

女川原子力発電所2号炉 東北地方太平洋沖地震等による影響を踏まえた 機器・配管系の耐震設計への反映事項について

機器・配管系の耐震設計に反映すべき事項の検討方針

東北地方太平洋沖地震等(3.11/4.7地震)の影響を踏まえた女川2号炉の機器・配管系の耐震設計に反映すべき事項は、「実用発電用原子炉の設置、運転等に関する規則」(以下「実用炉規則」という。)に基づき実施した地震後の設備健全性確認※1(特別な保全計画)における設備点検結果及び地震応答解析結果を考慮するとともに、機器・配管系が設置される建物・構築物の地震影響を踏まえ、検討する。

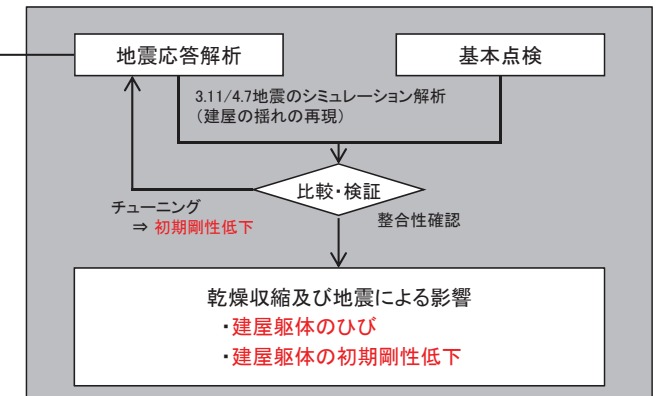
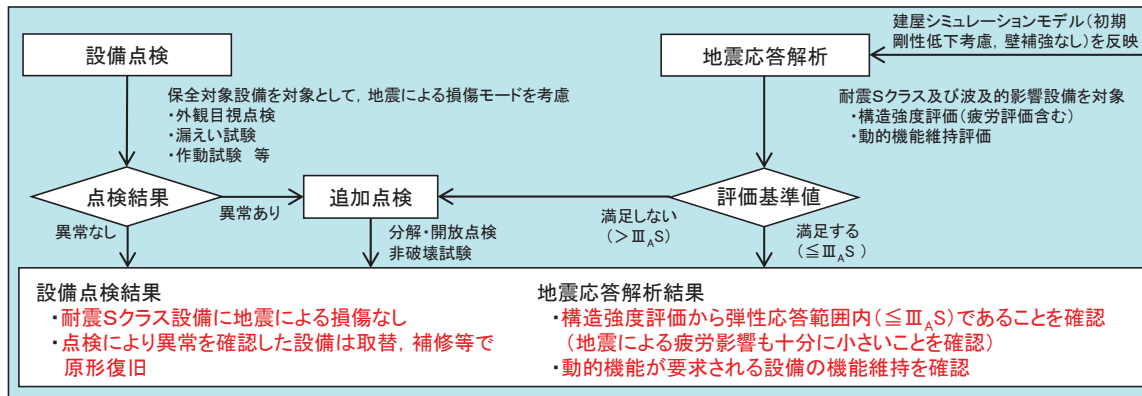
機器・配管系の耐震設計へ反映が必要となるのは、施設が地震影響によって損傷(変形、割れなど)し、補修、取替等が困難で、その状態のまま再使用する場合であつて、その損傷が地震応答解析及び構造強度評価に影響を与える場合である。(詳細については別紙参照)

※1 実用炉規則に基づき実施した地震後の設備健全性確認の結果は、発電所における保安検査等にて確認するとの見解が示されている(第68回原子力発電所の新規規制基準適合性に係る審査会合、平成26年1月16日)

機器・配管系

建物・構築物

地震後の設備健全性確認(特別な保全計画)



耐震設計への反映事項

・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。)

