

柏崎刈羽原子力発電所6号及び7号炉審査資料	
資料番号	KK67-0127 改02
提出年月日	平成28年10月11日

柏崎刈羽原子力発電所6号及び7号炉 耐震設計の論点に係る整理表

平成28年10月
東京電力ホールディングス株式会社

I. 耐震設計に係る主な論点

分類	整理 No.	論点	内容	難易度	現状のステータス(審査状況等)	今後の説明方針, 資料の位置付け等
共通	A	評価対象の網羅性	別表第二及び耐震重要度分類の区分に照らし、過去の工認及び最新プラントの建設工認の評価実績を踏まえて、評価対象施設、評価部位、評価項目の網羅性を確認した結果を整理	低	-	本件は、別表第二や先行認可実績と比較して工認耐震計算書の評価対象に抜けが無いことを確認することが目的の資料であり、詳細については工認図書をもとに説明することが適切であると考え。 【別紙-1参照】
	B	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	水平2方向及び鉛直方向の組合せによる耐震設計に係る技術基準が制定されたことに伴う、水平2方向及び鉛直方向地震力の組合せに係る影響評価方針を整理	低	9/21ヒアリングにて評価方針を説明。 同日のヒアリングにおける指摘事項について対応中。	評価方針は先行プラントと同様であり、論点とはならないと考えられる。 評価結果は、工認の耐震計算書、構造図をもとに説明することが適切であると考え。 【別紙-2参照】
	C	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(影響検討対象施設の抽出プロセス・抽出結果)	耐震重要施設の安全機能への波及的影響検討のうち、敷地全体を俯瞰した調査・検討等の結果及び波及的影響を及ぼす可能性のある施設、設備の選定結果を整理	中	8/30審査会合における指摘事項について、継続対応中。 (9/28ヒアリングにて一部回答)	審査会合での指摘事項は、別途、会合にて説明予定。
	D	重大事故等による荷重と地震動の組合せの設定の考え方	重大事故等対処施設に必要な耐震設計条件に適用する荷重条件と地震動の組合せを明確にし、重大事故等対処施設の耐震設計におけるその考え方の妥当性を整理	中	耐震設計については8/30審査会合にて説明済。	「格納容器の除熱手段」「長期冷却に係る手段」に係るコメント回答は別途10/27審査会合で説明予定。
共通 / 個別		既工認からの解析評価条件の変更	評価対象施設に適用した評価手法・評価条件について、既工認からの変更点を確認した結果を整理 詳細については、次ページ以降、「II. 既工認からの主な解析評価条件の変更点」参照	高～低	詳細については、下表「II. 既工認からの主な解析評価条件の変更点」参照	

【表の見方】
・難易度: 先行実績での有無、規格基準等での有無などを考慮して、高、中、低に区分する。区分目安は、以下のとおり
高: 観測記録によるシミュレーション、試験等により説明するもの。また、妥当性に係る説明内容が多いと考えられるもの
中: 既往論文(NUPEC報告書)や民間規格(日本建築学会、土木学会、日本道路協会、日本電気協会)等、参考となる知見を既に有するもの。また、妥当性に係る説明内容が「高」に比べて少ないと考えられるもの
低: 適用実績・審査実績、是認(エントース)された民間規格等を基に説明可能なもの
・参考根拠等: 適用実績、審査実績以外の説明根拠について記載する

II. 既工認からの主な解析評価条件の変更点

分類	整理No.	変更項目	変更内容	難易度	適用実績、審査実績	参考根拠等	現状のステータス(審査状況等)	今後の説明方針、資料の位置付け等	
建物・構築物	1	建屋の地震応答解析モデル(柏崎6, 7号)	コンクリート実剛性の採用	コア圧縮試験、建設時材齢強度(管理材齢時及び長期材齢時)等からコンクリートの実剛性を設定し、観測記録のシミュレーションや分析等により妥当性を説明する	高	—	・各種試験結果 ・観測記録のシミュレーション解析等	6/30審査会合にて、議論は概ね完了。 指摘事項については、10/4審査会合にて回答済。	済
			基礎側面回転パネの採用	より現実的な挙動として採用する	高	PWR (高浜3, 4号補助一般建屋)	・観測記録のシミュレーション解析 ・K-6R/Bを想定した地中外壁摩擦実験の結果とSsによる回転ばね反力の比較	10/4の審査会合における指摘事項について対応中。	10/4審査会合における指摘事項についてまとめ次第、回答する予定。
			補助壁の考慮	既工認では剛性対象範囲外としたが実際は建屋剛性に寄与すると考えられる壁を補助壁として、剛性を評価する	中	—	・観測記録のシミュレーション解析 ・RC-N規準等	6/30審査会合にて、議論は概ね完了。 指摘事項については、10/4審査会合にて回答済。	済
			表層部の埋込み効果の無視	中越沖地震時に表層地盤の変位を踏まえ、地盤-建屋相互作用効果が見込めないと判断し、この部分の埋込み効果を無視する	—	—	・観測記録のシミュレーション解析等	柏崎刈羽6号及び7号炉で想定するような強い地震時に表層部分の埋込み効果は期待できず、これらを無視することは、工学的に妥当な判断であるため、論点とはならないと考えられる。	—
6	弾塑性解析の適用	応力解析モデルへの弾塑性解析の適用	地震動の増大に対し、より現実的な挙動把握のため、原子炉格納施設の基礎などの鉄筋コンクリート部材の応力解析において、材料(コンクリート、鉄筋)の非線形特性を考慮した弾塑性解析を採用する予定としている	中	—	・既往知見 (CCV規格、NUPEC報告書、AIJ「コンクリート系構造物の部材解析モデルと設計への応用」、出雲他「面内力を受ける鉄筋コンクリート板要素の解析モデル」)	今回工認で弾塑性解析を採用したのは、基準地震動Ssが大きくなり、弾塑性解析では現象を適切に表現できなくなったことによる。なお、許容値として用いるひずみについては、既工認時の数値をそのまま用いる方針としている。弾塑性解析で得られるひずみは弾性解析で得られるひずみより大きくなるため、弾塑性解析を採用することにより安全側の評価となる。	弾塑性解析の条件については、適用実績のある規格規準等に基づき設定している。また、許容値については既工認と同じ値を用いることから、論点とはならないと考えられる。 【別紙-3参照】	
		原子炉建屋屋根トラスの解析モデルへの弾塑性解析の採用	原子炉建屋の屋根トラスの地震応答解析及び部材応力評価において、材料(鉄骨)の非線形特性を考慮した3次元フレームモデルによる弾塑性解析を適用	低	PWR (川内1,2号タービン建屋、伊方3号タービン建屋)	・既往知見 (谷口他「鉄骨X型ブレース架構の復元力特性に関する研究」)	—	既往知見に基づき、材料(鉄骨)の非線形性を考慮した3次元フレームモデルによる弾塑性解析を実施することについて説明予定。適用実績のある手法であり、論点とはならないと考えられる。 【別紙-4参照】	
屋外重要土木構築物	7	解析モデルの精緻化	構造解析における三次元モデルの適用	構造解析において三次元FEMモデル(線形)を適用	低	他BWR (女川)	・コンクリート標準示方書(土木学会) ・原子力発電所屋外重要土木構造物の耐震性能照査指針・マニュアル(土木学会)	三次元モデルは、既工認(女川等)で審査実績のある線形モデルを採用する予定。 隣接構造物のモデル化は、審査実績のある地盤改良体のモデル化と同様に、近接して存在する構造物を等価剛性でモデル化する予定。	ヒアリングにおける指摘事項について対応中。 適用実績があり論点とはならないと考える。 詳細は、工認の耐震計算書、補足説明資料にて説明する。 【別紙-5参照】
			隣接構造物のモデル化	隣接構造物をモデル化することによる精緻化を実施	低	PWR (川内1,2, 高浜1,2,3,4)	—	—	—
	8	解析手法の精緻化	時刻歴応答解析	・地震応答解析にFEMモデルによる非線形解析手法を適用(時刻歴応答解析) ・鉛直地震動について静的入力から動的入力に変更(水平・上下同時入力) ・評価基準値は、限界状態設計法も考慮	低	PWR (川内1,2, 高浜1,2,3,4, 伊方3)	・コンクリート標準示方書(土木学会) ・原子力発電所屋外重要土木構造物の耐震性能照査指針・マニュアル(土木学会) ・道路橋示方書(日本道路協会)	時刻歴応答解析の手法は、先行電力で審査実績のある解析モデルを採用する予定。 減衰定数は、できるだけ小さい値として1%を採用する予定。	ヒアリングにおける指摘事項について対応中。 適用実績があり論点とはならないと考える。 詳細は、工認の耐震計算書、補足説明資料にて説明する。 【別紙-6参照】
			減衰定数の変更	地震応答解析手法の変更に伴い、減衰定数にも非線形特性を適用(履歴減衰、レーリー減衰)	低	—	—	—	—
機器・配管系	10	原子炉本体基礎の復元力特性の考慮	地震動の増大に対してより現実的な応答特性を考慮するため、非線形特性を適用 既往試験に基づく知見をもとに説明。なお、原子炉建屋は設計時より非線形モデルを用いている	高	—	・SC構造設計の基礎式を参考にベDESTAL弾塑性手法を構築 ・ROCV共研の試験結果にて検証	7/26審査会合にて、議論は概ね完了。 資料の記載充実に関する指摘のため、ヒアリングにて回答済。	済	
	12	クレーン類のギャップ非線形モデルの採用	燃料交換機	鉛直1Gを超える加速度への対応として、車輪部に浮き上がり・衝突を考慮した非線形要素(ギャップ)を追加 合わせて滑り、衝突を考慮した3次元線形梁モデルを適用	—	—	—	地震時に燃料交換機の落下を防止するために追設したガイドプレートと燃料交換機脚部の接触を考慮した解析モデルを採用する効果を精査した結果、ガイドプレートを考慮せずとも、既工認で考慮していた落下防止措置のみでも落下防止を達成できることを確認したので、解析を複雑にするメリットが無いと判断し、適用しない方針に変更。	—
			原子炉建屋クレーン	—	低	他BWR (大間)	・JNES天井クレーン実証試験	—	柏崎6,7号炉の天井クレーンは、先行電力(大間)と類似の構造であり、大間実績が適用可能であることを説明予定。適用実績のある手法であり、論点とはならないと考えられる。 【別紙-7参照】
	13	燃料ラックの減衰定数の変更	角管並列型、格子型	加振試験に基づき減衰定数を適用(Ss:7%, Sd:5%)	中	—	・燃料ラック加振試験結果	8/30審査会合における指摘事項について、継続対応中。 (9/28ヒアリングにて一部回答)	審査会合での指摘事項は、別途、会合にて説明予定。
			角管市松型	—	中	—	・燃料ラック加振試験結果	—	—
	15	ポンプ等の応答解析モデルの精緻化	一部のポンプ等について、最新工認実績等を踏まえ応答解析モデルを見直し(1軸モデル→3軸モデル、モデル質点の追加、FEMモデルの適用等)	低	PWR (川内1,2, 高浜3,4, 伊方3, 玄海3,4) 他BWR (大間)	・原子力発電所耐震設計技術指針(JEAG4601-1991追補版)	—	最新の知見(JEAG4601-1991)に基づき、縦型ポンプのモデルを詳細化することを説明予定。適用実績のある手法であり、論点とはならないと考えられる。 【別紙-8参照】	
クレーン類、配管系の減衰定数の変更		振動試験結果を踏まえ、クレーン類及び配管系について、JEAC4601-2008に規定されている減衰定数に変更する	低	PWR (川内1,2, 高浜3,4, 伊方3) 他BWR (大間)	・試験、解析(JEAC4601-2008に記載)	—	柏崎6,7号炉のクレーン類は先行電力(大間)と類似の構造であり、大間実績が適用可能であることを説明予定。配管系については、先行電力で認可実績のある既往の知見を基に減衰定数を設定していることを説明予定。適用実績のある手法であり、論点とはならないと考えられる。 【別紙-9参照】		
共通	17	鉛直方向の動的地震力の適用	鉛直方向に動的地震力を適用するに伴い、鉛直方向に柔な設備については鉛直方向の減衰定数を新たに考慮しており、鉛直方向の解析モデルを追加する	低	PWR (川内1,2, 高浜3,4, 伊方3) 他BWR (大間)	・JEAC4601-2008に記載	—	柏崎6,7号炉についても、先行電力(大間)の実績が適用可能であることを説明予定。適用実績のある手法であり、論点とはならないと考えられる。 【別紙-10参照】	
		水平方向及び鉛直方向地震力の組合せ方法の変更	鉛直方向地震力が動的地震力に変更になったことに伴い、水平方向及び鉛直方向地震力の組合せ方法を、絶対値和法から組合せ係数法やSRSS法に一部変更する	低	PWR (川内1,2, 高浜3,4, 伊方3) 他BWR (大間)	・JEAC4601-2008に記載	—	—	

