

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2
提出年月日	2021年11月4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】

目 次

1. はじめに	1
2. 今回工認における配管の耐震評価方法	3
3. 今回工認におけるサプレッションチェンバ接続配管の耐震評価方法	3
4. サプレッションチェンバ接続配管の耐震評価に対するサプレッションチェンバの地震応答に関する影響確認	6
5. 影響確認結果	32

別紙1 サプレッションチェンバ接続配管の解析モデル図

別紙2 HPCS-002の算出値に対する考察

別紙3 サプレッションチェンバの地震応答加速度を包絡した設計用床応答曲線を用いたスペクトルモーダル解析による影響確認

参考1 時刻歴応答解析とスペクトルモーダル解析との比較

参考2 確認対象配管の固有値解析結果

参考3 サプレッションチェンバ接続配管の時刻歴解析に用いた応力算出方法

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曲線を適用している。

「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。」

サブプレッションチェンバに接続する配管については、上記基本方針の前半の記載「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」ではなく、ただし書き「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」を踏まえた設計用床応答曲線を適用した耐震評価を実施している。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設計用床応答曲線及びこれを用いた耐震評価方法が基本方針に則っており合理的なものであ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-2-5-4-1-4 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. 今回工認における配管の耐震評価方法

今回工認の配管の耐震評価に当たっては、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」（以下、「基本方針」という。）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。

原子炉圧力容器に接続する配管及びサ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。）を除く工認対象配管は、工認添付書類の基本方針（前半部分）の記載「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」に従って、配管系が設置されている位置を包絡した設計用床応答曲線を適用した耐震評価を行っている。

原子炉圧力容器に接続する配管については、既工認と同じ方法として、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曲線を適用している。

SC接続配管については、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、より実態に応じたサプレッションチェンバ地震応答の考慮として既工認とは異なる方法で設計用床応答曲線を設定している。

3. 今回工認におけるサプレッションチェンバ接続配管の耐震評価方法

SC接続配管については、既工認では、サ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）、SC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。

これを踏まえて、今回工認におけるSC接続配管の耐震評価にあたっては、より実態に応じたサプレッションチェンバ地震応答を考慮するため、適用する設計用床応答曲線の設定方法等に配慮し、既工認とは異なる方法で耐震評価を行う。

(1) 設計用床応答曲線の設定方法

女川2号機の工認対象のSC接続配管は全16モデル（別紙1参照）である。いずれの配管モデルもサプレッションチェンバとの接続部を含み、原子炉建屋内の広範囲に設置されており、配管の重心位置は原子炉建屋側にあるとともに、原子炉建屋に多くサポートが設置されている。

JEAG4601-1987では、配管の耐震評価に適用する床応答スペクトルについては、「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」と記載されている。

また、女川2号機の今回工認では、配管の耐震評価に適用する設計用床応答曲線の設定に当たり、基本方針（前半部分）には「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」に加えて、基本方針（ただし書き）には「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」と記載している。

ここで、女川2号機のSC接続配管の設置状況に対して、上記基本方針（前半部分）の「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」に則った場合、設計用床応答曲線は原子炉建屋の地震応答及びサブプレッションチェンバの地震応答の両者を包絡したものとなる。この設計用床応答曲線を用いた耐震評価では、サブプレッションチェンバの地震応答がサブプレッションチェンバから遠く離れた配管に対しても解析上は影響を及ぼすこととなり、配管のサポート設置状況や重心位置が適切に加味されず、過度に保守的な評価となる。

こうした状況を踏まえ、今回の耐震評価におけるSC接続配管に対する設計用床応答曲線は、基本方針（ただし書き）「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」の記載に則って設定する。

具体的には、JEAG4601に従って、女川2号機の工認対象のSC接続配管全16モデルについて、重心位置が原子炉建屋側にあること及び多くのサポートが原子炉建屋に設置されていることを確認した上で、重心位置の上階の床応答スペクトルを適用するよう配慮している。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するよう配慮している。

(2) サプレッションチェンバの地震応答に対する設計配慮

サブプレッションチェンバの地震応答に対する配慮として、サブプレッションチェンバとの接続位置にサブ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。

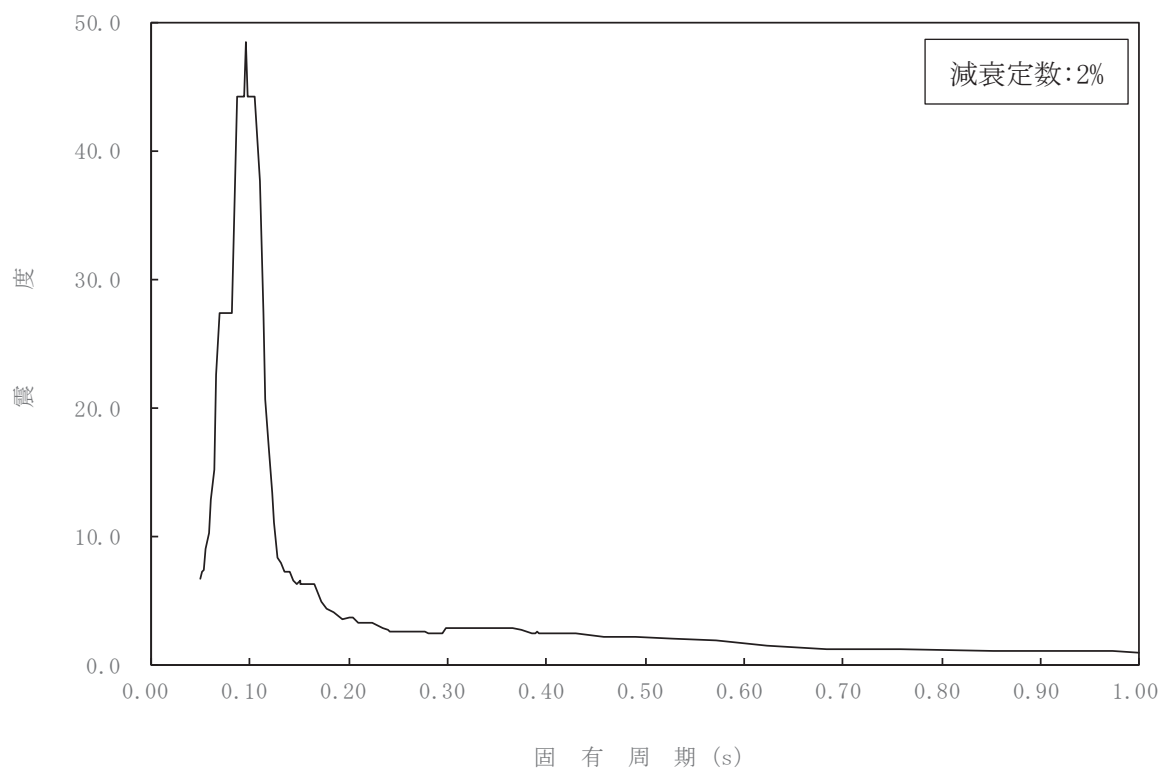
(1), (2)no

設計用床応答曲線の設定方法等は、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曲線を適用し、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原子炉圧力容器に接続する配管についても同様である（「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）。

以上のことから、今回工認におけるSC接続配管の耐震評価は、基本方針に則って配管のサポート設置状況や重心位置を適切に加味した原子炉建屋の設計用床応答曲線を適用しており、より実態に応じた合理的な評価を行っていると言える。



図1 サプレッションチェンバの地震応答解析モデル



注*：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. サプレッションチェンバ接続配管の耐震評価に対するサプレッションチェンバの地震応答に関する影響確認

SC接続配管の耐震評価に対するサプレッションチェンバの地震応答の影響に関して、今回工認におけるSC接続配管の耐震評価方法がより実態に応じた合理的な評価方法であることを定量的に補足するため、サプレッションチェンバの地震応答の影響が考えられる配管モデルに対し、より精緻な耐震評価としての多入力時刻歴応答解析及び過度に保守的な耐震評価としてのスペクトルモーダル解析（配管系が設置されている位置（サプレッションチェンバを含む）を包絡する設計用床応答曲線を適用）による影響確認を行う。

また、SC接続配管上のサプレッションチェンバ内に設置された重量物であり、サプレッションチェンバの地震応答の影響が想定されるストレーナの耐震評価に対しても、影響確認を行う。

a. 確認対象配管モデル

SC接続配管の耐震評価に対するサ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、サプレッションチェンバの地震応答加速度の影響が想定される配管モデルとして、サ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、今回工認で原子炉建屋の設計用床応答曲線を用いているSC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。なお、別紙1に示すSC接続配管の解析モデル図を確認すると、RHR-010については、モデル化範囲がサプレッションチェンバまわりで比較的小さいモデルとなっており、他の配管モデルよりサプレッションチェンバの地震応答影響を比較的受けやすいと考えられる。また、HPCS-002については、重量物であるストレーナを有する配管モデルであり、他のストレーナを有する配管モデルと同様なモデルとなっており、サプレッションチェンバの地震応答影響は同等であると考えられる。

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		

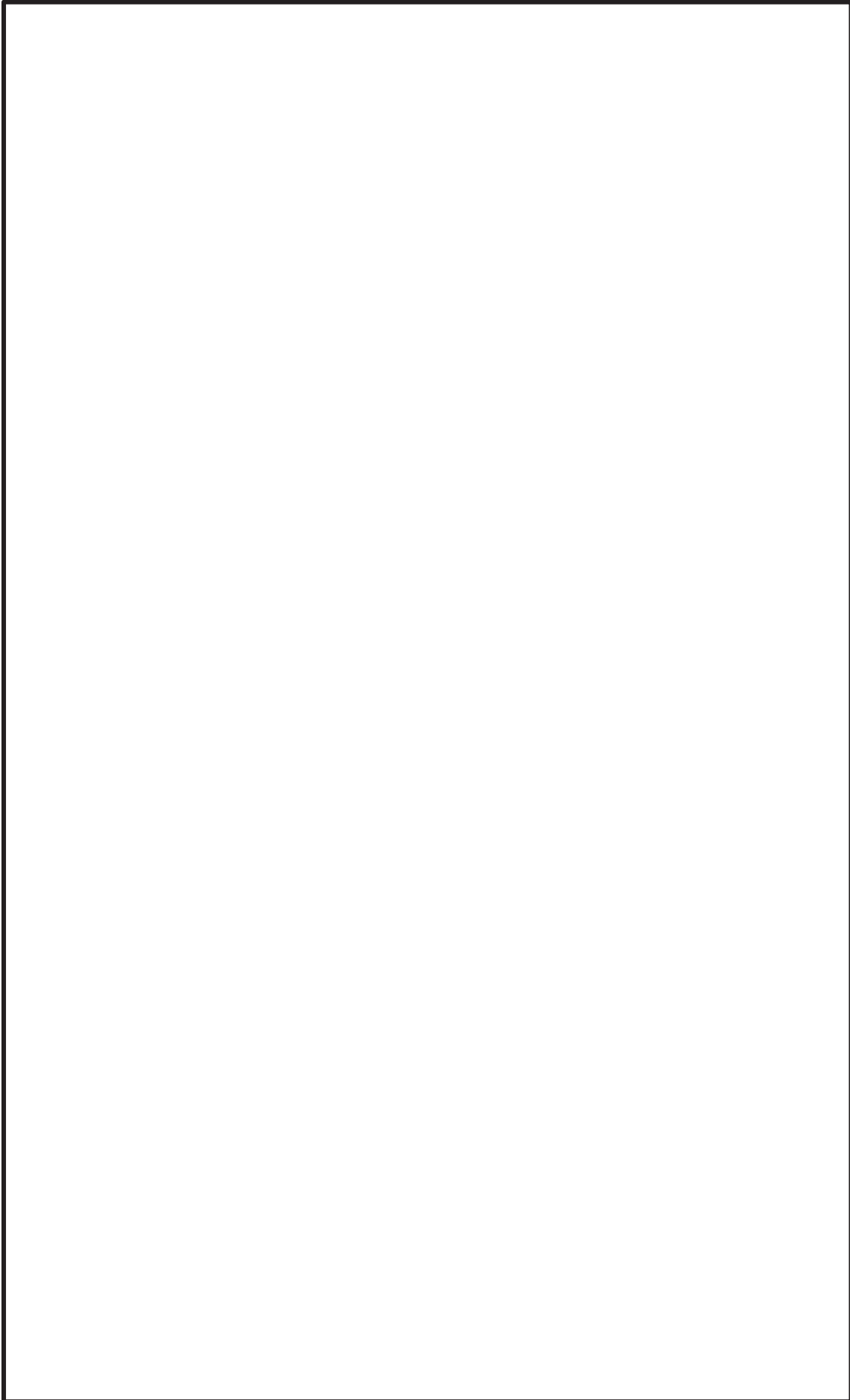


図3 解析モデル図 (RHR-010)

