

女川原子力発電所2号炉 耐震設計の基本方針について

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）
重大事故等対処設備について（第39条 地震による損傷の防止）

平成31年3月
東北電力株式会社

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。

目次

1. 耐震設計の基本方針
 - 1-1 基本方針
 - 1-2 耐震重要度分類
 - 1-3 設計用地震力
 - 1-4 地震による荷重と運転時, 事故時荷重との組合せ
 - 1-5 許容限界
2. 耐震性評価に係る主な確認事項
 - 2-1 今回の申請における耐震性評価の考え方
 - 2-2 具体的な施設の評価方針
 - 2-2-1 建物・構築物
 - 2-2-2 機器・配管系
 - 2-2-3 屋外重要土木構造物等及び津波防護施設
 - 2-3 上位クラス施設への下位クラス施設の波及的影響
 - 2-4 水平2方向及び鉛直方向の地震力の組合せの評価方針
3. 女川原子力発電所2号炉における耐震設計の論点

1. 耐震設計の基本方針

1-1 基本方針(1)

耐震設計は、「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」及びその解釈を踏まえ，以下の方針とする。

- (1) 設計基準対象施設は，地震により生ずるおそれがあるその安全機能の喪失及びそれに起因する放射線による公衆への影響の程度に応じ，耐震重要度分類を，Sクラス，Bクラス及びCクラスに分類し，それぞれに応じた地震力に十分に耐えられるように設計する。
- (2) Sクラスの施設（津波防護施設，浸水防止設備及び津波監視設備を除く）は，基準地震動 S_s による地震力に対して，その安全機能が保持できるように設計するとともに，弾性設計用地震動 S_d による地震力又は静的地震力のいずれか大きい方の地震力に対しておおむね弾性状態に留まる範囲で耐えられる設計とする。
- (3) Bクラスの施設は，静的地震力に対しておおむね弾性状態に留まる範囲で耐えられる設計とする。また，共振のおそれのある施設については，その影響について検討する。
- (4) Cクラスの施設は，静的地震力に対しておおむね弾性状態に留まる範囲で耐えられる設計とする。
- (5) 弾性設計用地震動 S_d は，基準地震動 S_s との応答スペクトルの比率が目安として0.5を下回らないように基準地震動 S_s に係数を乗じて設定する。ここで，係数は工学的判断として，原子炉施設の安全機能限界と弾性限界に対する入力荷重の比率が0.5程度であるという知見を踏まえ，さらに，「発電用原子炉施設に関する耐震設計審査指針（昭和56年7月20日原子力安全委員会決定，平成13年3月29日一部改訂）」における2号炉の基準地震動 S_1 の応答スペクトルをおおむね下回らないよう配慮した値とする。
具体的には，工学的判断により， $S_s-F1\sim F3$ 及び S_s-N1 は係数0.5を乗じた地震動，応答スペクトルに基づく地震動評価による基準地震動 $S_s-D1\sim D3$ に対しては更に余裕を見込み，係数0.58を乗じた地震動を弾性設計用地震動 S_d として設定する。また，建物・構築物及び機器・配管系ともに係数0.5又は0.58を採用することで，弾性設計用地震動 S_d に対する設計に一貫性をとる。弾性設計用地震動 S_d の年超過確率は短周期側で $10^{-2}\sim 10^{-4}$ 程度，長周期側で $10^{-3}\sim 10^{-5}$ 程度である。弾性設計用地震動 S_d と基準地震動 S_1 の応答スペクトルの比較や弾性設計用地震動 S_d と解放基盤表面における地震動の一樣ハザードスペクトルの比較を，1-3設計用地震力に示す。

1-1 基本方針(2)

- (6) 屋外重要土木構造物, 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・構築物及び土木構造物については, 基準地震動 S_s による動的地震力に対して, 要求される機能(津波防護機能, 浸水防止機能及び津波監視機能)を保持できるように設計する。
- (7) 常設耐震重要重大事故防止設備又は常設重大事故緩和設備が設置される重大事故等対処施設は, 基準地震動 S_s による地震力に対して, 重大事故等に対処するために必要な機能が損なわれるおそれがないように設計する。また, 常設耐震重要重大事故防止設備又は常設重大事故緩和設備が, Bクラス及びCクラスの施設, 常設耐震重要重大事故防止設備以外の常設重大事故防止設備が設置される重大事故等対処施設, 可搬型重大事故等対処設備, 常設重大事故防止設備及び常設重大事故緩和設備のいずれにも属さない常設の重大事故等対処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が損なわれないように設計する。
- (8) 常設耐震重要重大事故防止設備以外の常設重大事故防止設備が設置される重大事故等対処施設は, 代替する機能を有する設計基準事故対処設備が属する耐震重要度分類のクラスに適用される地震力に十分に耐えることができるように設計する。
- (9) 地震による荷重は, 通常運転時, 運転時の異常な過渡変化時, 事故時の荷重と適切に組み合わせて評価する。
- (10) 基準地震動 S_s 及び弾性設計用地震動 S_d による地震力は, 水平2方向及び鉛直方向について適切に組み合わせて算定するものとする。なお, 水平2方向及び鉛直方向の地震力が同時に作用し, 影響が考えられる施設, 設備については許容限界の範囲内に留まることを確認する。
- (11) 耐震重要施設は, 耐震重要度分類の下位のクラスに属するものの波及的影響によって, その安全機能を損なわないように設計する。

1-2 耐震重要度分類

設計基準対象施設は下表のとおり、その重要度によりSクラス、Bクラス、Cクラスに分類する。

耐震重要度 分類	該当する施設
Sクラス	<ul style="list-style-type: none"> ・原子炉冷却材圧力バウンダリを構成する機器・配管系 ・使用済燃料を貯蔵するための施設 ・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施設、及び原子炉の停止状態を維持するための施設 ・原子炉停止後、炉心から崩壊熱を除去するための施設 ・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の施設 ・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施設 ・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施設であり、上記の「放射性物質の放散を直接防ぐための施設」以外の施設 ・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 ・敷地における津波監視機能を有する施設
Bクラス	<ul style="list-style-type: none"> ・原子炉冷却材圧力バウンダリに直接接続されていて、一次冷却材を内蔵しているか又は内蔵し得る施設 ・放射性廃棄物を内蔵している施設(ただし、内蔵量が少ない又は貯蔵方式により、その破損により公衆に与える放射線の影響が実用発電用原子炉の設置、運転等に関する規則(昭和53年通商産業省令第77号)第2条第2項第6号に規定する「周辺監視区域」外における年間の線量限度に比べ十分に小さいものは除く。) ・放射性廃棄物以外の放射性物質に関連した施設で、その破損により、公衆及び従事者に過大な放射線被ばくを与える可能性のある施設 ・使用済燃料を冷却するための施設 ・放射性物質の放出を伴うような場合に、その外部放散を抑制するための施設で、Sクラスに属さない施設
Cクラス	<ul style="list-style-type: none"> ・Sクラスに属する施設及びBクラスに属する施設以外の一般産業施設又は公共施設と同等の安全性が要求される施設

1-3 設計用地震力 (1)

各施設の耐震重要度に応じて定める地震力は以下のとおりとする。なお、動的地震力を算定する地震応答解析においては、建物・構築物の剛性及び地盤物性等の不確かさを適切に考慮する。

	重要度分類	静的地震力 ^(注1)		動的地震力 ^{(注1)(注2)}	
		水平	鉛直	水平	鉛直
建物・構築物	S	$3.0C_i$ ^(注3)	$1.0C_v$ ^(注4) (=0.240)	Ss, Sd	Ss, Sd
	B	$1.5C_i$ ^(注3)	—	$Sd \times 1/2$ ^(注5)	$Sd \times 1/2$ ^(注5)
	C	$1.0C_i$ ^(注3)	—	—	—
機器・配管系	S	$3.6C_i$ ^(注3)	$1.2C_v$ ^(注4) (=0.288)	Ss, Sd	Ss, Sd
	B	$1.8C_i$ ^(注3)	—	$Sd \times 1/2$ ^(注5)	$Sd \times 1/2$ ^(注5)
	C	$1.2C_i$ ^(注3)	—	—	—
土木構造物	C	$1.0C_i$ ^(注3)	—	Ss ^(注6)	Ss ^(注6)
波及的影響施設	—	—	—	Ss	Ss
津波防護施設 浸水防止設備 津波監視設備	S	—	—	Ss	Ss
重大事故等対処施設	<ul style="list-style-type: none"> ・常設耐震重要重大事故防止設備は、基準地震動Ssによる地震力 ・常設耐震重要重大事故防止設備以外の常設重大事故防止設備は、代替する設備の耐震クラスに適用される地震力 ・常設重大事故緩和設備は、基準地震動Ssによる地震力 				

(注1) 機器・配管系については設置された床の応答を入力とする。

(注2) Ss: 基準地震動Ssにより定まる地震力

Sd: 弾性設計用地震動Sdにより定まる地震力

(注3) 地震層せん断力係数Cilは、標準せん断力係数を0.2以上とし、建物・構築物の振動特性、地盤の種類等を考慮して求められる値で次式に基づく。

$C_i = R_t \cdot A_i \cdot C_o$ 。(R_t: 振動特性係数0.8 A_i: C_iの分布係数 C_o: 標準せん断力係数0.2)

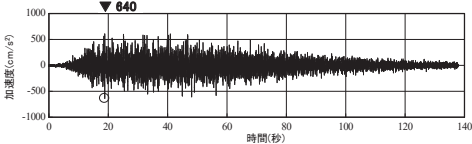
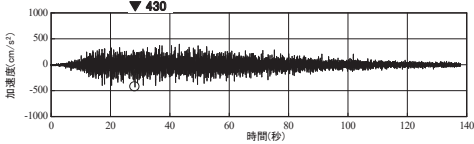
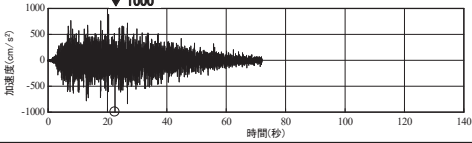
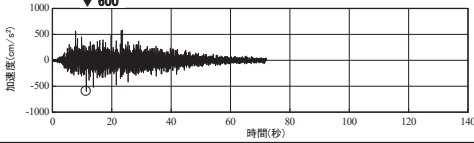
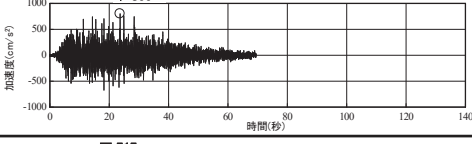
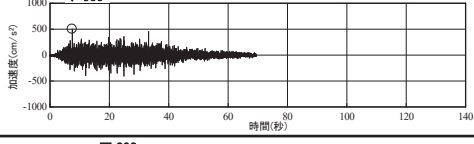
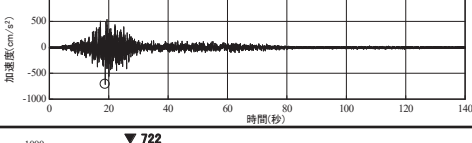
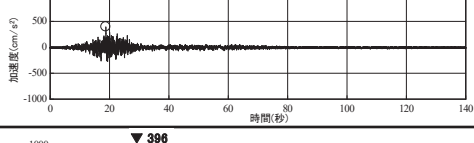
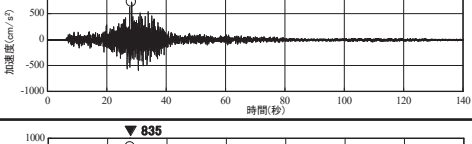
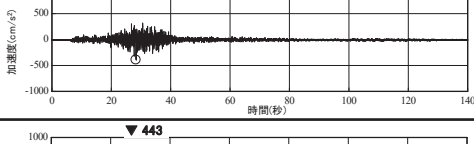


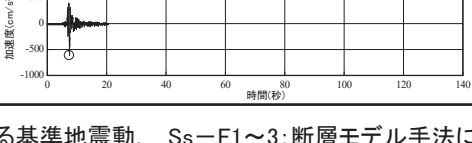

(注4) $C_v = R_v \cdot 0.3$ (R_v: 振動特性係数0.8)

(注5) 共振のおそれのある施設について適用する。

(注6) 屋外重要土木構造物のみに適用する。

1-3 設計用地震力 (2)

● 基準地震動Ssの加速度時刻歴波形の一覧を示す。

基準地震動*	水平方向	鉛直方向
Ss-D1		
Ss-D2		
Ss-D3		
Ss-F1		
Ss-F2		
Ss-F3		
Ss-N1		

* Ss-D1~3: 応答スペクトル手法による基準地震動, Ss-F1~3: 断層モデル手法による基準地震動, Ss-N1: 震源を特定せず策定する地震動

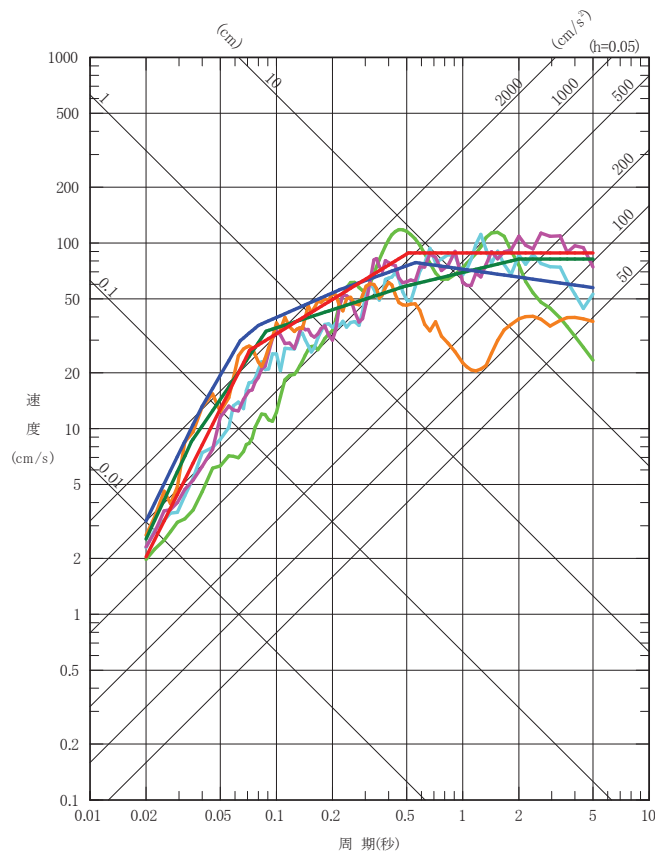


1-3 設計用地震力 (3)

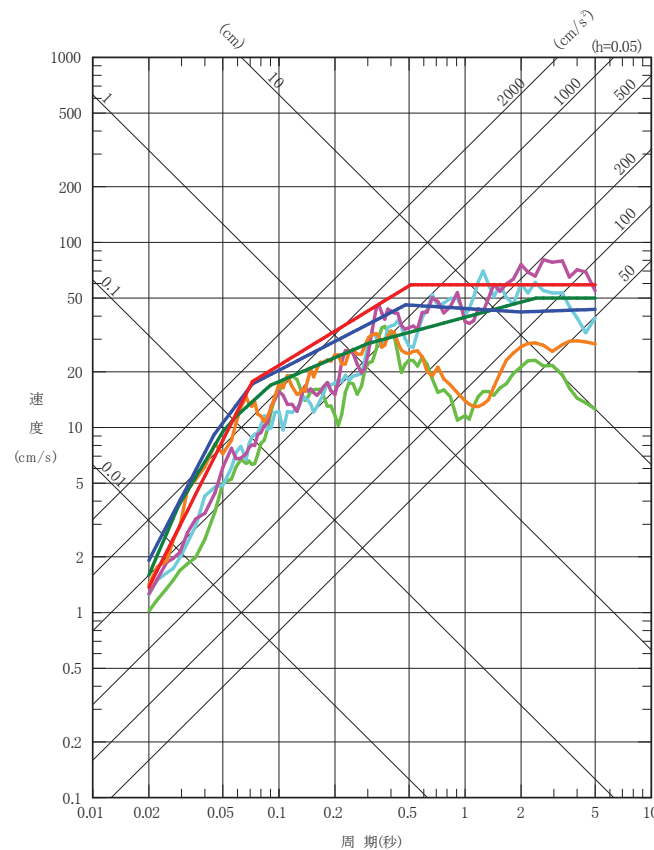
● 基準地震動Ssの応答スペクトル

- 基準地震動Ss-D1H
- 基準地震動Ss-D2H
- 基準地震動Ss-D3H
- 基準地震動Ss-F1H
- 基準地震動Ss-F2H
- 基準地震動Ss-F3H
- 基準地震動Ss-N1H

- 基準地震動Ss-D1V
- 基準地震動Ss-D2V
- 基準地震動Ss-D3V
- 基準地震動Ss-F1V
- 基準地震動Ss-F2V
- 基準地震動Ss-F3V
- 基準地震動Ss-N1V



水平方向



鉛直方向

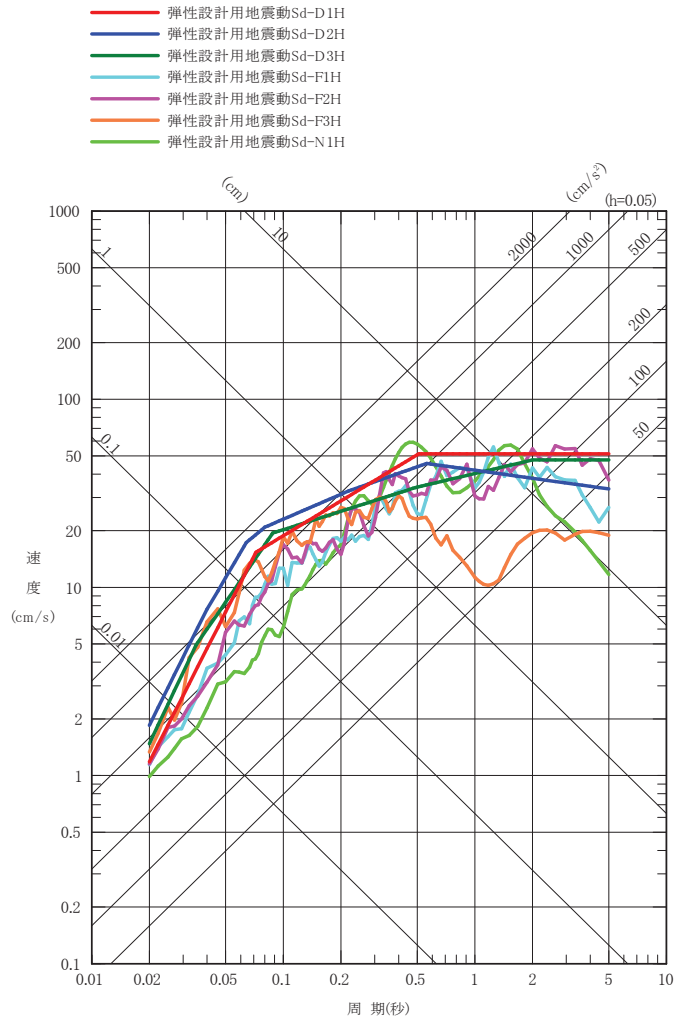
1-3 設計用地震力 (4)

