

福島第一原子力発電所 5号機

安全上重要な建物・構築物及び
機器・配管系の耐震安全性評価

平成21年7月15日

東京電力株式会社



東京電力

目次

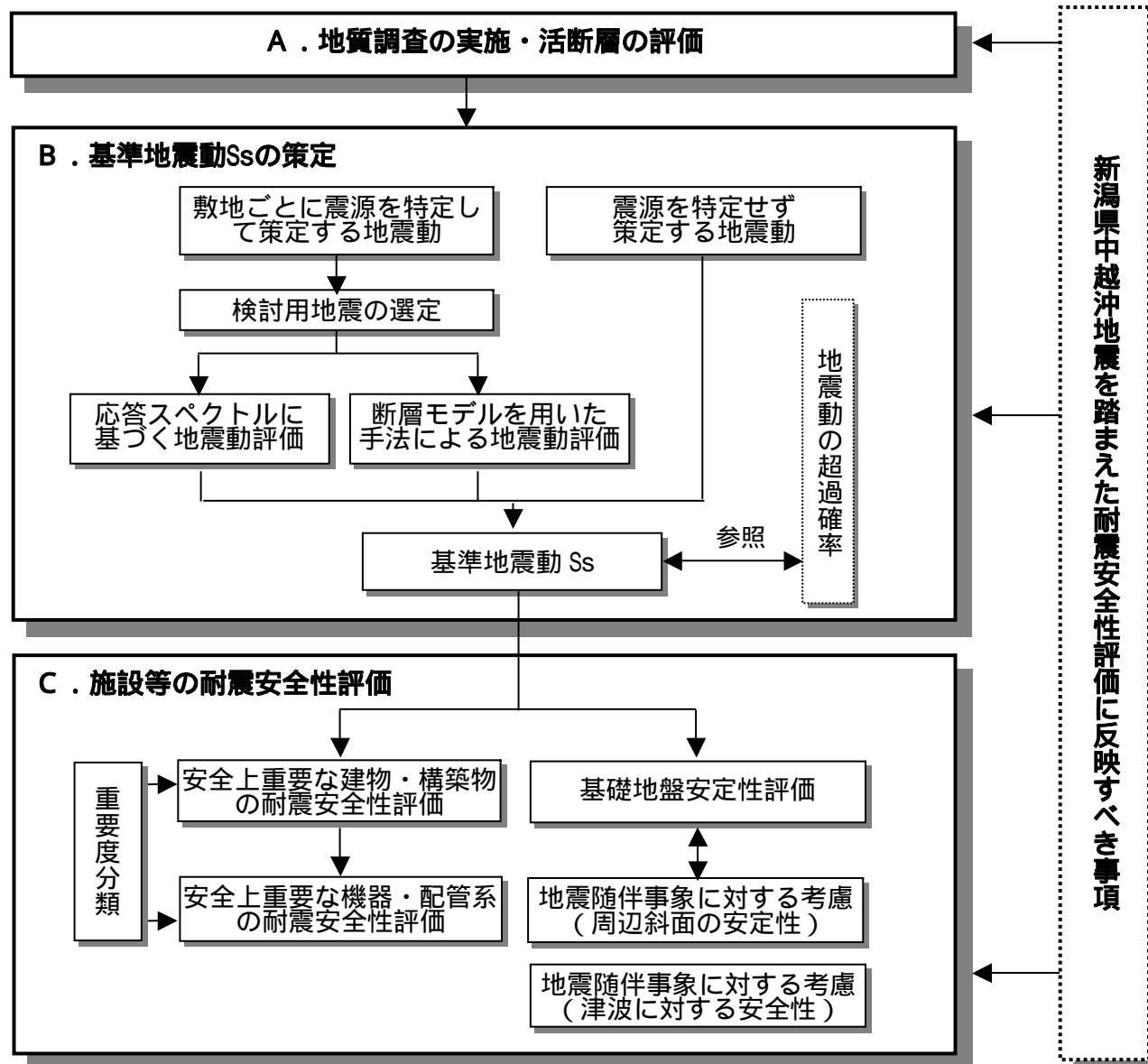
・安全上重要な建物・構築物の耐震安全性評価

- 1 建物概要
- 2 基準地震動 S_s の概要
- 3 入力地震動の算定
- 4 地震応答解析モデルの設定
- 5 地震応答解析結果
- 6 耐震安全性評価結果

・安全上重要な機器・配管系の耐震安全性評価

・参考資料

新耐震指針に照らした耐震安全性評価の流れ



・安全上重要な建物・構築物の耐震安全性評価

1 建物概要

評価対象建屋

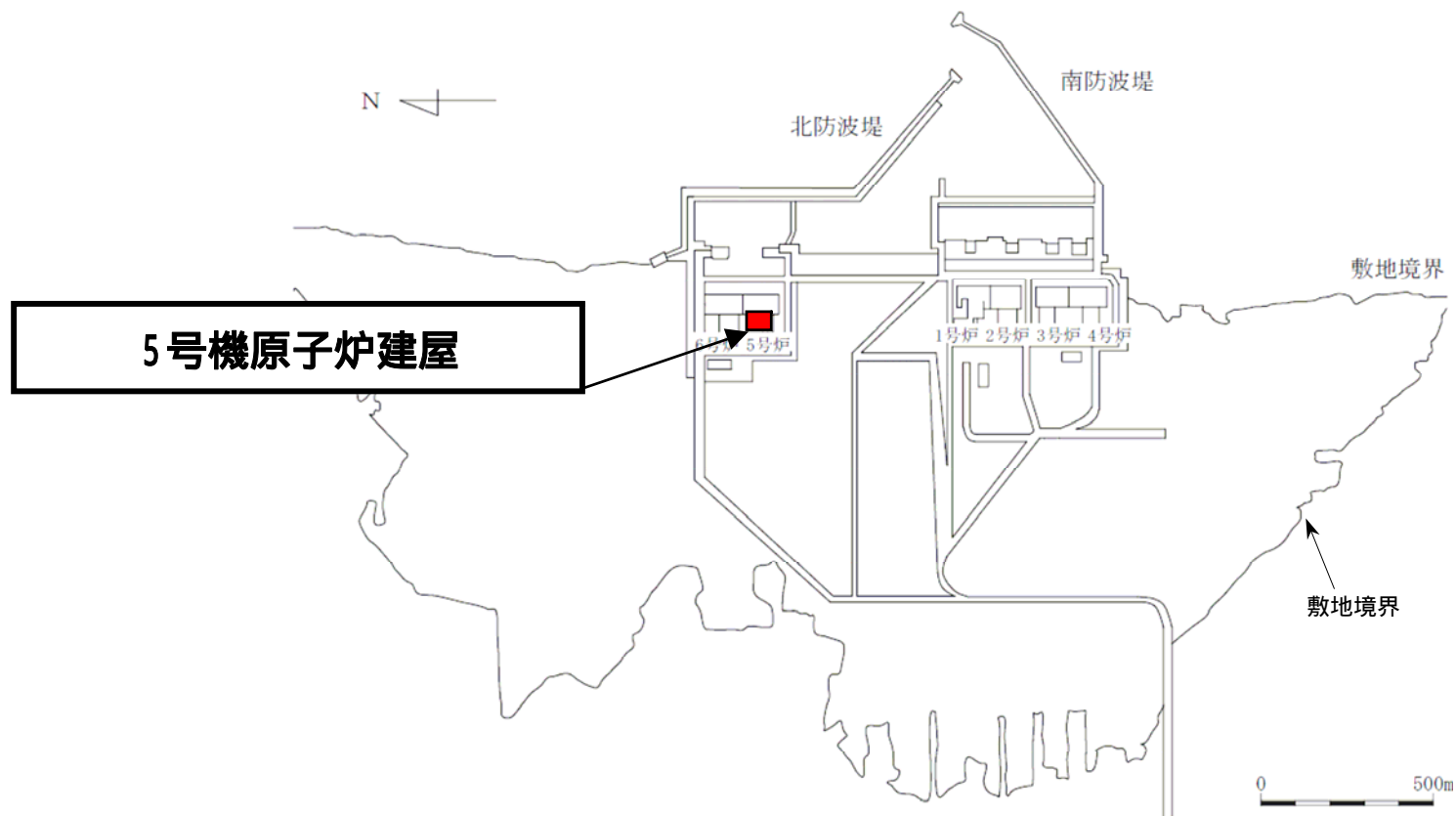


図1-1 福島第一原子力発電所 配置図

5号機原子炉建屋の概要

- 構造：鉄筋コンクリート造
 (一部鉄骨造(トラス構造))
- 階数：地上5階，地下1階
- 基礎：厚さ4.0mのべた基礎で，新第三紀層の泥岩盤上に設置
- 平面形状：47.0m (NS方向) × 47.0m (EW方向) (1,2階)
 47.0m (NS方向) × 35.2m (EW方向) (3,4,5階)
 47.0m (NS方向) × 57.4m (EW方向) (地下階)
- 高さ：基礎版底面から62.11m (地上高さ46.05m)

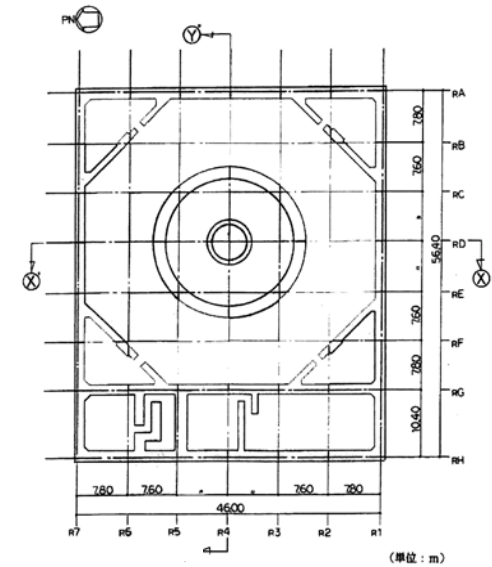


図1-2 平面図

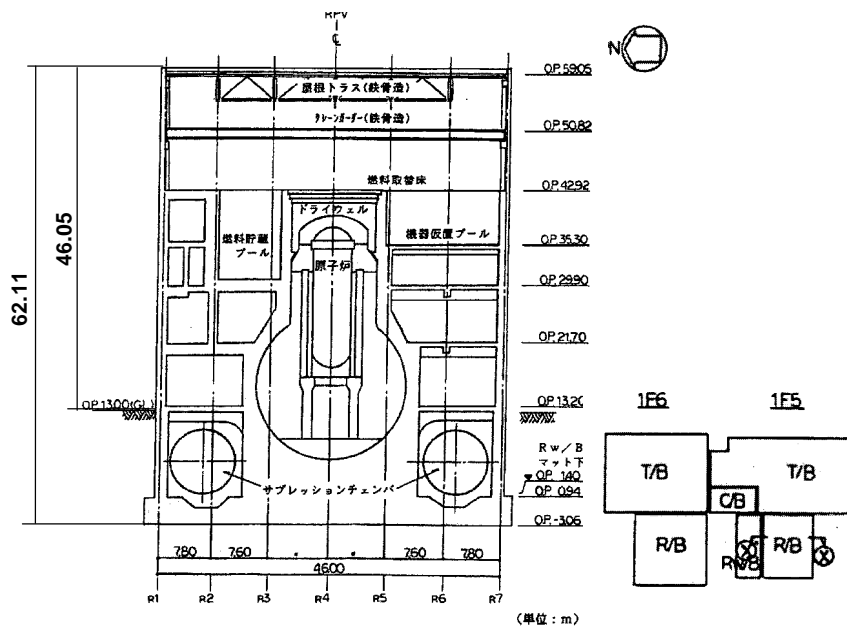


図1-3 断面図 (NS方向)

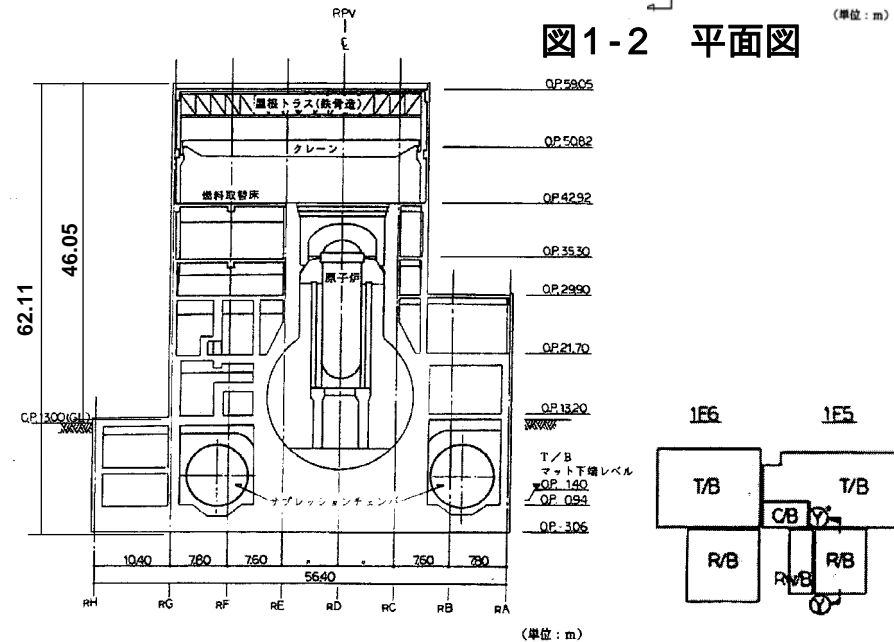


図1-4 断面図 (EW方向)

・安全上重要な建物・構築物の耐震安全性評価

2 基準地震動 S_s の概要

新指針に基づく基準地震動 S s

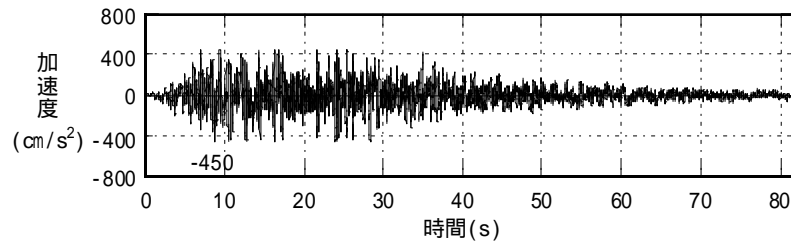


図2-1 加速度時刻歴波形
(Ss-1H)

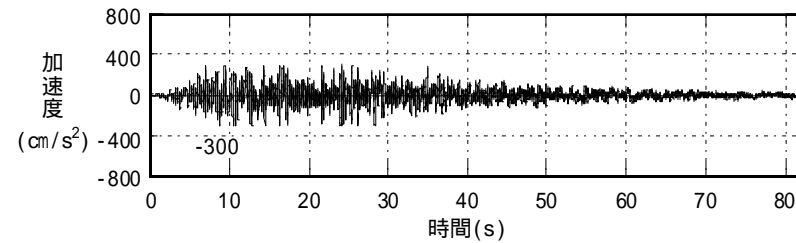


図2-4 加速度時刻歴波形
(Ss-1V)

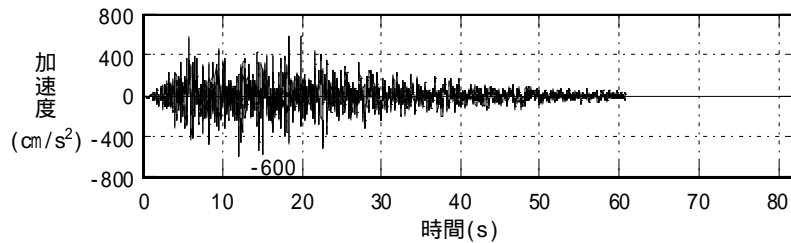


図2-2 加速度時刻歴波形
(Ss-2H)

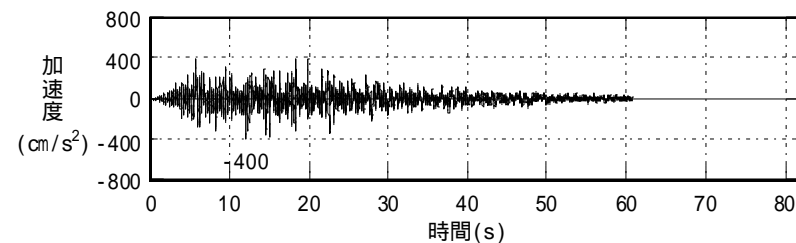


図2-5 加速度時刻歴波形
(Ss-2V)

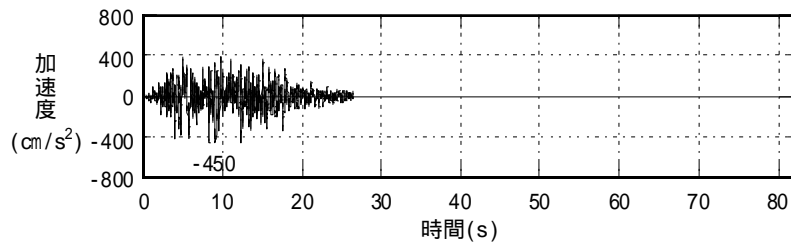


図2-3 加速度時刻歴波形
(Ss-3H)

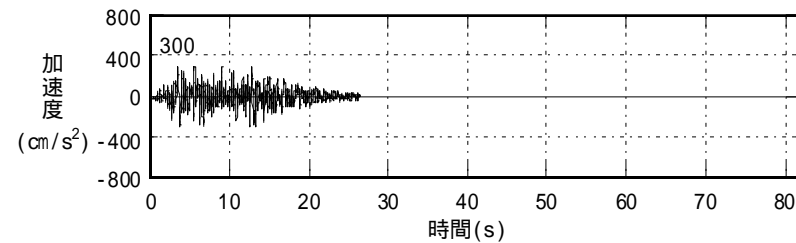


図2-6 加速度時刻歴波形
(Ss-3V)

新指針に基づく基準地震動 S s

新・旧指針による基準地震動の加速度応答スペクトルを示す。

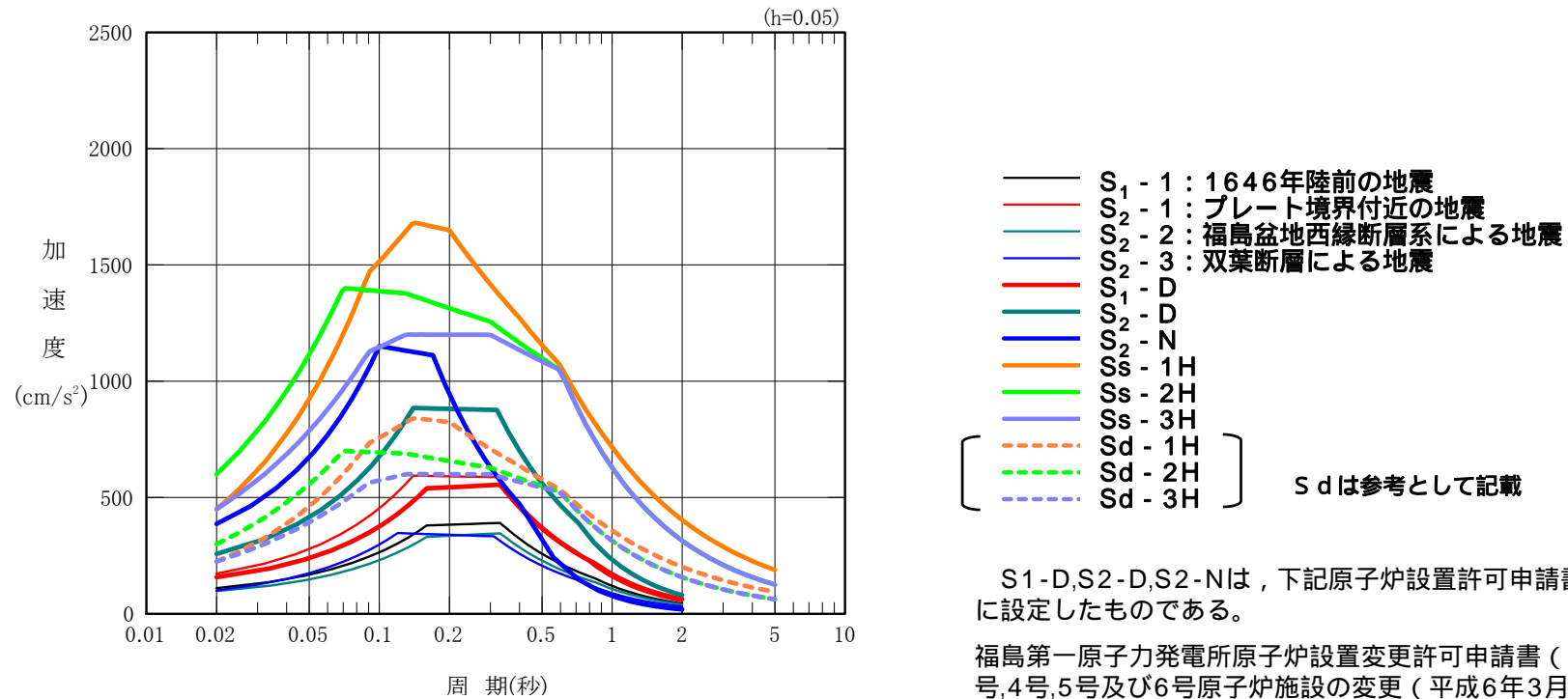
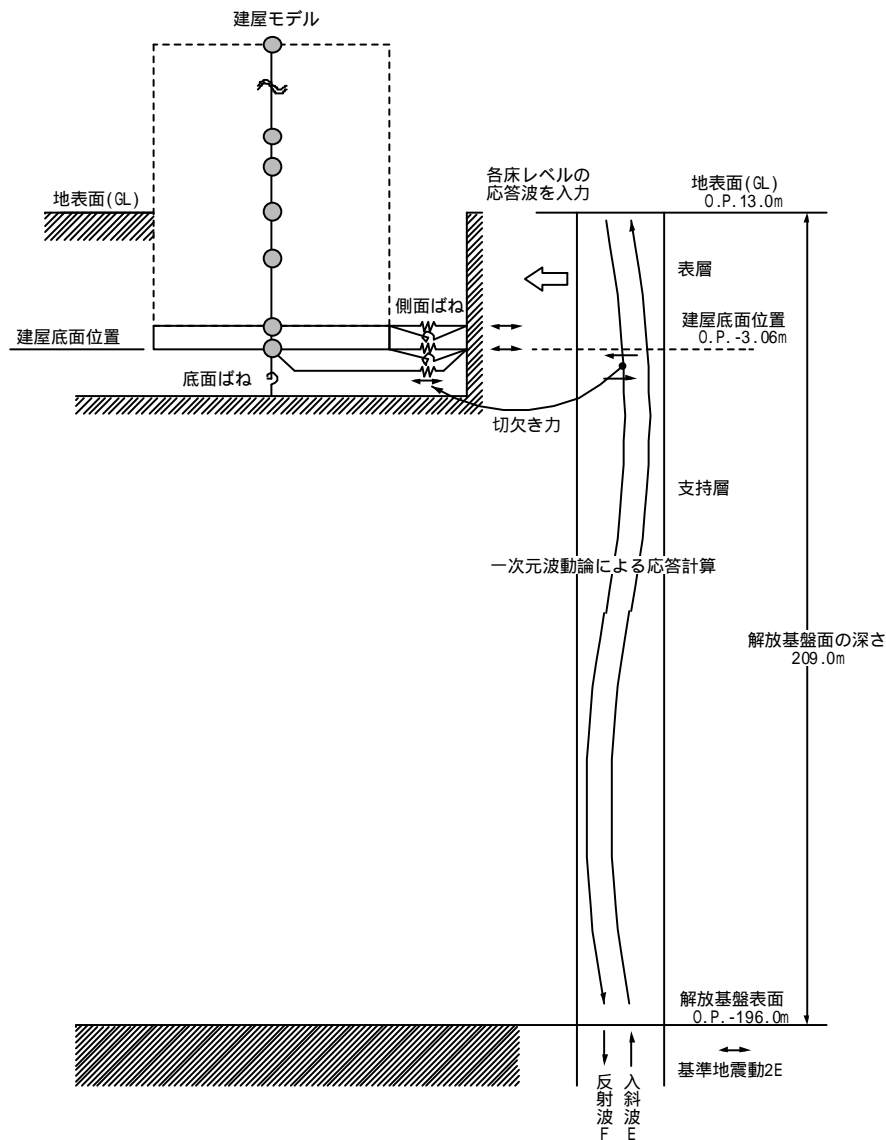


図2-7 新・旧指針による基準地震動の比較

・安全上重要な建物・構築物の耐震安全性評価

3 入力地震動の算定

入力地震動の算定（水平方向）

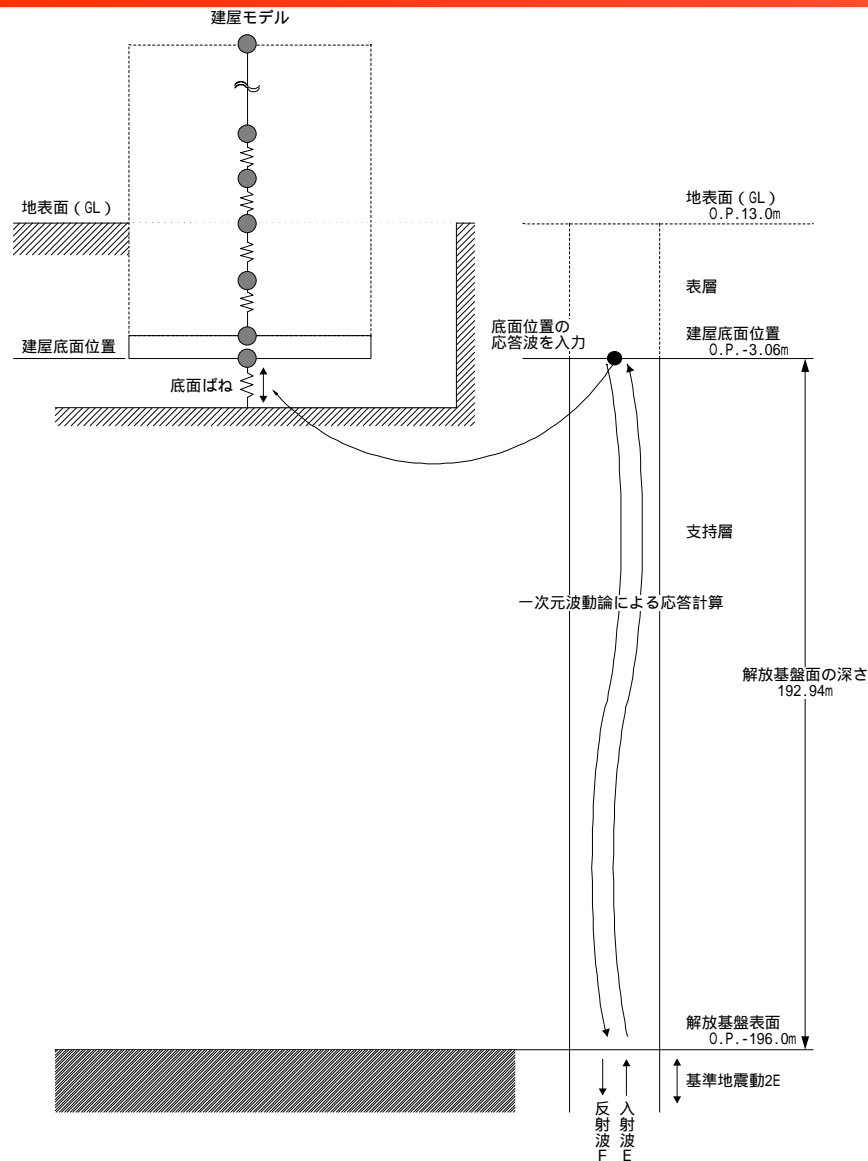


原子炉建屋の水平方向の入力地震動については、解放基盤表面で定義される基準地震動 S_s を入力として、解放基盤表面から地表面までの速度構造を成層と仮定した地盤モデルを用いた一次元波動論による地震応答解析を行い、原子炉建屋基礎底面位置及び側面ばね位置での地震動を入力地震動とした。

建屋基礎底面位置におけるせん断力（切欠き力）を入力地震動に付加することにより、地盤の切欠き効果を考慮した。

図3-1 入力地震動の概念図（水平方向）

入力地震動の算定（鉛直方向）



原子炉建屋の鉛直方向の入力地震動については、解放基盤表面で定義される基準地震動 S_s を入力として、解放基盤表面から原子炉建屋基礎底面位置までの速度構造を成層と仮定したモデルを用いた一次元波動論による地震応答解析を行い、原子炉建屋基礎底面位置での地震動を入力地震動とし、基礎底面レベルに取り付く鉛直地盤ばねを介して直接入力した。

図3-2 入力地震動の概念図（鉛直方向）

地盤定数

地盤モデル及び物性値については，原子炉建屋付近の地盤の調査結果に基づき，せん断弾性係数及び減衰定数のひずみ依存性を考慮した等価線形解析により，基準地震動Ss-1，Ss-2及びSs-3のそれぞれについて個別に設定した。疎密波速度は，水平方向の入力地震動算定に用いた地盤モデルの等価せん断波速度とポアソン比から求めた。

表3-1 地盤定数

標高 O.P. (m)	地質	せん断波 速度 Vs (m/s)	単位体 積重量 (kN/m ³)	ポア ソン 比	初期せん断 弾性係数 G ₀ (×10 ⁵ kN/m ²)	剛性 低下率 G/G ₀			せん断 弾性係数 G (×10 ⁵ kN/m ²)			ヤング 係数 E (×10 ⁵ kN/m ²)			剛性低下後 S波速度 Vs (m/s)			剛性低下後 P波速度 Vp (m/s)			減衰 定数 h (%)			層厚 H (m)	
						Ss-1	Ss-2	Ss-3	Ss-1	Ss-2	Ss-3	Ss-1	Ss-2	Ss-3	Ss-1	Ss-2	Ss-3	Ss-1	Ss-2	Ss-3	Ss-1	Ss-2	Ss-3		
13.0																									
4.5	砂岩	380	17.8	0.473	2.62	0.84	0.85	0.86	2.20	2.23	2.25	6.48	6.57	6.63	348	351	352	-	-	-	3	3	3	8.5	
-73.0	泥岩	470	17.0	0.459	3.83	0.77	0.80	0.77	2.95	3.06	2.95	8.61	8.93	8.61	413	420	413	1500	1530	1500	3	3	3	77.5	
-99.0		530	17.4	0.447	4.98				3.83	3.98	3.83	11.08	11.52	11.08	465	474	465	1500	1530	1500				26.0	
-181.0		580	17.4	0.443	5.97				4.60	4.78	4.60	13.28	13.80	13.28	509	519	509	1590	1620	1590				82.0	
-196.0		750	17.6	0.410	10.10				7.78	8.08	7.78	21.94	22.79	21.94	658	671	658	1690	1720	1690				15.0	
	[解放基盤]	750	17.6	0.410	10.10	1.00	1.00	1.00	10.10	10.10	10.10	28.48	28.48	28.48	750	750	750	1920	1920	1920	-	-	-	-	

入力地震動評価法の妥当性確認

入力地震動評価法の評価の妥当性を確認するために、敷地内で比較的大きな加速度を観測した2003年宮城県沖の地震による観測記録（5号機原子炉建屋の炉心位置から約170m離れた地点の地中観測記録）を用いた一次元波動論によるシミュレーション解析を実施した。