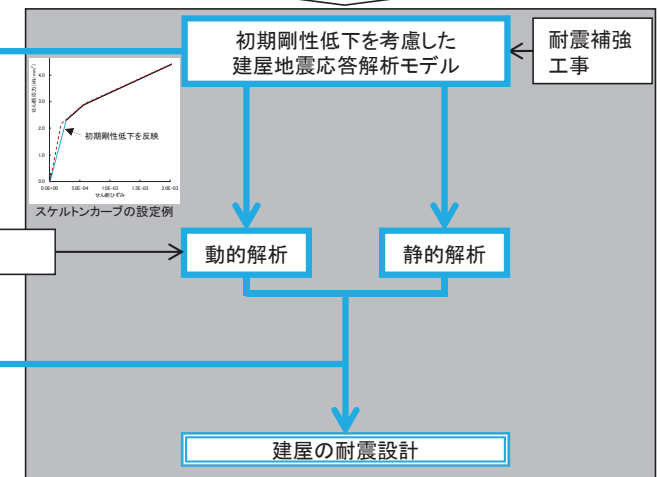
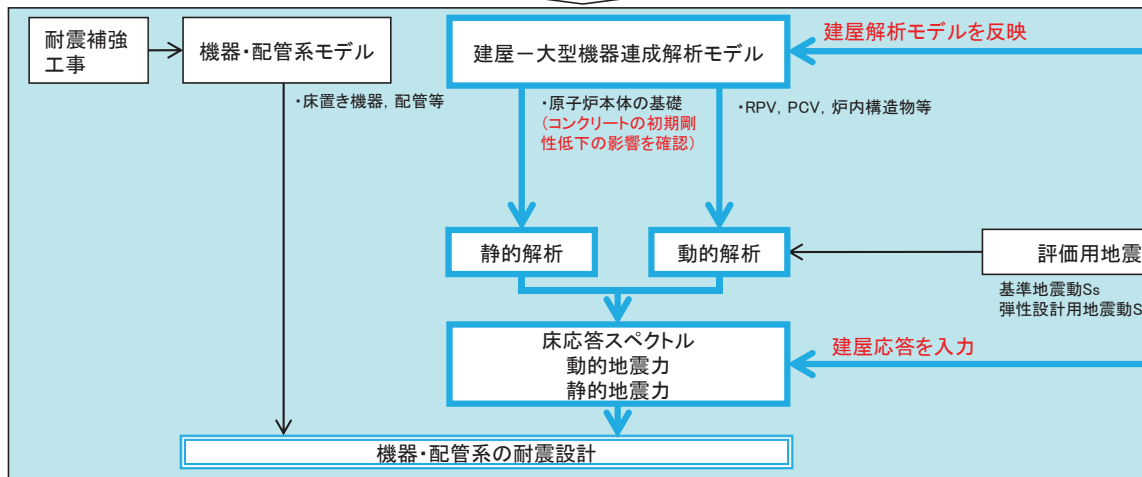
建屋の乾燥収縮及び地震による影響の観点からは、機器・配管系の耐震設計について、建屋初期剛性低下を考慮した地震応答解析モデル(建屋地震応答解析モデル、建屋-大型機器連成解析モデル)を反映する。

(建屋の適合性審査で説明済み)

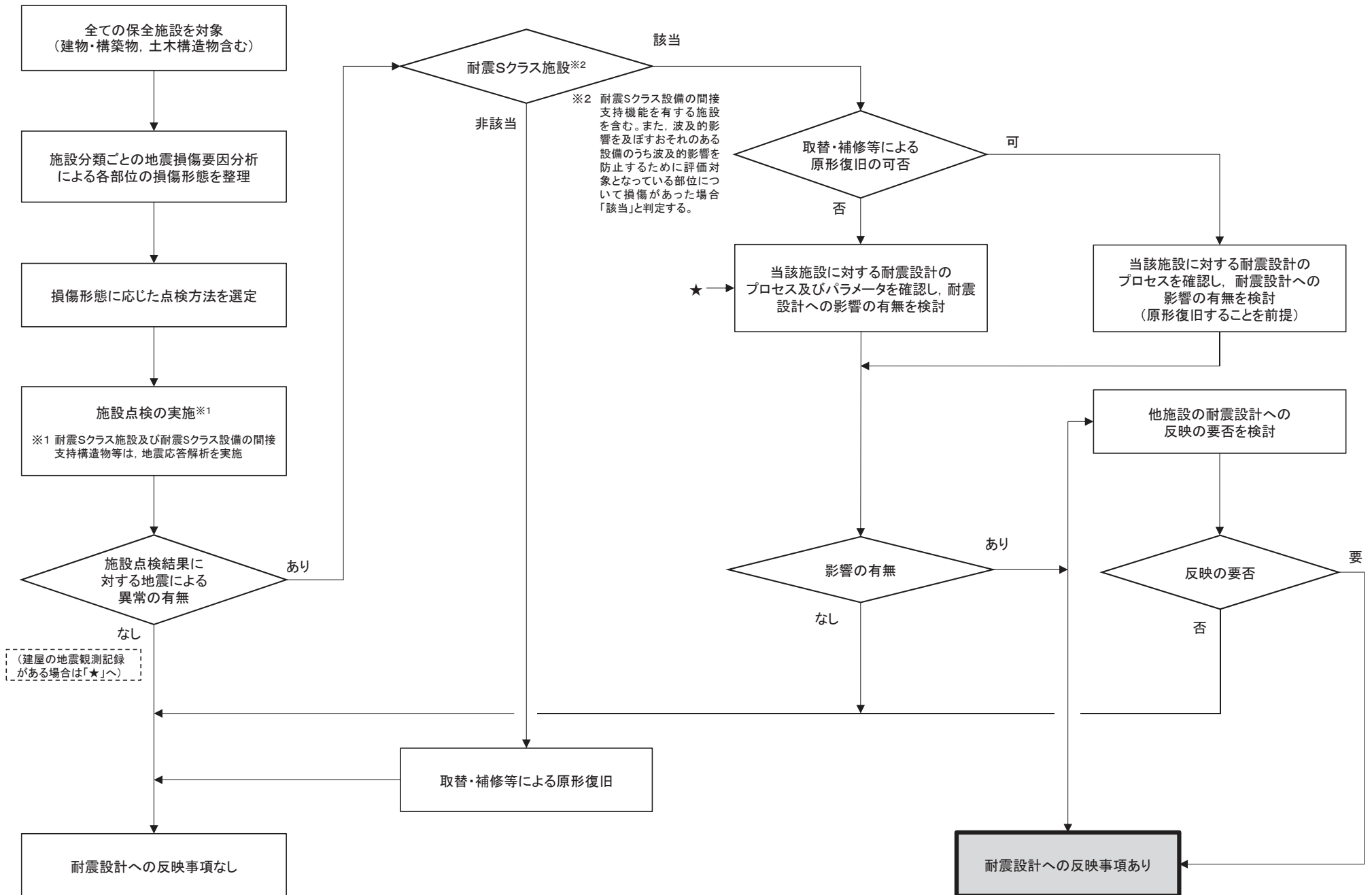
乾燥収縮及び地震による影響を踏まえて、建屋地震応答解析モデルに初期剛性低下を反映する。

