

本資料のうち、枠囲みの内容は商業機密の観点から公開できません。

女川原子力発電所第2号機 工事計画審査資料	
資料番号	02-補-E-19-0600-40-53_改1
提出年月日	2021年10月29日

補足-600-40-53 【サプレッションチェンバ接続配管に適用する床応答スペクトルに関する補足説明資料】

1. はじめに

配管の耐震評価にあたっては、添付書類「VI-2-1-13-6 管の耐震性についての計算書作成の基本方針」に記載された以下の方針に基づく設計用床応答スペクトルを適用している。

「設計用床応答曲線は、配管系が設置されている位置を包絡する設計用床応答曲線を適用する。また、異なる建物・構築物を渡る配管系については、配管系が設置されている位置を包絡する設計用床応答曲線を適用する。ただし、設計用床応答曲線の運用において合理性が示される場合には、その方法を採用できるものとする。」

このうち、サブプレッションチェンバに接続する配管（以下、SC接続配管という。）については、配管の重心が原子炉建屋側にあること、原子炉建屋に多くサポートが設置されていることを踏まえ、原子炉建屋の配管設置位置を包絡した設計用床応答スペクトルを適用している。その経緯は以下のとおり。

- ・既工認では、サブプレッションチェンバ全体を剛構造と見做していたため、サブプレッションチェンバに接続する配管の耐震評価は、サブプレッションチェンバの設置床及び評価対象配管の設置床を包絡した床応答スペクトルを適用していた。
- ・一方今回工認では、重大事故等時におけるサブプレッションチェンバ内部水質量の増加及び基準地震動の増大に伴い、サブプレッションチェンバが柔構造となって地震応答が大きくなったことから、より実態に応じた耐震評価とするため、サブプレッションチェンバに接続する配管の耐震評価に適用する床応答スペクトルは、JEAG4601の考え方等を踏まえ、評価対象配管の重心位置を確認した上で、重心位置の上階の床応答スペクトルを適用している。なお、評価対象配管が複数の床に設置される場合は、それらを包絡した床応答スペクトルを適用している。

本資料では、サブプレッションチェンバに接続する配管の耐震評価に対して適用する床応答スペクトル及びこれを用いた耐震評価方法が合理性を有することについて説明する。

本資料が関連する工認図書は以下の通り。

- ・ VI-2-5-3-1-2 管の耐震性についての計算書（主蒸気系）
- ・ VI-2-5-4-1-4 管の耐震性についての計算書（残留熱除去系）
- ・ VI-2-5-4-1-5 ストレーナ部ティーの耐震計算書（残留熱除去系）
- ・ VI-2-5-5-1-3 管の耐震性についての計算書（高圧炉心スプレイ系）
- ・ VI-2-5-5-1-4 ストレーナ部ティーの耐震計算書（高圧炉心スプレイ系）
- ・ VI-2-5-5-2-3 管の耐震性についての計算書（低圧炉心スプレイ系）
- ・ VI-2-5-5-2-4 ストレーナ部ティーの耐震計算書（低圧炉心スプレイ系）
- ・ VI-2-5-6-1-3 管の耐震性についての計算書（原子炉隔離時冷却系）
- ・ VI-2-9-4-4-2-1 管の耐震性についての計算書（可燃性ガス濃度制御系）
- ・ VI-2-9-4-4-4-1 管の耐震性についての計算書（可搬型窒素ガス供給系）
- ・ VI-2-9-4-5-1-1 管の耐震性についての計算書（原子炉格納容器調気系）

2. 配管の耐震評価に適用する床応答スペクトルの考え方

配管の耐震評価に適用する床応答スペクトルは、JEAG4601-1987では、「機器・配管系の重心位置に近い或いは耐震支持点の最も多い床面のもの等最も適切な床のものを採用することを基本」とすることと記載されている。

また、女川2号機では添付書類「VI-2-1-13-6 管の耐震性についての計算書作成の基本方針」において以下の通り方針を設定している。

「設計用床応答曲線は、配管系が設置されている位置を包絡する設計用床応答曲線を適用する。また、異なる建物・構築物を渡る配管系については、配管系が設置されている位置を包絡する設計用床応答曲線を適用する。ただし、設計用床応答曲線の運用において合理性が示される場合には、その方法を採用できるものとする。」

なお、原子炉圧力容器に接続する配管等については、既工認と同様に重心位置を個別に算定した上で重心位置の設計用床応答スペクトルを適用し、大型機器の接続位置に大型機器の変位を考慮した評価を行っている（「補足 600-40-11 配管解析における重心位置スペクトル法の適用について」参照）。

3. サプレッションチェンバ接続配管の耐震評価に適用する床応答スペクトルの考え方

今回工認においては、重大事故等時におけるサプレッションチェンバ内部水質量の増加及び基準地震動の増大に伴ってサプレッションチェンバが柔構造となり、既工認時に比べて地震応答が大きくなったため（図1、2*参照）、サプレッションチェンバ接続配管の耐震評価は、より実態に応じた耐震評価を実施する必要がある。

このため、S C接続配管に対する設計用床応答スペクトルは、添付書類「VI-2-1-13-6 管の耐震性についての計算書作成の基本方針」のうち、

“ただし、設計用床応答曲線の運用において合理性が示される場合には、その方法を採用できるものとする。”

との記載に従って、JEAG4601の考え方等を踏まえ、評価対象配管の重心位置を確認した上で、重心位置の上階の床応答スペクトルを適用している。なお、評価対象配管が複数の床に設置される場合は、それらを包絡した床応答スペクトルを適用している。

また、サプレッションチェンバとの接続位置にサプレッションチェンバの変位を考慮した評価を行っている。

注記*：添付書類「VI-2-1-7設計用床応答曲線の作成方針」より引用



図1 サプレッションチェンバの地震応答解析モデル

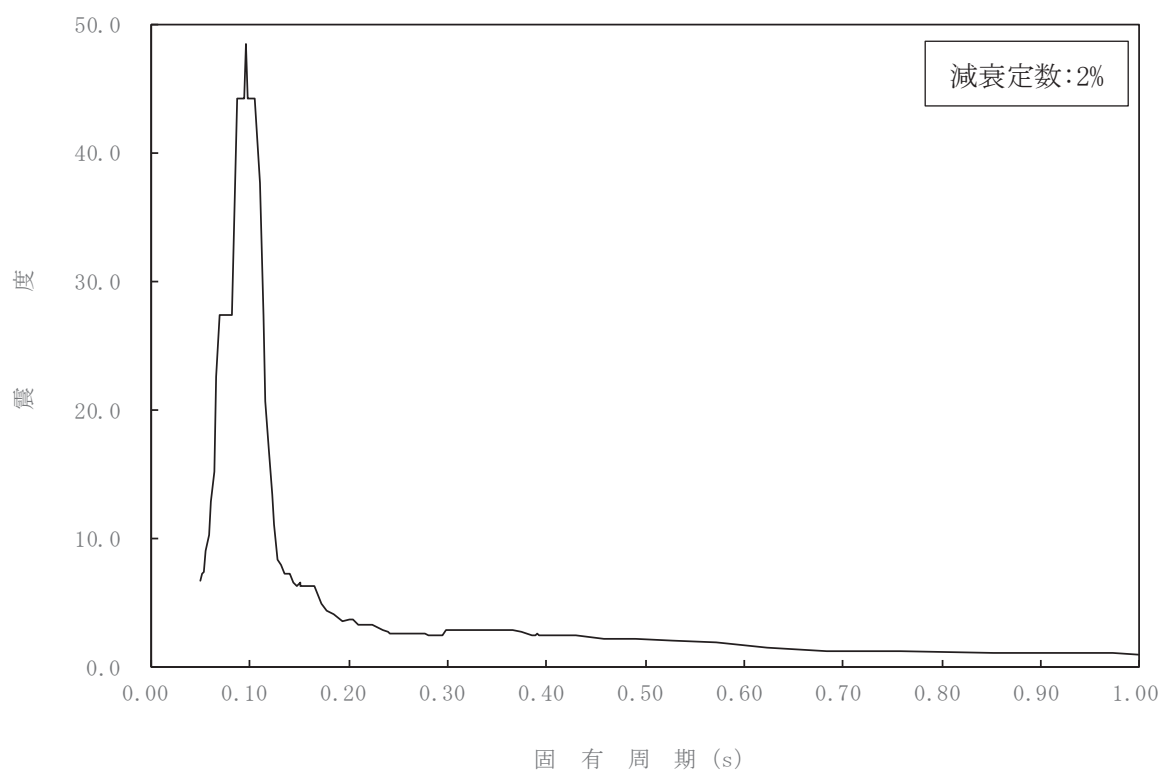


図2 サプレッションチェンバの床応答スペクトル

(基準地震動 S_s , 水平方向 (NS/EW 包絡), 減衰 2%, SA 時水位)

4. S C 接続配管の耐震評価方法に係る合理性の確認方針及び確認条件

S C 接続配管の耐震評価に適用する床応答スペクトル及びこれを用いた耐震評価方法の合理性を確認するため、多入力時刻歴応答解析を用いてより精緻に S C 接続配管の耐震評価を実施する。

サブプレッションチェンバの地震応答を考慮した多入力時刻歴応答解析の結果と原子炉建屋の床応答スペクトル（拡幅無し）のスペクトルモーダル解析の結果との比較を行い、S C 接続配管の耐震評価に対するサブプレッションチェンバの地震応答加速度の影響を確認する。

(1) 確認対象配管モデル

S C 接続配管の耐震評価に対するサブプレッションチェンバの地震応答加速度の影響は、地震慣性力の増加として現れる。これを踏まえて確認対象配管モデルは、サブプレッションチェンバの地震応答加速度の影響の観点から、地震慣性力に着目し一次応力評価で裕度が最小の配管モデル、また、サブプレッションチェンバ内部の重量物による地震慣性力の影響の観点から、サブプレッションチェンバ内にストレーナを有する配管モデルのうち一次応力評価で裕度が最小となる配管モデルを選定する。

表 1 に、原子炉建屋の設計用床応答曲線を用いている S C 接続配管モデルの一次応力評価の裕度整理結果を示す。この結果から一次応力評価で裕度が最小となる配管モデルとして RHR-010 及びストレーナを有する配管モデルとして一次応力評価で裕度が最小となる HPCS-002 を選定した。

