

女川原子力発電所第2号機 工事計画審査資料	
資料番号	O2-他-F-19-0025_改1
提出年月日	2021年 5月 11日

女川原子力発電所第2号機 建屋の地震影響を踏まえた機器・配管系の 耐震評価について

2021年5月11日
東北電力株式会社

1. 詳細設計申送り事項及び今回工認での対応
2. 東北地方太平洋沖地震後の健全性確認結果
 - 2.1 設備健全性確認結果の概要
 - 2.2 機器・配管系の耐震設計に反映すべき事項
3. 建屋の地震影響を踏まえた機器・配管系の耐震評価
 - 3.1 地震影響を踏まえた建屋耐震評価の検討結果の適用
 - 3.2 機器・配管系の耐震設計への影響検討
4. 今回工認の耐震評価結果を踏まえた耐震設計反映事項の妥当性確認
5. まとめ

参考1 設備健全性確認における疲労評価結果(3.11/4.7地震)

参考2 地震応答解析モデルの策定(既設建屋の初期剛性低下の補正係数)

参考3 コンクリートと関連する機器・配管系の影響整理結果

参考4 今回工認における耐震評価結果を踏まえた妥当性確認結果

1. 詳細設計申送り事項及び今回工認での対応

(1) 詳細設計申送り事項

No.	項目	概要
2-6	建屋の地震影響を踏まえた機器・配管系の耐震評価	機器・配管系の耐震評価においては、乾燥収縮及び地震影響による建屋コンクリート部材のひび割れの影響を踏まえた地震応答解析結果に基づいた機器・配管系の耐震評価により設計成立性を説明する。

(2) 今回工認における対応

項目	設置変更許可での検討内容	工事計画認可での対応内容
東北地方太平洋沖地震後の設備健全性確認	東北地方太平洋沖地震等(3.11/4.7地震)に対して代表部位が弾性応答範囲内であることを確認	・基準地震動 S_s に対しても代表部位が弾性応答範囲内であることにより、耐震設計に反映すべき事項がないことを確認 【2.1項, 2.2項, 4項で説明】
	3.11/4.7地震の影響を踏まえ、疲労評価をする場合には許容限界に対して余裕があることを確認する方針	・3.11/4.7地震の疲労評価結果を踏まえ、疲労評価において詳細検討を実施する基準となる値を設定 【2.1項, 2.2項で説明】
建屋の地震影響を踏まえた機器・配管系の耐震評価	3.11/4.7地震による建屋の初期剛性低下を考慮した地震応答解析モデルを反映	・建屋側の審査を踏まえ、機器・配管系の評価に用いる地震応答解析モデル及び入力地震動を設定 【2.2項, 3.1項, 3.2項で説明】

2.1 設備健全性確認結果の概要

- 「実用発電用原子炉の設置、運転等に関する規則」に基づき実施した、地震後の設備健全性確認(特別な保全計画)結果は以下のとおり。(設置変更許可段階からの変更なし)