〔土木構築物については、点検及び地震応答解析の結果から、損傷がないことを確認したため耐震設計への反映事項なし〕

地震影響を踏まえた耐震設計



別紙 東北地方太平洋沖地震等による影響を踏まえた耐震設計への反映事項の判断フロー(建物・構築物, 土木構造物含む)



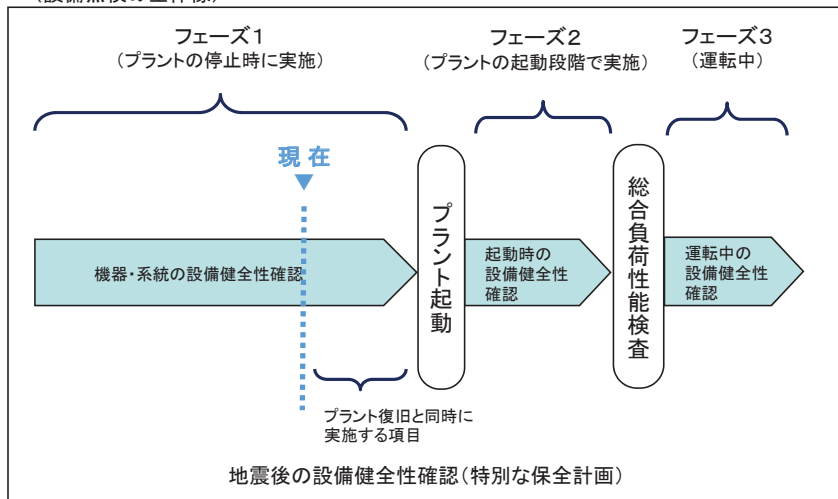
参考1 機器・配管系の地震後の設備健全性確認の概要

【地震後の設備健全性確認(特別な保全計画)の全体像】

プラントの状態に応じて、段階的に地震後の設備健全性を確認

- ・フェーズ1:プラントの停止期間中における機器・系統レベルの点検・評価
- ・フェーズ2:プラントの起動段階におけるプラント全体の健全性確認
- ・フェーズ3:運転期間中における地震影響の継続監視(データ採取)

(設備点検の全体像)

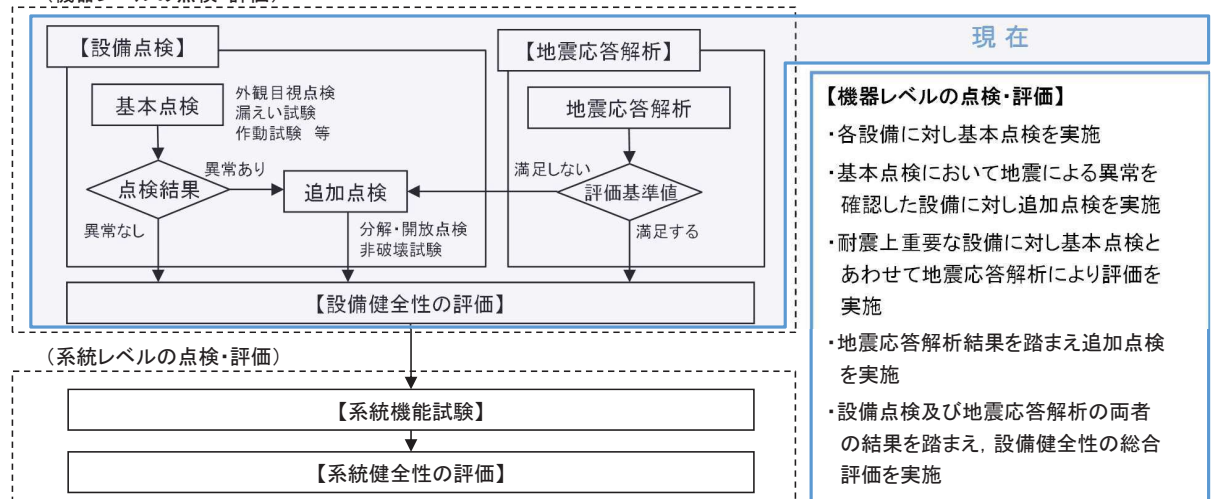


【機器・配管系の地震後の設備健全性確認(フェーズ1)の概要】

個々の機器に対する「機器レベルの点検・評価」、機器の組合せによる「系統レベルの点検・評価」により健全性を確認

- ・耐震安全上重要な機器について、設備点検と地震応答解析を実施し、両者の結果を照合し健全性を評価
- ・基本点検で異常が確認された場合、あるいは地震応答解析で評価基準値を満足しない場合は、追加点検を実施
- ・設備の健全性評価後、系統単位による機能試験を実施し、系統の健全性を評価

