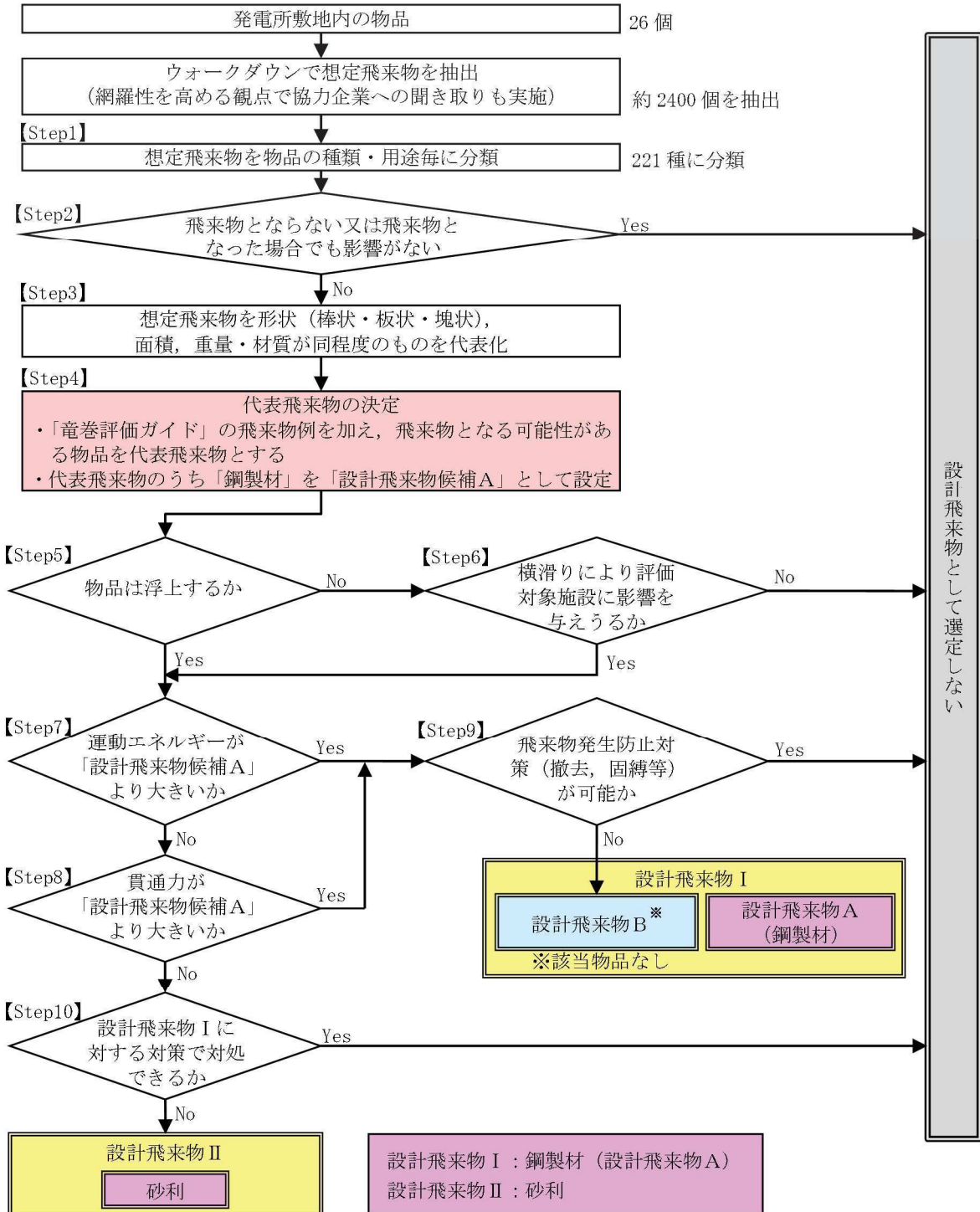


設計飛来物の選定について

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

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

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

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、その他）、サイズ（大、中、小）及び柔^{※1}、剛^{※2}などの特徴から同程度のものを代表化し、竜巻影響評価ガイドに示される飛来物例を追加した結果を第 3.3-1 表に示す。また、第 3.3-2 図～第 3.3-5 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

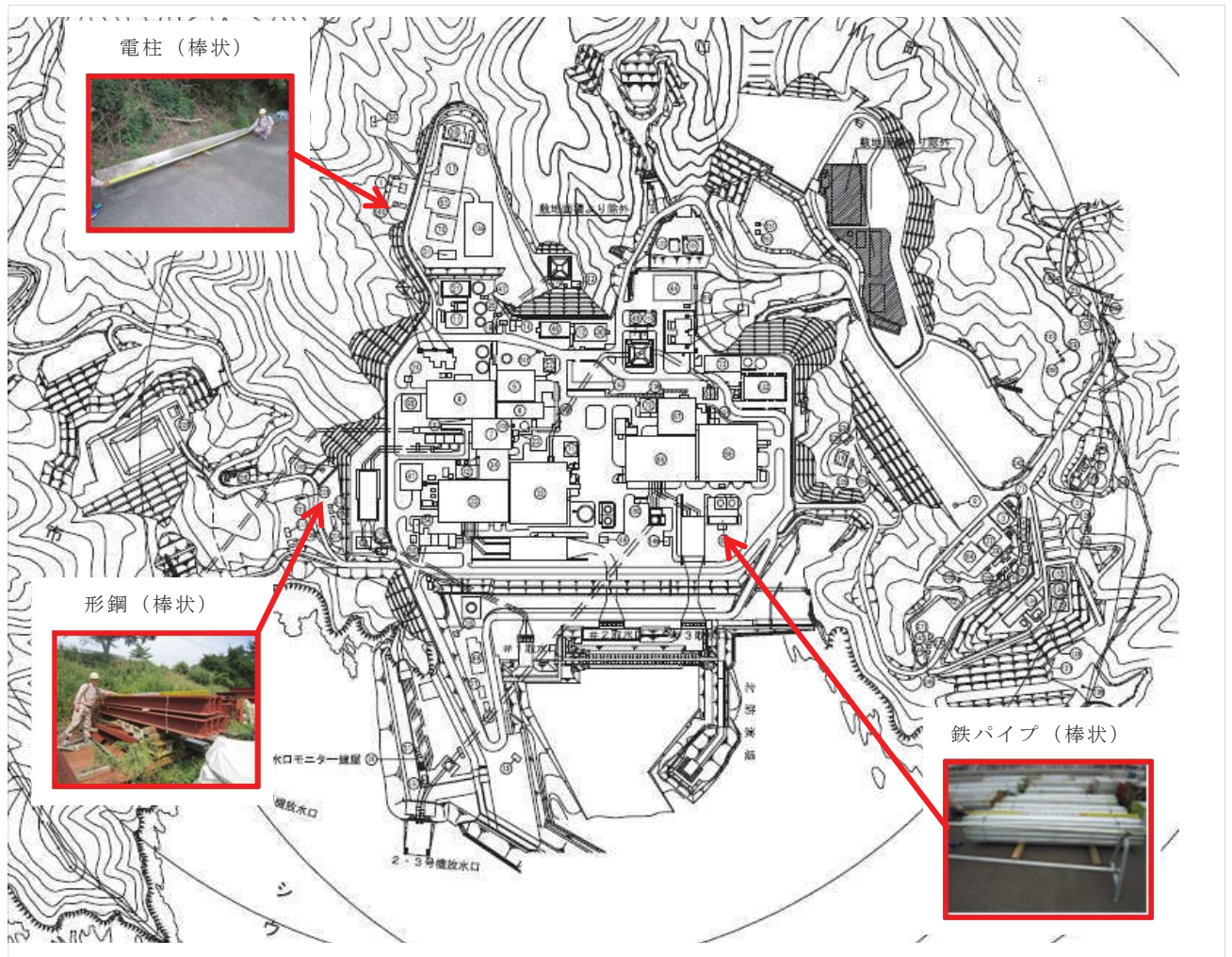
(代表飛来物)

	棒状			板状			塊状			その他		
	大	中	小	大	中	小	大	中	小	大	中	小
常設物	剛	•電柱	-	-	-	•マンホール蓋	-	-	-	-	-	-
仮設物	柔	-	-	-	-	-	-	-	•家庭用室外機	-	-	-
	剛	•形鋼	•(ガイド)鋼製材**	•(ガイド)鋼製鉄パイプ	•(ガイド)鉄パイプ**	•敷き鉄板	•コンクリート板	•(ガイド)コンクリート板**	•コンクリート塊	•循環水ポンプインペラ	•大型鋼管	•ガスボンベ
仮設物	柔	-	-	-	-	-	-	•コンテナボックス	•発電機	•(ガイド)トラック**	•乗用車	-
	剛	-	-	-	-	-	-	•テナボックス**	•自動販売機	•バス	•トレーラー	-
仮設物	剛	-	-	-	-	-	-	•フオーグリアフト	-	•オートテレコンクレーン	-	-

(二次飛来物)

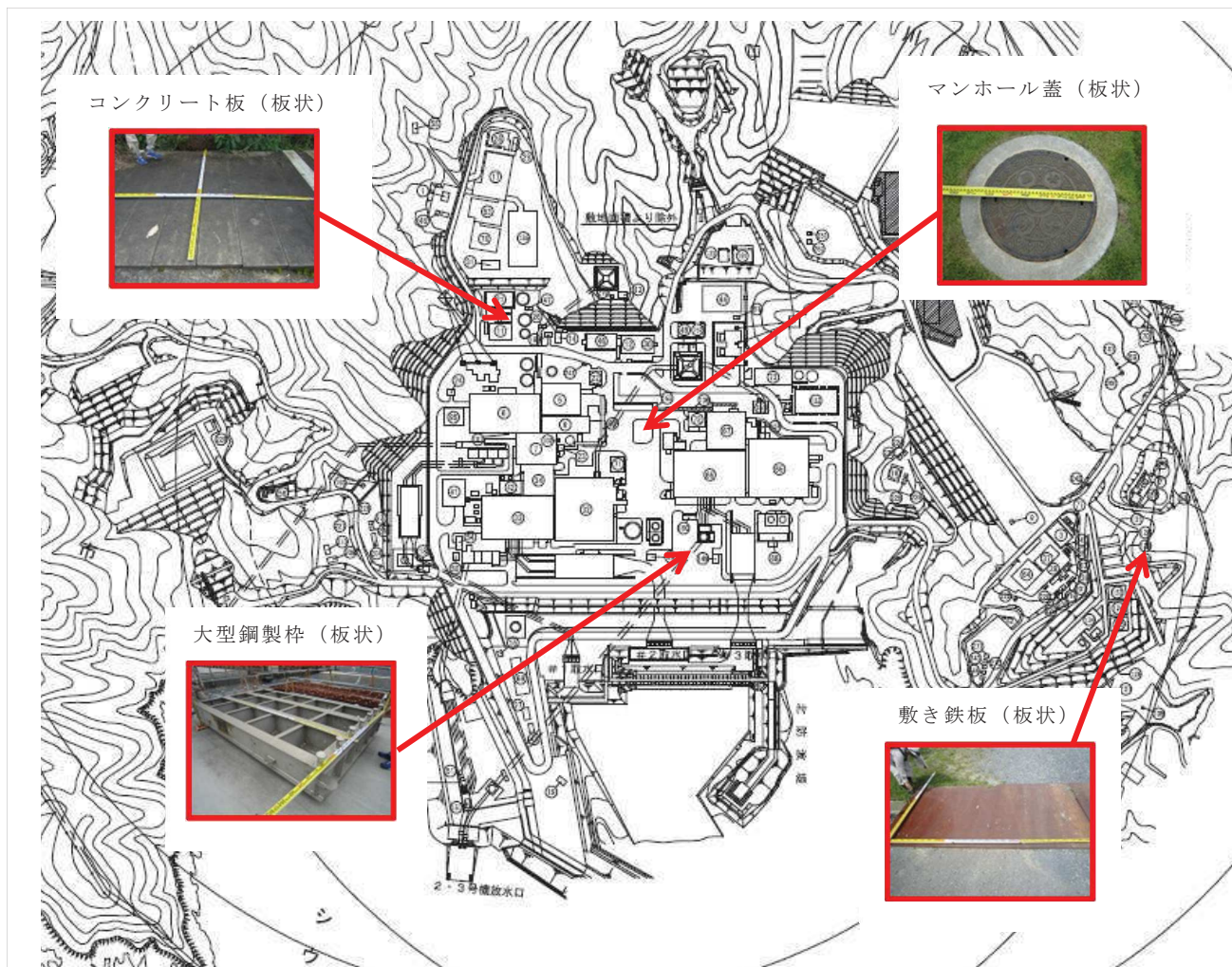
	棒状			板状			塊状		
	大	中	小	大	中	小	大	中	小
剛	-	•配管	-	•外壁	•扉	•鋼製階段	-	-	-
柔	-	•雨どい	-	•屋根(鋼板)	•手すり	-	-	-	•照明器具
二次飛来物	-	-	-	•シャッター	-	-	-	-	•アンテナ

※：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

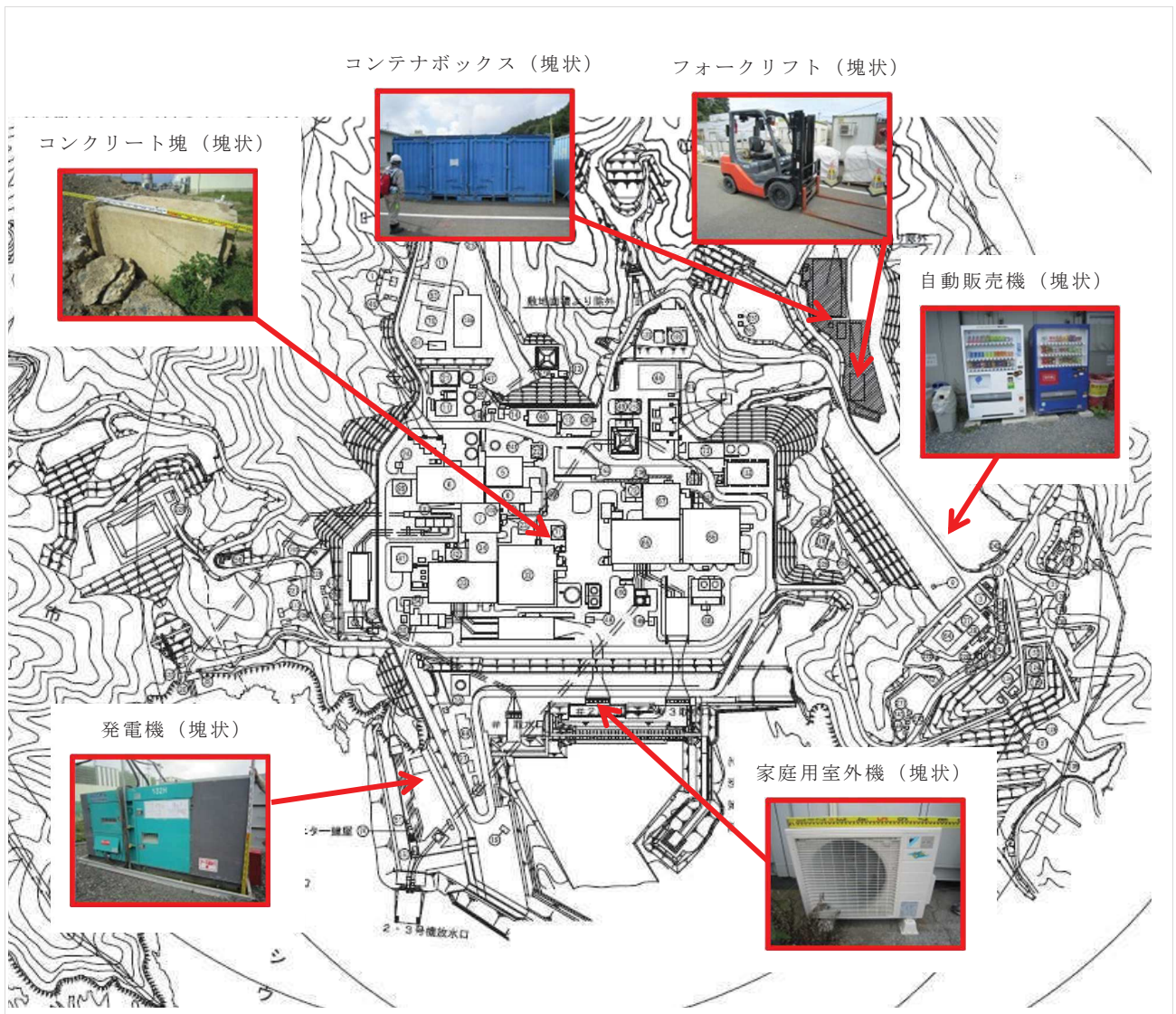


第 3.3-2 図 代表飛来物 (棒状)

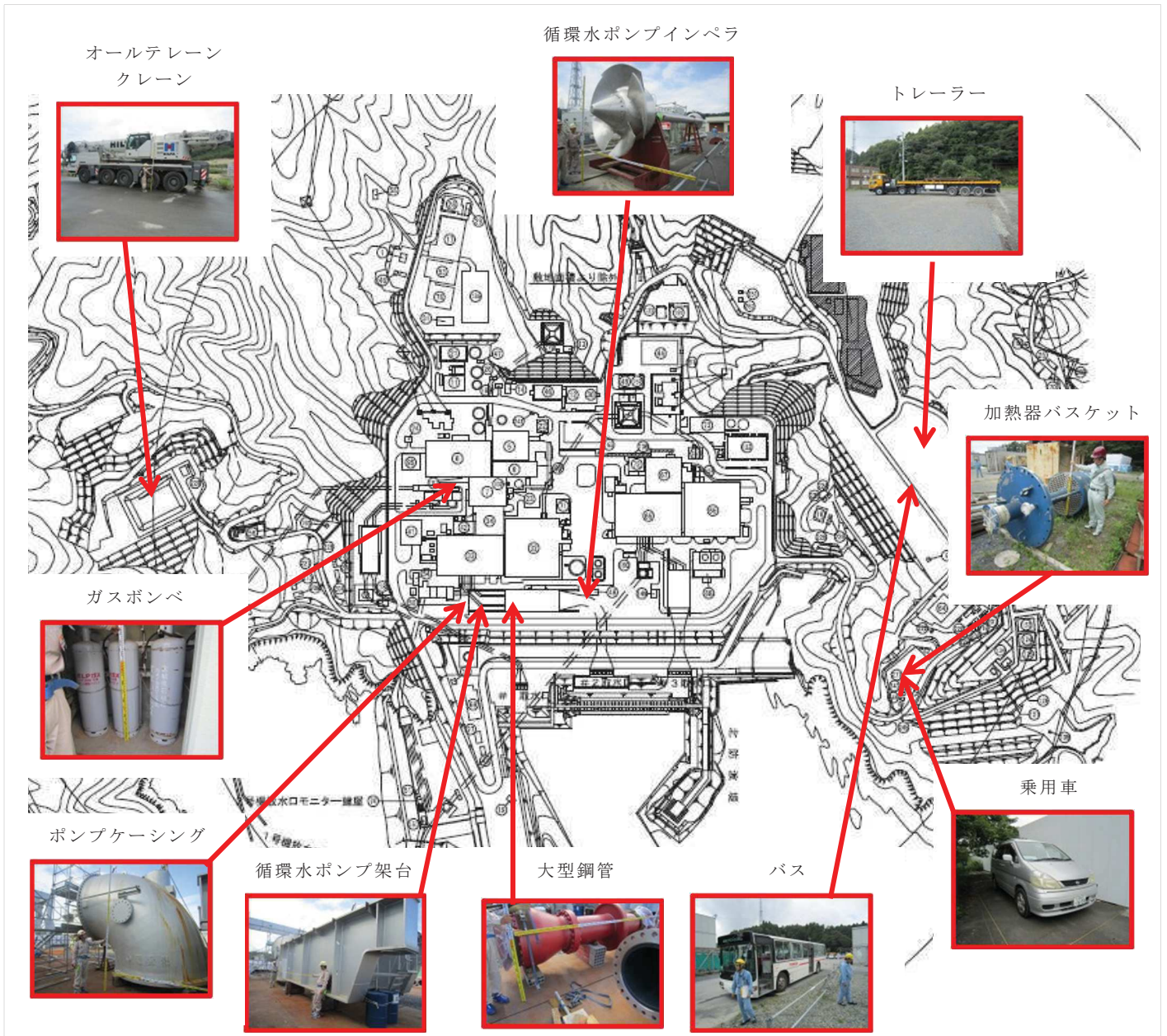
6 条(竜巻)－別添 1－添付 3.3-4



第 3.3-3 図 代表飛来物（板状）



第 3.3-4 図 代表飛来物 (塊状)



第 3.3-5 図 代表飛来物（その他）

6 条(竜巻)－別添 1－添付 3.3-7

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、フジタモデルの風速場（設計竜巻風速 100m/s）を適用した場合における飛散評価を以下の条件にて実施し、飛来物の浮上の有無について確認を行った。飛散評価結果を第 3.3-2 表に示す。

(1) 流入層高さ (H_i)

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

(2) 初期高さ

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

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。

参考文献

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

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 (1/5)

(常設・仮設物)

分類	名称	長さ [m]	幅 [m]	高さ [m]	質量 [kg]	空力パラメータ [m ² /kg]	初期高さ [m]	最大水平速度 [m/s]	最大鉛直速度 [m/s]	運動エネルギー [kJ] (水平)	運動エネルギー [kJ] (鉛直)	最大飛距離 [m]	最大飛散高さ [m]	コンクリートの貫通限界厚さ*2 [cm]		コンクリートの裏面剥離限界厚さ*2 [cm]		鋼板の貫通限界厚さ*3 [mm]			浮き上がりの有無
														水平 t _{p,h}	鉛直 t _{p,v}	水平 t _{s,h}	鉛直 t _{s,v}	水平 t _h	鉛直 t _v	T _y	
柔	その他	13.43	3	4.02	40750	0.0018	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	×
							40.0	27.2	27.1	15082	14959	55.5	0.0	86.6	86.3	151.2	150.8	12.3	12.2		
剛	その他	4.565	4.565	3.525	20000	0.0018	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	×
							40.0	27.6	27.1	7616	7338	56.8	0.0	58.4	57.4	111.6	110.2	6.8	6.6		
剛	その他	8.6	3.9	2.355	29000	0.0015	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	×
							40.0	22.9	27.3	7610	10784	43.2	0.0	66.2	77.3	120.9	135.9	8.9	11.2		
剛	その他	9.5	3.7	3.7	20000	0.0012	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	×
							40.0	18.7	27.4	3502	7499	33.1	0.0	42.6	59.8	87.4	112.8	4.4	7.2		
柔	その他	5	1.9	1.3	4750	0.0026	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	×
							40.0	34.6	26.7	2841	1699	89.5	0.0	50.2	40.0	88.1	74.2	8.9	6.3		
剛	その他	5.4	1.4	1.4	6000	0.0019	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	×
							40.0	29.2	27.1	2551	2198	62.4	0.0	50.6	47.4	88.3	84.0	9.3	8.4		
剛	板状	3.7	2.3	0.4	1870.4	0.0036	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	×
							40.0	38.4	26.4	1378	649.4	119.2	0.0	41.9	30.1	71.9	55.9	9.0	5.5		

※1：竜巻評価ガイドにおいてサイズ及び重量が記載されている物品

※2：修正NDR式、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BR L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

以下の点で飛来物とならないため、
 ・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、
 浮上しないが、外部事象防護対象施設等との離隔をとる、又は、固縛等を実施することから設計飛来物として選定しない。

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 (2/5)

(常設・仮設物)

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

※1：竜巻評価ガイドにおいてサイズ及び重量が記載されている物品

※2：修正NDR式、De gen式及びChang式を用いて算出

※3：原子炉施設のタービンサイルの評価に用いられているBR L式にて算出

※4：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 (3/5)

(常設・仮設物)

分類	名称	長さ [m]	幅 [m]	高さ [m]	質量 [kg]	空力パラメータ [m ² /kg]	初期高さ [m]	最大水平速度 [m/s]	最大鉛直速度 [m/s]	運動エネルギー [kJ] (水平)	運動エネルギー [kJ] (鉛直)	最大飛距離 [m]	最大飛散高さ [m]	コンクリートの貫通限界厚さ ^{※2} [cm]			コンクリートの裏面剥離限界厚さ ^{※2} [cm]			鋼板の貫通限界厚さ ^{※3} [mm]			浮き上がりの有無	以下の点で飛来物とならないか ^{※4} ・飛来物発生防止対策 (撤去、固縛等) が可能か ・他の飛来物に包絡されるか
														水平	鉛直	t _{p,h}	t _{s,h}	水平	鉛直	t _{s,v}	水平	鉛直		
剛	鉄パイプ	6	0.05	0.05	25.2	0.0057	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	×	浮上しないが、外部事象防護対象施設等との離隔をとる、又は、固縛等を実施することから設計飛来物として選定しない。	
							10.1	43.4	13.6	23.7	2.3	88.8	0.0	14.6	6.2	25.8	11.9	29.7	6.4					
柔	その他	バス (大型)	2.49	3.75	14583	0.0039	0.0	38.8	7.7	10983	427.4	84.9	4.6	75.1	17.6	130.5	44.0	11.3	1.3	1.3	1.3	○	外部事象防護対象施設等との離隔をとる、又は、固縛等を実施することから設計飛来物として選定しない。	
							40.0	39.2	26.1	11204	4962	126.6	0.0	75.8	52.7	131.4	100.0	11.4	6.7					
柔	その他	コンテナボックス	2.438	2.896	4510	0.0107	0.0	54.7	15.0	6754	506.7	197.4	19.1	60.2	19.0	105.7	44.4	9.4	1.7	1.7	1.7	○	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。	
							12.19	2.438	2.896	4510	0.0107	0.0	54.7	15.0	6754	506.7	197.4	19.1	60.2	19.0	105.7	44.4		9.4
柔	その他	バス (中型)	2.34	3.035	6608	0.0056	0.0	44.7	8.7	6604	247.6	121.4	7.1	60.7	14.0	107.5	35.8	9.2	1.1	1.1	1.1	○	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。	
							0.9	44.7	7.8	6611	200.2	113.3	4.6	60.7	12.8	107.5	33.3	9.2	0.9					
柔	その他	トレーラー	2.49	1.43	4970	0.0084	0.0	47.0	7.3	5485	133.3	85.9	4.0	62.8	12.0	106.2	30.6	11.5	1.0	1.0	1.0	○	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。	
							8.1	49.5	12.0	6082	359.3	123.6	1.5	65.7	18.7	109.9	42.6	12.3	1.9					
柔	その他	バス (小型)	2.08	3.1	5186	0.0055	0.0	44.6	8.7	5157	194.9	121.4	7.1	54.7	12.7	98.3	32.8	8.2	1.0	1.0	1.0	○	外部事象防護対象施設等との離隔をとる、又は、固縛等を実施することから設計飛来物として選定しない。	
							0.0	44.6	8.7	5157	194.9	121.4	7.1	54.7	12.7	98.3	32.8	8.2	1.0	1.0	1.0			
柔	塊状	コンテナボックス ^{※1}	2.4	2.6	2300	0.0106	0.0	54.2	14.2	3378	232.8	189.4	17.1	43.9	13.3	81.2	33.2	6.3	1.1	1.1	○			

※1：竜巻評価ガイドにおいてサイズ及び重量が記載されている物品

※2：修正NDR式、De gen式及びChang式を用いて算出

※3：原子炉施設のタービンサイルの評価に用いられているBR L式にて算出

※4：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 (4/5)
(常設・仮設物)

分類	名称	長さ [m]	幅 [m]	高さ [m]	質量 [kg]	空力パラメータ [m ² /kg]	初期高さ [m]	最大水平速度 [m/s]	最大鉛直速度 [m/s]	運動エネルギー (水平) [kJ]	運動エネルギー (鉛直) [kJ]	最大飛距離 [m]	最大飛散高さ [m]	コンクリートの貫通限界厚さ*2 [cm]		コンクリートの裏面剥離限界厚さ*2 [cm]		鉄板の貫通限界厚さ*3 [mm]			浮き上がりの有無	以下の点で飛来物とならないか*4 ・飛来物発生防止対策 (撤去、固縛等) が可能か ・他の飛来物に包絡されるか
														水平 t _{p,h}	鉛直 t _{p,v}	水平 t _{s,h}	鉛直 t _{s,v}	水平 T _h	鉛直 T _v			
柔	塊状 フオークリフト	3.465	1.15	2.11	3250	0.0029	0.0	15.3	1.0	382.4	1.6	13.0	0.2	20.3	1.8	44.0	7.0	2.4	0.1	○		
							40.0	35.8	2080	1152	97.3	0.0	43.1	33.1	77.6	63.7	7.3	5.0				
柔	その他 乗用車(セダン)	4.36	1.695	1.46	1140	0.0095	0.0	49.5	7.8	1399	34.8	139.8	5.2	34.2	6.6	63.3	18.4	5.6	0.5	○		
							8.1	51.3	12.0	1501	82.4	140.8	3.3	35.3	9.7	64.9	24.6	5.8	0.9			
柔	その他 乗用車(軽)	3.395	1.53	1.475	760	0.0110	0.0	52.9	8.6	1062	28.4	157.6	7.0	30.2	6.0	56.8	16.9	4.9	0.5	○	外部事象防護対象施設等との離隔をとる,又は,固縛等を実施することから設計飛来物として選定しない。	
							8.3	53.6	13.3	1090	67.5	161.2	6.0	30.5	8.8	57.3	22.6	5.0	0.8			
柔	塊状 発電機	1.87	0.86	1.22	1025	0.0033	0.0	11.9	0.7	73.0	0.3	7.6	0.1	10.8	0.9	25.5	4.0	1.2	0.1	○		
							40.0	37.3	26.5	714.3	359.1	109.9	0.0	29.7	21.9	54.7	43.5	3.5				
柔	塊状 自動販売機	1.362	0.74	1.83	365	0.0089	0.0	50.4	8.6	463.3	13.6	147.6	7.1	23.5	4.9	44.5	13.7	4.2	0.4	○		
							0.0	11.6	0.9	9.1	0.1	6.4	0.2	6.7	0.7	14.8	2.7	4.4				
剛	構状 (ガイド)鋼製材*1	4.2	0.3	0.2	135	0.0066	0.0	11.0	0.8	8.2	0.0	5.8	0.1	6.4	0.7	14.3	2.5	4.0	0.2	○	設計飛来物に選定する	
							10.3	45.7	13.7	140.8	12.7	112.9	0.4	22.1	7.8	37.1	16.6	26.9	5.4			
							11.5**5	46.6	14.9	146.4	14.9	139.4	2.6	22.5	8.4	37.0	17.6	27.6	6.1			

※1：電巻評価ガイドにおいてサイズ及び重量が記載されている物品

※2：修正NDR式, Degen式及びChang式を用いて算出

※3：原子炉施設のタービンサイルの評価に用いられているBRL式にて算出

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

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 (5/5)

(常設・仮設物)

分類	名称	長さ [m]	幅 [m]	高さ [m]	質量 [kg]	空力パラメータ [m ² /kg]	初期高さ [m]	最大水平速度 [m/s]	最大鉛直速度 [m/s]	運動エネルギー [kJ] (水平)	運動エネルギー [kJ] (鉛直)	最大飛距離 [m]	最大飛散高さ [m]	コンクリートの貫通限界厚さ ^{**2} [cm]			コンクリートの裏面剥離限界厚さ ^{**2} [cm]			鋼板の貫通限界厚さ ^{**3} [mm]			浮き上がりの有無	以下の点で飛来物とならないか ^{**4} ・飛来物発生防止対策 (撤去、固縛等) が可能か ・他の飛来物に包絡されるか
														水平 t _{p,h}	鉛直 t _{p,v}	t _{s,h}	水平 t _{s,v}	鉛直 t _{s,v}	水平 T _h	鉛直 T _v	T _v			
柔	家庭用室外機	0.94	0.32	0.99	71	0.0146	0.0	54.4	7.1	105.1	1.8	150.6	5.1	14.1	2.3	27.5	7.0	2.9	0.2	○				
							7.5	57.5	14.1	117.4	7.0	182.1	9.4	14.9	4.3	28.5	11.1	3.1	0.5					
剛	その他	1.51	0.232	0.232	57	0.0034	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	×				
							40.0	37.8	26.4	40.7	19.9	114.2	0.0	13.2	9.7	24.0	18.9	4.0	2.5					
剛	樹状	0.65	0.65	0.05	33.5	0.0074	0.0	5.3	0.2	0.5	0.0	1.4	0.0	1.9	0.2	5.4	0.7	0.3	0.1	○	エネルギー、貫通力が設計飛来物候補 (鋼製材) に包含される。			
							10.2	47.4	13.6	37.7	3.1	127.1	1.5	13.0	4.4	23.2	10.1	4.4	0.9					
剛	構状	2	0.05	0.05	8.4	0.0058	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	×				
							10.1	43.7	13.6	8.0	0.8	91.3	0.0	9.6	3.7	16.7	7.7	14.4	3.1					
剛	塊状	0.04	0.04	0.04	0.2	0.0160	0.0	16.4	0.8	0.0	0.0	11.5	0.1	0.8	0.1	2.0	0.3	0.2	0.1	○	設計飛来物に選定する			
							0.0 ^{**5}	15.7	0.7	0.0	0.0	10.7	0.1	0.8	0.1	2.0	0.3	0.2	0.1					
							7.6	58.8	14.8	0.3	0.0	188.4	10.7	2.3	0.7	4.7	1.9	0.9	0.2					
							8.0 ^{**5}	59.3	17.2	0.4	0.0	209.5	18.0	2.3	0.7	4.7	2.1	0.9	0.2					

※1：竜巻評価ガイドにおいてサイズ及び重量が記載されている物品

※2：修正NDR式, De gen式及びChang式を用いて算出

※3：原子炉施設のタービンシールドの破砕に用いられている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：設計飛来物に選定した鋼製材及び砂利については、流入層高さの感度解析の結果を踏まえ、流入層高さを17.5mとした場合の飛散評価結果も記載

6. 設計飛来物の選定結果

上記1. から5. より，女川原子力発電所における設計飛来物は，第3.3-3表及び第3.3-6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，海水ポンプへの防護対策として設置する竜巻防護ネットを通過する可能性があり，飛来物の影響を鋼製材にて包含できないことから，設計飛来物として選定した。

第3.3-3表 女川原子力発電所における設計飛来物

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

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

※2 初期高さは感度解析結果を踏まえて，最大水平速度の算出条件を適用

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

※4 敷地内の高台を考慮して設定



(砂利)



(鋼製材)

第3.3-6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

女川原子力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 9 月 10 日～12 日、平成 27 年 2 月 12 日～13 日に実施した。調査では、常設物、仮設物のうち飛来物となりうる物品（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、米国 NRC R. G. 1.76 を参考にするとともに、後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 250m 程度であることを踏まえ、原子炉建屋から半径 800m 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つた場合は、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 40m 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 40m 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 40m の範囲内に設置されている想定飛来物の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。

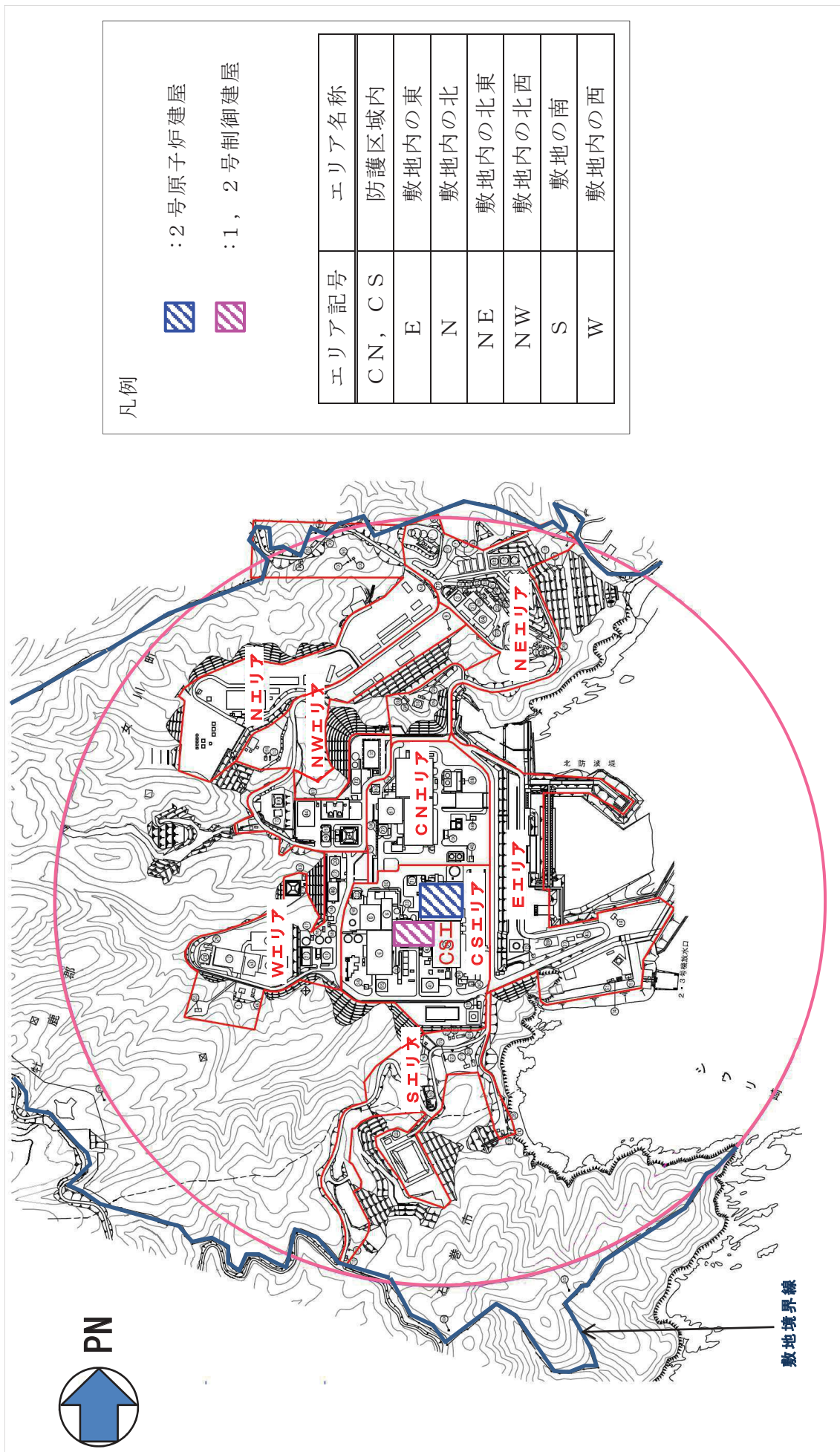


図1 調査範囲及び区分

女川原子力発電所 想定飛来物：CN3エリア（1／2）（39個）

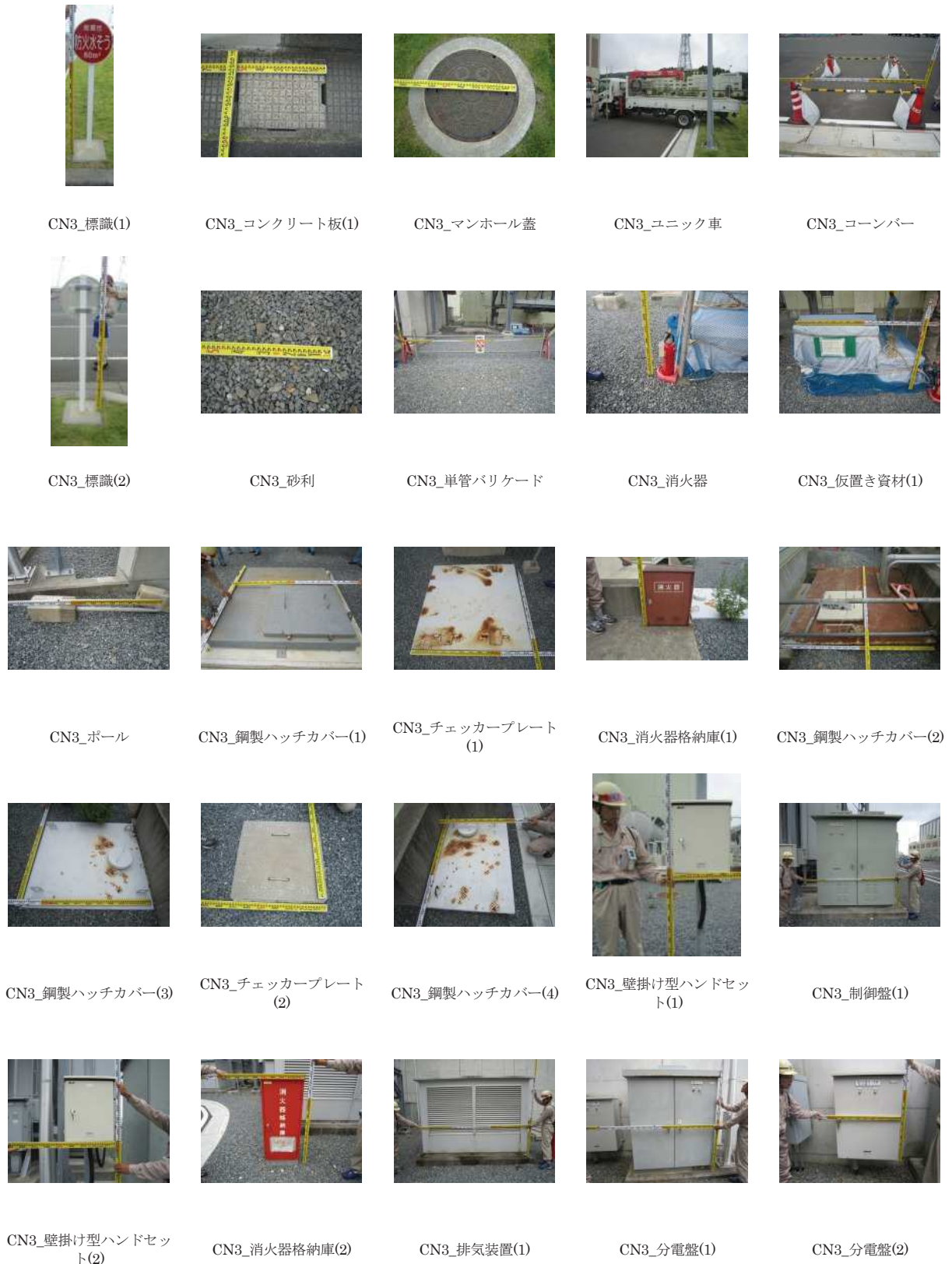


図2 飛来物（想定飛来物及び二次飛来物）の写真記録（1/53）

女川原子力発電所 想定飛来物：CN3エリア（2／2）



CN3_操作盤



CN3_壁掛け型ハンドセット(3)



CN3_制御盤(2)



CN3_チェッカープレート(3)



CN3_鋼製かご



CN3_資材類(1)



CN3_仮設足場板(1)



CN3_仮置き資材(2)



CN3_資材類(2)



CN3_鋼製屋根



CN3_コンクリート板(2)



CN3_鋼製看板（非固定）



CN3_仮設足場板(2)



CN3_排気装置(2)

図2 飛来物（想定飛来物及び二次飛来物）の写真記録（2/53）

女川原子力発電所 想定飛来物：CN4エリア（1／3）（70個）



CN4_仮囲い



CN4_仮設足場板



CN4_壁掛け型ハンドセット(1)



CN4_配電盤(1)



CN4_木材(1)



CN4_制御盤



CN4_計測盤



CN4_鋼板(厚)



CN4_鉄柱(1)



CN4_鉄柱(2)



CN4_鉄柱(3)



CN4_形鋼



CN4_ホース格納箱



CN4_消火器格納庫(1)



CN4_砂利(1)



CN4_排気口



CN4_分電盤(1)



CN4_プレハブ小屋(1)



CN4_仮設トイレ(1)



CN4_家庭用室外機(1)



CN4_木材(2)



CN4_棒状鋼材(1)



CN4_資材類(1)



CN4_仮置き資材



CN4_鋼管

図2 飛来物（想定飛来物及び二次飛来物）の写真記録（3/53）

女川原子力発電所 想定飛来物：CN4エリア（2／3）

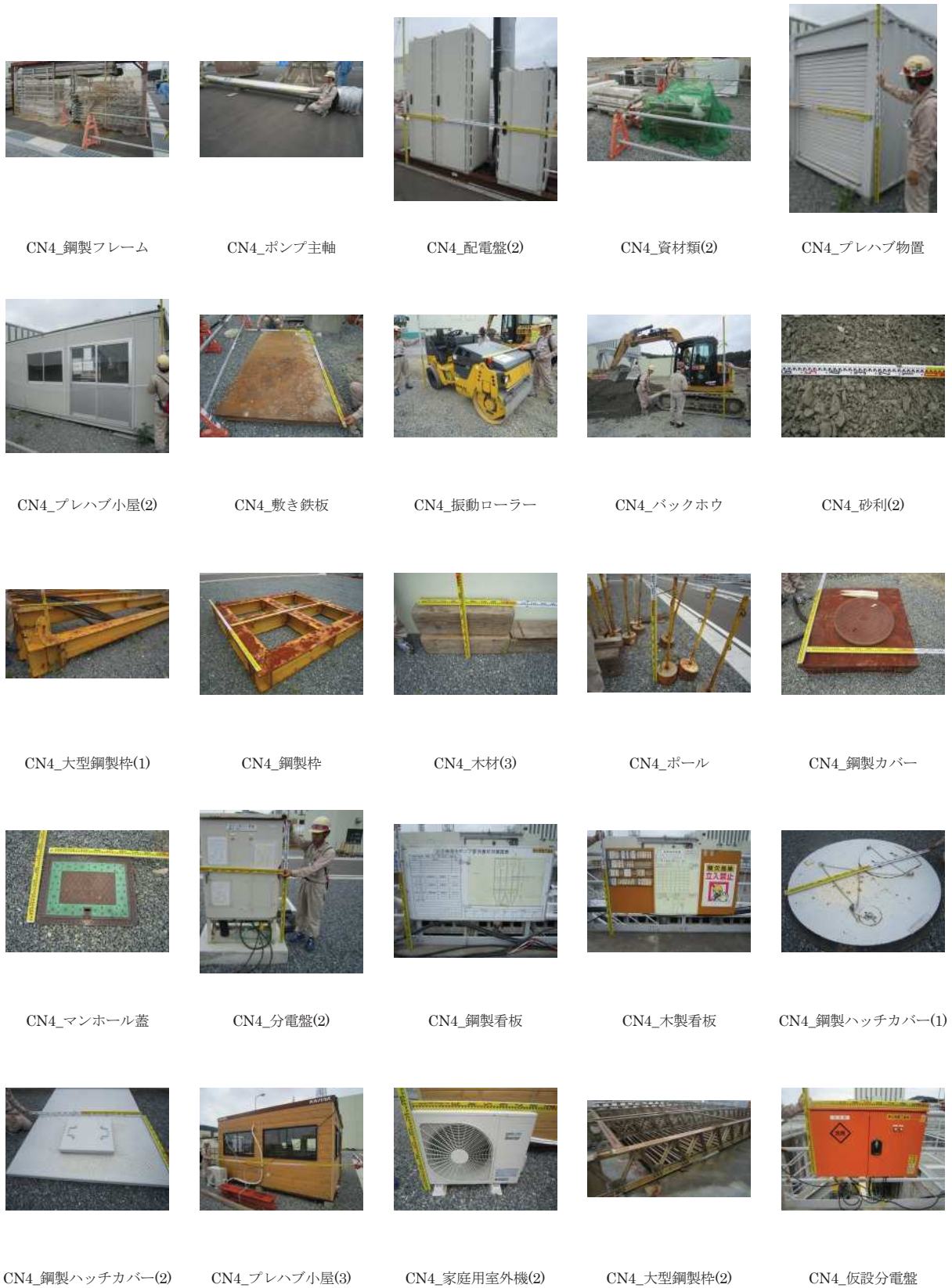


図2 飛来物（想定飛来物及び二次飛来物）の写真記録（4/53）

女川原子力発電所 想定飛来物：CN4エリア（3／3）

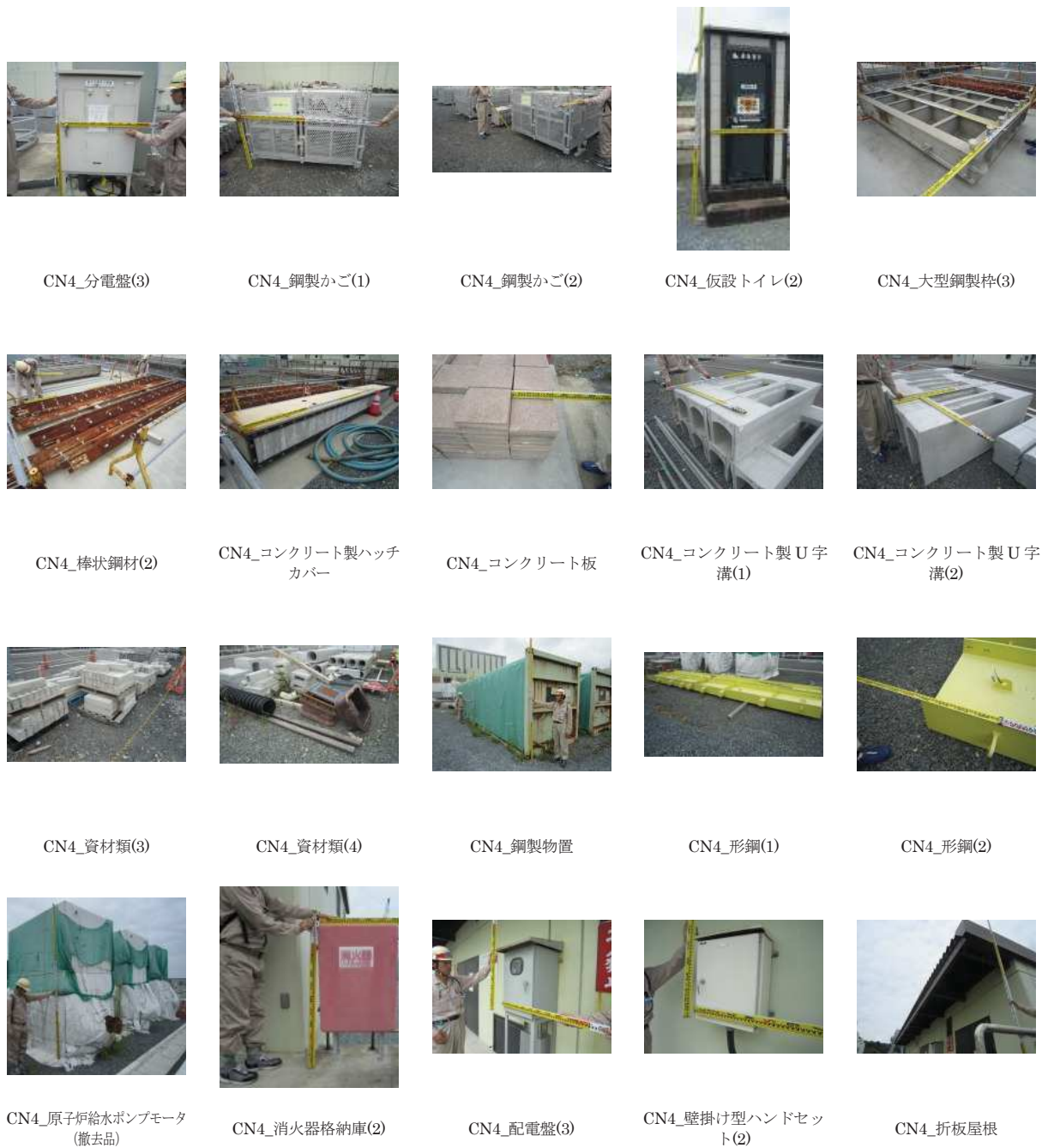


図2 飛来物（想定飛来物及び二次飛来物）の写真記録（5/53）

女川原子力発電所 想定飛来物：CN5エリア（1／2） （33個）

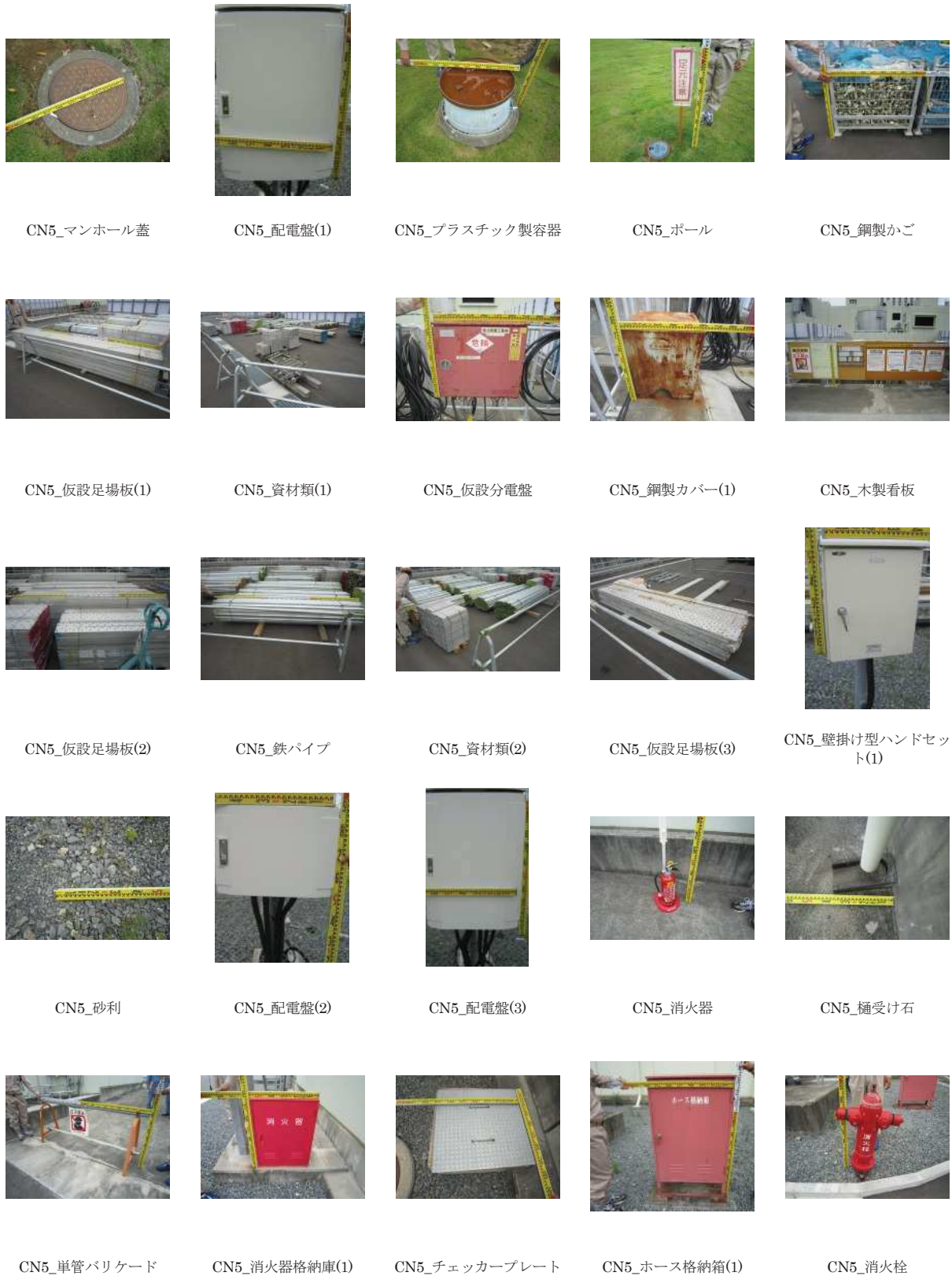


図2 飛来物（想定飛来物及び二次飛来物）の写真記録（6/53）

女川原子力発電所 想定飛来物：CN5エリア（2／2）



CN5_ホース格納箱(2)



CN5_消火器格納庫(2)



CN5_鋼製カバー(2)



CN5_接地極箱



CN5_壁掛け型ハンドセット(2)



CN5_配電盤(4)



CN5_発電機



CN5_土嚢袋

図2 飛来物（想定飛来物及び二次飛来物）の写真記録（7/53）

女川原子力発電所 想定飛来物：CN6エリア (23個)

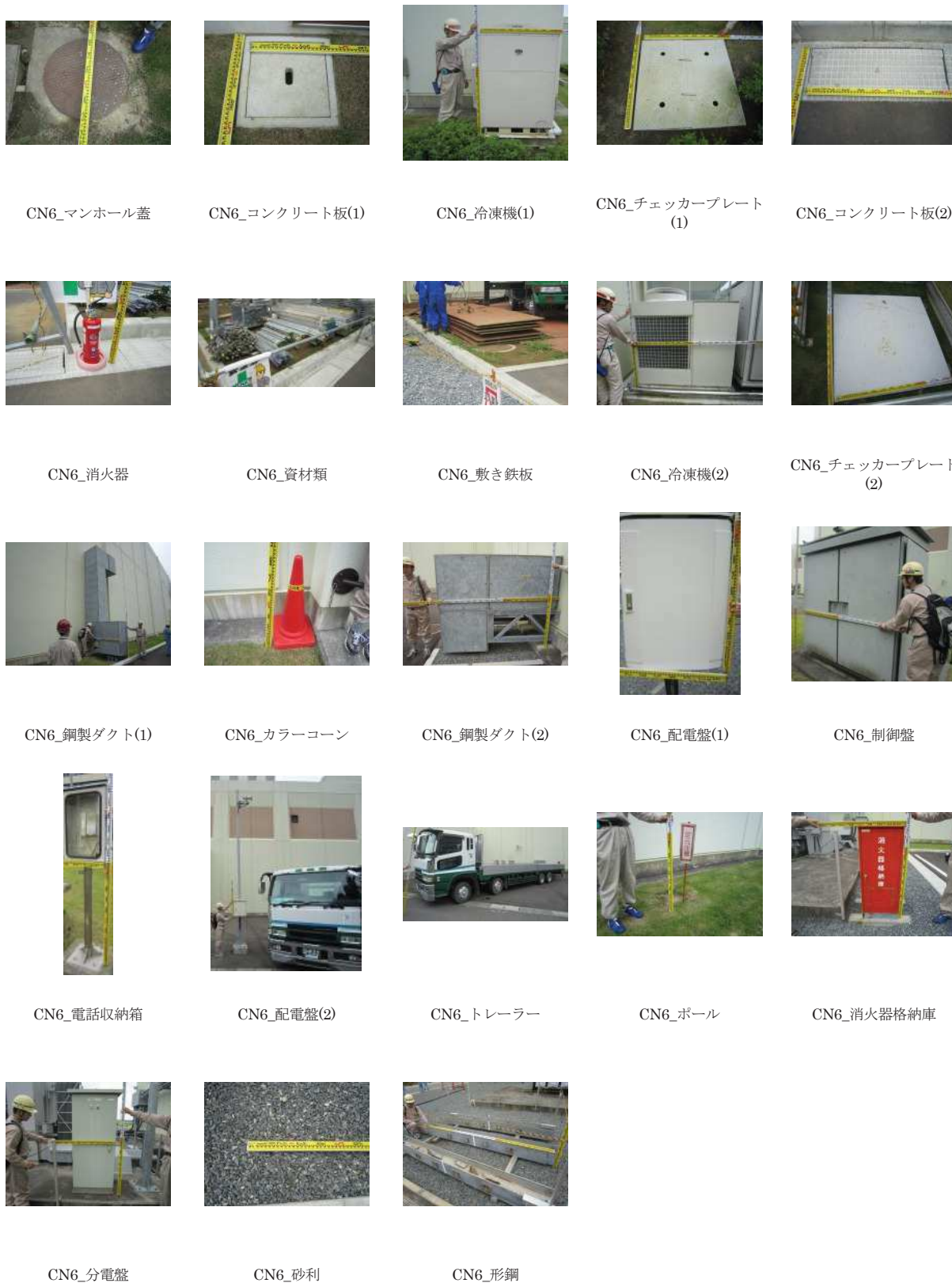


図2 飛来物（想定飛来物及び二次飛来物）の写真記録（8/53）

女川原子力発電所 想定飛来物：CS1エリア (19個)



CS1_仮設足場



CS1_タイル(1)



CS1_鋼製建具(1)



CS1_木板(1)



CS1_鋼製かご



CS1_鋼製建具(2)



CS1_仮置き資材



CS1_木板(2)



CS1_タイル(2)



CS1_鋼製容器



CS1_はしご



CS1_仮囲い



CS1_木板(3)



CS1_鋼製建具(3)



CS1_タイル(3)



CS1_木板(4)



CS1_鋼製建具(4)



CS1_分電盤



CS1_タイル(4)

図2 飛来物（想定飛来物及び二次飛来物）の写真記録（9/53）

女川原子力発電所 想定飛来物：CS2エリア (15個)



CS2_タイル(1)



CS2_仮囲い(1)



CS2_木板(1)



CS2_ガラリ



CS2_タイル(2)



CS2_鋼製建具



CS2_仮置き資材



CS2_仮設足場板



CS2_タイル(3)



CS2_仮囲い(2)



CS2_仮囲い(3)



CS2_木板(2)



CS2_タイル(4)



CS2_木板(3)



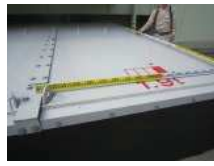
CS2_仮囲い(4)

図2 飛来物（想定飛来物及び二次飛来物）の写真記録（10/53）

女川原子力発電所 想定飛来物：CS5エリア（1／4）（86個）



CS5_チェッカープレート
(1)



CS5_鋼製ハッチカバー(1)



CS5_鋼製ハッチカバー(2)



CS5_鋼製ハッチカバー(3)



CS5_チェッカープレート
(2)



CS5_配電盤(1)



CS5_マンホール蓋(1)



CS5_プラスチック製容器



CS5_消火器格納庫(1)



CS5_ガスボンベ



CS5_折板屋根



CS5_鉄パイプ



CS5_鋼製かご



CS5_コンクリート板(1)



CS5_チェッカープレート
(3)



CS5_配電盤(2)



CS5_配電盤(3)



CS5_電気防食装置



CS5_配電盤(4)



CS5_現場盤



CS5_鋼製看板



CS5_消火器格納庫(2)



CS5_分電盤(1)



CS5_コンクリート板(2)



CS5_マンホール蓋(2)

図2 飛来物（想定飛来物及び二次飛来物）の写真記録（11/53）

女川原子力発電所 想定飛来物：CS5エリア（2／4）



図2 飛来物（想定飛来物及び二次飛来物）の写真記録（12/53）

女川原子力発電所 想定飛来物：CS5エリア（3／4）

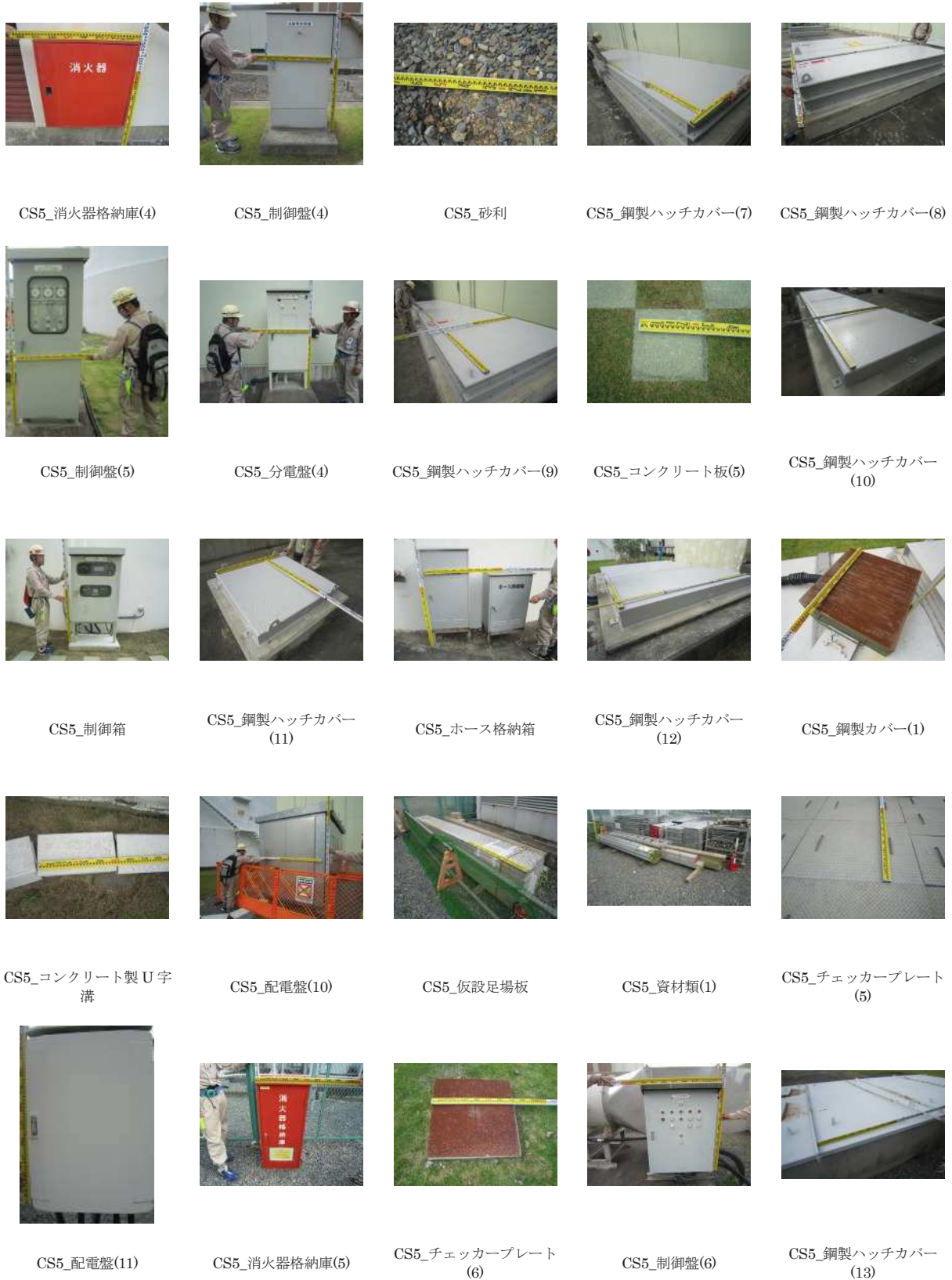


図2 飛来物（想定飛来物及び二次飛来物）の写真記録（13/53）

女川原子力発電所 想定飛来物：CS5エリア（4／4）



CS5_鋼製カバー(2)



CS5_マンホール蓋(4)



CS5_コンクリート板(6)



CS5_チェッカープレート
(7)



CS5_資材類(2)



CS5_配電盤(12)



CS5_鋼製ハッチカバー
(14)



CS5_分電盤(5)



CS5_チェッカープレート
(8)



CS5_配電盤(13)



CS5_鋼製ハッチカバー
(15)

図2 飛来物（想定飛来物及び二次飛来物）の写真記録（14/53）

女川原子力発電所 想定飛来物：CS6エリア（1／2）（33個）



CS6_マンホール蓋(1)



CS6_配電盤(1)



CS6_配電盤(2)



CS6_チェッカープレート
(1)



CS6_棒状鋼材



CS6_コンクリート板(1)



CS6_鋼製ハッチカバー



CS6_鋼製架台(1)



CS6_鋼製架台(2)



CS6_鋼製架台(3)



CS6_鋼製架台(4)



CS6_分電盤



CS6_コンクリート板(2)



CS6_配電盤(3)



CS6_マンホール蓋(2)



CS6_チェッカープレート
(2)



CS6_形鋼



CS6_鋼製カバー



CS6_コンクリート製容器



CS6_木製看板



CS6_消火器格納庫(1)



CS6_配電盤(3)



CS6_ホース格納箱(1)



CS6_配電盤(4)



CS6_消火器格納庫(2)

図2 飛来物（想定飛来物及び二次飛来物）の写真記録（15/53）

女川原子力発電所 想定飛来物：CS6エリア（2／2）



CS6_ホース格納箱(2)



CS6_チェッカープレート
(3)



CS6_火災報知器格納箱



CS6_家庭用室外機(1)



CS6_家庭用室外機(2)



CS6_プレハブ小屋



CS6_仮設トイレ



CS6_配電盤(5)