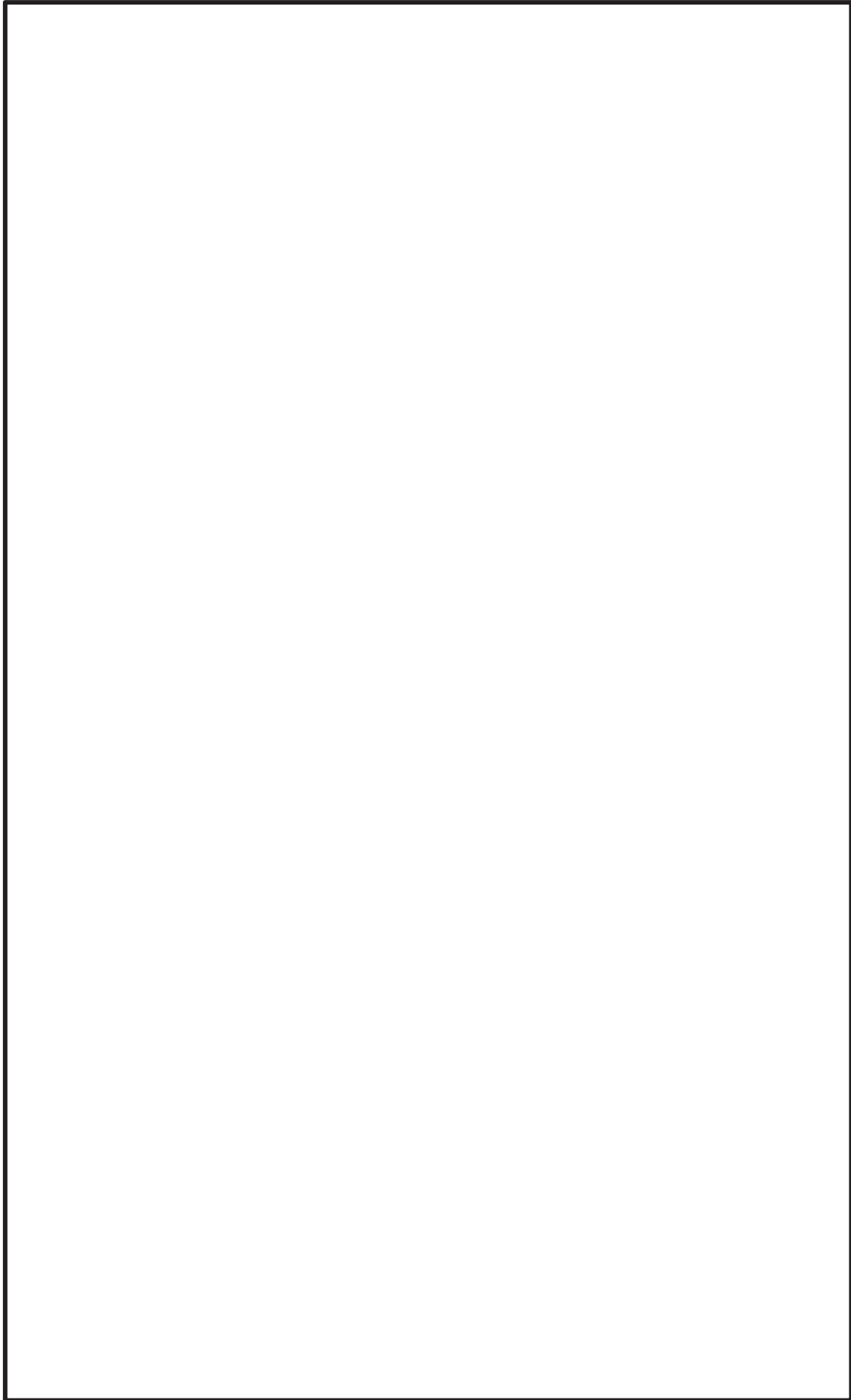


図4 解析モデル図 (HPCS-002)

b. 地震応答解析方法

今回工認におけるS C接続配管の耐震評価方法（重心位置が原子炉建屋側にあること及び多くのサポートが原子炉建屋に設置されていることを確認した上で、重心位置の上階の床応答スペクトルを適用したスペクトルモーダル解析）に対し、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（以下、「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」という。）(①)及びサブプレッションチェンバの地震応答加速度と原子炉建屋の地震応答加速度を包絡した設計用床応答曲線を用いたスペクトルモーダル解析(②)を行う。

c. 入力地震動

① 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

i) 入力地震動と入力位置

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。原子炉建屋の地震応答解析モデルは多軸モデルであるため、近接する原子炉建屋の中心軸の時刻歴加速度を用いる。

サブプレッションチェンバの地震応答解析モデルに対する確認対象配管モデル(RHR-010)の接続位置及び多入力時刻歴応答解析における時刻歴加速度の入力位置を図5,6に、原子炉建屋の地震応答解析モデルにおける時刻歴加速度の取り出し位置を図7に示す。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及びその床応答スペクトルを図8,9に、原子炉建屋の時刻歴加速度及びその床応答スペクトルを図10,11に、解析モデルと時刻歴加速度入力位置の関係を図12に示す。

また、サブプレッションチェンバに対する配管モデル(HPCS-002)の接続位置及び多入力時刻歴応答解析における時刻歴加速度の入力位置を図13,14に、原子炉建屋地震応答解析モデルに対する時刻歴加速度の取り出し位置を図15に示す。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及びその床応答スペクトルを図16,17に、原子炉建屋の時刻歴加速度及びその床応答スペクトルを図18,19に、解析モデルと時刻歴加速度入力位置の関係を図20に示す。

ii) 時刻歴応答解析に対する床応答スペクトルの拡幅相当の検討

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, DIVISION1-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、±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 サプレッションチェンバの地震応答解析モデルに対する確認対象配管モデル
(RHR-010)の接続位置

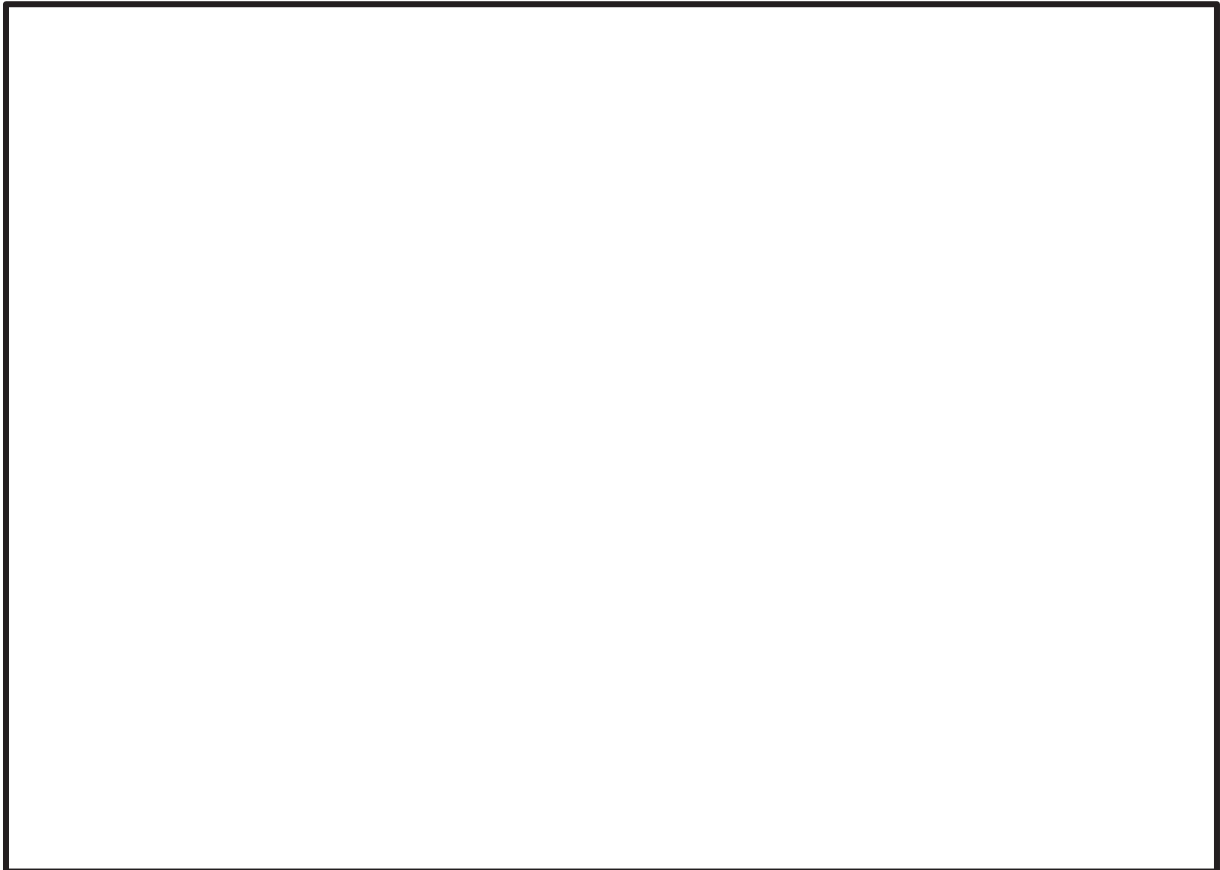
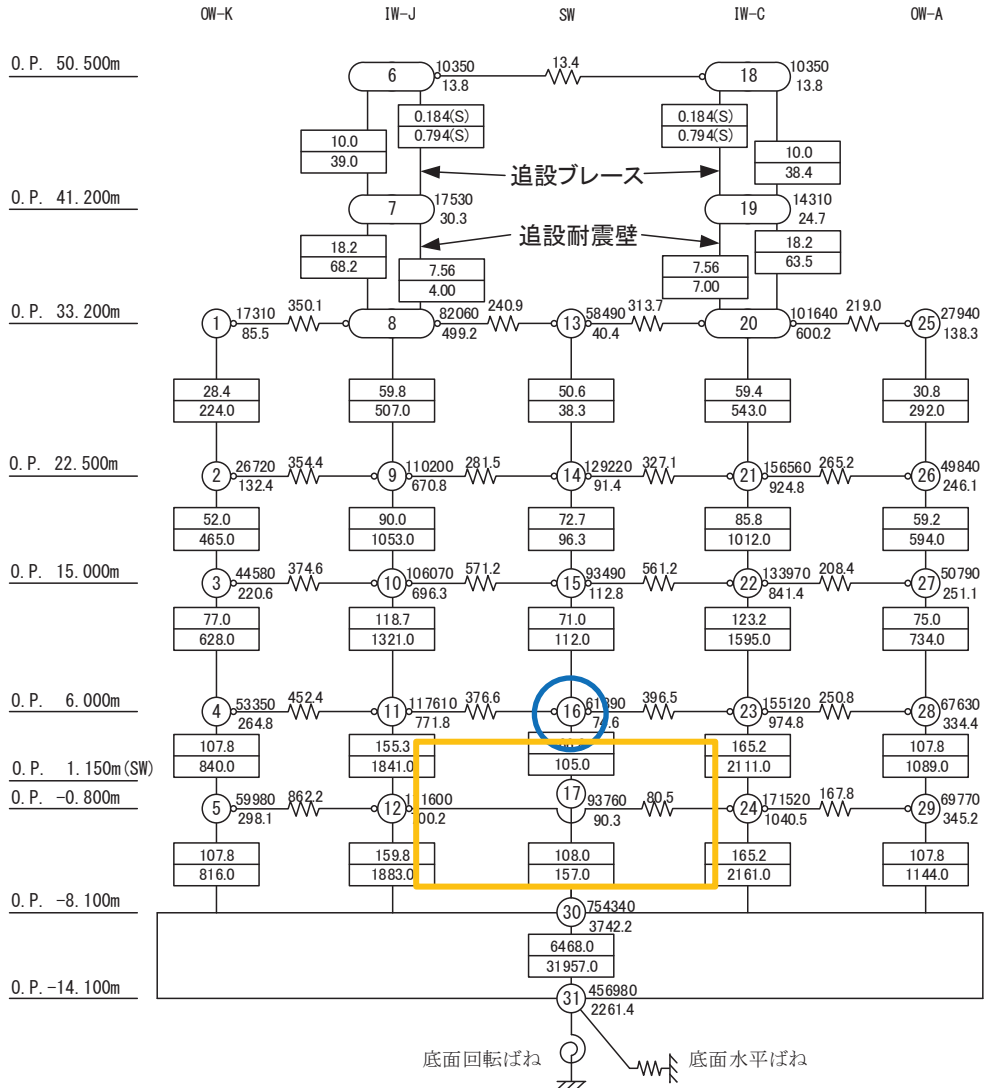
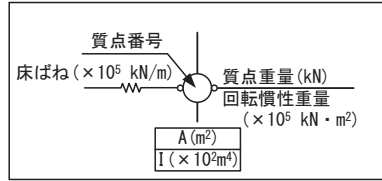


