

女川原子力発電所 2 号炉

設計基準対象施設について

(4 条 地震による損傷の防止)

(6 条 外部からの衝撃による損傷の防止(竜巻))

平成 3 1 年 4 月

東北電力株式会社

目次

- 4 条 地震による損傷の防止
- 5 条 津波による損傷の防止
- 6 条 外部からの衝撃による損傷の防止（その他外部事象）
- 6 条 外部からの衝撃による損傷の防止（竜巻）
- 6 条 外部からの衝撃による損傷の防止（火山）
- 6 条 外部からの衝撃による損傷の防止（外部火災）
- 7 条 発電用原子炉施設への人の不法な侵入等の防止
- 8 条 火災による損傷の防止
- 9 条 溢水による損傷の防止等
- 10 条 誤操作の防止
- 11 条 安全避難通路等
- 12 条 安全施設
- 14 条 全交流動力電源喪失対策設備
- 16 条 燃料体等の取扱施設及び貯蔵施設
- 17 条 原子炉冷却材圧力バウンダリ
- 23 条 計測制御系統施設（第 16 条に含む）
- 24 条 安全保護回路
- 26 条 原子炉制御室等
- 31 条 監視設備
- 33 条 保安電源設備
- 34 条 緊急時対策所
- 35 条 通信連絡設備

下線は、今回の提出資料を示す。

第4条：地震による損傷の防止

<目 次>

第1部

1. 基本方針
 - 1.1 要求事項の整理
 - 1.2 追加要求事項に対する適合性
 - (1) 位置，構造及び設備
 - (2) 安全設計方針
 - (3) 適合性説明
 - 1.3 気象等
 - 1.4 設備等
 - 1.5 手順等

第2部

1. 耐震設計の基本方針
 - 1.1 基本方針
 - 1.2 適用規格
2. 耐震設計上の重要度分類
 - 2.1 重要度分類の基本方針
 - 2.2 耐震重要度分類
3. 設計用地震力
 - 3.1 地震力の算定法
 - 3.2 設計用地震力
4. 荷重の組合せと許容限界
 - 4.1 基本方針
5. 地震応答解析の方針
 - 5.1 建物・構築物
 - 5.2 機器・配管系
 - 5.3 屋外重要土木構造物
 - 5.4 津波防護施設，浸水防止設備及び津波監視設備並びに浸水防止設備又は津波監視設備が設置された建物・構築物
6. 設計用減衰定数
7. 耐震重要施設の安全機能への下位クラス施設の波及的影響
8. 水平2方向及び鉛直方向の地震力の組合せに関する影響評価方針
9. 構造計画と配置計画

(別 添)

- 別添－ 1 設計用地震力
- 別添－ 2 動的機能維持の評価
- 別添－ 3 弾性設計用地震力 S_d ・静的地震力による評価
- 別添－ 4 上位クラス施設の安全機能への下位クラス施設の波及的影響の検討について
- 別添－ 5 水平 2 方向及び鉛直方向地震力の組合せに関する影響評価方針
- 別添－ 6 屋外重要土木構造物等及び津波防護施設の耐震評価における断面選定の考え方
- 別添－ 7 主要建屋の構造概要及び解析モデルについて
- 別添－ 8 入力地震動について

(別 紙)

- 別紙－ 1 既工認との手法の相違点の整理（設置変更許可申請段階での整理）
- 別紙－ 2 上位クラス施設の安全機能への下位クラス施設の波及的影響の検討
- 別紙－ 3 水平 2 方向及び鉛直方向の適切な組合せに関する検討について
- 別紙－ 4 サプレッションチェンバ内部水質量の考え方の変更について
- 別紙－ 5 竜巻防護ネットの耐震構造設計について
- 別紙－ 6 原子炉本体の基礎の復元力特性について
- 別紙－ 7 使用済燃料貯蔵ラックの減衰定数について
- 別紙－ 8 規格適用範囲外の動的機能維持の評価
- 別紙－ 9 海水ポンプ室門型クレーンへの非線形時刻歴応答解析の適用
- 別紙－ 1 0 地震時の燃料被覆管の閉じ込め機能の維持について
- 別紙－ 1 1 東北地方太平洋沖地震等による影響を踏まえた建屋耐震設計方法への反映について
- 別紙－ 1 2 埋め込まれた建屋の周辺地盤による影響について
- 別紙－ 1 3 原子炉建屋屋根トラスの解析モデルへの弾塑性解析の適用
- 別紙－ 1 4 応力解析モデルへの弾塑性解析の適用
- 別紙－ 1 5 屋外重要土木構造物等及び津波防護施設の耐震評価における断面選定について
- 別紙－ 1 6 土木構造物の解析手法及び解析モデルの精緻化について
- 別紙－ 1 7 後施工せん断補強筋による耐震補強について
- 別紙－ 1 8 液状化影響の検討方針について
- 別紙－ 1 9 地下水位低下設備について

女川原子力発電所 2号炉

竜巻防護ネットの耐震構造設計について

目 次

1. 概要	1
2. 基本方針	1
2.1 要求事項	1
2.2 構造の概要	1
2.3 評価方針	5
2.4 適用規格	6
3. 耐震評価方法	7
3.1 解析方針	7
3.2 設計用床応答スペクトル	7
3.3 解析モデル及び諸元	12
3.4 固有値解析結果	19
3.5 荷重の設定	22
3.6 評価対象部位	24
3.7 評価基準値	26
3.8 各部の評価方法	27
4. 評価結果	36
5. まとめ	37

添 付 資 料

- 添付資料 1 ゴム支承の構造検討について
- 添付資料 2 適用規格及び設計方法の比較，検証
- 添付資料 3 道路橋示方書，道路橋支承便覧の適用性について
- 添付資料 4 設計用床応答スペクトル及びモード図について
- 添付資料 5 地震時における異常要因分析
- 添付資料 6 ゴム支承及び可動支承の耐震設計について
- 添付資料 7 地震時の鉛直方向変位について
- 添付資料 8 竜巻防護ネット構造部材の質量詳細について
- 添付資料 9 竜巻防護ネットと海水ポンプ室の相互作用について

1. 概要

設計基準対象施設のうち耐震重要度分類 S クラスに属する施設、その間接支持構造物及び屋外重要土木構造物（以下「S クラス施設等」という。）が下位クラス施設の波及的影響によってその安全機能を損なわないこと、また、重大事故等対処施設のうち常設耐震重要重大事故防止設備及び常設重大事故緩和設備並びにこれらが設置される常設重大事故等対処施設（以下「重要 SA 施設」という。）が下位クラス施設の波及的影響によって重大事故等に対処するために必要な機能を損なわないことについては、「上位クラス施設の安全機能への下位クラス施設の波及的影響の検討」（以下「波及的影響検討」という。）の適合性評価において確認している。

波及的影響検討において抽出された下位クラス施設のうち、女川 2 号炉の竜巻防護ネットについては、基準地震動 S_s に対して十分な構造強度を有することを確認することで S クラス施設等及び重要 SA 施設（以下「上位クラス施設」という。）へ地震時に影響を及ぼさないことを説明する。

竜巻防護ネットの設置許可段階での論点については、「別紙-1 既工認との手法の相違点の整理（設置変更許可申請段階での整理）」の添付資料 1 において、以下の項目が論点であると整理している。

- ・ゴム支承や可動支承を採用した構造へのスペクトルモード解析等を含めた耐震設計手法の適用性

本資料では、この論点を踏まえて竜巻防護ネットの耐震設計方針を示すとともに、工事計画認可申請で提示する耐震評価の見通しを示すものである。

2. 基本方針

2.1 要求事項

竜巻防護ネットは飛来物から非常用海水ポンプ等を防護するものであり、地震時にその機能を求められるものではなく、耐震 C クラスに分類されるが、上位クラス施設である非常用海水ポンプ等に対し、地震時において竜巻防護ネットの損傷等により波及的影響を及ぼさないよう、基準地震動 S_s に対して十分な構造強度を有することが求められる。

2.2 構造の概要

竜巻防護ネットは海水ポンプ室（補機ポンプエリア）にフレームに取り付けたネットを配置することで、非常用海水ポンプ等を防護する構造である。

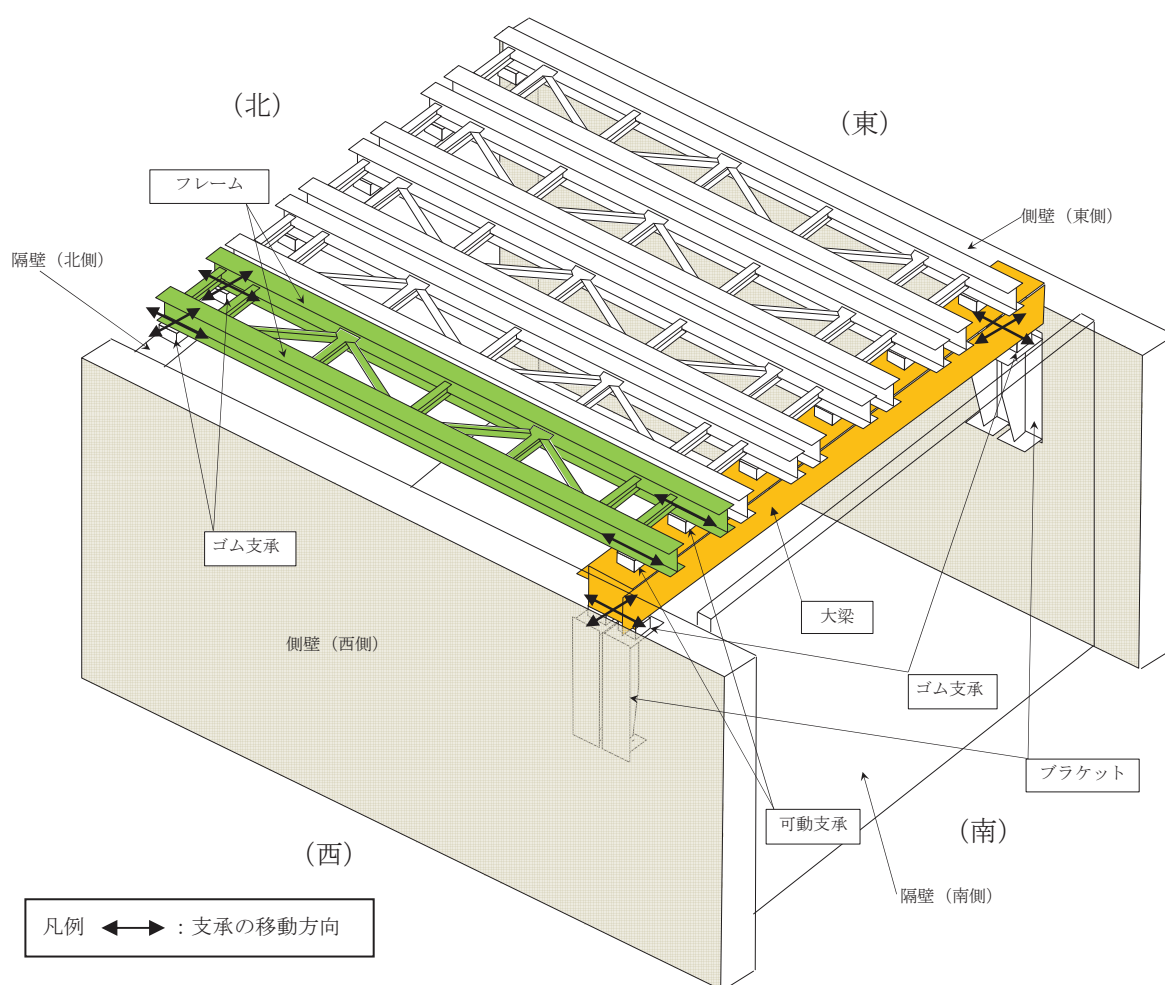
海水ポンプ室（補機ポンプエリア）の側壁（東側及び西側）の南寄り位置にブラケットを設け、フレーム支持用の大梁を設置する。この大梁と隔壁（北側）天面に支持部を設け、ネット及び防護板を取り付けたフレームを支持する。

また、大梁とフレームとの接続部には可動支承を設置し、ブラケットと大梁の接続部及び隔壁（北側）とフレームとの支持部にはゴム支承を設置する。ゴム支承の採用は、ゴム支承のアイソレート機能により竜巻防護ネットの固有値をやや

長周期化することで、海水ポンプ室への反力を低減することを目的としている。また、フレームと大梁の接続部に可動支承を採用することで、フレームや大梁の熱伸びによる変位を吸収する構造とし、メンテナンス性（分解作業の作業性）を向上することを目的としている。

竜巻防護ネットの概要を第2.2-1図及び第2.2-2図に示す。また、竜巻防護ネットの構成部材の仕様を第2.2-1表に、質量の内訳を第2.2-2表に示す。

なお、竜巻防護ネットの構造検討や採用理由について添付資料1に詳細を示す。

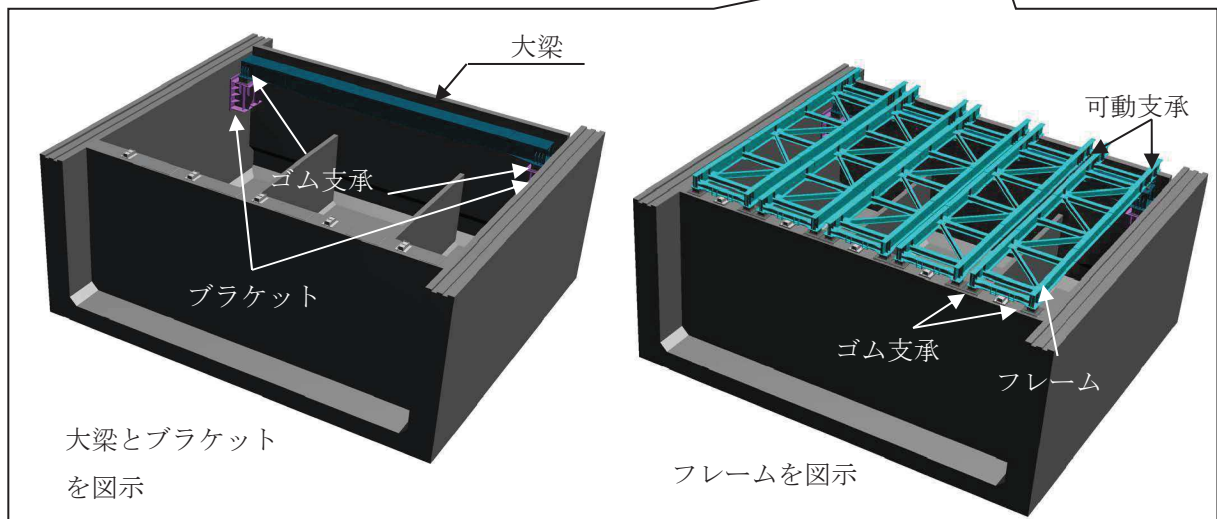
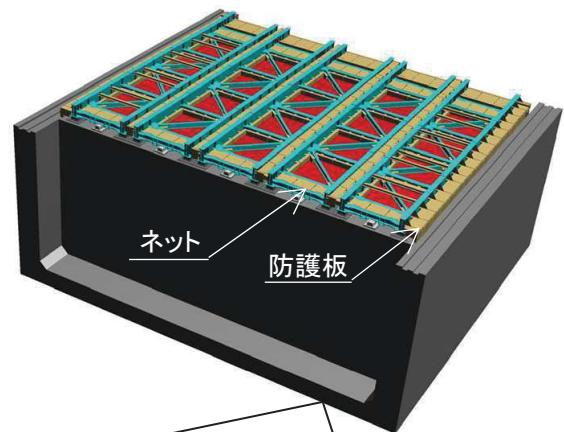


第 2.2-1 図 竜巻防護ネットの概要図（南西側から見た場合）

海水ポンプ室(補機エリア)



竜巻防護ネット取付状態



第 2.2-2 図 竜巻防護ネットの概要図（北西側から見た場合）

本資料のうち，枠囲みの内容は商業機密又は防護上の観点から公開できません。

第 2.2-1 表 竜巻防護ネットの仕様

総質量		約 500ton
全体形状		約 29m（東西方向）×約 24m（南北方向） 高さ 約 1m
ネット（金網部）	構成	主ネット×2 枚＋補助ネット×1 枚
	寸法	線径：φ 4mm 目合い寸法：主ネット 50mm，補助ネット 40mm
	主要材料	硬鋼線材，亜鉛めっき鋼線
フレーム	数量	5 組
	寸法	長さ×幅×高さ：約 23m×4.3m×1m
	主要材料	SM490A，SM400A，SS400
大梁	寸法	長さ×幅×高さ：約 26m×1.5m×1.5m
	主要材料	SM520B，SM490A
ゴム支承	仕様	水平力分散型
	数量	大梁用：4 個（2 組（2 個/組）） 隔壁用：10 個（5 組（2 個/組））
可動支承	数量	隔壁用：10 個（5 組（2 個/組））
防護板	材料	SM400A，SS400
耐震クラス	－	C

第2.2-2表 竜巻防護ネットの質量内訳

部材		数量	質量（t）＊
ネット		20基	20
フレーム		5基	170
大梁		1基	70
ゴム支承	フレーム	10基	10
	大梁	4基	10
可動支承		10基	10
防護板	フレーム（FR1）付	1式	40
	フレーム（FR2）付	1式	30
	フレーム（FR3）付	1式	30
	フレーム（FR4）付	1式	30
	フレーム（FR5）付	1式	40
	大梁付	1式	10
ブラケット		4基	30
総質量			500

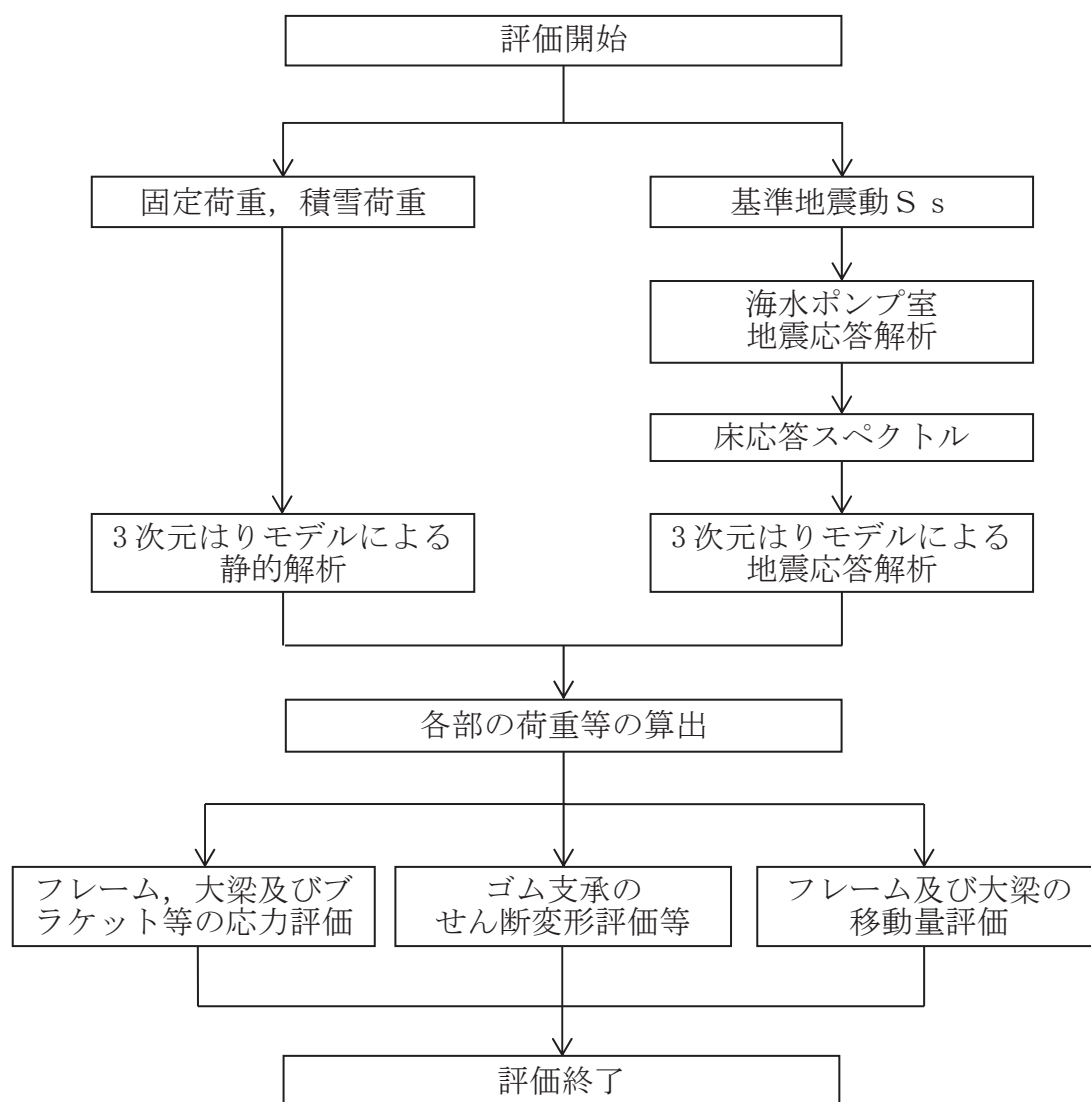
＊ 10t単位で切上げた概略質量，フレーム及び大梁を例に質量の詳細データを添付資料7に示す。

2.3 評価方針

竜巻防護ネットの耐震評価は、基準地震動 S_s による地震力に対して応力評価及び変形評価を行い、崩壊又は落下によって海水ポンプ室内の上位クラス施設に波及的な影響を及ぼさないことを確認する。

フレーム、大梁及び支持機構（ゴム支承，可動支承）等を対象とした3次元はりモデルによる地震応答解析を実施し、基準地震動 S_s 発生時（以下「 S_s 地震時」という。）にフレーム及び大梁の鋼製部材に発生する応力とゴム支承に発生するせん断変形等が評価基準値に収まることを確認する。また、 S_s 地震時のフレーム及び大梁の移動量が部材間のクリアランスを超えないことにより、部材同士の接触が生じないことを確認する。なお、地震荷重の組合せとして積雪荷重を考慮する。

竜巻防護ネットの耐震評価フローを第2.3-1図に示す。



第2.3-1図 竜巻防護ネットの耐震評価フロー

2.4 適用規格

竜巻防護ネットの設計に用いる規格としては、原子力発電所の施設設計に用いる、JSME や JEAG4601 の適用を基本とするが、ゴム支承の設計方法は JSME 等に規定されていないことから、道路橋示方書及び道路橋支承便覧を適用している。なお、道路橋用のゴム支承を適用した理由については添付資料 1 に、支承部の設計に用いる道路橋示方書、道路橋支承便覧の適用性検証の詳細については添付資料 2 及び添付資料 3 に示す。

- ・「発電用原子力設備規格 設計・建設規格 JSME S NC 1-2005/2007」(社) 日本機械学会
- ・「原子力発電所耐震設計技術指針 重要度分類・許容応力編 JEAG4601・補-1984」(社) 日本電気協会
- ・「原子力発電所耐震設計技術指針 JEAG4601-1987」(社) 日本電気協会
- ・「原子力発電所耐震設計技術指針 JEAG4601-1991 追補版」(社) 日本電気協会
- ・「鋼構造設計基準—許容応力度設計法—」((社) 日本建築学会, 2005 改定)
- ・建築基準法・同施行令
- ・「各種合成構造設計指針」((社) 日本建築学会, 2010 改定)
- ・「道路橋示方書・同解説 V 耐震設計編」((社) 日本道路協会, 平成 14 年 3 月)
- ・「道路橋支承便覧」((社) 日本道路協会, 平成 16 年 4 月)

3. 耐震評価方法

3.1 解析方針

竜巻防護ネットの耐震評価における評価対象部位は、フレーム、大梁及びゴム支承等とし、3次元はりモデルを用いた弾性応力解析により各部の応力及び変位を求める。

動的応答解析手法はスペクトルモーダル解析法とし、各振動モードの最大応答の重ね合わせにはSRSS法を用いる。また、解析で用いる減衰定数は、水平加振時ではゴム支承の変形が主体であるため、ゴム支承の等価減衰定数の試験結果より減衰定数を4.0%とし、鉛直方向についてはゴム支承の応答影響が小さいため、ボルト構造物の減衰定数である2.0%とする。なお、解析手法の適用性及び減衰定数の設定については添付資料2に詳細を示す。

3.2 設計用床応答スペクトル

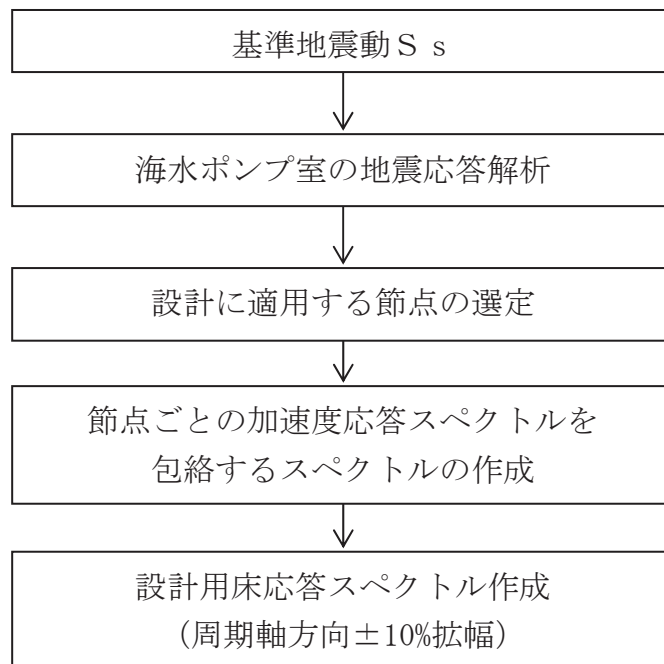
第3.2-1図に設計用床応答スペクトルの作成フローを示す。

基準地震動 S_s の海水ポンプ室の床応答のうち、竜巻防護ネットの設置位置を考慮して適用する節点を選定し、その節点の応答スペクトルを包絡した包絡スペクトルを用いる。なお、包絡スペクトルは周期軸方向に±10%拡幅して、設計用床応答スペクトルを作成している。

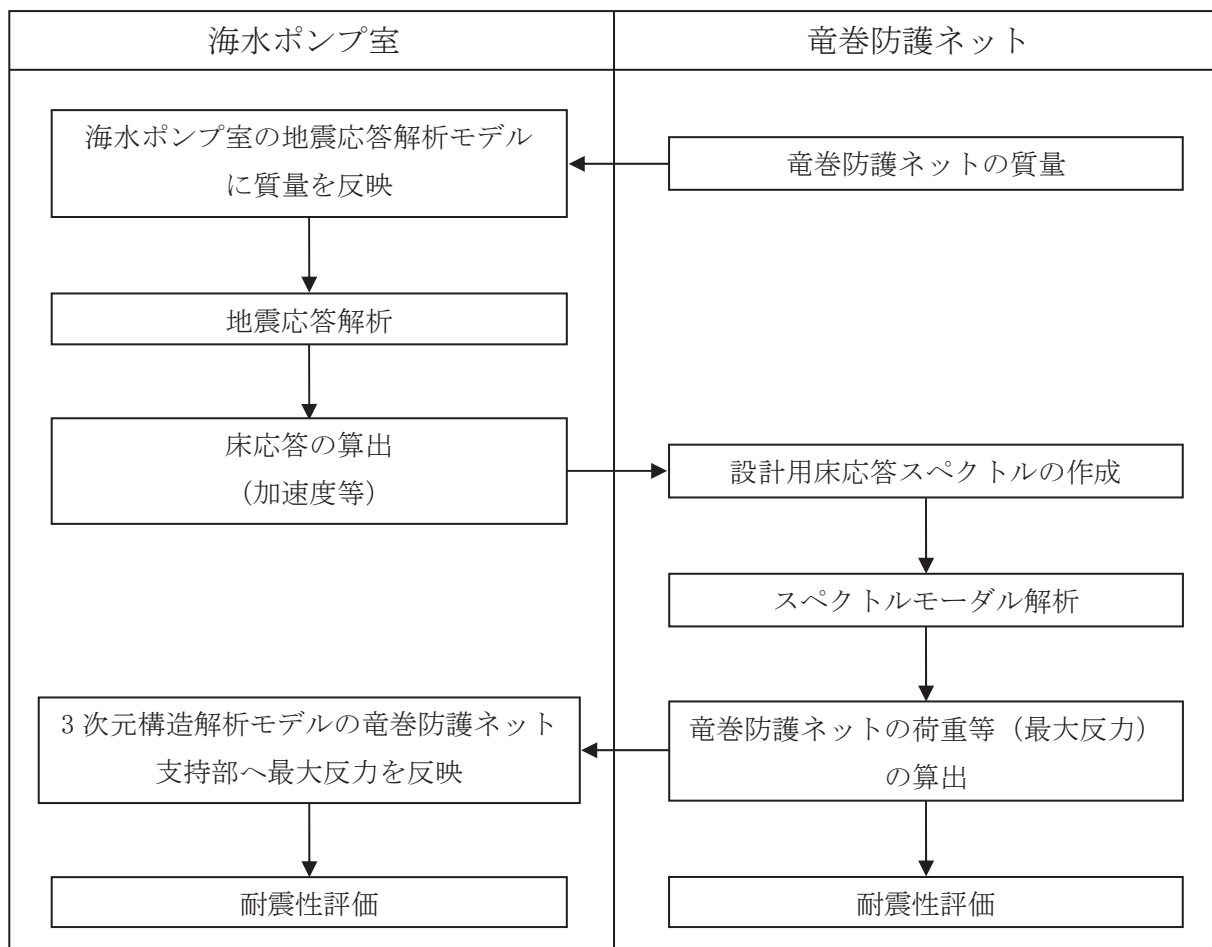
海水ポンプ室の地震応答解析は、海水ポンプ室の補機ポンプエリアを対象とした東西方向の断面（弱軸断面）形状を考慮した地盤—構造物連成の2次元時刻歴非線形解析を用いて算出している。地震応答解析モデルには竜巻防護ネットの質量を反映して地震応答を算定し、竜巻防護ネット設計用の床応答を算定している。竜巻防護ネットの設計により算定される海水ポンプ室への反力を、海水ポンプ室の3次元構造解析モデルの竜巻防護ネット支持部へ作用させ、間接支持機能（海水ポンプ室）を有する設計としている。海水ポンプ室と竜巻防護ネットの相互関係の詳細については第3.2-2図に示す。また、海水ポンプ室と竜巻防護ネットの動的な相互作用の影響について検討した結果を添付資料9に示す。

なお、海水ポンプ室の地震応答解析モデルについては現在、審査を進めているところであるため、審査結果を踏まえて設定する海水ポンプ室モデルの地震応答については、工認段階で竜巻防護ネットの耐震設計に反映する。

包絡スペクトルに適用する節点番号及び基準地震動 S_s を第3.2-1表に、海水ポンプ室の地震応答解析モデル図を第3.2-3図に示す。また、第3.2-4図に設計用床応答スペクトル図を示す。



第 3. 2-1 図 設計用床応答スペクトルの作成フロー



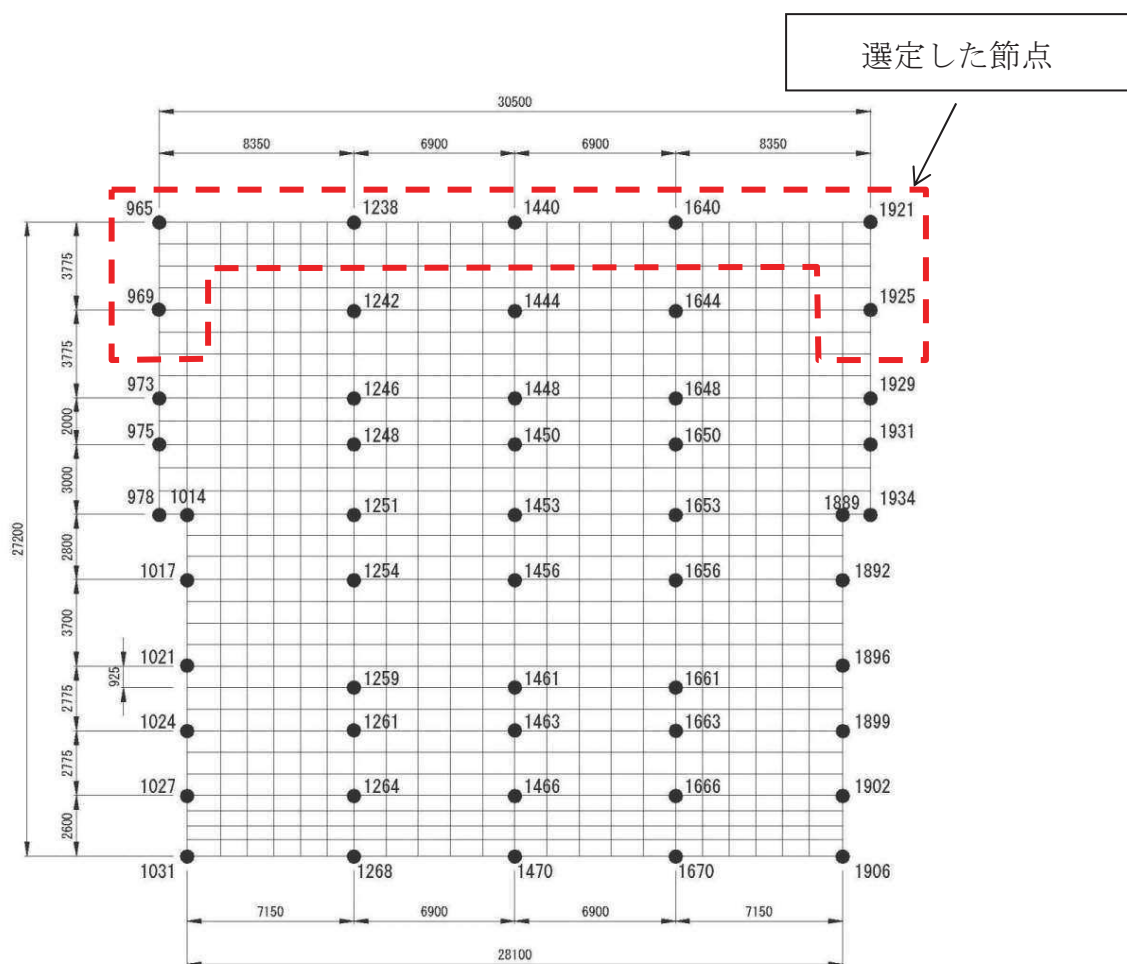
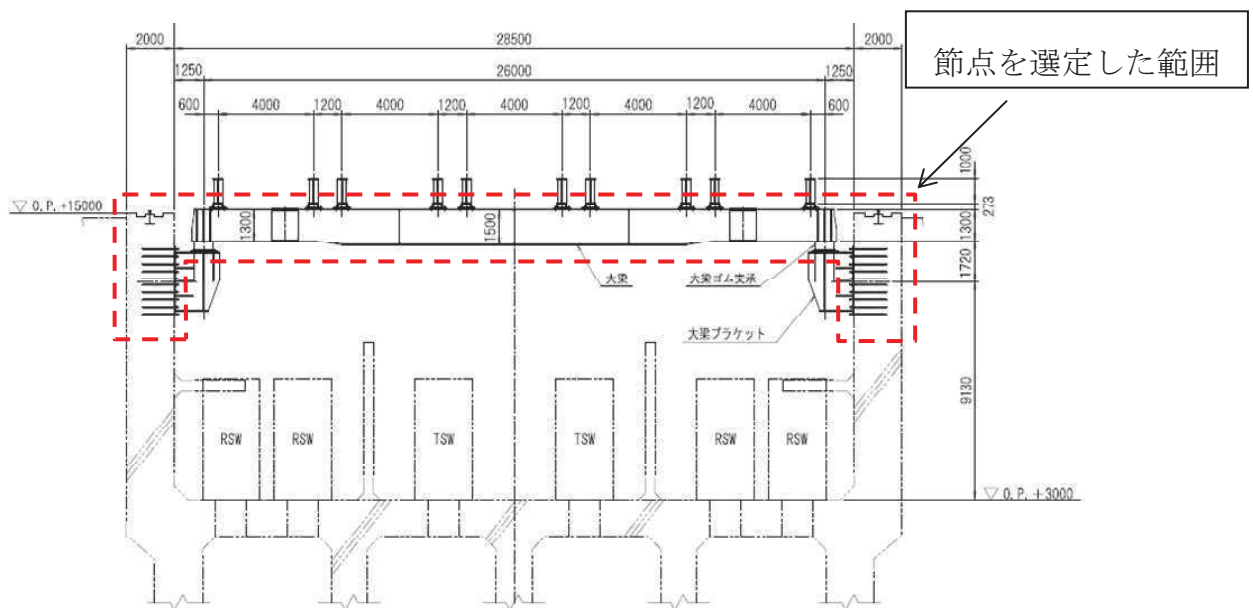
第3. 2-2図 耐震設計における竜巻防護ネットと海水ポンプ室の相互関係

第 3.2-1 表 海水ポンプ室の節点番号及び基準地震動一覧

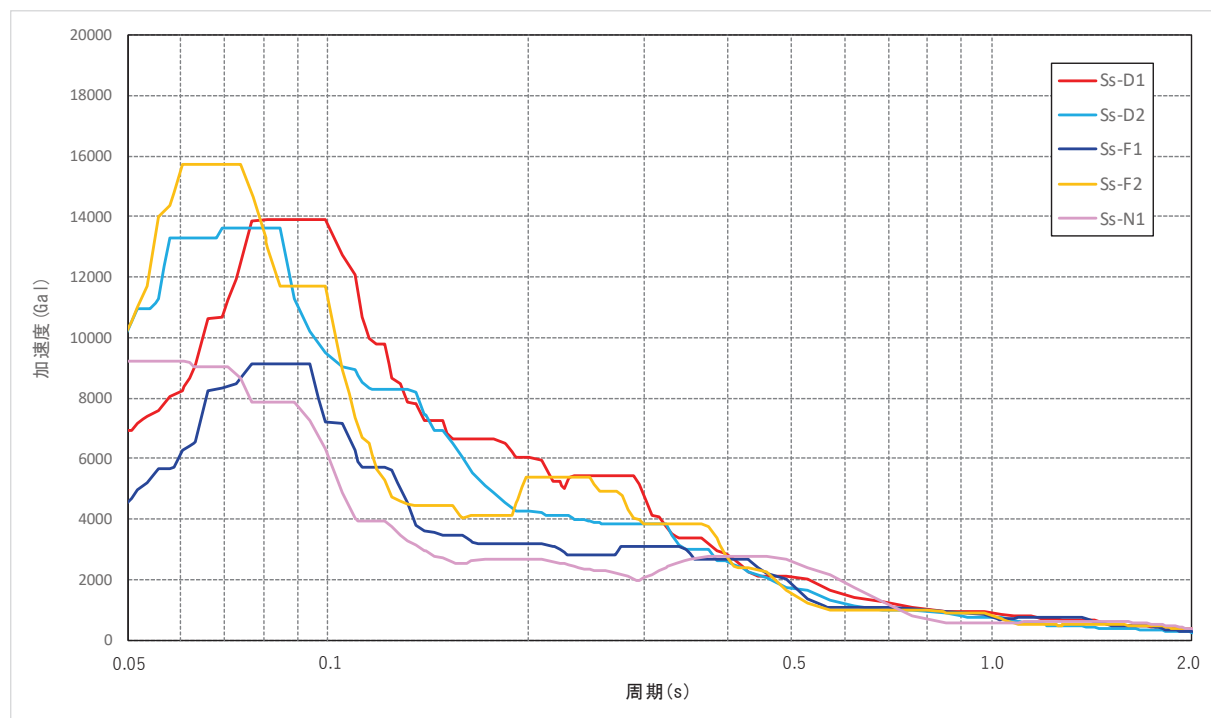
海水ポンプ室の 節点番号	基準地震動 S_s *
965, 969, 1238, 1440, 1640, 1921, 1925	S_s -D1, S_s -D2, S_s -D3, S_s -F1, S_s -F2, S_s -F3, S_s -N1

* 本資料では竜巻防護ネットへの影響が大きいと考えられる

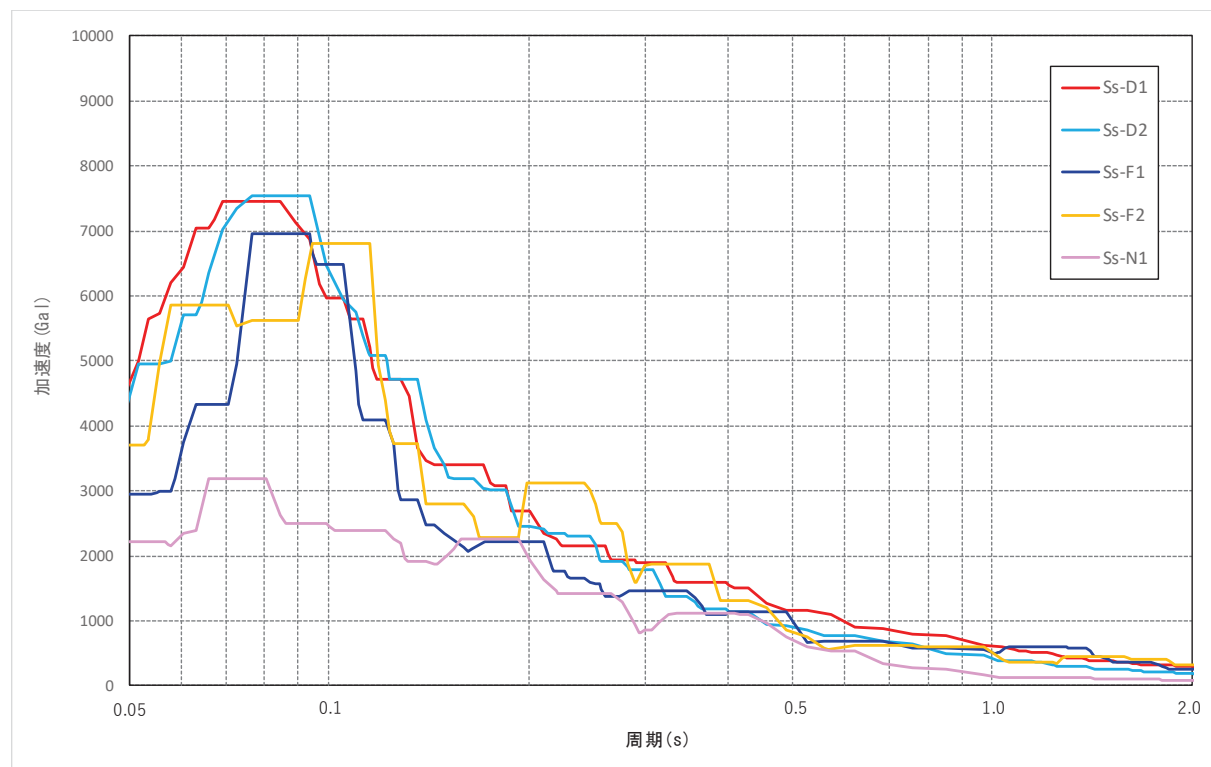
S_s -D1, D2, F1, F2, N1 の 5 波について耐震性を確認した結果を説明する。今後、工事計画認可申請において全ての S_s に対して評価を実施する。



第3.2-3図 海水ポンプ室の地震応答解析モデル図



(a) 水平方向 減衰定数 4.0%



(b) 鉛直方向 減衰定数 2.0%

第 3.2-4 図 設計用床応答スペクトル図

3.3 解析モデル及び諸元

(1) 解析モデル

解析モデル図を第3.3-1図に示す。大梁及びフレーム(主桁、横補強材、ブレース)の各部材は、線形はり要素でモデル化する。ゴム支承は線形ばね要素でモデル化する。

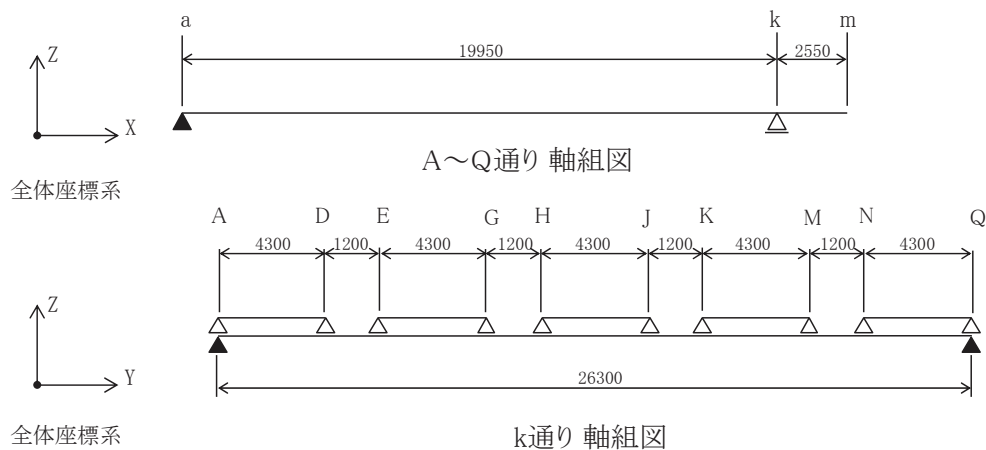
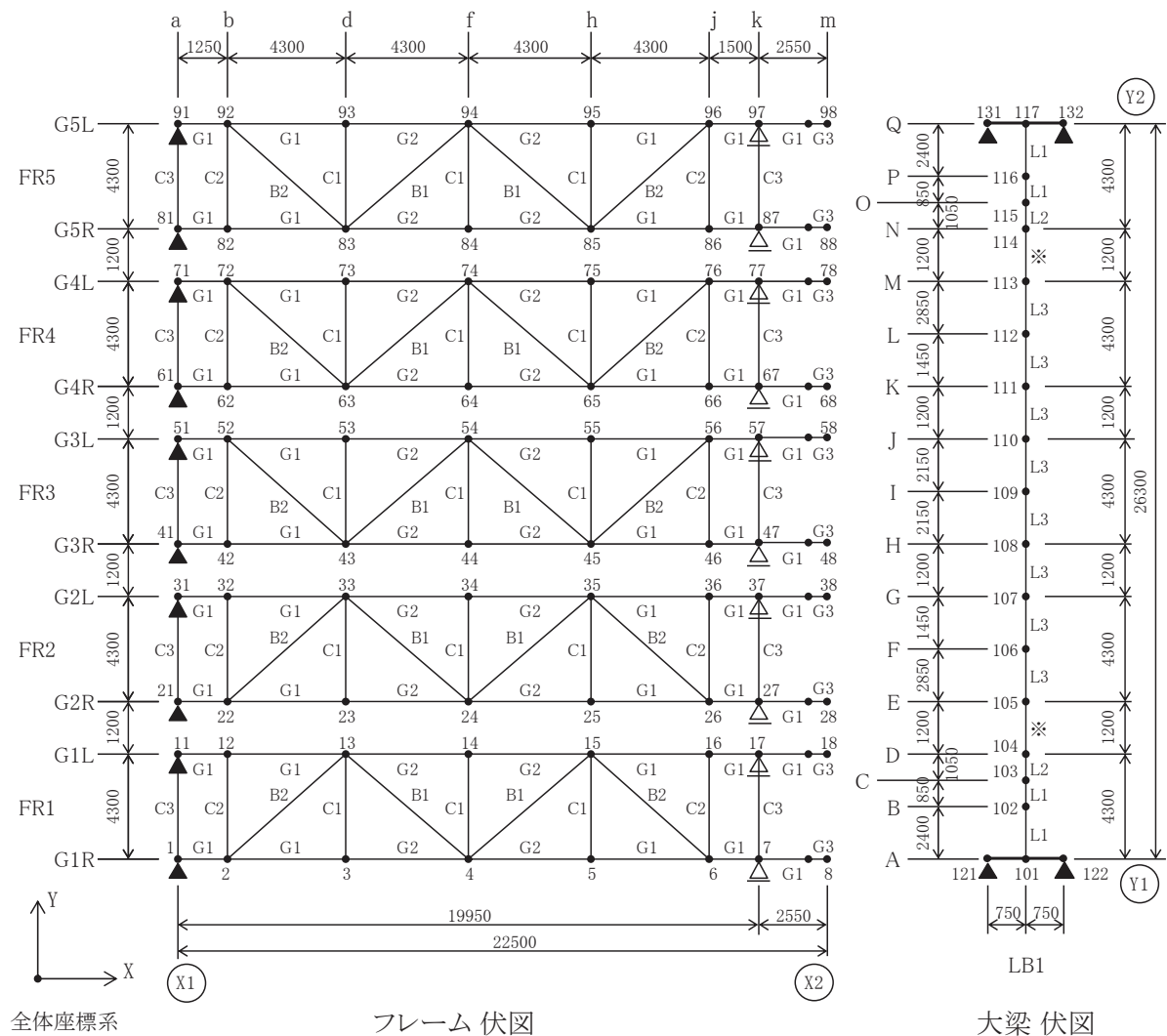
防護板については、架構全体の変形モードの中で防護板の剛性影響が小さいため、モデル化せずに質量のみを設置しているフレームに考慮している。防護板の剛性影響の詳細について以下に示す。

- 竜巻防護ネット全体の水平方向の変形モードはゴム支承の変位が主体であるため、防護板の剛性の影響はほとんどない。
- 防護板を設置しているフレームの鉛直方向の変形は主桁の曲げ変形が主体であることから、主桁の曲げ剛性に対する防護板の曲げ剛性の比率を確認した結果を第3.3-2図に示す。防護板の鉛直方向の曲げ剛性は、フレーム部材の主桁に比べて非常に小さく鉛直方向の変形に対しても、防護板の剛性の影響は無視できる。

以上の検討結果より、防護板のモデル化は不要と判断し、質量のみを考慮したモデルとしている。

また、解析モデルの軸線の高さは、主桁及び大梁の断面中心位置に設定している。フレームと大梁の接続部にあたる可動支承部では、X, Y, Zの3方向のバネを介して荷重を伝達するモデルとしている。可動支承の拘束方向であるY方向とZ方向は剛のバネ、可動方向であるX方向は拘束フリーのバネとしている。

解析コードは「DYNA2E Version 8.0」を用いる。



注) ▲印はゴム支承を示す。△印は可動支承を示す。

各点数字は節点番号を示す。

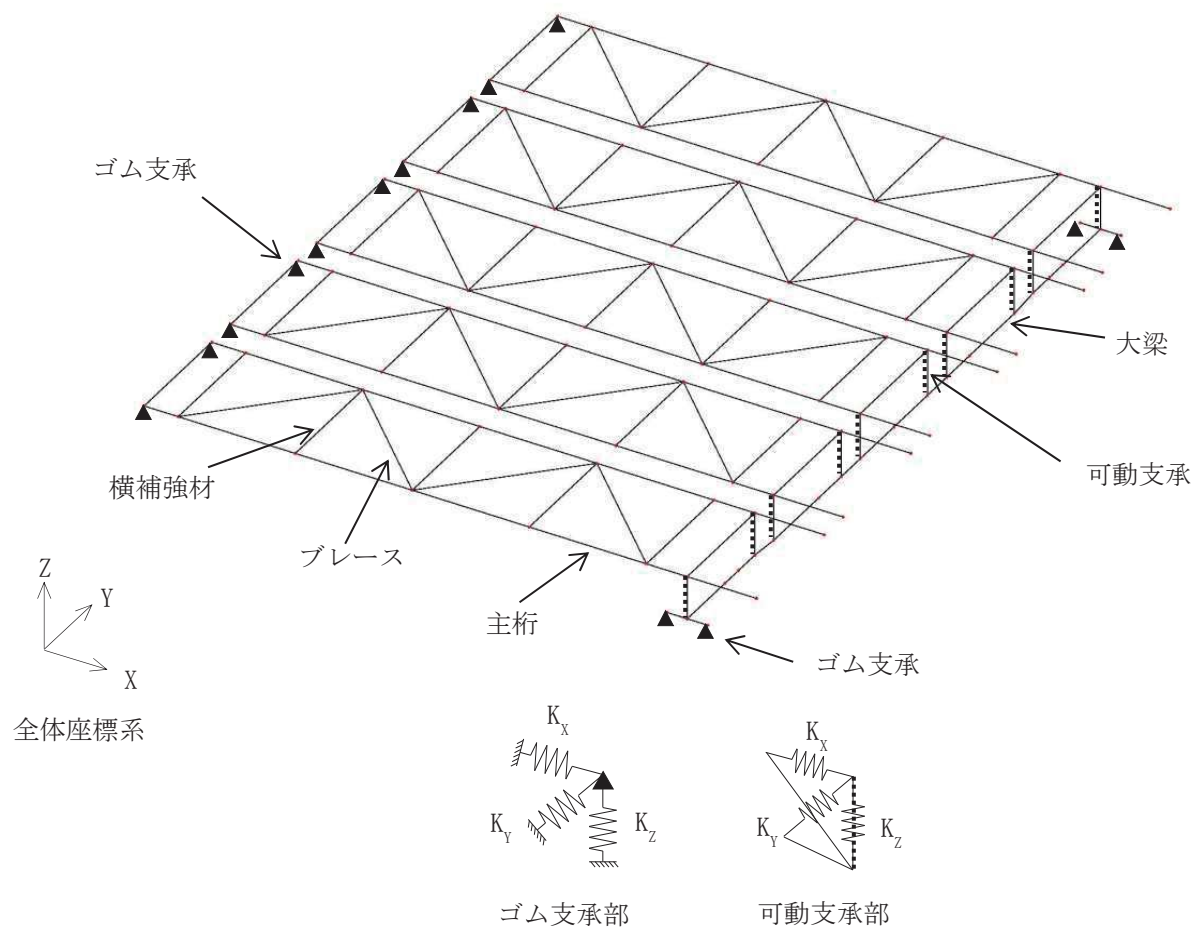
大梁ゴム支承の節点番号：121, 122, 131, 132

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

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

*印の断面性能はL2 と L3 の平均値とする。

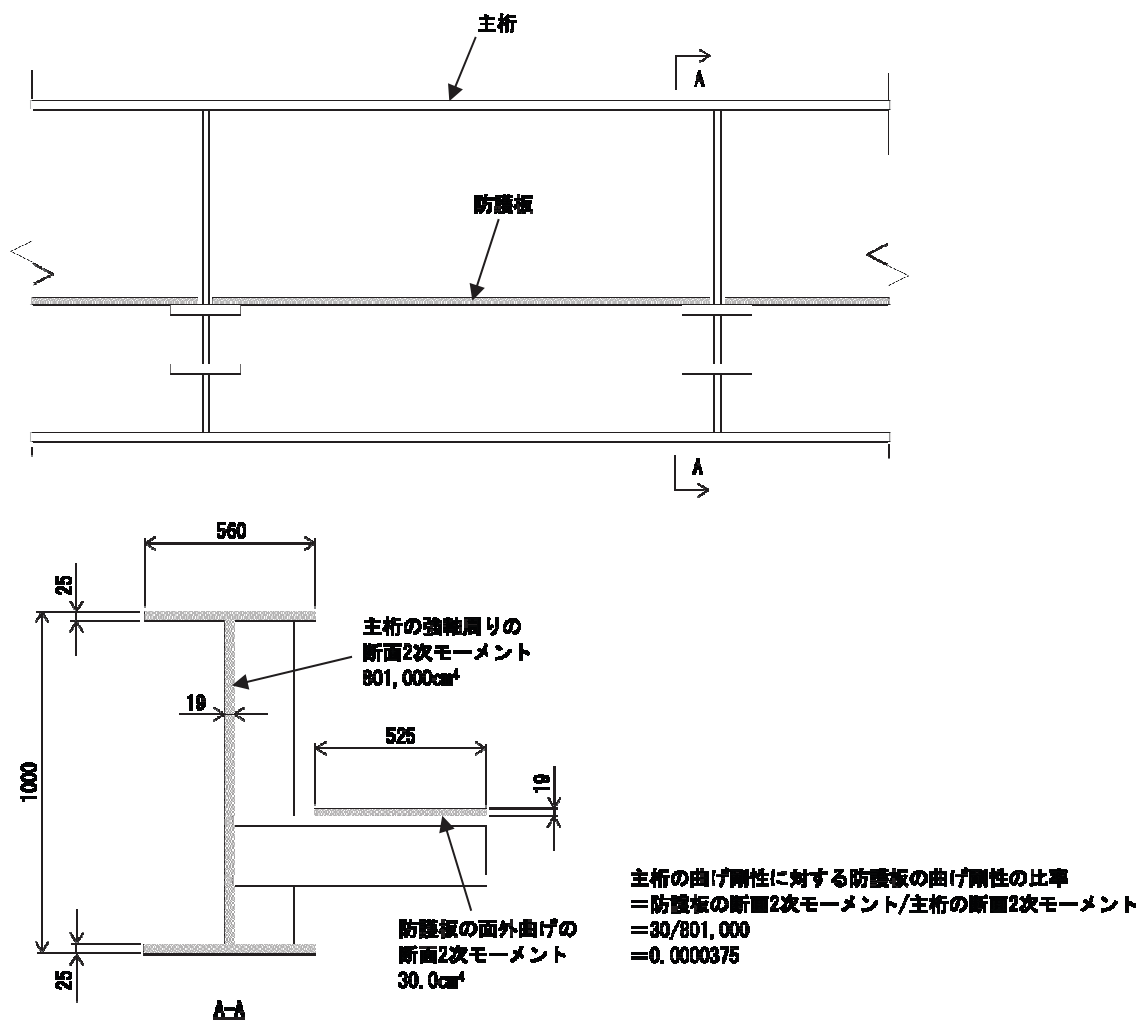
第 3.3-1 図 解析モデル (1/2)



ばね支持条件

記号	ゴム支承		可動支承
	大梁	フレーム	
K_X	弾性	弾性	自由
K_Y	弾性	弾性	剛
K_Z	剛	剛	剛

第 3.3-1 図 解析モデル (2/2)



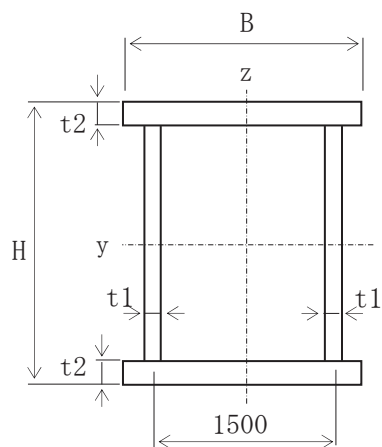
第 3. 3-2 図 主桁と防護板の曲げ剛性の比較

(2) 部材断面寸法

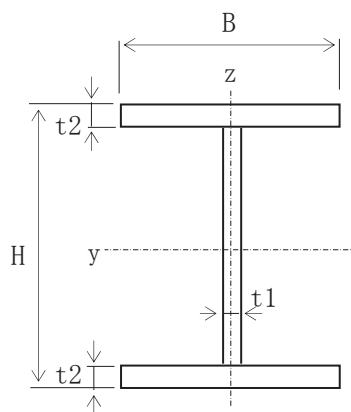
第 3. 3-1 表に部材の断面寸法の一覧を示す。また，第 3. 3-3 図に断面寸法の記号説明図を示す。

第 3. 3-1 表 部材断面寸法

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



(a) 大梁



(b) 主桁，横補強材，ブレース

第 3. 3-3 図 部材断面寸法の記号説明図

(3) 部材剛性

第 3.3-2 表に解析に用いる部材剛性の一覧を示す。

第 3.3-2 表 部材剛性

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

A : 断面積

I_z : 部材 z 軸周りの断面 2 次モーメント

I_y : 部材 y 軸周りの断面 2 次モーメント

I_x : ねじり剛性

As_y : 部材 y 軸方向のせん断断面積

As_z : 部材 z 軸方向のせん断断面積

部材軸方向の定義は第 3.3-3 図に示すとおりである。

(4) 材料定数

鋼材の材料定数を第 3.3-3 表に示す。

第 3.3-3 表 鋼材の材料定数

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

(5) ゴム支承及び可動支承

ゴム支承の水平剛性は、線形ばね要素のばね定数として与える。ゴム支承の鉛直方向は十分に剛性が高いことから固定条件としてモデル化する。ゴム支承の設計諸元を第 3.3-4 表に示す。

可動支承の結合条件は、フレームの軸方向を自由、軸直角方向と鉛直方向を固定とする。フレームの軸方向を自由とするのは、温度変化によるフレームの伸縮量を吸収することで、フレームの取付ボルトにせん断力が働かないように設計しているためである。可動支承の仕様を第 3.3-5 表に示す。

また、フレームの可動側の支承部に摩擦による水平力を分担させてフレームのゴム支承側に作用する水平力を減少させるような設計を避けるため、本来、摩擦力が移動方向と逆向きの抵抗力として作用することを利用した摩擦減衰効果があるが、摩擦減衰による地震のエネルギー吸収に期待しない保守的な設計とし、地震応答解析モデルにおける可動支承の結合条件は軸方向を自由とした。

第 3.3-4 表 ゴム支承の設計諸元

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

第 3.3-5 表 可動支承の設計仕様

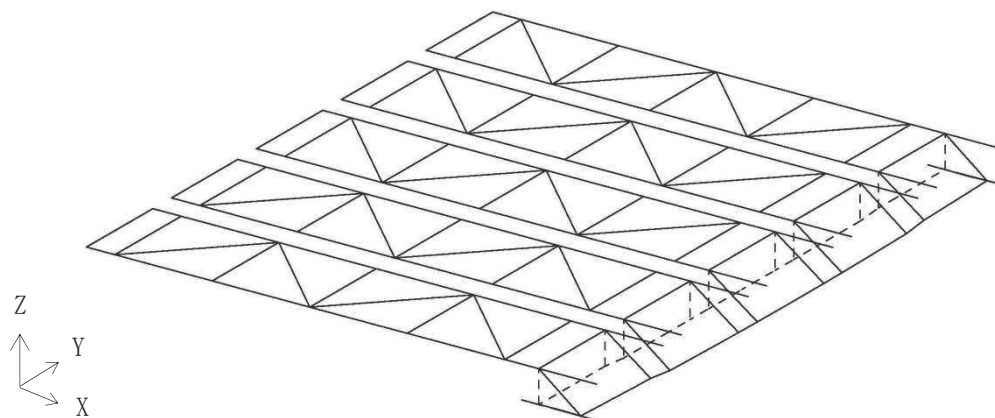
項目	材質	仕様		
すべり材	ポリアミド MC703HL	配合	ポリアミド樹脂	90%以上
			固形潤滑材	10%以下
		物性値	引張強度(N/mm ²)	60～70 ASTMD-638
			伸び(%)	15～25 ASTMD-638
			比重	1.11
			表面粗さ	Rz 25 μ 以下
	ステンレス SUS304 SUS316	材料規格		JIS G 4304 JIS G 4305
		表面処理		JIS G 4305 No2B
圧縮ゴム	クロロプレン 系合成ゴム C08	材料規格		JIS K 6383
鋼材 (ピストン ベースポッド レール等)	SS400 SM490	材料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

3.4 固有値解析結果

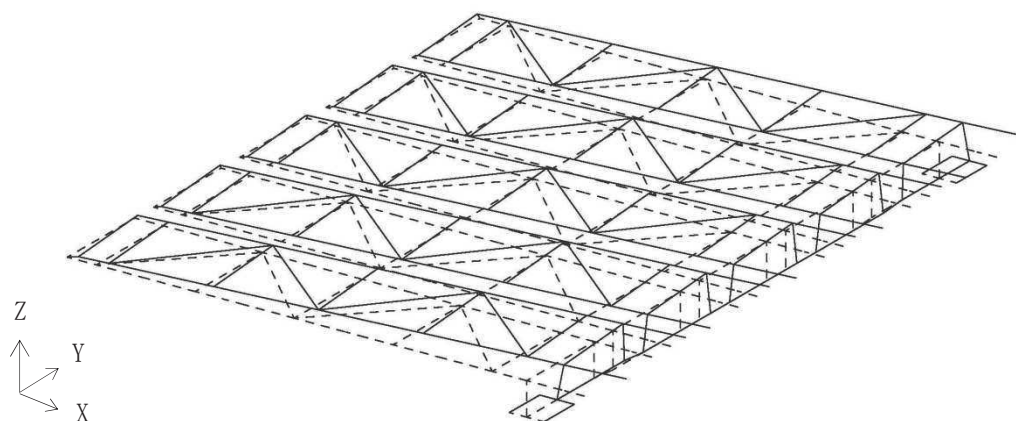
主要モードの固有周期を第3.3-6表、モード図を第3.3-4図に示す。また、スペクトルと固有周期の関係及びモード図の詳細については、添付資料3に示す。

第 3.3-6 表 固有値解析結果

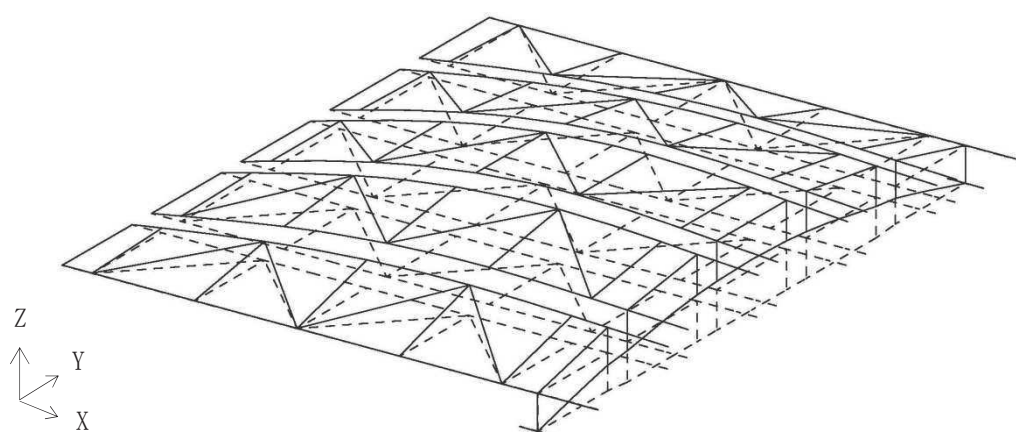
主要モード	固有周期 (秒)
大梁 水平 X 方向 1 次	0.50
大梁 水平 Y 方向 1 次	0.86
大梁 鉛直 Z 方向 1 次	0.34
フレーム 水平 X 方向 1 次	0.77
フレーム 水平 Y 方向 1 次	0.43
フレーム 鉛直 Z 方向 1 次	0.29



(a) 大梁 水平 X 方向 1 次

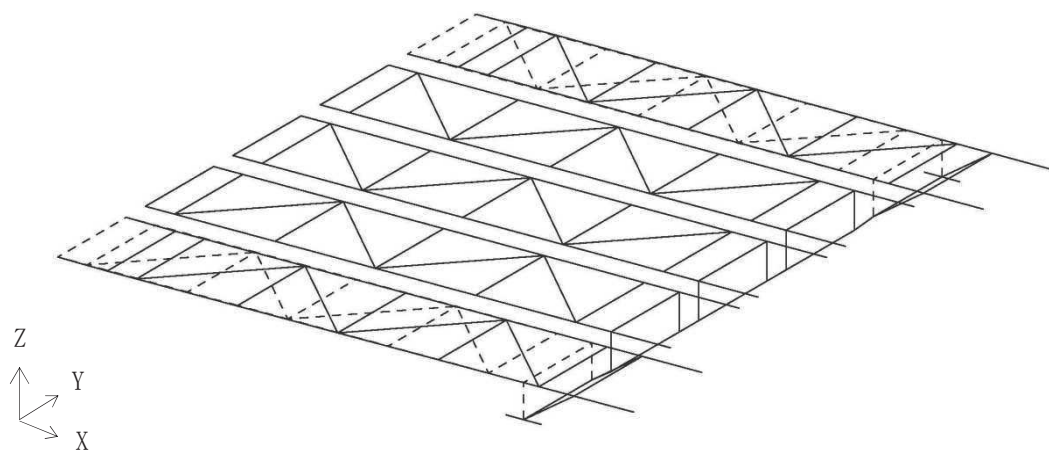


(b) 大梁 水平 Y 方向 1 次

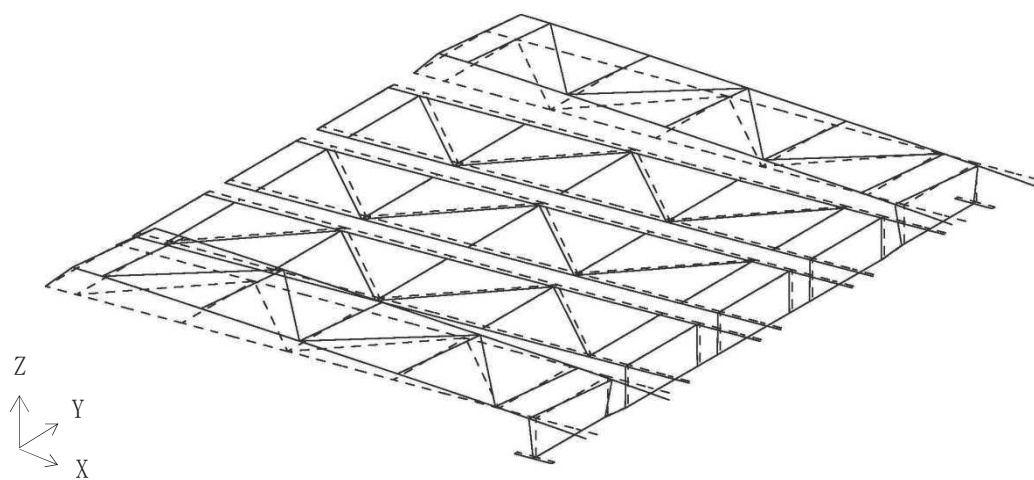


(c) 大梁 鉛直 Z 方向 1 次

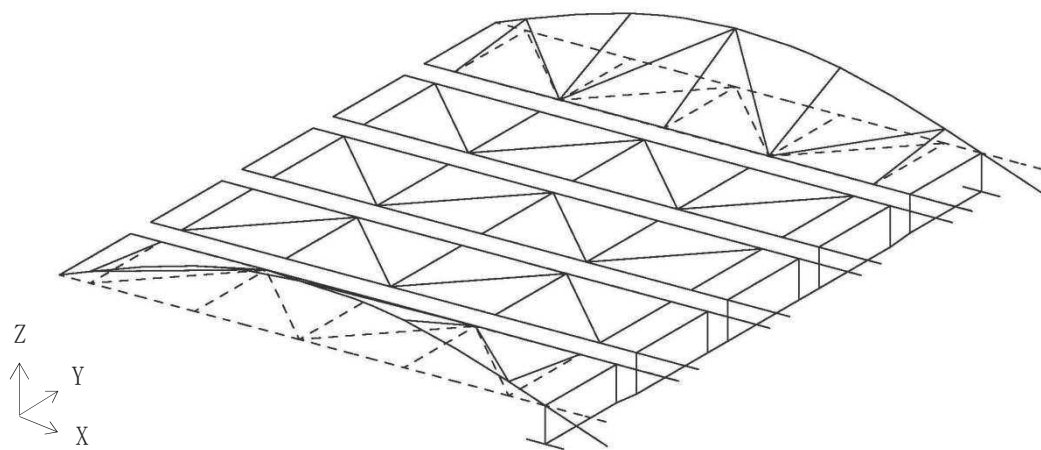
第 3.3-4 図 モード図 (1/2)



(d) フレーム 水平 X 方向 1 次



(e) フレーム 水平 Y 方向 1 次



(f) フレーム 鉛直 Z 方向 1 次

第 3.3-4 図 モード図 (2/2)

3.5 荷重の設定

(1) 荷重の設定

a. 固定荷重

竜巻防護ネットの各構成部品（ネット、フレーム、大梁、ブラケット、防護板及び支承）の自重を固定荷重として考慮する。

b. 積雪荷重

地震荷重との組合せに用いる積雪荷重は以下の式より算出する。

$$S=0.35 \times \rho \times d \times A \quad (\text{N})$$

ρ : 積雪の単位重量 (N/cm/m²) ($\rho = 20\text{N/cm/m}^2$)

d : 垂直積雪量 (cm) ($d=43\text{cm}$)

A : 水平投影面積 (m²)

c. 地震荷重

地震荷重は、3次元はりモデルによる地震応答解析から算出する。

(2) 荷重の組合せ

S s 地震時の評価は、竜巻防護ネットの3次元はりモデルを用いた解析に基づき、地震力及び地震力以外の荷重を組み合わせる。荷重の組合せを第3.4-1表に示す。地震荷重については、第3.4-1図に示す水平方向（X,Y方向）及び鉛直方向（Z方向）の3方向を考慮した設計とする。各方向の地震力の組合せはSRSS法による。

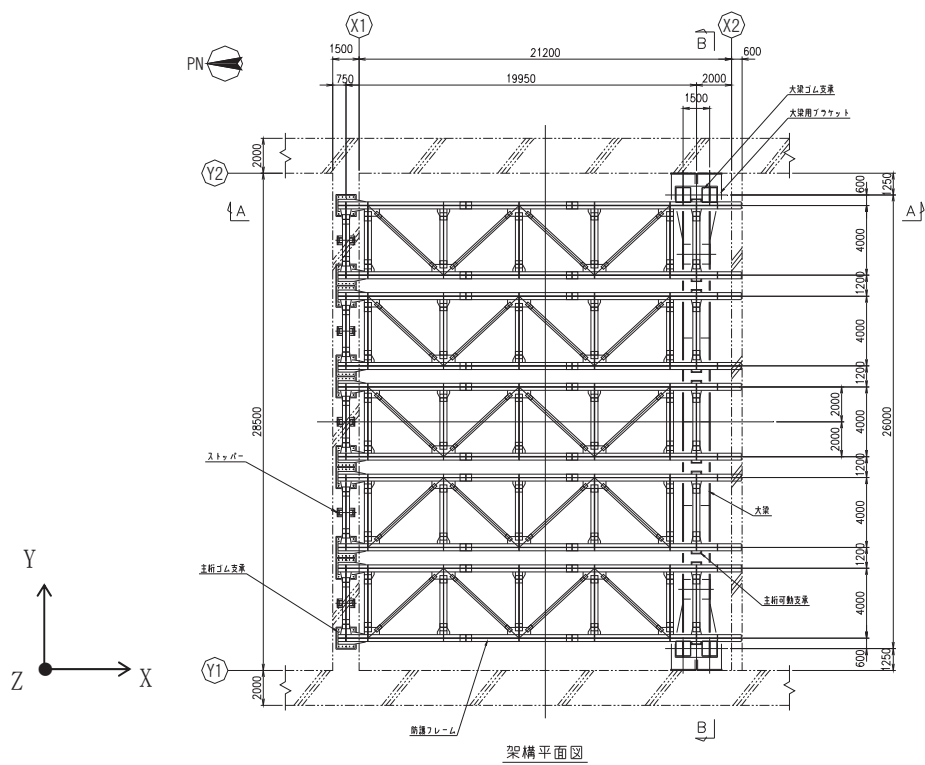
第3.4-1表 荷重の組合せ

外力の状態	荷重の組合せ
S s 地震時	G+S+Ks

G : 固定荷重

S : 積雪荷重

Ks : S s 地震荷重



第3.4-1図 地震荷重の作用方向の説明図

3.6 評価対象部位

竜巻防護ネットの耐震評価は、地震によるネット架構等の崩壊又は落下により、上位クラス施設（非常用海水ポンプ等）が損傷することを防止することが目的である。そこで、添付資料4に示す地震時における異常要因分析から波及的影響に関連する項目を検討した結果、抽出された評価対象部位について以下に示す。また、評価対象部位について第3.6-1図に模式図を示す。

(1) フレーム（主桁、横補強材、ブレース）、大梁（大梁フレーム）

フレームについては、フレームを構成する架構として、主桁、横補強材及びブレースの応力評価を実施する。また、大梁については、大梁を構成する部材として大梁フレームの応力評価を実施する。

(2) ブラケット（ブラケット本体、アンカーボルト）

大梁ゴム支承を支持するブラケットについては、ブラケット本体及びアンカーボルトの応力評価を実施する。

(3) ゴム支承（ゴム支承本体、ゴム支承取付ボルト）

フレームを支持するフレームゴム支承については、ゴム支承本体、ゴム支承取付ボルト及びアンカーボルトの応力評価を実施する。また、大梁を支持する大梁ゴム支承については、ゴム支承本体及びゴム支承取付ボルトの応力評価を実施する。なお、ゴム支承本体の評価方法については、添付資料5にその詳細を示す。

(4) 可動支承

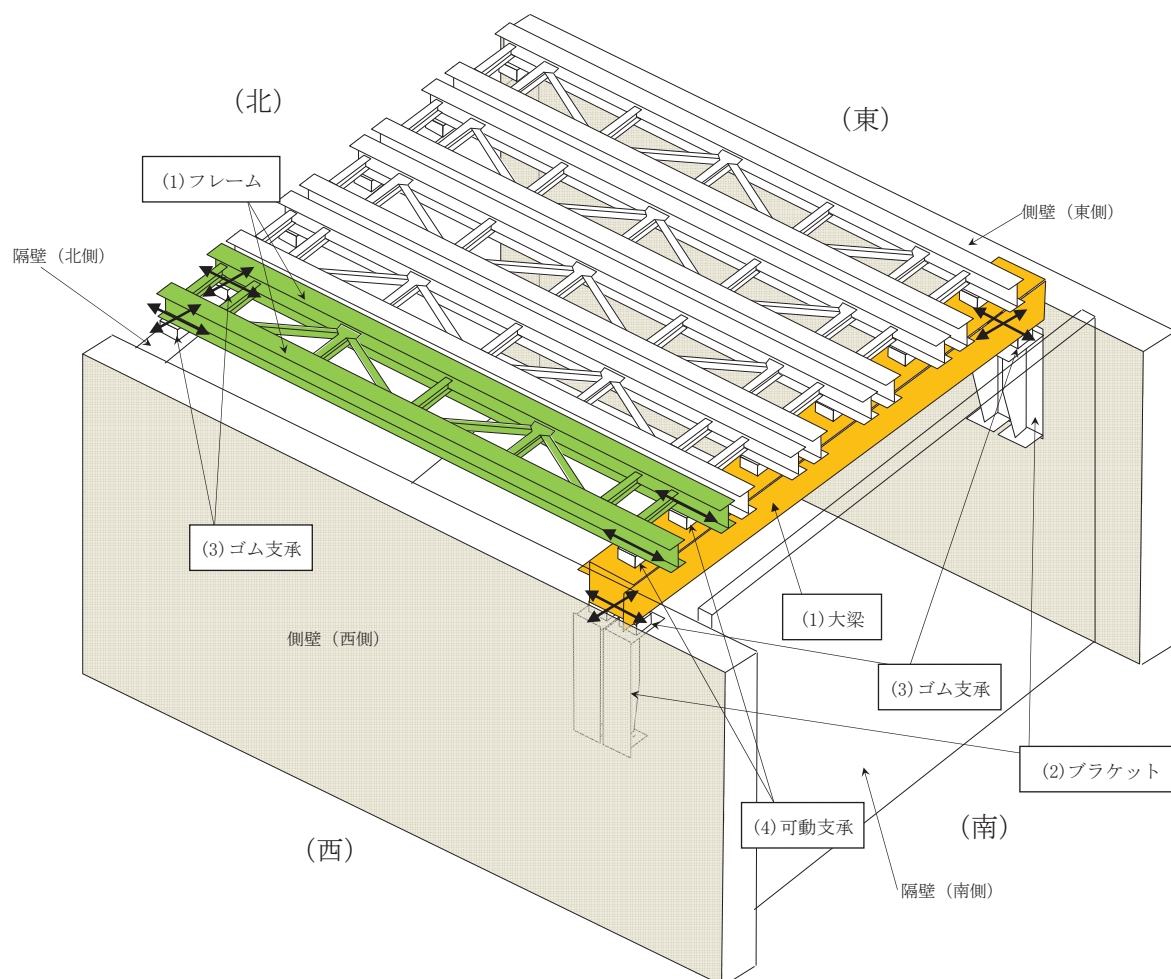
フレームと大梁とを接続する可動支承については、可動支承本体の応力評価を実施する。評価にあたっては各部位の許容応力より求められる支承全体の許容荷重を設定して評価を実施する。

また、本支承については可動方向に制限が設けられていることから、地震時に発生する移動量と制限値との比較を行い、ストッパーへの衝突が発生しないことを確認する。なお、可動支承の評価方法についても添付資料5に詳細を示す。

(5) クリアランス評価

竜巻防護ネットはゴム支承及び可動支承を採用していることから地震時の相対変位が大きくなる傾向にある。そこで、フレームが地震発生時に隣接する部材や海水ポンプ室に接触しないことを確認するため、フレームの地震時相対変位とフレーム間のクリアランス及びフレームと側壁のクリアランスとの比較を実施する。なお、鉛直方向地震力による、ゴム支承及び鋼製部材の変位に

については、変位量に比べてクリアランスが大きいことから、部材同士や部材と海水ポンプ室が衝突することはない。詳細については添付資料6に示す。



第 3. 6-1 図 竜巻防護ネットの模式図

3.7 評価基準値

竜巻防護ネットは、S s 地震時において、崩壊又は落下によって海水ポンプ室内の上位クラス施設に波及的影響を及ぼさないことが要求されるため、応力解析評価等における評価基準値は以下のとおりとし、第 3.7-1 表にまとめる。

(1) フレーム，大梁

鋼製部材で構成されるフレーム及び大梁については、塑性ひずみが生じる場合であっても、その量が小さなレベルに留まって破断延性限界に十分な余裕を有し、波及的な影響を及ぼさないことを確認するため、「原子力発電所耐震設計技術指針（JEAG4601・補-1984）」に基づいて、許容応力状態Ⅳ_AS の許容応力を適用する。

(2) ブラケット

鋼製部材で構成されるブラケットについては、塑性ひずみが生じる場合であっても、その量が小さなレベルに留まって破断延性限界に十分な余裕を有し、波及的な影響を及ぼさないことを確認するため、「原子力発電所耐震設計技術指針（JEAG4601・補-1984）」に基づいて、許容応力状態Ⅳ_AS の許容応力を適用する。

(3) ゴム支承（フレーム，大梁）

フレーム及び大梁を支持するゴム支承については、ゴム支承のアイソレート機能を維持する範囲であり、波及的な影響を及ぼさないことを確認するため、「道路橋示方書・同解説Ⅴ耐震設計編（H14.3）」に基づいて、評価基準値（引張応力，せん断ひずみ，座屈安定性，圧縮応力）を設定する。また，取付ボルトについてはブラケットと同様に鋼製部材であることから許容応力状態Ⅳ_AS の許容応力を適用する。

(4) 可動支承

すべり機能を有する可動支承については、支承の構造健全性及び移動量を評価し波及的影響を及ぼさないことを確認する必要がある。そこで，構造健全性については，メーカーの強度試験より算出した許容応力及び「原子力発電所耐震設計技術指針（JEAG4601・補-1984）」に基づく許容応力状態Ⅳ_AS の許容応力から支承全体の許容荷重を設定する。移動量評価については，可動限界としてストップパーまでのクリアランスを許容値として適用する。

(5) クリアランス評価

部材間の衝突や部材－海水ポンプ室側壁との衝突を防止し，波及的影響を及ぼさないことを確認するため，構造から求められるクリアランスを評価基準値として設定する。クリアランスの評価基準値は，地震時に生じる移動量が支配

的であることを踏まえ、地震時の移動量に対して一定の余裕を考慮して設定するものである。

第3.7-1表 応力解析評価における評価基準値

評価方針	地震力	部位	評価方法	許容限界
海水ポンプ室 の上位クラス 施設に波及的 影響を及ぼさ ないこと	基準地 震動 S _s	フレーム、大梁	部材に発生する応力が評価基準値を超えないこと。	許容応力状態Ⅳ _{AS} の許容応力
		ブラケット	部材に発生する応力が評価基準値を超えないこと。	許容応力状態Ⅳ _{AS} の許容応力
		ゴム支承 (フレーム、大梁)	支承に発生する応力が評価基準値を超えないこと。	「道路橋示方書・同解説Ⅴ耐震設計編(H14.3)」に基づく 評価基準値
				許容応力状態Ⅳ _{AS} の許容応力(取付ボルト)
		可動支承	支承に発生する荷重が許容荷重を超えないこと。	支承を構成するそれぞれの部品の許容値より算出した許容荷重
			支承の移動量がストッパーまでのクリアランスを超えないこと。	ストッパーまでのクリアランス
		クリアランス評価	部材に発生する移動量が部材間のクリアランスを超えないこと。	部材間のクリアランス

3.8 各部の評価方法

(1) フレーム、大梁及びブラケットの応力評価

フレーム、大梁及びブラケットの断面評価は次式によって行う。

鋼材の基準強度及び式中の各許容応力の算出方法を(a)～(e)に示す。

- ・圧縮応力と部材y, z軸（第3.3-3図参照）周りの曲げ応力の組合せ評価

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

- せん断応力の評価

$$\tau \leq f_s$$

- 垂直応力とせん断応力の組合せ評価

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

σ_c : 圧縮応力 $\sigma_c = N/A$

N : 軸力

A : 断面積

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

M_y : 部材y軸周りの曲げモーメント

Z_y : 部材y軸周りの断面係数

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

M_z : 部材z軸周りの曲げモーメント

Z_z : 部材z軸周りの断面係数

τ : せん断応力 $\tau = Q/A$

Q : せん断力

A : せん断断面積

σ_x, σ_y : 互いに直交する垂直応力

τ_{xy} : σ_x, σ_y の作用する面内せん断応力

f_c : 許容圧縮応力

f_{by} : 部材y軸周りの許容曲げ応力

f_{bz} : 部材z軸周りの許容曲げ応力

f_s : 許容せん断応力

f_t : 許容引張応力

(a) 鋼材の基準強度

次の計算式により算出した値とする。第3.8-1表に使用鋼材の設計降伏点 S_y 及び設計引張強さ S_u を示す。

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

F : 鋼材の基準強度 (MPa)

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

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

第3.8-1表 使用鋼材の設計降伏点及び設計引張強さ

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

(b) 許容引張応力

次の計算式により算出した値とする。

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

f_t : 許容引張応力 (MPa)

(c) 許容せん断応力

次の計算式により算出した値とする。

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

f_s : 許容せん断応力 (MPa)

(d) 許容圧縮応力

次の計算式により算出した値とする。

i) 圧縮材の有効細長比が限界細長比以下の場合

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

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

f_s : 許容圧縮応力 (MPa)

λ : 有効細長比

Λ : 限界細長比

v : 安全率

ℓ_k : 座屈長さ (mm)

i : 座屈軸についての断面二次半径 (mm)

E : 縦弾性係数 (ヤング係数) (MPa)

ii) 圧縮材の有効細長比が限界細長比を超える場合

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

(e) 許容曲げ応力

次の計算式により算出した値とする。

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

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

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

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

ここに、

f_b : 許容曲げ応力 (MPa)

ℓ_b : 圧縮フランジの支点間距離 (mm)

h : はりのせい (mm)

A_f : 圧縮フランジの断面積 (mm^2)

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

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

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

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

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

(2) ゴム支承の評価

(a) セン断ひずみ

ゴム支承のせん断ひずみは次式によって評価する。

$$\gamma_{se} = \frac{\Delta l_e}{\Sigma t_e} \leq \gamma_{ea}$$

γ_{se} : 地震時のせん断ひずみ

Δl_e : 地震時の移動量(mm)

Σt_e : 総ゴム厚(mm)

γ_{ea} : 地震時の許容せん断ひずみ

(b) 引張応力

ゴム支承の引張応力は次式によって評価する。

$$\sigma_{te} = \frac{R_u}{A_{te}} \leq \sigma_{ta}$$

σ_{te} : 地震時の引張応力

R_u : 上向きの反力

A_{te} : 地震時の移動量を控除した引張りに有効な面積

$$A_{te} = A_e - B \cdot \Delta l_e$$

(A_e : ゴム支承本体の側面被覆ゴムを除く面積, B : 有効幅)

σ_{ta} : 引張応力の許容値

(c) 圧縮応力 (座屈安定性)

ゴム支承の圧縮応力は次式によって評価する。

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

σ_{ce} : 地震時の圧縮応力

R_L : 下向きの反力

A_{ce} : 地震時の移動量を控除した圧縮に有効な面積

$$A_{ce} = A_e - B \cdot \Delta l_e$$

(A_e : ゴム支承本体の側面被覆ゴムを除く面積, B : 有効幅)

σ_{cra} : 圧縮応力の許容値

(3) 可動支承の強度評価

地震時に可動支承部の可動直角方向（拘束方向）に負荷する荷重が、支承の各部位の構造強度より算出された許容荷重以下であることを確認する。詳細は添付資料5に示す。

(4) ボルト材の応力評価

ボルトの呼び径断面に生じる応力は、次の値を超えないこととする。

(a) 許容引張応力

次の計算式により算出した値とする。

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

f_t : 許容引張応力 (MPa)

F : 3.8(1) (a)に定めるところによる。 S_y 、 S_u はJIS規格による降伏点、引張強さとする。ボルトの使用材料と降伏点及び引張強さは第3.8-2表のとおりである。

第 3.8-2 表 ボルトの使用材料と JIS 規格による降伏点及び引張強さ

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

(b) 許容せん断応力

次の計算式により算出した値とする。

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

f_s : 許容せん断応力 (MPa)

(c) 引張応力とせん断応力を同時に受けるボルトの許容引張応力

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

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

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

f_{ts} : せん断力を同時に受けるボルトの許容引張応力 (MPa)

f_{to} : (a)で規定するボルトの引張応力 (MPa)

τ : ボルトに作用するせん断応力 (MPa)

(5) 各部のクリアランス

各部のクリアランス評価においては、フレーム及び大梁の移動量が第3.8-2表に示す許容値以下であることを確認するため、地震応答解析により求められるフレーム及び大梁の移動量と部材間のクリアランスを比較する。また、可動支承の移動量(フレームと大梁の相対変位)と可動支承の移動可能量とを比較

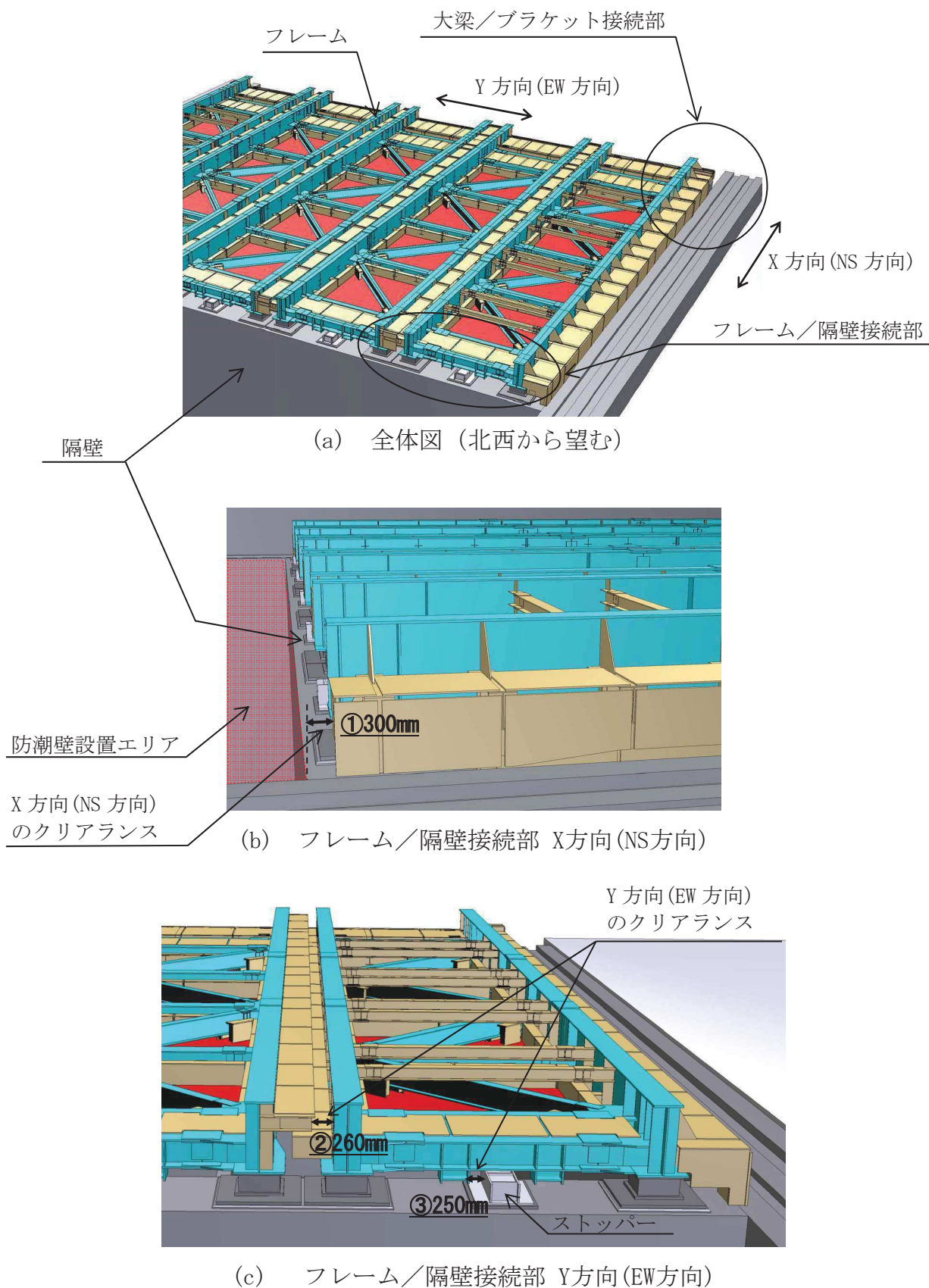
して評価する。評価箇所の模式図を第3.8-1図に示す。設定した許容値以上のクリアランスを確保するように部材配置を設計する。

なお、許容値は各接続部におけるクリアランス値を比較して、最も狭くなっている箇所のクリアランス値を代表として設定する。

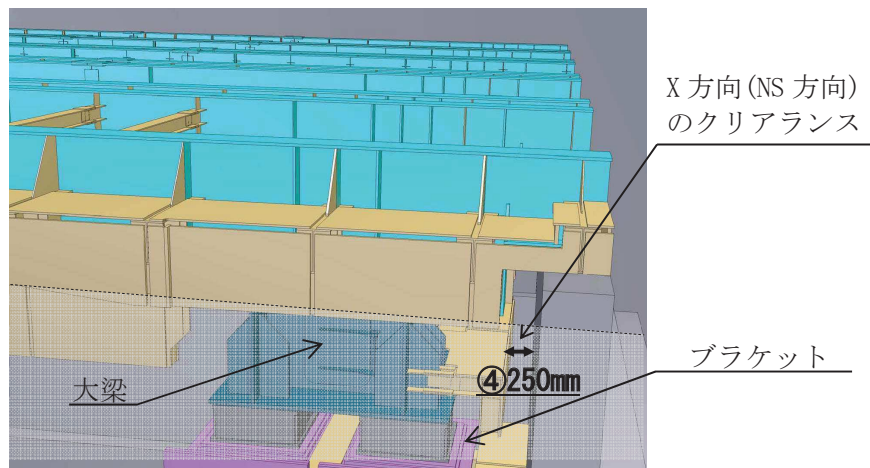
第 3.8-2 表 フレーム及び大梁の移動量の許容値

位置*	移動量の許容値 (mm)		許容値の根拠
	X方向 (NS方向)	Y方向 (EW方向)	
フレーム／隔壁接続部 ①フレーム－防潮壁 ②フレーム－フレーム ③フレーム－ストッパー	300	250	部材間のクリアランス
大梁／ブラケット接続部 ④フレーム－隔壁 ⑤フレーム－門型クレーン	250	350	
フレーム／大梁接続部 ⑥フレーム－大梁	400	—	可動支承の移動可能量

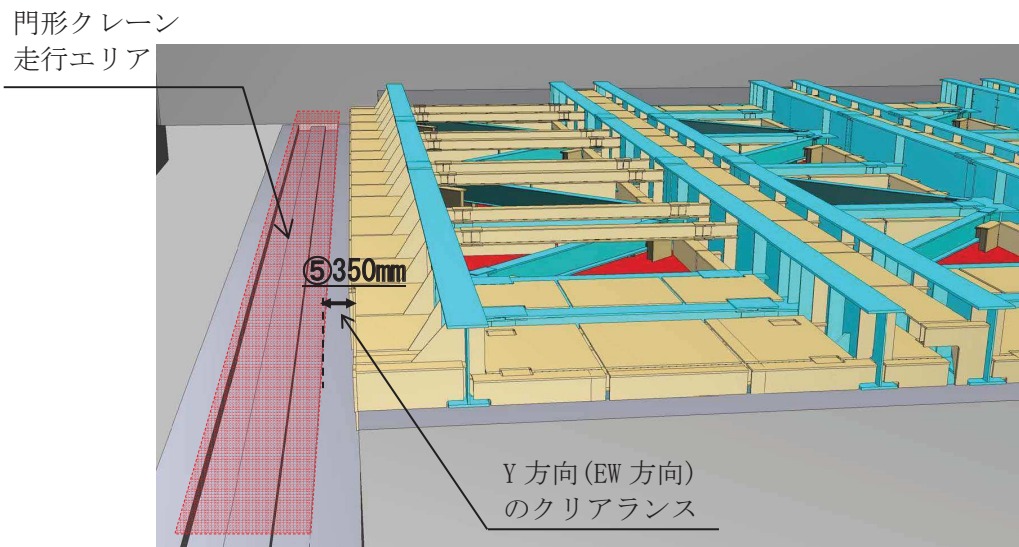
* 表中の番号は第 3.8-1 図中の番号と対応



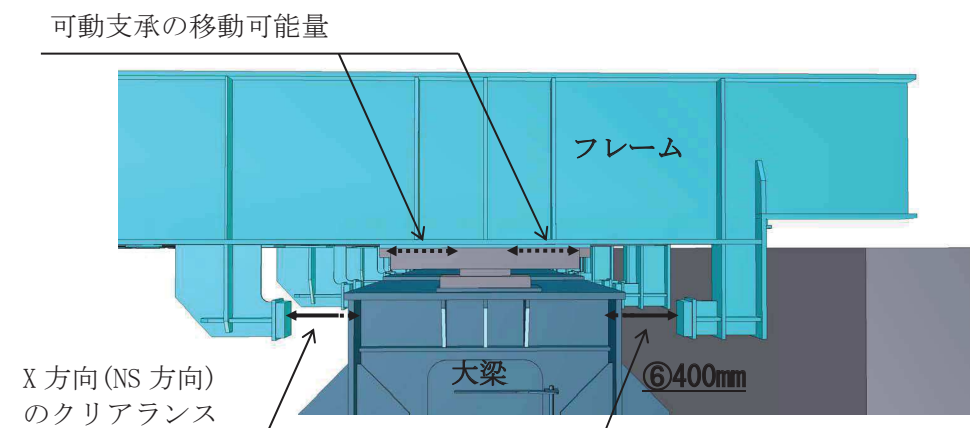
第3.8-1図 移動量の評価箇所(1/2)



(d) 大梁／ブラケット接続部 X方向(NS方向)



(e) 大梁／ブラケット接続部 Y方向(EW方向)



(f) フレーム／大梁接続部 X方向(NS方向)，可動支承の移動可能量

第3.8-1図 移動量の評価箇所 (2/2)

4. 評価結果

竜巻防護ネットの耐震評価結果を第4-1表に示す。各部材の発生応力が評価基準値を下回ること、ゴム支承に発生するせん断ひずみが許容値を下回ること、フレーム及び大梁に発生する移動量がクリアランスの許容値以下に収まることを確認した。なお、本評価結果は地震荷重について3方向を考慮した結果となっている。

第4-1表 耐震評価結果^{*1}

評価対象			評価項目	発生値 (MPa)	許容限界 (MPa)	裕度
フレーム	主桁		組合せ	225	343	1.52
	横補強材		組合せ	167	343	2.05
	ブレース		圧縮応力	42	91	2.16
大梁	大梁フレーム		組合せ	253	364	1.43
ブラケット	ブラケット本体		組合せ	153	343	2.24
	アンカーボルト		引張応力	146	275	1.88
大梁ゴム支承	ゴム支承本体	ゴム本体	せん断ひずみ ^{*2}	126	250	1.98
			圧縮応力	4.0	23.1	5.77
			引張応力	0.9	2.0	2.22
		内部鋼板	引張応力	43	280	6.51
	ゴム支承取付ボルト		引張応力	116	420	3.62
フレームゴム支承	ゴム支承本体	ゴム本体	せん断ひずみ ^{*2}	140	250	1.78
			圧縮応力	2.5	29.8	11.92
			引張応力	0.7	2.0	2.85
		内部鋼板	引張応力	24	280	11.66
	ゴム支承取付ボルト		引張応力	122	420	3.44
	アンカーボルト		引張応力	116	291	2.50
可動支承	構造部材		水平荷重 ^{*3}	363	600	1.65
			鉛直荷重 ^{*3}	276	350	1.26
大梁／ブラケット接続部	X方向		移動量 ^{*4}	150	250	1.66
	Y方向		移動量 ^{*4}	210	350	1.66
フレーム／隔壁接続部	X方向		移動量 ^{*4}	169	300	1.77
	Y方向		移動量 ^{*4}	119	250	2.10
フレーム／大梁接続部	X方向		移動量 ^{*4}	225	400	1.77

*1 本評価結果は暫定値（S s -D1, D2, F1, F2, N1の結果のうち最も厳しい結果）

*2 発生値，許容基準値は無次元

*3 発生値，許容基準値の単位（kN）

*4 発生値，許容基準値の単位（mm）

注) 上表の評価結果はゴム支承のせん断剛性が設計値の場合の値である。

また，評価項目については裕度が小さい項目を代表して記載している。

5. まとめ

竜巻防護ネットの波及的影響を防止するため、基準地震動 S_s に対して損傷しない構造が要求されることから、現在検討している耐震設計の方針と、工事計画認可申請で提示する耐震評価の見通しについて検討した。

- ・ 竜巻防護ネットの構造設計では、海水ポンプ室の特徴，設備メンテナンス性等を踏まえ，可動支承でフレームや大梁の熱伸びによる変位を吸収し，ゴム支承のアイソレート機能で海水ポンプ室への反力を低減する構造として，波及的影響を防止する設計とした。
- ・ 耐震評価では，竜巻防護ネットの構造特徴を考慮した地震応答解析モデルを設定するとともに，異常要因分析結果に基づき評価対象部位，評価項目，評価基準値を検討した。
- ・ 基準地震動 S_s の暫定値に対する竜巻防護ネットの耐震評価を実施し，構造健全性が確保できることを確認した。

以上の検討結果より，竜巻防護ネットは波及的影響を及ぼさないことの見通しを得た。

今後の工認段階では，基準地震動 S_s -D1～N1（全7波）に対する耐震評価を実施して，地震による波及的影響を及ぼさないことを説明する。評価の際には，審査結果を踏まえて設定する海水ポンプ室の地震応答解析モデルによる解析結果を竜巻防護ネットの耐震設計に適用するとともに，地盤の不確かさ等についても検討する。

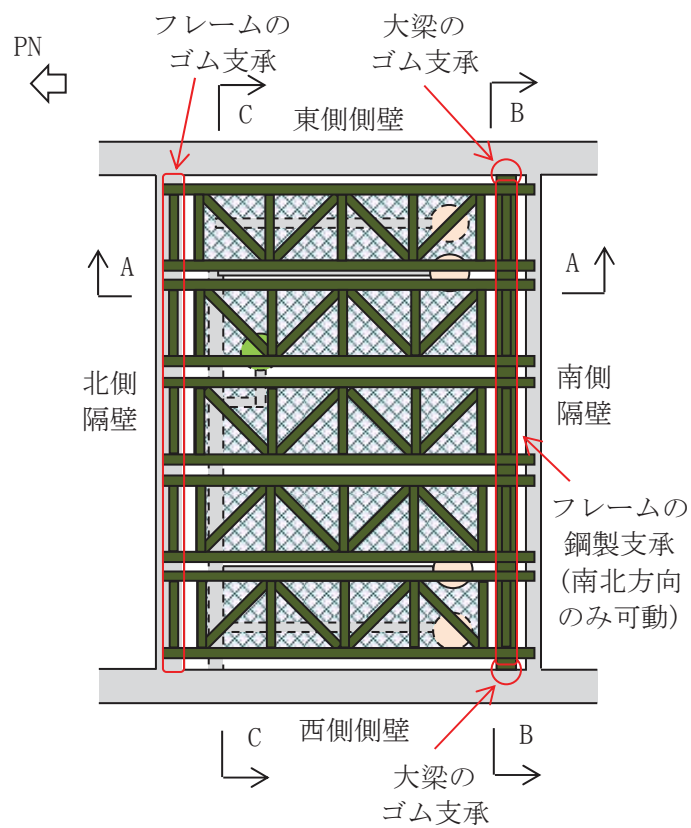
ゴム支承の構造検討について

1. 概要

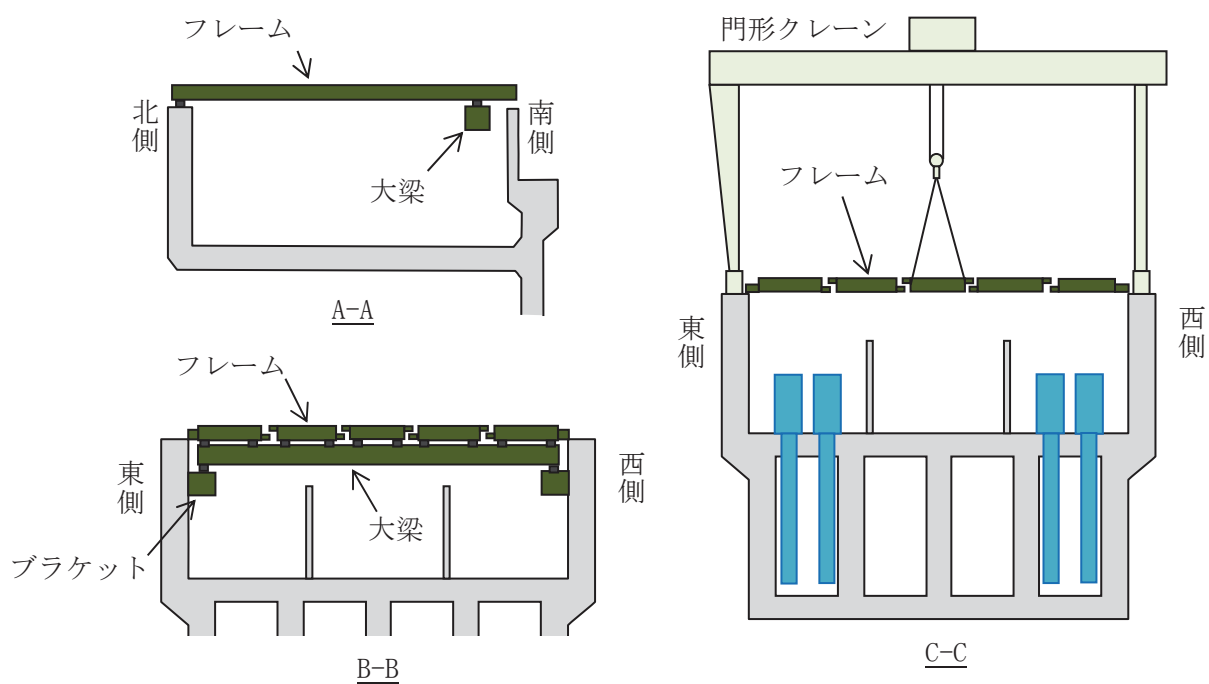
竜巻防護ネットのフレーム及び大梁の支持部に「地震時水平力分散型ゴム支承」を採用している。竜巻防護ネットの構造検討、ゴム支承の採用理由、ゴム支承の設計に係る適用規格について以下に示す。なお、構造のイメージについては添付 1-1 図に示す。