図2 飛来物（想定飛来物及び二次飛来物）の写真記録（16/53）

女川原子力発電所 想定飛来物：CS7エリア（1／3）（75個）

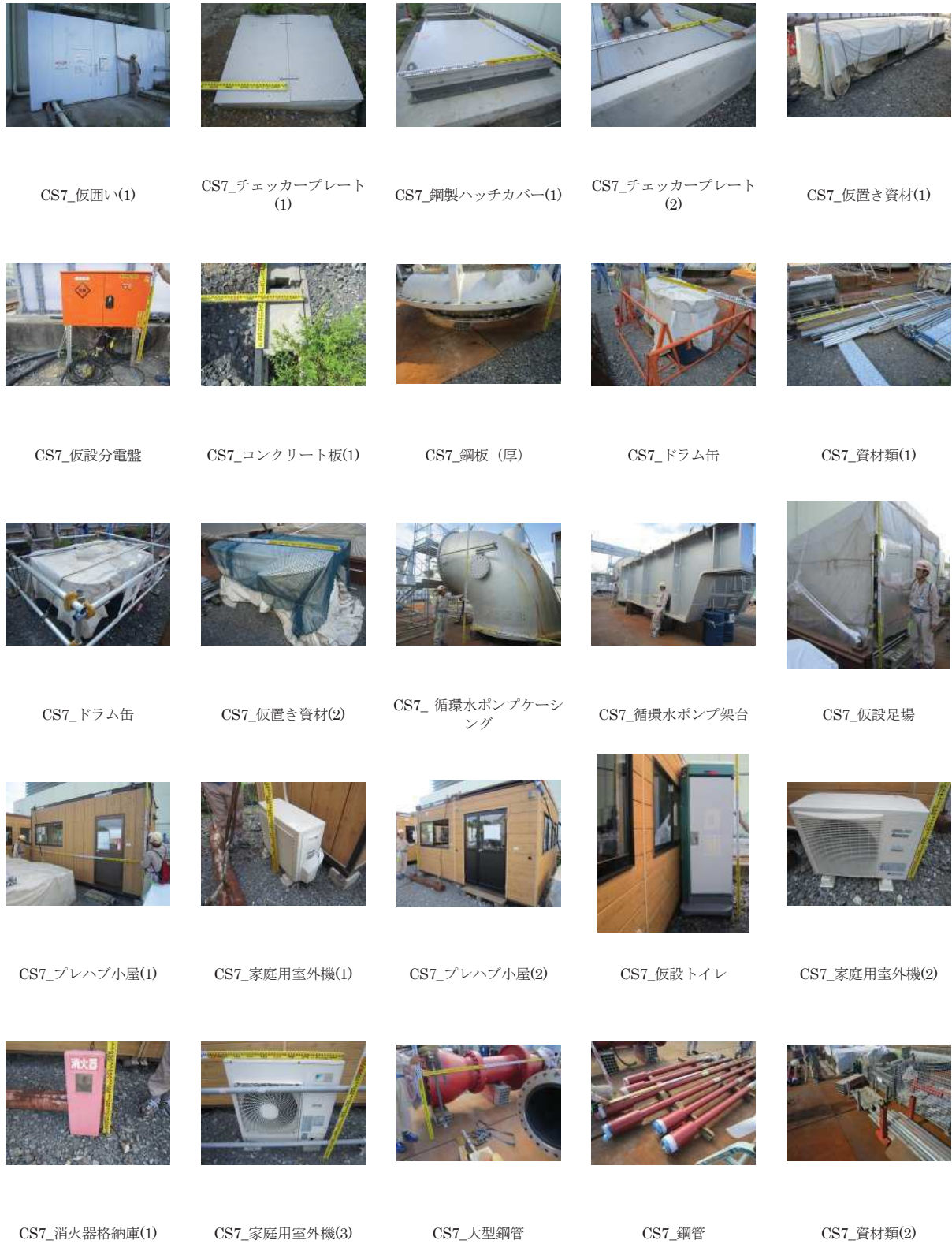


図2 飛来物（想定飛来物及び二次飛来物）の写真記録（17/53）

女川原子力発電所 想定飛来物：CS7エリア（2／3）

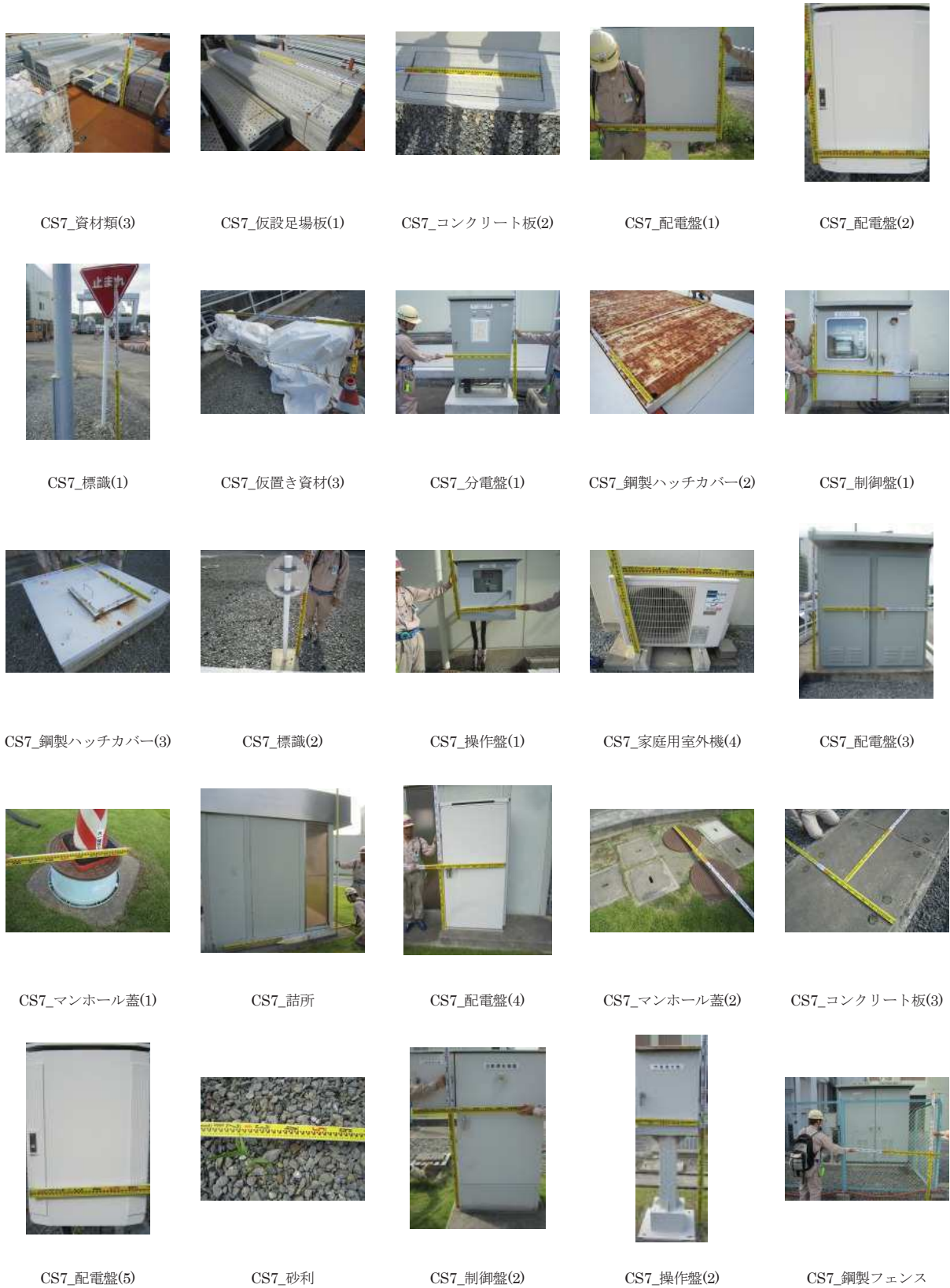


図2 飛来物（想定飛来物及び二次飛来物）の写真記録（18/53）

女川原子力発電所 想定飛来物：CS7エリア（3／3）



図2 飛来物（想定飛来物及び二次飛来物）の写真記録（19/53）

女川原子力発電所 想定飛来物：CS8エリア（1／3）（62個）



CS8_プラスチック製板材



CS8_資材類(1)



CS8_操作盤(1)



CS8_計測盤



CS8_鋼製看板



CS8_消火器格納庫(1)



CS8_チェッカープレート
(1)



CS8_配電盤(1)



CS8_消火器格納庫(2)



CS8_ページング格納箱



CS8_形鋼



CS8_コンクリート板(1)



CS8_仮設足場(1)



CS8_仮設足場(2)



CS8_コンクリート板(2)



CS8_壁掛け型ハンドセット
(1)



CS8_分電盤



CS8_鋼製容器(1)



CS8_標識



CS8_制御盤(1)



CS8_仮設足場(3)



CS8_制御盤(2)



CS8_仮置き資材(1)



CS8_現場盤



CS8_仮置き資材(2)

図2 飛来物（想定飛来物及び二次飛来物）の写真記録（20/53）

女川原子力発電所 想定飛来物：CS8エリア（2／3）

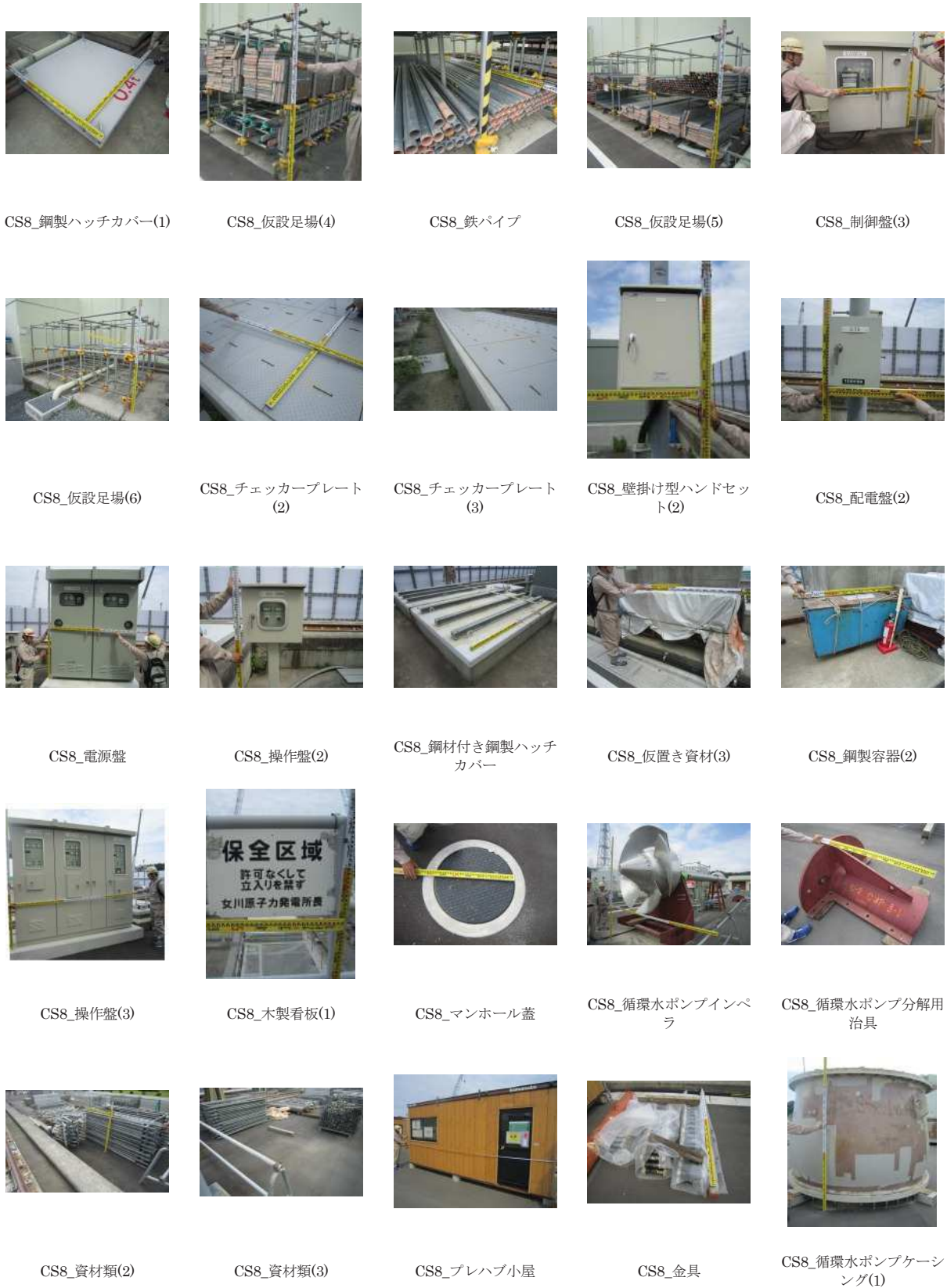


図2 飛来物（想定飛来物及び二次飛来物）の写真記録（21/53）

女川原子力発電所 想定飛来物：CS8エリア（3／3）



図2 飛来物（想定飛来物及び二次飛来物）の写真記録（22/53）

女川原子力発電所 想定飛来物：CS9エリア（1／3）（72個）

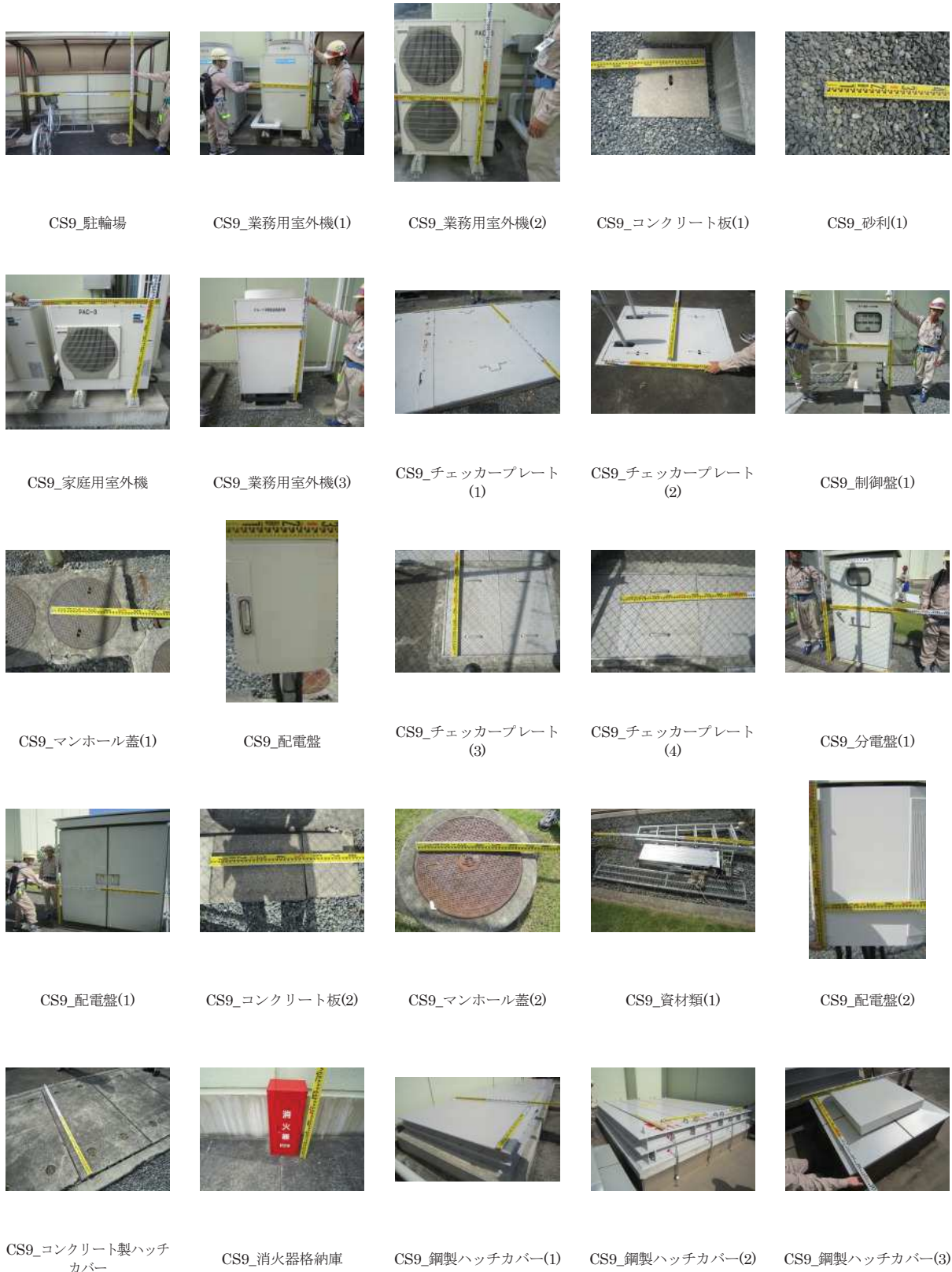
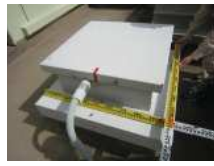


図2 飛来物（想定飛来物及び二次飛来物）の写真記録（23/53）

女川原子力発電所 想定飛来物：CS9エリア（2／3）



CS9_鋼製ハッチカバー(4)



CS9_電光表示板



CS9_チェッカープレート
(5)



CS9_チェッカープレート
(6)



CS9_分電盤(1)



CS9_カラーコーン



CS9_配電盤(3)



CS9_配電盤(4)



CS9_チェッカープレート
(7)



CS9_チェッカープレート
(8)



CS9_チェッカープレート
(9)



CS9_警報表示箱



CS9_ページング格納箱(1)



CS9_屋外照明



CS9_コンクリート板(3)



CS9_制御盤(2)



CS9_コンクリート板(4)



CS9_制御盤(3)



CS9_折板屋根



CS9_ガスボンベ



CS9_手押し車



CS9_コンクリート板(5)



CS9_チェッカープレート
(10)



CS9_砂利(2)



CS9_配電盤(5)

図2 飛来物（想定飛来物及び二次飛来物）の写真記録（24/53）

女川原子力発電所 想定飛来物：CS9エリア（3／3）

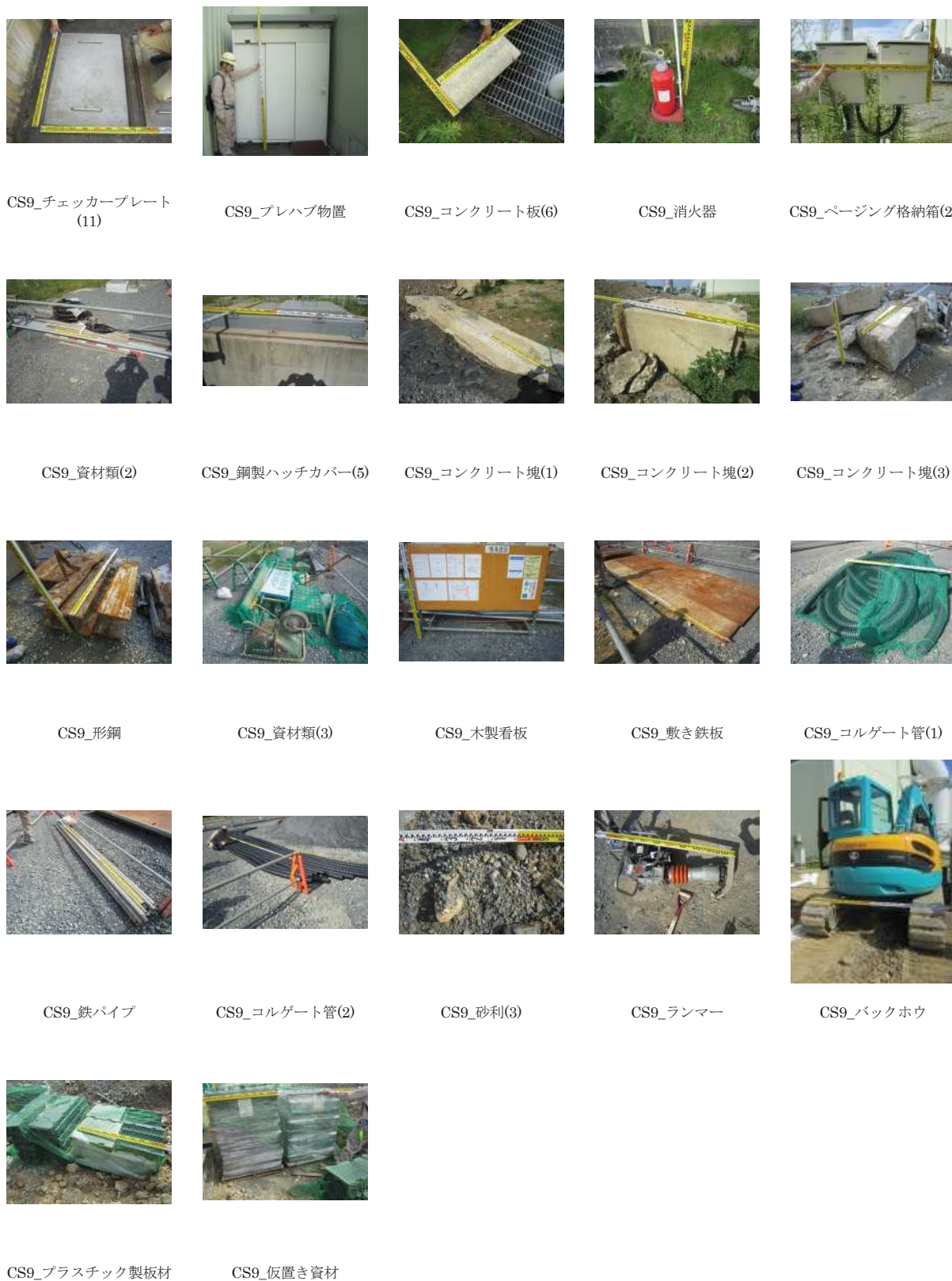


図2 飛来物（想定飛来物及び二次飛来物）の写真記録（25/53）

女川原子力発電所 想定飛来物：E1エリア（1／2）（28個）



E1_木板(1)



E1_木材(2)



E1_標識(1)



E1_鉄パイプ(1)



E1_標識(2)



E1_鉄パイプ(2)



E1_木板(3)



E1_仮設足場板(1)



E1_鋼製枠



E1_資材類(1)



E1_仮設足場板(2)



E1_資材類(2)



E1_資材類(3)



E1_プレハブ小屋



E1_家庭用室外機



E1_変圧器(1)



E1_変圧器(2)



E1_木製看板



E1_発電機(1)



E1_形鋼



E1_ポンプ車(1)



E1_コンクリート板



E1_仮置き資材



E1_高圧洗浄機



E1_発電機(2)

図2 飛来物（想定飛来物及び二次飛来物）の写真記録（26/53）

女川原子力発電所 想定飛来物：E 1 エリア（2 / 2）



E1_バックホウ



E1_ポンプ車(2)



E1_鋼製容器

図 2 飛来物（想定飛来物及び二次飛来物）の写真記録（27/53）

女川原子力発電所 想定飛来物：E2エリア（1／3）（61個）

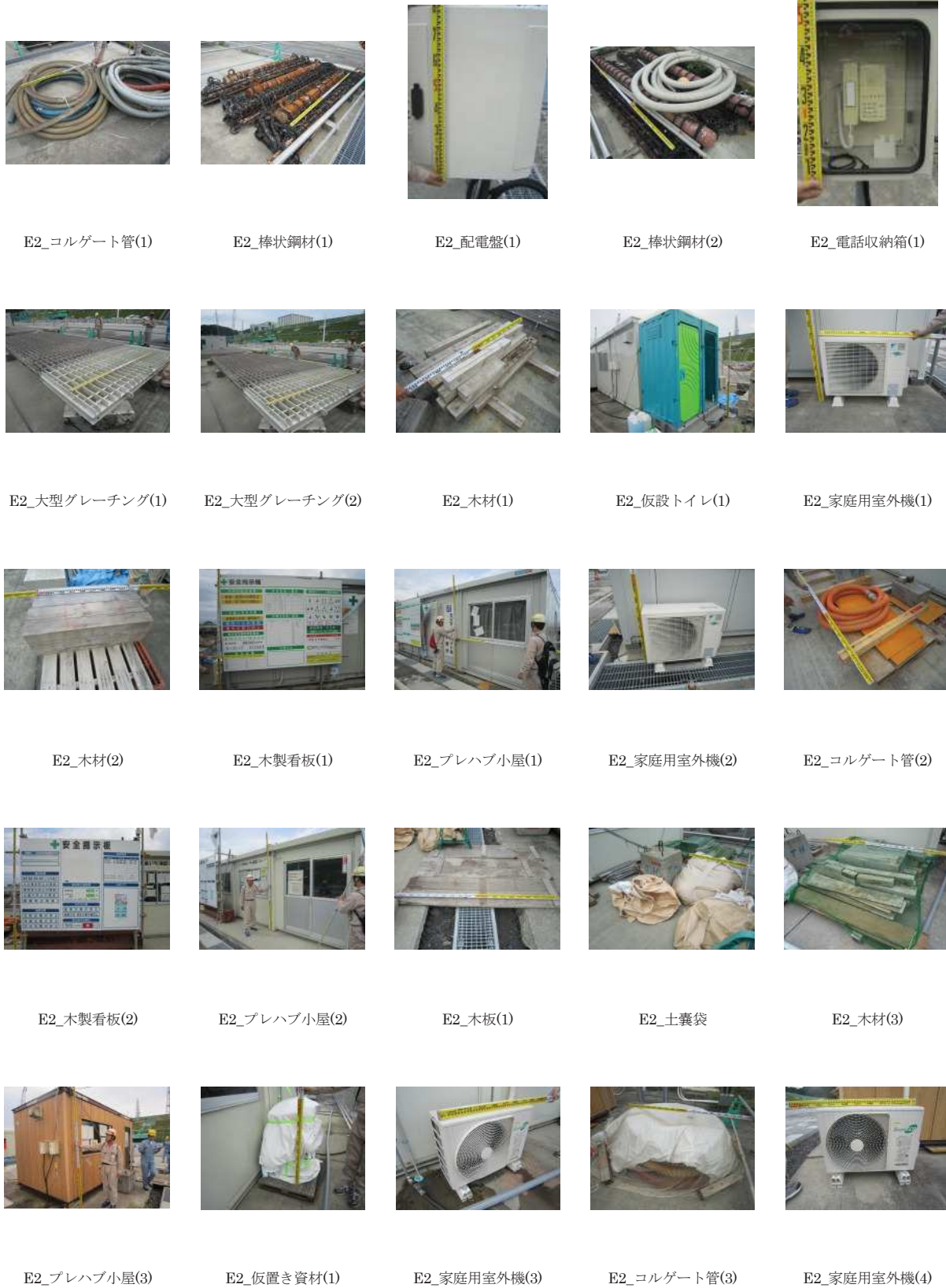


図2 飛来物（想定飛来物及び二次飛来物）の写真記録（28/53）

女川原子力発電所 想定飛来物：E2エリア（2／3）

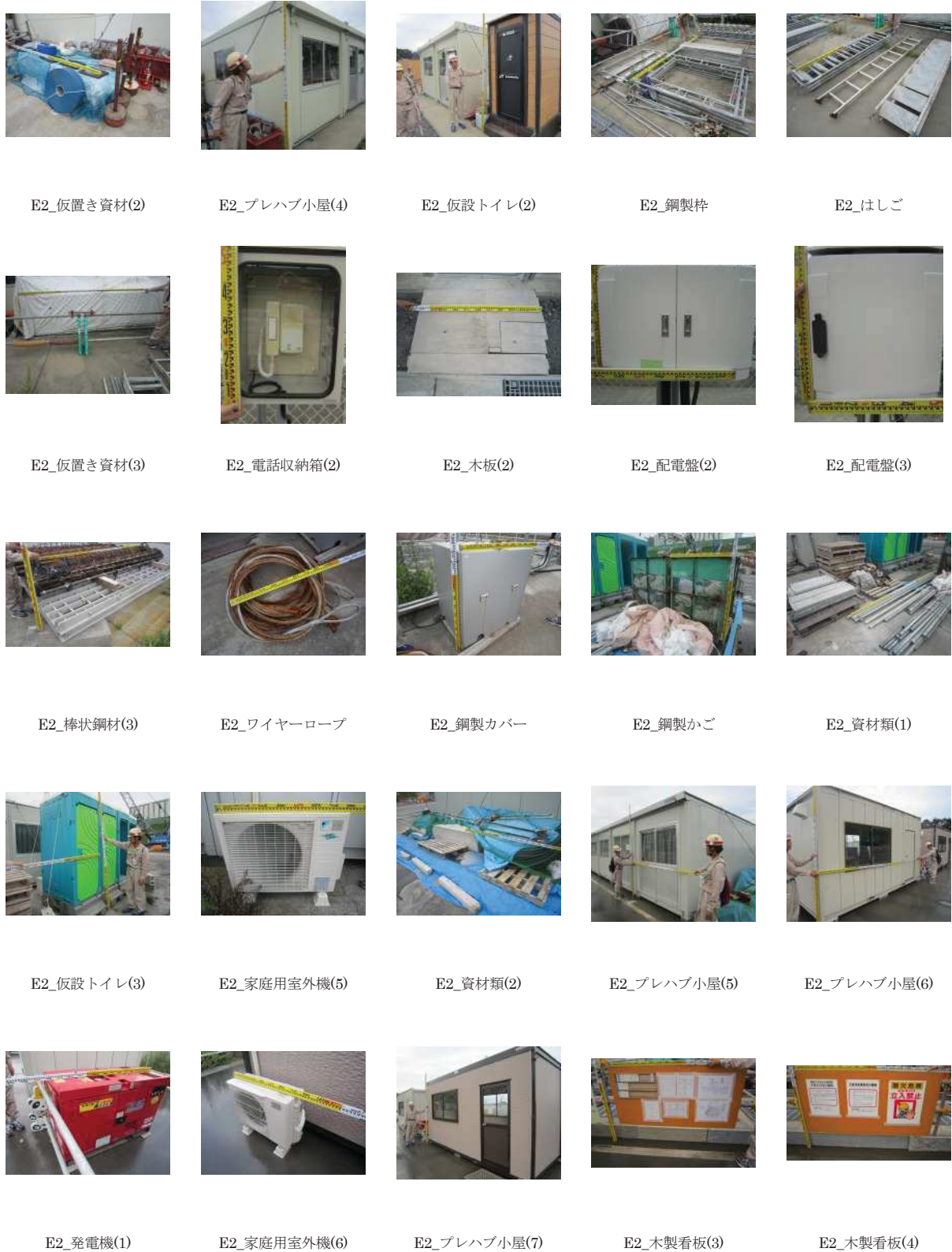


図2 飛来物（想定飛来物及び二次飛来物）の写真記録（29/53）

女川原子力発電所 想定飛来物：E2エリア（3／3）



E2_発電機(2)



E2_水中ポンプ



E2_コルゲート管(4)



E2_鋼製架台



E2_鋼管



E2_形鋼(1)



E2_資材類(3)



E2_形鋼(2)



E2_ポリタンク



E2_バックホウ



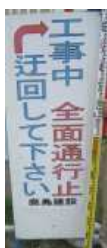
E2_鋼製看板

図2 飛来物（想定飛来物及び二次飛来物）の写真記録（30/53）

女川原子力発電所 想定飛来物：E3エリア（1／3）（71個）



E3_標識



E3_鋼製看板



E3_鋼製かご(1)



E3_送風機



E3_鋼製階段



E3_鋼管(1)



E3_鋼管(2)



E3_資材類(1)



E3_プレハブ小屋(1)



E3_仮設トイレ(1)



E3_敷き鉄板



E3_プレハブ物置(1)



E3_グラウトポンプ



E3_発電機(1)



E3_操作盤



E3_プレハブ物置(2)



E3_資材類(2)



E3_コルゲート管



E3_鋼製かご(2)



E3_集塵機



E3_制御盤(1)



E3_鋼製容器



E3_はしご



E3_鉄パイプ(1)



E3_投光器

図2 飛来物（想定飛来物及び二次飛来物）の写真記録（31/53）

女川原子力発電所 想定飛来物：E3エリア（2／3）

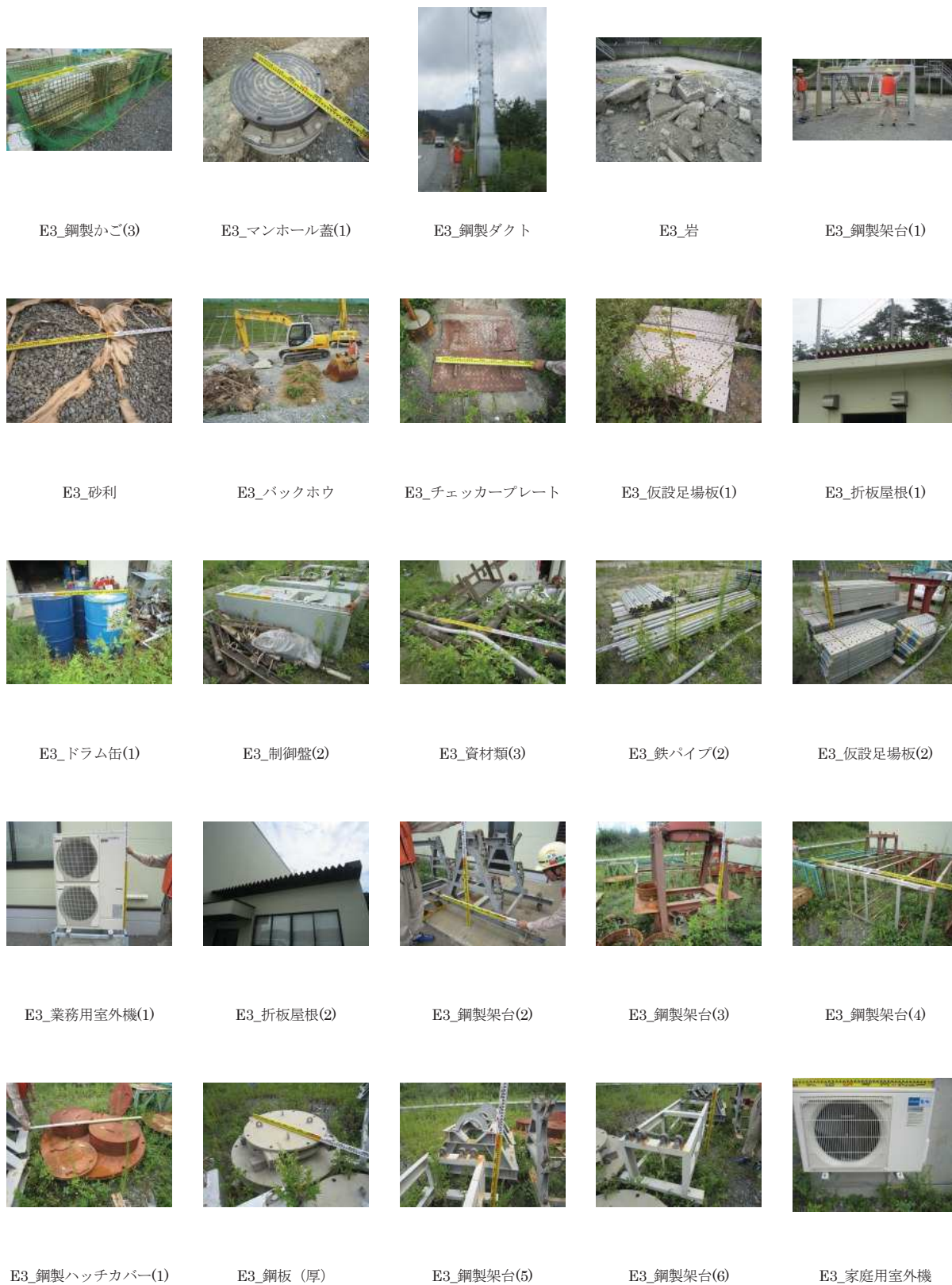


図2 飛来物（想定飛来物及び二次飛来物）の写真記録（32/53）

女川原子力発電所 想定飛来物：E3エリア（3／3）



E3_折板屋根(3)



E3_業務用室外機(2)



E3_仮置き資材(1)



E3_ワイヤーロープ



E3_プレハブ小屋(2)



E3_シート



E3_コルゲート管



E3_発電機(2)



E3_木製看板(1)



E3_木製看板(2)



E3_鋼管(3)



E3_仮設トイレ(2)



E3_ドラム缶(2)



E3_鋼製かご(4)



E3_プレハブ物置(3)



E3_仮置き資材(2)



E3_資材類(4)



E3_マンホール蓋(2)



E3_鋼製ハッチカバー(2)



E3_配電盤(1)



E3_配電盤(2)

図2 飛来物（想定飛来物及び二次飛来物）の写真記録（33/53）

女川原子力発電所 想定飛来物：E4エリア（1／4）（80個）



E4_マンホール蓋(1)



E4_鋼管(1)



E4_コンクリート板(1)



E4_鋼製物置



E4_鋼製階段



E4_仮設トイレ



E4_鋼管(2)



E4_仮置き資材(1)



E4_鋼管(3)



E4_鋼製レール



E4_木材(1)



E4_木材(2)



E4_形鋼(1)



E4_木製看板



E4_プレハブ物置(1)



E4_プレハブ物置(2)



E4_資材類(1)



E4_仮置き資材(2)



E4_形鋼(2)



E4_鋼板(薄)(1)



E4_資材類(2)



E4_木材(3)



E4_金網



E4_鋼製かご



E4_ハンドガイドローラー

図2 飛来物（想定飛来物及び二次飛来物）の写真記録（34/53）

女川原子力発電所 想定飛来物：E4エリア（2／4）



E4_プレートコンパクター



E4_鋼板（薄）(2)



E4_コンクリート板(2)



E4_鉄柱(1)



E4_パイ



E4_金属くず(1)



E4_砂利(1)



E4_砂利(2)



E4_砂利(3)



E4_岩(1)



E4_金属くず(2)



E4_コルゲート管(1)



E4_屋外照明



E4_鉄筋(1)



E4_鋼製架台(1)



E4_鋼製タンク



E4_コルゲート管(2)



E4_コンクリート塊(1)



E4_プレハブ物置(3)



E4_鋼板（薄）(3)



E4_配電盤



E4_家庭用室外機(1)



E4_家庭用室外機(2)



E4_チェッカープレート



E4_貯水槽

図2 飛来物（想定飛来物及び二次飛来物）の写真記録（35/53）

女川原子力発電所 想定飛来物：E 4 エリア（3 / 4）



E4_家庭用室外機(3)



E4_電線



E4_砂利(4)



E4_砂利(5)



E4_岩(2)



E4_マンホール蓋(2)



E4_鋼製架台(2)



E4_資材類(3)



E4_形鋼(3)



E4_コンクリート塊(2)



E4_コンクリート柱



E4_コンクリート製U字溝



E4_単管バリケード



E4_コンクリート塊(3)



E4_鉄筋(2)



E4_資材類(4)



E4_木製パレット



E4_ガスポンプ



E4_鉄筋(3)



E4_木材(4)



E4_塊状鋼材



E4_鉄柱(2)



E4_鋼管(4)



E4_コンクリート製容器
(1)



E4_テトラポット

図 2 飛来物（想定飛来物及び二次飛来物）の写真記録（36/53）

女川原子力発電所 想定飛来物：E 4 エリア（4 / 4）



E4_コンクリート製容器
(2)



E4_鋼管(5)



E4_形鋼(4)



E4_鋼板（薄）(4)



E4_仮設足場板

図 2 飛来物（想定飛来物及び二次飛来物）の写真記録（37/53）

女川原子力発電所 想定飛来物：N1エリア (23個)



N1_敷き鉄板(1)



N1_ユニック車



N1_資材類(1)



N1_ラフテレーンクレーン



N1_単管バリケード



N1_プレハブ小屋(1)



N1_仮置き資材



N1_鋼製かご



N1_発電機



N1_トラック



N1_資材類(2)



N1_金具



N1_木材



N1_敷き鉄板(2)



N1_乗用車(1)



N1_プレハブ小屋(2)



N1_プレハブ物置



N1_プレハブ小屋(3)



N1_コンクリート塊



N1_砂利



N1_木製パレット



N1_タンクローリー



N1_乗用車(2)

図2 飛来物(想定飛来物及び二次飛来物)の写真記録(38/53)

女川原子力発電所 想定飛来物：N2エリア（1／2） （29個）



N2_トラック



N2_貯水槽



N2_乗用車



N2_ポール



N2_鋼製容器



N2_シート



N2_プレハブ物置



N2_マンホール蓋(1)



N2_詰所



N2_バス



N2_木製看板



N2_鋼製架台



N2_家庭用室外機



N2_業務用室外機



N2_マンホール蓋(2)



N2_鋼製屋根(1)



N2_鋼製屋根(2)



N2_木材



N2_屋外照明



N2_鉄柱(1)



N2_鉄柱(2)



N2_鋼製看板(1)



N2_鋼製看板(2)



N2_コンクリート板(1)



N2_高圧洗浄機

図2 飛来物（想定飛来物及び二次飛来物）の写真記録（39/53）

女川原子力発電所 想定飛来物：N2エリア（2／2）



N2_コンクリート板(2)



N2_ポリバケツ



N2_駐輪場



N2_鋼製フェンス

図2 飛来物（想定飛来物及び二次飛来物）の写真記録（40/53）

女川原子力発電所 想定飛来物：N3エリア（1／3）（73個）



N3_コンクリート板



N3_プレハブ物置(1)



N3_折板屋根(1)



N3_鋼製容器(1)



N3_小型空気圧縮機(1)



N3_鋼製物置(1)



N3_ガスボンベ(1)



N3_シャッター



N3_折板屋根(2)



N3_折板屋根(3)



N3_ポール



N3_木製パレット



N3_石



N3_鋼製容器(2)



N3_鋼製かご



N3_小型空気圧縮機(2)



N3_シャッター



N3_金属くず



N3_資材類(1)



N3_資材類(2)



N3_鋼製物置(2)



N3_ガスボンベ(2)



N3_プレハブ物置(2)



N3_仮置き資材(1)



N3_資材類(3)

図2 飛来物（想定飛来物及び二次飛来物）の写真記録（41/53）

女川原子力発電所 想定飛来物：N3エリア（2／3）



N3_仮置き資材(2)



N3_コンテナボックス(1)



N3_仮置き資材(3)



N3_鋼製フレーム(1)



N3_コンテナボックス(2)



N3_鋼製物置(3)



N3_ビニールトタン(1)



N3_鋼製フレーム(2)



N3_仮設足場板



N3_プレハブ物置(3)



N3_鋼製物置(4)



N3_コンクリート塊(1)



N3_仮置き資材(4)



N3_空気圧縮機



N3_コンテナボックス(3)



N3_プレハブ物置(4)



N3_鋼製物置(5)



N3_ビニールトタン(2)



N3_プレハブ物置(5)



N3_資材類(4)



N3_仮設足場(1)



N3_資材類(5)



N3_鉄パイプ



N3_鋼製容器(3)



N3_資材類(6)

図2 飛来物（想定飛来物及び二次飛来物）の写真記録（42/53）

女川原子力発電所 想定飛来物：N3エリア（3／3）



N3_資材類(7)



N3_鋼製容器(4)



N3_コンクリート塊(2)



N3_プレハブ小屋(1)



N3_プレハブ小屋(2)



N3_プレハブ小屋(3)



N3_仮設足場(2)



N3_鋼製容器(5)



N3_プレハブ小屋(4)



N3_プレハブ小屋(5)



N3_鋼製建具



N3_折板屋根(4)



N3_仮設足場(3)



N3_鋼板（薄）



N3_プレハブ小屋(6)



N3_家庭用室外機



N3_折板屋根(5)



N3_フォークリフト



N3_ユニック車



N3_仮置き資材(5)



N3_コンテナボックス(4)



N3_コンテナボックス(5)



N3_仮置き資材(6)

図2 飛来物（想定飛来物及び二次飛来物）の写真記録（43/53）

女川原子力発電所 想定飛来物：N4エリア（1／2） （33個）



N4_プレハブ小屋(1)



N4_仮設トイレ(1)



N4_プレハブ小屋(2)



N4_プレハブ小屋(3)



N4_砂利



N4_詰所



N4_折板屋根



N4_仮置き資材(1)



N4_プレハブ小屋(4)



N4_コンテナボックス



N4_資材類



N4_木製ドラム(1)



N4_木製ドラム(2)



N4_鋼製屋根



N4_コンクリート板



N4_マンホール蓋(1)



N4_乗用車



N4_マンホール蓋(2)



N4_ホース延長回収車



N4_仮置き資材(2)



N4_注水車



N4_プレハブ小屋(5)



N4_プレハブ物置(1)



N4_流し台



N4_仮設トイレ(2)

図2 飛来物（想定飛来物及び二次飛来物）の写真記録（44/53）

女川原子力発電所 想定飛来物：N4エリア（2／2）



N4_仮設トイレ(3)



N4_自動販売機



N4_仮設足場



N4_単管バリケード



N4_プレハブ物置(2)



N4_業務用室外機



N4_標識



N4_標識（非固定）

図2 飛来物（想定飛来物及び二次飛来物）の写真記録（45/53）

女川原子力発電所 想定飛来物：N5エリア（1／3）（69個）



N5_バス



N5_資材類(1)



N5_鋼製かご(1)



N5_鋼製かご(2)



N5_鉄パイプ



N5_仮設足場板



N5_単管バリケード



N5_コンテナボックス



N5_自動販売機



N5_ユニック車(1)



N5_プレハブ物置(1)



N5_仮設トイレ(1)



N5_流し台



N5_電気温水器



N5_プレハブ小屋(1)



N5_プレハブ物置(2)



N5_シャッター



N5_折板屋根(1)



N5_折板屋根(2)



N5_形鋼(1)



N5_木材



N5_形鋼(2)



N5_敷き鉄板



N5_折板屋根(3)



N5_仮設足場(1)

図2 飛来物（想定飛来物及び二次飛来物）の写真記録（46/53）

女川原子力発電所 想定飛来物：N5エリア（2／3）



N5_仮設足場(2)



N5_仮設足場(3)



N5_形鋼(3)



N5_資材類(2)



N5_テント倉庫



N5_プレハブ小屋(2)



N5_資材類(3)



N5_鋼製物置(1)



N5_資材類(4)



N5_ユニック車(2)



N5_ラフテレーンクレーン



N5_トレーラー



N5_テント倉庫



N5_鋼製物置(2)



N5_発電機



N5_鋼製物置(3)



N5_プレハブ小屋(3)



N5_家庭用室外機



N5_仮設トイレ(2)



N5_木製ドラム



N5_砂利



N5_鋼製物置(4)



N5_鉄柱



N5_コンクリート塊



N5_バックホウ

図2 飛来物（想定飛来物及び二次飛来物）の写真記録（47/53）

女川原子力発電所 想定飛来物：N5エリア（3／3）



N5_プレハブ小屋(4)



N5_資材類(4)



N5_キャリア



N5_ソーラーパネル



N5_コルゲート管



N5_鋼製架台(1)



N5_鋼製架台(2)



N5_仮置き資材



N5_ユニック車(3)



N5_ユニック車(4)



N5_プレハブ小屋(5)



N5_鋼製架台(3)



N5_仮設足場(4)



N5_木製看板



N5_仮設足場(5)



N5_仮設足場(6)



N5_詰所



N5_マンホール蓋



N5_鋼製カバー

図2 飛来物（想定飛来物及び二次飛来物）の写真記録（48/53）

女川原子力発電所 想定飛来物：N6エリア (14個)



N6_標識(1)



N6_鋼製看板(1)



N6_標識(2)



N6_鋼製看板(2)



N6_鋼製看板(3)

核物質防護上
撮影不可

N6_鋼製バリケード(1)

核物質防護上
撮影不可

N6_鋼製バリケード(2)



N6_屋外照明



N6_鋼製看板(4)



N6_岩石



N6_屋外スピーカー



N6_鋼製看板(5)



N6_鋼製看板(6)



N6_標識(3)

図2 飛来物（想定飛来物及び二次飛来物）の写真記録（49/53）

女川原子力発電所 想定飛来物：NE1エリア（1／3） （54個）



図2 飛来物（想定飛来物及び二次飛来物）の写真記録（50/53）

女川原子力発電所 想定飛来物：NE1エリア（2／3）



NE1_コンクリート製容器
(2)



NE1_形鋼



NE1_手押し車



NE1_プレハブ小屋(1)



NE1_プレハブ小屋(2)



NE1_コンクリートブ
ック



NE1_仮置き資材(2)



NE1_チェッカープレート



NE1_資材類(1)



NE1_仮置き資材(3)



NE1_折板屋根



NE1_シャッター(1)



NE1_鋼製かご(1)



NE1_資材類(2)



NE1_木板(3)



NE1_資材類(3)



NE1_鋼製かご(2)



NE1_仮置き資材(4)



NE1_鋼製架台



NE1_仮置き資材(5)



NE1_鋼製容器



NE1_プレハブ小屋(3)



NE1_プレハブ小屋(4)



NE1_仮置き資材(6)



NE1_プレハブ小屋(5)

図2 飛来物（想定飛来物及び二次飛来物）の写真記録（51/53）

女川原子力発電所 想定飛来物：NE1エリア（3／3）



NE1_プラスチック製パレット



NE1_仮置き資材(6)



NE1_シャッター(2)



NE1_マンホール蓋

図2 飛来物（想定飛来物及び二次飛来物）の写真記録（52/53）

女川原子力発電所 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



ガラス窓, 屋根



ガラス窓



ガラス窓



ガラス窓, 配管



雨どい, 外壁



雨どい, 外壁



外壁



外壁



壁 (ポリカーボネート)



照明器具



鋼製階段



鋼製階段



配管

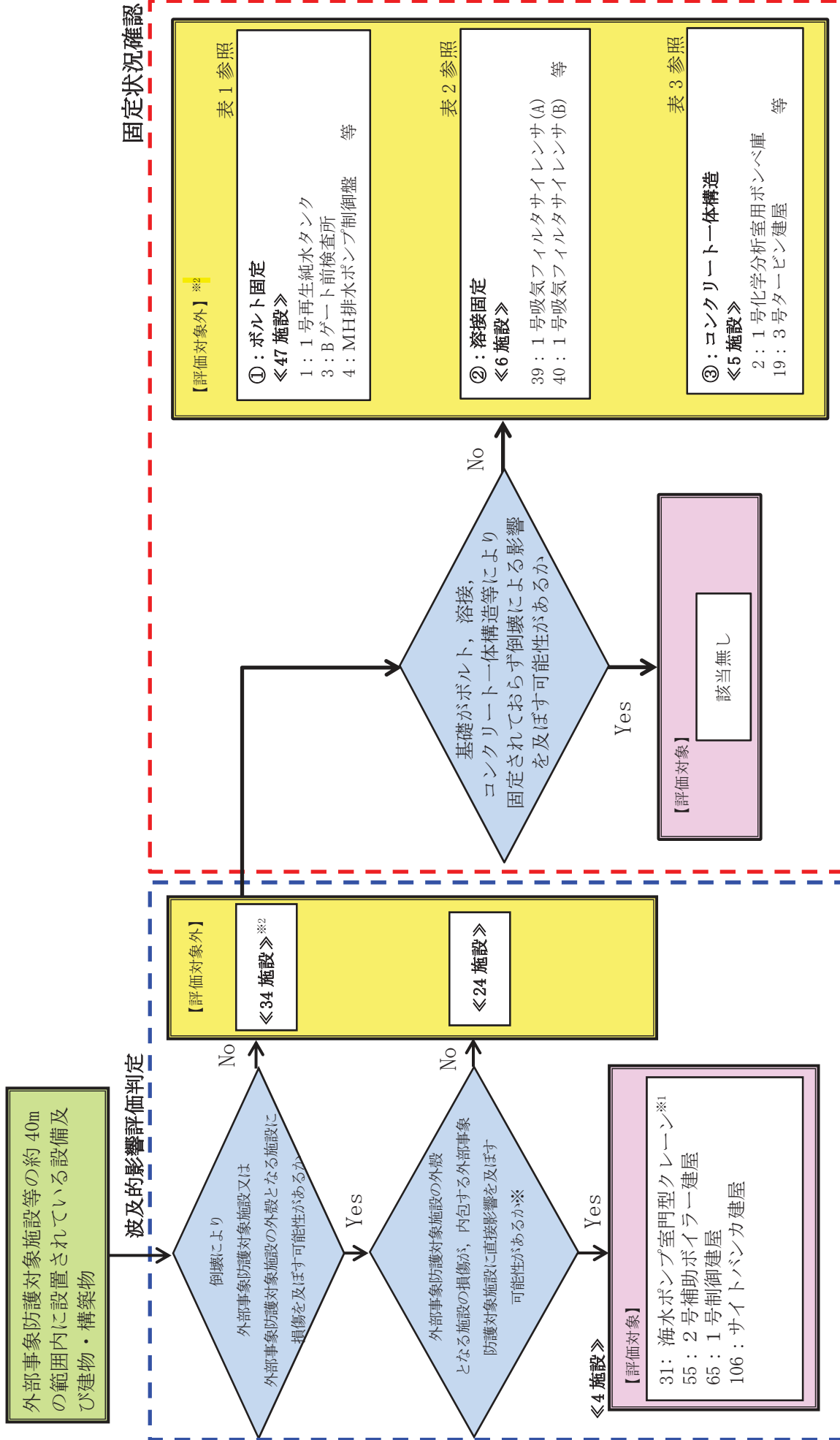


アンテナ



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 (53/53)



※1 海水ポンプ室門型クレーンについては、ストッパ等により固定される（図2参照）が、ストッパが破損した場合には竜巻の風により移動し、原子炉補機機冷却海水ポンプ等に隣接する可能性があるため抽出する
 ※2 津波防護施設等については、基礎津波の高さや防護範囲の広さ等の重要性を鑑み、自主的に機能維持のための配慮を行う

図 1 固定状況確認フロー及び確認結果

表1 固定状況確認による評価対象一覧表（ボルト固定）【47施設】

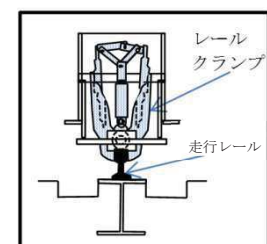
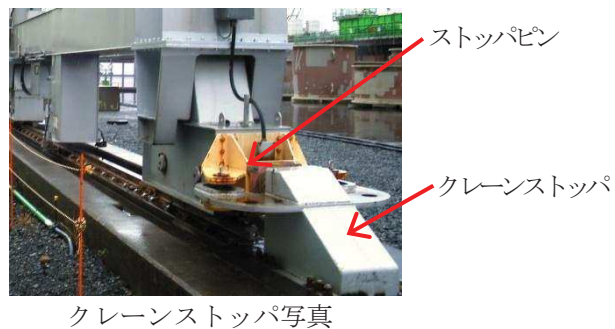
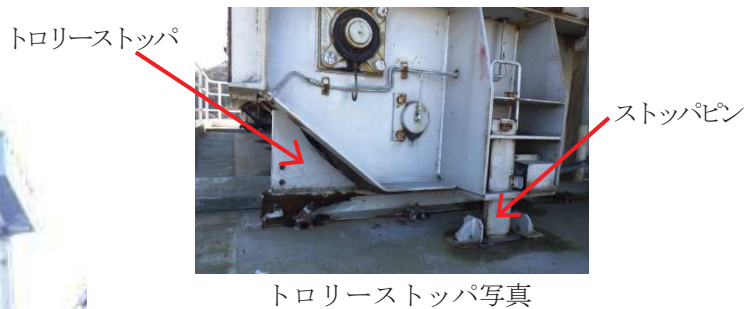
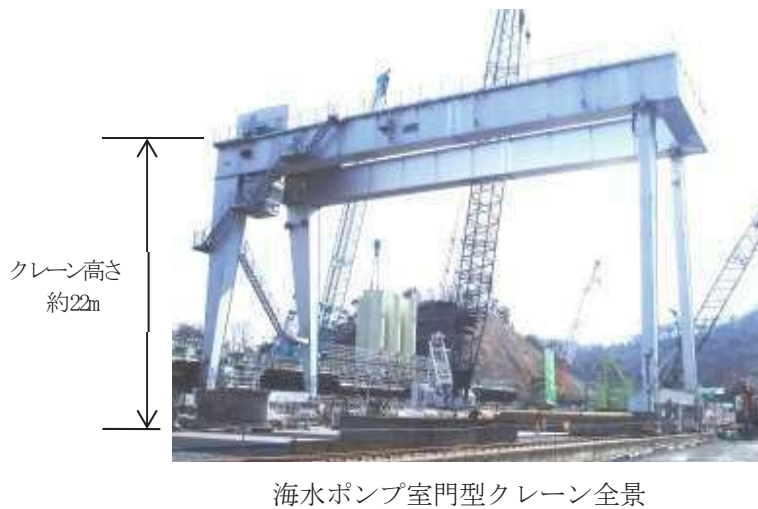
No.	施設名	No.	施設名
1	1号再生純水タンク	33	補助ボイラー変圧器クーラー制御盤（B）
3	Bゲート前検査所	36	1号主復水器電解鉄イオン注入装置電解槽A
4	MH排水ポンプ制御盤	37	1号主復水器電解鉄イオン注入装置電解槽B
5	窒素ガス供給装置制御盤	38	1号主復水器電解鉄イオン供給装置直流電源装置盤
6	窒素貯槽	43	1号排気サイレンサ（A）
7	常時補給用液体窒素蒸発器（送ガス）	44	1号排気サイレンサ（B）
8	常時補給用液体窒素蒸発器（加圧用）	45	1号中央制御室用凝縮機（A）
9	バージ用液体窒素蒸発器	46	1号中央制御室用凝縮機（B）
10	計器収納箱（A）	47	1号CVC F設置エリア用屋外機（A-1）
11	計器収納箱（B）	48	1号CVC F設置エリア用屋外機（A-2）
12	空冷チラーユニット	49	1号CVC F設置エリア用屋外機（B-1）
13	固化剤タンク	50	1号CVC F設置エリア用屋外機（B-2）
14	固化材ポンプ(A)	51	1号給湯系統高置水槽
15	固化材ポンプ(B)	52	1号給水系統高置水槽
16	SOL固化剤タンク水位計架台	53	補助ボイラーサイレンサー
17	屋外作業用分電盤	56	2号原子炉建屋避雷針
18	PLR-VVVF 入力変圧器	57	2号タービン建屋避雷針
20	3号硫酸貯槽	58	1号制御建屋避雷針
21	3号苛性ソーダ貯槽	59	1号空冷チリングユニット
24	軽油タンク(A)(B) 泡消火設備現場盤	60	復水器連続洗浄装置制御盤
25	揚水ポンプ制御盤（No.8）	-	-
26	揚水ポンプ制御盤（No.9）	-	-
27	揚水ポンプ制御盤（No.11）	-	-
28	No.9 揚水ポンプ遠方操作盤	-	-
29	屋外作業用電源盤	-	-
30	泡薬剤タンク	-	-
32	補助ボイラー変圧器クーラー制御盤（A）	-	-

表2 固定状況確認による評価対象一覧表（溶接固定）【6施設】

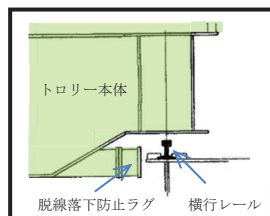
No.	施設名	No.	施設名	No.	施設名
34	補助ボイラー用変圧器A	41	1号吸気フィルタサイレンサ（C）	-	-
35	補助ボイラー用変圧器B	42	1号吸気フィルタサイレンサ（D）	-	-
39	1号吸気フィルタサイレンサ			-	-
40	1号吸気フィルタサイレンサ			-	-

表3 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）【5施設】

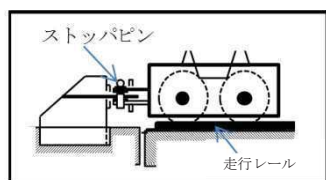
No.	施設名	No.	施設名	No.	施設名
2	1号化学分析室用ポンベ庫	54	渡り廊下	-	-
19	3号タービン建屋	-	-	-	-
22	3号ガスポンベ庫	-	-	-	-
23	除塵装置電源室	-	-	-	-



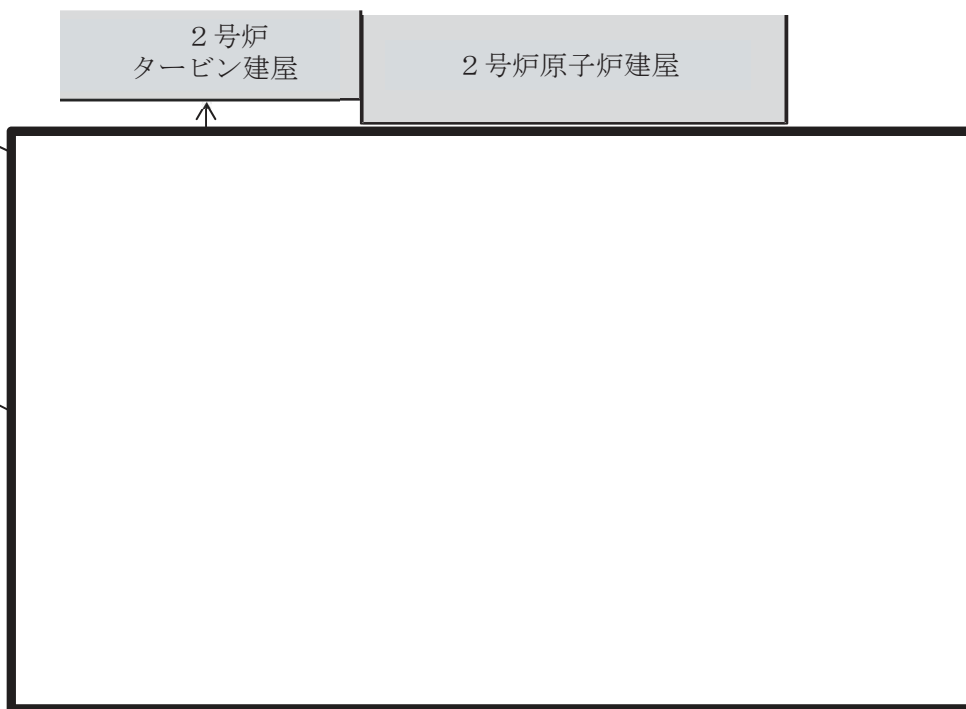
レールクランプ詳細図



トロリー脱線落下防止ラグ 詳細図



クレーンストッパー詳細図



* : 上記配置は海水ポンプ室門型クレーンの通常待機位置を示す

枠囲みの内容は商業機密又は防護上の観点から公開できません

図2 海水ポンプ室門型クレーンの脱線防止対策

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

設計飛来物の選定フローにおいて、「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」は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から、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について検討を行った結果より確認をしている。

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」は女川原子力発電所におけるウォークダウン結果を念頭に状況を示す。

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

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

(1) 屋外屋根の被害状況

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



牛舎の屋根東方向、柱・トタン板は西方向に飛散している

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



カーポート屋根の飛散及び骨組の損傷



カーポート屋根の破損



屋外トイレ屋根の損傷

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



折板の損傷



カーポートの被害

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



周囲の田に散乱した屋根ふき材

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



飛散した鋼板製屋根材



飛散した折板屋根の状況



電線等に引っ掛かった飛来物（鋼板製屋根材）

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

(2) シャッターの被害状況

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

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



シャッターの被害

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



シャッターの破損

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



シャッターの外れ

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



消防団施設のシャッターの被害状況

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



シャッターの被害

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

(3) ガラス窓の被害状況

図1 1～1 6にガラス窓の被害状況を示す。これらより、ガラス窓については、F0～F3, EF5の竜巻において損壊し、分解されていることが確認できる。分解された状態では、小型軽量となっており、設計飛来物である鋼製材もしく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1 3 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1 4 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17に仮設足場の被害状況を示す。これらより、仮設足場については、F2の竜巻において倒壊していることが確認できる。各足場パイプはクランプで固定されているため、足場パイプは容易に分解せず、仮設足場はほぼ組まれた状態で倒壊している。



仮設足場の倒壊

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

2. 女川原子力発電所の屋外屋根，シャッター，ガラス窓，仮設足場の状況

女川原子力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。女川原子力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及び砂利に包含される。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 女川原子力発電所における屋外屋根の状況



図 1 9 女川原子力発電所におけるシャッターの状況



図 2 0 女川原子力発電所におけるガラス窓の状況



図 2 1 女川原子力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）

女川原子力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22～28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22 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23 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 2 4 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 2 5 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 2 6 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 2 7 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. 女川原子力発電所の樹木、フェンスの状況

女川原子力発電所における樹木の状況を図3-2、フェンスの状況を図3-3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3-2 女川原子力発電所における樹木の状況



図3-3 女川原子力発電所におけるフェンスの状況

参考文献

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

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。

空気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。空気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	146.4kJ
貫通限界 厚さ	コンクリート Fc=330kgf/cm ²	0.9cm	2.8cm	22.5cm
	鋼板	0.2mm	0.7mm	27.6mm

※ 設計竜巻風速 100m/s, フジタモデルの風速場を用いた飛散評価手法, 鋼製材: 初期高さを 11.5m とした場合の計算結果

〔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、女川原子力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)

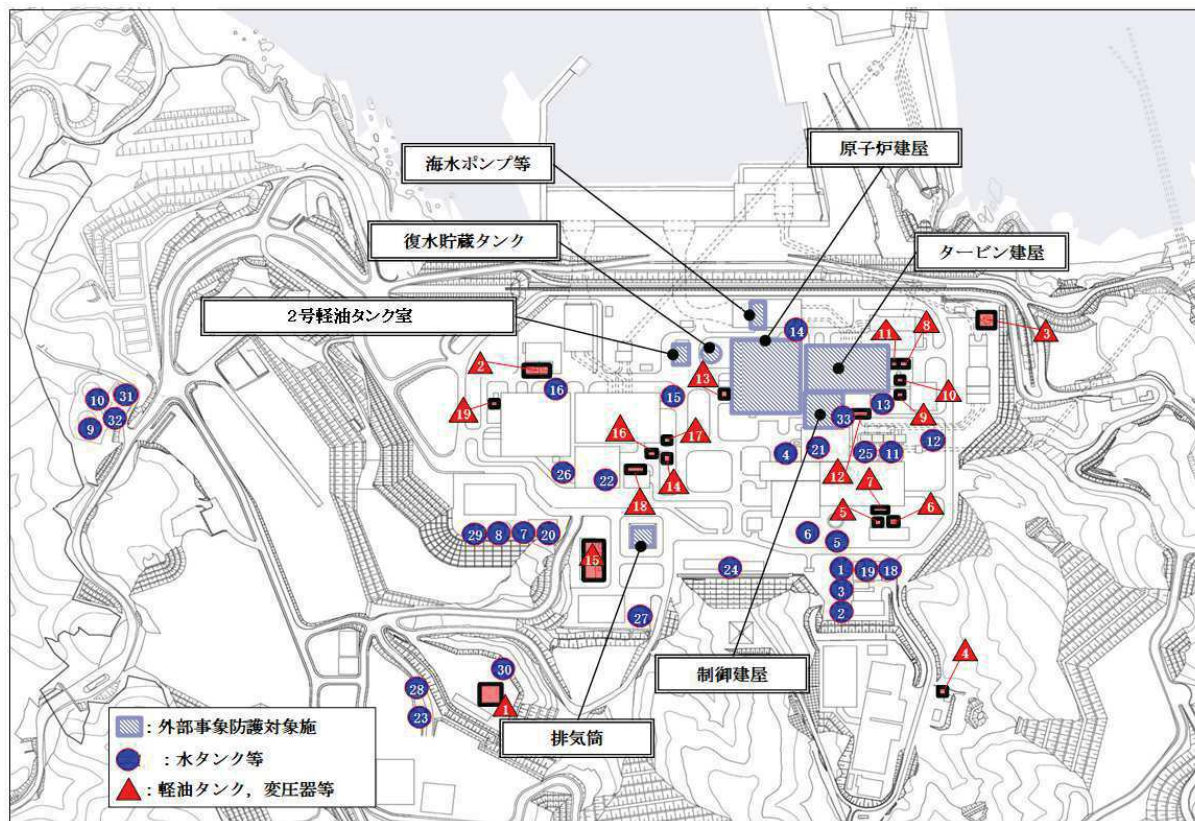
第 3.4.2 図 2006 年に北海道佐呂間町で発生した F3 竜巻による被害状況⁽²⁾⁽³⁾

2. 女川原子力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、女川原子力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、女川原子力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。



水タンク等	①	No.1純水タンク	⑪	1号復水浄化系復水脱塩装置硫酸・苛性ソーダ貯槽	⑳	高架水槽	㉒	ろ過水タンク
	②	No.2純水タンク	⑫	1号差圧調合槽	㉑	高架水槽	㉓	消火水タンク
	③	1, 2号ろ過水タンク	⑬	2号復水浄化系復水脱塩装置硫酸・苛性ソーダ貯槽・計量槽 ^{※1}	㉒	水蓄熱槽		
	④	再生純水タンク ^{※1}	⑭	2号バック入り差圧調合装置	㉓	主復水器用電解鉄イオン注入装置電解槽		
	⑤	No.1サブプレッションプール水貯蔵タンク ^{※1}	⑮	3号硫酸・苛性ソーダ貯槽 ^{※1}	㉔	水蓄熱槽		
	⑥	No.2サブプレッションプール水貯蔵タンク ^{※1}	⑯	3号差圧調合槽	㉕	受水槽		
	⑦	3号純水タンク	⑰	1号給排水薬品タンク類	㉖	受水槽		
	⑧	3号ろ過水タンク	⑱	1, 2号給排水建屋	㉗	燃料小出槽		
	⑨	原水タンク	⑲	3号給排水建屋	㉘	給水タンク		
	⑩	原水タンク	⑳	高置水槽	㉙	配水池		
軽油タンク, 変圧器等	△1	大容量電源装置	△6	1号起動変圧器	△11	2号励磁変圧器	△16	3号所内変圧器
	△2	3号軽油タンク	△7	1号所内変圧器	△12	2号補助ボイラー変圧器	△17	3号励磁変圧器
	△3	1号軽油タンク	△8	2号主変圧器	△13	2号PLR-VVVF変圧器	△18	3号補助ボイラー変圧器
	△4	予備変圧器	△9	2号起動変圧器	△14	3号主変圧器	△19	3号PLR-VVVF変圧器
	△5	1号主変圧器	△10	2号所内変圧器	△15	3号起動変圧器		

※1 運用容量 (0m³) を超過しないよう管理する

第3.4.3図 女川原子力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、鋼製材より運動エネルギー又は貫通力が大きい場合は固縛対策（運用管理）を実施する。