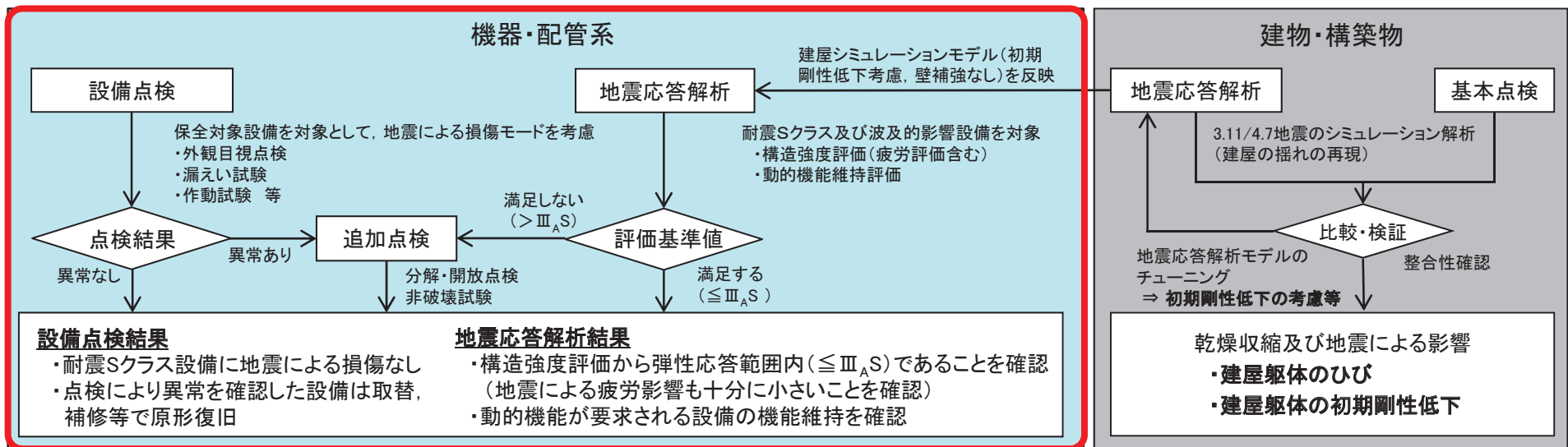
【設備点検結果】

- ・耐震Sクラス設備に地震による損傷なし
- ・点検により異常を確認した設備は取替, 補修等で原形復旧

【地震応答解析結果】

- ・構造強度評価から弾性応答範囲内(\leq 許容限界 $\text{III}_A S$)であることを確認(地震による疲労影響も十分に小さいことを確認)
- ・動的機能が要求される設備の機能維持を確認

地震後の設備健全性確認の概要(設置変更許可段階での整理結果)



2.2 機器・配管系の耐震設計に反映すべき事項

➤ 機器・配管系の設備健全性確認の観点

- 設備健全性確認結果からの機器・配管系の耐震設計へ反映すべき事項はない。
- 機器・配管系の疲労評価では、疲労累積係数の評価結果が評価基準値1.0に近接する場合(判断目安は0.99)には、3.11地震及び4.7地震の影響も考慮した詳細評価を行う。
- 詳細評価では、対象設備の疲労評価に適用する等価繰り返し回数の個別設定もしくは耐震性向上対策を実施する。

➤ 建屋の乾燥収縮及び地震による影響の観点

- 機器・配管系の評価のインプットとなる建屋応答については、建屋のひび割れに関する議論を踏まえた地震応答解析モデル用いて算定する。(詳細は3.1参照)

耐震設計への反映事項(設置変更許可段階での整理)

機器・配管系

- 設備健全性確認結果より、耐震Sクラス設備に地震による損傷はなく、地震応答は弾性応答範囲内である。
 - また、耐震B、Cクラス設備のうち異常を確認した設備については、原形に復旧するため、地震による損傷は残らない。(3.11/4.7地震は、設計地震力を超過)
- したがって、機器・配管系の設備健全性確認の観点からは、機器・配管系の耐震設計へ反映事項はない。
(なお、疲れ累積係数による疲労評価を実施する場合は、許容限界に対して余裕があることに留意する。)

建屋の乾燥収縮及び地震による影響の観点からは、機器・配管系の耐震設計について、建屋初期剛性低下を考慮した地震応答解析モデル(建屋地震応答解析モデル、建屋一大型機器連成解析モデル)を反映する。

