

福島第一原子力発電所 3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22年 6月17日

東京電力株式会社



東京電力

目次

I. 安全上重要な建物・構築物の耐震安全性評価

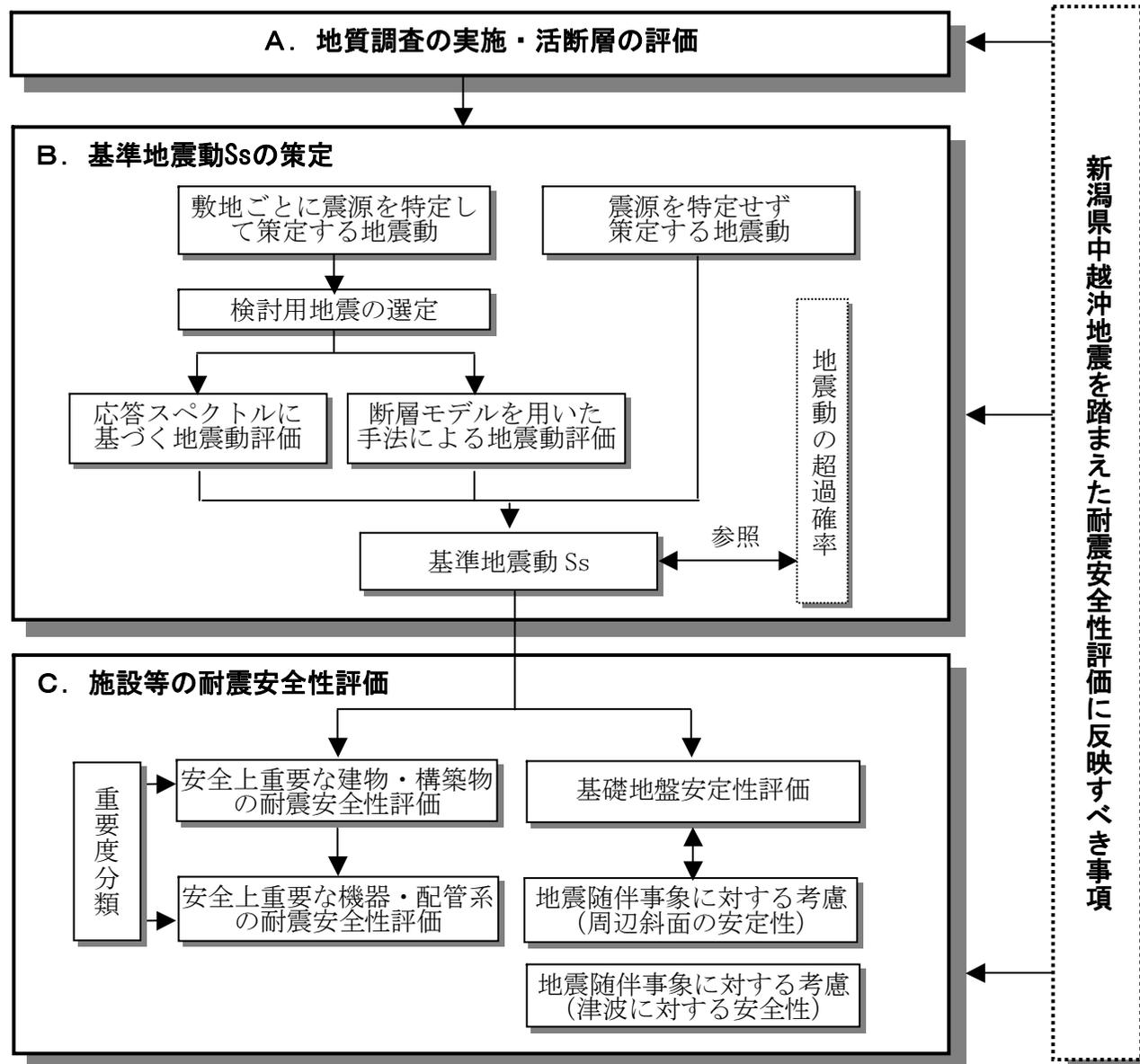
- 1 建物概要
- 2 基準地震動 S_s の概要
- 3 入力地震動の算定
- 4 地震応答解析モデルの設定
- 5 地震応答解析結果
- 6 耐震安全性評価結果

II. 安全上重要な機器・配管系の耐震安全性評価

- 1 評価概要
- 2 減衰定数
- 3 応答倍率法の考え方
- 4 各設備の評価プロセス

III. 参考資料

新耐震指針に照らした耐震安全性評価の流れ



I. 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

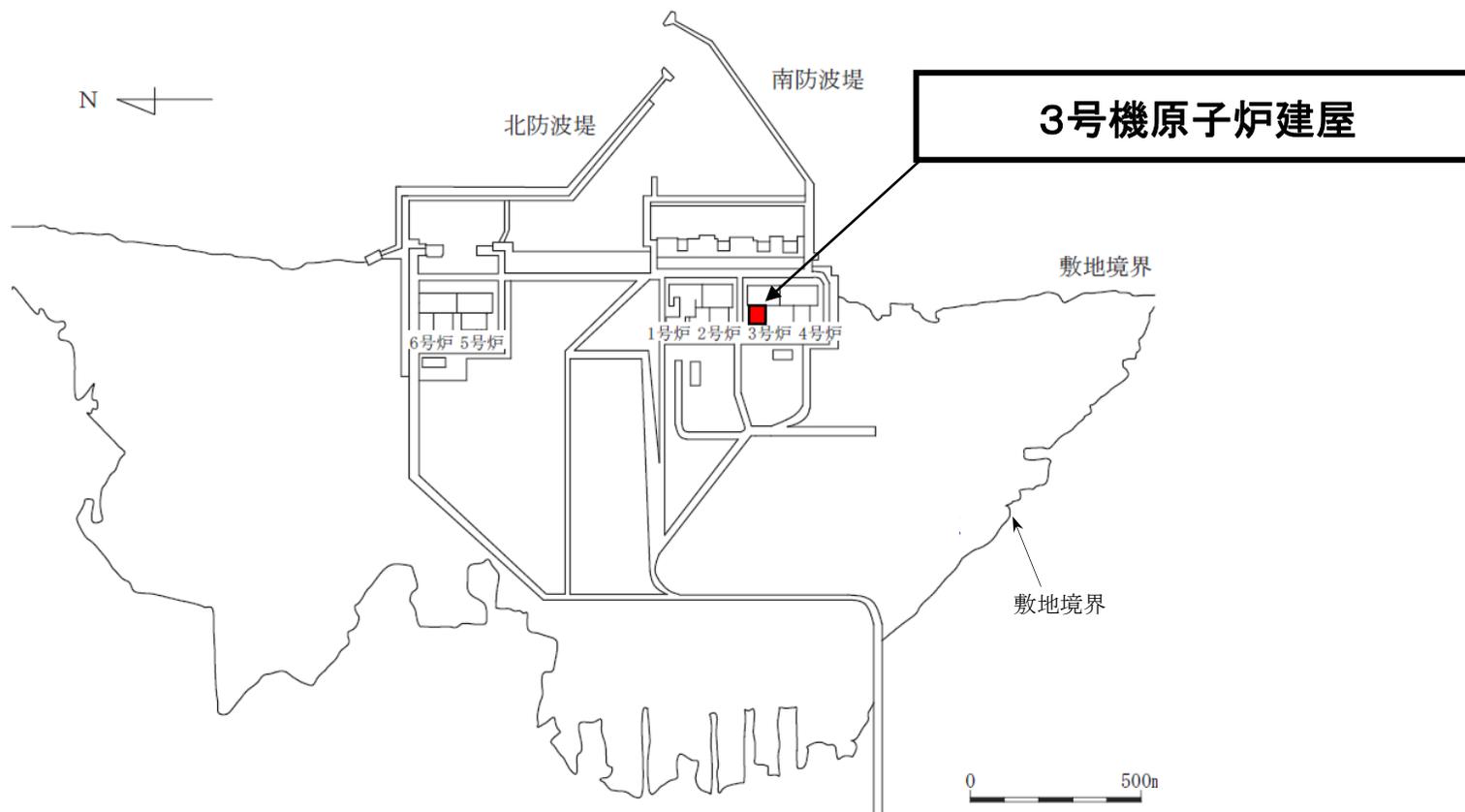


図1-1 福島第一原子力発電所 配置図

3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61.78m (地上高さ45.72m)

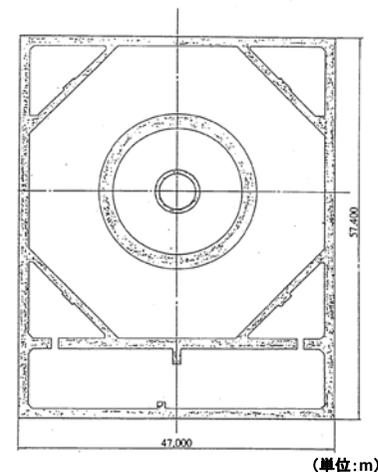


図1-2 平面図

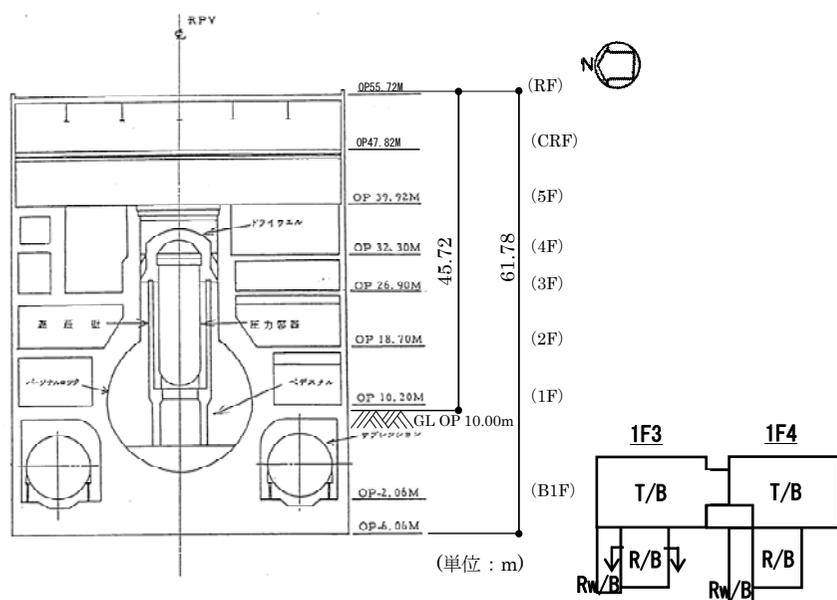


図1-3 断面図 (NS方向)

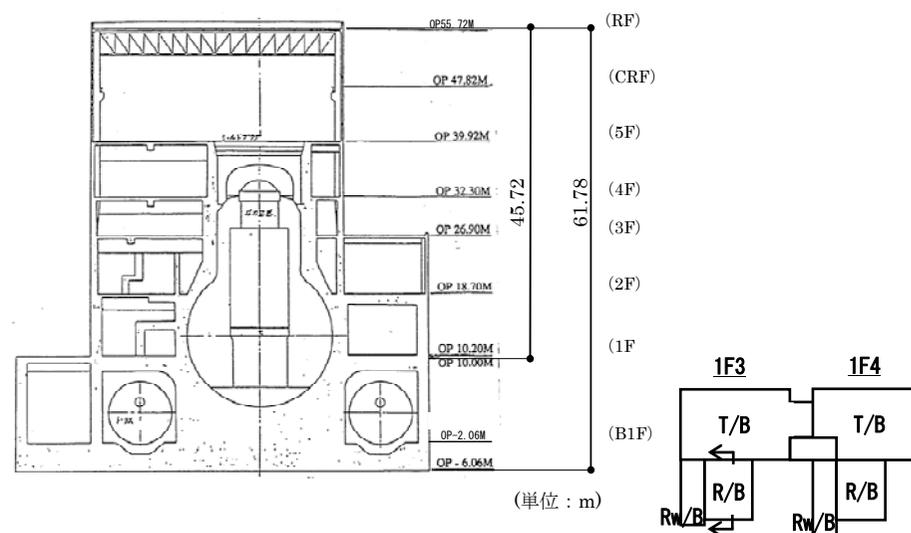


図1-4 断面図 (EW方向)

I. 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

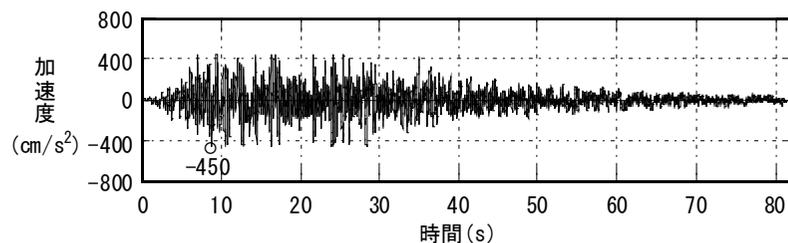


図2-1 加速度時刻歴波形
(Ss-1H)

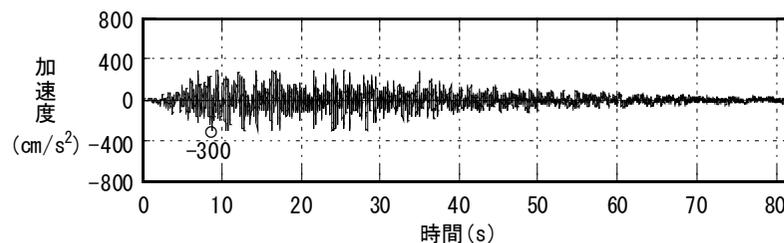


図2-4 加速度時刻歴波形
(Ss-1V)

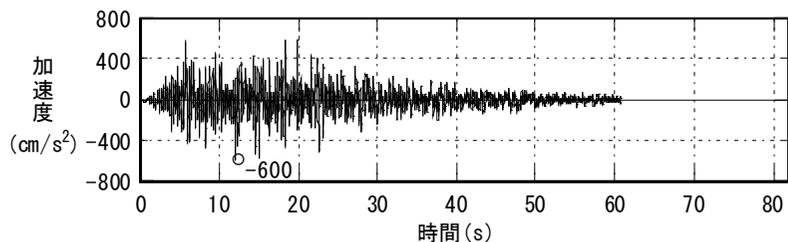


図2-2 加速度時刻歴波形
(Ss-2H)

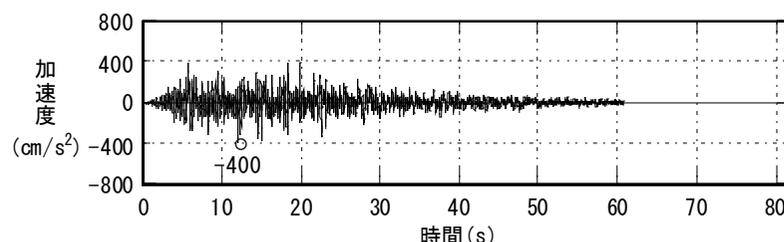


図2-5 加速度時刻歴波形
(Ss-2V)

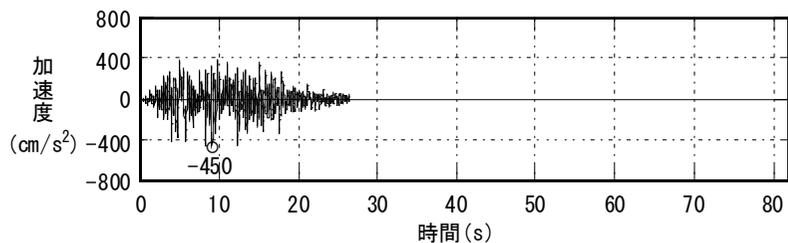


図2-3 加速度時刻歴波形
(Ss-3H)

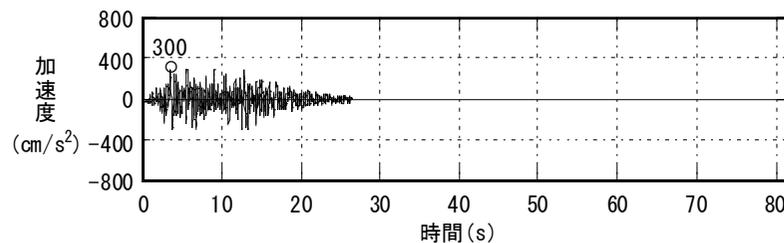


図2-6 加速度時刻歴波形
(Ss-3V)

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。

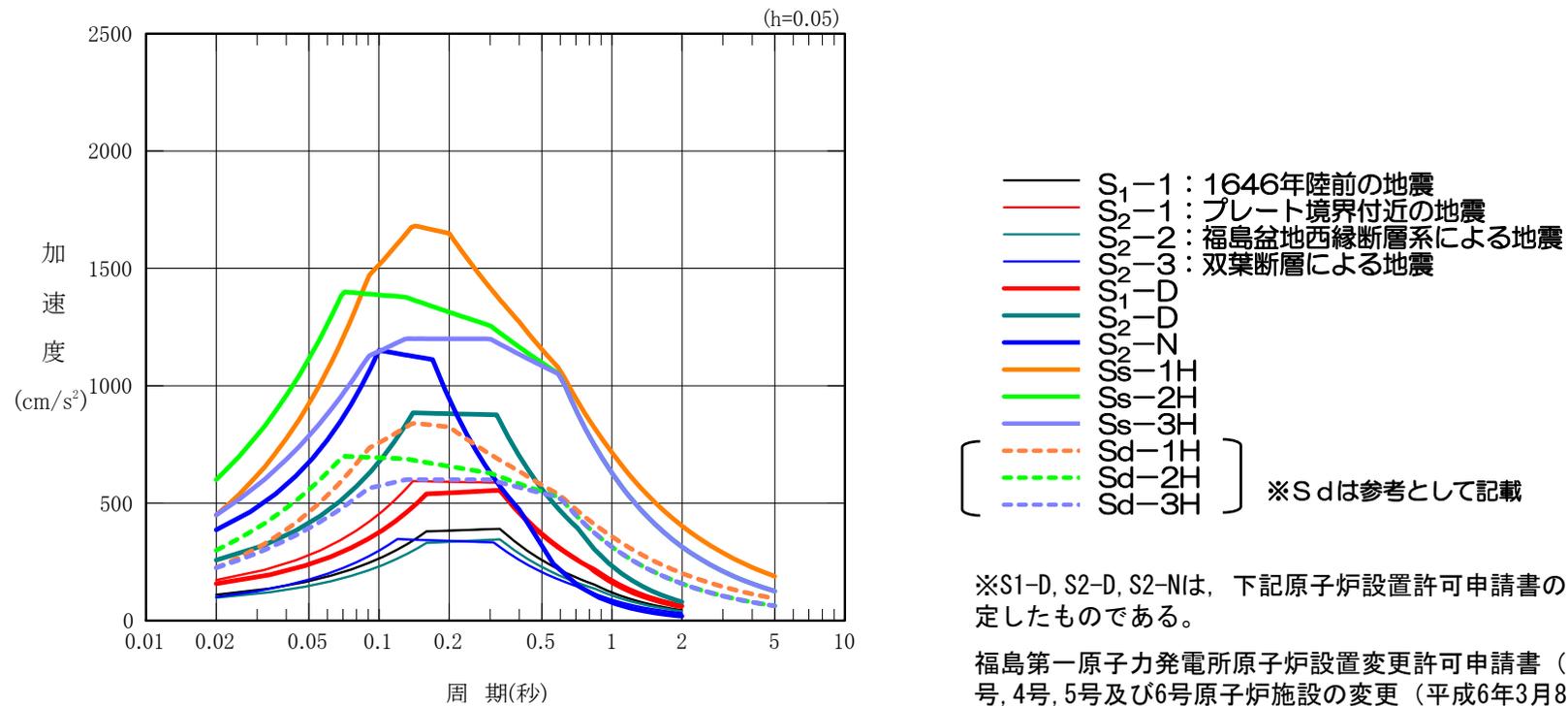
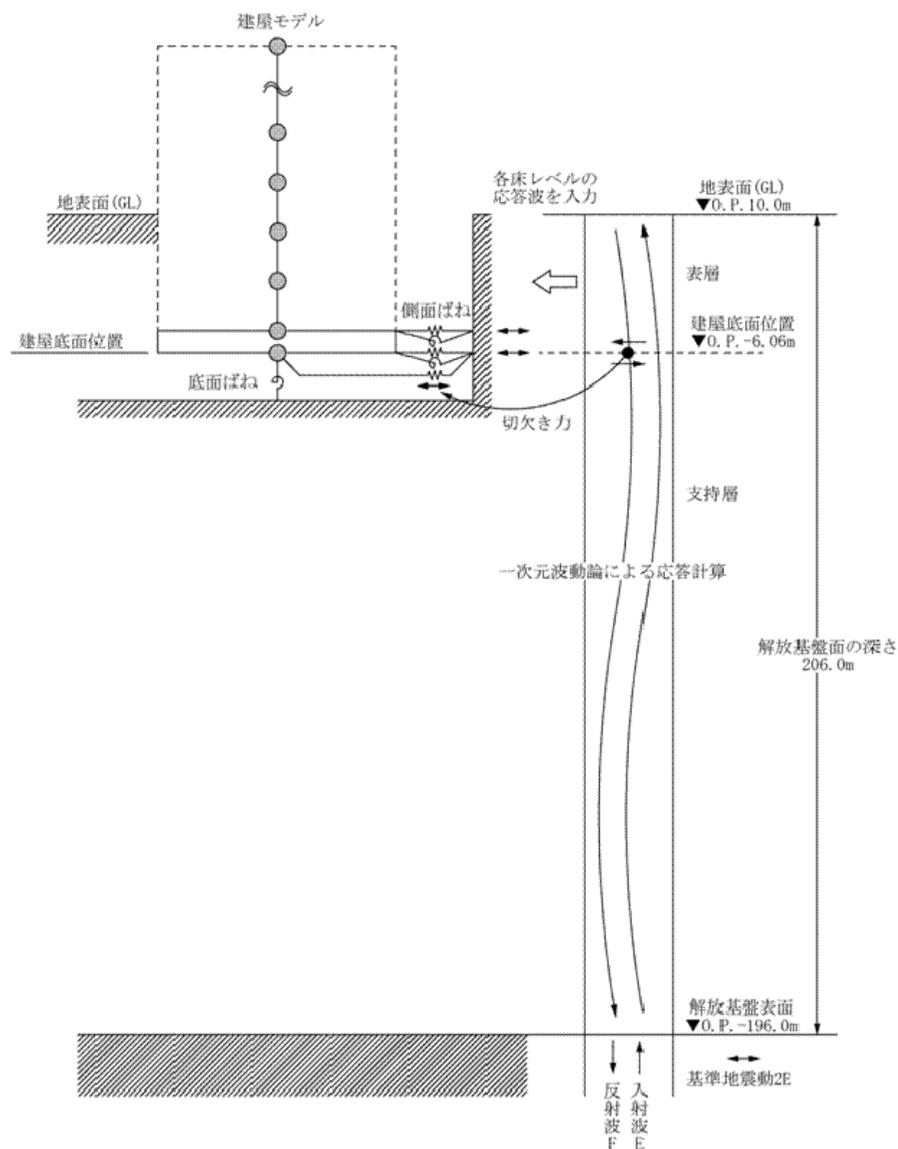


図2-7 新・旧指針による基準地震動の比較

I. 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）

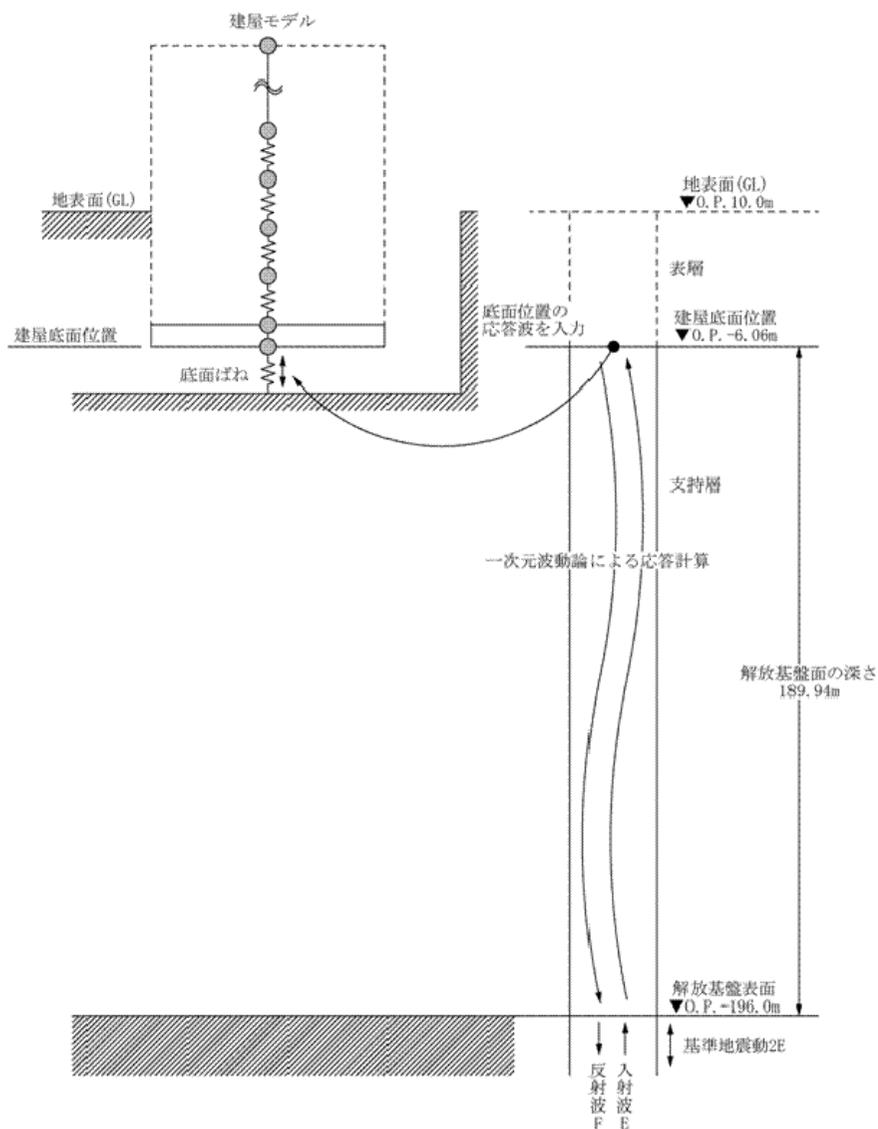


原子炉建屋の水平方向の入力地震動については、解放基盤表面で定義される基準地震動 S_s を入力として、解放基盤表面から地表面までの速度構造を成層と仮定した地盤モデルを用いた一次元波動論による地震応答解析を行い、原子炉建屋基礎底面位置及び側面ばね位置での地震動を入力地震動とした。

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 γ (kN/m ³)	ポア ソン 比 ν	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		
10.0																									
1.9	砂岩	380	17.8	0.473	2.62	0.85	0.85	0.86	2.23	2.23	2.25	6.57	6.57	6.63	351	351	352	-	-	-	3	3	3	8.1	
-10.0	泥岩	450	16.5	0.464	3.41	0.78	0.81	0.78	2.66	2.76	2.66	7.79	8.08	7.79	398	405	398	1530	1560	1530	3	3	3	11.9	
-80.0		500	17.1	0.455	4.36				3.40	3.53	3.40	9.89	10.27	9.89	442	450	442	1540	1570	1540				70.0	
-108.0		560	17.6	0.446	5.63				4.39	4.56	4.39	12.70	13.19	12.70	495	504	495	1580	1610	1580				28.0	
-196.0		600	17.8	0.442	6.53				5.09	5.29	5.09	14.68	15.26	14.68	530	540	530	1640	1670	1640				88.0	
-196.0	[解放基盤]	700	18.5	0.421	9.24	1.00	1.00	1.00	9.24	9.24	9.24	26.26	26.26	26.26	700	700	700	1890	1890	1890	-	-	-	-	

入力地震動評価法の妥当性確認

入力地震動評価法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（3号機原子炉建屋の炉心位置から約530m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（北緯38度49.2分 東経141度39.0分 深さ72km M7.1）
O. P. -200mでの観測波

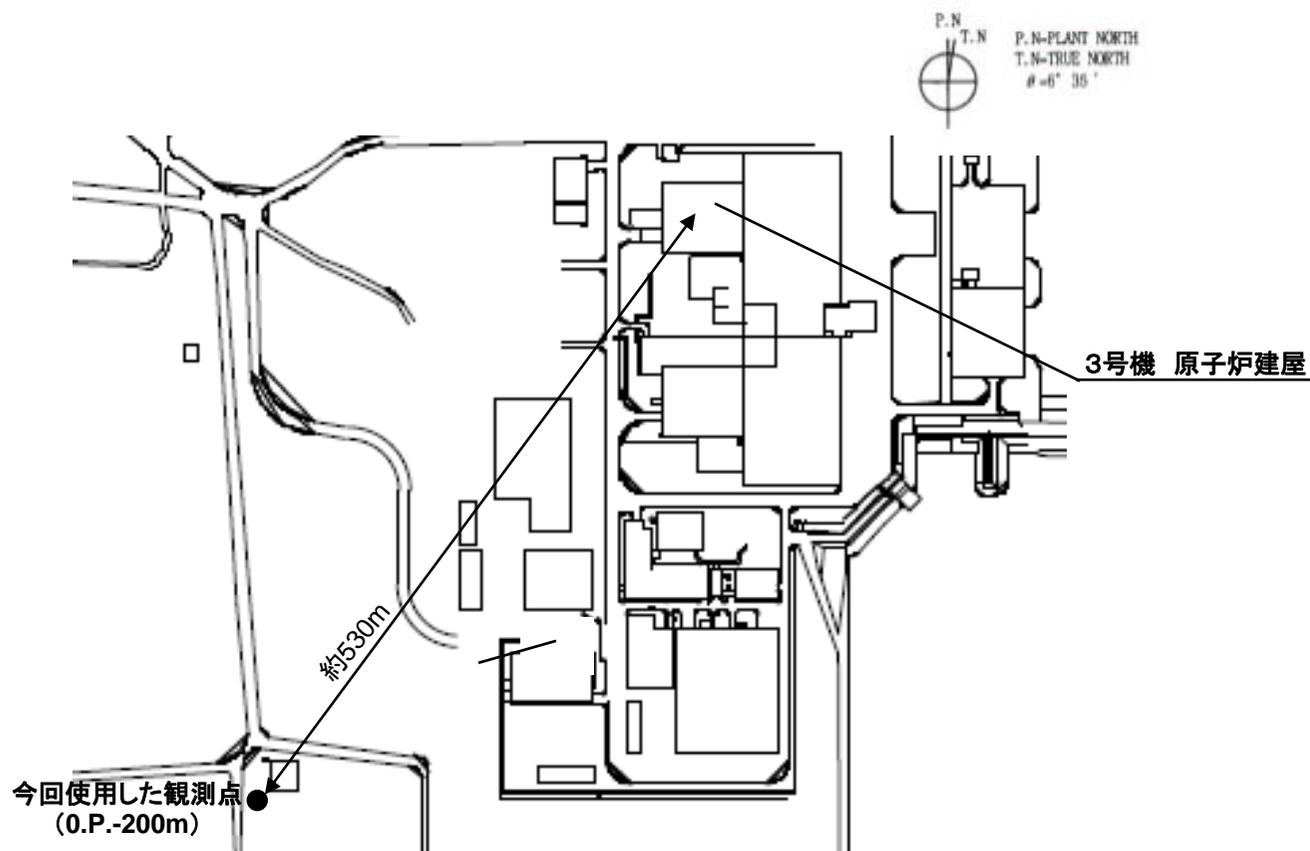


図3-3 福島第一原子力発電所 地震観測点配置図

入力地震動評価法の妥当性確認

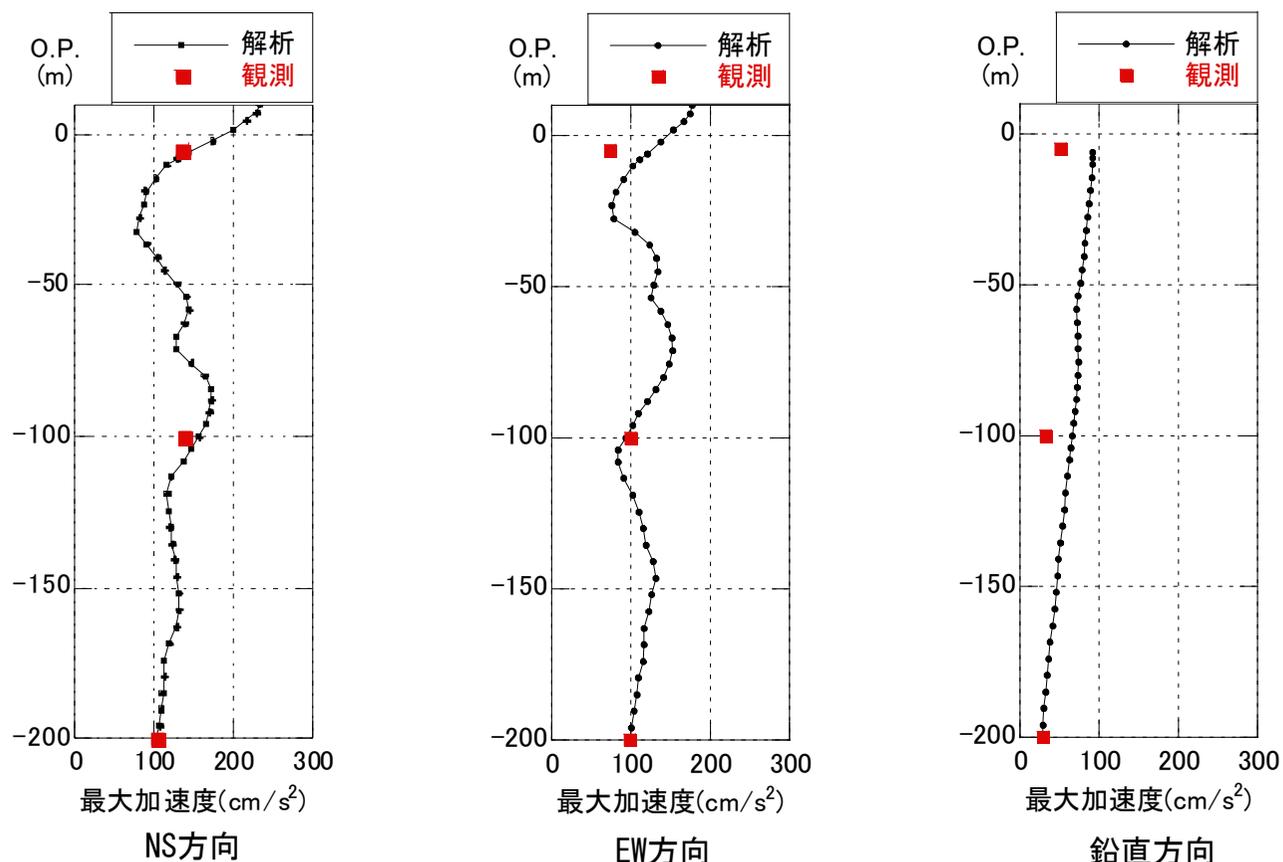


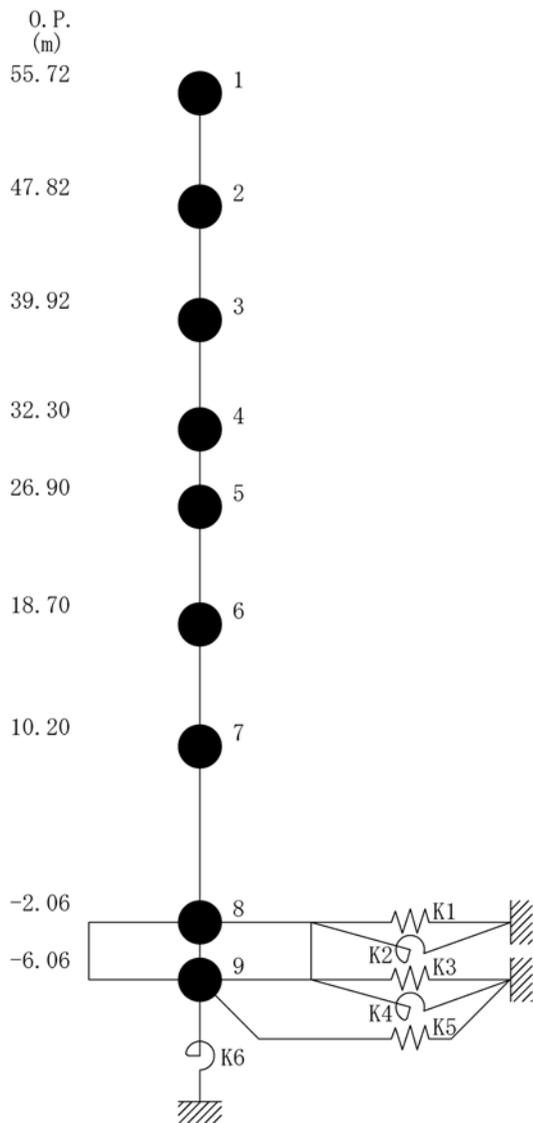
図3-4 地盤の最大応答加速度分布

入力地震動評価法の検証を行った結果、NS方向、EW方向とも最大加速度値は、観測記録にほぼ対応している。また、鉛直方向の最大加速度値は、観測記録に比べやや大きめの値を算定している。

I. 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
 - ・ 建屋を等価な多質点系モデルに置き換え、質量は各階床に集中しているものとする
 - ・ 建屋と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%
- 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
- 地盤の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 $I_G (\times 10^5 \text{kN}\cdot\text{m}^2)$	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	18,890	34.81		
2	15,670	28.83	28.2	14,571
3	74,990	138.08	28.2	15,986
4	88,070	162.10	206.3	27,958
5	109,640	201.82	212.2	38,723
6	130,160	239.58	237.3	56,230
7	226,760	417.47	208.6	60,144
8	301,020	554.17	458.7	112,978
9	127,000	233.79	2,697.8	496,620
合計	1,092,200			

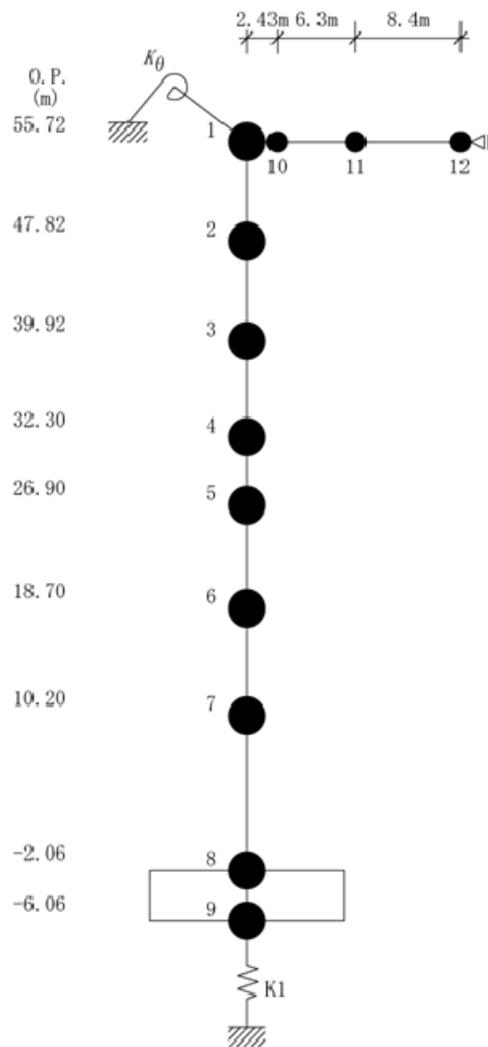
ヤング係数 E_c 2.57×10^7 (kN/m²)
 せん断弾性係数 G 1.07×10^7 (kN/m²)
 ポアソン比 ν 0.20
 減衰 h 5%
 基礎形状 47.0m(NS方向)×57.4m(EW方向)

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 $I_G (\times 10^5 \text{kN}\cdot\text{m}^2)$	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	18,890	19.52		
2	15,670	16.18	21.1	8,529
3	74,990	77.47	28.2	9,057
4	88,070	90.91	103.2	14,172
5	109,640	201.82	150.8	21,844
6	130,160	239.58	204.1	41,352
7	226,760	622.62	226.6	61,084
8	301,020	826.50	431.3	135,128
9	127,000	348.72	2,697.8	740,717
合計	1,092,200			

ヤング係数 E_c 2.57×10^7 (kN/m²)
 せん断弾性係数 G 1.07×10^7 (kN/m²)
 ポアソン比 ν 0.20
 減衰 h 5%
 基礎形状 47.0m(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
 - ・ 建屋を等価な多質点系モデルに置き換え、質量は各階床および鉄骨部分に集中しているものとする
 - ・ 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 ($\times 10^8$ kN/m)	質点番号	質点重量 W (kN)	せん断断面積 A_S ($\times 10^{-2}$ m ²)	断面2次モーメント I (m ⁴)
1	12,026			1	-		
		68.0	2.21			13.03	0.852
2	15,670	74.9	2.44	10	1,881	11.56	0.852
3	74,990	293.3	9.89	11	3,172	5.96	0.852
4	88,070	373.0	17.75	12	1,811		
5	109,640	431.7	13.53				
6	130,160	423.0	12.79				
7	226,760	691.2	14.49				
8	301,020	2,697.8	173.33				
9	127,000						
合計	1,092,200						

① コンクリート部

ヤング係数 E_c 2.57×10^7 (kN/m²)
 せん断弾性係数 G 1.07×10^7 (kN/m²)
 ポアソン比 ν 0.20
 減衰 h 5%

② 鉄骨部

ヤング係数 E_s 2.05×10^8 (kN/m²)
 せん断弾性係数 G 7.90×10^7 (kN/m²)
 ポアソン比 ν 0.30
 減衰 h 2%

トラス端部回転拘束ばね K_θ 2.36×10^7 (kN・m/rad)
 基礎形状 47.0m(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 ν	単位体積重量* ² γ (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。

解析に用いる地盤のばね定数と減衰係数 (Ss-1H)

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	2.32 × 10 ⁶	1.11	4.75 × 10 ⁵	2.53
K2	8	側面・回転	1.44 × 10 ⁹	0.01	8.80 × 10 ⁷	2.53
K3	9	側面・並進	2.32 × 10 ⁶	1.11	4.75 × 10 ⁵	2.53
K4	9	側面・回転	1.44 × 10 ⁹	0.01	8.80 × 10 ⁷	2.53
K5	9	底面・並進	5.37 × 10 ⁷	0.00	2.07 × 10 ⁶	2.53
K6	9	底面・回転	3.87 × 10 ¹⁰	0.00	3.21 × 10 ⁸	2.53

(*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	2.32 × 10 ⁶	1.11	4.76 × 10 ⁵	2.65
K2	8	側面・回転	1.44 × 10 ⁹	0.01	8.91 × 10 ⁷	2.65
K3	9	側面・並進	2.32 × 10 ⁶	1.11	4.76 × 10 ⁵	2.65
K4	9	側面・回転	1.44 × 10 ⁹	0.01	8.91 × 10 ⁷	2.65
K5	9	底面・並進	5.27 × 10 ⁷	0.00	1.99 × 10 ⁶	2.65
K6	9	底面・回転	5.16 × 10 ¹⁰	0.00	5.51 × 10 ⁸	2.65

(*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

解析に用いる地盤のばね定数と減衰係数 (Ss-2H)

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	2.40 × 10 ⁶	1.13	4.84 × 10 ⁵	2.56
K2	8	側面・回転	1.49 × 10 ⁹	0.01	8.94 × 10 ⁷	2.56
K3	9	側面・並進	2.40 × 10 ⁶	1.13	4.84 × 10 ⁵	2.56
K4	9	側面・回転	1.49 × 10 ⁹	0.01	8.94 × 10 ⁷	2.56
K5	9	底面・並進	5.56 × 10 ⁷	0.00	2.10 × 10 ⁶	2.56
K6	9	底面・回転	4.02 × 10 ¹⁰	0.00	3.25 × 10 ⁸	2.56

(*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	2.40 × 10 ⁶	1.13	4.84 × 10 ⁵	2.69
K2	8	側面・回転	1.49 × 10 ⁹	0.01	9.06 × 10 ⁷	2.69
K3	9	側面・並進	2.40 × 10 ⁶	1.13	4.84 × 10 ⁵	2.69
K4	9	側面・回転	1.49 × 10 ⁹	0.01	9.06 × 10 ⁷	2.69
K5	9	底面・並進	5.45 × 10 ⁷	0.00	2.02 × 10 ⁶	2.69
K6	9	底面・回転	5.35 × 10 ¹⁰	0.00	5.60 × 10 ⁸	2.69

(*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

解析に用いる地盤のばね定数と減衰係数 (Ss-3H)

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	2.32 × 10 ⁶	1.11	4.75 × 10 ⁵	2.53
K2	8	側面・回転	1.44 × 10 ⁹	0.01	8.80 × 10 ⁷	2.53
K3	9	側面・並進	2.32 × 10 ⁶	1.11	4.75 × 10 ⁵	2.53
K4	9	側面・回転	1.44 × 10 ⁹	0.01	8.80 × 10 ⁷	2.53
K5	9	底面・並進	5.37 × 10 ⁷	0.00	2.07 × 10 ⁶	2.53
K6	9	底面・回転	3.87 × 10 ¹⁰	0.00	3.21 × 10 ⁸	2.53

(*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	2.32 × 10 ⁶	1.11	4.76 × 10 ⁵	2.65
K2	8	側面・回転	1.44 × 10 ⁹	0.01	8.91 × 10 ⁷	2.65
K3	9	側面・並進	2.32 × 10 ⁶	1.11	4.76 × 10 ⁵	2.65
K4	9	側面・回転	1.44 × 10 ⁹	0.01	8.91 × 10 ⁷	2.65
K5	9	底面・並進	5.27 × 10 ⁷	0.00	1.99 × 10 ⁶	2.65
K6	9	底面・回転	5.16 × 10 ¹⁰	0.00	5.51 × 10 ⁸	2.65

(*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

解析に用いる地盤のばね定数と減衰係数 (Ss-1~3V)

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) f ₁ (Hz)
K1	9	底面・鉛直	8.83×10^7	0.00	4.77×10^6	4.41

(*1) f₁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) f ₁ (Hz)
K1	9	底面・鉛直	9.16×10^7	0.00	4.87×10^6	4.49

(*1) f₁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) f ₁ (Hz)
K1	9	底面・鉛直	8.83×10^7	0.00	4.77×10^6	4.41

(*1) f₁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（エルセント波及びタト波）を直接入力	解放基盤表面で定義した基準地震動Ssを一次元波動論により評価
建屋のモデル化	解析モデル	S Rモデル	埋込みS Rモデル
	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

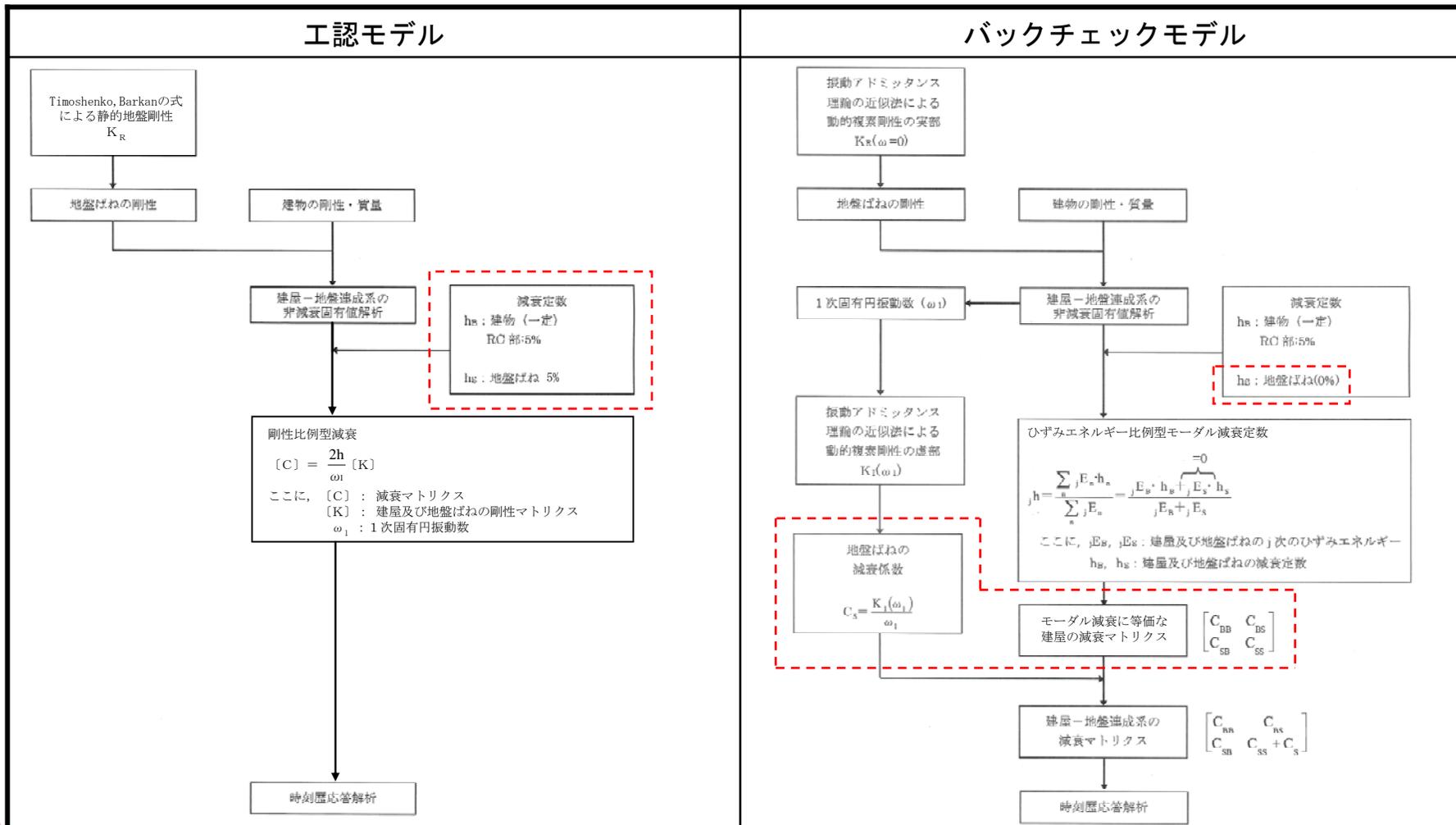
表4-13 地震応答解析モデル及び手法の比較（2）

		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: 6.21×10^7 (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、JEAG4601-1991に基づき近似したばねを考慮 Ss-1H入力のNS方向解析時 水平ばね: 4.64×10^6 (kN/m) 回転ばね: 2.88×10^9 (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、JEAG4601-1991に基づき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: 4.26×10^7 (kN/m) 回転ばね: 2.71×10^{10} (kNm/rad)	Ss-1H入力のNS方向解析時 水平ばね: 5.37×10^7 (kN/m) 回転ばね: 3.87×10^{10} (kNm/rad)
	減衰	安全側に各モード5%として考慮	振動アドミッタンス理論により求め、JEAG4601-1991に基づき近似した減衰係数を考慮

