対象構造物を投影した時の長さである。前述の 5. にて竜巻影響エリア

を円形（直径 D_0 ）で設定しているため、竜巻の移動方向には依存せず、一定値となる。

$$H(\alpha) = G(\alpha) = D_0 \quad (6.8)$$

したがって、式(6.6)は式(6.6')と表すことができる。

$$\begin{aligned} E[DA(V_0)] &= \int_0^\infty \int_0^\infty \int_0^\infty W(V_0) l f(V, w, l) dV dw dl \\ &+ D_0 \int_0^\infty \int_0^\infty l f(V, l) dV dl + D_0 \int_0^\infty \int_0^\infty W(V_0) f(V, w) dV dw \\ &+ (D_0^2 \pi / 4) \int_{V_0}^\infty f(V) dV \end{aligned} \quad (6.6')$$

2変量、3変量の対数正規分布は、以下の式(6.9)又は式(6.10)のように表される。

$$f(x, y) = \frac{1}{2\pi\sigma_x\sigma_y\sqrt{1-\rho^2}} \frac{1}{xy} \exp\left[-\frac{1}{2(1-\rho^2)} \left\{ \left(\frac{\ln(x)-\mu_x}{\sigma_x}\right)^2 - 2\rho\left(\frac{\ln(x)-\mu_x}{\sigma_x}\right)\left(\frac{\ln(y)-\mu_y}{\sigma_y}\right) + \left(\frac{\ln(y)-\mu_y}{\sigma_y}\right)^2 \right\}\right] \quad (6.9)$$

$$\begin{aligned} f(x, y, z) &= \frac{1}{(2\pi)^{3/2} \begin{vmatrix} \sigma_x^2 & \sigma_x\sigma_y\rho_{xy} & \sigma_x\sigma_z\rho_{xz} \\ \sigma_x\sigma_y\rho_{xy} & \sigma_y^2 & \sigma_y\sigma_z\rho_{yz} \\ \sigma_x\sigma_z\rho_{xz} & \sigma_y\sigma_z\rho_{yz} & \sigma_z^2 \end{vmatrix}^{1/2}} \times \frac{1}{xyz} \\ &\times \exp\left[-\frac{1}{2} \begin{pmatrix} \ln(x)-\mu_x & \ln(y)-\mu_y & \ln(z)-\mu_z \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \sigma_x^2 & \sigma_x\sigma_y\rho_{xy} & \sigma_x\sigma_z\rho_{xz} \\ \sigma_x\sigma_y\rho_{xy} & \sigma_y^2 & \sigma_y\sigma_z\rho_{yz} \\ \sigma_x\sigma_z\rho_{xz} & \sigma_y\sigma_z\rho_{yz} & \sigma_z^2 \end{pmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} \ln(x)-\mu_x \\ \ln(y)-\mu_y \\ \ln(z)-\mu_z \end{pmatrix}\right] \end{aligned} \quad (6.10)$$

ここに μ_x , μ_y , μ_z は変量 $\ln(x)$, $\ln(y)$, 及び $\ln(z)$ の平均値であり, σ_x , σ_y , σ_z は変量 $\ln(x)$, $\ln(y)$, 及び $\ln(z)$ の標準偏差を表す。また, ρ_{xy} は $\ln(x)$ と $\ln(y)$ の相関係数を表し, ρ_{yz} 等についても同様である。

なお, 変量 x と $\ln(x)$ の平均値をそれぞれ μ , μ_{\ln} , 標準偏差をそれぞれ σ , σ_{\ln} と表せば, これらの間には以下の関係がある。

$$\sigma_{\ln}^2 = \ln(CV^2 + 1) \quad (6.11)$$

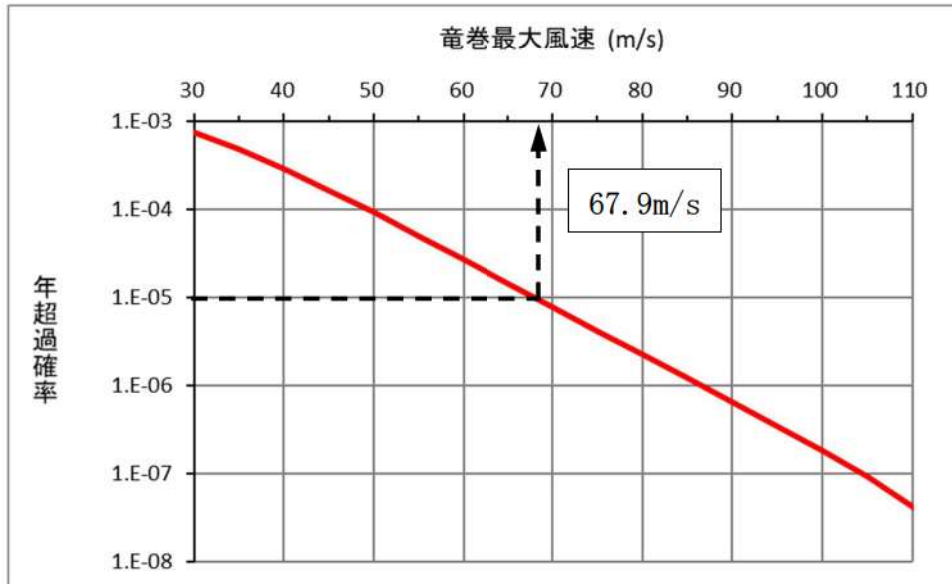
$$\mu_{\ln} = \ln(\mu) - \frac{\sigma^2}{2} \quad (6.12)$$

ここに, CV は変動係数 (σ/μ) である。本評価では上記の関係式を用いて, 4.にて求めた竜巻最大風速, 被害幅, 被害長さの平均値及び標準偏差から μ_x , σ_x 等

を定めた。

竜巻最大風速のハザード曲線の算定結果を第 6.1 図に示す。第 6.1 図より、竜巻影響評価ガイドを参考に年超過確率 10^{-5} に相当する風速は 67.9m/s となった。

なお、竜巻最大風速のハザード曲線の算定において、風速の積分範囲の上限値はハザード曲線の形状が不自然にならない程度に大きな値として 120m/s に設定している【参考資料 4】。



第 6.1 図 竜巻最大風速のハザード曲線（陸側及び海側それぞれ 5 km の範囲）

7. 1 km 範囲ごとの領域での竜巻ハザード曲線について

ガイドに従い、竜巻検討地域を 1 km 範囲ごとに細分化した場合の竜巻最大風速のハザード曲線の算定を行った。算定においては、以下の条件で算定を行った。計算に使用するパラメータは第 7.1 表に示す。

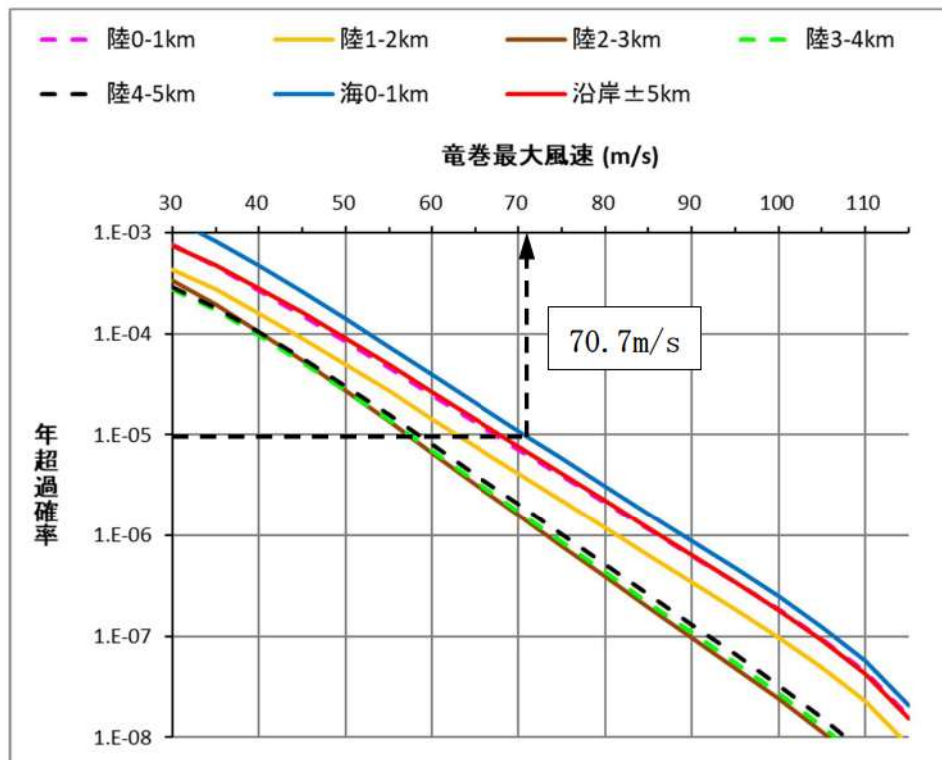
- ・ 被害幅及び被害長さは、それぞれ 1 km 範囲内の被害幅及び被害長さを用いる
- ・ 海側の竜巻発生位置は不明な場合が多く、竜巻移動経路が短冊を横切る長さを精度良く求められないため、海側 0-1km のセグメント長さの評価に陸側 0-1km 短冊の値を代用する方法を用いる
- ・ 1 km 範囲ごとの領域のデータ数は少ないため、相関係数は ± 5 km での値を代用する

第7.1表 保守的なハザード曲線算定に用いるパラメータ

竜巻検討地域 (1kmごとエリア)	統計量	発生数	風速	幅	長さ	相関係数		
		(個)	m/s	m	m	U~W	W~L	W~L
±5km	平均値	23.73	29.1919	117.8969	1550.491	(検討地域±5kmの値を代用)		
	標準偏差	9.91	9.8882	131.5575	2653.688			
陸0-1km	平均値	4.76	29.1388	122.1061	616.184			
	標準偏差	4.07	10.2770	151.6410	447.236			
陸1-2km	平均値	2.06	30.5236	190.9434	768.849			
	標準偏差	2.20	10.4155	170.2353	423.820			
陸2-3km	平均値	2.04	28.6714	176.7619	688.648			
	標準偏差	1.59	9.4043	179.6123	369.356			
陸3-4km	平均値	1.15	31.1864	217.4576	876.983			
	標準偏差	0.82	9.9156	211.2307	309.282			
陸4-5km	平均値	0.97	32.3000	283.6000	1016.240			
	標準偏差	0.95	10.2059	242.5440	185.356			
海0-1km	平均値	9.32	28.7010	91.9833	616.184			
	標準偏差	5.36	9.9741	118.8510	447.236			

以上の条件で算定した竜巻最大風速のハザード曲線を陸側及び海側5kmの範囲内の竜巻最大風速のハザード曲線と併せて第7.1図に示す。

第7.1図より、年超過確率 10^{-5} に相当する風速が最も大きく評価されたのは、海側0~1km範囲での70.7m/sであった。



第7.1図 竜巻最大風速のハザード曲線
(1 km 範囲ごと及び陸側及び海側それぞれ5 km の範囲)

第7.2表 年超過確率 10^{-5} に対応した竜巻最大風速

短冊ケース	竜巻最大風速[m/s]
陸 0～1km	67.3
陸 1～2km	63.0
陸 2～3km	57.1
陸 3～4km	57.4
陸 4～5km	58.4
海 0～1km	70.7
(参考) 陸側及び海側それぞれ 5 km	67.9

参考に陸側0～1km, 1～2km, 2～3km, 3～4km, 4～5km, 海側0～1kmの竜巻発生・通過数を第7.3～7.8表に示す。

第7.3表 陸側0～1km範囲の竜巻発生・通過数

竜巻検討地域 (陸0-1km)	発生数の統計	小計	竜巻スケール				不明		総数 (含む不明)
			F0	F1	F2	F3	(陸上)	(海上)	
1961～ 2012/6 (51.5年間)	期間内総数	56	18	26	12	0	12	0	68
	平均値(年)	1.09	0.35	0.50	0.23	-	0.23	-	1.32
	標準偏差(年)	1.79	1.38	0.70	0.47	-	0.68	-	2.00
1991～ 2012/6 (21.5年間)	期間内総数	36	18	15	3	0	11	0	47
	平均値(年)	1.67	0.84	0.70	0.14	-	0.51	-	2.19
	標準偏差(年)	2.47	2.06	0.79	0.36	-	0.98	-	2.71
2007～ 2012/6 (5.5年間)	期間内総数	20	16	4	0	0	5	0	25
	平均値(年)	3.64	2.91	0.73	-	-	0.91	-	4.55
	標準偏差(年)	4.47	3.58	1.09	-	-	1.69	-	4.80
疑似 51.5年間 (陸上竜巻)	期間内総数	245	150	36	12	0	47	0	245
	平均値(年)	4.75	2.91	0.70	0.23	-	0.91	-	4.75
	標準偏差(年)	4.07	3.58	0.79	0.47	-	1.69	-	4.07
疑似 51.5年間 (全竜巻)	期間内総数	245	197	36	12	0	0	0	245
	平均値(年)	4.75	3.82	0.70	0.23	-	-	-	4.75
	標準偏差(年)	4.07	3.96	0.79	0.47	-	-	-	4.07

第7.4表 陸側1～2km範囲の竜巻発生・通過数

竜巻検討地域 (陸1-2km)	発生数の統計	小計	竜巻スケール				不明		総数 (含む不明)
			F0	F1	F2	F3	(陸上)	(海上)	
1961～ 2012/6 (51.5年間)	期間内総数	34	10	20	4	0	1	0	35
	平均値(年)	0.66	0.19	0.39	0.08	-	0.02	-	0.68
	標準偏差(年)	1.19	0.77	0.63	0.27	-	0.14	-	1.19
1991～ 2012/6 (21.5年間)	期間内総数	23	10	11	2	0	0	0	23
	平均値(年)	1.07	0.47	0.51	0.09	-	-	-	1.07
	標準偏差(年)	1.64	1.16	0.68	0.30	-	-	-	1.64
2007～ 2012/6 (5.5年間)	期間内総数	12	8	4	0	0	0	0	12
	平均値(年)	2.18	1.45	0.73	-	-	-	-	2.18
	標準偏差(年)	2.84	2.08	0.86	-	-	-	-	2.84
疑似 51.5年間 (陸上竜巻)	期間内総数	106	75	27	4	0	0	0	106
	平均値(年)	2.04	1.45	0.51	0.08	-	-	-	2.04
	標準偏差(年)	2.20	2.08	0.68	0.27	-	-	-	2.20
疑似 51.5年間 (全竜巻)	期間内総数	106	75	27	4	0	0	0	106
	平均値(年)	2.04	1.45	0.51	0.08	-	-	-	2.04
	標準偏差(年)	2.20	2.08	0.68	0.27	-	-	-	2.20

第7.5表 陸側2～3km範囲の竜巻発生・通過数

竜巻検討地域 (陸2-3km)	発生数の統計	小計	竜巻スケール				不明		総数 (含む不明)
			F0	F1	F2	F3	(陸上)	(海上)	
1961～ 2012/6 (51.5年間)	期間内総数	27	10	14	3	0	0	0	27
	平均値(年)	0.52	0.19	0.27	0.06	-	-	-	0.52
	標準偏差(年)	1.02	0.66	0.57	0.24	-	-	-	1.02
1991～ 2012/6 (21.5年間)	期間内総数	18	10	7	1	0	0	0	18
	平均値(年)	0.84	0.47	0.33	0.05	-	-	-	0.84
	標準偏差(年)	1.38	0.97	0.57	0.22	-	-	-	1.38
2007～ 2012/6 (5.5年間)	期間内総数	12	9	3	0	0	0	0	12
	平均値(年)	2.18	1.64	0.55	-	-	-	-	2.18
	標準偏差(年)	2.22	1.46	0.88	-	-	-	-	2.22
疑似 51.5年間 (陸上竜巻)	期間内総数	105	85	17	3	0	0	0	105
	平均値(年)	2.02	1.64	0.33	0.06	-	-	-	2.02
	標準偏差(年)	1.59	1.46	0.57	0.24	-	-	-	1.59
疑似 51.5年間 (全竜巻)	期間内総数	105	85	17	3	0	0	0	105
	平均値(年)	2.02	1.64	0.33	0.06	-	-	-	2.02
	標準偏差(年)	1.59	1.46	0.57	0.24	-	-	-	1.59

第7.6表 陸側3～4km範囲の竜巻発生・通過数

竜巻検討地域 (陸3-4km)	発生数の統計	小計	竜巻スケール				不明		総数 (含む不明)
			F0	F1	F2	F3	(陸上)	(海上)	
1961～ 2012/6 (51.5年間)	期間内総数	21	4	16	1	0	0	0	21
	平均値(年)	0.41	0.08	0.31	0.02	-	-	-	0.41
	標準偏差(年)	0.67	0.27	0.58	0.14	-	-	-	0.67
1991～ 2012/6 (21.5年間)	期間内総数	12	4	8	0	0	0	0	12
	平均値(年)	0.56	0.19	0.37	-	-	-	-	0.56
	標準偏差(年)	0.75	0.40	0.59	-	-	-	-	0.75
2007～ 2012/6 (5.5年間)	期間内総数	7	4	3	0	0	0	0	7
	平均値(年)	1.27	0.73	0.55	-	-	-	-	1.27
	標準偏差(年)	1.04	0.55	0.88	-	-	-	-	1.04
疑似 51.5年間 (陸上竜巻)	期間内総数	59	38	20	1	0	0	0	59
	平均値(年)	1.12	0.73	0.37	0.02	-	-	-	1.12
	標準偏差(年)	0.80	0.55	0.59	0.14	-	-	-	0.80
疑似 51.5年間 (全竜巻)	期間内総数	59	38	20	1	0	0	0	59
	平均値(年)	1.12	0.73	0.37	0.02	-	-	-	1.12
	標準偏差(年)	0.80	0.55	0.59	0.14	-	-	-	0.80

第7.7表 陸側4～5km範囲の竜巻発生・通過数

竜巻検討地域 (陸4-5km)	発生数の統計	小計	竜巻スケール				不明		総数 (含む不明)
			F0	F1	F2	F3	(陸上)	(海上)	
1961～ 2012/6 (51.5年間)	期間内総数	18	3	14	1	0	0	0	18
	平均値(年)	0.35	0.06	0.27	0.02	-	-	-	0.35
	標準偏差(年)	0.66	0.24	0.63	0.14	-	-	-	0.66
1991～ 2012/6 (21.5年間)	期間内総数	11	3	8	0	0	0	0	11
	平均値(年)	0.51	0.14	0.37	-	-	-	-	0.51
	標準偏差(年)	0.75	0.36	0.74	-	-	-	-	0.75
2007～ 2012/6 (5.5年間)	期間内総数	7	3	4	0	0	0	0	7
	平均値(年)	1.27	0.55	0.73	-	-	-	-	1.27
	標準偏差(年)	1.04	0.58	1.28	-	-	-	-	1.04
疑似 51.5年間 (陸上竜巻)	期間内総数	50	29	20	1	0	0	0	50
	平均値(年)	0.94	0.55	0.37	0.02	-	-	-	0.94
	標準偏差(年)	0.94	0.58	0.74	0.14	-	-	-	0.94
疑似 51.5年間 (全竜巻)	期間内総数	50	29	20	1	0	0	0	50
	平均値(年)	0.94	0.55	0.37	0.02	-	-	-	0.94
	標準偏差(年)	0.94	0.58	0.74	0.14	-	-	-	0.94

第7.8表 海側0～1km範囲の竜巻発生・通過数

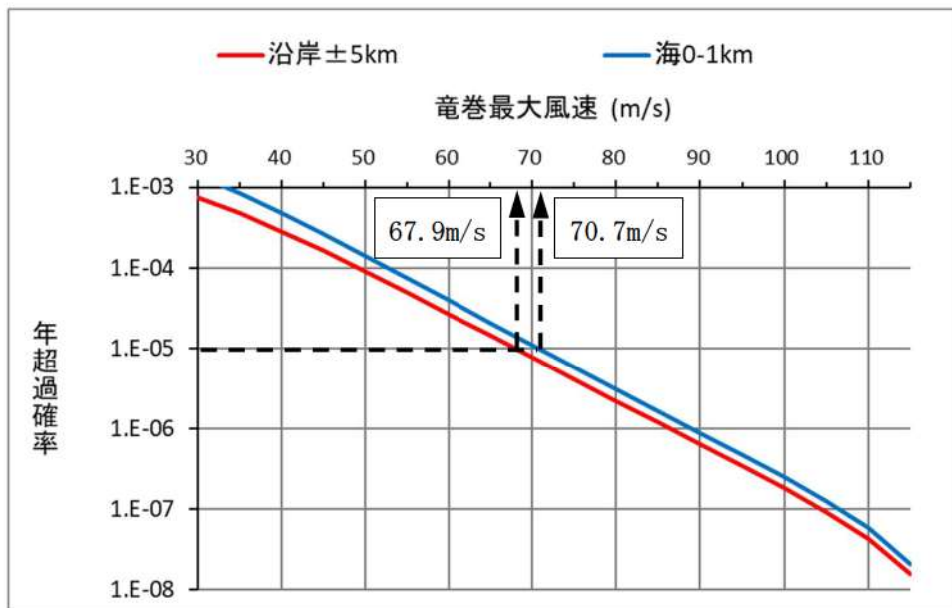
竜巻検討地域 (海0-1km)	発生数 の統計	小計	竜巻スケール				不明		総数 (含む不明)
			F0	F1	F2	F3	(陸上)	(海上)	
1961～ 2012/6 (51.5年間)	期間内総数	31	10	14	7	0	11	40	82
	平均値(年)	0.60	0.19	0.27	0.14	-	0.21	0.78	1.59
	標準偏差(年)	1.11	0.89	0.53	0.35	-	0.67	2.47	3.44
1991～ 2012/6 (21.5年間)	期間内総数	21	10	8	3	0	10	40	71
	平均値(年)	0.98	0.47	0.37	0.14	-	0.47	1.86	3.30
	標準偏差(年)	1.55	1.35	0.67	0.36	-	0.97	3.61	4.86
2007～ 2012/6 (5.5年間)	期間内総数	11	9	2	0	0	5	34	50
	平均値(年)	2.00	1.64	0.36	-	-	0.91	6.18	9.09
	標準偏差(年)	2.71	2.48	0.86	-	-	1.69	5.56	7.58
疑似 51.5年間 (陸上竜巻)	期間内総数	159	85	20	7	0	47	319	478
	平均値(年)	3.05	1.64	0.37	0.14	-	0.91	6.18	9.24
	標準偏差(年)	3.09	2.48	0.67	0.35	-	1.69	5.56	6.36
疑似 51.5年間 (全竜巻)	期間内総数	480	397	61	22	0	0	0	480
	平均値(年)	9.18	7.65	1.12	0.41	-	-	-	9.18
	標準偏差(年)	5.36	5.20	1.15	0.60	-	-	-	5.36

8. 竜巻最大風速のハザード曲線による最大風速 (V_{B2})

第 8.1 図に、海岸線から陸側及び海側それぞれ 5 km の範囲全域 (竜巻検討地域) 及び竜巻検討地域を 1 km 範囲ごとに細分化した場合の竜巻最大風速のハザード曲線を示す。

第 8.1 図より、陸側及び海側それぞれ 5 km の範囲全域を対象とした場合の年超過確率 10^{-5} における風速は 67.9m/s、竜巻検討地域を 1 km 範囲ごとに細分化した場合の年超過確率 10^{-5} における風速は 70.7m/s (海側 0～1km) となった。

よって、竜巻最大風速のハザード曲線による最大風速 (V_{B2}) は、陸側及び海側それぞれ 5 km の範囲全域及び 1 km 範囲の竜巻最大風速のハザード評価結果のうち大きい方を採用し、 $V_{B2}=70.7\text{m/s}$ とする。



第 8.1 図 竜巻最大風速のハザード曲線
(陸側及び海側それぞれ 5 km の範囲及び 1 km 範囲)

【参考資料 1】

海上のFスケール不明竜巻の按分方法の妥当性について

51. 5年間の疑似データを推定する際に、海上で発生したFスケール不明竜巻（非上陸竜巻）を、Fスケールが判明している陸上竜巻（含む上陸竜巻）のFスケールごとの発生比率で按分している。そこでは、沿岸部近傍での竜巻の発生特性は陸上と海上とでは類似している、と仮定している。他の合理的な按分方法も無いのが実情ではあるが、観測結果を基に、この仮定の妥当性について考察する。

ここでは、陸上で発生した竜巻（以下「陸上竜巻」という。）と、水上で発生しその後上陸した竜巻（以下「上陸竜巻」という。）を区別して考える。

表1及び図1は、陸上竜巻、上陸竜巻及び（陸上＋上陸）竜巻のそれぞれの竜巻区分に対して、F0, F1, F2以上の竜巻が占める割合である。全国の上陸竜巻の場合、Fスケールごとの割合はそれぞれ31, 45, 24%となっており、陸上竜巻との間に大きな差は無い（数%以内）。上陸竜巻は海上で発生した竜巻であることから、海上でのFスケール不明竜巻のFスケールごとの発生割合は、上陸竜巻の発生割合と同様だと考えられる。

上陸竜巻と陸上竜巻の発生割合に大きな差は見られないことは、海側と陸側のFスケールごとの発生割合が類似していることを示唆している。したがって、海上でのF不明竜巻を、陸上竜巻（あるいは（陸上＋上陸）竜巻）の発生割合で按分する手法は妥当な方法だと考えられる。

一方、竜巻検討地域の上陸竜巻の場合、Fスケールごとの割合はそれぞれ49, 33, 18%であり、陸上竜巻の値と10～20%程度異なる。竜巻検討地域の場合、F0の割合が全国の値に比べて大きく、逆にFスケールの大きな竜巻の割合が同程度少なくなっており、地域的な特性が見られる。上陸竜巻と陸上竜巻の割合の差が、地域特性によるものかデータ数が少ない事によるものか判断できないが、（陸上＋上陸）竜巻の割合は、全国の値に比較的近くなる（F0の数が多いという地域特性は残る）。したがって、（陸上＋上陸）竜巻の割合で按分する本手法は、データ数が少ない場合にも有効な手法だと考えられる。

表1 Fスケールごとの竜巻発生数の割合

(a) 全国沿岸±5km

発生数の割合 (%)	F0 (+不明)	F1	F2以上
陸上竜巻	32	50	18
上陸竜巻	31	45	24
(陸上+上陸)	32	48	20

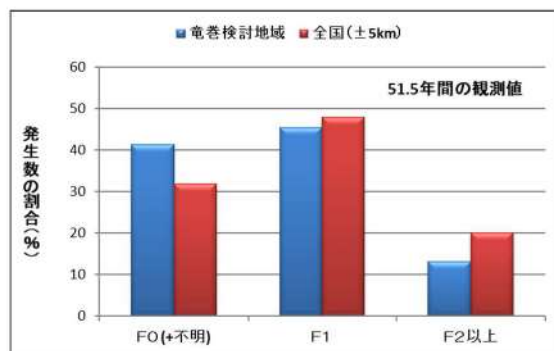
(b) 竜巻検討地域

発生数の割合 (%)	F0 (+不明)	F1	F2以上
陸上竜巻	37	53	10
上陸竜巻	49	33	18
(陸上+上陸)	41	45	13



(a) 全国±5km

(b) 竜巻検討地域



(c) (陸上+上陸) 竜巻

図1 Fスケールごとの発生数の割合

【参考資料 2】

竜巻発生数の確率分布（ポアソン，ポリヤ分布）がハザード結果に及ぼす影響

1. 竜巻発生確率とハザード曲線

Wen and Chu は、竜巻に遭遇し、かつ竜巻風速がある値以上となる確率の推定法を提案している。それによれば、竜巻の発生がポアソン過程に従うと仮定した場合、竜巻の年発生数の確率分布はポアソン分布若しくはポリヤ分布に適合する。

$$\text{ポアソン分布} : P_T(N) = \frac{(vT)^N}{N!} \exp(-vT) \quad (1)$$

$$\text{ポリヤ分布} : P_T(N) = \frac{(vT)^N}{N!} (1 + \beta vT)^{-(N+1/\beta)} \prod_{k=1}^{N-1} (1 + \beta k) \quad (2)$$

ここで、Nは竜巻の年発生数、 v は竜巻の年平均発生数、Tは年数である。

また、T年以内にいずれかの竜巻に遭遇し、 V_0 以上の竜巻風速に見舞われる確率 $P_{V_0,T}(D)$ は次式で表される。

$$\text{ポアソン分布} : P_{V_0,T}(D) = 1 - \exp[-vR(V_0)T] \quad (3)$$

$$\text{ポリヤ分布} : P_{V_0,T}(D) = 1 - [1 + \beta vR(V_0)T]^{-1/\beta} \quad (4)$$

ここで、 $R(V_0)$ は、検討対象とする構造物が、ある一つの竜巻に遭遇し、竜巻風速が V_0 以上となる確率である。

2. ポアソン分布とポリヤ分布

ポアソン過程とは、ある現象がランダムに起こる場合に、今までの発生状況がそれ以降の発生に影響を与えず、かつ発生が時間的に一様に推移する現象を表す数学的モデルであり、以下のような仮定に基づいている。

- ① 事象は時間・空間のいかなる場所でもランダムに発生する
- ② 与えられた時間・空間の区間内で、事象の発生は他の任意の区間に対して独立である
- ③ 微小区間 Δt における事象発生確率は Δt に比例する。 Δt の間に事象が2回以上発生する確率は無視できる

ポアソン分布に従う現象例としては、交通事故件数、大量生産の不良品数、火災件数、遺伝子の突然変異等数多くある。ポアソン分布の分散は平均値に等しいが、観測される現象の中には、その分散が平均値から外れている現象もある。

ポリヤ分布は、分散と平均値が異なるような現象への適合度が高く、 β が大きい場合は分散の大きな分布形を表し、 $\beta \rightarrow 0$ の時にはポアソン分布に近づく。Thom(1963) は、米国中部を対象とした竜巻発生数の分析を行い、ポアソン過程が実態と乖離する場合があることを指摘するとともに、ポリヤ分布による適合性が高いことを示した。

また、東京工芸大学委託成果では、陸上竜巻（含む上陸竜巻）及び水上竜巻のいずれに対しても、ポリヤ分布の適合度が高いことを示した。

ポリヤ分布は、疫病の流行、ある単語を含む文書数を数える文書頻度等の言語処理等に活用されており、ある事象が起こった場合に、それによって周囲にも現象が起こりやすくなる現象（弱い伝播性）が考慮されている。竜巻の場合では、前線や台風により竜巻が発生した場合、同時多発的に複数の竜巻が発生する（tornado outbreak と呼ばれる）状況が考えられる（Wen and Chu, 1973）。

3. 確率論から見た近似式

式(3)(4)に基づき、ポアソン分布とポリヤ分布に基づく竜巻ハザードを実際に計算すると、両者にほとんど違いが見られない。以下では、その理由について考察する。

ある一つの竜巻に遭遇し、竜巻風速が V_0 以上となるような被害を受ける確率を $R(V_0)$ とすると、このような竜巻被害を受けない確率は次式で表される。

$$(\text{被害を受けない確率}) = 1 - R(V_0) \quad (5)$$

同様に、 N 個の竜巻が発生したときに、いずれの竜巻に対しても被害を受けない確率は次式で表される（独立性を仮定）。

$$(N\text{個の竜巻で被害を受けない確率}) = [1 - R(V_0)]^N \quad (6)$$

逆に、 N 個の竜巻が発生したときに、いずれかの竜巻により被害（最低1回、最大 N 回）を受ける確率は次式となる。

$$(N\text{個のいずれかの竜巻で被害を受ける確率}) = 1 - [1 - R(V_0)]^N \quad (7)$$

したがって、1年間に N 個の竜巻が発生する確率を $P(N)$ とすると、これによる被害確率は、

$$\{1 - [1 - R(V_0)]^N\} P(N) \quad (8)$$

となる。 $R(V_0)$ が十分小さければ、上式は次のように近似できる。

$$\{1 - [1 - R(V_0)]^N\} P(N) \approx R(V_0) \times N \times P(N) \quad (9)$$

ここで、次の近似を用いている。

$$[1 - R(V_0)]^N \approx 1 - N \times R(V_0) \quad (10)$$

竜巻被害の場合、 $R(V_0)$ は通常 10^{-3} 以下であるから、式(10)の近似は非常に良い精度で成り立つ。

以上のことから、式(9)より、1年間にいずれかの竜巻により被害を受ける確率は次式で近似できる。

$$P_{V_0}(D) \approx \sum_{N=1}^{\infty} [R(V_0) \times N \times P(N)] = R(V_0) \sum_{N=1}^{\infty} [N \times P(N)] = \nu R(V_0) \quad (11)$$

すなわち、被害確率は竜巻発生数の平均値 ν のみに依存し、標準偏差は勿論、確率分布にも無関係であり、ポリヤ分布とポアソン分布によるハザードの結果は一致することが理解できる。

4. ポアソン分布とポリヤ分布のハザードの近似式

3. では、確率論的な観点だけで近似式を誘導したが、ここでは式(3) (4)の近似式を直接求め、上記の結果を検証する。

式(8)の $P(N)$ としてポアソン分布を仮定し、

$$\begin{aligned} \left\{ 1 - [1 - R(V_0)]^N \right\} P(N) &= P(N) - [1 - R(V_0)]^N P(N) \\ &= P(N) - [1 - R(V_0)]^N \frac{\nu^N}{N!} \exp(-\nu) = P(N) - \frac{(\nu - \nu R(V_0))^N}{N!} \exp(-\nu) \end{aligned} \quad (12)$$

となることを考慮すると、式(11)の厳密な式は以下のとおりである。

$$\begin{aligned} P_{V_0}(D) &= \sum_{N=1}^{\infty} \left\{ P(N) - \frac{(\nu - \nu R(V_0))^N}{N!} \exp(-\nu) \right\} \\ &= 1 - \exp(\nu - \nu R(V_0)) \exp(-\nu) \\ &= 1 - \exp(-\nu R(V_0)) \end{aligned} \quad (13)$$

すなわち、ポアソン分布によるハザード評価の式(3)が導かれる。ここで、次の関係式を用いている。

$$\exp(x) = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{x^n}{n!} \quad (14)$$

したがって、式(3) (あるいは式(13)) は、式(14)を用いると、

$$P_{V_0}(D) = 1 - \exp(-\nu R(V_0)) = 1 - \left(1 + \frac{(-\nu R(V_0))}{1!} + \frac{(-\nu R(V_0))^2}{2!} + \dots \right) \quad (15)$$

と表され、 $R(V_0)$ が小さい場合は、次式で近似できる。

$$P_{V_0}(D) \approx \nu R(V_0) \quad (16)$$

ポリヤ分布の場合も同様に、一般の2項定理を用いると、次式で近似できる。

$$\begin{aligned} P_{V_0}(D) &= 1 - [1 + \beta \nu R(V_0)]^{-1/\beta} = 1 - \left(1 + \left(\frac{-1}{\beta} \right) \beta \nu R(V_0) + \dots \right) \\ &\approx \nu R(V_0) \end{aligned} \quad (17)$$

以上のことから、竜巻のように一つの竜巻に対する被害確率が非常に小さな現象に対しては、年被害確率は竜巻発生数の平均値にのみ依存し、発生数の確率分布形状にはほとんど無関係であることが分かる。

【参考資料 3】

竜巻ハザードの推定幅（推定誤差）に関する考察

1. はじめに

自然現象評価では、不確実さの存在を認識することが重要であるため、竜巻ハザードに関わる不確かさの要素について、以下のとおり整理した。

- ① 確率分布形選択に伴う不確実さ（認識論的不確実さ）
確率分布形選択に伴うパラメータ不確実さ
- ② データ量が少ないことに伴う不確実さ（認識論的不確実さ）
データ収集期間が51.5年間分であることから、地震等と比較するとデータ量が少ないことに伴うパラメータ不確実さ
- ③ データの不確実さ（偶然的な不確実さ）
今後データ収集が進み、疑似データ同様のデータが収集されたとした場合でも残る、データそのものの不確実さ

これらの不確実さ要素がハザード評価に及ぼす影響について検討する。

2. Jackknife法を用いたハザードの推定誤差

2.1 竜巻パラメータとハザードの推定誤差

疑似データ209個の竜巻データに対して、Jackknife法を適用した。Jackknife法は水文統計分野で広く使用される手法で、国土交通省が定める河川行政の技術分野に関する基準である「河川砂防技術基準」においても、確率分布モデルのバイアスを補正すると共に、その安定性を評価する手法として挙げられている。母集団分布を仮定しないノンパラメトリックな方法であり、高い適用性をもつ。

Jackknife法は大きさ n 個の標本のうち i 番目の 1 データのみを欠いたデータ数 $n-1$ 個の標本をすべての i について作成し (n セット作成することになる)、これらの標本から求めた統計量を基に不偏推定値及びそのまわりの推定誤差を算定する手法である。(具体的な計算方法は後述)

n 個の全データを使って求められた再現期待値 (例えば風速平均値の場合、 n セットの風速平均の平均) を P_0 とすると、バイアス補正した推定値 (以下「Jackknife 推定値」という。) P^* とその標準偏差の推定値 (以下「Jackknife 推定幅」という。) ΔP^* は次式で与えられる。

$$P^* = P_0 + \frac{(N-1)(P_0 - \bar{P})}{N} \quad (1)$$

$$\Delta P^* = \sqrt{N-1} \Delta P \quad (2)$$

- ・ P_0 : N個の全データを使って求められた再現期待値 (例えば風速平均値の場合Nセットの風速平均の平均)
- ・ P^* : バイアス補正した推定値 (以下「Jackknife 推定値」という。)
- ・ ΔP^* : P^* の標準偏差の推定値 (以下「Jackknife 推定幅」という。)
- ・ \bar{P} : 分布を仮定した場合の推定値 (以下「推定値」という。)
- ・ ΔP : nセットの風速平均データの標準偏差
- ・ (1)式の下線部 : バイアス (母数の真の値と推定値の差)

本検討で得られた結果を表1に示す。

例えば風速の平均値の場合、Jackknife推定値は29.192m/sであり、対数正規分布を仮定した場合と同じである。また、Jackknife推定幅は0.283m/sと推定される。

これらの平均値と標準偏差、及びそれぞれの推定幅を基に、すべてのパラメータを+1 σ とした場合のハザードを計算した。計算条件の一覧を表2に示す。また、ハザードの推定結果を図1、図2及び表3に示す。

図1よりデータの変動に伴うバイアス誤差は小さいことが確認できる (①, ②の不確実さ推定)。ハザードについては表3より、サンプリング誤差に伴う不確実さについて信頼度84%をカバーする値として、年超過確率 10^{-5} において72.23m/sであると言える (③の不確実さを考慮)。

表1 Jackknife 法により得られた竜巻パラメータの特性

竜巻検討地域 (疑似データ 1222 個)	風速 (U)		幅 (W)		長さ (L)		相関係数		
	平均値	標準偏差	平均値	標準偏差	平均値	標準偏差	U~W	U~L	W~L
平均	29.192	9.888	117.9	131.6	1550.5	2653.7	-0.0600	0.3190	0.4574
標準偏差	0.008	0.008	0.1	0.2	2.2	5.4	0.0194	0.0176	0.0409
全データ	29.192	9.888	117.9	131.6	1550.5	2653.7	-0.0599	0.3190	0.4572
バイアス	0.000	-0.004	0.0	-0.2	0.0	-6.6	-0.0080	-0.0030	0.0083
Jackknife 推定値	29.192	9.893	117.9	131.7	1550.5	2660.3	-0.0518	0.3162	0.4507
Jackknife 推定幅	0.283	0.296	3.8	6.8	75.9	187.3	0.1506	0.1056	0.1325

表2 ハザードの計算条件

ケース名	統計量	発生数	風速	幅	長さ	U~W	U~L	W~L
基本 (全データ)	平均	23.728	29.192	117.897	1550.491	-0.0599	0.3190	0.4572
	標準偏差	9.914	9.888	131.558	2653.688			
バイアス補正後	平均	23.728	29.192	117.897	1550.491	-0.0518	0.3162	0.4507
	標準偏差	9.914	9.893	131.733	2660.295			
風速・幅・長さ・相関 (+1 σ)	平均	23.728	29.475	121.660	1626.404	0.0995	0.4082	0.5503
	標準偏差	9.914	10.188	138.526	2847.556			