2. 竜巻防護ネットの構造検討

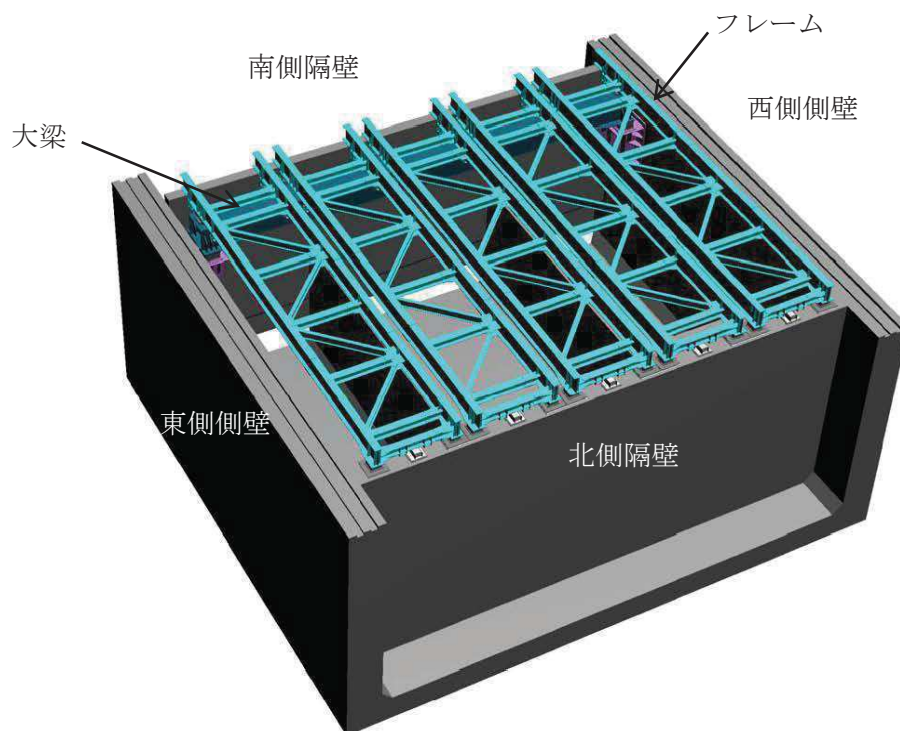
- (1) 海水ポンプ室の東側と西側の側壁上面を走行する門型クレーンによって防護フレームの取外しができること、また、南側の隔壁の壁厚が比較的薄いことを考慮し、東側及び西側の側壁側面と北側の隔壁上面で竜巻防護ネットからの荷重を受ける構造とする。
- (2) 防護フレームは、非常用海水ポンプのメンテナンス及び門型クレーンの吊上の能力を考慮して 5 分割とし、南側の隔壁付近の東西側壁の側面に取付けたブラケットを介して設置した大梁とその反対側に位置する北側隔壁で支持される構造とする。
- (3) 自重、温度変化による熱膨張等により、フレーム支持点に回転拘束によるモーメントや水平変位拘束による水平力が発生していると、メンテナンス時のフレーム取付ボルトが取り外せなくなるため、回転、水平変位に追従する機能を有する構造とする。
- (4) 大梁の温度伸縮に追従でき、コンクリート壁に過大な水平力が作用させないため、ゴム支承を海水ポンプ室の東側、西側、北側の 3 面のコンクリート壁に配置し、ゴム支承のせん断変形により地震時の水平力を効果的に分散させる構造とする。



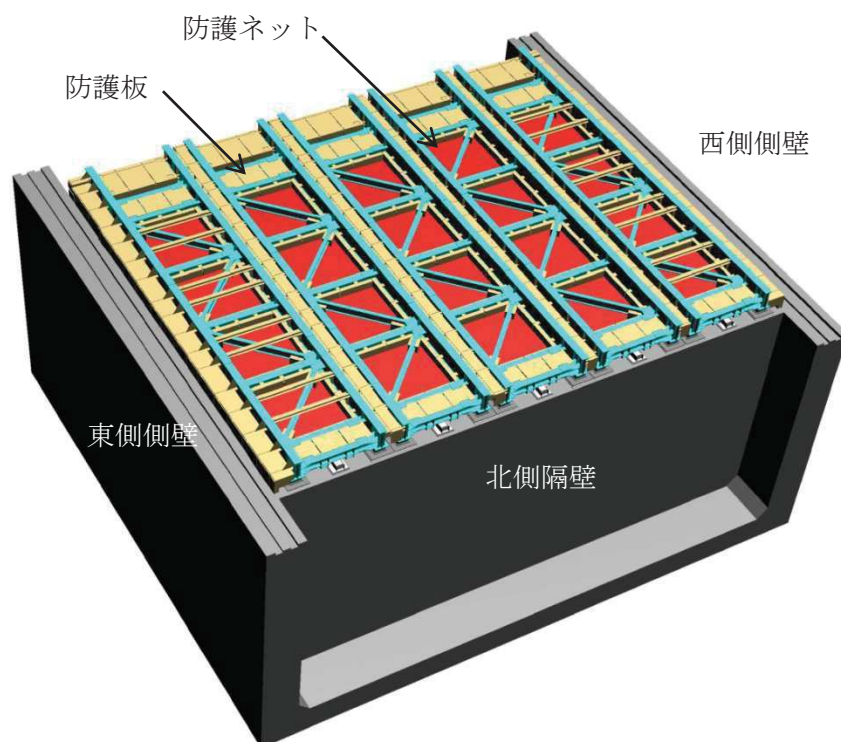
ネットイメージ図(平面図)
【ゴム支承採用案】



添付 1-1 図 竜巻防護ネットのイメージ図 (1/2)



(a) 防護ネット（防護板を除く）



(b) 防護ネット（防護板を含む）

添付 1-1 図 竜巻防護ネットのイメージ図（2/2）

3. 道路橋用ゴム支承の採用理由

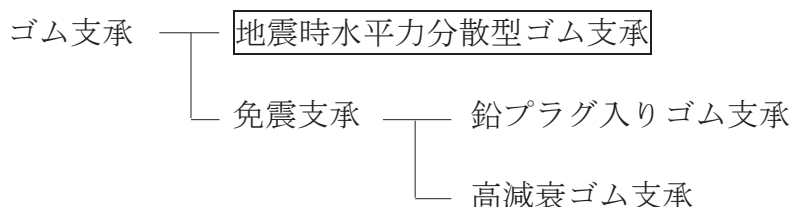
竜巻防護ネットは既設の海水ポンプ室の上部に設置するため、設置スペースや地震時の発生変位に対して制約がある。そのため、一般的な建築用免震支承より水平剛性を高くする必要がある。建築用免震支承のゴム材料のせん断弾性係数は $0.4 \sim 0.6 \text{ N/mm}^2$ 程度である。この材料を適用した場合、地震荷重による移動量が過大となり設計を成立させることが困難となる。したがって、本構造ではせん断弾性係数が $0.8 \sim 1.2 \text{ N/mm}^2$ 程度のゴム材料を使用している道路橋用ゴム支承を採用した。その他、使用環境及び使用条件についても検討し、道路橋用ゴム支承の採用に至っている。

道路橋用ゴム支承は、屋外での使用を前提としていることから、屋内（建物下）の比較的整備された環境内に設置されることを想定している建築用ゴム支承よりも、耐久性の観点から屋外に設置される本設備への使用に適している。また、本設備は橋梁の鋼桁形式で、昼夜の温度変化により鋼桁部材が伸縮しそれに追従してゴム支承が繰り返しの変形を受ける。道路橋用ゴム支承は、このような温度変化による鋼桁部材の伸縮を想定した繰り返し変形を受ける疲労耐久性の検証がなされている。

建築用ゴム支承は、本設備と比較すると非常に重量の大きな建築物を支持することを想定しており、一層あたりのゴム厚を薄くすることで鉛直支持力を高めている。道路橋用ゴム支承は、建築用ゴム支承と比較して想定している鉛直支持力は小さく、1層あたりのゴム厚を厚くし鉛直支持力よりも回転追随性を高めていることが特徴である。本設備は、一般の免震建築物と比べて大幅に重量が小さく、使用面圧は建築用ゴム支承の製品推奨面圧と比べ非常に小さい。よって、本設備に建築用ゴム支承を適用した場合には、設計で期待した水平剛性が得られない可能性がある。道路橋用ゴム支承の場合には、製品検査時の性能試験において使用条件の面圧下で設計想定内の水平剛性が得られることを確認することとされており、過去の実績においても安定した水平剛性が得られている。

4. ゴム支承の種類

耐震性向上を目的に設置される道路橋用ゴム支承には以下の種類がある。¹⁾



地震時水平力分散型ゴム支承はゴム支承のせん断剛性を利用して、上部構造の慣性力を複数の下部構造に分散させるものである。免震支承はゴム支承本体の水平剛性を利用したアイソレート機能とエネルギー吸収性能による減衰機能を併せ持つ

た支承である。代表的な免震支承としては、鉛プラグ入りゴム支承と高減衰ゴム支承がある。地震時水平力分散型ゴム支承は免震支承で期待されるようなエネルギー吸収性能による減衰機能はほとんどない。免震支承の場合には強い非線形履歴特性とひずみ依存性を有するが、地震時水平力分散型ゴム支承の場合には、設計で用いる範囲ではひずみ依存性のない線形部材としてモデル化できる。

本構造では、上部構造の地震時水平力の分散と適度な長周期化を目的としており、免震支承が有する大きい非線形履歴特性によるエネルギー吸収性能には期待しない地震時水平力分散型ゴム支承を採用した設計とする。

5. 適用規格

道路橋用ゴム支承は、「道路橋示方書・同解説 I 共通編, V耐震設計編（平成 14 年 3 月）」に従い、「道路橋支承便覧(平成 16 年 4 月)」に則り、設計・製作される。ゴム支承の特性、評価式及び許容値は同規格・基準に従う。その他の規格・基準類として「道路橋免震用ゴム支承に用いる積層ゴム-試験方法(JIS K 6411-2012)」及び「原子力発電所免震構造設計技術指針(JEAG 4614-2013)」を参考に各種依存性試験及び性能試験を実施し、ゴム支承の特性及び許容値の妥当性を検証する。

参考文献

- 1) 道路橋支承便覧(平成 16 年 4 月 社団法人 日本道路協会)

適用規格及び設計方法の比較，検証（1／2）

No.	規格	原子力発電所耐震設計技術指針（JEAG4601）	道路橋示方書、道路橋支承便覧	原子力発電所免震構造設計技術指針（JEAG4614）	建築基準法	女川 2 号炉 竜巻防護ネットの設計に適用する規格			適用規格の考え方
	対象設備、部位	竜巻防護ネット	竜巻防護ネット支承部	原子力発電所の免震構造施設（設計方法を参照）	女川発電所の事務建屋の免震装置（設計方法を参照）	本体（架構）	ネット	支承 鋼製部 ゴム部	
1	適用範囲	原子力施設における機器・配管系等	道路橋、道路橋支承（ゴム支承等）	免震型原子力施設における建屋（免震層含む）・機器	建物	JEAG4601 を適用			・ ゴム支承を含む竜巻防護ネットの固有周期が 1 秒以下となるよう設計している。一方、JEAG4614 などに記載の免震装置を適用する構造物の固有周期は 2 ～4 秒であることから、機器・配管系設備に一般的に適用している JEAG4601 をネットの設計に適用することを基本とする。 ・ ゴム支承については、以下の理由から道路橋用のゴム支承を採用するため、道路橋示方書、道路橋支承便覧を準用する。 →道路橋用のゴム支承は竜巻防護ネットのゴム支承と同じく屋外使用を想定している。 →竜巻防護ネットは建屋等と比較して軽量であることからゴム支承に負荷する面圧が小さくなるが、道路橋ゴム支承も低面圧を想定し必要な水平剛性を確保できる設計となっている。
2	検討用地震動	基準地震動 Ss	レベル 2 地震	長周期成分を考慮した基準地震動 Ss 告示波（極値）×1.5 倍	レベル 1、2 ^{*1} の告示波 レベル 1、2 ^{*1} の既往観測波 サイト波 ^{*2}	JEAG4601 を適用し基準地震動 Ss で設計			・ 竜巻防護ネットの固有周期は 1 秒以下の設計であり、長周期の影響が卓越する設備ではないことから、原子力発電所の設計に適用している基準地震動 Ss による設計を行う。
3	荷重の組合せ	死荷重＋地震荷重＋外部荷重（積雪、風等）	死荷重＋地震荷重	死荷重＋地震荷重＋外部荷重（積雪、風等）	固定荷重＋積載荷重＋地震荷重（積雪、風と地震力の重畳は考慮しない）	JEAG4601 を適用し「死荷重＋地震荷重＋外部荷重（積雪）」の荷重の組合せで設計			・ JEAG4601 を適用し、死荷重＋地震荷重＋積雪荷重を考慮した設計とする。 ・ 風荷重については、竜巻防護ネットの構造を踏まえて影響の程度を確認し、地震時に組合せを考慮すべきか工認段階で確認する。
4	地震力（水平／鉛直）の組合せ	SRSS、組合せ係数法、同時入力解析、代数和法のいずれか	SRSS	[免震装置] 絶対和、同時入力解析、SRSS、組合せ係数法、時刻歴和 [上部構造] 絶対和、同時入力解析	絶対和	JEAG4601 を適用し地震力の組合せは SRSS 法にて設計			・ 竜巻防護ネットは固有周期が 1 秒以下の設計であることから、水平及び鉛直方向の最大荷重発生タイミングが異なるものと考え、JEAG4601 を適用し SRSS 法で設計を行う。 ・ SRSS 法の適用性の定量的検討は、工認段階で時刻歴応答解析結果と比較するなどして検証する。
5	地震力の種類	動的地震力と静的地震力	動的地震力	動的地震力と静的地震力	動的地震力と静的地震力	JEAG4601 を適用し動的地震力を用いて設計			・ 波及的影響防止の観点で評価を実施する設備のため、基準地震動 Ss（動的地震力）に対して損傷しないことを確認する。 ・ 他の規格類と比較して特段不足はない。
6	地震応答解析法	時刻歴応答解析 又は スペクトルモーダル解析	時刻歴応答解析 又は スペクトルモーダル解析	時刻歴応答解析	時刻歴応答解析	JEAG4601 を適用しスペクトルモーダル解析にて設計			・ 道路橋示方書、支承便覧においてゴム支承は十分に線形的な挙動を示すことから、等価線形にモデル化し評価を行うことが認められている。 ・ また、スペクトルモーダル解析であれば周期方向の拡張により、地震応答解析等の不確かさを設計マージンとして簡便に取り込むことが出来る。 ・ さらに、地震応答を複数包絡して設計を行うことができるため、保守的かつ簡便に評価が可能。 ・ 以上の理由より、スペクトルモーダル解析を適用して設計。 ・ なお、スペクトルモーダル解析を適用することの妥当性については、工認段階で時刻歴応答解析結果と比較するなどして検証する。
7	支承の不確かさの考慮	－ （記載なし）	－ （記載なし）	免震装置については、経年劣化、温度変化、特性ばらつきの不確かさを考慮	免震装置については、経年劣化、温度変化、特性ばらつきの不確かさを考慮	－	－	－ JEAG4614 を参照	・ JEAG4601、道路橋示方書、支承便覧に明記されていないため、JEAG4614 の考え方を準用し、試験で確認したゴム支承の不確かさとして製品誤差、経年変化、温度変化、更には繰返し変位の影響を考慮し、設計評価の中でパラメータスタディを実施する。 ・ なお、入力地震動の不確かさを考慮するため、周期方向に±10%拡張したスペクトルを設計に適用する。
8	減衰定数	機器種別毎に異なる（ボルト構造物：2.0%）	使用するゴム支承の特性を考慮して設定 ^{*3}	免震装置の特性を考慮して設定するように要求	履歴減衰のみ考慮	鋼製部材については JEAG4601 を適用し設計			道路橋示方書、支承便覧を参照し、支承の物性試験データから減衰を設定して設計 ・ 水平方向 4.0%、鉛直方向 2.0%と設定する。 ・ 水平方向はゴム支承の変形モードが支配的であることを踏まえ、個別に実施した各種試験データより保守性を考慮して 4.0%と設定する。 ・ 鉛直方向はゴム支承の剛性が高く、鋼製部材の減衰が支配的であることを踏まえ、JEAG4601 に基づき 2.0%と設定する。
9	強度評価方法	「その他支持構造物」に該当（鋼製部材）	ゴム支承に該当（詳細は次頁参照）	免震装置以外は JEAG4601 と同等（免震装置の詳細は次頁参照）	建築基準法による	JEAG4601 を適用し設計			道路橋示方書、支承便覧を適用し設計 ・ 鋼製部材は JEAG4601 を適用して設計する。 ・ ゴム支承については道路橋示方書、支承便覧を適用し設計する。また、道路橋の設計方法については、せん断を考慮した状態での圧縮及び引張応力の評価を実施しており、JEAG4614 と考え方は同様であることを確認した。
10	許容限界				各製品の能力に応じて決定				

*1：免震装置のように固有周期が 2 ～ 4 秒程度の長周期となる設備を設計する場合に適用する長周期が卓越した地震動。

*2：事務建屋建設時のサイト波として 580gal を適用。

*3：道路橋示方書に，「最近の実験研究成果によれば 4.0%程度以上の値が得られることが多いことから，使用するゴム支承の減衰特性を十分に把握した上で適切な減衰定数を設定するのがよい。」と記載されている。

適用規格及び設計方法の比較，検証（２／２）

	道路橋示方書 道路橋支承便覧	原子力発電所免震構造 設計技術指針(JEAG4614)
圧縮応力	$\sigma_{ce} \leq \sigma_{cra}$ $\sigma_{ce} = RL / A_{ce}$ σ_{ce} : 地震時の圧縮応力 RL : 地震時の下向きの力 A_{ce} : 地震時の移動量を控除した圧縮に有効な面積 σ_{cra} : 座屈を考慮した圧縮応力の許容値 $\sigma_{cra} = G_e \cdot S_1 \cdot S_2 / f_{cr}$ G_e : ゴムのせん断弾性係数 S_1 : 一次形状係数 S_2 : 二次形状係数 f_{cr} : 荷重の大きさ及び発生頻度を考慮した係数(地震時 $f_{cr}=1.5$)	(a) $\sigma \geq \sigma_{tca}$ の場合 $\frac{\sigma - \sigma_{tca}}{\sigma_{ta} - \sigma_{tca}} + \frac{\gamma}{\gamma_a} \leq 1 \quad \dots\dots\dots (7.1.3-1)$ (b) $\sigma_{tca} > \sigma \geq \sigma_{cca}$ の場合 $\gamma \leq \gamma_a \quad \dots\dots\dots (7.1.3-2)$ (c) $\sigma < \sigma_{cca}$ の場合 $\frac{\sigma_{cca} - \sigma}{\sigma_{cca} - \sigma_{ca}} + \frac{\gamma}{\gamma_a} \leq 1 \quad \dots\dots\dots (7.1.3-3)$
引張応力	$\sigma_{te} \leq \sigma_{ta}$ $\sigma_{te} = RU / A_{te}$ σ_{te} : 地震時の引張応力 RU : 地震時の上向きの力 A_{te} : 地震時の移動量を控除した引張に有効な面積 σ_{ta} : 引張応力の許容値(G10 以上: $2N/mm^2$)	σ_{ty} : 引張せん断線形限界応力度 σ_{tca} : 許容引張せん断応力度 ($= \sigma_{ty} / \alpha_3$) σ_{cy} : 圧縮せん断線形限界応力度 σ_{cca} : 許容圧縮せん断応力度 ($= \sigma_{cy} / \alpha_4$) σ_{ey} : 圧縮線形限界応力度 σ_{ca} : 許容圧縮応力度 ($= \sigma_{ey} / \alpha_5$) $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4, \alpha_5$: 安全係数で 1.5 とする。
せん断ひずみ	$\gamma_{se} \leq \gamma_{ea}$ $\gamma_{se} = \Delta l_e / \Sigma t_e$ γ_{se} : 地震時のせん断ひずみ Δl_e : 地震時の移動量 Σt_e : 総ゴム厚 γ_{ea} : 地震時の許容せん断ひずみ(レベル 2 地震時: 250%)	γ : せん断ひずみ γ_y : 線形限界ひずみ γ_a : 許容限界ひずみ ($= \gamma_y / \alpha_1$) σ : 鉛直応力度 σ_{ty} : 引張線形限界応力度 σ_{ta} : 許容引張応力度 ($= \sigma_{ty} / \alpha_2$) これらの定数は，建築基準法第 37 条第 2 項の認定の際の試験資料あるいは免震装置特性確認試験に基づき評価する。(6.1.2 解説(4)より抜粋)
評価概要	各応力(圧縮，引張，せん断)がそれぞれの許容限界を満足していることを確認する。なお，せん断変形による面積減少を考慮した圧縮，引張応力を算出することから，せん断を組合せた評価と同等であると判断できる。	応力比の組合せ(圧縮，引張の応力比にせん断の応力比を加算)が“1”以下であることを確認する。

道路橋示方書，道路橋支承便覧の適用性について

道路橋示方書，道路橋支承便覧において規定されている各要求事項における設計の考え方を整理し，原子力発電所免震構造設計技術指針（以下，「JEAG4614」という。）との比較も行い，竜巻防護ネット支承部への本規格の適用性を確認する。なお，建築基準法は建物構築物全般の設計基準法令であり，要求事項は JEAG4614 とほぼ同様であることを踏まえ比較対象としては JEAG4614 を適用する。

1. 規格の比較検証

(1) 適用範囲

各規格を比較した結果は以下のとおり（添付資料 2 の再掲）。竜巻防護ネット支承部の設計には下線の設計手法を適用する。

No	規格	JEAG4601	道路橋示方書， 道路橋支承便覧	JEAG4614
	対象設備，部位	竜巻防護ネット	竜巻防護ネット支承部	原子力発電所の免震構造施設
1	適用範囲	原子力施設における 機器・配管系等	<u>道路橋，道路橋支承</u>	免震型原子力施設における 建屋・機器

竜巻防護ネットの鋼製部には JEAG4601 を適用し，支承部には以下の理由から，道路橋用のゴム支承を採用するため道路橋示方書，道路橋支承便覧を適用する。

- 道路橋用のゴム支承は竜巻防護ネットのゴム支承と同じく屋外使用を想定している。
- 竜巻防護ネットのゴム支承に負荷される面圧は建物用ゴム支承に比べて小さい。道路橋用ゴム支承も同様に低面圧を想定し必要な水平剛性を確保する設計となっている。

また，道路橋用支承に対する規格を適用することから，竜巻防護ネットのゴム支承が本規格の適用範囲に入っていることを確認する。

a. 構造要求

・平面形状

道路橋支承便覧にせん断変形性能試験の実績データが示されているが，このデータの範囲が支承一辺の寸法として 400mm～1100mm の範囲が示されている。竜巻防護ネットに採用する支承の平面一辺の寸法は 550mm 及び 800mm であり，道路橋支承便覧に示される範囲内のサイズとなっている。

・形状係数

一次形状係数については，道路橋において一般的に 6 程度以上を適用することが推奨されている。竜巻防護ネットのゴム支承では，いずれも 8 以上の形状係数にて設計しており道路橋の支承と形状は類似している。

また，二次形状係数については，道路橋示方書において地震時の安定性を考慮し 4 程度以上とすることが推奨されている。竜巻防護ネットのゴム支承ではいずれも 4 以上の形状係数にて設計しており道路橋の支承と

形状は類似している。

以上より、平面形状及び形状係数が道路橋で適用される支承と同等の設計としていることから、竜巻防護ネットのゴム支承は構造が道路橋の支承と類似しているものと判断できる。したがって、構造の観点から同規格の適用性は問題ないものと考えている。

b. 材料要求

同規格において、鋼製材料及びゴム材料について、JIS に規定されており、かつこれまでに十分な使用実績のある材料が示されている。竜巻防護ネットに適用するゴム支承の材料は、天然ゴムや SS400 であり、いずれの材料も同規格に示された材料を使用していることから、材料の観点から同規格の適用性は問題ないものと考えている。

c. 物性値要求

同規格において、ゴム材料については、適用実績の多いゴム材料と物性値（G6～G14）が示されている。本設備に適用するゴム支承は規格に示されている物性値の範囲で G10、G12 を適用するため、物性値の観点で同規格の適用性に問題はないものと考えている。

以上より、竜巻防護ネットのゴム支承は道路橋示方書、道路橋支承便覧の適用範囲に含まれていることを確認した。

(2) 検討用地震動

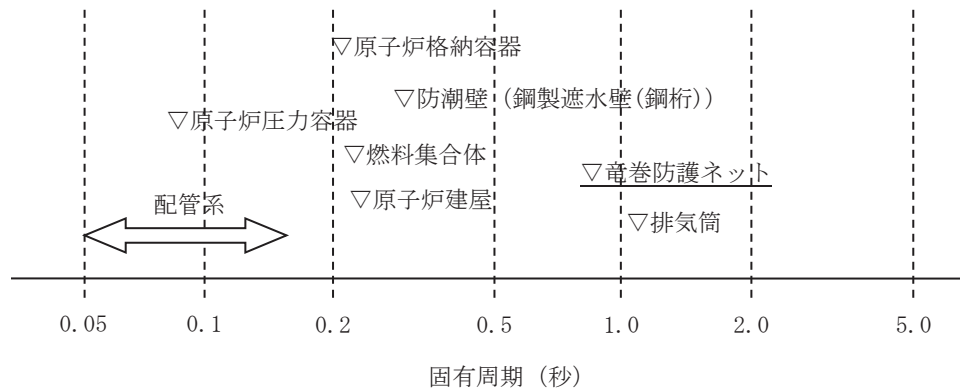
各規格を比較した結果は以下のとおり（添付資料 2 の再掲）。竜巻防護ネット支承部の設計には下線の設計手法を適用する。

No	規格	JEAG4601	道路橋示方書、 支承便覧	JEAG4614
	対象設備、部位	竜巻防護ネット	竜巻防護ネット支承部	原子力発電所の免震構造施設
2	検討用地震動	<u>基準地震動 Ss</u>	レベル 2 地震動	長周期成分を考慮した基準地震動 Ss 告示波（極稀）×1.5 倍

竜巻防護ネットの支承部については、基準地震動 Ss による設計を行う。これは以下に示す 2 つの理由からである。

a. 竜巻防護ネットの固有周期

竜巻防護ネットの固有周期は 1 秒以下の設計となっており、JEAG4614 に記載の免震装置を適用する構造物の固有周期 2～4 秒に比べて剛側の設計となっている。なお、女川 2 号炉の代表的な施設について固有周期を添付 3-1 図に例示しているが、竜巻防護ネットも含めて概ね 1.0s 以下の周期帯となっていることが分かる。



添付 3-1 図 女川 2 号炉における施設の固有周期の比較

b. 各規格の設計に適用する地震動の考え方

(a) 道路橋示方書，道路橋支承便覧

道路橋示方書，道路橋支承便覧においては，レベル 2 地震動での設計が規定されている一方で，「建設地点周辺における過去の地震情報，活断層情報，プレート境界で発生する地震の情報，地下構造に関する情報，建設地点の地盤条件に関する情報，既往の強震記録等を考慮して建設地点における設計地震動を適切に推定できる場合には，これに基づいて設計地震動を設定するものとする。」と規定されており，施設の設置場所を適切に考慮した設計用の地震動を設定することを認めている。

(b) JEAG4614

JEAG4614 においては，免震型発電用原子炉施設では，地震応答に支配的な固有周期が 2～4 秒程度の範囲にあり，耐震型発電用原子炉施設（1 秒以下）と比較してやや長周期帯域に存在することを踏まえて，長周期成分を考慮した基準地震動 S_s 及び必要に応じて告示波のうち極めて稀に発生する地震動の 1.5 倍を考慮するよう規定されている。

上記のとおり，竜巻防護ネットは JEAG4614 に記載の免震構造が有する固有周期 2～4 秒よりも短周期側で設計しており，更には道路橋示方書，道路橋支承便覧においては建設地点の情報を考慮して設計用の地震動を設定することが認められていることから，竜巻防護ネットの設計には女川の基準地震動 S_s が適用可能であると考えている。

(3) 荷重の組合せ

各規格を比較した結果は以下のとおり（添付資料 2 の再掲）。竜巻防護ネット支承部の設計には下線の設計手法を適用する。

No	規格	JEAG4601	道路橋示方書, 道路橋支承便覧	JEAG4614
	対象設備, 部位	竜巻防護ネット	竜巻防護ネット支承部	原子力発電所の免震構造施設
3	荷重の組合せ	死荷重+地震荷重+外部荷重 (積雪, 風等)	死荷重+地震荷重	死荷重+地震荷重+外部荷重 (積雪, 風等)

規格の比較結果より, JEAG4601 の荷重の組合せの考え方については, 道路橋示方書, 道路橋支承便覧及び JEAG4614 の荷重の組合せを包絡する条件となっていることを踏まえて, 竜巻防護ネットにおいては, JEAG4601 で規定されている「死荷重+地震荷重+外部荷重 (積雪, 風等)」を考慮した設計とする。この考え方は JEAG4601, 道路橋示方書, 支承便覧及び JEAG4614 のいずれの規格においても規定されているものであり, 包絡した条件となっていることから適用性について問題はないものと考えている。

なお, 風荷重については施設の構造を踏まえた影響の程度を確認し, 地震時に組合せを考慮すべきか工認段階で検討する。

(4) 地震力 (水平／鉛直) の組合せ

各規格を比較した結果は以下のとおり (添付資料 2 の再掲)。竜巻防護ネット支承部の設計には下線の設計手法を適用する。

No	規格	JEAG4601	道路橋示方書, 道路橋支承便覧	JEAG4614
	対象設備, 部位	竜巻防護ネット	竜巻防護ネット支承部	原子力発電所の免震構造施設
4	地震力 (水平／鉛直の組合せ)	SRSS, 組合せ係数法, 同時入力解析, 代数和法	<u>SRSS</u>	[免震装置] 絶対和, 同時入力解析, SRSS, 組合せ係数法, 時刻歴和 [上部構造] 絶対和, 同時入力解析

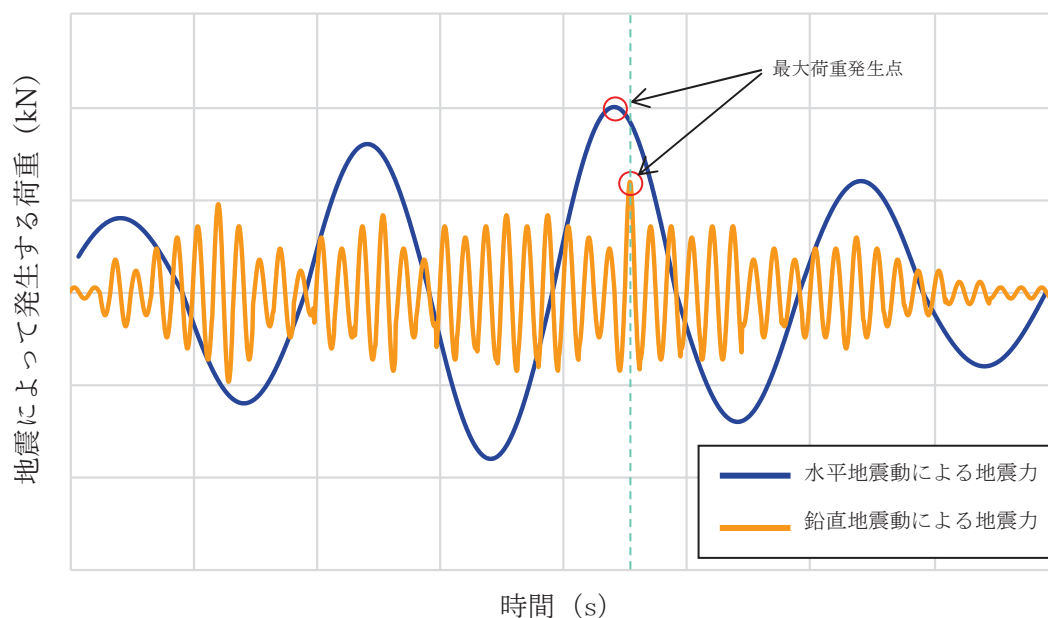
竜巻防護ネットの設計においては, 地震力の組合せ方法として鋼製部材, 支承部ともに SRSS 法を適用する。一方で JEAG4614 では免震型の原子炉施設に対する地震力の組合せ方法として, 絶対和もしくは同時入力解析を適用することを基本としていることから, SRSS 法の適用性について検討する。

a. 水平及び鉛直方向の最大地震力の重畳について

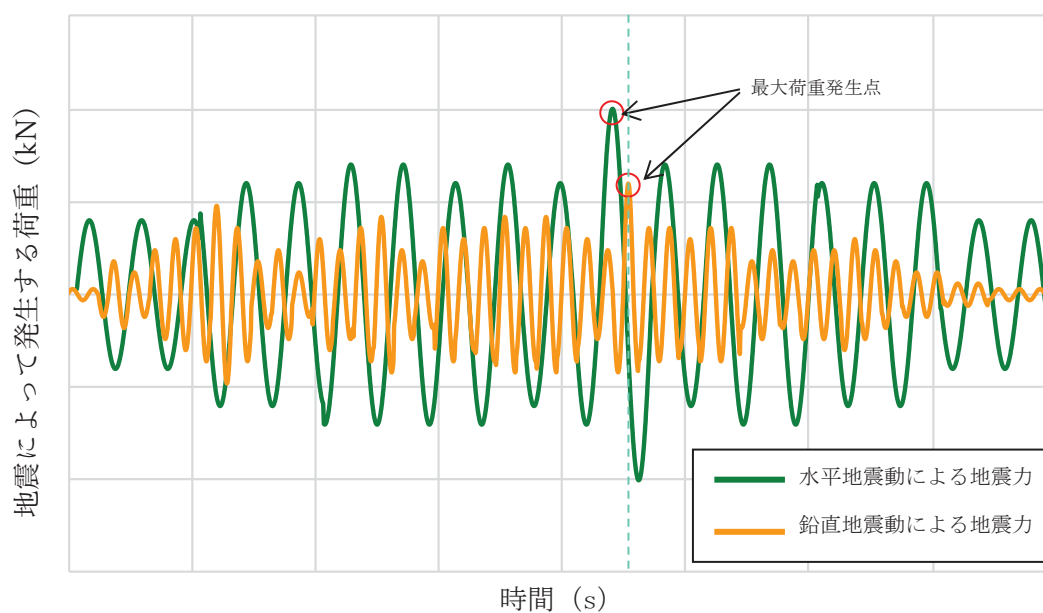
JEAG4614 で規定している免震型の原子炉施設については, 水平方向の固有周期が 2 ～ 4 秒程度で設計され, 長周期が卓越する応答を示すことから, 水平の最大地震力と鉛直の最大地震力が重畳する可能性が比較的高くなる可能性を考慮しての考え方である。地震力の重ね合わせの考え方のイメージを添付 3-2 図に示す。水平方向が長周期であることから, 地震時に水平地震動によって発生する荷重は比較的長い時間大きな荷重となっている。そのため鉛直地震動によって発生する最大荷重が水平地震動によって発生する最大荷重レベルと重畳する可能性は高くなるものである。

一方, 竜巻防護ネットについては, 道路橋用のゴム支承を適用し水平方向の固有周期を 1 秒以下となるように設計しており最大地震力が重畳する可能性は

低いと考えられる。同様のイメージを添付 3-3 図に示す。水平地震動の周期が短くなっているため、それぞれの方向による最大地震力の発生時間が僅かに異なることで最大荷重の重畳は起こらないことから、最大荷重の重畳が発生する可能性は免震型の原子炉施設よりも低くなることが分かる。



添付 3-2 図 免震型の施設における水平地震動による地震力と鉛直地震動による地震力の重畳のイメージ（水平方向の固有周期が 4 秒の例）



添付 3-3 図 竜巻防護ネットにおける水平地震動による地震力と鉛直地震動による地震力の重畳のイメージ（水平方向の固有周期 0.83s）

b. 各方向の地震力により部材に生じる応力について

方向別の地震荷重によって、竜巻防護ネットに発生する部材力及び反力の説明を添付 3-4 図に示す。添付 3-4 図に示す部材力及び反力は、各方向の地震荷重が作用したときにフレーム及び大梁を構成する部材に生じる主な応答成分とその発生位置を表している。

添付 3-4 図(a)にはフレームに発生する応答成分を示している。フレームでは、全体 X 方向の地震荷重に対して、主桁に軸力 N が発生する他、ゴム支承に反力 F_x が生じる。全体 Y 方向の地震荷重に対しては、トラスを構成する主桁、ブレース及び横補強材には軸力 N が発生し、トラスを構成していない主桁には Z 軸周りの曲げモーメント M_z と Y 軸方向のせん断力 Q_y が生じる。ゴム支承及び可動支承には反力 F_y が生じる。全体 Z 方向の地震荷重に対して、主桁は Y 軸周りの曲げモーメント M_y と Z 軸方向のせん断力 Q_z が発生して、ゴム支承及び可動支承には反力 F_z が生じる。

添付 3-4 図(c)には大梁に発生する応答成分を示している。大梁では、全体 X 方向の地震荷重に対して、Z 軸周りの曲げモーメント M_z と X 軸方向のせん断力 Q_x が発生し、ゴム支承には Y 方向の反力 F_y が生じる。全体 Y 方向の地震荷重に対して、大梁に軸力 N が発生してゴム支承には反力 F_y が生じる。全体 Z 方向の地震荷重に対して、X 軸周りの曲げモーメント M_x と Z 軸方向のせん断力 Q_z が発生し、ゴム支承には反力 F_z が生じる。

添付 3-4 図(b)には、(a)で示した応答成分が発生するフレーム断面を図示しているが、3 方向の地震荷重によって発生する応答成分はそれぞれ異なる方向に発生しており、せん断力や曲げモーメントを主に負担する強軸の部材が異なることから、3 方向の地震による荷重成分が重畳していないことが分かる。

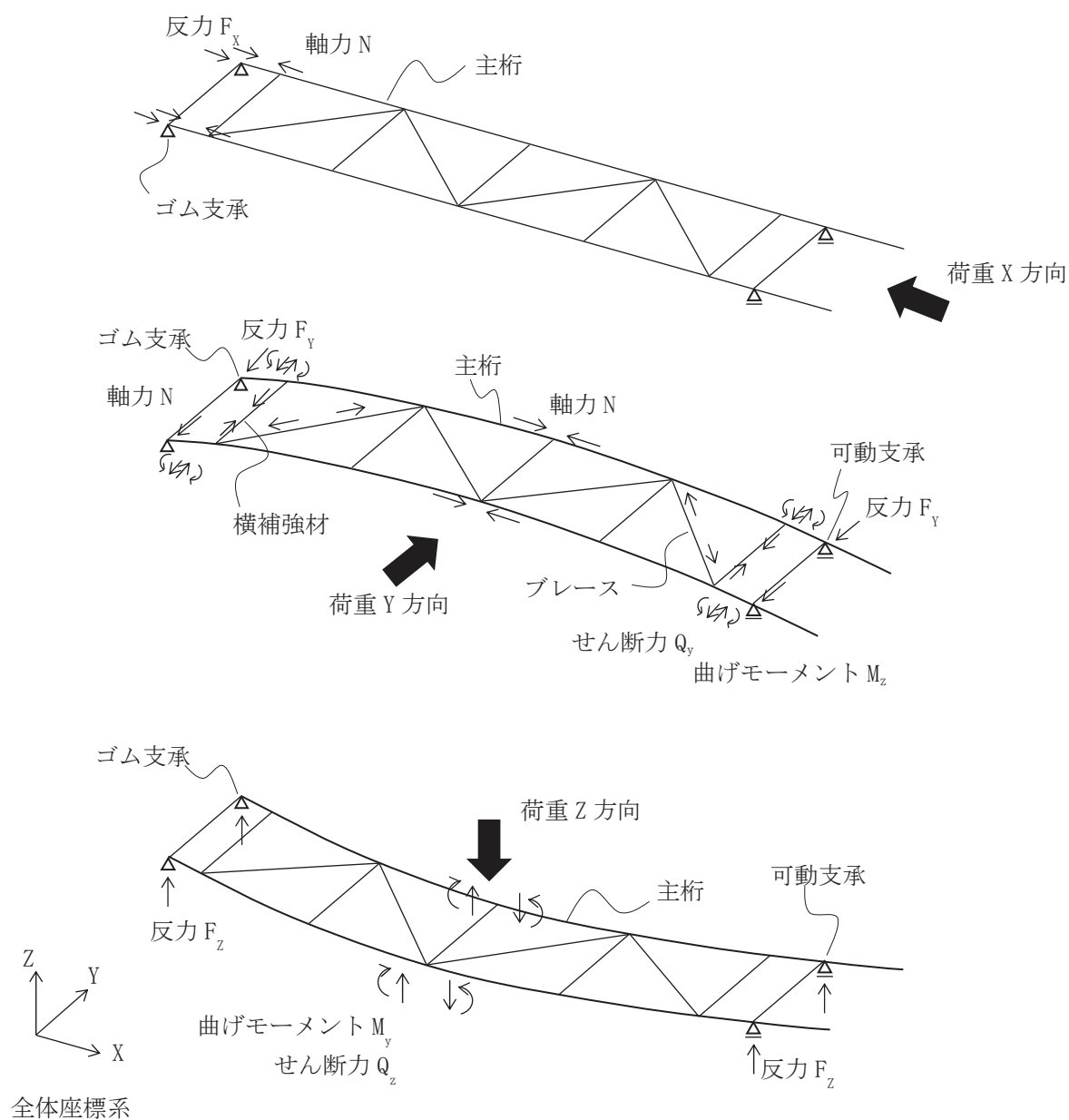
添付 3-4 図(d)には、(c)で示した応答成分が発生する大梁断面を図示しているが、3 方向の地震荷重によって発生する応答成分はそれぞれ異なる方向に発生しており、せん断力や曲げモーメントを主に負担する強軸の部材が異なることから、3 方向の地震による荷重成分が重畳していないことが分かる。

以上より、フレーム及び大梁を構成する部材に生じる応力は、地震荷重の方向別に発生する主な応答成分と発生位置が異なっており、水平方向と鉛直方向の地震荷重の組合せ方法 (SRSS 又は絶対和) の違いによる影響は小さいと考えられる。

a 項に示すとおり、竜巻防護ネットにおいては水平方向地震と鉛直方向地震による最大荷重発生タイミングが重畳する可能性は低いと考えていることから SRSS 法を重畳している。また、b 項において、各方向の地震によって部材に発生する応力について検討した結果から、それぞれ応答成分が負荷する断面が異なっているため最大発生荷重のタイミングが重畳した場合においても、応力評価に及ぼす影響は小さいと考えている。

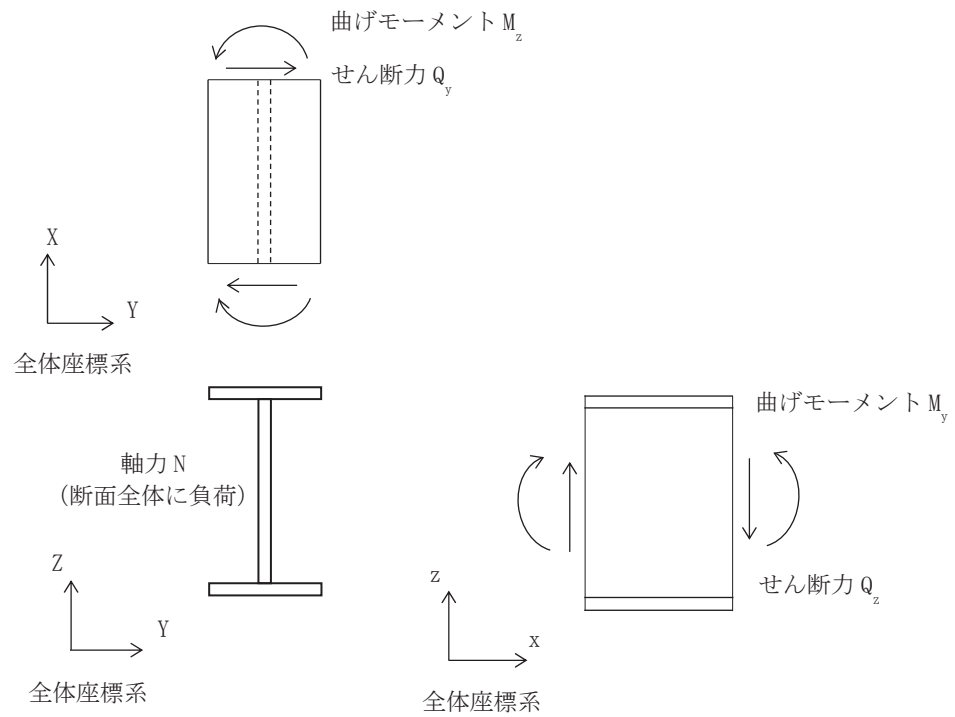
以上の検討結果より、竜巻防護ネットの耐震評価において地震荷重の評価の組合せに SRSS 法を適用することは妥当であると考えている。

なお、SRSS 法の妥当性については、工認段階で時刻歴応答解析結果と比較するなどして定量的な検討を行う。



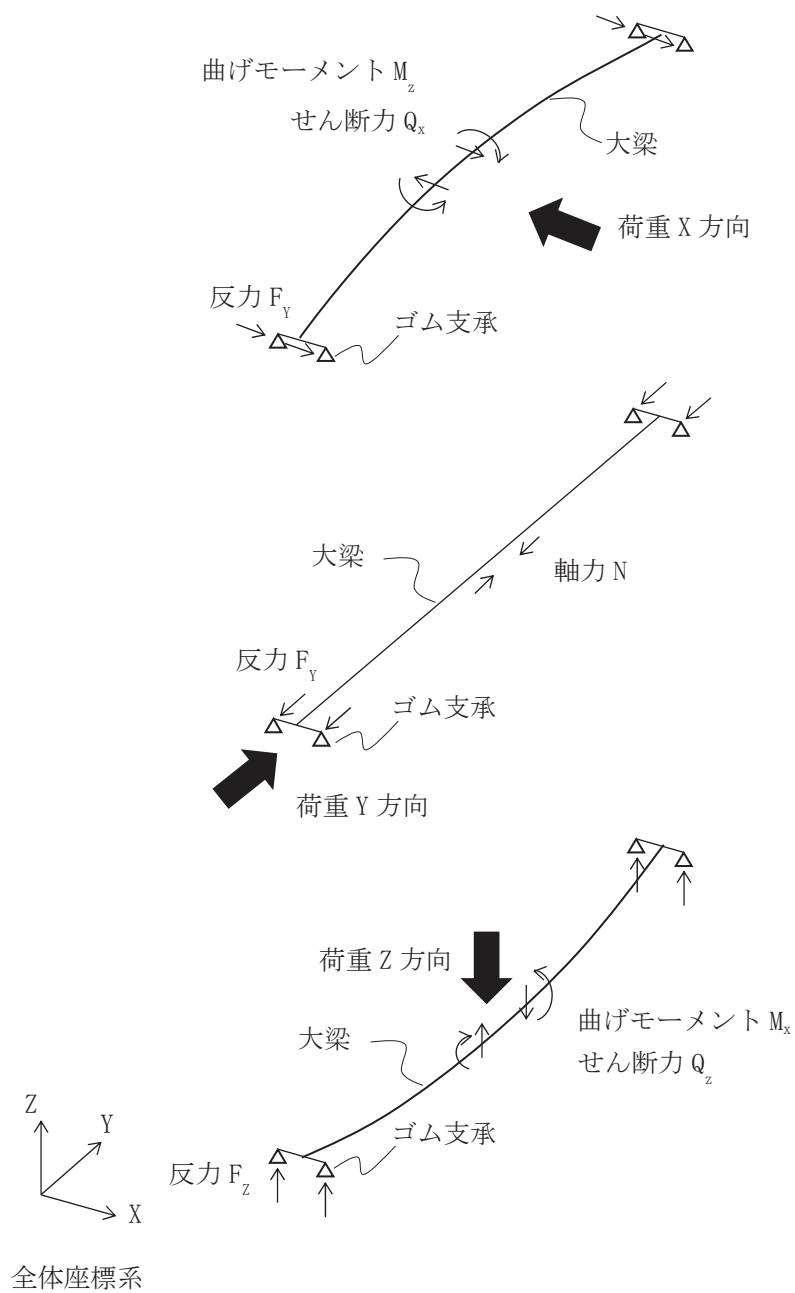
(a) フレームに発生する主な応答成分

添付 3-4 図 地震方向別の応答成分及び発生位置 (1/4)



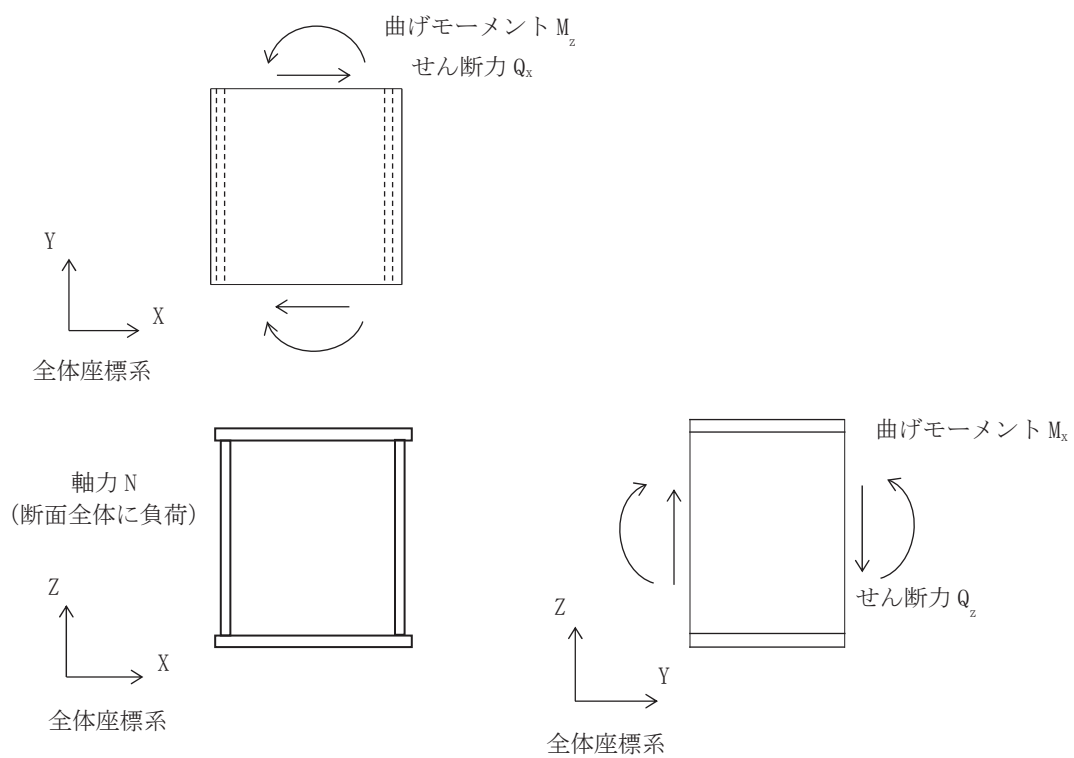
(b) フレーム（主桁）に発生する応答成分と負荷断面

添付 3-4 図 地震方向別の応答成分及び発生位置 (2/4)



(c) 大梁に発生する主な応答成分

添付 3-4 図 地震方向別の応答成分及び発生位置 (3/4)



(d) 大梁に発生する応答成分と負荷断面

添付 3-4 図 地震方向別の応答成分及び発生位置 (4/4)

(5) 地震力の種類

各規格を比較した結果は以下のとおり（添付資料 2 の再掲）。竜巻防護ネット
 支承部の設計には下線の設計手法を適用する。

No	規格	JEAG4601	道路橋示方書, 道路橋支承便覧	JEAG4614
	対象設備, 部位	竜巻防護ネット	竜巻防護ネット支承部	原子力発電所の免震構造施設
5	地震力の種類	<u>動的地震力</u> と静的地震力	<u>動的地震力</u>	動的地震力と静的地震力

竜巻防護ネットの設計においては、地震力として動的地震力を適用する。これは、竜巻防護ネットに要求される機能が波及的影響防止であり、基準地震動 S_s 発生時に損傷、落下することで上位クラス施設に対して影響を及ぼさないことを確認することであることから基準地震動 S_s による動的地震力を適用するものである。

動的地震力の適用については JEAG4601, 道路橋示方書, 支承便覧及び JEAG4614 のいずれの規格においても規定されているものであり、適用性について問題はないものと考えている。

(6) 地震応答解析法

各規格を比較した結果は以下のとおり（添付資料 2 の再掲）。竜巻防護ネット
 支承部の設計には下線の設計手法を適用する。

No	規格	JEAG4601	道路橋示方書, 道路橋支承便覧	JEAG4614
	対象設備, 部位	竜巻防護ネット	竜巻防護ネット支承部	原子力発電所の免震構造施設
6	地震応答 解析法	時刻歴応答解析又は <u>スペクトルモーダル解析</u>	時刻歴応答解析又は <u>スペクトルモーダル解析</u>	時刻歴応答解析

竜巻防護ネットの設計においては、スペクトルモーダル解析を適用する。これは以下に示す設計上の配慮から同手法を選定しているものである。

- スペクトルモーダル解析の場合、周期方向の拡張により、地震応答解析等の不確かさを設計の保守性として簡便に取り込むことが出来る。
- 地震応答を複数包絡して設計を行うことができるため、保守的かつ簡便に評価が可能。

設備評価においては入力地震動の不確かさに対する保守性の考慮や複数ある基準地震動 S_s に対する網羅的な評価が必要であることから、設計の簡便性も考慮した上で適用しているものである。

一方, JEAG4614 に規定される免震型の原子炉施設については時刻歴応答解析を実施するよう規定されていることから、スペクトルモーダル解析の適用性について検討する。

(a) 規格の要求について

JEAG4601 については、鋼製で製作された剛性の高い設備に対して、スペクトルモーダル解析又は時刻歴応答解析を適用するよう規定しているものである。そのため、JEAG4601 で規定されていないゴム支承を採用している竜巻防護ネットについては、解析手法の選定において道路橋示方書、道路橋支承便覧も適用している。道路橋示方書、道路橋支承便覧においては支承の特性を考慮して等価線形でモデル化することも可能であると規定している。また、竜巻防護ネットに採用する水平力分散型ゴム支承についても、設計で用いる範囲では線形部材としてモデル化してよいとの記載がある。

一方、JEAG4614 においては免震装置を適用した施設の設計に適用する規格であることから、鉛プラグ入り積層ゴムや高減衰積層ゴムもしくはダンパの設置などで、大きな減衰効果に期待する装置構成になっていることから、免震装置は非線形な挙動を示すこととなるため時刻歴応答解析の適用が基本となっている。JEAG4614 には「免震装置として、荷重－変形関係に非線形性を有するものが用いられる場合の地震応答解析には、原則として JEAG4601-2008 に記載されているモーダルアナリシス法、周波数応答解析法等のような振動系の線形性を前提とした解析手法は適用が難しい。このため地震応答解析は、以下に示す構造物等の非線形特性を踏まえた直接積分法による時刻歴応答解析によることを原則とする」と記載されており、時刻歴応答解析の適用は免震装置が非線形性を有することから要求しているものである。

(b) 竜巻防護ネットの設計状況について

竜巻防護ネットに採用するゴム支承は、水平分散型ゴム支承であり、ゴムの剛性が大きく、ゴム支承の荷重－変位特性については、ほぼ線形の挙動を示す設計となっている。このゴム支承の物性については、各種物性試験を実施しており添付資料 6 に示すとおり、設計に適用しているようなほぼ線形の挙動になっていることを確認している。さらには、実製品を作成した後に、物性確認試験を実施し設計で適用している物性と同様な特性であることを確認する

また、可動支承については、1 方向に自由に可動することが可能な設計としているが、可動支承を設置するフレームについては反対側にゴム支承を配置していることから地震時の挙動はゴム支承の変形挙動が支配的になる設計となっており、非線形な挙動を示すことはない。

以上のように、規格の要求としては、非線形を有する設備の設計にあたっては時刻歴応答解析を適用することを基本としているが、設備全体として線形挙動を示すものであれば、線形の時刻歴応答解析又はスペクトルモーダル解析を適用することができるとしており、竜巻防護ネットはモデル全体で線形挙動を示すためスペクトルモーダル解析の適用は妥当であると考えている。

なお、スペクトルモーダル解析の適用性や保守性については、時刻歴応答解析と比較するなどして工認段階で定量的な検討を行う。

(7) 支承の不確かさの考慮

各規格を比較した結果は以下のとおり（添付資料 2 の再掲）。竜巻防護ネット支承部の設計には下線の設計手法を適用する。

No	規格	JEAG4601	道路橋示方書, 道路橋支承便覧	JEAG4614
	対象設備, 部位	竜巻防護ネット	竜巻防護ネット支承部	原子力発電所の免震構造施設
7	支承の不確か さの考慮	—	—	<u>免震装置については, 経年劣化, 温度変化, 特性ばらつきの不確 かさを考慮</u>

ゴム材料を使用している、ゴム支承部については環境条件等による物性の変化が大きいことが一般的に知られていることから、竜巻防護ネットのゴム支承の不確かさを考慮した設計を行う方針としている。

しかし、JEAG4601 及び道路橋示方書、道路橋支承便覧には支承の不確かさの検討方法について特記されていないことから、JEAG4614 を参考に検討を実施している。JEAG4614 には「経年変化」、「温度変化」、「特性ばらつき」の 3 要因を考慮するよう規定されている。この情報を参考に、各種要因がゴム材料の物性に対して及ぼす影響の程度を確認するため、添付資料 6 に示すとおり各種物性試験を実施しており、ゴム材料の不確かさの影響が大きい要因として以下の 4 つの要因を設計に反映することとした。

- ①製品誤差
- ②経年変化
- ③温度変化
- ④繰返し変位の影響

不確かさの反映方法としては、4 要因の物性のばらつきをプラス側とマイナス側でそれぞれ重畳させて最大でのばらつきを想定し、物性が大きく変動している状況においても耐震性が確保されることを確認する。具体的には添付資料 6 に示している。

(8) 減衰定数

各規格を比較した結果は以下のとおり（添付資料 2 の再掲）。竜巻防護ネット支承部の設計には下線の設計手法を適用する。

No	規格	JEAG4601	道路橋示方書, 道路橋支承便覧	JEAG4614
	対象設備, 部位	竜巻防護ネット	竜巻防護ネット支承部	原子力発電所の免震構造施設
8	減衰定数	<u>機器種別ごとに異なる</u>	<u>使用するゴム支承の特性を考慮 して設定</u>	免震装置の特性を考慮して設定 するように要求

道路橋示方書、道路橋支承便覧や JEAG4614 においては、ゴム支承や免震装置

に対して、その特性を考慮して適切に設定するよう要求されている。そこで竜巻防護ネットについては以下の考え方にに基づき、減衰定数として水平 4.0%，鉛直 2.0%を適用している。

鉛直方向については、竜巻防護ネットがボルト構造物であり、ゴム支承の剛性も高いことから、JEAG4601 に基づき 2.0%と設定している。一方、水平方向については、固有値解析結果より水平方向の主要モードにおいては 4.3%以上のモード減衰定数が得られることを確認していることから、保守性を考慮して 4.0%の設定としている。固有値解析は、各構造要素に減衰定数を設定（鋼製部材 2.0%，ゴム支承 4.5%*）し、振動モードごとの減衰定数をひずみエネルギー比例型減衰法により求める。なお、ひずみエネルギー比例型減衰法は、構造物を構成する各構造要素で異なる減衰定数を設定した場合に、各次の振動モードの減衰定数をひずみエネルギーを重みとしてつけた加重平均として与えるものである。

本条件で実施した固有値解析結果については添付 3-1 表に示すとおり、水平方向の主要モードでは全て 4.3%以上のモード減衰が得られていることが分かる。この結果を踏まえて、竜巻防護ネットの耐震評価に適用する減衰定数としては保守性を踏まえて一律に水平 4.0%と設定しているものである。

* ゴム支承の各種依存性を考慮した試験結果において全て 5.0%以上の減衰定数が得られていることから（添付 6-8 図参照）、保守的に試験結果の下限値を 0.5%単位に切り下げ、4.5%の減衰定数を設定した。

なお、実機に使用するゴム支承については、製造後、物性試験を実施し水平方向の減衰効果が設計を上回っていることを確認することから減衰定数の適用性に問題はないものと考えている。

添付 3-1 表 固有値解析結果

次数	振動数 (Hz)	周期T (s)	刺激係数			有効質量比			減衰定数 h	備考
			β_x	β_y	β_z	X	Y	Z		
1	1.170	0.855	0.000	1.314	0.000	0.0%	81.8%	0.0%	0.0448	大梁 水平Y方向 1次
2	1.297	0.771	1.004	0.000	0.000	36.9%	0.0%	0.0%	0.0449	フレーム (FR1, FR5) 水平X方向 1次 (FR1 と FR5 が同位相)
3	1.298	0.771	0.000	-0.098	0.000	0.0%	0.4%	0.0%	0.0449	フレーム (FR1, FR5) 水平X方向 1次 (FR1 と FR5 が逆位相)
4	1.431	0.699	1.001	0.000	0.000	15.2%	0.0%	0.0%	0.0449	フレーム (FR3) 水平X方向 1次
5	1.433	0.698	-1.002	0.000	0.000	30.3%	0.0%	0.0%	0.0449	フレーム (FR2, FR4) 水平X方向 1次 (FR2 と FR4 が同位相)
6	1.433	0.698	0.000	0.001	0.000	0.0%	0.0%	0.0%	0.0449	フレーム (FR2, FR4) 水平X方向 1次 (FR2 と FR4 が逆位相)
7	2.000	0.500	1.061	0.000	0.000	17.6%	0.0%	0.0%	0.0428	大梁 水平X方向 1次
8	2.268	0.441	0.025	0.000	-0.006	0.0%	0.0%	0.0%	0.0437	フレーム (FR1, FR5) 水平Y方向 1次 (FR1 と FR5 が逆位相)
9	2.305	0.434	0.000	-0.660	0.000	0.0%	4.2%	0.0%	0.0437	フレーム (FR1, FR5) 水平Y方向 1次 (FR1 と FR5 が同位相)
10	2.502	0.400	0.001	-0.053	0.000	0.0%	0.0%	0.0%	0.0437	フレーム (FR2, FR3, FR4) 水平Y方向 1次
11	2.505	0.399	-0.001	0.000	0.000	0.0%	0.0%	0.0%	0.0437	フレーム (FR2, FR4) 水平Y方向 1次
12	2.571	0.389	0.000	0.940	0.000	0.0%	13.6%	0.0%	0.0438	フレーム (全体) 水平Y方向 1次
13	2.959	0.338	0.000	0.000	1.428	0.0%	0.0%	61.7%	0.0200	大梁 鉛直Z方向 1次
14	3.281	0.305	0.000	0.000	0.000	0.0%	0.0%	0.0%	0.0447	大梁 水平X方向 2次
15	3.425	0.292	0.000	0.000	0.000	0.0%	0.0%	0.0%	0.0200	主桁 (G1R, G5L) 鉛直Z方向 1次 (G1R と G5L が逆位相)
16	3.425	0.292	0.000	0.000	1.150	0.0%	0.0%	11.9%	0.0200	主桁 (G1R, G5L) 鉛直Z方向 1次 (G1R と G5L が同位相)
∴	∴	∴	∴	∴	∴	∴	∴	∴	∴	

* 着色部は水平方向の変形モードを示す。

(9) 強度評価方法及び許容限界

各規格を比較した結果は以下のとおり（添付資料 2 の再掲）。竜巻防護ネット
 支承部の設計には下線の設計手法を適用する。

No	規格	JEAG4601	道路橋示方書, 道路橋支承便覧	JEAG4614
	対象設備, 部位	竜巻防護ネット	竜巻防護ネット支承部	原子力発電所の免震構造施設
9	強度評価方法	<u>「その他支持構造物」に該当</u> <u>(鋼製部材)</u>	<u>ゴム支承に該当</u> <u>(詳細は添付資料 2 参照)</u>	免震装置以外は JEAG4601 と同等 (免震装置の詳細は添付資料 2 参照)
10	許容限界			

竜巻防護ネットの鋼製部材については、JEAG4601 を適用した設計を実施していることから、強度評価及び許容限界についても JEAG4601 の規定に従って設計する。

ゴム支承の設計については、道路橋示方書、道路橋支承便覧に基づいて設計を実施している。道路橋示方書、道路橋支承便覧で定められている強度評価方法及び許容限界は、道路橋用のゴム支承に対する既往の試験結果に基づき安全率を考慮して設定されたものである。

引張応力は、既往の引張破断試験結果の下限值に対して 2.5 倍の安全余裕を考慮した許容値としている。（評価式は添付資料 2 に示す。）

せん断ひずみは、既往のせん断変形性能試験を基に水平荷重-水平変位の関係が安定した特性を示す範囲であり、せん断破壊に対して必要な安全性が確保されるように道路橋示方書、道路橋支承便覧で設定された値 250%を使用するが、今回使用するゴム支承と同種の試験体を製作し、経年変化も考慮したせん断変形性能試験を実施して、添付資料 6 に示すとおり 350%を超える破断ひずみを確認しており、同規格の許容値である 250%を使用することが妥当であることを確認している。

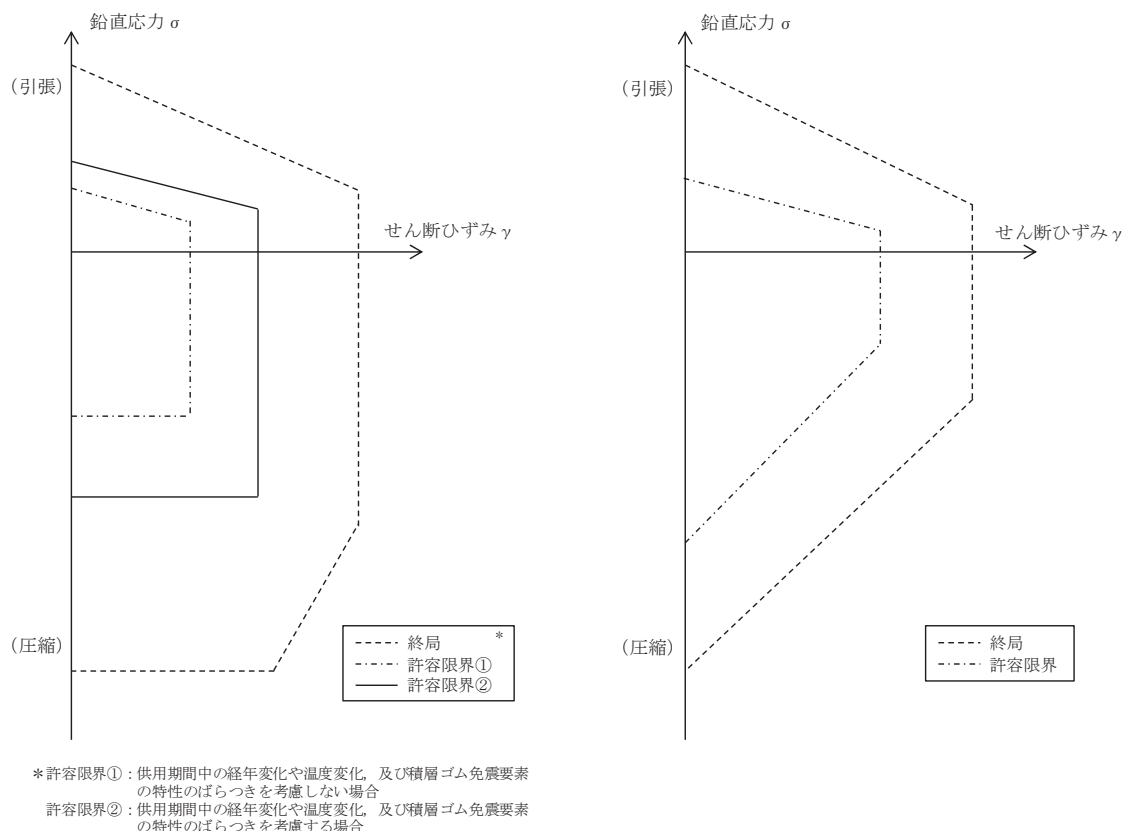
圧縮応力は、既往の検討に基づいて設定された座屈安定性の許容値には 1.5 倍の安全率を考慮している。なお、竜巻防護ネットの設計において、圧縮応力に関しては作用する鉛直荷重が小さいことから評価結果には十分に余裕がある。

上記のとおり、道路橋示方書、道路橋支承便覧に規定されている強度評価方法と許容限界は既往の知見に基づいて安全率を考慮した上で設定しているものであり、適用性に問題はないと考えているが、JEAG4614 の規定内容と比較して妥当性について検証する。

道路橋示方書、道路橋支承便覧の規定と JEAG4614 はそれぞれ使用目的が異なる支承に対する規定であり、安全率の設定方法も異なることから単純な比較は難しいが、その許容体系の考え方について、イメージを比較した図を添付 3-5 図に示す。図に示すとおり、双方の規格ともにせん断ひずみと軸方向の応力が重畳して負荷した場合に許容される範囲を規定するような許容体系になっており、その考え方は類似している。さらに、どちらの規格も損傷限界まで十分な安全率を考慮した設定になっていることが分かる。

また、JEAG4614 については免震ゴムのばらつきを考慮する場合としない場合で

許容限界の使い分けがなされているが、道路橋示方書、道路橋支承便覧については同様の考え方にはなっておらず終局に対して安全率を設定した許容限界となっている。そのため竜巻防護ネットの設計においては、ゴム支承のばらつきについて設計ケースとして考慮し、本許容限界内に収まることを確認する方針である（詳細は添付資料 6 参照）。



(a) JEAG4614

(b) 道路橋示方書、道路橋支承便覧

添付 3-5 図 JEAG4614 及び道路橋示方書、道路橋支承便覧における許容体系のイメージ図

以上の検討結果より、道路橋示方書、道路橋支承便覧の強度評価方法及び許容限界については、以下の理由により適用性に問題はないものと考えている。

- ・ 既往の知見に基づき安全率を考慮して設定している
- ・ 竜巻防護ネットに使用するゴム支承と同種の試験体を使用した物性試験から、せん断ひずみについて妥当性を確認している
- ・ JEAG4614 と比較した結果、鉛直荷重及びせん断ひずみを同時に考慮した類似の設計体系になっている

2. 適用性の検討結果

1 章にて、竜巻防護ネットの耐震設計に適用する各項目の妥当性、適用性について検証した結果、いずれの項目についても適切な考え方に基づいて設定されていることが確認できたことから、道路橋示方書、道路橋支承便覧は竜巻防護ネットの設計に適用可能であると考ええる。

なお、スペクトルモーダル解析法及び地震力(水平／鉛直)の組合せにおける SRSS 法の適用については、適用性の検討を補完する目的で、工認段階において定量的な影響検討を実施することから、検討結果については必要に応じて詳細設計へ反映を行う。

設計用床応答スペクトル及びモード図について

解放基盤表面で定義される基準地震動 S_s の応答スペクトルと、海水ポンプ室ピット壁の床応答から作成した設計用床応答スペクトル(周期軸±10%拡幅)を添付 4-1 図に示す。添付 4-1, 2 図には竜巻防護ネットの減衰定数である水平方向 4.0%, 鉛直方向 2.0%の応答スペクトルを示している。また、応答スペクトル図では、フレーム及び大梁の主要な振動モードの固有周期を縦破線で示し各基準地震動 S_s の応答スペクトルを重ね合わせて比較する。

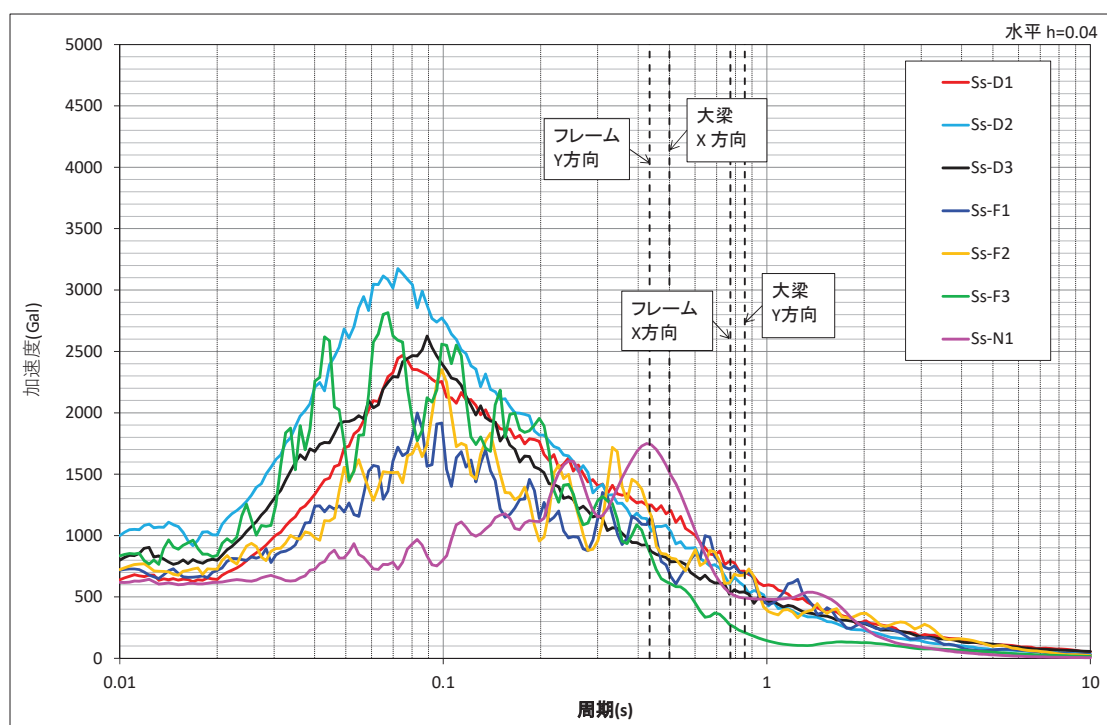
竜巻防護ネットの固有周期は、1 次モードで最長 0.86 秒(大梁、水平 Y 方向)であり、原子力発電所免震構造設計技術指針(JEAG4614-2013)に記載されている免震の一般的な固有周期の範囲である 2~4 秒に比べ、十分に短周期側の構造となることから、原子力発電所耐震設計技術指針(JEAG4601)に基づき、基準地震動 S_s に対する耐震設計を行う。

本評価で使用する竜巻防護ネットの解析モデルについて、添付 4-1 表に固有値解析結果を、添付 4-3 図にモード図を示す。各モードのうち特徴的な挙動が確認されているモードについて以下に解説する。

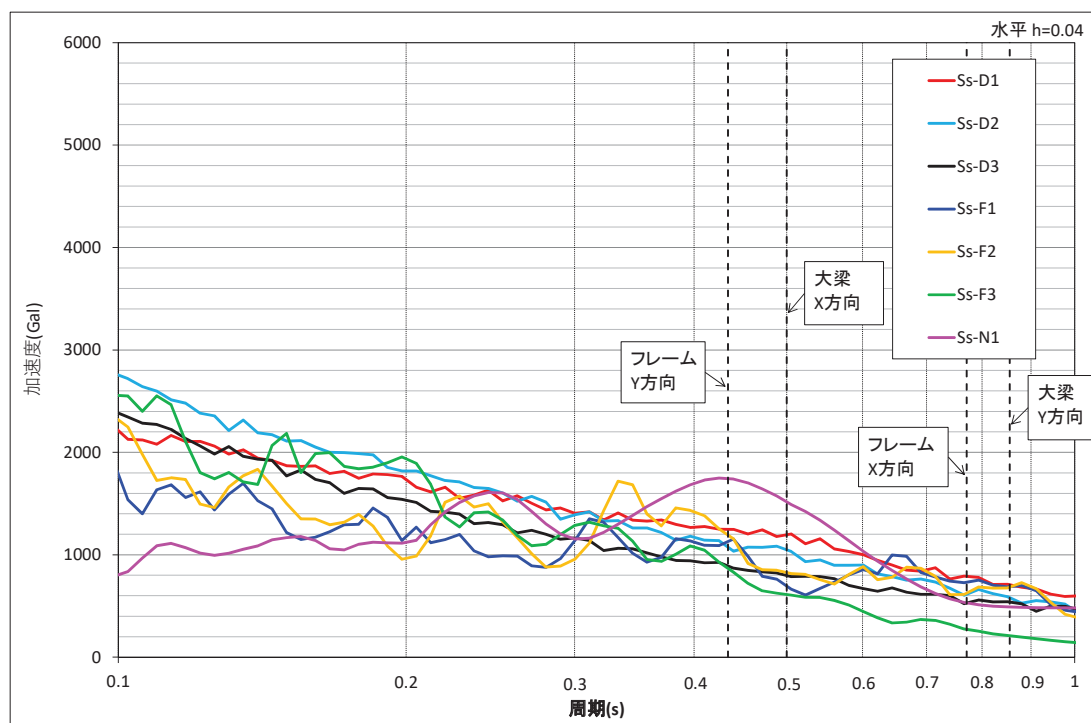
- 1 次モード：大梁のゴム支承が Y 方向に変形するモード
- 2 次モード：両端のフレーム (FR1, 5) が中央 3 枚 (FR2, 3, 4) のフレームよりも質量が大きいため、FR1, 5 のゴム支承のみが X 方向に変形するモード
- 3 次モード：2 次モードの逆位相モード
- 4 次モード：中央のフレーム (FR3) と隣接のフレーム (FR2, 4) は防護板設置の関係上形状が異なる。そのため、FR3 が FR2, 4 より質量が若干重いことから、中央のフレームのゴム支承のみが X 方向に変形するモード
- 5 次モード：FR2, 3 のゴム支承が X 方向に変形するモード
- 6 次モード：5 次モードの逆位相モード
- 7 次モード：大梁のゴム支承が X 方向に変形するモード
- 8 次モード：FR1, 5 のゴム支承が逆位相で Y 方向に変形するモード
- 9 次モード：FR1, 5 のゴム支承が Y 方向に変形するモード
- 10 次モード：FR2, 3, 4 のゴム支承が Y 方向に変形するモードで FR2, 4 と FR3 が逆位相となるモード
- 11 次モード：FR2, 4 のゴム支承が逆位相で Y 方向に変形するモード
- 12 次モード：全フレームのゴム支承が Y 方向に変形するモード
- 13 次モード：大梁が Z 方向に変形するモード

- 14 次モード：大梁のゴム支承が逆位相で変形するモード
- 15 次モード：FR1, 5 が逆位相で Z 方向に変形するモード
- 16 次モード：15 次モードの同位相モード

(1) 基準地震動 S_s の応答スペクトル

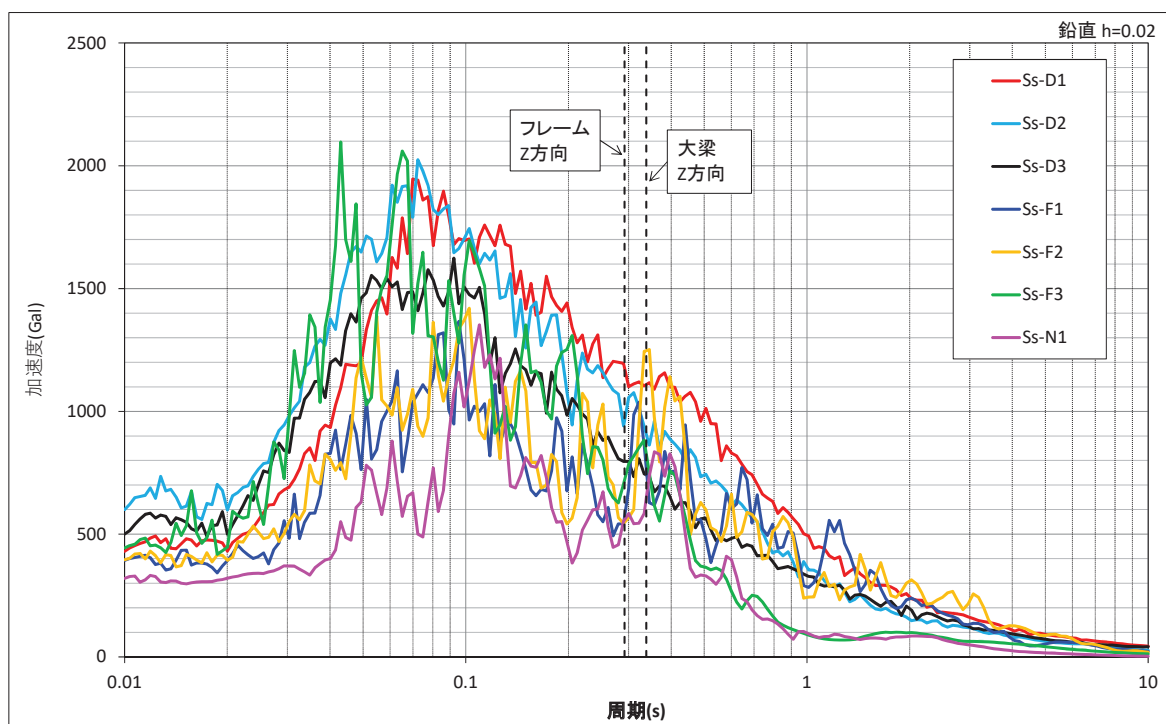


(a) 水平方向 減衰定数 4.0% 全体表示

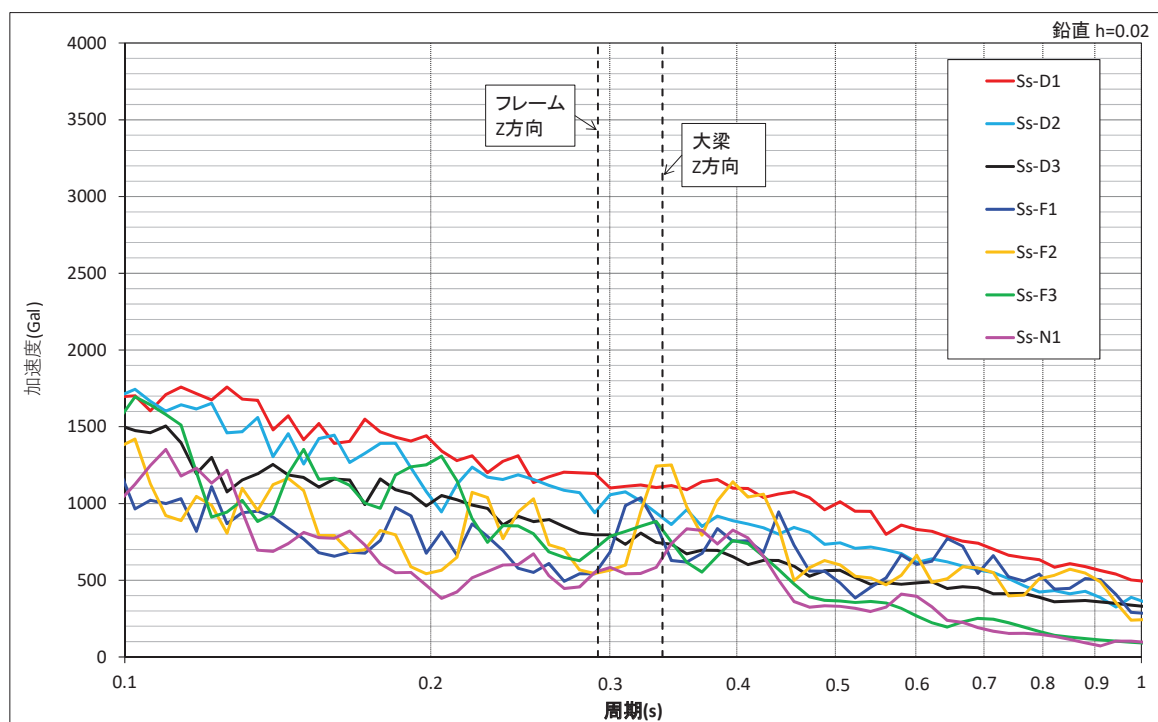


(b) 水平方向 減衰定数 4.0% 拡大表示

添付 4-1 図 基準地震動 S_s の応答スペクトル図 (1/2)



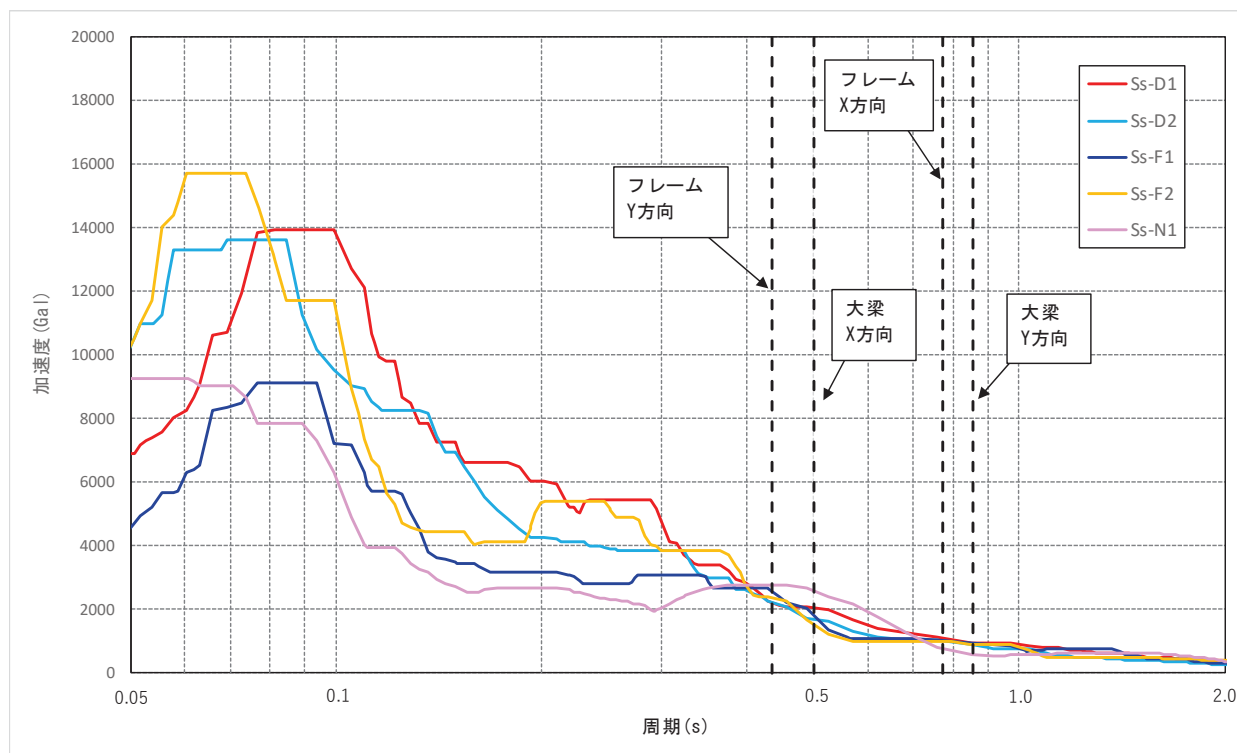
(c) 鉛直方向 減衰定数 2.0% 全体表示



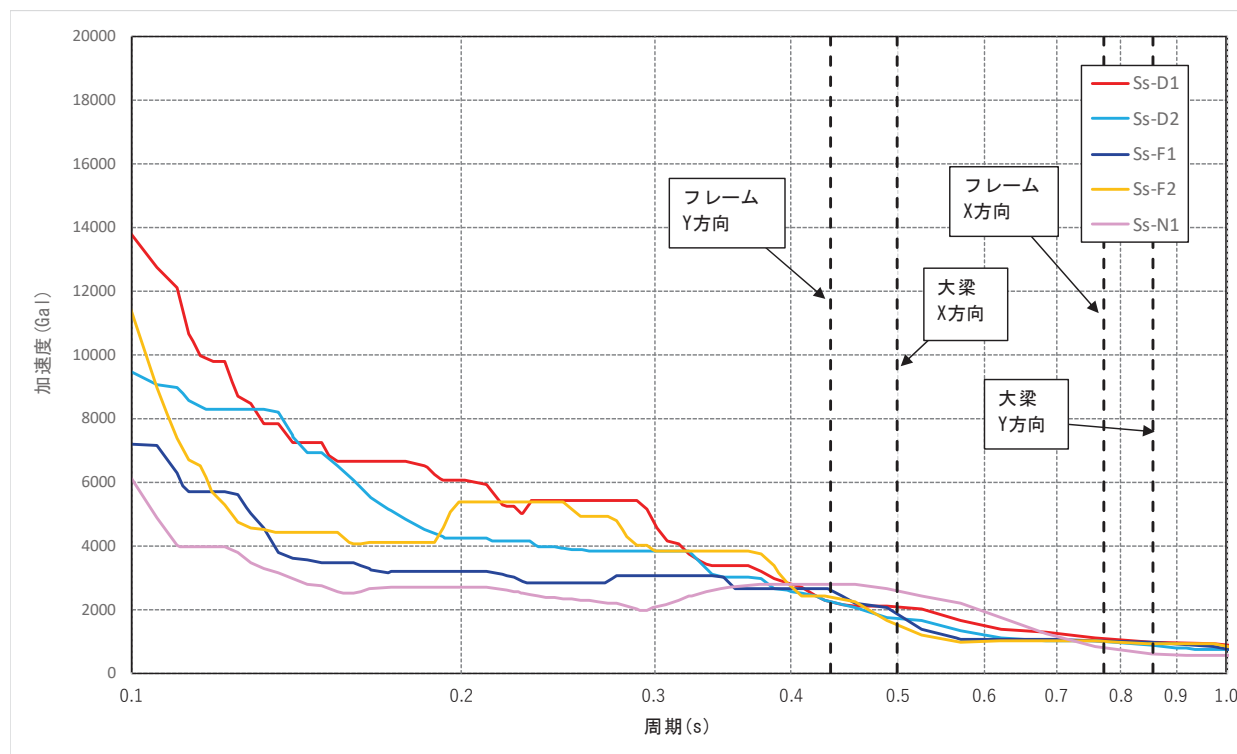
(d) 鉛直方向 減衰定数 2.0% 拡大表示

添付 4-1 図 基準地震動 S_s の応答スペクトル図 (2/2)

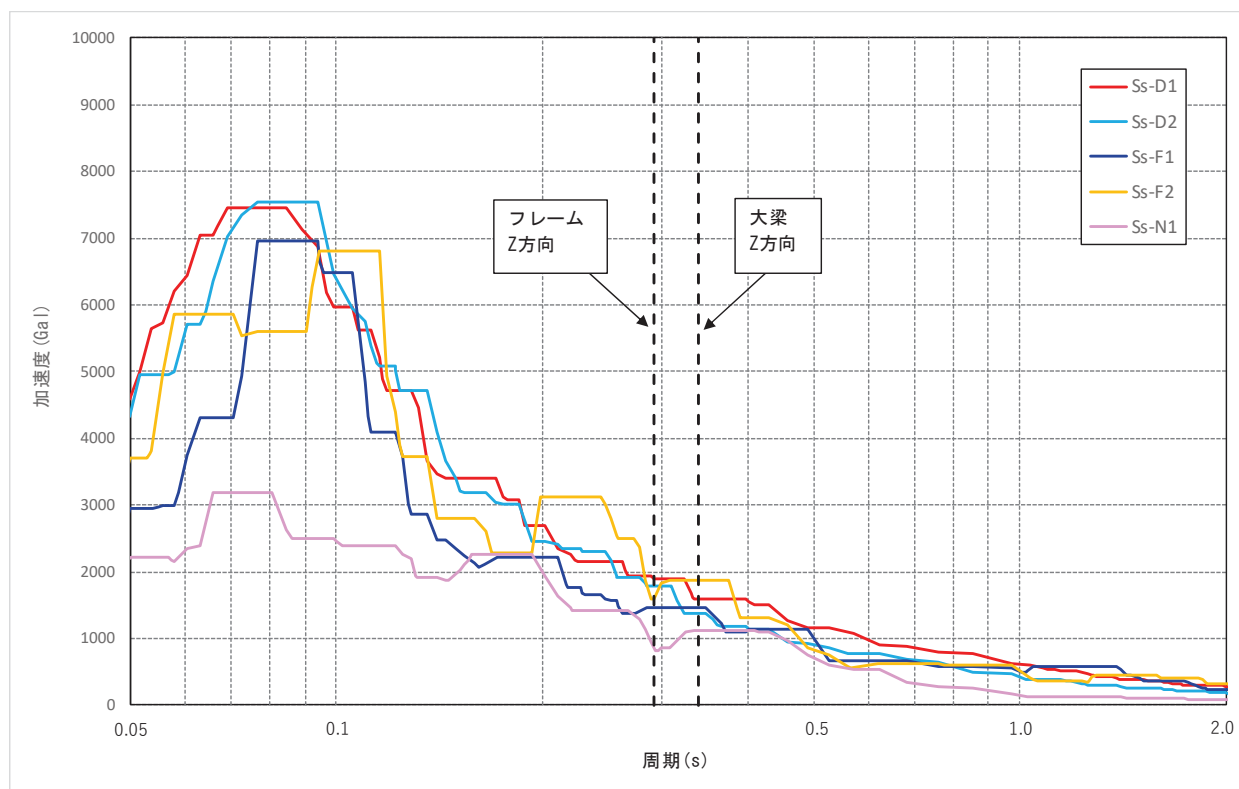
(2) 設計用床応答スペクトル



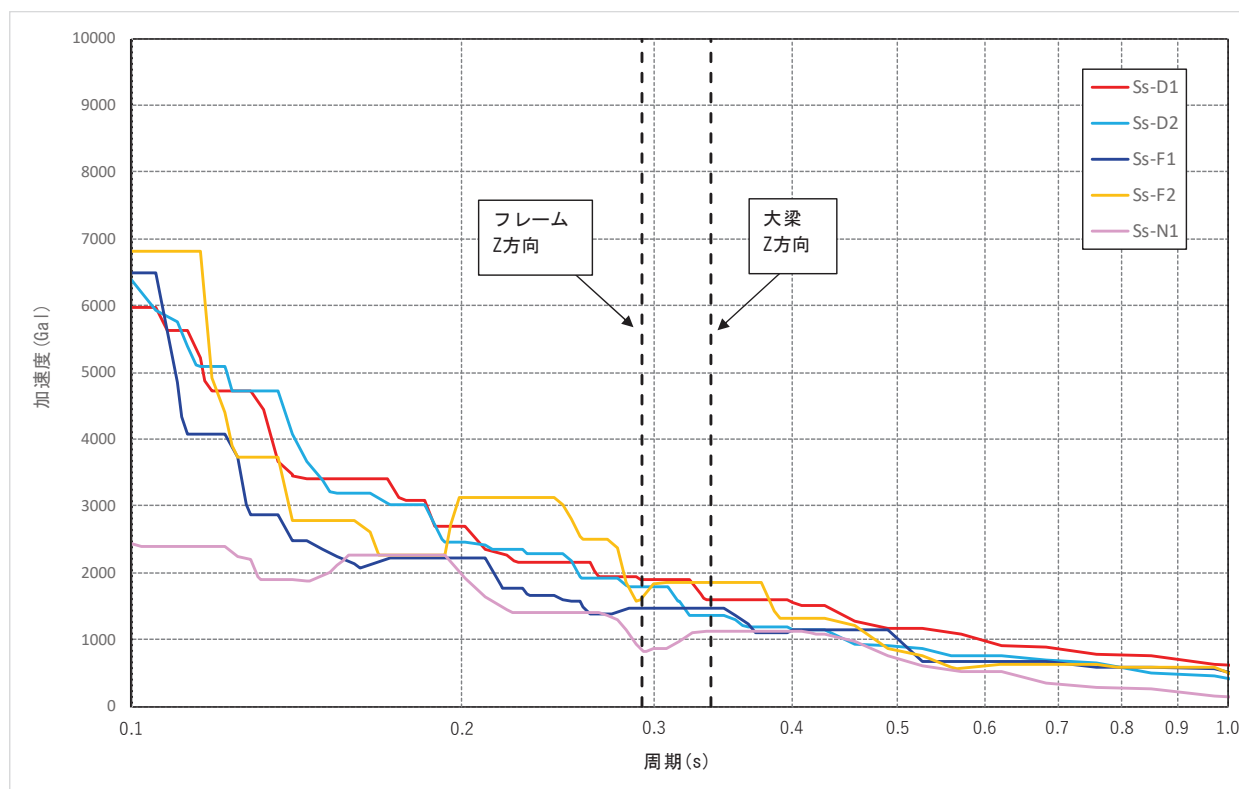
(a) 水平方向 減衰定数 4.0% 全体表示



(b) 水平方向 減衰定数 4.0% 拡大表示
添付 4-2 図 設計用床応答スペクトル図 (1/2)



(c) 鉛直方向 減衰定数 2.0% 全体表示



(d) 鉛直方向 減衰定数 2.0% 拡大表示
添付 4-2 図 設計用床応答スペクトル図 (2/2)

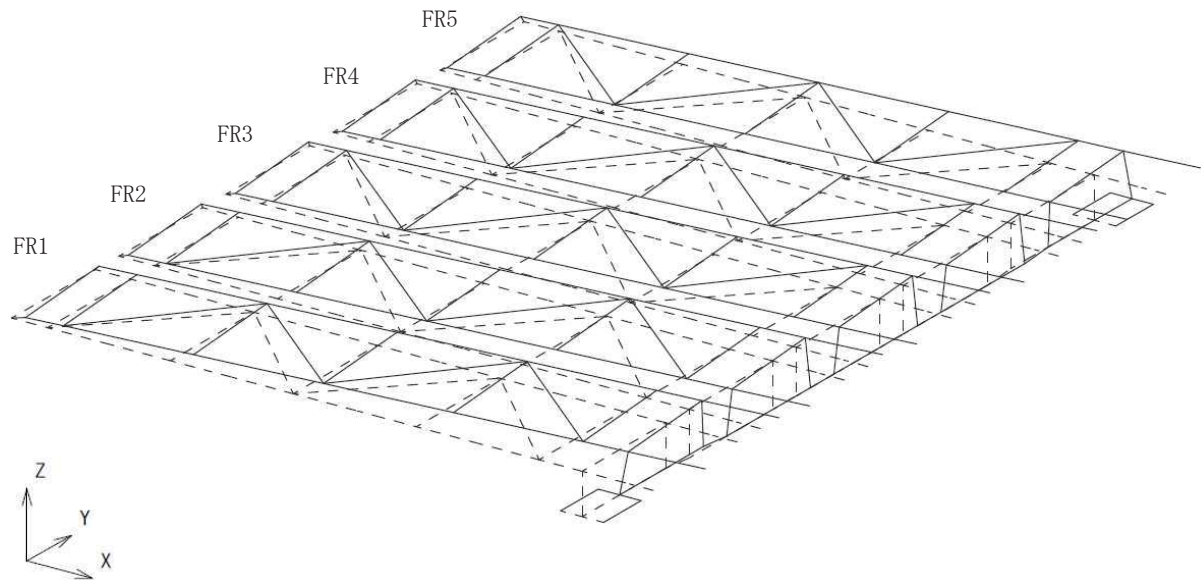
添付 4-1 表 固有値解析結果

次数	振動数 (Hz)	周期T (s)	刺激係数			有効質量比			備考
			β_x	β_y	β_z	X	Y	Z	
1	1.170	0.855	0.000	1.314	0.000	0.0%	81.8%	0.0%	大梁 水平Y方向 1次
2	1.297	0.771	1.004	0.000	0.000	36.9%	0.0%	0.0%	フレーム (FR1, FR5) 水平X方向 1次 (FR1とFR5が同位相)
3	1.298	0.771	0.000	-0.098	0.000	0.0%	0.4%	0.0%	フレーム (FR1, FR5) 水平X方向 1次 (FR1とFR5が逆位相)
4	1.431	0.699	1.001	0.000	0.000	15.2%	0.0%	0.0%	フレーム (FR3) 水平X方向 1次
5	1.433	0.698	-1.002	0.000	0.000	30.3%	0.0%	0.0%	フレーム (FR2, FR4) 水平X方向 1次 (FR2とFR4が同位相)
6	1.433	0.698	0.000	0.001	0.000	0.0%	0.0%	0.0%	フレーム (FR2, FR4) 水平X方向 1次 (FR2とFR4が逆位相)
7	2.000	0.500	1.061	0.000	0.000	17.6%	0.0%	0.0%	大梁 水平X方向 1次
8	2.268	0.441	0.025	0.000	-0.006	0.0%	0.0%	0.0%	フレーム (FR1, FR5) 水平Y方向 1次 (FR1とFR5が逆位相)
9	2.305	0.434	0.000	-0.660	0.000	0.0%	4.2%	0.0%	フレーム (FR1, FR5) 水平Y方向 1次 (FR1とFR5が同位相)
10	2.502	0.400	0.001	-0.053	0.000	0.0%	0.0%	0.0%	フレーム (FR2, FR3, FR4) 水平Y方向 1次
11	2.505	0.399	-0.001	0.000	0.000	0.0%	0.0%	0.0%	フレーム (FR2, FR4) 水平Y方向 1次
12	2.571	0.389	0.000	0.940	0.000	0.0%	13.6%	0.0%	フレーム (全体) 水平Y方向 1次
13	2.959	0.338	0.000	0.000	1.428	0.0%	0.0%	61.7%	大梁 鉛直Z方向 1次
14	3.281	0.305	0.000	0.000	0.000	0.0%	0.0%	0.0%	大梁 水平X方向 2次
15	3.425	0.292	0.000	0.000	0.000	0.0%	0.0%	0.0%	主桁 (G1R, G5L) 鉛直Z方向 1次 (G1RとG5Lが逆位相)
16	3.425	0.292	0.000	0.000	1.150	0.0%	0.0%	11.9%	主桁 (G1R, G5L) 鉛直Z方向 1次 (G1RとG5Lが同位相)
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	

*網掛け部は水平方向の変形モードを示す。

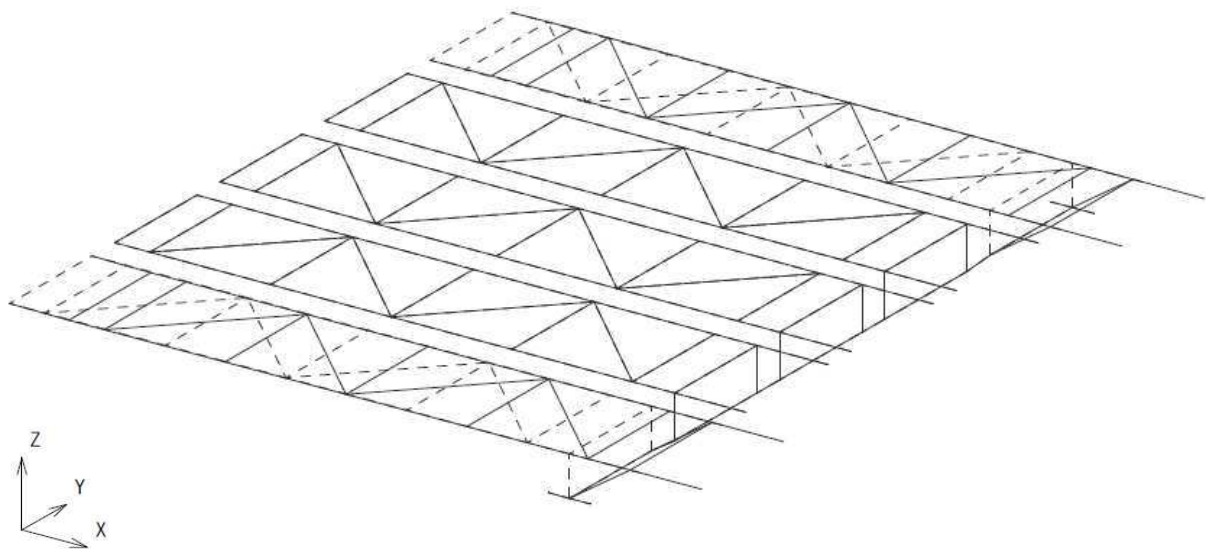
モード 1

振動数 1.170H z



モード 2

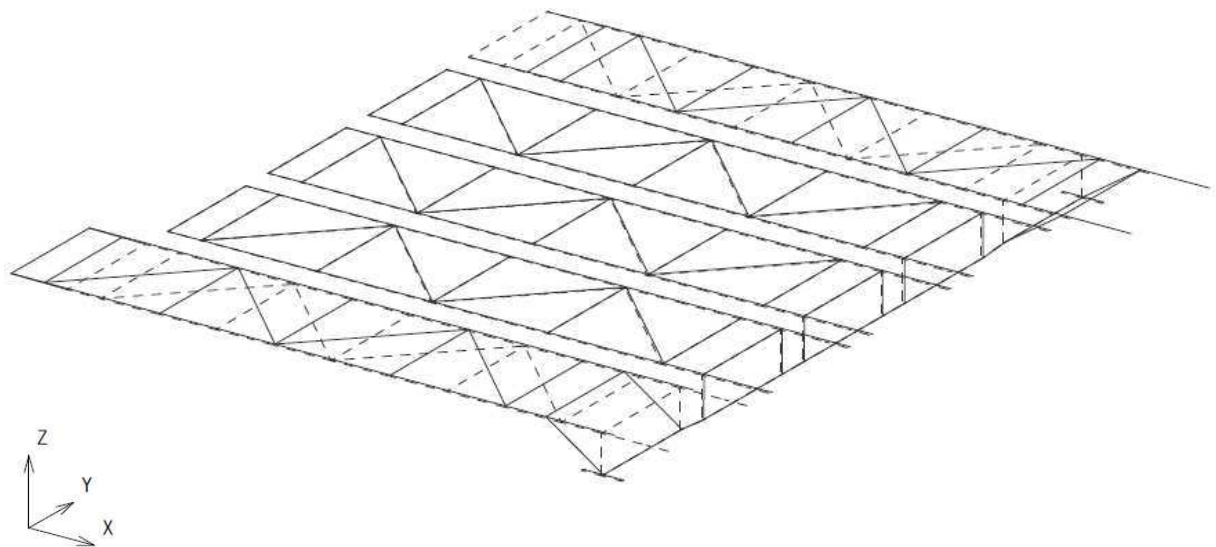
振動数 1.297H z



添付 4-3 図 モード図(1/8)