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（3）

BCモデルの地盤ばねの減衰評価は、工認モデルでの5%一定減衰ではなく、JEAG4601-1991に基づき、地盤ばねの減衰定数を0%として算出した「モーダル減衰に等価な建屋の減衰マトリクス」に地盤ばねの減衰係数を後から足し込んでいる。



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、「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	側面回転ばね	建屋減衰
バックチェックモデル	実強度	水平＋回転	5%
ケース1（設計強度）	設計基準強度	水平＋回転	5%
ケース2（側面回転ばね無視）	実強度	水平	5%
ケース3（建屋減衰3%）	実強度	水平＋回転	3%
ケース4（設計ベースモデル）	設計基準強度	水平	5%

地震応答解析モデルのパラメータスタディ (NS方向)

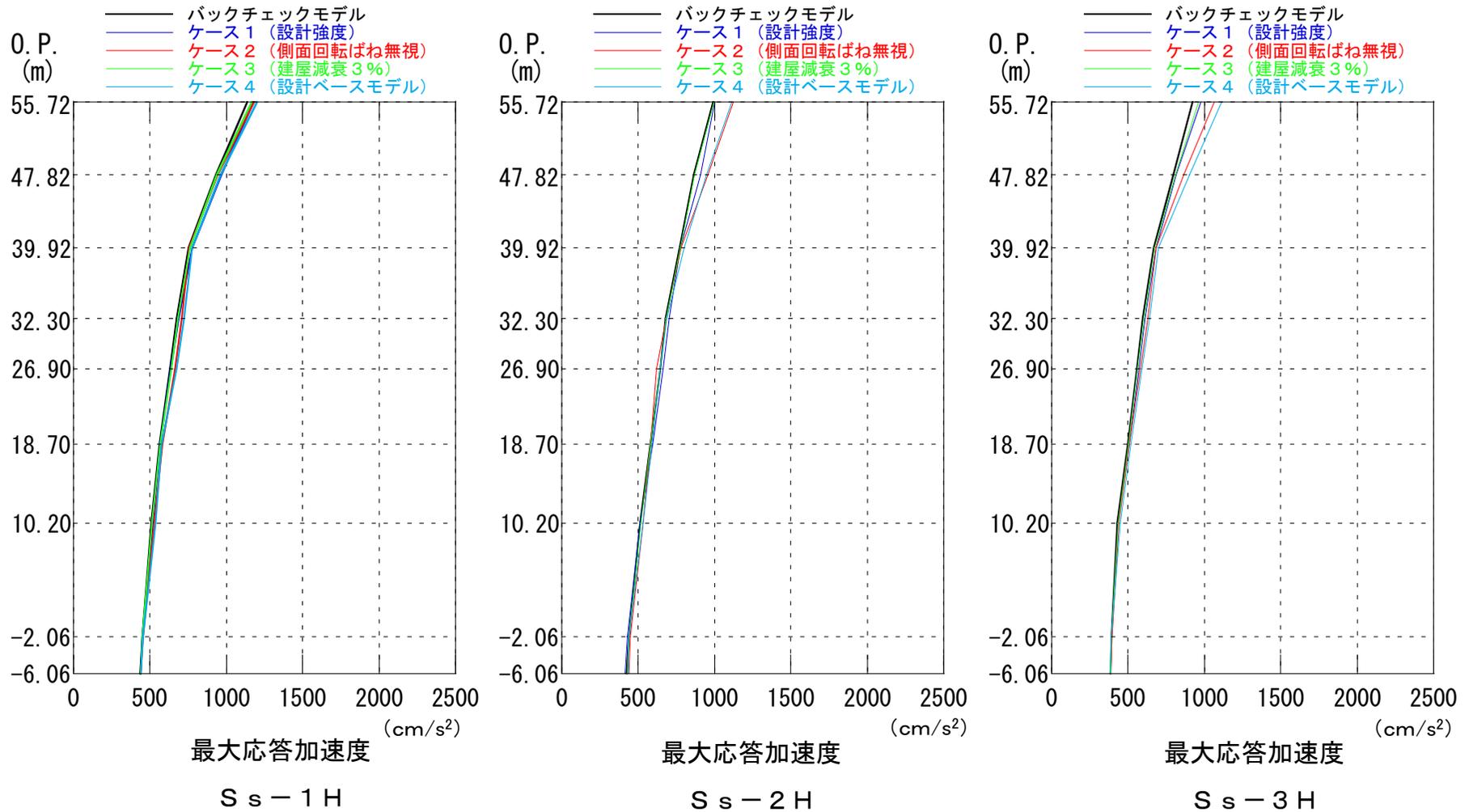


図4-3 最大応答加速度分布 (NS方向)

地震応答解析モデルのパラメータスタディ (EW方向)

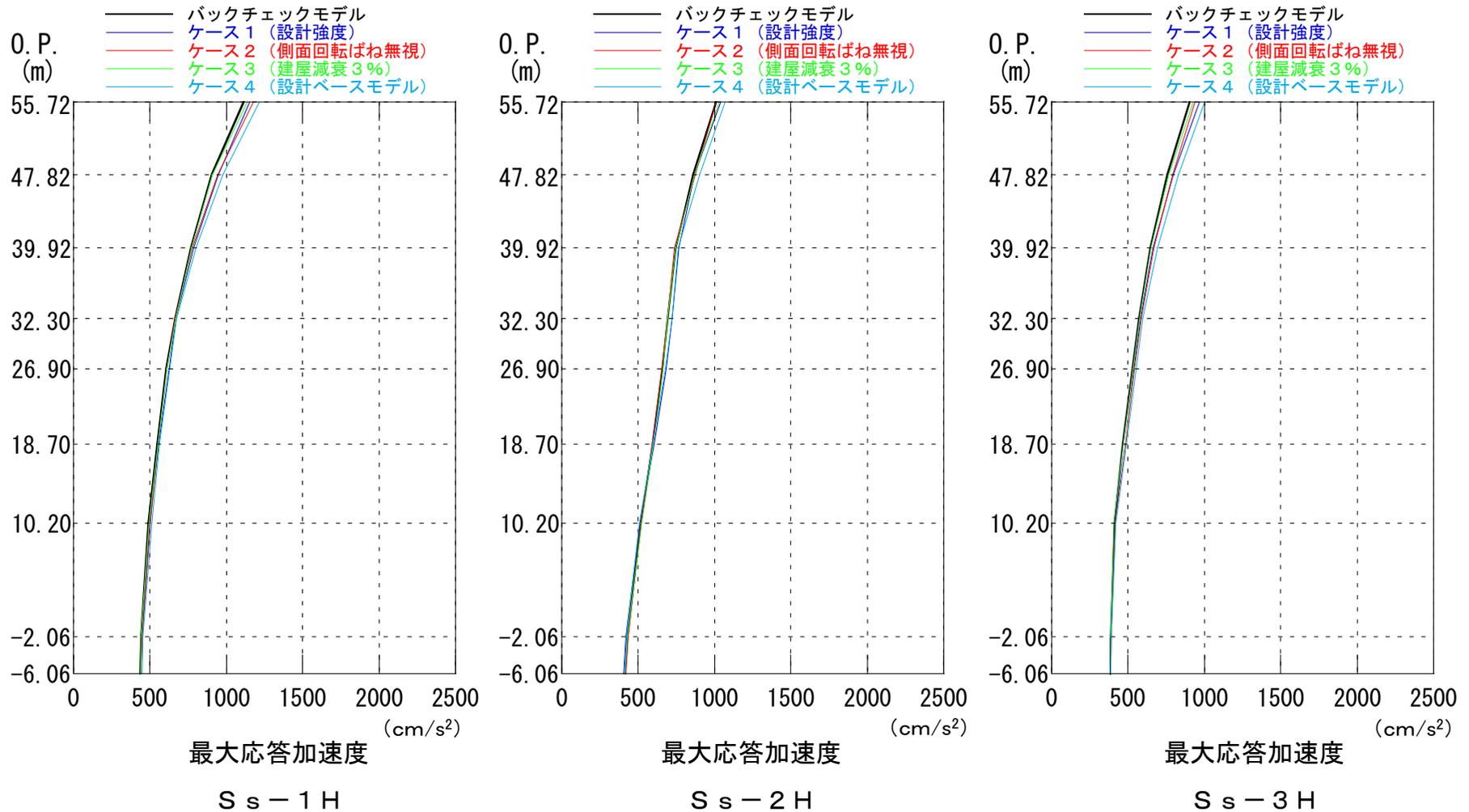


図4-4 最大応答加速度分布 (EW方向)

地震応答解析モデルのパラメータスタディ (NS方向)

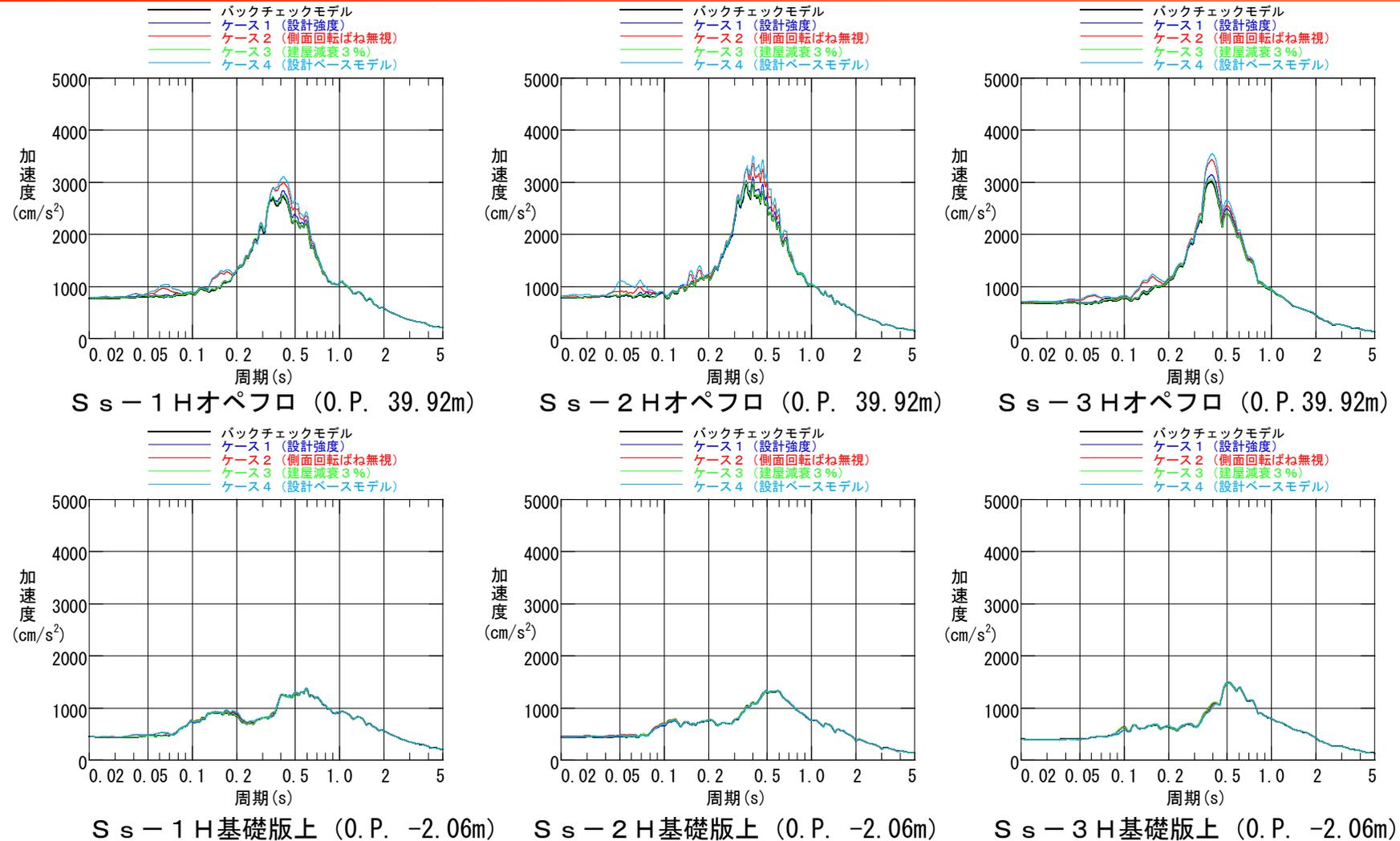


図4-5 床応答スペクトル (NS方向 : h=0.05)

地震応答解析モデルのパラメータスタディ (EW方向)

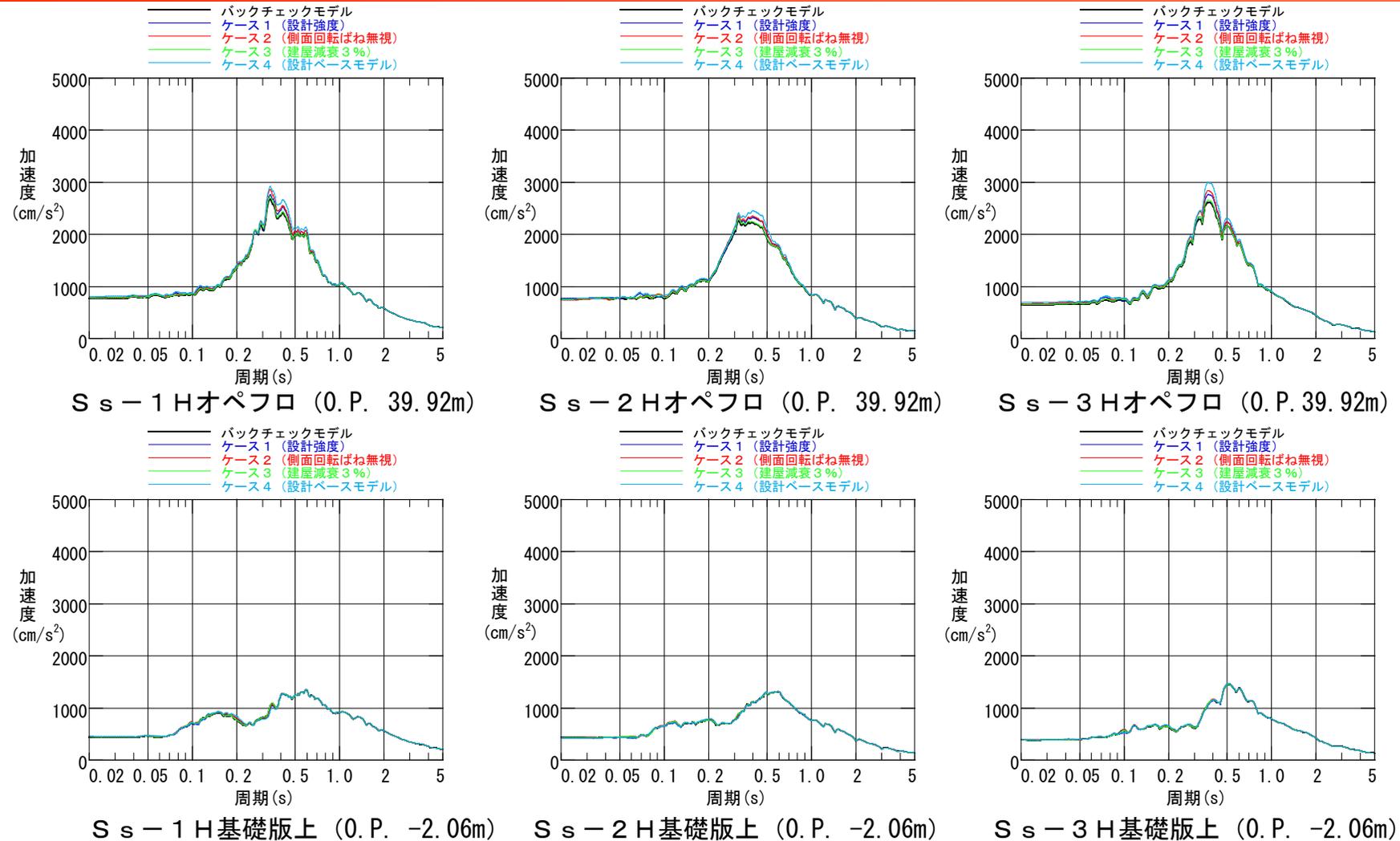


図4-6 床応答スペクトル (EW方向 : h=0.05)

オペフロ階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、「コンクリート強度」「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）

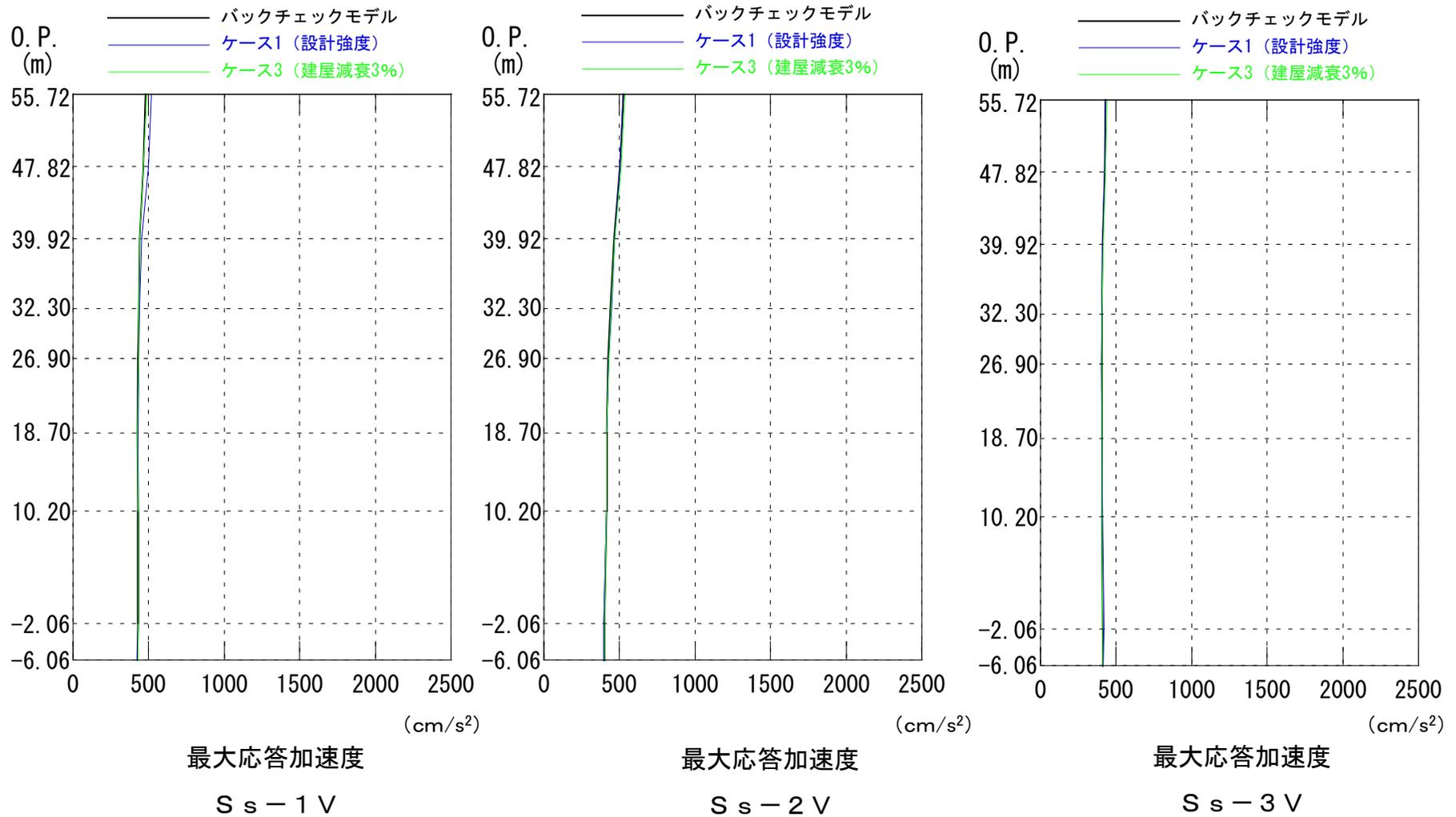


図4-7 最大応答加速度分布（鉛直方向）

地震応答解析モデルのパラメータスタディ（鉛直方向）

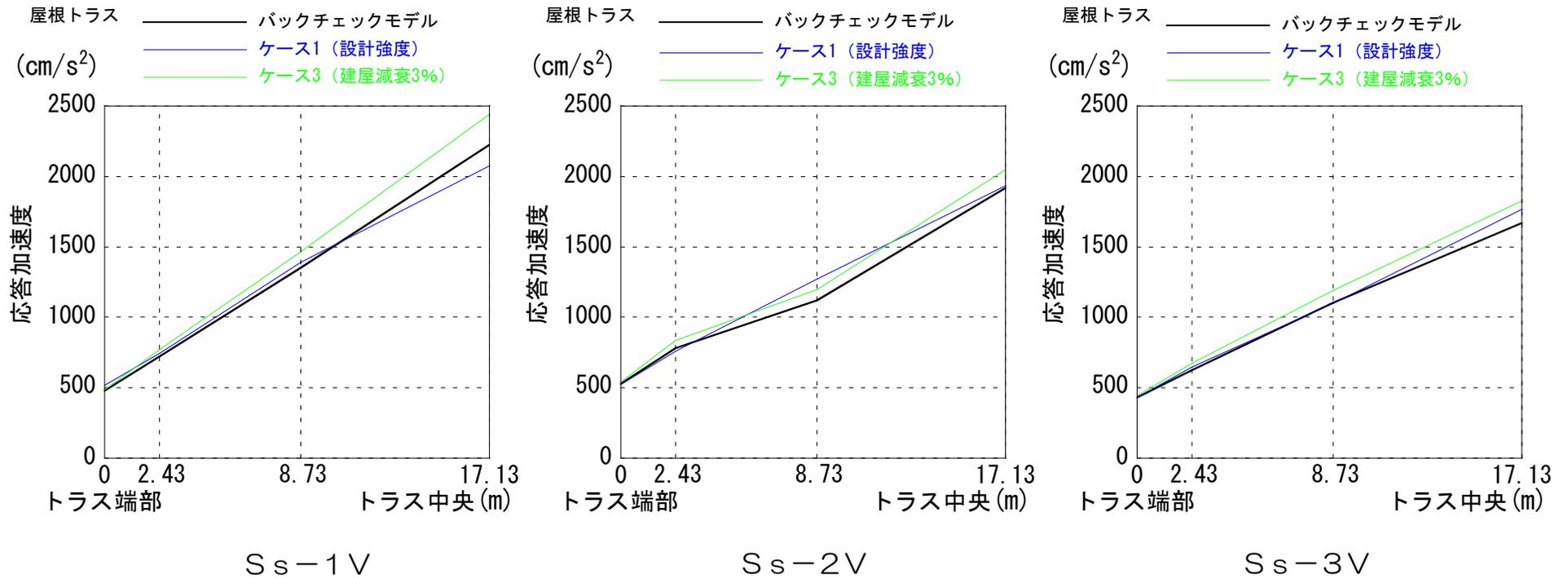


図4-8 最大応答加速度分布（鉛直方向：屋根トラス）

地震応答解析モデルのパラメータスタディ（鉛直方向）

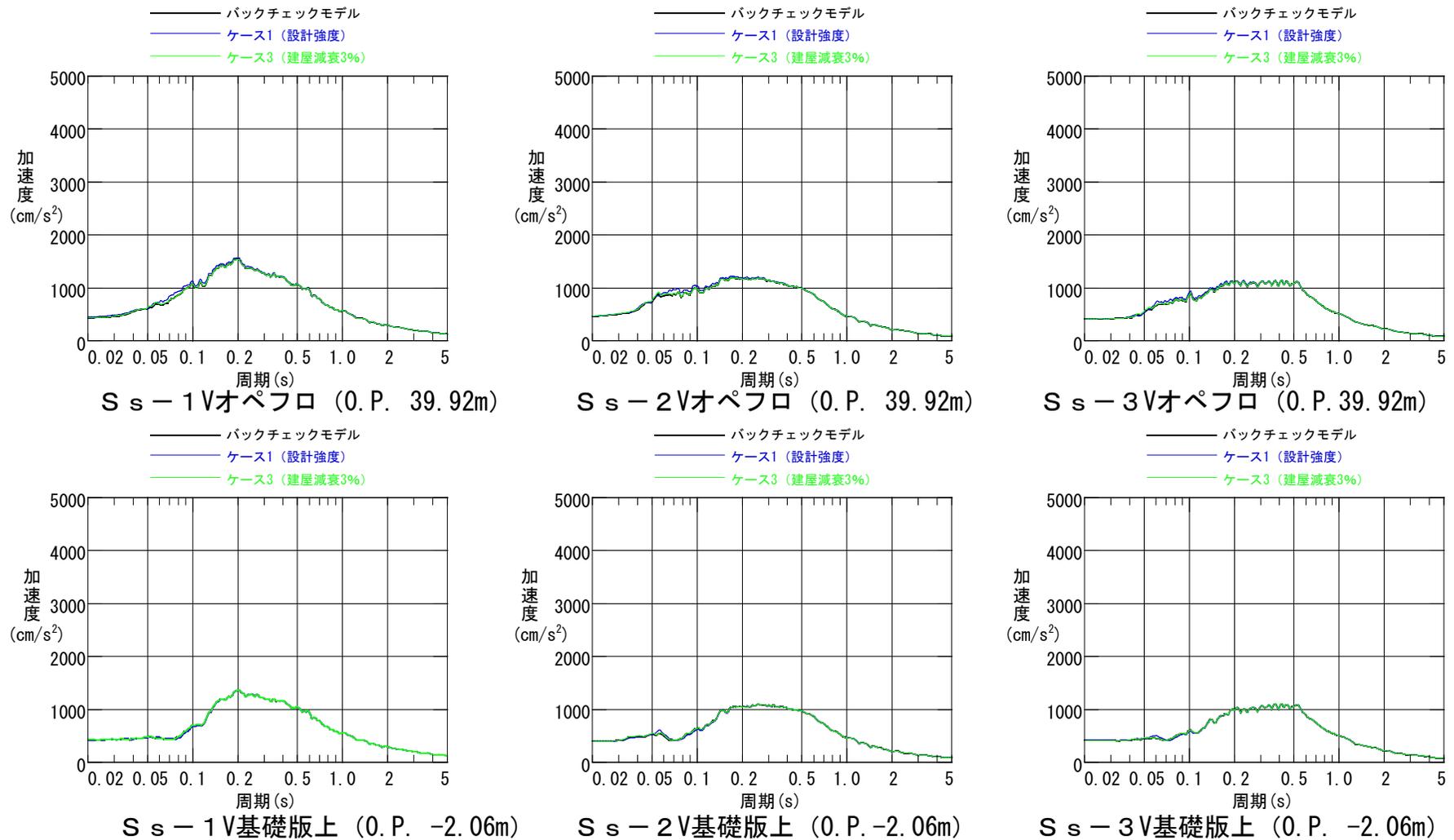


図4-9 床応答スペクトル（鉛直方向：h=0.05）

オペフロ階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」）と床の柔軟性を考慮したモデル（以下「床柔モデル」）によるシミュレーション解析を実施した。

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 (2.62×10 ⁶ kgf/cm 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)		0.362(NS) 0.347(EW)	0.373(NS) 0.358(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

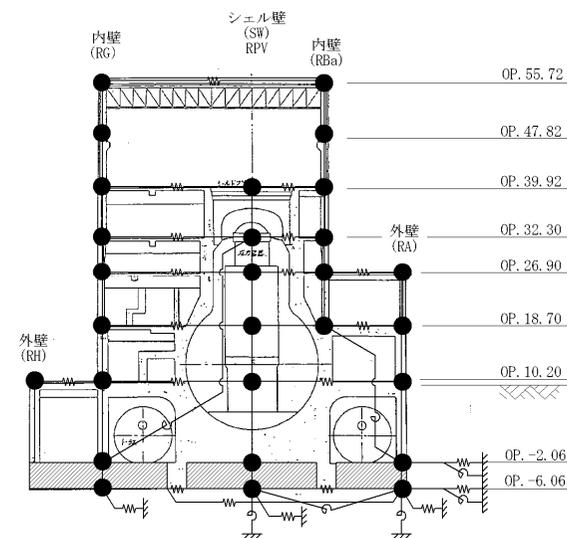


図4-10 床柔モデル (NS方向)

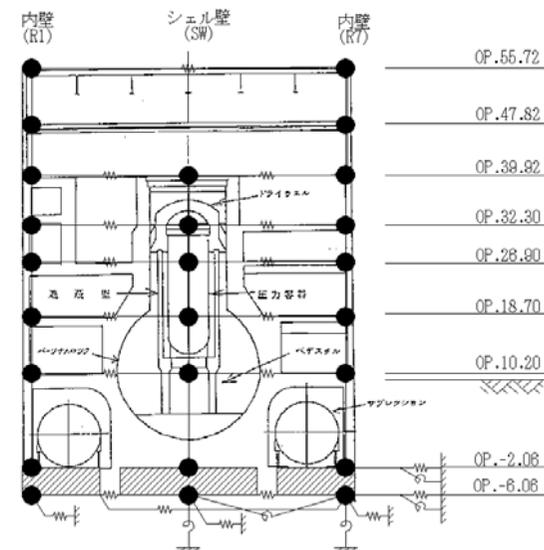


図4-11 床柔モデル (EW方向)

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 (床の柔軟性を考慮した検討結果について) 検討に用いた地震

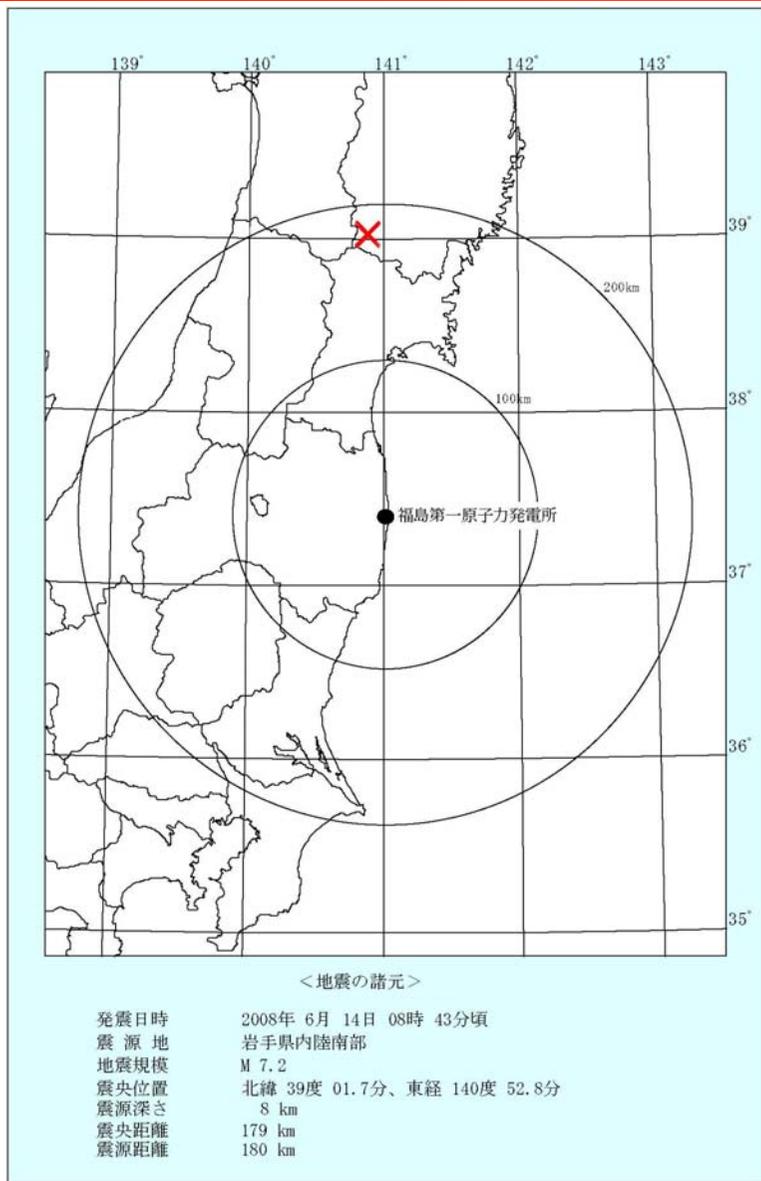


図4-12 地震の諸元

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)

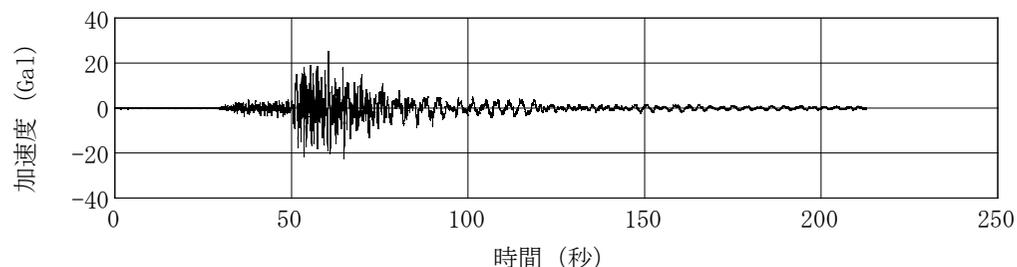


図4-13 加速度時刻歴波形 NS方向 Max=25 Gal

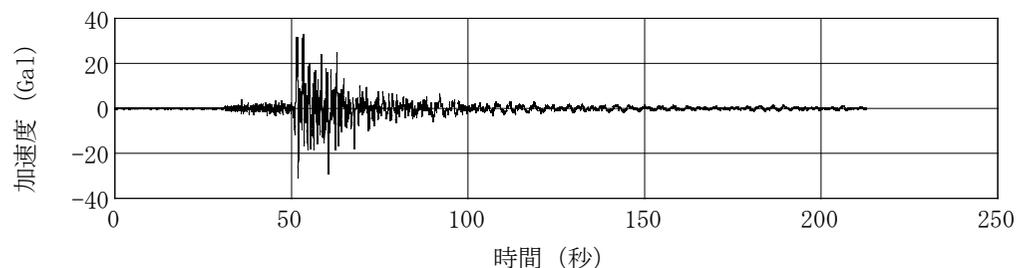


図4-14 加速度時刻歴波形 EW方向 Max=33 Gal

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) 床応答スペクトル(NS方向)

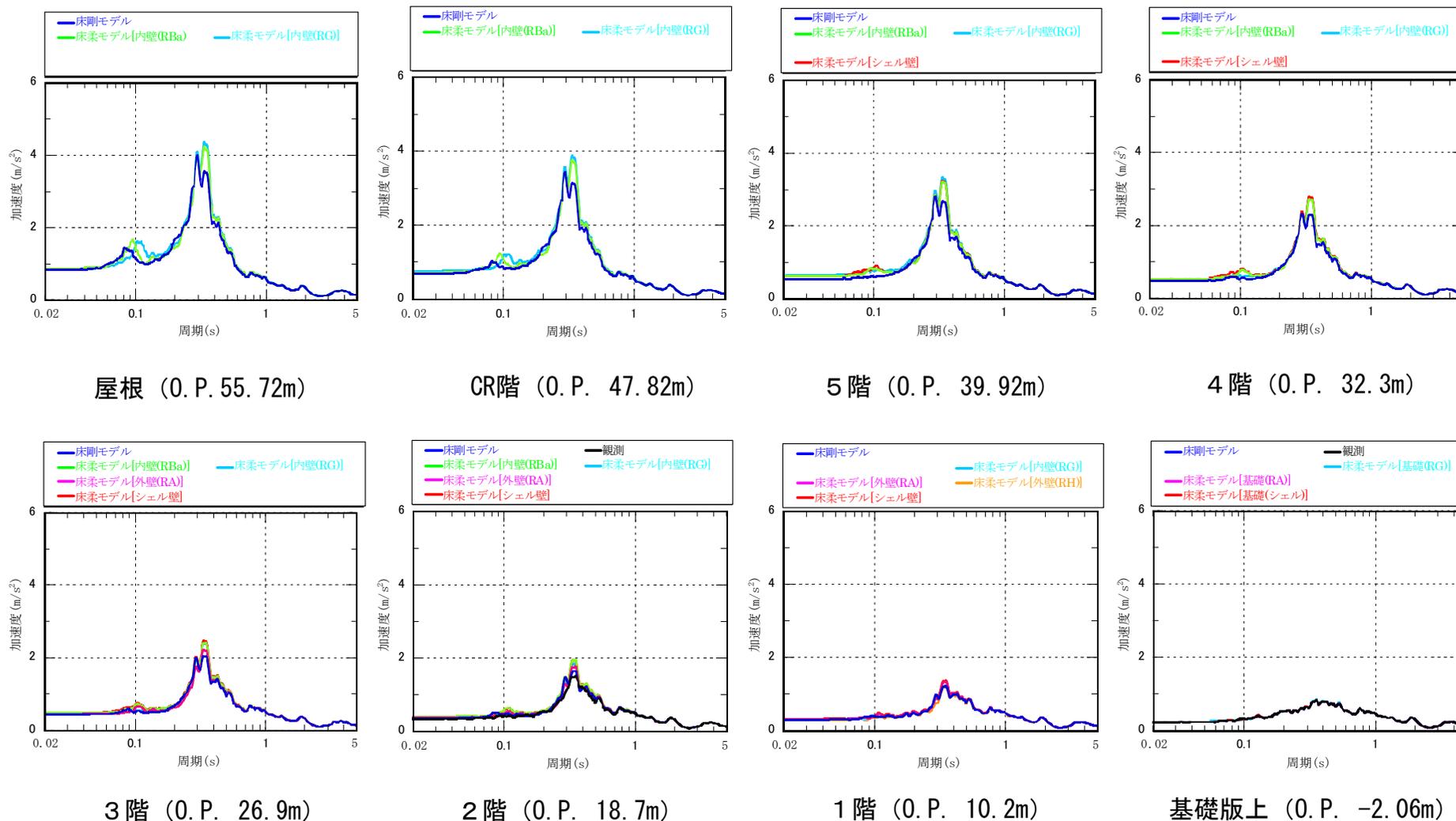


図4-15 床応答スペクトル (NS方向 h=0.05)

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) 床応答スペクトル(EW方向)

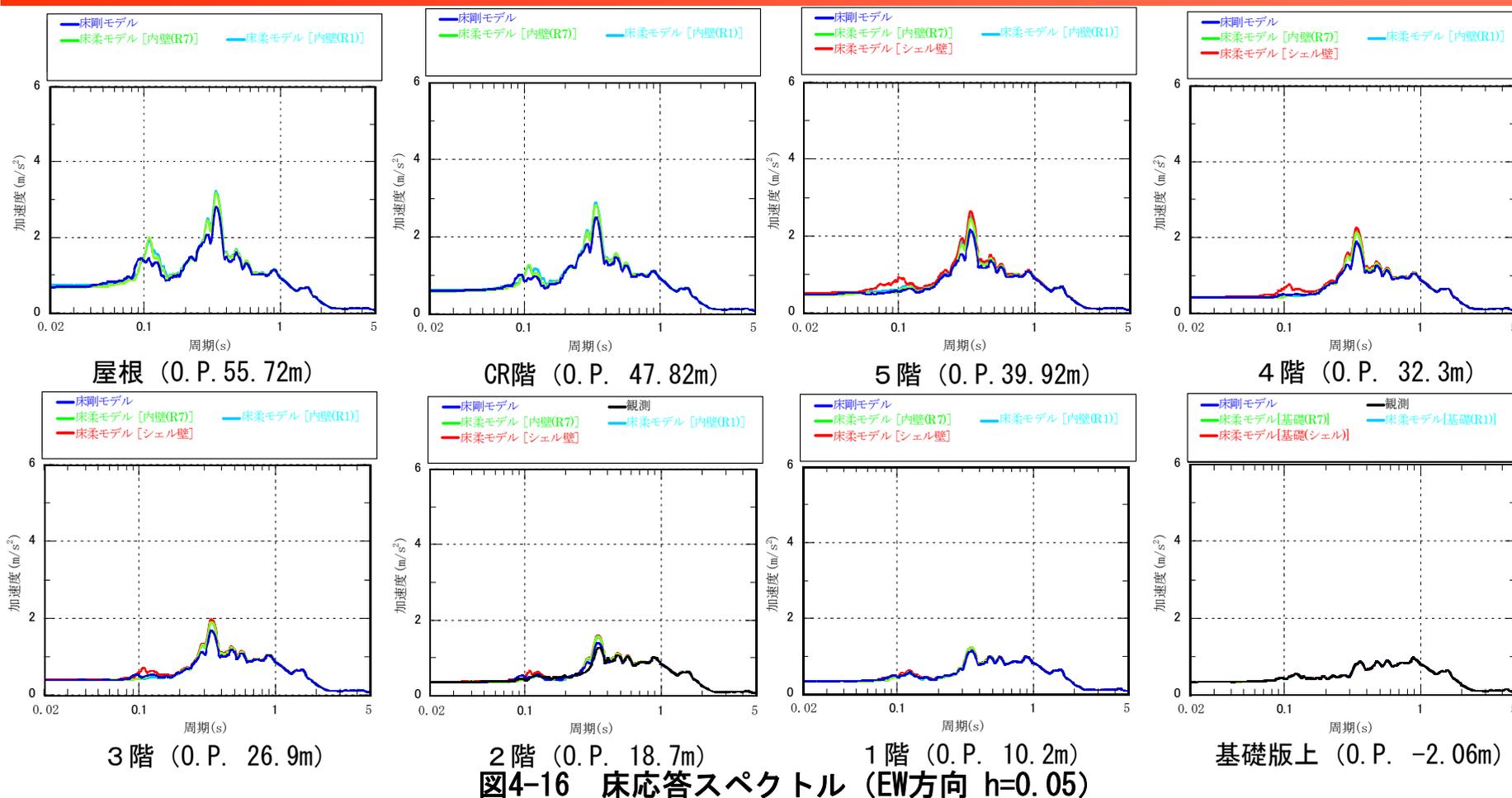


図4-16 床応答スペクトル (EW方向 h=0.05)

観測記録によるシミュレーション解析結果から

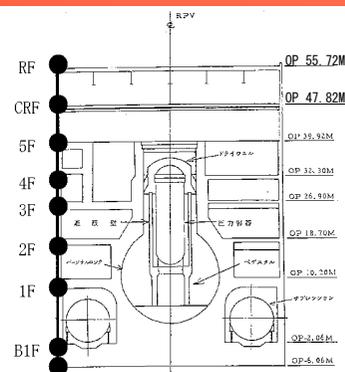
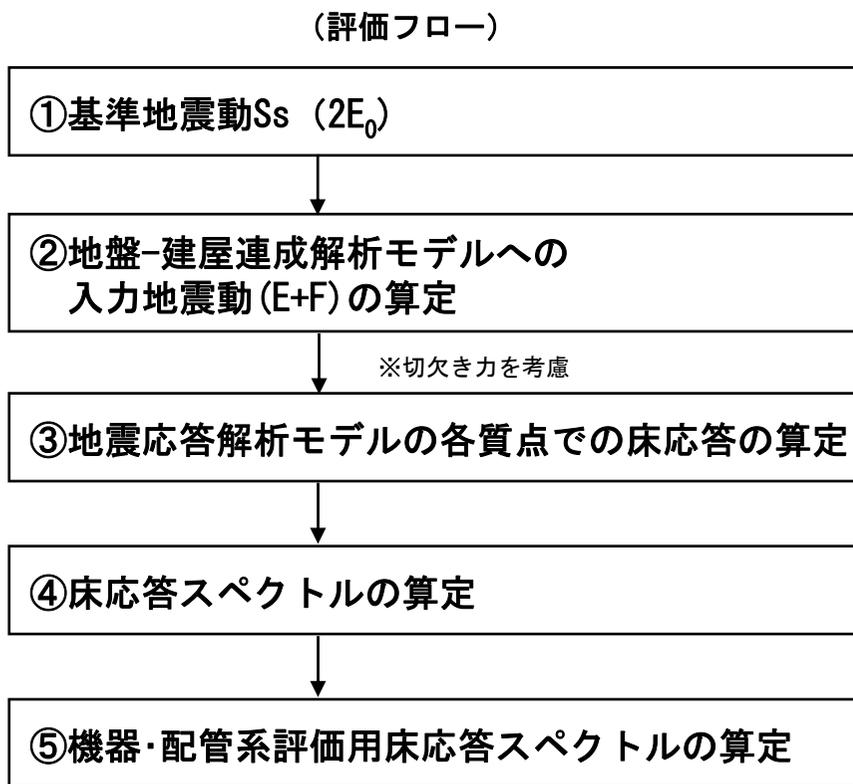
- ・ 床剛モデルの解析結果は、観測記録と概ね整合している。
- ・ 床柔モデルの解析結果は、床剛モデルと概ね良い対応を示し、床柔モデルの場合であっても、柏崎刈羽原子力発電所4号機の間階位置において、シミュレーションモデル（床剛モデル）では再現できなかった周期0.1秒及び0.5秒に二つのピークがあらわれる特異な応答性状が現れていないことを確認した。

I. 安全上重要な建物・構築物の耐震安全性評価

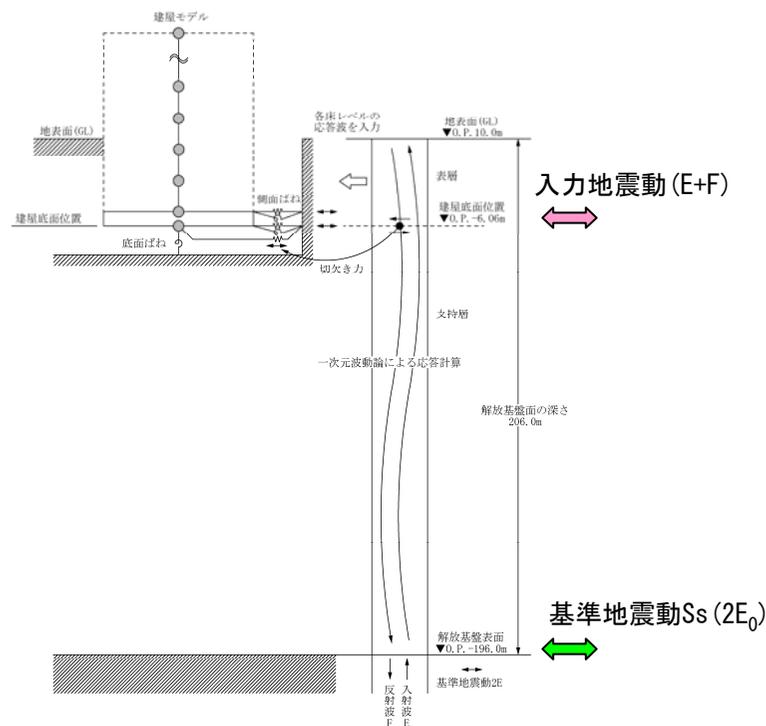
5 地震応答解析結果

地震応答解析（水平方向）

水平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 (水平方向))



(入力地震動の概念図 (水平方向))

図5-1 水平方向の地震応答解析の評価フロー

地震応答解析（解放基盤表面に定義した基準地震動S_s）

①基準地震動S_s (2E₀)

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。

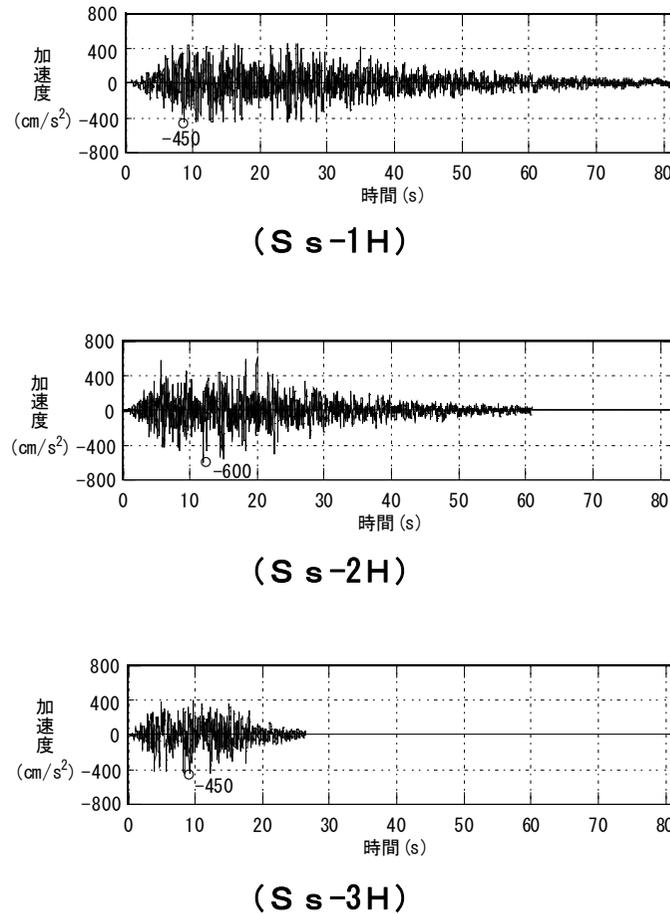


図5-2 加速度時刻歴波形（NS方向）

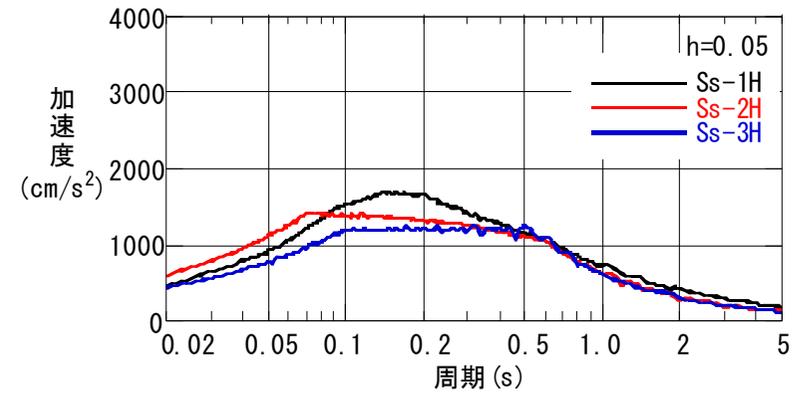


図5-3 基準地震動の応答スペクトル

地震応答解析（入力地震動）

②地盤-建屋連成解析モデルへの
入力地震動(E+F)の算定

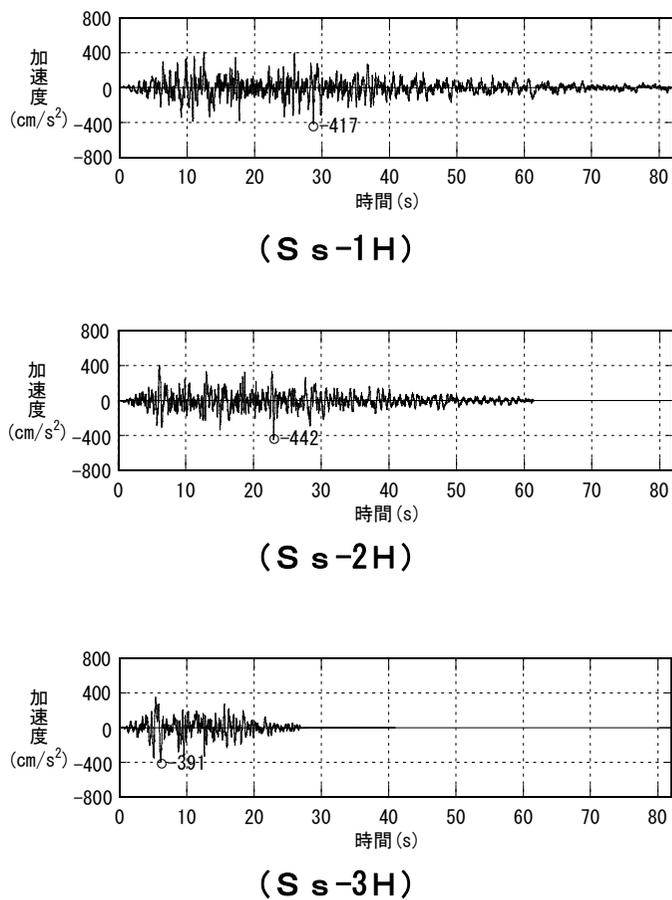


図5-4 加速度時刻歴波形

一次元波動論に基づく地盤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(1)に、また、参考として、入力地震動の応答スペクトルと基準地震動の応答スペクトルの比較を図5-5(2)に示す。

