

女川原子力発電所2号炉
竜巻防護ネットの構造設計について
(審査会合での指摘事項に対する回答)

設計基準対象施設について
(第4条 地震による損傷の防止)
(第6条 外部からの衝撃による損傷の防止(竜巻))

平成31年4月
東北電力株式会社

審査会合における指摘事項への回答【指摘事項③】（1／23）

【審査会合における指摘事項③】

設計飛来物に対する防護の設計方針について、竜巻防護ネットの支持部にゴム支承や可動支承を採用することにより、必要となる設計上の特段の配慮又は対策を整理して提示すること

【回答③】

➤ 竜巻防護ネットの支持部にゴム支承，可動支承を採用することにより，必要となる設計上の配慮又は対策について整理した結果を以下に示す

必要となる設計上の配慮又は対策	配慮が必要な理由	対応方針
(1) 衝撃荷重に対するゴム支承・可動支承の影響の配慮	衝撃荷重に対するゴム支承や可動支承の影響について，評価に関する規格類が制定されていないことや先行プラントでの審査実績がないことを踏まえて，評価の不確かさを考慮する必要がある	・ゴム支承，可動支承の影響の不確かさを考慮する観点で，2つの設計条件で評価を実施し，両立させることで，ゴム支承，可動支承の影響を最大限考慮した設計を実施する
(2) ストッパーの設置	設計飛来物がゴム支承，可動支承の近傍に衝突した場合は，設計飛来物の衝突により損傷する可能性がある	・フレーム等にストッパーを取り付け，水平方向の移動を拘束し，竜巻防護ネットの落下を防止する設計とする
(3) 作用荷重による変位に対する影響の配慮	ゴム支承や可動支承を採用したことにより竜巻や地震の荷重が加わった場合に水平方向の変位が発生する	・発生変位による部材の干渉を防止するため，部材間のクリアランスを考慮する ・クリアランスからの飛来物侵入を防ぐため防護板を設置とする
(4) 作用荷重により発生する振動の影響の配慮	作用荷重により振動する可能性が考えられる	・風による共振の影響を検討し，必要に応じ構造設計に反映する

➤ 対応方針を踏まえた詳細な構造設計や強度評価結果については，工事計画認可段階にて示す

審査会合における指摘事項への回答【指摘事項③】(2/23)

1. 竜巻防護ネットの設計竜巻に対する設計方針

- 女川2号炉の竜巻防護ネットは支持部にゴム支承, 可動支承を採用しており, 設計にあたってはゴム支承, 可動支承の影響を踏まえて設計を実施する

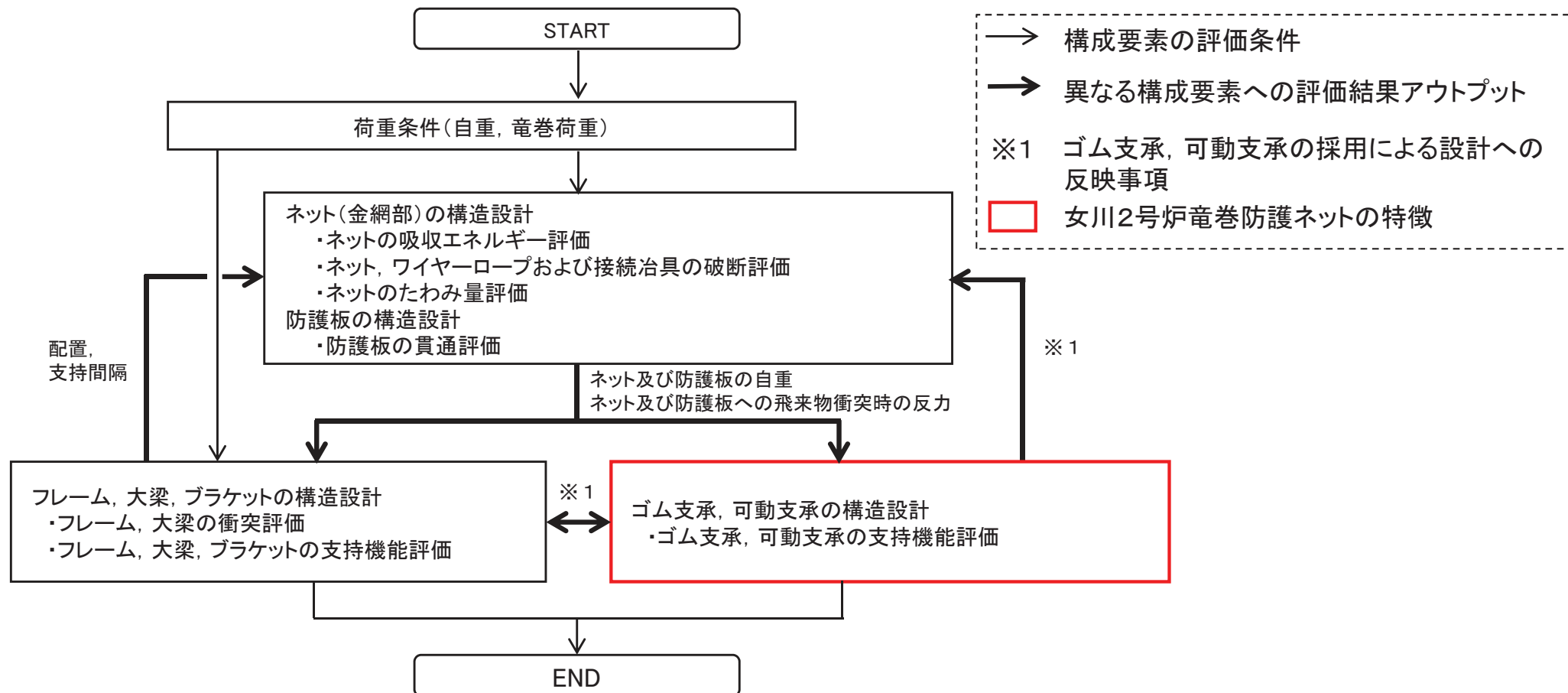


図1 竜巻防護ネットの設計フロー

- 次頁より, ゴム支承, 可動支承の採用による設計への反映事項について示す

審査会合における指摘事項への回答【指摘事項③】(3/23)

2. ゴム支承, 可動支承の採用による設計への反映事項

(1) ゴム支承, 可動支承の影響に対する検討

- 竜巻防護ネットの各構造に対して, 設計竜巻荷重より外部事象防護対象施設である非常用海水ポンプ等を防護できない事象(損傷モード)を検討し, その損傷モードを踏まえ, 各部位に必要な評価項目及び設計要求事項を設定する
- ゴム支承, 可動支承の特性を考慮し, ゴム支承, 可動支承の採用による設計上の配慮又は対策を抽出する
- 設計上の配慮又は対策に対する対応方針を検討し, 必要に応じて構造設計に反映する

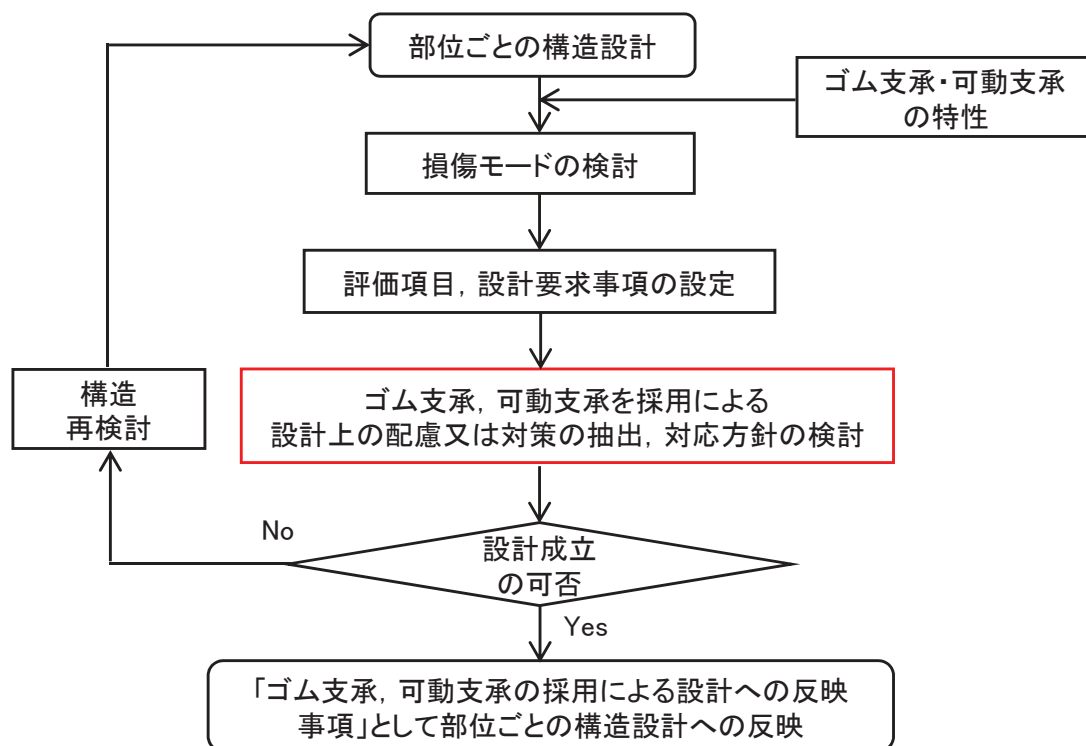


表1 ゴム支承, 可動支承の特性

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

図2 ゴム支承, 可動支承の影響に対する検討フロー

審査会合における指摘事項への回答【指摘事項③】(4/23)

2. ゴム支承, 可動支承を採用することによる設計への反映事項

(2) 竜巻防護ネットの損傷モードおよび設計上の配慮又は対策

- 竜巻防護ネットの各部位に対して, 竜巻による損傷モードを設定し, 損傷モードを踏まえた評価項目, 設計要求事項を設定した。さらに, ゴム支承, 可動支承の採用による設計上の配慮又は対策を抽出した

表2 竜巻防護ネットの損傷モード整理表(1/6)

評価対象		作用荷重	損傷モード	評価項目	設計要求事項	ゴム支承, 可動支承採用による設計上の配慮又は対策
ネット (金網部)	ネット	衝撃荷重 竜巻風荷重 自重	ネットの破断による設計飛来物の防護対象施設への衝突	【吸収エネルギー評価】	ネットの限界吸収エネルギーが作用荷重によるエネルギー以上であること(電中研報告※1による評価)	(1) 衝撃荷重に対するゴム支承・可動支承の影響に配慮する必要がある
				【破断評価】	ネットに作用する荷重がネットの素材の持つ破断強度以下であること(電中研報告※1による評価)	
	ネットがたわむことにより設計飛来物の防護対象施設への衝突		【たわみ評価】	ネットと防護対象施設までの離隔距離が作用荷重によるワイヤーロープたわみ量を含めたネット全体のたわみ量以上であること		
	ネットがたわむことにより設計飛来物の防護対象施設への衝突		【たわみ評価】			
	部材の破断による設計飛来物の防護対象施設への衝突		【破断評価】	作用する荷重が素材の持つ破断強度以下であること		
	部材の破断による設計飛来物の防護対象施設への衝突		【破断評価】	作用する荷重が素材の持つ破断強度以下であること		
	ワイヤーロープ					
ターンバックル シャックル						
接続治具						

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

審査会合における指摘事項への回答【指摘事項③】(5/23)

表2 竜巻防護ネットの損傷モード整理表(2/6)

評価対象		作用荷重	損傷モード	評価項目	設計要求事項	ゴム支承, 可動支承採用による設計上の配慮又は対策
防護板	横向き防護板 縦向き防護板	衝撃荷重 竜巻風荷重 自重	防護板を貫通することによる設計飛来物の防護対象施設への衝突	【貫通評価】 BRL式による板厚評価	防護板の板厚がBRL式※2より算出される貫通限界板厚以上であること	(1) 衝撃荷重に対するゴム支承・可動支承の影響に配慮する必要がある (3) 作用荷重によるフレームの変位に対する影響に配慮する必要がある
フレーム	主桁 横補強材	衝撃荷重 竜巻風荷重 ネット荷重 自重	主桁, 横補強材を貫通することによる設計飛来物の防護対象施設への衝突	【貫通評価】 ひずみ量	LS-DYNAによる衝突解析によりひずみ量を算出し, 破断ひずみ※3の範囲内であること, 最大ひずみが破断ひずみを超える場合には, 破断箇所を確認し, 全断面に発生しないこと	(1) 衝撃荷重に対するゴム支承・可動支承の影響に配慮する必要がある
			主桁, 横補強材に設計飛来物が衝突することで, 破断・落下し防護対象施設に衝突	【支持機能評価】 ひずみ量		
	ブレース		ブレースを貫通することによる設計飛来物の防護対象施設への衝突	ブレースはネットの上部に設置しており, ブレースを貫通した設計飛来物の衝突エネルギーは低減することから, ネットの吸収エネルギー評価, 破断評価に包絡される	ブレースはネットの上部に設置しており, 破断したブレースによる荷重の影響は, 設計飛来物におけるネットの吸収エネルギー評価, 破断評価に包絡される	(2) ストッパーの設置 (ストッパーの強度評価時には, 支承が損傷している状態を考慮して設計する) (3) 作用荷重によるフレームの変位に対する影響に配慮する必要がある
			ブレースに設計飛来物が衝突することで, 破断・落下し防護対象施設に衝突			
			フレームに設計飛来物が衝突した場合に, 支承が破損し, ストッパーに荷重が加わる。更にストッパーが破損することで, フレームが落下し防護対象施設に衝突	【支持機能評価】 ひずみ量		
フレーム全体	飛来物の衝突や設計竜巻の風による振動により破損, 落下し防護対象施設に衝突	共振の有無	共振が発生しないこと	(4) 作用荷重により発生する振動の影響		

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

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

審査会合における指摘事項への回答【指摘事項③】(6/23)

表2 竜巻防護ネットの損傷モード整理表 (3/6)