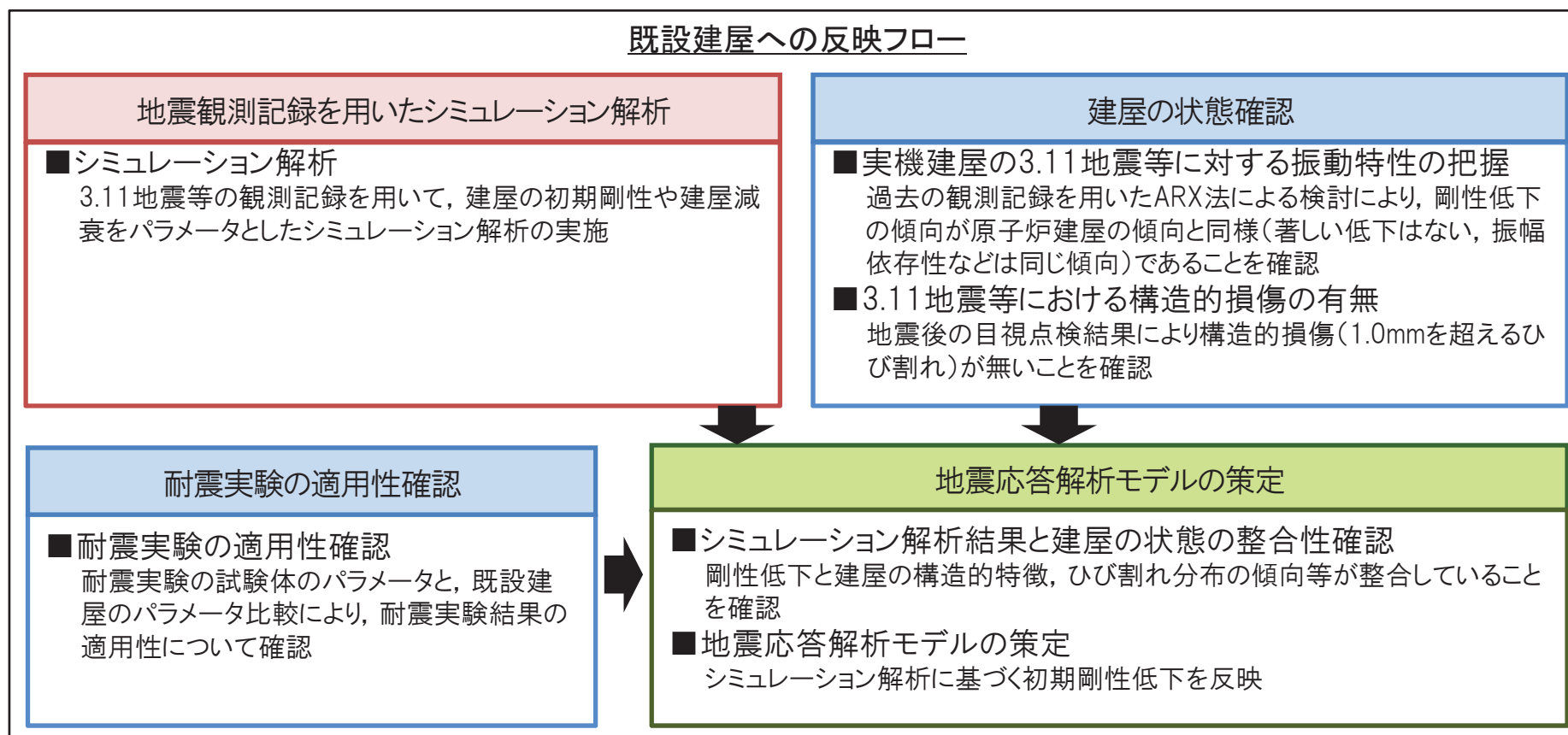
建物・構築物

乾燥収縮及び地震による影響を踏まえて、建屋地震応答解析モデルに初期剛性低下を反映する。

3.1 地震影響を踏まえた建屋耐震評価の検討結果の適用

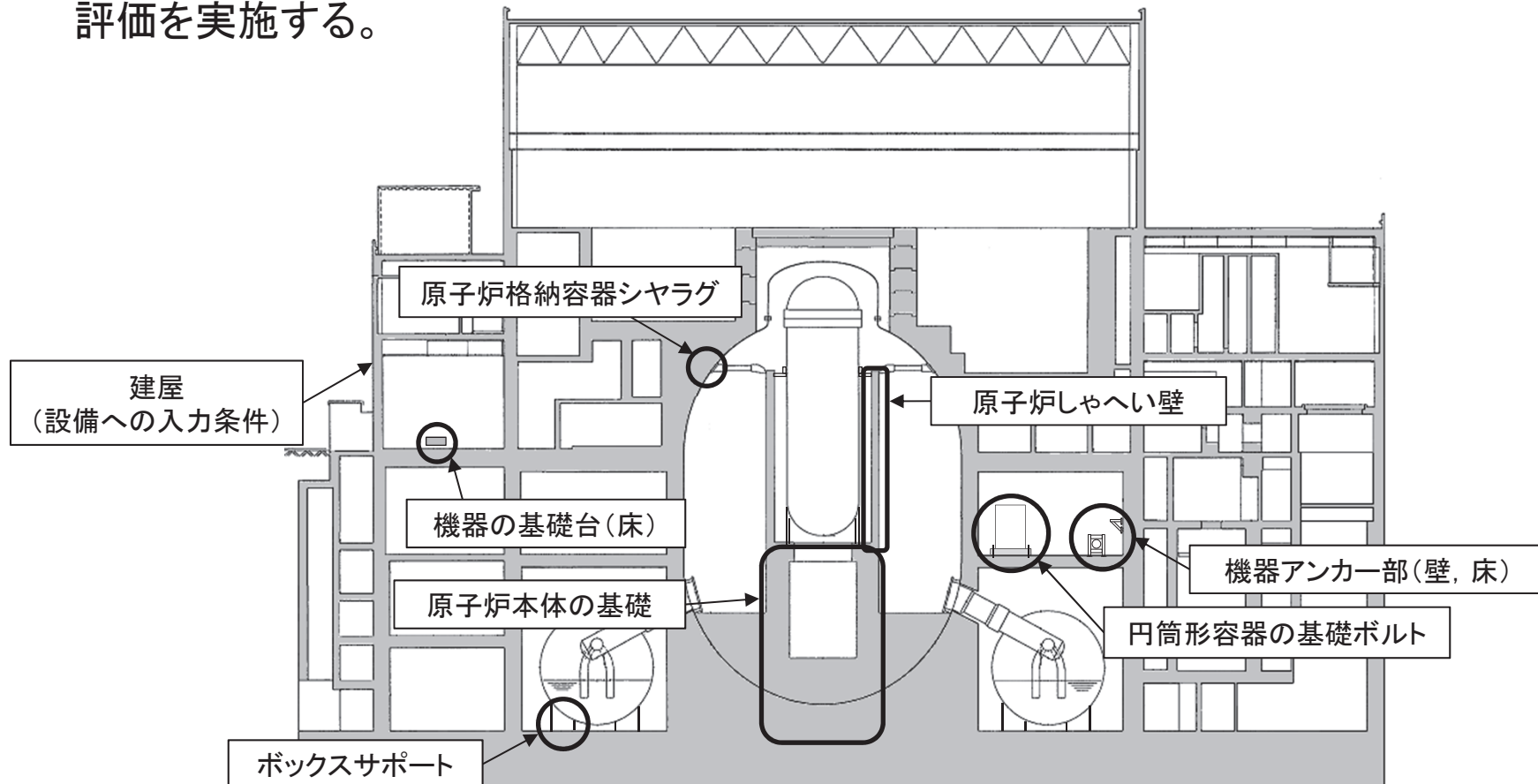
- 「3.11地震等の影響を踏まえた建屋耐震評価」の審査で示した既設各建屋の初期剛性低下を反映した地震応答解析モデル(基本モデル), 基準地震動 S_s による剛性低下を反映した地震応答解析モデル(不確かさケース)及び各建屋のシミュレーション解析を踏まえて設定した入力地震動を, 同様に機器・配管系の耐震評価に適用する。
- 上記による機器・配管系の設計用地震力を設定し, 各機器・配管系の耐震評価結果として今回工認の耐震計算書にて説明する。

