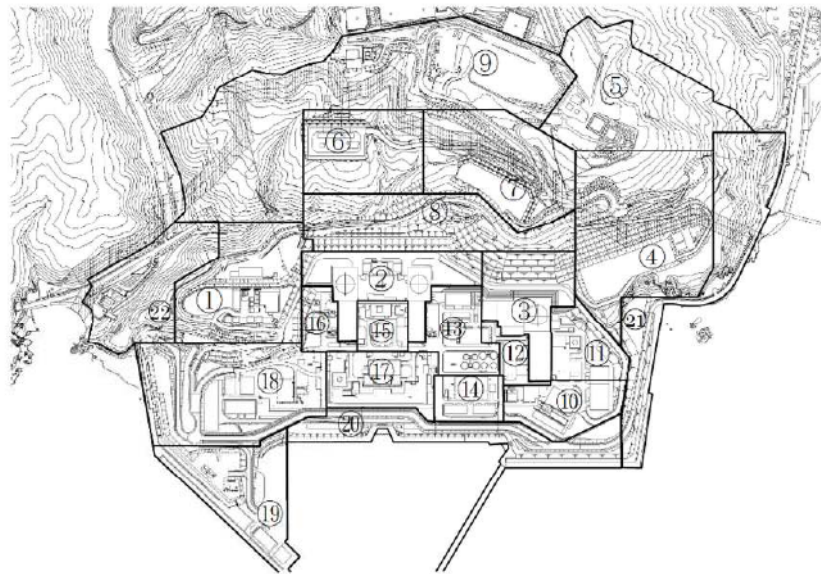


### 3. 設計飛来物の設定

#### (1) 現地調査（想定飛来物の抽出）

現地調査は平成 25 年 6 月，平成 27 年 7 月～11 月及び 2022 年 7 月にかけて，数度にわたり追加調査を実施している。追加調査では，泊発電所敷地内全域を第 12-2 図に示すとおり 22 のエリアに区画するとともに，それぞれのエリアで想定飛来物を調査し，現地調査後に新たに配置または撤去した資機材（重大事故等対処設備等）の反映を行っている。

想定飛来物としては，地盤・建物に固定されていないもの及び固定されているが竜巻によって飛散が考えられるものを対象として抽出している。エリア毎の調査結果を第 12-3 図に示す。



エリア	名称
①	緊急時対策所および 5 1 m 倉庫周辺
②	1, 2 号機背面 (3 1 m 盤)
③	3 号機背面 (3 1 m 盤)
④	4 6 m 倉庫周辺
⑤	NTT 局舎周辺
⑥	開閉所周辺
⑦	貯水設備周辺
⑧	5 1 m～展望台道路
⑨	風力跡地周辺
⑩	3 号機海側 (1 0 m 盤)
⑪	3 号機東側 (1 0 m 盤)
⑫	3 号機西側 (1 0 m 盤)
⑬	総合管理事務所周辺 (1 0 m 盤)
⑭	総合管理事務所海側 (1 0 m 盤)
⑮	管理事務所正面 (1 0 m 盤)
⑯	1 号機西側 (1 0 m 盤)
⑰	1, 2 号機海側 (1 0 m 盤)
⑱	保修事務所周辺 (1 0 m 盤)
㉑	防潮堤外西側 (1 0 m 盤)
㉒	防潮堤外正面 (1 0 m 盤)
㉓	防潮堤外東側 (1 0 m 盤)
㉔	茶津守衛所周辺

(現地調査区画)

第 12-2 図 構内配置と現地調査区画

 枠囲みの内容は機密情報に属しますので公開できません。

エリア①：緊急時対策所および51m倉庫周辺



第12-3図 想定飛来物の調査結果 (1/24)

エリア②：1，2号機背面（31m盤）（1／2）



盤 避雷針 盤 マンホール グレーチング



踏み台 盤 盤 標識



盤 砂利 配管 鋼製蓋



照明 グレーチング グレーチング 盤 盤



盤 スピーカー 代替非常用発電機 発電機車

第12-3図 想定飛来物の調査結果（2／24）

エリア②：1，2号機背面（31m盤）（2/2）



屋外カメラ



シルトフェンス車



ホイールローダ



バックホウ



ガードレール



可搬型直流電源用発電機



消火栓



消火栓



標識



コンクリートブロック



消火器



発電機



カードル



可搬型タンクローリー



ブルトザー



ユニック車



鋼製材



鋼製蓋

第12-3図 想定飛来物の調査結果（3/24）

エリア③：3号機背面（31m盤）



代替非常用発電機



コンテナ



スピーカー



屋外カメラ



盤



照明



鋼管



ガードレール



盤



標識



グレーチング



階段



コンクリート蓋



盤



屋外カメラ



階段



可搬型直流電源用発電機



ケーブルトラフ



照明



可搬型大型送水ポンプ車



放水砲



可搬型タンクローリー



盤



盤



ケーブルトラフ



ホース延長・回収車コンテナ

第12-3図 想定飛来物の調査結果（4/24）

エリア④：46m倉庫周辺



避雷針



照明



階段



ケーブル引き込みボックス



マンホール



標識



標識



盤



踏み台



鋼製蓋



砂利



プレハブ小屋



カーブミラー



盤



屋外カメラ



鋼板



プレハブ小屋



盤



コンクリート蓋



盤



盤



盤



消火器



屋外給水タンク

第12-3図 想定飛来物の調査結果 (5 / 24)

エリア⑤：NTT局舎周辺



盤



コンクリートブロック



空調室外機



盤



マンホール



グレーチング



盤



屋外カメラ



ガードレール



コンクリートブロック



標識



鋼製箱

第12-3図 想定飛来物の調査結果 (6 / 24)

エリア⑥：開閉所周辺



コンクリートブロック



グレーチング



カーブミラー



盤



コンクリートブロック



屋外カメラ



標識



砂利



鋼製蓋



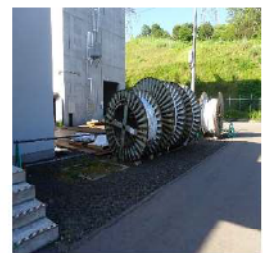
空調室外機



産廃カゴ



盤



ケーブルドラム

⑦貯水設備周辺



コンクリート蓋



マンホール



屋外カメラ



グレーチング



標識



カーブミラー



階段



盤



階段

第 12-3 図 想定飛来物の調査結果 (7 / 24)



エリア⑧：51m～展望台道路



コンクリートブロック



ガードレール



マンホール



階段



鋼板



ユニック車



可搬型タンクローリー



大規模損壊対応用変圧器車



泡消火薬剤コンテナ



コンテナ式運搬車



標識



標識



盤

第12-3図 想定飛来物の調査結果(8/24)

エリア⑨：風力跡地周辺



マンホール



ドラム缶



グレーチング



プレハブ小屋



カーブミラー



盤



屋外カメラ



盤



盤



可搬型大容量海水送水ポンプ車



ホース延長・回収車



ホース延長・回収車（送水車用）



可搬型大型送水ポンプ車



可搬型直流電源用発電機



可搬型大容量海水送水ポンプ車



ガードレール

第 12-3 図 想定飛来物の調査結果 (9 / 24)

エリア⑩：3号機海側（10m盤）



グレーチング



車両進入防止バリアード



標識



盤



消火栓



消火栓



マンホール



盤



階段



盤



踏み台



鋼製蓋



小屋



盤



鋼製蓋



盤



標識



コンクリートブロック



空調室外機



盤



盤

第12-3図 想定飛来物の調査結果（10/24）

エリア⑪：3号機東側（10m盤）



第12-3図 想定飛来物の調査結果（11/24）

エリア⑫：3号機西側（10m盤）



グレーチング



マンホール



標識



標識



コンクリートブロック



車



コンクリートブロック



消火栓



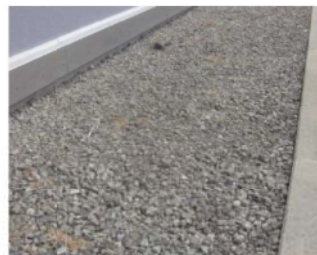
照明



盤



空調室外機



砂利



照明



盤



盤



照明



梯子



盤



標識



盤



空調室外機



盤



鋼製蓋

第12-3図 想定飛来物の調査結果（12/24）

エリア⑬：総合管理事務所周辺（10m盤）（1/2）



車



標識



鋼製蓋



マンホール



消火栓



標識



梯子



盤



自転車



鋼製蓋



配管



コンクリート蓋



マンホール



グレーチング



コンクリートブロック



鋼製蓋



空調室外機



車両衝突緩衝材



アーケード屋根

第12-3図 想定飛来物の調査結果（13/24）

エリア⑬：総合管理事務所周辺（10m盤）（2/2）



ベンチ



鋼製蓋



コンクリートブロック



照明



標識



プルボックス



プルボックス



アンテナ



空調室外機



盤



スピーカー



避雷針



スピーカー

第12-3図 想定飛来物の調査結果（14/24）

エリア⑭：総合管理事務所海側（10m盤）



標識



クッションドラム



空調室外機



鋼製蓋



廃棄庫



空調室外機



アーケード屋根



標識



盤



マンホール



鋼製蓋



消火栓



砂利



グレーチング



空調室外機

第12-3図 想定飛来物の調査結果（15/24）



エリア⑮：管理事務所正面（10m盤）



アーケード



標識



消火栓



盤



柵



マンホール



ベンチ



ベンチ



コンクリートブロック



コンクリートブロック



空調室外機



砂利



盤



看板



標識



コンクリートブロック



グレーチング



盤



プレハブ車庫



標識



階段



盤

第12-3図 想定飛来物の調査結果（16/24）

エリア⑩：1号機西側（10m盤）



鋼製蓋



盤



空調室外機



標識



標識



アーケード屋根



グレーチング



盤



コンテナ



標識



砂利



消火栓



盤



コンクリートブロック



階段



標識



盤



配管



盤

第12-3図 想定飛来物の調査結果（17/24）

エリア⑰：1，2号機海側（10m盤）



砂利



階段



看板



グレーチング



DG 専用空ドラム缶置場



鋼製蓋



盤



空調室外機



消火栓



看板



盤



盤



盤



ベンチ



自動販売機



屋外カメラ



コンクリートブロック



産廃庫



クッションドラム



標識



アーケード屋根



標識



鋼製蓋



盤



踏み台

第12-3図 想定飛来物の調査結果（18/24）

エリア⑱： 保修事務所周辺（10m盤）（1/2）



標識

標識

グレーチング

盤

ガードレール



マンホール



コンクリート蓋



グレーチング



標識



照明



スピーカー



小屋



小屋



鋼管



投光器



空調室外機



鋼製蓋



アーケード屋根



柵



標識



標識



柵



ゴミ箱



カーブミラー



標識



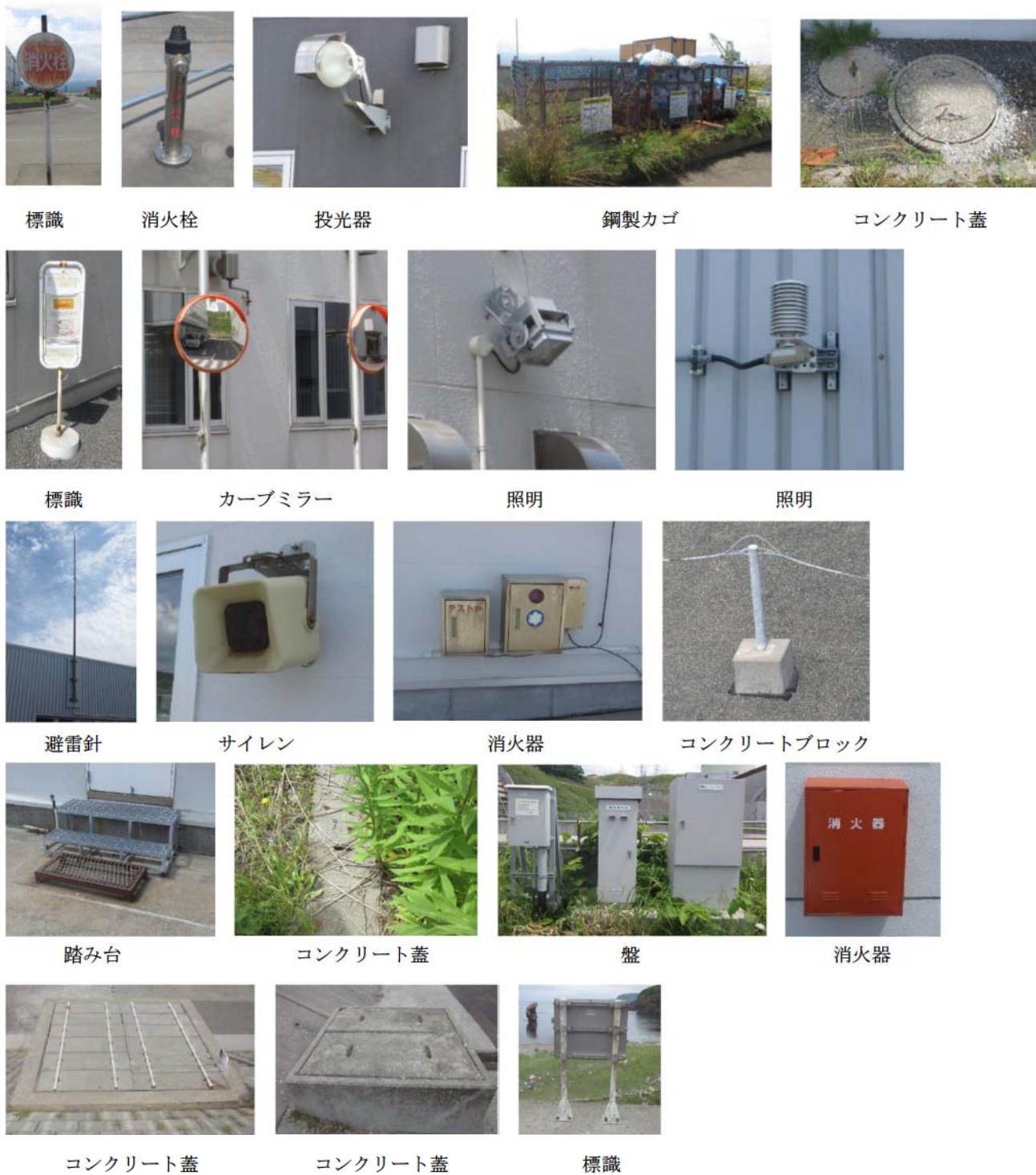
空調室外機



消火栓

第12-3 図 想定飛来物の調査結果（19/24）

エリア⑱： 保修事務所周辺（10m盤）（2/2）



第 12-3 図 想定飛来物の調査結果（20/24）

エリア⑱：防潮堤外西側（10m盤）



コンクリート蓋



鋼製箱



グレーチング



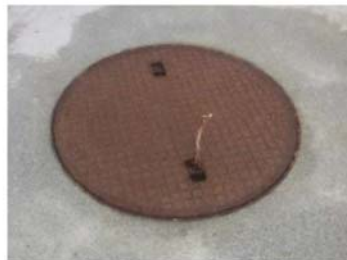
盤



盤



盤



マンホール



手摺



盤



鋼板



グレーチング



支柱

第12-3図 想定飛来物の調査結果（21/24）

エリア⑩：防潮堤外正面（10m盤）



盤



グレーチング



マンホール



鋼製箱



屋外カメラ



かご



標識



標識



階段



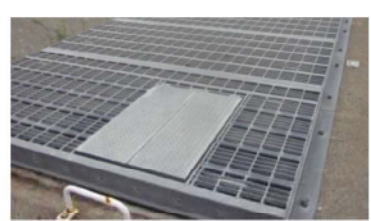
屋外カメラ



マンホール



盤



グレーチング



鋼製蓋



盤



盤



盤



盤



コンクリートブロック



ガードレール



標識

第 12-3 図 想定飛来物の調査結果（22 / 24）

エリア④：防潮堤外掘株側（10m盤）



マンホール



屋外カメラ



盤



グレーチング



土嚢



グレーチング



標識



標識



標識



看板



マンホール



標識



かご



盤



盤



アンテナ



階段



車両進入防止バリケード



空調室外機



スロープ



標識

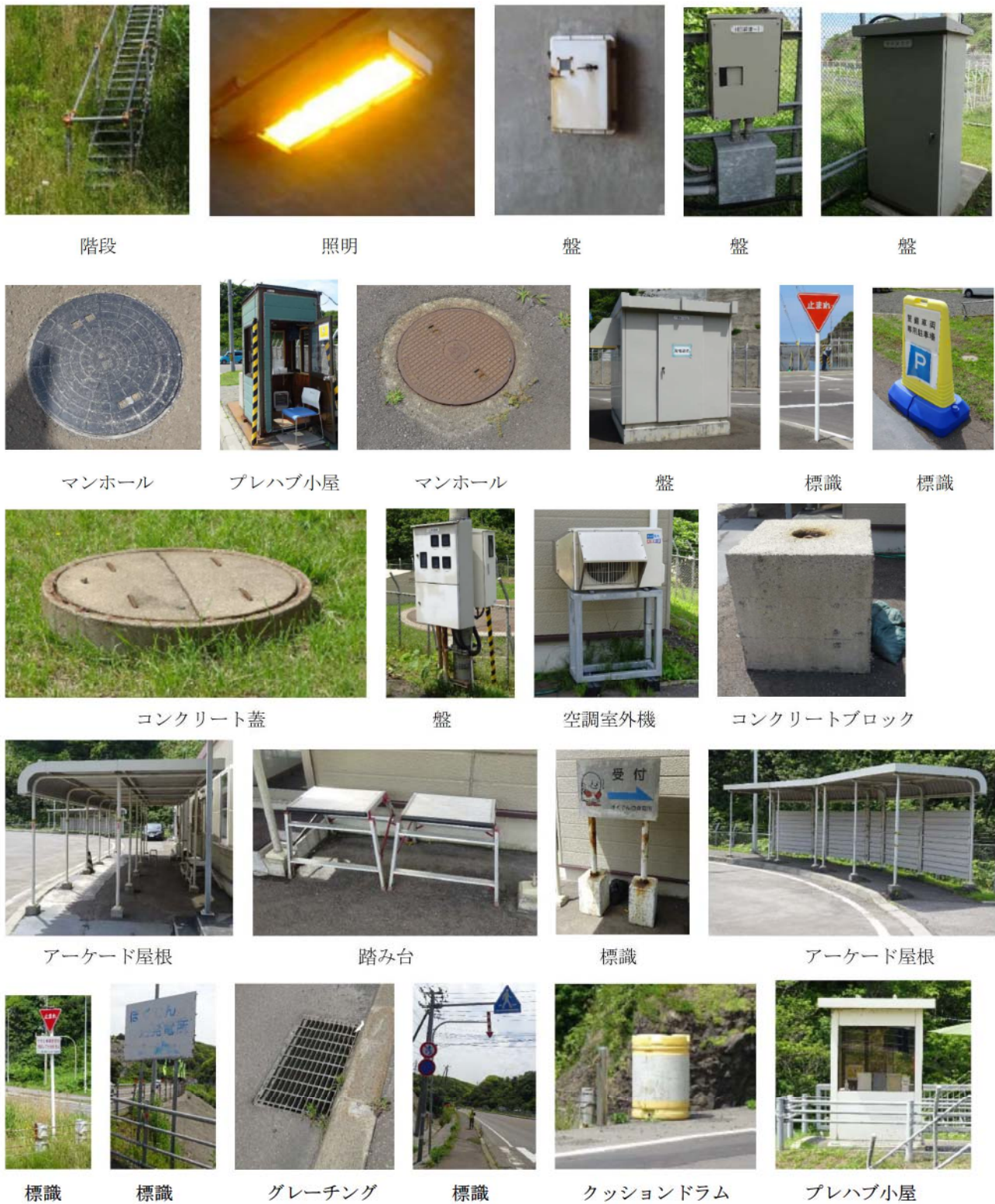


A型バリケード（単管パイプ製）

第12-3図 想定飛来物の調査結果（23/24）



エリア②：茶津守衛所周辺



第 12-3 図 想定飛来物の調査結果 (24 / 24)

(2) 想定飛来物の分類

現地調査の結果抽出された想定飛来物を、サイズ及び変形状による基準に基づいて7つに区分するとともに、形状による基準に基づいて3種類に分類する。

分類結果を第12-1表に示す。

【サイズによる分類】

飛散時の形状や重量の観点から、飛来物のサイズを分類する。

小（極小）：飛散する形態にて、概ね人力で持ち上げられる程度のもの。

中：飛散する形態にて、人力で持ち上がらないもの又は飛散・衝突時に分離・分散すると考えられるもの。

大：飛散する形態にて、構造体として分散しない塊状のもの。

【変形状による分類】

衝突時の変形状の観点から、飛来物が衝突した際の影響を分類する。

柔：非金属のもの、金属であっても薄板、足場や架台のような衝突時に変形が予想されるもの。

剛：金属のもの等であって、飛来物自身の変形が予想されず、運動エネルギーを伝達するもの。

【形状による分類】

飛散し易さは飛来物の形状に依存するため、この観点から、飛来物の形状を分類する。

塊状：複数の部材で構成される飛来物で、平面（板状）や線（棒状）ではなく、立体形状のもの。

なお、超重量物では飛散しないものもある。

板状：厚さが薄く、平面（板状）のもの。

棒状：細長く、線（棒状）で小さな断面を持つもの。

第12-1表 想定飛来物の分類結果

サイズ	極小	小		中		大		
剛 柔	剛	柔	剛	柔	剛	柔	柔（一部剛）	
区 分	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	
形状	棒状	—	—	<u>鋼製パイプ</u>	—	鋼管 <u>鋼製材</u> コンクリートブ ロック 鋼材	—	鋼製ステップ
	板状	—	—	グレーチング マンホール蓋	アーケード屋根 ベンチ 看板 カーブミラー 柵	<u>鋼板</u> コンクリート板	—	—
	塊状	砂利	自転車 脚立・踏み台 照明 スピーカー コーン アンテナ 屋外カメラ	バリケード	空調室外機 プレハブ小屋 消火器・消火栓 鋼製かご ドラム缶	カードル ケーブルドラム 発電機	<u>コンテナ</u> 電気盤 タンク	重機 放水砲 <u>トラック</u> タンクローリー 自動車 発電機車 ポンプ車 仮置資機材

※ガイド記載の飛来物についても想定飛来物とすることとし、下線を付けて示す。

### (3) 設計飛来物の選定

分類した想定飛来物について、空力パラメータ（高さ方向への飛散の有無）、運動エネルギー及び貫通力（BRL 式から算出した想定飛来物の貫通を生じないために必要な鋼板の最小板厚）の大きさを考慮して設計飛来物を選定する。想定飛来物の物性諸元の設定にあたっては、「原子力発電所の竜巻影響評価ガイド」（以下、「ガイド」という。）及びカタログ等を参考にしている。

泊発電所における設計飛来物の選定結果を第 12-2 表に示す。

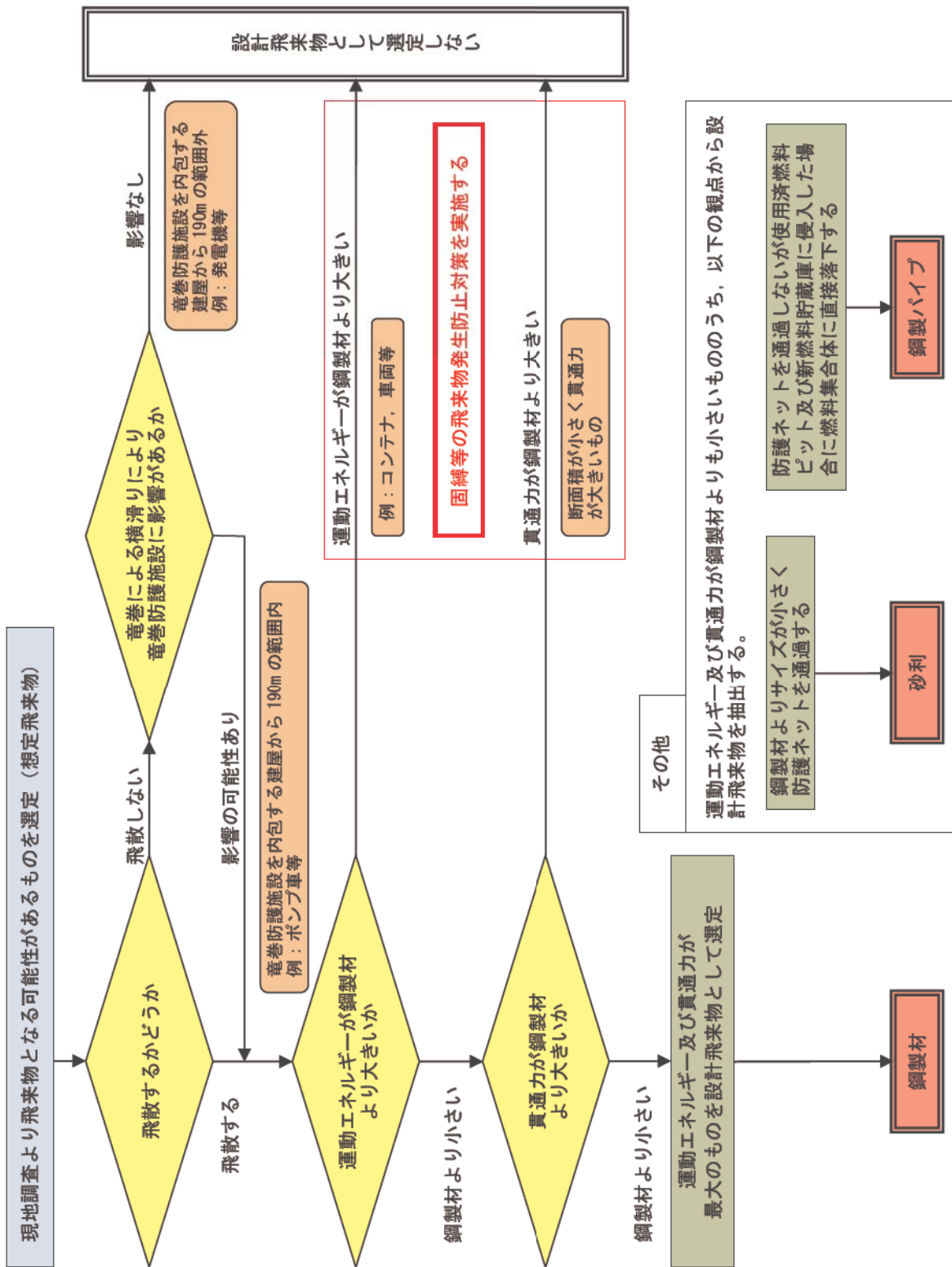
想定飛来物のうち、ガイドを参考にして、鋼製材を設計飛来物として選定する。また、鋼製パイプについては、使用済燃料ピット及び新燃料貯蔵庫に侵入した場合に燃料集合体に直接落下する可能性があること、砂利については、飛来物防護対策として設置する予定の防護ネットを通過する可能性があることから、設計飛来物として選定する。

設計飛来物の選定フローを第 12-4 図に、選定フローに基づいた想定飛来物の評価結果を第 12-3 表に示す。

なお、空力パラメータは、物体の抗力係数を基に算出する飛来物毎の物性値であり、飛来物に設計竜巻を作用させた時に、高さ方向に飛散するかどうかの判断基準となる指標である。空力パラメータの算出方法を別紙-1 に示す。また、空力パラメータに基づく想定飛来物の飛散速度及び飛散高さの評価概要を別紙-2 に示す。

第 12-2 表 設計飛来物の選定結果

飛来物の種類	砂利	鋼製パイプ	鋼製材
サイズ (m)	長さ×幅×奥行 0.04×0.04×0.04	長さ×直径 2×0.05	長さ×幅×奥行 4.2×0.3×0.2
質量 (kg)	0.17	8.4	135



第12-4図 設計飛来物の選定フロー

第12-3表 想定飛来物の評価結果 (1/2)

分類	形状	名称	長さ		幅	高さ (厚さ)	質量	空力 パラメータ		飛散※1	水平速度	運動 エネルギー	必要 板厚	備考
			m	m				C <sub>D</sub> A/m	m <sup>2</sup> /kg					
① (極小・剛)	塊状	砂利	0.04	0.04	0.04	0.04	0.17	0.0189	0.0189	○	63	1	1	設計飛来物
			1.9	1.1	0.6	25	0.1038	○	84	88	2			
② (小・柔)	塊状	脚立・踏み台	0.59	0.49	0.32	30	0.0142	○	59	52	3			
			0.5	0.5	0.46	6	0.0789	○	81	20	2			
		照明	0.6	0.6	0.6	4	0.1800	○	90	16	1			
			0.47	0.84	1.1	39	0.0314	○	69	93	3			
		アンテナ	1	1	1.5	7	0.3810	○	93	31	1			
		屋外カメラ	0.3	0.2	0.7	10	0.0274	○	67	23	3			
		鋼製パイプ※2	2	0.05	0.05	8.4	0.0058	○	49	11	18	設計飛来物		
③ (小・剛)	棒状	グレーチング	0.69	0.66	0.065	36	0.0095	○	54	52	5			
			0.65	0.65	0.01	32	0.0090	○	53	45	11			
	塊状	マンホール蓋	0.45	1.2	0.45	30	0.0285	○	68	69	3			
			2.91	2.4	0.008	20	0.2337	○	92	84	10			
	板状	ベンチ	3	3	0.04	115	0.0531	○	76	329	10	固縛等の対策実施		
			4	1	0.003	32.4	0.0825	○	81	107	29			
			1.2	1.2	0.04	25	0.0400	○	72	65	6			
④ (中・柔)	板状	カーブミラー	2.33	0.5	0.004	38.8	0.0202	○	63	77	29			
			0.77	0.86	1.33	220	0.0086	○	53	298	4	固縛等の対策実施		
	塊状	プレハブ小屋※3	6.0	3.06	2.08	2000	0.0125	○	57	3212	6	固縛等の対策実施		
			0.3	0.7	1.5	50	0.0228	○	65	105	4			
	塊状	消火器・消火栓	0.64	1.84	1.2	150	0.0185	○	62	287	4	固縛等の対策実施		
			0.6	0.6	0.9	245	0.0040	○	44	234	5	固縛等の対策実施		
			2.5	0.05	0.05	6.825	0.0088	○	53	10	7			
⑤ (中・剛)	棒状	鋼管	4.2	0.3	0.2	135	0.0066	○	57※4	220	37	設計飛来物		
			1	0.25	0.22	55	0.0041	○	45	54	5			
			2.5	0.25	0.25	250	0.0022	×	39	186	10			

第12-3表 想定飛来物の評価結果(2/2)

分類	形状	名称	長さ		幅	高さ (厚さ)	質量	空力 パラメータ		飛散 <sup>※1</sup>	水平速度	運動 エネルギー	必要 板厚	備考
			m	m				C <sub>D</sub> A/m	m <sup>2</sup> /kg					
⑤ (中・剛)	板状	コンクリート板 <sup>※2</sup>	1.5	1	0.15	540	0.0022		×	30	243	7	ガイド記載の飛来物	
		鋼板	6.1	1.54	0.021	1900	0.0034		○	43	1690	55	固縛等の対策実施	
	塊状	カードール	1.01	1.39	1.41	1500	0.0022		×	39	1099	7	固縛等の対策実施	
		ケーブルドラム	2.42	2.42	1.16	2650	0.0029		○	41	2211	8	固縛等の対策実施	
⑥ (中・柔)	塊状	発電機	0.98	2.09	1.55	1690	0.0027		○	41	1374	7	固縛等の対策実施	
		コンテナ <sup>※2</sup>	2.4	2.6	6	2300	0.0106		○	60	4140	8	ガイド記載の飛来物	
	塊状	電気盤	3.5	2.4	2.2	1830	0.0078		○	52	2384	6	固縛等の対策実施	
		タンク	3.08	9.2	3.46	95504.8	0.0005		×	10	4302	6	固縛等の対策実施	
⑦ (大・柔) (一部剛)	棒状	鋼製ステップ	0.6	5	1.2	183.1	0.0223		○	65	378	5	固縛等の対策実施	
		重機	9.53	2.8	3.16	20800	0.0022		×	39	15185	15	固縛等の対策実施	
	塊状	放水砲	2	4.7	1	3000	0.0036		○	43	2752	10	固縛等の対策実施	
		トラック <sup>※2</sup>	5	1.9	1.3	4750	0.0026		×	34	2746	9	ガイド記載の飛来物	
⑦ (大・柔) (一部剛)	塊状	タンクローリー	6.28	2.2	2.41	4380	0.0053		○	47	4758	9	固縛等の対策実施	
		自動車	4.9	1.87	1.87	2250	0.0065		○	49	2687	8	固縛等の対策実施	
	塊状	発電機車	20.1	7.5	8.25	58120	0.0044		○	45	58081	14	固縛等の対策実施	
		ポンプ車	8.79	2.49	3.16	13050	0.0030		○	41	10947	13	固縛等の対策実施	
		仮置資機材	6	5	5.6	14000	0.0044		○	45	14016	8	固縛等の対策実施	

※1：空力パラメータが0.0026より大きいものについては、高さ方向に飛散する評価としている。なお、この数値は、飛来物が浮いている状態を仮定して設計電巻を作用させた時に、上向きの加速度が発生する閾値である。

※2：構内の想定飛来物の他、ガイド記載の飛来物についても想定飛来物として評価する。

※3：質量は、内容物が無い空の状態として評価する。

※4：鋼製材の最大水平速度については、「原子力発電所の電巻影響評価ガイドの一部改正について」(平成26年9月17日 原子力規制庁)において、57m/sから51m/sに改正されているが改正前の値とする。

#### (4) 設計飛来物の設定

設計竜巻による設計飛来物の最大水平速度及び最大鉛直速度は、衝撃荷重による影響を保守的に評価するため、原子力発電所の竜巻影響評価ガイドに示される竜巻の最大風速 ( $V_D$ ) = 100m/s の場合と同じ値とする。なお、評価ガイドにおける鋼製材の最大水平速度、最大鉛直速度については、平成 26 年 9 月 17 日に改正 (最大水平速度が 57m/s から 51m/s に、最大鉛直速度が 38m/s から 34m/s に改正) されているが、竜巻防護設計にあたっては、より保守的な改正前の値を用いるものとし、第 12-4 表のとおりとする。

ただし、原子力発電所の竜巻影響評価ガイドに記載のない設計飛来物である砂利については、別紙-2 に示すランキン渦を仮定した風速場の中で水平速度を算出し、鉛直速度を原子力発電所の竜巻影響評価ガイドに基づき水平速度の 2/3 として算出した。

評価に用いる設計飛来物の設定結果を第 12-4 表に示す。

第 12-4 表 設計飛来物の設定結果

飛来物の種類	砂利	鋼製パイプ	鋼製材
サイズ (m)	長さ×幅×奥行 0.04×0.04×0.04	長さ×直径 2×0.05	長さ×幅×奥行 4.2×0.3×0.2
質量 (kg)	0.17	8.4	135
最大水平速度 (m/s)	62	49	57
最大鉛直速度 (m/s)	42	33	38

#### 4. まとめ

以上の通り、設計飛来物を設定したが、厳密には質量及び寸法の異なる想定飛来物も敷地内には存在する。しかしながら、設定した設計飛来物は、抽出した種々の想定飛来物の中から、高さ方向への飛散の有無、運動エネルギー及び貫通力の大きさ等を考慮して選定しており、設定した設計飛来物の中で運動エネルギー及び貫通力が最大である鋼製材より、運動エネルギー又は貫通力が大きなものについては、固縛等の飛来物発生防止対策を実施することから、これらの設計飛来物によって泊発電所において考えられる想定飛来物の影響を包絡できると考える。

したがって、竜巻防護施設に対する影響評価等の検討にあたっての設計飛来物としては妥当であると考えている。

なお、今後発電所内に搬入される物品を含め、設計飛来物の代表性が失われないよう、適切に固縛等の飛来物発生防止対策を実施していく。

## 空力パラメータの算出方法について

空力パラメータの算出方法は、ガイドの参考文献\*1を参照し、①式により算出する。

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

$m$  : 設計飛来物の質量

$c$  : 係数 (=0.33)

$C_{D1}, C_{D2}, C_{D3}$  : 飛来物の抗力係数

$A_1, A_2, A_3$  : 飛来物の投影面積

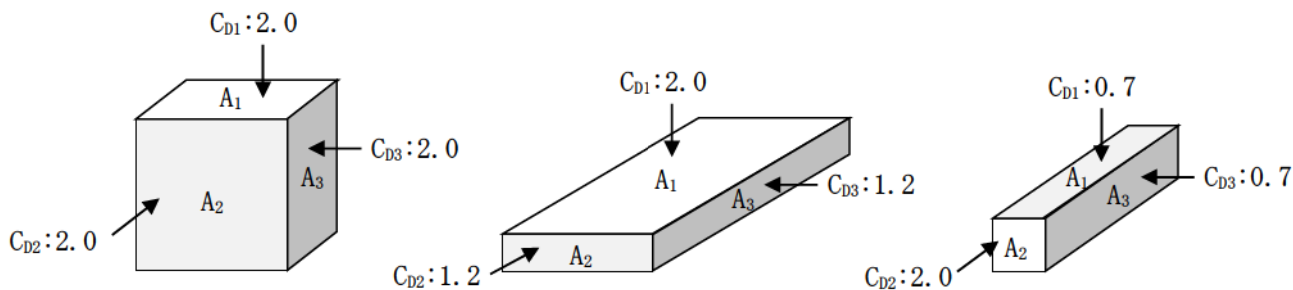
ここで、飛来物の抗力係数は、飛来物の形状毎に以下の第1表の通りとする。また、空力パラメータ算出の考え方を模式図に整理したものを第1図に示す。

なお、 $A_1, A_2, A_3$ は飛来物の投影面積であり、 $L, W, H$ をそれぞれ飛来物の長さ、幅、高さとした時に、 $A_1=L \times W, A_2=W \times H, A_3=H \times L$ である。

ただし、板状物体については、 $L, W > H$ 、棒状物体については、 $L > W, H$ とする。

第1表 飛来物の抗力係数

想定飛来物形状	$C_{D1}$	$C_{D2}$	$C_{D3}$
塊状物体	2.0	2.0	2.0
板状物体	2.0	1.2	1.2
棒状物体	0.7	2.0	0.7



第1図 空力パラメータ算出の考え方

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



想定飛来物の飛散速度及び飛散高さの評価について

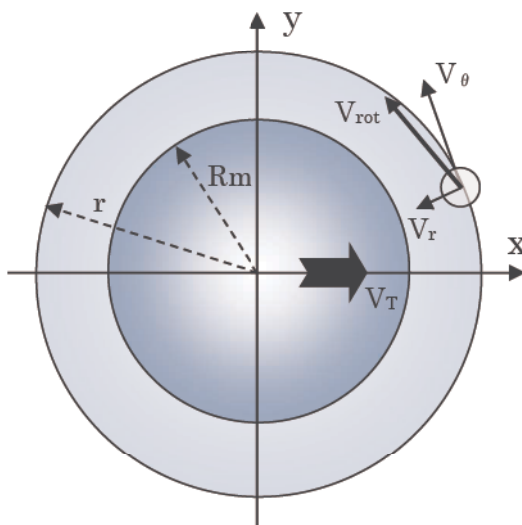
想定飛来物の飛散速度及び飛来高さは、竜巻による風速場の中の飛来物の飛散軌跡を計算することで評価している。評価概要を以下に示す。

1. 評価条件

竜巻の風速場は、ガイドを参考にして鉛直方向には風速・気圧といった構造が変化しないランキン渦としてモデル化する。

竜巻評価に用いる竜巻の風速分布は、下図に示すように原点から時刻  $t$  毎に  $x$  軸方向に  $V_T$  の速度で移動するとし、その時の飛来物の初期位置を竜巻中心（原点）から任意の距離（ $r$ ）に設定して算定する。<sup>\*1\*2</sup>

この時の接線方向風速  $V_\theta$ 、半径方向風速  $V_r$  及び上昇風速  $V_z$  は、①～③式で定義される。



$$V_\theta = \frac{2}{\sqrt{5}} V_{rot} \quad \dots \dots \textcircled{1}$$

$$V_r = \frac{1}{\sqrt{5}} V_{rot} \quad \dots \dots \textcircled{2}$$

$$V_z = \frac{4}{3\sqrt{5}} V_{rot} \quad \dots \dots \textcircled{3} \quad (V_z = \frac{2}{3} V_\theta \text{ より})$$

$$\left\{ V_{rot} = \frac{r}{R_m} V_{R_m} \quad (0 \leq r \leq R_m) \text{ の場合} \quad V_{rot} = \frac{R_m}{r} V_{R_m} \quad (R_m \leq r) \text{ の場合} \right\}$$

ここで、 $V_{R_m}$  は  $r=R_m$  の時の  $V_{rot}$  であり、 $V_{rot}$  の最大値である。その時、最大風速  $V_D$  は、

$$V_D = V_{R_m} + V_T \quad \dots \dots \textcircled{4}$$

$V_\theta$  : 竜巻の接線方向風速

$V_r$  : 竜巻の半径方向風速

$V_z$  : 竜巻の鉛直方向風速

$V_T$  : 竜巻の移動速度

$V_{rot}$  : 竜巻の旋回風速

$V_{R_m}$  : 竜巻の最大旋回風速

$V_D$  : 竜巻の最大風速

$r$  : 竜巻中心からの飛来物位置

$R_m$  : 竜巻旋回風速最大値位置の半径

## 2. 評価方法

1. に示す風速場における飛来物の運動は、相対速度の2乗に比例した抗力と重力が外力として作用するものと仮定すると、以下の⑤式で表すことができる。

飛散速度及び飛散高さの評価においては、時刻  $t$  の時間刻みにて⑤式を離散化することで算出する。この際、抗力係数  $C_D$  は、飛来物の3方向の面積で重み付けした平均値を用いている。<sup>※3</sup>

想定飛来物の高さ方向への飛散の有無は、⑤式に基づき、空力パラメータ ( $C_D A/m$ ) と飛来物に作用する浮き上がり力及び自重との関係から評価できる。(⑥式)

$$\ddot{x}(t) = \frac{1}{2} \rho \frac{C_D A}{m} (V(x(t)) - \dot{x}(t)) |V(x(t)) - \dot{x}(t)| - gJ \quad \dots \dots \textcircled{5}$$

$$\frac{C_D A}{m} > \frac{2g}{\rho V_z \sqrt{V_D^2 + V_z^2}} \quad \dots \dots \textcircled{6}$$