入力地震動 2003年5月26日宮城県沖の地震 / (M7.1) O.P.-130mでの観測波

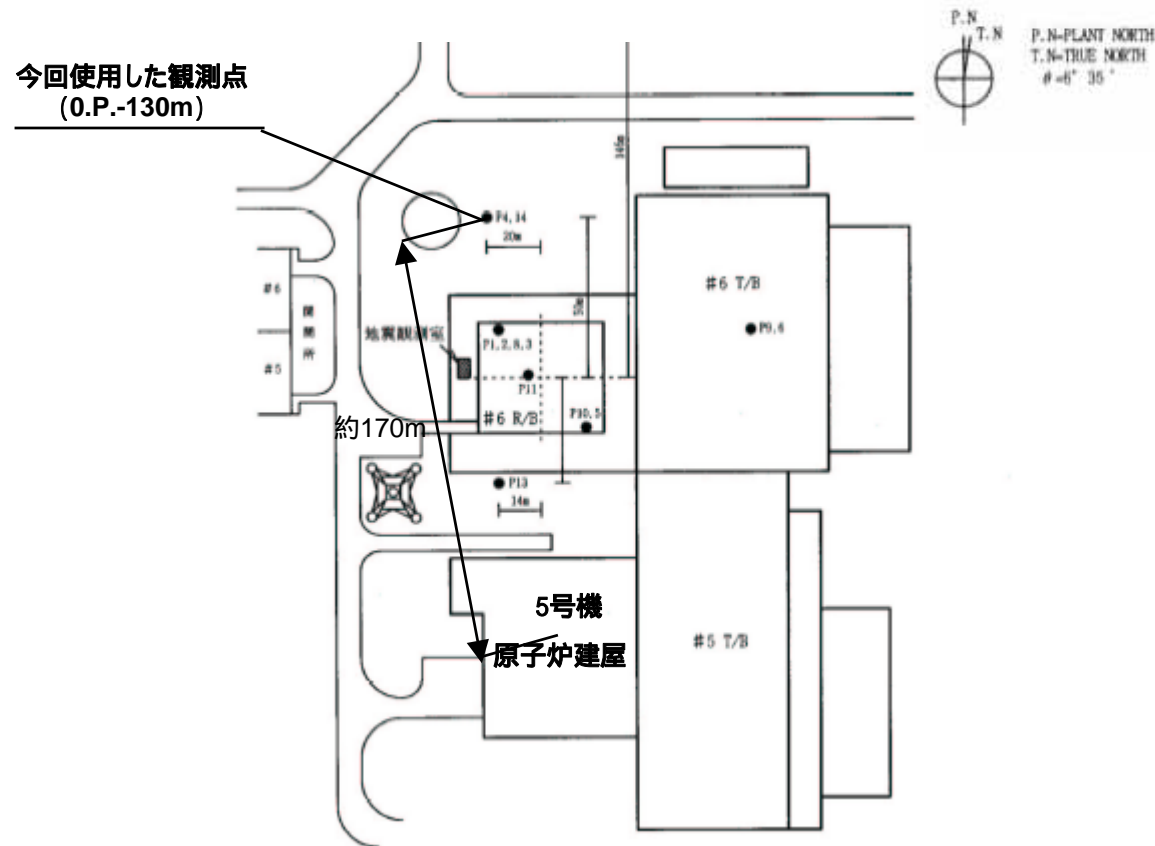


図3-3 福島第一原子力発電所 地震観測点配置図

入力地震動評価法の妥当性確認

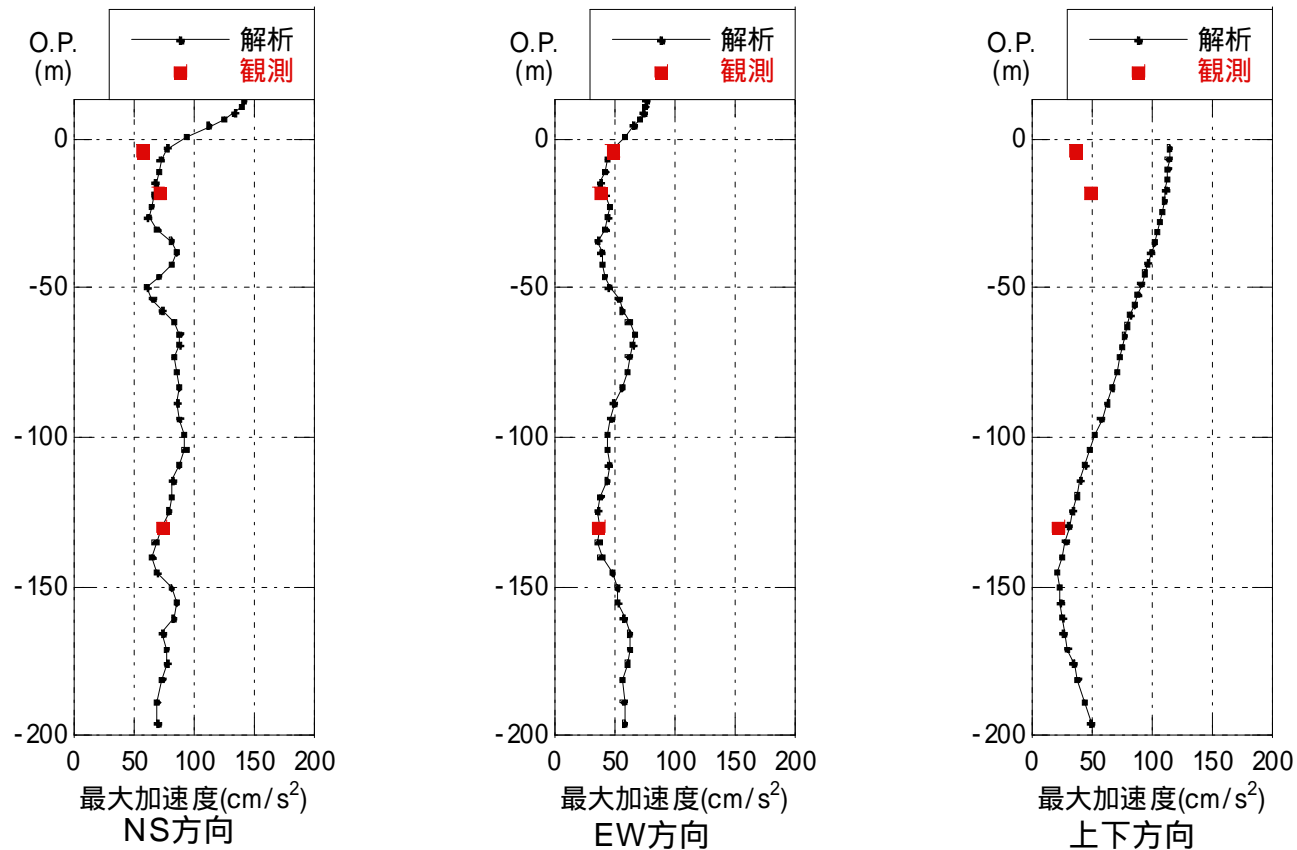


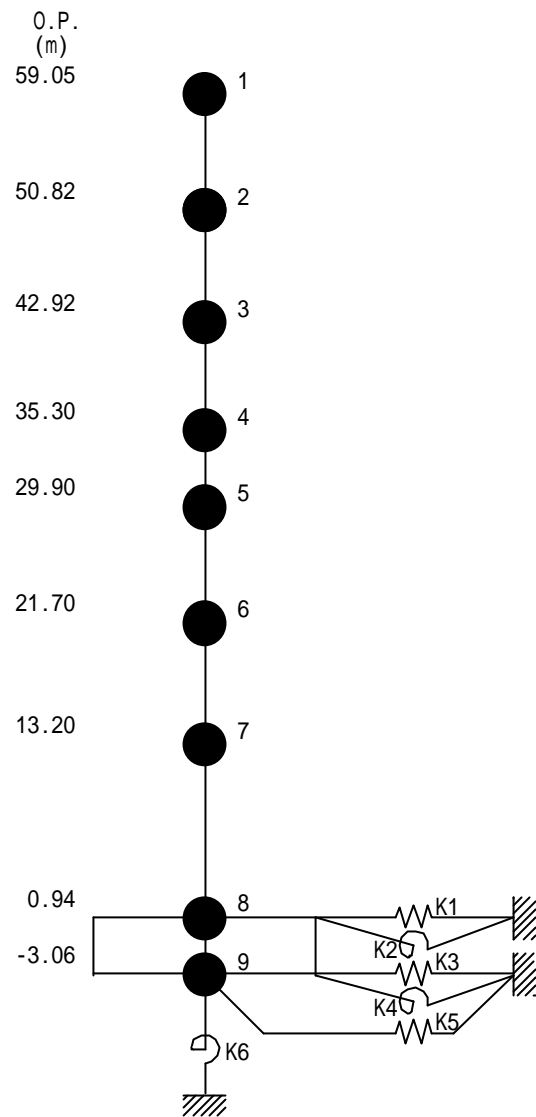
図3-4 地盤の最大応答加速度分布

入力地震動評価法の検証を行った結果、最大加速度値について、NS方向、EW方向とも解析結果は、観測記録にほぼ対応している。また、鉛直方向の解析結果は、観測記録に比べ大きめの値を算定している。

・安全上重要な建物・構築物の耐震安全性評価

4 地震応答解析モデルの設定

地震応答解析モデル（水平方向）



●一軸多質点系モデル

- ・ 建屋と底面・側面地盤との相互作用を考慮
- ・ 耐震壁のせん断剛性と曲げ剛性を考慮

●地盤ばね

- ・ 建屋底面地盤ばね（水平・回転）は，JEAG4601-1991による振動アドミッタンス理論に基づく近似ばね
- ・ 建屋側面地盤ばね（水平・回転）は，JEAG4601-1991によるNOVAKの手法に基づく近似ばね

●建屋の減衰

- ・ モード減衰（ひずみエネルギー比例型）

●建屋の減衰定数

- ・ コンクリート部 : 5 %
- ・ 鉄骨部（屋根トラス） : 2 %

●建屋耐震壁の非線形復元力特性

- ・ せん断については，JEAG4601-1991に基づき，トリ・リニア型スケルトン曲線の最大点指向型
- ・ 曲げモーメントについては，JEAG4601-1991に基づき，トリ・リニア型スケルトン曲線の第二折れ点までは最大点指向型，それ以降はディグレイディングトリリニア型

●地盤回転ばねの非線形特性

- ・ JEAG4601-1991に基づき，基礎浮上りによる地盤の回転ばねの幾何学的非線形を考慮

図4-1 地震応答解析モデル（水平方向）

地震応答解析モデル（水平方向）

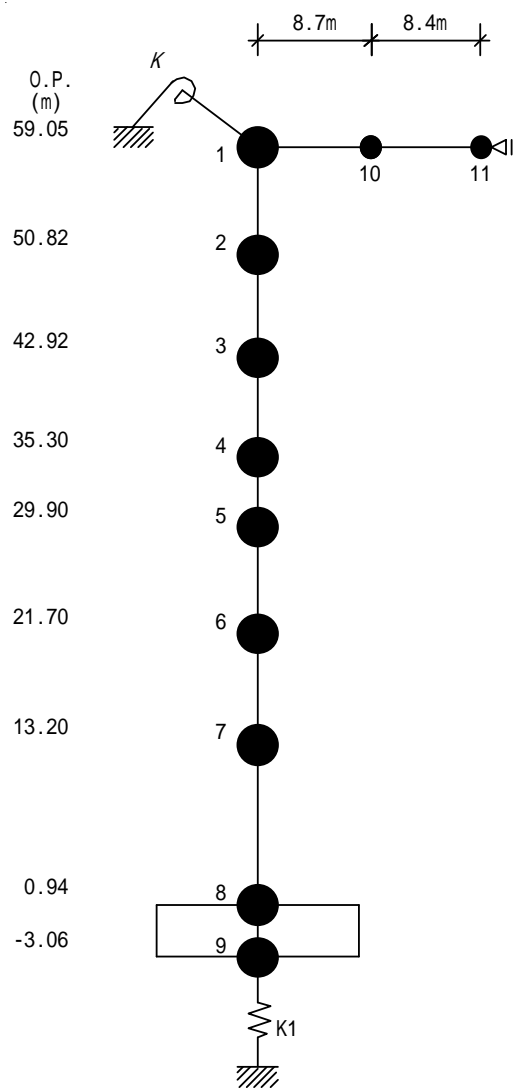
表4-1 解析モデルの諸元（NS方向）

質点番号	質点重量 W(kN)	回転慣性重量 $I_G(\times 10^6 \text{ kN} \cdot \text{m}^2)$	せん断断面積 $A_S(\text{m}^2)$	断面2次モーメント $I(\text{m}^4)$
1	21,420	3.94	18.8	11,950
2	20,250	3.73		
3	63,170	11.63	28.2	14,779
4	83,300	15.33	183.7	23,888
5	111,840	20.59	155.8	25,975
6	141,010	25.96	207.0	45,617
7	227,110	41.81	181.1	47,273
8	300,450	60.12	354.5	117,612
9	135,000	27.01	2,812.6	562,754
合計	1,103,550		ヤング係数 E_c 2.57×10^7 (kN/m ²) せん断弾性係数 G 1.07×10^7 (kN/m ²) ポアソン比 0.20 減衰 h 5% 基礎形状 49.0m(NS方向) × 57.4m(EW方向)	

表4-2 解析モデルの諸元（EW方向）

質点番号	質点重量 W(kN)	回転慣性重量 $I_G(\times 10^6 \text{ kN} \cdot \text{m}^2)$	せん断断面積 $A_S(\text{m}^2)$	断面2次モーメント $I(\text{m}^4)$
1	21,420	2.21	14.0	6,948
2	20,250	2.09		
3	63,170	6.52	21.1	8,650
4	83,300	8.60	96.0	12,728
5	111,840	20.59	124.1	15,511
6	141,010	25.96	172.8	34,327
7	227,110	62.36	239.2	47,077
8	300,450	82.49	348.4	140,127
9	135,000	37.07	2,812.6	772,237
合計	1,103,550		ヤング係数 E_c 2.57×10^7 (kN/m ²) せん断弾性係数 G 1.07×10^7 (kN/m ²) ポアソン比 0.20 減衰 h 5% 基礎形状 49.0m(NS方向) × 57.4m(EW方向)	

地震応答解析モデル（鉛直方向）



●一軸多質点系モデル

- ・耐震壁及び柱の軸剛性および屋根トラスのせん断剛性と曲げ剛性を考慮

●地盤ばね

- ・建屋底面地盤ばねは、JEAG4601-1991による振動アドミッタンス理論に基づく近似ばね

●建屋の減衰

- ・モード減衰（ひずみエネルギー比例型）

●建屋の減衰定数

- ・コンクリート部 : 5 %
- ・鉄骨部（屋根トラス） : 2 %

図4-2 地震応答解析モデル（鉛直方向）

地震応答解析モデル（鉛直方向）

表4-3 解析モデルの諸元（鉛直方向）

建屋				屋根			
質点番号	質点重量 W(kN)	軸断面積 A _N (m ²)	軸ばね剛性 K _A × 10 ⁸ (kN/m)	質点番号	質点重量 W(kN)	せん断断面積 A _S (× 10 ⁻² m ²)	断面2次モーメント I(m ⁴)
1	14,893			1	-		
		55.3	1.73			11.35	0.9975
2	20,250	62.1	2.02	10	4,377	6.18	0.9975
3	63,170	284.1	9.58	11	2,150		
4	83,300	294.9	14.04				
5	111,840	385.2	12.07				
6	141,010	419.3	12.68				
7	227,110	675.5	14.16				
8	300,450	2,812.6	180.71				
9	135,000						
合計	1,103,550						

コンクリート部	ヤング係数 E_C	2.57×10^7 (kN/m ²)
	せん断弾性係数 G	1.07×10^7 (kN/m ²)
	ポアソン比	0.20
	減衰 h	5%
鉄骨部	ヤング係数 E_S	2.05×10^8 (kN/m ²)
	せん断弾性係数 G	7.90×10^7 (kN/m ²)
	ポアソン比	0.30
	減衰 h	2%
トラス端部回転拘束ばね K		2.31×10^7 (kN·m/rad)
基礎形状		49.0m(NS方向) × 57.4m(EW方向)

解析に用いるコンクリートの物性値

表4-4 物性値

コンクリート	強度*1 Fc (N/mm ²)	ヤング係数 E (N/mm ²)	せん断弾性係数 G (N/mm ²)	ポアソン比	単位体積重量*2 (kN/m ³)
	35.0	2.57 × 10 ⁴	1.07 × 10 ⁴	0.2	24
鉄筋	SD345相当 (SD35)				
鋼材	SS400,SM400A相当 (SS41,SM41A)				

表4-5 圧縮強度試験データ分析結果

設計基準強度	22.1	N / mm ²
試験体数	373	本
平均圧縮強度	37.4	N / mm ²
解析採用値	35.0	N / mm ²

* 1 : RC造部の剛性を評価する際に用いるコンクリート強度は、過去に原子力発電所内で実施された高経年化技術評価、コンクリート健全性評価及び建築設備点検等における圧縮強度試験結果から推定した実強度として、圧縮強度のばらつきを考慮し、平均値をやや下回る値を採用した。

* 2 : 鉄筋コンクリートの値を示す。

解析に用いる基礎地盤のばね定数と減衰定数

表4-6 ばね定数と減衰係数 (Ss-1H)

(NS方向)

ばね番号	質点番号	地盤ばね成分	ばね		減衰	
			ばね定数 ^(*1) Kc	採用振動数 (Hz)	減衰係数 ^(*2) Cc	採用振動数 ^(*3) f ₁ (Hz)
K1	8	側面・並進	2.96 × 10 ⁶	1.16	5.92 × 10 ⁵	2.46
K2	8	側面・回転	1.92 × 10 ⁹	0.01	1.14 × 10 ⁸	2.46
K3	9	側面・並進	2.56 × 10 ⁶	1.16	5.12 × 10 ⁵	2.46
K4	9	側面・回転	1.66 × 10 ⁹	0.01	9.89 × 10 ⁷	2.46
K5	9	底面・並進	5.01 × 10 ⁷	0.00	2.09 × 10 ⁶	2.46
K6	9	底面・回転	3.70 × 10 ¹⁰	0.00	3.74 × 10 ⁸	2.46

(*1) K1, K3, K5はkN/m K2, K4, K6はkN・m/rad

(*2) K1, K3, K5はkN・s/m K2, K4, K6はkN・s・m/rad

(*3) f₁は連成系の1次固有振動数

(EW方向)

ばね番号	質点番号	地盤ばね成分	ばね		減衰	
			ばね定数 ^(*1) Kc	採用振動数 (Hz)	減衰係数 ^(*2) Cc	採用振動数 ^(*3) f ₁ (Hz)
K1	8	側面・並進	2.96 × 10 ⁶	1.16	5.92 × 10 ⁵	2.55
K2	8	側面・回転	1.92 × 10 ⁹	0.01	1.15 × 10 ⁸	2.55
K3	9	側面・並進	2.56 × 10 ⁶	1.16	5.12 × 10 ⁵	2.55
K4	9	側面・回転	1.66 × 10 ⁹	0.01	9.99 × 10 ⁷	2.55
K5	9	底面・並進	4.93 × 10 ⁷	0.00	2.02 × 10 ⁶	2.55
K6	9	底面・回転	4.64 × 10 ¹⁰	0.00	5.70 × 10 ⁸	2.55

(*1) K1, K3, K5はkN/m K2, K4, K6はkN・m/rad

(*2) K1, K3, K5はkN・s/m K2, K4, K6はkN・s・m/rad

(*3) f₁は連成系の1次固有振動数

解析に用いる基礎地盤のばね定数と減衰定数

表4-7 ばね定数と減衰係数 (Ss-2H)

(NS方向)

ばね番号	質点番号	地盤ばね成分	ばね		減衰	
			ばね定数 ^(*1) Kc	採用振動数 (Hz)	減衰係数 ^(*2) Cc	採用振動数 ^(*3) f ₁ (Hz)
K1	8	側面・並進	3.06 × 10 ⁶	1.18	6.02 × 10 ⁵	2.49
K2	8	側面・回転	1.99 × 10 ⁹	0.01	1.16 × 10 ⁸	2.49
K3	9	側面・並進	2.65 × 10 ⁶	1.18	5.21 × 10 ⁵	2.49
K4	9	側面・回転	1.72 × 10 ⁹	0.01	1.00 × 10 ⁸	2.49
K5	9	底面・並進	5.18 × 10 ⁷	0.00	2.12 × 10 ⁶	2.49
K6	9	底面・回転	3.85 × 10 ¹⁰	0.00	3.81 × 10 ⁸	2.49

(*1) K1, K3, K5はkN/m K2, K4, K6はkN・m/rad

(*2) K1, K3, K5はkN・s/m K2, K4, K6はkN・s・m/rad

(*3) f₁は連成系の1次固有振動数

(EW方向)

ばね番号	質点番号	地盤ばね成分	ばね		減衰	
			ばね定数 ^(*1) Kc	採用振動数 (Hz)	減衰係数 ^(*2) Cc	採用振動数 ^(*3) f ₁ (Hz)
K1	8	側面・並進	3.06 × 10 ⁶	1.18	6.02 × 10 ⁵	2.59
K2	8	側面・回転	1.99 × 10 ⁹	0.01	1.17 × 10 ⁸	2.59
K3	9	側面・並進	2.65 × 10 ⁶	1.18	5.21 × 10 ⁵	2.59
K4	9	側面・回転	1.72 × 10 ⁹	0.01	1.02 × 10 ⁸	2.59
K5	9	底面・並進	5.10 × 10 ⁷	0.00	2.06 × 10 ⁶	2.59
K6	9	底面・回転	4.83 × 10 ¹⁰	0.00	5.82 × 10 ⁸	2.59

(*1) K1, K3, K5はkN/m K2, K4, K6はkN・m/rad

(*2) K1, K3, K5はkN・s/m K2, K4, K6はkN・s・m/rad

(*3) f₁は連成系の1次固有振動数

解析に用いる基礎地盤のばね定数と減衰定数

表4-8 ばね定数と減衰係数 (Ss-3H)

(NS方向)

ばね番号	質点番号	地盤ばね成分	ばね		減衰	
			ばね定数 ^(*1) Kc	採用振動数 (Hz)	減衰係数 ^(*2) Cc	採用振動数 ^(*3) f ₁ (Hz)
K1	8	側面・並進	2.96 × 10 ⁶	1.16	5.92 × 10 ⁵	2.46
K2	8	側面・回転	1.92 × 10 ⁹	0.01	1.14 × 10 ⁸	2.46
K3	9	側面・並進	2.56 × 10 ⁶	1.16	5.12 × 10 ⁵	2.46
K4	9	側面・回転	1.66 × 10 ⁹	0.01	9.89 × 10 ⁷	2.46
K5	9	底面・並進	5.01 × 10 ⁷	0.00	2.09 × 10 ⁶	2.46
K6	9	底面・回転	3.70 × 10 ¹⁰	0.00	3.74 × 10 ⁸	2.46

(*1) K1, K3, K5はkN/m K2, K4, K6はkN・m/rad

(*2) K1, K3, K5はkN・s/m K2, K4, K6はkN・s・m/rad

(*3) f₁は連成系の1次固有振動数

(EW方向)

ばね番号	質点番号	地盤ばね成分	ばね		減衰	
			ばね定数 ^(*1) Kc	採用振動数 (Hz)	減衰係数 ^(*2) Cc	採用振動数 ^(*3) f ₁ (Hz)
K1	8	側面・並進	2.96 × 10 ⁶	1.16	5.92 × 10 ⁵	2.55
K2	8	側面・回転	1.92 × 10 ⁹	0.01	1.15 × 10 ⁸	2.55
K3	9	側面・並進	2.56 × 10 ⁶	1.16	5.12 × 10 ⁵	2.55
K4	9	側面・回転	1.66 × 10 ⁹	0.01	9.99 × 10 ⁷	2.55
K5	9	底面・並進	4.93 × 10 ⁷	0.00	2.02 × 10 ⁶	2.55
K6	9	底面・回転	4.64 × 10 ¹⁰	0.00	5.70 × 10 ⁸	2.55

(*1) K1, K3, K5はkN/m K2, K4, K6はkN・m/rad

(*2) K1, K3, K5はkN・s/m K2, K4, K6はkN・s・m/rad

(*3) f₁は連成系の1次固有振動数

解析に用いる基礎地盤のばね定数と減衰定数

表4-9 ばね定数と減衰係数 (Ss-1V : 鉛直方向)

ばね番号	質点番号	地盤ばね成分	ばね		減衰	
			ばね定数 Kc(kN/m)	採用振動数 (Hz)	減衰係数 Cc(kN・s/m)	採用振動数 (*1) (Hz)
K1	9	底面・鉛直	8.03×10^7	0.00	4.77×10^6	4.19

(*1) f_1 は連成系の1次固有振動数

表4-10 ばね定数と減衰係数 (Ss-2V : 鉛直方向)

ばね番号	質点番号	地盤ばね成分	ばね		減衰	
			ばね定数 Kc(kN/m)	採用振動数 (Hz)	減衰係数 Cc(kN・s/m)	採用振動数 (*1) (Hz)
K1	9	底面・鉛直	8.32×10^7	0.00	4.87×10^6	4.26

(*1) f_1 は連成系の1次固有振動数

表4-11 ばね定数と減衰係数 (Ss-3V : 鉛直方向)

ばね番号	質点番号	地盤ばね成分	ばね		減衰	
			ばね定数 Kc(kN/m)	採用振動数 (Hz)	減衰係数 Cc(kN・s/m)	採用振動数 (*1) (Hz)
K1	9	底面・鉛直	8.03×10^7	0.00	4.77×10^6	4.19

(*1) f_1 は連成系の1次固有振動数

地震応答解析モデルの変更点

表4-12 地震応答解析モデル及び手法の比較

項目	内容	工認モデル	バックチェックモデル
入力地震動	入力地震動の算定方法	基礎マット下端に既往波を直接入力	一次元波動論による評価
建屋-地盤相互作用	解析モデル	S Rモデル	埋込みS Rモデル
建屋のモデル化	材料特性	コンクリート設計基準強度 22.1N/mm ² (225kgf/cm ²) ヤング係数 2.06 × 10 ⁴ (N/mm ²) ポアソン比 0.167	コンクリート実強度 35.0N/mm ² ヤング係数 2.57 × 10 ⁴ (N/mm ²) ポアソン比 0.2
	剛性評価	耐震壁を考慮	同左
	減衰定数	R C : 5 %	同左
	せん断断面積	耐震要素の全断面積の 1/2	地震方向の耐震要素のせん断断面積の和
	断面2次モーメント	有効フランジ幅 1/2 中立軸：炉心位置 (オペフロ上部は中心位置)	有効フランジ幅 1/4 中立軸：耐震要素毎に算定
地盤のモデル化	底面ばね	水平及び回転を考慮	水平及び回転を考慮
	側面ばね	水平を考慮	水平及び回転を考慮
非線形特性	耐震壁	設定せず (線形)	非線形特性を設定
	底面ばね	設定せず (線形)	非線形特性を設定

地震応答解析モデルの変更点

表4-13 地震応答解析モデル及び手法の比較(2)

		工認モデル	バックチェックモデル
解析モデル			
側面地盤ばね	剛性	NS方向解析時 水平ばね: 6.19×10^7 (kN/m) 回転ばね:無し	基礎上端面までの各質点にNOVAKの方法により求め,JEAGにより近似したばねを考慮 Ss-1H入力でのNS方向解析時 水平ばね: 5.52×10^6 (kN/m) 回転ばね: 3.58×10^9 (kNm/rad)
	減衰	安全側に各モード5%として考慮	NOVAKの方法により求め,JEAGにより近似した減衰係数を考慮
底面地盤ばね	剛性	NS方向解析時 水平ばね: 4.37×10^7 (kN/m) 回転ばね: 3.01×10^{10} (kNm/rad)	Ss-1H入力でのNS方向解析時 水平ばね: 5.01×10^7 (kN/m) 回転ばね: 3.70×10^{10} (kNm/rad)
	減衰	安全側に各モード5%として考慮	振動アドミタンス理論により求め,JEAGにより近似した減衰係数を考慮

地震応答解析モデルのパラメータスタディ（水平方向）

建屋モデルの違いが建屋応答にあたる影響を確認するために、「建屋のコンクリート強度」「側面回転ばね」「建屋減衰」をパラメータにしたパラメータスタディを実施した。

表4-14 解析ケースの一覧（水平方向）

解析ケース	コンクリート強度	建屋減衰	埋め込み効果
バックチェックモデル	実強度	5 %	水平 + 回転
ケース 1（設計強度）	設計基準強度	5 %	水平 + 回転
ケース 2（側面回転ばね無視）	実強度	5 %	水平
ケース 3（建屋減衰 3 %）	実強度	3 %	水平 + 回転
ケース 4（設計ベースモデル）	設計基準強度	5 %	水平