(機器レベルの点検・評価)



【機器レベルの点検結果】

- ・これまで実施した機器・配管系の地震後の設備健全性確認において、耐震Sクラス設備に損傷はなく、プラントの安全性に影響を与える所見はない
- ・設備点検において異常を確認した設備については、いずれも原子炉安全を阻害する可能性はなく、取替、補修、手入れにより原形に復旧
- ・下位クラスの異常により、耐震Sクラス設備への波及的影響がないことを確認

【点検の概要】

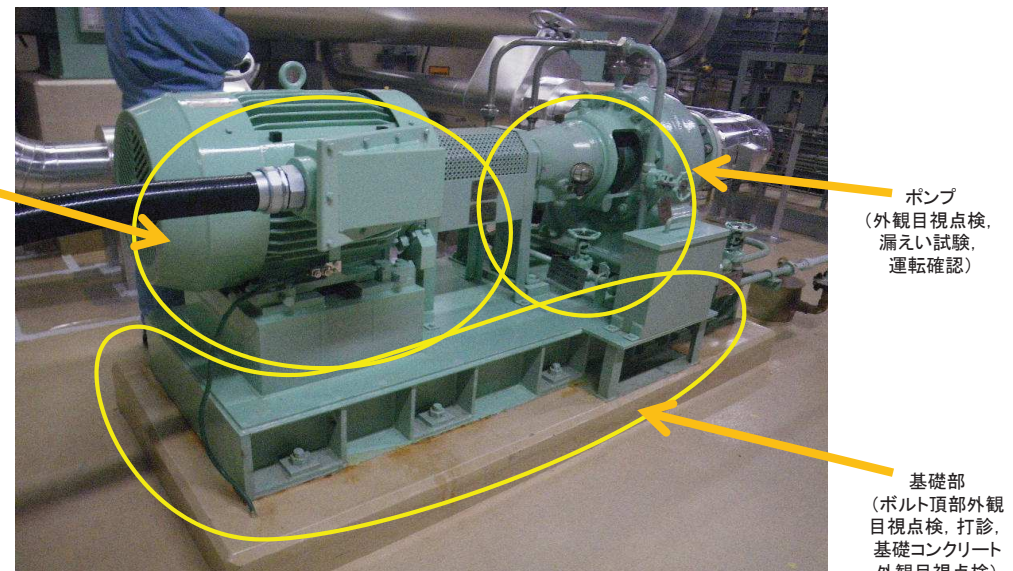
- ・各設備に共通して実施する基礎部及び本体の外観目視点検、動的機器の軸受損傷を考慮した運転確認など、地震の影響が及ぶ可能性のある部位に着目した基本点検を実施
- ・点検の結果、異常を確認した場合、分解点検、非破壊試験などの追加点検を実施

地震による異常を確認した代表的な設備

確認内容	耐震クラス
蒸気タービン動翼の損傷	B
蒸気タービン中間軸受箱の基礎ボルト曲がり	B
蒸気タービン中間軸受箱の基礎の損傷	B
原子炉建屋クレーン運転席鋼材等の損傷	B
原子炉格納容器内遮へい扉 留め具の変形	B
制御棒駆動系ハウジング支持金具サポートバーのずれ	C
変圧器避圧弁の油面変動に伴う動作	C
起動用変圧器放熱器油漏れ	C

機器レベルの点検・評価の状況

項目	対象数	状況
基本点検	約 33,000設備	完了※1
地震応答解析	構造強度評価:125設備 動的機能維持評価:35設備	完了※2



横型ポンプの基本点検箇所と点検内容の例

※1 今後のプラント復旧と同時に実施する点検(例:復水給水系の漏えい試験)を除く

※2 参考2参照

参考2-1 機器・配管系の地震応答解析の概要

【評価対象設備】

耐震安全上重要な全設備(耐震Sクラス)及び耐震B、Cクラス設備でその破損が耐震Sクラス設備に波及的影響を生じさせるおそれのある全設備を対象とする。同一の設備が複数存在するポンプ等は、据付床の床応答を考慮して、厳しい条件の設備を選定する。また、配管系等は、設計時又は既往の評価における余裕度の小さい設備を選定する。評価部位についても、設計時又は既往の評価を参照して選定する。(構造強度評価(125設備)、動的機能維持評価(35設備))

【地震応答解析】

建屋の地震応答解析は、地震観測記録を踏まえたシミュレーション解析モデルによる建屋応答を用いることを基本とし、地震観測記録も考慮する。なお、シミュレーション解析による建屋応答及び観測記録の拡幅は行わない。

【構造強度評価(疲労評価含む)】

構造強度評価は、設計時及び既往の評価結果において比較的余裕度の大きな設備については、簡易評価(応答倍率法による評価)を行う。簡易評価において算出値が評価基準値を満足しない場合には、設計時と同等の評価を行う。設計時と同等の評価において算出値が評価基準値を満足しない場合には詳細評価(時刻歴応答解析等)を行う。

また、地震の継続時間が比較的長かったことを考慮して、疲労の影響が大きいと考えられる配管等の疲労評価を実施する。

【動的機能維持評価】

弁、ポンプ等の動的機能維持の評価は、地震応答解析に基づき評価対象設備の応答加速度を求め、評価基準値である機能確認済加速度以下であることを確認する。応答加速度が機能確認済加速度を上回る設備については、詳細評価を実施する。