$m$  : 飛来物の質量

$x(t)$  : 時刻  $t$  での飛来物の位置

$x''(t)$  : 時刻  $t$  での飛来物の加速度

$C_D$  : 抗力係数

$g$  : 重力加速度

$V_D$  : 竜巻の最大風速

$A$  : 代表面積

$x'(t)$  : 時刻  $t$  での飛来物の速度

$V(x(t))$  : 時刻  $t$  での飛来物位置での風速

$\rho$  : 空気密度 (=1.22)

$J$  : 鉛直方向成分のみ1のベクトル

$V_z$  : 竜巻の鉛直方向風速

## 3. 評価結果

泊発電所の設計竜巻 (最大風速 100m/s) に対して、⑥式を用いて評価した結果、空力パラメータが 0.0028 以下の場合には高さ方向へは飛散しない評価となる。

よって、泊発電所の想定飛来物の高さ方向への飛散の有無は、0.0028 に保守性を考慮して 0.0026 を基準としている。

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

※2 : 電中研 江口護ほか, 移動ランキン渦モデルによる竜巻飛来物速度の評価, 日本流体力学会年会 2013

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

## 空力パラメータによる浮力の保守性について

空力パラメータを用いた飛来物の浮上と飛散状況について、気象庁ホームページに掲載されている藤田（F）スケールの解説において記述されている被害状況のうち、自動車を対象として比較を行った。

なお、評価する自動車の諸元は、現地調査の結果に基づいて設定している。評価対象の諸元を第1表に示す。

第1表 評価対象の諸元

	長さ (m)	幅 (m)	高さ (m)	質量 (kg)	空力パラメータ $C_D A/m$ ( $m^2/kg$ )
自動車	5.5	1.88	2.9	2770	0.0076

## 【検討結果】

## ・ F 2 レベル（風速 69m/s）での検討

風速 69m/s における浮上条件としては、別紙-2 の⑥式より  $C_D A/m=0.0059$  となり、自動車は浮き上がる評価となる。

これに対して、Fスケールの被害状況においては、F 2 レベルの竜巻においては、『自動車が道から吹き飛ばされ』という記述となっていることから、空力パラメータによる評価は保守的な評価となっている。

## ・ F 4 レベル（風速 100m/s）での検討

風速 100m/s における浮上条件としては、別紙-2 の⑥式より  $C_D A/m=0.0028$  となり、自動車は浮き上がる評価となり、その飛散距離は約 320m となる。

これに対して、Fスケールの被害状況においては、F 4 レベルの竜巻においては、『自動車は何メートルも空中飛行する』という記述となっていることから、空力パラメータによる評価は保守的な評価となっている。

以上のことから、空力パラメータを用いた飛来物の浮上と飛散状況に係る評価については、気象庁ホームページに掲載されている藤田（F）スケールにおける被害状況と比較して保守的な結果となると判断できる。

## 飛来物速度（鉛直方向）に関する保守性について

竜巻により舞い上がった物体に対して、竜巻が突然消滅した場合の飛来物落下速度について検討している。評価概要を以下に示す。

## 1. 評価条件

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

評価に用いる竜巻諸元を第1表に示す。なお、物体の初期位置は高さ40mとしている。

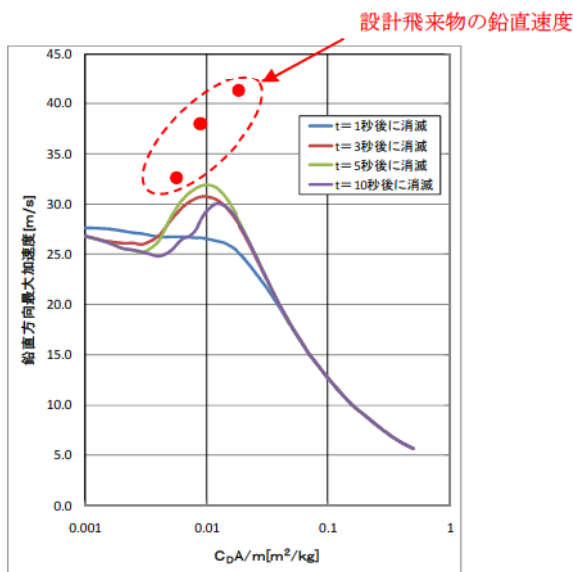
第1表 評価に用いる竜巻諸元

最大風速 (m/s)	移動風速 (m/s)	最大接線風速 (m/s)	最大風速半径 (m)	空気密度 (kg/m <sup>3</sup> )	重力加速度 (m/s <sup>2</sup> )
100	15	85	30	1.22	9.8

## 2. 評価結果

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

なお、グラフの各線は、竜巻が消滅した場合の鉛直方向の最大速度を示す。一方、設計飛来物の鉛直方向の速度設定は、竜巻影響ガイドに従い、第2表に示すように水平方向の2/3の速度に設定している。



第1図 竜巻風速100m/s時の飛来物の鉛直方向最大速度

第2表 設計飛来物の空力パラメータ及び飛散速度

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

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

### 1.3. 設計竜巻荷重と組み合わせる荷重について

設計竜巻荷重（以下「設計竜巻による複合荷重」という。）と組み合わせる荷重として、評価対象施設に常時作用する荷重（自重）および運転時荷重を適切に組み合わせている。

評価対象施設毎の設計竜巻による複合荷重と組み合わせる荷重の一覧を表-1に、運転時荷重の組み合わせを考慮していない理由の一覧を表-2に示す。

なお、設計竜巻による複合荷重 ( $W_{T1}=W_P$ ,  $W_{T2}=W_W+0.5\cdot W_P+W_M$ ) あるいは設計竜巻による気圧差による荷重 ( $W_P$ ) の設定の考え方については、補足説明資料19.による。

表-1 評価対象毎の設計竜巻による複合荷重と組み合わせる荷重一覧

評価対象施設		$W_W$	$W_P$	$W_M$	自重	運転時荷重	備考
原子炉補機冷却海水ポンプ	ポンプ	○	○	—※7	—※1	—※5	
	モータ	○	○	—※7	○	—※5	
排気筒（建屋外）		○	○	—※7	○	—※5	
蓄熱室加熱器		—	—	—	—	—	設計飛来物による影響評価のみ実施
原子炉補機冷却海水出口ストレーナ		○	○	—※7	○	○（最高使用圧力）	
配管および弁（原子炉補機冷却海水系統）		○	○	—※7	○	○（最高使用圧力）	
原子炉補機冷却水サージタンク他		—	—	—	—	—	設計飛来物による影響評価のみ実施
配管および弁（主蒸気管内）		—	—	—	—	—	設計飛来物による影響評価のみ実施
制御用空気系統配管		—	—	—	—	—	設計飛来物による影響評価のみ実施
使用済燃料ピット（使用済燃料ラック含む）		—	—	—	—	—	設計飛来物による影響評価のみ実施
新燃料ラック		—	—	—	—	—	設計飛来物による影響評価のみ実施
燃料移送装置		—	—	—	—	—	設計飛来物による影響評価のみ実施
使用済燃料ピットクレーン		—	—	—	—	—	設計飛来物による影響評価のみ実施
排気筒（建屋内）		—	○	—	○	—※5	
ディーゼル発電機排気消音器		○	—※8	—※7	○	—※8	
主蒸気逃がし弁消音器		○	—※8	—※7	—※1	—※8	
主蒸気安全弁排気管		○	—※8	—※7	—※1	—※8	
タービン動補助給水ポンプ排気管		○	—※8	—※7	—※1	—※8	
ディーゼル発電機燃料油貯油槽ベント管		○	—※8	—※7	—※1	—※8	
換気空調設備	ダンパ	—	○	—	○	—※5	
	バタフライ弁	—	○※6	—	—※2	—※5	
	ダクト	—	○	—	○	—※5	
	ファン	—	○	—	—※3	—※5	
	空調ユニット	—	○	—	—※4	—※5	

注：表中の「○」は設計竜巻による複合荷重と組み合わせる荷重を示す。

※1：自重によって生じる転倒モーメントが、設計竜巻による複合荷重によって生じる転倒モーメントを打ち消す方向に作用するため考慮していない。

※2：パタフライ弁の自重による応力は、パタフライ弁の設計上の圧力基準による発生応力に対して十分に小さいことから考慮しない。

※3：一部のファンにおいては、評価部位であるケーシングの自重と設計竜巻による気圧差荷重が同じ方向に作用するが、ケーシングは薄板構造であり自重としては、設計竜巻による気圧差荷重に対して十分に小さいことから考慮しない。

※4：自重と設計竜巻による気圧差荷重とは、作用方向が90°ずれていること等から考慮しない。

※5：表-2 参照。

※6：気圧差（内圧）と設計上の圧力基準（JIS10k）との比較にて評価を実施。

※7：設計飛来物による影響評価より貫通するとの結果が得られたことから考慮しない（貫通により安全機能を損なう可能性のある評価対象施設については飛来物防護対策を行う）。

※8：大気開放されているため考慮（作用）しない。

表-2 運転時荷重の組み合わせを考慮していない理由一覧

評価対象施設	考慮していない理由
<p>原子炉補機冷却海水ポンプ (モータ含む)</p>	<p>評価部位（ボルト）には、ポンプ（立型）の運転（揚水）によって生じる下向きスラスト荷重による転倒モーメントと、設計竜巻による複合荷重によって生じる転倒モーメント（逆向き）が作用する。これらのモーメントは、お互いに打ち消す方向に作用するため、保守的に運転時荷重（ポンプの揚水によって生じる下向きスラスト荷重）との組合せは考慮していない。</p>

評価対象施設		考慮していない理由
排気筒		当該設備に繋がる換気空調設備（評価対象施設）については、設計竜巻による気圧差の影響を極力回避するため、泊発電所が立地する後志地方を含むエリア（石狩・空知・後志地方）に竜巻注意情報が発表され、発電所上空に「竜巻発生確度 <sup>※1</sup> 2」かつ「雷活動度 <sup>※2</sup> 3以上」が発生したことを確認した場合またはその恐れがある場合は、外気との境界となるダンパおよびバタフライ弁を閉止する、または閉止状態を確認する手順とする。これに伴って当該設備に繋がるファンを停止する、または停止状態を確認する手順とするため、運転時荷重（ファン静圧）は作用しないことから考慮していない。
換気空調設備	ダンパ	<ul style="list-style-type: none"> <li>当該設備のうち、アニュラス空気浄化設備、格納容器空調装置、補助建屋空調装置、試料採取室空調装置および中央制御室空調装置については、設計竜巻による気圧差の影響を極力回避するため、泊発電所が立地する後志地方を含むエリア（石狩・空知・後志地方）に竜巻注意情報が発表され、発電所上空に「竜巻発生確度<sup>※1</sup> 2」かつ「雷活動度<sup>※2</sup> 3以上」が発生したことを確認した場合またはその恐れがある場合は、外気との境界となるダンパおよびバタフライ弁を閉止する、または閉止状態を確認する手順とする。これに伴って排気筒に繋がる換気空調設備（アニュラス空気浄化設備、格納容器空調装置、補助建屋空調装置及び試料採取室空調装置）のファンは停止する、または停止状態を確認する、中央制御室空調装置のファンは閉回路循環運転とする手順とするため、運転時荷重（ファン静圧）は作用しないこと等から考慮していない。</li> <li>ディーゼル発電機室換気装置、電動補助給水ポンプ室換気装置、制御用空気圧縮機室換気装置、安全補機開閉器室空調装置および蓄電池室排気装置については、竜巻防護施設の冷却等に使用されているため、冷却継続等の観点からファンは停止しないが、ファンの運転によってダクト等に生じる圧力は、竜巻による気圧低下を打ち消す方向に作用すること等から、運転時荷重との組み合わせは考慮していない。</li> </ul>
	バタフライ弁	
	ダクト	
	ファン	
	空調ユニット	

※1：気象庁が発表する防災気象情報の一つである「竜巻発生確度ナウキャスト」において、気象ドップラーレーダーなどから、10km 間隔で竜巻などの激しい突風が発生する可能性の程度を推定した指標（10分毎に更新）。中央制御室に設置している気象端末装置（MICOS）等にて確認可能であり、竜巻などの激しい突風が発生する可能性の低い方から発生確度1→2の2つに区分されている。

※2：気象庁が発表する防災気象情報の一つである「雷ナウキャスト」において、雷監視システムによる雷放電の検知及びレーダー観測などを基に雷の激しさや雷の可能性を1km 間隔で予測した指標（10分毎に更新）。中央制御室に設置している気象端末装置（MICOS）等にて確認可能であり、雷活動度の低い方から雷活動度1→4の4つに区分されている。



## 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。

「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とする。

## 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。

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 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)	$1.4 \times 10^{-7}$
従荷重	積雪	中	長 <sup>※1</sup>	$2.0 \times 10^{-2}$ <sup>※2</sup>

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

※2 垂直積雪量が冬季の最大積雪の50年再現期待値に相当する値

表2 竜巻(主荷重)と積雪(従荷重)の組合せ

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

上記のとおり、竜巻の作用時間は極めて短時間であること、積雪の荷重は冬季の限定された期間に発生し、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いため、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ガイド」で設計竜巻荷重に組み合わせる荷重として考慮され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。

竜巻通過後の気象条件において降雪を伴う可能性があるが、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。

#### 1 4. 雹を飛来物として想定した場合の影響評価について

雹を飛来物として考えた場合の建物・構築物及び設備に与える影響については、雹の一般的な大きさ（5mm～数 cm）から設計飛来物の評価で代表できると考えるが、ここでは、雹を飛来物として想定した場合の影響評価について示す。

##### 1. 雹の諸元（落下速度）

物体が大気中を運動する場合は空気抵抗を受けるため、時間が経過すれば空気抵抗と重力が釣り合って等速運動となり、このときの速度を終端速度という。空気中を落下する雨、雹等の粒子についても同様であることから、この終端速度で評価する。粒径ごとの雹の落下速度（出展：「一般気象学」東京大学出版）を第 14-1 表に示す。

第 14-1 表 雹の落下速度

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

##### 2. 雹による影響評価

影響評価にあたっては、粒径 10cm 程度の大型の雹を想定する。なお、雹が剛飛来物とは考えられないうが、剛飛来物と仮定して評価する。

コンクリート及び鋼板に対する貫通厚さについて、設計飛来物と同様に評価した結果を、設計飛来物（鋼製材）の評価結果と合わせて第 14-2 表に示す。

第 14-2 表 評価結果

	貫通厚さ	
	雹（粒径 10cm）	設計飛来物（鋼製材）
コンクリート（ $F_c = 24\text{N/mm}^2$ ）	3 (cm)	21 (cm)
鋼板	1 (mm)	22 (mm)

##### 3. まとめ

以上の結果より、雹を飛来物と想定しても、設計飛来物に十分包絡されることを確認した。

なお、コンクリートスラブの実際の最小厚さが 26cm であること、また、飛来物が直接的に影響を及ぼすと想定される設備である原子炉補機冷却海水ポンプ（モータ部ケーシング）の板厚は 3.2mm であることから、雹による施設への影響はない。

## 15. 設計基準事故時荷重の組み合わせを考慮していない理由について

「実用発電用原子炉及びその附属施設の位置、構造及び設備の基準に関する規則」第2条第2項第4号において、「設計基準事故」とは『発生頻度が運転時の異常な過渡変化より低い異常な状態であって、当該状態が発生した場合には発電用原子炉施設から多量の放射性物質が放出するおそれがあるものとして安全設計上想定すべきものをいう。』と定義されている。

「発電用軽水型原子炉施設の安全評価に関する審査指針」において、PWRにおける「事故」の具体的な事象は以下のとおりとされており、この中で『燃料集合体の落下』以外の事故については、竜巻防護施設（設備）が設計竜巻による影響を受けない建屋内に設置され設計基準事故の原因となる配管破損等は起こり難いことから、設計竜巻荷重と設計基準事故時荷重は重畳しないと考える。

一方、『燃料集合体の落下』については、使用済燃料ピットが設置されている建屋の上屋（燃料取扱棟）は鉄骨造であり飛来物の進入が想定されることから、クレーンにて燃料集合体を取扱い中に飛来物が燃料集合体保持機構に衝突した場合は発生する可能性があるが、竜巻襲来が予想される場合に燃料集合体を使用済燃料ピット内に戻して燃料集合体の取扱い作業を一時中断する旨マニュアルに反映することとしていること、飛来物が燃料集合体保持機構にあたる可能性は非常に小さいことから、竜巻が原因で発生する確率は小さいと考える。

また、万一発生したとしても、当該事故時において設計基準事故時荷重（配管破断時の反力による荷重など）は発生しない。

以上より、設計竜巻によって設計基準事故が発生することはなく、また、設計竜巻（風速92m/s）の発生頻度は小さいため（年超過確率： $1.4 \times 10^{-7}$ ）、設計竜巻と設計基準事故が同時に発生することは考え難いことから、設計基準事故時荷重との組み合わせは考慮していない。

仮に、風速が低く発生頻度が高い竜巻と設計基準事故が同時に発生する場合、評価対象施設のうち設計基準事故時荷重が生じる設備としては、動的機器である原子炉補機冷却海水ポンプが考えられるが、設計基準事故時においても海水ポンプの圧力、温度が変わらず、機械的荷重が変化することはないため、設計基準事故により考慮すべき荷重はなく、竜巻と設計基準事故時荷重の組み合わせは考慮しない。

- ・原子炉冷却材の喪失又は炉心冷却状態の著しい変化
  - (1) 原子炉冷却材喪失
  - (2) 原子炉冷却材流量の喪失
  - (3) 原子炉冷却材ポンプの軸固着
  - (4) 主給水管破断
  - (5) 主蒸気管破断
- ・反応度の異常な投入又は原子炉出力の急激な変化
  - (1) 制御棒飛び出し
- ・環境への放射性物質の異常な放出
  - (1) 放射性気体廃棄物処理施設の破損
  - (2) 蒸気発生器伝熱管破損
  - (3) 燃料集合体の落下
  - (4) 原子炉冷却材喪失
  - (5) 制御棒飛び出し

- ・原子炉格納容器内圧力，雰囲気等の異常な変化
  - (1) 原子炉冷却材喪失
  - (2) 可燃性ガスの発生

＜実用発電用原子炉及びその附属施設の位置，構造及び設備の基準に関する規則（抜粋）＞

第六条

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

＜実用発電用原子炉及びその附属施設の位置，構造及び設備の基準に関する規則の解釈（抜粋）＞

第6条

6 第2項に規定する「適切に考慮したもの」とは，大きな影響を及ぼすおそれがあると想定される自然現象により当該重要安全施設に作用する衝撃及び設計基準事故が発生した場合に生じる応力を単純に加算することを必ずしも要求するものではなく，それぞれの因果関係及び時間的变化を考慮して適切に組み合わせた場合をいう。

## 16. 建屋・構築物等の構造健全性の確認内容について

本資料は、竜巻防護施設の外殻となる施設及び竜巻防護施設に波及的影響を及ぼし得る施設の構造健全性の確認として「設計荷重に対する構造骨組の評価」、「鉄骨造部分の外壁及び屋根が飛散物にならないことの確認」、「設計飛来物の衝突に対する評価」についての評価方針、評価手法及び結果を記す。

### 1. 評価方針

評価については、竜巻防護施設の外殻となる施設及び竜巻防護施設に波及的影響を及ぼし得る施設が、竜巻による荷重に対し、構造健全性の評価基準を満たしていること、それぞれの特徴（形状、構造）に応じた変形、応力等を算出し確認する。（下記（1））

また、竜巻により生じた飛散物の衝突に対し、竜巻防護施設の安全機能の維持に影響を与えないことを、貫通評価等により確認する。（下記（3））

さらに評価した建屋が飛散物とならないか、竜巻による影響の状況を想定して確認する。（下記（2）及び（4））

#### （1）構造骨組の評価

鉄筋コンクリート造部分については、設計竜巻による複合荷重により生じる応力に対して、地震応答解析モデルにおける各部材のせん断力の復元力特性（ $Q-\gamma$ 関係）によりせん断ひずみを算定し、鉄筋コンクリート造耐震壁の最大応答せん断ひずみの評価基準値（ $2.0 \times 10^{-3}$ ）<sup>※1</sup>を下回ることを確認する。

また、鉄骨造部分については、設計竜巻による複合荷重により生じる応力に対して、地震応答解析モデルにおける各部材の荷重変形関係（ $Q-\delta$ 関係）から得られる水平変位より算定した層間変形角が評価基準値（ $1/120$ ）<sup>※2</sup>を下回ることを確認する。

※1：原子力発電所耐震設計技術指針（JEAG4601-1987）に示されている鉄筋コンクリート耐震壁のせん断ひずみに関する許容限界の目安値

※2：建築基準法施行令第82条の2に示されている当該層間変位の当該各階の高さに対する割合の許容限界値

#### （2）鉄骨造部分の外壁及び屋根が飛来物とならないことの確認

鉄骨造部分の外壁及び屋根については、複合荷重が面外方向に作用する。これらの荷重により、破損し、波及的影響を及ぼさないことを確認する。

ここで、複合荷重のうち $W_{T2}$ については、建屋の外側に向けて働く力（負圧）について検討することから、設計飛来物による衝撃荷重（ $W_M$ ）は考慮しない。また、外壁は構成部材である波板・胴縁・間柱を、屋根はコンクリート屋根スラブ、鉄骨梁について検討を行い、（部材の終局耐力から算定される許容荷重）／（竜巻による荷重）を部材の裕度とし、1.0以上あることを確認する。

なお、裕度が1.0を下回る場合には、接合部のボルトのせん断耐力から算定される許容荷重が竜巻による荷重を上回ることを確認する。

#### （3）設計飛来物の衝突に対する評価

設計飛来物が鉄筋コンクリート造部分の外壁及び屋根に衝突した場合について、貫通評価及び裏面剥離によるコンクリート片の飛散の評価を実施する。貫通または裏面剥離の有無は、設計飛来物の衝突に対して貫通または裏面剥離が生じないための必要最小厚さをそれぞれ算出し、評価部材の最小厚さと比較することで確認する。屋根に裏面剥離が発生する場合は、剥離したコンクリートが飛散しないことをデッキプレートの有無により確認する。

設計飛来物が鉄骨造部分の外壁（波板）に衝突した場合については、貫通するものとする。

なお、波及的影響を及ぼし得る施設である循環水ポンプ建屋、タービン建屋、電気建屋及び出入管理建屋については、竜巻防護施設の外殻となる施設（竜巻防護施設を内包する建屋・構築物）には該当しないことから、評価結果は記載していない。

(4) 開口部の建具の飛散に関する評価

建具開口部のうち、扉については複合荷重に対し、飛散物とならないことを確認する。具体的には、竜巻による荷重が、扉部材の許容荷重を下回ることにより確認する。ここで複合荷重のうち $W_{T2}$ については、負圧について検討することから設計飛来物による衝撃荷重 ( $W_M$ ) は考慮しない。

2. 設計竜巻の特性値

設計竜巻の特性値は第 16-1 表の通りとした。

第 16-1 表 設計竜巻の特性値

最大風速	移動速度	最大接線風圧	最大接線風圧半径	気圧低下量	最大気圧低下率 ( $dp/dt$ ) <sub>max</sub> (hPa/s)
$V_D$ (m/s)	$V_T$ (m/s)	$V_{Rm}$ (m/s)	$R_m$ (m)	$\Delta P$ (hPa)	
100	15	85	30	89	45

3. 設計飛来物の諸元

設計飛来物の諸元は第 16-2 表の通りとした。

第 16-2 表 設計飛来物の諸元

飛来物の種類	鋼製材
サイズ (m)	長さ×幅×奥行 4.2×0.3×0.2
質量 (kg)	135
最大水平速度 (m/s)	57
最大鉛直速度 (m/s)	38
運動エネルギー (kJ)	220

4. 設計竜巻荷重

(1) 設計竜巻荷重の組合せ

設計竜巻荷重は、設計竜巻の風圧力による荷重 ( $W_W$ )、気圧差による荷重 ( $W_P$ ) 及び設計飛来物による衝撃荷重 ( $W_M$ ) を組み合わせた複合荷重とした。

$$W_{T1} = W_P \quad \dots (1)$$

$$W_{T2} = W_W + 0.5 \cdot W_P + W_M \quad \dots (2)$$

- $W_{T1}, W_{T2}$  : 設計竜巻による複合荷重
- $W_W$  : 設計竜巻の風圧力による荷重
- $W_P$  : 設計竜巻による気圧差による荷重
- $W_M$  : 設計飛来物による衝撃荷重

(2) 風圧力による荷重の設定

a. 荷重の算定

設計竜巻の水平方向の最大風速によって施設に作用する風圧力による荷重 ( $W_w$ ) は、「建築基準法施行令」及び「日本建築学会 建築物荷重指針・同解説 (2004)」(以下、「荷重指針」という。)に準拠して、式 (3), (4) により算定した。

なお、ガスト影響係数 ( $G$ ) は  $G=1.0$ 、風力係数 ( $C$ ) は施設の形状や風圧力が作用する部位に応じて設定した。風圧力の設定に用いた各パラメータを第 16-3 表に示す。

$$W_w = q \cdot G \cdot C \cdot A \quad \dots (3)$$

$q$  : 設計用速度圧                       $G$  : ガスト影響係数 (=1.0)  
 $C$  : 風力係数                               $A$  : 施設の受圧面積

$$q = (1/2) \cdot \rho \cdot V_D^2 \quad \dots (4)$$

$\rho$  : 空気密度                               $V_D$  : 竜巻の最大風速

第 16-3 表 風圧力の設定に用いた各パラメータ

項目	値	単位	備考
最大風速 $V_D$	100	m/s	
空気密度 $\rho$	1.22	kg/m <sup>3</sup>	「荷重指針」による。
ガスト影響係数 $G$	1.0	—	「原子力発電所の竜巻影響ガイド」(以下、「評価ガイド」という。)による。
風力係数 $C$	「建設省告示第 1454 号(平成 12 年 5 月 31 日制定)」及び「荷重指針」により算定する。詳細は、「b. 風力係数の算定」に示す。		

b. 風力係数の算定

(a) 風力係数の算定の概要

設計竜巻の水平方向の最大風速によって施設に作用する風圧力算定における風力係数については、「建設省告示第 1454 号 (平成 12 年 5 月 31 日制定)」及び「荷重指針」に準拠して算定する。第 16-4 表に風力係数の算定方法一覧を示す。

第 16-4 表 風力係数の算定方法

項目		算定方法	
構造骨組 (建屋外壁面)	O/S 以外	「建設省告示第 1454 号(平成 12 年 5 月 31 日制定)」	
	O/S 部	ドーム部	「荷重指針」
		シリンダー部	
鉄骨造部分	外壁	波板	「建設省告示第 1454 号(平成 12 年 5 月 31 日制定)」
		胴縁	
		間柱	
	屋根	スラブ	
		大梁 小梁	



(b) 評価に用いる風力係数

評価に用いる風力係数については「建設省告示第 1454 号（平成 12 年 5 月 31 日制定）」より、 $C_f = C_{pe} - C_{pi}$  として算定する。

出典（一部抜粋）：「建設省告示第 1454 号（平成 12 年 5 月 31 日制定）」

第3 令第87条第1項の風力係数の数値は、次の図1から図7までに掲げる形状の建築物又は工作物にあつてはそれぞれ当該形状に応じて表1から表9までに掲げる数値を用いて次の式により算出するものとし、その他の形状のものにあつてはそれぞれ類似の形状のもの数値に準じて定めるものとする。ただし、風洞実験の結果に基づき算出する場合においては、当該数値によることができる。

$$C_f = C_{pe} - C_{pi}$$

この式において、 $C_f$ 、 $C_{pe}$ 及び $C_{pi}$ は、それぞれ次の数値を表すものとする。

$C_f$  風力係数

$C_{pe}$  閉鎖型及び開放型の建築物の外圧係数で、次の表1から表4までに掲げる数値（屋外から当該部分を垂直に押す方向を正とする。）

$C_{pi}$  閉鎖型及び開放型の建築物の内圧係数で、次の表5に掲げる数値（室内から当該部分を垂直に押す方向を正とする。）ただし、独立上家、ラチス構造物、金網その他の網状の構造物及び煙突その他の円筒形の構造物にあつては、次の表6から表9までに掲げる数値（図中の一の方向を正とする。）を $C_f$ とするものとする。

図1 閉鎖型の建築物（張り間方向に風を受ける場合。表1から表5までを用いるものとする。）



表1 壁面の $C_{pe}$

部位	風上壁面	側壁面		風下壁面
		風上端部より0.5aの領域	左に掲げる領域以外の領域	
$C_{pe}$	0.8kz	-0.7	-0.4	-0.4

表2 陸屋根面の $C_{pe}$

部位	風上端部より0.5aの領域	左に掲げる領域以外の領域
$C_{pe}$	-1.0	-0.5

表5 閉鎖型及び開放型の建築物の $C_{pi}$

形式	閉鎖型	開放型	
		風上開放	風下開放
$C_{pi}$	0及び-0.2	0.6	-0.4

【構造骨組の評価に用いる建屋外壁面（O/S以外）の風力係数】

外壁面の風力係数は、「建設省告示第 1454 号（平成 12 年 5 月 31 日制定）」に従い算定する。第 16-5 表に評価に用いた外壁面の風力係数を示す。なお、 $kz=1.0$  として算出する。また、内圧係数（ $C_{pi}$ ）については、風上側、風下側ともに作用するため、相殺される。

第 16-5 表 外壁面の風力係数

項目	風力係数
風上側	$C = 0.8$
風下側	$C = -0.4$

出典（一部抜粋）：「建設省告示第 1454 号（平成 12 年 5 月 31 日制定）」

第3 令第87条第1項の風力係数の数値は、次の図1から図7までに掲げる形状の建築物又は工作物にあってはそれぞれ当該形状に応じて表1から表9までに掲げる数値を用いて次の式により算出するものとし、その他の形状のものにあってはそれぞれ類似の形状のもの数値に準じて定めるものとする。ただし、風洞実験の結果に基づき算出する場合においては、当該数値によることができる。

$$C_f = C_{pe} - C_{pi}$$

この式において、 $C_f$ 、 $C_{pe}$ 及び $C_{pi}$ は、それぞれ次の数値を表すものとする。

$C_f$  風力係数  
 $C_{pe}$  閉鎖型及び開放型の建築物の外圧係数で、次の表1から表4までに掲げる数値（屋外から当該部分を垂直に押す方向を正とする。）  
 $C_{pi}$  閉鎖型及び開放型の建築物の内圧係数で、次の表5に掲げる数値（室内から当該部分を垂直に押す方向を正とする。）ただし、独立上家、ラチス構造物、金網その他の網状の構造物及び煙突その他の円筒形の構造物にあっては、次の表6から表9までに掲げる数値（図中の→の方向を正とする。）を $C_f$ とするものとする。

表1 壁面の $C_{pe}$

部位	風上壁面	側壁面		風下壁面
		風上端部より0.5aの領域	左に掲げる領域以外の領域	
$C_{pe}$	0.8kz	-0.7	-0.4	-0.4

【構造骨組の評価に用いる建屋外壁面（O/S部）の風力係数】

O/S部の風力係数は、「荷重指針」に従い算定を行う。第16-6表にO/S部（シリンダー部）の評価に用いた風力係数を示す。なお、ドーム部についても保守的にシリンダー部と同様に求める。

第16-6表 O/S部の風力係数

項目	風力係数	備考
O/S部	C=0.6	$C=1.2 \times 0.64 \times 0.75 \times 1.0 = 0.576 \Rightarrow 0.6$ $H=73.1$ $D=45.2$ $k_1=0.6418 \Rightarrow 0.64$ $k_2=0.75$ $k_z=1.0$

出典（一部抜粋）：「荷重指針」

A6.2.4 構造骨組用の風力係数

(1) 円形平面をもつ建築物の風力係数  $C_D$

円形平面をもつ建築物の風力係数は、表A6.12により定める。ただし、 $DU_H \geq 6(m^2/s)$ で、アスペクト比  $H/D$  が8以下の建築物にのみ適用する。

表 A6.12 円形平面をもつ建築物の風力係数  $C_D$

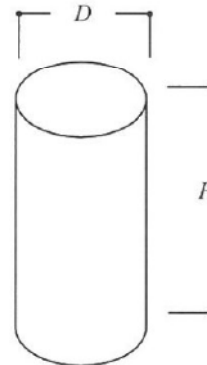
$$C_D = 1.2k_1k_2k_z$$

ここで、

$k_1$ ：アスペクト比の影響を表す係数

$k_2$ ：表面粗さの影響を表す係数

$k_z$ ：高さ方向分布係数で、表A6.8により定める。  
 ただし、 $0.8H < Z_b$  のときは  $k_z = 0.8^{2\alpha}$  とする。



$k_1$	
$H/D < 1$	$1 \leq H/D \leq 8$
0.6	$0.6(H/D)^{0.14}$

$k_2$	
滑らかな表面(金属, コンクリート表面, 平坦なカーテンウォール等)	0.75
粗な表面(外径の1%程度の凹凸のあるカーテンウォール等)	0.9
非常に粗な表面(外径の5%程度の凹凸)	1

$D$ ：建築物の外径 (m)

$H$ ：基準高さ (m)

$Z_b$ ：表A6.3に定める高さ (m)

$\alpha$ ：表A6.3に定めるパラメータ

【「鉄骨造部分の外壁及び屋根が飛散物とならないことの確認」に用いる風力係数】

鉄骨造部分の外壁及び屋根が飛散物とならないことの確認に用いる風力係数は、「建設省告示第1454号（平成12年5月31日制定）」に従い算定する。なお、風圧力による荷重及び気圧差による荷重がそれぞれ作用する方向を考慮し、複合荷重が最も大きくなるよう考慮し風力係数を設定する。第16-7表に評価に用いた外壁面及び屋根面の風力係数を示す。

第16-7表 外壁面及び屋根面の風力係数

項目	風力係数
外壁面	C = -0.7
屋根面	C = -1.0

出典（一部抜粋）：「建設省告示第1454号（平成12年5月31日制定）」

第3 令第87条第1項の風力係数の数値は、次の図1から図7までに掲げる形状の建築物又は工作物にあってはそれぞれ当該形状に応じて表1から表9までに掲げる数値を用いて次の式により算出するものとし、その他の形状のものにあってはそれぞれ類似の形状のもの数値に準じて定めるものとする。ただし、風洞実験の結果に基づき算出する場合には、当該数値によることができる。

$$C_f = C_{pe} - C_{pi}$$

この式において、 $C_f$ 、 $C_{pe}$ 及び $C_{pi}$ は、それぞれ次の数値を表すものとする。

$C_f$  風力係数  
 $C_{pe}$  閉鎖型及び開放型の建築物の外圧係数で、次の表1から表4までに掲げる数値（屋外から当該部分を垂直に押す方向を正とする。）  
 $C_{pi}$  閉鎖型及び開放型の建築物の内圧係数で、次の表5に掲げる数値（室内から当該部分を垂直に押す方向を正とする。）ただし、独立上家、ラチス構造物、金網その他の網状の構造物及び煙突その他の円筒形の構造物にあっては、次の表6から表9までに掲げる数値（図中の一方向を正とする。）を $C_f$ とするものとする。

表1 壁面の $C_{pe}$

部位	風上壁面	側壁面		風下壁面
		風上端部より0.5aの領域	左に掲げる領域以外の領域	
$C_{pe}$	0.8kz	-0.7	-0.4	-0.4

表2 陸屋根面の $C_{pe}$

部位	風上端部より0.5aの領域	左に掲げる領域以外の領域
$C_{pe}$	-1.0	-0.5

表5 閉鎖型及び開放型の建築物の $C_{pi}$

形式	閉鎖型	開放型	
		風上開放	風下開放
$C_{pi}$	0及び-0.2	0.6	-0.4

(c) 受圧面積の算定

**【構造骨組の評価に用いる受圧面積】**

風圧力による風荷重及び気圧差による荷重を算定する際の受圧面積は、建屋の形状を考慮して設定する。荷重は解析モデルに節点荷重として与えるが、節点荷重を算出する際の受圧面積は、「当該節点とその一つ下層の節点までの部材の高さ×受圧面の建屋幅」で算定した。

なお、受圧面積にはパラペットを考慮する。

**【「鉄骨造部分の外壁及び屋根が飛散物とならないことの確認」に用いる受圧面積】**

評価部材ごとに単位面積当たりの許容荷重を算定する。

(3) 気圧差による荷重の設定

建屋については、気圧差による荷重が最も大きくなる「閉じた施設」を想定し、内外気圧差による荷重 ( $W_P$ ) を式 (5) により設定する。

$$W_P = \Delta P \cdot A \quad \dots (5)$$

$\Delta P$  : 最大気圧低下量

$A$  : 施設の受圧面積

なお、 $\Delta P$ については、評価ガイドに従い以下の通り設定する。

$$\Delta P = \rho \cdot V_{Rm}^2 = 1.22 \text{ [kg/m}^3\text{]} \times (85 \text{ [m/s]})^2 = 8.81 \times 10^3 \text{ [N/m}^2\text{]} \Rightarrow 89 \text{ [hPa]} \text{ を採用する。}$$

(4) 衝撃荷重の設定

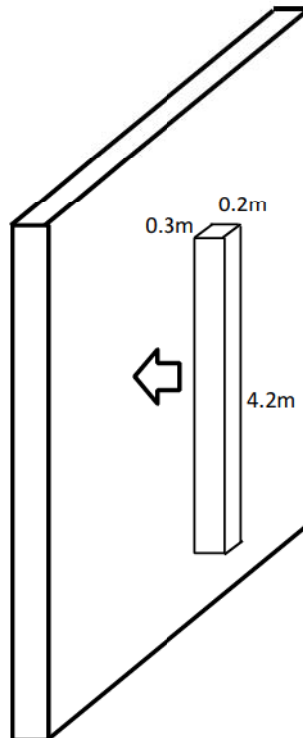
衝撃荷重は設計飛来物のうち、運動エネルギーが最も大きい鋼製材について算出する。評価に用いる衝撃荷重算定に用いた鋼製材の諸元を第16-8表に示す。

鋼製材による衝撃荷重の値は、重量分布を均一な直方体として Riera の方法\*により評価した。評価においては、設計飛来物と被衝突体の接触時間を考慮し、最も衝撃荷重が大きくなる第16-1図に示す衝突方向及び衝突面による荷重 (2,200kN) を採用するものとする。

※: J.D.Riera, “A Critical Reappraisal of Nuclear Power Plant Safety against Accidental Aircraft Impact”, Nuclear Engineering and Design 57, (1980)

第16-8表 評価に用いる衝撃荷重算定に用いた鋼製材の諸元

飛来物の種類	サイズ:長さ×幅×奥行(m)	質量(kg)	速度(m/s)	
			水平	鉛直
鋼製材	4.2×0.3×0.2	135	57	38



第16-1図 複合荷重 $W_{T2}$ に用いる衝撃荷重算出時の鋼製材衝突方向

## 5. 構造骨組の評価

### (1) 評価方法

鉄筋コンクリート部分については、設計竜巻による複合荷重 ( $W_{T1}$ ,  $W_{T2}$ ) に対し、地震応答解析モデルにおける各部材のせん断力の復元力特性 ( $Q-\gamma$  関係) によりせん断ひずみを算定し、鉄筋コンクリート造耐震壁の最大応答せん断ひずみの評価基準値 ( $2.0 \times 10^{-3}$ ) を下回ることを確認する。

また、鉄骨造部分については、設計竜巻による複合荷重により生じる応力に対して、地震応答解析モデルにおける各部材の荷重変形関係 ( $Q-\delta$  関係) から得られる水平変位より算定した層間変形角が評価基準値 (1/120) を下回ることを確認する。なお、波及的影響を及ぼし得る施設である循環水ポンプ建屋及びタービン建屋については、保有水平耐力が複合荷重により発生する層せん断力を上回ることを確認する。

竜巻防護施設の外殻となる施設及び竜巻防護施設に波及的影響評価を及ぼし得る施設の地震応答解析モデル図を、第 16-2 図～第 16-8 図に示す。地震応答解析モデルの各層に作用する風圧力による荷重 ( $W_w$ ) 及び気圧差による荷重 ( $W_p$ ) は、建屋の形状を考慮して算出した受圧面積に基づき算定する。

