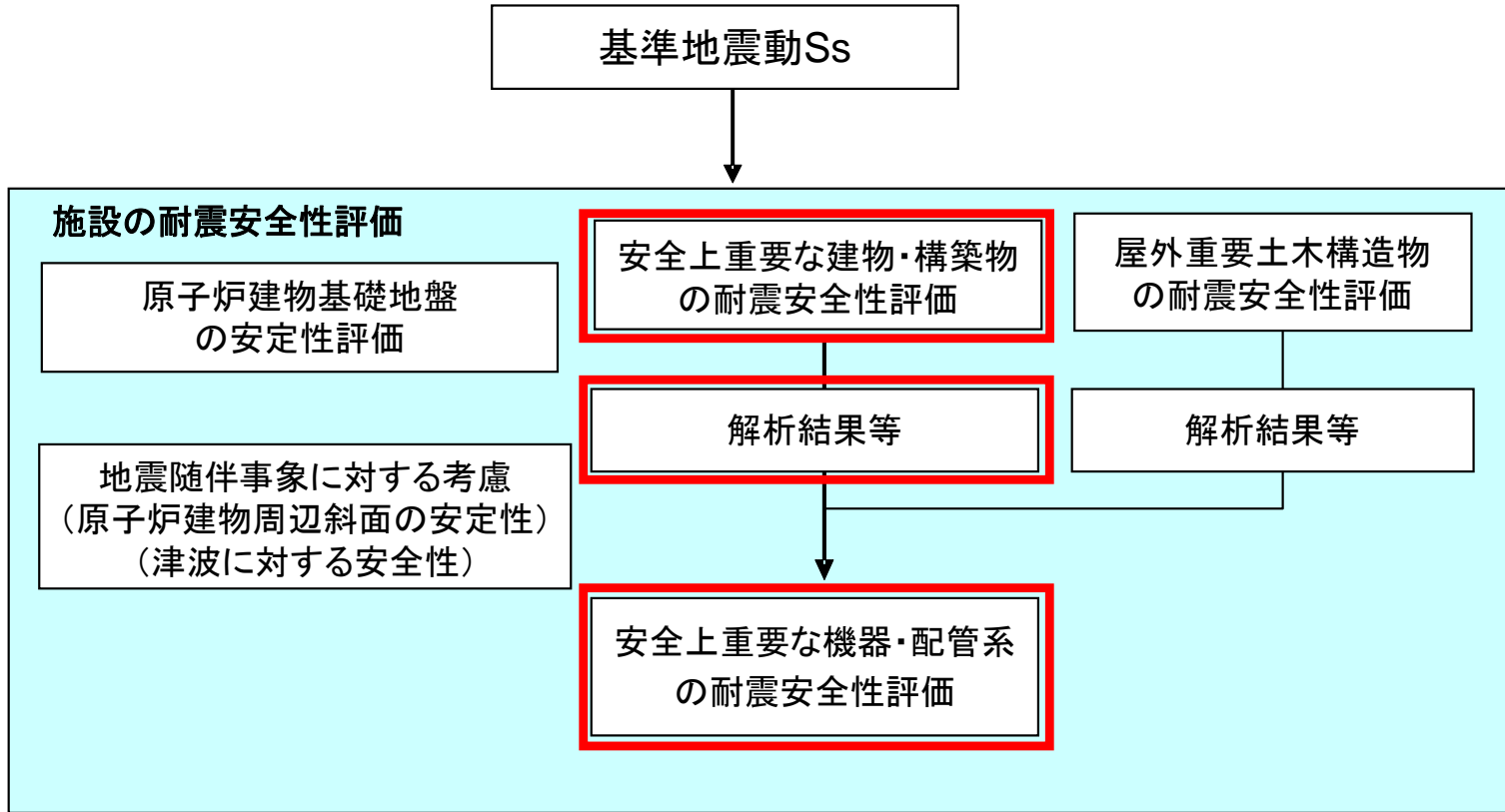


新耐震指針に照らした耐震安全性評価
主要施設の耐震安全性
(敦賀発電所1号機)

平成21年12月21日
日本原子力発電株式会社

1. 新耐震指針に照らした耐震安全性評価の流れ
2. 施設の耐震安全性評価方針
3. 建物・構築物の耐震安全性評価
4. 機器・配管系の耐震安全性評価
5. 安全上重要な主要施設の耐震安全性評価
6. まとめ

1. 新耐震指針に照らした耐震安全性評価の流れ



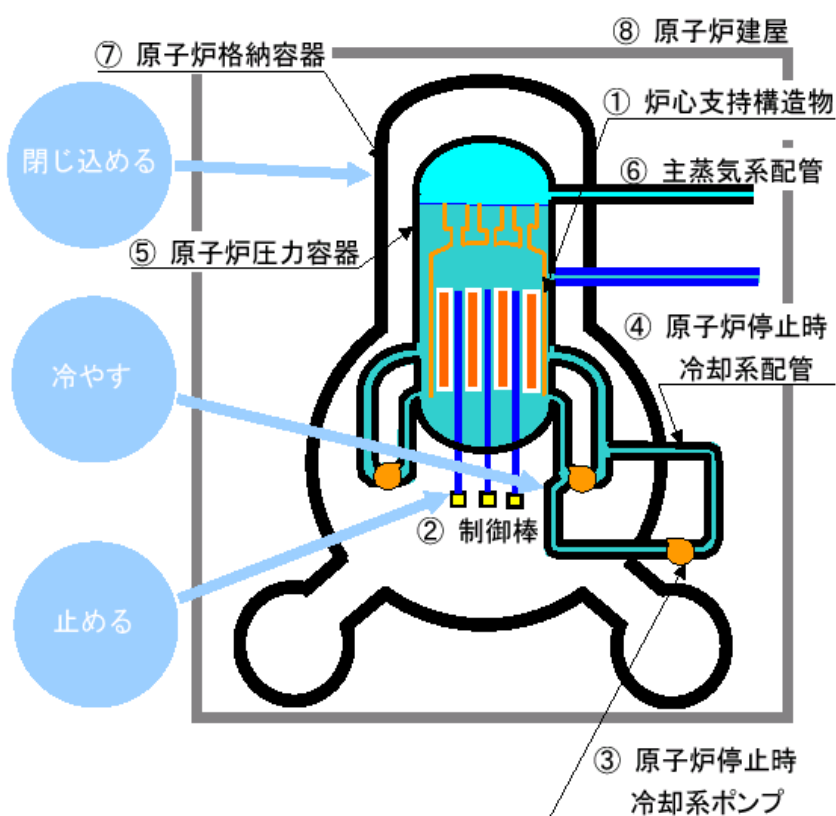
は中間報告対象

2. 施設の耐震安全性評価方針 — 敦賀1号機 —

評価方針

中間報告(改訂版)における評価対象施設は、新耐震指針によるSクラスの施設のうち、原子炉を「止める」、「冷やす」、放射性物質を「閉じ込める」に係る安全上重要な機能を有する主要な施設を対象としている。

本資料では、応答スペクトルに基づく基準地震動 S_s (以下「**応答スペクトル波**」という。)及び断層モデルを用いた手法による基準地震動 S_s (以下「**断層モデル波**」という。)に対する評価結果について示す。



[評価対象施設]

止める

- ①炉心支持構造物
- ②制御棒

冷やす

- ③原子炉停止時
冷却系ポンプ
- ④原子炉停止時
冷却系配管

閉じ込める

- ⑤原子炉圧力容器
- ⑥主蒸気系配管
- ⑦原子炉格納容器

上記施設を内包する 建物

- ⑧原子炉建屋

[評価方法]

1. 建物・構築物の評価

基準地震動 S_s による時刻歴応答解析により求めた耐震壁の最大応答せん断ひずみと評価基準値を比較(⑧)

2. 機器・配管系の構造強度評価

基準地震動 S_s を想定した場合に施設に生じる応力(発生値)を算出し、評価基準値(材料毎に定められた許容応力)と比較(①③④⑤⑥⑦)

3. 機器・配管系の動的機能維持評価

(制御棒挿入性)

基準地震動 S_s を想定した場合の燃料集合体相対変位を算定し、評価基準値(加振時の挿入試験により規定時間内に制御棒の挿入が確認された燃料集合体の相対変位)と比較(②)

3. (1) 評価方針 (建物・構築物の評価の流れ) — 敦賀1号機 —

<原子炉建屋の評価の流れ>

時刻歴応答解析

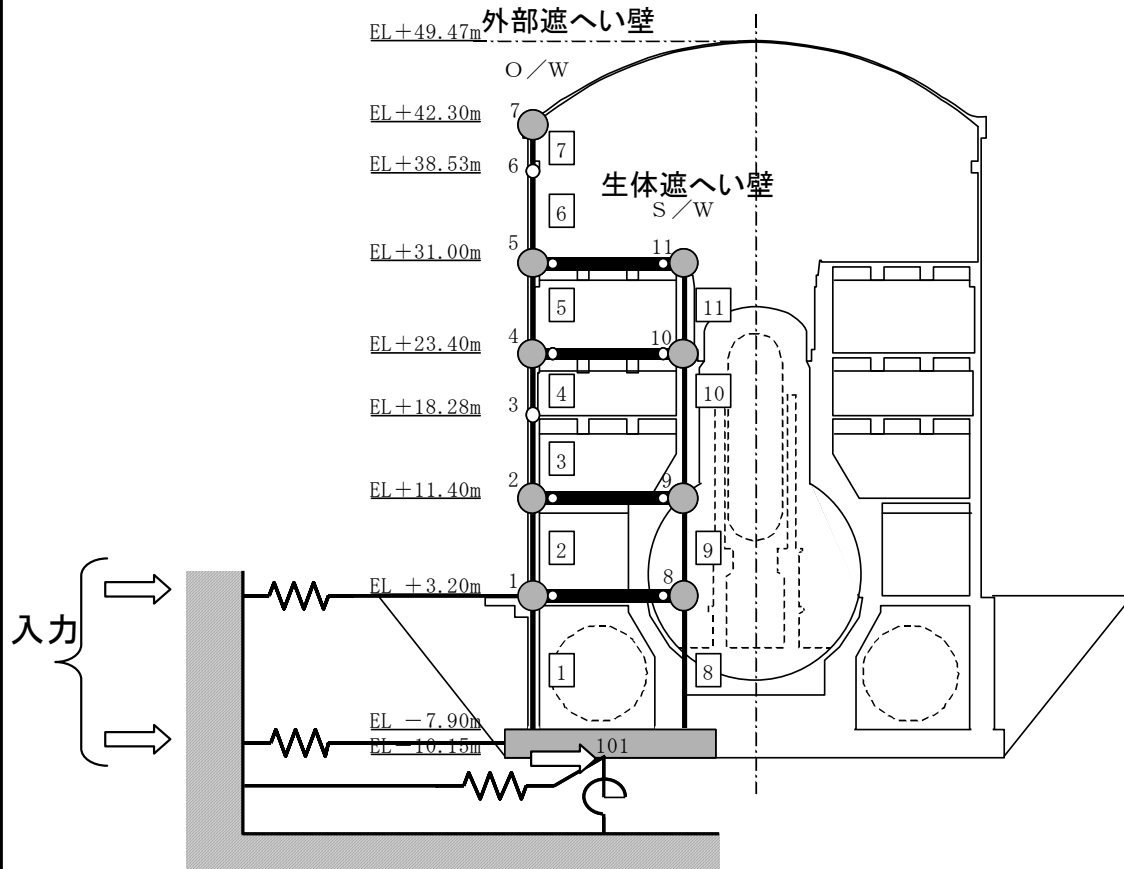
解放基盤表面で定義される基準地震動 S_s を用いて一次元波動論により算定した基礎下端および側面ばね位置での応答波を解析モデルに入力



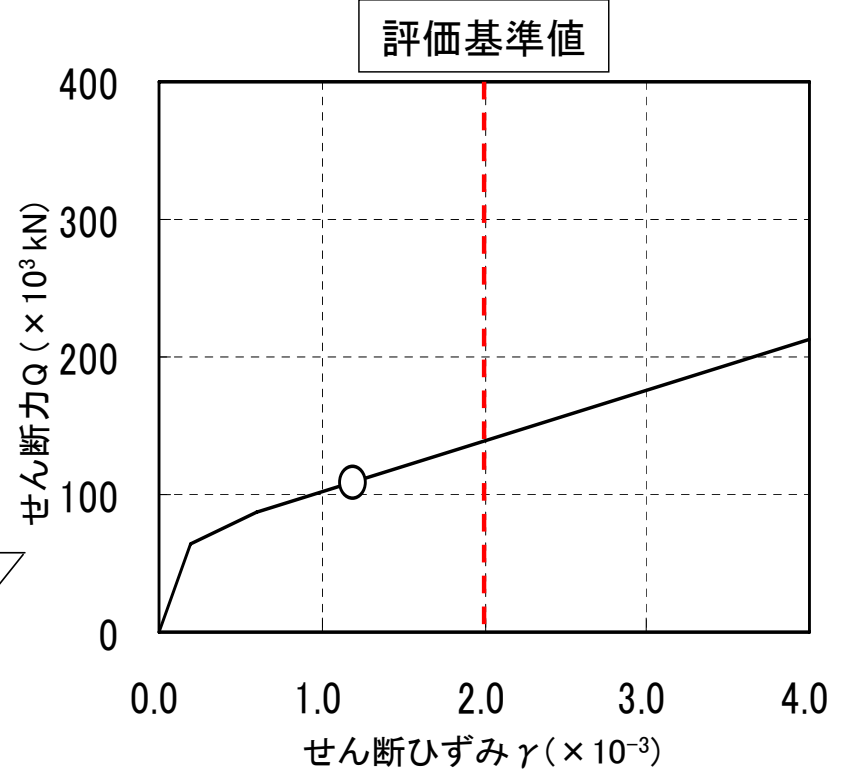
建屋のせん断ひずみを算出



耐震壁の最大せん断ひずみと評価基準値を比較



解析モデルの概念図

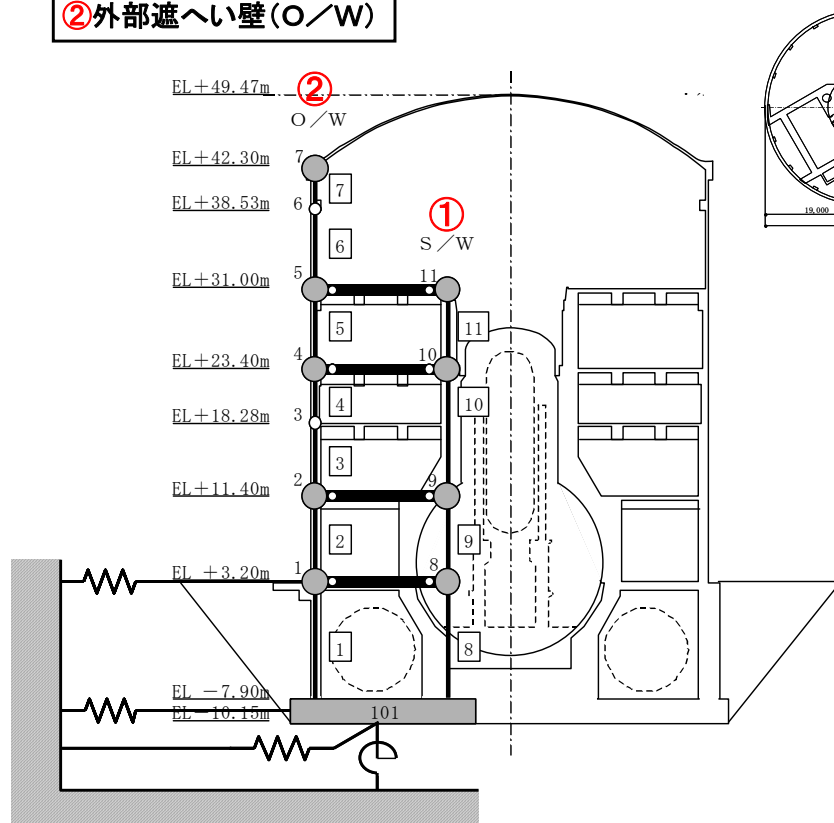


(南北方向, O/W)