注) 発生数の平均と標準偏差は、疑似データの値を使用。

注) 負の相関係数は0と置く。

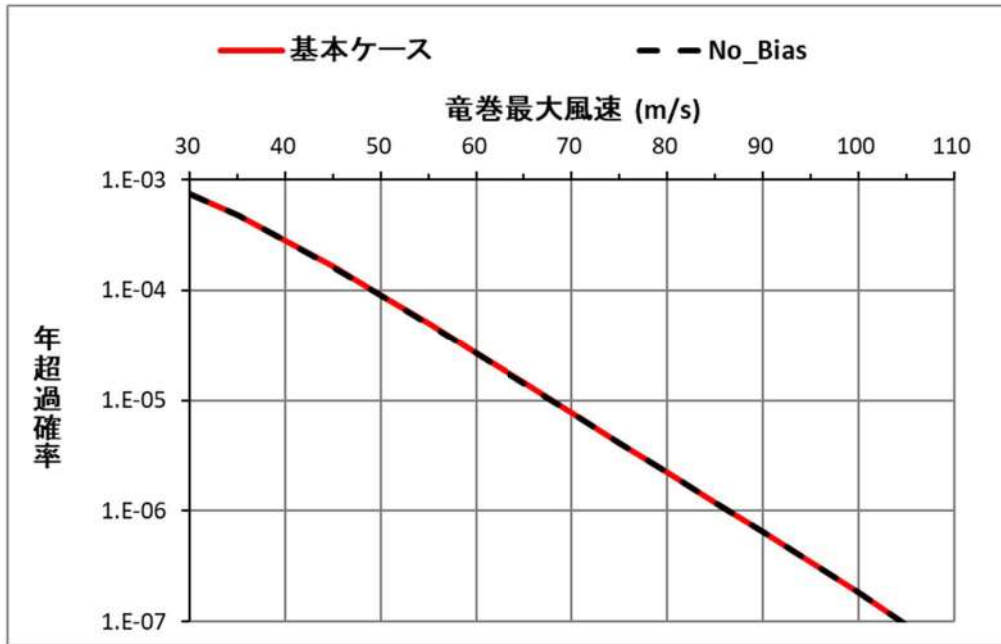


図1 基本ケースとバイアス補正後ケースのハザード算定結果比較

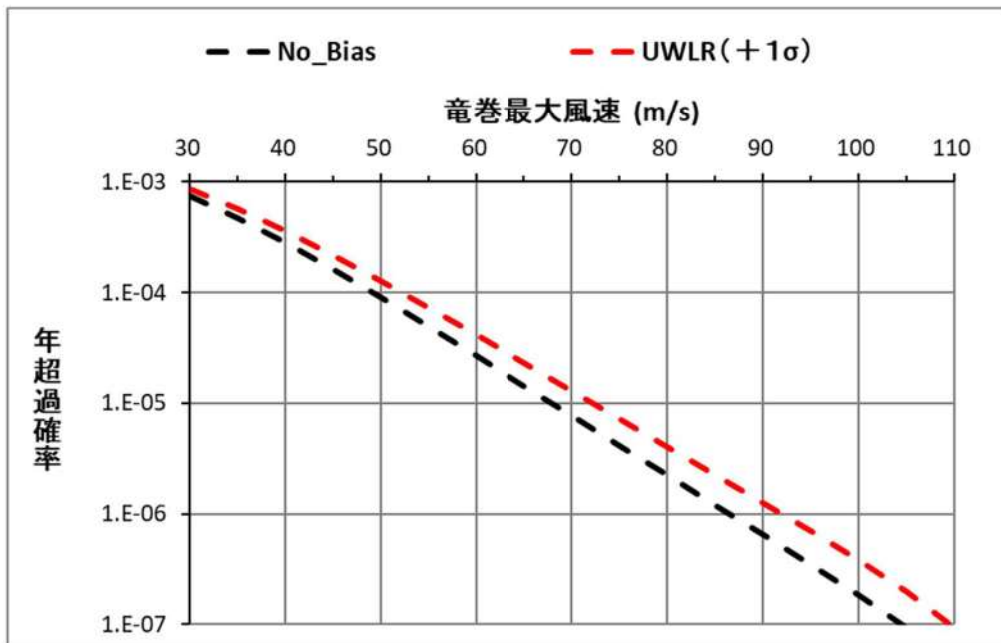


図2 バイアス補正後ケースと全パラメータ+1σケースのハザード算定結果比較

表3 ハザード推定結果

ケース名	超過確率に対応する竜巻風速				バイアス補正後の竜巻風速との差			
	10 ⁻⁴	10 ⁻⁵	10 ⁻⁶	10 ⁻⁷	10 ⁻⁴	10 ⁻⁵	10 ⁻⁶	10 ⁻⁷
基本ケース	49.14	67.90	86.45	104.39	0.02	0.03	0.03	0.02
バイアス補正後	49.12	67.87	86.42	104.37	0.00	0.00	0.00	0.00
風速・幅・長さ・相関 (+1σ)	52.13	72.23	91.93	109.51	3.01	4.36	5.51	5.14

3. まとめ

不確実さ要素のハザード算定への影響について以下のような結果が得られた。

① 確率分布形選択に伴う不確実さ（認識論的不確実さ）

⇒バイアス補正を実施してもハザードは年超過確率 10^{-5} において 1 m/s 以下の
変化であったことから、影響は限定的である。

② データ量が少ないことに伴う不確実さ（認識論的不確実さ）

⇒①同様、バイアス補正を実施してもハザードは年超過確率 10^{-5} において 1 m/s
以下の変化であったことから、安定した標本となっており、母集団の確率特
性をよく表現できていると考えられる

③ データ（疑似データ）の不確実さ（偶然的な不確実さ）

⇒データの不確実さを考慮したハザード評価により、サンプリング誤差の不確
実さについて信頼度 84%をカバーする値として、年超過確率 10^{-5} において
72.23m/s であると言える。

以上より、 $V_{B2}=70.7\text{m/s}$ は高い信頼度を持った数値と推測されることから、合理的
に望ましい対策を検討するために使用可能な数値と判断できる。

Jackknife 法の具体的な手順

大きさ n の標本の各データを X_1, X_2, \dots, X_n とする。これを用いて求める母集団の特性
を推定する統計量（竜巻ハザードの場合、各パラメータの平均及び分散）を

$$\hat{\psi} = \psi(X_1, X_2, \dots, X_n)$$

とする。大きさ n 個の標本のうち i 番目の 1 データのみを欠いたデータ数 $n-1$ 個の標
本を用いた統計量を

$$\hat{\psi}_{(i)} = \psi(X_1, X_2, \dots, X_{i-1}, X_{i+1}, \dots, X_n)$$

とする。 $\hat{\psi}_{(i)}$ の平均値を

$$\hat{\psi}_{(\bullet)} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \hat{\psi}_{(i)} \quad (3)$$

により求める。バイアス値は次式で与えられる。

$$\hat{BIAS} = (n-1)(\hat{\psi}_{(\bullet)} - \hat{\psi}) \quad (4)$$

これを用いて統計量のバイアスを補正した Jackknife 推定値は次式で与えられる。

$$\tilde{\psi} = \hat{\psi} - \hat{BIAS} = n\hat{\psi} - (n-1)\hat{\psi}_{(\bullet)}$$

また、Jackknife 法による推定幅は、

$$\hat{\sigma}^2 = \frac{n-1}{n} \sum_{i=1}^n (\hat{\psi}_{(i)} - \hat{\psi}_{(\bullet)})^2 \quad (5)$$

で求められる。

【参考資料 4】

竜巻風速の積分範囲（～120m/s）について

竜巻ハザードの計算では、下記の式を数値積分して、一つの竜巻が発生したときに、風速 V_0 以上となる被害面積の期待値を求める。風速に関しては、 $V_0 \sim \infty$ までが積分範囲（ V_0 以上の超過確率）であるが、実際には無限大まで積分できないため、ある風速（ V_{\max} ）で打ち切らざるを得ない。その場合、 $V_{\max} \sim \infty$ の超過確率が打ち切りに伴う誤差になる。

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

東京工芸大学委託成果では、この積分の打ち切り風速をFが上限（92.6m/s）とした場合と、F4の上限（116.2m/s）とした場合のハザードが比較されている（図1参照）。図1から分かるように、打ち切り風速により、高風速域でのハザードに違いが見られる。

東京工芸大学委託成果では、日本で発生する竜巻の風速が100m/s程度と見積もり、積分の上限も100m/s程度が妥当であろうとしている。一方、米国のガイドによる風速を踏まえ、日本で起こりうる竜巻最大風速を103m/sと想定し、積分の上限を92.5m/sとした場合と116.2m/sとした場合のハザードの竜巻風速を加重平均している（図2参照）。

一方で、大きな打ち切り風速を設定すると、数値積分上の誤差が蓄積し、ハザードの推定精度に影響を及ぼすことが懸念される。

ここで、風速の対数正規分布の超過確率評価における積分精度を確認するために、現行評価の計算結果と別の計算手法を用いた計算結果との比較を行うことで、現行評価手法の妥当性を確認した。現行評価では超過確率を求めるために、積分手法として一般的に用いられる台形公式を使用した数値積分を行っている。また、対数正規分布の積分式は、数学的手法により特定の関数形に置換することで近似解が得られることから、精度確認の比較計算として、この近似解を求める計算を行った。両計算によって得られる超過確率の比較を行うことで、現行評価の積分精度に問題がないことを確認している。（図3参照）

図3より、風速の対数正規分布（風速のみの1次元分布）は、120m/s程度までは正

確に積分できることを確認した上で、ハザードの積分の上限を120m/sに設定し、110～115m/s程度までのハザードを評価対象とした。

竜巻影響評価ガイドでは、「竜巻最大風速の確率密度分布の積分の上限値を設定する場合は、竜巻最大風速の評価を行うハザード曲線が不自然な形状にならないように留意する」と記されているが、本検討で得られたハザード曲線は、図1に示されたような問題点はほとんど無いものとする。

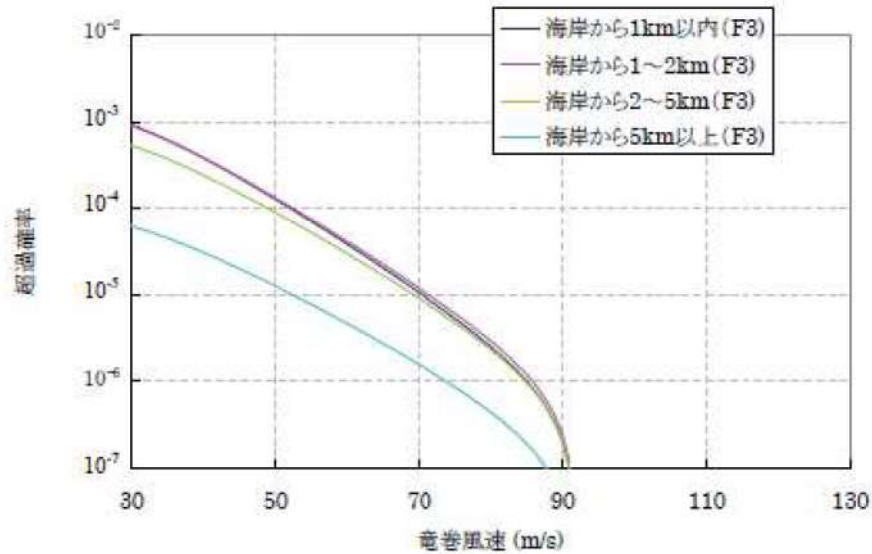


図 2.1.2.14 竜巻風速の確率密度の積分の上限を 92.6m/s (F3 の上限値) にした場合の竜巻リスクの計算結果 (全国平均)

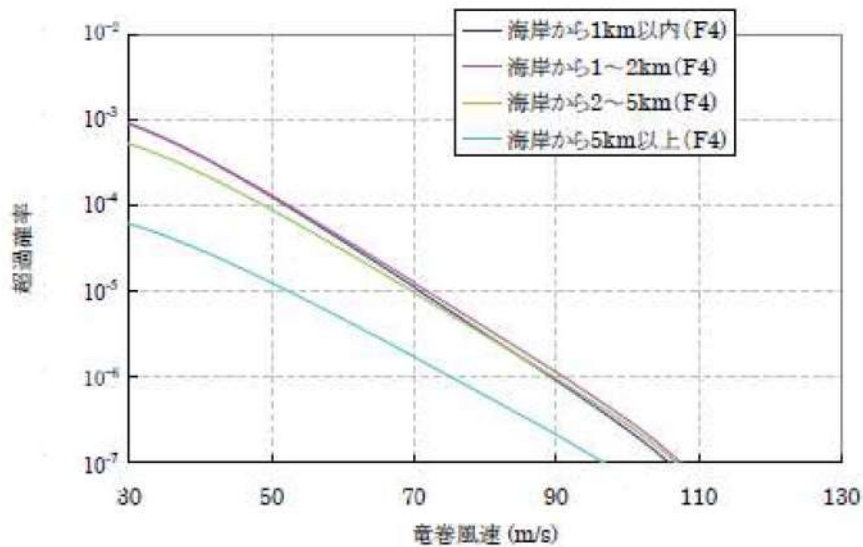


図 2.1.2.15 竜巻風速の確率密度の積分の上限を 116.2m/s (F4 の上限値) にした場合の竜巻リスクの計算結果 (全国平均)

図1 東京工芸大学委託成果より抜粋

気象庁の突風データベースに残されている最大の竜巻は F3 である。しかし、1990 年 12 月 11 日に千葉県茂原市で発生した竜巻の最大竜巻風速は 100m/s と予想され、F4 と判定すべきではないかという見解もある。そのため、本節で示した竜巻リスクの計算を行う場合、竜巻風速の確率密度分布を積分する上限値も 100m/s 程度にするのが妥当と思われる。

一方、米国の Regulatory Guide [12]では、超過確率が 10^{-7} に相当する竜巻風速を原子力施設のガイドラインとして設定しており、その値は下記の通りである。

- i) Region I (アメリカ中央部) : 103m/s (230mph)
- ii) Region II (東海岸、北部国境およびグレートプレーンズの西部) : 89m/s (200mph)
- iii) Region III (合衆国西部) : 72m/s (160mph)

米国の Regulatory Guide [12]に設定されている竜巻風速は、Region I では F4 に相当し、Region II および Region III では F3 に相当する。

この傾向を踏まえ、日本で起こりうる竜巻風速の最大値を 103m/s と想定し、竜巻風速の確率密度分布を積分する上限を 92.5m/s とした場合と 116.2m/s とした場合の竜巻風速を加重平均化した。そうして計算した超過確率が 10^{-5} 、 10^{-6} 、および 10^{-7} に相当する竜巻風速(全国平均)を表 2.1.2.22 および図 2.1.2.20 に示す。Regulatory Guide と同じ超過確率が 10^{-7} に相当する竜巻風速は、海岸から 5km 以内の陸地では 98m/s 程度で海岸から 5km 以上離れた陸地では 91m/s となり、米国の場合と大きな違いが見られない結果となっている。

図 2.1.2.1 に示した 7 個の地域の場合も、発生しうる最大の竜巻風速が 103m/s を想定した場合の超過確率が 10^{-5} 、 10^{-6} 、および 10^{-7} に相当する竜巻風速を、加重平均によって計算した。その結果を表 2.1.2.23 および図 2.1.2.21 に示す。海岸から 5km 以内の地域では、地域④の一部と地域⑤を除いて全て F4 の竜巻に相当する風速である。前述したように、地域④と地域⑤では人口密度が小さいため竜巻の単位面積あたりの観測数が実際よりも小さい可能性がある。その点を考慮すると、海岸から 5km 以内の超過確率が 10^{-7} に相当する竜巻風速は日本全国全ての地域で 100m/s 程度になるとと思われる。海岸から 5km 以上離れた地域では、地域に関係なく 10^{-7} に相当する竜巻風速は 80 から 90m/s である。

図 2.1.2.2 に示した 19 個の地域では、竜巻の発生頻度が顕著に高くなっている(図 2.1.2.5)。この 19 個の地域の 92.5m/s と 116.2m/s を積分の上限とした場合の竜巻リスクを計算した。その結果から超過確率が 10^{-5} 、 10^{-6} 、および 10^{-7} に相当する竜巻風速を取り出し、上記と同様の加重平均化した竜巻風速を計算した。その結果を表 2.1.2.24～表 2.1.2.26 および図 2.1.2.22～図 2.1.2.24 に示す。図 2.1.2.1 に示した 7 個の地域に分けた場合に比べて、図 2.1.2.2 に示した 19 個の地域の竜巻風速が大きくなる傾向にある。その傾向は超過確率が 10^{-6} と 10^{-5} の場合に、よりはっきりと表れている。特に、高知県南部(②-2)、静岡県(③-3)、北海道南部(④-1)、鳥取県の一部(⑤-4)、秋田県(⑦-2)の海岸地域のリスクは高い傾向にある。

図2 東京工芸大学委託成果より抜粋

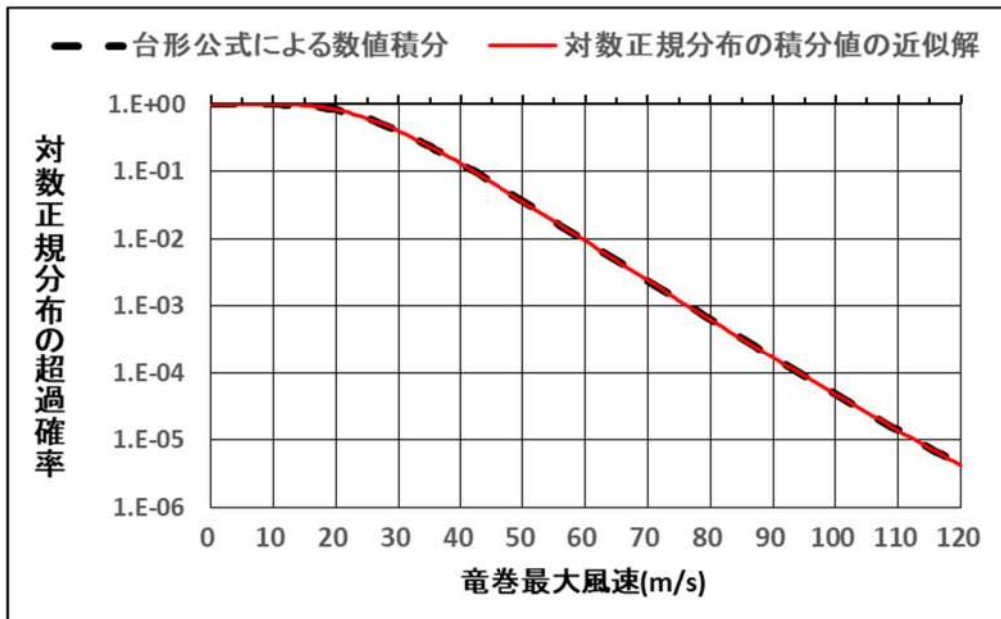


図3 風速の確率分布の積分精度の検証（近似解との比較）

地形効果による竜巻風速への影響について

1. はじめに

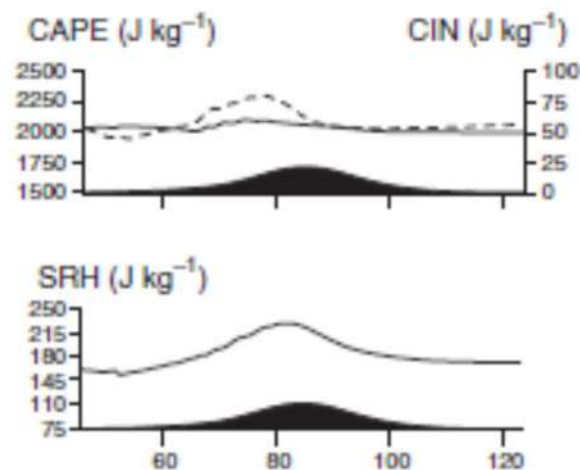
「原子力発電所の竜巻影響評価ガイド」において、丘陵等による地形効果によって竜巻が増幅する可能性があると考えられることから、原子力発電所が立地する地域において、設計対象施設の周辺地形等によって竜巻が増幅される可能性について検討を行い、その検討結果に基づいて設計竜巻の最大風速 (V_D) を設定することが求められている。

ここでは、既往の研究に基づく地形起伏の竜巻の風速への影響に関する知見を取りまとめる。

2. 対象とする地形起伏スケールの整理

竜巻に対する地形の効果は、スーパーセルスケールへの関与によるメソスケールでの「発生」等への影響と、渦の旋回流への関与によるマイクロスケールでの「風速」等への影響とに大別される。

前者への言及として、例えば、Markowsk and Dotezk(2011)による数値気象モデル (CM1) を用いた検討等がある。ここでは、メソスケールの地形 (尾根幅数十km程度) が、CAPEやSRHといった、竜巻の発生要因を支配するパラメータに与える影響が論点となる。加藤らによる佐呂間竜巻への分析もこれに相当すると考えられる。



第2-1図 メソスケール尾根地形に起因するCAPE, SRH等のパラメータの変化を調べた例

一方、竜巻風速 V_D に対する地形影響には、後者が相当する。ここでは、タッチダウンした漏斗雲により発生する旋回流及びそれに随伴して生じる強風への地形影響が論点となる。ここで考慮すべき地形の規模としては、前述のメソスケールのものと比べて小さく数百 m 規模と考えられる (Karstens 2012, Lewellen 2012)。

3. マイクロスケールの地形の起伏が竜巻の旋回流強度及び強風に与える影響

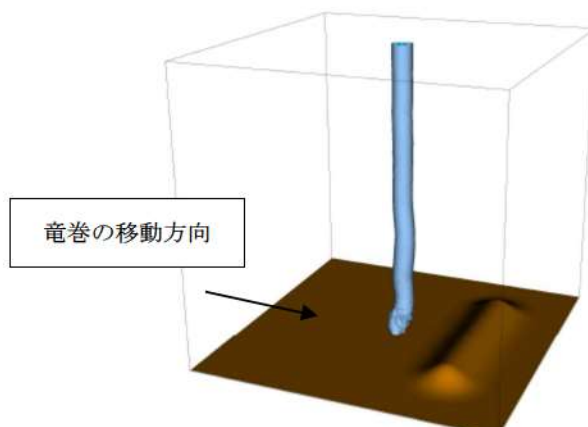
マイクロスケールの地形の起伏が竜巻の旋回流及び強風に与える影響の定量的評価は、未だ、研究課題である (Karstens 2012)。しかしながら、定性的な知見を与える関連研究は存在する。そこで用いられている主な手法は、①被害状況調査、②風洞実験、③数値シミュレーションとなる。

- ① 被害状況調査 (Forbes 1998, Karstens 2012) では、実際の竜巻の被害を精査し、被害状況と地形特性との関係を調べる。これにより、被害が発生しやすい地形特性を分析し、そこから旋回流強度及び風速の強弱を類推することになる。
- ② 風洞実験 (Karstens 2012) では、風洞実験の測定部に尾根や斜面といった地形模型を入れ、その上部に竜巻発生装置を設置し、それを移動させたときの、地表面近傍の圧力・風速分布を調べる。



第 3-1 図 風洞実験の様子 (Karstens 2012)

- ③ 数値シミュレーション (Lewellen 2012) では、竜巻の旋回流や移動及び地形の起伏を模擬した流体解析コードによる、数値実験を行い、旋回流の強度や風速及び竜巻の構造に関連する圧力分布を調べる。

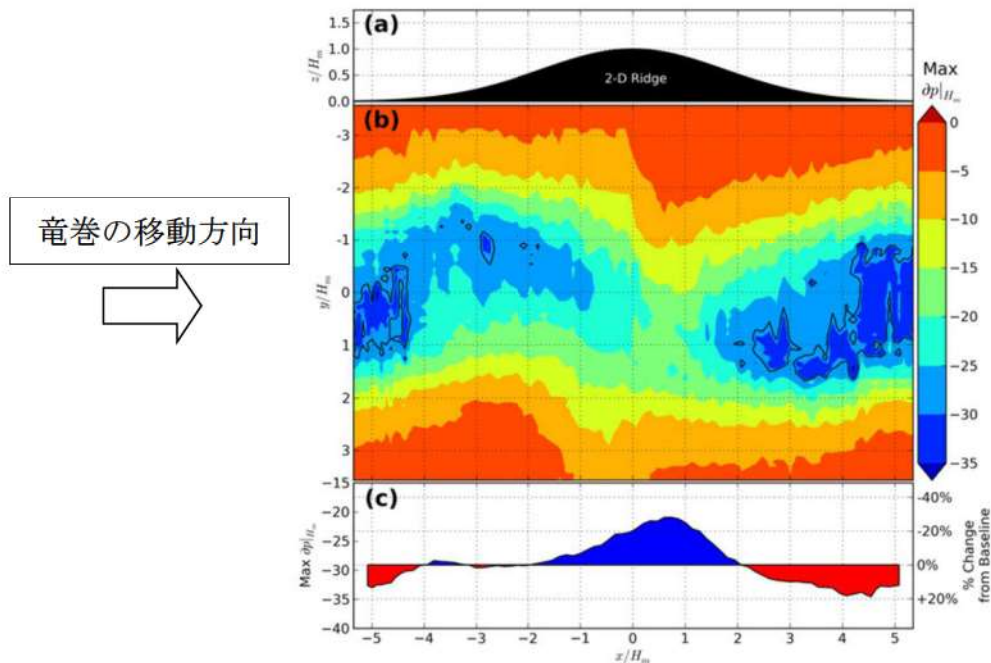


第 3-2 図 数値シミュレーションのセットアップ

これらを通じて、マイクロスケールの地形の起伏に起因する竜巻の旋回流や風速の強化に対する知見が得られている。被害状況調査により、竜巻の強化が下り斜面や尾根の裾で生じる可能性が示唆されている (Forbes 1998, Karstens 2012)。また、実被害調査の知見を支持する結果が風洞実験・数値シミュレーションにおいても確認されている。二次元尾根地形を対象とした場合の風洞実験 (Karstens 2012) 及び数値シミュレーション (Lewellen 2012) の結果をそれぞれ、第3-3図、第3-4図に示す。風洞実験の結果である第3-3図において、(a)に示す二次元尾根地形を図中左側から右側に竜巻を模擬した旋回流が移動するときに地表面で測定された圧力の最大値が(b)になる。ここで実験仕様の制約上、風速のデータは取得されておらず、風速に相当するものとして、圧力勾配 (圧力の高いところから低いところへ流れる風の駆動力になり、風速に相当する) を(c)に示している。(c)の結果から、

- ① 圧力勾配 (図(c)) が斜面において、正・負の値を持つこと (=旋回流が強弱する)
- ② 斜面に比べ尾根の上・下流の平坦な部ではほぼフラットとなること (=旋回流の強度が変化しない)

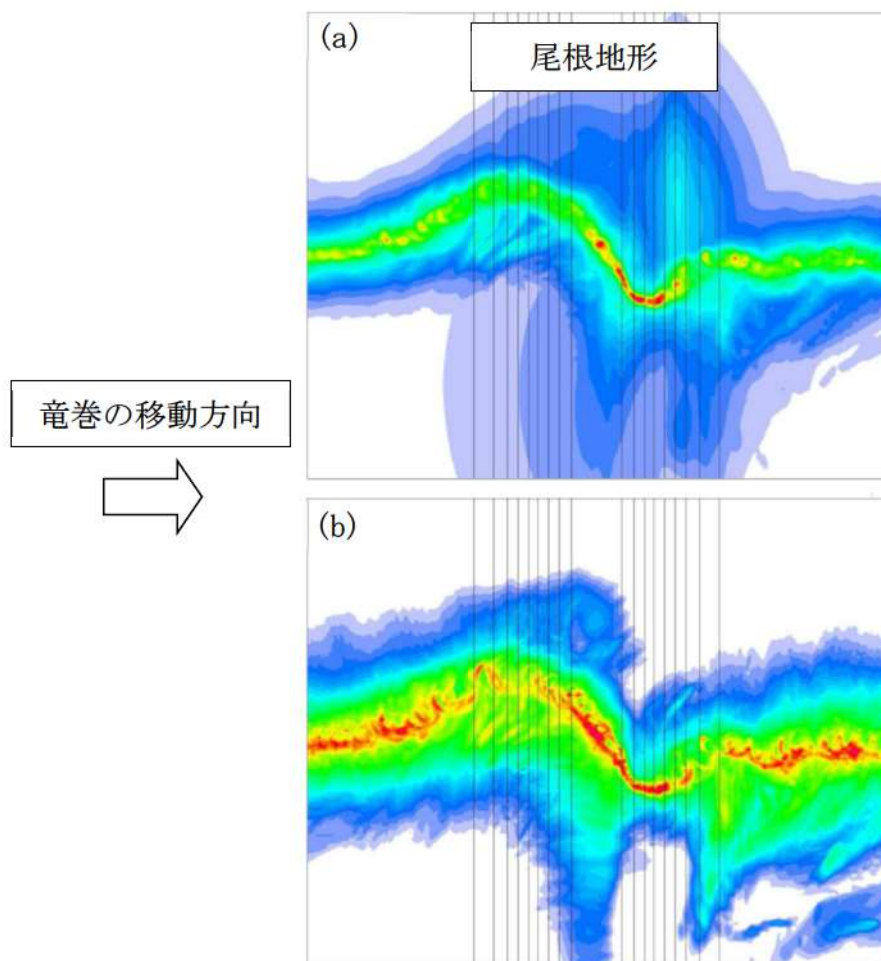
を理解できる。



第3-3図 尾根地形を竜巻が通過するときの地表面圧力及び圧力勾配 (風速に相当)

数値シミュレーション結果である第3-4図において、ピーク圧力が(a)、風速が(b)になる。シミュレーションは風速の取扱いを可能としており、第3-4図の(b)のような結果の議論を可能としている。図中の黒色実線が等高線を意味し、竜巻は、第3-3図と同じく図中左側から右側へと移動している。この結果も、下記のとおり第3-3図の知見と整合している。

- ・ 上り斜面では圧力が増加し（緑色→赤色）、下り斜面では圧力が減少（赤色→緑色）する（実験で得られた知見①を支持）
- ・ ピーク圧力の高い領域は尾根頂部に限定され、平たん部の圧力は上流側と下流側とで同レベルとなる。（実験で得られた知見②を支持）



第3-4図 尾根地形を竜巻が通過するときの地表面ピーク圧力及び風速

ここで地形の規模として尾根高さ H_m に対して $\pm 5H_m$ を考慮していることにも留意を願いたい。これは、尾根高さが100mの場合、 $\pm 500m$ にわたる地形を対象としていることを意味する。

また、これらの研究が、地形の起伏の影響範囲が、斜面及び尾根・山の頂・裾部に限定されることを示唆していることを強調したい。第3-3図、第3-4図にみられるとおり、地形の下流側の平たん部における風速や圧力の値は、地形を乗り越える前の上流部の値に相当する。

4. 泊発電所における地形効果による竜巻の増幅可能性について

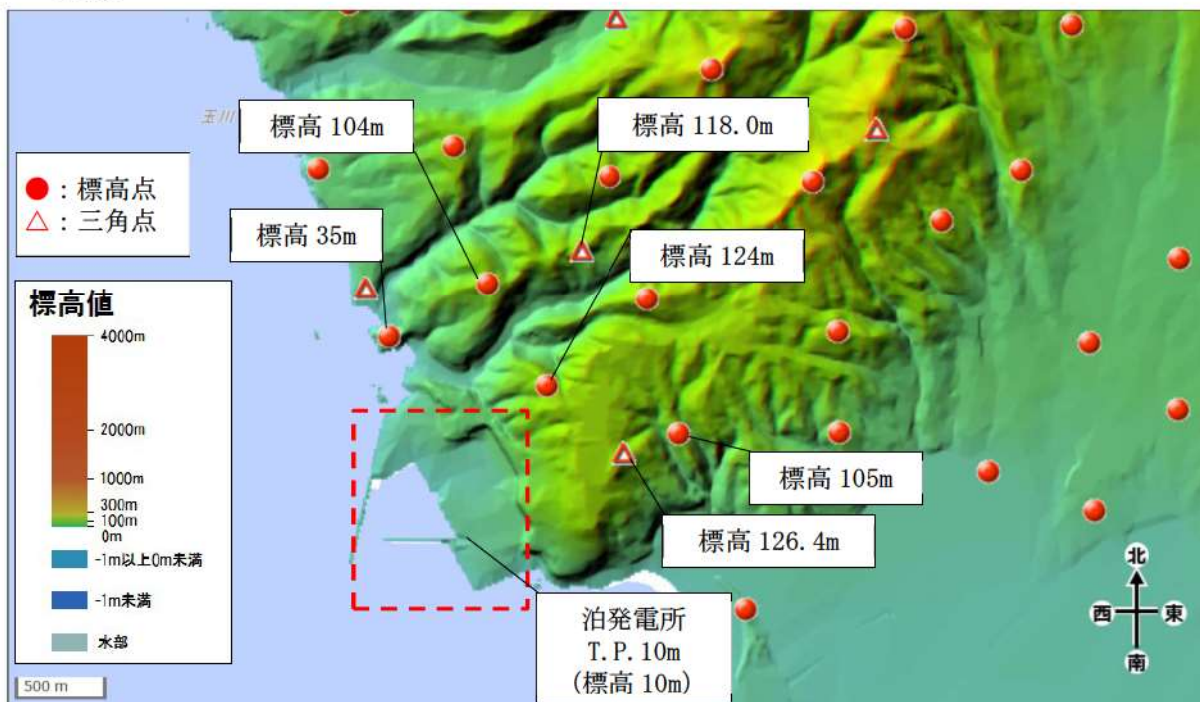
第 4-1 図に泊発電所周辺の地形図，第 4-2 図に泊発電所周辺の地表面粗度カラーコンタ（地表面粗度については参考資料 3 に示す），第 4-3 図に泊発電所周辺の標高及び防潮堤高さ，第 4-4 図に竜巻検討地域で発生した竜巻の移動方向を示す。

第 4-1 図～第 4-3 図に示すとおり，発電所が立地する敷地は，敷地前面（北西～南西方向）が日本海に面し，背後は積丹半島中央部の山嶺に続く標高 40m から 130m の丘陵地である。

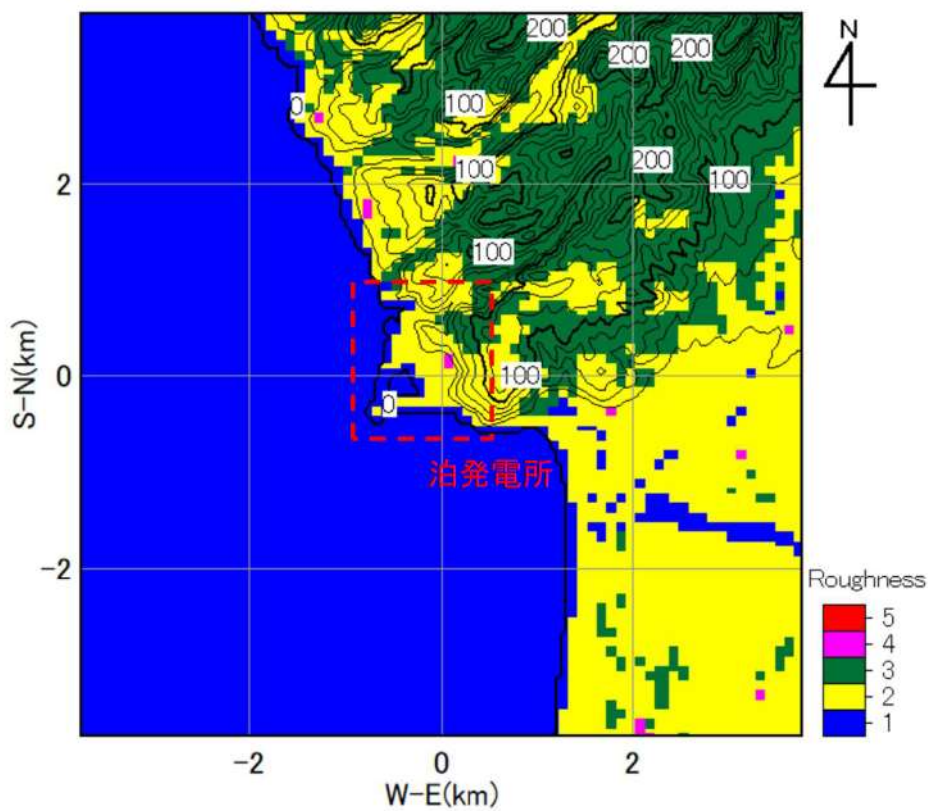
また，第 4-4 図より，竜巻検討地域で発生した竜巻は，海側から陸側に移動する方向が多く，竜巻風速は減衰する方向であった。

仮に竜巻が海上から発電所に進入してきた場合は，地表面粗度の影響を受けて竜巻は減衰した後，さらに防潮堤(T.P. 16.5m)で減衰するため，竜巻による施設への影響は限定的となると考えられる。また，山側から発電所の敷地に移動してきた場合についても，発電所周辺は広く森林が存在しており，竜巻は森林による粗度の影響を大きく受けるため減衰する。

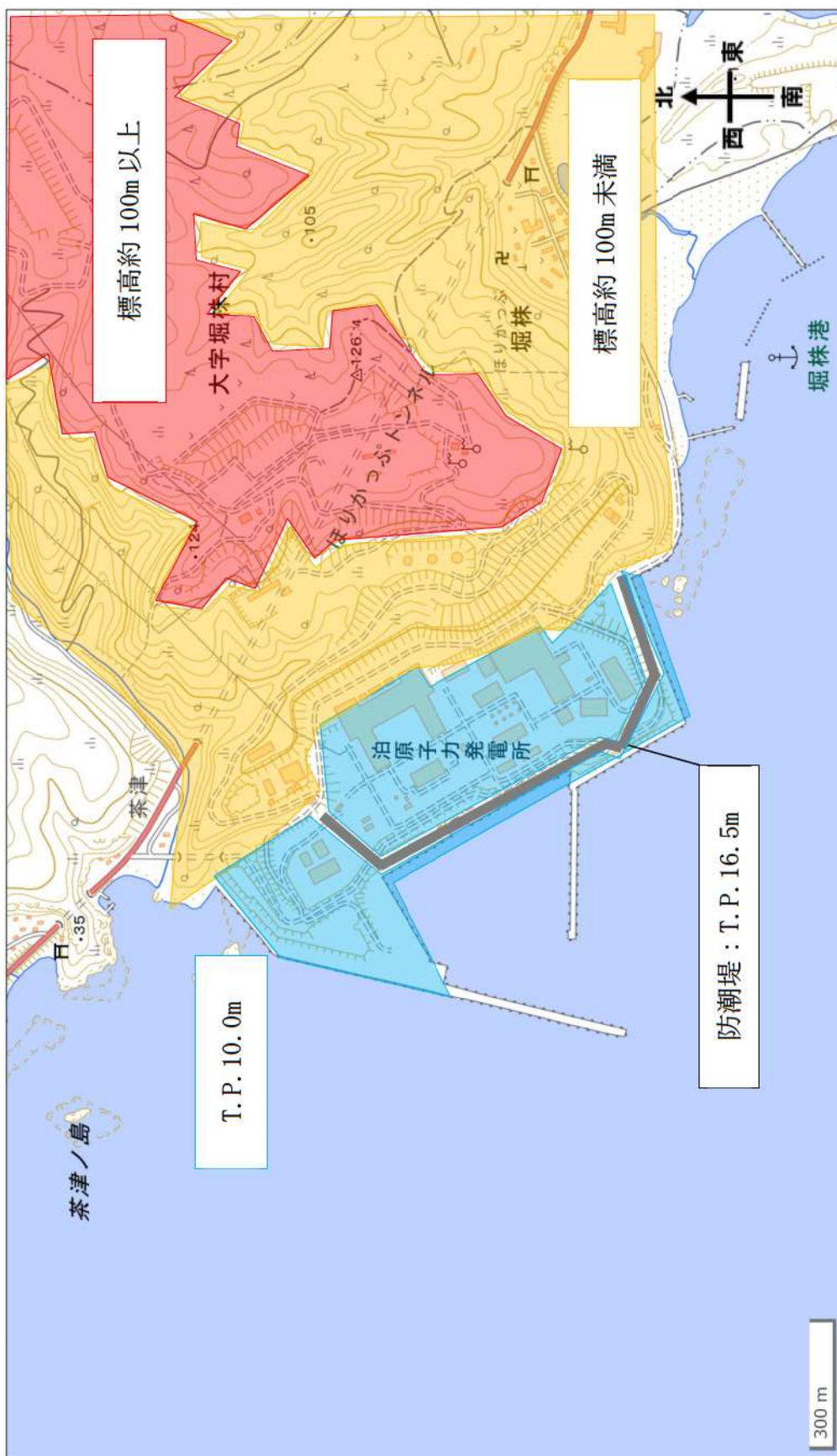
したがって，泊発電所において地形効果による竜巻の増幅を考慮する必要はないと考えられる。



第 4-1 図 泊発電所周辺の地形 (国土地理院「電子国土 Web」より作成)



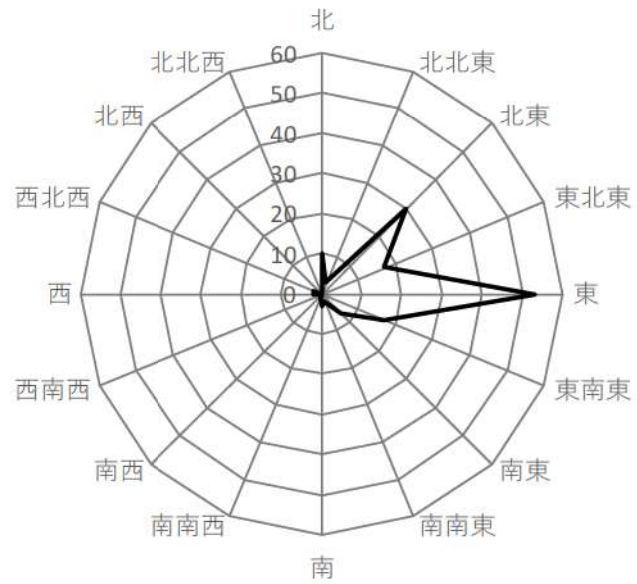
第 4-2 図 泊発電所周辺の地表面粗度



第 4-3 図 泊発電所の周辺の標高及び防潮堤高さ

[個]

北	10
北北東	3
北東	30
東北東	17
東	53
東南東	17
南東	7
南南東	2
南	3
南南西	1
南西	0
西南西	0
西	2
西北西	2
北西	0
北北西	0
計	147



第 4-4 図 竜巻移動方向

参考文献

- Forbes GS (1998) Topographic influences on tornadoes in Pennsylvania. Proc 19th Conf Severe local storms Amer Meteorol Soc, Minneapolis, MN, pp.269-272.
- Karstens CD (2012) Observations and laboratory simulations of tornadoes in complex topographical regions. Graduate theses and dissertations of Iowa state univ, paper12778.
- Lewellen DC (2012) Effects of topography on tornado dynamics: A simulation study. 26th Conference on Severe Local Storms Amer Meteorol Soc, Nashville, TN, 4B.1.