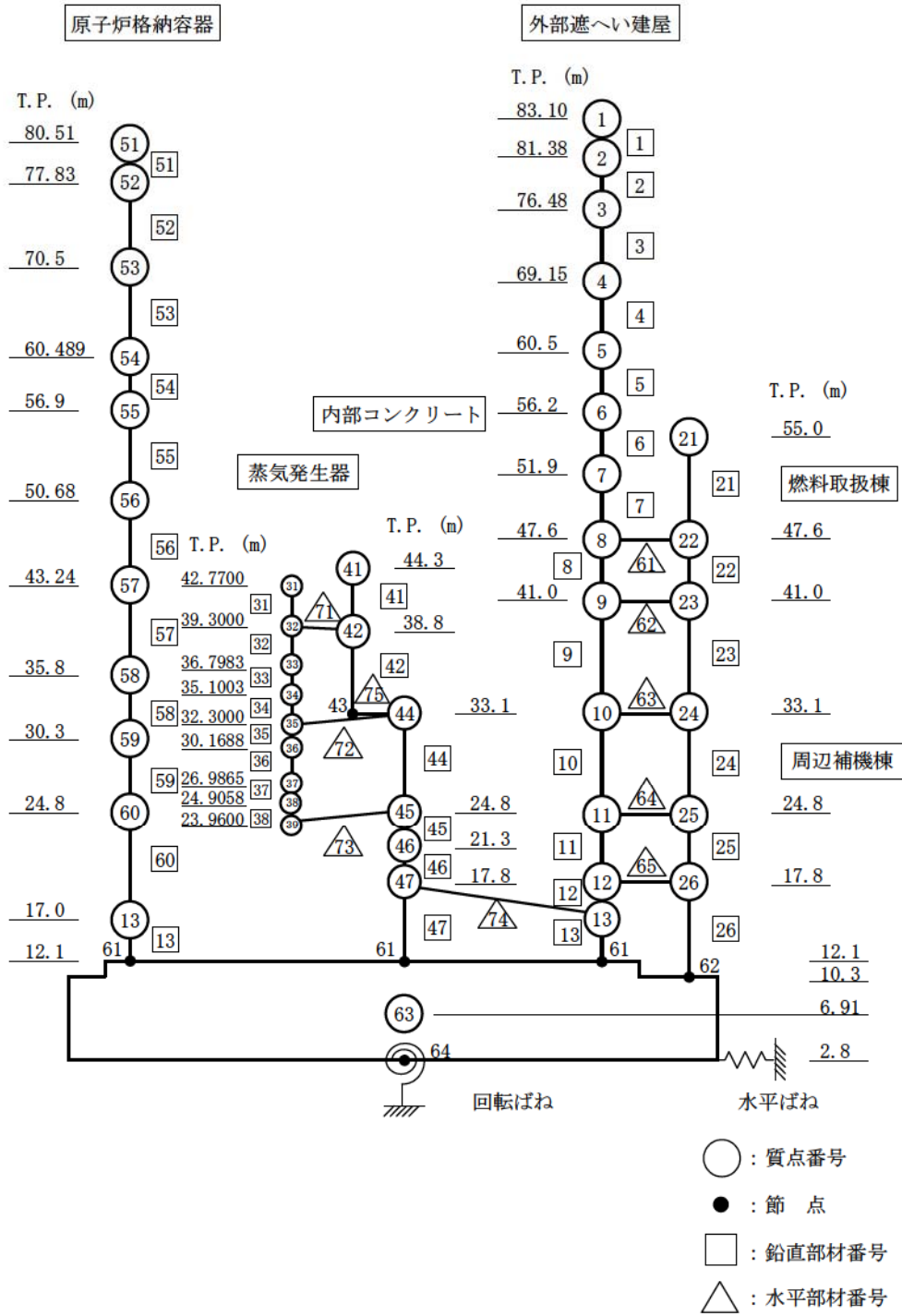
風圧力及び気圧差による荷重算定における受圧面積については、各建屋とも安全側の評価として、遮へい効果を考慮せず、南北・東西方向の検討を行う。

なお、気圧差による荷重 ( $W_p$ ) の算出にあたっては、風上側に生じる気圧差と風下側に生じる気圧差により、建屋全体における気圧差は相殺される。そこで、本検討では気圧差を風上側、または風下側のみに生じるものとして、建屋全体に作用する水平力を安全側に評価する。

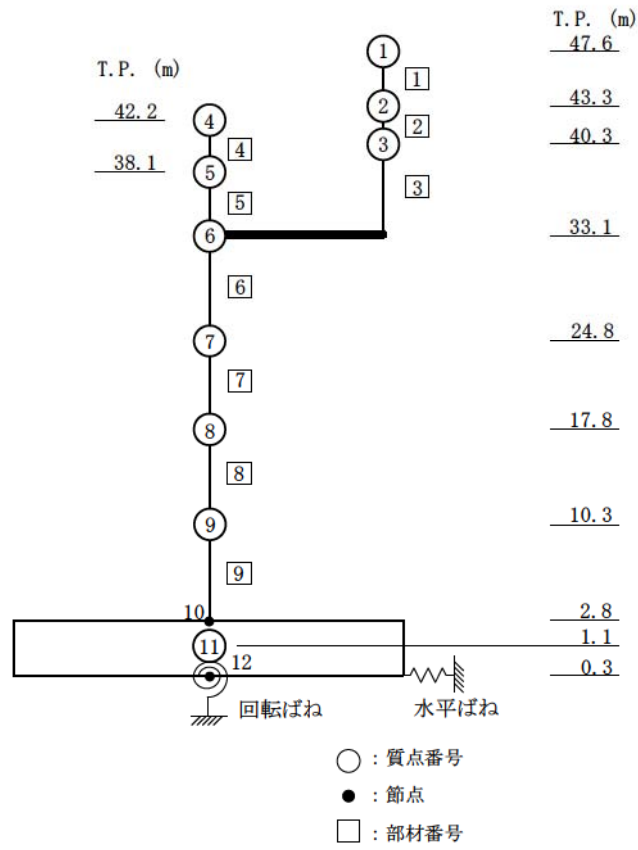
別紙-2 に、各建屋について算定した受圧面積を示す。

衝撃荷重 ( $W_M$ ) については、建屋の各層に作用する可能性があるが、地震応答解析モデルに対しては、各層に一定の層せん断力が発生するものとして考慮する。その際、層せん断力は設計飛来物である鋼製材による衝撃荷重を用いるものとした。

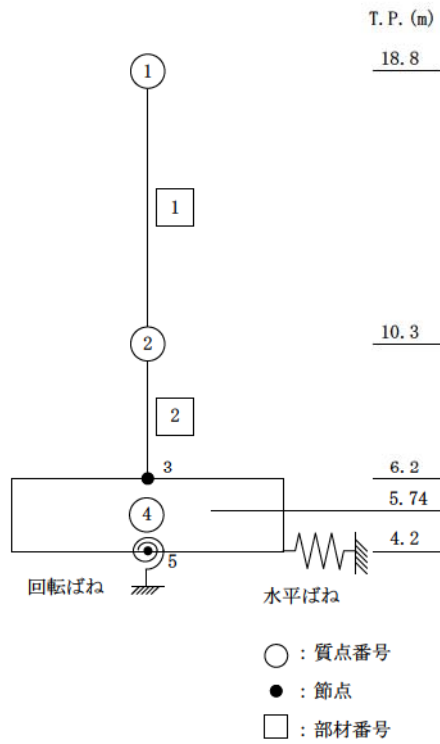




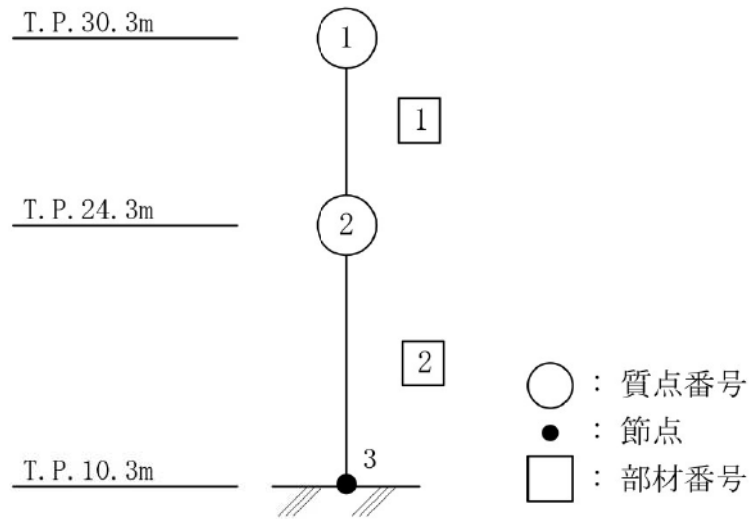
第 16-2 図 原子炉建屋の解析モデル図



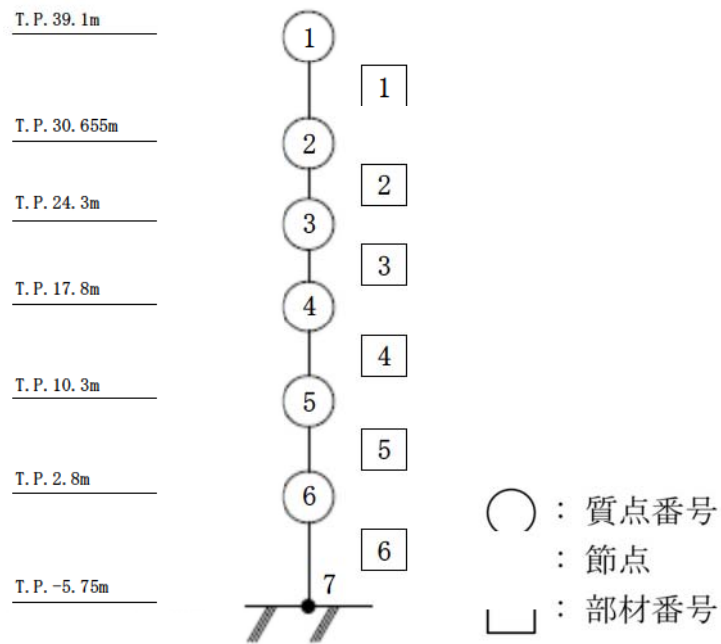
第 16-3 図 原子炉補助建屋の解析モデル図



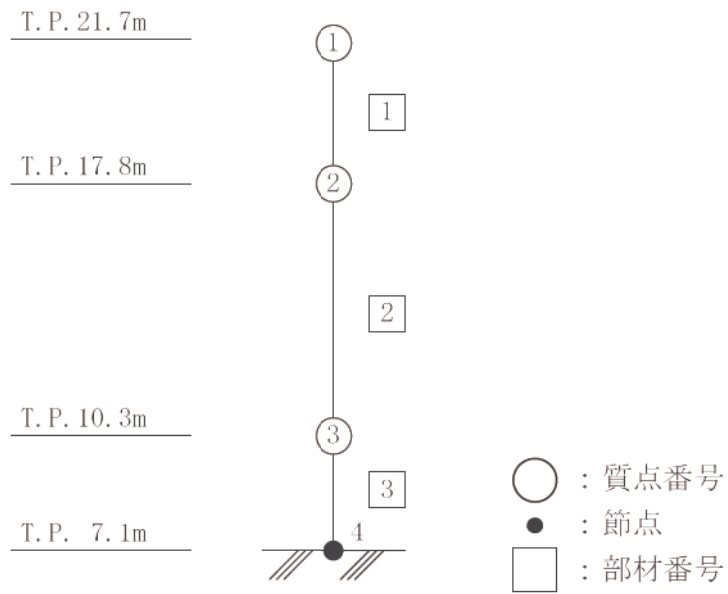
第 16-4 図 ディーゼル発電機建屋の解析モデル図



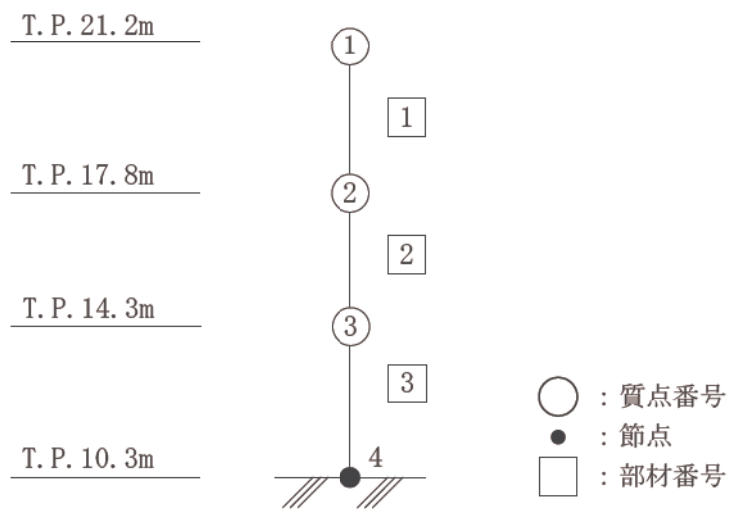
第 16-5 図 循環水ポンプ建屋の解析モデル図



第 16-6 図 タービン建屋の解析モデル図



第 16-7 図 電気建屋の解析モデル図



第 16-8 図 出入管理建屋の解析モデル図

## (2) 評価結果

複合荷重の算出過程及び建屋各層に生じる層せん断力の算出結果及び複合荷重に対する構造骨組の評価結果を第 16-9 表～第 16-16 表に示す。なお、鉄筋コンクリート造建屋及び鉄骨造の燃料取扱棟における評価結果には、裕度として、各部材に作用するせん断力と各部材の終局耐力との比較を記載した。

また、鉄骨造のうち波及的影響を及ぼし得る施設である循環水ポンプ建屋及びタービン建屋については、(保有水平耐力) / (竜巻により各部材に作用するせん断力) を裕度として記載した。

第 16-9 表 外部遮へい建屋の構造骨組の層せん断力算出結果と健全性評価結果

		風圧力による荷重			気圧差による荷重		衝撃荷重	複合荷重		評価結果		
部材 番号	見付面積	風力係数	層荷重	層せん断力	層荷重	層せん断力	層せん断力	$W_{T1}$	$W_{T2}$	最大歪	裕度確認	
	A	C	$P_D$	$W_W$	$\Delta P A$	$W_P$	$W_M$	$W_P$	$W_W + 0.5W_P + W_M$	RC部分 せん断 $\gamma$ $\leq 2000 \mu$	終局耐力	裕度
	( $m^2$ )		(kN)	(kN)	(kN)	(kN)	(kN)	(kN)	(kN)	(rad)	(kN)	
O/S												
4	390	0.6	1,427.4	3,001	3,471	7,298	2,200	7,298	8,850	1.434E-05	323,400	36.5
5	200	0.6	732.0	3,733	1,780	9,078	2,200	9,078	10,472	1.478E-05	384,800	36.7
6	200	0.6	732.0	4,465	1,780	10,858	2,200	10,858	12,094	1.705E-05	386,600	31.9
7	200	0.6	732.0	5,197	1,780	12,638	2,200	12,638	13,716	1.935E-05	426,500	31.0
8	300	0.6	1,098.0	6,295	2,670	15,308	2,200	15,308	16,149	2.279E-05	409,400	25.3

第16-10表 燃料取扱棟及び周辺補機棟の構造骨組の層せん断力算出結果と健全性評価結果

(E W方向)

部材 番号	風圧力による荷重					気圧差による荷重		衝撃荷重	複合荷重		評価結果				
	見付面積	風力係数	層荷重		層せん断力	層荷重	層せん断力	層せん断力	$W_{T1}$	$W_{T2}$	最大歪み・変形		裕度確認		
	A	C	$P_D$	$\Sigma P_D$	$W_W$	$\Delta P A$	$W_P$	$W_M$	$W_P$	$W_W + 0.5W_P + W_M$	RC部分 せん断 $\gamma$ $\leq 2000\mu$	S部 層間変形角 (せん断) $\leq 1/120$	終局耐力	裕度	
	( $m^2$ )		(kN)	(kN)	(kN)	(kN)	(kN)	(kN)	(kN)	(kN)	(rad)		(kN)		
FH/B・E/B															
21	ハブレット	40	1.2	292.8	1,464	1,464	1,424	1,424	2,200	1,424	4,376	-	1/6886	88,800	20.2
	風上	160	0.8	780.8											
	風下	160	0.4	390.4											
22	ハブレット	150	1.2	1,098.0	5,051	6,515	4,806	6,230	2,200	6,230	11,830	1.440E-05	-	456,400	38.5
	風上	540	0.8	2,635.2											
	風下	540	0.4	1,317.6											
23	風上	640	0.8	3,123.2	4,685	11,200	5,696	11,926	2,200	11,926	19,363	1.177E-05	-	923,800	47.7
	風下	640	0.4	1,561.6											
24	風上	670	0.8	3,269.6	4,904	16,104	5,963	17,889	2,200	17,889	27,249	8.166E-06	-	1,914,000	70.2
	風下	670	0.4	1,634.8											
25	風上	570	0.8	2,781.6	4,172	20,276	5,073	22,962	2,200	22,962	33,957	1.165E-05	-	1,617,000	47.6
	風下	570	0.4	1,390.8											
26	風上	630	0.8	3,074.4	4,612	24,888	5,607	28,569	2,200	28,569	41,373	1.528E-05	-	1,384,000	33.4
	風下	630	0.4	1,537.2											

(N S方向)

部材 番号	風圧力による荷重					気圧差による荷重		衝撃荷重	複合荷重		評価結果				
	見付面積	風力係数	層荷重		層せん断力	層荷重	層せん断力	層せん断力	$W_{T1}$	$W_{T2}$	最大歪み・変形		裕度確認		
	A	C	$P_D$	$\Sigma P_D$	$W_W$	$\Delta P A$	$W_P$	$W_M$	$W_P$	$W_W + 0.5W_P + W_M$	RC部分 せん断 $\gamma$ $\leq 2000\mu$	S部 層間変形角 (せん断) $\leq 1/120$	終局耐力	裕度	
	( $m^2$ )		(kN)	(kN)	(kN)	(kN)	(kN)	(kN)	(kN)	(kN)	(rad)		(kN)		
FH/B・E/B															
21	ハブレット	60	1.2	439.2	2,635	2,635	2,670	2,670	2,200	2,670	6,170	-	1/694	41,360	6.7
	風上	300	0.8	1,464.0											
	風下	300	0.4	732.0											
22	ハブレット	100	1.2	732.0	4,246	6,881	4,272	6,942	2,200	6,942	12,552	2.454E-05	-	285,700	22.7
	風上	480	0.8	2,342.4											
	風下	480	0.4	1,171.2											
23	風上	460	0.8	2,244.8	3,367	10,248	4,094	11,036	2,200	11,036	17,966	9.234E-06	-	1,079,000	60.0
	風下	460	0.4	1,122.4											
24	風上	490	0.8	2,391.2	3,587	13,835	4,361	15,397	2,200	15,397	23,734	8.041E-06	-	1,716,000	72.3
	風下	490	0.4	1,195.6											
25	風上	410	0.8	2,000.8	3,001	16,836	3,649	19,046	2,200	19,046	28,559	9.736E-06	-	1,692,000	59.2
	風下	410	0.4	1,000.4											
26	風上	460	0.8	2,244.8	3,367	20,203	4,094	23,140	2,200	23,140	33,973	1.259E-05	-	1,428,000	42.0
	風下	460	0.4	1,122.4											

第 16-11 表 原子炉補助建屋の構造骨組の層せん断力算出結果と健全性評価結果（その 1）

（E W方向）

		風圧力による荷重				気圧差による荷重		衝撃荷重	複合荷重		評価結果			
部材 番号	見付面積	風力係数	層荷重		層せん断力	層荷重	層せん断力	層せん断力	$W_{T1}$	$W_{T2}$	最大歪	裕度確認		
	A	C	$P_D$	$\Sigma P_D$	$W_W$	$\Delta P A$	$W_P$	$W_M$	$W_P$	$W_W + 0.5W_P + W_M$	RC部分 せん断 $\gamma$ $\leq 2000 \mu$	終局耐力	裕度	
	( $m^2$ )		(kN)	(kN)	(kN)	(kN)	(kN)	(kN)	(kN)	(kN)	(rad)	(kN)		
A/B 上部														
1	ハラベット	30	1.2	219.6	805	805	712	712	2,200	712	3,361	2.668E-05	71,990	21.4
	風上	80	0.8	390.4										
	風下	80	0.4	195.2										
2	風上	50	0.8	244.0	366	1,171	445	1,157	2,200	1,157	3,950	2.764E-05	77,200	19.5
	風下	50	0.4	122.0										
3	ハラベット	10	1.2	73.2	1,244	2,415	1,424	2,581	2,200	2,581	5,906	2.606E-05	120,000	20.3
	風上	160	0.8	780.8										
	風下	160	0.4	390.4										
A/B 上部														
4	ハラベット	40	1.2	292.8	1,757	1,757	1,780	1,780	2,200	1,780	4,847	3.163E-05	81,390	16.7
	風上	200	0.8	976.0										
	風下	200	0.4	488.0										
5	-	-	-	-	1,757	-	1,780	2,200	1,780	4,847	2.302E-05	108,100	22.3	
A/B 下部														
6	ハラベット	90	1.2	658.8	5,856	10,028	6,319	10,680	2,200	10,680	17,568	1.598E-05	600,700	34.1
	風上	710	0.8	3,464.8										
	風下	710	0.4	1,732.4										
7	ハラベット	30	1.2	219.6	3,440	13,468	3,916	14,596	2,200	14,596	22,966	9.580E-06	1,323,000	57.6
	風上	440	0.8	2,147.2										
	風下	440	0.4	1,073.6										
8	風上	490	0.8	2,391.2	3,587	17,055	4,361	18,957	2,200	18,957	28,734	1.428E-05	1,127,000	39.2
	風下	490	0.4	1,195.6										



第16-11表 原子炉補助建屋の構造骨組の層せん断力算出結果と健全性評価結果（その2）

(NS方向)

		風圧力による荷重				気圧差による荷重		衝撃荷重	複合荷重		評価結果			
部材 番号	見付面積	風力係数	層荷重		層せん断力	層荷重	層せん断力	層せん断力	$W_{T1}$	$W_{T2}$	最大歪	裕度確認		
	A	C	$P_D$	$\Sigma P_D$	$W_w$	$\Delta P_A$	$W_P$	$W_M$	$W_P$	$W_w + 0.5W_P + W_M$	RC部分 せん断 $\gamma$ $\leq 2000\mu$	終局耐力	裕度	
	( $m^2$ )		(kN)	(kN)	(kN)	(kN)	(kN)	(kN)	(kN)	(kN)	(rad)	(kN)		
A/B 上部														
1	ハブレット	30	1.2	219.6	805	805	712	712	2,200	712	3,361	2.954E-05	66,420	19.7
	風上	80	0.8	390.4										
	風下	80	0.4	195.2										
2	風上	50	0.8	244.0	366	1,171	445	1,157	2,200	1,157	3,950	2.821E-05	75,080	19.0
	風下	50	0.4	122.0										
3	ハブレット	20	1.2	146.4	1,025	2,196	1,068	2,225	2,200	2,225	5,509	2.280E-05	128,900	23.3
	風上	120	0.8	585.6										
	風下	120	0.4	292.8										
A/B 上部														
4	ハブレット	30	1.2	219.6	1,171	1,171	1,157	1,157	2,200	1,157	3,950	2.347E-05	96,140	24.3
	風上	130	0.8	634.4										
	風下	130	0.4	317.2										
5	-	-	-	-	1,171	-	1,157	2,200	1,157	3,950	2.020E-05	109,000	27.5	
A/B 下部														
6	ハブレット	70	1.2	512.4	4,319	7,686	4,628	8,010	2,200	8,010	13,891	1.407E-05	633,600	45.6
	風上	520	0.8	2,537.6										
	風下	520	0.4	1,268.8										
7	ハブレット	30	1.2	219.6	3,294	10,980	3,738	11,748	2,200	11,748	19,054	9.887E-06	1,192,000	62.5
	風上	420	0.8	2,049.6										
	風下	420	0.4	1,024.8										
8	風上	470	0.8	2,293.6	3,440	14,420	4,183	15,931	2,200	15,931	24,586	1.167E-05	1,199,000	48.7
	風下	470	0.4	1,146.8										

第 16-12 表 ディーゼル発電機建屋の構造骨組の層せん断力算出結果と健全性評価結果

(E W方向)

		風圧力による荷重				気圧差による荷重		衝撃荷重	複合荷重		評価結果			
部材 番号	見付面積	風力係数	層荷重		層せん断力	層荷重	層せん断力	層せん断力	$W_{T1}$	$W_{T2}$	最大歪	裕度確認		
	A	C	$P_D$	$\Sigma P_D$	$W_W$	$\Delta P A$	$W_P$	$W_M$	$W_P$	$W_W + 0.5W_P + W_M$	RC部分 せん断 $\gamma$ $\leq 2000 \mu$	終局耐力	裕度	
	( $m^2$ )		(kN)	(kN)	(kN)	(kN)	(kN)	(kN)	(kN)	(kN)	(kN)	(rad)	(kN)	
DG/B														
1	パラベット	50	1.2	366.0	2,416	2,416	1,780	1,780	2,200	1,780	5,506	2.034E-05	154,500	28.0
	塔屋	80	1.2	585.6										
	風上	200	0.8	976.0										
	風下	200	0.4	488.0										

(N S方向)

		風圧力による荷重				気圧差による荷重		衝撃荷重	複合荷重		評価結果			
部材 番号	見付面積	風力係数	層荷重		層せん断力	層荷重	層せん断力	層せん断力	$W_{T1}$	$W_{T2}$	最大歪	裕度確認		
	A	C	$P_D$	$\Sigma P_D$	$W_W$	$\Delta P A$	$W_P$	$W_M$	$W_P$	$W_W + 0.5W_P + W_M$	RC部分 せん断 $\gamma$ $\leq 2000 \mu$	終局耐力	裕度	
	( $m^2$ )		(kN)	(kN)	(kN)	(kN)	(kN)	(kN)	(kN)	(kN)	(kN)	(rad)	(kN)	
DG/B														
1	パラベット	50	1.2	366.0	2,050	2,050	1,691	1,691	2,200	1,691	5,096	5.213E-05	56,200	11.0
	塔屋	40	1.2	292.8										
	風上	190	0.8	927.2										
	風下	190	0.4	463.6										

第 16-13 表 循環水ポンプ建屋の構造骨組の層せん断力算出結果と健全性評価結果 (その 1)  
(取水ピットポンプ室上屋)

(E W方向)

		風圧力による荷重				気圧差による荷重		衝撃荷重	複合荷重		評価結果		
部材 番号	見付面積	風力係数	層荷重		層せん断力	層荷重	層せん断力	層せん断力	$W_{T1}$	$W_{T2}$	裕度確認		
	A	C	$P_D$	$\Sigma P_D$	$W_W$	$\Delta P A$	$W_P$	$W_M$	$W_P$	$W_W + 0.5W_P + W_M$	保有水平 耐力	裕度	
	( $m^2$ )		(kN)	(kN)	(kN)	(kN)	(kN)	(kN)	(kN)	(kN)	(kN)		
CWP/B (ポンプ室上屋)													
1	パラペット	70	1.2	512.4	2,782	2,782	2,225	2,225	2,200	2,225	6,095	7,233	1.1
	塔屋	60	1.2	439.2									
	風上	250	0.8	1,220.0									
	風下	250	0.4	610.0									
2	-	-	-	-	2,782	-	2,225	2,200	2,225	6,095	8,472	1.3	

(N S方向)

		風圧力による荷重				気圧差による荷重		衝撃荷重	複合荷重		評価結果		
部材 番号	見付面積	風力係数	層荷重		層せん断力	層荷重	層せん断力	層せん断力	$W_{T1}$	$W_{T2}$	裕度確認		
	A	C	$P_D$	$\Sigma P_D$	$W_W$	$\Delta P A$	$W_P$	$W_M$	$W_P$	$W_W + 0.5W_P + W_M$	保有水平 耐力	裕度	
	( $m^2$ )		(kN)	(kN)	(kN)	(kN)	(kN)	(kN)	(kN)	(kN)	(kN)		
CWP/B (ポンプ室上屋)													
1	パラペット	120	1.2	878.4	3,562	3,562	3,827	3,827	2,200	3,827	7,676	17,650	2.2
	塔屋	80	1.2	585.6									
	風上	430	0.8	2,098.4									
2	-	-	-	-	3,562	-	3,827	2,200	3,827	7,676	21,510	2.8	

第 16-13 表 循環水ポンプ建屋の構造骨組の層せん断力算出結果と健全性評価結果 (その 2)  
(分解ヤード上屋)

(E W 方向)

		風圧力による荷重				気圧差による荷重			衝撃荷重	複合荷重		評価結果	
部材 番号	見付面積	風力係数	層荷重		層せん断力	層荷重	層せん断力	層せん断力	$W_{T1}$	$W_{T2}$	裕度確認		
	A	C	$P_D$	$\Sigma P_D$	$W_W$	$\Delta P A$	$W_P$	$W_M$	$W_P$	$W_W + 0.5W_P + W_M$	保有水平 耐力	裕度	
	( $m^2$ )		(kN)	(kN)	(kN)	(kN)	(kN)	(kN)	(kN)	(kN)	(kN)		
CWP/B (ヤード上屋)													
1	ハラベット	120	1.2	878.4	3,806	3,806	3,560	3,560	2,200	3,560	7,786	10,650	1.3
	風上	400	0.8	1,952.0									
	風下	400	0.4	976.0									
2	-	-	-	-	3,806	-	3,560	2,200	3,560	7,786	13,030	1.6	

(N S 方向)

		風圧力による荷重				気圧差による荷重			衝撃荷重	複合荷重		評価結果	
部材 番号	見付面積	風力係数	層荷重		層せん断力	層荷重	層せん断力	層せん断力	$W_{T1}$	$W_{T2}$	裕度確認		
	A	C	$P_D$	$\Sigma P_D$	$W_W$	$\Delta P A$	$W_P$	$W_M$	$W_P$	$W_W + 0.5W_P + W_M$	保有水平 耐力	裕度	
	( $m^2$ )		(kN)	(kN)	(kN)	(kN)	(kN)	(kN)	(kN)	(kN)	(kN)		
CWP/B (ヤード上屋)													
1	ハラベット	120	1.2	878.4	2,977	2,977	3,827	3,827	2,200	3,827	7,091	28,800	4.0
	風上	430	0.8	2,098.4									
2	-	-	-	-	2,977	-	3,827	2,200	3,827	7,091	45,310	6.3	

第 16-14 表 タービン建屋の構造骨組の層せん断力算出結果と健全性評価結果

(E W方向)

		風圧力による荷重				気圧差による荷重		衝撃荷重	複合荷重		評価結果		
部材 番号	見付面積	風力係数	層荷重		層せん断力	層荷重	層せん断力	層せん断力	W <sub>T1</sub>	W <sub>T2</sub>	裕度確認		
	A		C	P <sub>D</sub>							Σ P <sub>D</sub>	W <sub>W</sub>	Δ P A
	(m <sup>2</sup> )		(kN)	(kN)	(kN)	(kN)	(kN)	(kN)	(kN)	(kN)	(kN)	(kN)	
T/B													
1	ハラベット	550	1.2	4,026.0	10,907	10,907	8,188	8,188	2,200	8,188	17,201	23,770	1.3
	塔屋	20	1.2	146.4									
	風上	920	0.8	4,489.6									
	風下	920	0.4	2,244.8									
2	ハラベット	30	1.2	219.6	5,270	16,177	6,141	14,329	2,200	14,329	25,542	27,740	1.0
	風上	690	0.8	3,367.2									
	風下	690	0.4	1,683.6									
3	ハラベット	80	1.2	585.6	5,783	21,960	6,319	20,648	2,200	20,648	34,484	38,790	1.1
	風上	710	0.8	3,464.8									
	風下	710	0.4	1,732.4									
4	ハラベット	10	1.2	73.2	6,295	28,255	7,565	28,213	2,200	28,213	44,562	52,240	1.1
	風上	850	0.8	4,148.0									
	風下	850	0.4	2,074.0									

(N S方向)

		風圧力による荷重				気圧差による荷重		衝撃荷重	複合荷重		評価結果		
部材 番号	見付面積	風力係数	層荷重		層せん断力	層荷重	層せん断力	層せん断力	W <sub>T1</sub>	W <sub>T2</sub>	裕度確認		
	A		C	P <sub>D</sub>							Σ P <sub>D</sub>	W <sub>W</sub>	Δ P A
	(m <sup>2</sup> )		(kN)	(kN)	(kN)	(kN)	(kN)	(kN)	(kN)	(kN)	(kN)	(kN)	
T/B													
1	ハラベット	190	1.2	1,390.8	6,002	6,002	4,005	4,005	2,200	4,005	10,205	28,930	2.8
	塔屋	180	1.2	1,317.6									
	風上	450	0.8	2,196.0									
	風下	450	0.4	1,098.0									
2	ハラベット	20	1.2	146.4	2,708	8,710	3,115	7,120	2,200	7,120	14,470	33,750	2.3
	風上	350	0.8	1,708.0									
	風下	350	0.4	854.0									
3	ハラベット	30	1.2	219.6	3,074	11,784	3,471	10,591	2,200	10,591	19,280	47,200	2.4
	風上	390	0.8	1,903.2									
	風下	390	0.4	951.6									
4	ハラベット	10	1.2	73.2	3,514	15,298	4,183	14,774	2,200	14,774	24,885	110,300	4.4
	風上	470	0.8	2,293.6									
	風下	470	0.4	1,146.8									

第 16-15 表 電気建屋の構造骨組の層せん断力算出結果と健全性評価結果

(EW方向)

		風圧力による荷重				気圧差による荷重		衝撃荷重	複合荷重		評価結果			
部材 番号	見付面積	風力係数	層荷重		層せん断力	層荷重	層せん断力	層せん断力	$W_{T1}$	$W_{T2}$	最大歪	裕度確認		
	A	C	$P_D$	$\Sigma P_D$	$W_w$	$\Delta P A$	$W_p$	$W_M$	$W_p$	$W_w + 0.5W_p + W_M$	RC部分 せん断 $\gamma$ $\leq 2000 \mu$	終局耐力	裕度	
	( $m^2$ )		(kN)	(kN)	(kN)	(kN)	(kN)	(kN)	(kN)	(kN)	(rad)	(kN)		
EL/B														
1	ハレット	60	1.2	439.2	1,757	1,757	1,335	1,335	2,200	1,335	4,625	2.155E-05	76,970	16.6
	塔屋	30	1.2	219.6										
	風上	150	0.8	732.0										
	風下	150	0.4	366.0										
2	ハレット	10	1.2	73.2	1,391	3,148	1,602	2,937	2,200	2,937	6,817	3.966E-05	75,500	11.0
	風上	180	0.8	878.4										
	風下	180	0.4	439.2										

(NS方向)

		風圧力による荷重				気圧差による荷重		衝撃荷重	複合荷重		評価結果			
部材 番号	見付面積	風力係数	層荷重		層せん断力	層荷重	層せん断力	層せん断力	$W_{T1}$	$W_{T2}$	最大歪	裕度確認		
	A	C	$P_D$	$\Sigma P_D$	$W_w$	$\Delta P A$	$W_p$	$W_M$	$W_p$	$W_w + 0.5W_p + W_M$	RC部分 せん断 $\gamma$ $\leq 2000 \mu$	終局耐力	裕度	
	( $m^2$ )		(kN)	(kN)	(kN)	(kN)	(kN)	(kN)	(kN)	(kN)	(rad)	(kN)		
EL/B														
1	ハレット	140	1.2	1,024.8	4,172	4,172	3,649	3,649	2,200	3,649	8,197	8.269E-05	58,970	7.1
	塔屋	20	1.2	146.4										
	風上	410	0.8	2,000.8										
	風下	410	0.4	1,000.4										
2	ハレット	10	1.2	73.2	3,148	7,320	3,738	7,387	2,200	7,387	13,214	1.790E-04	45,240	3.4
	風上	420	0.8	2,049.6										
	風下	420	0.4	1,024.8										

第 16-16 表 出入管理建屋の構造骨組の層せん断力算出結果と健全性評価結果

(E W方向)

		風圧力による荷重				気圧差による荷重		衝撃荷重	複合荷重		評価結果			
部材 番号	見付面積	風力係数	層荷重		層せん断力	層荷重	層せん断力	層せん断力	$W_{T1}$	$W_{T2}$	最大歪	裕度確認		
	A	C	$P_D$	$\Sigma P_D$	$W_W$	$\Delta P A$	$W_P$	$W_M$	$W_P$	$W_W + 0.5W_P + W_M$	RC部分 せん断 $\gamma$ $\leq 2000 \mu$	終局耐力	裕度	
	( $m^2$ )		(kN)	(kN)	(kN)	(kN)	(kN)	(kN)	(kN)	(kN)	(kN)	(rad)	(kN)	
AC/B														
1	ハラベット	80	1.2	585.6	1,830	1,830	1,513	1,513	2,200	1,513	4,787	9.296E-05	20,950	4.3
	風上	170	0.8	829.6										
	風下	170	0.4	414.8										
2	ハラベット	40	1.2	292.8	1,464	3,294	1,424	2,937	2,200	2,937	6,963	7.297E-05	34,770	4.9
	風上	160	0.8	780.8										
	風下	160	0.4	390.4										
3	ハラベット	20	1.2	146.4	1,610	4,904	1,780	4,717	2,200	4,717	9,463	6.556E-05	60,240	6.3
	風上	200	0.8	976.0										
	風下	200	0.4	488.0										

(N S方向)

		風圧力による荷重				気圧差による荷重		衝撃荷重	複合荷重		評価結果			
部材 番号	見付面積	風力係数	層荷重		層せん断力	層荷重	層せん断力	層せん断力	$W_{T1}$	$W_{T2}$	最大歪	裕度確認		
	A	C	$P_D$	$\Sigma P_D$	$W_W$	$\Delta P A$	$W_P$	$W_M$	$W_P$	$W_W + 0.5W_P + W_M$	RC部分 せん断 $\gamma$ $\leq 2000 \mu$	終局耐力	裕度	
	( $m^2$ )		(kN)	(kN)	(kN)	(kN)	(kN)	(kN)	(kN)	(kN)	(kN)	(rad)	(kN)	
AC/B														
1	ハラベット	80	1.2	585.6	1,830	1,830	1,513	1,513	2,200	1,513	4,787	1.176E-04	22,170	4.6
	風上	170	0.8	829.6										
	風下	170	0.4	414.8										
2	ハラベット	50	1.2	366.0	1,318	3,148	1,157	2,670	2,200	2,670	6,683	8.475E-05	34,020	5.0
	風上	130	0.8	634.4										
	風下	130	0.4	317.2										
3	風上	150	0.8	732.0	1,098	4,246	1,335	4,005	2,200	4,005	8,449	6.079E-05	63,910	7.5
	風下	150	0.4	366.0										

## 6. 鉄骨造部分の外壁及び屋根が飛散物とならないことの確認

外壁及び屋根は、風圧力による荷重 ( $W_w$ ) 及び気圧差による荷重 ( $W_p$ ) が衝撃荷重 ( $W_M$ ) とは逆向きの建屋の内側から外側方向に作用する。これらの荷重に対し、鉄骨造部分の外壁及び屋根が破損の恐れがあると考えられるため、鉄骨造である燃料取扱棟の外壁及び屋根について検討を実施した。

### (1) 外壁に対する評価荷重

外壁の評価に用いる荷重としては、風圧力による荷重、気圧差による荷重が作用する方向を考慮し、最大となる複合荷重に対し検討を行う。

建屋外側から内側に作用する荷重を正とすると、複合荷重 ( $W_{T1}$ ,  $W_{T2}^*$ ) は以下の通りとなる。

$$W_{T1} = W_p = -8.9 \text{ [kN/m}^2\text{]}$$

$$W_{T2} = W_w + 0.5 \times W_p = -6.1 \times C - 0.5 \times 8.9 = -6.1 \times 0.7 - 0.5 \times 8.9 = -8.72 \text{ [kN/m}^2\text{]}$$

※：屋外方向への荷重に対して、衝撃荷重 ( $W_M$ ) は考慮しない

したがって、複合荷重のうち荷重が大きい  $W_{T1}$  に対して検討を行う。

### (2) 屋根に対する評価荷重

屋根の評価に用いる荷重としては、風圧力による荷重、気圧差による荷重が作用する方向を考慮し、最大となる複合荷重に対し検討を行う。

建屋外側から内側に作用する荷重を正とすると、複合荷重 ( $W_{T1}$ ,  $W_{T2}^*$ ) は以下の通りとなる。

$$W_{T1} = W_p = -8.9 \text{ [kN/m}^2\text{]}$$

$$W_{T2} = W_w + 0.5 \times W_p = -6.1 \times C - 0.5 \times 8.9 = -6.1 \times 1.0 - 0.5 \times 8.9 = -10.55 \text{ [kN/m}^2\text{]}$$

※：屋外方向への荷重に対して、衝撃荷重 ( $W_M$ ) は考慮しない

したがって、複合荷重のうち荷重が大きい  $W_{T2}$  に対して検討を行う。



(3) 評価結果

外壁は構成部材である波板・胴縁・間柱について、屋根はコンクリート屋根スラブ・鉄骨梁について検討を行い、(部材の終局耐力から算定される許容荷重) / (竜巻による荷重) を部材の裕度とし、1.0以上あることを第16-17表の通り確認した。

検討部材及び計算結果の詳細については、別紙-4に記載する。

また、鉄骨造部分の外壁については、設計飛来物の貫通により開口部が発生する可能性があることから、開口部を想定した場合の屋根スラブへの吹上げ荷重の検討を行っており、結果については、別紙-5に記載する。

第16-17表 外壁及び屋根に対する影響評価

		竜巻による荷重 (kN/m <sup>2</sup> )	許容荷重 (kN/m <sup>2</sup> )	裕度
外壁	波板	8.9	30.8	3.4
	胴縁		11.1	1.2
	間柱		13.6	1.5
屋根	スラブ	10.55	70.3	6.6
	大梁		65.2	6.1
	小梁		39.5	3.7

## 7. 設計飛来物の衝突に対する評価

### (1) 評価方法

屋根及び外壁への設計飛来物の衝突に対し、裏面剥離または貫通を生じないための必要最小厚さを算出し、評価部材の最小厚さと比較することで貫通または裏面剥離の有無を確認する。貫通または裏面剥離が生じないための必要最小壁厚さの評価は、以下に記載する評価式を用いる。評価式に関する詳細は、別紙-3に示す。

なお、屋根に裏面剥離が発生する場合においては、剥離したコンクリートが飛散しないことをデッキプレートの有無により確認する。

貫通及び裏面剥離評価は、修正 NDRC 式 ((6) 式)、Degen 式 ((7) 式) 及び Chang 式 ((8) 式) に基づいて評価を実施する。このうち貫通評価については (6) 式に示す修正 NDRC 式を用いて貫入深さ  $x_c$  を求め、Degen 式による (7) 式により貫通限界厚さを求める。

また、裏面剥離評価は Chang による (8) 式により裏面剥離限界厚さを求める。

$$x_c = \alpha_c \sqrt{4KWND \left( \frac{V}{1000D} \right)^{1.8}}, \text{ for } \frac{x_c}{\alpha_c D} < 2.0 \quad \dots (6)$$

$$t_p = \alpha_p D \left\{ 2.2 \left( \frac{x_c}{\alpha_c D} \right) - 0.3 \left( \frac{x_c}{\alpha_c D} \right)^2 \right\}, \text{ for } \frac{x_c}{\alpha_c D} \leq 1.52 \quad \dots (7)$$

$$t_s = \alpha_s 1.84 \left\{ \frac{200}{V} \right\}^{0.13} \frac{(MV^2)^{0.4}}{(D/12)^{0.2} (144Fc)^{0.4}} \quad \dots (8)$$