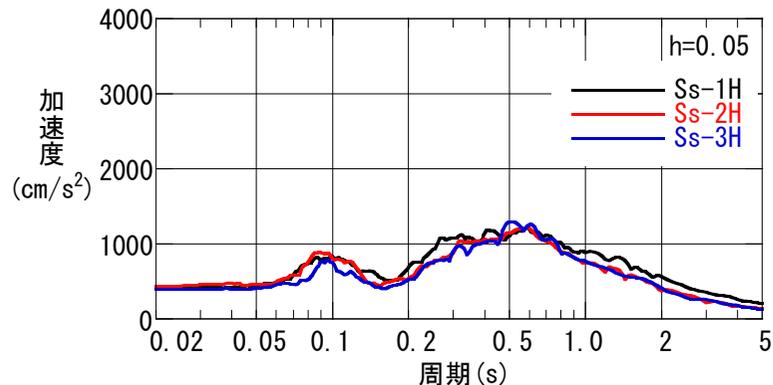


図5-5(1) 入力地震動の応答スペクトル
(基礎底面E+F)

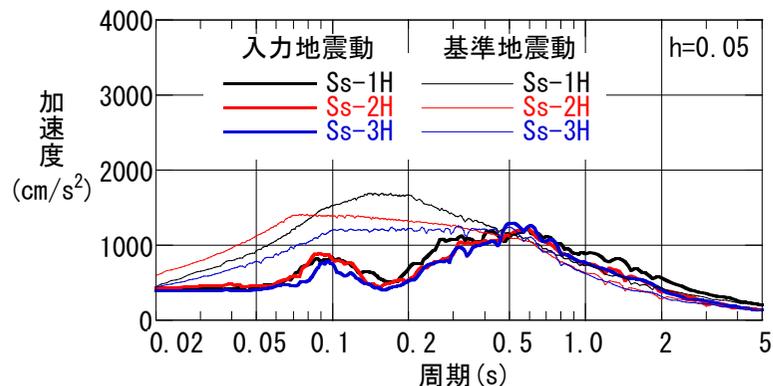


図5-5(2) 入力地震動の応答スペクトルと
基準地震動の応答スペクトルの比較

地震応答解析（床応答スペクトル（NS方向））

④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。

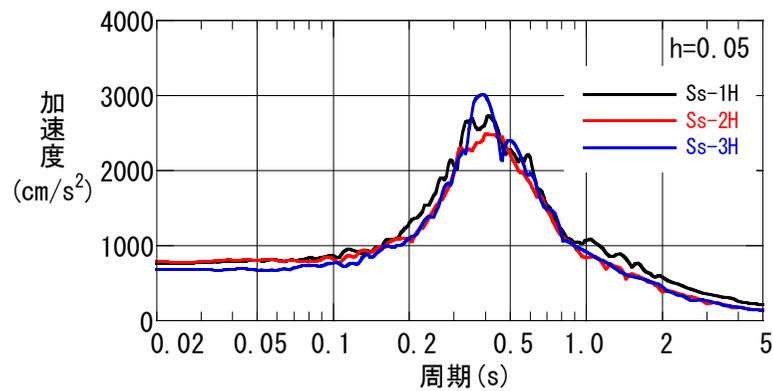


図5-6 床応答スペクトル
(オペレーティングフロア : 0. P. 39. 92m/NS方向)

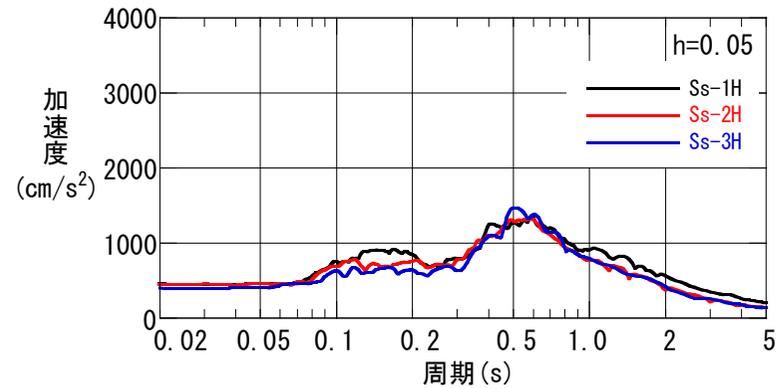
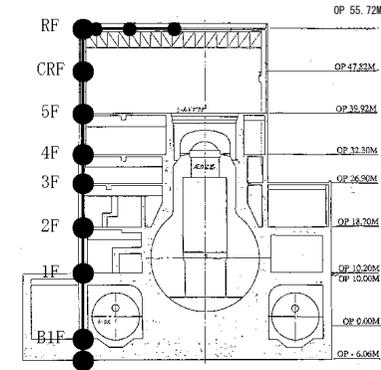
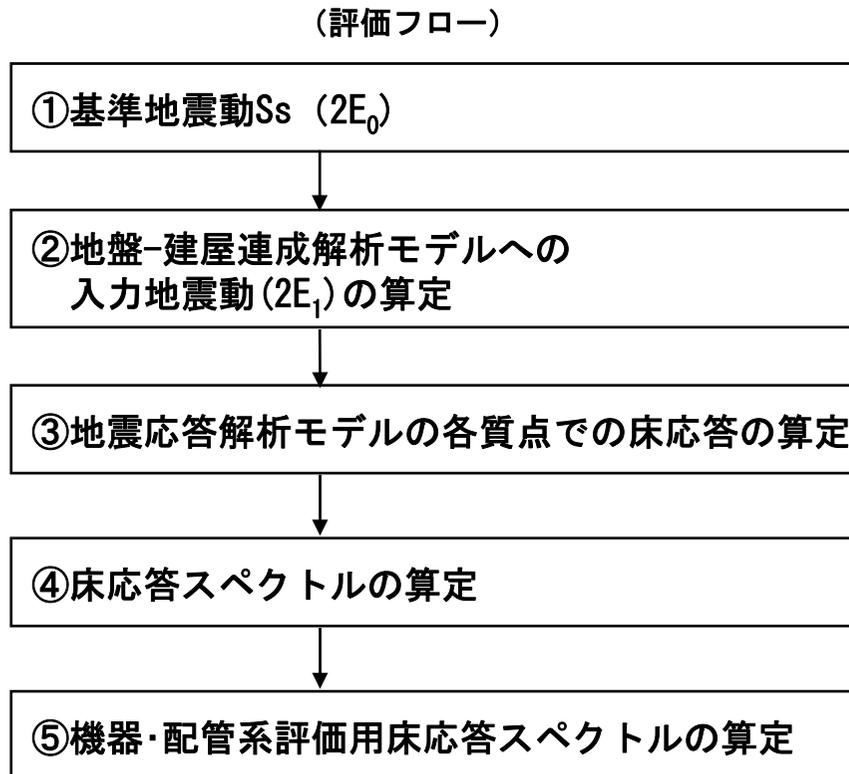


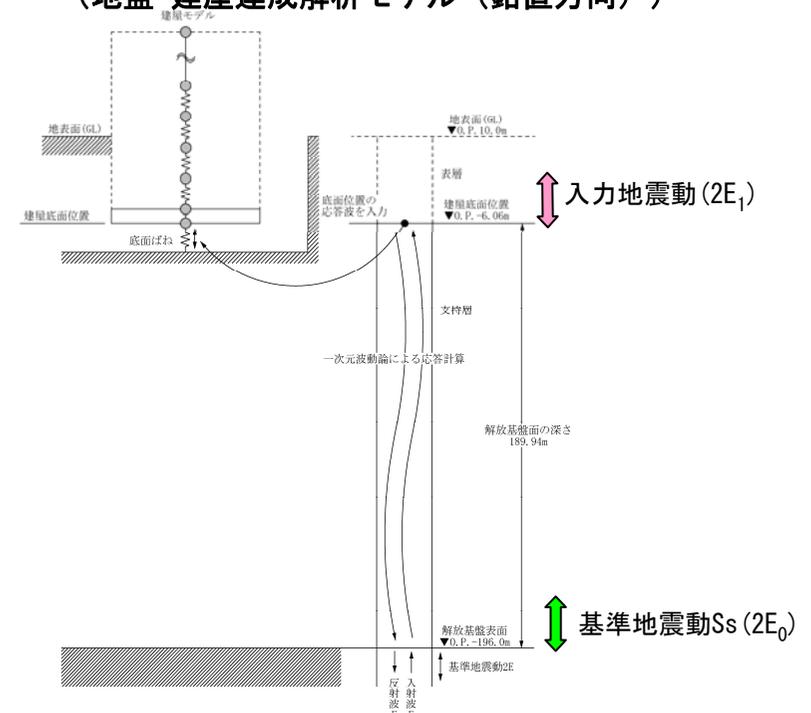
図5-7 床応答スペクトル
(基礎上面 : 0. P. -2. 06m/NS方向)

地震応答解析（鉛直方向）

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 鉛直方向の地震応答解析の評価フロー

地震応答解析（解放基盤表面に定義した基準地震動S_s）

①基準地震動S_s (2E₀)

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。

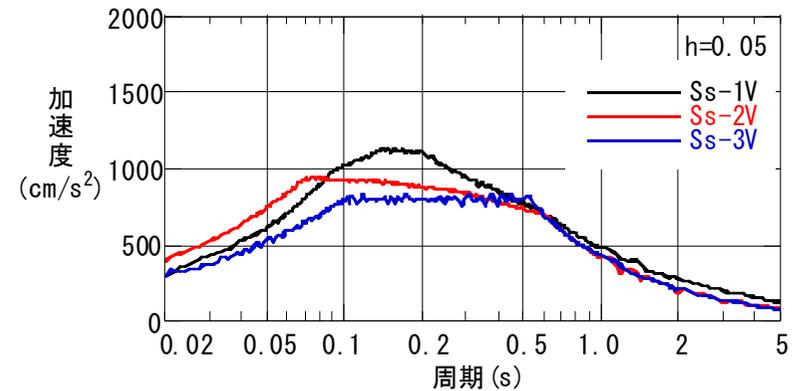
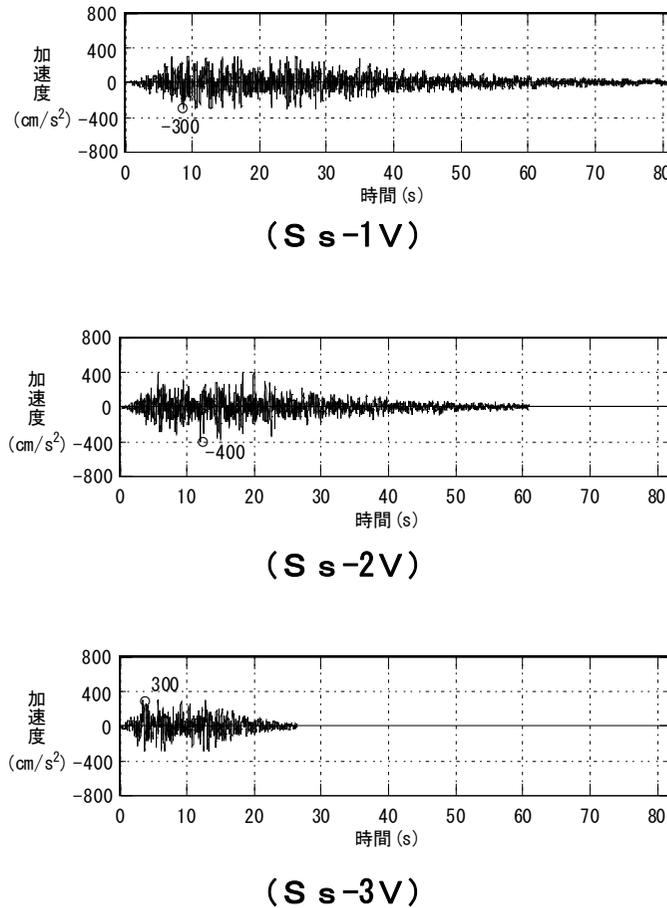


図5-10 基準地震動の応答スペクトル（鉛直方向）

図5-9 加速度時刻歴波形（鉛直方向）

地震応答解析（入力地震動）

②地盤-建屋連成解析モデルへの
入力地震動(2E₁)の算定

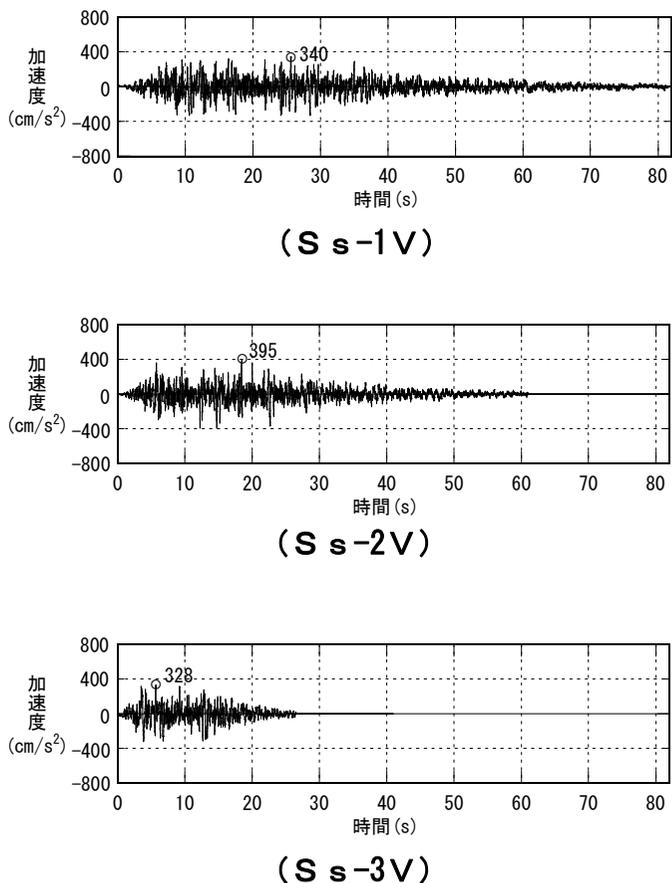


図5-11 加速度時刻歴波形（鉛直方向）

一次元波動論に基づく地盤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(1)に、また、参考として、入力地震動の応答スペクトルと基準地震動の応答スペクトルの比較を図5-12(2)に示す。

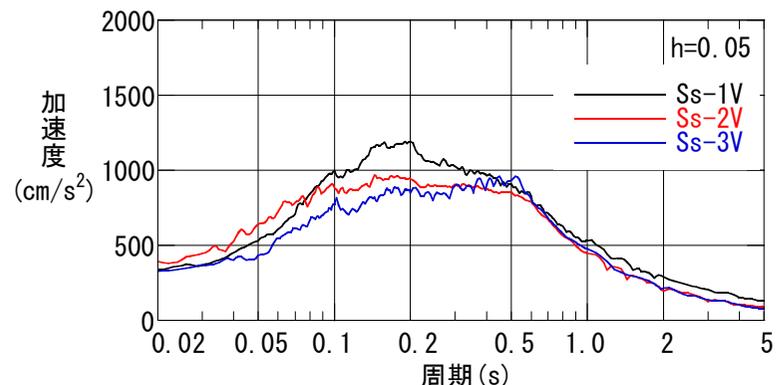


図5-12(1) 入力地震動の応答スペクトル
（基礎底面2E/鉛直方向）

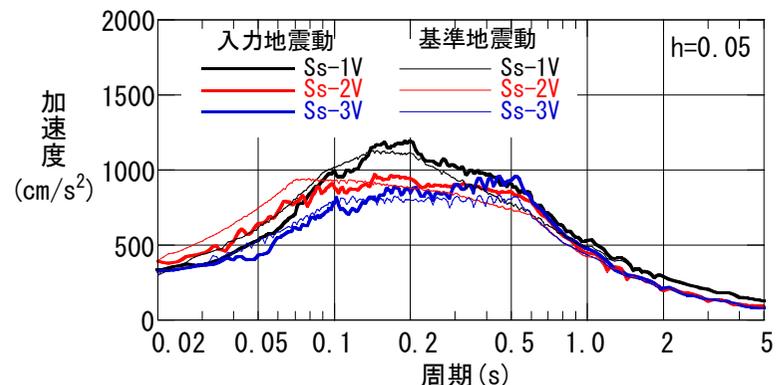


図5-12(2) 入力地震動の応答スペクトルと
基準地震動の応答スペクトルの比較

地震応答解析（床応答スペクトル）

④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。

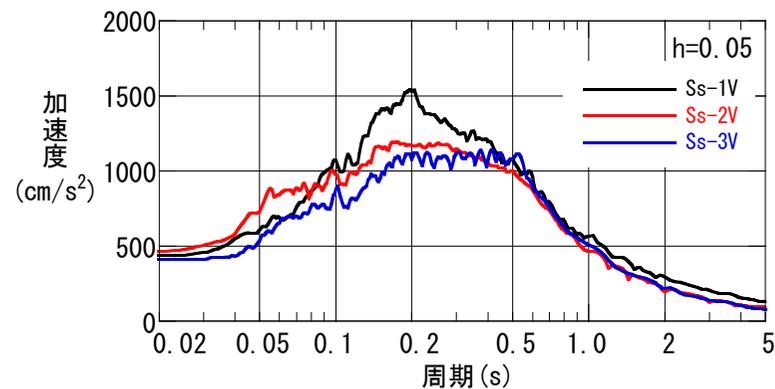


図5-13 床応答スペクトル
(オペレーティングフロア： O. P. 39.92m/鉛直方向)

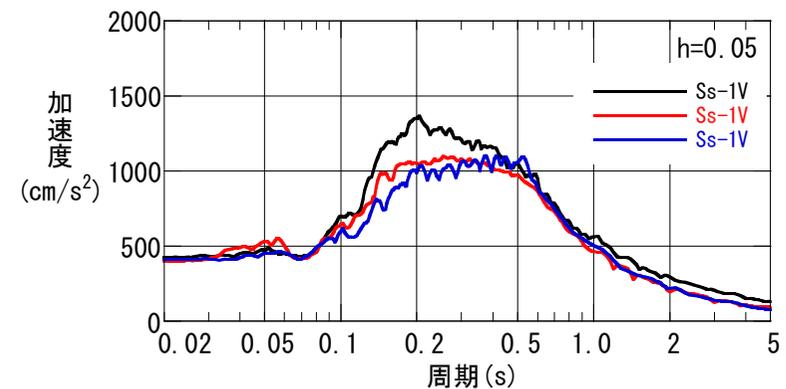


図5-14 床応答スペクトル
(基礎上面： O. P. -2.06m/鉛直方向)

固有値解析結果（水平）

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	0.396	2.53	1.755	地盤建屋連成一次
2	0.177	5.64	-0.921	
3	0.078	12.85	0.219	
4	0.060	16.59	-0.016	
5	0.051	19.73	-0.059	

(Ss-2H)

次数	固有周期 (s)	固有振動数 (Hz)	刺激係数	備考
1	0.390	2.56	1.759	地盤建屋連成一次
2	0.175	5.73	-0.932	
3	0.078	12.88	0.228	
4	0.060	16.63	-0.016	
5	0.051	19.74	-0.061	

(Ss-3H)

次数	固有周期 (s)	固有振動数 (Hz)	刺激係数	備考
1	0.396	2.53	1.755	地盤建屋連成一次
2	0.177	5.64	-0.921	
3	0.078	12.85	0.219	
4	0.060	16.59	-0.016	
5	0.051	19.73	-0.059	

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	0.377	2.65	1.774	地盤建屋連成一次
2	0.175	5.72	-0.980	
3	0.089	11.26	0.225	
4	0.065	15.41	0.032	
5	0.050	19.87	-0.063	

(Ss-2H)

次数	固有周期 (s)	固有振動数 (Hz)	刺激係数	備考
1	0.372	2.69	1.780	地盤建屋連成一次
2	0.172	5.80	-0.995	
3	0.089	11.29	0.236	
4	0.065	15.44	0.032	
5	0.050	19.87	-0.065	

(Ss-3H)

次数	固有周期 (s)	固有振動数 (Hz)	刺激係数	備考
1	0.377	2.65	1.774	地盤建屋連成一次
2	0.175	5.72	-0.980	
3	0.089	11.26	0.225	
4	0.065	15.41	0.032	
5	0.050	19.87	-0.063	

固有値解析結果（鉛直）

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	0.292	3.43	3.474	屋根トラス一次
2	0.227	4.41	-2.571	地盤建屋連成一次
3	0.091	11.00	0.108	
4	0.045	22.39	-0.266	
5	0.039	25.65	0.215	

(Ss-2V)

次数	固有周期(s)	固有振動数(Hz)	刺激係数	備考
1	0.292	3.43	3.308	屋根トラス一次
2	0.223	4.49	-2.410	地盤建屋連成一次
3	0.091	11.00	0.113	
4	0.045	22.40	-0.277	
5	0.039	25.65	0.224	

(Ss-3V)

次数	固有周期(s)	固有振動数(Hz)	刺激係数	備考
1	0.292	3.43	3.474	屋根トラス一次
2	0.227	4.41	-2.571	地盤建屋連成一次
3	0.091	11.00	0.108	
4	0.045	22.39	-0.266	
5	0.039	25.65	0.215	

地震応答解析結果 (NS方向)

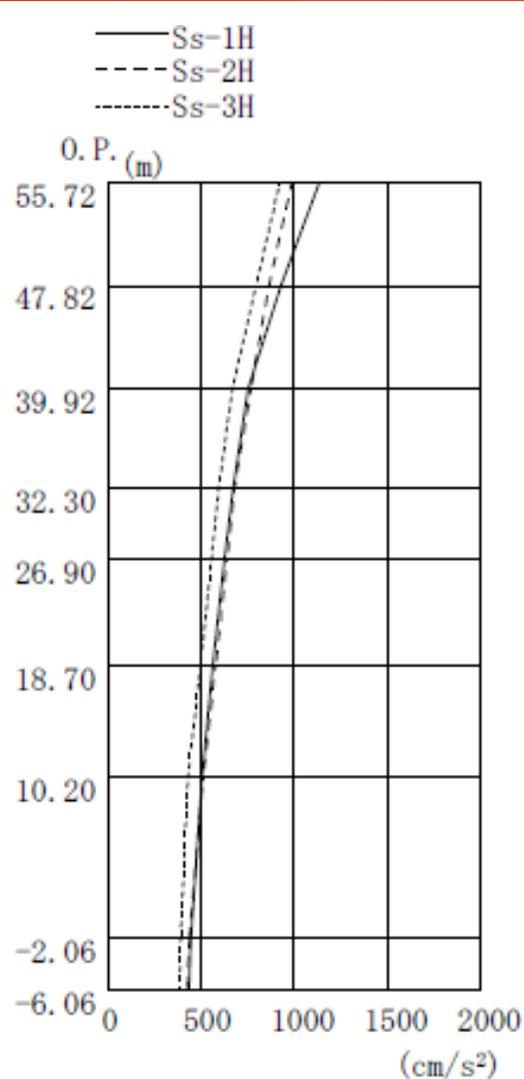


図5-15 最大応答加速度
(NS方向)

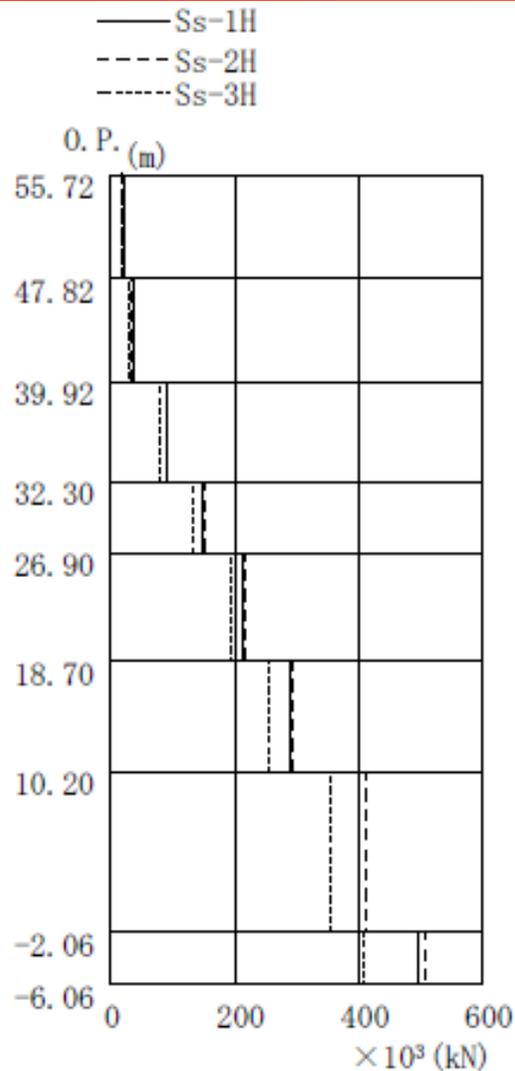


図5-16 最大応答せん断力
(NS方向)

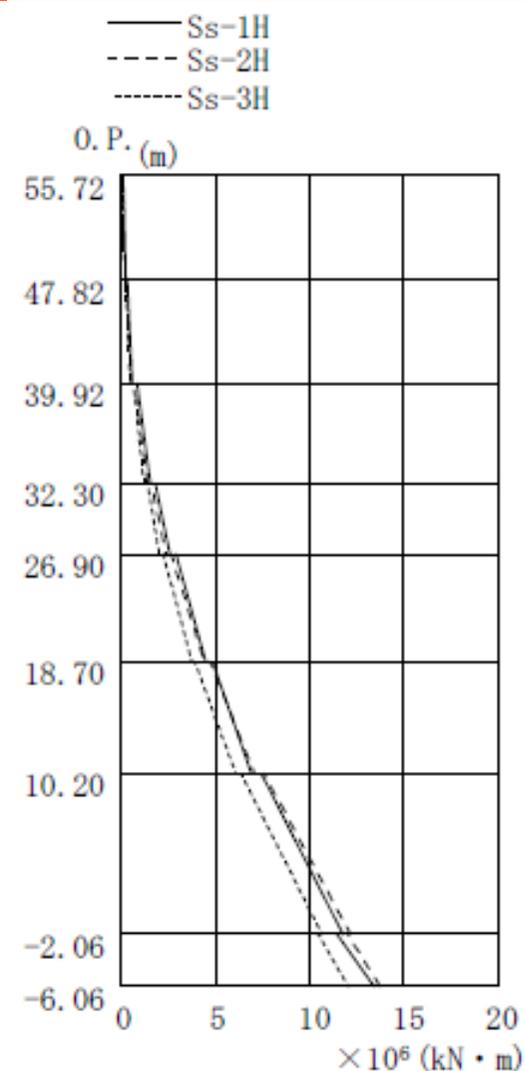


図5-17 最大応答曲げモーメント
(NS方向)

地震応答解析結果 (EW方向)

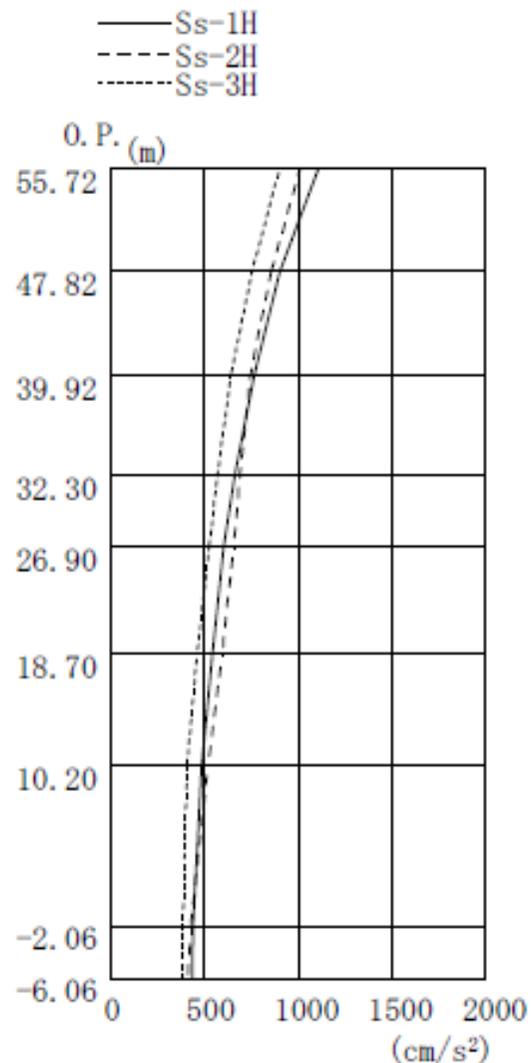


図5-18 最大応答加速度
(EW方向)

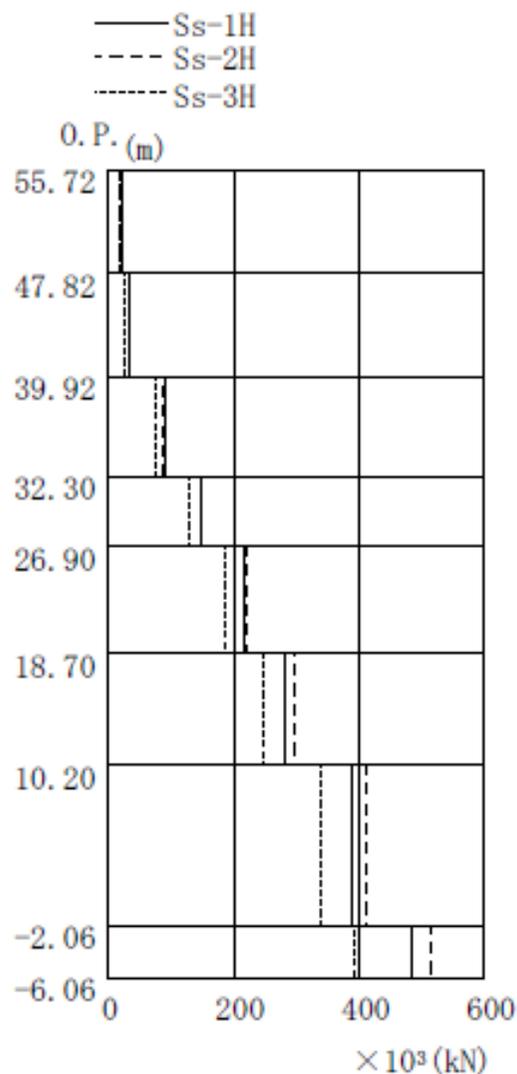


図5-19 最大応答せん断力
(EW方向)

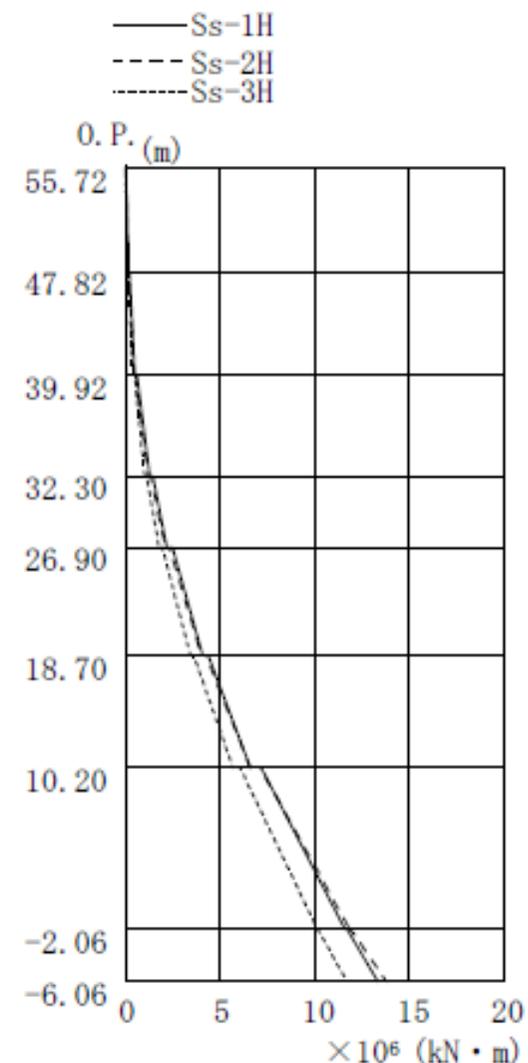


図5-20 最大応答曲げモーメント
(EW方向)

地震応答解析結果（鉛直方向）

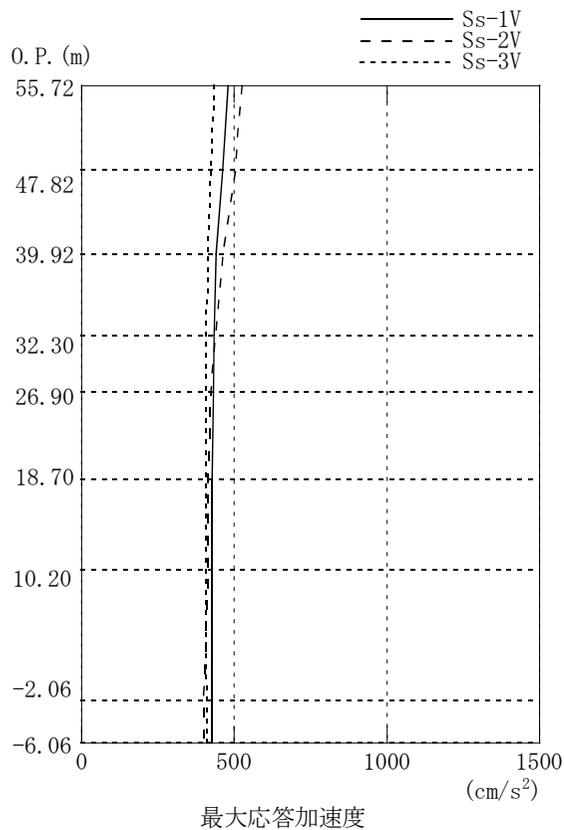


図5-21 最大応答加速度
(鉛直方向)

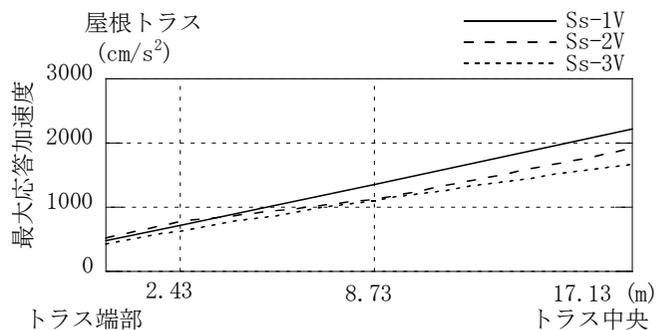


図5-22 最大応答加速度
(鉛直方向：屋根トラス)

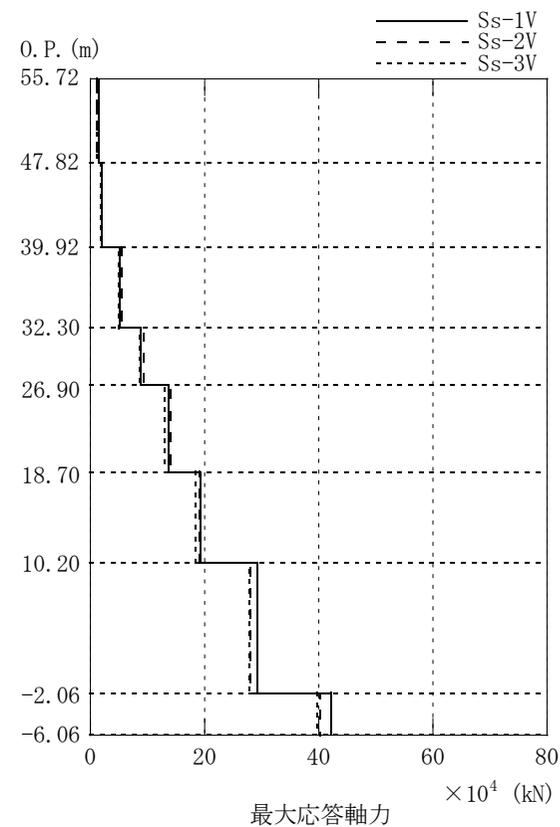


図5-23 最大応答軸力
(鉛直方向)

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
NS方向	74.6	72.7	82.0
EW方向	87.8	85.7	95.4

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、地反力を三角形分布と仮定して算出した。

※接地率 η 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)
 M_0 : 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解析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。

I. 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	NS方向		EW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
$S_s - 1$	0.13×10^{-3}	1階	0.12×10^{-3}	5階
$S_s - 2$	0.13×10^{-3}	1階	0.12×10^{-3}	1階
$S_s - 3$	0.12×10^{-3}	1階	0.10×10^{-3}	1階

耐震安全性評価結果（耐震壁）

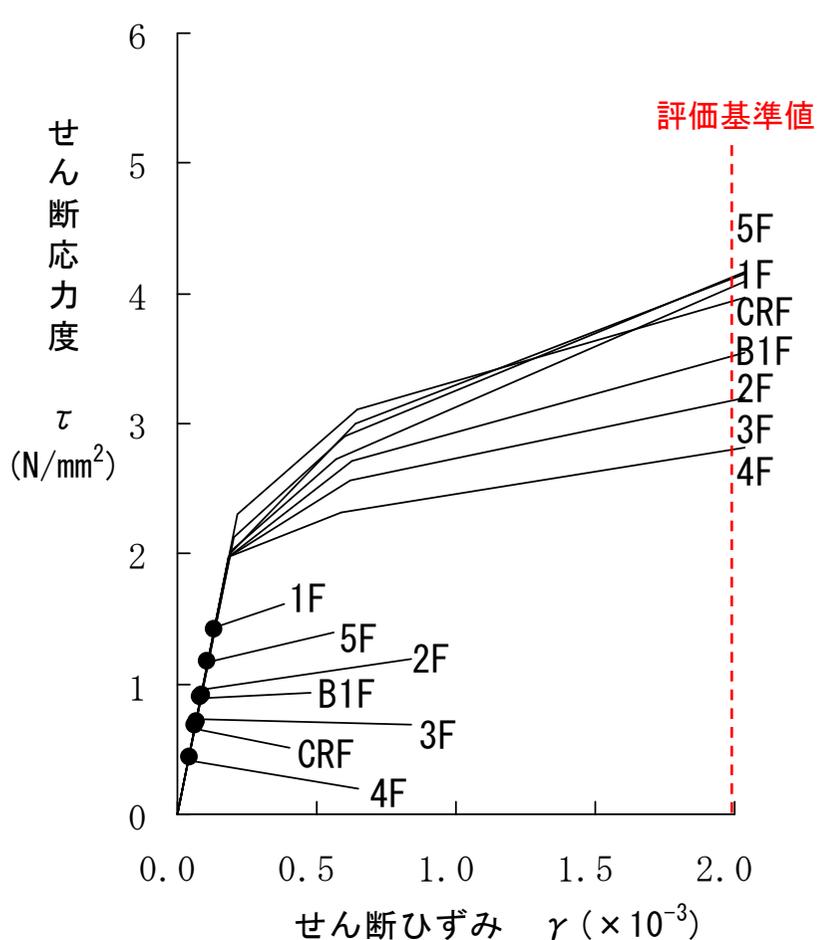


図6-1 せん断スケルトン曲線上の最大応答値 (Ss-2 NS方向)

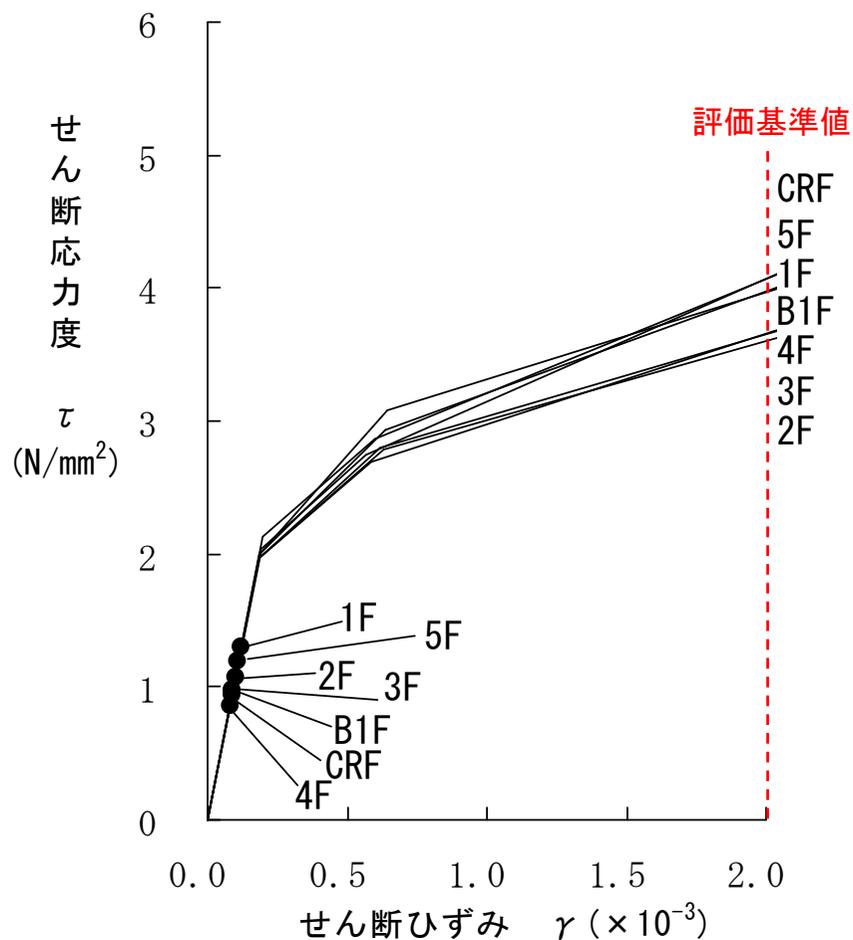


図6-2 せん断スケルトン曲線上の最大応答値 (Ss-2 EW方向)

耐震壁の最大応答せん断ひずみは、最大で 0.13×10^{-3} (Ss-2, NS方向, 1階) であり、評価基準値 (2.0×10^{-3}) を満たすことを確認した。

Ⅱ. 安全上重要な機器・配管系の耐震安全性評価

1 評価概要

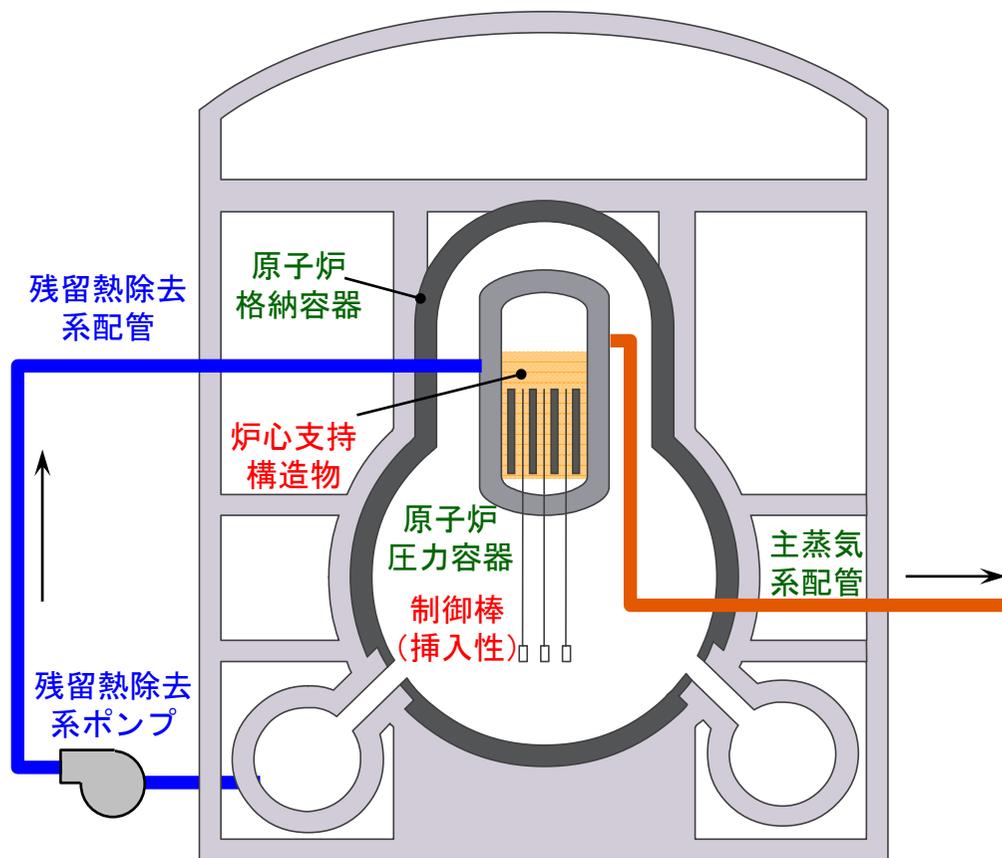
- 基準地震動 S_s に対する耐震設計上重要な機器・配管系の安全機能の保持の観点から耐震安全性の評価を実施
- 中間報告における評価対象施設は、新耐震指針によるSクラスの施設のうち、原子炉を「止める」、 「冷やす」、 放射性物質を「閉じ込める」に係る安全上重要な機能を有する主要な施設

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 3号機）

1F-5と同じ

- 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

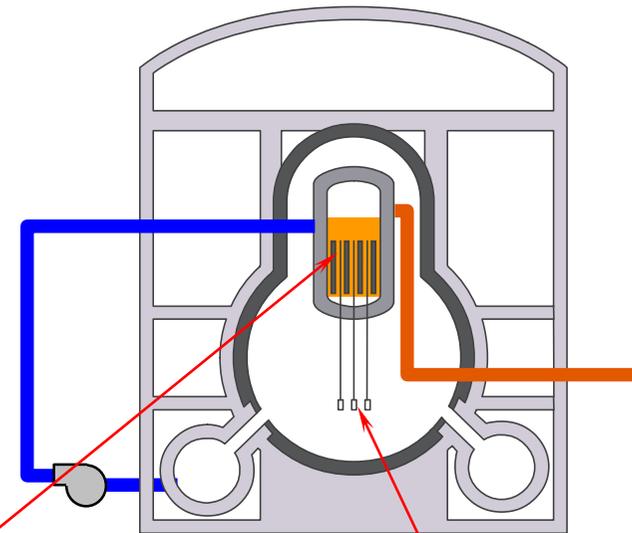
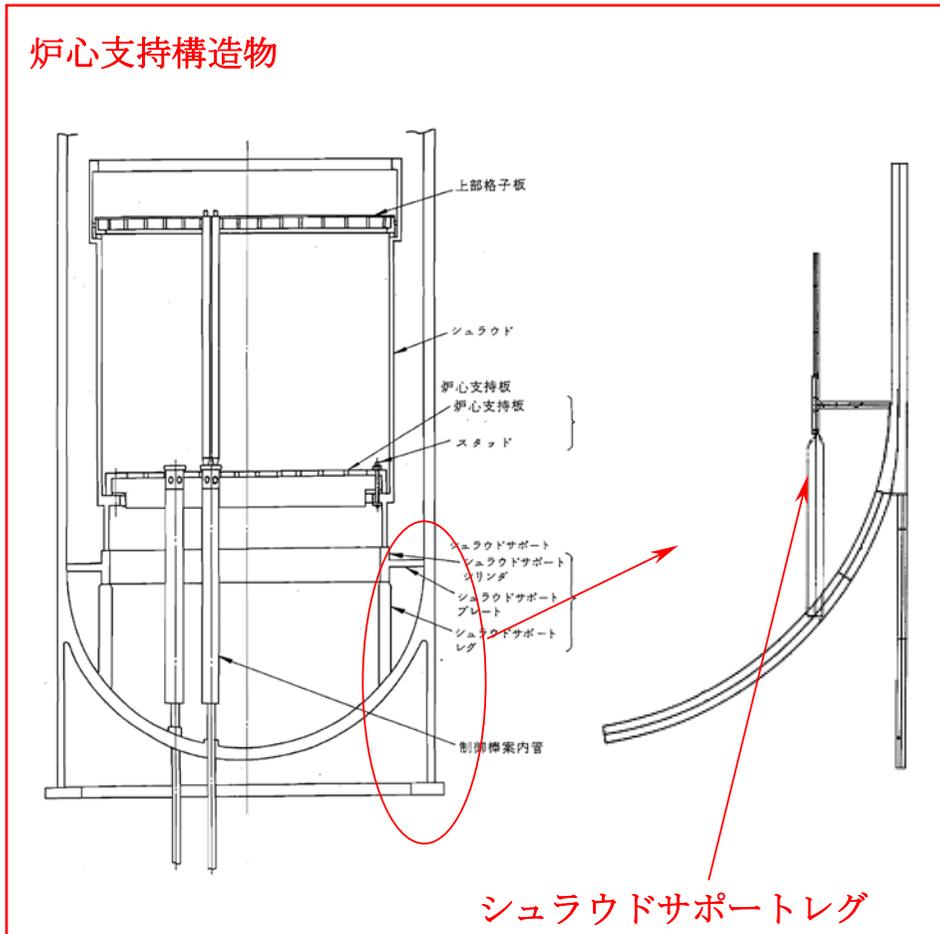


- 「止める」
 - ・ 制御棒 (挿入性)
 - ・ 炉心支持構造物
- 「冷やす」
 - ・ 残留熱除去系ポンプ
 - ・ 残留熱除去系配管
- 「閉じ込める」
 - ・ 原子炉圧力容器
 - ・ 主蒸気系配管
 - ・ 原子炉格納容器

評価対象部位 (福島第一原子力発電所 3号機)

(1/3)