制御棒の挿入性は、燃料集合体の相対変位を求め、試験により制御棒の挿入性が確認された相対変位以下であることを確認する。

【評価基準値】

「原子力発電所耐震設計技術指針JEAG4601-補・1984, JEAG4601-1987, JEAG4601-1991 追補版」等に基づく。構造強度評価では、弾性応答範囲内(≦Ⅲ_AS)であることを確認する。

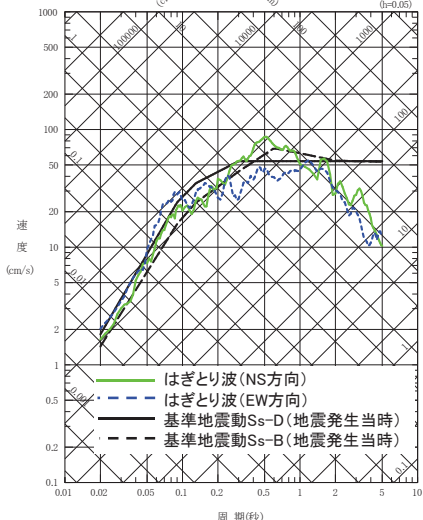
【地震応答解析等での考慮事項】

地震応答解析及び耐震評価は、設計時の評価条件と同条件にて評価することを基本とするが、より実態にあった評価条件として、地震時におけるブラント状態^{※1}等を考慮した評価を実施する場合がある。

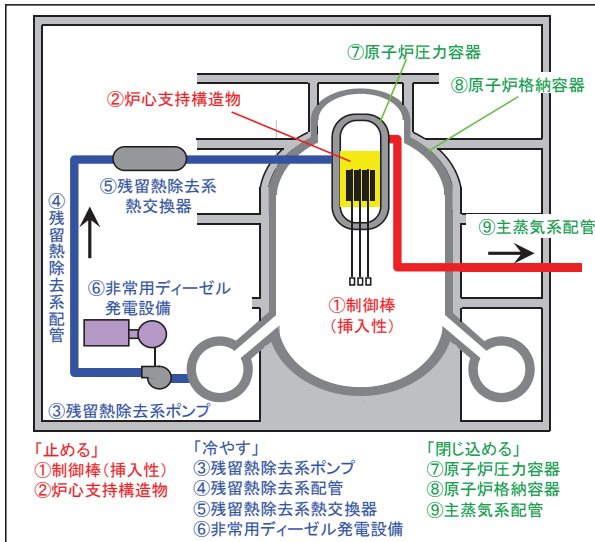
※1 女川2号炉は、平成23年(2011年)東北地方太平洋沖地震時は原子炉起動中、同年4月7日宮城県沖の地震時は冷温停止中

【地震応答解析結果】

東北地方太平洋沖地震等(3.11/4.7地震)の建屋シミュレーション解析を踏まえ、耐震Sクラス等の設備に対する構造強度評価の結果、弾性応答範囲内であること、地震による疲労影響は十分に小さいことを確認した。また、動的機能維持評価の結果、動的機能が要求される設備の機能が維持されることを確認した。



はざとり解析結果(3.11地震の例)



評価対象設備の例

構造強度評価の確認結果

評価対象	評価部位	応力分類	発生値[MPa]		評価基準値(Ⅲ _A S)[MPa]	判定
			3.11地震	4.7地震		
炉心支持構造物	シュラウドサポートレグ	軸圧縮	175 ^{※2}	177 ^{※2}	198	○
残留熱除去系ポンプ	原動機台取付ボルト	引張	26 ^{※2}	25 ^{※2}	444	○
残留熱除去系配管	配管本体	一次	117	144	274	○
残留熱除去系熱交換器	基礎ボルト	引張	82	56	147/169 ^{※3}	○
非常用ディーゼル機関	基礎ボルト	引張	79	50	254	○
原子炉圧力容器	基礎ボルト	引張	105	91	499	○
原子炉格納容器	サンドクッション部	座屈	0.48 ^{※4}	0.37 ^{※4}	1	○
主蒸気系配管	配管本体	一次	141	183	198	○

※2 簡易評価により算出

※3 評価基準値は、せん断力の組合せを考慮し、各々3.11/4.7地震を示す

※4 座屈に対する評価式により、発生値は評価基準値に対する比率で示す

疲労評価の確認結果

評価対象	対象地震	繰返しヒーク応力[MPa]	地震による疲れ累積係数[-]	合計[-]	判定
残留熱除去系配管 ^{※5}	3.11	247	0.0027	0.0036	○
	4.7	238	0.0009		
ベント管ペローズ ^{※6}	3.11	—	0.0002 ^{※7}	0.0004	○
	4.7	—	0.0002 ^{※7}		