$x_c$ : 貫入深さ (in)	$\alpha_c$ : 飛来物低減係数	$K$ : $180/\sqrt{Fc}$
$W$ : 飛来物重量 (lb)	$N$ : 形状係数	$D$ : 飛来物直径 (in)
$V$ : 衝突速度 (ft/s)	$Fc$ : コンクリート強度 (psi)	
$t_p$ : 貫通厚さ (in)	$\alpha_p$ : 飛来物低減係数	
$t_s$ : 裏面剥離厚さ (ft)	$\alpha_s$ : 飛来物低減係数	$M$ : 質量 (lb/ (ft/s <sup>2</sup> ))

### (2) 評価結果

飛来物の衝突に対し貫通または裏面剥離を生じないための必要最小壁厚さと、建屋の外壁または屋根の最小厚さとの比較を第 16-18 表に示す。

第 16-18 表 設計飛来物による貫通、裏面剥離評価結果

建屋	方向	必要最小厚さ※1		評価対象部材		評価結果		備考
		貫通 (cm)	裏面剥離 (cm)	位置 T.P. (m)	最小厚さ (cm)	貫通	裏面剥離	
原子炉建屋 (外部遮へい建屋)	水平	28	45	41.0~60.5 (シリンダー部)	100	○	○	デッキプレートにより剥離コンクリートは飛散しない
	鉛直	20	34	60.5~83.1 (ドーム部)	30	○	○	
原子炉建屋 (周辺補機棟)	水平	29	49	10.3~49.0 (外壁)	40	○	○	建屋内壁に施工されている鋼板により剥離コンクリートは飛散しない
	鉛直	21	37	49.0 (屋根スラブ)	48	○	○	
原子炉建屋 (燃料取扱棟)	水平	—	—	47.6~55.0 (鉄骨部)	—	×	—	貫通を前提とし、使用済燃料ピット及び新燃料貯蔵庫内への設計飛来物の侵入について影響評価を実施
	鉛直	21	37	47.6, 55.0	26	○	○	
原子炉補助建屋	水平	29	49	10.3~47.6 (外壁)	35	○	○	建屋内壁に施工されている鋼板により剥離コンクリートは飛散しない
	鉛直	21	37	33.1 (屋根スラブ)	38	○	○	
ディーゼル発電機建屋	水平	29	49	18.8~22.8 (塔屋部外壁)	29※2	○	○	建屋内壁に施工されている鋼板により剥離コンクリートは飛散しない
	鉛直	21	37	18.8 (屋根スラブ)	26	○	○	
A1, A2-燃料油貯油槽タンク室	鉛直	21	37	地中構造物	70	○	○	デッキプレートにより剥離コンクリートは飛散しない
B1, B2-燃料油貯油槽タンク室	鉛直	20	34	地中構造物	70	○	○	
取水ピットポンプ室	鉛直	—	—	地中構造物	—	×	—	当該室の上屋(外壁及び屋根)の貫通を前提とし、当該室上部の開口部から当該室への設計飛来物の侵入について影響評価を実施
	鉛直	—	—	地中構造物	—	×	—	

※1：小数点以下を切り上げており、数値以上の部材厚さがあれば、貫通または裏面剥離を生じない厚さ。

※2：最小厚さ 29cm (コンクリート 18cm + 鋼板 16mm (コンクリート換算 11cm 以上))

## 8. 開口部の建具の飛散に関する評価

### (1) 開口部の建具に対する評価荷重

建具の評価に用いる荷重としては、風圧力による荷重、気圧差による荷重が作用する方向を考慮し、最大となる複合荷重に対し検討を行う。

建屋外側から内側に作用する荷重を正とすると、複合荷重 ( $W_{T1}$ ,  $W_{T2}$ \*) は以下の通りとなる。なお、シャッター及びブローアウトパネル部については飛散するものとした。

$$W_{T1} = W_P = -8.9 \text{ [kN/m}^2\text{]}$$

$$W_{T2} = W_W + 0.5 \times W_P = -6.1 \times C - 0.5 \times 8.9 = -6.1 \times 0.7 - 0.5 \times 8.9 = 8.72 \text{ [kN/m}^2\text{]}$$

※：屋外方向への荷重に対して、衝撃荷重 ( $W_M$ ) は考慮しない

したがって、複合荷重のうち荷重が大きい  $W_{T1}$  に対して検討を行う。

なお、外壁の評価と同様に、風力係数 ( $C$ ) は気圧差による荷重と同方向に作用する  $-0.7$  とした。

### (2) 評価結果

竜巻による荷重と建具の許容荷重の比較結果を第 16-19 表に示す。

評価結果に基づき、竜巻による荷重により建具の飛散が考えられる扉のうち竜巻防護施設近傍の開口部については防護対策を実施する。

なお、飛来物が貫通する一部の扉についても防護対策を実施する。

第 16-19 表 複合荷重と扉の耐力の比較結果

建屋	対象建具	竜巻による荷重 (kN/m <sup>2</sup> )	許容荷重* (kN/m <sup>2</sup> )	裕度
原子炉建屋 (燃料取扱棟)	3 枚引戸	8.9	13.9	1.5
ディーゼル発電機建屋 (ディーゼル発電機室)	両開き扉		280.7	31.5
原子炉建屋 (原子炉補機冷却水サー ジタンク室)	片開き		2.1	0.2

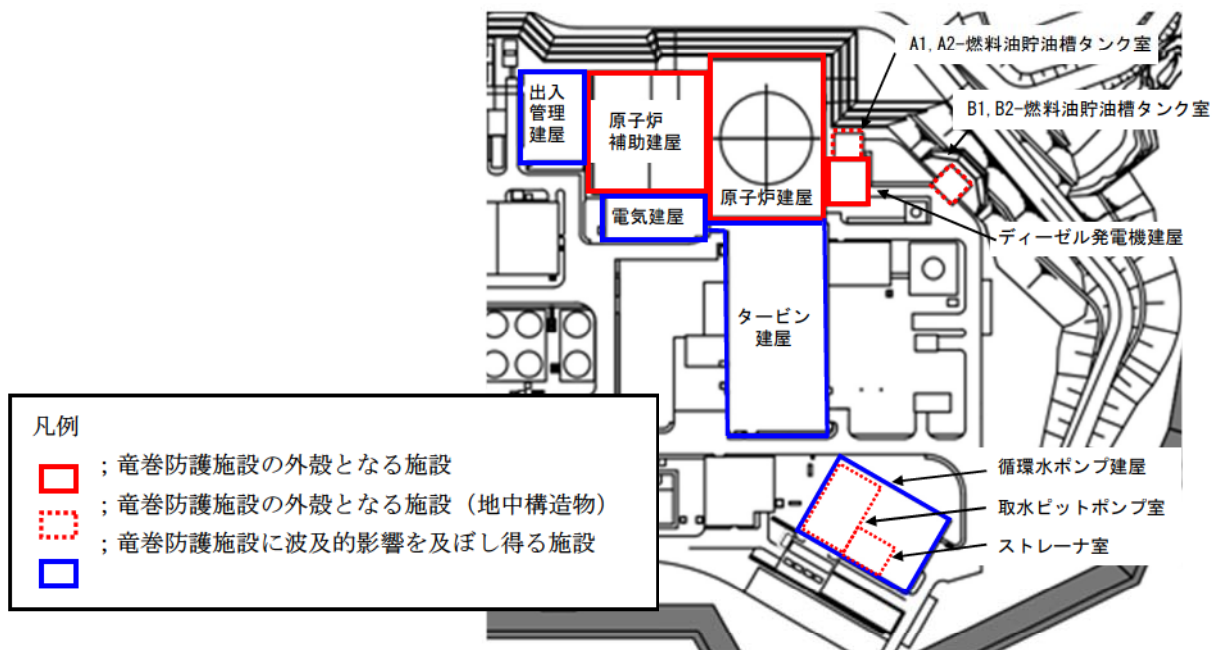
※：許容荷重については、扉を構成する面材及び補強材のうち耐力が最小の部材の値を示す。

**【別紙一覧】**

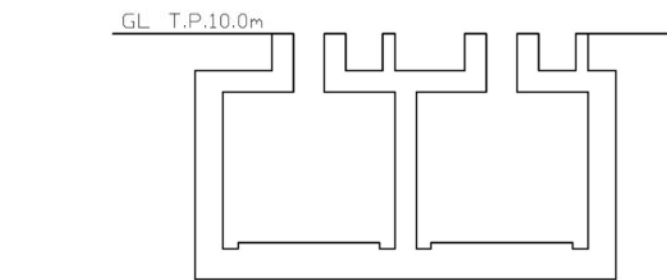
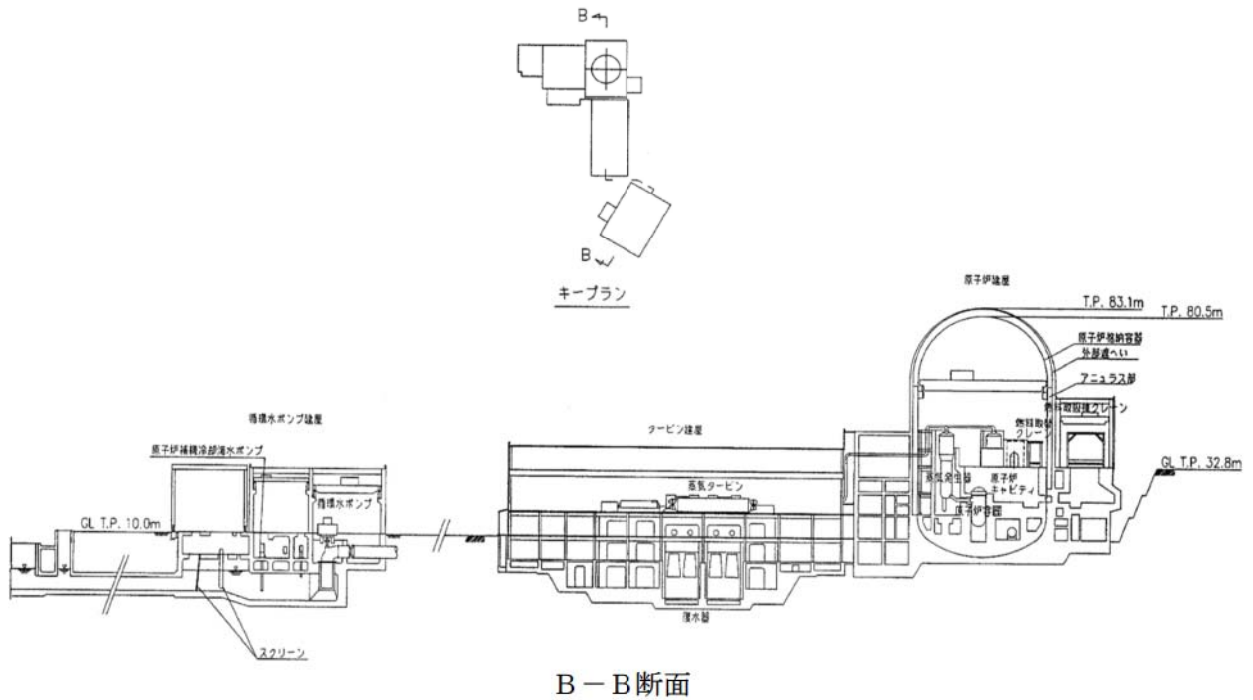
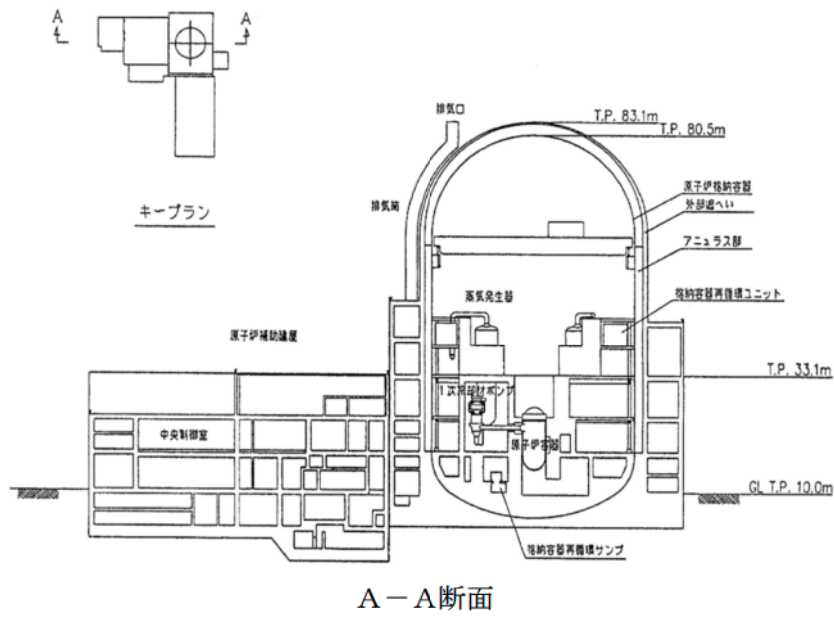
- 別紙-1：竜巻防護施設の外殻となる施設及び竜巻防護施設に波及的影響を及ぼし得る施設の概要図
- 別紙-2：構造骨組の評価における風圧力による荷重 ( $W_w$ ) 及び気圧差による荷重 ( $W_p$ ) 算出時の受圧面積について
- 別紙-3：コンクリート構造物への飛来物衝突影響評価について
- 別紙-4：竜巻防護施設の外殻となる施設の損壊等により部材が飛散物（2次飛来物）となるかの確認について
- 別紙-5：外壁に開口部を想定した際の燃料取扱棟の屋根スラブに対する吹上荷重の評価について

竜巻防護施設の外殻となる施設及び  
竜巻防護施設に波及的影響を及ぼし得る施設の概要図

竜巻防護施設の外殻となる施設及び竜巻防護施設に波及的影響を及ぼし得る施設の配置図を第1図に、概略断面図を第2図に示す。



第1図 評価対象施設の外殻となる施設の概略配置図



(A1, A2-燃料油貯油槽タンク室及びB1, B2-燃料油貯油槽タンク室)

第2図 評価対象建屋の概略断面図

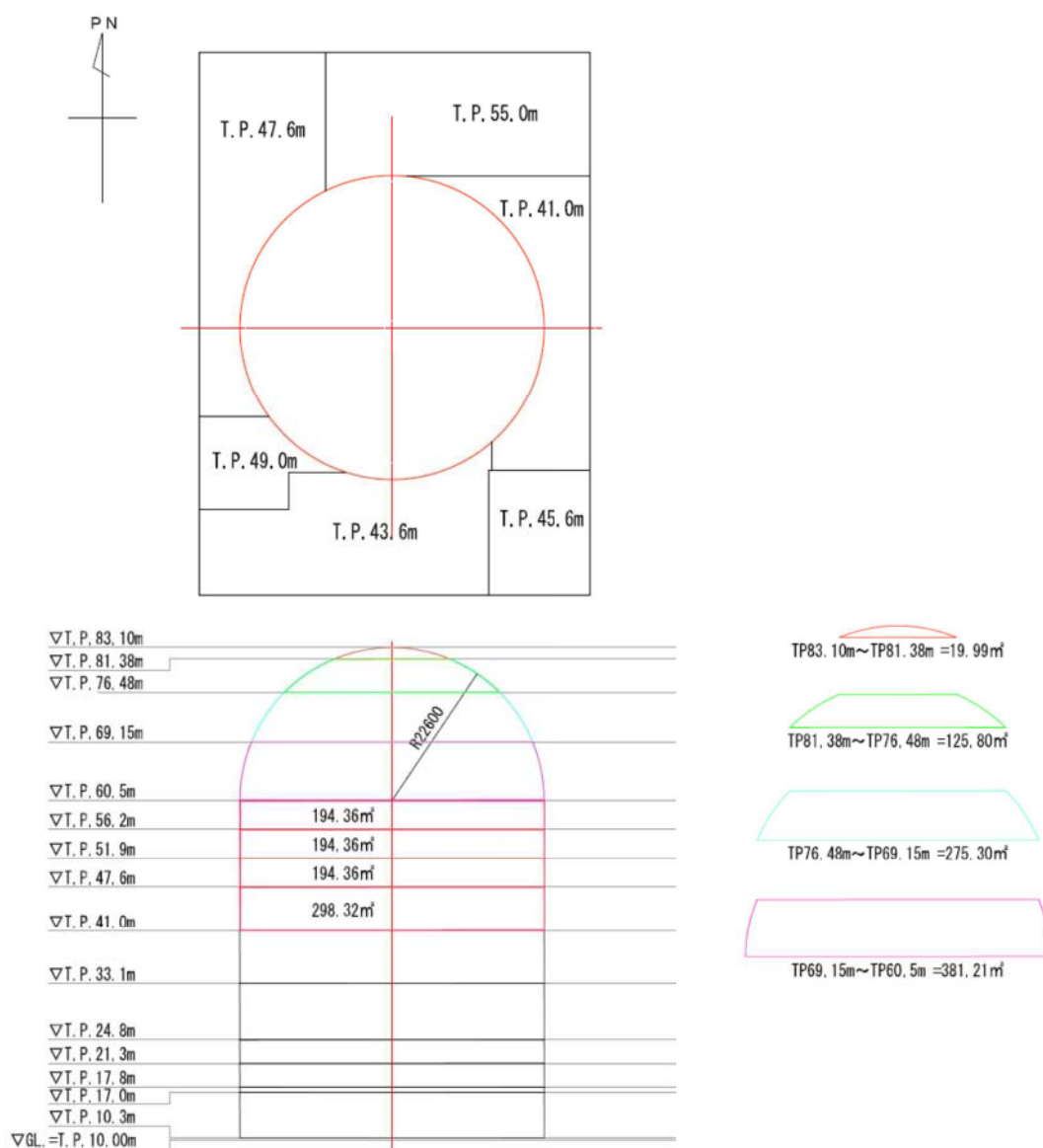
構造骨組の評価における  
風圧力による荷重 ( $W_w$ ) 及び気圧差による荷重 ( $W_p$ ) 算出時の受圧面積について

地震応答解析モデルの各層に作用する風圧力による荷重 ( $W_w$ ) 及び気圧差による荷重 ( $W_p$ ) は、建屋の形状を考慮し各層毎に算定した受圧面積に基づき算出する。

風圧力及び気圧差による荷重 ( $W_w$ ) 算定における受圧面積については、各建屋とも安全側の評価として、遮へい効果を期待せず、南北・東西方向の検討を行う。

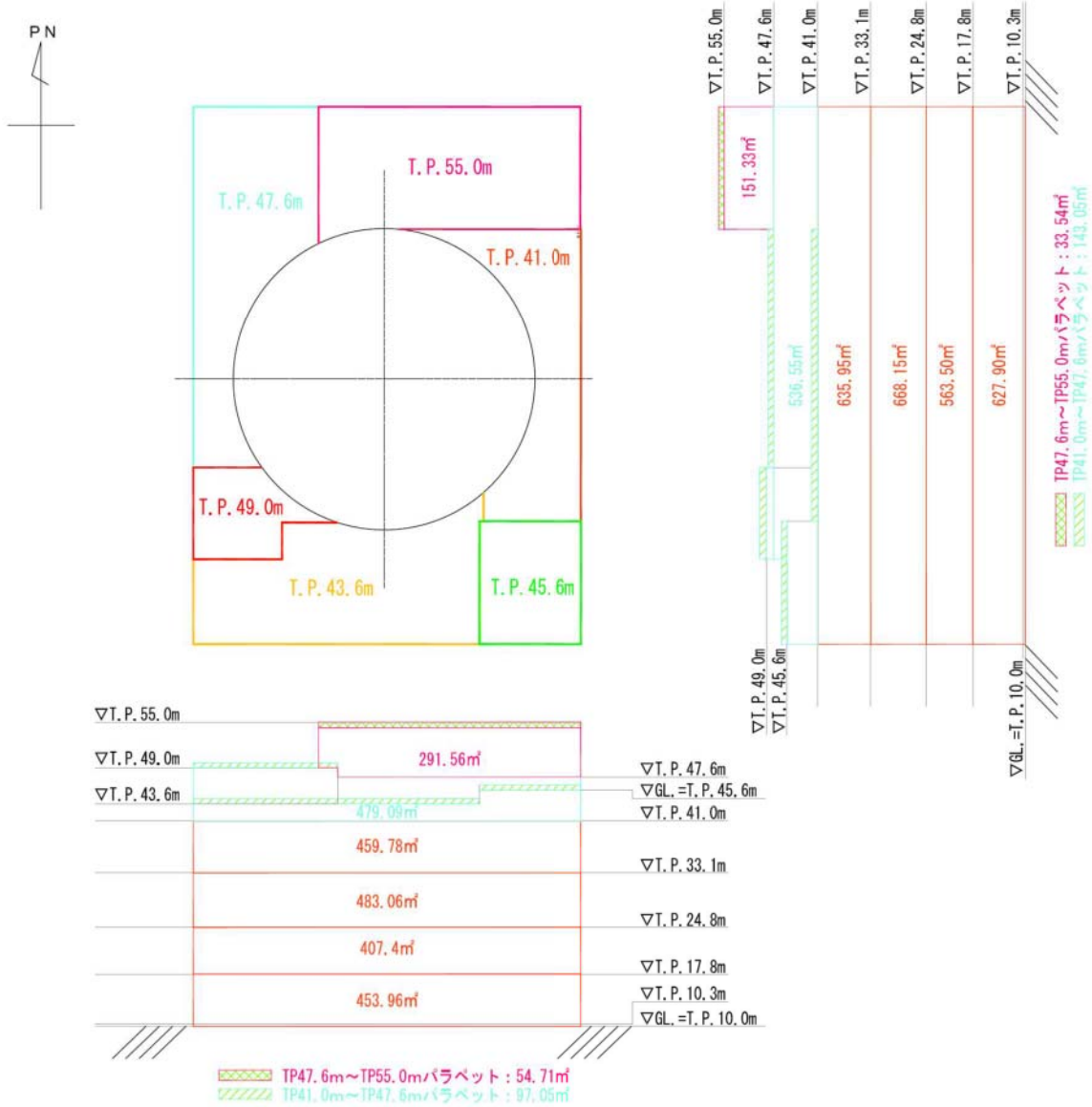
受圧面積は受風面の高さパラペットを考慮し、地震応答解析モデルの「当該節点とその一つ下層の節点までの部材の高さ×受圧面の建屋幅」により算出する。

風圧力及び気圧差による荷重算定に用いた、各建屋の受圧面積を建屋立面上に表記し、第1図～第8図に示す。

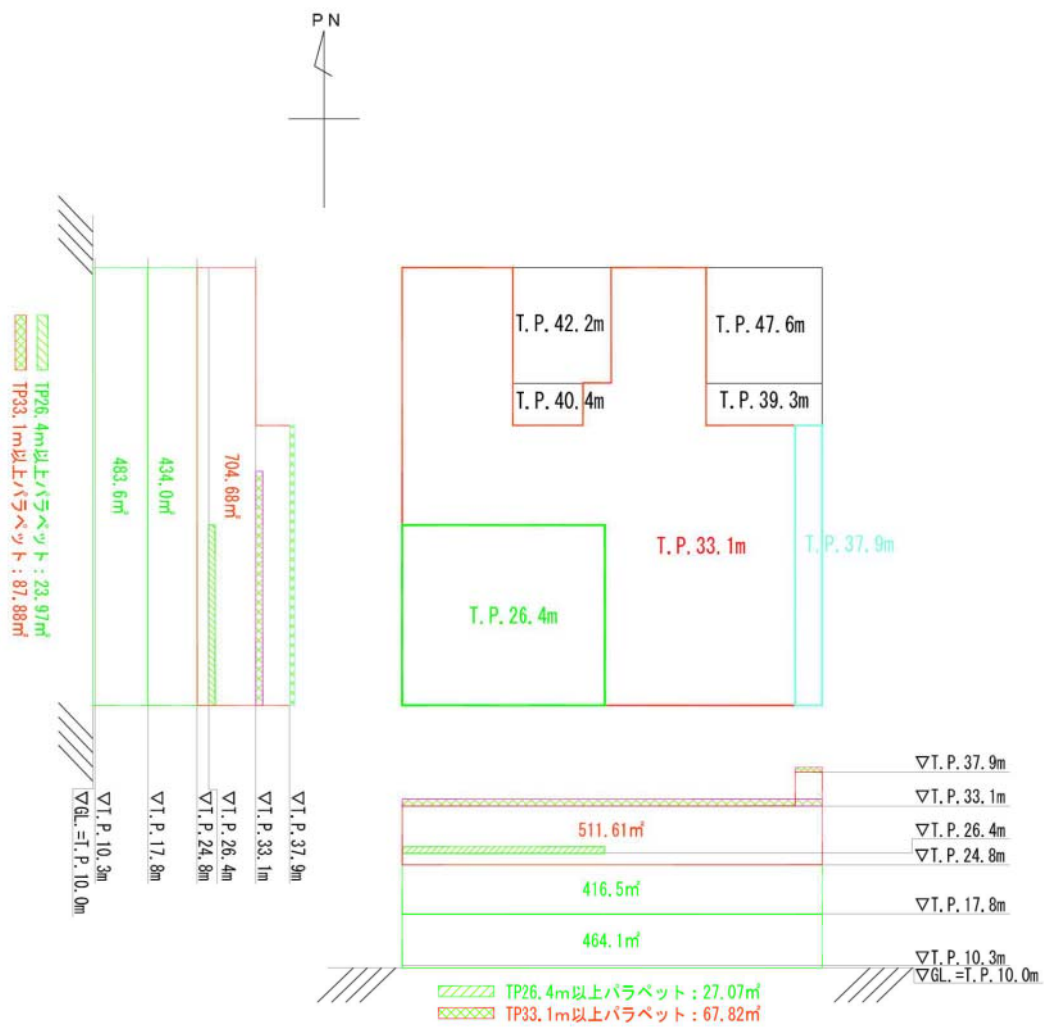


第1図 原子炉建屋（外部遮へい建屋）の受圧面積図



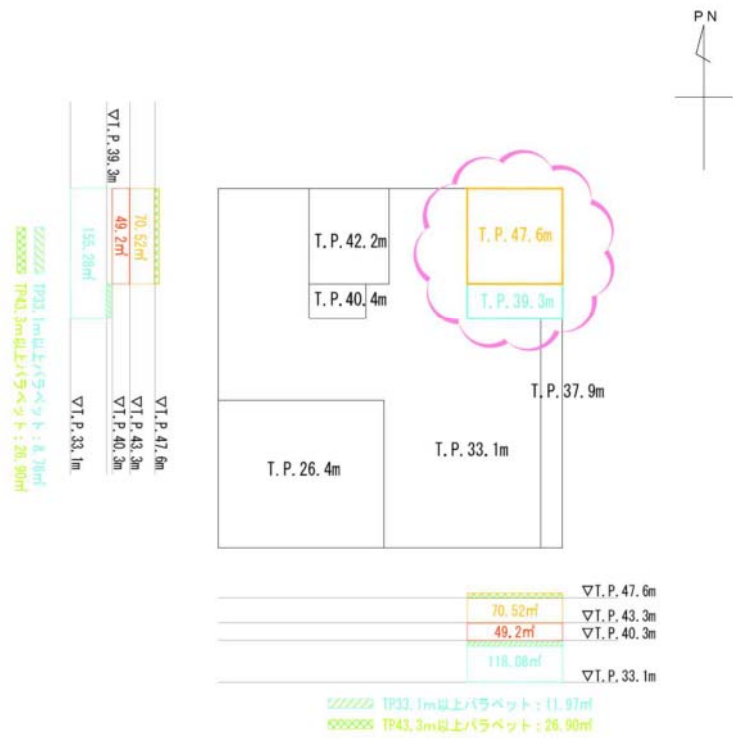


第2図 原子炉建屋（周辺補機棟及び燃料取扱棟）の受圧面積図

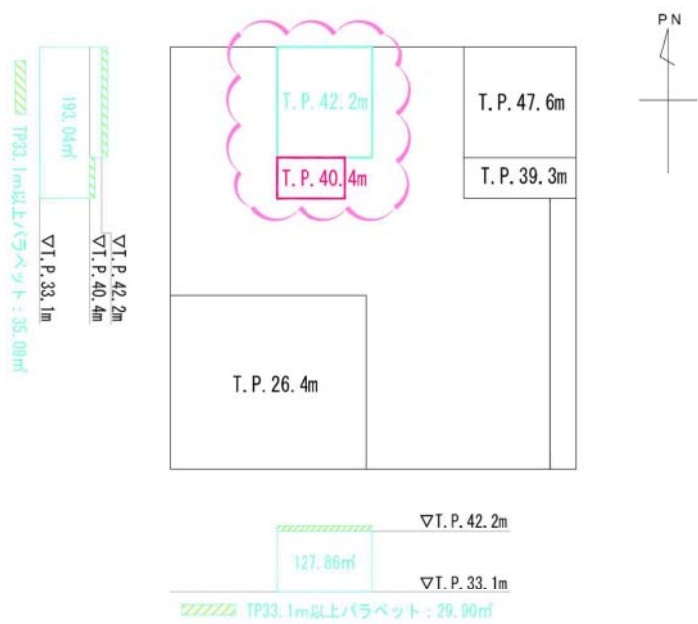


(T. P. 10. 0m (GL. ) ~ 33. 1m)

第 3 図 原子炉補助建屋の受圧面積図 (その 1)

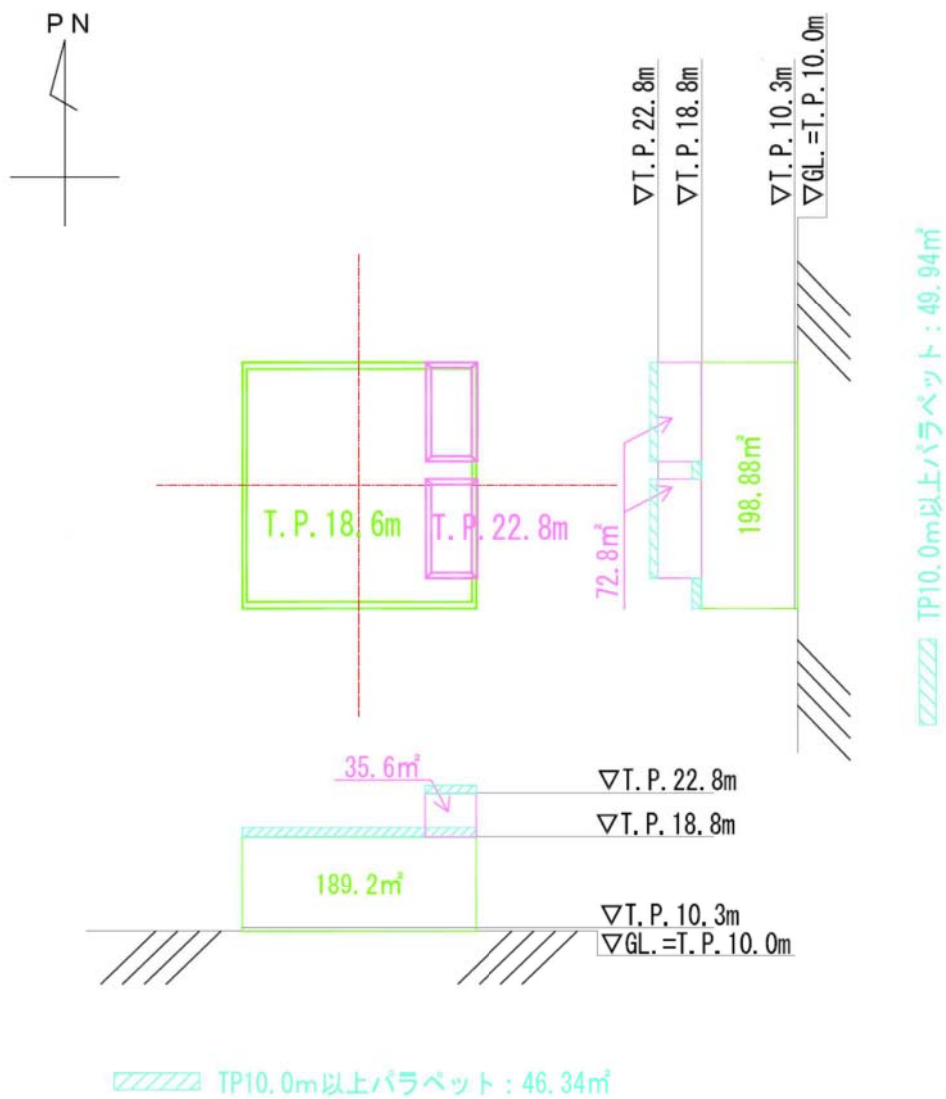


(T. P. 33. 1m～47. 6m (質点 1 ～ 3))

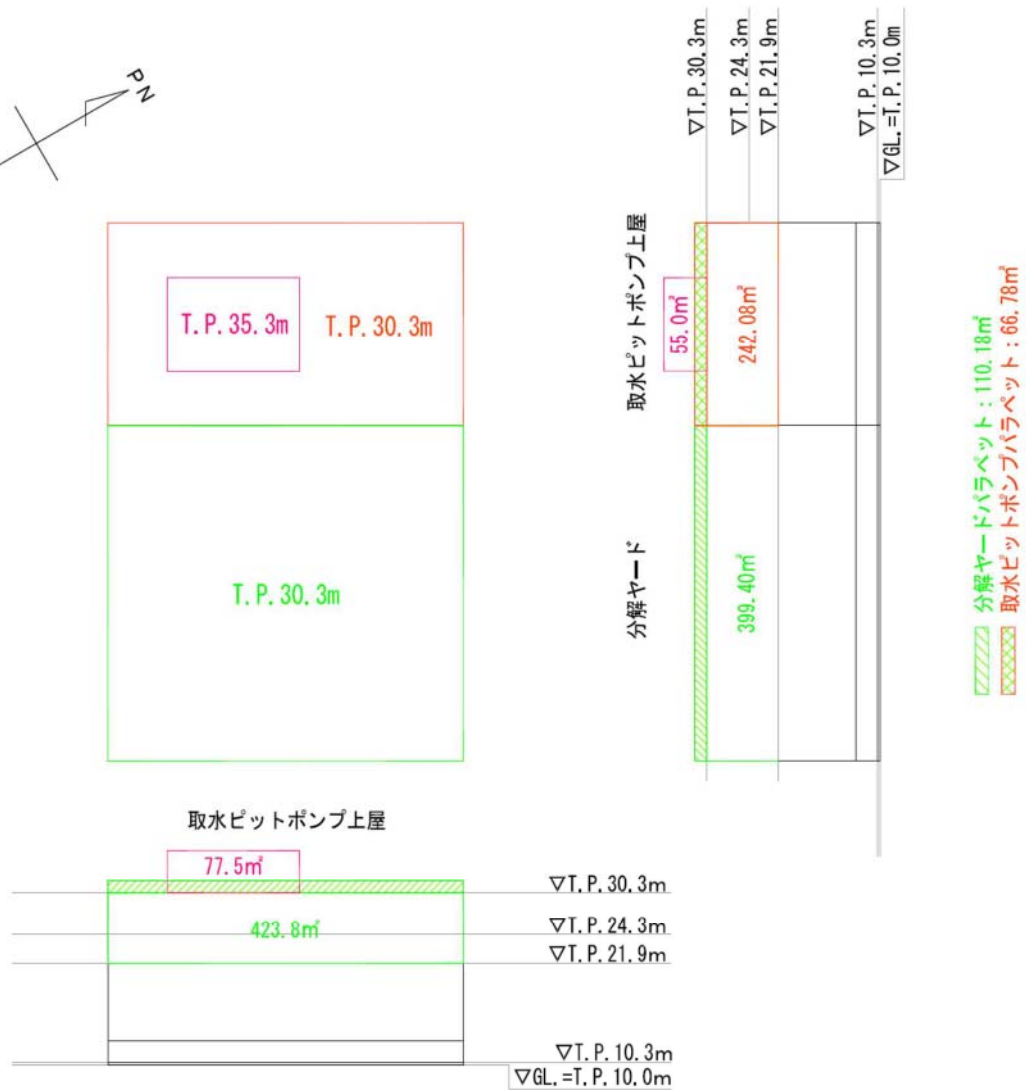
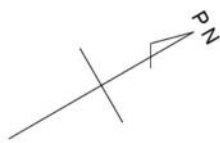


(T. P. 33. 1m～42. 2m (質点 4 ～ 5))

第 3 図 原子炉補助建屋の受圧面積図 (その 2)



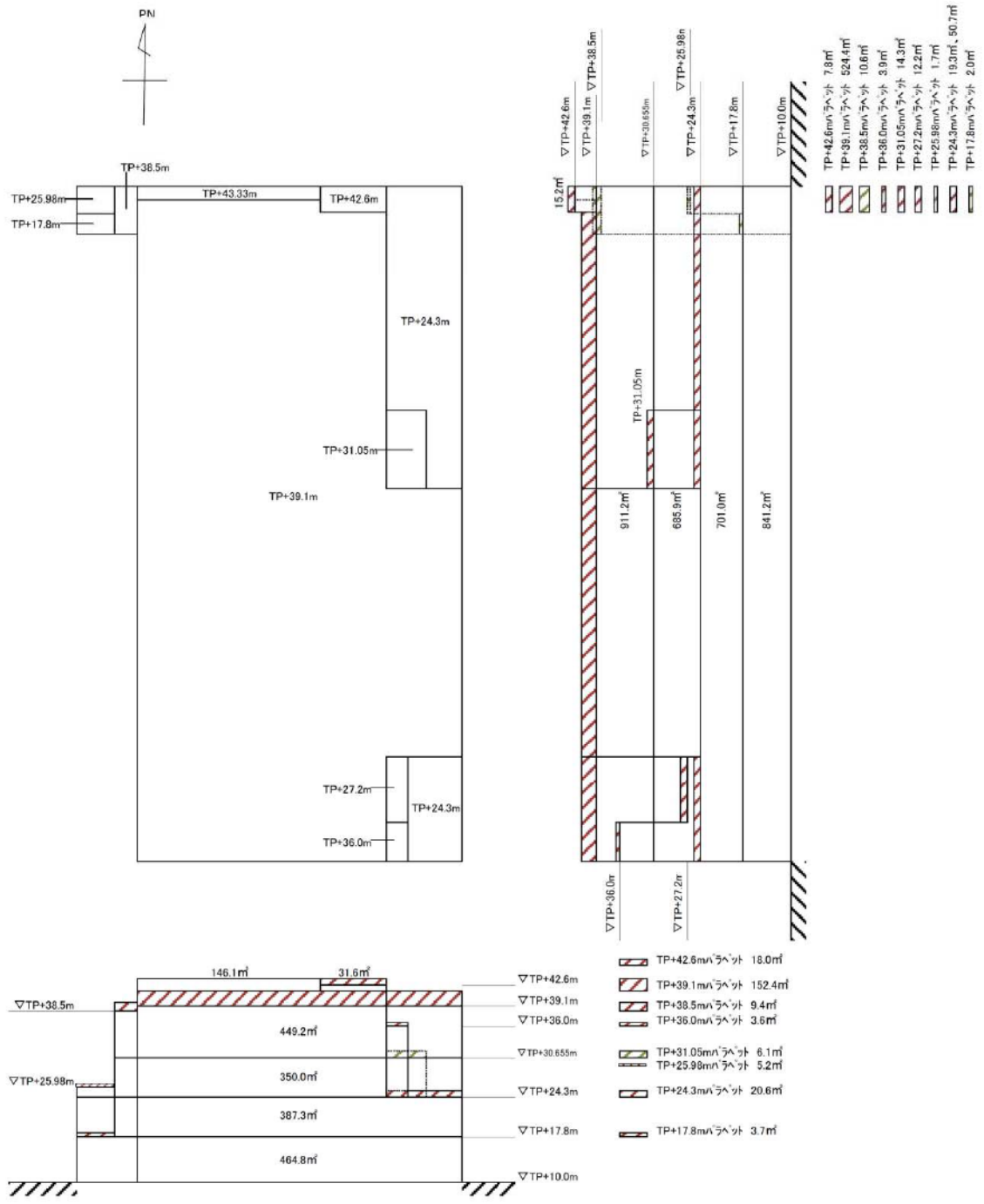
第4図 ディーゼル発電機建屋の受圧面積図



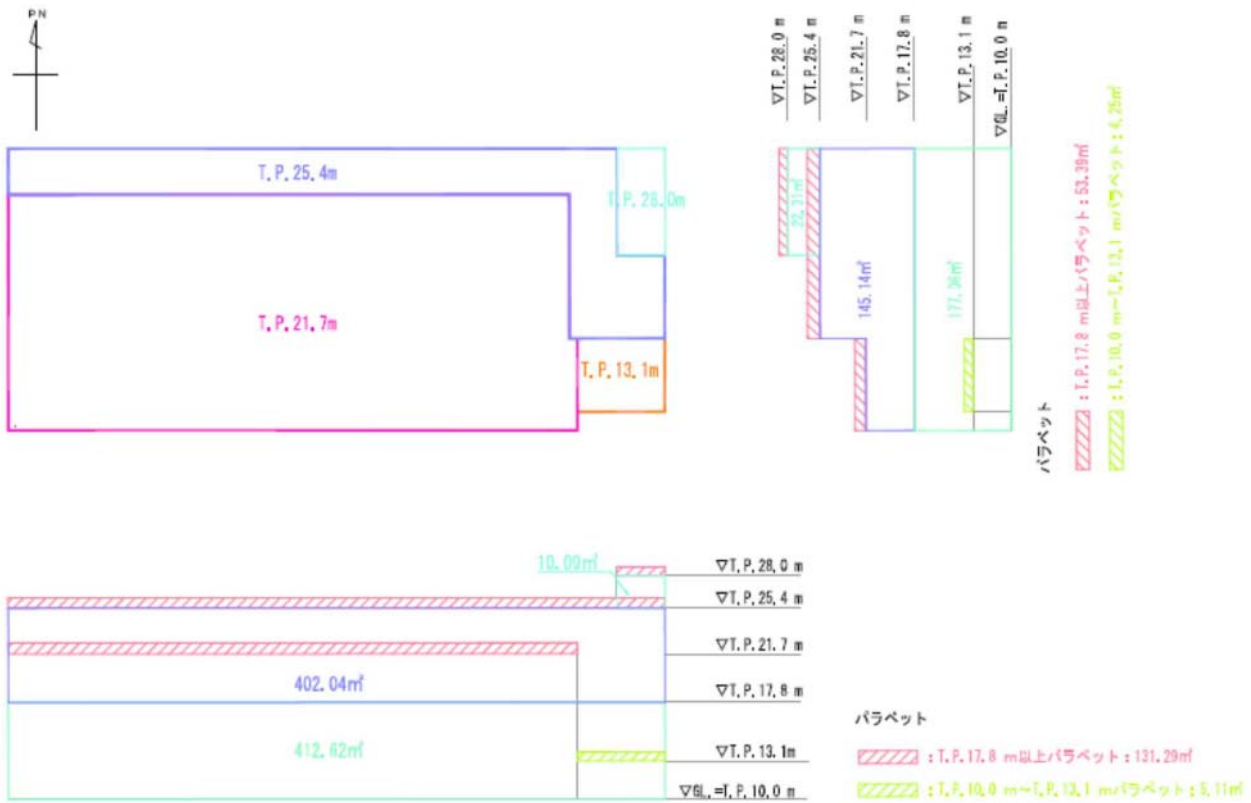
/// T. P. 10.0m以上バラボケット: 116.9m<sup>2</sup>