参考資料1：地形の起伏に起因する竜巻の旋回流の強弱に対する物理的解釈

ここでは、本資料で示した地形の起伏による竜巻の旋回流の強弱に対する物理的解釈を示す。なおここで示す、角運動量保存則に基づく解釈の妥当性を被害状況調査 (Forbes 1998, Karstens 2012) や風洞実験 (Karstens 2012) も支持している。

一般的に、回転する流れでは、「回転の中心からの距離」と「周方向の回転速度」の積が一定になるという性質がある。これは角運動量保存則と呼ばれるが、角運動量保存則と Holton (1992) を参考に、竜巻旋回流が形成された後における渦の伸長・収縮に伴う旋回流風速の増速・減速機構を以下に導く。竜巻のコア部分を一つの鉛直軸を有する剛体運動の気柱と仮定すると、上り坂を越える場合 (渦1から渦2へ移動する場合) には渦の長さが短くなる。その際、角運動量の保存則は次式のように表される。

$$\int_0^{2\pi} \int_0^{r_1} \int_0^{h_1} (\rho r^2 \omega_1) dh \cdot r dr d\phi = \int_0^{2\pi} \int_0^{r_2} \int_0^{h_2} (\rho r^2 \omega_2) dh \cdot r dr d\phi \quad (1)$$

$$\frac{1}{4} r_1^4 \omega_1 h_1 = \frac{1}{4} r_2^4 \omega_2 h_2 \quad (2)$$

ここで、 ω は角速度、 r は渦コア (気柱) の半径、 h は渦コア (気柱) の高さ、 ρ は空気密度であり、添字の1と2はそれぞれ、渦1と渦2に対する値を表す。また、気柱の体積が保存されるので、式(3)が成立する。

$$\pi r_1^2 h_1 = \pi r_2^2 h_2 \Rightarrow r_2^2 = \frac{h_1}{h_2} r_1^2 \quad (3)$$

この関係を式(2)に代入すると、式(4)が得られる。

$$\frac{\omega_1}{h_1} = \frac{\omega_2}{h_2} \Rightarrow \frac{d}{dt} \left(\frac{\omega}{h} \right) = 0 \quad (4)$$

(4)の関係式は「渦位 (ポテンシャル渦度) の保存式」に相当するものであり、角速度 ω は地上高さ h に比例することがわかる。また、式(3)より、渦の半径 r は $h^{1/2}$ に反比例するので、竜巻の最大接線風速 ($\omega \times r$) は $h^{1/2}$ に比例する。そのため、竜巻の渦が上り斜面を移動する時、基本的に渦は弱まり、下り斜面を移動する時には強まる。

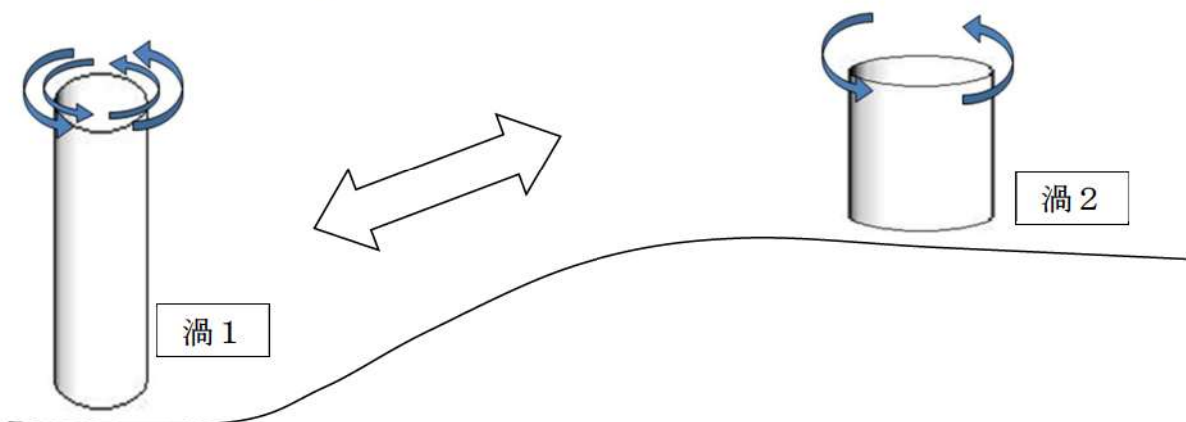


図1 竜巻旋回流の地形影響に関する模式図

参考資料2：竜巻による旋回流を対象とした数値シミュレーションへのレビュー

竜巻影響評価ガイド及びその解説に記載されている参考文献において、地形影響による旋回流の強化の評価技術として、数値シミュレーションの援用が例示されている。ここでは、ラージエディシミュレーション (LES) という技法が用いられている。LES では、風の運動を支配する方程式系を数値的に解くことにより、風の三次元分布の非定常な変化を求める。計算自体には仮定が少ないのが長所であるが、膨大な計算資源が必要であること、計算の初期・境界条件の設定が難しいことが欠点である。竜巻の実際の流れ場を対象とした場合、より難しいものとなる。

具体的には、LES では、風の変動を大規模なものと同規模なものに分離し、前者を数値シミュレーションの中で直接的に再現し、後者を物理法則から妥当性を類推できる仮定にもとづくモデル (サブグリッドモデル) で表現する。そのため、計算精度が格子解像度、計算手法やサブグリッドモデルの現象再現性に強く依存する。一方、表 1 に示すとおり、近年の竜巻数値流体計算に用いられている格子解像度や計算手法には、様々なものが用いられており、適切な手法として統一的な知見が得られていないのが現状といえる。

このことを勘案して、本資料では、数値シミュレーションの結果を援用して、旋回流の増減への定性的評価及びその挙動への物理的解釈を与えることとし、定量的な数値の取扱いは行わないこととした。

表 1 近年の竜巻数値流体計算の主要仕様

文献	解析体系	地表面境界条件	乱流モデル	解析手法	格子解像度	解析領域
Lewellen (2013)	複雑地形上実スケール竜巻	空力的粗度	LES (TKE型)	Lewellen(2007)と同じ (IB法を付加)	5m以下	2x2x2km
Natarajan and Hangan (2012)	実験スケール竜巻	不明 (ノンスリップ?)	LES (動的スマゴリンスキ型)	商用コードFluentベース (2次精度中心差分 hexahedral grid)	不明 (セル数は 2.5e6)	実験サイズ (半径=0.4m)
Maruyama (2011)	実験スケール竜巻	ノンスリップ	LES (標準スマゴリンスキ型)	RIAM-COMPACT (Kajishima Scheme)	最大風速半径の1/8	実験サイズ
Lewellen et al. (2008)	飛散物を含む実スケール竜巻	空力的粗度	LES (TKE型)	Lewellen(2007)と同様 (2流体モデルを付加)	不明	不明
Lewellen and Lewellen (2007)	実スケール竜巻	空力的粗度	LES (TKE型)	2次精度中心差分	不明	不明

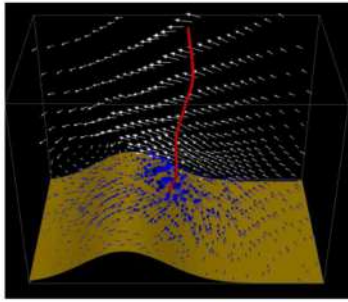
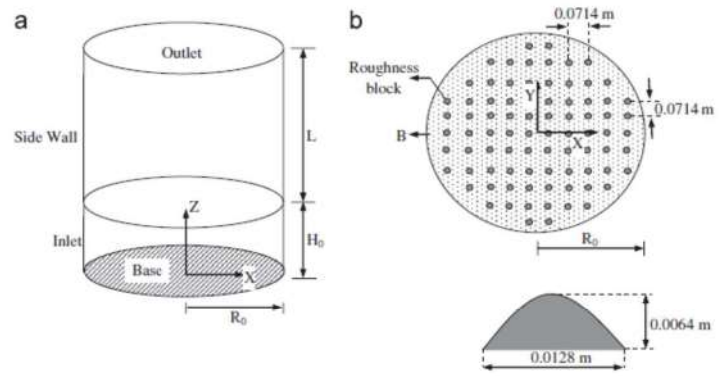


Figure 7: Sample velocity vectors 10 m above the surface (blue) and on a selected vertical plane (white) for a tornado heading upslope (moving right to left); vectors are given in a reference frame with the ground at rest. The red line represents the mean vortex core position at the time. The simulation case is that of fig. 4.

(a) Lewellen (2012)



(b) Natarajan and Hangan (2012)

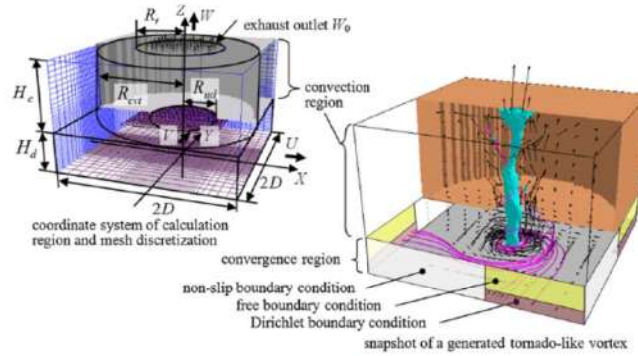


Fig. 1. Numerical tornado simulator.

(c) Maruyama (2011)

図1 近年の竜巻数値流体計算の解析モデル

参考資料3：地表面粗度について

1. 概要

本資料において、既往の研究に基づく地表面粗度の物理的意味及び竜巻等の暴風時の風速への影響に関する知見を取りまとめる。

2. 地表面粗度の定義

大気の運動（風）は、地表面の影響を受けるが、地表面に近いほどその影響は強い。影響を受ける範囲は1-2kmに及ぶことが一般的で、その範囲を大気境界層と呼ぶ。その中でも表面から数十メートルまでの領域は特にその影響が著しく、「接地層」といわれる（竹内・近藤 1981）。

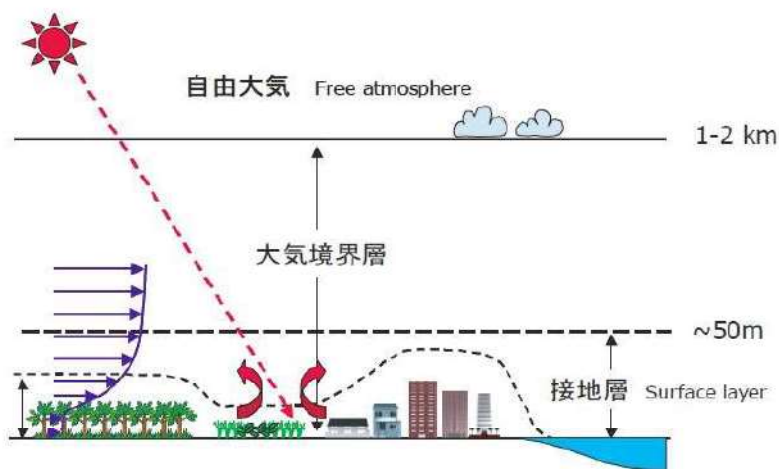


図1 大気の鉛直構造の模式図

風速は、地表面において0となり上空に向かうにつれて増加する。強風状態において、この風速の鉛直分布は対数分布と合致する。この対数分布の性状は、地表面の細かな凸凹が与える摩擦抵抗により定まる。この摩擦抵抗による風速分布への効果を示す指標を「粗度長」（地表面粗度）と定義する（塩谷 1992；近藤 2000）。

接地層内の風速 U は、地表面からの高さ z に対して、粗度長 z_0 を用いて

$$U(z) = c \ln(z/z_0) \quad (1)$$

により整理される（ここで、 c はカルマン定数と摩擦速度から導き出される係数）。

3. 粗度長の値

粗度長の値は、既往の研究において、様々な地表面状態に対して示されている。そこで得られている概略値を以下に示す。

地表面	粗度長[m]
水（広くて静かな面）	$10^{-6} - 10^{-5}$
砂・砂漠	0.0003
土	0.001 - 0.01
草（草丈 0.02 - 0.1 m）	0.003 - 0.01
草（草丈 0.25 - 1.0 m）	0.04 - 0.10
農地	0.04 - 0.20
果樹園	0.5 - 1.0
森林	1.0 - 6.0
大都市（東京）	2.0

竹内・近藤 1981 より

地表面	粗度長[m]
湖や海面	$10^{-3} - 10^{-5}$
水田	0.01 - 0.05
草（草丈 0.1 m）	0.01 - 0.03
草（草丈 1.0 m）	0.1 - 0.3
田園集落	0.2 - 0.5
森林	0.3 - 1.0
大都市	1 - 3

近藤 2000 より

粗度長が地表面の細かな凹凸の度合いに呼応し増減することを確認できる。

4. 粗度長を加味した風速の算定

この粗度長を考慮した建築物の耐風設計（強風を対象とした建築物の風荷重設定）手順を日本建築学会が取りまとめている（日本建築学会 2004）。ここでは、地表面の状況に応じた粗度長の変化を5つの区分に分類して取り扱うことにしている。

粗度区分	評価地点及び風上側地域の地表面の状況
I	海面又は湖面のような、ほとんど障害物のない地域
II	田園地帯や草原のような農作物程度の障害物がある地域、樹木、低層建築物などが散在している地域
III	樹木・低層建築物が多数存在する地域、あるいは中層建築物（4 - 9階）が散在している地域
IV	中層建築物（4 - 9階）が主となる市街地
V	高層建築物（10階以上）が密集する市街地

そして、式(1)の対数分布を近似するものとして、次式で示されるべき分布とともに、各粗度区

分に対して式中のパラメータとして下表の値を提示している。

$$U(z) = c(z/z_G)^\alpha \quad (z_b < z \leq z_G) \quad (2)$$

粗度区分	I	II	III	IV	V
z_b (m)	5	5	10	20	30
z_G (m)	250	350	450	550	650
α	0.1	0.15	0.2	0.27	0.35

ここで、 z_G は風速が地表面粗度の影響を受けない高さ、 z_b は風速が周囲の建築物の影響を受ける上限高さとして、指針で設定されたものである。

地表面の凹凸が大きくなるほど、 z_b 、 z_G 、 α （べき指数）の値も大きくなる。粗度区分 I-V に対して、式(2)から得られる風速の鉛直分布を図 2 に示す。

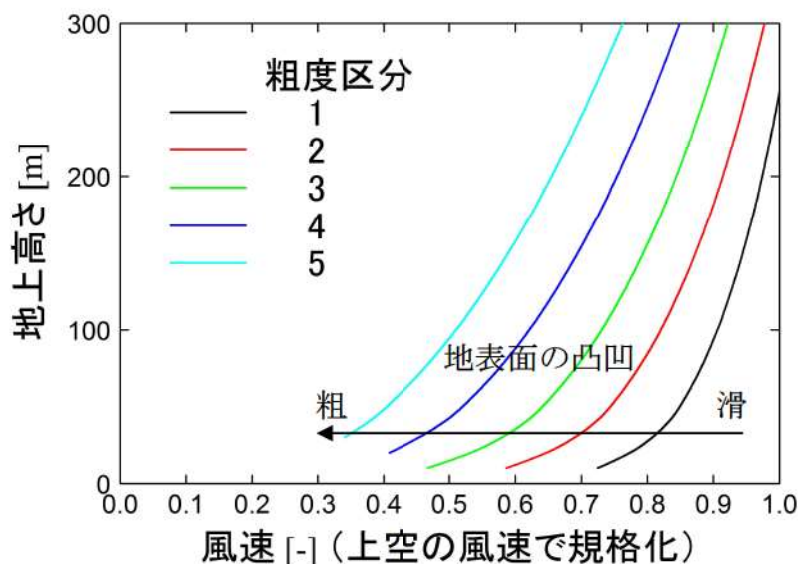


図 2 粗度区分と風速の鉛直分布との関係

ここで、地表面の凹凸による地表面近傍における風速の減速を議論するため、同一の上空風速 ($z = z_G$ の風速) に対する分布を提示している (粗度区分 I の場合は $z_G=250\text{m}$ の風速との比較、粗度区分 II の場合は $z_G=350\text{m}$ の風速との比較)。すなわち、横軸の数字は地表面粗度の影響に起因する減速の度合いを意味する。地上に近づくにつれて・粗度区分が大きくなるにつれて、地表面近傍の風速が小さくなることを確認できる。例えば、地上高さ 10m の風速は、粗度区分が I から II に変化することで 20% 程度低下し、III に変化することで 35% 程度低下する。

5. 竜巻の風速に対する粗度長の効果

4 章に示した風速の算定手順は、強風を対象としたものであり、地表面状態が森林等柔なものか

らビル等の剛なものまでを包括して、地表面の凹凸が、強風の減衰をもたらすことを示唆するものである。

なお、竜巻は通常の強風と異なり、強い渦（旋回流）構造を有する。地表面粗度は、この竜巻の旋回流を減衰させる効果を有する（例えば、Dessens 1972, Leslie 1977, Lewellen and Sheng 1979, Rostek and Snow 1985, Church 1993, Natarajan and Hangan 2012）。また、地表面粗度の構成物が飛来物として運動することも竜巻の風速を大きく減少させることも示唆されている（Lewellen et al. 2008）。

これらの知見から、表面の凹凸、すなわち地表面粗度の増加とともに竜巻に起因する強風の風速が低下するといえる。

参考文献

- ・ 近藤（2000） 地表面に近い大気の科学 324pp
- ・ 塩谷（1992） 強風の性質 開発社 201pp
- ・ 竹内・近藤（1981） 大気科学講座 1 地表に近い大気 東大出版 226pp
- ・ 日本建築学会（2004） 建築物荷重指針・同解説 丸善 651pp
- ・ Church CR（1993） The tornado: its structure, dynamics, prediction and hazards. American Geophysics Union.
- ・ Hattori Y et al.（2010） Wind-tunnel experiment on logarithmic-layer turbulence under the influence of overlying detached eddies. *Boundary-Layer Meteorol* 134, pp269-283.
- ・ Leslie F W（1997） Surface roughness effects on suction vortex formation. *J Atmos Sci* 34, pp.1022-1027.
- ・ Lewellen WS, Sheng YP（1979） Influence of surface conditions on tornado wind distribution. *Proc 11th Conf Severe local storms*, pp.375-378.
- ・ Lewellen DC, Gong B, Lewellen WS（2008） Effects of finescale debris on near-surface tornado dynamics. *J Atmos Scipp*.3247-3262.
- ・ Natarajan D, Hangan H（2012） Large eddy simulations of translation and surface roughness effects on tornado-like vortices. *J Wind Eng Ind Aerodyn* 104-106, pp.577-584.
- ・ Rostek WF, Snow JT（1985） Surface roughness effects on tornado like vortices. *Proc. 15th Conf Severe local storms*, pp.252-255.

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。

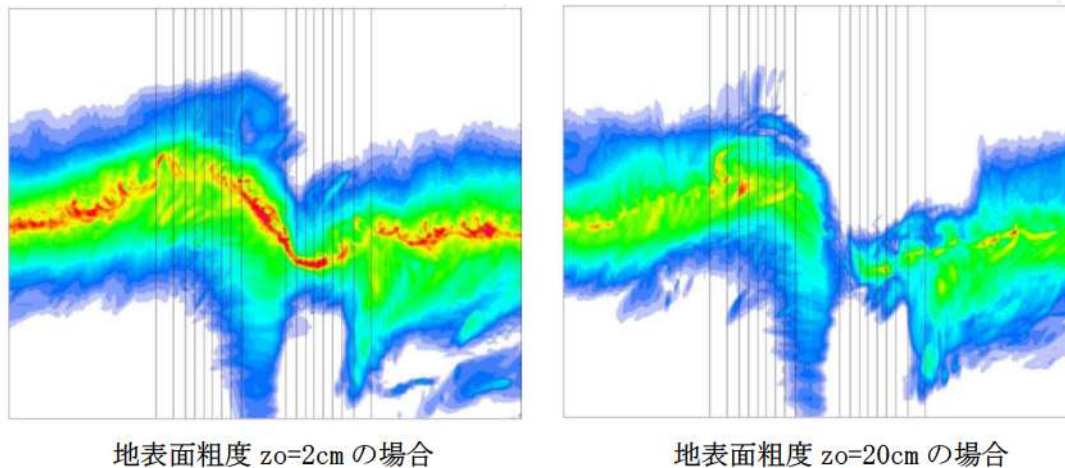


図1 最大風速のカラーコンタ

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。

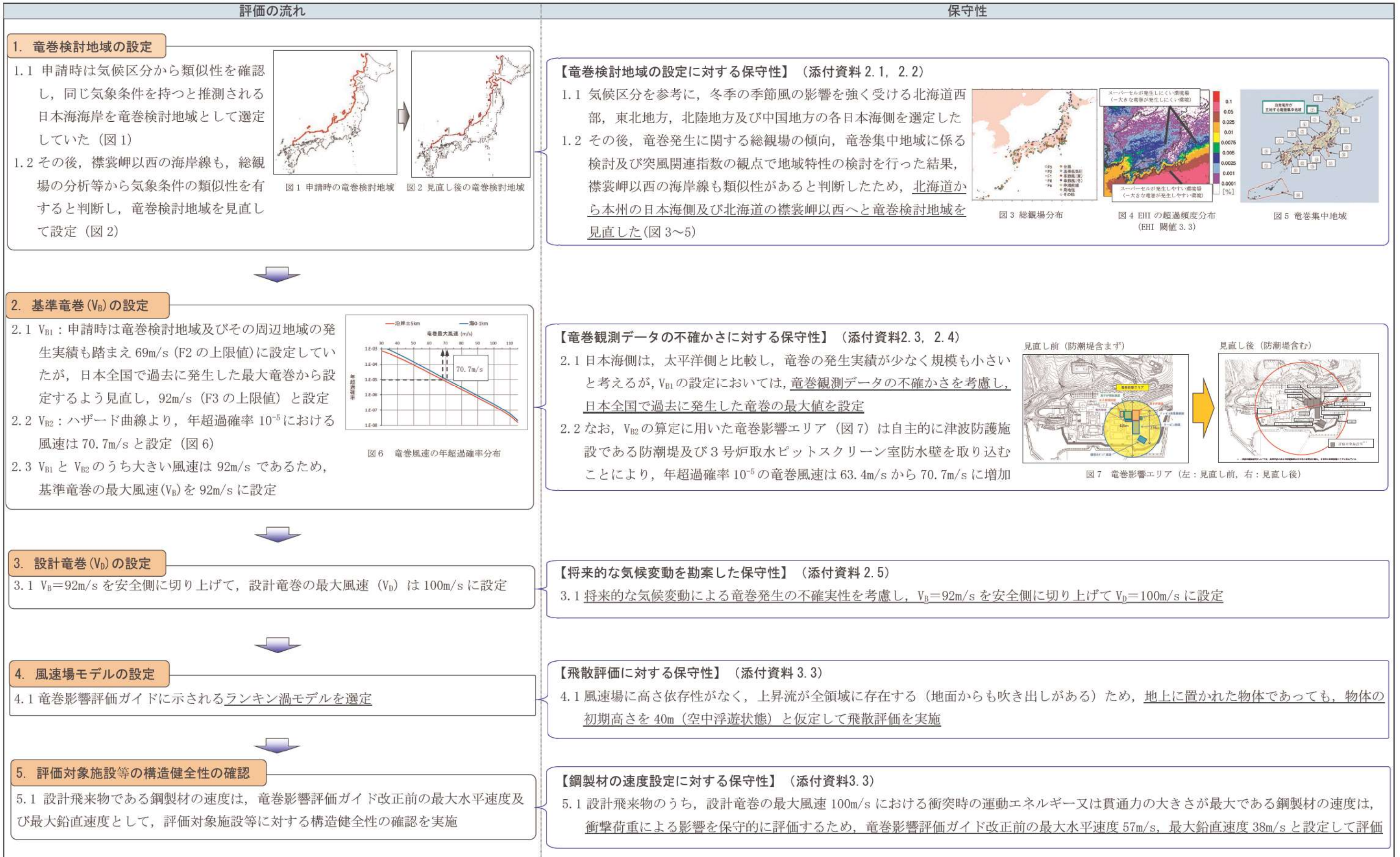
この結果は、本資料が説明した地表面粗度による竜巻風速の減衰について、地形の起伏が重畳する場合も同様の結論となることを示唆する。

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



竜巻影響評価及び竜巻対策の概要

【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_M) 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_M は、設計竜巻の最大風速 $V_D=100\text{m/s}$ 、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。

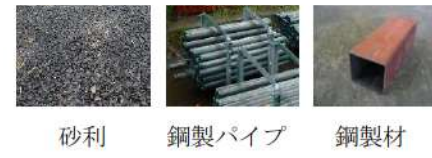


図1 泊発電所の設計飛来物 (イメージ)

表1 設計飛来物の緒元

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 (m/s)	62 ^{※2}	49 ^{※3}	57 ^{※4}
最大鉛直速度 (m/s)	42 ^{※3}	33 ^{※4}	38 ^{※4}

※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_M) = 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。

【竜巻影響評価】

設計荷重に対し、評価対象施設等 (施設、設備) の構造健全性評価を行い、必要に応じて対策を行うことで、構造健全性を維持すること、又は損傷した場合は、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 (原子炉建屋 (外部遮へい建屋)、原子炉建屋 (周辺補機棟)、原子炉建屋 (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、ディーゼル発電機燃料油貯油槽トレンチ) 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) に関する評価を実施し、内包する外部事象防護対象施設の安全機能に影響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、試料採取室空調装置、中央制御室空調装置、電動補助給水ポンプ室換気装置、制御用空気圧縮機室換気装置、ディーゼル発電機室換気装置及び安全補機開閉器室空調装置)、使用済燃料ピット、使用済燃料ラック、新燃料ラック、燃料移送装置、使用済燃料ピットクレーン、燃料取扱棟クレーン、燃料取替チャンネル、キャスクピット、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 (原子炉補機冷却海水系)、原子炉補機冷却水サージタンク (配管及び弁含む)、主蒸気系配管他、制御用空気系配管、蓄熱室加熱器、ディーゼル発電機燃料油移送配管) 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ャ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退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。

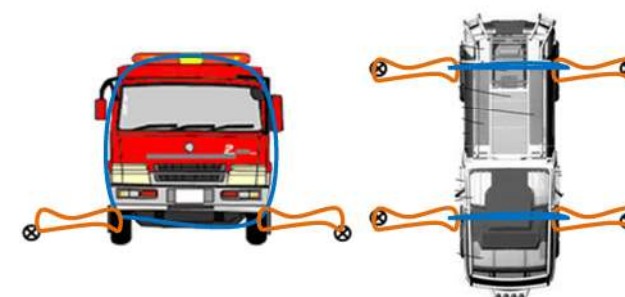


図2 車両の固縛イメージ

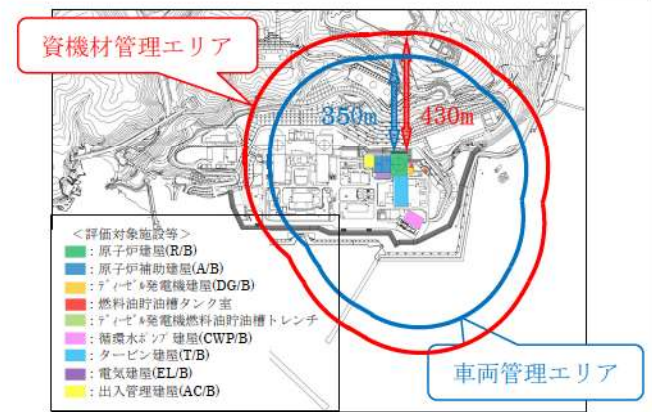


図3 資機材及び車両管理エリア

【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) を防護するため、当該設備が設置されている循環水ポンプ建屋内の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、架台及びネットで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)、主蒸気系配管他、制御用空気系配管、蓄熱室加熱器、ディーゼル発電機燃料油移送配管、新燃料ラックを防護するため、竜巻防護鋼板、竜巻防護壁 (板) 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。

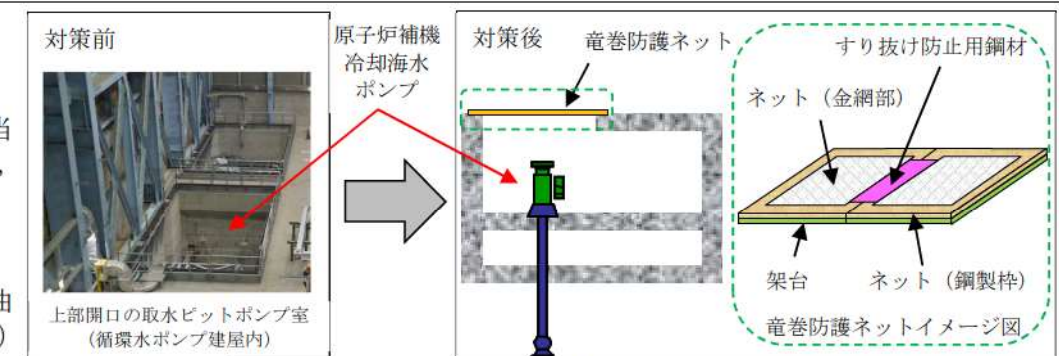
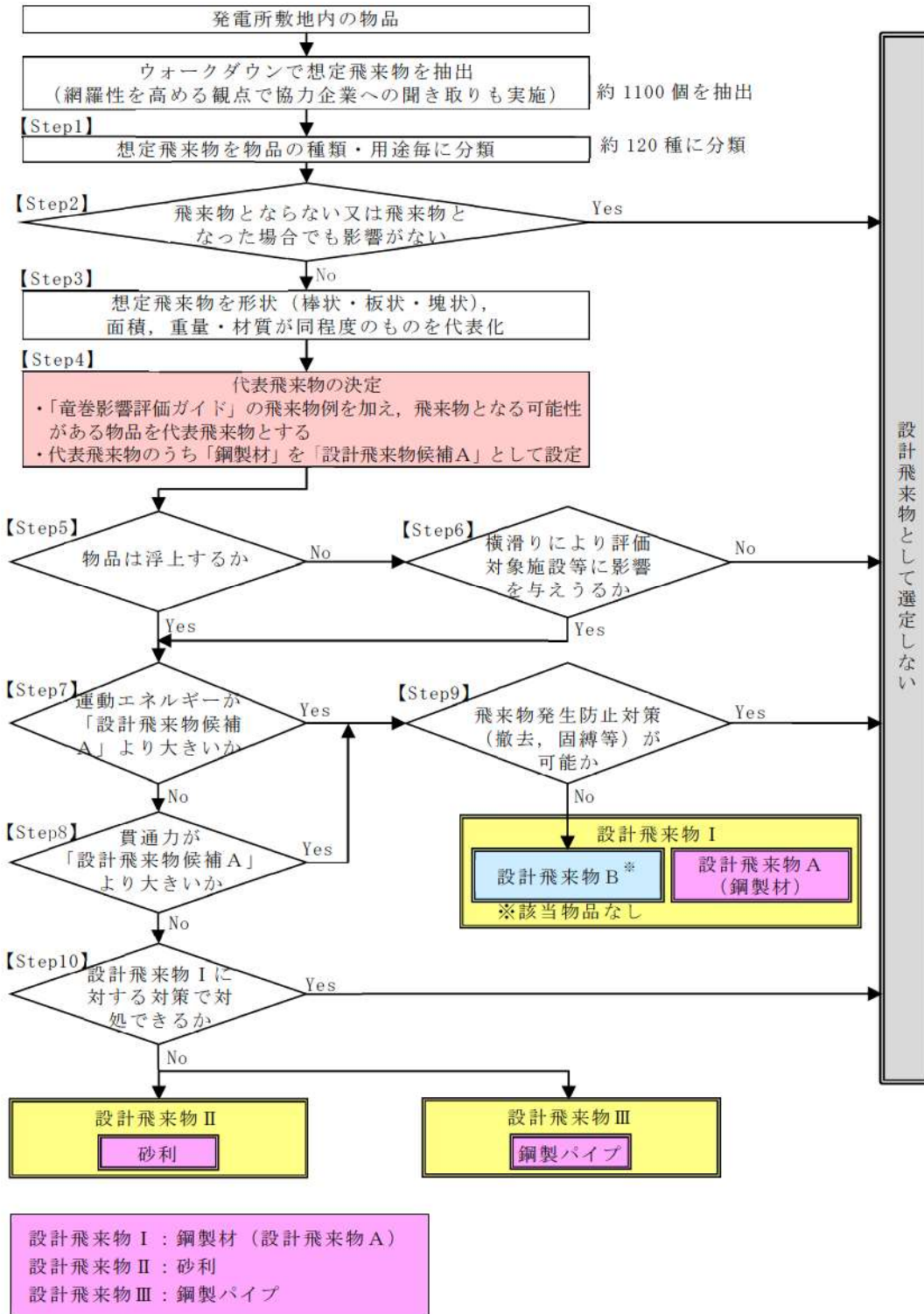


図4 竜巻防護ネットの設置イメージ

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	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※	・ドラム缶 ・プレハブ小屋 ・自動販売機	—	—
	柔(一部剛)	—	—	—	—	—	・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※	—	—	—

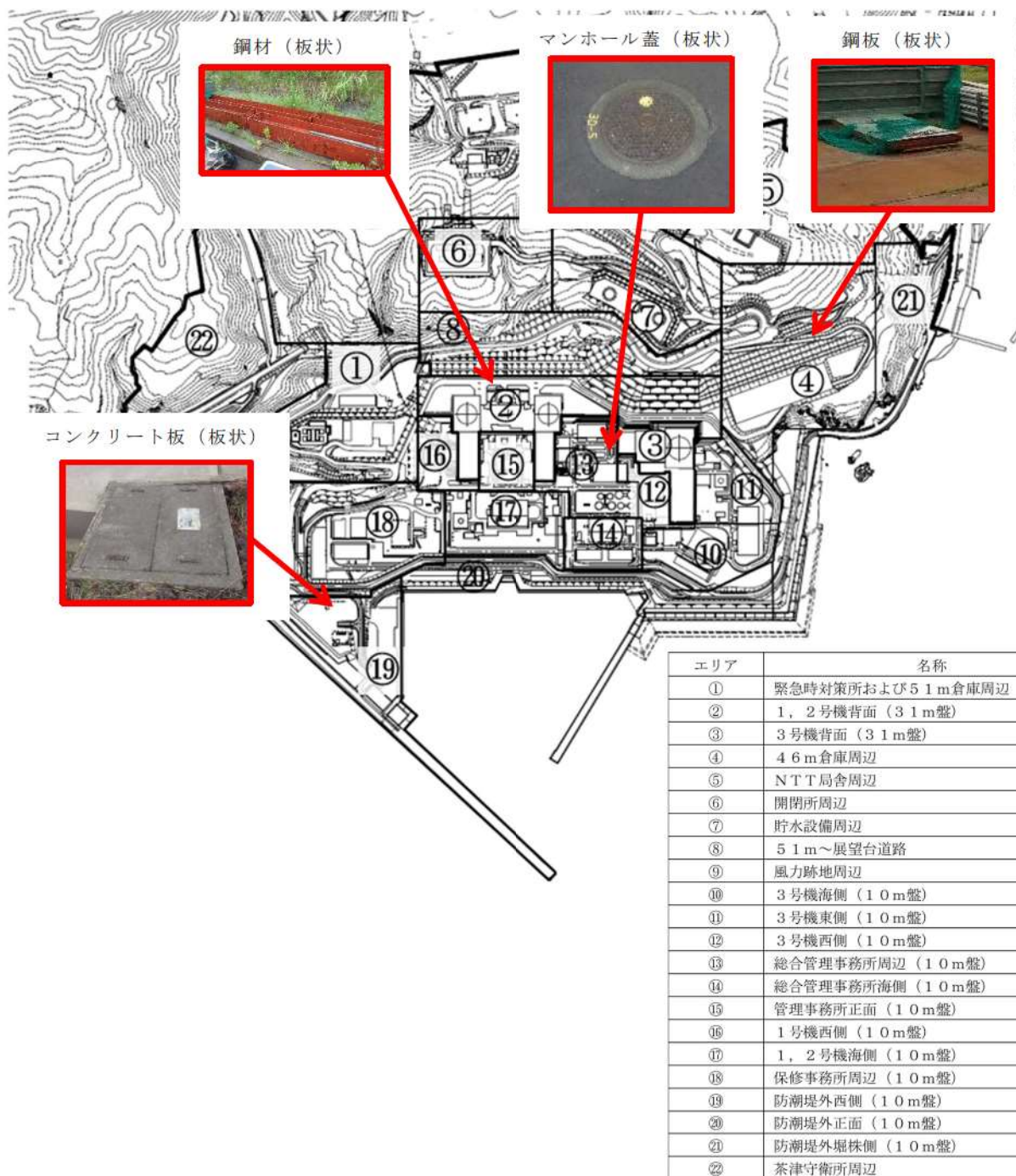
(二次飛来物)

	棒状			板状			塊状			
	大	中	小	大	中	小	大	中	小	
二次飛来物	剛	—	—	・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	