●弾性設計用地震動Sdの加速度時刻歴波形の一覧を示す。

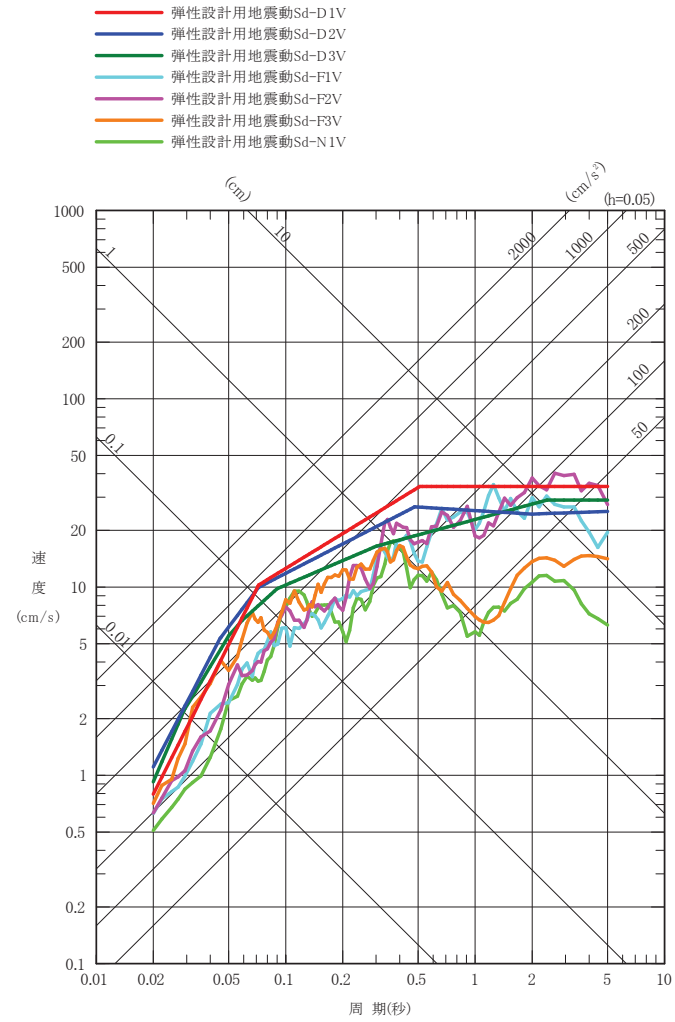
基準地震動	水平方向	鉛直方向
Sd-D1		
Sd-D2		
Sd-D3		
Sd-F1		
Sd-F2		
Sd-F3		
Sd-N1		

1-3 設計用地震力 (5)

●弾性設計用地震動Sdの応答スペクトル



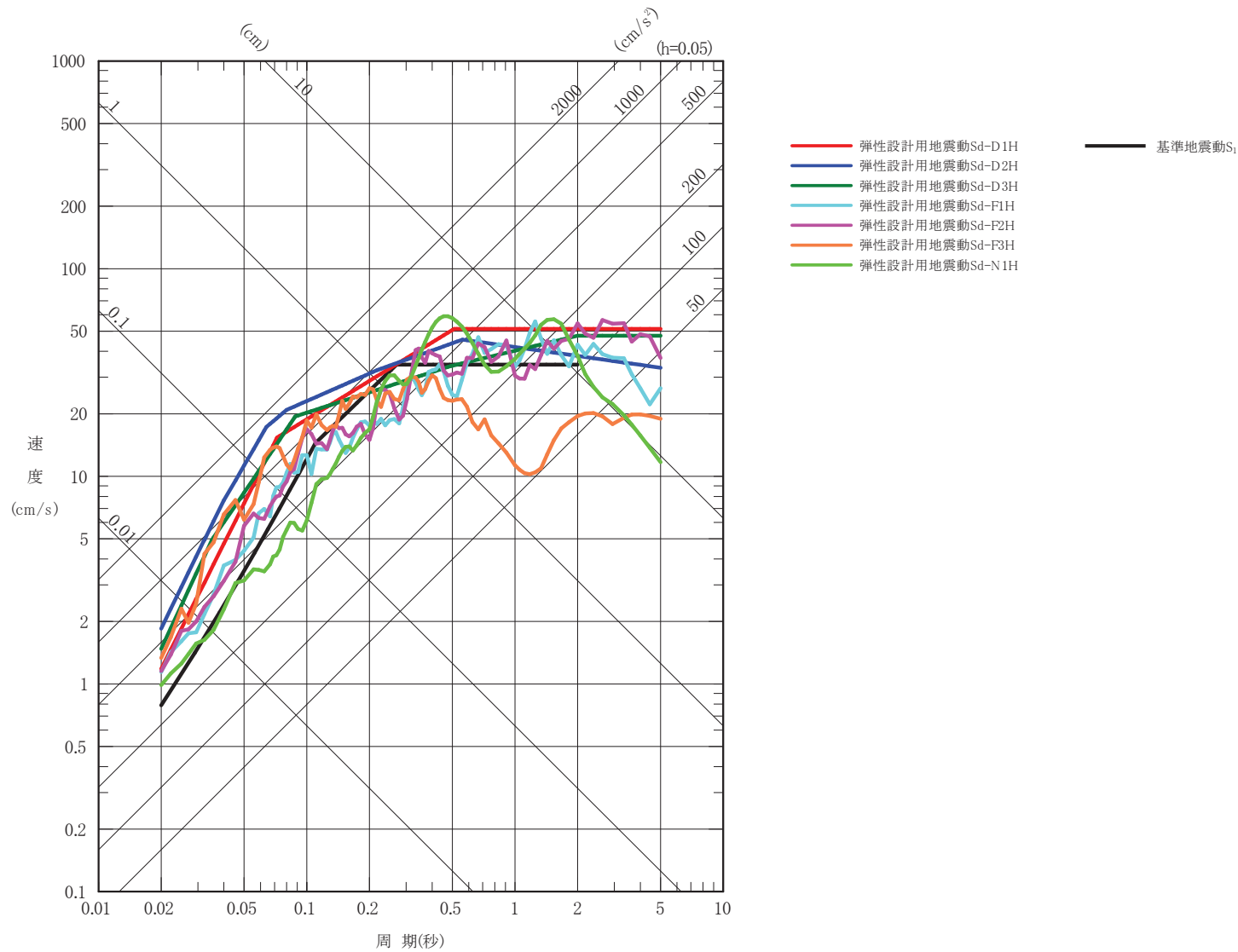
水平方向



鉛直方向

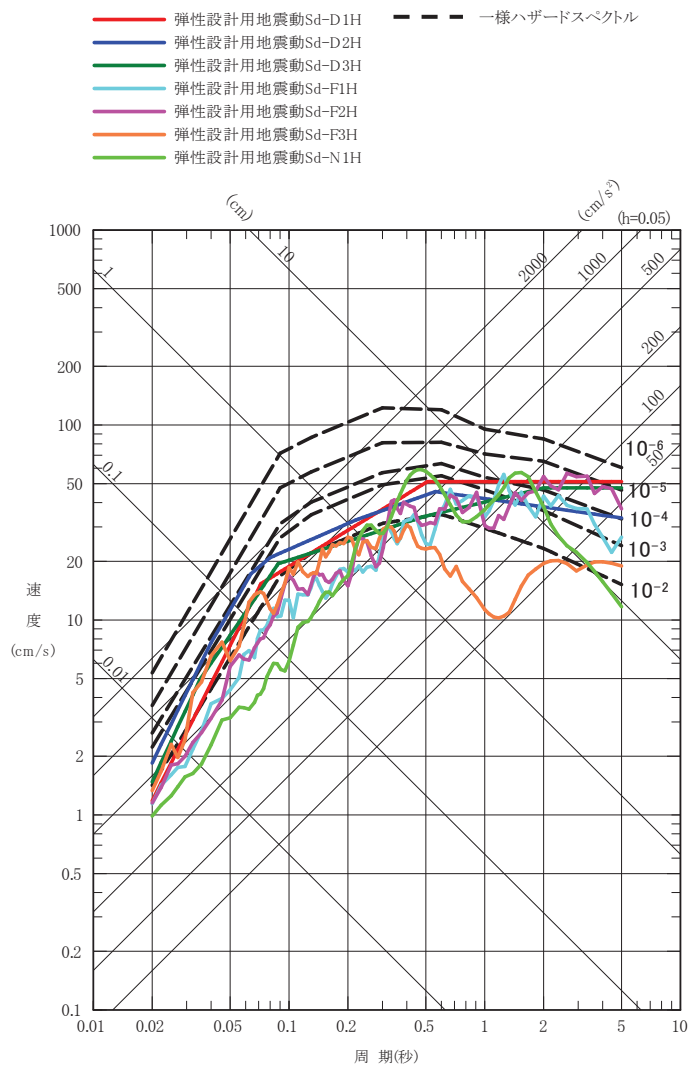
1-3 設計用地震力 (6)

●弾性設計用地震動Sdと基準地震動S1の応答スペクトル

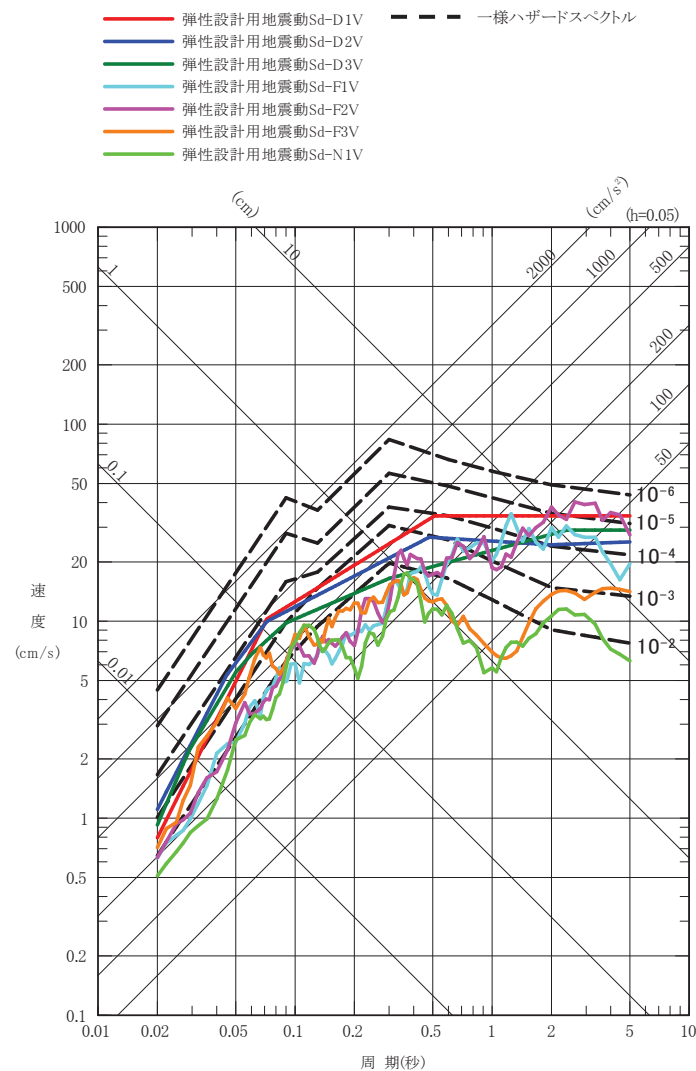


1-3 設計用地震力 (7)

●弾性設計用地震動Sdの応答スペクトル及び解放基盤表面における地震動の一樣ハザードスペクトル



水平方向



鉛直方向

1-4 地震による荷重と運転時，事故時荷重との組合せ（1）

地震による荷重は，通常運転時，運転時の異常な過渡変化時及び事故時の荷重並びに設計上考慮すべき自然条件の荷重と適切に組み合わせ評価する。

1. 設計基準対象施設

a. 建物・構築物

(a) Sクラス

- イ. 地震力と常時作用している荷重及び運転時（通常運転時又は運転時の異常な過渡変化時）に施設に作用する荷重を組み合わせる。
- ロ. 常時作用している荷重及び事故時の状態で施設に作用する荷重のうち長時間その作用が続く荷重と弾性設計用地震動Sdによる地震力又は静的地震力を組み合わせる。

(b) B, Cクラス

常時作用している荷重及び運転時の状態で施設に作用する荷重と動的地震力又は静的地震力を組み合わせる。

b. 機器・配管系

(a) Sクラス

- イ. 通常運転時の状態で作用する荷重と地震力を組み合わせる。
- ロ. 運転時の異常な過渡変化時の状態及び事故時の状態のうち地震によって引き起こされるおそれのある事象によって作用する荷重と地震力を組み合わせる。
- ハ. 運転時の異常な過渡変化時の状態及び事故時の状態のうち地震によって引き起こされるおそれのない事象であっても，いったん事故が発生した場合長時間継続する事象による荷重はその事故事象の発生確率，継続時間及び地震動の年超過確率の関係を踏まえ適切な地震力と組み合わせる。

(b) B, Cクラス

通常運転時の状態で作用する荷重及び運転時の異常な過渡変化時の状態で施設に作用する荷重と動的地震力又は静的地震力を組み合わせる。

1-4 地震による荷重と運転時，事故時荷重との組合せ (2)

c. 土木構造物

(a) 屋外重要土木構造物

常時作用している荷重及び運転時(通常運転時又は運転時の異常な過渡変化時)に施設に作用する荷重と地震力を組み合わせる。

(b) その他の土木構造物

常時作用している荷重及び運転時の状態で施設に作用する荷重と静的地震力を組み合わせる。

d. 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・構築物及び土木構造物

(a) 津波防護施設及び浸水防止設備又は津波監視設備が設置された建物・構築物及び土木構造物

常時作用している荷重及び運転時に作用する荷重と基準地震動 S_s による地震力を組み合わせる。また，地震と津波が同時に作用する可能性について検討し，必要に応じて基準地震動 S_s による地震力と津波による荷重の組合せを考慮する。

(b) 浸水防止設備及び津波監視設備

常時作用している荷重及び運転時に作用する荷重と基準地震動 S_s による地震力を組み合わせる。また，地震と津波が同時に作用する可能性について検討し，必要に応じて基準地震動 S_s による地震力と津波による荷重の組合せを考慮する。

なお，重大事故等対処施設を津波から防護するための津波防護施設，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・構築物及び土木構造物についても同様の設計方針とする。

1-4 地震による荷重と運転時，事故時荷重との組合せ (3)

2. 重大事故等対処施設

a. 建物・構築物

- (a) 常設耐震重要重大事故防止設備又は常設重大事故緩和設備が設置される重大事故等対処施設
- イ. 常時作用している荷重及び運転時の状態で施設に作用する荷重と地震力とを組み合わせる。
 - ロ. 常時作用している荷重，設計基準事故時の状態及び重大事故等時の状態で施設に作用する荷重のうち，地震によって引き起こされるおそれがある事象によって作用する荷重と地震力とを組み合わせる。
 - ハ. 常時作用している荷重，設計基準事故時の状態及び重大事故等時の状態で施設に作用する荷重のうち地震によって引き起こされるおそれがない事象による荷重は，その事故事象の発生確率，継続時間及び地震動の年超過確率の関係を踏まえ，適切な地震力（基準地震動 S_s 又は弾性設計用地震動 S_d による地震力）と組み合わせる。（添付資料1参照）
- (b) 常設耐震重要重大事故防止設備以外の常設重大事故防止設備が設置される重大事故等対処施設
- 常時作用している荷重及び運転時の状態で施設に作用する荷重と，動的地震力又は静的地震力とを組み合わせる。

b. 機器・配管系

- (a) 常設耐震重要重大事故防止設備又は常設重大事故緩和設備が設置される重大事故等対処施設
- イ. 通常運転時の状態で作用する荷重と地震力とを組み合わせる。
 - ロ. 運転時の異常な過渡変化時の状態，設計基準事故時の状態及び重大事故等の状態で作用する荷重のうち，地震によって引き起こされるおそれがある事象によって作用する荷重と地震力とを組み合わせる。
 - ハ. 運転時の異常な過渡変化時の状態，設計基準事故時の状態及び重大事故等の状態で作用する荷重のうち地震によって引き起こされるおそれがない事象による荷重は，その事故事象の発生確率，継続時間及び地震動の年超過確率の関係を踏まえ，適切な地震力（基準地震動 S_s 又は弾性設計用地震動 S_d による地震力）と組み合わせる。（添付資料1参照）
- (b) 常設耐震重要重大事故防止設備以外の常設重大事故防止設備が設置される重大事故等対処施設
- 通常運転時の状態又は運転時の異常な過渡変化時の状態で作用する荷重と，動的地震力又は静的地震力とを組み合わせる。

c. 土木構造物

設計基準対象施設の土木構造物の荷重の組合せを適用する。

1-5 許容限界 (1)

各施設の地震力と他の荷重とを組み合わせた状態に対する許容限界は以下のとおりJEAG4601・補-1984, 発電用原子力設備規格設計・建設規格(2005/2007)等の規格基準又は試験等で妥当性が確認されている許容応力等を用いる。

a. 建物・構築物

(a) Sクラス

イ. 弾性設計用地震動Sdによる地震力又は静的地震力との組合せに対する許容限界

建築基準法等の安全上適切と認められる規格及び基準による許容応力度を許容限界とする。冷却材喪失事故時に作用する荷重との組合せ(原子炉格納容器バウンダリにおける長期的荷重との組合せを除く。)に対しては, 下記(a)ロ.に示す許容限界を適用する。

ロ. 基準地震動Ssによる地震力との組合せに対する許容限界

構造物全体としての変形能力(終局耐力時の変形)について十分な余裕を有し, 建物・構築物の終局耐力に対して妥当な安全余裕をもたせることとする。

(b) Bクラス及びCクラス

建築基準法等の安全上適切と認められる規格及び基準による許容応力度を許容限界とする。

b. 機器・配管系

(a) Sクラス

イ. 弾性設計用地震動Sdによる地震力又は静的地震力との組合せに対する許容限界

応答が全体的におおむね弾性状態に留まることとする。冷却材喪失事故時に作用する荷重との組合せ(原子炉格納容器及び非常用炉心冷却設備等における長期的荷重との組合せを除く。)に対しては, 下記(a)ロ.に示す許容限界を適用する。

ロ. 基準地震動Ssによる地震力との組合せに対する許容限界

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, その施設に要求される機能に影響を及ぼさないように応力, 荷重等を制限する値を許容限界とする。また, 地震時又は地震後に動的機能が要求される機器等については, 実証試験等により確認されている機能確認済加速度等を許容限界とする。

1-5 許容限界 (2)

(b) Bクラス及びCクラス

応答が全体的におおむね弾性状態に留まることとする。

(c) チャンネルボックス

地震時に作用する荷重に対して、燃料集合体の冷却材流路を維持できること及び過大な変形や破損を生ずることにより制御棒の挿入が阻害されることがないことを確認する。

(d) 燃料被覆材

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、放射性物質の閉じ込め機能に影響を及ぼさないことを確認する。

c. 土木構造物

(a) 屋外重要土木構造物

イ. 静的地震力との組合せに対する許容限界

安全上適切と認められる規格及び基準による許容値を許容限界とする。

ロ. 基準地震動 S_s による地震力との組合せに対する許容限界

構造部材の曲げについては限界層間変形角又は許容応力度等、構造部材のせん断についてはせん断耐力又は許容応力度等に対して適切な安全余裕を持たせることとする。三次元静的材料非線形解析により評価を行うもの等、ひずみを許容値とする場合は、構造物の要求機能に応じた許容値に対し適切な安全余裕を持たせることとする。