地震応答解析モデルのパラメータスタディ（水平方向）

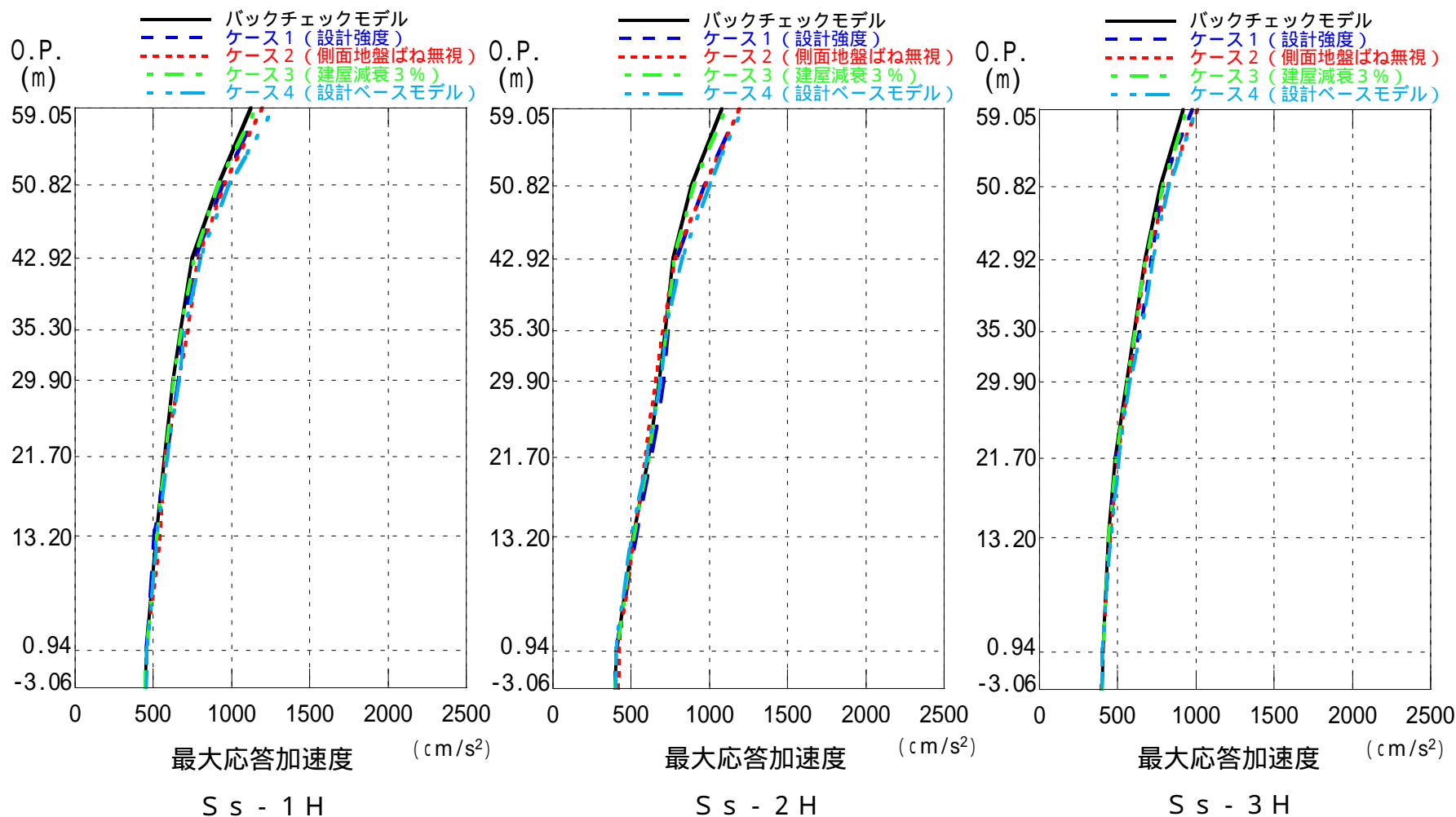


図4-3 最大応答加速度分布（NS方向）

地震応答解析モデルのパラメータスタディ（水平方向）

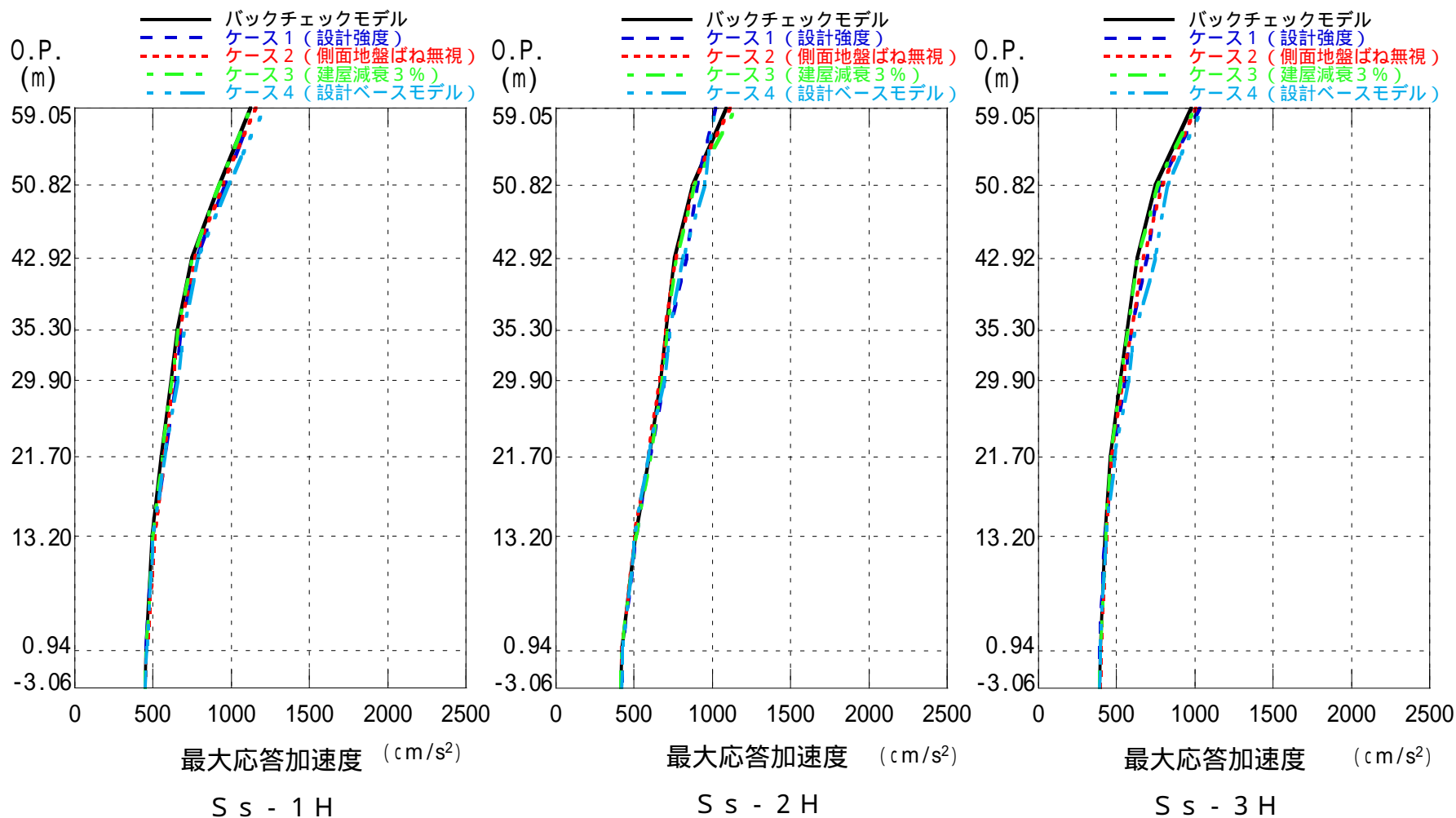


図4-4 最大応答加速度分布（EW方向）

地震応答解析モデルのパラメータスタディ（水平方向）

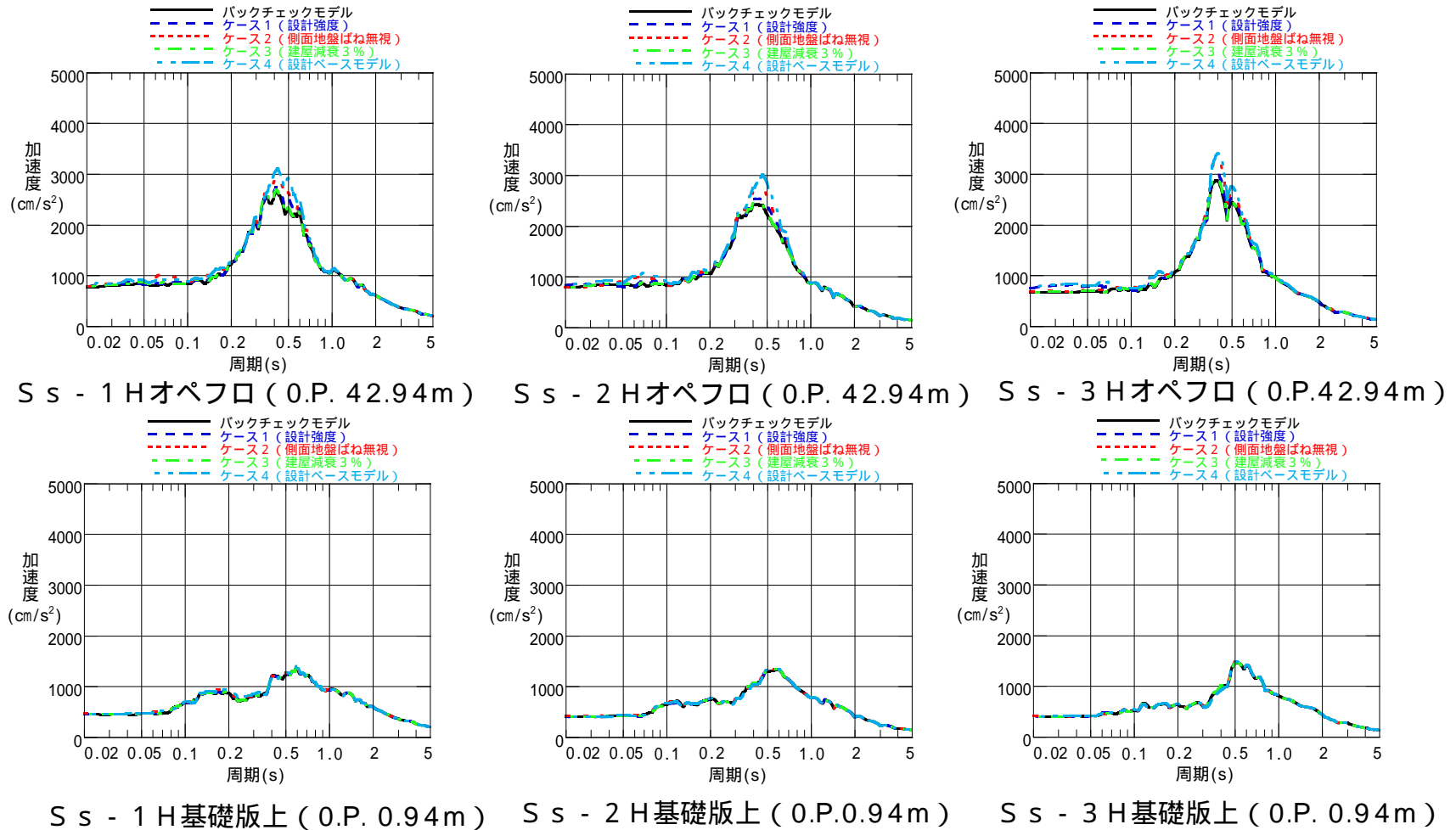


図4-5 床応答スペクトル（NS方向：h=0.05）

地震応答解析モデルのパラメータスタディ（水平方向）

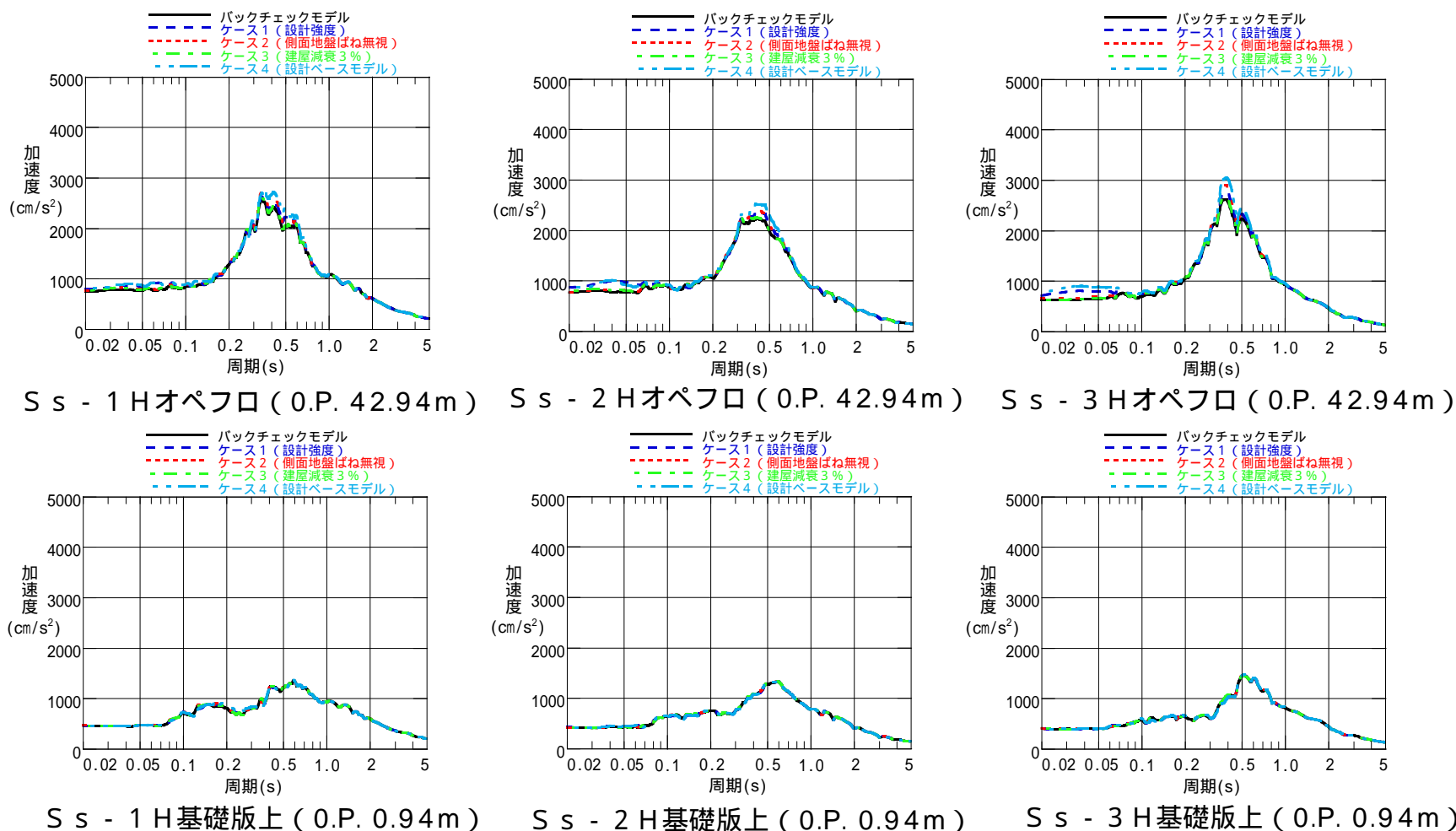


図4-6 床応答スペクトル（EW方向：h=0.05）

オペフロ階以上の層で若干のばらつきがあるが，建屋モデルの違いが建屋の応答に与える影響は小さい。

地震応答解析モデルのパラメータスタディ（鉛直方向）

建屋モデルの違いが建屋応答にあたる影響を確認するために、「建屋のコンクリート強度」「側面回転ばね」「建屋減衰」をパラメータにしたパラメータスタディを実施した。

表4-15 解析ケースの一覧（鉛直方向）

解析ケース	コンクリート強度	建屋減衰
バックチェックモデル	実強度	5 %
ケース 1（設計強度）	設計基準強度	5 %
ケース 3（建屋減衰 3 %）	実強度	3 %

地震応答解析モデルのパラメータスタディ（鉛直方向）

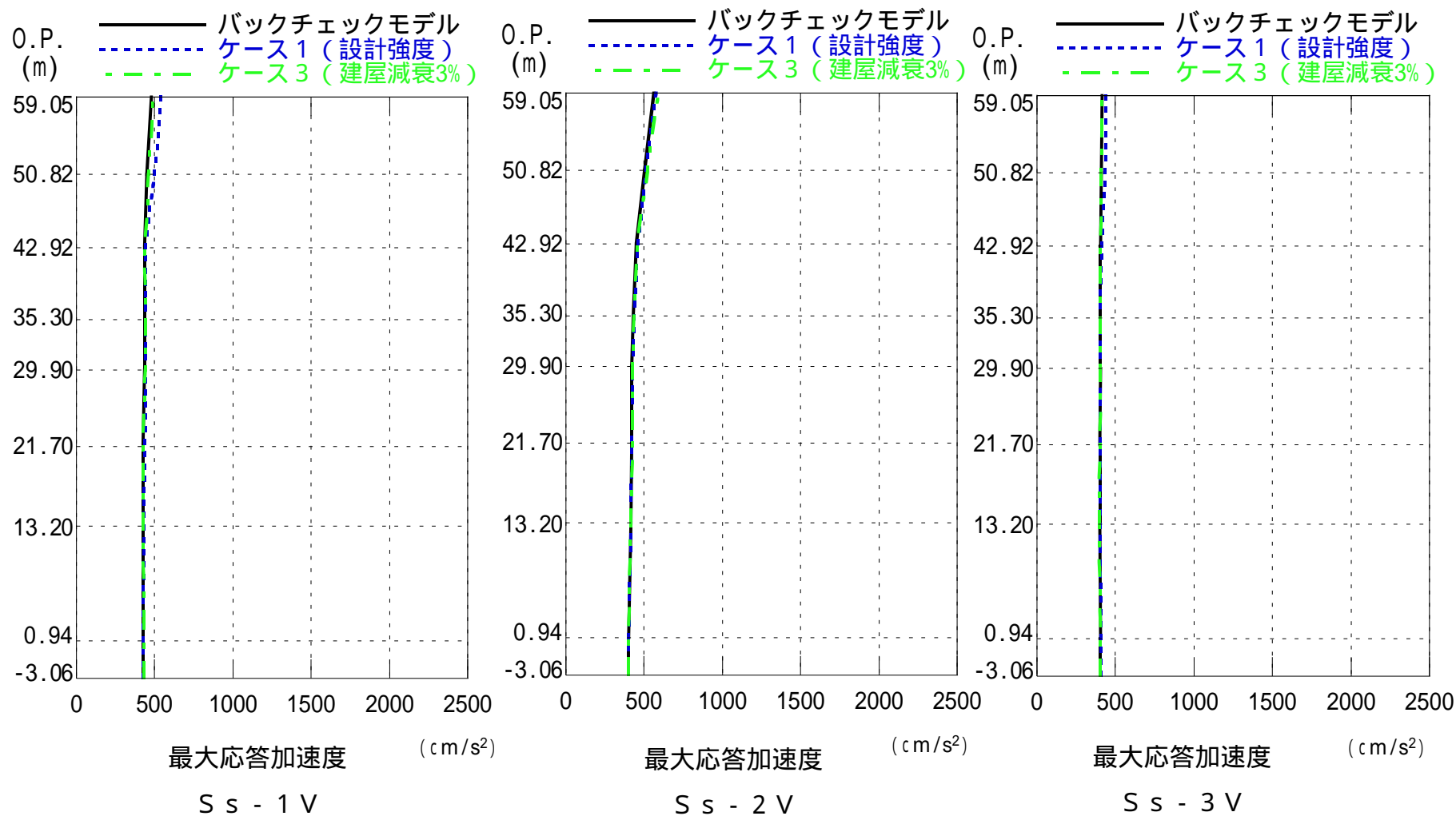


図4-7 最大応答加速度分布（鉛直方向）

地震応答解析モデルのパラメータスタディ（鉛直方向）

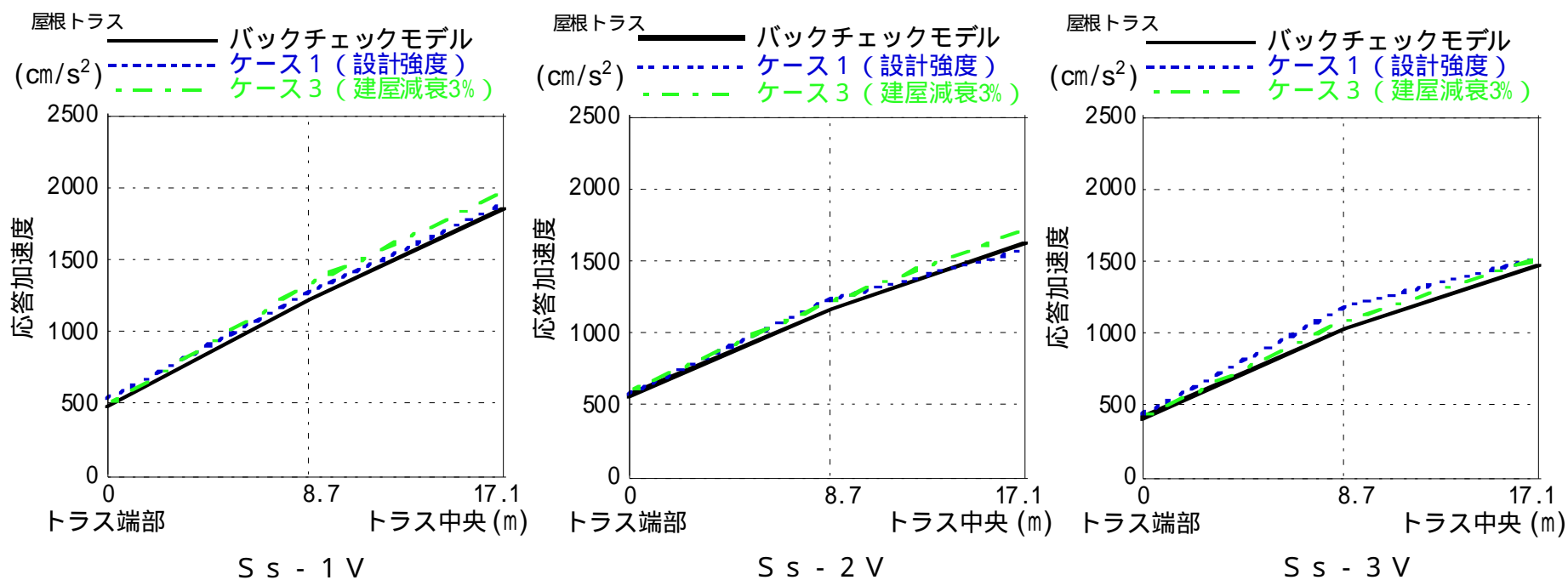
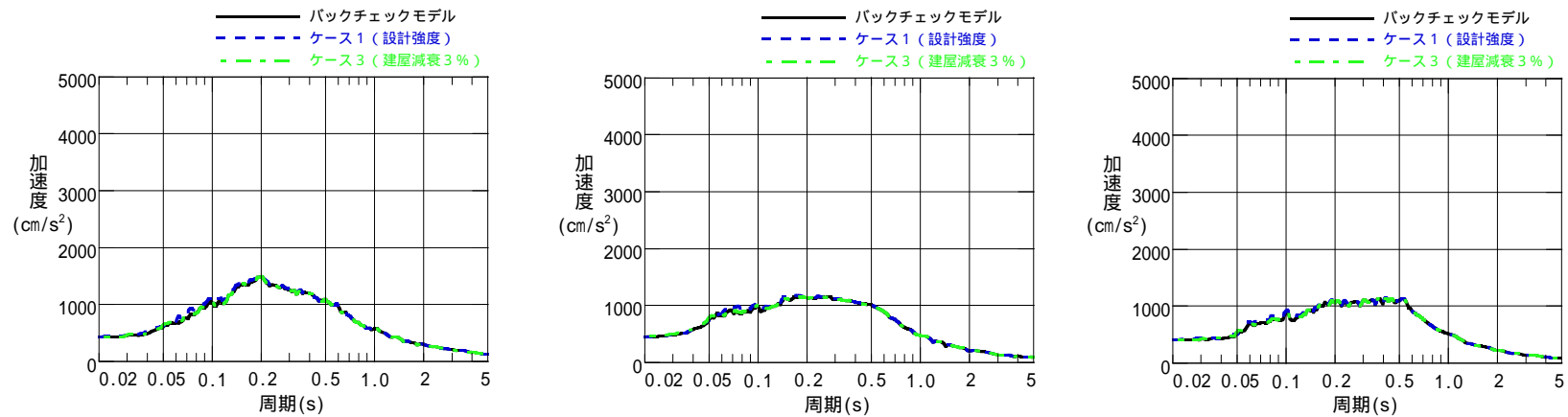


図4-8 最大応答加速度分布（鉛直方向：屋根トラス）

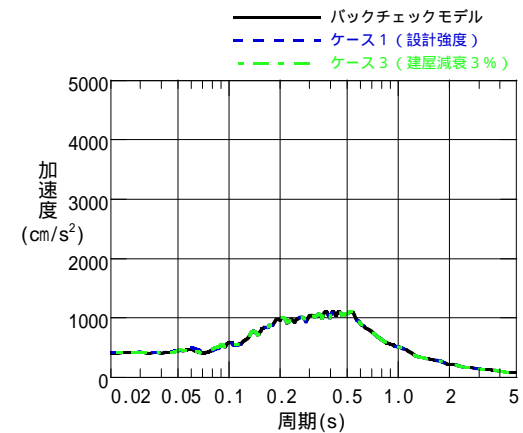
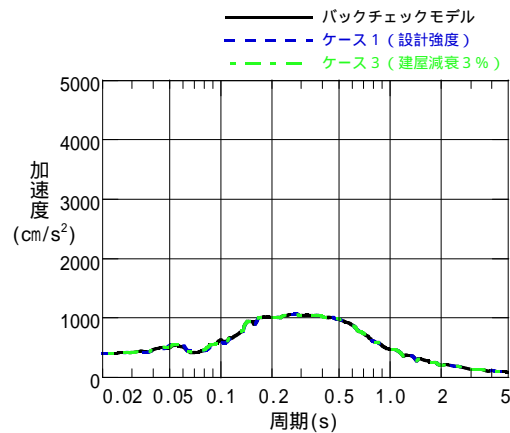
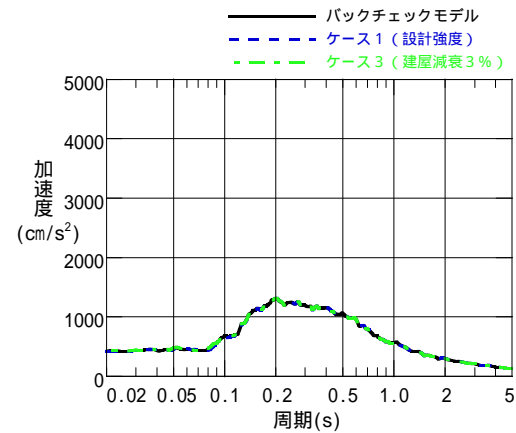
地震応答解析モデルのパラメータスタディ（鉛直方向）



S s - 1 V オペフロ (O.P. 42.94m)

S s - 2 V オペフロ (O.P. 42.94m)

S s - 3 V オペフロ (O.P. 42.94m)



S s - 1 V 基礎版上 (O.P. 0.94m)

S s - 2 V 基礎版上 (O.P. 0.94m)

S s - 3 V 基礎版上 (O.P. 0.94m)

図4-9 床応答スペクトル（鉛直方向：h=0.05）

オペフロ階以上の層で若干のばらつきがあるが、建屋モデルの違いが建屋の応答に与える影響は小さい。

新潟県中越沖地震を踏まえた地震応答解析モデルの妥当性確認 (床の柔軟性を考慮した検討結果について)

新潟県中越沖地震を踏まえ、床などの柔軟性を考慮した解析及び地震観測記録に基づいた解析などにより、耐震バックチェックで用いた水平方向の地震応答解析モデルによる耐震安全性評価に問題がないことを検討した。

検討は、2008年岩手・宮城内陸地震の観測記録のうち基礎版上の観測記録を入力として、耐震安全性評価モデル(以下「床剛モデル」と)と床の柔軟性を考慮したモデル(以下「床柔モデル」と)によるシミュレーション解析を実施した。

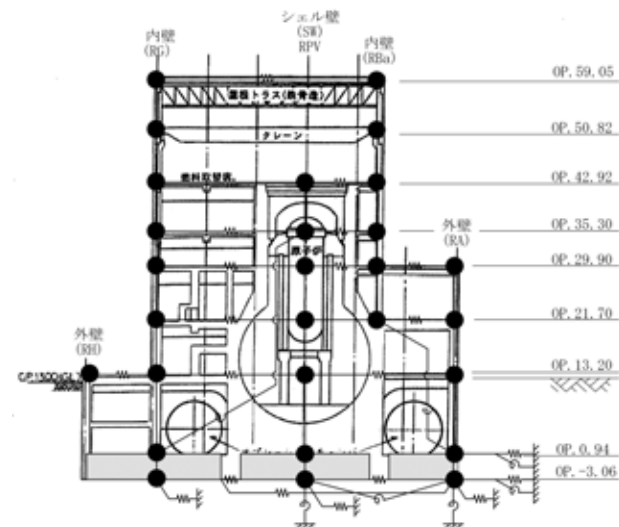


図4-10 床柔モデル (NS方向)

表4-16 解析モデルの条件

項目		床剛モデル (耐震安全性評価モデル)	床柔モデル
剛性評価	コンクリート強度	35.0N/mm ²	同左
	ヤング係数	25.7 × 10 ⁹ N/mm ²	同左
	考慮範囲	耐震壁	同左
減衰定数	鉄筋コンクリート	5%(複素減衰:一定減衰)	同左
解析モデル	建屋-地盤相互作用	埋込みSRモデル	同左
	建屋モデル	質点系1軸モデル	質点系多軸モデル
	地盤ばね	JEAGによる近似法	同左
	側面ばね	水平・回転を考慮	同左
1次固有周期(sec)		0.371(NS) 0.358(EW)	0.382(NS) 0.368(EW)
解析手法		周波数応答解析	同左
入力地震動		基礎版上観測記録	同左

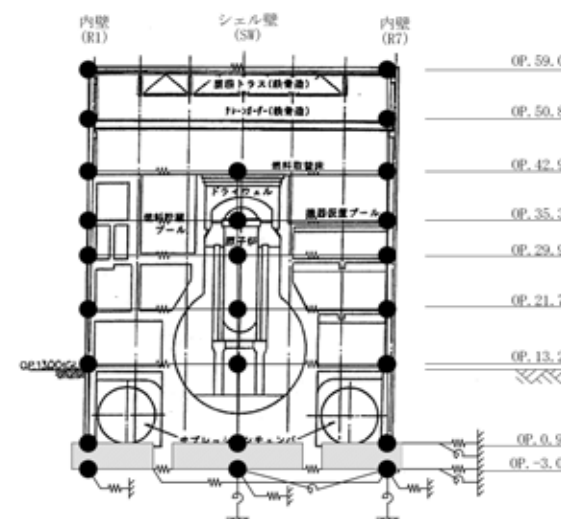


図4-11 床柔モデル (EW方向)

新潟県中越沖地震を踏まえた地震応答解析モデルの妥当性確認 (床の柔性を考慮した検討結果について)

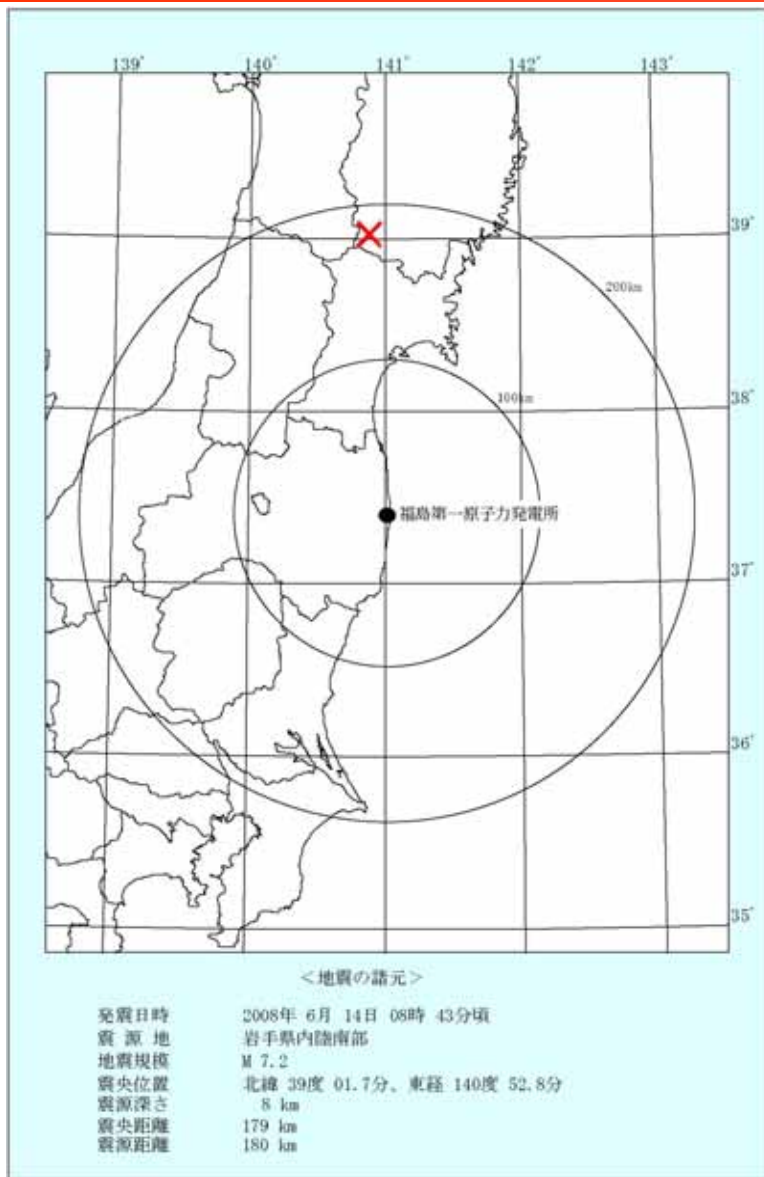


図4-12 地震の諸元

2008年6月14日の地震（岩手県内陸）の
基礎版上の観測記録
(平成20年岩手・宮城内陸地震)

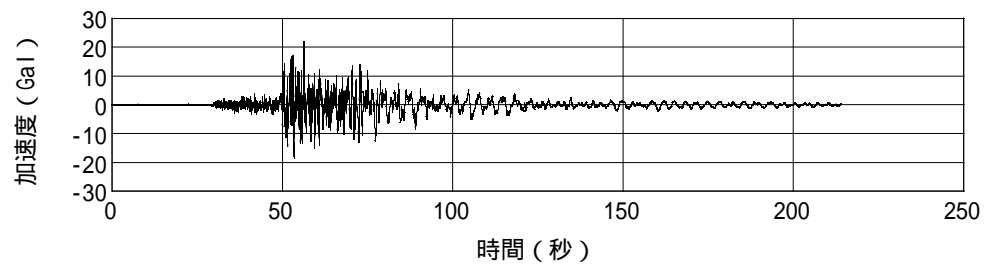


図4-13 加速度時刻歴波形 NS方向
Max=22 Gal

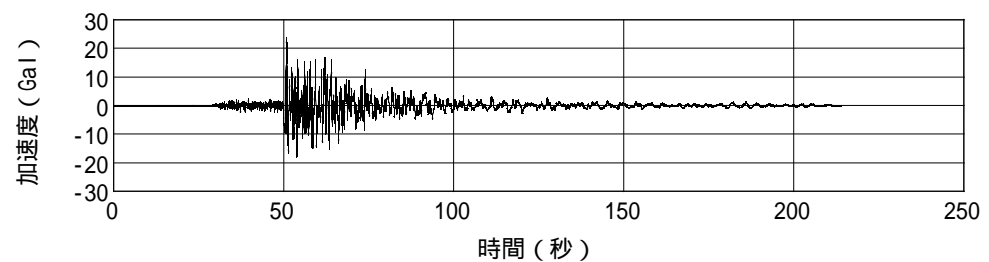


図4-14 加速度時刻歴波形 EW方向
Max=24 Gal

新潟県中越沖地震を踏まえた地震応答解析モデルの妥当性確認 (床の柔性を考慮した検討結果について)

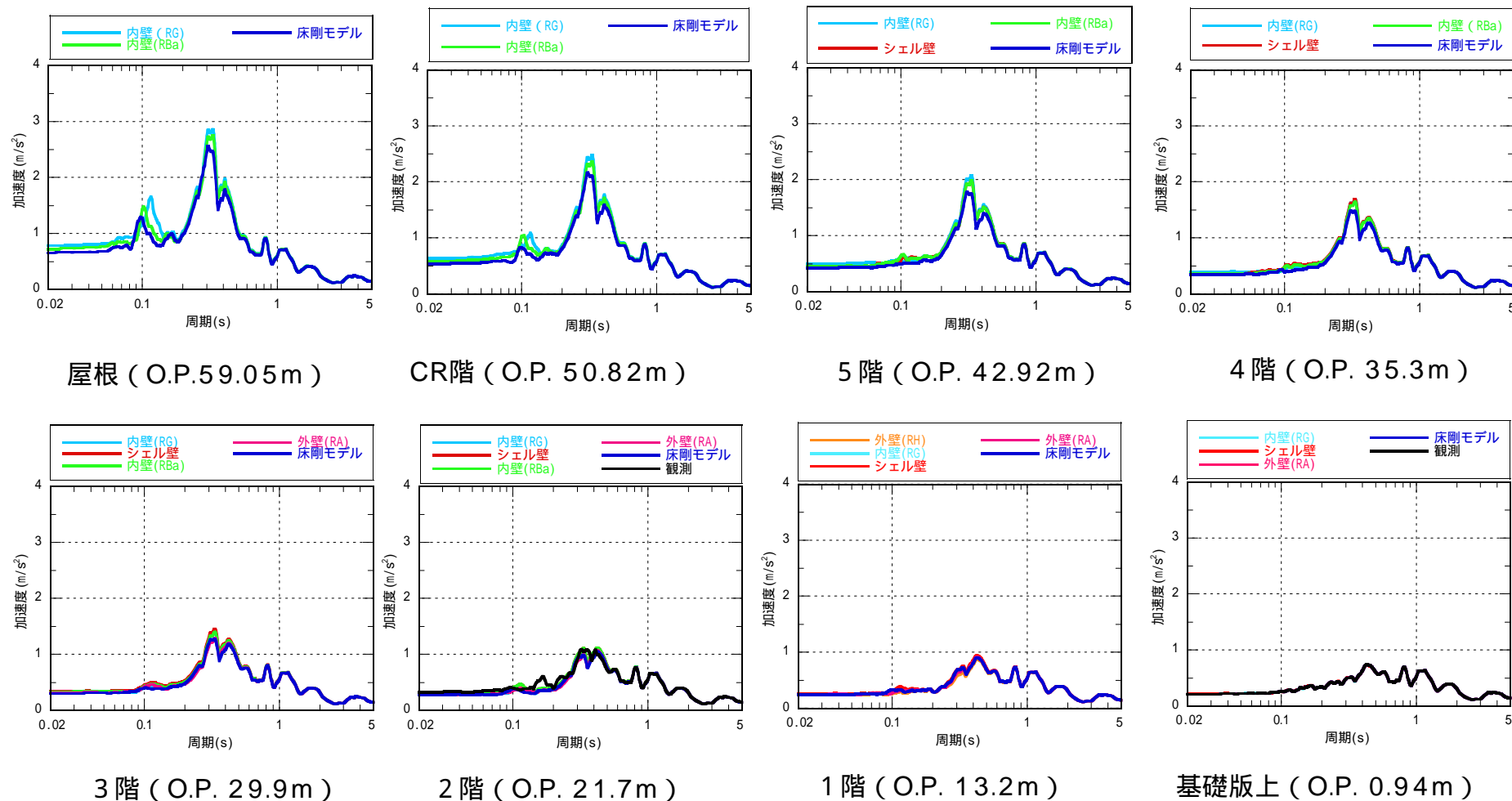
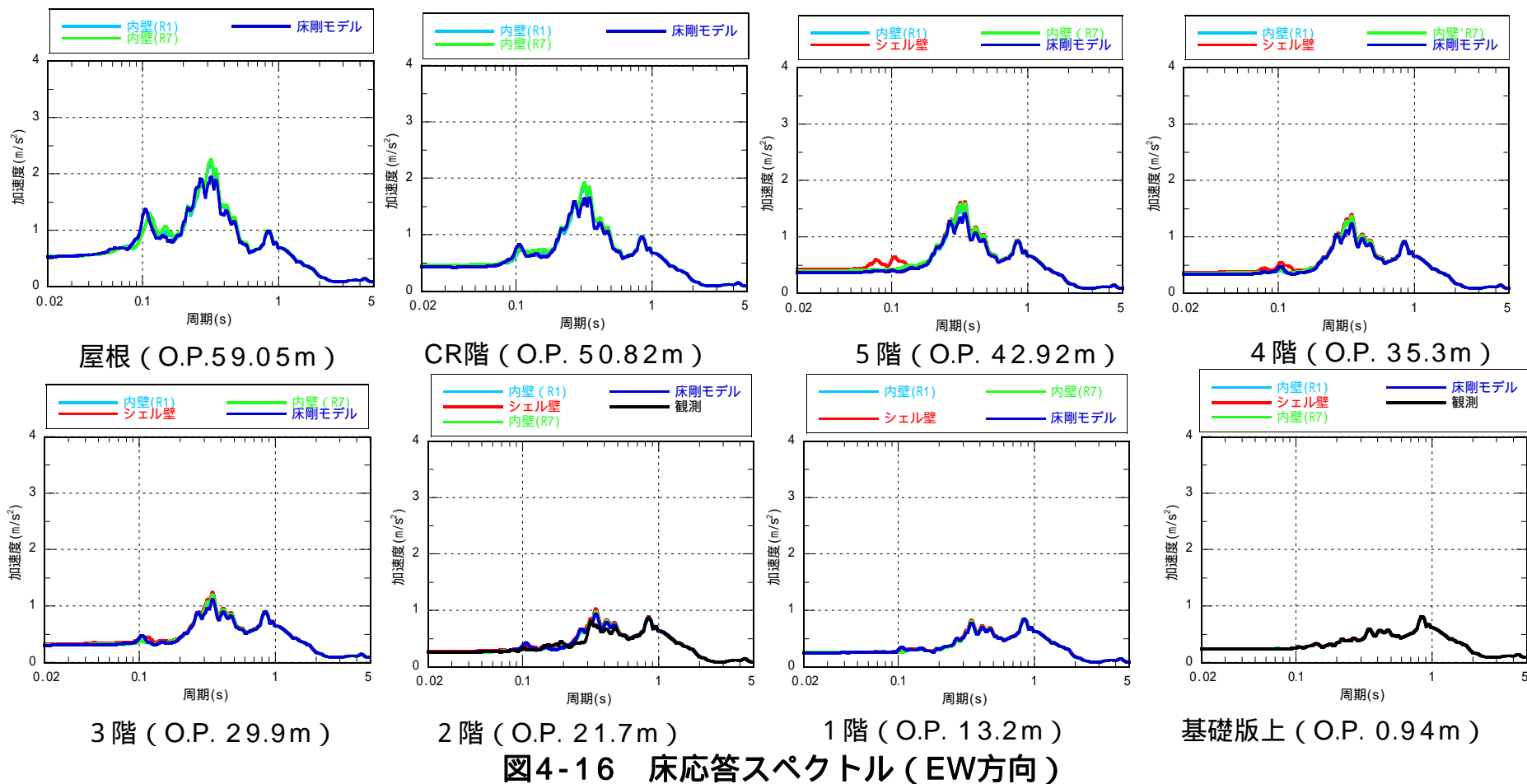


図4-15 床応答スペクトル (NS方向)

新潟県中越沖地震を踏まえた地震応答解析モデルの妥当性確認 (床の柔性を考慮した検討結果について)



観測記録によるシミュレーション解析結果から

- ・床剛モデルの解析結果は、観測記録と概ね整合している。
- ・床柔モデルの解析結果は、床剛モデルと概ね良い対応を示し、床柔モデルの場合であっても、柏崎刈羽原子力発電所4号機の間階位置で見られたような特異な応答性状が現れていないことを確認した。