評価対象		作用荷重	損傷モード	評価項目	設計要求事項	ゴム支承, 可動支承採用による設計上の配慮又は対策
大梁	大梁フレーム	衝撃荷重 竜巻風荷重 ネット荷重 フレーム荷重 自重	大梁を貫通することによる設計飛来物の防護対象施設への衝突	【貫通評価】 ひずみ量	LS-DYNAによる衝突解析によりひずみ量を算出し、破断ひずみ ^{※3} の範囲内であること、最大ひずみが破断ひずみを超える場合には、破断箇所を確認し、全断面に発生しないこと	(1) 衝突解析に対するゴム支承・可動支承の影響に配慮する必要がある (3) 作用荷重による大梁の変位に対する影響に配慮する必要がある
			大梁に設計飛来物が衝突することで、破断・落下し防護対象施設に衝突	【支持機能評価】 ひずみ量		
フレーム ゴム支承	ゴム支承 本体	衝撃荷重 竜巻風荷重 ネット荷重 フレーム荷重 自重	ゴム体の破断によりフレームが落下し、防護対象施設に衝突	【支持機能評価】 引張応力 圧縮応力 せん断ひずみ	フレームに設計飛来物が衝突した時の反力 (LS-DYNAによる衝突解析)を用いた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、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。許容値を超える場合には、ストッパーにより落下しないこと	(1) 衝突解析に対するゴム支承・可動支承の影響に配慮する必要がある (2) 支承が損傷した場合を想定し、ストッパーの設置が必要 (3) 作用荷重によるフレームの変位に対する影響に配慮する必要がある
			内部鋼板の破壊によりフレームが落下し、防護対象施設に衝突	【支持機能評価】 圧縮応力 (座屈安定性)		
	破断によりフレームが落下し、防護対象施設に衝突		【支持機能評価】 引張応力 せん断応力			
	破断によりフレームが落下し、防護対象施設に衝突		【支持機能評価】 引張応力 せん断応力			
	ゴム支承 取付ボルト					
	アンカーボルト					

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

表2 竜巻防護ネットの損傷モード整理表 (4/6)

評価対象		作用荷重	損傷モード	評価項目	設計要求事項	ゴム支承, 可動支承採用による設計上の配慮又は対策
大梁 ゴム支承	大梁ゴム支承 本体	衝撃荷重 竜巻風荷重 ネット荷重 フレーム荷重 大梁荷重 自重	ゴム体の破断によりフレームが落下し, 防護対象施設に衝突	【支持機能評価】 引張応力 圧縮応力 せん断ひずみ	フレームや大梁に設計飛来物が衝突した時の反力 (LS-DYNAによる衝突解析)を用いて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, 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	(1) 衝撃荷重に対するゴム支承・可動支承の影響に配慮する必要がある (3) 作用荷重による大梁の変位に対する影響に配慮する必要がある
			内部鋼板の破壊によりフレームが落下し, 防護対象施設に衝突	【支持機能評価】 圧縮応力 (座屈安定性)		
	大梁ゴム支承 取付ボルト		破断によりフレームが落下し, 防護対象施設に衝突	【支持機能評価】 引張応力 せん断応力		

審査会合における指摘事項への回答【指摘事項③】(8/23)

表2 竜巻防護ネットの損傷モード整理表 (5/6)

評価対象		作用荷重	損傷モード	評価項目	設計要求事項	ゴム支承, 可動支承採用による設計上の配慮又は対策
可動支承	すべり材	衝撃荷重 竜巻風荷重 フレーム荷重 自重	圧縮破壊によるすべり機能喪失・固着	【支持機能評価】 支圧応力	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 フレームに設計飛来物が衝突した時の反力(LS-DYNAによる衝突解析)を用いて, 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	(1) 衝撃荷重に対するゴム支承・可動支承の影響に配慮する必要がある (2) 支承が損傷した場合を想定し, ストッパーの設置が必要 (3) 作用荷重によるフレームの変位に対する影響に配慮する必要がある
	圧縮ゴム		圧縮破壊によるすべり機能喪失・固着	【支持機能評価】 支圧応力		
	ピストン		破断によるすべり機能喪失・固着	【支持機能評価】 曲げ応力		
	座金		圧縮破壊による機能喪失・固着	【支持機能評価】 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	【支持機能評価】 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・固着	【支持機能評価】 支圧応力		
	レール		破断によるフレームの落下・すべり機能喪失	【支持機能評価】 曲げ応力 引張応力 せん断応力		
	レール取付ボルト		破断によるフレームの落下	【支持機能評価】 引張応力 せん断応力		
	エンドプレート接合ボルト					
	上部・下部接合ボルト					
	ベースプレート					

表2 竜巻防護ネットの損傷モード整理表（6/6）

評価対象		作用荷重	損傷モード	評価項目	設計要求事項	ゴム支承, 可動支承採用による設計上の配慮又は対策
ブラケット	ブラケット本体	衝突荷重 竜巻風荷重 ネット荷重 フレーム荷重 大梁荷重 自重	破断による大梁の 落下	【支持機能評価】 せん断応力 圧縮応力 曲げ応力	フレームや大梁に設計 飛来物が衝突した時の 反力(LS-DYNAによる衝 突解析)を用いて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 評価を実施し, 作用す る荷重が許容応力以下 であること	(1)衝突荷重に対するゴム 支承・可動支承の影響に 配慮する必要がある
	ブラケットアン カーボルト					

審査会合における指摘事項への回答【指摘事項③】（10／23）

- 竜巻防護ネットの各構造に対し、ゴム支承、可動支承の採用による設計上の配慮又は対策が必要な事項を以下にまとめる

表3 ゴム支承、可動支承の採用による設計上の配慮又は対策が必要な事項のまとめ

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

凡例 ○: 配慮又は対策が必要
—: 対応不要

- 次頁より、設計上の配慮又は対策に対する具体的な対応方針について示す

審査会合における指摘事項への回答【指摘事項③】（11／23）

3. 設計上の配慮又は対策が必要な事項に対する対応方針

(1) 衝撃荷重に対するゴム支承・可動支承の影響

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

✓ 飛来物の衝突におけるゴム支承の変形等の影響

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

✓ 飛来物の衝突における部材間の荷重の伝達

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

- 一方、設計飛来物がフレームに衝突した場合に想定するゴム支承のせん断剛性は耐震評価で用いているゴム支承のせん断剛性を適用できるものとする

- ✓ 耐震評価で用いるゴム支承のせん断剛性に対する変位速度の影響は実機試験（振動数依存性試験）で確認している
- ✓ 設計飛来物がフレームに衝突した場合に想定するゴム支承の変位速度を算定すると、耐震評価における変位速度に包絡されることを確認している
- ✓ よって、衝突評価におけるせん断剛性は、耐震評価で用いているゴム支承のせん断剛性を適用できるものとする

しかしながら、竜巻の飛来物による衝突評価におけるゴム支承、可動支承の影響については、評価に関する十分な知見・実績がなく、不確実性を有することを踏まえて、設計する必要がある

審査会合における指摘事項への回答【指摘事項③】（12／23）

（2）衝撃荷重に対するゴム支承・可動支承の影響を考慮した設計方針

ゴム支承・可動支承の評価に関する課題

- ゴム支承・可動支承の影響について、竜巻の飛来物による衝突評価に関する規格類が制定されていない
- 先行プラントにおいて、ゴム支承・可動支承の影響を考慮した衝突評価に関わる審査実績がない

・上記の課題に対して、以下の設計を行うことにより、ゴム支承・可動支承の衝撃荷重に対する不確実性を包絡した設計が可能



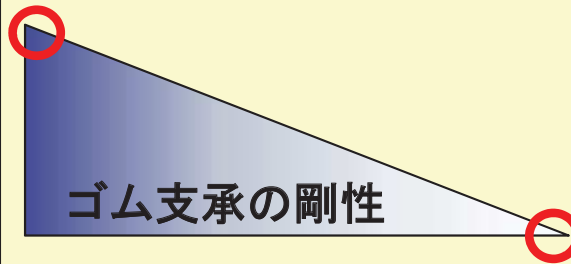
ゴム支承の衝撃荷重に対する不確実性を考慮した設計条件

設計条件①

【ゴム支承部のせん断剛性が極めて高い】

支承部が完全拘束の状態

- ・荷重低減効果を期待しない
- ・下部構造に支承部のピーク荷重がそのまま伝達される



設計条件②

【ゴム支承部のせん断剛性が極めて低い】

支承部の拘束が無い状態

- ・支承の損傷状態を模擬
- ・ストッパーに全ての荷重が伝達

実現象における竜巻防護ネットのゴム支承部の剛性はこの範囲に存在する

- ゴム支承の影響を最大限考慮する観点で、2つの設計条件にて構造設計を行い、これらが両立する設計を行う

可動支承の衝撃荷重に対する不確実性を考慮した設計条件

- 設計条件②にて評価することで、可動支承のすべり機構の影響を最大限考慮する

審査会合における指摘事項への回答【指摘事項③】（13／23）

設計条件①【ゴム支承部のせん断剛性が極めて高い】

【ゴム支承部の条件】

- ・ゴム支承部が完全拘束の状態

【設計条件の特徴】

- ・ゴム支承の特徴である水平方向の荷重を低減する効果を排除し、全ての荷重を伝達する
- ・下部構造に対し支承部のピーク荷重がそのまま伝達される

表4 ゴム支承，可動支承の影響を考慮した設計条件①

	設計条件①	
	ゴム支承	可動支承
想定される実現象	ゴムの変形により荷重が低減される	すべり面の摩擦によりエネルギーが低減
想定される実現象を保守的に考慮した場合の挙動	ゴムが変形せず荷重低減しない	エネルギー低減を期待しない
設計条件①で考慮する事項	飛来物衝突時のゴム支承等の荷重低減効果や挙動の不確実性を包絡した構造設計	
設計条件①での衝突解析モデル化	ゴム支承の結合条件を3方向固定	可動方向の結合条件をフリー 反可動方向，鉛直方向の結合条件を固定

- 支承部における荷重の低減・分散効果を期待しない衝突解析となるため，これまでの他プラントでの適用実績がある竜巻防護ネットの衝突解析と同等の条件となる
- ネット（金網部）の電中研報告による評価及び防護板のBRL式による評価手法は，設計条件①により適用が可能であり，ゴム支承による荷重低減効果を期待しない保守的な評価が可能

審査会合における指摘事項への回答【指摘事項③】（14／23）

設計条件②【ゴム支承部のせん断剛性が極めて低い】

【ゴム支承部の条件】

- ・支承部の拘束が無い状態

【設計条件の特徴】

- ・飛来物の衝突による、ゴム支承の水平方向の変形影響を最大限に考慮

表5 ゴム支承，可動支承の影響を考慮した設計条件②

	設計条件②	
	ゴム支承	可動支承
想定される実現象	ゴムが持つせん断剛性に応じ変形する	すべり機構がゴム支承の変形に応じて変位する
想定される実現象を保守的に考慮した場合の挙動	水平方向に自由に変形し部材と干渉する	可動方向に自由に変位し部材と干渉する
設計条件②で考慮する事項	ゴム支承の損傷状態を模擬	
設計条件②での衝突解析モデル	水平方向の結合条件をフリー 鉛直方向の結合条件を固定	可動方向の結合条件をフリー 反可動方向，鉛直方向の結合条件を固定

- 飛来物衝突時にゴム支承が損傷する可能性を想定することで、フレームが移動して落下する事象を考慮する必要があるため、水平方向の移動を拘束するストッパーを設置

審査会合における指摘事項への回答【指摘事項③】（15／23）

(2) ストッパーの設置

- 設計飛来物がゴム支承，可動支承の近傍に衝突した場合を考慮し，設計飛来物の衝突により，ゴム支承・可動支承が損傷する事象を考慮する
- ゴム支承，可動支承が損傷した場合でも，竜巻防護ネットが非常用海水ポンプ等に落下しないように，フレーム等にストッパーを取り付け，水平方向の移動を拘束し，竜巻防護ネットの落下を防止する設計とする
- ストッパーは設計飛来物による衝撃荷重や竜巻による風圧力に対し，フレームを支持可能な設計とする
- ストッパーの強度設計は，設計条件②（ゴム支承の水平方向の拘束が無く，ストッパーに全ての荷重を伝達）にて実施する