今回工認の耐震計算書における RHR-010 及び HPCS-002 の耐震評価の入力条件を表 2 に、解析モデルを図 3, 4 に示す。

表1 原子炉建屋の設計用床応答曲線を用いている

S C接続配管モデルの裕度整理結果

配管モデル	一次応力評価の裕度（許容応力/算出応力）		確認対象	備考
	設計基準対象施設	重大事故等対処設備		
RHR-006	2.18	2.24	—	ストレーナ有り
RHR-010	1.76	1.72	○	
RHR-011	2.36	2.22	—	ストレーナ有り
RHR-015	1.83	1.86	—	
RHR-016	2.30	2.55	—	ストレーナ有り
HPCS-002	1.93	1.94	○	ストレーナ有り
HPCS-003	3.37	2.31	—	
LPCS-002	2.43	2.22	—	ストレーナ有り
LPCS-003	3.79	3.83	—	
RCIC-001	4.11	3.10	—	ストレーナ有り
RCIC-005	5.58	5.67	—	
FCS-002	4.84	—	—	重大事故等対処設備ではない
FCS-004	6.98	—	—	重大事故等対処設備ではない
AC-014	—	2.50	—	設計基準対象施設ではない
AC-001	3.13	4.65	—	
AC-002	3.15	2.97	—	

表2 工認耐震計算書の入力条件

配管モデル	減衰定数	標高
RHR-010		
HPCS-002		

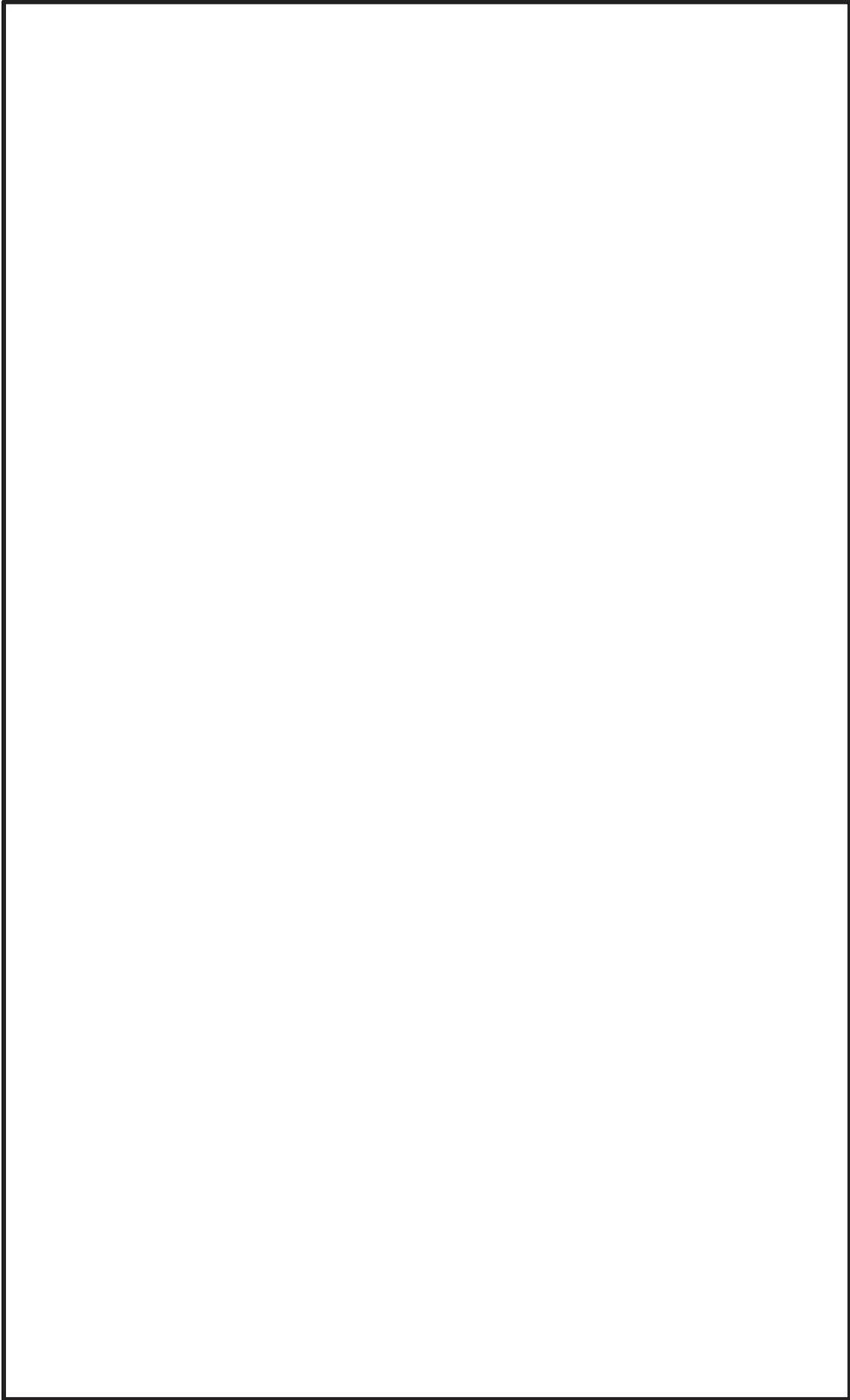


図3 解析モデル図 (RHR-010)

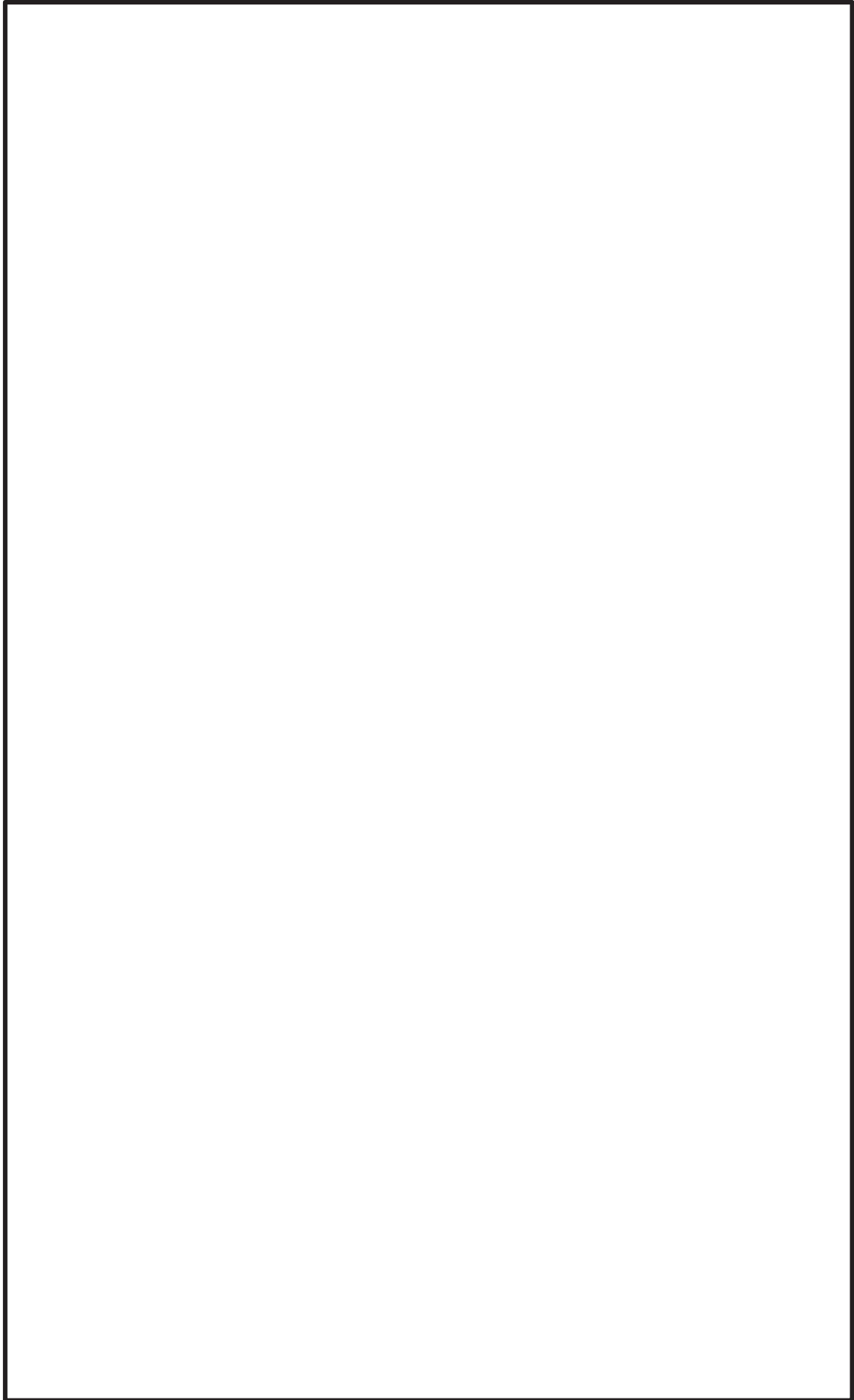


図 4 解析モデル図 (HPCS-002)

(2) 地震応答解析方法

地震応答解析は、サブプレッションチェンバと原子炉建屋の時刻歴応答加速度を用いた多入力時刻歴応答解析及び原子炉建屋の床応答スペクトルを用いたスペクトルモーダル解析を行う。ここで、原子炉建屋の床応答スペクトルを用いたスペクトルモーダル解析にあたっては、時刻歴応答解析の応答結果との比較の観点から、応答加速度を周期方向に拡幅を行っていない床応答スペクトルを評価に適用した。

(3) 入力地震動

① サプレッションチェンバの地震応答を考慮した多入力時刻歴応答解析

サブプレッションチェンバの地震応答を考慮した多入力時刻歴応答解析に用いる入力地震動は、配管の固有周期で応答加速度が大きく全周期帯において安定した応答を生じさせる基準地震動 $S_s - D2$ とし、配管とサブプレッションチェンバとの接続位置及びサブプレッションチェンバで支持するサポートの位置には、サブプレッションチェンバの時刻歴加速度、原子炉建屋で支持するサポートの位置には、その設置位置に応じた原子炉建屋の時刻歴加速度を入力する。

配管モデル (RHR-010) の評価に用いるサブプレッションチェンバの時刻歴加速度を図 5 に、サブプレッションチェンバの時刻歴加速度を用いた床応答スペクトルを図 6、原子炉建屋の時刻歴加速度を図 7 に、時刻歴加速度入力位置を図 8 に示す。