図6 多入力時刻歴応答解析における時刻歴加速度の入力位置

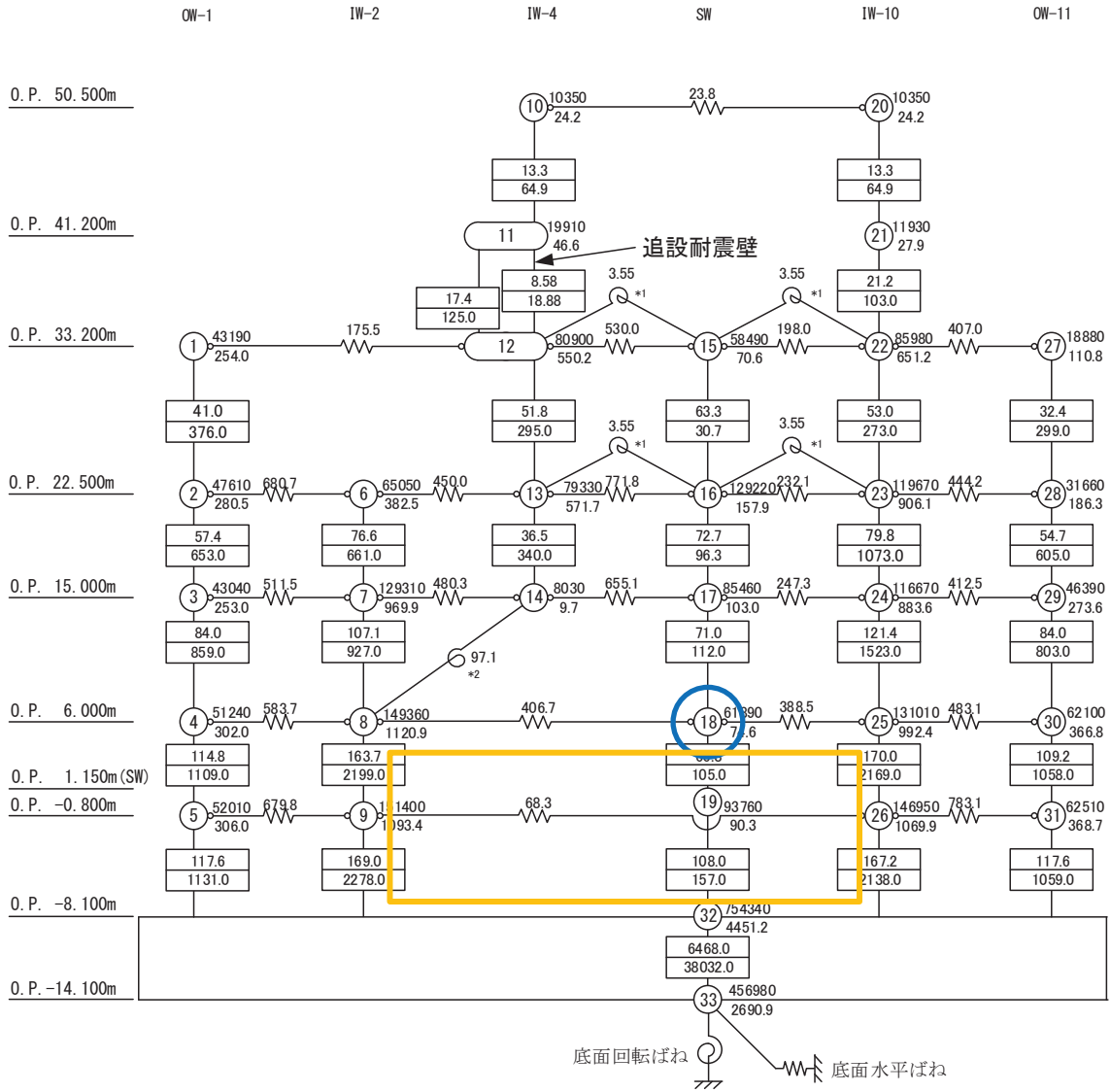
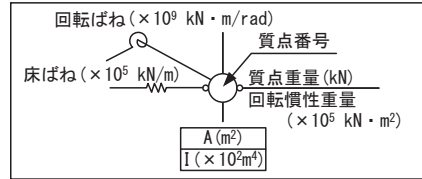
$E_c = 1.99 \times 10^4 \text{ N/mm}^2$
 $7.94 \times 10^3 \text{ N/mm}^2$ (燃料取替床上部)
 $2.52 \times 10^4 \text{ N/mm}^2$ (追設耐震壁)
 $G_c = 8.53 \times 10^3 \text{ N/mm}^2$
 $3.41 \times 10^3 \text{ N/mm}^2$ (燃料取替床上部)
 $1.05 \times 10^4 \text{ N/mm}^2$ (追設耐震壁)
 $E_s = 2.05 \times 10^5 \text{ N/mm}^2$ (追設ブレース)
 $G_s = 7.90 \times 10^4 \text{ N/mm}^2$ (追設ブレース)



- : 時刻歴加速度の取り出し位置
- : サプレッションチェンバ設置位置

図7 原子炉建屋の地震応答解析モデルにおける時刻歴加速度の取り出し位置 (NS方向)

$E_c = 2.12 \times 10^4 \text{ N/mm}^2$
 $1.32 \times 10^4 \text{ N/mm}^2$ (燃料取替床上部)
 $2.52 \times 10^4 \text{ N/mm}^2$ (追設耐震壁)
 $G_c = 9.10 \times 10^3 \text{ N/mm}^2$
 $5.69 \times 10^3 \text{ N/mm}^2$ (燃料取替床上部)
 $1.05 \times 10^4 \text{ N/mm}^2$ (追設耐震壁)



- : 時刻歴加速度の取り出し位置
- : サプレッションチェンバ設置位置

図7 原子炉建屋の地震応答解析モデルにおける時刻歴加速度の取り出し位置 (EW方向)

$$E_c = 2.65 \times 10^4 \text{ N/mm}^2$$

$$G_c = 1.14 \times 10^4 \text{ N/mm}^2$$

トラス部の断面性能 (As, I) はRC等価な値にて与える

せん断断面積 ($\times 10^{-2} \text{ m}^2$)
 断面二次モーメント (m^4)

質点番号
 質点重量 (kN)
 軸ばね ($\times 10^7 \text{ kN/m}$)

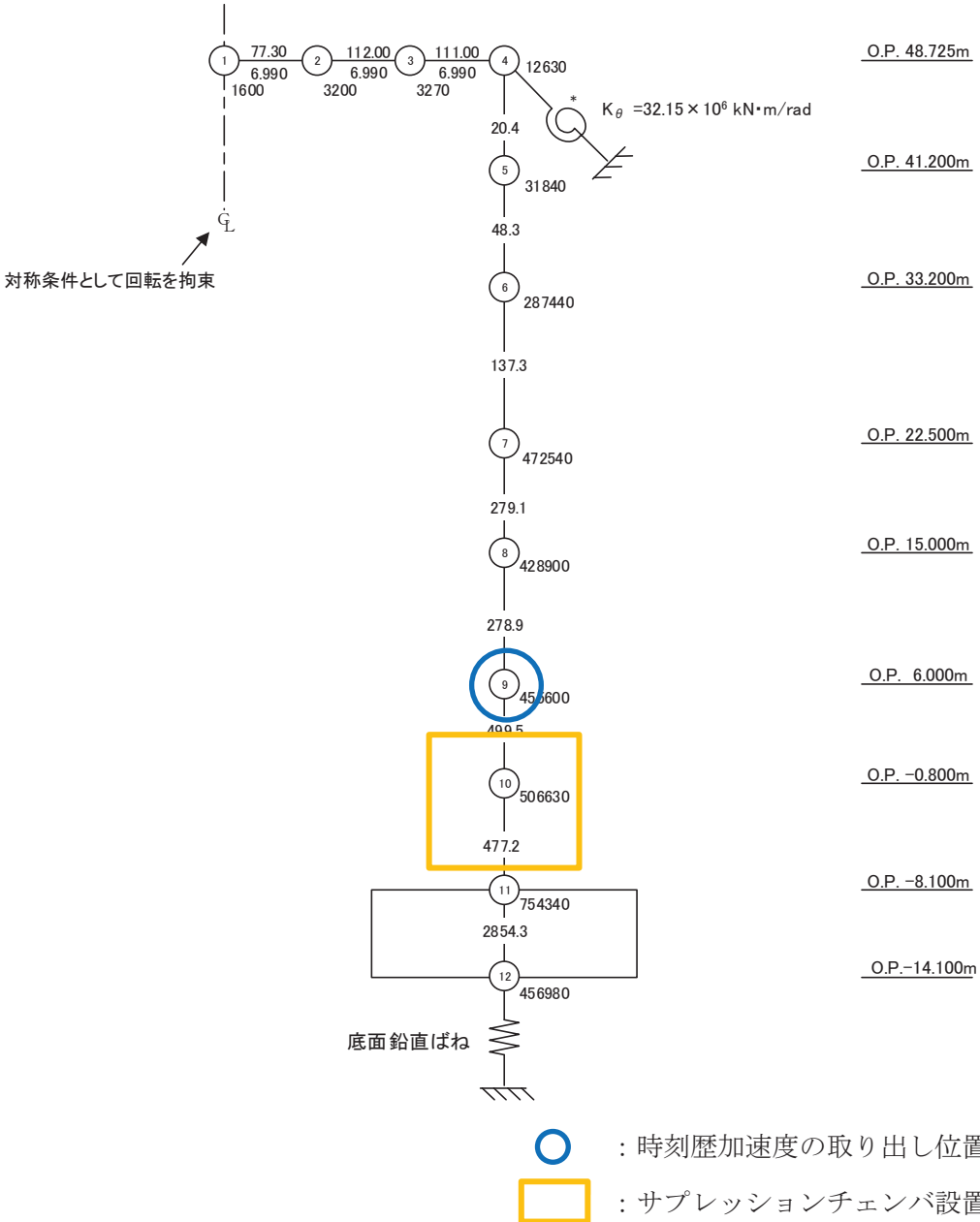


図7 原子炉建屋の地震応答解析モデルにおける時刻歴加速度の取り出し位置(UD方向)

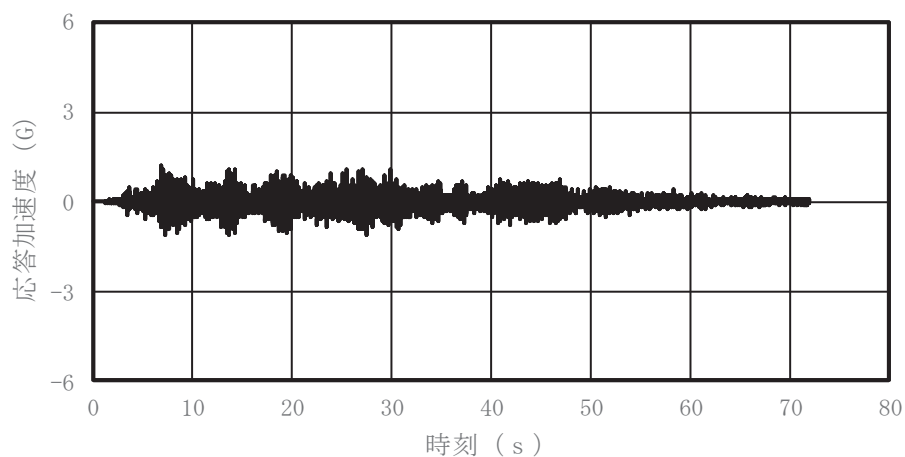


図 8 時刻歴加速度 (1/3)

(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)

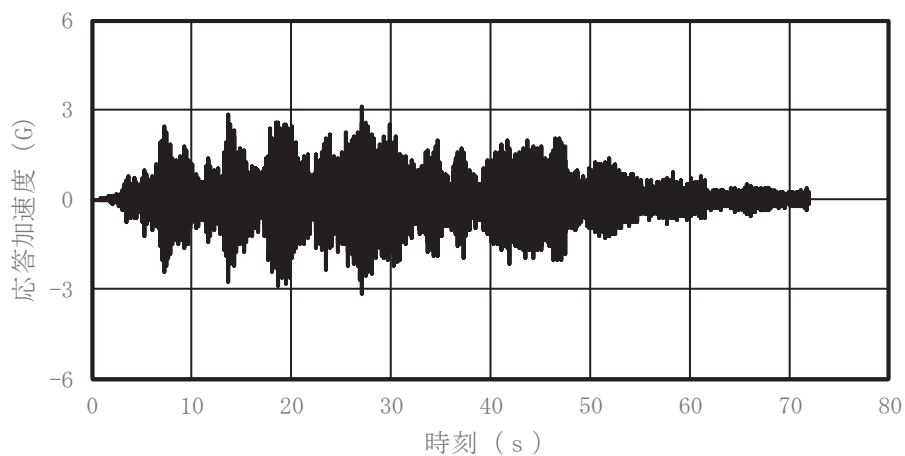


図 8 時刻歴加速度 (2/3)

(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)

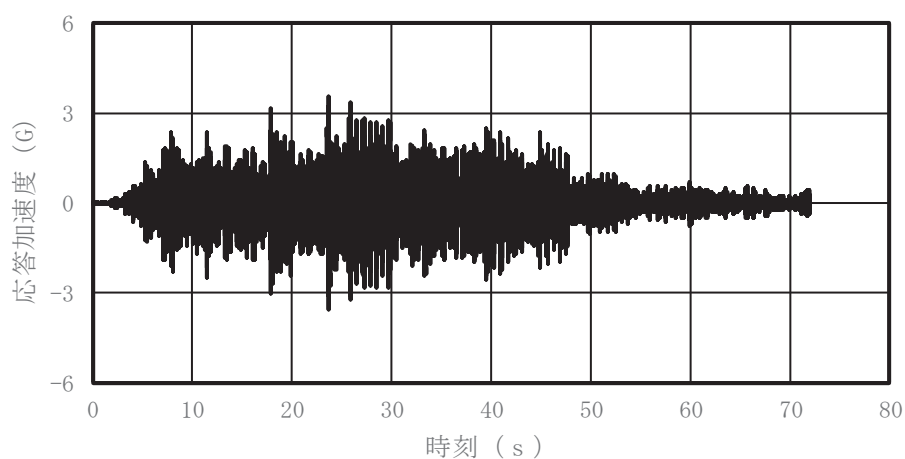


図 8 時刻歴加速度 (3/3)