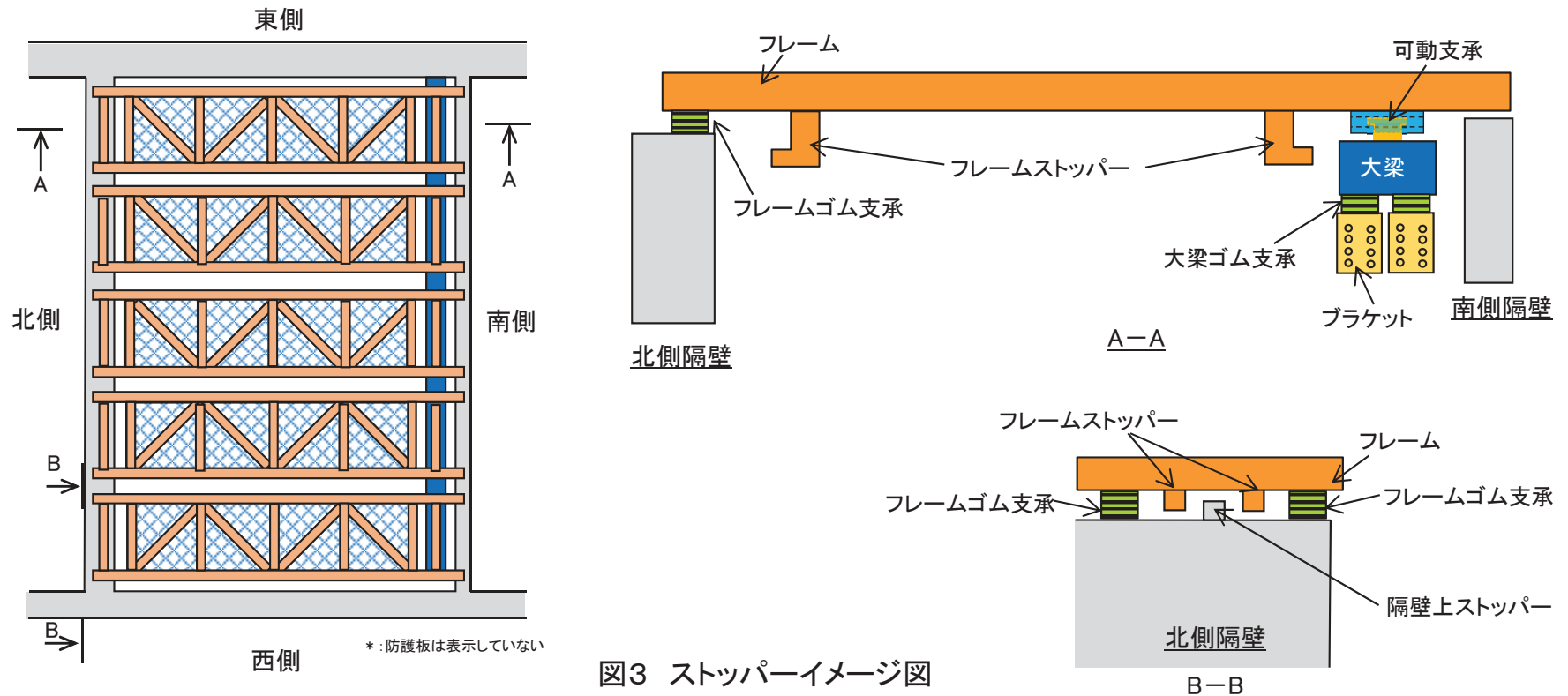
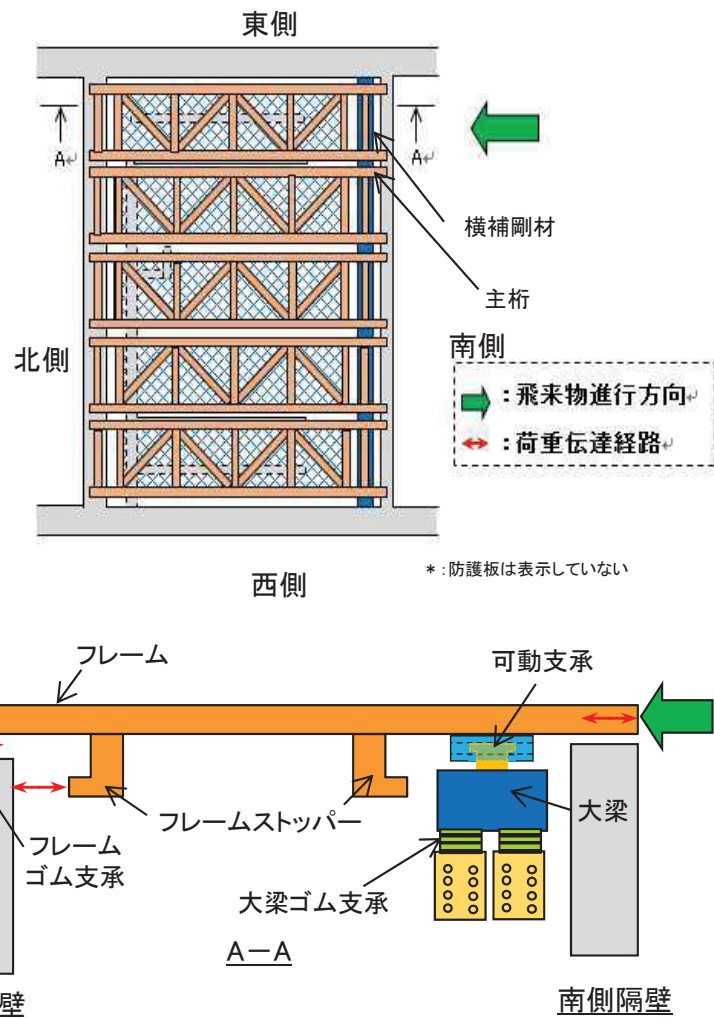
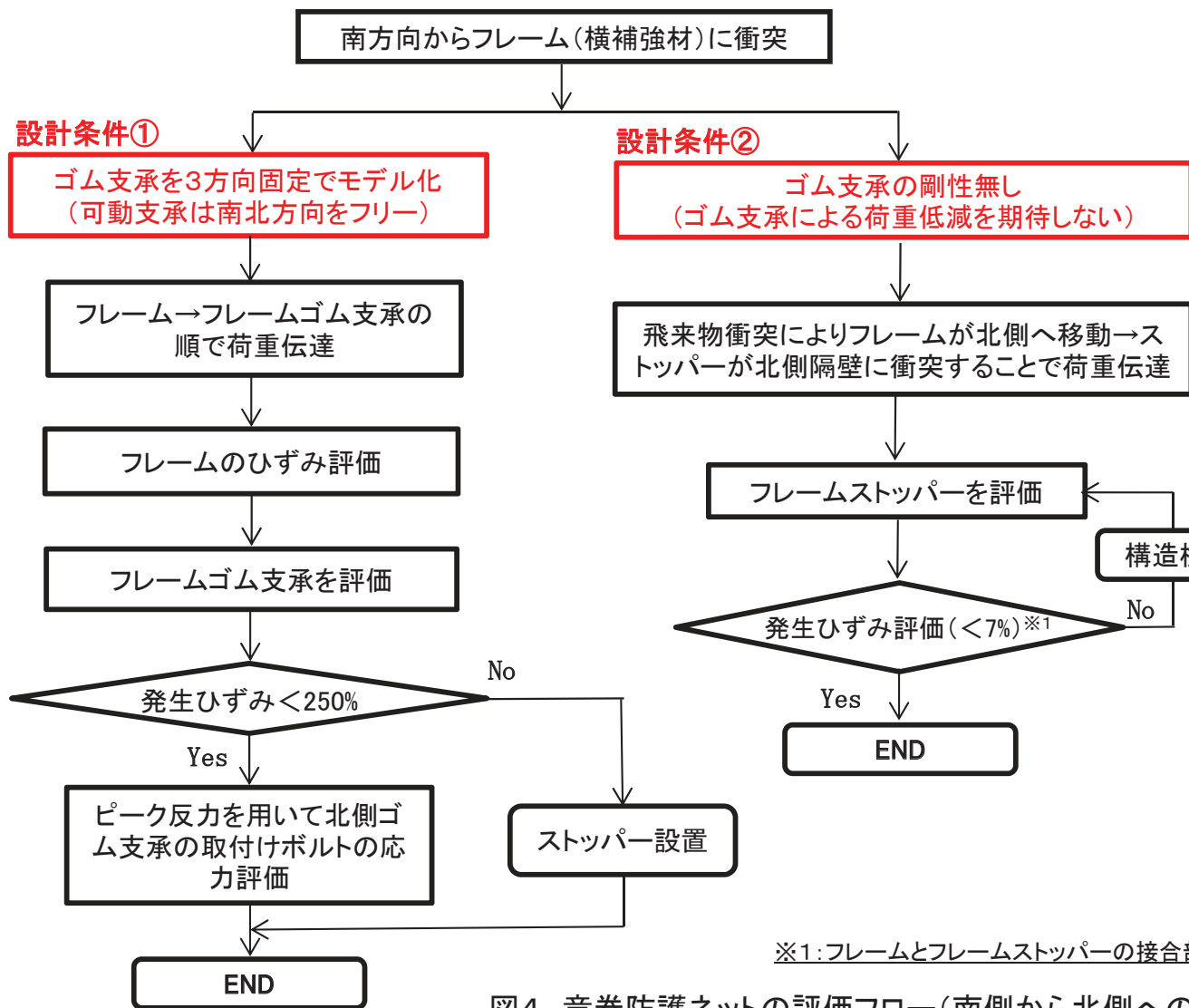


図3 ストッパーイメージ図

審査会合における指摘事項への回答【指摘事項③】（16／23）

「(1)衝撃荷重に対するゴム支承・可動支承の影響」及び「(2)ストッパーの設置」を踏まえた評価方法として、フレームに飛来物が衝突した場合の部材の評価フローを示す

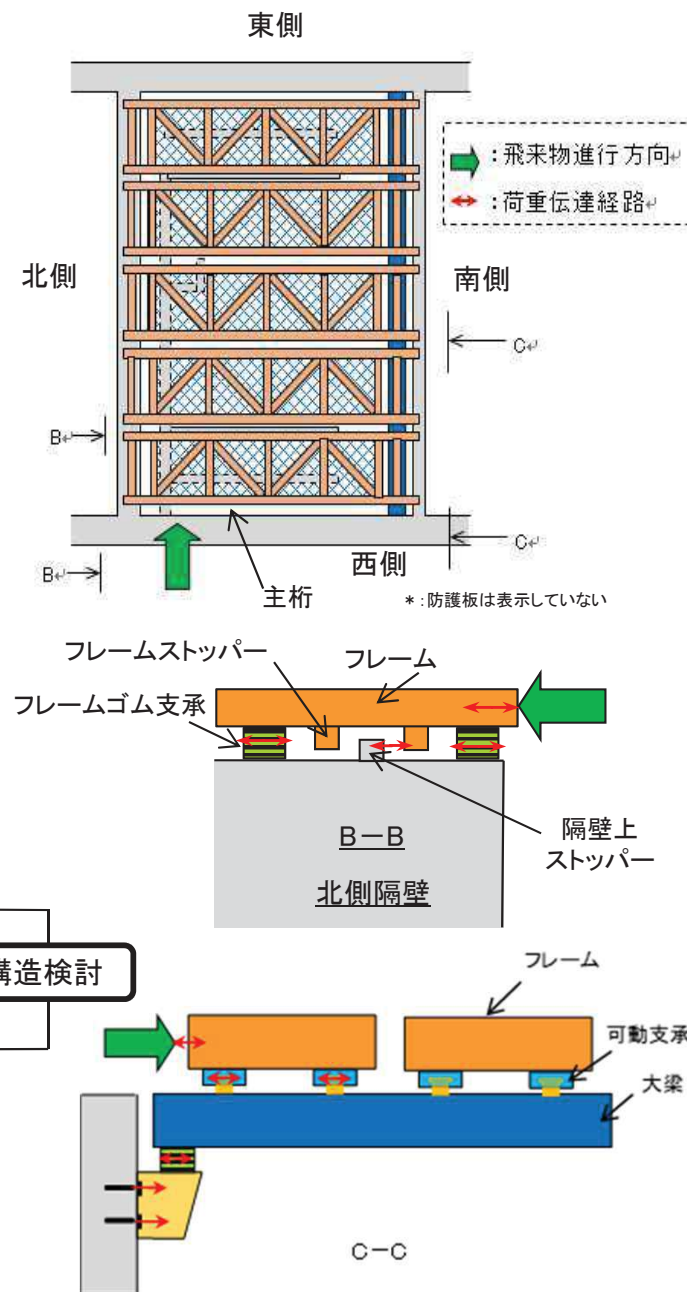
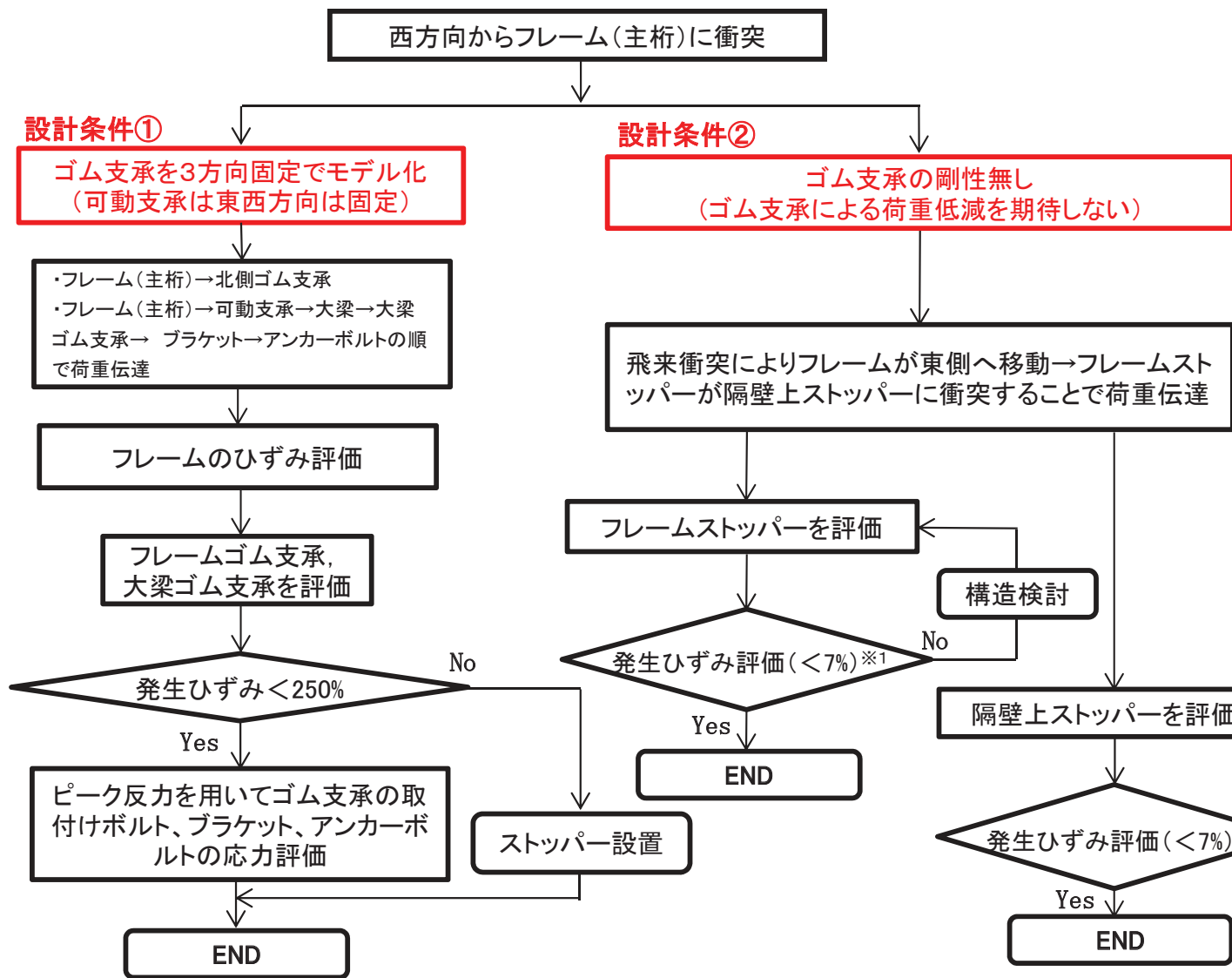
①南側から北側への水平衝突に対する評価フロー



※1: フレームとフレームストッパーの接合部は発生応力の確認も併せて実施する

図4 竜巻防護ネットの評価フロー(南側から北側への衝突)

②西側から東側への水平衝突に対する評価フロー



※1: フレームとフレームストッパーの接合部は発生応力の確認も併せて実施する

※2: 隔壁上ストッパーの取付ボルトは発生応力の確認も併せて実施する

図5 竜巻防護ネットの評価フロー(西側から東側への衝突)