2. 運用管理方針

2.1 運用管理の基準

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

竜巻警戒レベル	発令条件(案)	運用対策(案)
低（注意喚起レベル）	石巻市および女川町で雷注意報が発令	連絡体制の確認
中（対応準備レベル）	対象地域内(下図A)で竜巻発生確度ナウキャストの発生確度2または雷ナウキャストの活動度4が発令	車両、人の退避準備
高（退避レベル）	発電所上空(下図B, C)で竜巻発生確度ナウキャストの発生確度2または雷ナウキャストの活動度4が発令	車両、人の退避

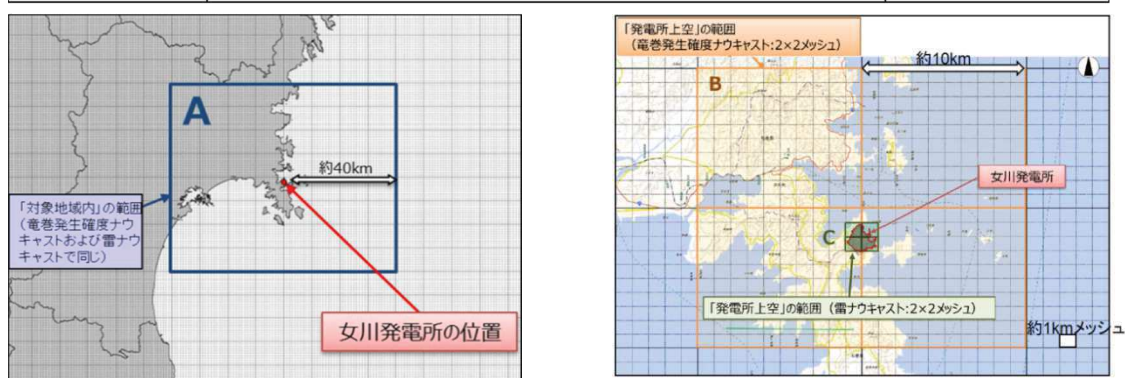


図1 竜巻運用対策の実施基準（イメージ）

2.2 運用管理の対象

運用管理の対象は、「車両」及び「車両以外の物品」に分けて管理を行う。

2.2.1 車両の管理

2.2.1.1 車両の管理に際し考慮する事項

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

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

(1) 車両の飛散の可能性

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

(2) 車両が置かれている場所

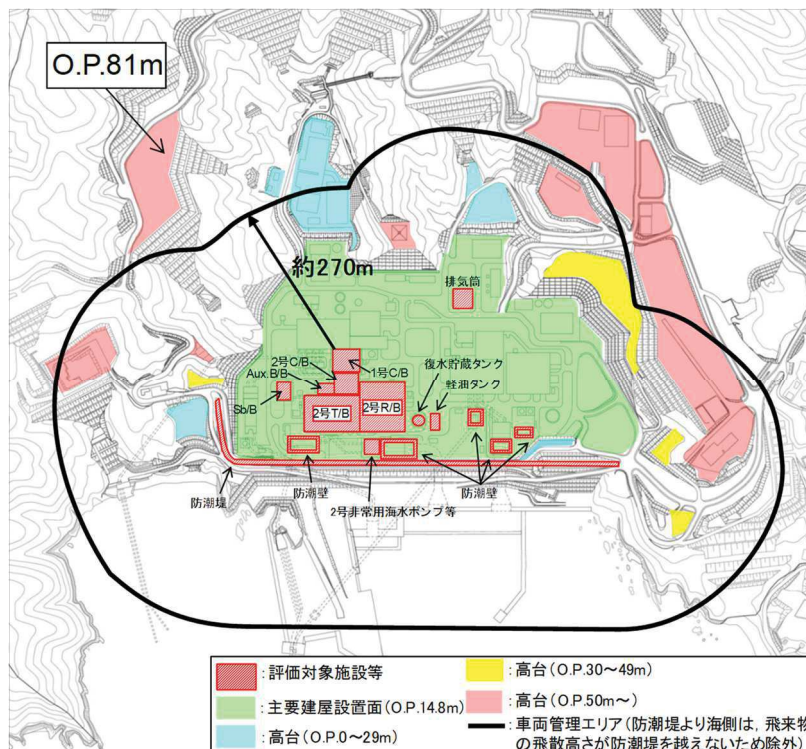
車両が飛散することによって評価対象施設等に衝突する可能性があるエリアを「車両管理エリア」と定め、車両が車両管理エリア内にある場合には、「2.2.2 管理方針」に示す管理を行う。

< 車両管理エリアの考え方（具体的なエリアは図 2 及び図 3 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。

評価対象施設等と車両の位置や高さの関係および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 設置高さは評価対象施設等の周辺で最も高い高台（O.P. 81m）を設定する
- ② 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「軽自動車」を飛来物として選定する
- ③ 最も高い高台（O.P. 81m）から最も飛散距離が大きい車両である「軽自動車」を水平速度が最大となる初期高さ 0m の条件において、フジタモデルで飛散させた場合、最大飛距離は約 270m と算出されることから、評価対象施設等から 270m の範囲を車両管理エリアと設定する



< 条件 >

- ・フジタモデル (高台高さ O.P. 81m)
- ・設計竜巻風速 : 100m/s
- ・飛来物 : 軽自動車

初期高さ [m]	最大速度 (水平) [m/s]	最大速度 (鉛直) [m/s]	最大飛散距離 [m]
0	52.9	29.4	268.4

図 2 車両管理エリア

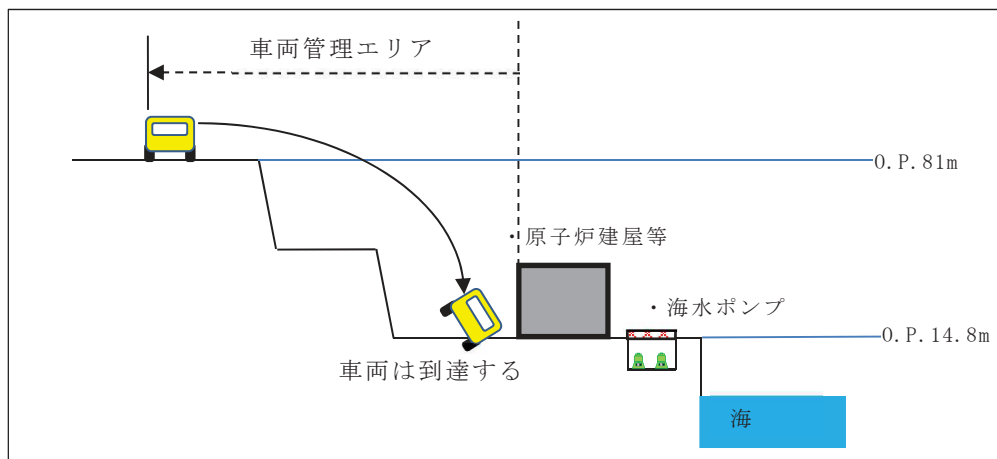


図 3 評価対象施設等と車両の所在位置との高さの関係

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「低」～「高」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「低」時では対策不要だが、竜巻警戒レベル「中」又は「高」時には固縛する、も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）に準備体制確認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「低」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>

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「低」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「低」時では対策不要だが竜巻警戒レベル「中」又は「高」時には固縛する、も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「低」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「中」又は「高」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「低」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	
			平時及び竜巻警戒レベル「低」時	竜巻警戒レベル「中」時及び竜巻警戒レベル「高」時
飛散も横滑りもしない車両	車両管理エリア内外	駐車 停車	対策不要	
飛散はしないが横滑りはする車両	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できていないこと	固縛又は退避 ^{※1}
	車両管理エリア外	駐車 停車	対策不要	
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できていないこと	固縛又は退避
	車両管理エリア外	駐車 停車	対策不要	

※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「低」以前に入域している車両は対象外

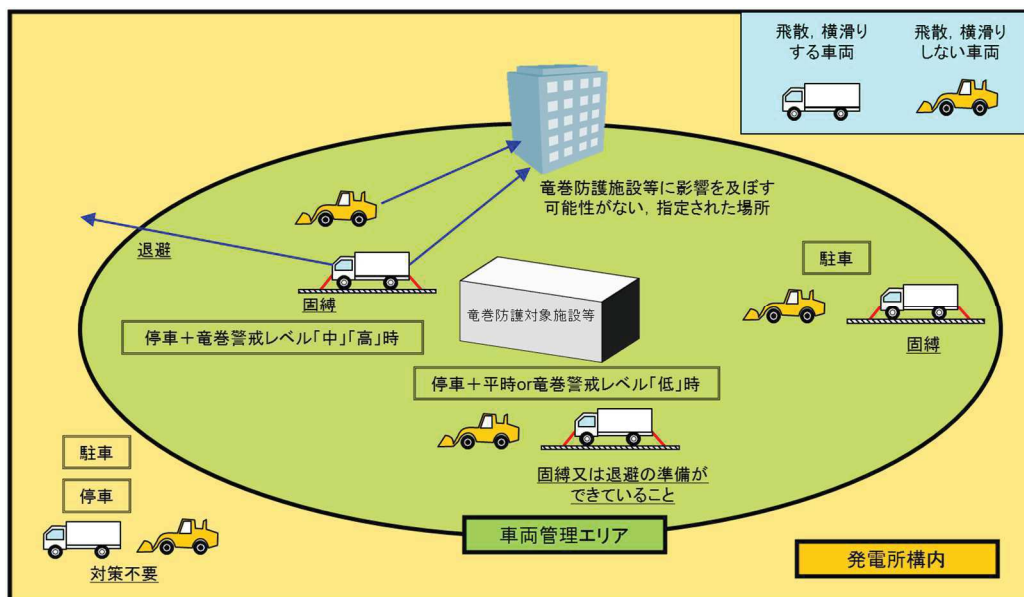


図 3 発電所への入構車両の管理イメージ

2.2.1.3 車両の退避場所

車両の退避について、退避エリア候補地①及び②へ退避する場合の退避ルートを図4で例示する。

構内へ入城する車両のうち、原子炉建屋等の防護対象施設周りに駐車する車両は、工事用車両が多く、原則、固縛対策を行うことで飛来物化しないと考えられることから、評価対象施設の近辺で最も避難する車両が多いと考えられる事務新館を基点として考える。

退避エリア候補地①及び②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ある30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

	事務新館からの距離	想定時間※
退避エリア候補地①	約 1.1km	約 14分
退避エリア候補地②	約 1.9km	約 24分

※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。

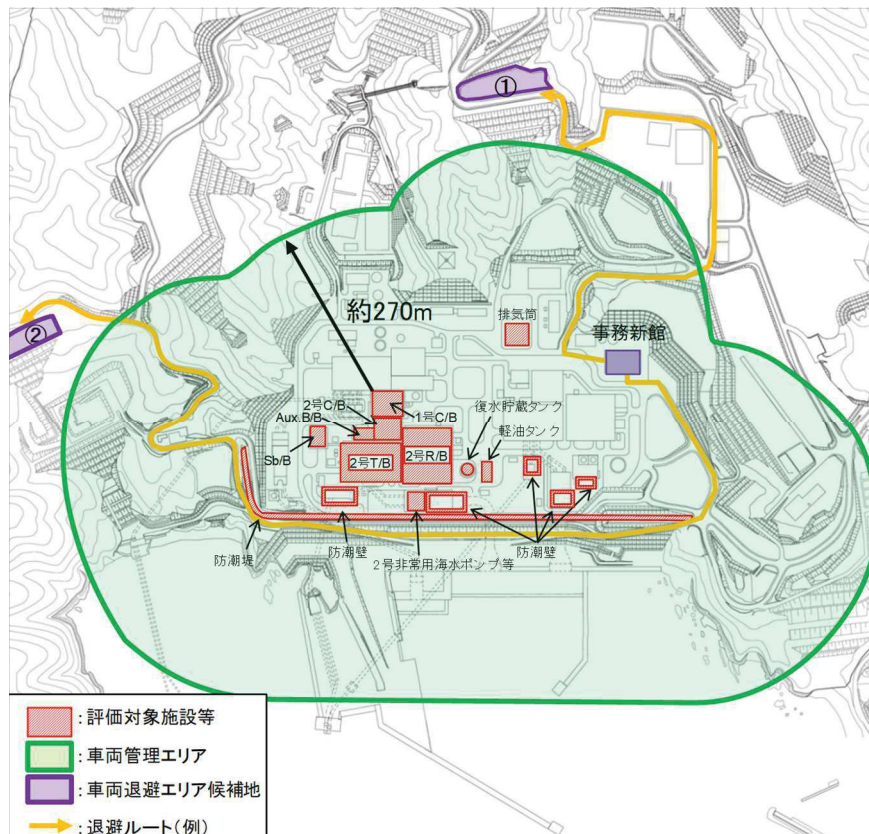


図4 車両管理エリア及び車両退避エリア

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。

評価対象施設等と物品の位置や高さの関係および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 設置高さは評価対象施設等の周辺で最も高い高台（O.P. 81m）を設定する
- ② 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「コンテナボックス」を飛来物として選定する
- ③ 最も高い高台（O.P. 81m）から最も飛散距離が大きい物品である「コンテナボックス」を水平速度が最大となる初期高さ 0mの条件において、フジタモデルで飛散させた場合、最大飛距離は約 300mと算出されることから、評価対象施設等から 300m の範囲を物品管理エリアと設定する

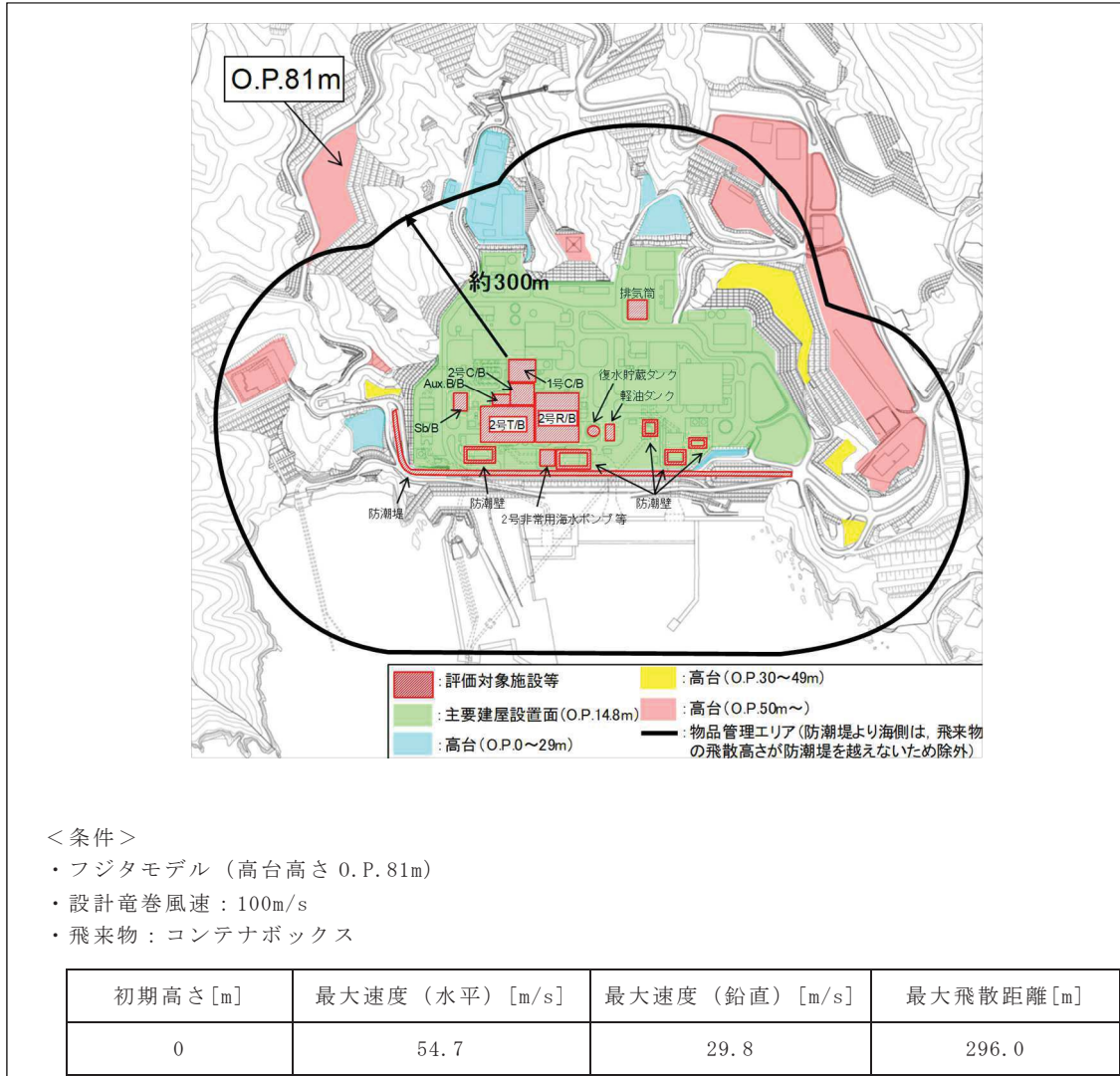


図5 物品管理エリア

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「低」～「高」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、準備作業開始時に移行した場合には速やかに再固定・再固縛が可能なるよう、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

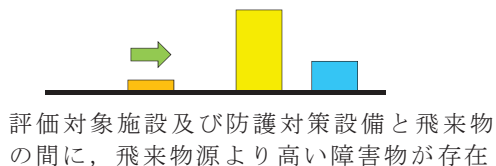
<横滑りへの対策が不要となる場所>

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「低」時以前に、作業等で既に搬入している物品を対象とする。

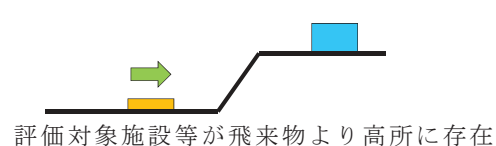
①障害物（イメージ）



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「低」～「高」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「中」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「低」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「低」時	竜巻警戒レベル「中」 時 竜巻警戒レベル「高」 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 が横滑りはす 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}	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「低」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経過レベル「低」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 設計飛来物の影響を超えるか（運動エネルギー/貫通力）
- ③ 評価対象施設等に到達し得るか（飛散高さ/障害の有無/離隔距離）

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。

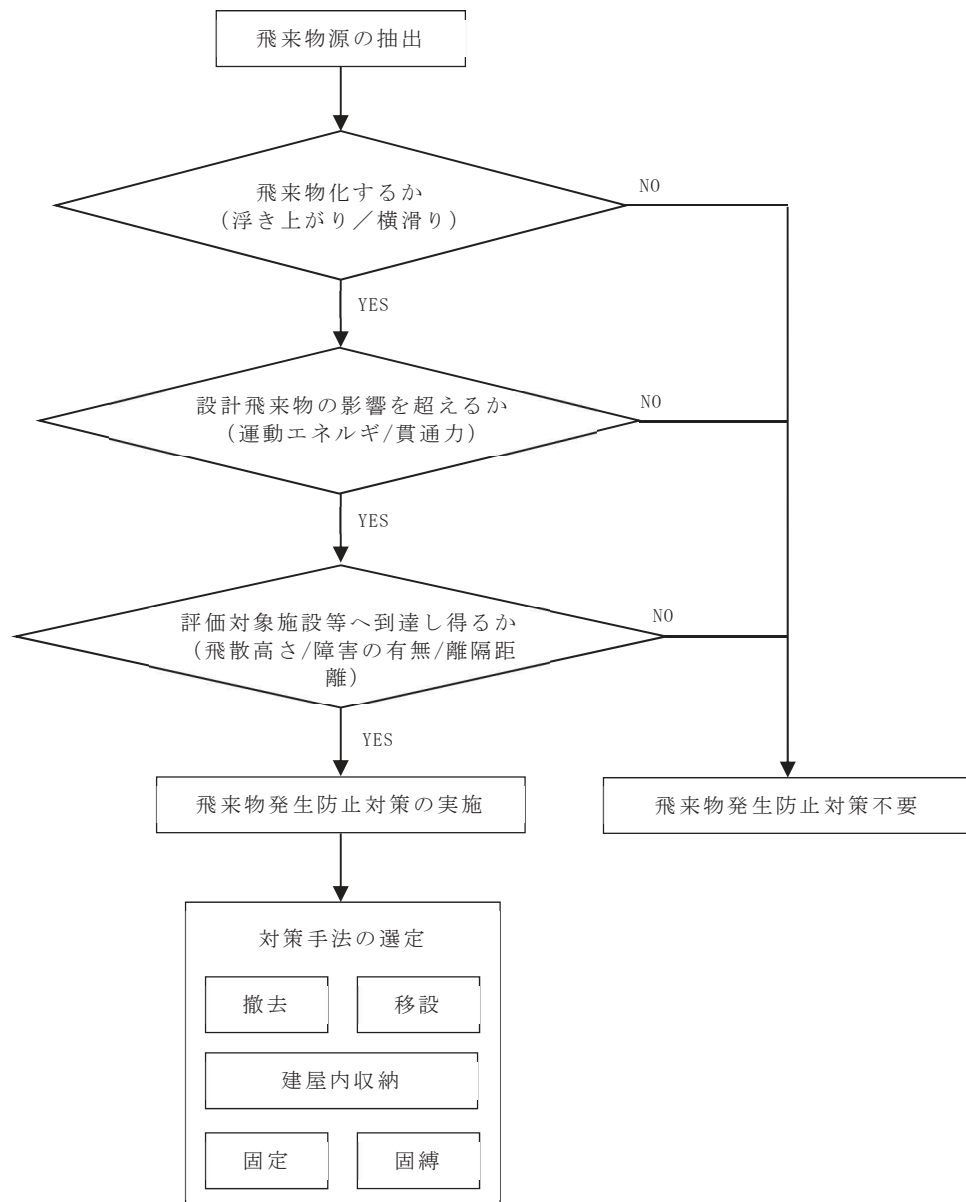


図7 飛来物発生防止対策実施フロー

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、固定、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（コンテナ、車両）を例として示す。

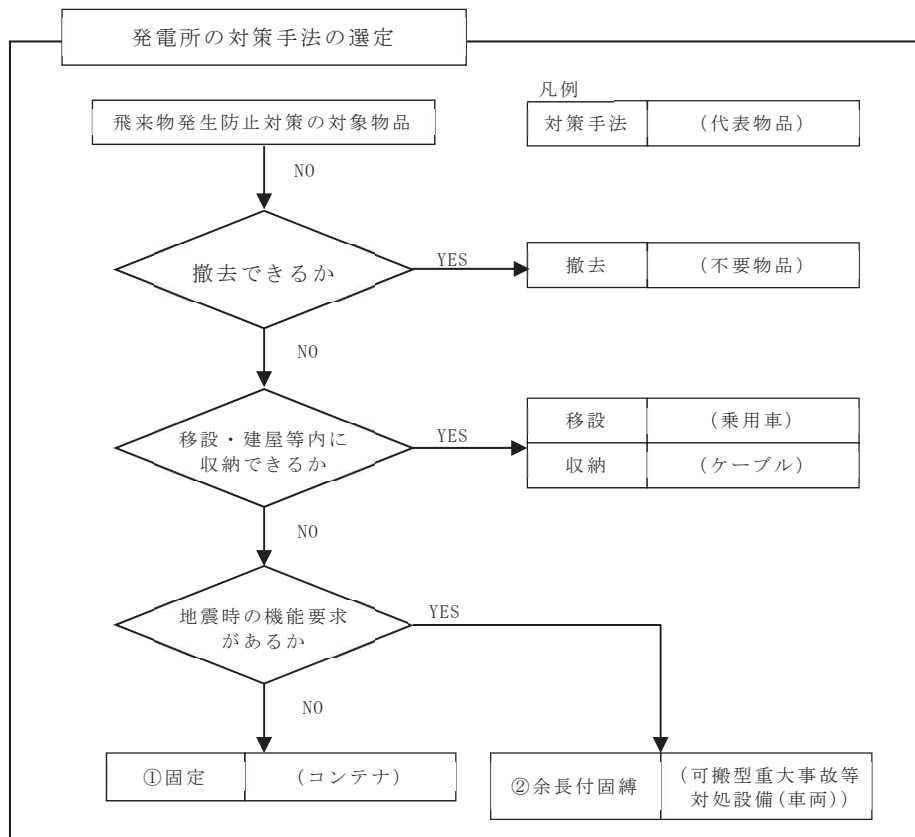


図8 飛来物発生防止対策選定フロー

<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（ナイロンスリング等）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（スリング、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）

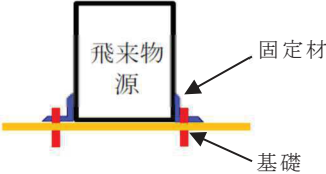
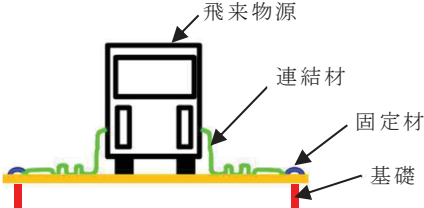
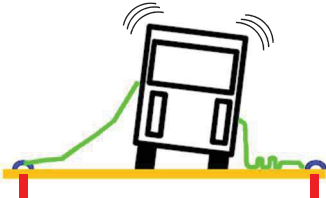
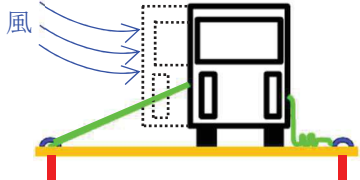
手法	対策の概要図
①固定	<p>飛来物源に固定金具を取り付けて固定</p> 
②余長付固縛	<p>【通常時】 飛来物源を連結材（ナイロンスリング等）を用いて固縛（動き代がある）</p> 
	<div style="display: flex; justify-content: space-around;"> <div style="width: 45%;"> <p>【地震時（イメージ）】</p>  <p>飛来物源が地震の揺れを受け、連結材の余長範囲内で動く（揺れる）</p> </div> <div style="width: 45%;"> <p>【竜巻時（イメージ）】</p>  <p>飛来物源が竜巻の風を受け、連結材の余長範囲内で動く</p> </div> </div>

図9 固縛装置の構成要素

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

設計荷重は、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。

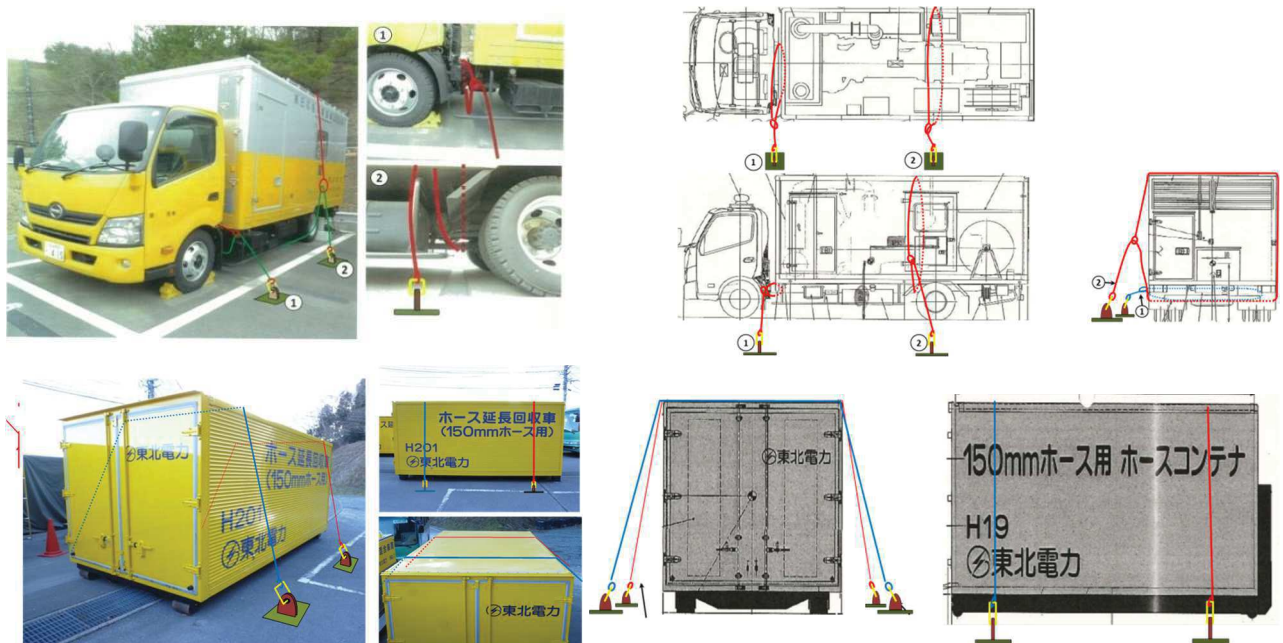


図 10 固縛装置のイメージ

以上

設計竜巻荷重と積雪荷重の考慮について

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る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1-1「女川原子力発電所2号炉 外部事象の考慮について」より抜粋）

表1 竜巻および積雪荷重の性質

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)	1.9×10^{-6}
従荷重	積雪	小	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

*2 100年再現期待値

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) + 小 (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）

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）及び高圧炉心スプレイ補機冷却海水ポンプ（電動機、配管等を含む）（以下、「非常用海水ポンプ等」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非常用海水ポンプを防護する観点で、以下の要求事項を満足する必要がある。

2.1 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、設計飛来物が非常用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構造体が崩壊及び落下せず、非常用海水ポンプ等を損傷させないこと。

2.2 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構造体が崩壊及び落下せず、非常用海水ポンプ等に波及的影響を及ぼさないこと。

2.3 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、非常用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、海水ポンプ室補機ポンプエリアに設置する。防護対象である非常用海水ポンプ等は、図1に示すように、ピット構造である海水ポンプ室補機ポンプエリア内の全域に及ぶことから、ピット開口部の上面に設置する。

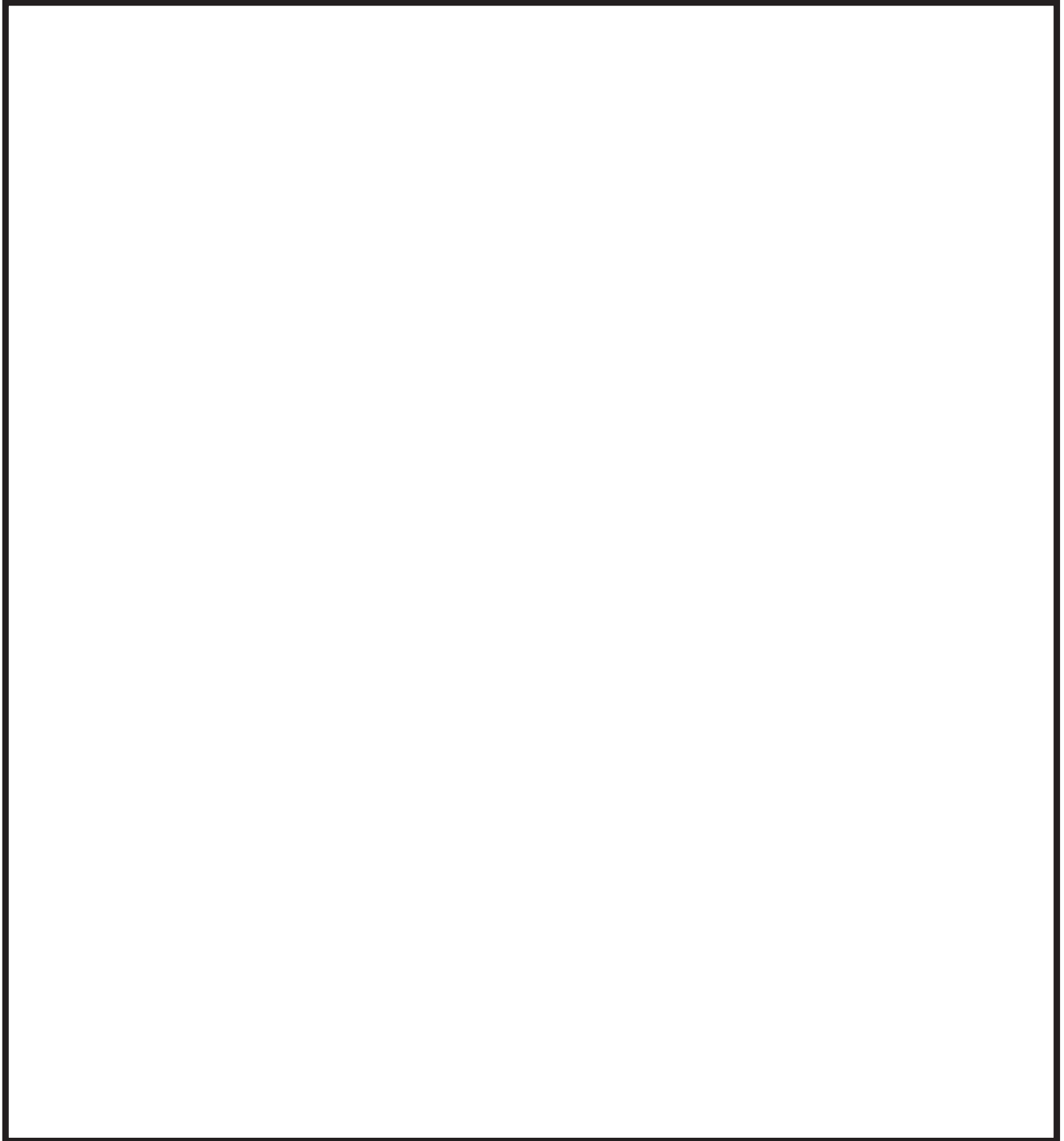


図1 海水ポンプ室補機ポンプエリアの外形図

3.1.2 構造概要

竜巻防護ネットは海水ポンプ室補機ポンプエリア開口部に対し、フレームに取り付けたネット（金網）を配置することで、設計飛来物の侵入を阻止し、非常用海水ポンプ等を防護する構造である。

海水ポンプ室補機ポンプエリアの隔壁（南側）は壁厚が薄くフレームを支持できないため、フレーム支持用の大梁を設置し、この大梁と隔壁（北側）天面にてネット及び防護板を取り付けたフレームを支持する。

6条(竜巻)－別添1－添付3.7-2

また、大梁とフレームとの接続部には可動支承を設置し、ブラケットと大梁の接続部及び隔壁（北側）とフレームとの接続部にはゴム支承を設置する。

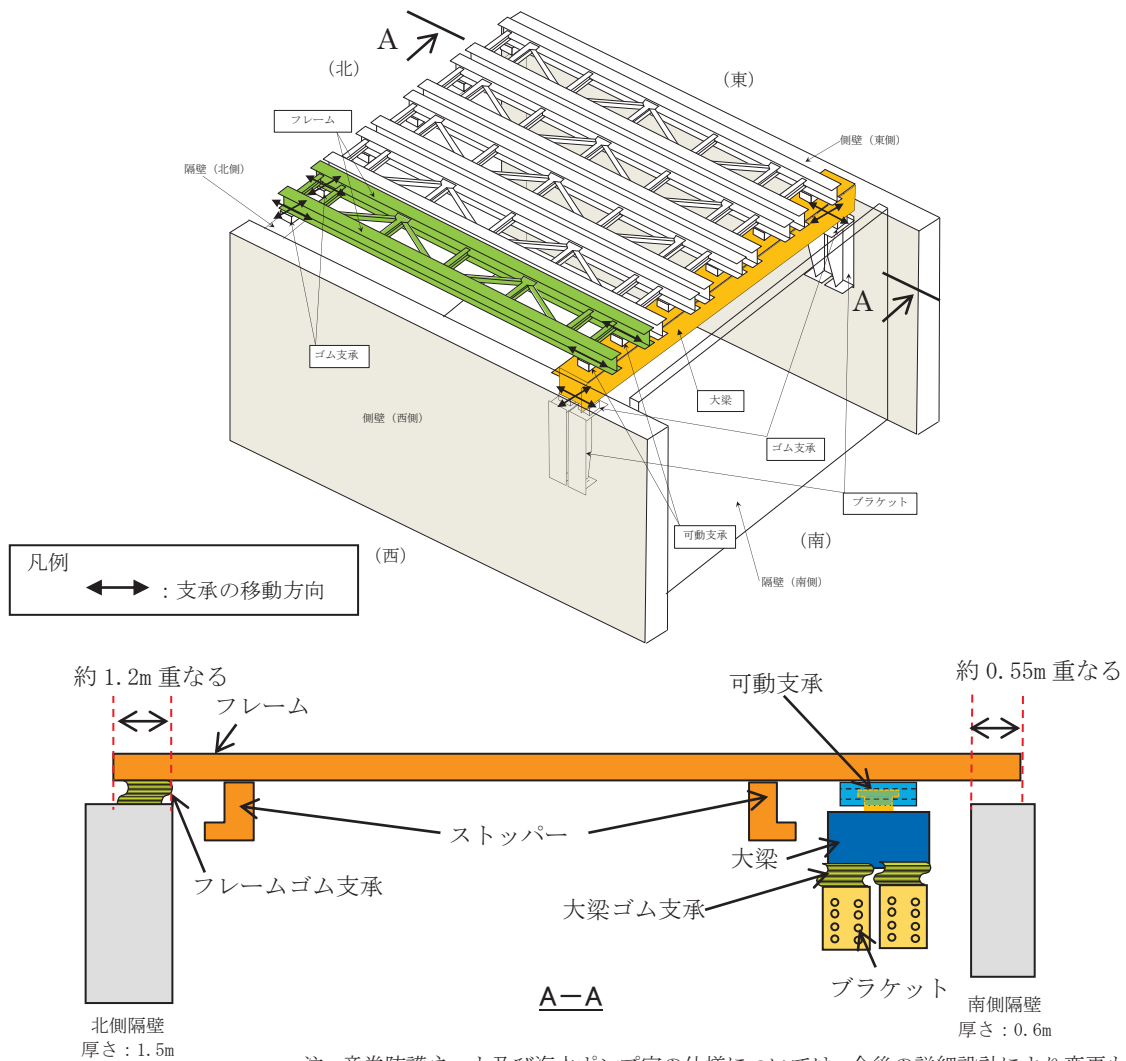
ゴム支承は、地震により生ずる応力及び反力を低減・分散させることを目的としており、水平方向の固有周期を長周期側に移動させ応答を下げるとともに、壁面へ伝達させる荷重を分散させる効果を期待する。

可動支承は、温度変化によるフレームの伸縮を吸収し、変形による荷重発生を防ぐため、水平変位に追従する機能を有する。

また、フレームにはストッパーを取り付けており、フレームを支持するゴム支承に期待しない場合でも、竜巻防護ネットが落下せず、非常用海水ポンプ等に波及的影響を与えない設計とする。

フレームは海水ポンプ室補機ポンプエリアの北側隔壁（厚さ 1.5m）に対して約 1.2m 重なる構造とし、南側隔壁（厚さ 0.6m）に対しても約 0.55m 重なる構造とし、海水ポンプ室補機ポンプエリア落下しない構造とする。

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。



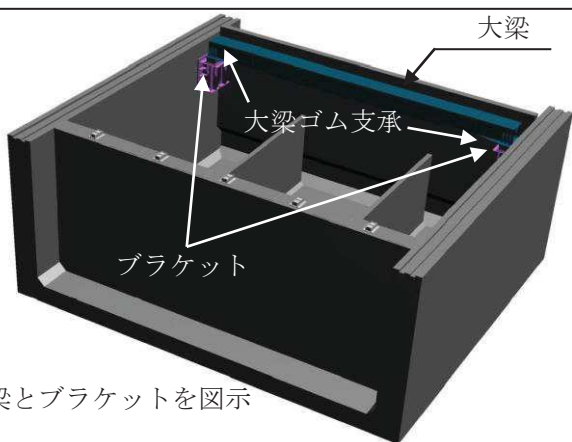
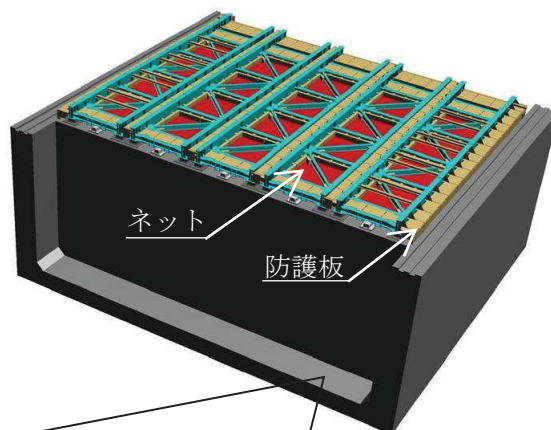
注：竜巻防護ネット及び海水ポンプ室の仕様については、今後の詳細設計により変更もありえる

図 2 竜巻防護ネットの概要図

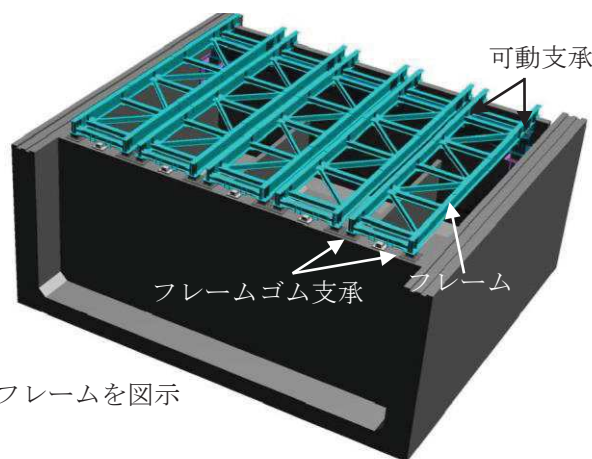
6 条(竜巻)－別添 1－添付 3.7－3

海水ポンプ室補機ポンプエリア

竜巻防護ネット取付状態



大梁とブラケットを図示



フレームを図示

枠囲みの内容は商業機密又は防護上の観点から公開できません

図3 竜巻防護ネットの概要図（北西側から見た場合）

表1 竜巻防護ネットの仕様

総質量	約 500ton	
全体形状	約 29m（東西方向）×約 24m（南北方向） 高さ 約 1m	
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
フレーム	数量	5組
	寸法	長さ×幅×高さ：約 23m×4.3m×1m
	主要材料	SM490A, SM400A, SS400
大梁	寸法	長さ×幅×高さ：約 26m×1.5m×1.5m
	主要材料	SM520B, SM490A
ゴム支承	仕様	水平力分散型
	数量	大梁用：4個（2組（2個/組）） フレーム用：10個（5組（2個/組））
可動支承	数量	フレーム用：10個（5組（2個/組））
ブラケット	材料	SM490A
防護板	材料	SM400A, SS400
耐震クラス	—	C

6条(竜巻)－別添1－添付3.7-4

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て、構造強度評価を実施し、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)」を組合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。

$$\begin{aligned} W_{T1} &= W_P \\ W_{T2} &= W_W + 0.5 \cdot W_P + W_M \end{aligned}$$

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 100m/s の風圧力による荷重を考慮する。

(b) 設計飛来物による衝撃荷重 (W_M)

設計竜巻の最大風速100m/s による設計飛来物の衝撃荷重は、砂利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室補機ポンプエリア（東西：約29m、南北：約24m）の上部全面に配置し、地上からの高さは約1mである。また、竜巻防護ネットの周囲は北側を防潮壁、東側を防潮堤で囲まれており、西側は約17mを隔てて、原子炉建屋が設置されている。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ると、飛来物の衝突方向は鉛直方向が支配的であると考えられる。水平方向からの衝突は、鉛直方向からの衝突に比べて起こりにくいと考えるが、設計飛来物の最大水平速度が大きいことを踏まえて、原子炉建屋との間の水平方向（西側）からの衝突も考慮する。

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	46.6	16.7
砂利	縦×横×高さ 0.04×0.04×0.04	0.2	59.3	22.6

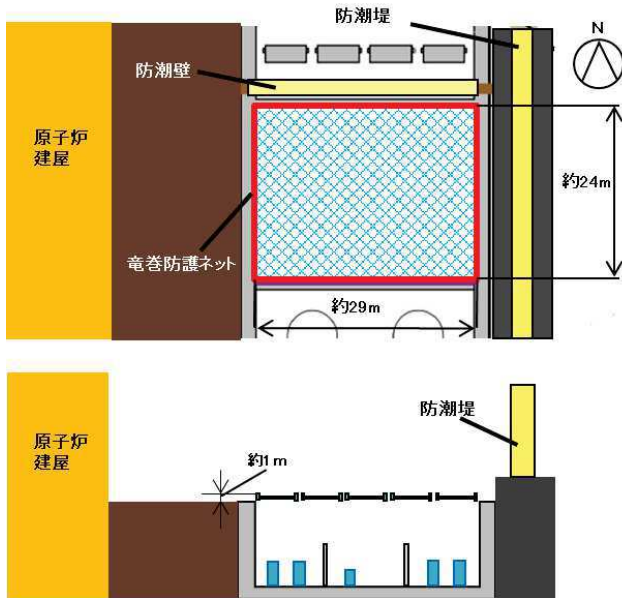


図4 竜巻防護ネットの配置 (平面図)

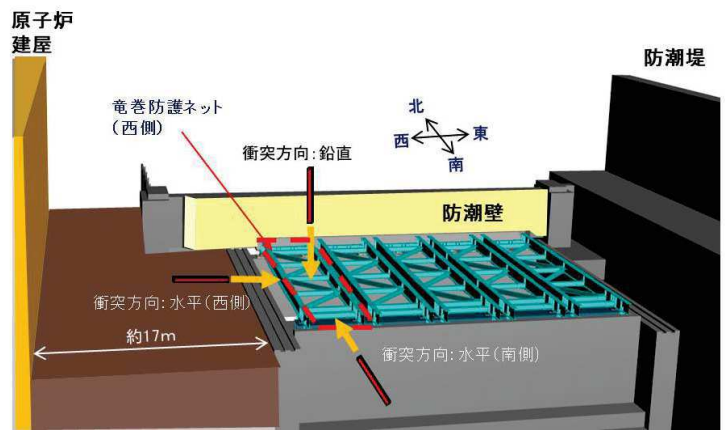


図5 竜巻防護ネットの配置 (俯瞰図)

(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

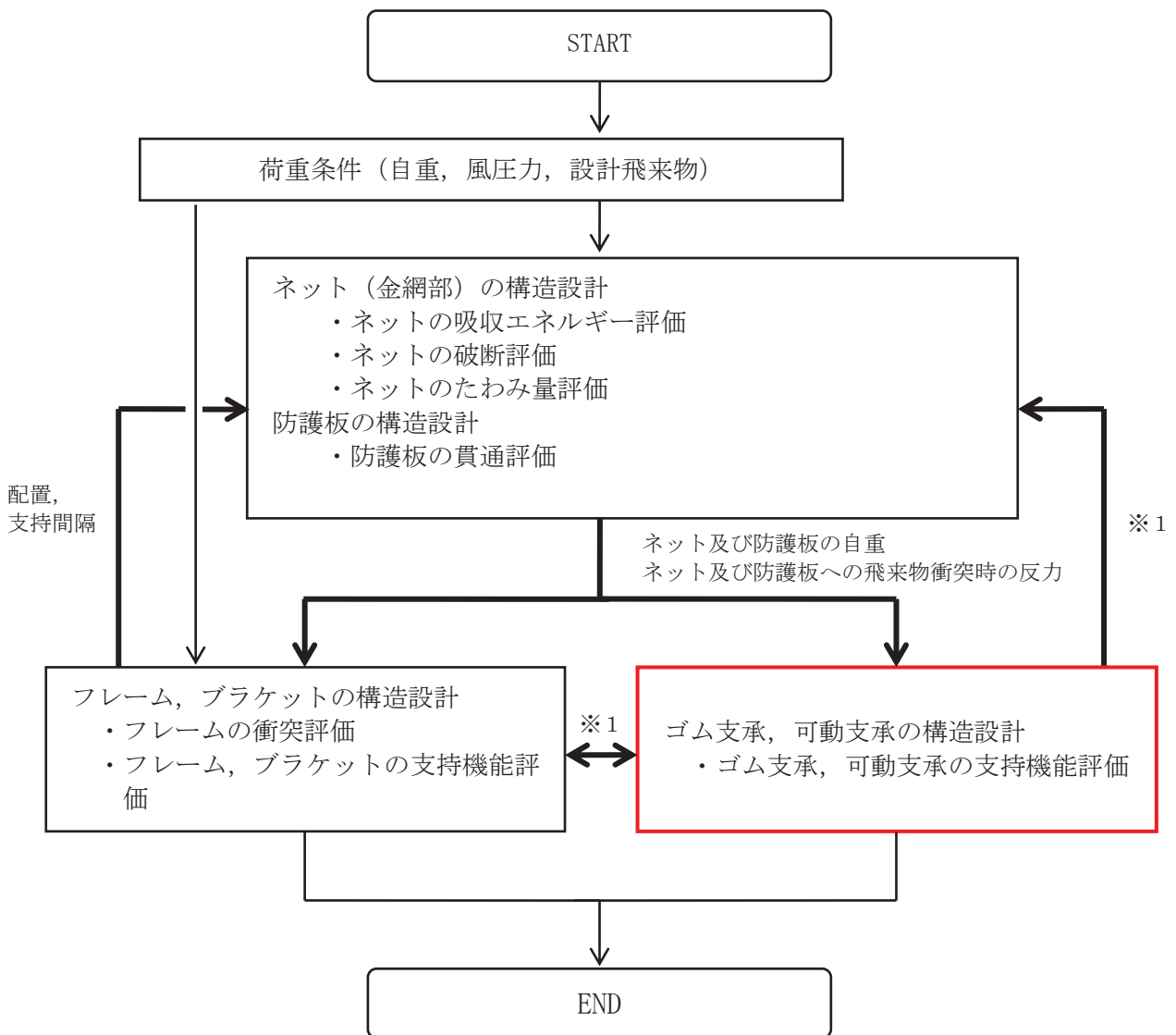
「2. 竜巻防護ネットに対する要求事項」を踏まえて、設置許可基準規則の各条文（第4条、第6条）に対する竜巻防護ネットの設計方針を表4のとおり整理した。

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	上位クラスである非常用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、内包する非常用海水ポンプ等が安全機能を損なわないよう、設計飛来物が非常用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、非常用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。竜巻防護ネットの構造の特徴である、ゴム支承、可動支承の採用による設計上考慮すべき事項については、適切に設計へ反映する。



- 構成要素の評価条件
- 異なる構成要素への評価結果アウトプット
- ◻ 竜巻防護ネットの構造設計の特徴
- ※1 ゴム支承, 可動支承による設計への反映事項

図6 竜巻防護ネットの設計フロー

3.3.2 竜巻防護ネットに関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。

支持部材であるゴム支承は、竜巻防護ネットの耐震設計の観点から地震（4条）のアイソレート機能^{*}を要求するものであるが、竜巻（6条）では、アイソレート機能の要求はなく、支持機能のみが機能要求である。

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）		—	<ul style="list-style-type: none"> 設計飛来物の非常用海水ポンプ等への到達を防止する
防護板			
支持部材	フレーム	<ul style="list-style-type: none"> ネット（金網部）及び防護板を支持する 	<ul style="list-style-type: none"> ネット（金網部）及び防護板を支持する 設計飛来物の非常用海水ポンプ等への到達を防止する
	大梁	<ul style="list-style-type: none"> フレーム及び可動支承を支持する 	<ul style="list-style-type: none"> フレーム及び可動支承を支持する
	ブラケット	<ul style="list-style-type: none"> 大梁を支持する 	<ul style="list-style-type: none"> 大梁を支持する
	フレームゴム支承	<ul style="list-style-type: none"> フレームを支持する（ゴム支承のアイソレート機能[*]により竜巻防護ネットの固有値をやや長周期化することで、海水ポンプ室への反力を低減） 	<ul style="list-style-type: none"> フレームを支持する（ゴム支承のアイソレート機能[*]を期待しない）
	大梁ゴム支承	<ul style="list-style-type: none"> 大梁を支持する（ゴム支承のアイソレート機能[*]により竜巻防護ネットの固有値をやや長周期化することで、海水ポンプ室への反力を低減） 	<ul style="list-style-type: none"> 大梁を支持する（ゴム支承のアイソレート機能[*]を期待しない）
	可動支承	<ul style="list-style-type: none"> フレームを支持する 	<ul style="list-style-type: none"> フレームを支持する
	ストッパー	—	<ul style="list-style-type: none"> フレームを支持する

※：水平方向に上部構造を柔らかく支持することで、固有周期を長くし、地震力を低減すること（参考文献：道路橋支承便覧）

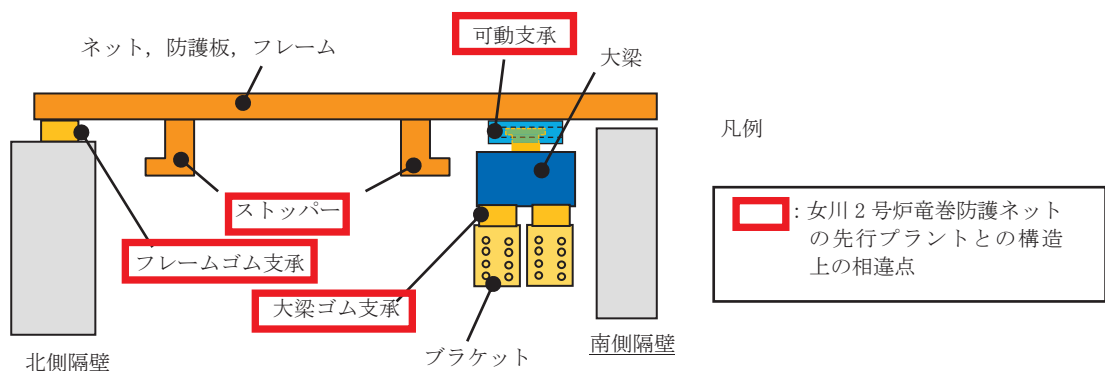


図7 竜巻防護ネットの構造（イメージ）

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。なお、先行プラントとの設計方針の比較について別紙1に整理する。

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）		ネットは、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、飛来物が非常用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、非常用海水ポンプ等の機能喪失に至る可能性がある飛来物が非常用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
防護板		防護板は、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、飛来物が非常用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、非常用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	フレーム	支持部材は設計竜巻の風圧力による荷重、飛来物による衝撃荷重及びその他の荷重に対し、飛来物が非常用海水ポンプ等へ衝突することを防止するために、飛来物が支持部材を構成する主要な構造部材を貫通せず、上載するネット及び防護板を支持する機能を維持可能な構造強度を有し、非常用海水ポンプ等に波及的影響を与えないために、支持部材を構成する部材自体の転倒及び脱落を生じない設計とする。	貫通評価
	大梁		支持機能評価
	ブラケット		
	フレームゴム 支承		
	大梁ゴム支承		
	可動支承		
	ストッパー		

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、非常用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

限界吸収エネルギー ^{*2}	170 (kJ)
設計飛来物の衝突エネルギー (鋼製材：135kg, 速度 16.7m/s)	19 (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、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。

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

ネット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、ワイヤーロープを通じてフレームに伝達する。

ネットを取り付けるフレームは、主桁、横補強材、ブレースで構成され、主桁と横補強材で区切られるセル毎にネットを支持する。1台のフレームに対して、セルは4つとし、5台のフレームで海水ポンプ室のほぼ全域を覆う構造とする。ネット（金網部）のフレーム取付け概要を図8に示す。

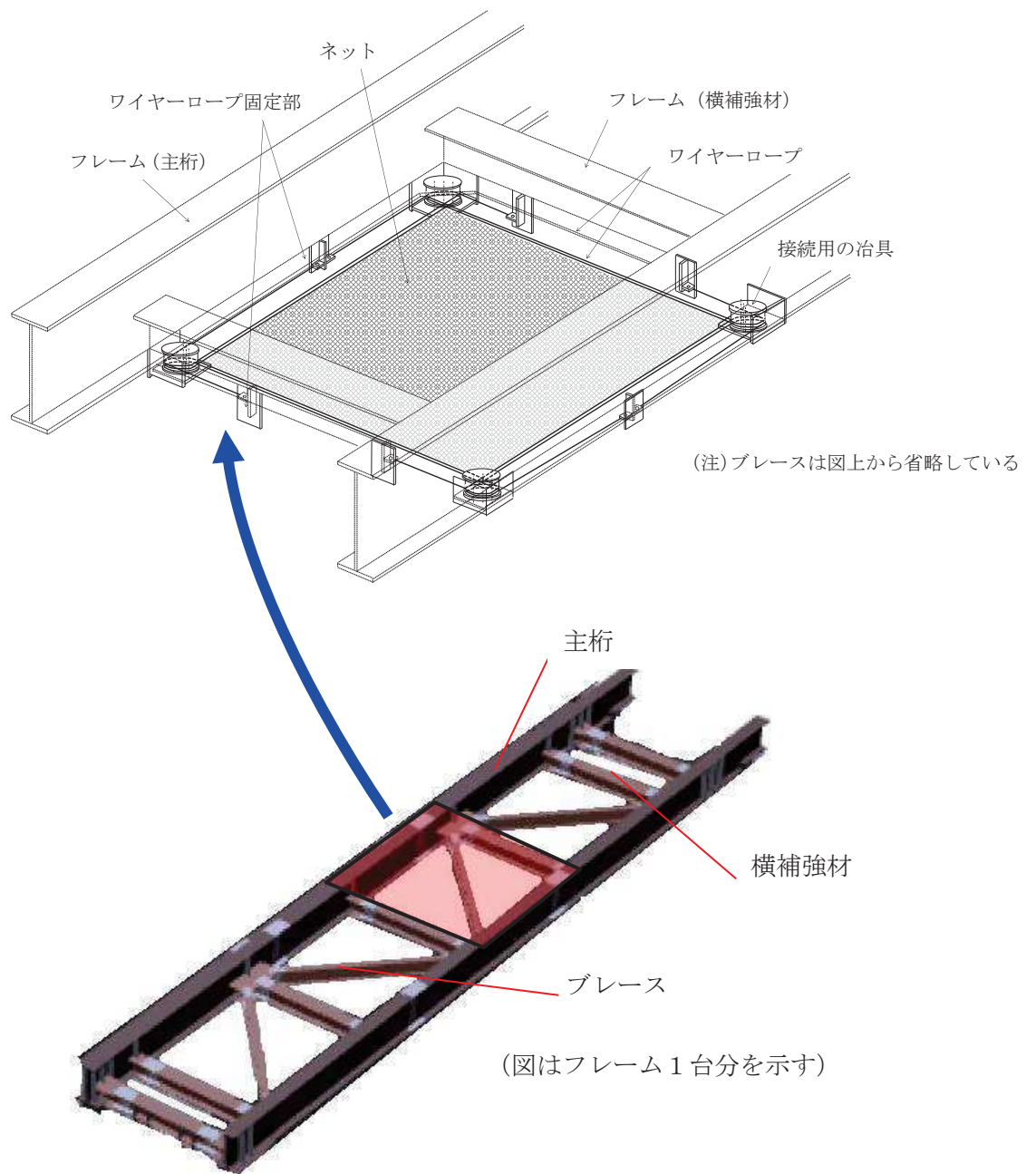


図 8 ネット（金網部）のフレーム取付け概要図

3.5 フレーム，大梁の構造設計

3.5.1 基本設計

竜巻防護ネットのフレームは，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（金網部）や防護板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，防護板を支持可能な構造設計とする。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とする。

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，非常用海水ポンプ等への波及的影響を与えることのない設計とするとともに，海水ポンプ室補機ポンプエリアの壁部材等に対して，海水ポンプ室補機ポンプエリアの強度を踏まえた荷重支持位置を考慮することにより，耐震安全性を確保する。

3.5.2 構造設計

ネット（金網部）及びフレームで発生した荷重は，海水ポンプ室補機ポンプエリアの壁面に伝達する構造とする。

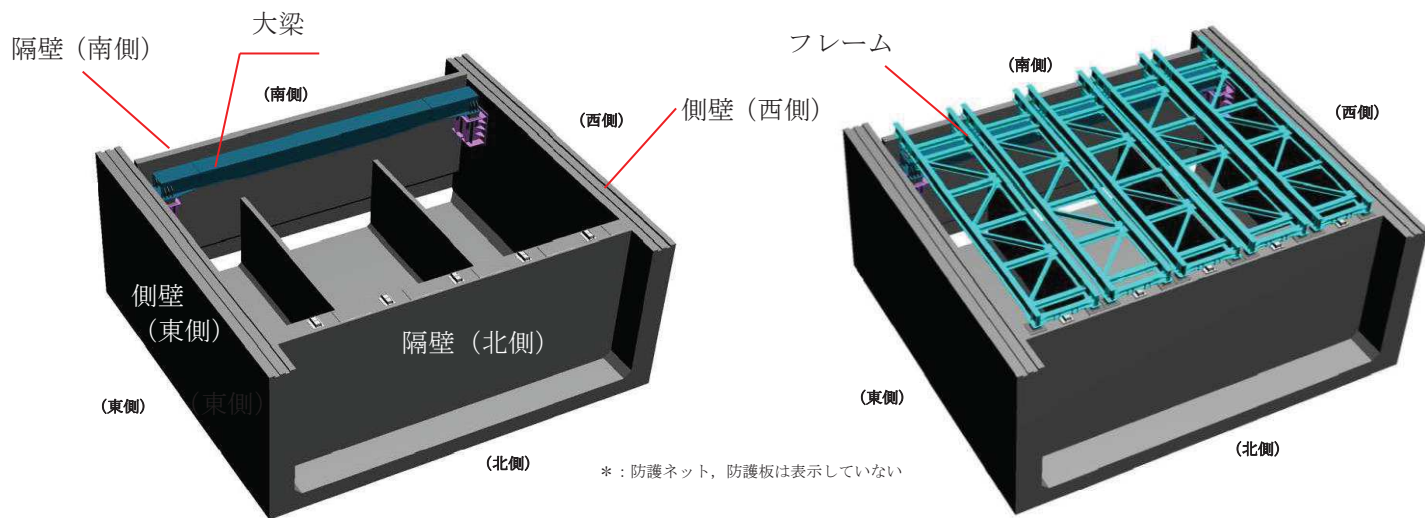
海水ポンプ室の壁面のうち，隔壁（南側）は厚さ 0.6m であり，荷重に対して十分な強度を確保できない可能性があるため，十分な厚み（厚さ 2m）がある側壁（東側）及び側壁（西側）にブラケットを取付け，大梁を設置することで，フレームを支持する。もう一方の支持は厚さ 1.5m の隔壁（北側）にて実施する。

以上により，十分な厚みがあり強度が確保できる隔壁（北側）と側壁（東側，西側）で荷重を受ける構造とする。

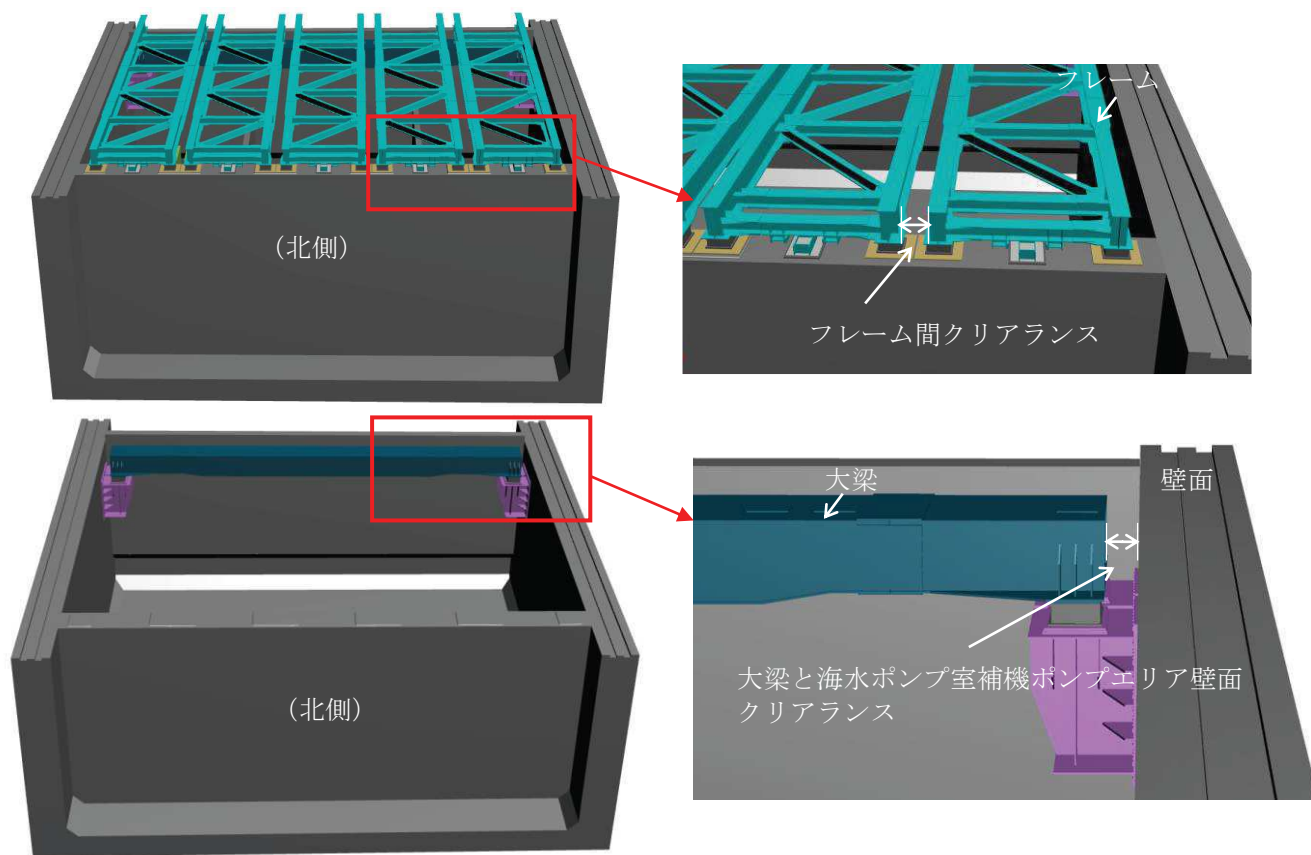
ゴム支承，可動支承に支持されているフレーム，ゴム支承に支持されている大梁は，地震力等によって水平方向の変位が生じることから，他の設備との干渉について考慮する必要がある。そのため，フレーム間及びフレームや大梁と海水ポンプ室補機ポンプエリア壁面との間に地震時に発生する変位を踏まえてクリアランスを確保する設計とする。

また，フレームを支持するゴム支承に期待しない場合でも竜巻防護ネットが非常用海水ポンプ等に落下しないように，フレーム等にストッパーを取り付けフレームの水平方向移動を拘束し，竜巻防護ネットの落下を防止する設計とする。

フレーム，大梁の設置状況を図 9 に示す。



フレーム, 大梁の設置状況



フレーム, 大梁のクリアランス例

図9 フレーム, 大梁の設置状況

3.6 ゴム支承，可動支承の構造設計

3.6.1 基本設計

地震によるフレーム，大梁の発生応力及び海水ポンプ室補機ポンプエリア壁面への支点反力を低減・分散させることを目的として，支持部にはゴム支承を採用する。また，フレームと大梁の接続部には，温度変化によるフレームの伸縮を吸収し，変形による荷重発生を防ぐため，水平変位に追従する可動支承を設置する。

ゴム支承を用いることの効果としては，以下のとおり。

- ・竜巻防護ネットの水平方向の固有周期を長周期側に移動させることで，応答を下げるができる。
- ・大梁の両端で水平力を支持し，海水ポンプ室壁面への荷重を分散することができる。

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，非常用海水ポンプ等への波及的影響を与えることのない設計とする。

3.6.2 構造設計

ゴム支承はフレームと隔壁（北側）の接続部及び大梁とブラケットの接続部に設置する。

フレームと隔壁（北側）の接続部は，フレーム1基に対して，隔壁（北側）の天面に設置した2個のゴム支承を取り付ける構造とする。（隔壁（北側）には計10個のゴム支承を設置）

大梁の支持は，片側1箇所あたり2基のブラケットを設置し，各ブラケットの上に1個のゴム支承を設置する。（ブラケットには計4個のゴム支承を設置）

大梁とフレームの接続部は可動支承を用いる。可動支承はフレーム1基に対して，2個の可動支承で支持する。（大梁には計10個の可動支承を設置）可動方向は南北方向のみである。