(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)

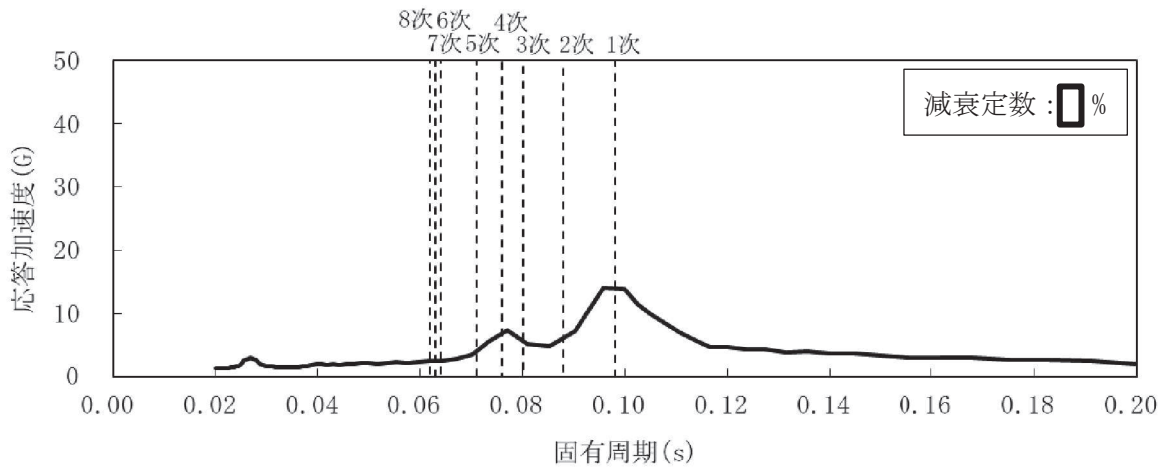


図9 床応答スペクトル (1/3)

(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)

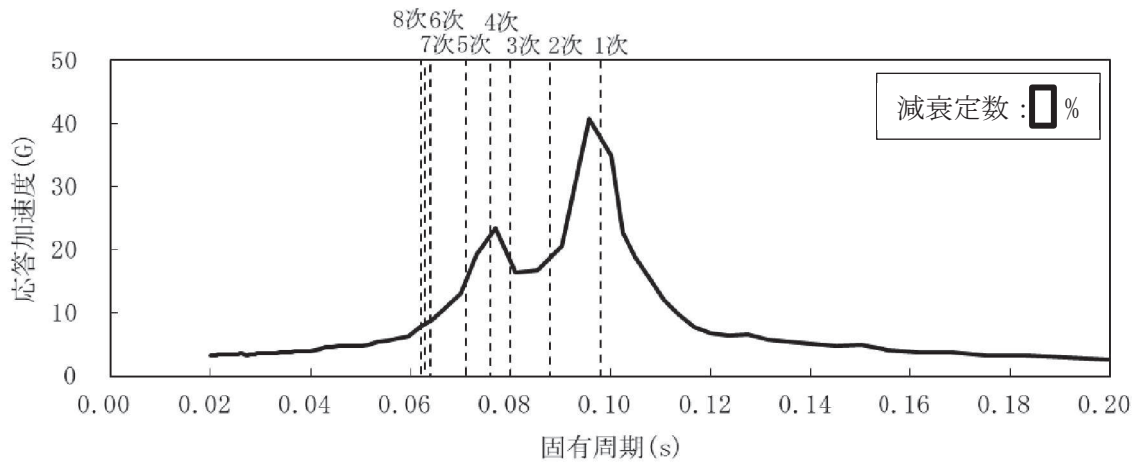


図9 床応答スペクトル (2/3)

(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)

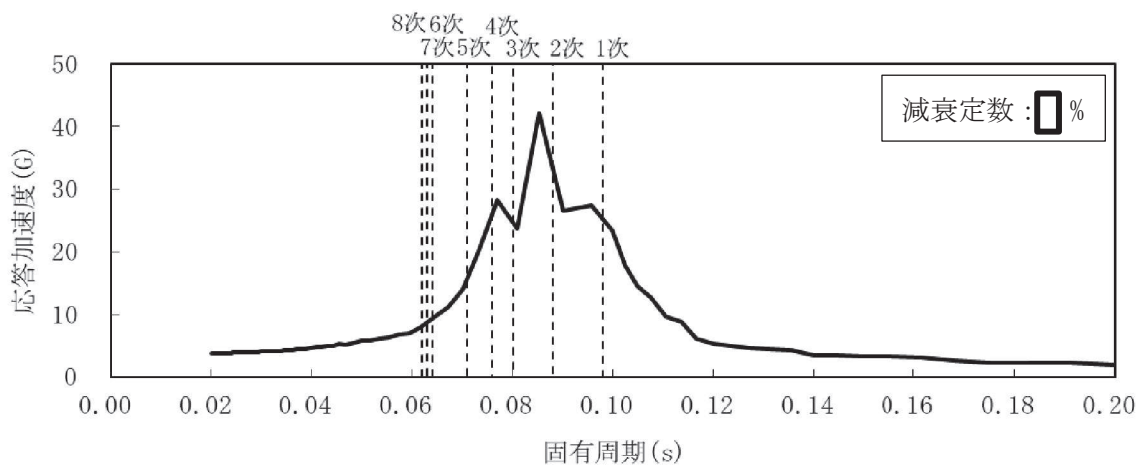


図9 床応答スペクトル (3/3)

(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)

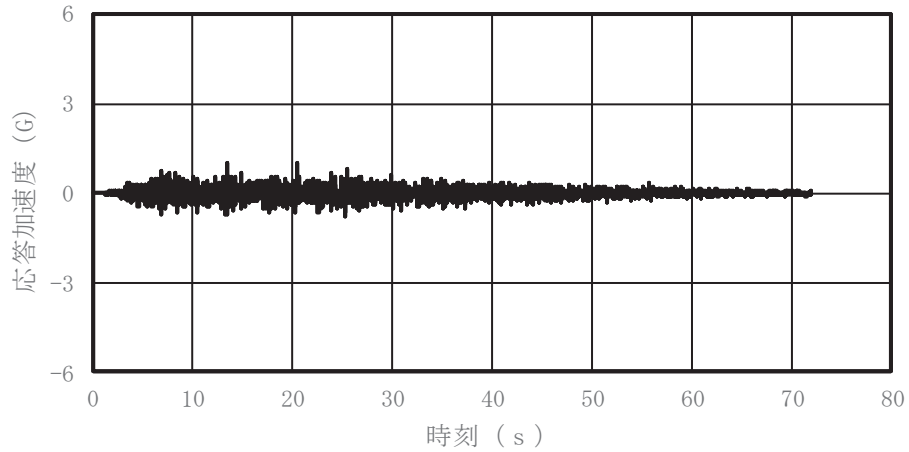


図 10 時刻歴加速度 (1/3)

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

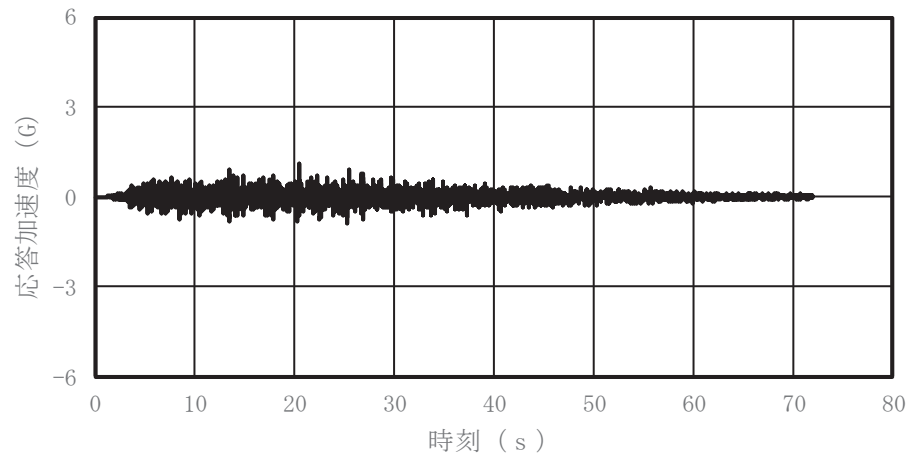


図 10 時刻歴加速度 (2/3)

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

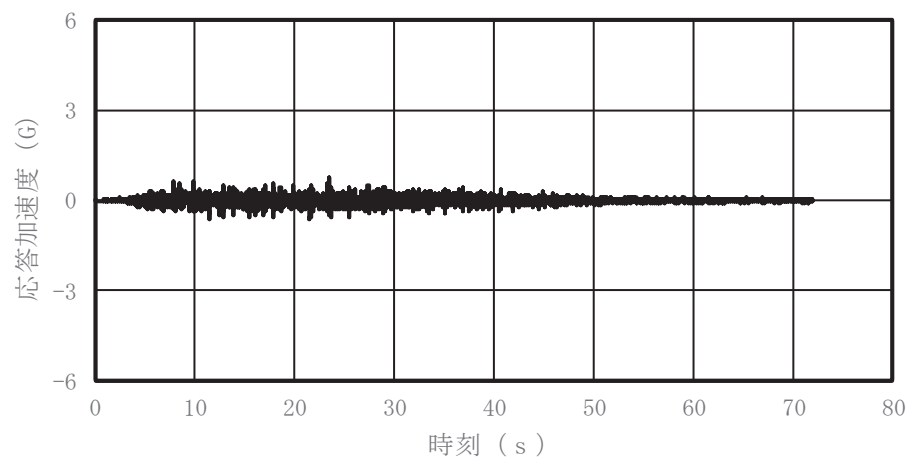


図 10 時刻歴加速度 (3/3)

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

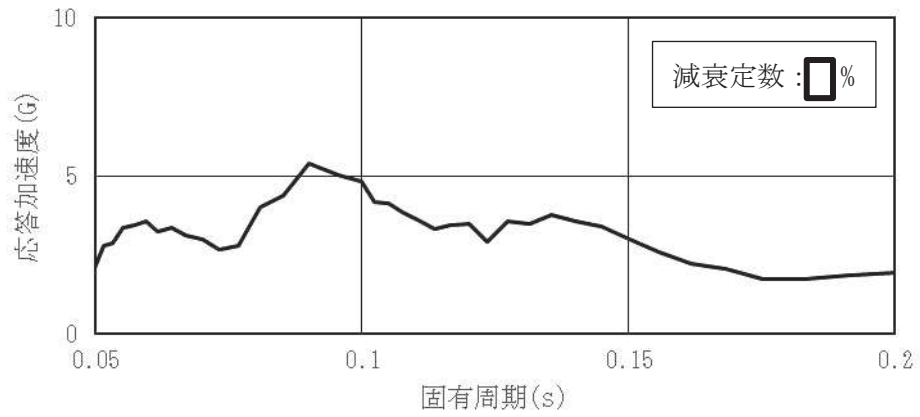


図 11 床応答スペクトル (1/3)

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

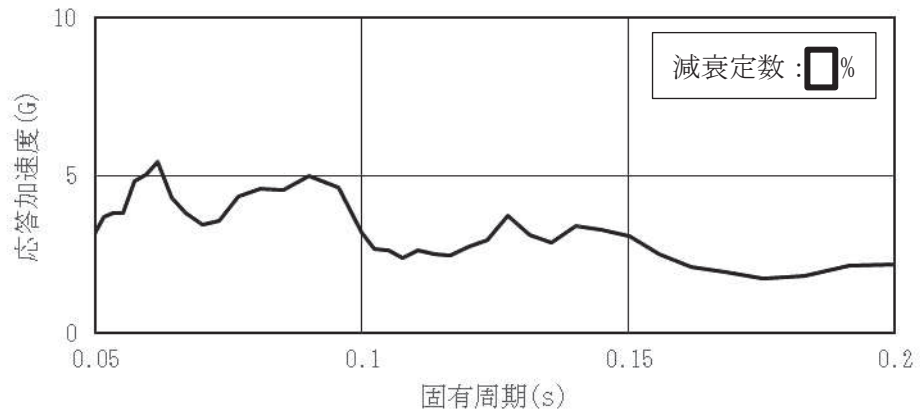


図 11 床応答スペクトル (2/3)