審査会合における指摘事項への回答【指摘事項③】（18／23）

③鉛直衝突に対する評価フロー

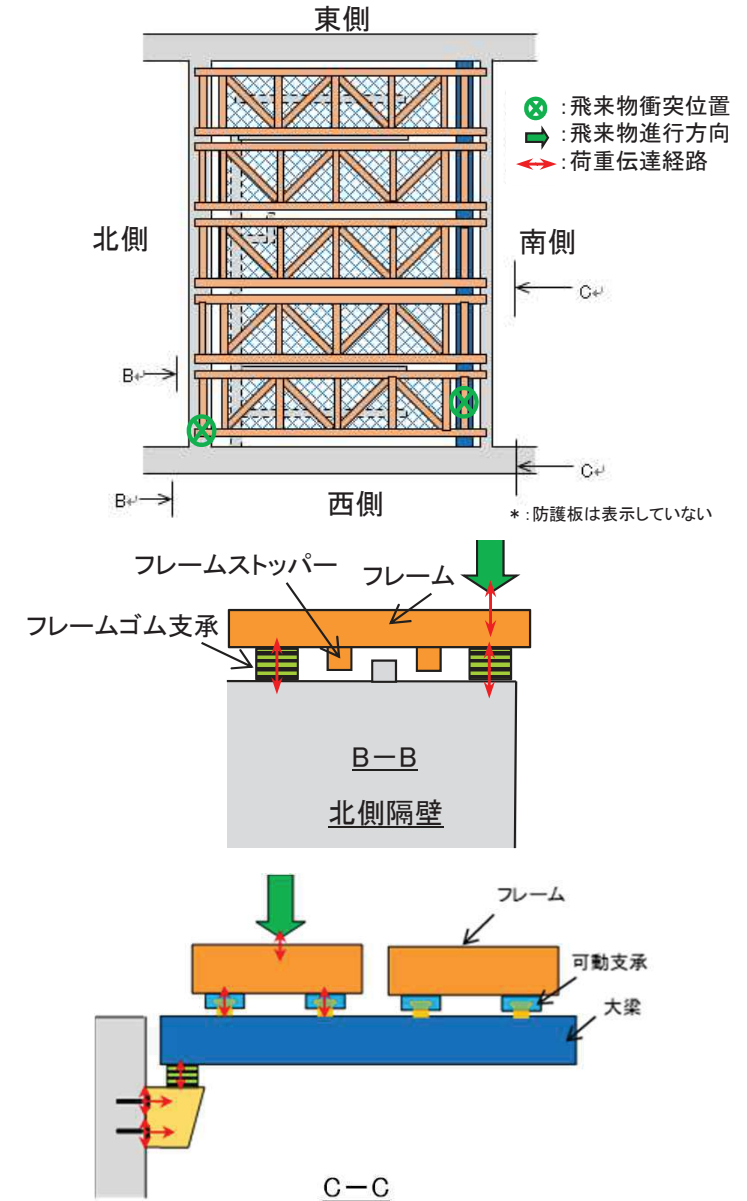
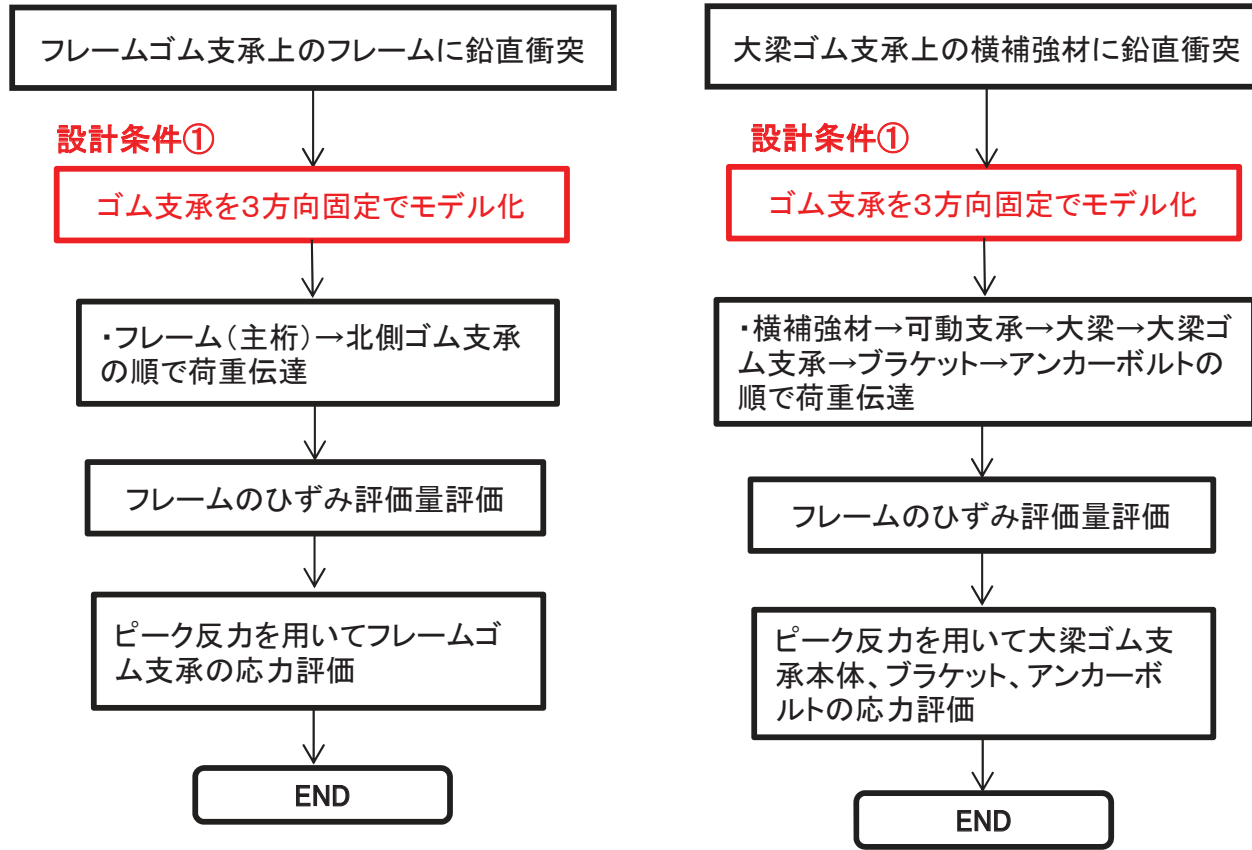


図6 竜巻防護ネットの評価フロー(鉛直衝突)

飛来物の衝突については、衝突部位、衝突方向により影響が異なることが考えられるため、その他の評価結果等について、工事計画認可段階に示し、必要に応じて設計に反映する

審査会合における指摘事項への回答【指摘事項③】（19／23）

(3) 作用荷重によるフレームの変位に対する影響

- ゴム支承, 可動支承に支持されているフレーム, ゴム支承に支持されている大梁は, 設計竜巻による風荷重や地震による荷重によって水平方向の変位が生じることから, 他の設備との干渉について考慮する必要がある
- フレーム間や大梁と海水ポンプ室補機ポンプエリア壁面との間等には上記の発生変位を踏まえてクリアランスを確保する設計とする
- 飛来物衝突時の変位に対しては, ストッパーを設置することで他の設備との干渉を防止する

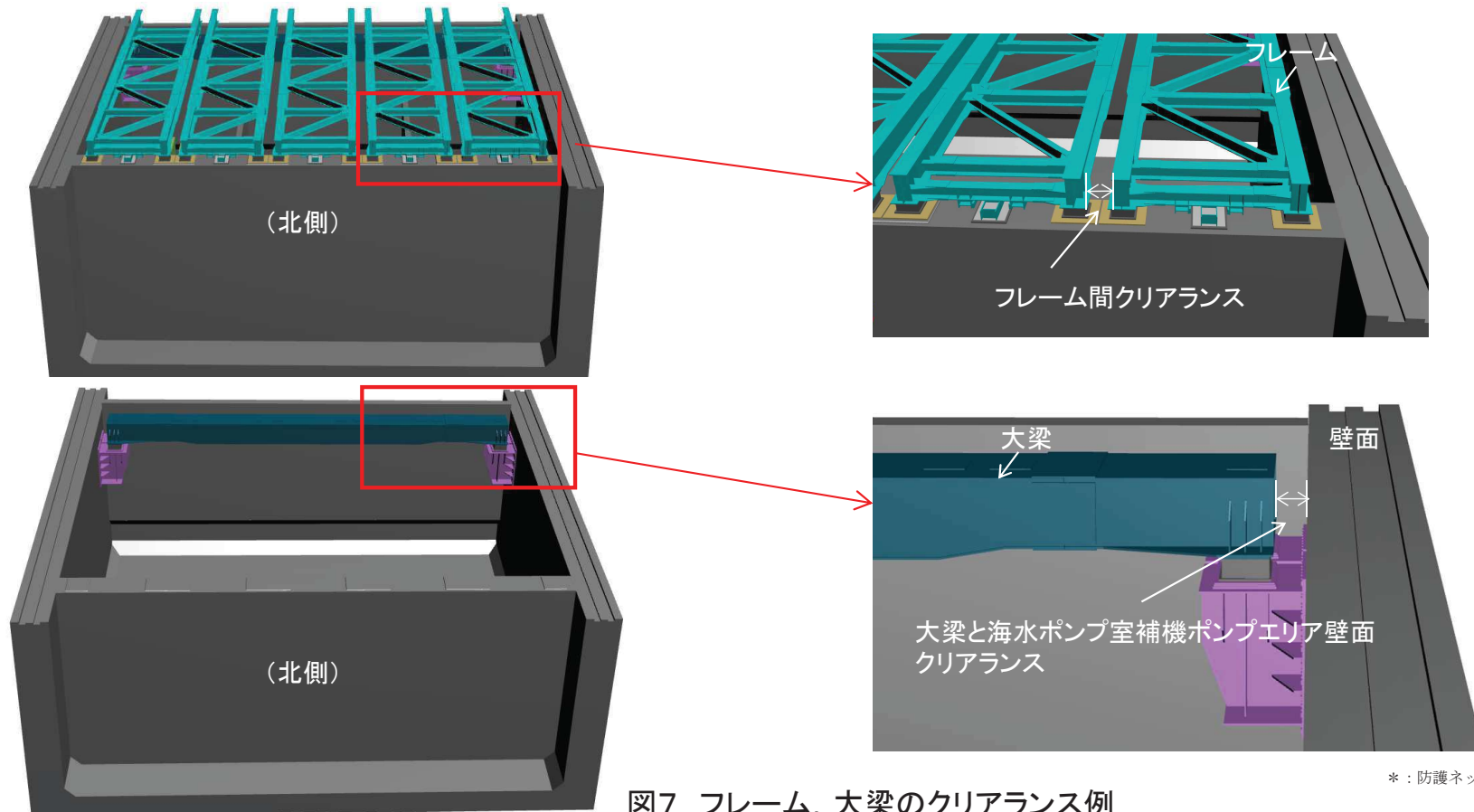


図7 フレーム, 大梁のクリアランス例

審査会合における指摘事項への回答【指摘事項③】（20／23）

(3) 作用荷重によるフレームの変位に対する影響

- フレーム間及びフレームと海水ポンプ室補機ポンプエリア壁面にクリアランスを確保していることから、これらのクリアランスから設計飛来物の侵入を防ぐために、フレームに防護板を設置する
- 防護板はフレームの変位を考慮した上で、ラビリンス構造とすることで、設計飛来物（鋼製材）が通過しない構造とする

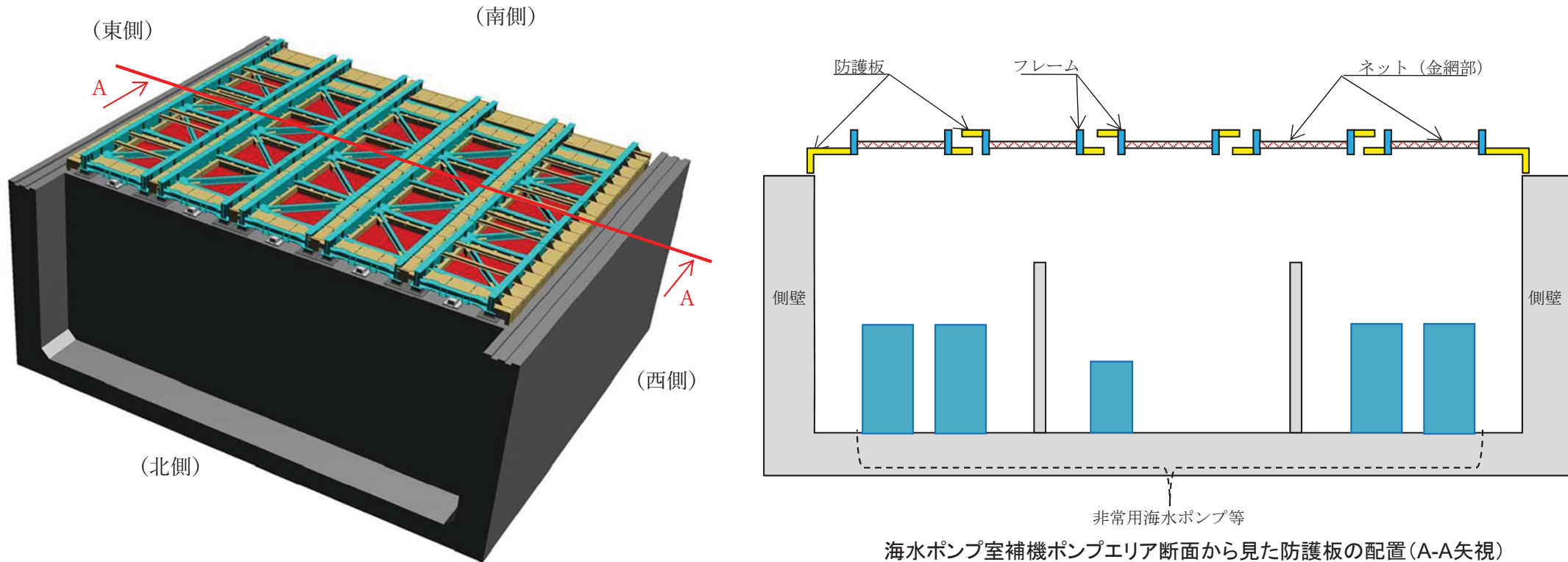


図8 フレーム、防護板等配置イメージ

審査会合における指摘事項への回答【指摘事項③】（21／23）

（4）振動による影響

- 飛来物の衝突による振動や、設計竜巻の風による振動は作用時間が短く、一時的なものであることから、共振が発生して構造健全性に影響を与える可能性は低い
- 一定の風が継続して吹く場合、風による共振が発生する可能性が考えられるため、共振や疲労などの風による振動への影響について検討し、必要に応じ、竜巻防護ネットの構造設計に反映する
- 振動による影響に対する検討結果含む詳細は工事計画認可段階にて示す

審査会合における指摘事項への回答【指摘事項③】(22/23)

4. 設置許可段階における説明内容

➤ 「原子力発電所の竜巻影響評価ガイド」(以下「竜巻ガイド」という)における要求

- ①設計荷重(設計竜巻荷重及びその他の組み合わせ荷重)が適切に考慮されていること。ただし、設置許可段階においては、その基本的な種類や値等が適切に設定されていることを確認する。(設計対象施設の部位に作用させる設計荷重の詳細は、詳細設計段階において確認する)
- ②設計荷重に対して、設計対象施設の構造健全性等が維持されて安全機能が維持される方針であること。