また、配管モデル (HPCS-002) の評価に用いるサブプレッションチェンバの時刻歴加速度を図 9 に、サブプレッションチェンバの時刻歴加速度を用いた床応答スペクトルを図 10 に、原子炉建屋の時刻歴加速度を図 11 に、時刻歴加速度入力位置を図 12 に示す。

本評価では、サブプレッションチェンバの地震応答を考慮した多入力時刻歴応答解析を行っており、設計用床応答曲線に考慮している応答加速度の周期方向へ $\pm 10\%$ の拡幅が考慮されないため、基準となる時刻歴加速度波 (固有周期シフトを考慮していないもの) による解析に加えて、ASME Boiler Pressure Vessel Code SECTION III, DIVISION 1-NONMANDATORY APPENDIX N-1222.3 Time History Broadening の規定をもとに時刻歴加速度波を時間軸方向に $\pm 10\%$ シフトさせた時刻歴加速度波による解析も実施する。さらに、 $\pm 10\%$ シフトさせた床応答スペクトルのピークに配管の固有周期が存在する場合は、ASME の規定に基づきピーク位置を考慮した評価も行うが、今回の評価では、配管の 1 次固有周期と水平の応答スペクトルのピークが比較的近接していることから、ピーク位置を考慮した評価は行わない。

また、配管が 3 次元的な広がりをもつ非対称な設備であることを踏まえ、位相を反転させた時刻歴加速度を用いた評価も行う。

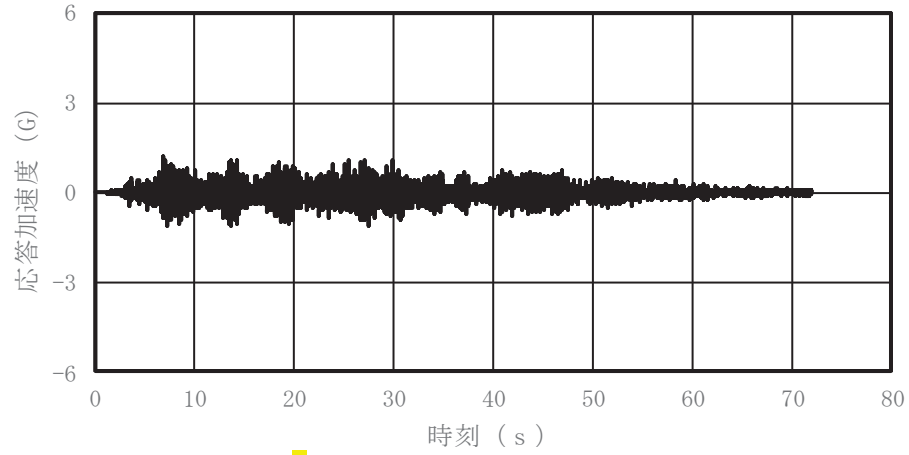


図5 時刻歴加速度 (1/3)

(RHR-010, 基準地震動S_s-D2, サプレッションチェンバ, NS方向, 質点9)

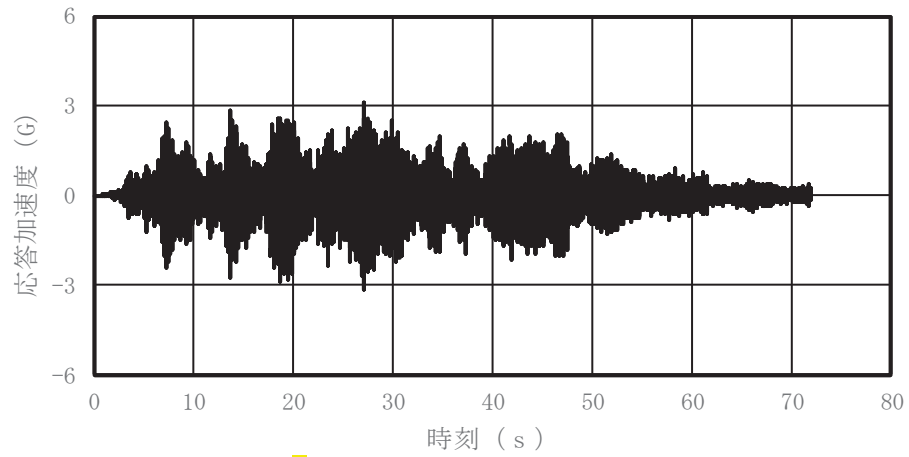


図5 時刻歴加速度 (2/3)

(RHR-010, 基準地震動S_s-D2, サプレッションチェンバ, EW方向, 質点9)

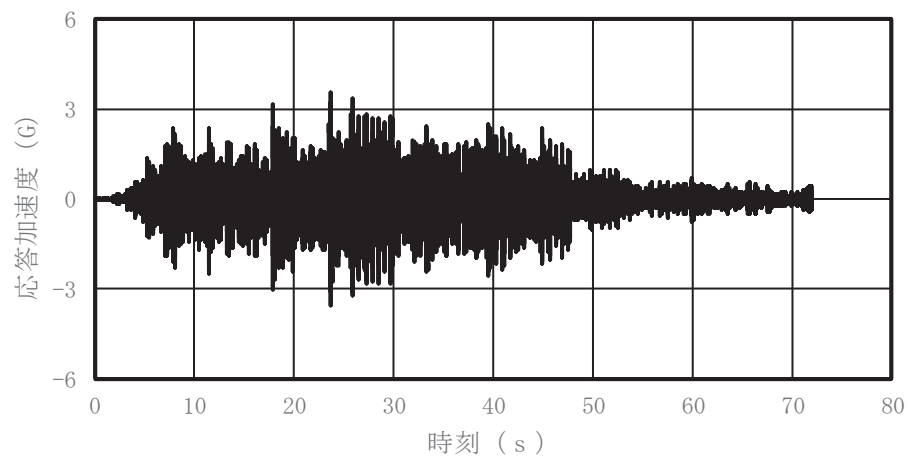


図5 時刻歴加速度 (3/3)

(RHR-010, 基準地震動S_s-D2, サプレッションチェンバ, UD方向, 質点9)

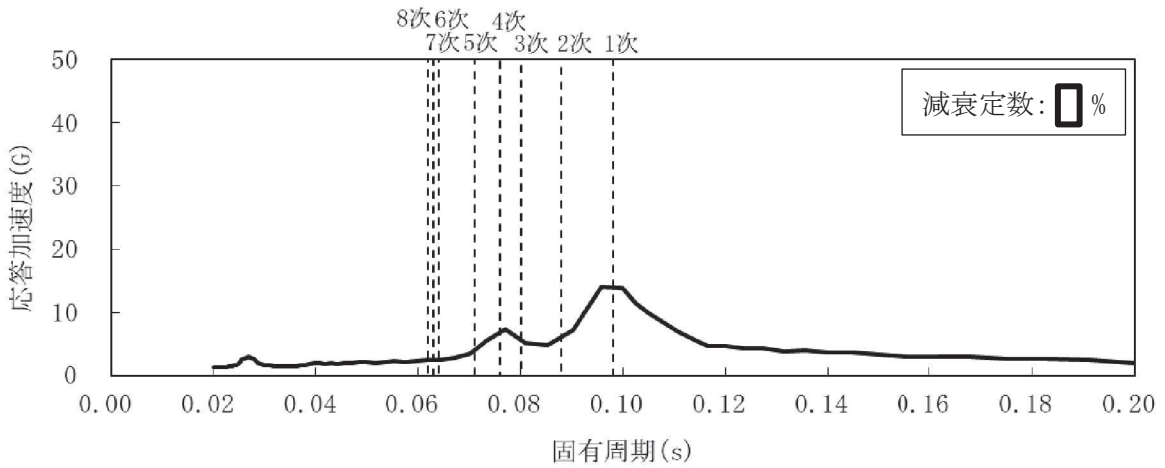


図6 床応答スペクトル (1/3)

(RHR-010, 基準地震動 S_s-D2, サプレッションチェンバ, NS 方向, 質点9)

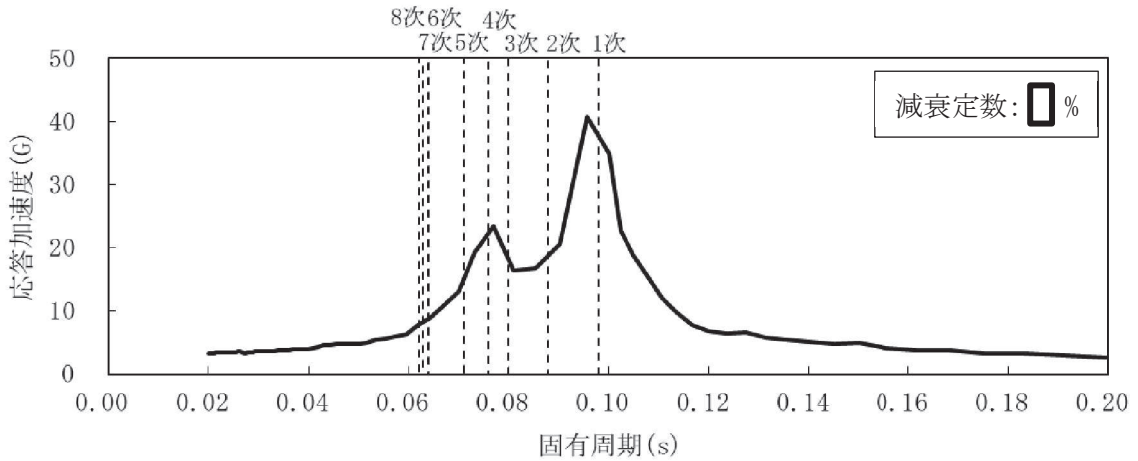


図6 床応答スペクトル (2/3)

(RHR-010, 基準地震動 S_s-D2, サプレッションチェンバ, EW 方向, 質点9)