\*分解ヤード上屋: 上記搭屋なしと同じ。

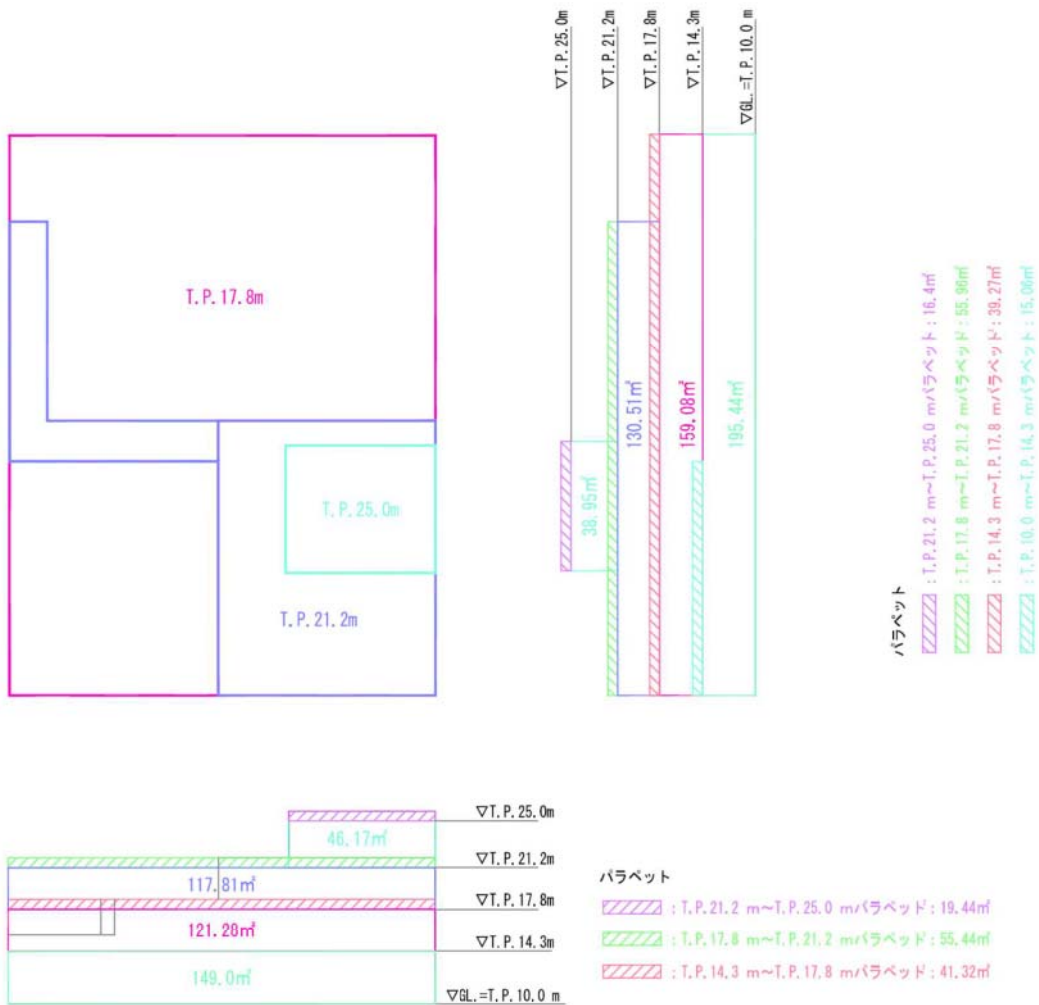
第5図 循環水ポンプ建屋の受圧面積図



第 6 図 タービン建屋の受圧面積図



第7図 電気建屋の受圧面積図



第 8 図 出入管理建屋の受圧面積図



## コンクリート構造物に対する飛来物衝突影響評価について

## 1. 概要

コンクリート構造物への飛来物衝突影響評価については、以下に示す評価式を用いて貫通限界深さ、裏面剥離限界必要厚さを算定している。

## &lt;貫通及び裏面剥離評価&gt;

修正 NDRC 式 ((1) 式), Degen 式 ((2) 式) 及び Chang 式 ((3) 式) に基づいて評価を実施する。このうち貫通評価については (1) 式に示す修正 NDRC 式を用いて貫入深さ  $x_c$  を求め、Degen 式による (2) 式により貫通限界厚さを求める。

また、裏面剥離評価は Chang による (3) 式により裏面剥離限界厚さを求める。

$$x_c = \alpha_c \sqrt{4KWND \left( \frac{V}{1000D} \right)^{1.8}}, \text{ for } \frac{x_c}{\alpha_c D} < 2.0 \quad \dots (1)$$

$$t_p = \alpha_p D \left\{ 2.2 \left( \frac{x_c}{\alpha_c D} \right) - 0.3 \left( \frac{x_c}{\alpha_c D} \right)^2 \right\}, \text{ for } \frac{x_c}{\alpha_c D} \leq 1.52 \quad \dots (2)$$

$$t_s = \alpha_s 1.84 \left\{ \frac{200}{V} \right\}^{0.13} \frac{(MV^2)^{0.4}}{(D/12)^{0.2} (144Fc)^{0.4}} \quad \dots (3)$$

ここで、

$x_c$ : 貫入深さ (in)	$\alpha_c$ : 飛来物低減係数	$K : 180/\sqrt{Fc}$
$W$ : 飛来物重量 (lb)	$N$ : 形状係数	$D$ : 飛来物直径 (in)
$V$ : 衝突速度 (ft/s)	$Fc$ : コンクリート強度 (psi)	
$t_p$ : 貫通厚さ (in)	$\alpha_p$ : 飛来物低減係数	
$t_s$ : 裏面剥離厚さ (ft)	$\alpha_s$ : 飛来物低減係数	$M$ : 質量 (lb/ (ft/s <sup>2</sup> ))

以下に上記評価式の採用理由を記す。

- 飛来物衝突に対する評価式として、NEI07-13<sup>※1</sup> 及び米国 NRC の基準類<sup>※2</sup> に算定式として記載されている。
- 「構造物の衝撃挙動と設計法」(土木学会)においては、貫通限界厚さの評価式として Degen 式の適用性が高く、裏面剥離限界厚さの評価式として、Chang 式の適用性が高いとされている。なお、これは電力中央研究所<sup>※3</sup> の実験結果に基づくものである。

※1 : Methodology for performing Aircraft Impact Assessments for New Plant Designs

※2 : U. S NUCLEAR REGULATORY COMMISSION : STANDARD REVIEW PLAN, 3. 5. 3 BARRIER DESIGN PROCEDURES, NUREG-0800, Revision 3-March 2007

※3 : 飛来物の衝突に対するコンクリート構造物の耐衝撃設計手法 電力中央研究所

2. 評価式の形状係数及び低減係数

貫入防止および裏面剥離防止必要厚さの算定に用いる係数は、NEI07-13における推奨値の他に、第1表に示す係数が提案されている。

第1表 評価式における形状係数及び低減係数

	NEI07-13	文献※1	文献※2
対象飛来物	【剛飛来物】 大型商用機のエンジン	—	【剛飛来物】 航空機エンジン
貫通深さ式 形状係数	0.72	0.72~1.14	—
貫通防止式 低減係数	0.60	—	0.65
裏面剥離防止式 低減係数	0.55	—	0.6

※1：構造工学シリーズ6 「構造物の衝撃挙動と設計法」 土木学会

※2：Experimental Studies on Local Damage of Reinforced Concrete Structures by the Impact of Deformable Missiles Part4

：Overall Evaluation of Local Damage, Kiyoshi Muto, etc., 10th SMiRT

剛飛来物である鋼製材が飛来衝突する場合、隅角部から衝突し、かつ航空機エンジン以上に剛体であり得ることも想定して、形状係数は「1.14」（非常に鋭い場合の係数）とし、低減係数についてはすべて「1.0」（低減せず）とする。

本評価における各係数を第2表に示す。

第2表 採用した形状係数及び低減係数

貫通深さ式 形状係数	1.14
貫通防止式 低減係数	1.00
裏面剥離防止式 低減係数	1.00

竜巻防護施設の外殻となる施設の損壊等により  
部材が飛散物（2次飛来物）となるかの確認について

部材が飛散物（2次飛来物）となるかの確認について、竜巻防護施設の外殻となる施設のうち鉄骨造である燃料取扱棟について確認を行った。

ここでは、建屋の外壁及び屋根について評価を実施し、竜巻による複合荷重によって生じる荷重が部材の許容荷重を下回ることを確認している。

## 1. 評価荷重

評価荷重については、本文「6. 鉄骨造部分の外壁及び屋根が飛散物とならないことの確認」に記載の通り、竜巻による複合荷重 ( $W_{T1}$ ,  $W_{T2}$ ) のうち最も大きくなる以下の荷重として評価を実施する。

外壁： $W_{T1}=8.9$  kN

屋根： $W_{T2}=10.55$  kN

## 2. 評価方法

### (1) 外壁について

波板・胴縁・間柱を評価対象とし、「1. 評価荷重」に示す評価荷重により、破損し、波及的影響を及ぼさないことを確認する。具体的には、各部材の終局耐力から算定した許容荷重が、竜巻による複合荷重を上回っている事を、(許容荷重) / (竜巻による荷重) を部材の裕度とし、この裕度が1.0以上あることで確認する。

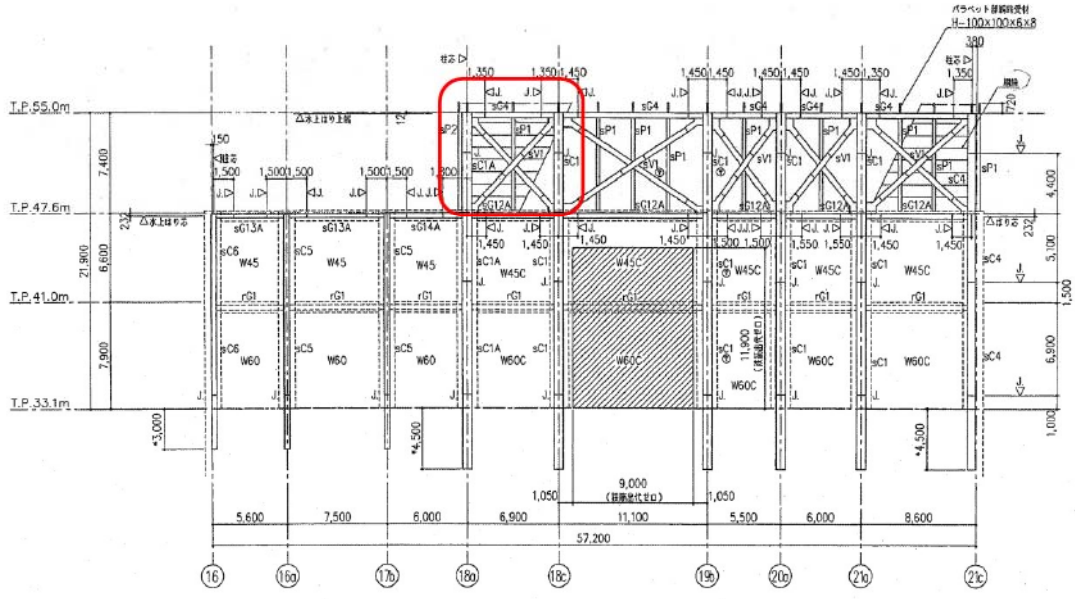
#### a. 使用材料及び許容応力度

外壁の飛散評価における、使用材料及び各部材の仕様を以下に示す。なお、終局時の検討であることから、鋼材は「建設省告示第2464号（平成12年12月26日施行）」に基づき、検討時にはF値を1.1倍する。

- ・波板 金属製リブ板 (  $t=0.8$  mm)
- ・胴縁 SS400 (  $F=235$  N/mm<sup>2</sup>)
- ・間柱 SS400 (  $F=235$  N/mm<sup>2</sup>)

b. 検討対象範囲

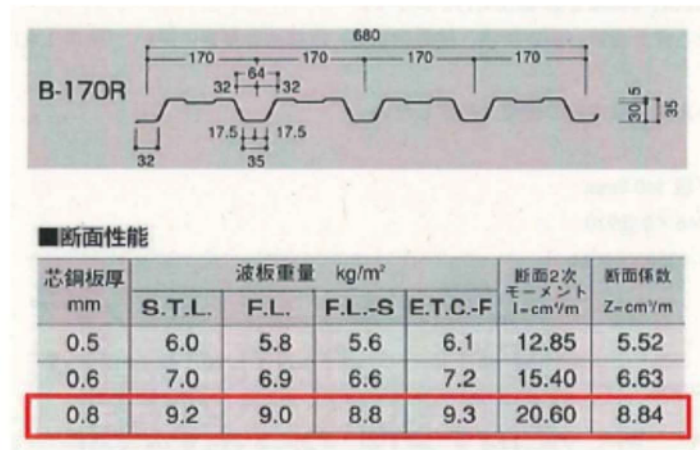
検討対象範囲を第1図に示す。



(軸組図)

検討部位	符号	断面
波板	—	$t = 0.8$ 山高 35mm (横胴縁ピッチ 900mm にて支持)
胴縁	—	$[-125 \times 65 \times 6 \times 8$
間柱	sP1	H-340 × 250 × 9 × 14

(部材リスト)



(波板詳細)

第1図 燃料取扱棟の外壁部材（外装材、胴縁、間柱）の検討箇所及び詳細（W通り軸組図）

(2) 屋根について

コンクリート屋根スラブ、鉄骨梁（大梁、小梁）を評価対象とし、「1. 評価荷重」に示す評価荷重により、破損し、波及的影響を及ぼさないことを確認する。具体的には、各部材の終局耐力から算定した許容荷重が、竜巻による複合荷重を上回っている事を、(許容荷重) / (竜巻による荷重) を部材の裕度とし、この裕度が 1.0 以上あることで確認する。

a. 使用材料及び許容応力度

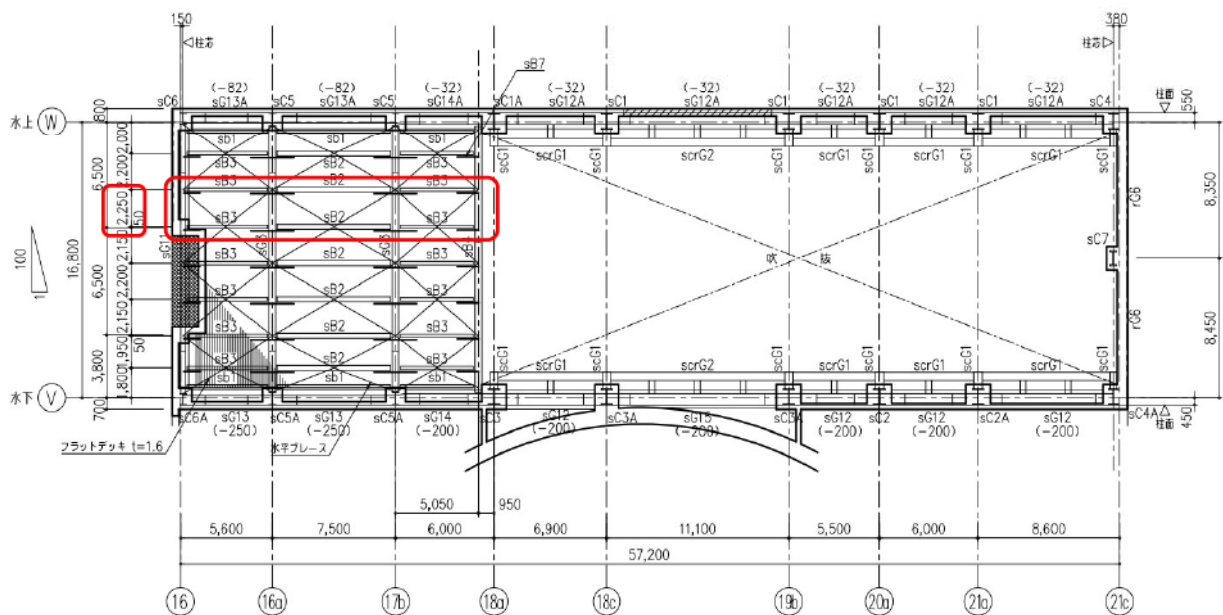
屋根の飛散評価における、使用材料及び各部材の仕様を以下に示す。なお、終局時の検討であることから、鋼材は「建設省告示第 2464 号（平成 12 年 12 月 26 日施行）」に基づき、検討時にはF 値を 1.1 倍する。

- ・コンクリート  $F_c = 24 \text{ N/mm}^2$
- ・鉄筋 床板 SD345 ( $F = 345 \text{ N/mm}^2$ )
- ・大梁 SN490B ( $F = 325 \text{ N/mm}^2$ )
- ・小梁 SS400 ( $F = 235 \text{ N/mm}^2$ )

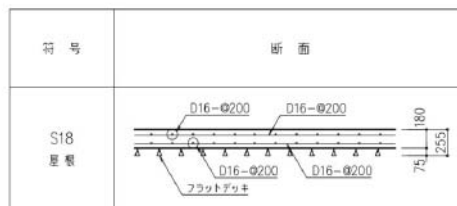
b. 検討対象範囲

検討対象範囲を第 2 図～第 4 図に示す。

検討箇所は、屋根スラブにおいてはスパンが広い箇所、屋根梁においてはピッチが広い箇所を基準に選定している。

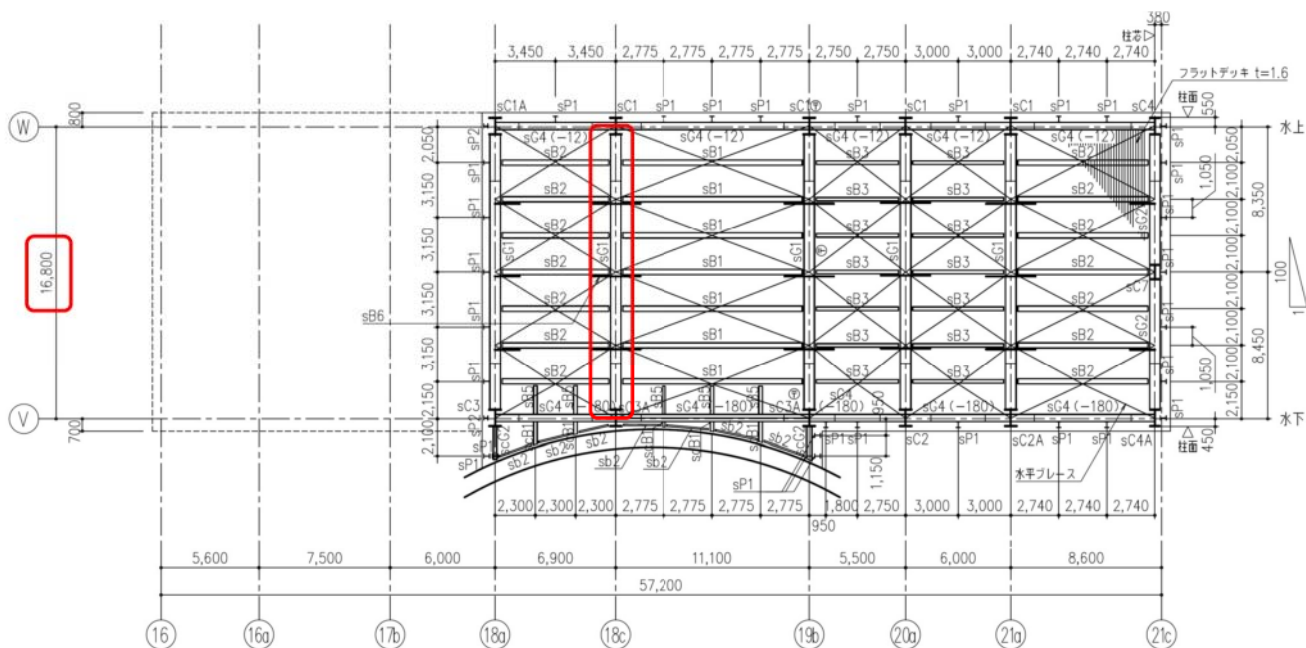


(T.P. 47.6m 屋根伏図)

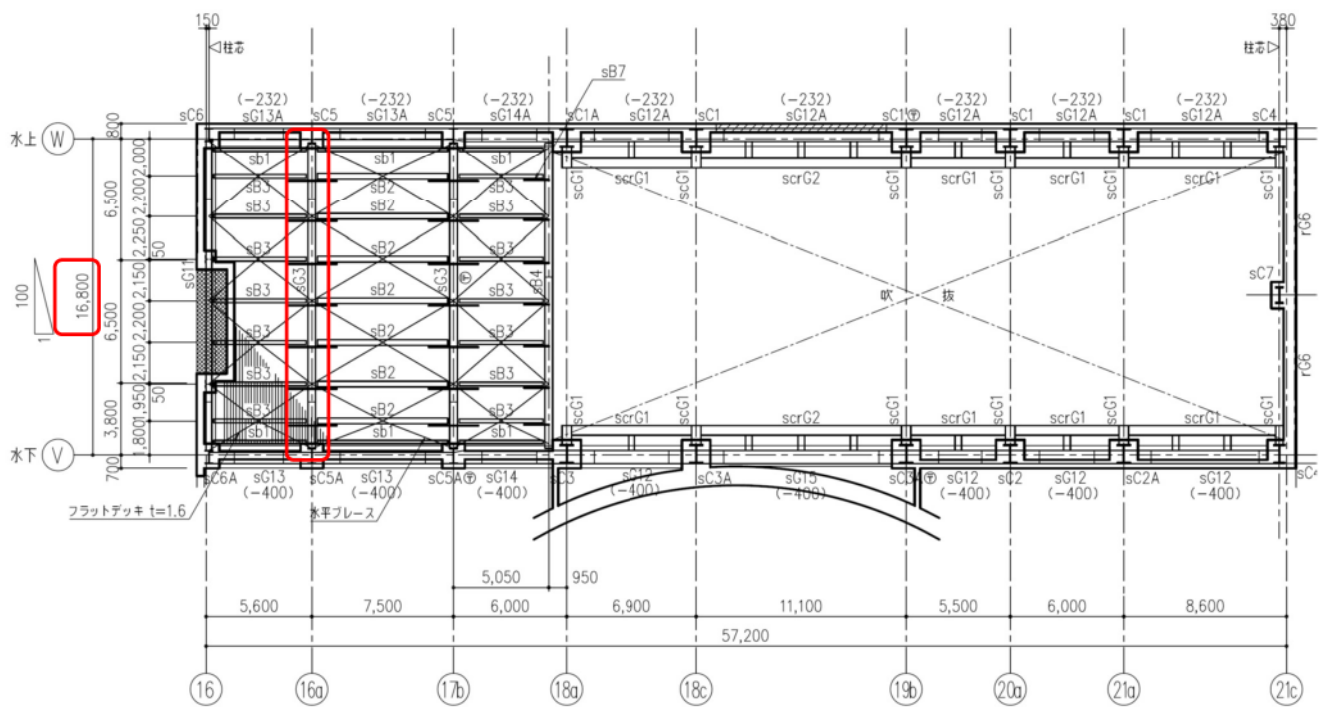


(スラブ詳細)

第 2 図 燃料取扱棟の屋根部材（屋根スラブ）の検討箇所及び詳細



(T. P. 55.0m 屋根伏図)

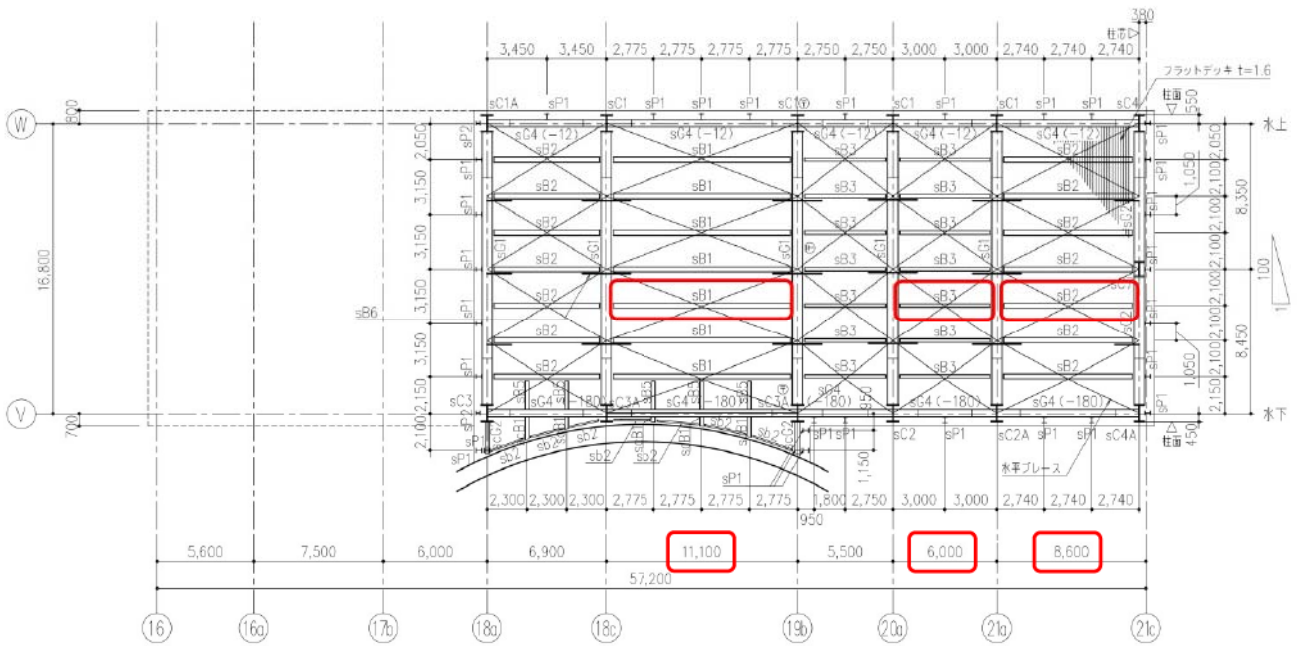


(T. P. 47.6m 屋根伏図)

符号	位置	断面
sG1	18c 通り	BH-1700×600×30×40
sG3	16a 通り	BH-1400×400×22×30

(部材リスト)

第3図 燃料取扱棟の屋根部材(大梁)の検討箇所及び詳細



(T. P. 55. 0m 屋根伏図)

符号	位置	断面
sB1	18c～19b 通り	H-700×300×13×24
sB2	21a～21c 通り	H-440×300×11×18
sB3	20a～21a 通り	H-400×200×8×13

(部材リスト)

第 4 図 燃料取扱棟の屋根部材（小梁）の検討箇所及び詳細

3. 評価結果

各部材の計算過程及び結果を第1表～第6表に示す。

第1表 燃料取扱棟の外装材の計算結果

種別	項目	記号・計算式	計算値	単位
部材諸元	断面係数	Z	8,840	mm <sup>3</sup> /m
	断面2次モーメント	I	206,000	mm <sup>4</sup> /m
	材長	L	0.90	m
	材間隔	a	1.00	m
竜巻荷重	風圧力荷重	$W_W$ (Cf = 0.7 )	4,270	N/m <sup>2</sup>
	気圧差荷重	$W_P$	8,900	N/m <sup>2</sup>
	荷重の組合せ	$W_{(T1,T2)} = \max(W_P, W_W + 0.5W_P)$	8,900	N/m <sup>2</sup>
	設計用風荷重	$w = W_{(T1,T2)} \times a$	8,900	N/m
応力計算	最大モーメント	$M_{\max} = wL^2/12$	601	Nm/m
断面検討	最大縁応力度	$\sigma_{\max} = M_{\max}/Z$	68.0	N/mm <sup>2</sup> /m
	許容応力度	sfb	235.0	N/mm <sup>2</sup> /m
	検定値	$\sigma = \sigma_{\max}/sfb$	0.29	< 1.00 OK
裕度の算定	最大負担曲げモーメント	$Ma = sfb \times Z$	2077	Nm/m
	最大負担荷重	$Ma = w_1 L^2 / 12$ より $w_1 = 12 \times Ma / L^2$	30,770	N/m/m
	最大負担竜巻荷重	$w_1 = wa \times a$ より $wa = w_1 / a$	30,770	N/m <sup>2</sup>
	裕度	$wa / W_{(T1,T2)}$	3.4	



第2表 燃料取扱棟の胴縁の計算結果

種別	項目	記号・計算式	計算値	単位
部材諸元	断面係数	Zx	67,800	mm <sup>3</sup>
		Zy	13,400	mm <sup>3</sup>
	断面2次モーメント	Ix	4,240,000	mm <sup>4</sup>
		Iy	618,000	mm <sup>4</sup>
	ウェブ断面積	Aw	654	mm <sup>2</sup>
	材長	L	3.45	m
	材間隔	a	0.90	m
鉛直荷重	外装重量	w <sub>v</sub>	400	N/m <sup>2</sup>
		W <sub>v</sub> =w <sub>v</sub> ×a	360	N/m
竜巻荷重	風圧力荷重	W <sub>w</sub> (Cf = 0.7 )	4,270	N/m <sup>2</sup>
	気圧差荷重	W <sub>p</sub>	8,900	N/m <sup>2</sup>
	荷重の組合せ	W <sub>(T1,T2)</sub> =max(W <sub>p</sub> , W <sub>w</sub> +0.5W <sub>p</sub> )	8,900	N/m <sup>2</sup>
	設計用風荷重	w =W <sub>(T1,T2)</sub> × a	8,010	N/m
応力計算	水平方向最大モーメント	M <sub>xmax</sub> =wL <sup>2</sup> /8	11,917	Nm
	鉛直方向最大モーメント	M <sub>ymax</sub> =W <sub>v</sub> L <sup>2</sup> /8	536	Nm
	せん断力	Q=wL/2	13,817	N
断面検討	水平方向最大縁応力度	σ <sub>h</sub> =M <sub>xmax</sub> /Zx	175.8	N/mm <sup>2</sup>
	鉛直方向最大縁応力度	σ <sub>v</sub> =M <sub>ymax</sub> /Zy	40.0	N/mm <sup>2</sup>
	許容曲げ応力度	1.1sfb (sfb = 235 N/mm <sup>2</sup> )	258.5	N/mm <sup>2</sup>
	曲げ検定値	(σ <sub>h</sub> /1.1sfb)+(σ <sub>v</sub> /1.1sfb)	0.83	< 1.00 OK
	せん断応力度	τ =Q/Aw	21.1	N/mm <sup>2</sup>
	許容せん断応力度	sfs (sfs = 135.7 N/mm <sup>2</sup> )	135.7	N/mm <sup>2</sup>
	せん断検定値	τ /sfs	0.16	< 1.00 OK
裕度の算定	最大負担曲げモーメント	M <sub>x</sub> =(1-M <sub>y</sub> /(Z <sub>y</sub> ・1.1sfb))×1.1sfb×Zx	14,814	Nm
	最大負担荷重	M <sub>x</sub> =w <sub>1</sub> L <sup>2</sup> /8 より w <sub>1</sub> = 8×M <sub>x</sub> /L <sup>2</sup>	9957	N/m
	最大負担竜巻荷重	w <sub>1</sub> =wa×a より wa = w <sub>1</sub> /a	11063	N/m <sup>2</sup>
	裕度	wa/W <sub>(T1,T2)</sub>	1.2	

第3表 燃料取扱棟の間柱の計算結果

種別	項目	記号・計算式	計算値	単位
部材諸元	断面係数	Z	1,250,000	mm <sup>3</sup>
	断面2次モーメント	I	212,000,000	mm <sup>4</sup>
	断面積	A	9,950	mm <sup>2</sup>
	ウェブ断面積	Aw	2,808	mm <sup>2</sup>
	材長	L	7.40	m
	材間隔	a	3.45	m
鉛直荷重	設計荷重	w <sub>V</sub>	600	N/m <sup>2</sup>
竜巻荷重	風圧力荷重	W <sub>W</sub> (Cf = 0.7)	4,270	N/m <sup>2</sup>
	気圧差荷重	W <sub>P</sub>	8,900	N/m <sup>2</sup>
	荷重組合せ	W <sub>(T1,T2)</sub> = max(W <sub>P</sub> , W <sub>W</sub> + 0.5W <sub>P</sub> )	8,900	N/m <sup>2</sup>
	設計用風荷重	w = W <sub>(T1,T2)</sub> × a	30,705	N/m
応力計算	最大モーメント	M <sub>max</sub> = wL <sup>2</sup> /8	210,176	Nm
	せん断力	Q = wL/2	113,609	N
	軸力	N = w <sub>V</sub> × a × L	15,318.0	N
断面検討	縁応力度	σ = M <sub>max</sub> /Z	168.1	N/mm <sup>2</sup>
	圧縮応力度	σ <sub>c</sub> = N/A	1.5	N/mm <sup>2</sup>
	許容曲げ応力度	1.1sfb (sfb = 235 N/mm <sup>2</sup> )	258.5	N/mm <sup>2</sup>
	許容圧縮応力度	1.1sfc (sfc = 235 N/mm <sup>2</sup> )	258.5	N/mm <sup>2</sup>
	検定値	σ <sub>c</sub> /1.1sfc + σ/1.1sfb	0.66	< 1.00 OK
	せん断応力度	τ = Q/Aw	40.5	N/mm <sup>2</sup>
	許容せん断応力度	sfs (sfs = 135.7 N/mm <sup>2</sup> )	135.7	N/mm <sup>2</sup>
	せん断検定値	τ/sfs	0.30	< 1.00 OK
裕度の算定	最大負担曲げモーメント	Ma = (1 - N/(A × 1.1sfc)) × 1.1sfb × Z	321,201	Nm
	最大負担荷重	Ma = w <sub>1</sub> L <sup>2</sup> /8 より w <sub>1</sub> = 8 × Ma/L <sup>2</sup>	46,925	N/m
	最大負担竜巻荷重	w <sub>1</sub> = wa × a より wa = w <sub>1</sub> /a	13,601	N/m <sup>2</sup>
	裕度	wa/W <sub>(T1,T2)</sub>	1.5	

第4表 燃料取扱棟のスラブの計算結果

種別	項目	記号・計算式	計算値	単位
諸元	コンクリート強度	$F_c24$	24	$N/mm^2$
	鉄筋の短期許容応力度	$f_t$	345	$N/mm^2$
	スラブ厚	$t$	180	mm
	鉄筋量	$a_t = 1.986 \times 1000 / 200$	993	$mm^2$
	有効せい	$d$	122	mm
	部材幅	$b$	1,000	mm
	応力中心間距離	$j = 7/8d$	106.75	mm
	スパン	$L$	2.25	m
鉛直荷重	屋根重量	$w_v$	6,700	$N/m^2$
竜巻荷重	風圧力荷重	$W_w$ (Cf = 1.0 )	6,100	$N/m^2$
	気圧差荷重	$W_p$	8,900	$N/m^2$
	荷重の組合せ	$W_{(T1,T2)} = \max(W_p, W_w + 0.5W_p)$	10,550	$N/m^2$
	設計用風荷重	$w = W_{(T1,T2)} - w_v$	3,850	$N/m^2$
応力計算	中央モーメント	$M = wL^2/8$	2,436	$Nm/m$
	端部せん断力	$Q = wL/2$	4,331	$N/m$
断面検討	引張応力度	$1.1f_t$	379.5	$N/mm^2$
	許容曲げモーメント	$Ma = a_t \cdot 1.1f_t \cdot j$	40,228	$Nm/m$
	曲げ検定値	$M/Ma$	0.06	< 1.00 OK
	許容せん断応力度	$f_s = \min(F_c/30 \times 1.5, (0.49 + F_c/100) \times 1.5)$	1.095	$N/mm^2$
	許容せん断力	$Qa = b \cdot j \cdot f_s$	116,891	$N/m$
	せん断検定値	$Q/Qa$	0.04	< 1.00 OK
裕度の算定	最大負担荷重	$Ma = w_1 L^2 / 8$ より $w_1 = 8 \times Ma / L^2$	63,570	$N/m$
	最大負担竜巻荷重	$w_1 = w_a - w_v$ より $w_a = w_1 + w_v$	70,270	$N/m^2$
	裕度	$w_a / W_{(T1,T2)}$	6.6	

第5表 燃料取扱棟の大梁の計算結果 (sG1)

種別	項目	記号・計算式	計算値	単位
部材諸元	断面係数	Z	51,410,000	mm <sup>3</sup>
	断面2次モーメント	I	43,700,000,000	mm <sup>4</sup>
	ウェブ断面積	A <sub>w</sub>	48,600	mm <sup>2</sup>
	材長	L	16.80	m
	材間隔	a	9.00	m
鉛直荷重	屋根重量	w <sub>v</sub>	8,900	N/m <sup>2</sup>
竜巻荷重	風圧力荷重	W <sub>w</sub> (C <sub>f</sub> = 1.0 )	6,100	N/m <sup>2</sup>
	気圧差荷重	W <sub>p</sub>	8,900	N/m <sup>2</sup>
	荷重の組合せ	W <sub>(T1,T2)</sub> =max(W <sub>p</sub> , W <sub>w</sub> +0.5W <sub>p</sub> )	10,550	N/m <sup>2</sup>
	設計用風荷重	w = W <sub>(T1,T2)</sub> × a - (w <sub>v</sub> × a)	14,850	N/m
応力計算	荷重項 (風荷重)	C=wL <sup>2</sup> /12	349,272	Nm
		Mo=wL <sup>2</sup> /8	523,908	Nm
		Qo=wL/2	124,740	N
	曲げモーメント	ML=α <sub>L</sub> × C      α <sub>L</sub> = 0.463	161,713	Nm
		Mc=α <sub>C</sub> × Mo      α <sub>C</sub> = 0.662	346,827	Nm
		MR=α <sub>R</sub> × C      α <sub>R</sub> = 0.550	192,100	Nm
せん断力	Q=Qo+( ML-MR )/L	126,549	N	
断面検討	縁応力度	σ=M <sub>max</sub> /Z	6.7	N/mm <sup>2</sup>
	許容曲げ応力度	1.1sfb (sfb = 325 N/mm <sup>2</sup> )	357.5	N/mm <sup>2</sup>
	曲げ検定値	σ / 1.1sfb	0.02	< 1.00 OK
	せん断応力度	τ = Q / A <sub>w</sub>	2.6	N/mm <sup>2</sup>
	許容せん断応力度	sfs (sfs = 187.6 N/mm <sup>2</sup> )	187.6	N/mm <sup>2</sup>
	せん断検定値	τ / sfs	0.01	< 1.00 OK
裕度の算定	最大負担曲げモーメント	Ma=1.1sfb × Z	18,379,075	Nm
	応力係数	α <sub>L</sub> = 0.463		
		α <sub>C</sub> = 0.662		
		α <sub>R</sub> = 0.550		
	最大荷重項	C <sub>L</sub> =Ma/α <sub>L</sub> =w <sub>1L</sub> L <sup>2</sup> /12 より w <sub>1L</sub> =(12 × Ma/α <sub>L</sub> )/L <sup>2</sup>	1,687,739	Nm
		Mo=Ma/α <sub>C</sub> =w <sub>1C</sub> L <sup>2</sup> /8 より w <sub>1C</sub> =(8 × Ma/α <sub>C</sub> )/L <sup>2</sup>	786,932	Nm
		C <sub>R</sub> =Ma/α <sub>R</sub> =w <sub>1R</sub> L <sup>2</sup> /12 より w <sub>1R</sub> =(12 × Ma/α <sub>R</sub> )/L <sup>2</sup>	1,420,770	Nm
	最大負担竜巻荷重	w <sub>1</sub> = wa × a - (w <sub>v</sub> × a) より		
wa <sub>L</sub> = w <sub>1L</sub> /a + w <sub>v</sub>		196,427	N/m <sup>2</sup>	
wa <sub>C</sub> = w <sub>1C</sub> /a + w <sub>v</sub>		96,337	N/m <sup>2</sup>	
wa <sub>R</sub> = w <sub>1R</sub> /a + w <sub>v</sub>		166,763	N/m <sup>2</sup>	
裕度	wa <sub>min</sub> /W <sub>(T1,T2)</sub>	9.1		

第5表 燃料取扱棟の大梁の計算結果 (sG3)