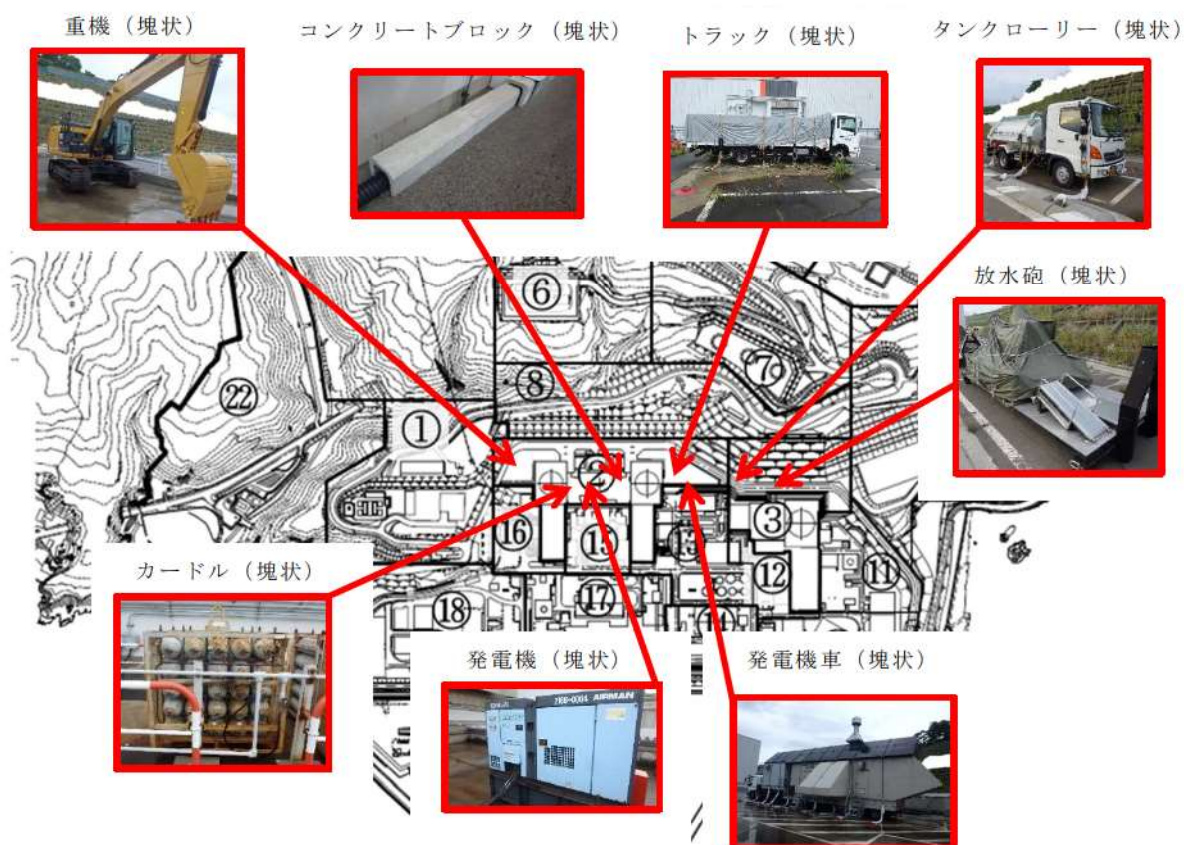
※：竜巻影響評価ガイドにおいてサイズ及び質量が記載されている物品



第 3.3.2 図 代表飛来物（棒状）

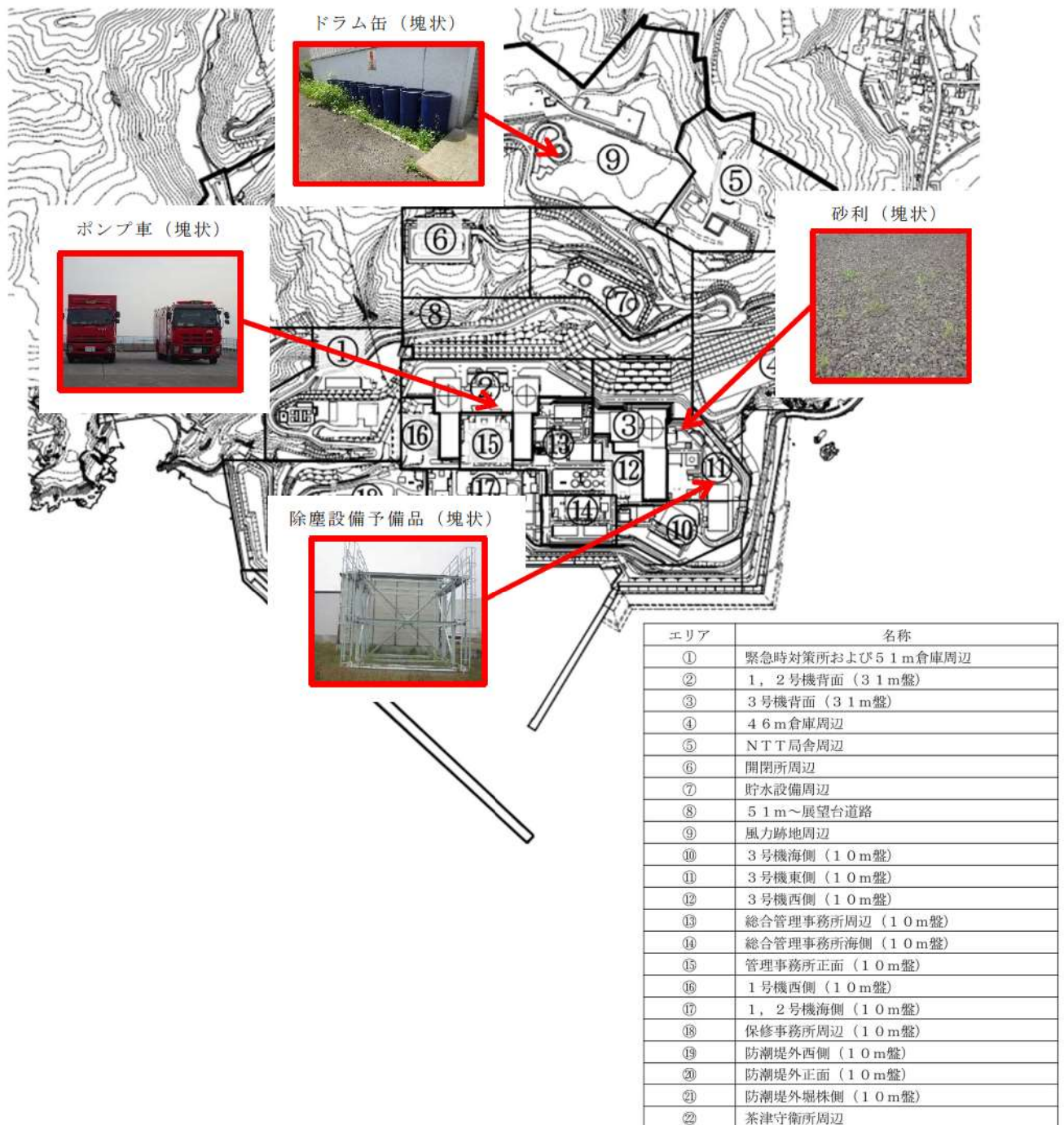


第 3.3.3 図 代表飛来物 (板状)

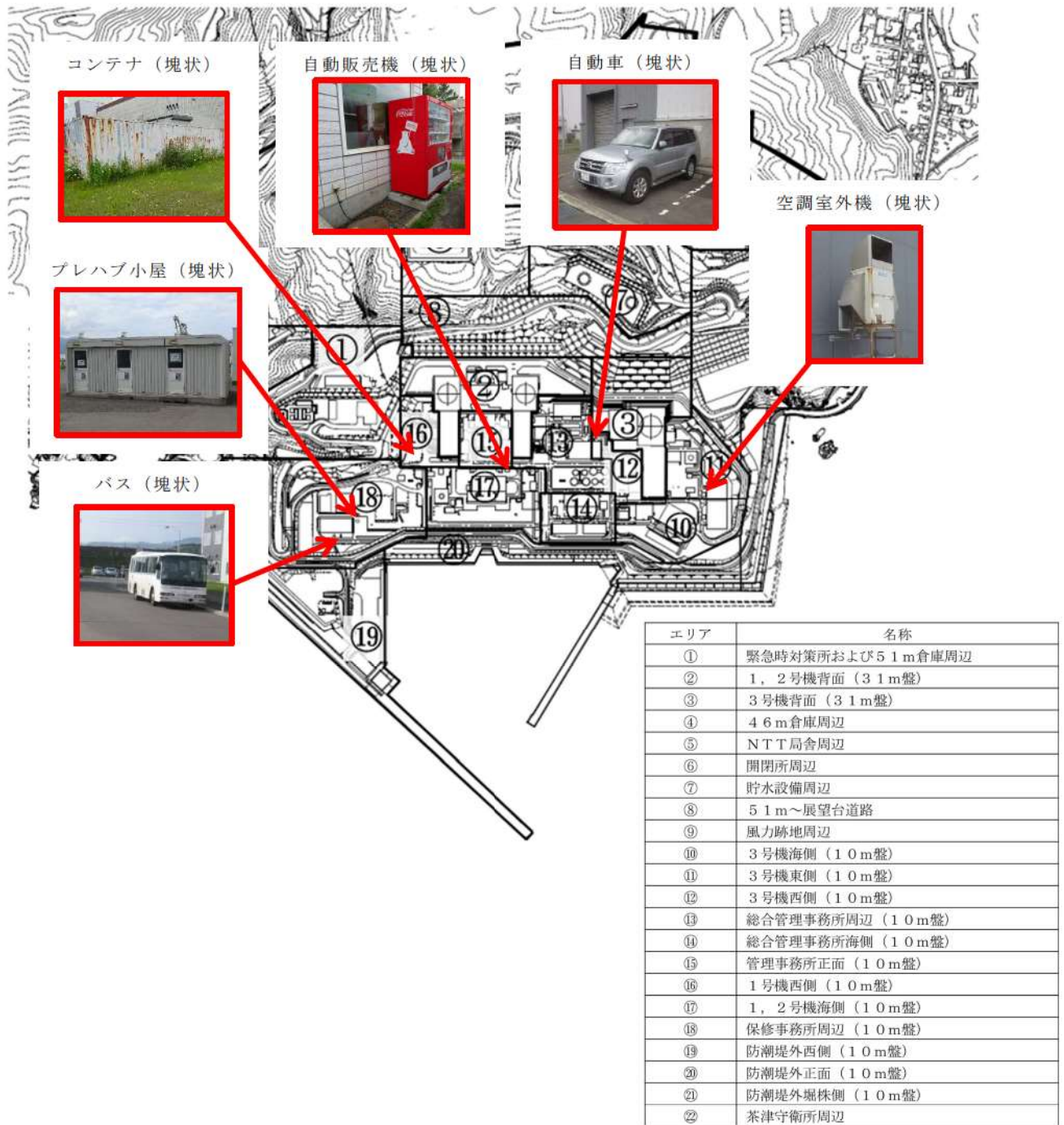


エリア	名称
①	緊急時対策所および51m倉庫周辺
②	1, 2号機背面 (31m盤)
③	3号機背面 (31m盤)
④	46m倉庫周辺
⑤	NTT局舎周辺
⑥	開閉所周辺
⑦	貯水設備周辺
⑧	51m～展望台道路
⑨	風力跡地周辺
⑩	3号機海側 (10m盤)
⑪	3号機東側 (10m盤)
⑫	3号機西側 (10m盤)
⑬	総合管理事務所周辺 (10m盤)
⑭	総合管理事務所海側 (10m盤)
⑮	管理事務所正面 (10m盤)
⑯	1号機西側 (10m盤)
⑰	1, 2号機海側 (10m盤)
⑱	保守事務所周辺 (10m盤)
⑲	防潮堤外西側 (10m盤)
⑳	防潮堤外正面 (10m盤)
㉑	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)	運動 エネルギー (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ければ ・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 _h	鉛直 T _v				
柔 (一部剛)	重機	9.53	2.8	3.16	20800	0.0021	38.1	25.5	15123	6784	119.9	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	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	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	37.2	26.0	70.3	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	33.8	23.9	58.4	44.6	9.6	5.6	×	
剛	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	30.2	21.4	52.9	40.5	8.5	5.0	×	
剛	鋼材	2.5	0.25	0.25	250	0.0022	38.3	25.5	183.6	81.1	126.1	27.1	19.1	46.9	35.7	9.0	5.2	×	
柔 (一部剛)	発電機車	20.1	7.5	8.25	58120	0.0043	44.6	24.6	57815	17606	256.1	126.0	74.1	230.5	154.8	13.2	6.0	○	
柔 (一部剛)	除塵設備予 備品	6	5	5.6	14000	0.0043	44.6	24.6	13952	4236	257.0	72.6	42.6	141.3	94.8	7.6	3.4	○	
柔 (一部剛)	ボンブ車	8.79	2.49	3.16	13050	0.0029	40.9	25.1	10910	4123	189.7	82.8	53.8	147.1	106.1	12.2	6.4	○	
柔 (一部剛)	バス (大型)	11.1	2.48	3.07	9890	0.0046	45.4	24.7	10173	3025	268.7	79.7	46.5	141.6	94.3	11.8	5.3	○	
柔 (一部剛)	バス (中型)	8.99	2.34	3.03	7410	0.0049	46.0	25.2	7834	2353	277.1	70.9	41.5	128.2	85.7	10.3	4.6	○	
柔 (一部剛)	トラック	8.21	2.5	2.46	7410	0.0042	44.3	24.7	7285	2260	251.9	70.5	41.9	126.9	85.7	10.5	4.8	○	
柔	コンテナ	12.2	2.6	2.44	5500	0.0052	46.5	25.6	5957	1798	282.6	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ば ^{※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 _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	17.2	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	55.1	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	64.2	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	924.3	226.3	1.3	54.1	33.4	96.5	67.0	9.6	4.7	○	
柔 (一部剛)	乗用車(セダ ン)	4.89	1.8	1.47	1760	0.0070	49.8	26.7	2182	629.3	313.5	33.1	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	0.5	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	59.7	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	44.0	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	40.8	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	3.7	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	46.6	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	5.6	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	46.4	18.4	10.7	20.2	10.8	4.3	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 C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]		コンクリートの貫通限界厚さ ^{※2} [mm]		浮き 上がり の有無	以下の点で飛来物とならなければ ・飛来物発生防止対策(除去、 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 _h	鉛直 T _v					
剛	棒状 (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	棒状 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 C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（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

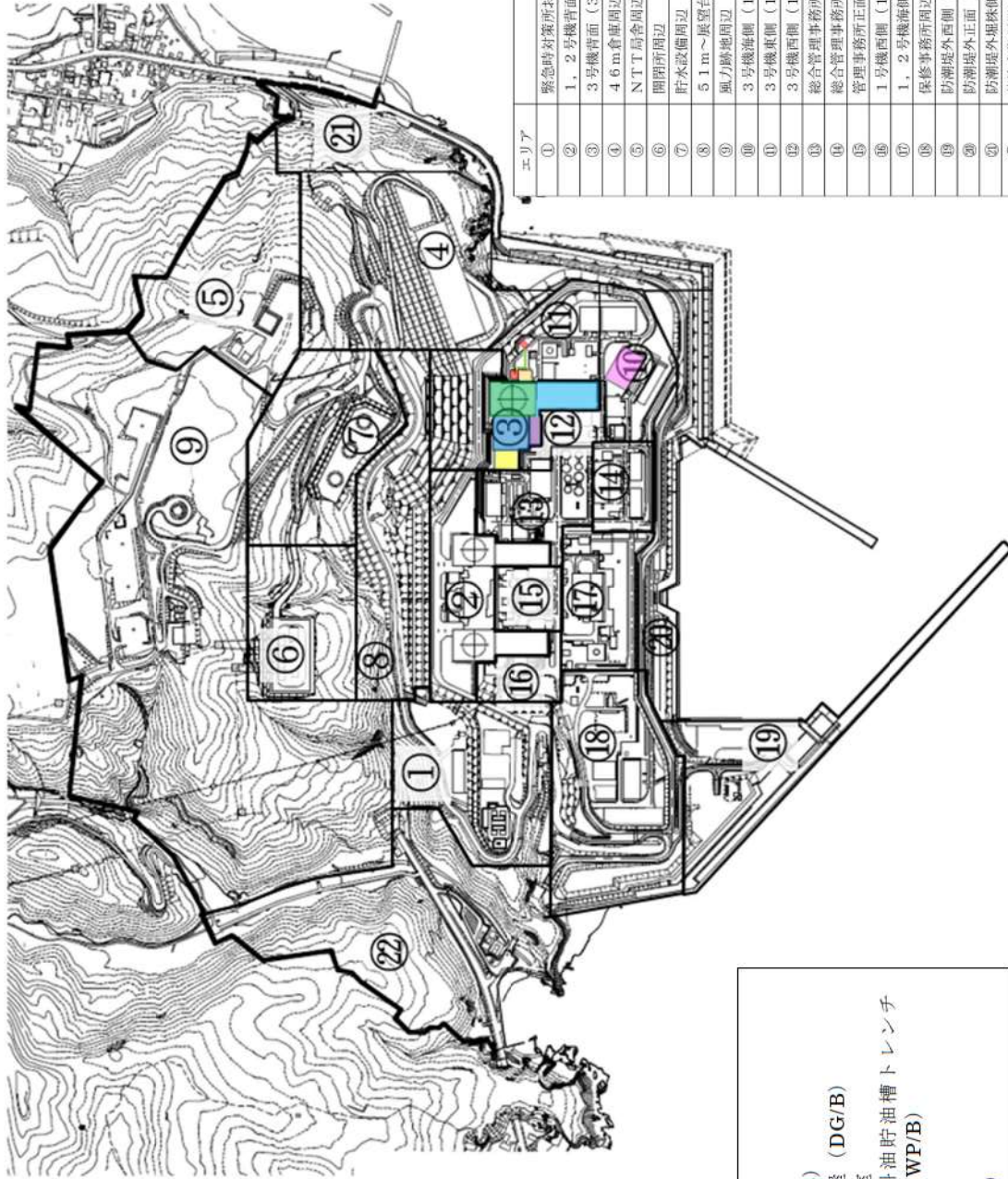
各エリアの区画図毎の飛来物(想定飛来物及び二次飛来物)調査結果を図 2 に示す。

(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)
 - : デイジーゼル発電機建屋 (DG/B)
 - : 燃料油貯油槽タンク室
 - : デイジーゼル発電機燃料油貯油槽トレンチ
 - : 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5.1m倉庫周辺
②	1, 2号機背面 (3.1m盤)
③	3号機背面 (3.1m盤)
④	4.6m倉庫周辺
⑤	NTT局舎周辺
⑥	開閉所周辺
⑦	貯水設備周辺
⑧	5.1m~展望台道路
⑨	風力降地周辺
⑩	3号機準備 (1.0m盤)
⑪	3号機東側 (1.0m盤)
⑫	3号機西側 (1.0m盤)
⑬	総合管理事務所周辺 (1.0m盤)
⑭	総合管理事務所準備 (1.0m盤)
⑮	管理事務所正面 (1.0m盤)
⑯	1号機西側 (1.0m盤)
⑰	1, 2号機海側 (1.0m盤)
⑱	保安事務所周辺 (1.0m盤)
⑲	防潮堤外西側 (1.0m盤)
⑳	防潮堤外正面 (1.0m盤)
㉑	防潮堤外東側 (1.0m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）

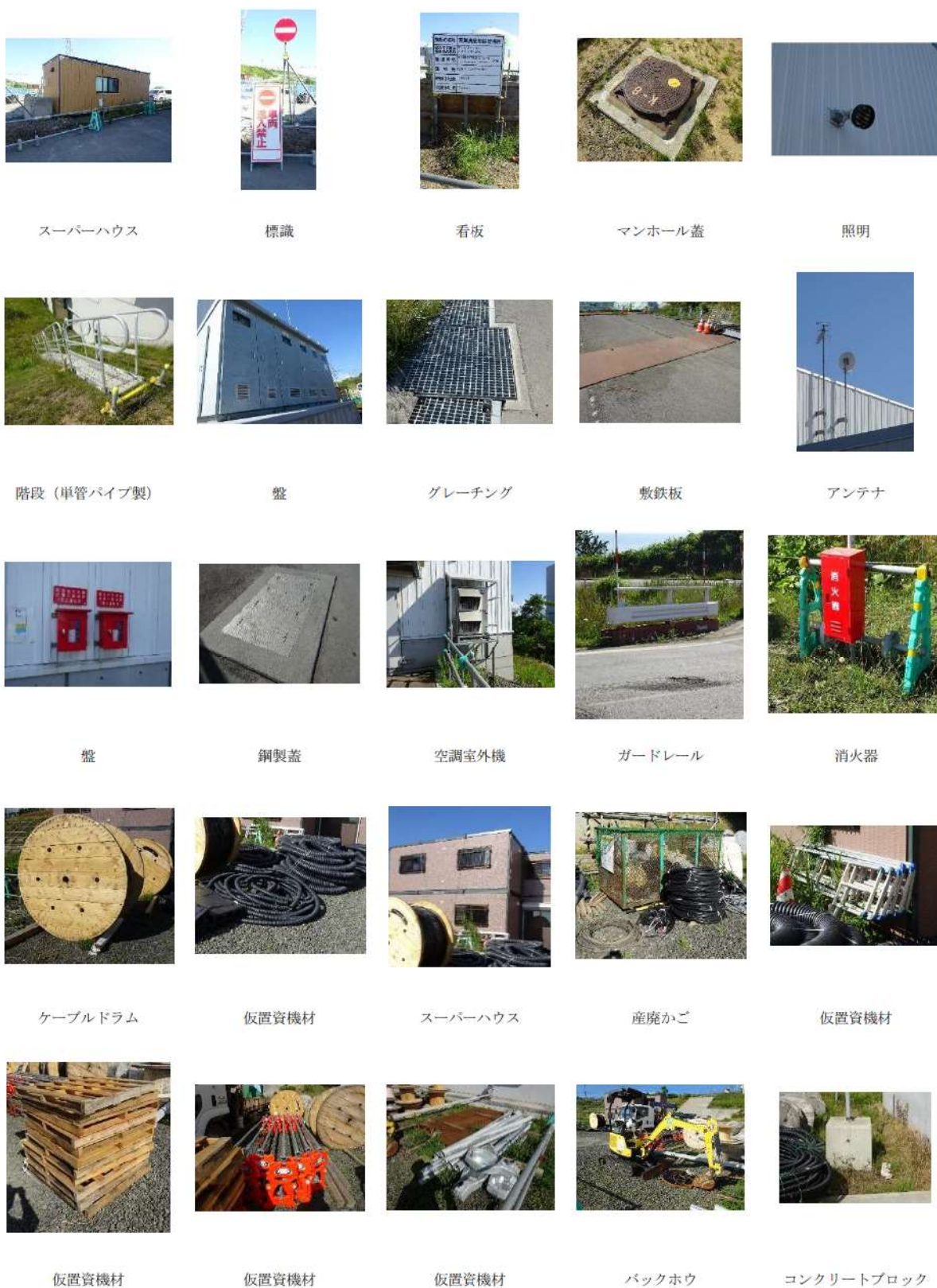


図2 飛来物（想定飛来物及び二次飛来物）の写真記録（1/36）

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）

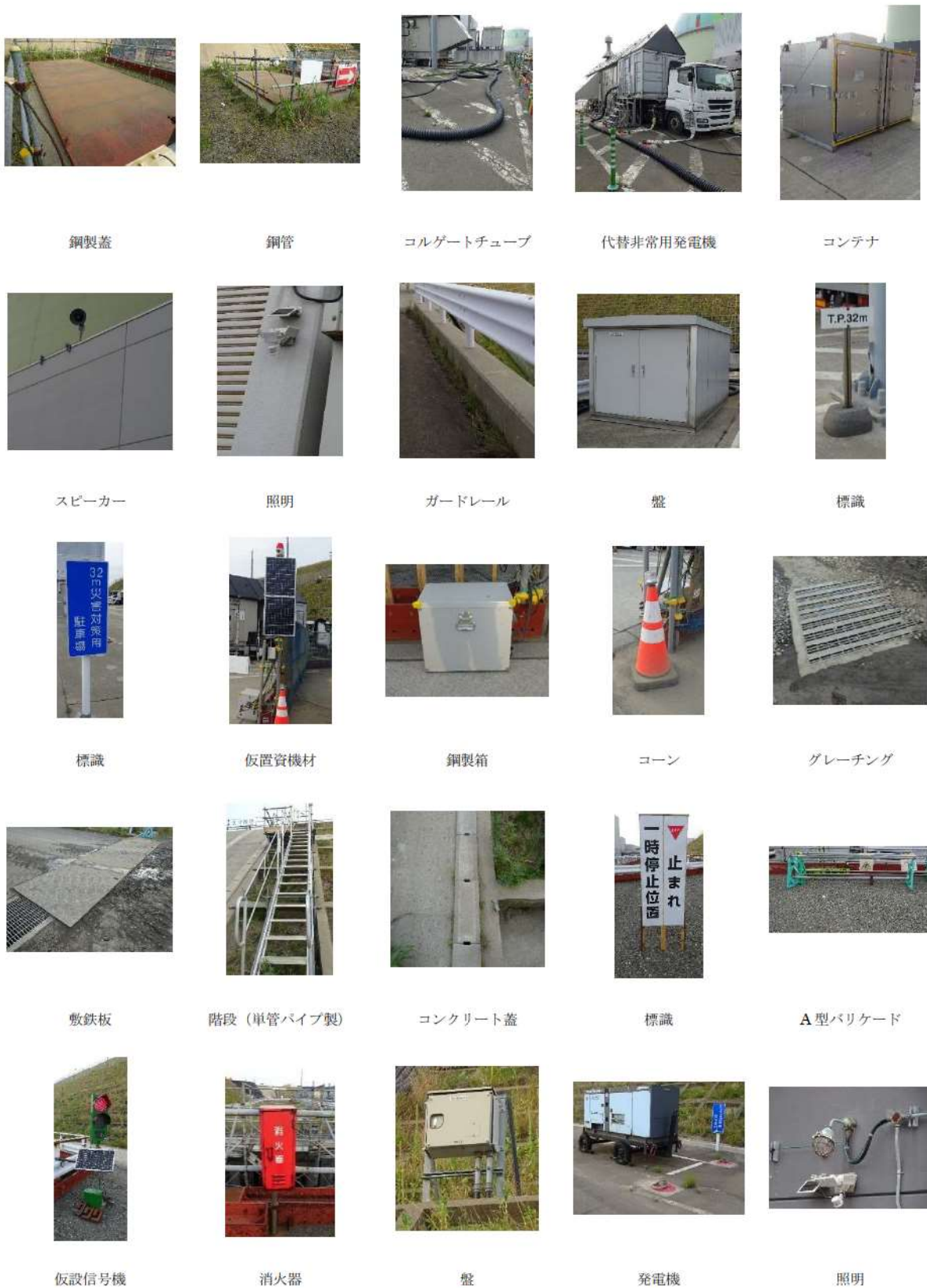


図2 飛来物（想定飛来物及び二次飛来物）の写真記録（6／36）

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）



グレーチング



仮置資機材



標識



盤



消火栓（ホース格納箱）



標識



消火栓



マンホール蓋



コンクリート蓋



鋼管



鋼製かご



仮置資機材



手すり



盤



踏み台



コンクリートブロック



鋼製蓋



踏み台



階段（単管パイプ製）



スーパーハウス



空調室外機



発電機



コルゲートチューブ



盤



プレハブ小屋

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）



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）

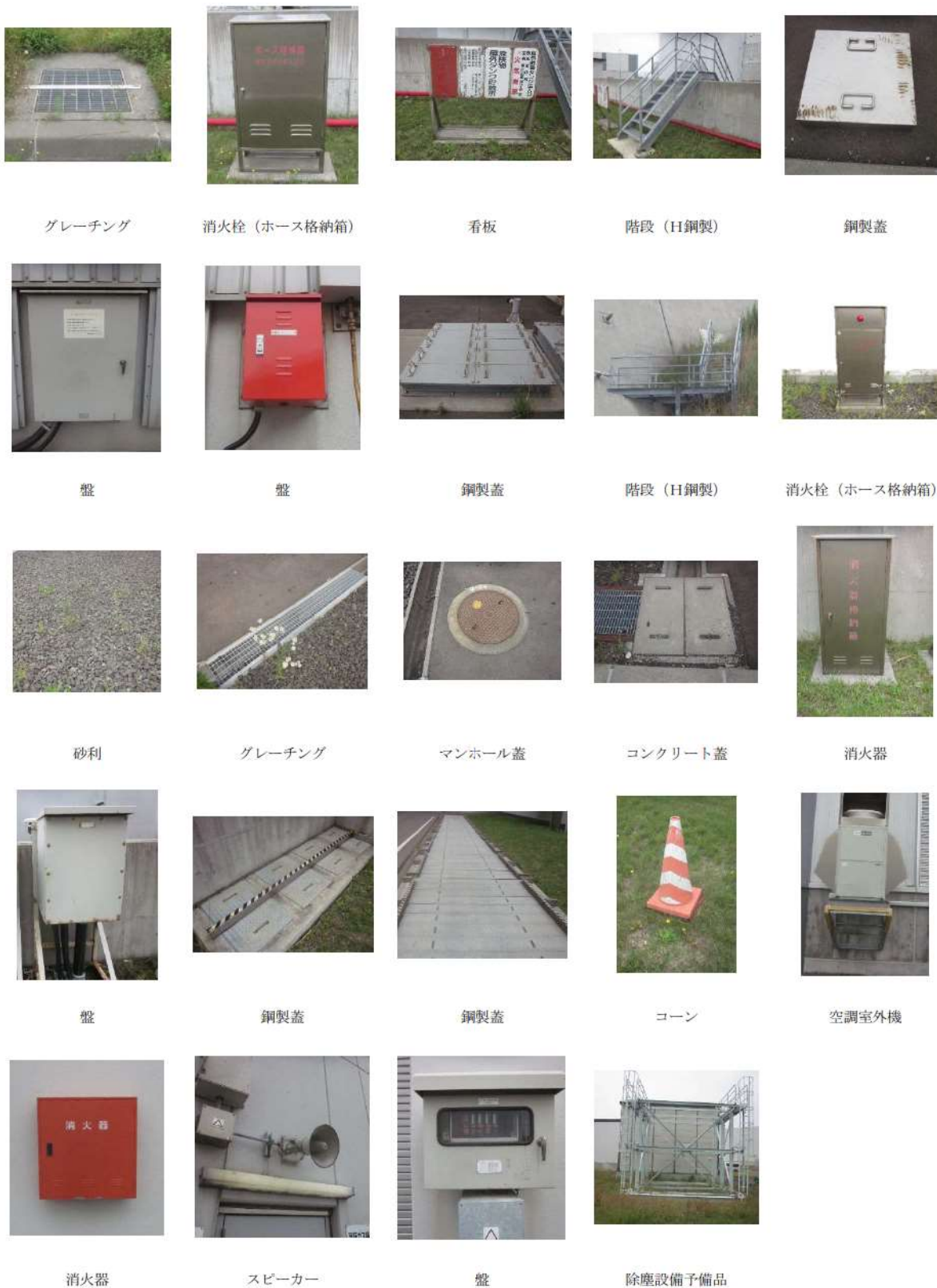


図2 飛来物（想定飛来物及び二次飛来物）の写真記録（18/36）

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）

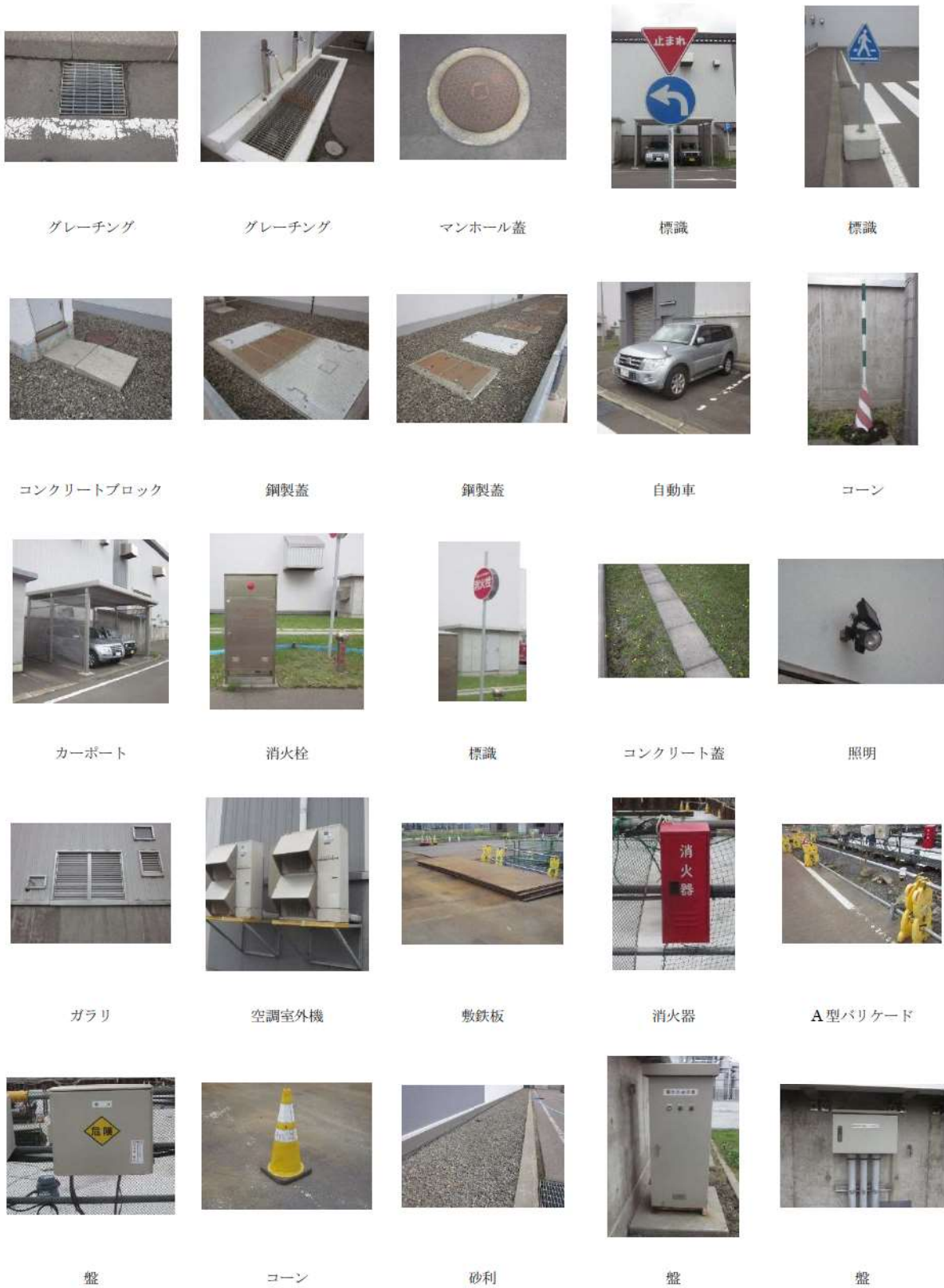


図2 飛来物（想定飛来物及び二次飛来物）の写真記録（20/36）

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）

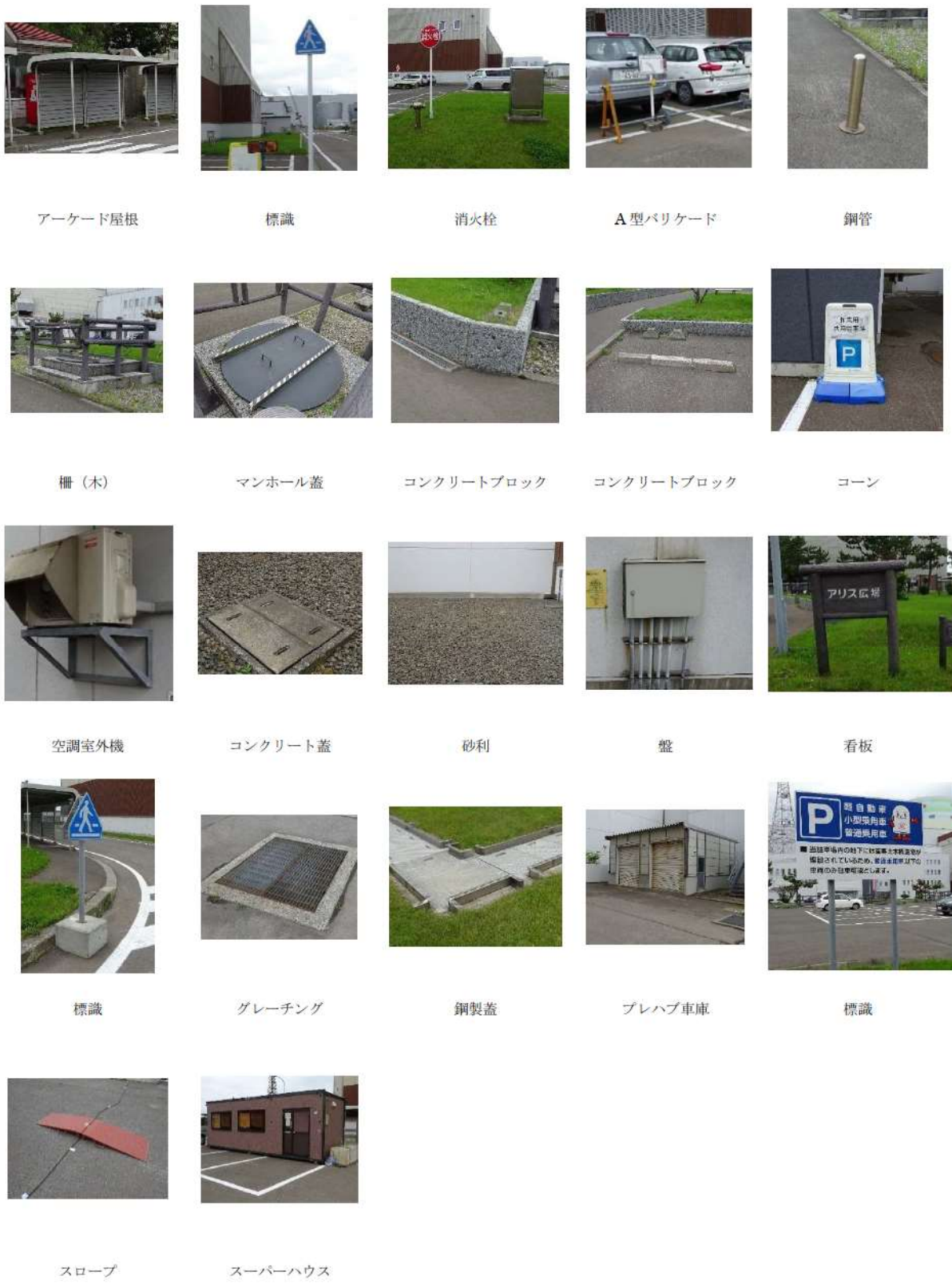


図2 飛来物（想定飛来物及び二次飛来物）の写真記録（25/36）

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）

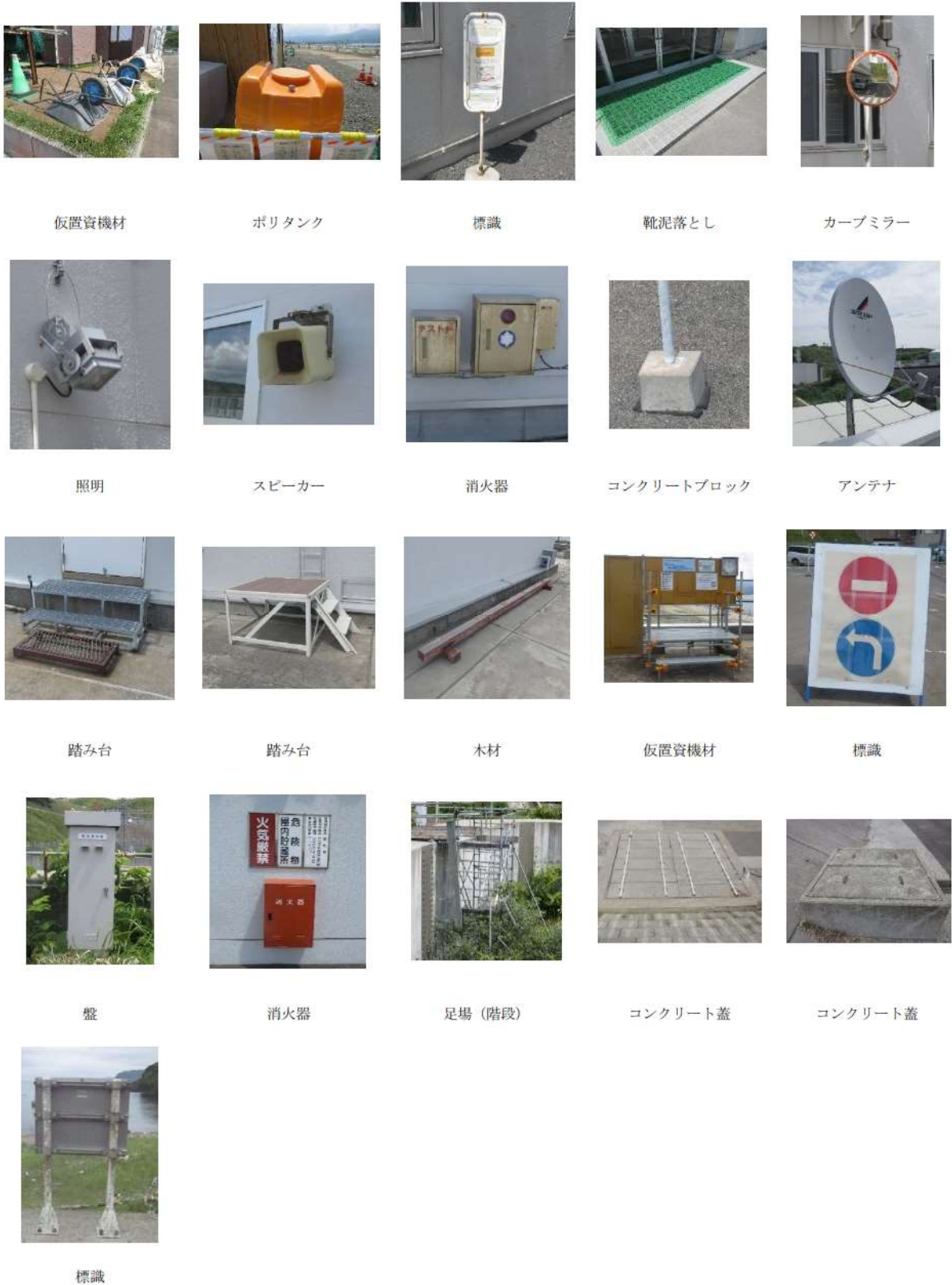


図2 飛来物（想定飛来物及び二次飛来物）の写真記録（31/36）

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

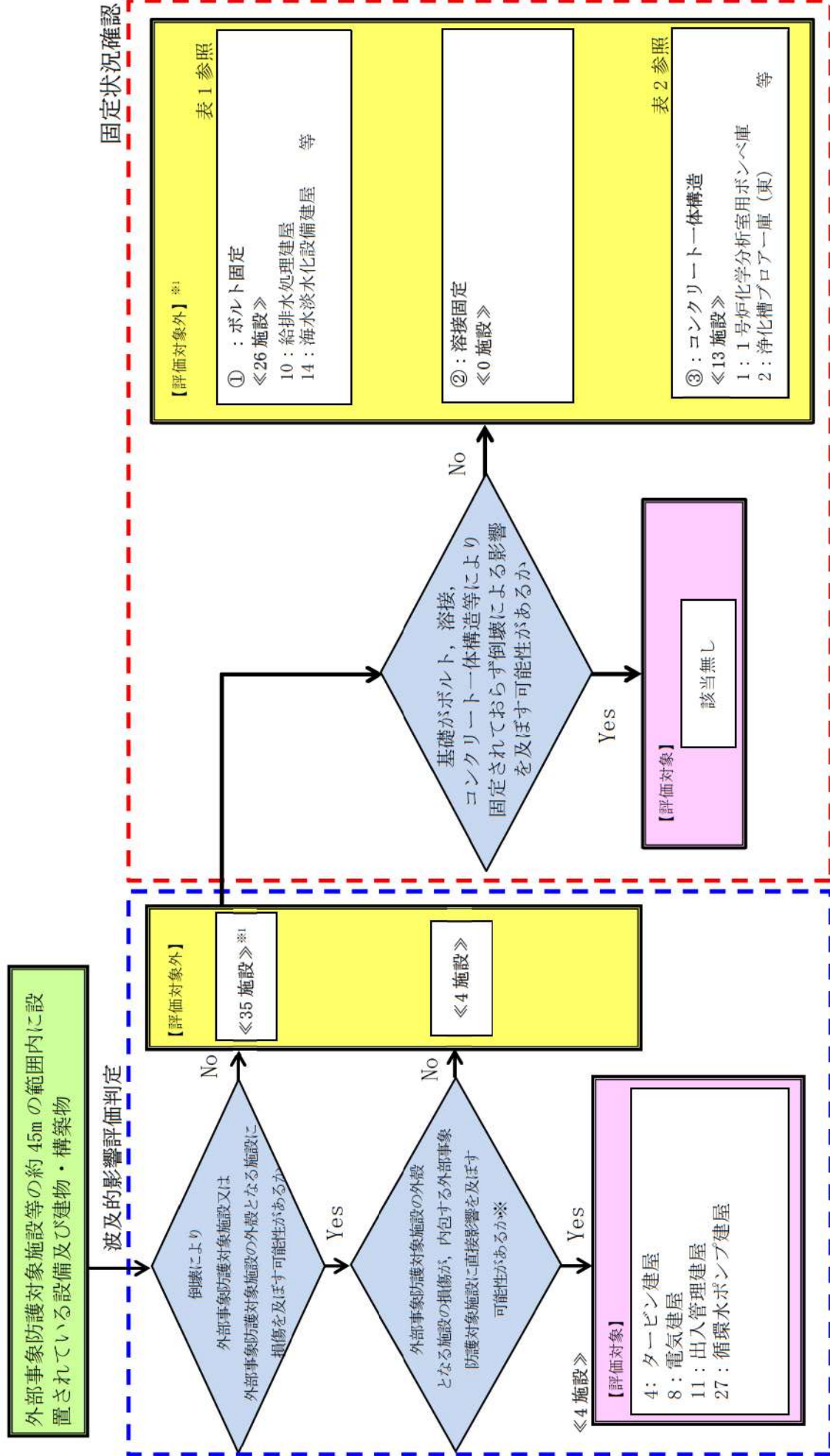


アンテナ



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、基準津波の高さや防護範囲の広さ等の重要性を鑑み、自主的に機能維持のための配慮を行う