※5 既往の評価結果を考慮し、疲れ累積係数が最大であるクラス1配管モデル

※6 評価項目が疲労評価である設備

※7 簡易評価により算出

動的機能維持評価の確認結果

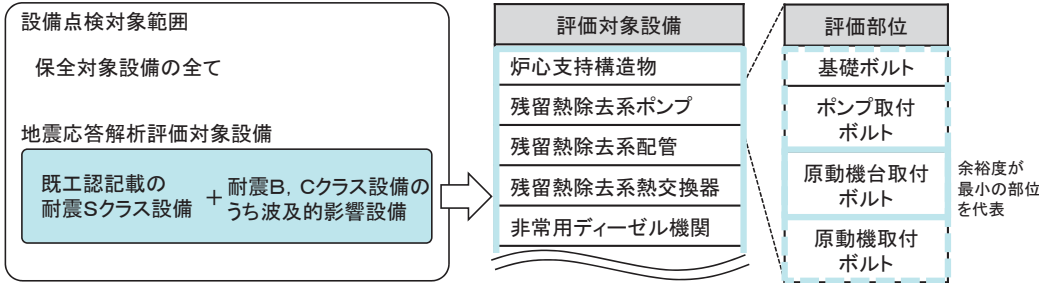
評価対象	相対変位[mm]		評価基準値[mm]	判定	備考
	3.11地震	4.7地震			
制御棒(挿入性) (燃料集合体相対変位)	18.2	8.5	40.0	○	(3.11地震時) 制御棒が全挿入したことを確認 (4.7地震時) 制御棒は全て挿入状態

評価対象	対象地震	水平加速度[G]		鉛直加速度[G]		判定
		応答加速度	評価基準値	応答加速度	評価基準値	
残留熱除去系ポンプ	3.11	0.62	10.0	0.40	1.0	○
	4.7	0.40	10.0	0.39	1.0	○
残留熱除去系電動機	3.11	0.62	2.5	0.40	1.0	○
	4.7	0.40	2.5	0.39	1.0	○
非常用ディーゼル機関	3.11	0.84	1.1	0.59	1.0	○
	4.7	0.58	1.1	0.63	1.0	○

参考2-2 地震応答解析を実施する機器・配管系の評価対象設備の考え方及び評価方法の概要

1. 評価対象選定の考え方

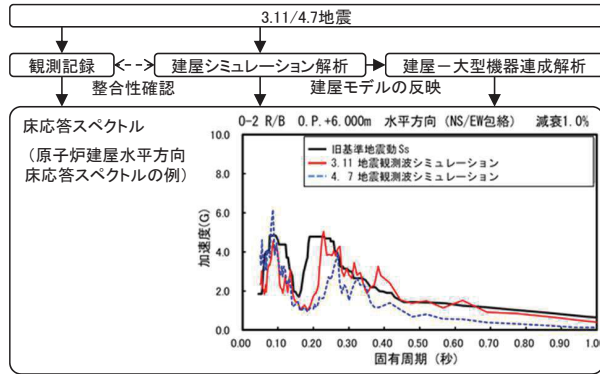
- ・評価対象設備は、既工認記載の耐震Sクラス設備及び耐震B、Cクラス設備のうち波及的影響設備とする。評価対象設備のうち、同一の設備が複数存在するポンプ等は、据付床の床応答を考慮して、厳しい条件の設備を選定する。また、配管等は、系統毎に設計時又は既往の評価における余裕度の小さい設備を選定する。
- ・評価部位は、設計時又は既往の評価における余裕度(=許容応力/発生応力)の最も小さい部位を代表部位とする。(代表部位以外についても評価する場合もある。)
- ・地震の継続時間が比較的長かったことを考慮して、疲労の影響が大きいと考えられる配管等を選定し、3.11/4.7地震に対する疲労評価(疲れ累積係数)を実施する。
- ・地震時に動的機能が要求される動的機器(ポンプ、弁等)を選定し、動的機能維持評価を実施する。



2. 評価方法の概要

(1) 地震応答解析に用いる建屋応答

- ・地震応答解析は、地震観測記録との整合性を確認した建屋シミュレーション解析モデル(初期剛性低下等を反映)を用いることを基本とし、建屋内に設置された地震計による観測記録も考慮する。
- ・なお、床応答スペクトルは、シミュレーション解析による建屋応答及び地震観測記録を反映しているため、振幅は行わない。



(2) 構造強度評価

- ・構造強度評価は、段階的な評価手順とする。
- ①設計時及び既往の評価結果において比較的余裕度の大きな設備については、簡易評価(応答倍率法による評価)を行う。
- ②簡易評価において算出値が評価基準値を満足しない場合には、設計時と同等の評価を行う。
- ③設計時と同等の評価において算出値が評価基準値を満足しない場合には詳細評価(時刻歴応答解析等)を行う。
- ・構造強度評価の評価基準値は、地震による影響の有無を確認する観点から「原子力発電所耐震設計技術指針 JEAG4601・補-1984」に規定される許容応力状態Ⅲ_AS(弾性応答範囲内)における許容応力を基本とする。
- ・地震応答解析及び耐震評価は、設計時の評価条件と同条件にて評価することを基本とするが、3.11/4.7地震に対する地震影響を詳しく確認するため、より実態にあった評価条件として、地震時におけるブランチ状態^{*1}等を考慮した評価を実施する場合がある。
- ・また、地震の継続時間が比較的長かったことを考慮して、疲労の影響が大きいと考えられる配管等については、時刻歴応答解析で求めたピーク応力強さの時刻歴と設計疲労線図に基づき、疲労評価を実施する。