種別	項目	記号・計算式	計算値	単位
部材諸元	断面係数	Z	22,390,000	mm <sup>3</sup>
	断面2次モーメント	I	15,674,000,000	mm <sup>4</sup>
	ウェブ断面積	A <sub>w</sub>	29,480	mm <sup>2</sup>
	材長	L	16.80	m
	材間隔	a	6.55	m
鉛直荷重	屋根重量	w <sub>v</sub>	8,900	N/m <sup>2</sup>
竜巻荷重	風圧力荷重	W <sub>w</sub> (C <sub>f</sub> = 1.0 )	6,100	N/m <sup>2</sup>
	気圧差荷重	W <sub>p</sub>	8,900	N/m <sup>2</sup>
	荷重の組合せ	W <sub>(T1,T2)</sub> =max(W <sub>p</sub> , W <sub>w</sub> +0.5W <sub>p</sub> )	10,550	N/m <sup>2</sup>
	設計用風荷重	w = W <sub>(T1,T2)</sub> × a - (w <sub>v</sub> × a)	10,808	N/m
応力計算	荷重項 (風荷重)	C=wL <sup>2</sup> /12	254,204	Nm
		Mo=wL <sup>2</sup> /8	381,306	Nm
		Qo=wL/2	90,787	N
	曲げモーメント	ML=α <sub>L</sub> × C      α <sub>L</sub> = 0.923	234,630	Nm
		Mc=α <sub>C</sub> × Mo      α <sub>C</sub> = 0.437	166,631	Nm
		MR=α <sub>R</sub> × C      α <sub>R</sub> = 0.766	194,720	Nm
せん断力	Q=Qo+( ML-MR )/L	93,163	N	
断面検討	縁応力度	σ=M <sub>max</sub> /Z	10.5	N/mm <sup>2</sup>
	許容曲げ応力度	1.1sfb (sfb = 325 N/mm <sup>2</sup> )	357.5	N/mm <sup>2</sup>
	曲げ検定値	σ / 1.1sfb	0.03	< 1.00 OK
	せん断応力度	τ = Q / A <sub>w</sub>	3.2	N/mm <sup>2</sup>
	許容せん断応力度	sfs (sfs = 187.6 N/mm <sup>2</sup> )	187.6	N/mm <sup>2</sup>
	せん断検定値	τ / sfs	0.02	< 1.00 OK
裕度の算定	最大負担曲げモーメント	Ma=1.1sfb × Z	8,004,425	Nm
	応力係数	α <sub>L</sub> = 0.923		
		α <sub>C</sub> = 0.437		
		α <sub>R</sub> = 0.766		
	最大荷重項	C <sub>L</sub> =Ma/α <sub>L</sub> =w <sub>1L</sub> L <sup>2</sup> /12 より w <sub>1L</sub> =(12 × Ma/α <sub>L</sub> )/L <sup>2</sup>	368,715	Nm
		Mo=Ma/α <sub>C</sub> =w <sub>1C</sub> L <sup>2</sup> /8 より w <sub>1C</sub> =(8 × Ma/α <sub>C</sub> )/L <sup>2</sup>	519,183	Nm
		C <sub>R</sub> =Ma/α <sub>R</sub> =w <sub>1R</sub> L <sup>2</sup> /12 より w <sub>1R</sub> =(12 × Ma/α <sub>R</sub> )/L <sup>2</sup>	444,287	Nm
	最大負担竜巻荷重	w <sub>1</sub> = wa × a - (w <sub>v</sub> × a) より		
wa <sub>L</sub> = w <sub>1L</sub> /a + w <sub>v</sub>		65,192	N/m <sup>2</sup>	
wa <sub>C</sub> = w <sub>1C</sub> /a + w <sub>v</sub>		88,165	N/m <sup>2</sup>	
wa <sub>R</sub> = w <sub>1R</sub> /a + w <sub>v</sub>		76,730	N/m <sup>2</sup>	
裕度	wa <sub>min</sub> /W <sub>(T1,T2)</sub>	6.1		

第6表 燃料取扱棟の小梁の計算結果 (sB1)

種別	項目	記号・計算式	計算値	単位
部材諸元	断面係数	Z	5,630,000	mm <sup>3</sup>
	断面2次モーメント	I	1,970,000,000	mm <sup>4</sup>
	ウェブ断面積	Aw	8,476	mm <sup>2</sup>
	材長	L	11.10	m
	材間隔	a	2.10	m
鉛直荷重	屋根重量	w <sub>v</sub>	7,200	N/m <sup>2</sup>
竜巻荷重	風圧力荷重	W <sub>w</sub> (Cf = 1.0 )	6,100	N/m <sup>2</sup>
	気圧差荷重	W <sub>p</sub>	8,900	N/m <sup>2</sup>
	荷重の組合せ	W <sub>(T1,T2)</sub> = max(W <sub>p</sub> , W <sub>w</sub> + 0.5W <sub>p</sub> )	10,550	N/m <sup>2</sup>
	設計用風荷重	w = W <sub>(T1,T2)</sub> × a - (w <sub>v</sub> × a)	7,035	N/m
応力計算	最大モーメント	M <sub>max</sub> = wL <sup>2</sup> /8	108,348	Nm
	せん断力	Q = wL/2	39,044	N
断面検討	縁応力度	σ = M <sub>max</sub> /Z	19.2	N/mm <sup>2</sup>
	許容曲げ応力度	1.1sfb (sfb = 235 N/mm <sup>2</sup> )	258.5	N/mm <sup>2</sup>
	曲げ検定値	σ / 1.1sfb	0.07	< 1.00 OK
	せん断応力度	τ = Q/Aw	4.6	N/mm <sup>2</sup>
	許容せん断応力度	sfs (sfs = 135.7 N/mm <sup>2</sup> )	135.7	N/mm <sup>2</sup>
	せん断検定値	τ / sfs	0.03	< 1.00 OK
裕度の算定	最大負担曲げモーメント	Ma = 1.1sfb × Z	1,455,355	Nm
	最大負担荷重	Ma = w <sub>1</sub> L <sup>2</sup> /8 より w <sub>1</sub> = 8 × Ma/L <sup>2</sup>	94,496	N/m
	最大負担竜巻荷重	w <sub>1</sub> = wa × a - (w <sub>v</sub> × a) より wa = w <sub>1</sub> /a + w <sub>v</sub>	52,198	N/m <sup>2</sup>
	裕度	wa/W <sub>(T1,T2)</sub>	4.9	

第6表 燃料取扱棟の小梁の計算結果 (sB2)

種別	項目	記号・計算式	計算値	単位
部材諸元	断面係数	Z	2,490,000	mm <sup>3</sup>
	断面2次モーメント	I	547,000,000	mm <sup>4</sup>
	ウェブ断面積	Aw	4,444	mm <sup>2</sup>
	材長	L	8.60	m
	材間隔	a	2.10	m
鉛直荷重	屋根重量	w <sub>v</sub>	7,200	N/m <sup>2</sup>
竜巻荷重	風圧力荷重	W <sub>w</sub> (Cf = 1.0 )	6,100	N/m <sup>2</sup>
	気圧差荷重	W <sub>p</sub>	8,900	N/m <sup>2</sup>
	荷重の組合せ	W <sub>(T1,T2)</sub> = max(W <sub>p</sub> , W <sub>w</sub> + 0.5W <sub>p</sub> )	10,550	N/m <sup>2</sup>
	設計用風荷重	w = W <sub>(T1,T2)</sub> × a - (w <sub>v</sub> × a)	7,035	N/m
応力計算	最大モーメント	M <sub>max</sub> = wL <sup>2</sup> /8	65,039	Nm
	せん断力	Q = wL/2	30,251	N
断面検討	縁応力度	σ = M <sub>max</sub> /Z	26.1	N/mm <sup>2</sup>
	許容曲げ応力度	1.1sfb (sfb = 235 N/mm <sup>2</sup> )	258.5	N/mm <sup>2</sup>
	曲げ検定値	σ / 1.1sfb	0.10	< 1.00 OK
	せん断応力度	τ = Q/Aw	6.8	N/mm <sup>2</sup>
	許容せん断応力度	sfs (sfs = 135.7 N/mm <sup>2</sup> )	135.7	N/mm <sup>2</sup>
	せん断検定値	τ / sfs	0.05	< 1.00 OK
裕度の算定	最大負担曲げモーメント	Ma = 1.1sfb × Z	643,665	Nm
	最大負担荷重	Ma = w <sub>1</sub> L <sup>2</sup> /8 より w <sub>1</sub> = 8 × Ma/L <sup>2</sup>	69,623	N/m
	最大負担竜巻荷重	w <sub>1</sub> = wa × a - (w <sub>v</sub> × a) より wa = w <sub>1</sub> /a + w <sub>v</sub>	40,354	N/m <sup>2</sup>
	裕度	wa/W <sub>(T1,T2)</sub>	3.8	

第6表 燃料取扱棟の小梁の計算結果 (sB3)

種別	項目	記号・計算式	計算値	単位
部材諸元	断面係数	Z	1,180,000	mm <sup>3</sup>
	断面2次モーメント	I	235,000,000	mm <sup>4</sup>
	ウェブ断面積	Aw	2,992	mm <sup>2</sup>
	材長	L	6.00	m
	材間隔	a	2.10	m
鉛直荷重	屋根重量	w <sub>v</sub>	7,200	N/m <sup>2</sup>
竜巻荷重	風圧力荷重	W <sub>w</sub> (Cf = 1.0 )	6,100	N/m <sup>2</sup>
	気圧差荷重	W <sub>p</sub>	8,900	N/m <sup>2</sup>
	荷重の組合せ	W <sub>(T1,T2)</sub> = max(W <sub>p</sub> , W <sub>w</sub> + 0.5W <sub>p</sub> )	10,550	N/m <sup>2</sup>
	設計用風荷重	w = W <sub>(T1,T2)</sub> × a - (w <sub>v</sub> × a)	7,035	N/m
応力計算	最大モーメント	M <sub>max</sub> = wL <sup>2</sup> /8	31,658	Nm
	せん断力	Q = wL/2	21,105	N
断面検討	縁応力度	σ = M <sub>max</sub> /Z	26.8	N/mm <sup>2</sup>
	許容曲げ応力度	1.1sfb (sfb = 235 N/mm <sup>2</sup> )	258.5	N/mm <sup>2</sup>
	曲げ検定値	σ / 1.1sfb	0.10	< 1.00 OK
	せん断応力度	τ = Q/Aw	7.1	N/mm <sup>2</sup>
	許容せん断応力度	sfs (sfs = 135.7 N/mm <sup>2</sup> )	135.7	N/mm <sup>2</sup>
	せん断検定値	τ / sfs	0.05	< 1.00 OK
裕度の算定	最大負担曲げモーメント	Ma = 1.1sfb × Z	305,030	Nm
	最大負担荷重	Ma = w <sub>1</sub> L <sup>2</sup> /8 より w <sub>1</sub> = 8 × Ma/L <sup>2</sup>	67,784	N/m
	最大負担竜巻荷重	w <sub>1</sub> = wa × a - (w <sub>v</sub> × a) より wa = w <sub>1</sub> /a + w <sub>v</sub>	39,478	N/m <sup>2</sup>
	裕度	wa/W <sub>(T1,T2)</sub>	3.7	



#### 4. 検討結果のまとめ

部材が飛来物（2次飛来物）となるかの確認について、外壁及び屋根の評価結果を以下の通りまとめる。

##### a. 外壁の検討結果

外壁の検討結果を以下の第7表に示す。

外壁部材において、(許容荷重) / (竜巻による荷重) が 1.0 以上あることを確認できたことから、部材の飛散はない。

第7表 燃料取扱棟の外壁部材の飛散有無確認結果

検討部位	符号	断面	裕度	備考
波板	—	t = 0.8 山高 35mm	3.4	波板 B-170R
胴縁	—	[-125×65×6×8	1.2	SS400
間柱	sP1	H-340×250×9×14	1.5	SS400

##### b. 屋根の検討結果

屋根の検討結果を第8表に示す。

屋根部材において、(許容荷重) / (竜巻による荷重) が 1.0 以上あることを確認できたことから、部材の飛散はない。

第8表 燃料取扱棟の屋根部材の飛散有無確認結果

検討部位	符号	断面	裕度	備考
スラブ	S18	t = 180mm	6.6	T. P. 47.6m
大梁	sG1	BH-1700×600×30×40	9.1	SN490B, T. P. 55.0m
	sG3	BH-1400×400×22×30	6.1	SN490B, T. P. 47.6m
小梁	sB1	H-700×300×13×24	4.9	SS400, T. P. 55.0m
	sB2	H-440×300×11×18	3.8	SS400, T. P. 55.0m
	sB3	H-400×200×8×13	3.7	SS400, T. P. 55.0m

外壁に開口部を想定した際の燃料取扱棟の屋根スラブ  
に対する吹上げ荷重の評価について

燃料取扱棟において、外壁に開口部を想定した際に屋根スラブに生じる吹上げ荷重に対する検討を実施した。

ここでは、吹上げ荷重として作用する複合荷重が屋根スラブの許容荷重を下回ることを確認している。

1. 評価荷重

(1) 風力係数の設定

風圧力による荷重算定にあたり、開口部を想定した際の風力係数は、「平成 12 年 建設省告示第 1454 号」に従い算定する。第 1 表に評価に用いた屋根の風力係数を示す。

第 1 表 開口部を想定した際の屋根面の風力係数

項目	風力係数
屋根面	C = -1.6

第3 令第87条第1項の風力係数の数値は、次の図1から図7までに掲げる形状の建築物又は工作物にあってはそれぞれ当該形状に応じて表1から表9までに掲げる数値を用いて次の式により算出するものとし、その他の形状のものにあってはそれぞれ類似の形状のもの数値に準じて定めるものとする。ただし、風洞実験の結果に基づき算出する場合においては、当該数値によることができる。

$$C_f = C_{pe} - C_{pi}$$

この式において、 $C_f$ 、 $C_{pe}$ 及び $C_{pi}$ は、それぞれ次の数値を表すものとする。

$C_f$  風力係数  
 $C_{pe}$  閉鎖型及び開放型の建築物の外圧係数で、次の表1から表4までに掲げる数値（屋外から当該部分を垂直に押す方向を正とする。）  
 $C_{pi}$  閉鎖型及び開放型の建築物の内圧係数で、次の表5に掲げる数値（室内から当該部分を垂直に押す方向を正とする。）ただし、独立上家、ラチス構造物、金網その他の網状の構造物及び煙突その他の円筒形の構造物にあっては、次の表6から表9までに掲げる数値（図中の一の方向を正とする。）を $C_f$ とするものとする。

図3 開放型の建築物（表1、表3及び表5を用いるものとする。）



表3 切妻屋根面、片流れ屋根面及びのこぎり屋根面の $C_{pe}$

部位	風上面		風下面
	正の係数	負の係数	
$\theta$			
10度未満	—	-1.0	-0.5
10度	0	-1.0	
30度	0.2	-0.3	
45度	0.4	0	
90度	0.8	—	

この表に掲げる $\theta$ の数値以外の $\theta$ に応じた $C_{pe}$ は、表に掲げる数値をそれぞれ直線的に補間した数値とする。ただし、 $\theta$ が10度未満の場合にあっては正の係数を、 $\theta$ が45度を越える場合にあっては負の係数を用いた計算は省略することができる。

表5 閉鎖型及び開放型の建築物の $C_{pi}$

形式	閉鎖型	開放型	
		風上開放	風下開放
$C_{pi}$	0及び-0.2	0.6	-0.4

## (2) 複合荷重

屋根の評価に用いる荷重としては、風圧力による荷重、気圧差による荷重が作用する方向を考慮し、最大となる複合荷重に対し検討を行う。

建屋外側から内側に作用する荷重を正とすると、複合荷重 ( $W_{T1}$ ,  $W_{T2}$ \*) は以下の通りとなる。

$$W_{T1} = W_P = -8.9 \text{ [kN/m}^2\text{]}$$

$$W_{T2} = W_W + 0.5 \times W_P = -6.1 \times C - 0.5 \times 8.9 = -6.1 \times 1.6 - 0.5 \times 8.9 = -14.21 \text{ [kN/m}^2\text{]}$$

※：屋外方向への荷重に対して、衝撃荷重 ( $W_M$ ) は考慮しない

したがって、複合荷重のうち荷重が大きい  $W_{T2}$  に対して検討を行う。

## (3) 評価荷重

評価荷重 ( $w$ ) は、上記による  $W_{T2}$  に対して逆向きに作用する自重 ( $W_D = 6.7 \text{ kN/m}^2$ ) を考慮し、 $w = -7.51 \text{ [kN/m}^2\text{]}$  とする。

## 2. 評価方法

コンクリート屋根スラブを評価対象とし、「1. 評価荷重」に示す評価荷重（w）により、破損し、波及的影響を及ぼさない事を確認する。具体的には、各部材の終局耐力から算定した許容荷重が、竜巻による複合荷重を上回っている事を、（許容荷重） / （竜巻による荷重）を部材の裕度とし、この裕度が1.0以上あることで確認する。

### (1) 使用材料及び許容応力度

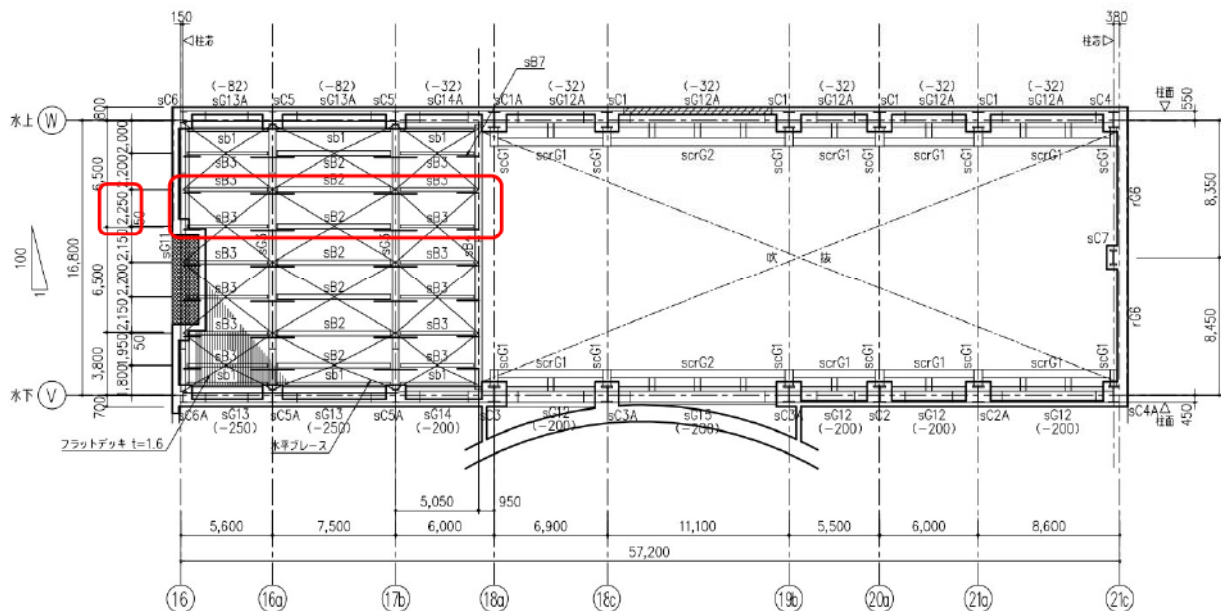
屋根の飛散評価における、使用材料及び各部材の仕様を以下に示す。なお、終局時の検討であることから、鋼材は建設省告示第2464号（平成12年12月26日施行）に基づき、検討時にはF値を1.1倍する。

- ・コンクリート  $F_c = 24 \text{ N/mm}^2$
- ・鉄筋 SD345 ( $F = 345 \text{ N/mm}^2$ )

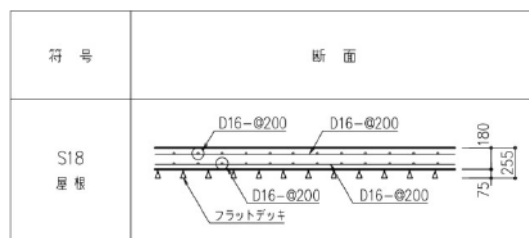
### (2) 検討対象範囲

検討対象範囲を第1図に示す。

検討箇所は、最も支持間隔が長い箇所としてスラブ S18 を選定している。



(T. P. 47.6m 屋根伏図)



(スラブ詳細)

第1図 燃料取扱棟の屋根部材（屋根スラブ）の検討箇所及び詳細

### 3. 評価結果

評価にあたっては、部材を両端固定の一方向版として検討する。竜巻による複合荷重が等分布荷重として部材に作用するものとして、最大曲げモーメント及びせん断力より評価荷重を算出し、部材の許容荷重と比較評価する。

評価結果を第2表に示す。評価結果より、外壁に開口部を想定した際の吹上げ荷重に対して、部材の飛散はない。

第2表 燃料取扱棟のスラブの計算結果

種別	項目	記号・計算式	計算値	単位
諸元	コンクリート強度	$F_c24$	24	$N/mm^2$
	鉄筋の短期許容応力度	$f_t$	345	$N/mm^2$
	スラブ厚	$t$	180	mm
	鉄筋量	$a_t = 1.986 \times 1000/200$	993	$mm^2$
	有効せい	$d$	122	mm
	部材幅	$b$	1,000	mm
	応力中心間距離	$j = 7/8d$	106.75	mm
	スパン	$L$	2.25	m
鉛直荷重	屋根重量	$w_v$	6,700	$N/m^2$
竜巻荷重	風圧力荷重	$W_w$ (Cf = 1.6)	9,760	$N/m^2$
	気圧差荷重	$W_p$	8,900	$N/m^2$
	荷重の組合せ	$W_{(T1,T2)} = \max(W_p, W_w + 0.5W_p)$	14,210	$N/m^2$
	設計用風荷重	$w = W_{(T1,T2)} - w_v$	7,510	$N/m^2$
応力計算	中央モーメント	$M = wL^2/8$	4,752	$Nm/m$
	端部せん断力	$Q = wL/2$	8,449	$N/m$
断面検討	引張応力度	1.1ft	379.5	$N/mm^2$
	許容曲げモーメント	$Ma = a_t \cdot 1.1ft \cdot j$	40,228	$Nm/m$
	曲げ検定値	$M/Ma$	0.12	< 1.00 OK
	許容せん断応力度	$f_s = \min(F_c/30 \times 1.5, (0.49 + F_c/100) \times 1.5)$	1.095	$N/mm^2$
	許容せん断力	$Qa = b \cdot j \cdot f_s$	116,891	$N/m$
	せん断検定値	$Q/Qa$	0.07	< 1.00 OK
裕度の算定	最大負担荷重	$Ma = w_1 L^2/8$ より $w_1 = 8 \times Ma/L^2$	63,570	$N/m$
	最大負担竜巻荷重	$w_1 = w_a - w_v$ より $w_a = w_1 + w_v$	70,270	$N/m^2$
	裕度	$w_a/W_{(T1,T2)}$	4.9	

## 17. 評価式の妥当性及び評価方法について

泊発電所における設計飛来物のコンクリート構造物への衝突による影響は、以下の「修正 NDRC 式」(①式)、「Degen 式」(②式)及び「Chang 式」(③式)に基づいて評価している。

このうち、貫通評価は①式に示す修正 NDRC 式を用いて貫入深さ  $x_c$  を求め、Degen による②式により貫通限界厚さを求めている。裏面剥離評価は Chang による③式により裏面剥離限界厚さを求めている。

$$x_c = \alpha_c \sqrt{4KWND \left( \frac{V}{1000D} \right)^{1.8}}, \text{ for } \frac{x_c}{\alpha_c D} < 2.0 \quad \dots \dots \textcircled{1}$$

$$t_p = \alpha_p D \left\{ 2.2 \left( \frac{x_c}{\alpha_c D} \right) - 0.3 \left( \frac{x_c}{\alpha_c D} \right)^2 \right\}, \text{ for } \frac{x_c}{\alpha_c D} \leq 1.52 \quad \dots \dots \textcircled{2}$$

$$t_s = \alpha_s 1.84 \left\{ \frac{200}{V} \right\}^{0.13} \frac{(MV^2)^{0.4}}{(D/12)^{0.2} (144Fc)^{0.4}} \quad \dots \dots \textcircled{3}$$

ここで、

$x_c$ : 貫入深さ (in)	$\alpha_c$ : 飛来物低減係数	$K : 180/\sqrt{Fc}$
$W$ : 飛来物重量 (lb)	$N$ : 形状係数	$D$ : 飛来物直径 (in)
$V$ : 衝突速度 (ft/s)	$Fc$ : コンクリート強度 (psi)	
$t_p$ : 貫通厚さ (in)	$\alpha_p$ : 飛来物低減係数	
$t_s$ : 裏面剥離厚さ (ft)	$\alpha_s$ : 飛来物低減係数	$M$ : 質量 (lb/ (ft/s <sup>2</sup> ))

### 1. 評価式の妥当性

これらの評価式については、NEI07-13<sup>※1</sup>に記載されている。また、竜巻による飛来物の取り扱いに関して、米国 NRC の基準類<sup>※2</sup>では、修正 NDRC 式等の実験式によってコンクリートへの貫入深さ、必要防護厚さを算定することができると記載されている。

また、これらの評価式は、飛来物を受けるコンクリート構造物の局部的損傷評価式として国内でも認知されており、「構造物の衝撃挙動と設計法」(土木学会)においても、裏面剥離限界厚さの評価式としては Chang 式の適用性が高く、貫通限界厚さの評価式としては Degen 式が比較的適用性が高いとされている。

以上のことから、設計飛来物のコンクリート構造物への衝突による影響評価において、上記の評価式を適用することは妥当であると考えられる。

※1 : Methodology for Performing Aircraft Impact Assessments for New Plant Designs

※2 : STANDARD REVIEW PLAN, 3.5.3 BARRIER DESIGN PROCEDURES

## 2. 評価方法

泊発電所における設計飛来物の諸元を第 17-1 表に示す。この諸元のうち鋼製材が原子炉建屋に水平に衝突した場合の評価について、評価式に基づく計算過程を以降に示す。

第 17-1 表 設計飛来物の諸元

飛来物の種類	砂利	鋼製パイプ	鋼製材
サイズ (m)	長さ×幅×奥行 0.04×0.04×0.04	長さ×直径 2×0.05	長さ×幅×奥行 4.2×0.3×0.2
質量 (kg)	0.17	8.4	135
最大水平速度 (m/s)	62	49	57
最大鉛直速度 (m/s)	42	33	38

### <飛来物評価諸元の設定>

設定が必要な各定数は、以下に基づいて設定している。設定した評価諸元を第 17-2 表に示す。

- ・低減係数：考慮しない (=1.0)
- ・コンクリート強度：原子炉建屋のコンクリート強度である  $F_c=24 \text{ N/mm}^2$
- ・飛来物直径：飛来物の衝突評価にあたっては、衝突面積が小さいほど貫入深さは大きくなるため、設計飛来物の最小面積となる部分が衝突するものとして評価する。  
鋼製材の場合は、幅 30cm×奥行 20cm=600cm<sup>2</sup> となることから、これと等面積の円となる直径を算出すると 27.6cm となる。
- ・形状係数：「構造工学シリーズ 6 建造物の衝撃挙動と設計法」(土木学会) に記載されている形状係数 (0.72~1.14) のうち、先端の形状が非常に鋭いもの (=1.14) として評価する。

第 17-2 表 飛来物評価諸元

低減係数 $\alpha_c, \alpha_P, \alpha_S$	コンクリート強度 Fc	飛来物重量 W	形状係数 N	飛来物直径 D	衝突速度 V
1.0	24 (N/mm <sup>2</sup> ) ↓ 3480 (psi)	135 (kg) ↓ 298 (lbf)	1.14	27.6 (cm) ↓ 10.9 (in)	57 (m/s) ↓ 187 (ft/s)



<貫通評価>

$$x_c = 1.0 \sqrt{4 \times \frac{180}{\sqrt{3480}} \times 298 \times 1.14 \times 10.9 \left(\frac{187}{1000 \times 10.9}\right)^{1.8}}$$

$$= 5.48 \text{ (in)}$$

$$t_p = 1.0 \times 10.9 \left\{ 2.2 \left(\frac{5.48}{1.0 \times 10.9}\right) - 0.3 \left(\frac{5.48}{1.0 \times 10.9}\right)^2 \right\}$$

$$= 11.23 \text{ (in)}$$

$$= 28.52 \text{ (cm)} \Rightarrow 29 \text{ (cm)}$$

<裏面剥離評価>

$$t_s = 1.0 \times 1.84 \left(\frac{200}{187}\right)^{0.13} \frac{(9.26 \times 187^2)^{0.4}}{\left(\frac{10.9}{12}\right)^{0.2} (144 \times 3480)^{0.4}}$$

$$= 1.589 \text{ (ft)}$$

$$= 48.44 \text{ (cm)} \Rightarrow 49 \text{ (cm)}$$

計算過程を示した鋼製材を含む設計飛来物の評価結果を第17-3表に示す。

第17-3表 原子炉建屋のコンクリートの必要最小厚

	砂利		鋼製パイプ		鋼製材	
	水平	鉛直	水平	鉛直	水平	鉛直
貫通 (cm)	3	2	12	9	29	21
裏面剥離 (cm)	6	4	21	16	49	37

※小数点以下は切り上げている。

## 18. デッキプレート等によるコンクリート片の飛散防止について

### 1. 検討方針

設計飛来物に対して、裏面剥離を生じさせないために必要な屋根スラブのコンクリート最小厚さを周辺補機棟、原子炉補助建屋及びディーゼル発電機建屋では 37cm 以上と、外部遮へい建屋では 34cm 以上と評価している。

周辺補機棟、原子炉補助建屋及びディーゼル発電機建屋の屋根スラブには、防水押えコンクリート（厚さ 8cm）を施工しているため、実質のコンクリート厚さは第 18-1 表の通りであり、周辺補機棟及び原子炉補助建屋は裏面剥離がないものと評価できる。一方、ディーゼル発電機建屋は、防水押えコンクリートを考慮しても裏面剥離を生じるコンクリート厚さであることから、外部遮へい建屋とともにデッキプレート等によるコンクリート片の飛散防止効果を確認する。

第 18-1 表 各建屋の屋根スラブのコンクリート厚さ

建屋名	コンクリート厚さ		評価	必要スラブ厚
	屋根スラブ	防水押え考慮		
周辺補機棟	40 (cm)	48 (cm)	>	37 (cm)
原子炉補助建屋	30 (cm)	38 (cm)	>	
ディーゼル発電機建屋	18 (cm)	26 (cm)	<	
外部遮へい建屋	30 (cm)	—	<	34 (cm)

### 2. 検討結果

コンクリートの裏面剥離は、応力波の伝播・反射によって生じる引張応力が原因とされているため、この応力波の反射を抑制する等により引張応力を小さくすることが必要であり、この対策としては、衝突面裏面に鋼製ライナーを取り付ける方法が有効であることが各種検討※1※2において確認されている。

#### 【ディーゼル発電機建屋】

- ・屋根スラブに施工されているデッキプレートは、厚さが 1.6mm の鋼板であり、鋼製ライナーとほぼ同等な性能を有していると考えられることから、裏面剥離発生の抑止効果が期待できる。
- ・また、デッキプレートは、1,500～2,200mm 程度の間隔で鉄骨梁に支持されていることから、裏面剥離が生じた場合にも鉄骨梁に支持されたデッキプレートでコンクリート片の飛散を抑える効果が期待できる。（屋根スラブの概略図を第 18-1 図に示す。）

これらのことから、デッキプレートによる効果を定量的に評価することは難しいものの、ディーゼル発電機建屋の屋根スラブに施工されたデッキプレートは、裏面剥離に対して十分な効果を発揮するとともに、コンクリート片の飛散防止に寄与するものと考えられる。

※1：「飛来物の衝突に対する鉄筋コンクリート構造物の対衝撃補強工法」コンクリート工学年次論文報告集

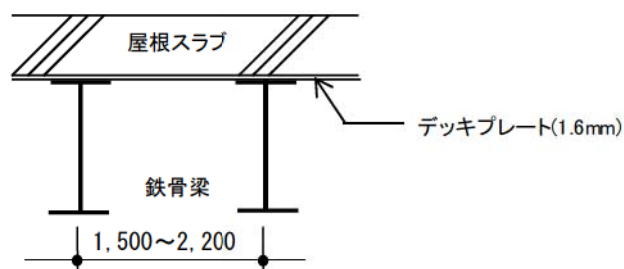
※2：「飛来物の高速衝突を受ける鋼製ライナー付き鉄筋コンクリート板の局部損傷評価法」日本建築学会構造系論文集

### 【外部遮へい建屋のドーム部】

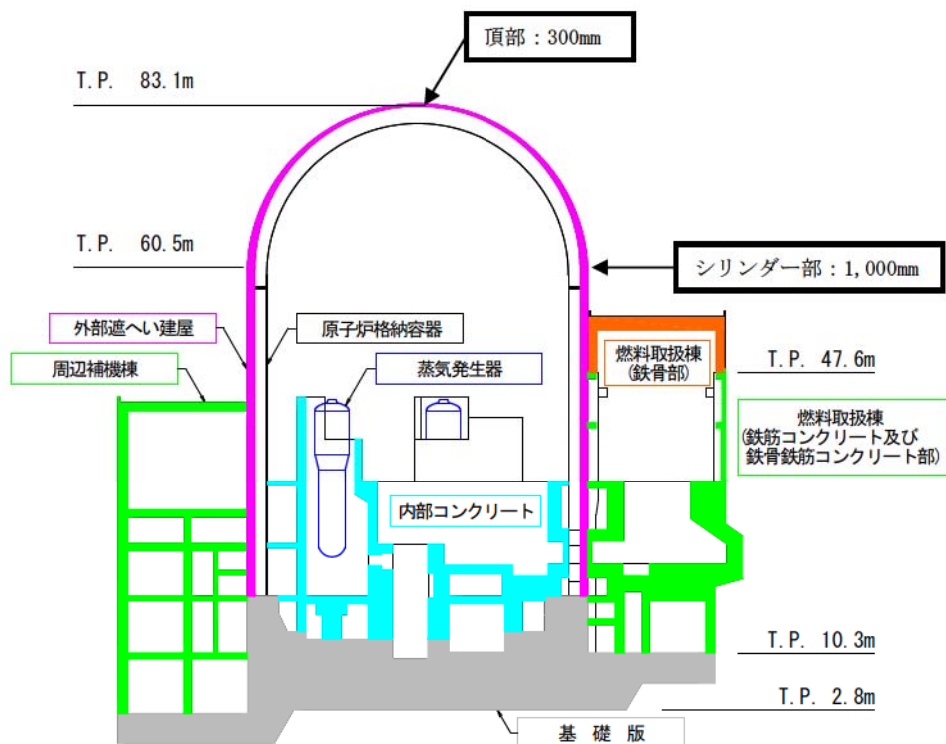
- ・ 頂部からシリンダー部にかけて 300mm～1,000mm と徐々にコンクリートが厚くなっている。(原子炉建屋の概略断面図を第 18-2 図に示す。)
- ・ コンクリート厚さが薄いドーム部の頂部付近には、厚さ 12mm の鋼板を施工している。
- ・ また、これ以外の部分は、他の建屋同様に厚さ 1.6mm のデッキプレートを施工しており、かつドーム部全体はトラス梁に支持されている。

これらのことから、外部遮へい建屋のドーム部の屋根スラブに施工された鋼板及びデッキプレートは、ディーゼル発電機建屋と同様に裏面剥離及びコンクリート片の飛散防止に対して十分な効果を発揮するものと考えられる。

なお、仮にコンクリート片の飛散が発生し、直下の原子炉格納容器に当たったとしても、その範囲は限定的であり、かつ厚さは 22.5mm の鋼板であることから、原子炉格納容器への影響はないものと考ええる。



第 18-1 図 屋根スラブの概略図



第 18-2 図 概略断面図

## 19. 評価対象施設の評価実施項目および考え方について

評価対象施設（設備）の構造健全性の確認にあたっては、「設計竜巻の風圧力による荷重」、「設計竜巻による気圧差による荷重」、「設計飛来物による衝撃荷重」を組み合わせた複合荷重（以下、「設計竜巻による複合荷重」という。）または「設計竜巻による気圧差による荷重」による影響を評価する。また、評価対象施設（設備）が屋外に設置されている場合および設計飛来物が外殻となる建屋の外壁等を貫通する場合は設計飛来物による影響を評価する。

設計竜巻による複合荷重 ( $W_{T1}=W_P, W_{T2}=W_W+0.5\cdot W_P+W_M$ ) または設計竜巻による気圧差による荷重 ( $W_P$ ) による影響評価の際に考慮する荷重については、次の考え方に基づいて設定する。

### ①設計竜巻の風圧力による荷重 ( $W_W$ )

下記の設備については、 $W_W$ を考慮する。

- 建屋外設備
- 建屋内設備のうち、設計竜巻により外壁（外装材等）が損傷することも考えられる鉄骨造建屋内に設置されている設備（全ての外壁が損傷することを考慮し、建屋外設備と同様に扱うものとする。）

### ②設計竜巻による気圧差による荷重 ( $W_P$ )

下記の設備については、 $W_P$ を考慮する。ただし、建屋外設備で大気開放されている場合は原則考慮しない。

- 建屋外設備
- 建屋内設備のうち、設計竜巻により外壁（外装材等）が損傷することも考えられる鉄骨造建屋内に設置されている設備（全ての外壁が損傷することを考慮し、建屋外設備と同様に扱うものとする。）
- 建屋内設備のうち、外気と繋がっている排気筒（建屋内）および換気空調設備

### ③設計飛来物による衝撃荷重 ( $W_M$ )

下記の設備については、 $W_M$ を考慮する。ただし、設計飛来物による影響評価より貫通するとの結果が得られた場合は考慮しない（貫通により安全機能を損なう可能性のある評価対象施設については飛来物防護対策を行う）。

- 建屋外設備
- 建屋内設備のうち、設計飛来物が衝突する可能性のある設備

評価対象施設の評価実施項目および考え方を表-1 に示す。

表-1 評価対象施設の評価実施項目および考え方 (1/9)

評価対象施設	①設計竜巻による複合荷重による影響評価		②設計飛来物による影響評価	考え方
	$W_{T1}$ ( $W_p$ )	$W_{T2}$ ( $W_w + 0.5 \cdot W_p + W_M$ )		
1. 竜巻防護施設				
原子炉補機冷却海水ポンプ (モータ含む)	○	○ <sup>*1</sup>	○	① ・当該設備は取水ピットポンプ室内に設置されているが、当該室の上部は開口しており、当該室の上屋 (循環水ポンプ建屋) は鉄骨造であるため、設計竜巻により当該建屋外壁の外装材等は損傷することも考えられる。 ・当該建屋外壁の外装材等が損傷した場合は、当該設備に設計竜巻による複合荷重が作用し、当該設備が損傷する可能性が考えられる。 ・以上より、設計竜巻による複合荷重により当該設備の据付面基礎ボルト、端子箱取付ボルト等に発生する応力を算定し、許容値との比較により安全余裕を確認する。
				② ・当該設備が設置されている取水ピットポンプ室の上屋 (循環水ポンプ建屋) の天井 (コンクリート) および外壁 (外装材) の厚さは薄いため、設計飛来物が貫通して侵入してくることが想定される。 ・以上より、当該設備への設計飛来物による影響を評価する。
排気筒 (建屋外)	○	○ <sup>*1</sup>	○	① ・当該設備は屋外に設置されているため、設計竜巻による複合荷重が作用し、当該設備の構造健全性が維持されない可能性が考えられる。 ・当該設備は大気開放されており、気圧差の影響は受けないと考えられるが、当該設備 (建屋外露出部) の高さは約 35m と長尺であることを踏まえ、気圧差の影響を考慮する。 ・以上より、設計竜巻による複合荷重により当該設備 (角ダクト、丸ダクト) の鋼板に発生する応力を算定し、許容値との比較により安全余裕を確認する。
				② ・当該設備は屋外に設置されているため、当該設備への設計飛来物による影響を評価する。

注：表中の「○」は評価実施項目であることを示す。

※1：設計飛来物による影響評価より貫通するとの結果が得られたことから、 $W_M$ については考慮しない (貫通により安全機能を損なう可能性のある評価対象施設については飛来物防護対策を行う)。

<凡例>

$W_w$ ：設計竜巻の風圧力による荷重、 $W_p$ ：設計竜巻による気圧差による荷重、 $W_M$ ：設計飛来物による衝撃荷重

表-1 評価対象施設の評価実施項目および考え方 (2/9)

評価対象施設	①設計竜巻による複合荷重による影響評価		②設計飛来物による影響評価	考え方
	$W_{T1}$ ( $W_P$ )	$W_{T2}$ ( $W_W + 0.5 \cdot W_P + W_M$ )		
蓄熱室加熱器	-	-	○	① ・当該設備はディーゼル発電機建屋内に設置されているが、当該建屋は鉄筋コンクリート造であり、設計竜巻による複合荷重に対して構造健全性が維持される。 ・以上より、当該設備が設計竜巻による影響を受けないと考えられることから評価対象外とする。
				② ・当該設備が設置されている蓄熱室に隣接する吸気ガラリ室の吸気フードおよび扉の厚さは薄いため、設計飛来物が貫通して侵入してくることが想定される。 ・以上より、当該設備への設計飛来物による影響を評価する。
配管および弁 (原子炉補機冷却海水系統)	○	○ <sup>*1</sup>	○	① ・当該設備は取水ピットポンプ室及びストレーナ室内に設置されているが、当該室の上部は開口しており、当該室の上屋（循環水ポンプ建屋）は鉄骨造であるため、設計竜巻により当該建屋外壁の外装材等は損傷することも考えられる。 ・当該建屋外壁の外装材等が損傷した場合は、当該設備に設計竜巻による複合荷重が作用し、当該設備の構造健全性が維持されない可能性が考えられる。 ・以上より、設計竜巻による複合荷重により当該設備（配管（弁は配管の評価に包絡））に発生する応力を算定し、許容値との比較により安全余裕を確認する。
				② ・当該設備が設置されている取水ピットポンプ室及びストレーナ室の上屋（循環水ポンプ建屋）の天井（コンクリート）および外壁（外装材）の厚さは薄いため、設計飛来物が貫通して侵入してくることが想定される。 ・以上より、当該設備への設計飛来物による影響を評価する。

注：表中の「○」は評価実施項目であることを示す。

※1：設計飛来物による影響評価より貫通するとの結果が得られたことから、 $W_M$ については考慮しない（貫通により安全機能を損なう可能性のある評価対象施設については飛来物防護対策を行う）。

<凡例>

$W_W$ ：設計竜巻の風圧力による荷重、 $W_P$ ：設計竜巻による気圧差による荷重、 $W_M$ ：設計飛来物による衝撃荷重

表-1 評価対象施設の評価実施項目および考え方 (3/9)