表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（避雷針含む）	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ワ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）

泊発電所におけるワークダウンの結果、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15 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16 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1.7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1.7 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報告」(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)

屋外のアクセスルート設定に係る対策設備の評価について

重大事故等時の屋外のアクセスルート確保のために今後配備する碎石及び防雪シートが、すでに実施している竜巻の評価に影響を与えないことを確認するため、以下のとおり評価した。

(1) 対策設備の抽出

屋外のアクセスルートに恒常的に設置する対策設備は以下のとおりであり、それぞれについて竜巻の評価への影響を評価する。

- a. 段差復旧用の碎石の配備
- b. 防雪シートの設置

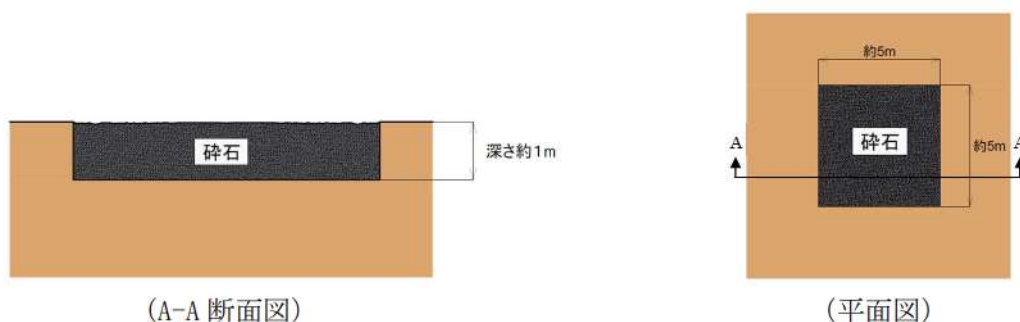
(2) 影響評価

- a. 段差復旧用の碎石の配備

【竜巻の評価への影響】

アクセスルート近傍にあらかじめ配備しておく段差復旧用の碎石の仕様については、北海道開発局独自「切込碎石及びコンクリート再生骨材 呼び名 30mm」（令和5年度 道路・河川工事仕様書 国土交通省 北海道開発局）に準拠するため、最大で4cmを想定しており、竜巻の評価にて、設計飛来物としている砂利、鋼製パイプ、鋼製材の評価に包含できることを確認した。

よって、段差復旧用の碎石を配備することによる、竜巻の評価への影響はない。



※：縦，横，深さについては，今後の検討により変更となる可能性がある。

段差復旧用の碎石の配備イメージ

【評価概要】

以下のとおり、碎石の大きさを想定し影響評価を実施した。

○碎石（最大4cm×4cm×4cm 重さ約0.18kg）

飛散した場合を考慮すると、竜巻防護ネットをすり抜ける可能性がある。よって、同様に竜巻防護ネットをすり抜ける可能性がある設計飛来物の砂利（4cm×4cm×4cm，重さ0.18kg）の評価に包含できることを確認した。

b. 防雪シートの設置

【竜巻の評価への影響】

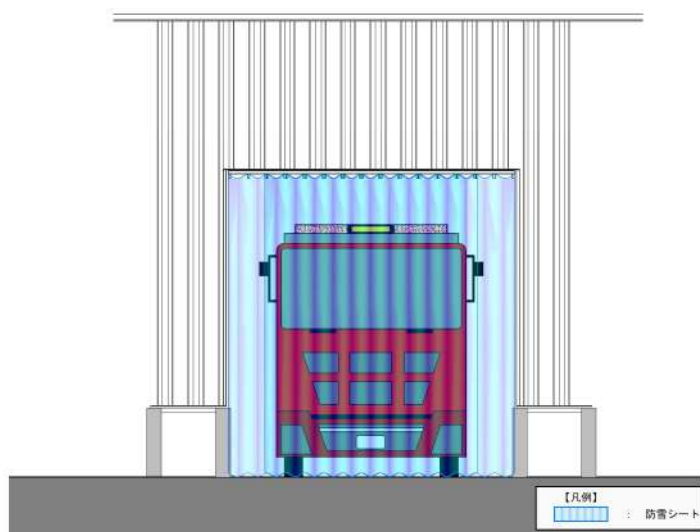
防雪シートについては、51m 倉庫・車庫の出入口に固定するものの、飛来物になりうる可能性があるため、竜巻の評価にて設計飛来物としている砂利，鋼製パイプ，鋼製材の評価に包含できることを確認した。

よって，防雪シートを設置することによる，竜巻の評価への影響はない。

【評価概要】

○防雪シート（約 4.0m×約 3.8m×約 0.53mm 重さ約 20kg）

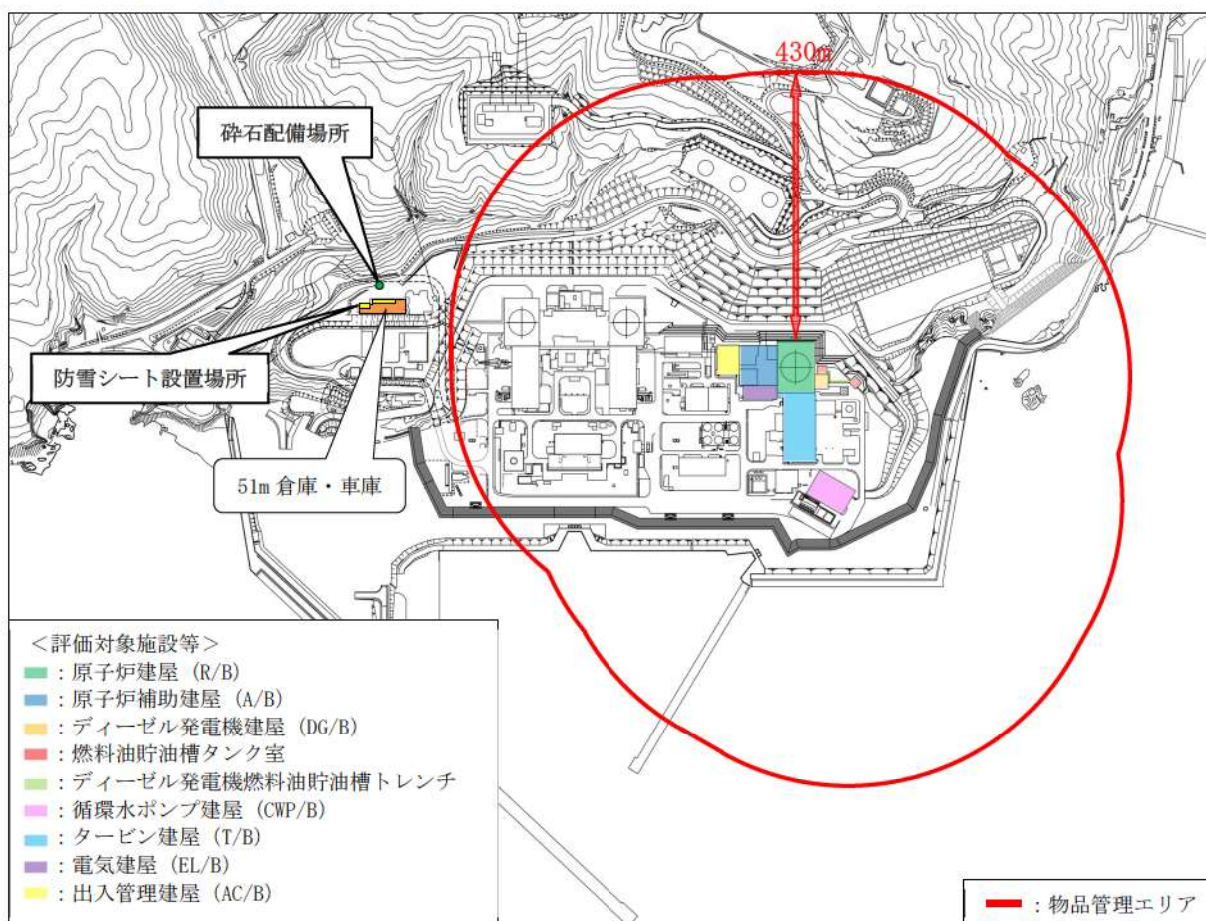
：飛散した場合を考慮し，評価対象施設の評価において最大の設計飛来物である鋼製材（4.2m×0.3m×0.2m 重さ 135kg）の評価に包含できることを確認した。



防雪シート設置イメージ

(3) 対策設備の設置場所

段差復旧用の碎石の配備場所及び防雪シートの設置場所を以下に示す。



※：碎石配備場所については、今後の検討により変更となる可能性がある。

アクセスルート対策設備の設置場所

(4) 評価結果

重大事故等時の屋外のアクセスルート確保のために今後配備する碎石及び防雪シートについて、以下の評価結果により、すでに実施している竜巻の評価に影響を与えないことを確認した。

表 アクセスルート対策設備の設計飛来物への包含性について

評価対象 (設計飛来物)	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]	評価結果
	長さ [cm]	幅 [cm]	高さ [cm]	質量 [kg]			
碎石 (砂利)	4.0 (4.0)	4.0 (4.0)	4.0 (4.0)	0.18 (0.18)	0.3 (0.3)	2.3 (2.3)	砂利の評価に包含できる。
防雪シート (鋼製材)	400 (420)	380 (30)	0.053 (20)	20 (135)	87.1 (219.3)	27.3 (28.5)	鋼製材の評価に包含できる。

(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)

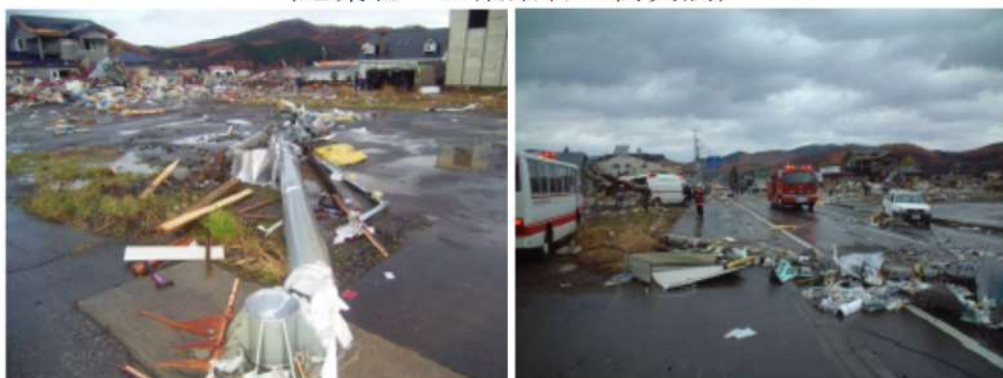
第3.4.1図 2012年茨城県つくば市で発生したF3竜巻による被害状況⁽¹⁾



(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)

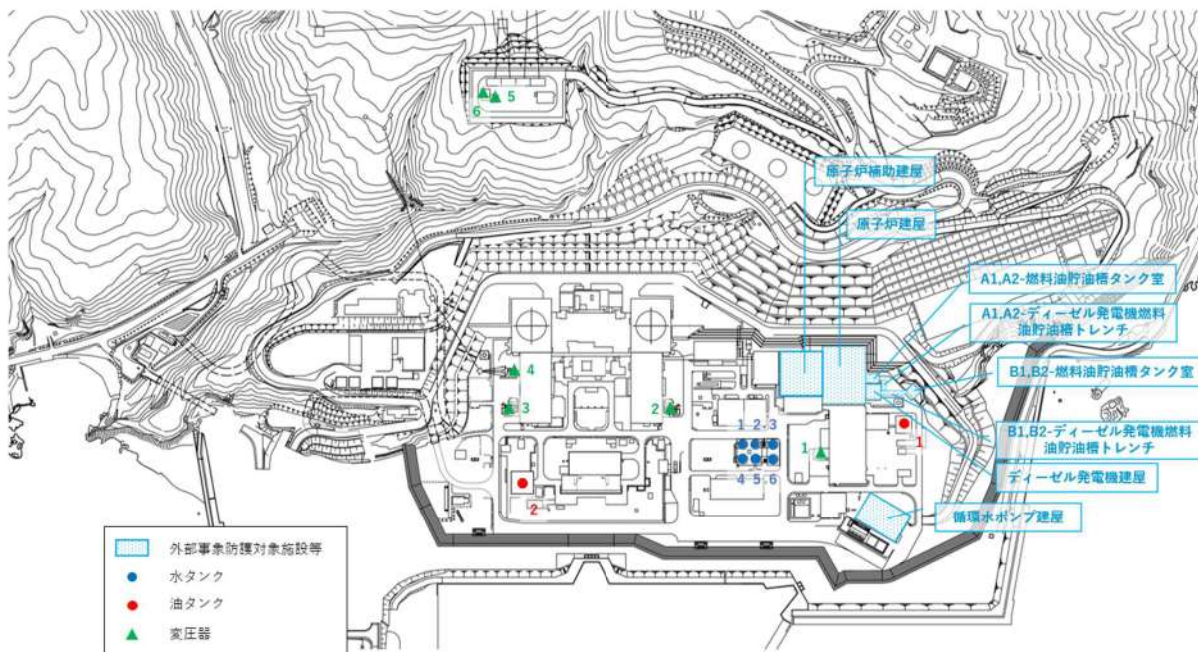
第 3.4.2 図 2006 年に北海道佐呂間町で発生した F3 竜巻による被害状況⁽²⁾⁽³⁾

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
	5: 3号予備変圧器	6: 後備変圧器 (設置予定)

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	運用対策
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 等
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 燃料取扱作業中止 等

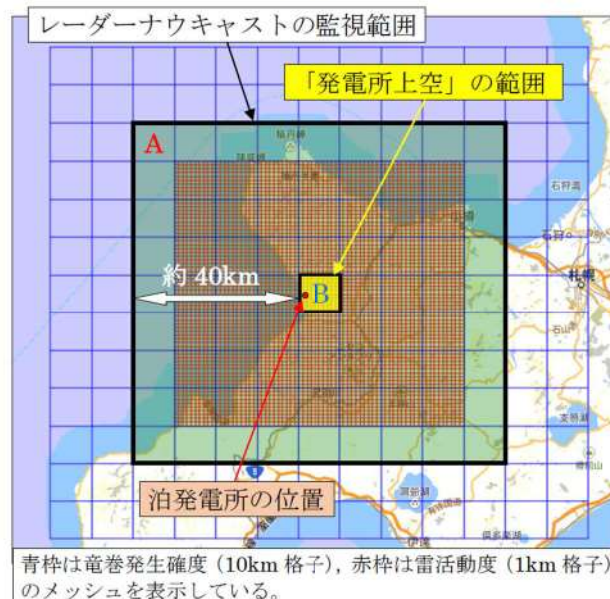


図1 竜巻運用対策の実施基準（イメージ）

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。

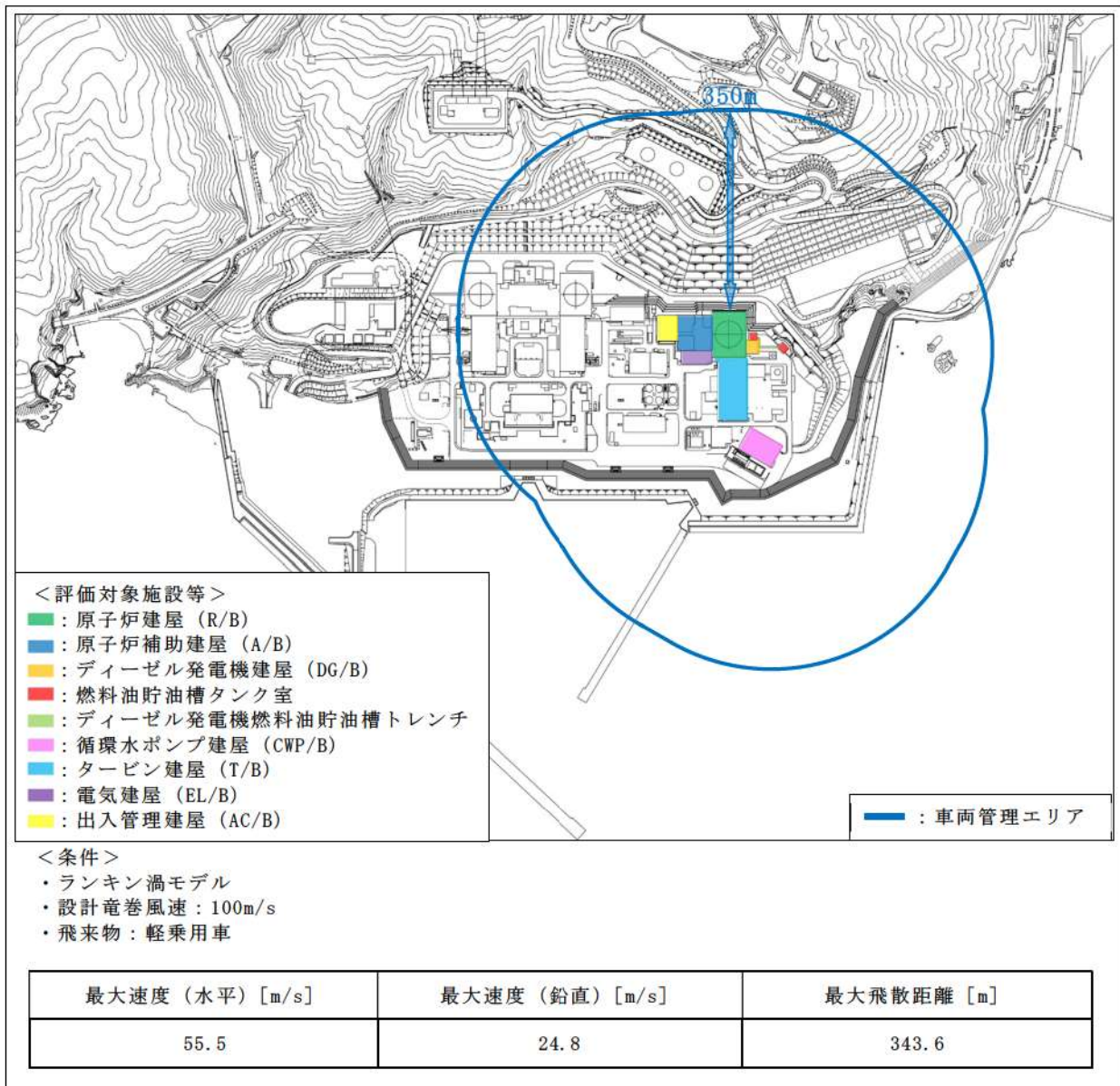


図2 車両管理エリア

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

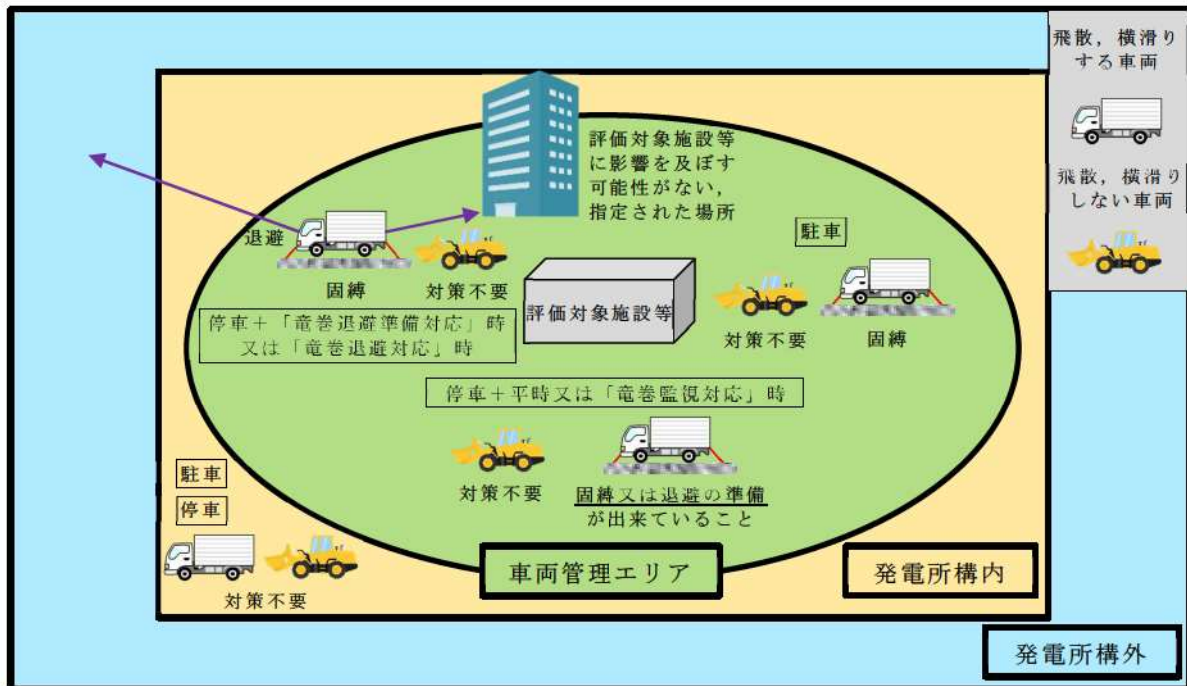


図3 発電所への入構車両の管理イメージ

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。

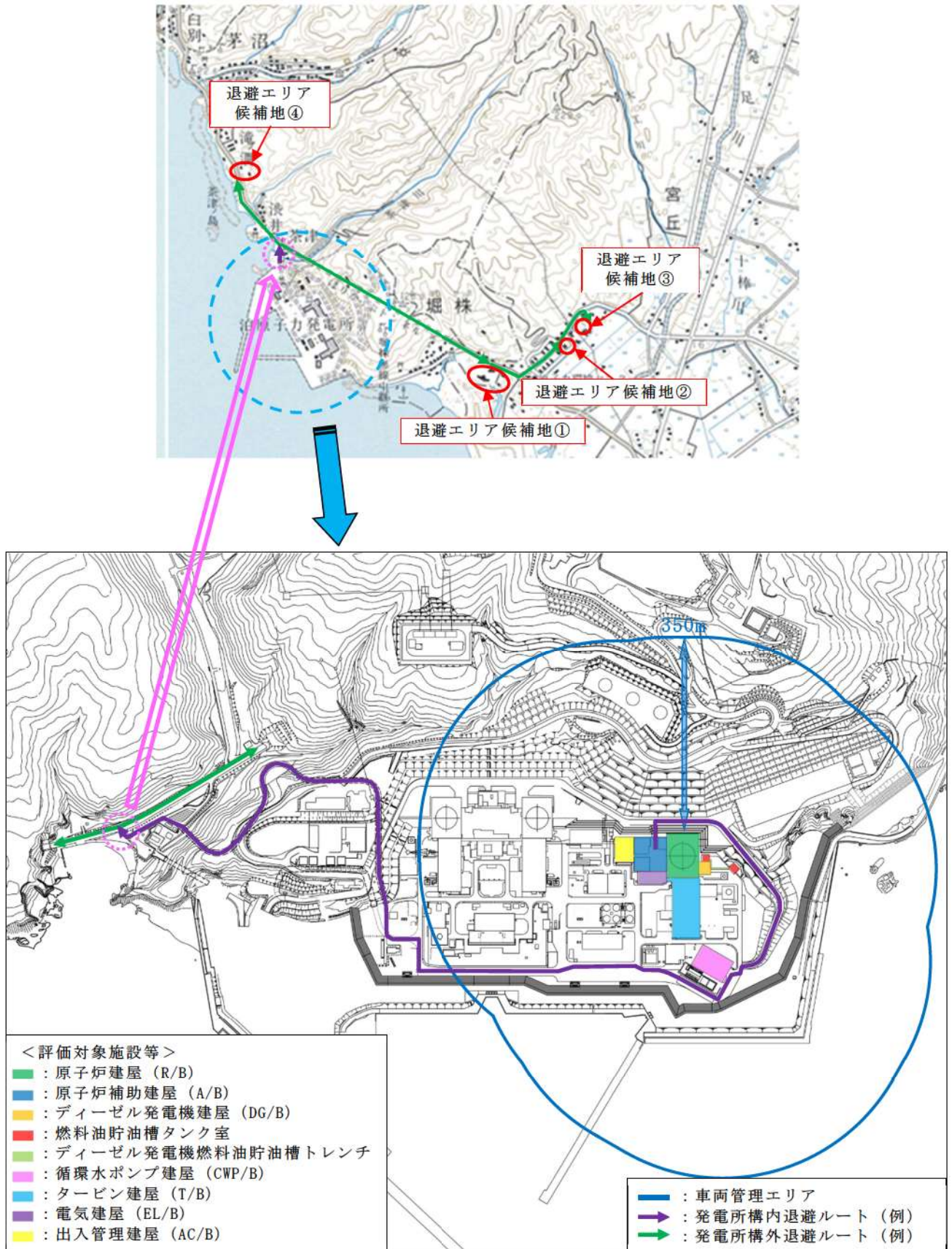


図4 車両管理エリア及び車両退避エリア

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

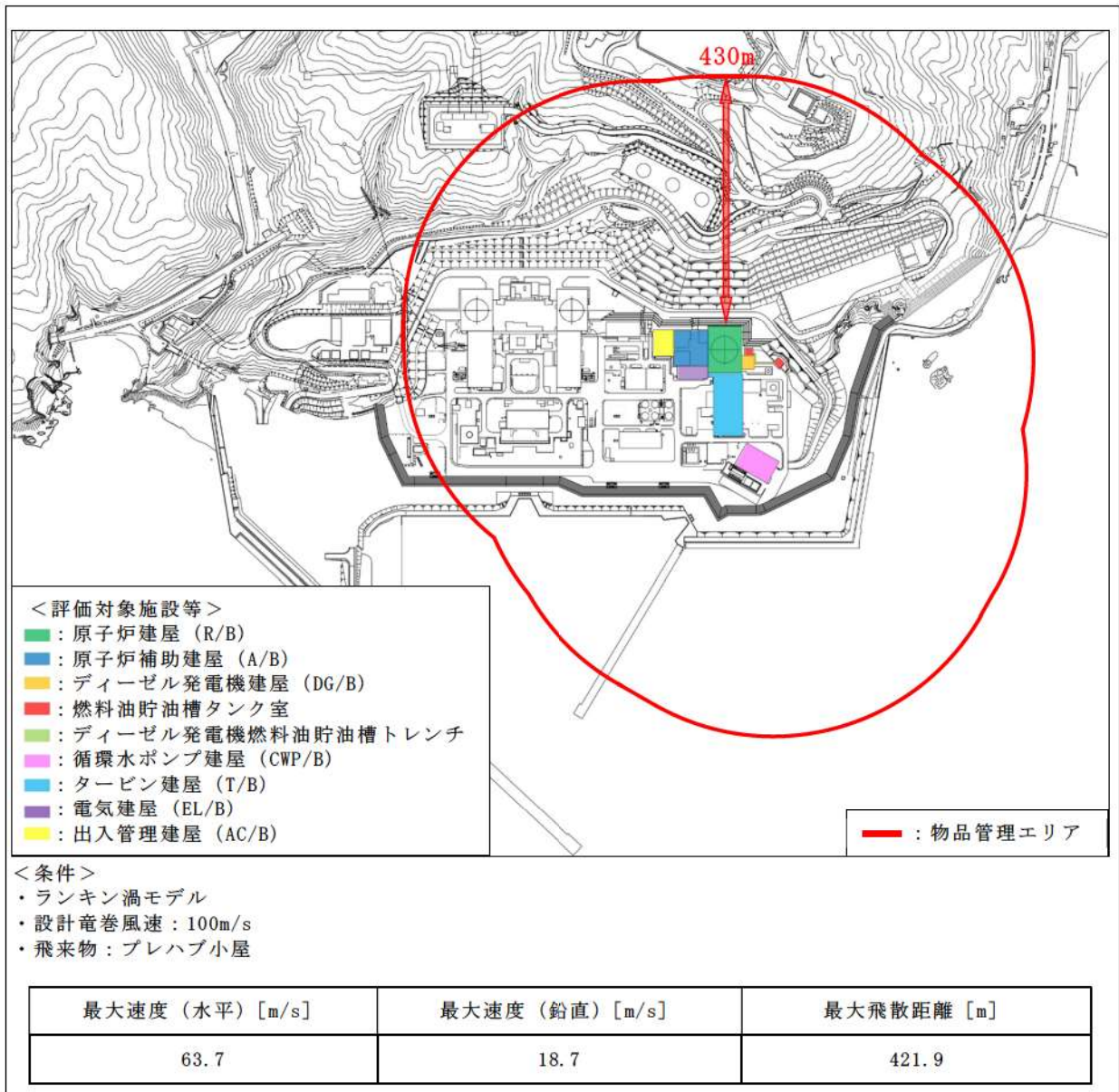


図5 物品管理エリア

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。

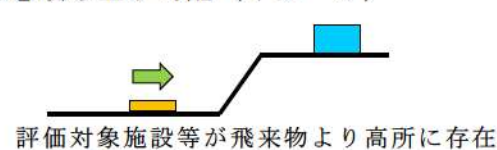
① 障害物（イメージ）



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。

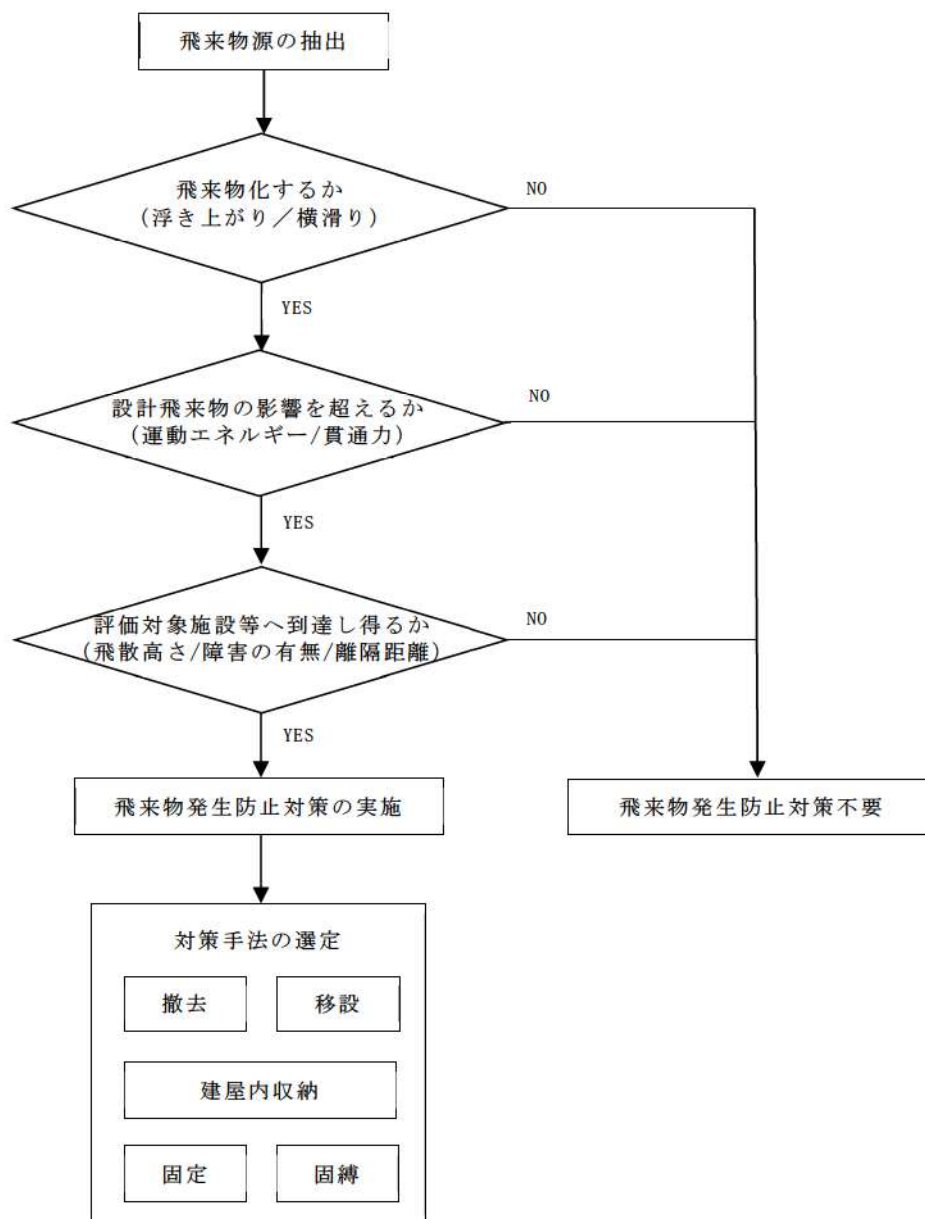


図7 飛来物発生防止対策実施フロー

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。

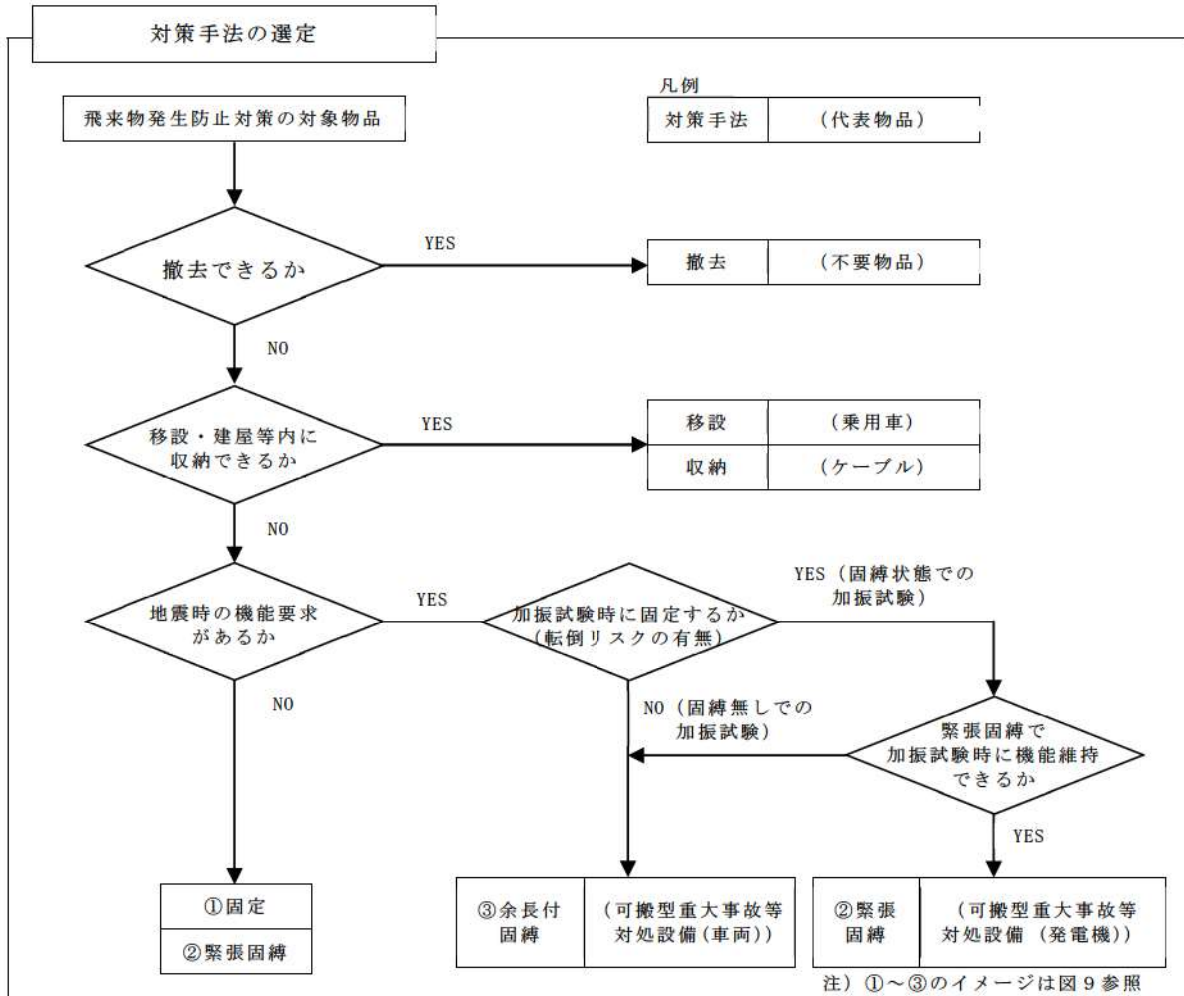


図8 飛来物発生防止対策選定フロー

<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(高強度繊維ロープ等)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（高強度繊維ロープ、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）

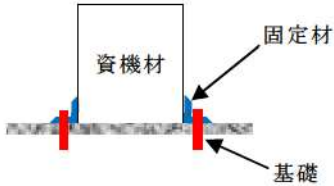
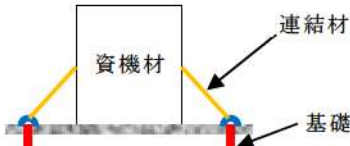
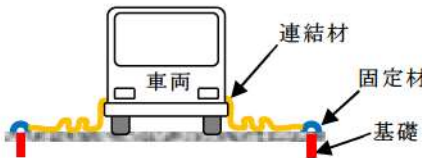
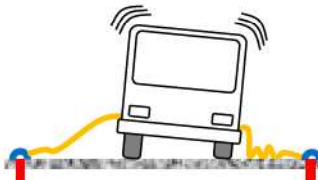
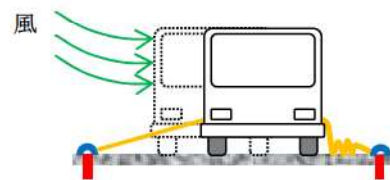
手法	対策の概要図
①固定	<p>飛来物源に固定金具を取り付けて固定</p> 
②緊張固縛	<p>飛来物源を連結材（高強度繊維ロープ等）を用いて固縛</p> 
③余長付固縛	<p>【通常時】 飛来物源を連結材（高強度繊維ロープ等）を用いて固縛（動き代がある）</p>  <p>【地震時（イメージ）】 飛来物源が地震の揺れを受け、連結材の余長範囲内で動く（揺れる）</p>  <p>【竜巻時（イメージ）】 飛来物源が竜巻の風を受け、連結材の余長範囲内で動く</p> 