(b) その他の土木構造物

安全上適切と認められる規格及び基準による許容値を許容限界とする。

1-5 許容限界 (3)

d. 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・構築物及び土木構造物

(a) 津波防護施設及び浸水防止設備又は津波監視設備が設置された建物・構築物及び土木構造物

当該施設及び建物・構築物が構造全体として変形能力(終局耐力時の変形)及び安定性について十分な余裕を有するとともに, その施設に要求される機能(津波防護機能, 浸水防止機能及び津波監視機能)が保持できるものとする。

(b) 浸水防止設備及び津波監視設備

その設備に要求される機能(浸水防止機能及び津波監視機能)が保持できるものとする。

e. 重大事故等対処施設(添付資料2参照)

(a) 常設重大事故防止設備

1-3の地震力に対して必要な機能が喪失しないことを確認する。

(b) 常設重大事故緩和設備

1-3の地震力に対して必要な機能が喪失しないことを確認する。

2. 耐震性評価に係る主な確認事項

2-1 今回の申請における耐震性評価の考え方

2-1 今回の申請における耐震性評価の考え方(1)

今回の申請における耐震性評価方針は以下のとおりとする。

(評価方針)

- 評価対象は実用炉規則別表第二の対象施設のSクラスの設計基準対象施設(以下「DB施設」という。)及び重大事故等対処施設(以下「SA施設」という。)とする。また、BクラスのDB施設のうち、共振のおそれのある施設も評価対象とする。
- SクラスのDB施設及びSA施設の間接支持構造物や波及的影響に関する施設についても、評価対象として追加し、網羅性を確認して評価を実施する。
- 既工認等の審査実績、規制基準における従前よりの変更点(鉛直方向に動的地震力を考慮など)を踏まえ、規制基準に基づき施設の耐震性を評価する上で必要な評価部位、評価項目についてすべて評価を実施する。
- 評価手法、許容限界は「1. 耐震設計の基本方針」に従うこととし、最新の知見等を反映して新たに採用した過去の許認可等で実績のある評価手法、許容限界を適用することを基本とする。実績のないものを用いる場合はその妥当性、適用性を確認した上で用いることとする。
- 他の評価で安全側に包絡できることが明らかである場合は評価を省略することがあるが、その際には評価を省略することの妥当性を示す。

2-1 今回の申請における耐震性評価の考え方 (2)

(1) 評価対象施設の網羅性

評価対象施設について、規制基準の要求に照らし必要な施設が網羅されていることを以下により確認する。

- 実用炉規則別表第二の記載項目に基づき、対応するSクラスのDB施設及びSA施設並びに上位クラス施設へ波及的影響を及ぼすおそれのある下位クラス施設が評価対象となっていることを確認する。また、BクラスのDB施設のうち、共振のおそれのある施設が評価対象となっていることを確認する。
- 実用炉規則別表第二対象のSクラスのDB施設及びSA施設について、間接支持構造物、波及的影響に関する施設が評価対象となっているか確認する観点で、重要度分類表及びSA設備分類表による整理を行い、評価対象施設に漏れがないことを確認する。

(2) 評価部位・評価項目の代表性

- DB施設の評価において、評価部位は既工認の実績に照らして網羅されていることを確認する。また、他の部位で代表可能なもの等について、評価を省略する場合は、その妥当性を説明する。
- 評価項目(応力分類等)が規格基準に照らし網羅されていることを確認する。また、他の評価項目(応力分類等)で代表可能なもの等について、評価を省略する場合は、その妥当性を説明する。
- 計算結果は、必要な評価対象部位についてすべて評価していることを確認する。

(3) 評価手法に関する既工認との差異

- 今回の評価で用いた各施設の評価手法・評価条件・解析モデルについて、既工認との差異を整理し、その妥当性を説明する。差異として抽出された論点の整理結果については3章に示す。
- 機器・配管系の耐震補強工事や原子炉建屋の壁補強工事など、既工認から構造変更している施設については、その構造変更を踏まえて論点整理を実施する。
- 平成23年(2011年)東北地方太平洋沖地震等の地震被災によって、施設の耐震評価条件に影響を及ぼす場合は、この影響についても考慮した評価手法を適用することを踏まえて論点整理を実施する。

2-2 具体的な施設の評価方針

2-2-1 建物・構築物（1）

建物・構築物は、以下の評価方針に基づき耐震性評価を実施する。なお、既工認から評価手法や評価条件を変更した施設については3章で網羅的に示す。

● 地震応答解析による評価

建物・構築物は、原則として、構造物全体として変形能力を有しているとの観点から、主たる耐震要素である耐震壁の最大応答せん断ひずみが許容限界を超えないことを確認する。評価は、各建屋の構造的な特徴を踏まえ、振動性状を適切に考慮した質点系モデルによる地震応答解析を基本とする。

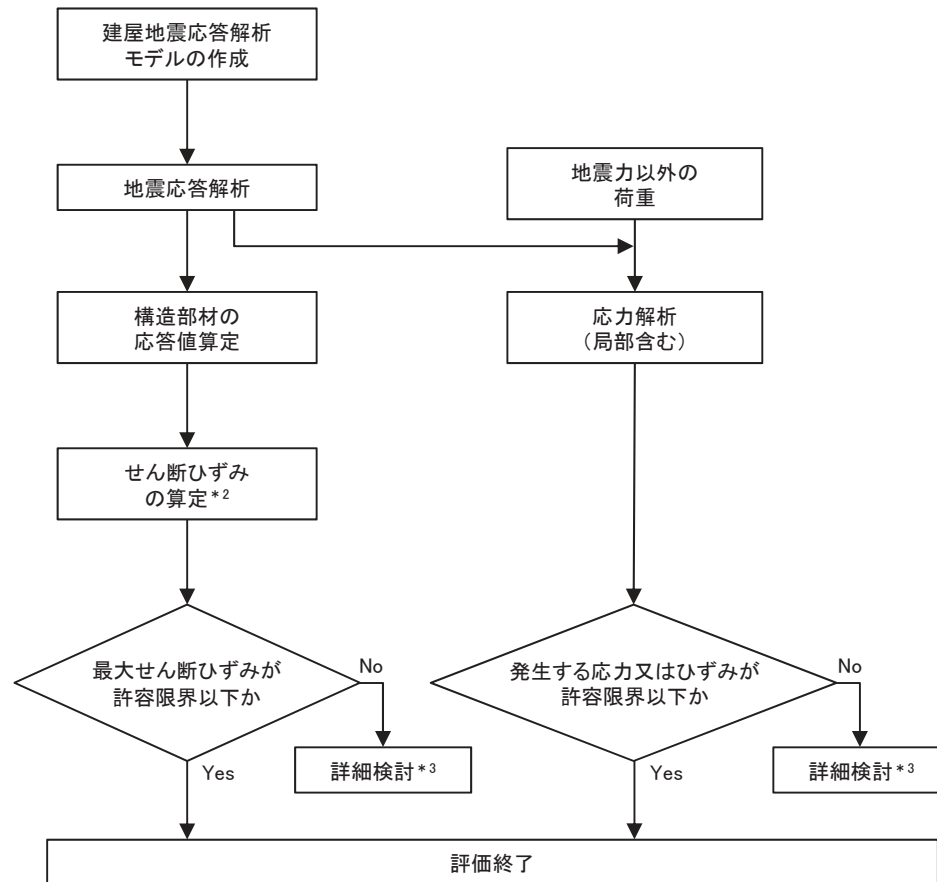
● 応力解析による評価

構造物全体の挙動に加え、局部の応力評価が必要な部位については、有限要素解析等による発生応力又はひずみを算定し、許容限界との比較を行う。局部の応力評価が必要な部位は、Sクラス施設の各部位及びSクラス施設の間接支持構造物の基礎並びに鉛直方向の地震力の影響を強く受けるおそれのある屋根トラスとする。また、3次元応答性状の影響、水平2方向及び鉛直方向の地震力の組合せに対する影響を踏まえ、必要に応じて他の部位についても実施する。

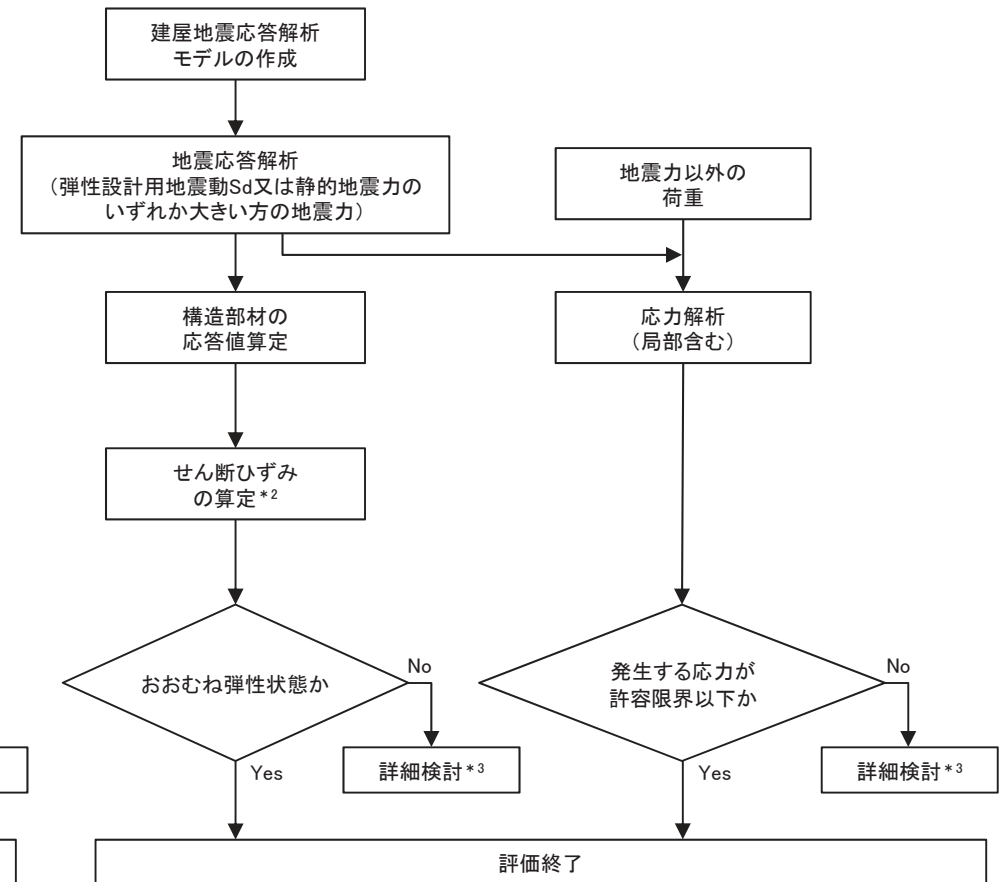
● 地震応答解析による評価、動的地震力の設定においては、建屋及び地盤の物性のばらつきによる変動幅の影響、3次元応答性状の影響、水平2方向及び鉛直方向の地震力の組合せに対する影響を考慮して適切に設定する。

2-2-1 建物・構築物 (2)

・基準地震動 S_s による評価フロー*1



・弾性設計用地震動 S_d ・静的地震力による評価フロー*1



*1 保有水平耐力が必要保有水平耐力以上であることも確認する。

*2 せん断ひずみに加え、接地圧を評価し、接地圧が定める許容限界以下であることも確認する。

*3 検討の内容に応じて必要なプロセスに戻る。

2-2-1 建物・構築物 (3)

代表的な建物・構築物として、原子炉建屋の構造概要を以下に示す。

原子炉建屋	
構造概要	RC造(一部SRC造及びS造)
基礎	厚さ約6m, 直接岩盤上に設置
平面形状	約77m(南北方向)×約84m(東西方向)
高さ	基礎版底面から64.6m
図面 (左:平面図, 右:断面図)	<p style="text-align: center;">平面図</p> <p style="text-align: center;">断面図</p>
建屋の特徴	<ul style="list-style-type: none"> 原子炉棟中央部には、鋼製格納容器を含む厚さ約2mの鉄筋コンクリート造の生体しゃへい壁があり、その外側に内部ボックス壁及び付属棟の外側である外部ボックス壁がある。 これらの壁は、原子炉建屋の主要な耐震壁を構成し、それぞれ壁の間を強固な床板で一体に連結しているので、全体として剛な構造となっている。

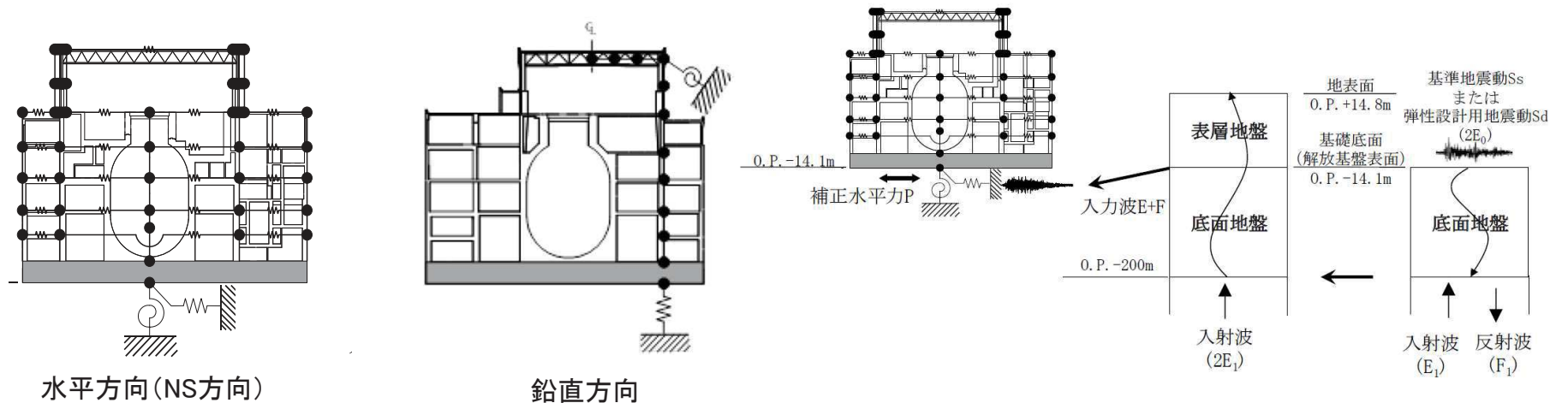
2-2-1 建物・構築物 (4)

地震応答解析モデルは、建屋構造概要を踏まえ、以下の方針に基づき構築する。

●モデル化の基本方針

- ・建物・構築物の剛性はそれらの形状、構造特性等を十分考慮して評価し、集中質点系等に置換した解析モデルを設定する。
- ・地盤と建物・構築物の相互作用は、弾性波動論に基づく等価なばねでモデル化して考慮する。
- ・平成23年(2011年)東北地方太平洋沖地震等の地震の影響により、建物・構築物に発生したひび割れ等を起因とする剛性の変動については、観測記録や試験データなどから適切に応答解析モデルへ反映し、保守性を確認した上で適用する。

代表的な建物・構築物として、原子炉建屋の地震応答解析モデルを以下に示す。



原子炉建屋の地震応答解析モデル

入力地震動の概念図

2-2-2 機器・配管系 (1)

機器・配管系のうちSクラス設備及びSA施設については、基準地震動 S_s に対し、構造強度評価により強度的に問題がないことを確認するとともに、地震時に動的機能が求められる設備について動的機能が維持できることを確認する。なお、既工認から評価手法や評価条件を変更した設備については3章で網羅的に示す。

a. 構造強度評価

- 構造強度に関する評価は、以下に示す解析法により発生値を算定し、許容限界と比較する。
なお、地震応答解析に当たっては、地盤物性・建屋剛性等のばらつきを適切に配慮する。
 - (1) スペクトルモーダル解析法
 - (2) 時刻歴応答解析法
 - (3) 定式化された評価式を用いた解析法(床置機器等)
- 機器・配管系の地震応答解析モデルは、形状、構造特性等を考慮して、代表的な振動モードを適切に表現できるよう質点系モデル等の有限要素モデルに置換し応答を求める。スペクトルモーダル解析法及び時刻歴応答解析法の選択に当たっては、衝突・すべり等の非線形現象を模擬する場合には時刻歴応答解析法を用いる等、解析対象とする現象、対象設備の振動特性・構造特性を考慮し適切に選定する。