【表の見方】
 ・難易度: 先行実績での有無、規格基準等での有無などを考慮して、高、中、低に区分する。区分目安は、以下のとおり
 高: 観測記録によるシミュレーション、試験等により説明するもの。また、妥当性に係る説明内容が多いと考えられるもの
 中: 既往論文(NUPEC報告書)や民間規格(日本建築学会、土木学会、日本道路協会、日本電気協会)等、参考となる知見を既に有するもの。また、妥当性に係る説明内容が「高」に比べて少ないと考えられるもの
 低: 適用実績・審査実績、是認(エンドース)された民間規格等を基に説明可能なもの
 ・参考根拠等: 適用実績、審査実績以外の説明根拠について記載する

Ⅲ. その他

分類	整理 No.	項目	概要	難易度	現状のステータス(審査状況等)	今後の説明方針, 資料の位置付け等
	1	地盤の液状化	地盤物性の整理, 地盤物性の代表性・網羅性の整理及び構造物影響評価(代表)を説明する。	—	地盤物性の代表性・網羅性について, 7/12, 9/8審査会合を実施。 構造物影響評価の方針(ばらつき考え方, 要求機能に対する損傷モードやそれに対応した性能目標水準についての考え方等)を, 代表構造物の取水路について9/8審査会合にて説明。	審査会合及びヒアリングにおける指摘事項について対応中。 構造物影響評価は, 代表構造物の結果を設置許可段階で会合にて説明し, それ以外の断面など詳細は工認段階で説明予定。
	2	保管場所・アクセスルート	保管場所の沈下及び斜面評価, 並びに, アクセスルートの段差及び斜面崩壊を考慮した仮復旧評価を説明する。	—	9/13審査会合にて審議。	液状化による浮き上がり等による影響を含め, アクセスルートの成立性について会合にて説明予定。 保管場所の沈下量については, 評価結果を会合にて説明予定。
	3	耐津波設計	入力津波の妥当性を示した上で, 大湊側の外郭防護, 荒浜側の外郭防護及び内郭防護の妥当性を検証するとともに, 入力津波に基づき設計で考慮する漂流物を選定	—	敷地内の沈下量(含む液状化)及び斜面崩壊による影響範囲を仮定した上で, 入力津波の妥当性(液状化の審議に応じてフィードバック要)を示すとともに, 入力津波に対する大湊側の外郭防護の妥当性を検証。 また, 入力津波に対する荒浜側の外郭防護, 内郭防護の妥当性も評価。 確定した津波条件(流向, 流速)に基づき, 防潮堤等の設計で考慮する漂流物(衝突荷重)の設定, 取水口通水性の詳細評価(堆積物の積算効果等)で考慮する漂流物の選定を実施。	審査会合及びヒアリングにおける指摘事項について対応中。 設置許可段階では評価方針を会合にて説明予定。
	4	3号炉原子炉建屋内緊急時対策所の耐震設計方針	緊急時対策所として, 確実に機能が維持されることの説明	—	9/13審査会合にて, 議論は概ね完了。	5号原子炉建屋内緊急時対策所を設置する方針に伴い, 論点から取り下げることとする。

評価対象の網羅性について

本件は、工事計画書に記載すべき事項をまとめた「実用発電用原子炉の設置、運転等に関する規則」別表第二や先行認可実績と比較して、耐震評価対象が抜け無く網羅されていることの確認を目的とした資料である。