第970回審査会合(2021年4月27日)資料1-2抜粋



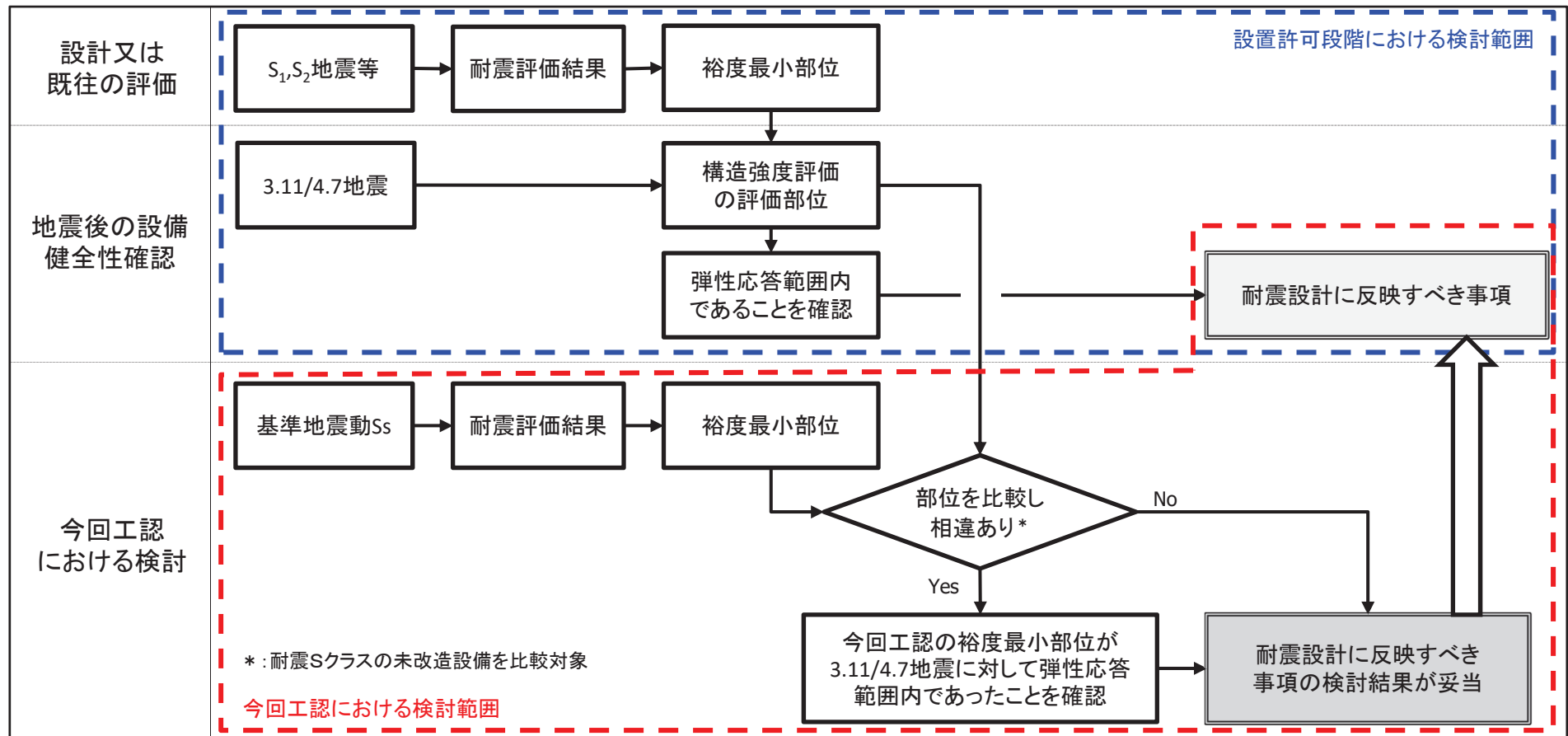
3.2 機器・配管系の耐震設計への影響検討

- 建屋コンクリートのひび割れを踏まえ、機器・配管系の耐震評価への影響を構造的な分類で抽出し、検討した結果、コンクリートに関連する機器の基礎台や機器アンカー一部等については十分な剛性を有しており、地震応答解析モデル及び許容限界に対して反映すべき事項はないことを確認した。(設計変更許可段階からの変更なし)
- 原子炉本体の基礎については、コンクリートのひび割れの影響はないと考えられるが、念のため、原子炉建屋と同様に初期剛性低下を考慮した地震応答解析モデルによる評価を実施する。



4. 今回工認の耐震評価結果を踏まえた耐震設計反映事項の妥当性確認

- 地震後の設備健全性確認における構造強度評価は、設計又は既往評価の裕度最小部位を代表としており、評価用地震動によっては裕度最小部位が変わる可能性があるため、今回工認の耐震評価結果(裕度最小部位)と比較・検討した。
- 裕度最小部位が相違する今回工認の裕度最小部位については、3.11/4.7地震に対して弾性応答範囲内であることを確認し、設備健全性確認結果に基づく耐震設計に反映すべき事項の検討結果が妥当であると判断した。



5. まとめ

設置許可段階での詳細設計申送り事項「建屋の地震影響を踏まえた機器・配管系の耐震評価」に対して、以下のとおり、今回工認における対応を検討した。

【東北地方太平洋沖地震後の設備健全性確認】

- 今回工認の基準地震動 S_s に対する耐震評価における裕度最小部位を確認し、地震後の設備健全性確認と相違する部位については、3.11/4.7地震に対して弾性応答範囲内であることを確認し、設備健全性確認結果に基づく耐震設計に反映すべき事項の検討結果が妥当であると判断した。
- 機器・配管系の疲労評価では、疲労累積係数の評価結果が評価基準値1.0に近接する場合(判断目安は0.99)には、3.11地震及び4.7地震の影響も考慮した詳細評価(等価繰り返し回数 of 個別設定もしくは耐震性向上対策)を実施する。

【建屋の地震影響を踏まえた機器・配管系の耐震評価】

- 建屋コンクリートの初期剛性低下については、建屋側の工認審査を踏まえて、建屋側と同様の地震応答解析条件(地震応答解析モデル, 入力地震動)を機器・配管系の耐震設計に適用し、各機器・配管系の耐震評価結果として今回工認の耐震計算書にて説明する。
- なお、原子炉本体の基礎については、原子炉建屋と同様に初期剛性低下を考慮した地震応答解析モデルによる評価を実施する。