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

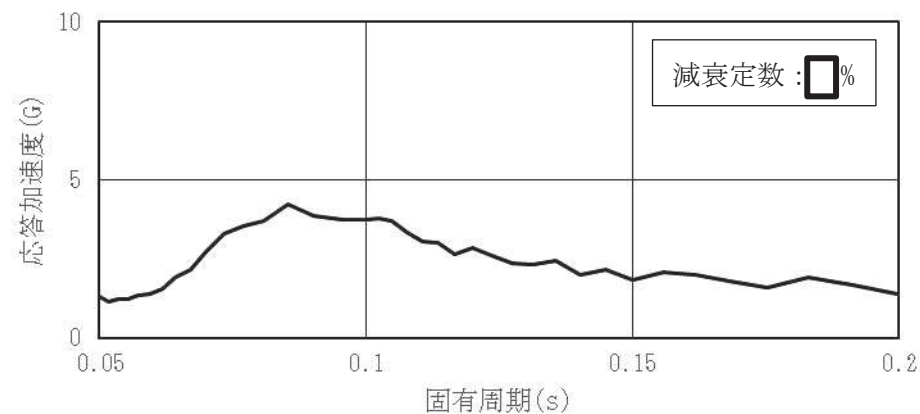


図 11 床応答スペクトル (3/3)

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

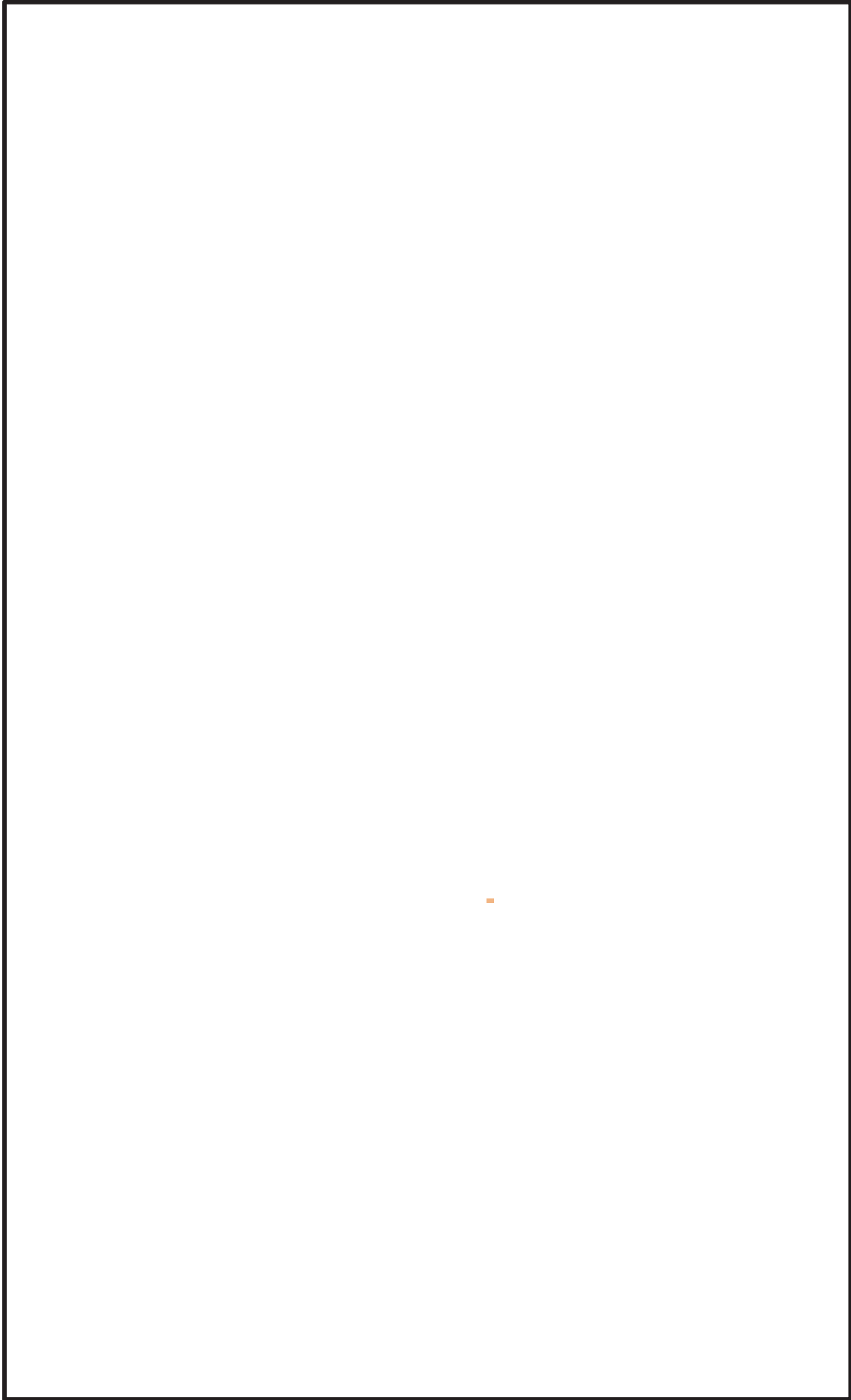


図 12 解析モデルと時刻歴加速度入力位置の関係 (RHR-010)

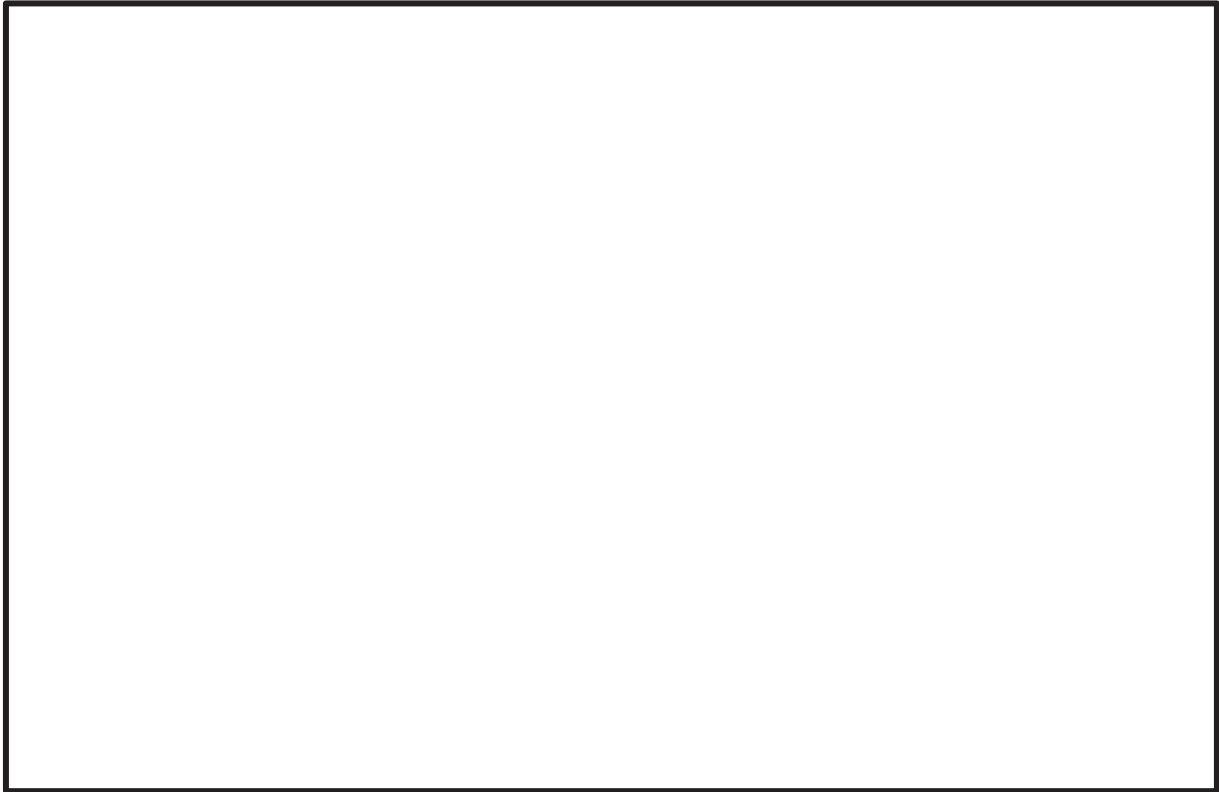


図 13 サプレッションチェンバの地震応答解析モデルに対する確認対象配管モデル
(HPCS-002) の接続位置

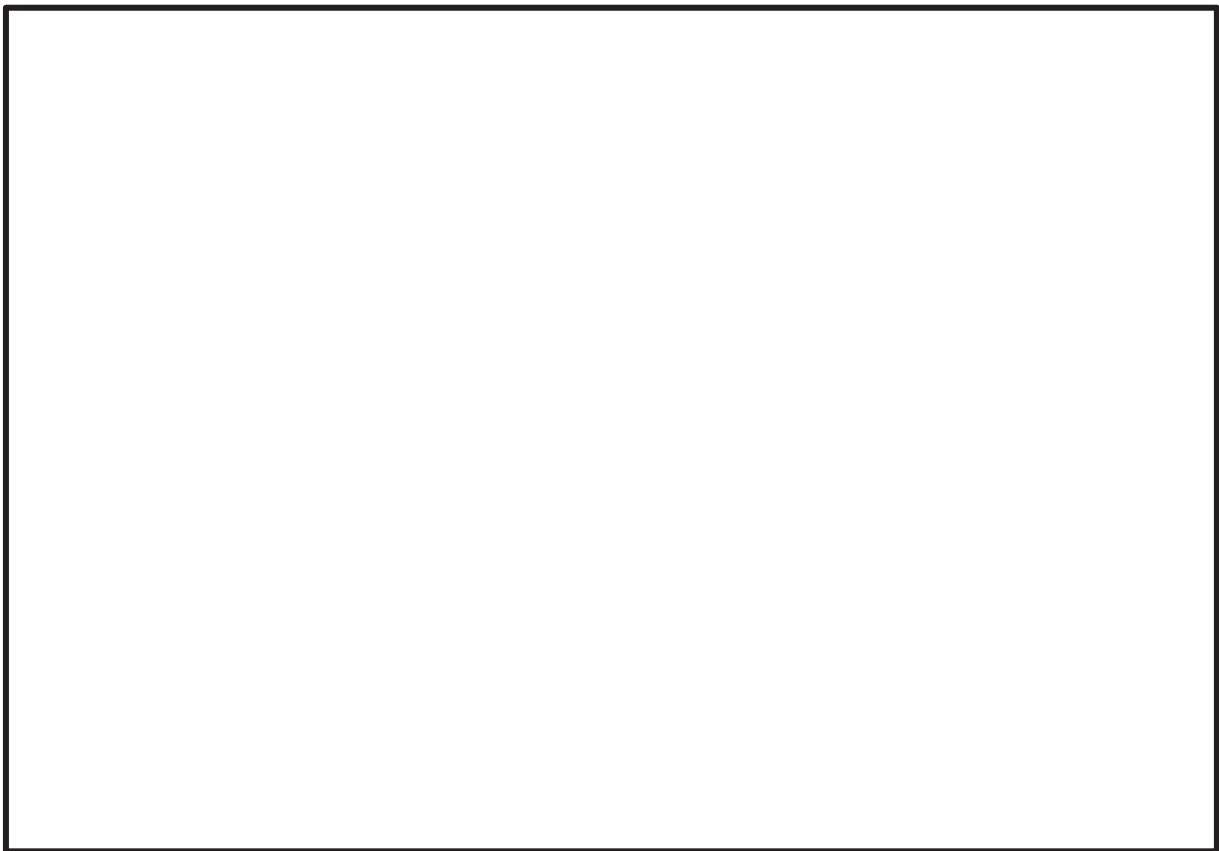
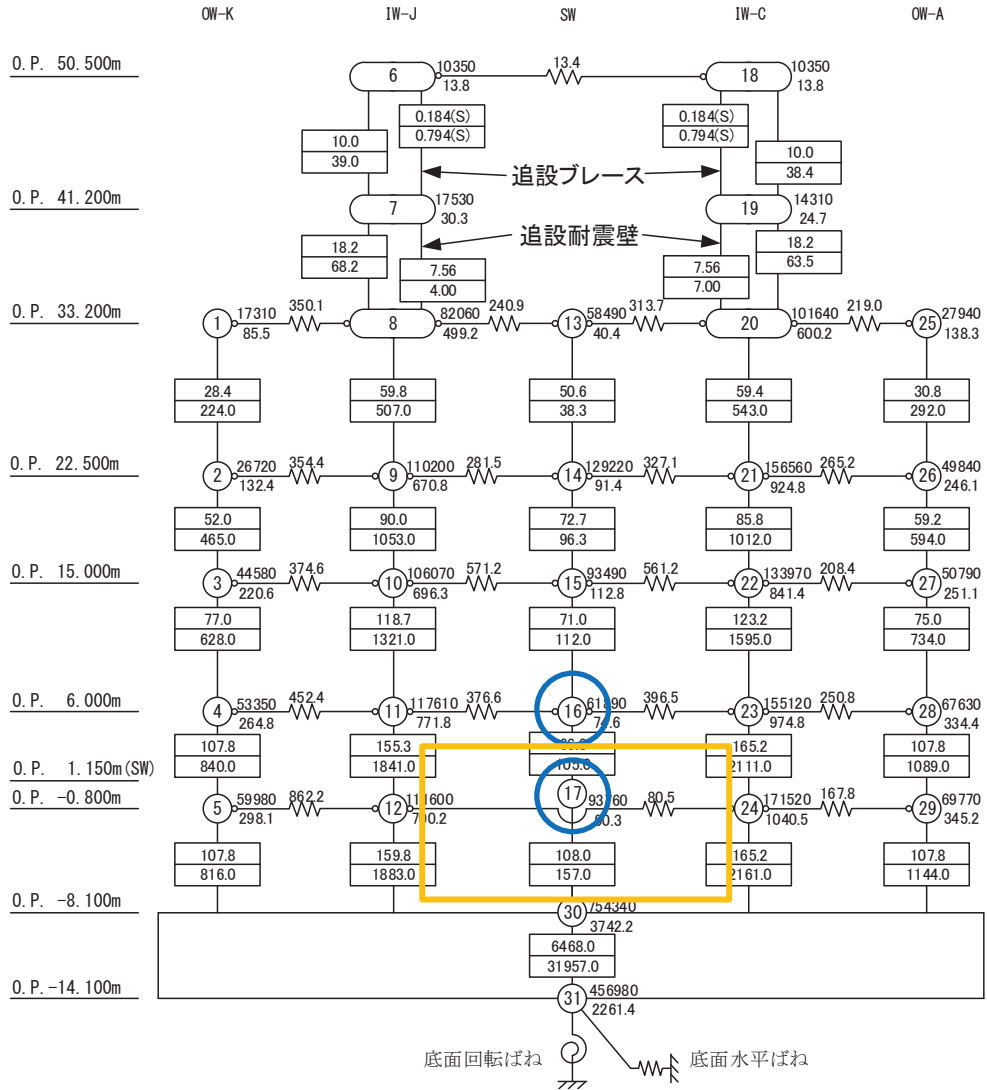
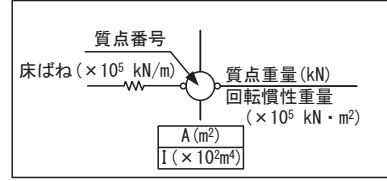