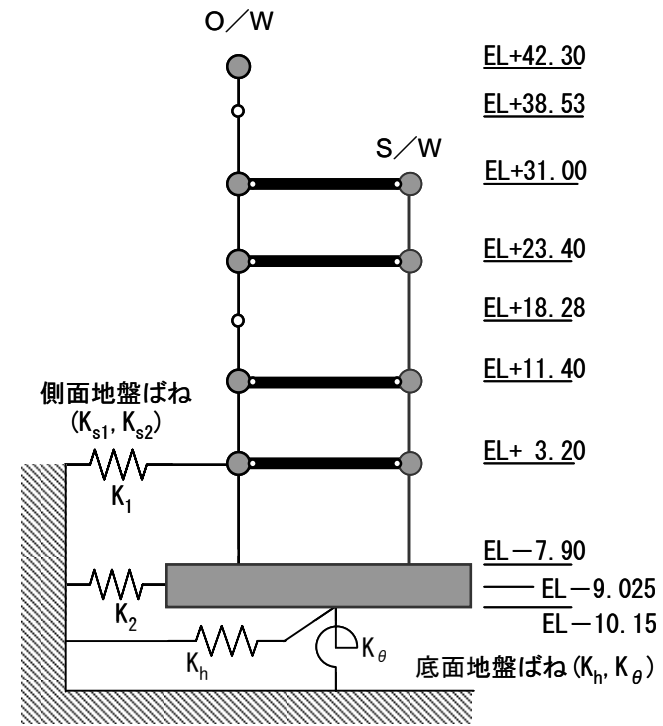
評価結果のイメージ

【凡 例】

- ① 生体遮へい壁(S/W)
- ② 外部遮へい壁(O/W)



原子炉建屋の解析モデルの概念図



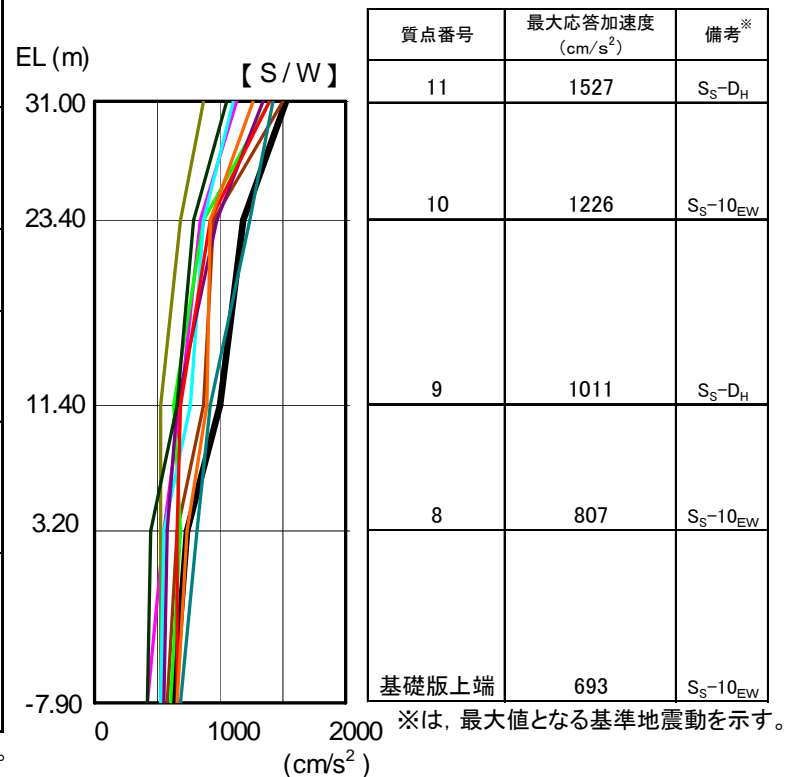
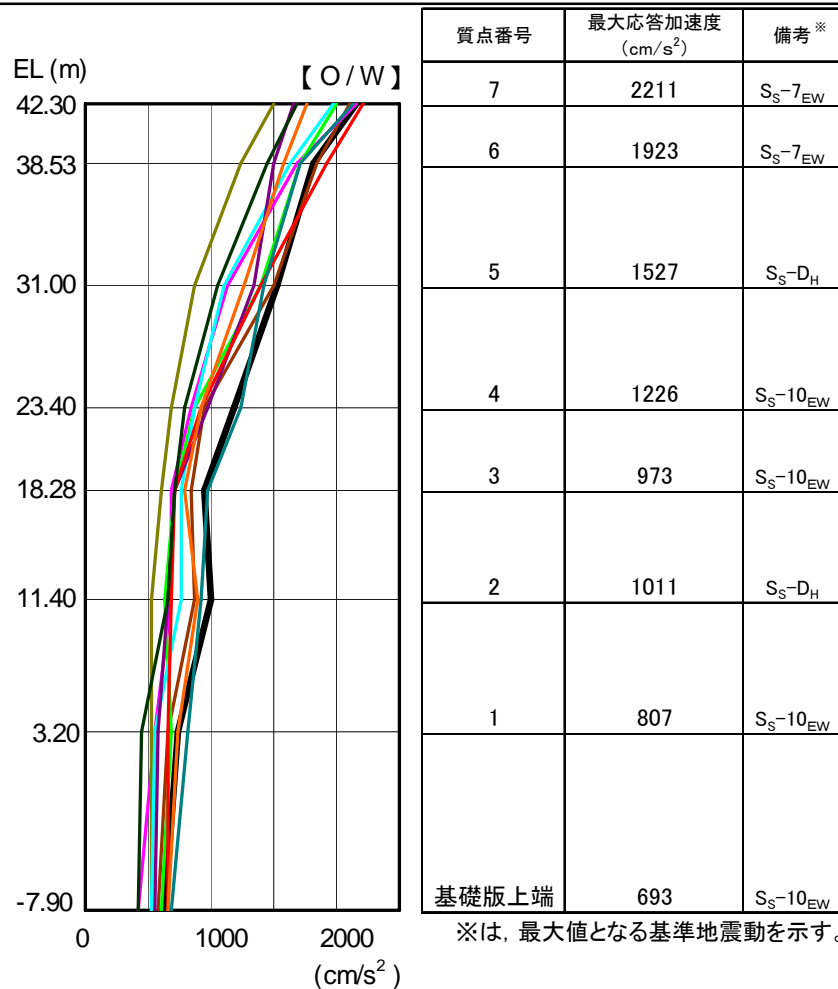
原子炉建屋の解析モデル(水平方向)

地盤定数

S波速度 (m/s)	せん断弾性係数 (kN/mm ²)	単位体積重量 (kN/m ³)	ポアソン比 ν
1600	6.14	23.5	0.38

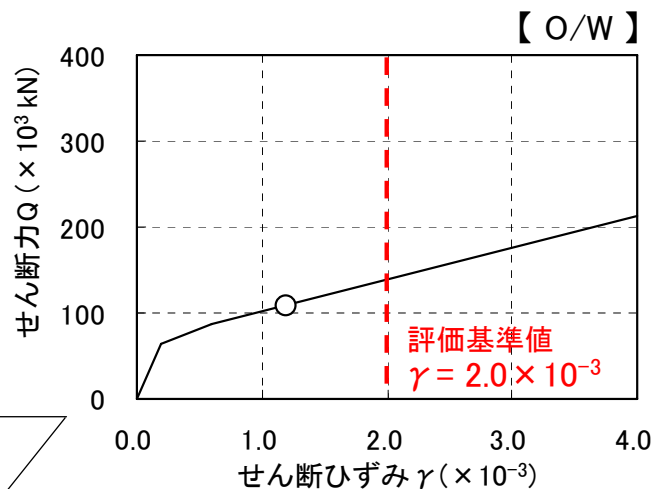
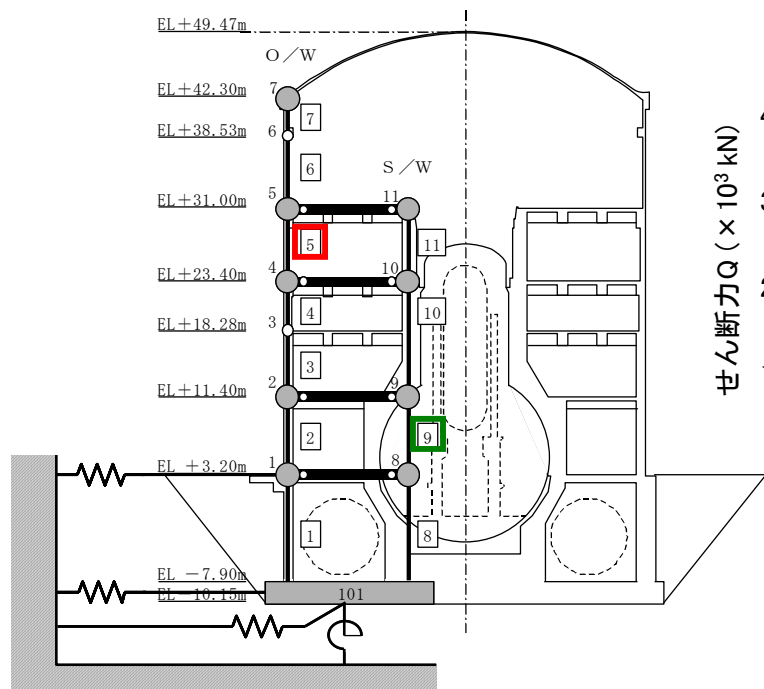
建物の材料定数及び減衰定数

		ヤング係数 (kN/mm ²)	せん断弾性係数 (kN/mm ²)	減衰定数 (%)
鉄筋コンクリート 構造物	地上部	22.1 ($F_c=22.1\text{N/mm}^2$)	9.21	5
	地下部 (EL+3.2m以下)	22.8 ($F_c=24.5\text{N/mm}^2$)	9.50	5

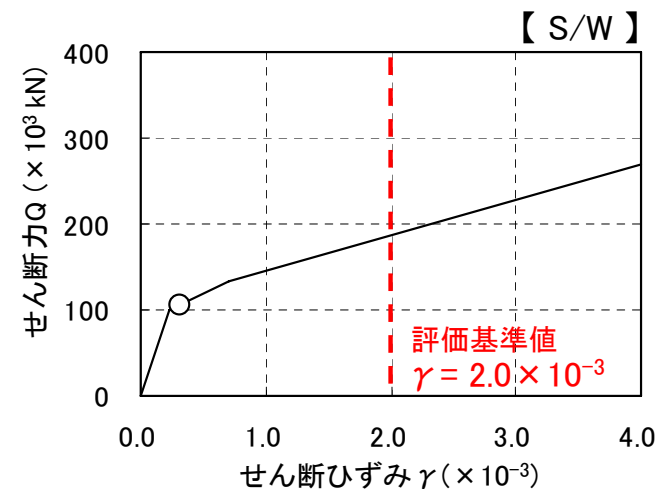


- 【凡 例】**
- ◇ 応答スペクトルによる基準地震動 — S_S-D_H
 - ◇ 断層モデルによる基準地震動
 - 浦底—内池見断層 — S_S-1_{EW}
 - 白木—丹生断層 — S_S-4_{EW}
 - C断層 — S_S-7_{EW}
 - 和布—干飯崎沖～甲楽城断層 — S_S-9_{EW}
 - S_S-2_{EW}
 - S_S-5_{EW}
 - S_S-8_{EW}
 - S_S-3_{EW}
 - S_S-6_{EW}
 - S_S-10_{EW}

最大加速度 (EW方向)



Ss-5_{NS}に対するせん断ひずみ評価結果



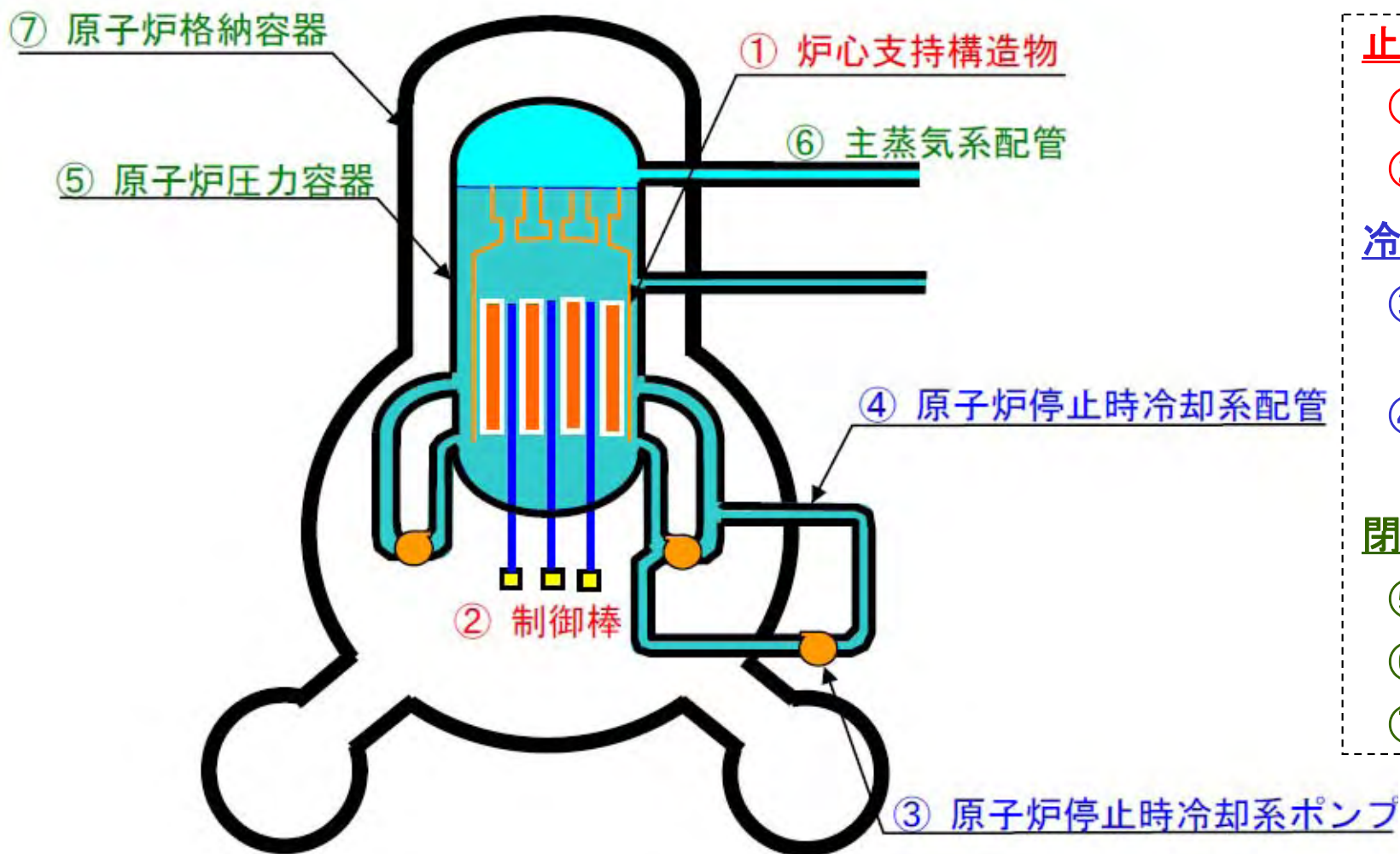
Ss-3_{NS}に対するせん断ひずみ評価結果

原子炉建屋評価結果

評価項目	解析方向	部位	評価結果										
			S _S -D _H	S _S -1	S _S -2	S _S -3	S _S -4	S _S -5	S _S -6	S _S -7	S _S -8	S _S -9	S _S -10
せん断ひずみ $\gamma (\times 10^{-3})$	NS方向* (入力)	O/W (外部遮へい壁)	1.165 (部材5)	0.82 (部材5)	0.662 (部材5)	1.111 (部材5)	0.485 (部材5)	1.197 (部材5)	0.913 (部材5)	0.652 (部材5)	0.869 (部材5)	0.221 (部材3)	0.432 (部材3)
		S/W (生体遮へい壁)	0.232 (部材9)	0.231 (部材9)	0.201 (部材9)	0.320 (部材9)	0.183 (部材9)	0.249 (部材9)	0.223 (部材9)	0.188 (部材9)	0.212 (部材9)	0.105 (部材9)	0.141 (部材9)
	EW方向* (入力)	O/W (外部遮へい壁)	同上	0.953 (部材5)	0.433 (部材3)	0.240 (部材3)	0.774 (部材5)	0.435 (部材3)	0.717 (部材5)	0.863 (部材5)	0.601 (部材5)	0.348 (部材5)	0.995 (部材5)
		S/W (生体遮へい壁)	同上	0.198 (部材9)	0.152 (部材9)	0.114 (部材9)	0.185 (部材9)	0.172 (部材9)	0.183 (部材9)	0.180 (部材9)	0.175 (部材9)	0.160 (部材9)	0.301 (部材9)