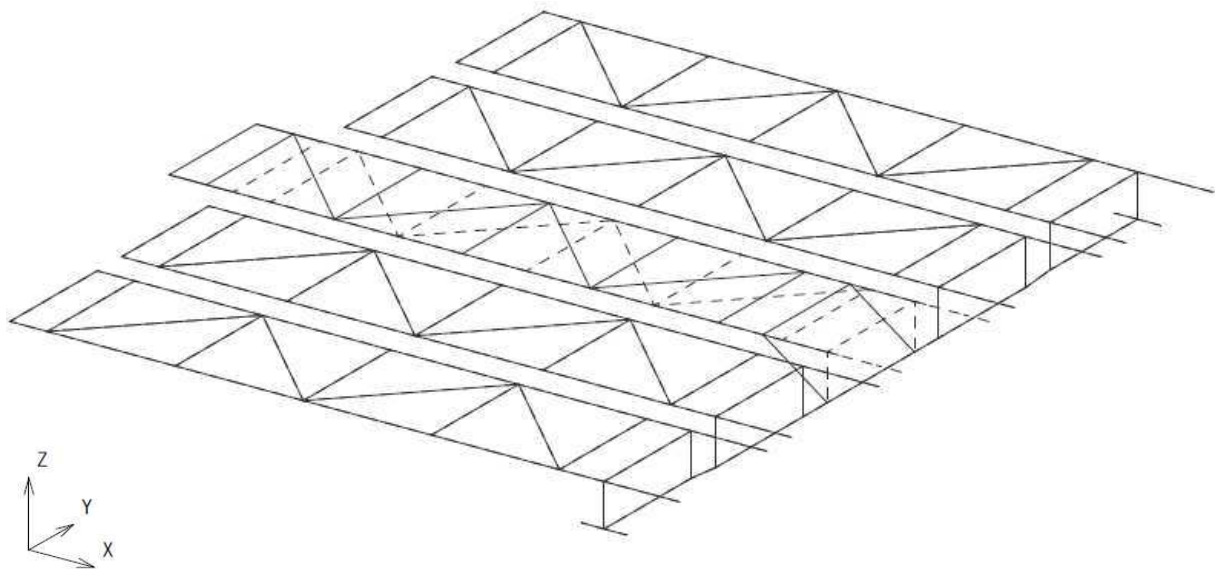
モード 3

振動数 1.298H z



モード 4

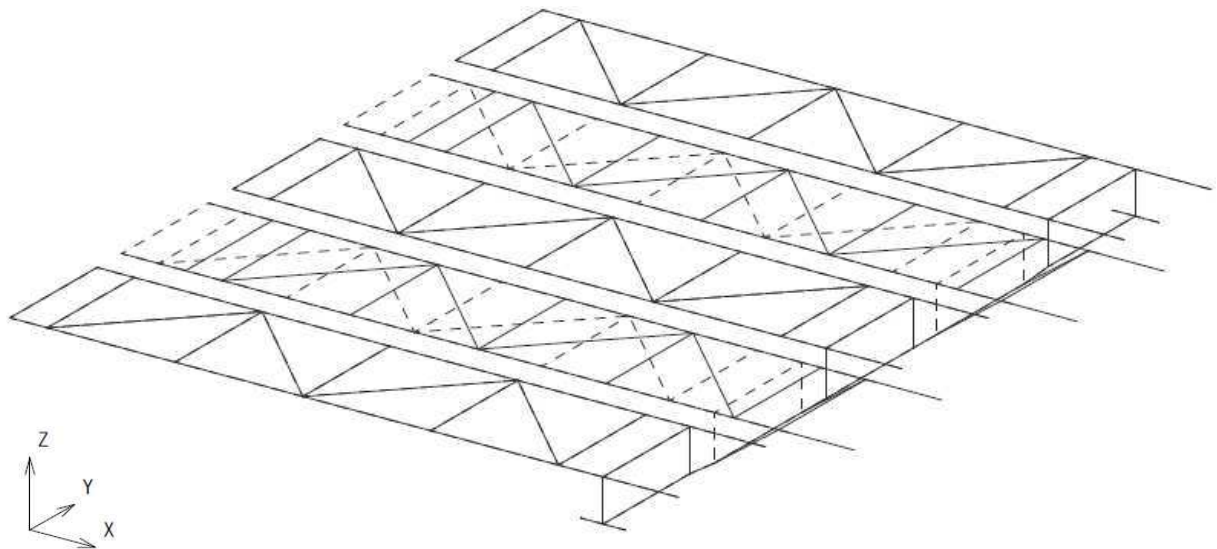
振動数 1.431H z



添付 4-3 図 モード図 (2/8)

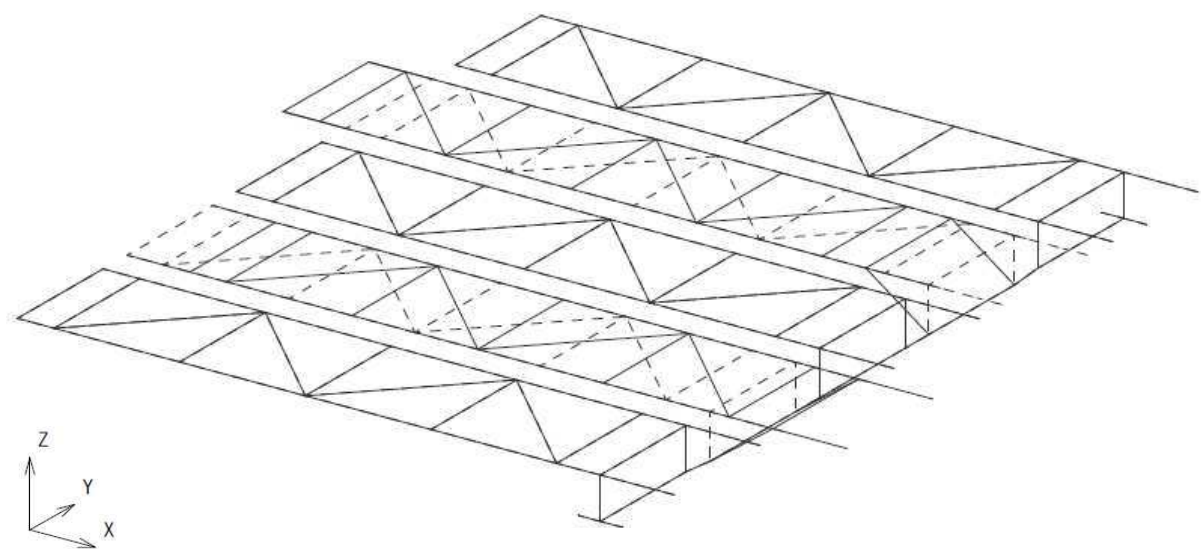
モード 5

振動数 1.433H z



モード 6

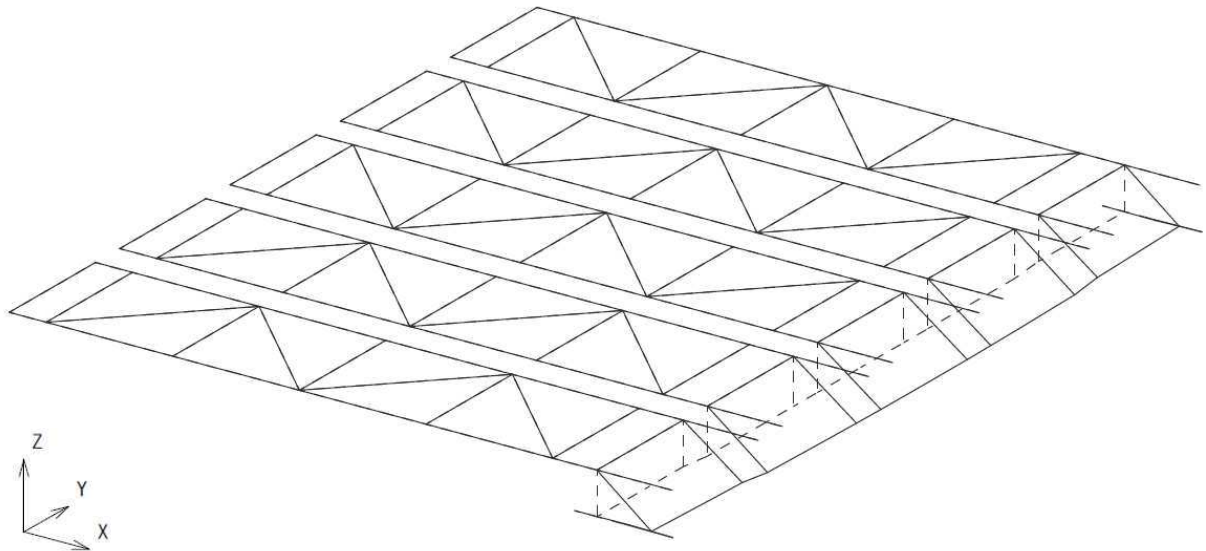
振動数 1.433H z



添付 4-3 図 モード図 (3/8)

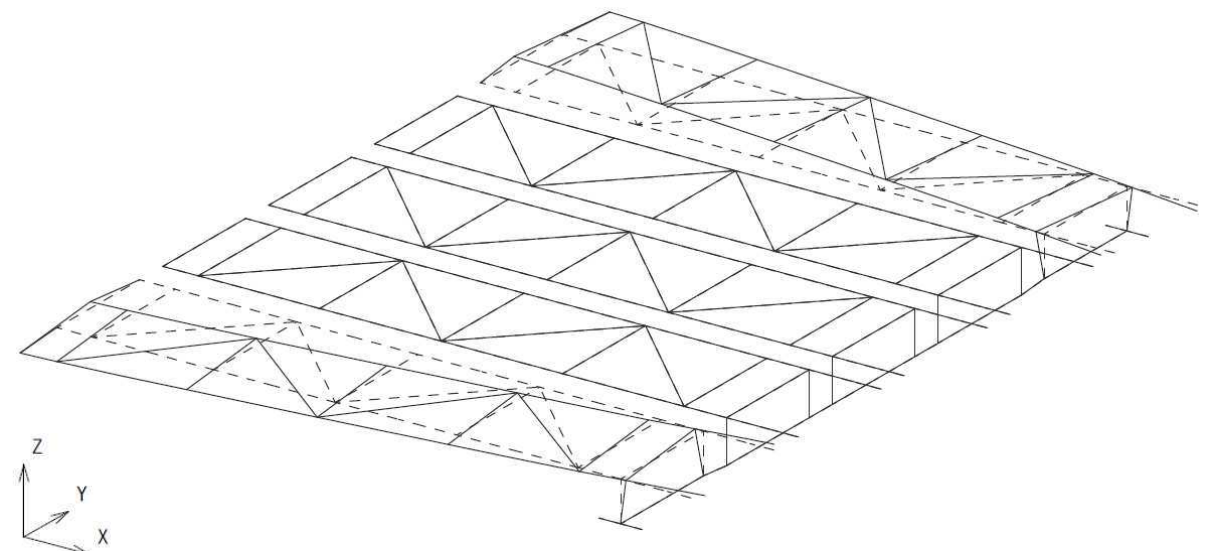
モード 7

振動数 2.000H z



モード 8

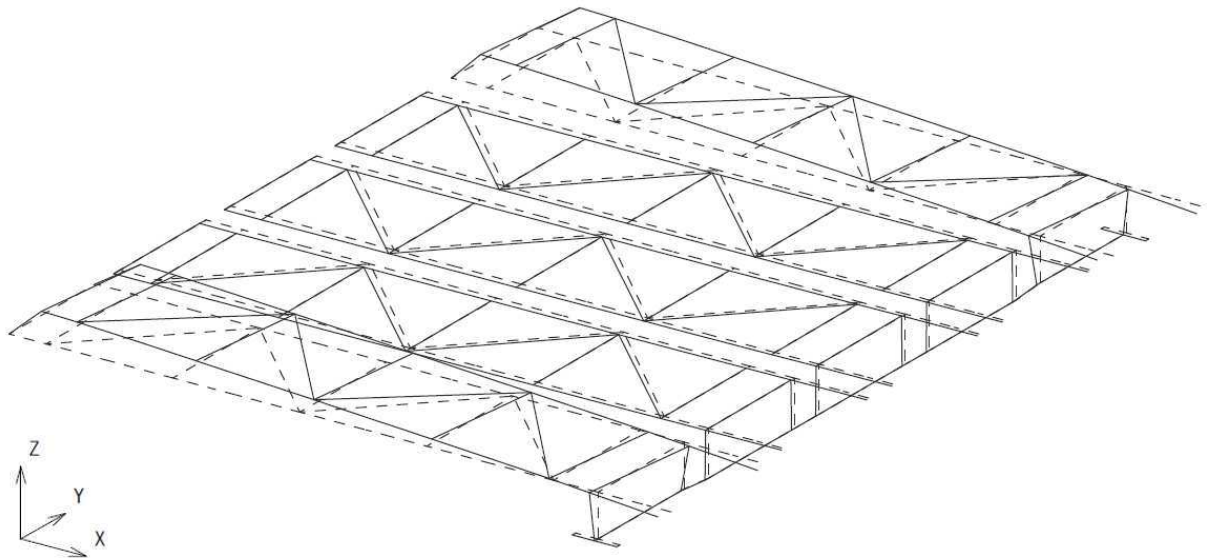
振動数 2.268H z



添付 4-3 図 モード図 (4/8)

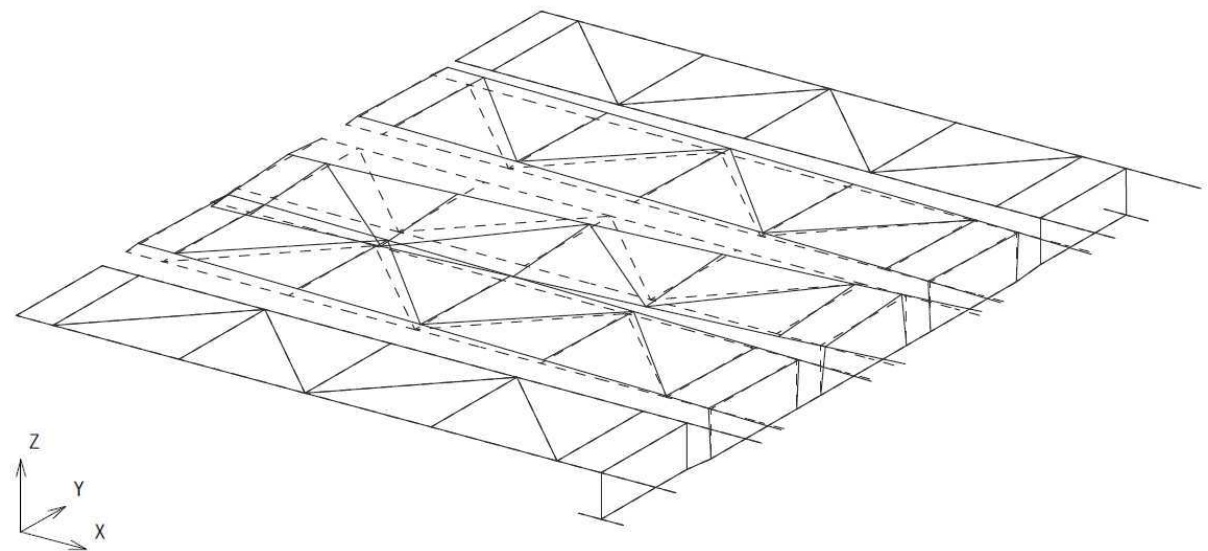
モード 9

振動数 2.305H z



モード 10

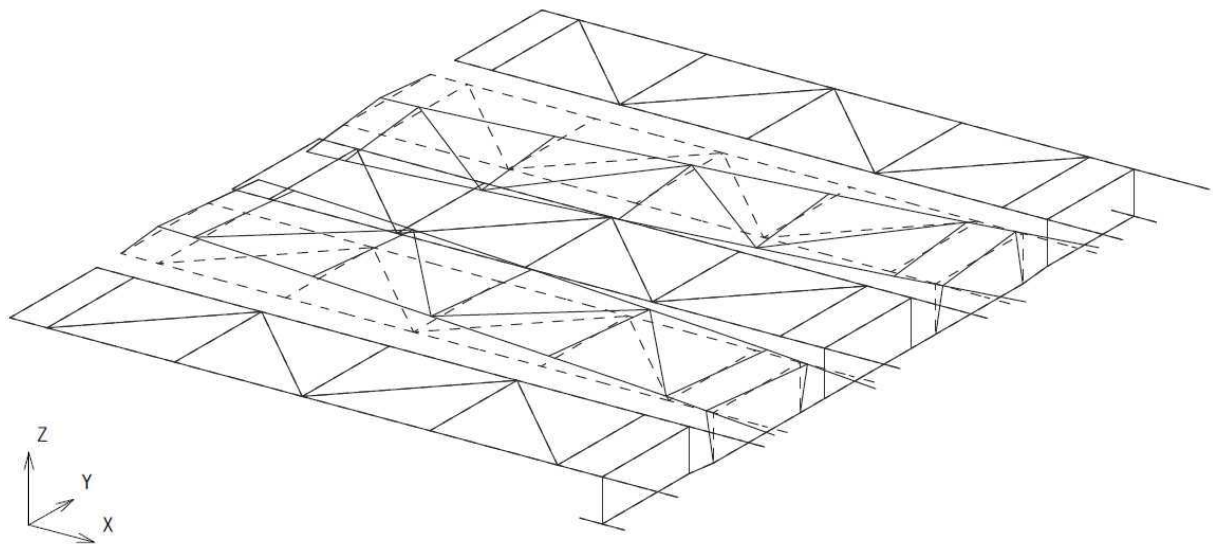
振動数 2.502H z



添付 4-3 図 モード図(5/8)

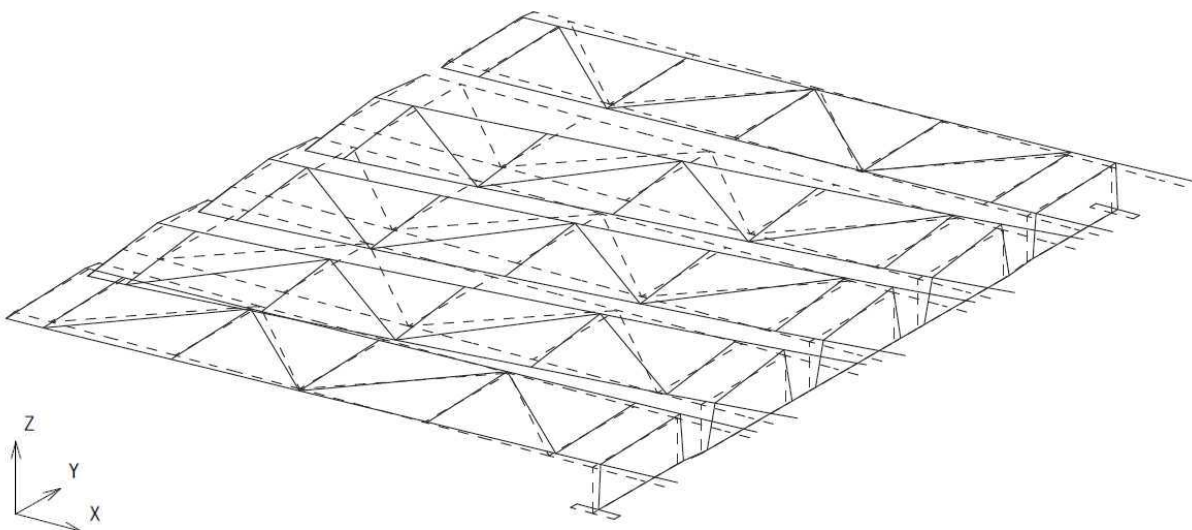
モード 11

振動数 2.505H z



モード 12

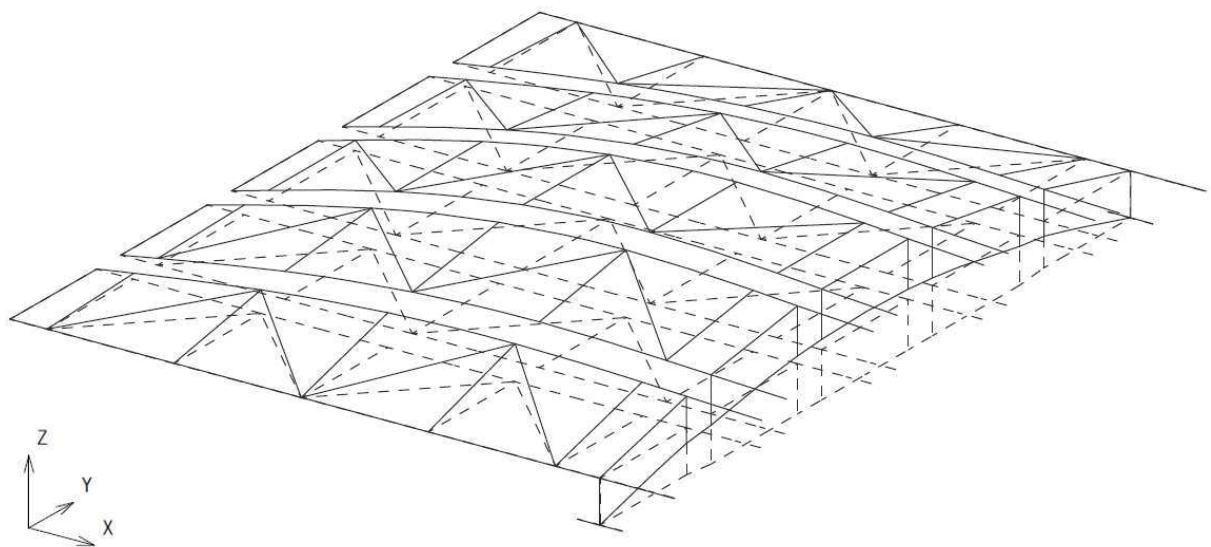
振動数 2.571H z



添付 4-3 図 モード図 (6/8)

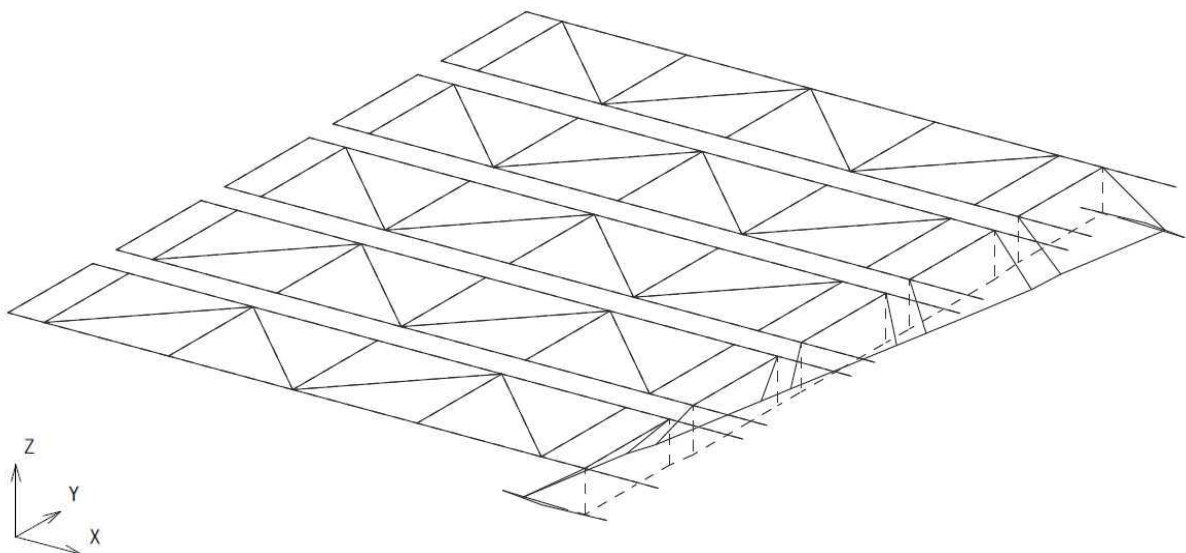
モード 13

振動数 2.959Hz



モード 14

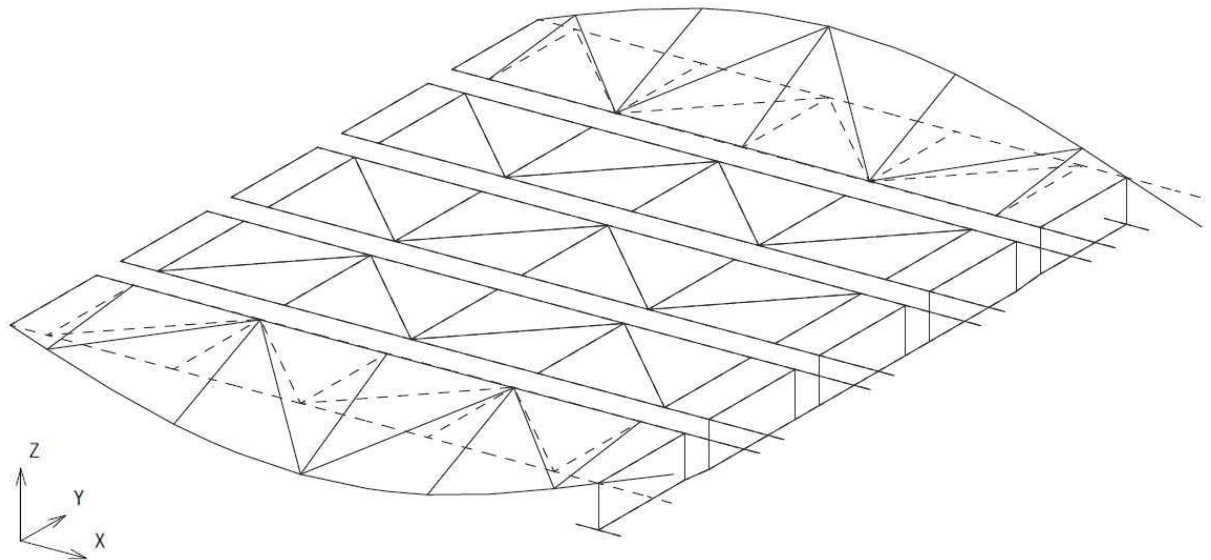
振動数 3.281Hz



添付 4-3 図 モード図(7/8)

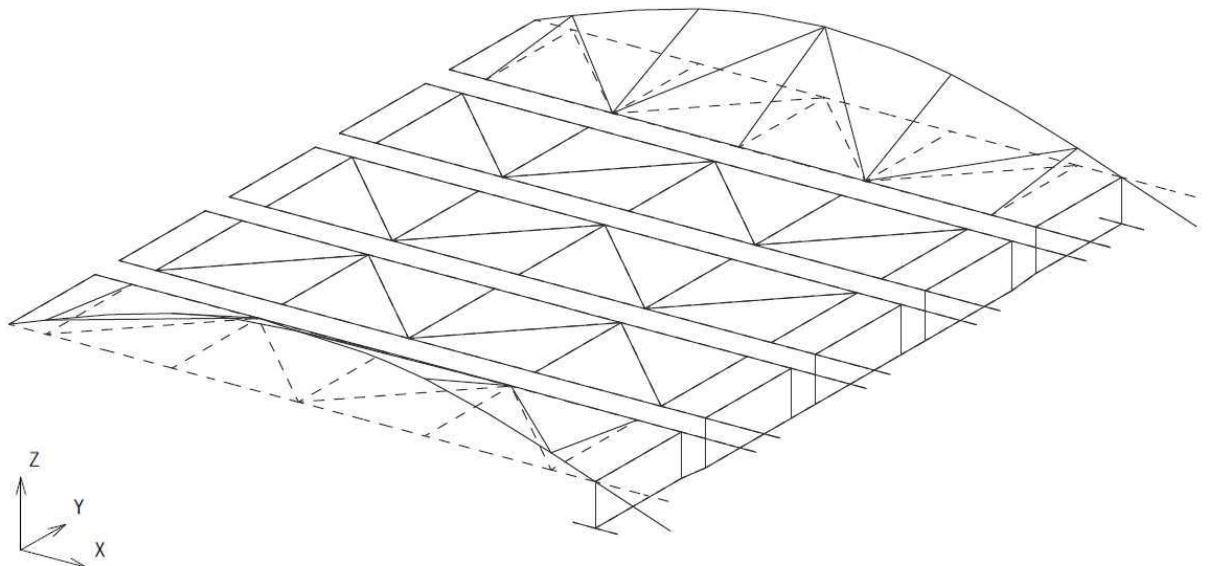
モード 15

振動数 3.425H z



モード 16

振動数 3.425H z



添付 4-3 図 モード図(8/8)

地震時における異常要因分析 (1/5)

評価対象		作用荷重	損傷モード	評価項目	評価基準値	設計要求事項
ネット (金網部)	ネット	水平方向の地震荷重	破断によるネットの落下	地震時に作用する荷重は竜巻飛来物衝突時に作用する荷重よりも小さいため、耐震性の評価は竜巻飛来物衝突評価に包絡される		
	ネット取付部材	鉛直方向の地震荷重 自重				
	組立ボルト	積雪荷重				
	主桁					
フレーム	横補強材	水平方向の地震荷重 鉛直方向の地震荷重 自重 積雪荷重	破断、座屈破壊によるフレームの落下	引張応力 せん断応力 圧縮応力 曲げ応力	JEAG4601・補-1984の許容応力	3 次元はりモデルによる応答解析によって算出した荷重から、部材の応力評価を実施
	ブレース					
	防護板取付金具					
	防護板		破断による落下	地震時に作用する荷重は竜巻飛来物衝突時に作用する荷重よりも小さいため、耐震性の評価は竜巻飛来物衝突評価に包絡される		
	防護板取付ボルト		破断による落下 破断による防護板の落下			
大梁	大梁フレーム	水平方向の地震荷重 鉛直方向の地震荷重 自重 積雪荷重	破断、座屈破壊による落下	引張応力 せん断応力 圧縮応力 曲げ応力	JEAG4601・補-1984の許容応力	3 次元はりモデルによる応答解析によって算出した荷重から、部材の応力評価を実施
ブラケット	ブラケット本体	水平方向の地震荷重 鉛直方向の地震荷重 自重 積雪荷重	破断による大梁の落下	引張応力 せん断応力 圧縮応力 曲げ応力	JEAG4601・補-1984の許容応力	3 次元はりモデルによる応答解析によって算出した荷重から、部材の応力評価を実施
	アンカーボルト		破断による大梁の落下	引張応力 せん断応力		

地震時における異常要因分析 (2/5)

評価対象	作用荷重	損傷モード	評価項目	評価基準値	設計要求事項
大梁ゴム支承	ゴム支承本体	ゴム体の破断による大梁の落下	引張応力	道路橋支承便覧（平成 16 年 4 月）に基づき 2.0N/mm ² と設定（実験より得られた破断応力に安全率 2.5 を考慮して設定）	3 次元はりモデルによる応答解析によって算出した、ゴム支承の荷重と変位に基づき応力評価及び変位評価を実施
			せん断ひずみ	道路橋支承便覧（平成 16 年 4 月）及び道路橋指示書・同解説 V 耐震設計編（平成 14 年 3 月）に基づき 250%と設定（試験にて適切性を確認）	
		ゴム体の座屈破壊による大梁の落下	圧縮応力（座屈安定性）	道路橋支承便覧（平成 16 年 4 月）に基づき設定（座屈を考慮した許容圧縮応力に対して十分な余裕を確保する）	
	ゴム支承取付ボルト	内部鋼板の破壊による大梁の落下	引張応力（内部鋼板）	JEAG4601・補-1984 の許容応力	
		破断による支承の支持機能喪失	引張応力 せん断応力	JEAG4601・補-1984 の許容応力	
		水平方向の地震荷重 鉛直方向の地震荷重 自重 積雪荷重			

地震時における異常要因分析 (3/5)

評価対象	作用荷重	損傷モード	評価項目	評価基準値	設計要求事項
フレームゴム 支承	ゴム支承本体	ゴム体の破断 によるフレー ムの落下	引張応力	道路橋支承便覧（平成 16 年 4 月）に基づき 2.0N/mm2 と 設定（破断応力に安全率 2.5 を考慮して設定）	3 次元はりモデルによる応答解析 によって算出した、ゴム支承の荷 重と変位に基づき応力評価及び変 位評価を実施
			せん断ひずみ	道路橋支承便覧（平成 16 年 4 月）及び道路橋指示書・同 解説 V 耐震設計編（平成 14 年 3 月）に基づき 250%と設 定（試験にて適切性を確認）	
		ゴム体の座屈 破壊によるフ レームの落下	圧縮応力 （座屈安定性）	道路橋支承便覧（平成 16 年 4 月）に基づき設定（座屈を 考慮した許容圧縮応力に対 して十分な余裕を確保す る）	
	ゴム支承取付ボルト アンカーボルト	内部鋼板の破 壊による大梁 の落下	引張応力 （内部鋼板）	JEAG4601・補-1984 の許容応 力	
		破断による支 承の支持機能 喪失	引張応力 せん断応力	JEAG4601・補-1984 の許容応 力	

地震時における異常要因分析 (4/5)

評価対象		作用荷重	損傷モード	評価項目	評価基準値	設計要求事項
可動支承	すべり材	水平方向の地震荷重 鉛直方向の地震荷重 自重 積雪荷重	圧縮破壊による機能喪失	支圧応力	メーカーの強度試験に基づき算出した許容応力	各部位の評価基準値より可動支承全体の許容荷重を設定。 3 次元はりモデルによる応答解析によって算出した可動支承に負荷する荷重と上記許容荷重を比較し評価を実施
	圧縮ゴム		圧縮破壊による機能喪失	支圧応力		
	ピストン		破断による機能喪失	曲げ応力	JEAG4601・補-1984 の許容応力	
	座金		圧縮破壊による機能喪失	支圧応力		
	ベースポット突出部		破断によるフレームの落下	せん断応力 曲げ応力 支圧応力		
	ベースポット支圧部		圧縮破壊による機能喪失	支圧応力		
	レール		破断によるフレームの落下	曲げ応力 引張応力 せん断応力		
	レール取付ボルト		破断によるフレームの落下	引張応力 せん断応力		
	エンドプレート接合ボルト		破断によるフレームの落下	引張応力		
	上部接合ボルト		破断によるフレームの落下	引張応力 せん断応力		
	下部接合ボルト		破断によるフレームの落下	引張応力 せん断応力		
	ベースプレート		破断によるフレームの落下	せん断応力 曲げ応力		
摺動部	ストッパーへの衝突を起因とした損傷によるフレームの落下	移動量	構造設計から求められるクリアランスから設定する許容値（衝突防止）	3 次元はりモデルによる応答解析によって算出した可動支承部の変位と評価基準値との比較評価を実施		

地震時における異常要因分析 (5/5)

評価対象	作用荷重	損傷モード	評価項目	評価基準値	設計要求事項
フレーム間のクリアランス	水平方向の地震荷重 鉛直方向の地震荷重 自重 積雪荷重	部材同士の衝突を起因とした損傷によるフレームの落下	相対変位	構造設計から求められるクリアランスから設定する許容値。(衝突防止)	3 次元はりモデルによる応答解析によって算出した各部位の相対変位を用いて、評価基準値との比較評価を実施
・フレームー隣接構造物 (門型クレーン, 防潮壁) ・フレームー側壁 ・フレームー隔壁 それぞれのクリアランス	水平方向の地震荷重 鉛直方向の地震荷重 自重 積雪荷重	側壁等への衝突を起因とした損傷によるフレームの落下	相対変位	構造設計から求められるクリアランスから設定する許容値。(衝突防止)	3 次元はりモデルによる応答解析によって算出した各部位の相対変位を用いて、評価基準値との比較評価を実施

ゴム支承及び可動支承の耐震設計について

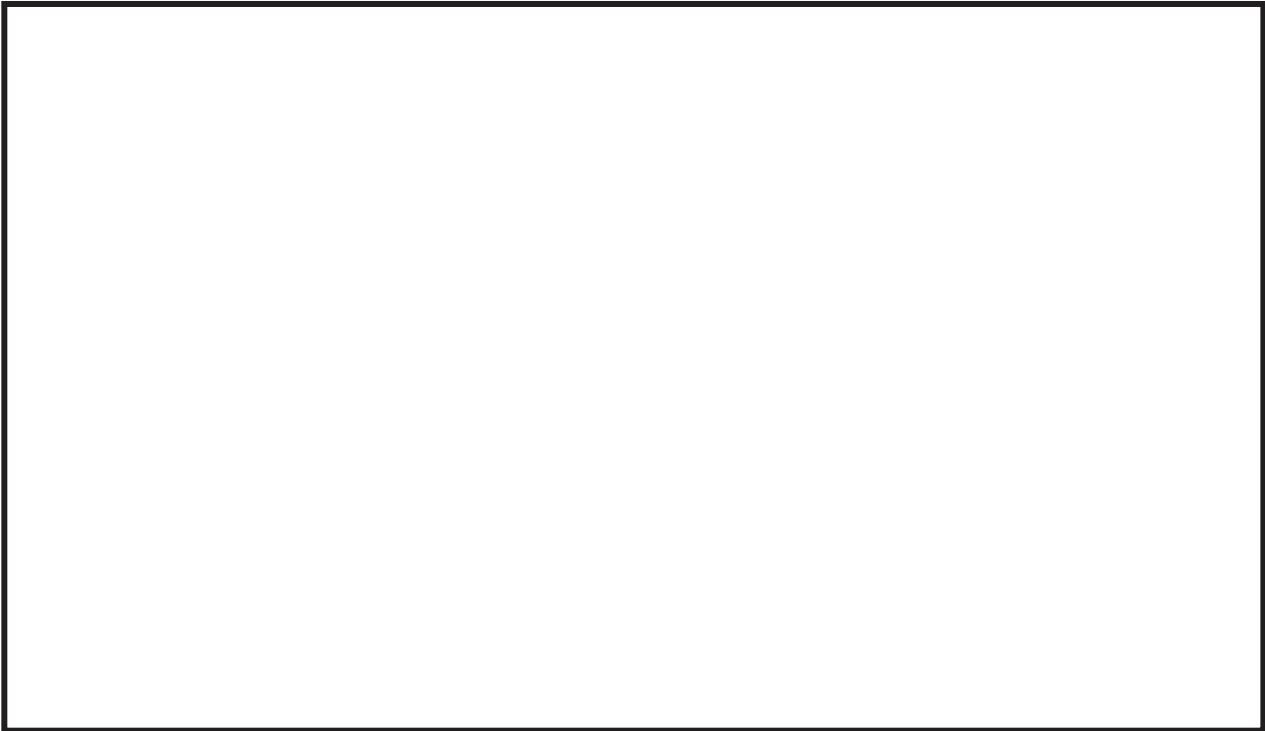
1. ゴム支承

1.1 構造概要

竜巻防護ネットに使用するゴム支承の構造諸元を添付 6-1 表に, 構造図を添付 6-1 図に示す。また, ゴム支承に使用するゴム材料の規格は道路橋支承便覧¹⁾に定められており, シート加硫したゴム試験片を用いて添付 6-2 表に示す破断伸び以上であることを検証する。

添付 6-1 表 ゴム支承の構造諸元

項目	大梁／フレーム 接続部 (大梁ゴム支承)	フレーム／隔壁 接続部 (主桁ゴム支承)
支承種類	地震時水平力分散型ゴム支承	
ゴム体種類	天然ゴム (NR)	
ゴム体有効平面寸法	800mm×800mm	550mm×550mm
総ゴム厚 (ゴム厚×層数)	192mm (24mm×8 層)	135mm (15mm×9 層)
せん断弾性係数	1. 0N/mm ² (G10)	1. 2N/mm ² (G12)
一次形状係数	8. 33	9. 17
二次形状係数	4. 17	4. 07
水平剛性	3. 333kN/mm	2. 689kN/mm
鉛直剛性	972kN/mm	863kN/mm



添付6-1図 ゴム支承の構造図

添付 6-2 表 ゴム材料の基本特性の試験方法と規格値

項目	材料の種類	弾性係数の 呼び	破断伸び (%)	引張強さ (N/mm ²)	試験方法
基本特性	天然ゴム (NR)	G10	550 以上	15 以上	引張試験 JIS K 6251
		G12	500 以上		

本資料のうち、枠囲みの内容は商業機密又は防護上の観点から公開できません。

1.2 モデル化

地震時水平力分散型ゴム支承は天然ゴム系積層ゴム支承である。天然ゴム系積層ゴム支承は、地震時の水平力に対してほぼ線形的な変形特性を有する。したがって、地震応答解析において、ゴム支承を線形ばね要素でモデル化し、ゴム支承の水平荷重－水平変位の関係であるせん断剛性をばね要素のせん断ばね定数として設定する。また、ゴム支承の減衰特性は試験結果に基づき等価減衰定数として評価する。

1.3 せん断剛性

1.3.1 せん断剛性の設定方針

地震時水平力分散型ゴム支承は、道路橋支承便覧¹⁾に定められる算出式によりせん断剛性の設計値が求められる。道路橋支承便覧に基づき設計されたゴム支承は道路橋において数多くの納入実績を有し、納入前の製品検査においてせん断特性試験が行われ、せん断剛性の算出式の検証がなされている。本設備においても、製品検査時にせん断特性試験を実施し、せん断剛性の製品初期ばらつきが設計値の±10%以内であることを確認し設計値の妥当性を確認する。この製品初期ばらつき±10%については設計条件の1つとして耐震評価条件に考慮する。

また、ゴム支承は製品初期ばらつきとは別に、使用環境の温度変化等の諸条件によってもせん断剛性に变化が生じるため、今回、温度変化等の各種依存性試験を実施しせん断剛性の变化率を確認し、せん断剛性のばらつきに対する影響確認を実施する。

1.3.2 せん断剛性の算出式

ゴム支承のせん断剛性は次式で算出する値を設計値とする。

$$K_s = G_e \cdot A_e / \Sigma t_e$$

ここに

- K_s : ゴム支承のせん断剛性
- G_e : せん断弾性係数
- A_e : ゴム支承本体の側面被覆ゴムを除く面積
- Σt_e : 総ゴム厚

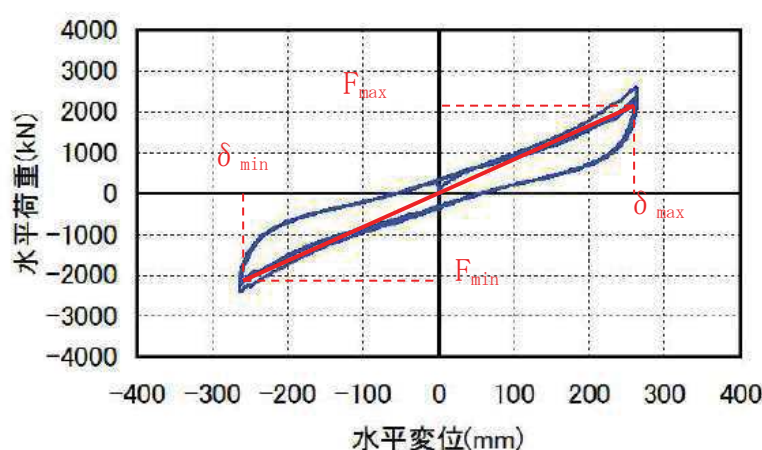
1.3.3 せん断剛性の製品確認試験

製品検査時のせん断特性試験において、固定荷重に相当する鉛直荷重を載荷した状態で総ゴム厚の175%の水平変位を正負繰返し与え、そのときのせん断剛性が設計値に対して±10%以内であることを確認する。地震時水平力分散型ゴム支承は繰返し回数3回目の値をせん断剛性とする。せん断剛性は次式により算出する。また、せん断剛性の算出方法のイメージを添付6-2図に示す。

$$K_{se} = (F_{max} - F_{min}) / (\delta_{max} - \delta_{min})$$

ここに

- K_{se} : ゴム支承のせん断剛性(試験結果)
- F_{max} : 最大荷重
- δ_{max} : せん断ひずみ (+175%変位)
- F_{min} : 最小荷重
- δ_{min} : せん断ひずみ (-175%変位)



添付 6-2 図 セン断剛性の算出方法

1. 3. 4 セン断剛性の各種確認試験

ゴム支承は使用温度や経年変化等の影響によりせん断剛性が変化する。これらの因子による特性変化を確認するため各種試験を実施する。試験の実施項目は JIS K 6411²⁾に従い、添付 6-3 表のとおりとする。

1. 3. 4. 1 試験方法

各種依存性試験及び熱老化特性試験について、試験方法を以下に示す。

試験は「JIS K 6411:2012」の試験方法を参考に設計における適用条件を踏まえ試験条件を設定する。試験体は、「JIS K 6411:2012」に従い各試験項目に対応した標準試験体を用いる。ゴム材料の種別は、実機に適用する G10 と G12 の 2 種類を実施する。各試験における鉛直荷重は実機における固定荷重相当を基準とする。試験項目、測定項目及び試験体を添付 6-4 表に示す。

添付 6-3 表 セン断特性試験項目

試験	項目	内容
各種依存性試験	せん断ひずみ依存性	複数のせん断ひずみを与えたときのせん断特性の依存性を求める。
	圧縮応力依存性	鉛直荷重の変化に対するせん断特性の依存性を求める。
	振動数依存性	水平振動数の変化に対するせん断特性の依存性を求める。
	繰返し数依存性	地震時の繰返し荷重に対するせん断特性の依存性を求める。
	温度依存性	使用環境の温度変化に対するせん断特性の依存性を求める。
熱老化特性試験	経年変化	熱老化試験により熱老化前後のせん断特性の経年変化を求める。

添付 6-4 表 セン断特性試験の試験項目と試験体

試験	測定項目	試験体		
		適用規格	形状	せん断 弾性係数
各種依存性試験 ・せん断ひずみ ・圧縮応力 ・振動数 ・繰返し数 ・温度	せん断特性 ・せん断剛性 ・等価減衰定数	JIS K6411:2012 標準試験体 No. 3*	有効平面寸法 400mm×400mm 総ゴム厚 54mm (9mm×6 層)	G10 大梁用 1.0N/mm ² G12 フレー ム用 1.2N/mm ²
熱老化特性試験 ・経年変化	せん断特性 ・せん断剛性 ・等価減衰定数 せん断変形性能 ・破断せん断ひ ずみ	JIS K6411:2012 標準試験体 No. 2*	有効平面寸法 240mm×240mm 総ゴム厚 30mm (5mm×6 層)	G10 大梁用 1.0N/mm ² G12 フレー ム用 1.2N/mm ²

* JIS K6411 で寸法等が規定されている試験体

(1) セン断ひずみ依存性試験

試験体に複数のせん断ひずみを与えたときのせん断特性の依存性を求める。固定荷重に相当する圧縮応力 1.0N/mm² の鉛直荷重*を載荷した状態で、各せん断ひずみにおける正負繰返し加振を 3 回行い、3 回目の水平荷重－水平変位データよりせん断剛性と等価減衰定数を算出する。試験結果は、(3) 振動数依存性試験と(5) 温度依存性試験より求めた振動数補正式と温度補正式によって、基準振動数(0.5Hz)と基準温度(23℃)相当に補正したものを測定値とする。せん断剛性は、せん断ひずみ 175%の測定値を基準として各せん断ひずみとの変化率を求める。

(2) 圧縮応力依存性試験

試験体に複数の圧縮応力を与えたときのせん断特性の依存性を求める。複数の鉛直荷重を載荷した状態で、せん断ひずみ 175%による正負繰返し加振を 3 回行い、3 回目の水平荷重－水平変位データよりせん断剛性と等価減衰定数を算出する。試験結果は、(5) 温度依存性試験より求めた温度補正式によって、基準温度(23℃)相当に補正したものを測定値とする。せん断剛性は、固定荷重相当の圧縮応力 1.0N/mm² 時の測定値を基準として各圧縮応力との変化率を求める。

(3) 振動数依存性試験

試験体に複数の振動数を与えたときのせん断特性の依存性を求める。固定荷重に相当する圧縮応力 1.0N/mm² の鉛直荷重を載荷した状態で、各種振動数

にてせん断ひずみ 175%による正負繰返し加振を 3 回行い、3 回目の水平荷重-水平変位データよりせん断剛性と等価減衰定数を算出する。試験温度は 23℃（基準温度）とする。恒温槽で温度保持した試験体を取り出し試験を行う。せん断剛性は、基準振動数 0.5Hz 時の測定値を基準として各振動数との変化率を求める。

(4) 繰返し数依存性試験

試験体に繰返し水平加振 50 回を与えたときのせん断特性の変化を求める。まず、固定荷重に相当する圧縮応力 1.0N/mm^2 の鉛直荷重を載荷した状態で、せん断ひずみ 175%による正負繰返し加振を 3 回行い、3 回目の水平荷重-水平変位データよりせん断剛性と等価減衰定数を算出する。その後、せん断ひずみ 175%による正負繰返し加振を連続 50 回行い、初期の載荷前温度まで冷却し、50 回繰返し加振前と同様のせん断特性試験を行い、せん断剛性と等価減衰定数を算出する。試験結果は、(5) 温度依存性試験より求めた温度補正式によって、基準温度 (23℃) 相当に補正したものを測定値とする。せん断剛性は、50 回繰返し加振前の測定値を基準として 50 回繰返し加振後との変化率を求める。

(5) 温度依存性試験

試験体に複数の温度条件を与えたときのせん断特性の依存性を求める。固定荷重に相当する圧縮応力 1.0N/mm^2 の鉛直荷重を載荷した状態で、各種温度にてせん断ひずみ 175%による正負繰返し加振を 3 回行い、3 回目の水平荷重-水平変位データよりせん断剛性と等価減衰定数を算出する。恒温槽で各試験温度に保持した試験体を取り出し試験を行う。せん断剛性は、基準温度 (23℃) 時の測定値を基準として各温度条件との変化率を求める。試験結果は、(3) 振動数依存性試験より求めた振動数補正式によって、基準振動数 (0.5Hz) 相当に補正したものを測定値とする。

(6) 熱老化特性試験

熱老化前後におけるせん断特性（せん断剛性、等価減衰定数）の変化と、熱老化させた試験体のせん断変形性能（破断せん断ひずみ）を確認する。熱老化は基準温度 23℃で 60 年に相当する試験条件とする。まず、固定荷重に相当する圧縮応力 1.0N/mm^2 の鉛直荷重を載荷した状態で、せん断ひずみ 175%による正負繰返し加振を 3 回行い、3 回目の水平荷重-水平変位データよりせん断剛性と等価減衰定数を算出する。その後、恒温槽で試験条件の熱老化をさせ、熱老化前と同様のせん断特性試験を行い、せん断剛性と等価減衰定数を算出する。試験結果は、(3) 振動数依存性試験と(5) 温度依存性試験より求めた振動数補正式と温度補正式によって、基準振動数 (0.5Hz) と基準温度 (23℃) 相当に補正したものを測定値とする。せん断剛性は、熱老化前の測定値を基準として熱老化後との変化率を求める。熱老化後の試験体で、1.4 項と同様のせん断変形性能試験を行い、せん断ひずみ 250%時及び 300%時の繰返し挙動の安定性並びに破断せん断ひずみを確認する。

* 試験においてゴム支承へ負荷する圧縮応力は固定荷重に相当する 1.0N/mm^2 を適用している。この数値は以下に示す、固定荷重による圧縮応力の計算結果より検討した数値である。

固定荷重によるゴム支承の圧縮応力

	節点番号	支点反力 (kN)	有効平面寸法 (mm)	有効面積 (mm^2)	圧縮応力度 (N/mm^2)
フレームゴム支承	1	185	550×550	302500	0.61
	11	133	550×550	302500	0.44
	21	129	550×550	302500	0.43
	31	129	550×550	302500	0.43
	41	129	550×550	302500	0.43
	51	129	550×550	302500	0.43
	61	129	550×550	302500	0.43
	71	129	550×550	302500	0.43
	81	133	550×550	302500	0.44
	91	185	550×550	302500	0.61
大梁ゴム支承	121	667	800×800	640000	1.04
	122	667	800×800	640000	1.04
	131	667	800×800	640000	1.04
	132	667	800×800	640000	1.04

1.3.4.2 試験結果

各種依存性試験及び熱老化特性試験より得られたせん断特性結果を添付 6-3 図に示す。以下にその結果を記載する。

(1) せん断ひずみ依存性試験

添付 6-3 図の(a)に示すせん断ひずみ依存性試験の結果より、ひずみの増減によらず、せん断剛性はほぼ一定の傾向を示すことが分かった。

(2) 圧縮応力依存性試験

添付 6-3 図の(b)に示す圧縮応力依存性試験の結果より、圧縮応力の増減によらず、せん断剛性はほぼ一定の傾向を示すことが分かった。これは、既往の研究⁴⁾における実験結果と同様の傾向を示している。

(3) 振動数依存性試験

添付 6-3 図の(c)に示す振動数依存性試験の結果より、振動数の変化によらず、せん断剛性はほぼ一定の傾向を示すことが分かった。これは、既往の研究⁴⁾における実験結果と同様の傾向を示している。

(4) 繰返し数依存性試験

添付 6-3 図の(d)に示す繰返し数依存性試験の結果より、せん断ひずみ 175% による 50 回の正負繰返し加振でのせん断剛性の変化率は最大で-9%程度となることが分かった。

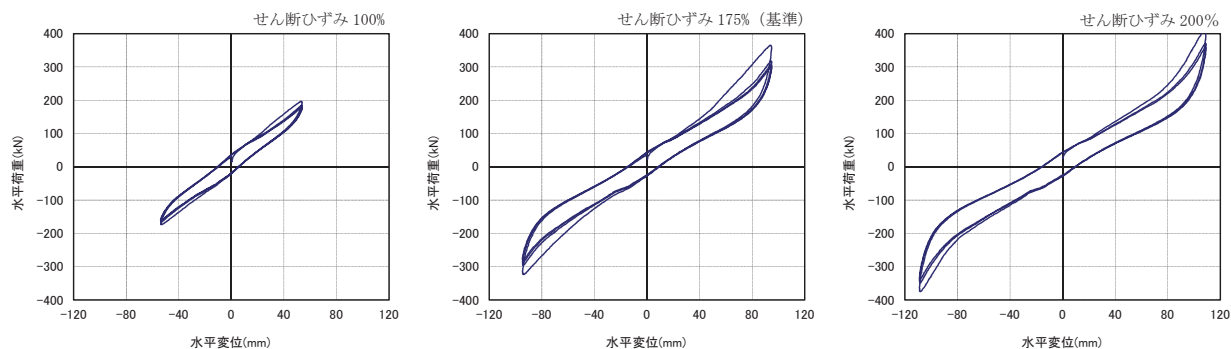
(5) 温度依存性試験

ゴム支承は低温下でのせん断剛性が大きくなり温度変化の影響を受けやすいことが一般的に知られている。添付 6-3 図の(e)に示す温度依存性試験結果より、温度依存性試験では低温になるほどせん断剛性が大きくなることが分かる。基準温度 23℃に対するせん断剛性の変化率は、女川 2 号炉の環境条件を踏まえ-15℃から+40℃までの範囲を確認しており、-15℃では+35%程度、+40℃では-5%程度であった。

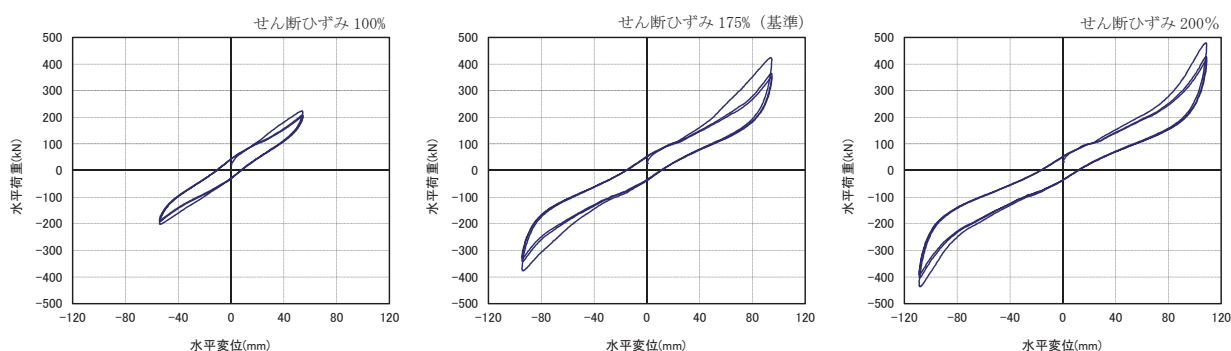
一方で、低温時には荷重－変位曲線が膨らんでいることから等価減衰定数の値が大きくなっていると推測される。等価減衰定数の分析結果については 1.5 項に示す。

(6) 熱老化特性試験

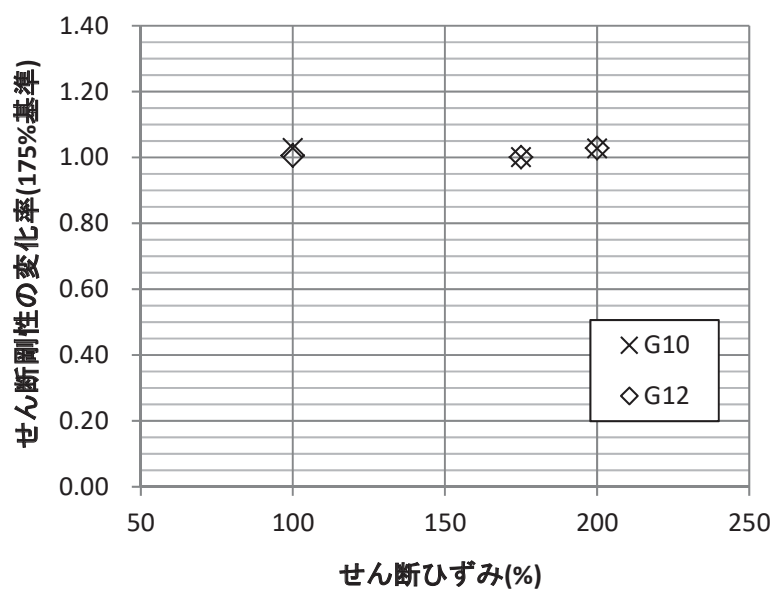
添付 6-3 図の(f)に示す熱老化特性試験の結果より、熱老化によってせん断剛性が増加する傾向が確認された。使用期間 60 年相当の熱老化に対するせん断剛性の変化率は最大+9%程度となることが分かった。



荷重－変位曲線 (G10)

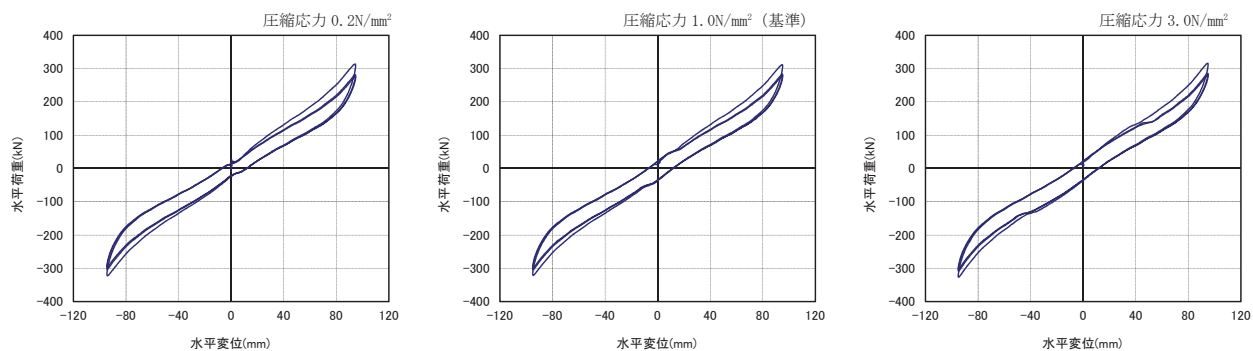


荷重－変位曲線 (G12)

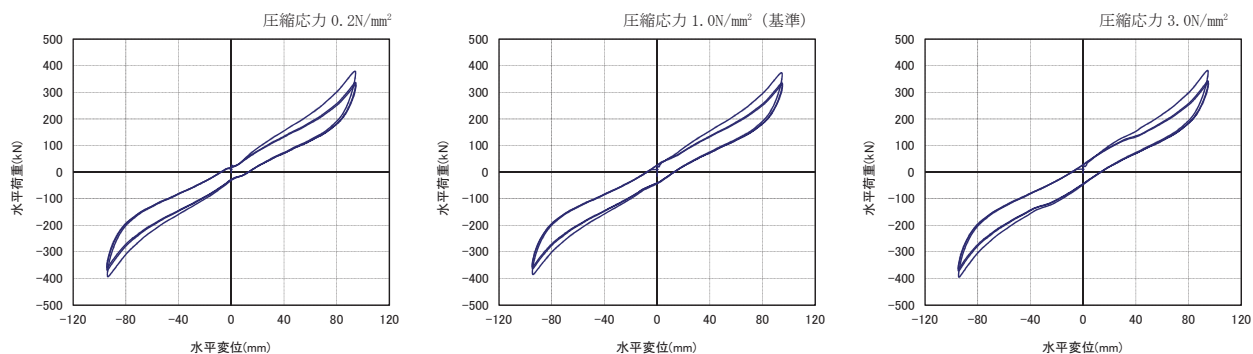


(a) せん断ひずみ依存性試験

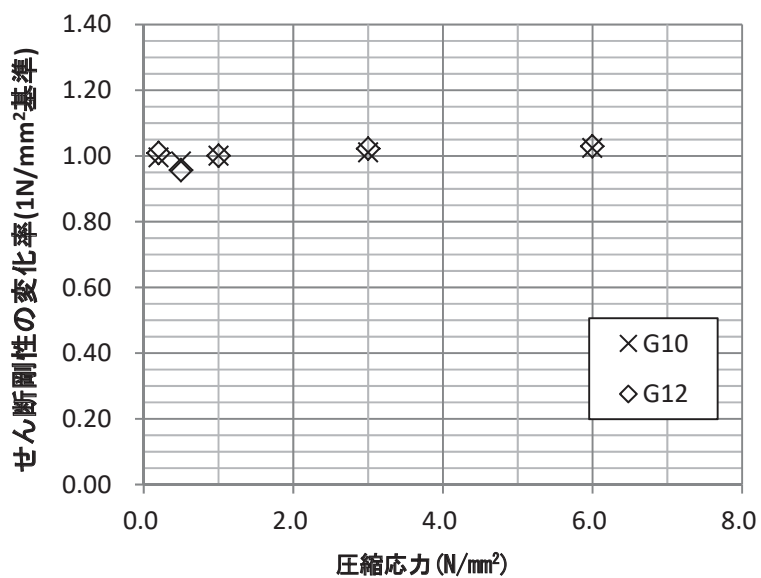
添付 6-3 図 せん断特性試験結果 (1/6)



荷重－変位曲線 (G10)

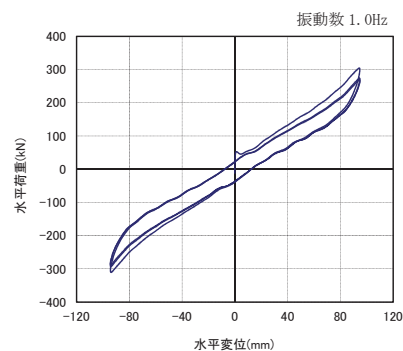
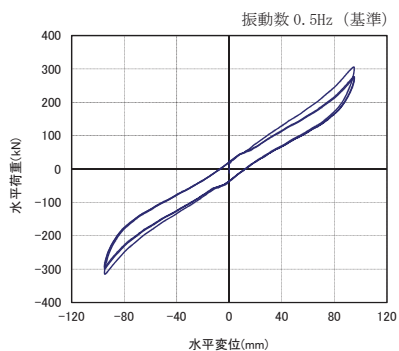
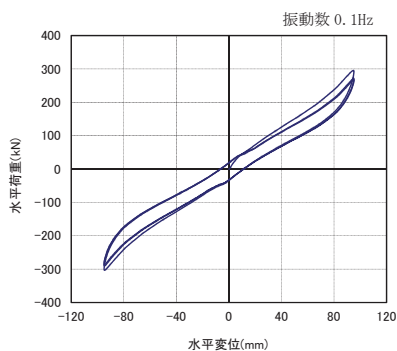


荷重－変位曲線 (G12)

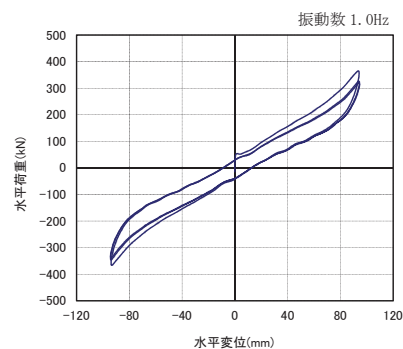
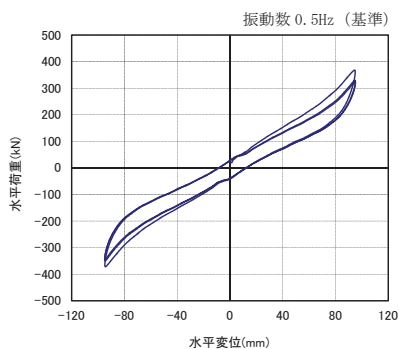
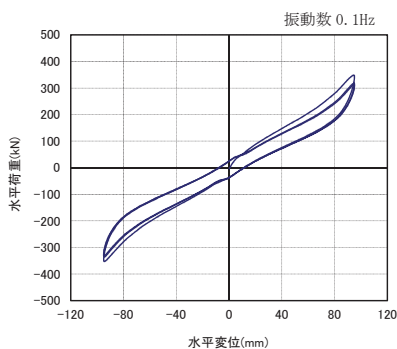


(b) 圧縮応力依存性試験

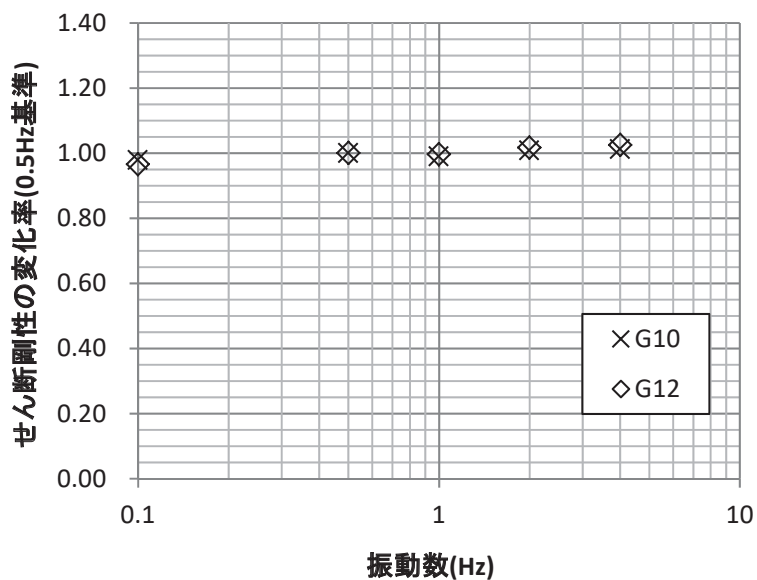
添付 6-3 図 せん断特性試験結果 (2/6)



荷重－変位曲線 (G10)



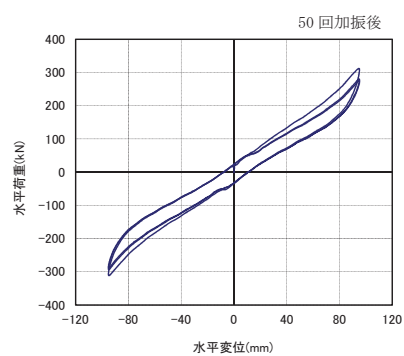
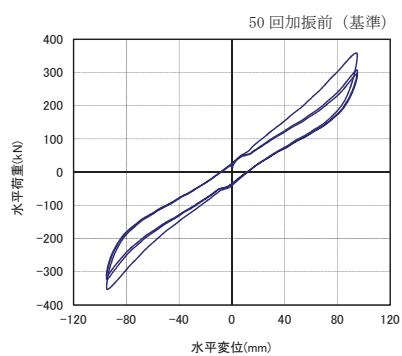
荷重－変位曲線 (G12)



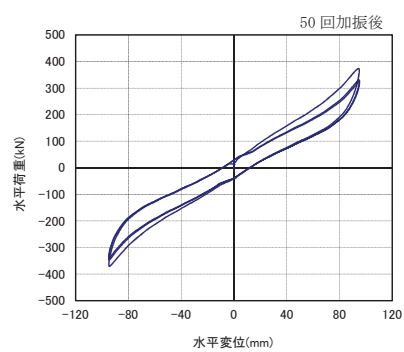
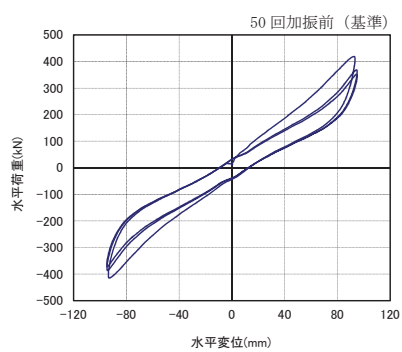
(c) 振動数依存性試験

* 2Hz, 4Hz の結果は補正式より算出

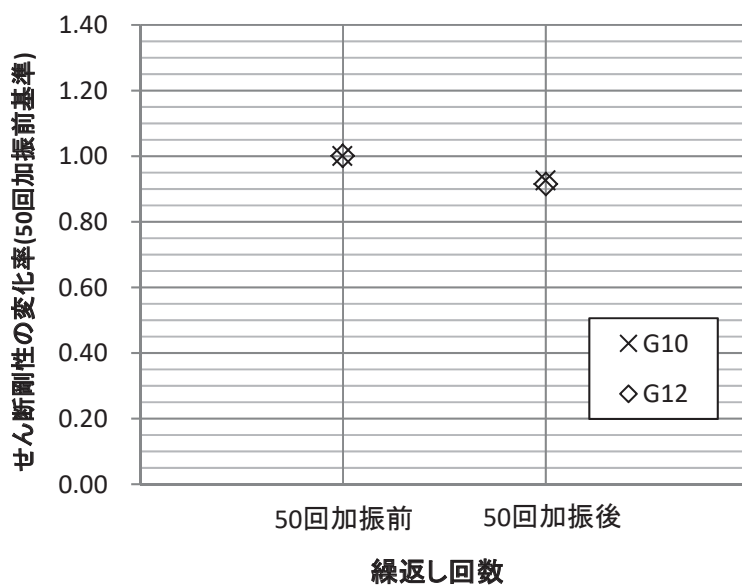
添付 6-3 図 せん断特性試験結果 (3/6)



荷重－変位曲線 (G10)

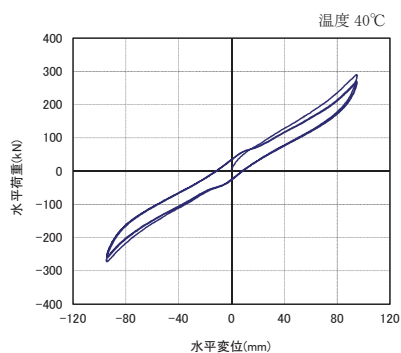
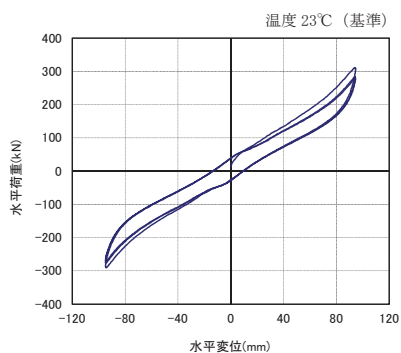
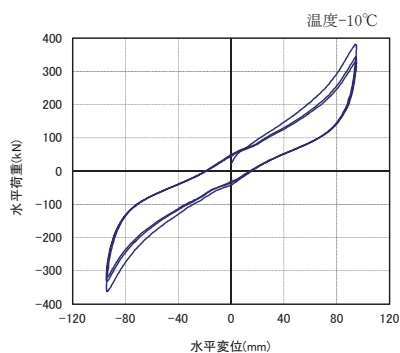


荷重－変位曲線 (G12)

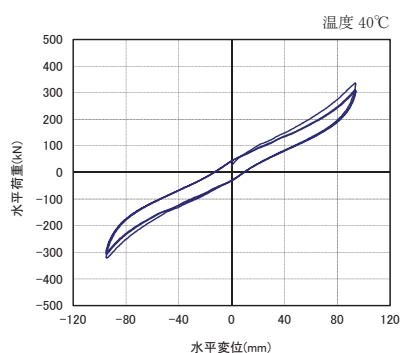
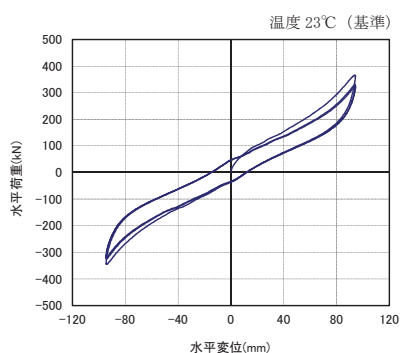
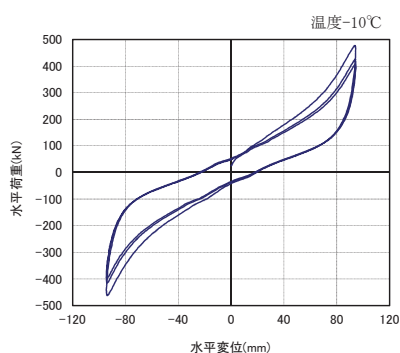


(d) 繰返し数依存性試験

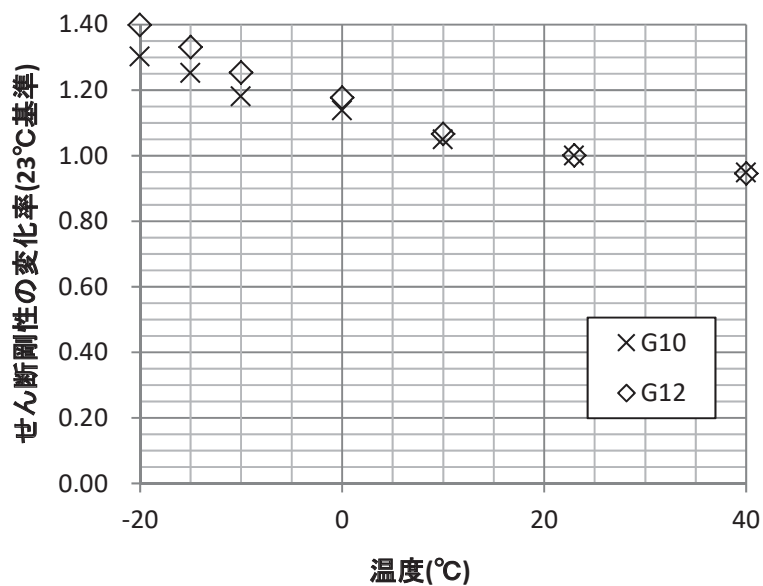
添付 6-3 図 せん断特性試験結果 (4/6)



荷重－変位曲線 (G10)



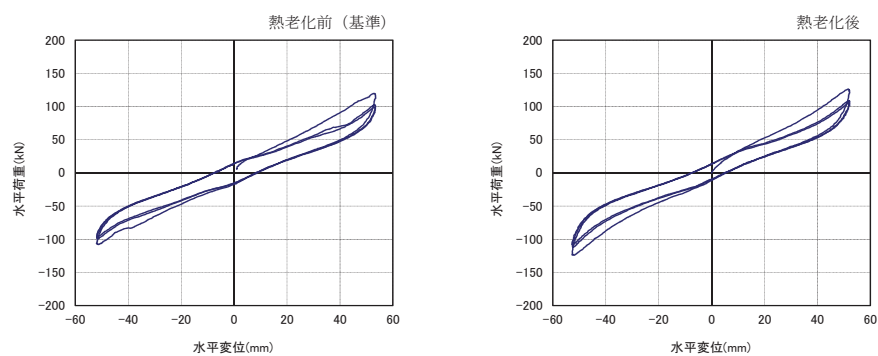
荷重－変位曲線 (G12)



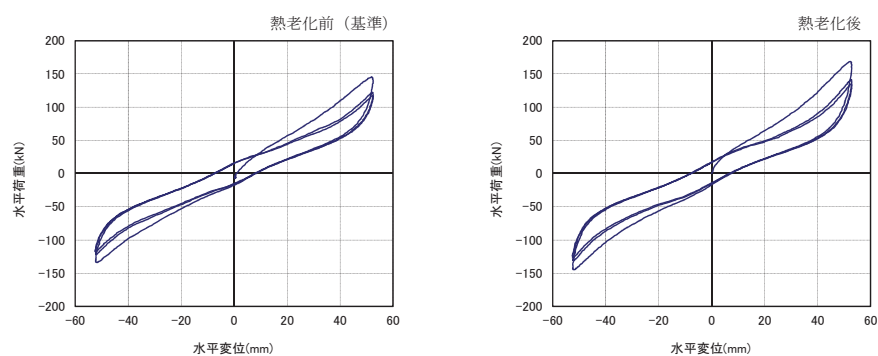
(e) 温度依存性試験

* -15°Cの結果は補正式より算出

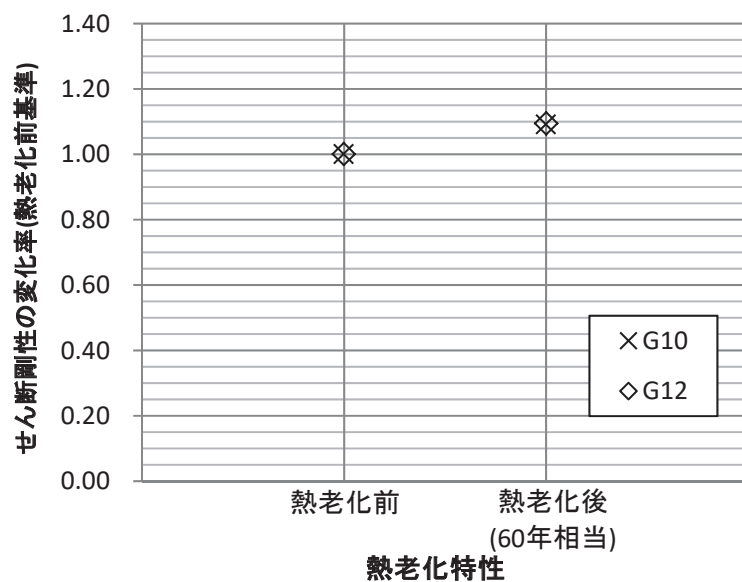
添付 6-3 図 せん断特性試験結果 (5/6)



荷重－変位曲線 (G10)



荷重－変位曲線 (G12)



(f) 熱老化特性試験

添付 6-3 図 せん断特性試験結果 (6/6)

1.3.5 せん断剛性のばらつきが及ぼす耐震設計への影響確認

各種依存性試験及び熱老化特性試験より得られたせん断剛性のばらつきについて、設計時の評価ケースとして地震応答解析に反映し、剛性のばらつきを考慮したケースにおいても竜巻防護ネットの耐震性が損なわれないことを確認する。適用するばらつきの設定方針を以下に示す。

1.3.4 項の試験結果より、せん断剛性のばらつきに与える影響の大きい項目としては、せん断ひずみの繰返し数、温度変化及び熱老化が挙げられる。試験結果より得られたせん断剛性の変化率を考慮して、設定するばらつきの範囲を添付 6-5 表に示す。

地震による繰返しせん断ひずみを受けた後の剛性の変化率として、繰返し数依存性試験の結果から-10%の変化率を考慮する。

環境条件（温度）によるせん断剛性の変化率は、女川の屋外環境条件が-15℃～36℃であることを考慮し、温度依存性試験の結果から+35%及び-5%の変化率を考慮する。

経年変化によるせん断剛性の変化率として、熱老化特性試験結果から+10%の変化率を考慮する。

1.3.1 項に示すとおり、ゴム支承は製品初期ばらつきとして±10%を設計上考慮し、この範囲内であることを製品試験で確認することとしているため、ばらつきの影響確認においても±10%を考慮する。

以上の各項目のばらつき設定を積算し、保守的に繰り上げた値として+60%から-30%をばらつきの設定として考慮する。

添付 6-5 表 せん断剛性のばらつき設定

項目	変化率	
	剛性変化（＋側）	剛性変化（－側）
繰返し数	—	-10%
温度	+35%	-5%
熱老化	+10%	—
初期ばらつき	+10%	-10%
積算値	+55%	-25%
影響確認用	+60%	-30%

1.4 セン断変形性能

ゴム支承のせん断ひずみに対する評価基準値として、水平荷重-水平変位の関係がほぼ安定した特性を示す範囲であり、かつ、せん断破壊に対する余裕を確保した許容せん断ひずみ 250%を設定している。本設定の妥当性を確認するため、せん断変形性能試験を実施する。

試験は、1.3.4 項の各種依存性試験と同様に、「JIS K 6411:2012」の試験方法を参考に設計における適用条件を踏まえ試験条件を設定した。試験体についても「JIS K 6411:2012」に対応した標準試験体とし、ゴム材料の種別は G10, G12 を適用する。試験項目、測定項目及び試験体を添付 6-6 表に示す。

添付 6-6 表 セン断変形性能試験の試験項目と試験体

試験	測定項目	試験体		
		適用規格	形状	せん断弾性係数
せん断変形性能試験 ・限界性能	せん断変形性能 ・破断せん断ひずみ	JIS K6411:2012 標準試験体 No. 3*	有効平面寸法 400mm×400mm 総ゴム厚 54mm (9mm×6 層)	G10 大梁用 1.0N/mm ² G12 フレーム用 1.2N/mm ²
熱老化特性試験 ・限界性能	せん断変形性能 ・破断せん断ひずみ（熱老化なし、あり）	JIS K6411:2012 標準試験体 No. 2*	有効平面寸法 240mm×240mm 総ゴム厚 30mm (5mm×6 層)	G10 大梁用 1.0N/mm ² G12 フレーム用 1.2N/mm ²

* JIS K6411 で寸法等が規定されている試験体

1.4.1 試験方法

(1) セン断変形性能試験

せん断ひずみ 250%時及び 300%時の繰返し挙動の安定性並びに破断せん断ひずみを確認する。まず、固定荷重に相当する圧縮応力 1.0N/mm² の鉛直荷重を載荷した状態で、せん断ひずみ 175%による正負繰返し加振を 3 回行い、せん断特性を確認する。その後、許容せん断ひずみに相当する±250%の繰返しを 6 回、300%の繰返しを 3 回行った後、単調載荷を行い、破断せん断ひずみを確認する。

(2) 熱老化特性試験

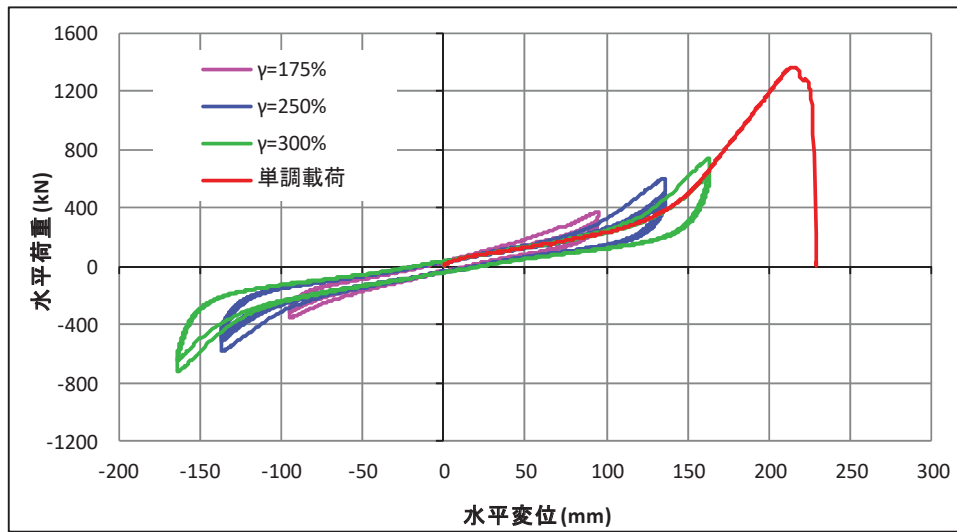
熱老化をさせていない試験体及び熱老化をさせた試験体それぞれに対して、(6)と同様のせん断変形性能試験を行い、せん断ひずみ 250%時及び 300%時の繰返し挙動の安定性並びに破断せん断ひずみを確認する。

1.4.2 試験結果

熱老化させていない試験体のせん断変形性能試験の荷重－変位曲線を添付 6-4 図及び添付 6-5 図に示す。使用期間 60 年相当の熱老化させた試験体のせん断変形性能試験の荷重－変位曲線を添付 6-6 図に示す。

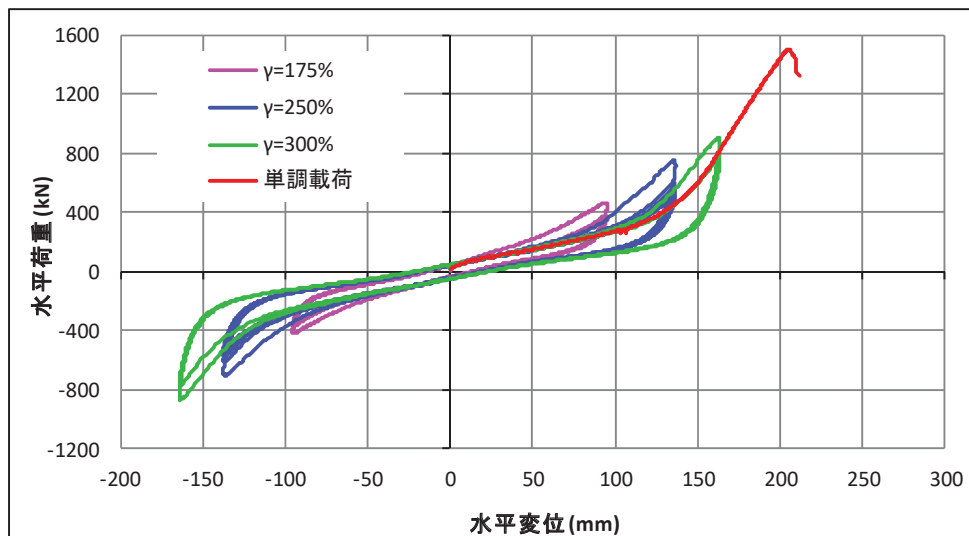
試験結果より、熱老化によらず破断ひずみは許容ひずみ 250%に対して十分な余裕を有していることが確認された。また、熱老化の有無によって破断ひずみに大きな相違がないことも確認している。

破断ひずみ: 399%



(a) 荷重-変位曲線 (G10)

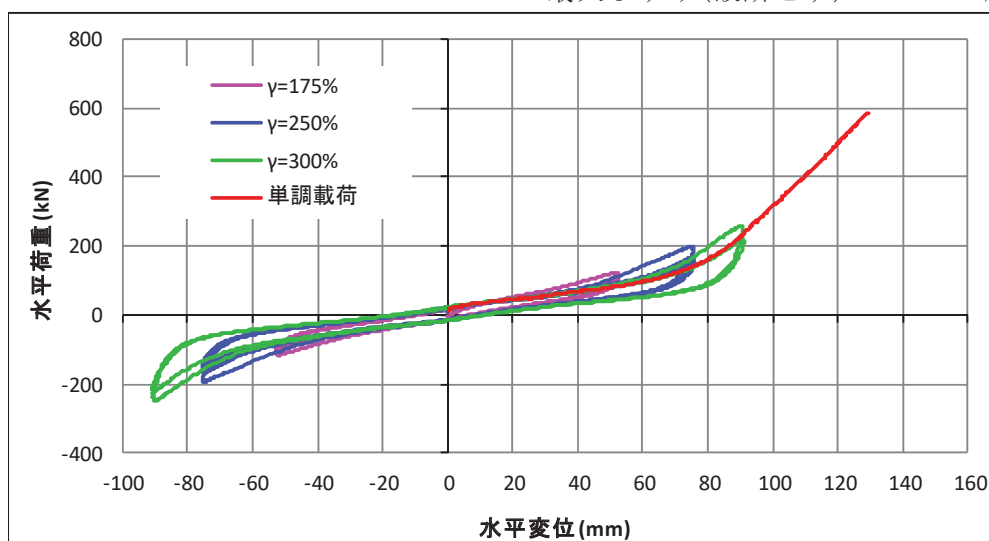
破断ひずみ: 380%



(b) 荷重-変位曲線 (G12)

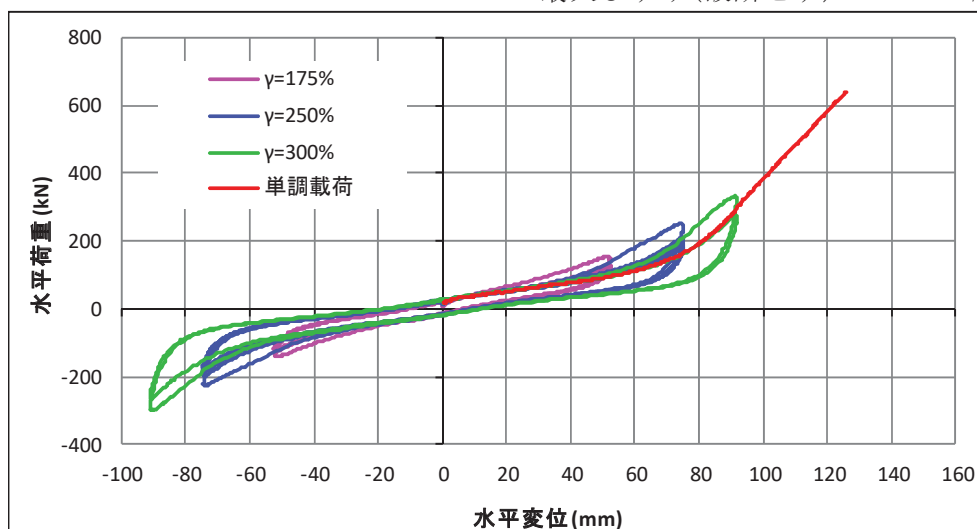
添付 6-4 図 せん断変形性能試験結果 (標準試験体 No. 3, 熱老化無し)

最大ひずみ(破断せず): 431%



(a) 荷重-変位曲線 (G10)

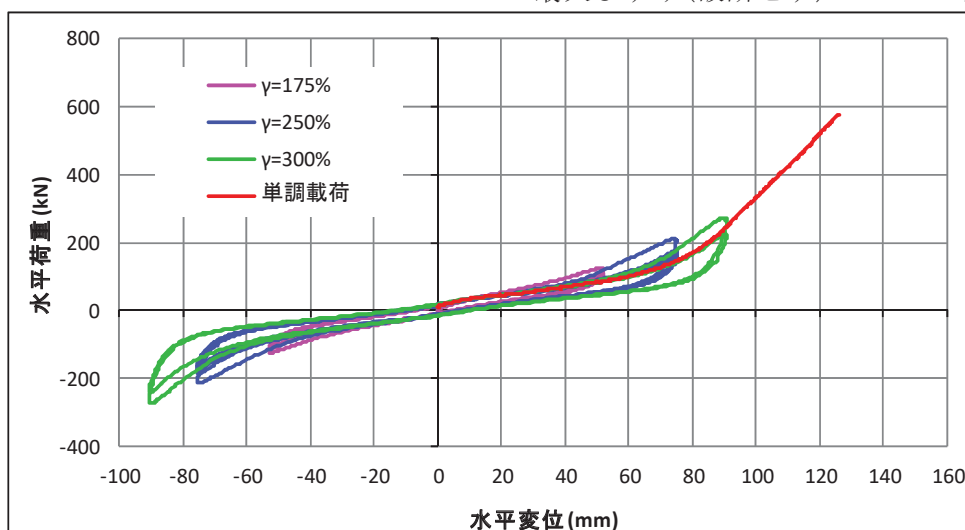
最大ひずみ(破断せず): 420%



(b) 荷重-変位曲線 (G12)

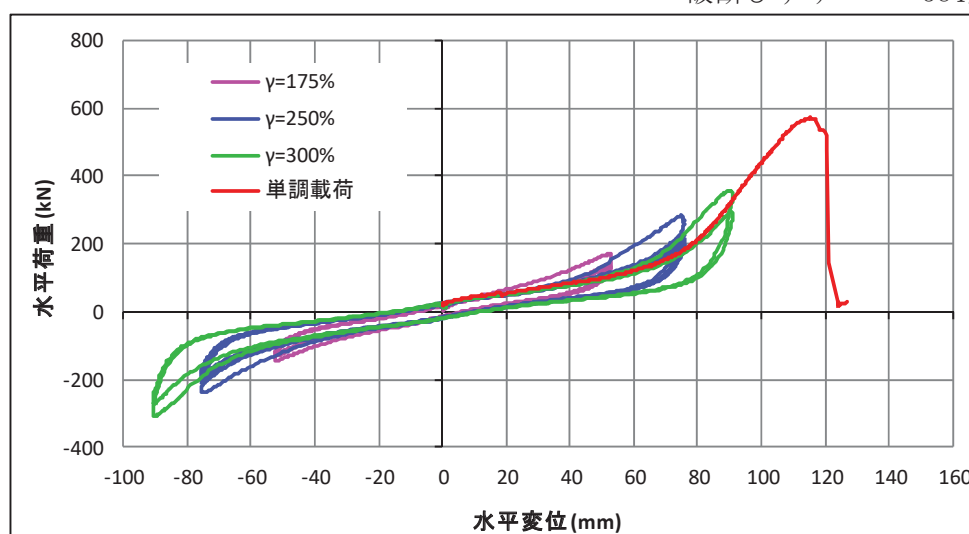
添付 6-5 図 セン断変形性能試験結果 (標準試験体 No. 2, 熱老化無し)

最大ひずみ(破断せず): 420%



(a) 荷重-変位曲線 (G10)

破断ひずみ: 384%



(b) 荷重-変位曲線 (G12)

添付 6-6 図 セン断変形性能試験結果 (標準試験体 No. 2, 熱老化有り)

1.5 等価減衰定数

等価減衰定数は測定した試験結果から次式によって求められる。

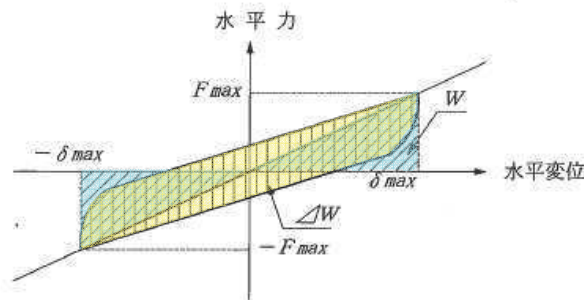
$$h_{eq} = \Delta W / 2\pi W$$

ここに

h_{eq} : 等価減衰定数

W : 弾性エネルギー (添付 6-7 図に示す三角形面積)

ΔW : 吸収エネルギー (添付 6-7 図に示す履歴曲線で囲まれる面積)



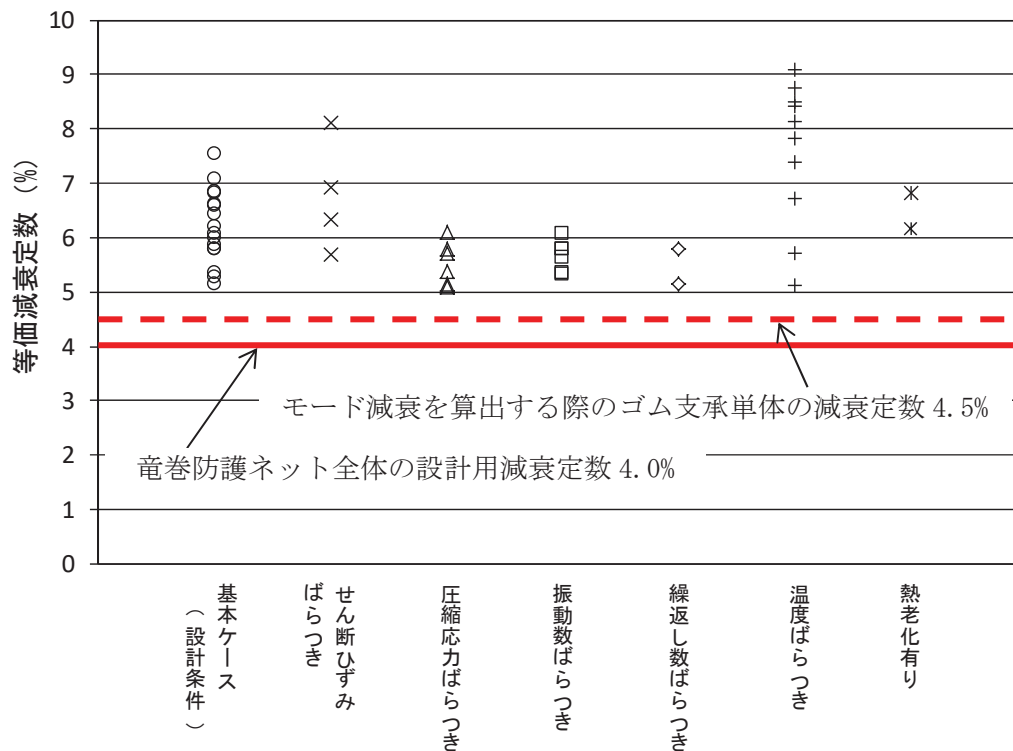
添付 6-7 図 等価減衰定数の算出方法²⁾

道路橋示方書 V 耐震設計編³⁾では、最近の実験研究成果によれば 0.04 程度以上の等価減衰定数が得られており、使用するゴム支承の減衰特性を十分に把握した上で適切な等価減衰定数を設定するのがよいとされている。今回、各種依存性試験及び熱老化特性試験において実施したせん断特性試験の結果に基づき、設計で用いる等価減衰定数を設定する。

せん断特性試験の結果を添付 6-8 図に示す。今回の試験結果から、設計条件並びにばらつきを考慮した条件のいずれにおいても 5.0%以上の等価減衰定数が得られていることが分かる。竜巻防護ネットの水平方向変形モードはゴム支承の変形が主体的であること及び本試験結果より安定して 5.0%以上の等価減衰定数が得られていることを踏まえ、耐震設計における竜巻防護ネット全体の水平方向減衰としては 4.0%を適用する。詳細は添付資料 3 に示しているが、ゴム支承単体の減衰を 4.5%、その他の鋼製部材の減衰を 2.0%と設定してモード減衰を算出した結果、4.0%より大きな減衰が得られていたことから、耐震性評価としては保守的に 4.0%と一律設定しているものである。

減衰については、実機へ使用するゴム支承の製品検査においてせん断特性試験を行うことで、その妥当性を確認する。

なお、添付 6-8 図に示すとおり温度依存性試験より得られた結果の中には 8~9%程度の大きな減衰が得られている結果があるが、これは 0℃以下の設定時のものであることから、ゴム支承は低温環境下で高減衰の特性を示すことが分かる。



添付 6-8 図 各種試験より得られた等価減衰定数の測定値

1.6 評価方法

1.6.1 評価項目

ゴム支承の評価項目は道路橋支承便覧に従い添付 6-7 表に示すとおりとする。せん断ひずみについては地震動のケース別に評価を実施する。それ以外の評価項目についてはケースごとの評価は省略し、全ての地震動ケースの中から鉛直力と水平移動量（水平力）の最大を抽出し最大値同士を組合せて評価する。

添付 6-7 表 ゴム支承の評価項目

評価項目			評価方法
地震時	荷重伝達機能	水平力支持	せん断ひずみの評価
		鉛直力支持	引張応力の評価 座屈安定性の評価 内部鋼板の引張応力の評価
常時	荷重伝達機能	鉛直力支持	最大圧縮応力の評価
	疲労耐久性	温度伸縮による移動	局部せん断ひずみの評価

1.6.2 せん断ひずみの評価

(1) せん断ひずみの評価式

水平力支持機能は、発生するせん断ひずみが許容せん断ひずみを超えないことを確認する。次式によって、水平変位量を総ゴム厚で除して求めたゴムのせん断ひずみを評価する。^{1), 3)}

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

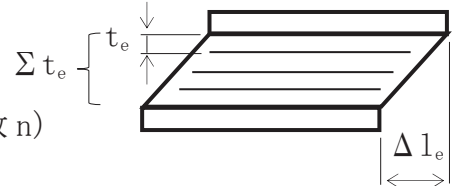
ここに、

γ_e : 地震時のせん断ひずみ

Δl_e : 地震時の水平変位量

Σt_e : 総ゴム厚 (=ゴム 1 層厚 t_e × 層数 n)

γ_{ea} : 地震時のせん断ひずみの許容値



(2) せん断ひずみの許容値

ゴム支承のせん断破壊に対して必要な安全性が確保されるようにゴム支承の破断試験など十分な検証に基づき許容せん断ひずみを設定する。今回、道路橋示方書 V³⁾に基づき、水平荷重－水平変位の関係が安定した特性を示す範囲にあり、せん断破壊に対して必要な安全性が確保されるように設定されたせん断ひずみ 250%を許容せん断ひずみとする。許容せん断ひずみを設定するにあたって採用するゴム支承と同種の試験体を製作し、せん断変形性能試験より破断ひずみを確認している。試験結果より破断ひずみはいずれも 350%を超えるひずみとなっており許容値とした 250%は十分に余裕のある設定となっている。また、過去の試験結果¹⁾によって得られた破断ひずみについても 300%～450%に分布しており、250%との設定は破断ひずみに対して余裕が確保されていることが分かる。

1.6.3 引張応力の評価

(1) 引張応力の評価式

地震時の上向きの力によって生じる引張応力を次式によって評価する。¹⁾

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

ここに、

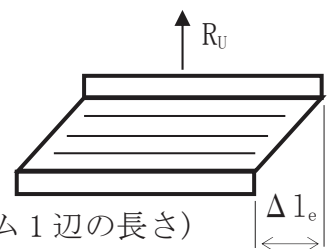
σ_{te} : 地震時の引張応力

R_U : 上向きの反力

A_{te} : 地震時の移動量を控除した引張に有効な面積

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

σ_{ta} : 引張応力の許容値



(2) 引張応力の許容値

引張応力の許容値は、道路橋支承便覧に基づき、せん断弾性係数の材料物性ごとに規定されている許容値から以下のとおり設定する。

G10 以上 : $\sigma_{ta} = 2.0 \text{ N/mm}^2$

引張応力の許容値は、実験結果により求めた引張破断応力に対して余裕を確保して定められている。既往の引張破断試験結果¹⁾では、一定の水平力を与え

せん断変形しているゴム支承に引張力を作用させ試験体を破断させ、破断実応力（せん断変形を控除した有効面積の応力）の下限值は 5N/mm^2 程度である。許容引張応力は、破断実応力に対して 2.5 倍の安全余裕を考慮して設定されている。その他既往の研究⁵⁾では、G8, G10, G12 の天然ゴム系積層ゴム支承に対してせん断変形を与えた引張試験を実施し、引張降伏応力が道路橋支承便覧で定める許容引張応力以上であること、許容引張応力付近では安定した線形特性を示す領域にあること、引張限界は許容引張応力に比べ十分余裕があることが確認されている。

1.6.4 座屈安定性の評価

(1) 座屈安定性の評価式

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

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

ここに、

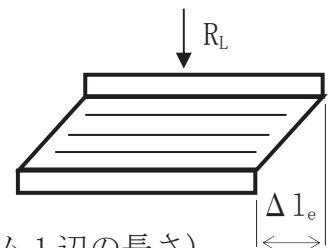
σ_{ce} : 地震時の圧縮応力

R_L : 下向きの反力

A_{ce} : 地震時の移動量を控除した圧縮に有効な面積

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

σ_{cra} : 道路橋支承便覧に定める座屈を考慮した圧縮応力の許容値



(2) 圧縮応力の許容値

座屈を考慮した圧縮応力の許容値は次式より求める。

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

ここに、

S_1 : ゴム支承の一次形状係数

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

S_2 : ゴム支承の二次形状係数

$$S_2 = B / \sum t_e$$

f_{cr} : 荷重の大きさ及び発生頻度を考慮した係数(地震時: 1.5)

1.6.5 内部鋼板の引張応力の評価

(1) 内部鋼板の評価式

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

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

ここに

σ_s : 内部鋼板の引張応力

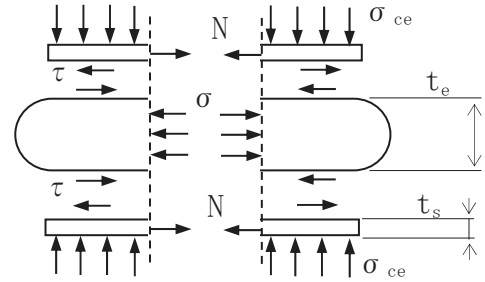
σ_{ce} : 地震時の圧縮応力

t_e : ゴム一層の厚さ

t_s : 内部鋼板の厚さ

f_c : 圧縮応力の分布を考慮した引張応力の係数 (=2.0)

f_t : 鋼材の許容引張応力



内部鋼板の引張応力の算出にあたっては、圧縮応力を静的荷重として内部鋼板の引張応力を求めている。ゴム支承平面内の圧縮応力分布を考慮して、実験より最大応力と平均応力の比を確認して係数 f_c が設定されている。¹⁾