図 14 多入力時刻歴応答解析における時刻歴加速度の入力位置

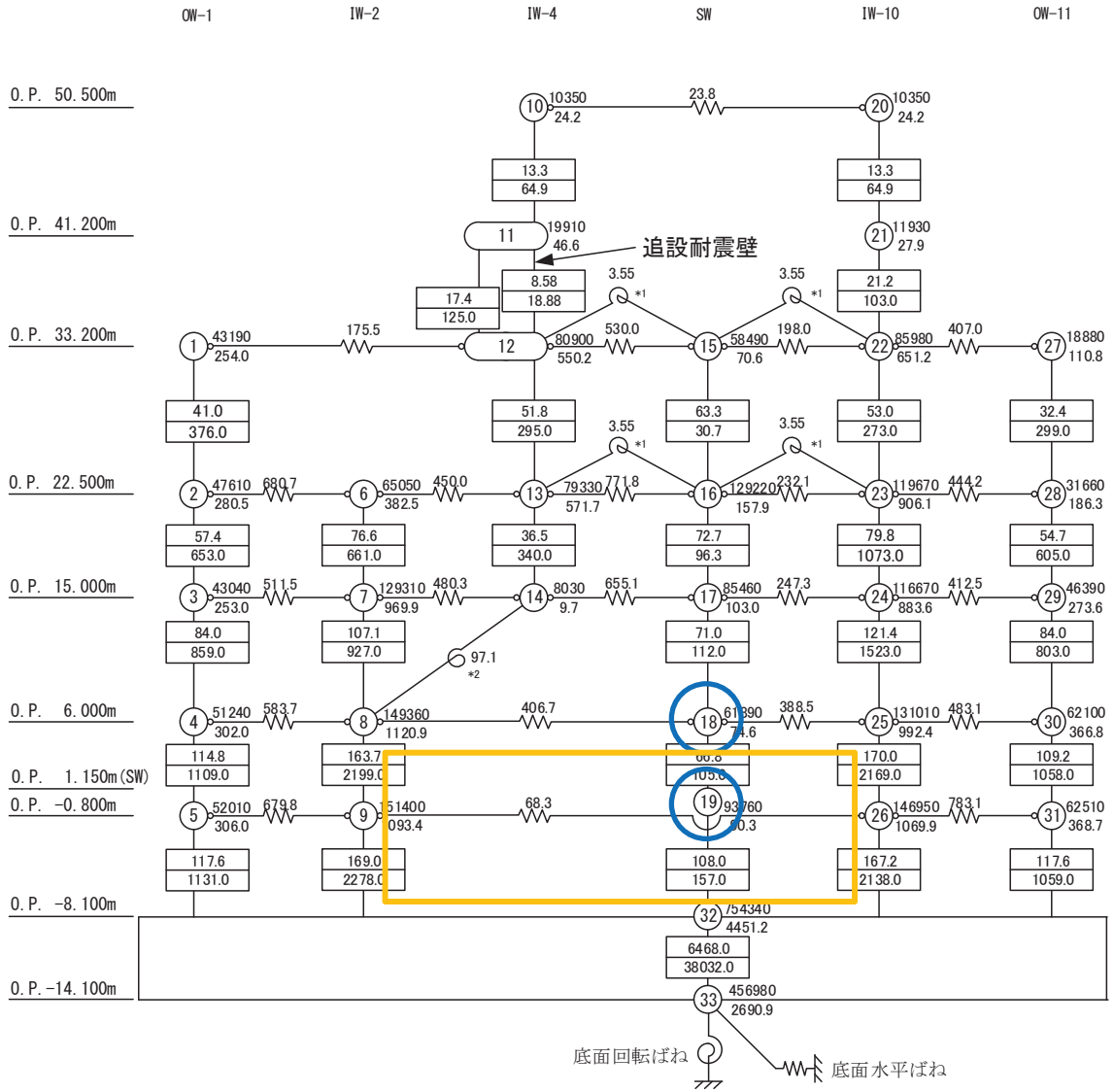
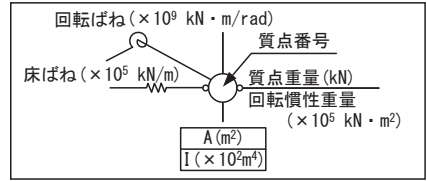
$E_c = 1.99 \times 10^4$	N/mm ²
7.94×10^3	N/mm ² (燃料取替床上部)
2.52×10^4	N/mm ² (追設耐震壁)
$G_c = 8.53 \times 10^3$	N/mm ²
3.41×10^3	N/mm ² (燃料取替床上部)
1.05×10^4	N/mm ² (追設耐震壁)
$E_s = 2.05 \times 10^5$	N/mm ² (追設ブレース)
$G_s = 7.90 \times 10^4$	N/mm ² (追設ブレース)



- : 時刻歴加速度の取り出し位置
- : サプレッションチェンバ設置位置

図 15 原子炉建屋の地震応答解析モデルにおける時刻歴加速度の取り出し位置 (NS 方向)

$E_c = 2.12 \times 10^4 \text{ N/mm}^2$
 $1.32 \times 10^4 \text{ N/mm}^2$ (燃料取替床上部)
 $2.52 \times 10^4 \text{ N/mm}^2$ (追設耐震壁)
 $G_c = 9.10 \times 10^3 \text{ N/mm}^2$
 $5.69 \times 10^3 \text{ N/mm}^2$ (燃料取替床上部)
 $1.05 \times 10^4 \text{ N/mm}^2$ (追設耐震壁)

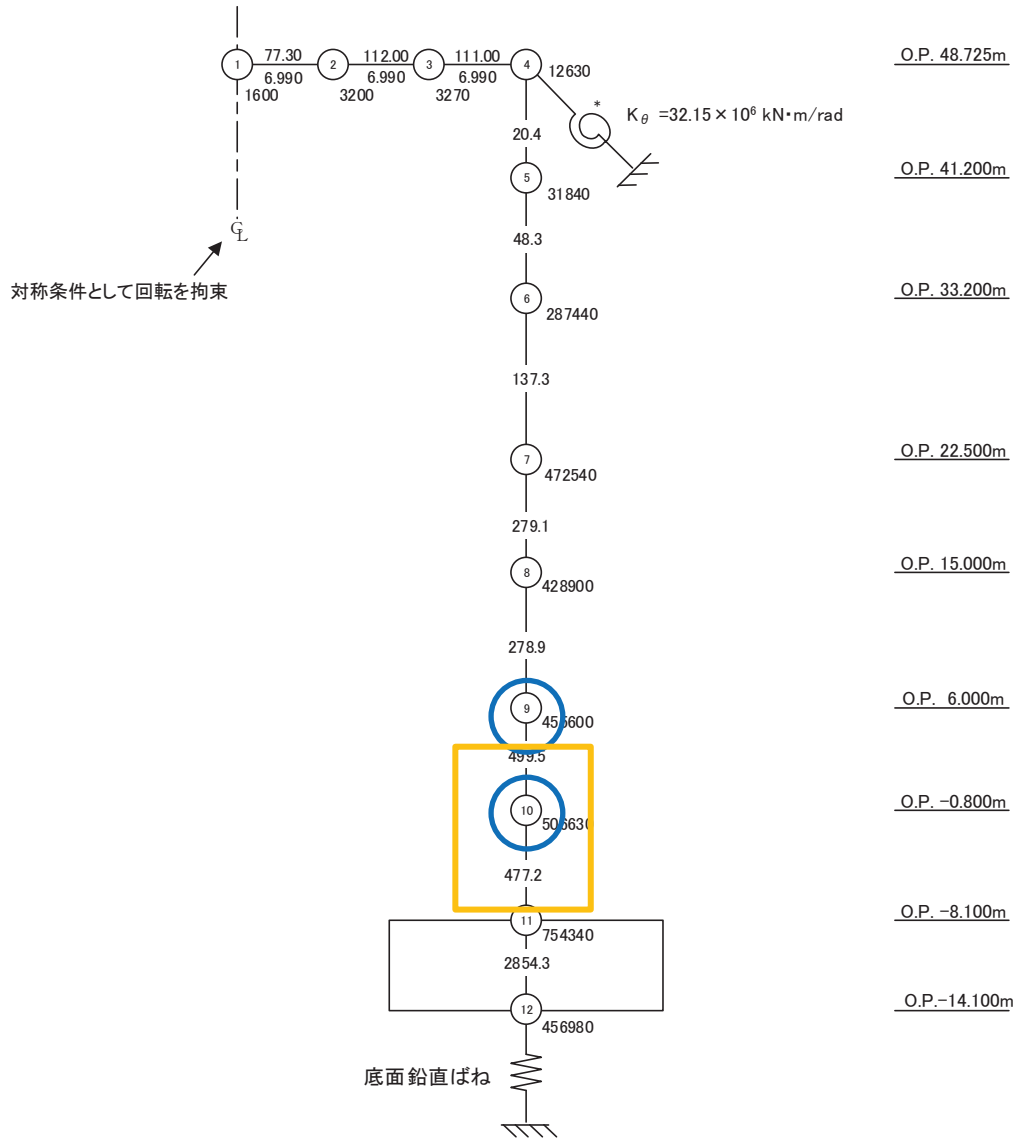


- : 時刻歴加速度の取り出し位置
- : サプレッションチェンバ設置位置

図 15 原子炉建屋の地震応答解析モデルにおける時刻歴加速度の取り出し位置 (EW 方向)

$E_c = 2.65 \times 10^4 \text{ N/mm}^2$
 $G_c = 1.14 \times 10^4 \text{ N/mm}^2$

トラス部の断面性能 (A_s, I) はRC等価な値にて与える
 せん断断面積 ($\times 10^{-2} \text{ m}^2$)
 断面二次モーメント (m^4)
 質点番号
 質点重量 (kN)
 軸ばね ($\times 10^7 \text{ kN/m}$)



- : 時刻歴加速度の取り出し位置
- : サプレッションチェンバ設置位置

図 15 原子炉建屋の地震応答解析モデルにおける時刻歴加速度の取り出し位置 (UD 方向)

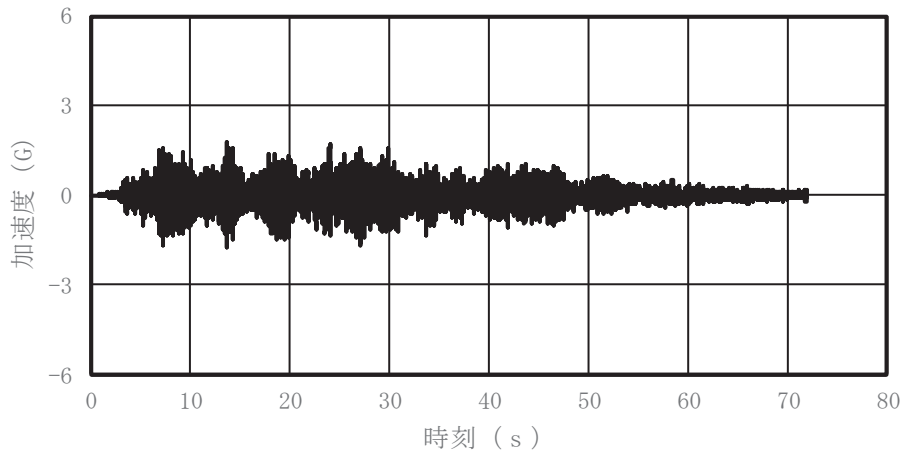


図 16 時刻歴加速度 (1/3)