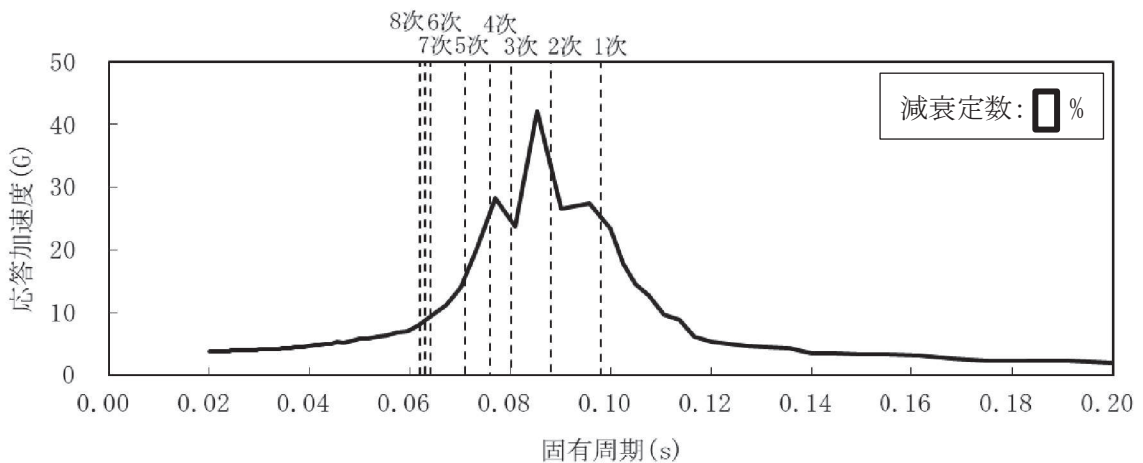


図6 床応答スペクトル (3/3)

(RHR-010, 基準地震動 S_s-D2, サプレッションチェンバ, UD 方向, 質点9)

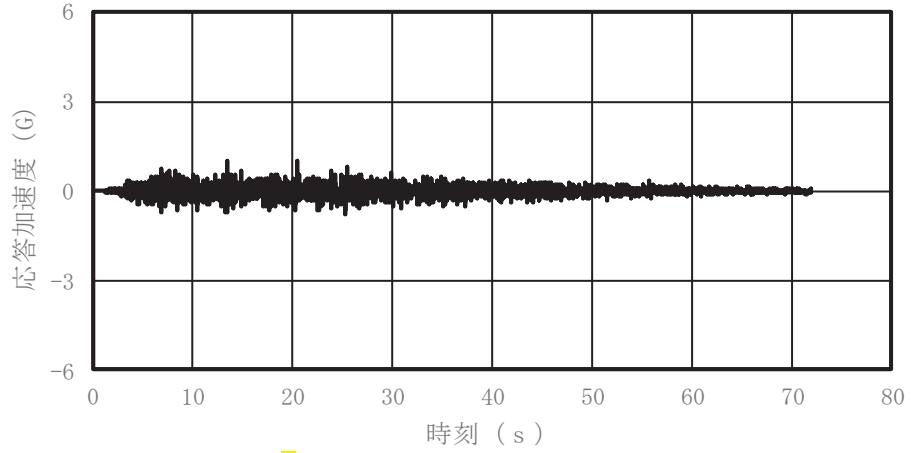


図 7 時刻歴加速度 (1/3)

(RHR-010, 基準地震動 S s-D 2, 原子炉建屋 : 0.P. m, NS 方向)

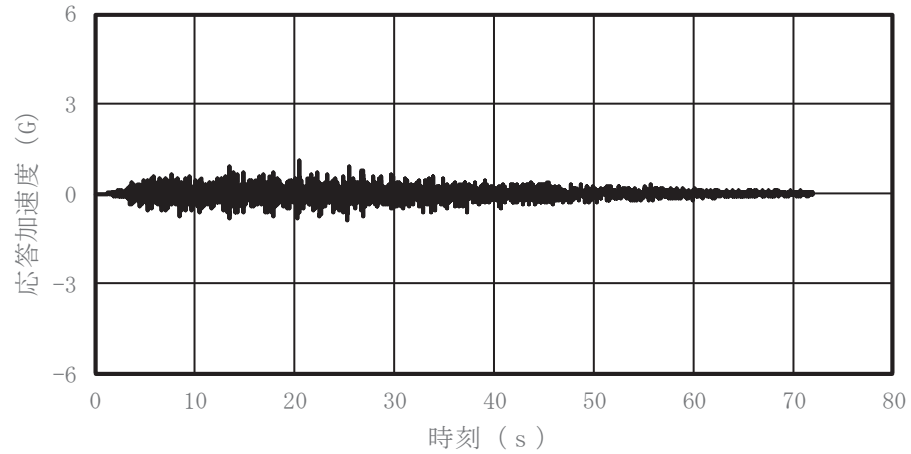


図 7 時刻歴加速度 (2/3)

(RHR-010, 基準地震動 S s-D 2, 原子炉建屋 : 0.P. m, EW 方向)

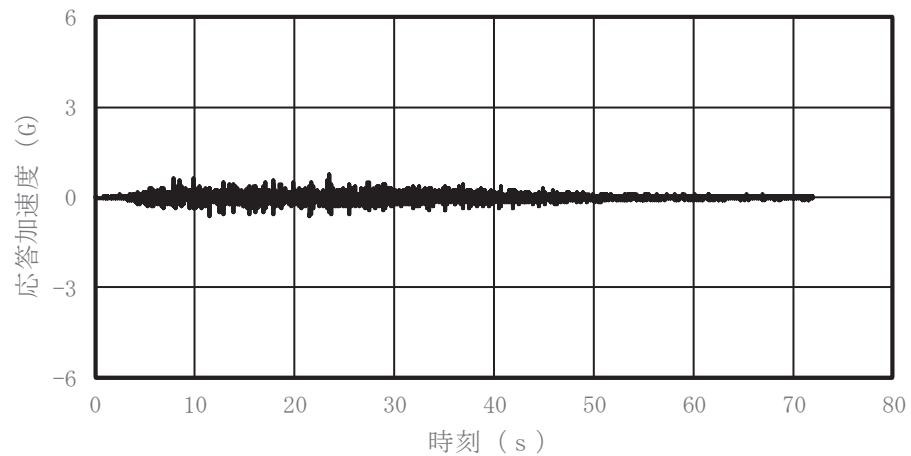


図 7 時刻歴加速度 (3/3)

(RHR-010, 基準地震動 S s-D 2, 原子炉建屋 : 0.P. m, UD 方向)

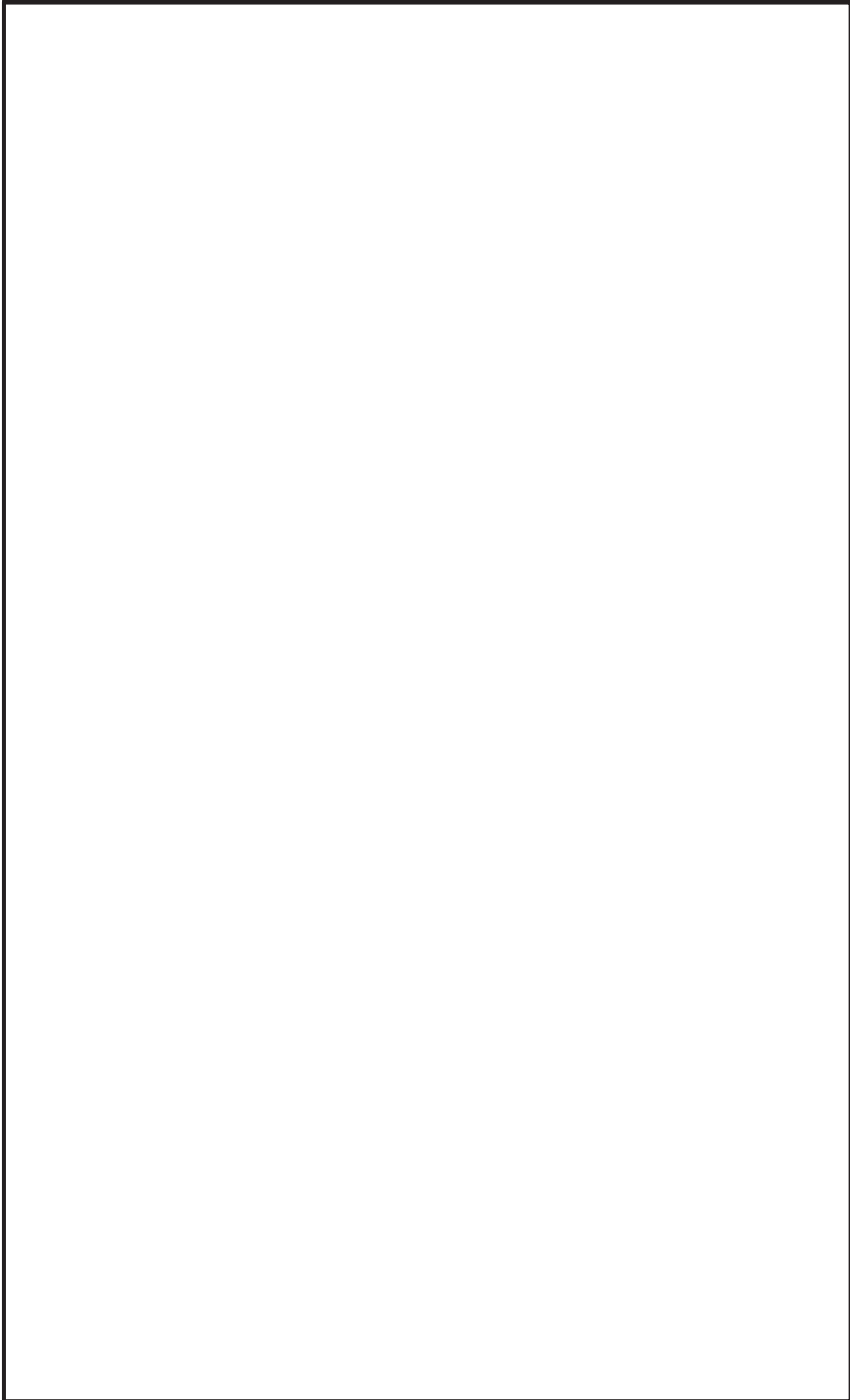


図 8 時刻歴加速度入力位置 (RHR-010)

枠囲みの内容は商業機密の観点から公開できません。

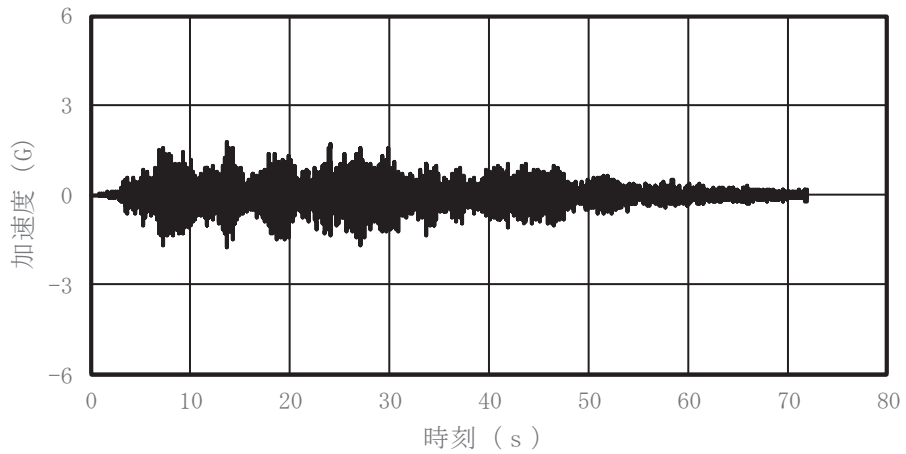


図9 時刻歴加速度 (1/3)