(2) 内部鋼板の許容値

内部鋼板の引張応力の許容値は、「発電用原子力設備規格 設計・建設規格 (JSME S NC1-2005/2007)」に基づき算出する。

1.6.6 最大圧縮応力の評価

(1) 最大圧縮応力の評価式

常時の鉛直力支持として、常時の最大反力によって生じる最大圧縮応力を次式により評価する。

$$\sigma_{max} = R_{max} / A_{cn} \leq \sigma_{maxa}$$

ここに、

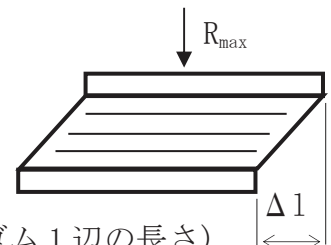
σ_{max} : 最大圧縮応力

R_{max} : 常時の最大反力

A_{cn} : 常時の移動量を控除した圧縮に有効な面積

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

σ_{maxa} : 道路橋支承便覧に定める最大圧縮応力の許容値



(2) 最大圧縮応力の許容値

最大圧縮応力の許容値はゴム支承の一次形状係数 S_1 の値によって次式より求める。

a) $S_1 < 8$ のとき

$$\sigma_{maxa} = 8.0 \text{ N/mm}^2$$

b) $8 \leq S_1 < 12$ のとき

$$\sigma_{maxa} = S_1 \text{ N/mm}^2$$

c) $12 \leq S_1$ のとき

$$\sigma_{maxa} = 12.0 \text{ N/mm}^2$$

1.6.7 局部せん断ひずみの評価

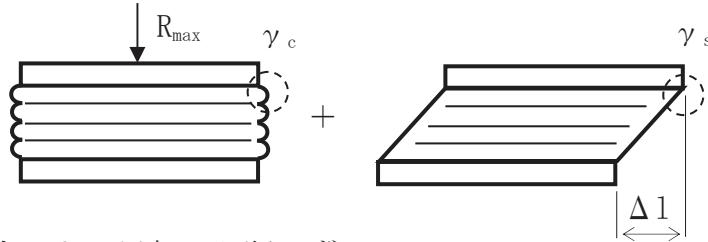
(1) 局部せん断ひずみの評価式

常時の疲労耐久性について、圧縮力、温度伸縮による移動量によって生じる局部せん断ひずみの和を次式により評価する。

$$\gamma_t = \gamma_c + \gamma_s \leq \gamma_{ta}$$

ここに、

γ_t : 局部せん断ひずみ (ゴム支承が圧縮力や水平変位等を受けて変形した際にゴムの端部の鋼板との境に生じる局部的なせん断ひずみ)



γ_c : 鉛直力による局部せん断ひずみ

$$\gamma_c = 8.5 \cdot S_1 \cdot R_{max} / E \cdot A_{cn}$$

ここに、

S_1 : 一次形状係数

R_{max} : 常時の最大反力

E : ゴム支承の縦弾性係数

A_{cn} : 常時の移動量を控除した圧縮に有効な面積

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

γ_s : 常時のせん断ひずみ

$$\gamma_s = \Delta l / \Sigma t_e$$

ここに

Δl : 常時の移動量 (温度変化による伸縮)

Σt_e : ゴム層の総厚

γ_{ta} : 道路橋支承便覧に定める局部せん断ひずみの許容値

(2) 局部せん断ひずみの許容値

局部せん断ひずみの許容値は次式により評価する。

$$\gamma_{ta} = \gamma_u / f_a$$

ここに、

γ_u : ゴムの破断伸び (添付 6-2 表に示す値)

f_a : 安全率 (=1.5)

2. 可動支承

2.1 構造概要

竜巻防護ネットに使用する可動支承の構成部品図を添付 6-9 図に示す。可動支承の使用材料を添付 6-8 表に示す。可動支承は、ベースポット、レール、すべり板等の鋼部材やゴム、樹脂等の部品を組み合わせで構成される。すべり特性は、支承製造メーカーによる試験結果に基づき、竜巻防護ネットで使用するポリアミドとステンレスの組合せの場合、摩擦係数の基準値は 0.04 となる。

2.2 モデル化

可動支承のモデル化及び設計上の配慮について以下の方針とする。

地震時移動によって可動支承には摩擦力が働くが、主桁の可動側の支承部に摩擦による水平力を分担させて主桁のゴム支承側に作用する水平力を減少させる設計を避けるため、地震応答解析モデルでは可動支承の軸方向の結合条件を自由とした。また、本来、摩擦力が移動方向と逆向きの抵抗力として作用することを利用した摩擦減衰効果があるが、ここでは摩擦減衰による地震のエネルギー吸収に期待しない設計としている。

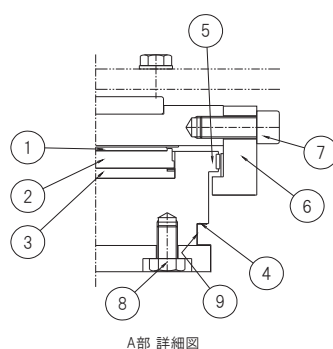
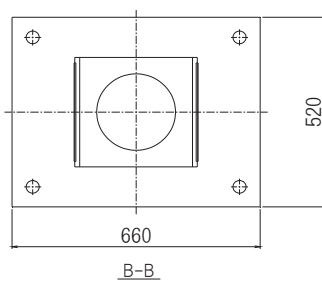
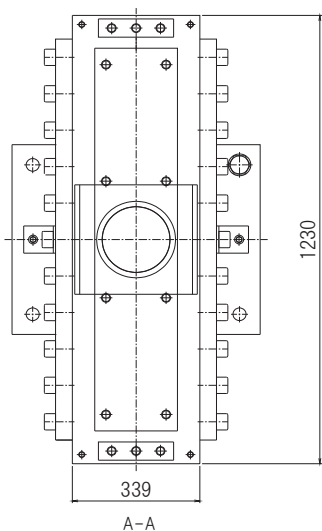
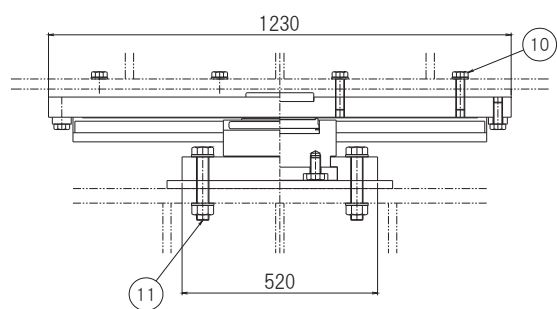
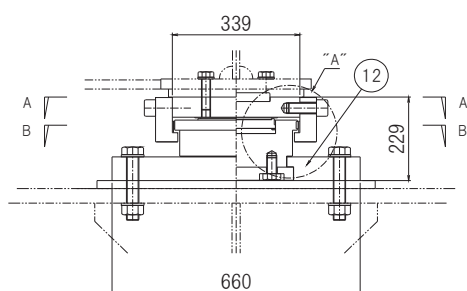
なお、摩擦係数について、温度の依存性を確認した結果を添付 6-10 図に示す。本データは、竜巻防護ネットに設置する可動支承と同じすべり材の材質の組合せ（ポリアミドと SUS）の試験体による試験結果となっている。摩擦係数は温度上昇に伴い漸減する傾向となり、20℃における摩擦係数 0.04 に対して、-15℃で 0.05 程度、40℃で 0.035 程度となる。本結果より摩擦係数の温度依存性は小さく、耐震評価に影響を及ぼす程度ではないと判断している。

また、可動支承のすべり部について経年劣化や異物混入によるすべり状態の劣化が考えられるが、経年劣化に対しては、可動支承の保全方法及び保全サイクルを保全計画へ反映し点検、管理を行う。（保守管理の方針については、「女川原子力発電所 2 号炉設計基準対象施設について」6 条(竜巻)-別添 1-添付 3.7-31 に示す。）すべり部への異物混入に対しては、竜巻防護ネットの可動支承の設置状況を踏まえると、異物が支承下部から回り込んで混入することは考え難いことから、異物混入の可能性は低いと判断している。

2.3 評価方法

竜巻防護ネットの設計における可動支承の評価・検証項目を添付 6-9 表及び添付 6-11 図に示す。添付 6-11 図に示す各部位の構造強度評価を行い、構造強度評価上最も弱い部位を選定する。選定された部位が許容基準値に達する応力を算出し、その応力が発生するときの負荷荷重を算定し、この荷重を可動支承の許容荷重として設定している。なお、今回の評価において、構造強度評価上、最も弱い部位と選定されたのは「⑥レール」である。

移動可能量の許容値は部品寸法と組立寸法により決まるため製品の寸法検査により検証する。



評価部位
①すべり材
②ピストン
③圧縮ゴム
④座金
⑤ベースポット突出部
⑥レール
⑦レール取り付けボルト
⑧エンドプレート接合ボルト
⑨ベースポット支圧部
⑩上部接合ボルト
⑪下部接合ボルト
⑫ベースプレート

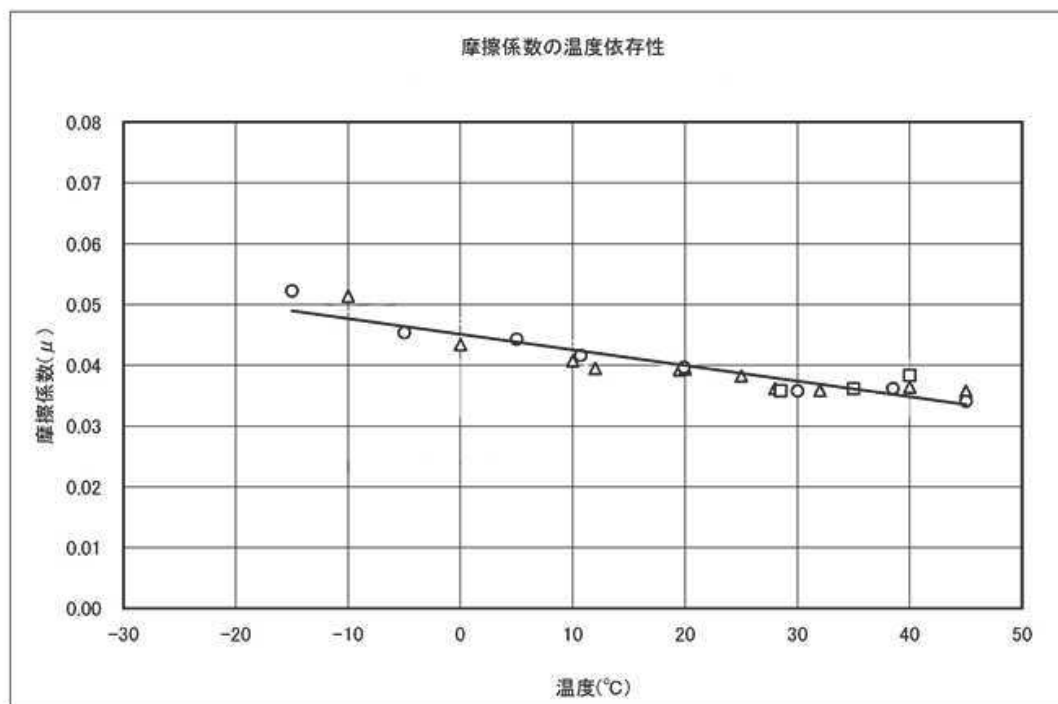
添付 6-9 図 可動支承の構成部品図

添付 6-8 表 可動支承の設計仕様

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

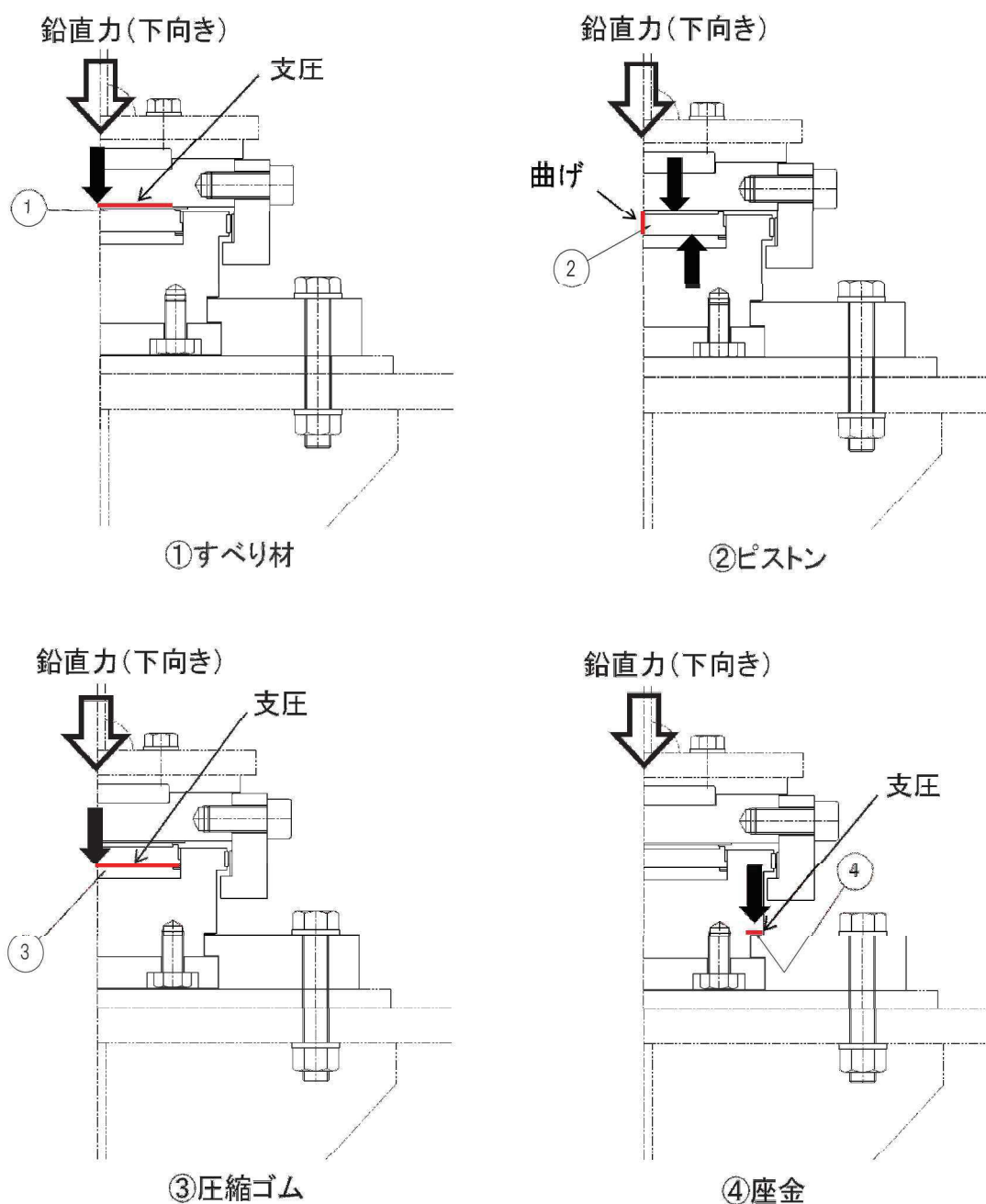
添付 6-9 表 可動支承の評価・検証項目

評価・検証項目	評価・検証方法	
荷重伝達機能	応力評価	詳細は添付 6-11 図参照
変位追従機能	移動量の評価	応答変位と移動可能量の比較



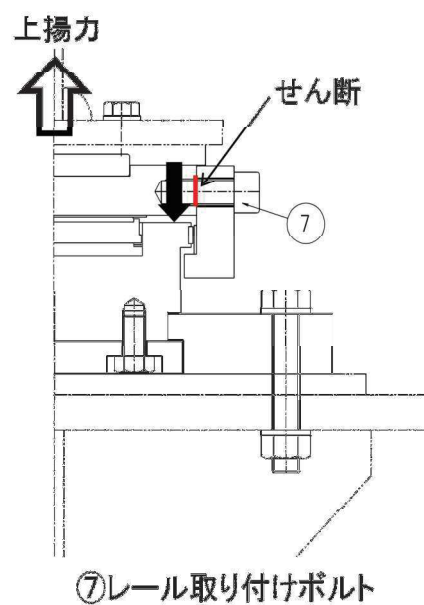
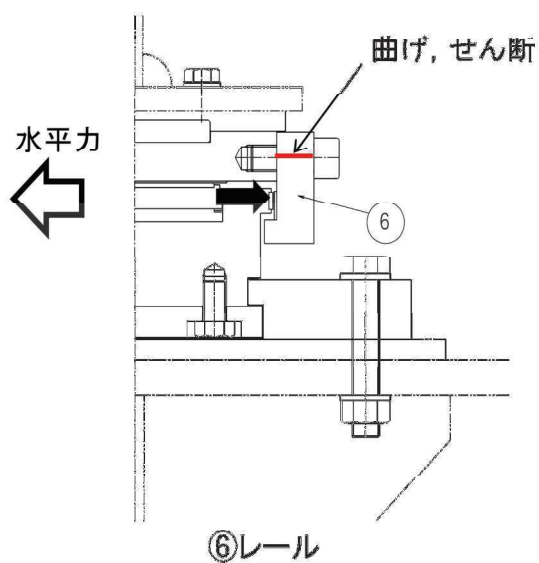
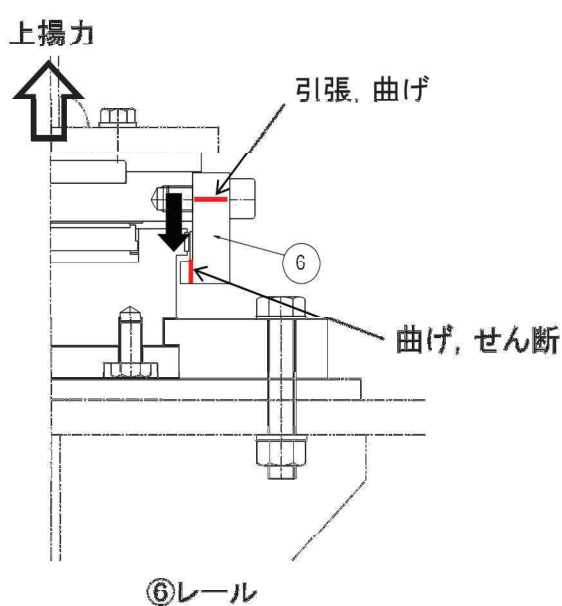
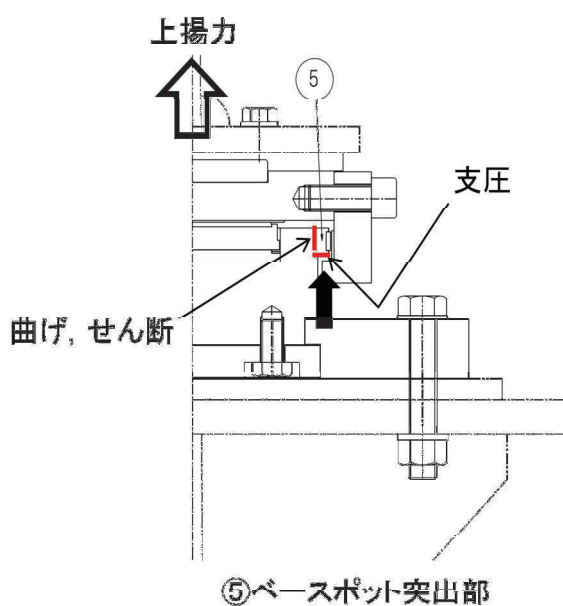
添付 6-10 図 すべり支承の摩擦係数に係る温度依存性試験結果

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



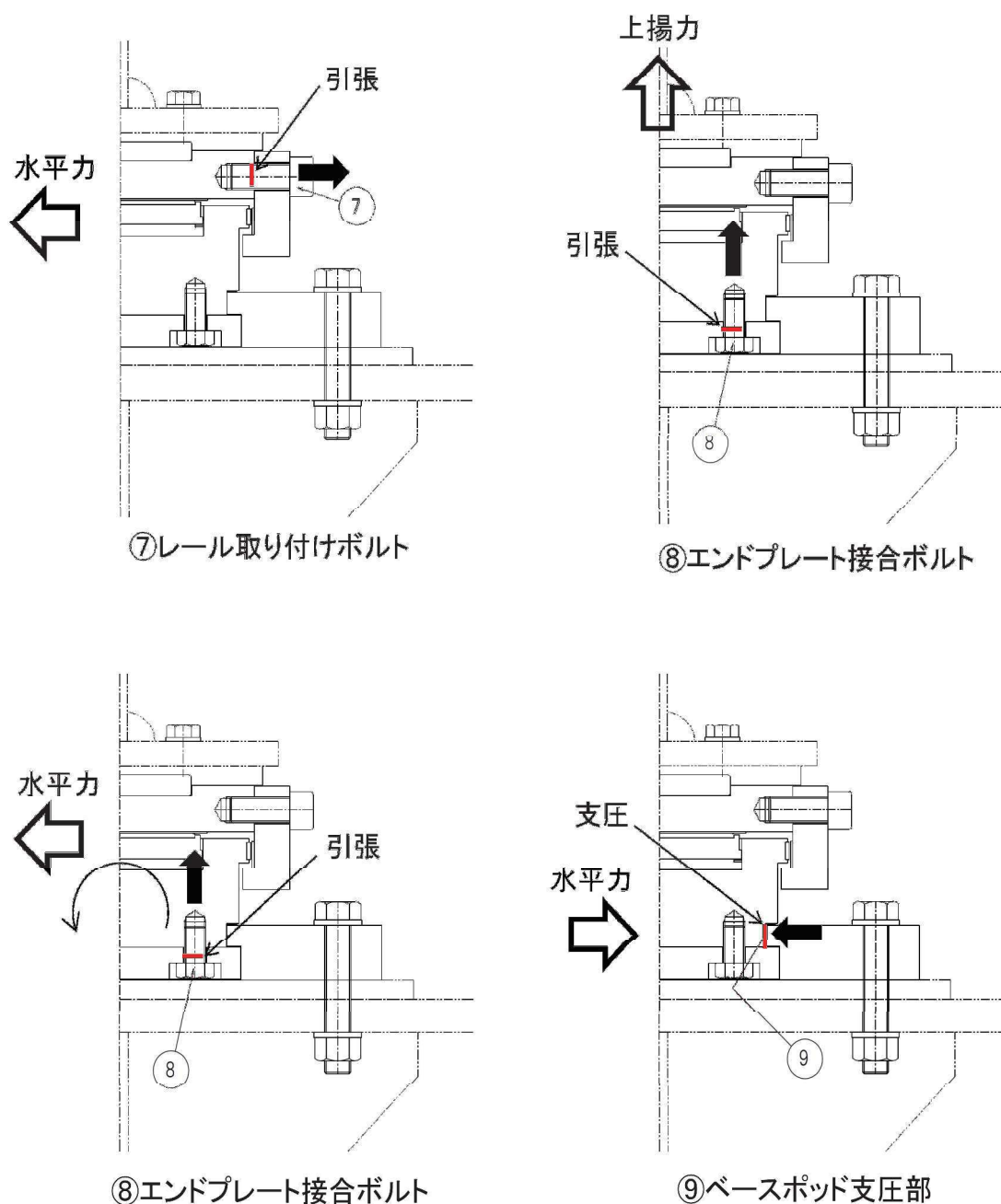
添付 6-11 図 可動支承の評価項目模式図 (1/5)

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



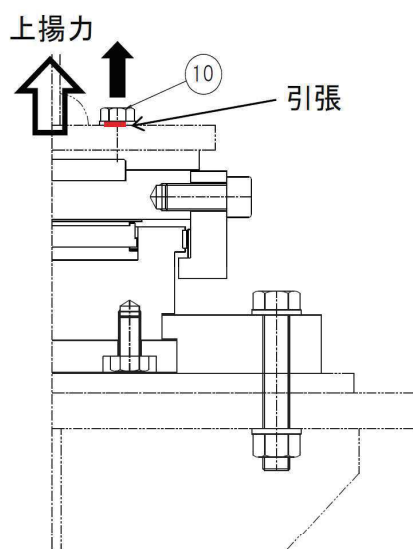
添付 6-11 図 可動支承の評価項目模式図 (2/5)

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

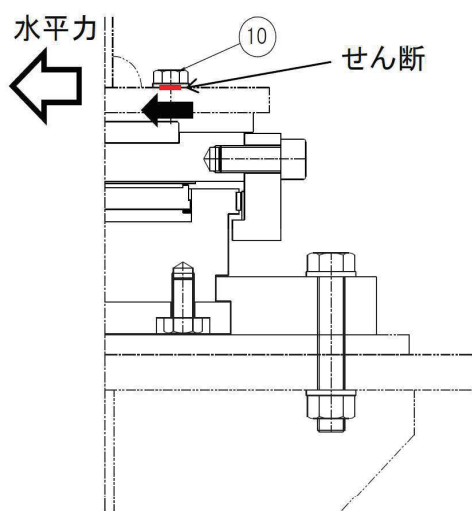


添付 6-11 図 可動支承の評価項目模式図 (3/5)

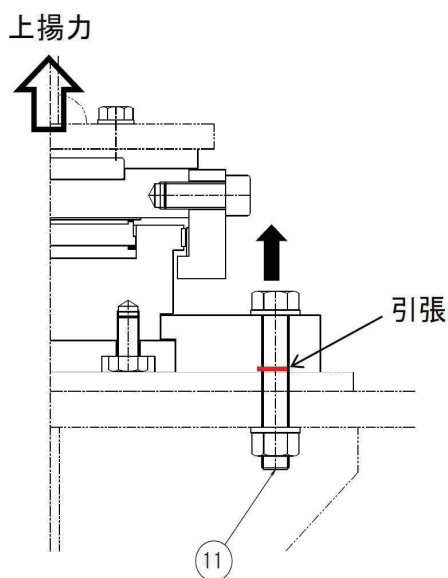
評価部位	作用力	評価項目
①すべり材	鉛直力（下向き）	支圧
②ピストン	鉛直力（下向き）	曲げ
③圧縮ゴム	鉛直力（下向き）	支圧
④座金	鉛直力（下向き）	支圧
⑤ベースポット突出部	上揚力	曲げ，せん断，支圧
⑥レール	上揚力，水平力	曲げ，引張，せん断
⑦レール取り付けボルト	上揚力，水平力	引張，せん断
⑧エンドプレート接合ボルト	上揚力，水平力	引張
⑨ベースポット支圧部	水平力	支圧
⑩上部接合ボルト	上揚力，水平力	引張，せん断
⑪下部接合ボルト	上揚力，水平力	引張，せん断
⑫ベースプレート	上揚力，水平力	曲げ，せん断



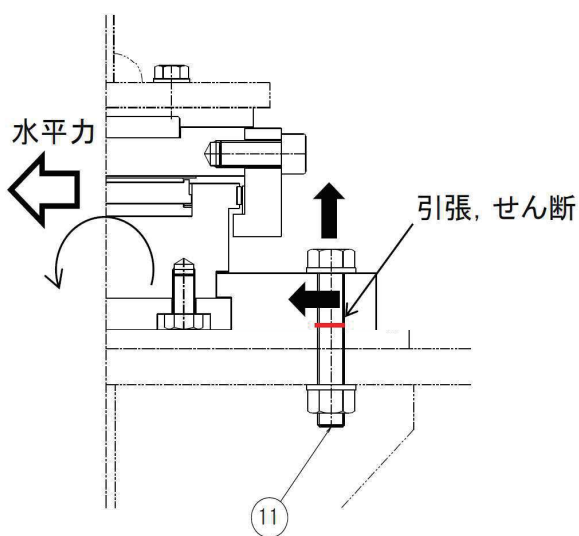
⑩上部接合ボルト



⑩上部接合ボルト



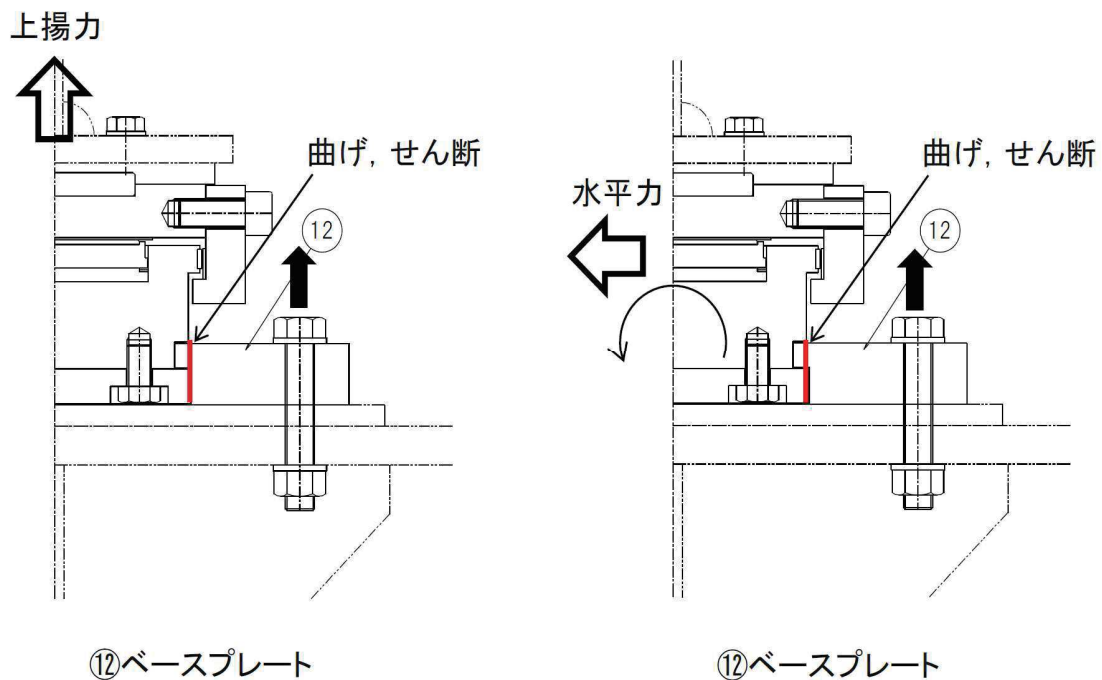
⑪下部接合ボルト



⑪下部接合ボルト

添付 6-11 図 可動支承の評価項目模式図 (4/5)

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



添付 6-11 図 可動支承の評価項目模式図 (5/5)

参考文献

- 1) 道路橋支承便覧（平成 16 年 4 月 社団法人 日本道路協会）
- 2) JIS 規格 道路橋免震用ゴム支承に用いる積層ゴム-試験方法 (JIS K 6411-2012)
- 3) 道路橋示方書・同解説 V 耐震設計編（平成 14 年 3 月 社団法人 日本道路協会）
- 4) 青山和嵩，青木徹彦，鈴木森晶：積層ゴム支承の耐震性能実験，愛知工業大学研究報告第 41 号 B 平成 18 年
- 5) 炭村透，鵜殿禎史，金井宏司：各種ゴム支承の引張限界性能に関する研究，土木学会地震工学論文集，2003. 10

地震時の鉛直方向変位について

地震時に竜巻防護ネットを構成するゴム支承や鋼製部材に変位が生じ、部材同士の衝突や海水ポンプ室への衝突が発生する可能性について検討する。

1. ゴム支承の変位量

衝突防止の観点から、鉛直方向の地震力によって発生するゴム支承の圧縮側最大変位について確認した結果を添付 7-1 表に示す。ゴム支承は鉛直方向の剛性が大きいことから変位量が非常に小さいことが分かる。

添付 7-1 表 ゴム支承の鉛直方向の変位量

	大梁ゴム支承	主桁ゴム支承
最大鉛直反力 (kN) *	1772	490
鉛直剛性 (kN/mm)	972	863
変位量 (mm)	1.9	0.6

* Ss-D1, D2, F1, F2, N1 の 5 波の解析結果から最大となった反力値

2. 鋼製部材の変位量

1 項と同じく、衝突防止の観点から、鉛直方向の地震力によって発生する鋼製部材の鉛直下向きの最大変位について確認した結果を添付 7-2 表に示す。フレームの中央部におけるたわみが最大となるが、クリアランスには十分に余裕があることが分かる。

添付 7-2 表 フレームの鉛直方向の変位量

	スパン中央部 (位置 : f ^{*1})	張出先端部 (位置 : m ^{*1})
変位量 (mm)	52 ^{*2}	23 ^{*2}
クリアランス (mm)	150	173

*1 位置の記号は第 3.3-1 図の解析モデル図中の記号

*2 上表の変位量にはフレーム支点におけるゴム支承の変位量も含む

以上の検討結果より、鉛直方向の変位については、クリアランスに十分余裕があることが分かっているため、今回の評価においては水平方向変位を代表として評価している。

竜巻防護ネット構造部材の質量詳細について

竜巻防護ネットを構成する部材のうち、フレーム及び大梁を対象に質量算出の内訳を示す。

1. フレーム

添付 8-1 表にフレーム質量の内訳を示す。主要部材である主桁、横補強材及びブレースの他に継手やストッパー等で構成されており、これらの部材も含めて合計 164t となるため、第 2.2-2 表では切り上げて 170t と表示している。内訳に記載の部材の概略構造について添付 8-1 図に示す。

添付 8-1 表 フレーム質量内訳

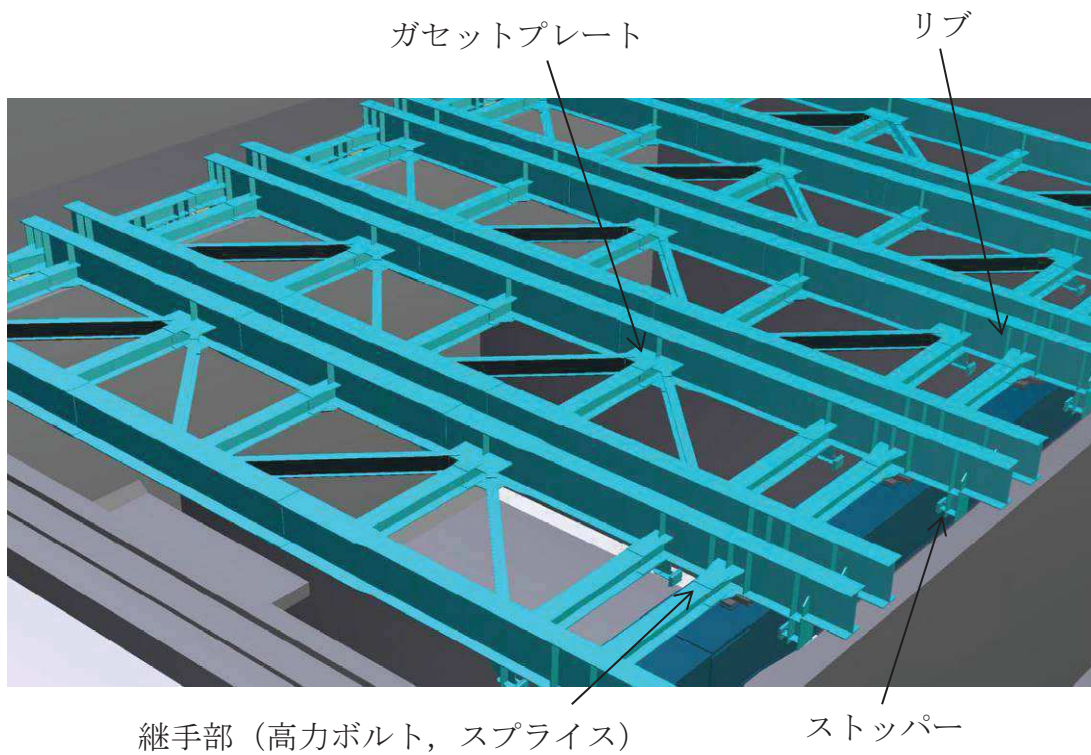
項目	重量 (t)
主桁断面 (フランジ, ウェブ)	79
横補強材断面 (フランジ, ウェブ)	31
ブレース断面 (フランジ, ウェブ)	10
継手部 (高力ボルト, スプライス)	23
ストッパー	4
ガセットプレート, リブ	10
その他 (支承部高さ調整プレート, 点検用手摺, 吊金具)	7
合計	164
第 2.2-2 表に記載の値	170

2. 大梁

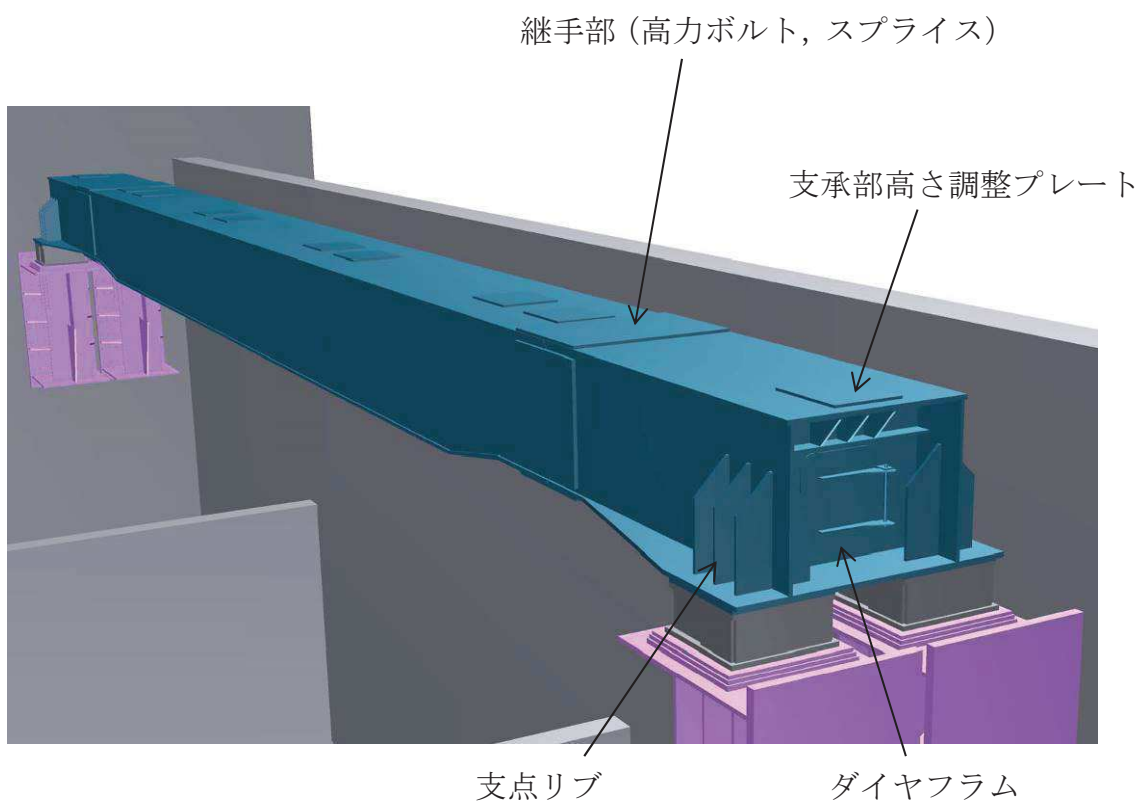
添付 8-2 表に大梁質量の内訳を示す。主要部材である大梁の他に継手や支点リブ等で構成されており、これらの部材も含めて合計 66t となるため、第 2.2-2 表では切り上げて 70t と表示している。内訳に記載の部材の概略構造について添付 8-2 図に示す。

添付 8-1 表 フレーム質量内訳

項目	重量 (t)
大梁断面 (フランジ, ウェブ)	51
継手部 (高力ボルト, スプライス)	8
ダイヤフラム, 支点リブ	5
その他 (支承部高さ調整プレート, マンホール, 吊金具)	2
合計	66
第 2.2-2 表に記載の値	70



添付 8-1 図 フレームの概略図



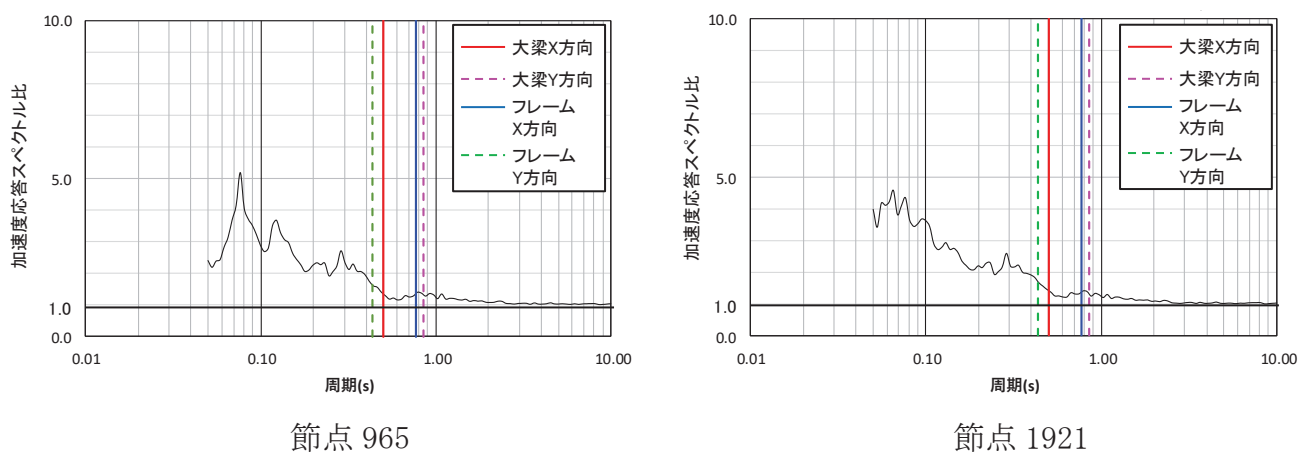
添付 8-2 図 大梁の概略図

竜巻防護ネットと海水ポンプ室の相互作用について

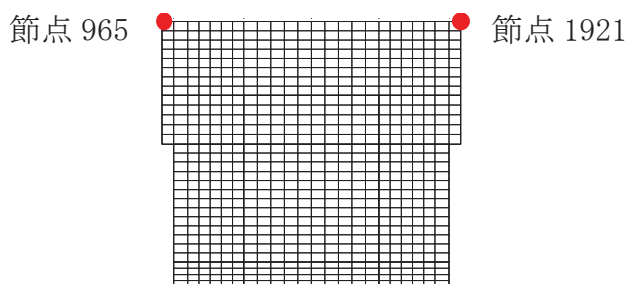
竜巻防護ネットは海水ポンプ室上端に設置される構造となることから、地震時の動的な相互作用の影響について確認する。

1. 固有周期の比較

竜巻防護ネットと海水ポンプ室の固有周期について比較，確認する。竜巻防護ネットの固有周期については添付資料 4 に詳細を示しているが，大梁及びフレームの主要なモードと海水ポンプ室の入力地震動に対する加速度応答スペクトル比について添付 9-1 図に示す。また，添付 9-1 図に示す加速度応答スペクトル比を確認した位置について添付 9-2 図に示す。



添付 9-1 図 海水ポンプ室の加速度応答スペクトル比
(大梁及びフレームの 1 次周期との比較)



添付 9-2 図 海水ポンプ室の地震応答解析モデル

竜巻防護ネットの主要モードは 0.3 秒～1.0 秒の周期帯に存在し，海水ポンプ室の増幅周期と異なっていることが分かる。このことから，双方の応答が互いに影響を与える共振の発生は考えられない。

2. 質量の比較

竜巻防護ネットと海水ポンプ室の質量について添付 9-1 表に示す。

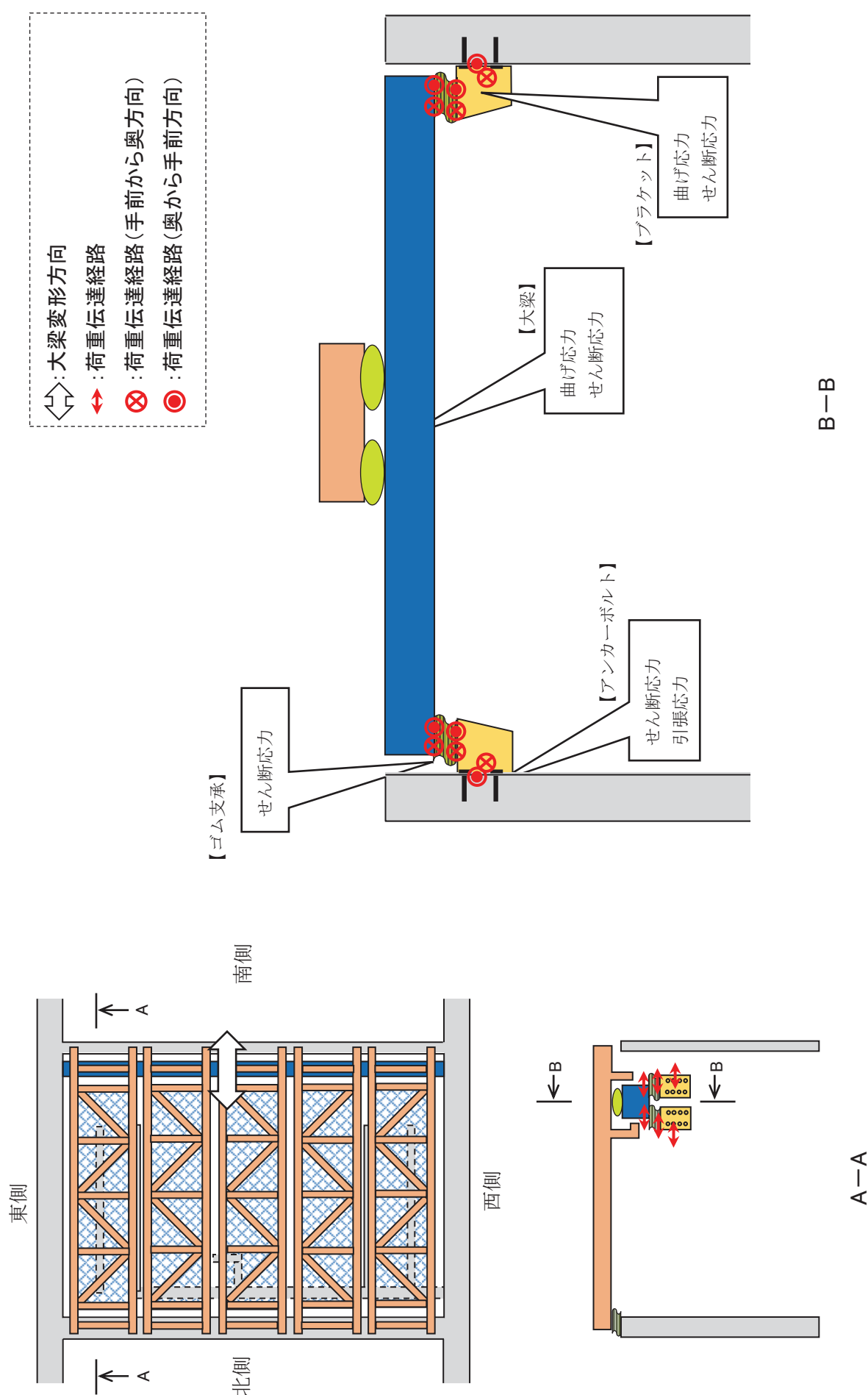
添付 9-1 表 竜巻防護ネットと海水ポンプ室の質量

	質量 (t)
竜巻防護ネット	約 500
海水ポンプ室	約 80, 000

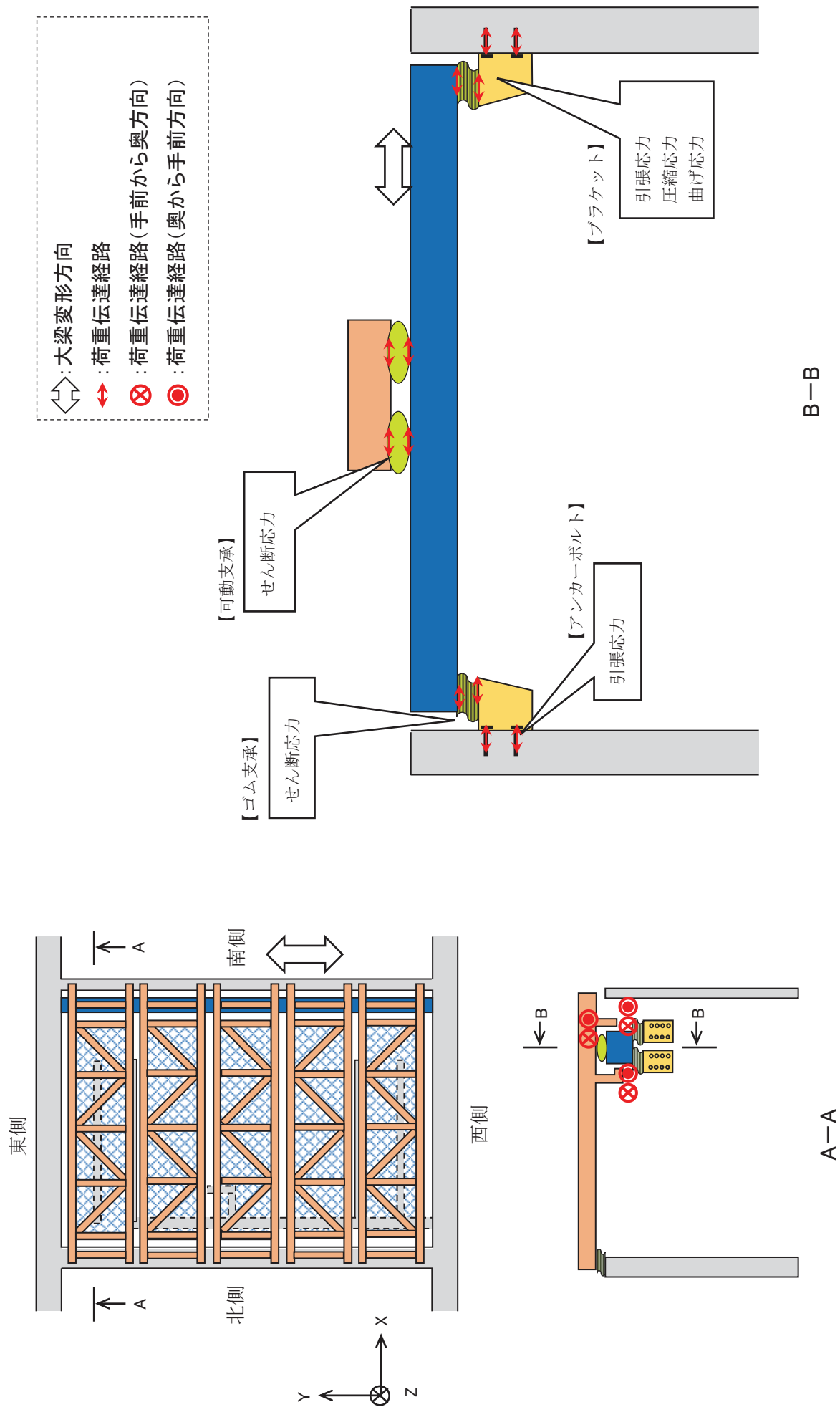
表に示すとおり竜巻防護ネットの質量は海水ポンプ室の質量の 1%未満であり，竜巻防護ネットの振動が海水ポンプ室の振動へ及ぼす影響は小さいものと考えられる。

以上の検討結果より，竜巻防護ネットと海水ポンプ室とは連成モデルとはせずに，竜巻防護ネットの設計においては，海水ポンプ室の地震応答解析より得られた地震応答を適用することとしている。

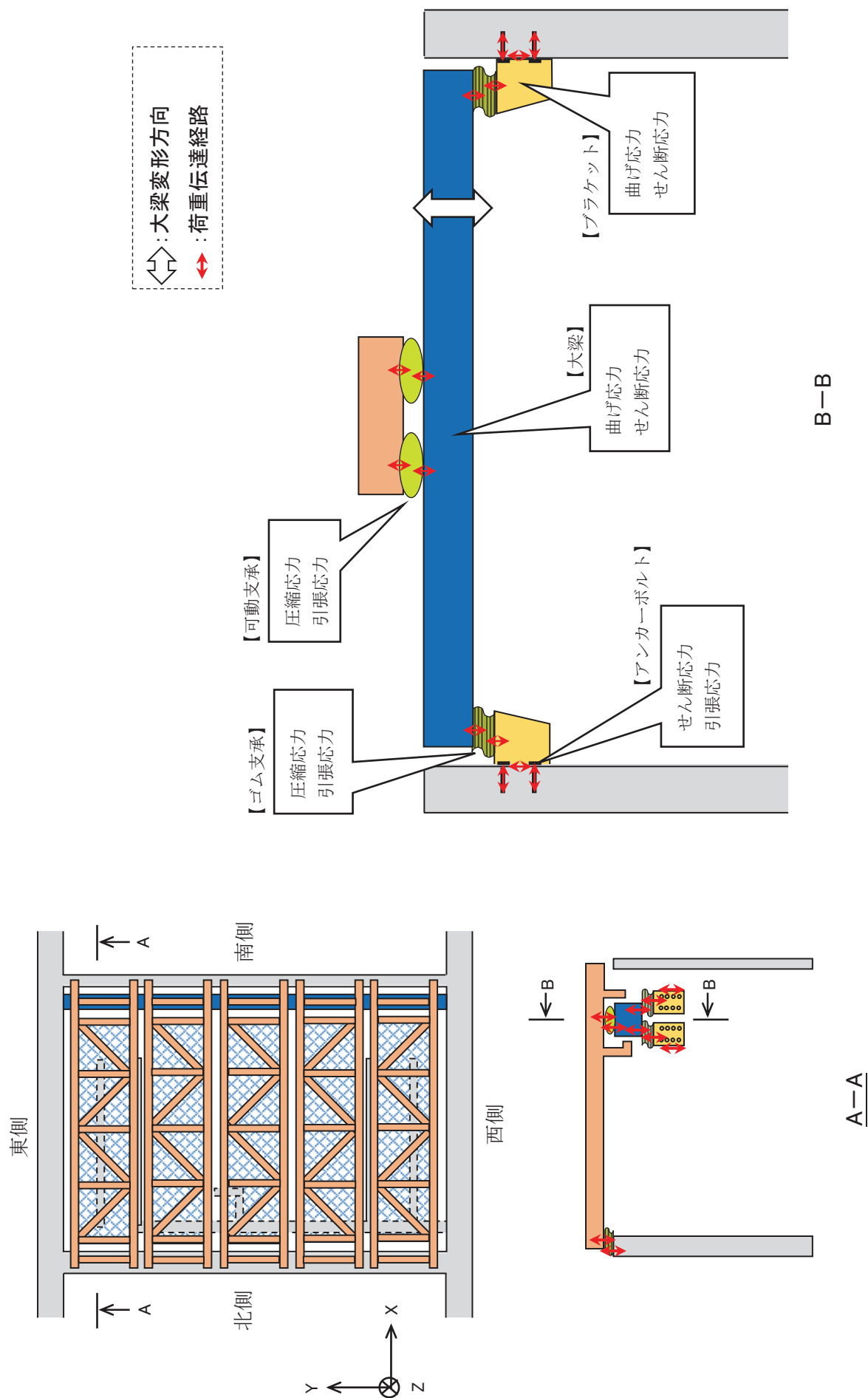
荷重傳達メカニズム図 (大梁 X 方向一次モード)



荷重伝達イメージ図（大梁 Y 方向一次モード）



荷重伝達イメージ図（大梁 Z 方向一次モード）



女川原子力発電所 2号炉

外部からの衝撃による損傷の防止

(竜巻)

枠囲みの内容は商業機密又は防護上の観点から公開できません

第 6 条：外部からの衝撃による損傷の防止
(竜巻)

< 目 次 >

1. 基本方針
 - 1.1 要求事項の整理
 - 1.2 追加要求事項に対する適合性
 - (1) 位置，構造及び設備
 - (2) 安全設計方針
 - (3) 適合性説明
 - 1.3 気象等
2. 外部からの衝撃による損傷の防止（竜巻）
 - 別添資料 1 竜巻影響評価について
 - 別添資料 2 竜巻影響評価におけるフジタモデルの適用について
 - 別添資料 3 運用，手順説明資料

＜概 要＞

- 1.において、設計基準対処設備の設置許可基準規則、技術基準規則の追加要求事項を明確化するとともに、それら要求に対する発電所における適合性を示す。
- 2.において、設計基準対処設備について、追加要求事項に適合するために必要となる機能を達成するための設備又は運用等について説明する。

1. 基本方針

1.1 要求事項の整理

外部からの衝撃による損傷の防止について，設置許可基準規則第 6 条及び技術基準規則第 7 条において，追加要求事項を明確化する（第 1.1-1 表）。

第 1.1-1 表 設置許可基準規則第 6 条及び技術基準規則第 7 条要求事項

設置許可基準規則 第 6 条（外部からの衝撃による損傷の防止）	技術基準規則 第 7 条（外部からの衝撃による損傷の防止）	備考
安全施設は、想定される自然現象（地震及び津波を除く。次項において同じ。）が発生した場合においても安全機能を損なわないものでなければならぬ。	設計基準対象施設が想定される自然現象（地震及び津波を除く。）によりその安全性を損なうおそれがある場合は、防護措置、基礎地盤の改良その他の適切な措置を講じなければならない。	追加要求事項
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。		追加要求事項
3 安全施設は、工場等内又はその周辺において想定される発電用原子炉施設の安全性を損なわせる原因となるおそれがある事故であって人為によるもの（故意によるものを除く。）に対して安全機能を損なわないものでなければならない。	2 周辺監視区域に隣接する地域に事業所、鉄道、道路その他の外部からの衝撃が発生するおそれがある要因がある場合には、事業所における火災又は爆発事故、危険物を搭載した車両、船舶又は航空機の事故その他の敷地及び敷地周辺の状況から想定される事象であって人為によるもの（故意によるものを除く。）により発電用原子炉施設の安全性が損なわれないよう、防護措置その他の適切な措置を講じなければならない。 3 航空機の墜落により発電用原子炉施設の安全性を損なうおそれがある場合は、防護措置その他の適切な措置を講じなければならない。	追加要求事項

1.2 追加要求事項に対する適合性

(1) 位置、構造及び設備

五 発電用原子炉及びその附属施設の位置、構造及び設備

ロ 発電用原子炉施設の一般構造

(3) その他の主要な構造

本発電用原子炉施設は、(1)耐震構造、(2)耐津波構造に加え、以下の基本的方針のもとに安全設計を行う。

a. 設計基準対象施設

(a) 外部からの衝撃による損傷の防止

安全施設は、発電所敷地で想定される洪水、風(台風)、竜巻、凍結、降水、積雪、落雷、地すべり、火山の影響、生物学的事象、森林火災及び高潮の自然現象(地震及び津波を除く。)又はその組合せに遭遇した場合において、自然現象そのものがもたらす環境条件及びその結果として施設で生じ得る環境条件においても安全機能を損なわない設計とする。

なお、発電所敷地で想定される自然現象のうち、洪水及び地すべりについては、立地的要因により設計上考慮する必要はない。

上記に加え、重要安全施設は、科学的技術的知見を踏まえ、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じる応力について、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る。

また、安全施設は、発電所敷地又はその周辺において想定される飛来物(航空機落下)、ダムの崩壊、爆発、近隣工場等の火災、有毒ガス、船舶の衝突、電磁的障害の発電用原子炉施設の安全性を損なわせる原因となるおそれがある事象であって人為によるもの(故意によるものを除く。)に対して安全機能を損なわない設計とする。

なお、発電所敷地又はその周辺において想定される人為事象のうち、飛来物(航空機落下)については、確率的要因により設計上考慮する必要はない。ダムの崩壊については立地的要因により考慮する必要はない。また、船舶の衝突については、航路からの離隔距離が確保されていること等により考慮する必要はない。

自然現象及び発電所敷地又はその周辺において想定される発電用原子炉施設の安全性を損なわせる原因となるおそれがある事象であって人為によるもの(故意によるものを除く。)の組み合わせについて

は、地震、津波、風（台風）、竜巻、凍結、降水、積雪、落雷、火山の影響、生物学的事象、森林火災等を考慮する。事象が単独で発生した場合の影響と比較して、複数の事象が重畳することで影響が増長される組み合わせを特定し、その組み合わせの影響に対しても安全機能を損なわない設計とする。

ここで、想定される自然現象及び発電所敷地又はその周辺において想定される発電用原子炉施設の安全性を損なわせる原因となるおそれがある事象であって人為によるもの（故意によるものを除く。）に対して、安全施設が安全機能を損なわないために必要な安全施設以外の施設又は設備等（重大事故等対処設備を含む。）への措置を含める。

(a-2) 竜巻

安全施設は、想定される竜巻が発生した場合においても、作用する設計荷重に対して、その安全機能を損なわない設計とする。また、安全施設は、過去の竜巻被害状況及びプラント配置から想定される竜巻に随伴する事象に対して、安全機能を損なわない設計とする。

竜巻に対する防護設計を行うための設計竜巻の最大風速は、100m/sとし、設計荷重は、設計竜巻による風圧力による荷重、気圧差による荷重及び飛来物が安全施設に衝突する際の衝撃荷重を組み合わせた設計竜巻荷重並びに安全施設に常時作用する荷重、運転時荷重及びその他竜巻以外の自然現象による荷重等を適切に組み合わせたものとして設定する。

安全施設の安全機能を損なわないようにするため、安全施設に影響を及ぼす飛来物の発生防止対策を実施するとともに、作用する設計荷重に対する安全施設及び安全施設を内包する区画の構造健全性の確保、若しくは、飛来物による損傷を考慮して、代替設備により必要な機能を確保すること、安全上支障のない期間での修復等の対応を行うこと又はそれらを適切に組み合わせることで、その安全機能を損なわない設計とする。

飛来物の発生防止対策として、飛来物となる可能性のあるもののうち、資機材、車両等については飛来した場合の運動エネルギー又は貫通力が設定する設計飛来物（鋼製材（長さ 4.2m×幅 0.3m×高さ 0.2m、質量 135kg、飛来時の水平速度 46.6m/s、飛来時の鉛直速度 16.7～34.7m/s）より大きなものに対し、それぞれ固縛、固定又は防護すべき施設からの離隔対策を実施する。

(2) 安全設計方針

1.8 外部からの衝撃による損傷の防止に関する基本方針

安全施設は、想定される自然現象（地震及び津波を除く。）及び想定される発電用原子炉施設の安全性を損なわせる原因となるおそれがある事象であって人為によるもの（故意によるものを除く。）に対して、安全機能を損なわない設計とする。安全機能が損なわれないことを確認する必要がある施設を、「発電用軽水型原子炉施設の安全機能の重要度分類に関する審査指針」で規定されている重要度分類（以下 1.8 では「安全重要度分類」という。）のクラス 1，クラス 2 及びクラス 3 に属する構築物，系統及び機器とする。

その上で、上記構築物，系統及び機器の中から、発電用原子炉を停止するため、また、停止状態にある場合は引き続きその状態を維持するために必要な異常の発生防止の機能又は異常の影響緩和の機能を有する構築物，系統及び機器並びに使用済燃料プールの冷却機能及び給水機能を維持するために必要な異常の発生防止の機能又は異常の影響緩和の機能を有する構築物，系統及び機器として安全重要度分類のクラス 1，クラス 2 及び安全評価上その機能に期待するクラス 3 に属する構築物，系統及び機器を外部事象から防護する対象（以下「外部事象防護対象施設」という。）とし、機械的強度を有すること等により安全機能を損なわない設計とする。

また、外部事象防護対象施設を内包する建屋（外部事象防護対象施設となる建屋を除く。）は、機械的強度を有すること等により、内包する外部事象防護対象施設の安全機能を損なわない設計及び外部事象防護対象施設へ波及的影響を及ぼさない設計とする。ここで、外部事象防護対象施設及び外部事象防護対象施設を内包する建屋を併せて、外部事象防護対象施設等という。

上記に含まれないその他の施設については、構造健全性の確保、若しくは損傷を考慮して、代替設備により必要な機能を確保すること、安全上支障のない期間で修復等の対応を行うこと、又は、それらを適切に組み合わせることで、その安全機能を損なわない設計とする。

1.8.2 竜巻防護に関する基本方針

1.8.2.1 設計方針

(1) 竜巻に対する設計の基本方針

安全施設が竜巻に対して、発電用原子炉施設の安全性を確保するために必要な安全機能を損なわないよう、基準竜巻，設計竜巻及び設計荷重を適切に設定し、以下の事項に対して、対策を行い、建屋による防護，

構造健全性の維持、代替設備の確保等によって、安全機能を損なわない設計とする。

また、安全施設は、設計荷重による波及的影響によって、安全機能を損なわない設計とする。

- a. 飛来物の衝突による施設の貫通及び裏面剥離
- b. 設計竜巻による風圧力による荷重、気圧差による荷重及び設計飛来物による衝撃荷重を組み合わせた設計竜巻荷重並びにその他の組み合わせ荷重（常時作用している荷重、運転時荷重、竜巻以外の自然現象による荷重及び設計基準事故時荷重）を適切に組み合わせた設計荷重
- c. 竜巻による気圧の低下
- d. 外気と繋がっている箇所への風の流入

設計竜巻によってその安全機能が損なわれないことを確認する必要がある施設を、安全重要度分類のクラス1、クラス2及びクラス3に属する構築物、系統及び機器とする。

設計竜巻によってその安全機能が損なわれないことを確認する必要がある施設のうち、外部事象防護対象施設は、設計荷重に対し機械的強度を有すること等により、安全機能を損なわない設計とする。

竜巻影響評価の対象施設としては、「1.8.2.1(3) 外部事象防護対象施設等のうち評価対象施設」及び「1.8.2.1(4) 外部事象防護対象施設等に波及的影響を及ぼし得る評価対象施設」に示す施設を、竜巻影響評価の対象施設とする。

なお、「基準地震動及び耐震設計方針に係る審査ガイド」の重要度分類における耐震Sクラスの設計を要求される設備（系統、機器）及び建屋、構築物のうち、竜巻の影響を受ける可能性がある施設を抽出した結果、追加で「1.8.2.1(3) 外部事象防護対象施設等のうち評価対象施設」に反映する施設はない。

竜巻に対する防護設計を行う、外部事象防護対象施設等のうち評価対象施設及び外部事象防護対象施設等に波及的影響を及ぼし得る施設を「評価対象施設等」という。

外部事象防護対象施設の安全機能を損なわないようにするため、外部事象防護対象施設等に影響を及ぼす飛来物の発生防止対策を実施するとともに、作用する設計荷重に対する外部事象防護対象施設の構造健全性の維持、外部事象防護対象施設を内包する区画の構造健全性の確保若しくは飛来物による損傷を考慮して、代替設備により必要な機能を確保すること、安全上支障のない期間での修復等の対応又はそれらを適切に

組み合わせた設計とする。

屋外に設置する外部事象防護対象施設の構造健全性の維持又は外部事象防護対象施設を内包する区画の構造健全性の確保において、それらを防護するために設置する竜巻飛来物防護対策設備は、竜巻防護ネット等から構成し、飛来物から外部事象防護対象施設を防護できる設計とする。

(2) 設計竜巻の設定

「添付書類六 7.2 竜巻」において設定した基準竜巻の最大風速は 92m/s とする。

設計竜巻の設定に際して、発電所は北東が太平洋に面し、三方を山及び森林に囲まれた狭隘な地形であり、地形効果による風の増幅について評価した結果、増幅を考慮する必要はないことを確認したが、将来的な気候変動による竜巻発生の不確実性を踏まえ、基準竜巻の最大風速を安全側に切り上げて、設計竜巻の最大風速は 100m/s とする。

(3) 外部事象防護対象施設等のうち評価対象施設

外部事象防護対象施設は、設計荷重に対し機械的強度を有すること等により安全機能を損なわない設計とする。

外部事象防護対象施設は、外殻となる施設（建屋、構築物）（以下「外殻となる施設」という。）に内包され、外気と繋がっておらず設計竜巻荷重の影響から防護される施設（以下「外殻となる施設に内包され防護される施設（外気と繋がっている施設を除く。）」という。）、設計竜巻荷重の影響を受ける屋外施設（以下「屋外施設」という。）、外殻となる施設に内包されるため、設計竜巻の風圧力による荷重及び設計飛来物等による衝撃荷重の影響から防護されるが、外気と繋がっており設計竜巻の気圧差による荷重の影響を受ける施設（以下「屋内の施設で外気と繋がっている施設」という。）及び外殻となる施設に内包されるが設計竜巻荷重の影響から防護が期待できない施設（以下「外殻となる施設による防護機能が期待できない施設」という。）に分類し、このうち、外殻となる施設に内包され防護される施設（外気と繋がっている施設を除く。）は内包する建屋により防護する設計とすることから、評価対象施設は、屋外施設、屋内の施設で外気と繋がっている施設及び外殻となる施設による防護機能が期待できない施設とし、以下のように抽出する。

なお、外殻となる施設による防護機能が期待できない施設については、「1.8.2.1(3)a. 屋外施設」のうち外部事象防護対象施設を内包する区

面の構造健全性維持可否の観点並びに設計飛来物の衝突等による開口部の開放及び開口部建具の貫通の観点から抽出する。

また、上記に含まれない構築物、系統及び機器は、竜巻及びその随伴事象により損傷した場合であっても、代替手段があること等により安全機能は損なわれない。

a．屋外施設（外部事象防護対象施設を内包する区画を含む）

（a）原子炉補機冷却海水ポンプ（配管，弁含む。）

（b）高圧炉心スプレイ補機冷却海水ポンプ（配管，弁含む。）

（c）高圧炉心スプレイ補機冷却海水ストレーナ

（d）復水貯蔵タンク

（e）非常用ガス処理系（屋外露出部）

（f）排気筒

（g）2号原子炉建屋

<以下，外部事象防護対象施設を内包する区画>

外部事象防護対象施設を内包する区画を，以下のとおり抽出する。

（h）2号タービン建屋（気体廃棄物処理設備排気放射線モニタを内包）

（i）2号制御建屋（中央制御室を内包）

（j）2号地下軽油タンクピット（軽油タンクを内包）

b．屋内の施設で外気と繋がっている施設

（a）中央制御室換気空調系

（b）計測制御電源室換気空調系

（c）原子炉補機室換気空調系

（d）原子炉棟給排気隔離弁（原子炉棟換気空調系）

（e）軽油タンク（燃料移送ポンプ等含む）

c．外殻となる施設による防護機能が期待できない施設

（a）原子炉補機室換気空調系

(4) 外部事象防護対象施設等に波及的影響を及ぼし得る施設

外部事象防護対象施設等に波及的影響を及ぼし得る評価対象施設としては、当該施設の破損等により外部事象防護対象施設等に波及的影響を及ぼして安全機能を喪失させる可能性がある施設、又はその施設の特定の区画とする。

外部事象防護対象施設等に波及的影響を及ぼし得る評価対象施設と

しては、外部事象防護対象施設等を除く構築物、系統及び機器の中から、外部事象防護対象施設等に機械的影響を及ぼし得る施設及び外部事象防護対象施設に機能的影響を及ぼし得る施設を以下のとおり抽出する。

a. 外部事象防護対象施設等に機械的影響を及ぼし得る施設

外部事象防護対象施設等に機械的影響を及ぼし得る施設としては、施設の高さと外部事象防護対象施設等との距離を考慮して、倒壊により外部事象防護対象施設等を損傷させる可能性がある施設を、外部事象防護対象施設等に機械的影響を及ぼし得る施設として抽出する。

- ・ 2号補助ボイラー建屋
- ・ 1号制御建屋
- ・ サイトバンカ建屋
- ・ 海水ポンプ室門型クレーン

b. 外部事象防護対象施設に機能的影響を及ぼし得る施設

外部事象防護対象施設に機能的影響を及ぼし得る施設としては、屋外にある外部事象防護対象施設の付属設備で、風圧力及び設計飛来物の衝突等による損傷により外部事象防護対象施設の安全機能を損なわせる可能性がある施設を、外部事象防護対象施設に機能的影響を及ぼし得る施設として抽出する。

- ・ 非常用ディーゼル発電設備
(排気消音器、機関ミスト配管、潤滑油サンプタンクミスト配管、燃料デイトankミスト配管、燃料油ドレンタンクミスト配管)
- ・ 高圧炉心スプレー系ディーゼル発電設備
(排気消音器、機関ミスト配管、潤滑油補給タンクミスト配管、燃料デイトankミスト配管、燃料油ドレンタンクミスト配管)
- ・ 軽油タンク
(軽油タンクベント配管)

(5) 設計飛来物の設定

敷地全体を俯瞰した現地調査及び検討を行い、発電所構内の資機材、車両等の設置状況を踏まえ、評価対象施設等に衝突する可能性のある飛来物を抽出する。

飛来物に係わる現地調査結果及び「原子力発電所の竜巻影響評価ガイド(平成25年6月19日 原規技発13061911号 原子力規制委員会決定)」に示されている設計飛来物の設定例を参照し設定する。

設計飛来物は、浮き上がりの有無、運動エネルギー及び貫通力を踏まえ、鋼製材（長さ 4.2m×幅 0.3m×高さ 0.2m、質量 135kg、飛来時の水平速度 46.6m/s、飛来時の鉛直速度 16.7～34.7m/s）を設定する。

また、竜巻飛来物防護対策設備である竜巻防護ネットを通過し得る可能性があり、鋼製材にて包含できないことから、砂利も設計飛来物とする。

第 1.8.2-1 表に発電所における設計飛来物を示す。

飛来物の発生防止対策については、現地調査により抽出した飛来物や発電所敷地内に持ち込まれる資機材、車両等の寸法、質量及び形状から飛来の有無を判断し、運動エネルギー及び貫通力を考慮して、衝突時に建屋等又は竜巻飛来物防護対策設備に与えるエネルギー又は貫通力が設計飛来物のうち鋼製材によるものより大きく、外部事象防護対象施設を防護できない可能性があるものは固縛、固定又は評価対象施設等からの離隔を実施し、確実に飛来物とならない運用とする。

(6) 荷重の組み合わせと許容限界

竜巻に対する防護設計を行うため、評価対象施設等に作用する設計竜巻荷重の算出、設計竜巻荷重の組み合わせの設定、設計竜巻荷重と組み合わせる荷重の設定及び許容限界について以下に示す。

a. 評価対象施設等に作用する設計竜巻荷重

設計竜巻により評価対象施設等に作用する荷重として「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 ）」を以下に示すとおり算出する。

(a) 風圧力による荷重（ W_w ）

設計竜巻の最大風速による荷重であり、「建築基準法施行令」（昭和 25 年 11 月 16 日政令第 338 号）、「日本建築学会 建築物荷重指針・同解説」及び建設省告示 1454 号（平成 12 年 5 月 31 日）に準拠して、次式のとおり算出する。

$$W_w = q \cdot G \cdot C \cdot A$$

ここで、

W_w ：風圧力による荷重

q ：設計用速度圧

G ：ガスト影響係数（＝1.0）

C ：風力係数（施設の形状や風圧力が作用する部位（屋根・壁等）に応じて設定する。）

A : 施設の受圧面積

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

ここで,

ρ : 空気密度

V_D : 設計竜巻の最大風速

ただし、竜巻による最大風速は、一般的には水平方向の風速として算定されるが、鉛直方向の風圧力に対してぜい弱と考えられる評価対象施設等が存在する場合には、フジタモデルの風速場により求まる鉛直方向の風速等に基づいて算出した鉛直方向の風圧力についても考慮した設計とする。

(b) 気圧差による荷重 (W_P)

外気と隔離されている区画の境界部が気圧差による圧力影響を受ける設備及び外部事象防護対象施設を内包する区画の外壁、屋根等においては、設計竜巻による気圧低下によって生じる評価対象施設等の内外の気圧差による圧力荷重が発生するため、保守的に「閉じた施設」を想定し次式のとおり算出する。

$$W_P = \Delta P_{max} \cdot A$$

ここで,

W_P : 気圧差による荷重

ΔP_{max} : フジタモデルにより求まる最大気圧低下量

A : 施設の受圧面積

(c) 設計飛来物による衝撃荷重 (W_M)

飛来物の衝突方向及び衝突面積を考慮して設計飛来物が評価対象施設等に衝突した場合の影響が大きくなる向きで衝撃荷重を算出する。

b. 設計竜巻荷重の組み合わせ

評価対象施設等の設計に用いる設計竜巻荷重は、設計竜巻による風圧力による荷重 (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、複合荷重 W_{T1} 及び W_{T2} は米国原子力規制委員会の基準類を参考として、以下のとおり設定する。

$$W_{T1} = W_P$$

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

なお、評価対象施設等には W_{T1} 及び W_{T2} の両荷重をそれぞれ作用させる。

c. 設計竜巻荷重と組み合わせる荷重の設定

設計竜巻荷重と組み合わせる荷重は、以下のとおり設定する。

(a) 評価対象施設等に常時作用する荷重，運転時荷重

評価対象施設に作用する荷重として，自重等の常時作用する荷重，内圧等の運転時荷重を適切に組み合わせる。

(b) 竜巻以外の自然現象による荷重

竜巻は，積乱雲及び積雲に伴って発生する現象であり⁽¹⁾，積乱雲の発達時に竜巻と同時発生する可能性がある自然現象は，雷，雪，ひょう及び降水である。これらの自然現象の組み合わせにより発生する荷重は，以下のとおり設計竜巻荷重に包絡される。

i) 雷

竜巻と雷が同時に発生する場合においても，雷によるプラントへの影響は，雷撃であるため雷による荷重は発生しない。

ii) 雪

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

冬期に竜巻が襲来する場合は竜巻通過前後に降雪を伴う可能性はあるが，上昇流の竜巻本体周辺では，竜巻通過時に雪は降らない。また，下降流の竜巻通過時は，竜巻通過前に積もった雪の大部分は竜巻の風により吹き飛ばされ，雪による荷重は十分小さく設計竜巻荷重に包絡される。

iii) ひょう

ひょうは積乱雲から降る直径 5mm 以上の氷の粒⁽²⁾であり，仮に直径 10cm 程度の大型のひょうを想定した場合，その重量は約 0.5kg となる。直径 10cm 程度のひょうの終端速度は 59m/s⁽³⁾，運動エネルギーは約 0.9kJ であり，設計飛来物の運動エネルギーと比べ十分に小さく，ひょうの衝突による荷重は設計竜巻荷重に包絡される。

iv) 降水

竜巻と降水が同時に発生する場合においても，雨水により屋外施設

に荷重の影響を与えることはなく、また降雨による荷重は十分小さいため、設計竜巻荷重に包絡される。

(c) 設計基準事故時荷重

外部事象防護対象施設は、設計竜巻によって安全機能を損なわない設計とするため、設計竜巻は原子炉冷却材喪失事故等の設計基準事故の起因とはならないことから、設計竜巻と設計基準事故は独立事象となる。

設計竜巻と設計基準事故が同時に発生する頻度は十分小さいことから、設計基準事故時荷重と設計竜巻荷重との組み合わせは考慮しない。

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、竜巻による風荷重等の影響を受ける屋外設備としては原子炉補機冷却海水ポンプ及び高圧炉心スプレイ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原子炉補機冷却海水ポンプ及び高圧炉心スプレイ補機冷却海水ポンプの圧力及び温度は変わらないため、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合せは考慮しない。

d. 許容限界

建屋及び構築物の設計において、設計飛来物等の衝突による貫通及び裏面剥離発生の有無の評価については、貫通及び裏面剥離が発生しない部材厚（貫通限界厚さ及び裏面剥離限界厚さ）と部材の最小厚さを比較することにより行う。さらに、設計荷重により、発生する変形又は応力が以下の法令、規格、基準、指針類等に準拠し算定した許容限界を下回る設計とする。

- ・ 建築基準法
- ・ 日本工業規格
- ・ 日本建築学会及び土木学会等の基準、指針類
- ・ 原子力発電所耐震設計技術指針 JEAG4601-1987（日本電気協会）
- ・ 震災建築物の被災度区分判定基準及び復旧技術指針（日本建築防災協会）
- ・ 原子力エネルギー協会（NEI）の基準・指針類

系統及び機器の設計において、設計飛来物の衝突による貫通の有無の評価については、貫通が発生しない部材厚である貫通限界厚さと部

材の最小厚さを比較することにより行う。設計飛来物が貫通することを考慮する場合には，設計荷重に対して防護対策を考慮した上で，系統及び機器に発生する応力が以下の規格，基準及び指針類に準拠し算定した許容応力度等に基づく許容限界を下回る設計とする。

- ・ 日本工業規格
- ・ 日本機械学会の基準，指針類
- ・ 原子力発電所耐震設計技術指針 JEAG4601-1987（日本電気協会）

(7) 評価対象施設の設計方針

評価対象施設の設計荷重に対する防護設計方針を以下に示す。

a. 屋外施設（外部事象防護対象施設を内包する区画を含む）

外部事象防護対象施設のうち屋外施設は，設計荷重に対して，安全機能が維持される設計とし，必要に応じて竜巻防護ネット等の竜巻飛来物防護対策設備又は運用による竜巻防護対策を講じる方針とする。

(a) 原子炉補機冷却海水ポンプ（配管，弁含む。）

原子炉補機冷却海水ポンプ（配管，弁含む。）は，設計飛来物（鋼製材）の衝突により貫通することを考慮し，竜巻防護ネットの設置等による竜巻防護対策を行うことにより，設計飛来物の衝突を防止し，風圧力による荷重，気圧差による荷重及び原子炉補機冷却海水ポンプ（配管，弁含む。）に常時作用する荷重に対して，構造健全性が維持され，安全機能を損なわない設計とする。

(b) 高圧炉心スプレイ補機冷却海水ポンプ（配管，弁含む。）

高圧炉心スプレイ補機冷却海水ポンプ（配管，弁含む。）は，設計飛来物（鋼製材）の衝突により貫通することを考慮し，竜巻防護ネットの設置等による竜巻防護対策を行うことにより，設計飛来物の衝突を防止し，風圧力による荷重，気圧差による荷重及び高圧炉心スプレイ補機冷却海水ポンプ（配管，弁含む。）に常時作用する荷重に対して，構造健全性が維持され，安全機能を損なわない設計とする。

(c) 高圧炉心スプレイ補機冷却海水ストレーナ

高圧炉心スプレイ補機冷却海水ストレーナは，設計飛来物の衝突により貫通することを考慮し，竜巻防護ネットの設置等による竜巻防護対策を行うことにより，設計飛来物の衝突を防止し，風圧力による荷

重、気圧差による荷重及び高圧炉心スプレイ補機冷却海水ストレーナに常時作用する荷重に対して、構造健全性が維持され、安全機能を損なわない設計とする。

(d) 復水貯蔵タンク

復水貯蔵タンクは、風圧力による荷重、気圧差荷重及び設備に常時作用する荷重に対して構造健全性が維持され、安全機能を損なわない設計とする。設計飛来物の衝突により、復水貯蔵タンクの部材が損傷したとしても、安全機能を損なわない設計とする。

(e) 非常用ガス処理系（屋外露出部）

非常用ガス処理系の屋外露出部は、設計飛来物の衝突により貫通することを考慮しても、閉塞することはなく、非常用ガス処理系の排気機能が維持される設計とする。さらに、非常用ガス処理系の屋外露出部は開かれた構造物であり気圧差荷重も作用しないことから、風圧力による荷重及び非常用ガス処理系の屋外露出部に常時作用する荷重に対して、構造健全性が維持され、安全機能を損なわない設計とする。

(f) 排気筒

排気筒の筒身については、設計飛来物の衝突により貫通することを考慮しても、閉塞することはなく、排気筒の排気機能が維持される設計とする。さらに、排気筒は開かれた構造物であり気圧差荷重は作用しないことから、風圧力による荷重及び排気筒に常時作用する荷重に対して、構造健全性が維持され、安全機能を損なわない設計とする。

また、設計飛来物の衝突により部材が損傷した場合においても構造健全性が維持され、排気筒全体が倒壊しない設計とする。

(g) 2号原子炉建屋

原子炉建屋原子炉棟外壁の原子炉建屋外側ブローアウトパネルについては、設計竜巻による気圧低下による開放及び設計飛来物の貫通により、原子炉建屋原子炉棟の放射性物質の閉じ込め機能を損なう可能性があるが、開放又は貫通した場合は、速やかにプラントを停止し、補修を実施する。

また、2号原子炉建屋は、外部事象防護対象施設を内包する建屋でもあるため、風圧力による荷重、気圧差による荷重、設計飛来物の衝撃荷重及び常時作用する荷重に対して、構造骨組の構造健全性が維持

されるとともに，2号原子炉建屋内の外部事象防護対象施設が安全機能を損なわない設計とする。また，設計飛来物の衝突時においても，貫通及び裏面剥離の発生により，原子炉建屋内の外部事象防護対象施設が安全機能を損なわない設計とする。

＜以下，外部事象防護対象施設を内包する区画＞

(h) 2号制御建屋及び2号タービン建屋

2号制御建屋及び2号タービン建屋は，風圧力による荷重，気圧差による荷重，設計飛来物等の衝撃荷重及び常時作用する荷重に対して，構造骨組の構造健全性を維持されるとともに，屋根，壁及び開口部（扉類）の破損により当該建屋内の外部事象防護対象施設が安全機能を損なわない設計とする。また，設計飛来物等の衝突時においても，貫通及び裏面剥離の発生により，当該建屋内外部事象防護対象施設が安全機能を損なわない設計とする。

(i) 2号地下軽油タンクピット

2号地下軽油タンクピットは，風圧力による荷重，気圧差による荷重に対して構造健全性を維持する設計とする。飛来物の衝突により，ピット頂版（鉄筋コンクリート造）は構造健全性を維持する設計とする。ハッチ（鋼製）は設計飛来物の衝突においても貫通せず，変形に留まる設計とすることで，ピットに内包する軽油タンク等の安全機能を損なわない設計とする。

- b. 外部事象防護対象施設のうち，屋内の施設で外気と繋がっている施設
外殻となる施設に内包され防護される外部事象防護対象施設のうち，外気と繋がっている施設は，設計荷重に対して，安全機能が維持される設計とし，必要に応じて竜巻飛来物防護対策設備等による竜巻防護対策を講じる方針とする。

(a) 中央制御室換気空調系，計測制御電源室換気空調系，原子炉補機室空調系及び原子炉棟給排気隔離弁（原子炉棟換気空調系）

中央制御室換気空調系，計測制御電源室換気空調系，原子炉補機室空調系及び原子炉棟給排気隔離弁（原子炉棟換気空調系）は，原子炉建屋又は制御建屋に内包されていることを考慮すると，風圧力による荷重及び設計飛来物による衝撃荷重は作用しないことから，気圧差による荷重及び設備に常時作用する荷重に対して，構造健全性が維持さ

れ、安全機能を損なわない設計とする。

(b) 軽油タンク（燃料移送ポンプ等を含む。）

軽油タンク及び燃料移送ポンプ等は、地下埋設されていることを考慮すると、風圧力による荷重及び設計飛来物による衝撃荷重は作用しないことから、気圧差による荷重に対して、構造健全性が維持され安全機能を損なわない設計とする。

c. 外殻となる施設等による防護機能が期待できない設備

外殻となる施設に内包される外部事象防護対象施設のうち、外殻となる施設が設計竜巻の影響により健全性が確保されず、貫通又は裏面剥離が発生し安全機能を損なう可能性がある場合には、施設の補強、竜巻飛来物防護対策設備又は運用による竜巻防護対策を実施することにより、安全機能を損なわない設計とする。

(a) 原子炉補機室換気空調系

原子炉補機室換気空調系は、設計飛来物の衝突により、開口部建具に貫通が発生することを考慮し、竜巻防護対策を行うことにより、原子炉補機室換気空調系への設計飛来物の衝突を防止し、原子炉補機室換気空調系の構造健全性が維持され、安全機能を損なわない設計とする。

d. 外部事象防護対象施設等に波及的影響を及ぼし得る評価対象施設

外部事象防護対象施設等に波及的影響を及ぼし得る評価対象施設については、設計荷重による影響を受ける場合においても外部事象防護対象施設等に影響を及ぼさないよう、設備又は運用による竜巻防護対策を実施することにより、外部事象防護対象施設等の安全機能を損なわない設計とする。

(a) 2号補助ボイラー建屋，1号制御建屋，サイトバンカ建屋

2号補助ボイラー建屋，1号制御建屋，サイトバンカ建屋は、風圧力による荷重，気圧差による荷重，設計飛来物による衝撃荷重及び自重等の常時作用する荷重に対して、倒壊により外部事象防護対象施設等へ波及的影響を及ぼさない設計とする。

(b) 海水ポンプ室門型クレーン

海水ポンプ室門型クレーンは、竜巻の襲来が予想される場合には、運転を中止し、停留位置に固定することにより、風圧力による荷重に

対して、外部事象防護対象施設等へ波及的影響を及ぼさない設計とする。

- (c) 非常用ディーゼル発電設備（排気消音器，機関ミスト配管，潤滑油サンプタンクミスト配管，燃料デイトンクミスト配管，燃料油ドレンタンクミスト配管），高圧炉心スプレイ系ディーゼル発電設備（排気消音器，機関ミスト配管，潤滑油補給タンクミスト配管，燃料デイトンクミスト配管，燃料油ドレンタンクミスト配管），軽油タンクベント配管

非常用ディーゼル発電設備（排気消音器，機関ミスト配管，潤滑油サンプタンクミスト配管，燃料デイトンクミスト配管，燃料油ドレンタンクミスト配管），高圧炉心スプレイ系ディーゼル発電設備（排気消音器，機関ミスト配管，潤滑油補給タンクミスト配管，燃料デイトンクミスト配管，燃料油ドレンタンクミスト配管），軽油タンクベント配管は，設計飛来物の衝突により貫通することを考慮しても，閉塞することがなく，ディーゼル発電設備及び軽油タンクの機能が維持される設計とする。

さらに，風圧力による荷重，気圧差による荷重及び自重等の常時作用する荷重に対して，構造健全性を維持し，安全機能を損なわない設計とし，外部事象防護対象施設であるディーゼル発電設備及び軽油タンクに機能的影響を及ぼさない設計とする。

(8) 竜巻随伴事象に対する評価

竜巻随伴事象として，過去の竜巻被害事例及び発電所の施設の配置から，想定される事象である，火災，溢水及び外部電源喪失を抽出し，事象が発生する場合においても，外部事象防護対象施設の安全機能を損なわない設計とする。

a. 火災

竜巻随伴事象として，竜巻による飛来物が建屋開口部付近の発火性又は引火性物質を内包する機器に衝突する場合及び屋外の危険物貯蔵施設等に飛来物が衝突する場合の火災が想定される。

建屋内については，飛来物が侵入する場合でも，建屋開口部付近には，発電用原子炉施設の安全機能を損なわせる可能性がある発火性又は引火性物質を内包する機器は配置されておらず，また，外部事象防護対象施設を設置している区画の開口部には竜巻防護ネット設置等の飛来物防護対策を行うことを考慮すると飛来物が到達することはない

ことから、設計竜巻により建屋内に火災が発生することではなく、建屋内の外部事象防護対象施設の安全機能を損なわない。

建屋外については、発電所敷地内の屋外にある危険物貯蔵施設等の火災がある。火災源と外部事象防護対象施設の位置関係を踏まえて火災の影響を評価した上で、外部事象防護対象施設が安全機能を損なわない設計とすることを「1.8.9 外部火災防護に関する基本方針」に記載する。

以上より、竜巻随伴事象としての火災に対して外部事象防護対象施設が安全機能を損なわない設計とする。

b. 溢水

竜巻随伴事象として、竜巻による飛来物が建屋開口部付近の溢水源に衝突する場合及び屋外水タンク等の溢水源に衝突する場合、溢水が想定される。

外部事象防護対象施設を内包する建屋内については、飛来物が侵入する場合でも、建屋開口部付近に飛来物が衝突して外部事象防護対象施設の安全機能を損なう可能性がある溢水源が配置されておらず、また、外部事象防護対象施設を設置している区画の開口部には、竜巻防護ネット設置等の飛来物防護対策を行うことを考慮すると、飛来物が到達することはないことから、設計竜巻により建屋内に溢水が発生することではなく、建屋内の外部事象防護対象施設の安全機能を損なわない。

建屋外については、設計竜巻による飛来物の衝突による屋外タンク等の破損に伴う溢水を想定されるが、「1.7 溢水防護に関する基本方針」にて、地震時の屋外タンク等の破損を想定し、地震起因の溢水が安全系機器に影響を及ぼさない設計としており、竜巻随伴事象による屋外タンク等が損傷して発生する溢水に対しては、上記に包絡されることから、外部事象防護対象施設の安全機能を損なわない。

以上より、竜巻随伴事象としての溢水に対して外部事象防護対象施設が安全機能を損なわない設計とする。

c. 外部電源喪失

設計竜巻又は設計竜巻と同時に発生する雷又はダウンバースト等の影響により外部電源喪失が発生する場合については、設計竜巻に対して非常用ディーゼル発電機（高圧炉心スプレー系ディーゼル発電機を含む。）の構造健全性を維持することにより、外部電源喪失の影響がな

く外部事象防護対象施設の安全機能を損なわない設計とする。

1.8.2.2 手順等

竜巻に対する防護については、竜巻に対する影響評価を行い、安全施設が安全機能を損なわないよう手順等を定める。

- (1) 屋外の作業区画で飛散するおそれのある資機材、車両等については、飛来時の運動エネルギー及び貫通力等を評価し、外部事象防護対象施設への影響の有無を確認する。外部事象防護対象施設に影響を及ぼす資機材、車両等については、固縛、固定、外部事象防護対象施設等から離隔、頑健な建屋内に収納又は撤去する。これら飛来物発生防止対策について手順を定める。
- (2) 竜巻の襲来が予想される場合及び竜巻襲来後において、外部事象防護対象施設を防護するための操作・確認、補修等が必要となる事項について手順を定める。

1.8.2.3 参考文献

- (1) 雷雨とメソ気象 大野久雄，東京堂出版
- (2) 気象庁ホームページ
- (3) 一般気象学 小倉義光，東京大学出版会

第 1.8.2-1 表 発電所における設計飛来物

項 目		飛来物の種類	
		砂利	鋼製材
サイズ (m)		長さ×幅×高さ 0.04×0.04×0.04	長さ×幅×高さ 4.2×0.3×0.2
質量 (kg)		0.2	135
初期高さ (m)		8.0	11.5
計 算 結 果	最大水平速度 (m/s)	59.3	46.6
	最大鉛直速度 (m/s)	22.6～37.9	16.7～34.7
	浮き上がり高さ (m)	18.0	2.6
	飛散距離 (m)	209.5	139.4

(3) 適合性説明

第六条 外部からの衝撃による損傷の防止

- 1 安全施設は、想定される自然現象（地震及び津波を除く。次項において同じ。）が発生した場合においても安全機能を損なわないものでなければならない。
- 2 重要安全施設は、当該重要安全施設に大きな影響を及ぼすおそれがあるとして想定される自然現象により当該重要安全施設に作用する衝撃及び設計基準事故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。
- 3 安全施設は、工場等内又はその周辺において想定される発電用原子炉施設の安全性を損なわせる原因となるおそれがある事象であって人為によるもの（故意によるものを除く。）に対して安全機能を損なわないものでなければならない。

適合のための設計方針

第1項について

(3) 竜巻

安全施設は、設計竜巻の最大風速 100m/s の竜巻による風圧力による荷重、気圧差による荷重及び飛来物の衝撃荷重を組み合わせた荷重等に対し安全機能を損なわないために、飛来物の発生防止対策及び竜巻防護対策を行う。

a. 飛来物の発生防止対策

竜巻により発電所構内の資機材等が飛来物となり、外部事象防護対象施設が安全機能を損なわないために、以下の対策を行う。

- ・外部事象防護対象施設等へ影響を及ぼす資機材及び車両については、固縛、固定、外部事象防護対象施設等及び竜巻防護対策設備からの離隔、頑健な建屋内収納又は撤去する。

b. 竜巻防護対策

固縛等による飛来物の発生防止対策ができないものが飛来し、安全施設が安全機能を損なわないように、以下の対策を行う。

- ・外部事象防護対象施設を内包する区画及び竜巻飛来物防護対策設備により外部事象防護対象施設を防護し、構造健全性を維持し安全機能を損なわない設計とする。
- ・外部事象防護対象施設の構造健全性が維持できない場合には、代替設備の確保、損傷した場合の取替え又は補修が可能な設計とすることにより安全機能を損なわない設計とする。

ここで、竜巻は積乱雲や積雲に伴って発生する現象であり、積乱雲の発達時に竜巻と同時発生する可能性のある自然現象は、雷、雪、ひょう及び降水

である。これらの自然現象の組み合わせにより発生する荷重は，設計竜巻荷重に包含される。

1.3 気象等

8. 竜巻

8.1 竜巻

竜巻影響評価は、「原子力発電所の竜巻影響評価ガイド（平成 25 年 6 月 19 日原規技発 13061911 号原子力規制委員会決定）」（以下「ガイド」という。）に基づき実施する。

基準竜巻及び設計竜巻の設定は、竜巻検討地域の設定、基準竜巻の最大風速の設定及び設計竜巻の最大風速の設定の流れで実施する。

8.1.1 竜巻検討地域の設定

発電所が立地する地域と、気象条件の類似性の観点で検討を行い、竜巻検討地域を設定する。

(1) 気候区分の確認

気象条件の類似性を確認するため、気候区分による確認を実施する。

女川原子力発電所の立地地域は、第 8.1-1 図に示す一般的な気候区分⁽¹⁾によれば、区分Ⅳ3 に属する。

(2) 気象総観場の分析

気候区分の確認に加え気象条件の類似性の観点から、気象総観場ごとの竜巻発生位置を整理し、発電所と類似の地域を抽出する。竜巻発生要因の総観場は、気象庁「竜巻等の突風データベース」⁽¹⁾を基に、原子力発電所の竜巻影響評価ガイド（案）及び解説⁽²⁾を参考に、寒気の移流、低気圧、寒冷前線、その他前線、局地性、暖気の移流、台風及びその他の 8 つに分類する。第 8.1-2 図に竜巻発生時の総観場の分布を示す。

ガイドでは、竜巻検討地域を設定する際に、IAEA の基準⁽³⁾が参考になるとされており、およそ 10 万 km² の範囲を目安とすることが挙げられている。

日本海側は太平洋側と気候的にも異なることを踏まえ、女川原子力発電所を中心とする 10 万 km²（半径 180km）の範囲の太平洋側沿岸を確認したところ、第 8.1-3 図に示すとおり、気候区分Ⅳ3 及びⅣ2 にまたがった範囲が該当する。

日本海側と太平洋側の気候的な類似性が無いことについては、以下に示す総観場の観点からも確認を行っている。

竜巻検討地域として、第 8.1-3 図に示した 10 万 km²（半径 180km）の範囲が適切であるか、又はさらに広げたエリアを設定することが適切であるかについて、総観場を用い、その類似性を確認することで評価を行う。

総観場の確認において、10 万 km² の範囲の北側に対しては、北海道の竜巻集中地域を含む襟裳岬までを対象とした。また、南側については、太平洋側における気候区分Ⅳ3 のエリアに当たる千葉県九十九里町までを対象とした。第 8.1-4 図にエリア毎の総観場の確認結果を示す。

(3) 総観場の分析に基づく地域特性の確認

全国で発生した竜巻の総観場ごとの F スケール別竜巻発生分布（第 8.1-2 図）、総観場ごとの確認結果（第 8.1-1 表）及び地域ごとの竜巻発生総観場及び寄与割合の比較結果（第 8.1-4 図）より発電所の立地地域より北側のエリア（竜巻集中地域を含んだ北海道までの沿岸）は、総観場的に地域性が異なると明確に差別化することはできず、また、南側のエリア（千葉県までの沿岸）については、発生数は少ないものの総観場的に類似性のあるエリアとして考慮する必要があると判断した。

(4) 突風関連指数に基づく地域特性の確認

気候区分及び総観場での検討に加え、大きな被害をもたらす強い竜巻の発生要因となる環境場の形成のし易さについての地域特性を確認するため、気象庁や米国気象局においても竜巻探知・予測に活用されており、竜巻の発生し易さを数値的に示すことができる突風関連指数を用いて地域特性の確認を行った。

大きな被害をもたらす竜巻の親雲の多くはスーパーセルであり、スーパーセルが発生しやすい環境場として、大気下層の鉛直シア（異なる高度間での風向・風速差）と、強い上昇気流を発生させるきっかけとしての不安定な大気場が必要であることから、突風関連指数としては、竜巻の発生実態を解明する研究において国内外で広く利用され、大気の不安定度を表す指標である「CAPE」、鉛直シアに伴って発生する水平渦度が親雲に取り込まれる度合いを表す指標である「SReH」を採用し、両者の指標が同時に高くなる頻度について、地域的な特徴を確認する分析を実施する。また、両者をかけ合わせた指標「EHI」による分析も実施し、SReH 及び CAPE の同時超過頻度分析との比較を実施する（第 8.1-5 図、第 8.1-6 図）。

突風関連指数による、大規模な竜巻形成につながる環境場の発生頻度分析を行った結果、東北地方太平洋側及び日本海側は、茨城県以西の太平洋側と地域特性の違いがあることを確認した。

(5) 竜巻検討地域

発電所に対する竜巻検討地域について、「気候区分の確認」、「総観場の分

析に基づく地域特性の確認」及び「突風関連指数に基づく地域特性の確認」により地域特性を確認し、北海道から千葉県にかけての太平洋側沿岸の海岸線から海側及び陸側それぞれ 5km の範囲を竜巻検討地域に設定する（面積約 18,800km²）。

第 8.1-7 図に竜巻検討地域を示す。

8.1.2 基準竜巻の最大風速 (V_B) の設定

基準竜巻の最大風速は、過去に発生した竜巻による最大風速 (V_{B1}) 及び竜巻最大風速のハザード曲線による最大風速 (V_{B2}) のうち、大きな風速を設定する。

(1) 過去に発生した竜巻による最大風速 (V_{B1})

過去に発生した竜巻による最大風速の設定に当たっては、日本で過去に発生した最大の竜巻は F3 であり、F スケールと風速の関係より風速は 70m/s ～92m/s であることから、日本で過去に発生した最大竜巻 F3 の風速範囲の上限値 92m/s を V_{B1} とする。

第 8.1-3 表に日本で過去に発生した F3 竜巻の観測記録を示す。

(2) 竜巻最大風速のハザード曲線による最大風速 (V_{B2})

竜巻最大風速のハザード曲線は、ガイドに従い、既往の算定方法に基づき、具体的には「竜巻による原子力施設への影響に関する調査研究」⁽⁴⁾を参照して、算定する。本評価は、竜巻データの分析、竜巻風速、被害幅及び被害長さの確率密度分布の算定、相関係数の算定、並びにハザード曲線の算定によって構成される。

竜巻最大風速のハザード曲線の算定は、竜巻検討地域（海岸線から陸側及び海側それぞれ 5km の範囲）の評価及び竜巻検討地域を海岸線に沿って 1km 範囲ごとに短冊状に細分化した場合の評価の 2 とおりで算定し、そのうち大きな風速を設定する。

a. 海岸線から陸側及び海側それぞれ 5km 全域の評価

本評価では、竜巻検討地域外で発生して竜巻検討地域内に移動した陸上発生竜巻も発生数にカウントする。被害幅及び被害長さは、それぞれ被害全幅及び被害全長を用いる。

b. 竜巻の発生頻度の分析

気象庁「竜巻等の突風データベース」⁽¹⁾をもとに、1961 年～2012 年 6 月

までの 51.5 年間の統計量を F スケール別に算出する。なお、観測体制の変遷による観測データ品質のばらつきを踏まえ、以下の (a)～(c) の基本的な考え方に基づいて整理を行う。

- (a) 被害が小さくて見過ごされやすい F0 及び F スケール不明竜巻に対しては、観測体制が強化された 2007 年以降の年間発生数及び標準偏差を用いる。
- (b) 被害が比較的軽微な F 1 竜巻に対しては、観測体制が整備された 1991 年以降の年間発生数や標準偏差を用いる。
- (c) 被害が比較的大きく見逃されることがないと考えられる F 2 及び F 3 竜巻に対しては、観測記録が整備された 1961 年以降の全期間の年間発生数や標準偏差を用いる。

また、F スケール不明の竜巻については、以下の取扱いを行う。

陸上で発生した竜巻（以下「陸上竜巻」という。）及び海上で発生して陸上へ移動した竜巻については、被害があつて初めてその F スケールが推定されるため、陸上での F スケール不明の竜巻は、被害が少ない F 0 竜巻とみなす。

海上で発生し、その後上陸しなかった竜巻（以下「海上竜巻」という。）については、その竜巻のスケールを推定することは困難であることから、「海岸線から海上 5km の範囲における海上竜巻の発生特性が、海岸線から内陸 5km の範囲における陸上竜巻の発生特性と同様である。」という仮定に基づいて各 F スケールに分類する。その結果、F スケール不明の海上竜巻の取扱いにより、第 8.1-3 表のとおり観測実績に対して保守性を高めた評価としている。

c. 年発生数の確率密度分布の設定

ハザード曲線の評価に当たって竜巻の発生がポアソン過程に従うと仮定し、使用する竜巻年発生数の確率密度分布はポリヤ分布を採用する。

竜巻年発生数の確率分布の設定には、ポアソン分布とポリヤ分布が考えられる。

ポアソン分布は、生起確率が正確に分からないまれな現象の場合に有用な分布である。一方、ポリヤ分布は、発生状況が必ずしも独立でないまれな現象（ある事象が生ずるのはまれであるが、一旦ある現象が発生するとその周囲にもその現象が生じやすくなる性質）の場合に有用な分布である（例えば、伝染病の発生件数）。台風や前線により竜巻が発生した場合、同時多発的に複数の竜巻が発生する状況が考えられるため、ポリヤ分布の方が実現象をより反映できると考えられる。

また、国内を対象とした竜巻の年発生数の分布の適合性に関する検討結果は、「竜巻による原子力施設への影響に関する調査研究」⁽⁴⁾に示されており、陸上及び海上竜巻の両方の発生数について、ポリヤ分布の適合性がポアソン分布に比べて優れているとしている。

発電所の竜巻検討地域で発生した竜巻を対象に、発生数に関するポアソン分布及びポリヤ分布の適合性を評価した結果、竜巻検討地域においても、ポリヤ分布の適合性がポアソン分布に比べて優れていることを確認している。

d. 竜巻風速、被害幅及び被害長さの確率分布並びに相関係数

竜巻検討地域における 51.5 年間の竜巻の発生数、被害幅及び被害長さを基に、確率密度分布についてはガイド及びガイドが参考としている「竜巻による原子力施設への影響に関する調査研究」⁽⁴⁾を参照し、対数正規分布に従うものとする。(第 8.1-8 図～第 8.1-13 図)。

なお、疑似的な竜巻の作成に伴う被害幅又は被害長さの情報がない竜巻には、被害幅又は被害長さを有する竜巻の観測値を与えている。その際は、被害幅又は被害長さが大きいほうから優先的に用いることで、被害幅又は被害長さの平均値が大きくなるように工夫しているとともに、被害幅又は被害長さ 0 のデータについては計算に用いておらず、保守的な評価を行っている。

このように、前述の F スケール不明の竜巻の取扱い等も含め、データについては保守的な評価となる取扱いを行っている。

また、1961 年以降の観測データのみを用いて、竜巻風速、被害幅及び被害長さについて相関係数を求める。(第 8.1-4 表)

e. 竜巻影響エリアの設定

竜巻影響エリアは、発電所の評価対象施設等の面積及び設置位置を考慮して、評価対象施設等を包絡する円形のエリア（直径 725m、面積約 413,000m²）として設定する。(第 8.1-14 図)

なお、竜巻影響エリアを円形とするため、竜巻の移動方向には依存性は生じない。

f. ハザード曲線の算定

T 年以内にいずれかの竜巻に遭遇し、かつ竜巻風速が V_0 以上となる確率を求め、ハザード曲線を求める。

前述のとおり、竜巻の年発生数の確率密度分布としてポリヤ分布の適合

性が高い。ポリヤ分布は式 (1) ⁽⁵⁾ で示される。

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

ここで,

N : 竜巻の年発生数

v : 竜巻の年平均発生数

T : 年数

β は分布パラメータであり式 (2) で示される。

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

ここで,

σ : 竜巻の年発生数の標準偏差

竜巻影響評価の対象となる構造物が風速 V_0 以上の竜巻に遭遇する事象を D と定義し、竜巻影響評価の対象構造物が 1 つの竜巻に遭遇し、その竜巻の風速が V_0 以上となる確率を $R(V_0)$ としたとき、 T 年以内にいずれかの竜巻に遭遇し、かつ竜巻風速が V_0 以上となる確率は式 (3) で示される。

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

この $R(V_0)$ は、竜巻影響評価の対象地域の面積を A_0 (つまり竜巻検討地域の面積約 18,800km²)、1 つの竜巻の風速が V_0 以上となる面積を $DA(V_0)$ とすると式 (4) で示される。

$$R(V_0) = \frac{E[DA(V_0)]}{A_0} \quad (4)$$

ここで、 $E[DA(V_0)]$ は、 $DA(V_0)$ の期待値を意味する。

本評価では、以下のようにして $DA(V_0)$ の期待値を算出し、式 (4) により $R(V_0)$ を推定して、式 (3) により $P_{V_0,T}(D)$ を求める。風速を V 、被害幅 w 、被害長さ l 、移動方向 α 及び構造物の寸法を A, B とし、 $f(V, w, l)$ 等の同時確率密度関数を用いると、 $DA(V_0)$ の期待値は式 (5) ⁽⁶⁾ で示される。

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

ここで、 $W(V_0)$ は竜巻風速が V_0 以上となる幅であり、式(6) ⁽⁶⁾ ⁽⁷⁾ で示される。

$H(\alpha)$ 及び $G(\alpha)$ はそれぞれ、竜巻の被害長さ及び被害幅方向に沿った面にリスク評価対象構造物を投影した時の長さであり、式(7)で示される。

$$W(V_0) = \left(\frac{V_{min}}{V_0} \right)^{1/1.6} w \tag{6}$$

ここで、

V_{min} : 被害幅 w 内の最小竜巻風速

V_0 : 被害が発生する最小風速

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

本評価ではリスク評価対象構造物を円形構造物（竜巻影響エリア）で設定しているため、 $H(\alpha)$ 、 $G(\alpha)$ とともに竜巻影響エリアの直径 725m で一定（竜巻の移動方向に依存しない）となる。円の直径を D_0 とした場合の計算式は式(8)で示される。

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

V_{min} は、竜巻被害が発生する最小風速であり、Garson は gale intensity velocity と呼んでいる（Gale とは非常に強い風の意）。米国の気象局（National Weather Service）では、34～47 ノット（17.5～24.2m/s）と

されている。日本の気象庁では、気象通報にも用いられている風力階級において、風力 8 が疾強風 (gale, 17.2~20.7m/s)、風力 9 は大強風 (strong gale, 20.8~24.4m/s) と分類されており、風力 9 では「屋根瓦が飛ぶ。人家に被害が出始める」とされている。

以上より、これらの風速を包括するよう、 $V_{min}=25\text{m/s}$ とした。この値は、F0 (17~32m/s) のほぼ中央値に相当する。

海岸線から陸側及び海側それぞれ 5km 範囲を対象に算定したハザード曲線より、年超過確率 10^{-5} における風速を求めると、75.1m/s となる。(第 8.1-15 図)

g. 1km 範囲に細分化した評価

1km 範囲ごとに細分化した評価は、1km 幅は変えずに順次ずらして移動するケース (短冊ケース) を設定して評価する。評価の条件として、被害幅及び被害長さは、それぞれ 1km 範囲内の被害幅及び被害長さを用いている。上記評価条件に基づいて、海岸線から陸側及び海側それぞれ 5km の範囲の評価と同様の方法でハザード曲線を算定する。

これら算定したハザード曲線より、年超過確率 10^{-5} における風速を求めると、陸側 0km~1km を対象とした場合の 83.6m/s が最大となる。(第 8.1-16 図)

h. 竜巻最大風速のハザード曲線による最大風速 (V_{B2})

海岸線から陸側及び海側それぞれ 5km 全域 (竜巻検討地域) の評価と 1km 範囲ごとに細分化した評価を比較して、竜巻最大風速のハザード曲線により設定する最大風速 V_{B2} は、ガイドを参考に年超過確率 10^{-5} に相当する風速とし、83.6m/s とする。(第 8.1-17 図)

(3) 基準竜巻の最大風速 (V_B)

過去に発生した竜巻による最大風速 $V_{B1}=92\text{m/s}$ 及び竜巻最大風速のハザード曲線による最大風速 $V_{B2}=83.6\text{m/s}$ より、発電所における基準竜巻の最大風速 V_B は 92m/s とする。

8.1.3 設計竜巻の最大風速 (V_D) の設定

発電所が立地する地域の特性として、周辺の地形や竜巻の移動方向を考慮して、基準竜巻の最大風速の割り増しを検討し、設計竜巻の最大風速を設定する。

8.1.3.1 地形効果による竜巻風速への影響

地形効果が竜巻強度に及ぼす影響に関する知見として、(1)地形起伏による影響、(2)地表面粗度による影響、について既往の研究において示されており、その知見を踏まえ、発電所周辺の地形効果による竜巻の増幅可能性について検討する。

(1) 地形起伏による影響

竜巻のような回転する流れでは、角運動量保存則により「回転の中心からの距離」及び「周方向の回転速度」の積が一定になるという性質がある。そのため、竜巻の渦が上り斜面を移動する時、基本的に渦は弱まり、下り斜面を移動する時には強まる。

(2) 地表面粗度による影響

風は地表面の細かな凸凹が与える摩擦抵抗の影響を受けやすく、風速は、地表面において0となり上空に向かうにつれて増加する。地表面粗度は竜巻の旋回流を減衰させる効果を有し、地表面粗度の構成物が飛来物として運動することで風速が減衰することも示唆されている。

8.1.3.2 発電所周辺の地形

発電所周辺の地形を第 8.1-18 図、発電所周辺の地表面粗度を第 8.1-19 図、発電所周辺の標高及び防潮堤高さを第 8.1-20 図に示す。発電所が立地する敷地は、北東が太平洋に面し、三方を山及び森林に囲まれた狭隘な地形である。

8.1.3.3 竜巻の移動方向の分析

竜巻検討地域で発生した竜巻のうち移動方向が判明している竜巻の移動方向を確認した結果（第 8.1-21 図）、多くが海側から陸側の方向に移動していた。

8.1.3.4 竜巻風速の増幅に関する検討

竜巻検討地域で発生した竜巻は、海側から陸側に進入する可能性が高く、竜巻が増幅することはないと考えられる。竜巻が海上から発電所に進入してきた場合は、地表面粗度の影響を受けて竜巻は減衰した後、さらに防潮堤(0.P.30.0m)で大幅に減衰するため、竜巻による施設への影響は限定的となると考えられる。また、山側から発電所の敷地に移動してきた場合について

も、発電所周辺は広い丘陵地に森林が存在しており、森林による粗度の影響を大きく受けるため減衰する。

従って、地形効果による竜巻の増幅の影響は受けないものと考えられる。

8.1.3.5 設計竜巻の最大風速 (V_D)

発電所では、地形効果による竜巻の増幅を考慮する必要はないと考えるが、将来的な気候変動による竜巻発生の不確実性を考慮し、設計竜巻の最大風速 V_D は、基準竜巻の最大風速 92m/s を安全側に切り上げた 100m/s とする。

8.1.4 設計竜巻の特性値

竜巻風速場としてフジタモデルを選定した場合の設計竜巻の特性値については、第 8.1-6 表のとおり設定する。

なお、最大気圧低下量と最大気圧低下率は、数値解析によって計算する。

(1) 設計竜巻の移動速度 (V_T)

設計竜巻の移動速度 (V_T) は、ガイドに基づき、「竜巻による原子力施設への影響に関する調査研究」⁽⁴⁾による風速場モデルに依存しない日本の竜巻の観測記録に基づいた竜巻移動速度（平均値）と最大風速との関係を参照して設定されている以下の算定式を用いて、 V_D から V_T を算定する。

$$V_T = 0.15 \cdot V_D$$

(2) 設計竜巻の最大接線風速 (V_{Rm})

設計竜巻の最大接線風速 (V_{Rm}) は、ガイドに基づき、米国 NRC の基準類⁽⁸⁾を参考に設定されている風速場モデルに依存しない以下の式を用いて算定する。

$$V_{Rm} = V_D - V_T$$

(3) 設計竜巻の最大接線風速が生じる位置での半径 (R_m)

設計竜巻の最大接線風速が生じる位置での半径 (R_m) は、ガイドに基づき、「竜巻による原子力施設への影響に関する調査研究」⁽⁴⁾による日本の竜巻の観測記録を基に提案された風速場モデルに準拠して以下の値を用いる。

$$R_m = 30 \text{ (m)}$$

(4) 設計竜巻の最大気圧低下量 (ΔP_{max})・最大気圧低下率 ($((dp/dt)_{max})$)

フジタモデルにおける設計竜巻の最大気圧低下量・最大気圧低下率について

ては、速度分布が既知である場合、流れの連続式と運動量保存式から導出される以下の圧力ポアソン方程式を解くことにより、圧力を求めることができる。

(5) 流入層高さ (H_i)

H_i は飛散評価に影響を与えることから、適切な流入層高さにて評価する必要がある。そのため、設定にあたっては Fujita の Workbook⁽⁹⁾ の提案式だけではなく、最新の研究成果や文献等⁽¹⁰⁾⁽¹¹⁾⁽¹²⁾について幅広く確認し、飛散評価結果が厳しくなるように、感度解析における流入層高さの上限を考慮し、 $H_i=17.5\text{m}$ と設定した。

フジタモデルでは物体を竜巻中心方向に引き込む流れとして、第 8.1-22 図に示すようなモデル化をしている。

H_i は飛散評価に影響を与えることから、適切な流入層高さにて評価する必要がある。そのため、設定にあたっては Fujita の Workbook⁽⁹⁾ の提案式だけではなく、最新の研究成果や文献等について幅広く確認し、飛散評価結果が厳しくなるように、感度解析における流入層高さの上限を考慮し、 $H_i=17.5\text{m}$ と設定した。

8.2 参考文献

- (1) 気象庁 竜巻等の突風データベース
- (2) 井上博登，福西史郎，鈴木哲夫，2013:原子力発電所の竜巻影響評価ガイド（案）及び解説，独立行政法人原子力安全基盤機構，JNES-RE-2013-9009
- (3) IAEA Safety Standards, Meteorological and Hydrological Hazards in Site Evaluation for Nuclear Installations, Specific Safety Guide No. SSG-18, 2011
- (4) 東京工芸大学 (2011) : 平成 21~22 年度原子力安全基盤調査研究 (平成 22 年度) 竜巻による原子力施設への影響に関する調査研究，独立行政法人原子力安全基盤機構
- (5) Wen. Y. K and Chu. S. L. (1973) : Tornado Risks and Design Wind Speed, Journal of the Structural Division, Proceedings of American Society of Civil Engineering, Vol. 99, No. ST12, pp. 2409-2421
- (6) Garson. R. C., Morla-Catalan J. and Cornell C. A. (1975) : Tornado Risk Evaluation Using Wind Speed Profiles, Journal of the Structural. Division, Proceedings of American Society of Civil Engineering, Vol. 101, No. ST5, pp. 1167 1171

- (7) Garson. R. C., Morla-Catalan J. and Cornell C.A. (1975) : Tornado Design Winds Based on Risk, Journal of the Structural Division, Proceedings of the American Society of Civil Engineers, Vol. 101, No. ST9, pp. 1883-1897
- (8) U.S. Nuclear Regulatory Commission, Regulatory Guide 1.76: Design-Basis Tornado and Tornado Missiles for Nuclear Power Plants, Revision 1, March 2007.
- (9) Fujita, T.T., “Workbook of tornadoes and high winds for engineering applications” (1978), U. Chicago.
- (10) Y. Eguchi, S. Sugimoto, H. Hattori and H. Hirakuchi, “Tornado Pressure Retrieval from Fujita’s Engineering Model, DBT-77”, Proceedings of the 6th International Conference on Vortex Flows and Vortex Models (ICVFM Nagoya 2014), November 17-20, 2014, Nagoya, Japan.
- (11) 江口 譲, 服部康男, 流速場情報に基づく圧力場計算法の提案, 第 72 回ターボ機械協会 大分講演会 (2014. 10. 3)
- (12) Karen A. Kosiba and Joshua Wurman : The Three-Dimensional Structure and Evolution of a Tornado Boundary Layer. Weather and Forecasting, 28, 1552-1561, 2013.