・安全上重要な建物・構築物の耐震安全性評価

5 地震応答解析結果

地震応答解析

水平方向の地震応答解析の評価フローを示す。

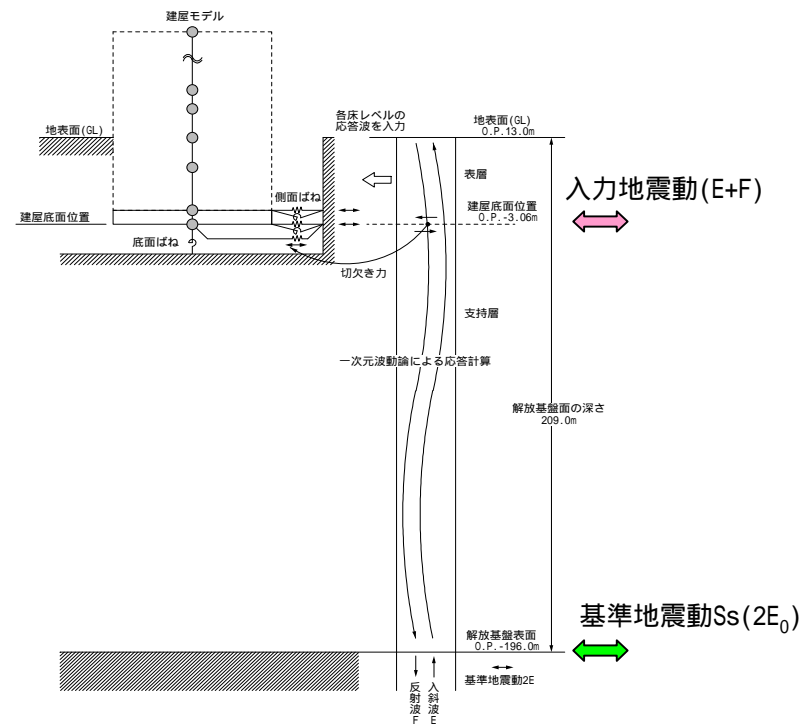
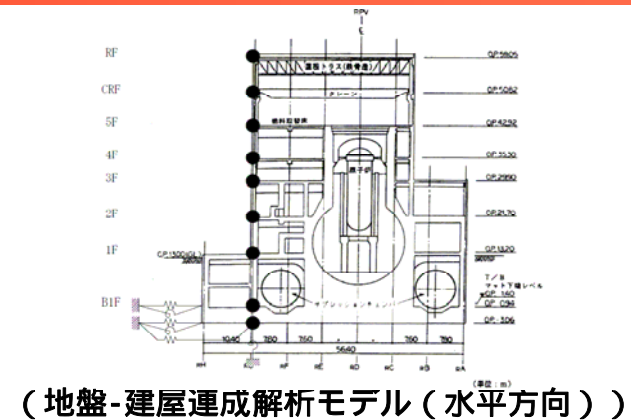
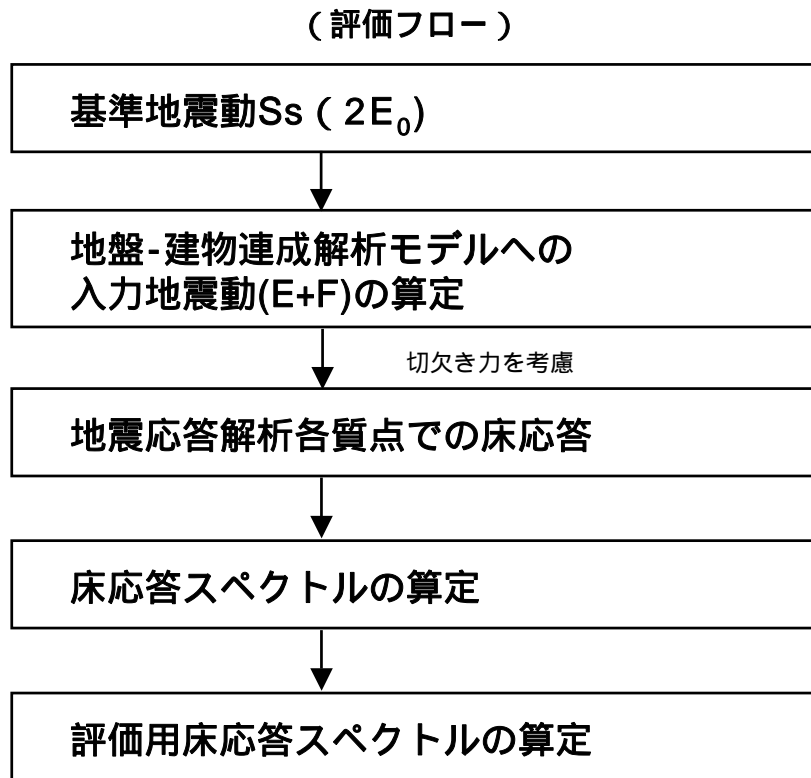


図5-1 基準地震動 S s から地震応答解析に至る評価フロー(水平方向)

地震応答解析

基準地震動 $S_s (2E_0)$

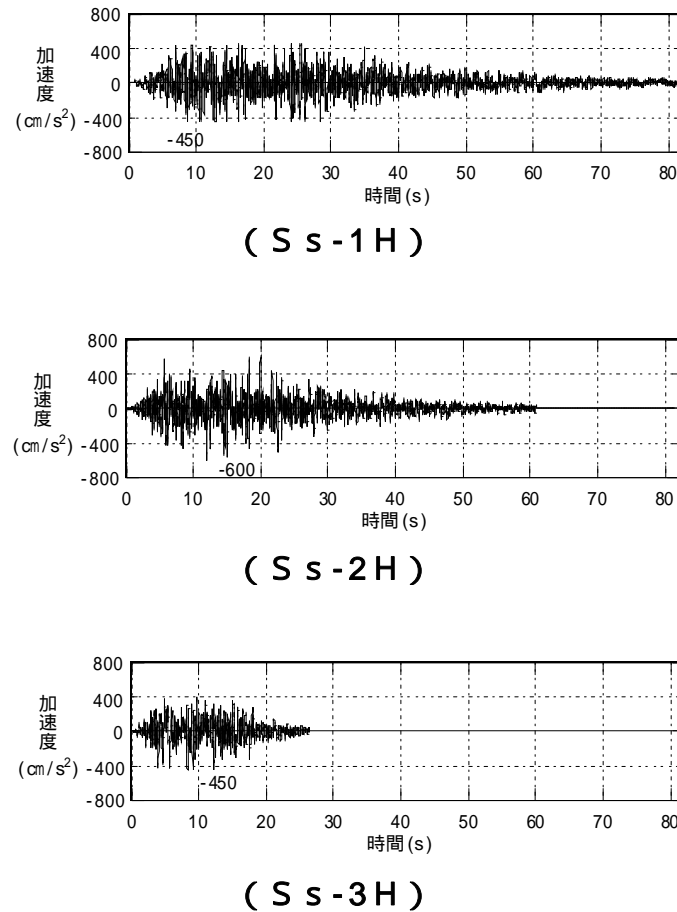


図5-2 加速度時刻歴波形 (N S 方向)

解放基盤表面に定義した基準地震動 S_s の加速度時刻歴波形を図5-2に、応答スペクトルを図5-3に示す。

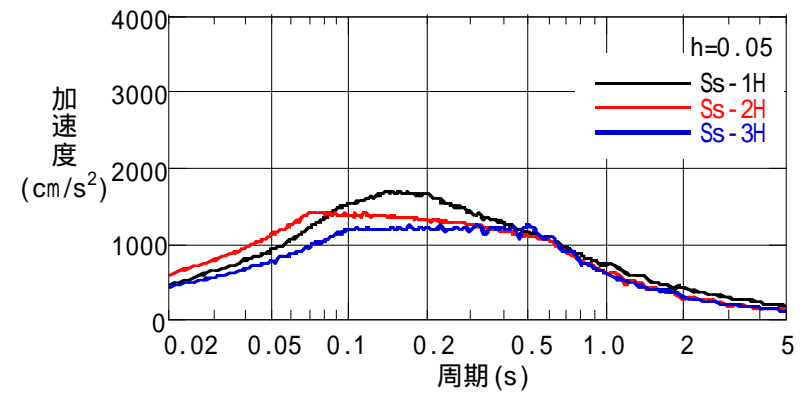


図5-3 基準地震動の応答スペクトル (N S 方向)

地震応答解析

地盤-建物連成解析モデルへの
入力地震動(E+F)の算定

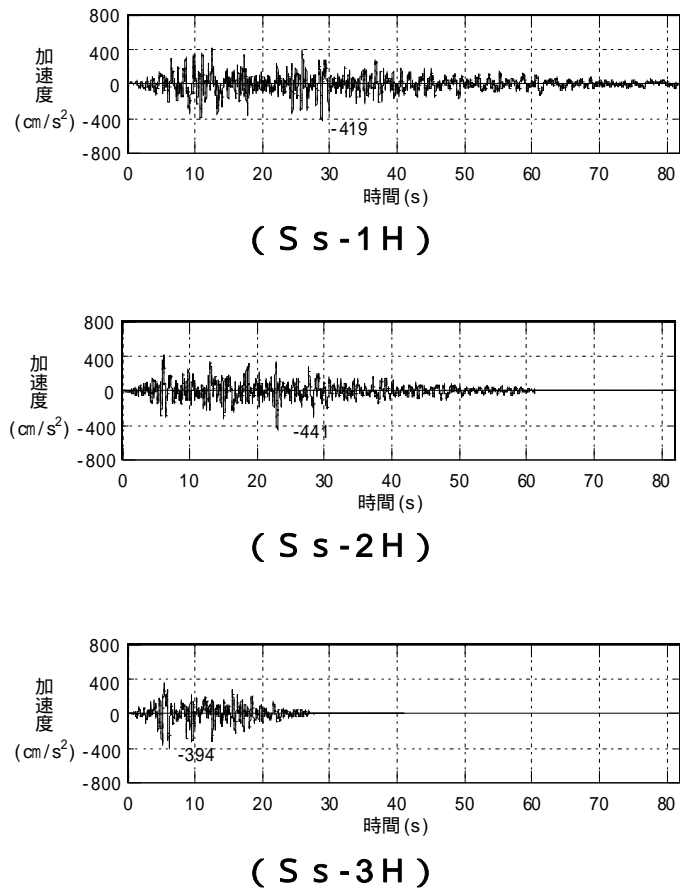


図5-4 加速度時刻歴波形 (N S 方向)

一次元波動論に基づく地震応答解析を行い原子炉
建屋基礎底面位置での入力地震動の加速度時刻歴波
形を図5-4に，応答スペクトルを図5-5に示す。

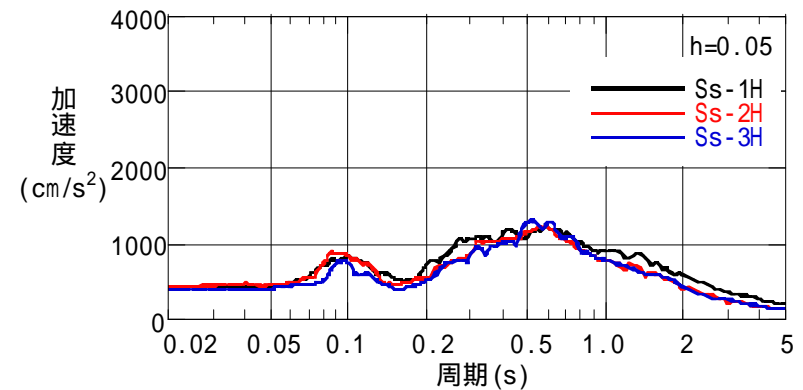


図5-5 入力地震動の応答スペクトル
(基礎底面E+F/N S 方向)

地震応答解析

床応答スペクトルの算定

地盤-建屋連成解析モデルによる地震応答解析結果に基づく応答スペクトルを図5-6，図5-7に示す。

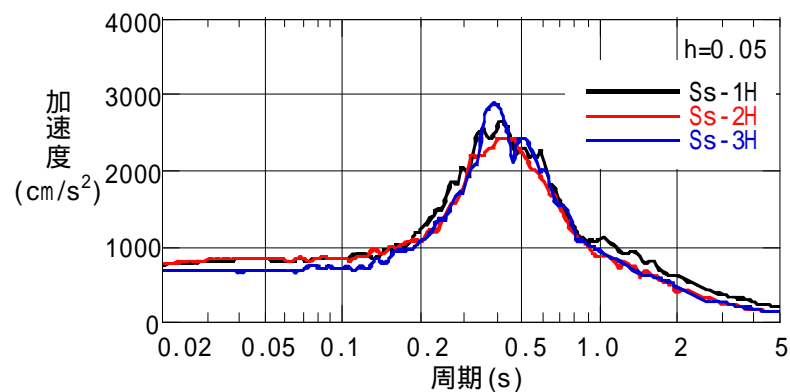


図5-6 床応答スペクトル
(O.P.42.92m/NS方向)

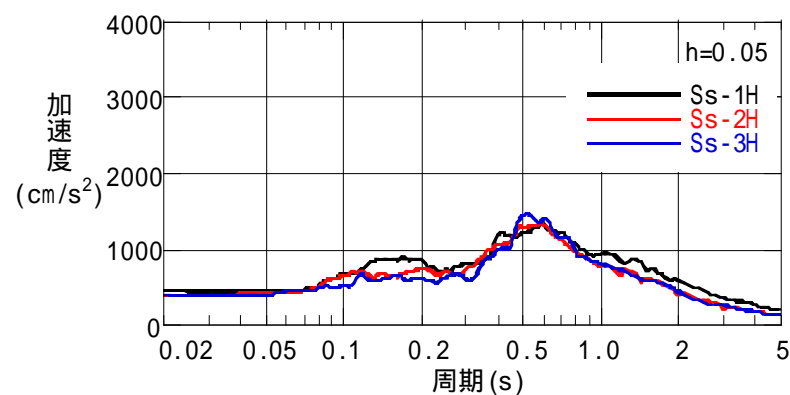
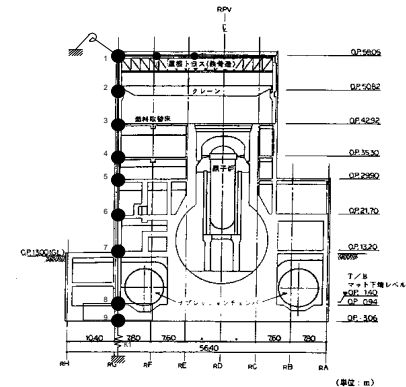
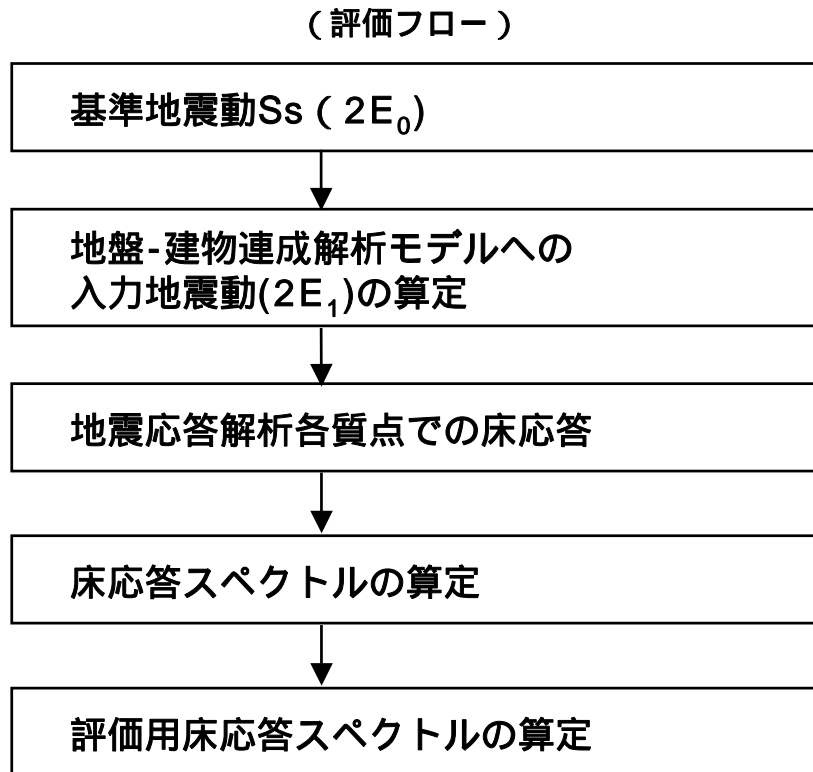


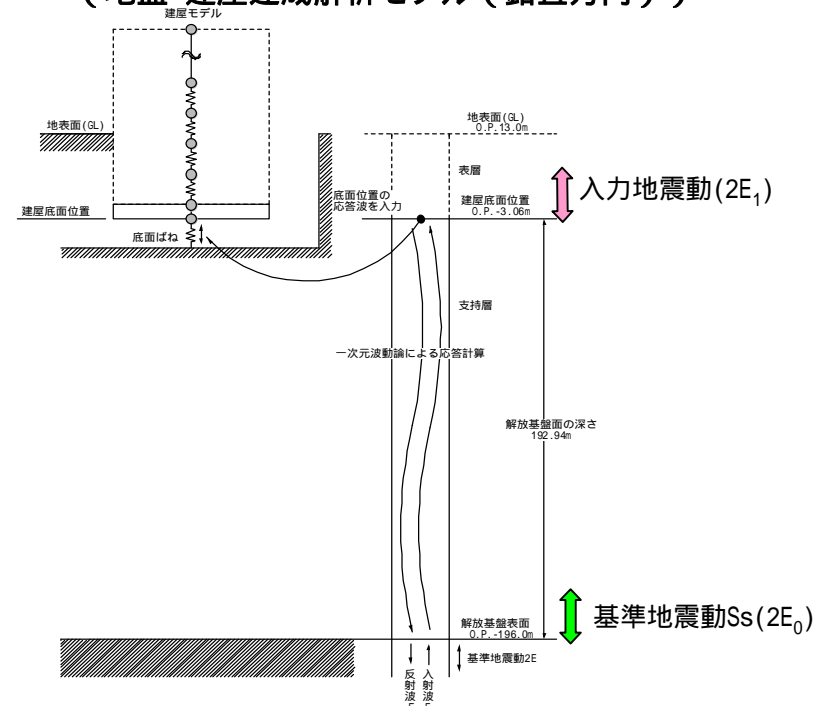
図5-7 床応答スペクトル
(O.P.0.94m/NS方向)

地震応答解析

鉛直方向の地震応答解析の評価フローを示す。



(地盤-建屋連成解析モデル(鉛直方向))

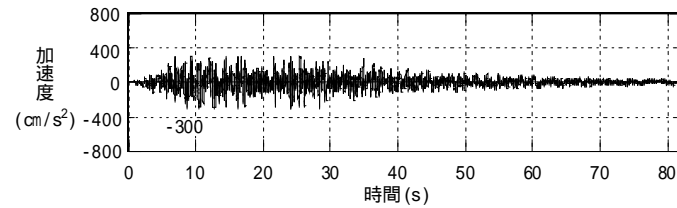


(入力地震動の概念図(鉛直方向))

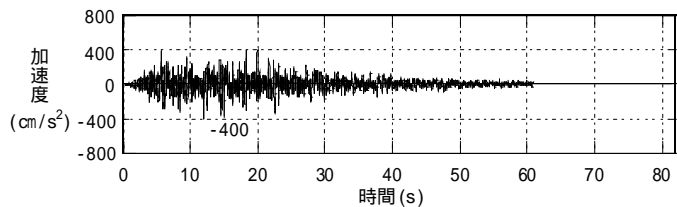
図5-8 基準地震動Ssから地震応答解析に至る評価フロー(鉛直方向)

地震応答解析

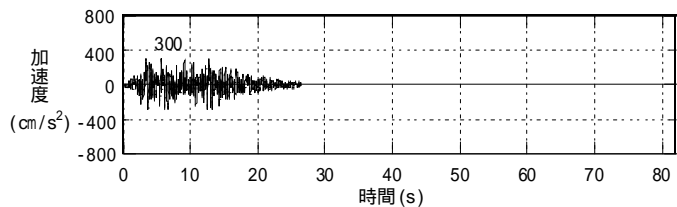
基準地震動 $S_s (2E_0)$



(S s - 1 V)



(S s - 2 V)



(S s - 3 V)

図5-9 加速度時刻歴波形 (鉛直方向)

解放基盤表面に定義した基準地震動 S_s の加速度時刻歴波形を図5-9に、応答スペクトルを図5-10に示す。

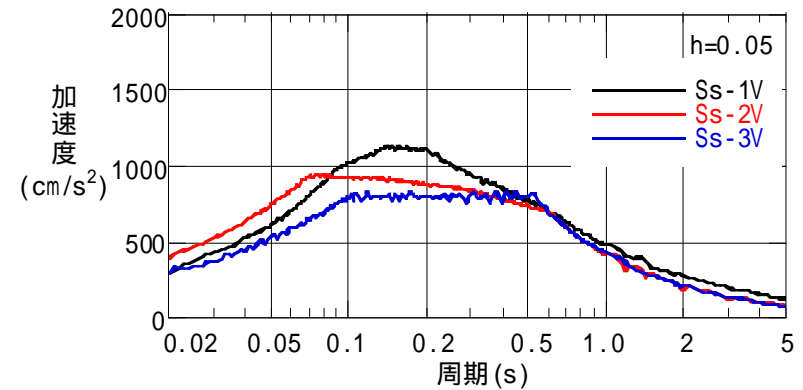
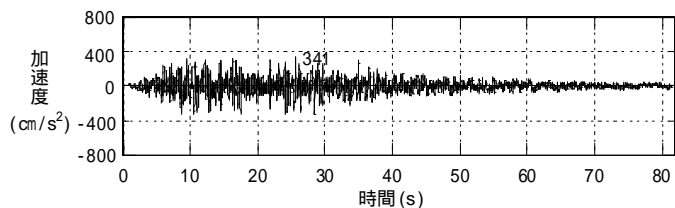


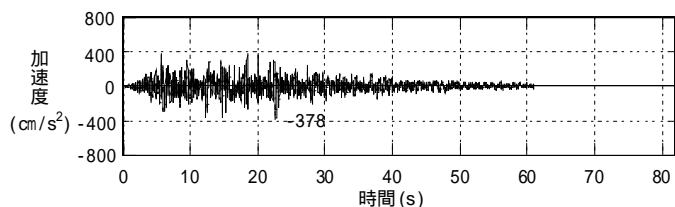
図5-10 基準地震動の応答スペクトル (鉛直方向)

地震応答解析

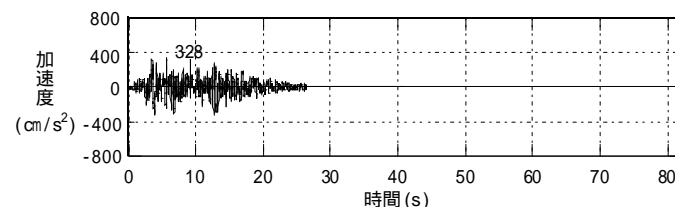
地盤-建物連成解析モデルへの
入力地震動(2E₁)の算定



(S s - 1 V)



(S s - 2 V)



(S s - 3 V)

図5-11 加速度時刻歴波形 (鉛直方向)

一次元波動論に基づく地震応答解析を行い原子炉
建屋基礎底面位置での入力地震動の加速度時刻歴波
形を図5-11に、応答スペクトルを図5-12に示す。

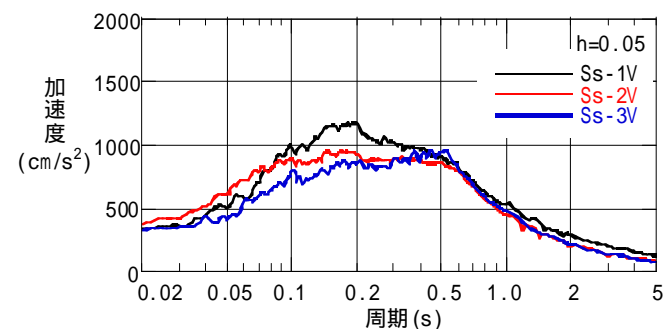


図5-12 入力地震動の応答スペクトル
(基礎底面2E/鉛直方向)

地震応答解析

床応答スペクトルの算定

地盤-建屋連成解析モデルによる地震応答解析結果に基づく応答スペクトルを図5-13，図5-14に示す。

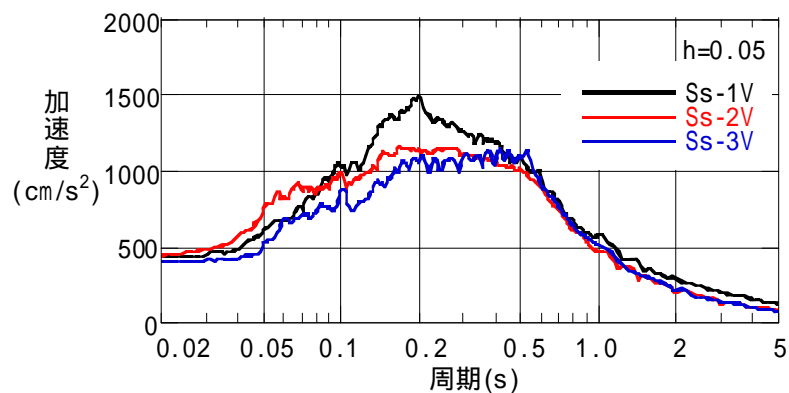


図5-13 床応答スペクトル
(O.P.42.92m/鉛直方向)

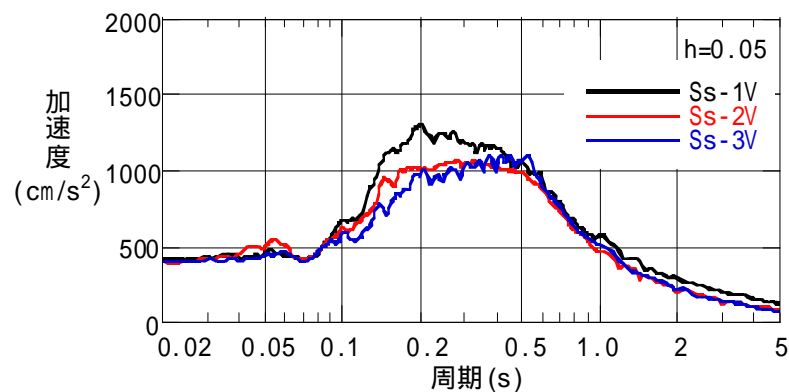


図5-14 床応答スペクトル
(O.P.0.94m/鉛直方向)

固有値解析結果

表5-1 固有値（固有周期，固有振動数）
および刺激係数（水平方向，NS方向）

(Ss-1H)

次数	固有周期 (s)	固有振動数 (Hz)	刺激係数	備考
1	0.407	2.46	1.789	地盤建屋連成一次
2	0.185	5.40	-1.005	
3	0.090	11.17	0.274	
4	0.065	15.28	-0.021	
5	0.056	17.76	-0.065	

(Ss-2H)

次数	固有周期 (s)	固有振動数 (Hz)	刺激係数	備考
1	0.401	2.49	1.794	地盤建屋連成一次
2	0.183	5.47	-1.018	
3	0.089	11.20	0.286	
4	0.065	15.32	-0.021	
5	0.056	17.77	-0.067	

(Ss-3H)

次数	固有周期 (s)	固有振動数 (Hz)	刺激係数	備考
1	0.407	2.46	1.789	地盤建屋連成一次
2	0.185	5.40	-1.005	
3	0.090	11.17	0.274	
4	0.065	15.28	-0.021	
5	0.056	17.76	-0.065	

表5-2 固有値（固有周期，固有振動数）
および刺激係数（水平方向，EW方向）

(Ss-1H)

次数	固有周期 (s)	固有振動数 (Hz)	刺激係数	備考
1	0.392	2.55	1.841	地盤建屋連成一次
2	0.185	5.41	-1.137	
3	0.105	9.56	0.326	
4	0.069	14.57	0.023	
5	0.056	17.71	-0.063	

(Ss-2H)

次数	固有周期 (s)	固有振動数 (Hz)	刺激係数	備考
1	0.386	2.59	1.848	地盤建屋連成一次
2	0.182	5.48	-1.159	
3	0.104	9.60	0.341	
4	0.068	14.61	0.022	
5	0.056	17.72	-0.065	

(Ss-3H)

次数	固有周期 (s)	固有振動数 (Hz)	刺激係数	備考
1	0.392	2.55	1.841	地盤建屋連成一次
2	0.185	5.41	-1.137	
3	0.105	9.56	0.326	
4	0.069	14.57	0.023	
5	0.056	17.71	-0.063	

固有値解析結果

表5-3 固有値（固有周期，固有振動数）
および刺激係数（鉛直方向）

(Ss-1V)

次数	固有周期 (s)	固有振動数 (Hz)	刺激係数	備考
1	0.317	3.16	3.024	屋根トラス一次
2	0.238	4.19	-2.104	地盤建屋連成一次
3	0.099	10.10	0.084	
4	0.046	21.60	-0.110	
5	0.029	34.22	0.047	

(Ss-2V)

次数	固有周期 (s)	固有振動数 (Hz)	刺激係数	備考
1	0.317	3.16	2.902	屋根トラス一次
2	0.235	4.26	-1.985	地盤建屋連成一次
3	0.099	10.10	0.087	
4	0.046	21.61	-0.114	
5	0.029	34.22	0.048	

(Ss-3V)

次数	固有周期 (s)	固有振動数 (Hz)	刺激係数	備考
1	0.317	3.16	3.024	屋根トラス一次
2	0.238	4.19	-2.104	地盤建屋連成一次
3	0.099	10.10	0.084	
4	0.046	21.60	-0.110	
5	0.029	34.22	0.047	

地震応答解析結果

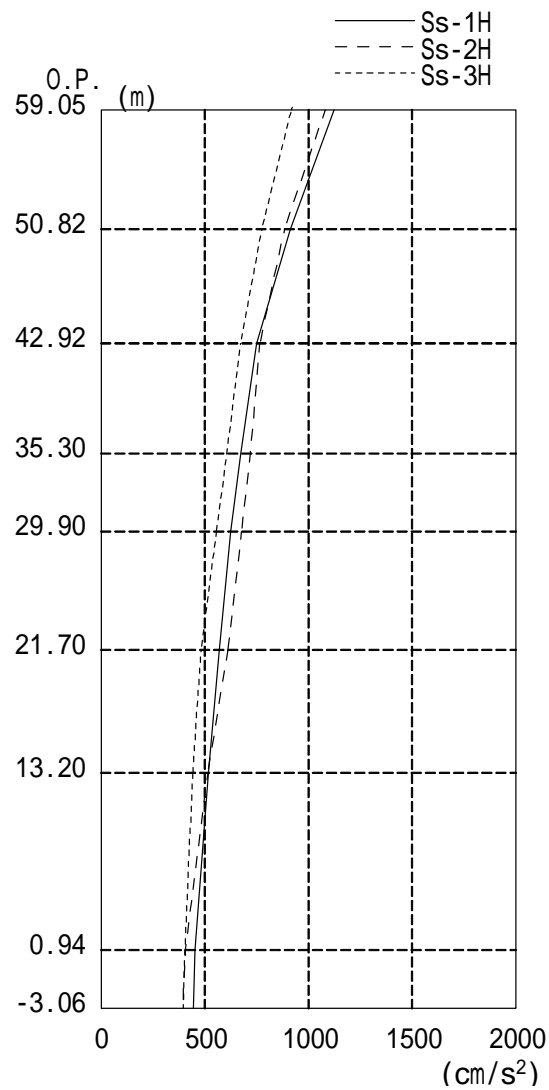


図5-15 最大応答加速度
(NS方向)

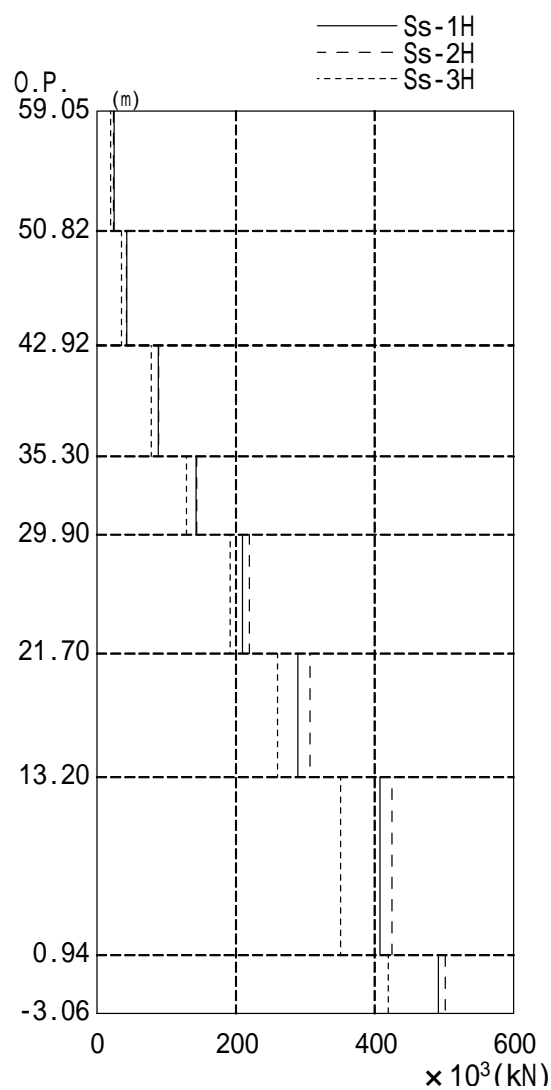


図5-16 最大応答せん断力
(NS方向)

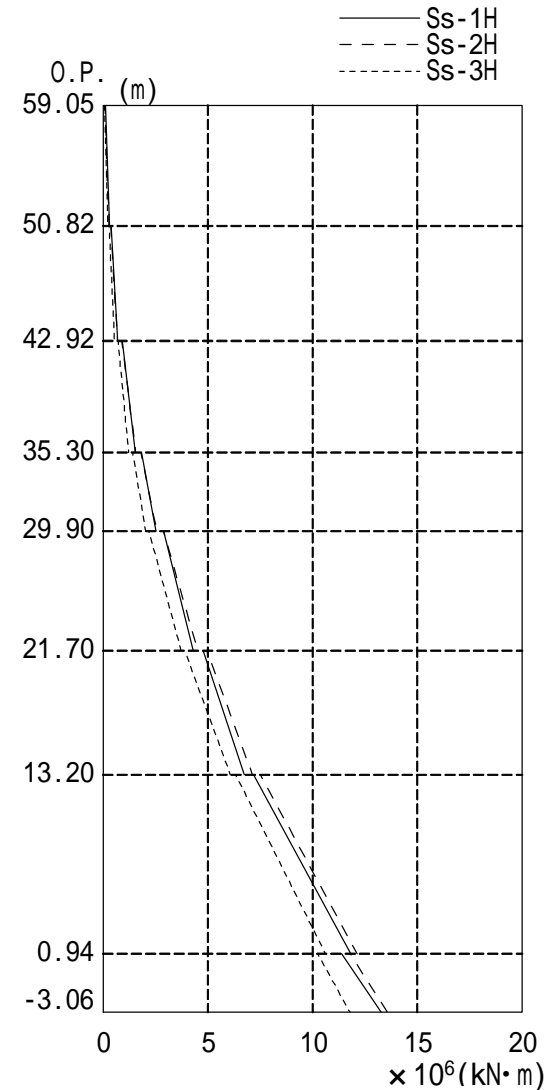


図5-17 最大応答曲げモーメント
(NS方向)

地震応答解析結果

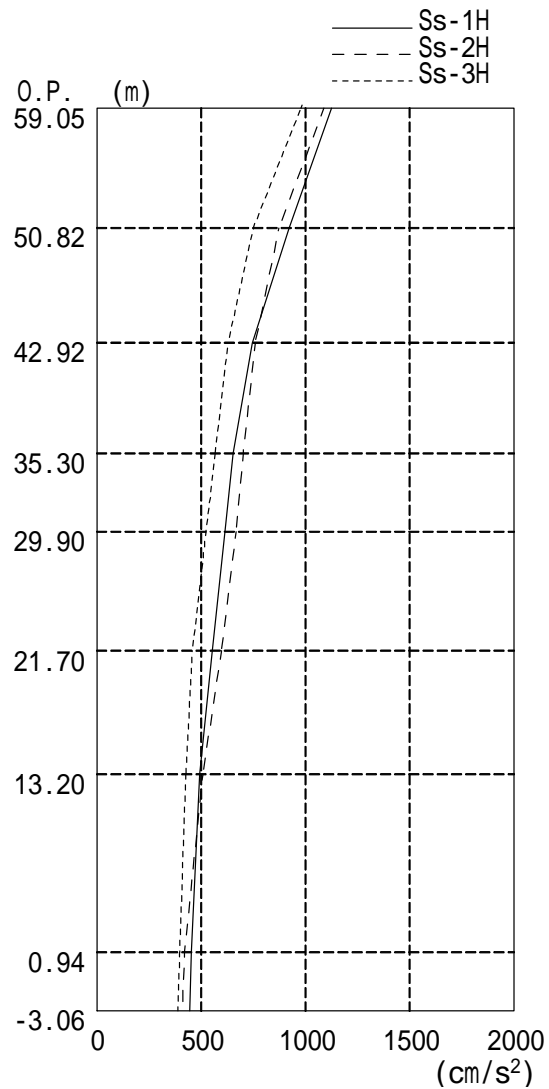


図5-18 最大応答加速度
(EW方向)