(HPCS-002, 基準地震動S_s-D2, サプレッションチェンバ, NS方向, 質点31)

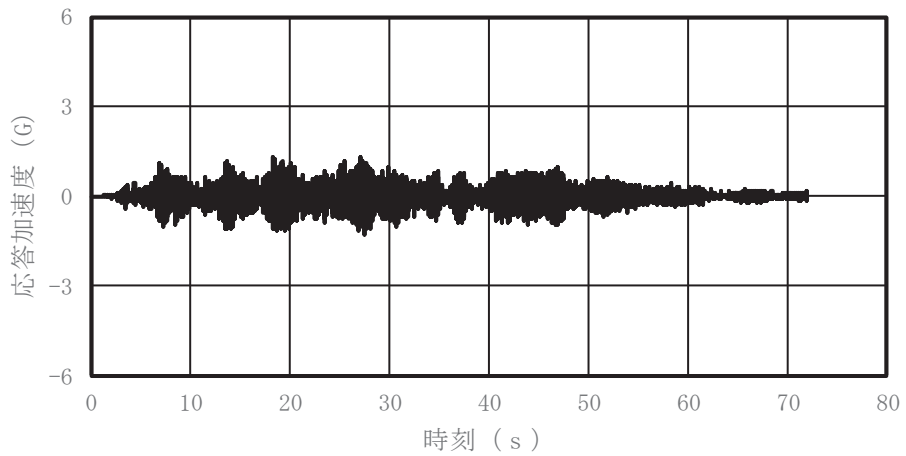


図9 時刻歴加速度 (2/3)

(HPCS-002, 基準地震動S_s-D2, サプレッションチェンバ, EW方向, 質点31)

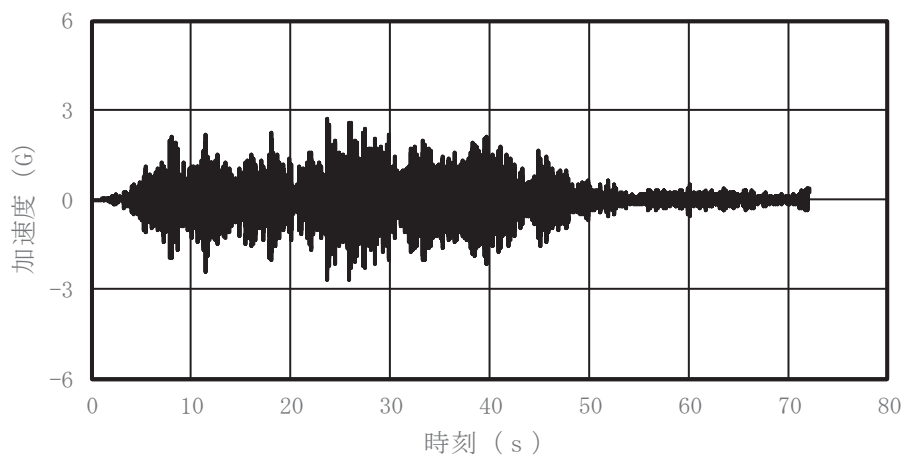


図9 時刻歴加速度 (3/3)

(HPCS-002, 基準地震動S_s-D2, サプレッションチェンバ, UD方向, 質点31)

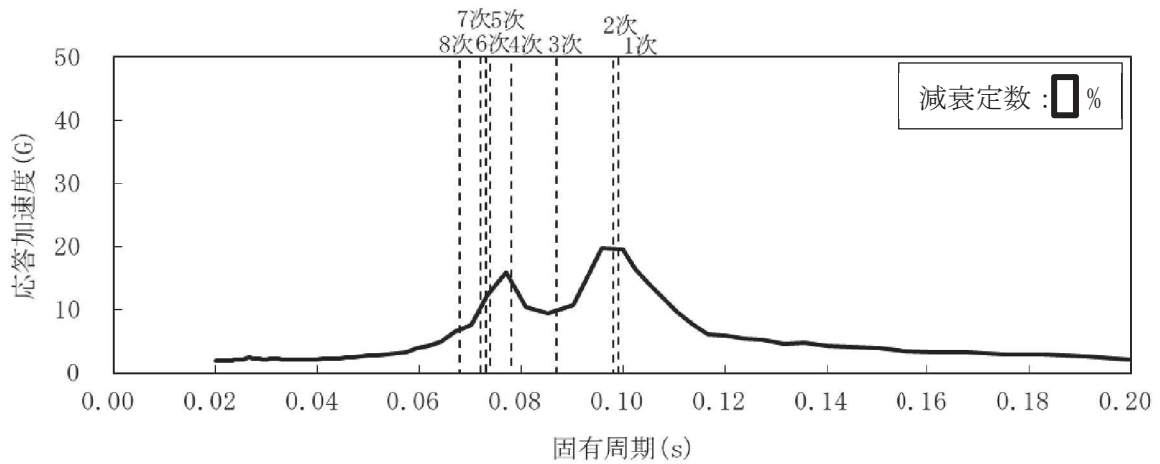


図10 床応答スペクトル (1/3)

(HPCS-002, 基準地震動S_s-D2, サプレッションチェンバ, NS方向, 質点31)

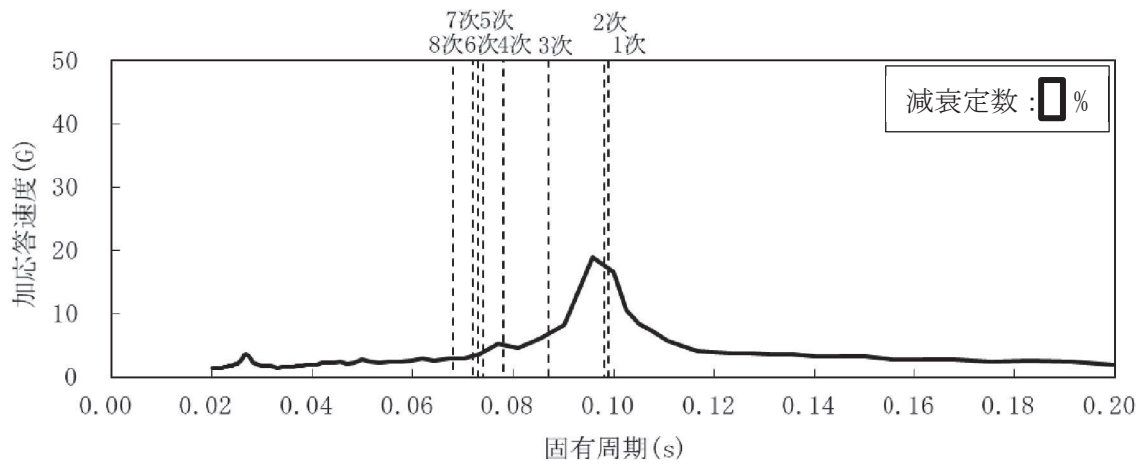


図10 床応答スペクトル (2/3)

(HPCS-002, 基準地震動S_s-D2, サプレッションチェンバ, EW方向, 質点31)

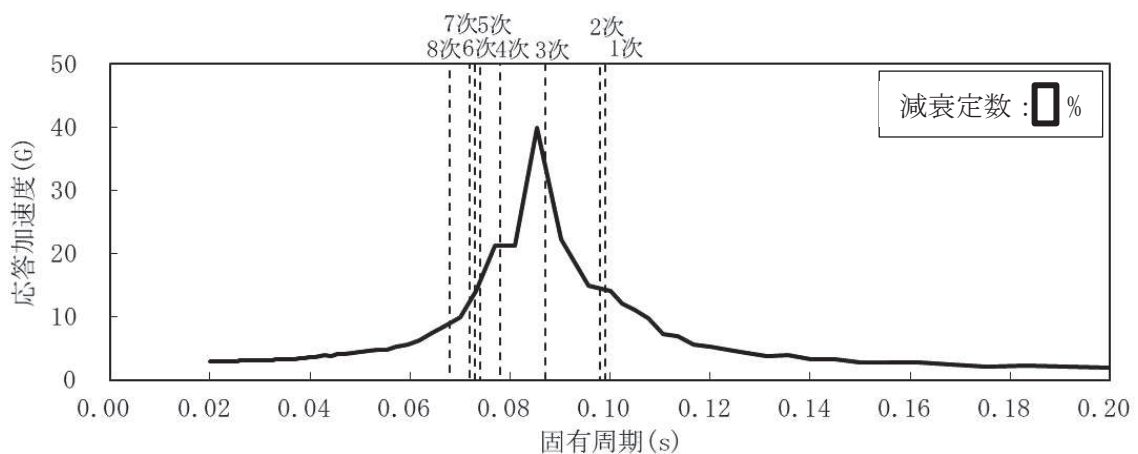


図10 床応答スペクトル (3/3)

(HPCS-002, 基準地震動S_s-D2, サプレッションチェンバ, UD方向, 質点31)

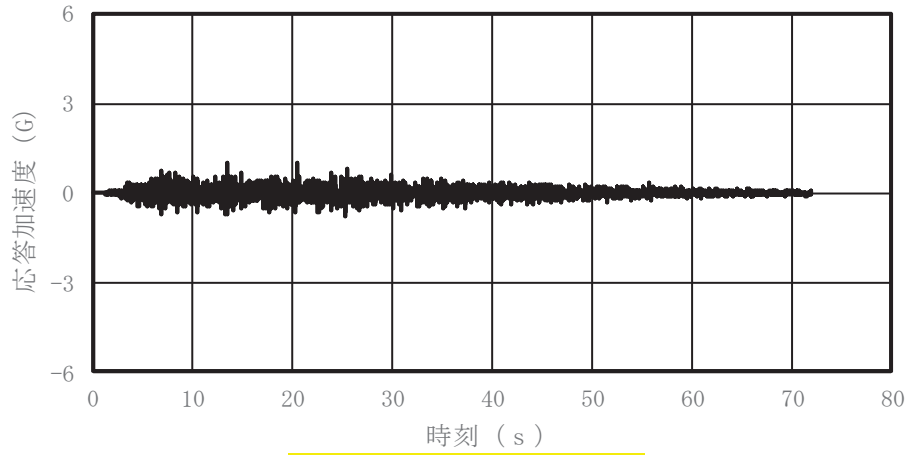


図 11 時刻歴加速度 (1/3)