評価対象施設	①設計竜巻による複合荷重による影響評価		②設計飛来物による影響評価	考え方
	$W_{T1}$ ( $W_P$ )	$W_{T2}$ ( $W_W + 0.5 \cdot W_P + W_M$ )		
原子炉補機冷却海水ポンプ出口ストレーナ	○	○ <sup>*1</sup>	○	<ul style="list-style-type: none"> <li>・当該設備はストレーナ室内に設置されているが、当該室の上部は開口しており、当該室の上屋（循環水ポンプ建屋）は鉄骨造であるため、設計竜巻により当該建屋外壁の外装材等は損傷することも考えられる。</li> <li>① ・当該建屋外壁の外装材等が損傷した場合は、当該設備に設計竜巻による複合荷重が作用し、当該設備が転倒する可能性が考えられる。</li> <li>・以上より、設計竜巻による複合荷重により当該設備の胴板、基礎ボルト等に発生する応力を算定し、許容値との比較により安全余裕を確認する。</li> </ul>
				<ul style="list-style-type: none"> <li>・当該設備が設置されているストレーナ室の上屋（循環水ポンプ建屋）の天井（コンクリート）および外壁（外装材）の厚さは薄いため、設計飛来物が貫通して侵入してくることが想定される。</li> <li>② ・以上より、当該設備への設計飛来物による影響を評価する。</li> </ul>
原子炉補機冷却水サージタンク他	-	-	○	<ul style="list-style-type: none"> <li>① ・当該設備は原子炉建屋内に設置されているが、当該建屋は鉄筋コンクリート造であり、設計竜巻による複合荷重に対して構造健全性が維持される。</li> <li>・以上より、当該設備が設計竜巻による影響を受けないと考えられることから評価対象外とする。</li> </ul>
				<ul style="list-style-type: none"> <li>② ・当該設備が設置されている区画の扉は薄いため、設計飛来物が貫通して侵入してくることが想定される。</li> <li>・以上より、当該設備への設計飛来物による影響を評価する。</li> </ul>

注：表中の「○」は評価実施項目であることを示す。

※1：設計飛来物による影響評価より貫通するとの結果が得られたことから、 $W_M$ については考慮しない（貫通により安全機能を損なう可能性のある評価対象施設については飛来物防護対策を行う）。

<凡例>

$W_W$ ：設計竜巻の風圧力による荷重， $W_P$ ：設計竜巻による気圧差による荷重， $W_M$ ：設計飛来物による衝撃荷重

表-1 評価対象施設の評価実施項目および考え方 (4/9)

評価対象施設	①設計竜巻による複合荷重による影響評価		②設計飛来物による影響評価	考え方
	$W_{T1}$ ( $W_P$ )	$W_{T2}$ ( $W_W + 0.5 \cdot W_P + W_M$ )		
配管および弁 (主蒸気管室内)	—	—	○	<p>①</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・当該設備は原子炉建屋内に設置されているが、当該建屋は鉄筋コンクリート造であり、設計竜巻による複合荷重に対して構造健全性が維持される。</li> <li>・以上より、当該設備が設計竜巻による影響を受けないと考えられることから評価対象外とする。</li> </ul> <p>②</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・当該設備が設置されている区画のブローアウトパネルおよび上部換気口周りに設置されているガラの厚さは薄いため、設計飛来物が貫通して侵入してくることが想定される。</li> <li>・以上より、当該設備への設計飛来物による影響を評価する。</li> </ul>
制御用空気系統配管	—	—	○	<p>①</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・当該設備は原子炉補助建屋内に設置されているが、当該建屋は鉄筋コンクリート造であり、設計竜巻による複合荷重に対して構造健全性が維持される。</li> <li>・以上より、当該設備が設計竜巻による影響を受けないと考えられることから評価対象外とする。</li> </ul> <p>②</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・当該設備が設置されている区画の扉は薄いため、設計飛来物が貫通して侵入してくることが想定される。</li> <li>・以上より、当該設備への設計飛来物による影響を評価する。</li> </ul>
使用済燃料ピット (使用済燃料ラック含む)	—	—	○	<p>①</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・当該設備は原子炉建屋内に設置されているが、当該建屋は鉄筋コンクリート造であり、設計竜巻による複合荷重に対して構造健全性が維持される。</li> <li>・以上より、当該設備が設計竜巻による影響を受けないと考えられることから評価対象外とする。</li> </ul> <p>②</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・当該設備が設置されている原子炉建屋の上屋(燃料取扱棟)は、外壁(外装材)の厚さが薄いため、設計飛来物が貫通して侵入してくることが想定される。</li> <li>・以上より、当該設備(使用済燃料ラックに貯蔵される燃料集合体を含む)への設計飛来物による影響を評価する。</li> </ul>

注：表中の「○」は評価実施項目であることを示す。

<凡例>

$W_W$ ：設計竜巻の風圧力による荷重， $W_P$ ：設計竜巻による気圧差による荷重， $W_M$ ：設計飛来物による衝撃荷重



表-1 評価対象施設の評価実施項目および考え方 (5/9)

評価対象施設	①設計竜巻による複合荷重による影響評価		②設計飛来物による影響評価	考え方
	$W_{T1}$ ( $W_P$ )	$W_{T2}$ ( $W_W + 0.5 \cdot W_P + W_M$ )		
新燃料ラック	-	-	○	① ・当該設備は原子炉建屋内に設置されているが、当該建屋は鉄筋コンクリート造であり、設計竜巻による複合荷重に対して構造健全性が維持される。 ・以上より、当該設備が設計竜巻による影響を受けないと考えられることから評価対象外とする。
				② ・当該設備が設置されている原子炉建屋の上屋（燃料取扱棟）は、外壁（外装材）の厚さが薄いため、設計飛来物が貫通して侵入してくることが想定される。 ・以上より、当該設備（新燃料ラックに貯蔵される燃料集合体を含む）への設計飛来物による影響を評価する。
燃料移送装置	-	-	○	① ・当該設備は原子炉建屋内に設置されているが、当該建屋は鉄筋コンクリート造であり、設計竜巻による複合荷重に対して構造健全性が維持される。 ・以上より、当該設備が設計竜巻による影響を受けないと考えられることから評価対象外とする。
				② ・当該設備が設置されている原子炉建屋の上屋（燃料取扱棟）は、外壁（外装材）の厚さが薄いため、設計飛来物が貫通して侵入してくることが想定される。 ・以上より、当該設備への設計飛来物による影響を評価する。
使用済燃料ピットクレーン	-	-	○	① ・当該設備は原子炉建屋内に設置されているが、当該建屋は鉄筋コンクリート造であり、設計竜巻による複合荷重に対して構造健全性が維持される。 ・以上より、当該設備が設計竜巻による影響を受けないと考えられることから評価対象外とする。
				② ・当該設備が設置されている原子炉建屋の上屋（燃料取扱棟）は、外壁（外装材）の厚さが薄いため、設計飛来物が貫通して侵入してくることが想定される。 ・以上より、当該設備への設計飛来物による影響を評価する。

注：表中の「○」は評価実施項目であることを示す。

<凡例>

$W_W$ ：設計竜巻の風圧力による荷重， $W_P$ ：設計竜巻による気圧差による荷重， $W_M$ ：設計飛来物による衝撃荷重

表-1 評価対象施設の評価実施項目および考え方 (6/9)

評価対象施設	①設計竜巻による複合荷重による影響評価		②設計竜巻による気圧差による影響評価	考え方
	$W_{T1}$ ( $W_P$ )	$W_{T2}$ ( $W_W + 0.5 \cdot W_P + W_M$ )	$W_P$	
排気筒 (建屋内) 換気空調設備※2	—	—	○	・当該設備は原子炉建屋，原子炉補助建屋，ディーゼル発電機建屋内に設置されているが，これらの建屋は鉄筋コンクリート造であり，設計竜巻による複合荷重に対して構造健全性が維持される。 ・ただし，当該設備は外気と繋がっているため，設計竜巻による気圧差が作用し，当該設備の構造健全性が維持されない可能性が考えられる。 ① ② ・以上より，設計竜巻による気圧差により外気と繋がるダクトの鋼板，ファンのケーシング，空調ユニットの外板や外気との境界となるダンパのケーシング，バタフライ弁等に発生する応力を算定し，許容値との比較（バタフライ弁は気圧差により生じる内圧と許容値との比較）により安全余裕を確認する。

注：表中の「○」は評価実施項目であることを示す。

※2：アニュラス空気浄化設備，格納容器空調装置，補助建屋空調装置，試料採取室空調装置，中央制御室空調装置，電動補助給水ポンプ室換気装置，制御用空気圧縮機室換気装置，ディーゼル発電機室換気装置，安全補機開閉器室空調装置

<凡例>

$W_W$ ：設計竜巻の風圧力による荷重， $W_P$ ：設計竜巻による気圧差による荷重， $W_M$ ：設計飛来物による衝撃荷重

表-1 評価対象施設の評価実施項目および考え方 (7/9)

2. 竜巻防護施設に波及的影響を及ぼし得る施設				
評価対象施設	①設計竜巻による複合荷重による影響評価		②設計飛来物による影響評価	考え方
	$W_{T1}$ ( $W_p$ )	$W_{T2}$ ( $W_w + 0.5 \cdot W_p + W_M$ )		
ディーゼル発電機排気消音器	-	○ <sup>※3</sup>	○	① ・当該設備は屋外に設置されているため、設計竜巻による複合荷重が作用し、当該設備の構造健全性が維持されない可能性が考えられる。ただし、ディーゼル発電機吸気消音器(吸気口)と当該設備(排気口)は共に大気開放されており、かつ近接して設置されているため、当該設備は気圧差の影響は受けない。 ・以上より、設計竜巻による複合荷重により当該設備の取付ボルトに発生する応力を算定し、許容値との比較により安全余裕を確認する。
				② ・当該設備は屋外に設置されているため、当該設備への設計飛来物による影響を評価する。
主蒸気逃がし弁消音器	-	○ <sup>※3</sup>	○	① ・当該設備は屋外に設置されているため、設計竜巻による複合荷重が作用し、当該設備の構造健全性が維持されない可能性が考えられる。ただし、当該設備は大気開放されており、気圧差の影響は受けない。 ・以上より、設計竜巻による複合荷重により当該設備の架台の柱脚すみ肉溶接部に発生する応力を算定し、許容値との比較により安全余裕を確認する。
				② ・当該設備は屋外に設置されているため、当該設備への設計飛来物による影響を評価する。

注：表中の「○」は評価実施項目であることを示す。

※3：当該設備は大気開放されているため、 $W_p$ については考慮しない。また、設計飛来物による影響評価より貫通するとの結果が得られたことから、 $W_M$ については考慮しない（貫通により安全機能を損なう可能性のある評価対象施設については飛来物防護対策を行う）。

<凡例>

$W_w$ ：設計竜巻の風圧力による荷重， $W_p$ ：設計竜巻による気圧差による荷重， $W_M$ ：設計飛来物による衝撃荷重

表-1 評価対象施設の評価実施項目および考え方 (8/9)

評価対象施設	①設計竜巻による複合荷重による影響評価		②設計飛来物による影響評価	考え方
	$W_{T1}$ ( $W_P$ )	$W_{T2}$ ( $W_W + 0.5 \cdot W_P + W_M$ )		
主蒸気安全弁排気管	—	○ <sup>※3</sup>	○	① ・当該設備は屋外に設置されているため、設計竜巻による複合荷重が作用し、当該設備の構造健全性が維持されない可能性が考えられる。ただし、当該設備は大気開放されており、気圧差の影響は受けない。 ・以上より、設計竜巻による複合荷重により当該設備に発生する応力を算定し、許容値との比較により安全余裕を確認する。
				② ・当該設備は屋外に設置されているため、当該設備への設計飛来物による影響を評価する。
タービン動補助給水ポンプ排気管	—	○ <sup>※3</sup>	○	① ・当該設備は屋外に設置されているため、設計竜巻による複合荷重が作用し、当該設備の構造健全性が維持されない可能性が考えられる。ただし、当該設備は大気開放されており、気圧差の影響は受けない。 ・以上より、設計竜巻による複合荷重により当該設備に発生する応力を算定し、許容値との比較により安全余裕を確認する。
				② ・当該設備は屋外に設置されているため、当該設備への設計飛来物による影響を評価する。
ディーゼル発電機燃料油貯油槽ベント管	—	○ <sup>※3</sup>	○	① ・当該設備は屋外に設置されているため、設計竜巻による複合荷重が作用し、当該設備の構造健全性が維持されない可能性が考えられる。ただし、当該設備は大気開放されており、気圧差の影響は受けない。 ・以上より、設計竜巻による複合荷重により当該設備本体およびサポートに発生する応力を算定し、許容値との比較により安全余裕を確認する。
				② ・当該設備は屋外に設置されているため、当該設備への設計飛来物による影響を評価する。

注：表中の「○」は評価実施項目であることを示す。

※3：当該設備は大気開放されているため、 $W_P$ については考慮しない。また、設計飛来物による影響評価より貫通するとの結果が得られたことから、 $W_M$ については考慮しない（貫通により安全機能を損なう可能性のある評価対象施設については飛来物防護対策を行う）。

<凡例>

$W_W$ ：設計竜巻の風圧力による荷重、 $W_P$ ：設計竜巻による気圧差による荷重、 $W_M$ ：設計飛来物による衝撃荷重

表-1 評価対象施設の評価実施項目および考え方 (9/9)

評価対象施設	①設計竜巻による複合荷重による影響評価		②設計竜巻による気圧差による影響評価	考え方
	$W_{T1}$ ( $W_p$ )	$W_{T2}$ ( $W_w + 0.5 \cdot W_p + W_M$ )	$W_p$	
換気空調設備※4	—	—	○	・当該設備は原子炉補助建屋内に設置されているが、当該建屋は鉄筋コンクリート造であり、設計竜巻による複合荷重に対して構造健全性が維持される。 ・ただし、当該設備は外気と繋がっているため、設計竜巻による気圧差が作用し、当該設備の構造健全性が維持されない可能性が考えられる。 ② ・当該設備が損傷した場合は、竜巻防護施設の機能に影響を与える可能性がある。 ・以上より、設計竜巻による気圧差により外気と繋がるダクトの鋼板、ファンのケーシングや外気との境界となるダンパのケーシング等に発生する応力を算定し、許容値との比較により安全余裕を確認する。

注：表中の「○」は評価実施項目であることを示す。

※4：蓄電池室排気装置

<凡例>

$W_w$ ：設計竜巻の風圧力による荷重， $W_p$ ：設計竜巻による気圧差による荷重， $W_M$ ：設計飛来物による衝撃荷重

## 20. 評価対象施設の評価方法について

設計竜巻による複合荷重 ( $W_{T1}$ ,  $W_{T2}$ ) および気圧差 ( $W_P$ ) による影響評価ならびに設計飛来物による影響評価の方法を以下に示す。また、表-1 に評価部位選定の考え方を示す。

### (1) 設計竜巻による複合荷重による影響評価

評価対象施設	評価方法	許容値
＜竜巻防護施設＞		
原子炉補機冷却海水ポンプ (モータ含む)	設計竜巻による複合荷重 ( $W_{T1}$ , $W_{T2}$ ) により原子炉補機冷却海水ポンプおよびモータの据付面基礎ボルト、端子箱取付ボルト等に発生する応力を算定し、許容値との比較により安全余裕を確認する。	＜ポンプ＞ JEAG4601 に基づく許容応力状態 III <sub>A</sub> S (クラス3 支持構造物) ＜モータ＞ JEAG4601 に基づく許容応力状態 III <sub>A</sub> S (クラス3 支持構造物準用)
排気筒 (建屋外)	設計竜巻による複合荷重 ( $W_{T1}$ , $W_{T2}$ ) により排気筒 (角ダクト, 丸ダクト) の鋼板に発生する応力を算定し、許容値との比較により安全余裕を確認する。	JEAG4601 に基づく許容応力状態 III <sub>A</sub> S (クラス2, 3 配管準用) 等
原子炉補機冷却海水ポンプ 出口ストレーナ	設計竜巻による複合荷重 ( $W_{T1}$ , $W_{T2}$ ) により原子炉補機冷却海水ポンプ出口ストレーナの胴板、基礎ボルト等に発生する応力を算定し、許容値との比較により安全余裕を確認する。	JEAG4601 に基づく許容応力状態 III <sub>A</sub> S (クラス3 容器・クラス3 支持構造物)
配管および弁 (原子炉補機冷却海水系統)	設計竜巻による複合荷重 ( $W_{T1}$ , $W_{T2}$ ) により配管 (弁は配管の評価に包絡) に発生する応力を算定し、許容値との比較により安全余裕を確認する。	JEAG4601 に基づく許容応力状態 III <sub>A</sub> S (クラス3 配管)
＜竜巻防護施設に波及的影響を及ぼし得る施設＞		
ディーゼル発電機排気消音器	設計竜巻による複合荷重 ( $W_{T2}=W_W$ ) により取付ボルトに発生する応力を算定し、許容値との比較により安全余裕を確認する。	JEAG4601 に基づく許容応力状態 III <sub>A</sub> S (クラス1 支持構造物準用)
主蒸気逃がし弁消音器	設計竜巻による複合荷重 ( $W_{T2}=W_W$ ) により当該消音器架台の柱脚すみ肉溶接部に発生する応力を算定し、許容値との比較により安全余裕を確認する。	JEAG4601 に基づく許容応力状態 III <sub>A</sub> S (クラス3 支持構造物準用)
主蒸気安全弁排気管	設計竜巻による複合荷重 ( $W_{T2}=W_W$ ) により排気管に発生する応力を算定し、許容値との比較により安全余裕を確認する。	JEAG4601 に基づく許容応力状態 III <sub>A</sub> S (クラス3 配管準用)
タービン動補助給水ポンプ 排気管	設計竜巻による複合荷重 ( $W_{T2}=W_W$ ) により排気管に発生する応力を算定し、許容値との比較により安全余裕を確認する。	JEAG4601 に基づく許容応力状態 III <sub>A</sub> S (クラス3 配管準用)

評価対象施設	評価方法	許容値
ディーゼル発電機燃料油貯油槽ベント管	設計竜巻による複合荷重 ( $W_{T2}=W_W$ ) によりベント管およびサポートに発生する応力を算定し、許容値との比較により安全余裕を確認する。	<ベント管> JEAG4601 に基づく許容応力状態 III <sub>A</sub> S (クラス3配管準用) <サポート> JEAG4601 に基づく許容応力状態 III <sub>A</sub> S (クラス3支持構造物準用)

注：許容値欄のクラス分類は JSME 設計・建設規格 2005 年版・2007 年追補版に基づく。

<凡例>

$$W_{T1}=W_P, W_{T2}=W_W+0.5 \cdot W_P$$

$W_W$ ：設計竜巻の風圧力による荷重， $W_P$ ：設計竜巻による気圧差による荷重

## (2) 設計飛来物による影響評価

評価対象施設	評価方法
<竜巻防護施設>	
原子炉補機冷却海水ポンプ (モータ含む)	設計竜巻に対して、設計飛来物の貫通を生じないために必要な鋼板の最小厚さと評価対象施設の最小板厚を比較することで、飛来物の貫通有無を確認する。鋼板の必要最小厚さは BRL 式 (補足説明資料 2 1. 参照) を用いて求める。
排気筒 (建屋外)	
蓄熱室加熱器	
原子炉補機冷却海水ポンプ 出口ストレーナ	
配管および弁 (原子炉補機冷却海水系統)	
原子炉補機冷却水サージタンク他	
配管および弁 (主蒸気管室内)	
制御用空気系統配管	
燃料移送装置	
使用済燃料ピットクレーン	

評価対象施設	評価方法
<竜巻防護施設>	
使用済燃料ピット（使用済燃料ラック含む）	<p>&lt;使用済燃料ラック&gt;</p> <p>①鋼製パイプ 鋼製パイプは直接燃料集合体に衝突することが考えられるため、鋼製パイプが燃料集合体上部ノズルに衝突した場合の燃料被覆管に発生する歪と許容歪を比較し、燃料被覆管が破損しないことを確認する。また、ラックセルに衝突した場合の貫入量と許容貫入量を比較し、ラックセルの損傷範囲が燃料有効部（許容貫入量）に達しないことを確認する。</p> <p>②鋼製材 鋼製材は直接燃料集合体に衝突することはないため、ラックセルに衝突した場合の貫入量から、ラックセルを押しつぶした後に燃料集合体上部ノズルに衝突する場合は、燃料被覆管に発生する歪と許容歪を比較し、燃料被覆管が破損しないことを確認する。また、ラックセルの貫入量と許容貫入量を比較し、ラックセルの損傷範囲が燃料有効部（許容貫入量）に達しないことを確認する。</p> <p>&lt;使用済燃料ピット&gt; 設計竜巻に対して、設計飛来物の貫通を生じないために必要な最小厚さ（コンクリート・鋼板）と評価対象施設（コンクリート躯体・ライニング）の最小板厚を比較することで、飛来物の貫通有無を確認する。コンクリートの必要最小厚さは修正 NDRC 式、Degen 式（補足説明資料 17. 参照）を、鋼板の必要最小厚さは BRL 式（補足説明資料 21. 参照）を用いて求める。</p>
新燃料ラック	<p>①鋼製パイプ 鋼製パイプは直接燃料集合体に衝突することが考えられるため、鋼製パイプが燃料集合体上部ノズルに衝突した場合の燃料被覆管に発生する応力と許容引張強さを比較し、燃料被覆管が破損しないことを確認する。また、ラックセルに衝突した場合の貫入量と許容貫入量を比較し、ラックセルの損傷範囲が燃料有効部（許容貫入量）に達しないことを確認する。</p> <p>②鋼製材 鋼製材は直接燃料集合体に衝突することはないため、ラックセルに衝突した場合の貫入量から、ラックセルを押しつぶした後に燃料集合体上部ノズルに衝突する場合は、燃料被覆管に発生する応力と許容引張強さを比較し、燃料被覆管が破損しないことを確認する。また、ラックセルの貫入量と許容貫入量を比較し、ラックセルの損傷範囲が燃料有効部（許容貫入量）に達しないことを確認する。</p>
<竜巻防護施設に波及的影響を及ぼし得る施設>	
ディーゼル発電機排気消音器	設計竜巻に対して、設計飛来物の貫通を生じないために必要な鋼板の最小厚さと評価対象施設の最小板厚を比較することで、飛来物の貫通有無を確認する。鋼板の必要最小厚さは BRL 式（補足説明資料 21. 参照）を用いて求める。
主蒸気逃がし弁消音器	
主蒸気安全弁排気管	
タービン動補助給水ポンプ排気管	
ディーゼル発電機燃料油貯油槽ペント管	



(3) 気圧差による影響評価

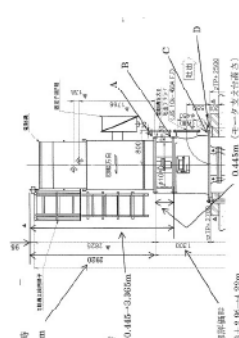
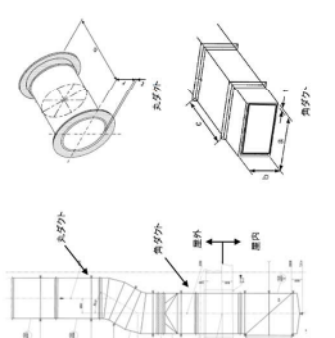
評価対象施設	評価方法	許容値
＜竜巻防護施設＞		
排気筒（建屋内） 換気空調設備※ <sup>1</sup>	<p>排気筒，外気との境界となるダンパおよびバタフライ弁，外気と繋がるダクト，ファンおよび空調ユニットについて，気圧差（<math>W_p</math>）に対する健全性を評価する。</p> <p>①ダンパ 気圧差によってケーシングに生じる最大曲げ応力，ベーンに生じる最大曲げ応力，シャフト断面に生じる最大せん断応力を算定し，それぞれ許容値との比較により安全余裕を確認する。</p> <p>②バタフライ弁 気圧差によってバタフライ弁に生じる内圧と許容値との比較により安全余裕を確認する。</p> <p>③排気筒（角ダクト），ダクト（角ダクト，丸ダクト） 気圧差によってダクトの鋼板に発生する応力を算定し，許容値との比較により安全余裕を確認する。</p> <p>④ファン 気圧差によってケーシングに生じる周応力を算定し，許容値との比較により安全余裕を確認する。</p> <p>⑤空調ユニット 気圧差によってユニット外板に生じる最大曲げ応力を算定し，許容値との比較により安全余裕を確認する。</p>	<p>＜ダンパ＞</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・ JEAG4601 に基づく許容応力状態Ⅲ<sub>A</sub>S（クラス1 支持構造物準用）</li> </ul> <p>＜バタフライ弁＞</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・ 設計上の圧力基準（JIS10k）</li> </ul> <p>＜排気筒，ダクト＞</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・ JEAG4601 に基づく許容応力状態Ⅲ<sub>A</sub>S（クラス2，3 配管準用）等</li> </ul> <p>＜ファン＞</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・ JEAG4601 に基づく許容応力状態Ⅲ<sub>A</sub>S（クラス3 ポンプ準用）</li> </ul> <p>＜空調ユニット＞</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・ JEAG4601 に基づく許容応力状態Ⅲ<sub>A</sub>S（クラス2，3 容器準用）</li> </ul>
＜竜巻防護施設に波及的影響を及ぼし得る施設＞		
換気空調設備※ <sup>2</sup>	<p>外気との境界となるダンパ，外気と繋がるダクトおよびファンについて，気圧差（<math>W_p</math>）に対する健全性を評価する。</p> <p>①ダンパ 気圧差によってケーシングに生じる最大曲げ応力，ベーンに生じる最大曲げ応力，シャフト断面に生じる最大せん断応力を算定し，それぞれ許容値との比較により安全余裕を確認する。</p> <p>②ダクト（角ダクト，丸ダクト） 気圧差によってダクトの鋼板に発生する応力を算定し，許容値との比較により安全余裕を確認する。</p> <p>③ファン 気圧差によってケーシングに生じる周応力を算定し，許容値との比較により安全余裕を確認する。</p>	<p>＜ダンパ＞</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・ JEAG4601 に基づく許容応力状態Ⅲ<sub>A</sub>S（クラス1 支持構造物準用）</li> </ul> <p>＜ダクト＞</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・ JEAG4601 に基づく許容応力状態Ⅲ<sub>A</sub>S（クラス2，3 配管準用）等</li> </ul> <p>＜ファン＞</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・ JEAG4601 に基づく許容応力状態Ⅲ<sub>A</sub>S（クラス3 ポンプ準用）</li> </ul>

注：許容値欄のクラス分類は JSME 設計・建設規格 2005 年版・2007 年追補版に基づく。

※1：アニュラス空気浄化設備，格納容器空調装置，補助建屋空調装置，試料採取室空調装置，中央制御室空調装置，電動補助給水ポンプ室換気装置，制御用空気圧縮機室換気装置，ディーゼル発電機室換気装置，安全補機開閉器室空調装置

※2：蓄電池室排気装置

表一-1 設備の構造健全性の確認における評価部位選定の考え方等について (1/4)

評価対象施設	評価部位	評価部位選定の考え方	荷重のかけ方		評価項目					備考	
			$W_{H1}$ による評価	$W_{H2}$ による評価	引張	せん断	圧縮	曲げ	組合せ		座屈
 <p>ポンプ</p>	<p>A部 電動機取合ボルト</p> <p>B部 電動機支え台取合ボルト</p> <p>C部 据付面取合ボルト</p> <p>D部 据付面基礎ボルト</p>	<p>設計電巻による複合荷重により損傷する可能性が考えられるため、風圧力による荷重を掛ける部分のうち、評価上厳しくなる構造上の不連続部(各ボルト)を選定</p>	<p>設計電巻により当該ポンプ設置建屋内の気圧が低下するため、当該ポンプの内外で気圧差が生じることから、<math>W_{H1}</math>を評価する。<math>W_{H1}</math>を水平荷重として評価高さの半分的位置に作用させる。ただし、自重については安全側に考慮しない。</p>	<p><math>W_{H2}</math>を水平荷重として評価高さの半分的位置に作用させる。ただし、自重については安全側に考慮しない。</p>	○	○	○	○	○	○	ボルトには、電巻により引張応力、せん断応力が生じる
	<p>①部 電動機フレーム</p> <p>②部(端子箱) 端子箱取付ボルト</p> <p>③部(空気冷却器) 空気冷却器取付ボルト</p> <p>④部(外扇カバー)接統箱) 外扇カバー接統箱取付ボルト</p> <p>⑤部(外扇カバー) 外扇カバー取付ボルト</p>	<p>設計電巻による複合荷重により損傷する可能性が考えられるため、風圧力による荷重を掛ける部分のうち、評価上厳しくなる構造上の不連続部(各ボルト)と想定される部位(電動機フレーム)を選定</p>	<p>設計電巻により当該ポンプ設置建屋内の気圧が低下するため、当該ポンプの内外で気圧差が生じることから、<math>W_{H1}</math>を評価する。<math>W_{H1}</math>を水平荷重として評価高さの半分的位置に作用させる。ただし、自重については安全側に考慮しない。</p>	<p><math>W_{H2}</math>を水平荷重として重心に作用させる。また、自重についてもボルトを引張る力として作用するため考慮する。</p>	○	○	○	○	○	○	ボルトには、自重・電巻により引張応力、せん断応力が生じる
 <p>排気筒(建屋外)</p>	<p>丸ダクト鋼板</p> <p>角ダクト鋼板</p>	<p>設計電巻による複合荷重を受けた場合、その荷重を受ける部位を選定</p>	<p>建屋外とダクト内で差圧(気圧差)が発生すると考え、<math>W_{H1}</math>を評価する。<math>W_{H1}</math>および自重を等分布荷重として作用させる。</p>	<p><math>W_{H2}</math>および自重を等分布荷重として作用させる。</p>			○				ダクト鋼板には、自重・電巻により座屈応力が生じる

※: 衝撃荷重( $W_{H3}$ )については、設計飛来物により貫通すると結果が得られたことから考慮しない(貫通により安全機能を損なう可能性のある評価対象施設については飛来物防護対策を行う)。

表 1-1 設備の構造健全性の確認における評価部位選定の考え方等について (2 / 4)

評価対象施設	評価部位	評価部位選定の考え方	荷重のかけ方		評価項目					備考	
			W <sub>H1</sub> による評価	W <sub>H2</sub> による評価	引張	せん断	圧縮	曲げ	組合せ		座屈
配管(弁) 原子炉補機冷却海水系統	管	全口径の配管を選定(弁については、配管に比べて断面係数が大きく肉厚なため、配管の評価に包絡される)	設計電巻により当該配管設置区画の気圧が低下するため、当該配管の内外で気圧差が生じることから、W <sub>H1</sub> を評価する。気圧が低下した分、内圧が増加すると考え、W <sub>H1</sub> および運転時荷重(最高使用圧力)を内圧として作用させる。また、自重を等分布荷重として作用させ、応力算出時に重ね合わせる。	W <sub>H1</sub> および自重を等分布荷重として作用させる。また、W <sub>H1</sub> および運転時荷重(最高使用圧力)を内圧として作用させ、応力算出時に重ね合わせる。							配管には、自重・風圧力により曲げ応力、気圧差・運転時荷重(最高使用圧力)により引張応力が生じる
原子炉補機冷却海水ポンプ出口ストレート	鋼板	設計電巻による複合荷重により転倒する可能性が考えられるため、「原子力発電所耐震設計技術指針(JEAG4601-1987)」におけるスカート支持たて置円筒形容器の評価方法を準用して選定	設計電巻により当該装置設置区画の気圧が低下することから、W <sub>H1</sub> を評価する。W <sub>H1</sub> を水平荷重として重心に作用させる。また、自重および運転時荷重(最高使用圧力)については、鋼板の応力として作用するため考慮する。	W <sub>H1</sub> を水平荷重として重心に作用させる。また、自重および運転時荷重(最高使用圧力)については、鋼板の応力として作用するため考慮する。							鋼板には、自重・電巻により引張応力・圧縮応力・曲げ応力・せん断応力が生じる
	スカート		設計電巻により当該装置設置区画の気圧が低下することから、W <sub>H1</sub> を評価する。W <sub>H1</sub> を水平荷重として重心に作用させる。また、自重については、スカートの応力として作用するため考慮する。	W <sub>H1</sub> を水平荷重として重心に作用させる。また、自重については、スカートの応力として作用するため考慮する。							スカートには、自重・電巻により圧縮応力・曲げ応力・せん断応力が生じる
	基礎ボルト		設計電巻により当該装置設置区画の気圧が低下することから、W <sub>H1</sub> を評価する。W <sub>H1</sub> を水平荷重として重心に作用させる。また、自重については、基礎ボルトの応力として作用するため考慮する。	W <sub>H1</sub> を水平荷重として重心に作用させる。また、自重については、基礎ボルトの応力として作用するため考慮する。							基礎ボルトには、自重・電巻により引張応力・せん断応力が生じる
排気筒(建屋内)	角ダクト鋼板	気圧差荷重を受けた場合、その荷重を受ける部位を選定	建屋内外とダクト内外で差圧(気圧差)が発生するため、W <sub>H1</sub> および自重を等分布荷重として作用させる。	当該設備を内包する建屋に防護されるため、W <sub>H2</sub> は発生しない。							ダクト鋼板には、自重・電巻により曲げ応力・座屈応力が生じる

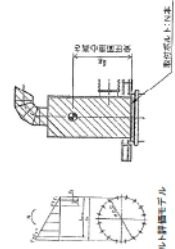
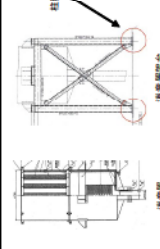
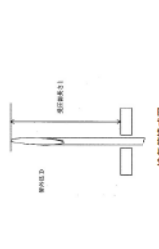
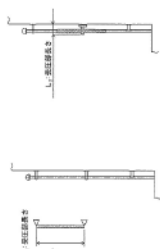
※: 衝撃荷重(W<sub>M</sub>)については、設計機材物による影響評価より重通することから考慮しない(貫通により安全機能を損なう可能性のある評価対象施設については飛来物防護対策を行う)。

表 1-1 設備の構造健全性の確認における評価部位選定の考え方等について (3 / 4)

評価対象施設	評価部位	評価部位選定の考え方	荷重のかけ方		評価項目						備考		
			$W_{H1}$ による評価	$W_{H2}$ による評価	引張	せん断	圧縮	曲げ	組合せ	座屈		一次一般	
ダンバ	ケーシング	気圧差を受けた場合、その荷重を受ける部位を選定	ダンバ前後で建屋内外と大気圧の気圧差が発生するため、 $W_{H1}$ および自重を等分布荷重として作用させる。				○					ケーシングには、自重・電巻により曲げ応力が生じる。	
	ペーン												○
	シャフト												
パタフライ	弁体	気圧差を受けた場合、その荷重を受ける部位を選定	弁前後で建屋内外と大気圧の気圧差が発生するため、 $W_{H1}$ と設計上の圧力基準を比較する。									気圧差と設計上の圧力基準 (JIS10k) との比較にて評価	
	弁箱												
	弁ふた												
丸ダクト	丸ダクト鋼板	気圧差荷重を受けた場合、その荷重を受ける部位を選定	建屋内外とダクト内で差圧 (気圧差) が発生するため、 $W_{H1}$ および自重を等分布荷重として作用させる。									ダクト鋼板には、自重・電巻により座屈応力が生じる	
	角ダクト												
ファン	ケーシング	気圧差を受けた場合、その荷重を受ける部位を選定	ケーシング内外で差圧 (気圧差) が発生するため、 $W_{H1}$ を等分布荷重として作用させる。									ダクト鋼板には、自重・電巻により曲げ応力・座屈応力が生じる	
	ユニット外板												
空調ユニット	ユニット外板	気圧差荷重を受けた場合、強度面で最も弱い部位を選定	空調ユニット内外で差圧 (気圧差) が発生するため、 $W_{H1}$ を等分布荷重として作用させる。									ユニット外板には、電巻により曲げ応力が生じる	

※: 衝撃荷重 ( $W_{H3}$ ) については、設計飛来物による影響評価より算出することから考慮しない (貫通により安全機能を損なう可能性のある評価対象施設については飛来物防護対策を行う)。

表 1-1 設備の構造健全性の確認における評価部位選定の考え方等について (4 / 4)

評価対象施設	評価部位	評価部位選定の考え方	荷重のかけ方		評価項目					備考	
			W <sub>n1</sub> による評価	W <sub>n1</sub> による評価	引張	せん断	圧縮	曲げ	組合せ		座屈
ディーゼル発電機 排気消音器	 ボルト締結部 取付ボルト	設計電巻による複合荷重により転倒する可能性が考えられるため、風圧力による荷重を受ける部分のうち、評価上厳しくなる構造上の不連続部を選定した。	ディーゼル発電機排気消音器(吸気口)とディーゼル発電機排気消音器(排気口)は共に大気開放されており、かつ近接して設置されているため、W <sub>n1</sub> は発生しない。	○	○			○			取付ボルトには、風圧力(自重を考慮)により引張応力・せん断応力が生じる
主蒸気速がし弁 消音器	 消音器 取付ボルト	設計電巻による複合荷重により転倒する可能性が考えられるため、風圧力による荷重を受ける部分のうち、強度面で相対的に弱いと想定される部位を選定した。	大気開放されているため、W <sub>n1</sub> は発生しない。	○	○			○			架台の柱脚すみ肉溶接部には、風圧力により引張応力・せん断応力が生じる
主蒸気安全弁排 気管	 WELDS WELDS 排気管排気部	設計電巻による複合荷重を受けける部位(建屋外に露出している部分)を選定	大気開放されているため、W <sub>n1</sub> は発生しない。					○			排気管には、風圧力により曲げ応力が生じる
タービン動補助給 水ポンプ排気管	 L-1: 配管部 L-2: 配管部 サブポート締結部 ベンチマーク部	設計電巻による複合荷重を受けける部位(建屋外に露出している部分)を選定	大気開放されているため、W <sub>n1</sub> は発生しない。					○			ベンチマークおよびサブポートには、風圧力により曲げ応力が生じる

※: 衝撃荷重(W<sub>n1</sub>)については、設計飛来物による影響評価より貫通することから考慮しない(貫通により安全機能を損なう可能性のある評価対象施設については飛来物防護対策を行う)。

## 2 1. BRL 式の妥当性および評価内容について

### (1) 妥当性について

設計飛来物が評価対象施設（鋼板部分）に衝突した場合の影響については、以下の「BRL 式」に基づいて貫通評価を行っている。

$$T^{3/2} = \frac{0.5MV^2}{17400K^2D^{3/2}}$$

ここで、

T：鋼板貫通厚さ (in)                      M：ミサイル質量 (lb・s<sup>2</sup>/ft)                      V：ミサイル速度 (ft/s)  
D：ミサイル直径 (in)                      K：鋼板の材質に関する定数≒1

本評価式については、(旧) 原子炉安全専門審査会においてタービンミサイル評価の判断基準等を決定することを目的として設置されたタービンミサイル検討会にて纏められた報告書「タービンミサイル評価について」の中で、鋼板に対する貫通厚さの算出式として使用する旨規定されていることから<sup>※1</sup>、設計飛来物の設備への衝突による貫通評価において、本評価式を適用することは妥当であると考えます。

※1：本報告書において、BRL 式については、「ISES7607-3 軽水炉構造機器の衝撃荷重に関する調査 その3 ミサイルの衝突による構造壁の損傷に関する評価式の比較検討（高温構造安全技術研究組合）」を引用している。

### (2) 評価内容について

設計飛来物の諸元を表-1 に示す。この諸元のうち鋼製材が水平に衝突した場合の貫通評価について、上記 (1) 項の「BRL 式」に基づく計算過程を以下に示す。

表-1 設計飛来物の諸元

飛来物の種類	砂利	鋼製パイプ	鋼製材
サイズ (m)	長さ×幅×奥行き 0.04×0.04×0.04	長さ×直径 2×0.05	長さ×幅×奥行き 4.2×0.3×0.2
質量 (kg)	0.17	8.4	135
最大水平速度 (m/s)	62	49	57
最大鉛直速度 (m/s)	42	33	38

#### <貫通評価に係る諸元の設定>

貫通評価にあたっては、衝突面積が小さいほど鋼板の貫通厚さは大きくなるため、設計飛来物の最小面積となる部分が衝突するものとし、ミサイル直径については、以下のとおり設定している。

表-2 に設定した貫通評価に係る諸元を示す。

➤ ミサイル直径

・ 鋼製材の場合

最小面積は幅 300mm×奥行き 200mm=60000mm<sup>2</sup>となるため、これと等面積の円となる直径を算出すると 276.40mm となるが、「原子力発電所の竜巻影響評価ガイド」において参照されている東京工芸大学の委託研究成果<sup>※2</sup>の中で記載されている鋼製材の板厚 5mm を参考にして最小面積を 300mm×200mm-290mm×190mm=4900mm<sup>2</sup> とし、これと等面積の円となる直径 78.99mm をミサイル直径とする。

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

表-2 貫通評価に係る諸元

ミサイル質量 M	ミサイル速度 V	ミサイル直径 D
13.77 (kg·s <sup>2</sup> /m)	57 (m/s)	78.99 (mm)
↓	↓	↓
9.25 (lb·s <sup>2</sup> /ft)	187.01 (ft/s)	3.11 (in)

<貫通評価>

$$T^{3/2} = \frac{0.5MV^2}{17400K^2D^{3/2}}$$

$$T = \sqrt[3]{\left(\frac{0.5 \times 9.25 \times 187.01^2}{17400 \times 1^2 \times 3.11^{3/2}}\right)^2}$$

$$= 1.42... \text{ (in)}$$

$$= 36.10... \text{ (mm)} \Rightarrow 37 \text{ (mm)}^{※3}$$

※3：飛来物の貫通を生じないために必要な鋼板の最小厚さ

表-3 に計算過程を示した鋼製材を含む設計飛来物の評価結果を示す。

表-3 鋼板の必要最小厚さ

	砂利		鋼製パイプ		鋼製材	
	水平	鉛直	水平	鉛直	水平	鉛直
最大飛来物速度 (m/s)	62	42	49	33	57	38
必要最小厚さ (mm)	1	1	18	11	37	22

注：必要最小厚さは計算結果を切り上げた値

## 2.2. 使用済燃料ピット内へ設計飛来物が進入した場合の影響評価に係る評価条件等について

### (1) 使用済燃料ラック（当該ラックに貯蔵される燃料集合体を含む）

#### a. はじめに

使用済燃料ピット内へ設計飛来物が進入した場合、使用済燃料ラック（当該ラックに貯蔵される燃料集合体を含む）への影響が考えられるため、以下の評価条件および評価式にて、①設計飛来物が燃料集合体に衝突した場合の燃料被覆管に生じる歪および②設計飛来物が使用済燃料ラック（ラックセル）に衝突した場合のラックセル貫入量を評価する。