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

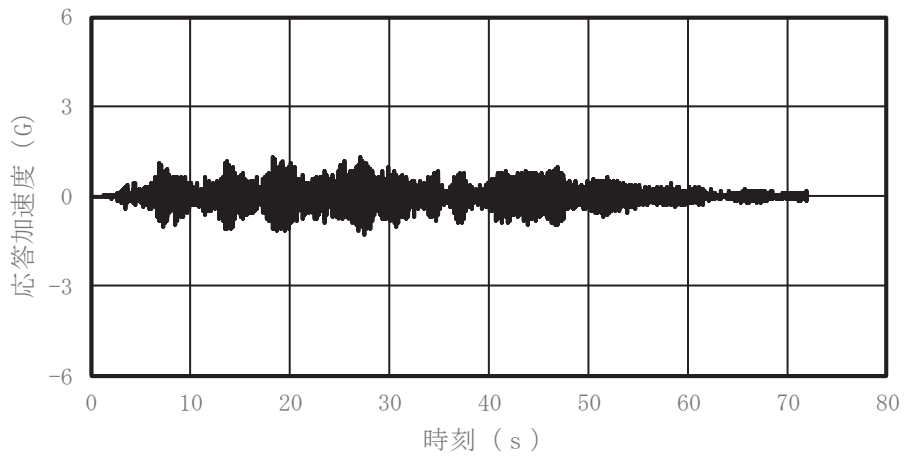


図 16 時刻歴加速度 (2/3)

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

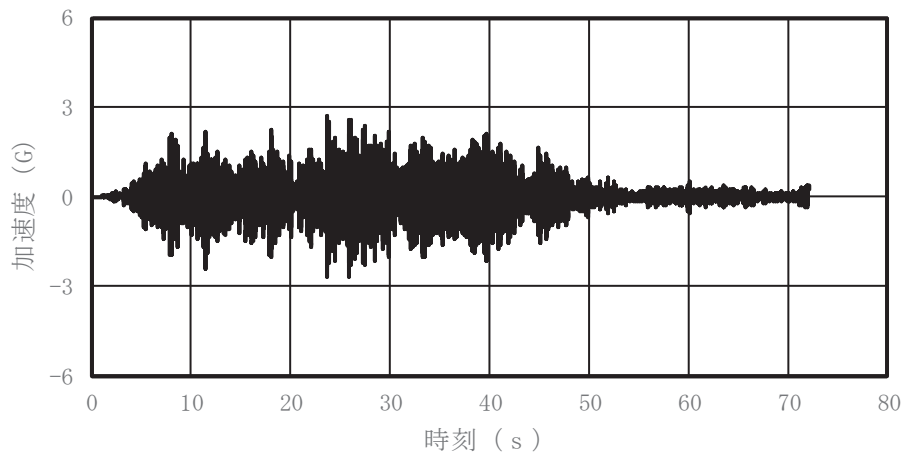


図 16 時刻歴加速度 (3/3)

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

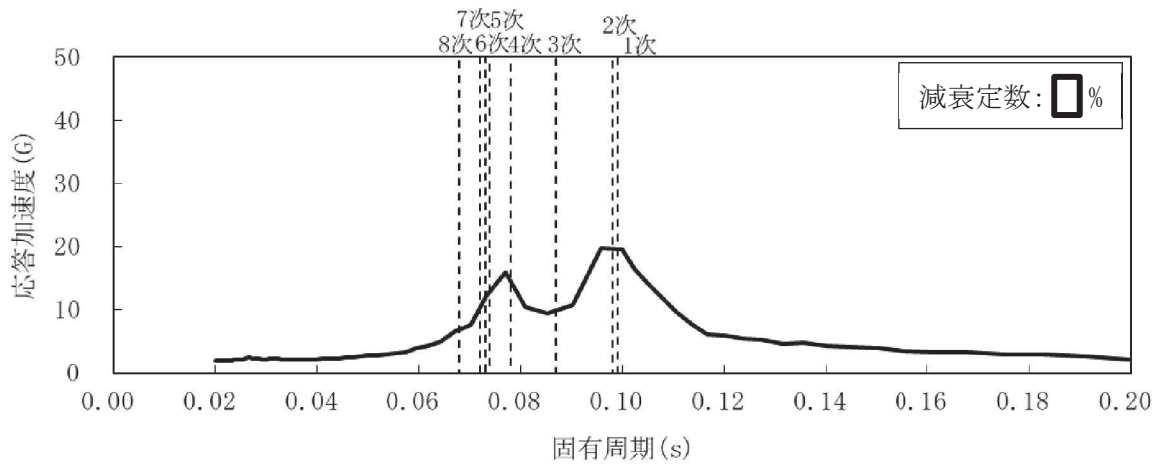


図 17 床応答スペクトル (1/3)

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

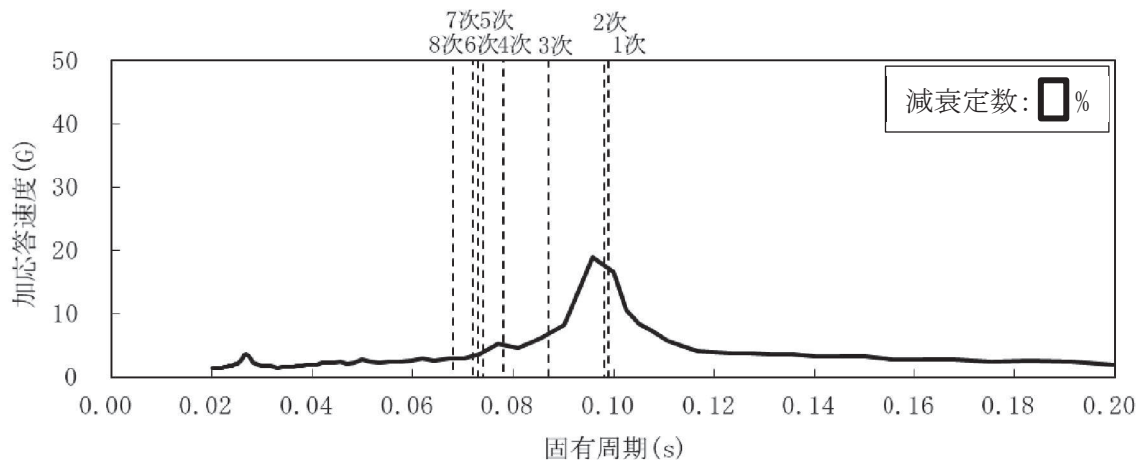


図 17 床応答スペクトル (2/3)

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

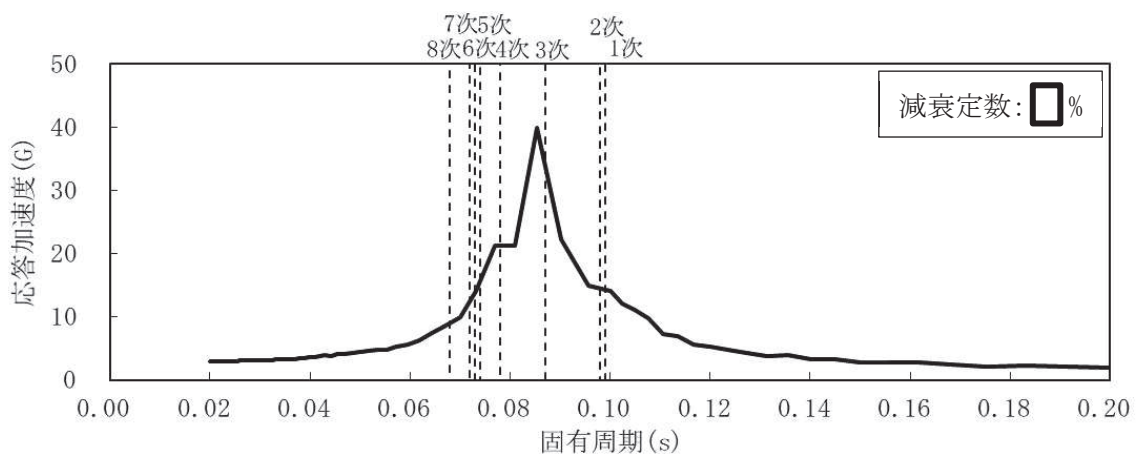


図 17 床応答スペクトル (3/3)

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

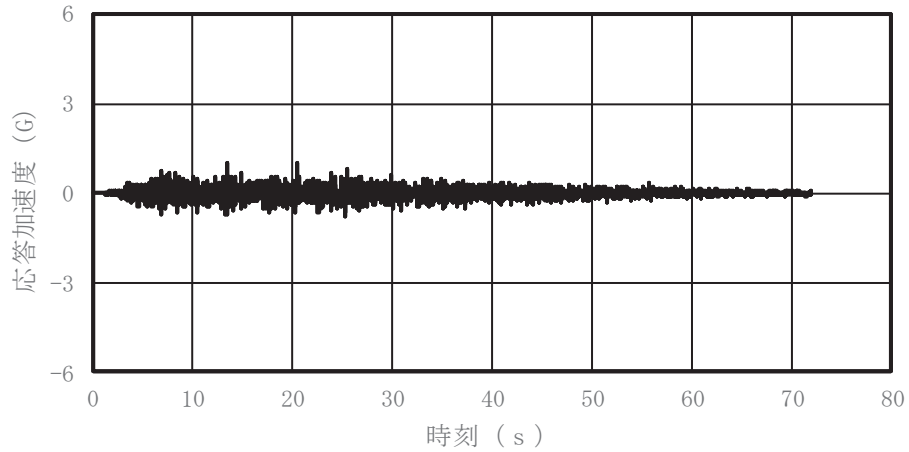


図 18 時刻歴加速度 (1/3)

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

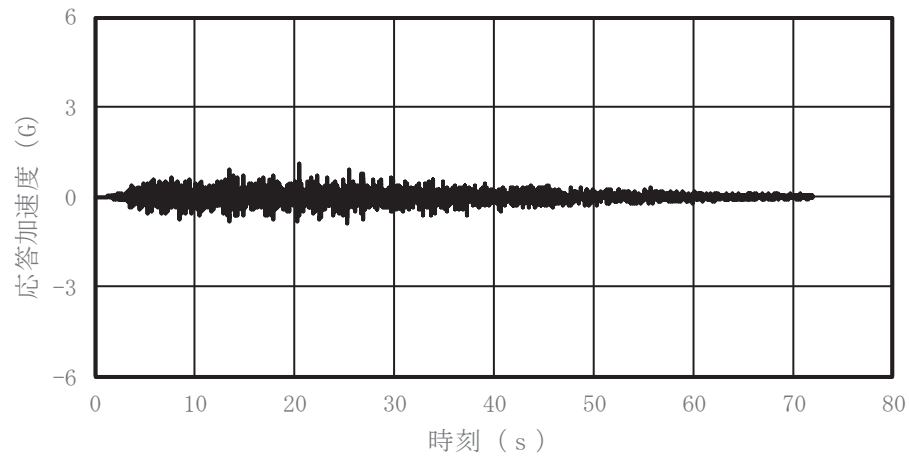


図 18 時刻歴加速度 (2/3)

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

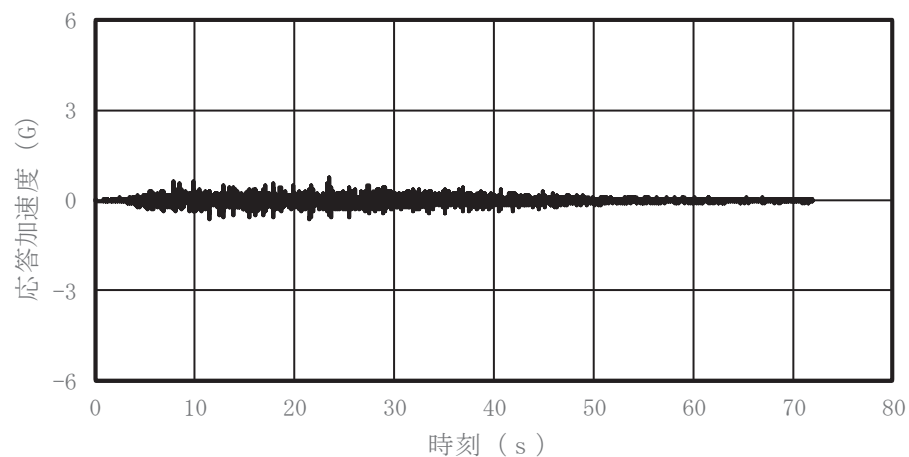


図 18 時刻歴加速度 (3/3)