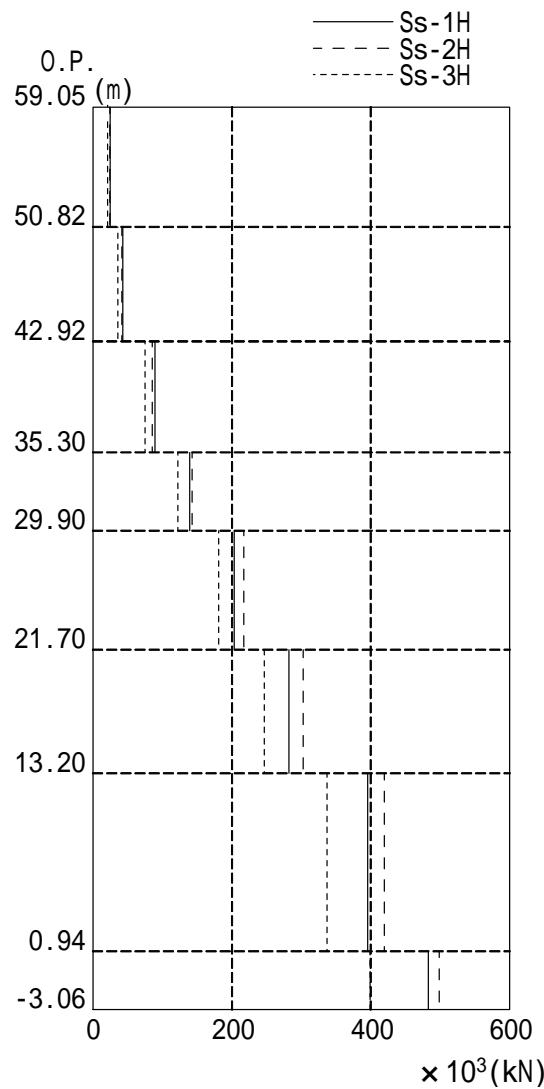


図5-19 最大応答せん断力
(EW方向)

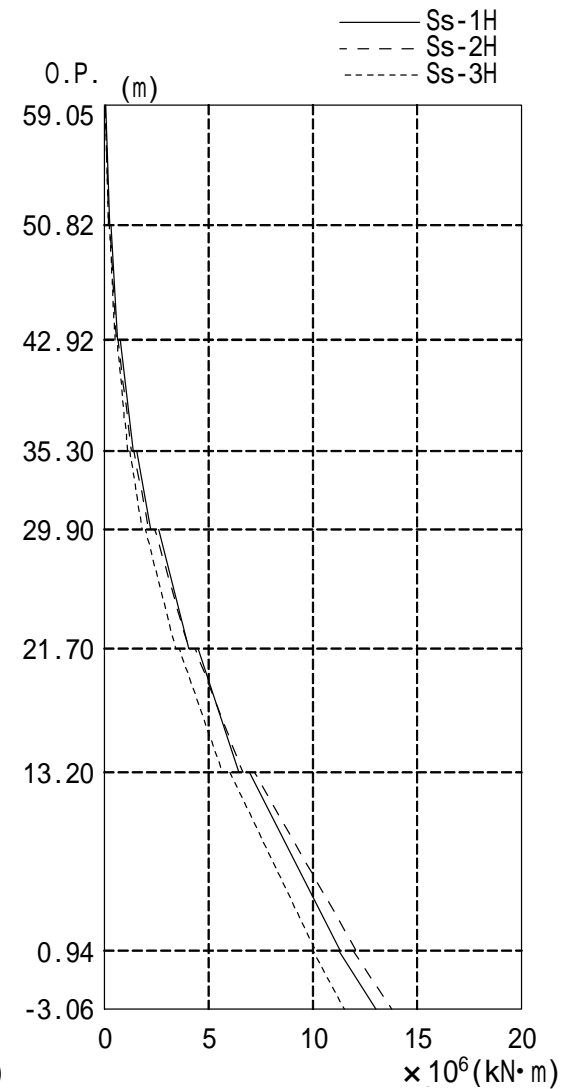


図5-20 最大応答曲げモーメント
(EW方向)

地震応答解析結果

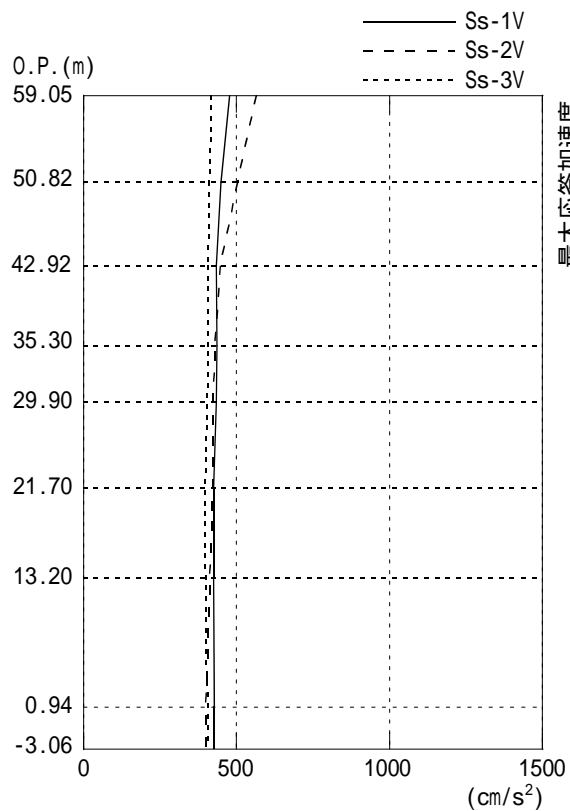


図5-21 最大応答加速度
(鉛直方向)

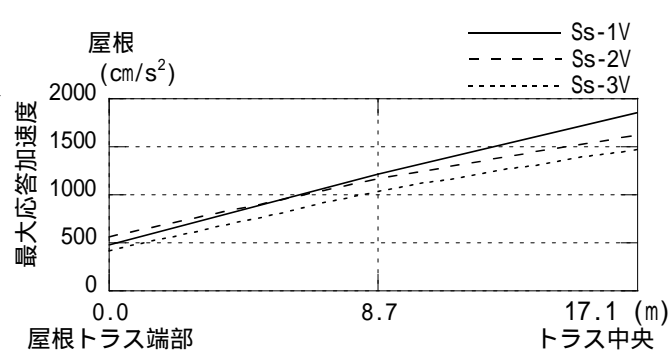


図5-22 最大応答加速度
(鉛直方向：屋根トラス)

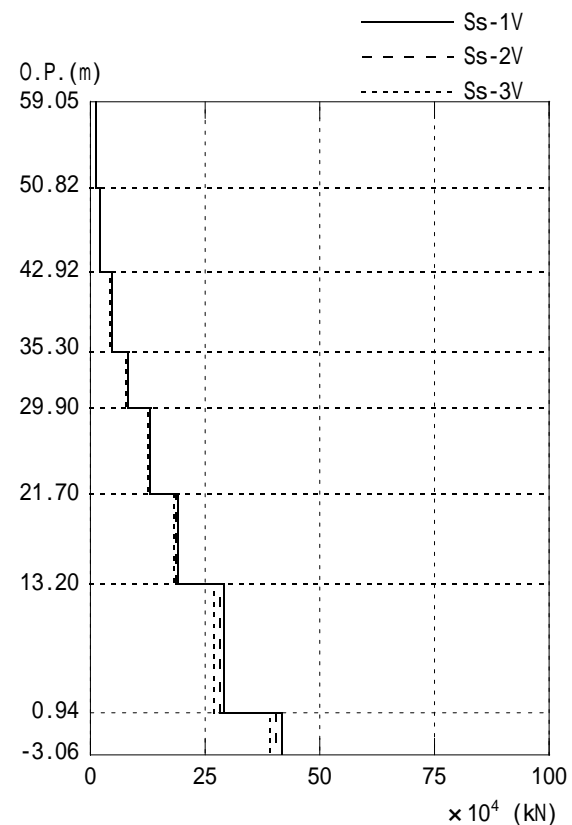


図5-23 最大応答軸力
(鉛直方向)

基礎浮上りの検討結果（接地率）

基礎浮上り非線形を考慮した地震応答解析結果の適用性を確認するため、地震応答解析から得られる最大転倒モーメントを用いて算出した原子炉建屋の接地率を表5-4に示す。

表5-4 接地率 (単位：%)

	S s - 1	S s - 2	S s - 3
N S 方向	79.7	78.1	87.5
E W 方向	90.6	87.3	97.6

建物の接地率は、JEAG4601-1991に基づき、地震応答解析の結果得られた最大転倒モーメントを用い、地震反力を三角形分布と仮定して算出した。

接地率 は下式により算出

$$\eta = \frac{1}{2} \left(3 - \frac{M}{M_0} \right) = 3 \left(\frac{1}{2} - \frac{M}{WL} \right)$$

η：接地率（>1.0の場合は=100%とする。）
 M：最大転倒モーメント（基礎下端の最大応答モーメント）
 M₀：浮上り限界転倒モーメント
 W：建屋総重量（鉛直地震力および浮力は無視）
 L：加振方向の基礎長さ

接地率は、JEAG4601-1991追補版において基礎浮上り非線形性を考慮した地震応答の適用条件とされている「接地率 65%以上」をいずれも満足する。

・安全上重要な建物・構築物の耐震安全性評価

6 耐震安全性評価結果

耐震安全性評価結果（耐震壁）

耐震安全性の評価は、基準地震動 S_s による各層の鉄筋コンクリート耐震壁の最大応答せん断ひずみが評価基準値（ 2.0×10^{-3} ）を超えないことを確認する。

地震応答解析から得られる最大せん断応答ひずみを表6-1に、せん断スケルトン曲線上の最大応答値を図6-1，図6-2に示す。

表6-1 耐震壁の最大応答せん断ひずみ一覧

基準地震動 S_s	N S 方向		E W 方向	
	最大応答 せん断ひずみ	部位	最大応答 せん断ひずみ	部位
$S_s - 1$	0.15×10^{-3}	1階	0.19×10^{-3}	5階
$S_s - 2$	0.16×10^{-3}	1階	0.18×10^{-3}	5階
$S_s - 3$	0.13×10^{-3}	1階	0.16×10^{-3}	5階

耐震安全性評価結果（耐震壁）

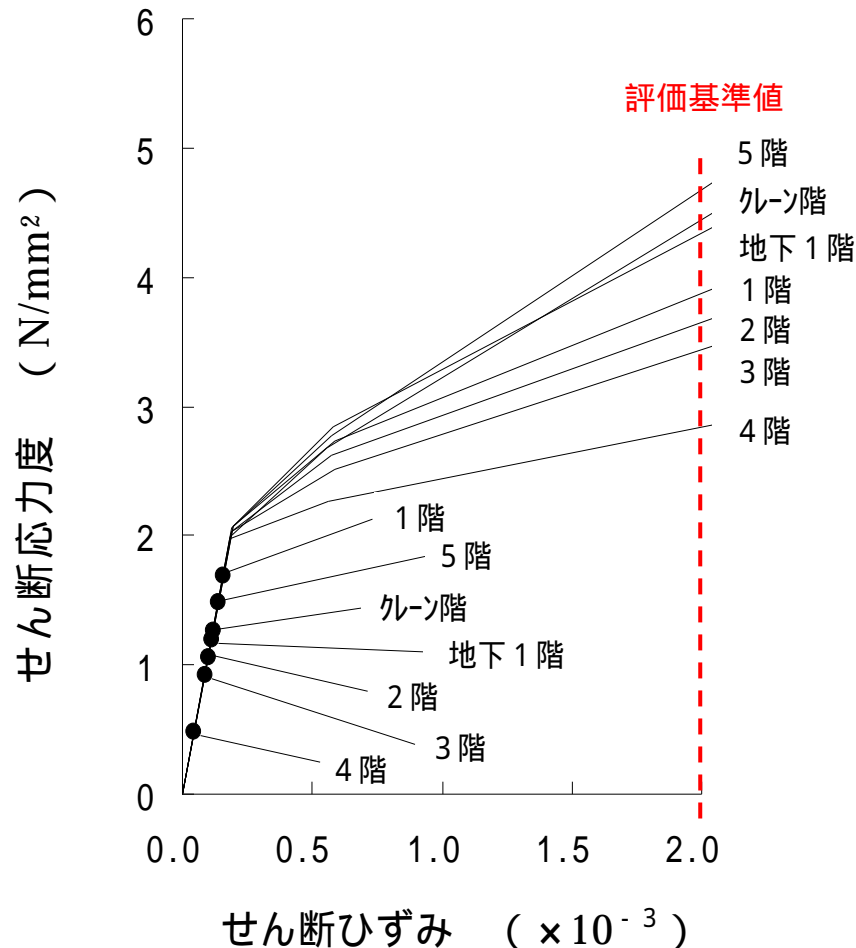


図6-1 せん断スケルトン曲線上の最大応答値
(Ss - 2 NS方向)

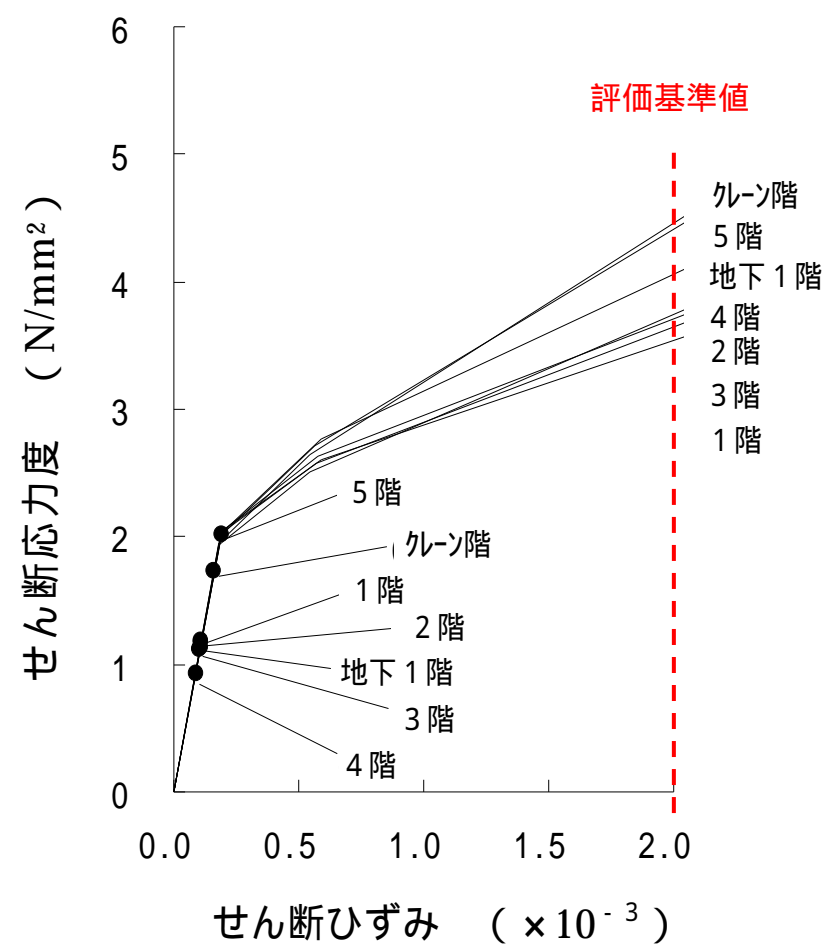


図6-2 せん断スケルトン曲線上の最大応答値
(Ss - 1 EW方向)

耐震壁の最大応答せん断ひずみは、最大で 0.19×10^{-3} (Ss - 1, EW方向, 5階) であり、評価基準値 (2.0×10^{-3}) を満たすことを確認した。

・安全上重要な機器・配管系の耐震安全性評価

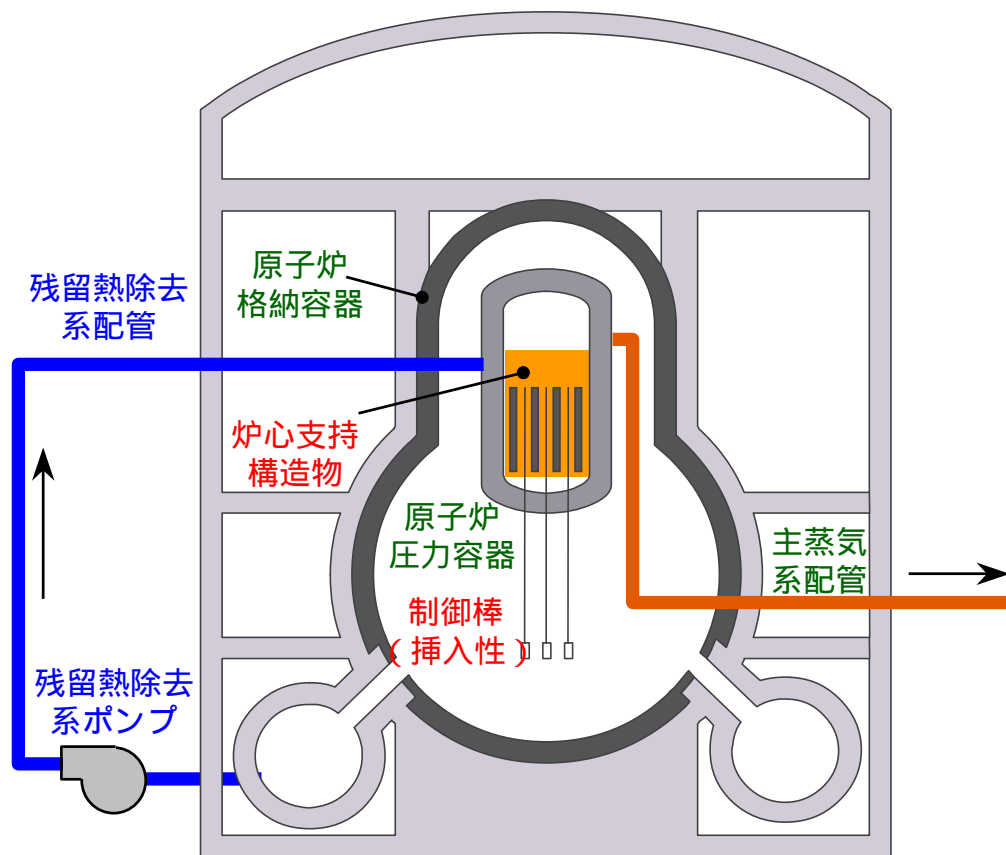
評価方針

- 基準地震動Ssに対する耐震設計上重要な機器・配管系の安全機能の保持の観点から耐震安全性の評価を実施
- 中間報告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

具体的な評価対象設備、評価内容等について、次ページ以降に示す

評価対象設備（福島第一原子力発電所 5号機）

- 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次の主要な施設



「止める」

- ・ 制御棒（挿入性）
- ・ 炉心支持構造物

「冷やす」

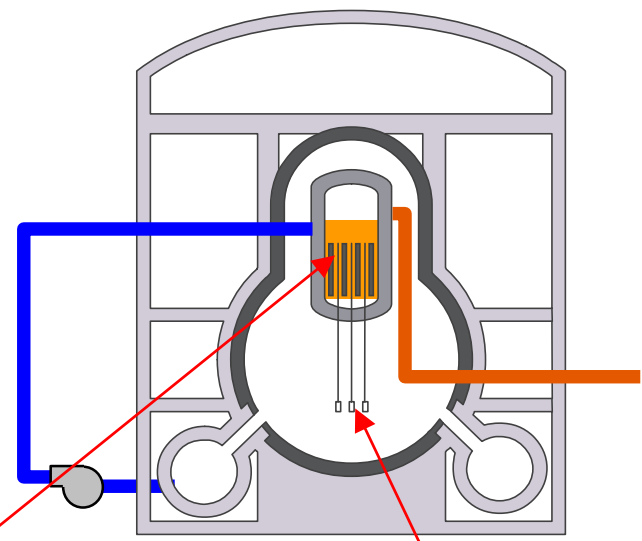
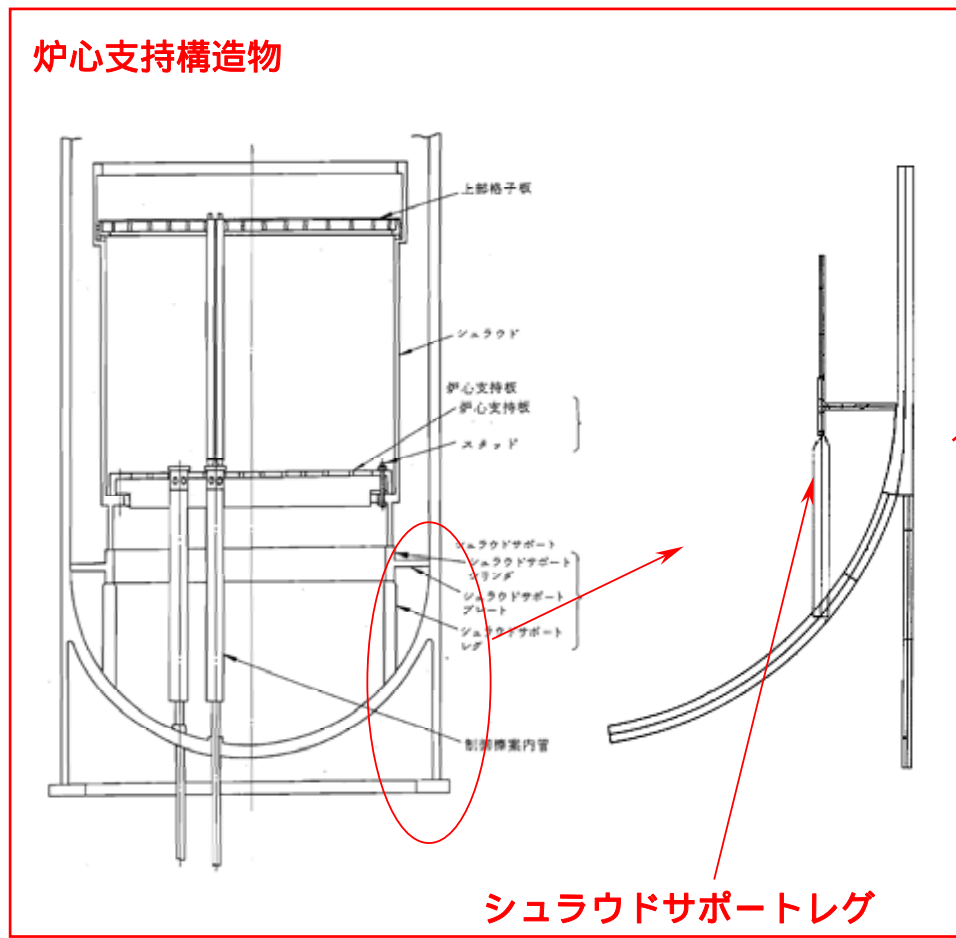
- ・ 残留熱除去系ポンプ
- ・ 残留熱除去系配管

「閉じ込める」

- ・ 原子炉圧力容器
- ・ 主蒸気系配管
- ・ 原子炉格納容器

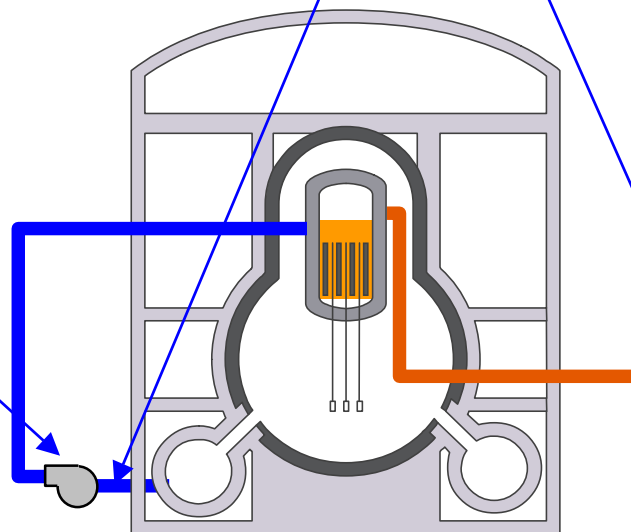
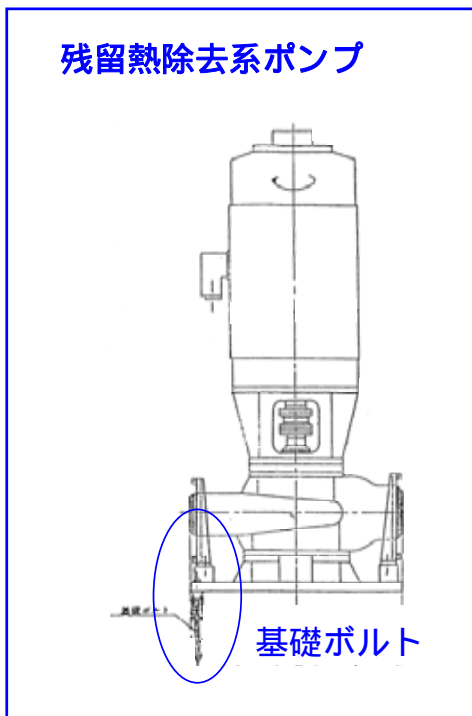
評価対象部位（福島第一原子力発電所5号機）（1 / 3）

■ 「止める」

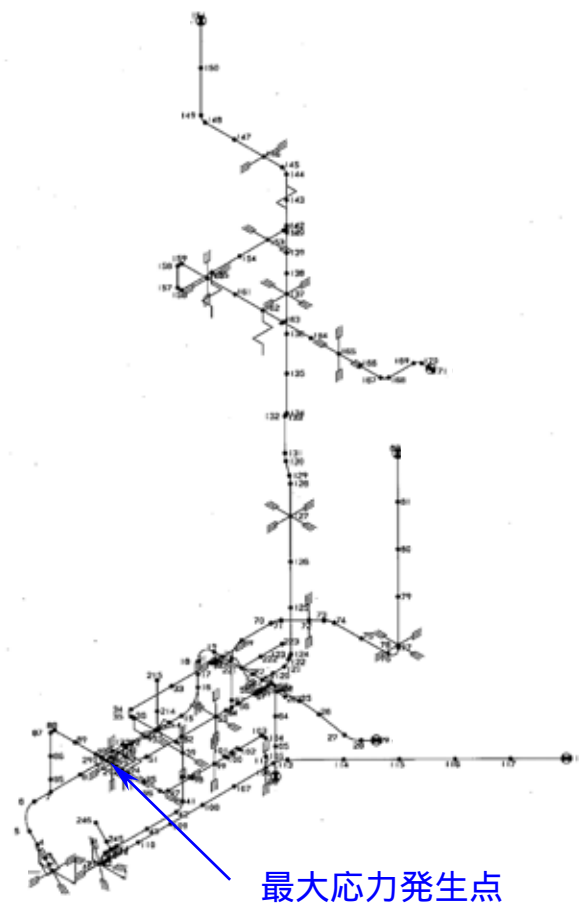


評価対象部位 (福島第一原子力発電所 5号機) (2 / 3)

■ 「冷やす」

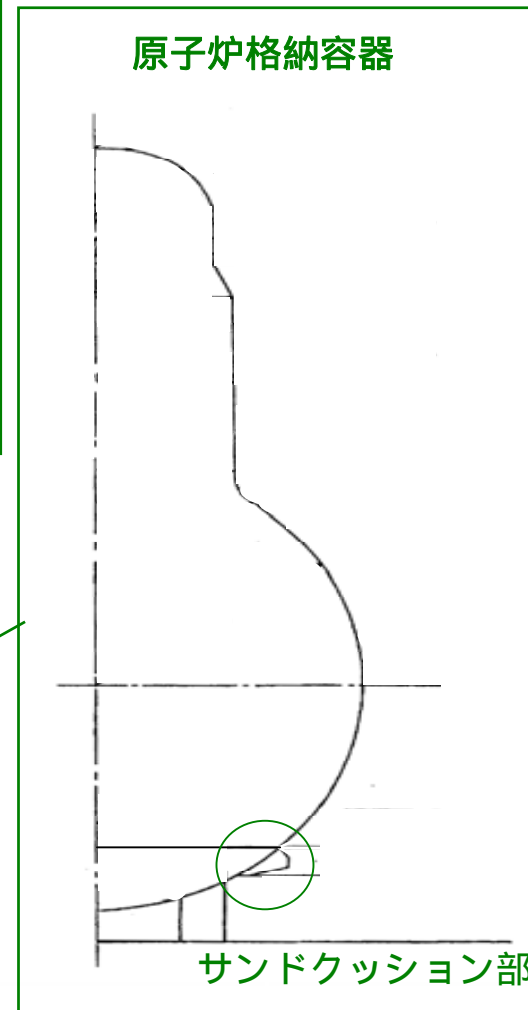
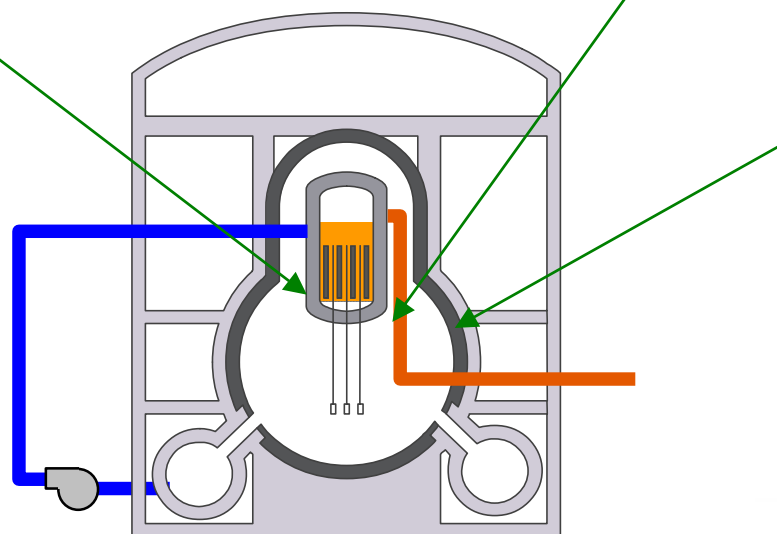
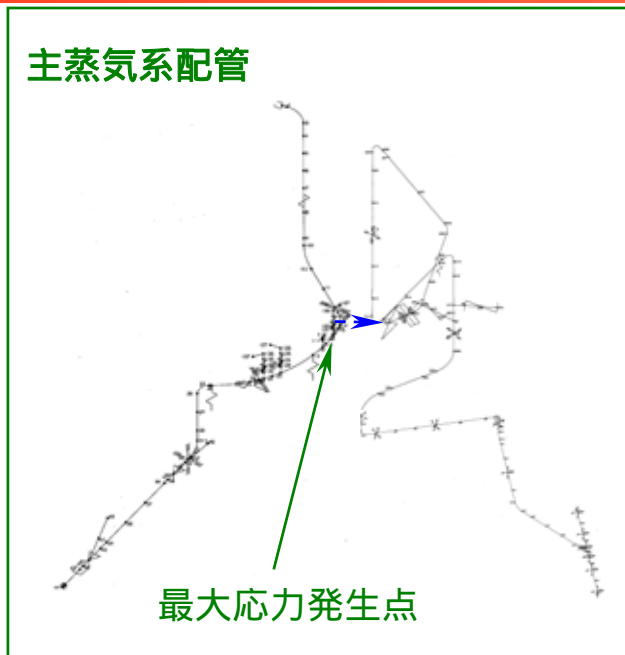
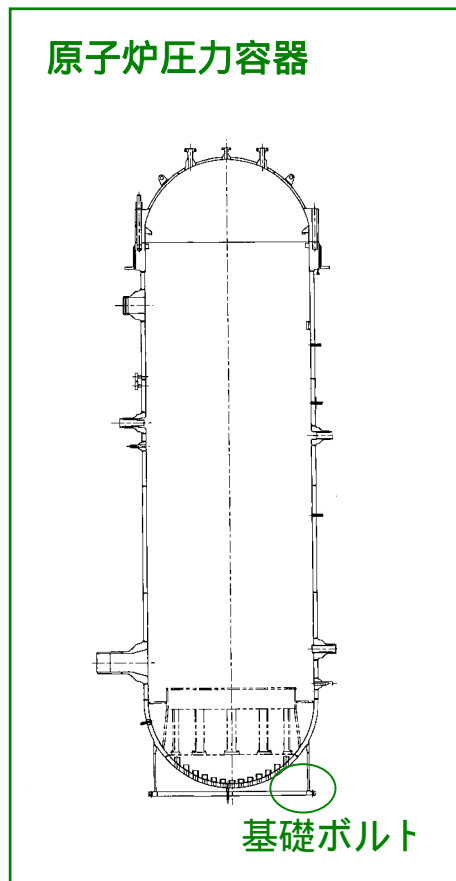


残留熱除去系配管



評価対象部位（福島第一原子力発電所 5号機）（3 / 3）

■ 「閉じ込める」



評価内容および評価方法

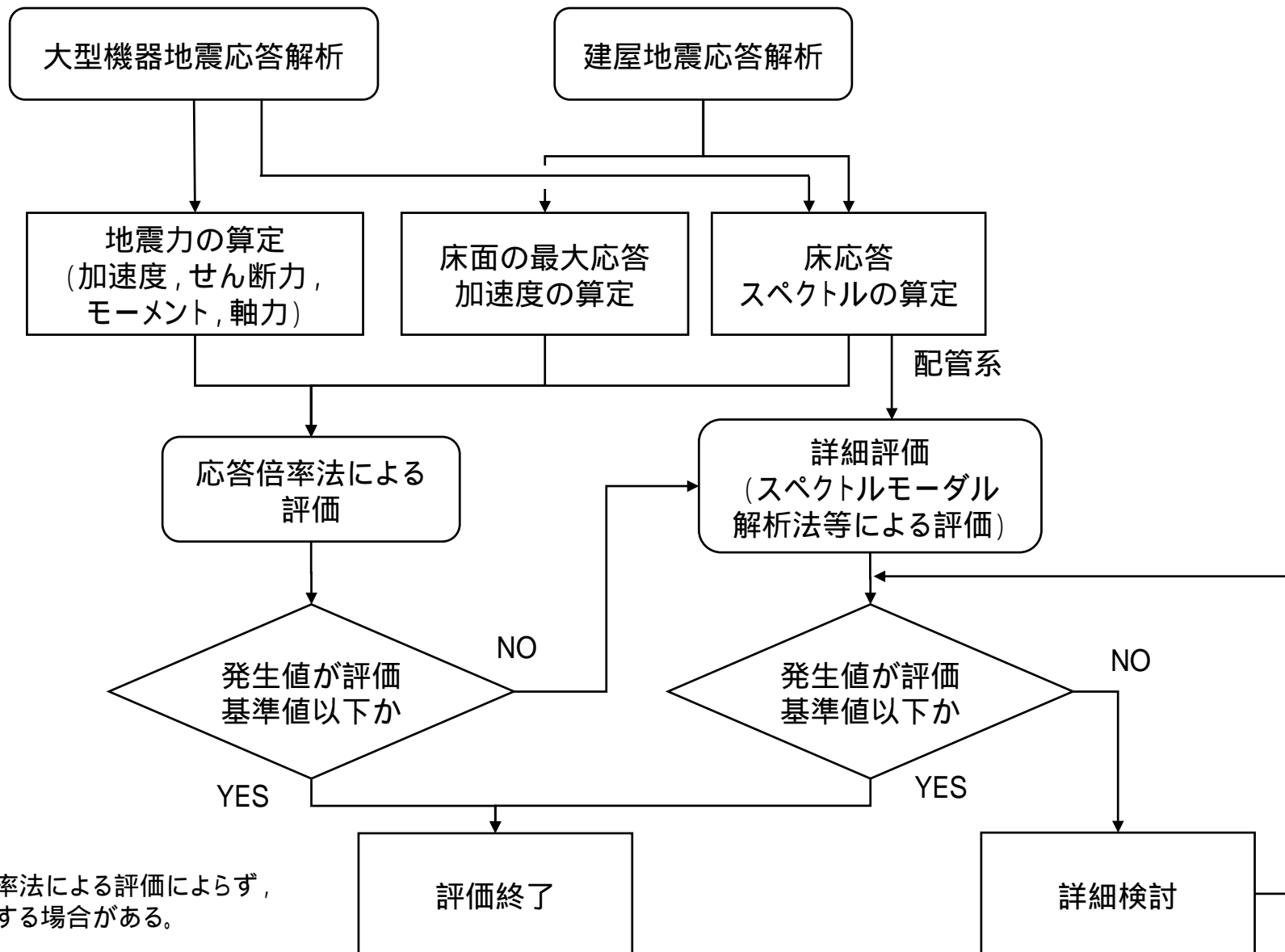
■ 構造強度評価

- 応答倍率法による評価や、スペクトルモーダル法や定式化された評価式を用いた解析法等による詳細評価を行い、基準地震動 S_s により設備に発生する応力を算出する。
- 基準地震動 S_s により設備に発生する応力が、材料の許容される強度（評価基準値）以下であることを確認する。
 - 1 地震以外の荷重についても、適切に考慮した上で評価を実施する。