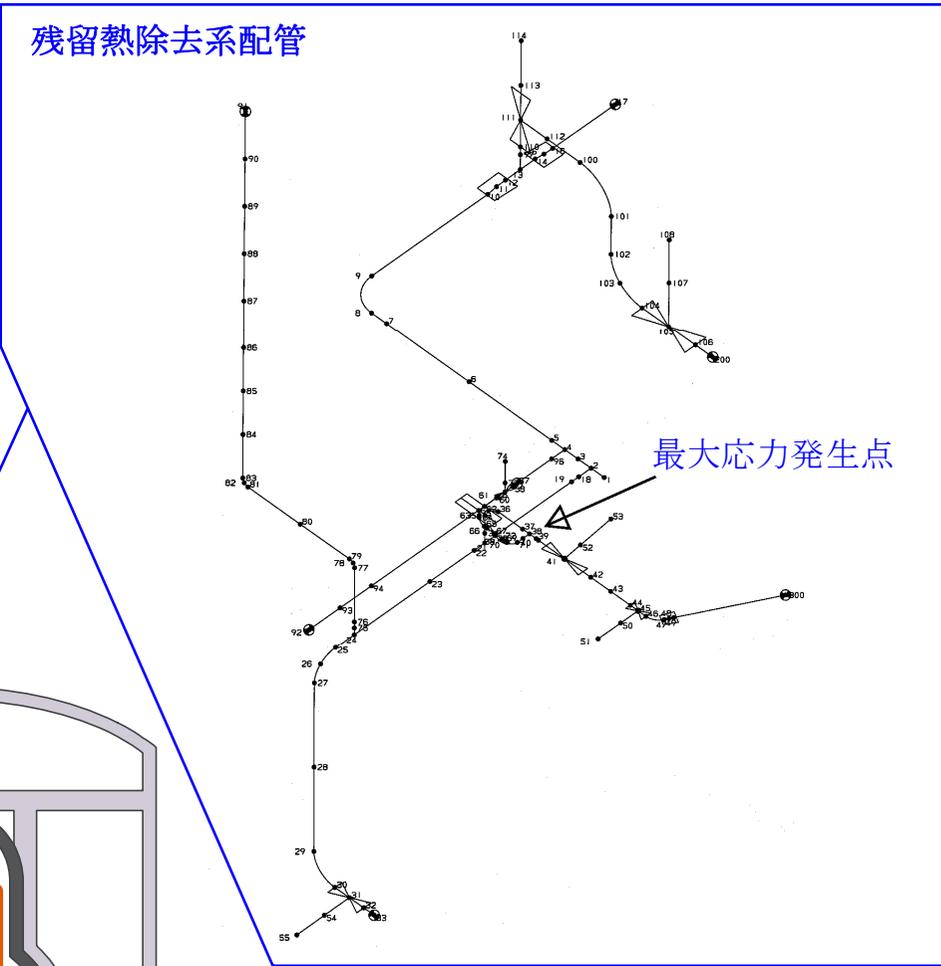
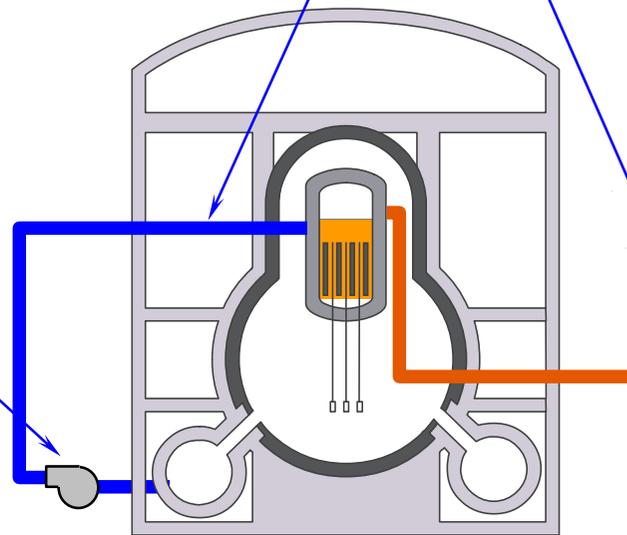
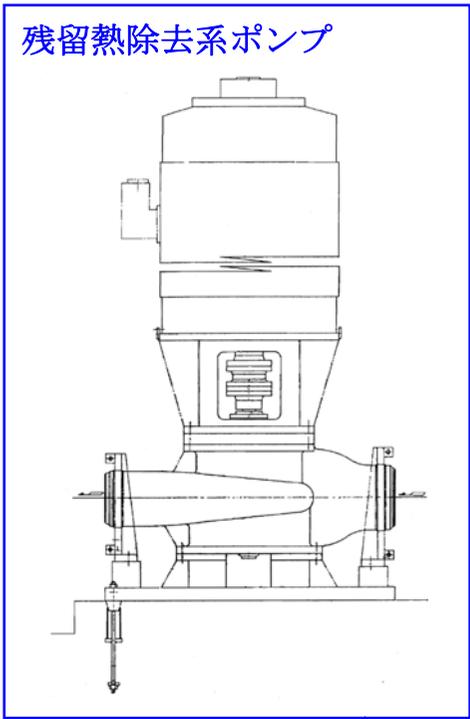
■ 「止める」



評価対象部位 (福島第一原子力発電所 3号機)

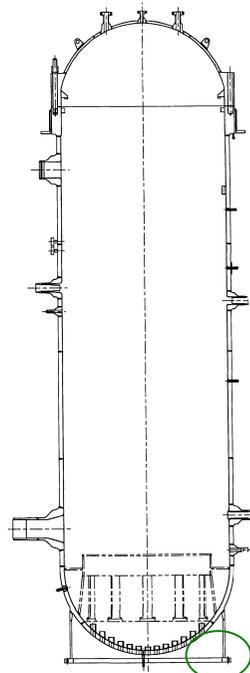
(2/3)

■ 「冷やす」



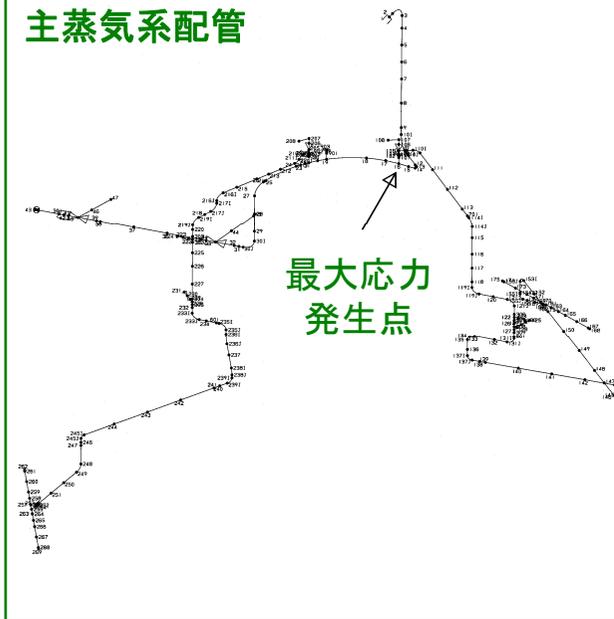
■ 「閉じ込める」

原子炉圧力容器



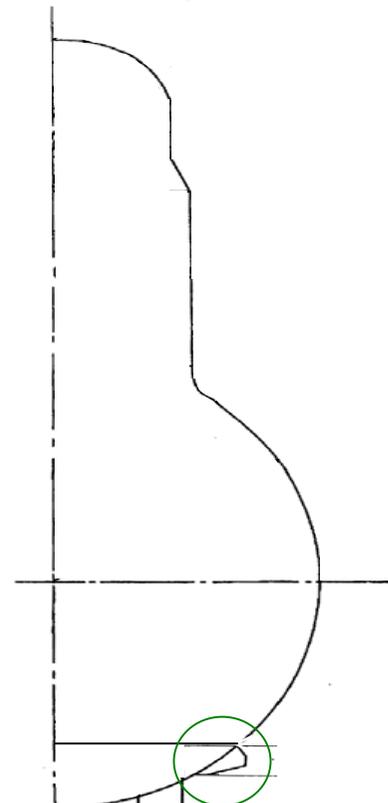
基礎ボルト

主蒸気系配管

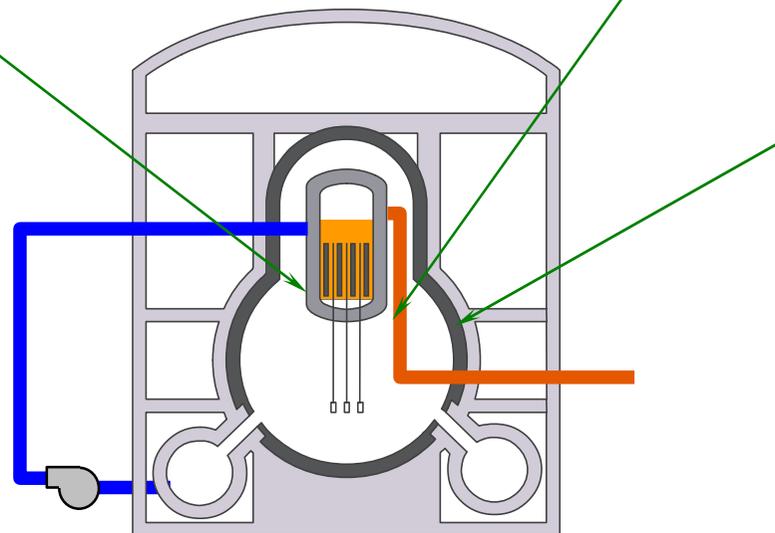


最大応力発生点

原子炉格納容器



サンドクッション部



■ 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^{※1}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

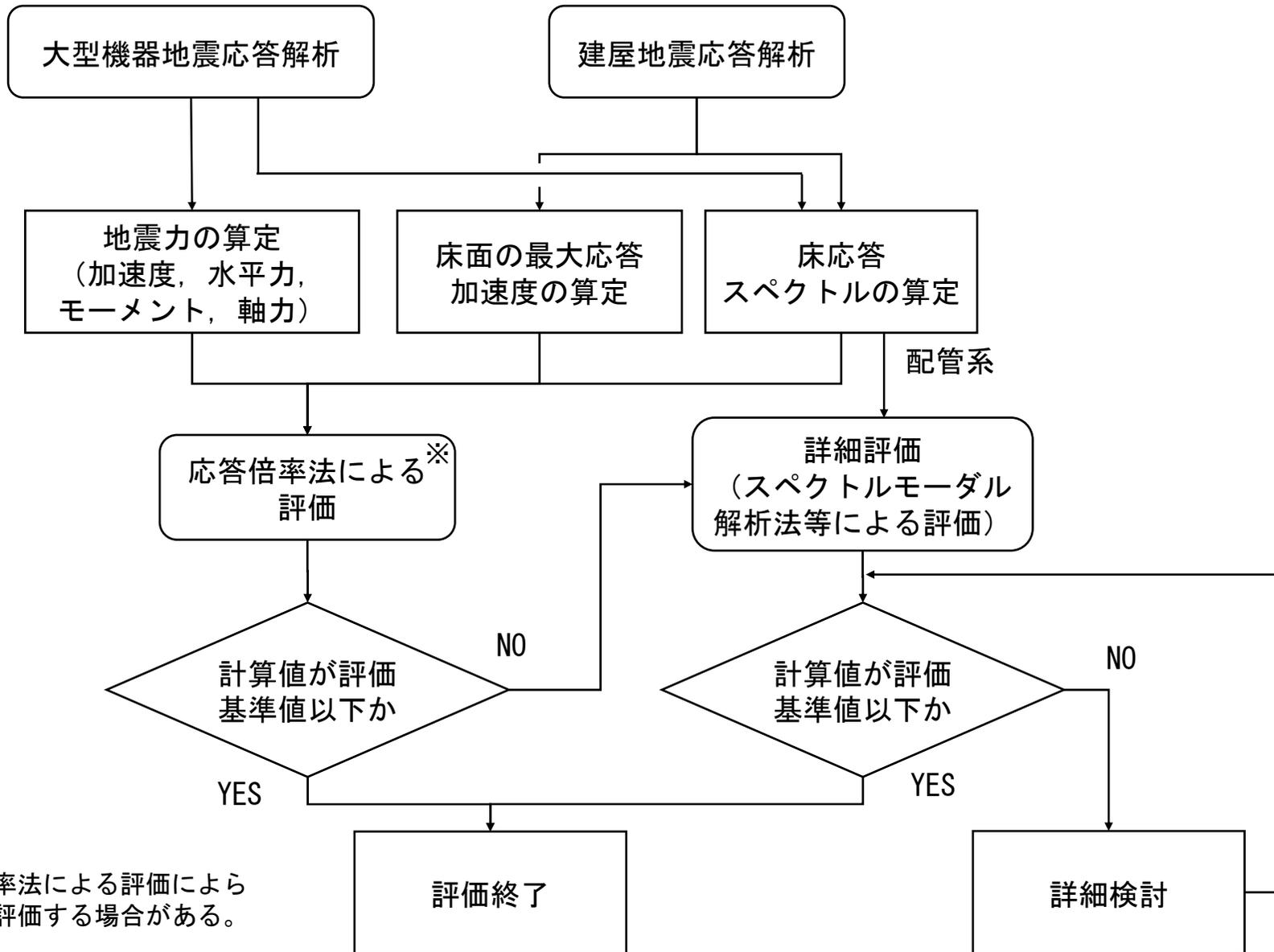
- 「原子力発電所耐震設計技術指針JEAG4601－補・1984, JEAG4601－1987, JEAG4601－1991追補版」および「発電用原子力設備規格設計・建設規格 JSME S NC1－2005」に準拠するとともに、ほかの規格基準で規定されている値および実験等で妥当性が確認されている値等も用いる。

■ 動的機能維持評価

- 制御棒挿入性評価に用いる評価基準値の相対変位は、試験により挿入性が確認された相対変位を用いる。

構造強度評価の流れ

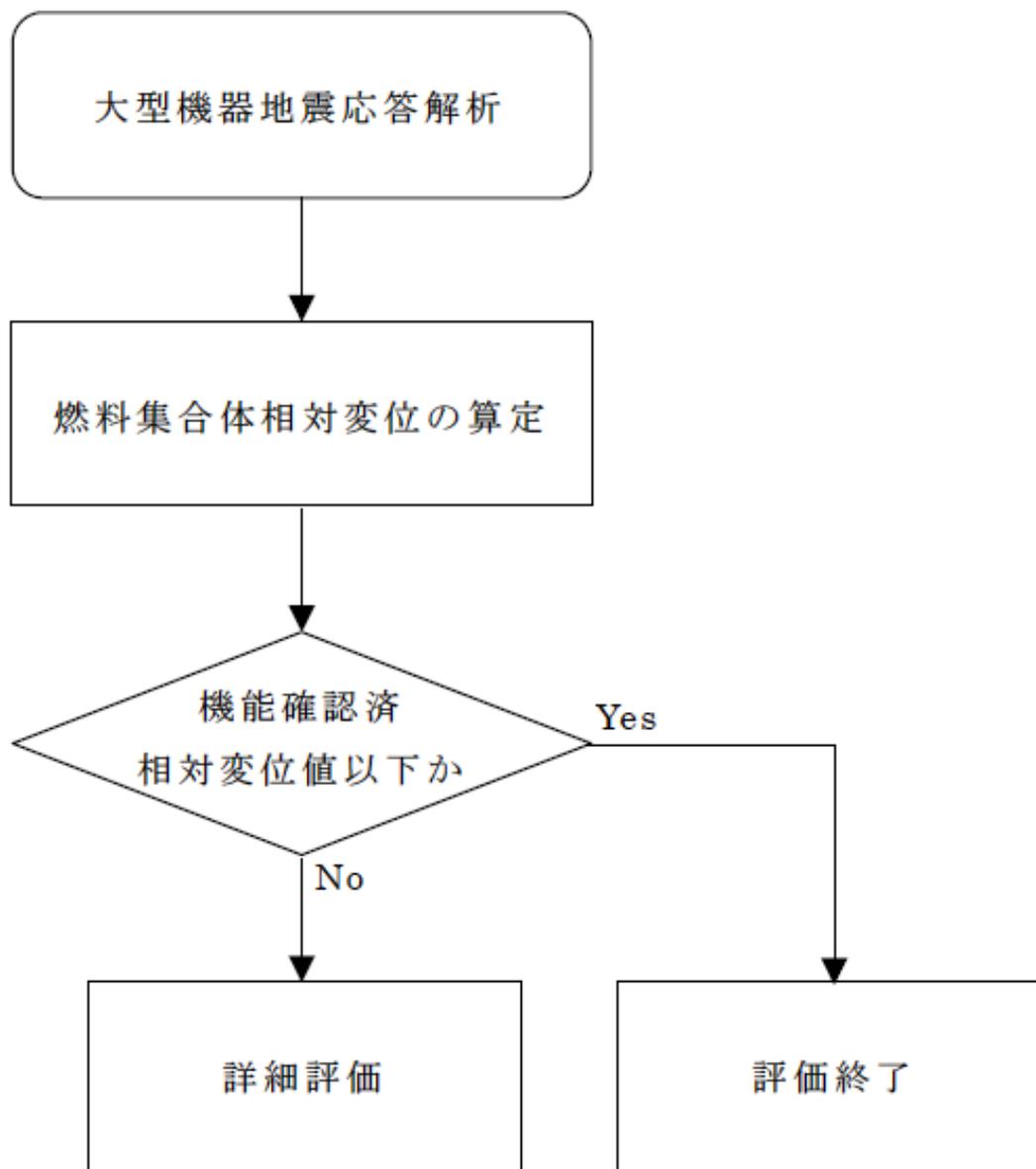
1F-5と同じ



※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。

動的機能維持評価の流れ（制御棒挿入性）

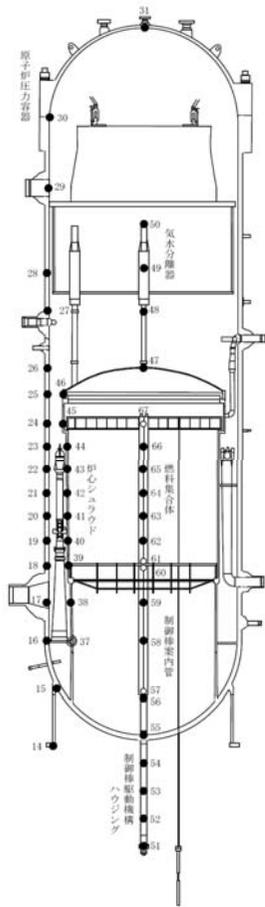
1F-5と同じ



炉内構造物の解析モデル例（福島第一原子力発電所3号機）

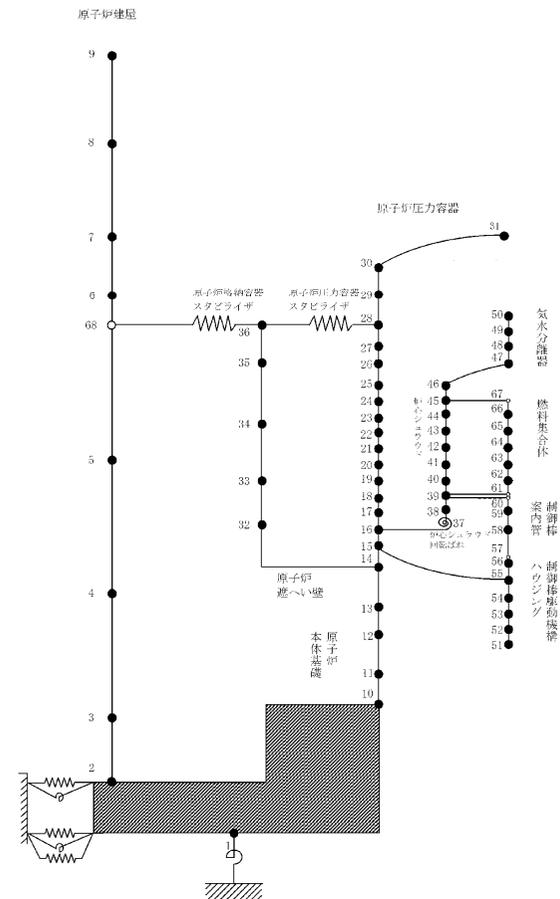
- 水平方向は，多質点モデル化し，それぞれの質点間を曲げ，せん断剛性を有するはり，またはばねにより結合する。

炉内構造物の概要



モデル化

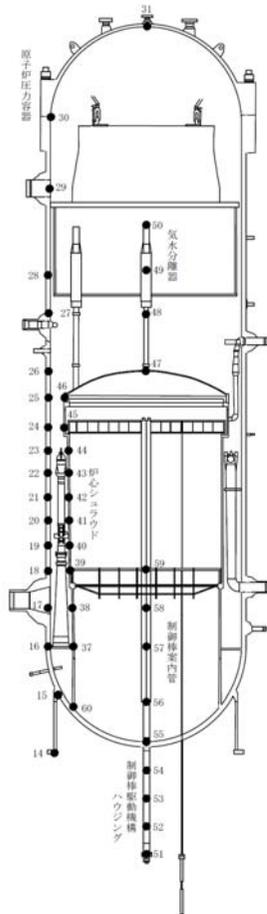
炉内構造物のモデル化（水平方向）



炉内構造物の解析モデル例（福島第一原子力発電所3号機）

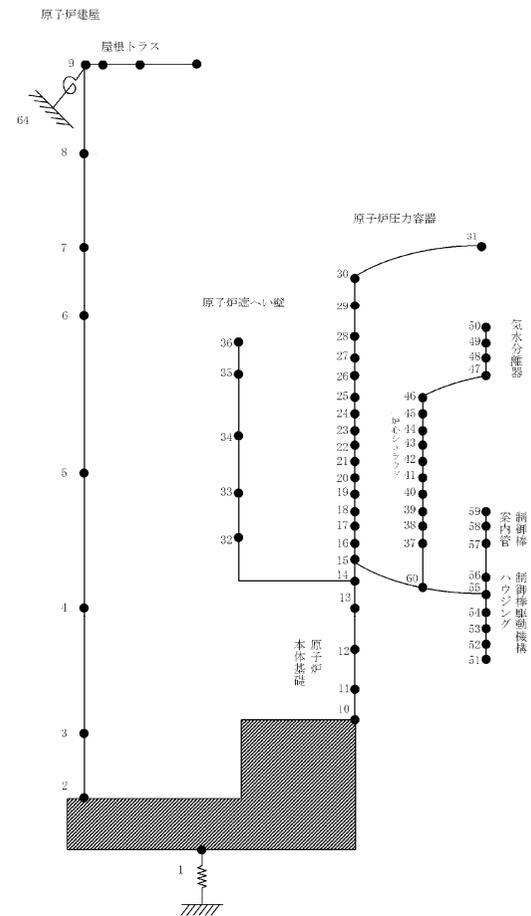
- 鉛直方向は、質点間を軸剛性（圧縮，引張に対する剛性）を有するばねにより結合する。

炉内構造物の概要



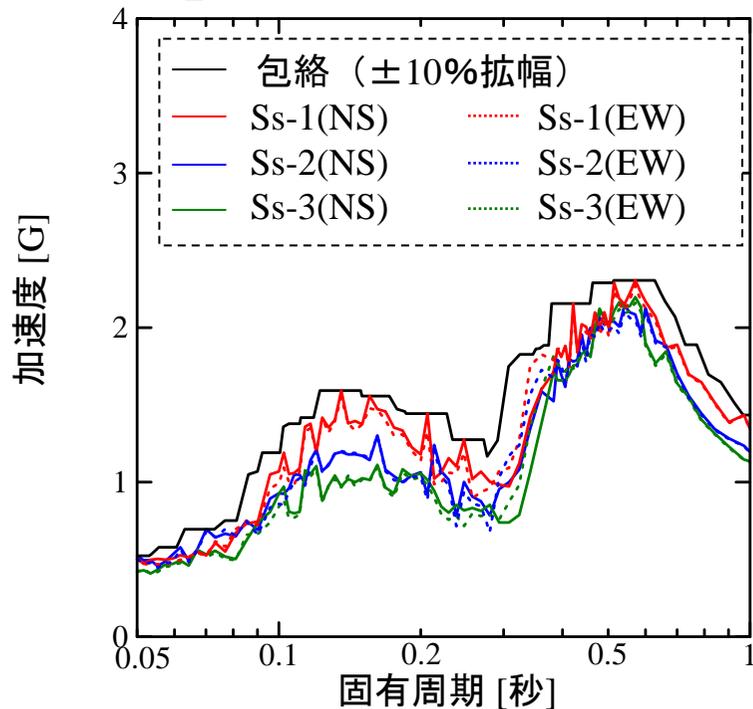
モデル化

炉内構造物のモデル化（鉛直方向）

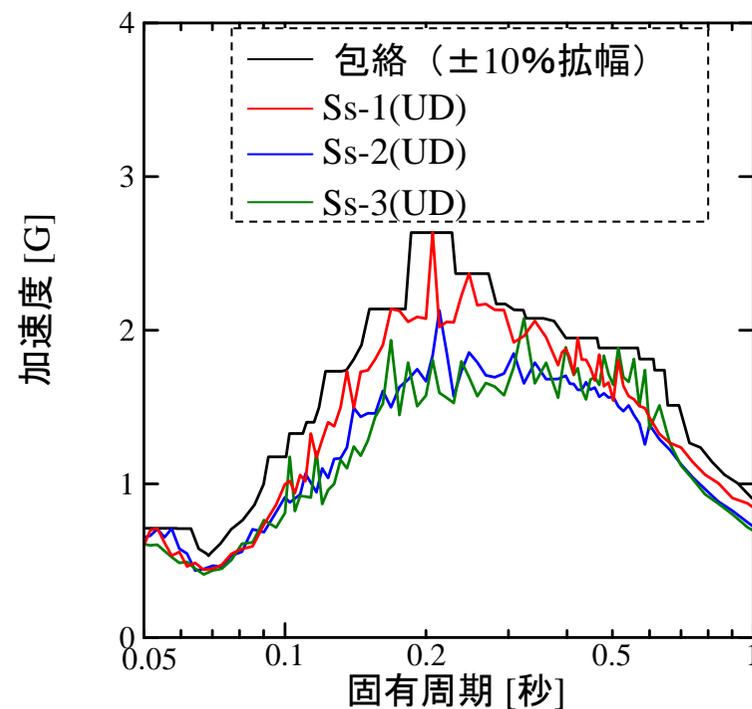


床応答スペクトル（福島第一原子力発電所3号機）

- 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



福島第一3号機 原子炉建屋水平方向
(O.P.-2.06m, 減衰1.0%)
(Ss3波包絡)



福島第一3号機 原子炉建屋鉛直方向
(O.P.-2.06m, 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（ドライウエル） 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)

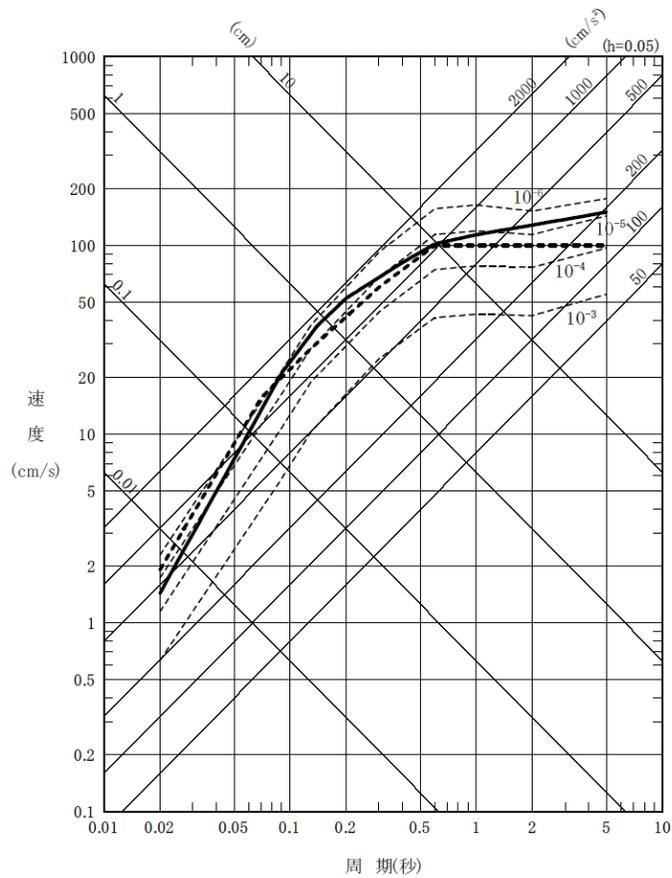
1F-5と同じ

- 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)

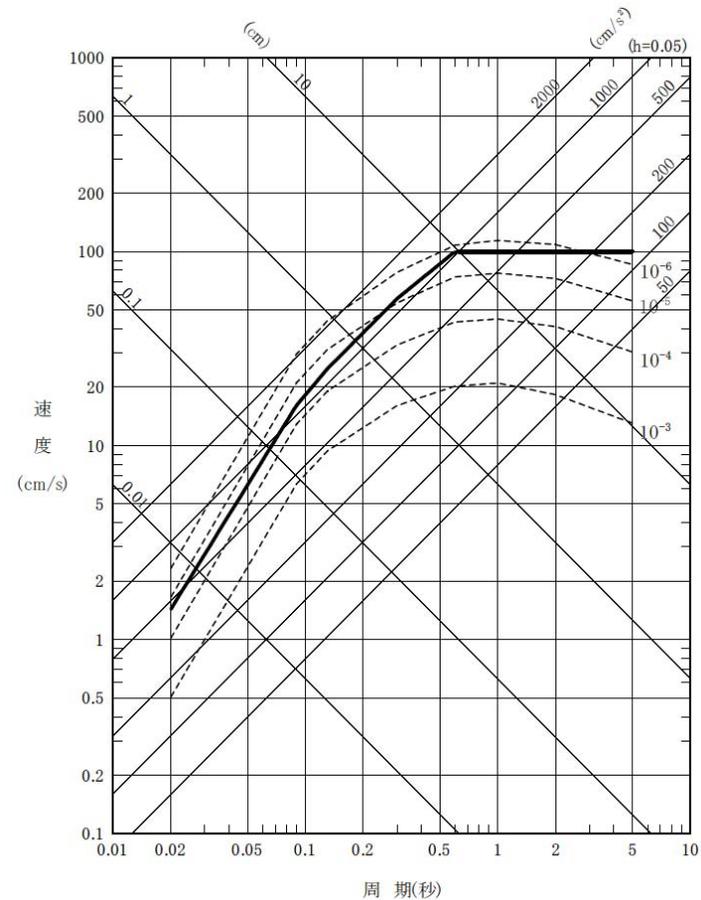
1F-5と同じ

— 設計用応答スペクトル Ss-1H
 - - - 設計用応答スペクトル Ss-2H
 - - - 一様ハザードスペクトル (年超過確率: 10^{-3} , 10^{-4} , 10^{-5} , 10^{-6})



福島第一原子力発電所における
Ss-1, Ss-2の年超過確率

— 設計用応答スペクトル Ss-3H
 - - - 一様ハザードスペクトル (年超過確率: 10^{-3} , 10^{-4} , 10^{-5} , 10^{-6})



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)

1F-5と同じ

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	← S ₂ +III
	1日以内						← S ₂ +II			← S ₂ +III	
	1年以内			← S ₂ +II	← S ₂ +III	← S ₂ +IV					

5 × 10⁻⁴ ~ 10⁻⁵ / 年

※図中の基準地震動S₁および基準地震動S₂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 S₂の発生確率は10⁻⁴ ~ 10⁻⁵ / サイト・年と推定されるが、ここでは 5 × 10⁻⁴ ~ 10⁻⁵ / サイト・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3号機）

- 基準地震動Ssによる計算値，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	計算値 (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	36	222	②
原子炉格納容器	ドライウェル	膜	199	255	①
炉心支持構造物	シュラウドサポート	軸圧縮	33	208	①
残留熱除去系ポンプ	基礎ボルト	引張	42	185	②
残留熱除去系配管	配管本体	一次	268	363	②
主蒸気系配管	配管本体	一次	183	417	②

※1 ①：応答倍率法による評価、②：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）	14.8	40.0

Ⅱ. 安全上重要な機器・配管系の耐震安全性評価

2 減衰定数

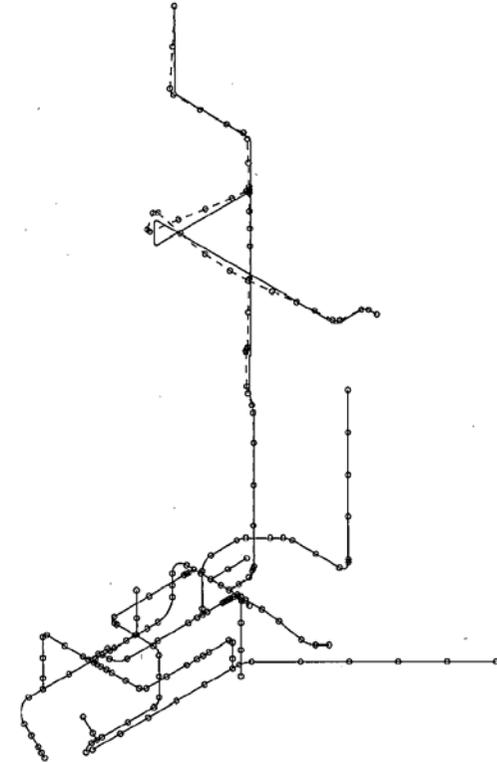
配管系の減衰定数（鉛直方向）

1F-5と同じ

- ✓ 配管系の減衰に寄与する要素には、主に配管と支持部の摩擦、配管と保温材の摩擦等による構造減衰がある。
- ✓ 配管系は、水平方向と鉛直方向に亘って立体的に引き回して施工するため、3次元の振動モードを有しており、**配管系の応答は水平方向と鉛直方向の応答が複合的に現れる。**



配管と支持部の摩擦、配管と保温材の摩擦等による構造減衰も、**水平・鉛直いずれの方向においても同じ機構で働くと考えられるため、配管系の鉛直方向の減衰定数については、水平方向と同じ減衰定数を適用。**



1F-5残留熱除去系配管の振動モード（例）

配管系の減衰定数（1/2）

- 配管系の設計用減衰定数は「原子力発電所耐震設計技術指針JEAG4601-1991追補版」に規定されているが，新たに実施した振動試験等をもとに，保温材の付加減衰定数およびUボルトを用いた支持具を有する配管系の減衰定数を定めた。

配管区分		減衰定数(%) ^{※1}	
		保温材有 ^{※2}	保温材無
I	スナッパ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(スナッパ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	スナッパ， 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とるUボルトの数が4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

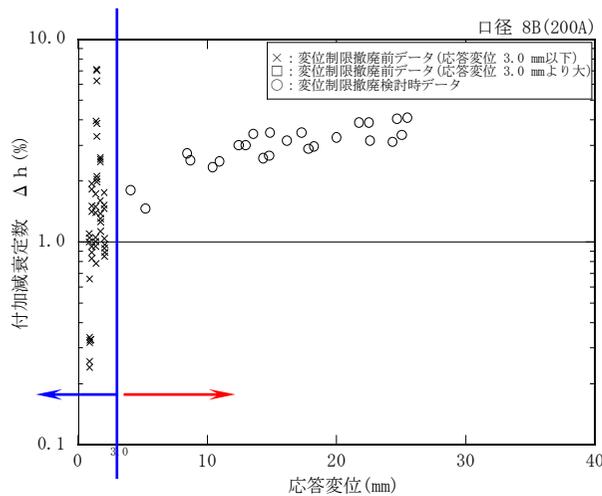
※1 「原子力発電所耐震設計技術指針JEAG4601-1991 追補版」に追加および変更した箇所を下線で示す。

※2 保温材有の設計用減衰定数は，無機多孔質保温材による付加減衰として，1.0%を考慮したものである。金属保温材による付加減衰定数は，配管ブロック全体に対する金属保温材使用割合が40%以下の場合1.0%を適用してよいが，金属保温材使用割合が40%を超える場合は0.5%とする。

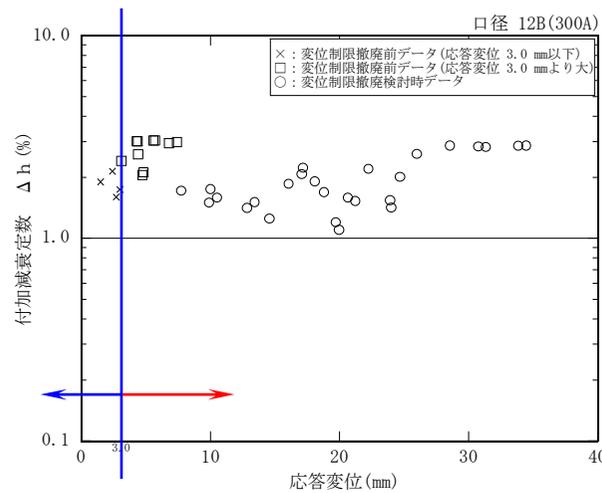
配管系の減衰定数 (2/2)

■ 保温材による設計用付加減衰定数について

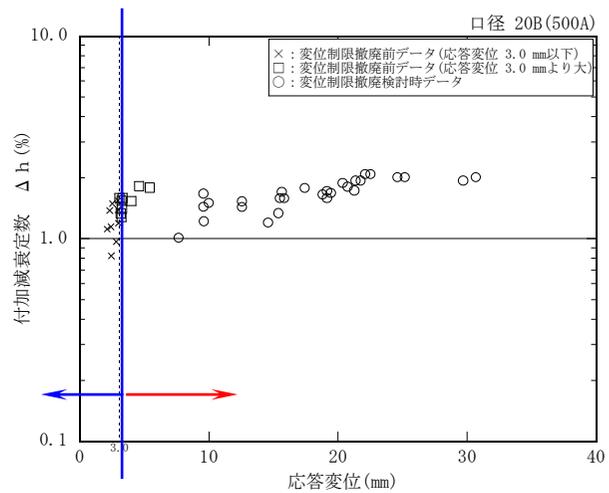
- ✓ 配管口径200A, 300A, 500Aの試験体を用いて振動試験を実施
- ✓ 応答変位3mm以上の領域において保温材による付加減衰定数は1.0%以上
- ✓ 3mm程度の応答変位では配管系に生じる応力が許容応力に対して十分余裕があることから、今回の付加減衰定数見直しは3mm以上のデータを対象に検討



200A



300A

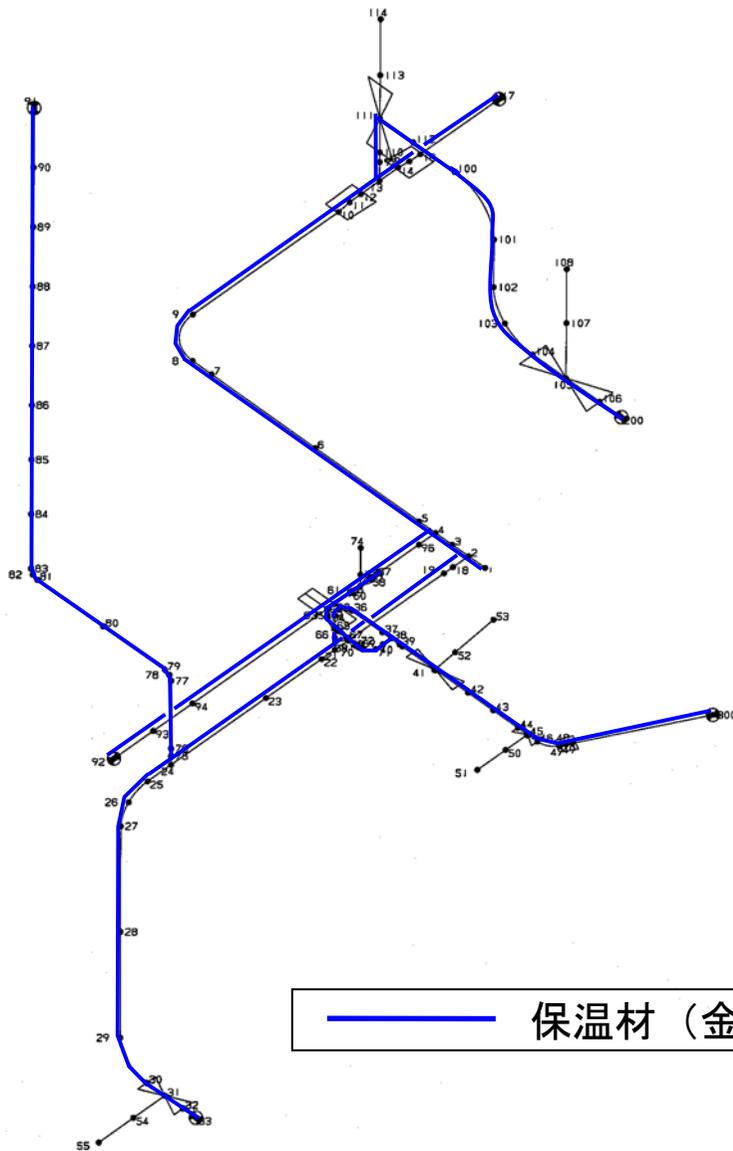


500A

付加減衰定数と応答変位 → 検討対象の領域

← 配管系に生じる応力が許容応力に対して十分余裕がある領域

残留熱除去系配管に使用されている保温材による付加減衰定数



- 当該モデルの配管は、全範囲で保温材が使用されているが、金属保温材は使用していない。
- よって、当該配管モデルにおいては、保温材による付加減衰定数として1%を適用した。

残留熱除去系配管モデル図

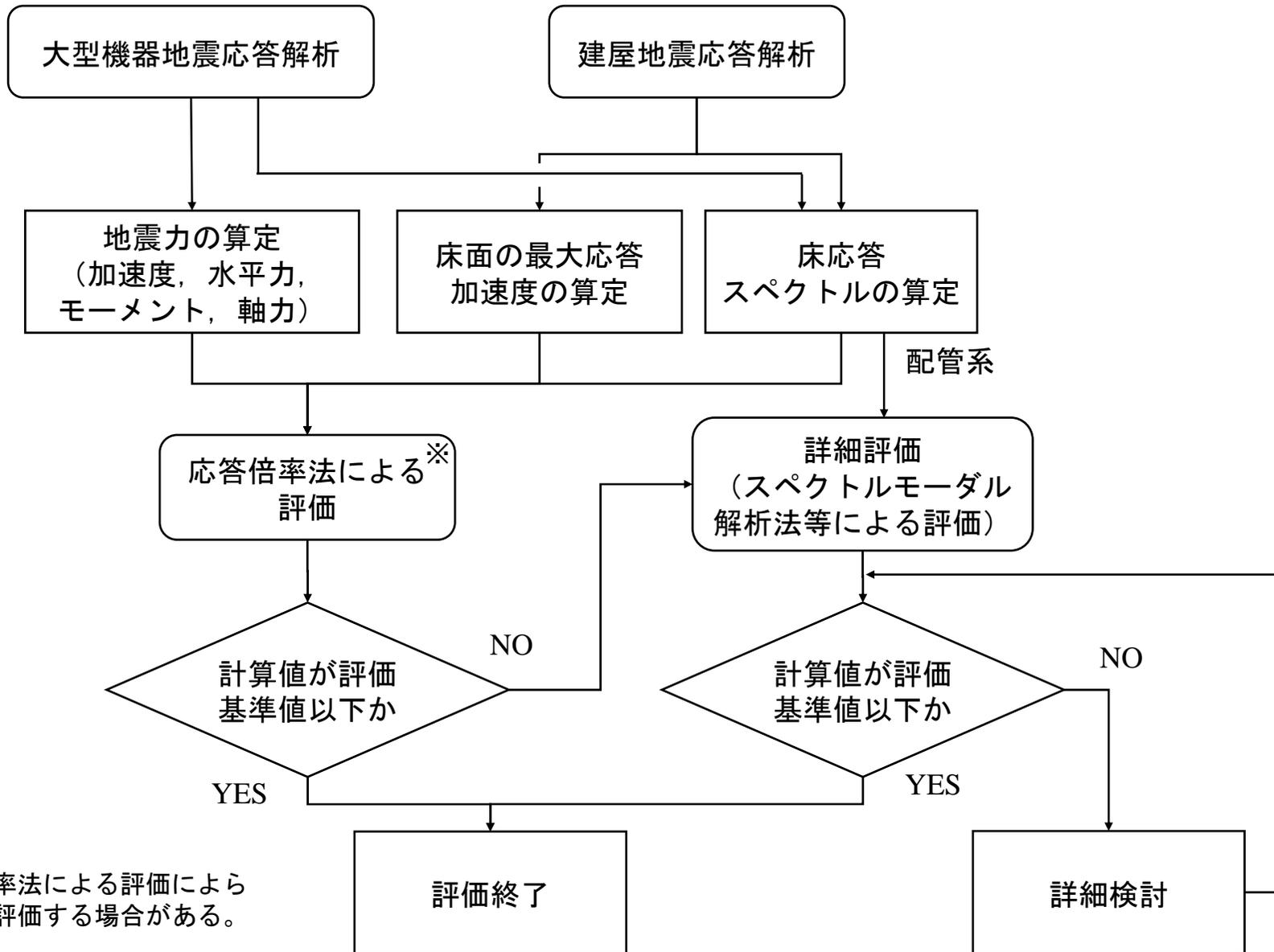
Ⅱ. 安全上重要な機器・配管系の耐震安全性評価

3 応答倍率法の考え方

- 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）

1F-5と同じ



※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評価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評価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、設備の算出応力を推定し、評価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、応答倍率法による計算値は地震による算出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、算出応力として報告書に記載。

応答倍率法による評価

- 設計時の耐震計算書等の既往評価条件と基準地震動 S_s の評価条件の比率（応答比）を算定して、その応答比を既往評価値に乗じることにより、基準地震動 S_s に対する評価対象設備の計算値が、評価基準値を上回らないことを確認する。

※応答比

A1：応答荷重比を用いた評価

設備の算出応力値を算定するにあたり、水平力、モーメント、軸力を用いる機器は、基準地震動 S_s 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

A2：応答加速度比を用いた評価

設備の算出応力値を算定するにあたり、水平加速度、鉛直加速度を用いる機器は基準地震動 S_s による床応答スペクトル等と、既往評価で用いた床応答スペクトル等から水平加速度と鉛直加速度の比をそれぞれ求め、大きい方の値を応答比とする

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

C_{H0} ：既往評価による水平加速度

C_H ：基準地震動 S_s による水平加速度

C_{V0} ：既往評価による鉛直加速度

C_V ：基準地震動 S_s による鉛直加速度

応答比の変更点

- 福島第一5号機の審議を踏まえ、福島第一3号機の耐震安全性評価における応答比は下表の通り見直している。

項目	1F-3	1F-5
応答比の算定 (床置き機器)	$\text{MAX} \left(\frac{C_H}{C_{H0}}, \frac{C_V}{C_{V0}} \right)$	$\frac{\sqrt{(C_H)^2 + (1 + C_V)^2}}{\sqrt{(C_{H0})^2 + (1 + C_{V0})^2}}$
応答比の算定 (原子炉格納容器、 原子炉圧力容器、 炉内構造物)	「1プラス鉛直動による応答加速度」の応答比は用いない	「1プラス鉛直動による応答加速度」の応答比を用いる設備もあり

応答比を用いた評価

1F-5と同じ

既往評価での評価方法に応じて、以下の方法①または方法②で実施

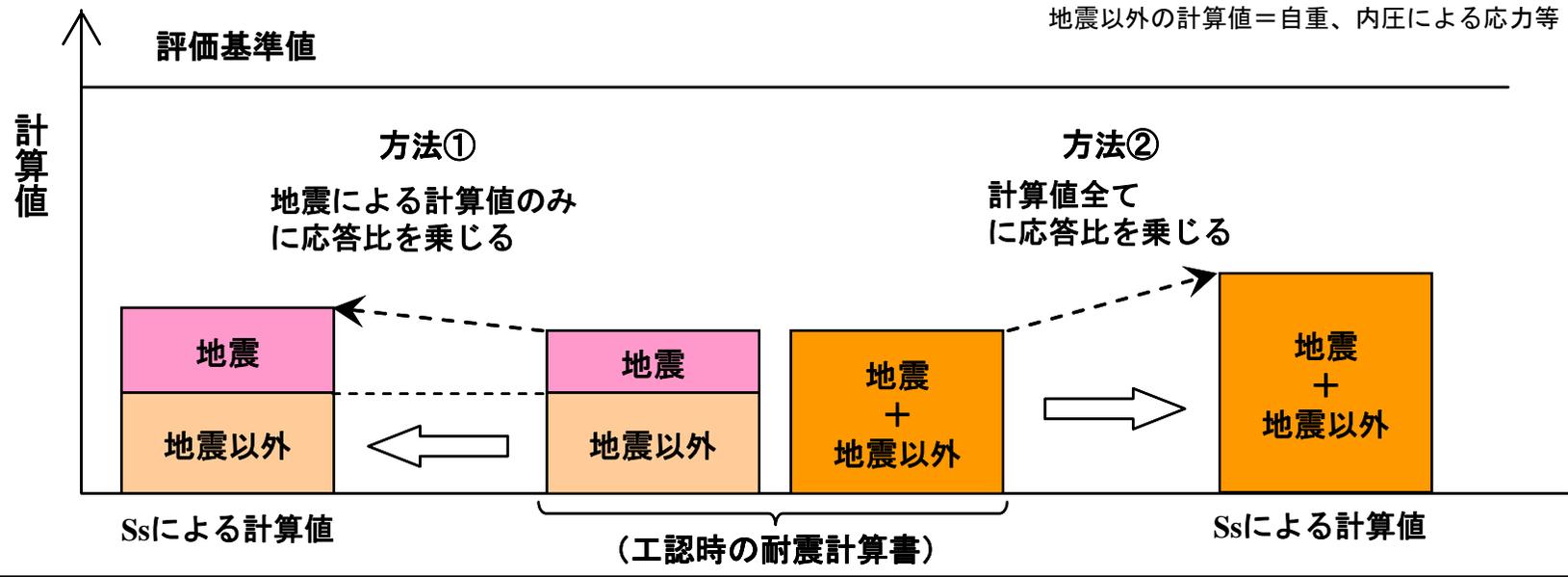
【方法①】：地震による計算値と地震以外による計算値が分離されている場合の取扱い

$$S_s \text{による計算値} = \begin{matrix} \text{地震以外による計算値} & + & \text{地震による計算値} \\ \text{(工認時の耐震計算書)} & & \text{(工認時の耐震計算書)} \end{matrix} \times \text{応答比}$$

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

$$S_s \text{による計算値} = \left(\text{地震以外による計算値} + \text{地震による計算値} \right) \times \text{応答比}$$

(工認時の耐震計算書)



■ 応答倍率法を適用する設備

① 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

② 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

① 地震に対する応答が比較的複雑な設備

例) 配管類

② 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

③ 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)