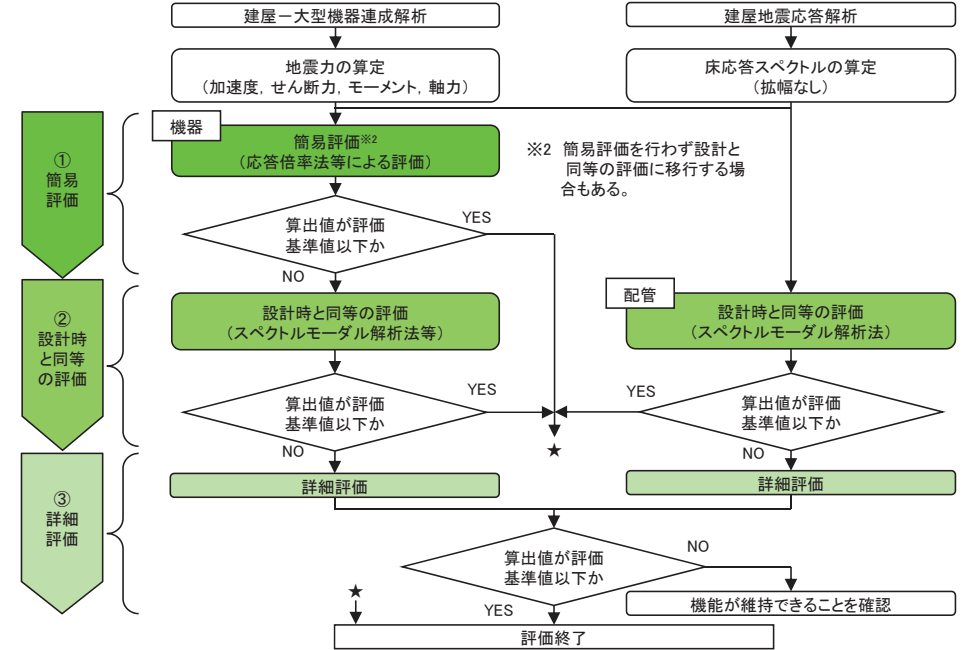
^{*1} 女川2号炉は、平成23年(2011年)東北地方太平洋沖地震時は原子炉起動中、同年4月7日宮城県沖の地震時は冷温停止中

(3) 動的機能維持評価

- ・弁、ポンプ等の動的機能維持の評価は、地震応答解析に基づき評価対象設備の応答加速度を求め、評価基準値である機能確認済加速度以下であることを確認する。また、応答加速度が機能確認済加速度を上回る設備については、詳細評価を実施する。
- ・制御棒の挿入性は、地震応答解析により燃料集合体の相対変位を求め、試験により制御棒の挿入性が確認された相対変位以下であることを確認する。
- ・評価基準値の機能確認済加速度は、JEAG4601-1991追補版に準拠するとともに、試験等で妥当性が確認された値も用いる。

3. 段階的な構造強度評価の概要

(1) 評価フロー



(2) 応答倍率法の概要

応答倍率法による算出値の求め方の例

ケース1 算出値 = 設計時又は既往評価での全体応力 × 応答比
(地震及び地震以外による応力)

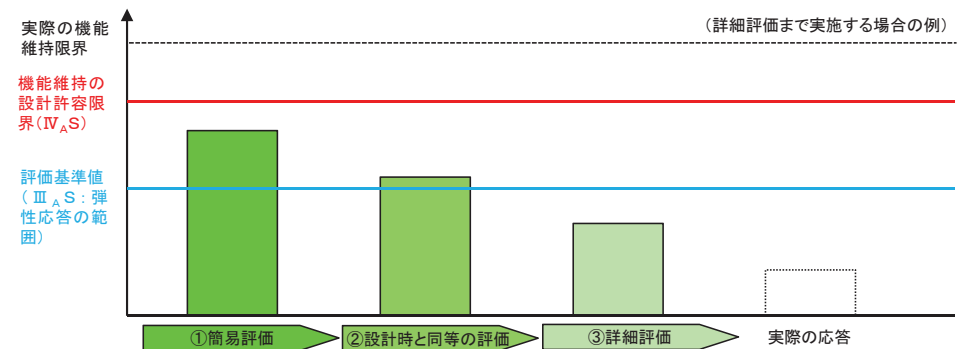
ケース2 算出値 = 設計時又は既往評価での地震以外による応力 + 設計時又は既往評価での地震による応力 × 応答比