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。

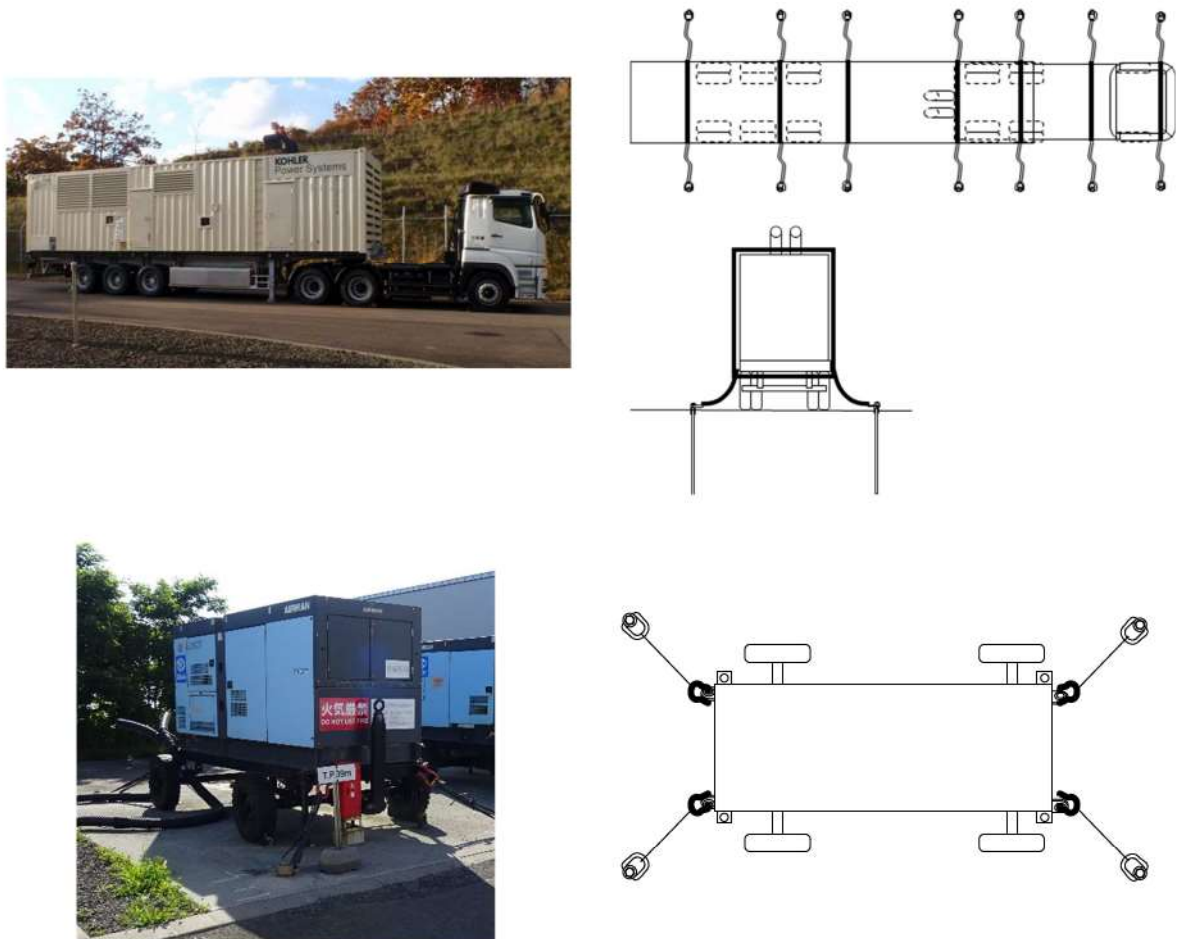


図 10 固縛装置のイメージ

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。

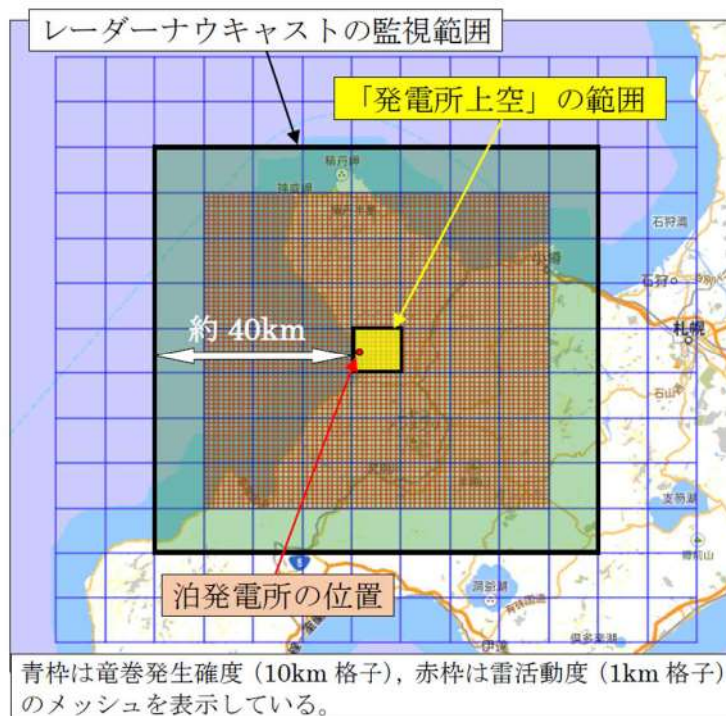


図1 レーダーナウキャスト監視範囲

(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。

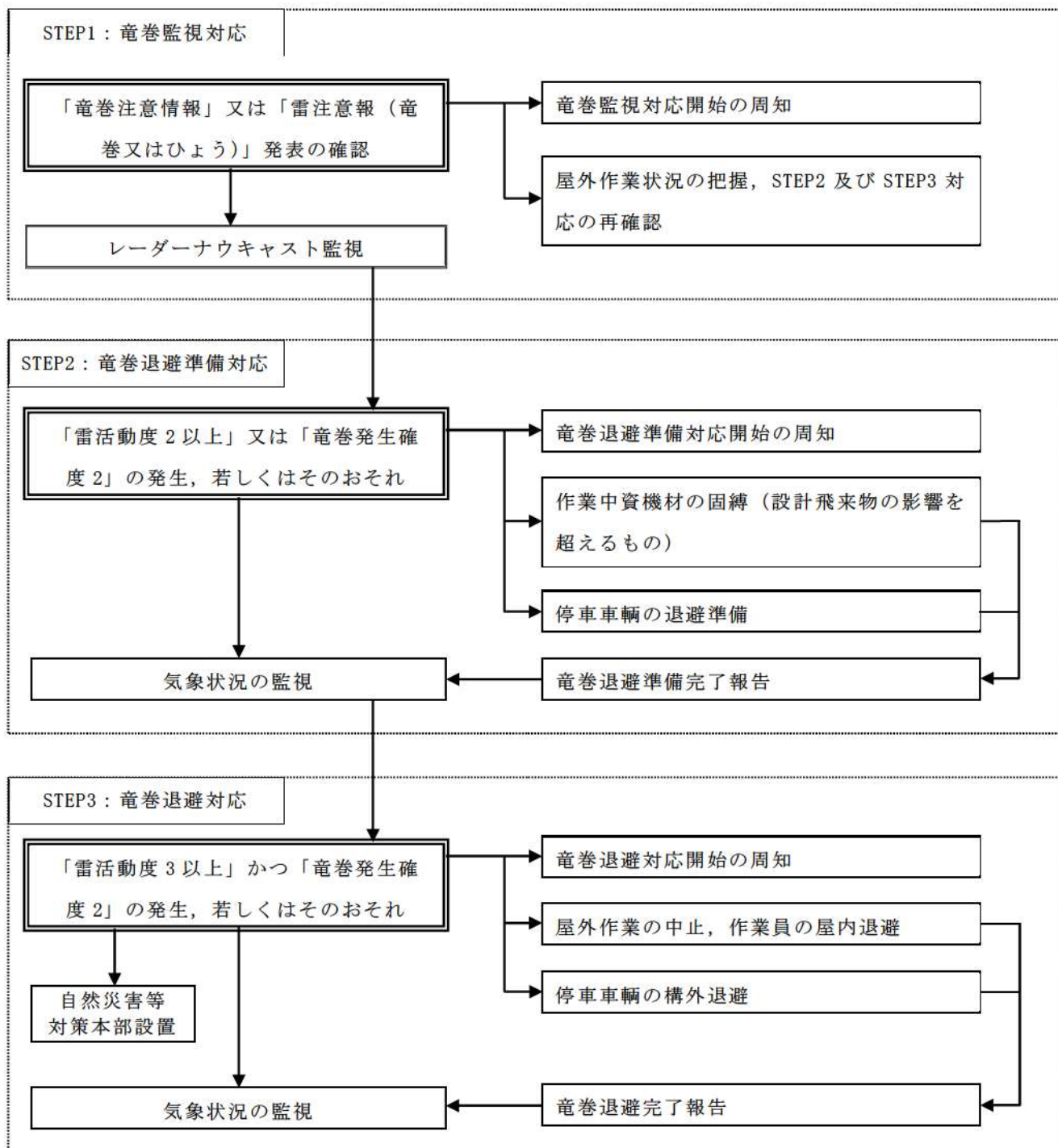


図 2 物品等飛散防止対策・車両退避フロー

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	3
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	61

	2016	2017	2018	2019	2020	2021	6年間合計
全捕捉率	92.9%	100%	91.7%	88.9%	100%	100%	95.1%
猶予30分超えでの捕捉率	85.7%	0	91.7%	55.6%	87.5%	100%	86.9%
猶予60分超えでの捕捉率	78.6%	100%	83.3%	44.4%	75%	71.4%	77.0%

・捕捉率95.1%（61回の竜巻発生回数に対し、捕捉出来なかったのは3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OR条件によって判定される。

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，下記の条件1，2のAND条件によって判定される。

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}

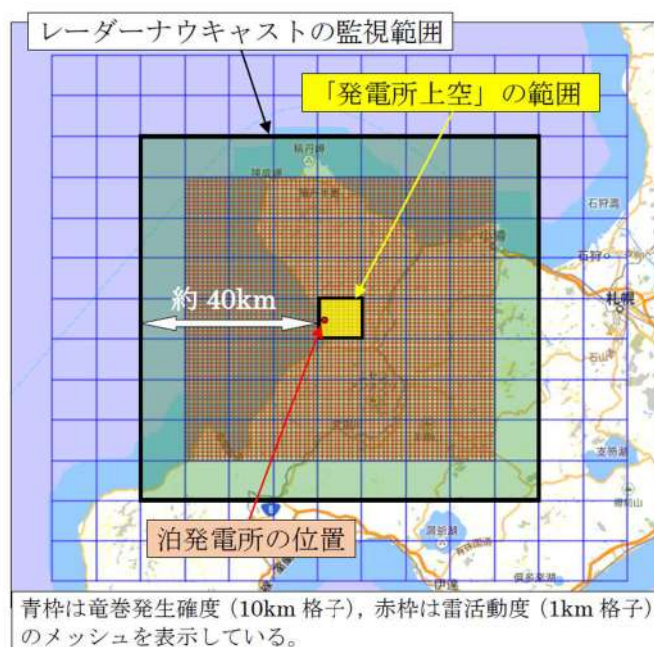


図1 レーダーナウキャスト監視範囲

- ・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。  <p style="text-align: center;">対策例</p>
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。  <p style="text-align: center;">対策例</p>
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エイトを取付ける。 ・ ウエイトの重量については，車両の自重+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。 ・ 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。

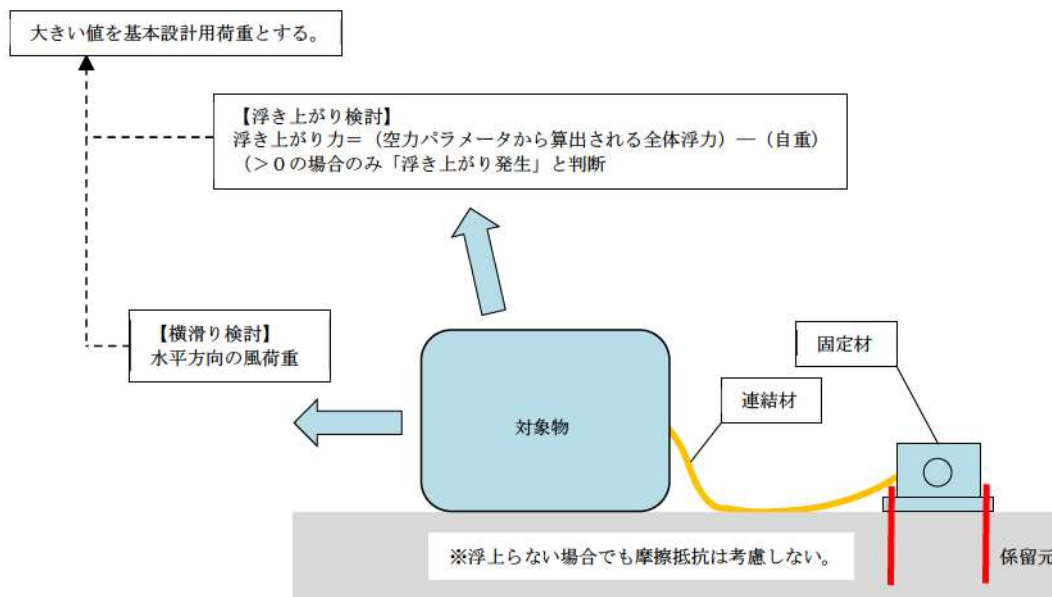


図1 横滑りを考慮する物品に対する基本設計用荷重の考え方の概念図

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/m³)

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) [m²]

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。

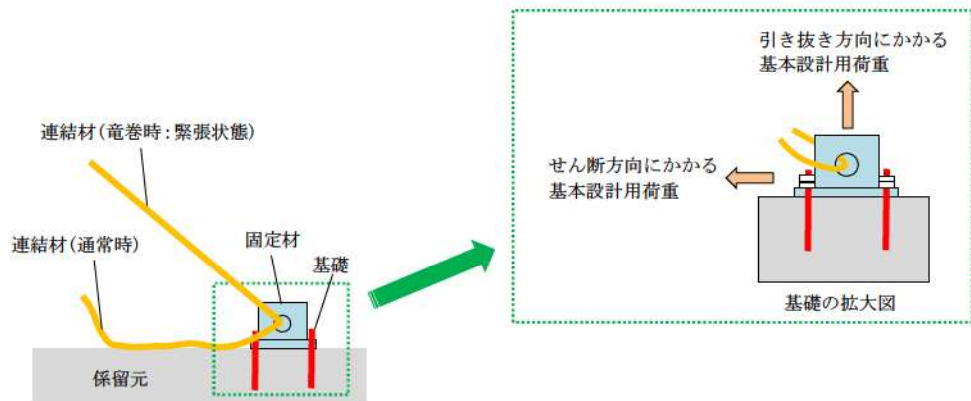


図2 アンカーボルト等に関する検討荷重（概念図）

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。

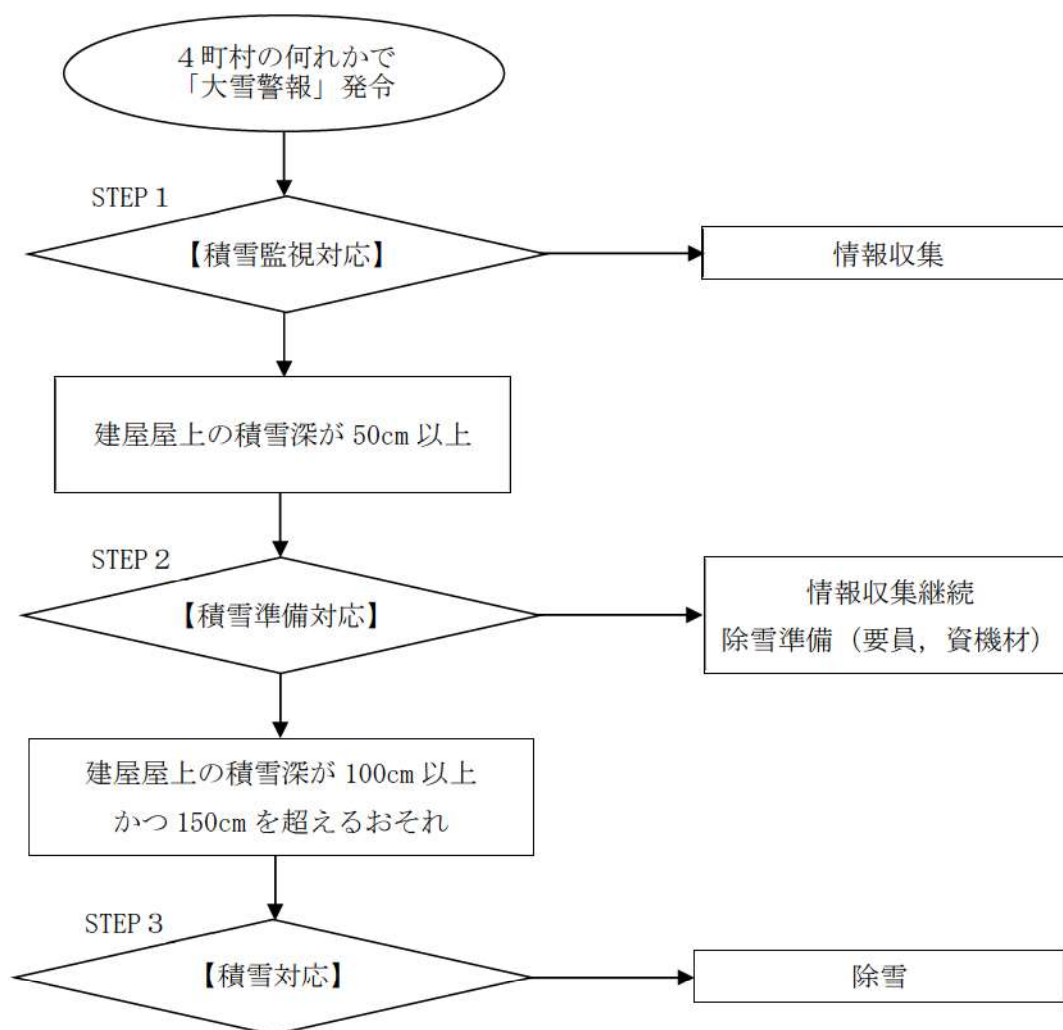
竜巻通過前後の気象条件において降雪を伴う可能性はあるが、上昇流の竜巻本体周辺では、竜巻通過時に雪は降らない。また、下降流の竜巻通過時は、竜巻通過前に積もった雪の大部分は竜巻の風により吹き飛ばされ、雪による荷重は十分小さく設計竜巻荷重に包絡される。よって、「原子力発電所の竜巻影響評価ガイド」で考慮することが要求される竜巻と同時発生が想定される雪は荷重として影響を及ぼさないことから、組合せを考慮しない。

[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。

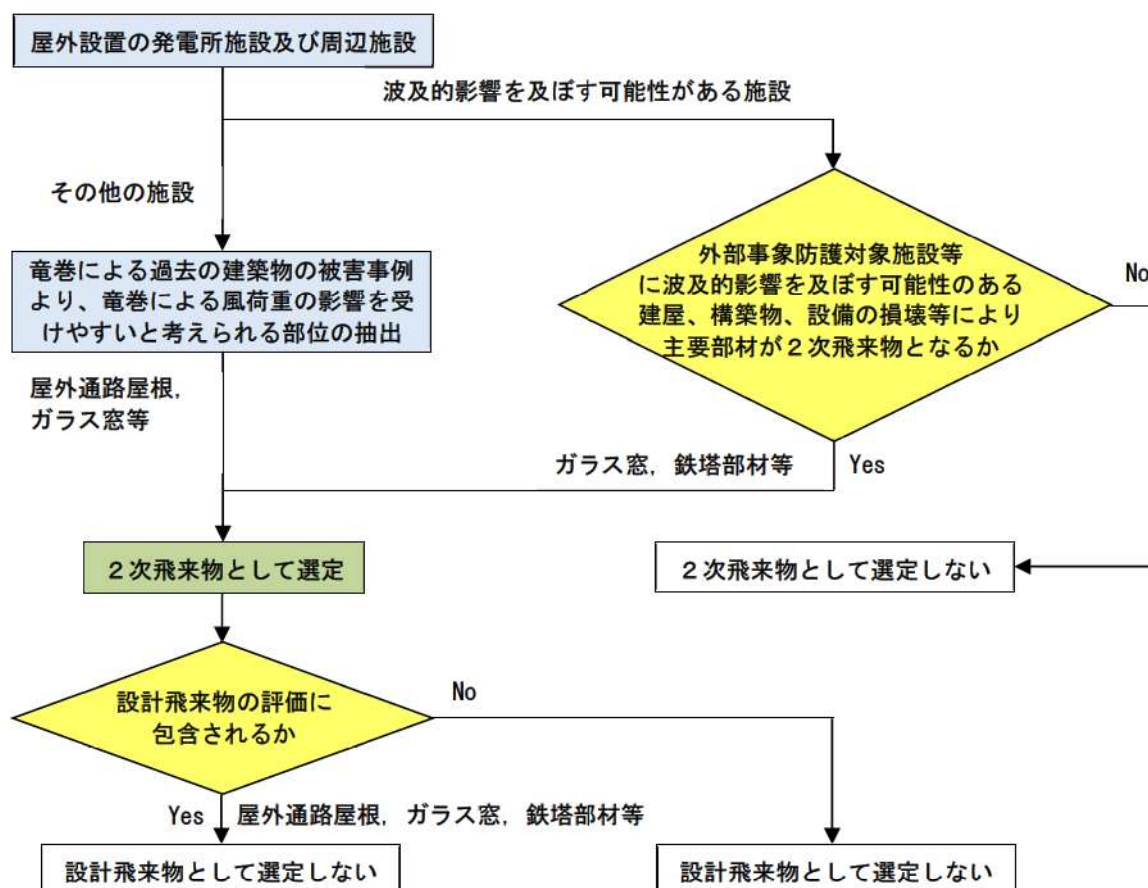


図1 2次飛来物選定フロー

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、原子炉建屋（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	
原子炉建屋（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。

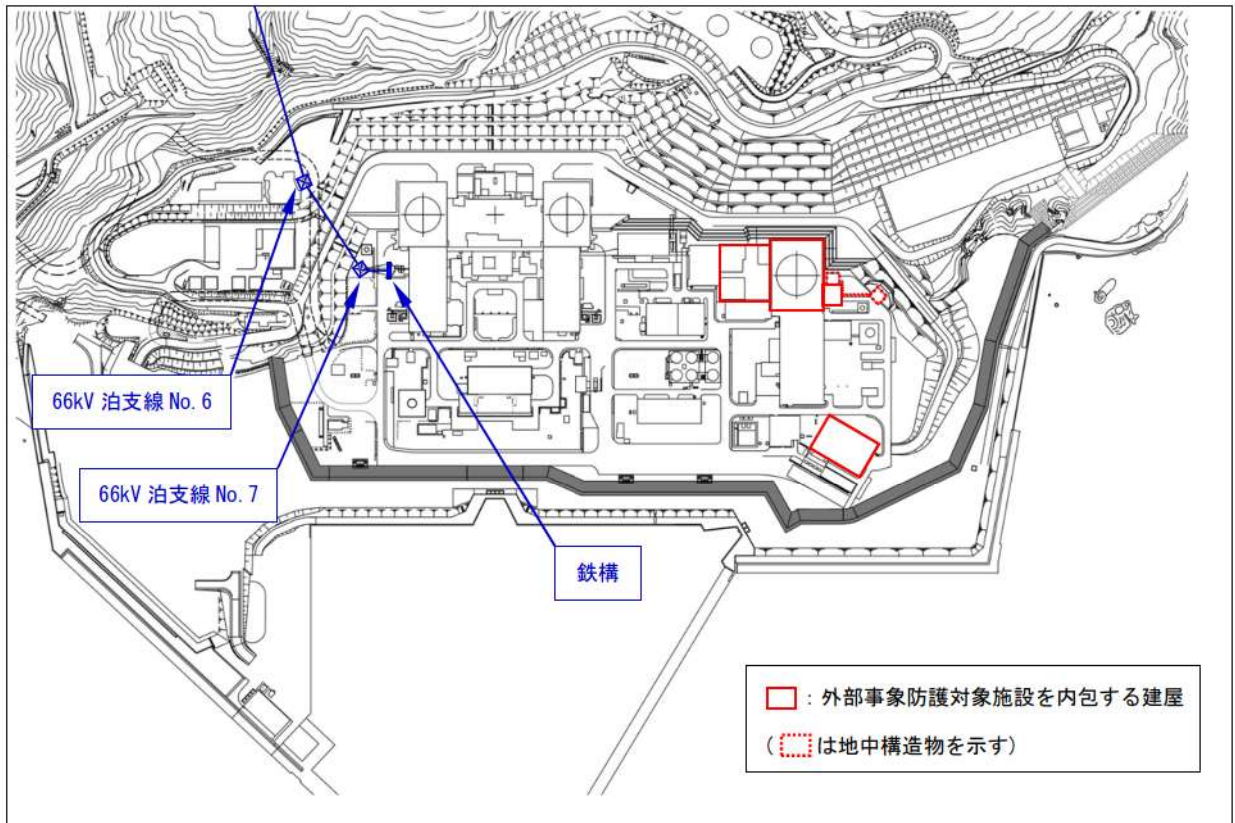


図 1 検討対象平面図

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

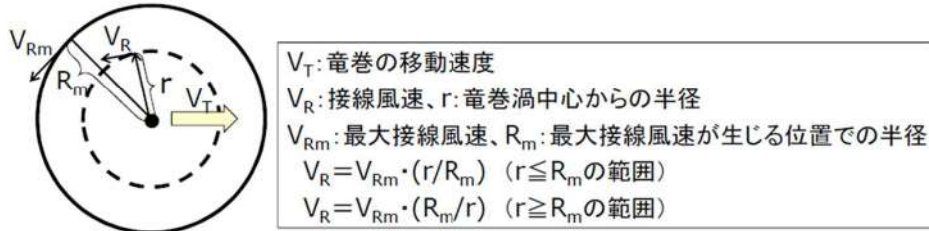
架渉線については、風速 40m/s 時の電線 1m 当りの電線風圧値 (H_c) を設定し、この風圧値が作用した際に耐えられるよう送電鉄塔の設計を行っている。