➤ 竜巻防護ネットに対する設置許可段階での説明内容は以下のとおり

設置許可段階での説明内容											
①設計荷重の設定	竜巻防護ネットの設計飛来物の種類や速度を設定については審査会合で説明済(平成30年4月12日, 5月31日)										
②安全機能が維持される方針	<p>竜巻防護ネットへの飛来物衝突時における評価方針, 評価フローを策定し, これに基づき設計することで, 安全機能を維持</p> <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th style="width: 10%;"></th> <th style="width: 45%; background-color: #ffff00;">評価対象</th> <th style="width: 45%; background-color: #ffff00;">設計方針</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td rowspan="3" style="writing-mode: vertical-rl; text-orientation: upright; text-align: center;">竜巻防護ネット</td> <td style="text-align: center;">ネット(金網部)</td> <td>電中研報告にて検証を行っている評価方法を適用する</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">防護板</td> <td>審査実績のあるBRL式による評価方法を適用する</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">フレーム 大梁 ゴム支承・可動支承 ブラケット ストッパー</td> <td> ゴム支承・可動支承の採用によって必要となる設計上の配慮及び対策が必要な事項を踏まえた設計とする (ゴム支承・可動支承の衝撃荷重に関する評価は設計条件①及び設計条件②が両立する設計を行うことで, ゴム支承, 可動支承の影響の不確かさを考慮した設計とする) </td> </tr> </tbody> </table>		評価対象	設計方針	竜巻防護ネット	ネット(金網部)	電中研報告にて検証を行っている評価方法を適用する	防護板	審査実績のあるBRL式による評価方法を適用する	フレーム 大梁 ゴム支承・可動支承 ブラケット ストッパー	ゴム支承・可動支承の採用によって必要となる設計上の配慮及び対策が必要な事項を踏まえた設計とする (ゴム支承・可動支承の衝撃荷重に関する評価は設計条件①及び設計条件②が両立する設計を行うことで, ゴム支承, 可動支承の影響の不確かさを考慮した設計とする)
	評価対象	設計方針									
竜巻防護ネット	ネット(金網部)	電中研報告にて検証を行っている評価方法を適用する									
	防護板	審査実績のあるBRL式による評価方法を適用する									
	フレーム 大梁 ゴム支承・可動支承 ブラケット ストッパー	ゴム支承・可動支承の採用によって必要となる設計上の配慮及び対策が必要な事項を踏まえた設計とする (ゴム支承・可動支承の衝撃荷重に関する評価は設計条件①及び設計条件②が両立する設計を行うことで, ゴム支承, 可動支承の影響の不確かさを考慮した設計とする)									

➤ 設計方針を踏まえた構造設計, 強度評価結果については, 詳細設計段階(工認)にて示す

審査会合における指摘事項への回答【指摘事項③】(23/23)

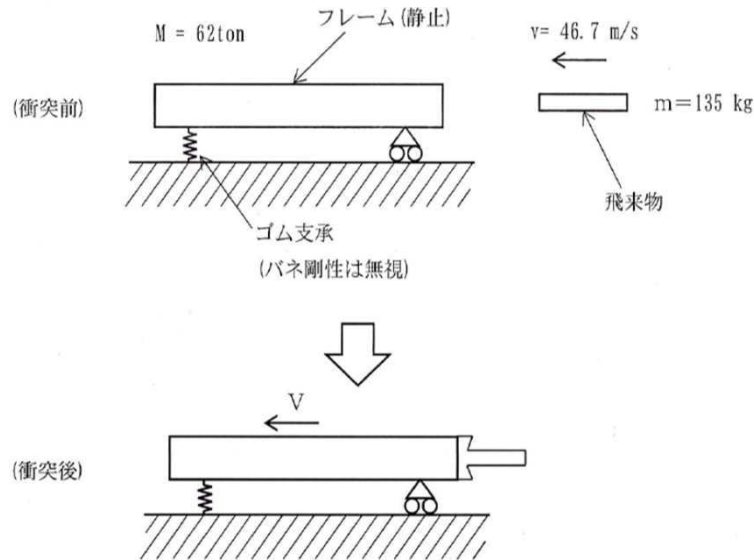
5. まとめ

- 女川2号炉の竜巻防護ネットは支持部にゴム支承, 可動支承を採用していることから, それらの影響を踏まえ, 設計上の配慮や対策を実施する必要がある
- 竜巻防護ネットの各部位に対して, 竜巻による損傷モードを設定し, 損傷モードを踏まえた評価項目, 設計要求事項を設定した
- ゴム支承, 可動支承の特性を考慮し, ゴム支承, 可動支承の採用による必要となる設計上の配慮又は対策を整理した
- 竜巻防護ネットは上記の検討を踏まえて, ゴム支承, 可動支承の影響による飛来物衝突に対する不確実性を包絡した設計方針とする
- ゴム支承, 可動支承が損傷した場合を想定し, 竜巻防護ネットが非常用海水ポンプ等に落下しないようにストッパーを設置し, 非常用海水ポンプ等に波及的影響を及ぼさない設計とする

- 今後は, 本設計方針に従い構造設計及び評価を実施し, 強度評価結果含む詳細は工事計画認可段階にて示す
- 工事計画認可段階では, 飛来物の衝突について, 衝突部位, 衝突方向により影響が異なることが考えられるため, その影響や評価結果等についても検討し, 必要に応じ設計に反映する

【参考資料1】飛来物衝突時と地震時におけるゴム支承の変位速度の比較

- 竜巻防護ネットのフレームに飛来物が衝突した際のフレームの移動速度を、衝突前後の運動量保存則から算出すると、約0.1m/sとなる
- 一方、地震時のゴム支承の動的特性を把握するため、振動数依存性試験を実施しており、変位速度の最大値は約0.06~0.60m/sの範囲の速度範囲において、せん断剛性に有意な変化がないことを確認している
- したがって、飛来物衝突時の評価においても、耐震評価で得られたゴム支承のせん断剛性を適用することが可能であると考える



飛来物衝突前後のイメージ図

運動量保存則より $mv = (m + M)V$

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

v : 設計飛来物(鋼製材)衝突速度 ($v = 46.7\text{m/s}$)

M : フレーム重量 ($M = 62000\text{kg}$)

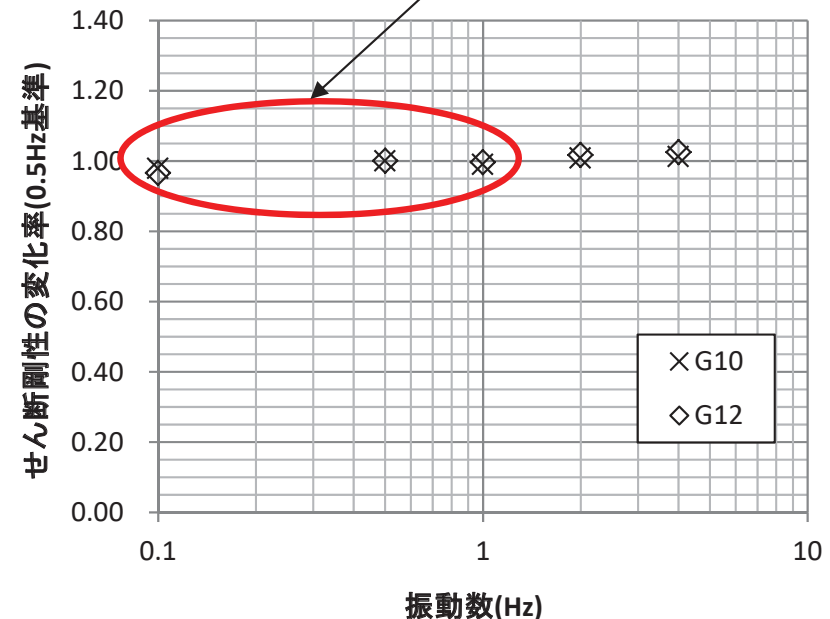
V : 衝突後のフレーム移動速度 (m/s)

$$V = mv / (m + M)$$

$$= 135 \times 46.7 / (135 + 62000)$$

$$\approx 0.101 (\text{m/s})$$

振動数依存性試験(ゴム支承を振幅95mmで単振動)により、ゴム支承の変位速度0.06m/s(0.1Hz)~0.6m/s(1Hz)において、ゴム支承のせん断剛性に有意な変化がないことを確認している



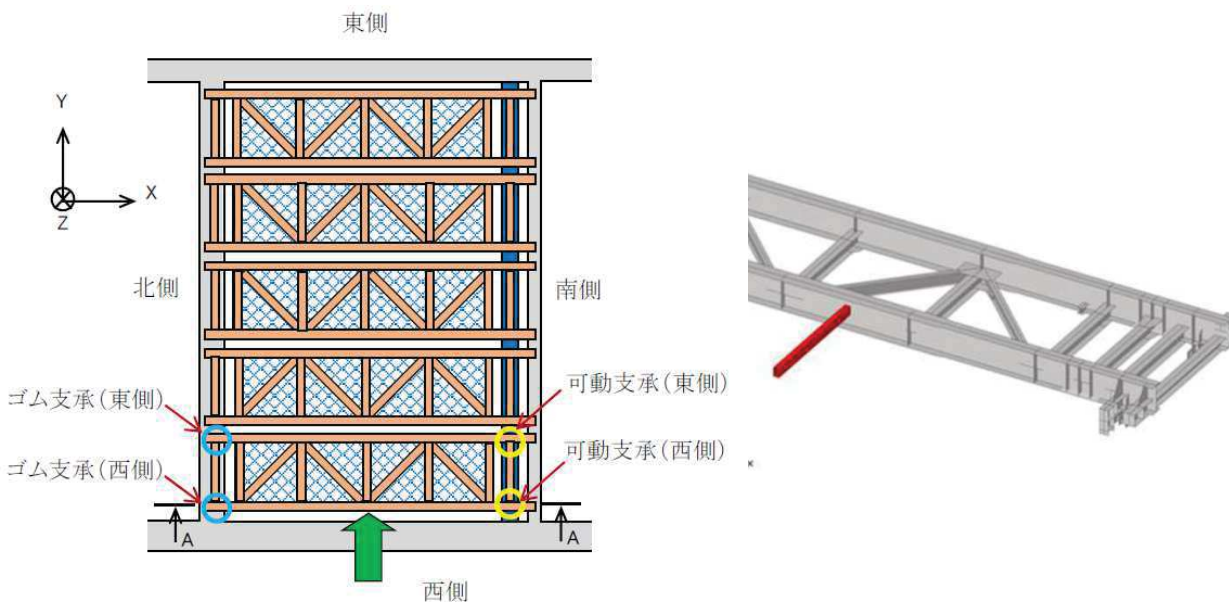
振動数依存性試験結果抜粋

【参考資料2】衝突解析におけるゴム支承の境界条件の影響確認

- 衝突解析におけるゴム支承の境界条件を耐震評価に使用した線形ばねモデルと同等としたものと、ゴム支承の影響を排除する観点で3方向固定としてモデル化したものでそれぞれ衝突解析を実施し、ゴム支承と可動支承へ伝達される衝撃荷重の差を比較した
- 衝突解析の結果、ゴム支承の境界条件を固定条件とした場合が大きな反力を得られることが確認された。特にゴム支承において衝撃荷重に大きな差が確認された(固定条件としたときの衝撃荷重のピーク値は、ゴム支承のせん断剛性を考慮した場合に比べて、約100~200倍大きな値となる)
- 衝突荷重に対するゴム支承の評価については、十分な知見、実績があるとは言い難いため、竜巻防護ネットの設計における不確実性を考慮する観点から、衝突解析においてはゴム支承のせん断剛性を考慮しない固定条件で解析を実施する

表 ゴム支承せん断剛性影響の検討結果

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

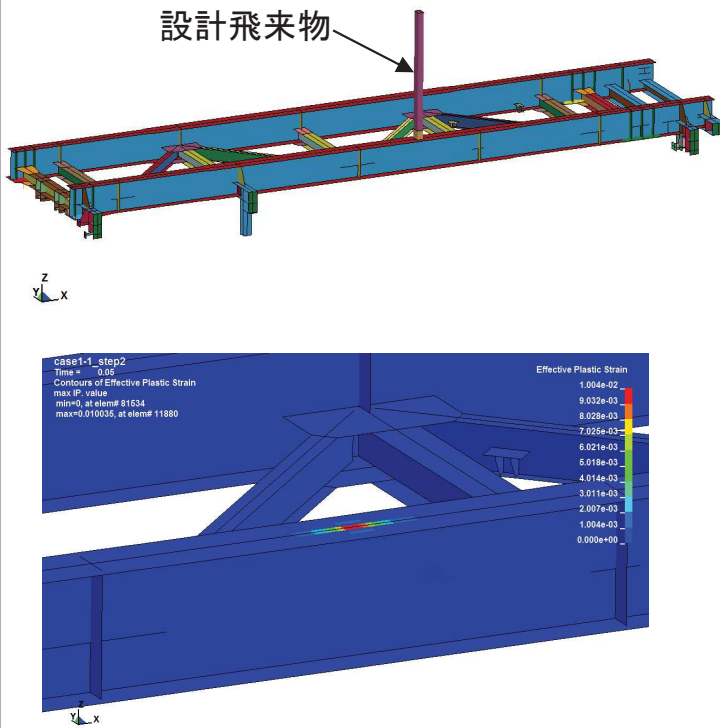


ゴム支承の影響検討における飛来物衝突位置および解析モデル図

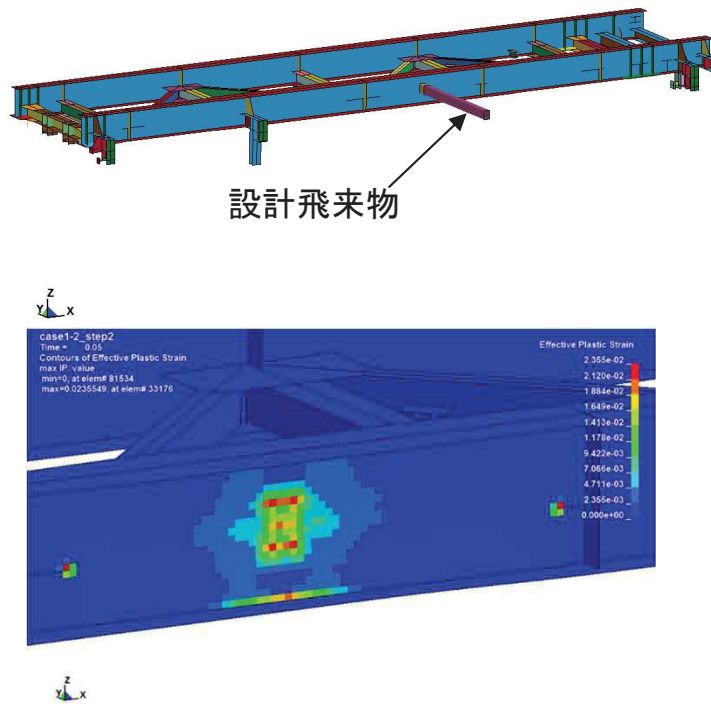
【参考資料3】衝突部位，衝突方向を変化させた場合の衝突解析への影響

- フレーム等の構造設計においては，衝突解析(LS-DYNA)によって算出したフレーム等のひずみ量や各支承に発生するピーク反力(設計条件①及び設計条件②)を用いて構造物の設計を実施する
- 衝突評価においては，飛来物の衝突部位，衝突方向により影響が異なることが考えられるため，様々な方向からの衝突を想定し評価を実施する
- 今後の詳細設計において，衝突部位，衝突方向の影響を踏まえた衝突評価の感度解析を実施し，設計の妥当性について確認する