支持構造模式図を図10，ゴム支承及び可動支承概略図を図11に示す。

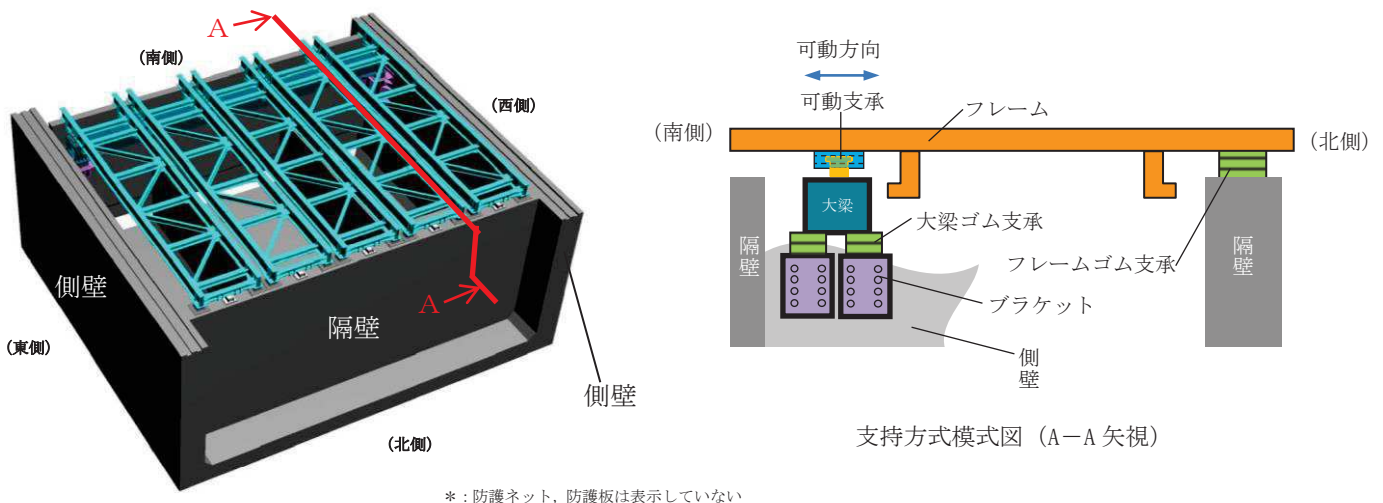
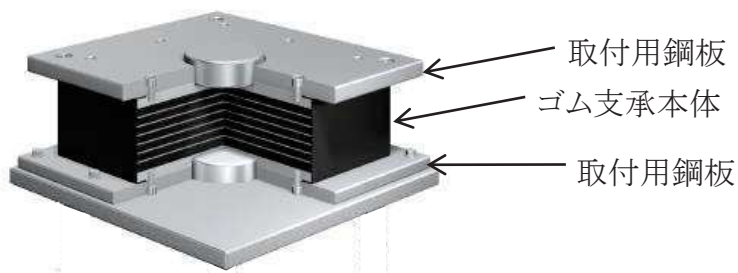
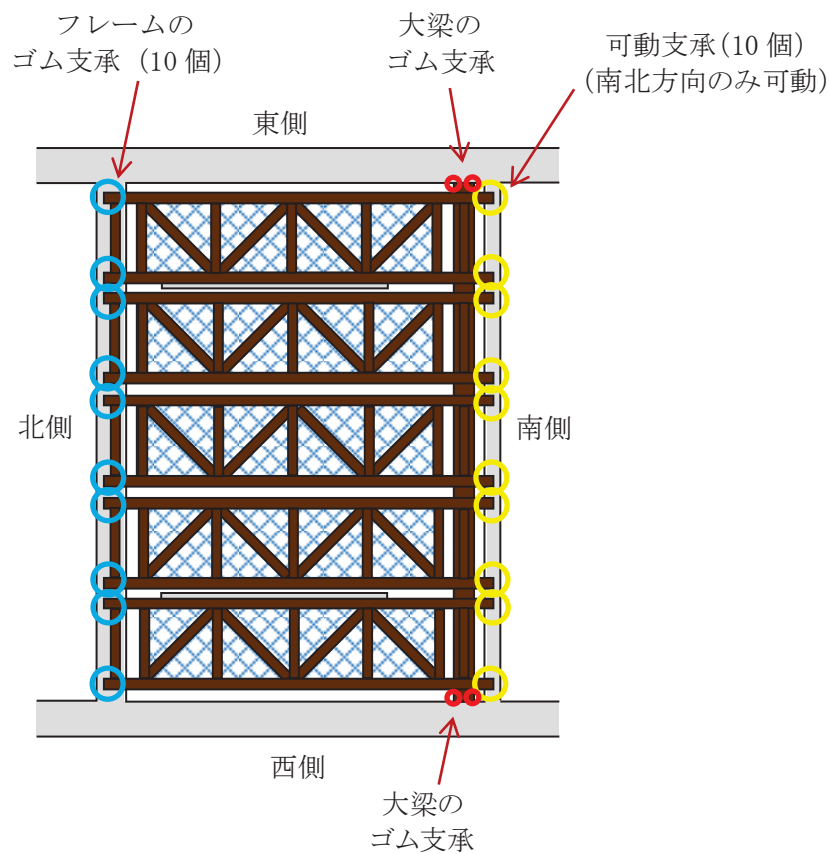
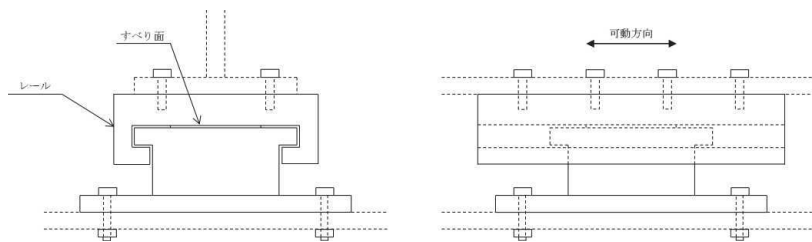


図10 支持構造模式図



ゴム支承概略図 (イメージ)



可動支承概略図 (イメージ)

図 11 ゴム支承及び可動支承概略図

3.7 防護板の構造設計

3.7.1 基本設計

竜巻防護ネットのうち、ゴム支承に支持されているフレーム、大梁は、地震力によって水平方向の変位が生じることから、他の設備との干渉を回避する必要がある。このため、フレーム間及びフレームと海水ポンプ室補機ポンプエリア壁面との間に隙間を設けており、隙間からの設計飛来物の侵入を防ぐために、防護板を設置する。

防護板は、設計飛来物の衝突に対して、BRL 式^{※3}を用いて算出される貫通限界厚さ以上の板厚を確保することで、貫通せず変形に留まる設計とする。また、防護板は地震時にフレームが移動しても干渉しない構造であるとともに、設計飛来物である鋼製材が海水ポンプ室補機ポンプエリアに侵入しない構造とする。

3.7.2 構造設計

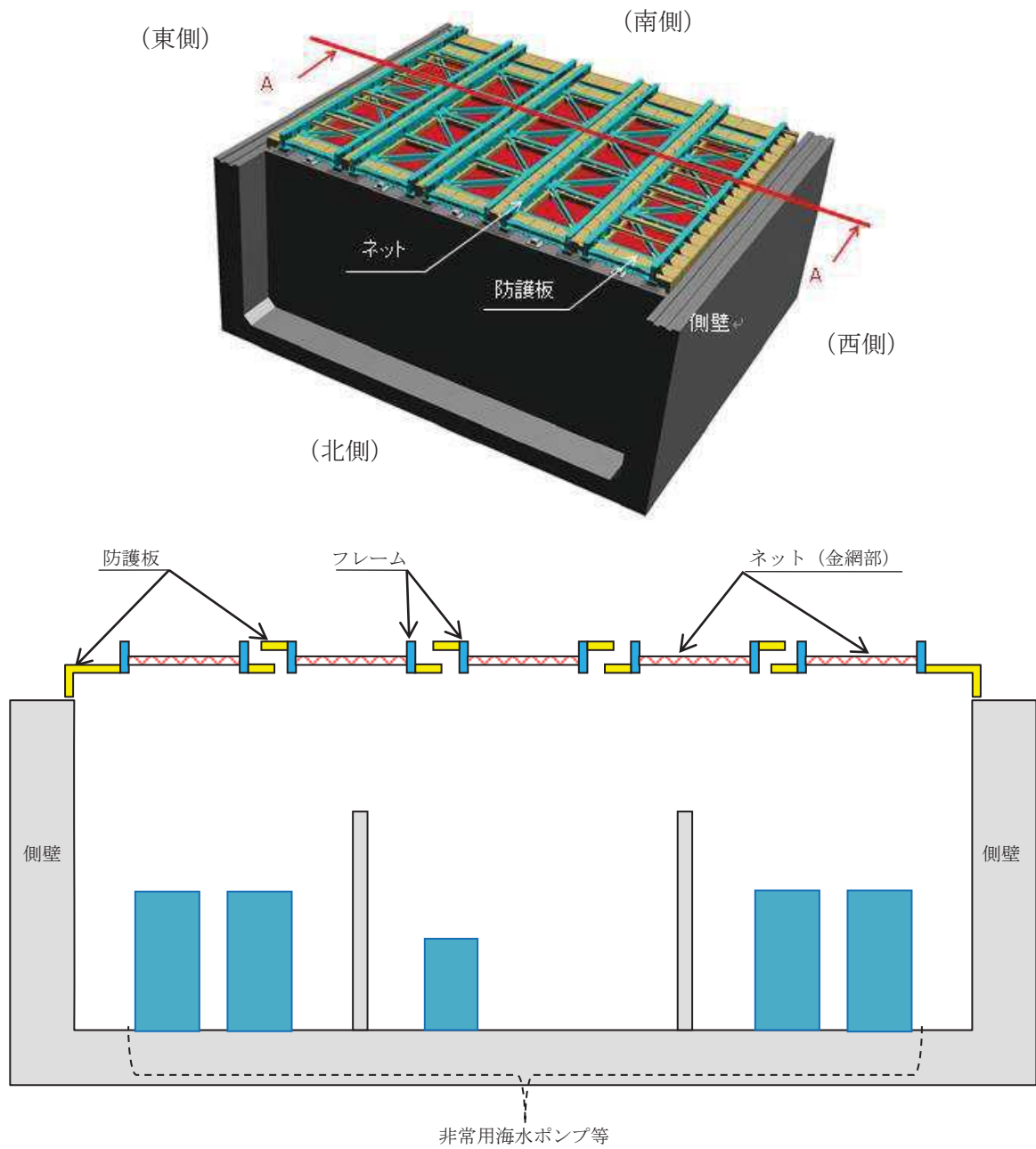
竜巻防護ネットの5台のフレームは、地震時に発生する変位を踏まえて隙間を確保している。また、同様に海水ポンプ室補機ポンプエリアの側壁との間にも隙間を設けている。防護板はフレームの変位を考慮した上で、ラビリンス構造とすることで、設計飛来物である鋼製材（縦 4.2m×横 0.3m×高さ 0.2m）が通過しない構造とする。

また、BRL 式による貫通厚さは表 8 に示すとおりであり、防護板に対する垂直方向の衝突を考慮する。図 12 にフレーム、防護板等の配置イメージを示す。

表 8 BRL 式^{※3}による貫通厚さ

設計飛来物	仕様		貫通限界厚さ (mm)	
	サイズ (m)	質量 (kg)	水平方向の衝突	鉛直方向の衝突
鋼製材	縦×横×高さ 4.2×0.3×0.2	135	27.6	7.1
(参考) 砂利	縦×横×高さ 0.04×0.04×0.04	0.2	0.9	0.2

※3:「タービンミサイル評価について(昭和 52 年 7 月 20 日 原子炉安全専門審査会)」で用いられている BRL 式



海水ポンプ室補機ポンプエリア断面から見た防護板の配置 (A-A 矢視)

図 12 フレーム，防護板等配置イメージ

3.8 ゴム支承，可動支承の採用による設計への反映事項

3.8.1 ゴム支承，可動支承の影響に対する検討

竜巻防護ネットの各構造に対して，設計竜巻荷重より外部事象防護対象施設である非常用海水ポンプ等を防護できない事象（損傷モード）を検討し，その損傷モードを踏まえ，各部位に必要な評価項目及び構造強度上の評価方針を整理する。ゴム支承，可動支承の特性を考慮し，ゴム支承，可動支承の採用による設計上の配慮又は対策を抽出する。

抽出された設計上の配慮又は対策に対する対応方針を検討し，設計に反映する。検討フローを図 13，ゴム支承，可動支承の特性を表 9，竜巻防護ネットの損傷モードを整理した結果を表 10 示す。

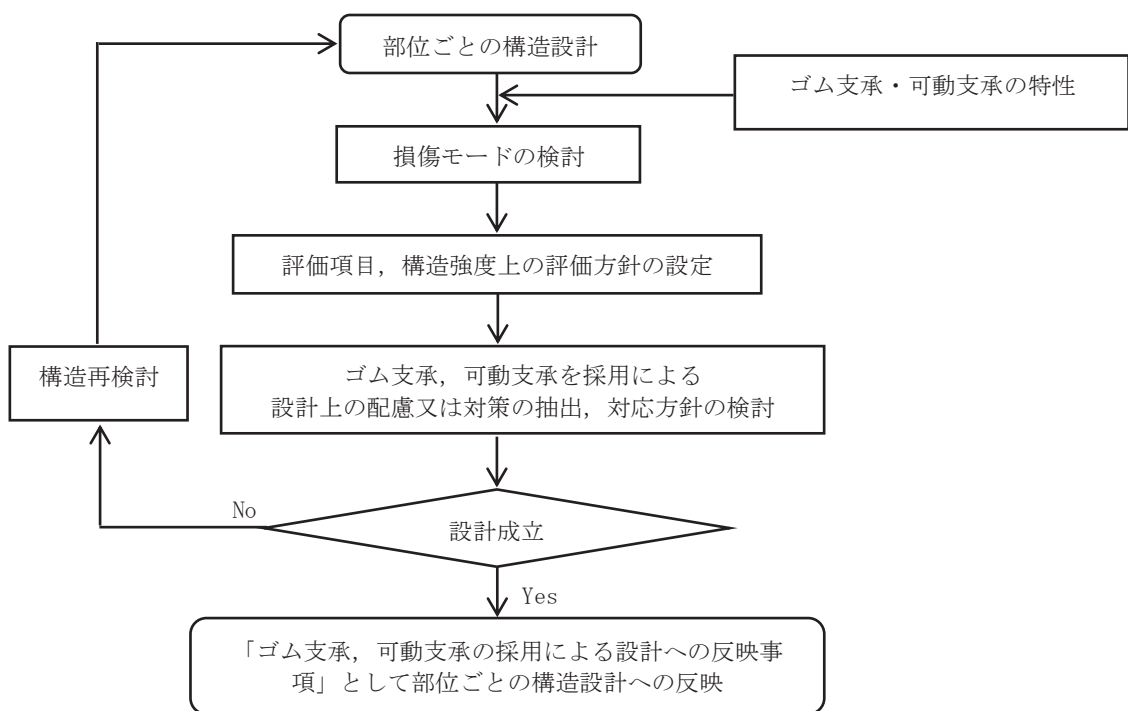


図 13 ゴム支承，可動支承の影響に対する検討フロー

表 9 ゴム支承，可動支承の特性

支承の種類	特性
ゴム支承	作用荷重により変形する
	荷重の伝達時に，反力を低減・分散する
可動支承	すべり機構により，1軸方向に可動する

表 10 竜巻防護ネットの損傷モード整理表(1/6)

評価対象	作用荷重	損傷モード	評価項目	構造強度上の評価方針	ゴム支承，可動支承採用による設計上の配慮又は対策
ネット (金網部)	衝撃荷重 竜巻風荷重 自重	ネットの破断による設計飛来物の防護対象施設への衝突	【吸収エネルギー評価】	ネットに設計飛来物が衝突した場合に，限界吸収エネルギー以上である荷重によるエネルギー以上であることを確認する（電中研報告※ ¹ による評価）	(1) 衝撃荷重に対するゴム支承・可動支承の影響に配慮する必要がある
			【破断評価】	ネットに設計飛来物が衝突した場合に，作用する荷重がネットの素材の持つ破断強度以下であることを確認する（電中研報告※ ¹ による評価）	
		【たわみ評価】	ネットに設計飛来物が衝突した場合に，防護対象施設までの離隔距離が作用荷重によるワイヤロープたわみ量を含めたネット全体のたわみ量以上であることを確認する		
		【破断評価】	ネットに設計飛来物が衝突した場合に，作用する荷重が素材の持つ破断強度以下であることを確認する		
ワイヤロープ		ネットの破断による設計飛来物の防護対象施設への衝突	【破断評価】		
ターンバックル		部材の破断による設計飛来物の防護対象施設への衝突	【破断評価】		
シヤックル		部材の破断による設計飛来物の防護対象施設への衝突	【破断評価】		
接続治具			【破断評価】		

※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 NI3014, 平成 26 年 3 月), 電力中央研究所報告 O01「高強度金網を用いた竜巻設計飛来物対策工の合理的な衝撃応答評価手法」

表 10 竜巻防護ネットの損傷モード整理表(2/6)

評価対象	作用荷重	損傷モード	評価項目	構造強度上の評価方針	ゴム支承, 可動支承採用による設計上の配慮又は対策
防護板	衝撃荷重 竜巻風荷重 自重	防護板を貫通することによる設計飛来物の防護対象施設への衝突	【貫通評価】 BRL 式による板厚評価	防護板の板厚が BRL 式 ^{※2} より算出される貫通限界板厚以上であることを確認する	(1) 衝撃荷重に対するゴム支承・可動支承の影響に配慮する必要がある (3) 作用荷重によるフレームの変位に対する影響に配慮する必要がある
		主桁, 横補強材を貫通することによる設計飛来物の防護対象施設への衝突	【貫通評価】 ひずみ量	設計飛来物が支持部材に衝突した場合に, 衝突箇所に発生する衝撃荷重によって貫通が生じないように, フレームの鋼材が終局状態に至るようなひずみを生じないことを確認する	(1) 衝撃荷重に対するゴム支承・可動支承の影響に配慮する必要がある
フレーム	衝撃荷重 竜巻風荷重 ネット荷重 自重	主桁, 横補強材に設計飛来物が衝突すること, 破断・落下し防護対象施設に衝突	【支持機能評価】 ひずみ量		
		ブレースを貫通することによる設計飛来物の防護対象施設への衝突	【貫通評価】		
フレーム全体	衝撃荷重 竜巻風荷重	ブレースに設計飛来物が衝突すること, 破断・落下し防護対象施設に衝突	【貫通評価】 ブレースはネットの上部に設置しており, ブレースを貫通した設計飛来物の衝突エネルギーは低減することから, ネットの吸収エネルギー評価, 破断評価に包絡される		
		飛来物の衝突や設計竜巻の風による振動により破損, 落下し防護対象施設に衝突	ブレースはネットの上部に設置しており, 破断したブレースによる荷重の影響は, 設計飛来物におけるネットの吸収エネルギー評価, 破断評価に包絡される		
ストッパー	衝撃荷重 竜巻風荷重	ゴム支承近傍に設計飛来物が衝突した場合に, ゴム支承が破損し, ストッパーに荷重が加わる。更にストッパーが破損すること, フレームが落下し防護対象施設に衝突	共振の有無	作用荷重により共振が発生しないことを確認する	(4) 作用荷重により発生する振動の影響
			【支持機能評価】 せん断応力 曲げ応力	竜巻の風圧力による荷重及び設計飛来物による衝撃荷重に対し, フレーム等を支持する構造強度を維持するため, 作用する応力が許容応力状態 IV _{AS} の許容応力を超えないことを確認する	(2) ストッパーの設置(許容応力に対し余裕を有する設計) (3) 作用荷重によるフレームの変位に対する影響に配慮する必要がある

※2:「タービンサイクル評価について(昭和52年7月20日 原子炉安全専門審査会)」

表 10 竜巻防護ネットの損傷モード整理表 (3/6)

評価対象	作用荷重	損傷モード	評価項目	構造強度上の評価方針	ゴム支承, 可動支承採用による設計上の配慮又は対策		
大梁	衝撃荷重 竜巻風荷重 ネット荷重 フレーム荷重 自重	大梁が破断・落下し防護対象施設に衝突	【支持機能評価】 せん断応力 曲げ応力	竜巻の風圧力による荷重及び設計飛来物による衝撃荷重に対し、上載するフレーム等を支持する構造強度を維持するため、作用する応力が許容応力状態Ⅳ _{AS} の許容応力を超えないことを確認する	(1) 衝突解析に対するゴム支承・可動支承の影響に配慮する必要がある (3) 作用荷重による大梁の変位に対する影響に配慮する必要がある		
						【支持機能評価】 せん断ひずみ	(1) 衝突解析に対するゴム支承・可動支承の影響に配慮する必要がある (3) 作用荷重によるフレームの変位に対する影響に配慮する必要がある
フレーム ゴム支承	衝撃荷重 竜巻風荷重 ネット荷重 フレーム荷重 自重	ゴム体の破断によるアイソレータ機能の喪失	【支持機能評価】 引張応力 圧縮応力 せん断ひずみ	竜巻の風圧力による荷重及び設計飛来物による衝撃荷重に対し、上載するフレーム等を支持する機能を担う部材が支持機能を維持するため、作用する応力等が「道路橋示方書・同解説Ⅴ耐震設計編 (H14.3)」に基づく基準値を超えないことを確認する			
						内部鋼板の破損によるアイソレータ機能の喪失	【支持機能評価】 引張応力
		アンカーボルト	内部鋼板	破損によるアイソレータ機能の喪失	【支持機能評価】 引張応力 せん断応力		
			ゴム支承 取付ボルト				

表 10 竜巻防護ネットの損傷モード整理表(4/6)

評価対象	損傷モード	評価項目	構造強度上の評価方針	ゴム支承, 可動支承採用による設計上の配慮又は対策
大梁ゴム支承	ゴム体	【支持機能評価】 引張応力 圧縮応力 せん断ひずみ	竜巻の風圧力による荷重及び設計飛来物による衝撃荷重に 対し, 上載するフレーム等を 支持する機能を担う部材が支 持機能を維持するため, 作用 する応力等が「道路橋設計方 書・同解説 V 耐震橋設計編 (H14.3)」に基づく基準値を 超えないことを確認する	(1) 衝撃荷重に対するゴム支 承・可動支承の影響に配慮する 必要がある (3) 作用荷重による大梁の変 位に対する影響に配慮する必 要がある
	内部鋼板	【支持機能評価】 引張応力	竜巻の風圧力による荷重及び 設計飛来物による衝撃荷重に 対し, 上載するフレーム等を 支持する機能を担う部材が支 持機能を維持するため, 作用 する応力が許容応力状態IV _{AS} の許容応力を超えないことを 確認する	
	大梁ゴム支承 取付ボルト	【支持機能評価】 引張応力 せん断応力	破損によるアイソレート機能の喪失	

表 10 竜巻防護ネットの損傷モード整理表 (5/6)

評価対象	作用荷重	損傷モード	評価項目	構造強度上の評価方針	ゴム支承、可動支承採用による設計上の配慮又は対策		
可動支承	衝撃荷重 竜巻風荷重 ネット荷重 フレーム荷重 自重	ソールプレート	【支持機能評価】 支圧応力	竜巻の風圧力による荷重及び設計飛来物による衝撃荷重に対し、上載するフレーム等を支持する機能が支持機能を維持するため、作用する応力が許容応力状態IV _A Sの許容応力を超えないことを確認する	(1) 衝撃荷重に対するゴム支承・可動支承の影響に配慮する必要がある (3) 作用荷重によるフレームの変位に対する影響に配慮する必要がある		
			【支持機能評価】 支圧応力				
		すべり材	【支持機能評価】 支圧応力	圧縮破壊によるすべり機能喪失・固着		竜巻の風圧力による荷重及び設計飛来物による衝撃荷重に対し、上載するフレーム等を支持する機能が支持機能を維持するため、作用する応力が許容応力状態IV _A Sの許容応力を超えないことを確認する	
			【支持機能評価】 支圧応力				
		圧縮ゴム	【支持機能評価】 支圧応力	圧縮破壊によるすべり機能喪失・固着		竜巻の風圧力による荷重及び設計飛来物による衝撃荷重に対し、上載するフレーム等を支持する機能が支持機能を維持するため、作用する応力がメーカーの許容応力を超えないことを確認する	
			【支持機能評価】 支圧応力				
		ピストン	【支持機能評価】 曲げ応力	破断によるすべり機能喪失・固着		【支持機能評価】 支圧応力	
			【支持機能評価】 支圧応力				
		座金	【支持機能評価】 支圧応力	圧縮破壊によるすべり機能喪失・固着		【支持機能評価】 支圧応力	
			【支持機能評価】 支圧応力				
		ベース ポット	【支持機能評価】 せん断応力 曲げ応力 支圧応力	破断によるすべり機能喪失		【支持機能評価】 支圧応力	
			【支持機能評価】 支圧応力				
		レール	【支持機能評価】 曲げ応力 引張応力 せん断応力	圧縮破壊によるすべり機能喪失		【支持機能評価】 支圧応力	竜巻の風圧力による荷重及び設計飛来物による衝撃荷重に対し、上載するフレーム等を支持する機能が支持機能を維持するため、作用する応力が許容応力状態IV _A Sの許容応力を超えないことを確認する
			【支持機能評価】 引張応力 せん断応力				
レール取付ボルト	【支持機能評価】 曲げ応力 せん断応力	破断によるすべり機能喪失・固着	【支持機能評価】 曲げ応力 せん断応力				
エンドプレート 接合ボルト							
上部接合ボルト							
下部接合ボルト							
ベースプレート	【支持機能評価】 曲げ応力 せん断応力	破断によるすべり機能喪失・固着	【支持機能評価】 曲げ応力 せん断応力				

表 10 竜巻防護ネットの損傷モード整理表 (6/6)

評価対象	作用荷重	損傷モード	評価項目	構造強度上の評価方針	ゴム支承, 可動支承採用による設計上の配慮又は対策
ブラケット	衝撃荷重 竜巻風荷重 ネット荷重 フレーム荷重 大梁荷重 自重	破断による大梁の落下	【支持機能評価】 せん断応力 圧縮応力 曲げ応力 引張応力	竜巻の風圧力による荷重及び設計飛来物による衝撃荷重に対し, 上載するフレーム等を支持する構造強度を維持するため, 作用する応力が許容応力状態Ⅳ _{AS} の許容応力を超えないことを確認する	(1) 衝撃荷重に対するゴム支承・可動支承の影響に配慮する必要がある
	ブラケット 本体				

3.8.2 設計上の配慮又は対策が必要となる事項

竜巻防護ネットの各構造について、ゴム支承、可動支承の採用による設計上の配慮又は対策が必要な事項を表 11 にまとめる。

表 11 ゴム支承、可動支承の採用による設計上の配慮又は対策が必要な事項

評価部位	設計上の配慮又は対策が必要な事項			
	(1) 衝撃荷重に対するゴム支承・可動支承の影響	(2) ストッパーの設置	(3) 作用荷重による変位に対する影響	(4) 作用荷重により発生する振動の影響
ネット (金網部)	○	—	—	—
防護板	○	—	○	—
フレーム	○	○	○	○
大梁	○	—	○	—
ゴム支承	○	—	○	—
可動支承	○	—	○	—
ブラケット	○	—	—	—

凡例 ○：配慮又は対策が必要
—：対応不要

3.8.3 設計上の配慮又は対策が必要となる事項に対する対応

「3.8.2 設計上の配慮又は対策が必要となる事項」で抽出された事項について、適切に設計に反映することで、竜巻防護ネットにより非常用海水ポンプ等を設計飛来物の衝突から防護し、安全機能が損なわれない設計とする。設計上の配慮又は対策が必要な事項に対する対応方針について、(1)～(4)に示す。

(1) 衝撃荷重に対するゴム支承・可動支承の影響

衝撃荷重に対するゴム支承や可動支承の影響は、地震時における部材の特性(役割・挙動)から、飛来物の衝突時において以下の影響が考えられる。

a. 飛来物の衝突におけるゴム支承の変形等の影響

飛来物が部材に衝突した場合には、伝達された荷重によってゴム支承が変形、可動支承が1軸方向にすべることにより他の部材と干渉する可能性がある。

b. 飛来物の衝突における部材間の荷重の伝達

飛来物が部材に衝突した場合には、荷重が伝達されるが、ゴム支承が変形することにより、荷重が低減される可能性がある。

これらの影響を踏まえて、構造成立性を見通しを確認するために、竜巻防護ネットを構成する支持部材に対する代表的な飛来物衝突の解析評価を実施する。評価は以下の2ステップで実施する。各STEPの評価フローを図14に示す。また、支持部材の評価方法について別紙2に整理する。

【STEP1】

ゴム支承に支持されるフレームに飛来物が衝突した際の挙動を確認するため、ゴム支承の剛性を考慮した衝突解析を実施する。衝突解析は、ゴム支承による影響が最も大きくなると想定される条件(飛来物姿勢、衝突位置、飛来方向)で実施し、ゴム支承の影響を考慮した場合において、フレームゴム支承、可動支承がフレームを支持する機能を維持可能な構造強度を有することを確認する。STEP1の評価結果について別紙3に整理する。

【STEP2】

衝突時の竜巻防護ネットを構成する支持部材の構造成立性を確認するため、以下の評価を実施する。STEP2の評価結果については別紙4に整理する。

STEP2-1: 竜巻防護ネットを構成する支持部材(ストッパーを除く)はゴム剛性の結合条件を3方向固定(衝撃荷重のピーク値が大きくなると推測される条件)にて衝突解析を行い、構造成立性の確認を行う。

STEP2-2: STEP2-1はフレームゴム支承に対し非常に厳しい条件であるため、STEP2-1の条件で評価を実施した結果、許容値を満足しない場合には、詳細評価としてゴム支承のせん断剛性を考慮した解析条件にて評価を実施する。

STEP2-3: STEP2-2のフレームゴム支承の評価結果を踏まえて、ストッパーの評価を実施する。ストッパーの評価はゴム剛性の結合条件を自由(ゴム支承による荷重の負担は期待せずストッパーに全ての荷重を伝達する条件)とし衝突解析を行い、構造成立性の確認を行う。

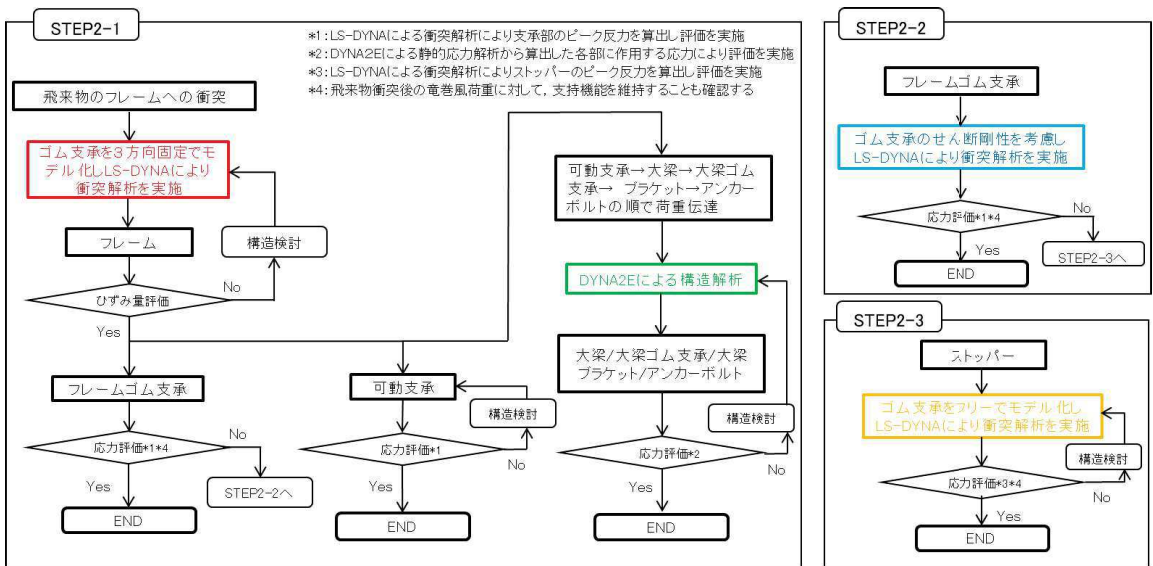
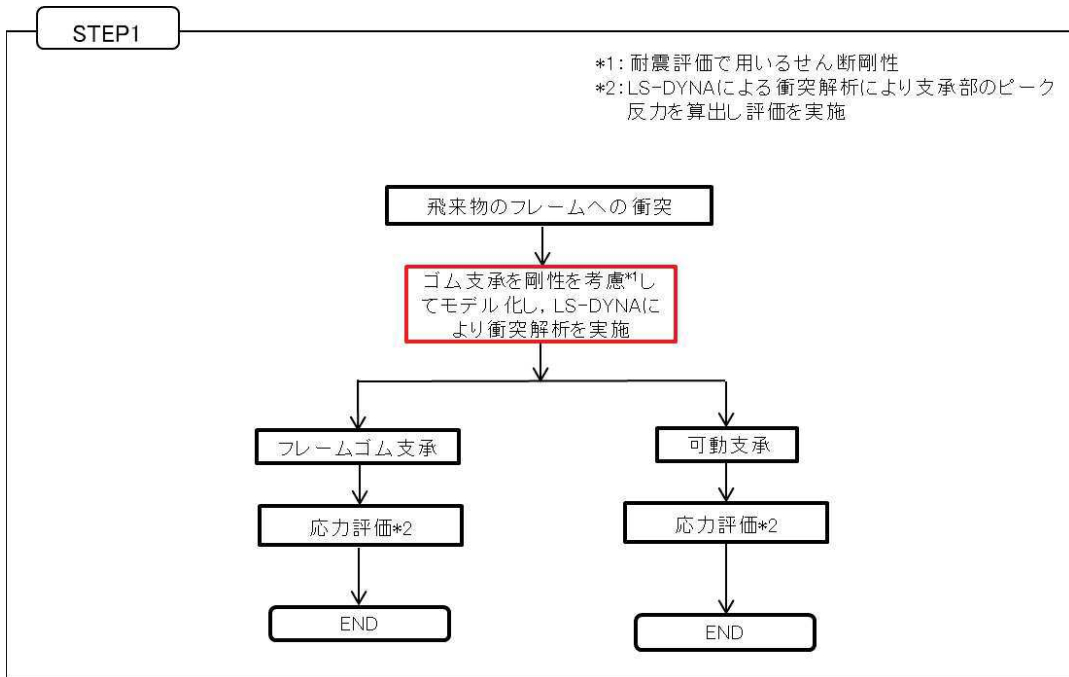


図 14 STEP1, STEP2 評価フロー

応力等の算出方法について図 15 に示す。

衝突解析は LS-DYNA を使用し、モデル化の対象は飛来物が衝突するフレームとする。フレームゴム支承、可動支承は各 STEP において設定した結合条件を設定する。LS-DYNA により衝突部であるフレームのひずみ評価を実施するとともに、支承部のピーク反力を算出し、フレームゴム支承及び可動支承の評価を実施する。(自重及び竜巻による風荷重についても反力として考慮する)

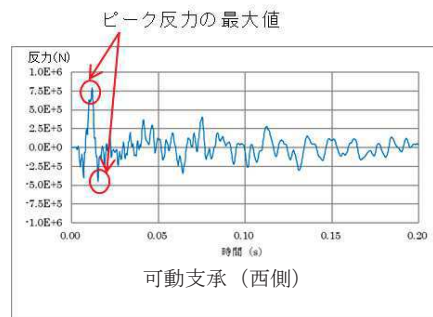
可動支承に発生した荷重は大梁、大梁ゴム支承、ブラケット、ブラケットアンカーボルトに伝達されるため、LS-DYNA により算出した可動支承に作用するピーク反力を解析モデル(耐震評価と同様のモデル: DYN2E)に入力し、各部に作用する応力を算出する。

フレームの被衝突部の形状をフラットに設定することで、飛来物の衝突影響を大きく受けるようにしている。

ピーク反力の最大値が静的に継続作用すると設定し応力評価を実施

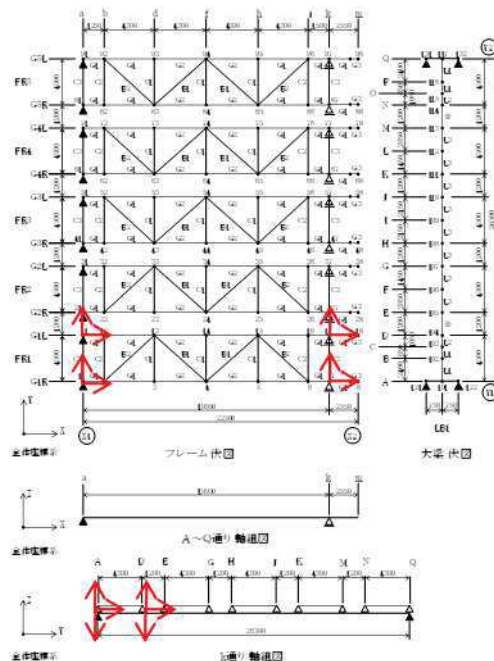


可動支承 (西側)



② 支承部の反力の最大値を算出

① LS-DYNAにより衝突解析を実施



③ DYN2Eに支承部の反力を入力し、可動支承の下部構造物に作用する応力を算出

図 15 応力等の算出方法 (例)

表 12～15 に、衝突解析における各 STEP ごとのフレームゴム支承，可動支承の結合条件を整理する。

STEP2-1 は，下部構造に対し支承部の荷重がそのまま伝達される条件で評価を実施し，ゴム支承における荷重の低減・分散効果を期待しない衝突解析となるため，これまでの他プラントでの適用実績がある竜巻防護ネットの衝突解析と同等の条件となる。また，ネット（金網部）の電中研報告による評価及び防護板の BRL 式による評価手法は，STEP2-1 の条件で適用が可能である。よって，STEP2-1 の条件は，ストッパーを除く部材に適用する。

STEP2-2 の条件は，STEP2-1 でフレームゴム支承が許容値を満足しない場合のフレームゴム支承評価に適用する。

STEP2-3 は，STEP2-2 でフレームゴム支承が許容値を満足しない場合のストッパー評価に適用する。

表 12 【STEP1】衝突解析におけるゴム支承，可動支承の結合条件

方向	フレーム ゴム支承	可動支承
X	弾性	自由
Y	弾性	剛
Z	剛	剛

表 13 【STEP2-1】衝突解析におけるゴム支承，可動支承の結合条件

方向	フレーム ゴム支承	可動支承
X	剛	自由
Y	剛	剛
Z	剛	剛

表 14 【STEP2-2】衝突解析におけるゴム支承，可動支承の結合条件

方向	フレーム ゴム支承	可動支承
X	弾性	自由
Y	弾性	剛
Z	剛	剛

表 15 【STEP2-3】衝突解析におけるゴム支承，可動支承結合条件

方向	フレーム ゴム支承	可動支承
X	自由	自由
Y	自由	剛
Z	自由	剛

(2) ストッパーの設置

ストッパーは STEP2-2 の評価結果（別紙 4 参照）において、許容値を満足しない場合に、支持機能としての役割が必要となるものである。

ストッパーの設計は、STEP2-3 の解析条件にて実施し、ストッパーはゴム支承による荷重の負担を期待せず全ての荷重を伝達する条件で、衝撃荷重に対し許容応力を満足し、竜巻防護ネットを支持する構造強度を有する設計とする。

ストッパーの設置イメージを図 16 に示す。

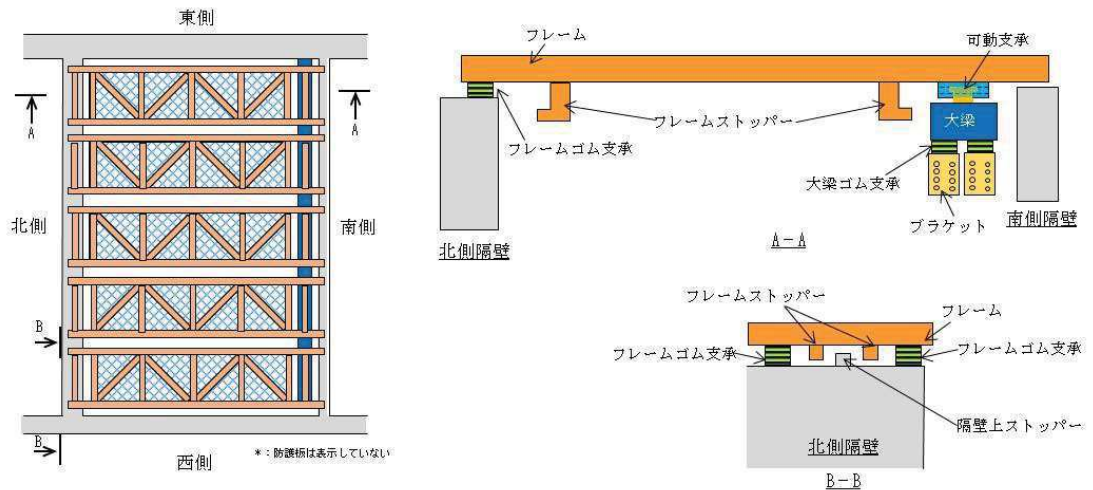


図 16 ストッパーイメージ図

(3) 作用荷重によるフレームの変位に対する影響

ゴム支承、可動支承に支持されているフレーム及びゴム支承に支持されている大梁は、設計竜巻による風荷重や地震によって水平方向の変位が生じることから、他の設備との干渉について考慮する必要がある。

そのため、フレーム間や大梁と海水ポンプ室補機ポンプエリア壁面との間等に、設計竜巻による風荷重や地震により発生する変位を踏まえてクリアランスを確保する設計とする。

地震力による水平方向の変位についての評価は、設置許可基準規則第 4 条に対する適合状況説明資料『設計基準対象施設について（第 4 条 地震による損傷の防止）』で説明する。なお、風圧力による水平方向の変位については、地震力による水平方向の変位に包絡される。

また、フレーム間及びフレームと海水ポンプ室補機ポンプエリア壁面にクリアランスを確保していることから、これらの隙間から設計飛来物の侵入を防ぐために、フレームに防護板を設置する。

防護板はフレームの水平変位を考慮した上で、ラビリンス構造とすることで、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。

(4) 振動による影響

竜巻防護ネットに飛来物衝突した際に振動が発生するが、飛来物衝突による振動は一時的なものであり、共振が発生して構造健全性に影響を与える可能性は低い。

また、竜巻による風の影響により振動が発生する可能性があるが、共振が発生するには一定の風が吹き続ける必要があることから、竜巻による瞬間的な風に対し、共振が発生する可能性は低い。

一定の風が継続して吹く場合、風による共振が発生する可能性が考えられるため、共振や疲労など風による振動への影響について検討し、必要に応じ、竜巻防護ネットの構造設計に反映する。

4. 竜巻防護に対する評価方針

4.1 強度評価

4.1.1 ネット（金網部）

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

(1) 評価項目

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

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

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

(2) 評価対象部位

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

① ネット

ネットには設計竜巻荷重が直接作用するため、評価対象部位とする。

② ワイヤーロープ、ターンバックル及びシャックル

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

③ 接続用の治具

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

図17にネット（金網部）の評価対象部位、図18に設計飛来物衝突時の荷重伝達を示す。

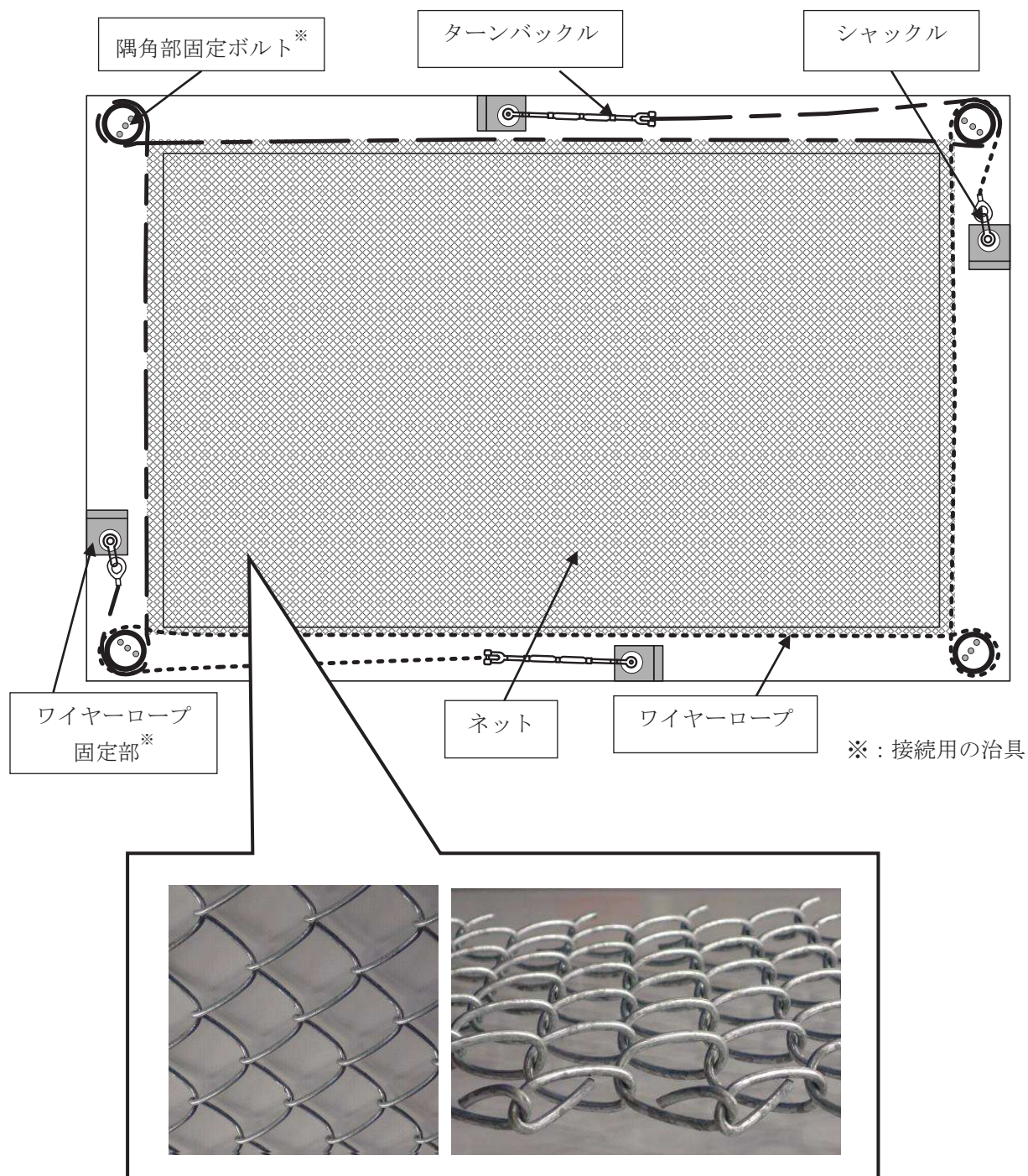


図 17 ネット（金網部）の評価対象部位

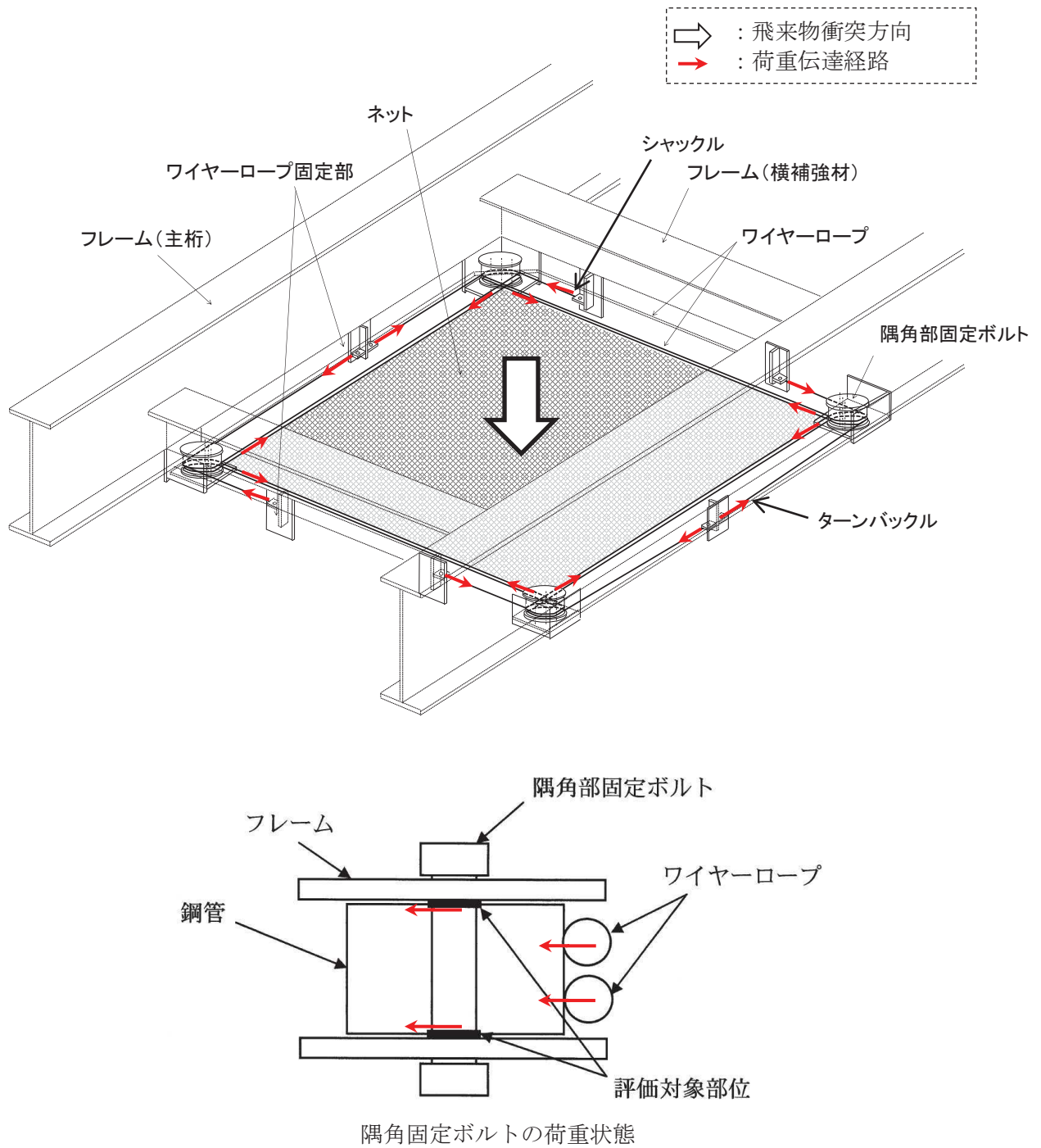


図 18 設計飛来物衝突時の荷重伝達図 (ネット (金網部))

(3) 許容限界（詳細は別紙 5 参照）

① 吸収エネルギー評価

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

② 破断評価

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

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

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

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

③ たわみ評価

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

4.1.2 支持部材（フレーム、大梁、フレームゴム支承、大梁ゴム支承、可動支承、ブラケット、ストッパー）

支持部材（フレーム、大梁、フレームゴム支承、大梁ゴム支承、可動支承、ブラケット、ストッパー）の強度評価は、「3.2.1荷重条件」にて設定した荷重及び荷重の組合せを踏まえて、評価対象部位に作用する応力等について確認するものである。

(1) 評価項目

設計荷重に対してフレームは、設計飛来物が貫通せず非常用海水ポンプ等への到達を阻止できること（貫通評価）、また、非常用海水ポンプ等へ波及的影響を与えないよう落下が生じないこと（支持機能評価）を衝突解析により確認する。

大梁、フレームゴム支承、大梁ゴム支承、可動支承、ブラケット、ストッパーは、フレームで受けた荷重が伝達されるため、衝突解析によって算出した荷重によって落下が生じないこと（支持機能評価）を確認する。

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

支持部材に対する支持機能評価は、「3.8.3 設計上の配慮又は対策が必要となる事項に対する対応 (1)」で定めた STEP2 で実施し、衝突解析におけるゴム支承、可動支承の解析条件を表 16 に整理する。

表 16 衝突解析におけるゴム支承、可動支承の解析条件

解析条件	ゴム支承	可動支承
【STEP2-1】 (大梁、フレームゴム支承、大梁ゴム支承、可動支承、ブラケットの評価に適用)	ゴム支承の結合条件を3方向固定(下部構造に対し、支承部のピーク荷重がそのまま伝達される条件で評価を実施)	可動方向の結合条件をフリー 反可動方向、鉛直方向の結合条件を固定
【STEP2-2】 (フレームゴム支承の評価に適用)	ゴム支承の結合条件を耐震評価で用いるせん断剛性(実現象に近いと考えられる条件で評価を行う観点から適用する)	
【STEP2-3】 (ストッパーの評価に適用)	ゴム支承の結合条件をフリー(ゴム支承による荷重の負担を期待せず、ストッパーへかかる衝撃荷重が大きくなる条件で評価を実施)	

(2) 評価対象部位

支持部材の強度評価においては、その構造を踏まえて、設計荷重の作用方向及び伝達過程を考慮し、フレーム、大梁、フレームゴム支承、大梁ゴム支承、可動支承、ブラケット、ストッパーを評価対象部位として設定する。なお、ゴム支承と可動支承の部材のうち支持機能評価の対象部材については、竜巻時の役割を踏まえて選定する。図19及び図20にゴム支承、可動支承の支持機能評価対象部材を示す。また、図21～図23に各衝突方向からの設計飛来物衝突時の荷重伝達の例を示す。

a. ゴム支承の支持機能評価対象部材選定について

設計飛来物の衝突による衝撃荷重は瞬間的な荷重であり、135 k g の鋼製材の衝突により約 6 0 t のフレームがフレームゴム支承ごと水平方向に移動することは考え難いとする（別紙 3 補足 2 参照）。よって、評価対象部材はフレームゴム支承のうち鉛直荷重を支える部材を選定する。

ゴム支承の部材のうち、飛来物衝突時の役割である上載するフレームを支持する支持機能を担う部材は、①ゴム体である。ゴム支承の支持機能評価にあたっては、当該部材に対し、構造強度上の評価方針を満足することを確認する。

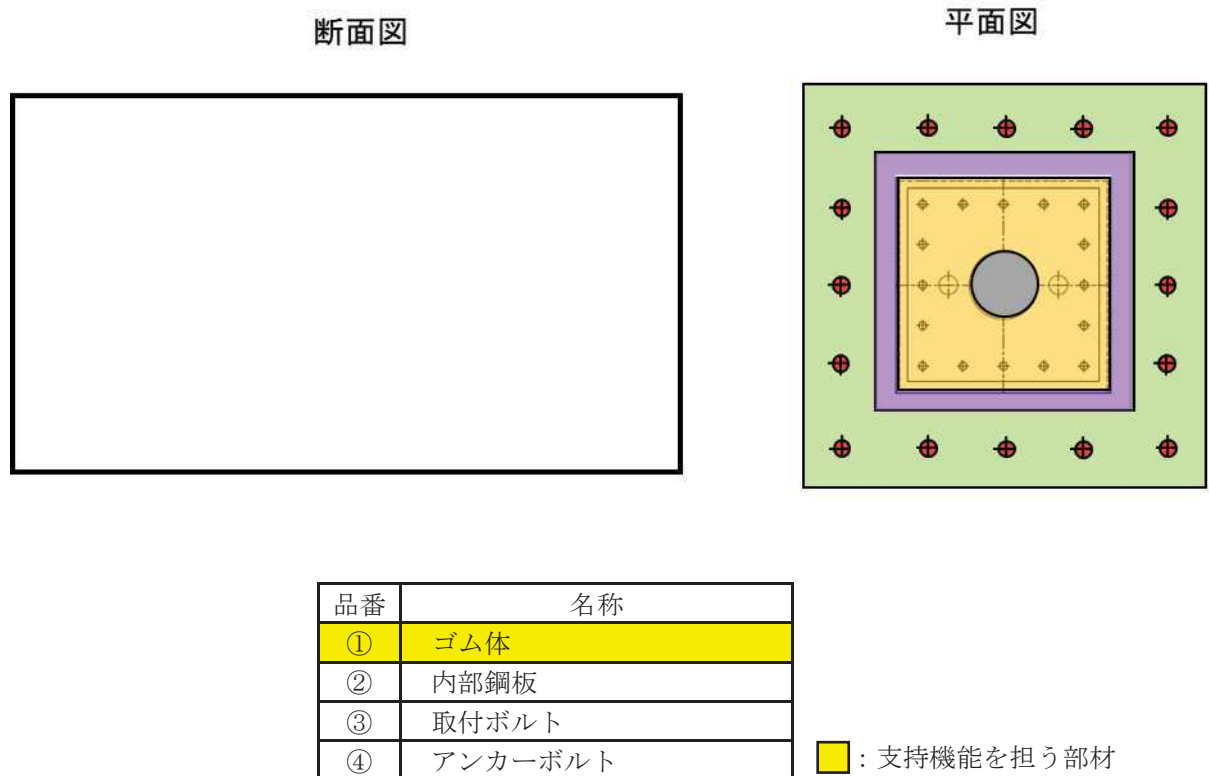


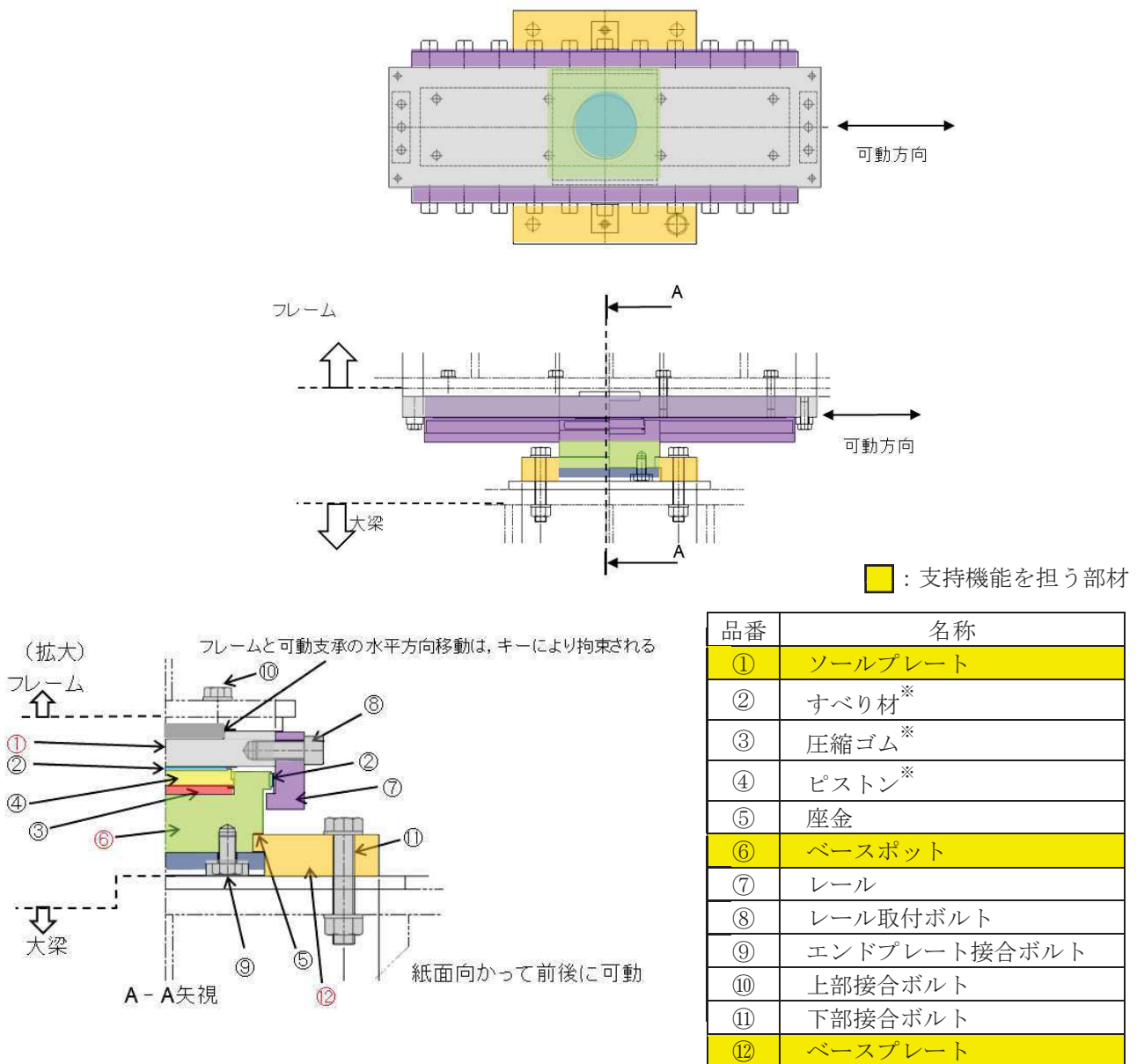
図 19 ゴム支承の支持機能評価対象部材

枠囲みの内容は商業機密又は防護上の観点から公開できません

b. 可動支承の支持機能評価対象部材の選定について

設計飛来物の衝突による衝撃荷重は瞬間的な荷重であり、135 kg の鋼製材の衝突により約 60 t のフレームが可動支承ごと水平方向に移動することは考え難いとする（別紙 3 補足 2 参照）。よって、評価対象部材は可動支承のうち鉛直荷重を支える部材を選定する。

可動支承はすべり機能を有するが、飛来物衝突時の役割である上載するフレームを支持する支持機能を担う部材は、①ソールプレート、⑥ベースポット、⑫ベースプレートである。可動支承の支持機能評価にあたっては、これらの部材に対し、構造強度上の評価方針を満足することを確認する。



※すべり材、ピストン、圧縮ゴムはソールプレートとベースポットの間にある内部部材のため、ソールプレートとベースポットが支持機能を維持可能な構造強度を有していれば、鉛直荷重の支持機能に影響を与えない

図 20 可動支承の支持機能評価対象部材

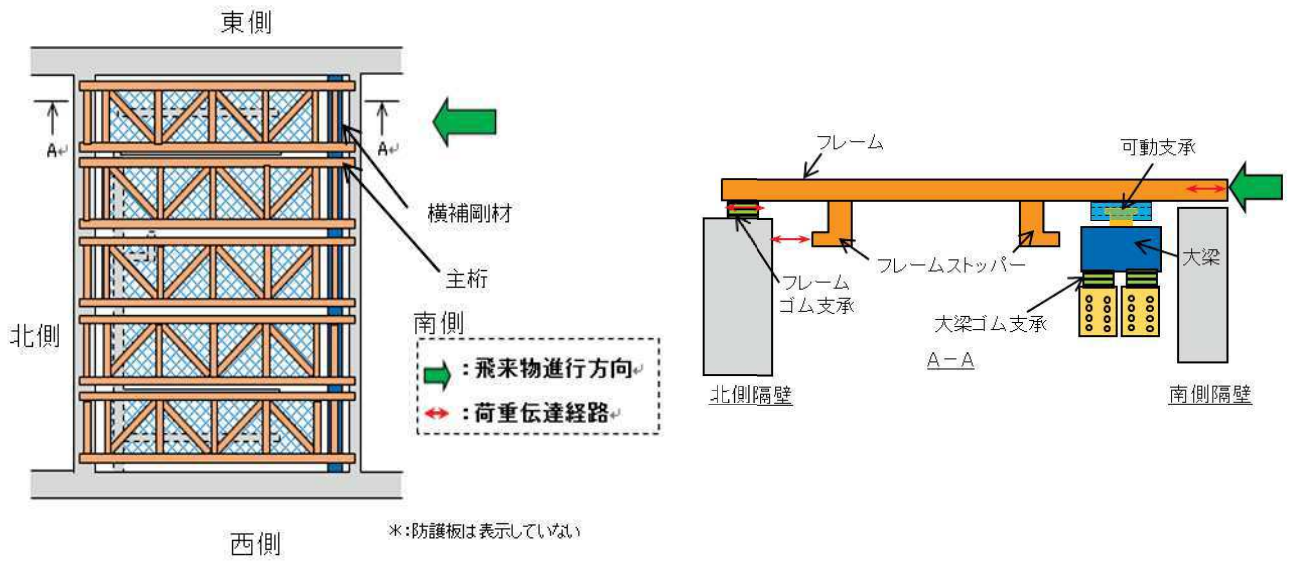


図 21 設計飛来物衝突時の荷重伝達例
(水平方向 (南から北) から衝突した場合)

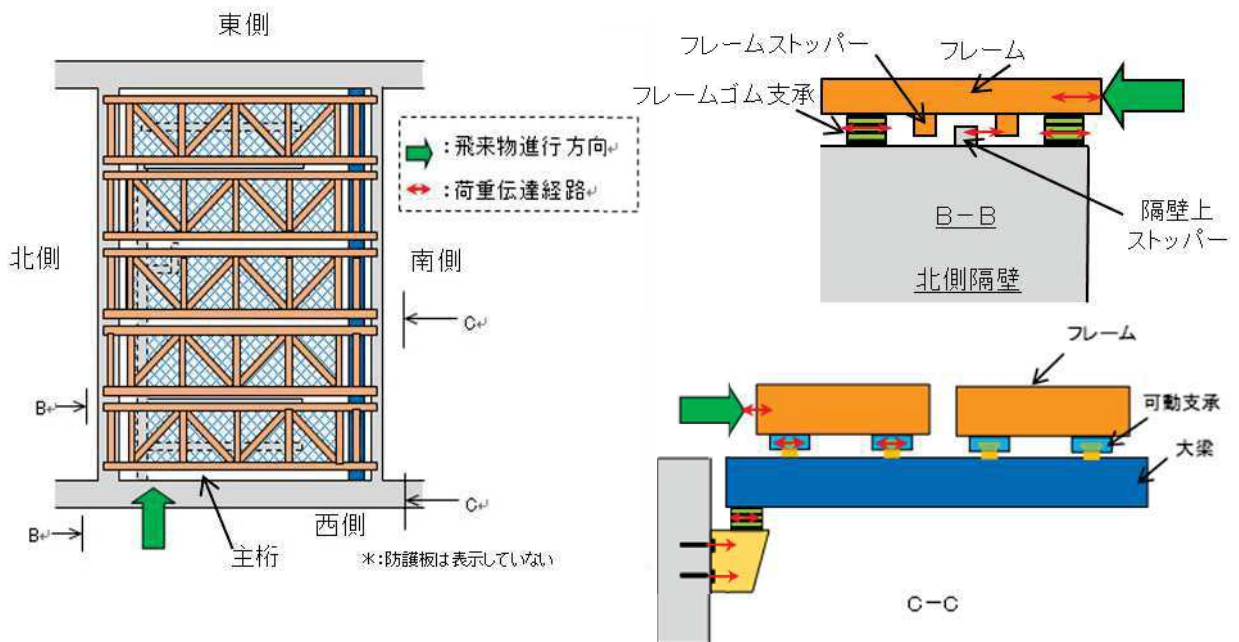


図 22 設計飛来物衝突時の荷重伝達例
(水平方向 (西から東) から衝突した場合)

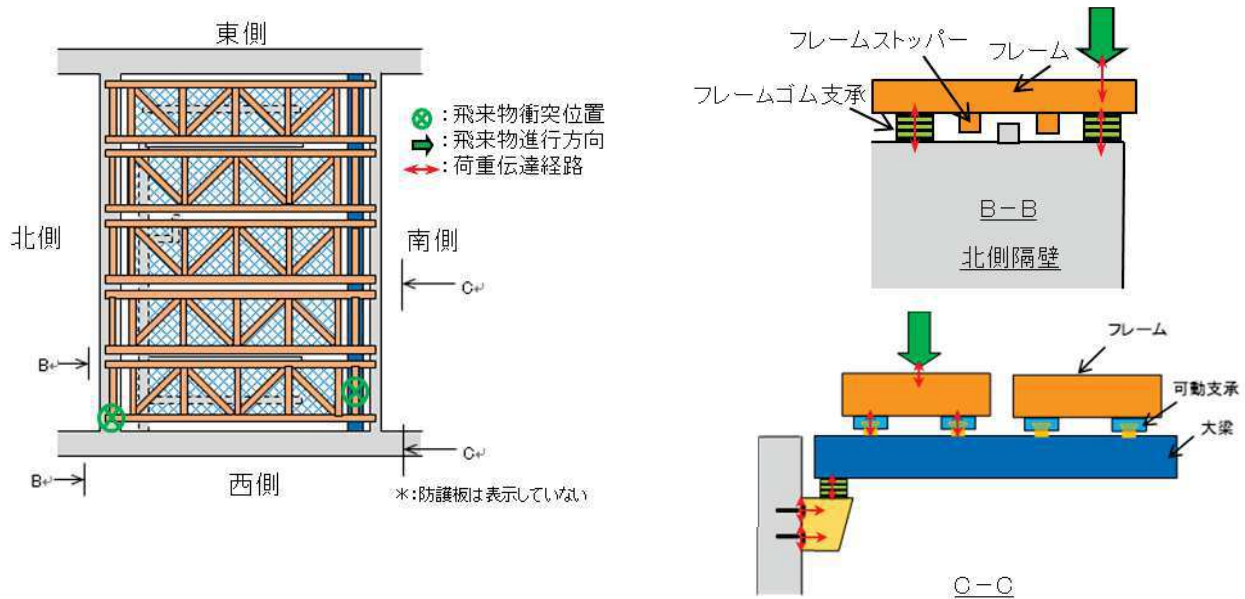


図 23 設計飛来物衝突時の荷重伝達例
(鉛直方向から衝突した場合)

(3) 許容限界 (詳細は別紙4参照)

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

大梁、ゴム支承 (構成部材のうち鋼製部品)、可動支承、ブラケット、ストッパーにおいては、「原子力発電所耐震設計技術指針 (JEAG4601・補-1984)」に基づいて、許容応力状態 $IV_A S$ の許容応力を許容限界として設定するか、もしくは試験結果やメーカー保証値に基づく許容限界を設定する。ゴム支承のうちゴム部分については、「道路橋示方書・同解説V耐震設計編 (H14.3)」に基づく評価基準値を設定する。

(4) 支持部材に対する性能目標と評価方針

(1)～(3)を踏まえ、支持部材に対する構造強度上の性能目標と評価方針を表17に整理する。

表17 支持部材に対する構造強度上の性能目標と評価方針 (1/2)