■ 動的機能維持評価（制御棒挿入性）

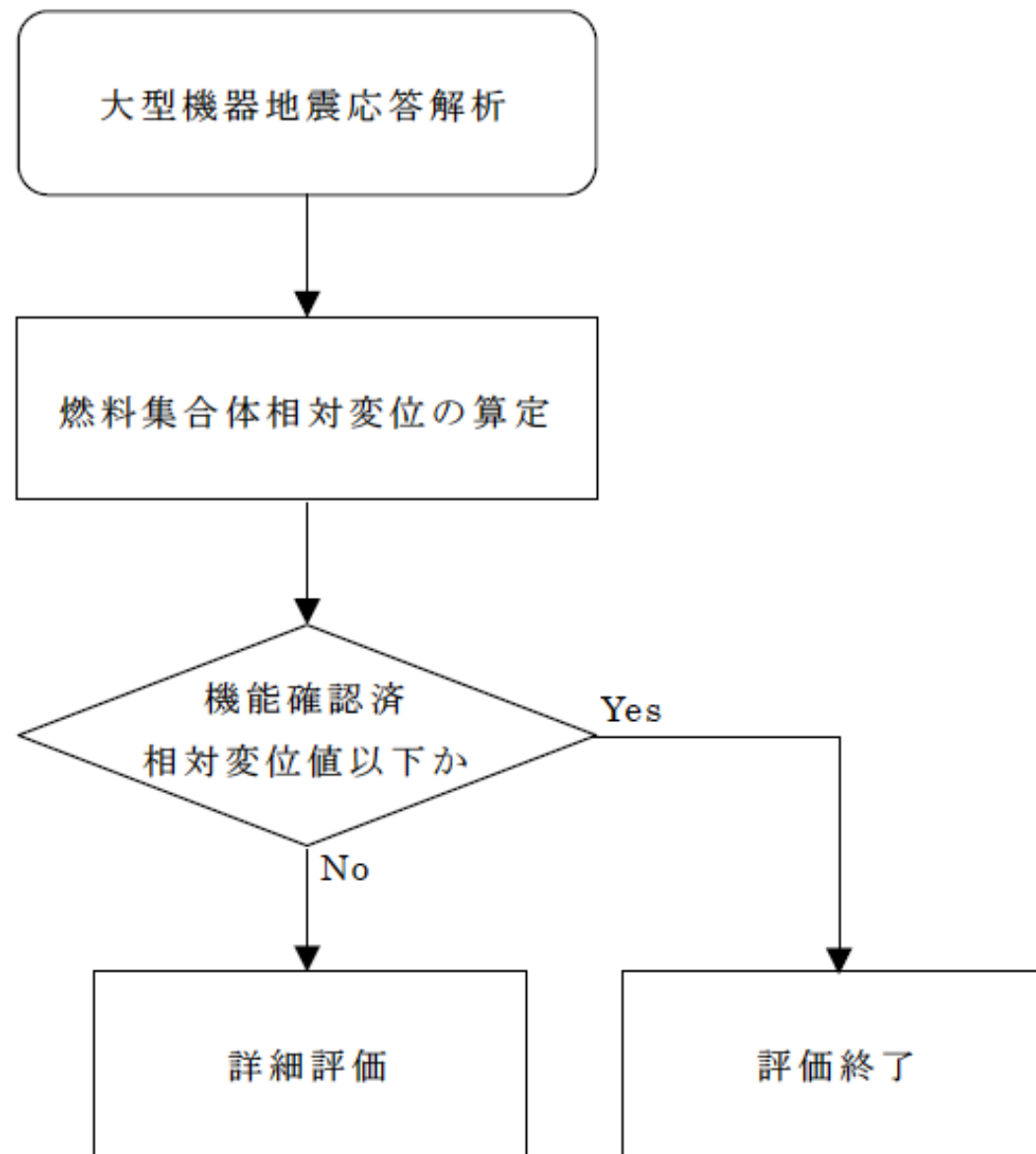
- 基準地震動 S_s による燃料集合体の相対変位を求め、その相対変位が試験により挿入性が確認された相対変位以下であることを確認。

構造強度評価の流れ



応答倍率法による評価によらず、
詳細評価する場合があります。

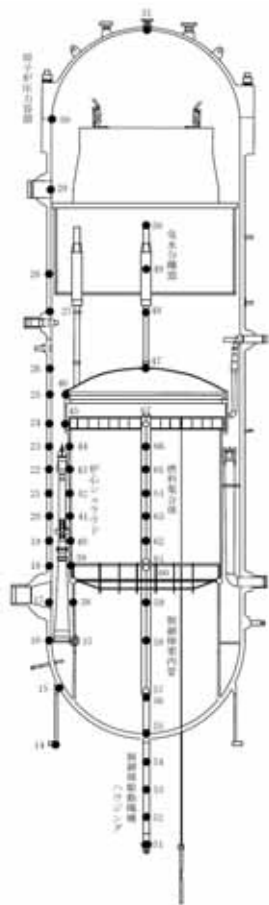
動的機能維持評価の流れ（制御棒挿入性）



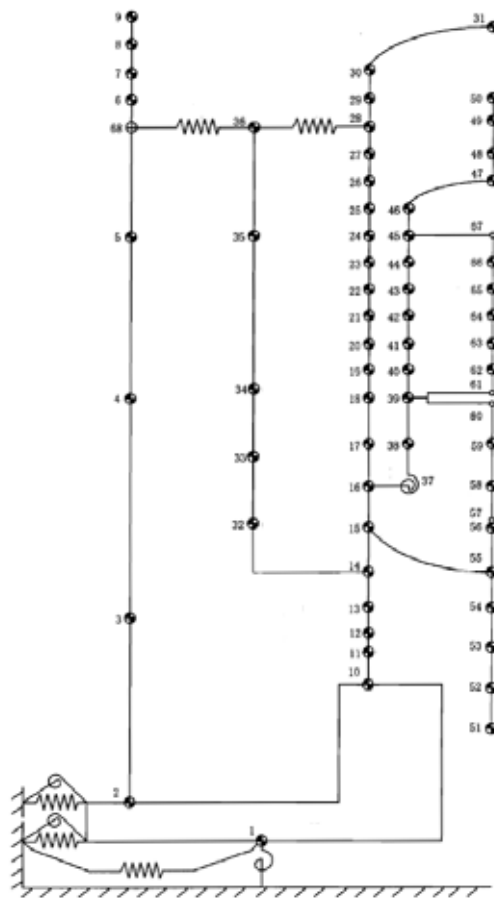
炉内構造物の解析モデル例（福島第一原子力発電所 5号機）

- 水平方向は，多質点モデル化し，それぞれの質点間を曲げ，せん断剛性を有するはり，またはばねにより結合する。

炉内構造物の概要



炉内構造物のモデル化（水平方向）

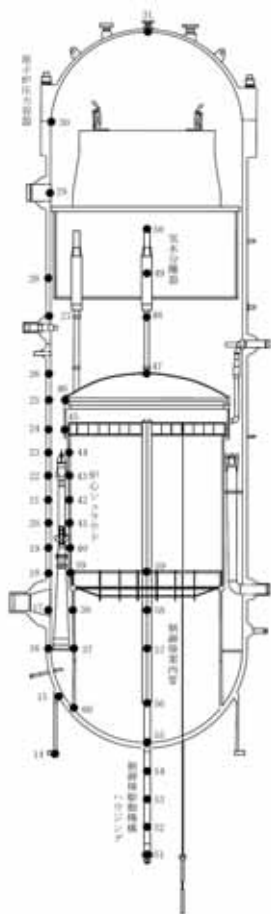


モデル化

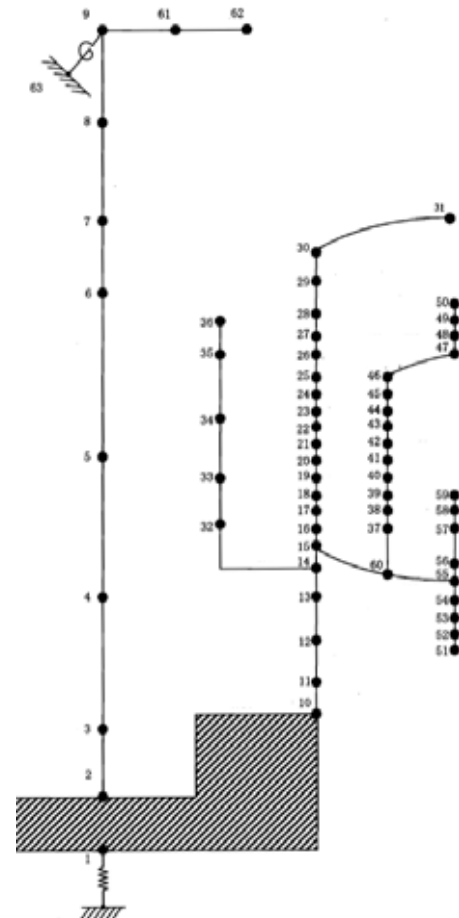
炉内構造物の解析モデル例（福島第一原子力発電所 5号機）

- 鉛直方向は，質点間を軸剛性（圧縮，引張に対する剛性）を有するばねにより結合する。

炉内構造物の概要



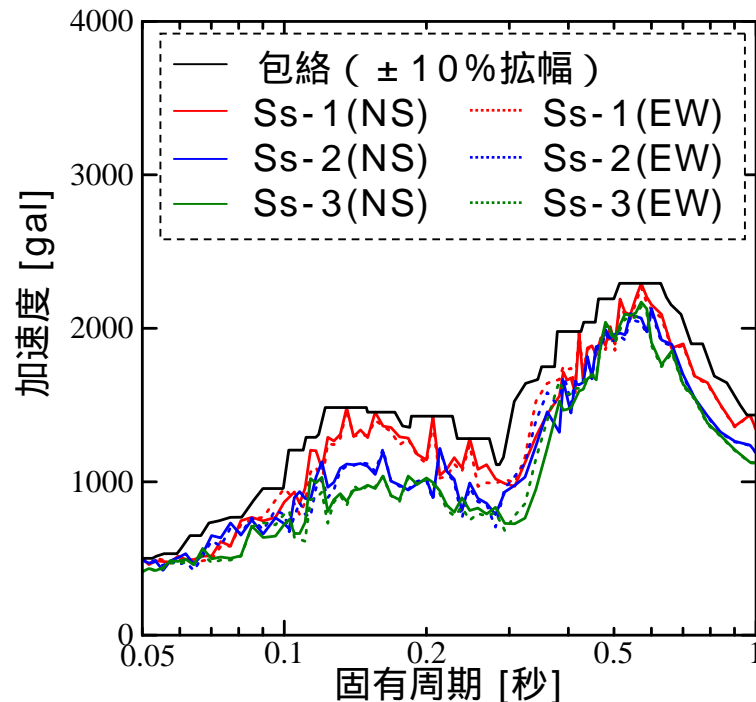
炉内構造物のモデル化（鉛直方向）



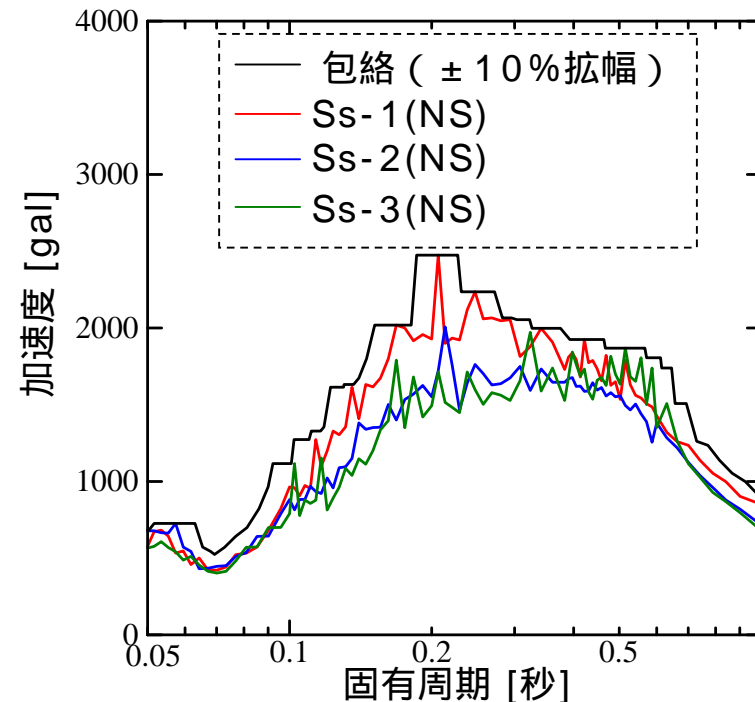
モデル化

床応答スペクトル (福島第一原子力発電所 5号機)

- 建物・構築物，大型機器の地震応答解析で得られた各位置の加速度応答時刻歴を用いて水平方向および鉛直方向について算定
- 算定にあたっては，地盤や建屋の物性等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」等を参考に周期軸方向に±10%拡幅



福島第一5号機 原子炉建屋水平方向
(O.P.0.94m, 減衰1.0%)
(Ss3波包絡)



福島第一5号機 原子炉建屋鉛直方向
(O.P.0.94m, 減衰1.0%)
(Ss3波包絡)

減衰定数

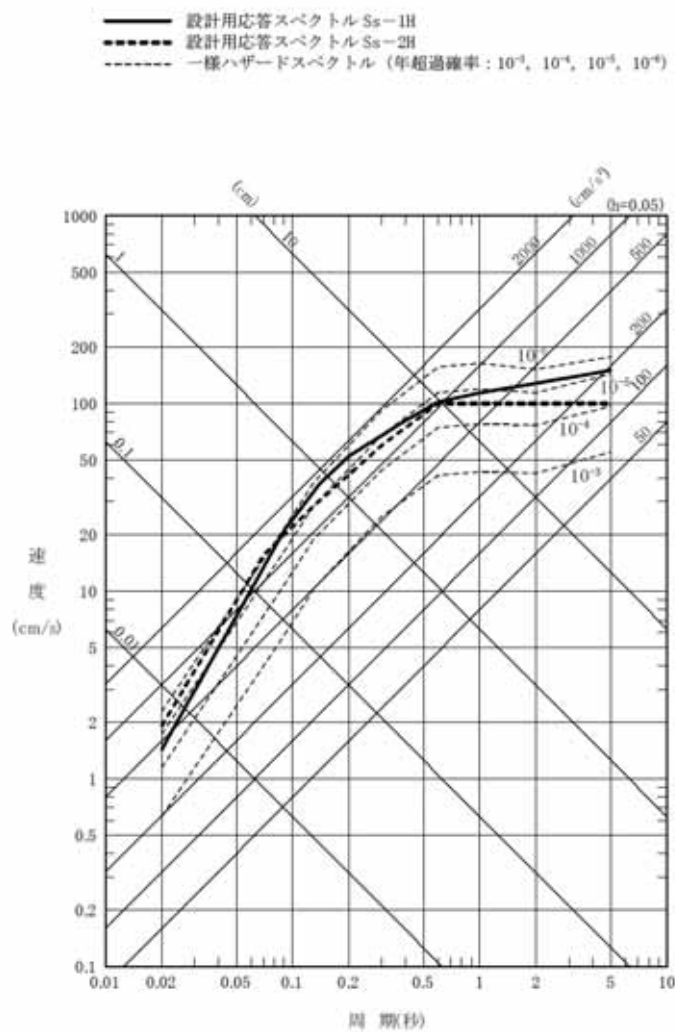
- 原則として「原子力発電所耐震設計技術指針JEAG4601-1991追補版」に規定された値とし，試験等で妥当性が確認された値も用いる。

対象施設	減衰定数 (%)		備考
	水平方向	鉛直方向	
溶接構造物	1.0	1.0	原子炉圧力容器 (基礎ボルト) 原子炉格納容器 (ドライウェル) 炉心支持構造物 (シュラウドサポート)
ポンプ・ファン等の 機械装置	1.0	1.0	残留熱除去系ポンプ (基礎ボルト)
燃料集合体	7.0	1.0	制御棒挿入性
配管系	0.5 ~ 3.0	0.5 ~ 3.0	残留熱除去系配管 主蒸気系配管

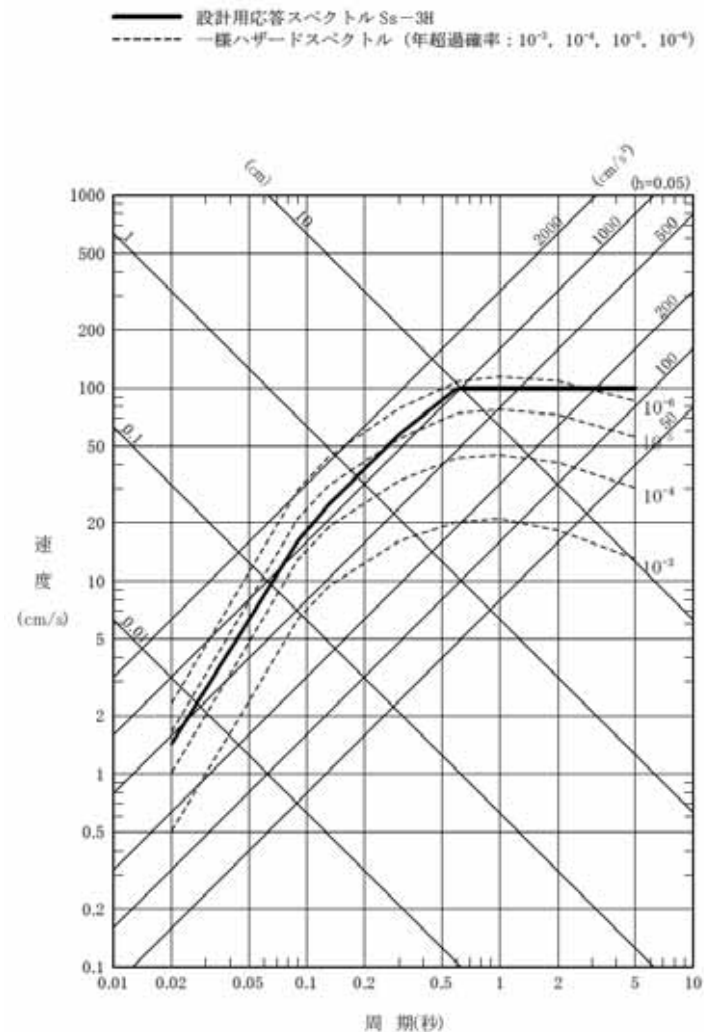
荷重の組合せ (1 / 3)

- 中間報告においては、「通常運転時に生じる荷重」および「運転時の異常な過渡変化時に生じる荷重」と基準地震動 S_s による地震力を組み合わせて評価する。
 - 福島第一原子力発電所における基準地震動 S_s の年超過確率は、概ね 10^{-4} / 年から 10^{-6} / 年である。
 - 「原子力発電所耐震設計技術指針JEAG4601-1984」における運転状態と地震動との組合せに関する記載の中で、基準地震動 S_2 の発生確率は $5 \times 10^{-4} \sim 10^{-5}$ / 年としている。
 - JEAG4601-1984の考え方に基つけば、JEAG4601-1984にて想定している S_2 の発生確率よりも福島第一原子力発電所における基準地震動 S_s の年超過確率が小さいことから、これまでの工事計画認可において実績のある荷重組合せの考え方が適用できると考えている。
- 最終報告においては、上記の組み合わせに加えて、「事故時に生じる荷重」の発生確率と継続時間および地震動の超過確率の関係を踏まえ、「事故時に生じる荷重」については弾性設計用地震動 S_d との組み合わせを考慮した評価を実施する。

荷重の組合せ (2 / 3)



福島第一原子力発電所における
Ss-1, Ss-2の年超過確率



福島第一原子力発電所における
Ss-3の年超過確率

荷重の組合せ (3 / 3)

発生確率		1	10^{-1}	10^{-2}	10^{-3}	10^{-4}	10^{-5}	10^{-6}	10^{-7}	10^{-8}	10^{-9}
運転状態の発生確率 (1/年)		I	II	III	IV						
基準地震動の発生確率 (1/年)				S_1	S_2						
基準地震動 S_1 との組合せ	従属事象	S_1 従属									
	1分以内										S_1+II
	1時間以内								S_1+II		S_1+III
	1日以内							S_1+II		S_1+III	S_1+IV
	1年以内			S_1+II		S_1+III				S_1+IV	
基準地震動 S_2 との組合せ	従属事象	S_2 従属									
	1分以内	(S_2+II) は 10^{-9} 以下となる									
	1時間以内										S_2+II
	1日以内								S_2+II		S_2+III
	1年以内			S_2+II		S_2+III				S_2+IV	

$5 \times 10^{-4} \sim 10^{-5} / \text{年}$

図中の基準地震動 S_1 および基準地震動 S_2 は、それぞれ弾性設計用地震動 S_d および基準地震動 S_s と読み替える。

- 注：① 発生確率から見て
 ← 組合せが必要なもの。
 ← 発生確率が 10^{-7} 以下となり組合せが不要となるもの。
 ② 基準地震動 S_2 の発生確率は $10^{-4} \sim 10^{-6} / \text{サイト} \cdot \text{年}$ と推定されるが、ここでは $5 \times 10^{-4} \sim 10^{-6} / \text{サイト} \cdot \text{年}$ を用いた。
 ③ 表に示す発生確率は現在の知見によるものである。

運転状態と地震動との組合せの確率的評価

(原子力発電所耐震設計技術指針 JEAG4601 - 1984 P.38より引用)

評価結果（福島第一原子力発電所 5号機）

- 基準地震動Ssによる応答値，相対変位が**評価基準値以下**であることを確認した。

- 構造強度評価

評価対象設備	評価部位	応力分類	発生値 (MPa)	評価基準値 (MPa)	評価 ¹ 手法
原子炉圧力容器	基礎ボルト	引張	39	222	
原子炉格納容器	ドライウェル	膜	90	255	
炉心支持構造物	シュラウドサポート	膜	86	300	
残留熱除去系ポンプ	基礎ボルト	引張	29	202	
残留熱除去系配管	配管本体	一次	197	364	
主蒸気系配管	配管本体	一次	356	417	

1 : 応答倍率法による評価、 : 詳細評価

- 動的機能維持評価

評価対象設備	地震時の相対変位 (mm)	評価基準値 (mm)
制御棒 (挿入性)	13.8	40.0

構造WG Aサブグループにおける主な論点

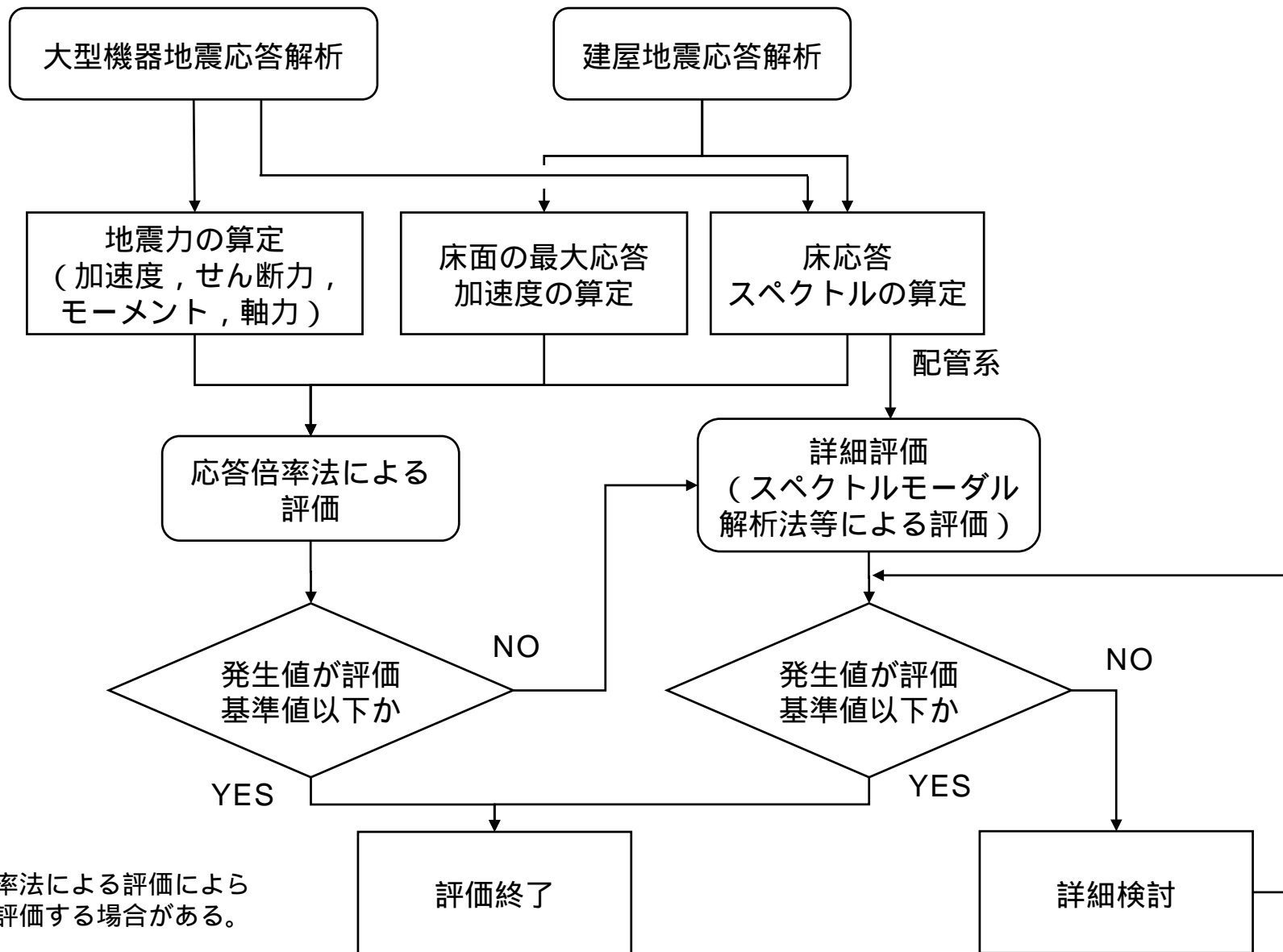
	コメント概要	回答概要
(1)	【地震応答解析手法および応力評価手法】 応答倍率法の適用性について説明すること	「応答倍率法の基本的な考え方」にて、応答倍率法を適用しない設備、適用する設備の例を提示し、詳細評価が必要か否かのスクリーニングに用いる手法としては妥当であるとの考えを説明。
(2)	【評価が厳しい機器・配管系の評価】 機器・配管系の評価では、設備ごとに厳しい部位が異なるのでそれを踏まえて結果を確認すること。	中間報告においては、評価対象設備の耐震安全性を確認する観点から重要な評価部位を建設工認時の耐震計算書を参考に選定している。機器毎に評価部位を説明。

構造WGAサブグループの主な論点

(1) 応答倍率法の適用性について

- 新耐震指針に照らした耐震安全性評価では、機器・配管系設備の評価手法として応答倍率法を適用
- 応答倍率法による評価の適用に関する整理を行い、本手法の適用性について検討

構造強度評価の流れ（再掲）



応答倍率法による評価によらず、詳細評価する場合がある。

応答倍率法の基本的な考え方

■ 応答倍率法とは

- ✓ 設計条件から基準地震動 S_s による評価条件への倍率（応答比）を算定して、設計時応力に乗じることで許容基準値を超えるかどうかの判定を行うもの。
- ✓ 応答倍率法による算出応力が許容基準値を超えるかどうか判断が困難なものについては詳細評価を行う。

■ 応答倍率法の目的

- ✓ 原子力発電所は多数の設備を有しているため、耐震安全性評価に長期間を要している。
- ✓ できるだけ早期に評価結果を報告することは重要と考えており、そのための評価手法として、設備の発生応力を推定し、許容基準値を超えないことを速やかに確認することを目的に応答倍率法を採用。
- ✓ 従って、応答倍率法による算出値は地震による発生応力そのものを示しているわけではないが、詳細評価を行う設備を選定するスクリーニングのための値と考えており、便宜上、発生応力として報告書に記載。

応答比

■ 応答荷重比を用いた評価

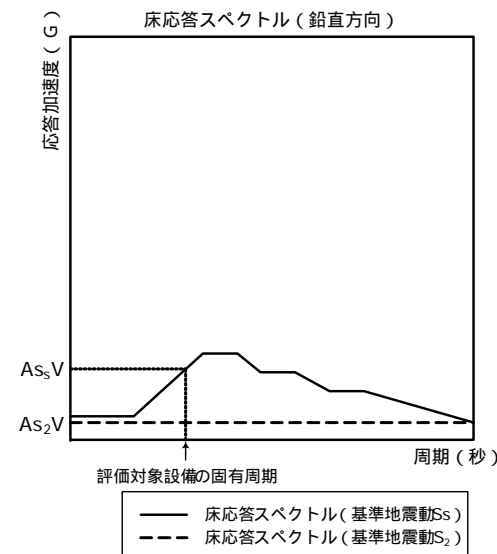
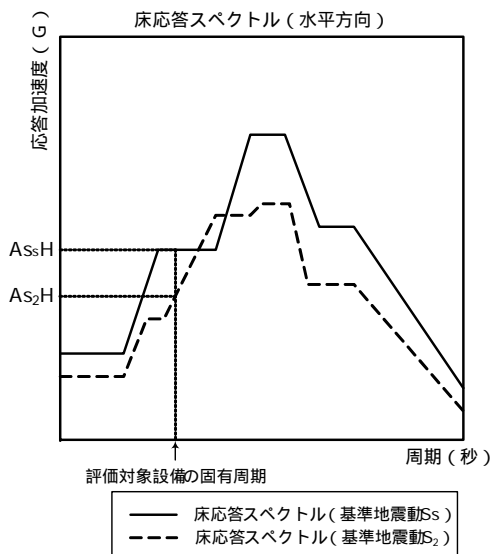
設備の発生応力値を算出するにあたり，せん断力，モーメント，軸力を用いる機器は，基準地震動Ssによる地震力と既往評価の地震力との比を応答比とする。

■ 応答加速度比を用いた評価

設備の発生応力値を算出するにあたり，加速度を用いる機器は，基準地震動Ssによる床応答スペクトル等からの水平加速度と鉛直加速度の二乗和平方根と，既往評価で用いた床応答スペクトル等からの水平加速度と鉛直加速度の二乗和平方根との比を応答比とする。

$$\text{応答比} = \frac{\sqrt{(C_H)^2 + (1 + C_V)^2}}{\sqrt{(C_{H0})^2 + (1 + C_{V0})^2}}$$

- C_{H0} : 既往評価による水平方向評価震度
- C_H : 基準地震動Ssによる水平方向評価震度
- C_{V0} : 既往評価による鉛直方向評価震度
- C_V : 基準地震動Ssによる鉛直方向評価震度



応答比を用いた評価

既往評価での評価方法に応じて、以下の方法 または方法 で実施

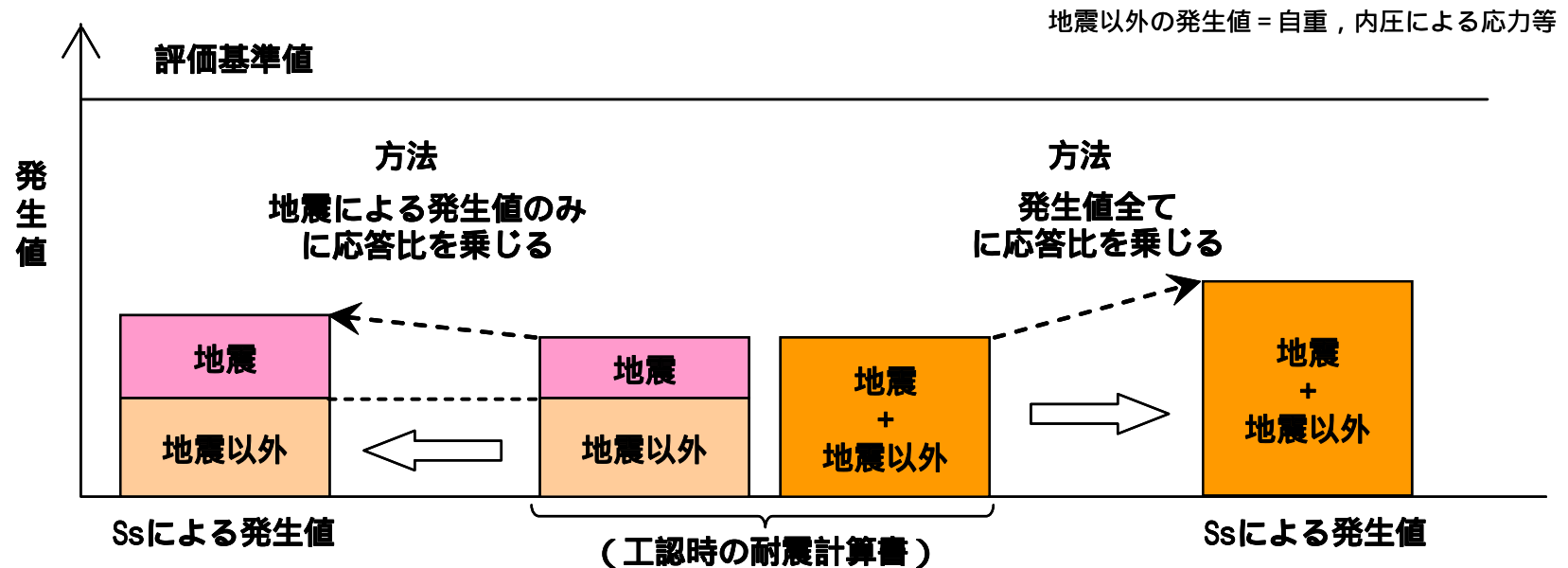
【方法 1】：地震による発生値と地震以外による発生値が分離されている場合の取扱い

$$S_s \text{による発生値} = \text{地震以外による発生値 (工認時の耐震計算書)} + \text{地震による発生値 (工認時の耐震計算書)} \times \text{応答比}$$