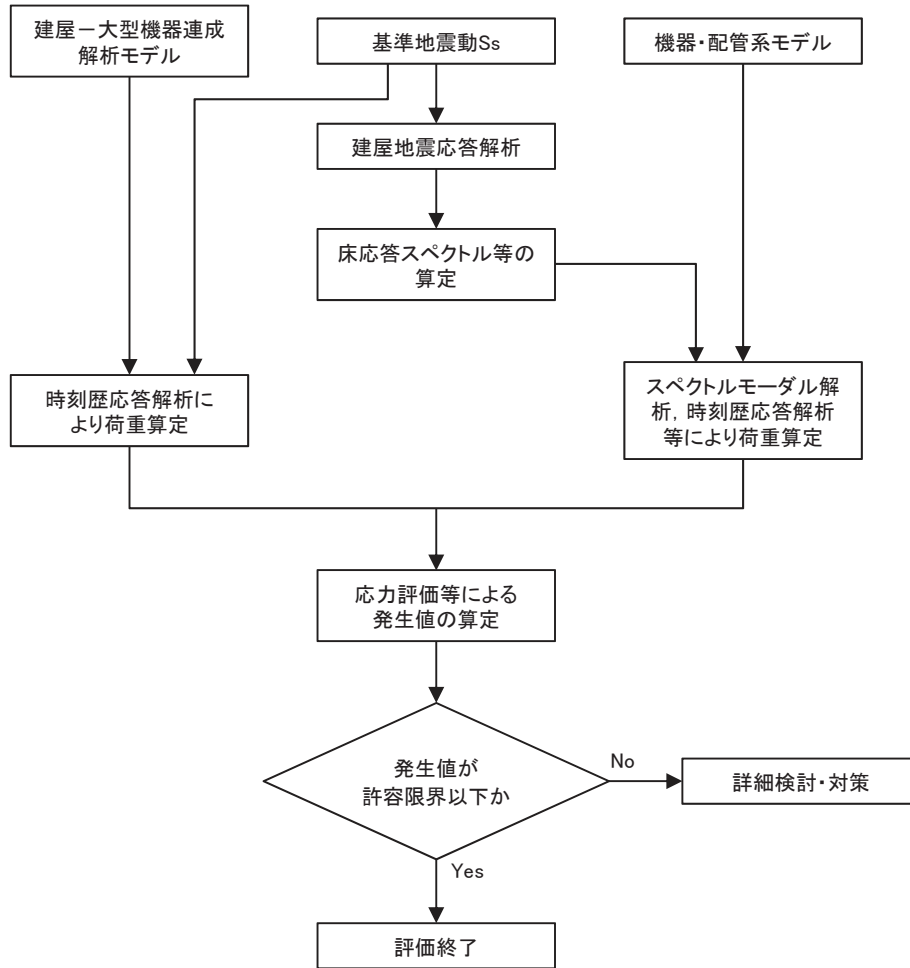
b. 動的機能維持評価

動的機能維持に関する評価は、以下に示す機能確認済加速度との比較等により実施する。

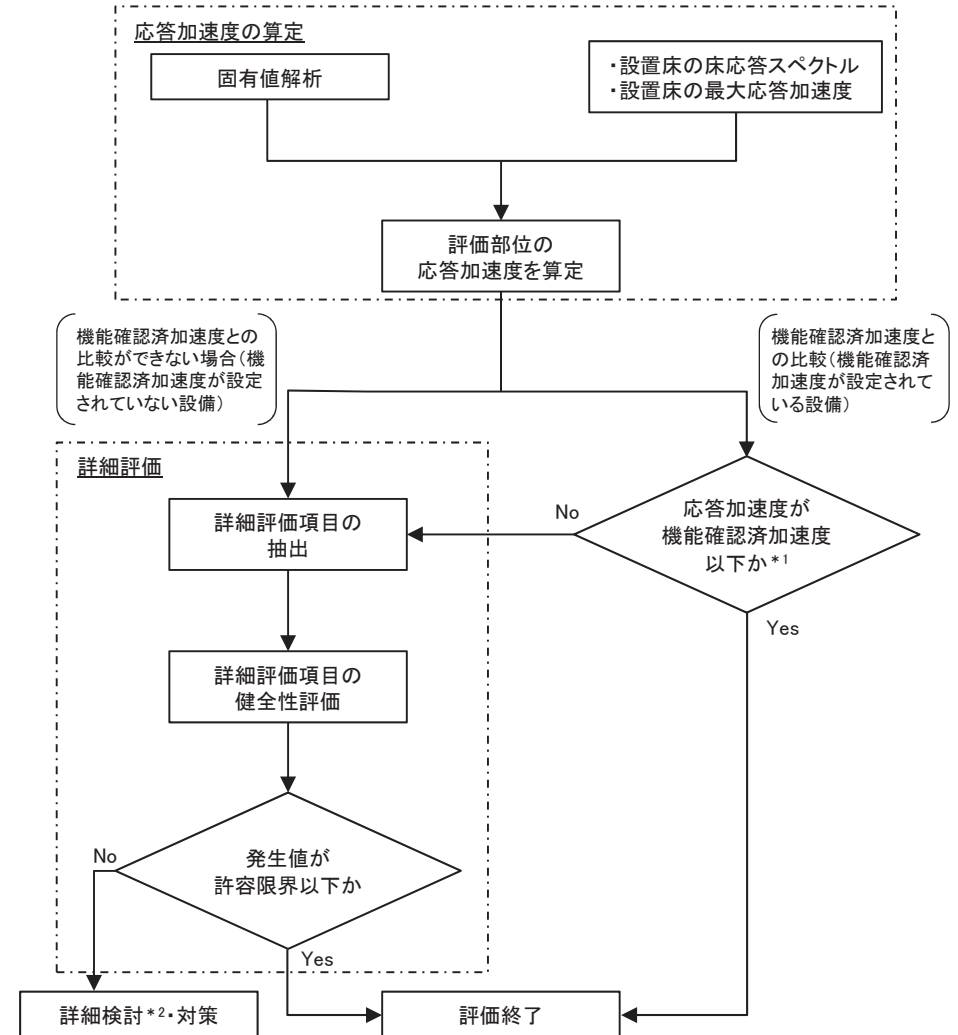
- (1) 機能確認済加速度との比較
基準地震動 S_s による評価対象機器の応答加速度を求め、その加速度が機能確認済加速度以下であることを確認する。なお、機能確認済加速度とは、立形ポンプ、横形ポンプ、ポンプ駆動用タービン等、機種ごとに試験あるいは解析により動的機能維持が確認された加速度である。制御棒の地震時挿入性については、加振試験結果から挿入機能に支障を与えない燃料集合体変位と地震応答解析から求めた燃料集合体変位とを比較することにより評価する。
- (2) 詳細評価
機能確認済加速度の設定されていない機器、基準地震動 S_s による応答加速度が機能確認済加速度を上回る機器については、「原子力発電所耐震設計技術指針JEAG4601-1991追補版」等を参考に動的機能維持を確認するうえで評価が必要となる項目を抽出し、対象部位ごとの構造強度評価又は動的機能維持評価を行い、発生値が許容限界を満足していることを確認する。

2-2-2 機器・配管系 (2)

構造強度評価の手順



動的機能維持評価の手順



*1 制御棒の地震時挿入性の評価については、炉心を模擬した実物大の部分モデルによる加振時制御棒挿入性試験結果から挿入機能に支障を与えない最大燃料集合体変位を求め、地震応答解析から求めた燃料集合体変位がその最大燃料集合体変位を下回ることを確認する。

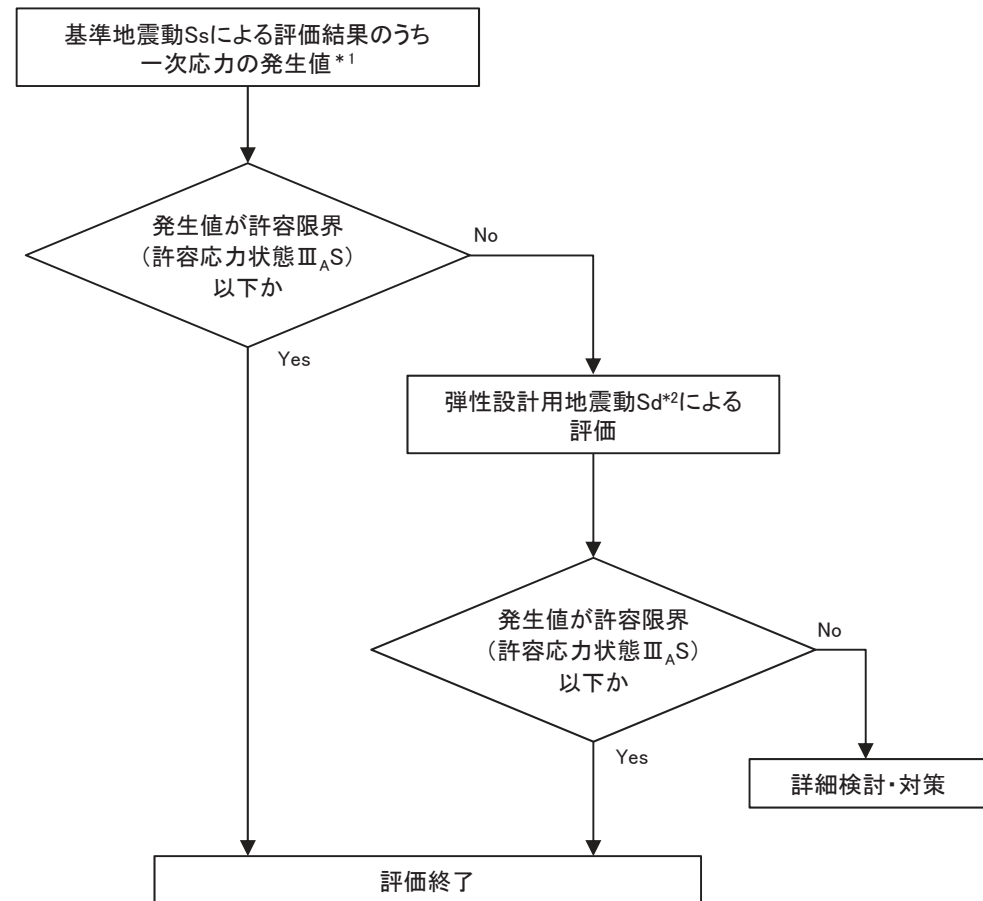
*2 解析、試験等による検討。

2-2-2 機器・配管系 (3)

弾性設計用地震動Sd及び静的地震力に対しておおむね弾性状態にあることを、以下の(1), (2)のいずれかの手順に従い確認する。

(1) 基準地震動Ssによる評価で代用する場合

- 評価対象設備の基準地震動Ssによる発生値が弾性設計用の許容限界(許容応力状態Ⅲ_AS)以下であることを確認する。
- 弾性設計用地震動Sdは基準地震動Ssの係数倍にて定義していることから、設備の基準地震動Ssによる発生値が、許容限界(許容応力状態Ⅲ_AS)以下であれば、弾性設計用地震動Sdによる発生値についても、許容限界(許容応力状態Ⅲ_AS)以下となる。
- 基準地震動Ss評価では考慮しない事故時荷重(LOCA時荷重など)を考慮する必要がある評価ケースは、弾性設計用地震動Sdと組み合わせるべき事故時荷重を考慮した発生値で評価を行う。
- 座屈の評価はJEAG4601に規定される評価式を用いるため、評価式中の許容限界をIV_ASからⅢ_ASとして、評価を行う。



*1 弾性設計用地震動Sd評価において、基準地震動Ss評価では考慮していない事故時荷重(LOCA)を考慮する必要がある評価ケースは、評価を行い、発生値に考慮する。

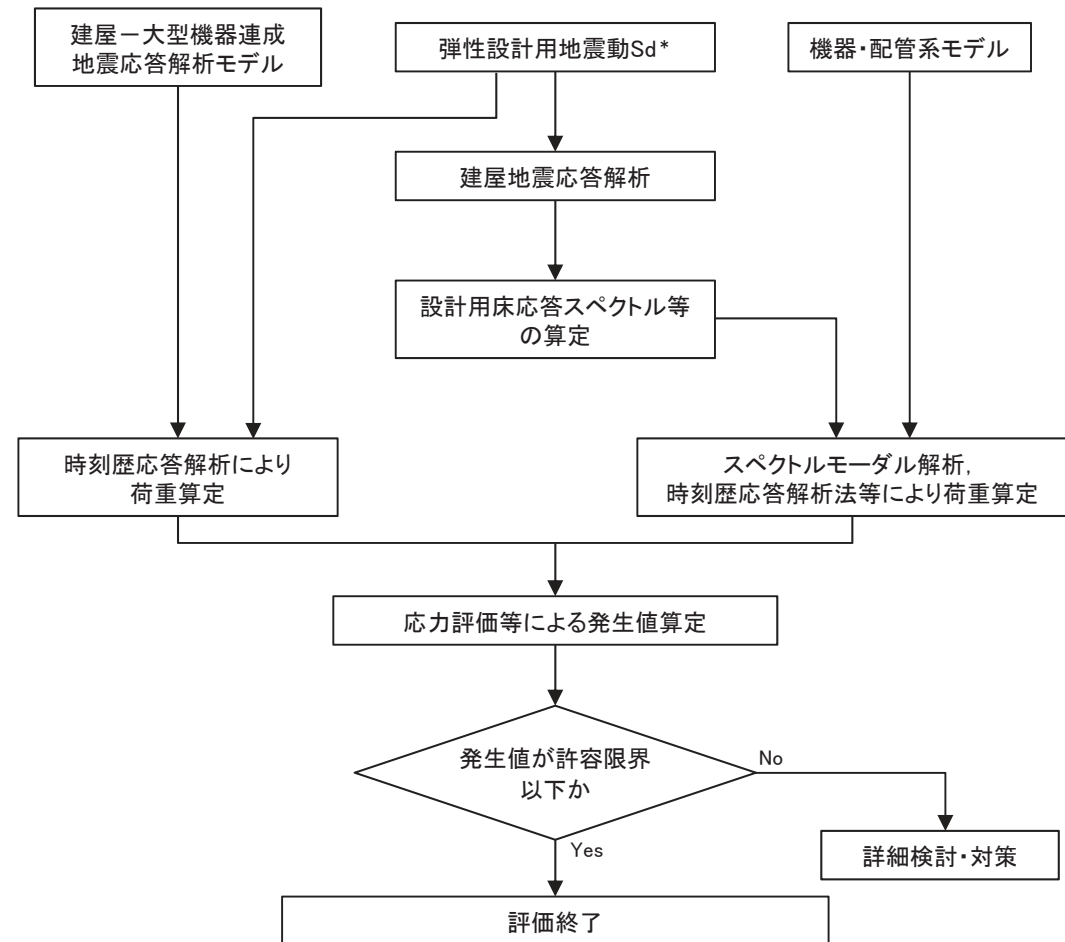
*2 静的地震力についても考慮する。

基準地震動Ssによる評価で代用する場合の評価手順

2-2-2 機器・配管系 (4)

(2) 弾性設計用地震動Sdに対する評価

- 弾性設計用地震動Sdによる発生値を算定し、その算定した発生値が許容限界（許容応力状態Ⅲ_AS）以下であることを確認する。その際、弾性設計用地震動Sdと静的地震力を比較し、静的地震力の方が大きい場合は、静的地震力についても考慮する。
- 一次＋二次応力評価については、JEAG4601に規定されている許容応力状態Ⅳ_ASとⅢ_ASの許容値は同一となる。許容値が同じであれば、弾性設計用地震動Sdより大きな地震動である基準地震動Ssで評価した結果の方が厳しいことから、基準地震動Ssの評価を実施することで、弾性設計用地震動Sdによる評価は省略する。
- 支持構造物（ボルト以外）のうち、「支圧」に対しては、許容応力状態Ⅳ_ASとⅢ_ASで許容値が異なるケースが存在するため、個別確認を実施する。



* 静的地震力についても考慮する。

弾性設計用地震動Sdを適用する場合の評価手順

2-2-3 屋外重要土木構造物等及び津波防護施設(1)

屋外重要土木構造物等*及び津波防護施設は、以下の評価方針に基づき耐震性評価を実施する。なお、既工認から評価手法や評価条件を変更した施設については3章で網羅的に示す。

* 屋外重要土木構造物、常設耐震重要重大事故防止設備又は常設重大事故緩和設備のうち土木構造物、常設耐震重要重大事故防止設備又は常設重大事故緩和設備が設置される重大事故等対処施設(特定重大事故等対処施設を除く)のうち土木構造物のいずれかに該当するか、又は兼務する構造物を「屋外重要土木構造物等」という。

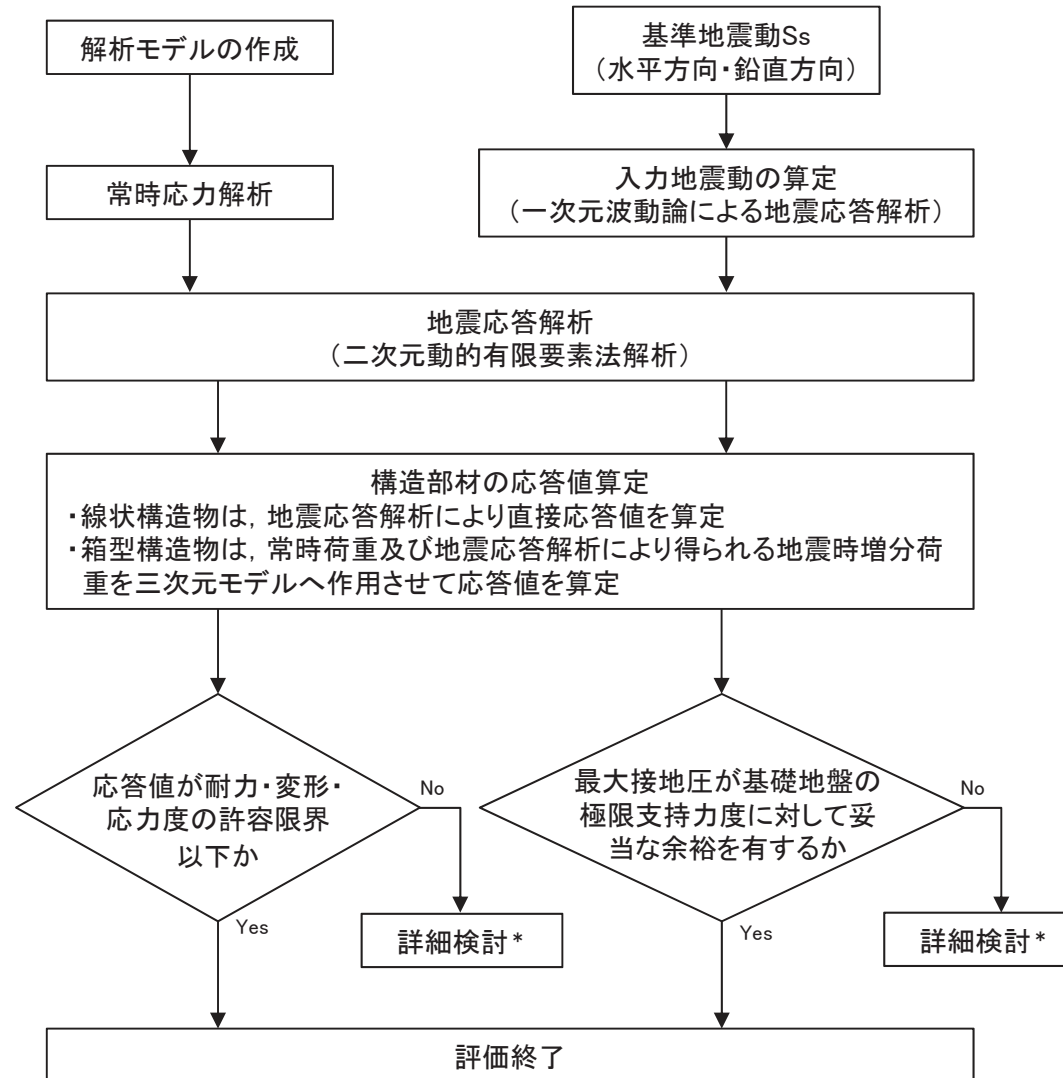
○評価方針

- ・屋外重要土木構造物等は、耐震安全上重要な機器・配管系、常設耐震重要重大事故防止設備又は常設重大事故緩和設備の間接支持機能若しくは非常時における海水の通水機能等が求められている。
- ・津波防護施設は津波防護機能及び耐震安全上重要な施設(津波監視設備等)の間接支持機能が求められている。
- ・屋外重要土木構造物等の耐震性評価では、構造物が崩壊しないこと、間接支持する機器・配管系に影響がないこと等を目標機能とし、基準地震動 S_s による地震応答解析を行い、構造部材の応答値が許容限界以下であること及び基礎地盤が十分な支持機能を有することを確認する。
- ・津波防護施設の耐震性評価では、構造全体としての変形能力(終局耐力時の変形)について十分な余裕を有するとともに、それぞれの施設に要求される機能が保持できることを確認する。
- ・上記の評価における断面選定の考え方については、添付資料3に詳細を示す。

○評価フロー

- ・屋外重要土木構造物等を例に評価フローを次頁に示す。

2-2-3 屋外重要土木構造物等及び津波防護施設 (2)



* 検討の内容に応じて必要なプロセスへ戻る

標準地震動 S_s に対する評価手順(屋外重要土木構造物等における時刻歴応答解析)

2-2-3 屋外重要土木構造物等及び津波防護施設 (3)

○ 地震応答解析手法

- ・地震応答解析手法は、構造物と地盤の相互作用を考慮できる連成系の地震応答解析手法とし、地盤及び構造物の地震時における非線形挙動の有無や程度に応じて、線形、等価線形又は非線形解析のいずれかにて行う。地震応答解析では水平地震動と鉛直地震動の同時入力を基本とする。
- ・液状化の影響については、地下水位低下設備を考慮の上で設定した地下水位及び液状化検討対象層の分布状況を踏まえ、全応力解析又は有効応力解析のいずれかを選定し評価する。液状化強度特性の設定に当たっては、液状化(繰返し軟化)を示す土層の分布範囲等を踏まえた上で、ばらつき及び不確実性を考慮する。