評価対象	支持部材の設計方針	構造強度上の性能目標	構造強度上の評価方針	評価部材	主な機能損傷モード		許容限界
					作用荷重	限界状態	
竜巻防護ネット (支持部材)	<p>支持部材は設計竜巻の風圧力による荷重、飛来物による衝撃荷重及びその他の荷重に対し、飛来物が非常用海水ポンプ等へ衝突すること、飛来物が支持部材を構成する主要な構造部材を貫通せず、上載するネット及び防護板を支持する機能を維持可能な構造強度を有し、非常用海水ポンプ等に波及的影響を与えないために、支持部材を構成する部材自体の転倒及び脱落を生じない設計とする。</p>	<p>【貫通】 設計飛来物の支持部材への衝突に対して、衝突箇所を貫通させない。</p>	<p>設計飛来物が支持部材に衝突した場合に、衝突箇所が発生する衝撃荷重によって貫通が生じないように、フレームの鋼材が終局状態に至るようなひずみを生じないことを確認する。 竜巻の風圧力による荷重及び設計飛来物による衝撃荷重に対し、上載するネットを支持するため、フレームの鋼材が終局状態に至るようなひずみを生じないことを確認する。</p>	フレーム	<ul style="list-style-type: none"> 自重 上載荷重 (ネット) 竜巻風荷重 衝撃荷重 	(衝突面の) 全断面欠損	NEI07-13※にTF (多軸係数) を考慮して設定した破断ひずみ以下 (LS-DYNA による衝突解析によりひずみ量を算出)
				大梁	<ul style="list-style-type: none"> 自重 上載荷重 (ネット, フレーム) 竜巻風荷重 衝撃荷重 	終局状態	発生する応力が JEAG 4601 の IV _{AS} 以下
			<p>【支持機能】 支持部材は設計竜巻の風圧力による荷重、飛来物による衝撃荷重及びその他の荷重に対し、上載するネット及び防護板を支持する機能を維持可能な構造強度を有する。</p>	ブラケット	<ul style="list-style-type: none"> 自重 上載荷重 (ネット, フレーム, 大梁) 竜巻風荷重 衝撃荷重 		
				ブラケットアンカーボルト			

※: 「NEI07-13:Methodology for Performing Aircraft Impact Assessments for New Plant Designs」

表17 支持部材に対する構造強度上の性能目標と評価方針 (2/2)

評価対象	支持部材の設計方針	構造強度上の性能目標	構造強度上の評価方針	評価部材		主な機能損傷モード		許容限界
				大梁ゴム支承	ゴム体	作用荷重	限界状態	
竜巻防護ネット (支持部材)	支持部材は設計竜巻の風圧力による荷重、飛来物による衝撃荷重及びその他の荷重に対し、飛来物が非常用海水ポンプ等へ衝突することを防止するため、飛来物が支持部材を構成する主要な構造部材を貫通せず、上載するネット及び防護板を支持する機能を維持可能な構造強度を有し、非常用海水ポンプ等に波及的影響を与えないために、支持部材を構成する部材自体の転倒及び脱落を生じない設計とする。	【支持機能】 支持部材は設計竜巻の風圧力による荷重、飛来物による衝撃荷重及びその他の荷重に対し、上載するネット及び防護板を支持する機能を維持可能な構造強度を有する。	竜巻の風圧力による荷重及び設計飛来物による衝撃荷重に対し、上載するフレーム等を支持する機能を維持するため、作用する応力が「道路橋示方書・同解説Ⅴ耐震設計編(H14.3)」に基づく基準値を超えないことを確認する。	大梁ゴム支承	ゴム体	自重 ・上載荷重(ネット, フレーム, 大梁) ・竜巻風荷重 ・衝撃荷重	終局状態	発生する引張応力が道路橋支承便覧の許容値以下 ・発生するせん断ひずみが道路橋支承便覧の許容値以下
				フレームゴム支承 (*1)	ゴム体	自重 ・上載荷重(ネット, フレーム) ・竜巻風荷重 ・衝撃荷重	終局状態	発生する引張応力が道路橋支承便覧の許容値以下 ・発生するせん断ひずみが道路橋支承便覧の許容値以下
				可動支承	ソールプレート ベースポット ベースプレート	自重 ・上載荷重(ネット, フレーム) ・竜巻風荷重 ・衝撃荷重	終局状態	発生する応力が JEAG 4601 のⅣ _A S 以下
			竜巻の風圧力による荷重及び設計飛来物による衝撃荷重に対し、フレーム等を支持する構造強度を維持するため、作用する応力が許容応力状態Ⅳ _A Sの許容応力を超えないことを確認する。	ストッパー	自重 ・竜巻風荷重 ・衝撃荷重	終局状態	発生する応力が JEAG 4601 のⅣ _A S 以下	

*1: フレームゴム支承は、2つのうち1つ以上の支承が構造強度上の評価方針を満足することを確認する。

(4) 評価結果

STEP2の評価結果を別紙3に整理する。

竜巻防護ネットの支持部材は構造強度上の評価方針を満足し、飛来物衝突時及び衝突後において竜巻防護ネットの支持機能を維持することから、構造成立性が見通しがあることを確認した。

4.1.3 防護板

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

(1) 評価項目

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

(2) 評価対象部位

防護板は設計飛来物の衝突に対し、非常用海水ポンプ等を防護するための設備であることから評価対象部位とする。

(3) 許容限界 (詳細は別紙5参照)

防護板の貫通評価における許容限界は、防護板の板厚が貫通限界厚さを上回る値とする。貫通限界厚さは「タービンミサイル評価について(昭和52年7月20日 原子炉安全専門審査会)」で用いられているBRL式を用いて算出する。

5. 竜巻以外の自然現象（地震，津波含む）に対する評価方針

5.1 竜巻以外の自然現象に対する評価

(1) 竜巻以外の自然現象の影響抽出

竜巻防護ネットは，竜巻以外の自然現象によって非常用海水ポンプ等に波及的影響を及ぼさないことを確認する。

竜巻防護ネットに対する竜巻以外の自然現象（地震，津波含む）の影響を，表 18 に示す。

竜巻防護ネットを設置する海水ポンプ室（コンクリート壁含む）及び竜巻防護ネットの耐震評価方針については，設置許可基準規則第 4 条に対する適合状況説明資料『設計基準対象施設について（第 4 条 地震による損傷の防止）』で説明する。

表 18 竜巻防護ネットに対する竜巻以外の自然現象（地震，津波含む）の影響

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

(2) 設計条件

竜巻以外の自然現象による波及的影響の評価の条件を以下に示す。

a. 荷重条件

(a) 風（台風）による荷重，

風（台風）による荷重は，建設省告示第 1454 号に定められた女川町の基準風速 30m/s による荷重とする。

(b)積雪荷重

積雪荷重として以下の条件を考慮する。

積雪量 : 43cm (積雪深さの月最大値) *1

単位荷重 : 20N/m² *2

*1: 建築基準法施行細則(宮城県)に定められる女川町の垂直積雪量は40cmであるが、保守的に既往最大である垂直積雪量43cmを用いる。

*2: 建築基準法施行令に基づく積雪の単位荷重(積雪1cm当たり20N/m²)

(c)火山の影響による荷重

火山事象における降下火砕物による静的荷重として以下の条件を考慮する。

堆積量 : 15cm

密度 : 1.5g/cm³ (湿潤状態)

(d)地震荷重

波及的影響の評価は基準地震動Ssによる地震力に対して実施する。

竜巻防護ネットには、ゴム支承、可動支承を用いており、ゴム支承、可動支承をモデル化した3次元はりモデルによる地震応答解析は、他プラントを含む既工認及び新規制審査での適用実績がない。

そのため、耐震設計の審査において既工認との手法の相違点を整理し、説明をしている。(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)』別紙-1参照)

b. 荷重の組合せ

荷重の組合せは「女川原子力発電所2号炉 外部事象の考慮について」に示す自然現象の組合せの方針に従い、以下のとおりとする。

(a)地震荷重+風荷重

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

(b)地震荷重+積雪荷重

女川原子力発電所は多雪地域ではないため、建築基準法による「積雪荷重と他の荷重の組合せ」を考慮する必要はないが、原子力発電所の重要性を鑑み、多雪地域の基準を準用して、建築基準法施行令の積雪荷重に地震や暴風と組合せる際に用いる平均的な積雪荷重を与えるための係数0.35の係数を考慮して地震評価における静的荷重として組み合わせる。

(c)降下火砕物荷重+風荷重+積雪荷重

降下火砕物荷重と風荷重及び積雪荷重の組合せは、3つの荷重が同時に発生することを考慮し、施設の形状、配置により適切に組み合わせることとしている。

ただし、竜巻防護ネットは風荷重の影響が大きいと考えられるような構造や形状の施設でないため、上記3つの荷重のうち降下火砕物荷重と積雪荷重の組合せを考慮する。

組合せる荷重は、降下火砕物荷重と積雪荷重は相関性が低い事象の組合せであるが、個別の事象が重畳した場合には堆積荷重が増加すると考えられるため、

Turkstra の法則を適用して設定することとし、降下火砕物による荷重を主荷重（湿潤状態の降下火砕物の荷重（層厚 15cm））、積雪による荷重（石巻における年最大積雪深さの平均値 17cm）を従荷重として組み合わせる。

c. 風（台風）による振動の影響

一定の風が継続して吹く場合、風による共振が発生する可能性が考えられるため、風による共振への影響について検討し、必要に応じ、竜巻防護ネットの構造設計に反映する。

6. 竜巻随件事象に対する評価

(1) 火災

竜巻随件事象として、建屋外については、発電所敷地内の屋外にある危険物貯蔵施設等の火災がある。火災源と竜巻防護ネットの位置関係を踏まえて火災の影響を評価（「6 条（外部火災）」により評価）した上で、竜巻防護ネットが非常用海水ポンプ等に波及的影響を及ぼさない設計とする。

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

(2) 溢水

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

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

(3) 外部電源喪失

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

7. 竜巻防護ネットの維持管理について

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

非常用海水ポンプ等の点検時には、竜巻防護ネットのフレームの取外し、取付けを実施することから、接続部（可動支承等）の健全性を確認して据付を実施する。

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

8. 設置許可段階と工認段階における説明内容

設置許可段階では、STEP1 及び STEP2 の評価のとおり、竜巻防護ネットの構造成立性に係る代表的な評価結果をもって、構造成立性を見通しを説明した。詳細設計段階では、設置許可断面の評価を踏まえて詳細設計を行い、改めて竜巻防護ネットの強度計算結果を説明する。(別紙 6 参照)

竜巻防護ネットの設計方針に関する先行プラントとの比較

竜巻防護ネットの設計方針等について、先行プラントと比較した結果を表 1 に整理する。構成部材のうち、ネット（金網部）と防護板は先行プラントと構造設計の相違がないが、ゴム支承及び可動支承を用いることで先行プラントと支持部材が異なることを踏まえて、支持部材に対する設計方針について比較を実施した。

表 1 竜巻に対する設計の基本方針，竜巻防護ネットの設計方針等の比較

プラント	女川	(参考) 東海第二	差異理由
竜巻に対する設計の基本方針	竜巻飛来物防護対策設備は、竜巻防護ネット、防護鋼板等から構成し、飛来物から外部事象防護対象施設を防護できる設計とする。 (まとめ資料:1.8.2.1 設計方針 (1) 竜巻に対する設計の基本方針より抜粋)	竜巻飛来物防護対策設備は、防護ネット、防護鋼板等から構成し、飛来物から外部事象防護対象施設を防護できる設計とする。 (設置変更許可申請書 (一部補正) 1.7.2.1 設計方針 (1) 竜巻に対する設計の基本方針より抜粋)	差異無し
竜巻防護ネットの設計方針	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、内包する非常用海水ポンプ等が安全機能を損なわないよう、設計飛来物が非常用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、非常用海水ポンプ等に波及的影響を及ぼさない設計とする。	防護対策施設は、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、内包する外部事象防護対象施設が安全機能を損なわないよう、設計飛来物等が外部事象防護対象施設に衝突することを防止可能な設計とする。 また、防護対策施設は、その他考えられる自然現象 (地震等) に対して、外部事象防護対象施設に波及的影響を及ぼさない設計とする。 (工認 V-1-1-2-3-1 竜巻への配慮に関する基本方針 2.1.3 竜巻の影響を考慮する施設の竜巻防護設計方針 c. 防護対策施設)	設備名称の相違
支持部材の設計方針	支持部材は設計竜巻の風圧力による荷重、飛来物による衝撃荷重及びその他の荷重に対し、飛来物が非常用海水ポンプ等へ衝突することを防止するために、飛来物が支持部材を構成する主要な構造部材を貫通せず、上載するネット及び防護板を支持する機能を維持可能な構造強度を有し、非常用海水ポンプ等に波及的影響を与えないために、支持部材を構成する部材自体の転倒及び脱落を生じない設計とする。	架構は、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、飛来物が外部事象防護対象施設へ衝突することを防止するために、飛来物が架構を構成する主要な構造部材を貫通せず、上載する防護ネット及び防護鋼板を支持する機能を維持可能な構造強度を有し、外部事象防護対象施設に波及的影響を与えないために、架構を構成する部材自体の転倒及び脱落を生じない設計とする (工認 V-3-別添 1-2 防護対策施設の強度計算の方針 2.2 構造強度の設計方針 (3) 架構)	部材名称の相違 設備名称の相違
支持機能を担保する部材	フレーム、大梁、ブラケット、ゴム支承、可動支承、ストッパー	架構	支持構造の相違
支持部材に対する評価項目	貫通評価及び支持機能評価	貫通評価及び支持機能評価	差異無し

女川 2 号炉の竜巻防護ネットは、先行プラントと支持構造に相違はあるが、「竜巻に対する設計の基本方針」、「竜巻防護ネットの設計方針」、「支持部材の設計方針」、「評価項目」に対して、先行プラントとの相違はないことを確認した。

以上

支持部材の評価方法について

1. 基本方針

設計飛来物がフレームに衝突した際の貫通評価及び支持機能評価は、フレーム及び設計飛来物である鋼製材を LS-DYNA によりモデル化し、衝突解析により実施する。

設計飛来物がフレームに衝突した際には可動支承を介して大梁、大梁ゴム支承ブラケット、ブラケットアンカーボルトに荷重が伝達されるため、LS-DYNA により算出される可動支承に作用する反力を用いて DYNA2E（耐震評価と同様の解析モデル）により大梁、大梁ゴム支承、ブラケット、ブラケットアンカーボルトの応力評価を実施する。

2. 解析モデル

LS-DYNA におけるモデル化対象はフレーム及び鋼製材とする。フレームゴム支承、可動支承は各 STEP において設定した結合条件を設定する。

LS-DYNA による解析モデルを図 1 に示す。また、設計飛来物の鋼製材を図 2 に、鋼製材の緒言について、表 1 に示す。

DYNA2E におけるモデル化対象は耐震評価と同様とし、フレーム、大梁、フレームゴム支承、大梁ゴム支承、可動支承とする。各部材は梁要素でモデル化し、ゴム支承は線形ばね要素でモデル化する。解析モデルを図 3 に示す。なお、解析モデルの詳細は、詳細設計により変更もあり得る。

3. 評価方法

LS-DYNA により、フレームに設計飛来物が衝突した被衝突部に対し、ひずみ量を算出し、ひずみ量評価を実施する。

また、LS-DYNA により可動支承の水平方向/鉛直上向き/鉛直下向きに作用するピーク反力を算出し、DYNA2E の解析モデルに入力して、応力評価を実施する(図 4 参照)。フレームの位置により大梁以降に発生する応力が異なるため、DYNA2E にて反力を入力するフレームは端部と中央に存在する 2 つを選定する。

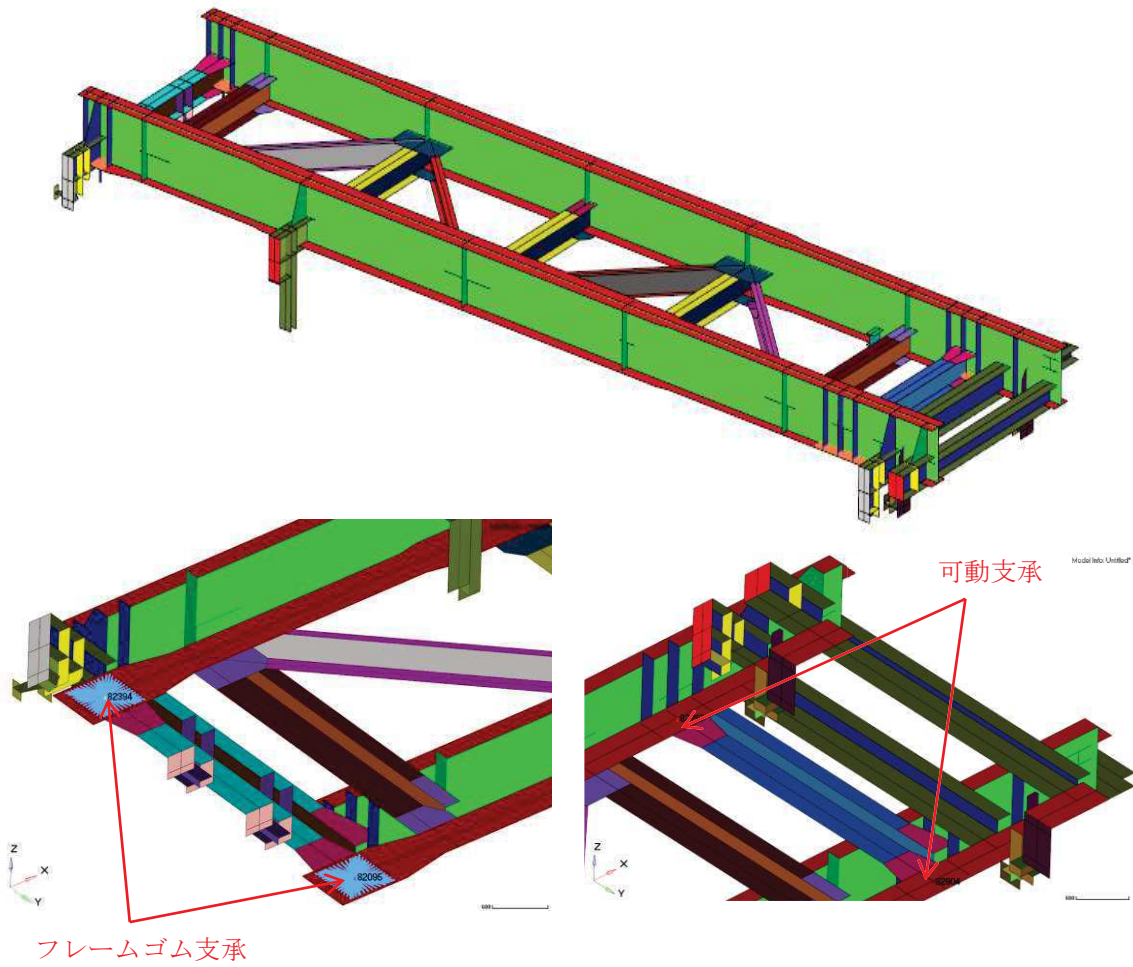


図1 LS-DYNA 解析モデル

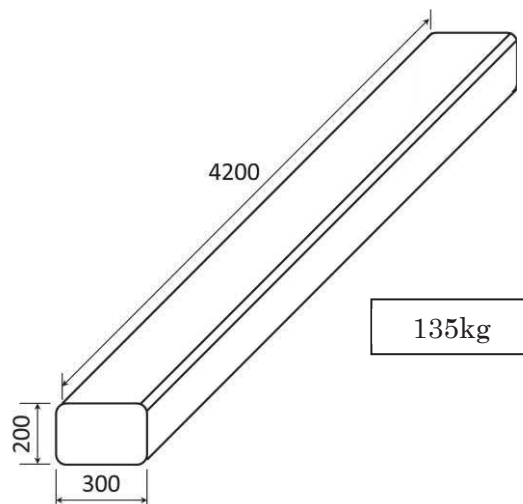
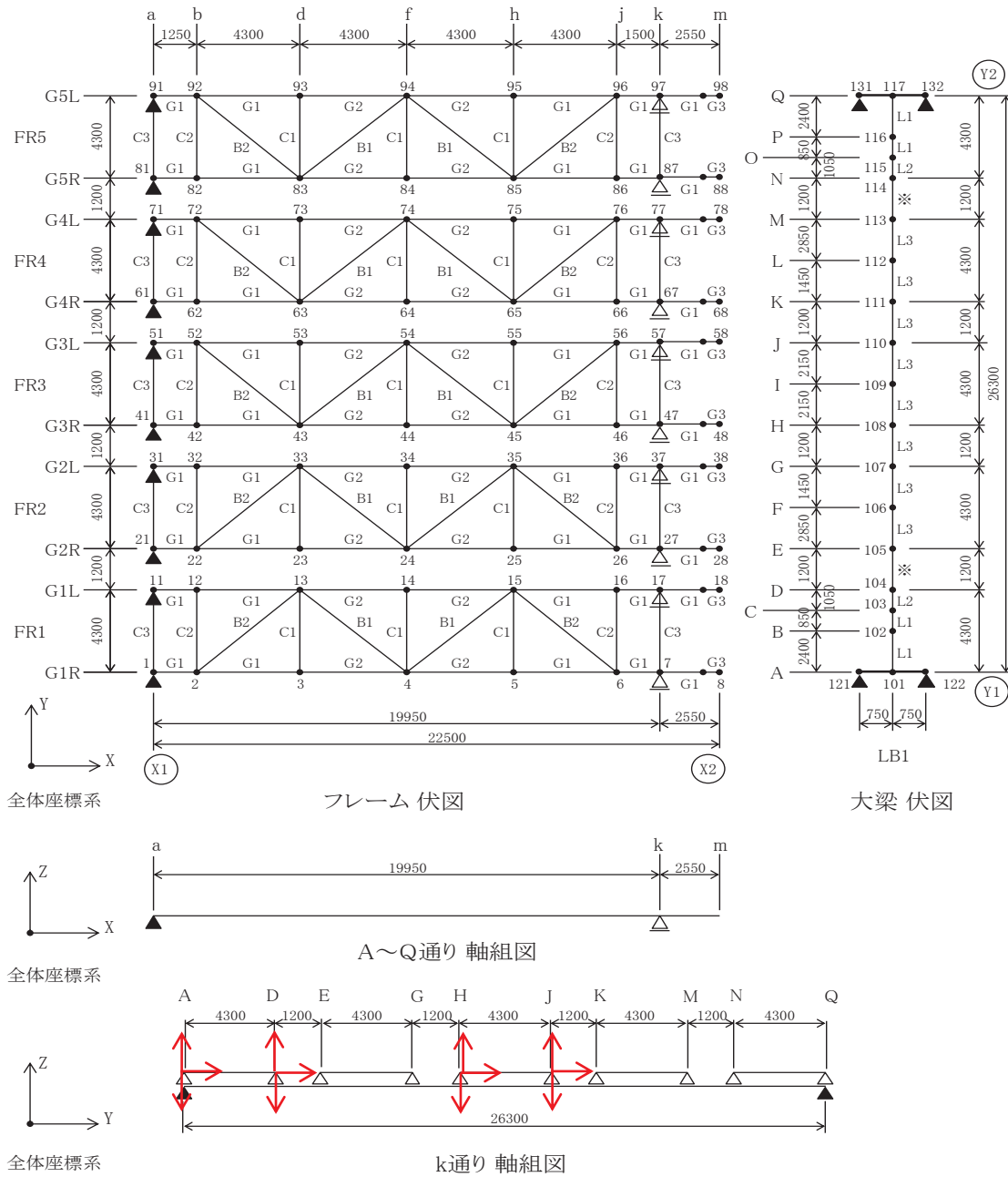


図2 設計飛来物（鋼製材）

6条(竜巻)一別添1一添付3.7一別紙2-2

表 1 設計飛来物の諸言

項目	諸元
種類	鋼製材
形状(mm)	200×300×4200
重量(kg)	135
衝突速度(m/s)	水平：46.6 鉛直：16.7
要素タイプ	シェル要素
ひずみ速度依存性	NEI07-13 の DIF
破断ひずみ	0.14/TF, TF=1 (破断ひずみを超えても要素を消去しない)
質量密度	7.85 ton/m ³
縦弾性係数	2.05×10 ⁵ N/mm ²
ポアソン比	0.3



注) ▲印はゴム支承を示す。△印は可動支承を示す。

各点数字は節点番号を示す。

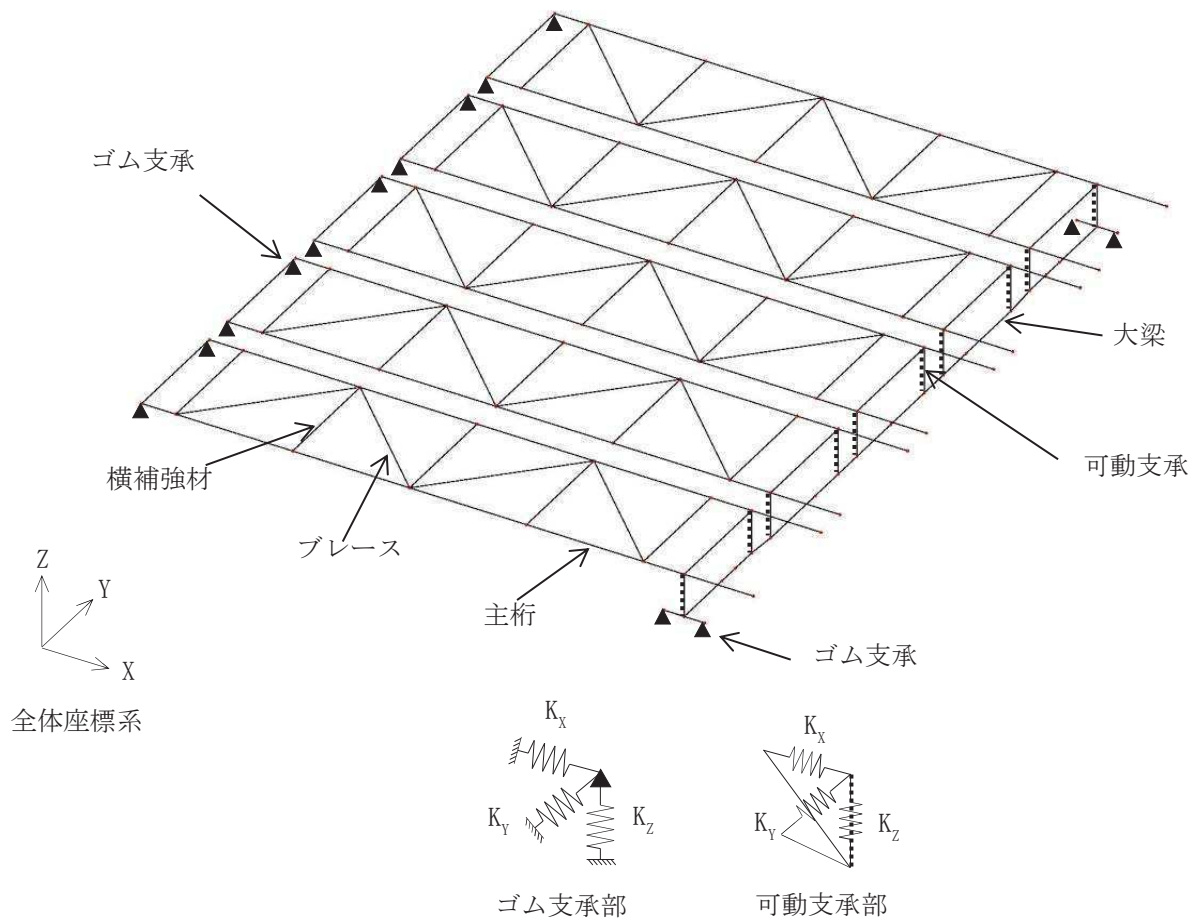
大梁ゴム支承の節点番号：121, 122, 131, 132

フレームゴム支承の節点番号：1, 11, 21, 31, 41, 51, 61, 71, 81, 91

可動支承の節点番号：7, 17, 27, 37, 47, 57, 67, 77, 87, 97

*印の断面性能はL2とL3の平均値とする。

図3 DYNA2Eの解析モデル図 (1/2)



ばね支持条件

記号	ゴム支承		可動支承
	大梁	フレーム	
K_x	弾性	弾性	自由
K_y	弾性	弾性	剛
K_z	剛	剛	剛

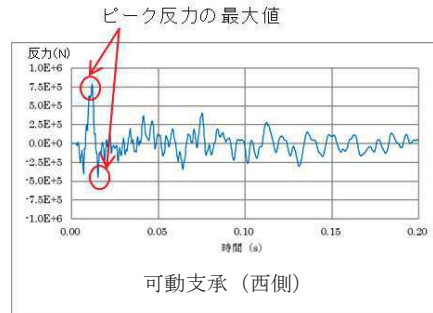
図3 DYNA2Eの解析モデル図 (2/2)

フレームの被衝突部の形状をフラットに設定することで、飛来物の衝突影響を大きく受けるようにしている。

ピーク反力の最大値が静的に継続作用すると設定し応力評価を実施

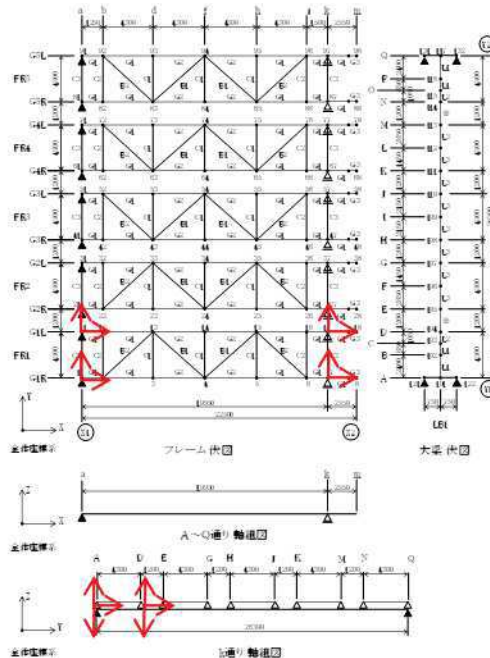


可動支承（西側）



①LS-DYNAにより衝突解析を実施

②支承部の反力の最大値を算出



③DYNA2Eに支承部の反力を入力し、可動支承の下部構造物に作用する応力を算出

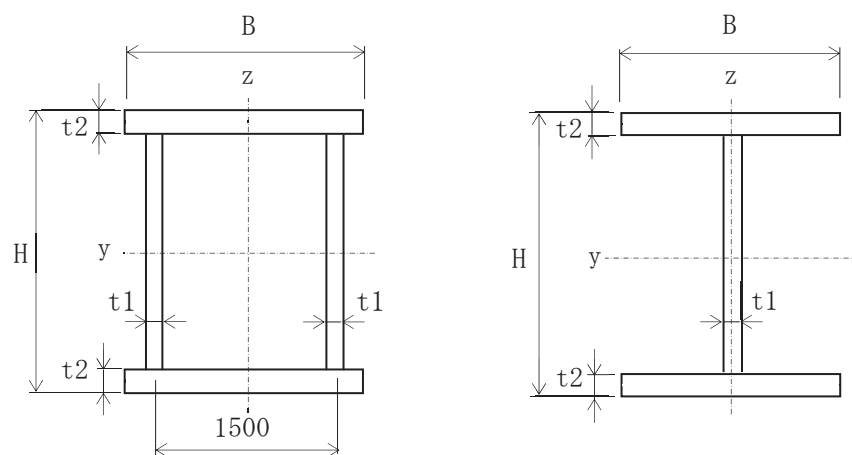
図4 応力等の算出方法（例）

4. フレーム及び大梁の部材断面寸法

表 2 に部材の断面寸法の一覧を示す。また、図 5 に断面寸法の記号説明図を示す。

表 2 部材断面寸法

部材	記号	材質	断面寸法 (mm)				
			H	B	t1	t2	
大梁	L1	SM490A	1300	1580	32	40	
	L2	SM520B	1300	1580	40	40	
	L3	SM520B	1500	1580	40	40	
フレーム	主桁	G1	SM490A	1000	450	19	25
		G2	SM490A	1000	560	19	25
		G3	SM490A	900	450	19	25
	横補強材	C1	SM400A	400	400	19	22
		C2	SM490A	400	400	19	22
		C3	SM490A	400	400	19	25
ブレース	B1	SS400	400	200	8	13	
	B2	SM400A	400	200	9	22	



(a) 大梁

(b) 主桁, 横補強材, ブレース

図 5 部材断面寸法の記号説明図

5. フレーム及び大梁の部材剛性

表 3 に解析に用いる部材剛性の一覧を示す。

表 3 部材剛性

部材	記号	A (cm ²)	I _z (cm ⁴)	I _y (cm ⁴)	I _x (cm ⁴)	As _y (cm ²)	As _z (cm ²)	
大梁	L1	2,045	7,020,000	5,990,000	9,300,000	1,264	780.8	
	L2	2,240	8,120,000	6,230,000	10,400,000	1,264	976.0	
	L3	2,400	9,020,000	8,650,000	13,000,000	1,264	1,136	
フレーム	主桁	G1	405.5	38,000	671,000	686	225.0	180.5
		G2	460.5	73,200	801,000	801	280.0	180.5
		G3	386.5	38,000	528,000	663	225.0	161.5
	横補強材	C1	243.6	23,500	70,100	365	176.0	67.64
		C2	243.6	23,500	70,100	365	176.0	67.64
		C3	266.5	26,700	77,200	497	200.0	66.50
	ブレース	B1	83.37	-	-	-	-	-
		B2	120.0	-	-	-	-	-

A : 断面積

I_z : 部材 z 軸周りの断面 2 次モーメント

I_y : 部材 y 軸周りの断面 2 次モーメント

I_x : ねじり剛性

As_y : 部材 y 軸方向のせん断断面積

As_z : 部材 z 軸方向のせん断断面積

部材軸方向の定義は図 2 に示すとおりである。

6. 材料定数

鋼材の材料定数を表 4 に示す。

表 4 鋼材の材料定数

材料	ヤング率 (N/mm ²)	ポアソン比
鋼材	2.03 × 10 ⁵	0.3

7. ゴム支承及び可動支承の仕様

ゴム支承の設計仕様を表 5 に示す。

可動支承の設計仕様を表 6 に示す。

表 5 ゴム支承の設計仕様

項目	ブラケット 接続部	フレーム／隔壁 接続部
支承種類	地震時水平力分散型ゴム支承	
ゴム体種類	天然ゴム (NR)	
ゴム体有効平面寸法 (mm)	800×800	550×550
総ゴム厚 (mm) (ゴム厚 (mm) × 層数)	192 (24×8 層)	135 (15×9 層)
せん断弾性係数 (N/mm ²)	1.0 (G10)	1.2 (G12)
一次形状係数	8.33	9.17
二次形状係数	4.17	4.07
水平剛性 (kN/mm)	3.333	2.689
鉛直剛性 (kN/mm)	972	863

表 6 可動支承の設計仕様

項目	材質	仕様		
		配合	ポリアミド樹脂	90%以上
すべり材	ポリアミド MC703HL		固形潤滑材	10%以下
		物性値	引張強度 (N/mm ²)	60～70 ASTMD-638
			伸び (%)	15～25 ASTMD-638
			比重	1.11
			表面粗さ	Rz 25 μ 以下
	ステンレス SUS304 SUS316	材料規格	JIS G 4304 JIS G 4305	
圧縮ゴム	クロロプレン 系合成ゴム C08	表面処理	JIS G 4305 No2B	
		材料規格	JIS K 6383	
鋼材 (ピストン ベースポッド レール等)	SS400 SM490	材料規格	JIS G 3101 JIS G 3106	

8. 各部の評価方法

(1) 大梁及びブラケットの応力評価

大梁及びブラケットの断面評価は次式によって行う。

鋼材の基準強度及び式中の各許容応力の算出方法を(a)～(e)に示す。

- ・ 圧縮応力と部材y, z軸 (図5参照) 周りの曲げ応力の組合せ評価

$$\frac{\sigma_c}{f_c} + \frac{\sigma_{by}}{f_{by}} + \frac{\sigma_{bz}}{f_{bz}} \leq 1$$

- ・ せん断応力の評価

$$\tau \leq f_s$$

- ・ 垂直応力とせん断応力の組合せ評価

$$\sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2 - \sigma_x \sigma_y + 3\tau_{xy}^2} \leq f_t$$

σ_c : 圧縮応力 $\sigma_c = N/A$

N : 軸力

A : 断面積

σ_{by} : 部材y軸周りの曲げ応力 $\sigma_{by} = M_y/Z_y$

M_y : 部材y軸周りの曲げモーメント

Z_y : 部材y軸周りの断面係数

σ_{bz} : 部材z軸周りの曲げ応力 $\sigma_{bz} = M_z/Z_z$

M_z : 部材z軸周りの曲げモーメント

Z_z : 部材z軸周りの断面係数

τ : せん断応力 $\tau = Q/A$

Q : せん断力

A : せん断断面積

σ_x, σ_y : 互いに直交する垂直応力

τ_{xy} : σ_x, σ_y の作用する面内せん断応力

f_c : 許容圧縮応力

f_{by} : 部材y軸周りの許容曲げ応力

f_{bz} : 部材z軸周りの許容曲げ応力

f_s : 許容せん断応力

f_t : 許容引張応力

(a) 鋼材の基準強度

次の計算式により算出した値とする。表7に使用鋼材の設計降伏点 S_y 及び設計引張強さ S_u を示す。

$$F = \text{MIN} (1.2S_y, 0.7S_u)$$

F : 鋼材の基準強度 (MPa)

S_y : 「発電用原子力設備規格 設計・建設規格 (JSME S NC1-2005/2007)」に規定される鋼材の設計降伏点 (MPa)

S_u : 「発電用原子力設備規格 設計・建設規格 (JSME S NC1-2005/2007)」に規定される鋼材の設計引張強さ (MPa)

表7 使用鋼材の設計降伏点及び設計引張強さ

鋼材の種類	評価用温度 (°C)	板厚 t (mm)	設計降伏点 S _y (MPa)	設計引張強さ S _u (MPa)
SS400, SM400A	40	t ≤ 40	235	400
SM490A	40	t ≤ 40	315	490
SM520B	40	t ≤ 40	355	520

(b) 許容引張応力

次の計算式により算出した値とする。

$$f_t = 1.5 \cdot \frac{F}{1.5}$$

f_t : 許容引張応力 (MPa)

(c) 許容せん断応力

次の計算式により算出した値とする。

$$f_s = 1.5 \cdot \frac{F}{1.5\sqrt{3}}$$

f_s : 許容せん断応力 (MPa)

(d) 許容圧縮応力

次の計算式により算出した値とする。

i) 圧縮材の有効細長比が限界細長比以下の場合

$$f_c = 1.5 \cdot \left\{ 1 - 0.4 \left(\frac{\lambda}{\Lambda} \right)^2 \right\} \frac{F}{v}$$

$$\lambda = \frac{\ell_k}{i} \quad \Lambda = \sqrt{\frac{\pi^2 E}{0.6F}} \quad v = 1.5 + \frac{2}{3} \left(\frac{\lambda}{\Lambda} \right)^2$$

f_c : 許容圧縮応力 (MPa)

λ : 有効細長比

Λ : 限界細長比

v : 安全率

ℓ_k : 座屈長さ (mm)

i : 座屈軸についての断面二次半径 (mm)

E : 縦弾性係数 (ヤング係数) (MPa)

ii) 圧縮材の有効細長比が限界細長比を超える場合

$$f_c = 1.5 \cdot 0.277F \left(\frac{\Lambda}{\lambda} \right)^2$$

(e) 許容曲げ応力

次の計算式により算出した値とする。

- i) 荷重面内に対称軸を有する圧延形鋼及び溶接組立鋼であって強軸周りに曲げを受けるもの（箱形断面のものを除く）。

次の2つの計算式により計算した値のうちいずれか大きい方の値又は f_t のいずれか小さい方の値とする。

$$f_b = 1.5 \cdot \left\{ 1 - 0.4 \frac{\ell_b^2}{C \lambda^2 i^2} \right\} f_t$$

$$f_b = 1.5 \cdot \frac{0.433EA_f}{\ell_b h}$$

ここに、

f_b : 許容曲げ応力 (MPa)

ℓ_b : 圧縮フランジの支点間距離 (mm)

h : はりのせい (mm)

A_f : 圧縮フランジの断面積 (mm^2)

i : 圧縮フランジとはりのせいの6分の1とからなるT型断面のウェブ軸周りの断面二次半径 (mm)

C : 次の計算式により計算した値又は2.3のうちいずれか小さい方の値（ただし、座屈区間中間の強軸まわりの曲げモーメントが M_1 より大きい場合は、1とする）

$$c = 1.75 + 1.05 \left(\frac{M_2}{M_1} \right) + 0.3 \left(\frac{M_2}{M_1} \right)^2$$

M_1, M_2 : それぞれ座屈区間端部における強軸周りの曲げモーメント。この場合において、 M_2/M_1 は1より小さいものとし、単曲率の場合を負に、複曲率の場合を正とする。

- ii) 荷重面内に対称軸を有する圧延形鋼及び溶接組立鋼であって弱軸周りに曲げを受けるもの、面内に曲げを受けるガゼットプレート、曲げを受ける鋼管及び箱形断面の場合は f_t とする。

(2) ゴム支承の評価

(a) せん断ひずみの評価

i) せん断ひずみの評価式

水平力支持機能は、発生するせん断ひずみが許容せん断ひずみを超えないことを確認する。次式によって、水平変位量を総ゴム厚で除して求めたゴムのせん断ひずみを評価する。

$$\gamma_e = \Delta l_e / \Sigma t_e \leq \gamma_{ea}$$

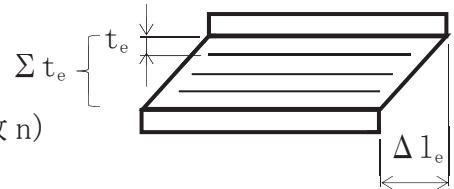
ここに、

γ_e : せん断ひずみ

Δl_e : 水平変位量

Σt_e : 総ゴム厚 (=ゴム 1 層厚 t_e × 層数 n)

γ_{ea} : せん断ひずみの許容値



ii) 引張応力の評価式

地震時の上向きの力によって生じる引張応力を次式によって評価する。

$$\sigma_{te} = R_U / A_{te} \leq \sigma_{ta}$$

ここに、

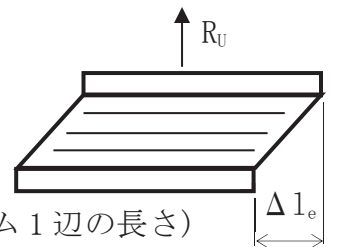
σ_{te} : 引張応力

R_U : 上向きの反力

A_{te} : 移動量を控除した引張に有効な面積

$A_{te} = A_e - B \cdot \Delta l_e$ (B: 有効幅, ゴム支承の積層ゴム 1 辺の長さ)

σ_{ta} : 引張応力の許容値



(b) 座屈安定性の評価

i) 座屈安定性の評価式

圧縮力が作用したときゴム支承本体の座屈に対して安全でなければならぬ。座屈安定性は地震時のせん断変形時における圧縮に有効な面積より算出した圧縮応力により評価する。次式により座屈に対する安全性を確認する。

$$\sigma_{ce} = R_L / A_{ce} \leq \sigma_{cra}$$

ここに、

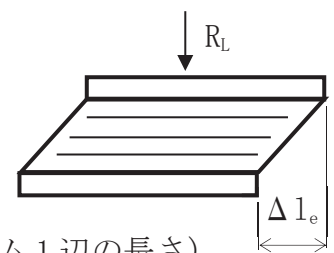
σ_{ce} : 圧縮応力

R_L : 下向きの反力

A_{ce} : 移動量を控除した圧縮に有効な面積

$A_{ce} = A_e - B \cdot \Delta l_e$ (B: 有効幅, ゴム支承の積層ゴム 1 辺の長さ)

σ_{cra} : 道路橋支承便覧に定める座屈を考慮した圧縮応力の許容値



(c) 圧縮応力の許容値

座屈を考慮した圧縮応力の許容値は次式より求める。

$$\sigma_{cra} = G_e \cdot S_1 \cdot S_2 / f_{cr}$$

ここに、

S_1 : ゴム支承の一次形状係数

$$S_1 = A_e / (4 \cdot B \cdot t_e)$$

S_2 : ゴム支承の二次形状係数

$$S_2 = B / \sum t_e$$

f_{cr} : 荷重の大きさ及び発生頻度を考慮した係数

(3) 内部鋼板の引張応力の評価

(a) 内部鋼板の評価式

ゴム支承に補強材として使用する内部鋼板には、下図のように鉛直荷重によって水平方向への引張力 N が発生する。圧縮力が作用したときゴム支承の内部鋼板に生じる引張応力を次式により評価する。

$$\sigma_s = f_c \cdot \sigma_{ce} \cdot t_e / t_s \leq f_t$$

ここに

σ_s : 内部鋼板の引張応力

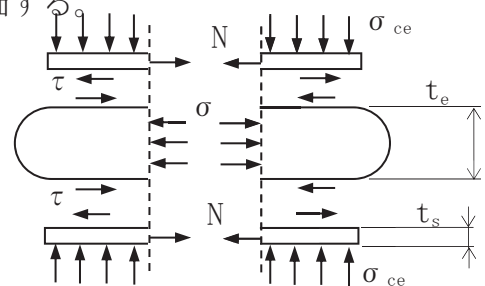
σ_{ce} : 圧縮応力

t_e : ゴム一層の厚さ

t_s : 内部鋼板の厚さ

f_c : 圧縮応力の分布を考慮した引張応力の係数 (=2.0)

f_t : 鋼材の許容引張応力



内部鋼板の引張応力の算出にあたっては、圧縮応力を静的荷重として内部鋼板の引張応力を求めている。ゴム支承平面内の圧縮応力分布を考慮して、実験より最大応力と平均応力の比を確認して係数 f_c が設定されている。

(4) ボルト材の応力評価

(a) 許容引張応力

次の計算式により算出した値とする。

$$f_t = 1.5 \cdot \frac{F}{2}$$

f_t : 許容引張応力 (MPa)

F : 9. (1) (a) に定めるところによる。Sy, SuはJIS規格による降伏点, 引張強さとする。ボルトの使用材料と降伏点及び引張強さは表8のとおりである。

表 8 ボルトの使用材料と JIS 規格による降伏点及び引張強さ

部位	材料	降伏点 (MPa)	引張強さ (MPa)
アンカーボルト	SD390	390	560
ゴム支承受付ボルト	JIS 強度区分 8.8	640	800

(b) 許容せん断応力

次の計算式により算出した値とする。

$$f_s = 1.5 \cdot \frac{F}{1.5\sqrt{3}}$$

f_s : 許容せん断応力 (MPa)

(c) 引張応力とせん断応力を同時に受けるボルトの許容引張応力

せん断応力と引張応力を同時に受けるボルトの許容引張応力 f_{ts} は、次のいずれか小さい方の値とする。

(i) $f_{ts} = 1.4f_{to} - 1.6\tau$

(ii) $f_{ts} = f_{to}$

f_{ts} : せん断力を同時に受けるボルトの許容引張応力 (MPa)

f_{to} : (a)で規定するボルトの引張応力 (MPa)

τ : ボルトに作用するせん断応力 (MPa)

(3) 可動支承の評価

竜巻防護ネットの設計における可動支承の評価項目を表9及び図8に示す。

表9 可動支承評価項目

評価部位	作用力	評価項目
①すべり材	鉛直力（下向き）	支圧
②ピストン	鉛直力（下向き）	曲げ
③圧縮ゴム	鉛直力（下向き）	支圧
④座金	鉛直力（下向き）	支圧
⑤ベースポット突出部	上揚力	曲げ，せん断，支圧
⑥レール	上揚力，水平力	曲げ，引張，せん断
⑦レール取付ボルト	上揚力，水平力	引張，せん断
⑧エンドプレート接合ボルト	上揚力，水平力	引張
⑨ベースポット支圧部	水平力	支圧
⑩上部接合ボルト	上揚力，水平力	引張，せん断
⑪下部接合ボルト	上揚力，水平力	引張，せん断
⑫ベースプレート	上揚力，水平力	曲げ，せん断
⑬ソールプレート(上板)	鉛直力(下向き)	支圧
⑭せん断キー	水平力	せん断

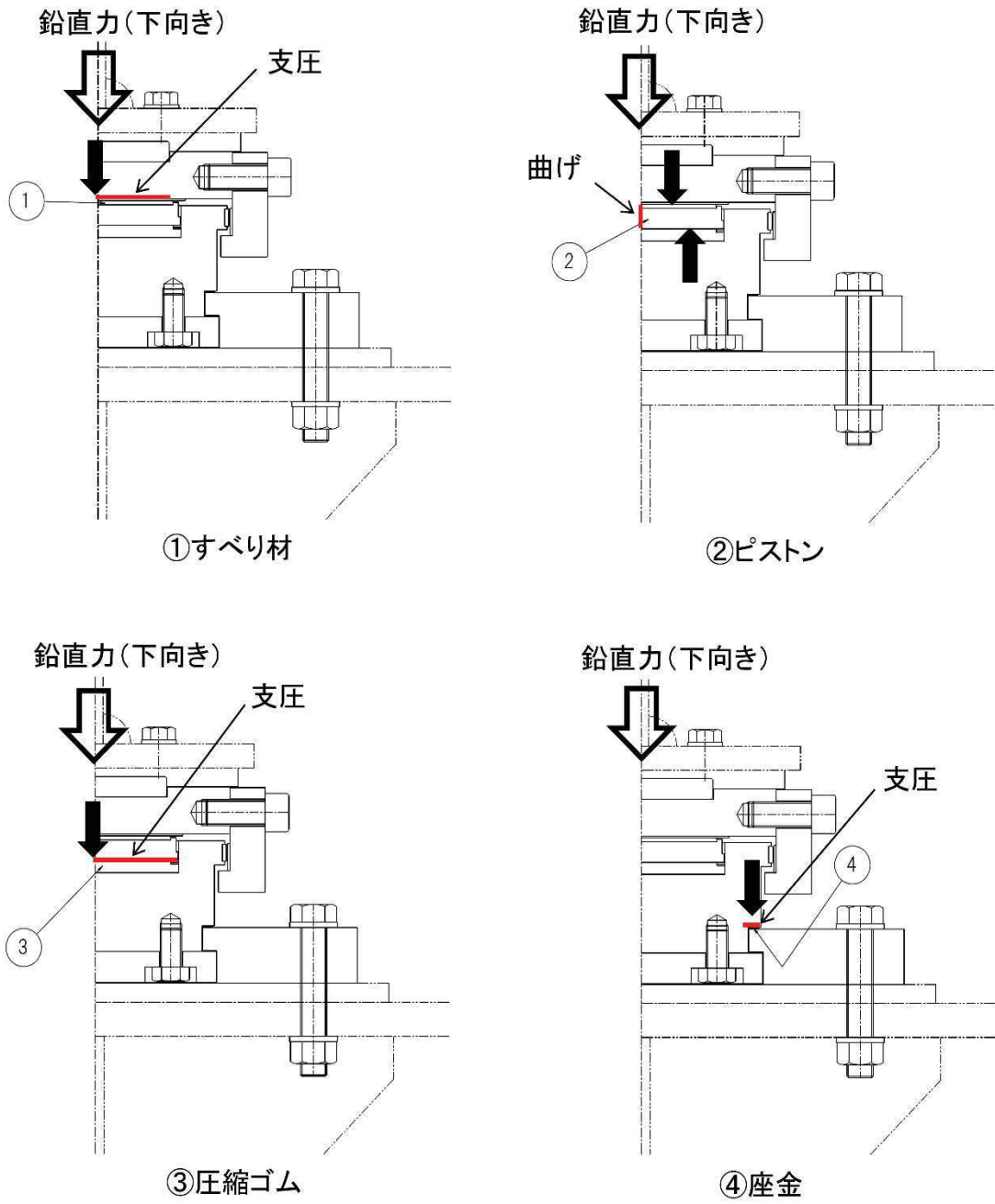


図8 可動支承の評価項目模式図 (1/5)

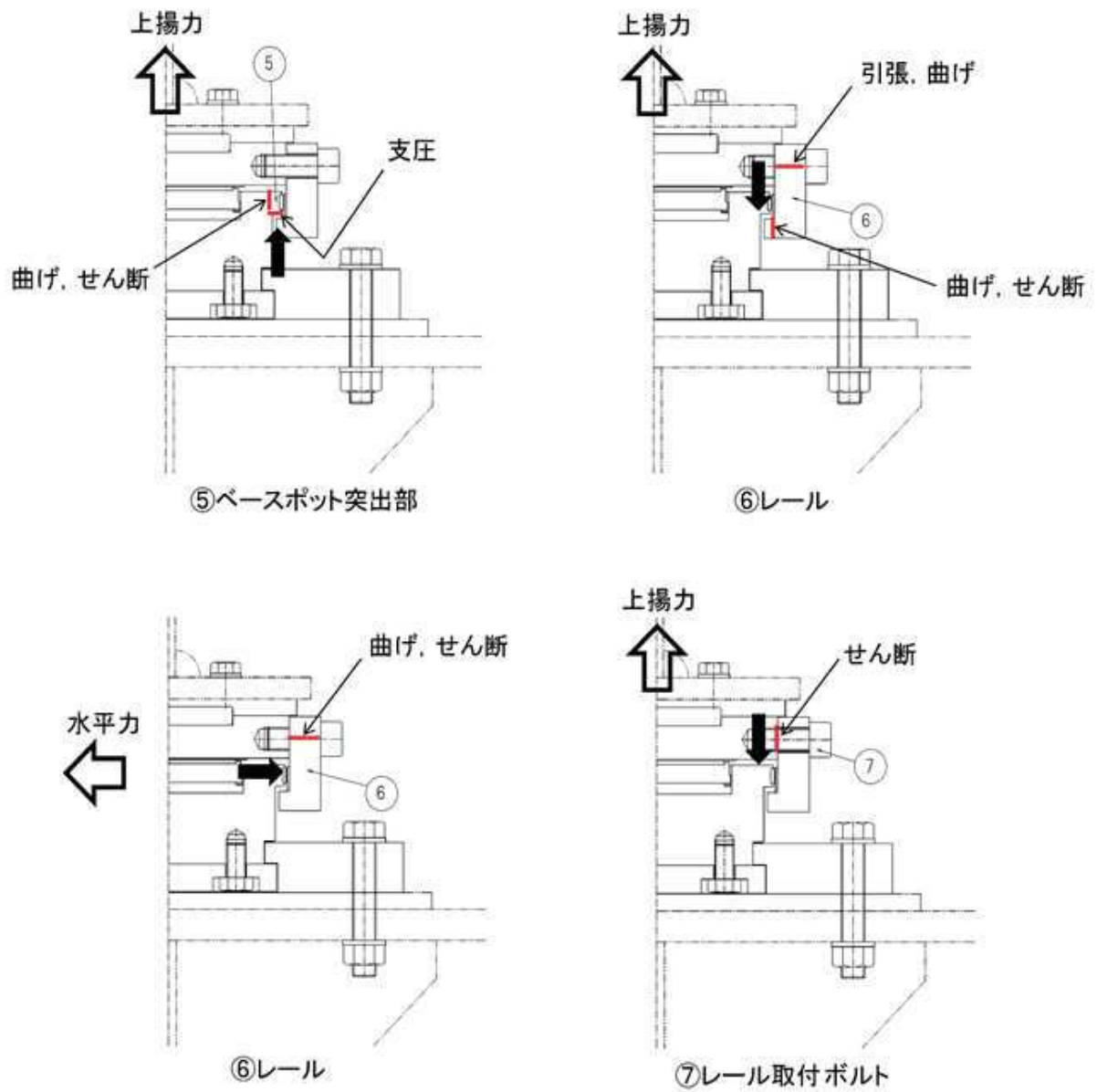


図8 可動支承の評価項目模式図 (2/5)

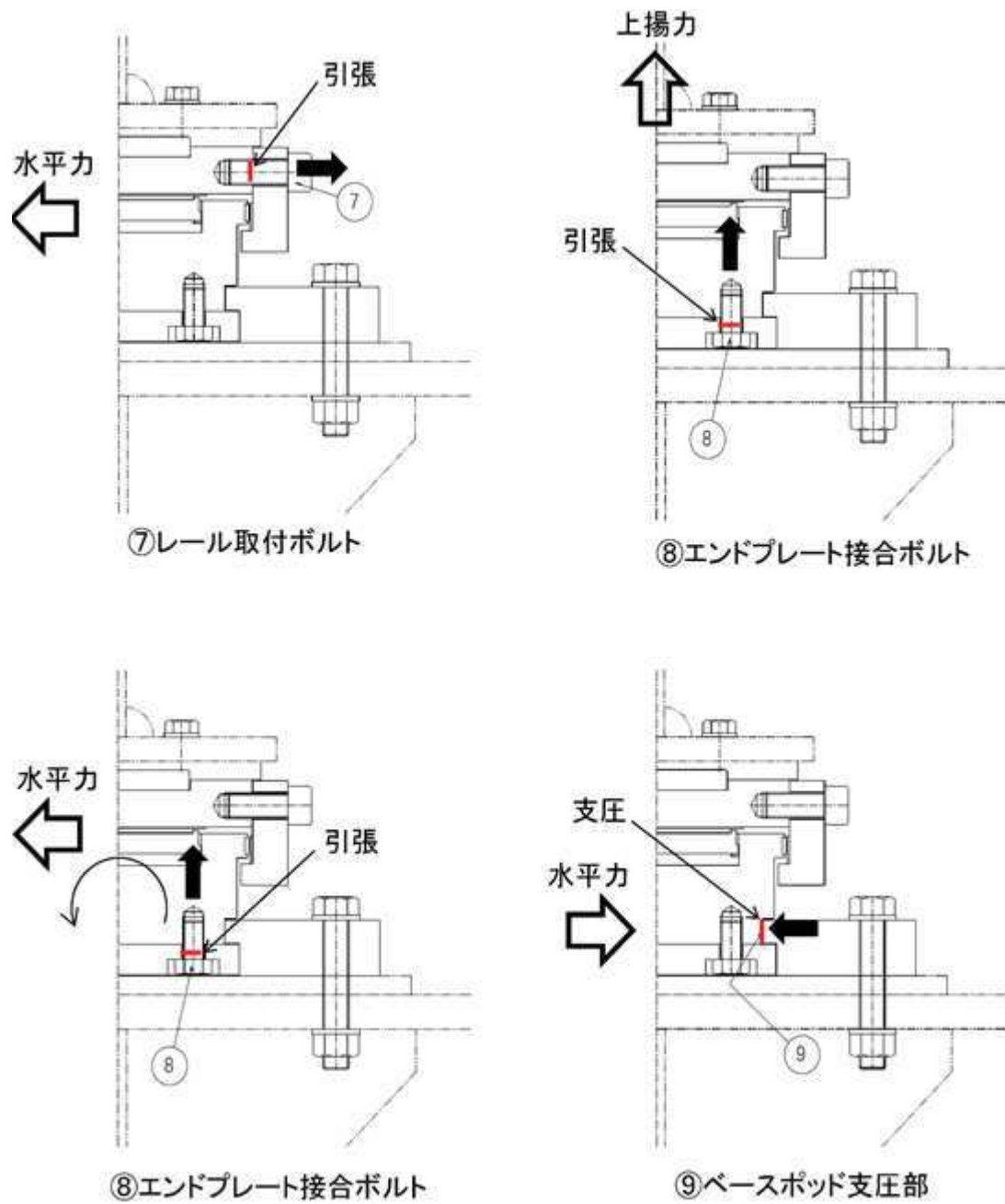


図8 可動支承の評価項目模式図 (3/5)

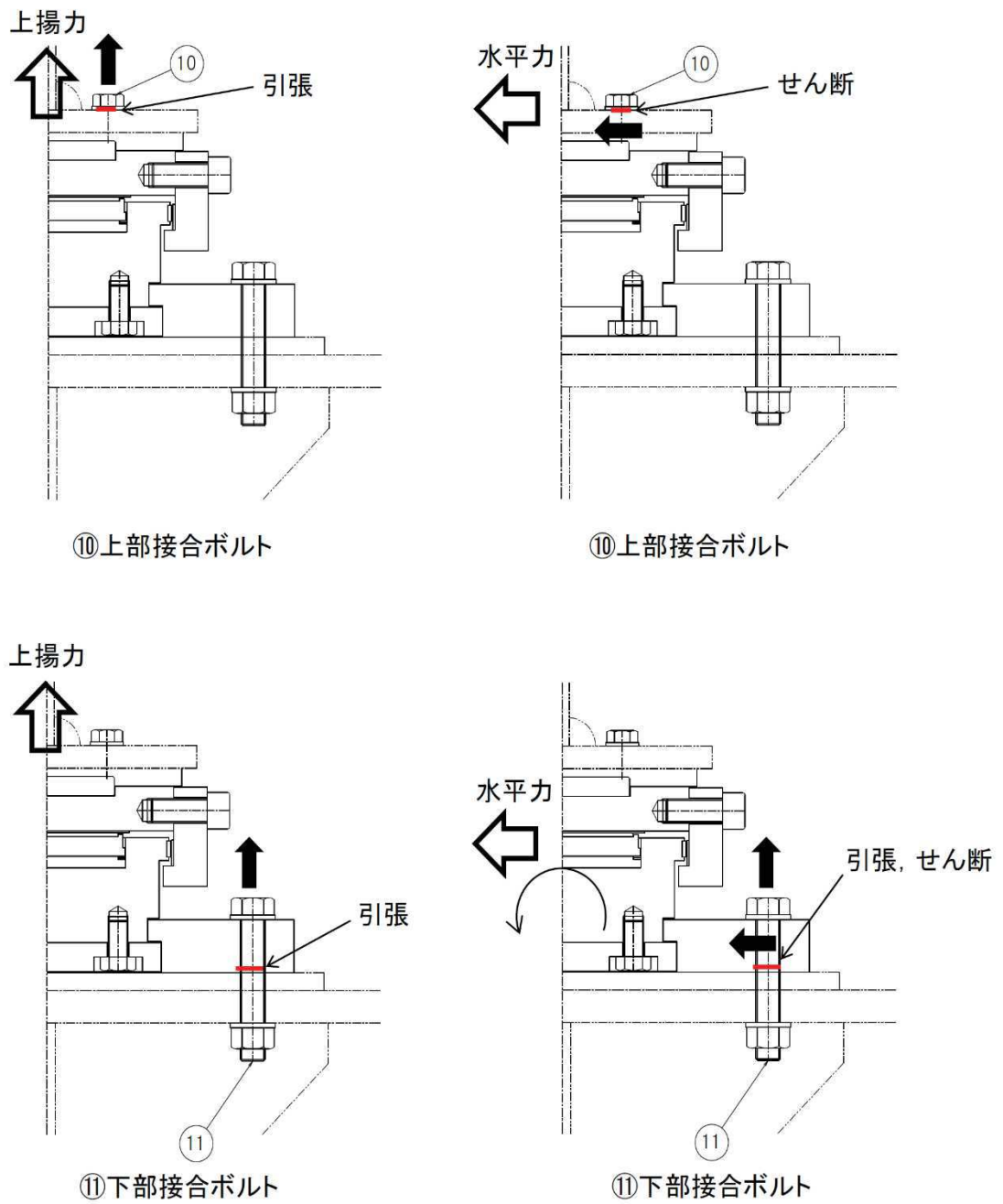


図8 可動支承の評価項目模式図 (4/5)

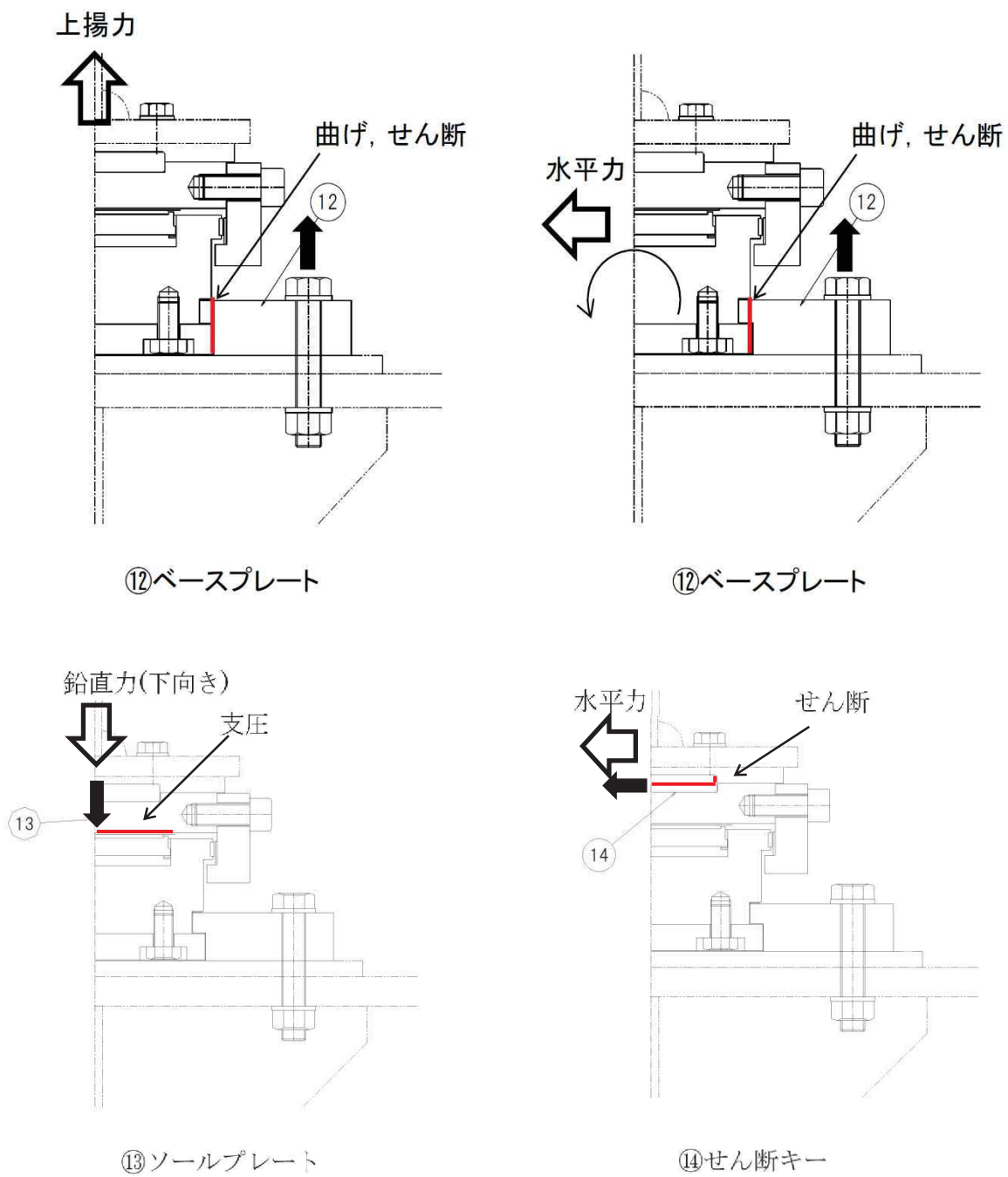


図8 可動支承の評価項目模式図 (5/5)

竜巻防護ネットの構造成立性確認結果について (STEP1)
(ゴム支承の剛性を耐震評価時に用いるせん断剛性とする場合)

1. 解析条件

ゴム支承に支持されるフレームに飛来物が衝突した際の挙動を確認するため、図1に示すフローのとおり、ゴム支承の剛性を考慮した衝突解析を実施する。

衝突解析は、ゴム支承による影響が最も大きくなると想定される条件（飛来物姿勢、衝突位置、飛来方向）で実施し、ゴム支承の影響を考慮した場合において、フレームゴム支承、可動支承がフレームを支持する機能を維持可能な構造強度を有することを確認する。

評価対象は支持機能に大きな影響を与える部材であるフレームゴム支承と可動支承とする。解析条件とその考え方を表1、2及び図2に示す。

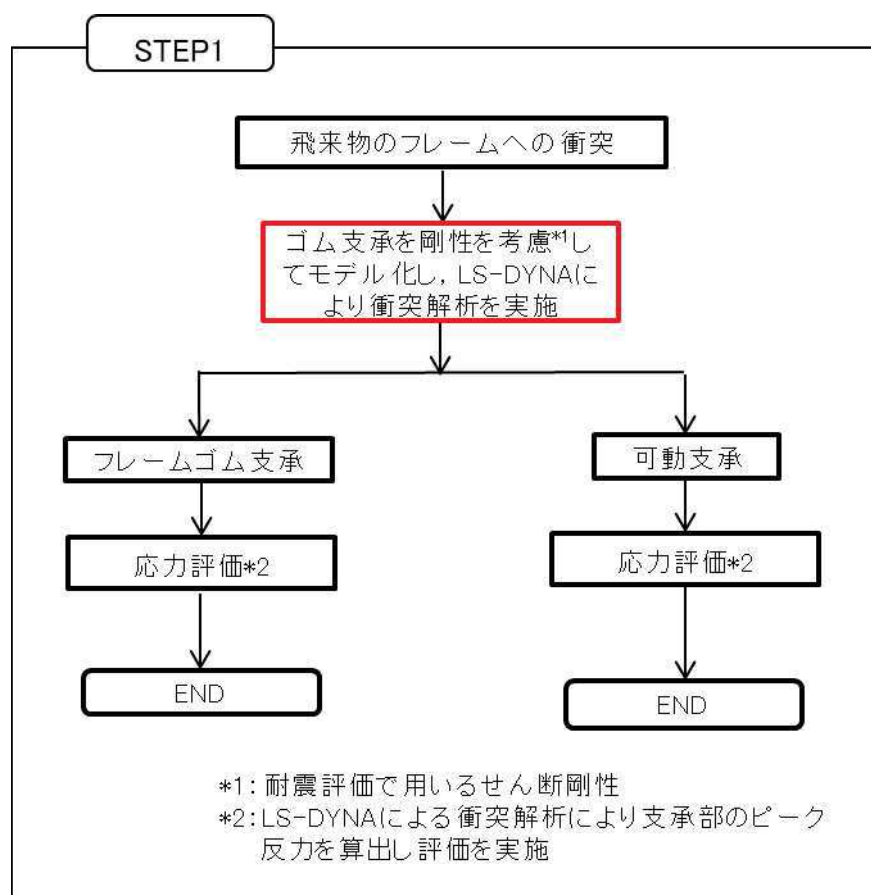


図1 STEP1 構造成立性確認フロー

表 1 STEP1 の解析条件

設定項目	設定条件	考え方
ゴム支承の剛性	耐震評価で用いるせん断剛性 (表 2 参照)	設計飛来物がフレームに衝突した場合に想定されるゴム支承の変位速度は、約 0.1m/s と考えられる (別紙 3 (補足 1) 参照)。この変位速度は、地震時のゴム支承の動的特性を把握するために実施した振動数依存性試験におけるゴム支承の変位速度 (0.06~0.6m/s) に包絡されることから、飛来物衝突においても、耐震評価で用いるゴム支承のせん断剛性を適用する。
衝突方向	水平方向	配置及び形状から水平方向から衝突する可能性は極めて低いと考えられるが、鉛直速度よりも最大速度が大きく、ゴム支承のせん断剛性への影響が大きい方向。
衝突位置	ゴム支承近傍	ゴム支承への影響が大きくなると考えられる位置。
飛来物姿勢	長辺全面で衝突	フレームには防護板や補強用のリブが設置されることから、平面となる面積が限られており、長辺全面が部材に垂直に衝突する可能性は極めて低いと考えるが、最もゴム支承に対し厳しい姿勢による挙動を確認する観点から、長辺全面が衝突すると設定。