(HPCS-002, 基準地震動S_s-D2, 原子炉建屋: 0.P. [] m, NS 方向)

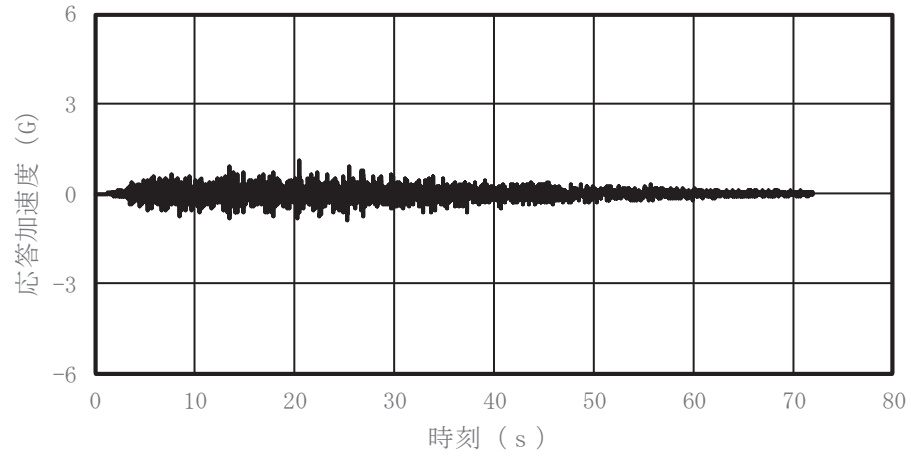


図 11 時刻歴加速度 (2/3)

(HPCS-002, 基準地震動S_s-D2, 原子炉建屋: 0.P. [] m, EW 方向)

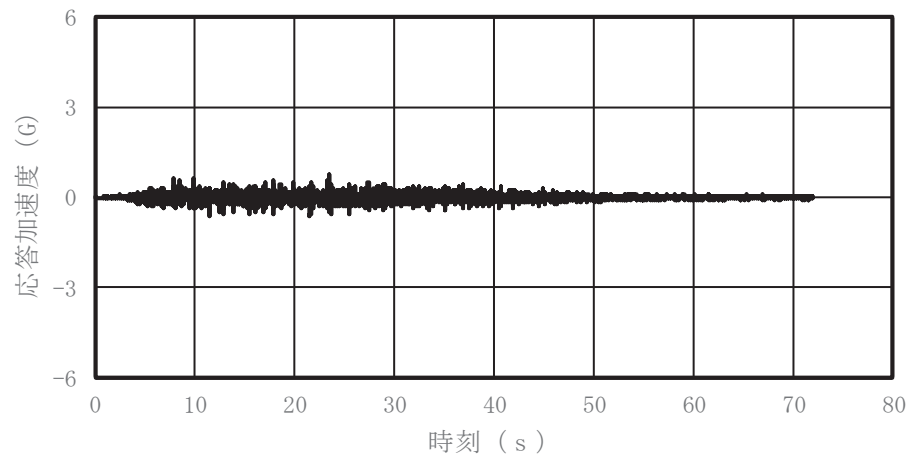


図 11 時刻歴加速度 (3/3)

(HPCS-002, 基準地震動S_s-D2, 原子炉建屋: 0.P. [] m, UD 方向)

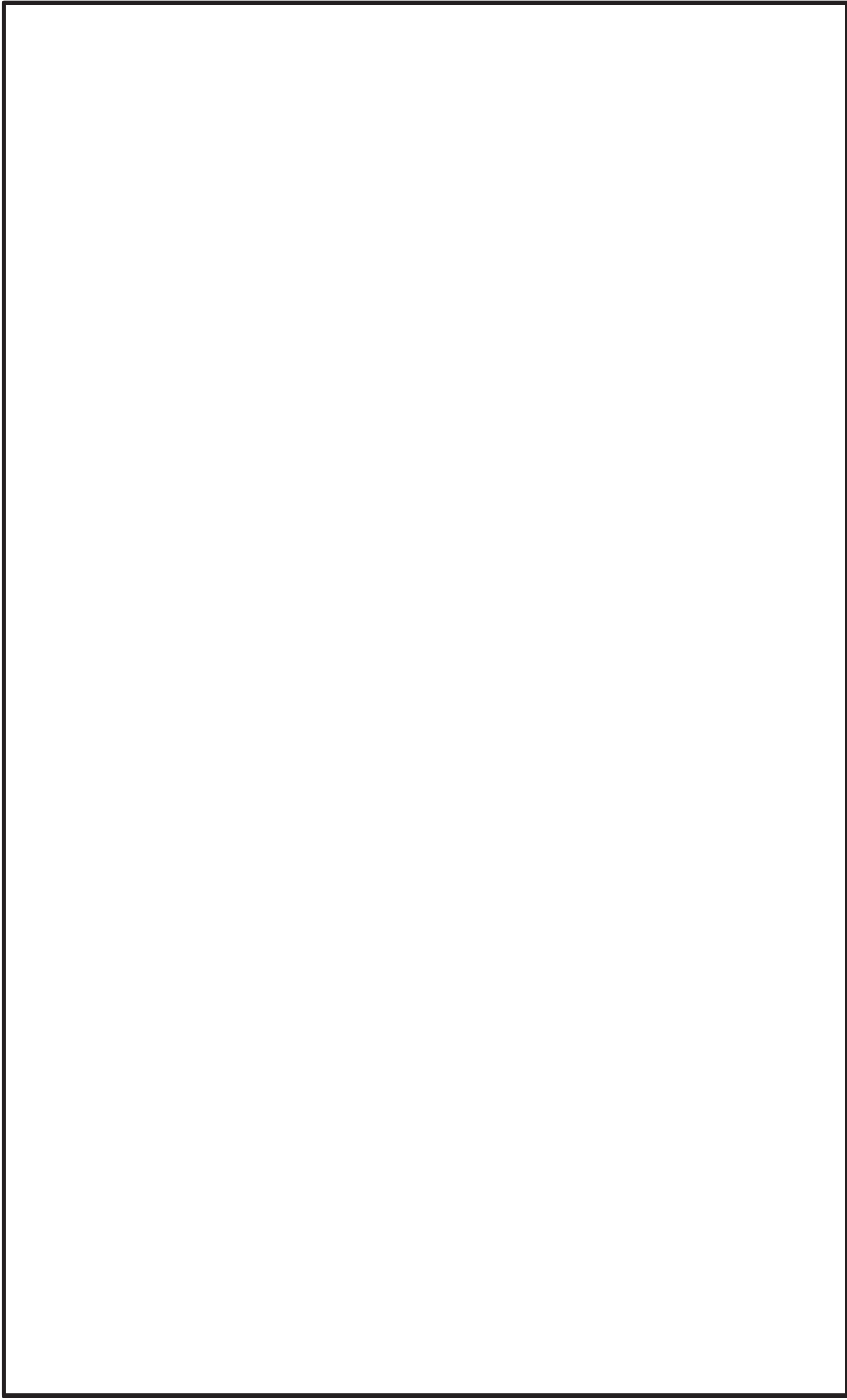


図 12 解析モデル図 (HPCS-002)

② スペクトルモード解析

スペクトルモード解析に用いる入力地震動は、サブプレッションチェンバの地震応答を考慮した多入力時刻歴応答解析の応答結果との比較の観点から S s - D 2 とし、配管設置位置の標高を包絡した床応答スペクトルを入力する。ここで、原子炉建屋の床応答スペクトルは、時刻歴応答解析の応答結果との比較の観点から、応答加速度を周期方向に拡幅しない。

RHR - 0 1 0 及び H P C S - 0 0 2 に対する応答スペクトルを図 13, 14 に示す。

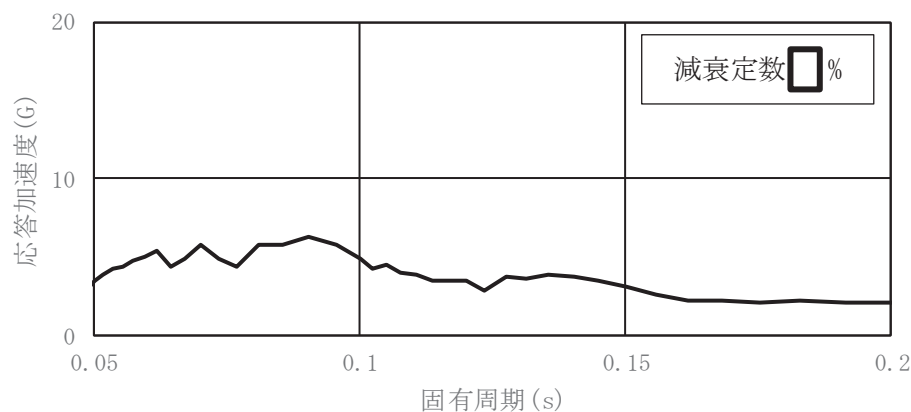


図 13 床応答スペクトル (1/2)

(基準地震動 S s - D 2, 原子炉建屋 : 0. P. [] m, 水平方向 (NS/EW 包絡))

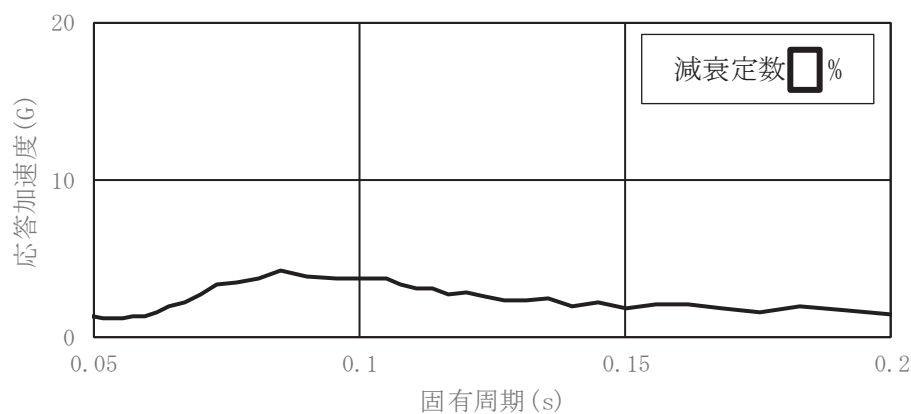


図 14 床応答スペクトル (2/2)