○ 許容限界

- ・屋外重要土木構造物等の構造部材の曲げについては、限界層間変形角又は許容応力度等、構造部材のせん断については、せん断耐力又は許容応力度等に対して、妥当な安全余裕を持たせることとする。三次元静的材料非線形解析により評価を行うもの等、ひずみを許容値とする場合は、構造物の要求機能に応じた許容値に対し妥当な安全余裕を持たせることとする。なお、それぞれの安全余裕については、各施設の要求機能等を踏まえ設定する。
- ・津波防護施設については、構造全体としての変形能力(終局耐力時の変形)及び安定性について十分な余裕を有するとともに、津波防護機能が保持できることを確認する。
- ・上記の評価に当たっては、「コンクリート標準示方書[構造性能照査編]((社)土木学会, 2002年制定)」等に基づき行う。

○ 耐震性評価

- ・海水ポンプ室、原子炉機器冷却海水配管ダクト、軽油タンク室、軽油タンク連絡ダクト及び排気筒連絡ダクトについては、Sクラス設備を間接支持する機能等を、取水路、取水口及び海水ポンプ室については通水機能等を維持する必要がある。また、復水貯蔵タンク基礎及びガスタービン発電設備軽油タンク室については常設耐震重要重大事故防止設備又は常設重大事故緩和設備を間接支持する機能を維持する必要がある。
- ・防潮堤等の津波防護施設については、津波防護機能及び耐震安全上重要な施設(津波監視設備)の間接支持機能を維持する必要がある。
- ・上記の評価については、解析結果による発生値が許容限界を超えないことを確認する。

2-3 上位クラス施設への下位クラス施設の 波及的影響

2-3 上位クラス施設への下位クラス施設の波及的影響

上位クラス施設への下位クラス施設の波及的影響評価の方針を以下に示す。また、方針の詳細については、添付資料4に示す。

- 上位クラス施設(耐震Sクラス施設及びSA施設)は、耐震重要度分類の下位のクラスに属する施設の波及的影響によって、その安全機能を損なわないように設計する。
- 具体的には下位クラス施設は原則、耐震重要施設に対して離隔をとり配置する、若しくは耐震重要施設の設計に用いる地震力に対して構造強度を保つなどして耐震重要施設の安全機能を損なわない設計とする。また、波及的影響においては水平2方向及び鉛直方向の地震力が同時に作用する場合に影響を及ぼす可能性のある施設、設備を選定し評価する。
- 波及的影響評価に当たっては、敷地全体を俯瞰した調査・検討等を行い、耐震重要施設の安全機能への影響がないことを確認する。

2-4 水平2方向及び鉛直方向の地震力の 組合せの評価方針

2-4 水平2方向及び鉛直方向の地震力の組合せの評価方針

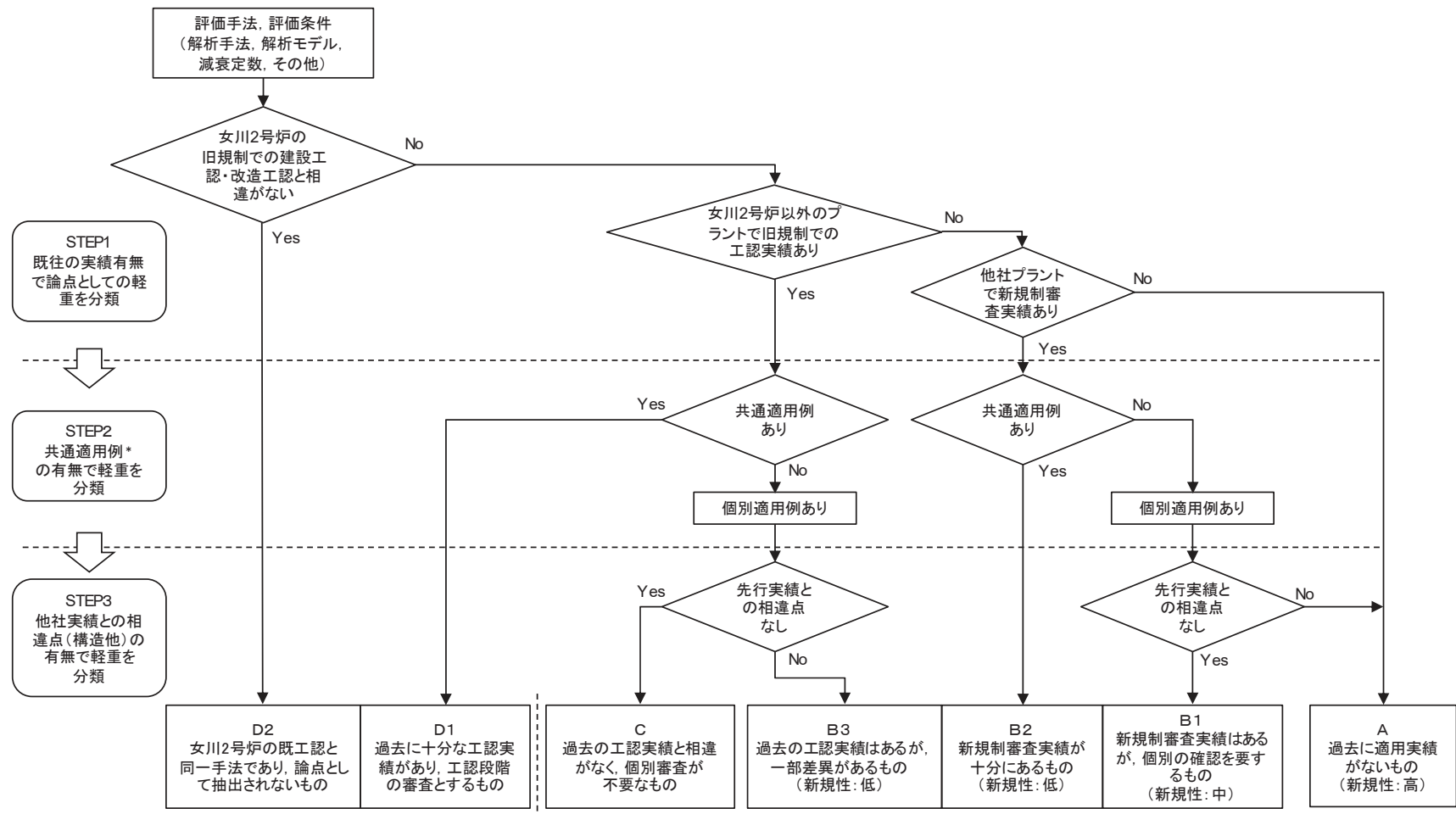
水平2方向及び鉛直方向地震力の組合せに関する影響評価の方針を以下に示す。また、方針の詳細については、添付資料5に示す。

- ・施設の耐震設計では、基本的に設備の構造から地震力の方向に対して弱軸、強軸を明確にし、地震力に対して配慮した構造とする。
- ・評価対象は耐震重要施設及びその間接支持構造物、常設耐震重要重大事故防止設備又は常設重大事故緩和設備が設置される重大事故等対処施設、並びに、これらの施設への波及的影響防止のために耐震性評価を実施する施設とする。耐震Bクラスの施設については、共振のおそれのあるものを評価対象とする。
- ・評価に当たっては、施設の構造特性(設備の形状、支持構造物の拘束方向等)から水平2方向及び鉛直方向地震力の影響を受ける部位を建屋3次元FEM解析等により抽出し、その部位について水平2方向及び鉛直方向の地震力による応力を算出し、施設が有する耐震性への影響を確認する。
- ・耐震性への影響が確認された場合は、詳細な構造強度評価等の手法を用いた検討を行い、必要により設計上の対応策(補強工事等)を講じる。
- ・応答スペクトルに基づく地震動として策定された基準地震動 S_s -D1～D3、断層モデルを用いた地震動として策定された基準地震動 S_s -F1～F3及び震源を特定せず策定する地震動として策定された基準地震動 S_s -N1については、水平方向の地震動に方向性がないことから、水平2方向及び鉛直方向地震力の同時入力による影響検討を行う場合、水平2方向のうち1方向について位相の異なる地震動を作成し入力する方法を基本とする。

3. 女川原子力発電所2号炉における 耐震設計の論点

3. 女川原子力発電所2号炉における耐震設計の論点 (1)

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整理し、変更した評価手法、評価条件について、自他社プラントにおける適用実績・審査実績を踏まえて、女川原子力発電所2号炉としての耐震設計の論点を整理した。論点を整理するためのフローは以下のとおり。



設置許可審査で論点資料を作成するもの

* 規格・基準類に基づき、プラントの仕様等によらず適用性が確認された手法、または他プラントで適用され工認実績、新規制審査実績が複数あり自プラントへの適用性について確認した手法

3. 女川原子力発電所2号炉における耐震設計の論点 (2)

分類	項目		内容	適用実績・ 審査実績	論点整理 結果*	備考
建物・ 構築物	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	シミュレーション解析 等に基づく初期剛性 の設定	2011年東北地方太平洋沖地震及び2011 年4月7日宮城県沖の地震の観測記録に 基づく建屋シミュレーション解析を行い、解 析から得られた知見を踏まえて、建屋解析 モデルの初期剛性等を設定する。また、原 子炉建屋の耐震補強工事の結果を建屋 解析モデルに反映する。	—	A	個別に審査中
		耐震補強工事の反 映		—	A	
		周辺地盤による低減 効果を考慮		BWR (柏崎6,7号 既工認)	B3	
	屋根トラスの解析モデルへの弾塑性解析 の適用	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FEMモデルによる弾塑性解析を採用す る。	PWR (川内1,2号)	B2	個別に審査中	
	応力解析モデルへ(建物・構築物)の弾塑 性解析の適用	基準地震動 S_s による検討においては、材 料(コンクリート及び鉄筋)の非線形特性を 考慮した弾塑性解析を採用する。	BWR (柏崎6,7号)	B2	個別に審査中	
オイルダンパーの適用	排気筒に制振装置としてオイルダンパーを 適用する。	BWR (柏崎6,7号 既工認他)	D1			

* (論点整理結果の定義)

A : 過去に適用実績がないもの(新規性:高)

B1: 新規制審査実績はあるが、個別の確認を要するもの(新規性:中) B2: 新規制審査実績が十分にあるもの(新規性:低) B3: 過去の工認実績はあるが、一部差異があるもの(新規性:低)

C : 過去の工認実績と相違がなく、個別審査が不要なもの

D1: 過去に十分な工認実績があり、工認段階の審査とするもの D2: 女川2号炉の既工認と同一手法であり、論点として抽出されないもの(新規制基準にて新たに評価対象となった設備若しくは評価手法を
変えた設備で、当該設備での実績はないものの、他の設備での適用実績が十分にあるもの)

3. 女川原子力発電所2号炉における耐震設計の論点 (3)

分類	項目	内容	適用実績・ 審査実績	論点整理 結果*	備考
機器・ 配管系	サプレッションチェンバ内部水質量の考え方の変更	既工認では、水全体を剛体とみなし、内部水の全質量を用いていたが、今回工認では、タンクの耐震設計に一般的に用いられている水の有効質量比を適用する。	—	A	個別に審査中
	竜巻防護ネットへのゴム支承の適用	海水ポンプ室(海水ポンプ補機エリア)の壁部材等の耐震性を確保するため、地震時の竜巻防護ネットからの荷重を低減させる構造(ゴム支承等)を採用する。	—	A	個別に審査中
	一定の余裕を考慮した弁の動的機能維持評価	弁の動的機能維持評価において、高振動数領域の影響に配慮した設計を行う。	—	A	添付資料6
	原子炉本体の基礎の復元力特性の変更	RPVペDESTALの解析に、原子炉建屋と同様の非線形解析モデルを採用する。	BWR (柏崎6,7号)	B1	個別に審査実施済
	使用済燃料貯蔵ラックの減衰定数の変更	使用済燃料貯蔵ラックの加振試験により得られた結果から、減衰定数7%を適用する。	BWR (柏崎6,7号)	B1	個別に審査実施済
	規格適用範囲外の動的機能維持評価の実施	燃料移送ポンプの動的機能維持評価について、JEAG4601の考え方及び既往研究の知見を用いて詳細評価(異常要因分析や構造強度評価)を実施する。	BWR (東海第二)	B1	添付資料6
	地震時の燃料被覆管の閉じ込め機能の維持	燃料被覆管の閉じ込め機能維持の観点で、地震時の荷重を考慮した一次応力+二次応力の評価を実施する。	PWR (高浜3, 4号他)	B2	個別に審査中

* (論点整理結果の定義)

A :過去に適用実績がないもの(新規性:高)

B1:新規制審査実績はあるが、個別の確認を要するもの(新規性:中) B2:新規制審査実績が十分にあるもの(新規性:低) B3:過去の工認実績はあるが、一部差異があるもの(新規性:低)

C :過去の工認実績と相違がなく、個別審査が不要なもの

D1:過去に十分な工認実績があり、工認段階の審査とするもの D2:女川2号炉の既工認と同一手法であり、論点として抽出されないもの(新規制基準にて新たに評価対象となった設備若しくは評価手法を変更した設備で、当該設備での実績はないものの、他の設備での適用実績が十分にあるもの)

3. 女川原子力発電所2号炉における耐震設計の論点 (4)

分類	項目	内容	適用実績・ 審査実績	論点整理 結果*	備考
機器・ 配管系	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	海水ポンプ室門型クレーンの耐震性評価に当たって、浮上りやすべりを考慮した解析モデルによる非線形時刻歴応答解析を適用する。	BWR (大間1号 既工認)	B3	添付資料7
	鉛直方向応答解析モデルの追加	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動的地震力の算定を行うための解析モデルを作成する。	PWR BWR (大間1号 既工認他)	D1	
	鉛直方向の減衰定数の考慮	今回工認では最新知見として得られた減衰定数を採用する。また、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する。	PWR BWR (大間1号 既工認他)	D1	
	最新知見として得られた減衰定数の採用				
	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	水平方向及び鉛直方向ともに動的な地震力での評価となったことから、方向ごと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て、二乗和平方根法による組合せ法を適用する。	BWR (大間1号 既工認他)	D1	
	立形ポンプの解析モデルの精緻化	既工認モデルに対してJEAG4601-1991 追補版に基づくモデルの精緻化を行う。	BWR (東通1号 既工認他)	D1	

* (論点整理結果の定義)

A : 過去に適用実績がないもの(新規性:高)

B1: 新規制審査実績はあるが、個別の確認を要するもの(新規性:中) B2: 新規制審査実績が十分にあるもの(新規性:低) B3: 過去の工認実績はあるが、一部差異があるもの(新規性:低)

C : 過去の工認実績と相違がなく、個別審査が不要なもの

D1: 過去に十分な工認実績があり、工認段階の審査とするもの D2: 女川2号炉の既工認と同一手法であり、論点として抽出されないもの(新規制基準にて新たに評価対象となった設備若しくは評価手法を変更した設備で、当該設備での実績はないものの、他の設備での適用実績が十分にあるもの)

3. 女川原子力発電所2号炉における耐震設計の論点 (5)

分類	項目	内容	適用実績・ 審査実績	論点整理 結果*	備考
機器・ 配管系	原子炉建屋クレーンの非線形時刻歴応答解析の適用	浮上りやすべりを考慮した解析モデルによる非線形時刻歴応答解析を適用する。	PWR BWR (大間1号 既工認他)	D1	
	動的機能維持評価の実施	地震時又は地震後に動的機能が要求される機器等については、実証試験等により確認されている機能確認済加速度等を許容限界とした評価を行う。	PWR BWR (大間1号 既工認他)	D1	

* (論点整理結果の定義)

A : 過去に適用実績がないもの(新規性:高)

B1:新規制審査実績はあるが、個別の確認を要するもの(新規性:中) B2:新規制審査実績が十分にあるもの(新規性:低) B3:過去の工認実績はあるが、一部差異があるもの(新規性:低)

C :過去の工認実績と相違がなく、個別審査が不要なもの

D1:過去に十分な工認実績があり、工認段階の審査とするもの D2:女川2号炉の既工認と同一手法であり、論点として抽出されないもの(新規制基準にて新たに評価対象となった設備若しくは評価手法を変更した設備で、当該設備での実績はないものの、他の設備での適用実績が十分にあるもの)

3. 女川原子力発電所2号炉における耐震設計の論点 (6)

分類	項目		内容	適用実績・ 審査実績	論点整理 結果*	備考
屋外重要 土木構造物等	土木構造物の解析 手法及び解析モデルの 精緻化	三次元非線形モデルの適用	海水ポンプ室及び取水口は三次元非線形ソリッドによりモデル化し、軽油タンク室及び復水貯蔵タンク基礎は三次元非線形シェルによりモデル化する。 地震時荷重に対して発生する変形量や断面力を、三次元静的材料非線形解析により算定し、限界状態設計法により部材の耐震性を評価する。	—	A	個別に審査中
		限界状態設計法の適用(変形量や断面力を用いた評価)	三次元非線形モデルより変形量や断面力を算出し、照査の指標とする。曲げ系の破壊については、層間変形角及びひずみを、せん断破壊については、せん断力を指標とする。	—	A	個別に審査中
	後施工せん断補強工法(セラミックキャップバー工法)の適用		原子炉機器冷却海水配管ダクト及び軽油タンク室等の耐震補強工法として、せん断耐力の向上を目的に、後施工せん断補強鉄筋(セラミックキャップバー工法)による耐震補強を採用する。	—	A	個別に審査中

* (論点整理結果の定義)

A : 過去に適用実績がないもの(新規性:高)

B1: 新規制審査実績はあるが、個別の確認を要するもの(新規性:中) B2: 新規制審査実績が十分にあるもの(新規性:低) B3: 過去の工認実績はあるが、一部差異があるもの(新規性:低)

C : 過去の工認実績と相違がなく、個別審査が不要なもの

D1: 過去に十分な工認実績があり、工認段階の審査とするもの D2: 女川2号炉の既工認と同一手法であり、論点として抽出されないもの(新規制基準にて新たに評価対象となった設備若しくは評価手法を変更した設備で、当該設備での実績はないものの、他の設備での適用実績が十分にあるもの)

3. 女川原子力発電所2号炉における耐震設計の論点 (7)

分類	項目		内容	適用実績・ 審査実績	論点整理 結果*	備考
屋外重要土木 構造物等	土木構造物の解析 手法及び解析モデ ルの精緻化	時刻歴応答解析の 適用	原子炉機器冷却海水配管ダクト等の構造物において、構造物や周辺地盤の非線形性を、より精緻に再現できる時刻歴応答解析を用いて照査用応答値を算出する。構造物の非線形性は、構造モデルをフレームモデル(部材非線形)とすることで考慮している。	PWR (川内1,2号 他)	B2	添付資料8
		時刻歴応答解析に おける構造物の履 歴減衰及び Rayleigh減衰の 適用	原子炉機器冷却海水配管ダクト等の構造物において、時刻歴応答解析に非線形性を考慮するに当たり、非線形の程度に応じた減衰(履歴減衰)を考慮する。また、解析上の安定のためにモデル全体にRayleigh減衰を考慮する。	PWR (川内1,2号 他)	B2	添付資料8
		限界状態設計法の 適用(層間変形角 及びせん断力によ る評価)	原子炉機器冷却海水配管ダクト等の構造物において、限界状態設計法を適用することで、構造物の非線形性や各種要求機能に応じた設計とする。	PWR (川内1,2号 他)	B2	添付資料8

* (論点整理結果の定義)

A : 過去に適用実績がないもの(新規性:高)

B1: 新規制審査実績はあるが、個別の確認を要するもの(新規性:中) B2: 新規制審査実績が十分にあるもの(新規性:低) B3: 過去の工認実績はあるが、一部差異があるもの(新規性:低)