表 2 フレームゴム支承、可動支承の結合条件

方向	フレームゴム支承	可動支承
X	弾性	自由
Y	弾性	剛
Z	剛	剛

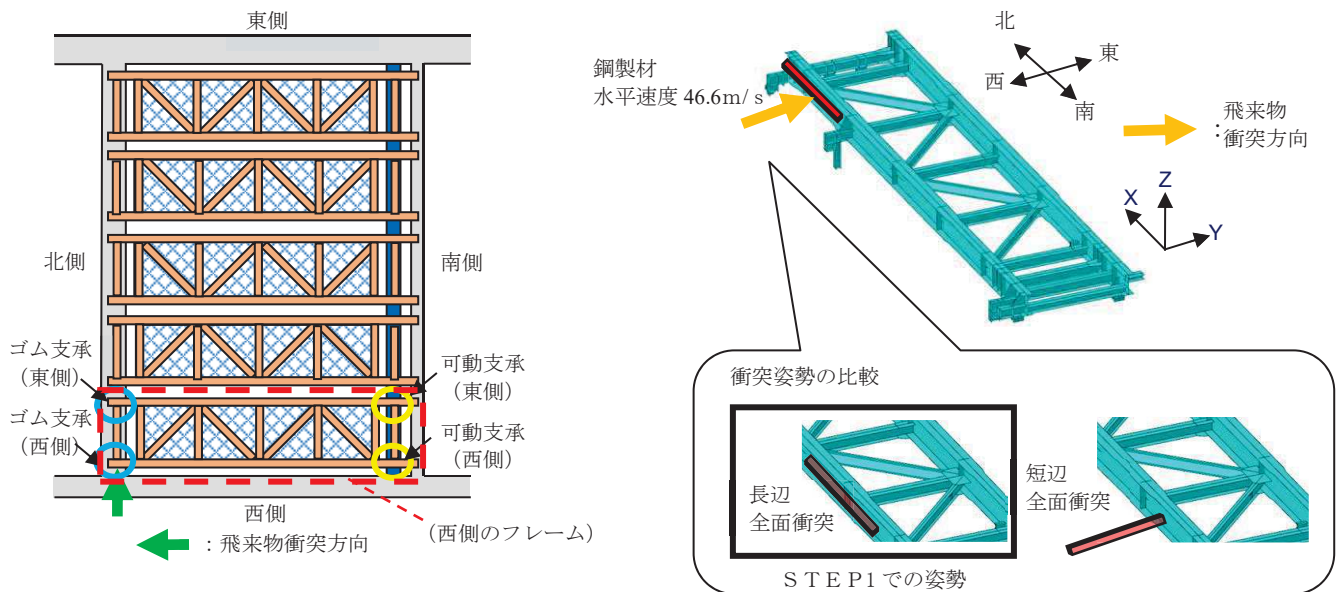


図 2 飛来物衝突位置及び解析モデル図 (STEP1)

2. 解析結果

フレームゴム支承の衝突解析結果を表 3、可動支承の衝突解析結果を表 4 に示す。

フレームゴム支承のうち、上載するフレームを支持する機能を担う部材は①ゴム体であり、これらの部材に発生する応力等は許容値を超えず、「4.1.2 支持部材 (4)」に定める構造強度上の評価方針を満足する。

可動支承については、上載するフレームを支持する機能を担う部材は①ソールプレート、⑥ベースポット、⑫ベースプレートであり、これらの部材に発生する応力等は許容値を超えず、「4.1.2 支持部材 (4)」に定める構造強度上の評価方針を満足する。

以上より、ゴム支承の剛性を考慮した場合において、ゴム支承による影響が最も大きくなると想定される個所に飛来物が衝突した場合でも、ゴム支承、可動支承は構造強度上の評価方針を満足し、フレームを支持する機能を維持可能な構造強度を有することを確認した。

表 3 STEP1 におけるフレームゴム支承の解析結果 (注) 本評価結果は暫定値

評価対象	評価項目	発生値		許容値	
		西側	東側		
フレーム ゴム支承	①ゴム体	応力度 (引張)	1.2 MPa	0.7MPa	2.0 MPa ^{※1}
		せん断ひずみ	61%	60%	250 % ^{※1}
		応力度 (圧縮)	2.3MPa	2.1MPa	29.8MPa ^{※1}
	②内部鋼板	応力度 (引張)	22MPa	20MPa	280 MPa ^{※2}
	③取付ボルト	応力度 (組合せ)	63MPa	56MPa	420 MPa ^{※2}
④アンカーボルト	応力度 (組合せ)	86MPa	68MPa	294 MPa ^{※2}	

※1 : 「道路橋示方書・同解説 V 耐震設計編 (H14.3)」に基づく道路橋支承便覧による許容値

※2 : JEAG4601 に基づく許容応力状態IV_AS の許容応力

□ : 支持機能を担う部材

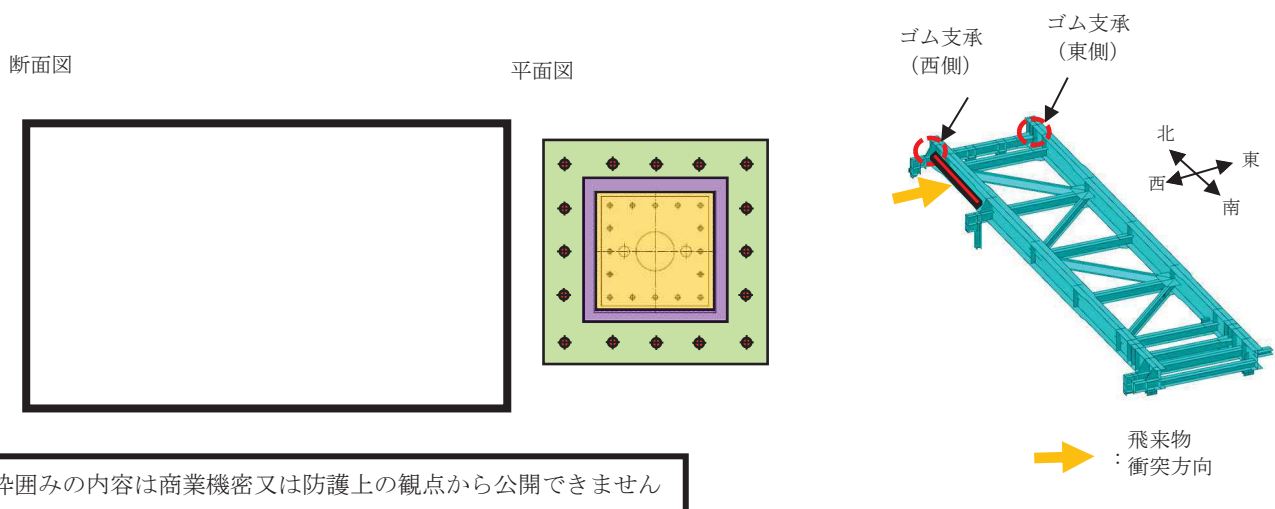


図 3 フレームゴム支承の構造図

表 4 STEP1 における可動支承の評価結果

(注) 本評価結果は暫定値

評価対象	評価項目	発生値 [MPa]		許容値 [MPa] ※1		
		西側	東側			
可動 支承	① ソールプレート	18	21	351		
	② すべり材	22	25	60 (メーカー値)		
	③ 圧縮ゴム	18	21	50 (メーカー値)		
	④ ピストン	65	74	280		
	⑤ 座金	57	65	335		
	⑥ ベースポット	突出部	せん断応力	16	15	148
			曲げ応力	33	32	258
		支圧部	支圧応力	67	66	351
			支圧応力	110	110	351
	⑦ レール	曲げ応力	<u>400</u>	<u>390</u>	343	
		引張応力	8.8	8.7	343	
		せん断応力	54	54	198	
⑧ レール取付ボルト	引張応力	<u>600</u>	<u>600</u>	525		
	せん断応力	37	40	404		
⑨ エンドプレート接合ボルト	引張応力	<u>450</u>	<u>450</u>	420		
⑩ 上部接合ボルト	引張応力	72	71	420		
	せん断応力	220	220	323		
⑪ 下部接合ボルト	引張応力	210	210	420		
	せん断応力	240	230	323		
⑫ ベースプレート	せん断応力	11	11	198		
	曲げ応力	180	170	343		

※1: メーカー値でないものは、JEAG4601に基づく許容応力状態IV_ASの許容応力

- : 支持機能を担う部材
- : 許容値を超えるもの

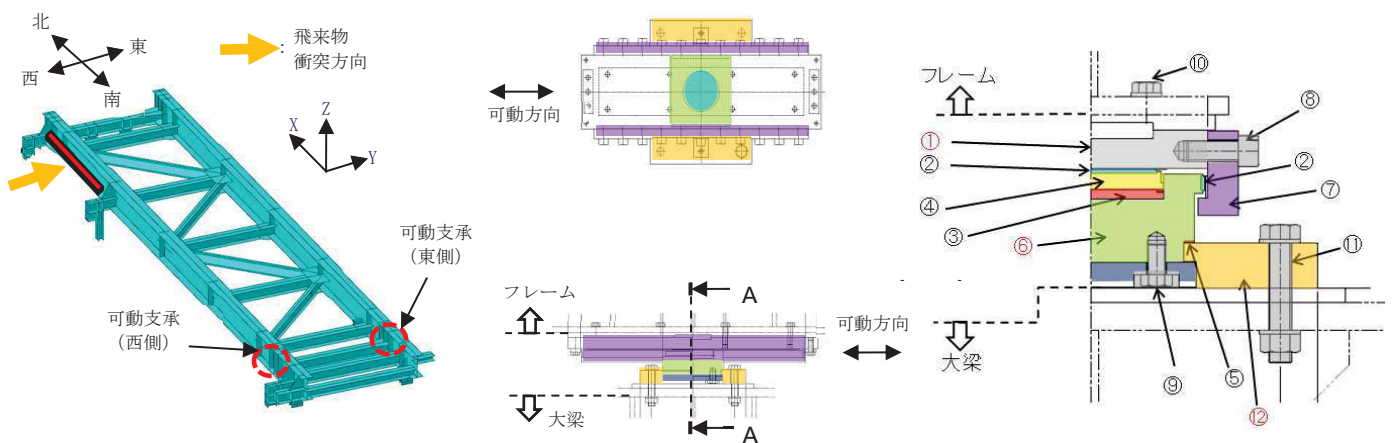


図 4 可動支承の構造図

衝突解析に対するゴム支承の影響に対する検討

竜巻防護ネットに採用する地震時水平力分散型ゴム支承は、ゴム支承のせん断剛性を利用して、上部構造の慣性力を複数の下部構造に分散させる機能を持つ。耐震設計については「道路橋示方書・同解説（（社）日本道路協会，平成14年3月）」及び「道路橋支承便覧（（社）日本道路協会，平成16年4月）」に則り、線形ばね要素でモデル化し、ゴム支承による荷重の低減効果を見込んだ耐震評価を実施する。（竜巻防護ネットの耐震評価方針については、設置許可基準規則第4条に対する適合状況説明資料『設計基準対象施設について（第4条地震による損傷の防止）』で説明）

一方、飛来物の衝撃荷重によるゴム支承の影響・評価については、先行プラントにおいて審査実績がないことや、評価に関わる規格類が制定されていないことを踏まえ、衝突解析におけるゴム支承の影響について、以下のとおり検討を実施した。

1. 飛来物衝突時と地震時におけるゴム支承変位速度の比較

(1) 検討方法

竜巻防護ネットのフレームはゴム支承に支持されているため、飛来物が衝突した場合や地震時にはフレームが移動する。フレームの移動速度が飛来物衝突時と地震時で異なる場合、ゴム支承の挙動が異なることが考えられる。

この影響を検討するため、飛来物衝突後のフレーム移動速度から想定されるゴム支承の変位速度と、耐震評価において想定するゴム支承の変位速度を比較し検討する。

(2) 飛来物衝突時のフレーム速度の算出

竜巻防護ネットのフレームに飛来物が衝突した際のフレームの移動速度は、衝突前後の運動量保存則から算出する。算出にあたって、ゴム支承のばね剛性はフレームの移動に対し抵抗となり得るが、この影響はないものとして扱う。飛来物はフレームの南側に衝突し、衝突後はフレームと飛来物が一体となって移動を始めるものとする。（図1参照）

以上の条件から、運動量保存則から以下の式が成り立つ

$$m v = (m + M) V \cdots \textcircled{1}$$

ここで、 m ：設計飛来物（鋼製材）重量（ $m = 135\text{kg}$ ）

v ：設計飛来物（鋼製材）衝突速度（ $v = 46.6\text{m/s}$ ）

M ：フレーム重量（ $M = 62000\text{kg}$ ）

V ：衝突後のフレーム移動速度（ m/s ）

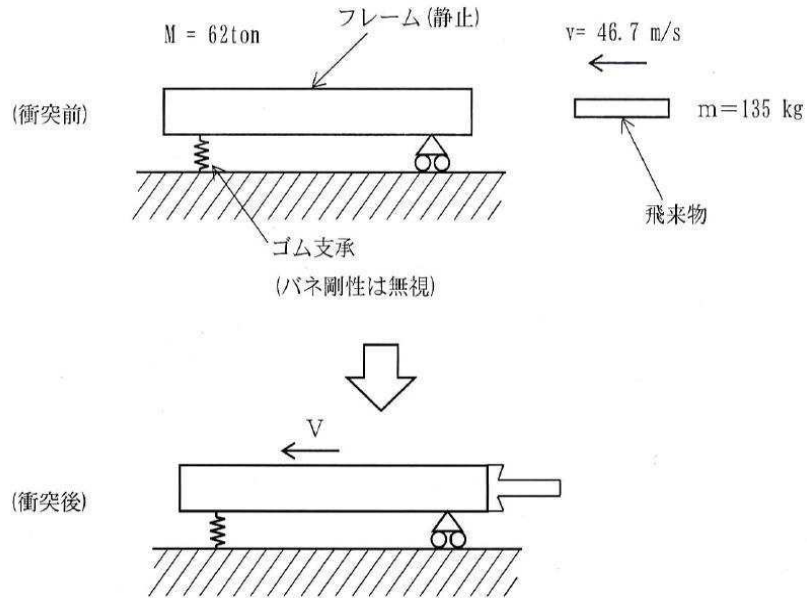


図1 飛来物衝突前後のイメージ

①式より,

$$\begin{aligned}
 V &= m v / (m + M) \\
 &= 135 \times 46.6 / (135 + 62000) \\
 &\doteq 0.1 \text{ (m/s)}
 \end{aligned}$$

上記のとおり、フレームの質量が飛来物に比べて著しく大きいことから、衝突後のフレームの移動速度は最大でも約0.1m/sとなる。フレームはゴム支承に支持されていることから、ゴム支承の変位速度はフレームの移動速度と同等の速度になると想定される。

(3) ゴム支承特性試験について

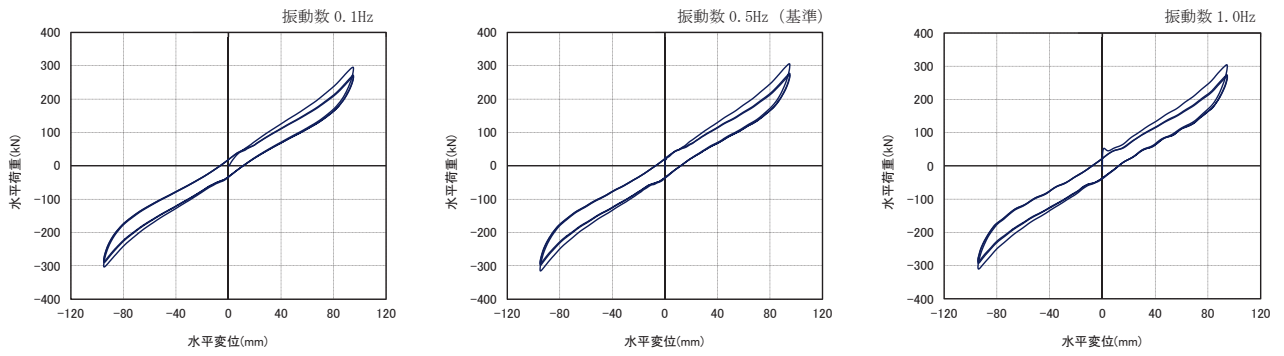
ゴム支承の動的特性を把握するための試験のうち振動数依存性試験を実施している。本試験は、ゴム支承を振幅95mmの単振動(0.1~1Hzの振動数)でせん断変形させた際の剛性を実測したものである。試験結果を図2に示す。(図2は「設置許可基準規則第4条に対する適合状況説明資料『設計基準対象施設について(第4条 地震による損傷の防止)』」より抜粋)

ここで、変位 $x = A \sin \omega t$ より ($A=95\text{mm}$, $\omega = 2\pi f$, $f=0.1, 0.5, 1.0\text{Hz}$)
 変位速度 $\dot{x} = A \omega \cos \omega t$ であるから、変位速度の最大値は $A \omega$ となる。

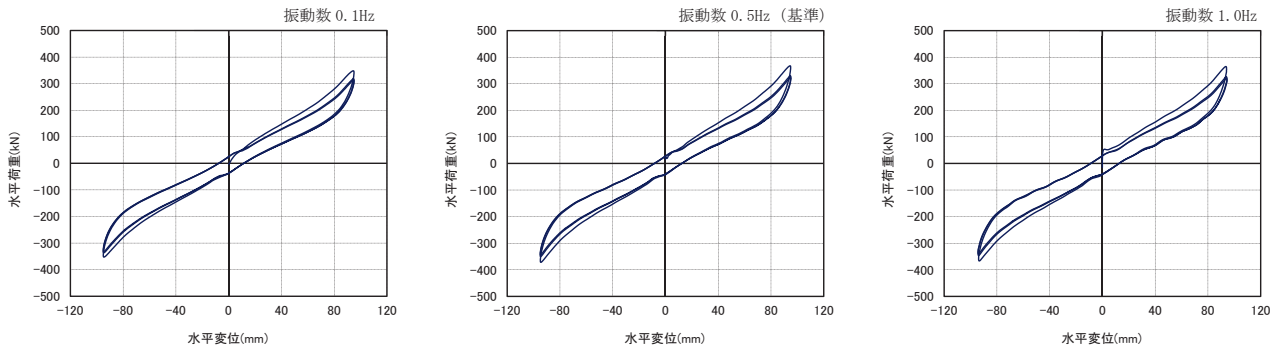
$$f = 0.1\text{Hz} \text{ のとき, } A \omega = 95 \times 2\pi \times 0.1 \doteq 0.06\text{m/s}$$

$$f = 1.0\text{Hz} \text{ のとき, } A \omega = 95 \times 2\pi \times 1.0 \doteq 0.60\text{m/s}$$

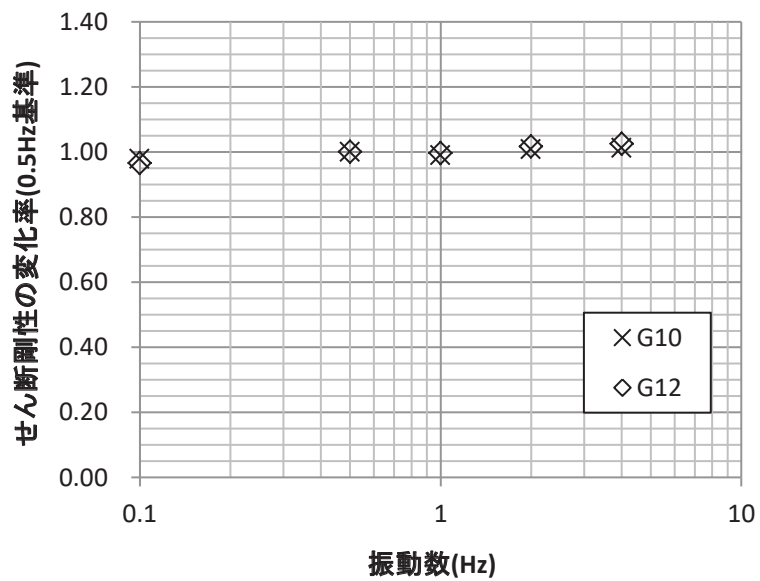
よって振動数依存性試験における変位速度の最大値は約0.06~0.60m/sの範囲となる。試験結果から、この速度範囲において、せん断剛性の変化は無視できるものであることを確認している。



荷重—変位曲線 (G10)



荷重—変位曲線 (G12)



* 2Hz, 4Hz の結果は補正式より算出

(c) 振動数依存性試験

図 2 せん断特性試験結果

(4) 検討結果

飛来物衝突後のフレーム移動速度から想定されるゴム支承の変位速度は約0.1m/s程度である。一方、振動数依存性試験結果から、ゴム支承の変位速度が約0.06～0.60m/sの速度範囲において、せん断剛性の変化は無視できるものであることを確認している。

よって、飛来物衝突時のゴム支承の変位速度は、振動数依存性試験で確認している速度範囲内であることから、飛来物衝突時においてもゴム支承のせん断剛性は適用できると考える。

2. 衝突解析におけるゴム支承境界条件の影響確認

前項の検討を踏まえて、耐震評価に使用したせん断剛性を考慮した衝突解析を実施し、衝突解析におけるゴム支承せん断剛性の影響を確認する。

(1) 検討方法

ゴム支承に支持される竜巻防護ネットに飛来物が衝突した場合、飛来物による衝撃荷重がフレームや大梁を介してゴム支承に伝わり変形することにより、衝撃荷重が低減されることが考えられる。

この影響について、衝突解析におけるゴム支承の境界条件を耐震評価に使用した線形ばねモデルと同等としたものと、ゴム支承の影響を排除する観点で3方向固定としてモデル化したものでそれぞれ衝突解析を実施し、ゴム支承と可動支承へ伝達される衝撃荷重の差を比較する。

(2) 検討における解析条件

衝突解析は、解析コード「LS-DYNA」を用いて3次元 FEM モデルによりフレームをモデル化し評価を実施する。フレームはシェル要素でモデル化し、境界条件は端部を固定条件としたものと、ゴム支承を線形ばねモデルとし、水平剛性を考慮したものでそれぞれ解析を実施する。可動支承の境界条件は、可動方向はフリー、固定方向は固定の条件とする。飛来物の衝突方向については、ゴム支承の剛性が小さく、変形が大きい水平方向からの水平衝突とし、衝突位置はフレームの中央に衝突したケースを代表として実施する。検討における解析条件を表1に、検討に用いる衝突位置や解析モデルを図3に示す。

表 1 検討における解析条件

検討ケース		①フレームゴム支承部を固定としてモデル化	②フレームゴム支承部を線形ばねモデル化
解析モデル		LS-DYNA による 3 次元 FEM モデル	
境界条件	ゴム支承	固定条件	線形ばねモデル* ¹ 水平剛性：2.689 (kN/mm) 鉛直方向：固定条件* ²
	可動支承	可動方向は拘束なし 非可動方向は固定条件	
衝突方向		ゴム支承の剛性が小さく，変形量が大い水平方向（西から東）からの衝突	
衝突位置		フレーム中央	

*1：耐震評価モデルと同様の剛性を設定

*2：ゴム支承の鉛直方向は十分に剛性が高い(鉛直剛性 863 (kN/mm))ことから固定条件としてモデル化する

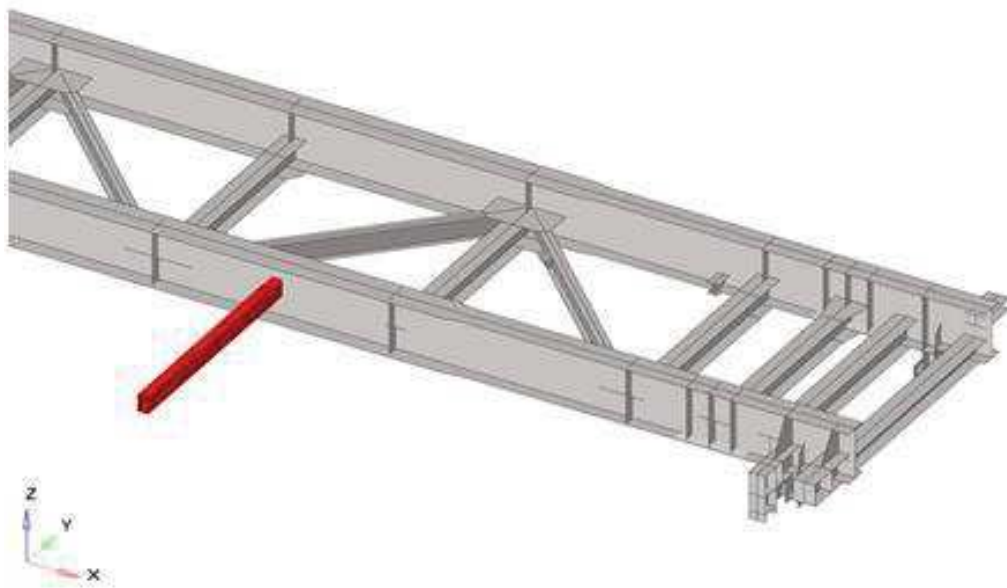
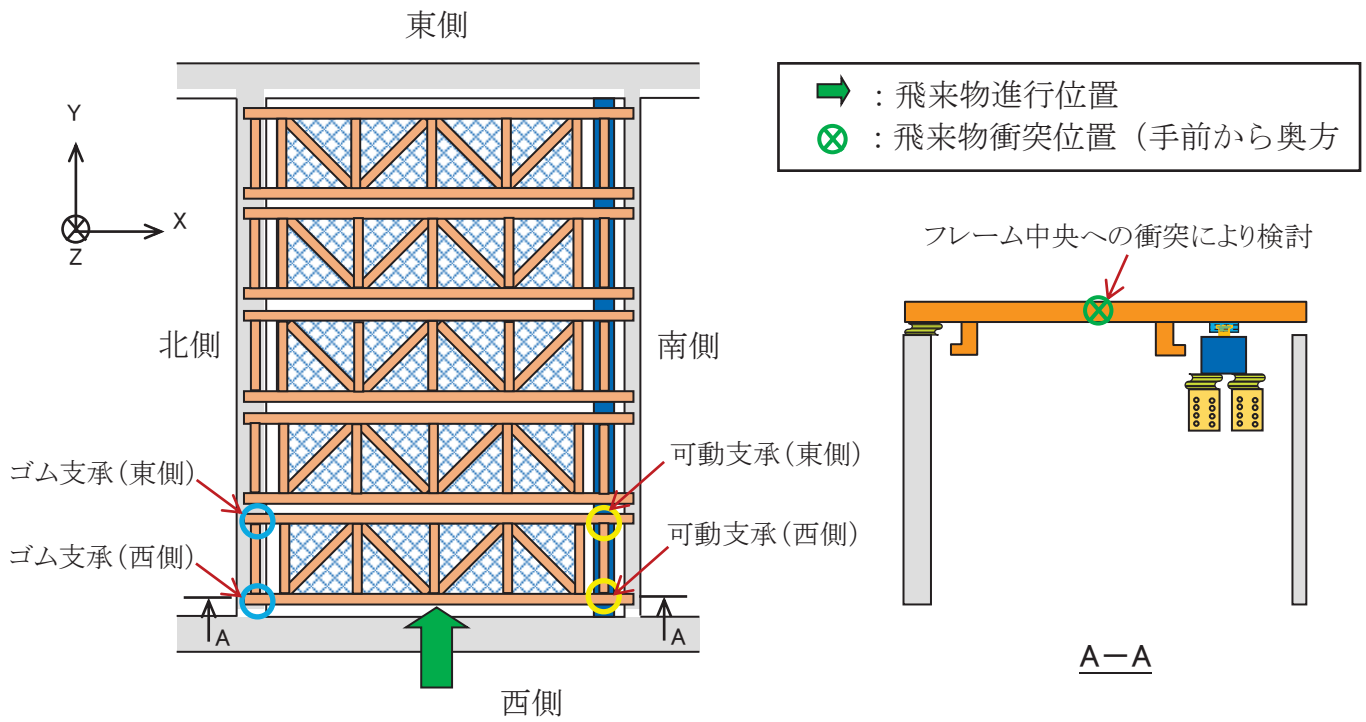


図3 ゴム支承の影響検討における飛来物衝突位置及び解析モデル図

(3) 検討結果

検討の結果、ゴム支承と可動支承へ伝達される衝撃荷重は、ゴム支承の境界条件を固定条件とした場合に大きな反力が発生する結果となることを確認した。特にゴム支承における衝撃荷重に大きな差が生じており、ゴム支承のせん断剛性を固定条件とすると、ゴム支承自体に発生する衝撃荷重が非常に大きくなることを確認した。検討結果を表2に示す。

なお、今回の検討は水平方向からの衝突に対する結果であるが、ばね剛性を考慮することによる影響は鉛直方向についても同様であり、境界条件を固定とした場合、衝撃荷重は大きくなることが想定される。

表2 ゴム支承せん断剛性影響の検討結果

評価対象			衝撃荷重 (ピーク値) (kN)	
			ゴム支承境界条件	
			固定	せん断剛性有
ゴム支承 (東側)	X 方向	+側	456	2
		-側	-478	-4
	Y 方向	+側	229	1
		-側	-265	-24
ゴム支承 (西側)	X 方向	+側	429	4
		-側	-415	-2
	Y 方向	+側	224	1
		-側	-260	-24
可動支承 (東側)	X 方向	+側	0	0
		-側	0	0
	Y 方向	+側	454	424
		-側	-508	-392
可動支承 (西側)	X 方向	+側	0	0
		-側	0	0
	Y 方向	+側	300	265
		-側	-375	-355

3. まとめ

衝突時と地震時においてゴム支承の変位速度について有意な差がないことから、衝突解析においても耐震評価と同等条件でゴム支承をモデル化した評価が適用可能と考えられる。

そこで、ゴム支承のせん断剛性を考慮したものと、考慮しない固定条件としたものでそれぞれ衝突解析を実施し、衝突時におけるゴム支承のせん断剛性の影響を確認した。解析の結果から、ゴム支承を固定条件とすると特にゴム支承自体に発生する衝撃荷重が非常に大きくなることを確認した。この場合、ゴム支承の下部構造に伝達される荷重も大きくなるため、下部構造に対しても厳しい条件となることを確認した。

以上

設計飛来物衝突によるフレームの移動量検討について

1. 検討方法

「衝突解析に対するゴム支承の影響に対する検討 (別紙3 (補足1))」の検討により、飛来物衝突後のフレームの移動速度は最大でも約0.1m/sとなる。

飛来物の衝突により、フレームゴム支承のアンカーボルトが機能喪失し、フレームゴム支承と隔壁の拘束がなく、フレームゴム支承がフレームと一体となって水平移動する場合を想定しフレーム移動量を算出する。なお、検討にあたっては、可動支承の影響が少なく、フレームの移動量が大きくなる南側からの飛来物衝突により検討する。また、アンカーボルトの破断によるエネルギー吸収が想定されるが、この影響はないものとして扱う。(本検討条件は、フレームゴム支承のアンカーボルトが機能喪失した状態で飛来物が衝突したものに相当する)

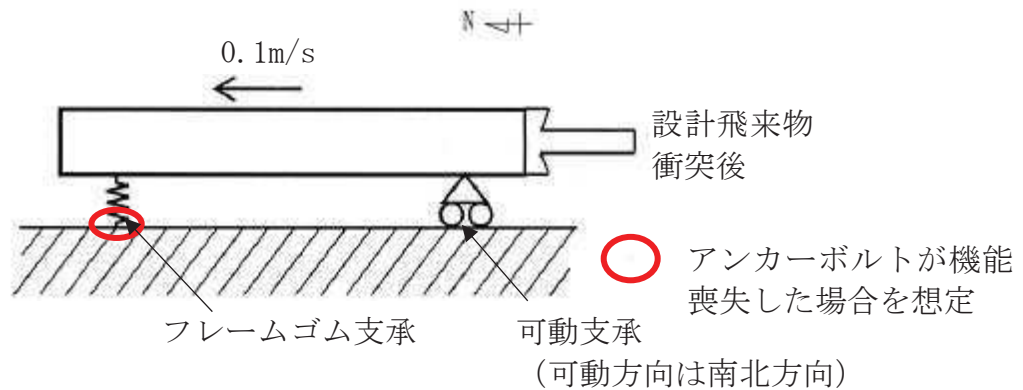


図1 フレーム移動量算出イメージ

2. 飛来物衝突時のフレーム移動量の算出

エネルギー保存則により、フレームの持つ運動エネルギーは、フレーム移動時の摩擦力により消費されるエネルギーと釣り合うものとして、フレームの移動量を算出する。算出にあたって、フレーム及び各支承は飛来物衝突後一体となって移動を始めるものとし、移動速度は0.1m/sとする。また、フレームゴム支承と隔壁との動摩擦係数は、コンクリートと鉄の摩擦係数0.4とする。

以上の条件からエネルギー保存則より以下の式が成り立つ。

$$\frac{1}{2}MV^2 = \mu MgL \cdots \textcircled{1}$$

ここで、M：フレーム重量 (M=62000kg)

V：衝突後のフレーム移動速度 (m/s)

μ ：摩擦係数 (0.4 (出典：鋼構造設計基準))

g：重力加速度 (9.80665m/s²)

L：フレーム移動距離

$$\begin{aligned} \textcircled{1} \text{式より, } L &= \frac{V^2}{2\mu g} \\ &= \frac{0.1^2}{2 \times 0.4 \times 9.80665} \doteq 1.3\text{mm} \end{aligned}$$

以上より、フレームゴム支承のアンカーボルトが機能喪失した状態で飛来物が衝突した場合でも、フレームの質量が著しく大きいことから、摩擦力も非常に大きくなり、飛来物衝突によるフレームの移動量は1.3 mm程度であり、ほとんど移動しない結果となった。

また、同様に可動支承側の検討をした場合、大梁と可動支承間の鉄材同士の摩擦係数は0.35～0.40（出典：機械工学便覧）となるため、概ね同程度の移動距離となることが想定される。

竜巻防護ネット構造成立性確認結果について (STEP2)
(支持部材全体の構造成立性)

1. 評価方法

飛来物衝突時の竜巻防護ネットを構成する支持部材全体の構造成立性を確認するため、図1に示すフローで評価を実施する。

STEP2-1 の条件で、支持部材全体に対し評価を実施する。STEP2-1 の条件で評価を実施した結果、フレームゴム支承が許容値を満足しない場合、詳細評価としてSTEP2-2 でゴム支承のせん断剛性を考慮した解析条件にて評価を実施する。STEP2-2 の結果を踏まえて、STEP2-3 としてストッパーの評価を実施する。

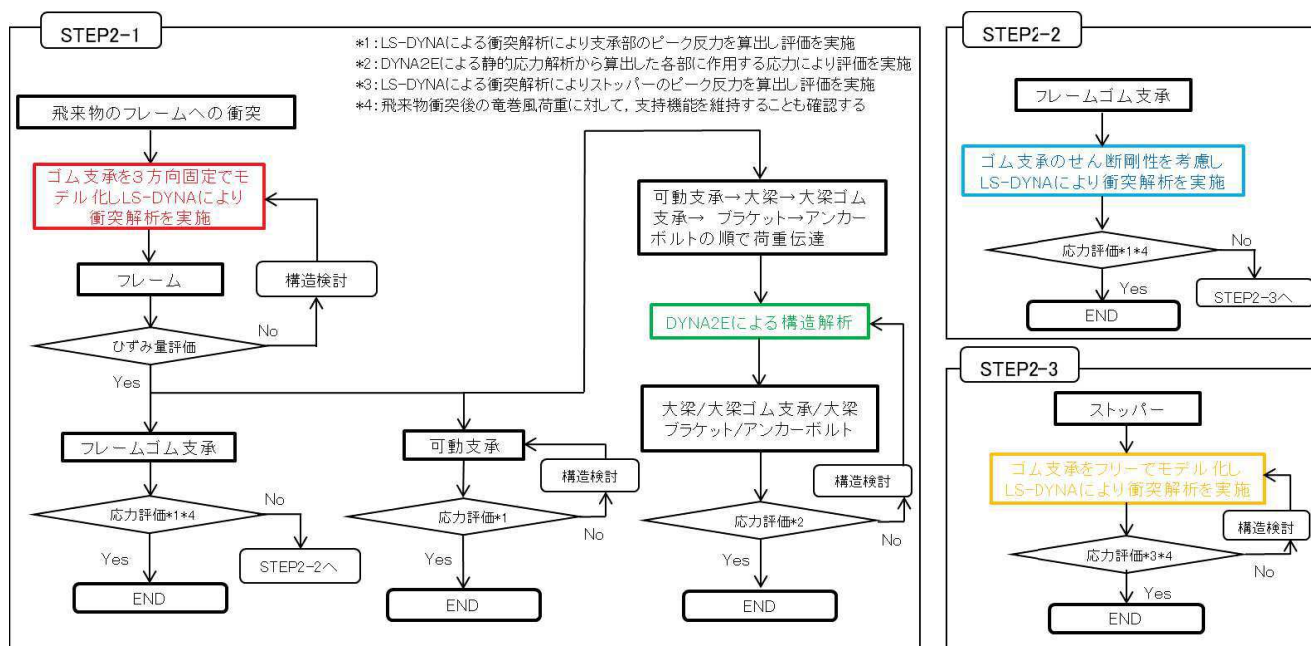


図1 STEP2 評価フロー

2. ゴム剛性の結合条件を3方向固定 (STEP2-1)

(1) 解析条件

評価はフレームに飛来物が衝突したときに、直接荷重を受けるフレーム及びその荷重が伝達されるフレームゴム支承、可動支承、大梁、大梁ゴム支承、ブラケットに対して実施する。解析条件とその考え方を表1、2及び図2に示す。

表1 STEP2-1 解析条件

設定項目	設定条件	考え方
ゴム支承の剛性	3方向固定 (表2参照)	下部構造物に伝達する衝撃荷重のピーク値が大きくなるため
衝突方向	水平及び鉛直	鉛直・水平方向からの衝突による部材への影響をそれぞれ確認するため (配置及び形状から水平方向から衝突する可能性は極めて低いと考えられるが、鉛直速度よりも速度が大きいため、評価を行う)
衝突位置	7パターン	<ul style="list-style-type: none"> ▶衝突方向は衝突面積が大きい鉛直 (①～③) , 障害物がないNS方向南側からの水平 (④) に加えて、障害物があり飛来物衝突の可能性が低いと考えられるEW方向からの水平 (⑤～⑦) も考慮する ▶各部材に対する影響が大きいと考えられる箇所を抽出 <ul style="list-style-type: none"> ・フレームの曲げモーメントが最大になるフレームの中央部への衝突 (②, ⑥) ・可動支承, 大梁ゴム支承, ブラケットが影響を受けるように, 当該部材の近傍に衝突 (①, ⑤) ・ゴム支承が大きな影響を受けるように, 当該部材の近傍に衝突 (③, ⑦) ・可動支承のスライドによるフレームの変位によりゴム支承が大きな影響を受ける部位への衝突 (④)
飛来物姿勢	短辺全面で衝突	竜巻防護ネットの形状, 衝突時の影響, 先行プラントの審査実績を踏まえて設定

表2 フレームゴム支承, 可動支承の結合条件

方向	フレームゴム支承	可動支承
X	剛	自由
Y	剛	剛
Z	剛	剛

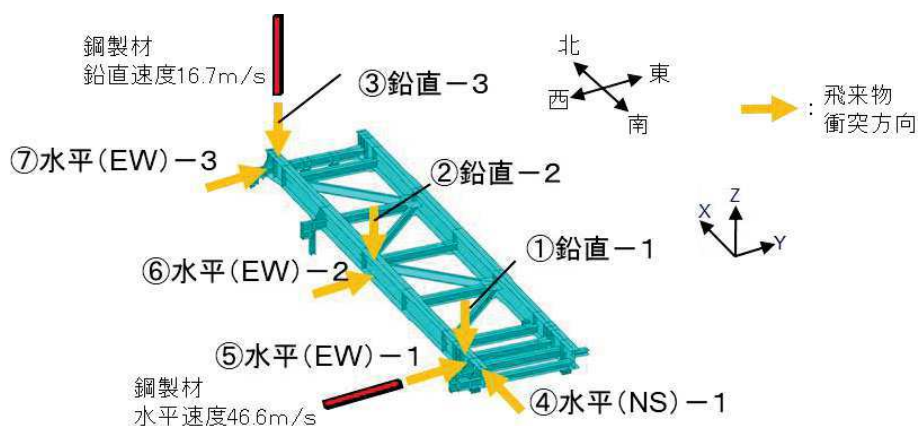


図2 飛来物衝突位置及び解析モデル図 (STEP2-1)

(2) 解析結果

各部材の衝突解析結果を表 3 に示す。

全ての衝突ケースにおいて、フレーム、ブラケット、大梁ゴム支承、可動支承は許容値を超えず、構造強度上の評価方針を満足することを確認した。

また、フレームゴム支承は表 4 に示すとおり、①～⑥の衝突位置の評価条件において、構造強度上の評価方針を満足することを確認した。⑦の衝突位置の場合には、2つのゴム支承が許容値を満足しないことから、詳細評価 (STEP2-2) としてゴム剛性を考慮した衝突解析を行い、構造成立性の確認を行う。

表3 STEP2-1におけるフレームゴム支承の解析結果

(注) 本評価結果は暫定値

評価対象部位	評価項目 (単位)	飛来物衝突位置														許容値								
		①		②		③		④		⑤		⑥		⑦										
		鉛直-1	鉛直-2	鉛直-3	水平(NS)-1	水平(EW)-1	水平(EW)-2	水平(EW)-3	西側	東側	西側	東側	西側	東側										
フレーム	最大ひずみ (%)	0.23	0.46	1.66	1.41	1.12	1.83	9.05 ^{※1}	7.0															
大梁	応力度(組合せ) (MPa)	260 (364)	160 (364)	110 (364)	120 (364)	150 (364)	130 (364)	120 (364)	※2															
ブラケット	本体	100 (343)	64 (343)	45 (343)	47 (343)	63 (343)	53 (343)	46 (343)	※2															
	アンカボルト	140	100	79	84	130	100	84	294															
				西側	東側	西側	東側	西側	東側	西側	東側	西側	東側	西側	東側	西側	東側							
フレーム ゴム 支承	ゴム体	応力度(引張) (MPa)	0	0	1.4	0.9	14	0.6	0.3	0.2	0.1	0	1.2	0.9	23	3.2	2.0							
		せん断ひずみ (%)	58	56	190	200	310	98	170	140	130	190	230	240	360	310	250							
		応力度(圧縮) (MPa)	1.2	1.2	3.4	2.6	47.5	2.1	2.2	1.8	1.6	2.2	3.8	3.4	25	7.7	29.8							
	内部鋼板	応力度(引張) (MPa)	11	11	32	24	450	20	21	17	15	21	36	32	240	72	280							
	取付ボルト	応力度(組合せ) (MPa)	45 (420)	44 (420)	160 (420)	160 (420)	660 (392)	95 (420)	140 (420)	120 (420)	100 (420)	160 (420)	200 (420)	210 (420)	420 (349)	310 (392)	※2							
	アンカボルト	応力度(組合せ) (MPa)	40 (294)	38 (294)	170 (259)	160 (253)	370 (163)	93 (294)	130 (272)	110 (294)	100 (294)	130 (255)	180 (230)	180 (220)	310 (110)	210 (163)	※2							
大梁 ゴム 支承	ゴム体	応力度(引張) (MPa)	1.2	0.7	0.2	0.3	0.8	0.6	0.2	2.0														
		せん断ひずみ (%)	110	96	89	95	170	120	91	250														
		応力度(圧縮) (MPa)	4.7	2.8	1.8	1.9	3.2	2.3	1.9	23.1														
	内部鋼板	応力度(引張) (MPa)	50	30	19	20	34	25	20	280														
取付ボルト	応力度(組合せ) (MPa)	110 (420)	130 (420)	100 (420)	110 (420)	180 (420)	140 (420)	100 (420)	※2															
可動 支承	ソールプレート	応力(圧縮) (MPa)	82	23	33	22	13	13	15	14	22	24	19	18	15	14	351							
	すべり材	応力(圧縮) (MPa)	100	28	40	27	16	16	18	17	27	30	23	22	18	17	60							
	圧縮ゴム	応力(圧縮) (MPa)	82	23	33	22	13	13	15	14	22	24	19	18	15	14	50							
	ヒストン	応力(曲げ) (MPa)	290	81	120	79	48	46	54	49	80	86	66	65	53	48	280							
	座金	応力(圧縮) (MPa)	260	70	100	69	41	40	47	43	70	75	58	57	46	40	335							
	ベアスポット突出部	応力(せん断) (MPa)	43	20	21	12	3.5	0.1	3.8	3.3	20	10	14	11	2.7	0.4	148							
		応力(曲げ) (MPa)	91	43	45	24	7.3	0.2	7.9	6.9	42	21	30	23	5.5	0.8	258							
		応力(圧縮) (MPa)	190	89	92	50	15	0.3	16	14	85	44	61	47	11	1.5	351							
	ベアスポット支圧部	応力(圧縮) (MPa)	93	82	62	68	51	52	61	63	160	230	95	110	54	56	351							
	レール	応力(曲げ) (MPa)	430	320	260	250	170	160	200	210	550	740	340	390	180	180	343							
		応力(引張) (MPa)	25	12	12	6.6	2.0	0.1	2.2	1.9	11	5.8	8.1	6.2	1.5	0.2	343							
		応力(せん断) (MPa)	49	40	30	33	25	25	30	31	77	110	47	56	26	28	198							
	レール取付ボルト	応力(引張) (MPa)	500	440	340	360	270	280	330	340	840	1220	510	610	290	300	525							
		応力(せん断) (MPa)	100	49	51	28	8.3	0.2	9.0	7.8	47	24.3	34	26	6.3	0.8	404							
	エンドプレート接合ボルト	応力(引張) (MPa)	520	380	310	280	190	170	220	230	620	810	390	430	190	190	420							
	上部接合ボルト	応力(引張) (MPa)	200	96	100	54	16	0.3	18	15	92	48	66	50	12	1.6	420							
応力(せん断) (MPa)		190	160	120	140	100	100	120	130	310	460	190	230	110	110	323								
下部接合ボルト	応力(引張) (MPa)	320	200	180	140	77	62	91	91	280	320	180	190	76	70	420								
	応力(せん断) (MPa)	200	170	130	140	110	110	130	130	330	480	200	240	110	120	323								
ベアプレート	応力(せん断) (MPa)	16	10	9.1	7.0	4.0	3.2	4.7	4.7	14	16	9.3	9.5	3.9	3.5	198								
	応力(曲げ) (MPa)	270	170	150	120	65	52	77	77	240	270	150	150	64	58	343								

※1: フレーム部材端部に生じる最大ひずみが破断ひずみを上回るが、全断面欠損に至らず部材は支持されることを確認

※2: 引張応力とせん断応力を同時に受ける部材の許容値については () 内に許容引張応力を記載

□: 支持機能を担う部材

■: 支持機能を担う部位のうち許容値を超えるもの

—: 支持機能を担う部位以外で許容値を超えるもの

表 4 STEP2-1 における支承部の評価

衝突位置		飛来物衝突位置						
		①	②	③	④	⑤	⑥	⑦
衝突方向	構造強度上の評価方針 竜巻の風圧力による荷重及び設計飛来物による衝撃荷重に対し、上載するフレーム等支持機能を維持するため、作用する応力等が「道路橋示方書・同解説 V 耐震設計編 (H4.3)」に基づく基準値を超えないことを確認する。*1	鉛直-1 フレーム 中央部	鉛直-2 フレーム 中央部	鉛直-3 フレーム 可動支承近傍	水平 (NS)-1 フレーム 可動支承近傍	水平 (EW)-1 フレーム ゴム支承近傍	水平 (EW)-2 フレーム ゴム支承近傍	水平 (EW)-3 フレーム 南側端部
		鉛直	鉛直	鉛直	水平 (NS)	水平 (EW)	水平 (EW)	水平 (EW)
評価対象	フレーム ゴム支承	位置						
		西側	○	ゴム体が許容値を満足しない	○	○	○	ゴム体が許容値を満足しない
評価結果	可動支承	東側	○	○	○	○	○	○
		西側	○	○	○	○	○	○
		東側	○	○	○	○	○	

*1：フレームゴム支承は、2つのうち1つ以上の支承が構造強度上の評価方針を満足することを確認する

○：支持機能を担う部位の発生応力又はひずみが許容値内

□：STEP2-2にて詳細評価を実施

3. 詳細評価（ゴム支承のせん断剛性を考慮した解析）（STEP2-2）

(1) 解析条件

STEP2-1 における⑦の衝突位置の場合には，2つのゴム支承が許容値を満足しないことを踏まえて，詳細評価としてゴム剛性を考慮した衝突解析を行い，構造成立性の確認を行う。解析条件とその考え方を表5，6及び図3に示す。

表5 STEP2-2 解析条件

設定項目	設定条件	考え方
ゴム支承の剛性	耐震評価で用いるせん断剛性 (表6参照)	実現象に近いと考えられる条件で評価を行う観点から，STEP1で用いた耐震評価で用いるゴム支承のせん断剛性を適用する
衝突方向	水平及び鉛直	STEP2-1の⑦の衝突位置と同様
衝突位置	ゴム支承近傍	
飛来物姿勢	短辺全面で衝突	

表6 フレームゴム支承，可動支承の結合条件

方向	フレームゴム支承	可動支承
X	弾性	自由
Y	弾性	剛
Z	剛	剛

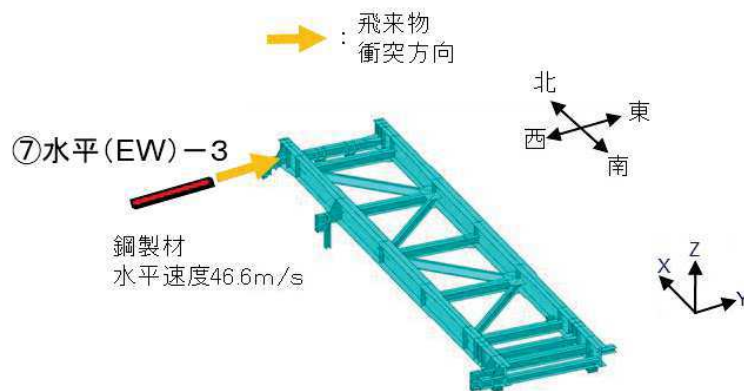


図3 飛来物衝突位置及び解析モデル図（STEP2-2）

(2) 解析結果

フレームゴム支承の衝突解析結果を表 7 に示す。

フレームゴム支承のうち、上載するフレームを支持する機能を担う部材は①ゴム体であり、これらの部材に発生する応力等は許容値を超えず、構造強度上の評価方針を満足する。

表 7 STEP2-2 におけるフレームゴム支承の解析結果 (注) 本評価結果は暫定値

評価対象	評価項目	発生値		許容値	
		西側	東側		
フレーム ゴム支承	①ゴム体	応力度 (引張)	1.1 MPa	0.8 MPa	2.0 MPa ^{※1}
		せん断ひずみ	62 %	62 %	250 % ^{※1}
		応力度 (圧縮)	2.0 MPa	2.0 MPa	29.8 MPa ^{※1}
	②内部鋼板	応力度 (引張)	19 MPa	19 MPa	280 MPa ^{※2}
	③取付ボルト	応力度 (組合せ)	61 MPa	60 MPa	420 MPa ^{※2}
	④アンカーボルト	応力度 (組合せ)	98 MPa	82 MPa	294 MPa ^{※2}

※1 : 「道路橋示方書・同解説 V 耐震設計編 (H14.3)」に基づく道路橋支承便覧による許容値

※2 : JEAG4601 に基づく許容応力状態IV_AS の許容応力

□ : 支持機能を担う部材

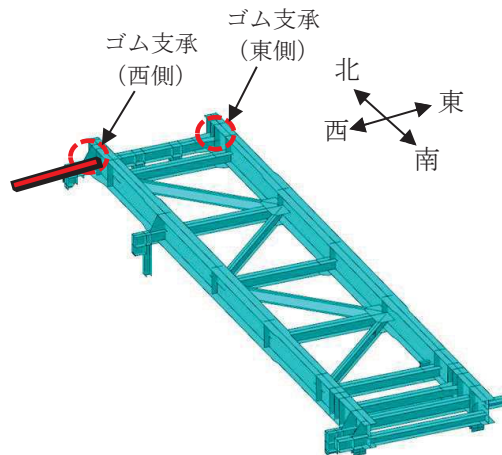


図 4 飛来物衝突位置及び評価対象 (STEP2-2)

3. ストッパーの評価（ゴム剛性の結合条件を自由とした解析）（STEP2-3）

(1) 解析条件

今回実施した①～⑦の衝突ケースでは、フレームゴム支承が許容値を満足しない場合は確認されなかったことから、ストッパーに支持機能が必要な状況ではないが、STEP2-2 の評価で許容値を満足しない場合を想定し、ストッパーの評価を実施する。

飛来物の衝撃荷重に対して、ゴム支承による荷重を負担せずに、ストッパーに全ての荷重を伝達する条件で評価する。解析条件とその考え方を表 8, 9 及び図 5 に示す。

表 8 STEP2-3 解析条件

設定項目	設定条件	考え方
ゴム支承の剛性	自由 (表 9 参照)	飛来物がフレームに衝突した場合の荷重をすべて伝達し、ゴム支承による荷重の負担を期待せず、ストッパーへかかる衝撃荷重が大きくなる条件とするため
衝突方向	水平	フレームの水平移動によるストッパーへの影響が大きい方向
衝突位置	1 パターン	可動支承の拘束が期待できない可動方向 (NS 側) として、南側端部への衝突を考慮
飛来物姿勢	短辺全面で衝突	竜巻防護ネットの形状、衝突時の影響、先行プラントの審査実績を踏まえて設定

表 9 フレームゴム支承，可動支承の結合条件

方向	フレームゴム支承	可動支承
X	自由	自由
Y	自由	剛
Z	自由	剛

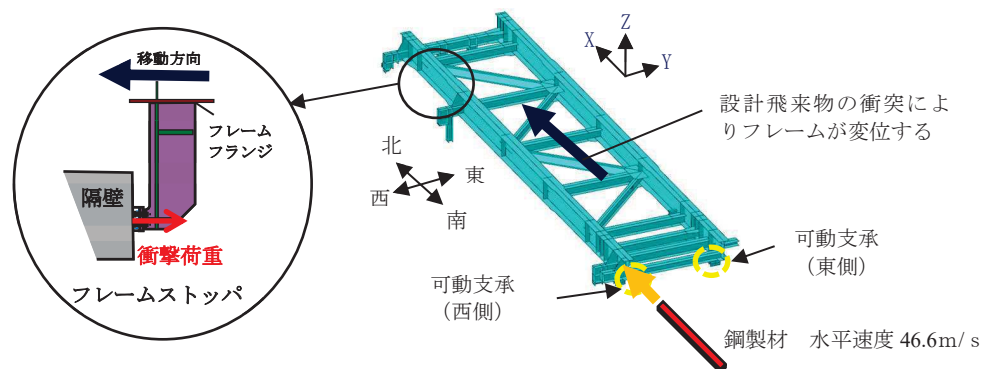


図 5 可動支承の挙動確認における飛来物衝突位置及び解析モデル図 (STEP2-3)

(2) 解析結果

ストッパーの評価結果を図 6 及び表 10 に示す。発生する応力は許容値を満足する。

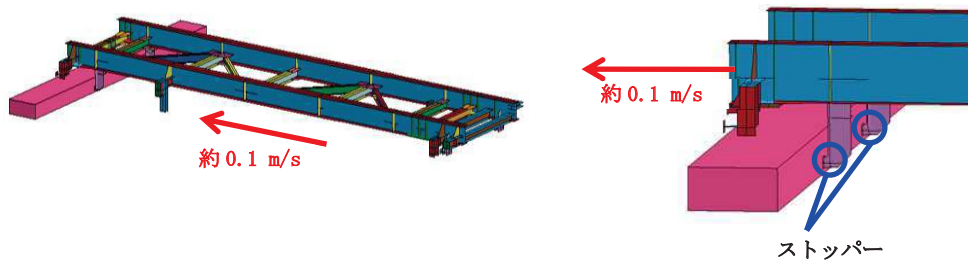


図 6 設計飛来物衝突時のフレーム変位イメージ

表 10 ストッパー応力評価結果

	発生値 (MPa)	許容値 (MPa)
せん断応力	19	198
曲げ応力	228	343
組合せ応力	230	343

4. 飛来物衝突後の竜巻風荷重に対する評価

飛来物衝突後の竜巻による風荷重に対して、竜巻防護ネットは非常用海水ポンプ等に波及的影響を与えないことが要求される。

STEP2-1 及び STEP2-2 の評価結果から、許容値を超えないゴム支承が少なくとも 1 つは残るため、フレーム全体が受ける竜巻による風荷重が、ゴム支承 1 つに対して作用する条件で評価を実施した。評価条件は以下のとおり。

- ・ 風速 100m/s (設計竜巻風速)
- ・ 受圧面積は形状を考慮した投影面積
- ・ フレームゴム支承 (西側) のみが残存し風荷重を受ける場合を代表とした
- ・ 評価モデル図は図 7 のとおり

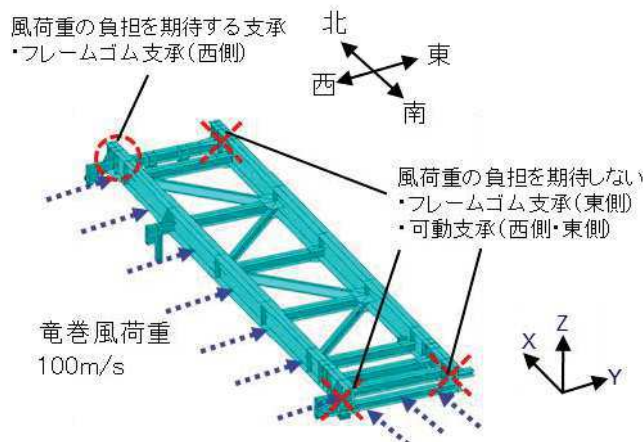


図 7 竜巻風荷重に対する評価モデル図

以上の条件で評価を行ったところ、フレームゴム支承 1 つが残存すれば、竜巻風

荷重を受けても当該支承に生じる応力等は許容値以下となり、竜巻風荷重に対する支持機能を維持することを確認した。評価結果を表 11 に示す。

(注) 本評価結果は暫定値

表 11 竜巻風荷重に対するフレームゴム支承の評価結果

評価対象		評価項目	発生値	許容値
			東側	
フレーム ゴム支承	①ゴム体	応力度 (引張)	0.4 MPa	2.0 MPa ^{※1}
		せん断ひずみ	130 %	250 % ^{※1}
		応力度 (圧縮)	1.2 MPa	29.8 MPa ^{※1}
	②内部鋼板	応力度 (引張)	11 MPa	280 MPa ^{※2}
	③取付ボルト	応力度 (組合せ)	100 MPa	420 MPa ^{※2}
	④アンカーボルト	応力度 (組合せ)	73 MPa	294 MPa ^{※2}

※1: 「道路橋示方書・同解説 V 耐震設計編 (H14.3)」に基づく道路橋支承便覧による許容値

※2: JEAG4601 に基づく許容応力状態IV_AS の許容応力

5. STEP2 における構造成立性見通し

①～⑦の全ての衝突位置において、フレーム、ブラケット、大梁ゴム支承、可動支承は許容値を超えず、構造強度上の評価方針を満足することを確認した。

フレームゴム支承については、STEP2-1 においてフレームゴム支承近傍に設計飛来物が水平に衝突する場合のみ (⑦の衝突位置)、フレームゴム支承が 2 つ許容値を満足しない結果となったが、STEP2-2 において詳細評価を実施し、フレームゴム支承が構造強度上の評価方針を満足することを確認した。

また、飛来物衝突後には、構造健全性を保つゴム支承が少なくとも 1 つ残存することから、1 つのゴム支承にて竜巻による風荷重及び常時作用する荷重に対し、フレームの支持機能を維持することを確認した。

さらに、STEP2-1 及び STEP2-2 の評価において、許容値を超えないゴム支承が 1 つ残存するため、ストッパーに支持機能が必要な状況ではないが、STEP2-3 として飛来物の衝撃荷重に対してフレームゴム支承による荷重を負担せずに、ストッパーに全ての荷重を伝達する条件で評価を実施し、構造強度上の評価方針を満足することを確認した。

以上より、竜巻防護ネットの支持部材は構造強度上の評価方針を満足し、飛来物衝突時及び衝突後において竜巻防護ネットの支持機能を維持することから、構造成立性が見通しがあることを確認した。

以上

竜巻防護ネットの構造健全性評価基準について

竜巻防護ネットの構造成立性確認を行う際に用いる許容限界（構造健全性評価基準）は、竜巻ガイド等の要求や、先行プラントの実績を踏まえて表1のとおり設定する。

表1 竜巻防護ネットの各部材に対する許容限界（1/2）

	評価対象	作用荷重	飛来物の衝突の有無	評価項目	許容限界 (構造健全性評価基準)
ネット (金網部)	ネット	衝撃荷重 竜巻風荷重 自重	有	吸収エネルギー評価	電中研報告によるネットの限界吸収エネルギー
				破断評価	電中研報告書に記載されている引張試験により確認される破断荷重
	たわみ評価			ネットと防護対象施設までの離隔距離	
	たわみ評価			ネットと防護対象施設までの離隔距離	
	破断評価			JISに規定される規格値	
	破断評価			試験結果に基づくメーカーの保証値	
	ワイヤロープ			破断評価	JISに規定される規格値
	ターンバックル ジャックル			破断評価	試験結果に基づくメーカーの保証値
	接続治具			破断評価	JEAG4601に基づく許容応力状態IV _A Sの許容応力
防護板	横向き防護板 縦向き防護板	衝撃荷重 竜巻風荷重 自重	有	貫通評価	BRL式より算出される貫通限界板厚
フレーム	主桁 横補強材	衝撃荷重 竜巻風荷重 ネット荷重 自重	有	【貫通評価】 ひずみ量	NEI 07-13にTF(多軸性係数)を考慮して設定した破断ひずみ(LS-DYNAによる衝突解析によりひずみ量を算出)
	ブレース			【支持機能評価】 ひずみ量	
				【貫通評価】 ブレースはネットの上部に設置しており、ブレースを貫通した設計飛来物の衝突エネルギーは低減することから、ネットの吸収エネルギー評価、破断評価に包絡される	
	大梁	衝撃荷重 竜巻風荷重 ネット荷重 フレーム荷重 自重	無	【支持機能評価】 せん断応力 曲げ応力	JEAG4601に基づく許容応力状態IV _A Sの許容応力
ブラケット	ブラケット本体	衝撃荷重 竜巻風荷重 ネット荷重 フレーム荷重 大梁荷重 自重	無	【支持機能評価】 せん断応力 圧縮応力 曲げ応力 引張応力	JEAG4601に基づく許容応力状態IV _A Sの許容応力
	ブラケット アンカーボルト				

表1 竜巻防護ネットの各部材に対する許容限界 (2/2)

	評価対象	作用荷重	飛来物衝突の有無	評価項目	許容限界 (構造健全性評価基準)	
フレーム ゴム支承	ゴム体	衝撃荷重 竜巻風荷重 ネット荷重 フレーム荷重 自重	無	【支持機能評価】 引張応力 圧縮応力 せん断ひずみ	「道路橋示方書・同解説 V 耐震設計編 (H14.3)」に基づく道路橋支承便覧の評価基準値	
	内部鋼板			【支持機能評価】 引張応力		
	ゴム支承 取付ボルト			【支持機能評価】 引張応力 せん断応力		
	アンカーボルト			【支持機能評価】 引張応力 せん断応力		
大梁 ゴム支承	ゴム体	衝撃荷重 竜巻風荷重 ネット荷重 フレーム荷重 大梁荷重 自重	無	【支持機能評価】 引張応力 圧縮応力 せん断ひずみ	「道路橋示方書・同解説 V 耐震設計編 (H14.3)」に基づく道路橋支承便覧の評価基準値	
	内部鋼板			【支持機能評価】 引張応力		
	大梁ゴム支承 取付ボルト			【支持機能評価】 引張応力 せん断応力		
可動支承	ソール プレート	衝撃荷重 竜巻風荷重 ネット荷重 フレーム荷重 自重	無	【支持機能評価】 支圧応力	JEAG4601 に基づく許容応力状態IV _{AS} の許容応力	
	すべり材			【支持機能評価】 支圧応力		
	圧縮ゴム			【支持機能評価】 支圧応力		
	ピストン			【支持機能評価】 曲げ応力		
	座金			【支持機能評価】 支圧応力		
	ベース ポット			突出部		【支持機能評価】 せん断応力 曲げ応力 支圧応力
				支圧部		【支持機能評価】 支圧応力
	レール			【支持機能評価】 曲げ応力 引張応力 せん断応力		
	レール取付ボルト			【支持機能評価】 引張応力 せん断応力		
	エンドプレート 取付ボルト					
	上部接合ボルト					
	下部接合ボルト					
	ベースプレート					【支持機能評価】 曲げ応力 せん断応力
ストッパー	フレームストッパー 隔壁上ストッパー	衝撃荷重 竜巻風荷重	無	【支持機能評価】 せん断応力 曲げ応力	JEAG4601 に基づく許容応力状態IV _{AS} の許容応力	

以上

設置許可段階と詳細設計段階での説明事項

設置許可段階では、【STEP1】及び【STEP2】の評価のとおり、竜巻防護ネットの構造成立性にかかわる代表的な評価結果をもって、構造成立性を見通しを説明した。詳細設計段階では、設置許可断面の評価を踏まえて詳細設計を行い、改めて竜巻防護ネットの強度計算結果を説明する。

各段階での説明事項を表 1 に示す。

表 1 設置許可段階及び詳細設計段階での説明事項 (1/3)

評価対象	支持部材の設計方針	構造強度上の性能目標	構造強度上の評価方針	評価部材	主な機能損傷モード		許容限界	説明段階	
					作用荷重	限界状態		E P (構造成立性見通し)	C P (構造強度)
竜巻防護ネット (支持部材)	支持部材は設計竜巻の風圧力による荷重、飛来物による衝撃荷重及びその他の荷重に対し、飛来物が非常用海水ポンプ等へ衝突することを防止するために、飛来物が支持部材を構成する主要な構造部材を貫通せず、上載するネット及び防護板を支持可能な構造強度を有し、非常用海水ポンプ等に波及的影響を与えないために、支持部材を構成する部材自体の転倒及び脱落を生じない設計とする。	【貫通】 設計飛来物の支持部材への衝突に対して、衝突箇所を貫通させない。	設計飛来物が支持部材に衝突した場合に、衝突箇所が発生する衝撃荷重によって貫通が生じないよう、フレームの鋼材が終局状態に至るようひずみを生じないことを確認する。	フレーム	<ul style="list-style-type: none"> 自重 上載荷重 (ネット) 竜巻風荷重 衝撃荷重 	衝突面の全断面欠損	NEI07-13 に TF (多軸性係数) を考慮して設定した破断ひずみ以下 (LS-DYNA による衝突解析によりひずみ量を算出)	○ (STEP2-1)	○ (STEP2-1)
	【支持機能】 支持部材は設計竜巻の風圧力による荷重、飛来物による衝撃荷重及びその他の荷重に対し、上載するネット及び防護板を支持可能な構造強度を有する。	竜巻の風圧力による荷重及び設計飛来物による衝撃荷重に対し、上載するフレームを支持するため、フレームの鋼材が終局状態に至るようひずみを生じないことを確認する。	大梁 ブラケット アンカー ボルト	<ul style="list-style-type: none"> 自重 上載荷重 (ネット, フレーム) 竜巻風荷重 衝撃荷重 	終局状態	発生する応力が JEAG 4601 の IV AS 以下	○ (STEP2-1)	○ (STEP2-1)	

※ EP : 設置許可段階 CP : 詳細設計段階

表 1 設置許可段階及び詳細設計段階での説明事項 (2/3)