上記における「応答比」の求め方の例

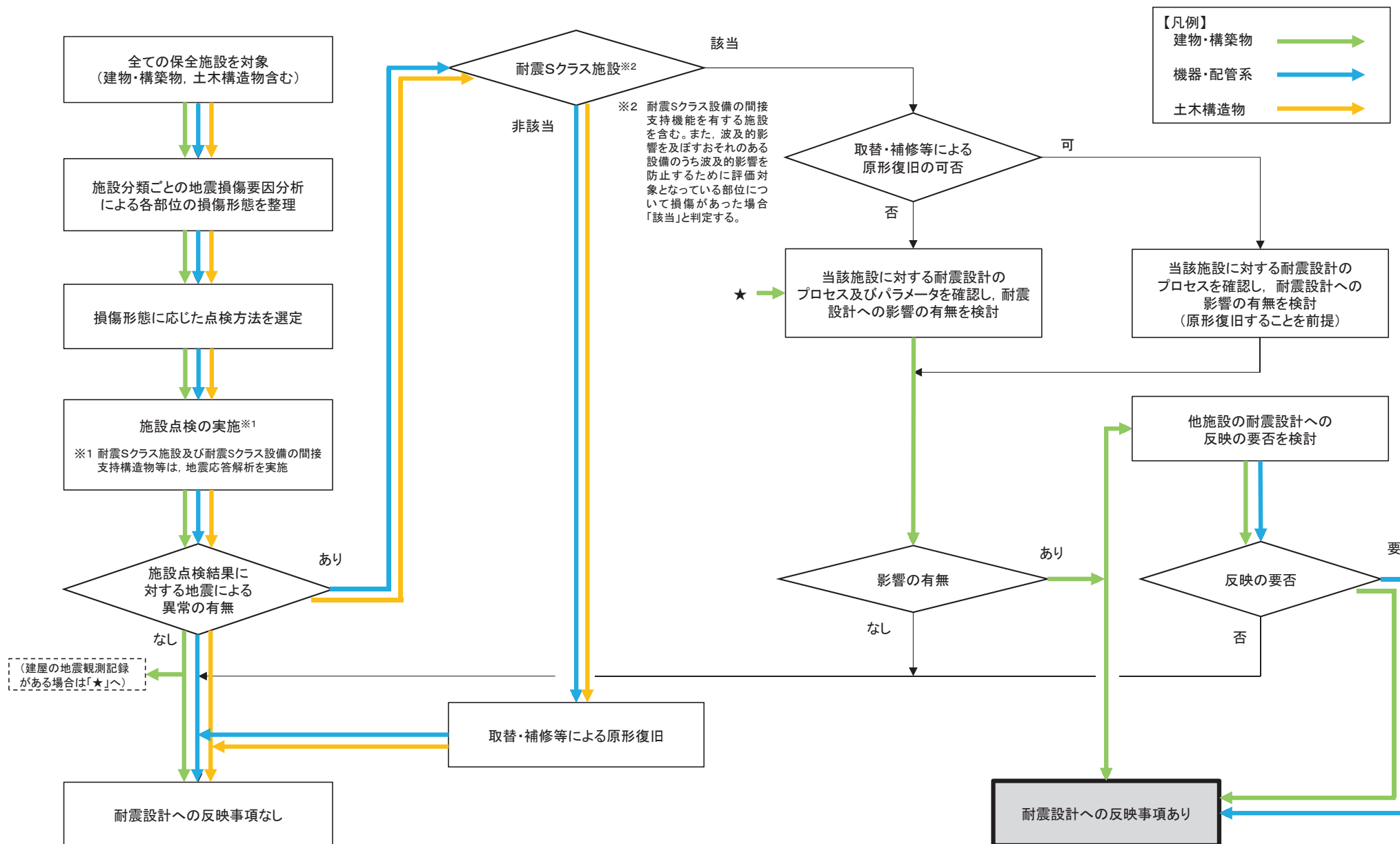
(a) 原子炉炉圧容器や炉内構造物等、算出値を求めるにあたり、加速度、せん断力、モーメント、軸力を用いる機器
3.11/4.7地震時の地震力と設計時又は既往評価での地震力の比
(加速度、せん断力、モーメント、軸力ごとに応答比を算出)

(b) ポンプの基礎ボルト等、算出値を求めるにあたり、水平加速度、鉛直加速度を用いる機器
3.11/4.7地震時の加速度と設計時又は既往評価での加速度の比
(水平加速度、鉛直加速度ごとに応答比を算出)

(3) 構造強度評価の各段階における実際の応答に対する保守性(イメージ)



参考3 耐震設計への反映事項の判断(別紙参照)の実績



【既設耐震B、Cクラス施設のうち、新規制基準に伴い基準地震動Ssでの耐震評価が必要な施設への設計反映事項について】

上記フローは、地震影響による耐震設計への反映事項有無の判断を示したものであり、既設耐震B、Cクラス施設のうち、新規制基準において重大事故等対処施設及び波及的影響施設等の機能要求により基準地震動Ssでの耐震評価が必要となった施設の耐震設計への反映事項の有無については、施設点検結果から以下のとおり整理した。

- ・建物・構築物 : 新規制基準に伴い基準地震動Ssでの耐震評価が必要となった建物・構築物は、地震による異常がなかったものの、初期剛性低下の影響を確認し、その影響を設計反映する。
- ・機器・配管系 : 地震による異常があった既設耐震B、Cクラス設備は、新規制基準により重大事故等対処施設及び波及的影響設備となる設備も含めて原形復旧しているため耐震設計への反映事項はない。なお、新規制基準での要求事項については、基準地震動Ssでの耐震評価を行い、必要に応じて耐震補強工事を実施し適合性を確保する。
- ・土木構造物 : 新規制基準に伴い基準地震動Ssでの耐震評価が必要となった軽油タンク室、軽油タンク連絡ダクト、復水貯蔵タンク基礎は、地震による異常がなかったため耐震設計への反映事項はない。