C : 過去の工認実績と相違がなく、個別審査が不要なもの

D1: 過去に十分な工認実績があり、工認段階の審査とするもの D2: 女川2号炉の既工認と同一手法であり、論点として抽出されないもの(新規制基準にて新たに評価対象となった設備若しくは評価手法を変更した設備で、当該設備での実績はないものの、他の設備での適用実績が十分にあるもの)

3. 女川原子力発電所2号炉における耐震設計の論点 (8)

分類	項目	内容	適用実績・ 審査実績	論点整理 結果*	備考
津波 防護 施設	時刻歴応答解析(有効応力解析)の適用	防潮堤の鋼管式鉛直壁(一般部)及び盛土堤防等の耐震性評価においては、構造物と地盤の動的相互作用を考慮できる二次元動的有限要素解析において、有効応力解析を用いた時刻歴応答解析により地震時の応答を算定する。	—	A	個別に審査中
	すべり安全率による評価	防潮堤の鋼管式鉛直壁(一般部)及び盛土堤防については、「耐津波設計に係る工認審査ガイド」に準じ、防潮堤の各部位に想定したすべり線に対して、すべり線上の応力状態を考慮したすべり安全率が妥当な安全裕度を有していることを確認する。	—	A	個別に審査中
	限界状態設計法の適用(降伏モーメント及びせん断耐力による評価)	防潮壁の耐震性評価においては、構造部材の曲げ系の破壊については、部材降伏点として降伏モーメント M_y を許容限界とする。せん断破壊については、せん断耐力に対して妥当な裕度を持つことを確認する。	—	A	個別に審査中
	フレームモデル(線形)の適用、許容応力度法の適用	防潮堤の鋼管式鉛直壁(一般部・岩盤部)については、地盤と杭の動的相互作用を考慮するため、二次元FEMモデルにおいて、地盤は平面ひずみ要素、鋼管杭は梁要素(線形)でモデル化し、許容応力度法で評価を行う。	BWR (柏崎6,7号 既工認他)	D1	

* (論点整理結果の定義)

A : 過去に適用実績がないもの(新規性:高)

B1: 新規制審査実績はあるが、個別の確認を要するもの(新規性:中) B2: 新規制審査実績が十分にあるもの(新規性:低) B3: 過去の工認実績はあるが、一部差異があるもの(新規性:低)

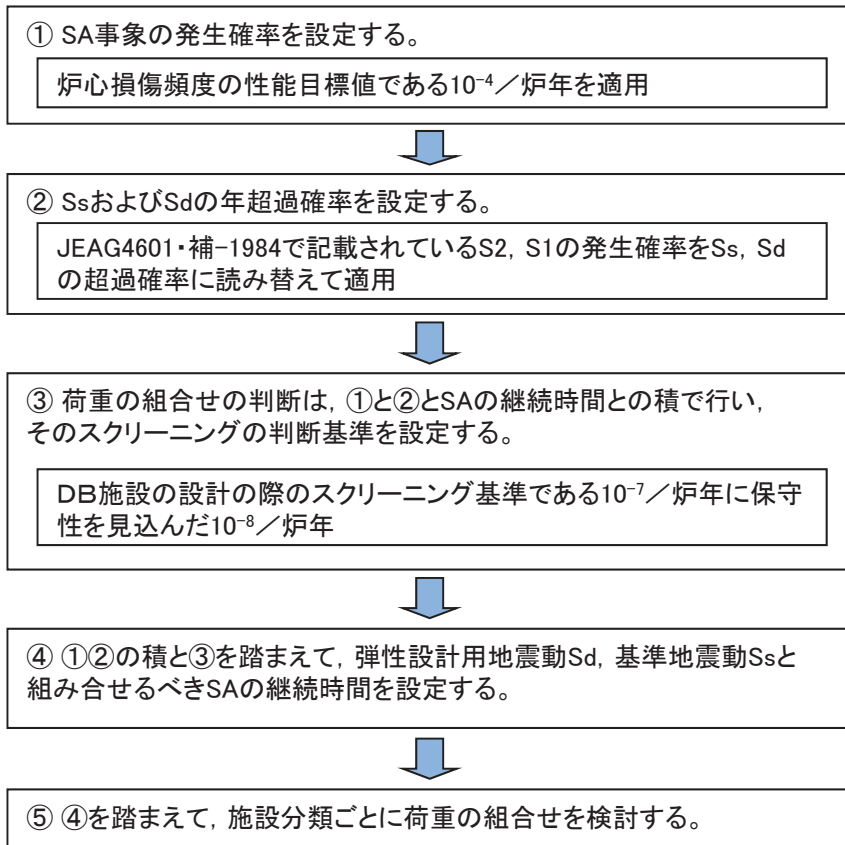
C : 過去の工認実績と相違がなく、個別審査が不要なもの

D1: 過去に十分な工認実績があり、工認段階の審査とするもの D2: 女川2号炉の既工認と同一手法であり、論点として抽出されないもの(新規制基準にて新たに評価対象となった設備若しくは評価手法を変更した設備で、当該設備での実績はないものの、他の設備での適用実績が十分にあるもの)

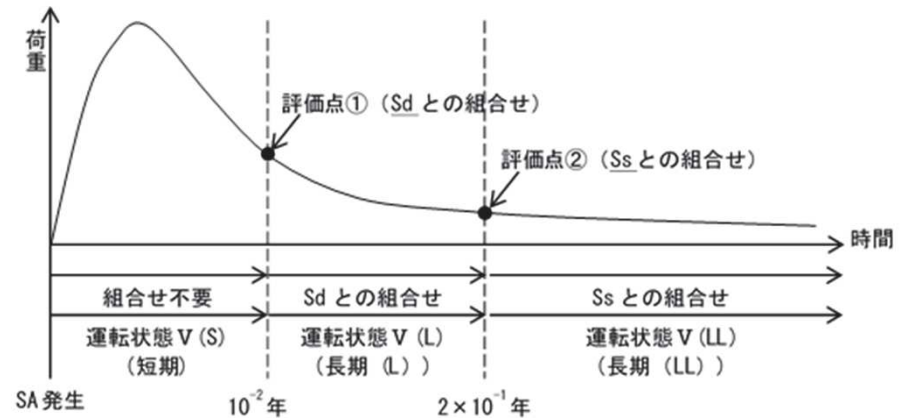
添付資料

添付資料1 SA施設の重大事故と地震の荷重の組合せ

施設分類ごと(全般施設, PCVバウンダリ, RPVバウンダリを構成する設備)に適用する荷重の組合せの選定手順を示す。考え方としては, 事象の発生確率, 継続時間, 地震動の年超過確率の積等を考慮し, 工学的, 総合的に組み合わせる地震力を判断する。以下に全体フローを示す。



PCVバウンダリを構成する設備における荷重の組合せの例



荷重の組合せと継続時間の関係(イメージ)

事故シーケンス	重大事故等の発生確率	地震動の発生確率		荷重の組合せを考慮する判断目安	組合せの目安となる継続時間
		弾性設計用地震動 Sd	10^{-2} / 年以下		
全てのSA	10^{-4} / 炉年	基準地震動 Ss	5×10^{-4} / 年以下	10^{-8} / 炉年以上	10^{-2} 年以上
					2×10^{-1} 年以上

【組合せ】

- ・SA短期荷重と地震動との組合せは不要
- ・SA長期(L)荷重(評価点①)とSdの組合せを考慮
- ・SA長期(LL)荷重(評価点②)とSsの組合せを考慮

添付資料2 SA施設の耐震設計に用いる許容応力状態の設定

- SA施設の耐震設計は、DB施設に準拠することとしていることから、運転状態ⅠからⅣと地震による地震力の組合せに対しては、DB施設と同様の許容応力状態を適用する。
- 設計条件を超える運転状態Ⅴの許容応力状態として V_A を定義し、さらに地震との組合せにおいては、許容応力状態 $V_A S$ を定義する。
- 設置許可基準規則の解釈の別記2によれば、機能維持設計の要求として、「荷重により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、その施設に要求される機能に影響を及ぼさないこと。」とされており、DB施設では、許容応力状態 $IV_A S$ の許容限界を適用している。
- 新たに定義する許容応力状態 $V_A S$ は、SA事象に対処するために必要な機能が損なわれない許容限界であり、女川2号炉では、機能維持設計の許容限界として適用実績のある許容応力状態 $IV_A S$ と同じ許容限界を適用する。

PCVバウンダリの荷重の組合せと許容応力状態の例

運転状態	許容応力状態	DB施設		SA施設		備考
		Sd	Ss	Sd	Ss	
Ⅰ	I_A	$III_A S$	$IV_A S$	—	$IV_A S$	DBと同じ許容応力状態とする。
Ⅱ	II_A	$III_A S$	$IV_A S$	—	$IV_A S$	DBと同じ許容応力状態とする。
Ⅲ	III_A	$III_A S$	$IV_A S$	—	$IV_A S$	DBと同じ許容応力状態とする。
Ⅳ(L)	I_A^*	$III_A S$	—	$III_A S$	—	DBと同じ許容応力状態とする。
Ⅳ(S)	IV_A	$IV_A S^{*1}$	—	—	—	—
Ⅴ(LL)	V_A			—	$V_A S^{*2}$	$V_A S$ の許容限界は、女川2号炉では、 $IV_A S$ と同じものを適用する。
Ⅴ(L)	V_A			$V_A S^{**2}$	—	
Ⅴ(S)	V_A			—	—	

*1: 構造体全体としての安全裕度を確認する意味でLOCA後の最大内圧とSdによる地震力との組合せを考慮する。

*2: 原子炉格納容器雰囲気温度の影響を受ける全般施設についても考慮する。

添付資料3 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

【断面選定の方針】

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いては、以下の方針により評価対象断面を選定する。

- ① 二次元地震応答解析により得られる構造物の応答に対して耐震評価を行う構造物(線状構造物:原子炉機器冷却海水配管ダクト等)については、評価対象構造物の構造的特徴、周辺状況、地震波の伝搬特性等を考慮して、構造物の応答が耐震評価上最も厳しくなると考えられる断面を評価対象断面として選定する。
- ② 二次元地震応答解析により得られる土圧等の荷重を三次元モデルに作用させて耐震評価を行う構造物(箱形構造物:海水ポンプ室等)については、評価対象構造物の構造的特徴、周辺状況、地震波の伝搬特性等を考慮して、三次元モデルに作用させる荷重を適切に評価することが可能な断面を評価対象断面として選定する。
- ③ 津波防護施設のうち、設備構造が複雑かつ設置範囲が長大である防潮堤及び防潮壁については、屋外重要土木構造物等と同様の考え方に加え、各部位の役割を踏まえ、津波に対する止水機能維持も含めた耐震評価を行うため、耐震・耐津波評価を行う上で厳しい断面を選定する。

【評価対象断面の選定の流れ】

耐震評価における評価対象断面は、以下のとおり、まず構造的特徴等の観点から耐震評価候補断面を整理した上で、絞り込みにより選定する。

① 耐震評価候補断面の整理

以下の観点にて、耐震評価候補断面を整理する。

- ・要求機能及び間接支持される機器・配管の有無及び設置位置
- ・構造的特徴(部材厚、内空断面、断面急変部、構造物間の連結部等)
- ・周辺状況(上載荷重、土被り厚、周辺地質、周辺地質変化部、隣接する構造物、地下水位*、断層との交差状況)
- ・地震波の伝搬特性
- ・機器・配管への応答加速度及び応答変位算出位置

*:地下水位は三次元浸透流解析等の地下水位に係る検討結果を踏まえて工認段階で設定する。

② 評価対象断面の選定

①で整理した耐震評価候補断面のうち耐震評価上厳しいと考えられる断面を絞り込み、評価対象断面として選定する。

耐震評価候補断面の整理と、評価対象断面の選定結果については、工認段階で示す。

添付資料4 上位クラス施設への下位クラス施設の波及的影響(1)

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

耐震重要施設が、耐震重要度分類の下位のクラスに属するものの波及的影響によって、その安全機能を損なわないように設計すること。この波及的影響の評価に当たっては、敷地全体を俯瞰した調査・検討の内容等を含めて、事象選定及び影響評価の結果の妥当性を示すとともに、耐震重要施設の設計に用いる地震動又は地震力を適用すること。

なお、上記の「耐震重要施設が、耐震重要度分類の下位のクラスに属するものの波及的影響によって、その安全機能を損なわない」とは、少なくとも次に示す事項について、耐震重要施設の安全機能への影響が無いことを確認すること。

- ・設置地盤及び地震応答性状の相違等に起因する相対変位又は不等沈下による影響
- ・耐震重要施設と下位のクラスの施設との接続部における相互影響
- ・建屋内における下位のクラスの施設の損傷、転倒及び落下等による耐震重要施設への影響
- ・建屋外における下位のクラスの施設の損傷、転倒及び落下等による耐震重要施設への影響

以上の規則の解釈を踏まえた波及的影響への設計配慮の基本方針を次頁以降に示す。

添付資料4 上位クラス施設への下位クラス施設の波及的影響(2)

波及的影響に係る設計方針

- 耐震重要施設(SA施設を含む)は、耐震重要度分類の下位のクラスに属する施設(以下「下位クラス施設」という。)の波及的影響によって、その安全機能を損なわないように設計する。
- 具体的には下位クラス施設は原則、耐震重要施設に対して離隔をとり配置する、若しくは耐震重要施設の設計に用いる地震力に対して構造強度を保つなどして耐震重要施設の安全機能を損なわない設計とする。また、波及的影響においては水平2方向及び鉛直方向の地震力が同時に作用する場合に影響を及ぼす可能性のある施設、設備を選定し評価する。
- 波及的影響評価に当たっては、以下(1)～(4)をもとに、敷地全体を俯瞰した調査・検討等を行い、耐震重要施設の安全機能への影響がないことを確認する。
- なお、原子力発電所の地震被害情報をもとに、以下(1)～(4)以外に検討すべき事項がないかを確認し、新たな検討事項が抽出された場合には、その観点を追加する。

(1) 設置地盤及び地震応答性状の相違等に起因する相対変位又は不等沈下による影響

a. 不等沈下

耐震重要施設の設計に用いる地震動又は地震力に対して、下位クラスの施設が設置される地盤の不等沈下により、耐震重要施設の安全機能へ影響がないことを確認する。

b. 相対変位

耐震重要施設の設計に用いる地震動又は地震力による下位クラス施設と耐震重要施設の相対変位により、耐震重要施設の安全機能へ影響がないことを確認する。

(2) 耐震重要施設と下位クラス施設との接続部における相互影響

耐震重要施設の設計に用いる地震動又は地震力に対して、耐震重要施設に接続する下位クラス施設の損傷により、耐震重要施設の安全機能へ影響がないことを確認する。

添付資料4 上位クラス施設への下位クラス施設の波及的影響 (3)

(3) 建屋内における下位クラス施設の損傷, 転倒及び落下等による耐震重要施設への影響

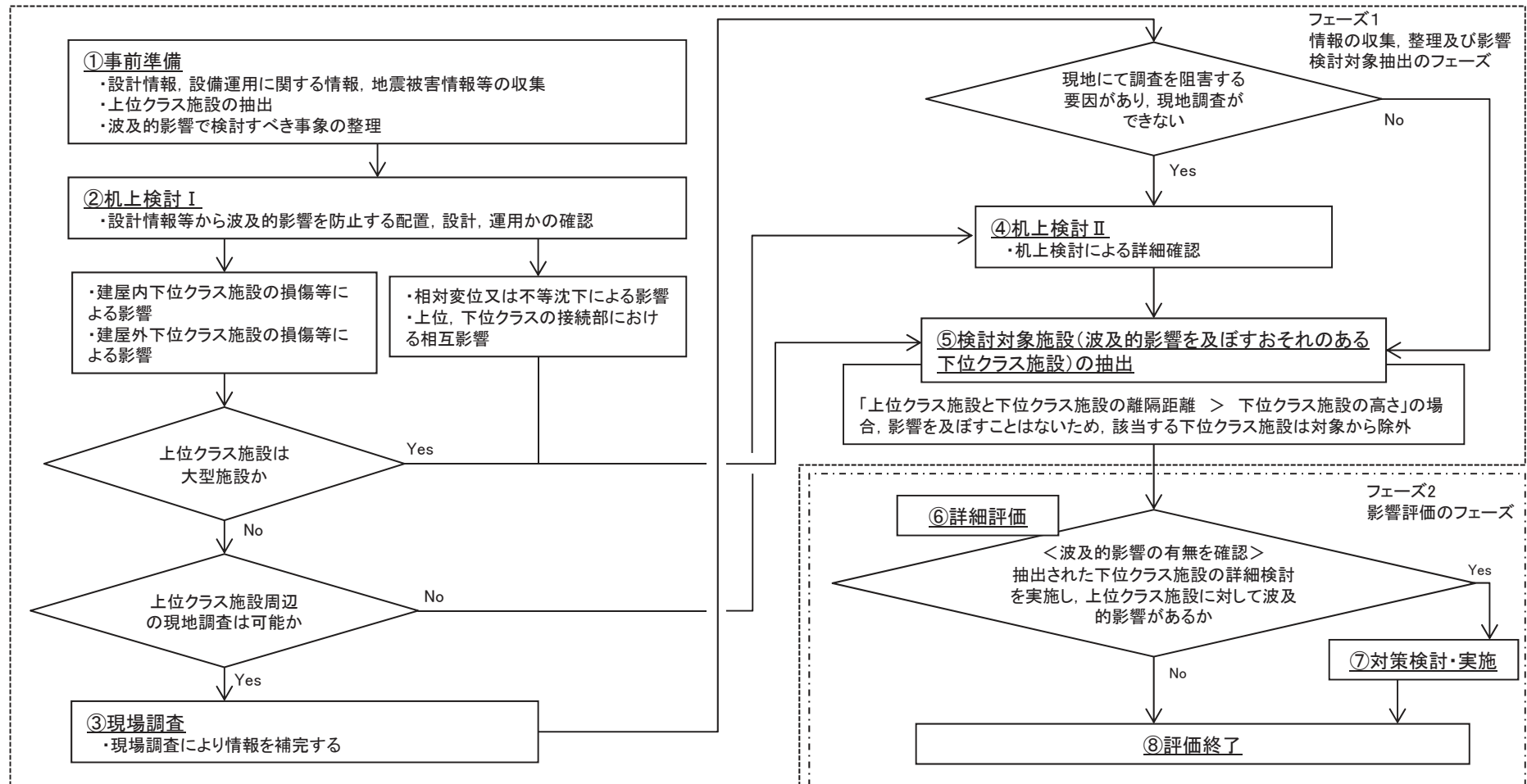
耐震重要施設の設計に用いる地震動又は地震力に対して, 建屋内の下位クラス施設が損傷, 転倒及び落下等により, 耐震重要施設の安全機能へ影響がないことを確認する。

(4) 建屋外における下位クラス施設の損傷, 転倒及び落下等による耐震重要施設への影響

- ・耐震重要施設の設計に用いる地震動又は地震力に対して, 建屋外の下位クラス施設の損傷, 転倒及び落下等により, 耐震重要施設の安全機能へ影響がないことを確認する。
- ・耐震重要施設の設計に用いる地震動又は地震力に対して, 耐震重要施設周辺の斜面が崩壊しないことを確認する。

添付資料4 上位クラス施設への下位クラス施設の波及的影響 (4)

新規基準の要求を踏まえ、考慮すべき検討事象の整理を行い、各々の検討事象に対して波及的影響のおそれがないかを机上検討(施設的设计情報等)及び現場確認(ウォークダウン)により確認する。