【参考1】設備健全性確認における疲労評価結果(3.11/4.7地震)

- 既往の評価において裕度が小さい配管モデルを対象に、3.11地震及び4.7地震に対する疲労評価を実施。
- 地震による疲労累積係数は、3.11地震及び4.7地震を合計しても0.01未満であり、評価基準値(1.00)には大きな余裕がある。

対象設備	評価用 地震動	地震による 疲労累積係数[-]	合計[-]
給水系配管	3.11地震	0.0001	0.0002
	4.7地震	0.0001	
残留熱除去系配管	3.11地震	0.0027	0.0036
	4.7地震	0.0009	
原子炉補機冷却海水系配管	3.11地震	0.0008	0.0014
	4.7地震	0.0006	
給水ノズル	3.11地震	0.0002	0.0019
	4.7地震	0.0017	

- ▶ 原子炉建屋は、質点系シミュレーション解析に基づき建屋初期剛性を評価し、過去の地震観測記録の傾向分析や点検結果等を踏まえて、設計値に対する補正係数を0.3~0.8と設定し、地震応答解析モデルに反映している。
- ▶ 原子炉建屋以外の既設建屋についても同様な検討を行い、剛性低下と建屋の構造的特徴、ひび割れ分布の傾向等が整合していることを確認の上、設計値に対する補正係数を設定した。

今回工認における既設建屋の初期剛性の設計値に対する補正係数

建屋		補正係数								(参考)建屋に要求される機能 (今回工認)	
		0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0		
原子炉建屋	地上3階及びクレーン階 (O.P.33.2mより上部)	NS ●		EW ●							Sクラス (原子炉建屋原子炉棟:二次格納施設) Sクラス設備の間接支持機能
	地下3階~地上2階 (O.P.33.2mより下部)						NSEW ● ●				
制御建屋				NSEW ● ●							Sクラス(中央制御室しゃへい壁) Sクラス設備の間接支持機能
タービン建屋	地上2階及びクレーン階 (O.P.24.8mより上部)	NSEW ● ●									Bクラス(補助しゃへい壁) Bクラス設備(Sd機能維持設備含む)の 間接支持機能 原子炉建屋、制御建屋へ波及的影響を 与えないこと
	地下2階~地上1階 (O.P.24.8mより下部)	NSEW ● ●									
補助ボイラー建屋									NS・EW ◆		Cクラス設備の間接支持機能 制御建屋へ波及的影響を与えないこと
第3号機海水熱交換器建屋							NS・EW ●				浸水防護施設の間接支持機能
第1号機制御建屋		NS ●	EW ●								制御建屋へ波及的影響を与えないこと

●: 原子炉建屋オペフロ上部と同様の大架構的特徴を有した部位 ●: 原子炉建屋オペフロ下部と同様の耐震壁の配置が密な部位
◆: 補助ボイラー建屋は、地震計が設置されていなく、シミュレーション解析が実施できないことから、設計剛性を採用