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

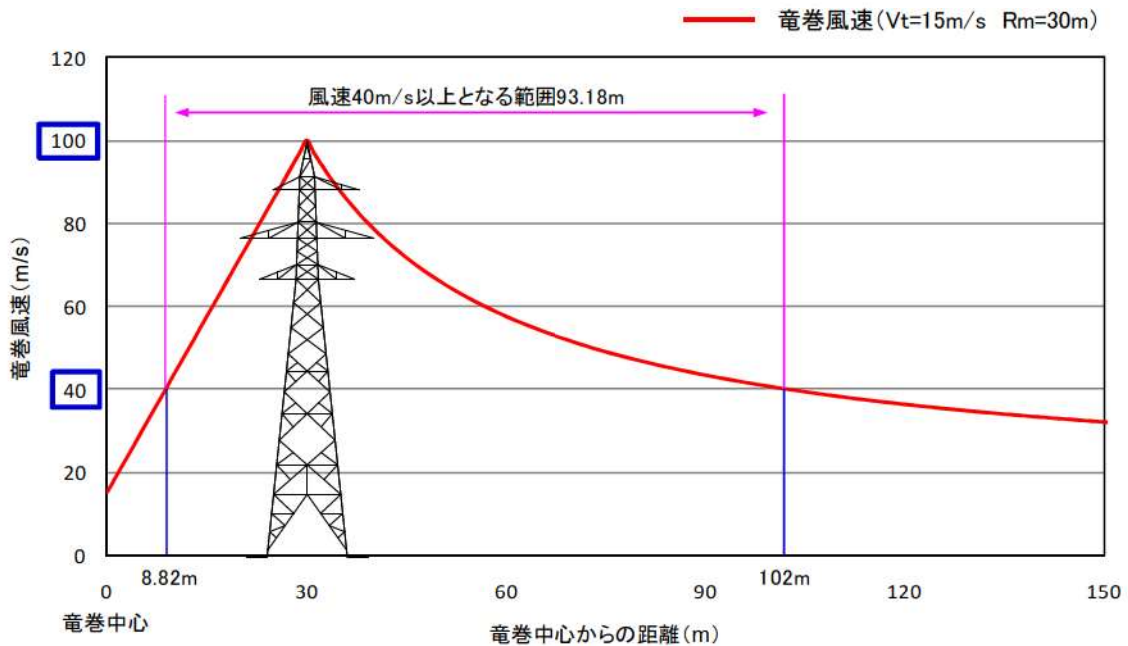


図 3 竜巻風速 100m/s 時の風速分布

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。

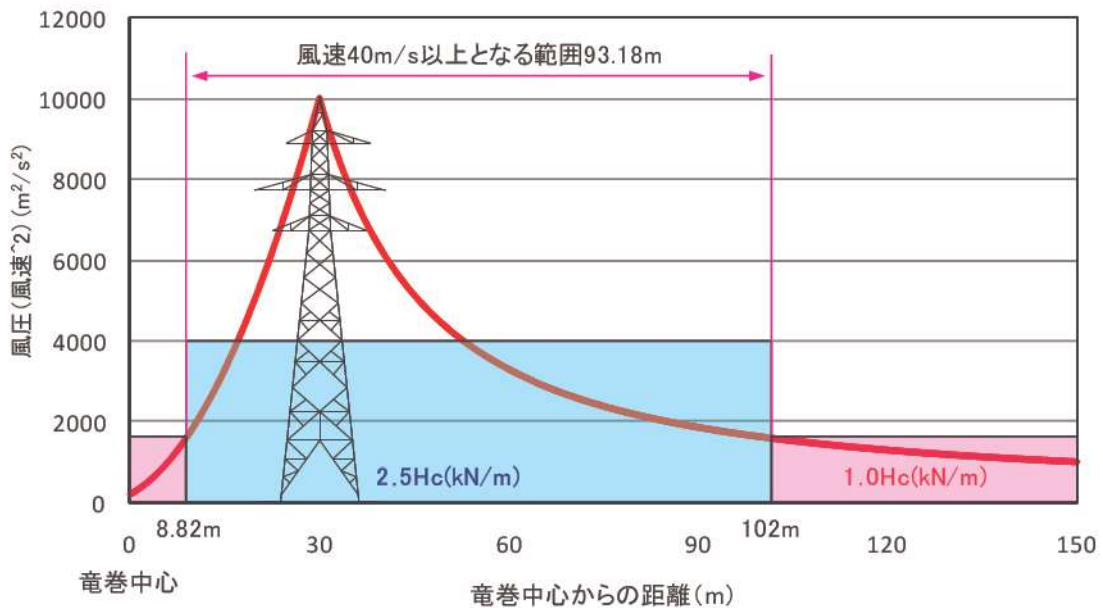


図4 架渉線に作用する風荷重の算定結果

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。

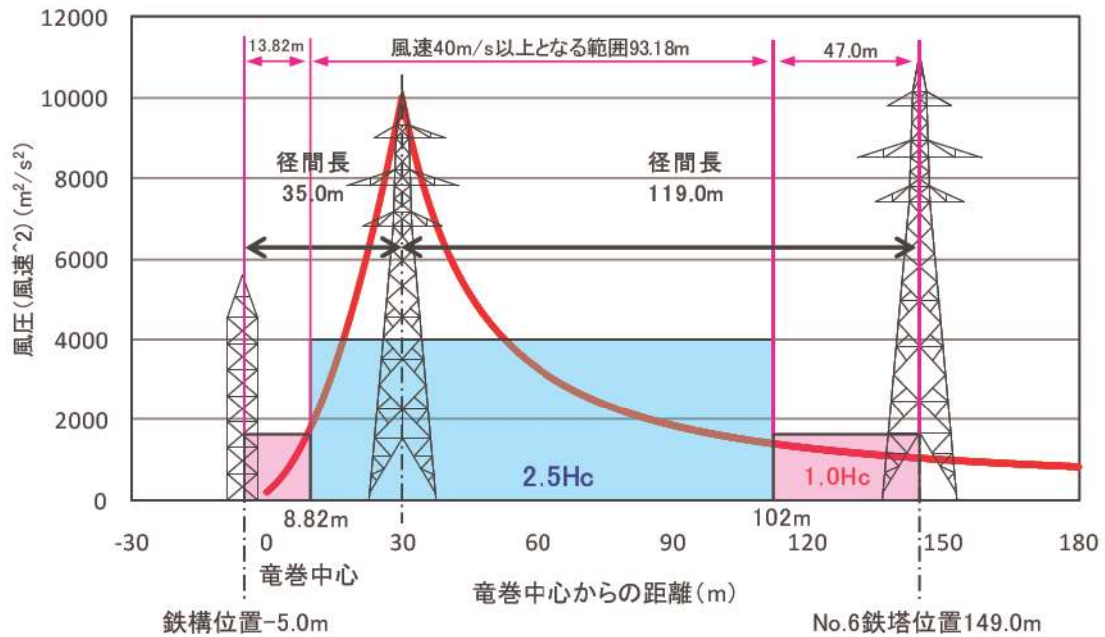


図 5 泊支線 No. 7 鉄塔前後の架渉線に作用する風荷重

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。

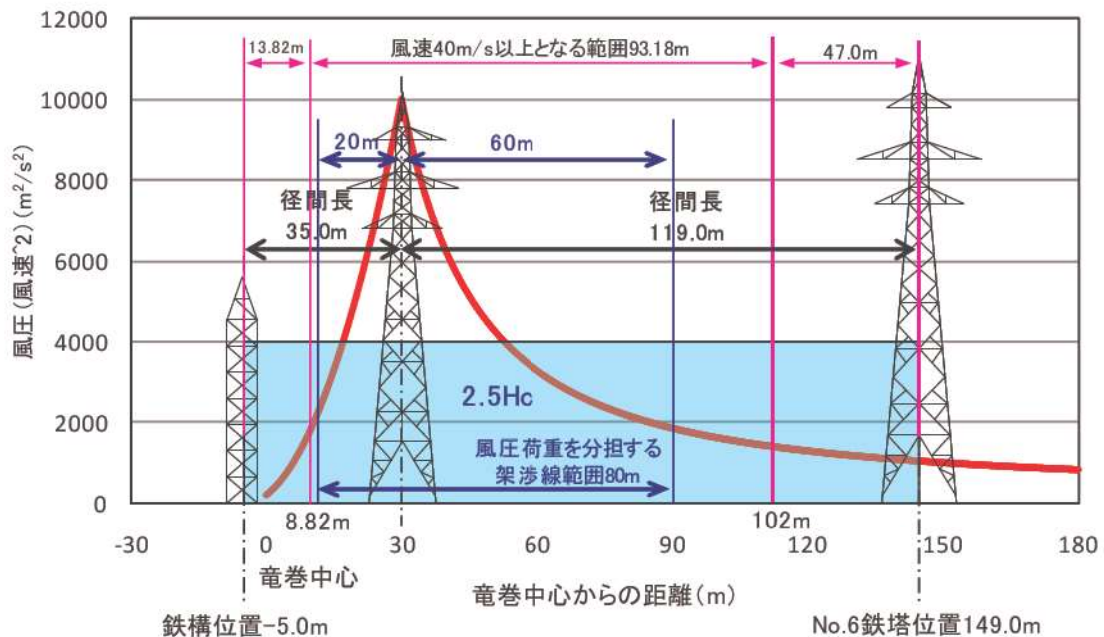


図 6 本検討における架渉線風荷重分布

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

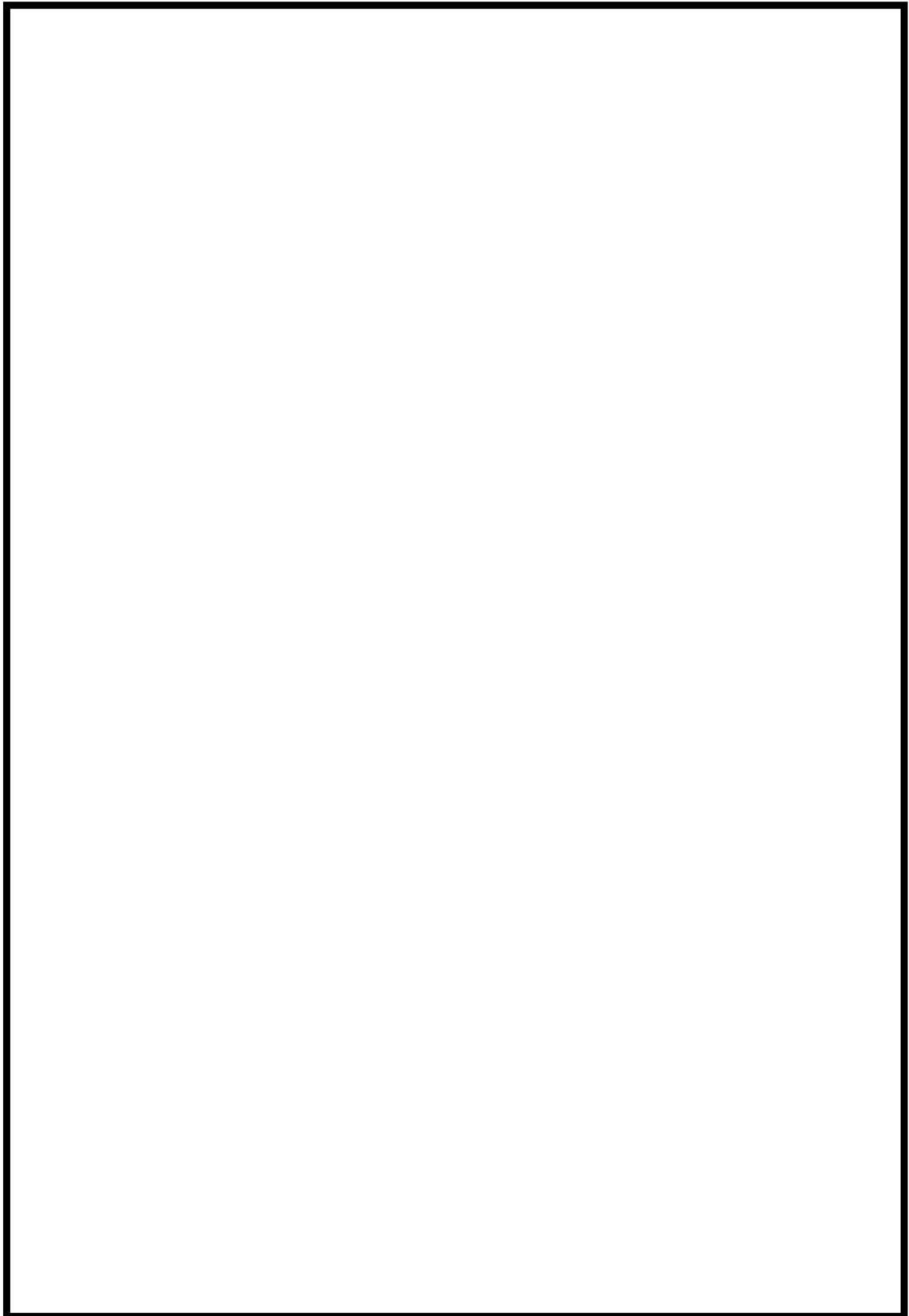
<参考資料>

【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。

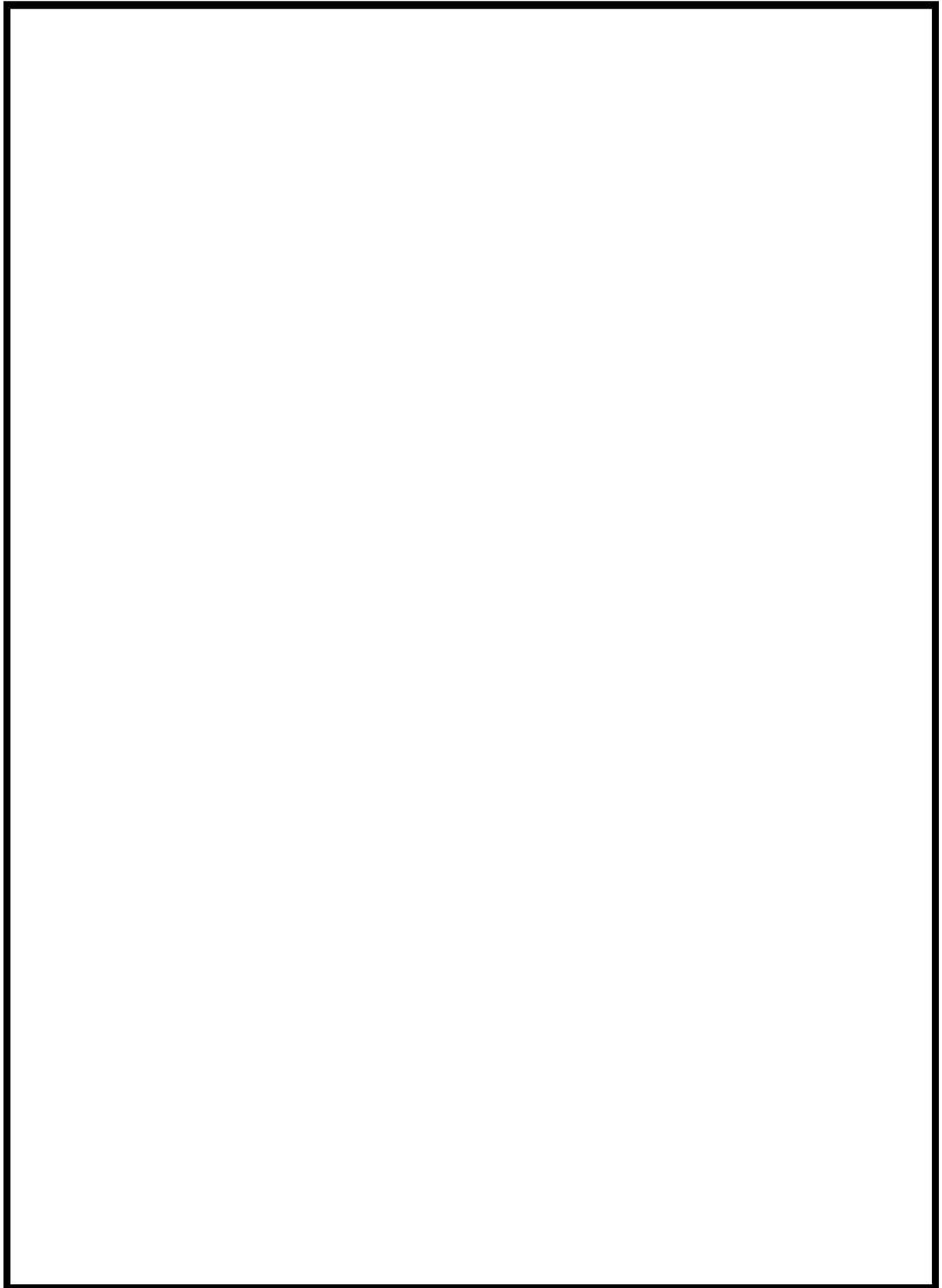
【鉄塔部材の強度検討結果】




※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，

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

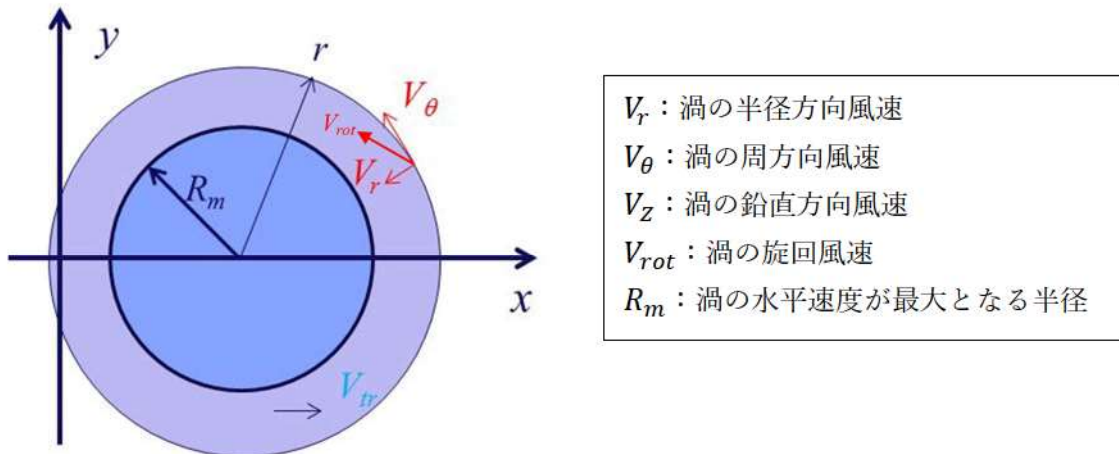


図1 風速条件の設定概略図

- ※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。

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

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。

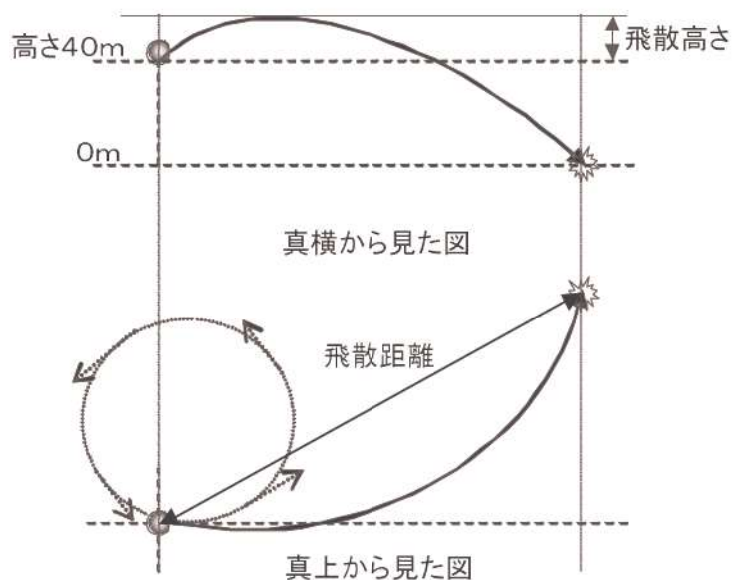


図2 飛来物の軌跡評価イメージ

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}

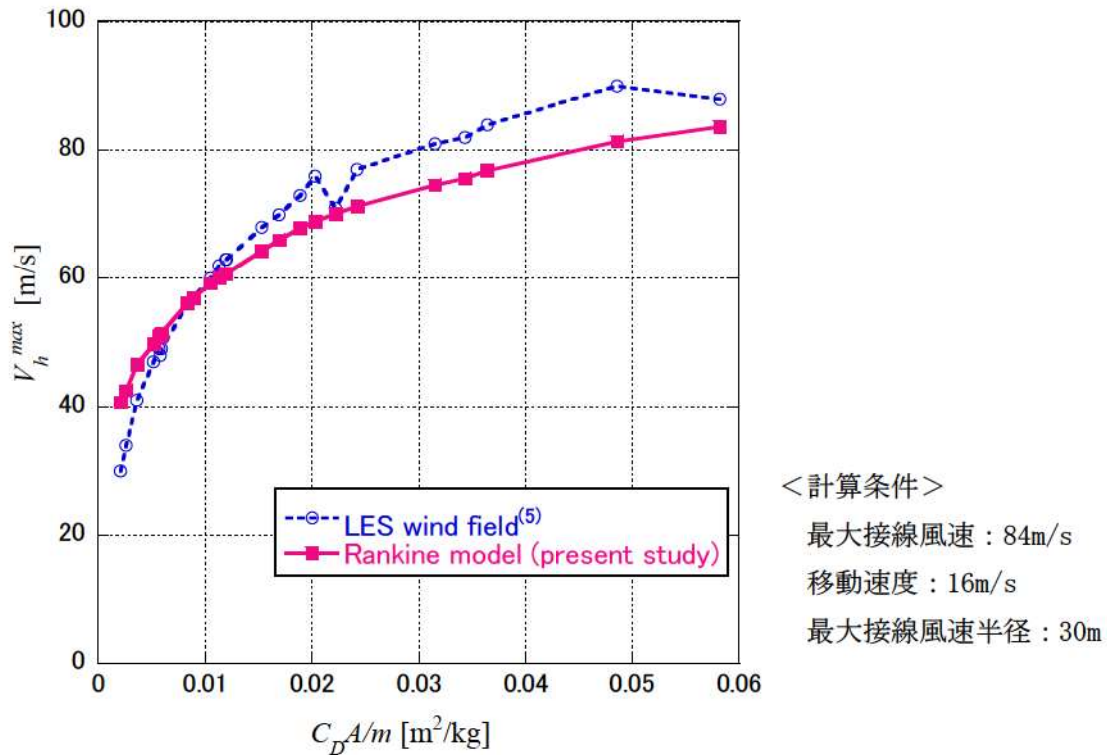


図3 空力パラメータと飛来物速度の関係

- ※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。

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

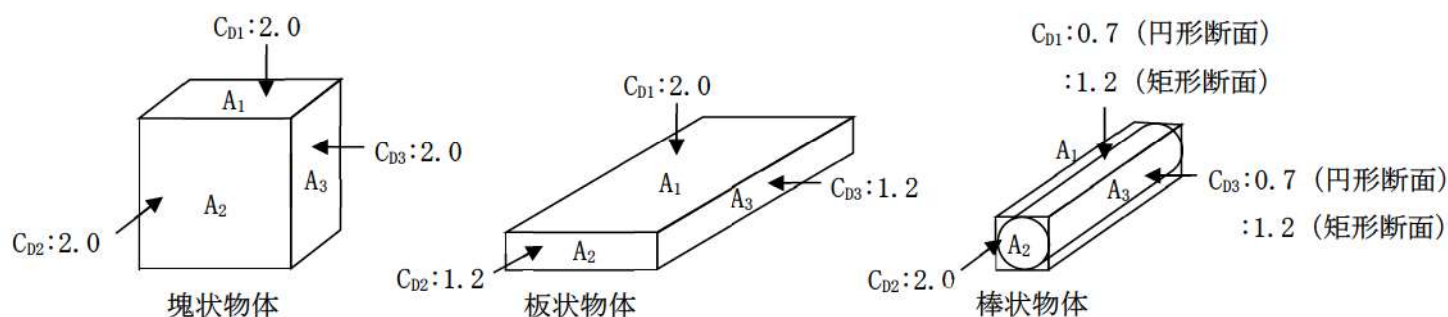
ここで、

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。

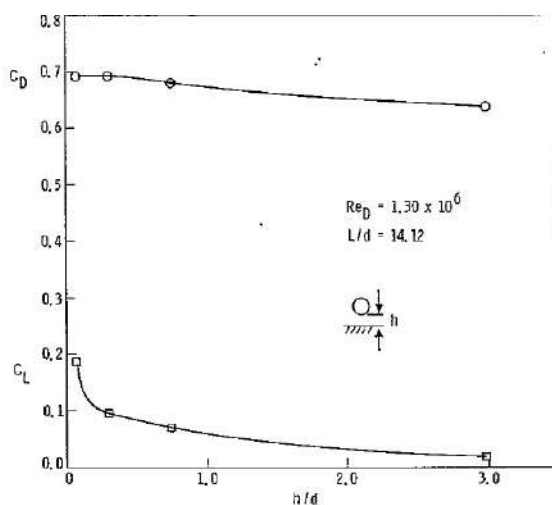


Fig. 3-19. Effect of distance from ground plane on the drag and lift coefficients of open circular cylinder (length/diameter = 14.1) normal to flow ($\psi = 90^\circ$) in supercritical Reynolds Number regime

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	0.00699

・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、『自動車が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

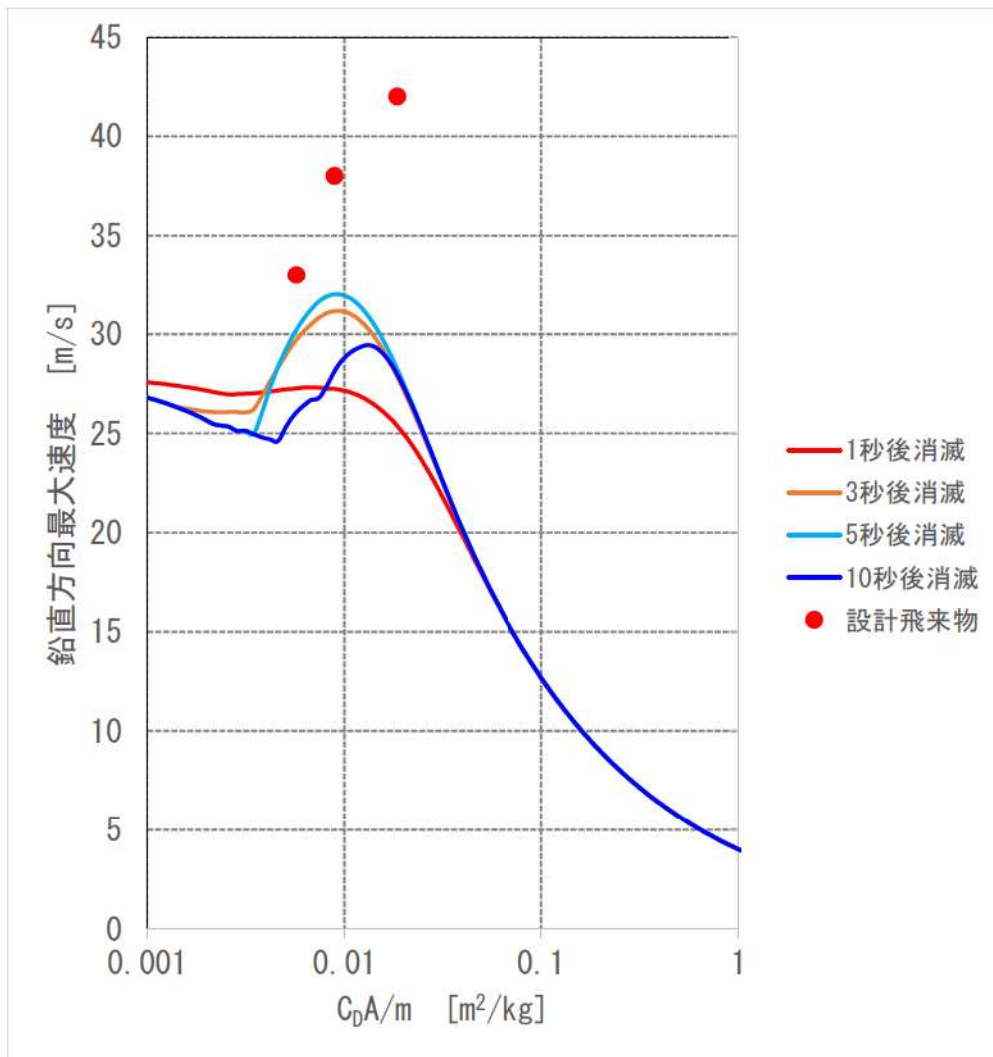


図1 竜巻風速 100m/s 時の飛来物の鉛直方向最大速度

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、 $A_R = 1.7 \times 1.2 = 2.04[m^2]$ とする。

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

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。）

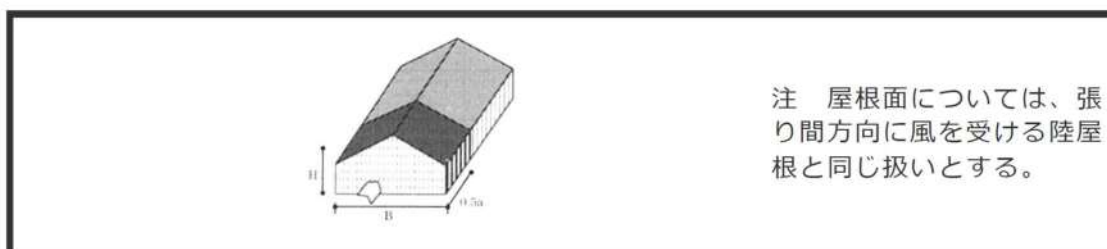


表2 陸屋根面のCpe

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、 $8815\text{N}/\text{m}^2$ であるが、作用する気圧差荷重を保守的に $8900\text{N}/\text{m}^2$ 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 $8815\text{N}/\text{m}^2$ であるが保守的に $8900\text{N}/\text{m}^2$ 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 $C_{dA}/\text{m}^2/\text{kg}$	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	0.00699	313
乗用車(セダン2)	4.58	1.74	1.46	1310	0.00867	329
乗用車(セダン3)	4.40	1.69	1.48	1170	0.00928	335
乗用車(ワゴン1)	4.41	1.69	1.50	1280	0.00857	328
乗用車(ワゴン2)	4.40	1.69	1.50	1190	0.00920	334
乗用車(ワゴン3)	4.40	1.69	1.50	1200	0.00912	333
乗用車(ワゴン4)	4.84	1.88	2.10	2040	0.00751	321
乗用車(ワゴン5)	4.84	1.88	2.10	2050	0.00748	321
乗用車(ワゴン6)	4.69	1.69	2.24	2350	0.00624	304
乗用車(ワゴン7)	5.46	2.15	2.57	2880	0.00718	316
乗用車(ワゴン8)	5.49	1.88	2.90	2770	0.00756	321
乗用車(ワゴン9)	4.40	1.69	1.50	1180	0.00927	335
乗用車(バン1)	4.24	1.69	1.53	1170	0.00917	334
乗用車(バン2)	4.69	1.69	1.98	1960	0.00693	312
乗用車(バン3)	4.80	1.69	2.90	2770	0.00642	307
乗用車(バン4)	4.39	1.69	1.54	1270	0.00873	330
乗用車(ミニバン1)	4.68	1.69	1.87	1740	0.00752	321
乗用車(ミニバン2)	4.69	1.69	1.86	1660	0.00787	324
乗用車(ミニバン3)	4.68	1.69	1.87	2140	0.00612	302
乗用車(ミニバン4)	4.69	1.69	1.87	1730	0.00758	322
乗用車(SUV1)	3.76	1.67	1.70	1000	0.01024	340
乗用車(SUV2)	4.61	1.79	1.71	1500	0.00845	327
乗用車(SUV3)	4.56	1.78	1.67	1450	0.00852	328
乗用車(SUV4)	4.90	1.87	1.87	2250	0.00641	306
乗用車(SUV5)	3.39	1.47	1.72	1040	0.00847	327
乗用車(SUV6)	4.64	1.82	1.71	1500	0.00858	328
乗用車(SUV7)	4.59	1.79	1.69	1470	0.00853	328
乗用車(SUV8)	4.76	1.88	1.85	2080	0.00674	310
乗用車(SUV9)	4.90	1.87	1.90	2130	0.00683	311
乗用車(SUV10)	4.36	1.79	1.56	1470	0.00782	324
乗用車(SUV11)	4.00	1.69	1.70	1200	0.00904	333
乗用車(SUV12)	3.99	1.69	1.62	1040	0.01012	339
軽乗用車1	3.39	1.47	1.51	720	0.01130	344
軽乗用車2	3.39	1.47	1.51	720	0.01130	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	0.00418	252
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	3.15	3.16	20800	0.00223	134
重機 2	7.13	3.05	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	410	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

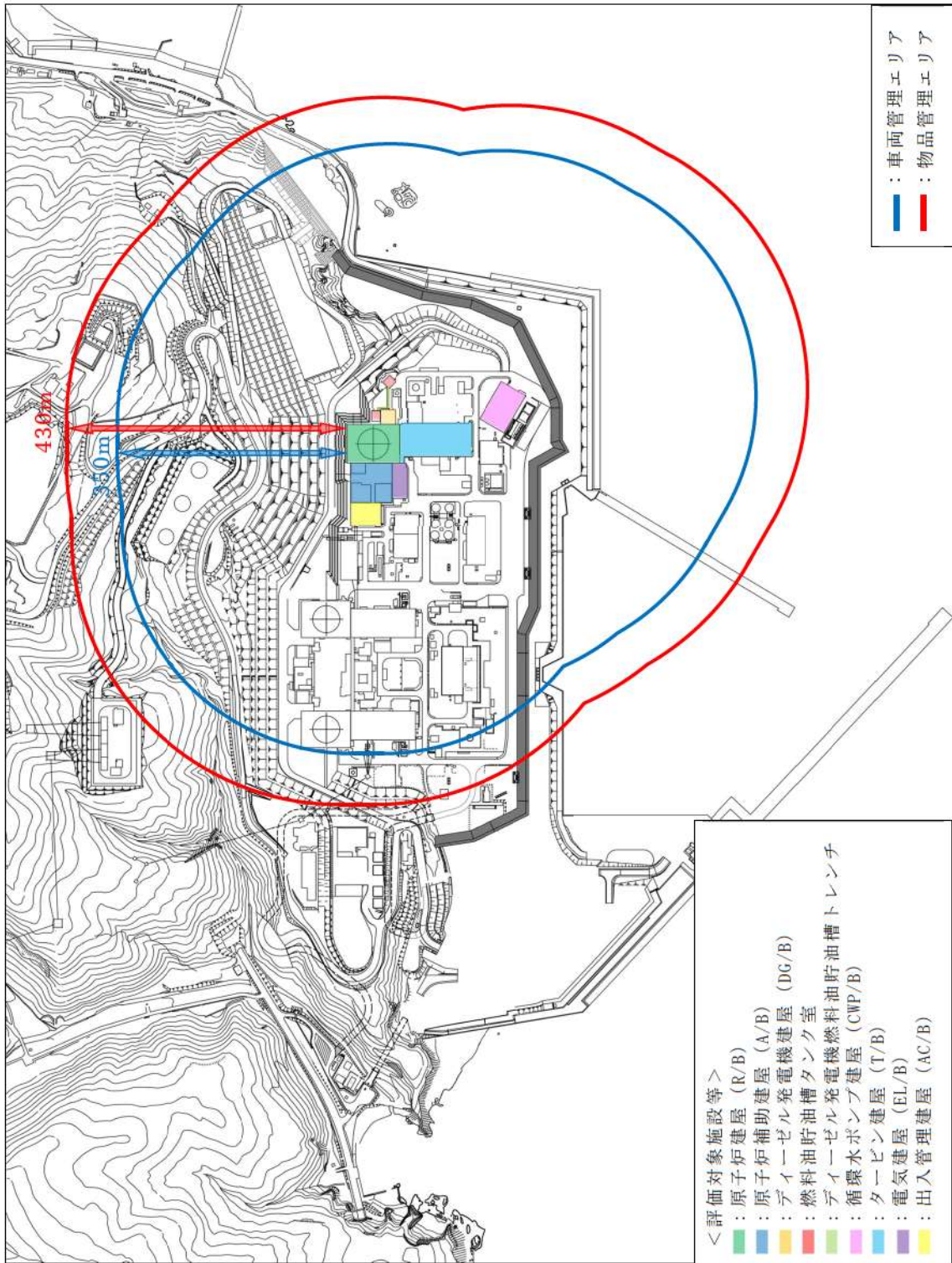


図1 泊発電所における車両及び物品管理エリア

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	竜巻防護対策	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	ディーゼル発電機設備 (A, B-ディーゼル発電機他)	竜巻防護扉の設置 ^{*2} (ディーゼル発電機建屋)	図1 (T. P. 10. 3m)
	④A-ディーゼル発電機室排気口 ⑥B-ディーゼル発電機室排気口		竜巻防護板の設置 ^{*2} (ディーゼル発電機建屋)	
2	③タービン建屋連絡通路扉	空調用冷水系配管	竜巻防護扉の設置 ^{*2} (原子炉建屋 (周辺補機棟))	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配管 制御用空気系配管 空調用冷水系配管	竜巻防護扉の設置 ^{*2} (原子炉建屋 (周辺補機棟))	図1 (T. P. 10. 3m)
4	⑤A-吸気ガラリ室扉 ⑦B-吸気ガラリ室扉 ③A-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	竜巻防護鋼板の設置 ^{*1} (ディーゼル発電機建屋)	図3 (T. P. 17. 8m)
	⑥A-蓄熱室扉 ⑧B-蓄熱室扉		竜巻防護扉の設置 ^{*2} (ディーゼル発電機建屋)	
5	⑩A-原子炉建屋給気ガラリアkses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)	竜巻防護鋼板の設置 ^{*2} (原子炉建屋 (周辺補機棟))	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	竜巻防護対策	参照図面
6	⑪ B-原子炉建屋給気ガラリアkses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) 補助給水系配管	竜巻防護鋼板の設置 ^{※2} (原子炉建屋 (周辺補機棟))	図 3 (T. P. 17. 8m)
7	⑫タービン建屋連絡通路扉	補助給水系配管	竜巻防護扉の設置 ^{※2} (原子炉建屋 (周辺補機棟))	図 3 (T. P. 17. 8m)
8	⑭主蒸気管室ブローアウトパネル ⑮主蒸気管室ブローアウトパネル	主蒸気系配管及び弁 主給水系配管及び弁 補助給水系配管及び弁 制御用空気系配管及び弁	竜巻防護鋼板の設置 ^{※2} (原子炉建屋 (周辺補機棟))	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	燃料取扱作業中止 (原子炉建屋 (燃料取扱棟))	図 5 (T. P. 33. 1m)
10	⑯トラックアクセスエリア (2) 扉	制御用空気系配管	竜巻防護壁の設置 ^{※1} (原子炉補助建屋)	図 5 (T. P. 33. 1m)
11	⑰主蒸気管室上部換気口	主蒸気系配管及び弁 制御用空気系配管	竜巻防護鋼板の設置 ^{※2} (原子炉建屋 (周辺補機棟))	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kses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)	竜巻防護鋼板の設置 ^{※2} (原子炉建屋 (周辺補機棟))	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配管及び弁	竜巻防護壁の設置 ^{※1} (原子炉建屋 (周辺補機棟))	図 9 (T. P. 43. 6m)

※1：「蓄熱室加熱器」(No. 4：⑤⑦⑧⑩)，「制御用空気系配管」(No. 10)，「原子炉補機冷却水サージタンク (配管及び弁含む)」(No. 13) については、竜巻防護対策として、当該建屋内に竜巻飛来物防護対策設備 (竜巻防護鋼板及び竜巻防護壁) を設置するため、当該建屋開口部周辺に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。

※2：「主蒸気系配管他」(No. 1～3, 5～8, 11, 12)，「蓄熱室加熱器」(No. 4：⑥⑧) については、竜巻防護鋼板、竜巻防護板及び竜巻防護扉で当該開口部の竜巻防護対策を実施する。

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。

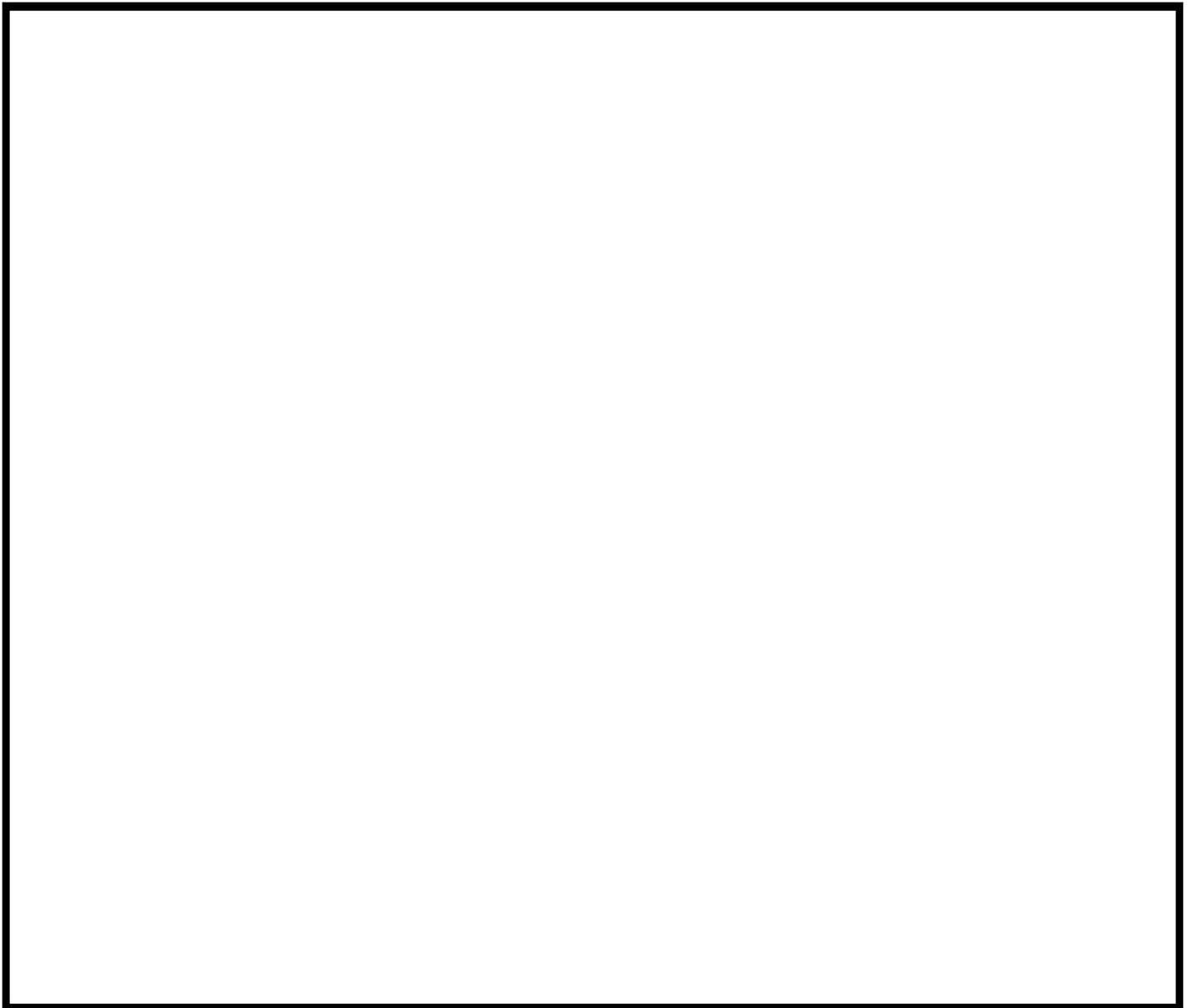



図1 泊発電所3号炉における建屋開口部 (T.P. 10.3m (中間床含む))

 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。

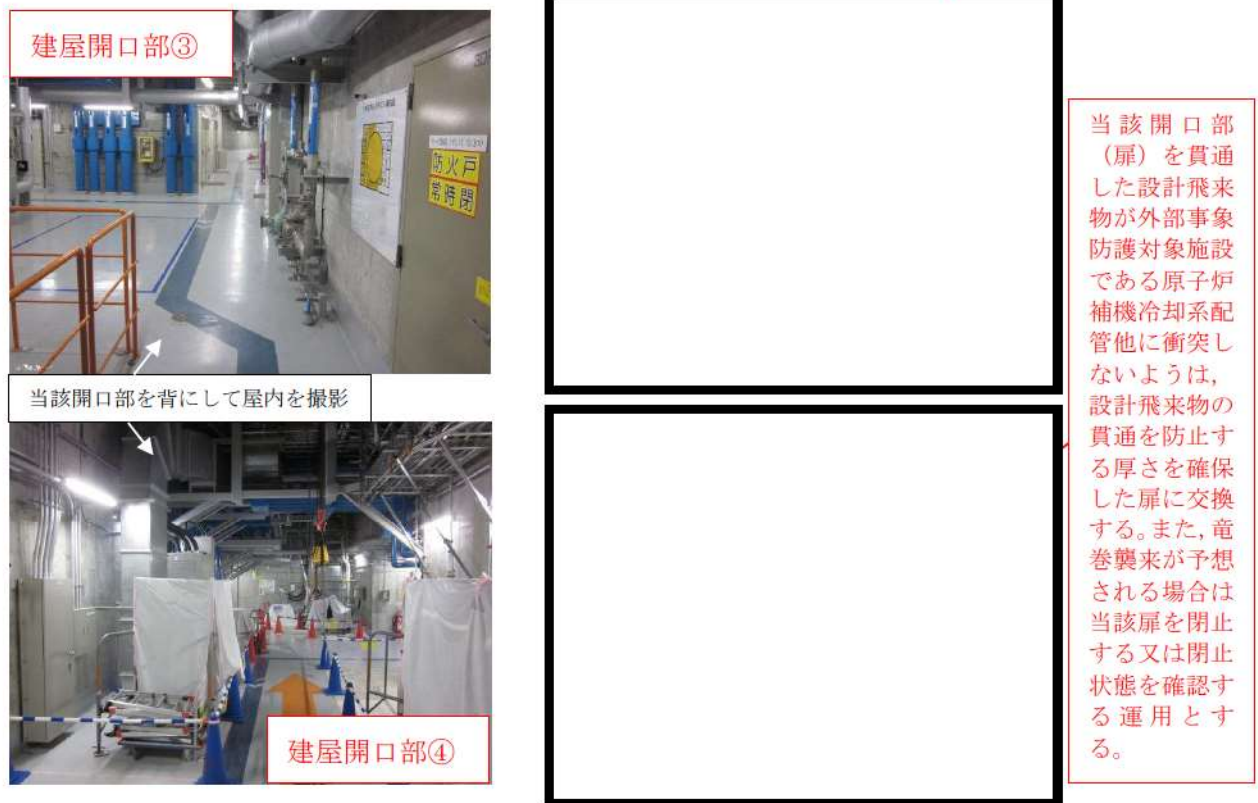
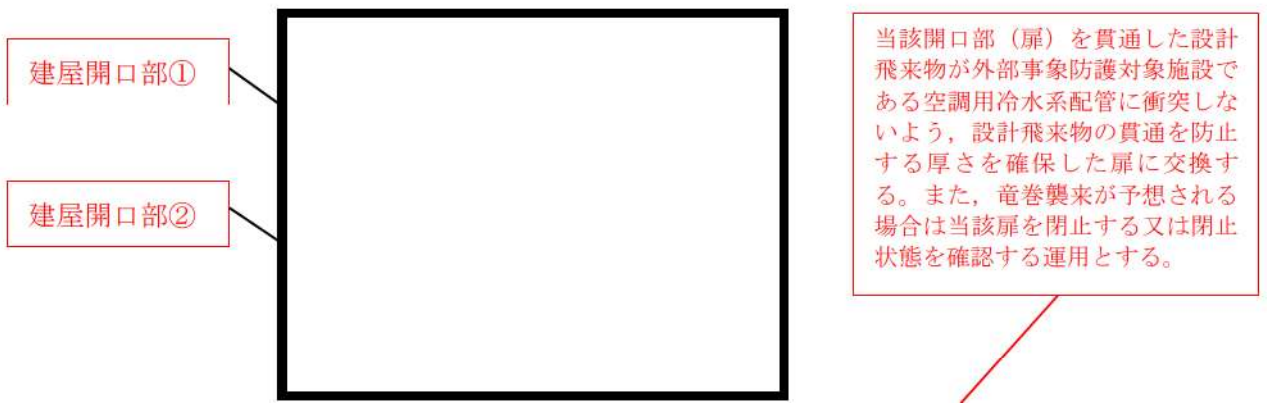


図2 泊発電所3号炉における建屋開口部周辺の屋内写真他（T.P. 10.3m（中間床含む））（1/2）

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)

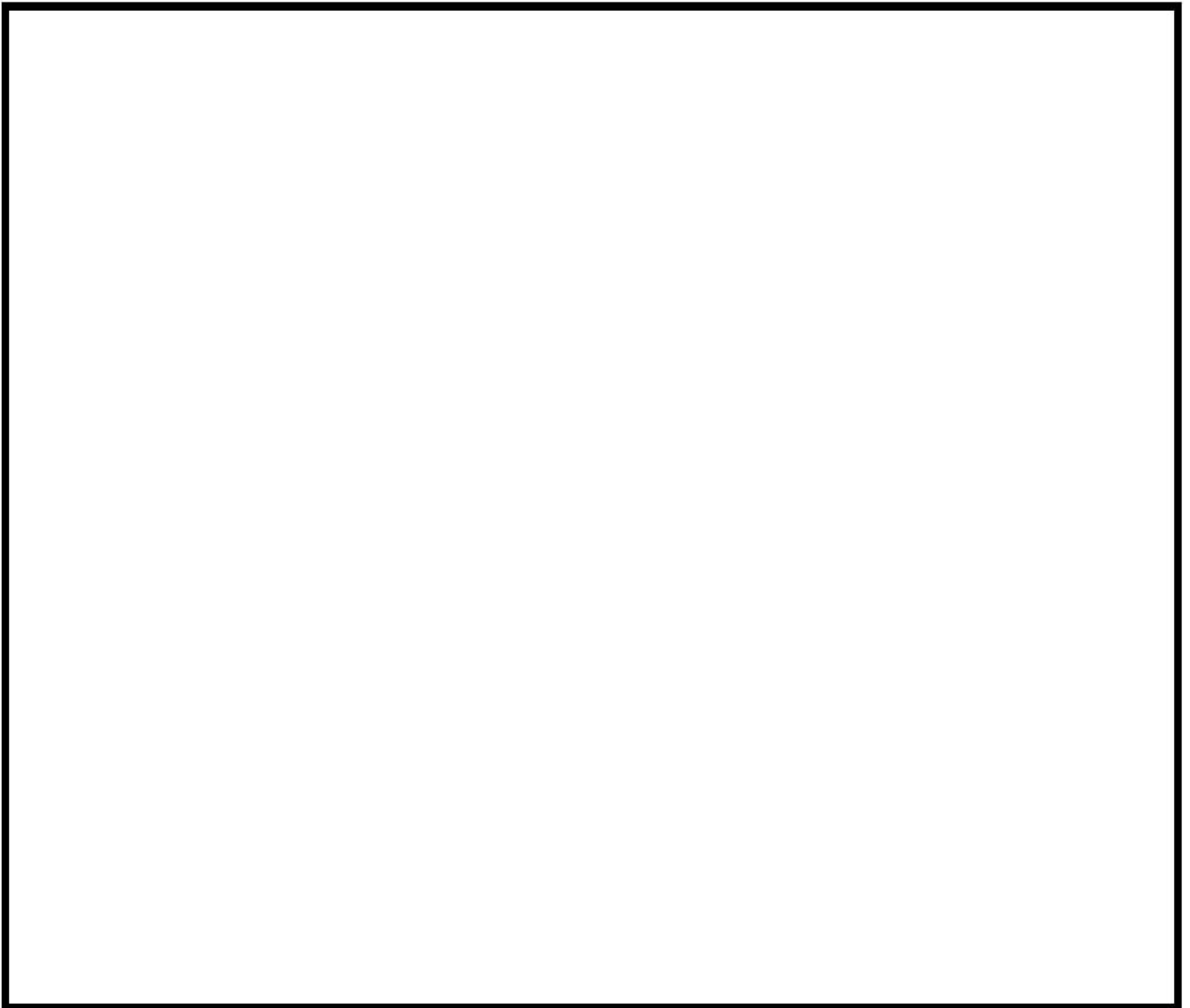



図3 泊発電所3号炉における建屋開口部 (T.P. 17.8m (中間床含む))

 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。

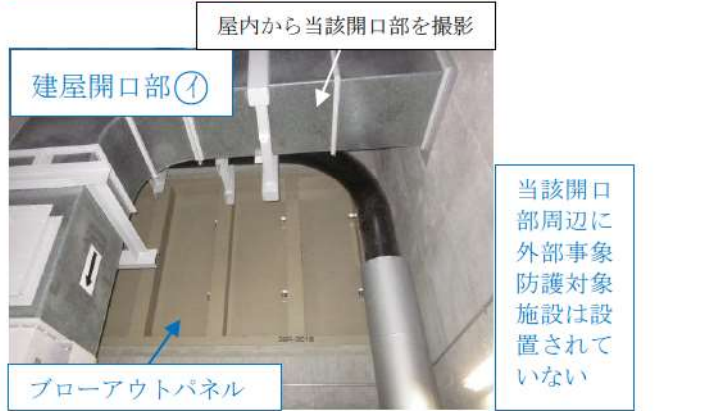
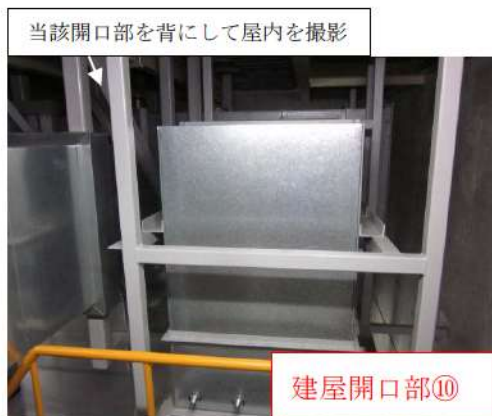


図4 泊発電所3号炉における建屋開口部周辺の屋内写真他 (T.P. 17.8m (中間床含む)) (2/2)