波及的影響評価の概略フロー

添付資料5 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 (1)

【「建物・構築物」における影響検討方針】

① 耐震性評価上の構成部位の整理

耐震性評価上の構成部位を整理し、網羅的に確認する

② 応答特性の整理

耐震性評価上の構成部位について、水平2方向及び鉛直方向地震力の組合せによる影響が想定される応答特性を整理する

③ 荷重の組合せによる応答特性が想定される部位の抽出

整理した耐震性評価上の構成部位について、荷重の組合せによる応答特性により、耐震性への影響が想定される部位を抽出する

④ 3次元的な応答特性が想定される部位の抽出

3次元的な応答特性により、耐震性への影響が想定される部位を抽出する

⑤ 3次元解析モデルによる精査

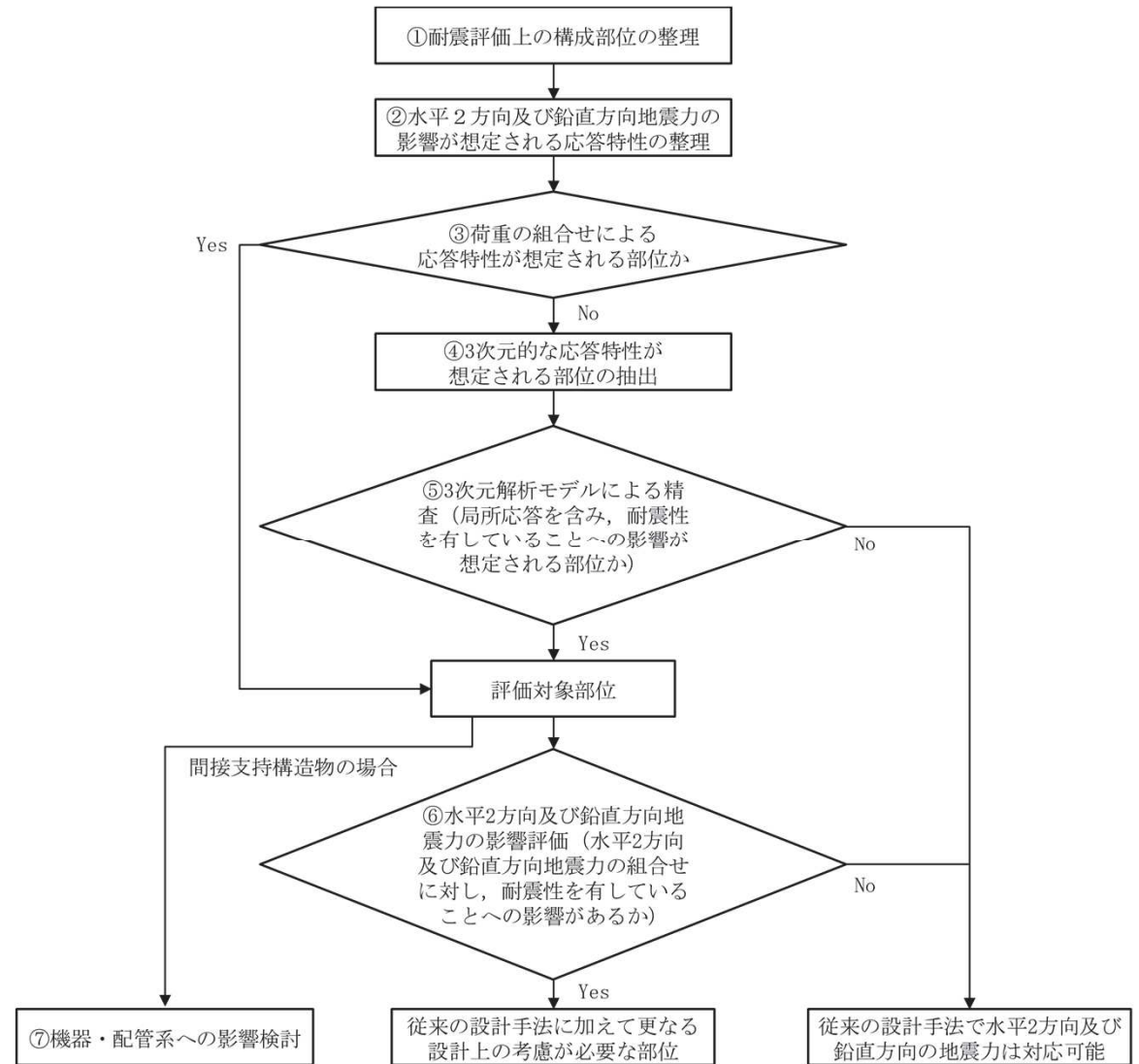
3次元解析モデルを用いた精査を実施し、耐震性への影響が想定される部位を抽出する

⑥ 水平2方向及び鉛直方向地震力の組合せによる影響評価

評価対象として抽出した耐震性評価上の構成部位について、各部位の耐震性への影響を評価する

⑦ 機器・配管系への影響検討

機器・配管系の間接支持機能を有する場合、応答値への影響を確認する



「建物・構築物」の影響検討フロー

添付資料5 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 (2)

【「機器・配管系」における影響検討方針】

① 評価対象となる設備の整理

代表的な機種ごとに分類し整理する

② 構造上の特徴による抽出

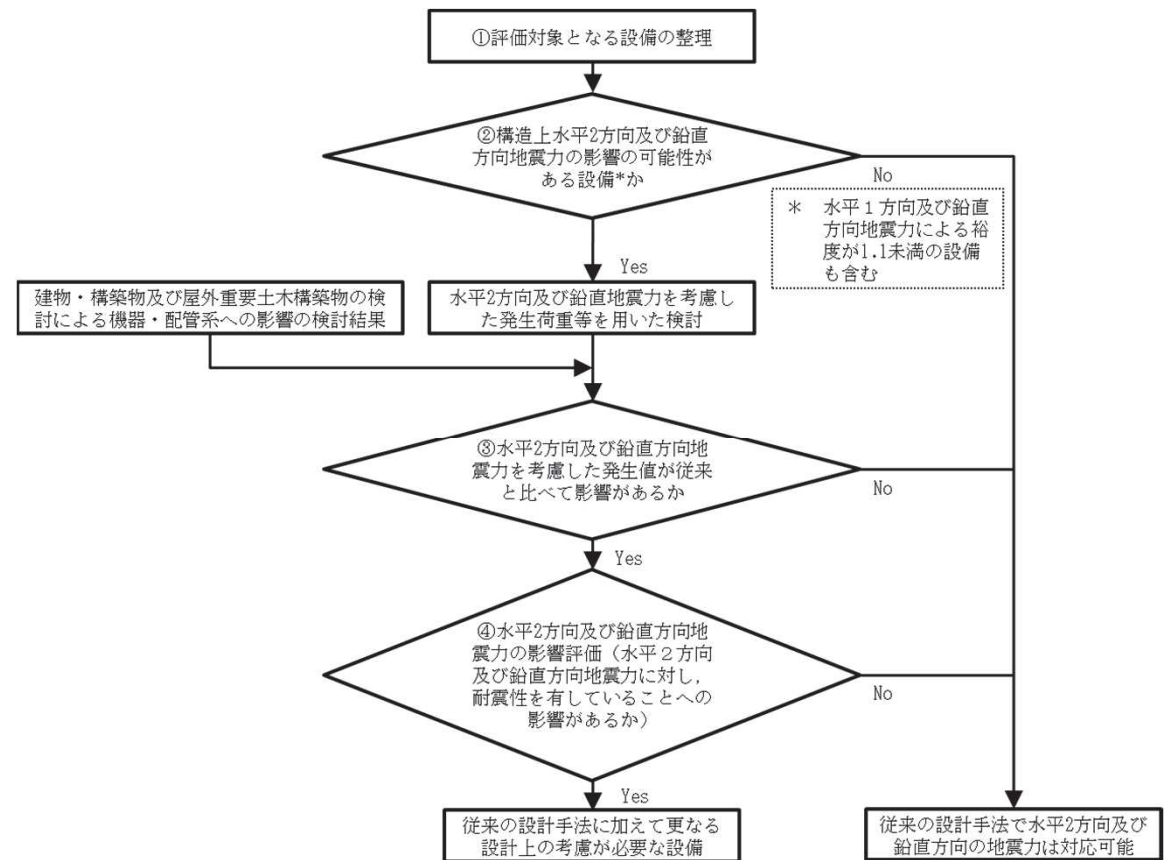
機種ごとに構造上の特徴から水平2方向の地震力による影響の可能性のある設備を抽出する

③ 発生値の増分による抽出

水平2方向及び鉛直方向地震力を考慮した発生値の増分を用いて影響を検討し、耐震性への影響が懸念される設備を抽出する

④ 水平2方向及び鉛直方向地震力の影響評価

③の検討において算出された荷重や応力を用いて、設備の耐震性への影響を確認する



「機器・配管系」の影響検討フロー

添付資料5 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 (3)

【「屋外重要土木構造物」及び「津波防護施設、浸水防止設備及び津波監視設備」における影響検討方針】

① 構造形式の分類

各構造物の構造上の特徴や従来設計手法の考え方を踏まえ、構造形式ごとに大別する

② 従来設計手法における評価対象断面に対して直交する荷重の整理 評価対象断面に対して直交する荷重を抽出する

③ 荷重の組合せによる応答特性が想定される構造形式の抽出

②で整理した荷重に対して、水平2方向及び鉛直方向地震力の組合せの影響が想定される構造形式を抽出する

④ 従来設計手法における評価対象断面以外の3次元的な応答特性が想定される箇所の抽出

③で抽出されなかった構造形式について、3次元的な応答が想定される箇所を抽出する

⑤ 従来設計手法の妥当性の確認

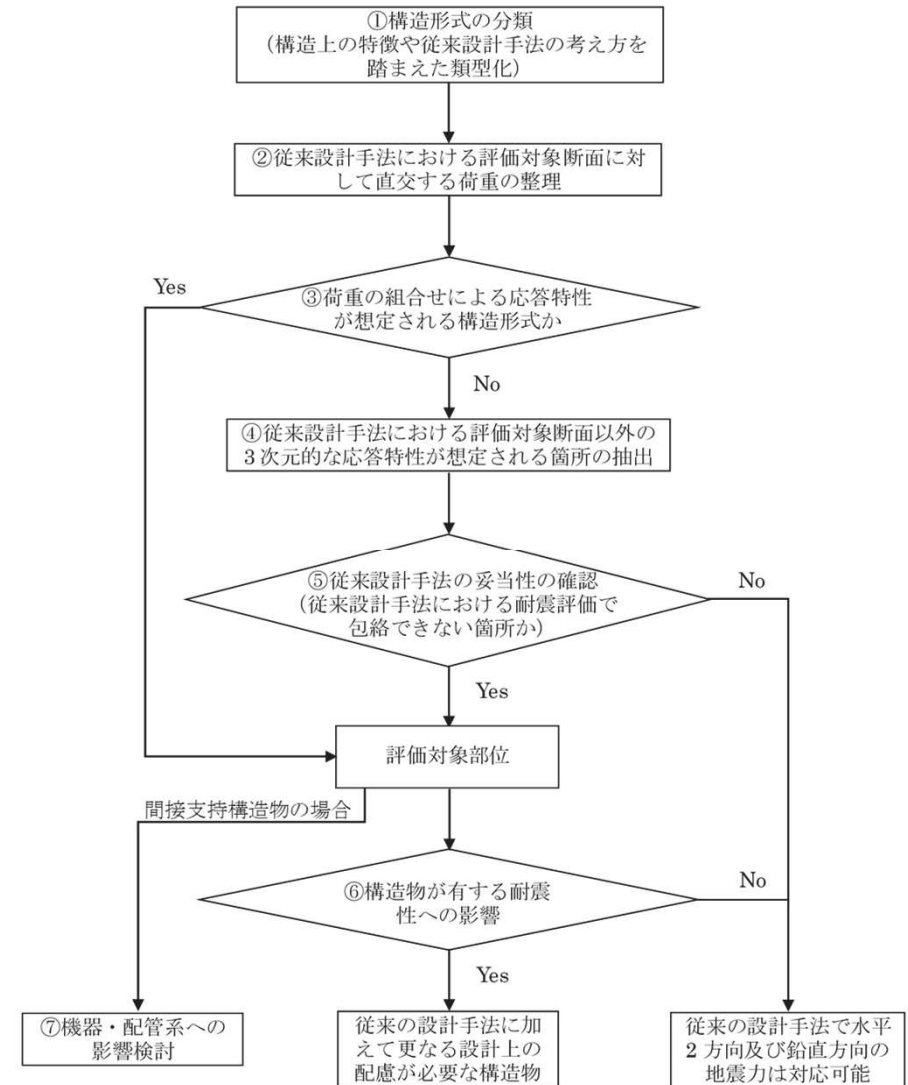
④で抽出された箇所が、水平2方向及び鉛直方向地震力の組合せに対して、従来設計手法における評価対象断面の耐震性評価で満足できるか検討を行う

⑥ 水平2方向及び鉛直方向地震力の組合せの影響評価

構造部材が有する耐震性への影響を確認する

⑦ 機器・配管系への影響検討

機器・配管系の間接支持機能を有する場合、応答値への影響を確認する



「屋外重要土木構造物」及び「津波防護施設、浸水防止設備及び津波監視設備」の影響検討フロー

添付資料6 規格適用範囲外の動的機能維持評価及び一定の余裕を考慮した弁の動的機能維持評価(1)

➤ 規格適用外の動的機能維持評価について

【目的】

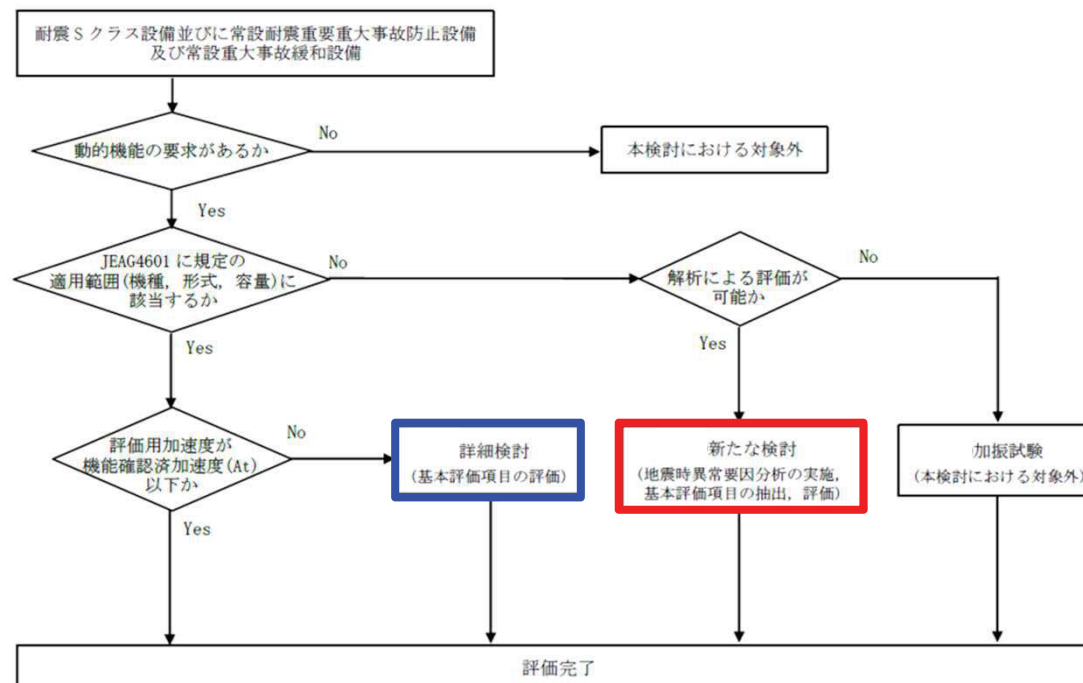
規格が適用できない機器及び評価用加速度が機能確認済加速度を超える設備に対して、動的機能維持評価方法を検討し実施する。

【検討対象設備】

耐震Sクラス設備並びに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とし、地震後も動的機能が要求される設備を対象とする。

【検討対象外の設備】

- ・動的機能の要求がない設備
- ・加振試験にて動的機能維持評価を実施する設備
- ・電気計装機器(加振試験にて、電氣的機能維持を確認)
- ・弁類(JEAG4601に、詳細検討の手順が規定)



動的機能維持評価方法の検討フロー

【機器・配管系における検討方針】

動的機能維持の要求がある設備について、JEAG4601に定める機能確認済加速度との比較による評価方法が適用できる機種(ポンプ、電動機、ファン等)に対して、JEAG4601で定められた設備の適用範囲(構造、作動原理、容量)と比較し、大きな差異がないか確認する。

適用範囲と差異がなく、JEAG4601を適用できる設備については、評価用加速度が機能確認済加速度以下であることの確認を行い、機能確認済加速度を超える設備については、“**詳細検討**”(基本評価項目の評価)が必要な設備として抽出し評価する。(超えない場合は評価終了)

詳細検討においては、設備の評価項目についてJEAG4601等を参考に、代表機種ごとに規定された全ての基本評価項目について、構造強度評価又は動的機能維持評価を行い、発生値が許容限界を満足していることを確認する。

適用範囲と差異があり、JEAG4601が適用できない設備については、解析による評価が可能であるか確認し、可能な場合には“**新たな検討**”(地震時異常要因分析の実施、基本評価項目の抽出、評価)が必要な設備として抽出し評価する。(不可の場合は、加振試験にて評価)

新たな検討においては、類似機種の既往研究等を参考に、設備の地震時異常要因分析を実施し、その分析に基づき抽出された設備の評価項目に対して、構造強度評価又は動的機能維持評価を行い、発生値が許容限界を満足していることを確認する。

添付資料6 規格適用範囲外の動的機能維持評価及び一定の余裕を考慮した弁の動的機能維持評価 (2)

➤ 一定の余裕を考慮した弁の動的機能維持評価について

【目的】

女川2号炉の配管系に設置される弁の動的機能維持評価に適用する加速度について、規格基準に基づく設計手順と比較し、算定方針を定めることで、弁の動的機能維持評価を実施する。

【規格基準に基づく設計手順との比較及び方針】

弁の動的機能維持評価に用いる弁駆動部の応答加速度の算定方針がJEAGにて示されており、女川2号炉の今回工認における弁駆動部での応答加速度の設定については、JEAGにおける規定に加えて、一定程度の余裕を見込み評価を実施する。(下表参照)