(基準地震動 S s - D 2, 原子炉建屋 : 0. P. [] m, UD 方向)

(4) 評価条件の比較

今回工認の耐震計算書及びS C接続配管の耐震評価方法に係る合理性の確認に適用する評価条件を表3示す。

表3 評価条件の比較

項目	今回工認	比較対象	
		①サプレッションチェンバの地震応答を考慮した多入力時刻歴応答解析	②スペクトルモーダル解析
解析モデル	構造に基づき設定	同左	同左
地震応答解析方法	スペクトルモーダル解析	多入力時刻歴応答解析*1	スペクトルモーダル解析
入力地震動	設計用床応答曲線 (周期方向に10%拡幅) ・原子炉建屋 (O.P. <input type="text"/> m)	時刻歴応答加速度 ・サプレッションチェンバ ・原子炉建屋 (O.P. <input type="text"/> m) *2	床応答スペクトル (周期方向への拡幅なし) ・原子炉建屋 (O.P. <input type="text"/> m)
地震動入力方向	水平2方向+鉛直方向	水平2方向+鉛直方向 (同時入力)	水平2方向+鉛直方向
減衰定数	設計用減衰定数 <input type="text"/> %	同左	同左

注記*1：設計用床応答曲線に含まれる保守性を考慮するため、基準となる時刻歴加速度波（固有周期シフトを考慮していないもの）による解析に加えて、時刻歴加速度波を時間軸方向に±10%シフトさせた時刻歴加速度波による解析等も実施する。また、時刻歴加速度の位相を反転させた評価も行う。

*2：RHR-010は、O.P. m、HPCS-002は、O.P. mを適用。

5. 確認結果

SC接続配管に対するサプレッションチェンバの地震応答を考慮した評価結果を表4の①、②及び表5に示す。

評価結果から、RHR-010については、①サプレッションチェンバの地震応答を考慮した多入力時刻歴応答解析による算出値が②スペクトルモーダル解析による算出値と同程度となることを確認した。

また、HPCS-002については、①サプレッションチェンバの地震応答を考慮した多入力時刻歴応答解析の算出値が②スペクトルモーダル解析による算出値を上回っているが、許容値に対して余裕があることを確認した。さらに、その比率（①/②=1.48）を今回工認の算出値に乗じた場合（ $1.48 \times 172 = 255$ ）であっても、許容値に対して余裕（ $335/255 = 1.31$ ）がある。

以上のことから、SC接続配管に対するサプレッションチェンバの地震応答の影響を確認した結果、算出値が増減するものの、算出値は許容値を下回っていることを確認できたことから、サプレッションチェンバに接続する配管の耐震評価に対して適用する床応答スペクトル及びこれを用いた耐震評価方法が合理性を有するものと判断した。

表4 評価結果

解析モデル	①サプレッションチェンバの地震応答を考慮した多入力時刻歴応答解析*1			②スペクトルモーダル解析			今回工認		
	算出値 (MPa)	許容値 (MPa)	裕度 *2	算出値 (MPa)	許容値 (MPa)	裕度 *2	算出値 (MPa)	許容値 (MPa)	裕度 *2
RHR-010*3	171 (29)	363	2.12	185 (29)	363	1.96	210 (29)	363	1.72
HPCS-002	216 (75)	335	1.55	146 (75)	335	2.29	172 (75)	335	1.94

注記*1：入力時刻歴の時間シフト（±10%）及び時刻歴の位相反転を考慮した時刻歴応答解析の結果のうち裕度最小の値を記載。詳細は、表5参照

*2：許容値/算出値を表す。

*3：括弧内は応力評価点を表す。

表5 サプレッションチェンバの地震応答を考慮した多入力時刻歴応答解析結果

解析モデル	検討ケース	発生値 (MPa)	許容値(MPa)	裕度
RHR-010	基本ケース(+++)	171(29)	363	2.12
	時間シフト+10%	153(29)	363	2.37
	時間シフト-10%	187(29)	363	1.94
	位相反転(--+)	150(17)	363	2.42
	位相反転 (-++)	163(29)	363	2.22
	位相反転 (++-)	191(29)	363	1.90
HPCS-002	基本ケース(+++)	180(75)	335	1.86
	時間シフト+10%	153(75)	335	2.18
	時間シフト-10%	132(75)	335	2.53
	位相反転(--+)	160(75)	335	2.09
	位相反転 (-++)	216(75)	335	1.55
	位相反転 (++-)	185(75)	335	1.81

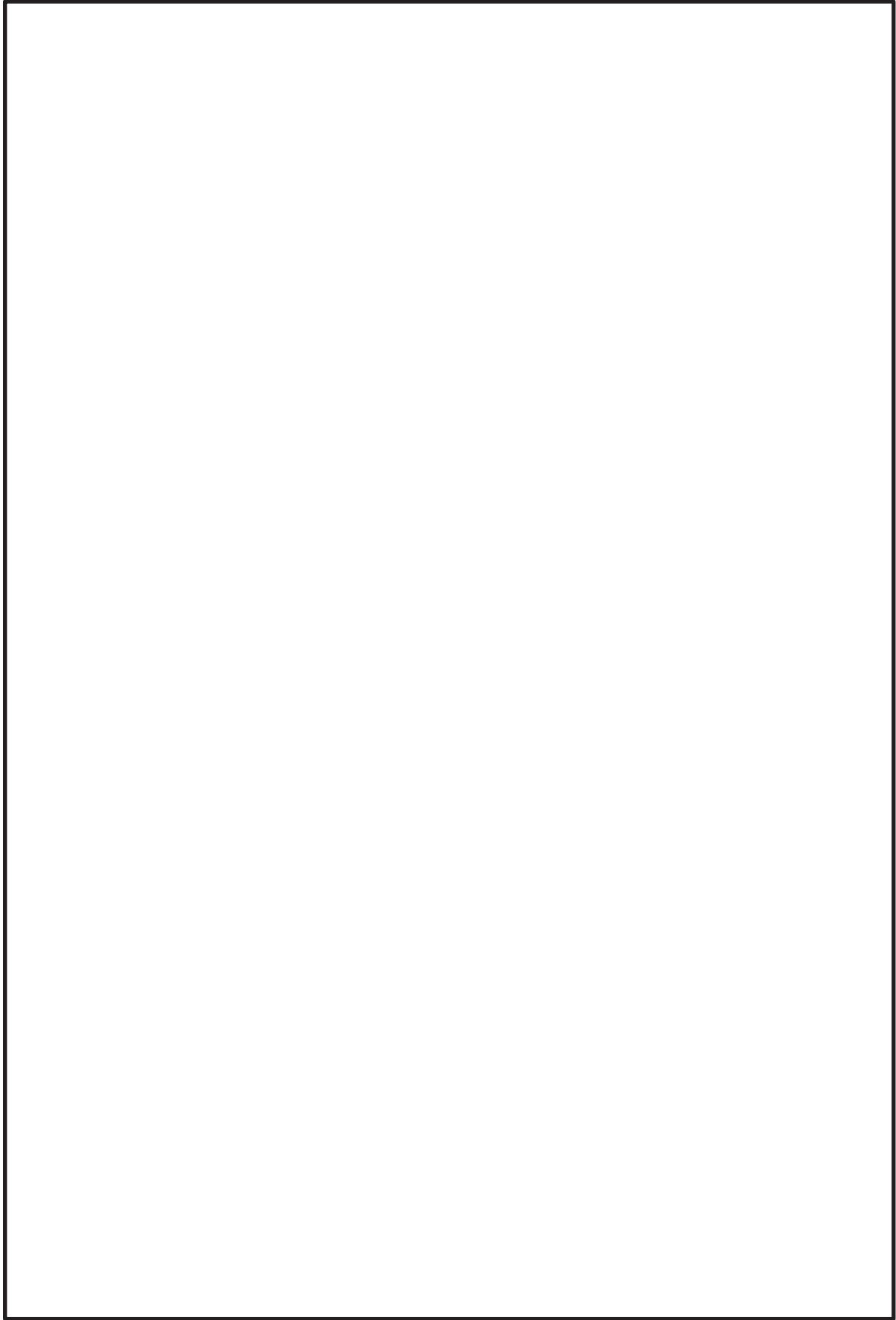
対象配管の固有値解析結果

配管モデル（RHR-010）に対する固有値解析結果を参表1に、振動モード図（1次～4次モード）を参図1,2に示す。また、配管モデル（HPCS-002）に対する固有値解析結果を参表2に、振動モード図（1次～4次モード）を参図3,4に示す。