工事計画認可申請書の内容と紐付く内容であることから、確認内容の詳細については工事計画認可申請書をもとに説明することが適切であるとする。

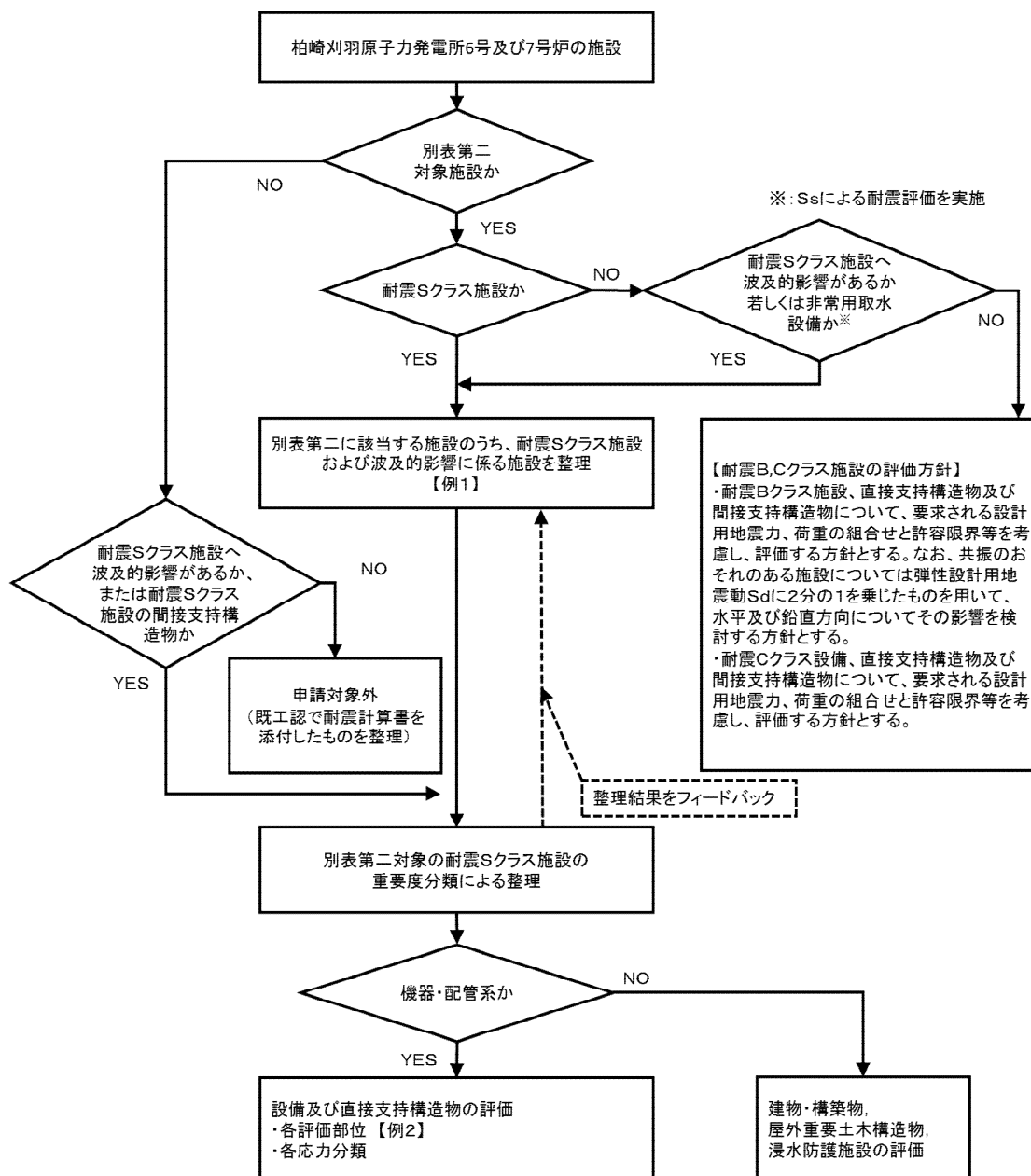


図1 評価対象の網羅性に関する確認手順

【例1】

別表第二に該当する施設のうち、耐震 S クラス施設および波及的影響に係る施設の整理

別表第二の記載項目を示し、各項目に該当する耐震 S クラス設備及び波及的影響設備を整理する。

別表第二を踏まえた対象設備の網羅性(柏崎刈羽6,7号機)

別表第二記載項目		柏崎刈羽原子力発電所 6,7号炉 今回工認記載内容	参考(柏崎刈羽6,7号機 建設工認記載)	備考	
		耐震Sクラス	耐震Sクラス(建設時As, A) ¹⁾		
炉型式、定格熱出力、過剰反応度及び反応度係数並びに減速材		-	-		
炉心	炉心形状(チャンネルボックス)	チャンネルボックス*	-	*: 燃料集合体の評価に包摂される	
	燃料材(燃料集合体)	燃料集合体	燃料集合体		
		炉心シュラウド及びシュラウドサポート	炉心シュラウド シュラウドサポート	炉心シュラウド シュラウドサポート	
	炉心支持構造物	上部格子板	上部格子板	上部格子板	
		炉心支持板	炉心支持板	炉心支持板	
		燃料支持金具	中央燃料支持金具 周辺燃料支持金具	燃料支持金具	
		制御棒案内管	制御棒案内管	制御棒案内管	
	反射材	原子炉圧力容器本体並びに監視試験片	原子炉圧力容器	原子炉圧力容器	設備では無いため対象外
		原子炉圧力容器支持構造物	原子炉圧力容器スカート	-	
		基礎ボルト	原子炉圧力容器基礎ボルト	原子炉圧力容器基礎ボルト	
原子炉圧力容器スタビライザ		原子炉圧力容器スタビライザ	原子炉圧力容器スタビライザ		
原子炉格納容器スタビライザ		-	-	該当設備なし	
原子炉格納容器スタビライザ		-	-		

【例2】

評価対象設備の評価部位の網羅性に関する整理

今回工認の耐震評価対象設備の評価部位について、既工認及び最新プラントである大間1号炉の建設工認にて実施していた評価部位と比較することにより、必要な評価部位が網羅されていることを整理する。

添付-2 対象設備の評価部位の網羅性(柏崎刈羽原子力発電所 第7号機)

評価対象設備			耐震重要度分類	当該プラントにおける工認記載設備・部位	最新プラントにおける工認記載設備・部位	今回工認における評価		評価部位の選定理由	理由番号 ①: 構造上他の部位で代表可能 ②: 過去の評価実績から他の部位で代表可能 ③: 過去の評価実績から裕度を十分有する ④: 該当する部位がない
設備	機器名称	評価部位				構造強度	機能維持		
炉心支持構造物	炉心シュラウド	上部フランジ	S	○	○	○	-	主要部位(当該プラント及び最新プラントでの工認評価部位)であるため評価対象とする。	-
		下部フランジ		○	○	○			
		炉心支持板支持面		○	○	○			
	シュラウドサポート	レタ	S	○	○	○	-	主要部位(当該プラント及び最新プラントでの工認評価部位)であるため評価対象とする。	-
		シリンダ		○	○	○			
		プレート		○	○	○			
		下部胴		○	○	○			
	上部格子板	リム胴板	S	○	○	○	-	主要部位(当該プラント及び最新プラントでの工認評価部位)であるため評価対象とする。	-
		グリッドプレート		○	○	○			
	炉心支持板	補強ビーム	S	○	○	○	-	主要部位(当該プラント及び最新プラントでの工認評価部位)であるため評価対象とする。	-
		支持板		○	○	○			
	燃料支持金具	中央燃料支持金具	S	-	○	○	-	主要部位(最新プラントでの工認評価部位)であるため評価対象とする。	-
		周辺燃料支持金具		-	○	○			
	制御棒案内管	下部溶接部	S	○	○	○	-	主要部位(当該プラント及び最新プラントでの工認評価部位)であるため評価対象とする。	-
長手中央部		○		○	○				

水平2方向及び鉛直方向の適切な組み合わせに関する検討について

本件は、従来の耐震設計手法において水平1方向及び鉛直方向地震力を考慮していたのに対して、今回工認においては「実用発電用原子炉及びその附属施設の位置、構造及び設備の基準に関する規則の解釈」「耐震設計に係る工認審査ガイド」に従い水平2方向及び鉛直方向地震力を考慮することから、その影響について検討・評価することを目的とした資料である。本検討の概略フローを以下に示す。