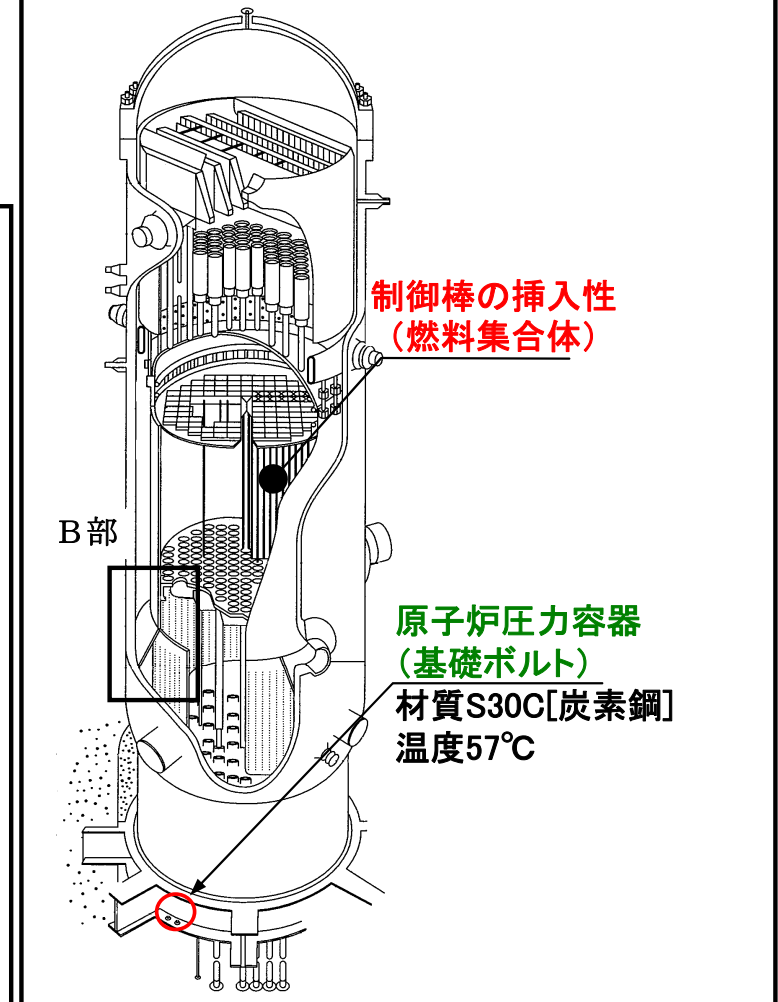
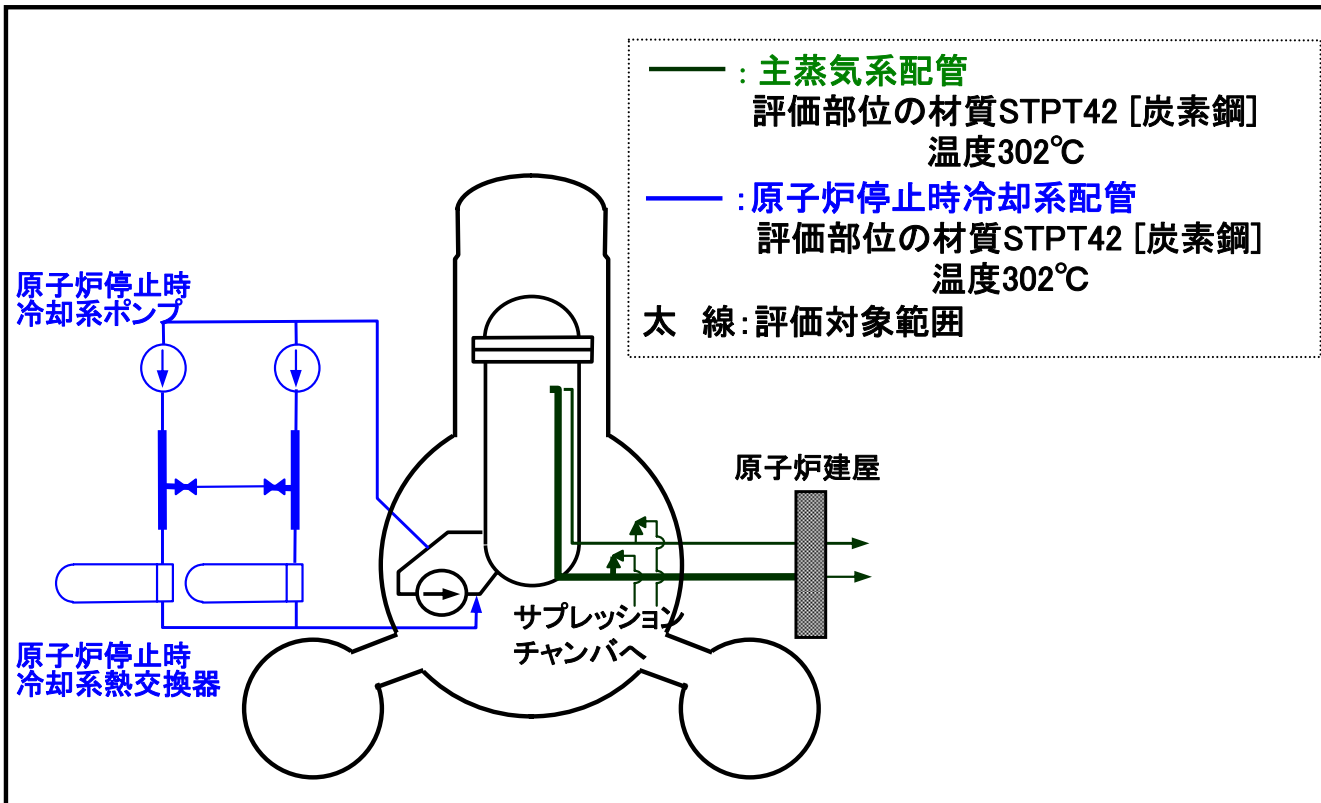
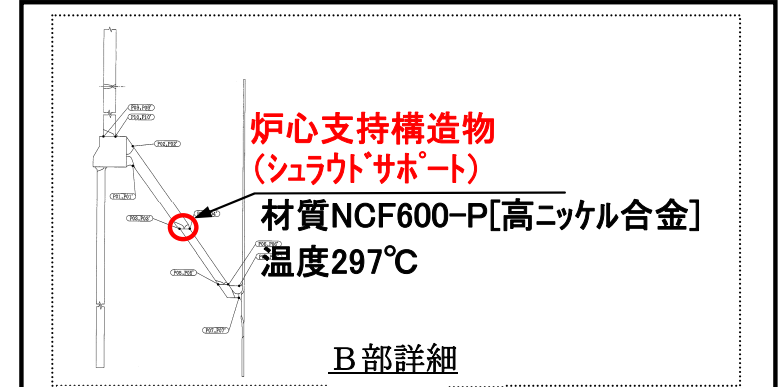
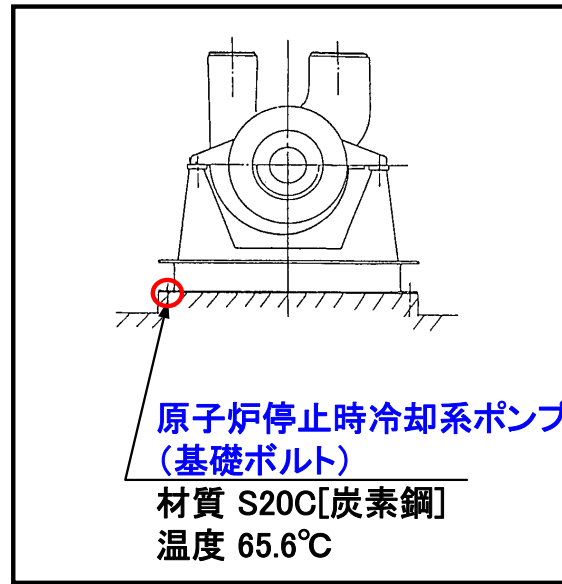
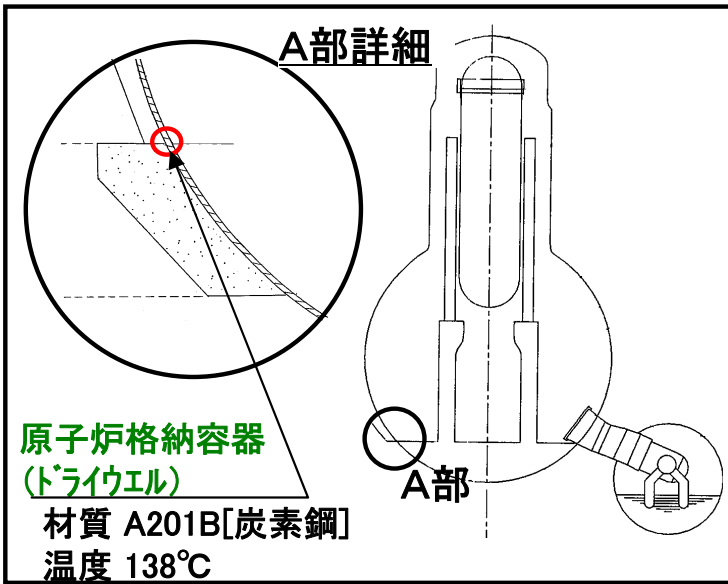
*建屋解析モデルは、方向性なし

新耐震指針によるSクラスの施設のうち、原子炉を「止める」、「冷やす」、放射性物質を「閉じ込める」に係る安全上重要な機能を有する主要な施設を対象としている。

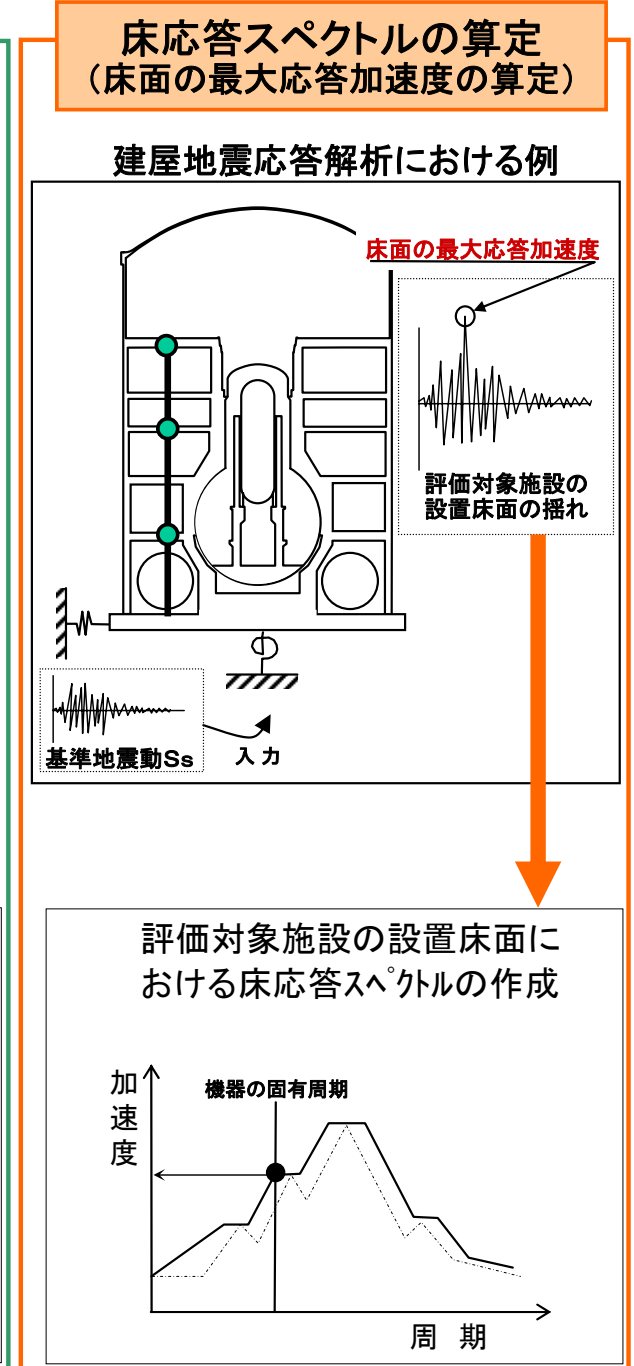
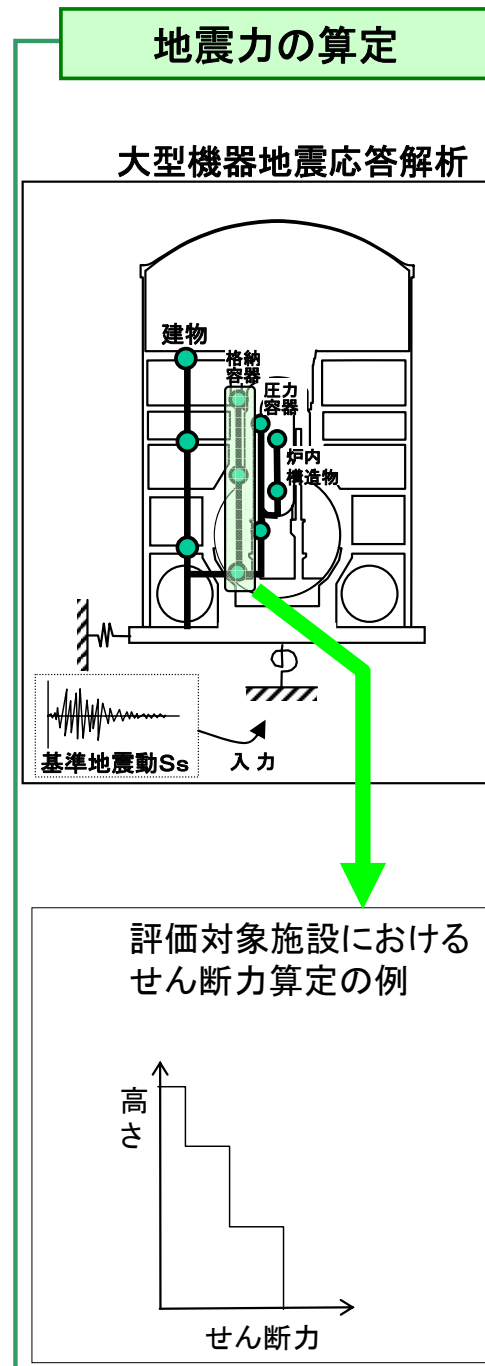
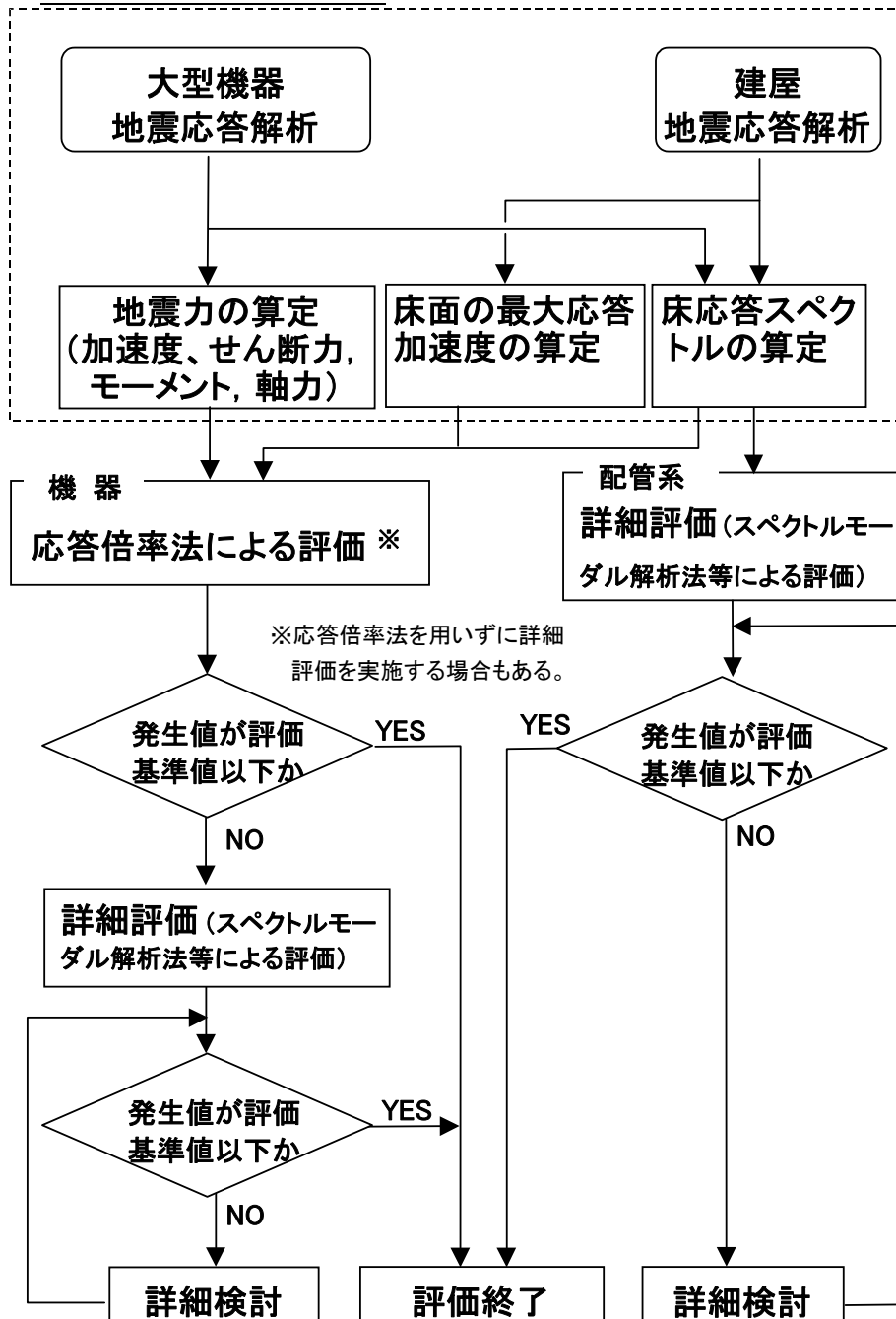