第 8.1-1 表 総観場の分類と特徴

総観場	気象庁 DB の分類	特徴
寒気の移流	寒気の移流	大気上層に寒気が流入することで大気が不安定になり竜巻の親雲を形成する環境場。下層に暖気の移流があると、親雲の更なる発達を促すため、F3 竜巻も見られる。
低気圧	熱帯低気圧(台風以外)、南岸低気圧、日本海低気圧、二つ玉低気圧、東シナ海低気圧、オホーツク海低気圧、その他(低気圧)	寒気と暖気が接し傾圧不安定による組織的な雲を形成する環境場。南からの下層の暖湿流がある場合、親雲の更なる発達を促すため、F3 竜巻も見られる。
寒冷前線	寒冷前線、気圧の谷	大気上層への寒気の移流と、それにとともなう組織的な前線の形成により親雲を形成する環境場。南からの下層の暖湿流がある場合、親雲の更なる発達を促すため、F3 竜巻も見られる。
その他前線	温暖前線、閉塞前線、停滞前線、梅雨前線、前線帯、不安定線、その他(前線)	寒冷前線以外の前線により親雲を形成する環境場。暖湿流が主要因となる場合が多い。
局地性	局地性擾乱、雷雨(熱雷)、雷雨(熱雷を除く)、地形効果、局地性降水	地域的な大気循環により親雲を形成する環境場。親雲の形成に地形的な影響も受けることも多い。
暖気の移流	暖気の移流、湿舌	大気下層に暖湿流が流入することで竜巻の親雲を形成する環境場。上層の寒気の移流がある場合、親雲の更なる発達を促す。
台風	台風	台風により竜巻の親雲を形成する環境場。 台風中心の北東方向では、南東からの強い暖気移流があるため、非常に活発な積乱雲が発生しやすいため、F3 竜巻も多くみられる。
その他	移動性高気圧、中緯度高気圧、太平洋高気圧、大陸高気圧、オホーツク海高気圧、帯状高気圧、その他(高気圧)、季節風、大循環異常、その他	上記に当てはまらない環境場。気圧配置の変わり目が多いが、全体の個数は少ない。

第 8.1-2 表 総観場毎の竜巻発生分布の傾向

総観場	傾向
台風	・ 太平洋側で多く発生しており日本海側では確認されていない。規模的には、関東以西の太平洋側では F3 を含む規模の大きな竜巻が発生しているが、東北地方太平洋側では F1 が 1 件発生しているのみである。 ・ 関東地方、中部地方の太平洋側及び九州地方の太平洋側では発生が集中しており、これらの地域は太平洋側の竜巻集中地域に整理されている。 ・ 台風は北上（低緯度から中高緯度に移動）するに従い減衰するため、東北地方や北海道など、北部での発生数は少なく、規模も小さくなると考えられる。本州に接近・上陸する台風の減衰は、地表面摩擦の増大による風速の減衰に加え、海水温が低下するため、台風の維持、発達に必要な、海から供給される水蒸気量が減少し減衰する。
暖気の移流	・ 日本海側での発生数は少なく、主に太平洋側の関東以西で発生している。 ・ 規模的には、関東以西の太平洋側では F3 を含む規模の大きな竜巻が多く発生しているが、東北地方太平洋側では F1 が 1 件発生しているのみである。 ・ 太平洋側では、暖湿流が大気下層に流入することが多いため、関東以西で発生数が多くなる。特に関東平野では太平洋側から流入する暖気が遮られずに内陸深くまで流入するため、内陸部でも発生が集中している。
寒気の移流	・ 北海道を含む日本海側で多く発生しているが、東北地方太平洋側での発生実績はない。 ・ 日本海側は北からの寒気が山岳等に遮られずに直接流入するため、発生数が多いと考えられる。
低気圧	・ 主に太平洋側の関東以西で多く発生している。 ・ 太平洋側では、大気下層に流入する南からの暖気の流れと上層の寒気が親雲の更なる発達を促すため、関東以西の太平洋側で発生頻度が高くなる。
寒冷前線	・ 日本海側の沿岸部及び関東以西の太平洋側で多く発生している。 ・ 太平洋側では、大気下層に流入する南からの暖気の流れによる影響も寄与するため、太平洋側で強い竜巻の発生数が多くなる。
その他前線	・ 日本海側での発生数は少なく、主に太平洋側の関東以西で多く発生しており、関東平野で発生が集中している。 ・ 太平洋側では、大気下層に流入する南からの暖気の流れによる影響も寄与するため、関東の平野部では発生数が多くなる。
局地性	・ 地形的な影響によるものであり、全国で発生している。
その他	・ 全国的に発生数は少なく、地域差はみられない。

第 8.1-3 表 日本で過去に発生した F3 竜巻
(気象庁「竜巻等の突風データベース」より作成)

F スケール	発生日時	発生場所緯度	発生場所経度	発生場所
F3	1971 年 07 月 07 日 07 時 50 分	35 度 52 分 45 秒	139 度 40 分 13 秒	埼玉県浦和市
F3	1990 年 12 月 11 日 19 時 13 分	35 度 25 分 27 秒	140 度 17 分 19 秒	千葉県茂原市
F3	1999 年 09 月 24 日 11 時 07 分	34 度 42 分 4 秒	137 度 23 分 5 秒	愛知県豊橋市
F3	2006 年 11 月 07 日 13 時 23 分	43 度 58 分 39 秒	143 度 42 分 12 秒	北海道網走支庁佐呂間町
F3	2012 年 05 月 06 日 12 時 35 分	36 度 6 分 38 秒	139 度 56 分 44 秒	茨城県常総市

第 8.1-4 表 竜巻発生数の分析結果

竜巻検討地域 (沿岸 ±5 km)	発生数の統計	小計	竜巻スケール				不 明		総数 (含む不明)
			F0	F1	F2	F3	(陸上)	(海上)	
1961～ 2012/6 (51.5年間)	期間内総数	23	2	13	7	1	3	3	29
	平均値(年)	0.45	0.04	0.25	0.14	0.02	0.06	0.06	0.56
	標準偏差(年)	0.67	0.20	0.56	0.35	0.14	0.31	0.31	0.81
1991～ 2012/6 (21.5年間)	期間内総数	14	2	10	2	0	1	3	18
	平均値(年)	0.65	0.09	0.47	0.09	0.00	0.05	0.14	0.84
	標準偏差(年)	0.80	0.30	0.75	0.30	0.00	0.22	0.47	0.97
2007～ 2012/6 (5.5年間)	期間内総数	3	1	2	0	0	0	2	5
	平均値(年)	0.55	0.18	0.36	0.00	0.00	0.00	0.36	0.91
	標準偏差(年)	0.58	0.43	0.55	0.00	0.00	0.00	0.86	0.80
疑似 51.5年間 (陸上竜巻)	期間内総数	42	10	24	7	1	0	19	61
	平均値(年)	0.80	0.18	0.47	0.14	0.02	0.00	0.36	1.17
	標準偏差(年)	0.93	0.43	0.75	0.35	0.14	0.00	0.86	1.27
疑似 51.5年間 (全竜巻)	期間内総数	63	15	35	11	2	0	0	0
	平均値(年)	1.17	0.26	0.68	0.20	0.03	0.00	0.00	0.00
	標準偏差(年)	1.13	0.52	0.90	0.42	0.17	0.00	0.00	0.00

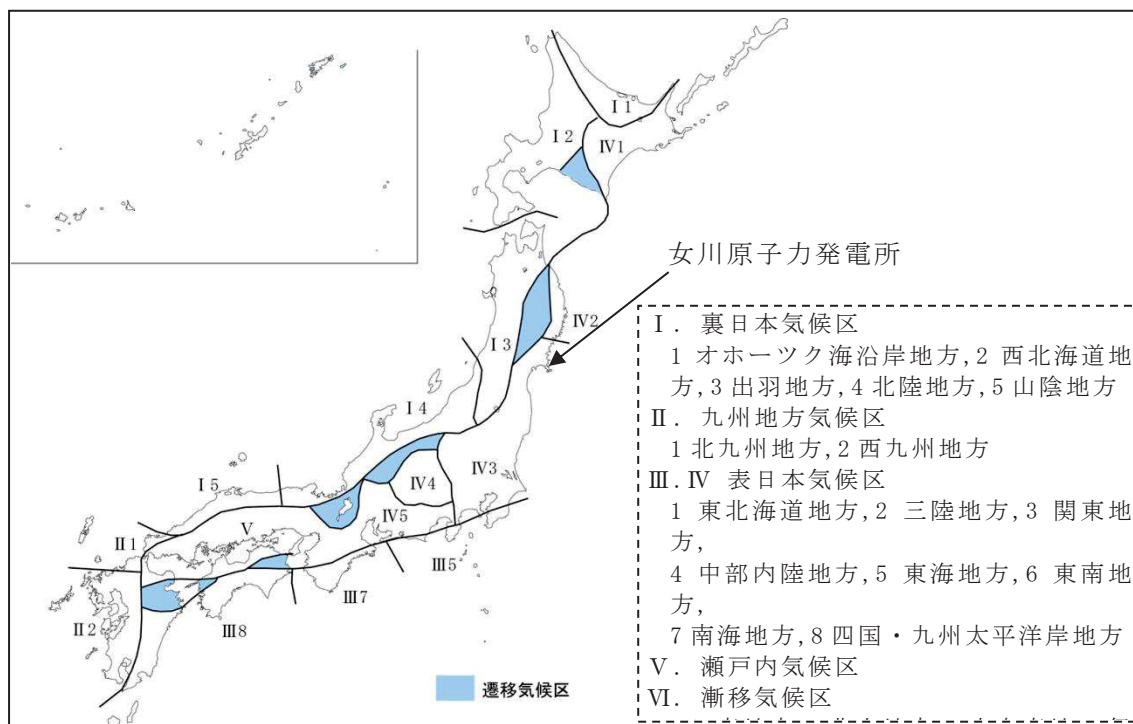
第 8.1-5 表 竜巻風速，被害幅，被害長さの相関係数（単位無し）

データ数	風速	被害幅	被害長さ
風速	1.000	-0.073*	0.590
被害幅	-0.073*	1.000	0.173
被害長さ	0.590	0.173	1.000

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

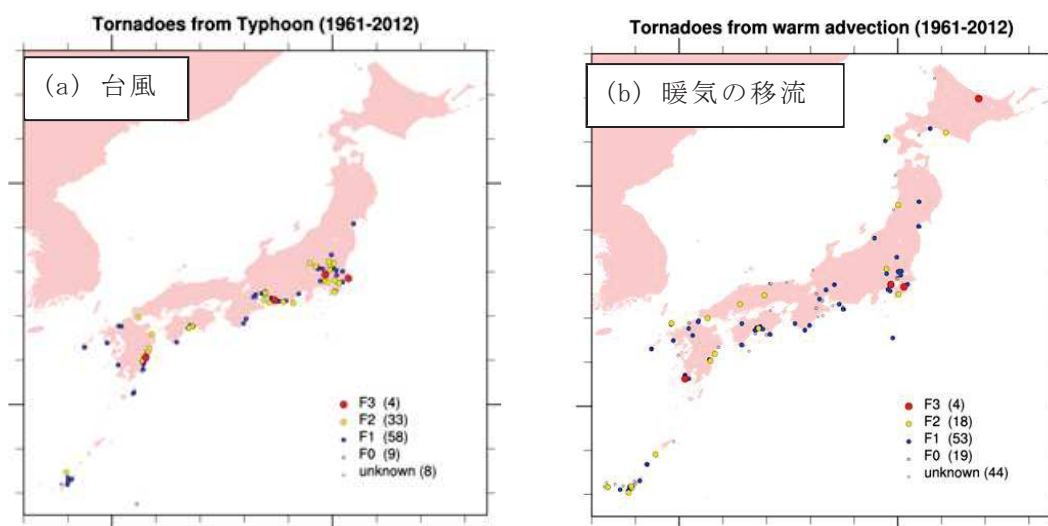
第 8.1-6 表 設計竜巻の特性値

最大風速 V_D [m/s]	移動速度 V_T [m/s]	最大接線風速 V_{Rm} [m/s]	最大接線風速 半径 R_m [m]	最大気圧低下量 ΔP_{max} [hPa]	最大気圧低下率 $(dp/dt)_{max}$ [hPa/s]
100	15	85	30	76	53

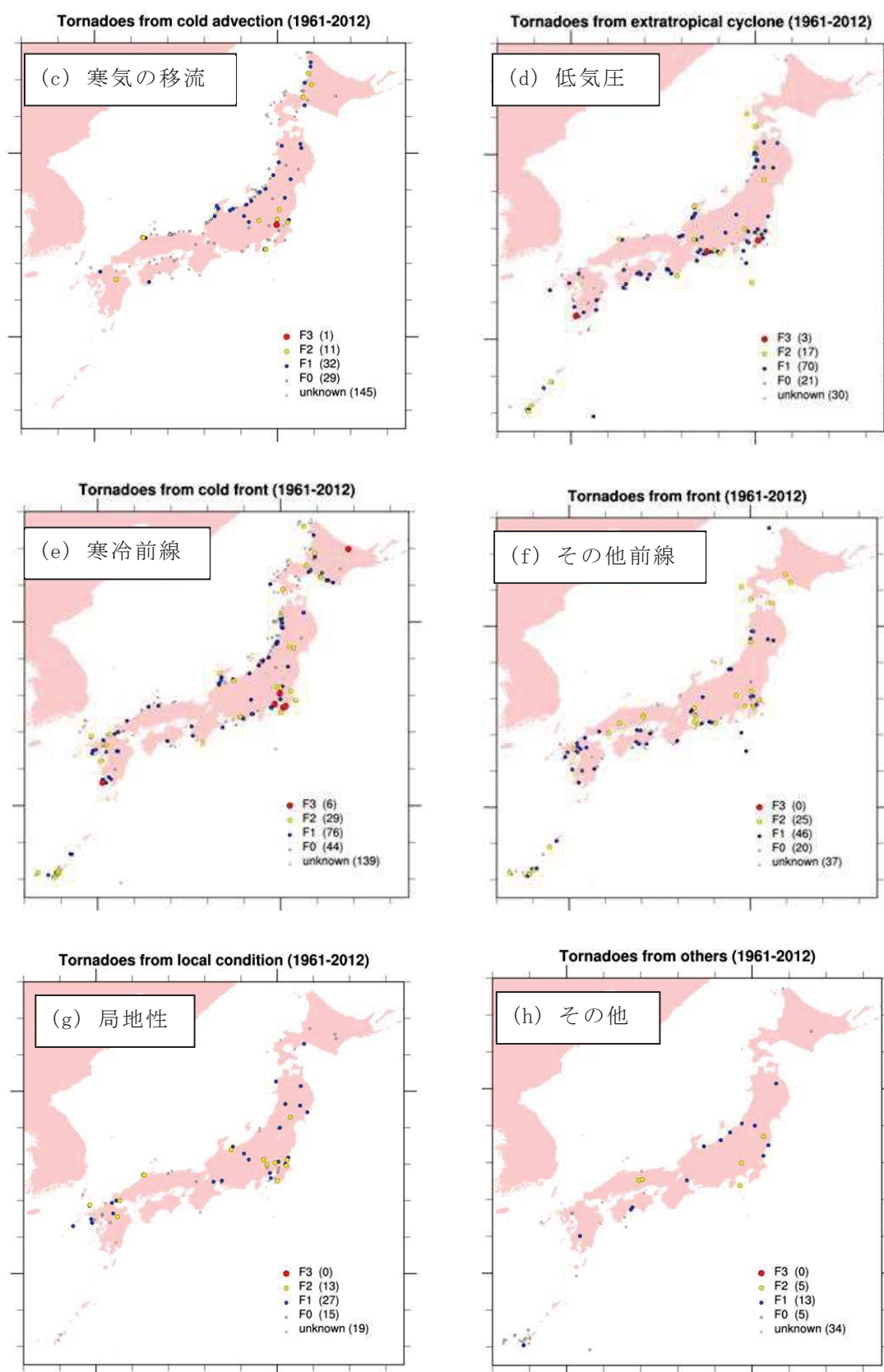


出展：関口武「日本の気候区分」東京教育大学地理学研究報告（1959）

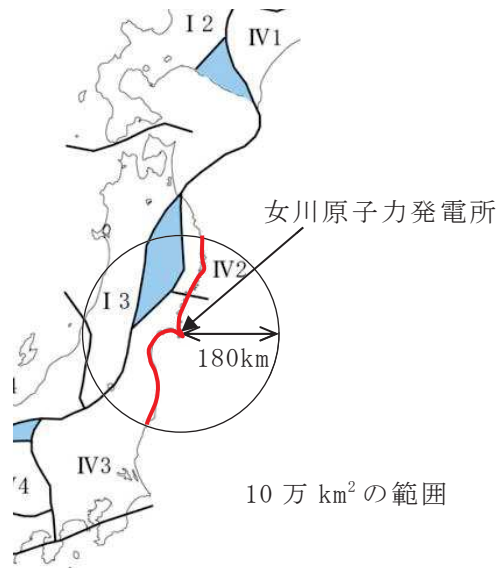
第 8.1-1 図 日本の気候区分



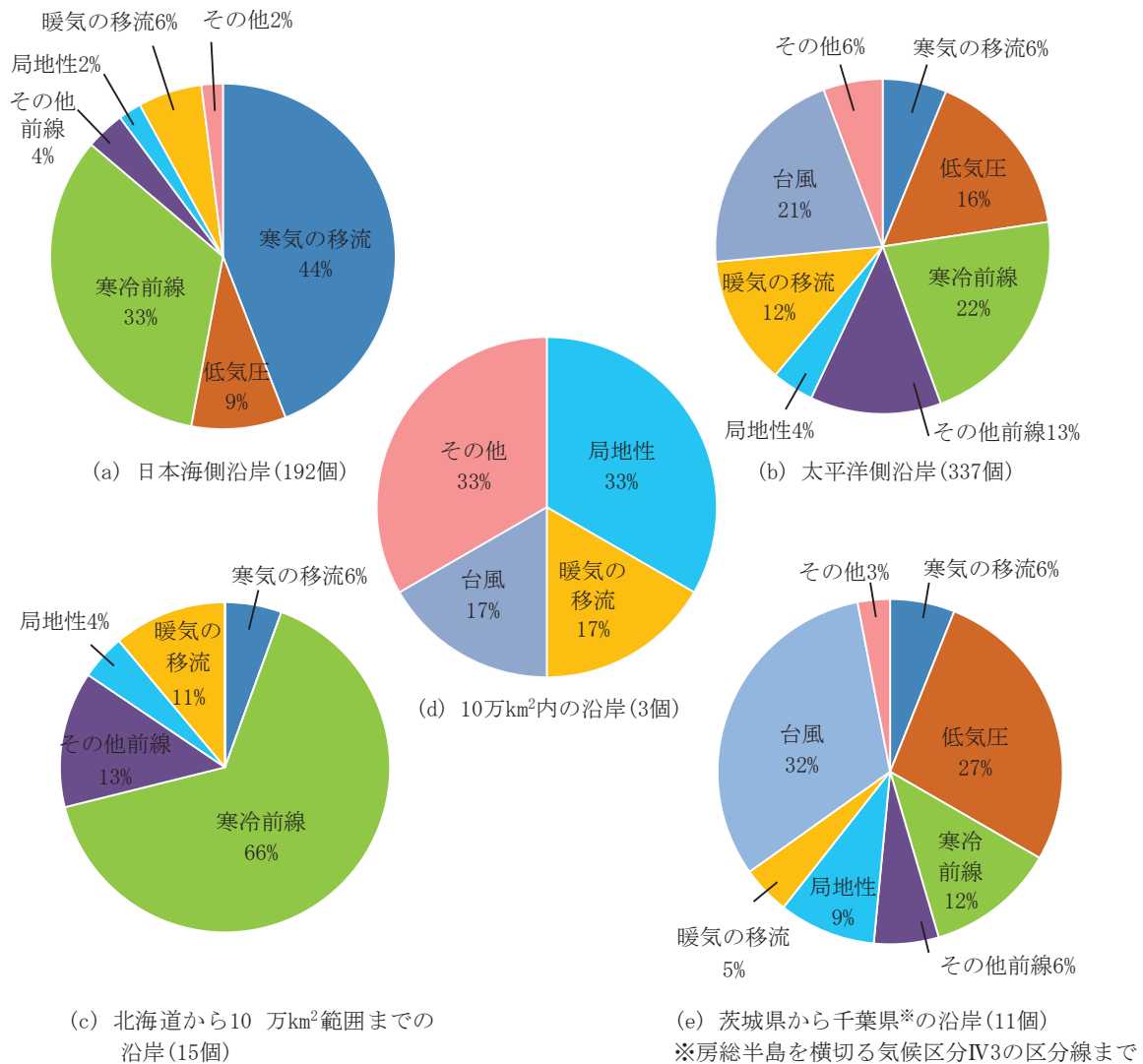
第 8.1-2 図 総観場ごとの F スケール別竜巻発生分布（1/2）



第 8.1-2 図 総観場ごとの F スケール別竜巻発生分布 (2/2)

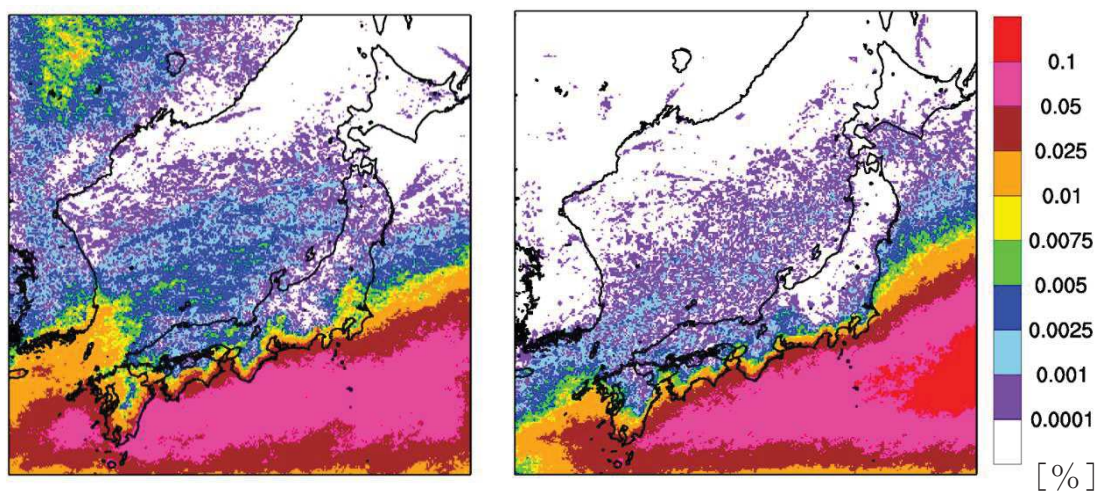


第 8.1-3 図 女川原子力発電所を中心とする 10 万 km² の範囲

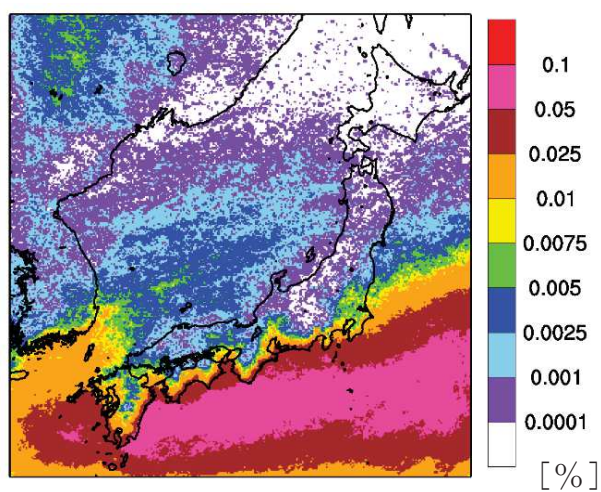


()は竜巻個数を示す

第 8.1-4 図 地域ごとの竜巻発生総観場及び寄与割合の比較



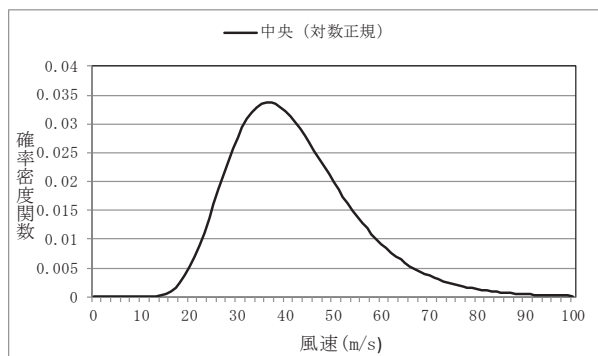
第 8.1-5 図 F3 規模以上を対象とした SReH, CAPE 同時超過頻度分布



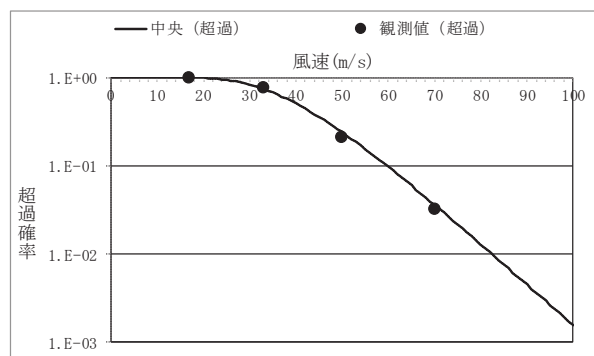
第 8.1-6 図 EHI の超過頻度分布 (閾値 3.3)



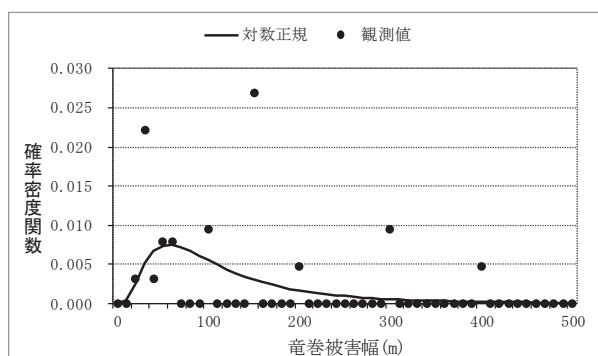
第 8.1-7 図 竜巻検討地域



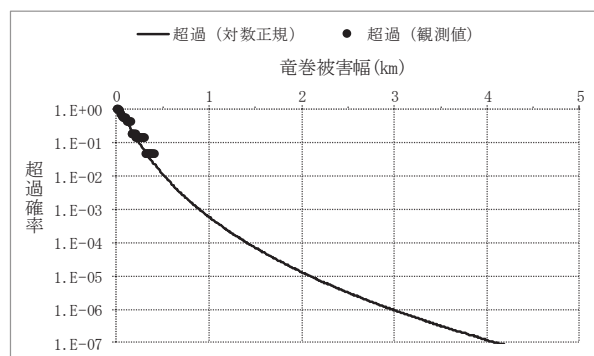
第 8.1-8 図 竜巻風速の確率密度分布



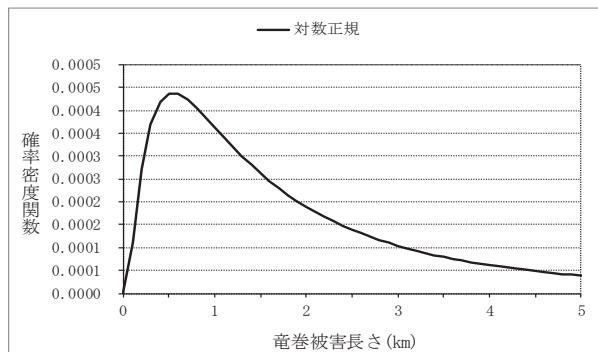
第 8.1-9 図 竜巻風速の超過確率分布



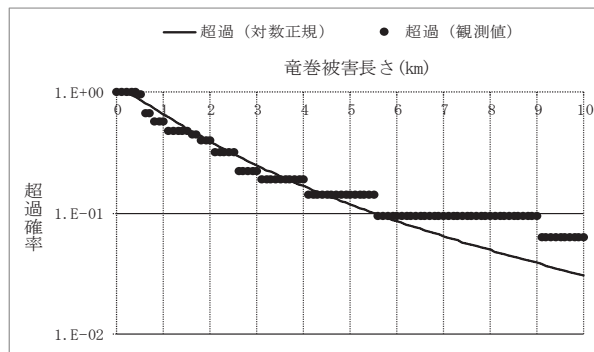
第 8.1-10 図 被害幅の確率密度分布



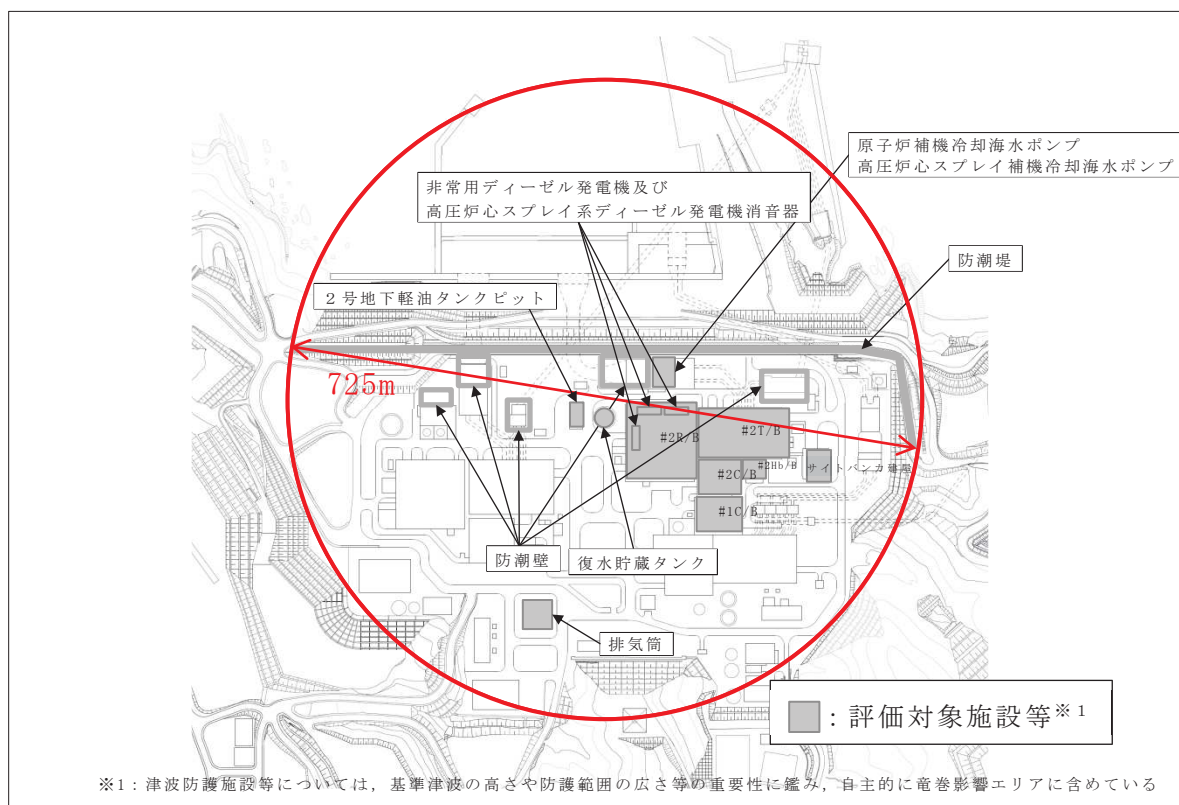
第 8.1-11 図 被害幅の超過確率分布



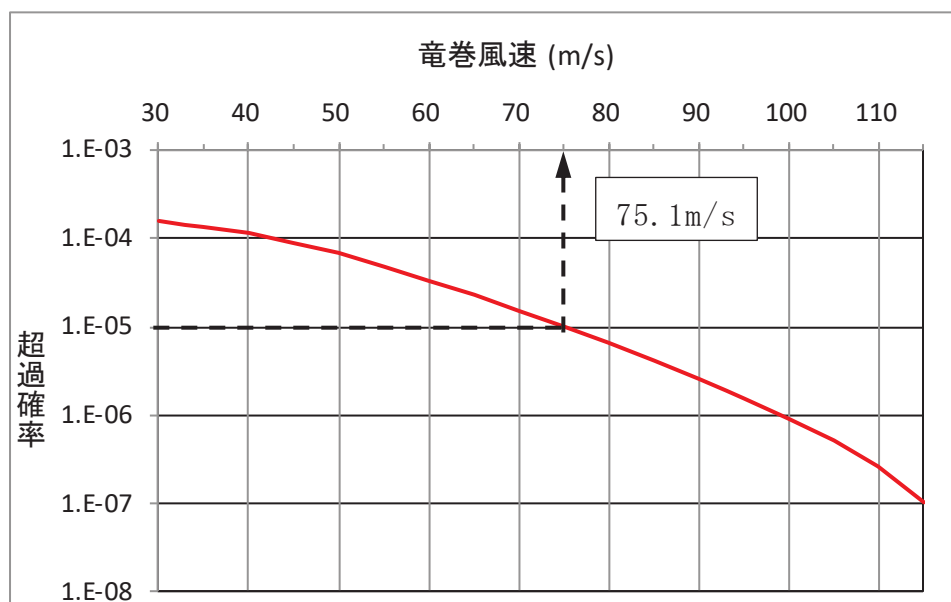
第 8.1-12 図 被害長さの確率密度分布



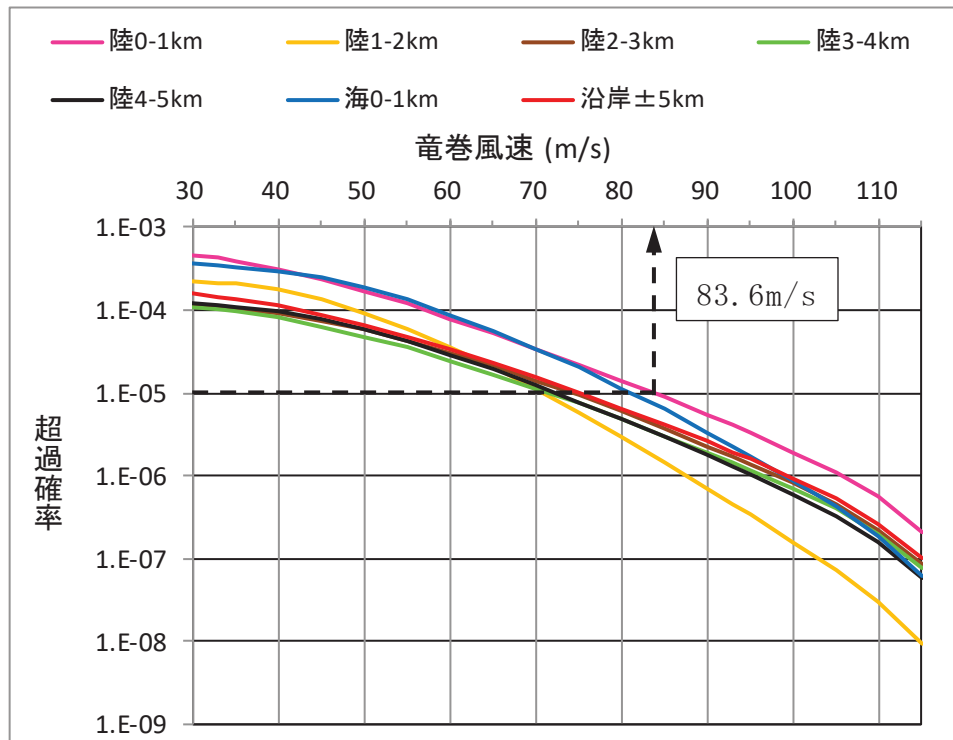
第 8.1-13 図 被害長さの超過確率分布



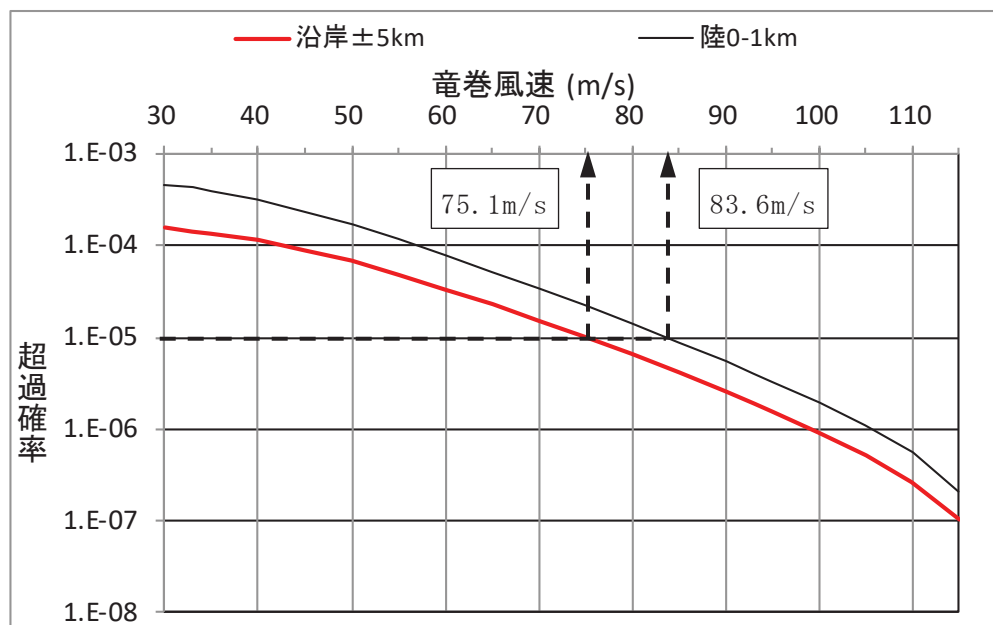
第 8.1-14 図 評価対象施設等の位置



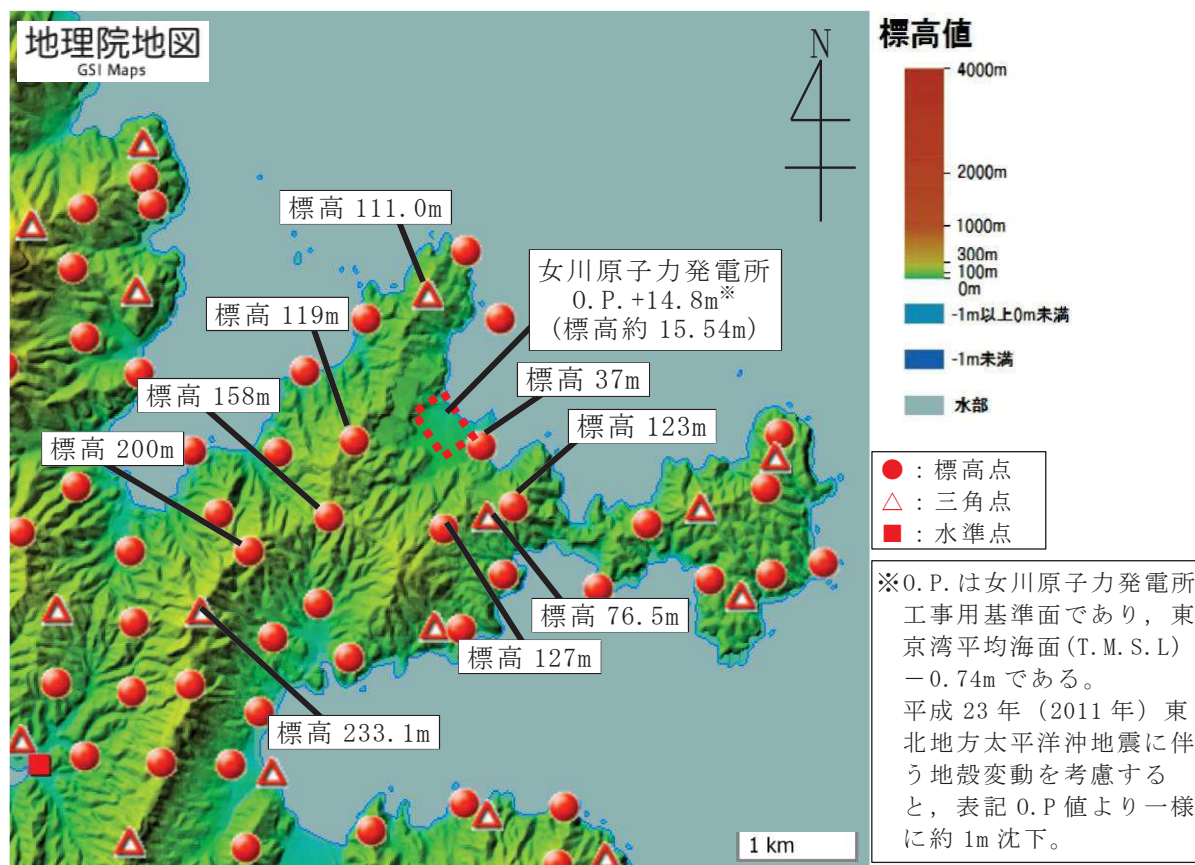
第 8.1-15 図 竜巻最大風速のハザード曲線（海側，陸側 5km 範囲）



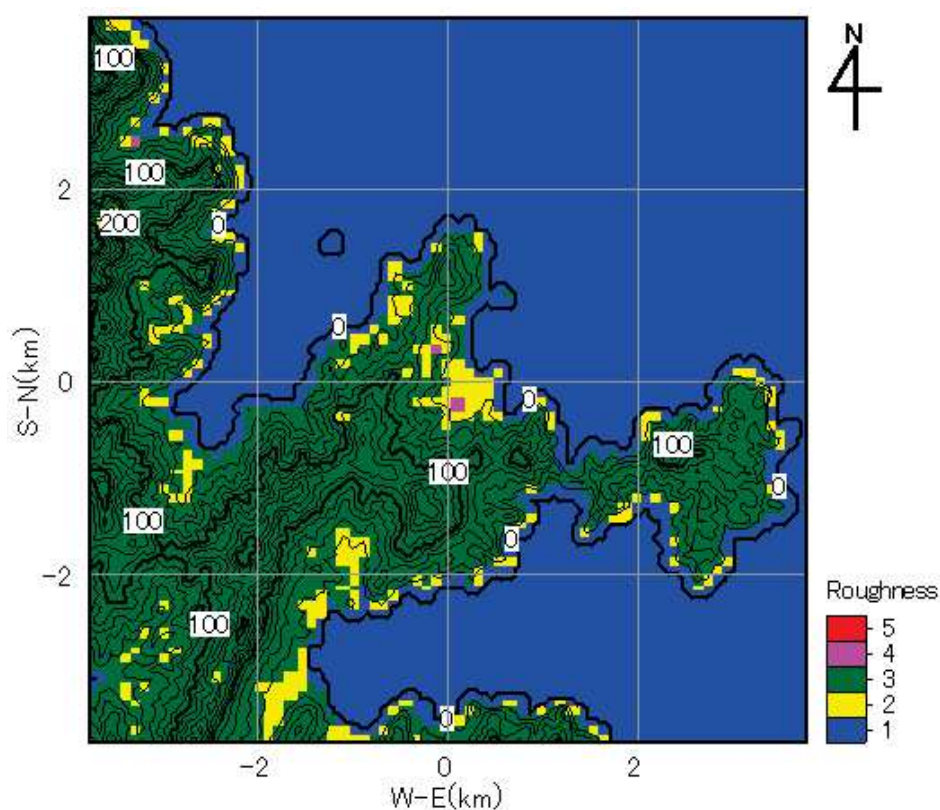
第 8.1-16 図 竜巻検討地域を 1km 幅ごとに細分化したハザード曲線と
海側，陸側 5km 範囲のハザード曲線



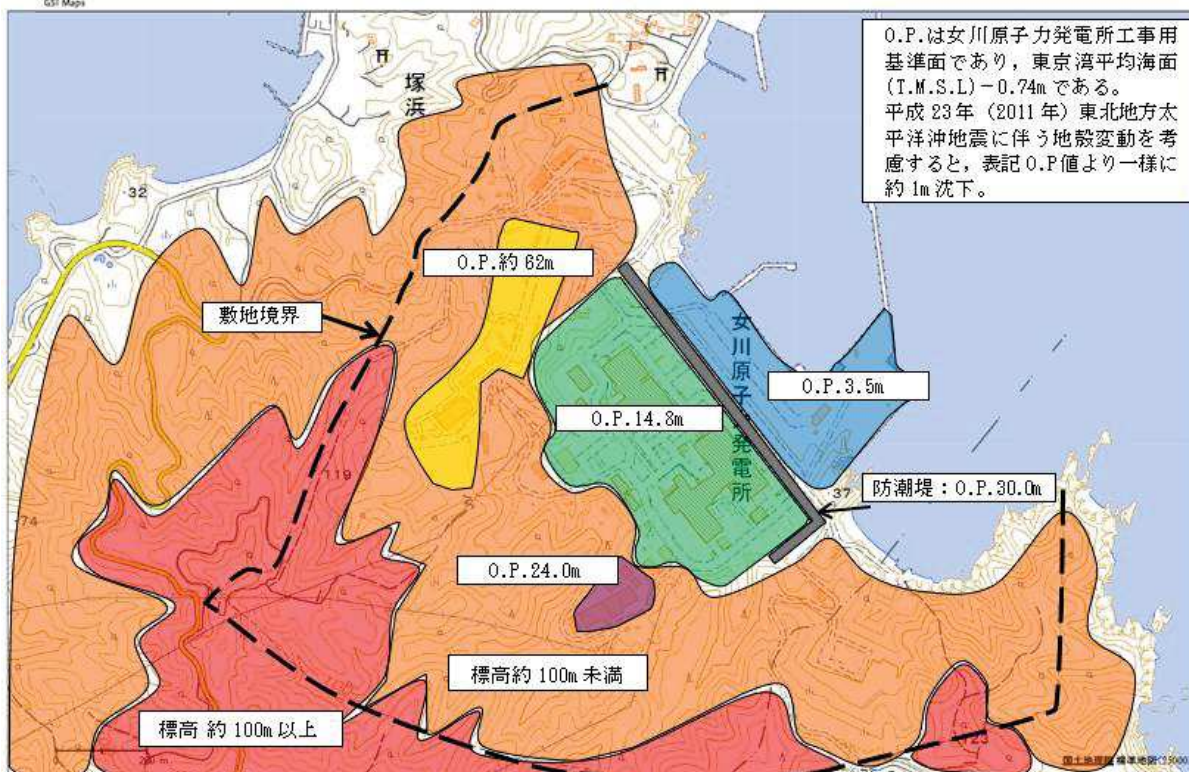
第 8.1-17 図 竜巻最大風速のハザード曲線



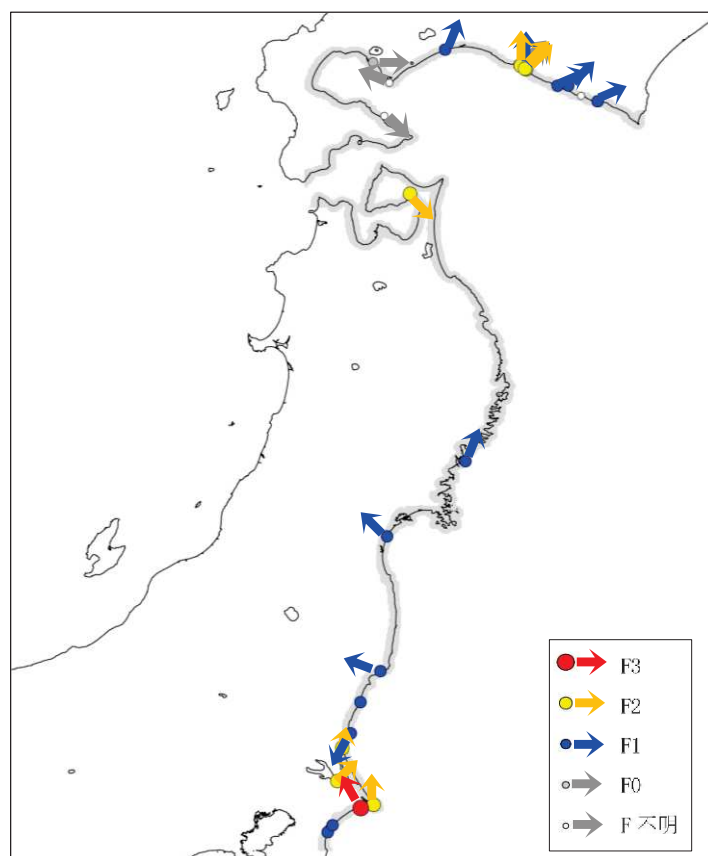
第 8.1-18 図 女川原子力発電所周辺の地形 (国土地理院「電子国土 Web」より作成)



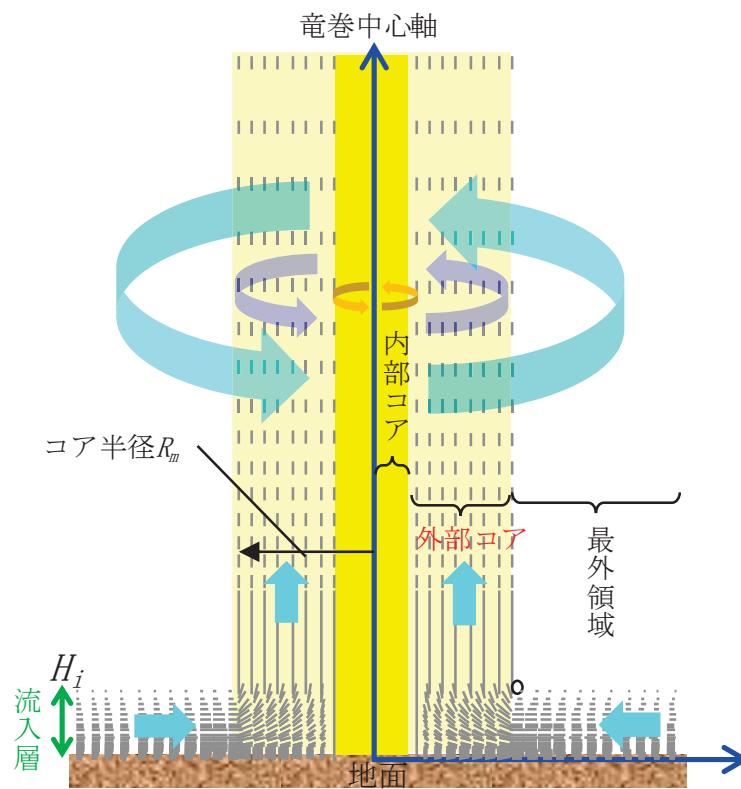
第 8.1-19 図 女川原子力発電所周辺の地表面粗度



第 8.1-20 図 女川原子力発電所の周辺の標高及び防潮堤高さ



第 8.1-21 図 竜巻移動方向



第 8.1-22 図 フジタモデルの風速場

女川原子力発電所 2 号炉

竜巻影響評価について

目 次

別添資料-1

1. 竜巻に対する防護
 - 1.1 概要
 - 1.2 評価の基本方針
 - 1.3 評価の基本的な考え方
2. 基準竜巻・設計竜巻の設定
 - 2.1 概要
 - 2.2 竜巻検討地域の設定
 - 2.3 基準竜巻の最大風速(V_B)の設定
 - 2.4 設計竜巻の最大風速(V_D)の設定
 - 2.5 設計竜巻の特性値
3. 竜巻影響評価
 - 3.1 評価概要
 - 3.2 評価対象施設等
 - 3.3 設計荷重の設定
 - 3.4 評価対象施設等の設計方針
 - 3.5 竜巻随件事象に対する評価

添付資料

- 1.1 重大事故等対処施設に対する考慮について
- 1.2 評価対象施設の抽出について
- 1.3 外部事象防護対象施設等に波及的影響を及ぼし得る施設の抽出について
- 2.1 気候区分について
- 2.2 数値気象解析にもとづく竜巻検討地域の設定について
- 2.3 竜巻検討地域及び全国で発生した竜巻
- 2.4 竜巻最大風速のハザード曲線の求め方
- 2.5 地形効果による竜巻風速への影響について
- 2.6 設計竜巻の特性値の設定
- 2.7 米国及び関東平野の竜巻の類似性
- 3.1 竜巻影響評価の概要及び保守性について
- 3.2 竜巻影響評価及び竜巻対策の概要
- 3.3 設計飛来物の選定について
- 3.4 竜巻随件事象の抽出について
- 3.5 飛来物化する可能性がある物品等の管理について
- 3.6 設計竜巻荷重と積雪荷重との組み合わせについて
- 3.7 竜巻防護ネットの構造設計について

1. 竜巻に対する防護

1.1 概要

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

発電用原子炉施設の供用期間中に極めてまれに突風・強風を引き起こす自然現象としての竜巻及びその随伴事象等によって発電用原子炉施設の安全性を損なうことのない設計であることを評価・確認するため、原子力規制委員会の定める「原子力発電所の竜巻影響評価ガイド（平成 25 年 6 月 19 日原子力規制委員会決定、平成 26 年 9 月 17 日改正）」（以下「ガイド」※という。）を参照し、竜巻影響評価として以下を実施し、発電用原子炉施設の安全機能が維持されることを確認する。

- ・設計竜巻及び設計荷重（設計竜巻荷重及びその他の組み合わせ荷重）の設定
- ・女川原子力発電所における飛来物に係る調査
- ・飛来物防止対策
- ・考慮すべき設計荷重に対する外部事象防護対象施設の構造健全性等の評価を行い、必要に応じ対策を行うことで安全機能が維持されることの確認

また、第四十三条の要求を踏まえ、設計竜巻によって、設計基準対象施設の安全機能と重大事故等対処設備の機能が同時に損なわれることがないことを確認するとともに、重大事故等対処設備の機能が喪失した場合においても、位置的分散又は頑健性のある外殻となる建屋による防護に期待できるといった観点から、代替手段により必要な安全機能を維持できることを確認する。【添付資料 1.1】

※「原子力発電所の竜巻影響評価ガイド（案）及び解説（平成 25 年 10 月、独立行政法人原子力安全基盤機構）」を含む。

1.2 評価の基本方針

1.2.1 竜巻から防護する施設の抽出

竜巻から防護する施設は、安全施設が竜巻の影響を受ける場合においても発電用原子炉施設の安全性を確保するために、「発電用軽水型原子炉施設の安全機能の重要度分類に関する審査指針」で規定される重要度分類（以下「安全重要度分類」という。）のクラス 1、クラス 2 及びクラス 3 の設計を要求される構築物、系統及び機器とする。

その上で、上記構築物、系統及び機器の中から、発電用原子炉を停止するため、また停止状態にある場合は引き続きその状態を維持するために必要な異常の発生防止の機能又は異常の影響緩和の機能を有する構築物、系統及び機器として安全重要度分類のクラス 1、クラス 2 及び安全評価※上その機能に期待するクラス 3 に属する構築

物、系統及び機器（以下「外部事象防護対象施設」という。）とし、機械的強度を有すること等により、安全機能を損なわない設計とする。

※ 運転時の異常な過渡変化及び設計基準事故解析

また、外部事象防護対象施設を内包する建屋（外部事象防護対象施設となる建屋を除く。）は、機械的強度を有すること等により、内包する外部事象防護対象施設の安全機能を損なわない設計及び外部事象防護対象施設へ波及的影響を及ぼさない設計とする。ここで、外部事象防護対象施設及び外部事象防護対象施設を内包する建屋を併せて、外部事象防護対象施設等という。

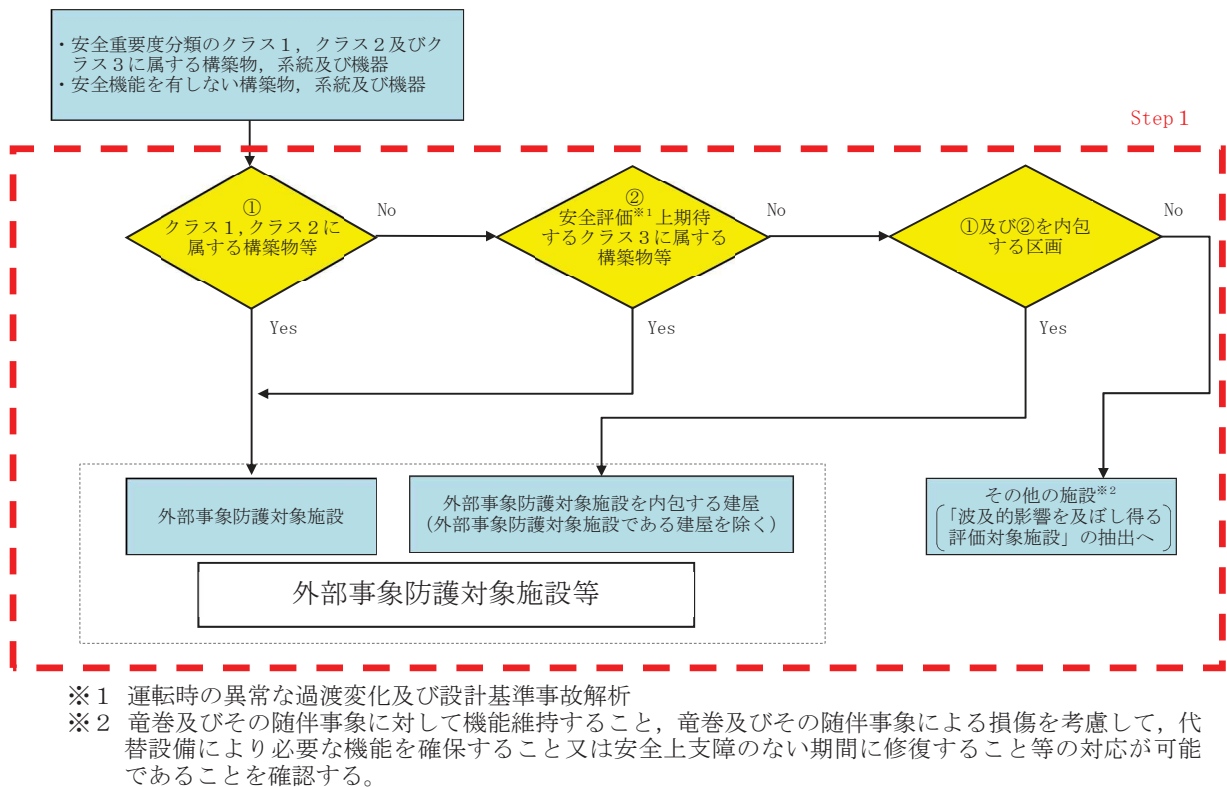
上記に含まれない構築物、系統及び機器は、竜巻及びその随伴事象に対して機能を維持すること若しくは竜巻及びその随伴事象による損傷を考慮して代替設備により必要な機能を確保すること、安全上支障のない期間での修復等の対応を行うこと又はそれらを適切に組み合わせることにより、その安全機能を損なわない設計とする。

1.2.2 竜巻影響評価の対象施設

竜巻影響評価の対象施設としては、以下の「(1) 外部事象防護対象施設等のうち評価対象施設」、「(2) 外部事象防護対象施設等に波及的影響を及ぼし得る施設」に示す施設を竜巻影響評価の対象施設とする。

また、竜巻に対する防護設計を行う、外部事象防護対象施設等のうち評価対象施設及び外部事象防護対象施設等に波及的影響を及ぼし得る評価対象施設を「評価対象施設等」という。外部事象防護対象施設等の抽出フローを第 1.2.2-1 図に示す。

なお、「基準地震動及び耐震設計方針に係る審査ガイド」の重要度分類における耐震 S クラスの設計を要求される施設についても、外部事象防護対象施設等として抽出すべきものがないことを確認した。【添付資料 1.2】



第 1.2.2-1 図 外部事象防護対象施設等の抽出フロー

(1) 外部事象防護対象施設等のうち評価対象施設【添付資料 1.2】

外部事象防護対象施設等のうち評価対象施設として、屋外施設（外部事象防護対象施設を内包する施設を含む）、屋内の施設で外気と繋がっている施設及び外殻となる施設（建屋、構築物）（以下「外殻となる施設」という。）による防護機能が期待できない施設を抽出する。

なお、外殻となる施設による防護機能が期待できない施設については、外部事象防護対象施設を内包する区画の構造健全性の確認結果を踏まえ抽出する。

防護機能を期待できることが確認できた区画に内包される外部事象防護対象施設については、該当する外殻となる施設により防護されることから、個別評価は実施しない。

第 1.2.2-2 図に、評価対象施設等の抽出フロー及び抽出された評価対象施設等を示す。

また、第 1.2.2-2 図において抽出した評価対象施設等のうち、屋外施設の配置を第 1.2.2-3 図に示す。

（屋外施設（外部事象防護対象施設を内包する区画を含む））

- ・原子炉補機冷却海水ポンプ（配管，弁含む）
- ・高圧炉心スプレイ補機冷却海水ポンプ（配管，弁含む）
- ・高圧炉心スプレイ補機冷却海水ストレーナ
- ・復水貯蔵タンク

- ・ 非常用ガス処理系（屋外露出部）
- ・ 排気筒
- ・ 2号原子炉建屋

＜以下，外部事象防護対象施設を内包する区画＞

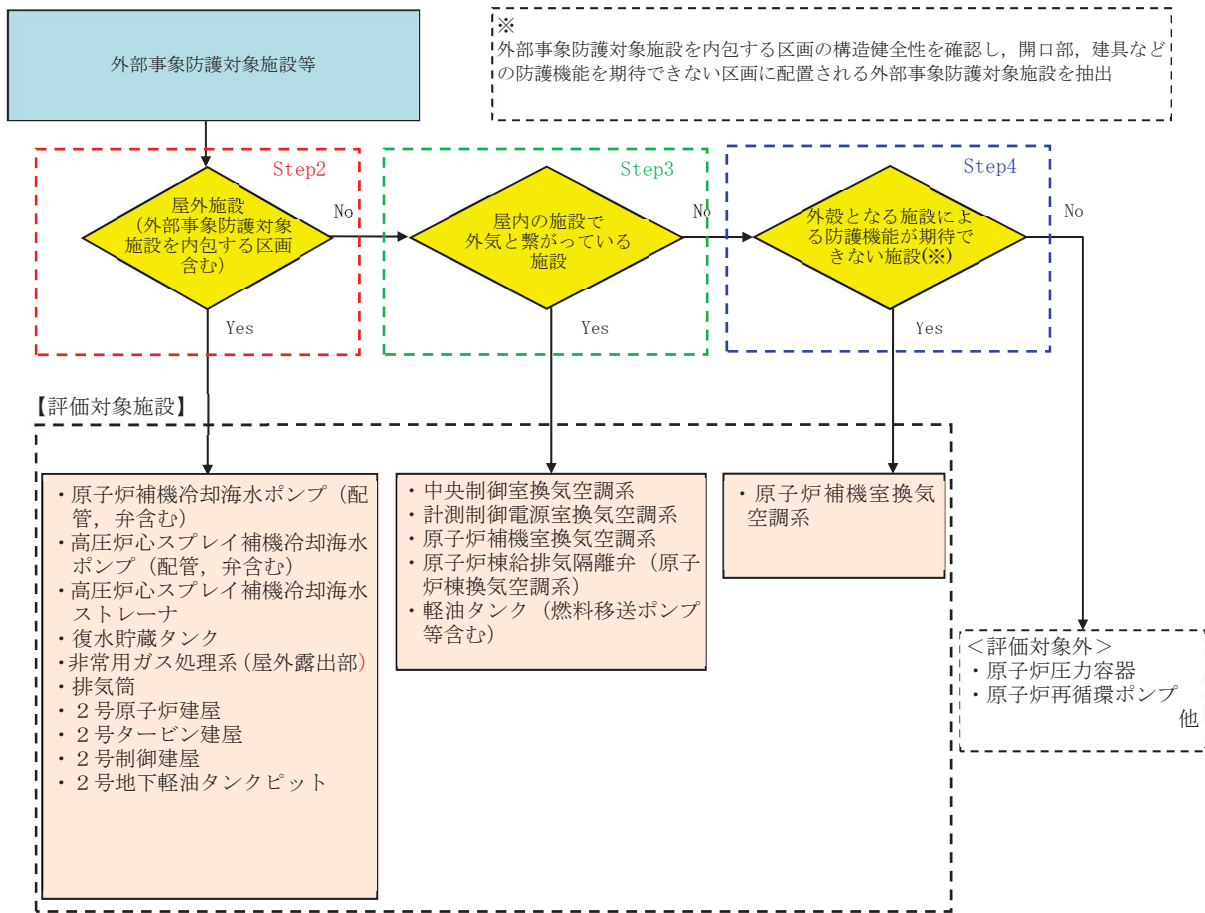
- ・ 2号タービン建屋（気体廃棄物処理系隔離弁等を内包）
- ・ 2号制御建屋（中央制御室を内包）
- ・ 2号地下軽油タンクピット（軽油タンクを内包）

（外気と繋がる設備）

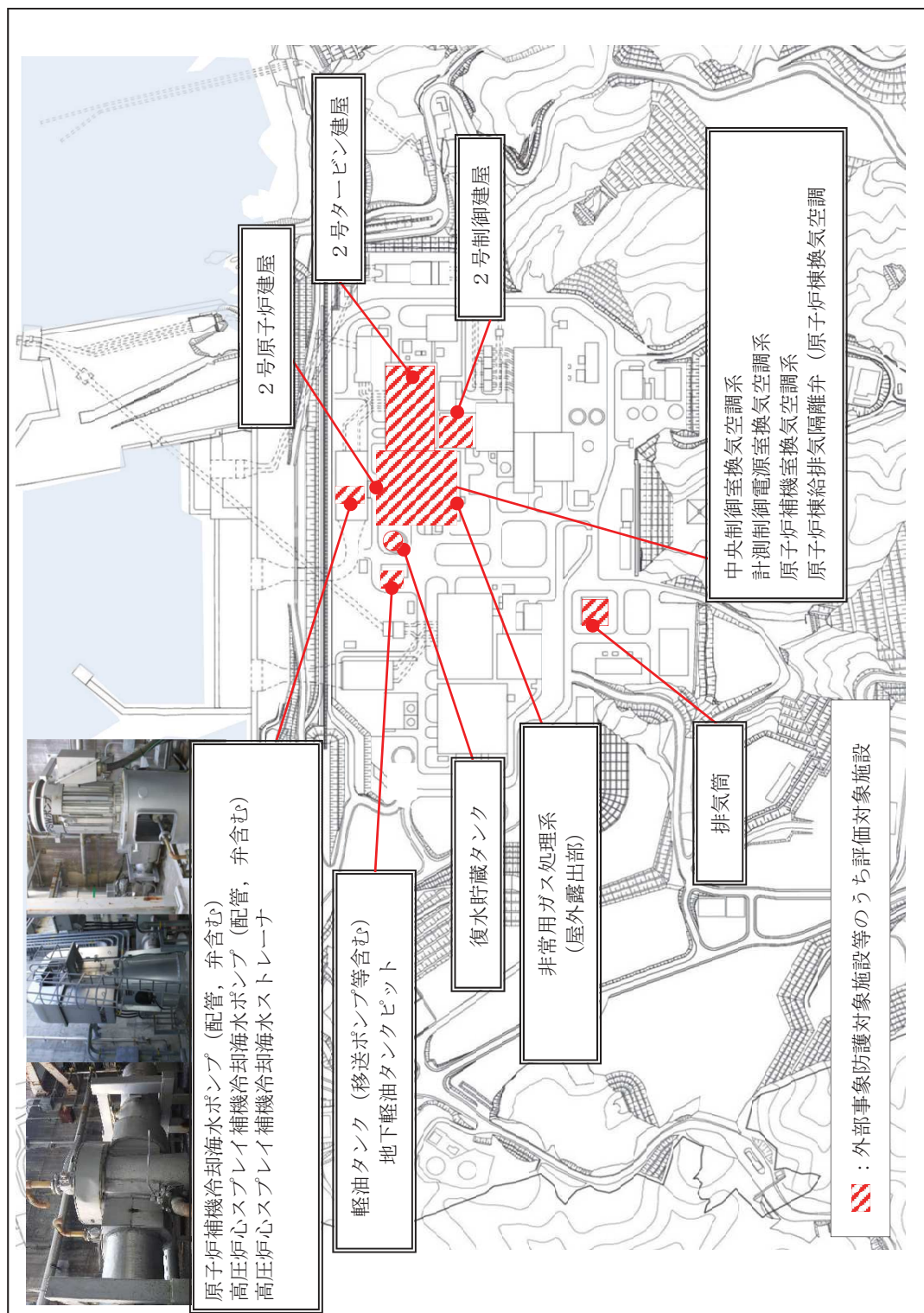
- ・ 中央制御室換気空調系
- ・ 計測制御電源室換気空調系
- ・ 原子炉補機室換気空調系
- ・ 原子炉棟給排気隔離弁（原子炉棟換気空調系）
- ・ 軽油タンク（燃料移送ポンプ等含む）

（外殻となる施設による防護機能が期待できない設備）

- ・ 原子炉補機室換気空調系



第 1. 2. 2-2 図 評価対象施設の抽出フロー



第 1.2.2-3 図 外部事象防護対象施設等のうち評価対象施設 (屋外施設)

(2) 外部事象防護対象施設等に波及的影響を及ぼし得る施設【添付資料 1.3】

外部事象防護対象施設等に波及的影響を及ぼし得る施設は、その他の施設（外部事象防護対象施設以外の施設）のうち、破損により外部事象防護対象施設等を機能喪失させる（機械的影響）可能性があるもの及び屋外に設置される外部事象防護対象施設の付属設備のうち、設計竜巻の風圧力、気圧差及び設計飛来物等の衝突による損傷により外部事象防護対象施設を機能喪失させる（機能的影響）可能性があるものとする。

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

第 1.2.2-4 図に、外部事象防護対象施設等に波及的影響を及ぼし得る施設の抽出フロー及び抽出された施設を示す。

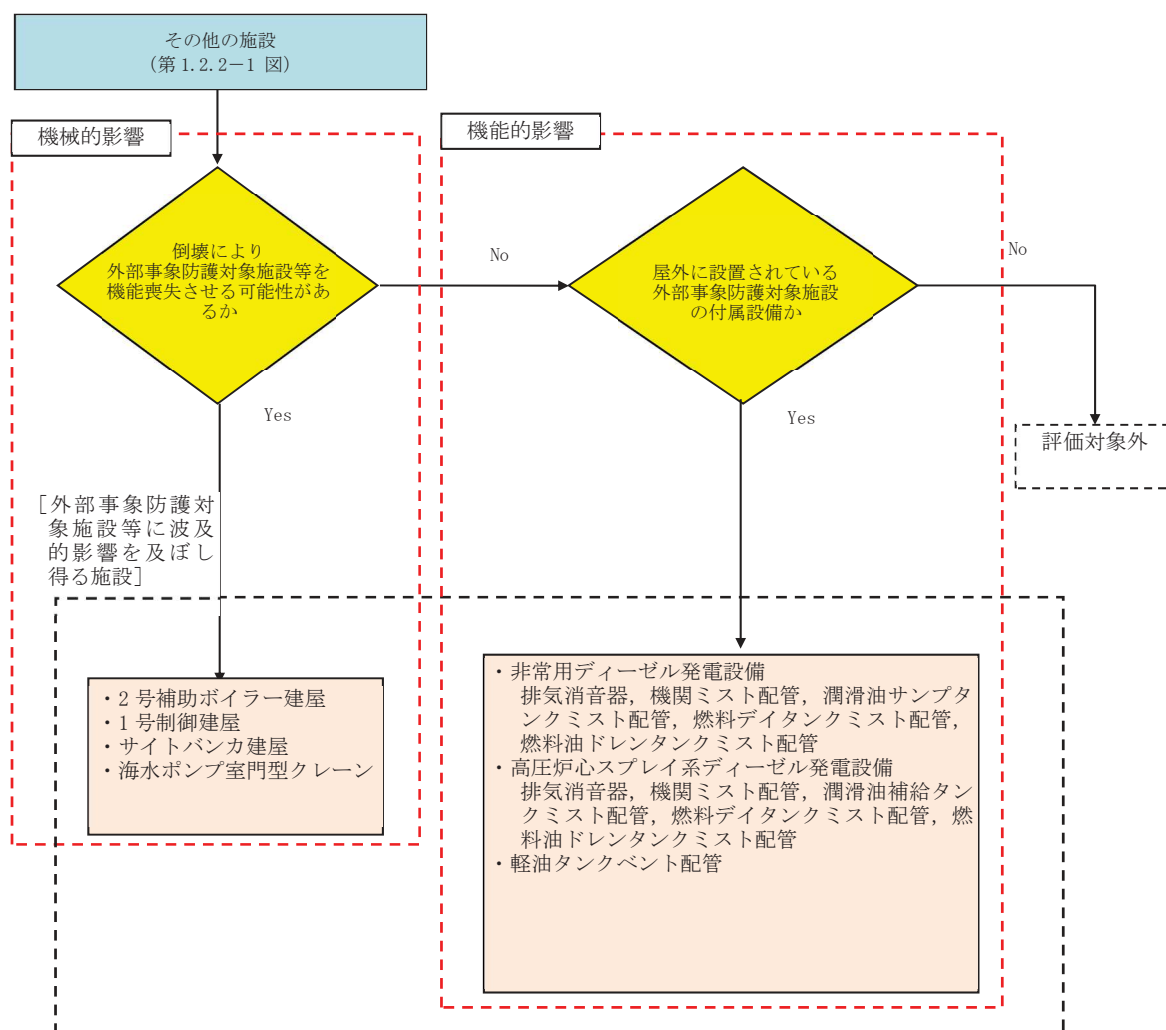
また、第 1.2.2-4 図において抽出した外部事象防護対象施設等に波及的影響を及ぼし得る施設の配置図を第 1.2.2-5 図に示す。

a. 外部事象防護対象施設等に機械的影響を及ぼし得る施設

- ・ 2 号補助ボイラー建屋
- ・ 1 号制御建屋
- ・ サイトバンカ建屋
- ・ 海水ポンプ室門型クレーン

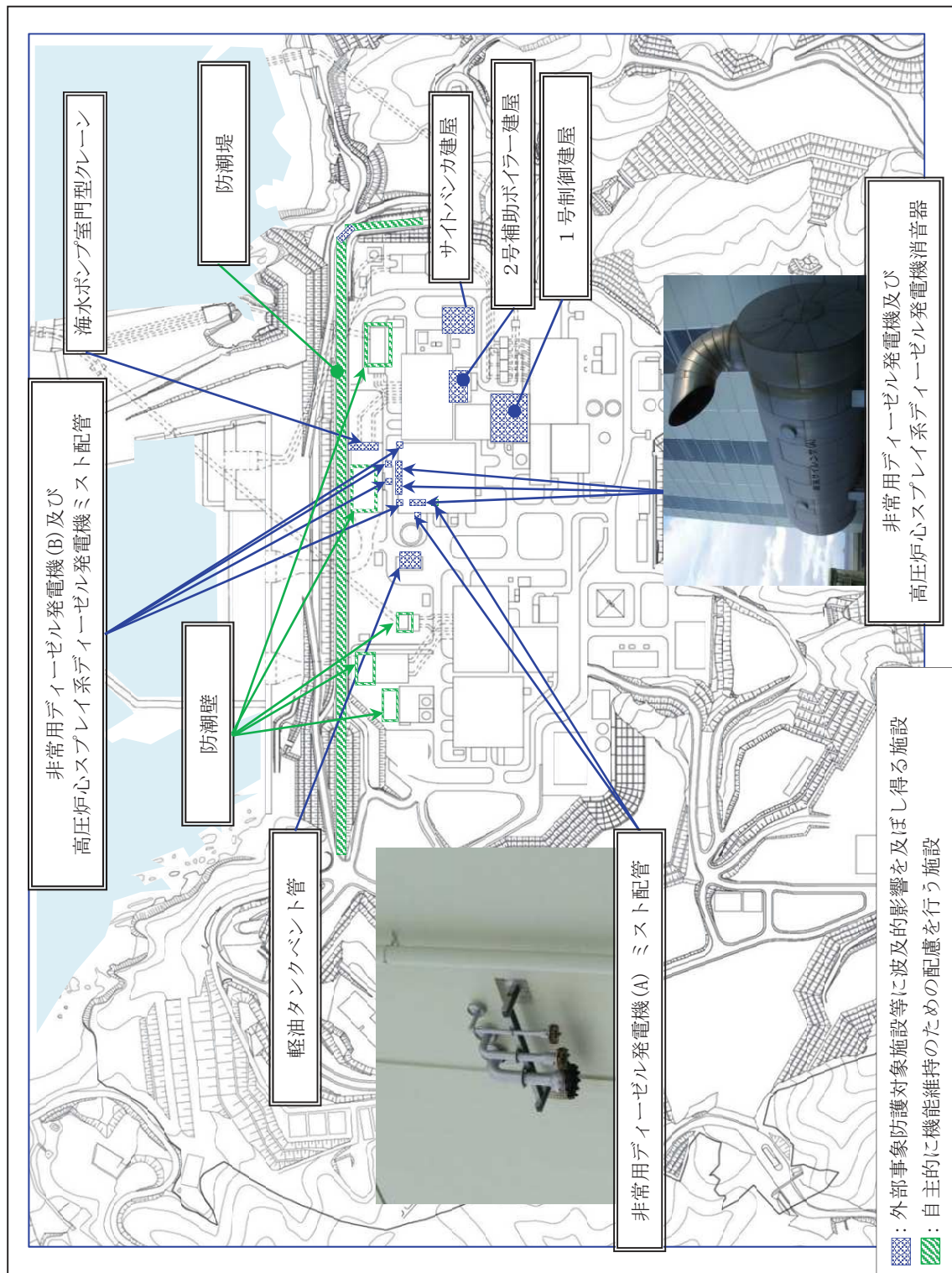
b. 外部事象防護対象施設に機能的影響を及ぼし得る施設

- ・ 非常用ディーゼル発電設備
(排気消音器, 機関ミスト配管, 潤滑油サンプタンクミスト配管, 燃料デイトンクミスト配管, 燃料油ドレンタンクミスト配管)
- ・ 高圧炉心スプレイ系ディーゼル発電設備
(排気消音器, 機関ミスト配管, 潤滑油補給タンクミスト配管, 燃料デイトンクミスト配管, 燃料油ドレンタンクミスト配管)
- ・ 軽油タンク
(軽油タンクベント配管)



第 1.2.2-4 図 外部事象防護対象施設等に波及的影響を及ぼし得る施設の抽出フロ

ー



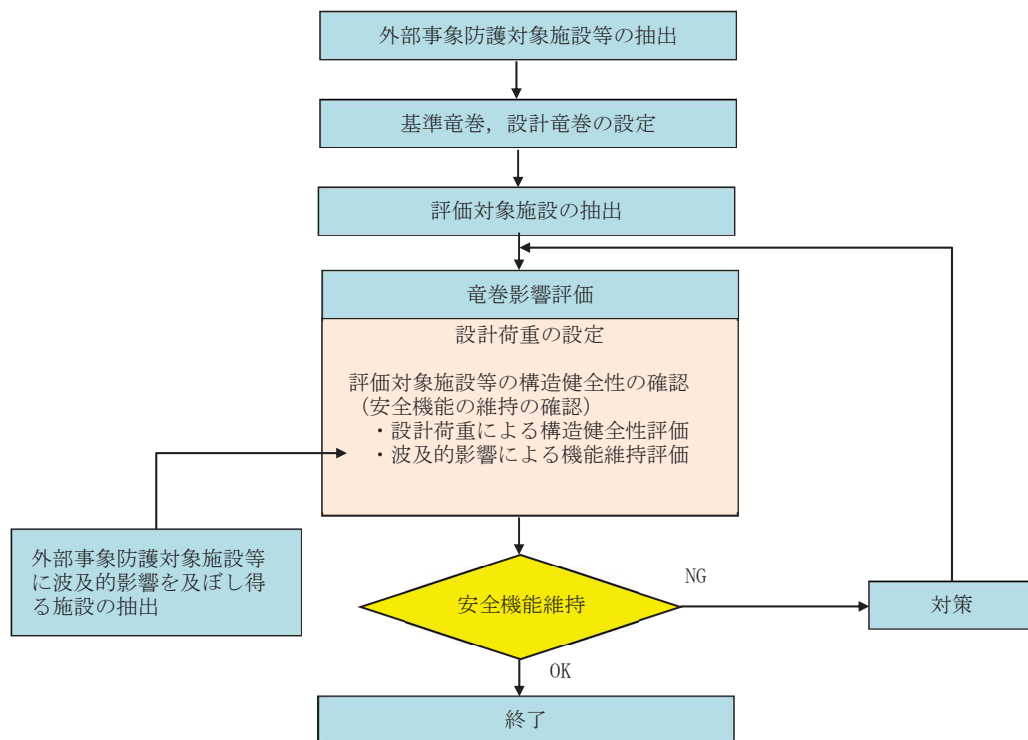
第 1.2.2-5 図 外部事象防護対象施設等に波及的影響を及ぼし得る施設

1.3 評価の基本的な考え方

1.3.1 評価方法

基準竜巻、設計竜巻及び設計荷重を適切に設定するとともに、評価対象施設等を抽出し、考慮すべき設計荷重に対する評価対象施設等の構造健全性について評価を行い、必要に応じて対策を行うことで安全機能が維持されていることを確認する。

竜巻影響評価の基本フローを第 1.3.1-1 図に示す。



第 1.3.1-1 図 竜巻影響評価の基本フロー

1.3.2 評価対象施設等に作用する荷重

以下に示す設計荷重を適切に設定する。

(1) 設計竜巻荷重

設計竜巻荷重を以下に示す。

a. 風圧力

設計竜巻の最大風速による風圧力

b. 気圧差による圧力

設計竜巻における気圧低下によって生じる評価対象施設等の内外の気圧差による圧力

c. 飛来物の衝撃荷重

設計竜巻によって評価対象施設等に衝突し得る飛来物（以下「設計飛来物」という。）が評価対象施設等に衝突する際の衝撃荷重

(2) 設計竜巻荷重と組み合わせる荷重

設計竜巻荷重と組み合わせる荷重を以下に示す。

- a. 評価対象施設等に常時作用する荷重，運転時荷重等
- b. 竜巻以外の自然現象による荷重，設計基準事故時荷重等

なお，b. の荷重については，竜巻以外の自然現象及び事故の発生頻度等を参照して，a. の荷重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考慮して判断する。

具体的な荷重については，「3.3.2 設計竜巻荷重と組み合わせる荷重の設定」に示す。

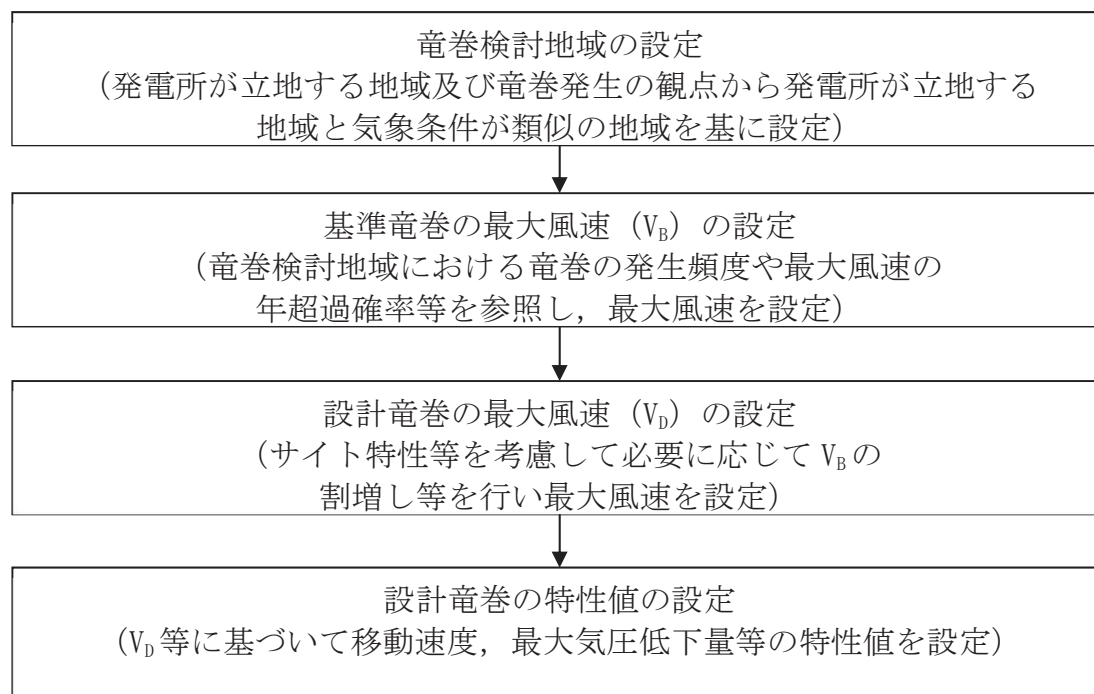
1.3.3 施設の安全性の確認方針

設計竜巻荷重及びその他組み合わせ荷重（常時作用している荷重，竜巻以外の自然現象による荷重，設計基準事故時荷重等）を適切に組み合わせた設計荷重に対して，評価対象施設等，あるいはその特定の区画の構造健全性等の評価を行い，必要に応じて対策を行うことで安全機能が維持されることを確認する。

2. 基準竜巻・設計竜巻の設定

2.1 概要

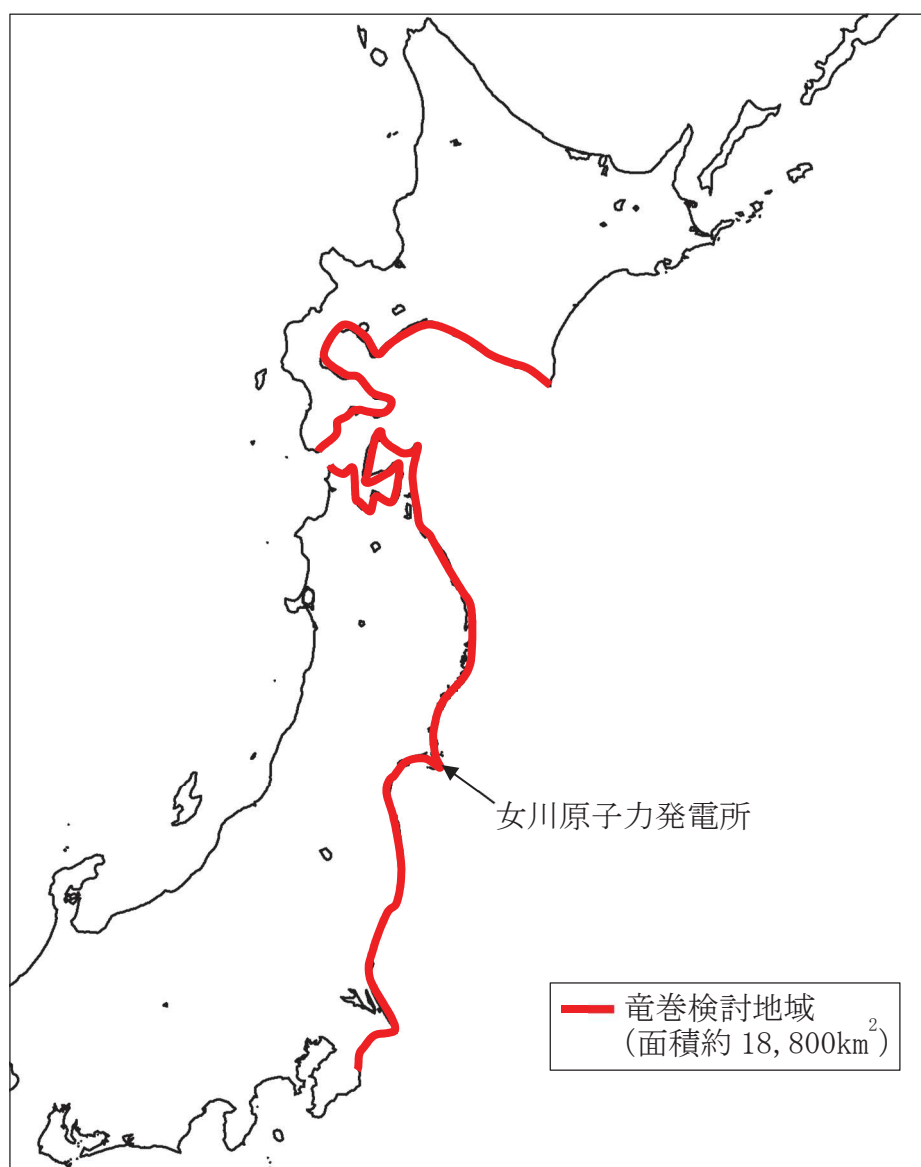
基準竜巻及び設計竜巻の設定フローを第 2.1-1 図に示す。



第 2.1-1 図 基準竜巻・設計竜巻の設定に係る基本フロー

2.2 竜巻検討地域の設定

女川原子力発電所に対する竜巻検討地域について、ガイドを参考に、発電所が立地する地域と気象条件の類似性の観点で検討を行い、第2.2-1図に示すとおり北海道襟裳岬から千葉県九十九里町までの海岸線から陸側及び海側それぞれ5kmの範囲を竜巻検討地域に設定した（面積約18,800km²）。以下にその妥当性確認の結果を示す。



第2.2-1図 竜巻検討地域

2.2.1 竜巻検討地域の妥当性確認

竜巻検討地域の妥当性について、以下の観点から確認を実施した。

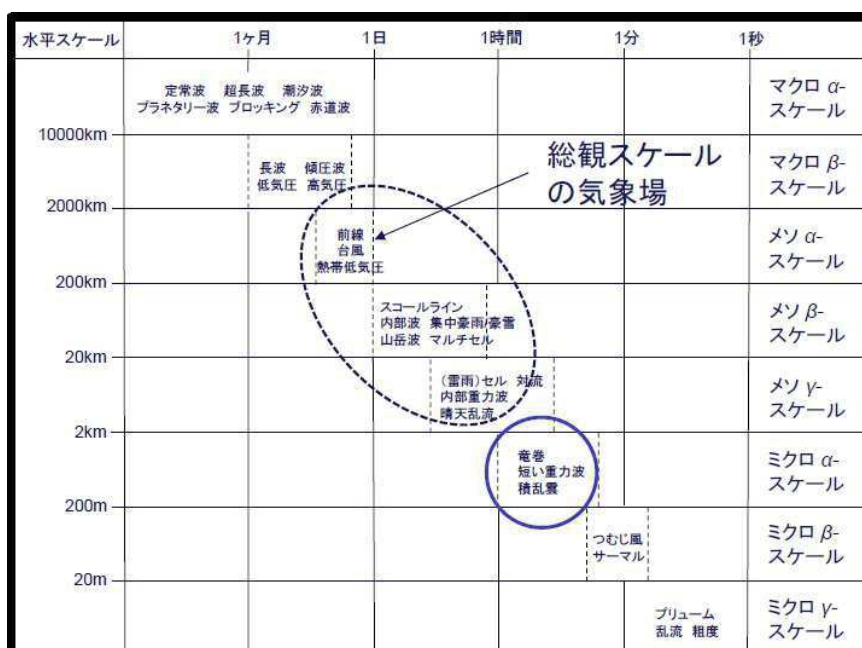
- (1) 気候区分による確認
- (2) 総観場の分析に基づく地域特性の検討
- (3) 突風関連指数に基づく地域特性の検討

竜巻検討地域は、(1)の確認により、日本海側と太平洋側が気候特性が異なる地域に整理されることを確認するとともに、女川原子力発電所が立地する気候区分(区分IV3)を確認した。

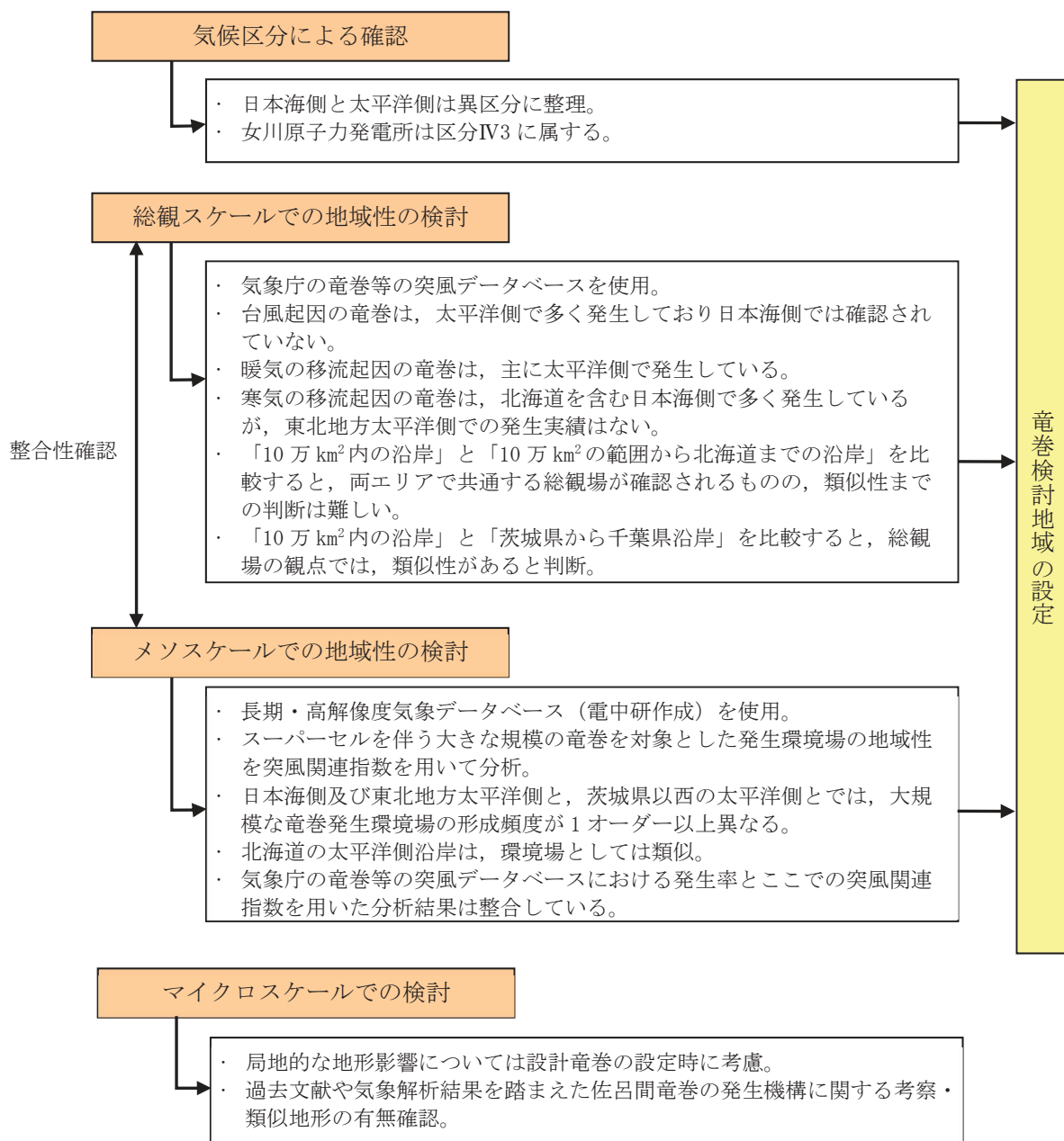
その上で、「原子力発電所の竜巻影響評価ガイド(案)及び解説」の考え方にに基づき、竜巻発生要因となる気象条件(総観場)を確認する観点から、(2)の分析により地域特性を確認した。