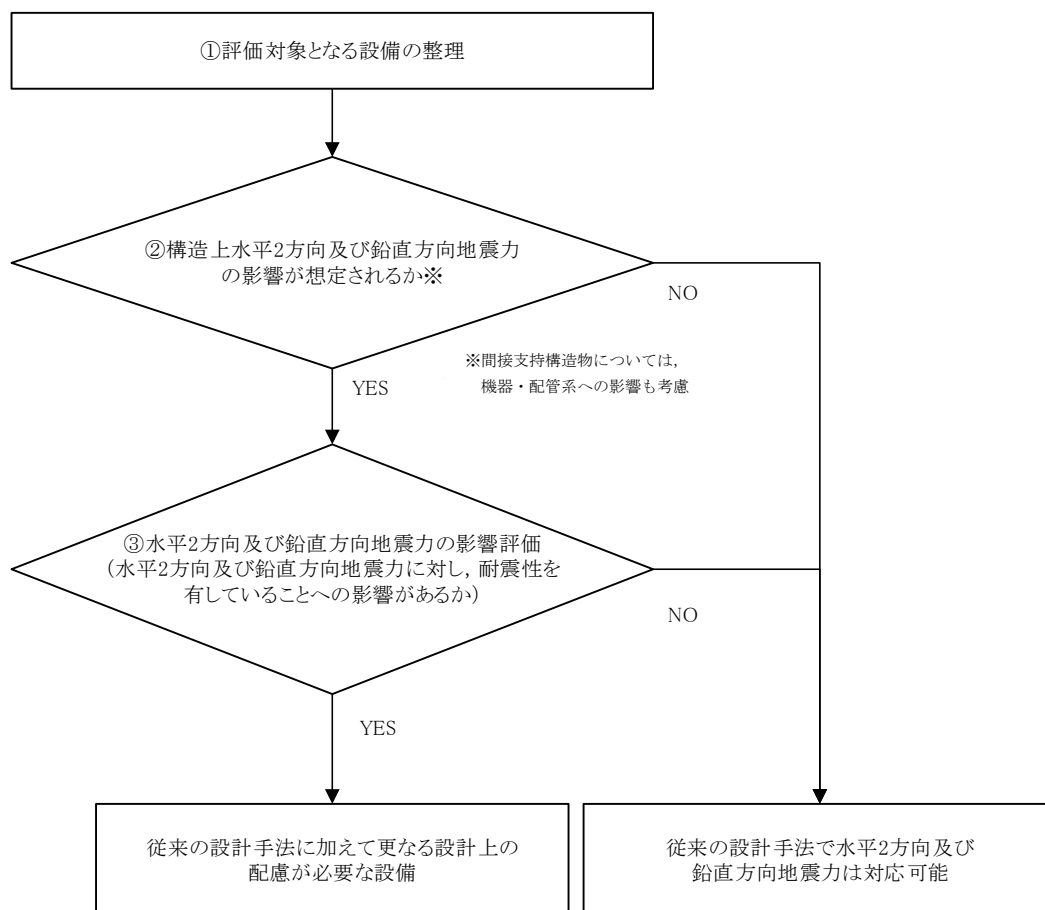


図 水平2方向及び鉛直方向地震力による影響評価検討の概要

本検討方針については先行プラントと同様であり論点とはならず、検討結果については工事計画認可申請書における各機器の耐震計算書や構造図をもとに説明することが適切であると考えます。

原子炉格納容器コンクリート部の応力解析における弾塑性解析の採用について

(1) 概要

原子炉格納容器コンクリート部（以下、RCCV という）の応力解析については、建設時には弾性静的応力解析を実施していたが、今回工認の評価では、弾塑性静的応力解析を実施する。今回工認で弾塑性解析を採用したのは、基準地震動 S_s が大きくなり、弾性解析では現象を適切に表現できなくなったことによる。なお、許容値として用いるひずみについては、既工認時の数値^{※1} をそのまま用いる方針としている。弾塑性解析で得られるひずみは弾性解析で得られるひずみより大きくなるため、弾塑性解析を採用することにより安全側の評価となる。

※1：既工認で参照したのは、通商産業省告示 452 号「コンクリート製原子炉格納容器に関する構造等の技術基準」であるが、今回工認で参照予定の「発電用原子力設備規格コンクリート製原子炉格納容器規格 JSME S NE1-2003」（以下、CCV 規格という）についても同じ許容値となっている。

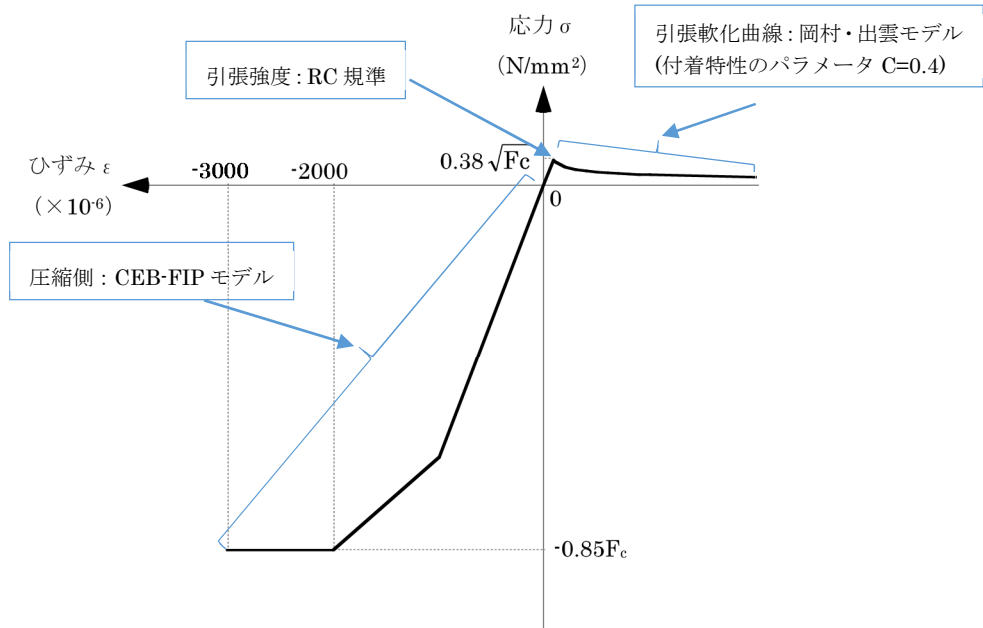
(2) 妥当性・適用性の説明方針

RCCV の応力解析に弾塑性解析を取り入れることにより、既工認で採用していた弾性解析では表現出来ないような大入力時の弾塑性挙動を適切に評価できるが、弾塑性挙動を適切に評価するにあたっては、鉄筋及びコンクリートの材料構成則（材料の応力とひずみの関係をモデル化したもの）を適切に設定した上で解析を実施する必要がある。今回の工認で採用予定の材料構成則を表 1 及び図 1 に示す。ここで、コンクリート（圧縮側）は CEB-FIP モデル、コンクリート（引張側）は RC 規準（ひび割れ点の評価）と岡村・出雲モデル（ひび割れ点以降の引張軟化曲線）、鉄筋（圧縮・引張側）は完全弾塑性型を用いている。これらの設定は弾塑性挙動に直結するものであるため、その設定の妥当性・適用性を説明する方針である。

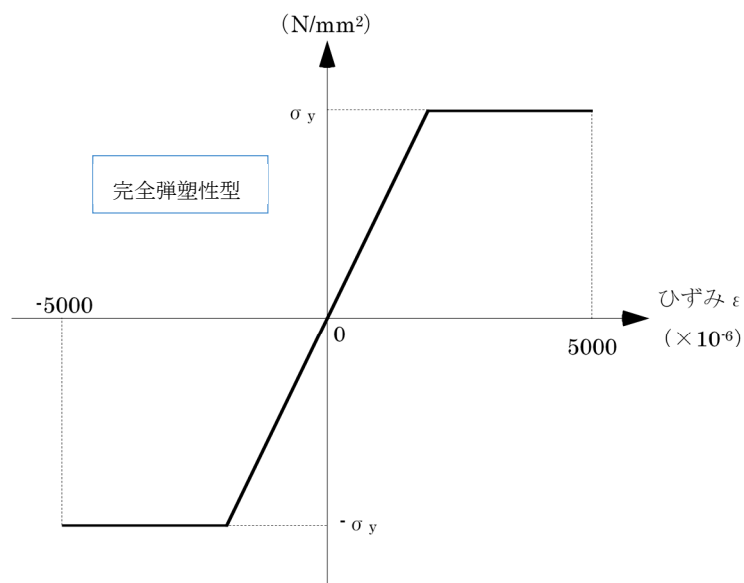
なお、妥当性・適用性の説明は、耐震設計に係る工認審査ガイドにおける「安全上適切と認められる規格及び基準等」に該当する規格・基準の記載や既往知見（財団法人原子力発電技術機構の原子炉格納容器信頼性実証事業）で検証された内容に基づき行う予定であることから、大きな論点とはならないと考えられる。