- 止める**
- ① 炉心支持構造物
 - ② 制御棒
- 冷やす**
- ③ 原子炉停止時冷却系ポンプ
 - ④ 原子炉停止時冷却系配管
- 閉じ込める**
- ⑤ 原子炉压力容器
 - ⑥ 主蒸気系配管
 - ⑦ 原子炉格納容器

4. (1) 評価方針 (評価対象施設の評価部位) — 敦賀1号機 —



<BWRにおける評価の流れ>



応答比は以下による。

応答比A1 床面の最大応答加速度または床応答スペクトルより得られる加速度を用いて
 応答比を算定

$$\text{応答比} = \frac{\text{基準地震動}S_s\text{による加速度}}{\text{設計時の加速度}} \quad \left[\text{各加速度は、水平加速度と鉛直加速度との二乗和平方根より得られる値を用いる。} \right]$$

$$\text{応答比} = \frac{\sqrt{A_{SsH}^2 + (1 + A_{SsV})^2}}{\sqrt{A_{S0H}^2 + (1 + A_{S0V})^2}}$$

記号説明

- A_{SsH} : S_s による水平加速度
- A_{SsV} : S_s による鉛直加速度
- A_{S0H} : 設計時の水平加速度
- A_{S0V} : 設計時の鉛直加速度

応答比A2 大型機器地震応答解析により得られる地震力 (加速度, せん断力, モーメント, 軸力) を用いて応答比を算定

$$\text{応答比} = \frac{\text{基準地震動}S_s\text{による地震力}}{\text{設計時の地震力}} \quad \left[\text{大型機器地震応答解析により得られる地震力(加速度, せん断力, モーメント, 軸力)から算定される応答比の最大値を用いる。} \right]$$

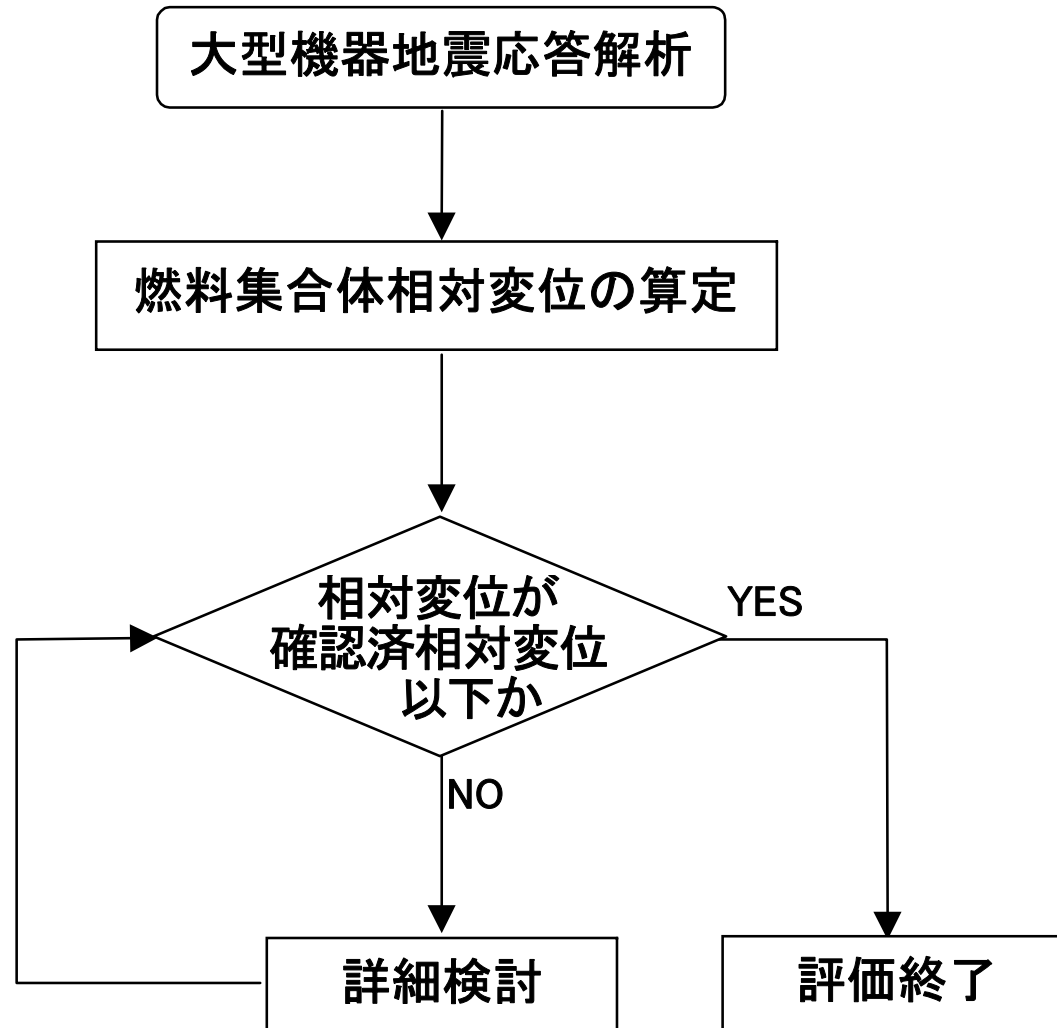
$$\text{応答比} = \text{MAX} \left(\frac{\text{加速度}_{Ss}}{\text{加速度}_{S0}}, \frac{\text{せん断力}_{Ss}}{\text{せん断力}_{S0}}, \frac{\text{モーメント}_{Ss}}{\text{モーメント}_{S0}}, \frac{\text{軸力}_{Ss}}{\text{軸力}_{S0}} \right)$$

加速度による応答比の算定は応答比A1の方法と同じ

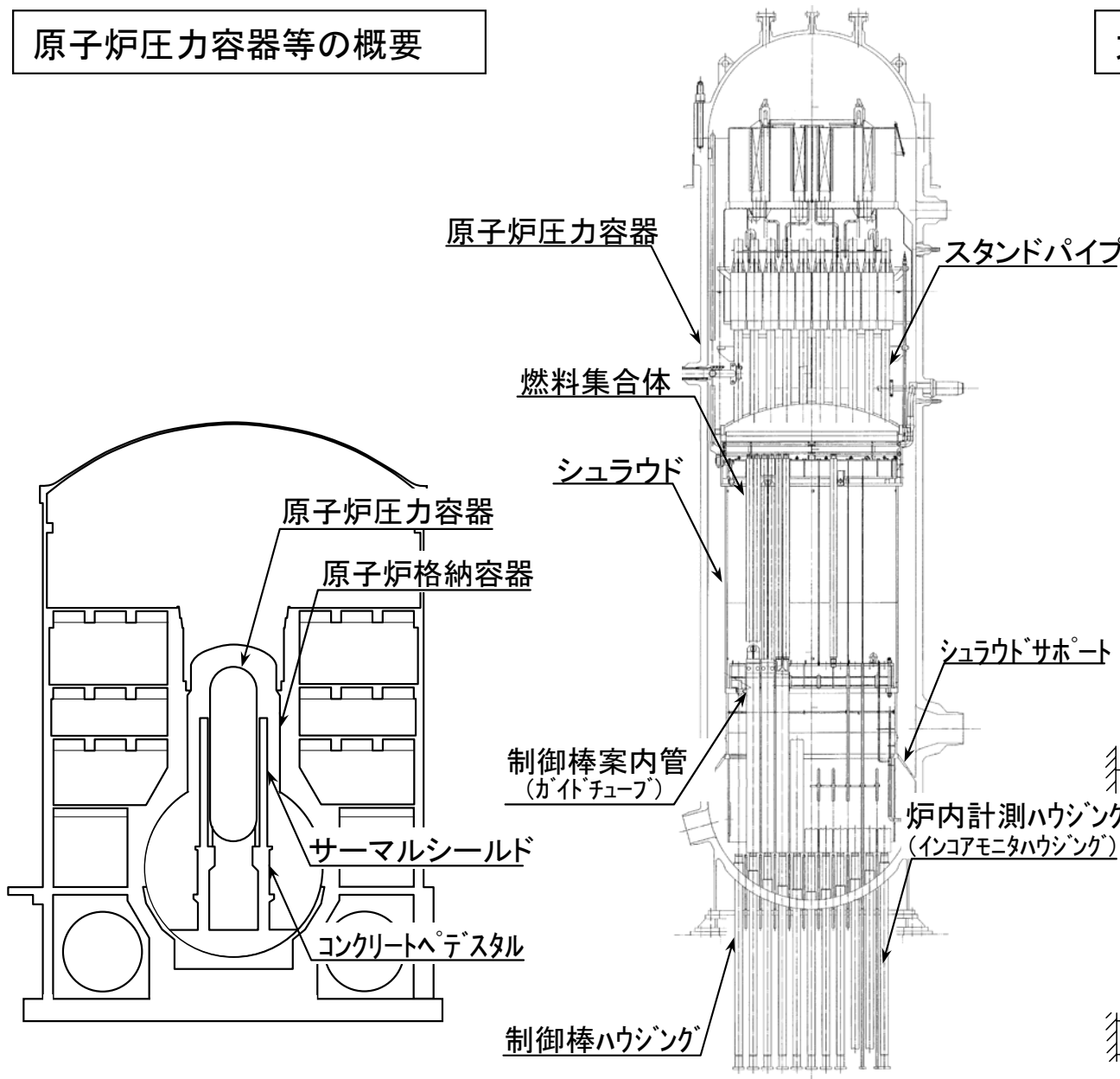
$$\text{応答比} = \frac{\sqrt{A_{SsH}^2 + (1 + A_{SsV})^2}}{\sqrt{A_{S0H}^2 + (1 + A_{S0V})^2}}$$