ただし、砂利については、鋼製材および鋼製パイプの評価に包絡されるため、評価対象外とする。

#### b. 評価条件

- ✓ 燃料集合体に直接衝突する場合は最も厳しい評価となるため、設計飛来物の進入方向は鉛直方向とする。
- ✓ 使用済燃料ピットが設置されている建屋の上屋（燃料取扱棟）の屋根は設計飛来物が貫通しないとの結果が得られたが保守的に考慮しない。
- ✓ ラックセルは近接して設置されているため（図-1 参照）、設計飛来物は複数のラックセルに同時に衝突することが考えられるが、保守的に1体のラックセルに集中して衝突するものとする（図-2 参照）。
- ✓ 設計飛来物の衝突速度（最大鉛直速度）は水中抵抗による減速を考慮し以下のとおりとする。

鋼製パイプ：18.82m/s

鋼製材：24.03m/s

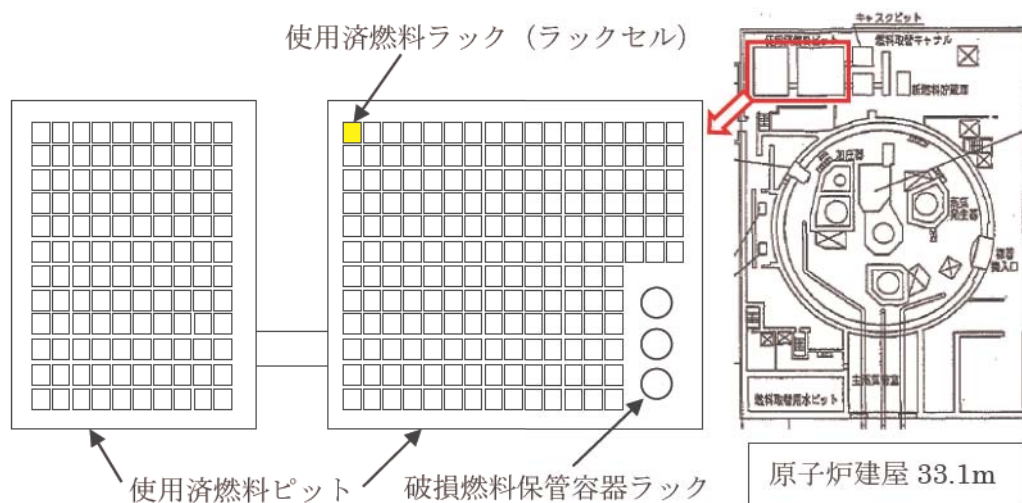


図-1 使用済燃料ラックの配置イメージ



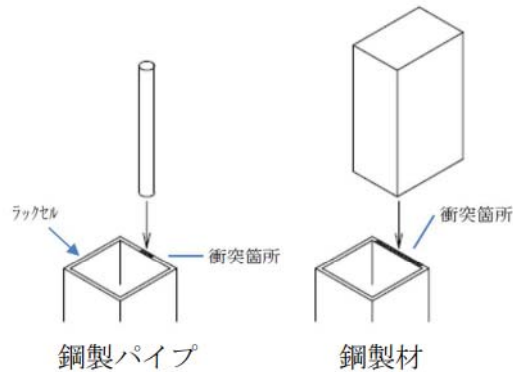


図-2 ラックセルの衝突箇所

c. 評価式

(a) 燃料被覆管に生じる歪

飛来物の衝突に伴う荷重は、燃料集合体の上部ノズルを介して燃料棒及び制御棒案内シムプルに作用することとなる。この際に燃料被覆管に生じる歪を評価した。算出にあたっては、保守的な評価となるよう次の仮定を設けた。

- ・ 飛来物の運動エネルギー $E_0$ は燃料集合体の変形エネルギー $E_1$ に等しいとし、飛来物の運動エネルギー全てが燃料被覆管の変形に費やされるものとする（制御棒案内シムプルによる荷重の分担は考慮しない）。
- ・ 燃料被覆管は弾完全塑性体とする（塑性変形に伴う硬化を考慮しない）。（図-3）

すなわち、

$$E_0 = \frac{1}{2}mv^2$$

$$E_1 = \left( \frac{1}{2}\sigma_y \varepsilon_y + \sigma_y \varepsilon_p \right) \times AL$$

より、 $E_0=E_1$ として $\varepsilon_p$ を求める。

但し、 $\left( \frac{1}{2}\sigma_y \varepsilon_y \right) \times AL$ が $E_0$ よりも大きい場合、 $\varepsilon_p=0$ （弾性範囲内）となる。

ここで

m：飛来物の質量

鋼製パイプ 8.4kg

鋼製材 135kg

v：飛来物の衝突速度

鋼製パイプ 18.82m/s

鋼製材 9.83m/s

$\sigma_y$ ：被覆管耐力  MPa

$\varepsilon_y$ ：弾性歪、 $\sigma_y=E \times \varepsilon_y$ より算出

枠囲みの内容は機密情報に属しますので公開できません。

E : 燃料集合体の縦弾性係数   MPa

$\epsilon_p$  : 塑性歪

A : 受圧面積 (被覆管の断面積)  $3.15 \times 10^{-3} \text{m}^2$

L : 被覆管長さ 3856mm

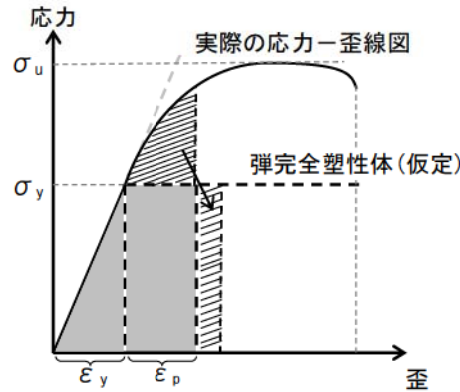


図-3 弾完全塑性体の保守性  
(イメージ図)

  枠囲みの内容は機密情報に属しますので公開できません。

(b) ラックセル貫入量

設計飛来物がラックセルに衝突すると、衝突直前の設計飛来物の運動エネルギーは、ラックセルの変形によって吸収される<sup>\*1</sup>ことになる。

このため、設計飛来物の衝突によるラックセルの貫入量(変形量)については、衝突直前の設計飛来物の運動エネルギーとラックセルの変形による吸収エネルギーが等しくなるときの貫入量となるため、以下のとおり算出している。

\*1: 保守的な評価となるよう、飛来物は剛体と考えて、飛来物の変形によるエネルギー吸収は考慮しない。

<算出式>

設計飛来物の運動エネルギー  $W$  (N・m) は、ラックセルの圧縮エネルギー  $E_c$  (N・m) (圧縮破壊による吸収エネルギー) とせん断エネルギー  $E_s$  (N・m) (せん断破壊による吸収エネルギー) により吸収されるため<sup>\*2</sup>、次の式で与えられる。

\*2: 飛来物衝突時にラックセルに発生する圧縮応力は、ラックセルの細長比を考慮した許容圧縮応力よりも小さく座屈は発生しないことから、座屈によるエネルギー吸収は考慮していない。

$$W = E_c + E_s$$

$$W = 1/2 \cdot m \cdot v^2$$

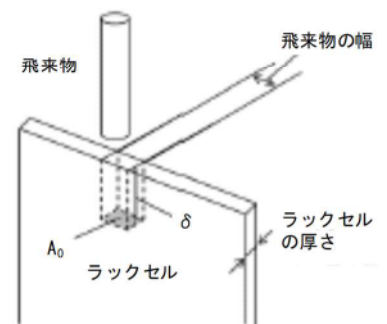
m : 飛来物の質量 (kg)、v : 飛来物の衝突速度 (m/s)

ここで、ラックセルの圧縮エネルギー  $E_c$  (N・m) とせん断エネルギー  $E_s$  (N・m) は次の式で与えられる。

① ラックセルの圧縮エネルギー  $E_c$

$$E_c = e \cdot V = e \cdot A_0 \cdot \delta$$

e : 単位体積当たりの吸収エネルギー (N/m<sup>2</sup>) = ラックセル



圧縮エネルギー

ルの引張強さ×ラックセルの伸び

$$V: \text{貫入体積 (m}^3\text{)} = A_0 \cdot \delta$$

$A_0$ : 飛来物の幅×ラックセルの厚さ

$\delta$ : ラックセルの貫入量 (m)

②ラックセルのせん断エネルギー

$$E_s = 1/2 \cdot (A_s \cdot \tau) \cdot \delta = t \cdot \tau \cdot \delta^2$$

$A_s$ : ラックセルのせん断断面積 (m<sup>2</sup>) = 2面×t× $\delta$

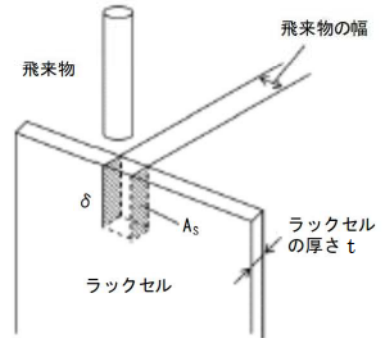
$\tau$ : 最大せん断応力 (N/m<sup>2</sup>) = ラックセルの引張強さ÷ $\sqrt{3}$

$\delta$ : ラックセルの貫入量 (m)

t: ラックセルの厚さ (m)

以上より、下式を満足するラックセルの貫入量  $\delta$  を求める。

$$e \cdot A_0 \cdot \delta + t \cdot \tau \cdot \delta^2 - W = 0$$



せん断エネルギー

d. 評価結果

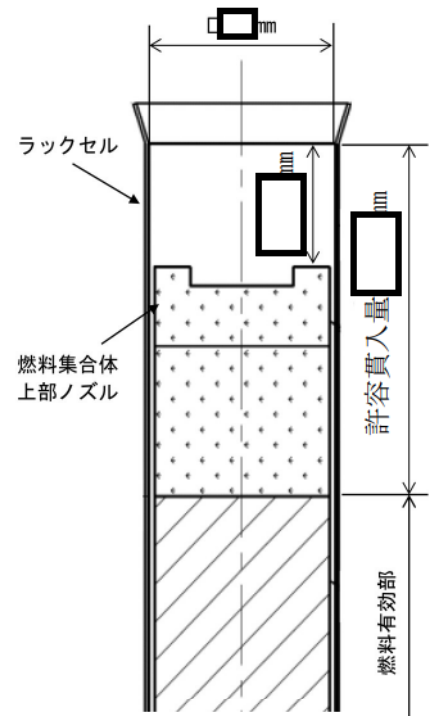
(a) 鋼製パイプ

鋼製パイプは直接燃料集合体に衝突することが考えられるため、鋼製パイプが燃料集合体上部ノズルに衝突した場合の燃料被覆管に発生する歪を評価した結果、燃料被覆管の許容歪 1% に対して、塑性歪は発生しない(弾性範囲内)ことから、燃料被覆管は破損しないため健全性は維持される。

なお、ラックセルに衝突した場合は、ラックセル上端から燃料集合体上部ノズルまでの最小距離  $\square$  mm に対して、31mm の貫入となり、燃料ラックの損傷範囲が燃料有効部に達することはなく、未臨界性は維持される。

(b) 鋼製材

鋼製材は直接燃料集合体に衝突することはないため、ラックセルに衝突した場合の貫入量を評価した結果、ラックセル上端から燃料集合体上部ノズルまでの最小距離  $\square$  mm に対して、162mm の貫入となり、燃料ラックの損傷範囲が燃料有効部に達することはなく、未臨界性は維持されるが、ラックセルを押しつぶした後に燃料集合体上部ノズルに衝突する。その際に燃料被覆管に発生する歪を評価した結果、燃料被覆管の許容歪 1% に対して、塑性歪は発生しない(弾性範囲内)ことから、燃料被覆管は破損せず健全性は維持される。



ラックセル概要図

$\square$  枠囲みの内容は機密情報に属しますので公開できません。

e. 斜め方向から進入した設計飛来物の衝突による燃料集合体への影響について

使用済燃料ピットが設置されている建屋の上屋（燃料取扱棟）の屋根は設計飛来物が貫通しないとの結果が得られているが、上記のとおり、燃料集合体に直接衝突する場合が最も厳しい評価となるため、屋根は考慮せずに、設計飛来物は鉛直方向から進入するものとして評価している。しかしながら、実際には、設計飛来物は燃料取扱棟の壁（斜め方向）から進入してラックセルに衝突することが考えられる。

設計飛来物が斜め方向から進入して燃料集合体に衝突した場合、燃料集合体の燃料被覆管には鉛直方向の衝突速度成分による発生歪と水平方向の衝突速度成分による発生歪が生じるが、鉛直方向の衝突速度成分による発生歪については、前述の設計飛来物が鉛直方向から進入した場合の評価に包絡されるため、以下の評価条件および評価式にて水平方向の衝突速度成分による発生歪を算出し、設計飛来物が斜め方向から燃料集合体に衝突した場合の燃料被覆管への影響を評価した。

<評価方針>

- ・ 設計飛来物が斜め方向から衝突する場合、ラックセルに衝突し、直接燃料集合体に衝突することはないが、評価においては、保守的に設計飛来物が直接燃料集合体（上部ノズル上端）に衝突するものとする。
- ・ 設計飛来物のうち、鋼製パイプについては、衝突速度、質量共に鋼製材より小さいため、より衝撃荷重の大きい鋼製材にて代表する。

(a) 評価条件

- ・ 設計飛来物は鋼製材とする。  
質量 : 135kg  
衝突速度 : 22.54m/s（最大水平速度）※水中抵抗による減速を考慮。
- ・ ラックセルは上部、下部 2 箇所の支持格子で支持されているため、ラックセルを支持格子部で水平方向に支持された張り出し梁にモデル化して、設計飛来物により発生する曲げ応力を算出する（評価モデルは図-4 のとおり）。

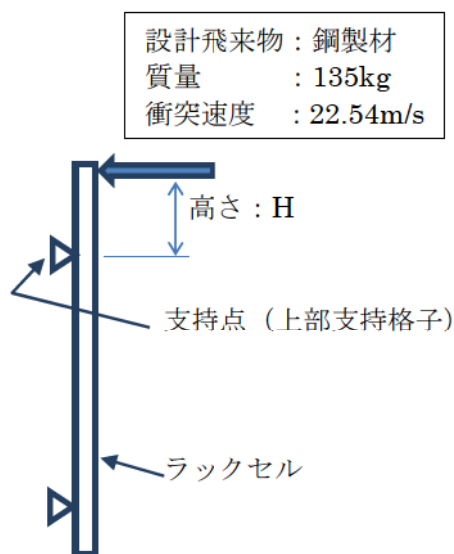


図-4 評価モデル

(b) 評価結果

イ. ラックセル

(イ) 衝突荷重

ラックセルに作用する荷重  $F$  は、運動量と力積の関係から求める。荷重と時間の関係を  $\sin$  カーブと仮定し、積分計算により力積を求めた。

ここで、衝突時間  $\Delta T$  は、ラックセルの一次固有周期の  $1/4$  とする。

$$m \cdot v = F \cdot \Delta T / (\pi/2) \text{ より、}$$

$$F = (\pi/2) \cdot m \cdot v / \Delta T = (\pi/2) \times 135 \times 22.54 / 0.0098$$

$$= 4.88 \times 10^5 \text{ N}$$

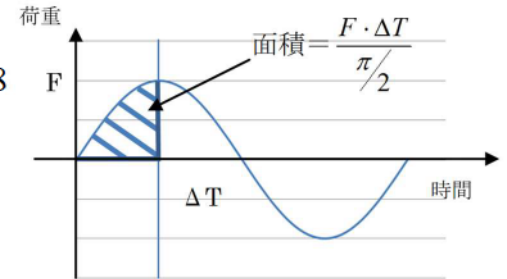
ここで、 $m$  : 鋼製材の質量 135kg

$v$  : 鋼製材の衝突速度 22.54m/s

$\Delta T$  : 衝突時間 0.0098s

$$\Delta T = 1/4 f = 1/(4 \times 25.38 \text{ Hz}) = 0.0098 \text{ s}$$

ここで、 $f$  : ラックセルの一次固有振動数



(ロ) ラックセルに生じる曲げモーメントおよびせん断力

ラックセルに生じる曲げモーメントは、支持点（上部支持格子）で最大となる。上部支持格子における曲げモーメント  $M$  およびせん断力  $Q$  は、次式より求める。

$$M = F \cdot H = 4.88 \times 10^5 \times \boxed{\quad} = 3.56 \times 10^8 \text{ N} \cdot \text{mm}$$

ここで、 $H$  : 燃料集合体頂部から上部支持格子までの距離  $\boxed{\quad}$  mm

$$Q = F = 4.88 \times 10^5 \text{ N}$$

(ハ) ラックセルに生じる曲げ応力およびせん断応力

$$\text{曲げ応力: } \sigma = M/Z = 3.56 \times 10^8 / 2.82 \times 10^5 = 1263 \text{ MPa} > \text{許容曲げ応力: } 205 \text{ MPa}$$

$$\text{せん断応力: } \tau = Q/A = 4.88 \times 10^5 / 3712 = 132 \text{ MPa} > \text{許容せん断応力: } 118 \text{ MPa}$$

ここで、 $Z$  : ラックセルの断面係数  $\boxed{\quad} = 2.82 \times 10^5 \text{ mm}^3$

$A$  : ラックセルの断面積  $\boxed{\quad} = 3712 \text{ mm}^2$

以上より、曲げ応力およびせん断応力は材料の降伏点を超過し、永久変形が残ると考えられる。このときの塑性ひずみ量を以下の方法で求める。

$\boxed{\quad}$  枠囲みの内容は機密情報に属しますので公開できません。

(ニ) ラックセルの塑性ひずみ

ラックセルの塑性ひずみを求めるにあたり、以下の仮定を設ける。

- ・ ラックセルの材料（1%B-SUS）を弾完全塑性体とする。
- ・ ラックセルを完全弾性体としたときの弾性ひずみエネルギーが、弾完全塑性体

のひずみエネルギーに等しいとする。

以上の仮定より、曲げ応力による塑性ひずみ量  $\varepsilon$  は、以下のとおりとなる。

$$\text{弾性ひずみエネルギー } E_e : E_e = \frac{\sigma^2}{2E}$$

$$\text{塑性ひずみエネルギー } E_p : E_p = \sigma_y \cdot \varepsilon - \frac{\sigma_y^2}{2E}$$

$E_e = E_p$  より、

$$\varepsilon = \frac{\sigma^2 + \sigma_y^2}{2E\sigma_y} = \frac{1263^2 + 189^2}{2 \times 1.918 \times 10^5 \times 189} = 0.023$$

ここで、 $\sigma$  : 弾性体とした時の曲げ応力  $\sigma = 1263 \text{ MPa}$

$\sigma_y$  : 材料の降伏点  $\sigma_y = 189 \text{ MPa}$

$E$  : 材料の縦弾性係数  $E = 1.918 \times 10^5 \text{ MPa}$

(JSME 設計・建設規格の SUS304, at 65°C)

同様に、せん断応力による塑性ひずみ  $\gamma$  は、以下のとおりとなる。

$$\gamma = \frac{\tau^2 + \tau_y^2}{2G\tau_y} = \frac{132^2 + 109^2}{2 \times 7.377 \times 10^4 \times 109} = 0.002$$

ここで、 $\tau$  : 弾性体とした時のせん断応力  $\tau = 132 \text{ MPa}$

$\tau_y$  : 材料の降伏点 /  $\sqrt{3}$   $\tau_y = 189 / \sqrt{3} = 109 \text{ MPa}$

$G$  : 材料のせん断弾性係数  $G = \frac{E}{2(1+\nu)} = \frac{1.918 \times 10^5}{2 \times (1+0.3)} = 7.377 \times 10^4 \text{ MPa}$

$\nu$  : ポアソン比  $\nu = 0.3$

以上より、ラックセルの曲げ応力による塑性ひずみ量は 2.3% 程度であり、材料の破断伸び 16% (工認記載値) に対して余裕を有しており破断することはない。

また、同様にせん断応力による塑性ひずみ量は 0.2% 程度であり破断することはない。

(ホ) ラックセルの曲げたわみ量

ラックセルのたわみ量は、以下の構造力学公式より求める。

構造力学公式

燃料集合体上部ノズル上端部におけるラックセルのたわみ量：

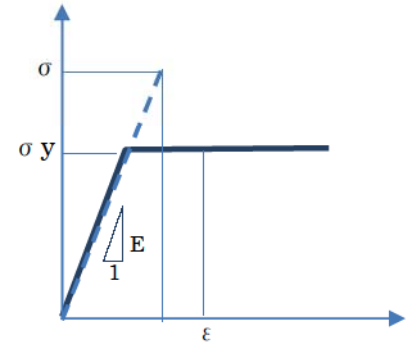


図-5 塑性ひずみの算定方法

弾性ひずみエネルギーと面積が等しくなる塑性ひずみ  $\varepsilon$  を求める。

$$\delta = \frac{FH^2(H + \ell)}{3EI}$$

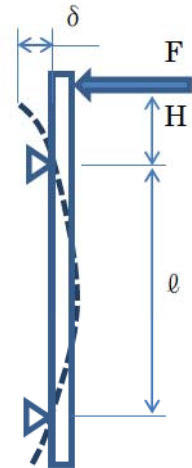
ここで、 $F = 4.88 \times 10^5 N$

$$H = \boxed{\phantom{000}} \text{ mm}$$

$$\ell = \boxed{\phantom{000}} \text{ mm}$$

$$E = 1.918 \times 10^5 \text{ MPa}$$

$$I : \text{断面 2 次モーメント } I = \boxed{\phantom{00000000}} = 3.33 \times 10^7 \text{ mm}^4$$



よって、曲げたわみ量は、 $\delta = 45.7 \text{ mm}$ である。

(へ) ラックセルのせん断変形量

ラックセルのせん断変形量  $\delta_Q$  は次式で表される。

$$\delta_Q = \tan(\gamma) \cdot H = \tan\left(\frac{\tau}{G}\right) \cdot H = \tan\left(\frac{132}{7.377 \times 10^4}\right) \times \boxed{\phantom{000}} = 1.4 \text{ mm}$$

ここで、 $\gamma$  : せん断ひずみ  $\gamma = \frac{\tau}{G}$

$\tau$  : せん断応力  $\tau = 132 \text{ MPa}$

$G$  : せん断弾性係数  $G = \frac{E}{2(1+\nu)} = \frac{1.918 \times 10^5}{2 \times (1+0.3)} = 7.377 \times 10^4 \text{ MPa}$

$E$  : 縦弾性係数

$\nu$  : ポアソン比  $\nu = 0.3$

$H$  : ラックセルのせん断力を受ける長さ (上図参照)  $H = \boxed{\phantom{000}} \text{ mm}$

(ト) ラックセルの変形量 (曲げたわみ+せん断変形)

上記 (ホ) 項および (へ) 項の結果より、燃料集合体上部ノズル上端部におけるラックセルの変形量は、 $47.1 \text{ mm}$  となる。

ラックセルの変形量 = 曲げたわみ量  $\delta$  + せん断変形量  $\delta_Q$

$$= 45.7 \text{ mm} + 1.4 \text{ mm} = 47.1 \text{ mm}$$

枠囲みの内容は機密情報に属しますので公開できません。

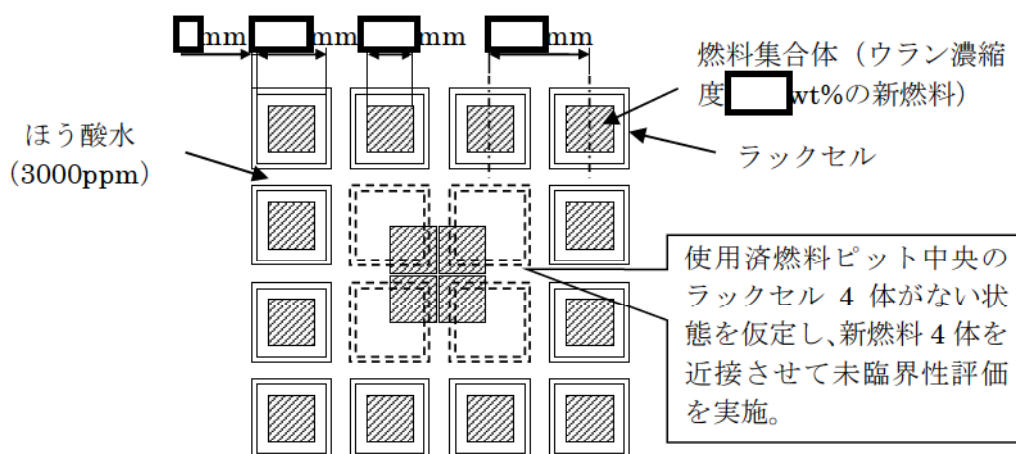
(チ) ラックセルの変形に伴う未臨界性への影響

使用済燃料ピットにはウラン濃縮度が約 4.8wt%の燃料集合体(新燃料または使用済燃料)がほう酸水中(約 3000ppm)に保管されている。

燃料集合体が貯蔵される使用済燃料ラックセル間の距離は、鋼製材(サイズ 200×300mm)と比較して短いため、同時に複数のラックセルに衝突し、最大で4体のラックセルの変形や燃料間距離の減少が生じる可能性が考えられることから、保守的に使用済燃料ピット中央のラックセル4体がない状態を仮定し、ウラン濃縮度 [ ] wt%の新燃料4体が直接近接した条件で未臨界性への影響を評価した。

影響評価の結果、ウラン濃縮度 [ ] wt%の新燃料4体が近接しても、ほう酸水中(3000ppm)の実効増倍率は約 0.90であり、臨界となることはないと考える。

なお、新燃料と比較して反応度が低い照射燃料およびウラン濃縮度約 4.1wt%相当であるウラン・プルトニウム混合酸化物燃料(MOX燃料)についても、臨界となることはない。



未臨界性評価体系イメージ図  
(使用済燃料ピット中心付近拡大図)

ロ. 燃料被覆管

(イ) 燃料被覆管に生じる歪

燃料集合体(上部ノズル)が水平方向に変位すると、燃料集合体に曲がりが発生する。また、燃料集合体に曲がりがあると、図-6のように鉛直方向の荷重によっても曲がりが発生する。ここでは、燃料集合体の曲がり量として、e. (b)イ. (ト)で求めた燃料集合体上部ノズル上端部におけるラックセルの変形量47.1mm、燃料集合体とラックセルの間隔 [ ] mmおよび鉛直方向からの飛来物による荷重を考慮した解析を実施し、燃料被覆管に生じる曲げ応力による歪量と、曲がりに伴い燃料集合体とラックセルの接触により燃料被覆管に発生する応力による歪量を評価した。

このとき、燃料被覆管に生じる曲げ応力等を地震時の燃料集合体の応力評価で使用するANSYSコードを用いて評価した結果、燃料被覆管に生じる曲げ応力は約 60MPaであり、また、曲がりに伴い燃料集合体とラックセルの接触により燃料被覆管に発生する応力約2MPaと合わせても、燃料被覆管の許容歪1%に対して、発生する塑性歪は0.1%であり、燃料被覆管は破損しないため健全性は維持される。

[ ] 枠囲みの内容は機密情報に属しますので公開できません。



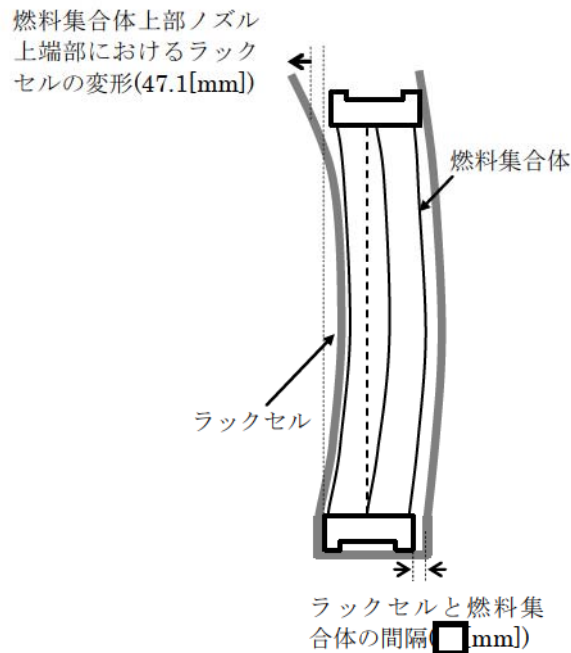


図-6 ラックセルの変形・燃料集合体曲がりによる評価イメージ

(c) まとめ

以上より、設計飛来物が斜め方向から燃料集合体に衝突した場合に燃料被覆管に生じる歪は0.1%であり、燃料被覆管の許容歪1%に対して十分小さい値である。また、前述した設計飛来物が鉛直方向から進入した場合の評価における燃料被覆管に生じる歪（弾性範囲内）を考慮しても、燃料被覆管の許容歪を下回っており、燃料被覆管は破損せず健全性が維持できることを確認した。また、ラックセルの変形に伴う未臨界性への影響はないことを確認した。

f. 燃料被覆管の許容歪について

設計飛来物が燃料集合体に衝突した場合の燃料被覆管に生じる歪の評価にあたって、燃料被覆管の許容歪については、未照射材、照射材の引張試験により求められる破断歪データを踏まえて保守的に1%としている。

(2) 使用済燃料ピット

使用済燃料ピット内へ設計飛来物が進入した場合、使用済燃料ピットへの影響が考えられるため、設計飛来物が使用済燃料ピットに衝突した場合の貫通評価を実施した。評価は使用済燃料ピットのコンクリート躯体および使用済燃料ピット内面に内張りされているステンレス製のライニングについて実施した。

a. 評価条件

- ✓ 使用済燃料ピットが設置されている建屋の上屋（燃料取扱棟）の屋根は設計飛来物が貫通しないとの結果が得られたが保守的に考慮しない。
- ✓ 保守的に飛来物は使用済燃料ピット内に水平または鉛直に進入して当該ピットの側面または底面に衝突するものとする。
- ✓ 保守的に飛来物は使用済燃料ピット内の保有水により減速することなく衝突するものとする。

□ 枠囲みの内容は機密情報に属しますので公開できません。

✓ 保守的に飛来物は剛体と考えて、飛来物の変形によるエネルギー吸収は考慮しない。

b. 評価結果

(a) ライニング

飛来物の貫通を生じないために必要な鋼板の最小厚さとライニングの最小板厚を比較した結果、飛来物が貫通することを確認した。評価結果を表-1に示す。

表-1 ライニングに対する貫通評価結果

飛来物の種類		鋼製パイプ	鋼製材
最大水平速度 (m/s)		49	57
最大鉛直速度 (m/s)		33	38
水 平	鋼板の必要最小厚さ (mm)	18	37
	ライニング最小板厚 4.5mm に対する評価	貫通する	貫通する
鉛 直	鋼板の必要最小厚さ (mm)	11	22
	ライニング最小板厚 4.5mm に対する評価	貫通する	貫通する

(b) コンクリート躯体

飛来物の貫通を生じないために必要なコンクリートの最小厚さとコンクリート躯体の最小板厚を比較した結果、飛来物は貫通しないことを確認した（使用済燃料ピット内面のライニング厚さは保守的に考慮していない）。評価結果を表-2に示す。

表-2 コンクリート躯体に対する貫通評価結果

飛来物の種類		鋼製パイプ	鋼製材
最大水平速度 (m/s)		49	57
最大鉛直速度 (m/s)		33	38
水 平	コンクリートの必要最小厚さ (mm)	120	290
	コンクリート躯体最小板厚 1800mm に対する評価	貫通しない	貫通しない
鉛 直	コンクリートの必要最小厚さ (mm)	90	210
	コンクリート躯体最小板厚 1800mm に対する評価	貫通しない	貫通しない

c. 安全機能への影響

上記 b. 項の評価結果から、設計飛来物により使用済燃料ピット内面のライニングは貫通等の損傷を受ける可能性があるが、コンクリート躯体は貫通せず、コンクリートの必要最小厚さ 290mm（最大）に対して、コンクリート躯体の最小板厚は 1800mm あることから損傷の程度は小さく、直ちに使用済燃料ピットの保有水が漏えいすることはない。また、ライニングが損傷することにより、使用済燃料ピットから漏えいした保有水はライニング背面の漏えい検知溝を通り漏えい検知管から排水されるが、①使用済燃料ピットの水位低警報（NWL-0.08 m）等により漏えいを検知でき、その後水張り等の処置を行う手順としていること、②使用済燃料ピット内面（4 面のうち 1 面）のライニングが無い状態を仮定し、漏えい検知溝（直径 8mm の半円状でありライニングの溶接線に沿って設置されている）12 本（A, B ピットのうち、1 面あたりの本数が最大となる B ピットの値）を通り使用済燃料ピット保有水が漏えいしたとしても、漏えい量は約 17m<sup>3</sup>/h であり、使用済燃料ピットへの給水量 46 m<sup>3</sup>/h（ポンプ定格流量）を下回っていることから、使用済燃料ピット保有水の有意な消失は生じず、使用

済燃料ピットの冷却および遮へい機能は維持されることから、安全機能に影響を与えない。

なお、設計飛来物により使用済燃料ピット内面のライニングに貫通等の損傷を受けた場合は補修を実施することになるが、国内におけるライニングの補修実績としては、日本原燃の使用済燃料受入れ・貯蔵施設の燃料貯蔵プールにおいて、当該プール内に仮設補修用ダクトを設置し、ダクト内を排水して気中環境とした上でライニングの補修を行った事例がある。

### (3) まとめ

前述のとおり、使用済燃料ピットが設置されている原子炉建屋の上屋（燃料取扱棟）は設計飛来物が貫通して進入してくることが想定されるため、①使用済燃料ラック、②使用済燃料ラックに貯蔵される燃料集合体、および③使用済燃料ピットへの設計飛来物による影響を評価した結果、当該設備に設計飛来物が衝突したとしても、①ラックセルの損傷範囲は燃料有効部に達することはないこと等により未臨界性は維持されること、②燃料被覆管は破損せず健全性は維持されること、および③使用済燃料ピット内面のライニングは損傷しても保有水の有意な消失は生じず、使用済燃料ピットの冷却および遮へい機能は維持され安全機能が維持できることを確認した。

また、設計飛来物が上屋を貫通して進入してくることから、発電所周辺の公衆に対する被ばく影響が懸念されるが、上記のとおり安全機能は維持できるため、放射性物質が大量に放出される事態にはならない。

以上から、設計飛来物が上屋を貫通して進入してきた場合でも、使用済燃料ラック等の安全機能は維持されるため、発電所周辺の公衆に対する被ばく影響は小さいと考える。

2 3. 新燃料貯蔵庫内へ設計飛来物が進入した場合の影響評価に係る評価条件等について

(1) 新燃料ラック（当該ラックに貯蔵される燃料集合体を含む）

a. はじめに

新燃料貯蔵庫内へ設計飛来物が進入した場合、新燃料ラック（当該ラックに貯蔵される燃料集合体を含む）への影響が考えられるため、以下の評価条件および評価式にて、①設計飛来物が直接燃料集合体に衝突した場合の燃料被覆管に生じる歪および②設計飛来物が新燃料ラック（ラックセル）に衝突した場合のラックセル貫入量を評価する。

ただし、砂利については、鋼製材及び鋼製パイプの評価に包絡されるため、評価対象外とする。

b. 評価条件

- ✓ 新燃料貯蔵庫が設置されている建屋の上屋（燃料取扱棟）の屋根は設計飛来物が貫通しないとの結果が得られたが保守的に考慮しない。
- ✓ 燃料集合体に直接衝突する場合が最も厳しい評価となるため、設計飛来物の進入方向は鉛直方向とする。
- ✓ 設計飛来物の衝突速度（最大鉛直速度）は以下のとおりとする。

鋼製パイプ：33m/s

鋼製材：38m/s

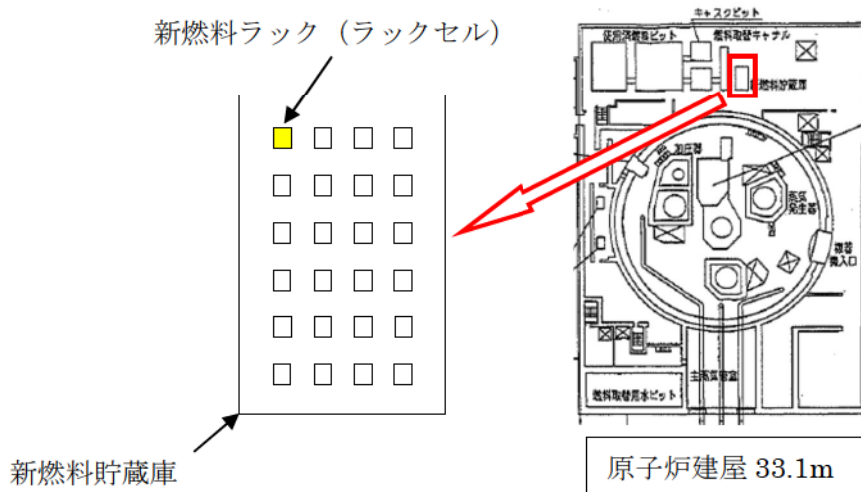


図-1 新燃料ラックの配置イメージ

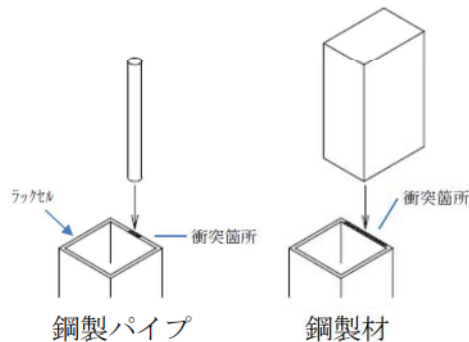


図-2 ラックセルの衝突箇所

c. 評価式

(a) 燃料被覆管に生じる歪

飛来物の衝突に伴う荷重は、燃料集合体の上部ノズルを介して燃料棒及び制御棒案内シンプルに作用することとなる。この際に燃料被覆管に生じる歪を評価した。算出にあたっては、保守的な評価となるよう次の仮定を設けた。

- ・ 飛来物の運動エネルギー $E_0$ は燃料集合体の変形エネルギー $E_1$ に等しいとし、飛来物の運動エネルギー全てが燃料被覆管の変形に費やされるものとする（制御棒案内シンプルによる荷重の分担は考慮しない）。
- ・ 燃料被覆管は弾完全塑性体とする（塑性変形に伴う硬化を考慮しない）。（図-3）

すなわち、

$$E_0 = \frac{1}{2}mv^2$$

$$E_1 = \left( \frac{1}{2}\sigma_y \varepsilon_y + \sigma_y \varepsilon_p \right) \times AL$$

より、 $E_0=E_1$ として $\varepsilon_p$ を求める。

但し、 $\left( \frac{1}{2}\sigma_y \varepsilon_y \right) \times AL$ が $E_0$ よりも大きい場合、 $\varepsilon_p=0$ （弾性範囲内）となる。

ここで

m：飛来物の質量

鋼製パイプ 8.4kg

鋼製材 135kg

v：飛来物の衝突速度

鋼製パイプ 33m/s

鋼製材 15.6m/s

$\sigma_y$ ：被覆管耐力 MPa

$\varepsilon_y$ ：弾性歪、 $\sigma_y=E \times \varepsilon_y$ より算出

E：燃料集合体の縦弾性係数 MPa

$\varepsilon_p$ ：塑性歪

A：受圧面積（被覆管の断面積）  $4.22 \times 10^{-3}m^2$

L：被覆管長さ 3856mm

枠囲みの内容は機密情報に属しますので公開できません。

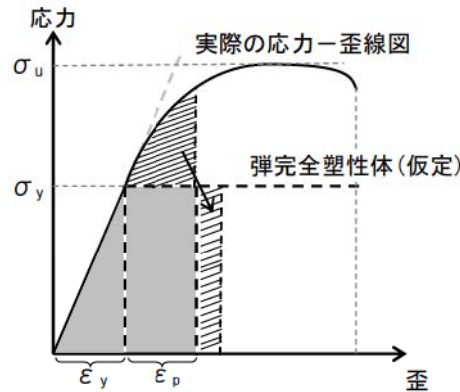


図-3 弾完全塑性体の保守性  
(イメージ図)

(b) ラックセル貫入量

設計飛来物がラックセルに衝突すると、衝突直前の設計飛来物の運動エネルギーは、ラックセルの変形によって吸収される<sup>※1</sup>ことになる。

このため、設計飛来物の衝突によるラックセルの貫入量(変形量)については、衝突直前の設計飛来物の運動エネルギーとラックセルの変形による吸収エネルギーが等しくなるときの貫入量となるため、以下のとおり算出している。

※1: 保守的な評価となるよう、飛来物は剛体と考えて、飛来物の変形によるエネルギー吸収は考慮しない。

<算出式>

設計飛来物の運動エネルギー  $W$  (N・m) は、ラックセルの圧縮エネルギー  $E_c$  (N・m) (圧縮破壊による吸収エネルギー) とせん断エネルギー  $E_s$  (N・m) (せん断破壊による吸収エネルギー) により吸収されるため<sup>※2</sup>、次の式で与えられる。

※2: 飛来物衝突時にラックセルに発生する圧縮応力は、ラックセルの細長比を考慮した許容圧縮応力よりも小さく座屈は発生しないことから、座屈によるエネルギー吸収は考慮していない。

$$W = E_c + E_s$$

$$W = 1/2 \cdot m \cdot v^2$$

$m$ : 飛来物の質量 (kg)、 $v$ : 飛来物の衝突速度 (m/s)

ここで、ラックセルの圧縮エネルギー  $E_c$  (N・m) とせん断エネルギー  $E_s$  (N・m) は次の式で与えられる。

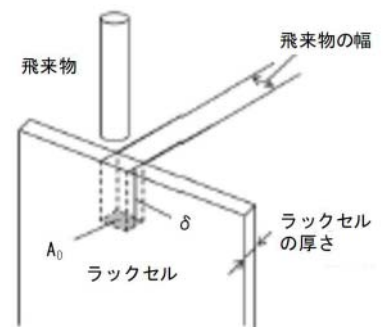
① ラックセルの圧縮エネルギー  $E_c$

$$E_c = e \cdot V = e \cdot A_0 \cdot \delta$$

$e$ : 単位体積当たりの吸収エネルギー (N/m<sup>2</sup>) = ラックセルの引張強さ × ラックセルの伸び

$V$ : 貫入体積 (m<sup>3</sup>) =  $A_0 \cdot \delta$

$A_0$ : 飛来物の幅 × ラックセルの厚さ



圧縮エネルギー