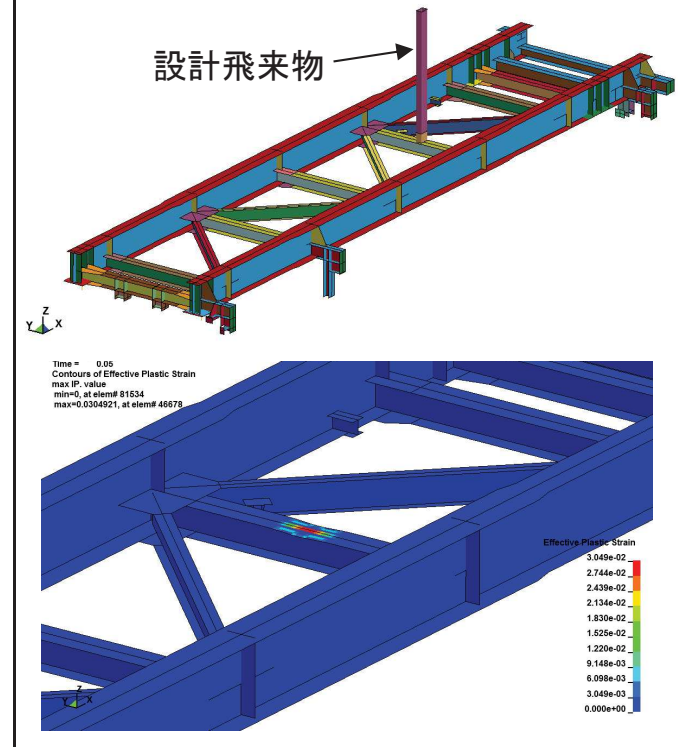
(1) フレーム中央への鉛直衝突



(2) フレーム中央への水平衝突



(3) フレーム(横補強材)への鉛直衝突



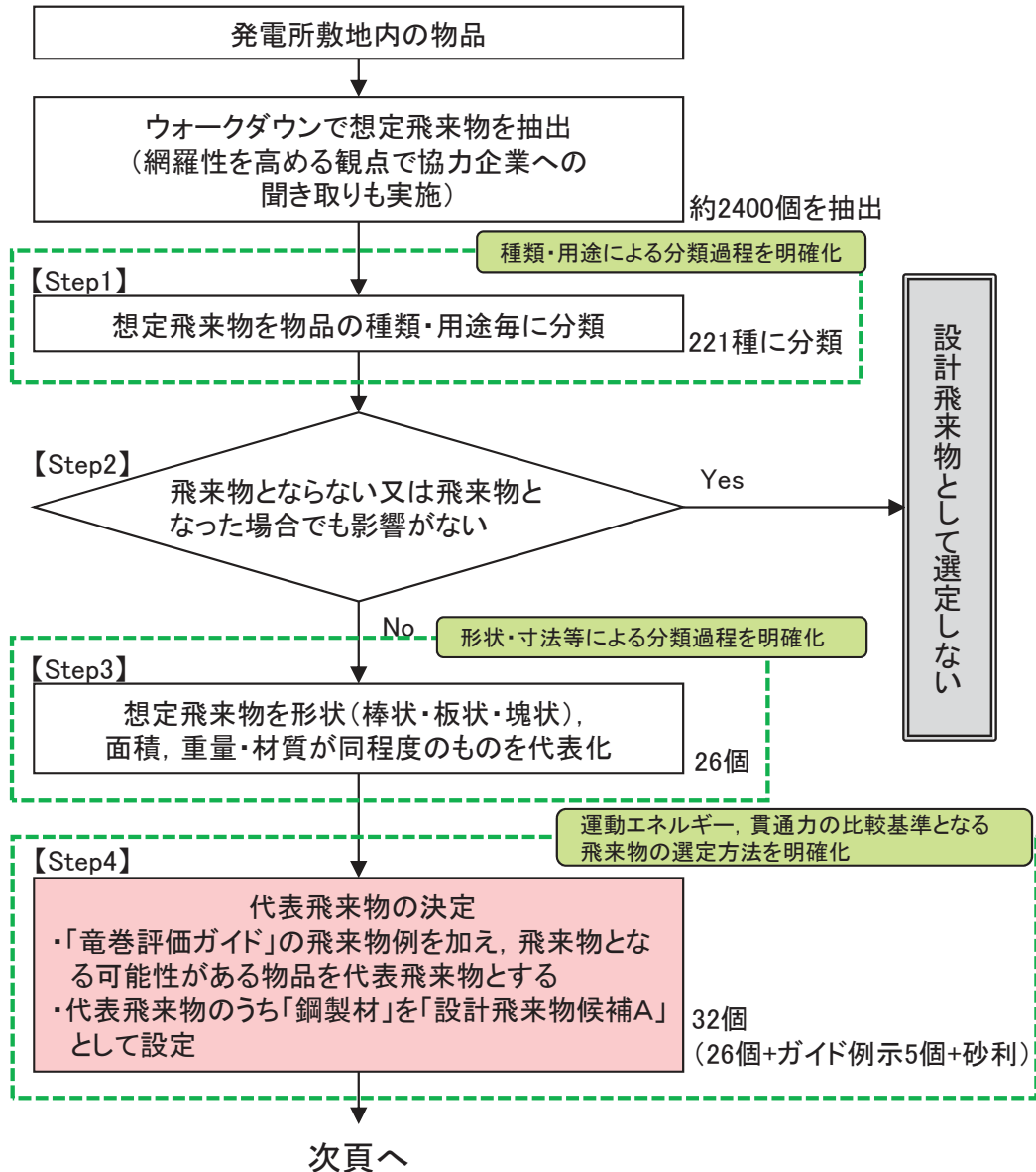
衝突モデル及び解析結果イメージ

・感度解析による衝突解析への影響及び設計への反映事項については，詳細設計にて示す

(参考) 審査会合時の説明内容 (1/3)

4. 設計飛来物の抽出 (1/3)

- 従来の設計飛来物の抽出の考え方の変更はないものの、プロセスを明確化する観点でフローを見直した
- ウォークダウンで網羅的に抽出した想定飛来物を分類、評価した結果、設計飛来物として「鋼製材」及び「砂利」を選定した



【Step1】
例) 大型コンテナ(11個)は「コンテナボックス」に分類
他の物品も同様に整理し、221種に分類

大型コンテナ(11個)

【Step2】
竜巻被害事例を参考に以下の観点で判定

飛来物化しない(風の影響を受けにくい形状(網状など)、頑健に固定)	金網、本設備等
設備への影響が明らかに小さい(分解し小型軽量となるもの、柔らかい材質)	プラスチック製、木製等
倒壊するが飛来物とはならない	フェンス、樹木等

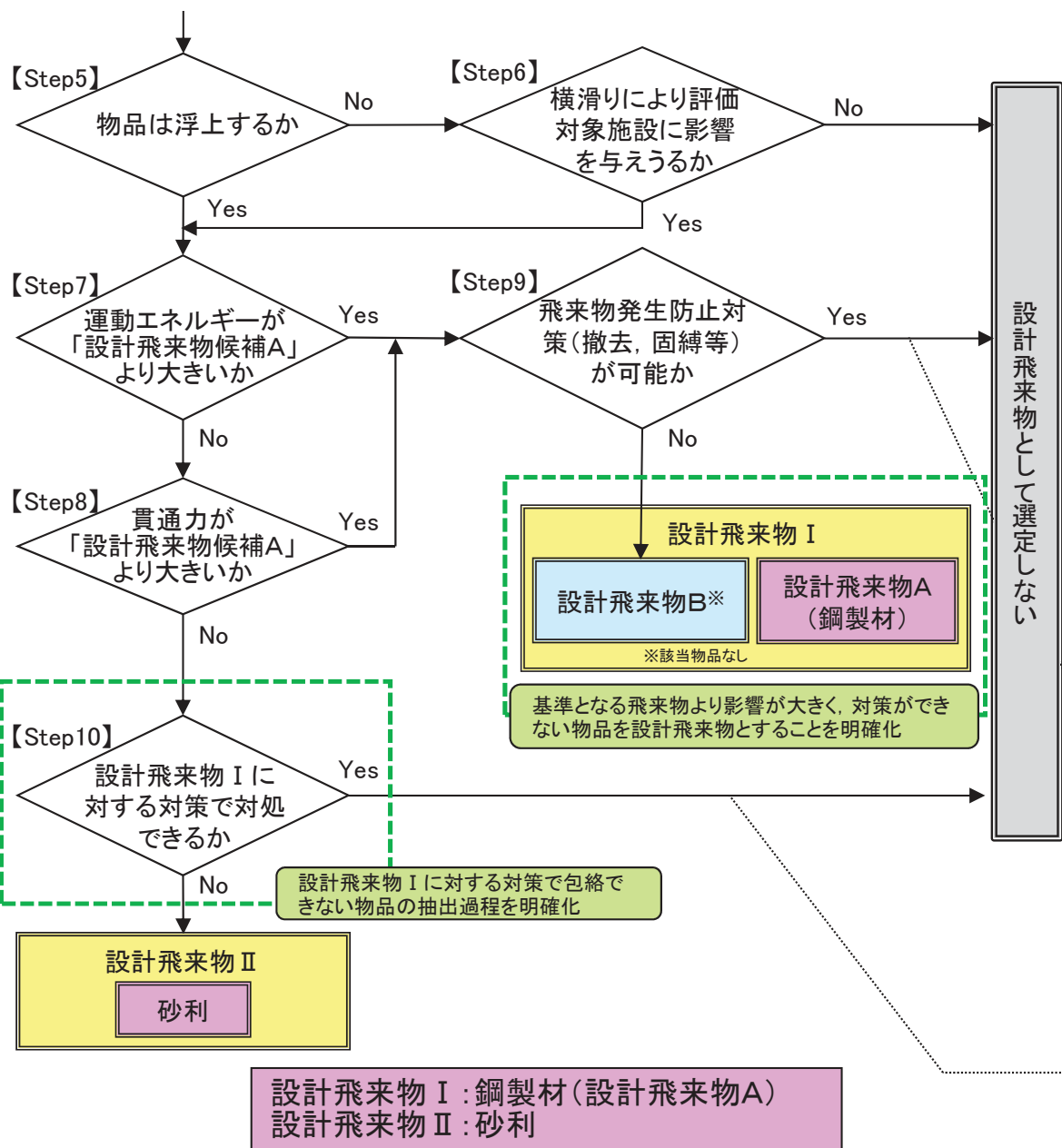
【Step3】
例) 大型の鋼材物品を形状、面積等の特徴から、「コンテナボックス」に代表化
他の物品も同様に評価し、26個に代表化

【Step4】
「鋼製材」は固縛等の運用面での対応は可能であるものの、仮設資材として使用される状況を勘案すると、管理が容易とはいいがたく、また、飛散した場合の貫通力等の影響が大きいことから、「設計飛来物候補A」として設定する

図4-1 設計飛来物の抽出フロー

4. 設計飛来物の抽出 (2/3)

前頁より



【Step5】
飛来物の寸法, 重量, 形状により空力パラメータを算出し, 当社の飛散評価により浮上の有無を判断

【Step6】
横滑りの過程で, 評価対象施設廻りに障害物となる施設がある場合には, 横滑りにより影響を与えないと判断

【Step7, Step8】
代表飛来物毎に当社の飛散評価を行い, 水平速度が最大となる初期高さにおける運動エネルギー及び貫通力を「設計飛来物候補A」と比較(比較結果は次頁参照)

【Step9】
「設計飛来物候補A」の影響を上回る物品は, 飛来物発生防止対策を施すか, 評価対象施設からの離隔及び頑健な建物内への移動等の運用を行う
上記対策が実施困難な物品があれば, 「設計飛来物B」として選定

- 分類された飛来物**
- ・形鋼
 - ・バス(大, 中, 小)
 - ・コンテナボックス
 - ・オールレーンクレーン
 - ・大型鋼管
 - ・トレーラー
 - ・循環水ポンプケーシング
 - ・コンクリート板
 - ・(ガイド)コンテナボックス
 - ・循環水ポンプ架台
 - ・敷き鉄板
 - ・(ガイド)コンクリート塊
 - ・フォークリフト
 - ・循環水ポンプインペラ
 - ・コンクリート塊
 - ・(ガイド)コンクリート板
 - ・乗用車(セダン, 軽)
 - ・(ガイド)トラック
 - ・(ガイド)コンクリート板
 - ・発電機
 - ・加熱器バスケット
 - ・電柱(資材)
 - ・鉄パイプ
 - ・自動販売機
 - ・大型鋼製枠

【Step10】
竜巻防護ネットをすり抜ける可能性がある物品として砂利を選定

- 分類された飛来物**
- ・家庭用室外機
 - ・マンホール蓋
 - ・ガスボンベ
 - ・(ガイド)鉄パイプ

図4-1 設計飛来物の抽出フロー

(参考) 審査会合時の説明内容 (3/3)

1. 審査会合における指摘事項への回答【指摘事項①】(14/14)

11. 設計飛来物の速度等の設定

➤ 設定した飛散評価条件に基づき評価した結果を踏まえ、以下のとおり設計飛来物の速度等を設定した(表4及び図19参照)

(1) 最大水平速度

- 流入層高さ、初期高さの感度解析結果における水平速度の最大値(鋼製材:46.6m/s, 砂利:59.3m/s)を適用

(2) 最大鉛直速度

- 飛散高さから地面まで自由落下した場合の最大鉛直速度を適用
- 高台を考慮して、評価対象施設ごとに鉛直速度を設定

(3) 飛散高さ、飛散距離

- 飛散評価条件に基づき設定

表4 評価対象施設毎の設計飛来物の速度(鋼製材)