添字説明

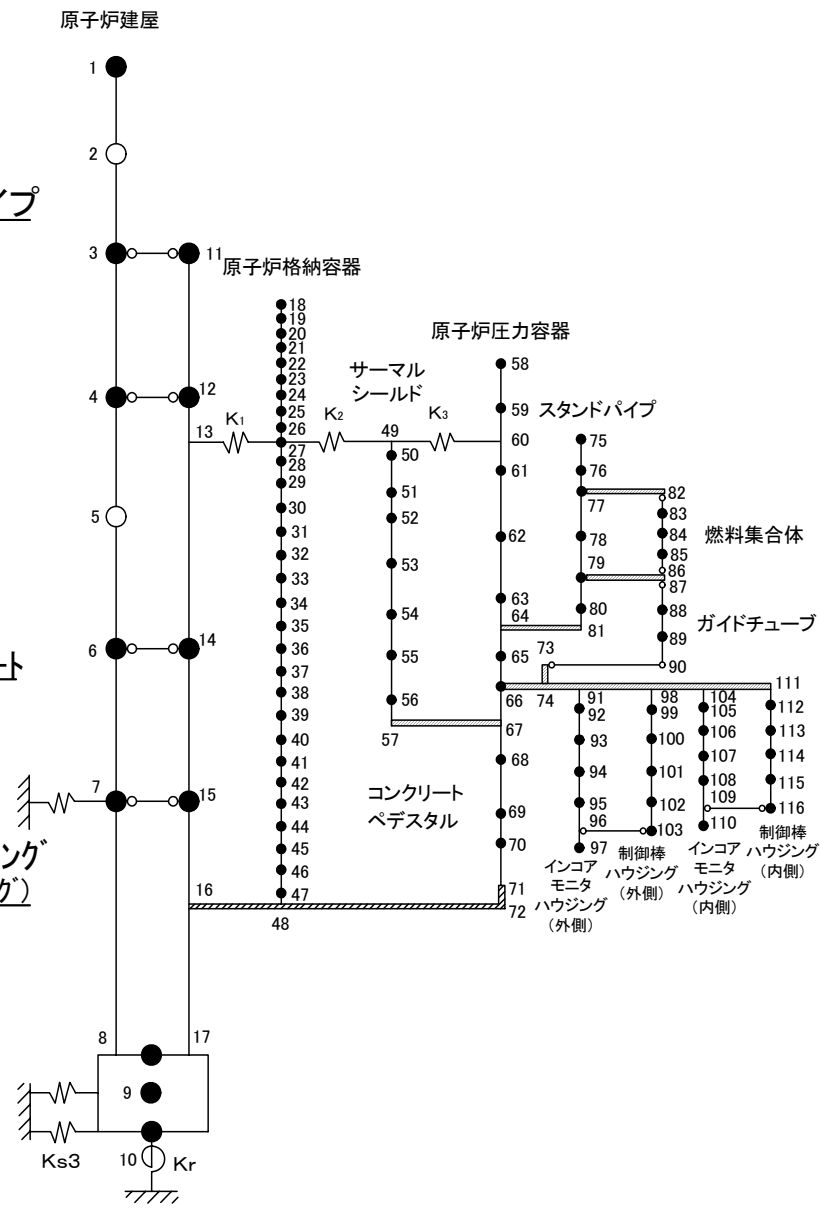
- S_s : S_s によるの地震力
- S_0 : 設計時の地震力



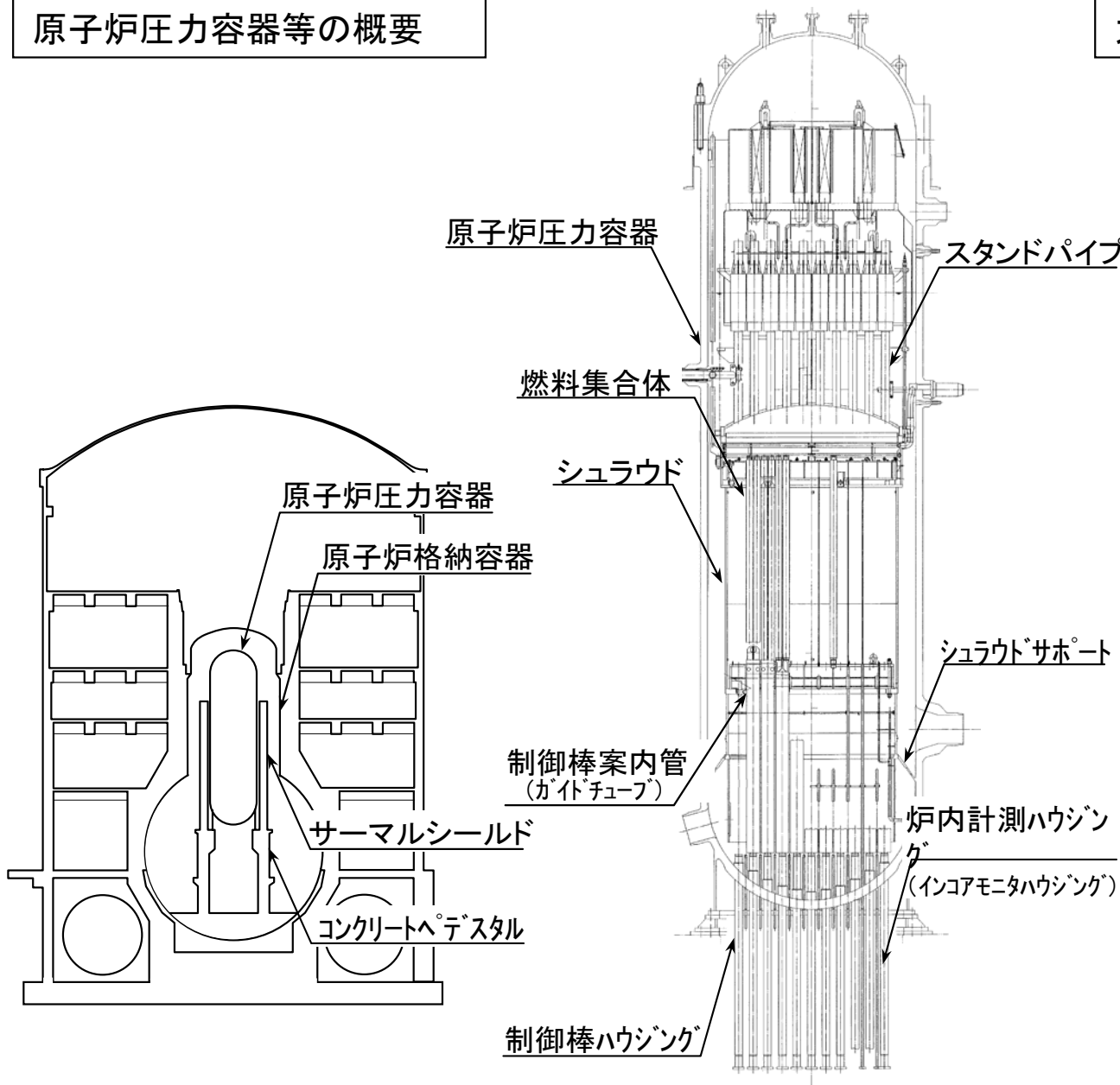
原子炉圧力容器等の概要



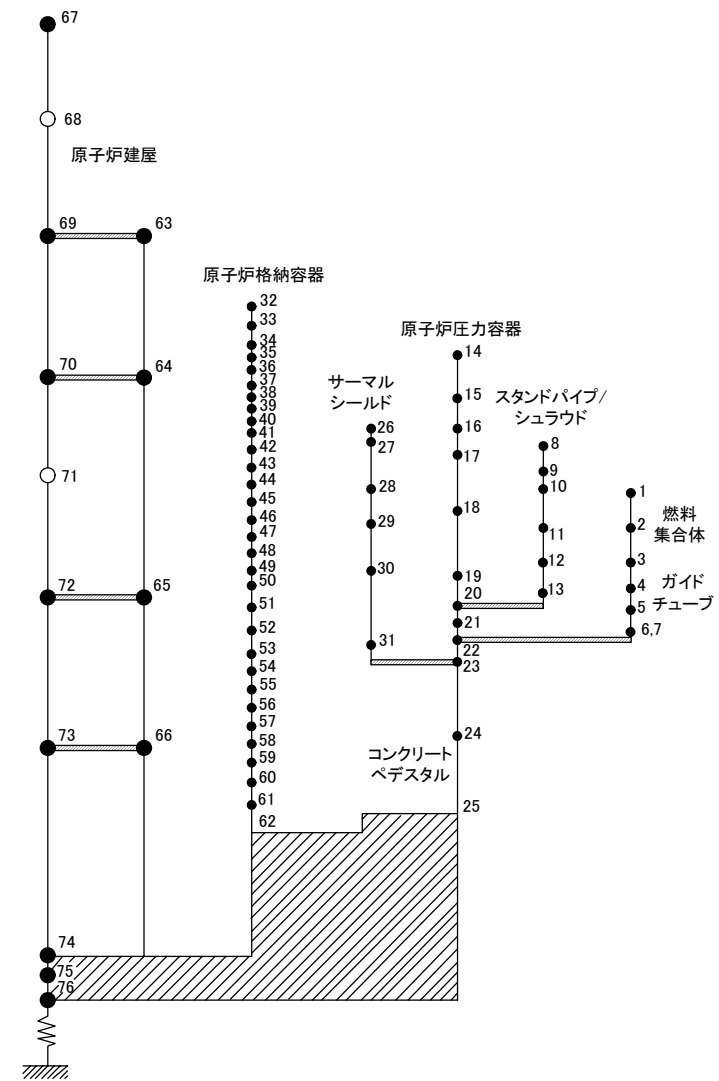
大型機器地震応答解析モデル(水平方向)



原子炉圧力容器等の概要



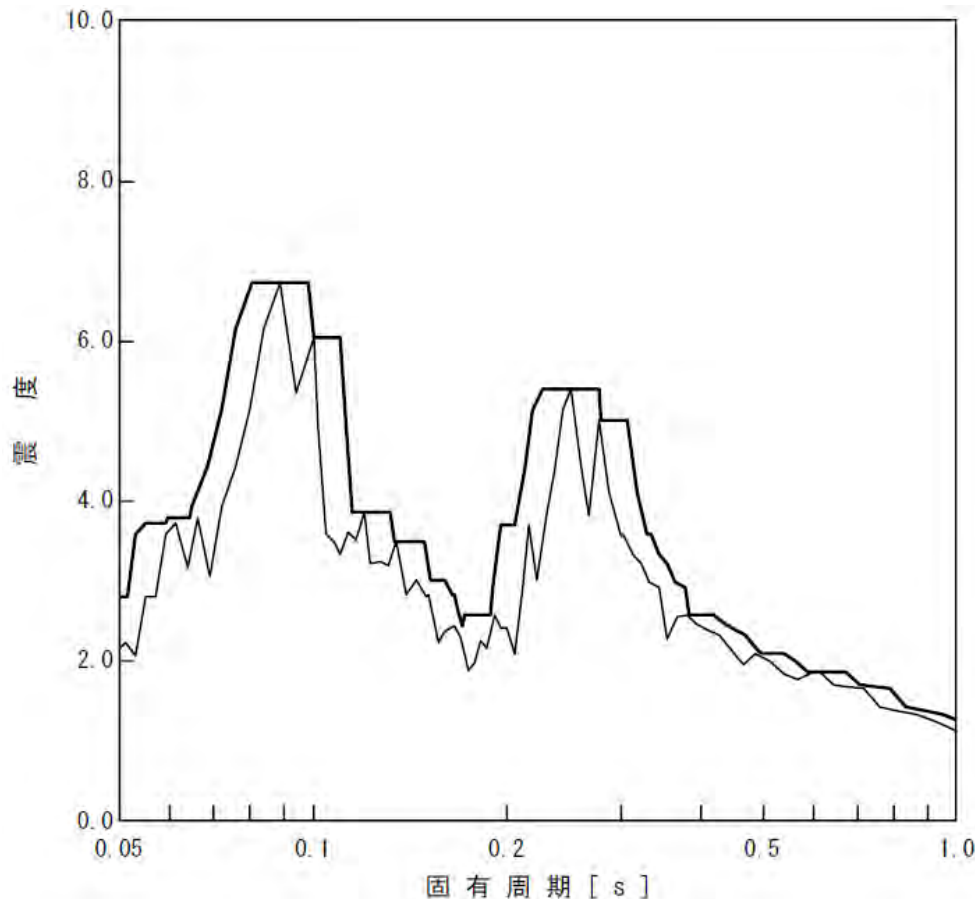
大型機器地震応答解析モデル(鉛直方向)



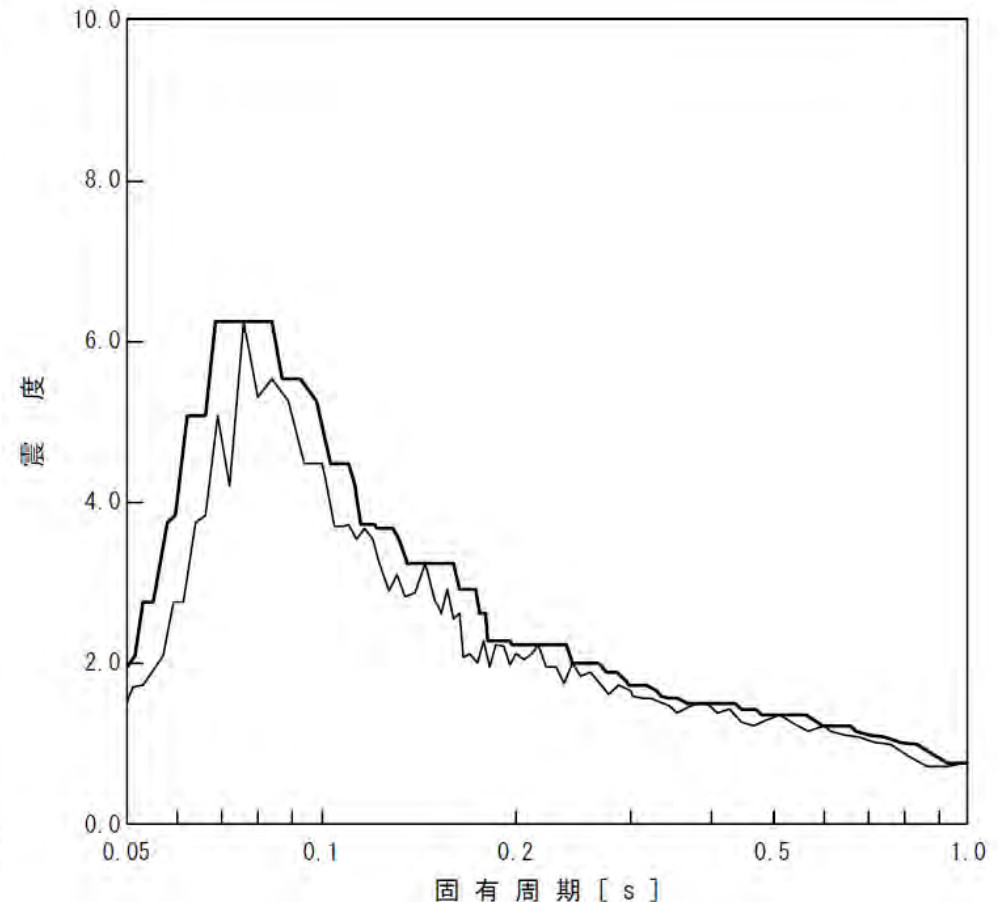
床応答スペクトルは、建物の地震応答解析、または建屋と大型機器を連成した解析モデルによる地震応答解析で得られた床応答時刻歴を用いて水平方向及び鉛直方向について算定

算定に当たっては、地盤や建屋の物性値のばらつきが床応答に与える影響を考慮し、「原子力発電所耐震設計技術指針 JEAG4601-1987」を参考に周期軸方向に±10%拡幅する。

なお、断層モデル波においては、全断層モデル波を包絡した床応答スペクトルにて評価を実施した。



原子炉建屋水平方向床応答スペクトル
(応答スペクトル波 EL.+11.4m 減衰1.5%)



原子炉建屋鉛直方向床応答スペクトル
(応答スペクトル波 EL.+11.4m 減衰1.5%)

減衰定数は、原則として「原子力発電所耐震設計技術指針 JEAG4601－1991追補版」に規定された値とし、試験等で妥当性が確認された値も評価に用いる。

対象施設	減衰定数(%)	
	水平方向	鉛直方向
溶接構造物	1.0	1.0
ポンプ・ファン等の機械装置	1.0	1.0
燃料集合体	7.0	1.0
配管系	0.5 ~ 3.0	0.5 ~ 3.0

配管系の減衰定数

配管区分		減衰定数(%)*	
		保温材有	保温材無
I	スナツバ及び架構レストレイント支持主体の配管系で、その支持具(スナツバ又は架構レストレイント)の数が4個以上のもの	<u>3.0</u>	2.0
II	スナツバ、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	<u>2.0</u>	1.0
III	Uボルトを有する配管で、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	<u>3.0</u>	<u>2.0</u>
IV	配管区分I、II及びIIIに属さないもの	<u>1.5</u>	0.5

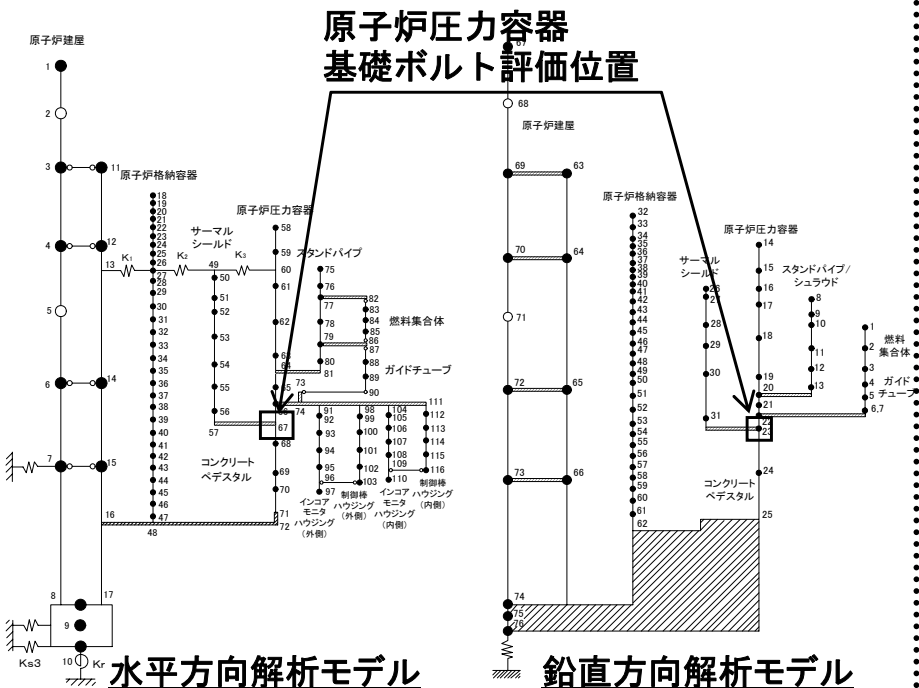
* : 「原子力発電所耐震設計技術指針 JEAG4601-1991 追補版」から変更した箇所を下線で示す。