1F-5と同じ

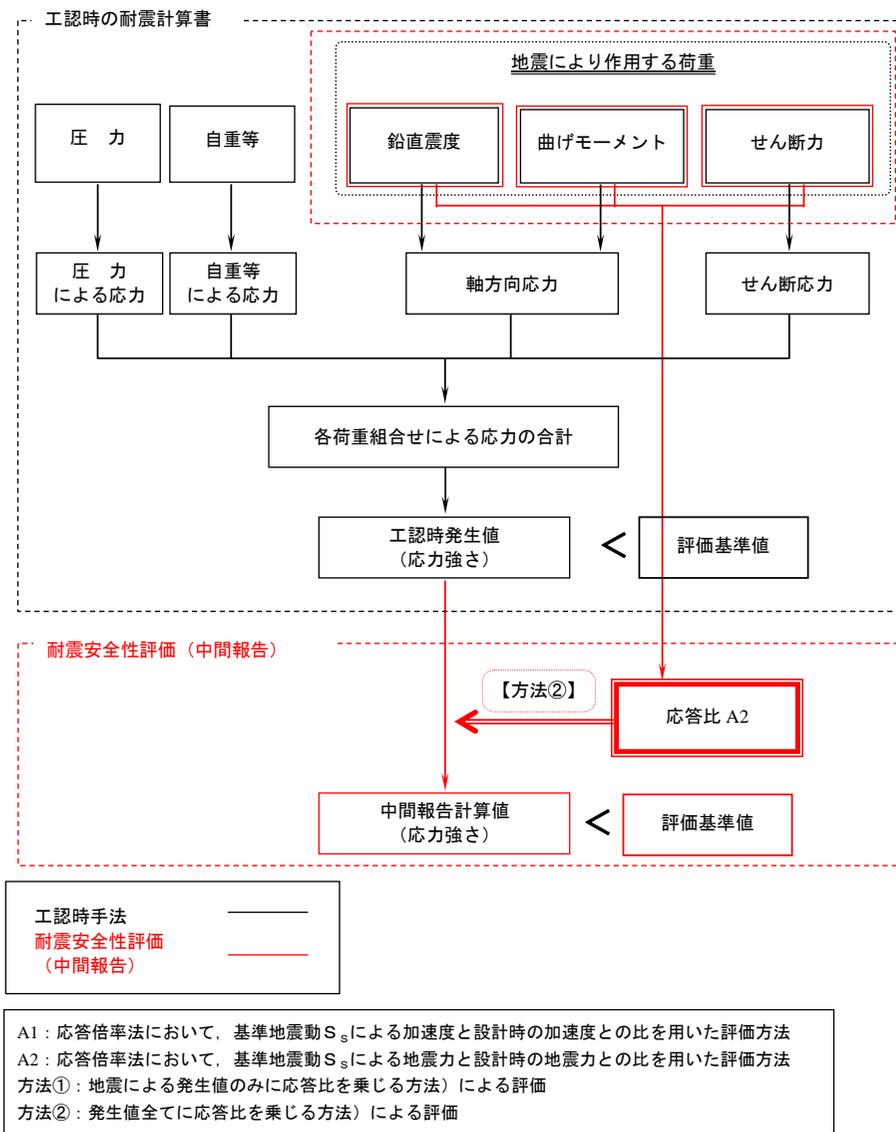
設備	設計手法の特徴	適用する 応答比	応答倍率法の適用に あたってのスタンス
原子炉 格納容器 原子炉 圧力容器 炉内構造物	建物と機器の連成解析により、各評価部位の荷重、加速度に基づき、応力を算出。	応答荷重比	荷重を用いて設計を行っている設備については、 <u>基準地震動S_sによる評価荷重が算出されていれば、加速度設計の設備よりも比較的精度よく応答値の予測が可能なので、応答倍率法を適用する。</u>
床置き機器 (ポンプ、 ファン、熱交換器、盤等)	主に建物の応答解析により、算出される床の応答加速度に基づき応力を算出。	応答加速度比	加速度を用いて設計している設備のうち、 <u>設計時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。

応答倍率法の適用に関する整理(3/3)

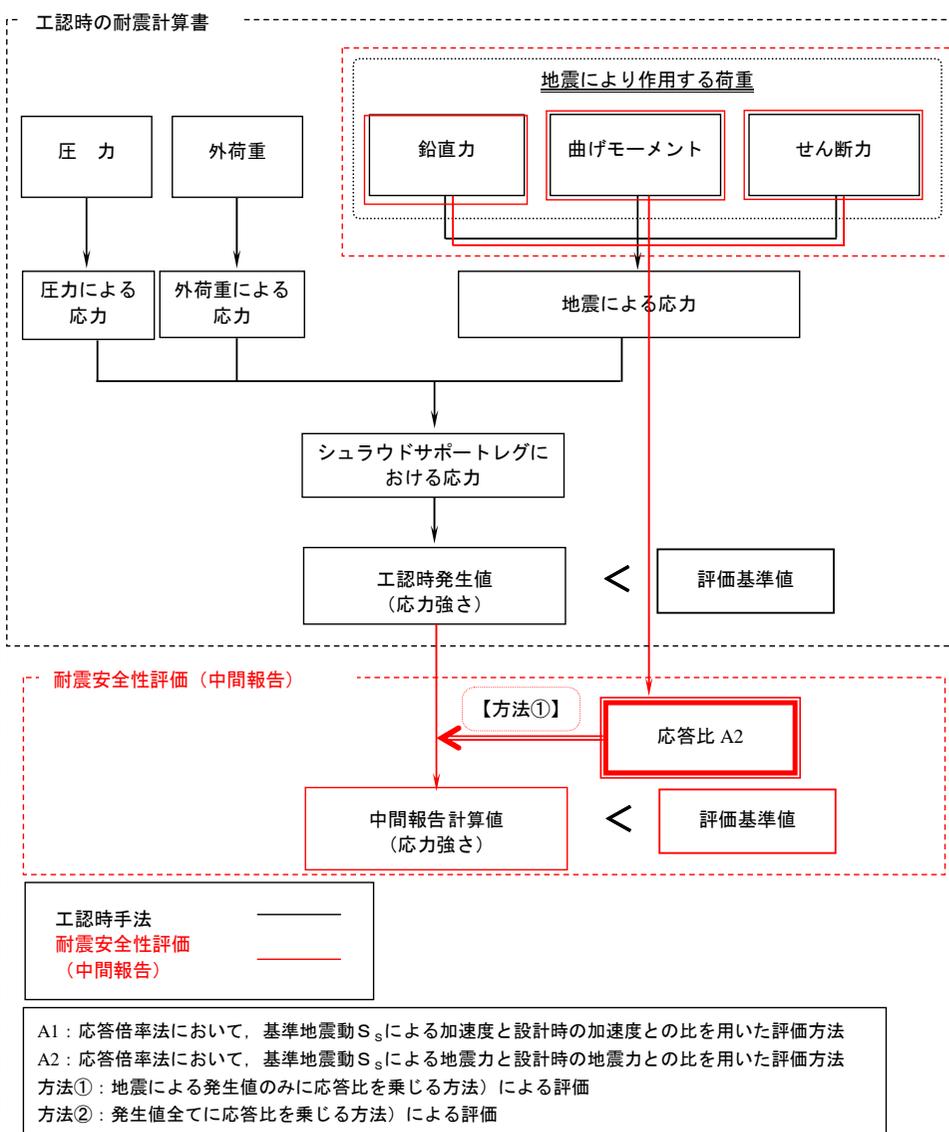
1F-5と同じ

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
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、応答倍率による <u>応答予測が困難であること</u> から <u>詳細評価を実施する</u> 。
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</u> 、 <u>詳細評価を実施する</u> 。

応答比を用いた評価手順



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

Ⅱ. 安全上重要な機器・配管系の耐震安全性評価

4 各設備の評価プロセス

各設備の評価プロセス

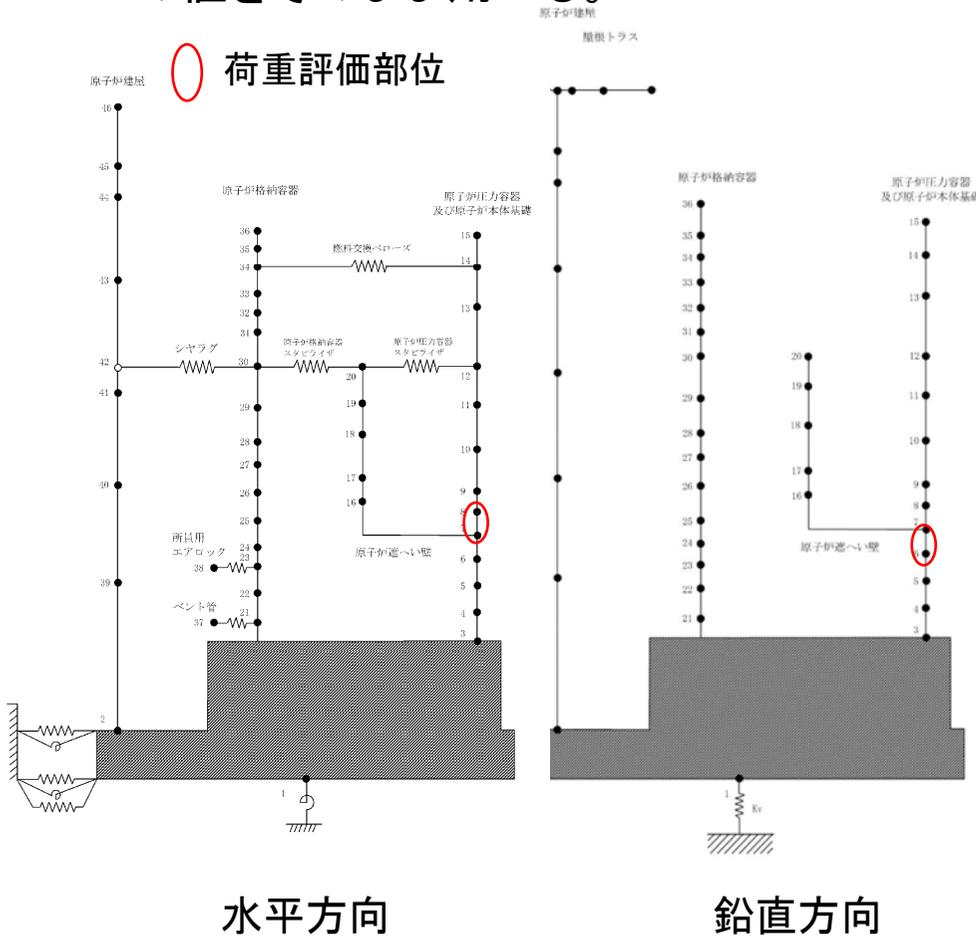
■福島第一原子力発電所3号機

- ✓原子炉圧力容器
- ✓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，主蒸気系配管）
- ✓制御棒挿入性

(各設備の評価プロセス)

福島第一3号機 原子炉压力容器（基礎ボルト）（1/2）

- 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、地震による水平力，モーメント，軸力が算出される。地震以外の荷重については，設計時の値をそのまま用いる。



PCV-RPV連成解析モデル

荷重条件※

荷重		Ss荷重	地震以外の荷重	Ss荷重+地震以外の荷重
軸力 [kN]	最大	5780	21080	26860
	最小	-5780	8880	3100
水平力 [kN]		4970	—	4970
曲げモーメント [kN・m]		30400	—	30400

※ 一の位を切り上げた値を荷重条件とした

地震以外の荷重の内訳

	原子炉压力容器自重	スクラム反力	その他の活荷重	合計
最大 [kN]	11533	7927	1619	21079
最小 [kN]	11533	-4272	1619	8880

(各設備の評価プロセス)

福島第一3号機 原子炉压力容器（基礎ボルト）（2/2）

- JEAG4601-1987に基づき右図のような応力分布を考え、下式の関係より基礎ボルトに作用する引張り応力を算出する。

$$\frac{\sigma_t}{n \cdot \sigma_c} = \frac{1 + \cos \alpha}{1 - \cos \alpha}$$

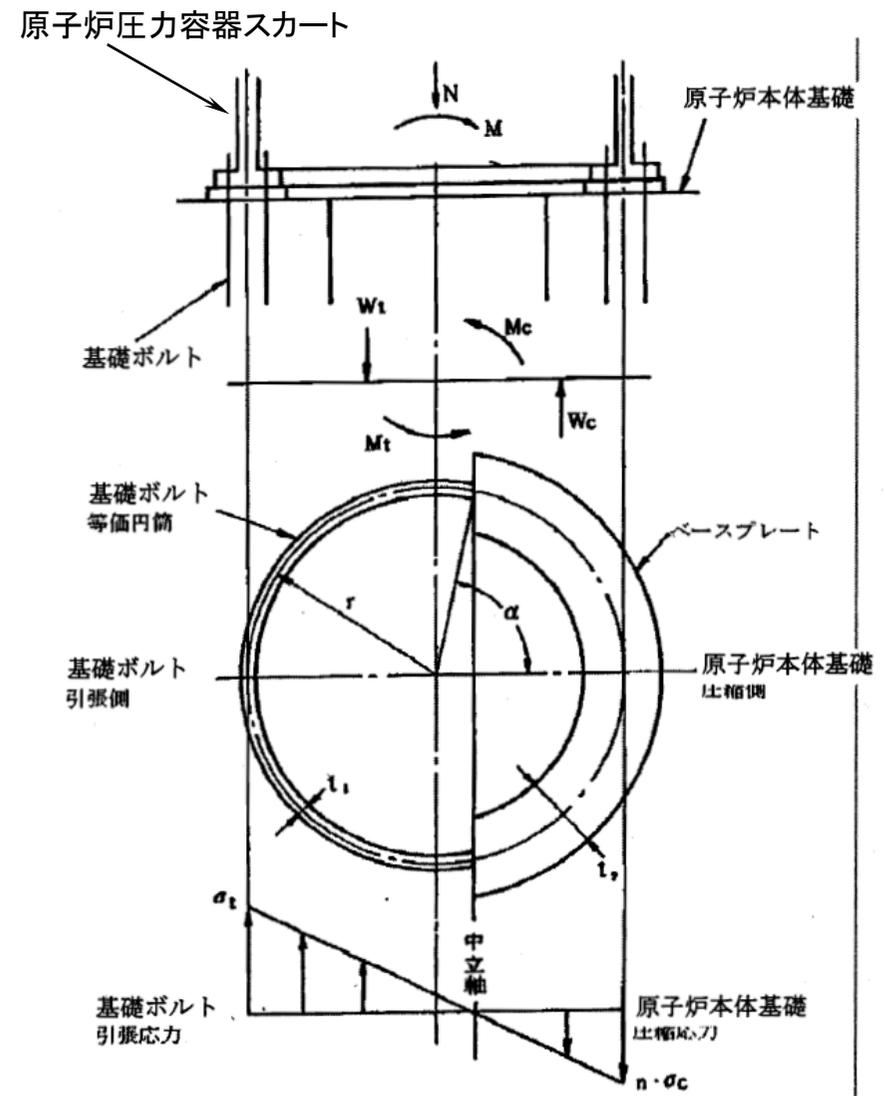
$$N + W_t - W_c = 0$$

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

- σ_t : 基礎ボルトに生じる引張り応力
- σ_c : 原子炉本体基礎に生じる圧縮応力
- n : 基礎ボルトと原子炉本体基礎の縦弾性係数の比
- α : 中立軸の位置を示す角度
- N : 原子炉压力容器スカートに作用する鉛直力
- M : 原子炉压力容器スカートに作用するモーメント
- W_t : 基礎ボルトに作用する力の合計
- W_c : 原子炉本体基礎に作用する反力の合計
- M_t : W_t によるモーメント
- M_c : W_c によるモーメント

評価結果

応力分類	計算値 [MPa]	評価基準値 [MPa]
引張	36	222



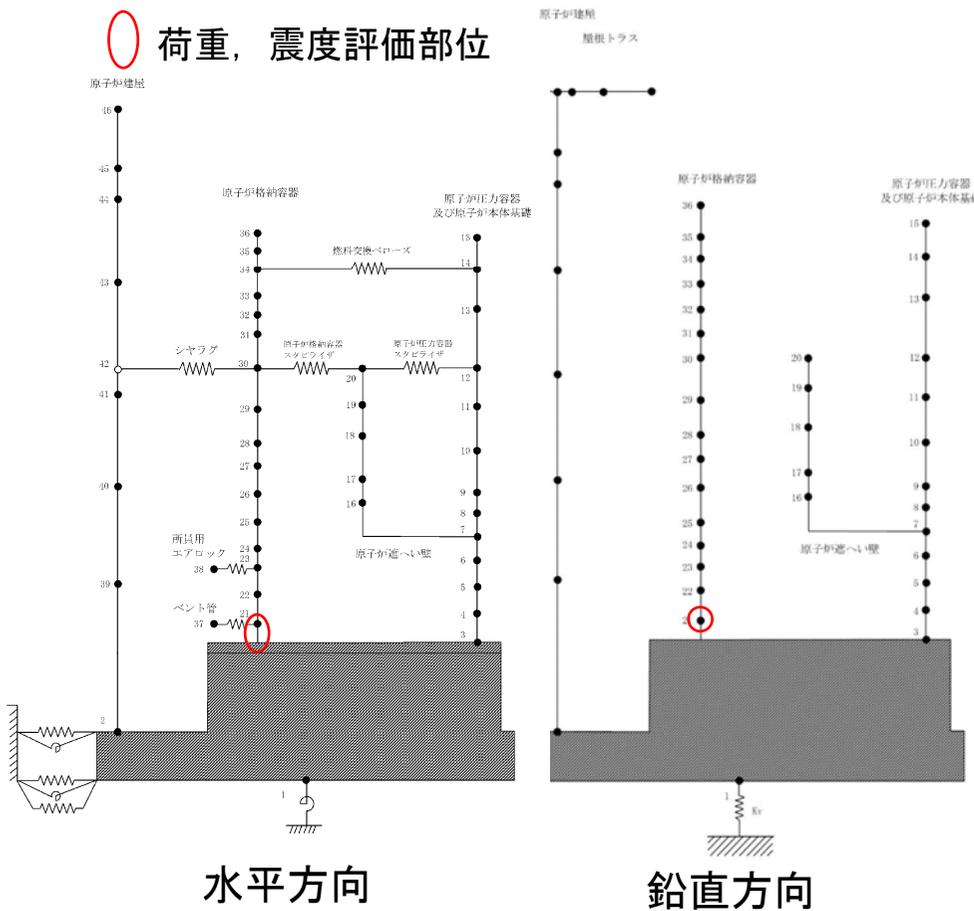
基礎ボルトの等価円筒及び応力分布

(各設備の評価プロセス)

福島第一3号機 原子炉格納容器 (サンドクッション部) (1/2)

- PCV-RPV連成解析により地震による水平力, 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, 応答比を算出し, それぞれの比のうち最大の値1.84を評価に用いる。

○ 荷重, 震度評価部位



PCV-RPV連成解析モデル

$$\alpha_H = \frac{H_{Ss}}{H_0}$$

$$\alpha_M = \frac{M_{Ss}}{M_0}$$

$$\alpha_{Cv} = \frac{Cv_{Ss}}{Cv_0}$$

- α_H : 水平力による応答比
- α_M : 曲げモーメントによる応答比
- α_{Cv} : 鉛直震度による応答比
- H_{Ss} : 基準地震動Ssによるせん断力
- H_0 : 設計時の水平力
- M_{Ss} : 基準地震動Ssによるモーメント
- M_0 : 設計時のモーメント
- Cv_{Ss} : 基準地震動Ssによる鉛直震度
- Cv_0 : 設計時の鉛直震度

応答比

荷重	設計時地震荷重, 震度	Ss地震荷重, 震度	応答比
水平力 [kN]	6865	7070	1.03
曲げモーメント [kN・m]	107900	123000	1.14
鉛直震度	0.24	0.44	1.84

(各設備の評価プロセス)

福島第一3号機 原子炉格納容器（サンドクッション部）（2/2）

- 設計時の計算値に応答比を乗じ，原子炉格納容器サンドクッション部の応力を算出する。

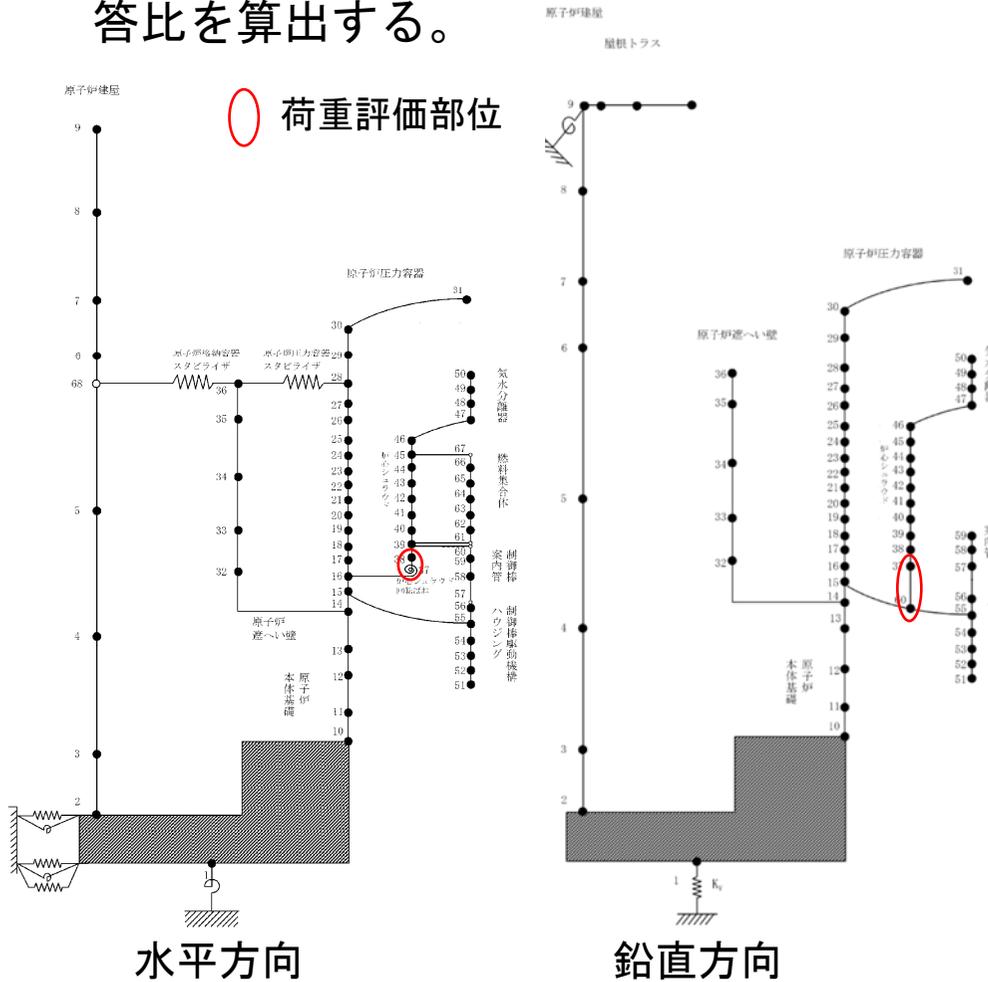
評価結果

応力分類	設計時 計算値 [MPa]	応答比	基準地震動 S_s による 計算値 [MPa]	評価基準値 [MPa]
膜	108	1.84	199	255

(各設備の評価プロセス)

福島第一3号機 炉心支持構造物（シュラウドサポートレグ）（1/2）

- 炉内構造物の連成解析により地震による、モーメント，軸力が算出される。設計時の当該荷重，基準地震動Ssによる当該荷重をそれぞれ比較することにより，応答比を算出する。



$$\alpha_H = \frac{H_{Ss}}{H_0}$$

$$\alpha_M = \frac{M_{Ss}}{M_0}$$

$$\alpha_V = \frac{V_{Ss}}{V_0}$$

α_H : 水平力による応答比
 α_M : 曲げモーメントによる応答比
 α_V : 軸力による応答比
 H_{Ss} : 基準地震動Ssによるせん断力
 H_0 : 設計時の水平力
 M_{Ss} : 基準地震動Ssによるモーメント
 M_0 : 設計時のモーメント
 V_{Ss} : 基準地震動Ssによる軸力
 V_0 : 設計時の軸力

応答比

荷重	設計時地震荷重, 震度	Ss地震荷重, 震度	応答比
水平力 [kN]	6767	2440	0.36
モーメント [kN・m]	34820	13600	0.39
軸力 [kN]	387	783	2.03

炉内構造物連成解析モデル

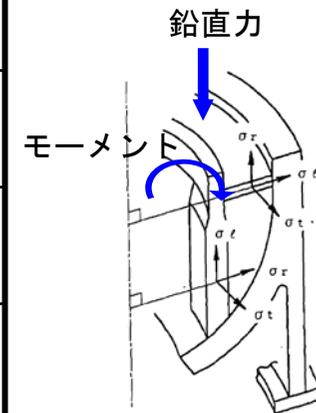
(各設備の評価プロセス)

福島第一3号機 炉心支持構造物（シュラウドサポートレグ）（2/2）

- 算出した応答比を設計時の軸圧縮応力の地震成分のうち、モーメントによる成分、軸力による成分に乘じ、設計時の地震以外の成分と組合せることでシュラウドサポートレグの軸圧縮応力を算出する。

応力評価

		設計時の応力 [MPa]	応答比	基準地震動Ss による応力[MPa]
地震による 応力	モーメント による応力	71.13	× 0.39	27.74
	軸力 による応力	0.87	× 2.03	1.77
地震以外による 応力	自重 による応力	3	× 1	3
地震による 応力 +	地震以外に よる応力			32.51



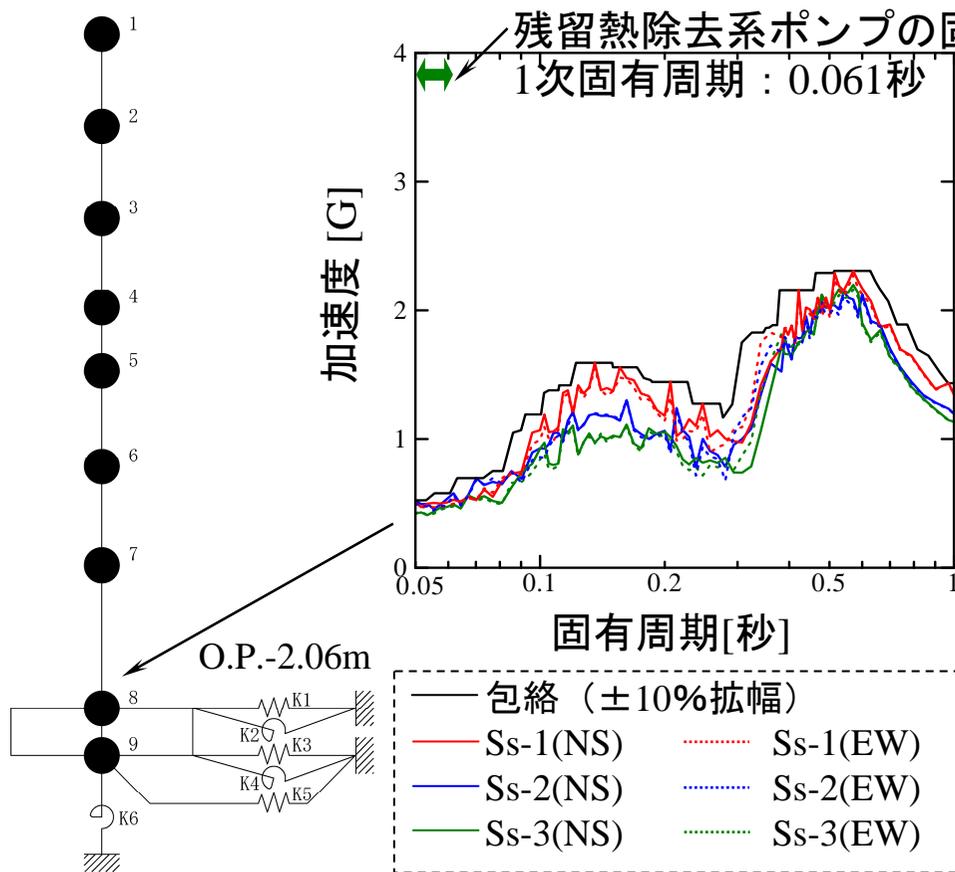
評価結果

応力分類	計算値 [MPa]	評価基準値 [MPa]
軸圧縮	33	208

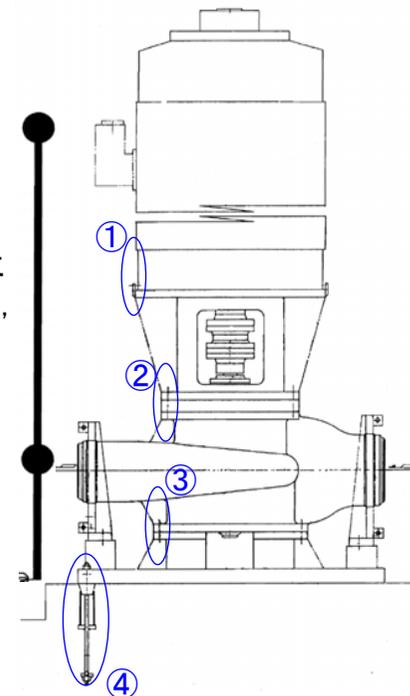
(各設備の評価プロセス)

福島第一3号機 残留熱除去系ポンプ（基礎ボルト）（1/2）

- 残留熱除去系ポンプは水平方向に関して柔なので、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ダル解析を実施し、ポンプ廻りの水平力、モーメントを算出する。



スペクトルモーダル解析により、ポンプ廻りの水平力、モーメントを算出



ポンプ外形図，応答解析モデル

- ① 電動機取付ボルト
- ② 電動機台取付ボルト
- ③ ポンプ取付ボルト
- ④ 基礎ボルト

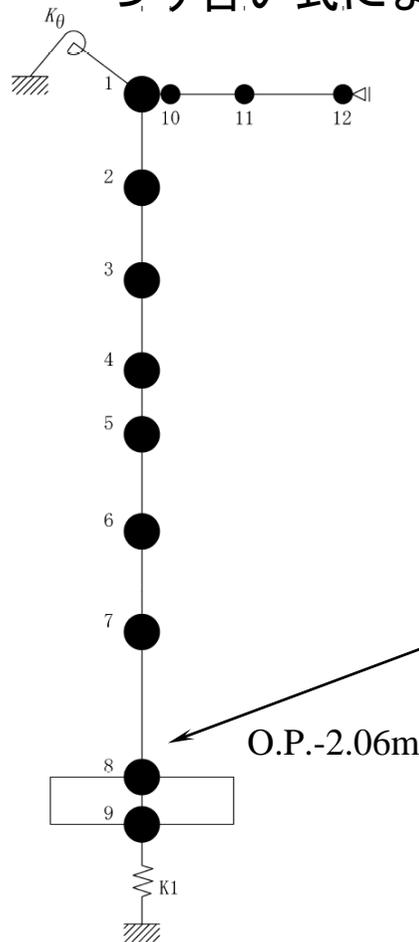
原子炉建屋
水平方向解析モデル

床応答スペクトル
(減衰定数1%)

(各設備の評価プロセス)

福島第一3号機 残留熱除去系ポンプ（基礎ボルト）（2/2）

- 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応力を算出する。



スペクトルモーダル解析によって算出した
水平力，モーメント

地震荷重種別	Ss地震荷重
水平力 [kN]	52
モーメント [kN・m]	142

鉛直方向評価用震度

鉛直方向 評価用震度	0.53
---------------	------

つり合いの式により
応力算出

評価結果

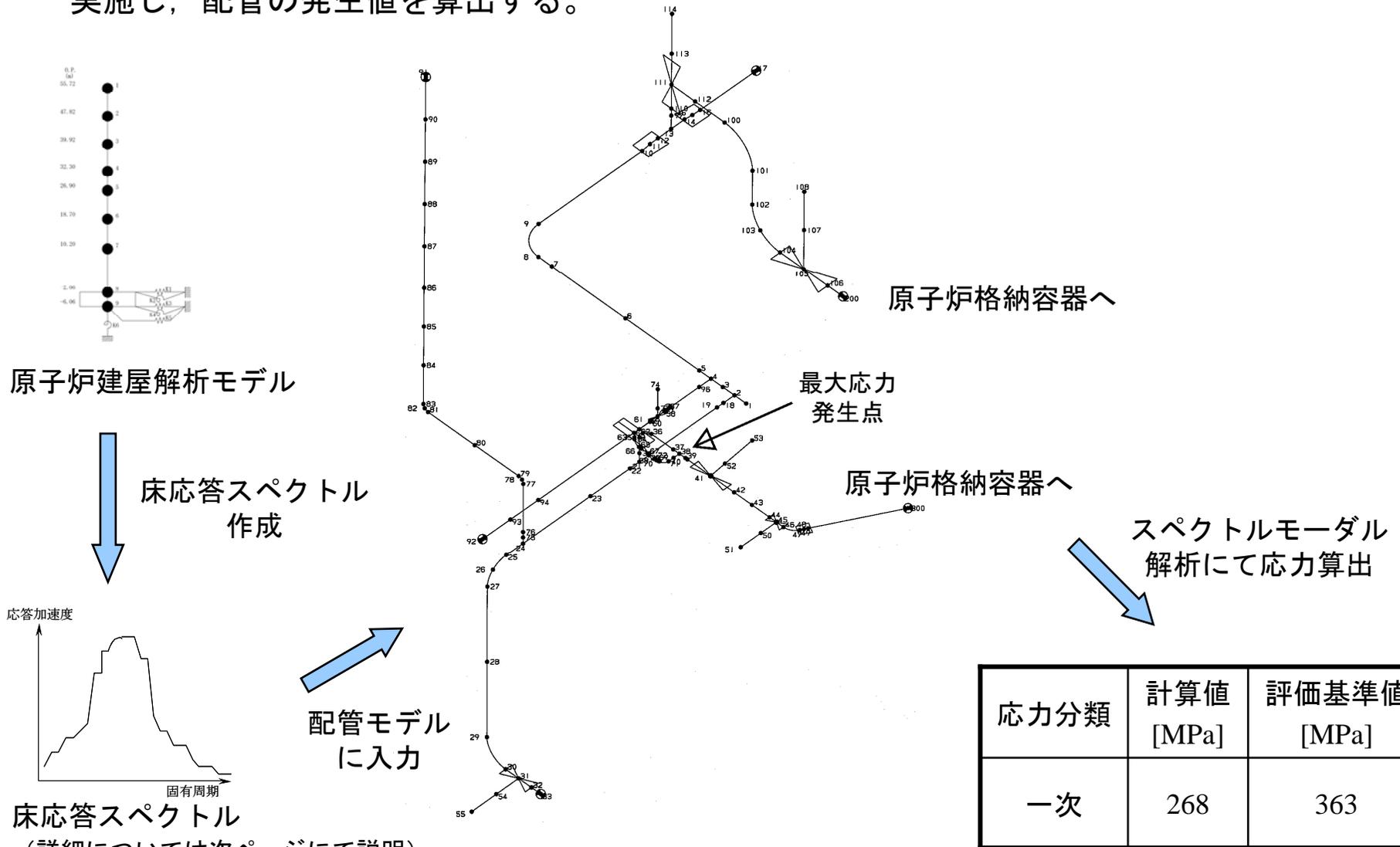
応力分類	計算値 [MPa]	評価基準値 [MPa]
引張	42	185

※ボルト類の内、評価基準値／発生値が
最も小さい電動機取付ボルトの値を記載

原子炉建屋
鉛直方向解析モデル

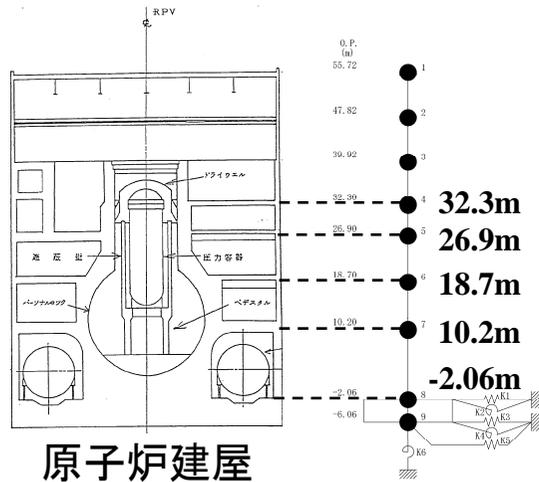
(各設備の評価プロセス) 福島第一3号機 配管 (残留熱除去系配管)

- 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、スペクトルモーダル解析を実施し、配管の発生値を算出する。

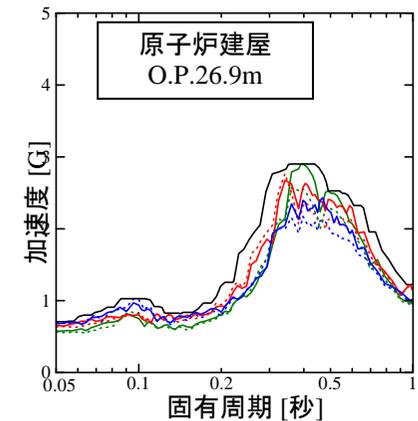
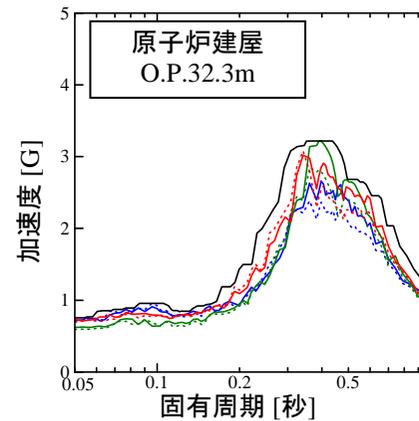


(各設備の評価プロセス) 福島第一3号機 残留熱除去系配管の評価に用いた水平方向床応答スペクトル (1/2)

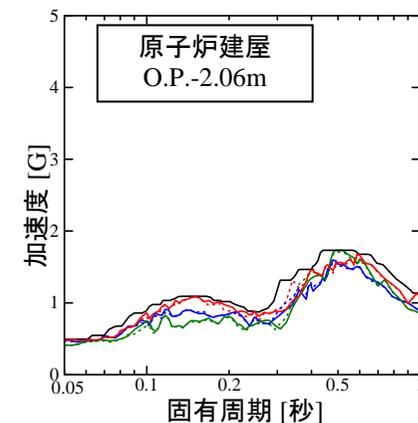
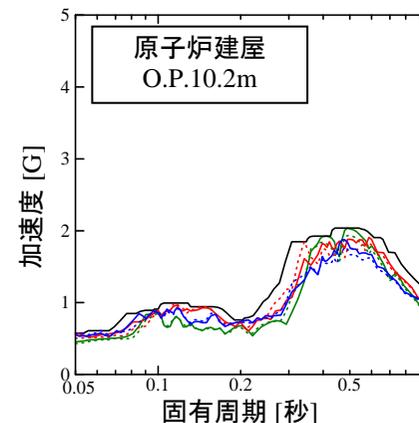
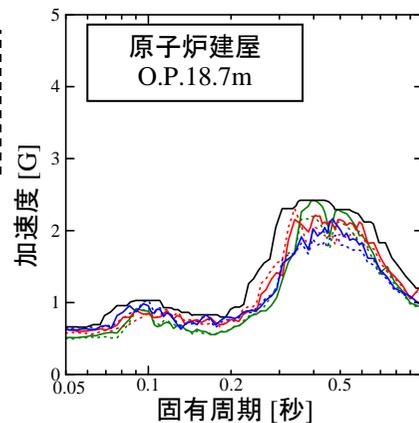
■ 原子炉建屋のO.P.32.3m, O.P.26.9m, O.P.18.7m, O.P.10.2m, O.P.-2.06m各フロアそれぞれにおいて, Ss-1(NS, EW), Ss-2(NS, EW), Ss-3(NS, EW)による床応答スペクトルを包絡, $\pm 10\%$ 拡張した上で, 各フロアのスペクトルを包絡して作成。



原子炉建屋



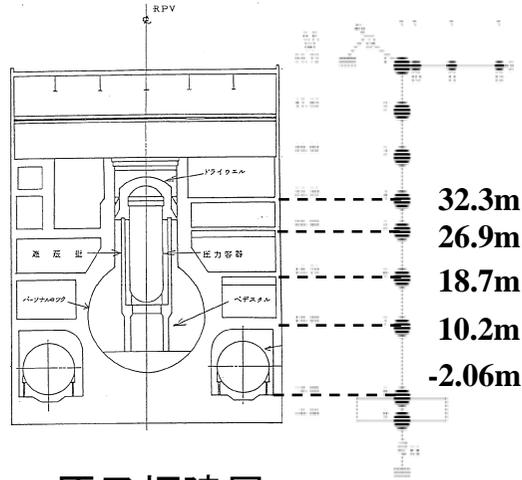
- 包絡 ($\pm 10\%$ 拡張)
- Ss-1(NS) ····· Ss-1(EW)
- Ss-2(NS) ····· Ss-2(EW)
- Ss-3(NS) ····· Ss-3(EW)



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3.0%)

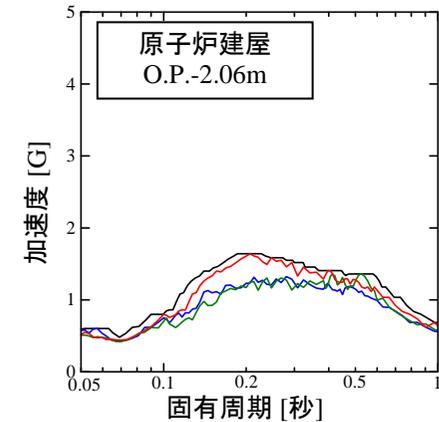
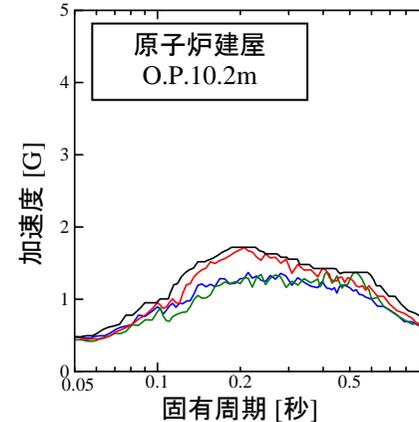
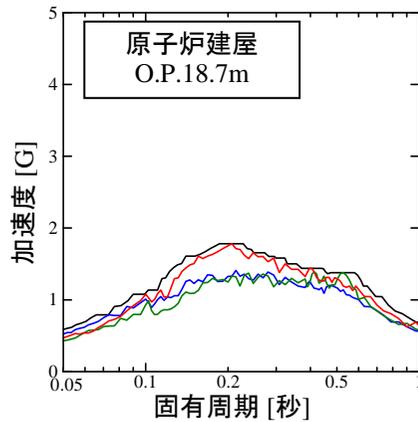
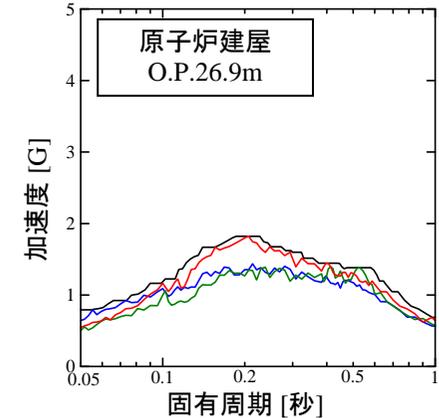
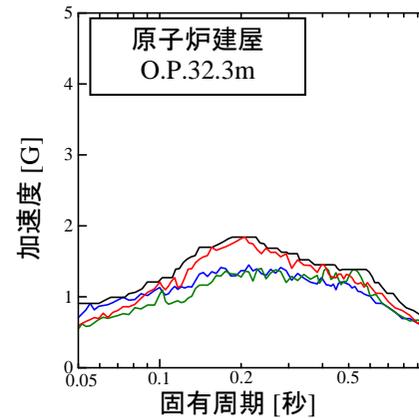
(各設備の評価プロセス) 福島第一3号機 残留熱除去系配管の評価に用いた鉛直方向床応答スペクトル (1/2)

- 原子炉建屋のO.P.32.3m, O.P.26.9m, O.P.18.7m, O.P.10.2m, O.P.-2.06m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, $\pm 10\%$ 拡幅した上で, 各フロアのスペクトルを包絡して作成。



原子炉建屋

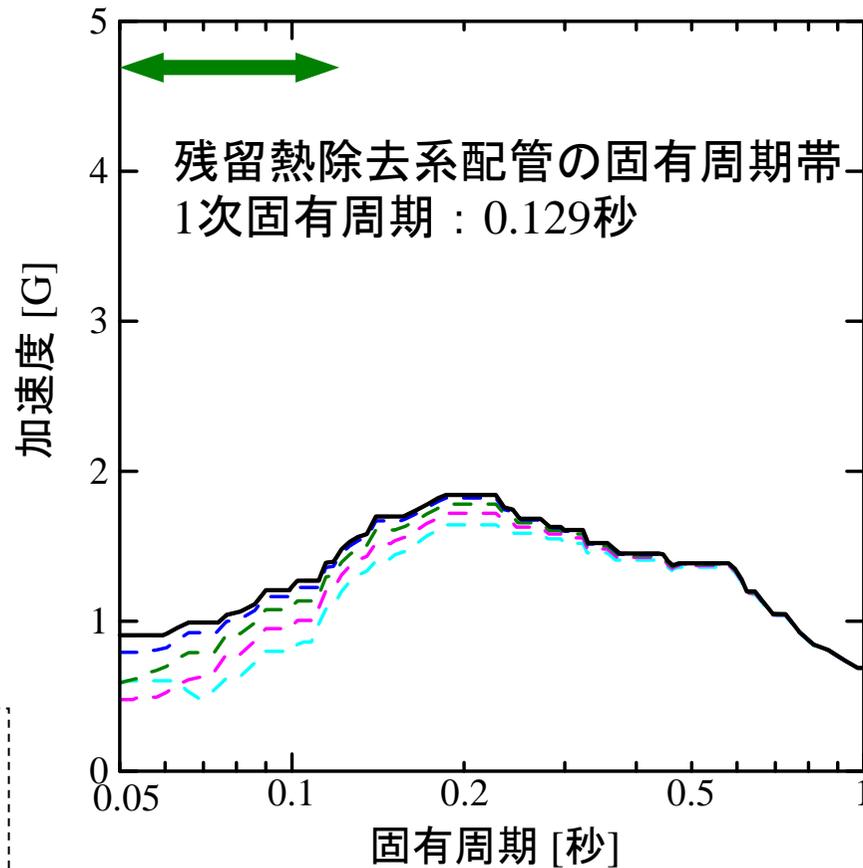
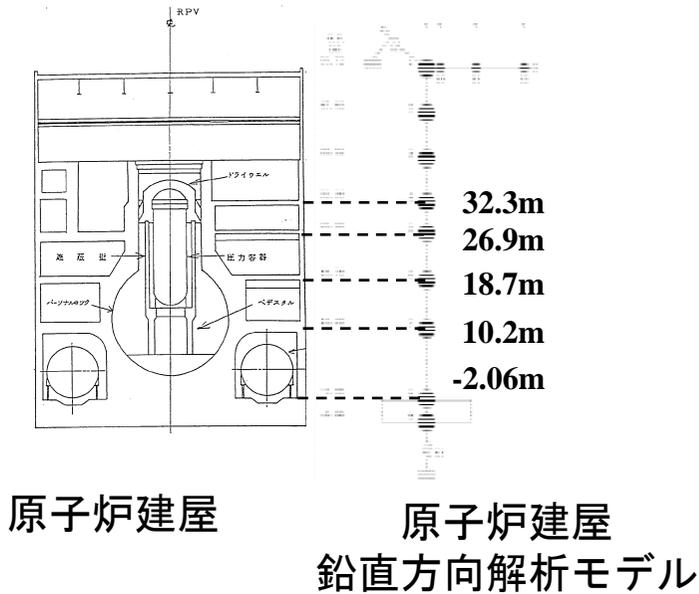
- 包絡 ($\pm 10\%$ 拡幅)
- Ss-1(UD)
- Ss-2(UD)
- Ss-3(UD)



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3.0%)

(各設備の評価プロセス) 福島第一3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.32.3m, O.P.26.9m, O.P.18.7m, O.P.10.2m, O.P.-2.06m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, ±10%拡幅した上で, 各フロアのスペクトルを包絡して作成。



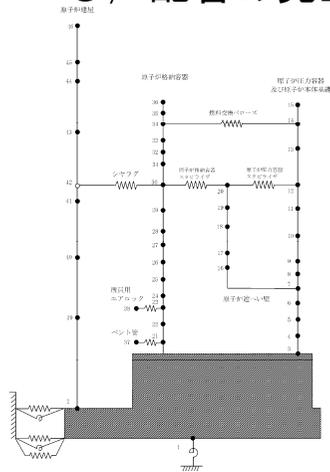
- 全フロア包絡
- - - O.P.35.3m包絡
- - - O.P.29.9m包絡
- - - O.P.21.7m包絡
- - - O.P.13.2m包絡
- - - O.P.0.94m包絡

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3.0%)

(各設備の評価プロセス)

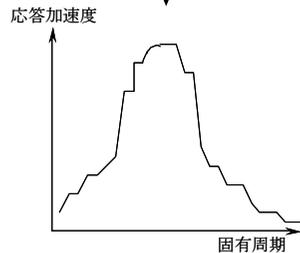
福島第一3号機 配管 (主蒸気系配管)