表-1 採用予定の材料構成則

材料	採用モデル	備考（説明方針）
コンクリート （圧縮側）	CEB-FIP Model Code 1990	<ul style="list-style-type: none"> ・既工認の RCCV の評価において、応力検定時に参照している構成則であることを説明する。 ・パラボラ型の応力ひずみ曲線を想定する際に一般的なモデルであり、CCV 規格（CVE3511.2-1）でも参照されている。
コンクリート （引張側）	【ひび割れ点迄】 鉄筋コンクリート構造 設計規準・同解説に示 される引張強度	<ul style="list-style-type: none"> ・同規準に示される引張強度の下限値を採用しており、保守的な設定になっていることを説明する。
	【ひび割れ点以降】 岡村・出雲モデル	<ul style="list-style-type: none"> ・コンクリートと鉄筋の付着効果による影響を表現したモデルであり、解析の収束性の観点から採用するものである。 ・各種実験結果（原子力発電技術機構による原子炉格納容器信頼性実証事業における解析結果等）との対応が良いことが確認されている構成則であることを説明する。
鉄筋 （圧縮・引張）	完全弾塑性型	<ul style="list-style-type: none"> ・既工認時の RCCV の評価において、応力検定時に参照している構成則であることを説明する。 ・CCV 規格（CVE-3511.2 の記載）に記載されている。



(a) コンクリートの応力-ひずみ関係



(b) 鉄筋の応力-ひずみ関係

F_c : コンクリートの設計基準強度, σ_y : 鉄筋の降伏強度

図-1 採用予定の材料構成則

原子炉建屋屋根トラスの解析モデルへの弾塑性解析の採用

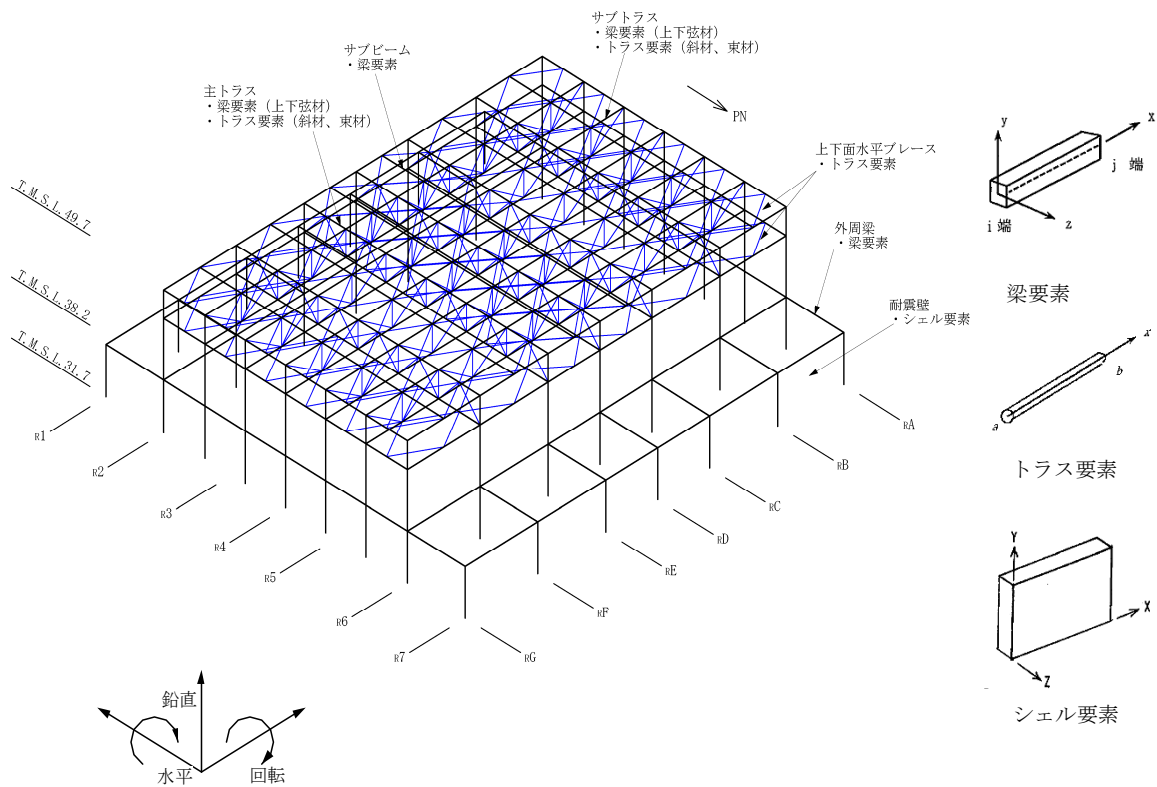
6, 7号炉の原子炉建屋屋根トラスの耐震評価にあたっては、解析モデルとしては水平2方向及び鉛直方向の地震力の影響を適切に考慮できるように3次元フレームモデルを採用することとしている。また、基準地震動 S_s による地震動の増大に伴い、屋根トラスを構成する部材の一部^{※1}が弾塑性領域に入ると考えられるが、弾性解析では当該部材の座屈や塑性化による影響を考慮できないため、解析と実現象に乖離が生じることになる。そこで今回工認では、屋根トラスの弾塑性挙動を適切に評価することを目的として、部材の弾塑性特性を考慮した地震応答解析を採用する。屋根トラス各部材で考慮する材料特性を表-1に、解析モデル図を図-1に示す。

なお、3次元フレームモデル及び適用予定の弾塑性特性（修正若林モデル）は、先行審査（川内1号機タービン建屋等）で適用実績があり、論点とはならないと考えられる。

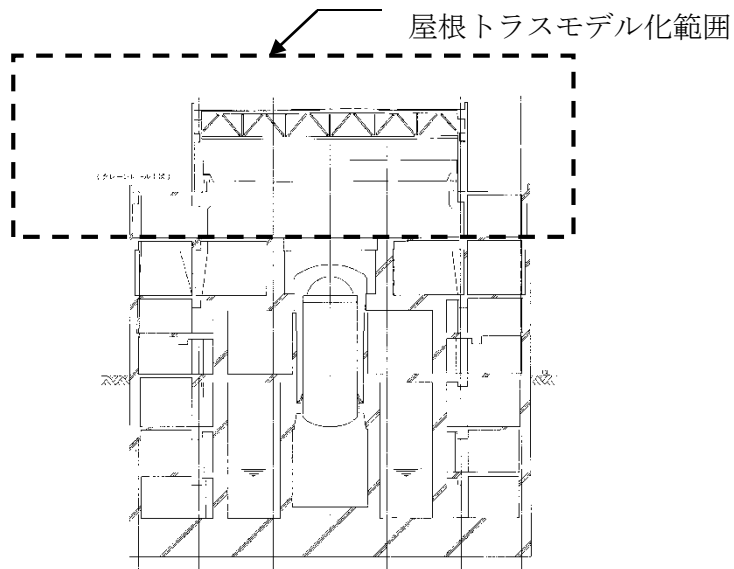
※1：サブトラス（斜材、束材）や下弦面水平ブレース等

表-1 屋根トラス部材の解析モデルで考慮する材料特性

評価部位		モデル要素	材料特性
主トラス	上弦材	梁要素	弾性
	下弦材		
	斜材	トラス要素	弾性
	束材		
サブトラス	上弦材	梁要素	弾性
	下弦材		
	斜材	トラス要素	弾塑性（修正若林モデル）
	束材		
水平ブレース	上弦面 水平ブレース	トラス要素	弾性
	下弦面 水平ブレース		弾塑性（修正若林モデル）



解析モデル図



原子炉建屋断面図

図-1 今回工認の屋根トラスの解析モデル

解析モデルの精緻化（屋外重要土木構造物）

（構造解析における三次元モデルの適用）

今回工認では、構造物の三次元性の影響が大きい見通しの荒浜側防潮堤跨ぎ部（鉄筋コンクリート躯体部）について、構造物の現実的な挙動特性を把握するために、三次元モデルを用いた静的線形解析を実施する。