表. 弁の機能維持評価の耐震設計手順の比較

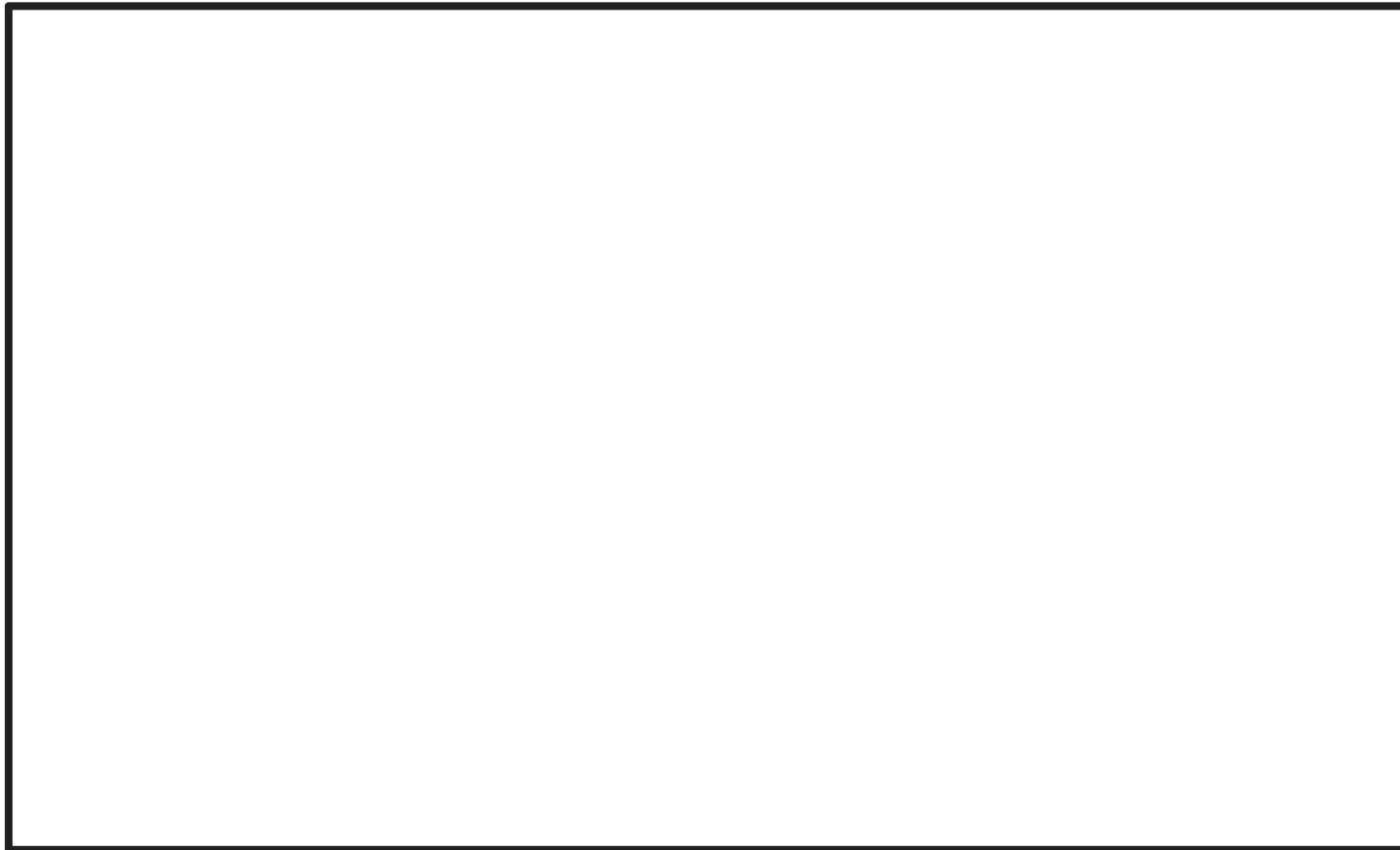
配管系の 固有値	弁駆動部の応答加速度の算定方針	
	JEAG4601	女川2号炉
“剛”の場合	“最大加速度(ZPA)”を適用	“ <u>最大加速度(ZPA)を1.2倍した値(1.2ZPA)</u> ”を適用 (最大加速度(ZPA)に一定の余裕を考慮)
“柔”の場合	設計用床応答スペクトルを入力とした配管系のスペクトルモーダル解析を行い算出された弁駆動部での応答加速度を適用	①(JEAG4601の方針と同様) 設計用床応答スペクトルを入力とした配管系のスペクトルモーダル解析を実施し、弁駆動部の応答加速度*を算出 ② <u>1.2倍した最大加速度(1.2ZPA)による弁駆動部の応答加速度を算定(剛領域の振動モードの影響を考慮)</u>

①, ②のいずれか
大きい加速度を
適用する

* 弁駆動部の応答加速度の算定に用いる配管系のスペクトルモーダル解析において、剛領域の振動モードの影響により応答加速度の増加が考えられる場合、剛領域の振動モードの影響を考慮するため、高周波数領域の振動モードまで考慮した地震応答解析を実施。(スペクトルモーダル解析において考慮する高周波数領域の範囲については、応答解析結果を用いた検討を踏まえて決定する)

添付資料7 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(1)

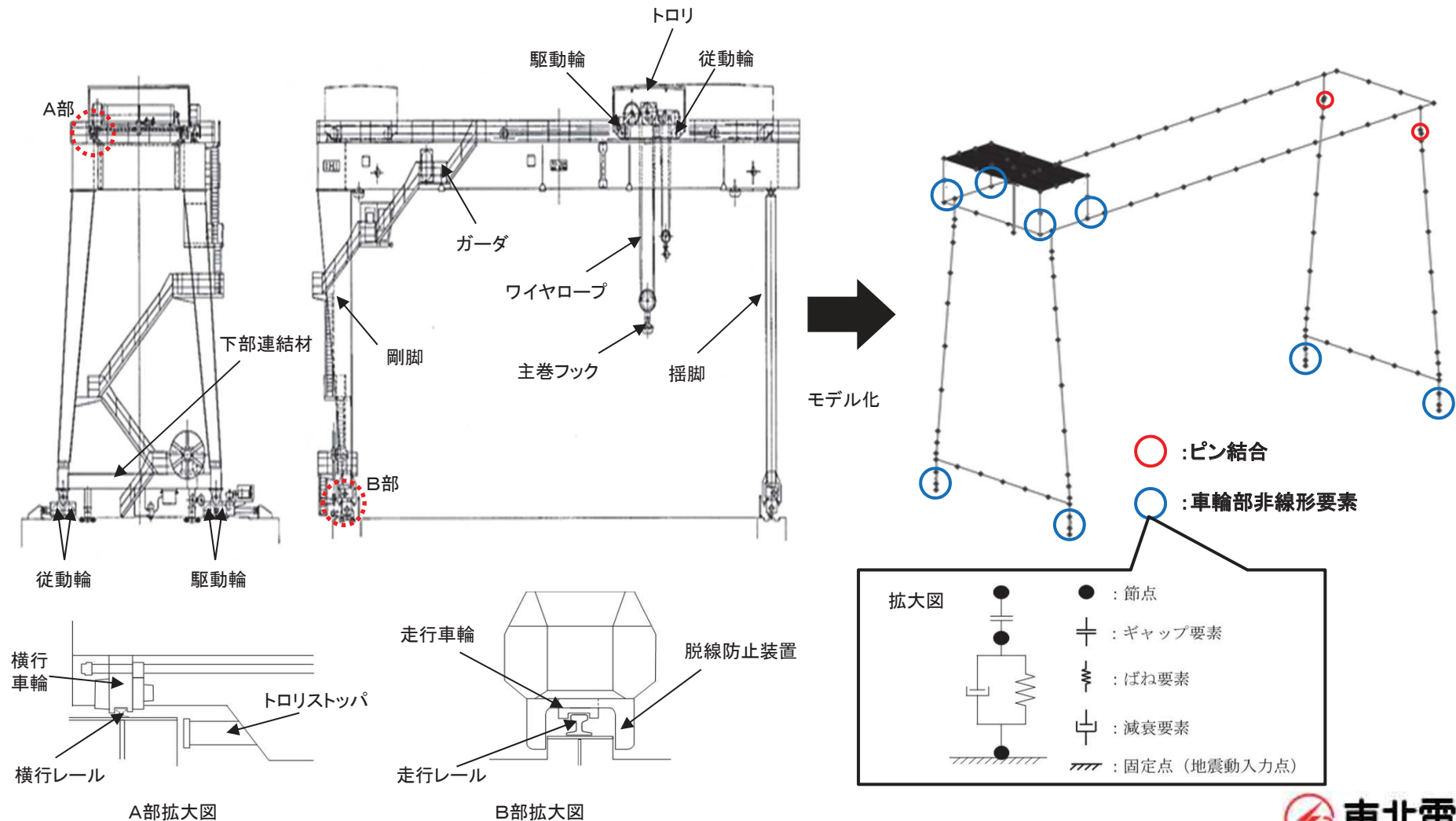
- 海水ポンプ室門型クレーンについては、地震時に機能を求められるものではないため、耐震Cクラス設備であるが、非常用海水ポンプ等のメンテナンスを実施する期間には耐震Sクラスである非常用海水ポンプ等が設置された補機ポンプエリア付近に位置することとなるため、地震時の波及的影響を及ぼさないことが要求される。



海水ポンプ室門型クレーンの設置位置概要

添付資料7 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 (2)

- 耐震性評価を実施するにあたっては、海水ポンプ室門型クレーンがレール上に固定されていないという構造上の特徴を踏まえ、水平方向へのすべりと鉛直方向の車輪部の浮上りを考慮した解析モデルによる非線形時刻歴解析を適用する。



添付資料7 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 (3)

- 非線形時刻歴応答解析の実績のある原子炉建屋クレーンと海水ポンプ室門型クレーンとの構造を比較した結果、クレーン本体の鋼構造物として脚が存在することのみが差異であり、これ以外の全体構造、荷重伝達及び車輪まわり構造が同様であることを確認した。
- 同様に評価方法及び解析モデルについて比較した結果、解析モデルの設定方法として、3次元はり要素によるモデル化、水平方向のすべり、鉛直方向の浮上がりの挙動を考慮する非線形要素の考え方が同様であることを確認した。
- したがって、女川2号炉海水ポンプ室門型クレーンの耐震評価手法として、非線形時刻歴解析を適用することは妥当であると考えられる。

項目		大間1号炉 原子炉建屋クレーン	柏崎刈羽6、7号炉 原子炉建屋クレーン	女川2号炉 海水ポンプ室門型クレーン	
構造 比較	構造概要	・2本のレール間を跨ぐ構造 ・ガーダ上にトロリを設置 ・車輪を介してレール上に設置	同左	同左	
	主要構造物	・ガーダ ・サドル ・トロリ	同左	・ガーダ ・サドル ・トロリ ・脚	
	構造形状	鋼構造物(炭素鋼) 溶接構造物	同左	同左	
評価 手法 比較	解析手法	非線形時刻歴応答解析	同左	同左	
	解析モデル	3次元FEM解析モデル	同左	同左	
	車輪-レール間の 境界条件	すべり, 浮上がり, 衝突考慮	同左	同左	
	地震力	水平	動的地震力	同左	同左
		鉛直			
	入力地震動	クレーン設置位置の 入力加速度	同左	同左	
	減衰定数	水平	2.0%	同左	同左
		鉛直			
解析プログラム	ABAQUS Ver.6.5-4	ABAQUS Ver.6.5-4/11-1	ABAQUS Ver.6.11-1		
時刻歴の保守性検討	—	考慮 ASME Time History Broadening	考慮 ASME Time History Broadening		

添付資料7 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(4)

- 女川2号炉の基準地震動 S_s 相当に対して各部材の発生応力が許容応力を下回ること、浮上がり高さが許容浮上がり高さを下回ること及び吊具の発生荷重が許容荷重を下回ることを確認した。
 - したがって、海水ポンプ室門型クレーンは、女川2号炉の基準地震動 S_s に対して損傷・落下せず上位クラス施設へ波及的影響を及ぼさないことの見通しを得た。
-
- 今後は工認段階で、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。
 - 工認段階で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。また、時刻歴応答解析の保守性に配慮した詳細な検討についても実施する。

耐震評価結果*1

評価部位		評価項目*2	発生値	許容限界
クレーン 本体	ガーダ	曲げ	238(MPa)	276(MPa)
	剛脚	組合せ	0.67(-)	1(-)
	揺脚	組合せ	0.82(-)	1(-)
	下部連結材 (剛脚側)	組合せ	0.59(-)	1(-)
	下部連結材 (揺脚側)	組合せ	0.52(-)	1(-)
車輪部	脱線防止装置	曲げ	218(MPa)	336(MPa)
	トロリストッパ	圧縮	37(MPa)	276(MPa)
クレーン本体		浮上がり	12(mm)	
トロリ		浮上がり	22(mm)	
吊具	ワイヤロープ	荷重	3.276×10^3 (kN)	6.059×10^3 (kN)
	主巻フック	荷重	3.209×10^3 (kN)	5.170×10^3 (kN)

*1 本評価は平成25年12月27日申請時の基準地震動 S_s -1,2による暫定評価

*2 各評価項目について最も裕度が小さい項目を記載

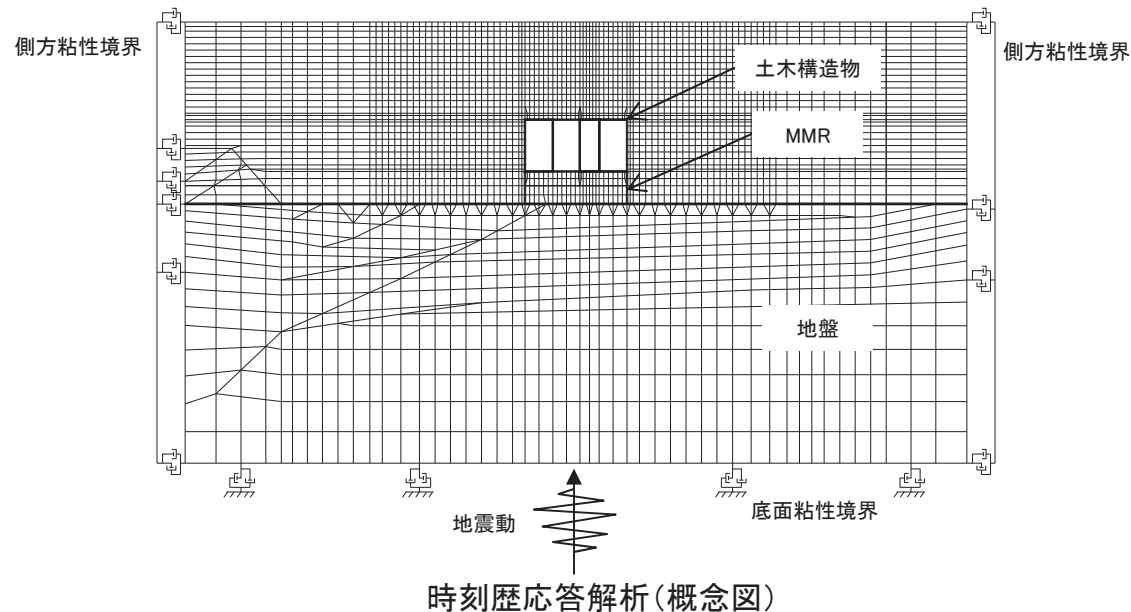
本資料のうち、枠囲みの内容は商業機密又は防護上の観点から公開できません。

添付資料8 土木構造物の解析手法及び解析モデルの精緻化

(1)時刻歴応答解析の適用

時刻歴応答解析及び部材非線形解析は、既工認において適用実績がある手法である。なお、解析手法の選定に当たっては、地下水位低下設備を考慮の上設定した地下水位及び液状化検討対象層の分布状況を踏まえ、全応力解析又は有効応力解析のいずれかを選定する。

適用の目的	構造物や周辺地盤の非線形性をより精緻に再現できる時刻歴応答解析を用いて照査用応答値を算出することを目的とする。
適用の効果	時刻歴応答解析を採用することで、構造物や周辺地盤の非線形性を考慮した現実的な挙動特性を把握することができる。構造物の非線形性は、構造モデルをフレームモデル(部材非線形)とすることで考慮している。
適用の妥当性	適用基準は既工認にて適用実績のある「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 2005)」(以下、土木学会マニュアルという。), 「コンクリート標準示方書(土木学会 2002及び2012)」(以下「コンクリート標準示方書(2002), コンクリート標準示方書(2012)」という。)とする。 【先行プラントの審査における適用実績】 ・川内1, 2号取水ピット 等



添付資料8 土木構造物の解析手法及び解析モデルの精緻化

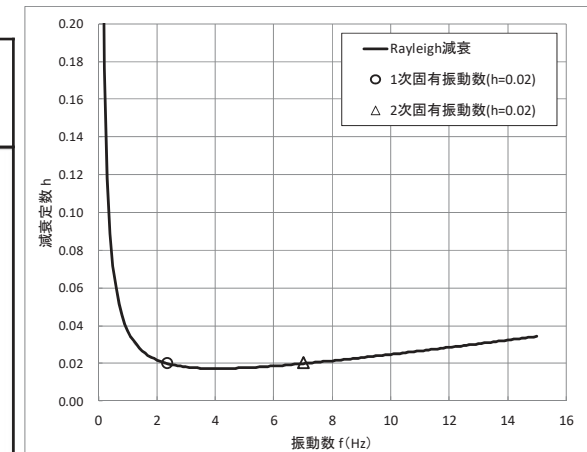
(2)時刻歴応答解析における構造物の履歴減衰及びRayleigh減衰の適用

減衰定数の変更は、既工認において適用実績がある手法である。

適用の目的	時刻歴応答解析に非線形性を考慮するに当たり、非線形の程度に応じた減衰(履歴減衰)を考慮することで、現実的な挙動特性を把握することを目的としている。なお、解析上の安定のためにRayleigh減衰を考慮する。
適用の効果	本手法を採用することで、構造物の非線形性を考慮した現実的な挙動特性を把握することができる。
適用の妥当性	適用基準は既工認にて適用実績のある「土木学会マニュアル」を適用する。 【先行プラントの審査における適用実績】 ・川内1, 2号取水ピット 等

今回工認で採用する構造物の減衰

履歴減衰	構造部材の材料非線形性(コンクリート及び鉄筋の応力 - ひずみ関係)における非線形の程度に応じた値となる。
粘性減衰	Rayleigh減衰: $[C] = \alpha[M] + \beta[K]$ $[C]$: 減衰係数マトリックス $[M]$: 質量マトリックス $[K]$: 剛性マトリックス 係数 $\alpha = \frac{2\omega_1\omega_2(h_1\omega_2 - h_2\omega_1)}{\omega_2^2 - \omega_1^2}$, $\beta = \frac{2(h_2\omega_2 - h_1\omega_1)}{\omega_2^2 - \omega_1^2}$ $\omega_1 = 2\pi \cdot f_1$, $\omega_2 = 3\omega_1$, $h_1 = h_2 = 0.02$ f_i : 固有振動数, h_i : 固有振動数における減衰定数 減衰定数は2%としている。



Rayleigh減衰の設定イメージ

添付資料8 土木構造物の解析手法及び解析モデルの精緻化

(3) 限界状態設計方法の適用(層間変形角及びせん断耐力による評価)

限界状態設計法は、既工認において適用実績がある手法である。

適用の目的	時刻歴応答解析の採用にあわせて限界状態設計法を適用することで、構造物の非線形性や各種要求機能に応じた設計とすることを目的とする。 限界状態設計法による設計として、構造部材の曲げ系の破壊については限界層間変形角、せん断破壊についてはせん断耐力に対して妥当な裕度を持つことを確認することを基本とし、各設備の要求機能を踏まえて照査項目・内容を追加することとする。なお、せん断耐力については、せん断耐力評価式、材料非線形解析を用いた方法のいずれかを用いて評価する。
適用の効果	限界状態設計法を用いて照査を行うことにより、構造物の非線形性や各設備の要求機能を考慮した設計が可能となる。
適用の妥当性	適用基準は既工認にて適用実績のある「土木学会マニュアル」、「コンクリート標準示方書(2012)」を適用する。 【先行プラントの審査における適用実績】 ・川内1, 2号取水ピット 等