- 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。

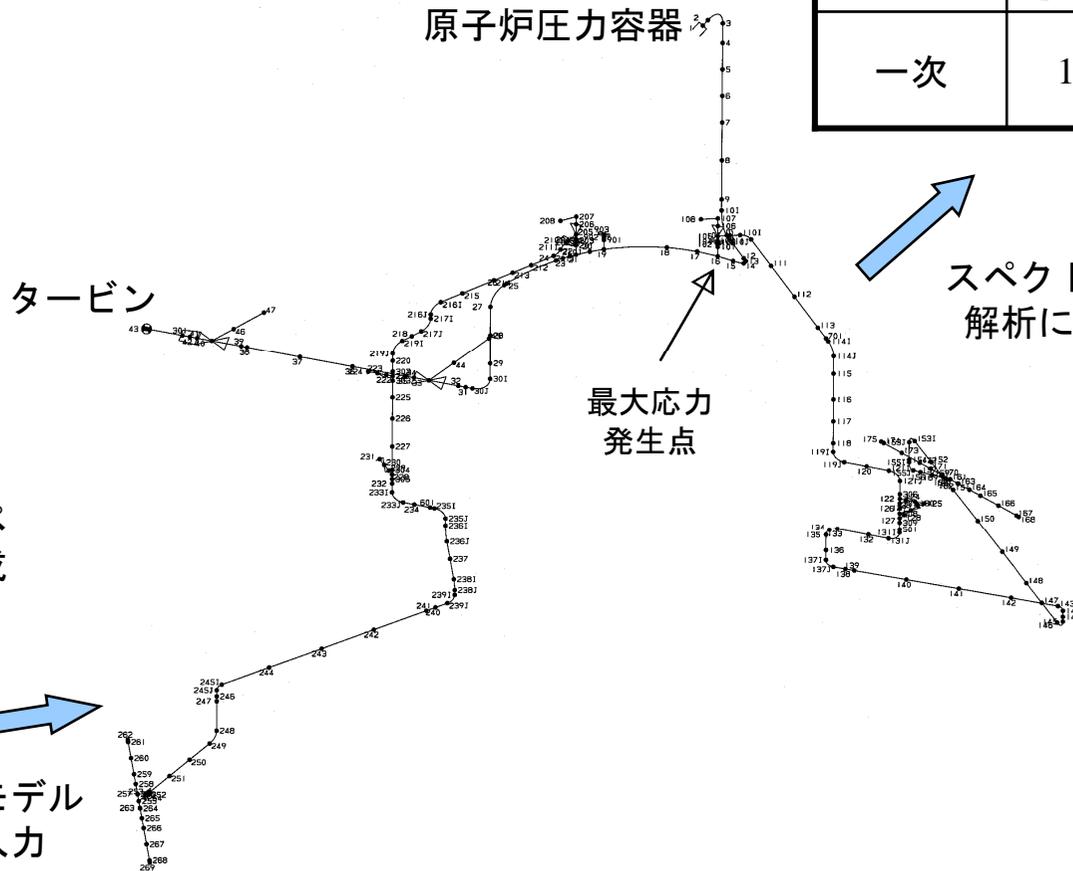


PCV-RPV連成解析モデル

床応答スペクトル作成



配管モデルに入力



応力分類	計算値 [MPa]	評価基準値 [MPa]
一次	183	417

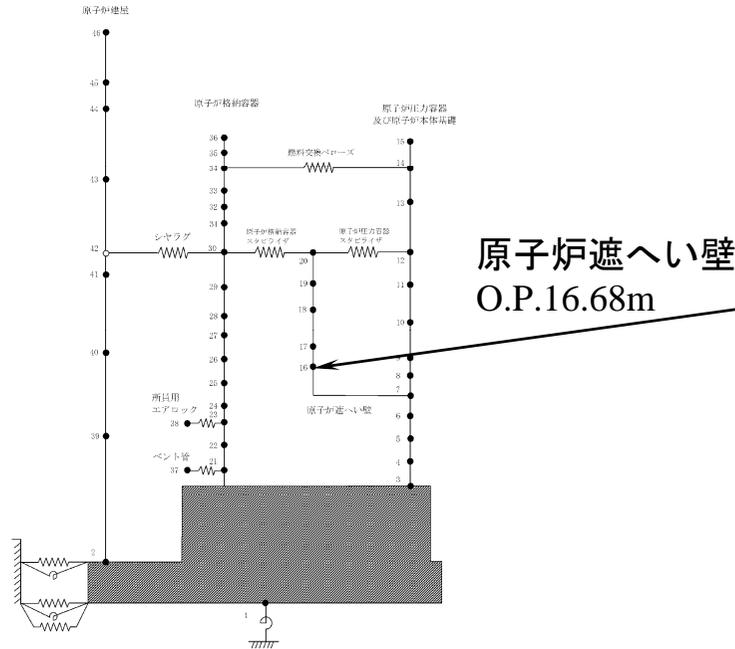
スペクトルモーダル解析にて応力算出

床応答スペクトル

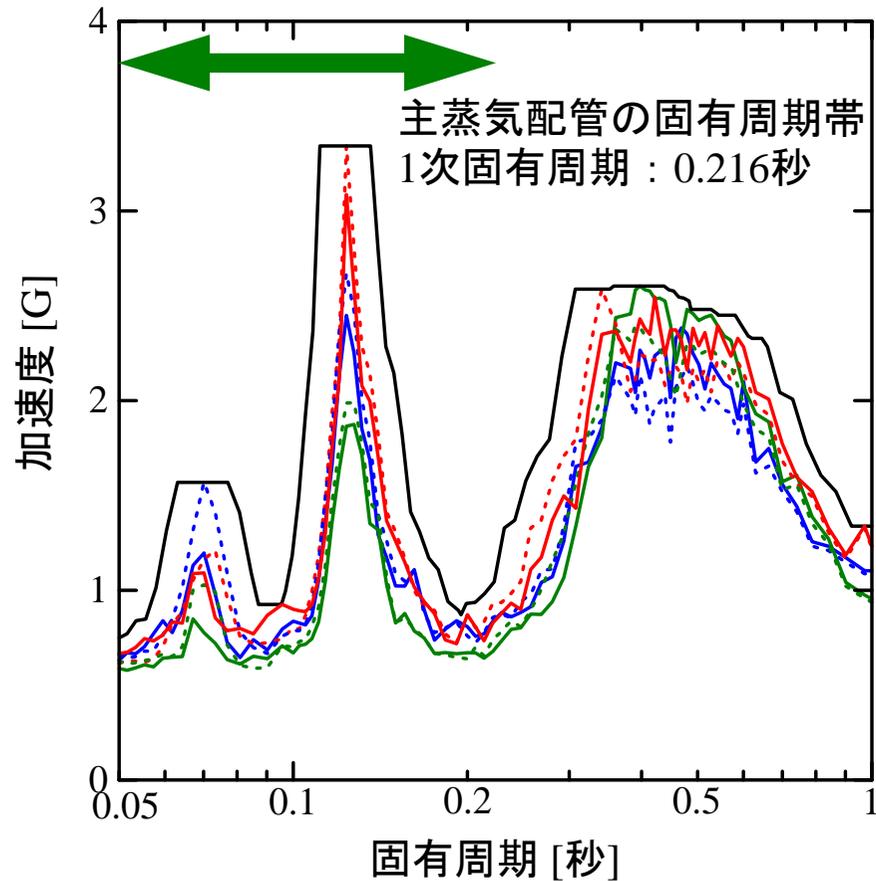
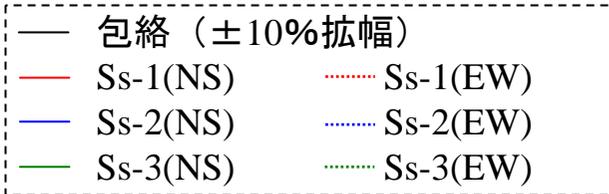
(詳細については次ページにて説明)

(各設備の評価プロセス) 福島第一3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.16.68m）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。



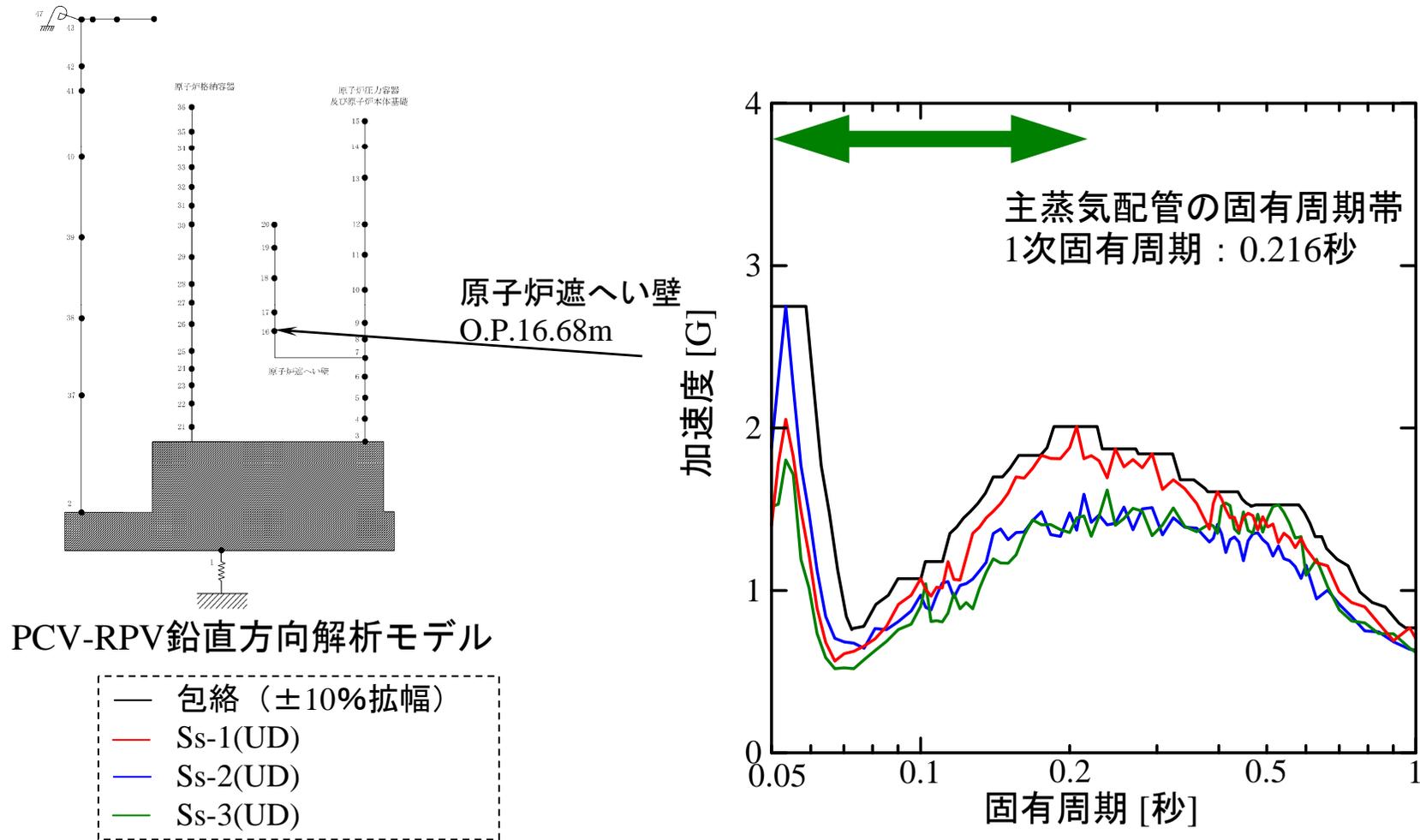
PCV-RPV水平方向解析モデル



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%）

(各設備の評価プロセス) 福島第一3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

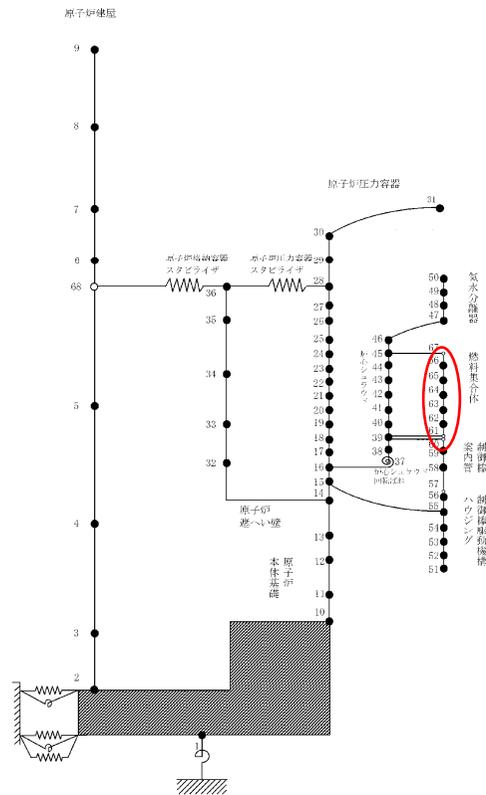
- 配管の重心に近い位置（原子炉遮へい壁のO.P.16.68m）において、Ss-1, Ss-2, Ss-3による床応答スペクトルを包絡し、±10%拡幅して作成。



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%）

(各設備の評価プロセス) 福島第一3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。

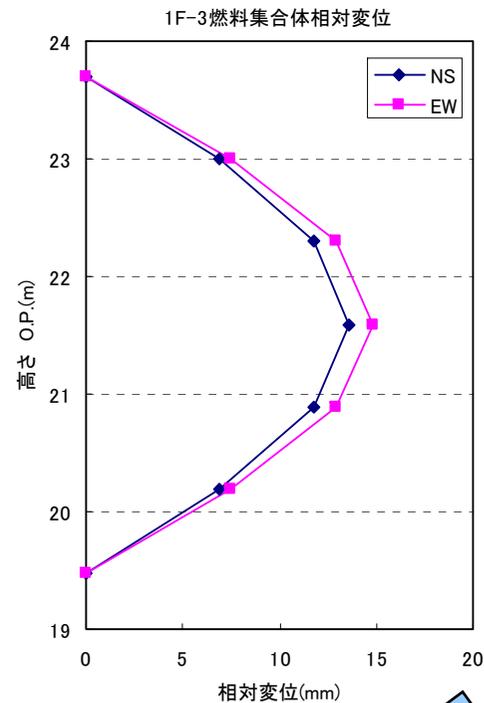


炉内構造物連成解析モデル

燃料集合体



燃料集合体の
相対変位を算出



地震時燃料相対変位



燃料集合体の地震時相対変位 (計算値) [mm]	確認済相対変位 [mm]
14.8	40.0

Ⅲ. 参考資料

(参考資料①) 入力地震動算定における一次元波動論の適用性について

【構造A2-2-4】P.18～P.27 【構図A5-2-1-1】:P.8～P.25

(参考資料②) 建屋の埋め込み状況について

【構造A18-2-1】P.8～P.9

(参考資料③) 側方地盤ばねの回転成分の考え方

【構造A5-3-1】P.3-1

(参考資料④) コンクリート強度の設定について

【構造A5-3-1】P.2-1～P.2-8 構造A8-2-2:P.4-1～P.4-12

(参考資料⑤) 建屋剛性の算定の考え方について

【構造A19-2-1】P.2～P.3

(参考資料⑥) モーダル減衰と地盤ばねの減衰定数について

【構造A8-2-2】:P.2-1～P.2-18

(参考資料⑦) 工認時の地震波を用いた検討について

【構造A8-2-2】:P.6-1～P.6-4

(参考資料⑧) 弾性設計用地震動 S_d の設定について

Ⅲ. 参考資料

(参考資料⑨)鉛直方向の拡幅率10%の適用性検討
【構造A19-2-1】P.4～P.10

(参考資料⑩)水平方向および鉛直方向の地震力の組合せ方法
【構造A7-2-3-1】P.参-1～P.参-3

(参考資料⑪)応答解析モデルに係る工認時との比較
【構造A19-2-3】P.7～P.12

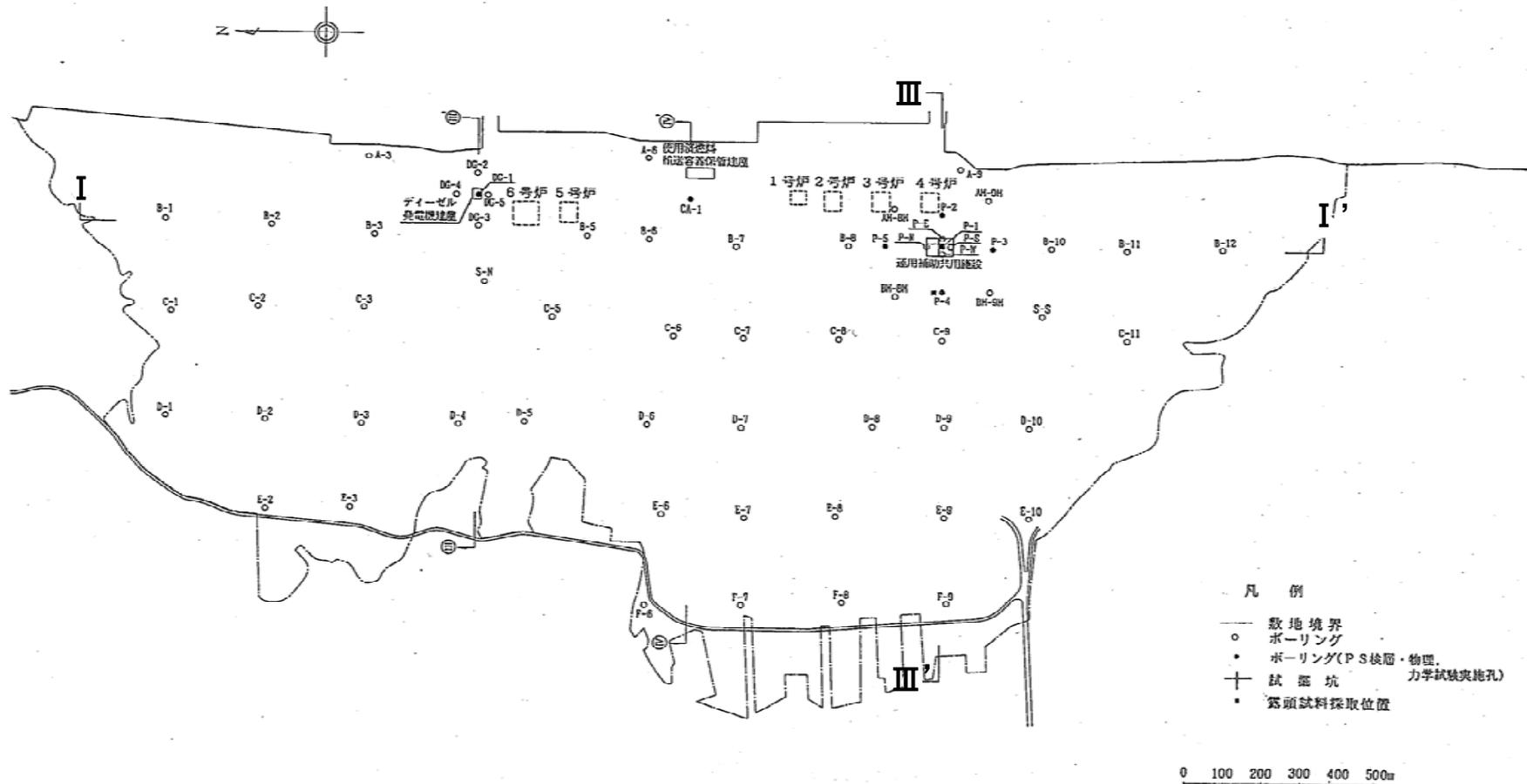
(参考資料⑫)機器・配管系における評価結果の比較(福島第一3号機、5号機)

(参考資料⑬)疲れ解析が必要な応答領域に達しているかの確認
【構造A19-2-3】P.15

(参考資料①) 入力地震動算定における一次元波動論の適用性について

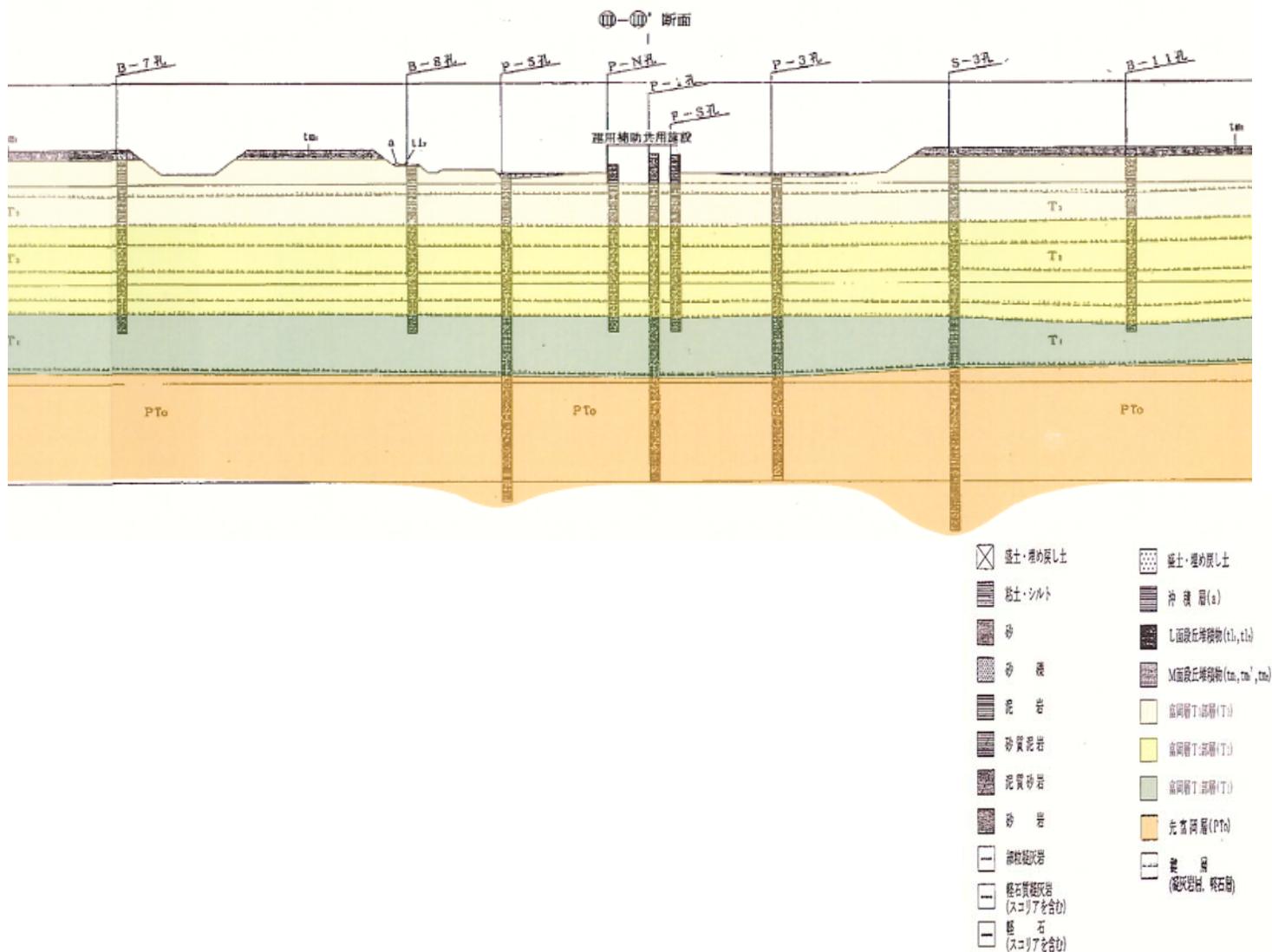
福島第一原子力発電所における解放基盤表面より上部の地質構造は、ほぼ水平な成層構造とみなせるため、速度構造を成層と仮定した地盤モデルを用いた一次元波動論による地震応答解析を行い、入力地震動を算定している。

参図①-1に敷地内調査位置図、参図①-2及び参図①-3に敷地内断面図を示す。



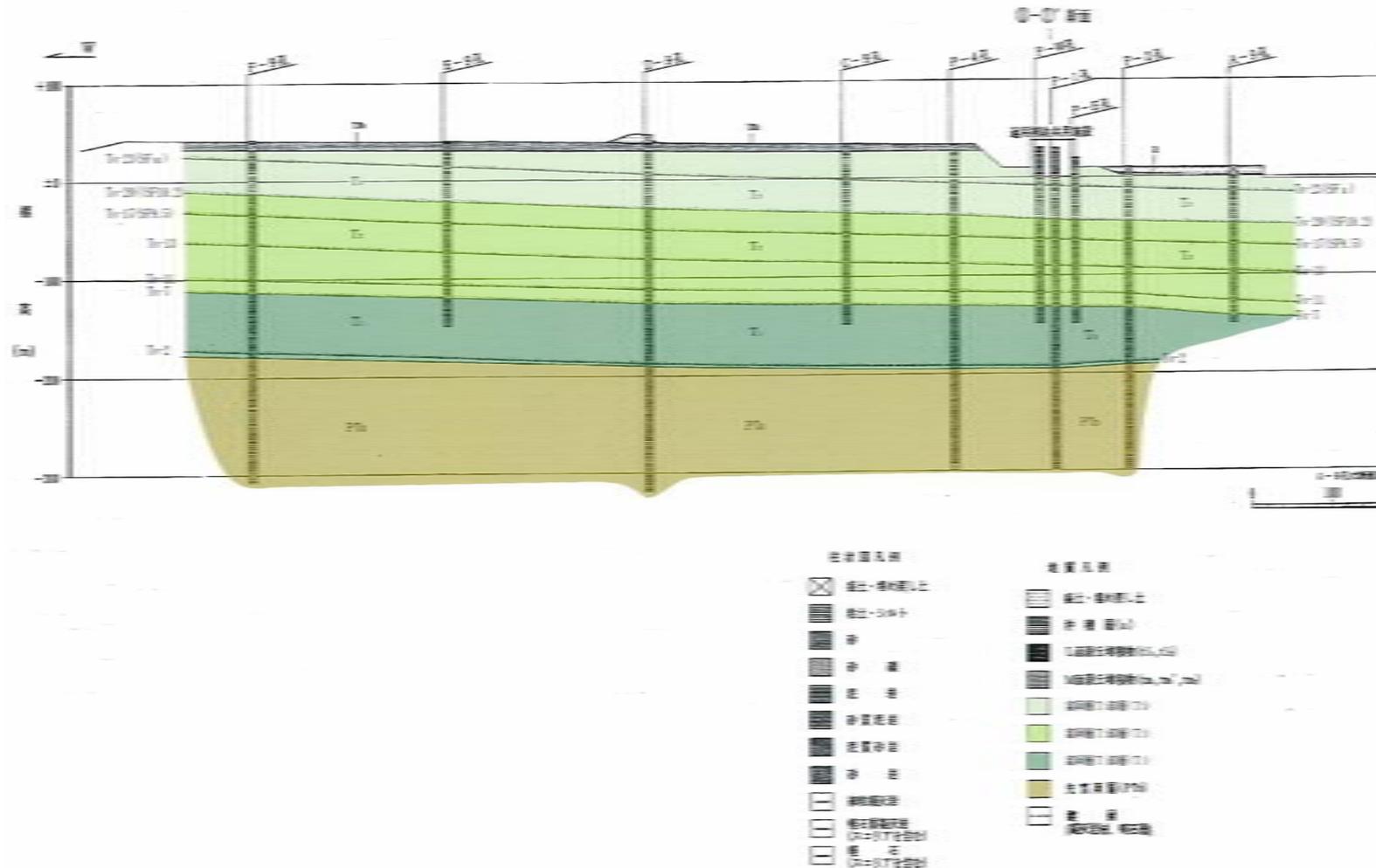
参図①-1 敷地内地質調査位置図

(参考資料①) 入力地震動算定における一次元波動論の適用性について



参図①-2 敷地内地質断面図 (I-I' 断面)

(参考資料①) 入力地震動算定における一次元波動論の適用性について



参図①-3 敷地内地質断面図 (Ⅲ-Ⅲ' 断面)

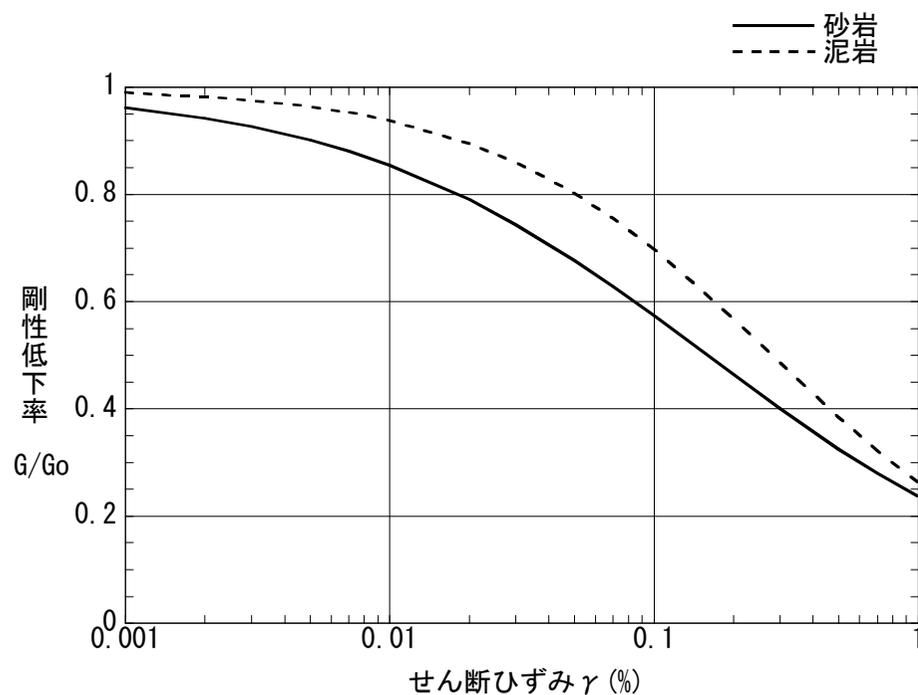
(参考資料①) 入力地震動算定における一次元波動論の適用性について

一次元波動論に用いた地盤モデルの諸元を参表①-1に、 $G/G_0 \sim \gamma$ 曲線及び $h \sim \gamma$ 曲線を参図①-4に示す。

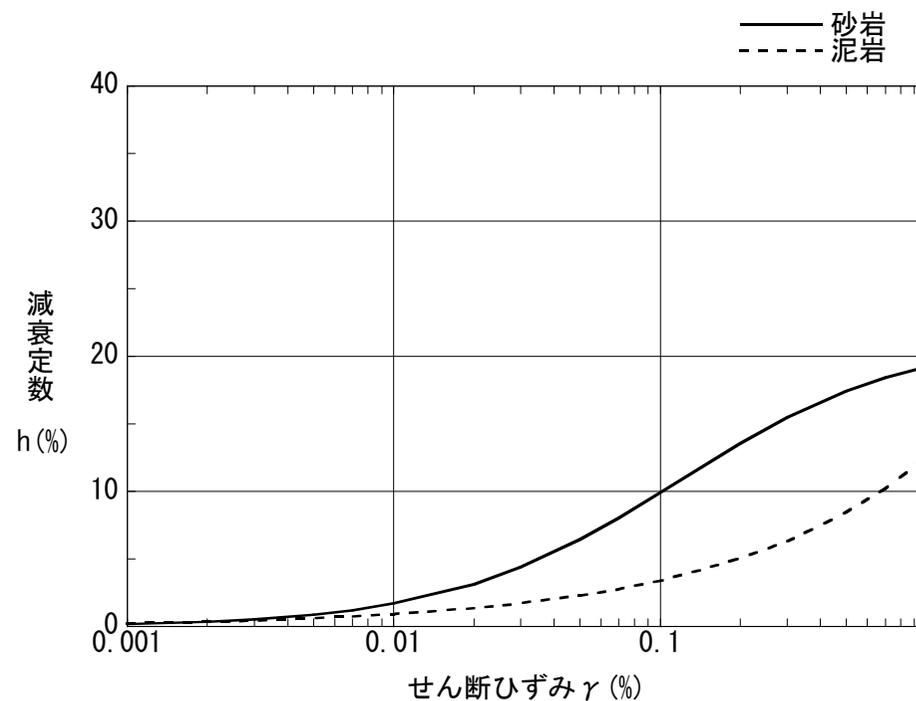
参表①-1 地盤モデルの諸元

標高 O. P. (m)	地質	せん断波 速度 V_s (m/s)	単位体 積重量 γ (kN/m ³)	ポア ソン 比 ν	初期せん断 弾性係数 G_0 ($\times 10^5$ kN/m ²)	剛性 低下率 G/G_0			せん断 弾性係数 G ($\times 10^5$ kN/m ²)			ヤング 係数 E ($\times 10^5$ kN/m ²)			剛性低下後 S波速度 V_s (m/s)			剛性低下後 P波速度 V_p (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	
10.0	砂岩	380	17.8	0.473	2.62	0.85	0.85	0.86	2.23	2.23	2.25	6.57	6.57	6.63	351	351	352	-	-	-	3	3	3	8.1
1.9																								
-10.0	泥岩	450	16.5	0.464	3.41	0.78	0.81	0.78	2.66	2.76	2.66	7.79	8.08	7.79	398	405	398	1530	1560	1530	3	3	3	11.9
-80.0		500	17.1	0.455	4.36				3.40	3.53	3.40	9.89	10.27	9.89	442	450	442	1540	1570	1540				70.0
-108.0		560	17.6	0.446	5.63				4.39	4.56	4.39	12.70	13.19	12.70	495	504	495	1580	1610	1580				28.0
-196.0		600	17.8	0.442	6.53				5.09	5.29	5.09	14.68	15.26	14.68	530	540	530	1640	1670	1640				88.0
-196.0	[解放基盤]	700	18.5	0.421	9.24	1.00	1.00	1.00	9.24	9.24	9.24	26.26	26.26	26.26	700	700	700	1890	1890	1890	-	-	-	-

(参考資料①) 入力地震動算定における一次元波動論の適用性について



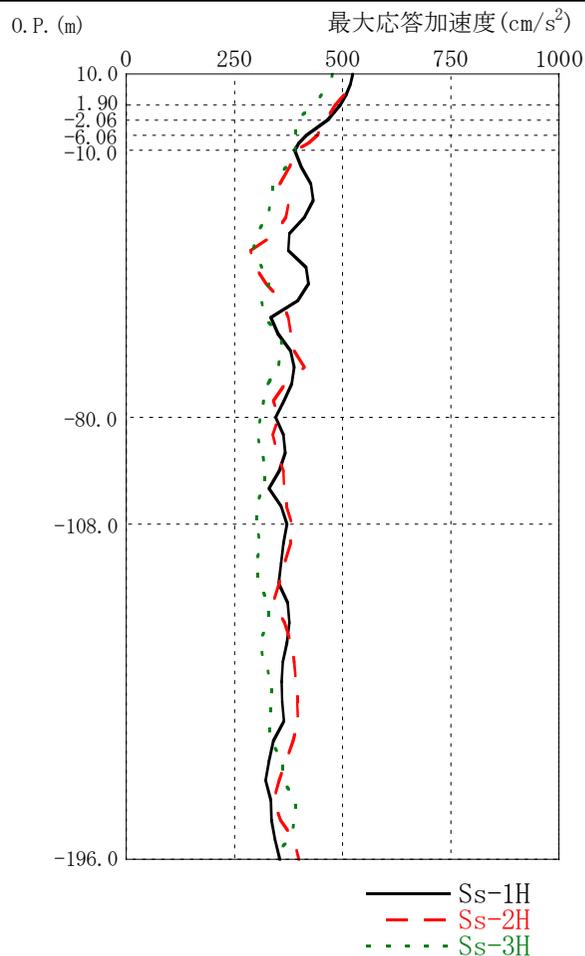
参図①-4(1) $G/G_0 \sim \gamma$ 曲線



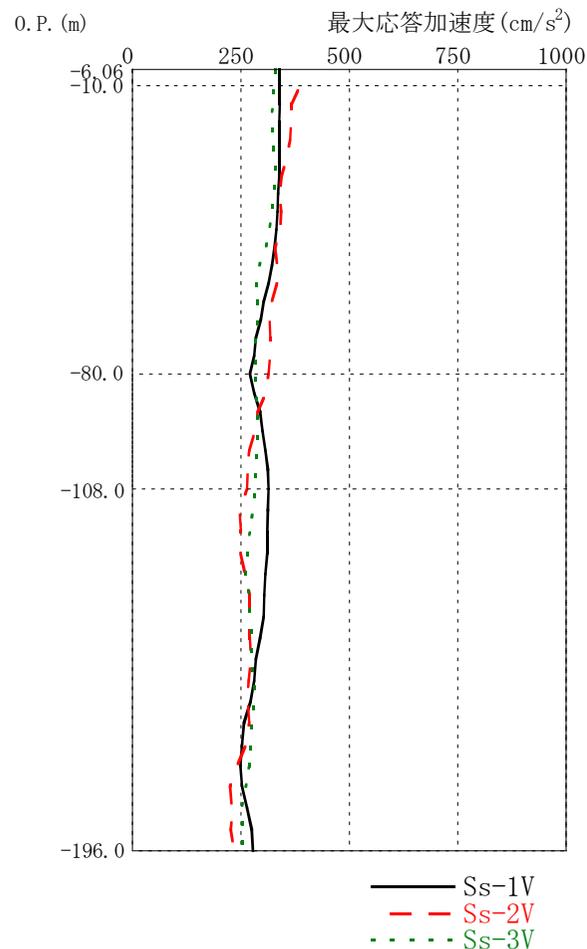
参図①-4(2) $h \sim \gamma$ 曲線

(参考資料①) 入力地震動算定における一次元波動論の適用性について

参表①-1の地盤モデルに基づき一次元波動論により算定した地盤の最大応答加速度分布を参図①-5に示す。



参図①-5 (1) 最大応答加速度分布 (水平方向)

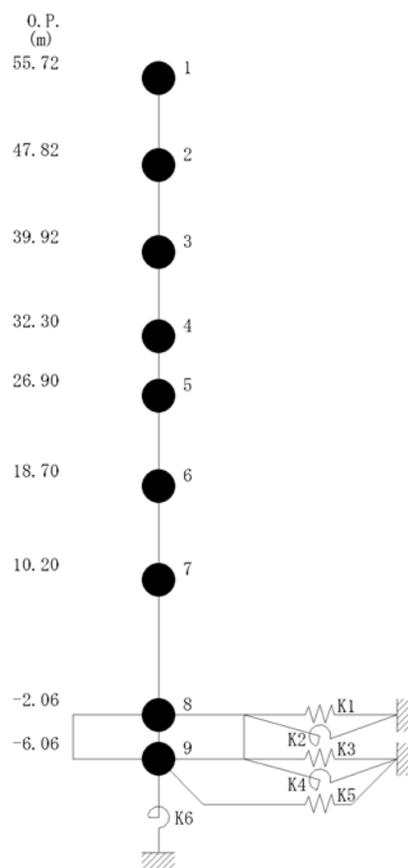


参図①-5 (2) 最大応答加速度分布 (鉛直方向)

(参考資料②) 建屋の埋め込み状況について

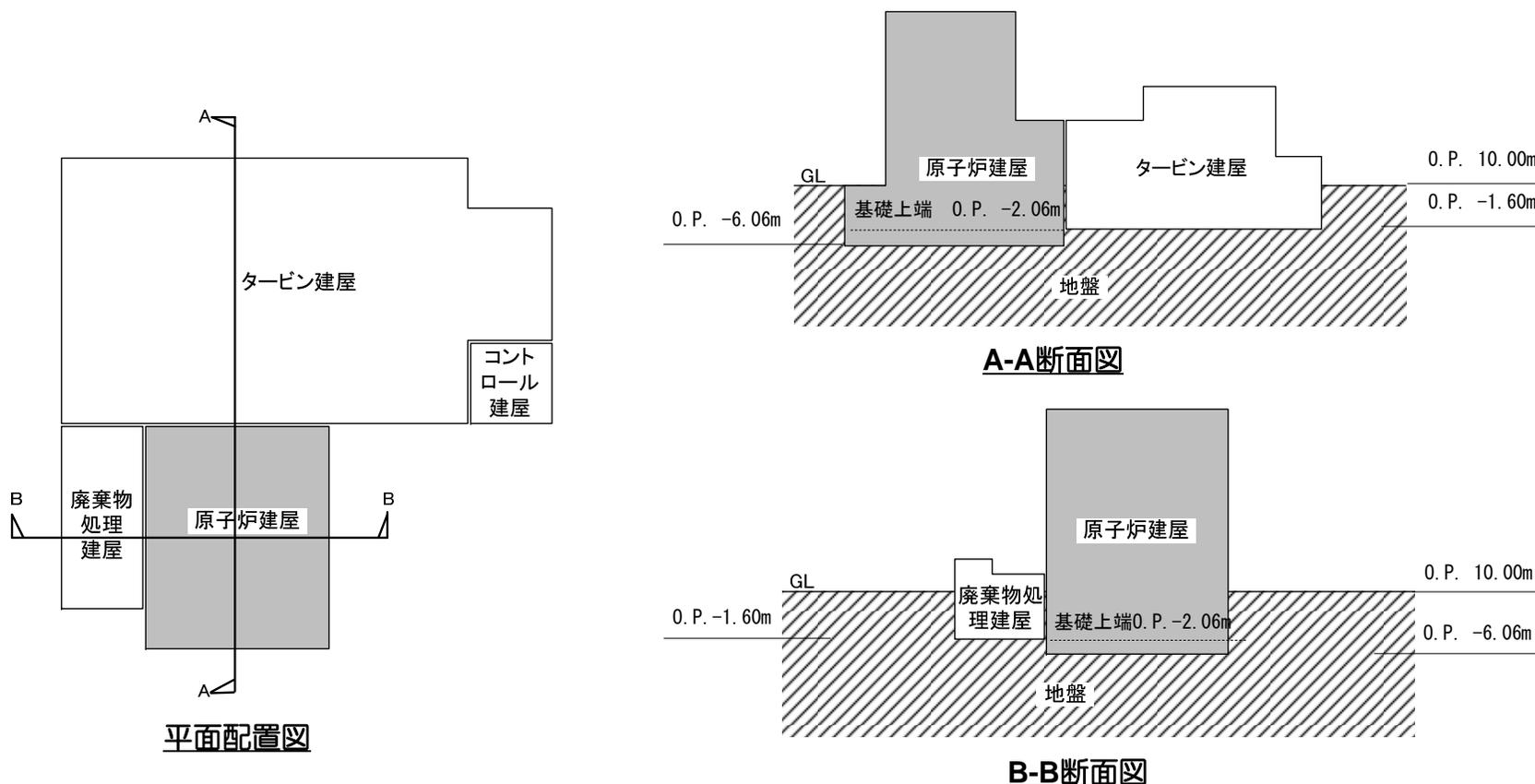
水平方向の地震応答解析モデルは、参図②-1に示すように、建屋を質点系とし地盤を等価なばねで評価した建屋-地盤連成モデルとしている。なお、建屋は曲げ変形とせん断変形をする質点系としてモデル化し、基礎版底面下の地盤は水平ばね及び回転ばねで置換している。

埋め込みについては、原子炉建屋の周辺状況を考慮し、基礎版側面について考慮している。



(参考資料②) 建屋の埋め込み状況について

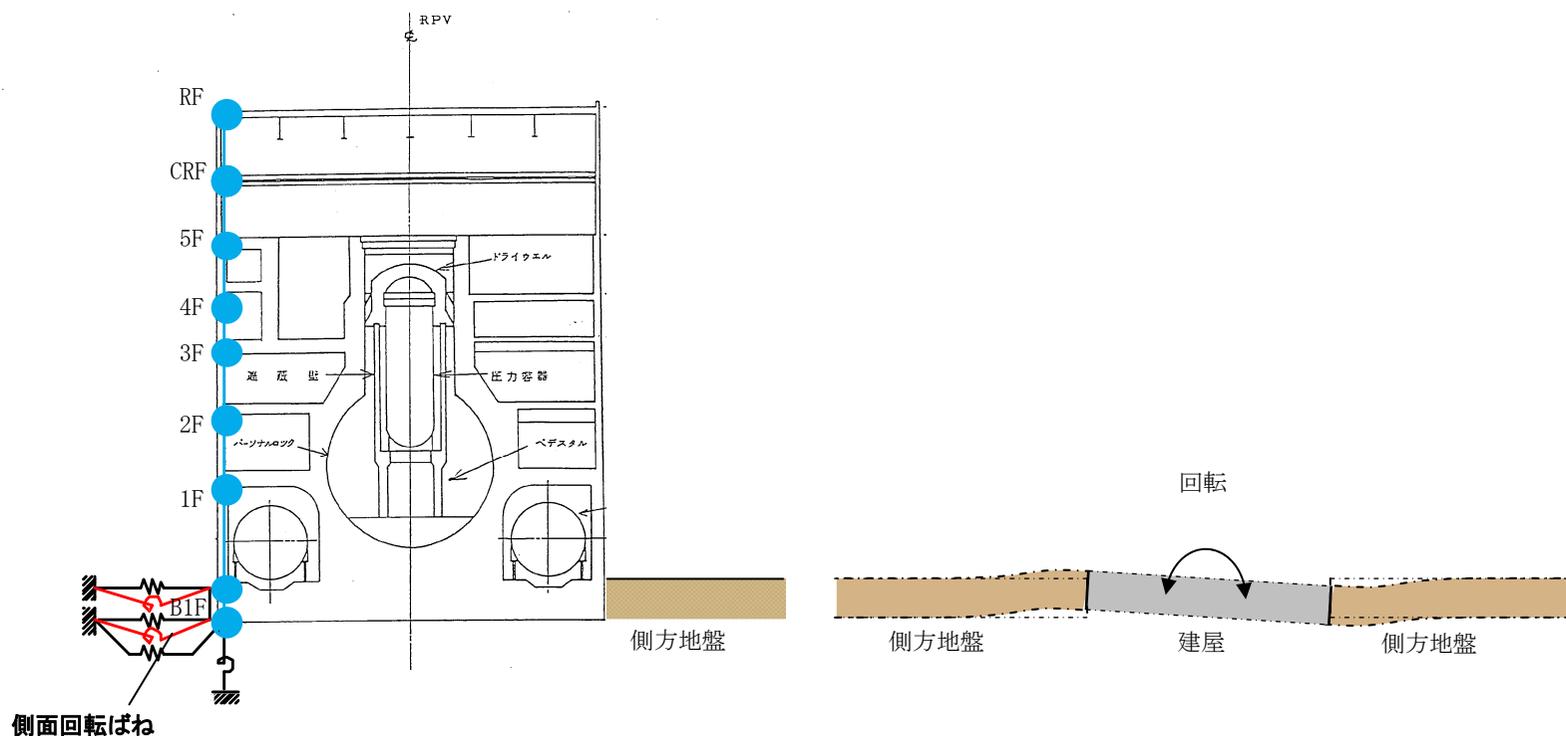
参図②-2に示すように、基礎版側面と地盤は密着（接地している割合100%）しており、変位の連続条件が成り立つと考えられるため、埋め込み部分の建屋側面の地盤はNOVAKの方法に基づき水平ばね及び回転ばねで考慮している。



参図②-2 原子炉建屋の周辺状況

(参考資料③) 側方地盤ばねの回転成分の考え方

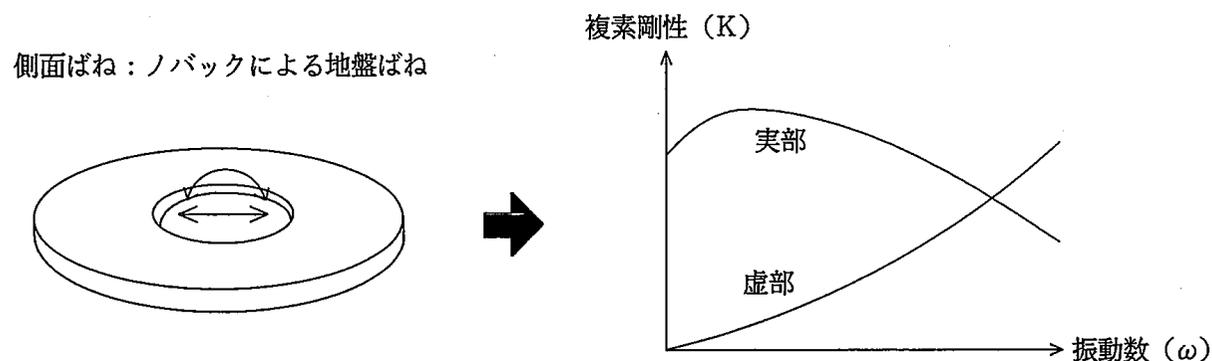
水平方向の地震応答解析モデルでは、埋込み部に側面回転ばねを考慮している（参図③-1）。これは、建屋の埋込み部の回転（ロッキング）変形に伴う側方地盤の抵抗（摩擦力）を評価する目的による。



参図③-1 地震応答解析モデル

(参考資料③) 側方地盤ばねの回転成分の考え方

建屋側面の地盤は、NOVAKの手法に基づいて参図③-2に示すような動的複素剛性として評価し、振動数に依存する実部（KR）と虚部（KI）から成る等価な水平ばね及び回転ばねを各床レベル毎に考慮する。



参図③-2 側面地盤ばねの評価

(参考資料④) コンクリート強度の設定について

■ コンクリート強度の設定根拠

- ・今回、解析に採用したコンクリートの実強度およびその設定根拠は福島第一原子力発電所5号機の耐震安全性評価と同じである。
- ・コンクリートの強度については、過去に原子力発電所内で実施された圧縮強度試験の結果から、一般に設計基準強度を上回るという知見が得られている。
- ・また、新潟県中越沖地震に対する柏崎刈羽原子力発電所の健全性評価においては、コンクリートの実強度を用いたシミュレーション解析を実施しており、より実状に近づけることで概ね地震観測記録を再現できるという知見も得られている。したがって、耐震安全性評価において、コンクリート実強度を用いることは、従来の評価実績および最近の知見の考慮であると考えている。

(参考資料④) コンクリート強度の設定について

解析において、実強度の設定にあたり使用した圧縮試験強度試験における試験体数を参表④-1に、圧縮強度試験一覧を参表④-2に示す。

参表④-1 圧縮強度試験試験における試験体数 (Fc=22.1N/mm²) 水平方向)

設計基準強度 F _c = 22.1N/mm ²	福島第一						福島第二	
	1号機	2号機	3号機	4号機	5号機	6号機	1号機	1/2号機 共用
原子炉建屋	37	22	21	39	33	15	11	-
タービン建屋	33	14	21	30	24	21	11	-
コントロール建屋	3	3	-	1	3	-	-	5
廃棄物処理建屋	6	3	-	3	3	-	-	5
チャコール建屋	6	-	-	-	-	-	-	-
計	373							

(参考資料④) コンクリート強度の設定について

参表④-2(1) 圧縮強度試験一覧 (Fc=22.1N/mm²)

号機	建屋名称	調査年	階	部位	方位	内外	試験体数	調査件名	
1号機	原子炉建屋	1988	1	外壁	西	-	1	社内調査研究	
			1	外壁	北	内側	1		
		1998	1	外壁	北	内側	1	建築設備点検	
			1	外壁	西	外側	1		
			1	外壁	北	内側	3		
		2001	1	外壁	西	外側	3	高経年化技術評価	
			1	RPV基礎	南	-	3		
		2005	1	大搬	南	内側	3	コンクリート健全性調査	
			3	外壁	東	外側	3		
		2006	1	MS室	東	内側	3	高経年化技術評価	
			3	外壁	東	内側	3		
			4	外壁	東	内側	3		
			1	外壁	西	内側	3		
			1	外壁	西	内側	3		
		タービン建屋	1998	1	外壁	北	内側	1	建築設備点検
	B1			外壁	東	内側	1		
	2001		1	外壁	北	内側	3	高経年化技術評価	
			1	外壁	東	外側	3		
	2006		2	T/G基礎	-	-	3	高経年化技術評価	
			2	T/G基礎	-	-	3		
			1	外壁	-	外側	3		
			B1	内壁	-	-	3		
			1	外壁	東	内側	3		
			1	外壁	北	内側	3		
	コントロール建屋	2006	1	外壁	東	内側	3	高経年化技術評価	
		廃棄物処理建屋	2006	1	外壁	北	内側	3	高経年化技術評価
			1	外壁	北	外側	3		
	チャコール建屋	2006	1	外壁	東	内側	3	高経年化技術評価	
			1	外壁	東	内側	3		
	2号機	原子炉建屋	1997	-	RPV基礎	北	-	2	社内調査研究
1				大搬	-	内側	1		
1998			1	外壁	北	内側	1	建築設備点検	
			1	外壁	西	外側	1		
			3	外壁	東	外側	3		
2005			1	外壁	西	外側	3	高経年化技術評価	
			4	外壁	西	内側	3		
			3	外壁	東	内側	3		
2005			1	大搬	北	内側	3	コンクリート健全性調査	
		2006	1	RPV基礎	-	-	2		高経年化技術評価
タービン建屋		1997	-	T/G基礎	-	-	3	社内調査研究	
			B1	外壁	東	内側	1		
		1998	1	外壁	北	外側	1	高経年化技術評価	
			1	外壁	南	外側	3		
		2005	1	外壁	南	内側	3	高経年化技術評価	
	2		T/G基礎	-	-	3			
コントロール建屋	2005	1	外壁	東	内側	3	高経年化技術評価		
廃棄物処理建屋	2005	1	外壁	西	外側	3	高経年化技術評価		