本内容は、壁部及びフーチング部を対象とした線形板解析であること、三次元静的線形解析は女川 2 号炉海水ポンプ室の建設工認等にて適用実績があることから、論点とはならないと考える。

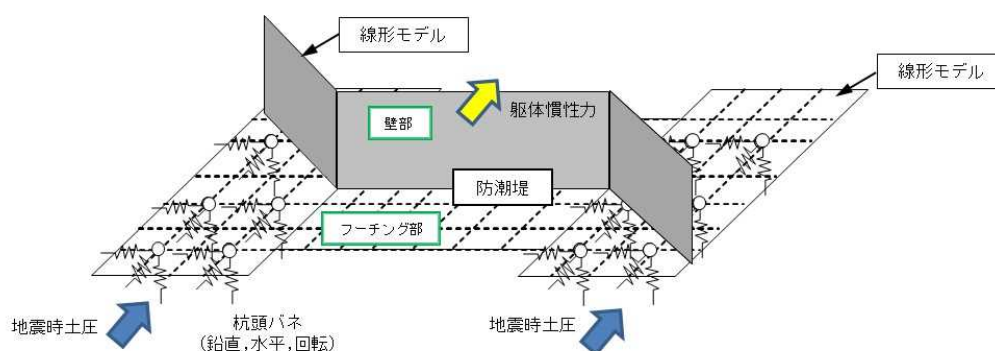


図 1 荒浜側防潮堤跨ぎ部の三次元モデル（概念図）

（隣接構造物のモデル化）

既工認では、簡便かつ保守的に評価する観点から、評価対象構造物に隣接する建物等は地震応答解析モデルでは地盤としてモデル化している。

今回工認では、隣接構造物が評価対象構造物の地震時挙動に与える影響が大きい見通しの場合や、従来手法にて安全性が確認されない見通しの場合について、近接して存在する構造物を等価剛性でモデル化する。

実際に存在する隣接構造物をモデル化した評価は、高浜 4 号炉海水ポンプ室等にて適用実績があり、論点とはならないと考える。

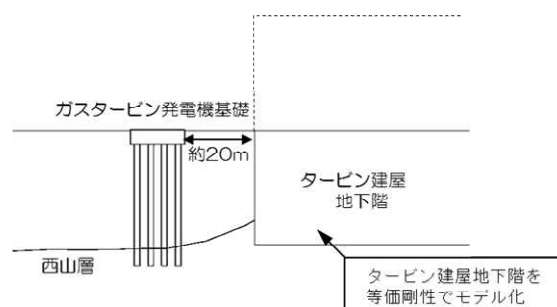


図 2 隣接構造物のモデル化（概念図）

解析手法の精緻化（屋外重要土木構造物）

（時刻歴応答解析）

既工認では、周波数応答解析による許容応力度法を用いた評価を実施している。

今回工認では、構造物の現実的な挙動特性を把握するため、時刻歴応答解析による限界状態設計法を用いた評価を実施する。

本内容は、川内・高浜・伊方等の先行審査にて適用実績があり、論点とはならないと考える。

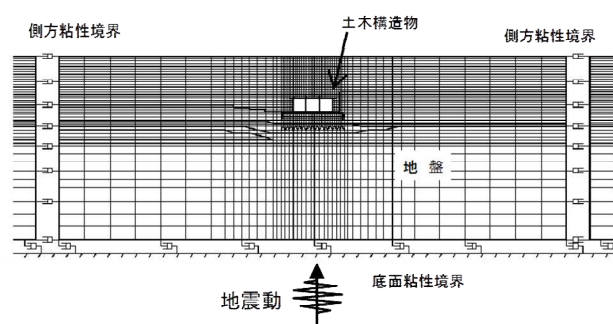


図 1 時刻歴応答解析（概念図）

（減衰定数の変更）

既工認では、周波数応答解析における構造物の減衰定数は 5%を用いている（JEAG4601-1987 記載）。

今回工認では、時刻歴応答解析において構造部材の非線形性を考慮するため、ひずみが大い領域では履歴減衰が支配的となることから、粘性減衰は、解析上の安定のためになるべく小さい値として減衰 1%を採用する。

本内容は、解析上の安定のためになるべく小さい値として設定するものであることから、論点とはならないと考える。

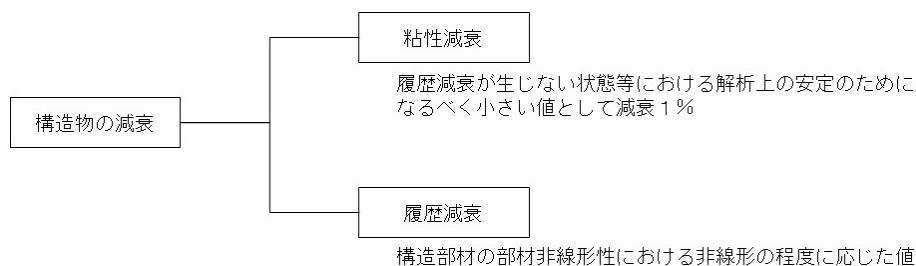


図 2 時刻歴応答解析における構造物の減衰定数

原子炉建屋クレーンのギャップ非線形モデルの採用

原子炉建屋クレーン（図1）の耐震評価は、従来、鉛直方向は静的地震力のみであったことから簡便に手計算により耐震評価を実施していた。

今回工認では鉛直動的地震力を考慮する必要があること及びクレーンの車輪部はレール上に乗っており固定されていないという構造上の特徴を踏まえ、鉛直方向の地震力に対する車輪部の浮き上がり挙動を考慮した解析モデル（図2）を用いた非線形時刻歴応答解析により評価を実施する。

なお、本モデル及び評価手法は大間1号炉の建設工認にて適用例があり、柏崎刈羽6号及び7号炉の原子炉建屋クレーンと大間1号炉の原子炉建屋クレーンは類似構造であることから、論点とはならないと考える。

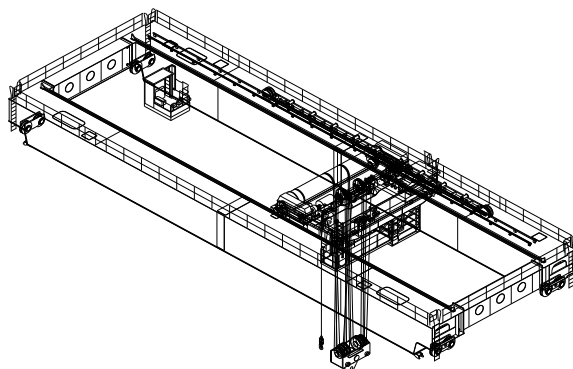


図1 原子炉建屋クレーン（7号炉の例）

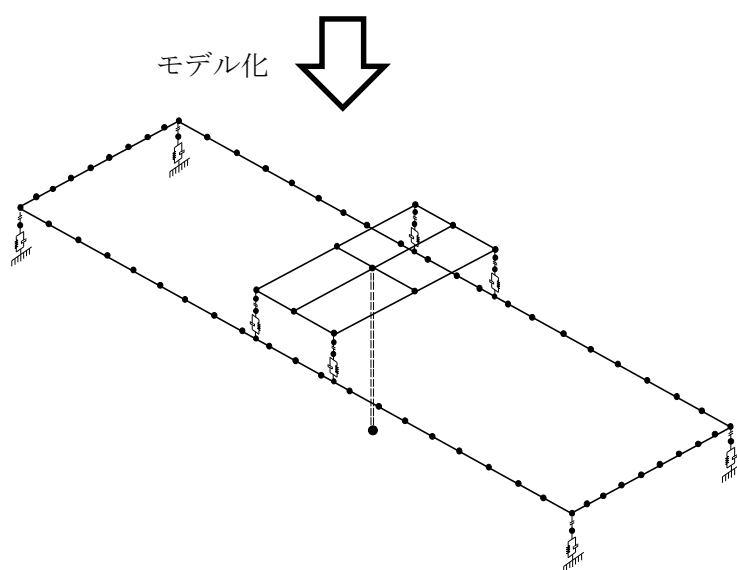


図2 今回工認の解析モデルの例

立形ポンプの解析モデルの精緻化

既工認における立形ポンプの解析モデルは、実機構造を踏まえた振動特性とするため、設備の寸法、質量情報に基づき、主要部であるローター、インナーケーシング、及びディスチャージケーシングを相互にばね等で接続した多質点系モデルとして構築していた。