【参考3】 コンクリートと関連する機器・配管系の影響整理結果

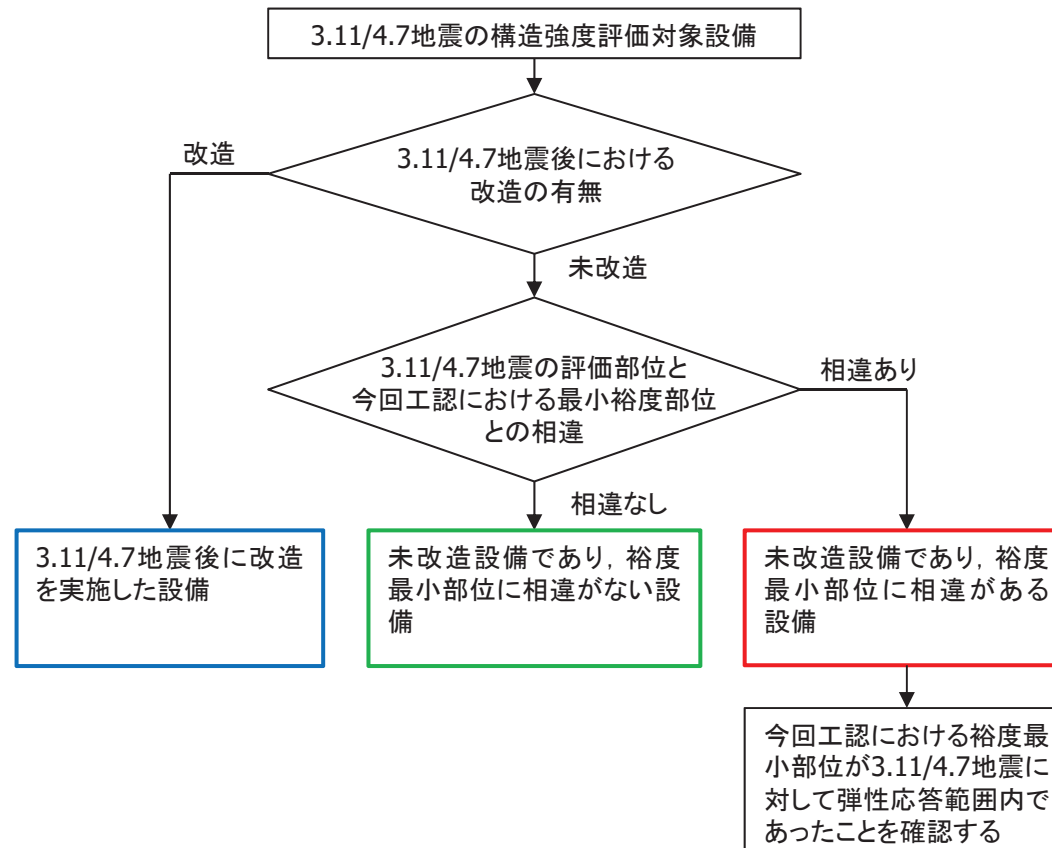
- ▶ 乾燥収縮及び地震影響によるコンクリートのひび割れを踏まえ、評価への影響の可能性が考えられる機器・配管系の設備を構造的な分類により抽出し、抽出された設備の耐震評価において考慮すべき内容を整理する。
- ▶ 耐震評価において考慮すべき内容は、評価対象部位ごとにコンクリートのひび割れに係る影響検討結果(建屋の初期剛性が低下していること、建屋躯体の耐力への影響が小さいこと)、設備の構造特徴等を踏まえて検討を行う。

第698回審査会合(2019年4月2日) 資料1-2-3を再整理

	評価対象部位	地震応答解析, 発生応力算出に対する考慮	許容限界に対する考慮
「コンクリートのひび割れの影響」	建屋(設備評価への入力条件)	・建屋の初期剛性低下や地盤物性の不確かさを考慮した建屋モデルを用いた地震応答解析を実施する。	—
	原子炉本体の基礎	・原子炉本体の基礎のコンクリートは、鋼板で覆われており、乾燥収縮の影響はないと考えられるが、念のため、建屋側と同様に剛性低下を考慮した地震応答解析を行い、影響を確認して設計へ反映する。	・内部に充填されたコンクリートには、強度を期待せず、鋼板のみで耐える設計とする。【従来同様】
	機器の基礎台	・機器の基礎台は、剛性が十分に大きくなるように設計していることから、コンクリートのひび割れが地震応答解析モデルに与える影響はない。	・建屋躯体と同様の構造であり、耐力への影響はないことから、JEAG4601に基づく設計とする。【従来同様】
	機器アンカー一部	・機器アンカー一部は、建屋躯体と十分深い位置で定着させる設計であり、建屋躯体と一体となって挙動するため、コンクリートのひび割れが地震応答解析モデルに与える影響はない。	・JEAG4601に基づく設計とする(コンクリートのコーン状破壊の評価において、建屋の面内せん断ひずみ度に応じた低減係数を考慮)。【従来同様】
	円筒形容器の基礎ボルト	・円筒形容器の基礎ボルトは、建屋躯体と十分深い位置で定着させる設計であり、建屋躯体と一体となって挙動するため、コンクリートのひび割れが地震応答解析モデルに与える影響はない。	・鋼材のみの物性値により評価を実施している【従来同様】
	原子炉しゃへい壁	・原子炉しゃへい壁は、鋼板の剛性のみを考慮した地震応答解析を実施しているため、コンクリートのひび割れが地震応答解析モデルに与える影響はない。【従来同様】	・内部に充填されたモルタルには強度を期待せず、鋼板のみで耐える設計とする。【従来同様】
	原子炉格納容器シヤラグ	・原子炉格納容器シヤラグの地震応答解析に用いるばね定数は、鋼材の物性値により設定されるため、コンクリートのひび割れが地震応答解析モデルに与える影響はない。【従来同様】	・コンクリートの圧縮に係る評価には、ひび割れの影響は無視できること、建屋躯体の耐力への影響はないことから、JEAG4601に基づく設計とする。【従来同様】
	ボックスサポート	・ボックスサポートの基礎ボルトは、建屋躯体と十分深い位置で定着させる設計であり、建屋躯体と一体となって挙動するため、コンクリートのひび割れが地震応答解析モデルに与える影響はない。	・コンクリートの圧縮に係る評価には、ひび割れの影響は無視できること、建屋躯体の耐力への影響はないことから、JEAG4601に基づく設計とする。【従来同様】