4. (4) 評価結果 (原子炉圧力容器)

— 敦賀1号機 —

基準地震動 S_s による大型機器地震応答解析により、評価部位におけるせん断力、モーメント及び軸力を求め、各荷重のつり合い計算により基準地震動 S_s による発生値を算定する。

大型機器地震応答解析



基礎ボルトの応力算定

下図において、以下の関係が成り立っており、 σ_t , σ_c , α を繰り返し計算により求める。

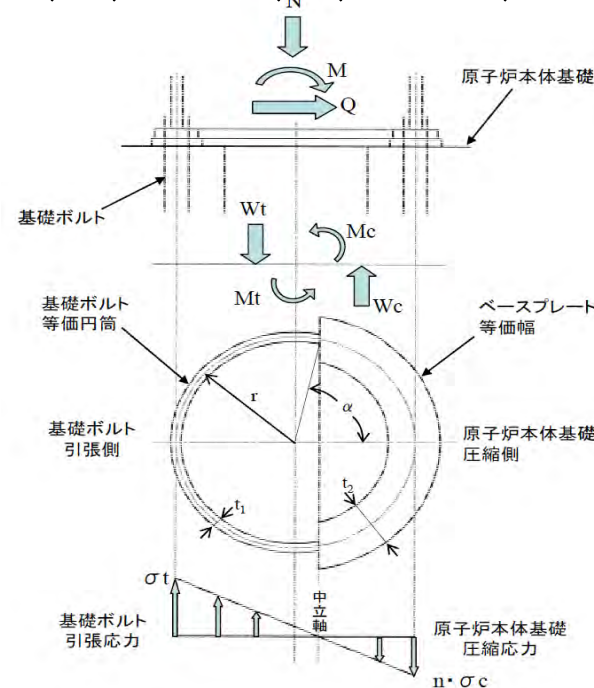
○軸力 N と曲げモーメント M のつり合い

$$N + W_t - W_c = 0$$

$$M - N \cdot r \cdot \cos \alpha - M_t - M_c = 0$$

○中立軸の位置と応力の関係

$$\sigma_t / (n \cdot \sigma_c) = (1 + \cos \alpha) / (1 - \cos \alpha)$$



基準地震動 S_s の荷重を算出

	せん断力 H (kN)	曲げモーメント M (kN・m)	軸力 N (kN)
応答スペクトル波	6830	37300	9860
断層モデル波	8960	56500	6650

地震以外の荷重

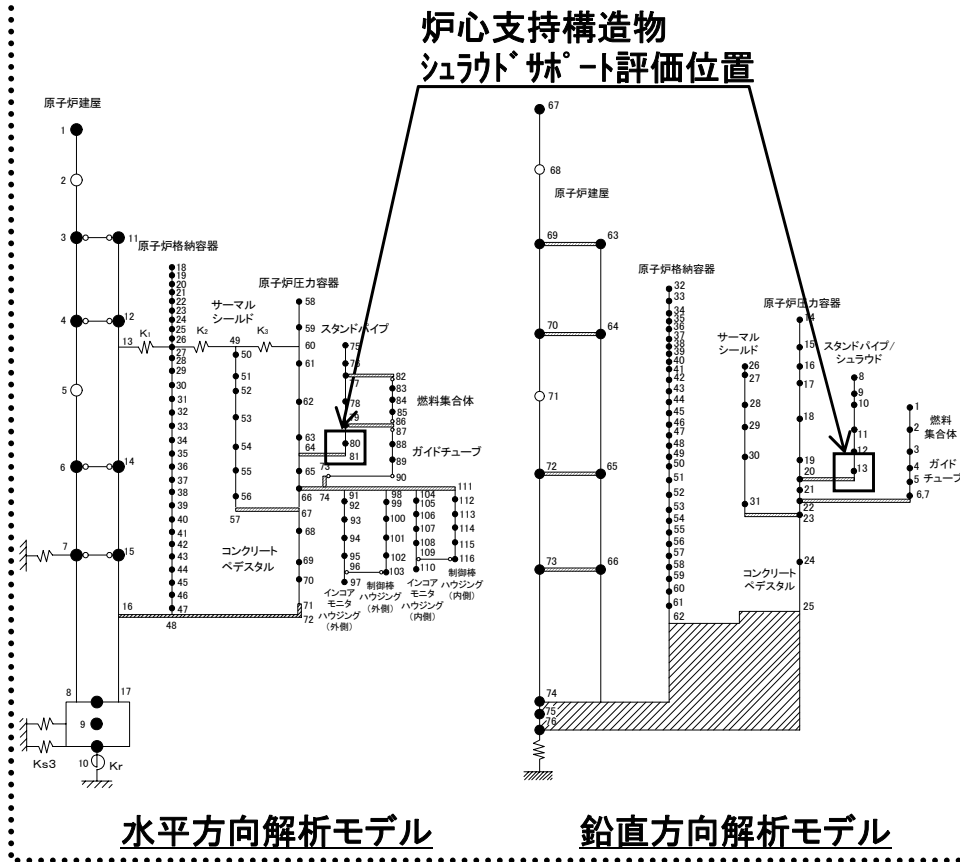
	軸力 N (kN)
地震以外	8630 (最大) 7560 (最小)

	発生値 (MPa)	評価基準値 (MPa)
応答スペクトル波	140	207
断層モデル波	191	

4. (4) 評価結果 (炉心支持構造物①) — 敦賀1号機 —

基準地震動 S_s による大型機器地震応答解析により、評価部位におけるせん断力、モーメント及び軸力を求め、FEM解析(弾性解析)で応答スペクトル波による発生値を算定する。また断層モデル波による評価は、弾塑性解析により発生値を算定する。

大型機器地震応答解析

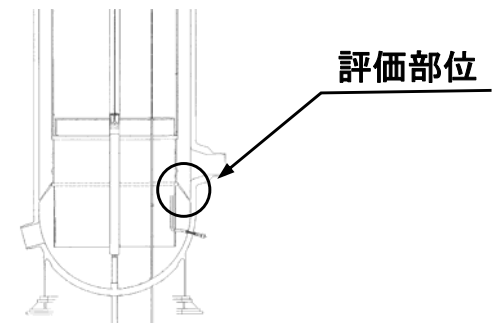


基準地震動 S_s の荷重を算出

地震以外の荷重

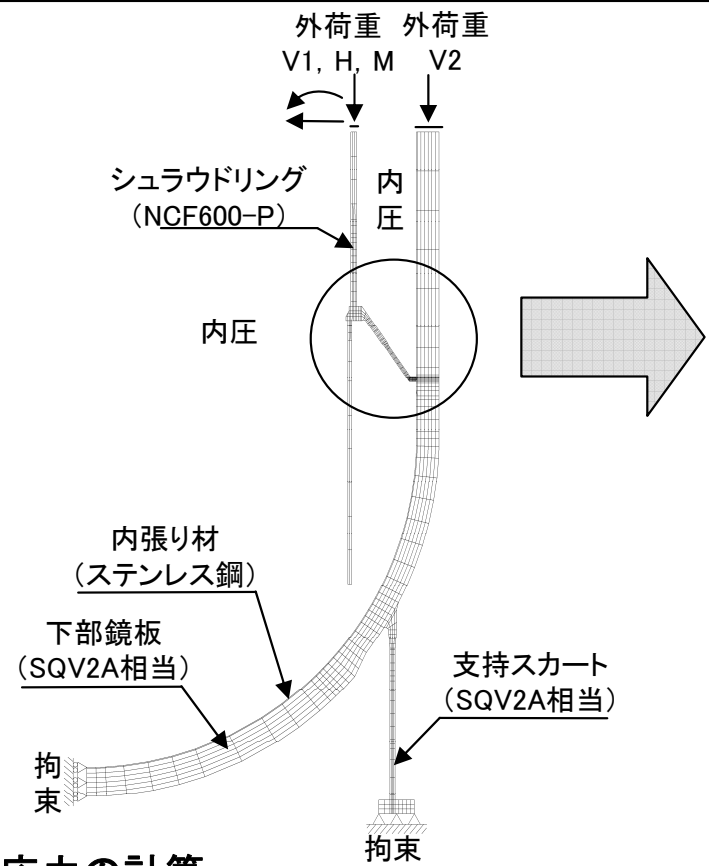
- ・せん断力
- ・モーメント
- ・軸力

シュラウドサポートの応力算定



	発生値	評価基準値
応答スペクトル波	209 MPa	250 MPa
断層モデル波	58200 kN・m	63300 kN・m

4. (4) 評価結果(炉心支持構造物②:応答スペクトル波) — 敦賀1号機 —



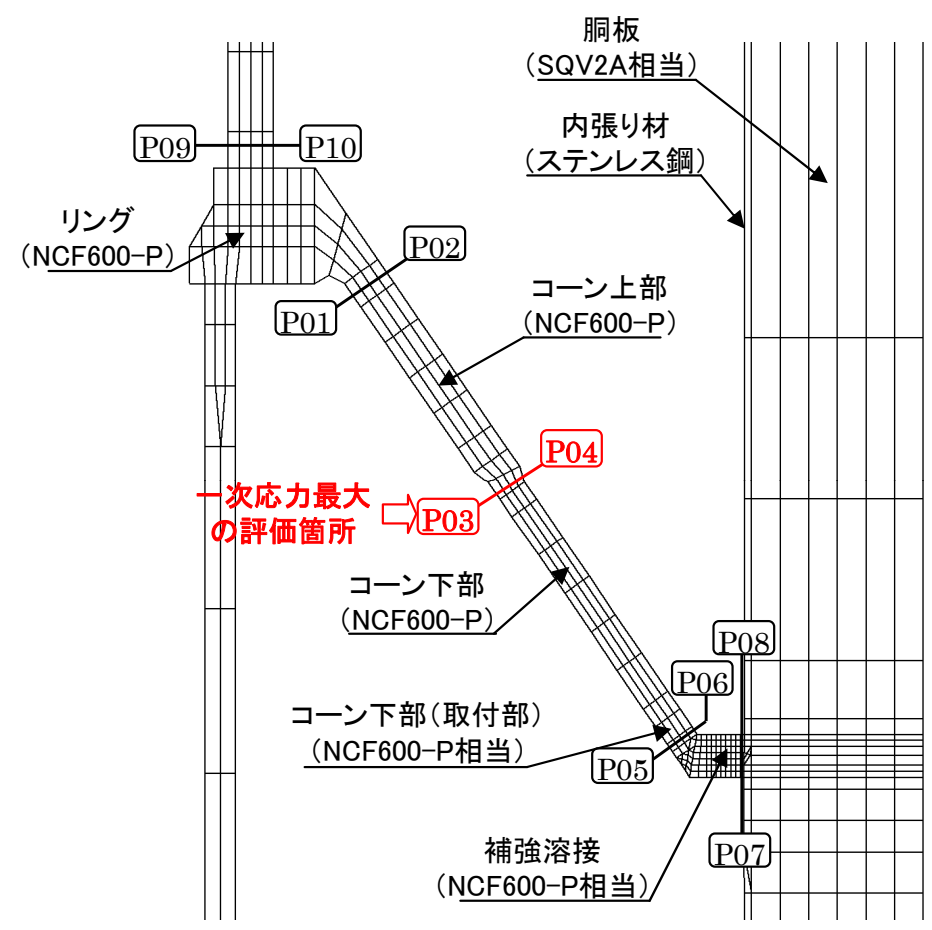
■内圧による応力の計算

解析モデルにRPV内の圧力条件を与え、各評価箇所での1次応力の算出を行う。

■外荷重(地震荷重、機械荷重)による応力の計算

解析モデルに下表の荷重条件を与え、各評価箇所の1次応力の算出を行う。

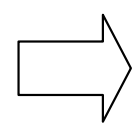
	軸力		せん断力 H (kN)	モーメント M (kN・m)
	V 1 (kN)	V 2 (kN)		
運転状態 I 及び II + 地震荷重	2178	10903	6910	41200



■応力評価

内圧, 外荷重による応力の計算結果を組み合わせて算出した応力が評価基準値を超えないことを確認

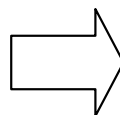
応力分類	発生値 (MPa)	評価基準値 (MPa)
膜応力	209	250



4. (4) 評価結果(炉心支持構造物③:断層モデル波) —敦賀1号機—

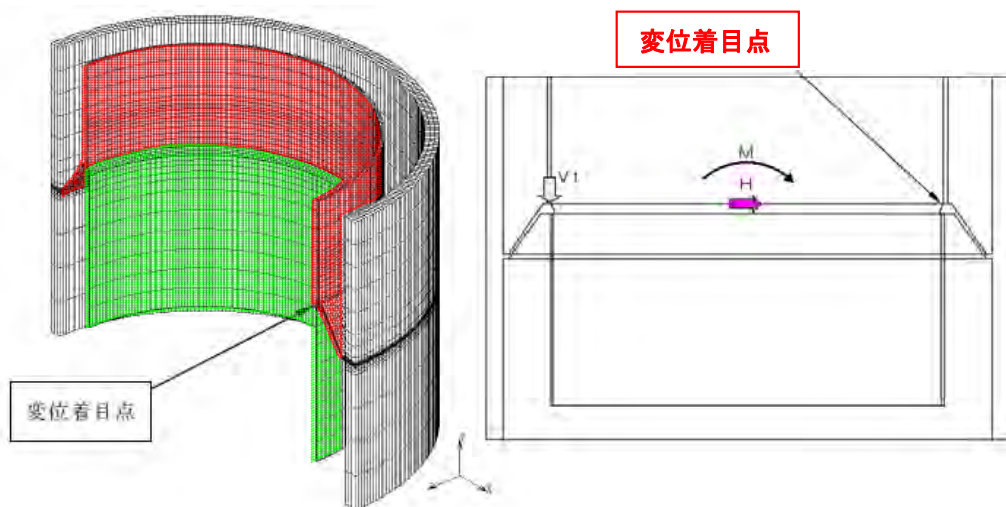
- 地震以外による荷重を負荷する。
- 地震荷重を0から比例増加させて、荷重と変位との関係を求める。