評価対象	支持部材の設計方針	構造強度上の性能目標	構造強度上の評価方針	評価部材		主な機能損傷モード		許容限界	説明段階※			
				大梁 ゴム支承	ゴム 体	作用荷重	限界状態		STEP1	EP (構造成立性見通し)	STEP2	C P (構造強度)
竜巻防護ネット (支持部材)	支持部材は設計竜巻の風圧力による荷重、飛来物による衝撃荷重及びその他の荷重に対し、飛来物が非常用海水ポンプ等へ衝突することを防止するため、飛来物が支持部材を構成する主要な構造部材を貫通せず、上載するネット及び防護板を支持する機能を維持可能な構造強度を有し、非常用海水ポンプ等と波及び的影響を与えないために、支持部材を構成する部材自体の転倒及び脱落を生じない設計とする。	【支持機能】 支持部材は設計竜巻の風圧力による荷重、飛来物による衝撃荷重及びその他の荷重に対し、上載するネット及び防護板を支持する機能を維持可能な構造強度を有する。	竜巻の風圧力による荷重及び設計飛来物による衝撃荷重に対し、上載するフレーム等を支持する機能を担う部材が支持機能を維持するため、作用する応力等が「道路橋示方書・同解説 V 耐震設計編 (H14.3)」に基づき基準値を超えないことを確認する。	大梁 ゴム支承	ゴム 体	<ul style="list-style-type: none"> 自重 上載荷 (ネット、フレーム、大梁) 竜巻風荷重 衝撃荷重 	終局状態	発生する引張応力が道路橋支承便覧の許容値以下	○ (STEP2-1)	○ (STEP2-1)	○ (STEP2-1)	
				フレーム ゴム支承 (*1)	ゴム 体	<ul style="list-style-type: none"> 自重 上載荷 (ネット、フレーム) 竜巻風荷重 衝撃荷重 	終局状態	発生する引張応力が道路橋支承便覧の許容値以下	○ (STEP2-1) (STEP2-2)	○ (STEP2-1) (STEP2-2)	○ (STEP2-1) (STEP2-2)	
						<ul style="list-style-type: none"> 自重 上載荷 (ネット、フレーム) 竜巻風荷重 衝撃荷重 	終局状態	発生する引張応力が道路橋支承便覧の許容値以下	○ (STEP2-1) (STEP2-2)	○ (STEP2-1) (STEP2-2)	○ (STEP2-1) (STEP2-2)	

*1：フレームゴム支承は、2つのうち1つ以上の支承が評価方針を満足することを確認する

※ EP：設置許可段階 CP：詳細設計段階

表 1 設置許可段階及び詳細設計段階での説明事項 (3/3)

評価対象	支持部材の設計方針	構造強度上の性能目標	構造強度上の評価方針	評価部材		主な機能損傷モード		許容限界	説明段階※		
				可動支承	ソールプレート ベース ポット ベース プレート	作用荷重	限界状態		EP (構造成立性見直し) STEP1	STEP2	CP (構造強度)
竜巻防護ネット (支持部材)	支持部材は設計による風圧力、飛来物による衝撃荷重、飛来物による他の荷重に、飛来物が非常用海水ポンプ等へ衝突することを防止するために、飛来物が支持部材を構成する主要な構造部材を貫通せず、上載するネット及び防護板を支持する機能を構造強度を有し、非常用海水ポンプ等に波及的影響を与えないために、支持部材を構成する部材自体の転倒及び脱落を生じない設計とする。	【支持機能】 支持部材は設計による風圧力、飛来物による衝撃荷重、飛来物による他の荷重に、飛来物による衝撃荷重及びその他の荷重に、上載するネット及び防護板を支持する機能を構造強度を有する。	竜巻の風圧力による荷重及び設計飛来物による衝撃荷重に対し、上載するフレーム等を支持する機能を維持するため、作用する応力が許容応力状態IV _{AS} の許容応力を超えないことを確認する。					可動支承			
			竜巻の風圧力による荷重及び設計飛来物による衝撃荷重に、フレーム等を支持するため、作用する応力が許容応力状態IV _{AS} の許容応力を超えないことを確認する。		ストッパー	<ul style="list-style-type: none"> 竜巻風荷重 衝撃荷重 	終局状態	発生する応力が JEAG 4601 のIV _{AS} 以下	—	○ (STEP2-3)	○ (STEP2-3)

※ EP：設置許可段階 CP：詳細設計段階



支持機能評価対象外の部材の評価

ゴム支承、可動支承の支持機能評価対象部材に該当しない部材について、許容値を超えた場合の支持機能への影響について確認した。

1. フレームゴム支承

支持機能評価対象外の部材の一部は、STEP2-1 のケース③（西側フレームゴム支承直上への鉛直衝突）により許容値を超えるが、フレームをゴム支承で支持する構造が維持され、上載するフレームの支持機能に影響を及ぼさないことを確認した。詳細評価を表 1 に示す。

表 1 支持機能評価対象外の部材が許容値を上回る場合の影響評価
(フレームゴム支承)

取付ボルト (STEP2-1 のケース③で許容値を超える場合)	アンカーボルト (STEP2-1 のケース③で許容値を超える場合)
<p>取付ボルトが組合せ応力により許容値を超えた場合でも、キーによりフレームとフレームゴム支承は位置決めされており、フレームの下部にゴム体が位置する状況は変わらないことから、支持機能に影響を及ぼさない。</p> 	<p>アンカーボルトが組合せ応力により許容値を超えた場合でも、135 k g の鋼製材の衝突により約 60 t のフレームがフレームゴム支承ごと水平方向に移動することは考え難く、フレームの下部にゴム体が位置する状況は変わらないことから、支持機能に影響を及ぼさない。なお、アンカーボルトに発生する応力は Su 値を超えないことから、塑性変形に留まり構造は維持されると判断する。</p> 

枠囲みの内容は商業機密又は防護上の観点から公開できません

なお、STEP2-1 のケース③についてSTEP2-2 の詳細評価を実施した結果、表2のとおり取付ボルト、アンカーボルトについて許容値を満足することを確認した。

表2 STEP2-2 におけるフレームゴム支承の解析結果 (注) 本評価結果は暫定値

評価対象		評価項目	発生値		許容値
			西側	東側	
フレーム ゴム支承	①ゴム体	応力度 (引張)	1.5 MPa	1.3 MPa	2.0 MPa ^{※1}
		せん断ひずみ	48 %	48 %	250 % ^{※1}
		応力度 (圧縮)	3.7 MPa	2.4 MPa	29.8 MPa ^{※1}
	②内部鋼板	応力度 (引張)	35 MPa	23 MPa	280 MPa ^{※2}
	③取付ボルト	応力度 (組合せ)	62 MPa	60 MPa	420 MPa ^{※2}
	④アンカーボルト	応力度 (組合せ)	90 MPa	85 MPa	294 MPa ^{※2}

※1 : 「道路橋示方書・同解説 V 耐震設計編 (H14.3)」に基づく道路橋支承便覧による許容値
 ※2 : JEAG4601 に基づく許容応力状態IV_AS の許容応力

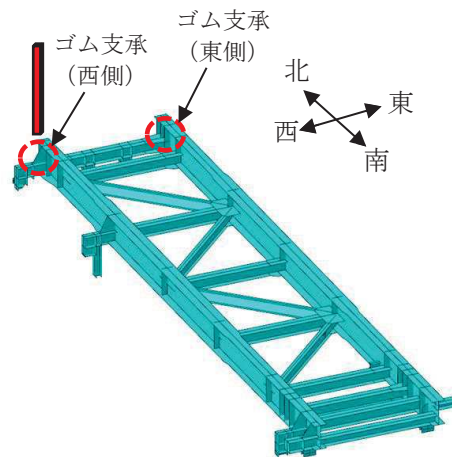


図1 飛来物衝突位置及び評価対象 (STEP2-2 ケース③)

2. 可動支承

支持機能評価対象外の部材の一部は設計飛来物の衝突により許容値を超えるが、フレームを支持する構造は維持され、支持機能に影響を及ぼさないことを確認した。(可動支承の可動機構は機能を喪失するが、支持機能は維持される。詳細評価を表3に示す。

表3 支持機能評価対象外の部材が許容値を上回る場合の影響評価(1/2)
(可動支承)

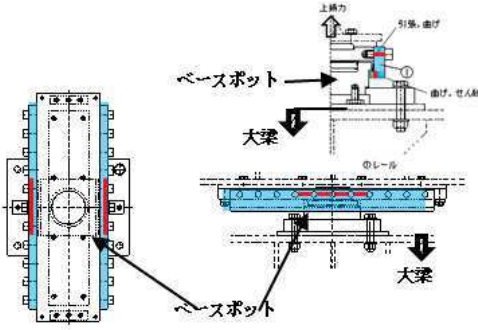
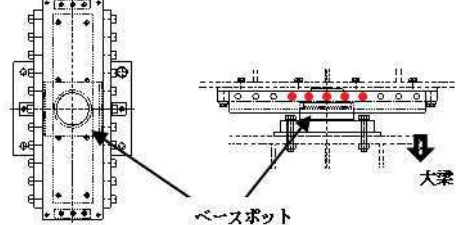
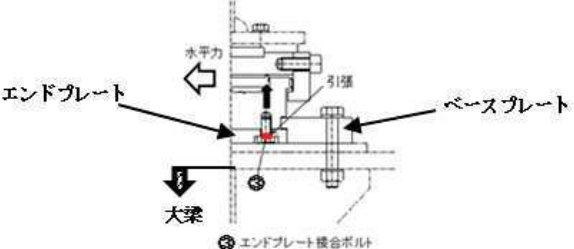
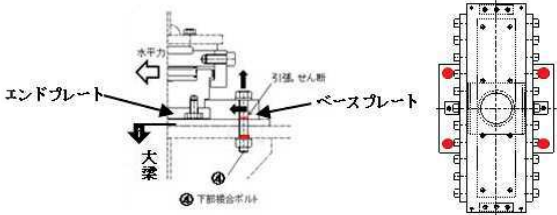
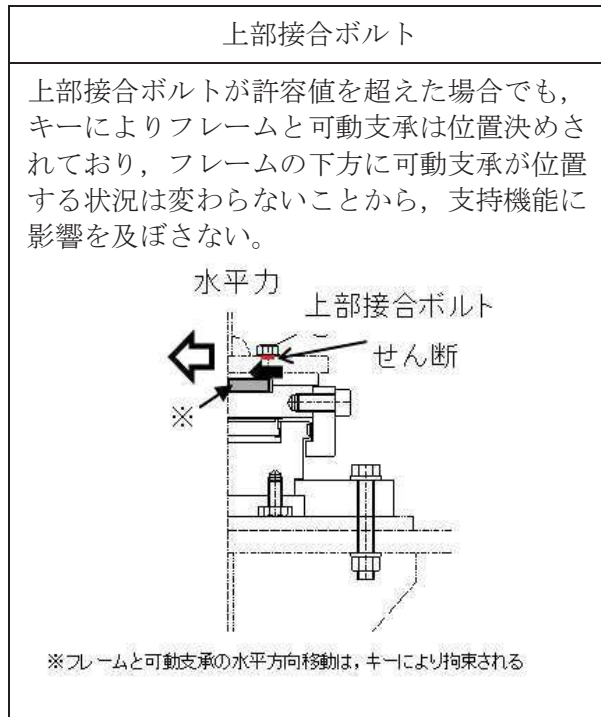
レール	レール取付ボルト
<p>レールとベースポットが重なる部分(赤線)が許容値を超えた場合でも、それ以外の部分は健全な状態であることから、レールは可動支承本体と一体で保たれる。よって支持機能に影響を及ぼさない。</p> 	<p>ベースポットと重なる範囲にあるレール取付ボルト(赤で示した範囲)が許容値を超えた場合でも、他のボルトが残存しボルト締結されているレール全体は脱落することはない。よって支持機能に影響を及ぼさない。</p> 
エンドプレート接合ボルト	下部接合ボルト
<p>エンドプレート接合ボルトが許容値を超えた場合でも、当該ボルトは自重伝達経路部材ではないため、支持機能に影響を及ぼさない。</p> 	<p>下部接合ボルトが許容値を超えた場合でも、135kgの鋼製材の衝突により約60tのフレームが可動支承ごと水平方向に移動することは考え難く、ベースプレートの下方に大梁が位置する状況は変わらないことから、支持機能に影響を及ぼさない。</p> 

表3 支持機能評価対象外の部材が許容値を上回る場合の影響評価(2/2)
(可動支承)



なお、可動支承の水平方向に対して最も厳しいSTEP2-1のケース⑤(可動支承真横への水平衝突)に対し、上部接合ボルトと可動支承との間に設置しているキーの評価を実施した結果、表4に示すとおり許容値を満足することを確認した。

表4 STEP2-2 ケース⑤における可動支承せん断キーの解析結果

評価対象		評価項目	発生値		許容値
			西側	東側	
可動支承	キー	せん断応力	45 MPa	65 MPa	198 MPa ^{※1}

※1: JEAG4601に基づく許容応力状態IV_{AS}の許容応力

(注) 本評価結果は暫定値

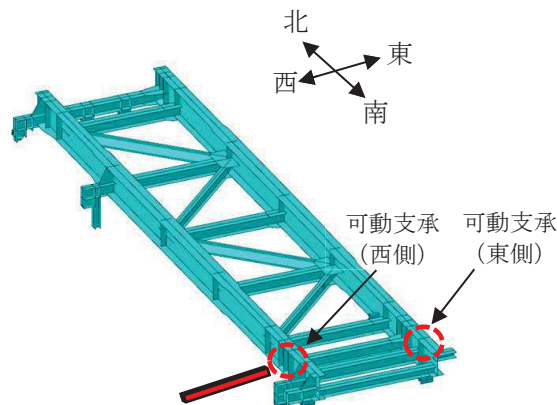


図2 飛来物衝突位置及び評価対象 (STEP2-2 ケース⑤)

女川原子力発電所 2 号炉

竜巻影響評価における

フジタモデルの適用について

目 次

別添資料 2

1. はじめに
2. 各風速場モデルの概要
 - 2.1 フジタモデル
 - 2.2 ランキン渦モデル
 - 2.3 非定常乱流渦モデル (LES による数値解析)
3. 各風速場モデルの比較
4. 米国におけるフジタモデルの取り扱い
 - 4.1 フジタモデルの利用実績
 - 4.2 NRC ガイドでの取り扱い
5. 飛来物評価における不確定性の考慮
 - 5.1 地表面付近の風速場に関する不確定性の考慮
 - 5.2 物体の浮上・飛来モデルにおける不確定性の考慮
 - 5.3 竜巻が物体に与える速度に関する不確定性の考慮
 - 5.4 飛来物評価法のまとめ
6. 実際の飛散状況に対する検証
 - 6.1 フジタモデルを用いた飛散解析結果とフジタスケールとの比較
 - 6.2 米国 Grand Gulf 原子力発電所への竜巻来襲事例
 - 6.3 佐呂間竜巻での車両飛散事例
7. 飛散以外の挙動に対する考慮
8. まとめ
9. 参考文献

別紙 1 「フジタモデル」及び「ランキン渦モデル」並びに「それぞれの風速場モデルを用いた際の飛来物評価手法」の比較

1. はじめに

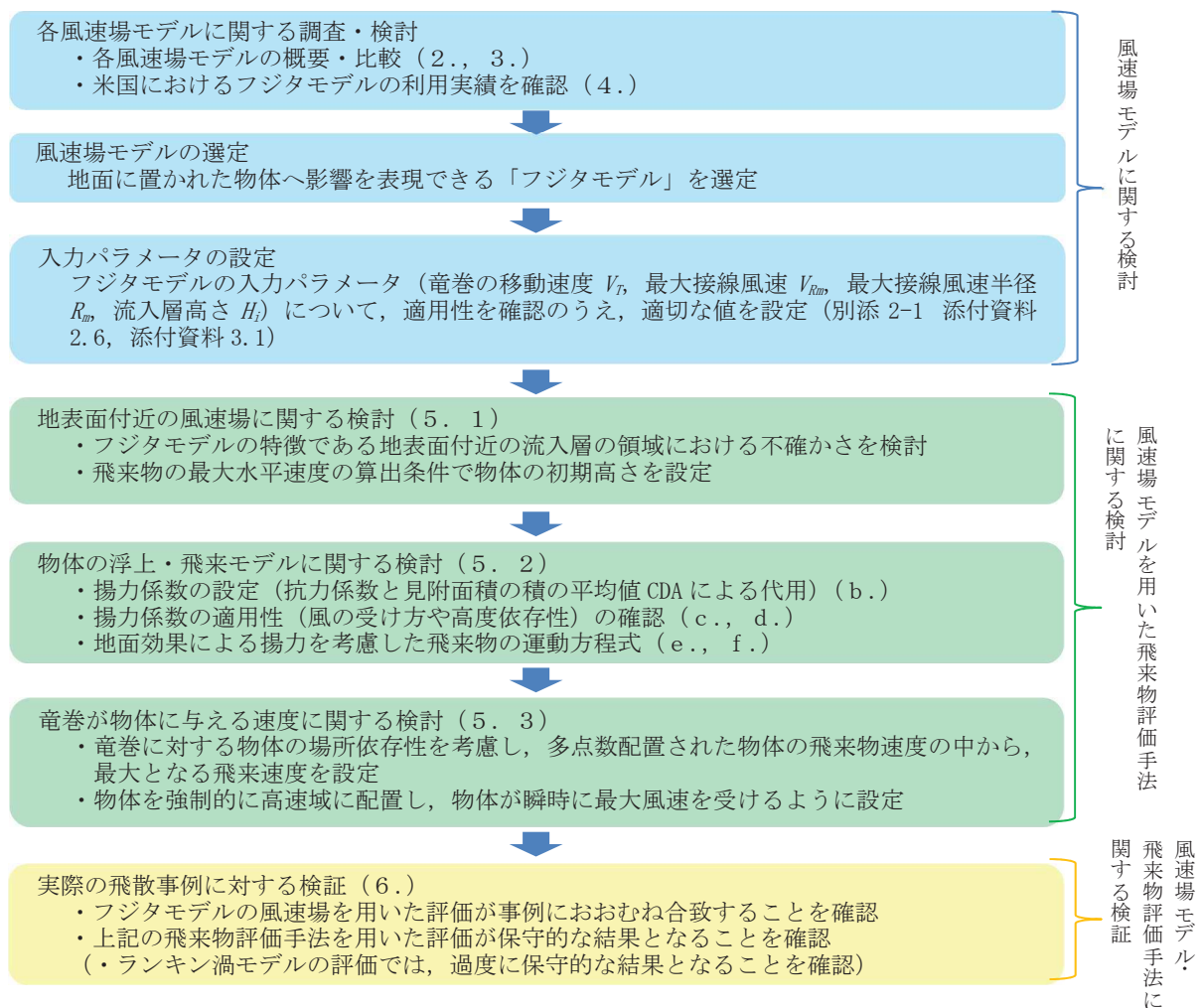
「原子力発電所の竜巻影響評価ガイド」⁽¹⁾（以下「NRA ガイド」という。）に従い竜巻影響評価を行う上で、設計飛来物の飛来速度を設定するための風速場モデルを選定する必要がある。

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

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

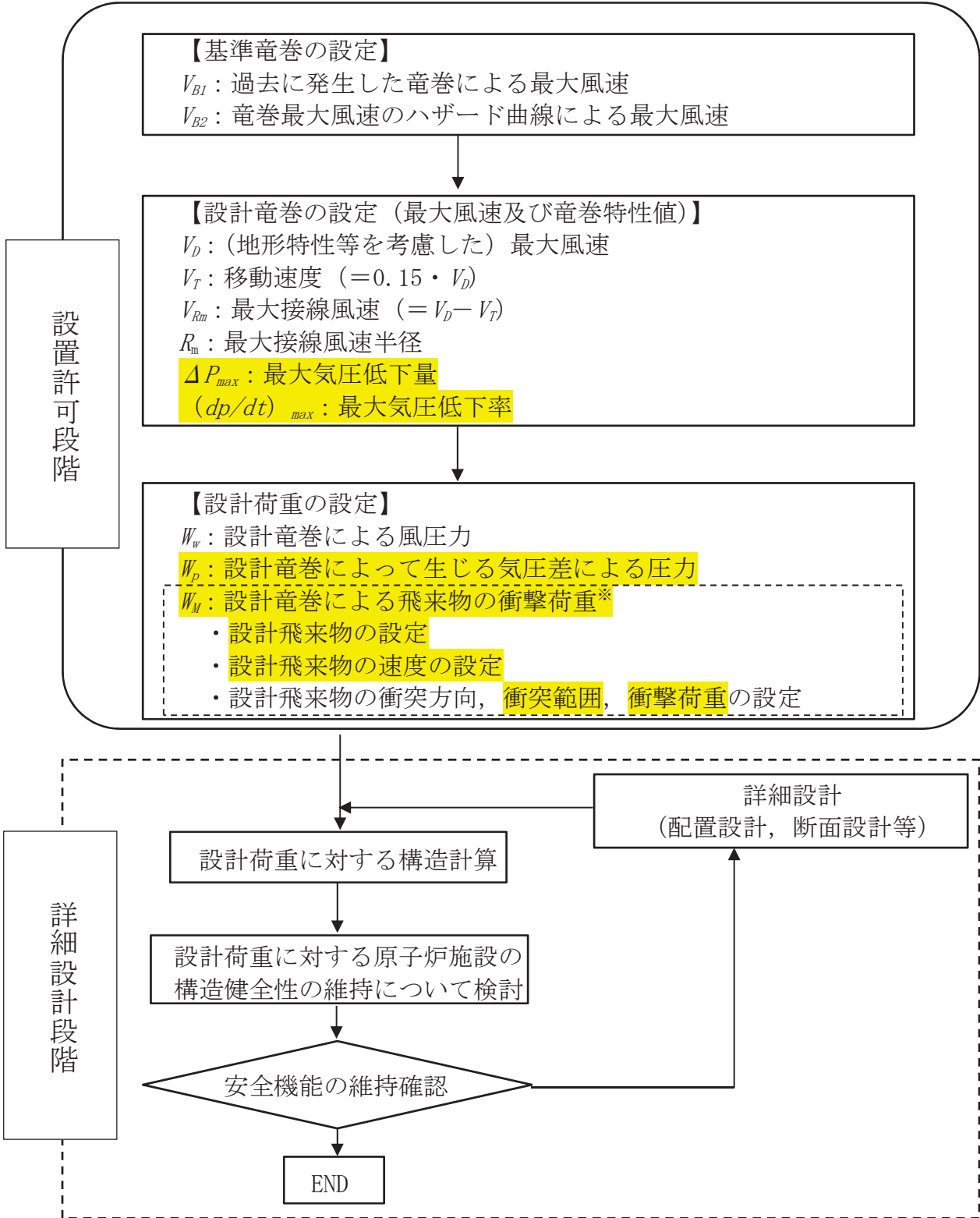
次節以降において、フジタモデルの詳細や、フジタモデルを適用した理由等を説明する。

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



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

：フジタモデルの関連箇所



※フジタモデルの風速場を用いて浮上の有無, 飛来物への作用する力を評価する

第 1-2 図 竜巻影響評価フローとフジタモデルの関連箇所

2. 各風速場モデルの概要

2.1 フジタモデル

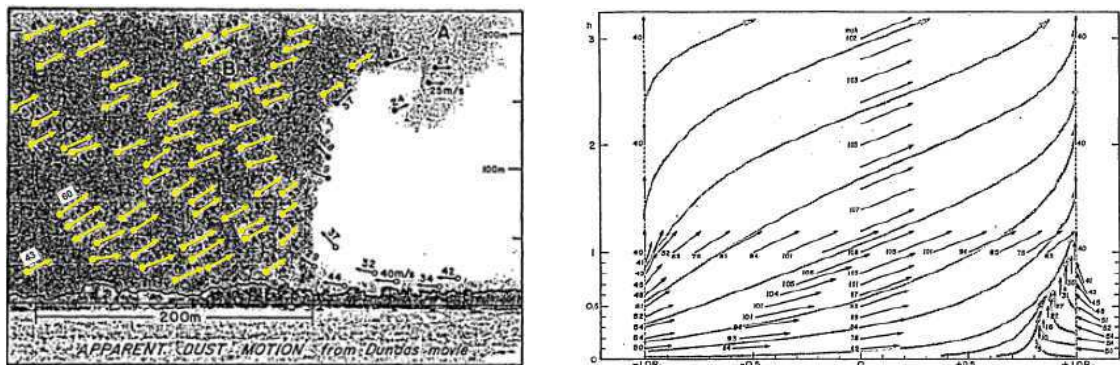
フジタモデルは、米国 NRC が実際の竜巻風速場をモデル化したいという要望により、藤田博士が 1978 年に竜巻観測記録を基に考案した工学モデルである⁽⁵⁾。

このフジタモデルの作成に当たっては、1974 年 8 月の米国カンザス州 Ash Valley 等で発生した竜巻のビデオ画像（第 2.1-1 図）を写真図化分析し、竜巻の地上痕跡調査及び被災状況調査結果と照合することで、第 2.1-2 図（左）に示すような風速ベクトルを作成している。このベクトル図を基に作成された流線モデル（第 2.1-2 図（右））から、竜巻風速場を代数式で表わすようにしている。

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



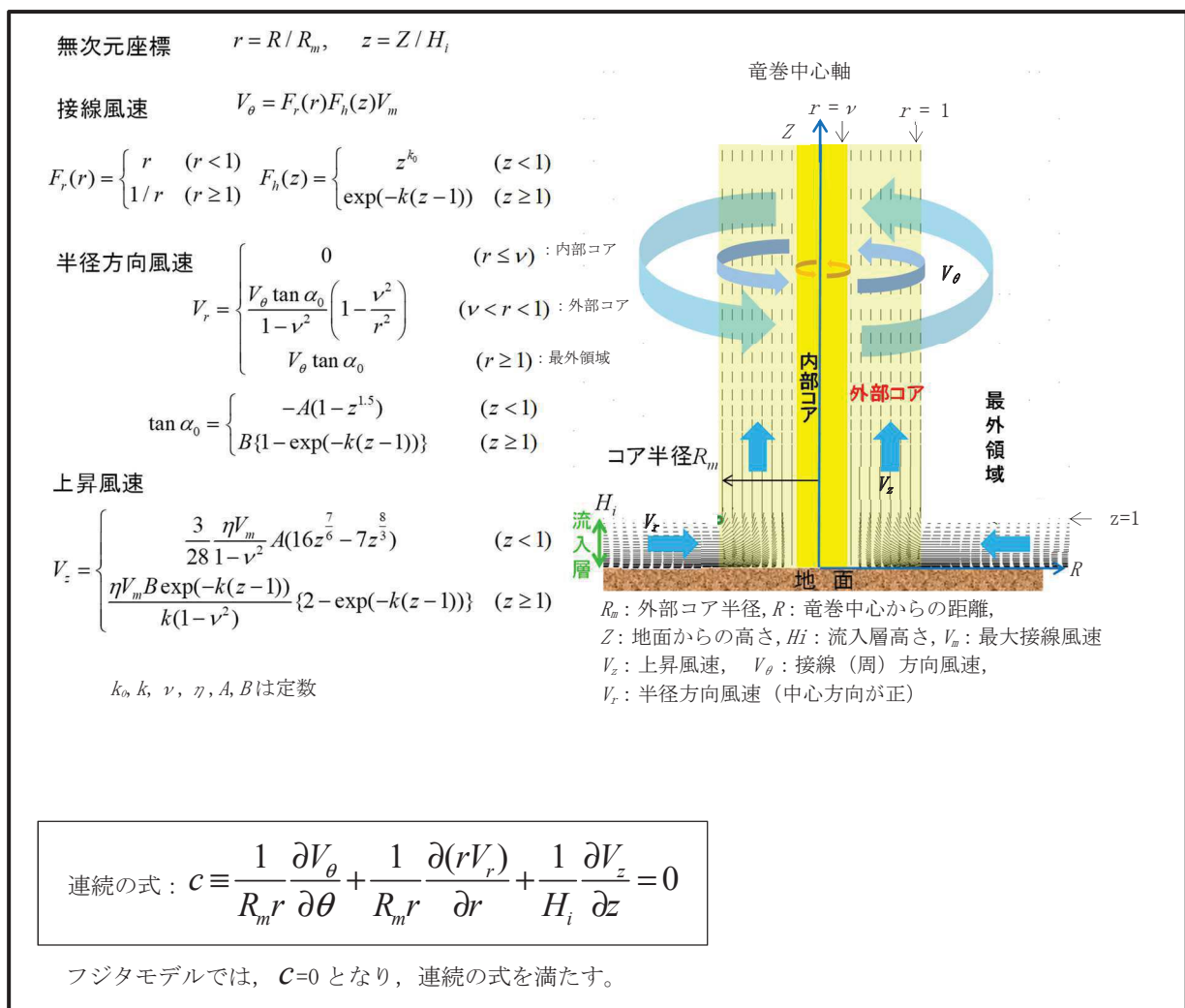
第 2.1-1 図 Ash Valley 竜巻 (1974. 8. 30) のビデオ画像



第 2.1-2 図 分析によって作成した風速ベクトル（左）、ベクトル図より作成したフジタモデル流線（右）

フジタモデルの風速場は第 2.1-3 図に示すように半径方向に 3つの領域（内部コア、外部コア及び最外領域）で構成され、鉛直方向は流入層と非流入層とで構成される。流入層では圧力勾配が遠心力よりも卓越するため、竜巻中心方向に向かう強い水平方向の流れ V_r があり、この空気の流れ込みが外部コア内での上昇流 V_z となる。また、接線風速や鉛直風速は高さ方向に変化し、特に、地表面付近では水平風速に境界層型の分布がある。また、流体の連続式（質量保存式）を満たす形で定式化されており、力学的に根拠のある風速場となっている。

フジタモデル DBT-77 における接線風速等の関係式については、Fujita Workbook⁽⁵⁾の Chapter6 に下記のとおり記載されている（Chapter6 では、フジタモデル DBT-78（詳細は別添 2-1 添付資料 2.6 参照）は引用されていない）。



第 2.1-3 図 フジタモデルの概要

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

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

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

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

ここで、 η は 1 以下の正の値であり、Fujita Workbook⁽⁵⁾ の (6. 4) 式より $\eta = 0.55(1 - \nu^2)$ で定義される。

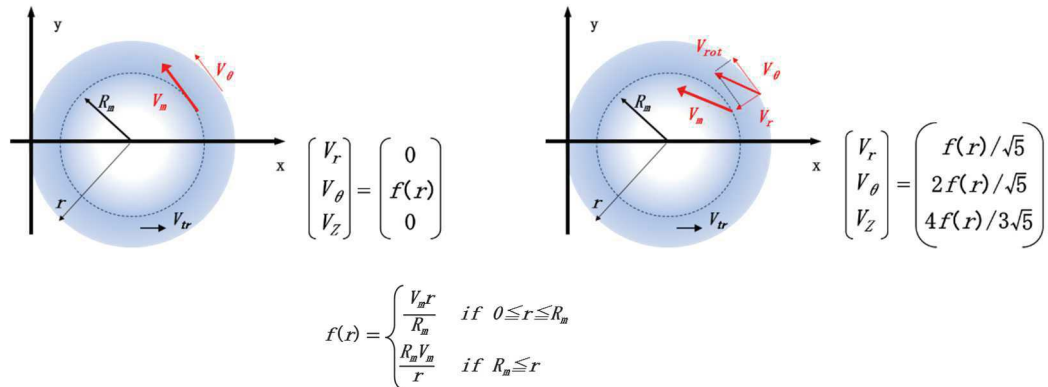
上記式において、外部コア半径 $R_m = 30\text{m}$ の場合、 $\eta = 0.501$ ($H_i = 15\text{m}$) となり、原子力安全基盤機構の調査研究報告書⁽⁴⁾ の第 2.2.3.10 図における流入層高さ と竜巻半径の比 ($\eta = 0.4$ 程度) や、Kosiba⁽¹⁴⁾ により示されている流入層高さ ($H_i = 10 \sim 14\text{m}$ 以下) とおおむね同じである。

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

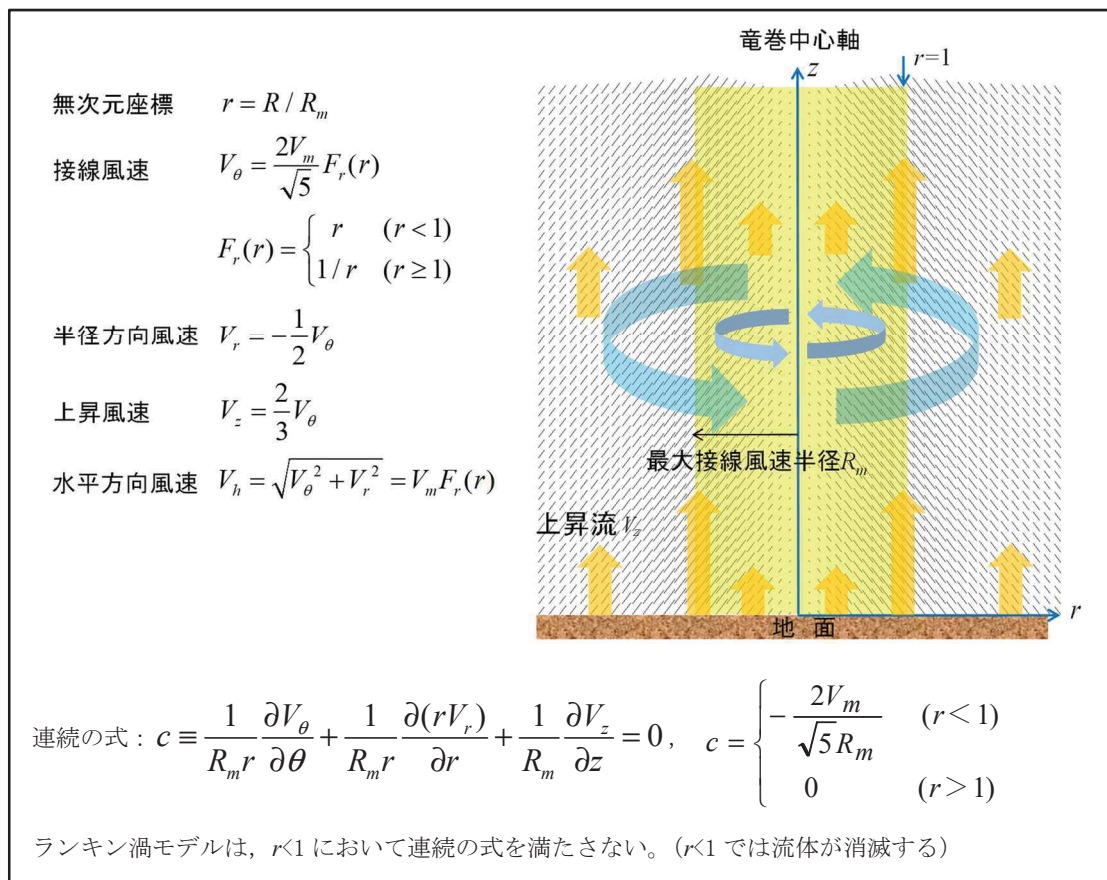
なお、その他の定数についても、Fujita⁽⁵⁾ の提案している値として、 $k_c = 1/6$, $k = 0.03$, $A = 0.75$, $B = 0.217$ を用いた。

2.2 ランキン渦モデル

ランキン渦モデルは、米国 NRC ガイドでも採用されており、設計竜巻の特性値を設定する際に用いられている。しかし、米国で開発された飛来物速度評価用のランキン渦モデル⁽³⁾は、竜巻中心に向かう半径方向風速 V_r と上昇風速 V_z を特別に付加している(第 2.2-1 図)。そのため、流れの連続の式(質量保存式)を満たしておらず、第 2.2-2 図に示すように地面から吹き出しが生じるような流れとなっており、地上からの物体の浮上・飛散を現実的に模擬することができない。ランキン渦モデルを用いて飛散評価を行う場合、地上の物体であっても空中浮遊状態を仮定して評価することになる。



第 2.2-1 図 設計竜巻圧力用のランキン渦モデル(左)と飛来物速度評価用のランキン渦モデル(右)



第 2.2-2 図 飛来物速度評価用のランキン渦モデルの概要

2.3 非定常乱流渦モデル (LES による数値解析)

LES は、非定常な乱流場を数値的に計算する手法として、NRA ガイドにおける飛来物の最大速度の設定例にも活用されている。第 2.3-1 図に LES による渦の発生状況を示す。

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

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

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

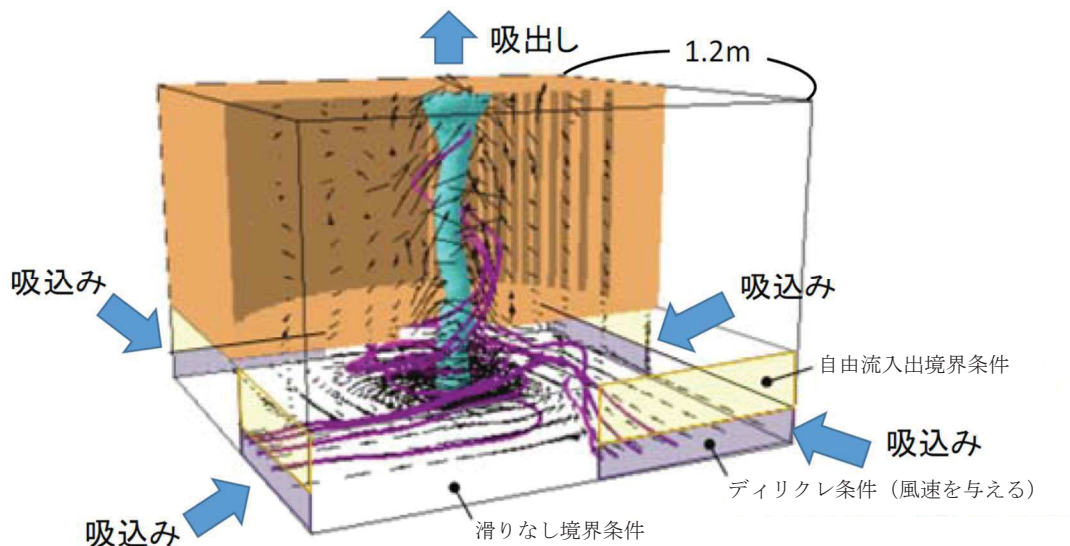
ここで、 U_i 及び P は i 方向の流速ベクトル及び圧力を表し、 ν は動粘性係数を、 f_i は i 方向の外力加速度を表す。また x_i は i 方向の座標を表す。

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

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

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

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



第 2.3-1 図 LES 計算領域内での竜巻状の渦の発生状況

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

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

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

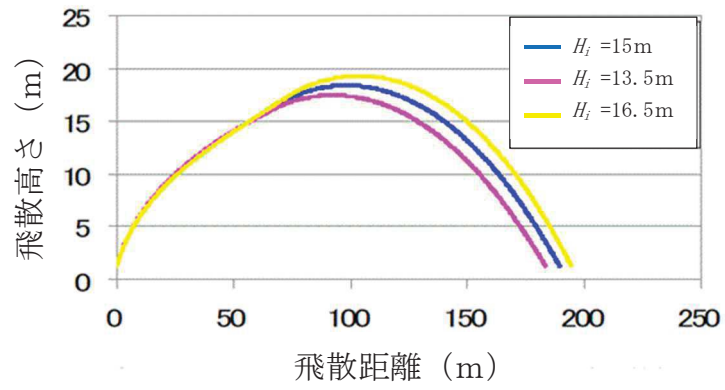
- ・人為的な流入境界条件（流入風速分布や流入箇所の局所的配置等）を設定していることから、流入境界条件の影響を受ける地表面付近の竜巻風速場の再現はできていないものと考えられる。
- ・小規模な計算領域によるシミュレーションであり、実スケールへの適用（飛来物評価）の際には単純に速度を規格化して飛来物評価に適用している。
 - ⇒風速の規格化の際には、時間平均の最大風速を 100m/s（風速+移動速度）に設定している。Maruyama⁽⁷⁾によれば、瞬間的な周方向風速は 1.7 倍程度まで大きくなる場合があり、移動速度と合わせると最大 160 m/s 程度まで達するため、飛来物評価の際に非常に保守的な結果が算出されることが考えられる。
 - ⇒流速が早い場合には粘性の影響は小さくなる傾向となるが、その影響については考慮していないことから、特に地表面付近については風速場の再現はできていないものと考えられる。

(参考：フジタモデルを適用した場合の飛来物の飛跡)

第 2.3-2 図にフジタモデルを適用した場合におけるコンテナの飛散解析（長さ 6m×幅 2.4m×高さ 2.6m，質量 2300kg， $C_d A/m=0.0105$ ，最大風速 100m/s）における飛跡を示す。

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

$H_i=15\text{m}$ の際のコンテナの最大飛散距離 189.4m に対し、流入層高さ H_i を ±10% 変化させた場合の最大飛散距離は 183.4m(-3.2%)，194.7m(+2.8%)となる。



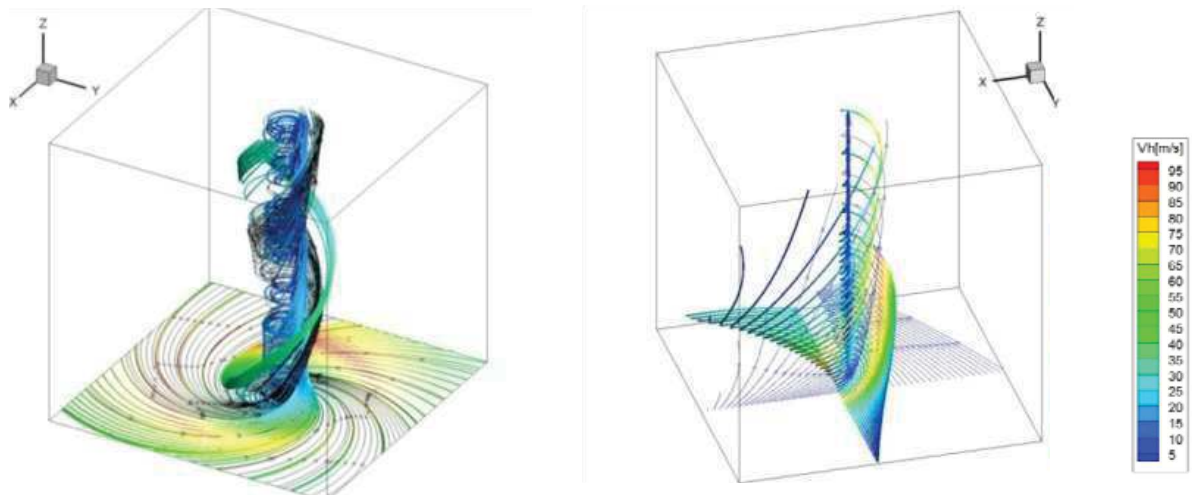
第 2.3-2 図 流入層高さを変化させた場合のコンテナの飛跡 (最大風速 100m/s)

3. 各風速場モデルの比較

各風速場モデルの特徴の比較を第 3-1 表に示す。また、フジタモデルとランキン渦モデルの風速場構造の比較を第 3-1 図に示す。フジタモデルの風速場構造の流線は、竜巻風速場に即した形で表現されており、地上からの物体の浮上・飛散解析が可能となっていることがフジタモデルの大きなメリットとなっている。それに対し、ランキン渦モデルは上空での水平方向風速の観点からは比較的よく表現できると言えるものの、地上付近では実現象と乖離しており、地上からの飛散挙動は解析できない。LES も同様に地上付近での風速場が実現象と乖離しているため、地上からの飛散挙動を解析できない。よって、竜巻影響評価に用いる風速場モデルとしてフジタモデルを選定することは妥当であると考えられる。

第 3-1 表 各風速場モデルの特徴の比較

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



第 3-1 図 フジタモデル (左) とランキン渦モデル (右) の風速場構造の比較

4. 米国におけるフジタモデルの取扱い

4.1 フジタモデルの利用実績

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

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

なお、米国 LES (Louisiana Energy Services) の濃縮施設 (NEF : National Enrichment Facility) では、上記の DOE 施設の基準に基づき竜巻飛来物 (鋼鉄パイプや木材の板等) を設定しており、米国 NRC は当該施設に対する安全評価報告書 (NUREG-1827) ⁽¹³⁾の中で竜巻飛来物に対する LES の竜巻設計を是認している。

(“Based on the review of the information concerning tornados and tornado-generated missiles, NRC concludes: (i) the information is accurate and is from reliable sources; and (ii) the design bases tornado-generated missiles are acceptable because they were determined based on an appropriate DOE standard. The use of a DOE standard is an acceptable approach to NRC staff.”)

4.2 NRC ガイドでの取り扱い

2.1 節でも述べたとおり、フジタモデルは実際の竜巻風速場をモデル化したいという米国 NRC の要請を受けて考案されたものであるが、米国 NRC Regulatory Guide 1.76⁽²⁾では、フジタモデルについて “The NRC staff chose the Rankine combined vortex model for its simplicity, as compared to the model developed by

T.Fujita (Ref.7) .”と述べられており、単に数式の簡易さを理由にランキン渦モデルが選定されている。また、NRC スタッフ自身で水平方向の飛来物速度 (Simiu らの運動方程式⁽³⁾) を計算するプログラムを開発している (“The NRC staff developed a computer program to calculate the maximum horizontal missile speeds by solving these equations. ”) ことが明記されている。

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

(参考) : 米国におけるランキン渦モデル以外の風速場モデルの利用実績

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

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

5. 飛来物評価における不確定性の考慮

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

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

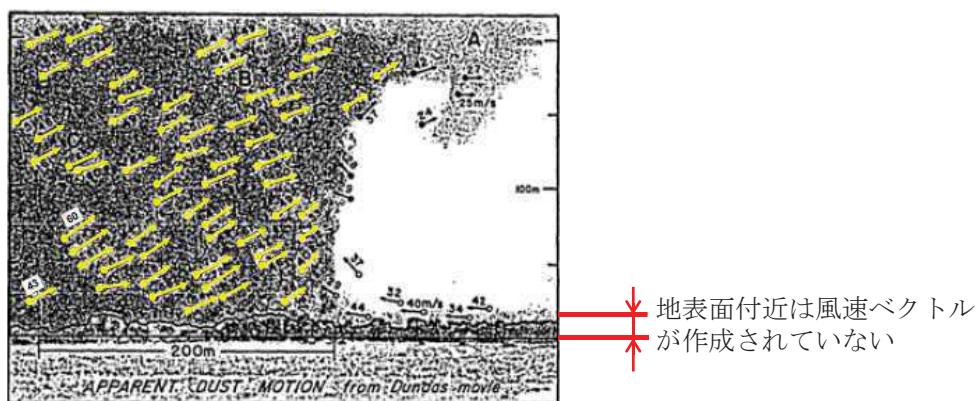
5.1 地表面付近の風速場に関する不確定性の考慮

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

(1) 流入層高さの感度解析

フジタモデルの特徴として流入層があるが、第5.1-1図に示すとおり、モデル化においては地表面付近の領域に対し、必ずしも十分な分析がなされていない可能性がある（飛散評価においては地表面に近づくに従い風速が減少し地表面（高さ0m）では0m/sになるようモデル化されている）。

また、当社の飛散評価においては、流入層高さを17.5mと設定しており、この流入層高さの感度解析を行った結果、第5.1-1表に示すとおり、流入層が低い場合に、僅かではあるが評価結果を厳しく与えることを確認した。



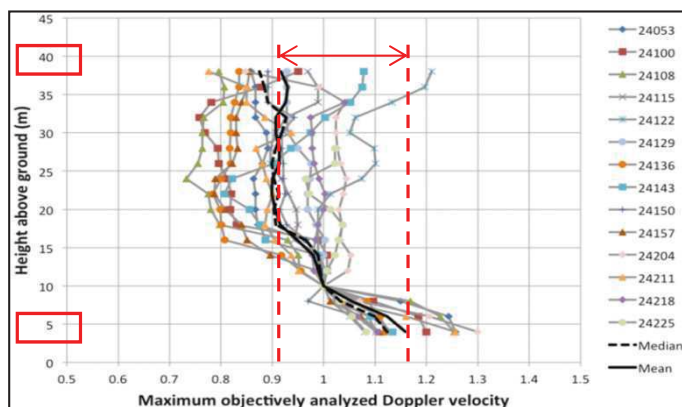
第5.1-1図 写真図化分析で作成された風速ベクトル⁽⁵⁾

第5.1-1表 流入層高さの感度解析結果（下線部：最大値）

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

(2) 至近の研究報告

Kosiba and Wurman 2013⁽¹⁴⁾によると、第5.1-2図に示すとおり地上高さ約5mにおける風速は地上高さ約40mに比べて約25%大きな値が観測されたことが報告されている。

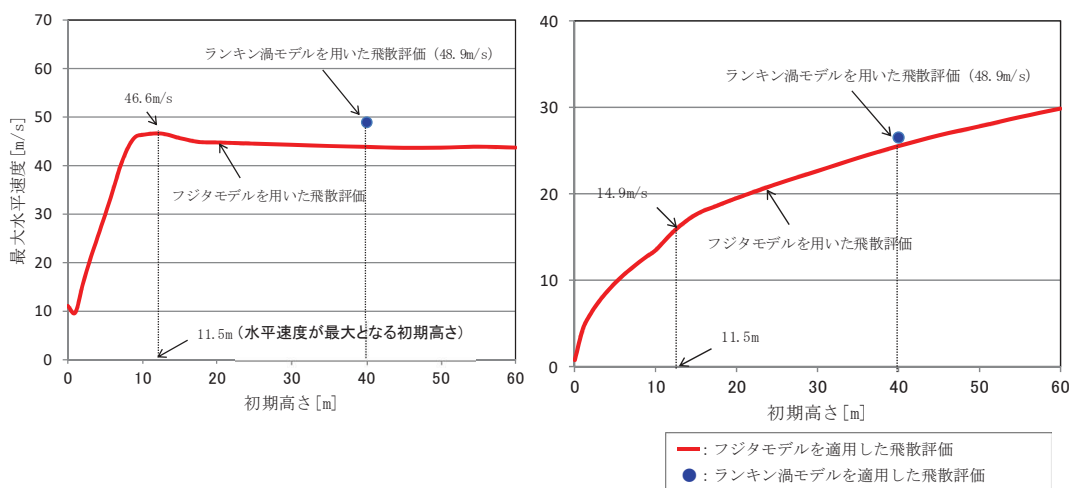


- 14箇所の観測点における風速を観測した結果、強い風は地上5m付近で観測されており、地上10m付近では約15%減少し、地上10~40mでは約10%減少する
- 地上から3m程度は観測を行っていない
- 実線は平均値を表す

第5.1-2図 地上高さと風速分布⁽¹⁴⁾

以上のことから、設備影響評価における、設計飛来物の条件としては、飛来物の速度の不確かさを考慮する必要があると判断し、当社が実施するフジタモデルの風速場を用いた飛散評価の条件（初期高さ）設定においては、飛散評価結果が厳しくなるように感度解析の結果を踏まえて、最大水平速度の算出条件を設定することで、地表面付近の風速場の不確実性を考慮した。また、女川原子力発電所の特徴である敷地の高さについても適切に考慮して飛散評価を行うこととする。（別添2-1 添付資料3.1参照）

(参考) 初期高さと速度の関係（鋼製材の例）



第5.1-3図 飛来物（鋼製材）の初期高さと速度の関係

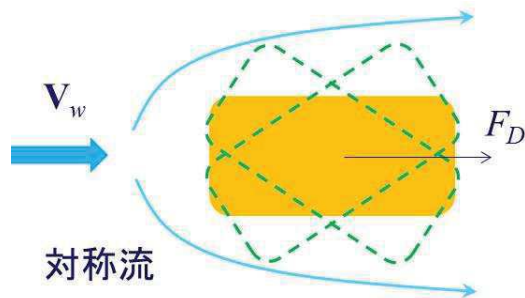
5.2 物体の浮上・飛来モデルにおける不確定性の考慮

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

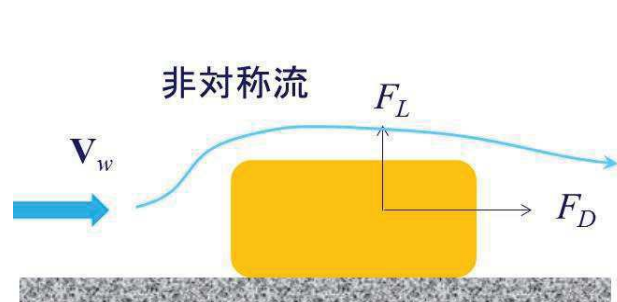
a. 物体の揚力の計算式

物体が空中にある場合、物体に作用する力は、NRA ガイドの飛来物運動モデル⁽³⁾⁽⁴⁾と同様に、飛来物は第 5.2-1 図のようにランダムに回転しているものとし、平均的な抗力（流れの速度方向に平行な力） F_D と重力のみが作用する飛行モデルを採用している。

一方、物体が地面に置かれている場合や地面に近い場合は、地面効果による揚力（次頁参照）を考慮している⁽⁶⁾。具体的には、物体の形状が流れ方向の軸に関して対称であっても、第 5.2-2 図に示すように地面の存在により流れが非対称になり、物体上部の圧力が低くなることで物体を浮上させる駆動力が生じることから、これを揚力 F_L として考慮する。



第 5.2-1 図 空中で飛来物へ作用する力



第 5.2-2 図 地面付近で飛来物へ作用する力

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

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

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

(参考) 地上の物体における地面効果による揚力について

物体や地面は完全な滑面ではなく、凹凸を有しているため、完全接触と非接触の領域に区別される。物体の地面への投影面積を A とし、物体と地面の完全接触面積を s とした場合、無風時（第 5.2-3 図左）は物体が流体に接する全表面で圧力は一定 (p_0) とみなせるため、鉛直方向（上向き）に作用する揚力 F_{L0} は、以下で与えられる。

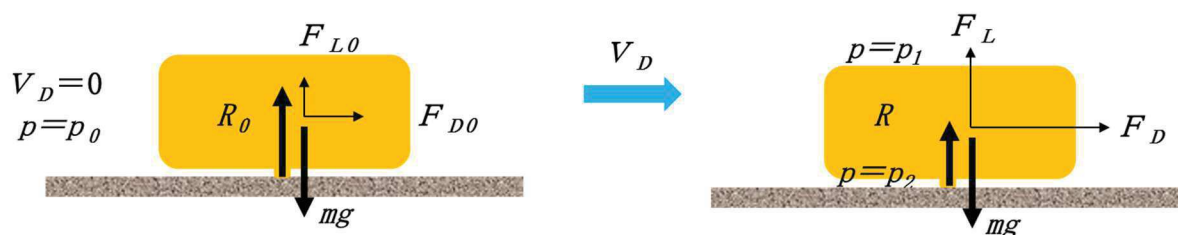
$$F_{L0} = -p_0 A + p_0 (A - s) = -p_0 s \quad (7)$$

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

一方、竜巻通過時（第 5.2-3 図右）の物体に圧力差に伴う流体力が作用（簡単のため上面での圧力 p_1 、下面での圧力 p_2 と仮定）する場合、鉛直方向の流体力 F_L は、以下で与えられる（圧力分布がある任意形状の物体についても圧力の表面積分を用いれば同様に計算は可能）。

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

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



第 5.2-3 図 部分的に地面に接する物体に作用する力（左：無風時，右：強風時）

b. 揚力係数の設定

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

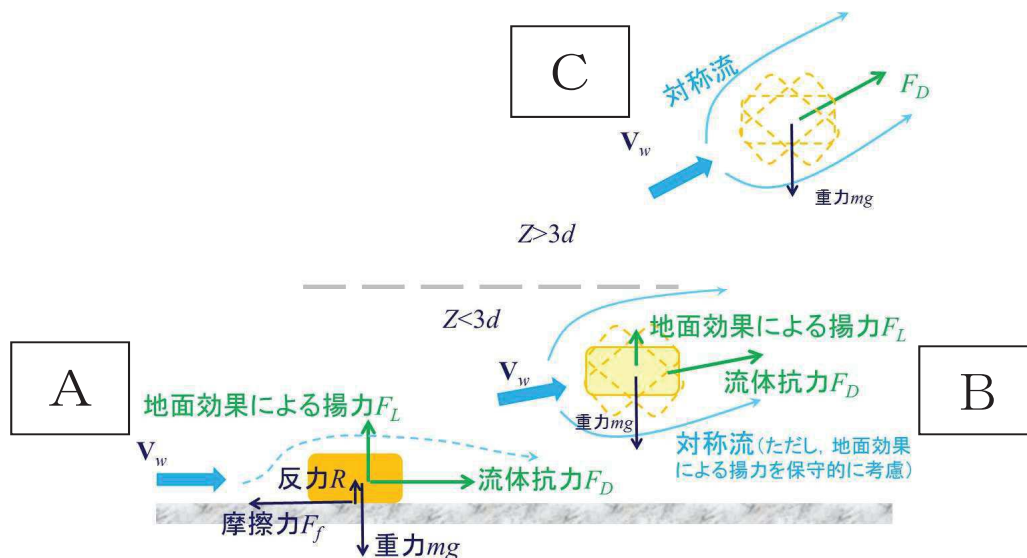
本評価では、条件によらず保守性を確保できるように、 C_{La} に代わり以下で定義される抗力係数と見附面積の積の平均値 $C_D A$ を用いることとする。

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

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

飛来物の運動モデルを第 5.2-4 図に示す。上記 (9) 式の考え方は、第 5.2-4 図に当てはめ整理すると以下のとおり。

- ・物体がある程度浮き上がった後の状態（第 5.2-4 図の B）であれば、物体はランダム回転し、物体各面に均等に風を受けるものと考えられること。
- ・物体が地面におかれた状態（第 5.2-4 図の A）から、実際に浮き上がる際には、物体の上面や下面での圧力が均一ではなく、傾きながら浮き上がるようなことも考えられるが、このような挙動を理論的に評価することは難しい。
そのため、これに準ずる方法として、評価に用いる係数は、地面から浮かせた状態で実測された C_{La} のうち、物体が地面に置かれた状態（第 5.2-4 図の A）にできる限り近い場合の値よりも大きな係数を用いることで、保守性は確保できると考えられること。
- ・物体が地面におかれた状態（第 5.2-4 図の A）と物体がある程度浮き上がった状態（第 5.2-4 図の B）での評価にて、共通の係数を用いることは、地上からの物体浮上・飛散評価における実用性の観点からも望ましいこと。



第 5.2-4 図 飛来物の運動モデルの模式図
(A : 地面上, B : $Z < 3d$ の高度範囲, C : $Z > 3d$ の高度範囲)

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

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

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

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

そこで、典型的な塊状物体・柱状物体・板状物体が地面に置かれた場合の $C_L a$ の最大値（又はそれに近い値）の実測結果と物体の幾何学形状のみで決定される $C_D A$ の値を比較した。（第 5.2-1 表）

第 5.2-1 表より、 $C_D A > C_L a$ の関係が成立しており、 $C_L a$ の代用として $C_D A$ の利用が適切であることが確認できる。なお、 $C_D A$ は各方向の抗力係数と見附面積の積の平均値であり、例えば一辺 d の立方体では $C_D A = 2d^2$ 、一辺 d の平板では $C_D A = 0.66d^2$ となる。両者には約 3 倍の違いがあるが、いずれの場合も実際の $C_L a$ 値よりも大きな値であり、揚力の評価モデルとして $C_L a$ 値の代わりに $C_D A$ を用いることで保守性は確保できる。

また、以上の揚力のモデル化の説明は浮上時（第 5.2-4 図の状態 A）に対するものであるが、この揚力が物体高さの 3 倍までの飛散高度の範囲で連続的に低減するように作用するようにモデル化しており、第 5.2-4 図の状態 A, B, C の全領域で揚力の連続性が確保されている。

第5.2-1表 主な物体の $C_D A$ と地面に置かれた物体の $C_L a$ (実測値)の大小関係 (1/2)

形状	物体	仕様	$C_D A^{*1}$	$C_L a$ (実測値)	$C_L a$ (実測値)に係る試験条件等
塊状	自動車	実物の Dodge Dart (長さ 16.7ft., 幅 5.8ft., 高さ 4.3ft.)	129ft. ²	48.7ft. ²	<ul style="list-style-type: none"> 風洞試験⁽¹⁶⁾ (風速 22~31m/s, $Re=2.8 \times 10^6 \sim 4 \times 10^6$) $C_L a$ が最大となる流入角での値を$C_L a$ (実測値)として記載
		1/6 縮尺模型 (セダン: 長さ 4.85m, 幅 1.79m, 高さ 1.69m, 質量 1633kg)	12.07 m ²	7.76 m ²	<ul style="list-style-type: none"> 風洞試験⁽²²⁾ (風速 0~150m/s, $Re=0 \sim 3 \times 10^6$) 4つのタイヤに作用する地面からの反力のうち, 少なくとも一つがゼロとなった時点の風速 U から$C_L a$ 値を計算 ($C_L a = 2mg / \rho U^2$) $C_L a$ が最大となる流入角での値を$C_L a$ (実測値)として記載
		1/6 縮尺模型 (ミニバン: 長さ 5.12m, 幅 1.94m, 高さ 1.42m, 質 量 2086kg)	14.58 m ²	7.89 m ²	<ul style="list-style-type: none"> 水路試験⁽¹⁷⁾ ($Re=8000 \sim 28000$) 流入方向と立方体面の一面が垂直になる配置における値を$C_L a$ (実測値)として記載
柱状	円柱	長さ λ , 直径D	2D ²	0.2D ² 程度	<ul style="list-style-type: none"> 風洞試験⁽¹⁶⁾ ($Re=1.3 \times 10^6$) 流入方向と円柱の軸直角方向が垂直になる配置(円柱の軸方向は地面と平行)における値を$C_L a$ (実測値)として記載
		長さ λ , 直径D	0.47D λ	0.05D $\lambda \sim 0.23D\lambda$	<ul style="list-style-type: none"> 風洞試験 ($Re=3.5 \times 10^4 \sim 1.2 \times 10^5$) 流入方向と円柱の軸直角方向が垂直になる配置(円柱の軸方向は地面と平行)における値を$C_L a$ (実測値)として記載
		長さ λ , 断面が一辺Dの正方形	0.8D λ (1.3D λ) ^{*2}	0.5D $\lambda \sim 0.7D\lambda$ 程度	<ul style="list-style-type: none"> 水路試験⁽¹⁷⁾ ($Re=8000 \sim 28000$) 長方形断面(アスペクト比 4:3)の角柱は地面から 0.167D 以上離れると揚力は負となる(電中研風洞実験) 流入方向と角柱の軸方向が垂直になる配置(角柱の軸方向は地面と平行)における値を$C_L a$ (実測値)として記載
柱状	角柱	長さ λ , 高さD, 幅Bの長方形断面	0.4(D+B) λ	負値(地面との隙間が 0.167D 以上の場合)	<ul style="list-style-type: none"> 風洞試験 ($Re=3.8 \times 10^4$) 流入方向と角柱の軸方向が垂直になる配置(角柱の軸方向は地面と平行)

第 5.2-1 表 主な物体の $C_D A$ と地面に置かれた物体の $C_L a$ (実測値) の大小関係 (2/2)

形状	物体	仕様	$C_D A$ ※1	$C_L a$ (実測値)	$C_L a$ (実測値) に係る試験条件等
平板	薄い平板	長さ λ , 幅 B, 厚さ D (B=200mm, D=5mm, λ =1000mm の場合)	0.66B λ	0 に近い値 (地面から 0.25B 離れた位置で $C_L a = 0.04B\lambda$)	<ul style="list-style-type: none"> 風洞試験⁽¹⁸⁾ (幅 B に基づく $Re=2 \times 10^5$) 流入方向と平板の長さ方向が垂直になる配置 (平板は地面と平行) における値を $C_L a$ (実測値) として記載
	薄い翼	長さ λ , 幅 B, 厚さ D (B=100mm, D=15mm, λ =300mm) (参考文献(20)では B の代わりに c で表記)		0.2B λ 程度	<ul style="list-style-type: none"> 風洞試験⁽²¹⁾ (幅 B(参考文献(20)では c) に基づく $Re=2.2 \times 10^5$) 流入方向と翼の長さ方向が垂直になる配置 (翼面は地面と平行)
	平板状 ブロック	長さ λ , 幅 B, 厚さ D	0.66B λ 0.66(B λ +D(B+ λ)) ※2	0.1B λ 程度	<ul style="list-style-type: none"> 水路試験⁽¹⁹⁾ ($Re=5 \times 10^4$ 程度) 流入方向と平板状ブロックの長さ方向が垂直になる配置 (平板状ブロックは地面と平行) における値を $C_L a$ (実測値) として記載

※1: 柱状及び平板では微少項を無視して記載

※2: 塊状をみなせる場合

c. 設定した揚力係数の適用性の確認

地面における揚力係数 C_L と見附面積 a の積 $C_L a$ が、飛行定数 $C_D A/m$ と同類の $C_D A$ で代用できることについて、第 5.2-1 表における $C_L a$ (実測値) が竜巻における飛来物の飛散解析に適用可能であることについて、レイノルズ数の観点から確認を行った。

第 5.2-1 表の各文献中の実験でのレイノルズ数 Re は同表の備考欄に示すとおり、 10^4 から 10^6 の範囲にある。

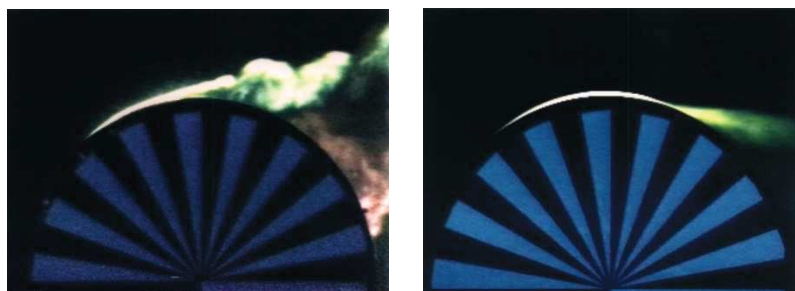
ここで、実物の自動車 (Dodge Dart : 長さ 16.7ft., 幅 5.8ft., 高さ 4.3ft.) では風速を 30mph (13m/s) から 120mph (54m/s) まで変化させてレイノルズ数の影響を調べた結果、風速は各空力係数に対して顕著な影響がないことが確認されている⁽¹⁶⁾。

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

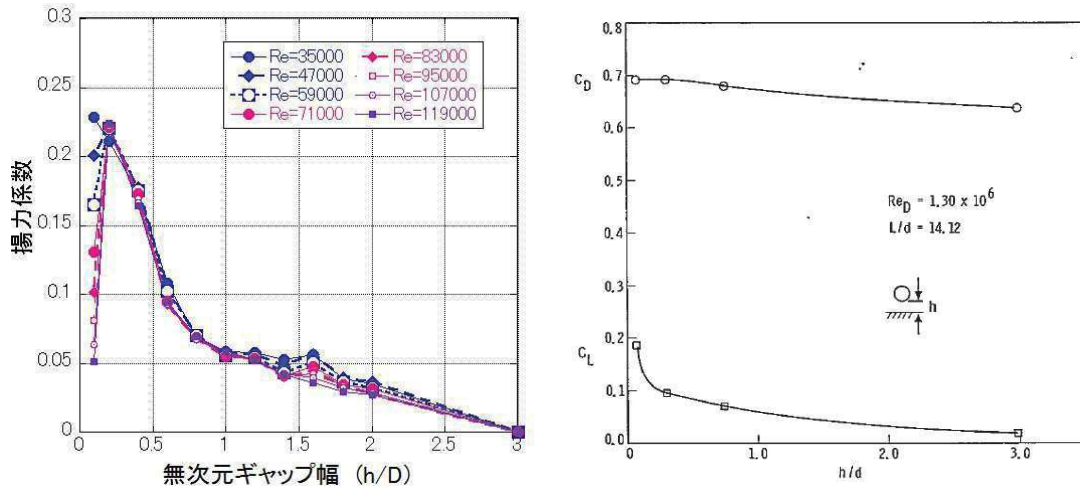
一方、円柱周りの流れのように剥離点が曲面上にある場合については、第 5.2-5 図に示すようにレイノルズ数 Re が変化すると、剥離点が移動し、抗力係数等が変化することが知られている。第 5.2-1 表の EPRI の円柱の風洞試験結果⁽¹⁶⁾は $Re = 1.3 \times 10^6$ の高レイノルズ数条件で得られたものであり、竜巻中の円柱状の飛来物のレイノルズ数範囲に入るものと考えられる (例えば、相対風速 92 m/s の直径 0.1m のパイプのレイノルズ数は $Re = 6 \times 10^5$ 程度)。また、電力中央研究所我孫子地区内の吹出式開放型風洞 (吹出口寸法 : 高さ 2.5 m × 幅 1.6 m, 風速 : 3.0 ~ 16.5 m/s) においても、壁 (地面) 近くに設置した円柱 (直径 100mm × 模型長 1000mm) を対象として、 $Re = 3 \times 10^4$ から 1×10^5 程度までの揚力係数の測定試験が行われている。

EPRI の風洞試験と電力中央研究所の風洞試験には、レイノルズ数条件に大きな違いがあるが、第 5.2-6 図に示すとおり風洞試験で得られた円柱揚力係数に顕著な相違は認められない。

以上より、地面における各物体の揚力係数 C_L と見附面積 a の積 $C_L a$ はレイノルズ数にほとんど依存せず、第 5.2-1 表に示す風洞試験結果に基づくモデル化は妥当であると考えられる。



第 5.2-5 図 可視化した円柱周りの流れ⁽²⁰⁾ (左 : $Re \approx 4 \times 10^4$, 右 : $Re \approx 2 \times 10^5$)



第 5.2-6 図 電力中央研究所の風洞試験 ($Re=3 \times 10^4 \sim 1 \times 10^5$) (左) と EPRI の風洞試験⁽¹⁶⁾ ($Re = 1.3 \times 10^6$) で得られた円柱揚力係数 (右)

d. 揚力の高さ依存性

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

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

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

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

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

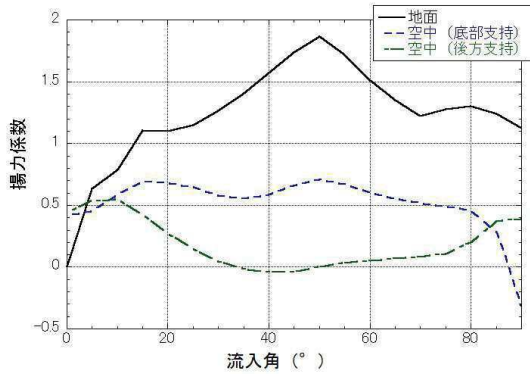
また、以下において、塊状物体 (自動車)、柱状物体 (角柱、円柱) 及び板状物体 (平板) の風洞試験結果を踏まえ、物体高さ d の物体にかかる揚力は、物体底面が地面から $3d$ の高度で消滅するとした仮定が適切であることを確認する。

(a) 塊状物体 (自動車) の揚力の高さ依存性

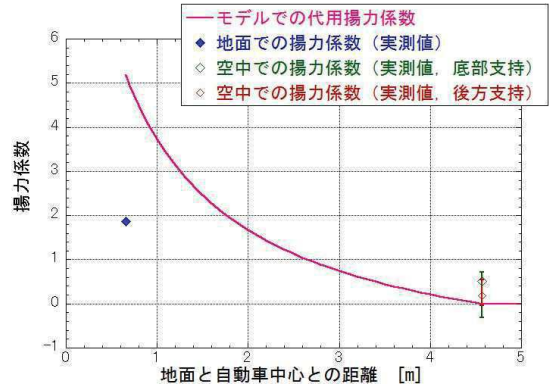
自動車の揚力係数は、EPRI の風洞試験⁽¹⁶⁾にて、地面及び風洞中央 ($h/d \doteq 3.5$) に設置した場合にて計測されており、第 5.2-7 図 (a) に示すように流入角 (0° は正面、 90° は側面に風を受ける角度) に依存した揚力係数が得られている。

また、第 5.2-7 図 (b)にて、EPRI の風洞試験によって得られた揚力

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



第 5.2-7 図 (a) 地面及び風洞中央に設置した自動車の揚力係数の流入角依存性

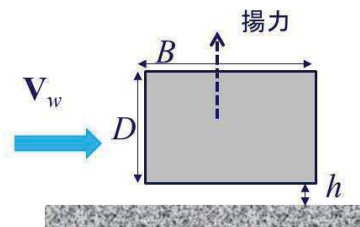
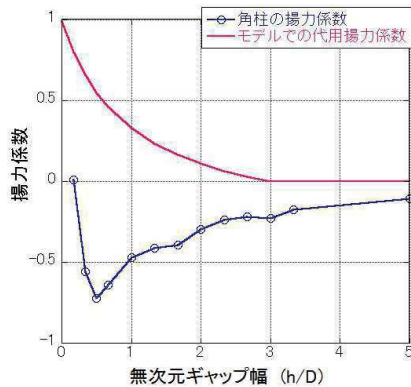


第 5.2-7 図 (b) 自動車の風洞試験による揚力係数と本モデルで代用した揚力係数の関係

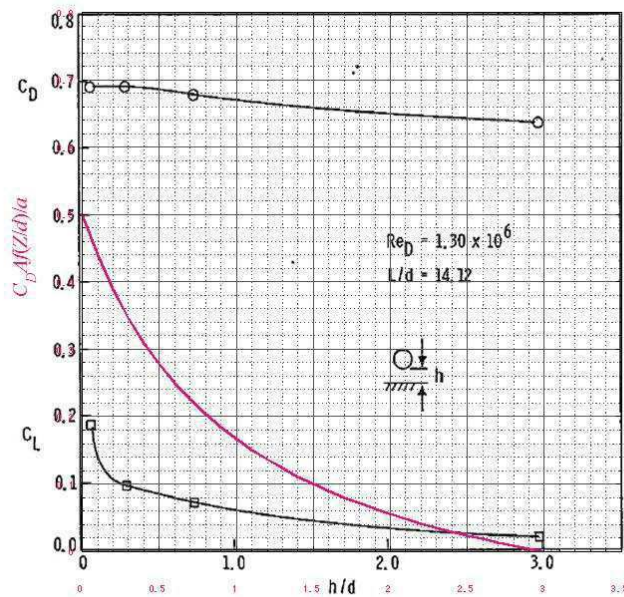
(b) 柱状物体（角柱・円柱）の揚力の高さ依存性

角柱の揚力係数は、電力中央研究所我孫子地区内の吹出式開放型風洞（吹出口寸法：高さ 2.5m×幅 1.6 m，風速：3.0～16.5m/s）にて測定しており，第 5.2-8 図にその結果を示す。角柱の場合，地面から 0.167D 以上離れると揚力は負となるので，正の揚力を与える本モデルの代用揚力式（第 5.2-8 図の赤線）は保守的な結果となっていることが分かる。

円柱の揚力係数は，EPRI の風洞試験⁽¹⁶⁾にて測定しており，第 5.2-9 図に示すように本モデルの代用揚力係数（第 5.2-9 図の赤線）は実際の円柱に働く揚力の最大揚力係数よりも大きな値となっているため，保守的な結果となっていることが分かる。



第 5.2-8 図 角柱の風洞試験による揚力係数と本モデルで代用した揚力係数の関係（幅 B=80mm×高さ D=60mm×模型長 1000mm）



第 5.2-9 図 円柱の風洞試験による揚力係数と本モデルで代用した揚力係数の関係

(c) 板状物体（平板）の揚力の高さ依存性

平板の揚力係数は、平面的な形状を有する翼（迎角 0° ）の試験結果⁽²¹⁾に基づき考察すると、本モデルで代用した揚力係数（第 5.2-10 図の赤線）は実際の翼に働く地面効果による揚力係数よりもおおむね大きな値となっている。また、この翼は奥行方向が長い形状で流れに直交するような配置となっており、実際の平板に比べて揚力が作用しやすいことを考慮すると、実際の平板の揚力係数はさらに小さいものと考えられる。

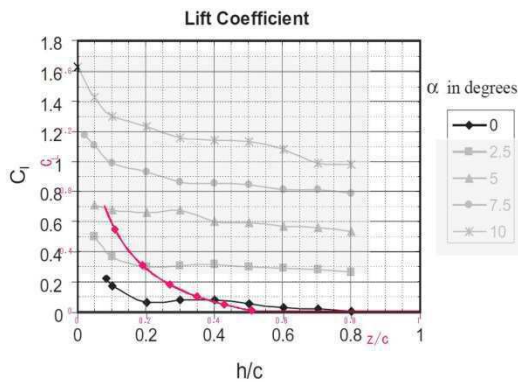


Fig. 8. Coefficient of lift at varying ground clearances for different angles of attack.