【方法 2】：地震による発生値と地震以外による発生値の合計が示されている場合の取扱い

$$S_s \text{による発生値} = \left[\text{地震以外による発生値} + \text{地震による発生値} \right] \times \text{応答比}$$

(工認時の耐震計算書)



応答倍率法の適用に関する整理(1 / 3)

■ 応答倍率法を適用する設備

設計時の余裕が比較的大きい設備

例) ポンプ, ファン等の床置機器

応答倍率法の精度の高さが期待できる設備

例) 原子炉圧力容器, 原子炉格納容器, 炉内構造物

■ 応答倍率法を適用しない設備

地震に対する応答が比較的複雑な設備

例) 配管類

指針改訂に伴い、従来の設計手法とは異なる手法の採用が適切な設備

例) 原子炉建屋クレーン

耐震強化等の工事により、応答倍率法が適用できない設備

例) 配管類

応答倍率法の適用に関する整理(2/3)

設備	設計手法の特徴	適用する 応答比	応答倍率法の適用に あたってのスタンス	設備の割合
原子炉 格納容器	建物と機器の連成解析により、各評価部位の荷重、加速度に基づき、応力を算出。	応答荷重比	荷重を用いて設計を行っている設備については、基準地震動 S_s による評価荷重が算出されていれば、 <u>加速度設計の設備よりも比較的精度よく応答値の予測が可能なので、応答倍率法を適用する。</u>	約4割
原子炉 圧力容器				
炉内構造物				
床置き機器 (ポンプ、ファン、熱交換器、盤等)	主に建物の応答解析により、算出される床の応答加速度に基づき応力を算出。	応答加速度比	加速度を用いて設計している設備のうち、 <u>設計時の余裕が大きい設備については、詳細設計を行わずとも、評価基準値以下になることが容易に推定できるため、応答倍率法を適用する。</u> 比較的余裕が小さい設備に対しては、設計時の評価手法や地震の寄与等を検討し、必要に応じて詳細評価を実施する。	約4割 (このうち、設計時の余裕*が10を下回る設備は2割程度(2F-4の例)) *裕度 (評価基準値/発生値)

応答倍率法の適用に関する整理(3/3)

設備	設計手法の特徴	適用する 応答比	応答倍率法の適用に あたってのスタンス	設備の 割合
配管	振動モードを考慮したスペクトルモーダル解析により応力を算出。	なし (詳細評価)	多数の振動モードを持つ特性を有する設備であり、 <u>応答倍率による応答予測が困難であることから詳細評価を実施する。</u>	約2割
クレーン	建物の応答解析による応答加速度に基づき応力を算出。	なし (詳細評価)	鉛直方向地震力を動的に考慮することは、 <u>設計時の手法にて適切な評価が困難であるため、詳細評価を実施する。</u>	数設備

1.構造WGAサブグループの主な論点

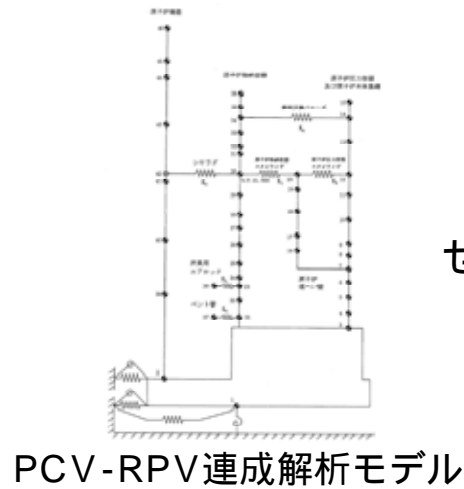
(2) 機器・配管系の評価について

■福島第一原子力発電所5号機

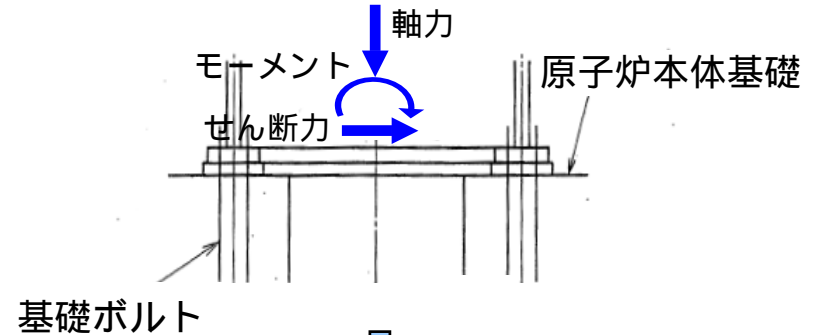
- ✓原子炉压力容器
- ✓原子炉格納容器
- ✓炉心支持構造物
- ✓残留熱除去系ポンプ
- ✓配管（残留熱除去系配管，主蒸気配管）
- ✓制御棒挿入性

福島第一5号機 原子炉压力容器（基礎ボルト）

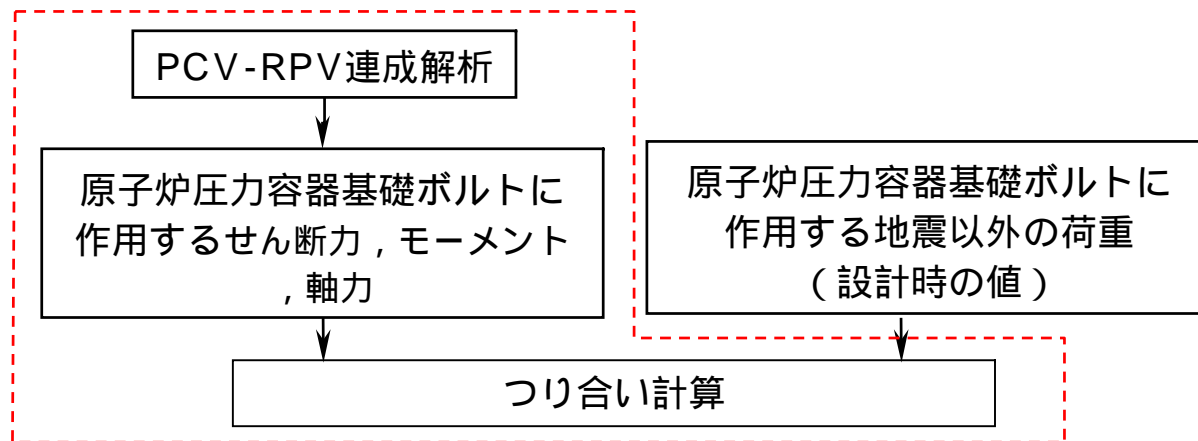
- 原子炉格納容器 - 原子炉压力容器連成解析（以下，PCV-RPV連成解析）により，地震によるせん断力，モーメント，軸力を算出する。また，地震以外の荷重については，設計時の値をそのまま用い，各荷重のつり合い計算により原子炉压力容器基礎ボルトに発生する応力値を求める。



連成解析により
せん断力，モーメント，
軸力を算出



つり合い計算により
応力算出



応力分類	発生値 [MPa]	評価基準値 [MPa]
引張	39	222

今回実施した範囲

福島第一5号機 原子炉格納容器（サンドクッション部）

- PCV-RPV連成解析により地震によるせん断力，モーメント，鉛直震度が算出される。設計時の当該荷重，耐震安全性評価時の当該荷重をそれぞれ比較することにより，水平方向応答比，鉛直方向応答比を求め，それぞれの比のうち最大の値を応答比とする。設計時の発生値に応答比を乗じ，原子炉格納容器サンドクッション部の発生値を算出する。



PCV-RPV連成解析モデル

↓ 連成解析により
せん断力，
モーメント，
鉛直震度を算出

せん断力 H_{Ss}
モーメント M_{Ss}
鉛直震度 C_{VsS}

$$\text{応答比} = \text{MAX} \left(\frac{H_{Ss}}{H_0}, \frac{M_{Ss}}{M_0}, \frac{1 + C_{VsS}}{1 + C_{V0}} \right)$$

$$= \text{MAX}(1.06, 1.16, 1.17)$$

$$= 1.17$$

H_0 : 設計時せん断力
 M_0 : 設計時モーメント
 C_{V0} : 設計時鉛直震度

↓ 設計時発生値に
応答比を乗じ，
耐震安全性評価時の
発生値を算出

応力分類	設計時発生値 [MPa]	耐震安全性評価時発生値 [MPa]	評価基準値 [MPa]
膜	77	90	255

参考

中間報告書においては，応答比を算出する際，分母，分子ともに鉛直方向の震度に1を足し込んでいたが，1を足し込まずに算出した場合でも，評価基準値を下回ることを確認。

$$\text{応答比} = \text{MAX} \left(\frac{H_{Ss}}{H_0}, \frac{M_{Ss}}{M_0}, \frac{C_{VsS}}{C_{V0}} \right)$$

$$= \text{MAX}(1.06, 1.16, 1.88)$$

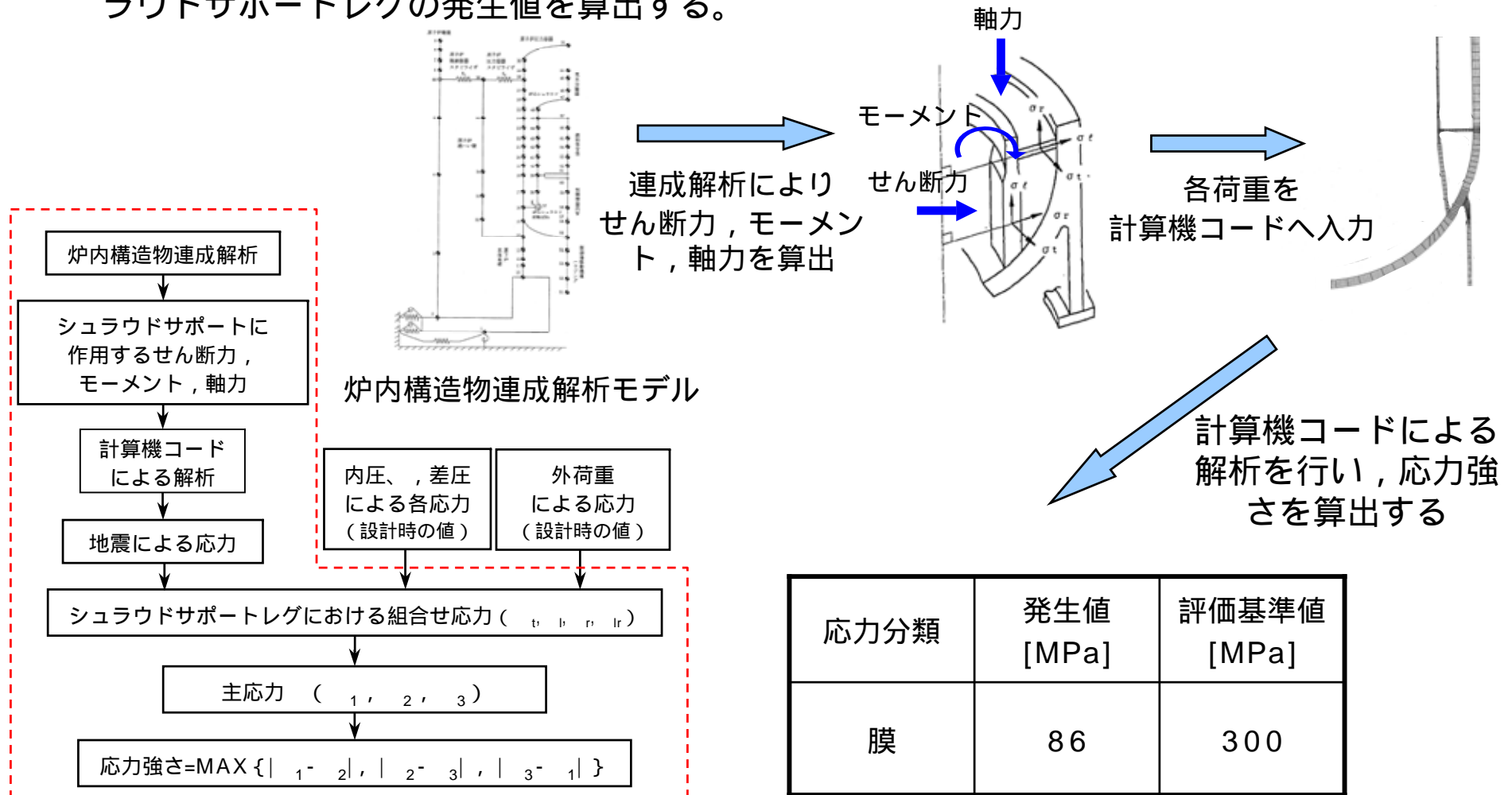
$$= 1.88$$

発生値 = 77 × 1.88

$$145 \text{ [MPa]}$$

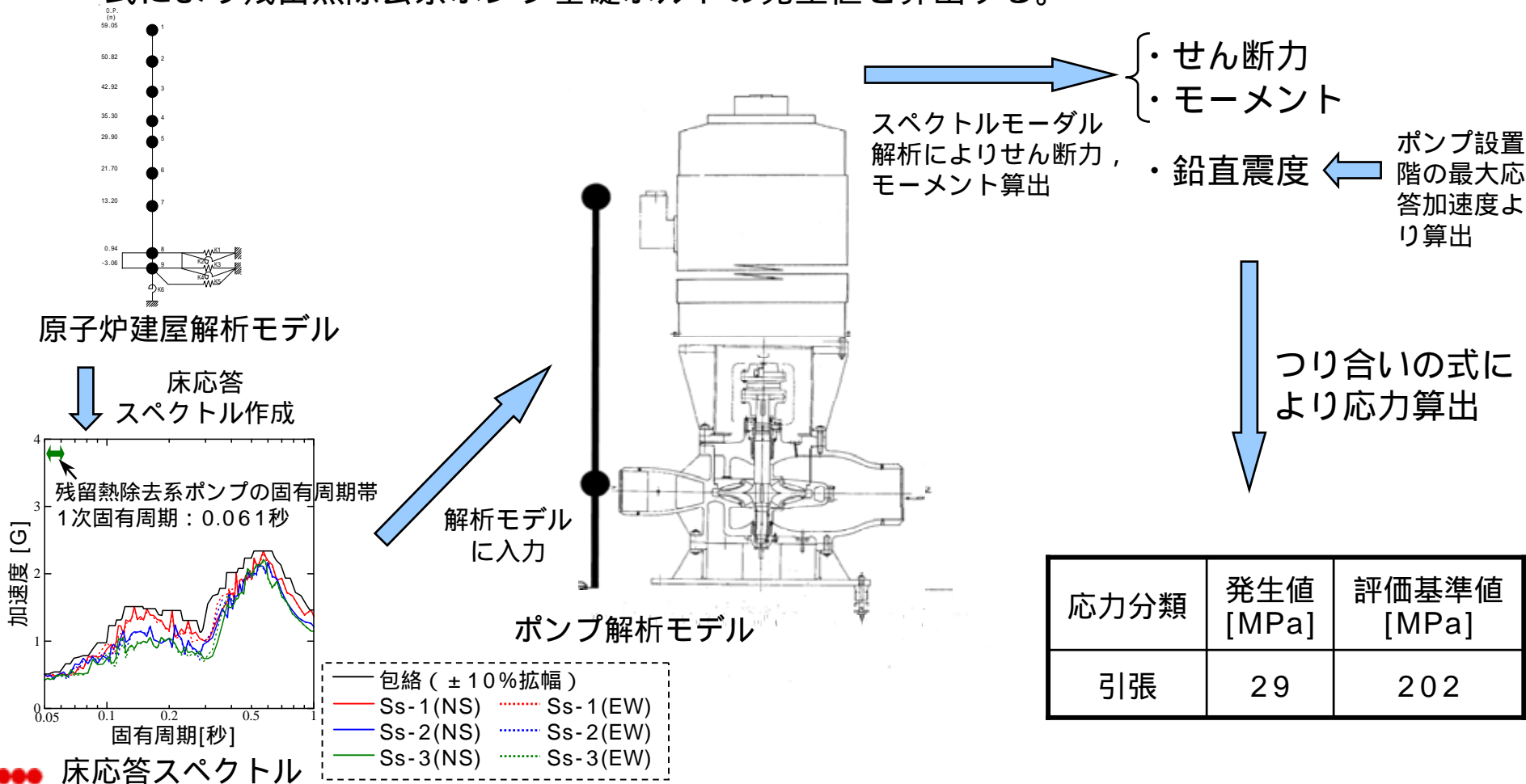
福島第一5号機 炉心支持構造物（シュラウドサポートレグ）

- 炉内構造物連成解析により，せん断力，モーメント，軸力を算出し，計算機コードによる解析を実施することで地震による応力を算出する。また，地震以外の条件である内圧，差圧，外荷重については，設計時の値をそのまま用いて，それらの応力値を組合せてシュラウドサポートレグの発生値を算出する。



福島第一5号機 残留熱除去系ポンプ（基礎ボルト）

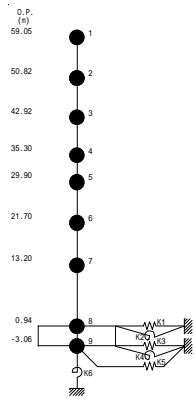
- 水平方向に関して残留熱除去系ポンプは柔なので、当該ポンプ設置階の床応答スペクトルに基づくスペクトルモード解析を実施し、ポンプ廻りのせん断力，モーメントを算出する。鉛直方向に関しては剛なので、ポンプ設置階の最大応答加速度を評価用震度として評価に用いる。これらの荷重，評価用震度を踏まえた基礎ボルトに関するつり合い式により残留熱除去系ポンプ基礎ボルトの発生値を算出する。



応力分類	発生値 [MPa]	評価基準値 [MPa]
引張	29	202

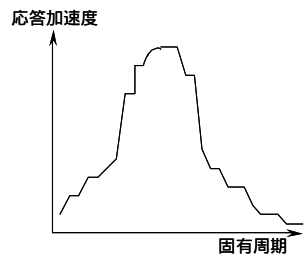
福島第一5号機 配管（残留熱除去系配管）

- 原子炉建屋の応答解析による床応答スペクトルに基づいて、スペクトルモデル解析を実施し、配管の発生値を算出する。



原子炉建屋解析モデル

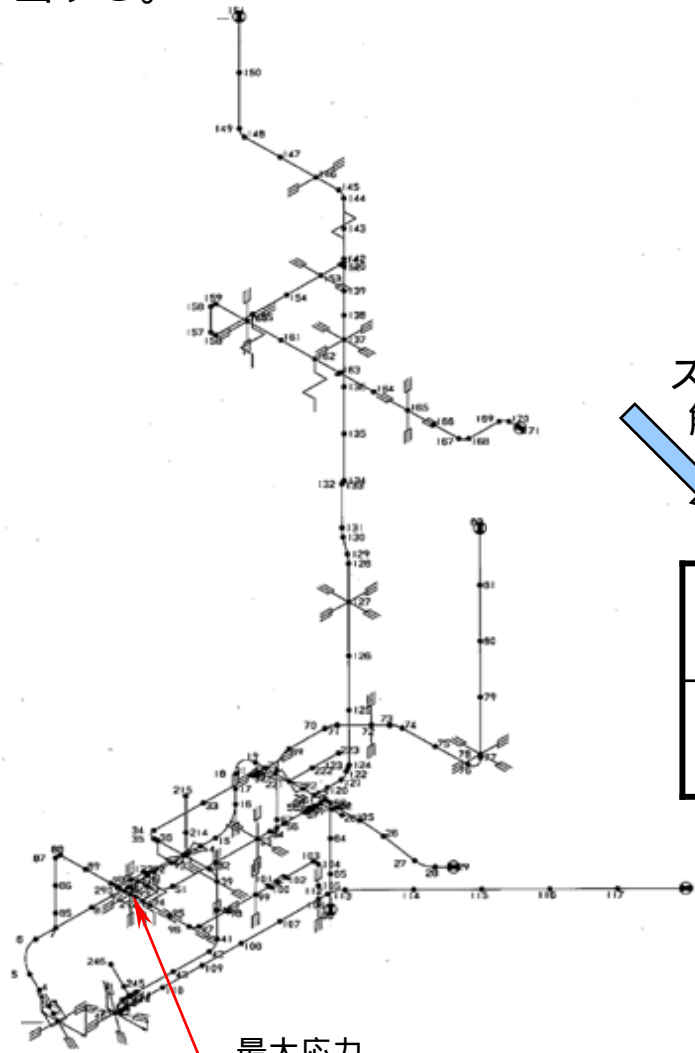
床応答スペクトル
作成



床応答スペクトル

(詳細については次ページにて説明)

配管モデル
に入力



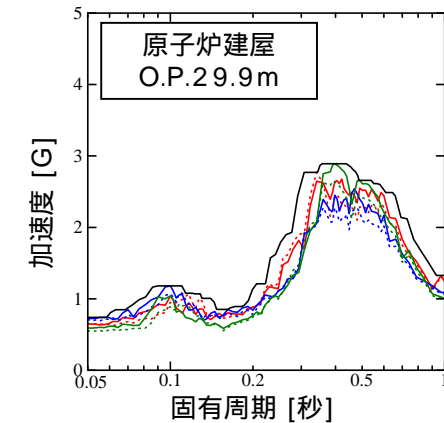
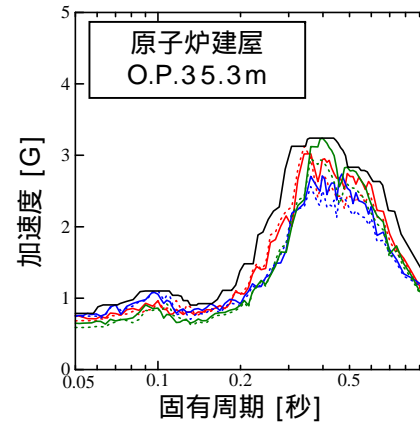
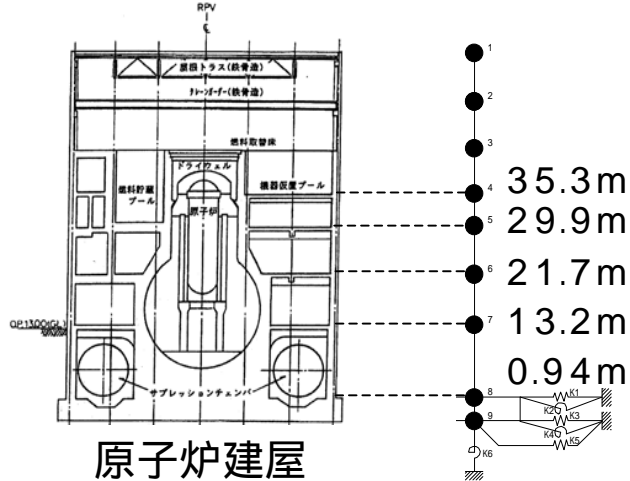
最大応力
発生点

スペクトルモデル
解析にて応力算出

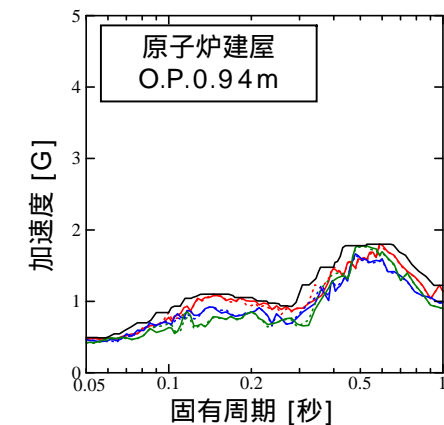
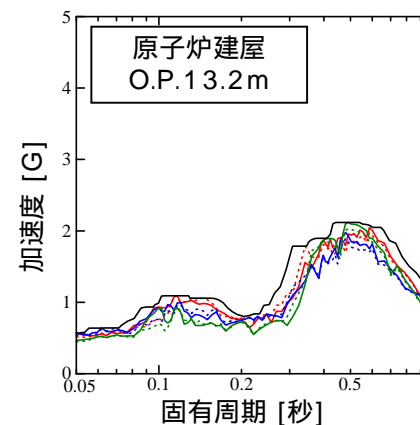
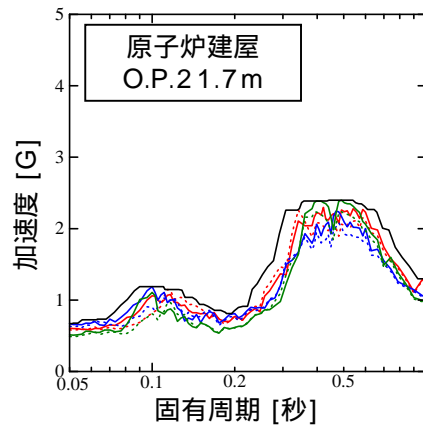
応力分類	発生値 [MPa]	評価基準値 [MPa]
一次	197	364

福島第一5号機 残留熱除去系配管の評価に用いた 水平方向床応答スペクトル (1/2)

- 原子炉建屋のO.P.35.3m, O.P.29.9m, O.P.21.7m, O.P.13.2m, O.P.0.94m各フロアそれぞれにおいて, Ss-1(NS, EW), Ss-2(NS, EW), Ss-3(NS, EW)による床応答スペクトルを包絡, ±10%拡幅した上で, 各フロアのスペクトルを包絡して作成。



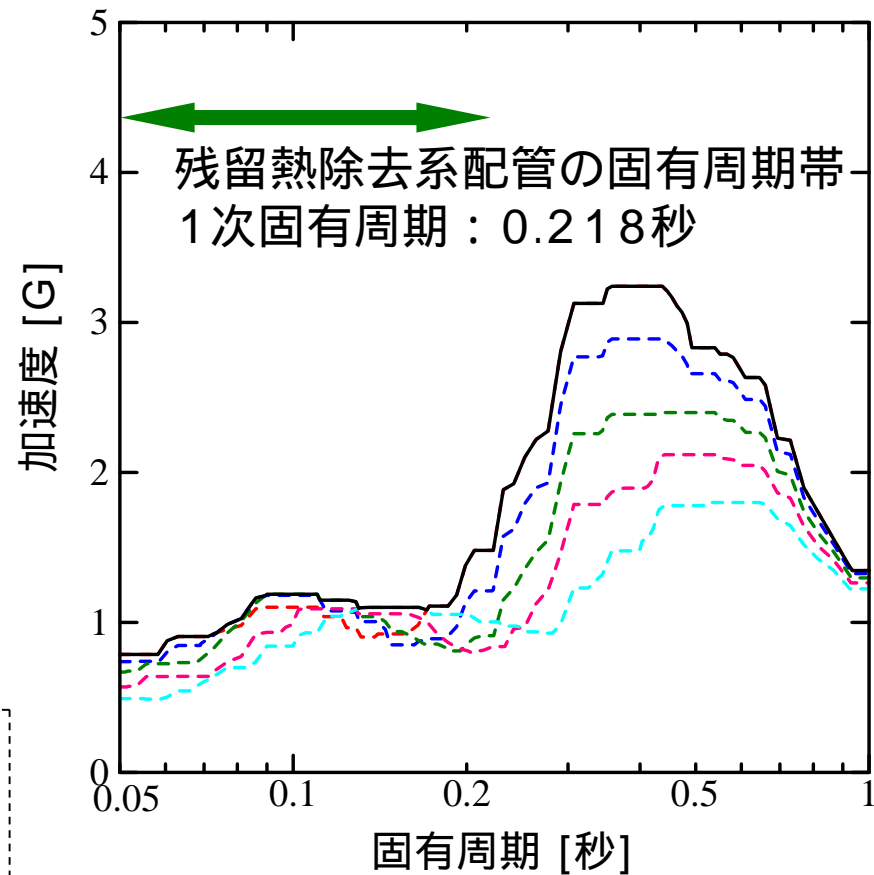
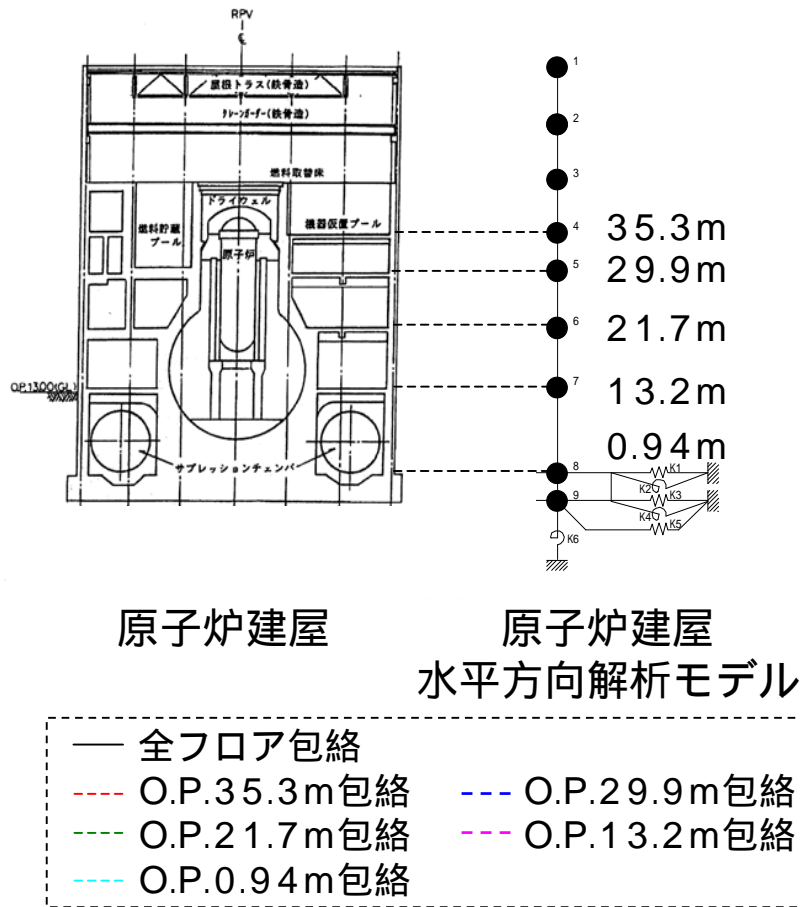
- 包絡 (±10%拡幅)
- Ss-1(NS) - - - Ss-1(EW)
- Ss-2(NS) - - - Ss-2(EW)
- Ss-3(NS) - - - Ss-3(EW)



原子炉建屋各フロアの床応答スペクトル (水平方向, 減衰定数2.5%)

福島第一5号機 残留熱除去系配管の評価に用いた 水平方向床応答スペクトル (2/2)

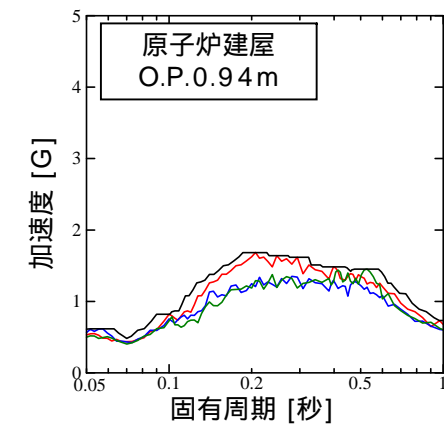
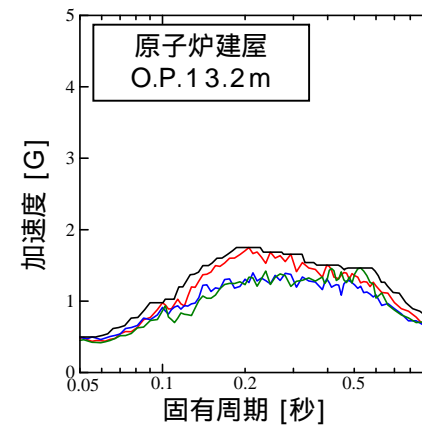
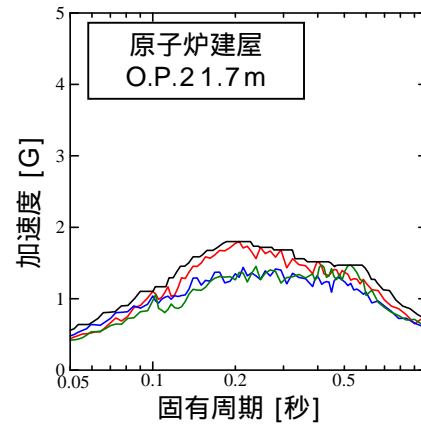
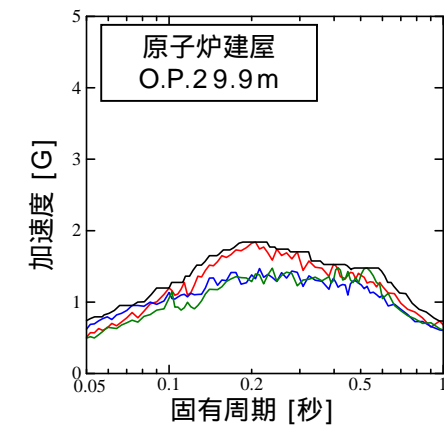
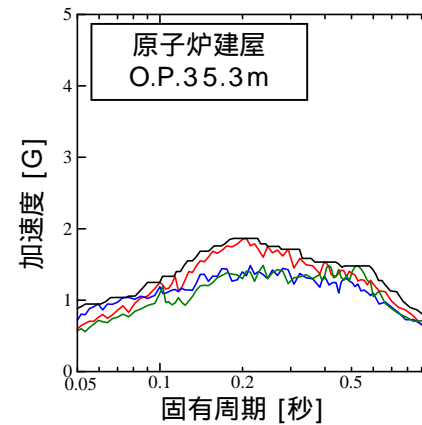
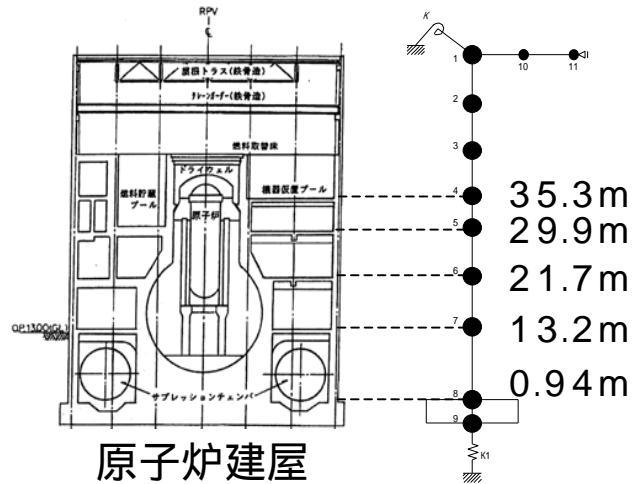
- 原子炉建屋のO.P.35.3m, O.P.29.9m, O.P.21.7m, O.P.13.2m, O.P.0.94m各フロアそれぞれにおいて, Ss-1(NS, EW), Ss-2(NS, EW), Ss-3(NS, EW)による床応答スペクトルを包絡, $\pm 10\%$ 拡張した上で, 各フロアのスペクトルを包絡して作成。



残留熱除去系配管の評価に用いた床応答スペクトル (水平方向, 減衰定数2.5%)

福島第一5号機 残留熱除去系配管の評価に用いた鉛直方向床応答スペクトル (1/2)