また、一般的に大気現象は時空間スケールの階層構造が見られ、ある大気現象はスケールの小さな現象を内包しているため、大きな竜巻の発生要因となる環境場の形成のし易さを把握する観点から、(3)の分析により、竜巻の発生スケールに近いメソスケールの気象場が有する地域性と齟齬がないことについても確認した。竜巻とその関連気象の時空間スケールを第2.2.1-1図に、検討の流れを示したフローを第2.2.1-2図に示す。

なお、(3)の突風関連指数を用いた分析は、“大きな竜巻の発生に対する大気場の必要条件”を把握する上で有効であることを踏まえ、(3)の分析結果のみで竜巻検討地域を設定するものではなく、設定した竜巻検討地域の妥当性を確認するために用いている。



第2.2.1-1図 竜巻とその関連気象の時空間スケール



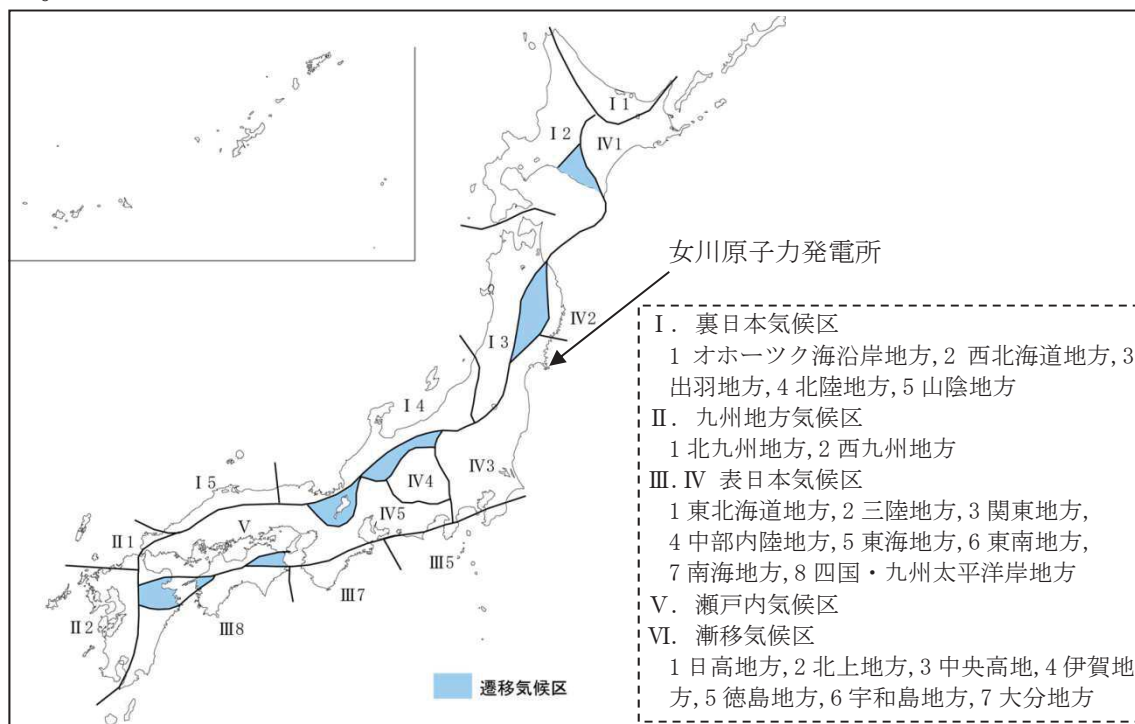
第 2.2.1-2 図 竜巻検討地域の検討フロー

2.2.2 気候区分による確認

女川原子力発電所が立地している宮城県の牡鹿半島は、第2.2.2-1図に示す日本の気候区分において、区分IV3に属している。

区分IV3の沿岸部は、およそ宮城県から千葉県九十九里町までの広範囲な太平洋側をカバーする区域となっている。

また、ガイドにおいては、日本海側と太平洋側は気象条件が異なることが例示されており、気候区分においても日本海側と太平洋側は異なる区分であるとされている。



出展：関口武「日本の気候区分」東京教育大学地理学研究報告（1959）

第2.2.2-1図 日本の気候区分

2.2.3 総観場の分析に基づく地域特性の検討

2.2.3.1 総観場ごとのFスケール別竜巻発生分布

気象庁の竜巻等の突風データベース※では、竜巻を発生させた総観場を約40種に分類しているが、「原子力発電所の竜巻影響評価ガイド（案）及び解説」を参考に、竜巻を発生させる親雲の発生要因を考慮して8種に再編し、発生分布の特徴を分析した。第2.2.3.1-1表に総観場の分類法と発生分布の特徴、第2.2.3.1-1図に全国で発生した竜巻の総観場ごとのFスケール別竜巻発生分布、第2.2.3.1-2図にF2以上の竜巻発生箇所を示す。

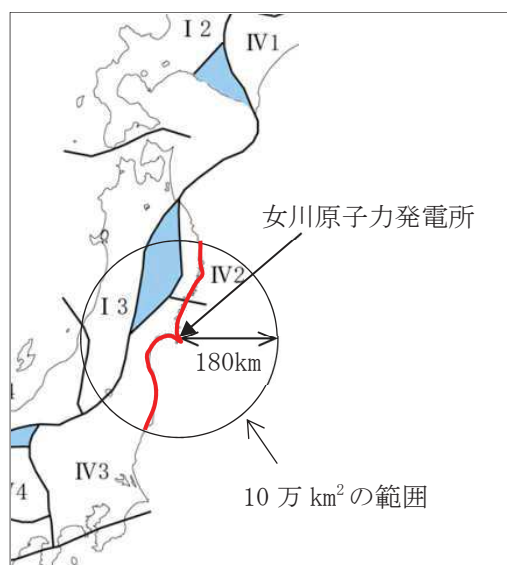
※ 気象庁 竜巻等の突風データベース (<http://www.data.jma.go.jp/obd/stats/data/bosai/tornado/index.html>)

2.2.3.2 総観場を用いた分析対象範囲

ガイドでは、竜巻検討地域を設定する際に、IAEA の基準※が参考になるとされており、およそ 10 万 km² の範囲を目安とすることが挙げられている。

日本海側は太平洋側と気候的にも異なることを踏まえ、女川原子力発電所を中心とする 10 万 km²（半径 180km）の範囲の太平洋側沿岸を確認したところ、第 2.2.3.2-1 図に示すとおり、気候区分Ⅳ3 及びⅣ2 にまたがった範囲が該当する。

日本海側と太平洋側の気候的な類似性が無いことについては、以下に示す総観場の観点からも確認を行っている。



第 2.2.3.2-1 図 女川原子力発電所を中心とする 10 万 km² の範囲

竜巻検討地域として、第 2.2.3.2-1 図に示した 10 万 km²（半径 180km）の範囲が適切であるか、又はさらに広げたエリアを設定することが適切であるかについて、総観場を用い、その類似性を確認することで評価を行う。

総観場の確認において、10 万 km² の範囲の北側に対しては、北海道の竜巻集中地域を含む襟裳岬までを対象とした。また、南側については、太平洋側における気候区分Ⅳ3 のエリアに当たる千葉県九十九里町までを対象とした。

第 2.2.3.2-2 図に各エリア毎の総観場の確認結果を示す。

※ IAEA Safety Standards, Meteorological and Hydrological Hazards in Site Evaluation for Nuclear Installations, Specific Safety Guide No. SSG-18, 2011

2.2.3.3 総観場の分析結果

全国で発生した竜巻の総観場ごとの F スケール別竜巻発生分布（第 2.2.3.1-1 図）より、以下に示す①～③の地域性を確認した。また、総観場ごとの確認結果を第 2.2.3.3-1 表に示す。

- ① 台風起因の竜巻は、太平洋側で多く発生しており日本海側では確認されていない。規模的には、関東以西の太平洋側では F3 を含む規模の大きな

竜巻が発生しているが、東北地方太平洋側ではF1が1件発生しているのみである。台風は北上するにつれて衰弱しやすい特性を有しているため、この特徴が発生傾向にも現れている（第2.2.3.1-1図(a)）。

- ② 暖気の移流起因の竜巻は、主に太平洋側で発生している。規模的には、関東以西の太平洋側ではF3を含む規模の大きな竜巻が多く発生しているが、東北地方太平洋側ではF1が1件発生しているのみである。主に太平洋側で発生している要因としては、太平洋側は暖湿流が大気下層に流入することが多いためと考えられる。特に関東平野では太平洋側から流入する暖気が遮られずに内陸深くまで流入するため、内陸部でも発生が集中している（第2.2.3.1-1図(b)）。

なお、類似の特徴は米国におけるロッキー山脈とアパラチア山脈との間の竜巻街道（トルネード・アレー）と呼ばれる領域においても確認されている（添付資料2.7参照）。

- ③ 寒気の移流起因の竜巻は、北海道を含む日本海側で多く発生しているが、東北地方太平洋側での発生実績はない。北海道を含む日本海側で発生数が多い要因としては、北からの寒気が山岳等に遮られずに直接流入するためと考えられる（第2.2.3.1-1図(c)）。

また、地域ごとの竜巻発生総観場及び寄与割合の比較結果（第2.2.3.2-2図）より、以下の内容を確認した。

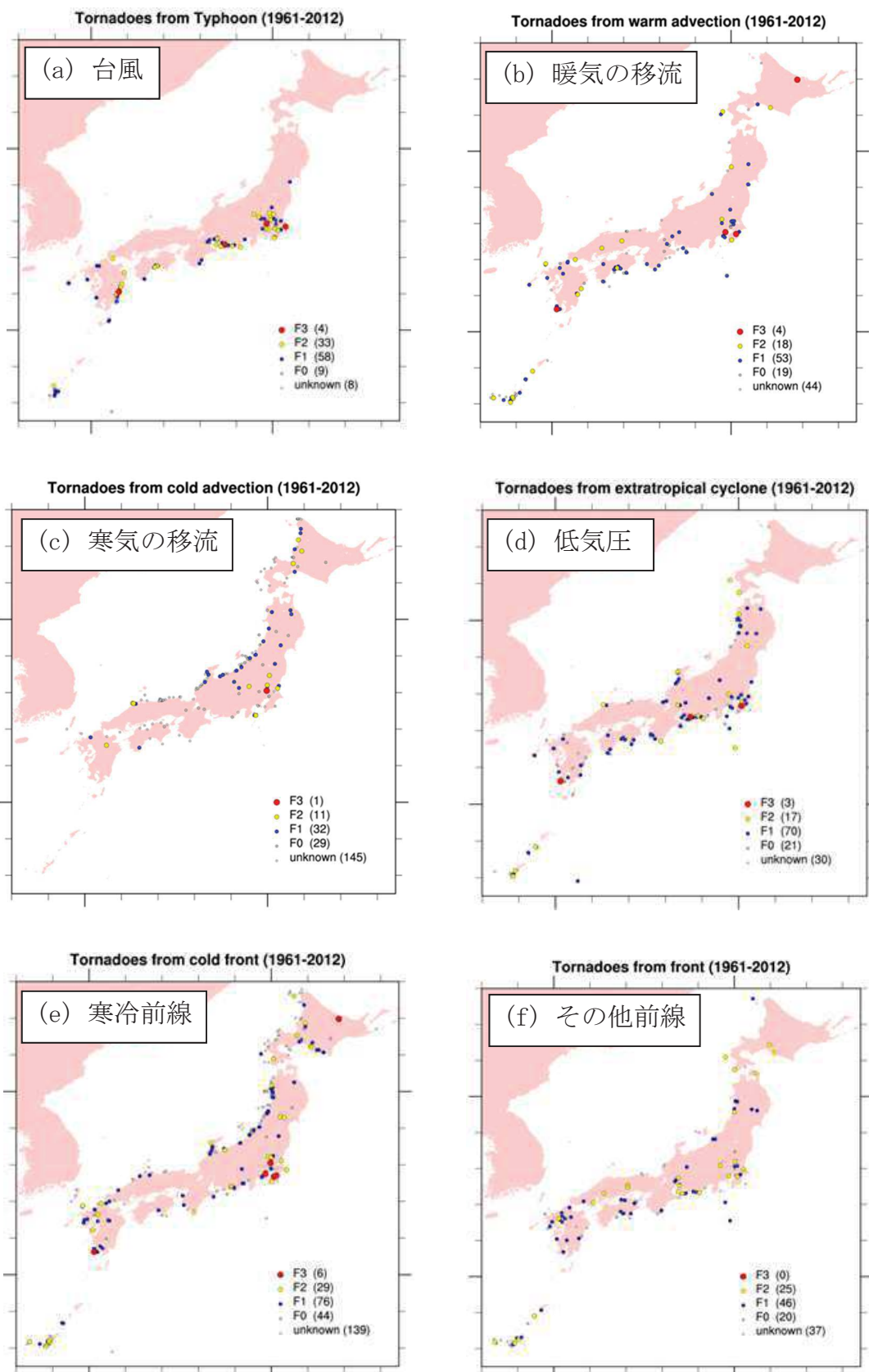
- ④ 「日本海側」と「太平洋側」を比較すると、総観場の分布が大きく異なっており、この点からも気候区分として差別化することが可能と考えられる（第2.2.3.2-2図(a), (b)）。
- ⑤ 「10万km²内の沿岸」と「10万km²の範囲から北海道までの沿岸」を比較すると、両エリアで暖気の移流や局地性など共通する総観場が確認できるが、竜巻の発生実績が少ないエリアということもあり、総観場の観点から明確に差別化はできない（第2.2.3.2-2図(c), (d)）。
- ⑥ 「10万km²内の沿岸」と「茨城県から千葉県沿岸」を比較すると、竜巻の発生数は少ないものの「10万km²内の沿岸」で確認された総観場全てが、「茨城県から千葉県沿岸」において確認できるため、類似性のあるエリアとして取り扱うことが適切と考えられる（第2.2.3.2-2図(d), (e)）。

以上の分析結果より、発電所の立地地域より北側のエリア（竜巻集中地域を含んだ北海道までの沿岸）は、総観場的に地域性が異なると明確に差別化することはできず、また、南側のエリア（千葉県までの沿岸）については、発生数は少ないものの総観場的に類似性のあるエリアとして考慮する必要があると判断した。

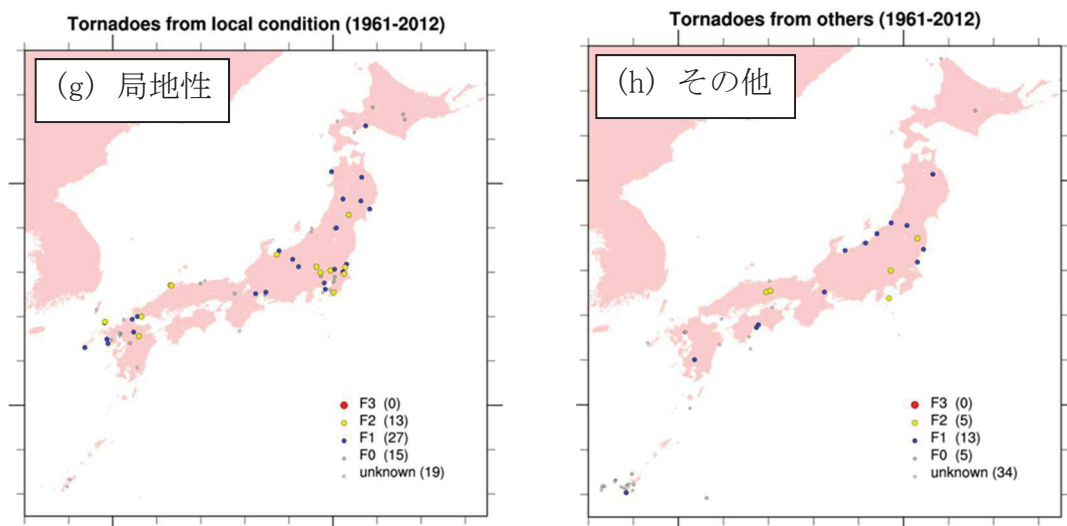
よって、北海道から千葉県までの太平洋側沿岸を竜巻検討地域として設定することが適切と判断した。

第 2.2.3.1-1 表 総観場の分類と特徴

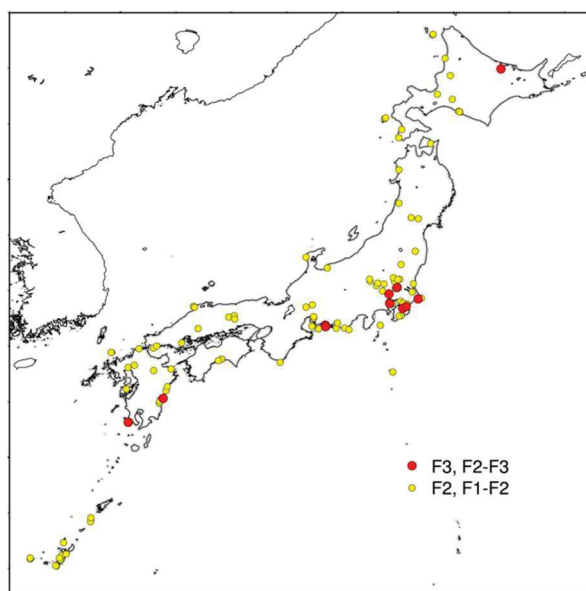
総観場	気象庁 DB の分類	特徴
寒気の移流	寒気の移流	大気上層に寒気が流入することで大気不安定になり竜巻の親雲を形成する環境場。下層に暖気の移流があると、親雲の更なる発達を促すため、F3 竜巻も見られる。
低気圧	熱帯低気圧(台風以外)、南岸低気圧、日本海低気圧、二つ玉低気圧、東シナ海低気圧、オホーツク海低気圧、その他(低気圧)	寒気と暖気が接し傾圧不安定による組織的な雲を形成する環境場。南からの下層の暖湿流がある場合、親雲の更なる発達を促すため、F3 竜巻も見られる。
寒冷前線	寒冷前線、気圧の谷	大気上層への寒気の移流と、それにとまなう組織的な前線の形成により親雲を形成する環境場。南からの下層の暖湿流がある場合、親雲の更なる発達を促すため、F3 竜巻も見られる。
その他前線	温暖前線、閉塞前線、停滞前線、梅雨前線、前線帯、不安定線、その他(前線)	寒冷前線以外の前線により親雲を形成する環境場。暖湿流が主要因となる場合が多い。
局地性	局地性擾乱、雷雨(熱雷)、雷雨(熱雷を除く)、地形効果、局地性降水	地域的な大気循環により親雲を形成する環境場。親雲の形成に地形的な影響も受けることも多い。
暖気の移流	暖気の移流、湿舌	大気下層に暖湿流が流入することで竜巻の親雲を形成する環境場。上層の寒気の移流がある場合、親雲の更なる発達を促す。
台風	台風	台風により竜巻の親雲を形成する環境場。台風中心の北東方向では、南東からの強い暖気移流があるため、非常に活発な積乱雲が発生しやすいため、F3 竜巻も多くみられる。
その他	移動性高気圧、中緯度高気圧、太平洋高気圧、大陸高気圧、オホーツク海高気圧、帯状高気圧、その他(高気圧)、季節風、大循環異常、その他	上記に当てはまらない環境場。気圧配置の変わり目が多いが、全体の個数は少ない。



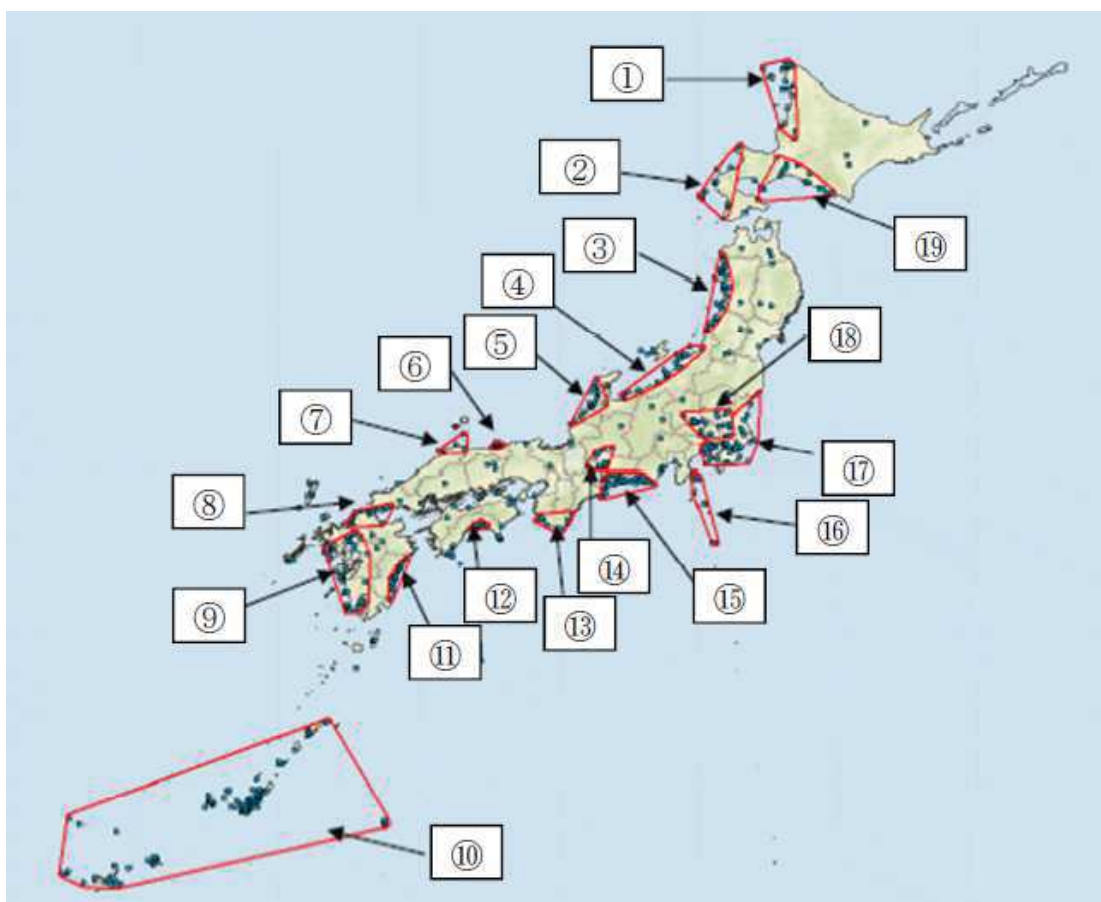
第 2.2.3.1-1 図 総観場ごとの F スケール別竜巻発生分布 (1/2)



第 2.2.3.1-1 図 総観場ごとの F スケール別竜巻発生分布 (2/2)



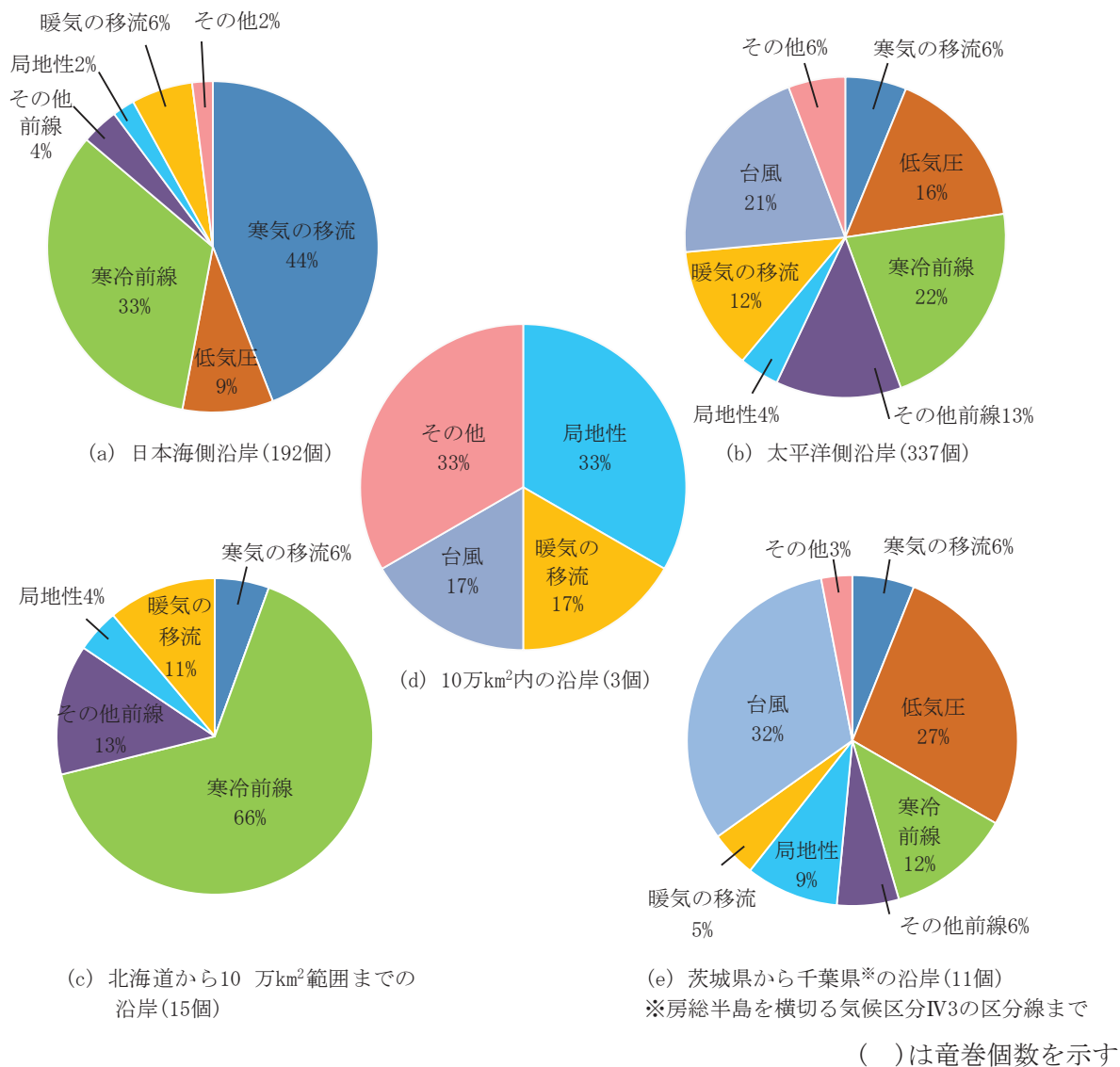
第 2.2.3.1-2 図 F2 以上の竜巻発生箇所
(気象庁「竜巻等の突風データベース」をもとに作成)



第 2. 2. 3. 1-3 図 竜巻集中地域
 (JNES「原子力発電所の竜巻影響評価ガイド(案)及び解説」より引用)

第 2.2.3.3-1 表 総観場毎の竜巻発生分布の傾向

総観場	傾向
台風	・ 太平洋側で多く発生しており日本海側では確認されていない。規模的には、関東以西の太平洋側では F3 を含む規模の大きな竜巻が発生しているが、東北地方太平洋側では F1 が 1 件発生しているのみである。 ・ 関東地方、中部地方の太平洋側及び九州地方の太平洋側では発生が集中しており、これらの地域は太平洋側の竜巻集中地域に整理されている（第 2.2.3.1-3 図参照）。 ・ 台風は北上（低緯度から中高緯度に移動）するに従い減衰するため、東北地方や北海道など、北部での発生数は少なく、規模も小さくなると考えられる。本州に接近・上陸する台風の減衰は、地表面摩擦の増大による風速の減衰に加え、海水温が低下するため、台風の維持、発達に必要な、海から供給される水蒸気量が減少し減衰する。
暖気の移流	・ 日本海側での発生数は少なく、主に太平洋側の関東以西で発生している。 ・ 規模的には、関東以西の太平洋側では F3 を含む規模の大きな竜巻が多く発生しているが、東北地方太平洋側では F1 が 1 件発生しているのみである。 ・ 太平洋側では、暖湿流が大気下層に流入することが多いため、関東以西で発生数が多くなる。特に関東平野では太平洋側から流入する暖気が遮られずに内陸深くまで流入するため、内陸部でも発生が集中している。
寒気の移流	・ 北海道を含む日本海側で多く発生しているが、東北地方太平洋側での発生実績はない。 ・ 日本海側は北からの寒気が山岳等に遮られずに直接流入するため、発生数が多いと考えられる。
低気圧	・ 主に太平洋側の関東以西で多く発生している。 ・ 太平洋側では、大気下層に流入する南からの暖気の移流と上層の寒気が親雲の更なる発達を促すため、関東以西の太平洋側で発生頻度が高くなる。
寒冷前線	・ 日本海側の沿岸部及び関東以西の太平洋側で多く発生している。 ・ 太平洋側では、大気下層に流入する南からの暖気の移流による影響も寄与するため、太平洋側で強い竜巻の発生数が多くなる。
その他前線	・ 日本海側での発生数は少なく、主に太平洋側の関東以西で多く発生しており、関東平野で発生が集中している。 ・ 太平洋側では、大気下層に流入する南からの暖気の移流による影響も寄与するため、関東の平野部では発生数が多くなる。
局地性	・ 地形的な影響によるものであり、全国で発生している。
その他	・ 全国的に発生数は少なく、地域差はみられない。



第 2. 2. 3. 2-2 図 地域ごとの竜巻発生総観場及び寄与割合の比較

2.2.4 突風関連指数に基づく地域特性の検討

総観場での検討に加え、大きな被害をもたらす強い竜巻の発生要因となる環境場の形成のし易さに対する地域特性を検討するため、気象庁や米国気象局における現業においても竜巻探知・予測に活用されており、竜巻の発生し易さを数値的に示すことができる突風関連指数を用いて地域特性の検討を行った。なお、突風関連指数を用いての検討については日本海側と太平洋側の地域性が異なること、さらに立地地域とその他の地域の特性を確認するために実施したものであり、特定規模の竜巻発生の可能性を評価するものではない。

2.2.4.1 突風関連指数を用いた竜巻予測の技術について

竜巻の主な発生メカニズムは、二つに大別されると考えられている。一つは局地的な前線（寒気団と暖気団との境界線）に伴って生じた渦が上昇流によって引き伸ばされて竜巻となるもので、比較的寿命が短く強い竜巻になりにくいとされている。

もう一つは「スーパーセル」と呼ばれる、回転する継続した上昇気流域（メソサイクロン）を伴った非常に巨大な積乱雲に伴って竜巻が発生するものである。スーパーセル内では、下降流域と上昇流域が分離されるため、巨大な積乱雲が長時間持続する傾向にある。近年、ドップラーレーダによる解析を基にした竜巻の事例調査が進んだことにより、大きな被害をもたらす強い竜巻の多くはスーパーセルに伴って発生することが判明している。現状、竜巻を直接予測することは困難であるが、大規模竜巻の発生と関係が深いスーパーセルの発生環境を予測することにより竜巻発生を間接的に予測できる。以下に、竜巻発生予測について、突風関連指数を適用している例を示す。

気象庁での突風関連指数の適用状況

気象庁では平成 20 年 3 月から、低気圧の発達等に関して半日から 1 日程度前に発表する予告的な気象情報において、11 種類の突風関連指数を算出し、竜巻やダウンバースト等の激しい突風が発生する可能性があるとして予測される場合には、当気象情報において注意喚起することとした。

その後、気象庁では竜巻等の突風の予測プロダクトとして、平成 22 年 5 月より竜巻発生確度ナウキャスト情報の提供を開始した。竜巻発生確度ナウキャストは、「竜巻が今にも発生する（又は発生している）可能性の程度」（発生確度）を 10 分ごとに解析した結果をもとに、降水域の移動ベクトル等を用いて 1 時間先まで発生確度を予測する。発生確度の解析は、以下の二つの技術を組み合わせて実施している。

- ・気象ドップラーレーダ観測によるメソサイクロン（親雲）検出技術
- ・メソ数値予測（MSM）を用いた突風危険指数の算出技術

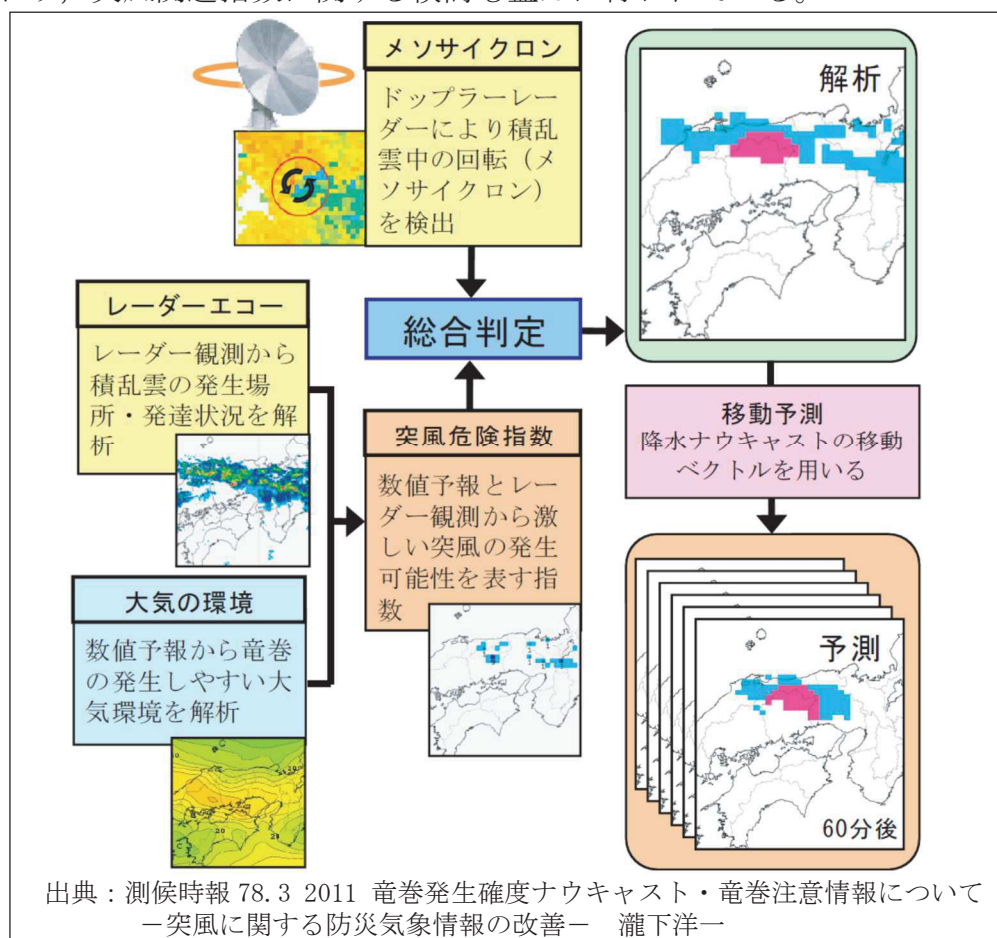
竜巻発生確度ナウキャストにおけるデータ等の流れを第 2.2.4.1-1 図に示す。竜巻発生確度ナウキャストは最新の観測・解析データをもって短いリードタイムの予

測を迅速に行うことが主目的のため、レーダプロダクトに重みを置いている。また、小さな竜巻も見逃しなく予測できるような説明変数として突風関連指数を選択している。

以上のように、気象庁では竜巻の監視や様々なリードタイムに対する予測に突風関連指数を活用している。

海外での突風関連指数の適用状況

海外では、米国の気象庁にあたる NOAA の SPC（ストーム予測センター）においても気象庁と同様に、突風関連指数の情報とレーダー観測のデータが現業で活用されており、突風関連指数に関する検討も盛んに行われている。



第 2.2.4.1-1 図 竜巻発生確度ナウキャストの解析・予測技術

2.2.4.2 検討に用いる突風関連指数について

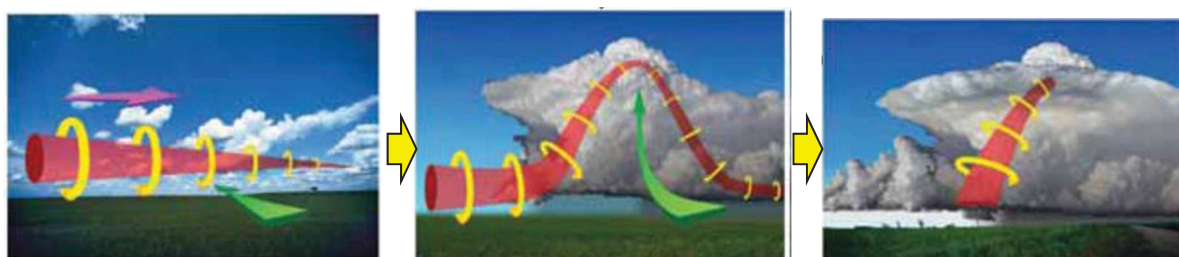
大きな被害をもたらす竜巻の親雲の多くはスーパーセルであり、スーパーセルの発生環境は予測できる技術があって気象庁等でも活用されていることを述べてきた。ここでは、本検討に用いる突風関連指数について説明する。

第 2.2.4.2-1 図に竜巻の発生メカニズムを示す。スーパーセルが発生しやすい環境場として、大気下層の鉛直シア（異なる高度間での風向・風速差）と、強い上昇気流を起こすきっかけとしての不安定な大気場が必要である。本検討では、大気の

不安定度を表す指標として「CAPE」、鉛直シアに伴って発生する水平渦度が親雲に取り込まれる度合いを表す指標として「SReH」を採用し、両者の指標が同時に高くなる頻度について、地域的な特徴を確認する分析を行った。また、両者を掛け合わせた指標である EHI による分析も行い、SReH・CAPE の同時超過頻度分析との比較を行った。

SReH, CAPE, EHI については、竜巻の発生実態を解明する研究において国内外で広く利用され、竜巻発生環境場との関連づけ等の知見が多く蓄積されており、気象庁での竜巻予測に用いる突風関連指数の中でも主な指標として紹介されているため、本検討を行う上でも妥当なものと考えられる。

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



風向・風速差による渦の発生

上昇気流の発生

竜巻の発生

第 2.2.4.2-1 図 竜巻の発生メカニズム

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

風向・風速差により発生した渦度が親雲に取り込まれる度合であり、値が大きいほど、積乱雲はスーパーセルに発達しやすい (第2.2.4.2-2図)。

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

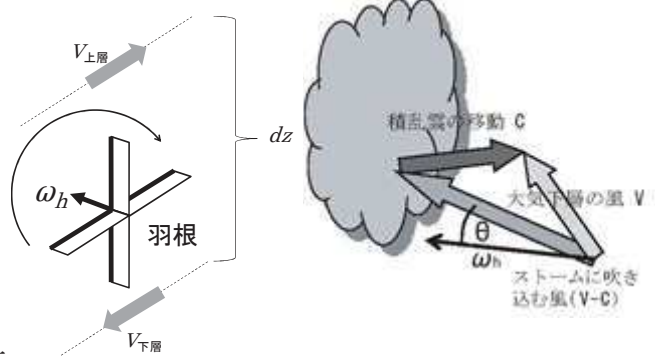
$\mathbf{V}$: 水平風速ベクトル

$\mathbf{C}$: ストームの移動速度

$\boldsymbol{\omega}$: 鉛直シアに伴う水平渦度



「水平軸周り」に回転する渦が親雲に吸い上げられて、「鉛直軸周り」の回転となる



積乱雲の移動と積乱雲に吹き込む風

第 2.2.4.2-2 図 SReH の概念図

(2) CAPE (Convective Available Potential Energy : 対流有効位置エネルギー)
 上昇気流の発生しやすさを表し、値が大きいほど背の高い積乱雲に発達しう
 るため、大気的不安定度の指標となる (第 2.2.4.2-3 図)。

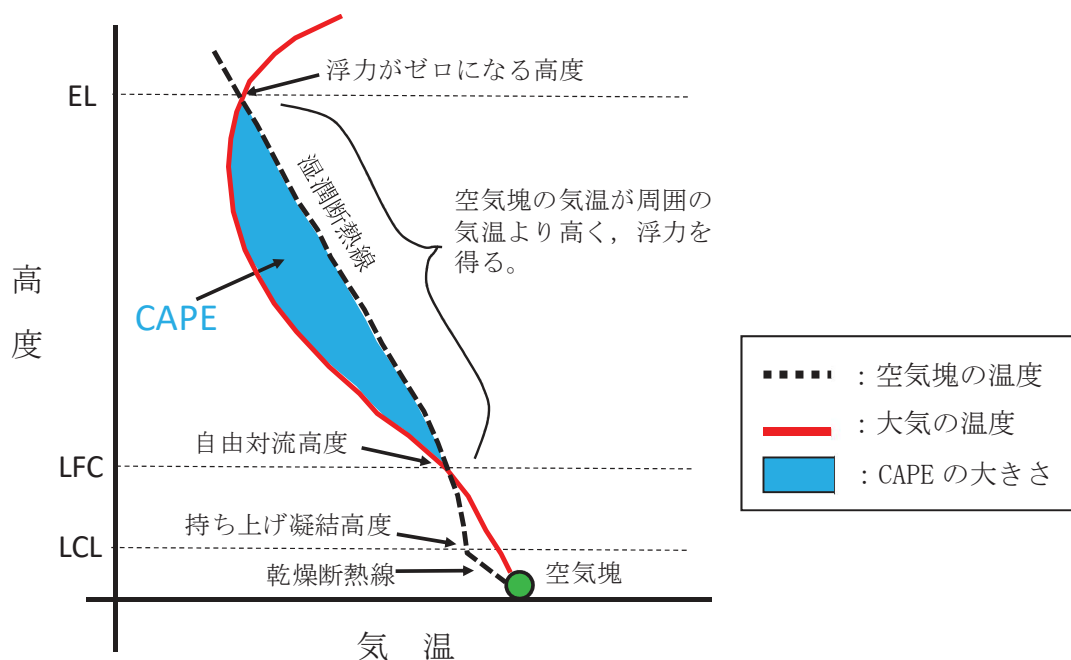
$$CAPE = \int_{LFC}^{EL} g \frac{\theta'_e(z) - \theta_e(z)}{\theta_e(z)} dz$$

g : 重力加速度

θ'_e : 持ち上げ空気塊の相当温位

θ_e : ストーム周囲の相当温位

dz : 鉛直方向の層厚



第 2.2.4.2-3 図 CAPE の算出概念

(3) EHI (Energy Helicity Index)

SReH及びCAPEを用いて算出し、スーパーセルや竜巻の発生しやすさを経験的に指標化したものであり、米国ではCAPE単独又はSReH単独に比べると、竜巻発生との相関関係が高いとされている。

$$EHI = \frac{SReH \times CAPE}{160,000}$$

(参考) 相当温位

温位とは、下式に示すように気温 T と気圧 p に関する量であり、ある空気塊を断熱的に基準圧力 1,000hPa に戻したときの絶対温度である。

2つの空気塊を比較した場合、温位の高い空気塊は軽く上昇しやすく (不安定であり)、単位体積中に含みうる水蒸気量が多いため、大きな積乱雲の発生につながる。

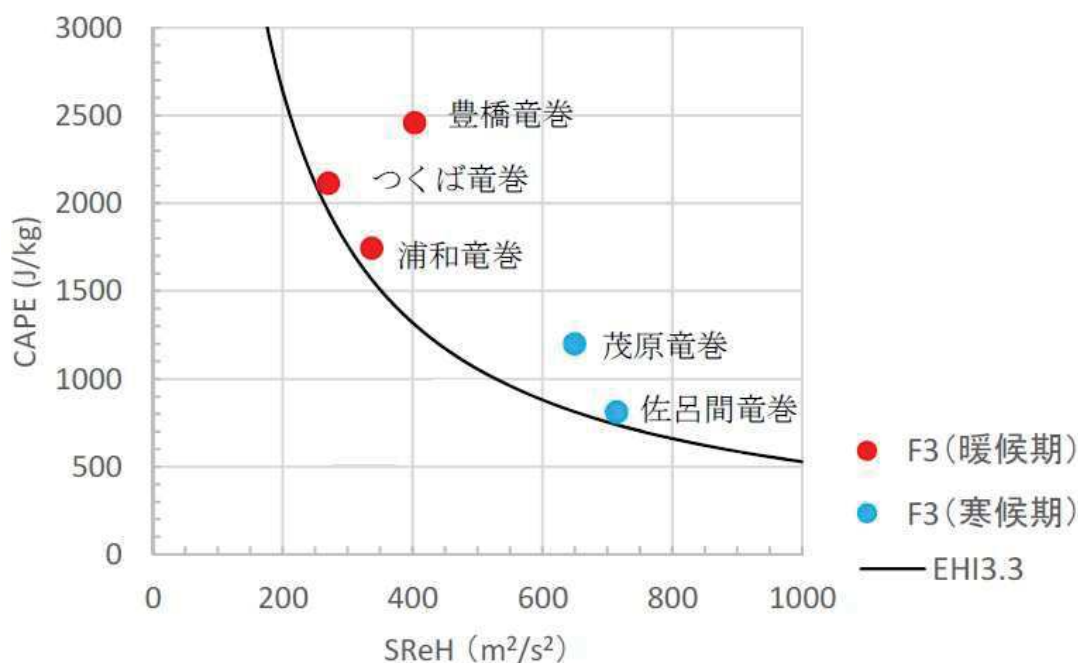
相当温位は、空気塊に含まれる水蒸気の持っている潜熱 (水蒸気が凝結する際

に空気塊の温度が上昇)の影響も考慮された温位である。

$$\theta = T \left(\frac{1,000}{p} \right)^{\frac{R}{c_p}} \quad (R: \text{気体定数}, c_p: \text{定圧比熱})$$

2.2.4.3 突風関連指数の地域特性

これまでに発生した F3 竜巻に対する突風関連指数の分析結果を第 2.2.4.3-1 図に示す。WRF モデル (Weather Research and Forecasting model) と呼ばれる数値気象モデルを用いて当時の気象場を解析 (再現) し, それをもとに突風関連指数を算出している。第 2.2.4.3-1 図をみると, 季節によって CAPE の値が大きく異なるものの, F3 竜巻事例では共通して SReH と CAPE の両方が大きくなる傾向が見られた。



第 2.2.4.3-1 図 F3 竜巻における SReH と CAPE の関係

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

したがって, SReH と CAPE それぞれに対して閾値を設け, その閾値を同時に超える頻度 (以下「同時超過頻度」という。) を分析することにより, スーパーセルに伴って発生するような大規模な竜巻の発生環境を観点とした地域性を見出すことができると考えられる。

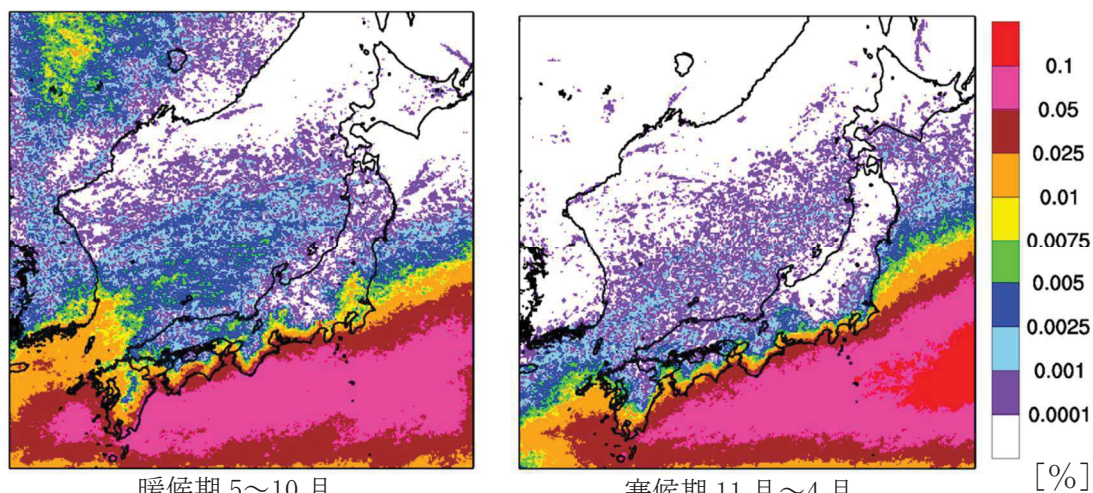
2.2.4.4 突風関連指数の同時超過頻度による地域性の検討

SReH と CAPE の閾値については、第 2.2.4.4-1 図の F3 竜巻のデータをもとに、実際の竜巻発生地点と対応するよう、下記のように設定した。また、CAPE の閾値については、緯度・季節で絶対値が大きく変わるため、5 月～10 月（暖候期）及び 11 月～4 月（寒候期）に分けて閾値を設定した。

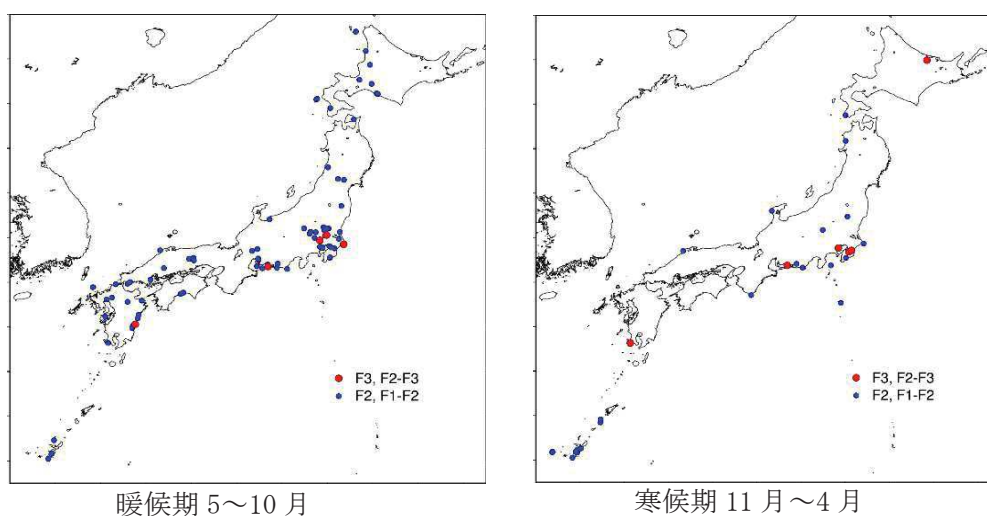
〔5 月～10 月（暖候期）〕 SReH : $250\text{m}^2/\text{s}^2$, CAPE : $1,600\text{J/kg}$

〔11 月～4 月（寒候期）〕 SReH : $250\text{m}^2/\text{s}^2$, CAPE : 600J/kg

第 2.2.4.4-1 図は、1961 年～2010 年までの 50 年間にわたって 1 時間毎に解析されたデータをもとに、SReH と CAPE の同時超過頻度分布をマップ化したものである。また、気象庁「竜巻等の突風データベース」で確認された F2-F3 竜巻及び F3 竜巻の発生箇所を第 2.2.4.4-2 図に示す。



第 2.2.4.4-1 図 F3 規模以上を対象とした SReH, CAPE 同時超過頻度分布



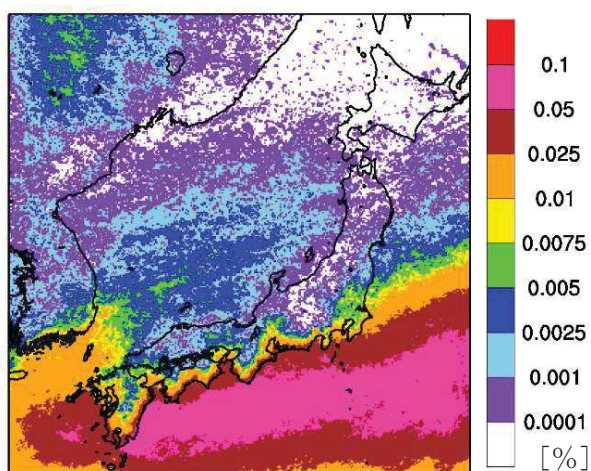
第 2.2.4.4-2 図 F2 規模以上の発生箇所
(気象庁「竜巻等の突風データベース」より作成)

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

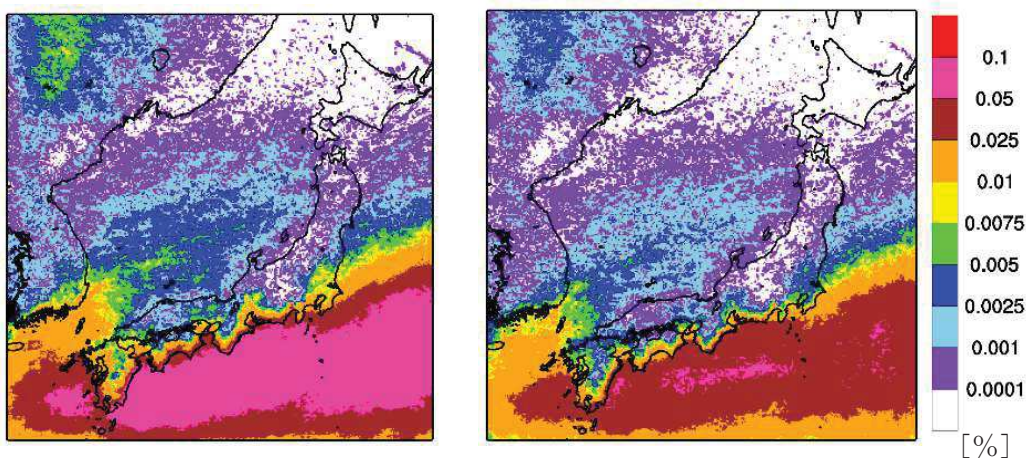
EHI の超過頻度分布をマップ化したものについても第 2.2.4.4-3 図に示す。SReH、CAPE の同時超過頻度分布（第 2.2.4.4-1 図）に対応した結果となっており、EHI を用いて通年レベルの評価を行った場合でも地域特性がはっきり表れている。

以上により、CAPE、SReH、EHI について F3 以上を想定した特定の閾値を設けた場合の分析を実施したが、突風関連指数については不確実性が存在するため、EHI:3.0 及び 3.6 を設定した場合についても同様の地域性が現れることを確認した（第 2.2.4.4-4 図）。ただし、閾値を大きくした場合、実際に F3 が発生した関東平野内を包含できなくなる。また閾値を小さくした場合、小さな竜巻が発生する環境場をカウントすることから、地域性は薄れていくことがわかる。

なお、CAPE、SReH についても同様の感度解析を実施しており、同様の傾向が得られることを確認した。【添付資料 2.2 付録 E】



第 2.2.4.4-3 図 EHI の超過頻度分布（閾値 3.3）



閾値 3.0

閾値 3.6

第 2.2.4.4-4 図 EHI の超過頻度分布

突風関連指数による、大規模な竜巻形成につながる環境場の発生頻度分析を行った結果、福島県以北の東北地方太平洋側及び日本海側は、茨城県以西の太平洋側沿岸よりも1～2 オーダー以下の頻度となることが分かった。

スーパーセルに伴って発生する大規模な竜巻形成につながる環境場の発生頻度分布の観点からも、東北地方太平洋側及び日本海側は、茨城県以西の太平洋側と地域特性の違いがあることを確認した。

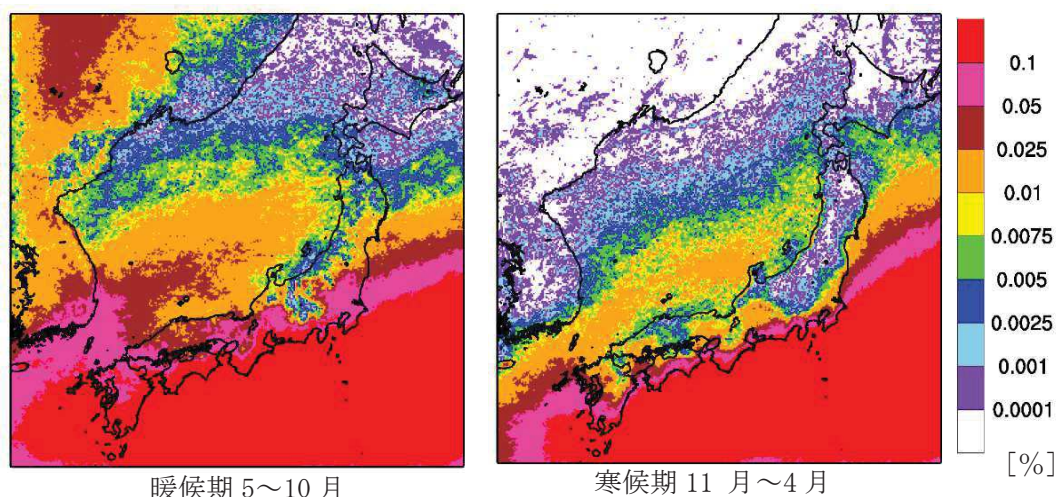
参考として、F2 規模の竜巻について同様の検討を行った。閾値の設定は F2 規模の竜巻発生時の実績をもとに以下の様に設定した。

[5 月～10 月(暖候期)] SReH : $200\text{m}^2/\text{s}^2$, CAPE : $1,000\text{J/kg}$

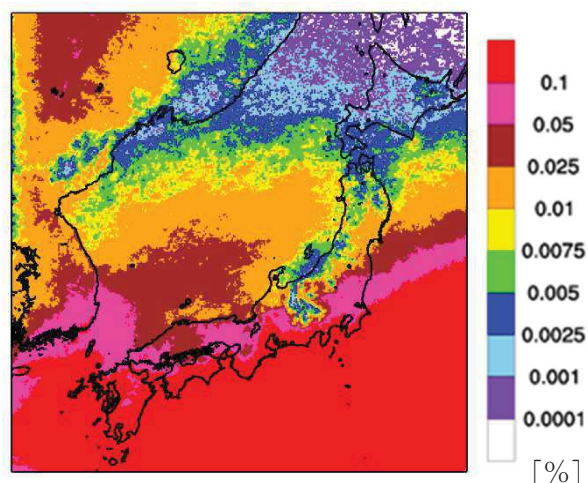
[11 月～4 月(寒候期)] SReH : $200\text{m}^2/\text{s}^2$, CAPE : 350J/kg

EHI を用いる場合の閾値 EHI : 1.5

SReH, CAPE の同時超過頻度分析の結果を第 2.2.4.4-5 図に、EHI の超過頻度分布を第 2.2.4.4-6 図に示す。F3 規模以上を対象とした閾値の分析結果に比べ、頻度は全体的に上がったが、概ね同様の傾向が確認できた。



第 2.2.4.4-5 図 F2 規模の竜巻形成につながる環境場の閾値の同時超過頻度分布



第 2.2.4.4-6 図 EHI の超過頻度分布 (閾値 : 1.5)

F2 規模相当の閾値での同時超過頻度を解析した結果をみても、東北地方太平洋側及び日本海側は、茨城県以西の太平洋側と比較して頻度が低くなっていることが確認できる。

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

2.2.4.5 佐呂間町で発生した竜巻について

突風関連指数を用いた解析結果から、F3 規模以上の竜巻が発生しやすいとされる地域が分かったが、そのエリアに含まれていない北海道網走支庁佐呂間町では 2006 年 11 月に F3 竜巻が発生している（以下「佐呂間竜巻」という。）。

佐呂間竜巻は、太平洋沿岸で発生した竜巻と比較すると、

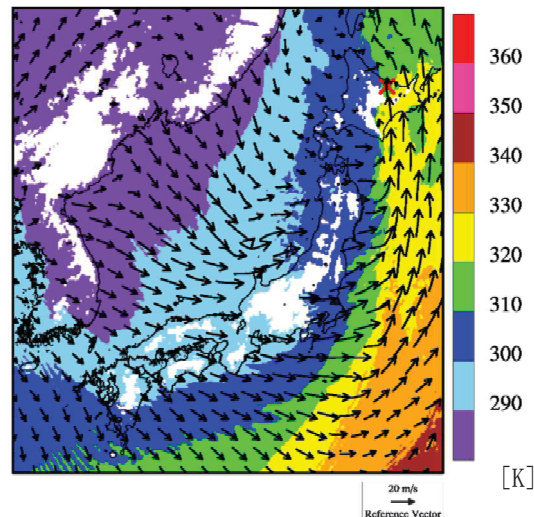
- ・ 国内で唯一内陸部（丘陵地の麓）において発生した竜巻である。
- ・ F3 竜巻としては継続時間（1 分）と移動距離（約 1.4km）が非常に短かった。

という点で異なっている。

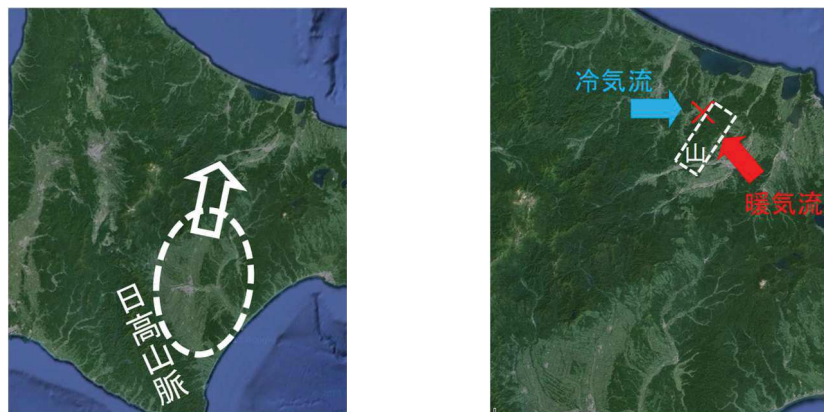
佐呂間竜巻の発生した地域では、太平洋側からの暖湿流が小高い丘を越えて流入するような地形になっており、平野部の冷気流とぶつかることにより大きな上層・下層間の風向差が生じる環境場となっていた（第 2.2.4.5-1 図，第 2.2.4.5-2 図）。

また、日高山脈の東側では、山を越えた冷気流と太平洋側の暖気流がぶつかる地点となっており、ここで発生した親雲が山脈沿いに北上しながら持続的に発達し、佐呂間地域で F3 規模の竜巻を形成するに至ったと考えられる。

これらの発生メカニズムについて、第 2.2.4.5-3 図に模式的に示す。



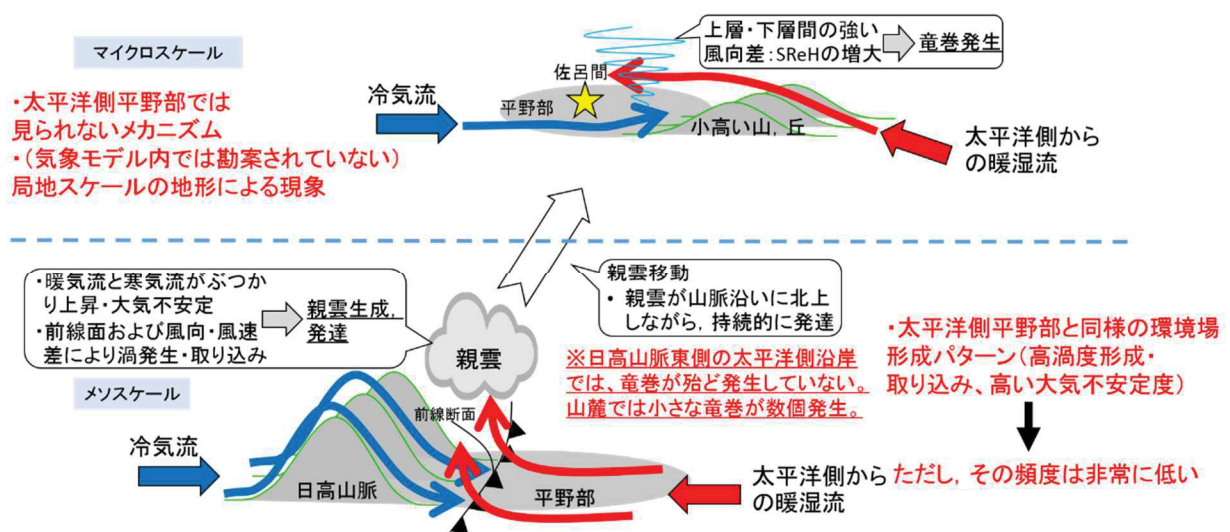
第 2.2.4.5-1 図 佐呂間竜巻発生時の風向・風速及び相当温位の分布（海拔 500m 高度）



親雲の発生位置（点線内）と移動方向

竜巻の発生位置（×）と影響が指摘される山（点線部）

第 2.2.4.5-2 図 親雲の発生箇所と移動方向（左）及び竜巻の発生箇所（右）



第 2.2.4.5-3 図 佐呂間竜巻の発生メカニズムに関する模式図※

※軽水型原子力発電所の竜巻影響評価における設計竜巻風速及び飛来物速度の設定に関するガイドライン，日本保全学会，原子力規制関連事項検討会，平成 27 年 1 月

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

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

考慮する際のポイントは、以下の 2 点である。

- ・ 太平洋側からの暖湿流が高標高山岳等に遮断されずに直接流入しうる地域である。
- ・ 近隣地形（数キロ程度四方の範囲）において、（太平洋側からの）暖気流の流入する風上側に尾根状の丘・山が存在すること。

その観点で女川原子力発電所周辺の地形を確認すると、以下のように整理できる。

- ・ 太平洋側沿岸部に立地しているため暖湿流が直接流入するが、気流の流入する風上側は海域であるため、尾根状の丘・山は存在しない。

したがって、女川原子力発電所で佐呂間竜巻と同様な地形条件にはなっていないことを確認した。

2.2.5 竜巻検討地域の妥当性確認結果

総観場ごとの F スケール別竜巻発生分布より、発生する竜巻の規模には地域差があり、また、突風関連指数の分析結果から、東北地方太平洋側は茨城県以西の太平洋側と大規模な竜巻形成につながる環境場の傾向が異なることが確認できた。

一方、総観場による分析では、北海道から千葉県にかけての太平洋側沿岸部は、地域を差別化するには至らない。

以上の分析結果を踏まえれば、女川原子力発電所の竜巻検討地域として、北海道から千葉県にかけての太平洋側沿岸を設定することが妥当と判断した。

2.3 基準竜巻の最大風速(V_B)の設定

基準竜巻の最大風速は、過去に発生した竜巻による最大風速(V_{B1})及び竜巻最大風速のハザード曲線による最大風速(V_{B2})のうち、大きな風速を設定する。

2.3.1 過去に発生した竜巻による最大風速(V_{B1})

女川原子力発電所が立地する東北地方太平洋側は、過去の発生実績及び突風関連指数を用いた分析結果から、大規模な竜巻は発生しにくいものと考えられる。

また、竜巻は観測の歴史が浅いこと及び気象庁における竜巻観測体制の変遷を踏まえると、他の気象観測データに比べ不確かさがあると考ええる。

上記を勘案し、日本で過去に発生した竜巻の最大風速を V_{B1} として設定する。

日本で過去に発生した最大の竜巻は F3 スケールである。F スケールと風速の関係より、F3 スケールの風速は 70～92m/s であるため、過去に発生した竜巻による最大風速 V_{B1} は、F3 スケールの上限値である 92m/s とする。

第 2.3.1-1 表に日本で過去に発生した F3 竜巻を示す。

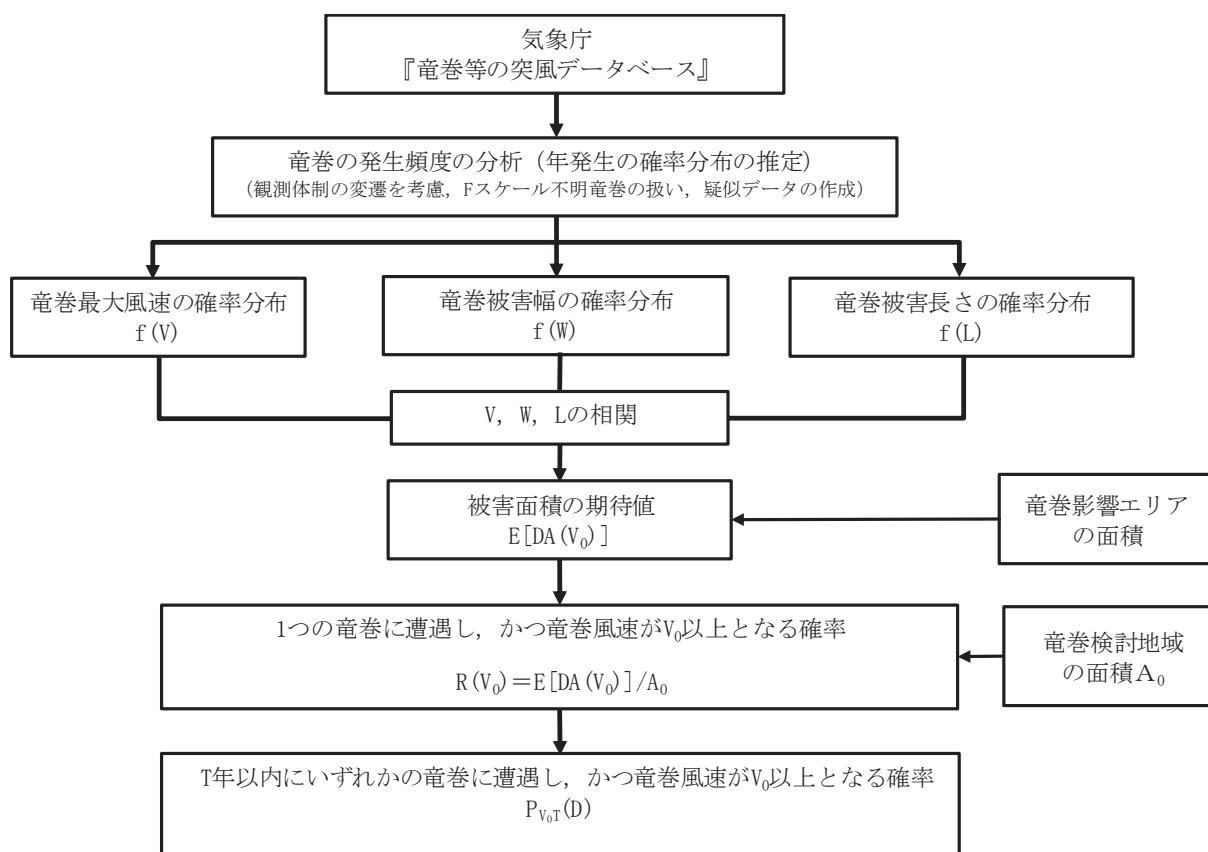
第 2.3.1-1 表 日本で過去に発生した F3 竜巻
(気象庁「竜巻等の突風データベース」より作成)

F スケール	発生日時	発生場所緯度	発生場所経度	発生場所
F3	1971 年 07 月 07 日 07 時 50 分	35 度 52 分 45 秒	139 度 40 分 13 秒	埼玉県浦和市
F3	1990 年 12 月 11 日 19 時 13 分	35 度 25 分 27 秒	140 度 17 分 19 秒	千葉県茂原市
F3	1999 年 09 月 24 日 11 時 07 分	34 度 42 分 4 秒	137 度 23 分 5 秒	愛知県豊橋市
F3	2006 年 11 月 07 日 13 時 23 分	43 度 58 分 39 秒	143 度 42 分 12 秒	北海道網走支庁 佐呂間町
F3	2012 年 05 月 06 日 12 時 35 分	36 度 6 分 38 秒	139 度 56 分 44 秒	茨城県常総市

2.3.2 竜巻最大風速のハザード曲線の求め方【添付資料 2.4 1.】

竜巻最大風速のハザード曲線は、気象庁「竜巻等の突風データベース」より竜巻検討地域における竜巻の観測記録を抽出・評価し、既往の算定法(Wen and Chu 及び Garson et. al)に基づき算定した。具体的な算定方法は、JNES 委託研究成果報告書※を参考とし、第 2.3.2-1 図に示すフローに従いハザード曲線を算定した。なお、ハザード曲線は、竜巻検討地域の竜巻特性を適切に考慮できる海岸線から海側、陸側それぞれ 5km の範囲内で算定した。加えて、竜巻検討地域において過去に発生した竜巻は、竜巻発生確認数にばらつきがあることを踏まえ、ガイドに基づき、ハザード曲線に保守性をもたせるために竜巻検討地域を海岸線に沿って 1km 範囲ごとに短冊状に細分化した場合のハザード曲線も算定した。

※ 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



第 2.3.2-1 図 竜巻最大風速ハザード曲線の算定フロー

2.3.3 海岸線から陸側及び海側それぞれ 5km 全域の評価

本評価では、竜巻検討地域外で発生して竜巻検討地域内に移動した竜巻である通過竜巻も発生数にカウントする。被害幅及び被害長さは、それぞれ被害全幅および被害全長を用いる。

2.3.4 竜巻の発生頻度の分析【添付資料 2.4 2.】

気象庁「竜巻等の突風データベース」を基に 1961 年 1 月～2012 年 6 月までの 51.5 年間の統計量を F スケール別に算出した。なお、観測体制の変遷による観測データ品質のばらつき（第 2.3.4-1 図参照）を踏まえ、以下の①～④の基本的な考え方に基づいて整理を行った。

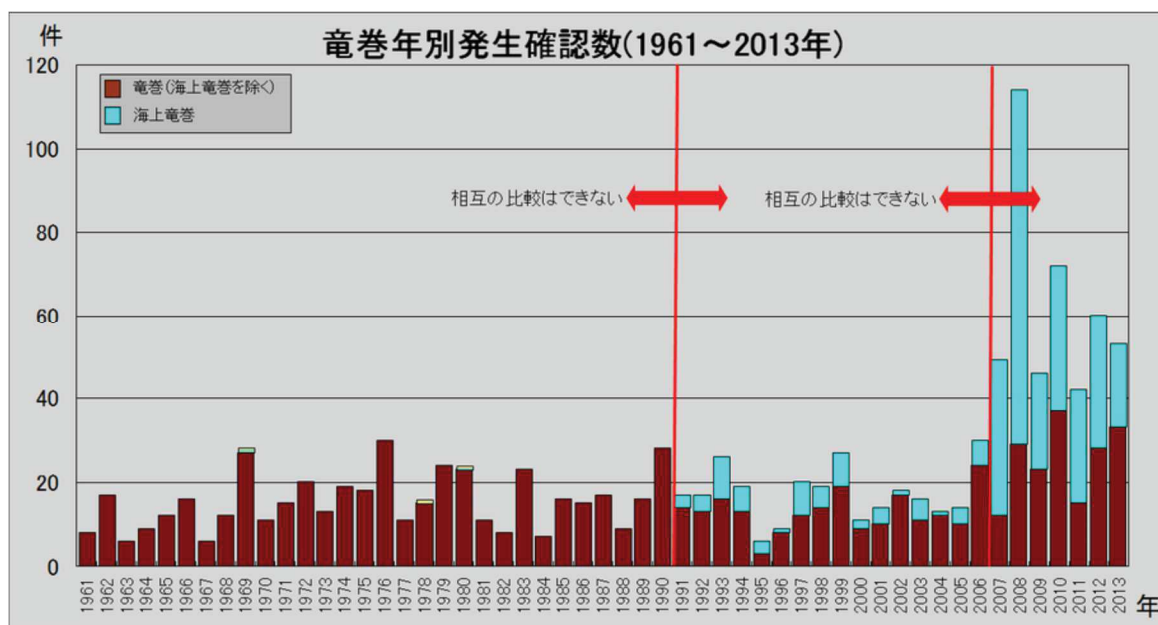
- ① 被害が比較的大きく見逃されることが少ない F2, F3 竜巻については、観測データが整備された 1961 年 1 月以降の全期間の年間発生数や標準偏差を採用する。
- ② 被害が比較的軽微な F1 竜巻については、観測体制が整備された 1991 年以降の年間発生数や標準偏差を採用する。
- ③ 被害が小さくて見過ごされやすい F0 及び F 不明竜巻は、観測体制が強化された 2007 年以降の年間発生数や標準偏差を採用する。
- ④ 51.5 年間の発生数を、①～③の観測期間との比率から F スケール毎に推計する。

また、F スケールが不明な竜巻については、以下の考え方に基づいて分類した。

- ⑤ 陸上で発生した F スケールが不明な竜巻及び海上で発生しその後上陸した F 不明竜巻は F0 に含める。これにより、全ての陸上竜巻を F0～F3 に分類する。
- ⑥ 沿岸部近傍での海上竜巻の特性は、陸上竜巻の特性と類似しているとの仮定の下、不明な海上竜巻の発生数を陸上竜巻の F スケール別発生比率で按分する。

上記の基本的な考え方に基づいて観測記録を整理・推定した結果を第 2.3.4-1 表に示す。

なお、竜巻発生の確率モデルは、ガイドに従ってポアソン過程に従うものとし、年発生数の確率分布には、ポリヤ分布を適用した。



第 2.3.4-1 図 竜巻の年別発生確認数（気象庁 HP より）

第 2.3.4-1 表 竜巻発生数の分析結果

竜巻検討地域 (沿岸 ±5 km)	発生数の統計	小計	竜巻スケール				不 明		総数 (含む不明)
			F0	F1	F2	F3	(陸上)	(海上)	
1961～ 2012/6 (51.5年間)	期間内総数	23	2	13	7	1	3	3	29
	平均値(年)	0.45	0.04	0.25	0.14	0.02	0.06	0.06	0.56
	標準偏差(年)	0.67	0.20	0.56	0.35	0.14	0.31	0.31	0.81
1991～ 2012/6 (21.5年間)	期間内総数	14	2	10	2	0	1	3	18
	平均値(年)	0.65	0.09	0.47	0.09	0.00	0.05	0.14	0.84
	標準偏差(年)	0.80	0.30	0.75	0.30	0.00	0.22	0.47	0.97
2007～ 2012/6 (5.5年間)	期間内総数	3	1	2	0	0	0	2	5
	平均値(年)	0.55	0.18	0.36	0.00	0.00	0.00	0.36	0.91
	標準偏差(年)	0.58	0.43	0.55	0.00	0.00	0.00	0.86	0.80
疑似 51.5年間 (陸上竜巻)	期間内総数	42	10	24	7	1	0	19	61
	平均値(年)	0.80	0.18	0.47	0.14	0.02	0.00	0.36	1.17
	標準偏差(年)	0.93	0.43	0.75	0.35	0.14	0.00	0.86	1.27
疑似 51.5年間 (全竜巻)	期間内総数	63	15	35	11	2	0	0	0
	平均値(年)	1.17	0.26	0.68	0.20	0.03	0.00	0.00	0.00
	標準偏差(年)	1.13	0.52	0.90	0.42	0.17	0.00	0.00	0.00

2.3.5 竜巻風速，被害幅，被害長さの確率分布及び相関係数【添付資料 2.4 3.】【添付資料 2.4 4.】

竜巻ハザードを評価するためには，一つの竜巻が発生した際の竜巻風速，被害幅及び被害長さの確率分布が必要となることから，これらの確率密度分布を求める。

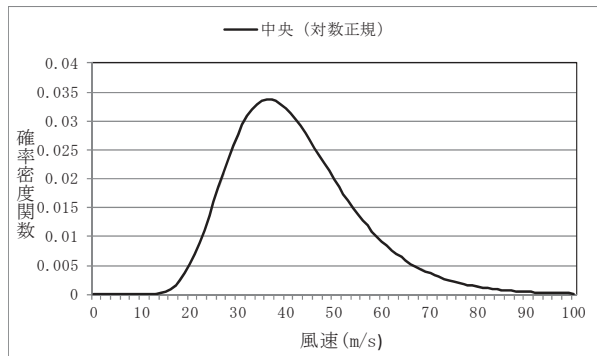
なお，竜巻風速の確率密度分布は，F スケール別の竜巻発生数から求める。

竜巻検討地域における 51.5 年間の竜巻の発生数，被害幅及び被害長さを基に，確率密度分布についてはガイド及びガイドが参考としている JNES 委託研究成果報告書を参照し，対数正規分布に従うものとする（第 2.3.5-1 図～第 2.3.5-6 図）。

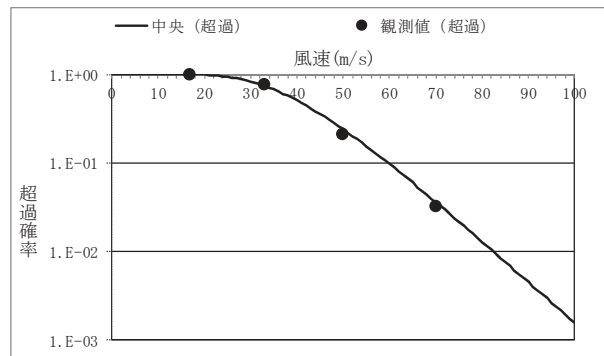
なお，疑似的な竜巻の作成に伴う被害幅又は被害長さの情報がない竜巻には，被害幅又は被害長さを有する竜巻の観測値を与えている。その際は，被害幅又は被害長さが大きいほうから優先的に用いることで，被害幅又は被害長さの平均値が大きくなるように工夫しているとともに，被害幅又は被害長さ 0 のデータについては計算に用いておらず，保守的な評価を行っている。

このように，前述の F スケール不明の竜巻の取扱い等も含め，データについては保守的な評価となる取扱いを行っている。

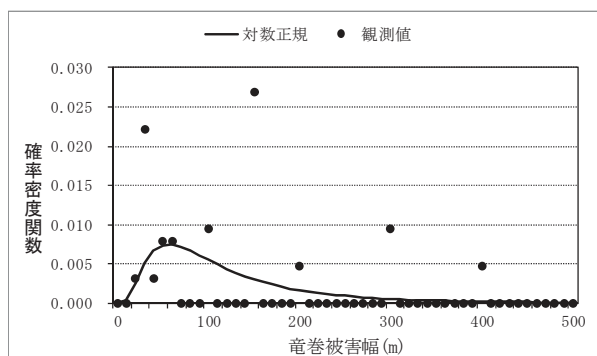
また，竜巻のハザードの計算においては，2 変量あるいは 3 変量の確率分布関数を対象とするため，竜巻風速，被害幅及び被害長さについての相関係数を求めた。第 2.3.5-1 表に 1961 年以降の観測データのみを用いて，竜巻風速，被害幅及び被害長さについて相関係数を求めた結果を示す。



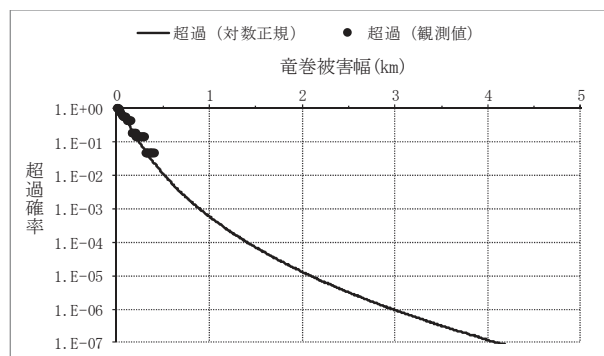
第 2.3.5-1 図 竜巻風速の確率密度分布



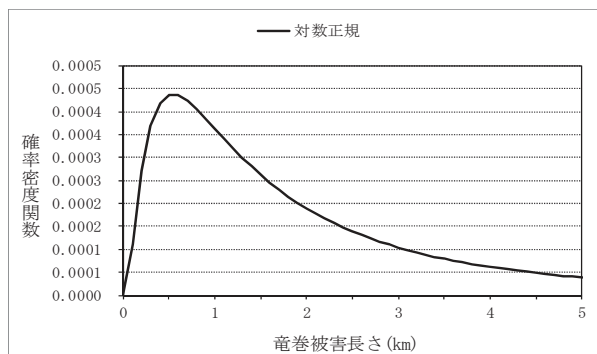
第 2.3.5-2 図 竜巻風速の超過確率分布



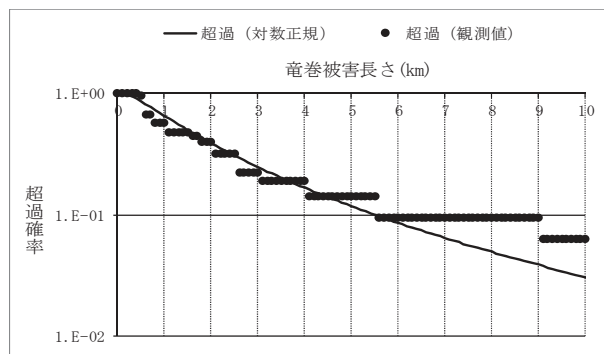
第 2.3.5-3 図 被害幅の確率密度分布



第 2.3.5-4 図 被害幅の超過確率分布



第 2.3.5-5 図 被害長さの確率密度分布



第 2.3.5-6 図 被害長さの超過確率分布

第 2.3.5-1 表 竜巻風速，被害幅，被害長さの相関係数（単位無し）

	風速	被害幅	被害長さ
風速	1.000	-0.073*	0.590
被害幅	-0.073*	1.000	0.173
被害長さ	0.590	0.173	1.000

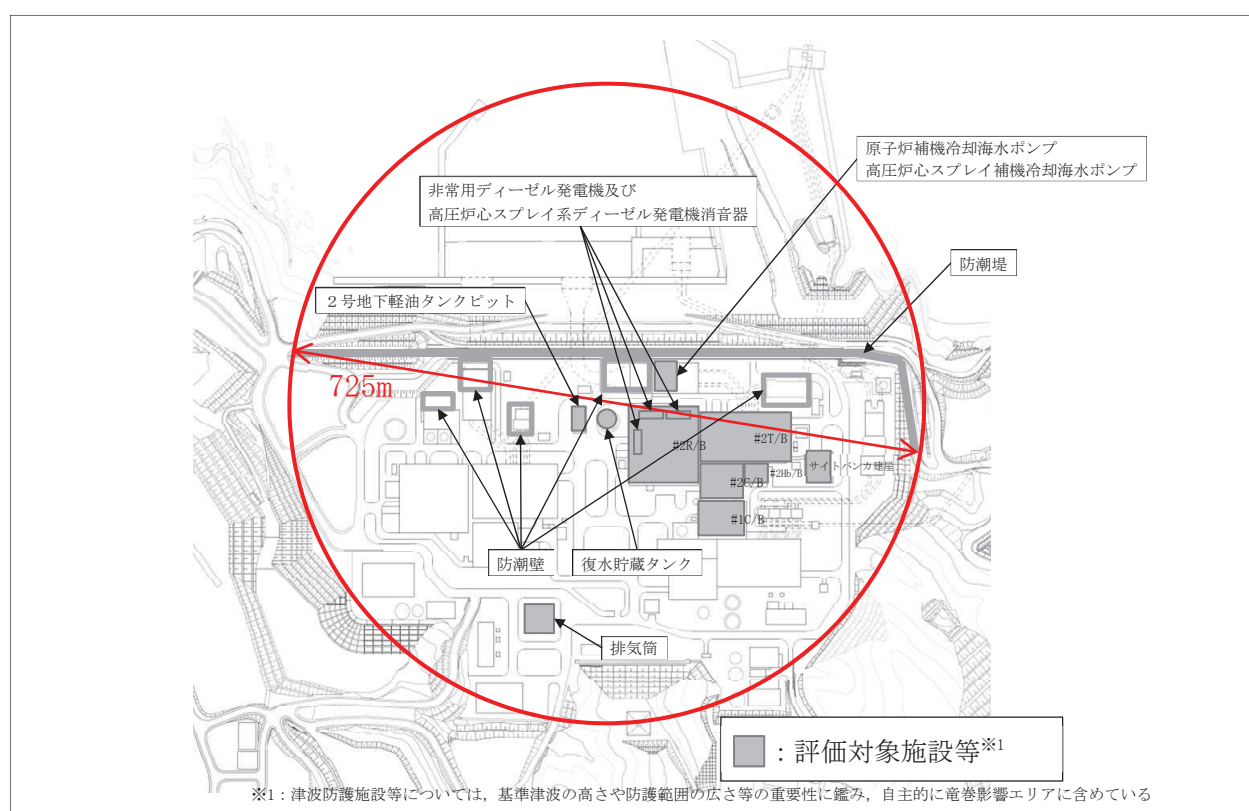
*風速と被害幅は無相関との知見が得られたため，ハザード算定の際には，相関係数 0 と
して計算

2.3.6 竜巻影響エリアの設定【添付資料 2.4 5.】

竜巻最大風速のハザード曲線による最大風速 (V_{B2}) の算定にあたり、 V_{B2} の発生エリアである竜巻影響エリアを設定する。竜巻影響エリアは、女川原子力発電所 2 号炉の評価対象施設等の設置面積の合計値及び推定される竜巻被害域(被害幅、被害長さから設定)に基づいて設定する。

女川原子力発電所 2 号炉における評価対象施設等の位置を第 2.3.6-1 図に示す。評価対象施設等の位置が分散しているため、保守的にそれぞれを包含する円形エリアを竜巻影響エリア（面積約 413,000 m^2 （直径 725m の円））として設定した。

なお、竜巻影響エリアを円形とするため、竜巻移動方向の依存性はない。



第 2.3.6-1 図 評価対象施設等の位置

2.3.7 竜巻ハザード曲線の算定【添付資料 2.4 6.】

T 年以内にいずれかの竜巻に遭遇し、かつ竜巻風速が V_0 以上となる確率を求める。竜巻の年発生数の確率密度分布としてポリヤ分布の適合性が高い。ポリヤ分布は式 (1) で示される。

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

ここで、

N : 竜巻の年発生数

v : 竜巻の年平均発生数

T : 年数

β は分布パラメータであり式 (2) で示される。

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

ここで、

σ : 竜巻の年発生数の標準偏差

D をリスク評価対象構造物が風速 V_0 以上の竜巻に遭遇する事象と定義し、 $R(V_0)$ をリスク評価対象構造物が 1 つの竜巻に遭遇し、竜巻風速が V_0 以上となる確率と定義すると、 T 年以内にいずれかの竜巻に遭遇し、かつ竜巻風速が V_0 以上となる確率は式 (3) で示される

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

この $R(V_0)$ は、竜巻影響評価の対象地域の面積を A_0 (つまり竜巻検討地域の面積約 18,800km²)、1 つの竜巻の風速が V_0 以上となる面積を $DA(V_0)$ とすると式 (4) で示される。

$$R(V_0) = \frac{E[DA(V_0)]}{A_0} \quad (4)$$

ここで、 $E[DA(V_0)]$ は、 $DA(V_0)$ の期待値を意味する。

本評価では、以下のようにして $DA(V_0)$ の期待値を算出し、式 (4) により $R(V_0)$ を推定して、式 (3) により $P_{V_0,T}(D)$ を求める。風速を V 、被害幅 w 、被害長さ l 、移動方向 α 及び構造物の寸法を A, B とし、 $f(V, w, l)$ 等の同時確率密度関数を用いると、 $DA(V_0)$ の期待値は式 (5) で示される。

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

ここで、 $W(V_0)$ は竜巻風速が V_0 以上となる幅であり、式(6)で示される。

$H(\alpha)$ 及び $G(\alpha)$ はそれぞれ、竜巻の被害長さ及び被害幅方向に沿った面にリスク評価対象構造物を投影した時の長さであり、式(7)で示される。

$$W(V_0) = \left(\frac{V_{min}}{V_0} \right)^{1/1.6} w \tag{6}$$

ここで、

V_{min} ：被害幅 w 内の最小竜巻風速

V_0 ：被害が発生する最小風速

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

本評価ではリスク評価対象構造物を円形構造物（竜巻影響エリア）で設定しているため、 $H(\alpha)$ 、 $G(\alpha)$ ともに竜巻影響エリアの直径725mで一定（竜巻の移動方向に依存しない）となる。円の直径を D_0 とした場合の計算式は式(8)で示される。

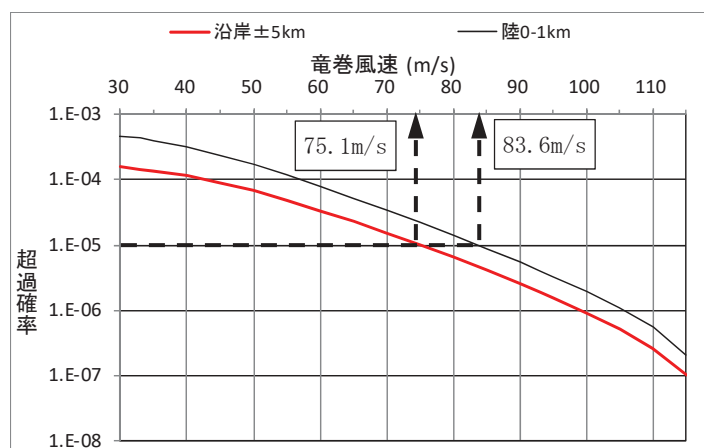
$$\begin{aligned}
E[DA(V_0)] &= \int_0^\infty \int_0^\infty \int_{V_0}^\infty W(V_0) l f(V, w, l) dV dw dl \\
&+ D_0 \int_0^\infty \int_{V_0}^\infty l f(V, l) dV dl + D_0 \int_0^\infty \int_{V_0}^\infty W(V_0) f(V, w) dV dw \\
&+ \left(D_0^2 \pi / 4 \right) \int_{V_0}^\infty f(V) dV
\end{aligned} \tag{8}$$

2.3.8 竜巻最大風速のハザード曲線による最大風速 (V_{B2})

第 2.3.8-1 図に、海岸線から陸側及び海側それぞれ 5km 全域（竜巻検討地域）及びガイドに従い竜巻検討地域を 1km 範囲ごとに細分化した場合のハザード曲線を示す。

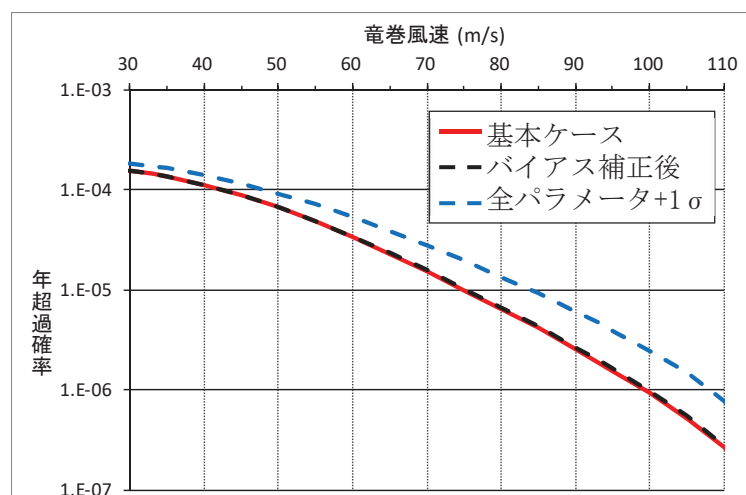
第 2.3.8-1 図より、5km 全域を対象とした場合の年超過確率 10^{-5} における風速は 75.1m/s、竜巻検討地域を 1km 範囲ごとに細分化した場合の年超過確率 10^{-5} における風速は 83.6m/s（陸側 0～1km）となった。

よって、竜巻最大風速のハザード曲線による最大風速 (V_{B2}) は、5km 全域及び 1km 範囲のハザード評価結果のうち大きい方を採用し、 $V_{B2}=83.6\text{m/s}$ とする。



第 2.3.8-1 図 ±5km 範囲のハザード曲線と 1km 範囲毎のハザード曲線

また、不確実さ要素のハザード算定結果への影響を検討した結果を第 2.3.8-2 図に示す【添付資料 2.4 参考資料 3】。第 2.3.8-2 図より、データ、確率分布形選択及びデータ量が少ないことによる不確実さを表したハザード曲線により、これらの不確実さが小さいことを確認した。



バイアス補正後及び全パラメータ+1σ のハザード

第 2.3.8-2 図 ハザード不確実さ検討結果

2.3.9 基準竜巻の最大風速 (V_B)

過去に発生した竜巻による最大風速 $V_{B1}=92\text{m/s}$ 及び竜巻最大風速のハザード曲線による最大風速 $V_{B2}=83.6\text{m/s}$ のうち、大きい風速は 92m/s である（第 2.3.9-1 表）。
よって、基準竜巻の最大風速 (V_B) は 92m/s とする。

使用した竜巻の統計データの不確実性については前項までで検討を実施しているが、今後も最新のデータ・知見をもって竜巻検討地域や基準竜巻の最大風速について、必要に応じ見直しを行っていくものとする。

第 2.3.9-1 表 竜巻の最大風速の評価結果

項目	最大風速[m/s]
過去に発生した竜巻による最大風速 (V_{B1})	92 (F3)
竜巻最大風速のハザード曲線による最大風速 (V_{B2})	83.6
基準竜巻の最大風速 (V_B)	92

2.3.10 竜巻データの更新に関する対応

(1) 評価時点以降のデータ更新分について

上記の基準竜巻の検討には、検討実施時点で最新であった 1961 年 1 月～2012 年 6 月までの気象庁竜巻データベースを用いているが、その後、気象庁により継続的にデータベースが更新されている※¹。本状況においても、以下の理由より、最新データを参照した場合でも基準竜巻の最大風速は上記の評価結果を上回るものではなく、現時点での見直しは不要と判断している。

- ・2012 年 6 月以降、現時点での V_{B1} の風速 92m/s を超える竜巻の報告はない。
- ・2012 年 6 月以降、竜巻検討地域で観測された竜巻は F0 若しくは F1 相当のものがほとんどであり、竜巻強度の分布はハザードを下げる方向に変化していると考えられるため、現時点での V_{B2} が更新されることはない。

※1：2017 年 3 月末時点で、2016 年 3 月までのデータ及び 2016 年 4 月以降の速報データが掲載されている。

(2) 将来の気候変動について

将来的な気候変動として予測される地球温暖化により竜巻の規模や発生数が増加する可能性も否定できない。

しかしながら、将来的な気候変動を完全に予測することは難しいため、最新のデータ、知見をもって気候変動の影響に注視し、竜巻検討地域や基準竜巻の最大風速は、必要に応じ見直しを実施していくものとする。

2.4 設計竜巻の最大風速(V_D)の設定【添付資料 2.5】

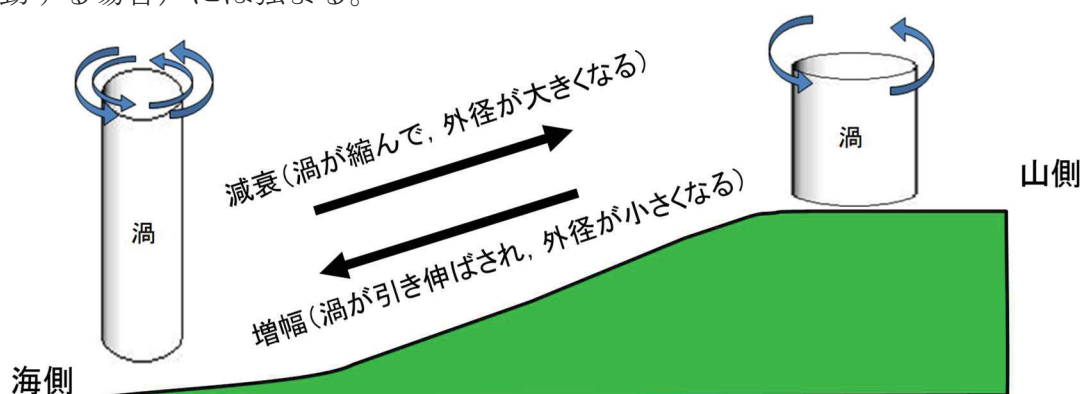
発電所が立地する地域の特性として、周辺の地形や竜巻の移動方向を考慮して、基準竜巻(V_B)の割り増しを検討し、設計竜巻の最大風速を設定する。

2.4.1 地形効果による竜巻風速への影響

地形効果が竜巻強度に及ぼす影響に関する知見として、(1)地形起伏による影響、(2)地表面粗度による影響、について既往の研究において示されており、その知見を踏まえ、女川原子力発電所周辺の地形効果による竜巻の増幅可能性について検討する。

(1) 地形起伏による影響

竜巻のような回転する流れでは、角運動量保存則により「回転の中心からの距離」及び「周方向の回転速度」の積が一定になるという性質がある。そのため、第 2.4.1-1 図に示すとおり、竜巻の渦が上り斜面を移動する時（海側から山側へ移動する場合）、基本的に渦は弱まり、下り斜面を移動する時（山側から海側へ移動する場合）には強まる。



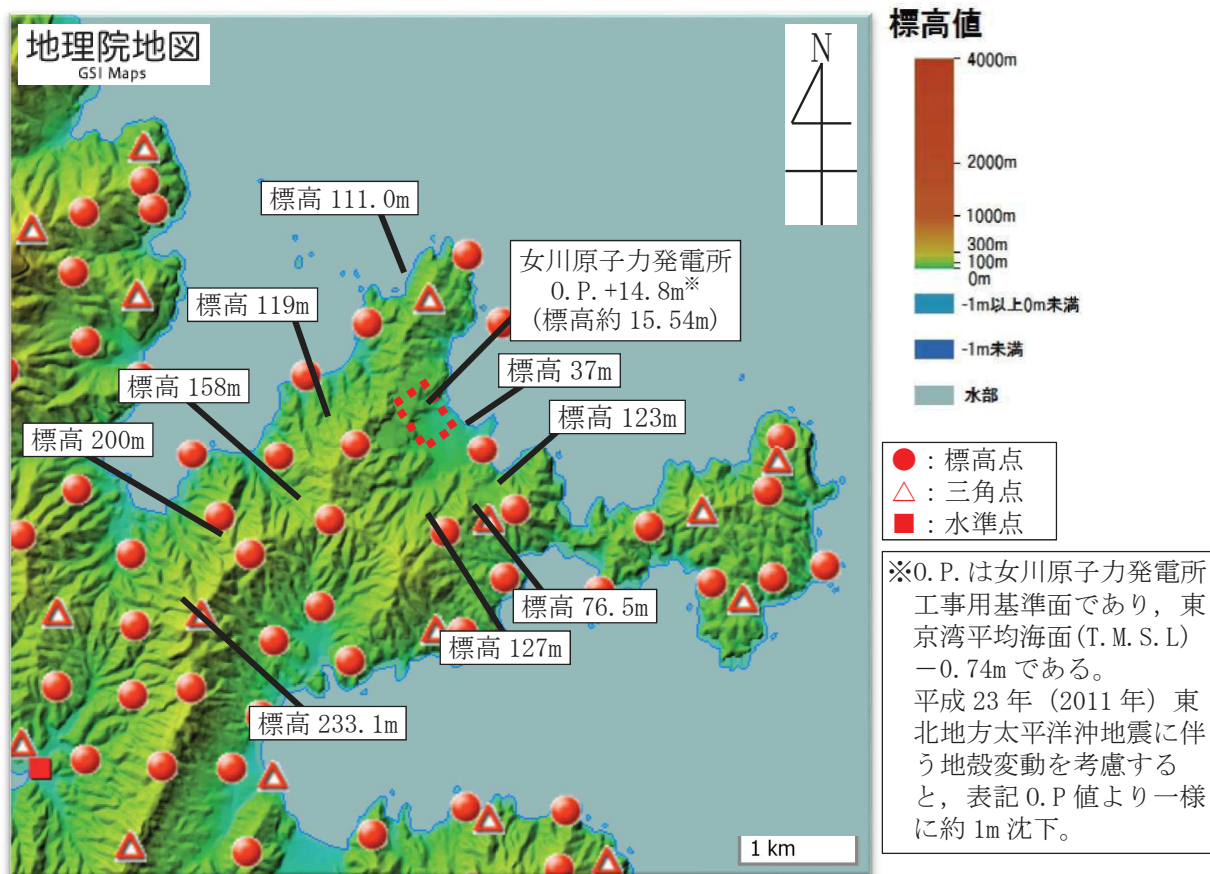
第 2.4.1-1 図 竜巻旋回流の地形影響に関する模式図

(2) 地表面粗度による影響

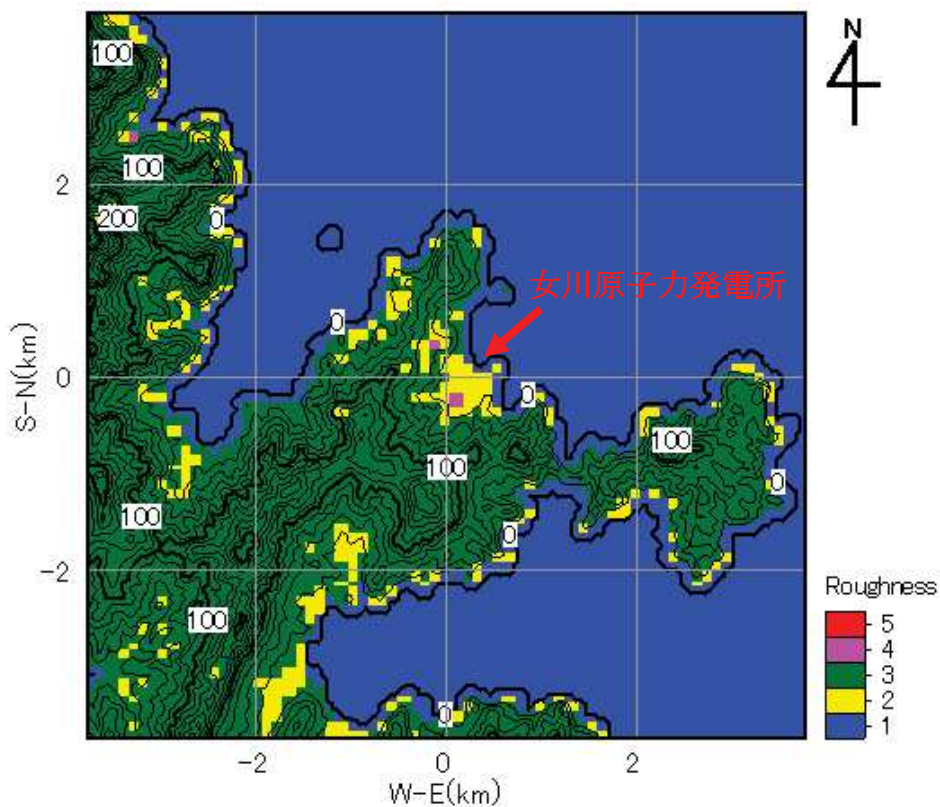
風は地表面の細かな凸凹が与える摩擦抵抗の影響を受けやすく、風速は、地表面において 0 となり上空に向かうにつれて増加する。地表面粗度は竜巻の旋回流を減衰させる効果を有し、地表面粗度の構成物が飛来物として運動することで風速が減衰することも示唆されていることから、地表面粗度の増加とともに竜巻に起因する強風の風速を低下させるといえる。