主な評価対象施設	設計飛来物(鋼製材)が到達する高台のうち最大鉛直速度が最も大きくなる高台※1		鋼製材	
			最大水平速度 [m/s]	最大鉛直速度 [m/s]※2
防潮堤	⑬	O.P.62m	46.6	34.7
2号タービン建屋	①	O.P.56m		32.9
2号補助ボイラー建屋	①	O.P.56m		32.9
防潮壁	①	O.P.56m		32.9
排気筒	⑧	O.P.50m		31.1
1号制御建屋	⑧	O.P.50m		31.1
2号制御建屋	無			16.7
2号原子炉建屋				
軽油タンク				
竜巻防護ネット				

※1 番号は図19の高台の位置を示す
複数の高台から設計飛来物が到達する場合は、設計飛来物が到達する高台のうち最も高い高台を設定

※2 高台高さに初期高さ(11.5m)を加えて評価した飛散高さからの自由落下速度を適用

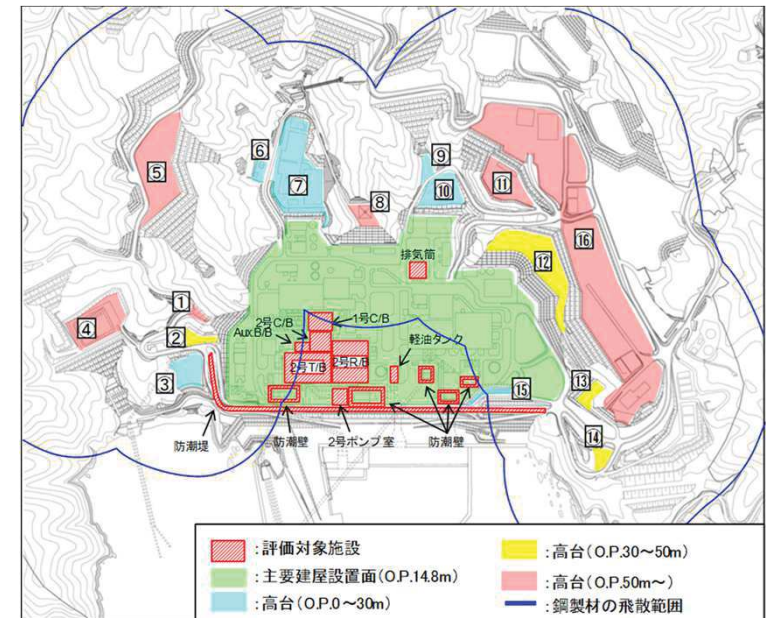


図19 各高台からの設計飛来物の飛散範囲

審査会合における指摘事項への回答【指摘事項④】(1/2)

【審査会合における指摘事項④】

道路橋示方書，道路橋支承便覧の適用性について，竜巻防護ネットの構造形式及び他の参考文献等を踏まえ，整理して提示すること。

【回答④】

- 竜巻防護ネットの耐震設計に適用している道路橋示方書においては，橋の重要度に応じて下表に示す内容の耐震性能の要求が定められており，B種の橋はA種の橋に対してより高い要求となっており，レベル2地震動において損傷が限定的なものとなるよう求められている。
- また，支承部の耐震性能については，支承部のタイプが分類されており，タイプBの支承部の場合には，レベル2地震動に対しても性能が満足される構造が求められる。
- 竜巻防護ネットに適用するゴム支承については，より高い要求となっているB種の橋及びタイプBの支承部の要求を参照した上で，基準地震動 S_s に対して支承部に損傷がなく，機能を維持する設計としている。
- したがって，支承部について基準地震動 S_s に対して損傷せず機能を維持する設計であることから，竜巻防護ネットへの要求機能である上位クラス施設への波及的影響防止について満足できるものと考えている。

4条地震による損傷の防止 別紙-5 竜巻防護ネットの耐震構造設計について 添付資料2.3

道路橋示方書に規定されている橋の種別と耐震性能要求

設計地震動		橋の重要度の区分	
		A種の橋*1	B種の橋*1
レベル1地震動*2		地震によって橋としての健全性を損なわない性能	
レベル2 地震動*3	タイプⅠの地震動(プレート境界型)	地震による損傷が橋として致命的とならない性能	地震による損傷が限定的なものにとどまり*4，橋としての機能の回復が速やかに行い得る性能
	タイプⅡの地震動(内陸直下型)		

*1 A種の橋:B種以外の橋(重要度が標準的な橋)，B種の橋:高速自動車国道や一般国道の橋など特に重要度が高い橋

*2 橋の供用期間中に発生する確率が高い地震動

*3 橋の供用期間中に発生する確率は低いが大きな強度をもつ地震動

*4 エネルギー吸収することを目的に塑性化することを考慮して設計している部材のみが塑性変形している状態

道路橋示方書・同解説(平成14年3月，社団法人日本道路協会)より抜粋

道路橋示方書及び道路橋支承便覧に規定されている支承部の分類と耐震性能要求

	タイプAの支承部	タイプBの支承部
耐震性能要求	レベル1地震動により生じる水平力及び鉛直力に対しては支承部の機能を確保できるが，レベル2地震動により生じる水平力に対しては，変位制限構造と補完し合って抵抗する	レベル1地震動及びレベル2地震動により生じる水平力及び鉛直力に対して，支承部の性能を満足する

道路橋示方書・同解説(平成14年3月，社団法人日本道路協会)より抜粋

【回答④】

- 竜巻防護ネットに適用するゴム支承の構造について、道路橋示方書及び道路橋支承便覧に示された構造要求への適合性を確認した結果、竜巻防護ネットのゴム支承はその要求範囲内であるとともに、材料や物性値についても要求範囲内であることを確認した。

4条地震による損傷の防止 別紙-5 竜巻防護ネットの耐震構造設計について 添付資料2.3

構造要求に対する適合性

		要求事項	竜巻防護ネットのゴム支承
平面形状		支承一辺の寸法として400mm～1100mm (せん断変形性能試験の実績データより)	550mm及び800mm
形状係数	一次形状係数	6程度以上の適用を推奨	8以上
	二次形状係数	4程度以上の適用を推奨	4以上

材料要求及び物性値要求に対する適合性

		要求事項	竜巻防護ネットのゴム支承
材料		鋼製材料:SS400, SM400, SC450等 ゴム材料:天然ゴム, クロロプレンゴム, スチレン・ブタジエンゴム	鋼製材料:SS400 ゴム材料:天然ゴム
物性値		天然ゴム:G6～G14	G10,G12

審査会合における指摘事項への回答【指摘事項⑤】

【審査会合における指摘事項⑤】

耐震設計上の既工認実績の有無について、体系的に整理して提示すること。

【回答⑤】

- 4条まとめ資料の「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)」においては、耐震Sクラス施設、上位クラスへ波及的影響を及ぼす下位クラス施設及びSクラス設備を支持する施設を対象として、今回の申請で適用する耐震設計手法について既工認等での実績を確認している。
- 竜巻防護ネットについては、波及的影響の対象設備として、設計手法の整理を行っており、その結果、以下の論点を選定した。
 - ・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ダル解析等を含めた耐震設計手法の適用性
- 本論点については、これまで自社プラント及び先行プラントいずれにおいても適用実績がなかったことから、今回、設置許可段階でその適用性と評価の見通しについて説明しているもの。

4条地震による損傷の防止 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) 添付資料1
別紙-5 竜巻防護ネットの耐震構造設計について

審査会合における指摘事項への回答【指摘事項⑥】(1/6)

【審査会合における指摘事項⑥】

ゴム支承及び可動支承を用いた構造物の地震応答解析手法について、非線形時刻歴応答解析ではなくスペクトルモーダル解析を選定した理由及び適切性を提示すること。

【回答④】

- 竜巻防護ネットの耐震設計には、スペクトルモーダル解析を適用している。
- これは、竜巻防護ネットが線形挙動を示すことを前提に、設計用床応答スペクトルの±10%の拡幅によって地震応答の不確かさを容易に設計に反映できることに加え、複数の地震応答を包絡して設計ができるため、保守的かつ簡便に設計が実施可能であることを踏まえたものである。
- 本検討では、免震装置などの設計では非線形の時刻歴応答解析を適用することが一般的であることを踏まえ、竜巻防護ネットに対するスペクトルモーダル解析の適用性について検証する。

審査会合における指摘事項への回答【指摘事項⑥】(2/6)

【地震応答解析に係る規格要求】

[JEAG4601]耐震設計の規格

- JEAG4601の機器・配管系(鋼材で製作された設備)に対する地震応答解析では、基本的にスペクトルモーダル解析又は時刻歴応答解析による線形解析を適用することを規定している。

[道路橋示方書, 道路橋支承便覧]橋梁の設計規格

- 竜巻防護ネットに適用するゴム支承について、JEAG4601に設計手法が規定されていないため、道路橋示方書、道路橋支承便覧を参照している。道路橋示方書、道路橋支承便覧では、支承部の評価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、支承部を等価線形に設定することで解析評価が線形解析となる場合、スペクトルモーダル解析の適用も認められている。

[JEAG4614]免震型施設の耐震設計規格(参考)

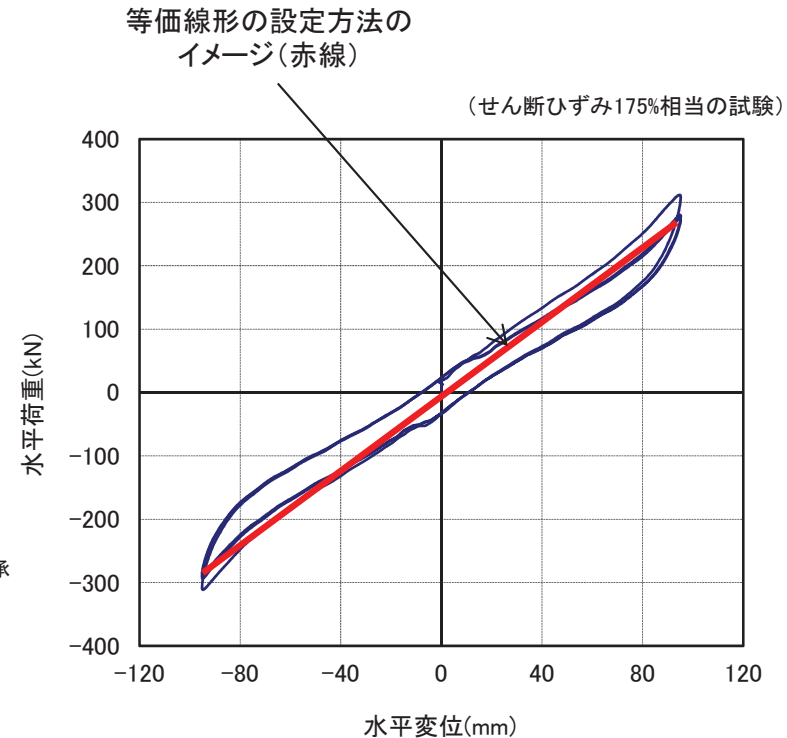
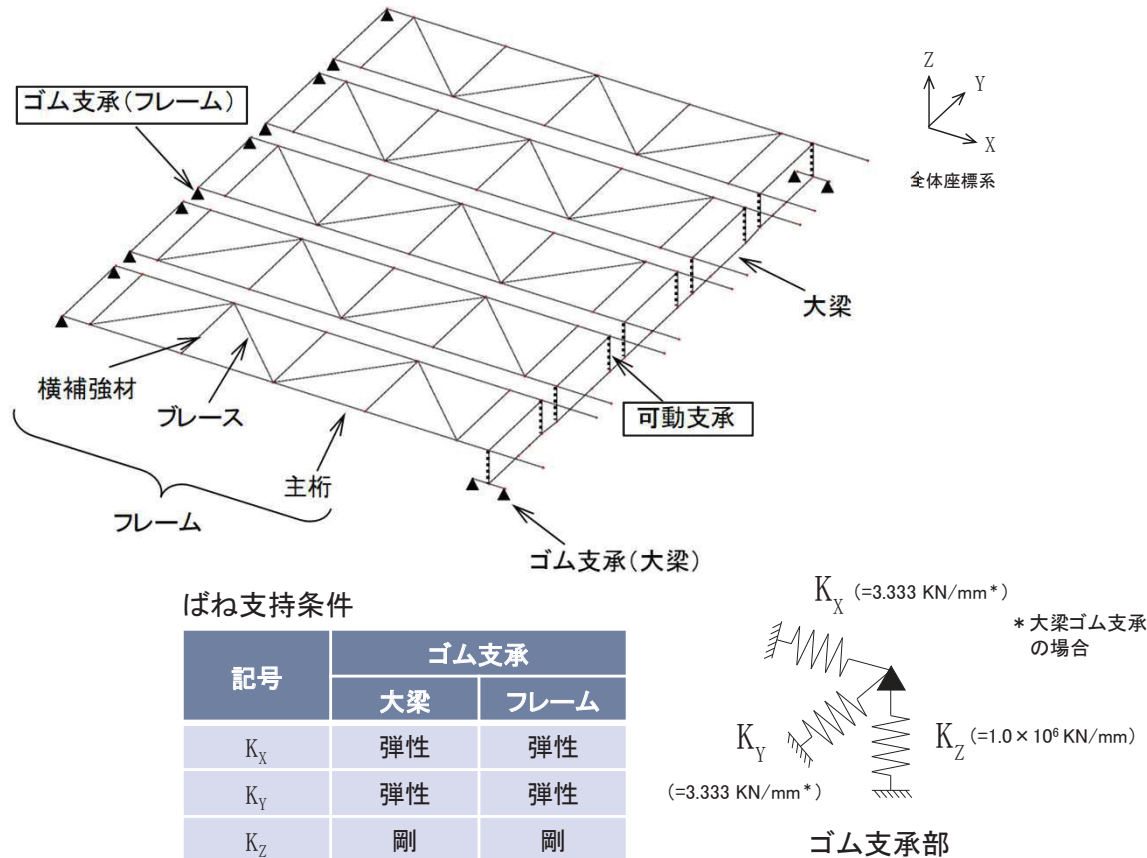
- JEAG4614においては免震装置(鉛プラグ入り積層ゴムや高減衰積層ゴム若しくはダンパの設置など)を適用した施設の設計に適用する規格であり、免震装置は非線形な挙動を示すこととなるため時刻歴応答解析の適用を基本としている。
- JEAG4614には「免震装置として、荷重－変形関係に非線形性を有するものが用いられる場合の地震応答解析には、原則としてJEAG4601-2008に記載されているモーダルアナリシス法、周波数応答解析法等のような振動系の線形性を前提とした解析手法は適用が難しい。このため地震応答解析は、以下に示す構造物等の非線形特性を踏まえた直接積分法による時刻歴応答解析によることを原則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