今回工認では、既工認モデルに対し JEAG4601-1991 追補版に基づくモデルの精緻化を行う。なお、本解析モデルは大間1号炉の建設工認にて適用例がある。

本内容は最新版の規格・基準の反映及び先行認可実績のあるものであることから、論点とはならないと考える。

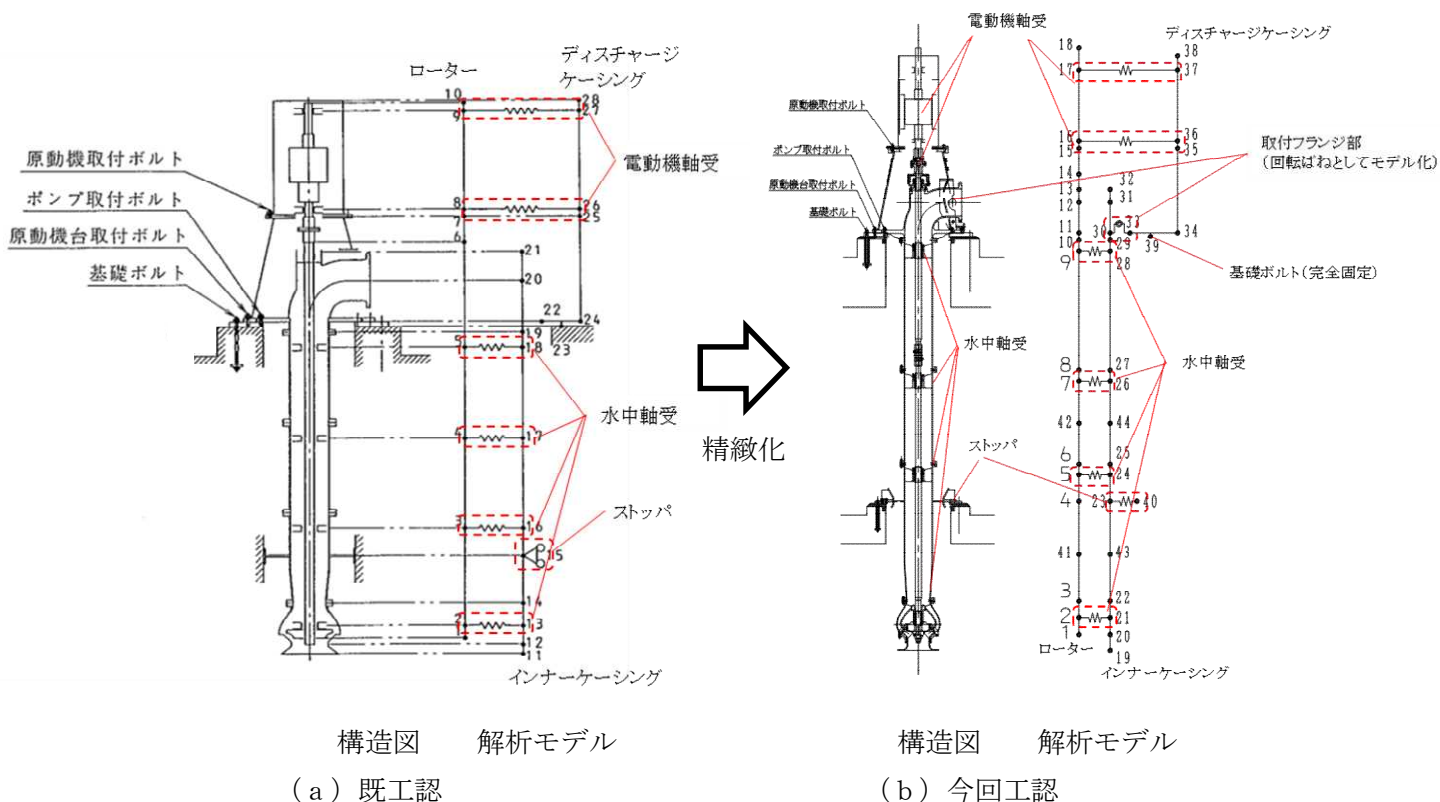


図1 原子炉補機冷却海水ポンプ解析モデル図 (7号炉の例)

【主な変更点】

- ① 取付フランジ部の剛性を回転ばねとして考慮する。
- ② 流体の影響として、インナーケーシングの内部だけでなく、外側の水質点を質点に負荷する。また、水平方向の水の連成効果を考慮する。
- ③ ディスチャージケーシングのストッパをピン支持から水平方向ばねに変更。

原子炉建屋クレーン，燃料取替機及び配管系の減衰定数の変更

今回工認では，最新知見として得られた原子炉建屋クレーン，燃料取替機及び配管系の減衰定数を採用する。この変更は，振動試験結果を踏まえ設計評価用として安全側に設定したものであり，大間1号炉の建設工認にて適用例があるものである。

設計用減衰定数の比較を表1及び表2に示す。

表1 原子炉建屋クレーン及び燃料取替機の設計用減衰定数

設 備	設計用減衰定数 (%)			
	水平方向		鉛直方向	
	JEAG4601* ¹	柏崎刈羽* ²	JEAG4601* ¹	柏崎刈羽* ²
原子炉建屋クレーン	1.0	2.0	—	2.0
燃料取替機	1.0	2.0	—	1.5(2.0)* ³

第2表 配管系の設計用減衰定数

配管区分		設計用減衰定数 (%)			
		保温材無		保温材有	
		JEAG 4601* ¹	柏崎刈羽* ²	JEAG 4601* ¹	柏崎刈羽* ²
I	支持具がスナバ及び架構レストレイント主体の配管系で，その数が4個以上のもの	2.0	同左	2.5	3.0
II	スナバ，架構レストレイント，ロッドレストレイント，ハンガ等を有する配管系で，アンカ及びUボルトを除いた支持具の数が4個以上であり，配管区分Iに属さないもの	1.0	同左	1.5	2.0
III* ⁴	U字ボルトを有する配管系で，架構で水平配管の自重を受けるUボルトの数が4個以上のもの	—	2.0	—	3.0
IV	配管区分I，II及びIIIに属さないもの	0.5	同左	1.0	1.5

注記 *1:原子力発電所耐震設計技術指針 JEAG4601-1991 追補版(社団法人日本電気協会)

*2:柏崎刈羽原子力発電所6号炉及び7号炉

*3:()外は，燃料取替機のトリ位置が端部にある場合

()内は，燃料取替機のトリ位置が中央部にある場合

*4:区分III(Uボルトを有する配管系)については，新たに設定したものであり，

現行 JEAG4601-1991 追補版では区分IVに含まれている。

: 新たに設定したもの

: JEAG4601 から見直したもの

鉛直方向の動的地震力の適用

1. 地震応答解析モデルの追加及び鉛直方向の減衰定数の考慮

今回工認においては、鉛直方向の動的地震力に対する考慮が必要となったことから、鉛直方向についても水平方向と同様に動的地震力の算定を行う。鉛直方向の地震応答解析モデルについては、鉛直方向の各応力評価点における軸力を算定するため、従来の水平方向モデルをベースに新たに多質点モデルを作成する。なお、鉛直方向の地震応答解析モデルは、大間1号炉の建設工認と同様の考えに基づくものである。