- 原子炉建屋のO.P.35.3m, O.P.29.9m, O.P.21.7m, O.P.13.2m, O.P.0.94m各フロアそれぞれにおいて, Ss-1, Ss-2, Ss-3による床応答スペクトルを包絡, $\pm 10\%$ 拡張した上で, 各フロアのスペクトルを包絡して作成。

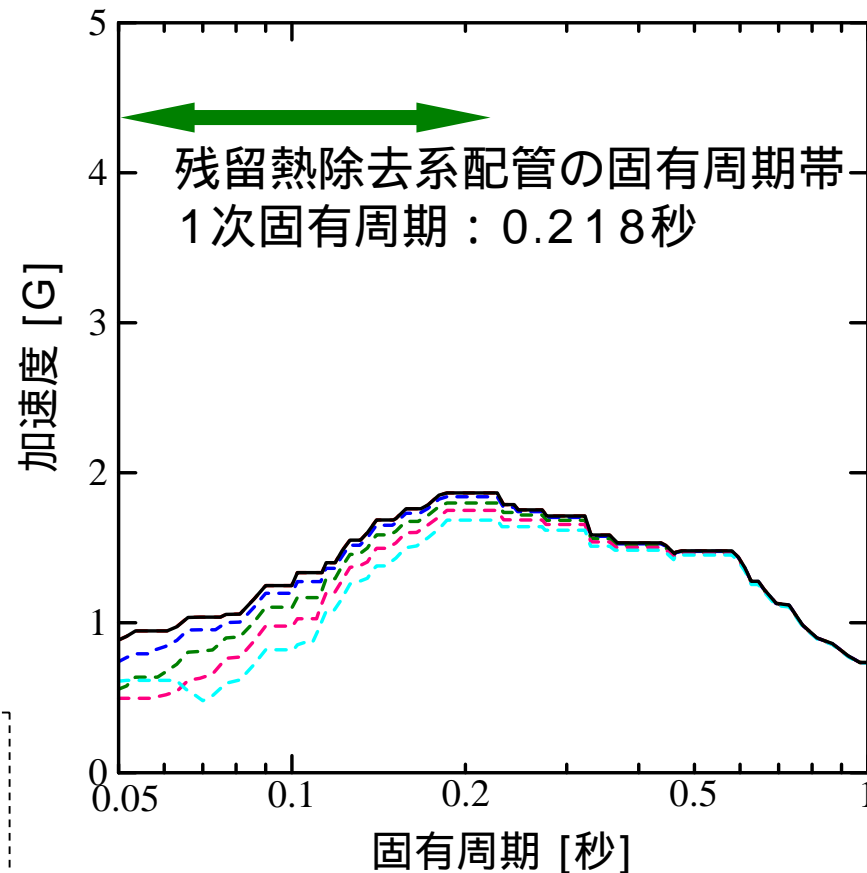
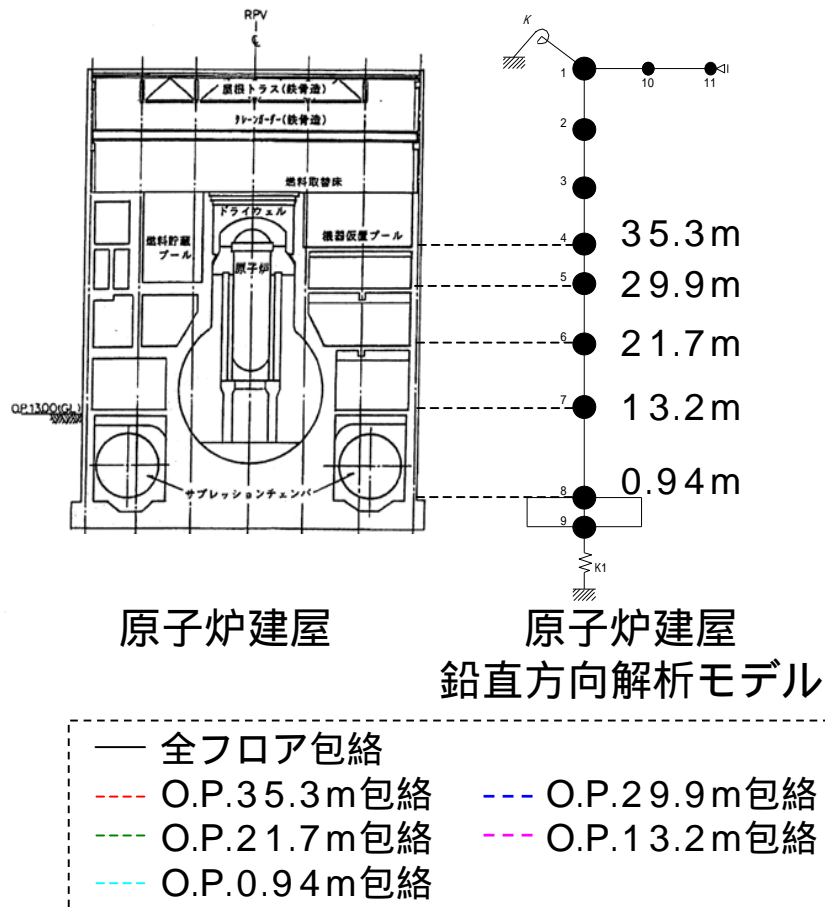


- 包絡 ($\pm 10\%$ 拡張)
- Ss-1(UD)
- Ss-2(UD)
- Ss-3(UD)

原子炉建屋各フロアの床応答スペクトル (鉛直方向, 減衰定数2.5%)

福島第一5号機 残留熱除去系配管の評価に用いた鉛直方向床応答スペクトル (2/2)

- 原子炉建屋のO.P.35.3m, O.P.29.9m, O.P.21.7m, O.P.13.2m, O.P.0.94m各フロアそれぞれにおいて, Ss-1, Ss-2, Ss-3による床応答スペクトルを包絡, $\pm 10\%$ 拡張した上で, 各フロアのスペクトルを包絡して作成。

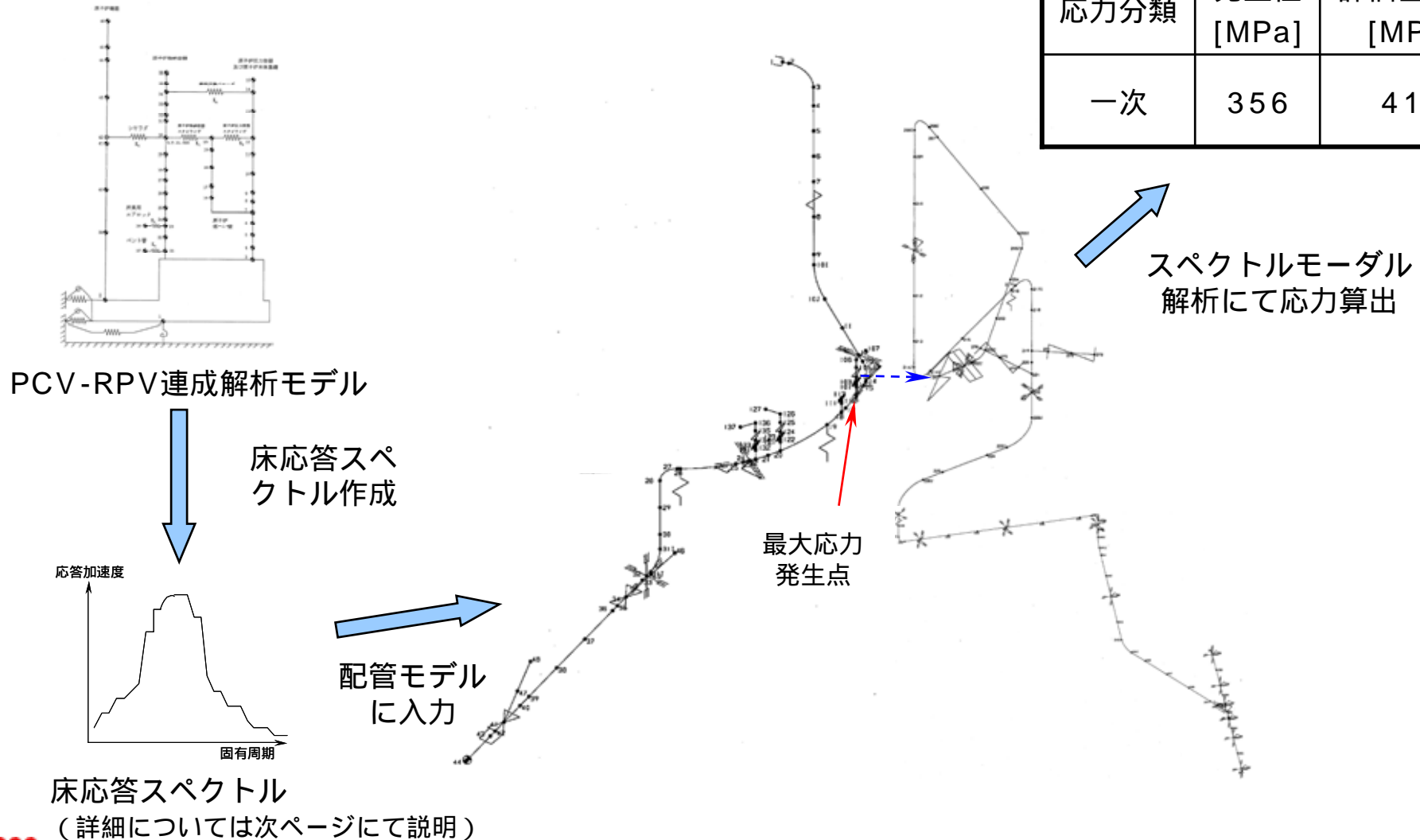


残留熱除去系配管の評価に用いた床応答スペクトル (鉛直方向, 減衰定数2.5%)

福島第一5号機 配管（主蒸気系配管）

- PCV-RPV連成解析による床応答スペクトルに基づいて，スペクトルモーダル解析を実施し，配管の発生値を算出する。

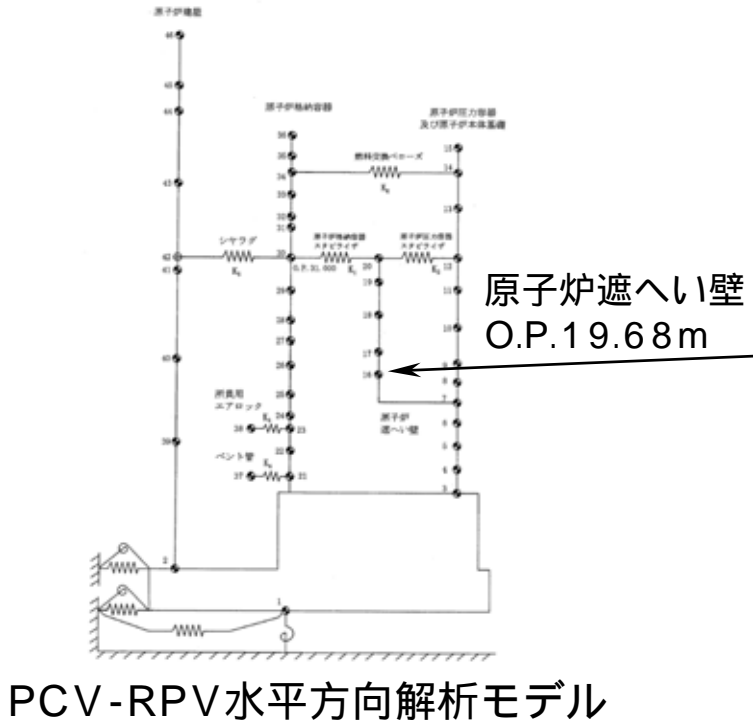
応力分類	発生値 [MPa]	評価基準値 [MPa]
一次	356	417



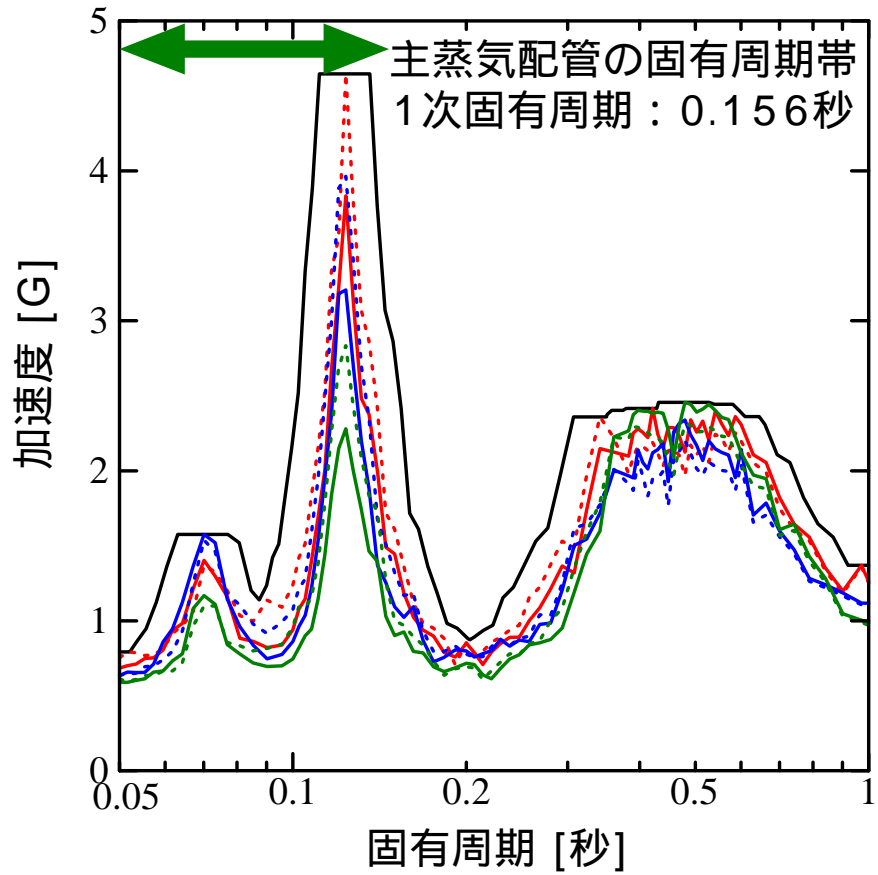
床応答スペクトル
（詳細については次ページにて説明）

福島第一5号機 主蒸気系配管の評価に用いた 水平方向床応答スペクトル

- 配管の重心に近い位置（原子炉遮へい壁のO.P.19.68m）において， $S_s-1(NS, EW)$ ， $S_s-2(NS, EW)$ ， $S_s-3(NS, EW)$ による床応答スペクトルを包絡し， $\pm 10\%$ 拡幅して作成。



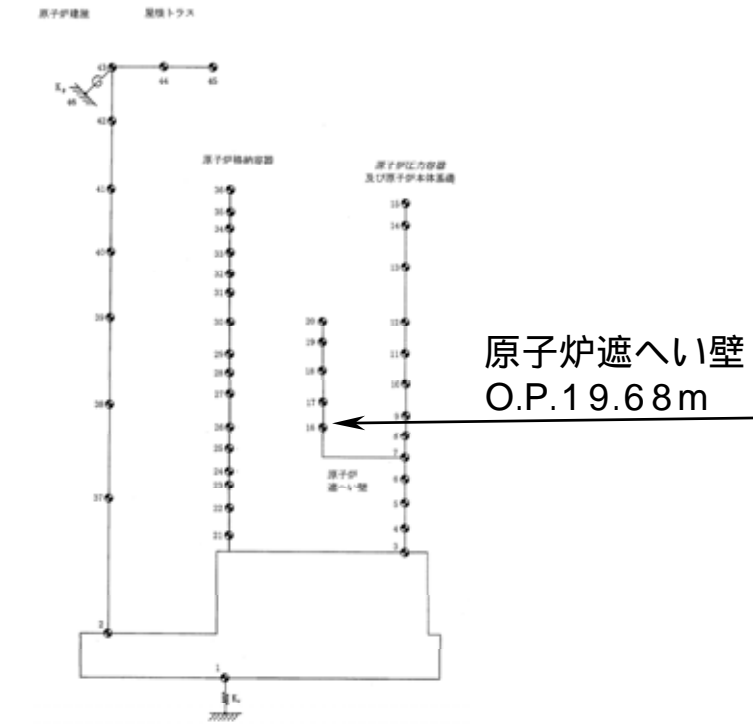
- 包絡 ($\pm 10\%$ 拡幅)
- Ss-1(NS) Ss-1(EW)
- Ss-2(NS) Ss-2(EW)
- Ss-3(NS) Ss-3(EW)



主蒸気系配管の評価に用いた床応答スペクトル（水平方向，減衰定数2.0%）

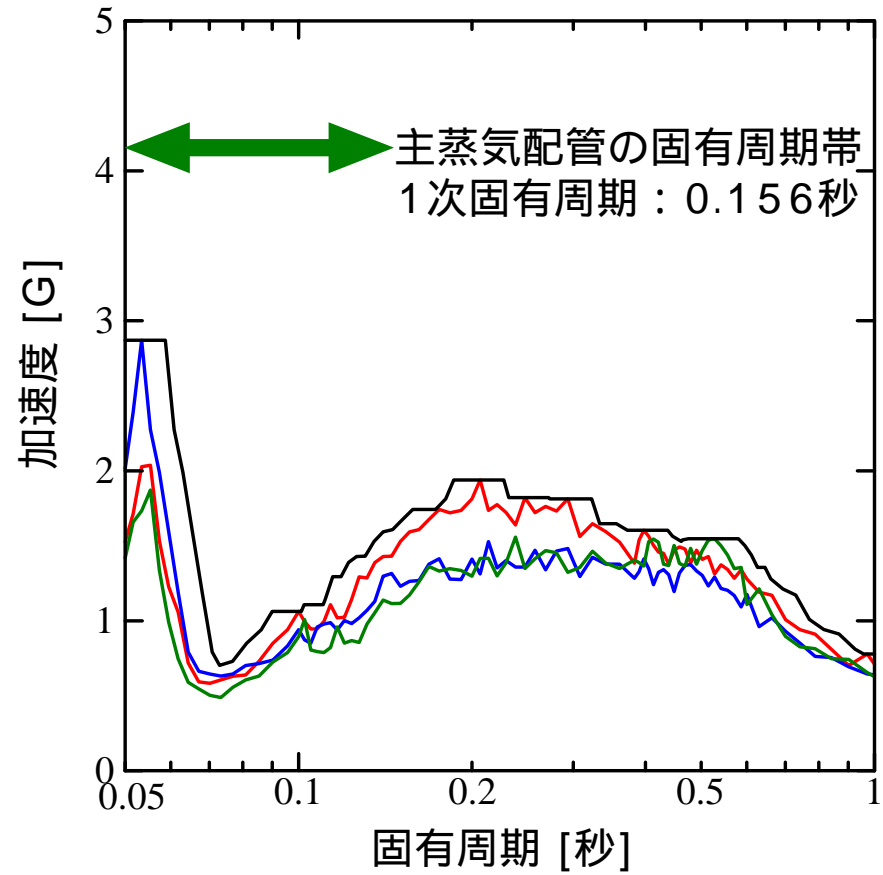
福島第一5号機 主蒸気系配管の評価に用いた鉛直方向床応答スペクトル

- 配管の重心に近い位置（原子炉遮へい壁のO.P.19.68m）において， S_s-1 ， S_s-2 ， S_s-3 による床応答スペクトルを包絡し， $\pm 10\%$ 拡幅して作成。



PCV-RPV鉛直方向解析モデル

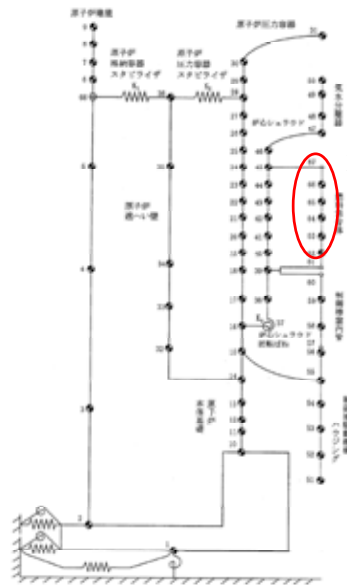
- 包絡 ($\pm 10\%$ 拡幅)
- S_s-1 (UD)
- S_s-2 (UD)
- S_s-3 (UD)



主蒸気系配管の評価に用いた床応答スペクトル（鉛直方向，減衰定数2.0%）

福島第一5号機 制御棒（挿入性）

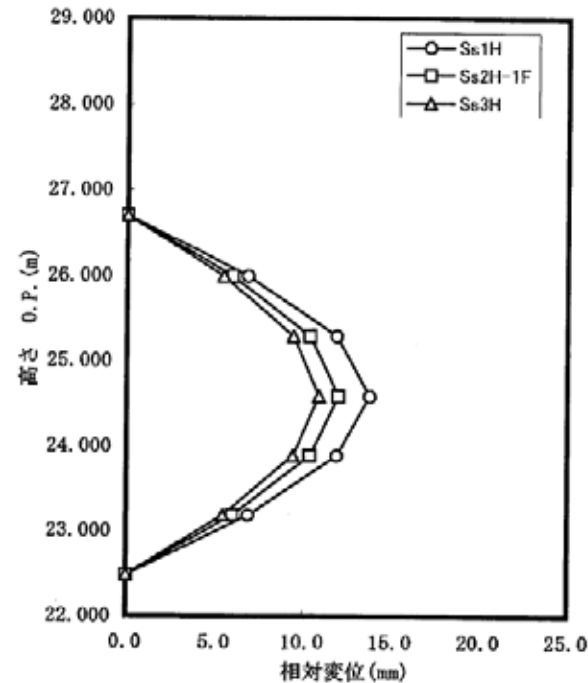
- 制御棒の地震時挿入性については、地震による燃料集合体の相対変位が試験により挿入性が確認された相対変位以下であることを確認した。



燃料集合体

燃料集合体の
相対変位を算出

炉内構造物連成解析モデル

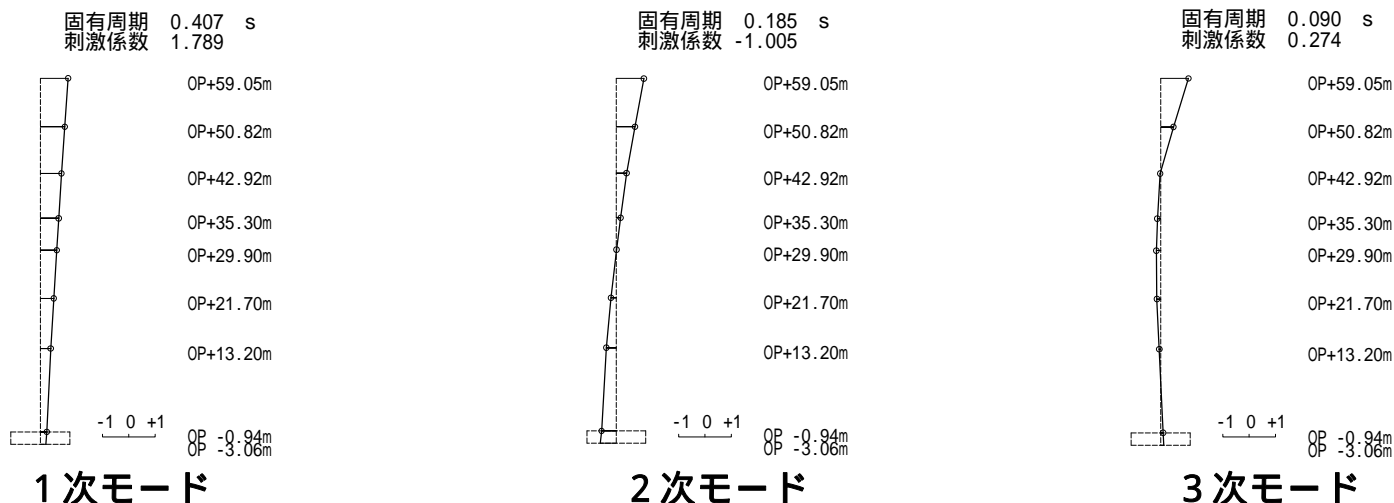


地震時燃料相対変位

燃料集合体の地震時相対変位 [mm]	確認済相対変位 [mm]
13.8	40.0

. 参考資料

(参考資料) モーダル減衰と地盤ばねの減衰定数について (水平)



参図 -1 原子炉建屋 固有モード (NS方向 , Ss-1H)

参表 -1 ひずみエネルギー比例型モーダル減衰定数の算定結果 (NS方向 , Ss-1H)

次数	固有周期 (s)	固有振動数 (Hz)	刺激係数*	モーダル減衰定数 (%)	備考
1	0.407	2.46	1.789	17.07	地盤建屋連成一次
2	0.185	5.40	-1.005	33.39	
3	0.090	11.17	0.274	9.46	

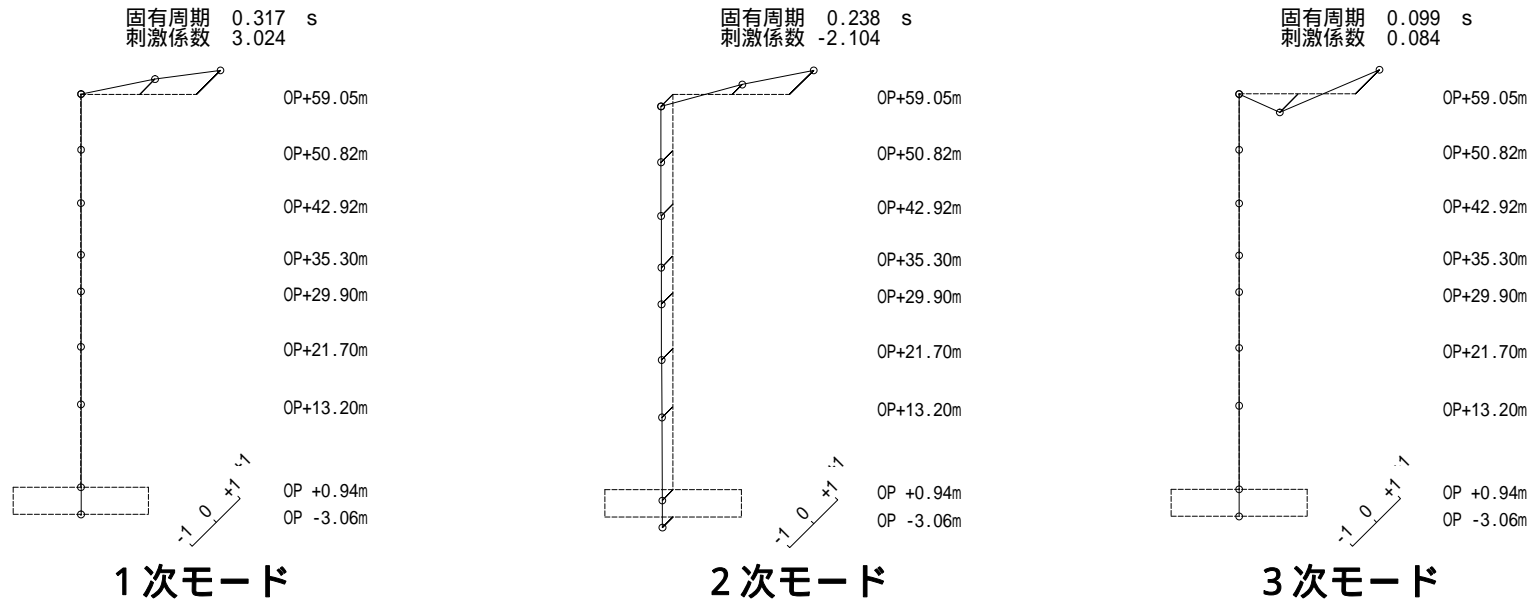
注* : 各モードごとに固有ベクトルの最大値を1に基準化して得られる刺激係数を示す。

参表 -2 モーダル減衰定数及び算定に用いた数値 (NS方向 , Ss-1H)

1F5			1次			2次			3次			
			① 各部材の 減衰定数	② 歪エネルギー の比率	①×②	① 各部材の 減衰定数	② 歪エネルギー の比率	①×②	① 各部材の 減衰定数	② 歪エネルギー の比率	①×②	
建屋			5.0%	17.8%	0.9%	5.0%	18.1%	0.9%	5.0%	87.0%	4.4%	
地盤 ばね	O.P.0.94	側面	並進	58.8%	2.6%	1.5%	65.4%	2.6%	1.7%	68.2%	0.1%	0.1%
			回転	36.2%	2.2%	0.8%	52.7%	1.1%	0.6%	61.9%	0.5%	0.3%
	O.P.-3.06	側面	並進	58.8%	1.6%	1.0%	65.4%	2.7%	1.8%	68.2%	0.1%	0.1%
			回転	36.3%	1.9%	0.7%	52.7%	1.0%	0.5%	61.9%	0.4%	0.2%
	O.P.-3.06	底面	並進	28.2%	31.7%	8.9%	46.0%	53.0%	24.4%	58.2%	2.9%	1.7%
			回転	7.7%	42.2%	3.3%	16.4%	21.5%	3.5%	30.4%	8.9%	2.7%
合計(モーダル減衰定数)					17.1%			33.4%			9.5%	

1次が地盤建屋連成のスウェイモード、2次が地盤建屋連成のロッキングモード、3次が建屋単独のモードとなっている。したがって、参表 -1及び参表 -2に示すモーダル減衰定数は、1次および2次では地盤減衰の影響が大きく、3次では地盤減衰の影響が比較的小さくなっている。

(参考資料) モーダル減衰と地盤ばねの減衰定数について (鉛直)



参図 -2 原子炉建屋 固有モード (鉛直方向, Ss-1V)

参表 -3 ひずみエネルギー比例型モーダル減衰定数の算定結果 (鉛直方向, Ss-1V)

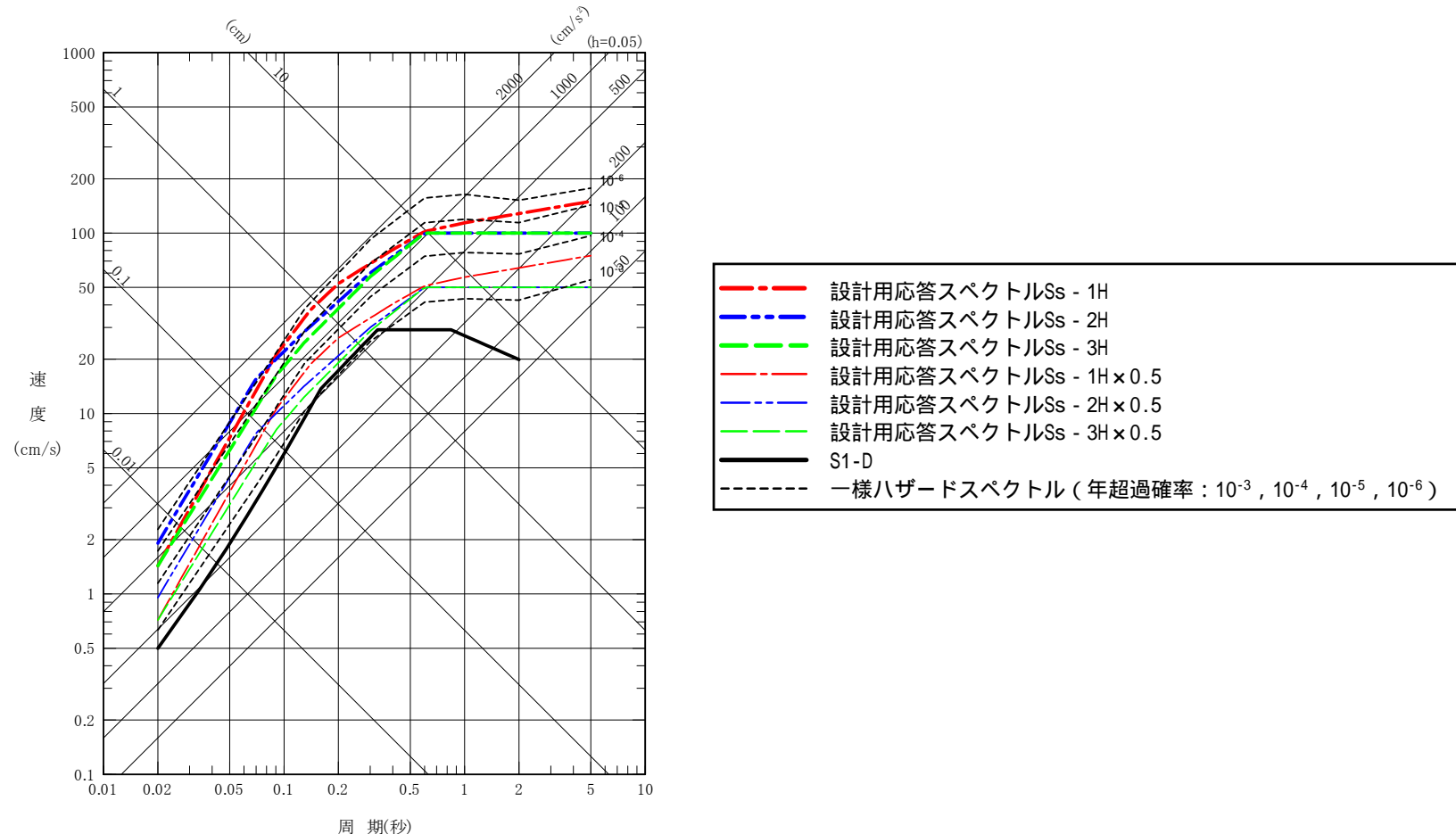
次数	固有周期 (s)	固有振動数 (Hz)	刺激係数*	モーダル減衰定数 (%)	備考
1	0.317	3.16	3.024	3.50	屋根トラス一次
2	0.238	4.19	-2.104	45.39	地盤建屋連成一次
3	0.099	10.10	0.084	2.08	屋根トラス二次

注* : 各モードごとに固有ベクトルの最大値を1に基準化して得られる刺激係数を示す。

1次が屋根トラスの一次モード、2次が地盤建屋連成の一次モード、3次が屋根トラスの二次モードとなっている。したがって、参表 -3に示すモーダル減衰定数は、2次で地盤減衰の影響が大きく、1次および3次では地盤減衰の影響が比較的小さくなっている。

(参考資料) 弾性設計用地震動 S d の設定について

弾性設計用地震動 S d は、基準地震動 S s による安全機能維持をより確実なものとする観点から、弾性設計用地震動 S d と基準地震動 S s の比率 (S d / S s) を 0.5 とし、旧耐震設計指針における基準地震動 S₁ (最大加速度振幅 180 cm/s²) の応答スペクトルを下回らないよう配慮し設定した。



参図 - 1 弾性設計用地震動 S d の年超過確率

(参考資料) 最終報告に用いる応答加速度比

- 福島第一、福島第二原子力発電所の耐震安全性評価中間報告書（H20.3.31提出）にて用いていた応答加速度比

$$\text{応答比} = \frac{\sqrt{(C_H)^2 + (1 + C_V)^2}}{\sqrt{(C_{H0})^2 + (1 + C_{V0})^2}}$$

C_{H0} : 既往評価による水平方向評価震度
 C_H : 基準地震動Ssによる水平方向評価震度
 C_{V0} : 既往評価による鉛直方向評価震度
 C_V : 基準地震動Ssによる鉛直方向評価震度

- 構造WGの審議等を踏まえ、今後評価を行う設備に関しては、応答加速度比の算出方法を以下の様に変更することとしている。

$$\text{応答比} = \text{MAX} \left(\frac{C_H}{C_{H0}}, \frac{C_V}{C_{V0}} \right)$$