【参考4】 今回工認における耐震評価結果を踏まえた妥当性確認結果(1)

- 3.11/4.7地震の構造強度評価対象設備について、検討対象設備抽出フローに基づき、3.11/4.7地震後における改造の有無、3.11/4.7地震の評価部位と今回工認における裕度最小部位との相違に着目し、3区分(青枠, 緑枠, 赤枠)で分類する。
- 未改造設備であり、裕度最小部位に相違がある設備(赤枠の分類)を検討対象として、今回工認の耐震評価における裕度最小部位が3.11/4.7地震に対して弾性応答範囲内であったことを確認する。



検討対象設備抽出フロー

【参考4】 今回工認における耐震評価結果を踏まえた妥当性確認結果(2)

- 未改造設備であり、裕度最小部位に相違がある設備(赤枠の分類)について、3.11/4.7地震の構造強度評価結果と今回工認における耐震評価結果の比較例を下表に示す。
- 簡易評価(下表①)による高圧及び低圧炉心スプレイスパーージャは、今回工認の基準地震動 S_s による算出値(裕度最小部位:ヘッダ)が許容応力状態 $III_A S$ に対する評価基準値以下であることを確認しており、3.11/4.7地震は基準地震動 S_s に包絡されることから、今回工認における裕度最小部位は、3.11/4.7地震においても弾性応答範囲内となる。
- 設計時と同等の評価(下表②)による炉心シュラウドは、今回工認の弾性設計用地震動 S_d 及び基準地震動 S_s それぞれの裕度最小部位(下部胴及び上部サポート支持面)についても3.11/4.7地震の算出値が弾性応答範囲内になることを確認した。
- 今回工認の耐震評価における裕度最小部位が3.11/4.7地震に対しても弾性応答範囲内であることから、設備健全性確認結果に基づく耐震設計に反映すべき事項の検討結果は妥当である。

A. 3.11/4.7地震による耐震評価結果									
評価対象設備及び評価箇所			評価用地震動	評価部位	評価項目(応力分類)	算出値 [MPa]	評価基準値 ($III_A S$) [MPa]	評価	評価方法 ^{※1}
原子炉本体	原子炉圧力容器内部構造物	高圧及び低圧炉心スプレイスパーージャ	3.11地震	ティー	一次一般膜応力	10	92	○	①
			4.7地震	ティー	一次一般膜応力	15	92	○	①
	炉心支持構造物	炉心シュラウド	3.11地震	下部胴	一次一般膜応力	69	92	○	②
			4.7地震	下部胴	一次一般膜応力	71	92	○	②
⋮									

B. S_d 及び S_s それぞれにおける裕度最小部位の耐震評価結果					
評価用地震動	評価部位	評価項目(応力分類)	算出値 [MPa]	評価基準値 ^{※2} [MPa]	評価
S_d	ヘッダ	一次膜+一次曲げ応力	16	139	○
S_s	ヘッダ	一次膜+一次曲げ応力	23	223	○
S_d	下部胴	一次一般膜応力	56	92	○
S_s	上部サポート支持面	支圧応力	160	210	○
⋮					

C. B.の評価部位、評価項目での3.11/4.7地震による耐震評価結果					
評価用地震動	評価部位	評価項目(応力分類)	算出値 [MPa]	評価基準値 ($III_A S$) [MPa]	評価
3.11地震	S_s による算出値が $III_A S$ 以下であり、3.11/4.7地震に対しても $III_A S$ 以下となる				
4.7地震					
3.11地震	上部サポート支持面	支圧応力	34	158	○
4.7地震	上部サポート支持面	支圧応力	35	158	○
⋮					

※1 評価方法：①簡易評価、②設計時と同等の評価

※2 評価用地震動が S_d の場合は許容応力状態 $III_A S$ 、 S_s の場合は許容応力状態 $IV_A S$

3.11/4.7地震の構造強度評価対象と異なる評価部位及び評価項目を赤字で示す。