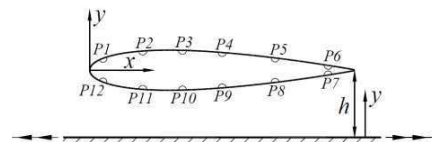


Fig. 2. Locations of pressure tappings.

第 5.2-10 図 翼の風洞試験による揚力係数と本モデルで代用した揚力係数の関係

e. 飛来物の運動方程式

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

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

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

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

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

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

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

f. 飛来物の運動方程式（(13)式）に関する考察

地上面の物体（第 5.2-4 図の状態 A）が浮上するには、地面からの反力が消滅（ $R < 0$ 、つまり $mg < F_L$ ）する条件で浮上し、浮上後は、(13) 式を成分表示した以下の飛来物の運動方程式に従って飛散する。

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

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

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

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

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

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

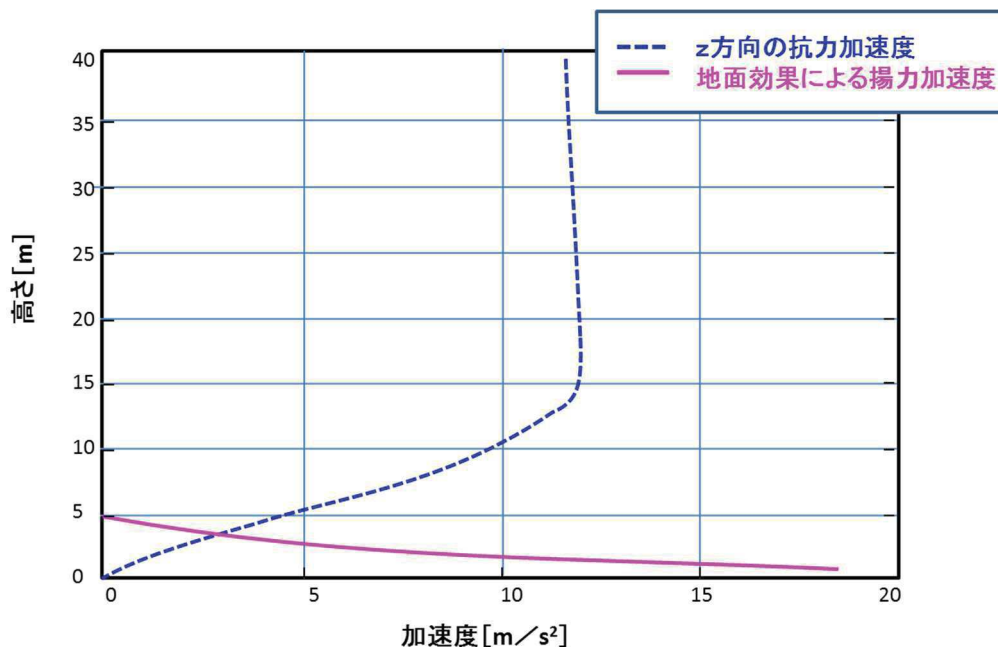
$$\frac{dV_{M,z}}{dt} = \frac{1}{2} \rho \frac{C_D A}{m} \sqrt{V_{w,x}^2 + V_{w,y}^2 + V_{w,z}^2} \times V_{w,z} - g + L \quad (18')$$

フジタモデルでは、物体が地面上にある場合（第 5.2-4 図の状態 A）では上昇速度はゼロに近く、地面で静止している飛来物が受ける上昇速度はほぼゼロであるため、式（18'）の右辺第 1 項は右辺第 2、第 3 項に比べてはるかに小さな量となり、以下のとおり物理的に合理的な関係式が成立する。

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

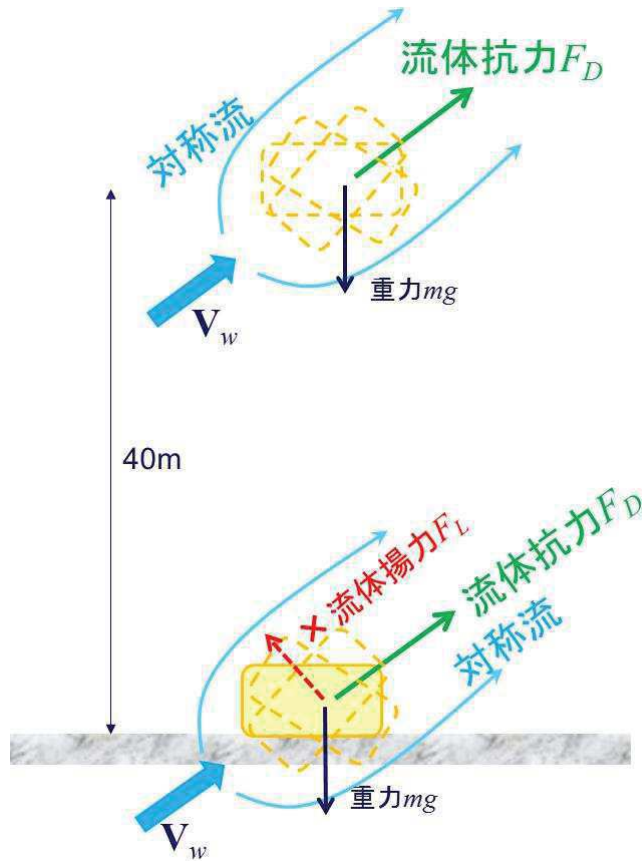
例として、竜巻コア半径 30m、最大風速 92m/s の竜巻が原点に位置し x 方向に 14m/s で移動する場合、点 (0, -30m) における式（18'）の右辺第 1 項の値（z 方向抗力（流体抗力）による加速度）と第 3 項の値（地面効果による揚力加速度）を第 5.2-11 図に示す。

第 5.2-11 図より、地面上（z=0）においては、z 方向抗力による加速度は十分小さく、地面効果による揚力加速度の影響が大きいことが分かる。



第 5.2-11 図 地面近傍の飛来物に作用する z 方向の加速度
（飛来物の特性： $0.5 \rho C_D A / m = 0.004 [\text{m}^{-1}]$, $d = 1.31 [\text{m}]$ ）

なお、高さ方向の依存性が考慮されていないランキン渦の場合は、上昇風速が水平風速の約 60%にも達するため、地面から非現実的な風の噴出が発生する。地面効果は地面の存在によって水平な風が物体付近で湾曲・剥離することによって生じるものであるが、ランキン渦の風速場では地面の有無によって物体周りの流況が大きく変化せず、地面効果は物理的に発現しにくいいため、ランキン渦モデルを用いた解析においては鉛直方向による揚力 L を付加していない（第 5.2-12 図）。

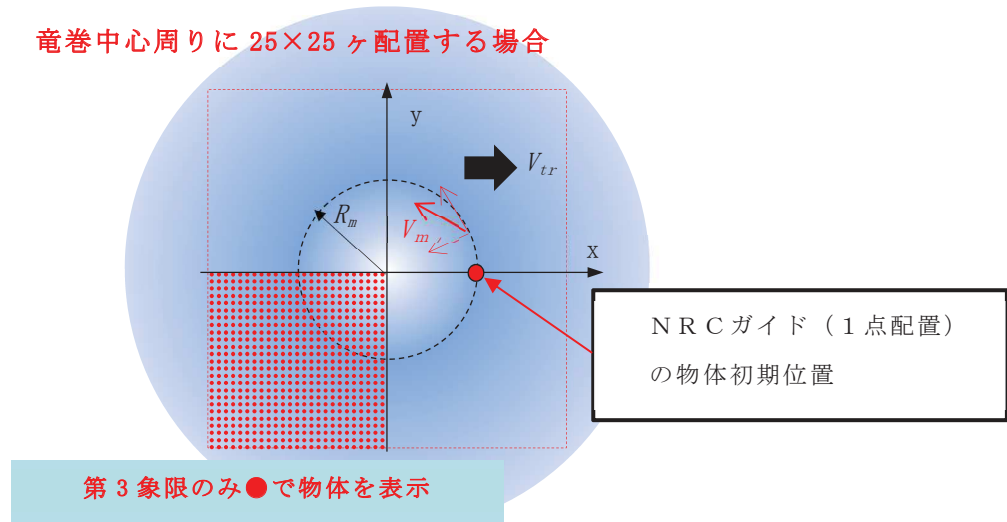


第 5.2-12 図 ランキン渦の場合の飛来物の運動モデルの模式図

5.3 竜巻が物体に与える速度に関する不確定性の考慮

竜巻によって飛散する物体の飛来速度や飛散距離は、同じ竜巻内であっても物体の受ける風速(物体がある位置の竜巻風速)によって大きく変動する。その影響度合いを確認するため、米国 NRC ガイド⁽²⁾に記載されている方法(物体の1点配置)と、物体を多点多配置した場合の飛来速度の違いを比較した。配置の違いについて、第5.3-1図に示す。

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

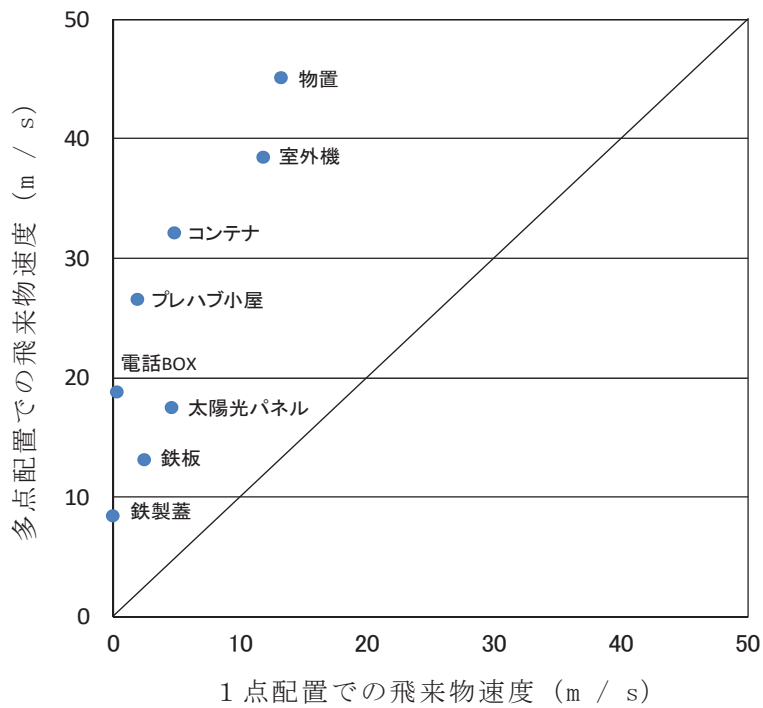


第5.3-1図 飛来物評価における竜巻と物体の位置関係

評価条件として、竜巻の最大風速を 69m/s とし、フジタモデルの風速場を用いて地上から飛散させるものとする。また、NRAガイドの記載より竜巻の移動速度 V_{tr} を 10m/s 、竜巻コア半径 R_m を 30m とする。飛散させる物体のパラメータとして、原子力安全基盤機構の調査研究報告書⁽⁴⁾に掲載されている物体の飛行定数(5.2節の $C_D A$ を質量で割った値 $C_D A/m(\text{m}^2/\text{kg})$)を用いた。第5.3-2図に比較結果を示す。

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

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

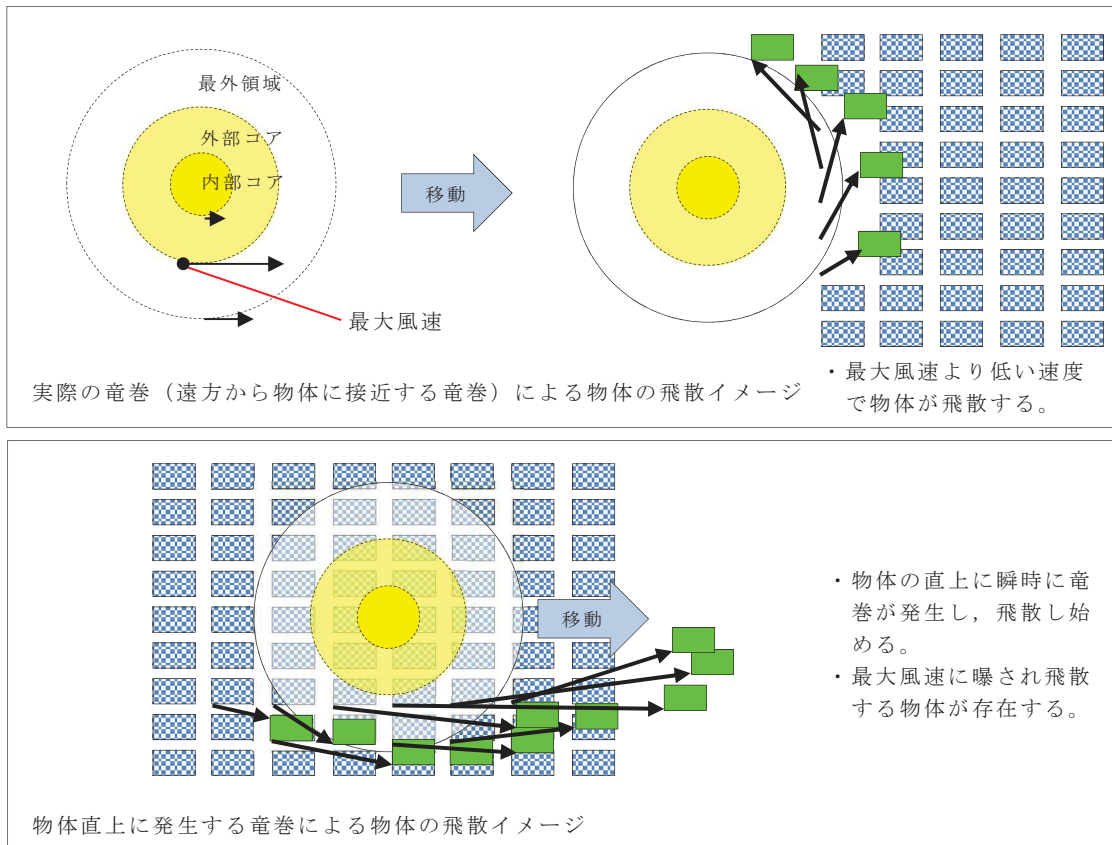


物体名称	長さ	幅	高さ	質量	$C_D A/m$
	(m)	(m)	(m)	(kg)	(m^2/kg)
物置	1.80	0.90	1.50	120	0.0315
室外機	0.80	0.25	0.30	10	0.0343
コンテナ	2.40	2.60	6.00	2300	0.0105
プレハブ小屋	5.00	5.00	3.00	4400	0.0083
電話BOX	0.30	0.30	0.40	13	0.0169
太陽光パネル	1.20	1.00	0.05	14.5	0.0582
鉄板	2.00	0.25	0.04	7.6	0.0486
鉄製蓋	0.70	0.50	0.03	6.8	0.0364

第 5.3-2 図 1 点配置時と多点配置時の最大飛来物速度の比較（上）と物体のパラメータ（下）

第 5.3-1 図に示す物体の多点配置(竜巻半径の 4 倍の正方形の領域に 51 × 51 個の物体を配置)を初期状態として適用したが、この手法は、物体の直上に竜巻を発生させており、竜巻発生地点の不確定についても考慮した設定となる。

第 5.3-3 図に遠方から物体に接近する竜巻と、物体直上に発生する竜巻による飛散の比較イメージ図を示す。竜巻に遭遇する状況(海上で竜巻が発生して上陸する場合など)を考慮すると、竜巻は遠方から物体に近づくため、最大風速より低い風速に曝され、飛散することになる。しかし、物体の直上に竜巻を発生させる設定とすることで、実際の竜巻による飛散と比較して、より厳しい結果を与えることになる。



第 5.3-3 図 物体に接近する竜巻と物体直上に発生する竜巻の比較イメージ図

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

5.4 飛来物評価法のまとめ

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

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

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

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

6. 実際の飛散状況に対する検証

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

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

6.1 フジタモデルを用いた飛散解析結果とフジタスケールとの比較

フジタスケールは、竜巻等の突風により発生した建築物や車両等の被害状況から、当時の竜巻風速を推定するために考案された指標である。このフジタスケールで示されている自動車の被災状況を第 6.1-1 表に示す。

ここで、各スケールに対応する最大風速（69m/s、92m/s、116m/s）を用いて、フジタモデルによる自動車飛散解析を行った。その結果を第 6.1-2 表に示す。

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

第 6.1-1 表 フジタスケールで示されている自動車の被災状況⁽²⁸⁾

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

第 6.1-2 表 フジタモデルによる自動車の飛散解析結果

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

6.2 米国 Grand Gulf 原子力発電所への竜巻来襲事例

1978 年 4 月 17 日に米国のミシシッピ州にて建設中の Grand Gulf 原子力発電所に F3 の竜巻が来襲した⁽²⁴⁾。主な被害として、建設中の冷却塔内部

に設置されていたコンクリート流し込み用のクレーンが倒壊し、冷却塔の一部が破損したことが挙げられる。

また、竜巻によりトレーラーが台から剥がれ移動したことや、直径8から10インチの木が折れた事例等も確認されており、第6.2-1図は、竜巻による飛来物の飛散状況が定量的に分かる事例として、資材置き場のパイプの飛散状況を示したものである。なお、通過時の竜巻規模はF2であったと考えられている。このパイプはコンクリート・石綿製で、長さは8フィート、直径（内径）は8インチであった。このパイプの飛散状況に対して、フジタモデルあるいはランキン渦モデルを風速場として用いた飛来解析を行った⁽²⁹⁾。その計算条件は過去の記録に基づき第6.2-1表のとおりとした。



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

第6.2-1図 Grand Gulf 原子力発電所資材置き場におけるパイプの散乱状況

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

第6.2-1表 Grand Gulf 原子力発電所の竜巻によるパイプ飛散の再現をする上での計算条件

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

計算結果を第6.2-2表に示す。フジタモデルを風速場とした場合は、パイプがほとんど飛散せず、木箱が倒れた影響で散らばったと思われる状況とおおむね合致している。

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

第6.2-2表 Grand Gulf原子力発電所のパイプの飛散計算結果

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

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

※2:初期物体高さからの飛散高さ。

6.3 佐呂間竜巻での車両飛散事例

2006年11月7日に北海道網走支庁佐呂間町に発生した竜巻（以下、佐呂間竜巻と言う。）により、4tトラックが約40m移動したことが報告されている⁽²⁵⁾。被災状況を第6.3-1図に示す。この事例では被災時に4tトラックに乗員2名が乗車しており、4tトラックの初期位置と移動位置が分かっている（第6.3-1図左上画像の②）。また、4tトラックのほかに2台の自動車（第6.3-1図左上画像の③と⑥）について、初期位置と被災後の移動位置が分かっている。このように竜巻被災前後で車両等の位置が明確になっている事例は極めてまれである。なお、竜巻飛来物の再現計算は、竜巻が頻発する米国でもほとんど実施されていない。この理由としては、来襲した実際の竜巻特性を精度よく計測・推測することが困難であることや自動車等の移動前後の位置が不明確な場合が多いことが挙げられる。



第6.3-1図 佐呂間竜巻（2006.11.7）による被災状況（工事事務所敷地内の車両被災）⁽²⁵⁾
 文献(24)で示されている竜巻被害の方向を で加筆

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

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

a. 竜巻特性や飛来物の状況を現実的に設定した場合の再現解析

(a) 4tトラックの飛散解析

再現解析の条件として、入手可能なデータ⁽²⁵⁾⁽²⁶⁾に基づき、合理的と考えられる竜巻特性条件と飛来物（4tトラック）の条件を第6.3-1表のように設定した。初期配置の条件として、配置個数は1個とし、竜巻が遠方から近づく状況設定としている。また、風速60m/s以下では浮上しない設定となっている。その上で、竜巻との距離を合理的な範囲で変化させ、佐呂間竜巻の再現性を確認した。

車両と竜巻中心との距離を18m, 20m, 22mとした場合の解析結果を第6.3-2表及び第6.3-2図に示す。車両の軌跡は竜巻中心との相対位置関係に敏感であるが、各ケースとも飛散方向が実際の移動方向とおおむね合致しており、特に車両と竜巻中心との距離を20mとしたケース2では飛散距離もほぼ正確に再現されている。このように、フジタモデルを風速場とした飛散解析で、飛来物が地上に設置された状況からの飛散挙動が再現できることが確認できた。

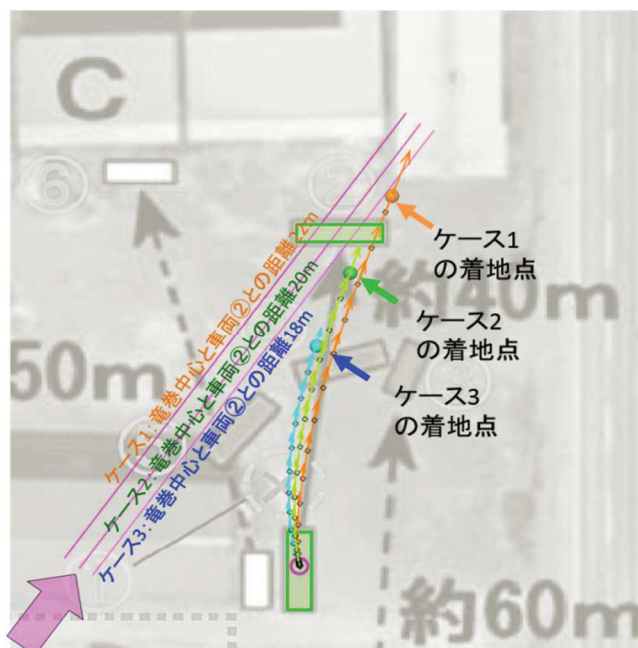
また、フジタモデルとランキン渦モデルの比較の観点から、ケース2を対象として解析を行った。解析の結果は第6.3-2表に示すとおり、ランキン渦モデルの場合は過大な結果を与えることが確認された。

第6.3-1表 佐呂間竜巻の4tトラックの計算条件

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

第6.3-2表 佐呂間竜巻での4tトラックの飛散計算結果

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



第6.3-2図 フジタモデルによるトラック飛散の再現解析結果

(b) 乗用車の飛散解析

白い乗用車（第6.3-1図の⑥）の被災事例を対象として、物体を1点初期配置した条件で最大水平速度等を計算した。

乗用車の計算条件について、第6.3-3表に示す。

第6.3-3表 佐呂間竜巻の乗用車の計算条件

竜巻条件	第6.3-1表と同様		
飛来物条件	乗用車 〔トヨタカローラ〕 を仮定	車両長さ	4.40m
		車両幅	1.70m
		車両高さ	1.50m
	飛行定数 $C_D A/m$	0.0097m ² /kg	
初期配置	<ul style="list-style-type: none"> ・物体個数1個 ・竜巻は遠方から物体に近づくが、風速60m/s以下では浮上しない ・フジタモデル：設置高さ0m ・ランキン渦モデル：初期高さ40m 		

乗用車と竜巻中心との距離を、18m、20m、22mとした場合の解析結果を第6.3-4表及び第6.3-3図に示す。飛散距離についてはケース1でおおむね合致している。

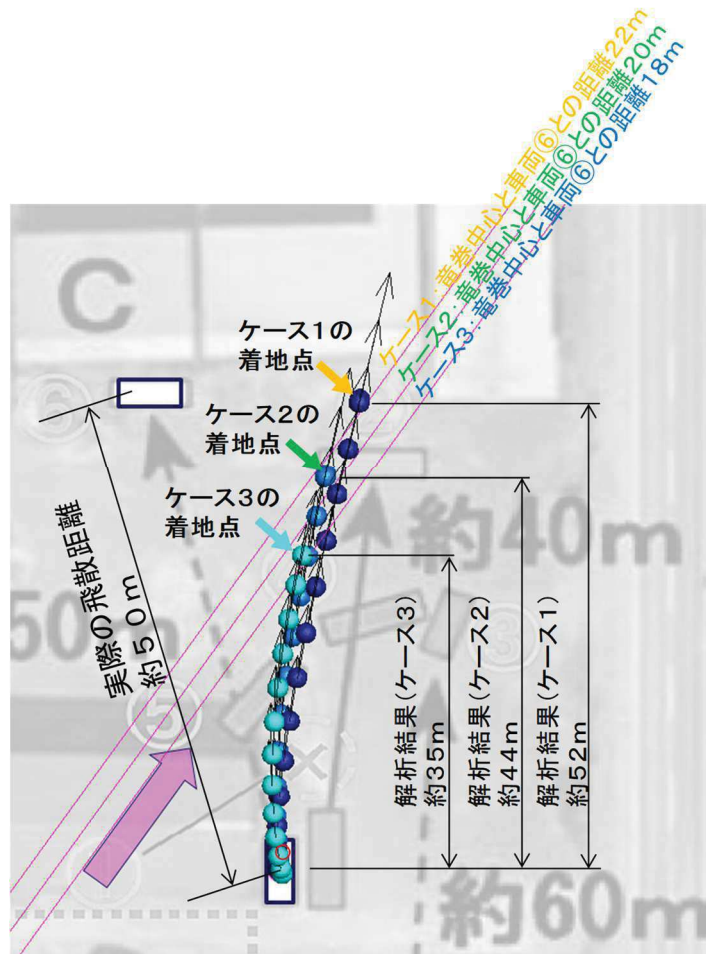
飛散方向については、飛び出し方向はおおむね合致しているものの、最終的な着地点には多少のずれが生じている。これは乗用車（白）が建物（A棟）に近接して駐車していたため、この建物の倒壊の影響を受けて飛散方向のずれが生じたものと推定される。

なお、赤い乗用車（第6.3-1図の③）について評価した場合は、竜巻中心との距離が大きいため飛散しない解析結果となった。ただし、実際には、赤い乗用車は全壊・飛散したプレハブ建物（軽量鉄骨造2階建て、第6.3-1図のA）の直ぐ下流側に駐車しており、その瓦礫の影響を受けて一緒に移動したものと考えられる。

また、フジタモデルとランキン渦モデルの比較の観点から、ケース1を対象として解析を行った。解析の結果は第6.3-4表に示すとおり、ランキン渦モデルの場合は過大な結果を与えることが確認された。

第6.3-4表 佐呂間竜巻での乗用車の飛散計算結果

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



第6.3-3図 フジタモデルによる乗用車飛散の再現解析結果

(c) 多点配置等を考慮した場合の竜巻評価の影響

前述の佐呂間竜巻の再現解析に対して、物体を多点配置した場合の影響について確認する。竜巻条件と飛来物条件を第6.3-5表のとおり設定した。

第6.3-5表 多点配置時の計算条件

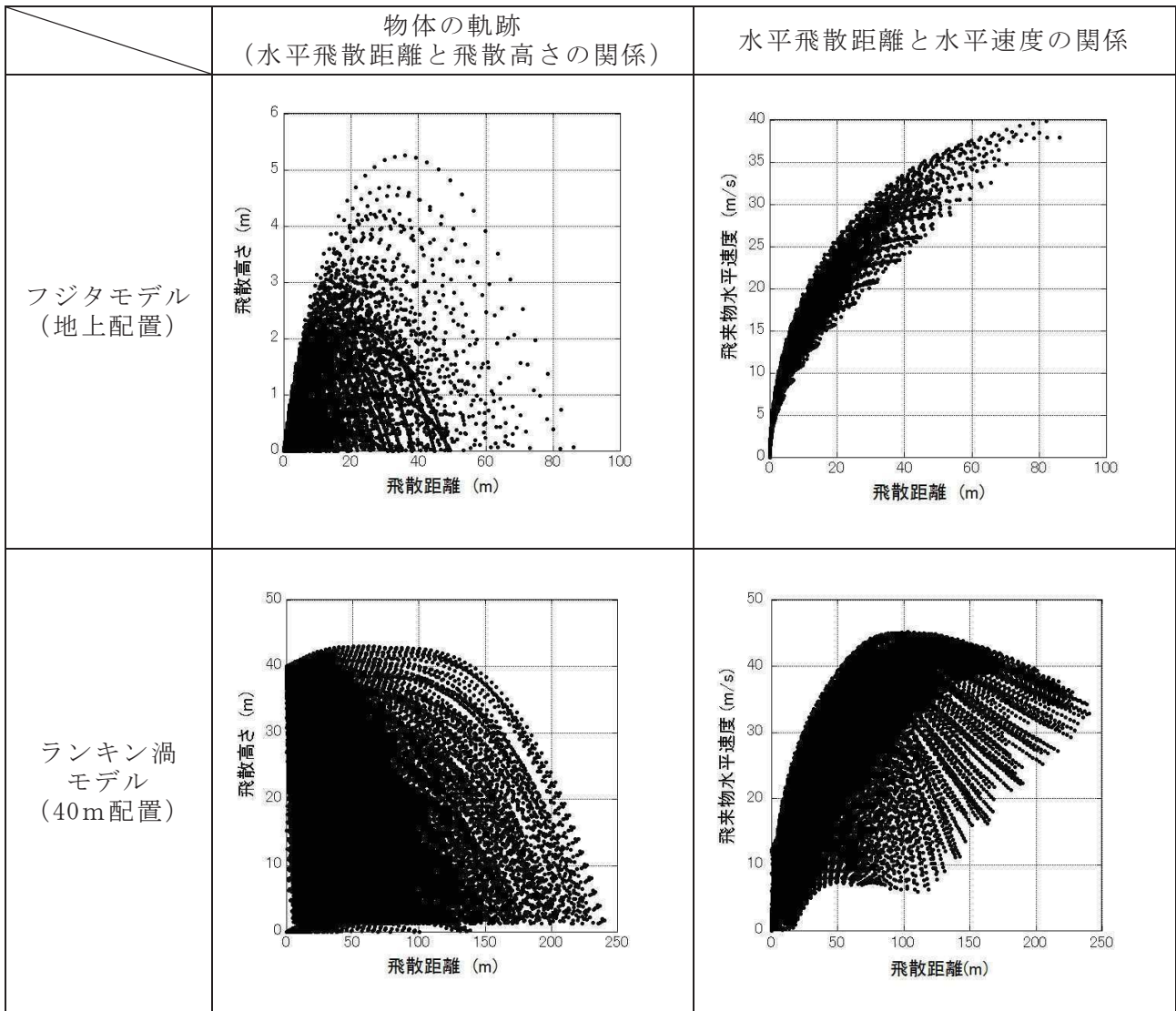
竜巻条件	第6.3-1表と同様	
飛来物条件	4 tトラック	第6.3-2表と同様
	乗用車	第6.3-3表と同様
初期配置	<ul style="list-style-type: none"> 物体個数 51×51 個，竜巻半径の4倍を一辺とする正方形内に等間隔配置 フジタモデル：初期高さ 0 m ランキン渦モデル：初期高さ 40m 	

飛散解析結果として、0.1秒毎の物体の軌跡（水平飛散距離と飛散高さの関係）及び水平飛散距離と物体の水平速度の関係を第6.3-6表並びに第

6.3-7表に示す。フジタモデル及びランキン渦モデルを用いた解析結果は1点配置に比べていずれも保守的な評価となっており、特にランキン渦モデルは被災状況に対して過度に保守性があることが分かる。

第 6.3-6 表 多点配置を考慮した解析結果 (4 t トラック)

(第 6.3-6 表-1 : 物体の飛跡と水平速度の関係)

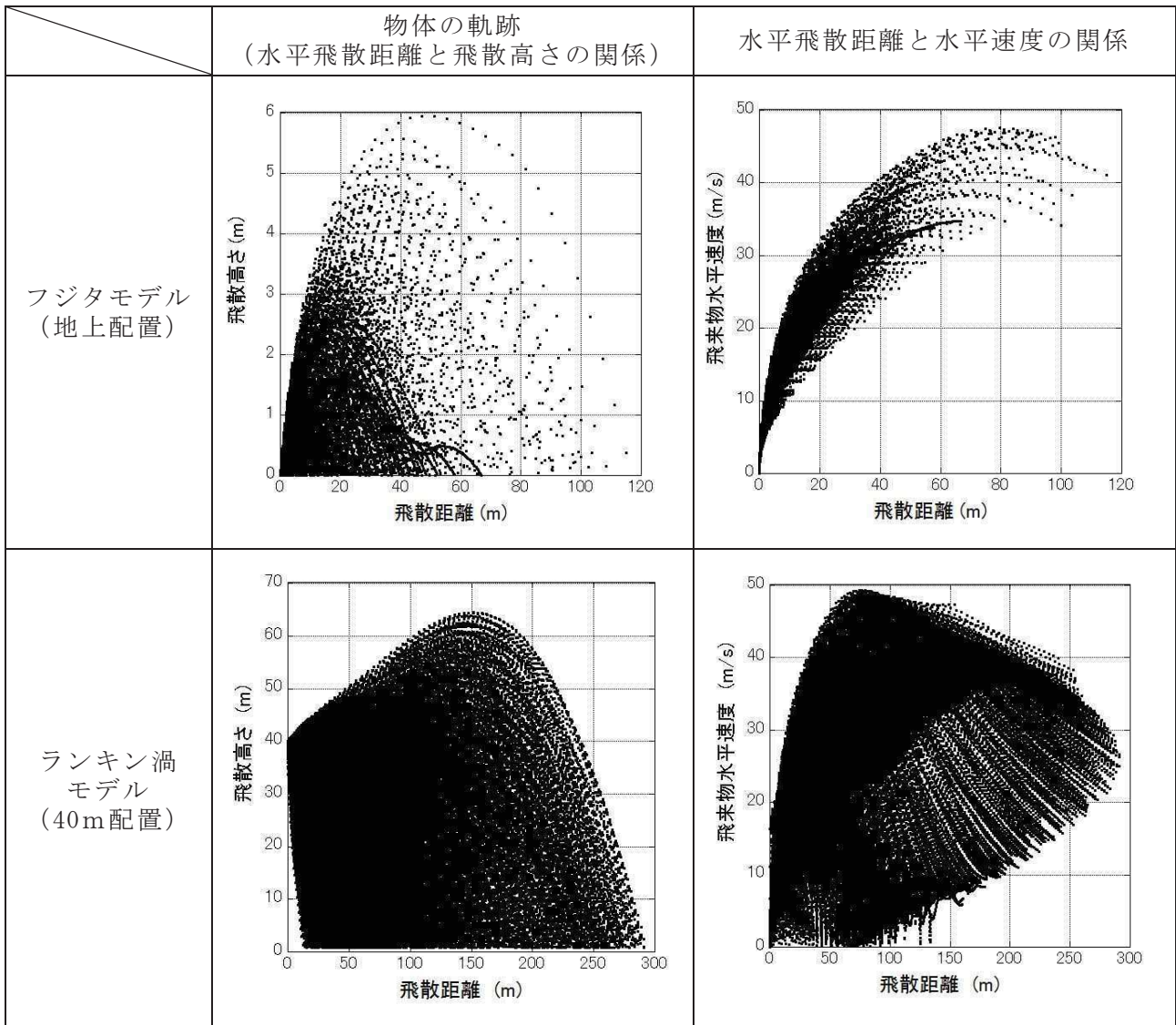


(第 6.3-6 表-2 : 飛跡及び水平速度の最大値)

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

第 6.3-7 表 多点配置を考慮した計算結果（乗用車）

（第 6.3-7 表-1：物体の飛跡と水平速度の関係）



（第 6.3-7 表-2：飛跡及び水平速度の最大値）

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

b. 原子力発電所に適用する飛来物評価法による検証⁽²⁷⁾

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

(a) 4tトラックの飛散解析

計算条件について第6.3-8表に示す。竜巻条件としては、最大風速を92m/sとし、その他の特性量については、NRAガイドに例示されている方法に従い、移動速度 V_{tr} を14m/s（最大風速の15%）、竜巻コア半径 R_m を30mとした。

第6.3-8表 原子力発電所に適用する飛来物評価法の計算条件

竜巻条件	設計竜巻風速	92m/s
	最大接線風速	78m/s
	移動速度	14m/s
	コア半径	30m
飛来物条件	第6.3-1表と同様	
初期配置	<ul style="list-style-type: none"> ・物体個数51×51個，竜巻半径の4倍を一辺とする正方形内($x, y = [-2R_m, +2R_m]$)に等間隔配置。 ・設置高さ0m 	

第6.3-9表に実際の被災状況と、原子力発電所に適用する飛来物評価法の結果の比較を示す。また、第6.3-4図に被災後の4tトラックの状況を示す。

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

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

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

第6.3-9表 実際の被災状況と「原子力発電所の飛来物評価法」の結果の比較

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

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

※2:初期物体高さからの飛散高さ。



第6.3-4図 竜巻による被災後の4tトラックの様子⁽²⁶⁾⁽³⁰⁾

(b) 乗用車(白)の飛散解析

4tトラックの場合と同様に、原子力発電所に適用する飛来物評価条件で乗用車の飛散解析を行った場合の結果を第6.3-10表に示す。

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

第6.3-10表 「原子力発電所の飛来物評価法」の評価結果の比較（乗用車の場合）

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

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

※2:初期物体高さからの飛散高さ。

7. 飛散以外の挙動に対する考慮

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

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

(a) 飛散する物体における横滑りや転がりの影響

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

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

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

(b) 飛散しない物体における横滑りや転がりの影響

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

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

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

8. まとめ

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

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

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

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

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

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

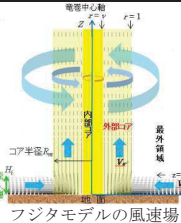
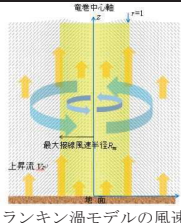
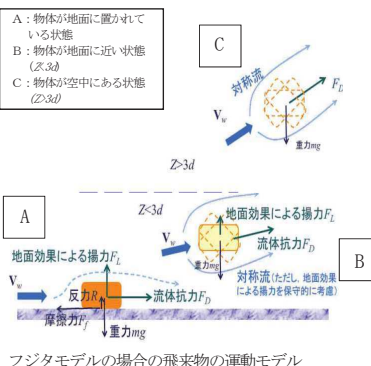
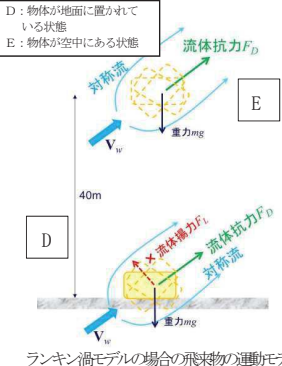
9. 参考文献

- (1) 原子力規制委員会，2013： 原子力発電所の竜巻影響評価ガイドの制定について，原規技発第13061911号，平成25年6月19日制定，平成26年9月一部改正。
- (2) U.S.Nuclear Regulatory Commission, Regulatory Guide 1.76 : Design-BasisTornado and Tornado Missiles for Nuclear Power Plants, Revision 1, March2007.
- (3) Simiu, E. and Cordes, M., Tornado-Borne Missile Speeds, NBSIR76-1050, 1976.
- (4) 東京工芸大学，平成21～22年度原子力安全基盤調査研究（平成22年度）竜巻による原子力施設への影響に関する調査研究，独立行政法人原子力安全基盤機構委託研究成果報告書，2011.
- (5) Fujita, T. T., Workbook of tornadoes and high winds for engineering applications, U.Chicago, 1978.
- (6) 江口讓，杉本聡一郎，服部康男，平口博丸，竜巻による物体の浮上・飛来解析コードTONBOSの開発，電力中央研究所 研究報告N14002, 2014.
- (7) Maruyama, T., Simulation of flying debris using a numerically generatedtornado-like vortex. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, vol.99 (4) , pp.249-256, 2011.
- (8) U.S. Department of Energy, Natural Phenomena Hazards Design and Evaluation Criteria for Department of Energy Facilities, DOE-STD-1020-2002, 2002.
(<http://pbadupws.nrc.gov/docs/ML0302/ML030220224.pdf>)
- (9) Malaeb, D. A., Simulation of tornado-generated missiles. M. S. thesis, Texas, Tech University, 1980

- (10) P. -H. Luan, Estimates of Missile Speeds in Tornadoes, M.S. thesis, Texas, Tech University, 1987.
- (11) J. R. McDonald, Rationale for Wind-Borne Missile Criteria for DOE facilities, UCRL - CR - 135687, Lawrence Livermore National Laboratory, 1999.
(<https://e-reports-ext.llnl.gov/pdf/236459.pdf>)
- (12) McDonald, J. R., T, Theodore Fujita: His contribution to tornado knowledge through damage documentation and the Fujita scale. Bull. Amer. Meteor. Soc., 82, pp. 63-72, 2001
- (13) NUREG-1827 Safety Evaluation Report for the National Enrichment Facility in Lea County, New Mexico (Docket No. 70-3103)
- (14) Karen A. Kosiba and Joshua Wurman, 2013: The Three-Dimensional Structure and Evolution of a Tornado Boundary Layer. Wea. Forecasting, 28, 1552-1561.
- (15) 日本鋼構造協会, 構造物の耐風工学, p82
- (16) EPRI, Wind field and trajectory models for tornado-propelled objects, report NP-2898, 1978.
- (17) 林建二郎・大井邦昭・前田稔・斉藤良, 開水路中に水没設置された立方体及び棧粗度の流体力, 土木学会論文集B1 (水工学) Vol. 67, No. 4, I_1141-I_1146, 2011.
- (18) 松宮央登, 中岡宏一, 西原 崇, 木村吉郎: 太陽光発電パネルに作用する空気力の地面効果に関する風洞実験, 構造工学論文集, Vol. 60A, pp. 446-454, 2014.
- (19) 山本晃一, 林建二郎, 関根正人, 藤田光一, 田村正秀, 西村晋, 浜口憲一郎, 護岸ブロックの抗力・揚力係数, 及び相当粗度の計測方法について, 水工学論文集, 第44巻, pp1053~1058, 2000.
- (20) 江口 譲, 西原 崇, 水流動試験による電線の風荷重低減化のメカニズム解明, 電力中央研究所 研究報告U96050, 1997.
- (21) M. R. Ahmed, S. D. Sharma, An investigation on the aerodynamics of a symmetrical airfoil in ground effect, Experimental Thermal and Fluid Science, 29, pp. 633-647, 2005.
- (22) Schmidlin, T., Hammer, B., King, P., Ono, Y., Miller, L. S. and Thumann, G., Unsafe at any (wind) speed? -Testing the stability of motor vehicles in severe winds-, Vol. 83, No. 12, pp. 1821-1830, 2002.

- (23) Lei, C., Cheng, L. and Kavanagh, K., Re-examination of the effect of a plane boundary on force and vortex shedding of a circular cylinder, J. of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, Vol.80, pp.263-286, 1999.
- (24) Fujita, T. T., and J. R. McDonald, Tornado damage at the Grand Gulf, Mississippi nuclear power plant site: Aerial and ground surveys, U.S. Nuclear Regulatory Commission NUREG/CR-0383, 1978.
- (25) 札幌管区気象台：平成18年11月7日から9日に北海道（佐呂間町他）で発生した竜巻等の突風. 災害時気象調査報告, 災害時自然現象報告書, 2006年第1号, 2006.
(<http://www.jma-net.go.jp/sapporo/tenki/yohou/saigai/saroma/saroma.htm>にて閲覧可能。)
- (26) 奥田泰雄, 喜々津仁密, 村上知徳, 2006年佐呂間町竜巻被害調査報告. 建築研究所災害調査, 46, 2006.
(<http://www.kenken.go.jp/japanese/contents/activities/other/other.html>)
- (27) 江口譲, 杉本聡一郎, 服部康男, 平口博丸, 原子力発電所での竜巻飛来物速度の合理的評価法 (Fujitaの竜巻モデルを用いた数値解析コードの妥当性確認), 日本機械学会論文集, Vol.81, No.823, 2015.
- (28) Fujita, T. T., 1971: Proposed characterization of tornadoes and hurricanes by area and intensity. SMRP Research Paper 91, University of Chicago, Chicago, IL, 42 pp
- (29) 日本保全学会 原子力規制関連事項検討会, 2015: 軽水型原子力発電所の竜巻影響評価における設計竜巻風速および飛来物速度の設定に関するガイドライン (JSM-NRE-009)
- (30) 土木学会 平成 18 年 11 月北海道佐呂間町竜巻緊急災害調査報告書

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

		フジタモデル (及びモデルを用いた際の飛来物評価手法)		ランキン渦モデル (及びモデルを用いた際の飛来物評価手法)																								
風速場モデル	各風速場モデルの概要	 <ul style="list-style-type: none"> ・Fujitaにより実観測に基づき考案された竜巻風速場モデルであり、実際に近い風速場構造を有する ・半径方向に内部コア、外部コア、最外領域の3つの領域で構成され、外部コアに上昇風速を有する ・接線風速や上昇風速に高さ依存性がある ・米国DOE重要施設の基準において、竜巻飛来物速度、飛散高さの設定に使用 <p>フジタモデルの風速場</p>		 <ul style="list-style-type: none"> ・簡易な式で上空での水平方向の風速場を表現 ・上昇流は全領域に存在 ・接線風速や上昇風速に高さ依存性がなく、地面から吹き出しが生じる流れとなっている (飛散評価を行う場合、地上からの物体の浮上・飛散挙動を表現できないため、地上の物体であっても空中浮遊状態を仮定して評価することになる) ・米国NRC Regulatory Guide 1.76にて採用 <p>ランキン渦モデルの風速場</p>																								
	メリット	<ul style="list-style-type: none"> ・地面に置かれた物体へ影響を与える風速場をよく表現できており、地上からの物体の浮上・飛散解析が可能 →地上における構造物に対する力や挙動を表現するのに適しているモデルであり、防護対策や固縛対策の範囲や強度について、実行性の高い対策とすることが可能 		<ul style="list-style-type: none"> ・簡易な式で上空での水平方向の風速場を表現可能 																								
	デメリット	<ul style="list-style-type: none"> ・地表面付近の風速分布に不確かさがあるため、パラメータ設定時には不確かさの考慮が必要 		<ul style="list-style-type: none"> ・風速場に高さ依存性がなく、上昇流が全領域に存在する(地面からも吹き出しがある)ため、実現象から乖離しており、地上からの物体の浮上・飛散挙動を表現できない →地上における構造物に対し、過度に保守的な防護対策や固縛対策が必要となる (例えば、SA車両を固縛することで、機動性が損なわれる) 																								
	主なパラメータ (設計竜巻の最大風速100m/sの場合)	<table border="1"> <tr> <td>竜巻の移動速度 V_T</td> <td>15 (m/s)</td> </tr> <tr> <td>最大接線風速 V_{lim}</td> <td>85 (m/s)</td> </tr> <tr> <td>最大接線風速半径 R_0</td> <td>30 (m)</td> </tr> <tr> <td>最大気圧低下量 ΔP_{max}</td> <td>76 (hPa)</td> </tr> <tr> <td>最大気圧低下率 $(dp/dt)_{max}$</td> <td>53 (hPa/s)</td> </tr> <tr> <td>内部コア半径と外部コア半径の比 ν</td> <td>0.3</td> </tr> <tr> <td>流入層高さ H_i</td> <td>15 (m), 17.5 (m)</td> </tr> </table>	竜巻の移動速度 V_T	15 (m/s)	最大接線風速 V_{lim}	85 (m/s)	最大接線風速半径 R_0	30 (m)	最大気圧低下量 ΔP_{max}	76 (hPa)	最大気圧低下率 $(dp/dt)_{max}$	53 (hPa/s)	内部コア半径と外部コア半径の比 ν	0.3	流入層高さ H_i	15 (m), 17.5 (m)	<p>NRAガイドの値や式が風速場モデルによらないことを確認のうえ、各値や式をフジタモデルへ適用</p> <p>フジタモデルの圧力分布は複雑であるため、有限要素法の数値解析により算出 (フジタモデルは、地面との摩擦の影響を受けず回転するランキン渦モデルに比べ、地面との摩擦の影響により回転が弱まり中心付近が低圧になりにくいモデルである。そのため、ランキン渦モデルより最大気圧低下量が小さくなる)</p> <p>Fujitaにより提案された経験式より算出 (流入層高さは他の文献に示されている値とおおむね同じであることを確認。また、設計飛来物については流入層高さの感度解析の結果を踏まえ17.5mも採用)</p> <p>※: その他の定数についても、Fujitaにより提案された値を使用</p>	<table border="1"> <tr> <td>竜巻の移動速度 V_T</td> <td>15 (m/s)</td> </tr> <tr> <td>最大接線風速 V_{lim}</td> <td>85 (m/s)</td> </tr> <tr> <td>最大接線風速半径 R_0</td> <td>30 (m)</td> </tr> <tr> <td>最大気圧低下量 ΔP_{max}</td> <td>89 (hPa)</td> </tr> <tr> <td>最大気圧低下率 $(dp/dt)_{max}$</td> <td>45 (hPa/s)</td> </tr> </table>	竜巻の移動速度 V_T	15 (m/s)	最大接線風速 V_{lim}	85 (m/s)	最大接線風速半径 R_0	30 (m)	最大気圧低下量 ΔP_{max}	89 (hPa)	最大気圧低下率 $(dp/dt)_{max}$	45 (hPa/s)
竜巻の移動速度 V_T	15 (m/s)																											
最大接線風速 V_{lim}	85 (m/s)																											
最大接線風速半径 R_0	30 (m)																											
最大気圧低下量 ΔP_{max}	76 (hPa)																											
最大気圧低下率 $(dp/dt)_{max}$	53 (hPa/s)																											
内部コア半径と外部コア半径の比 ν	0.3																											
流入層高さ H_i	15 (m), 17.5 (m)																											
竜巻の移動速度 V_T	15 (m/s)																											
最大接線風速 V_{lim}	85 (m/s)																											
最大接線風速半径 R_0	30 (m)																											
最大気圧低下量 ΔP_{max}	89 (hPa)																											
最大気圧低下率 $(dp/dt)_{max}$	45 (hPa/s)																											
飛来物評価手法	物体の浮上・飛来モデル	<p>《物体の浮上・飛来モデル》</p> <ul style="list-style-type: none"> ・地面の存在により物体上面と下面の流れが非対称となることで生じる地面効果による揚力(左図A/B)と流れの速度方向に平行な抗力(左図A~C、ただし地面付近では抗力の影響は小さい)を考慮し、地面に置かれた状態からの飛来高さや飛来物速度等を評価  <p>フジタモデルの場合の飛来物の運動モデル</p> <p>《揚力係数》</p> <ul style="list-style-type: none"> ・地面から浮き上がる際の物体挙動を理論的に評価することは困難であるため、翼のような極端な形状を除き保守的となるよう、風洞実験の結果を踏まえ、代用の揚力係数を設定 (物体の風の受け方や高度を変化させた場合でも、代用揚力係数が実測値より保守的になっていることを確認) 		<p>《物体の浮上・飛来モデル》</p> <ul style="list-style-type: none"> ・物体に働く流れの速度方向に平均的な抗力(左図D/E)と自重の関係から、物体が飛来するか否かを判定し、飛来する場合には、風速場を表現できている空中浮遊状態からの飛来高さや飛来速度等を評価  <p>ランキン渦モデルの場合の飛来物の運動モデル</p> <p>《揚力係数》</p> <ul style="list-style-type: none"> ・物体がランダム回転し、物体の各面に均等に力を受けるものとして、抗力係数は3方向の平均値を設定 																								
	竜巻が物体に与える速度に関する設定	<ul style="list-style-type: none"> ・竜巻に対する物体の場所依存性を考慮し、風速場における物体の中から、最大の飛来物速度や飛来距離を設定 ・実際に竜巻が遠方から近づく場合には、低い風速に曝され飛来することになるが、物体を強制的に高速域に配慮し、物体が瞬時に最大風速を受けるよう設定 		<p>同左</p>																								

女川原子力発電所 2号炉

運用，手順説明資料

外部からの衝撃による損傷の防止

(竜巻)

第6条 外部からの衝撃による損傷の防止（竜巻）

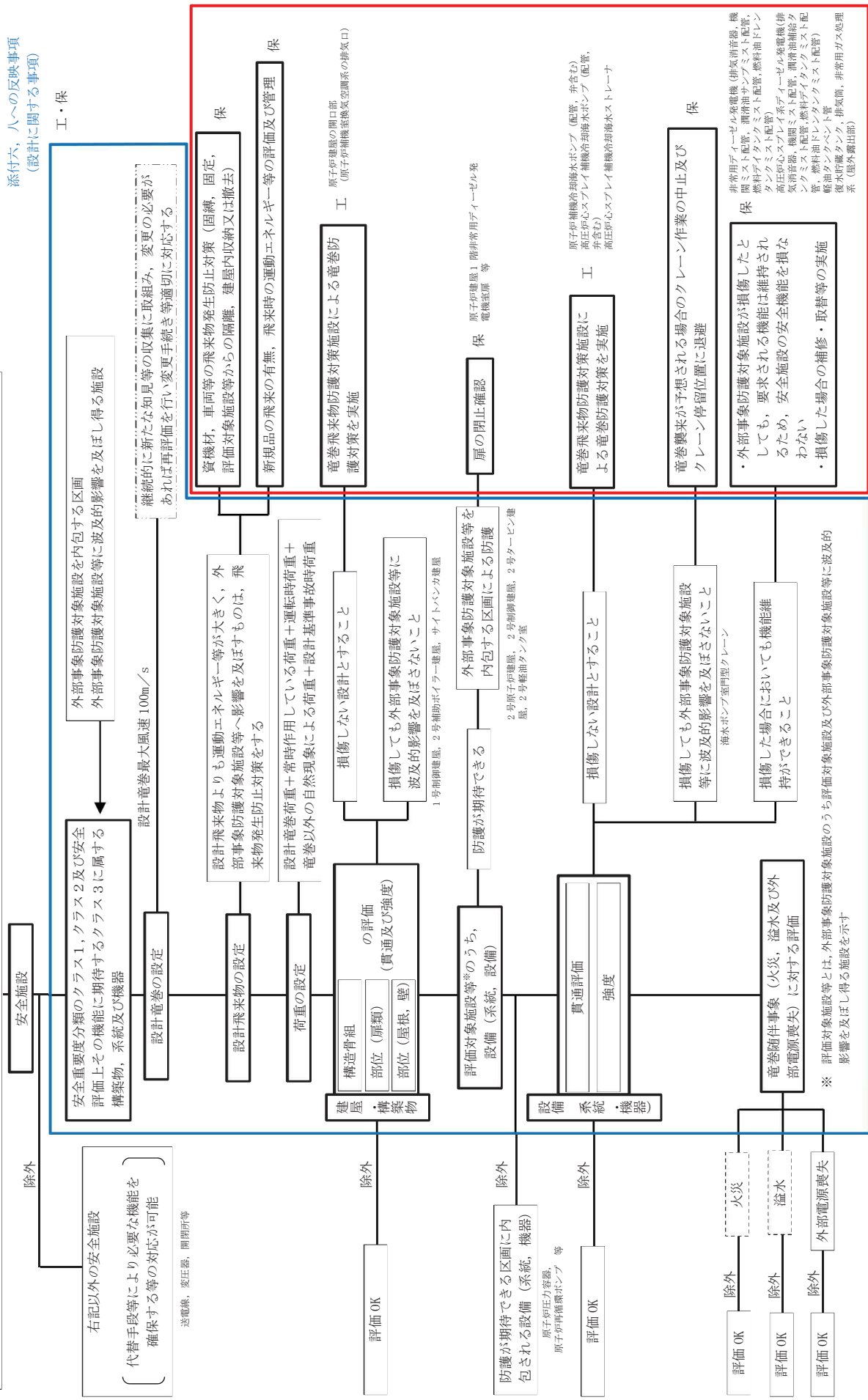
安全施設は、想定される自然現象（地震及び津波を除く。次項について同じ。）が発生した場合においても安全機能を損なわないものでなければならない。

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して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に生ずる応力を適切に考慮したものでなければならぬ。

安全施設は、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。

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。

安全施設は、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ぬ。



添付六、八への反映事項
(設計に関する事項)

工・保

継続的に新たな知見等の収集に取組み、変更の必要があれば再評価を行い変更手続き等適切に対応する

資機材、車両等の飛来物発生防止対策（固縛、固定、評価対象施設等からの隔離、建屋内収納又は撤去）

新規品の飛来の有無、飛来時の運動エネルギー等の評価及び管理

電巻飛来物防護対策施設による電巻防護対策を実施

扉の閉止確認

電巻飛来物防護対策施設による電巻防護対策を実施

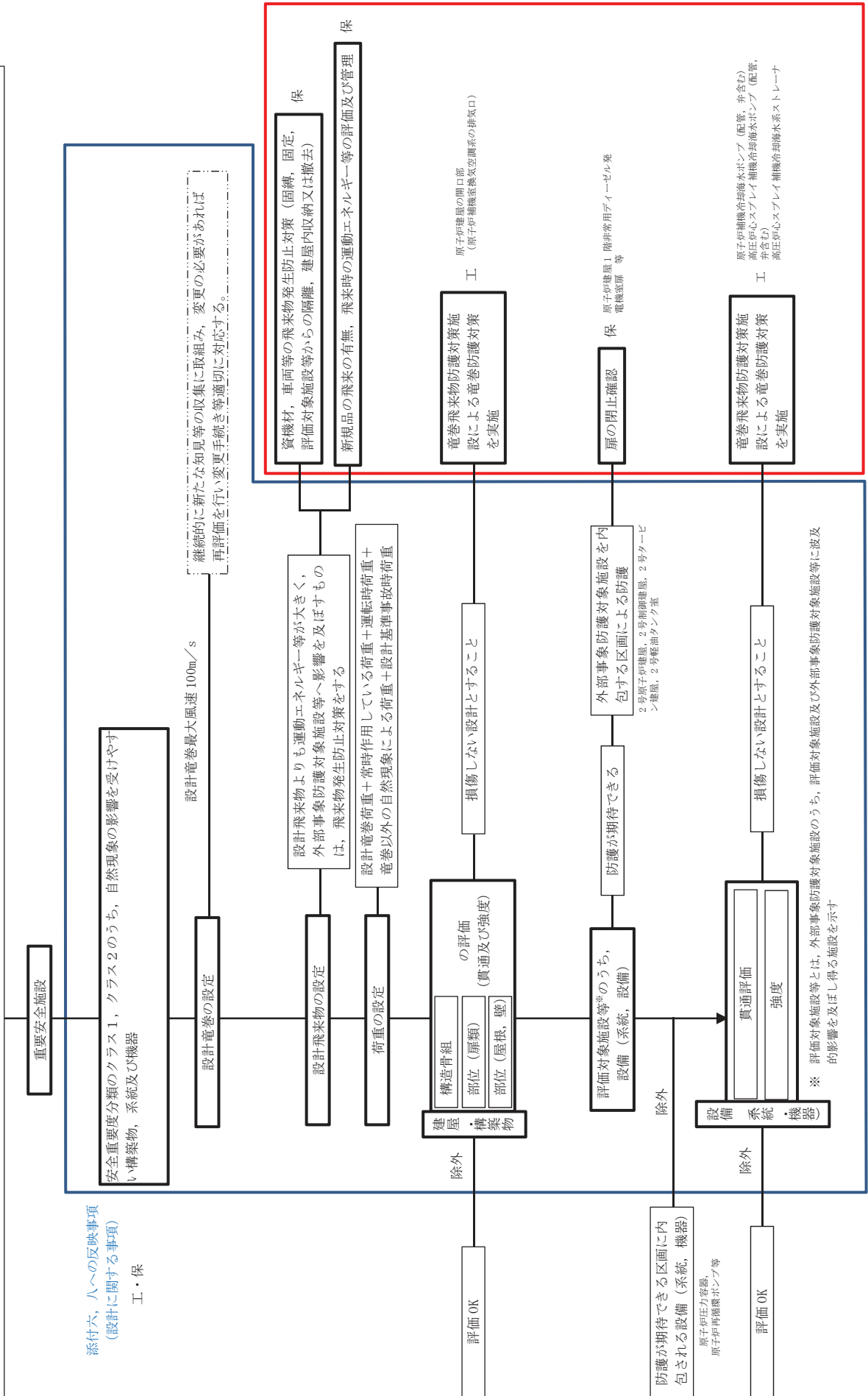
電巻襲来が予想される場合のクレーン作業の中止及びクレーン停留位置に退避

・外部事象防護対象施設が損傷したとしても、要求される機能は維持されるため、安全施設の安全機能を損なわない
・損傷した場合の補修・取替等の実施

添付六、八への反映事項（手順に関する事項）

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ぬ

添付六、八への反映事項
(設計に関する事項)
工・保



添付六、八への反映事項
(手順に関する事項)

運用, 手順に係る対策等 (設計基準)

設置許可基準規則 対象条文	対象項目	区分	運用対策等
第6条 外部からの衝撃による損傷の防止	資機材, 車両等管理 資機材, 車両等の飛来物発生防止対策(固縛, 固定, 評価対象施設等からの隔離, 建屋内収納又は撤去)	運用・手順 体制 保守・点検 教育・訓練	<ul style="list-style-type: none"> ・屋外の飛散するおそれのある資機材, 車両等については, 飛来時の運動エネルギー等を評価し, 評価対象施設等への影響の有無を確認する。評価対象施設等へ影響を及ぼす資機材, 車両等については, 固縛, 固定, 評価対象施設等からの隔離, 建屋内収納又は撤去の飛来物発生防止対策について手順等を定める ・資機材, 車両等の質量, 寸法, 形状から算出した飛来の有無, 飛来時の運動エネルギー等による飛来物発生防止対策(固縛, 固定, 評価対象施設等からの隔離, 建屋内収納又は撤去)の評価方法手順及び評価結果の管理 ・担当部署による保守・点検の体制 ・日常点検 ・定期点検 ・損傷時の補修 ・運用・手順, 体制, 保守・点検に関する教育

設置許可基準規則 対象条文	対象項目	区分	運用対策等
第6条 外部からの衝撃による損傷の防止	評価対象施設等を防護するための操作・確認事項	運用・手順	<ul style="list-style-type: none"> ・ 竜巻の襲来が予想される場合及び竜巻襲来後において、評価対象施設等を防護するための操作・確認、補修等が必要となる事項について手順等を定める <p>[操作・確認事項]</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ 竜巻に関する情報入手及び情報入手後の対応(情報の入手, 周知, 体制判断, 実施方法と手順) ・ 竜巻襲来が予想される場合の対応に関する運用・手順(竜巻襲来が予想される場合の使用中の資機材の固縛等) ・ 海水ポンプ室門型クレーン作業の中止及び海水ポンプ室門型クレーン停留についての運用, 手順 ・ 扉(原子炉建屋1階非常用ディーゼル発電機室扉等)の閉止確認手順 <p>[補修]</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ 設備が損傷した場合の代替設備の確保及び補修, 取替等の運用, 手順
		体制	<ul style="list-style-type: none"> ・ 担当部署による作業中止等の実施体制 ・ 担当部署による扉閉止確認体制 ・ 竜巻襲来に備えた体制の構築, 実施及び解除の判断基準, 実施手順, 連絡方法等 ・ 担当部署による保守・点検の体制 ・ 担当部署による損傷箇所への補修体制
		保守・点検	<ul style="list-style-type: none"> ・ 日常点検 ・ 定期点検 ・ 損傷時の補修
		教育・訓練	<ul style="list-style-type: none"> ・ 運用・手順, 体制, 保守・点検に関する教育