参表④-2(2) 圧縮強度試験一覧 (Fc=22.1N/mm²)

号機	建屋名称	調査年	階	部位	方位	内外	試験体数	調査件名
3号機	原子炉建屋	1999	1	外壁	北	内側	1	建築設備点検
			1	大搬	北	内側	1	
			1	外壁	南	外側	1	
		2000	B2	内壁	-	-	3	高経年化技術評価
			3	外壁	東	外側	3	
			1	外壁	北	内側	3	
		2002	3	外壁	東	外側	3	高経年化技術評価
			1	RPV基礎	-	-	3	
		タービン建屋	2005	1	外壁	西	内側	3
	B1			外壁	北	内側	1	
	1			外壁	北	内側	1	
	2000		B2	内壁	-	-	3	高経年化技術評価
			1	外壁	東	外側	3	
			1	外壁	西	外側	3	
	2002	1	外壁	北	内側	3	高経年化技術評価	
1		外壁	東	外側	3			
2		T/G基礎	-	-	3			
4号機	原子炉建屋	1999	B1	外壁	北	内側	1	建築設備点検
			1	大搬	北	内側	1	
			1	外壁	西	外側	1	
		2000	B2	内壁	-	-	3	高経年化技術評価
			3	外壁	東	外側	3	
			1	外壁	北	内側	3	
		2002	3	外壁	東	外側	3	高経年化技術評価
			1	RPV基礎	-	-	3	
			2005	1	外壁	西	内側	
	タービン建屋	2006	1	MS室	-	-	3	高経年化技術評価
			2	外壁	東	内側	3	
			1	外壁	西	外側	3	
		2007	1	外壁	南	外側	3	高経年化技術評価
			1	外壁	北	外側	3	
			2	RPV基礎	-	-	3	
タービン建屋	1999	1	外壁	東	内側	1	建築設備点検	
		B1	外壁	北	内側	1		
		1	外壁	東	外側	1		
	2000	1	内壁	-	-	3	高経年化技術評価	
		1	外壁	東	外側	3		
		1	外壁	西	外側	3		
	2002	1	外壁	東	内側	3	高経年化技術評価	
		1	外壁	東	外側	3		
		2	T/G基礎	-	-	3		
2006	B1	内壁	-	-	3	高経年化技術評価		
	1	外壁	西	外側	3			
	1	外壁	南	外側	3			
コントロール建屋	2006	1	外壁	東	内側	1	高経年化技術評価	
廃棄物処理建屋	2006	1	外壁	北	外側	3	高経年化技術評価	

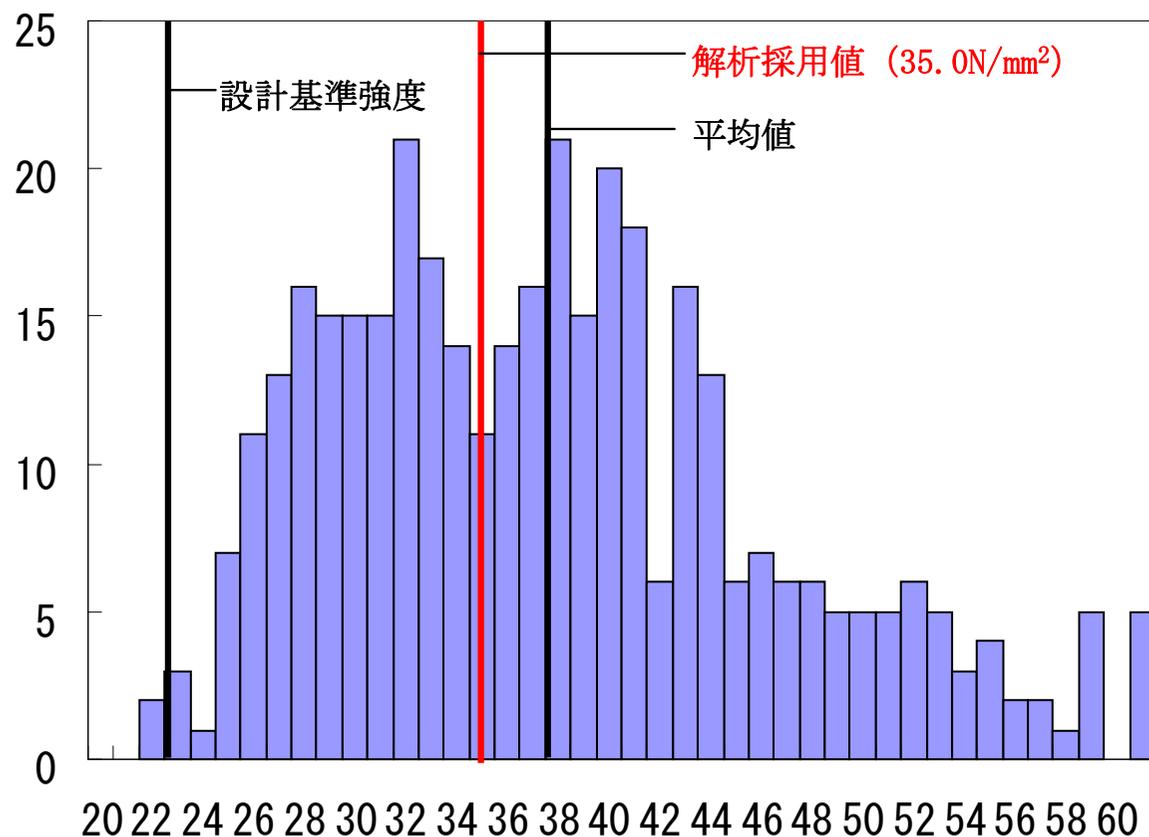
(参考資料④) コンクリート強度の設定について

参表④-2(3) 圧縮強度試験一覧 (Fc=22.1N/mm²)

号機	建屋名称	調査年	階	部位	方位	内外	試験体数	調査件名	
福島第一 原子力発電所	5号機	2000	B2	内壁	-	-	3	高経年化技術評価	
			3	外壁	東	外側	3		
		2003	3	外壁	東	内側	3	高経年化技術評価	
			1	外壁	西	外側	3		
			3	外壁	東	外側	3		
			1	RPV基礎	-	-	3		
		2005	1	外壁	東	内側	3	コンクリート健全性調査	
			1	外壁	西	外側	3		
		2006	1	外壁	南	外側	3	高経年化技術評価	
			1	外壁	北	外側	3		
	2007	2	RPV基礎	-	-	3	高経年化技術評価		
	タービン建屋	2000	B1	内壁	-	-	3	高経年化技術評価	
			1	外壁	東	外側	3		
		2003	1	外壁	西	外側	3	高経年化技術評価	
			1	外壁	東	内側	3		
			1	外壁	東	外側	3		
			2	T/G基礎	-	-	3		
2006		1	外壁	西	外側	3	高経年化技術評価		
		1	外壁	南	外側	3			
コントロール建屋	2003	1	外壁	西	外側	3	高経年化技術評価		
廃棄物処理建屋	2003	1	外壁	北	外側	3	高経年化技術評価		
6号機	原子炉建屋	2000	B2	内壁	-	-	3	高経年化技術評価	
			3	外壁	東	外側	3		
		2005	1	外壁	西	内側	3	コンクリート健全性調査	
			3	外壁	東	内側	3		
	2006	3	外壁	東	外側	3	高経年化技術評価		
		3	外壁	東	外側	3			
	タービン建屋	2000	1	内壁	-	-	3	高経年化技術評価	
			1	外壁	東	外側	3		
			1	外壁	西	外側	3		
			2	T/G基礎	-	-	3		
2006		2	T/G基礎	-	-	3	高経年化技術評価		
		1	外壁	東	内側	3			
福島第二 原子力発電所	1号機	1992	1	外壁	西	内側	1	建築設備点検	
			1	外壁	南	外側	1		
		2001	B1	内壁	-	-	3	建築設備点検	
			1	外壁	南	外側	3		
		2005	1	内壁	-	-	3	コンクリート健全性調査	
			1	外壁	南	内側	1		
	タービン建屋	1992	1	外壁	東	外側	1	建築設備点検	
			1	外壁	東	外側	1		
		2001	B1	内壁	-	-	3	建築設備点検	
			1	外壁	南	外側	3		
	1・2号機	コントロール建屋	1992	-	外壁	西	外側	1	建築設備点検
				-	外壁	西	内側	1	
廃棄物処理建屋		2002	1	外壁	南	外側	3	建築設備点検	
			1	内壁	-	-	1		
		1995	1	外壁	北	外側	1	建築設備点検	
			1	外壁	東	外側	3		
					計	373			

(参考資料④) コンクリート強度の設定について

参図④-1にコンクリート圧縮強度試験結果の頻度分布図に平均値、設計基準強度および解析採用値を示す。なお、解析採用値は圧縮強度のばらつきを考慮し、平均値をやや下回る値とした。



参図④-1 コンクリート圧縮強度頻度分布図 (設計強度22.1N/mm²)

(参考資料④)コンクリート強度の設定について

■設計基準強度と実強度より算出した剛性を用いた固有値解析結果及びモード図の比較について

地盤-建屋地震応答解析に用いる建屋モデルについて、建屋剛性に実強度と設計基準強度を用いた場合の固有値解析結果を比較する。

コンクリート物性値を参表④-1に、固有値解析結果の比較を参表④-2に固有モード図の比較を参図④-1～参図④-3に示す。

参表④-1 コンクリート物性値

解析ケース	強度 Fc (N/mm ²)	ヤング係数 E (N/mm ²)	ポアソン比 ν
実強度	35.0	2.57×10^4	0.2
設計基準強度	22.1	2.06×10^4	0.167

(参考資料④) コンクリート強度の設定について (固有値解析結果)

参表④-2 固有値解析結果の比較
(NS方向、Ss-1H)

次数	実強度			設計基準強度			備考
	固有周期 (s)	固有振動数 (Hz)	刺激係数*	固有周期 (s)	固有振動数 (Hz)	刺激係数*	
1	0.396	2.53	1.755	0.401	2.49	1.772	地盤建屋連成一次
2	0.177	5.64	-0.921	0.179	5.57	-0.970	
3	0.078	12.85	0.219	0.083	12.02	0.262	

(EW方向、Ss-1H)

次数	実強度			設計基準強度			備考
	固有周期 (s)	固有振動数 (Hz)	刺激係数*	固有周期 (s)	固有振動数 (Hz)	刺激係数*	
1	0.377	2.65	1.774	0.382	2.62	1.802	地盤建屋連成一次
2	0.175	5.72	-0.980	0.178	5.63	-1.052	
3	0.089	11.26	0.225	0.094	10.58	0.278	

(鉛直方向、Ss-1V)

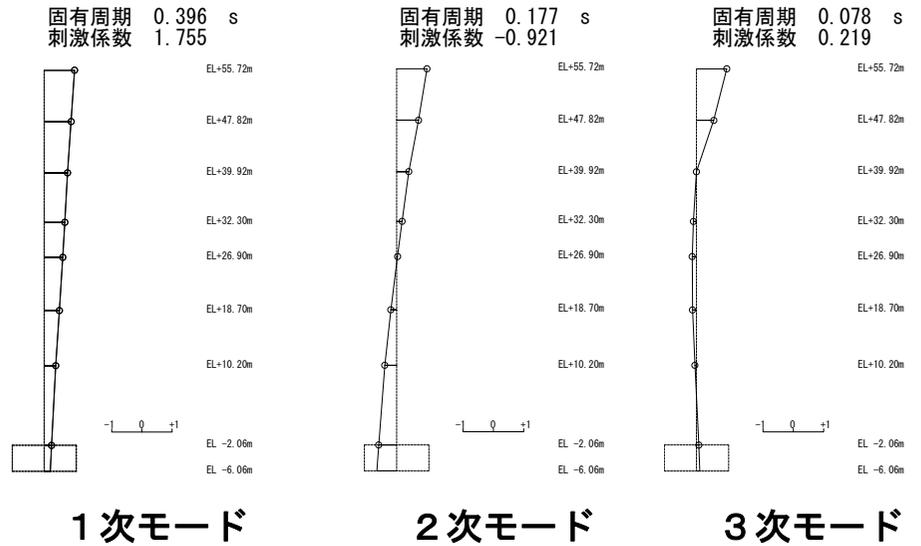
次数	実強度			設計基準強度			備考
	固有周期 (s)	固有振動数 (Hz)	刺激係数*	固有周期 (s)	固有振動数 (Hz)	刺激係数*	
1	0.292	3.43	3.474	0.298	3.36	3.322	屋根トラス一次
2	0.227	4.41	-2.571	0.228	4.39	-2.424	地盤建屋連成一次
3	0.091	11.00	0.108	0.091	10.97	0.116	屋根トラス二次

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。

実強度および設計基準強度における固有値解析結果はほぼ同等となっている。

(参考資料④) コンクリート強度の設定について (固有モード図 NS方向)

(実強度)

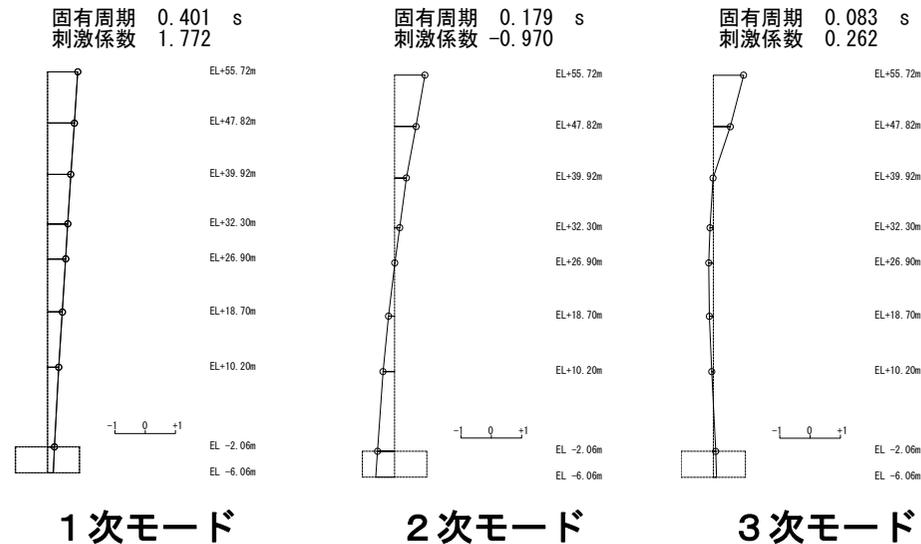


1次モード

2次モード

3次モード

(設計基準強度)



1次モード

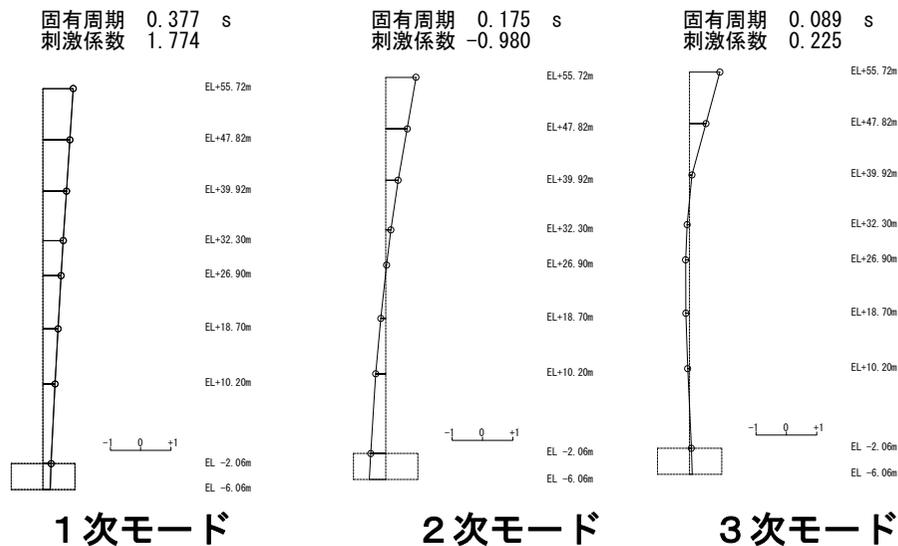
2次モード

3次モード

実強度および設計基準強度とも、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おり、固有モードはほぼ同等となっている。

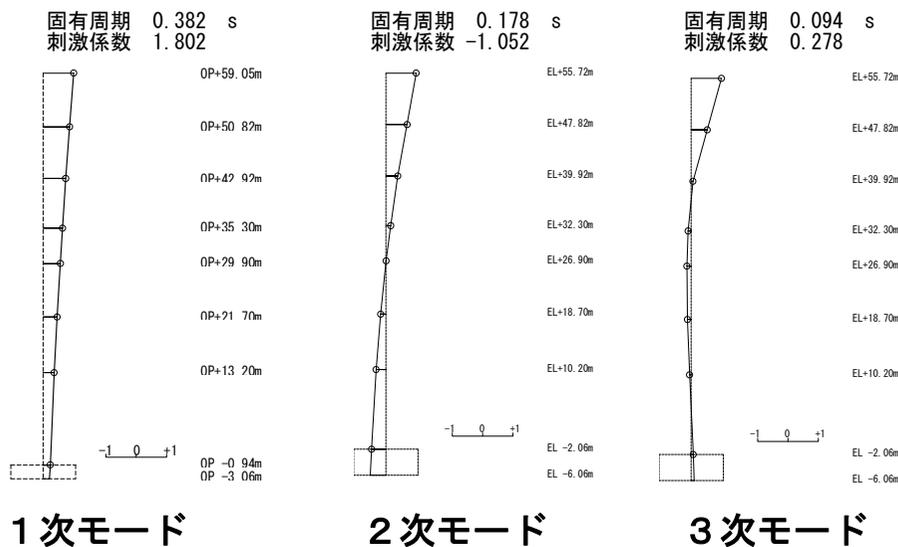
(参考資料④) コンクリート強度の設定について (固有モード図 EW方向)

(実強度)



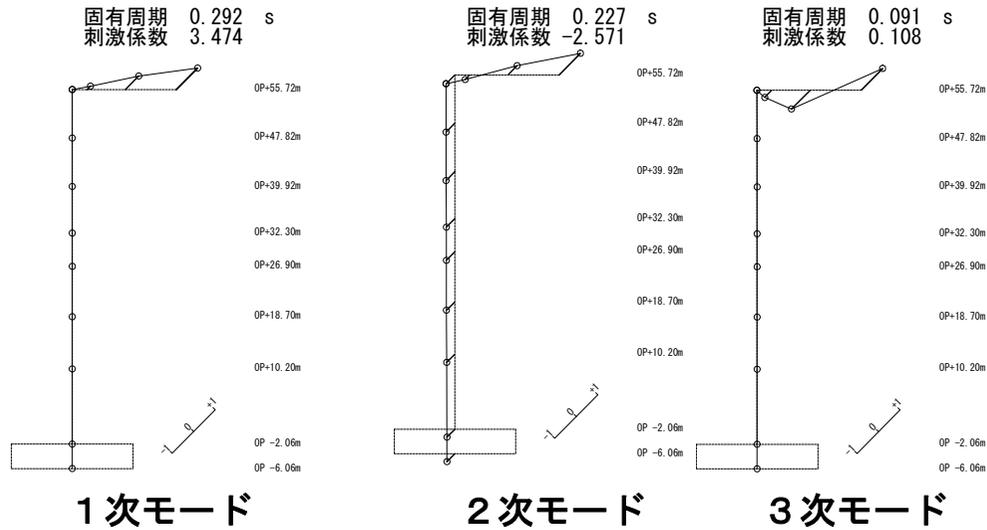
実強度および設計基準強度とも、1次が地盤建屋連成のスウェイモード、2次が地盤建屋連成のロッキングモード、3次が建屋単独のモードとなっており、固有モードはほぼ同等となっている。

(設計基準強度)



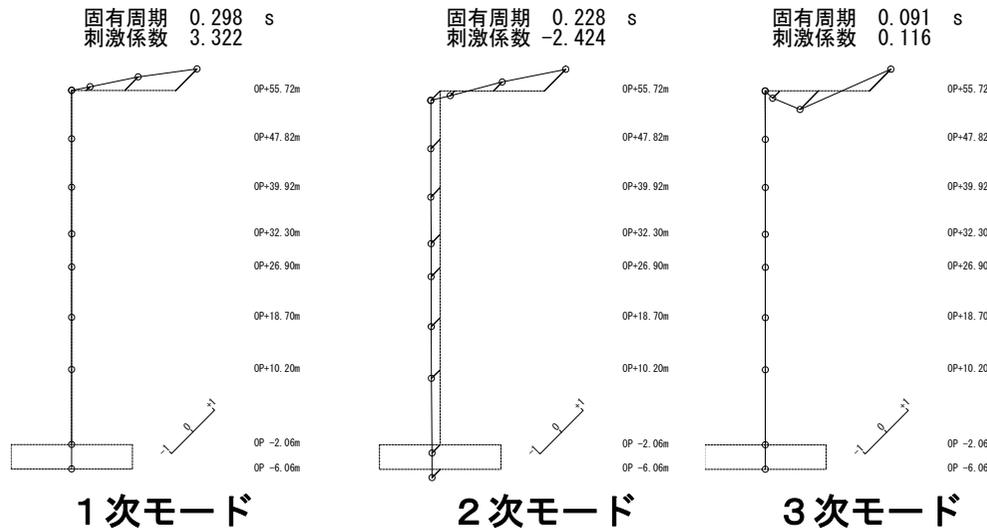
(参考資料④) コンクリート強度の設定について (固有モード図 鉛直方向)

(実強度)



実強度および設計基準強度とも、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おり、固有モードはほぼ同等となっている。

(設計基準強度)

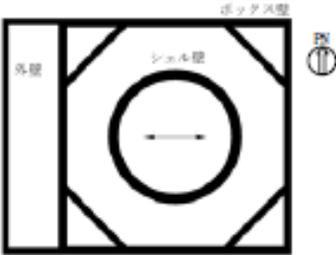
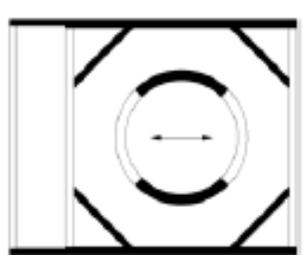
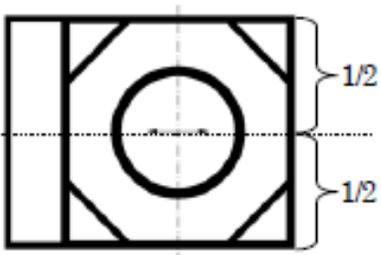
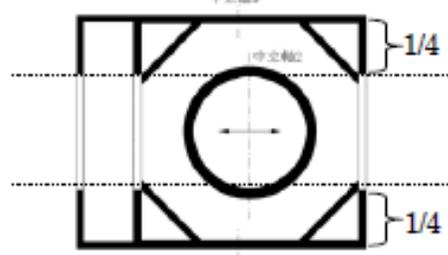


参図④-3 固有モード図 (鉛直方向, Ss-1V)

(参考資料⑤) 建屋剛性の算定の考え方について

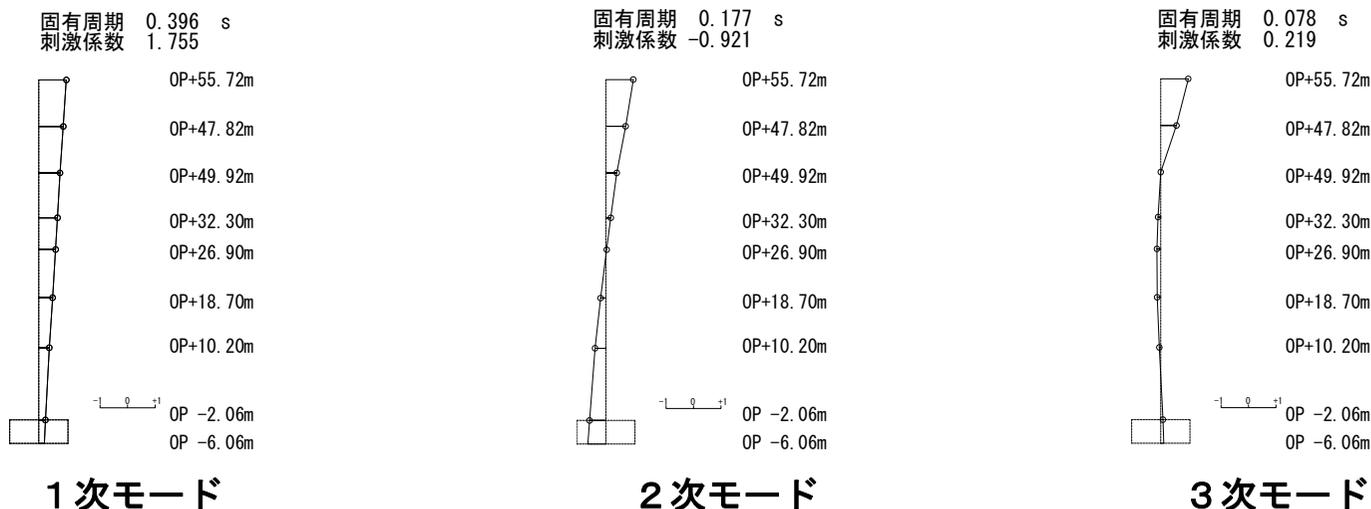
福島第一原子力発電所3号機原子炉建屋の工認モデルと、バックチェックモデルの建屋剛性算定の考え方の概念を参表⑤に示す。

参表⑤ 建屋剛性の算定の考え方(概念図)

	工認モデル	バックチェックモデル
As	 <p>耐震要素の 全断面積の1/2</p>	 <p>地震方向の耐震要素の せん断断面積の和</p>
I	 <p>有効フランジ幅 1/2 中立軸：炉心位置 (ボク上部は中心位置)</p>	 <p>有効フランジ幅 1/4 中立軸：耐震要素毎に算定</p>

(注) ←→は地震方向を示す。

(参考資料⑥) モーダル減衰と地盤ばねの減衰定数について (水平)



参図⑥ -1 原子炉建屋 固有モード (NS方向, Ss-1H)

参表⑥ -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	0.396	2.53	1.755	15.85	地盤建屋連成一次
2	0.177	5.64	-0.921	32.79	
3	0.078	12.85	0.219	8.36	

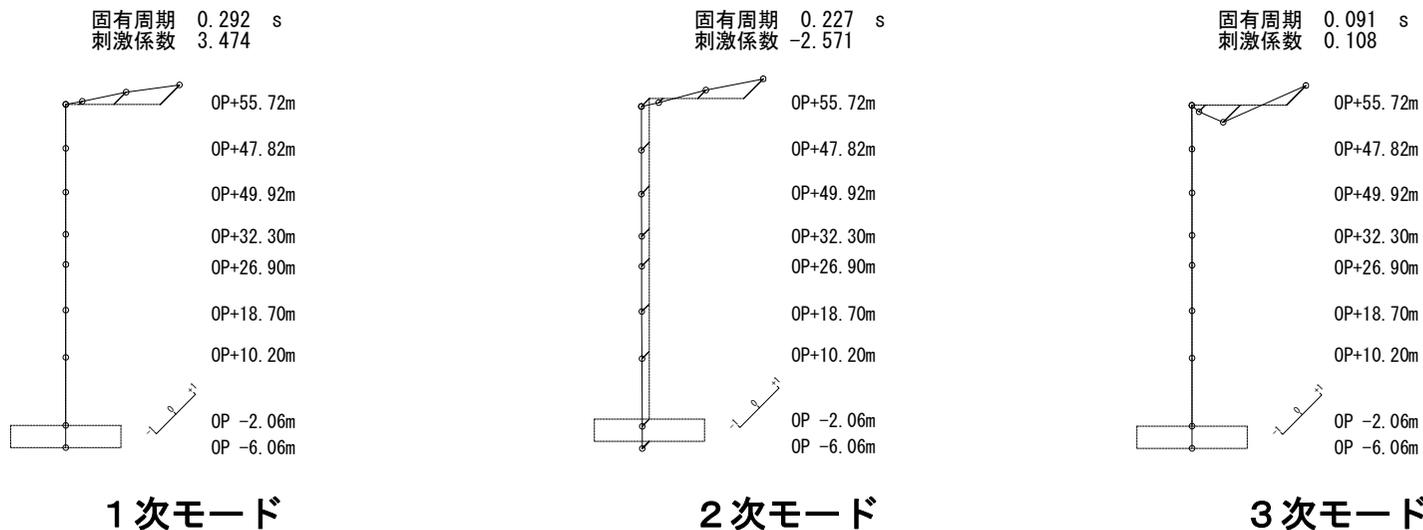
注*: 各モードごとに固有ベクトルの最大値を1に基準化して得られる刺激係数を示す。

参表⑥ -2 モーダル減衰定数及び算定に用いた数値 (NS方向, Ss-1H)

1F3			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%	16.3%	0.8%	5.0%	15.6%	0.8%	5.0%	89.7%	4.5%	
地盤ばね	O.P.-2.06	側面	並進	59.4%	2.0%	1.2%	65.7%	2.0%	1.3%	68.5%	0.0%	0.0%
			回転	37.6%	1.7%	0.6%	53.9%	0.9%	0.5%	63.3%	0.3%	0.2%
		O.P.-6.06	並進	59.4%	1.4%	0.8%	65.7%	2.4%	1.6%	68.5%	0.1%	0.1%
	回転		37.6%	1.6%	0.6%	53.9%	0.9%	0.5%	63.3%	0.3%	0.2%	
	O.P.-6.06	底面	並進	27.1%	32.7%	8.9%	45.2%	55.0%	24.9%	58.9%	2.1%	1.3%
			回転	6.5%	44.3%	2.9%	14.3%	23.3%	3.3%	29.1%	7.4%	2.2%
合計(モーダル減衰定数)					15.8%			32.8%			8.4%	

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⑥-1及び参表⑥-2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⑥) モーダル減衰と地盤ばねの減衰定数について (鉛直)



参図⑥ -2 原子炉建屋 固有モード (鉛直方向, Ss-1V)

参表⑥ -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)

参表⑥ -4 モーダル減衰定数及び算定に用いた数値 (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	0.292	3.43	3.474	3.61	屋根トラス一次
2	0.227	4.41	-2.571	44.30	地盤建屋連成一次
3	0.091	11.00	0.108	2.13	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。

1F3	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
屋根	2.0%	71.2%	1.4%	2.0%	1.7%	0.0%	2.0%	96.2%	1.9%
建屋	5.0%	26.8%	1.3%	5.0%	4.9%	0.2%	5.0%	3.8%	0.2%
底面地盤ばね	41.7%	2.0%	0.8%	47.1%	93.4%	44.0%	60.9%	0.0%	0.0%
合計(モーダル減衰定数)			3.6%			44.3%			2.1%

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⑥-3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⑦) 工認時の地震波を用いた検討について

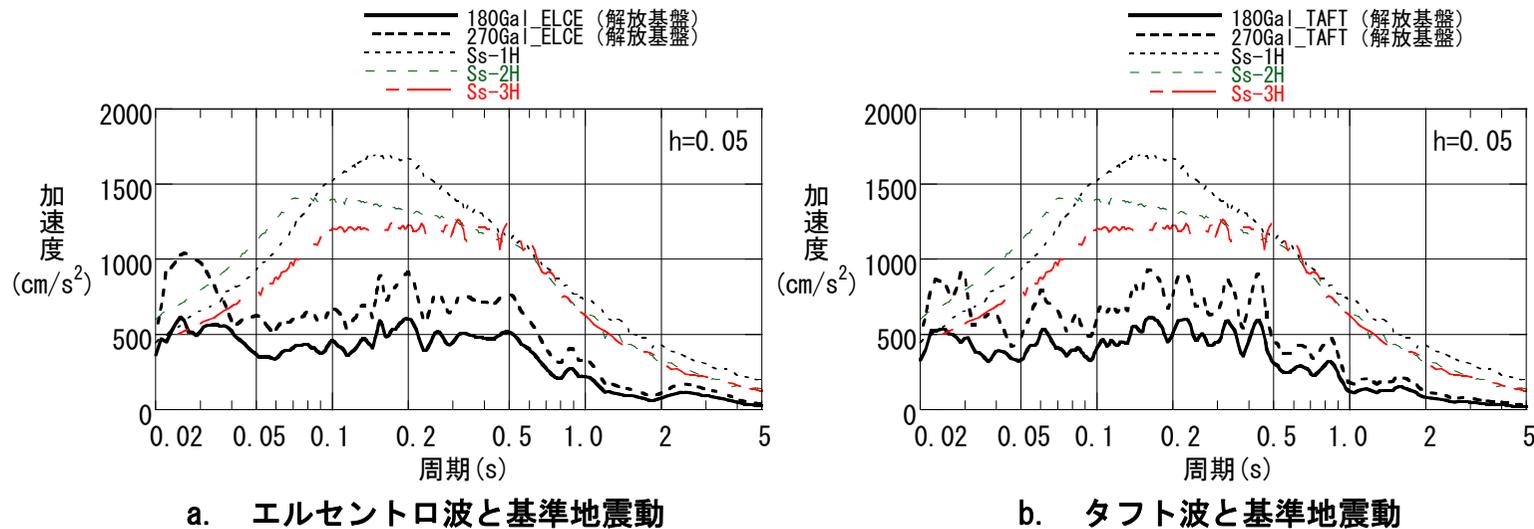
バックチェックモデルを用い、工認時の地震波（最大加速度を180Galに基準化したエルセントロ波とタフト波（以下、180Gal既往波という。）および270Galに基準化したエルセントロ波とタフト波（以下、270Gal既往波という。））を入力とした地震応答解析を行い、基準地震動 S_s によるバックチェックの応答結果と比較を行うとともに、工認時の応答結果と比較し、モデルの違いによる影響を確認する。

※工認時用いた180Gal既往波が S_1 相当であることを考慮し、参考として S_2 相当として270Gal既往波についても検討を行う。

(参考資料⑦) 工認時の地震波を用いた検討について

■ 解放基盤表面での180Gal既往波及び270Gal既往波と基準地震動Ssとの比較

基準地震動Ssと、180Gal既往波及び270Gal既往波を解放基盤表面上まで引き下げた地震動の応答スペクトルを参図⑦-1に示す。図より、基準地震動Ssの方が、建屋の主要周期帯において180Gal既往波及び270Gal既往波を解放基盤表面上まで引き下げた地震動より地震動レベルが大きい。

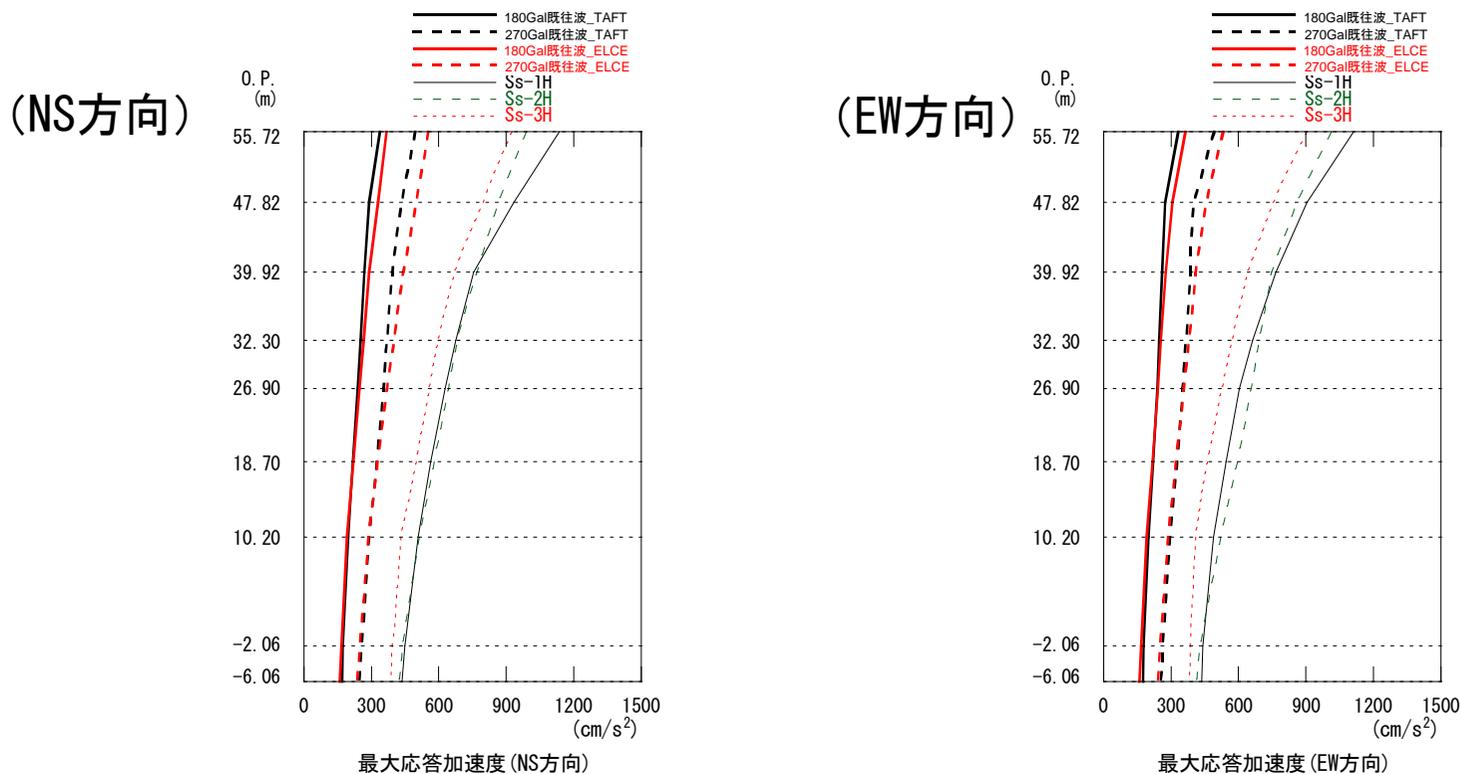


参図⑦-1 既往波(解放基盤表面)と基準地震動の加速度応答スペクトル (h=0.05)

(参考資料⑦) 工認時の地震波を用いた検討について

■ 180Gal 既往波および270Gal 既往波をバックチェックモデルに入力した際の応答結果とバックチェックにおける応答結果の比較

参図⑦-2に180Gal 既往波及び270Gal 既往波をバックチェックモデルに入力した際の最大応答加速度とバックチェックにおける最大応答加速度を比較して示す。図より、バックチェックの応答結果に比べ、180Gal 既往波及び270Gal 既往波を用いた解析結果のいずれも最大応答加速度が小さくなっている。これより、「最新の知見を取り入れた建屋モデル」とすることで、基準地震動Ssと180Gal 既往波及び270Gal 既往波の地震動レベルとの大小関係が応答結果とよく対応している。



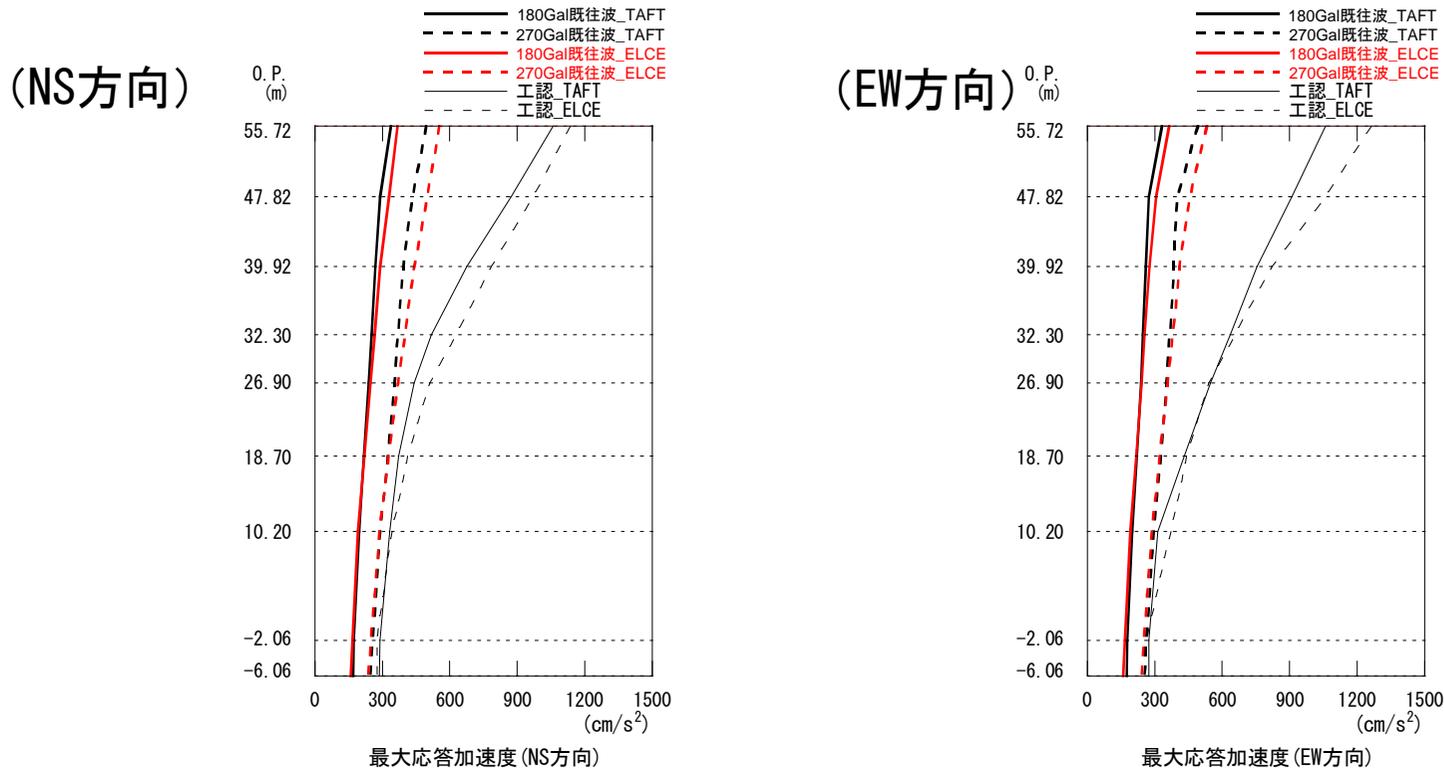
参図⑦-2 最大応答加速度の比較

(参考資料⑦) 工認時の地震波を用いた検討について

■ 180Gal 既往波および270Gal 既往波をバックチェックモデルに入力した際の応答結果と工認時の応答結果の比較

参図⑦-3に180Gal 既往波及び270Gal 既往波をバックチェックモデルに入力した際の最大応答加速度と工認時の最大応答加速度を比較して示す。図より、工認時（エルセントロ波及びタフト波）に比べ、180Gal 既往波及び270Gal 既往波を用いた解析結果の方が、最大応答加速度が小さくなっている。これより、工認時のモデルと「最新の知見を取り入れた建屋モデル」とでは、同じ地震動であっても、モデルの設定方法や入力方法が異なることにより応答結果に違いがあらわれている。

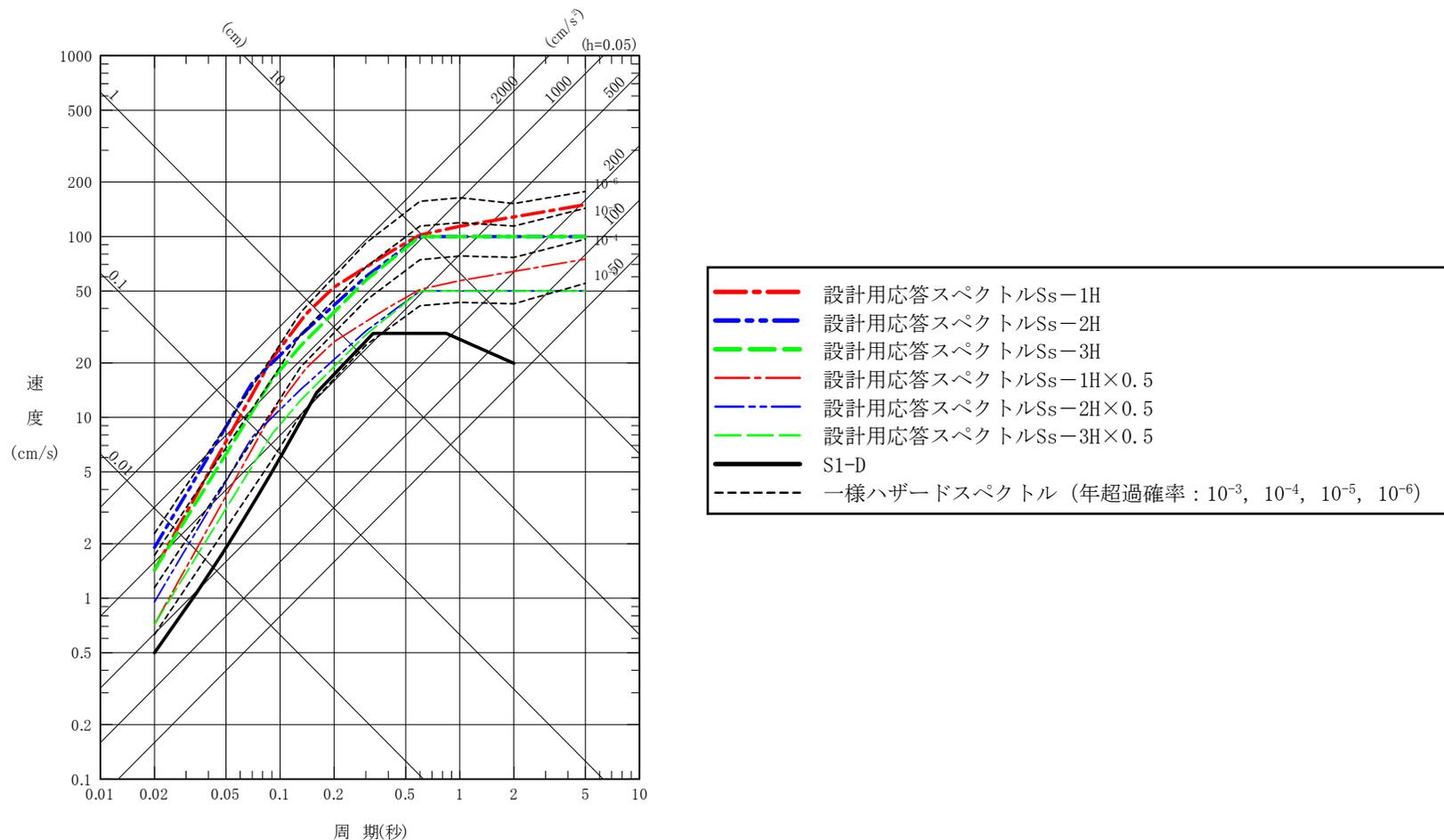
したがって、今回の耐震安全性評価と工認時とでは、建屋モデルの設定方法とその入力方法が異なることにより応答結果に違いがあらわれたものと考えられる。



参図⑦-3 最大応答加速度の比較

(参考資料⑧) 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 S_1 (最大加速度振幅180 cm/s^2) の応答スペクトルを下回らないよう配慮し設定した。