➡ 線形挙動を示す竜巻防護ネットの地震応答解析にスペクトルモーダル解析を適用することは可能である。竜巻防護ネットの構造特徴などを次頁以降に示す。

審査会合における指摘事項への回答【指摘事項⑥】(3/6)

【ゴム支承のモデル化の考え方】

- ゴム支承については、水平方向に比較的変形が発生しやすい構造特徴を有していることから、X,Y方向については設置するゴム支承の剛性を踏まえた設定としている。一方、鉛直方向には大きな剛性を示すことからZ方向は剛の設定としている。ゴム支承の特徴は水平方向剛性がゴム材料の物性が支配的になっていること。
- ゴム支承は、道路橋示方書、道路橋支承便覧を適用した設計であり、物性確認試験結果より、ほぼ線形の挙動を示すことを確認している。
- 道路橋示方書、道路橋支承便覧の規定では、ゴム支承をモデル化する場合、その物性を等価線形に置き換えてモデル化することが認められている。
- 以上を踏まえて、ゴム支承の水平方向については等価線形の物性としたばねによるモデル化を行っている。



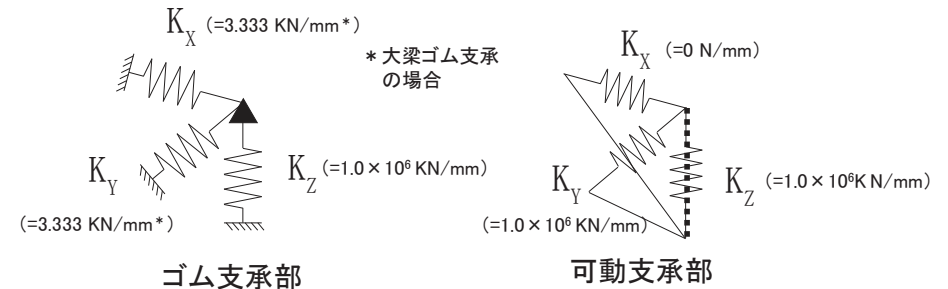
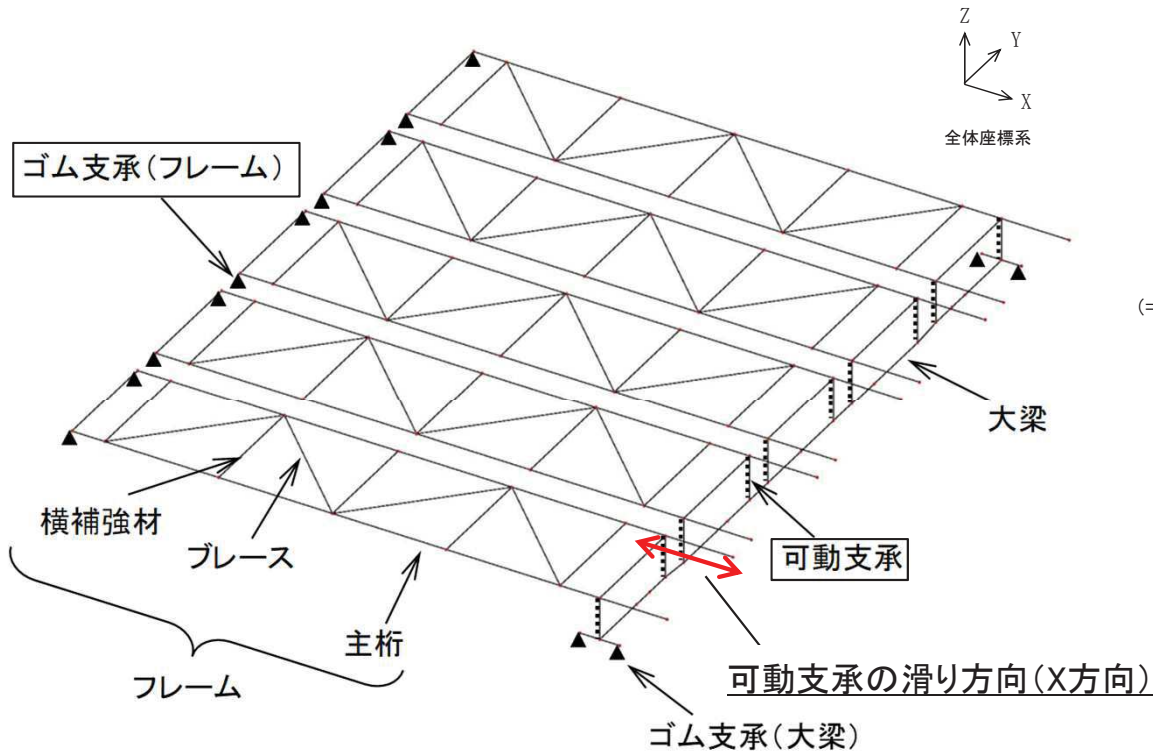
ゴム支承の物性確認試験結果の一例

審査会合における指摘事項への回答【指摘事項⑥】(4/6)

【可動支承のモデル化の考え方】

- 可動支承の特徴は、1方向にだけ滑りが生じる構造であることからX方向を自由の設定とし、Y、Z方向は拘束されているため剛の設定としている。可動支承の特徴は1方向が自由に変位が生じる設定となっていること。
- 可動支承で支持されているフレームは、可動支承の反対側はゴム支承*で支持しており、地震発生時、可動支承はX方向に自由に滑りが生じる構造であるものの、反対側のゴム支承によって、その変位は制限を受ける構造である。
- フレームのX方向の地震時の挙動は、滑りによる非線形な挙動ではなくゴム支承の変形挙動に支配された挙動となることから、ゴム支承の線形挙動と同様の応答となる。

*:天然ゴム系積層ゴム支承



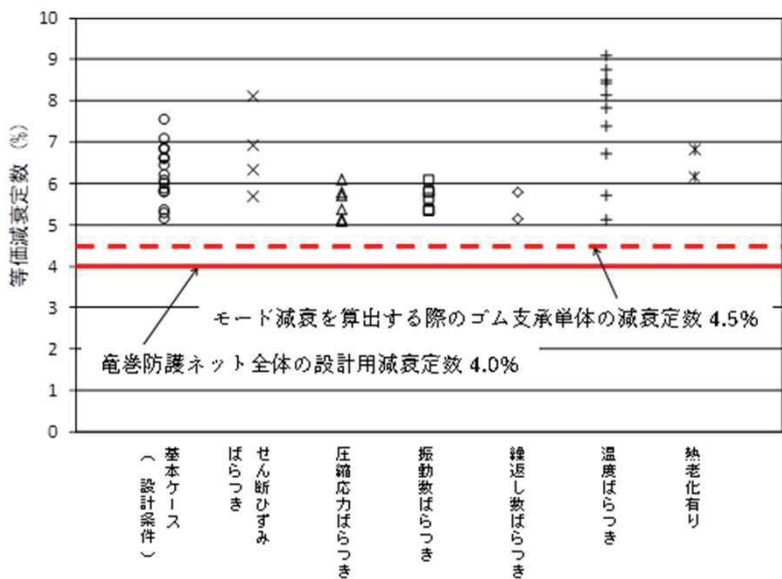
ばね支持条件

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

審査会合における指摘事項への回答【指摘事項⑥】(5/6)

【減衰定数の設定の考え方】

- スペクトルモーダル解析の適用に当たっての減衰定数の考え方は以下のとおり。
- 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ることから、JEAG4601に基づき2.0%と設定している。
- 水平方向については、以下の検証結果を踏まえ、保守性を考慮して4.0%と設定している。
 - ー ゴム支承の物性確認試験結果において、おおむね5.0%以上の減衰定数が得られている
 - ー 試験で得られた減衰定数を保守的に設定(鋼製部材2.0%, ゴム支承4.5%)して、固有値解析を実施し、振動モードごとの減衰定数を算出した結果より、水平方向の主要モードの全てにおいて4.3%以上のモード減衰が得られていることを確認



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)

固有値解析結果

物性確認試験より得られた減衰定数

審査会合における指摘事項への回答【指摘事項⑥】(6/6)

- 竜巻防護ネットの耐震設計においては、設計用床応答スペクトルの±10%拡幅によって地震応答の不確かさを容易に設計に反映することができることに加え、複数の地震応答を包絡して設計ができるため、保守的かつ簡便に設計が実施可能であることなどの理由からスペクトルモーダル解析法を採用している。
- スペクトルモーダル解析法の適用性について以下のとおり確認した。
 - 竜巻防護ネットに適用している道路橋示方書、道路橋支承便覧及び原子力発電所耐震設計技術指針(JEAG4601)のほかに、免震型施設の設計に適用する原子力発電所免震構造設計技術指針(JEAG4614)における地震応答、解析手法の選定に係る考え方を確認した結果、いずれともに線形解析の場合はスペクトルモーダル解析や時刻歴応答解析の適用が可能であり、非線形解析が必要な施設については時刻歴応答解析の適用を推奨していることを確認した。
 - 竜巻防護ネットに係る設計内容を確認した結果、本設備は線形挙動を示すことを確認した。
 - － 竜巻防護ネットの構造(支承部を除く)は鋼材で構成されており、線形応答範囲内の設計としている。
 - － 竜巻防護ネットのゴム支承は、ほぼ線形の挙動を示す設計であり、道路橋示方書、道路橋支承便覧において等価線形の設定が認められていること、また、物性確認試験を実施しほぼ線形の挙動を示すことを確認している。
 - － 可動支承は、滑りが生ずる構造であるものの、可動支承の反対側に設置されているゴム支承によって制限されるため、ほぼ線形の挙動を示すことになる。
 - － 減衰定数は、ゴム支承の減衰が支配的となる水平方向については、ゴム支承の物性試験結果を踏まえて保守的な設定とし、鉛直方向についてはJEAG4601に基づき2.0%と設定している。
 - 以上の検討結果から、構造全体として線形挙動を示す構造物であるため、スペクトルモーダル解析は適用可能であると判断している。
- なお、工認段階において、時刻歴応答解析結果と比較するなどして、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検証する。

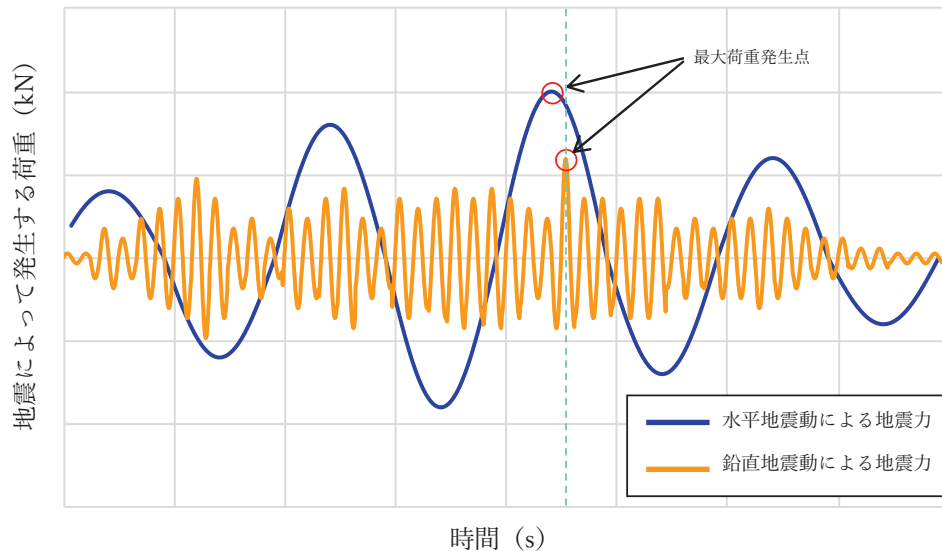
審査会合における指摘事項への回答【指摘事項⑦】

【審査会合における指摘事項⑦】

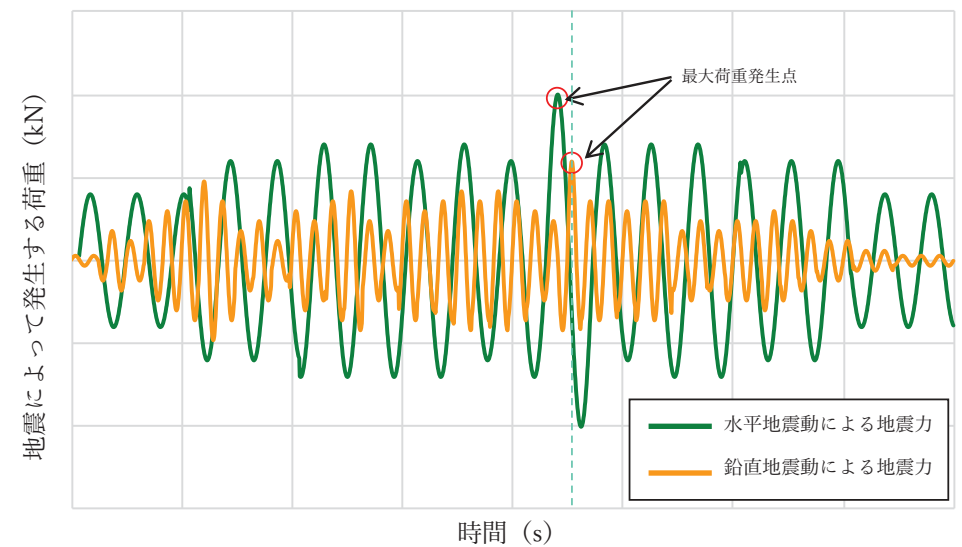
各方向の地震荷重の組合せについて、ゴム支承及び可動支承を用いた構造物(固有周期が長周期となるもの)に対してSRSS法を適用することの妥当性を提示すること。

【回答⑦】

- 竜巻防護ネットの固有周期は1秒以下であることを確認しており、一般的な免震装置を用いた建物の固有周期である2～4秒に比べて剛側である。
- 固有周期が剛側である場合には、柔側の設備に比べ、水平方向の最大荷重と鉛直方向の最大荷重が重畳する可能性は低くなることから(概念図参照)、他の施設と同様に、竜巻防護ネットにおいても地震荷重の組合せはSRSS法を適用している。
- なお、工認段階において、時刻歴応答解析を実施して地震時挙動を確認するなどして、各方向の地震荷重の組合せに対するSRSS法の適用性について詳細な検討を実施する。



免震型の施設(水平方向の固有周期が4秒の例)



竜巻防護ネット(水平方向の固有周期0.83秒)

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概念図