	モーメント M (kN・m)	せん断力 H (kN)	軸力 V1 (kN)
地震荷重	58200	9950	1080
地震以外による荷重	—	—	588



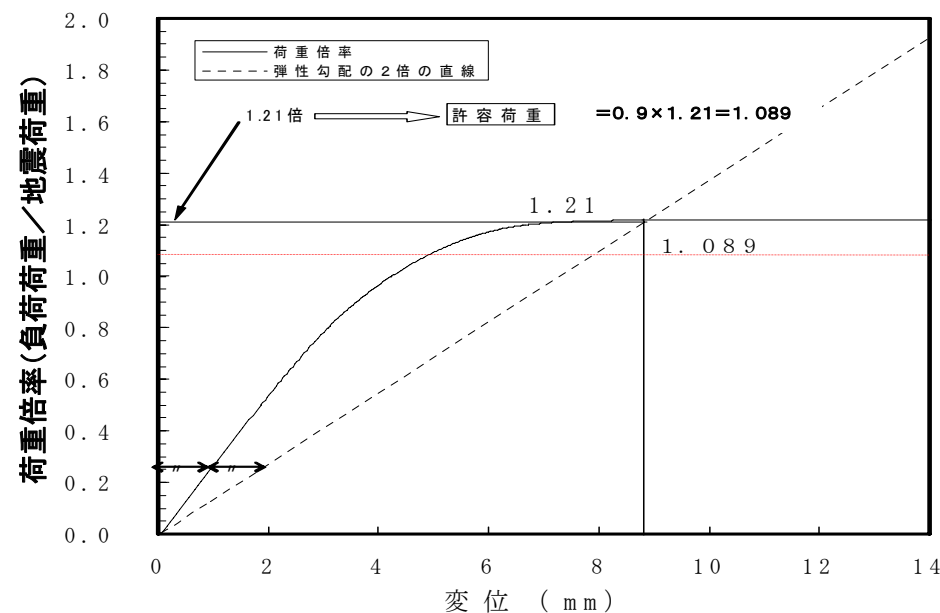
- 地震荷重が評価基準値*を超えないことを確認

	発生値 (kN・m)	評価基準値 (kN・m)
断層モデル波	58200	63300



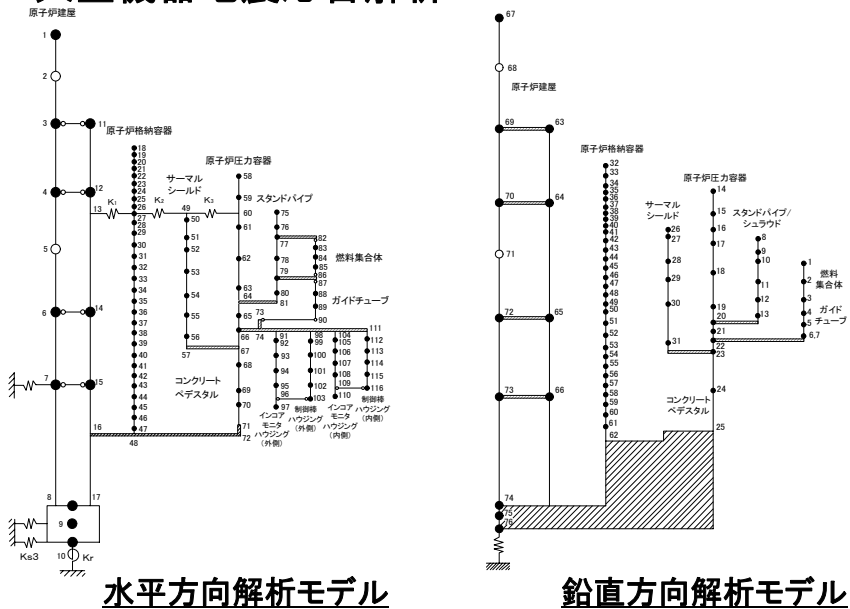
解析モデル図

* 評価基準値: 負荷荷重によるシュラウドの変位の挙動を示した線図(実線)が弾性勾配の2倍の直線(破線)と交わったときの荷重(地震荷重に対して荷重倍率で1.21倍)の0.9倍

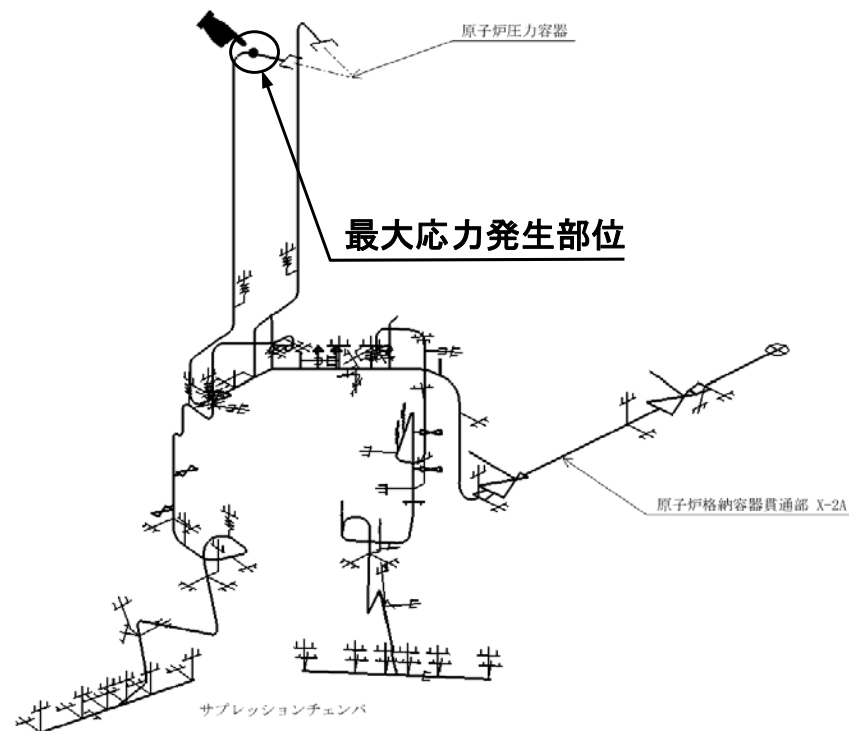


大型機器地震応答解析による床応答スペクトルに基づいて、詳細評価(スペクトルモーダル解析法)を実施し、配管に発生する応力を求める。

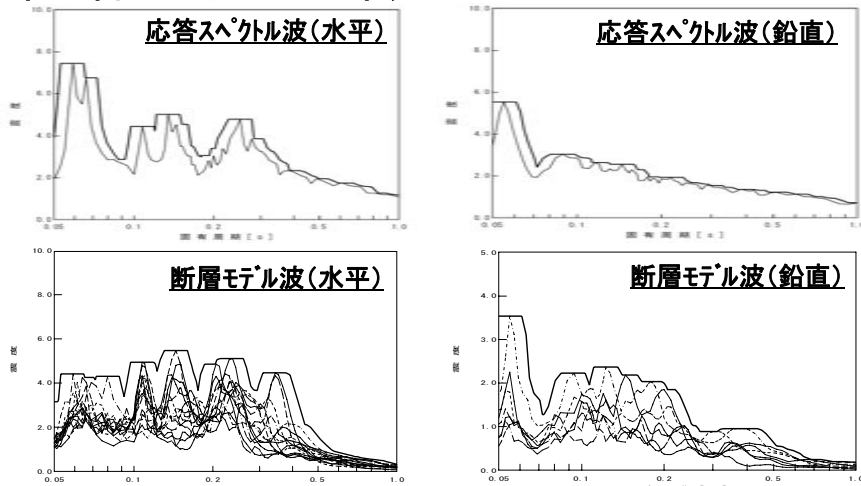
大型機器地震応答解析



発生値の算定 (スペクトルモーダル解析の実施)

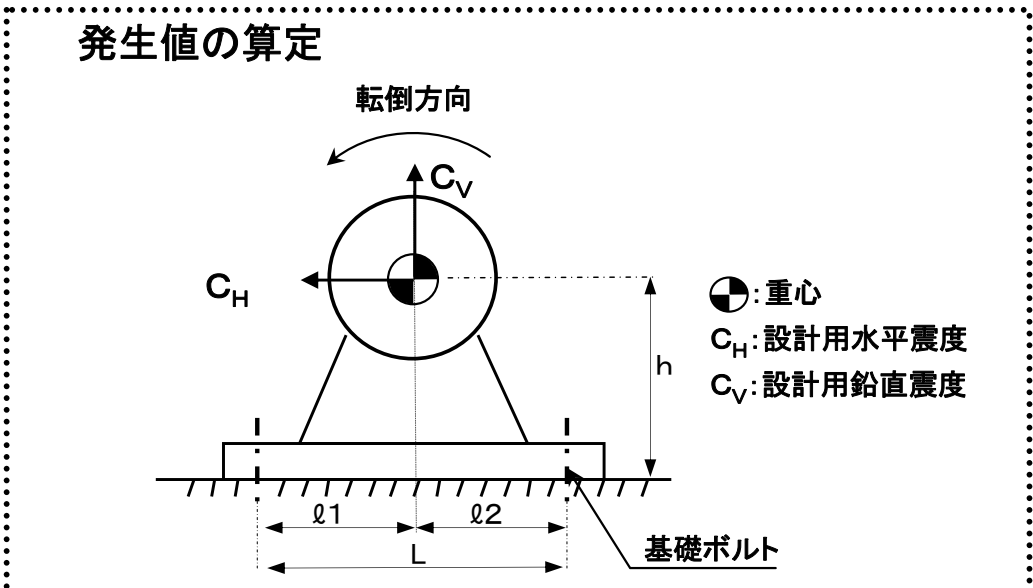
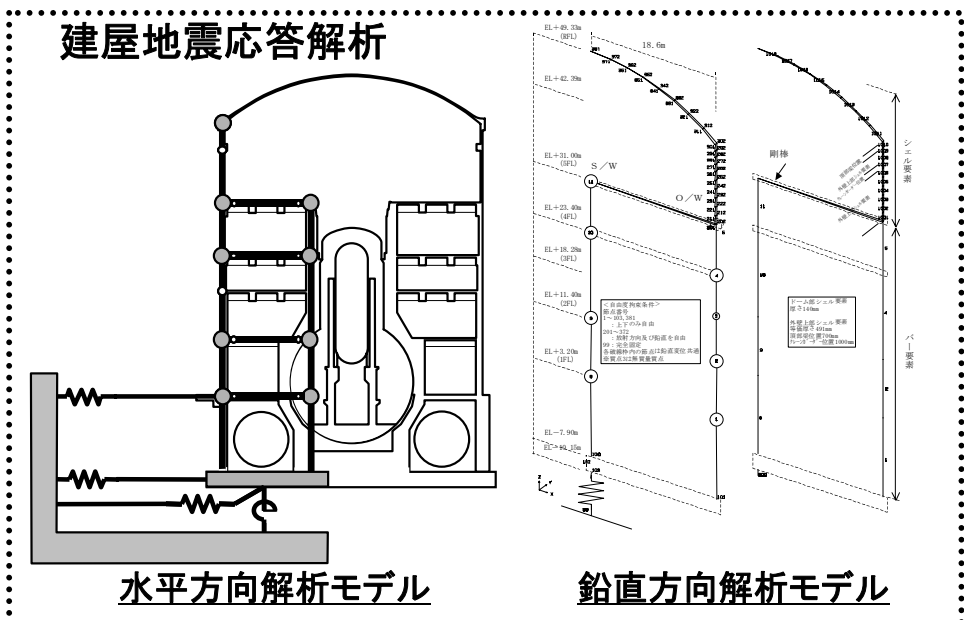


床応答スペクトルの策定



1次応力	発生値 (MPa)	評価基準値 (MPa)
応答スペクトル波	227	364
断層モデル波	231	

基準地震動 S_s による建屋地震応答解析により、機器設置床の最大応答加速度を求め、詳細評価を実施し、発生値を算定する。



最大応答加速度の算定

建屋地震応答解析結果から算定される最大応答加速度を1.2倍したものを設計用震度として用いる。

	設計用水平震度	設計用鉛直震度
応答スペクトル波	0.90	0.95
断層モデル波	0.99	0.95

引張応力 $\sigma_b = F_b / (n_f \cdot A_b)$
せん断応力 $\tau_b = Q_b / (n \cdot A_b)$

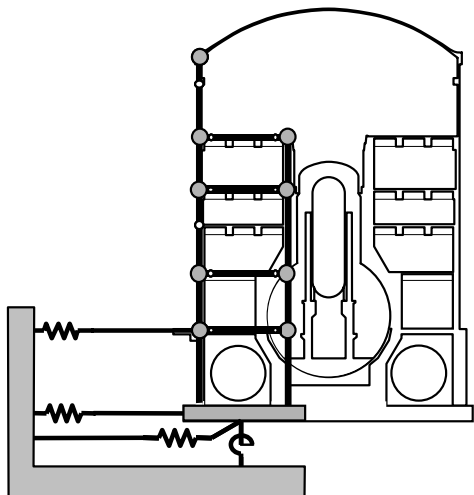
$F_b = \{mg(C_H + C_p)h + Mp - mg(1 - C_V - C_p)l_1\} / L$
 $Q_b = mg(C_H h + C_p)$

せん断応力	発生値 (MPa)	評価基準値 (MPa)
応答スペクトル波	12	152
断層モデル波	13	

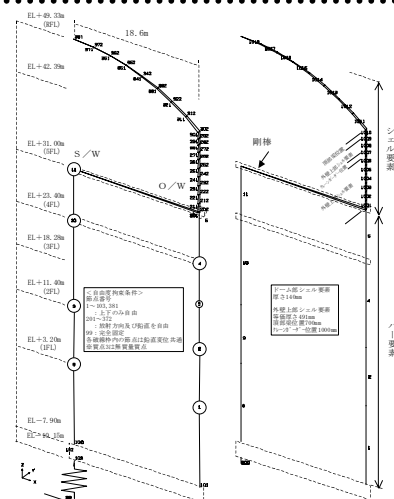
4. (4) 評価結果 (原子炉停止時冷却系配管) — 敦賀1号機 —

建屋地震応答解析による床応答スペクトルに基づいて、詳細評価(スペクトルモーダル解析法)を実施し、配管に発生する応力を求める。

建屋地震応答解析

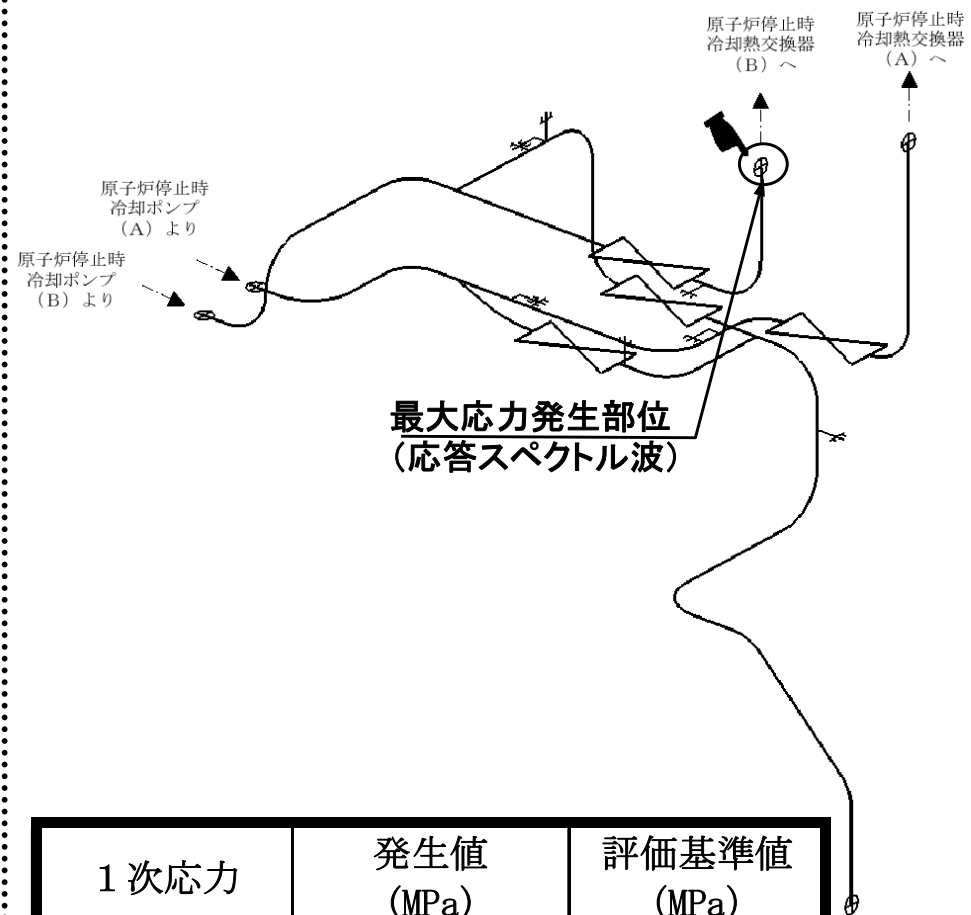


水平方向解析モデル

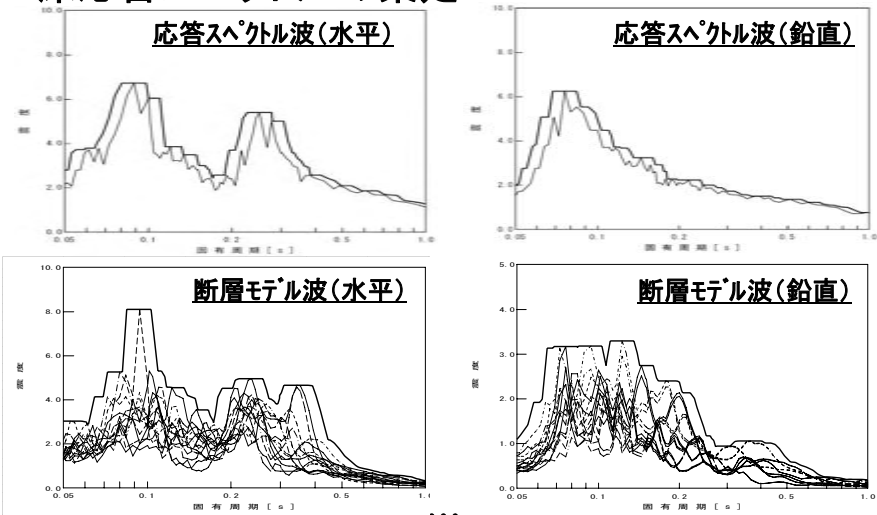


鉛直方向解析モデル

発生値の算定 (スペクトルモーダル解析の実施)