2.4.2 女川原子力発電所周辺の地形

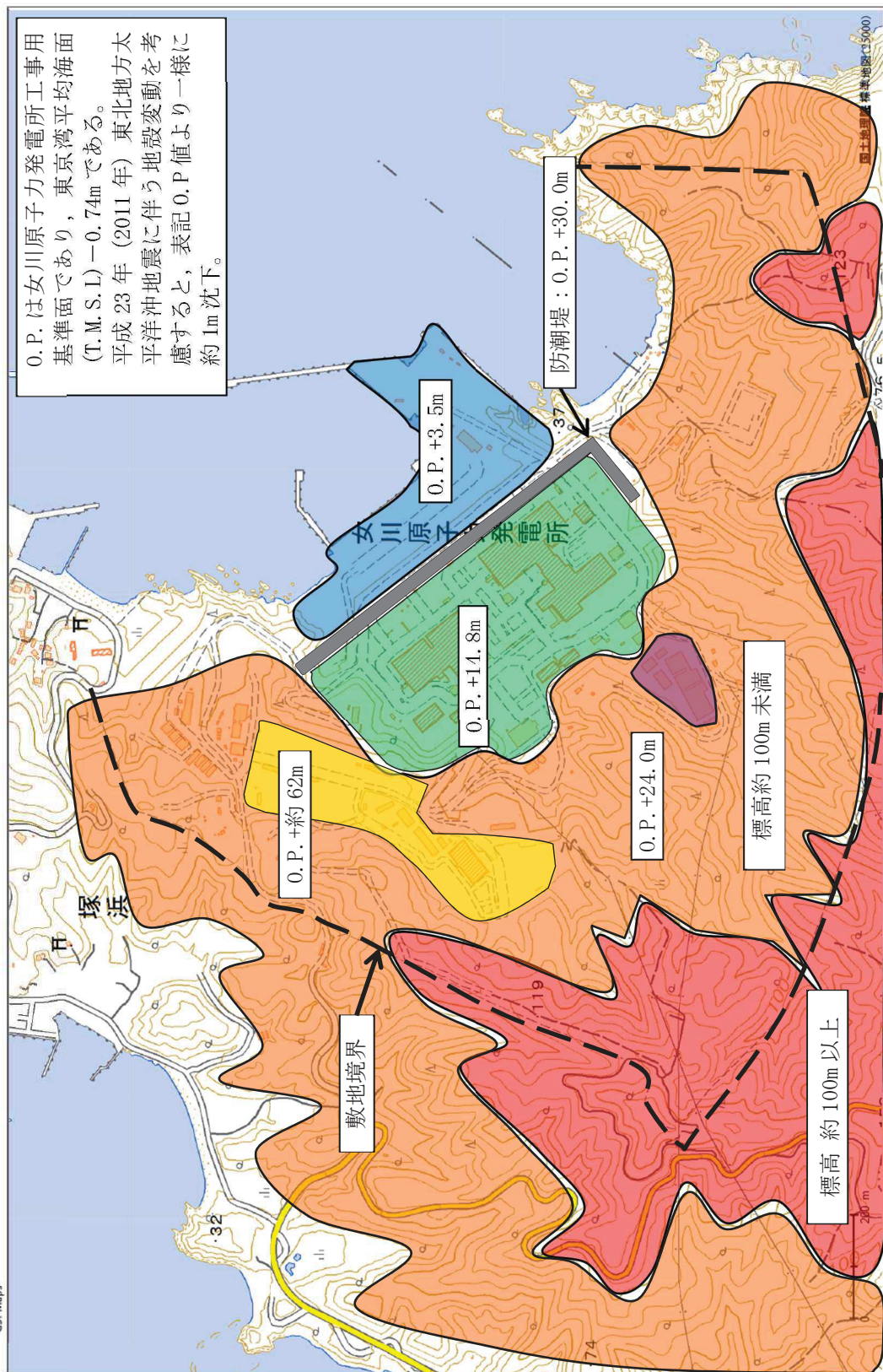
第 2.4.2-1 図に女川原子力発電所周辺の地形図、第 2.4.2-2 図に女川原子力発電所周辺の地表面粗度、第 2.4.2-3 図に女川原子力発電所周辺の標高及び防潮堤高さを示す。発電所が立地する敷地は、北東が太平洋に面し、三方を山及び森林に囲まれた狭隘な地形である。



第 2.4.2-1 図 女川原子力発電所周辺の地形 (国土地理院「電子国土 Web」より作成)



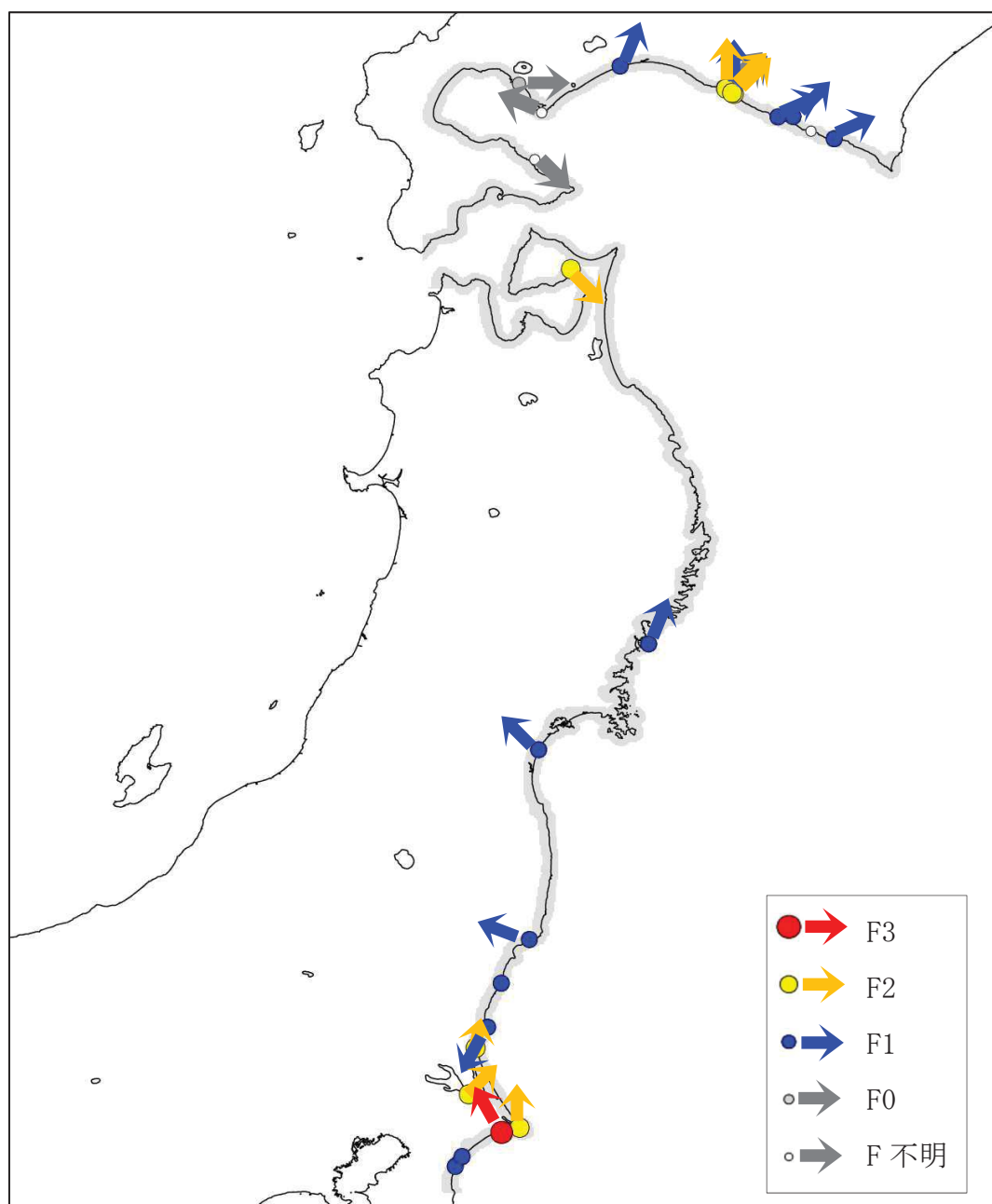
第 2.4.2-2 図 女川原子力発電所周辺の地表面粗度



第 2.4.2-3 図 女川原子力発電所の周辺の標高及び防潮堤高さ

2.4.3 竜巻の移動方向の分析

竜巻検討地域で発生した竜巻のうち、移動方向が判明している竜巻の移動方向を第2.4.3-1図に示す。第2.4.3-1図より、竜巻検討地域で発生した竜巻は、多くが海側から陸側の方向に移動していた。



第2.4.3-1図 竜巻移動方向

2.4.4 竜巻風速の増幅に関する検討

竜巻検討地域で発生した竜巻は、海側から陸側に進入する可能性が高く、竜巻が増幅することはないと考えられる。竜巻が海上から発電所に進入してきた場合は、地表面粗度の影響を受けて竜巻は減衰した後、さらに防潮堤(0. P. 29. 0m)で大幅に減衰するため、竜巻による施設への影響は限定的となると考えられる。また、山側から発電所の敷地に移動してきた場合についても、発電所周辺は広い丘陵地に森林が存在しており、森林による粗度の影響を大きく受けるため減衰する。

従って、女川原子力発電所において地形効果による竜巻の増幅の影響は受けないものと考えられる。

2.4.5 設計竜巻の最大風速(V_D)

検討の結果、女川原子力発電所において地形効果による竜巻の増幅を考慮する必要はないと考えられるため、基準竜巻の割増しは不要と考えるが、将来的な気候変動による竜巻発生の不確実性を考慮し、基準竜巻の 92m/s を安全側に切り上げて、設計竜巻の最大風速(V_D)は 100m/s とする。

2.5 設計竜巻の特性値【添付資料 2.6】

竜巻風速場としてフジタモデルを選定した場合の設計竜巻の特性値については、第 2.5-1 表のとおり設定する。

なお、最大気圧低下量と最大気圧低下率は、数値解析によって計算する。

第 2.5-1 表 設計竜巻の特性値

最大風速 V_D [m/s]	移動速度 V_T [m/s]	最大接線風速 V_{Rm} [m/s]	最大接線風速 半径 R_m [m]	最大気圧低下量 ΔP_{max} [hPa]	最大気圧低下率 $(dp/dt)_{max}$ [hPa/s]
100	15	85	30	76	53

3. 竜巻影響評価

3.1 評価概要

評価の概要は以下のとおり。

- (1) 設計荷重（設計竜巻荷重及びその他の組み合わせ荷重）の設定
- (2) 原子力発電所における飛来物に係る調査
- (3) 飛散防止対策
- (4) 考慮すべき設計荷重に対する評価対象施設等の構造健全性等の評価を行い、必要に応じ対策を行うことで安全機能が維持されることを確認

3.2 評価対象施設等

「1.2.2 竜巻影響評価の対象施設」に示すとおり。

3.3 設計荷重の設定

3.3.1 設計竜巻荷重の設定

設計竜巻の最大風速 V_D 等に基づき、「風圧力」、「気圧差による圧力」及び「飛来物の衝撃荷重」について、以下のとおり設定する。

(1) 設計竜巻による風圧力の設定

設計竜巻の水平方向の最大風速によって施設（屋根を含む）に作用する風圧力 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」に準拠して、下式により算定する。

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（屋根、壁等）に応じて設定する。

$$W_w = q \cdot G \cdot C \cdot A$$

q ：設計用速度圧

G ：ガスト影響係数(=1.0)

C ：風力係数

(施設の形状や風圧力が作用する部位（屋根、壁等）に応じて設定)

A ：施設の受圧面積

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

ρ ：空気密度

V_D ：設計竜巻の最大風速

ただし、竜巻による最大風速は、一般的には水平方向の風速として算定されるが、鉛直方向の風圧力に対してぜい弱と考えられる評価対象施設等が存在する場合には、フジタモデルの風速場による求まる鉛直方向の風速等に基づいて算出した鉛直方向の風圧力についても考慮する。

- (2) 設計竜巻における気圧低下によって生じる評価対象施設等の内外の気圧差による圧力の設定

設計竜巻による評価対象施設等の内外の気圧差による圧力は、最大気圧低下量 ΔP_{max} に基づき設定する。

a. 建屋・構造物等

建屋については、気圧差による圧力荷重が最も大きくなる「閉じた施設」を想定し、内外気圧差による圧力荷重 W_p を以下の式により設定する。

$$W_p = \Delta P_{max} \cdot A$$

ΔP_{max} : フジタモデルにより求まる最大気圧低下量

A : 施設の受圧面積

外部事象防護対象施設を内包する建屋・構築物について、影響評価を実施し、当該施設が破損した場合には安全機能維持について確認を行う。

b. 設備(系統, 機器)

設備についても、上記と同様に圧力荷重 W_p を設定する。

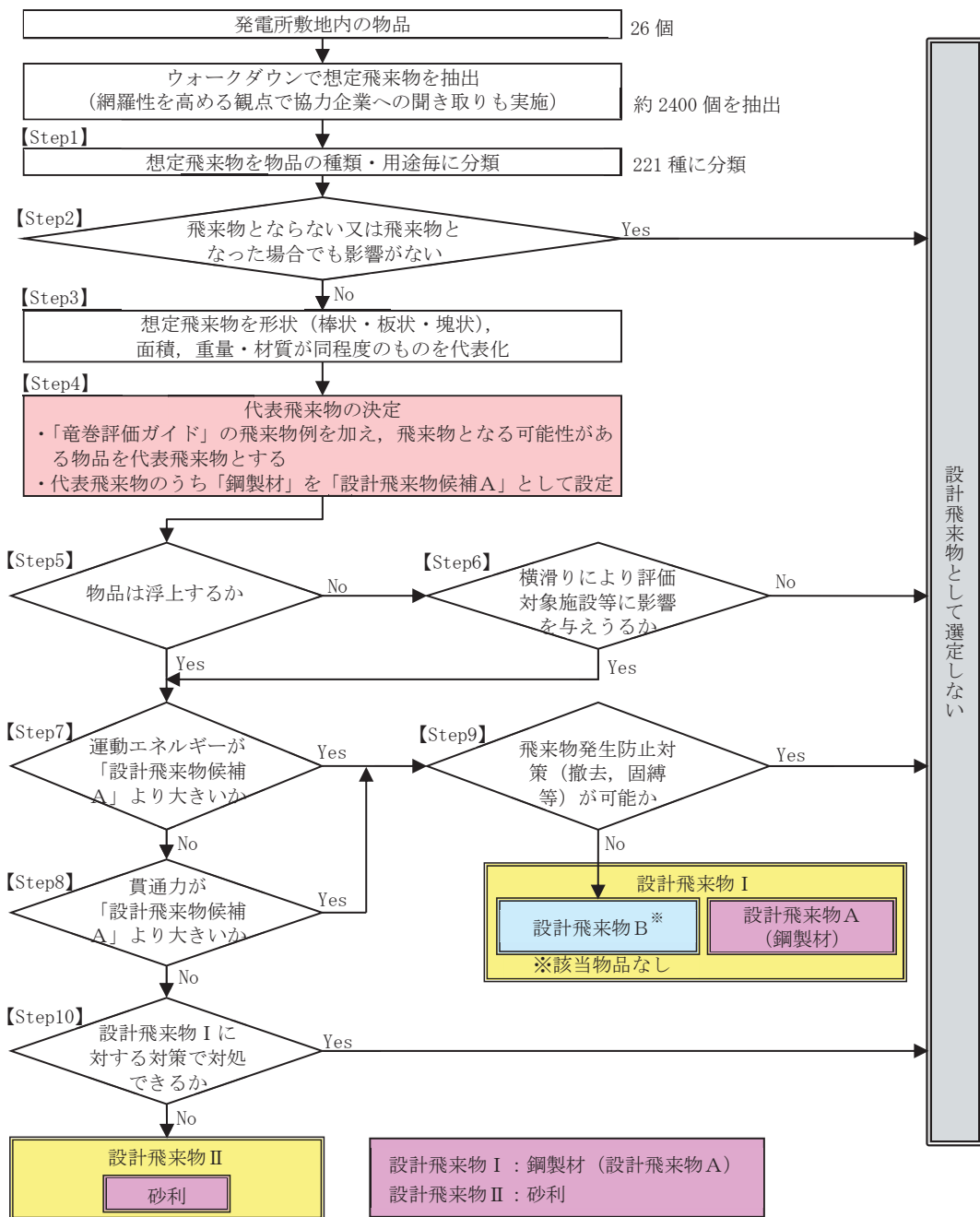
なお、換気空調系のように外気と隔離されている区画の境界部等、気圧差による圧力影響を受ける設備について、圧力影響により作用する応力が許容値内であるか確認し、許容値を上回る場合には安全機能維持への影響について確認する。

- (3) 設計竜巻による飛来物が評価対象施設等に衝突する際の衝突荷重の設定

a. 女川原子力発電所 2 号炉における設計飛来物等の設定【添付資料 3. 3】

女川原子力発電所 2 号炉の竜巻影響評価における設計飛来物等については、女川原子力発電所 2 号炉における飛来物源の現地調査結果及び「竜巻影響評価ガイド」の解説表 4. 1 に示されている設計飛来物の設定例を参照して設定する。

第 3. 3. 1-1 図に女川原子力発電所 2 号炉における設計飛来物の設定フローを、第 3. 3. 1-1 表に女川原子力発電所 2 号炉における設計飛来物を示す。



第 3.3.1-1 図 設計飛来物の選定フロー

(a) 評価に用いる設計竜巻の特性

評価に用いる設計竜巻の最大風速は、100m/s とする。（第 2.5-1 表）

(b) 設計飛来物の選定

i) 現地調査

飛来物となり得る物品を確認するため、女川原子力発電所の現地調査を実施した。調査範囲は、女川原子力発電所の敷地のみならず、発電所敷地近傍も含んだ、原子炉建屋から半径 800m の範囲とした。後述の飛散評価の結果

によれば、確認された物品の飛散距離は 800m を十分に下回ることから、調査範囲は十分と考えられる。

ii) 設計飛来物となり得る飛来物源の抽出

現地調査で確認された物品の最大飛散距離は最大でも 400m 程度と評価された。したがって、女川原子力発電所 2 号炉の設計飛来物の設定に際しては、発電所敷地内で認められた物品に「竜巻影響評価ガイド」の解説表 4.1 に例示された物品を加えたものを飛来物源として抽出した。

iii) 設計飛来物の設定

上記の飛来物源から、第 3.3.1-1 図のフローに従い、「竜巻影響評価ガイド」に例示されている鋼製材を設計飛来物として設定した。

さらに、鋼製材に対する飛来物防護対策として設置する防護ネットを通過し得る設計飛来物として、砂利を設定した。砂利のサイズはネットの網目のサイズを考慮して設定した。以降の設計飛来物とは、上記の鋼製材及び砂利の 2 つを示す。

(c) 設計飛来物以外の飛来物源に対する措置

i) 基本方針

設計飛来物以外の飛来物源については、設計竜巻の最大風速 100m/s における衝突時の運動エネルギー又は貫通力の大きさを、設計飛来物のうちこれらが最大となる鋼製材と比較し、鋼製材を上回る飛来物源（コンテナ等）については、以下のとおり対応する。

- ・女川原子力発電所敷地内のものは、飛来物発生防止対策（固縛等）を施すか、評価対象施設等及び竜巻飛来物防護対策設備からの離隔及び頑健な建物内への移動等の運用により、設計飛来物による影響を上回らないものとする。

b. 設計飛来物の速度等の設定【添付資料 3.1】

設計竜巻の最大風速（ 100m/s ）による設計飛来物の最大水平速度 MV_{Hmax} は、フジタモデルの風速場を用いて算出した。また、設計飛来物の浮き上がり高さ及び飛散距離も同様に算出した。その結果を第 3.3.1-1 表に示す。

竜巻影響評価においては、敷地の高台等を適切に考慮し評価を実施する。また、影響範囲は「設計飛来物が到達する高さ」以上の範囲もカバーする観点から、評価対象施設等の全面に設計飛来物が影響を及ぼすものとして評価する。

第 3.3.1-1 表 女川原子力発電所における設計飛来物

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

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

※2 初期高さは感度解析の結果を踏まえて、最大水平速度の算出条件を適用

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

※4 敷地内の高台を考慮して設定

c. 設計飛来物の衝撃荷重の設定

設計竜巻の最大風速 100m/s による設計飛来物の衝撃荷重は、砂利と比べ運動エネルギーが大きくなる鋼製材の衝突方向及び衝突面積を考慮し、鋼製材が評価対象施設等に衝突した場合の影響が大きくなる衝突方向で算出する。

鋼製材の最大速度は第 3.3.1-1 表のとおりであり、静的な構造評価を実施する場合の衝撃荷重は、重量分布を均一な直方体として、Riera の方法⁽¹⁾を踏まえた下式にて算出した。

$$W_w = F_{MAX} = MV^2 / L_{MIN}$$

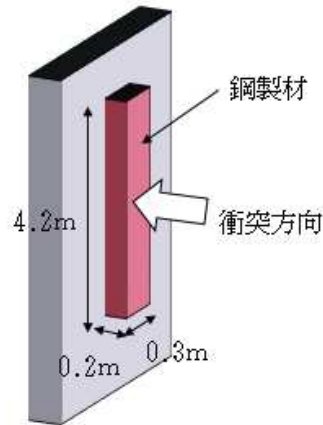
M：飛来物の質量

V：飛来物の衝突速度

L_{MIN}：飛来物の衝突方向長さ

この場合、衝撃荷重が最大となるのは第 3.3.1-2 図に示す向きの衝突となる。

なお、有限要素法による飛来物衝突評価を行う場合には、飛来物の衝突速度を初速値として入力し、算出された衝撃荷重により解析評価を行っている。



第 3.3.1-2 図 最大衝撃荷重となる鋼製材衝突方向 (Riera の方法⁽¹⁾)

d. 設計竜巻荷重の組み合わせ

評価対象施設等の評価に用いる設計竜巻荷重は、設計竜巻による風圧力による荷重 W_w 、気圧差による荷重 W_p 、及び設計飛来物による衝撃荷重 W_M を組み合わせた複合荷重として、以下の式により算出する。

$$W_{T1} = W_p$$

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

ここで、

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 : 設計竜巻の気圧差による荷重

W_M : 設計飛来物による衝撃荷重

ここで、竜巻襲来時のある瞬間において、各荷重の作用方向は必ずしも一様ではないが、 W_{T2} の算出においては W_w 、 W_p 及び W_M の作用方向を揃えることとし、保守性を考慮する。また、評価対象施設等には W_{T1} 及び W_{T2} の両荷重をそれぞれ作用させる。

3.3.2 設計竜巻荷重と組み合わせる荷重の設定

設計竜巻荷重と組み合わせる荷重は、以下のとおりとする。

(1) 評価対象施設等に常時作用する荷重，運転時荷重等

評価対象施設等に自重等の常時作用する荷重，内圧等の運転時荷重を適切に組み合わせる。

(2) 竜巻以外の自然現象による荷重

竜巻は積乱雲や積雲に伴って発生する現象であり⁽²⁾，積乱雲の発達時に竜巻と同時発生する可能性がある自然現象は，雷，雪，ひょう及び降水である。これらの自然現象の組み合わせにより発生する荷重は，以下のとおり設計竜巻に包絡される。

なお，竜巻と同時に発生する自然現象については今後も継続的に新たな知見等の収集に取り組み，必要な事項については適切に反映を行う。

①雷

竜巻と雷が同時に発生する場合においても，雷によるプラントへの影響は，雷撃であるため雷による荷重は発生しない。

②雪

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

冬期に竜巻が襲来する場合は竜巻通過前後に降雪を伴う可能性はあるが，上昇流の竜巻本体周辺では，竜巻通過時に雪は降らない。

また，下降流の竜巻通過時は，竜巻通過前に積もった雪の大部分は竜巻の風により吹き飛ばされ，雪による荷重は十分小さく設計竜巻荷重に包絡される。

③ひょう

ひょうは積乱雲から直径 5mm 以上の氷の粒⁽³⁾であり，仮に直径 10cm 程度の大型のひょうを想定した場合，その重量は約 0.5kg となる。直径 10cm 程度のひょうの終端速度は 59m/s⁽⁴⁾，運動エネルギーは約 0.9kJ であり，設計飛来物の運動エネルギーと比べ十分に小さく，ひょうの衝突による荷重は設計竜巻荷重に包絡される。

④降水

竜巻と降水が同時に発生する場合においても，雨水により屋外施設に荷重の影響を与えることはなく，また降雨による荷重は十分小さいため，設計竜巻荷重に包絡される。

(3) 設計基準事故時荷重

設計竜巻は原子炉冷却材喪失事故等の設計基準事故の起因とはならないことから、設計竜巻と設計基準事故は独立事象となる。

設計竜巻と設計基準事故が同時に発生する頻度は十分小さいことから、設計基準事故時荷重と設計竜巻荷重との組み合わせは考慮しない。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、評価対象施設等のうち設計基準事故時荷重が生じる屋外設備としては、原子炉補機冷却海水ポンプ及び高圧炉心スプレイ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、通常運転時の系統内圧力及び温度と変わらないため、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。

3.4 評価対象施設等の設計方針

外部事象防護対象施設のうち評価対象施設等については、設計荷重に対してその構造健全性を維持すること又は取替、補修が可能なこと、設計上の要求を維持することにより、安全機能を損なわない設計とする。また、外部事象防護対象施設等に波及影響を及ぼし得る施設については、竜巻及びその随伴事象に対して構造健全性を確保すること、設計上の要求を維持すること又は安全上支障のない期間での修復等の対応により、外部事象防護対象施設の安全機能を損なわない設計とする。

(1) 許容限界

建屋・構築物の設計において、設計飛来物の衝突による貫通及び裏面剥離発生の有無の評価については、貫通及び裏面剥離が発生する限界厚さと部材の最小厚さを比較すること、又は、詳細評価により行う。さらに、設計荷重により、発生する変形又は応力が以下の法令、規格、基準、指針類等に準拠し算定した許容限界を下回る設計とする。

- ・ 建築基準法
- ・ 日本工業規格
- ・ 日本建築学会及び土木学会等の基準・指針類
- ・ 原子力発電所耐震設計技術指針 JEAG4601-1987（日本電気協会）
- ・ 震災建築物の被災度区分判定基準及び復旧技術指針（日本建築防災協会）
- ・ 原子力エネルギー協会（NEI）の基準・指針類等

系統及び機器の設計において、設計飛来物の衝突による貫通の有無の評価については、貫通が発生する限界厚さと部材の最小厚さを比較することにより行う。

設計飛来物が貫通することを考慮する場合には、設計荷重に対して防護対策を考慮した上で、系統及び機器に発生する応力が以下の規格、基準及び指針類に準拠し算定した許容応力度等に基づく許容限界を下回る設計とする。

- ・ 日本工業規格

- ・日本機械学会の基準・指針類
- ・原子力発電所耐震設計技術指針 JEAG4601-1987（日本電気協会）等

(2) 屋外施設（外部事象防護対象施設を内包する区画を含む。）

設計荷重に対して、安全機能を損なわない設計とし、安全機能を損なう可能性がある場合には施設の補強、竜巻防護ネット等の設置又は運用による竜巻防護対策を講じることにより、安全機能を損なわない設計とする。

外殻となる施設等による防護機能が期待できる屋内設備は、建屋又は構築物による防護により、設計荷重に対して安全機能を損なわない方針とする。

なお、設計飛来物は評価対象施設等の全面に影響を及ぼすものとして評価及び対策を行う。

① 原子炉補機冷却海水ポンプ（配管，弁含む）

原子炉補機冷却海水ポンプ（配管，弁含む）は、設計飛来物（鋼製材）により貫通することを考慮し、竜巻防護ネットの設置等による竜巻防護対策を行うことにより設計飛来物の衝突を防止し、風圧力による荷重、気圧差による荷重及び原子炉補機冷却海水ポンプ（配管，弁含む。）に常時作用する荷重に対して、構造健全性が維持され、安全機能を損なわない設計とする。なお、竜巻防護ネットの金網を通過する可能性がある設計飛来物として設定した砂利の衝突に対して、部材を貫通しない厚さを確保し、安全機能を損なわない設計とする。

② 高圧炉心スプレイ補機冷却海水ポンプ（配管，弁含む）

高圧炉心スプレイ補機冷却海水ポンプ（配管，弁含む）は、設計飛来物（鋼製材）により貫通することを考慮し、竜巻防護ネットの設置等による竜巻防護対策を行うことにより設計飛来物の衝突を防止し、風圧力による荷重、気圧差による荷重及び原子炉補機冷却海水ポンプ（配管，弁含む。）に常時作用する荷重に対して、構造健全性が維持され、安全機能を損なわない設計とする。なお、竜巻防護ネットの金網を通過する可能性がある設計飛来物として設定した砂利の衝突に対して、部材を貫通しない厚さを確保し、安全機能を損なわない設計とする。

③ 高圧炉心スプレイ補機冷却海水ストレーナ

高圧炉心スプレイ補機冷却海水ストレーナは、設計飛来物の衝突により貫通することを考慮し、竜巻防護ネットの設置等による竜巻防護対策を行うことにより、設計飛来物の衝突を防止し、風圧力による荷重、気圧差による荷重及び高圧炉心スプレイ補機冷却海水ストレーナに常時作用する荷重に対して、構造健全性が維持され、安全機能を損なわない設計とする。なお、竜巻防護ネット

の金網を通過する可能性がある設計飛来物として設定した砂利の衝突に対して、部材を貫通しない厚さを確保し、安全機能を損なわない設計とする。

④ 復水貯蔵タンク

復水貯蔵タンクは、風圧力による荷重、気圧差荷重及び設備に常時作用する荷重に対して構造健全性が維持され、安全機能を損なわない設計とする。設計飛来物の衝突により、復水貯蔵タンクの部材が損傷した場合においても、安全機能を損なわない設計とする。

⑤ 非常用ガス処理系（屋外露出部）

非常用ガス処理系の屋外露出部は、設計飛来物が衝突により貫通することを考慮しても、閉塞することではなく、非常用ガス処理系の排気機能が維持される設計とする。さらに、非常用ガス処理系の屋外露出部は開かれた構造物であり気圧差荷重も作用しないことから、風圧力による荷重及び非常用ガス処理系の屋外露出部に常時作用する荷重に対して、構造健全性が維持され、安全機能を損なわない設計とする。

⑥ 排気筒

排気筒については、設計飛来物の衝突により筒身が貫通することを考慮しても、閉塞することではなく、排気筒の安全機能を損なわない設計とする。

さらに、排気筒は開かれた構造物であり気圧差荷重は作用しないことから、風圧力による荷重、排気筒に常時作用する荷重及び設計飛来物の衝突荷重に対して、防護対象施設に波及的影響を及ぼさない設計とする。

⑦ 2号原子炉建屋

原子炉建屋原子炉棟外壁の原子炉建屋外側ブローアウトパネルについては、設計竜巻による気圧低下による開放及び設計飛来物の貫通により、原子炉建屋原子炉棟の放射性物質の閉じ込め機能を損なう可能性があるが、開放又は貫通した場合は、速やかにプラントを停止し、補修を実施する。

また、2号原子炉建屋は、外部事象防護対象施設を内包する建屋でもあるため、風圧力による荷重、気圧差による荷重、設計飛来物の衝撃荷重及び常時作用する荷重に対して、構造骨組の構造健全性が維持されるとともに、2号原子炉建屋内の外部事象防護対象施設が安全機能を損なわない設計とする。また、設計飛来物の衝突時においても、貫通及び裏面剥離の発生により、原子炉建屋内の外部事象防護対象施設が安全機能を損なわない設計とする。

<以下，外部事象防護対象施設を内包する区画>

⑧ 2号制御建屋及び2号タービン建屋

2号制御建屋及び2号タービン建屋は，風圧力による荷重，気圧差による荷重，設計飛来物等の衝撃荷重及び常時作用する荷重に対して，構造骨組の構造健全性が維持されるとともに，屋根，壁及び開口部（扉類）の破損により当該建屋内の外部事象防護対象施設が安全機能を損なわない設計とする。また，設計飛来物等の衝突時においても，貫通及び裏面剥離の発生により，当該建屋内の外部事象防護対象施設が安全機能を損なわない設計とする。

⑨ 2号地下軽油タンクピット

2号地下軽油タンクピットは，構造に合わせて考慮すべき風圧力による荷重，気圧差による荷重に対して構造健全性を維持する設計とする。飛来物の衝突により，ピット頂版（鉄筋コンクリート造）は構造健全性を維持する設計とする。ハッチ（鋼製）は設計飛来物の衝突においても貫通せず，変形に留まる設計とすることで，ピットに内包する軽油タンク等の安全機能を損なわない設計とする。

(3) 屋内の施設で外気と繋がる設備

設計荷重に対して安全機能が維持される設計とし，安全機能を損なう可能性がある場合には必要に応じて，竜巻防護対策を実施することにより，安全機能を損なわない設計とする。

① 中央制御室換気空調系，計測制御電源室換気空調系，原子炉補機室換気空調系及び原子炉棟給排気隔離弁（原子炉棟換気空調系）

中央制御室換気空調系，計測制御電源室換気空調系，原子炉補機室空調系及び原子炉棟給排気隔離弁（原子炉棟換気空調系）は，原子炉建屋又は制御建屋に内包されていることを考慮すると，風圧力による荷重及び設計飛来物による衝撃荷重は作用しないことから，気圧差による荷重及び設備に常時作用する荷重に対して，構造健全性が維持され，安全機能を損なわない設計とする。

② 軽油タンク（燃料移送ポンプ等を含む）

軽油タンク及び燃料移送ポンプ等は，地下埋設されていることを考慮すると，風圧力による荷重及び設計飛来物による衝撃荷重は作用しないことから，気圧差による荷重に対して，構造健全性が維持され安全機能を損なわない設計とする。

(4) 外殻となる施設等による防護機能が期待できない設備

設計荷重に対して安全機能が維持される設計とし、安全機能を損なう可能性がある場合には必要に応じて、竜巻防護対策を実施することにより、安全機能を損なわない設計とする。

① 原子炉補機室換気空調系

原子炉補機室換気空調系は、設計飛来物の衝突により、開口部建具に貫通が発生することを考慮し、竜巻防護対策を行うことにより、原子炉補機室換気空調系への設計飛来物の衝突を防止し、原子炉補機室換気空調系の構造健全性が維持され、安全機能を損なわない設計とする。

(5) 外部事象防護対象施設等に波及的影響を及ぼし得る評価対象施設

設計荷重に対して、当該施設の構造健全性を確保すること、設計上の要求を維持すること又は安全上支障のない期間での取替え、補修が可能なことにより、外部事象防護対象施設等の安全機能を損なわない設計とする。

① 2号補助ボイラー建屋，1号制御建屋，サイトバンカ建屋

2号補助ボイラー建屋，1号制御建屋，サイトバンカ建屋は、風圧力による荷重，気圧差による荷重，設計飛来物による衝撃荷重及び自重等の常時作用する荷重に対して、倒壊により外部事象防護対象施設等へ波及的影響を及ぼさない設計とする。

② 海水ポンプ室門型クレーン

海水ポンプ室門型クレーンは、竜巻の襲来が予想される場合には、運転を中止し、停留位置に固定することにより、風圧力による荷重に対して、外部事象防護対象施設等へ波及的影響を及ぼさない設計とする。

③ 常用ディーゼル発電設備（排気消音器，機関ミスト配管，潤滑油サンプタンクミスト配管，燃料デイトンクミスト配管，燃料油ドレンタンクミスト配管），高圧炉心スプレイ系ディーゼル発電設備（排気消音器，機関ミスト配管，潤滑油補給タンクミスト配管，燃料デイトンクミスト配管，燃料油ドレンタンクミスト配管）及び軽油タンクベント配管

常用ディーゼル発電設備（排気消音器，機関ミスト配管，潤滑油サンプタンクミスト配管，燃料デイトンクミスト配管，燃料油ドレンタンクミスト配管），高圧炉心スプレイ系ディーゼル発電設備（排気消音器，機関ミスト配管，潤滑油補給タンクミスト配管，燃料デイトンクミスト配管，燃料油ドレンタンクミスト配管）及び軽油タンクベント配管は、設計飛来物の衝突により貫通することを考慮しても、閉塞することがなく、ディーゼル発電設備及び軽油タンクの機能が維持される設計とする。

さらに、風圧力による荷重、気圧差による荷重及び自重等の常時作用する荷重に対して、構造健全性を維持し、安全機能を損なわない設計とし、外部事象防護対象施設であるディーゼル発電設備及び軽油タンクに機能的影響を及ぼさない設計とする。

- ④ 竜巻随件事象の影響により外部事象防護対象施設等を機能喪失させる可能性がある施設（溢水により外部事象防護対象施設等の機能を喪失させる可能性がある設備、火災発生により外部事象防護対象施設等の機能を喪失させる可能性がある設備、外部電源）

竜巻随件事象の影響により外部事象防護対象施設等の機能を喪失させる可能性がある施設の設計方針は、「3.5 竜巻随件事象に対する評価」に記載する。

- (6) 基準津波の高さや防護範囲の広さ等の重要性に鑑み、自主的に機能維持のための配慮を行う施設

① 防潮堤

風圧力による荷重に対して、構造健全性が維持され安全機能を損なわない設計とする。

設計飛来物による衝突については、衝撃荷重に対して、倒壊せず構造健全性を確保することで、安全機能に影響を及ぼさない設計とする。また、貫通により津波防護施設としての機能に影響が及ぶ可能性がある場合には、損傷状況を踏まえ、必要に応じ、プラントを停止して修復する。

② 防潮壁

風圧力による荷重に対して、構造健全性が維持され安全機能を損なわない設計とする。

防潮壁の構造は主に構造的に強度を確保した複数の部材（支柱と壁部材）を組み合わせる構造とすることで、設計飛来物による衝突時の損傷は局所的となり、大規模な損傷に至らない設計とする。損傷した場合には損傷状況を踏まえ、必要に応じ、プラントを停止して修復する。

3.5 竜巻随件事象に対する評価

竜巻随件事象は過去の竜巻被害事例及び女川原子力発電所のプラント配置から、想定される事象である、火災、溢水及び外部電源喪失を抽出し、事象が発生した場合の影響評価を行い、外部事象防護対象施設が安全機能を損なわないことを確認した。【添付資料 3.4】

(1) 火災

竜巻随件事象として、竜巻による飛来物が建屋開口部付近の発火性又は引火性物質を内包する機器に衝突する場合及び屋外の危険物貯蔵施設等に飛来物が衝

突する場合の火災が想定される。

建屋内については、飛来物が侵入する場合でも、建屋開口部付近には、発電用原子炉施設の安全機能を損なわせる可能性がある発火性又は引火性物質を内包する機器は配置されておらず、また、外部事象防護対象施設を設置している区画の開口部には竜巻防護ネット設置等の飛来物防護対策を行うことを考慮すると飛来物が到達することはないことから、設計竜巻により建屋内に火災が発生することはない、建屋内の外部事象防護対象施設の安全機能を損なわない。

建屋外については、設計竜巻による発電所敷地内の屋外にある危険物貯蔵施設等の火災がある。火災源と外部事象防護対象施設の位置関係を踏まえた外部火災影響評価において、航空機墜落や敷地内の危険物貯蔵施設等からの火災が発生した場合においても、安全上重要な設備が収納されている原子炉建屋、制御建屋や屋外設置の外部事象防護対象施設に影響を及ぼさないことを確認している。

以上より、竜巻による火災が外部事象防護対象施設の安全機能に影響を与えることはない。

(2) 溢水

竜巻随伴事象として、竜巻による飛来物が建屋開口部付近の溢水源に衝突する場合及び屋外水タンク等の溢水源に衝突する場合、溢水が想定される。

外部事象防護対象施設を内包する建屋内については、飛来物が侵入する場合でも、建屋開口部付近に飛来物が衝突して外部事象防護対象施設の安全機能を損なう可能性がある溢水源が配置されておらず、また、外部事象防護対象施設を設置している区画の開口部には、竜巻防護ネット設置等の飛来物防護対策を行うことを考慮すると、飛来物が到達することはないことから、設計竜巻により建屋内に溢水が発生することはない、建屋内の外部事象防護対象施設の安全機能を損なわない。

建屋外については、設計竜巻による飛来物の衝突による屋外タンク等の破損に伴う溢水があるが、内部溢水影響評価において、地震時の屋外水タンク等の破損を想定し、原子炉建屋、制御建屋等の水密扉や建屋貫通部の止水処置等により、地震起因の溢水が外部事象防護対象施設に影響を及ぼさないことを確認している。竜巻による飛来物で屋外水タンク等が損傷して発生する溢水は、上記に包絡されることから、外部事象防護対象施設の安全機能維持に影響を与えることはない。

以上より、竜巻による溢水が外部事象防護対象施設の安全機能に影響を与えることはない。

(3) 外部電源喪失

設計竜巻と同時に発生する雷又はダウンバースト等の影響により外部電源喪失が発生する場合については、設計竜巻に対して非常用ディーゼル発電機（高圧

炉心スプレイ系ディーゼル発電機を含む。)の構造健全性を維持することにより、外部電源喪失の影響がなく外部事象防護対象施設の安全機能を損なわない設計とする。

なお、非常用ディーゼル発電機(高圧炉心スプレイ系ディーゼル発電機を含む。)の付属設備について、安全機能を損なわないことを以下のとおり確認している。

- ・吸排気については外気と繋がっているが、竜巻襲来時の短時間での圧力差による影響はない。
- ・排気消音器出口に風圧力による荷重が作用して消音器内に大気が逆流した場合において、排気が阻害され系統内が閉塞気味になり、排気ガス温度が徐々に上昇し、通常運転時を超える温度となり出力制限となることが予想されるが、竜巻は長期間停滞することなく数秒～10 数秒のオーダーで通過するため、この程度であれば排気ガス温度の急激な上昇はなく非常用ディーゼル発電機(高圧炉心スプレイ系ディーゼル発電機を含む。)運転に支障を来すことはない。

<参考文献>

- (1) J.D.Riera, “A Critical Reappraisal of Nuclear Power Plant safety against Accidental Aircraft Impact”, Nuclear Engineering and Design 57, (1980)
- (2) 雷雨とメソ気象 大野久雄, 東京堂出版
- (3) 気象庁ホームページ
(http://www.jma.go.jp/jma/kishou/known/yougo_hp/kousui.html)
- (4) 一般気象学 小倉義光, 東京大学出版会

女川原子力発電所 2 号炉

竜巻影響評価について
(添付資料)

添付資料

- 1.1 重大事故等対処施設に対する考慮について
- 1.2 評価対象施設の抽出について
- 1.3 外部事象防護対象施設に波及的影響を及ぼし得る施設の抽出について
- 2.1 気候区分について
- 2.2 数値気象解析にもとづく竜巻検討地域の設定について
- 2.3 竜巻検討地域及び全国で発生した竜巻
- 2.4 竜巻最大風速のハザード曲線の求め方
- 2.5 地形効果による竜巻風速への影響について
- 2.6 設計竜巻の特性値の設定
- 2.7 米国及び関東平野の竜巻の類似性
- 3.1 竜巻影響評価の概要及び保守性について
- 3.2 竜巻影響評価及び竜巻対策の概要
- 3.3 設計飛来物の選定について
- 3.4 竜巻随件事象の抽出について
- 3.5 飛来物化する可能性がある物品等の管理について
- 3.6 設計竜巻荷重と積雪荷重との組み合わせについて
- 3.7 竜巻防護ネットの構造設計について

重大事故等対処施設に対する考慮について

設置許可基準規則第 43 条（重大事故等対処設備）の要求を踏まえ、設計竜巻によって、設計基準対象施設の安全機能と重大事故等対処設備の機能が同時に損なわれることがないことを確認するとともに、重大事故等対処設備の機能が喪失した場合においても、位置的分散又は頑健性のある外殻となる建屋による防護に期待できる代替手段等により必要な機能を維持できることを確認する。

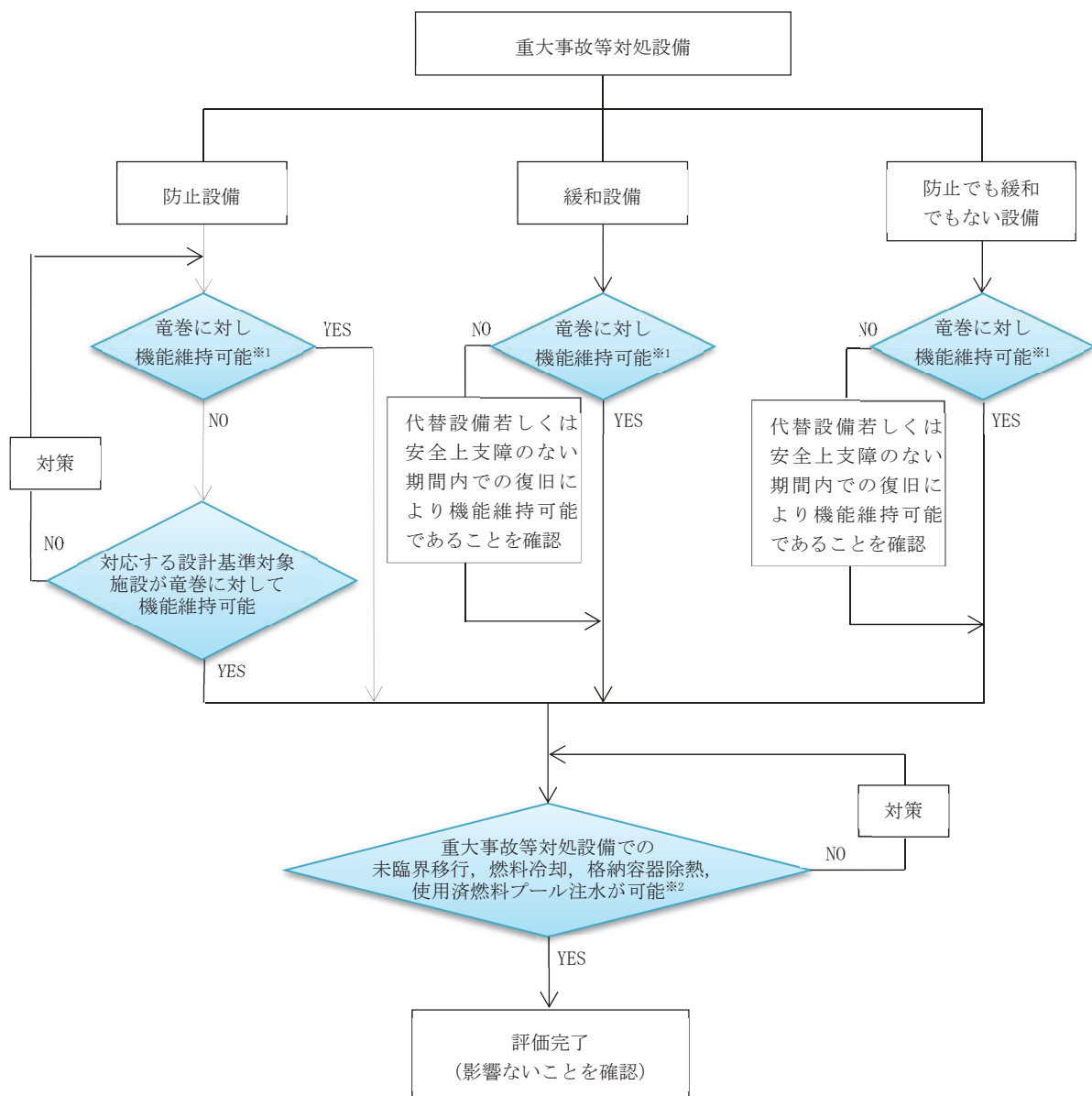
重大事故等対処設備の機能維持は、以下の方針に従い評価を実施する。

- （1） 重大事故防止設備は、竜巻によって対応する設計基準対象施設の安全機能と同時にその機能が損なわれるおそれのないこと
- （2） 重大事故等対処設備であって、重大事故防止設備でない設備は、代替設備若しくは安全上支障のない期間内での復旧により機能維持可能であること
- （3） 竜巻が発生した場合においても、重大事故等対処設備によりプラント安全性に関する主要な機能（未臨界移行機能、燃料冷却機能、格納容器除熱機能、使用済燃料プール注水機能）が維持できること（竜巻により重大事故等対処設備と設計基準対象施設の機能が同時に損なわれることはないが、安全上支障のない期間内での復旧により機能維持可能であることを確認する）

竜巻に対する重大事故等対処設備の影響評価フロー並びに方針（1）及び（2）に対する評価結果をそれぞれ第 1 図、第 1 表に示す。また、方針（3）に示したプラント安全性に関する主要な機能は、以下に例示するとおり重大事故等対処設備により維持される。

- ・ 未臨界移行機能：ATWS 緩和設備（代替制御棒挿入機能）
- ・ 燃料冷却機能：低圧代替注水系（可搬型）
- ・ 格納容器除熱機能：原子炉補機代替冷却水系
- ・ 使用済燃料プール注水機能：燃料プール代替注水系（可搬型）

なお、重大事故等対処施設の設計方針は、設置許可基準規則第 43 条（重大事故等対処設備）にて考慮する。



※1：屋内設備については、当該設備を内包する建屋の影響評価を実施し、安全機能が維持されるかを確認
 ※2：竜巻により重大事故等対処設備と設計基準対象施設の機能が同時に損なわれることはないが、安全上支障のない期間内での復旧により機能維持可能であることを確認

第1図 竜巻に対する重大事故等対処設備の影響評価フロー

第1表 竜巻に対する重大事故等対処設備の影響評価（1/8）

設置許可基準	重大事故等対処設備		分類	保管・設置箇所※	竜巻		
					評価	防護方法	
第 37 条（重大事故等の拡大の防止等）	－		－	－	－	－	
第 38 条（重大事故等対処施設の地盤）	－		－	－	－	－	
第 39 条（地震による損傷の防止）	－		－	－	－	－	
第 40 条（津波による損傷の防止）	－		－	－	－	－	
第 41 条（火災による損傷の防止）	－		－	－	－	－	
第 42 条（特定重大事故等対処施設）	特定重大事故等対処施設		→申請範囲外	－	－	－	
第 43 条（重大事故等対処設備）	ブルドーザ		防止でも緩和でもない設備	可搬型 SA 設備 保管場所	○	分散配置	
第 44 条(緊急停止失敗時に発電用原子炉を未臨界にするための設備)	ATWS 緩和設備（代替制御棒挿入機能），制御棒，制御棒駆動機構，制御棒駆動水圧系水圧制御ユニット，制御棒駆動水圧系配管		防止設備	R/B, C/B	○	建屋内	
	ATWS 緩和設備（代替原子炉再循環ポンプトリップ機能）		防止設備	R/B, C/B	○	建屋内	
	ほう酸水注入系		防止設備・緩和設備	R/B	○	建屋内	
	ATWS 緩和設備（自動減圧系作動阻止機能）		防止設備	R/B, C/B	○	建屋内	
第 45 条(原子炉冷却材圧力バウンダリ高圧時に発電用原子炉を冷却するための設備)	高圧代替注水系	高圧代替注水系ポンプ，配管等	防止設備・緩和設備	R/B	○	建屋内	
		復水貯蔵タンク	56 条に記載		－	－	
	原子炉隔離時冷却系	原子炉隔離時冷却系ポンプ，配管等	（設計基準対象施設）		R/B	○	建屋内
		復水貯蔵タンク	56 条に記載		－	－	
	高圧炉心スプレイ系	高圧炉心スプレイ系ポンプ，配管等	（設計基準対象施設）		R/B	○	建屋内
		復水貯蔵タンク	56 条に記載		－	－	
		サブプレッションチェンバ	56 条に記載		－	－	
	ほう酸水注入系		44 条に記載		－	－	
第 46 条(原子炉冷却材圧力バウンダリを減圧するための設備)	主蒸気逃がし安全弁，逃がし弁機能用アキュムレータ，自動減圧機能用アキュムレータ，主蒸気系配管等		防止設備・緩和設備	R/B	○	建屋内	
	代替自動減圧回路（代替自動減圧機能）		防止設備	R/B, C/B	○	建屋内	
	ATWS 緩和設備（自動減圧系作動阻止機能）		44 条に記載		－	－	
	可搬型代替直流電源設備		57 条に記載		－	－	
	主蒸気逃がし安全弁用可搬型蓄電池		防止設備	C/B	○	建屋内	
	高圧窒素ガス供給系（非常用）	高圧窒素ガスポンプ，主蒸気逃がし安全弁自動減圧機能用アキュムレータ，配管等	防止設備	R/B	○	建屋内	
	代替高圧窒素ガス供給系	高圧窒素ガスポンプ，ホース，配管等	防止設備	R/B	○	建屋内	
	HPCS 注入隔離弁		（設計基準対象施設）		R/B	○	建屋内
	原子炉建屋ブローアウトパネル		防止設備	屋外 R/B 廻り	○	影響なし （ブローアウトパネルが開放した場合は，補修を実施又は必要に 応じプラント停止）	

○：竜巻に対し安全機能を維持できる
又は竜巻による損傷を考慮した場合でも、対応する設計基準対象施設が竜巻に対し安全機能を維持できる（防止設備）
又は竜巻による損傷を考慮して、代替設備による機能維持や安全上支障のない期間での修復等の対応が可能（緩和設備、防止でも緩和でもない設備）
—：他の項目にて整理
※ SA設備：重大事故等対処設備、R/B：原子炉建屋、C/B：制御建屋

第1表 竜巻に対する重大事故等対処設備の影響評価（2/8）

設置許可基準	重大事故等対処設備		分類	保管・設置箇所※	竜巻	
					評価	防護方法
第47条(原子炉冷却材圧力バウンダリ低圧時に発電用原子炉を冷却するための設備)	低圧代替注水系（常設） （復水移送ポンプ）	復水移送ポンプ，配管等	防止設備・緩和設備	R/B	○	建屋内
		復水貯蔵タンク	56条に記載		—	—
	低圧代替注水系（常設） （直流駆動低圧注水ポンプ）	直流駆動低圧注水ポンプ，配管等	防止設備	R/B	○	建屋内
		復水貯蔵タンク	56条に記載		—	—
	低圧代替注水系（可搬型）	可搬箇所：大容量送水ポンプ（タイプⅠ），ホース延長回収車，ホース等	防止設備・緩和設備	可搬型 SA 設備 保管場所	○	分散配置
		常設箇所：接続口，配管等	防止設備・緩和設備	屋外 R/B 廻り	○	分散配置
		常設箇所：配管等	防止設備・緩和設備	R/B	○	建屋内
		淡水貯水槽（No.1），淡水貯水槽（No.2）	56条に記載		—	—
	残留熱除去系（低圧注水モード）	残留熱除去系ポンプ，配管等	（設計基準対象施設）	R/B	○	建屋内
		サブプレッションチェンバ	56条に記載		—	—
	残留熱除去系（原子炉停止時冷却モード）	残留熱除去系ポンプ，配管等	（設計基準対象施設）	R/B	○	建屋内
	低圧炉心スプレイ系	低圧炉心スプレイ系ポンプ，配管等	（設計基準対象施設）	R/B	○	建屋内
		サブプレッションチェンバ	56条に記載		—	—
	原子炉補機冷却水系（原子炉補機冷却海水系を含む）		48条に記載		—	—
	非常用取水設備		その他の設備に記載		—	—
第48条(最終ヒートシンクへ熱を輸送するための設備)	原子炉補機代替冷却水系	可搬箇所：熱交換器ユニット，大容量送水ポンプ(タイプⅠ)，ホース延長回収車，ホース等	防止設備・緩和設備	可搬型 SA 設備 保管場所	○	分散配置
		常設箇所：残留熱除去系熱交換器，配管等	防止設備・緩和設備	R/B	○	建屋内
		常設箇所：接続口，配管等	防止設備・緩和設備	屋外 R/B 廻り	○	分散配置
		貯留堰，取水口，取水路，海水ポンプ室	その他の設備に記載		—	—
	耐圧強化ベント系	配管，弁等	防止設備	R/B	○	建屋内
		排気筒	防止設備	屋外	○	代替設備（原子炉補機代替冷却水系）
	原子炉格納容器フィルタベント系	フィルタ装置等	50条に記載		—	—
		淡水貯水槽（No.1），淡水貯水槽（No.2）	56条に記載		—	—
	残留熱除去系（原子炉停止時冷却モード）		47条に記載		—	—
	残留熱除去系（格納容器スプレイ冷却モード）		49条に記載		—	—
	残留熱除去系（サブプレッションプール水冷却モード）		49条に記載		—	—
	原子炉補機冷却水系（原子炉補機冷却海水系を含む）	原子炉補機冷却水ポンプ，配管等	（設計基準対象施設）	R/B	○	建屋内
		原子炉補機冷却海水ポンプ，配管等	（設計基準対象施設）	屋外	○	防護対策実施
	高圧炉心スプレイ補機冷却水系（高圧炉心スプレイ補機冷却海水系を含む）	高圧炉心スプレイ補機冷却水ポンプ，配管等	（設計基準対象施設）	R/B	○	建屋内
		高圧炉心スプレイ補機冷却海水ポンプ，配管等	（設計基準対象施設）	屋外	○	防護対策実施
	非常用取水設備		その他の設備に記載		—	—

○：竜巻に対し安全機能を維持できる
又は竜巻による損傷を考慮した場合でも，対応する設計基準対象施設が竜巻に対し安全機能を維持できる（防止設備）
又は竜巻による損傷を考慮して，代替設備による機能維持や安全上支障のない期間での修復等の対応が可能（緩和設備，防止でも緩和でもない設備）
—：他の項目にて整理
※ SA 設備：重大事故等対処設備，R/B：原子炉建屋，C/B：制御建屋

第 1 表 竜巻に対する重大事故等対処設備の影響評価 (3/8)

設置許可基準	重大事故等対処設備		分類	保管・設置箇所※	竜巻	
					評価	防護方法
第 49 条(原子炉格納容器内の冷却等のための設備)	原子炉格納容器代替スプレイ冷却系（常設）	復水移送ポンプ，配管等	防止設備・緩和設備	R/B	○	建屋内
		復水貯蔵タンク	56 条に記載		—	—
	原子炉格納容器代替スプレイ冷却系（可搬型）	可搬箇所：大容量送水ポンプ（タイプ I），ホース延長回収車，ホース等	防止設備・緩和設備	可搬型 SA 設備 保管場所	○	分散配置
		常設箇所：接続口，配管等	防止設備・緩和設備	屋外 R/B 廻り	○	分散配置
		常設箇所：配管等	防止設備・緩和設備	R/B	○	建屋内
		淡水貯水槽（No. 1），淡水貯水槽（No. 2）	56 条に記載		—	—
	残留熱除去系（格納容器スプレイ冷却モード）	残留熱除去系ポンプ，配管等	（設計基準対象施設）	R/B	○	建屋内
		サブプレッションチェンバ	56 条に記載		—	—
	残留熱除去系（サブプレッションプール水冷却モード）	残留熱除去系ポンプ，配管等	（設計基準対象施設）	R/B	○	建屋内
		サブプレッションチェンバ	56 条に記載		—	—
第 50 条(原子炉格納容器の過圧破損を防止するための設備)	原子炉補機冷却水系（原子炉補機冷却海水系を含む）		48 条に記載		—	—
	非常用取水設備		その他の設備に記載		—	—
	代替循環冷却系	代替循環冷却ポンプ，残留熱除去系熱交換器，配管等	緩和設備	R/B	○	建屋内
		サブプレッションチェンバ	56 条に記載		—	—
		原子炉補機代替冷却水系（可搬箇所：熱交換器ユニット，大容量送水ポンプ(タイプ I)，ホース延長回収車，ホース等）	48 条に記載		—	—
		原子炉補機代替冷却水系（常設箇所：残留熱除去系熱交換器，配管等）	48 条に記載		—	—
		原子炉補機代替冷却水系（常設箇所：接続口，配管等）	48 条に記載		—	—
		原子炉補機冷却水ポンプ，配管等	48 条に記載		—	—
		原子炉補機冷却海水ポンプ，配管等	48 条に記載		—	—
		貯留堰，取水口，取水路，海水ポンプ室	その他の設備に記載		—	—
	原子炉格納容器フィルタベント系	常設箇所：フィルタ装置，圧力開放板，配管，遠隔手動弁操作設備等	防止設備・緩和設備	R/B	○	建屋内
		常設箇所：配管（排気管）	防止設備・緩和設備	屋外 R/B 廻り	○	代替設備 (代替循環冷却系)
		可搬箇所：可搬型窒素ガス供給装置，ホース等	緩和設備	可搬型 SA 設備 保管場所	○	分散配置
		常設箇所：接続口，配管等（窒素ガス）	緩和設備	R/B 内及び屋外 R/B 廻り	○	分散配置 (一方は建屋内)
		可搬箇所：大容量送水ポンプ（タイプ I），ホース延長回収車，ホース等	防止設備・緩和設備	可搬型 SA 設備 保管場所	○	分散配置
		常設箇所：接続口，配管等（水補給）	防止設備・緩和設備	R/B 内及び屋外 R/B 廻り	○	分散配置 (一方は建屋内)
		淡水貯水槽（No. 1），淡水貯水槽（No. 2）	56 条に記載		—	—

○：竜巻に対し安全機能を維持できる
 又は竜巻による損傷を考慮した場合でも，対応する設計基準対象施設が竜巻に対し安全機能を維持できる（防止設備）
 又は竜巻による損傷を考慮して，代替設備による機能維持や安全上支障のない期間での修復等の対応が可能（緩和設備，防止でも緩和でもない設備）
 —：他の項目にて整理
 ※ SA 設備:重大事故等対処設備，R/B：原子炉建屋，C/B：制御建屋

第1表 竜巻に対する重大事故等対処設備の影響評価（4/8）

設置許可基準	重大事故等対処設備		分類	保管・設置箇所※	竜巻	
					評価	防護方法
第51条(原子炉格納容器下部の溶融炉心を冷却するための設備)	原子炉格納容器下部注水系（常設）	復水移送ポンプ，配管等	緩和設備	R/B	○	建屋内
		復水貯蔵タンク	56条に記載		—	—
	原子炉格納容器下部注水系（可搬型）	可搬箇所：大容量送水ポンプ（タイプⅠ），ホース延長回収車，ホース等	緩和設備	可搬型 SA 設備 保管場所	○	分散配置
		常設箇所：接続口，配管等	緩和設備	屋外 R/B 廻り	○	分散配置
		常設箇所：配管等	緩和設備	R/B	○	建屋内
		淡水貯水槽（No.1），淡水貯水槽（No.2）	56条に記載		—	—
	原子炉格納容器代替スプレイ冷却系（常設）	復水移送ポンプ，配管等	49条に記載		—	—
		復水貯蔵タンク	56条に記載		—	—
	原子炉格納容器代替スプレイ冷却系（可搬型）	可搬箇所：大容量送水ポンプ（タイプⅠ），ホース延長回収車，ホース等	49条に記載		—	—
		常設箇所：接続口，配管等	49条に記載		—	—
		常設箇所：配管等	49条に記載		—	—
		淡水貯水槽（No.1），淡水貯水槽（No.2）	56条に記載		—	—
	代替循環冷却系	代替循環冷却ポンプ，残留熱除去系熱交換器，配管等	50条に記載		—	—
		サプレッションチェンバ	56条に記載		—	—
		原子炉補機代替冷却水系（可搬箇所：熱交換器ユニット，大容量送水ポンプ（タイプⅠ），ホース延長回収車，ホース等）	48条に記載		—	—
		原子炉補機代替冷却水系（常設箇所：残留熱除去系熱交換器，配管等）	48条に記載		—	—
		原子炉補機代替冷却水系（常設箇所：接続口，配管等）	48条に記載		—	—
		原子炉補機冷却水ポンプ，配管等	48条に記載		—	—
		原子炉補機冷却海水ポンプ，配管等	48条に記載		—	—
		貯留堰，取水口，取水路，海水ポンプ室	その他の設備に記載		—	—
	高压代替注水系		45条に記載		—	—
	ほう酸水注入系		44条に記載		—	—
	低压代替注水系（常設）（復水移送ポンプ）		47条に記載		—	—
	低压代替注水系（可搬型）		47条に記載		—	—
	（原子炉格納容器調気系）		（設計基準対象施設）		—	—
第52条(水素爆発による原子炉格納容器の破損を防止するための設備)	可搬型窒素ガス供給装置	可搬箇所：可搬型窒素ガス供給装置，ホース等	緩和設備	可搬型 SA 設備 保管場所	○	分散配置
		常設箇所：接続口，配管等	緩和設備	屋外 R/B 廻り	○	分散配置 （一方は建屋内）
		常設箇所：配管等	緩和設備	R/B	○	建屋内
	原子炉格納容器フィルタベント系	フィルタ装置等	50条に記載		—	—
		フィルタ装置出口放射線モニタ，フィルタ装置出口水素濃度	58条に記載		—	—
		淡水貯水槽（No.1），淡水貯水槽（No.2）	56条に記載		—	—
第53条(水素爆発による原子炉建屋等の損傷を防止するための設備)	格納容器内水素濃度（D/W），格納容器内水素濃度（S/C），格納容器内雰囲気水素濃度，格納容器内雰囲気酸素濃度		緩和設備	R/B	○	建屋内
	静的触媒式水素再結合装置，静的触媒式水素再結合装置動作監視装置		緩和設備	R/B	○	建屋内
	原子炉建屋原子炉棟		その他の設備に記載		—	—
	原子炉建屋内水素濃度		緩和設備	R/B	○	建屋内

○：竜巻に対し安全機能を維持できる
 又は竜巻による損傷を考慮した場合でも，対応する設計基準対象施設が竜巻に対し安全機能を維持できる（防止設備）
 又は竜巻による損傷を考慮して，代替設備による機能維持や安全上支障のない期間での修復等の対応が可能（緩和設備，防止でも緩和でもない設備）
 —：他の項目にて整理
 ※ SA 設備：重大事故等対処設備，R/B：原子炉建屋，C/B：制御建屋

第1表 竜巻に対する重大事故等対処設備の影響評価 (5/8)

設置許可基準	重大事故等対処設備		分類	保管・設置箇所※	竜巻	
					評価	防護方法
第54条(使用済燃料貯蔵槽の冷却等のための設備)	燃料プール代替注水系(常設配管)	可搬箇所：大容量送水ポンプ(タイプⅠ)，ホース延長回収車，ホース等	防止設備	可搬型SA設備保管場所	○	分散配置
		常設箇所：接続口，配管等	防止設備	屋外R/B廻り	○	分散配置
		常設箇所：配管等	防止設備	R/B	○	建屋内
		淡水貯水槽(No.1)，淡水貯水槽(No.2)	56条に記載		—	—
	燃料プール代替注水系(可搬型)	可搬箇所：大容量送水ポンプ(タイプⅠ)，ホース延長回収車，ホース等	防止設備	可搬型SA設備保管場所	○	分散配置
		可搬箇所：ホース	防止設備	R/B	○	建屋内
		淡水貯水槽(No.1)，淡水貯水槽(No.2)	56条に記載		—	—
	燃料プールのスプレイ系(常設配管)	可搬箇所：大容量送水ポンプ(タイプⅠ)，ホース延長回収車，ホース等	緩和設備	可搬型SA設備保管場所	○	分散配置
		可搬箇所：スプレイノズル	緩和設備	R/B	○	建屋内
		常設箇所：接続口，配管等	緩和設備	屋外R/B廻り	○	分散配置
		常設箇所：配管等	緩和設備	R/B	○	建屋内
		淡水貯水槽(No.1)，淡水貯水槽(No.2)	56条に記載		—	—
	燃料プールのスプレイ系(可搬型)	可搬箇所：大容量送水ポンプ(タイプⅠ)，ホース延長回収車，ホース等	緩和設備	可搬型SA設備保管場所	○	分散配置
		可搬箇所：スプレイノズル，ホース	緩和設備	R/B	○	建屋内
		淡水貯水槽(No.1)，淡水貯水槽(No.2)	56条に記載		—	—
	大気への放射性物質の拡散抑制		55条に記載		—	—
	使用済燃料プール水位/温度(ヒートサーモ式)，使用済燃料プール水位/温度(ガイドバルス式)，使用済燃料プール上部空間放射線モニタ(高線量，低線量)，使用済燃料プール監視カメラ		防止設備・緩和設備	R/B	○	建屋内
	重大事故等時における使用済燃料プールの除熱	燃料プール冷却浄化系(燃料プール冷却浄化系ポンプ，熱交換器，配管等)	防止設備	R/B	○	建屋内
		原子炉補機代替冷却水系(可搬箇所：熱交換器ユニット，大容量送水ポンプ(タイプⅠ)，ホース延長回収車，ホース等)	防止設備	可搬型SA設備保管場所	○	分散配置
		原子炉補機代替冷却水系(常設箇所：燃料プール冷却浄化系熱交換器，配管等)	防止設備	R/B	○	建屋内
		原子炉補機代替冷却水系(常設箇所：接続口，配管等)	防止設備	屋外R/B廻り	○	分散配置
		貯留堰，取水口，取水路，海水ポンプ室	その他の設備に記載		—	—
第55条(工場等外への放射性物質の拡散を抑制するための設備)	大気への放射性物質の拡散抑制(大容量送水ポンプ(タイプⅡ)，ホース延長回収車，ホース，放水砲)		緩和設備	可搬型SA設備保管場所	○	分散配置
	航空機燃料火災への泡消火(大容量送水ポンプ(タイプⅡ)，ホース延長回収車，ホース，泡消火薬剤混合装置，放水砲)		緩和設備	可搬型SA設備保管場所	○	分散配置
	海洋への放射性物質の拡散抑制(シルトフェンス)		緩和設備	可搬型SA設備保管場所	○	分散配置
第56条(重大事故等の収束に必要な水の供給設備)	復水貯蔵タンク		防止設備・緩和設備	屋外	○	代替設備(サブプレッションチェンバ，淡水貯水槽(No.1)，淡水貯水槽(No.2))
	サブプレッションチェンバ		緩和設備	R/B	○	建屋内
	淡水貯水槽(No.1)，淡水貯水槽(No.2)		—(代替淡水源)	屋外(地下)	○	影響なし
	ほう酸水注入系貯蔵タンク		44条に記載		—	—
	水の供給	可搬箇所：大容量送水ポンプ(タイプⅠ)，大容量送水ポンプ(タイプⅡ)，ホース延長回収車，ホース等	防止設備・緩和設備	可搬型SA設備保管場所	○	分散配置
		常設箇所：接続口，配管等	防止設備・緩和設備	屋外及び屋外(地下)	○	分散配置(一方は地下)
		貯留堰，取水路，取水口，海水ポンプ室	その他の設備に記載		—	—

○：竜巻に対し安全機能を維持できる
又は竜巻による損傷を考慮した場合でも，対応する設計基準対象施設が竜巻に対し安全機能を維持できる(防止設備)
又は竜巻による損傷を考慮して，代替設備による機能維持や安全上支障のない期間での修復等の対応が可能(緩和設備，防止でも緩和でもない設備)
—：他の項目にて整理
※ SA設備：重大事故等対処設備，R/B：原子炉建屋，C/B：制御建屋

6条(竜巻)－別添1－添付1.1－7

第 1 表 竜巻に対する重大事故等対処設備の影響評価 (6/8)

設置許可基準	重大事故等対処設備		分類	保管・設置箇所*	竜巻	
					評価	防護方法
第 57 条(電源設備)	常設代替交流電源設備	ガスタービン発電機	防止設備・緩和設備	屋外(緊急用電気品建屋)	○	代替設備 (非常用交流電源設備)
		ガスタービン発電設備軽油タンク	防止設備・緩和設備	屋外(地下)	○	影響なし
		ガスタービン発電設備燃料移送ポンプ, 配管等	防止設備・緩和設備	屋外	○	代替設備 (非常用交流電源設備)
	可搬型代替交流電源設備	可搬箇所: 電源車	防止設備・緩和設備	可搬型 SA 設備 保管場所	○	分散配置
		常設箇所: 電源車接続口	防止設備・緩和設備	R/B 内及び屋外 R/B 廻り	○	分散配置 (一方は建屋内)
		常設箇所: 軽油タンク	防止設備・緩和設備	屋外(地下)	○	影響なし
		常設箇所: ガスタービン発電設備軽油タンク	防止設備・緩和設備	屋外(地下)	○	影響なし
		可搬箇所: タンクローリ	防止設備・緩和設備	可搬型 SA 設備 保管場所	○	分散配置
	所内常設蓄電式直流電源設備	125V 蓄電池 2A, 125V 蓄電池 2B, 125V 充電器盤 2A, 125V 充電器盤 2B	防止設備・緩和設備	C/B	○	建屋内
	常設代替直流電源設備	125V 代替蓄電池	防止設備・緩和設備	C/B	○	建屋内
		250V 蓄電池	防止設備	C/B	○	建屋内
	可搬型代替直流電源設備	常設箇所: 125V 代替蓄電池, 125V 代替充電器盤	防止設備・緩和設備	C/B	○	建屋内
		常設箇所: 250V 蓄電池, 250V 充電器盤	防止設備	C/B	○	建屋内
		可搬箇所: 電源車	防止設備・緩和設備	可搬型 SA 設備 保管場所	○	分散配置
		常設箇所: 電源車接続口	防止設備・緩和設備	R/B 内及び屋外 R/B 廻り	○	分散配置 (一方は建屋内)
		常設箇所: 軽油タンク	防止設備・緩和設備	屋外(地下)	○	影響なし
		常設箇所: ガスタービン発電設備軽油タンク	防止設備・緩和設備	屋外(地下)	○	影響なし
		常設箇所: タンクローリ	防止設備・緩和設備	可搬型 SA 設備 保管場所	○	分散配置
	代替所内電気設備	ガスタービン発電機接続盤, 緊急用高圧母線 2F 系, 緊急用高圧母線 2G 系, 緊急用動力変圧器 2G 系, 緊急用低圧母線 2G 系, 緊急用交流電源切替盤 2G 系, 緊急用交流電源切替盤 2C 系, 緊急用交流電源切替盤 2D 系, 非常用高圧母線 2C 系, 非常用高圧母線 2D 系	防止設備・緩和設備	R/B, 緊急用電気品建屋	○	建屋内
	非常用交流電源設備	非常用ディーゼル発電機, 燃料デイトタンク, 配管等	(設計基準対象施設)	R/B	○	建屋内
		非常用ディーゼル発電設備燃料移送ポンプ	(設計基準対象施設)	屋外(地下)	○	影響なし
		軽油タンク, 配管等	防止設備・緩和設備	屋外(地下)	○	影響なし
		高圧炉心スプレイ系ディーゼル発電機, 燃料デイトタンク, 配管等	(設計基準対象施設)	R/B	○	建屋内
		高圧炉心スプレイ系ディーゼル発電設備燃料移送ポンプ	(設計基準対象施設)	屋外(地下)	○	影響なし
	非常用直流電源設備	125V 蓄電池 2A, 125V 蓄電池 2B, 125V 充電器盤 2A, 125V 充電器盤 2B	防止設備・緩和設備	C/B	○	建屋内
		125V 蓄電池 2H, 125V 充電器盤 2H	(設計基準対象施設)	R/B	○	建屋内
	燃料補給設備	常設箇所: 軽油タンク, ガスタービン発電設備軽油タンク	防止設備・緩和設備	屋外(地下)	○	影響なし
		可搬箇所: タンクローリ	防止設備・緩和設備	可搬型 SA 設備 保管場所	○	分散配置

○: 竜巻に対し安全機能を維持できる
 又は竜巻による損傷を考慮した場合でも, 対応する設計基準対象施設が竜巻に対し安全機能を維持できる(防止設備)
 又は竜巻による損傷を考慮して, 代替設備による機能維持や安全上支障のない期間での修復等の対応が可能(緩和設備, 防止でも緩和でもない設備)
 一: 他の項目にて整理
 ※ SA 設備: 重大事故等対処設備, R/B: 原子炉建屋, C/B: 制御建屋

第1表 竜巻に対する重大事故等対処設備の影響評価（7/8）

設置許可基準	重大事故等対処設備		分類	保管・設置箇所※	竜巻	
					評価	防護方法
第58条(計装設備)	重大事故等時の計装（SA 時計装一式） [原子炉圧力容器内の温度・圧力・水位] [原子炉圧力容器・原子炉格納容器への注水量] [原子炉格納容器内の温度・圧力・水位・水素濃度・放射線量率] [未臨界の維持又は監視] [最終ヒートシンクの確保（代替循環冷却系・原子炉格納容器フィルタベント系・耐圧強化ベント系・残留熱除去系）] [格納容器バイパスの監視] [水源の確保] [原子炉建屋内の水素濃度] [原子炉格納容器内の酸素濃度] [使用済燃料プールの監視]		防止設備・緩和設備・（設計基準対象施設）	R/B, 屋外（地下）	○	影響なし
	[発電所内の通信連絡]		防止でも緩和でもない設備	C/B, 緊急時対策建屋	○	建屋内
	[温度, 圧力, 水位, 注水量の計測・監視]		防止設備・緩和設備	C/B, 緊急時対策建屋	○	建屋内
第59条(運転員が原子炉制御室にとどまるための設備)	居住性の確保	中央制御室, 中央制御室待避所	（重大事故等対処施設）	C/B	○	建屋内
		中央制御室遮蔽, 中央制御室送風機, 中央制御室排風機, 中央制御室再循環送風機, 中央制御室再循環フィルタ装置, ダクト等	防止設備・緩和設備	C/B	○	建屋内
		中央制御室待避所遮蔽, 中央制御室待避所加圧設備（空気ポンプ, 配管等）	緩和設備	C/B	○	建屋内
		差圧計, 酸素濃度計, 二酸化炭素濃度計, データ表示装置（待避所）	防止でも緩和でもない設備	C/B	○	建屋内
		トランシーバ（固定）, 衛星電話（固定）	62 条に記載		—	—
	照明の確保	可搬型照明（SA）	防止でも緩和でもない設備	C/B	○	建屋内
	被ばく線量の低減	非常用ガス処理系（排風機, 配管等）	緩和設備	R/B	○	建屋内
		排気筒	緩和設備	屋外	○	影響なし （損傷した場合は, 補修を実施又は必要に応じてプラント停止）
		原子炉建屋ブローアウト閉止装置	緩和設備	R/B	○	建屋内
第60条(監視測定設備)	可搬型モニタリングポスト, 代替気象観測設備		緩和設備・防止でも緩和でもない設備	可搬型 SA 設備保管場所（コンテナ内）, 緊急時対策建屋	○	分散配置, 建屋内
	可搬型放射線計測装置（可搬型ダスト・よう素サンブラ, γ線サーベイメータ, β線サーベイメータ, α線サーベイメータ, 電離箱サーベイメータ）		防止でも緩和でもない設備	緊急時対策建屋	○	建屋内
	小型船舶		防止でも緩和でもない設備	可搬型 SA 設備保管場所	○	分散配置
	常設代替交流電源設備		57 条に記載		—	—

○：竜巻に対し安全機能を維持できる
又は竜巻による損傷を考慮した場合でも，対応する設計基準対象施設が竜巻に対し安全機能を維持できる（防止設備）
又は竜巻による損傷を考慮して，代替設備による機能維持や安全上支障のない期間での修復等の対応が可能（緩和設備，防止でも緩和でもない設備）
—：他の項目にて整理
※ SA 設備：重大事故等対処設備，R/B：原子炉建屋，C/B：制御建屋

第1表 竜巻に対する重大事故等対処設備の影響評価（8/8）

設置許可基準	重大事故等対処設備		分類	保管・設置箇所※	竜巻	
					評価	防護方法
第61条(緊急時対策所)	居住性の確保	緊急時対策所	(重大事故等対処施設)	緊急時対策建屋	○	建屋内
		緊急時対策所遮蔽, 緊急時対策建屋非常用送風機, 緊急時対策建屋非常用フィルタ装置, 配管等	緩和設備	緊急時対策建屋	○	建屋内
		緊急時対策所加圧設備(空気ポンプ, 配管等)	緩和設備	緊急時対策建屋	○	建屋内
		差圧計, 酸素濃度計, 二酸化炭素濃度計	防止でも緩和でもない設備	緊急時対策建屋	○	建屋内
		緊急時対策所可搬型エリアモニタ	緩和設備	緊急時対策建屋	○	建屋内
		可搬型モニタリングポスト	60条に記載		—	—
	電源の確保(緊急時対策所)	ガスタービン発電機, ガスタービン発電設備軽油タンク, ガスタービン発電設備燃料移送ポンプ, ガスタービン発電機接続盤, 緊急用高圧母線2F系	57条に記載		—	—
		電源車	防止設備・緩和設備	屋外緊急時対策建屋廻り及び可搬型SA設備保管場所	○	代替設備(非常用交流電源設備)
		緊急時対策所軽油タンク, 緊急時対策所燃料移送系配管等	防止設備・緩和設備	緊急時対策建屋	○	建屋内
		緊急時対策所用高圧母線J系	防止設備・緩和設備	緊急時対策建屋	○	建屋内
	必要な情報の把握	安全パラメータ表示システム(SPDS)	62条に記載		—	—
	通信連絡(緊急時対策所)	トランシーバ(固定), トランシーバ(携帯), 衛星電話(固定), 衛星電話(携帯), 統合原子力防災ネットワークを用いた通信連絡設備	62条に記載		—	—
第62条(通信連絡を行うために必要な設備)	所内通信	携行型通話装置	防止設備・緩和設備	C/B	○	建屋内
		トランシーバ(固定), トランシーバ(携帯)	防止設備・緩和設備	C/B, 緊急時対策建屋(屋外設備含む)	○	影響なし (建屋内設置, 屋外設備は分散配置された代替設備(有線系, 衛星系)により機能維持)
		安全パラメータ表示システム(SPDS)	緩和設備	C/B, 緊急時対策建屋(屋外設備含む)	○	影響なし (建屋内設置, 屋外設備は代替設備(有線系)にて機能維持可能)
	所内外通信	衛星電話(固定), 衛星電話(携帯)	防止設備・緩和設備	C/B, 緊急時対策建屋(屋外設備含む)	○	影響なし (建屋内設置, 屋外設備は分散配置された代替設備(有線系, 無線系)により機能維持)
	所外通信	統合原子力防災ネットワークを用いた通信連絡設備, データ伝送設備	防止でも緩和でもない設備	緊急時対策建屋(屋外設備含む)	○	影響なし (建屋内設置, 屋外設備は分散配置された代替設備(有線系, 無線系)により機能維持)
その他の設備	重大事故等時に対処するための流路, 注水先, 注入先, 排出元等非常用取水設備	原子炉圧力容器, 原子炉格納容器, 使用済燃料プール	防止設備・緩和設備	R/B	○	建屋内
		原子炉建屋原子炉棟	緩和設備	R/B	○	影響なし
		貯留堰, 取水口, 取水路, 海水ポンプ室	防止設備・緩和設備	屋外	○	影響なし

○: 竜巻に対し安全機能を維持できる
又は竜巻による損傷を考慮した場合でも, 対応する設計基準対象施設が竜巻に対し安全機能を維持できる(防止設備)
又は竜巻による損傷を考慮して, 代替設備による機能維持や安全上支障のない期間での修復等の対応が可能(緩和設備, 防止でも緩和でもない設備)
—: 他の項目にて整理
※ SA設備: 重大事故等対処設備, R/B: 原子炉建屋, C/B: 制御建屋

評価対象施設の抽出について

1. 抽出方針

女川原子力発電所 2 号炉における評価対象施設の抽出フローを図 1，抽出結果を表 1 に示す。具体的には，以下の手順で抽出した。

Step1：安全施設（安全重要度クラス 1，2，3）及び安全施設以外の施設から外部事象防護対象施設^{※1}を抽出する。

※1：外部事象に対し必要な構築物，系統及び機器（発電用原子炉を停止するため，また停止状態にある場合は引き続きその状態を維持するために必要な異常の発生防止の機能又は異常の影響緩和の機能を有する構築物，系統及び機器）として，「発電用軽水型原子炉施設の安全機能の重要度分類に関する審査指針」（以下「重要度分類指針」という。）における安全重要度クラス 1，2 に属する施設，安全評価上期待する安全重要度クラス 3 に属する構築物，系統及び機器並びにそれを内包する区画

また，外部事象防護対象施設を内包する建屋（外部事象防護対象施設となる建屋を除く。）は，機械的強度を有すること等により，内包する外部事象防護対象施設の安全機能を損なわない設計及び外部事象防護対象施設へ波及的影響を及ぼさない設計とする。ここで，外部事象防護対象施設及び外部事象防護対象施設を内包する建屋を併せて，外部事象防護対象施設等という。

上記以外の「その他の施設」については，竜巻及びその随伴事象に対して機能維持，又は，竜巻及びその随伴事象による損傷を考慮して，代替設備により必要な機能を確保すること，必要に応じプラントを停止し，安全上支障のない期間に修復すること等の対応を行うこと又はそれらを適切に組み合わせることにより，安全機能を損なわない設計とすることから評価完了とする。

Step2：屋外施設

外部事象防護対象施設等として抽出された設備の設置場所を確認し，竜巻襲来時に風圧，気圧差及び飛来物衝突の影響を受ける屋外施設（外部事象防護対象施設を内包する区画を含む。）を評価対象施設とする。

Step3：外気と繋がる設備

外気との接続があるため，竜巻襲来時に気圧差荷重の影響を受ける換気空調設備等を評価対象施設とする。

Step4：外殻となる施設による防護が期待できない設備

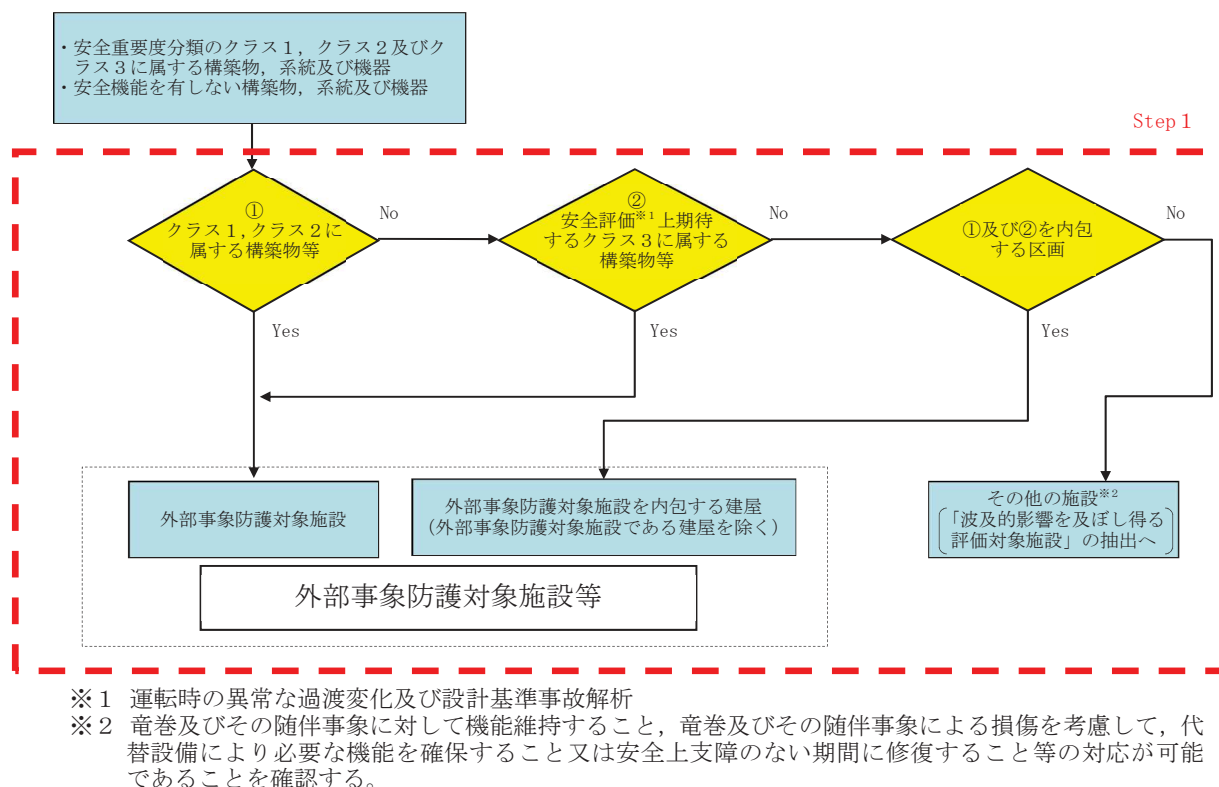
外部事象防護対象施設が設置されている施設等の外殻による防護機能が期待

できないものを評価対象施設とする。

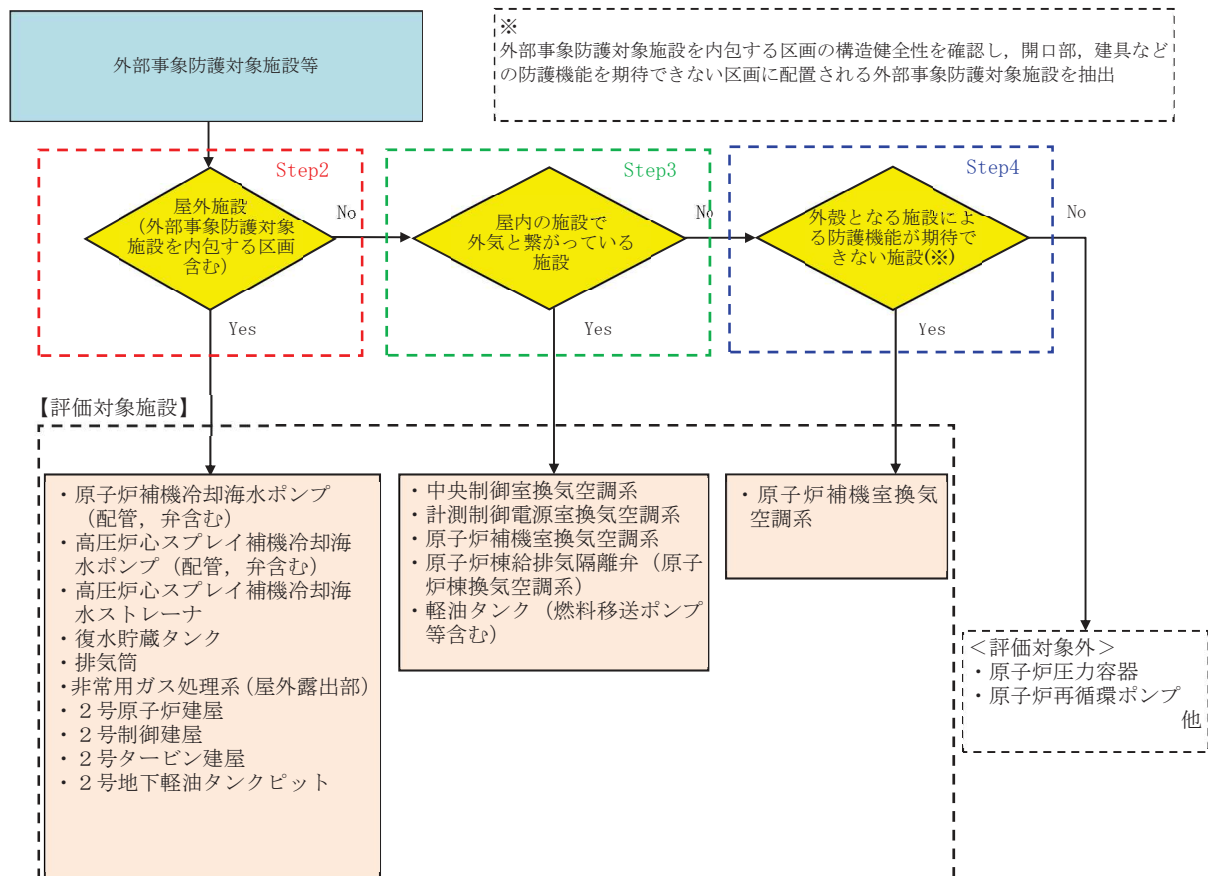
なお、外殻による防護に期待できるかは、外殻となる建屋・構築物等の竜巻荷重に対する健全性の確認結果による。

2. 抽出結果

外部事象防護対象施設等及び評価対象施設の抽出フローを第1図及び第2図に、外部事象防護対象施設等のうち評価対象施設抽出結果を第1表に示す。



第1図 外部事象防護対象施設等の抽出フロー



第2図 外部事象防護対象施設等のうち評価対象施設の抽出フロー

第1表 外部事象防護対象施設等のうち評価対象施設の抽出結果 (1/7)

○：Yes ×：No -：該当せず※3

重要度分類指針					女川原子力発電所2号炉	抽出の観点※1				設置場所※2	評価対象施設	備考
分類	定義	機能	構築物、系統又は機器	構築物、系統又は機器	構築物、系統又は機器	1	2	3	4			
PS-1	その損傷又は故障により発生する事象によつて、(a)炉心の著しい損傷、又は(b)燃料の大量の破損を引き起こすおそれのある構築物、系統及び機器	1) 原子炉冷却材圧力バウンダリ機能		原子炉冷却材圧力バウンダリを構成する機器・配管系(計装等の小口径配管・機器は除く。)	原子炉圧力容器	○	×	×	×	R	-	
					原子炉再循環ポンプ	○	×	×	×	R	-	
		2) 過剰反応度の印加防止機能		制御棒カップリング	配管、弁	○	×	×	×	R	-	
					原子炉圧力容器バウンダリ隔離弁	○	×	×	×	R	-	
		3) 炉心形状の維持機能			制御棒駆動機構ハウジング	○	×	×	×	R	-	
					中性子束計装ハウジング	○	×	×	×	R	-	
					制御棒カップリング	○	×	×	×	R	-	
					制御棒駆動機構カップリング	○	×	×	×	R	-	
					炉心シェラウド	○	×	×	×	R	-	
					シェラウドサポート	○	×	×	×	R	-	
MS-1	1) 異常状態発生時に原子炉を緊急に停止し、残留熱を除去し、原子炉冷却材圧力バウンダリの過圧を防止し、敷地周辺公衆への過度の放射線の影響を防止する構築物、系統及び機器	1) 原子炉の緊急停止機能		原子炉停止系の制御棒による系(制御棒及び制御棒駆動系(スクラム機能))	上部格子板	○	×	×	×	R	-	
					炉心支持板	○	×	×	×	R	-	
		2) 未臨界維持機能		原子炉停止系(制御棒による系、ほう酸水注入系)	燃料支持金具	○	×	×	×	R	-	
					制御棒案内管	○	×	×	×	R	-	
					制御棒駆動機構ハウジング	○	×	×	×	R	-	
					燃料集合体(上部タイブレート)	○	×	×	×	R	-	
					燃料集合体(下部タイブレート)	○	×	×	×	R	-	
					燃料集合体(スペーサ)	○	×	×	×	R	-	
					直接関連系(燃料集合体)	○	×	×	×	R	-	
					制御棒	○	×	×	×	R	-	
			原子炉停止系の制御棒による系(制御棒及び制御棒駆動系(スクラム機能))	制御棒案内管	○	×	×	×	R	-		
				制御棒駆動機構	○	×	×	×	R	-		
				制御棒駆動機構カップリング	○	×	×	×	R	-		
				直接関連系(制御棒駆動水圧系)	○	×	×	×	R	-		
				水圧制御ユニット(スクラムパイロット弁、スクラム弁、アキュムレータ、室素容器、配管、弁)	○	×	×	×	R	-		
				制御棒	○	×	×	×	R	-		
				制御棒カップリング	○	×	×	×	R	-		
				直接関連系(制御棒駆動機構)	○	×	×	×	R	-		
				制御棒駆動機構ハウジング	○	×	×	×	R	-		
				ほう酸水注入系(ポンプ、注入弁、タンク出口弁、貯蔵タンク、ポンプ吸込配管及び弁、注入配管及び弁)	○	×	×	×	R	-		
					主蒸気逃がし安全弁(安全弁としての開機能)	○	×	×	×	R	-	

※1：1＝外部事象防護対象施設等、2＝屋外設備、3＝外気と繋がる設備、4＝外殻となる施設による防護が期待できない設備
 ※2：R＝2号原子炉建屋、C＝2号制御建屋、T＝2号タービン建屋、L0＝2号地下軽油タンクピット、D＝固体廃棄物貯蔵所、HB＝補助ボイラー建屋、TSC＝緊急時対策所
 ※3：抽出の観点1～4の評価の結果、該当せず
 ※4：屋外にある外部事象防護対象施設の付属設備 (波及的影響 (機能的影響) を及ぼし得る施設) として抽出

第1表 外部事象防護対象施設等のうち評価対象施設の抽出結果 (2/7)

○：Yes ×：No -：該当せず※3

重要度分類指針			機能	構築物、系統又は機器	女川原子力発電所 2号炉 構築物、系統又は機器	抽出の観点 ^{※1}				設置場所 ^{※2}	評価対象施設	備考
分類	定義	1				2	3	4				
MS-1	1) 異常状態発生時に原子炉を緊急に停止し、残留熱を除去し、原子炉冷却材圧力バウンダリの過圧を防止し、敷地周辺公衆への過度の放射線の影響を防止する構築物、系統及び機器 4) 原子炉停止後の除熱機能	残留熱を除去する系統（残留熱除去系（原子炉停止時冷却モード）、原子炉隔離時冷却系、高圧炉心スプレイス、逃がし機能）、自動減圧系（手動逃がし機能））	直接関連系（原子炉隔離時冷却系）	残留熱除去系（ポンプ、熱交換器、原子炉停止時冷却モードのルートとなる配管及び弁）	熱交換器バイパス配管及び弁 原子炉隔離時冷却系（ポンプ、サブレーションチェンバ、タービン、サブレーションチェンバから注水先までの配管、弁） タービンへの蒸気供給配管、弁 ポンプミニマムフローラインの配管、弁 サブレーションチェンバ内のストレーナ 復水貯蔵タンク ポンプの復水貯蔵タンクからの吸込弁 ポンプの復水貯蔵タンクからの吸込配管、弁 潤滑油冷却器及びその冷却器までの冷却水供給配管 高圧炉心スプレイス系（ポンプ、サブレーションチェンバ、サブレーションチェンバからスプレイ先までの配管、弁、スプレイスバージヤ） ポンプミニマムフローラインの配管、弁 サブレーションチェンバ内のストレーナ 復水貯蔵タンク ポンプの復水貯蔵タンクからの吸込弁 ポンプの復水貯蔵タンクからの吸込配管、弁 ポンプの復水貯蔵タンクからの吸込弁 ポンプの復水貯蔵タンクからの吸込配管、弁 直接関連系（高圧炉心スプレイス系） 主蒸気逃がし安全弁（手動逃がし機能） 直接関連系（主蒸気逃がし安全弁（手動逃がし機能）） 自動減圧系（自動減圧系（手動逃がし機能）） 直接関連系（自動減圧系（手動逃がし機能）） 自動減圧系（自動減圧系（手動逃がし機能））	○	×	×	×	R	-	
				直接関連系（残留熱除去系）		○	×	×	×	R	-	
				原子炉隔離時冷却系（ポンプ、サブレーションチェンバから注水先までの配管、弁）		○	×	×	×	R	-	
				タービンへの蒸気供給配管、弁		○	×	×	×	R	-	
				ポンプミニマムフローラインの配管、弁		○	×	×	×	R	-	
				サブレーションチェンバ内のストレーナ		○	×	×	×	R	-	
				復水貯蔵タンク		○	○	×	×	屋外	○	
				ポンプの復水貯蔵タンクからの吸込弁		○	×	×	×	R	-	
				ポンプの復水貯蔵タンクからの吸込配管、弁		○	×	×	×	R	-	
				潤滑油冷却器及びその冷却器までの冷却水供給配管		○	×	×	×	R	-	
				高圧炉心スプレイス系（ポンプ、サブレーションチェンバ、サブレーションチェンバからスプレイ先までの配管、弁、スプレイスバージヤ）		○	×	×	×	R	-	
				ポンプミニマムフローラインの配管、弁		○	×	×	×	R	-	
				サブレーションチェンバ内のストレーナ		○	×	×	×	R	-	
				復水貯蔵タンク		○	○	×	×	屋外	○	
				ポンプの復水貯蔵タンクからの吸込弁		○	×	×	×	R	-	
ポンプの復水貯蔵タンクからの吸込配管、弁	○	×	×	×	R	-						
主蒸気逃がし安全弁（手動逃がし機能）	○	×	×	×	R	-						
直接関連系（主蒸気逃がし安全弁（手動逃がし機能））	○	×	×	×	R	-						
自動減圧系（自動減圧系（手動逃がし機能））	○	×	×	×	R	-						
直接関連系（自動減圧系（手動逃がし機能））	○	×	×	×	R	-						
自動減圧系（自動減圧系（手動逃がし機能））	○	×	×	×	R	-						

※1：1＝外部事象防護対象施設等，2＝屋外設備，3＝外気と繋がる設備，4＝外殻となる施設による防護が期待できない設備
 ※2：R＝2号原子炉建屋，C＝2号制御建屋，T＝2号タービン建屋，L0＝2号地下軽油タンクピット，D＝固体廃棄物貯蔵所，HB＝補助ボイラー建屋，TSC＝緊急時対策所
 ※3：抽出の観点 1～4 の評価の結果，該当せず
 ※4：屋外にある外部事象防護対象施設の付属設備（波及的影響（機能的影響）を及ぼし得る施設）として抽出

第1表 外部事象防護対象施設等のうち評価対象施設の抽出結果 (3/7)

Q: Yes X: No —: 該当せず※3

分類	定義	機能	重要度分類指針	女川原子力発電所2号炉		設置場所 ※2	評価対象施設	備考			
				構造物、系統又は機器	抽出の観点 ^{※1}						
									STEP		
				1	2	3	4				
MS-1	1) 異常状態発生時に原子炉を緊急に停止し、残留熱を除去し、原子炉冷却材圧力バウンダリの過圧を防止し、敷地周辺公衆への過度の放射線の影響を防止する構造物、系統及び機器	5) 炉心冷却機能	非常用炉心冷却系（低圧炉心スプレイ系、低圧注水系、高圧炉心スプレイ系、自動減圧系）	残留熱除去系（低圧注水モード）（ポンプ、サブレーションチェンパイパスライン含む）、注水ヘッダ	○	×	×	R	-		
				直接関連系（残留熱除去系（低圧注水モード））	○	×	×	×	R	-	
				サブレーションチェンパイパスラインからのストレーナ	○	×	×	×	R	-	
				低圧炉心スプレイ系（ポンプ、サブレーションチェンパイパスラインからのストレーナ、サブレーションチェンパイパスラインからのストレーナ）	○	×	×	×	R	-	
				直接関連系（低圧炉心スプレイ系）	○	×	×	×	R	-	
				高圧炉心スプレイ系（ポンプ、サブレーションチェンパイパスラインからのストレーナ、サブレーションチェンパイパスラインからのストレーナ）	○	×	×	×	R	-	
				直接関連系（高圧炉心スプレイ系）	○	×	×	×	R	-	
				自動減圧系（主蒸気逃がし安全弁）	○	×	×	×	R	-	
				直接関連系（自動減圧系（主蒸気逃がし安全弁））	○	×	×	×	R	-	
				駆動用窒素源（アキウムレタから主蒸気逃がし安全弁までの配管、弁）	○	×	×	×	R	-	
				原子炉格納容器（格納容器本体、貫通部、所用エアロック、機器搬出入用ハッチ）	○	×	×	×	R	-	
				ペント管	○	×	×	×	R	-	
				スプレイ管	○	×	×	×	R	-	
				真空破壊弁	○	×	×	×	R	-	
				主蒸気逃がし安全弁排気管のクエンチャ	○	×	×	×	R	-	
		原子炉建屋（原子炉建屋原子炉棟）（ブローアウトパネル付き）	○	○	×	×	×	外施設（ブローアウトパネルについては別紙1参照）			
	直接関連系（原子炉建屋（原子炉建屋原子炉棟））	○	×	○	×	×	（原子炉棟換気空調系）				
	原子炉格納容器隔離弁及び格納容器バウンダリ配管	○	×	×	×	×					
	直接関連系（原子炉格納容器隔離弁及び格納容器バウンダリ配管）	○	×	×	×	×					
	主蒸気流量制限器	○	×	×	×	×					

※1: 1＝外部事象防護対象施設等、2＝屋外設備、3＝外気と繋がる設備、4＝外設となる施設による防護が期待できない設備

※2: R=2号原子炉建屋、C=2号制御建屋、T=2号タービン建屋、L0=2号地下軽油タンクピット、D=3号固体廃棄物貯蔵所、HB=補助ボイラー建屋、TSC=緊急時対策所。

※3: 抽出の観点1～4の評価の結果、該当せず

※4:屋外にある外部事象防護対象施設の付属設備(波及的影響(機能的影響)を及ぼし得る施設)として抽出

第1表 外部事象防護対象施設等のうち評価対象施設の抽出結果 (4/7)