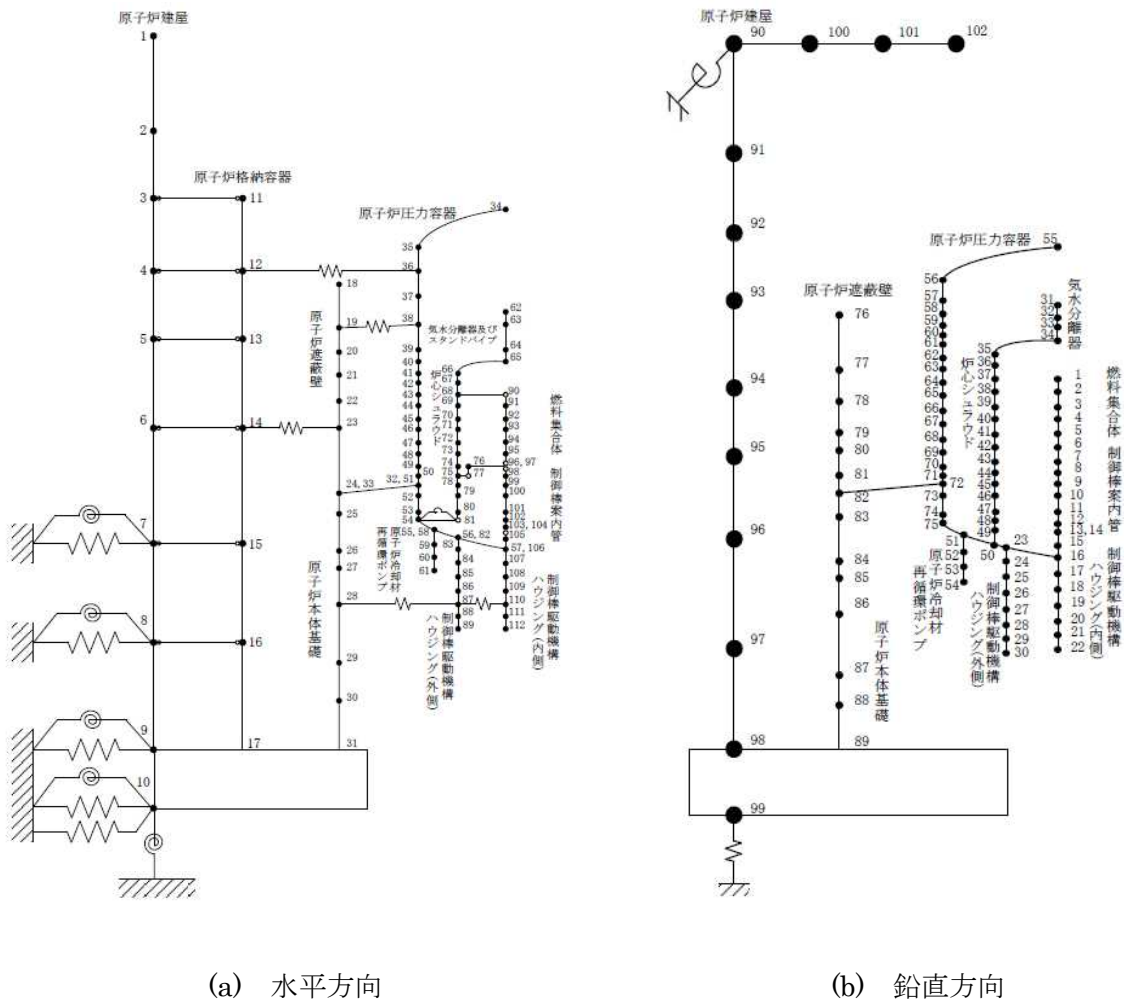


図1 地震応答解析モデルの例

2. 鉛直方向の減衰定数の考慮

今回工認では、鉛直方向の動的地震力を適用することに伴い、鉛直方向の設計用減衰定数を新たに設定している。

鉛直方向の設計用減衰定数は、基本的に水平方向と同様とするが電気盤や燃料集合体等の鉛直地震動に対し剛体挙動する設備は 1.0%とする。また、原子炉建屋クレーン、燃料取替機及び配管系については、既往の試験等により確認されている値を用いる。

なお、これら鉛直方向の設計用減衰定数は、大間 1 号炉の建設工認と同様である。

表 1 機器・配管系の設計用減衰定数

設 備	設計用減衰定数 (%)			
	水平方向		鉛直方向	
	既工認	今回工認	既工認	今回工認
溶接構造物	1.0	同左	—	1.0
ボルト及びリベット構造物	2.0	同左	—	2.0
ポンプ・ファン等の機械装置	1.0	同左	—	1.0
燃料集合体	7.0	同左	—	1.0
制御棒駆動機構	3.5	同左	—	1.0
電気盤	4.0	同左	—	1.0
使用済燃料貯蔵ラック	1.0	Ss:7.0 Sd:5.0	—	1.0
天井クレーン	1.0	2.0	—	2.0
燃料取替機	1.0	2.0	—	1.5(2.0)*
配管系	0.5~2.0	0.5~3.0	—	0.5~3.0

注記 *:()外は、燃料取替機のトリ位置が端部にある場合

()内は、燃料取替機のトリ位置が中央部にある場合

3. 水平方向と鉛直方向の動的地震力の二乗和平方根（SRSS）法による組合せ

従来の水平方向及び鉛直方向の荷重の組合せは、静的な地震力による鉛直方向の荷重には地震継続時間や最大加速度の生起時刻のような時間の概念がなかったことから、水平方向及び鉛直方向の地震力による荷重の最大値同士の絶対値の和としていた。（以下、「絶対値和法」という。）

今回工認では、鉛直方向の地震力について動的な地震力を考慮する必要があり、水平方向及び鉛直方向の両者がともに動的な地震力であることから、両者の最大加速度の生起時刻に差があるという実挙動を踏まえると、従来と同じように絶対値和法を用いるのではなく、時間的な概念を取り入れた荷重の組み合わせ法を検討する必要がある。

今回工認では、既往研究や大間 1 号炉の認可実績も踏まえ二乗和平方根法（以下、「SRSS 法（Square Root of the Sum of the Squares）」という。）による組み合わせを採用する。

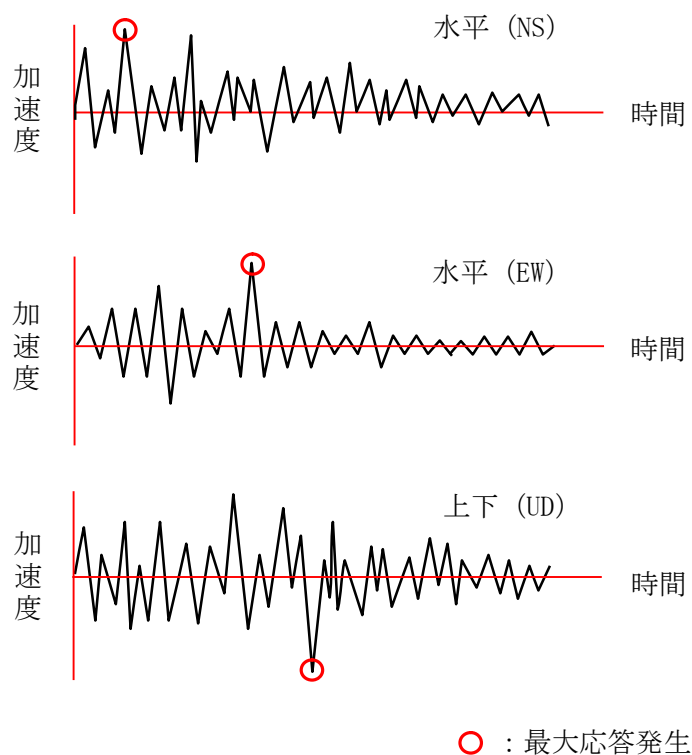


図 2 最大加速度の生起時刻の差の概念図

(参考) 荷重の組み合わせ法

(1) 絶対値和法

本手法は、水平方向及び鉛直方向の地震力による最大荷重（又は応力）※を絶対値和で組み合わせる方法である

この方法は、水平方向及び鉛直方向の地震力による最大荷重が同時刻に同位相で生じることを仮定しており、組合せ法の中で最も大きな荷重を与える。本手法は、主に地震力について時間の概念がない静的地震力による荷重の組合せに使用する。

$$\text{組合せ荷重（又は応力）} = |M_H|_{\max} + |M_V|_{\max}$$

M_H ：水平方向地震力による荷重（又は応力）

M_V ：鉛直方向地震力による荷重（又は応力）

(2) SRSS 法

本手法は、水平方向及び鉛直方向の地震力による最大荷重（又は応力）※を二乗和平方根で組み合わせる方法である。

この方法は、水平方向及び鉛直方向の地震力による最大荷重の生起時刻に時間的なずれがあるという実挙動を考慮しており、水平方向及び鉛直方向地震動の同時入力による時刻歴応答解析結果との比較において平均的な荷重を与える。本手法は、動的な地震力による荷重同士の組合せに使用する。

$$\text{組合せ荷重(又は応力)} = \sqrt{(M_H)_{\max}^2 + (M_V)_{\max}^2}$$

M_H ：水平方向地震力による荷重（又は応力）

M_V ：鉛直方向地震力による荷重（又は応力）

※：荷重の段階で組み合わせる場合と、荷重により発生した応力の段階で組み合わせる場合がある。