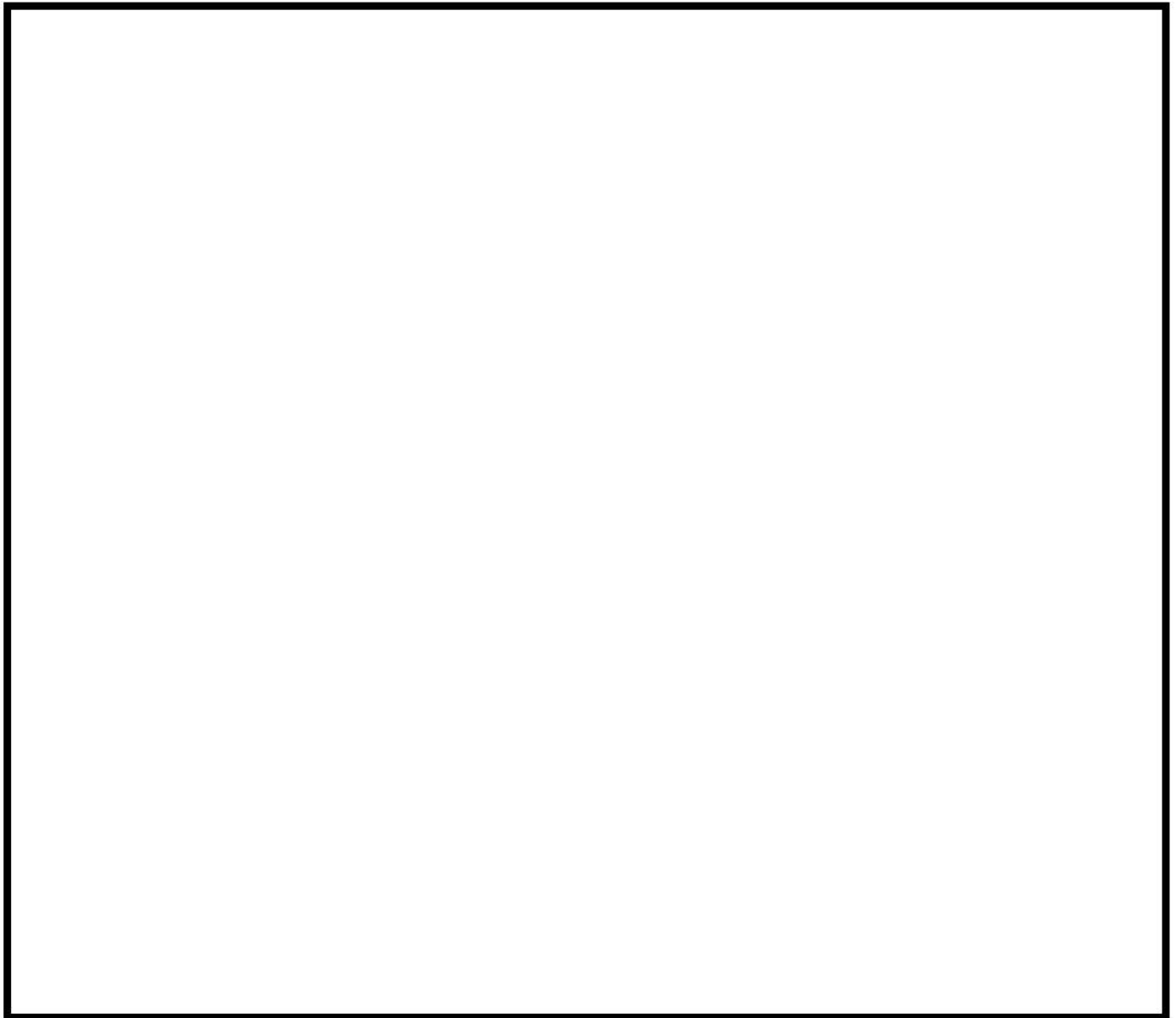


図5 泊発電所3号炉における建屋開口部 (T.P. 33.1m)

 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、⑭周辺に外部事象防護対象施設は設置されていない



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原子炉建屋（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。



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



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）

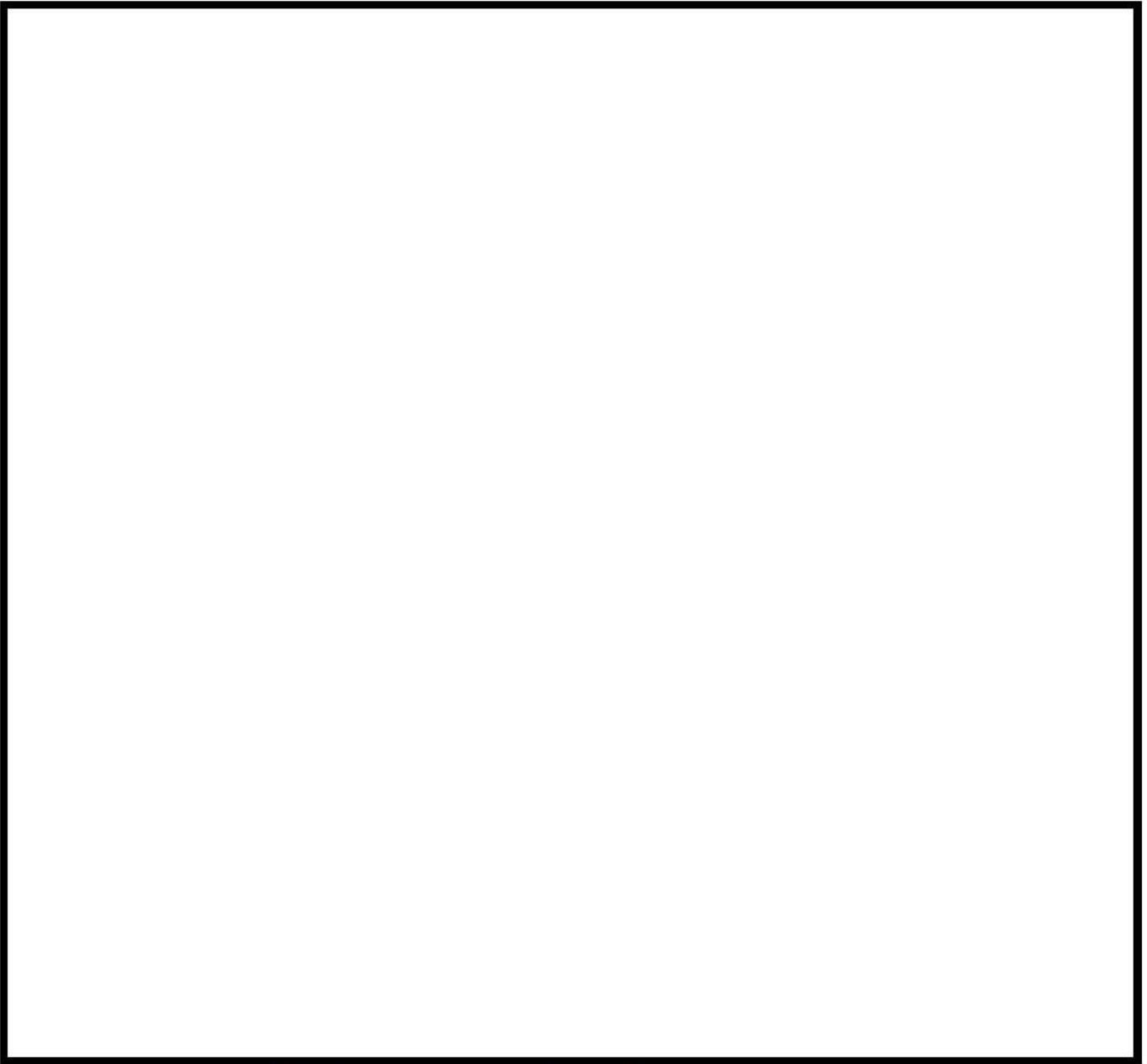


図7 泊発電所3号炉における建屋開口部 (T.P. 40. 3m, T.P. 43. 3m)


 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)

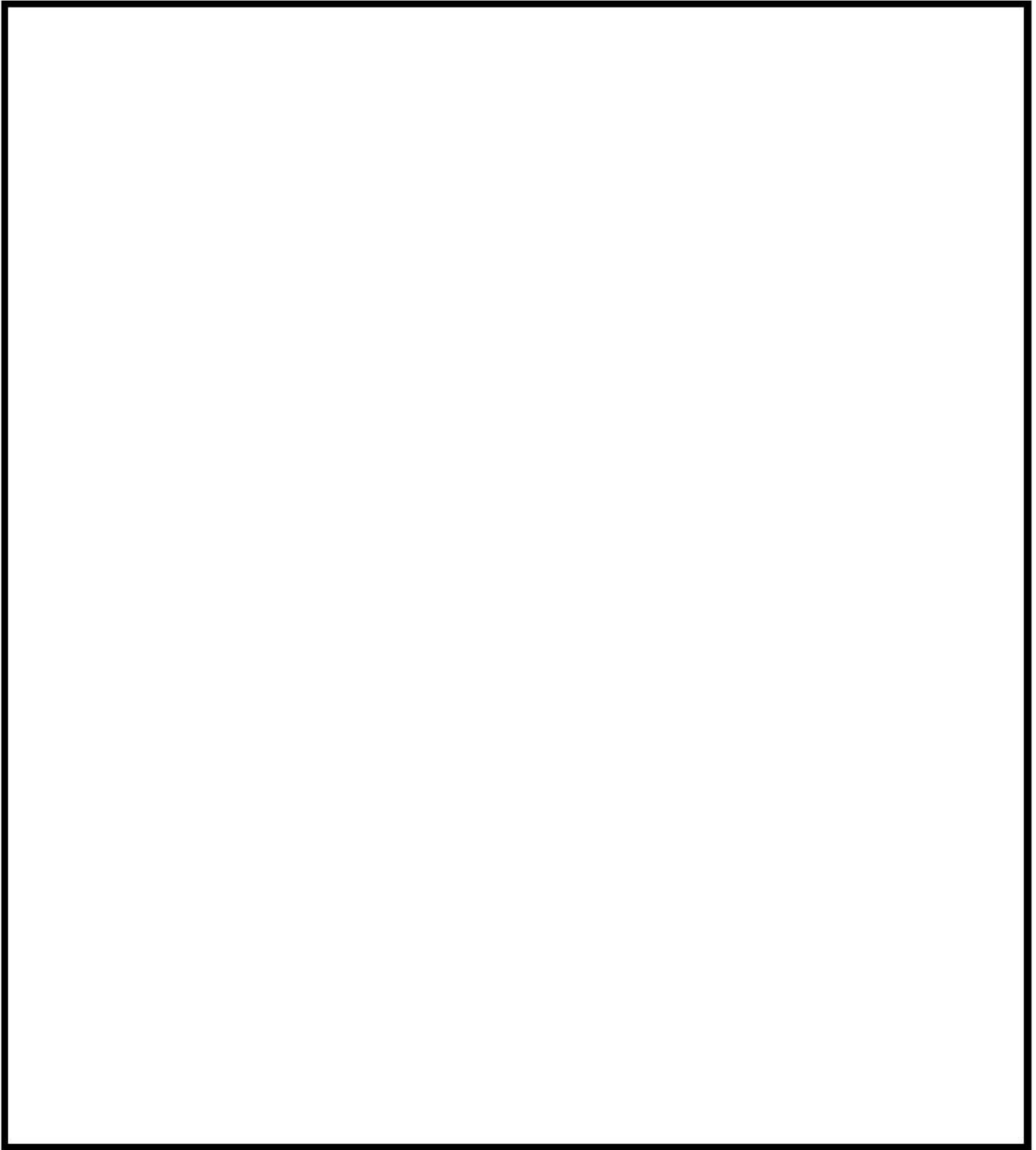


図9 泊発電所3号炉における建屋開口部 (T.P. 43.6m)


 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。

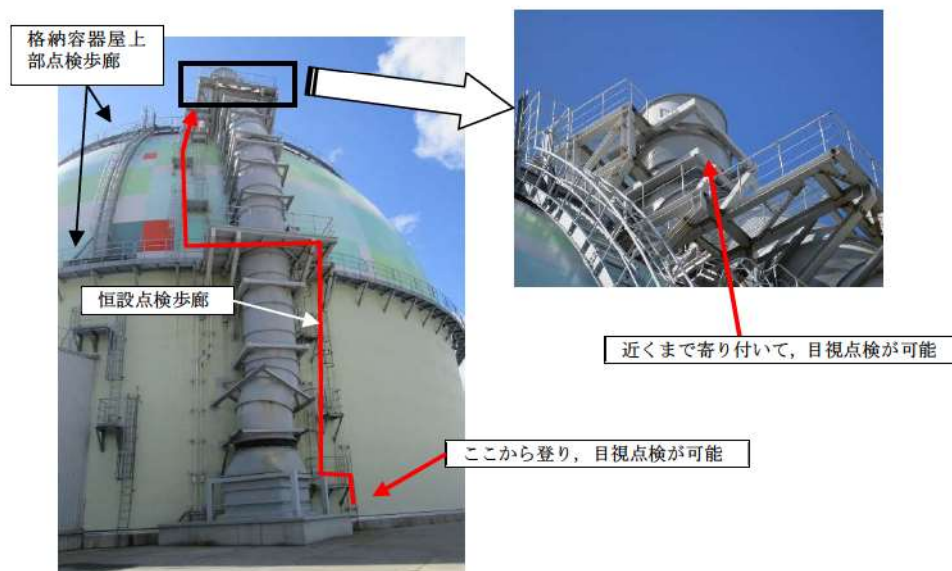
以上

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
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 負圧達成後のアニュラス排気風量	(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) (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) (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)	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	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) ・排気筒放出 $\chi/Q : 4.3 \times 10^{-5} \text{ s}/\text{m}^3$ $D/Q : 3.1 \times 10^{-19} \text{ Gy}/\text{Bq}$	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) ・地上放出 $\chi/Q : 4.5 \times 10^{-5} \text{ s}/\text{m}^3$ $D/Q : 3.1 \times 10^{-19} \text{ Gy}/\text{Bq}$

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。

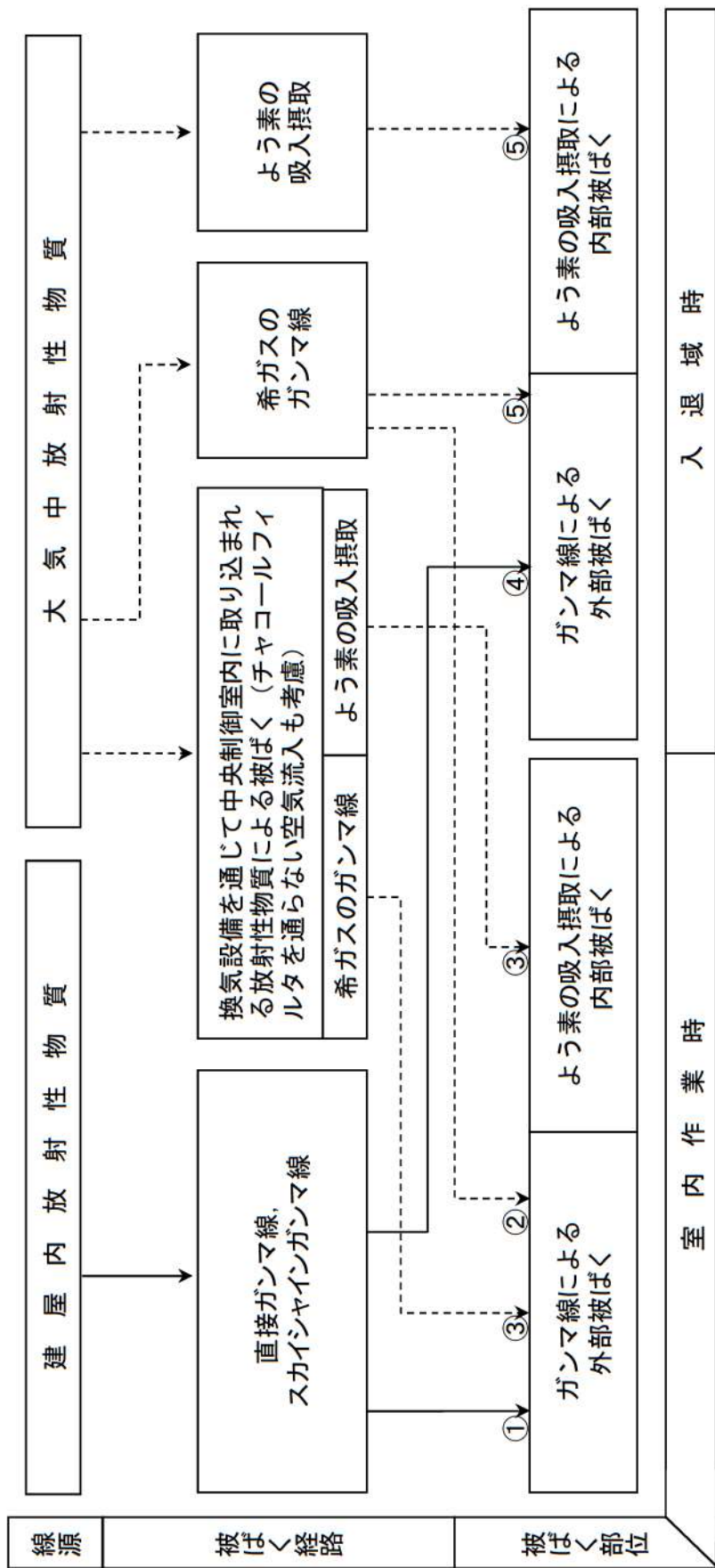


図1 事故時における中央制御室等の従事者の被ばく経路

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。

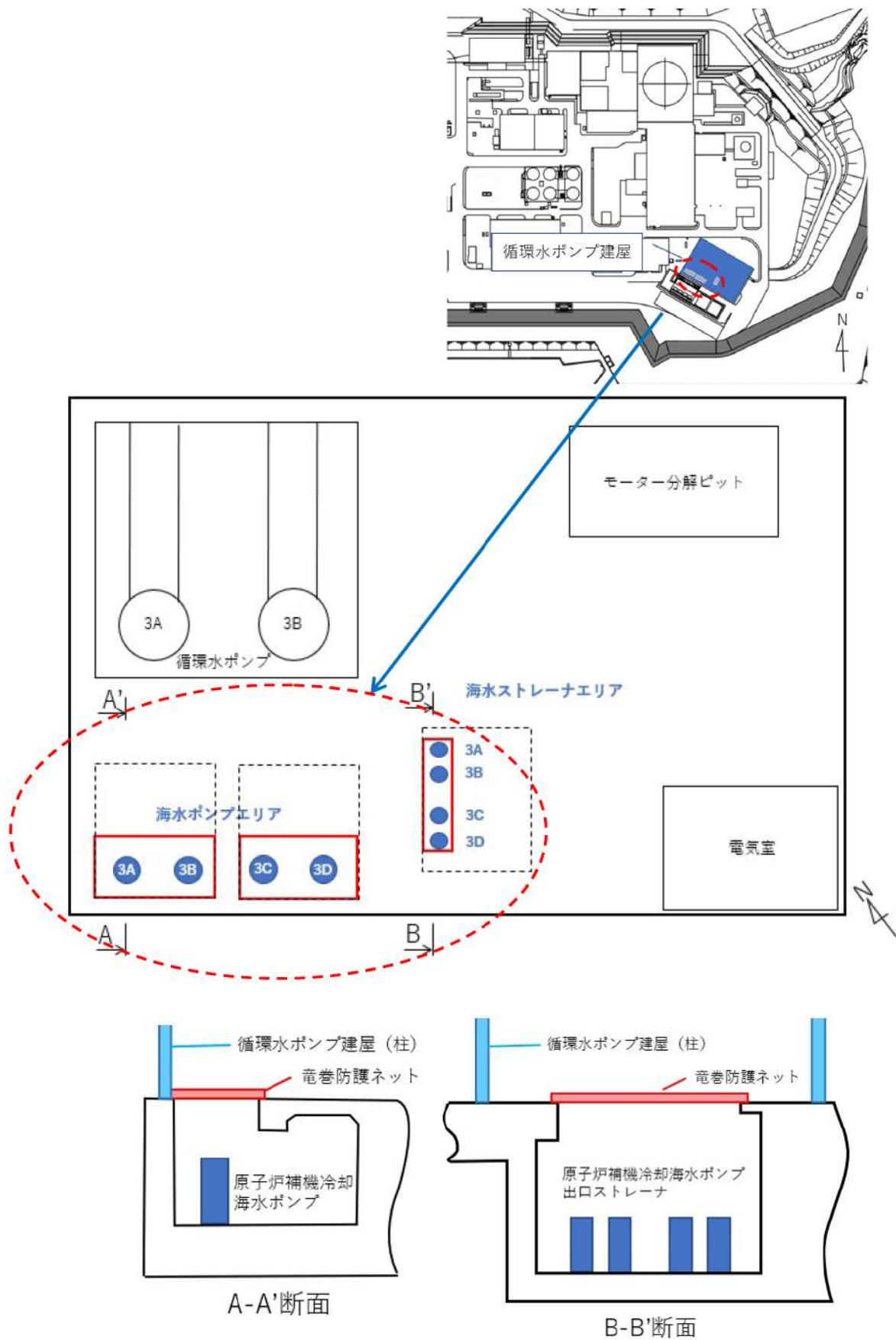


図1 海水ポンプエリア，海水ストレーナエリアの外形図

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ーナ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及びネット1面の縦横の寸法の比は、電中研報告書にて適用性が確認されている範囲(1:1~2:1)に入る必要があることを考慮し、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。

竜巻防護ネットは主にネット(金網部)の目合いが変形し飛来物の衝突荷重によるエネルギーを吸収することで設計飛来物の侵入を阻止する構造である。

海水ストレーナエリア上部開口は海水ポンプエリア上部開口に対して面積が小さいことから、海水ポンプエリア上部と同じ目合い寸法のネットを採用した場合は、目合いの数が減少するためネットの吸収可能エネルギーも小さくなり、設計の裕度が小さくなる。

そのため、海水ストレーナエリア上部開口には、目合い寸法の小さい40mmのネットを採用し目合いの数を確保することで海水ポンプエリア上部開口に設置する竜巻防護ネットと同等の裕度を確保する計画である。

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。

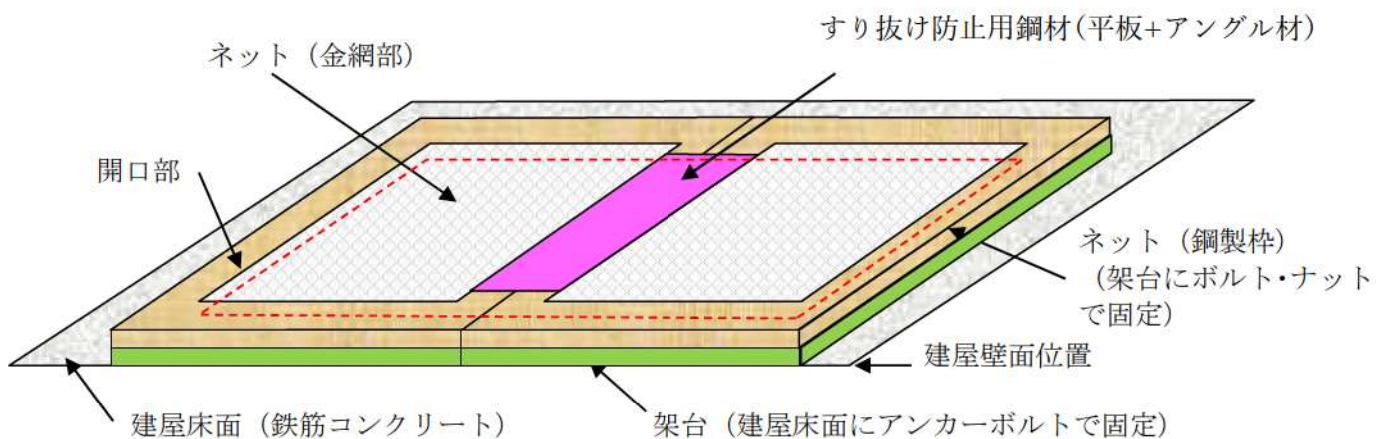
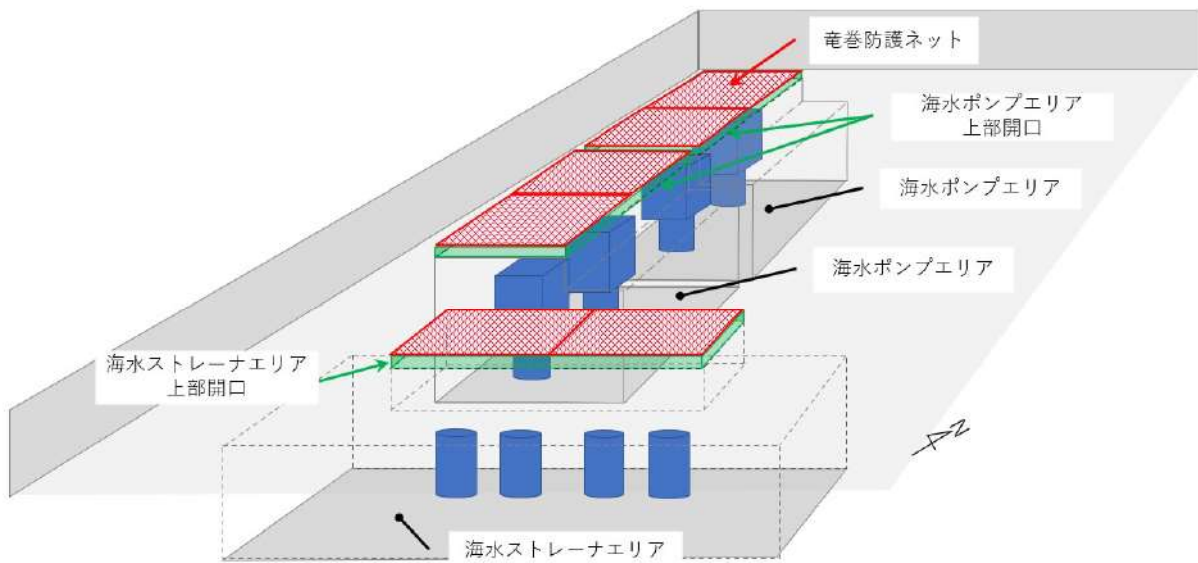
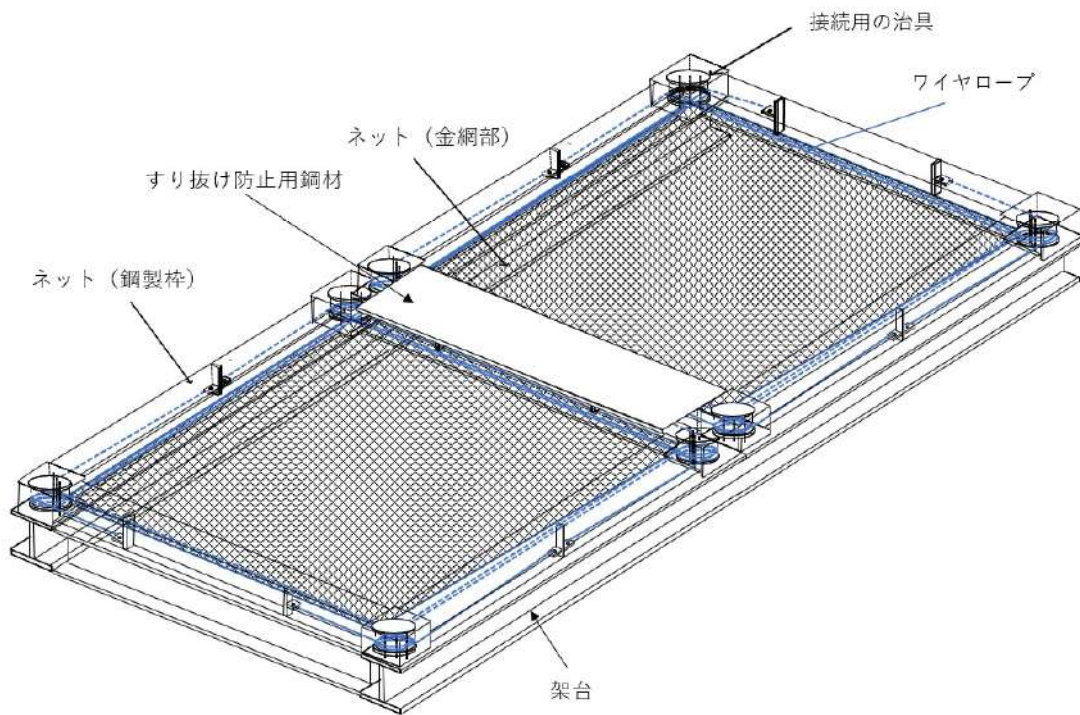


図2 海水ポンプエリア、海水ストレーナエリア開口部に設置する防護ネットのイメージ図



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上部 (約 10m×約 2.6m) の全面に配置し、地上からの高さは約 0.7 m 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

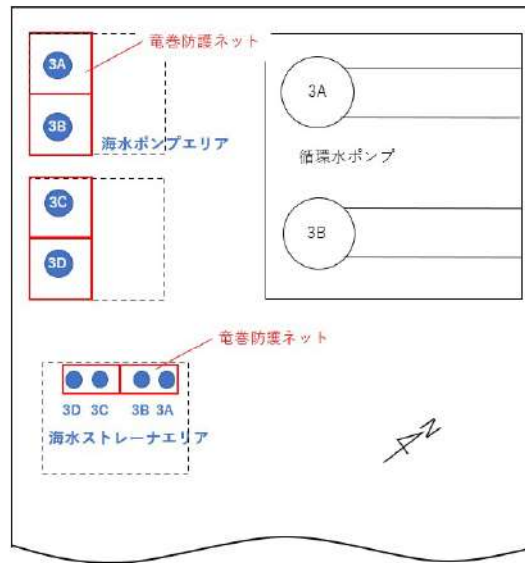


図4 竜巻防護ネットの配置（平面図）

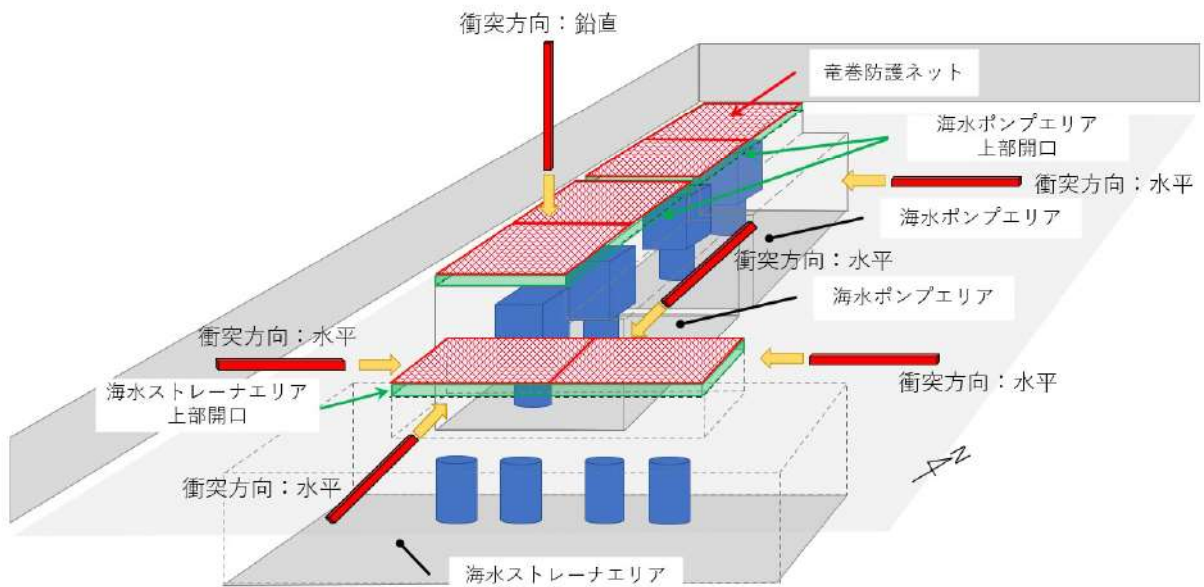


図5 竜巻防護ネットの配置（俯瞰図）

(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。

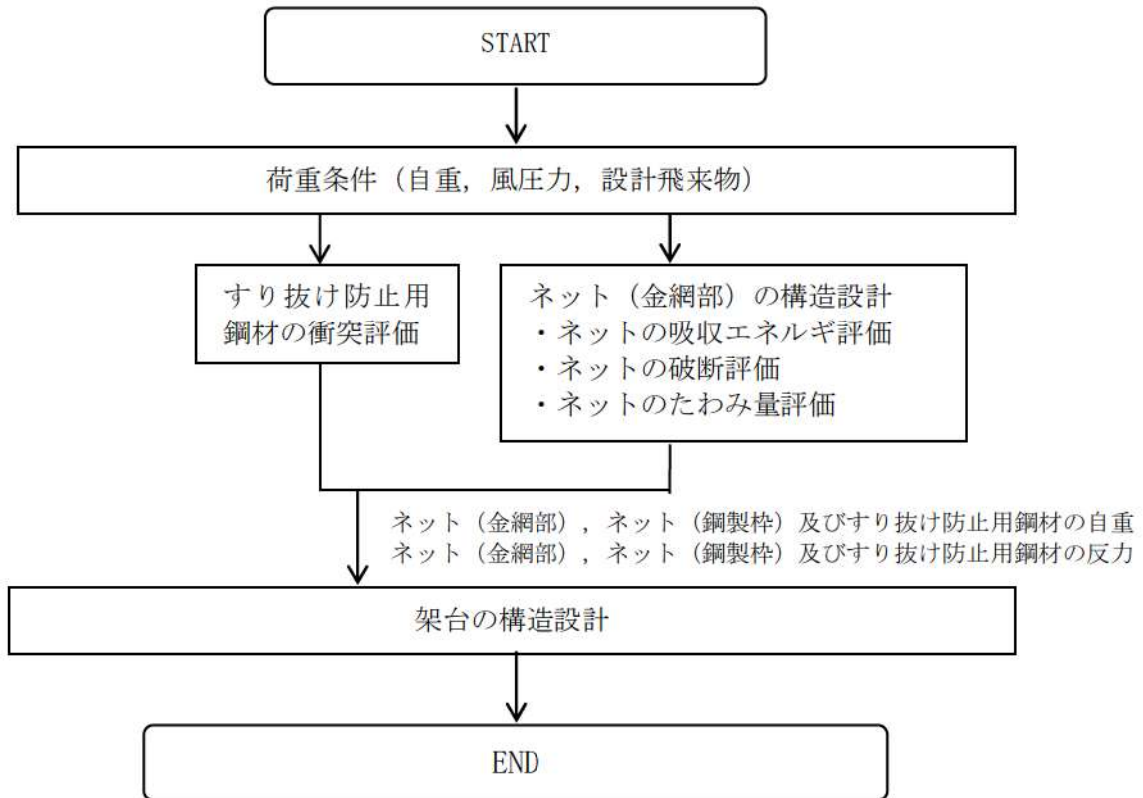


図6 竜巻防護ネットの設計フロー

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

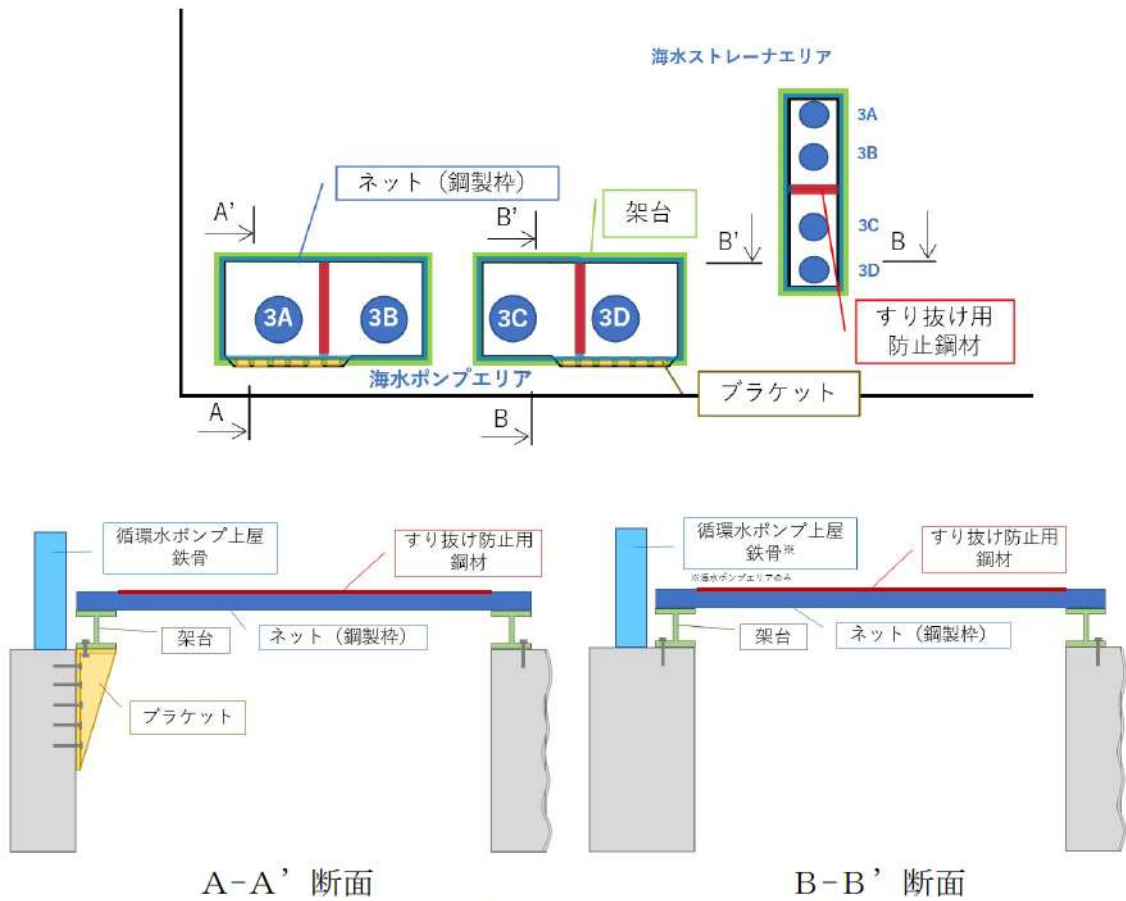


図7 竜巻防護ネットの構造 (イメージ)

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		海水ストレーナエリア上部開口部	
	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[kJ]	327[kJ]	252 [kJ]	251 [kJ]
設計飛来物の衝突エネルギー (鋼製材：135kg, 速度 38m/s)	98 [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。

海水ストレーナ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。

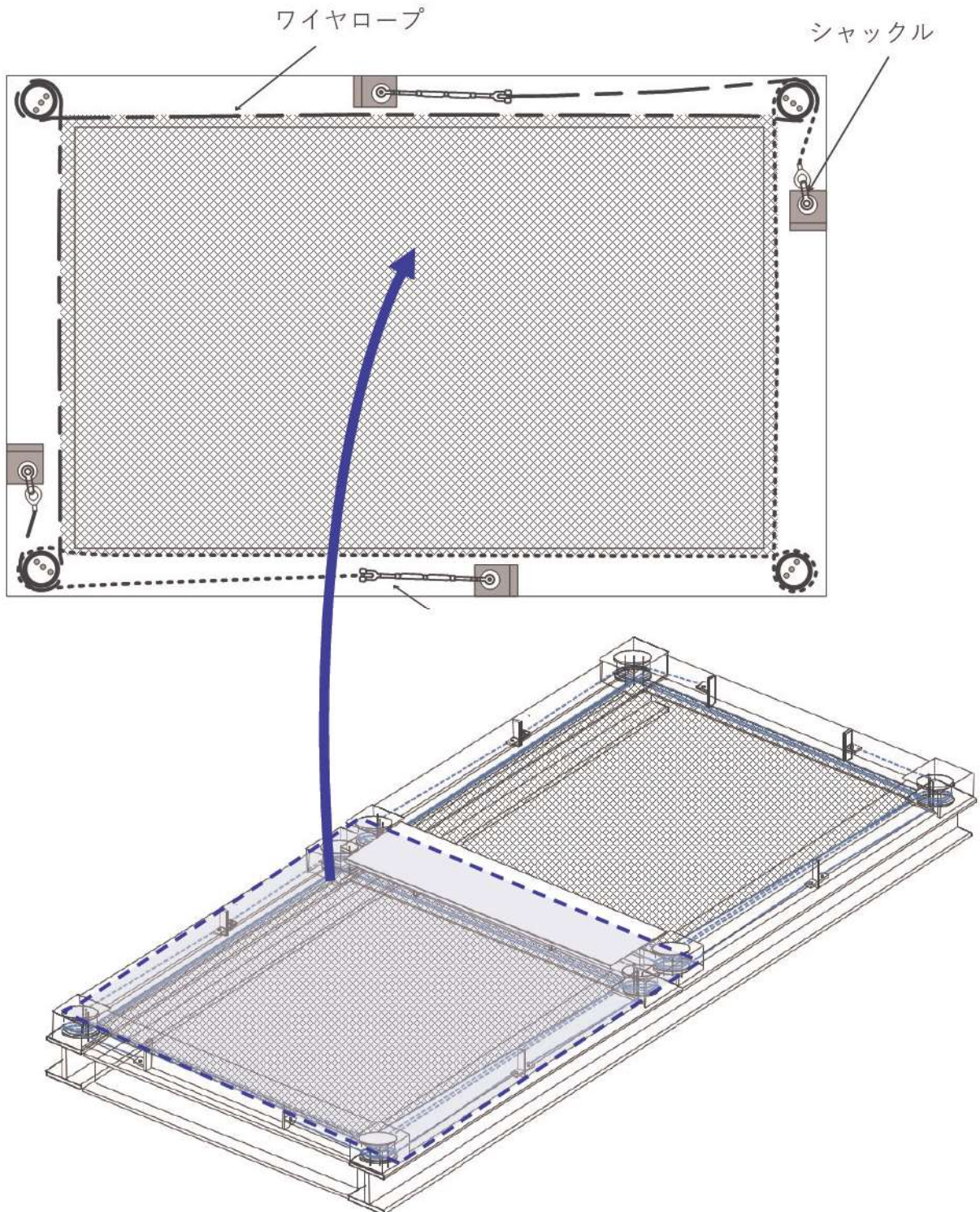


図 8 ネット（金網部）のフレーム取付け概要図

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。