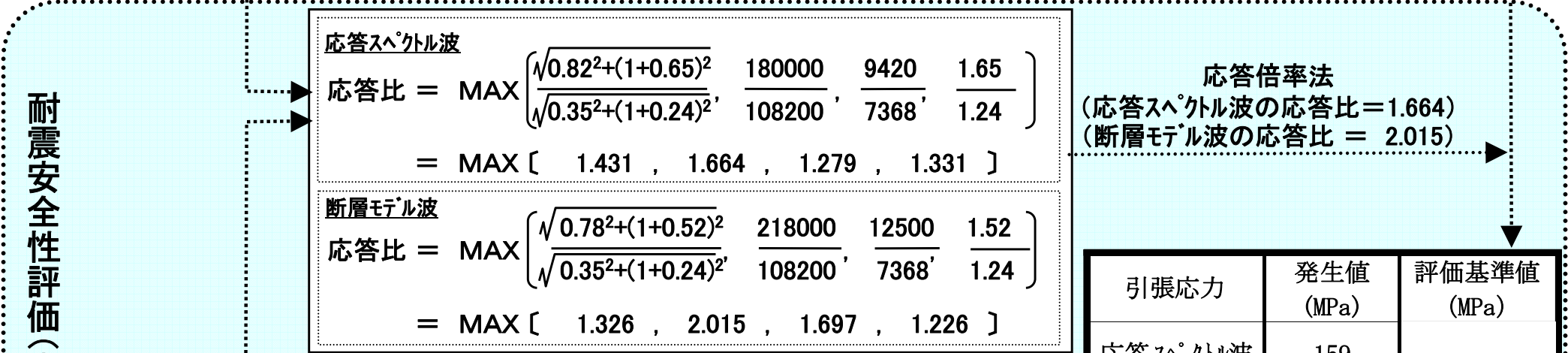
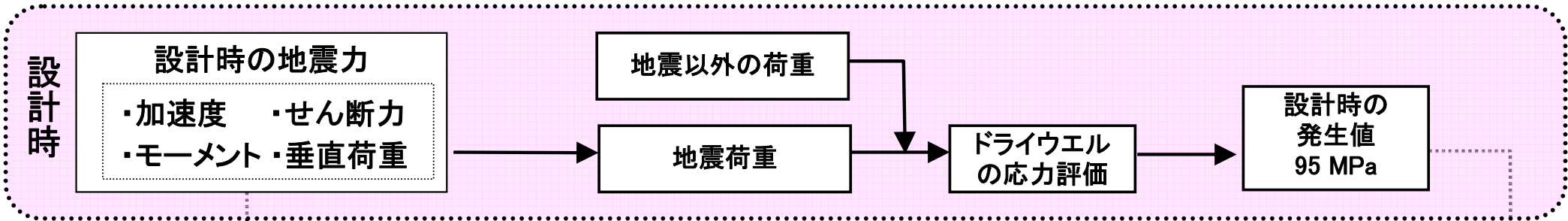


床応答スペクトルの策定



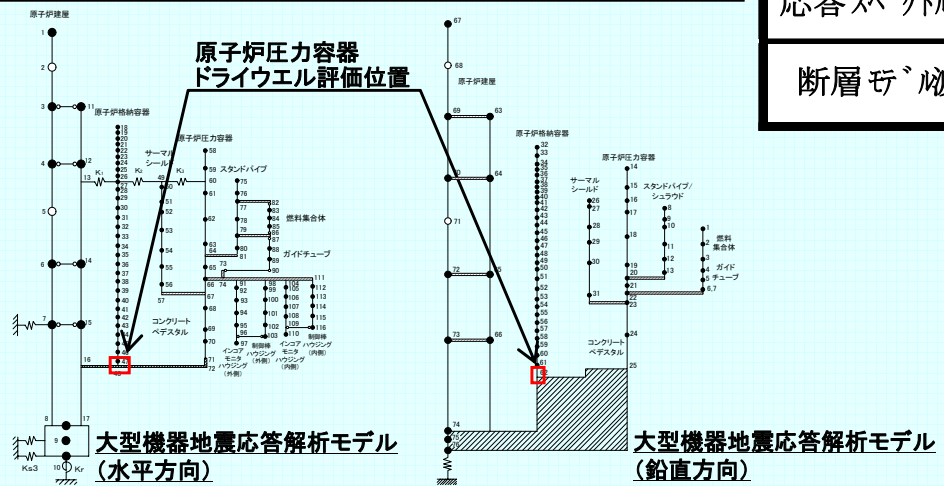
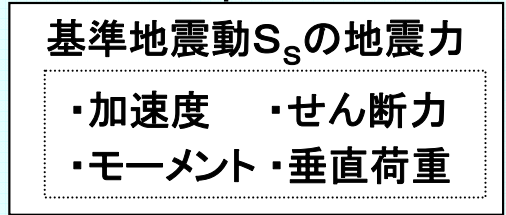
1次応力	発生値 (MPa)	評価基準値 (MPa)
応答スペクトル波	229	363
断層モデル波	224	

基準地震動 S_s による大型機器地震応答解析により、評価部位における加速度、せん断力、モーメント及び垂直荷重を求め、設計時とのそれぞれの応答比の最大値を用いて基準地震動 S_s による発生値を算定する。

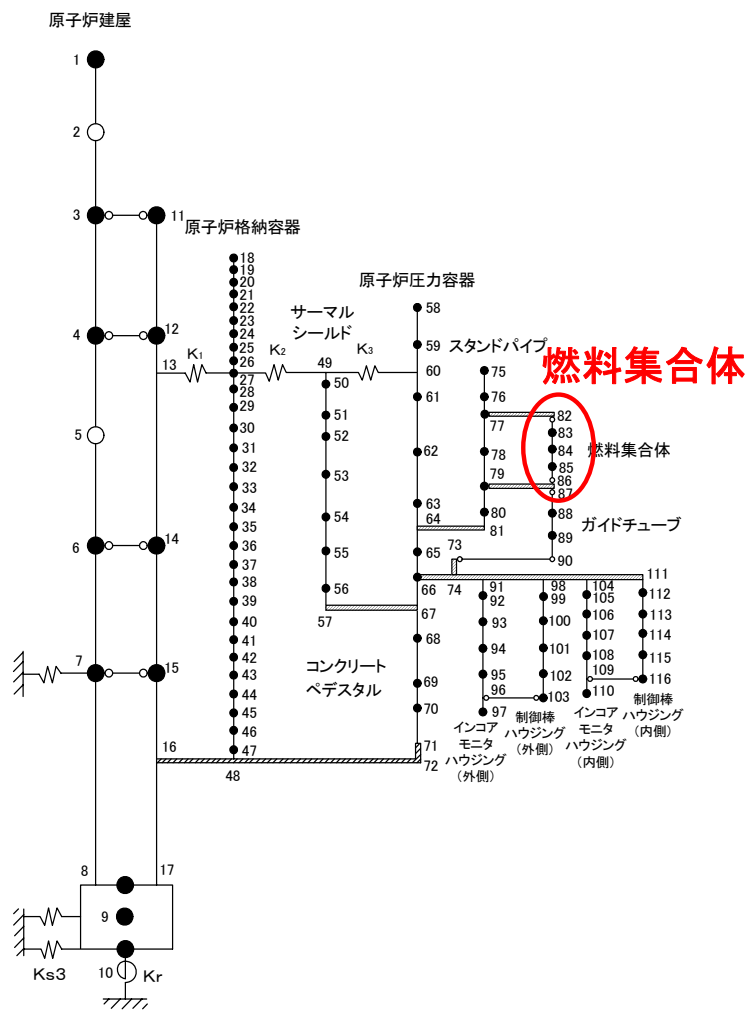


引張応力	発生値 (MPa)	評価基準値 (MPa)
応答スペクトル波	159	332
断層モデル波	192	

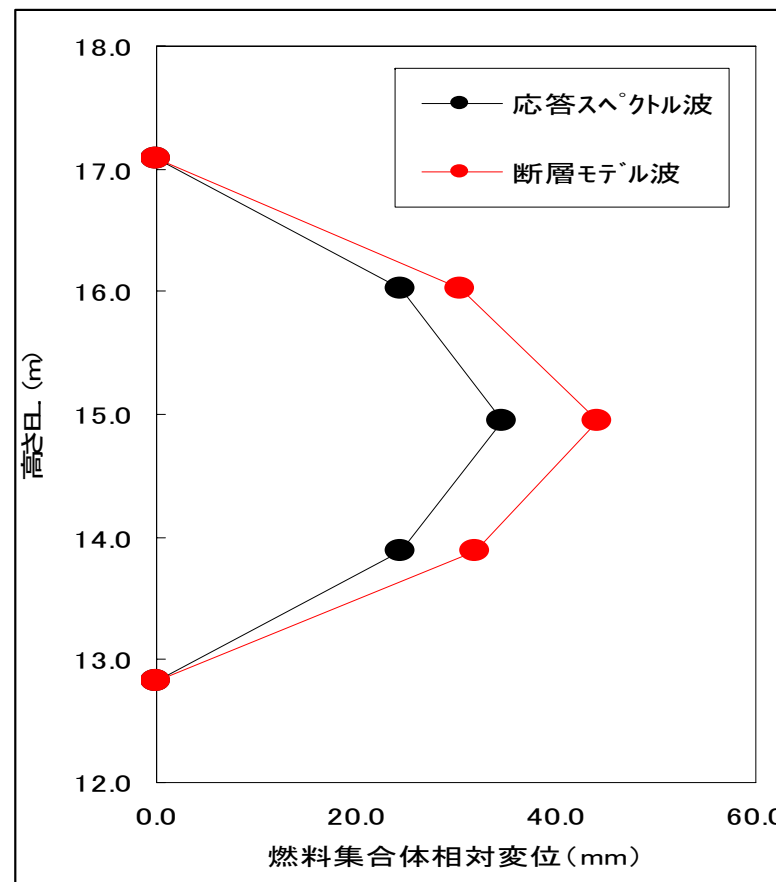
耐震安全性評価(中間報告)



基準地震動 S_S による燃料集合体の相対変位を求め、評価基準値と比較することにより評価する。
 地震時における燃料集合体の相対変位は、燃料集合体を大型機器地震応答解析モデルにモデル化することにより、大型機器地震応答解析から得られる応答を用いて算定している。



大型機器地震応答解析モデル



相対変位	発生値 (mm)	評価基準値 (mm)
応答スペクトル波	34.5	80
断層モデル波	44.3	

5. 安全上重要な主要施設の耐震安全性評価(まとめ)－敦賀1号機－

評価対象	評価部位	評価項目と単位	発生値 ※	評価基準値	判定	評価手法
原子炉建屋	耐震壁	せん断ひずみ	1.197×10^{-3}	2.0×10^{-3}	○	時刻歴応答解析
原子炉圧力容器	基礎ボルト	応力 (MPa)	191	207	○	定式化された評価式を用いた解析
炉心支持構造物	シユアウトサホート	モーメント (kN・m)	58, 200	63, 300	○	時刻歴応答解析
主蒸気系配管	配管	応力 (MPa)	231	364	○	スペクトルモーダル解析
原子炉停止時冷却系ポンプ	基礎ボルト	応力 (MPa)	13	152	○	定式化された評価式を用いた解析
原子炉停止時冷却系配管	配管	応力 (MPa)	229	363	○	スペクトルモーダル解析
原子炉格納容器	ドライウェル	応力 (MPa)	192	332	○	応答倍率法
制御棒	挿入性	燃料集合体の 相対変位 (mm)	44. 3	80	○	時刻歴応答解析

※ ■ は断層モデル波による発生値を示す

発生値はすべて評価基準値を下回っており、耐震安全性を確保していることを確認

- ◆国の委員会において、原子力安全・保安院から示された「活断層等に係る評価の中間的整理(案)」等を踏まえ、基準地震動の見直しを実施した。
- ◆その後、国の委員会等における審議を踏まえて地震動の再評価を行い、8月31日に基準地震動の見直し(追加)を国の委員会においてご説明した。
- ◆見直した基準地震動 S_s に対する主要施設の耐震安全性の評価を行い、耐震安全性が確保されていることを確認。順次、国の委員会においてご説明しているところ。
- ◆今後も引き続き、国の委員会および福井県原子力安全専門委員会での審議に真摯に対応していく。
- ◆また、耐震安全性評価と併行して進めている耐震裕度向上工事についても着実に取り組んでいく。

評価対象	評価部位	評価項目と単位	発生値 ※	評価基準値	判定	評価手法
原子炉建屋	耐震壁	せん断ひずみ	0.262×10^{-3}	2.0×10^{-3}	○	時刻歴応答解析
原子炉補助建屋	耐震壁	せん断ひずみ	0.444×10^{-3}	2.0×10^{-3}	○	時刻歴応答解析
原子炉容器	支持構造物	応力 (MPa)	271	462	○	応答倍率法
炉内構造物	炉心そう	応力 (MPa)	143	391	○	応答倍率法
1次冷却材管	配管	応力 (MPa)	192	346	○	応答倍率法
蒸気発生器	支持構造物	応力 (MPa)	88	155	○	応答倍率法
余熱除去ポンプ	基礎ボルト	応力 (MPa)	2	210	○	応答倍率法
余熱除去設備配管	配管	応力 (MPa)	250	361	○	応答倍率法
原子炉格納容器 (PCCV)	耐震壁	せん断ひずみ	0.777×10^{-3}	2.0×10^{-3}	○	時刻歴応答解析
制御棒	挿入性	挿入時間 (秒)	2.22	2.5	○	応答倍率法

※・原子炉建屋、原子炉補助建屋、原子炉格納容器を除く主要施設は、断層モデル波(10波)のうち5波について評価を実施し、残りの5波については評価中
 なお、原子炉建屋は、原子炉格納容器を除いた部位の中で最大値を記載

・ は断層モデル波による発生値を示す