○：Yes ×：No -：該当せず※3

重要度分類指針				構築物、系統又は機器	評価 対象 施設	備考							
分類	定義	機能	構築物、系統又は機器										
							抽出の観点 ^{※1}						
				STEP									
				1	2	3	4						
MS-1	1) 異常状態発生時に原子炉を緊急に停止し、残留熱を除去し、原子炉冷却材圧力バウンダリの過圧を防止し、敷地周辺公衆への過度の放射線の影響を防止する構築物、系統及び機器	6) 放射性物質の閉じ込め機能、放射線の遮へい及び放出低減機能	原子炉格納容器、原子炉格納容器隔離弁、原子炉格納容器スプレッド冷却系、原子炉建屋、非常用ガス処理系、非常用再循環ガス処理系、可燃性ガス濃度制御系	残留熱除去系（格納容器スプレッド冷却モード）（ポンプ、熱交換器、サブレンションバ、サブレンションベンパからスプレッド（ドライウエル及びサブレンションベンパ気相部）までの配管、弁、スプレッドヘッド（ドライウエル及びサブレンションベンパ））	○	×	×	×	R	-			
				直接関連系 （残留熱除去系（格納容器スプレッド冷却モード））	○	×	×	×	×	R	-		
				非常用ガス処理系（乾燥装置、排風機、フィルタ装置、原子炉建屋原子炉棟吸込口から排気筒までの配管、弁）	○	○	×	×	×	屋外	○	一部の屋外配管	
				直接関連系 （非常用ガス処理系）	○	×	×	×	×	R	-		
				可燃性ガス濃度制御系（再結合装置、格納容器から再結合装置までの配管、弁、再結合装置から格納容器までの配管、弁）	○	×	×	×	×	R	-		
				直接関連系 （可燃性ガス濃度制御系）	○	×	×	×	×	R	-		
				残留熱除去系（再結合装置への冷却水供給をつかさどる部分）	○	×	×	×	×	R	-		
				遮へい設備（原子炉遮へい壁、一次遮へい壁、二次遮へい壁）	○	×	×	×	×	R	-		
				原子炉停止系への作動信号の発生機構 ・原子炉保護系の安全保護回路	○	×	×	×	×	R, C	-		
				工学的安全施設への作動信号の発生機構 ・非常用炉心冷却系作動の安全保護回路 ・主蒸気隔離の安全保護回路 ・原子炉格納容器隔離の安全保護回路 ・非常用ガス処理系作動の安全保護回路	○	×	×	×	×	R, C	-		
	2) 安全上必須なその他の構築物、系統及び機器	1) 工学的安全施設及び原子炉停止系への作動信号の発生機能 2) 安全上特に重要な関連機能	安全保護系 非常用所内電源系、制御室及びその遮へい、非常用換気空調系、非常用補機冷却水系、直流通電源系（いずれも、MS-1 関連のもの）	非常用所内電源設備（ディーゼル機関、発電機、発電機から非常用負荷までの配電設備及び電路）	○	×	○	○	R	○	関連設備として原子炉補機室換気空調系を抽出		
				燃料系（デایتンクからディーゼル機関まで）	○	×	×	×	×	R _{屋外}	-	燃料油ドレンタンクミスト配管※4	
				始動用空気系（空気だめからディーゼル機関まで）	○	×	×	×	×	R	-		
				吸気系	○	×	×	×	×	R _{屋外}	-	排気消音器※4	
				冷却水系	○	×	×	×	×	R	-		
				潤滑油系	○	×	×	×	×	R _{屋外}	-	機関ミスト配管、潤滑油サンプタンクミスト配管、潤滑油供給タンクミスト配管※4	
				燃料移送系（軽油タンクからデایتンクまで）	○	×	×	×	×	R _{屋外}	-	燃料デایتンクミスト配管※4	
				軽油タンク	○	×	×	○	×	L0 _{屋外}	○	軽油タンクベント配管※4	

※1：1＝外部事象防護対象施設等、2＝屋外設備、3＝外気と繋がる設備、4＝外殻となる施設による防護が期待できない設備
 ※2：R＝2号原子炉建屋、C＝2号制御建屋、T＝2号タービン建屋、L0＝2号地下軽油タンクピット、D＝固体廃棄物貯蔵所、HB＝補助ボイラー建屋、TSC＝緊急時対策所
 ※3：抽出の観点1～4の評価の結果、該当せず
 ※4：屋外にある外部事象防護対象施設の付属設備（波及的影響（機能的影響）を及ぼし得る施設）として抽出

第1表 外部事象防護対象施設等のうち評価対象施設の抽出結果 (5/7)

○：Yes ×：No -：該当せず※3

重要度分類指針			機能	定義	分類											
構造物，系統又は機器																
MS-1	中央制御室及び中央制御室遮へい		非常用所内電源系，制御室及びその遮へい，非常用換気空調系，非常用補機冷却水系，直流電源系（いずれも，MS-1 関連のもの）	構造物，系統又は機器	女川原子力発電所2号炉	抽出の観点 ^{※1}				設置場所 ^{※2}	評価対象施設	備考				
	構造物，系統又は機器			STEP												
	中央制御室及び中央制御室遮へい	中央制御室換気空調系（放射線防護機能及び有毒ガス防護機能）（再循環送風機，再循環フィルタ装置，空気調和装置，送風機，排風機，ダクト及びダンパ）		原子炉補機冷却水系（ポンプ，熱交換器，非常用系負荷冷却ライン配管，弁（MS-1 関連））	直接関連系（原子炉補機冷却水系）	高圧炉心スプレィ補機冷却水系（ポンプ，熱交換器，配管，弁）	直接関連系（高圧炉心スプレィ補機冷却水系）	原子炉補機冷却海水系（ポンプ，配管，弁，ストレーナ（MS-1 関連））	直接関連系（原子炉補機冷却海水系）	高圧炉心スプレィ補機冷却海水系（ポンプ，配管，弁，ストレーナ）	直接関連系（高圧炉心スプレィ補機冷却海水系）	直流通電設備（蓄電池，蓄電池から非常用負荷までの配電設備及び電路（MS-1 関連））	計測制御用電源設備（蓄電池から非常用計測制御装置までの配電設備及び電路（MS-1 関連））	原子炉冷却材浄化系（原子炉冷却材圧力バウンダリ以外の部分）	主蒸気系（原子炉冷却材圧力バウンダリ以外の部分）	原子炉隔離時冷却系（原子炉冷却材圧力バウンダリ以外の部分でタービン止め弁まで）
	○	○		○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
	×	×		×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×
	×	○		×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×
	×	×		×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×
	×	×		×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×
	×	×		×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×
	×	×		×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×
×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×		
×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×		
×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×		
×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×		
×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×		
×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×		
×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×		
×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×		
×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×		
×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×		
×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×		
×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×		
×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×		
×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×		
×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×		
×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×		
×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×		
×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×		
×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×		
×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×		
×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×		
×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×		
×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×		
×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×		
×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×		
×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×		
×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×		
×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×		
×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×		
×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×		
×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×		
×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×		
×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×		
×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×		
×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×		
×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×		
×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×		
×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×		
×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×		
×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×		
×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×		
×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×		
×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×		
×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×		
×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×		
×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×		
×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×		
×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×		
×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×		
×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×		
×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×		
×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×		
×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×		
×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×		
×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×		
×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×		
×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×		
×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×		
×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×		
×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×		
×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×		
×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×		
×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×		
×																

※1：1＝、2＝屋外設備、3＝外気と繋がる設備、4＝外殻となる施設による防護が期待できない設備
 ※2：R＝2号原子炉建屋、C＝2号制御建屋、T＝2号タービン建屋、L0＝2号地下圧油タンクピット、D＝固体廃棄物貯蔵所、HB＝補助ボイラー建屋、TSC＝緊急時対策所
 ※3：抽出の観点1～4の評価の結果、該当せず
 ※4：屋外にある外部事象防護対象施設の付属設備（波及的影響（機能的影響）を及ぼし得る施設）として抽出

第1表 外部事象防護対象施設等のうち評価対象施設の抽出結果 (6/7)

○：Yes ×：No -：該当せず※3

重要度分類指針				女川原子力発電所2号炉 構築物、系統又は機器	抽出の観点 ^{※1}				設置 場所 ^{※2}	評価 対象 施設	備考		
分類	定義	機能	構築物、系統又は機器		STEP								
					1	2	3	4					
PS-2	1) その損傷又は故障により発生する事象によつて、炉心の著しい損傷又は燃料の大量の破損を直ちに引き起こすおそれはないが、敷地外への過度の放射性物質の放出のおそれのある構築物、系統及び機器	2) 原子炉冷却材圧力バウンダリに直接接続されているものであって、放射性物質を貯蔵する機能	放射性廃棄物処理施設（放射能インベントリの大きいもの）、使用済燃料プール（使用済燃料貯蔵ラックを含む。）	気体廃棄物処理系（活性炭式希ガスホルドアップ装置） 使用済燃料プール（使用済燃料貯蔵ラックを含む） 新燃料貯蔵庫（臨界を防止する機能）（新燃料貯蔵ラック）				○	×	×	T	-	
		3) 燃料を安全に取り扱う機能	燃料取扱設備	燃料交換機	原子炉建屋クレーン	○	×	×	×	R	-		
					直接関連系（燃料取扱設備）	○	×	×	×	R	-		
					原子炉ウエル	○	×	×	×	R	-		
					主蒸気逃がし安全弁（吹き止まり機能）	○	×	×	×	R	-		
MS-2	1) PS-2の構築物、系統及び機器の損傷又は故障により敷地周辺公衆に与える放射線の影響を十分小さくするようにする構築物、系統及び機器	1) 燃料プールの補給機能	非常用補給水系	残留熱除去系（ポンプ、サブレッションチェンバ、サブレッションチェンバ内のストレーナから燃料プールまでの配管、弁） 直接関連系（残留熱除去系）	○	×	×	×	R	-			
		2) 放射性物質放出の防止機能	放射性気体廃棄物処理系の隔離弁、排気筒（非常用ガス処理系排気管の支持機能以外） 燃料集合体落下事故時放射能放出を低減する系	ポンプミニマムフローラインの配管、弁 サブレッションチェンバ内のストレーナ	○	×	×	×	R	-			
				気体廃棄物処理系の隔離弁 排気筒	○	×	×	×	T	-			
				燃料プール冷却浄化系の燃料プール注入逆止弁	○	×	×	×	R	-			
				原子炉建屋（原子炉建屋原子炉棟（ブローアウトパネル付き）） 直接関連系（原子炉建屋原子炉棟） 非常用ガス処理系（乾燥装置、排風機、フィルタ装置、原子炉建屋原子炉棟吸込口から排気筒までの配管、弁） 直接関連系（非常用ガス処理系） 乾燥装置（乾燥機能部分）	○	×	×	×	屋外	○	（原子炉棟換気空調系） 一部の屋外配管		

※1：1＝外部事象防護対象施設等、2＝屋外設備、3＝外気と繋がる設備、4＝外設となる施設による防護が期待できない設備
 ※2：R＝2号原子炉建屋、C＝2号制御建屋、T＝2号タービン建屋、L0＝2号地下軽油タンクピット、D＝固体廃棄物貯蔵所、HB＝補助ボイラー建屋、TSC＝緊急時対策所
 ※3：抽出の観点1～4の評価の結果、該当せず
 ※4：屋外にある外部事象防護対象施設付属設備（波及的影響（機能的影響）を及ぼし得る施設）として抽出

第 1 表 外部事象防護対象施設等のうち評価対象施設の抽出結果 (7/7)

○：Yes ×：No -：該当せず※3

重要度分類指針			女川原子力発電所 2 号炉		抽出の観点※1				設置場所※2	評価対象施設	備考
分類	定義	機能	構造物、系統又は機器	機能	STEP						
					1	2	3	4			
MS-2	2) 異常状態への対応上特に重要な構造物、系統及び機器	1) 事故時のプラント状態の把握機能 2) 異常状態への対応上特に重要な構造物、系統及び機器	構造物、系統又は機器 事故時監視計器の一部	中性子束（起動領域モニタ） ・原子炉スクラム用電磁接触器の状態 ・制御棒位置 ・原子炉水位（広帯域、燃料域） ・原子炉圧力 ・原子炉格納容器圧力 ・サブプレッションプール水温度 ・格納容器内雰囲気モニタ（放射線レベル） [低温停止への移行] ・原子炉圧力 ・原子炉水位（広帯域） [ドライウエルスブレイ] ・原子炉水位（広帯域、燃料域） ・原子炉格納容器圧力 [サブプレッションチェンバ冷却] ・原子炉水位（広帯域、燃料域） ・サブプレッションプール水温度 [可燃性ガス濃度制御系起動] ・格納容器内雰囲気モニタ（水素・酸素濃度）（対象外） 中央制御室外原子炉停止装置	○	×	×	×	R, C	-	
					○	×	×	×	R, C	-	
					○	×	×	×	R, C	-	
					○	×	×	×	R, C	-	
					○	×	×	×	R, C	-	
MS-3	2) 異常状態への対応上必要な構造物、系統及び機器	1) 緊急時対策上重要なもの及び異常状態の把握機能 2) 緊急時対策上重要なもの及び異常状態の把握機能 3) 制御室外からの安全停止機能	原子力発電所緊急時対策所、試料採取系、通信連絡設備、放射能監視設備、事故時監視計器の一部、消火系、安全避難通路、非常用照明	放射線監視設備（気体廃棄物処理設備排気放射線モニタ） 2 号制御建屋 2 号タービン建屋 2 号地下軽油タンクピット	○	×	×	×	T	-	
					○	×	×	×		○	外殻施設
					○	×	×	×		○	外殻施設
					○	×	×	×		○	外殻施設

※1：1＝、2＝屋外設備、3＝外気と繋がる設備、4＝外殻となる施設による防護が期待できない設備
 ※2：R＝2 号原子炉建屋、C＝2 号制御建屋、T＝2 号タービン建屋、L0＝2 号地下軽油タンクピット、D＝固体廃棄物貯蔵所、HB＝補助ボイラー建屋、TSC＝緊急時対策所
 ※3：抽出の観点 1～4 の評価の結果、該当せず
 ※4：屋外にある外部事象防護対象施設の付属設備（波及的影響（機能的影響）を及ぼし得る施設）として抽出

○津波防護施設等については、評価対象施設等に抽出されないが、別紙 2 に示すとおり、女川原子力発電所の津波防護施設等については、基準津波の高さや防護範囲の広さ等その重要性に鑑み、自主的に機能維持のための配慮を行う。

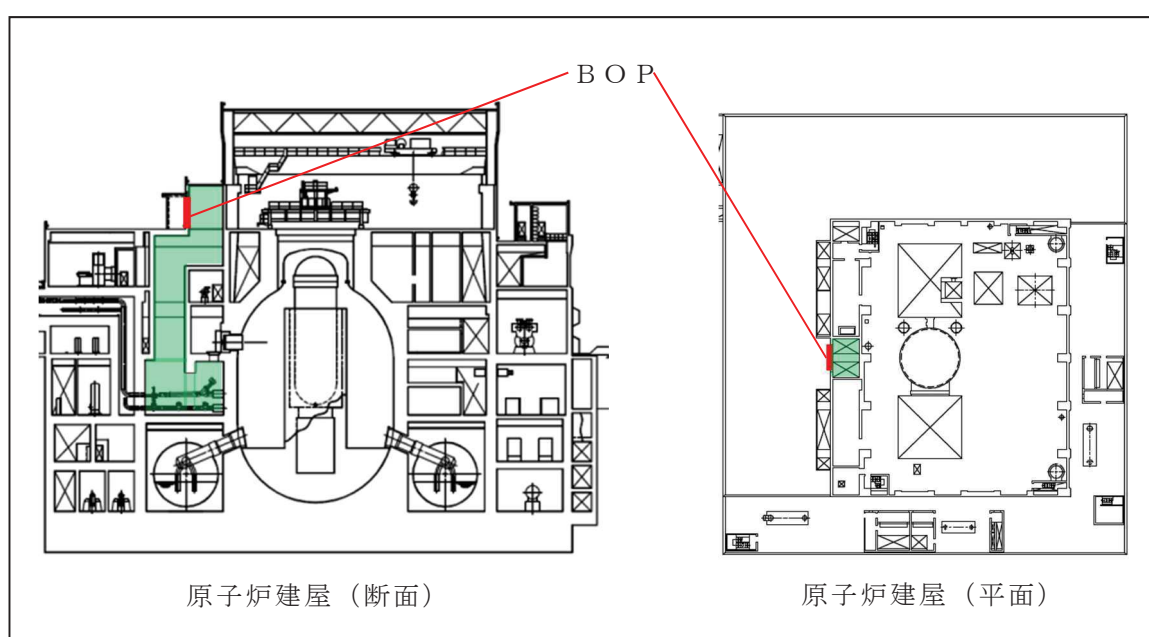
原子炉建屋ブローアウトパネルに対する対応方針について

1. はじめに

原子炉建屋原子炉棟外壁に設置されているブローアウトパネル（以下「BOP」という。）の竜巻に対する対応方針について整理した。

2. BOPの設置状況について

屋外境界のBOPは原子炉建屋原子炉棟 3 階の 1 箇所に設置されている。図 1 に設置状況を示す。



BOP外観（屋外から撮影）



BOP外観（建屋内から撮影）

図 1 BOPの設置状況

3. BOPの開放に伴う影響評価

BOPが開放した場合に、竜巻の影響を受ける可能性があるMSトンネル室内の外部事象防護対象施設の設置状況は図2のとおりである。

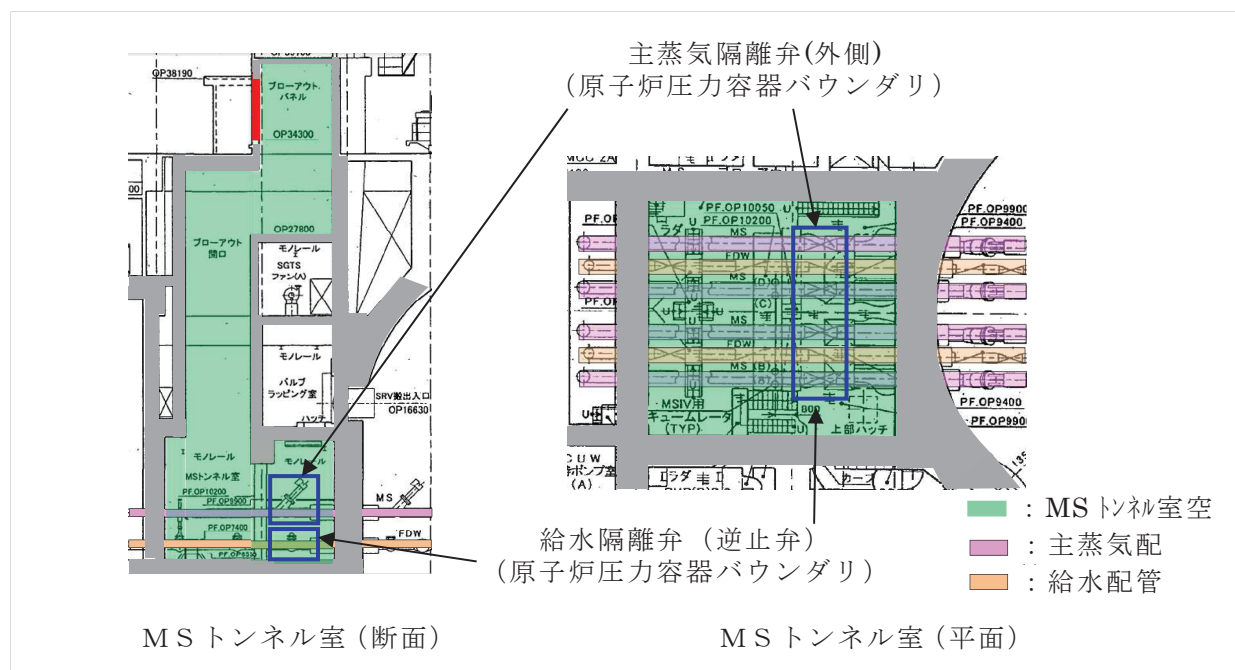


図2 MSトンネル室内の外部事象防護対象施設の設置状況

BOPが開放、損傷した場合に、BOP開放部から原子炉建屋内部（MSトンネル室）に作用し得る竜巻に関連する荷重を表1に示す。

表1 BOP開口部からMSトンネル室に作用し得る竜巻に関連する荷重

荷重		評価	考慮の 要否
風圧力による荷重 (W_w)		同一区画に外気に対して開放するBOPが1枚のみであり、流路が形成されないため考慮不要	否
気圧差による荷重 (W_p)		MSトンネル室には、密閉され気圧差の影響を受ける設備がないため考慮不要	否
設計飛来物による 衝撃荷重 (W_m)		開口部付近に外部事象防護対象施設はないため設計飛来物による影響の考慮不要。 なお、BOP開放により開口部に設計飛来物「砂利」が侵入した場合でも、隔離弁駆動部等の動的機能を有する設備は、図2のとおり影響を受ける配置ではない	否
随伴 事象	雷	建屋開口部から雷の侵入は考え難いため考慮不要	否
	降水	雨の影響は開口部近傍に限られるとともに、特に重要な安全機能を有する設備への影響は、内部溢水評価に包含されることから、影響はない	否
	雹	施設への影響がない設計飛来物である「砂利」と寸法及び運動エネルギーが同程度であり、施設への影響はない	否

4. 安全機能への影響と対応方針

竜巻襲来時にBOPに想定される状態、プラントへの影響及び対応方針を整理した結果を表2に示す。プラントへの影響を踏まえて以下の対応を行うことにより、安全機能を損なわないことを確認した。

表2 BOPの竜巻影響について

竜巻襲来時の BOPの状態	プラントへの影響	対応方針
気圧差による開放	原子炉建屋原子炉棟の閉じ込め機能の喪失が考えられるが、竜巻と設計基準事故が同時に発生する頻度は十分小さい	開放した場合は速やかにプラント停止し、補修を行う
	建屋内部の評価対象施設への竜巻荷重（風圧力）の影響	各評価対象施設は、風圧力により安全機能を損なわない設計とする
飛来物による損傷（貫通）	原子炉建屋原子炉棟の閉じ込め機能の喪失が考えられるが、竜巻と設計基準事故が同時に発生する頻度は十分小さい	貫通した場合は速やかにプラント停止し、補修を行う
	飛来物の侵入による、建屋内部の外部事象防護対象施設の損傷	損傷により、裏面の外部事象防護対象施設の安全機能に影響を及ぼさない設計とする

以 上

外部事象に対する津波防護施設，浸水防止設備
及び津波監視設備の防護方針について

1. 概要

津波防護施設，浸水防止設備及び津波監視設備（以下「津波防護施設等」という。）の外部事象に対する防護方針を以下に示す。

2. 防護に関する考え方

以下の考え方に基づき，女川原子力発電所において設計上考慮すべき外部事象に対する津波防護施設等の機能維持のための対応の要否について整理した。

外部事象に対する津波防護施設等の機能維持対応要否判断フローを図 1 に示す。

- （1）設計上考慮すべき事象が，津波若しくは津波の随伴，重畳が否定できない事象に該当するかを確認する。定量的な重畳確率が求められない事象については，保守的にその影響を考慮する。
- （2）津波の随伴，重畳が否定できない場合は，当該事象による津波防護施設の機能喪失モードの有無を確認する。機能喪失モードが認められる場合は，設計により健全性を確保する。
- （3）津波の随伴，重畳が有意でないと評価される事象についても，女川原子力発電所の津波防護施設については，基準津波の高さや防護範囲の広さ等その重要性に鑑み，自主的に機能維持のための配慮を行う。

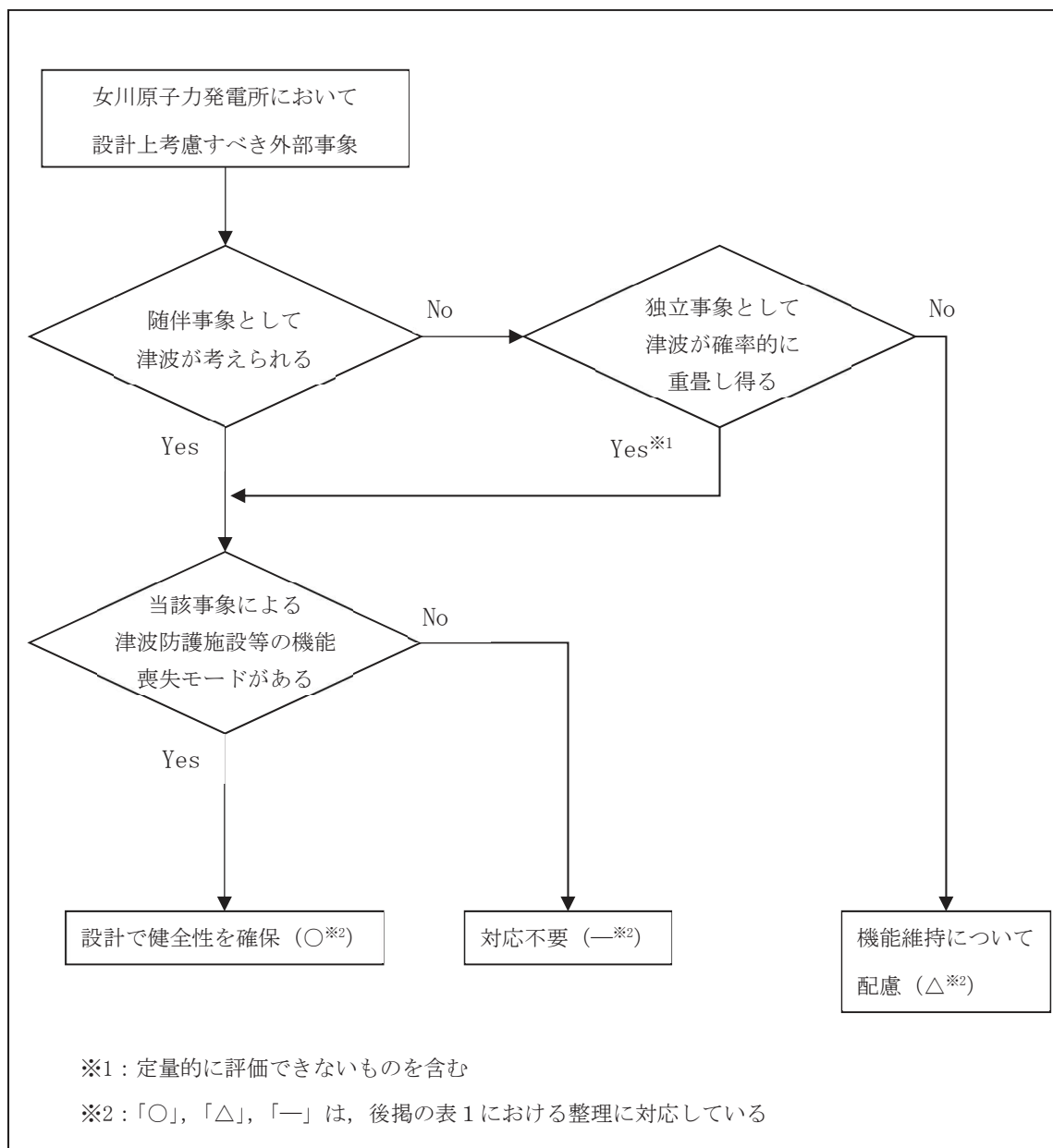


図1 外部事象に対する津波防護施設等の機能維持対応要否判断フロー

3. 検討結果

上記フローに基づく各事象に対する防護方針の検討結果を以下に示す。

(詳細は表 1 のとおり)

(1) 津波の随伴、重畳が否定できない事象^{※1}に対する防護方針

これらの外部事象に対しては、津波との随伴若しくは重畳の可能性を否定できないため、荷重の重ね合わせのタイミングも考慮した上で設計への反映の要否を検討し、津波防護施設等への影響が考えられる事象に対しては、津波防護施設等の機能を維持する設計とする。

※1:地震、風(台風)、凍結、降水、積雪、落雷、森林火災

(2) 津波の随伴、重畳が有意ではない事象(竜巻、火山の影響)に対する防護方針

「竜巻」、「火山の影響」の2つの外部事象に津波は随伴せず、また、基準津波との重畳の確率も有意ではないため、津波防護施設等を防護対象施設とはしないものの、津波防護施設等の機能が要求される時にはその機能を期待できるように以下の対応を自主的に実施する。

a. 竜巻

設計竜巻と基準津波が重畳する年超過確率は約 $1.9 \times 10^{-12} \sim 1.9 \times 10^{-13}$ (/年)であり、竜巻と津波の重畳は有意ではないと評価されるが、竜巻が襲来した場合には必ず作用する風荷重に対しては、津波防護施設等の健全性を維持する設計とする。また、竜巻が襲来した場合でも、必ずしも津波防護施設に作用するとは限らない竜巻飛来物の衝撃荷重に対しては、大規模な損傷に至り難い構造とする。

b. 火山の影響

設計で想定する降下火砕物の噴火と基準津波が重畳する年超過確率は約 $1.2 \times 10^{-10} \sim 1.2 \times 10^{-11}$ (/年)^{※2}であり、火山の影響と基準津波の重畳は有意ではないと評価されるが、降下火砕物の堆積荷重について長期荷重に対する構造健全性を確保するとともに、降灰後に適宜除去が可能な設計とする。

※2:噴火については約1万2千年前の肘折尾花沢噴火を考慮

	：津波の随伴，重量が否定できないため，設計で健全性を確保する事象（○）
	：津波の随伴，重量は有意ではないが，機能維持について設計上配慮する事象（△）
	：対応が不要な事象（—）

表 1 外部事象に対する津波防護施設等の対応方針整理表（1/2）

設計上考慮すべき外部事象	① 随伴事象として 津波を考慮要	② 独立事象として 津波が重量し得る	津波との重量 を考慮要 (①か②が○)	津波防護施設の機能喪失による 安全施設等の機能喪失の可能性	設計への 反映要否	機能維持のための対応方針
地震	○	—	○	あり 地震荷重により損傷した場合，安全施設等への津波の到達，浸水による機能喪失が想定される。	○	耐震 S クラスとして基準地震動 S_s に対し健全性を維持し，津波に対する防護機能を維持する。 また，津波と余震の組み合わせも考慮する。
風（台風）	—	○	○	あり 風荷重により損傷した場合，安全施設等への津波の到達，浸水による機能喪失が想定される。	○	・風荷重，津波荷重を考慮した設計とする。 ・津波監視カメラ ^{*1} は，風荷重を考慮した設計とする。
竜巻	—	—	—	なし 以下のとおり，重量の頻度は無視し得る。 ・設計竜巻の確率：約 1.9×10^{-6} /年 ・基準津波の年超過確率 ： $1 \times 10^{-6} \sim 1 \times 10^{-7}$ /年 ⇒重量確率：約 $1.9 \times 10^{-12} \sim 1.9 \times 10^{-13}$ /年 年超過確率が 1×10^{-7} /年未満であり，有意ではない。	△	防潮堤・防潮壁の設計においては，自主的に以下の配慮を行い，信頼性を高める。 ・風圧力に対しては，健全性を維持する設計とする。 ・飛来物については，大規模な損傷に至り難い構造とする。 ・津波監視カメラ ^{*1} は，風荷重を考慮した設計とする。
凍結	—	○	○	あり 凍害により止水目地が損傷した場合，安全施設への津波の到達，浸水による機能喪失が想定される。	○	止水目地は最低気温を考慮した設計とする。

*1：津波監視カメラを含めた監視カメラの外部事象に対する考えは別紙 3 参照

	：津波の随伴，重量が否定できないため，設計で健全性を確保する事象（○）
	：津波の随伴，重量は有意ではないが，機能維持について設計上配慮する事象（△）
	：対応が不要な事象（—）

表 1 外部事象に対する津波防護施設等の対応方針整理表 (2/2)

設計上考慮すべき外部事象	① 随伴事象として 津波を考慮要	② 独立事象として 津波が重畳し得る	津波との重量 を考慮要 (①か②が○)	津波防護施設の機能喪失による 安全施設等の機能喪失の可能性	設計への 反映要否	機能維持のための対応方針
降水	—	○	○	なし 降雨による海水面上昇の影響は無視し得る。	—	—
積雪	—	○	○	あり 積雪荷重により損傷した場合，安全施設等への津波の到達，浸水による機能喪失が想定される。	○	積雪荷重と津波荷重を考慮した設計とする。
落雷	—	○	○	あり 落雷による津波監視設備の機能喪失が想定される。	○	津波監視設備については，既設避雷設備の遮へい範囲内への設置を行う。
火山	—	—	—	なし 以下のとおり，重量の頻度は無視し得る。 ・想定する火山の確率：約 1.2×10^{-4} / 年 ^{*2} ・基準津波の年超過確率 ： $1 \times 10^{-6} \sim 1 \times 10^{-7}$ / 年 ⇒重量確率：約 $1.2 \times 10^{-10} \sim 1.2 \times 10^{-11}$ / 年 年超過確率が 1×10^{-7} / 年未満であり，有意ではない。	△	設計にて長期荷重に対する構造健全性を確保するとともに，降灰後に降下火砕物を適宜除去が可能な設計とする。
生物学的事象	—	—	—	なし 生物による影響（閉塞，侵入）による機能喪失モードを有しない。	—	—
森林火災	—	○	○	なし 防火帯により森林との離隔距離が確保されるため，熱影響を受けることはない。	—	—

*2：噴火については約 1 万 2 千年前の肘折尾花沢噴火を考慮

竜巻影響評価における監視カメラの扱いについて

1. 概要

中央制御室には、発電用原子炉施設の外の状況を把握するために、2号炉原子炉建屋屋上他に設置した監視カメラの映像により、津波等の自然現象を昼夜にわたり監視できる設備を設置することとしている。本設備について、竜巻の影響を考慮した防護方針について以下にまとめる。

2. 竜巻影響について

(1) 設計方針

監視カメラは外部事象防護対象施設ではないが、損傷した場合でも外部事象防護対象施設に対して波及的影響を及ぼさないこと、竜巻及びその随伴事象に対して機能維持、又は竜巻及びその随伴事象による損傷を考慮して、代替設備により必要な機能を確保すること、必要に応じプラントを停止し、安全上支障のない期間に修復する等の対応により安全機能を損なわない設計としている。具体的には、竜巻発生時において監視カメラの機能を期待できるように、竜巻の風荷重（100m/s）に対し、監視カメラの構造健全性を維持する設計とする。

また、監視カメラが損傷したとしても代替設備及び措置（運転員による確認）によって、原子炉施設に影響を及ぼす可能性がある自然現象等を把握することが可能な設計としている。（図1及び表1参照）

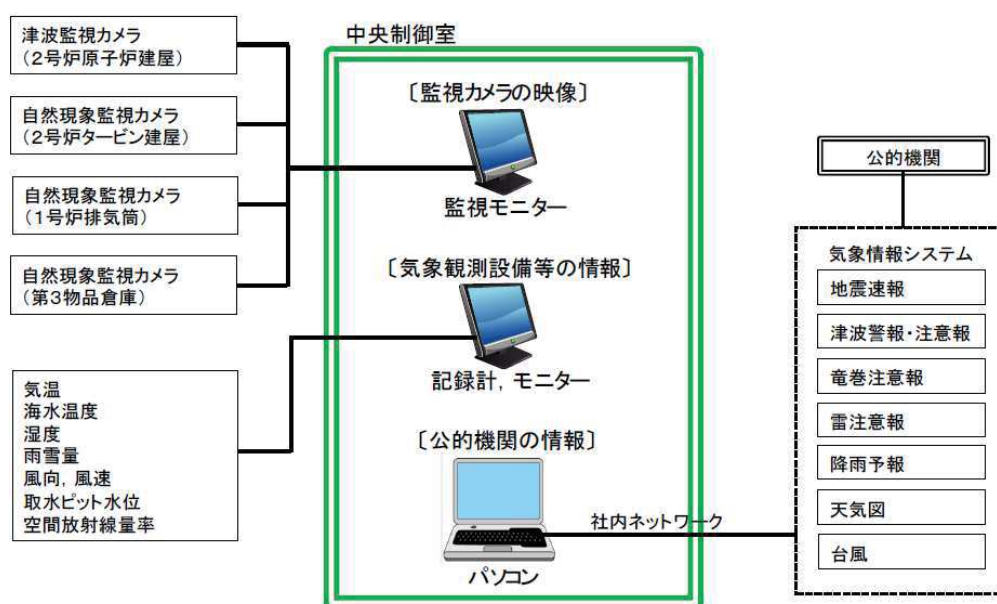


図1 中央制御室における外部状況の把握イメージ

表 1 監視カメラにより把握可能な自然現象等

自然現象等	監視カメラにより把握できる 発電用原子炉施設の外の状況	監視カメラ以外の 設備等による把握手段
地震	地震による発電所構内及び原子炉施設の損 壊状況	公的機関（地震速報）
津波	津波の襲来状況や発電所構内の浸水状況	取水ピット水位計 公的機関（津波警報・注意 報）
風（台風）	風（台風）・竜巻（飛来物含む）による発 電所構内及び原子炉施設の損壊状況	気象観測設備（風向，風速） 公的機関（台風，竜巻注意 報）
竜巻		
降水	発電所構内の浸水状況	気象観測設備（降水量）
積雪	発電所構内及び原子炉施設の積雪状況	気象観測設備（降水量）
落雷	発電所構内及び原子炉施設周辺の落雷状況	公的機関（雷注意報）
火山の影響	発電所構内及び原子炉施設の降下火砕物堆 積状況	目視確認※
生物学的事象	発電所前方の海面における海生生物（クラ ゲ等）の襲来状況	取水ピット水位計
森林火災	火災状況，ばい煙の方向確認	目視確認※
飛来物 （航空機落下）	飛来物による発電所構内及び原子炉施設の 損壊状況	目視確認※
近隣工場等の火災	火災状況，ばい煙の方向確認	目視確認※
船舶の衝突	船舶の衝突による原子炉施設の損壊状況	目視確認※

※ 建屋外で状況確認

以 上

耐震 S クラス施設について

「竜巻影響評価ガイド」においては、竜巻及びその随伴事象等によって発電用原子炉施設の安全性を損なわない設計であることを確認する施設（竜巻影響評価ガイドにおいては竜巻防護施設と定義）は「基準地震動及び耐震設計方針に係る審査ガイド」の重要度分類における耐震 S クラスの設計を要求される設備（系統、機能）及び建屋、構築物等とされている。一方、今回の竜巻影響評価では、安全重要度分類のクラス 1、クラス 2 及び安全評価上その機能に期待するクラス 3 に属する施設を外部事象防護対象施設として選定しているため、外部事象防護対象施設に該当しない耐震 S クラス施設の有無について確認した結果、第 1 表に示すとおり、津波防護施設、浸水防止設備及び津波監視設備が抽出されたが、以下の理由により、竜巻影響評価の対象として追加する必要はないと判断した。

〈津波防護施設、浸水防止設備及び津波監視設備を評価対象施設としない理由〉

- ・ 津波防護施設、浸水防止設備及び津波監視設備は、津波に対して機能を発揮する施設であり、竜巻と津波の重畳の考慮可否を検討することで、竜巻に対する機能維持の可否が判断可能である。
- ・ 竜巻及びその随伴事象によりこれらの施設が損傷することを想定した場合、基準津波に対する影響を考慮する必要があるが、津波と竜巻は発生原因が異なり独立事象であること、及び基準津波の年超過確率（ $1 \times 10^{-6} \sim 1 \times 10^{-7}$ /年）と設計竜巻（ $V_D=100\text{m/s}$ ）の発生頻度（約 1.9×10^{-6} /年）を踏まえると、敷地レベルを超える津波と設計竜巻が同時に発生する可能性は小さい。また、基準津波と設計竜巻の発生頻度を踏まえると、竜巻及びその随伴事象により津波防護施設等が損傷した場合でも当該機能が必要となる前に修復等の対応が可能と考えられる。

第1表 耐震Sクラス設備における評価対象施設の抽出結果（1/2）

耐震 重要度	機能別分類	設備別分類	構築物，系統又は機器	安全重要度 クラス1 or 2 or 3 (※1)
Sクラス	「原子炉冷却材圧力バウンダリ」を構成する配管及び機器	主要設備	・原子炉圧力容器	○
			・原子炉冷却材圧力バウンダリに関する容器・配管・ポンプ・弁	○
		補助設備	・隔離弁を閉とするに必要な電気及び計装設備	○
		直接支持構造物	・原子炉圧力容器支持スカート	○
			・機器・配管，電気計装設備等の支持構造物	○
	使用済燃料を貯蔵するための設備	主要設備	・使用済燃料プール	○
			・使用済燃料貯蔵ラック	○
	原子炉の緊急停止のために急激に負の反応度を付加するための設備及び原子炉の停止状態を維持するため設備	主要設備	・制御棒，制御棒駆動機構及び制御棒駆動水圧系（スクラム機能に関する部分）	○
		補助設備	・炉心支持構造物	○
			・電気計装設備	○
			・チャンネルボックス	○
		直接支持構造物	・機器・配管，電気計装設備等の支持構造物	○
	原子炉停止後，炉心から崩壊熱を除去するための施設	主要設備	・原子炉隔離時冷却系	○
			・高圧炉心スプレイ系	○
			・残留熱除去系（停止時冷却モード運転に必要な設備）	○
			・冷却水源としてのサブプレッションチェンバ	○
		補助設備	・当該施設の冷却系（原子炉補機冷却系）	○
			・炉心支持構造物	○
			・非常用電源及び計装設備（ディーゼル発電機及びその冷却系・補助施設を含む） ・当該施設の機能維持に必要な空調設備	○
	原子炉冷却材圧力バウンダリ破損事故後，炉心から崩壊熱を除去するために必要な設備	主要設備	・機器・配管，電気計装設備等の支持構造物	○
			・非常用炉心冷却系 1) 高圧炉心スプレイ系 2) 低圧炉心スプレイ系 3) 残留熱除去系（低圧注水モード運転に必要な設備） 4) 自動減圧系	○
		補助設備	・冷却水源としてのサブプレッションチェンバ	○
			・当該施設の冷却系（原子炉補機冷却系）	○
			・非常用電源及び計装設備（ディーゼル発電機及びその冷却系・補助施設を含む）	○
			・中央制御室の遮蔽及び空調設備 ・当該施設の機能維持に必要な空調設備	○
		直接支持構造物	・機器・配管，電気計装設備等の支持構造物	○

※1：クラス3については，安全評価上その機能に期待するものに限る。

第1表 耐震Sクラス設備における評価対象施設の抽出結果 (2/2)

耐震重要 度分類	機能別分類	設備別分類	構築物，系統又は機器	安全重要度 クラス1 or 2 or 3 (※1)
Sクラス	原子炉冷却材圧力バウン ダリ破損事故の際に圧力 障壁となり，放射性物質 の放散を直接防ぐための 設備	主要設備	・原子炉格納容器	○
			・格納容器バウンダリに属する配管・弁	○
		補助設備	・隔離弁を閉とするに必要な電気及び計装設備	○
		直接支持構造物	・機器・配管，電気計装設備等の支持構造物	○
	放射性物質の放出を伴う ような事故の際にその外 部放散を抑制するための 設備で上記(vi)以外の設 備	主要設備	・残留熱除去系（格納容器スプレイ冷却モードの運転に 必要な設備）	○
			・可燃性ガス濃度制御系	○
			・原子炉建屋原子炉棟	○
			・非常用ガス処理系及び排気筒	○
			・原子炉格納容器圧力抑制装置（ベントヘッド，ダウン カマ等）	○
			・冷却水源としてのサブプレッションチェンバ	○
		補助設備	・当該施設の冷却系（原子炉補機冷却系）	○
			・非常用電源及び計装設備（ディーゼル発電機及びその 冷却系・補助施設を含む） ・当該施設の機能維持に必要な空調設備	○
		直接支持構造物	・機器・配管，電気計装設備等の支持構造物	○
	津波防護機能を有する設 備及び浸水防止機能を有 する設備	主要設備	・津波防護施設（防潮堤，防潮壁，取放水路流路縮小工， 逆流防止設備，水密扉，浸水防止蓋，浸水防止壁，逆 止弁付ファンネル，貫通部止水処置）	該当しない
		直接支持構造物	・機器等の支持構造物	該当しない
	敷地における津波監視装 置を有する施設	主要設備	・津波監視カメラ，取水ピット水位計	該当しない
		補助設備	・非常用電源及び計装設備	○
		直接支持構造物	・機器・配管，電気計装設備等の支持構造物	—
	その他	主要設備	・燃料プール水補給設備（残留熱除去系（燃料プール冷 却運転に必要な設備）） ・ほう酸水注入系 ・压力容器内部構造物	○
		補助設備	・非常用電源及び計装設備（ディーゼル発電機及びその 冷却系・補助施設を含む）	○
		直接支持構造物	・機器・配管，電気計装設備等の支持構造物 ・原子炉压力容器	○

※1：クラス3については，安全評価上その機能に期待するものに限る。

外部事象防護対象施設に波及的影響を及ぼし得る施設の抽出について

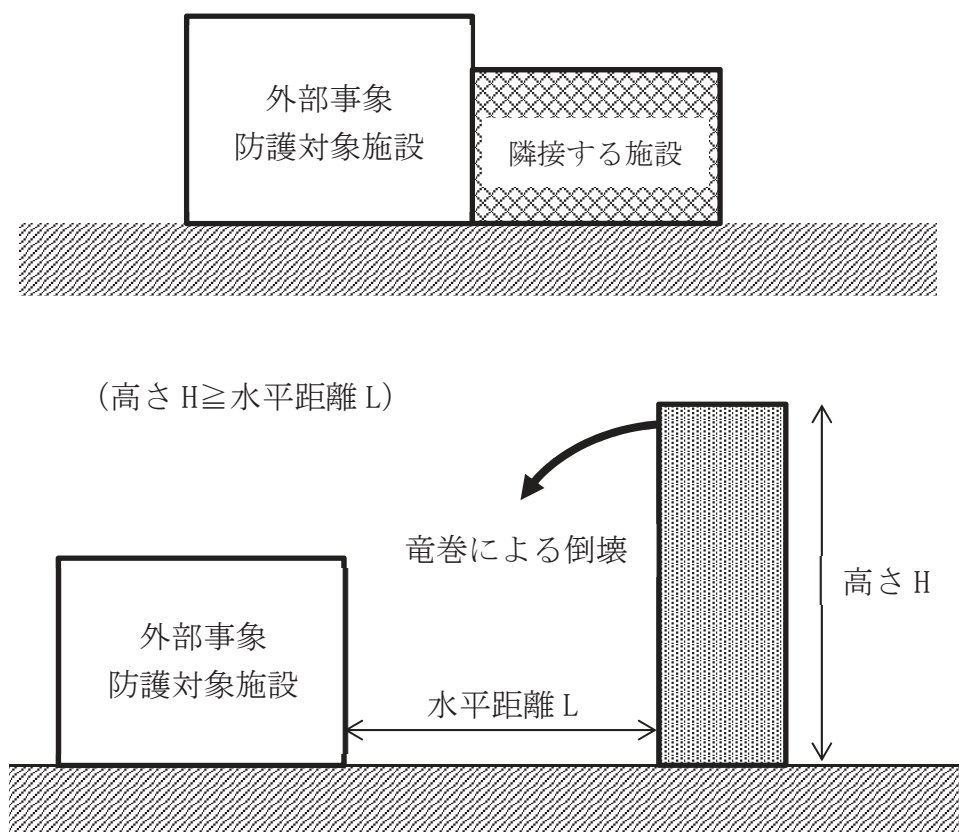
1. 抽出方針

発電所構内の構築物、系統及び機器のうち外部事象防護対象施設等を除く施設（以下「その他の施設」という。）のうち、外部事象防護対象施設に対する波及的影響として、以下の観点から波及的影響を及ぼし得る施設を抽出する。

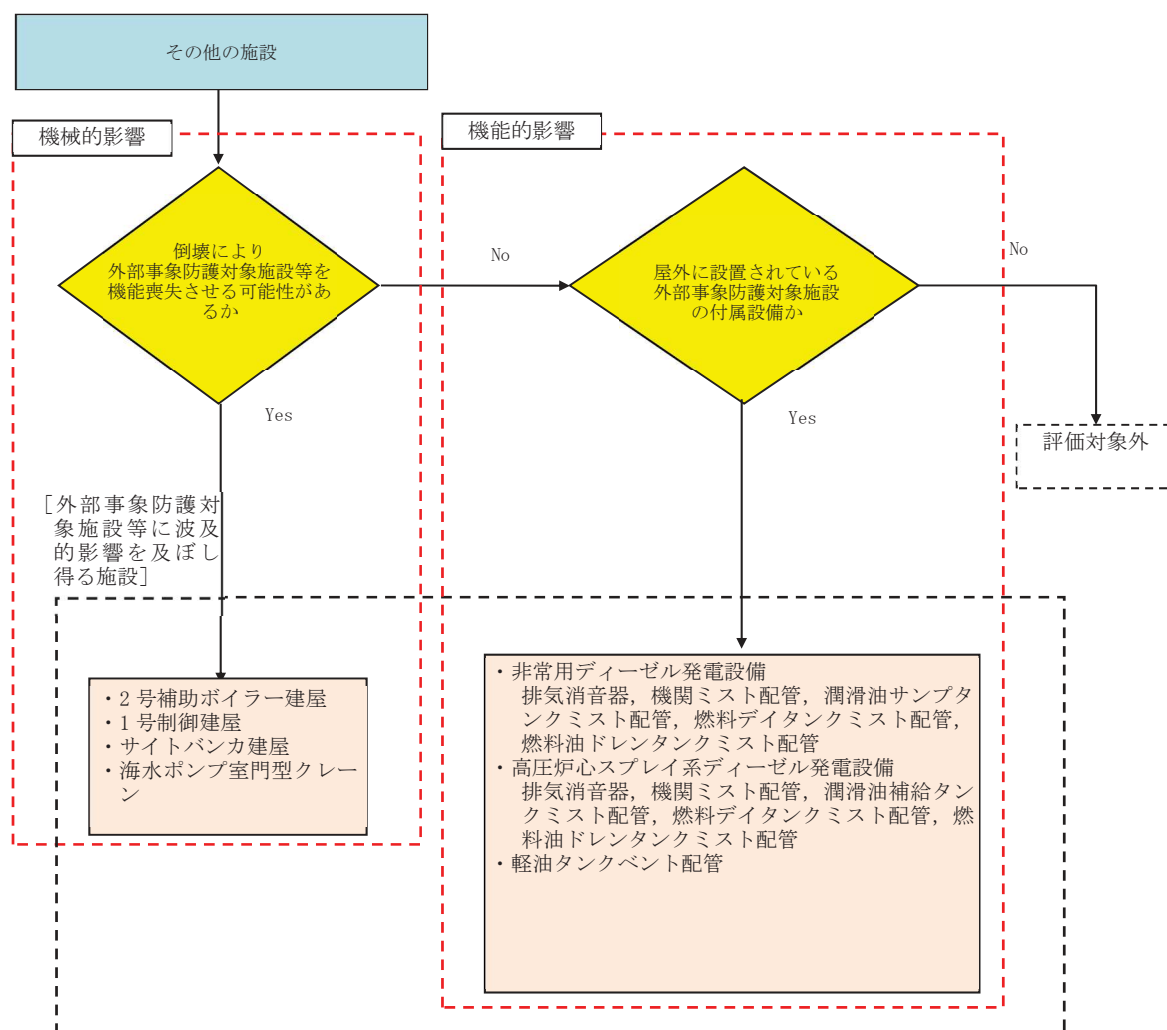
1.1 機械的影響の観点での抽出

外部事象防護対象施設に対して、機械的影響の観点から、施設が倒壊することにより、外部事象防護対象施設の機能を喪失させる可能性がある施設及び隣接する施設を抽出する。第 1.1-1 図に示すとおり、隣接施設及び施設の高さが外部事象防護対象施設との距離以上である施設を抽出した。

抽出フローを第 1.1-2 図に、抽出結果を第 1.1-1 表及び第 1.1-3 図に示す。また、抽出結果の詳細を、別紙 1「外部事象防護対象施設に波及的影響を及ぼし得る施設に係る調査結果について」に示す。



第 1.1-1 図 隣接する施設及び倒壊により外部事象防護対象施設等に損傷を及ぼし得る施設



第 1. 1-1 図 外部事象防護対象施設等に波及的影響を及ぼし得る施設の抽出フロー

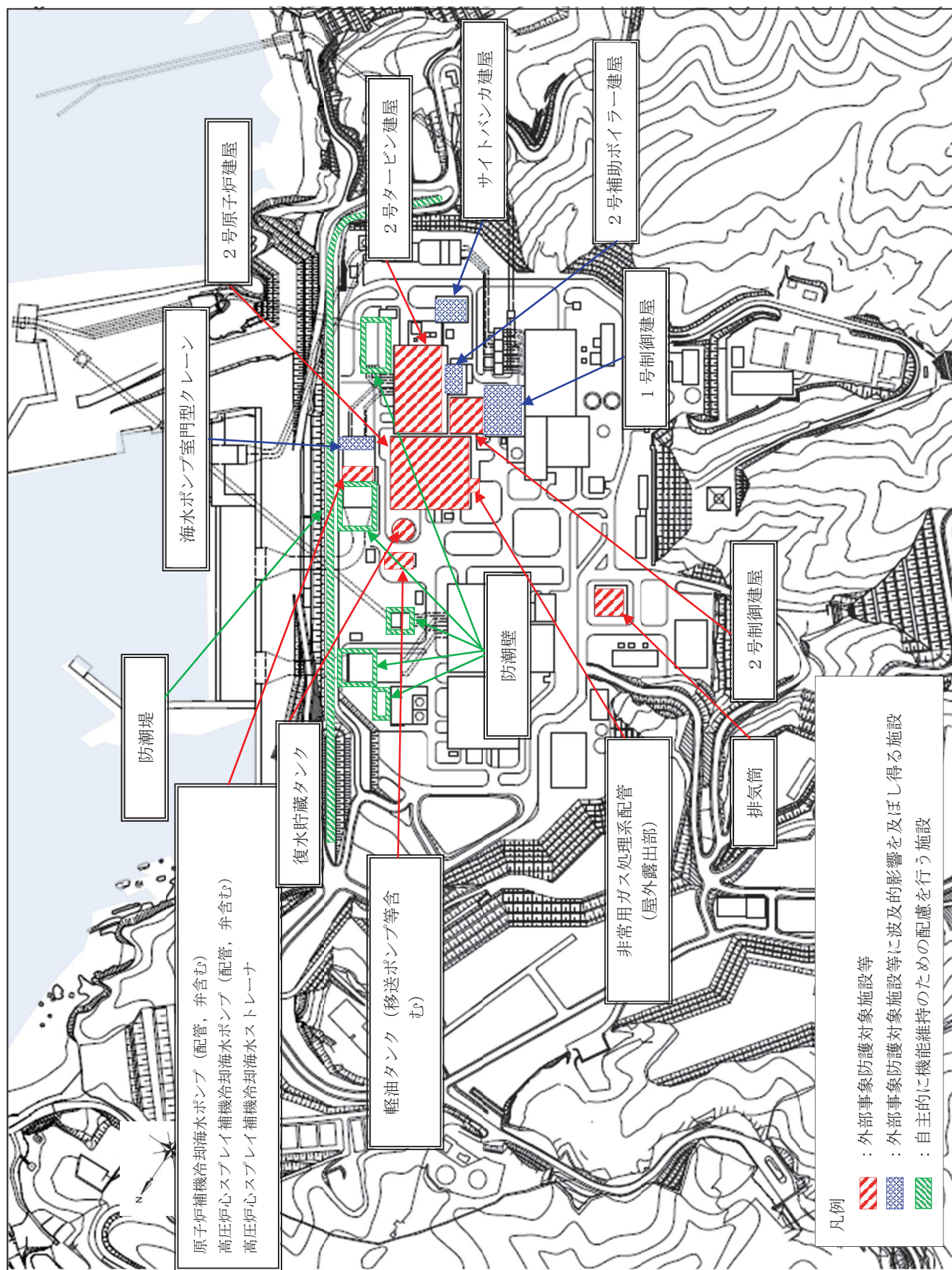
第 1.1-1 表 機械的影響の観点からの抽出結果

外部事象防護対象施設等 へ損傷を及ぼす可能性の ある建物及び構築物等	外部事象防護対象施設等	地上高 (m)	外部事象防護対象 施設等までの最短 距離 (m)	抽出 結果
1 号制御建屋	2 号制御建屋	—	隣接	○
2 号補助ボイラー建屋	2 号制御建屋 2 号タービン建屋	—	隣接	○
サイトバンカ建屋	2 号タービン建屋	約 44	約 22	○
海水ポンプ室門型 クレーン	原子炉補機冷却海水ポンプ等	約 23	約 36※ ¹	○※ ²
窒素貯槽	2 号原子炉建屋	約 4	約 9	—
VVVF 変圧器	2 号原子炉建屋	約 3	約 8	—
2 号除塵装置電源室	2 号地下軽油タンクピット	約 5	約 11	—

(注) 機械的影響の観点からの主な抽出結果を記載している。

※ 1 : 通常待機位置における最短距離

※ 2 : 海水ポンプ室門型クレーンはストッパー等により固定されているが、破損した場合には竜巻の風圧を受け移動し、原子炉補機冷却海水ポンプ等に隣接する可能性があるため抽出する



第 1.1-3 図 機械的影響の観点からの抽出結果

1. 機能的影響の観点での抽出

2.1 外部事象防護対象施設の付属施設のうち屋外にある設備

外部事象防護対象施設に対して、機能的影響の観点（「屋外にある外部事象防護対象施設の付属設備」）から、機能喪失に陥った場合に外部事象防護対象施設も機能喪失する可能性がある施設を抽出した。抽出結果を第 2.1-1 表に示す。

第 2.1-1 表 機能的影響の観点からの抽出結果

外部事象防護対象施設	屋外にある付属施設
非常用ディーゼル発電設備	排気消音器
	機関ミスト配管
	潤滑油サンプタンクミスト配管
	燃料デイトankミスト配管
	燃料油ドレンタンクミスト配管
高圧炉心スプレイ系ディーゼル発電設備	排気消音器
	機関ミスト配管
	潤滑油補給タンクミスト配管
	燃料デイトankミスト配管
	燃料油ドレンタンクミスト配管
軽油タンク	軽油タンクベント配管

外部事象防護対象施設に波及的影響を及ぼし得る施設に係る
調査結果について

女川原子力発電所における波及的影響を及ぼし得る施設に係るウォークダウンは、平成 25 年 9 月 10 日～12 日、平成 27 年 2 月 12 日～13 日に実施した。

調査では、外部事象防護対象施設及び外部事象防護対象施設の外殻に波及的影響を及ぼし得る施設を抽出し、倒壊による影響を及ぼす可能性について確認を行った。

1. 調査範囲

外部事象防護対象施設等の周りの最も高い建物である事務建屋の高さを基準として、約 40m の範囲とした。

2. 調査方法

調査範囲内にある施設について、外部事象防護対象施設等の周辺の状況を確認し、隣接施設及び比較的近接している施設を抽出するとともに、倒壊による影響の可能性の観点から寸法測定、設置場所の確認、写真撮影等を行った。具体的な内容については以下のとおり。

(1) 寸法測定

外部事象防護対象施設等からの離隔距離の測定、対象物の平面寸法及び高さを、計測器による測定及び図面等により確認した。

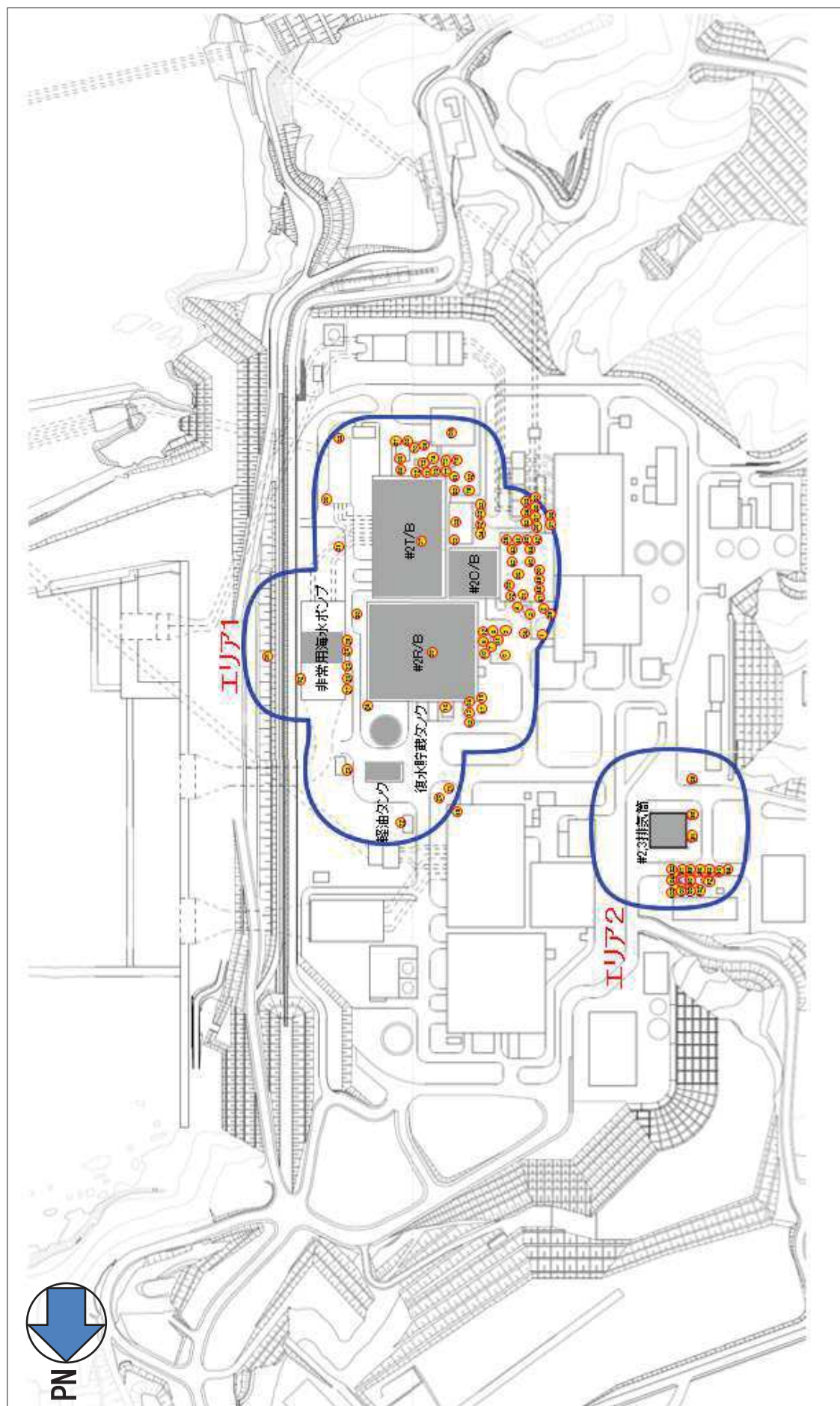
(2) 設置場所

確認した施設について、配置図の作成及び、写真撮影を実施した。

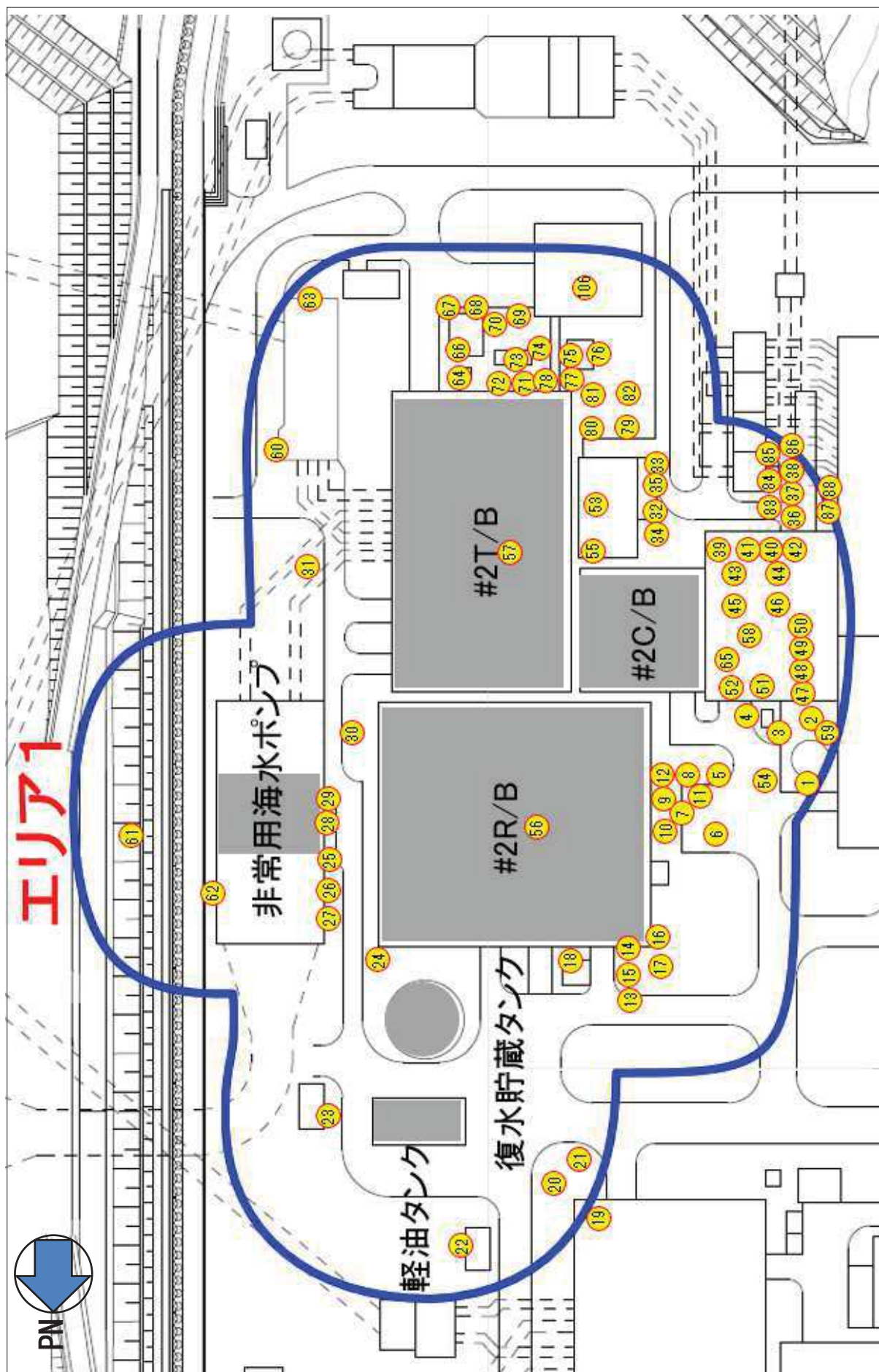
その他、現地で確認できない情報（重量、寸法等）については、設計図書等により確認した。

3. 調査結果

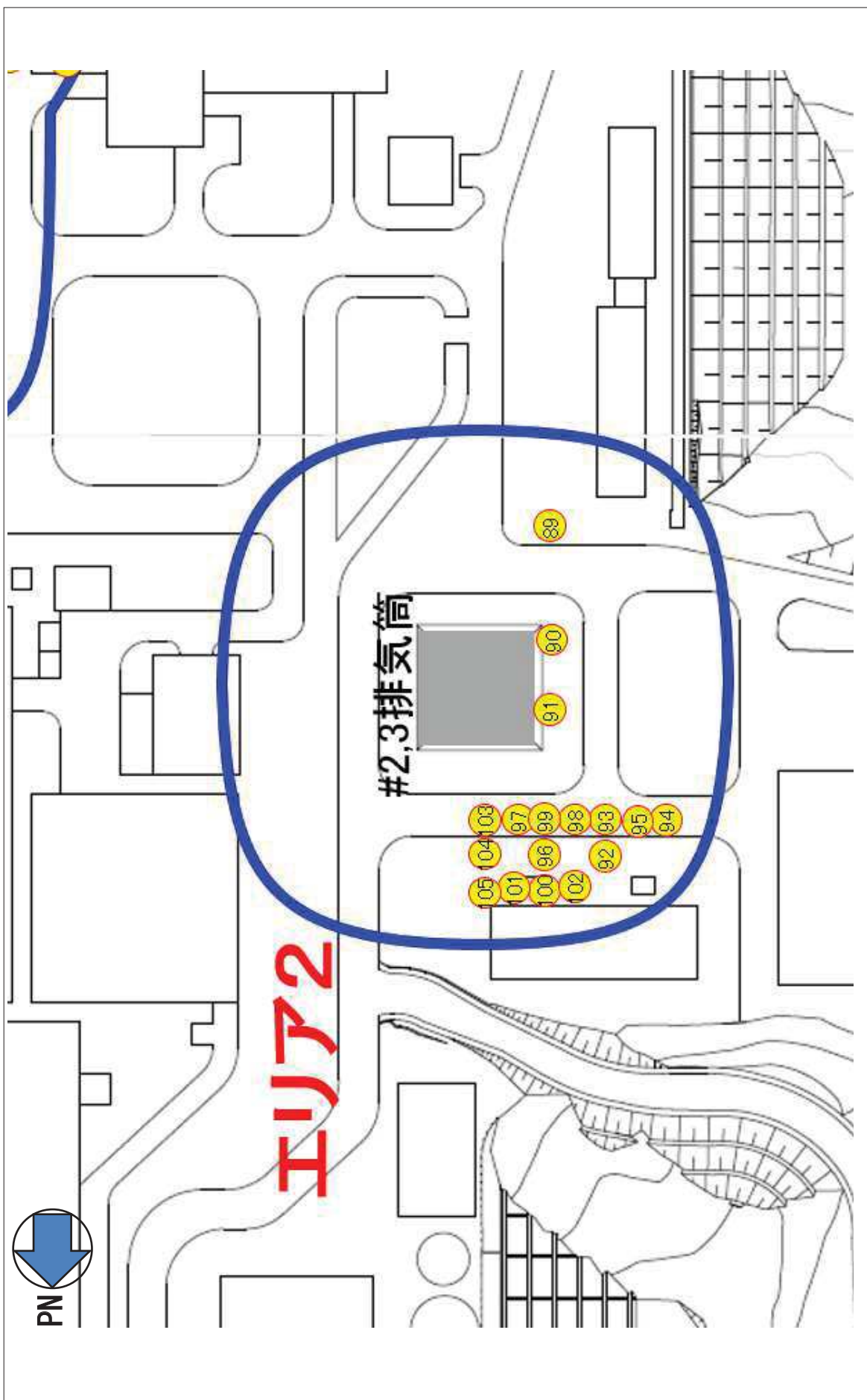
本調査で抽出された、波及的影響を及ぼし得る施設を第 3-1 図～第 3-3 図及び第 3-1 表～第 3-3 表に示す。外部事象防護対象施設等から約 40m の範囲内に設置されている設備及び建物・構築物として 106 施設を抽出し、それらについて第 3-4 図のフローに基づいて評価を行った。その結果、外部事象防護対象施設に波及的影響を及ぼし得る施設の評価対象として、1 号制御建屋、2 号補助ボイラー建屋、サイトバンカ建屋及び海水ポンプ室門型クレーンに加え、基準津波の高さや防護範囲の広さ等の重要性に鑑み自主的に機能維持のための配慮を行う防潮堤及び防潮壁の 6 施設を選定した。



第3-1図 波及的影響を及ぼし得る可能性のある施設配置図（調査エリア）



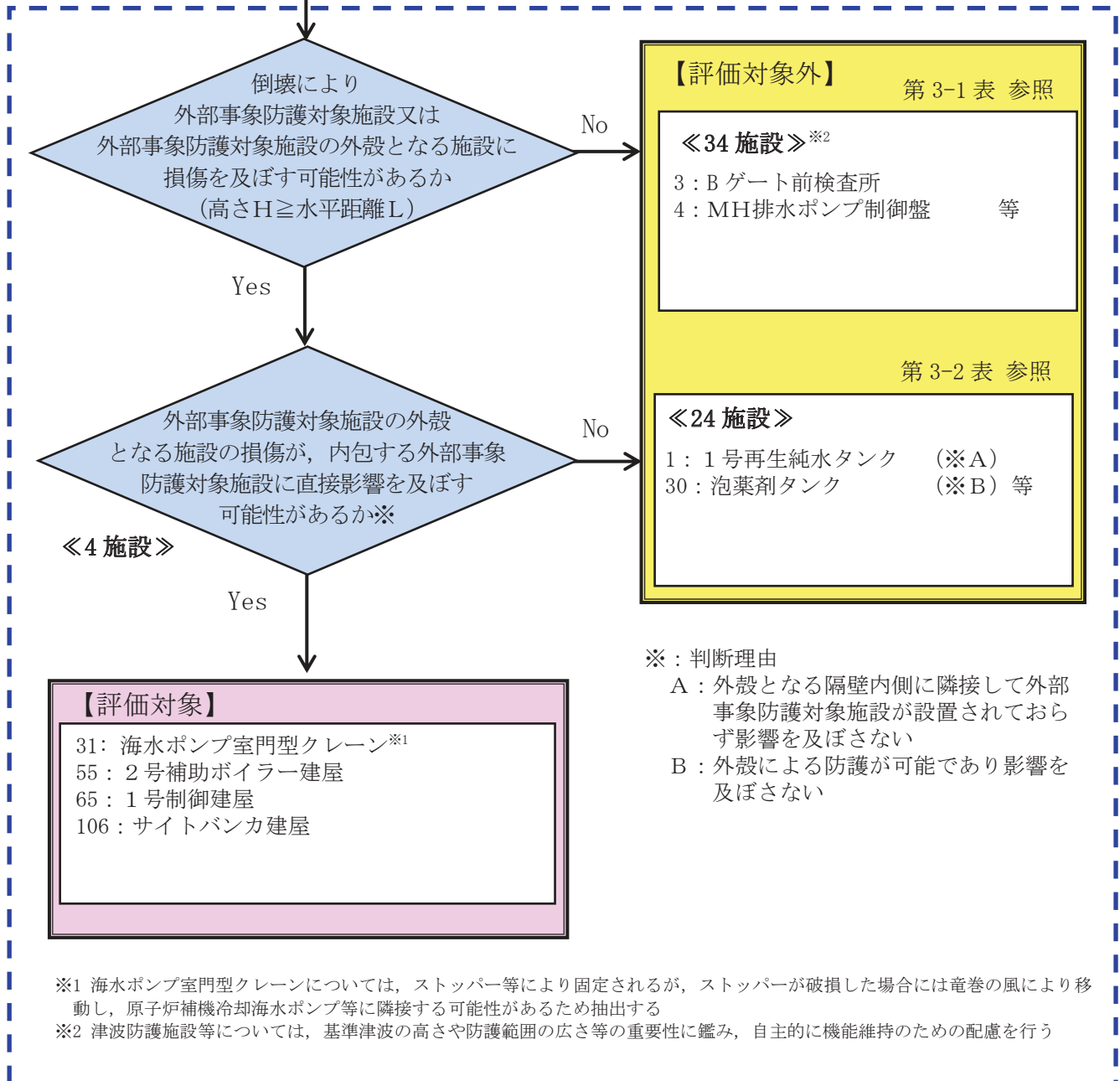
第 3-2 図 波及的影響を及ぼし得る可能性のある施設配置図（エリア 1）



第 3-3 図 波及的影響を及ぼし得る可能性のある施設配置図（エリア 2）

外部事象防護対象施設等の約 40m の範囲内に設置されている設備及び建物・構築物

波及的影響評価判定



第 3-4 図 倒壊による波及的影響を及ぼし得る可能性のある施設の評価判定フロー

第 3-1 表 倒壊により外部事象防護対象施設又は外部事象防護対象施設の外殻となる施設に
損傷を及ぼす可能性がある施設 評価対象外一覧表【34 施設】

No.	施設名	No.	施設名	No.	施設名
3	B ゲート前検査所	17	屋外作業用分電盤	32	補助ボイラー変圧器クーラー制御盤 (A)
4	MH排水ポンプ制御盤	18	PLR-VVVF 入力変圧器	33	補助ボイラー変圧器クーラー制御盤 (B)
5	窒素ガス供給装置制御盤	19	3 号タービン建屋	34	補助ボイラー用変圧器 A
6	窒素貯槽	20	3 号硫酸貯槽	35	補助ボイラー用変圧器 B
7	常時補給用液体窒素蒸発器 (送ガス)	21	3 号苛性ソーダ貯槽	36	1 号主復水器電解鉄イオン注入装置電解槽 A
8	常時補給用液体窒素蒸発器 (加圧用)	22	3 号ガスボンベ庫	37	1 号主復水器電解鉄イオン注入装置電解槽 B
10	計器収納箱 (A)	23	除塵装置電源室	38	1 号主復水器電解鉄イオン供給装置直流電源装置盤
11	計器収納箱 (B)	25	揚水ポンプ制御盤 (No.8)	54	渡り廊下
13	固化剤タンク	26	揚水ポンプ制御盤 (No.9)	61	防潮堤 ^{※1}
14	固化材ポンプ (A)	27	揚水ポンプ制御盤 (No.11)	62	防潮壁 ^{※1}
15	固化材ポンプ (B)	28	No.9 揚水ポンプ遠方操作盤		
16	S O L 固化剤タンク水位計架台	29	屋外作業用電源盤		

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

第 3-2 表 外部事象防護対象施設の外殻の損傷が、内包する外部事象防護対象施設に直接影響を及ぼす
可能性がある施設 評価対象外一覧表【24 施設】

No.	施設名	No.	施設名	No.	施設名
1	1 号再生純水タンク (※A)	41	1 号吸気フィルタサイレンサ (C) (※B)	49	1 号 C V C F 設置エリア用屋外機 (B-1) (※B)
2	1 号化学分析室用ボンベ庫 (※A)	42	1 号吸気フィルタサイレンサ (D) (※B)	50	1 号 C V C F 設置エリア用屋外機 (B-2) (※B)
9	パージ用液体窒素蒸発器 (※A)	43	1 号排気サイレンサ (A) (※B)	51	1 号給湯系統高置水槽 (※B)
12	空冷チラーユニット (※A)	44	1 号排気サイレンサ (B) (※B)	52	1 号給水系統高置水槽 (※B)
24	軽油タンク (A) (B) 泡消火設備現場盤 (※B)	45	1 号中央制御室用凝縮機 (A) (※B)	53	補助ボイラーサイレンサー (※A)
30	泡薬剤タンク (※B)	46	1 号中央制御室用凝縮機 (B) (※B)	56	2 号原子炉建屋避雷針 (※B)
39	1 号吸気フィルタサイレンサ (A) (※B)	47	1 号 C V C F 設置エリア用屋外機 (A-1) (※B)	57	2 号タービン建屋避雷針 (※B)
40	1 号吸気フィルタサイレンサ (B) (※B)	48	1 号 C V C F 設置エリア用屋外機 (A-2) (※B)	58	1 号制御建屋避雷針 (※B)

※：判断理由

A：外殻となる隔壁内側に隣接して外部事象防護対象施設が設置されておらず影響を及ぼさない。

B：外殻による防護が可能であり影響を及ぼさない。

第3-3 表 現地調査結果における波及的影響を及ぼし得る施設の抽出結果 (1/5)

No.	設備名称	安全 重要度 クラス	波及的影響を及ぼす対象 (外部事象防護対象施設の 外殻となる建屋及び構築物等)	地上高 (m) H	外部事象防護対象施設 の外殻となる建屋及び構築物等ま での最短距離 (m) L	L－H (m)	波及的影響		評価対象
							倒壊により外部事象防護 対象施設又は外部事象防護 対象施設の外殻となる施 設に損傷を及ぼす可能性 があるか (高さH≧水平距離L)	外部事象防護対象施設の 外殻となる施設の損傷が、 内包する外部事象防護対 象施設に直接影響を及ぼ す可能性があるか	
1	1号再生純水タンク	NON	2号制御建屋	11.8	27.0	15.2	－	－	－
2	1号化学分析室用ポンプ庫	NON	2号制御建屋	2.6	22.0	19.4	－	－	－
3	Bゲート前検査所	NON	2号制御建屋	3.6	16.0	12.4	－	－	－
4	MH排水ポンプ制御盤	NON	2号制御建屋	1.7	11.0	9.3	－	－	－
5	窒素ガス供給装置制御盤	MS-3	2号原子炉建屋	2.7	13.0	10.3	－	－	－
6	窒素貯槽	MS-3	2号原子炉建屋	4.0	9.0	5.0	－	－	－
7	常時補給用液体窒素蒸発器 (送ガス)	MS-3	2号原子炉建屋	2.8	7.0	4.2	－	－	－
8	常時補給用液体窒素蒸発器 (加圧用)	NON	2号原子炉建屋	2.7	5.8	3.1	－	－	－
9	バージ用液体窒素蒸発器	NON	2号原子炉建屋	3.4	0.8	-2.6	○	－	－
10	計器収納箱 (A)	NON	2号原子炉建屋	1.8	4.0	2.2	－	－	－
11	計器収納箱 (B)	MS-3	2号原子炉建屋	1.8	10.0	8.2	－	－	－
12	空冷チラーユニット	NON	2号原子炉建屋	3.7	0.6	-3.1	○	－	－
13	固化剤タンク	NON	2号原子炉建屋	6.5	10.0	3.5	－	－	－
14	固化材ポンプ (A)	NON	2号原子炉建屋	0.6	4.3	3.7	－	－	－
15	固化材ポンプ (B)	NON	2号原子炉建屋	0.6	6.1	5.5	－	－	－
16	SOL 固化剤タンク水位計架台	NON	2号原子炉建屋	1.8	10.0	8.2	－	－	－
17	屋外作業用分電盤	NON	2号原子炉建屋	1.6	1.7	0.1	－	－	－
18	PLR-VWVF 入力変圧器	PS-3	2号原子炉建屋	3.3	8.0	4.7	－	－	－
19	3号タービン建屋	PS-2	2号地下軽油タンクピット	24.5	35.0	10.5	－	－	－
20	3号硫酸貯槽	NON	2号地下軽油タンクピット	2.5	30.0	27.5	－	－	－
21	3号苛性ソーダ貯槽	NON	2号地下軽油タンクピット	2.7	35.0	32.3	－	－	－
22	3号ガスポンプ庫	NON	2号地下軽油タンクピット	4.7	34.0	29.3	－	－	－

○：該当
－：該当せず

第3-3 表 現地調査結果における波及的影響を及ぼし得る施設の抽出結果 (2/5)

No.	設備名称	安全 重要度 クラス	波及的影響を及ぼす対 象（外部事象防護対象施 設の外殻となる建屋及 び構築物等）	地上高 (m) H	外部事象防護対象施 設の外殻となる建 屋及び構築物等ま での最短距離 (m) L	L－H (m)	波及的影響		評価対象
							倒壊により外部事象防護 対象施設又は外部事象防護 対象施設の外殻となる施 設に損傷を及ぼす可能性 があるか (高さH≧水平距離L)	外部事象防護対象施設の外 殻となる施設の損傷が、 内包する外部事象防護対 象施設に直接影響を及ぼ す可能性があるか	
23	除塵装置電源室	NON	2号地下軽油タンクピット	4.8	13.0	8.2	－	－	－
24	軽油タンク (A) (B) 泡消火設備現場盤	MS-3	2号原子炉建屋	2.3	2.0	-0.3	○	－	－
25	揚水ポンプ制御盤 (No.8)	NON	2号原子炉建屋	2.4	15.0	12.6	－	－	－
26	揚水ポンプ制御盤 (No.9)	NON	2号原子炉建屋	2.4	15.0	12.6	－	－	－
27	揚水ポンプ制御盤 (No.11)	NON	2号原子炉建屋	2.4	15.0	12.6	－	－	－
28	No.9 揚水ポンプ遠方操作盤	NON	海水ポンプ室	1.6	3.5	1.9	－	－	－
29	屋外作業用電源盤	NON	海水ポンプ室	2.7	3.0	0.3	－	－	－
30	泡薬剤タンク	MS-3	2号原子炉建屋	2.2	1.1	-1.1	○	－	－
31	海水ポンプ室門型クレーン	NON	2号タービン建屋	22.7	19.6	-3.1	○*	－	○
32	補助ボイラー変圧器クーラー制御盤 (A)	PS-3	2号制御建屋	1.7	19.0	17.3	－	－	－
33	補助ボイラー変圧器クーラー制御盤 (B)	PS-3	2号制御建屋	1.7	29.0	27.3	－	－	－
34	補助ボイラー用変圧器A	PS-3	2号制御建屋	5.7	13.0	7.3	－	－	－
35	補助ボイラー用変圧器B	PS-3	2号制御建屋	5.7	23.0	17.3	－	－	－
36	1号主復水器電解鉄イオン注入装置電解槽A	NON	2号制御建屋	4.0	33.0	29.0	－	－	－
37	1号主復水器電解鉄イオン注入装置電解槽B	NON	2号制御建屋	4.0	34.0	30.0	－	－	－
38	1号主復水器電解鉄イオン供給装置直流電源装置盤	NON	2号制御建屋	2.4	35.0	32.6	－	－	－
39	1号吸気フィルタサイレンサ (A)	MS-1	2号制御建屋	5.2	9.0	3.8	－	－	－
40	1号吸気フィルタサイレンサ (B)	MS-1	2号制御建屋	5.2	15.0	9.8	－	－	－
41	1号吸気フィルタサイレンサ (C)	MS-1	2号制御建屋	5.2	12.0	6.8	－	－	－
42	1号吸気フィルタサイレンサ (D)	MS-1	2号制御建屋	5.2	18.0	12.8	－	－	－
43	1号排気サイレンサ (A)	MS-3	2号制御建屋	10.6	5.0	5.6	－	－	－
44	1号排気サイレンサ (B)	MS-3	2号制御建屋	10.6	15.0	5.6	－	－	－

※海水ポンプ室門型クレーンについては、ストッパーにより固定されるが、ストッパーが破損した場合には竜巻の風により移動し、原子炉補機冷却海水ポンプ等に隣接する可能性があるため抽出する。

○：該当
－：該当せず

第3-3 表 現地調査結果における波及的影響を及ぼし得る施設の抽出結果 (3/5)

No.	設備名称	安全 重要度 クラス	波及的影響を及ぼす対象 (外部事象防護対象施設の外殻となる建屋及び構築物等)	地上高 (m) H	外部事象防護対象施設の外殻となる建屋及び構築物等までの最短距離 (m) L	L－H (m)	波及的影響		評価対象
							倒壊により外部事象防護対象施設又は外部事象防護対象施設の外殻となる施設に損傷を及ぼす可能性があるか (高さH≧水平距離L)	外部事象防護対象施設の外部となる施設の損傷が、内包する外部事象防護対象施設に直接影響を及ぼす可能性があるか	
45	1号中央制御室用凝縮機 (A)	MS-1	2号制御建屋	4.6	4.0	-0.6	○	－	－
46	1号中央制御室用凝縮機 (B)	MS-1	2号制御建屋	4.6	10.0	5.4	－	－	－
47	1号CVCF設置エリア用屋外機 (A-1)	NON	2号制御建屋	0.8	24.0	23.2	－	－	－
48	1号CVCF設置エリア用屋外機 (A-2)	NON	2号制御建屋	0.8	24.0	23.2	－	－	－
49	1号CVCF設置エリア用屋外機 (B-1)	NON	2号制御建屋	0.8	24.0	23.2	－	－	－
50	1号CVCF設置エリア用屋外機 (B-2)	NON	2号制御建屋	0.8	24.0	23.2	－	－	－
51	1号給湯系統高置水槽	NON	2号制御建屋	2.2	7.0	4.8	－	－	－
52	1号給水系統高置水槽	NON	2号制御建屋	2.2	4.0	1.8	－	－	－
53	補助ボイラーサイレンサー	NON	2号タービン建屋	0.9	10.5	9.6	－	－	－
54	渡り廊下	NON	2号原子炉建屋 2号制御建屋	5.2	37.7	32.5	－	－	－
55	2号補助ボイラー建屋	PS-3	2号タービン建屋 2号制御建屋	－	隣接	－	○	○	○
56	2号原子炉建屋避雷針	NON	2号原子炉建屋	10.4	屋上	－	○	－	－
57	2号タービン建屋避雷針	NON	2号タービン建屋	10.4	屋上	－	○	－	－
58	1号制御建屋避雷針	NON	2号制御建屋	13.0	10.0	-3.0	○	－	－
59	1号空冷チリングユニット	NON	2号制御建屋	2.3	22.0	19.7	－	－	－
60	復水器連続洗浄装置制御盤	NON	2号タービン建屋	2.4	35.0	32.6	－	－	－
61	防潮堤	NON (津波防護施設)	基準津波の高さや防護範囲の広さ等の重要性を鑑み、自主的に機能維持のための配慮を行う						
62	防潮壁	NON (津波防護施設)	基準津波の高さや防護範囲の広さ等の重要性を鑑み、自主的に機能維持のための配慮を行う						
63	放水路サンプリング建屋	NON	2号タービン建屋	4.8	34.0	29.2	－	－	－
64	励磁変圧器	PS-3	2号タービン建屋	4.8	3.0	-1.8	○	－	－
65	1号制御建屋	NON	2号制御建屋	－	隣接	－	○	○	○

○：該当

一：該当せず

第3-3 表 現地調査結果における波及的影響を及ぼし得る施設の抽出結果 (4/5)

No.	設備名称	安全 重要度 クラス	波及的影響を及ぼす対 象（外部事象防護対象施 設の外殻となる建屋及 び構築物等）	地上高 (m) H	外部事象防護対象施 設の外殻となる建 屋及び構築物等ま での最短距離 (m) L	L－H (m)	波及的影響		評価対象
							倒壊により外部事象防護 対象施設又は外部事象防護 対象施設の外殻となる施 設に損傷を及ぼす可能性 があるか (高さH≧水平距離L)	外部事象防護対象施設の 外殻となる施設の損傷が、 内包する外部事象防護対 象施設に直接影響を及ぼ す可能性があるか	
66	主変圧器	PS－3	2号タービン建屋	9.5	8.6	-0.9	○	－	－
67	主変圧器制御盤	PS－3	2号タービン建屋	2.7	22.0	19.3	－	－	－
68	屋外変圧器消火制御盤	MS－3	2号タービン建屋	2.6	22.3	19.7	－	－	－
69	所内変圧器 2 A 冷却器制御盤	PS－3	2号タービン建屋	2.7	11.5	8.8	－	－	－
70	所内変圧器 2 B 冷却器制御盤	PS－3	2号タービン建屋	2.7	11.5	8.8	－	－	－
71	所内変圧器 2 A 中性点接地装置	PS－3	2号タービン建屋	2.2	1.8	-0.4	○	－	－
72	所内変圧器 2 B 中性点接地装置	PS－3	2号タービン建屋	2.2	1.8	-0.4	○	－	－
73	所内変圧器	PS－3	2号タービン建屋	5.8	4.5	-1.3	○	－	－
74	屋外作業用分電盤	NON	2号タービン建屋	1.6	19.0	17.4	－	－	－
75	起動変圧器	PS－3	2号タービン建屋	7.5	4.8	-2.7	○	－	－
76	起動変圧器制御盤	PS－3	2号タービン建屋	2.7	14.0	11.3	－	－	－
77	起動変圧器NGR盤 2－1	PS－3	2号タービン建屋	2.2	4.2	2.0	－	－	－
78	起動変圧器NGR盤 2－2	PS－3	2号タービン建屋	2.2	2.2	0.0	○	－	－
79	復水脱塩装置薬液貯槽現場盤	NON	2号タービン建屋	2.0	13.0	11.0	－	－	－
80	苛性ソーダ貯槽	NON	2号タービン建屋	4.2	5.5	1.3	－	－	－
81	硫酸計量槽	NON	2号タービン建屋	1.4	5.5	4.1	－	－	－
82	硫酸貯槽	NON	2号タービン建屋	2.9	8.5	5.6	－	－	－
83	1号鉄イオン供給装置現場盤	NON	2号制御建屋	1.7	18.0	16.3	－	－	－
84	1号主復水器連続洗浄装置電気防食装置直流通電 源盤	NON	2号制御建屋	2.4	25.0	22.6	－	－	－
85	1号主復水器電解鉄イオン供給装置制御盤	NON	2号制御建屋	2.7	19.0	16.3	－	－	－
86	1号主復水器連続洗浄装置制御盤	NON	2号制御建屋	2.7	28.0	25.3	－	－	－

※1 倒壊しても、防護施設（竜巻）に到達しないが、構造物の形状を踏まえ、抽出

○：該当
－：該当せず

第3-3 表 現地調査結果における波及的影響を及ぼし得る施設の抽出結果 (5/5)

No.	設備名称	安全 重要度 クラス	波及的影響を及ぼす対 象 (外部事象防護対象施 設の外殻となる建屋及 び構築物等)	地上高 (m) H	外部事象防護対象施 設の外殻となる建 屋及び構築物等ま での最短距離 (m) L	L－H (m)	波及的影響		評価対象
							倒壊により外 部事象防護 対象施設又は外部事象防護 対象施設の外殻となる施 設に損傷を及ぼす可能性 があるか (高さH≧水平距離L)	外部事象防護対象施設の外 殻となる施設の損傷が、 内包する外部事象防護対 象施設に直接影響を及ぼ す可能性があるか	
87	1号No.8 揚水井戸制御盤	NON	2号制御建屋	2.1	7.0	4.9	－	－	－
88	1号プロパンガスボンベ庫	NON	2号制御建屋	2.6	9.0	6.4	－	－	－
89	旧事務本館	NON	2号排気筒	20.0	28.0	8.0	－	－	－
90	2号スタックモニタ建屋	MS－3	2号排気筒	4.3	4.6	0.3	－	－	－
91	3号スタックモニタ建屋	MS－3	2号排気筒	4.7	5.1	0.4	－	－	－
92	3号起動変圧器A	PS－3	2号排気筒	6.9	33.6	26.7	－	－	－
93	3号起動変圧器3A 冷却制御盤	PS－3	2号排気筒	2.7	29.9	27.2	－	－	－
94	3号起動変圧器3A 中性点接地装置 (2次側)	PS－3	2号排気筒	2.2	32.4	30.2	－	－	－
95	3号起動変圧器3A 中性点接地装置 (3次側)	PS－3	2号排気筒	2.2	30.1	27.9	－	－	－
96	3号起動変圧器B	PS－3	2号排気筒	6.9	26.7	19.8	－	－	－
97	3号起動変圧器3B 冷却制御盤	PS－3	2号排気筒	2.7	22.8	20.1	－	－	－
98	3号起動変圧器3B 中性点接地装置 (2次側)	PS－3	2号排気筒	2.2	24.0	21.8	－	－	－
99	3号起動変圧器3B 中性点接地装置 (3次側)	PS－3	2号排気筒	2.2	23.5	21.3	－	－	－
100	3号GIS 2号送電線ユニット制御盤	PS－3	2号排気筒	2.0	36.0	34.0	－	－	－
101	3号GIS 主変圧器ユニット制御盤	PS－3	2号排気筒	2.0	35.3	33.3	－	－	－
102	3号GIS 起動変圧器3B ユニット制御盤	PS－3	2号排気筒	2.0	36.7	34.7	－	－	－
103	3号開閉所電源盤	PS－3	2号排気筒	2.4	23.5	21.1	－	－	－
104	3号C V ケーブル洞道出入口	NON	2号排気筒	2.3	26.7	24.4	－	－	－
105	3号C V ケーブル洞道冷却制御盤	PS－3	2号排気筒	2.4	29.8	27.4	－	－	－
106	サイトバンカ建屋	PS－3	2号タービン建屋	28.9	22.0	-6.9	○	○	○

※1 倒壊しても、防護施設 (竜巻) に到達しないが、構造物の形状を踏まえ、抽出

○：該当
－：該当せず

気候区分について

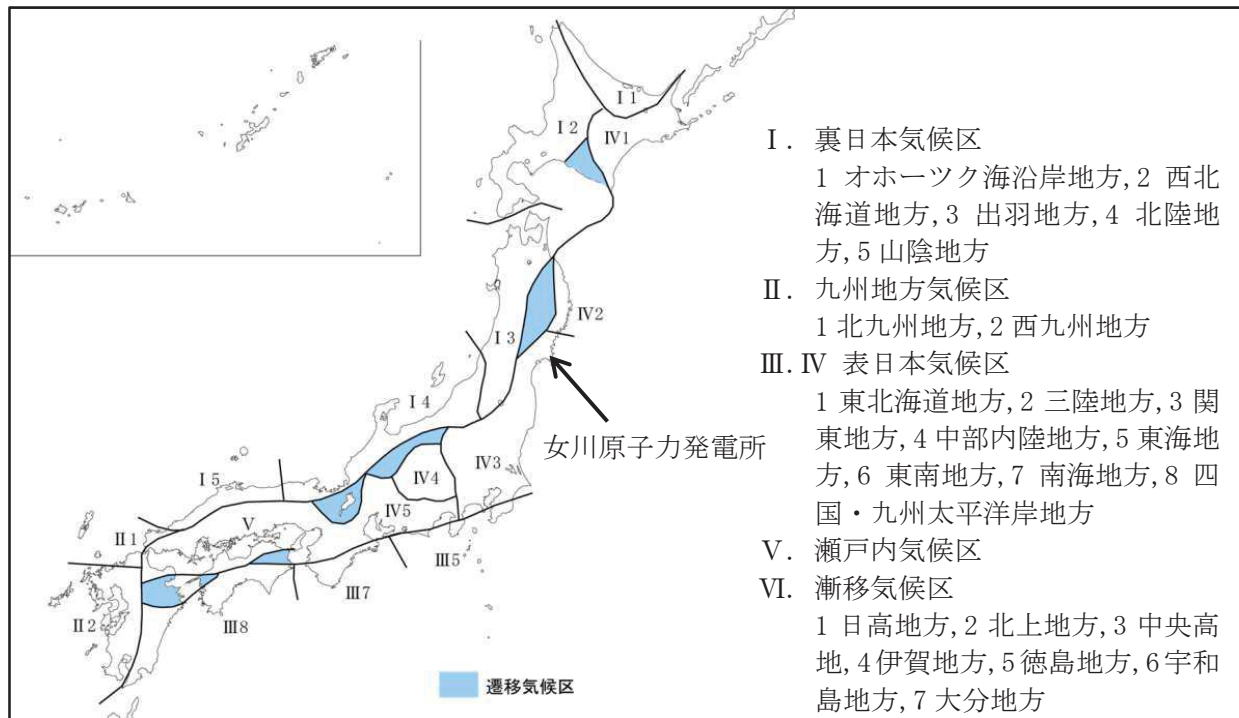
気候区分（関口 1959）は、以下の 4 種類の気候要素を基に、気候の境界を表したものである。

- ① 気温の日較差（1 日の最高気温と最低気温の差）
- ② 雨天日数
- ③ 日照率
- ④ 気候の乾湿

4 つの気候要素を基に作成された気候区分を第 1 図に示す。

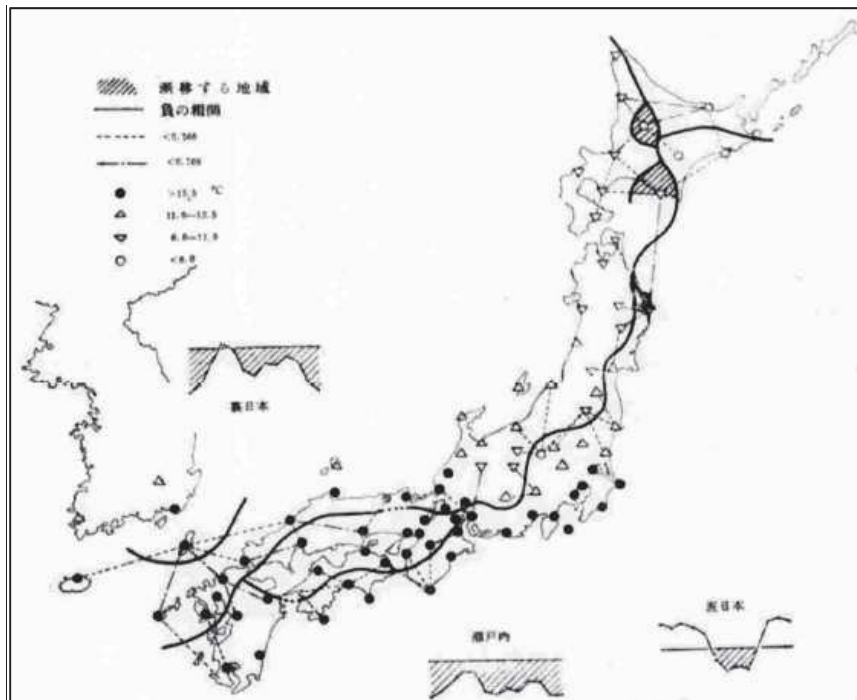
第 1 図より、女川原子力発電所は区分Ⅳ3 に属している。また、日本海側（裏日本）と太平洋側（表日本）は判然と区別されていることが分かる。

なお、第 2 図～第 5 図に示すとおり、①～④の各気候要素の気候区分、いずれにおいても日本海側（裏日本）と太平洋側（表日本）は判然と区別されている。

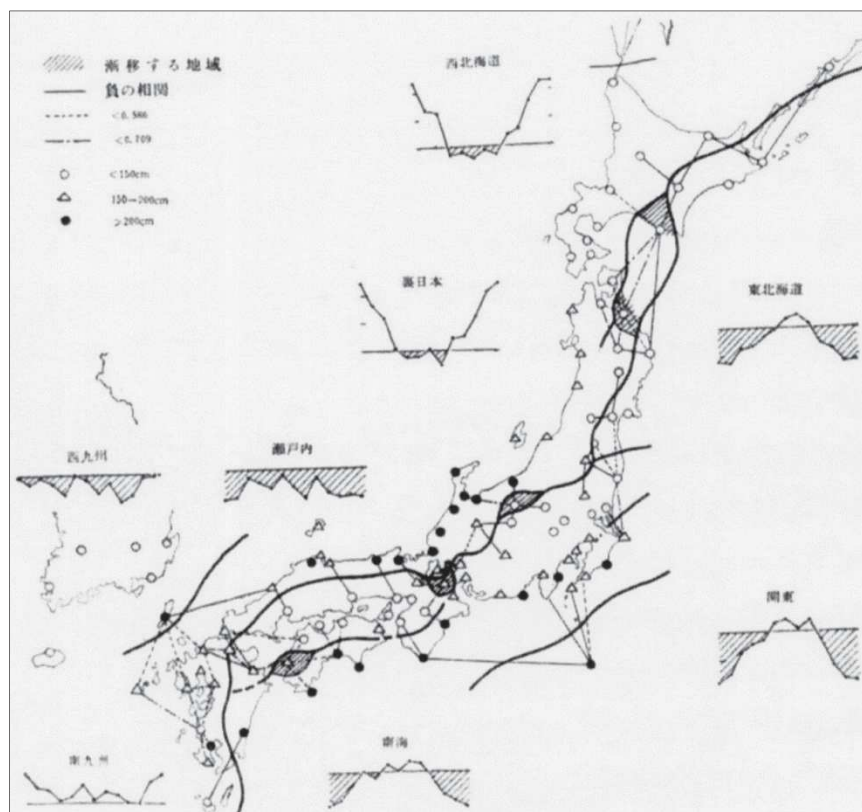


出展：関口武「日本の気候区分」東京教育大学地理学研究報告（1959）

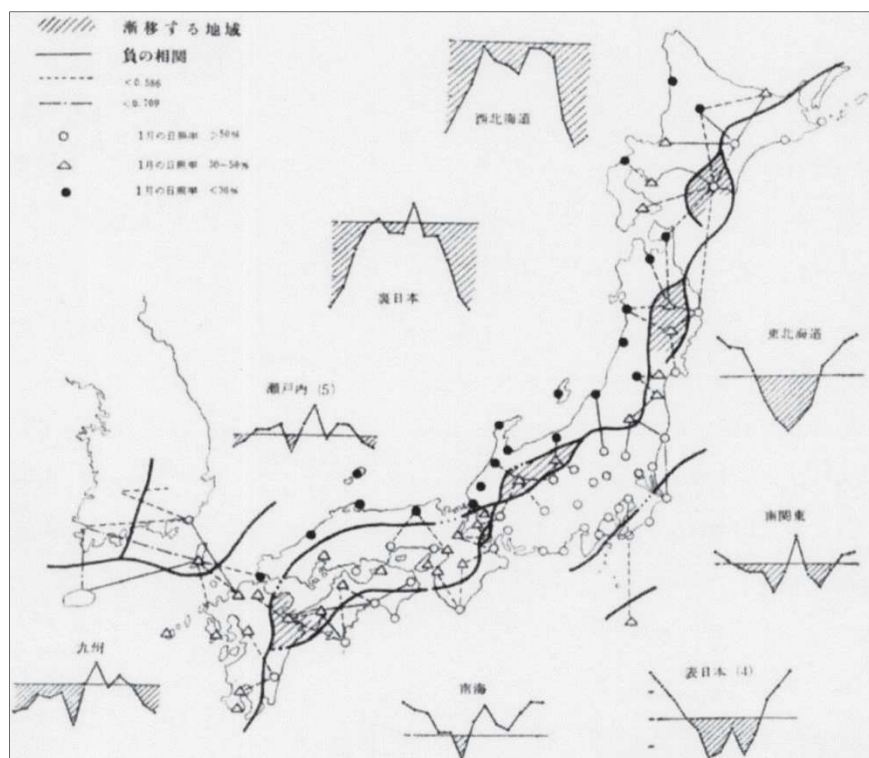
第 1 図 日本の気候区分（関口）



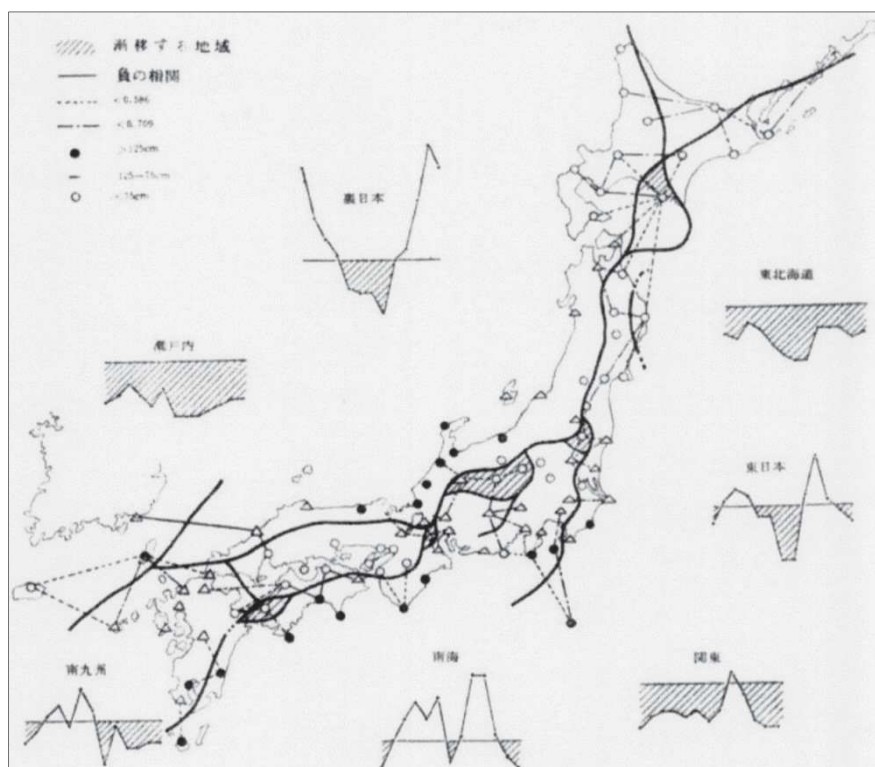
第2図 気温の日較差の年変化型による気候区分



第3図 雨天日数による気候区分



第4図 日照率による気候区分



第5図 気候の乾湿による気候区分