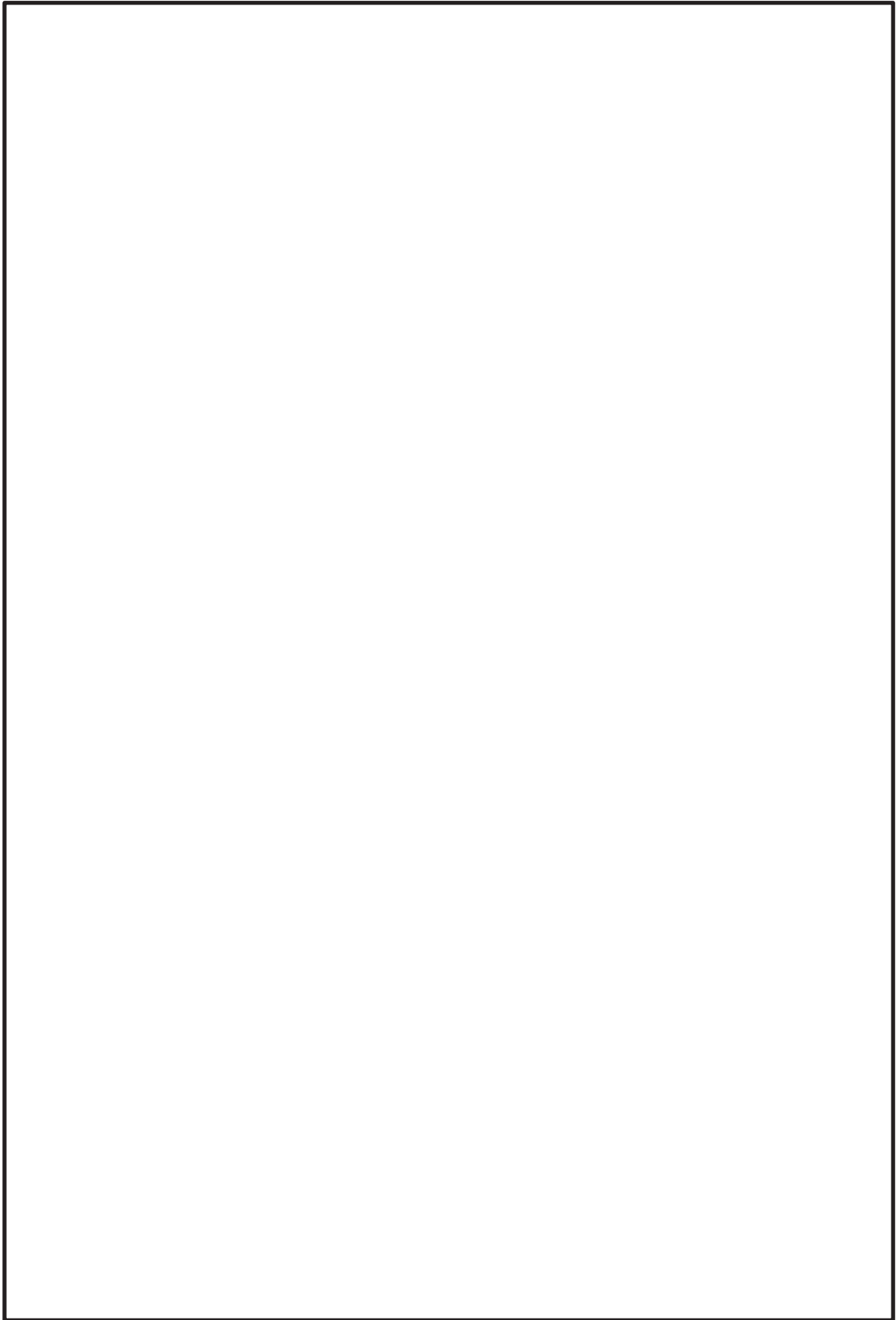
参表1 固有値解析結果

モード	固有周期 (s)	刺激係数		
		X方向	Y方向	Z方向
1次				
2次				
3次				
4次				
5次				
6次				
7次				
8次				
14次				

注記*: 刺激係数は、モード質量を正規化し、固有ベクトルと質量マトリックスの積から算出した値を示す。



参図1 振動モード図（上段：1次モード，下段：2次モード）

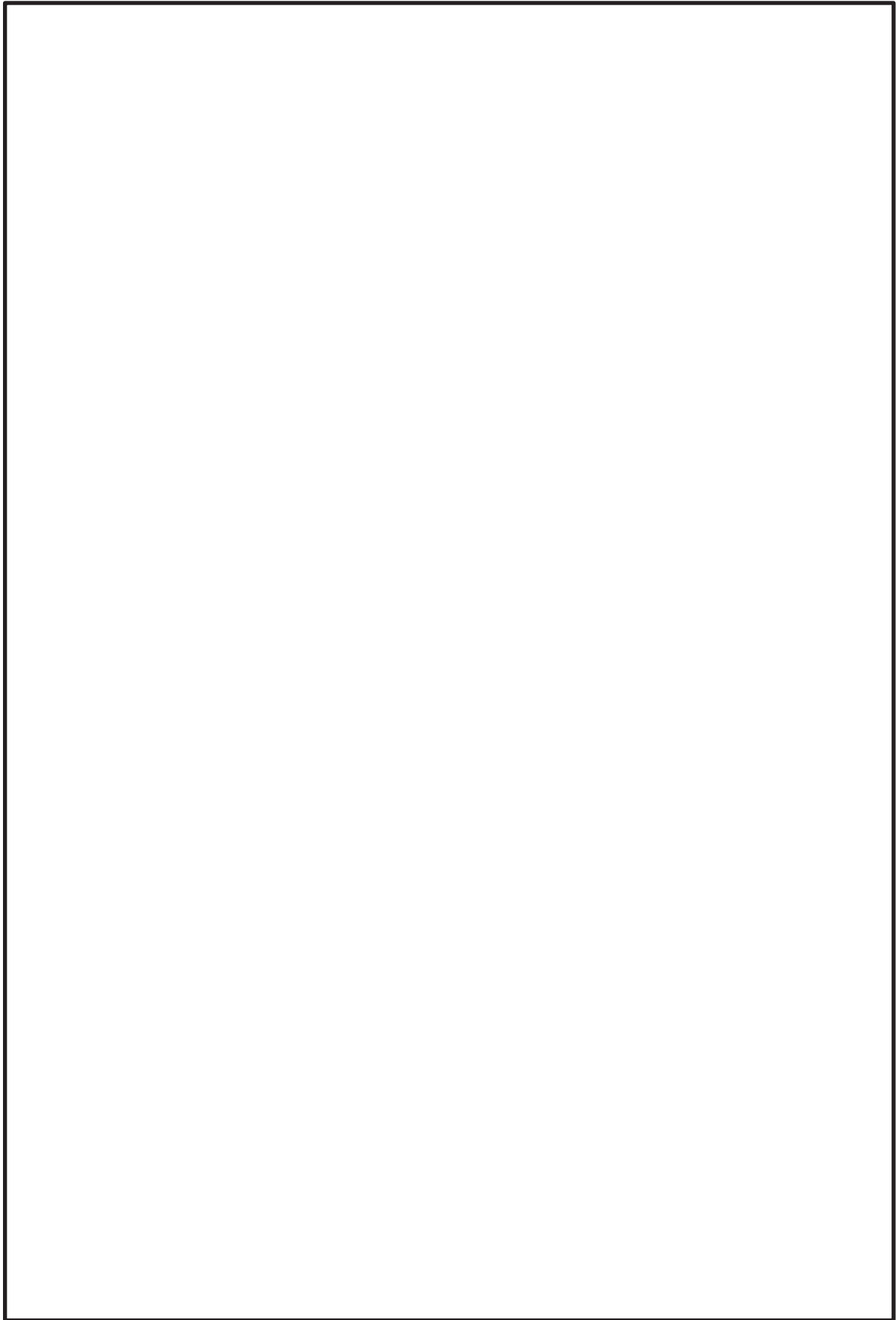


参図 2 振動モード図 (上段 : 3 次モード, 下段 : 4 次モード)

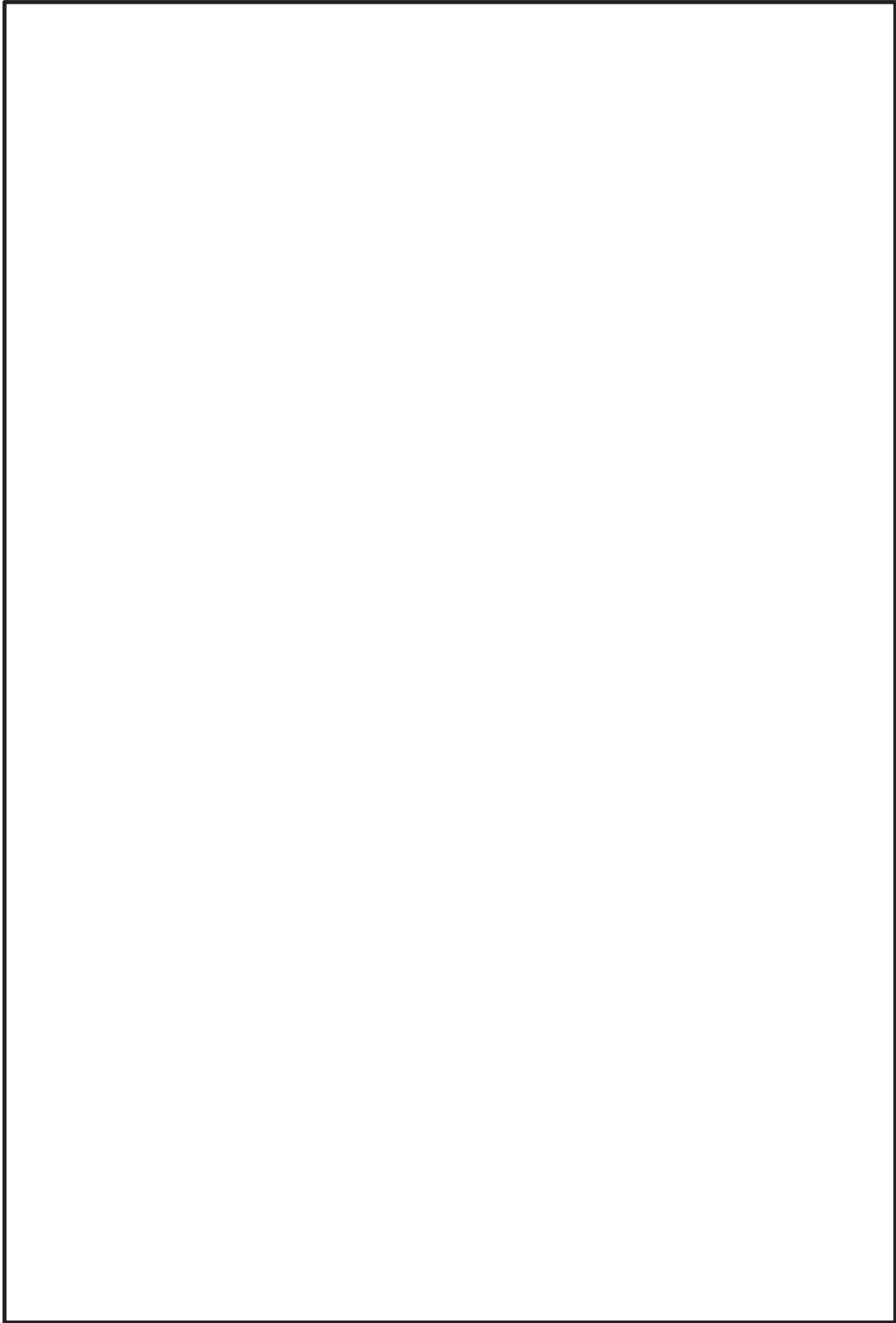
参表2 固有値解析結果

モード	固有周期 (s)	刺激係数*		
		X方向	Y方向	Z方向
1次				
2次				
3次				
4次				
5次				
6次				
7次				
8次				
14次				

注記*: 刺激係数は、モード質量を正規化し、固有ベクトルと質量マトリックスの積から算出した値を示す。



参図 3 振動モード図（上段：1次モード，下段：2次モード）



参図4 振動モード図（上段：3次モード，下段：4次モード）