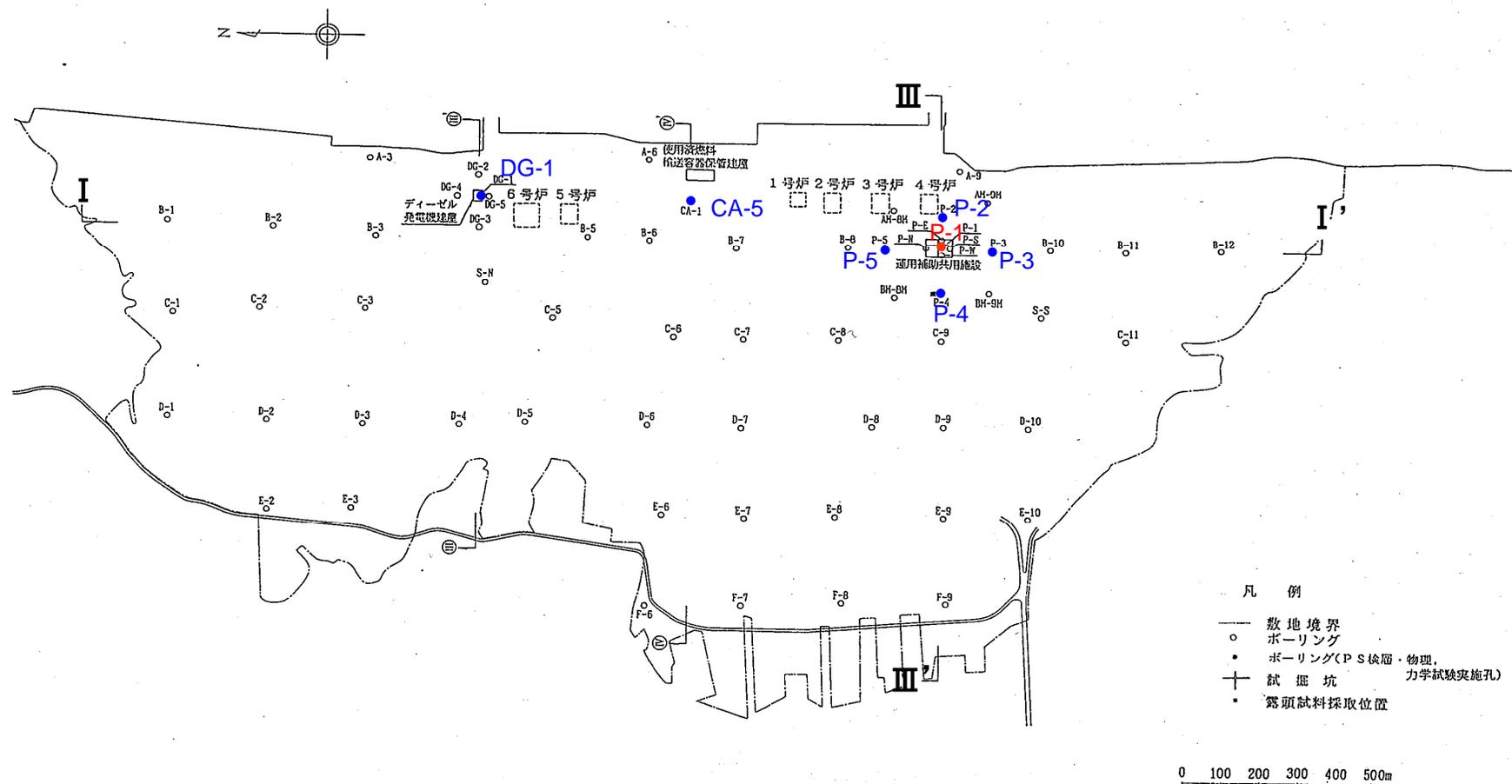


参図⑧ 弾性設計用地震動 S_d の年超過確率

(参考資料⑨) 鉛直方向の拡幅率10%の適用性検討

■ 地盤剛性の変動幅

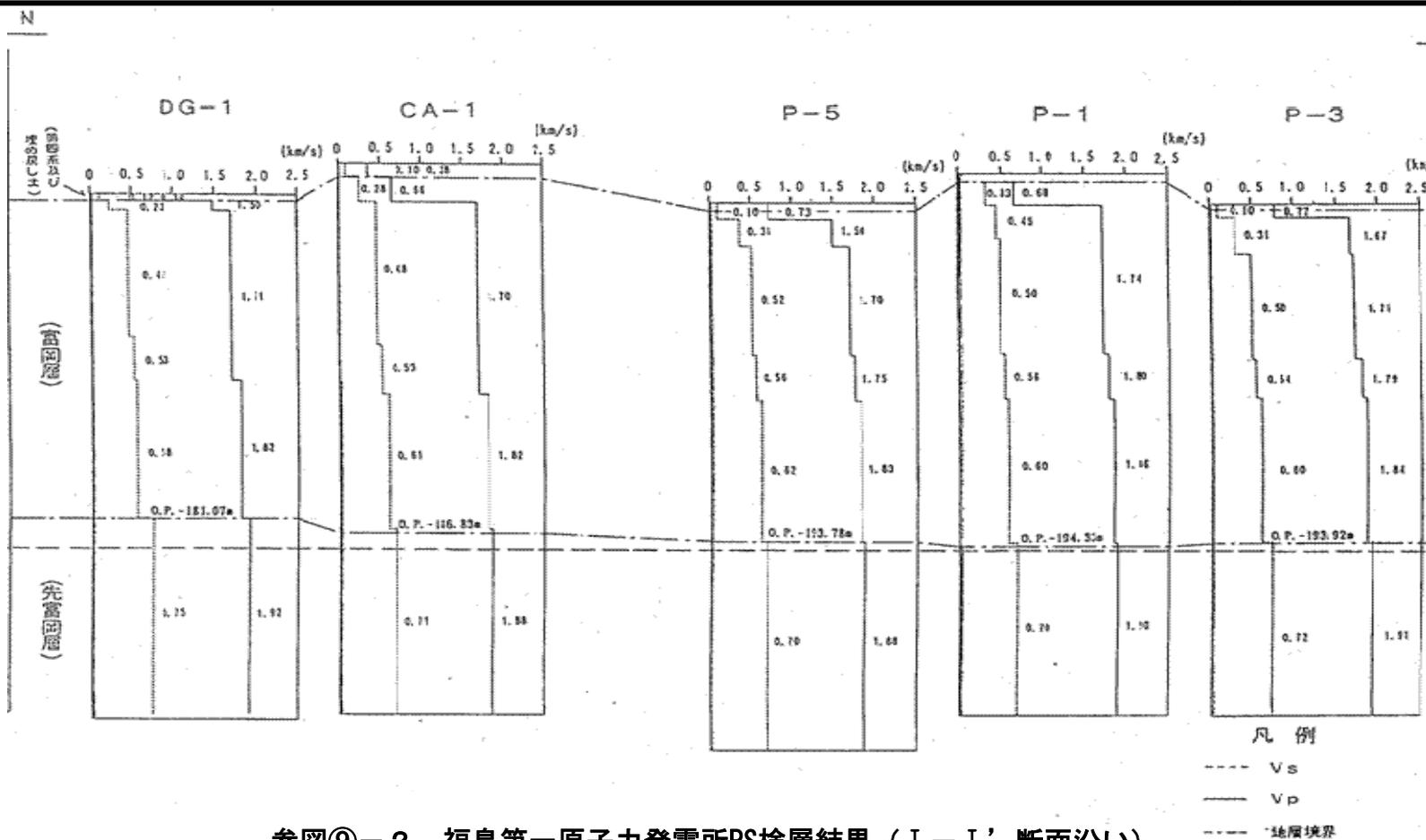
福島第一原子力発電所3号機原子炉建屋の検討用地盤モデルは、参図⑨-1の敷地内地質調査位置図に示す運用補助共用施設(P-1)のPS検層により得られた弾性波速度に基づき設定されている。



参図⑨-1 福島第一原子力発電所 敷地内地質調査位置図

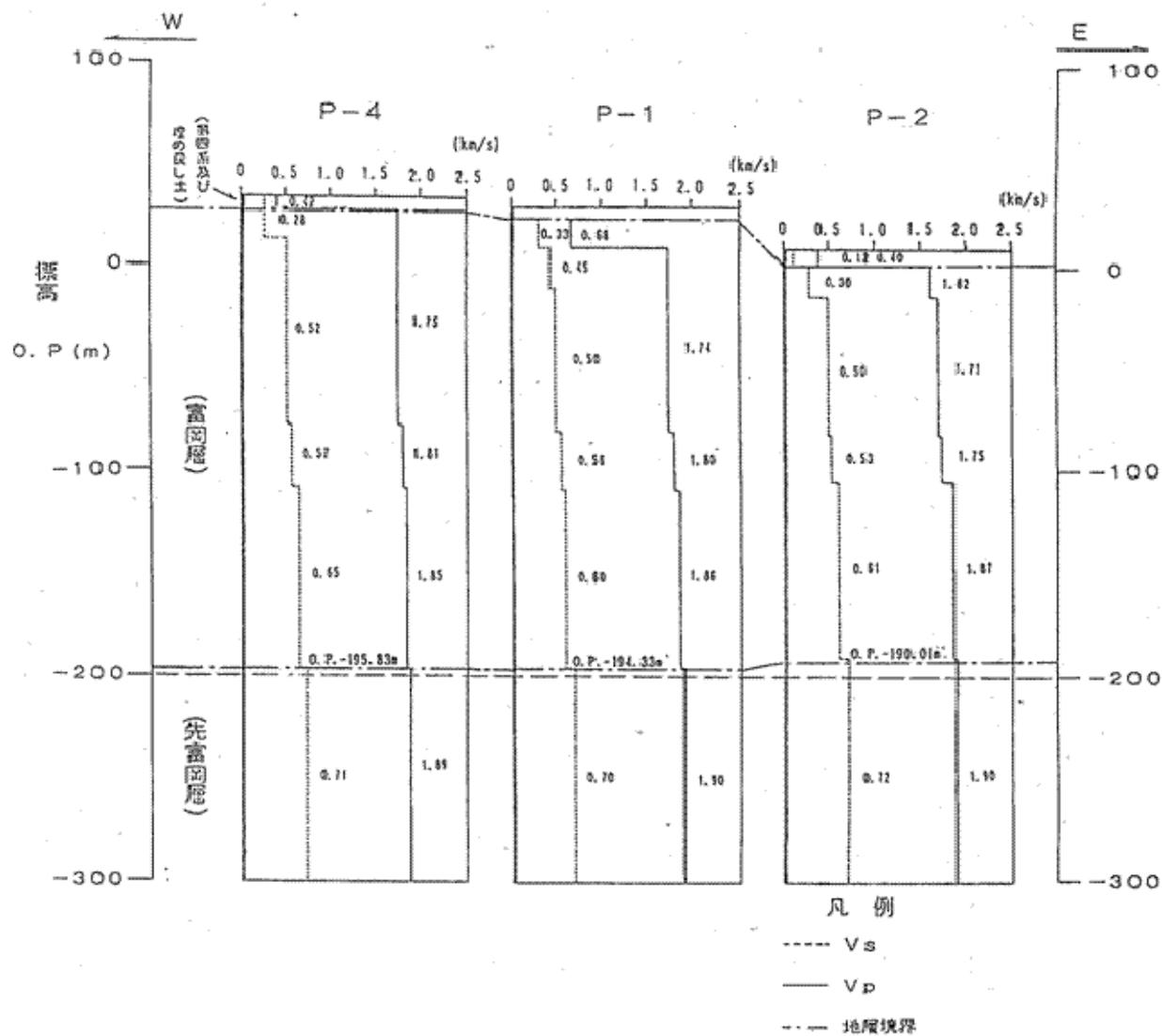
(参考資料⑨) 鉛直方向の拡幅率10%の適用性検討

参図⑨-2及び参図⑨-3図に示す福島第一原子力発電所の原子炉設置変更許可申請時（1号，2号，3号，4号及び6号原子炉施設の変更 平成5年4月）の地質調査結果である7孔（DG-1，CA-1，P-1，P-2，P-3，P-4，P-5）のPS検層結果に基づき各層のS波速度及びせん断弾性係数について変動係数を算定した。



参図⑨-2 福島第一原子力発電所PS検層結果 (I-I' 断面沿い)

(参考資料⑨) 鉛直方向の拡幅率10%の適用性検討



参図⑮-3 福島第一原子力発電所PS検層結果 (Ⅲ-Ⅲ' 断面沿い)

(参考資料⑨) 鉛直方向の拡幅率10%の適用性検討

参表⑨-1 PS検層結果に基づく各層のS波速度の変動係数の算定

	S波速度 Vs (m/s)											P-1に対する 変動係数(%)	
	DG-1	CA-1	P-1	P-2	P-3	P-4	P-5	7孔平均	標準偏差	-σ	+σ	マイナス側	プラス側
O.P.-6.06m~O.P.-80.0m	476	482	497	479	464	521	501	489	19	469	508	-5.6	2.1
O.P.-80.0m以深	546	533	560	539	534	570	557	549	14	534	563	-4.6	0.5
	606	618	600	615	600	650	619	615	17	598	633	-0.3	5.4
	750	710	700	720	720	709	700	716	17	698	733	-0.2	4.7

参表⑨-2 PS検層結果に基づく各層のせん断弾性係数の変動係数の算定

	γt (kN/m ³)	せん断弾性係数 Go (kN/m ²)											P-1に対する 変動係数(%)	
		DG-1	CA-1	P-1	P-2	P-3	P-4	P-5	7孔平均	標準偏差	-σ	+σ	マイナス側	プラス側
O.P.-6.06m~ O.P.-80.0m	17.1	395000	405000	431000	399000	376000	474000	438000	416857	32962	383895	449819	-10.9	4.4
O.P.-80.0m以深	17.6	535000	510000	563000	522000	512000	583000	557000	540286	27986	512299	568272	-9.0	0.9
	17.8	666000	694000	653000	687000	653000	767000	695000	687857	39287	648570	727144	-0.7	11.4
	18.5	1061000	951000	924000	978000	978000	948000	924000	966286	47240	919046	1013525	-0.5	9.7

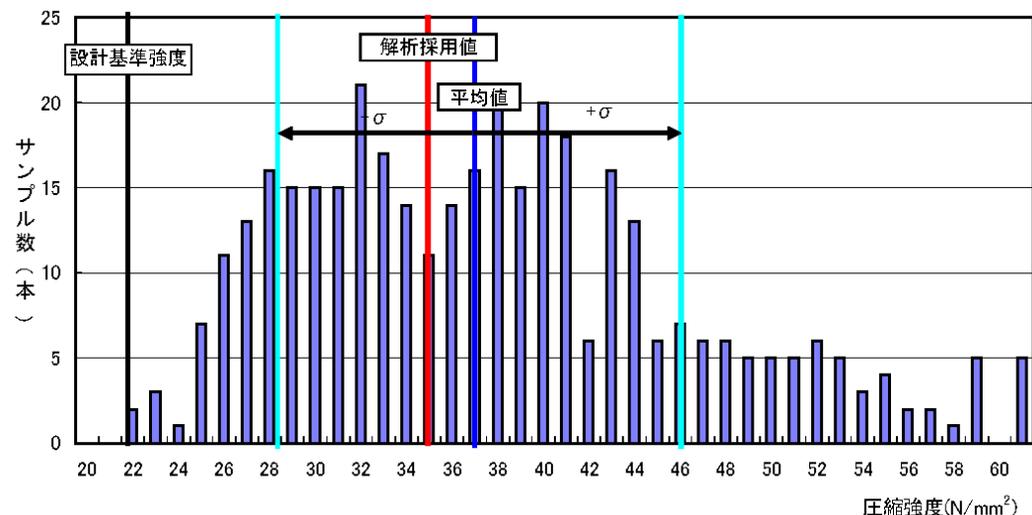
参表⑨-3 地盤剛性の変動幅

層区分	地盤剛性の変動幅
富岡層 O. P. -6. 06m~O. P. -80. 0m	-15% ~ 5%
富岡層 O. P. -80. 0m以深	-10% ~ +15%

(参考資料⑨) 鉛直方向の拡幅率10%の適用性検討

■ 建屋剛性の変動幅

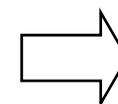
解析で採用した実強度を設定した際に使用したコンクリート圧縮強度の頻度分布を参図⑨-4に、分析結果を参表⑨-4に示す。参表⑨-4より建屋剛性の変動幅は-7%~15%の範囲である。



参図⑨-4 コンクリート圧縮強度の頻度分布図 (Fc=22.1 N/mm²)

参表⑨-4 コンクリート圧縮強度試験データ及びヤング係数の分析結果 (Fc=22.1 N/mm²)

	強度	ヤング係数
設計基準強度	22.1 N/mm ²	—
平均圧縮強度	37.4 N/mm ²	—
標準偏差	8.8 N/mm ²	—
解析採用値	35.0 N/mm ²	E = 2.57 × 10 ⁴ N/mm ²
平均値 - 標準偏差	28.6 N/mm ²	E = 2.40 × 10 ⁴ N/mm ² 解析採用値に対する変動係数：-6.5%
平均値 + 標準偏差	46.2 N/mm ²	E = 2.94 × 10 ⁴ N/mm ² 解析採用値に対する変動係数：14.5%



建屋剛性の変動幅
-7%~15%

(参考資料⑨) 鉛直方向の拡幅率10%の適用性検討

これらの変動幅は、(社)日本電気協会の耐震設計分科会資料*「鉛直方向の設計用床応答スペクトルの拡幅率」に示される床応答スペクトルを±10%拡幅することによりカバーできる地盤剛性および建屋剛性の変動幅(それぞれ±50%, ±30%)の範囲内である。

*:(社)日本電気協会「参考資料4.7 鉛直方向の設計用床応答スペクトルの拡幅率」, 第29回耐震設計分科会資料No. 29-4-5-7, 平成20年1月18日

参表⑨-5 地盤剛性の変動幅

層区分	地盤剛性の変動幅
富岡層 O.P. -6.06m~O.P. -80.0m	-15% ~ 5%
富岡層 O.P. -80.0m以深	-10% ~ +15%

参表⑨-6 建屋剛性の変動幅

建屋剛性の変動幅
-7%~15%

(参考資料⑩) 水平方向および鉛直方向の地震力の組合せ方法

1F-5と同じ

- 既往評価（工認時の耐震計算）では、地震により構造物に生じる荷重を、水平および鉛直地震動各々により発生した最大荷重の絶対値を組合わせる「絶対和法」を用いている。
- 新耐震指針に照らした耐震安全性評価においては、地震により構造物に生じる荷重を、水平および鉛直地震動各々により発生した最大荷重の二乗和平方根として組合わせる「二乗和平方根（SRSS）法」を用いることとしている。

この方法は、水平および鉛直地震動を同時に入力した場合の最大荷重との比較において平均的な値を与え、設備における荷重分布は水平および鉛直地震動を同時に入力した場合の最大荷重分布に近い傾向を示すものである。

【参 考】日本電気協会「機器・配管系検討会No.10-4-1、平成18年6月9日」（抜粋）

水平および鉛直地震動による荷重をSRSS法により組合せた場合と水平および鉛直地震動を同時に入力する時刻歴法による場合とで比較した結果、以下を確認している

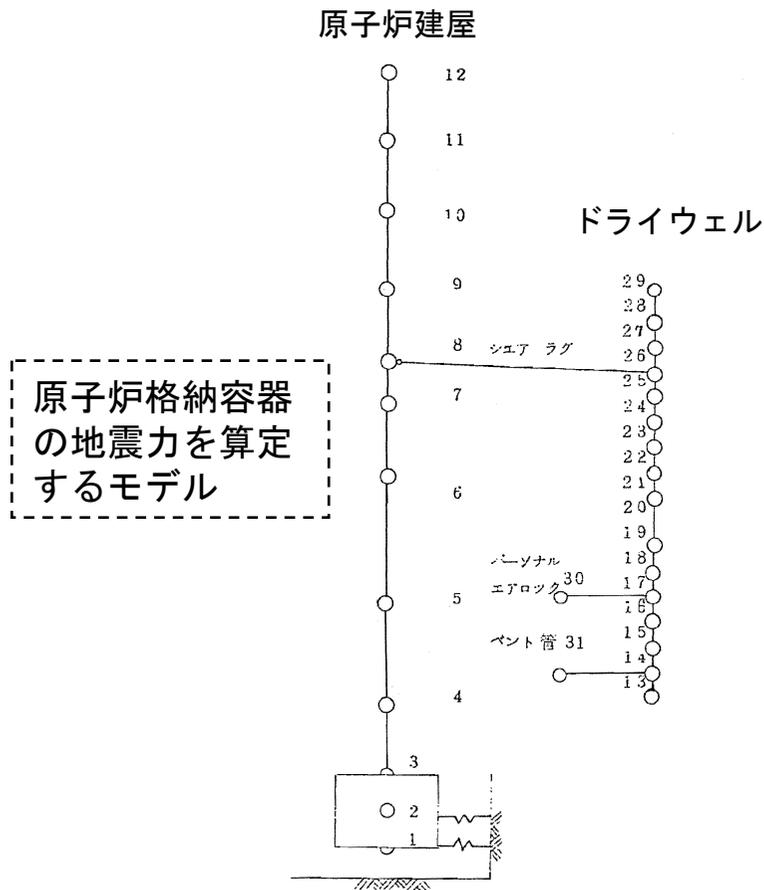
- (1) 水平および鉛直地震動各々に対する設備の応答は、最大値発生時刻に差があることから、互いに相関が小さい。
- (2) SRSS法による応答が同時入力の時刻歴法による応答を下回る地震発生時間中の頻度は小さく、実機配管系を例に解析した結果では0.1%未満であった。
- (3) 実機配管系において、水平および鉛直地震動による荷重とSRSS法と同時入力の時刻歴法で比較したところ、最大応力発生点およびこれに準ずる比較的応力の高い評価点では、SRSS法が時刻歴法より大きな応力となった。配管系全体にわたっては、SRSS法による応力は時刻歴法による応力を中心にばらつき、平均的な応答を与えた。

以上から、水平地震動と鉛直地震動による地震荷重の組合せ方法として、SRSS法を用いて差し支えない。

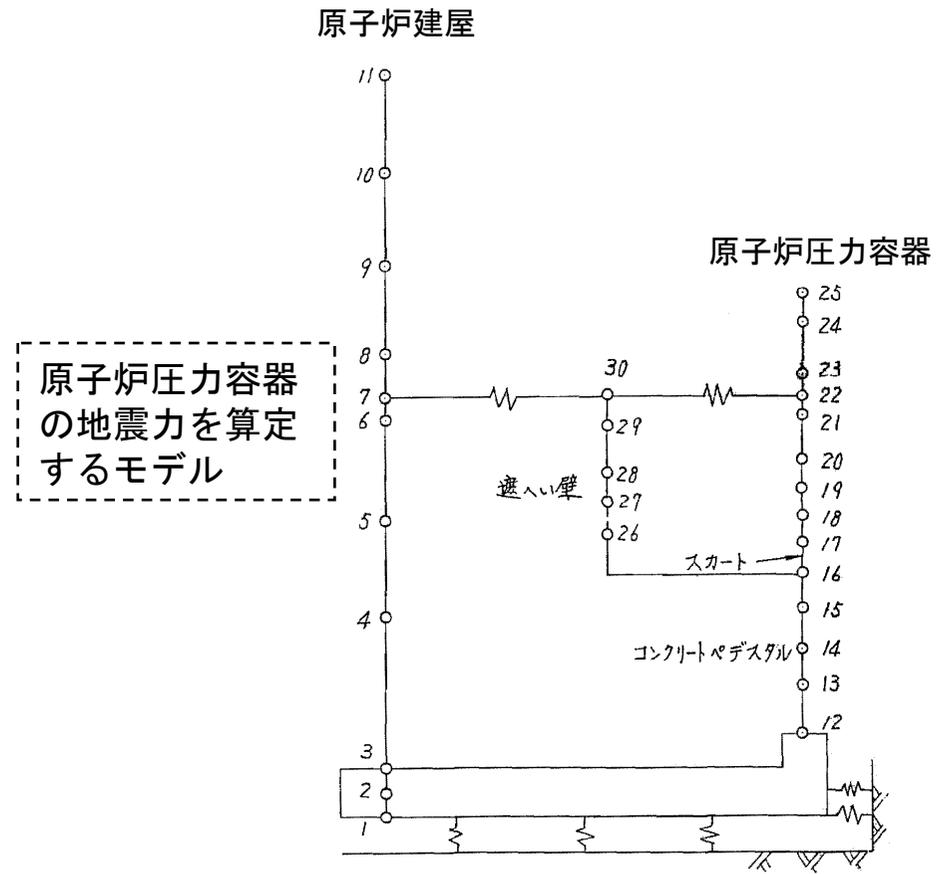
(参考資料⑪) 応答解析モデルに係る工認時との比較 (1/6)

設計時は、以下の2つのモデルを用いて解析を実施している。

- ・ 原子炉建屋－原子炉格納容器連成モデル
- ・ 原子炉建屋－原子炉圧力容器連成モデル



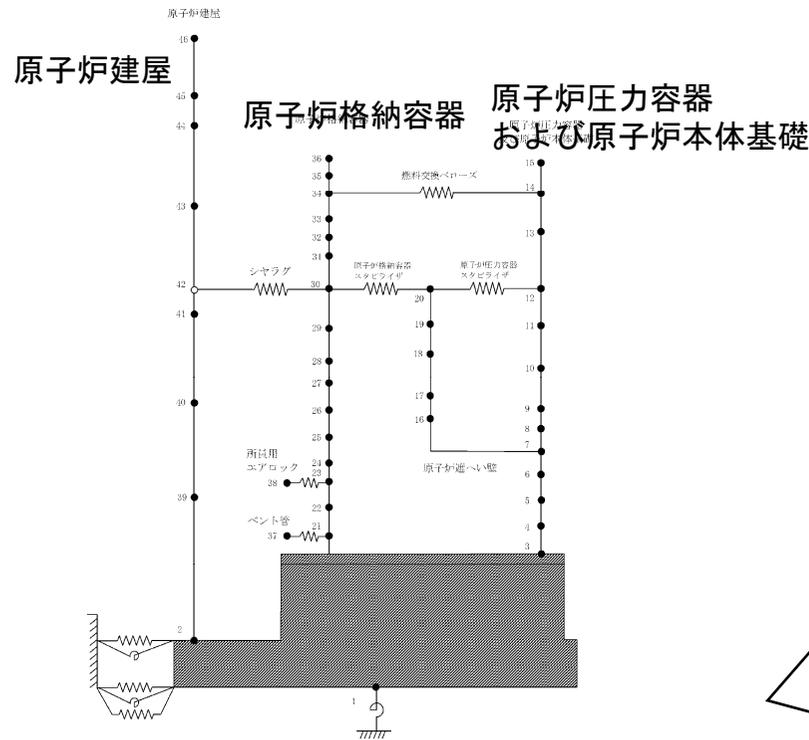
原子炉建屋－原子炉格納容器
連成モデル (1F-3設計時)



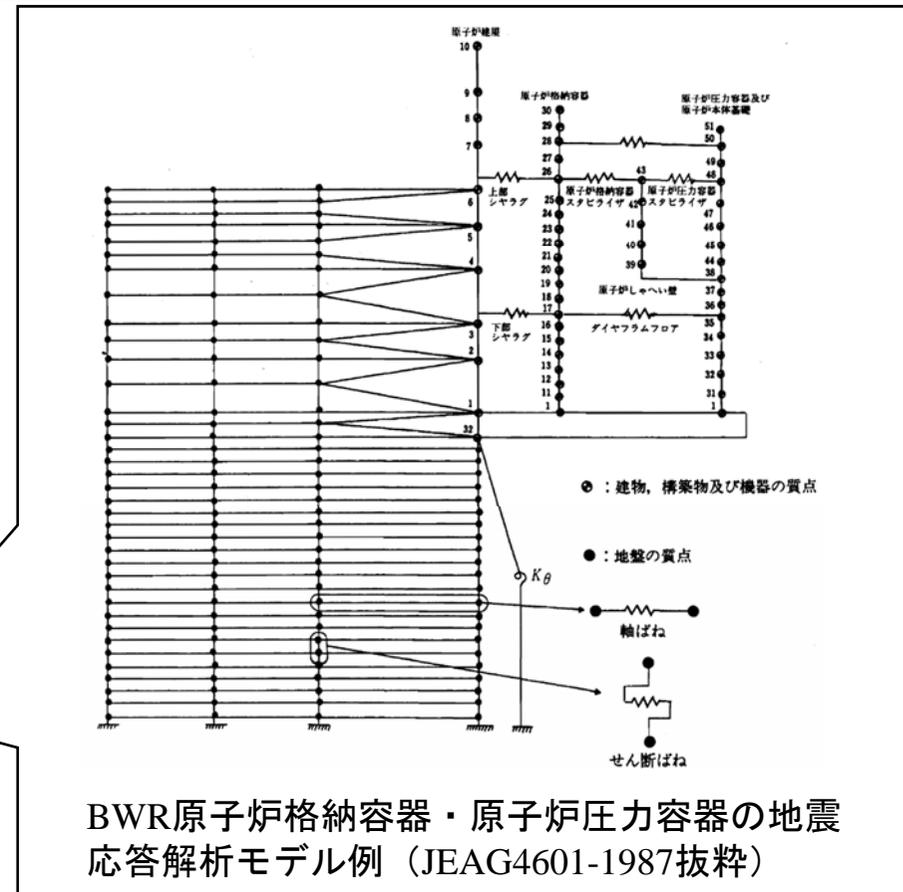
原子炉建屋－原子炉圧力容器
連成モデル (1F-3設計時)

(参考資料⑪) 応答解析モデルに係る工認時との比較 (2/6)

耐震安全性評価ではJEAG4601-1987に記載のとおり、最新のプラントと同様に、**原子炉建屋—原子炉格納容器—原子炉圧力容器連成モデル**としている。



原子炉格納容器—原子炉圧力容器
地震応答解析モデル (1F-3耐震安全性評価)

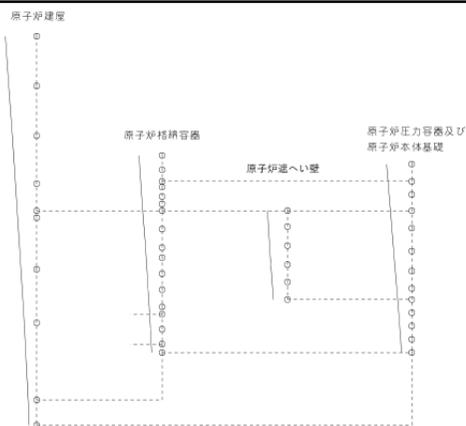


BWR原子炉格納容器・原子炉圧力容器の地震
応答解析モデル例 (JEAG4601-1987抜粋)

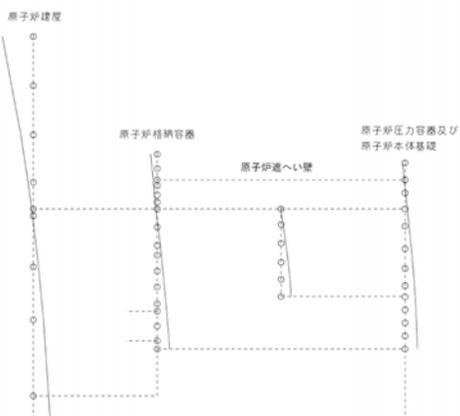
原子炉建屋と原子炉格納容器の間にあるシヤラグ，原子炉格納容器と原子炉圧力容器の間にある燃料交換ベローズは，耐震安全性評価においてはJEAG4601-1987に記載のとおり，最新のプラントと同様にバネを用いてモデル化

(参考資料⑪) 応答解析モデルに係る工認時との比較 (3/6)

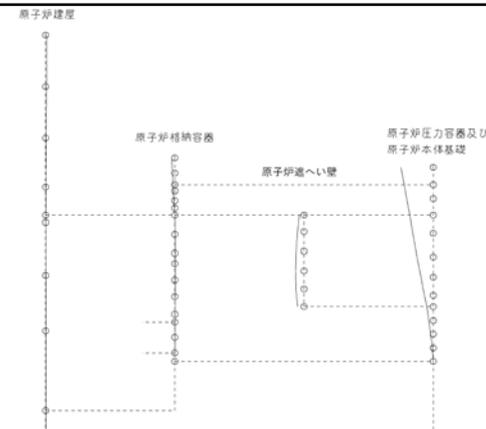
耐震安全性評価における振動モード図とそれに対応する設計時の振動モード図をそれぞれ比較すると、**原子炉建屋**、**原子炉格納容器**は同様な挙動を示している。



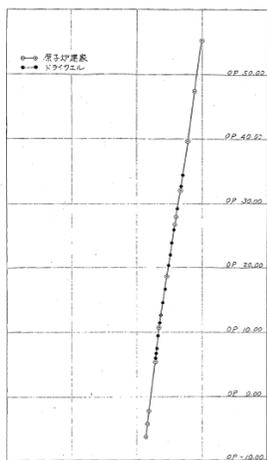
1F-3大型機器振動モード図
(耐震安全性評価, EW方向1次モード)



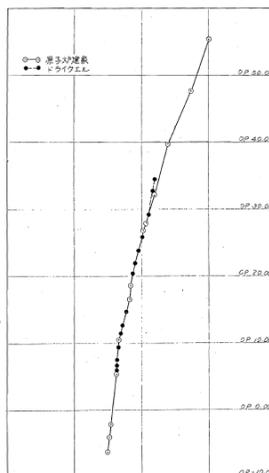
1F-3大型機器振動モード図
(耐震安全性評価, EW方向2次モード)



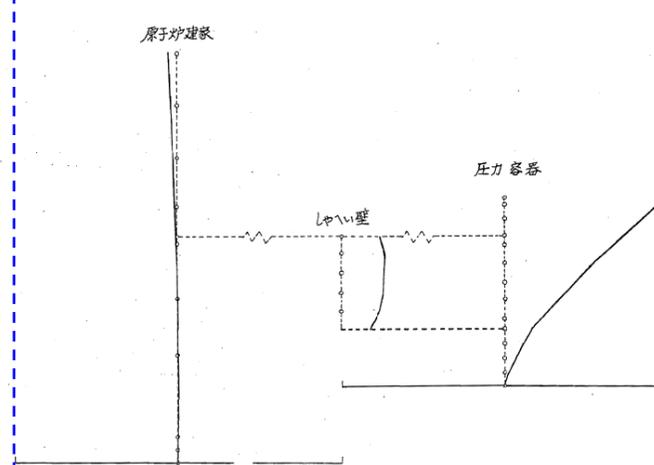
1F-3大型機器振動モード図
(耐震安全性評価, EW方向3次モード)



1F-3原子炉建屋－原子炉格納容器
振動モード図(設計時, EW方向1次モード)



1F-3原子炉建屋－原子炉格納容器
振動モード図(設計時, EW方向2次モード)

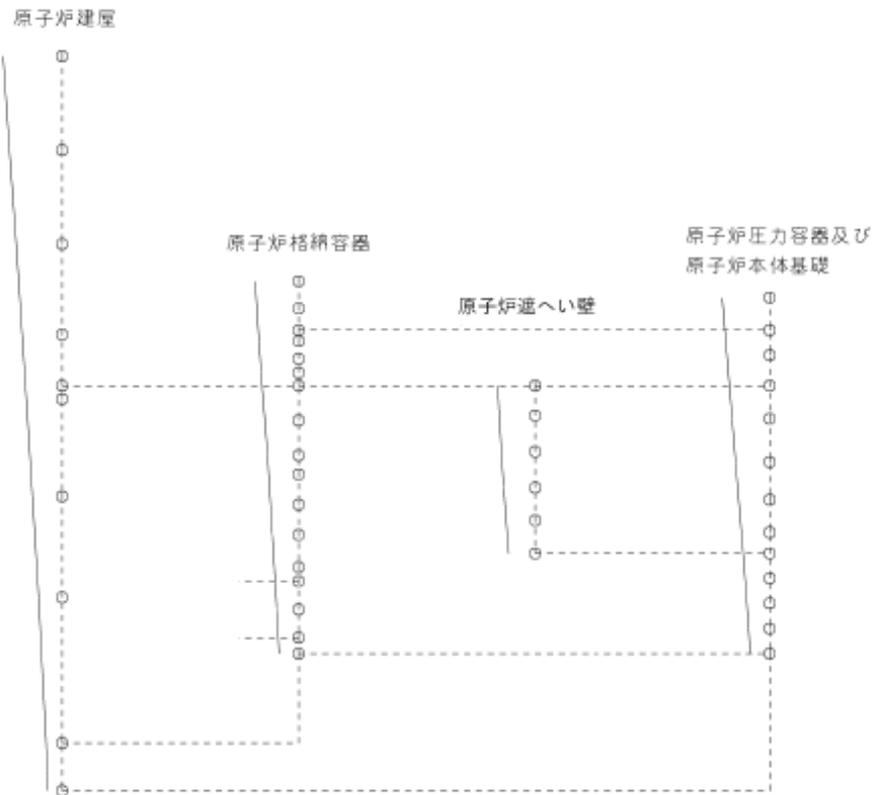


1F-3原子炉建屋－原子炉圧力容器
振動モード図(設計時, EW方向2次モード)

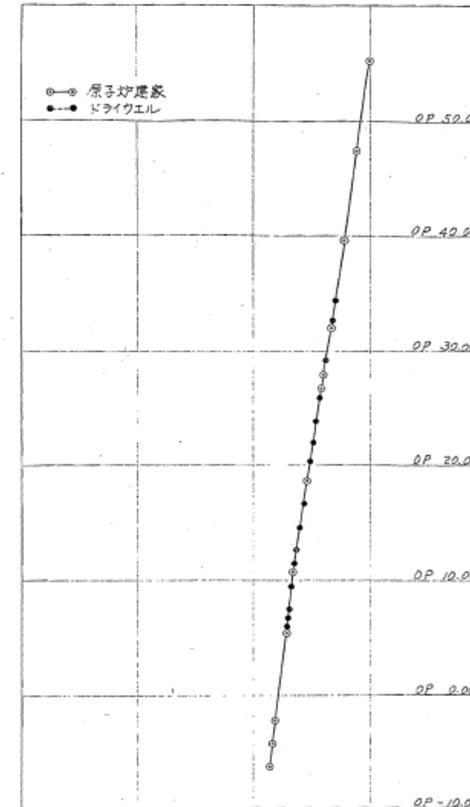
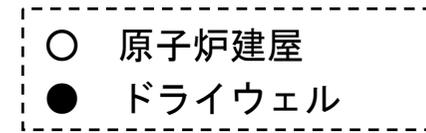
(参考資料⑪) 応答解析モデルに係る工認時との比較 (4/6)

振動モード (拡大図)

原子炉格納容器の比較



1F-3大型機器振動モード図
(耐震安全性評価, EW方向1次モード)

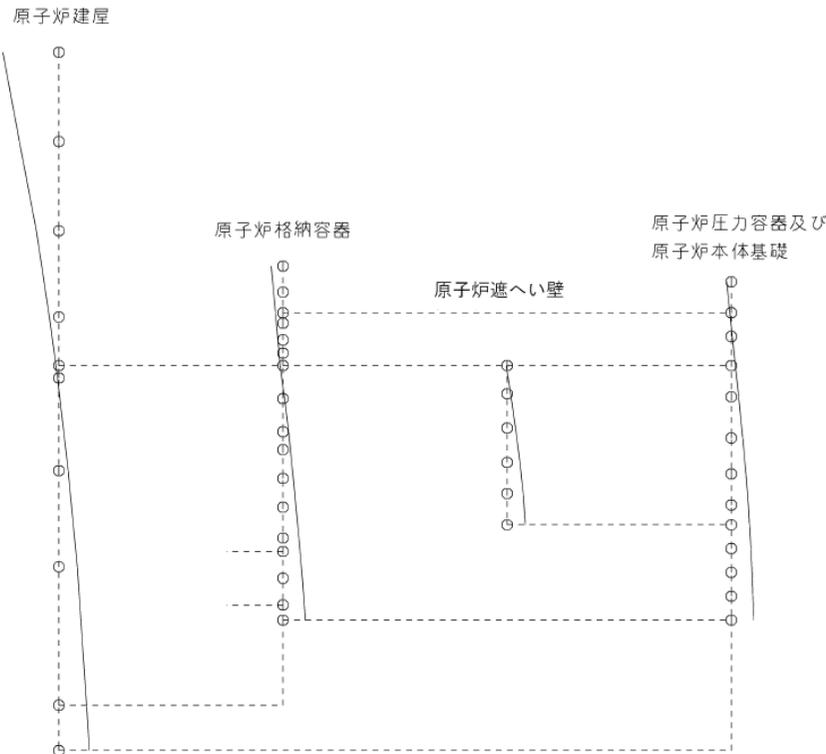


1F-3原子炉建屋－原子炉格納容器
振動モード図(設計時, EW方向1次モード)

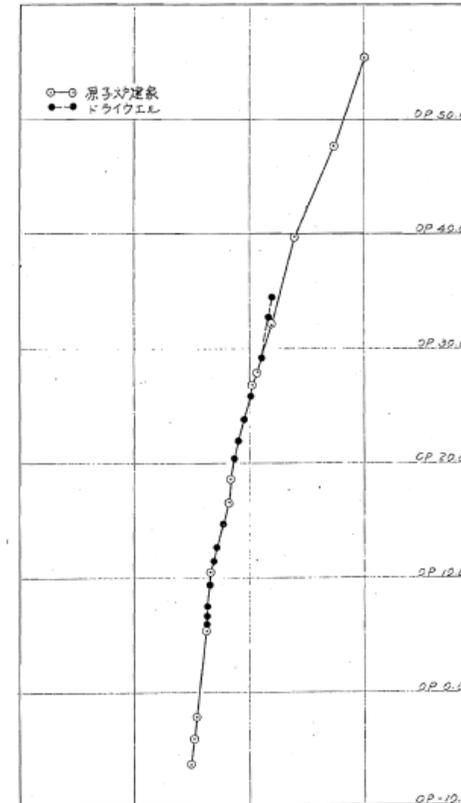
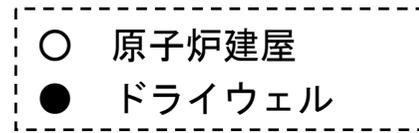
(参考資料⑪) 応答解析モデルに係る工認時との比較 (5/6)

振動モード (拡大図)

原子炉格納容器の比較



1F-3大型機器振動モード図
(耐震安全性評価, EW方向2次モード)

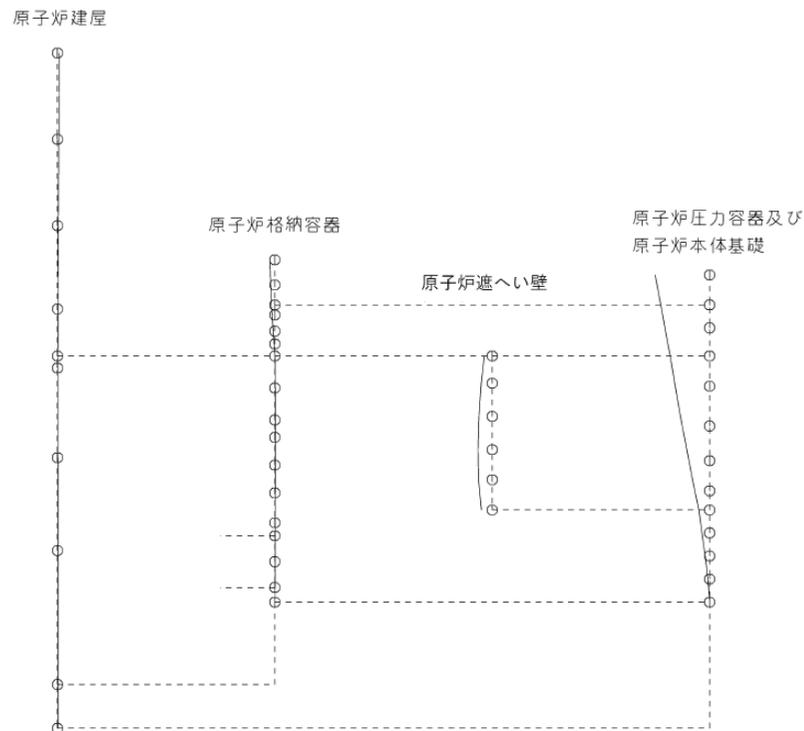


1F-3原子炉建屋—原子炉格納容器
振動モード図 (設計時, EW方向2次モード)

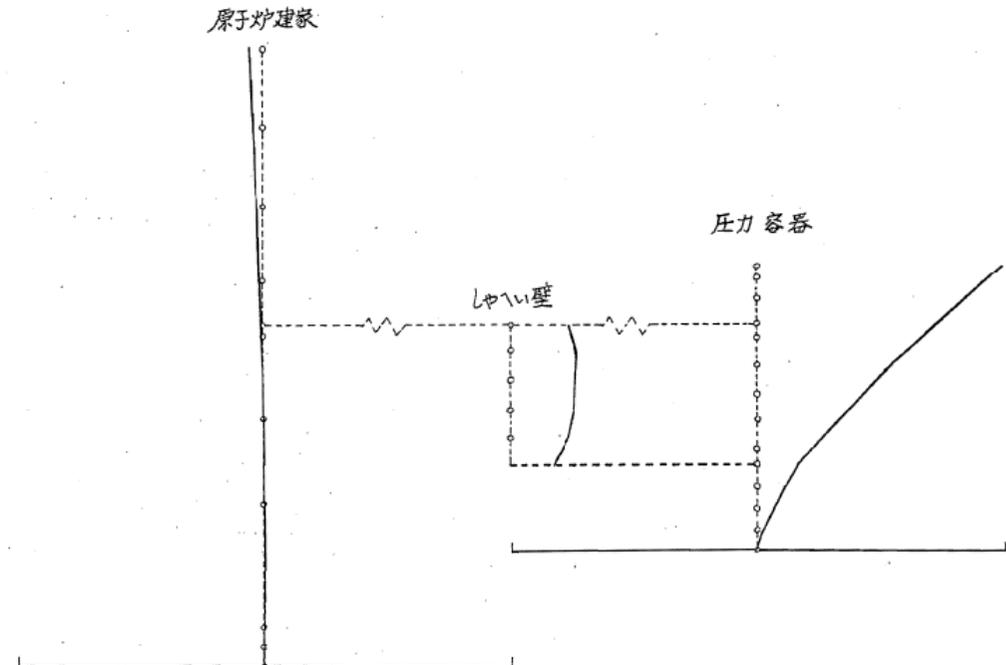
(参考資料⑪) 応答解析モデルに係る工認時との比較 (6/6)

振動モード (拡大図)

原子炉压力容器の比較



1F-3大型機器振動モード図
(耐震安全性評価, EW方向3次モード)



1F-3原子炉建屋-原子炉压力容器
振動モード図 (設計時, EW方向2次モード)

(参考資料⑫) 機器・配管系における評価結果の比較 (1/2)

(福島第一3号機、5号機)

単位：MPa

評価対象 設備	評価部位	福島第一3号機				福島第一5号機				備考
		応力 分類	計算値	評価 基準値	評価 手法 ^{※1}	応力 分類	計算値	評価 基準値	評価 手法 ^{※1}	
原子炉 压力容器	基礎 ボルト	引張	36	222	②	引張	39	222	②	概ね同じ
原子炉 格納容器	ドライ ウェル	膜	199	255	①	膜	90	255	①	応答比の違いによる計算値等 の違い ^{※2}
炉心支持 構造物	シュラウド サポート	軸圧縮	33	208	①	軸圧縮	24	231	②	形状の違い ^{※3} による評価基準 値の違い 評価手法の違いによる計算値 の違い
		膜	85	300	②	膜	86	300	②	
残留熱除去系 ポンプ	基礎 ボルト	引張	42	185	②	引張	29	202	②	ボルト径の違いによる計算値 及び評価基準値の違い
残留熱除去 系配管	配管 本体	一次	268	363	②	一次	197	364	②	配管のルーティングの違いに よる最大応力発生部位及び計 算値の違い 温度の違いによる評価基準値 のわずかな違い
主蒸気 系配管	配管 本体	一次	183	417	②	一次	356	417	②	入力の違いによる計算値の違 い【次項にて説明】
制御棒 挿入性	燃料 集合体	相対変位	14.8 [mm]	40.0 [mm]	②	相対変位	13.8 [mm]	40.0 [mm]	②	概ね同じ

※1 ①：応答倍率法による評価 ②：詳細評価

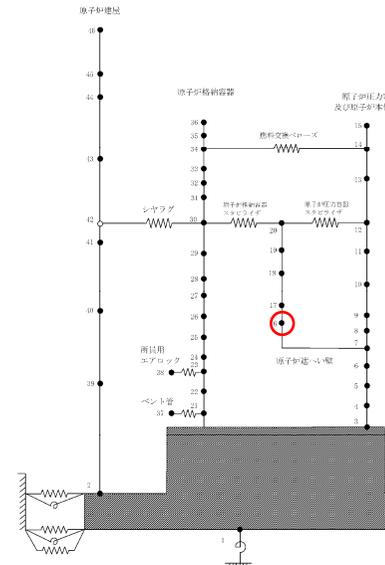
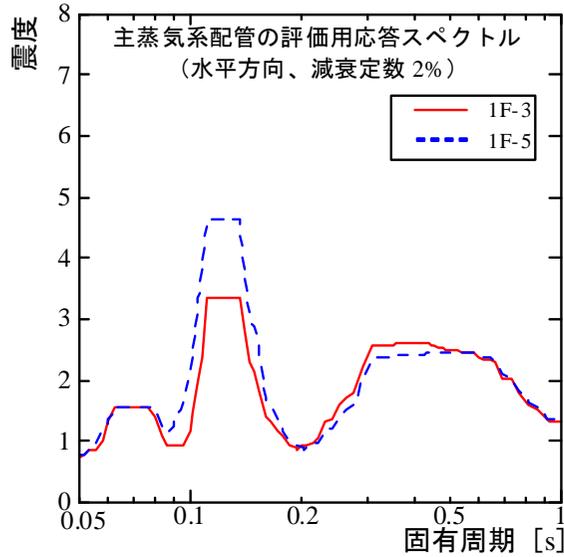
※2 1F-3は応答比が $C_v/C_{v0}=1.84$ 、1F-5は応答比が $(1+C_v)/(1+C_{v0})=1.17$

※3 レグの長さ、レグの板厚の違い

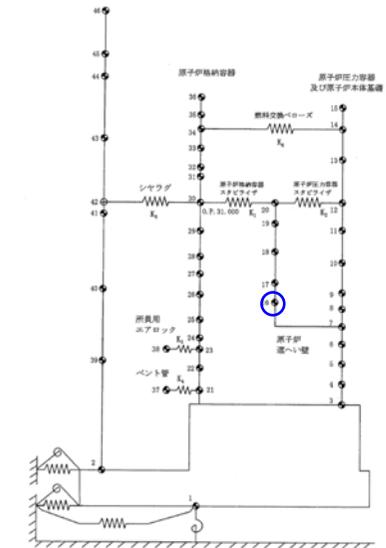
C_v : 基準地震動 S_s の鉛直震度
 C_{v0} : 設計時の鉛直震度

(参考資料⑫) 機器・配管系における評価結果の比較 (2/2)

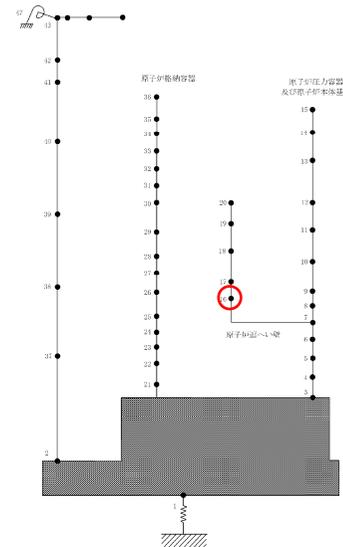
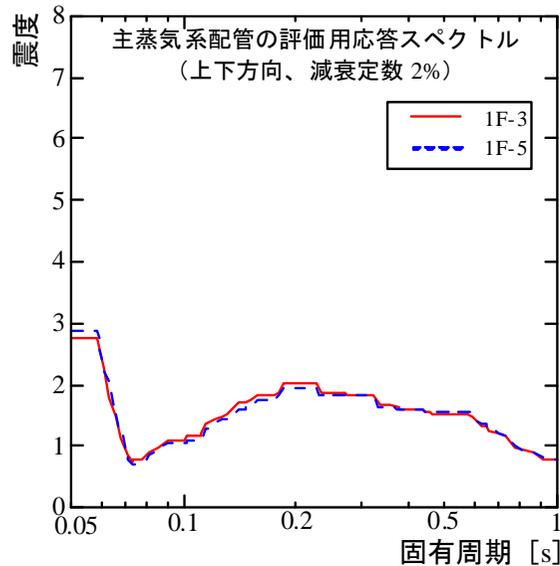
(福島第一3号機、5号機)



1F-3 PCV-RPV解析モデル (水平)



1F-5 PCV-RPV解析モデル (水平)



1F-3 PCV-RPV解析モデル (上下)



1F-5 PCV-RPV解析モデル (上下)

(参考資料⑬)

疲れ解析が必要な応答領域に達しているかの確認

新耐震指針に照らした耐震安全性評価では、耐震設計上重要な施設（Sクラス）について基準地震動 S_s に対する安全機能が保持されることの確認を目的としている。

その際、構造物の破壊に直結する一次応力が、評価基準値を上回らないことの確認を基本としており、対象とした機器・配管系について評価基準値以下であることを確認している。

管(第1種管)の設計

地震動のみによる疲れ解析を行い疲れ累積係数を求め、運転状態Ⅰ、Ⅱにおける疲れ累積係数との和が1.0以下であることを確認（原子力発電所耐震設計技術指針（JEAG4601・補-1984））

管(第4種管)の設計

地震による1次+2次応力が評価基準値（ $2S_y$ ）を超える場合、疲れ解析を行い地震による疲れ累積係数が1.0以下であることを確認（原子力発電所耐震設計技術指針（JEAG4601・補-1984））

福島第一3号機の主蒸気系配管について、疲れ解析を実施したところ、地震による疲れ累積係数と運転状態Ⅰ、Ⅱにおける疲れ累積係数の和が1.0以下であることを確認した。

福島第一3号機の残留熱除去系配管について、1次+2次応力評価を実施したところ、計算値が評価基準値以下であることを確認しており、疲れ解析は不要である。