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

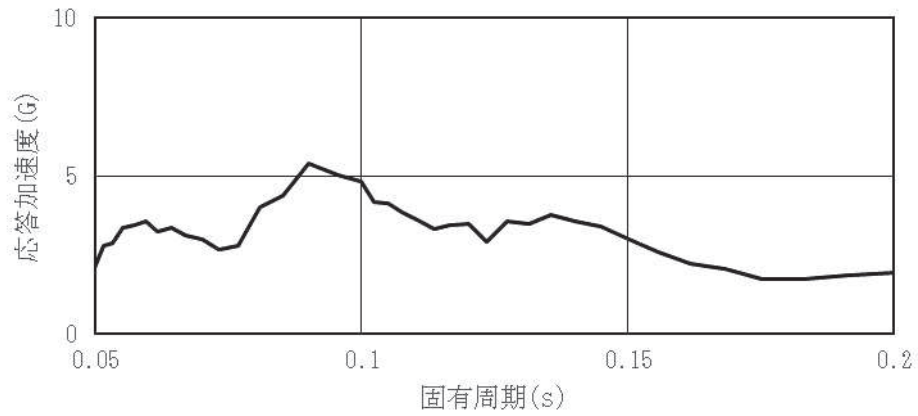


図 19 床応答スペクトル (1/3)

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

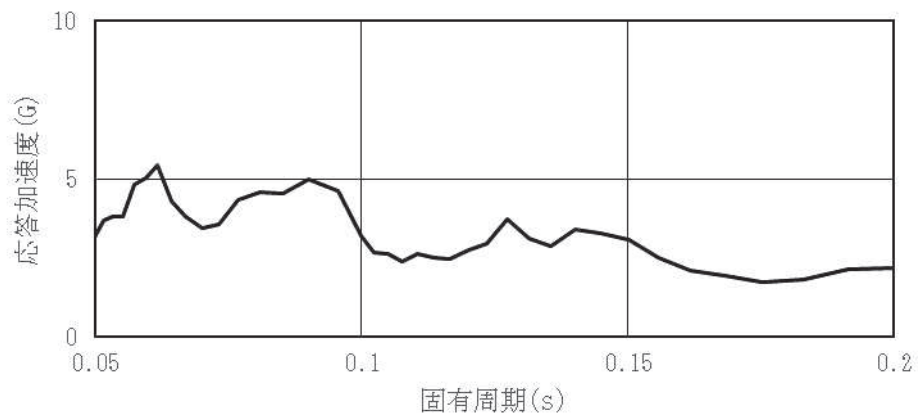


図 19 床応答スペクトル (2/3)

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

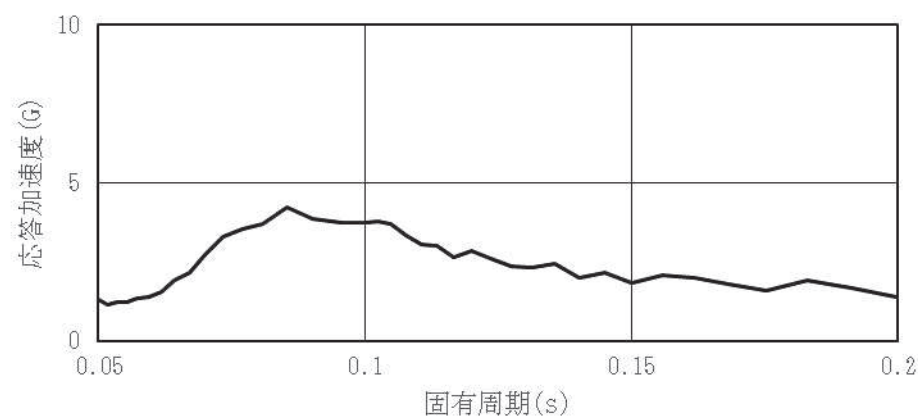


図 19 床応答スペクトル (3/3)

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

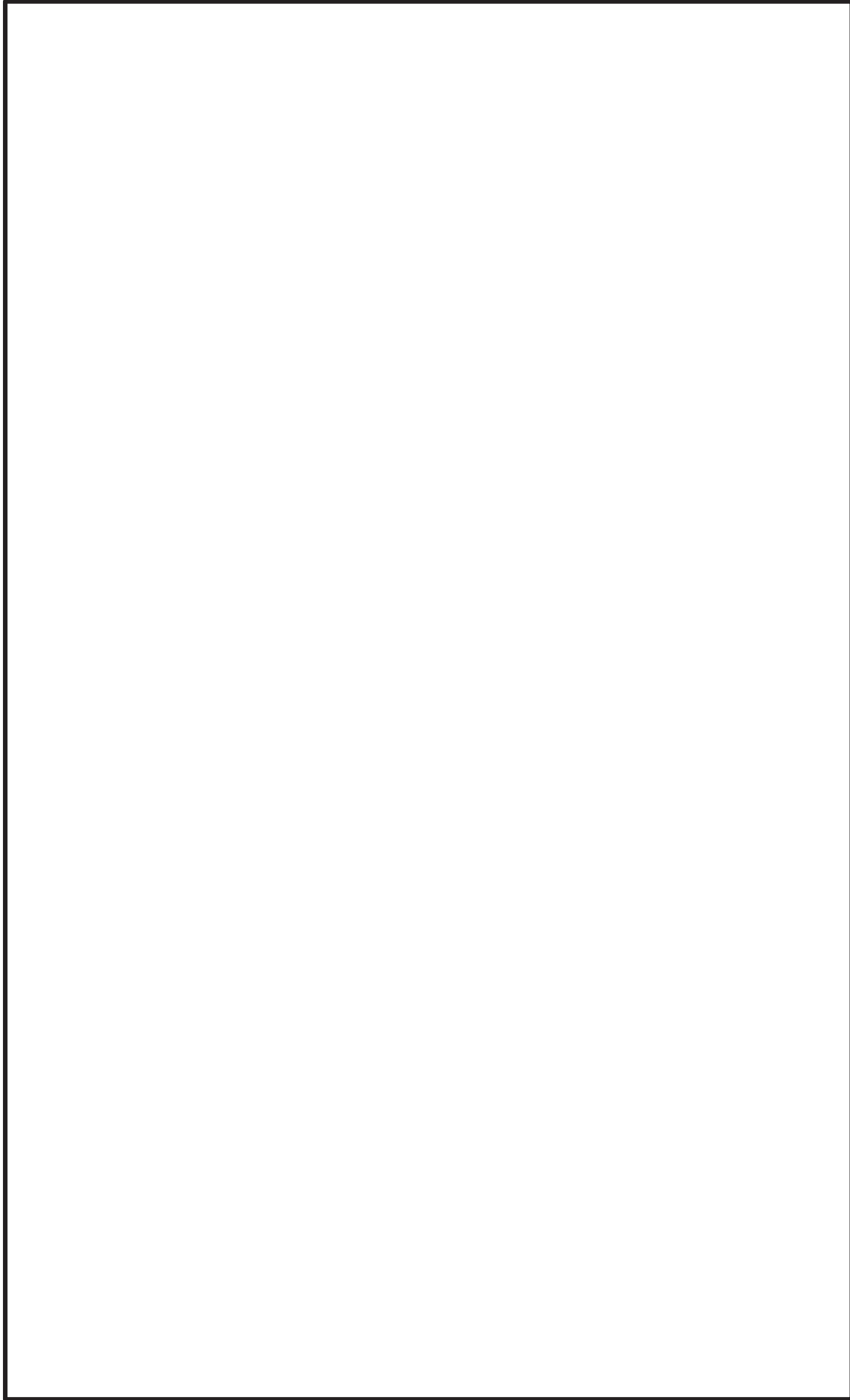


図 20 解析モデルと時刻歴加速度入力位置の関係 (HPCCS-002)

② サプレッションチェンバと原子炉建屋の地震応答を包絡した設計用床応答曲線を用いた
スペクトルモーダル解析

スペクトルモーダル解析に用いる入力地震動は、サプレッションチェンバと原子炉建屋の地震応答を包絡した設計用床応答曲線を用いる。

RHR-010及びHPCS-002に対する応答スペクトルを図21に示す。

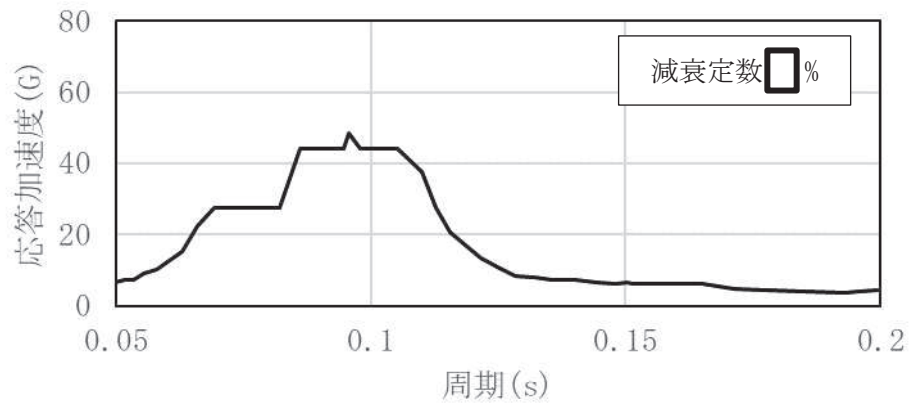


図21 床応答スペクトル (1/2)

(サプレッションチェンバ及び原子炉建屋：O.P. [] m, 水平方向 (NS/EW 包絡))

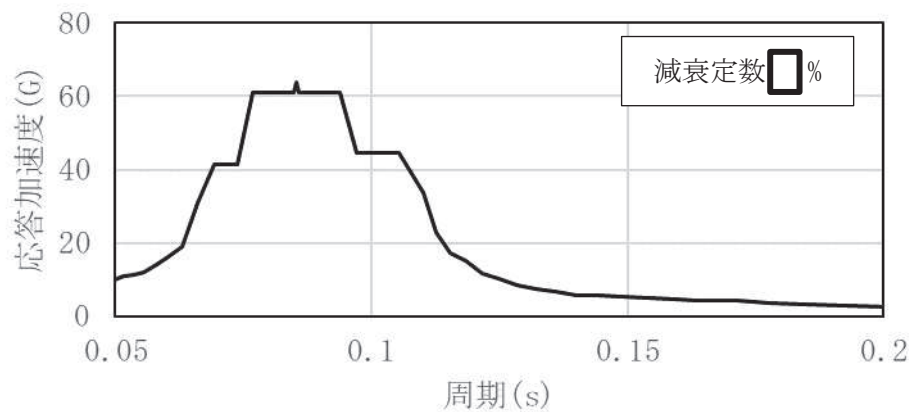


図21 床応答スペクトル (2/2)

(サプレッションチェンバ及び原子炉建屋：O.P. [] m, UD 方向)

d. 評価条件の比較

影響確認に適用する評価条件を表3示す。

表3 影響確認に適用する評価条件の比較

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サプレッションチェンバと原子炉建屋の地震応答を包絡した設計用床応答曲線を用いた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, 基準地震動S _s 7波) ・原子炉建屋 (O.P. <input type="text"/> m)	時刻歴応答加速度 (基準地震動S _s -D2) ・サプレッションチェンバ ・原子炉建屋 (O.P. <input type="text"/> m) *2	設計用床応答曲線 (周期方向に10%拡幅, 基準地震動S _s 7波) ・サプレッションチェンバ ・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. 影響確認結果

a. SC接続配管

SC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に関する影響確認として、①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(裕度最小の値)、②サブプレッションチェンバと原子炉建屋の地震応答を包絡した設計用床応答曲線を用いたスペクトルモーダル解析及び今回工認の評価結果を表4に示す。また、①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対する床応答スペクトルの拡幅相当の検討結果の詳細を表5に示す。

①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よるRHR-010及びHPCS-002の算出値は、今回工認に比べて増減があるものの、いずれも許容値を十分に満足することを確認した。なお、HPCS-002の算出値(サブプレッションチェンバ外の評価点)が今回工認よりも大きくなった要因については、別紙2に示す通り、サブプレッションチェンバ内に設置されたストレーナが振動する固有周期帯のサブプレッションチェンバの応答影響がサブプレッションチェンバ外に伝達したことによるものと考えられる。

また、②サブプレッションチェンバと原子炉建屋の地震応答を包絡した設計用床応答曲線を用いたスペクトルモーダル解析によるRHR-010及びHPCS-002の算出値は、いずれも①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よる算出値及び今回工認に比べて、大きな評価結果となっている。これは、別紙3に示す通り、サブプレッションチェンバから遠く離れた評価位置においては、解析上、サブプレッションチェンバの地震応答が考慮されることになるため、より精緻な多入力時刻歴解析に対して、過度に保守的な(合理性に欠ける)評価結果となっているものである。

b. SC接続配管上のストレーナ

SC接続配管上のストレーナに対するサブプレッションチェンバの地震応答の影響確認として、HPCS-002のストレーナ取付部の応力に着目し、①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評価結果と今回工認の評価結果を表6に示す。

①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評価結果、ストレーナ取付部の応力は、いずれの検討ケースにおいても、今回工認とほぼ同等であることからストレーナの耐震評価(今回工認の最小裕度:2.21)への影響はないと判断する。

以上のことから、SC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の影響に関して、今回工認におけるSC接続配管の耐震評価方法がより実態に応じた合理的な評価方法であることを定量的に確認した。

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サプレッションチェン バと原子炉建屋の地震応 答を包絡した設計用床応 答曲線を用いたスペクト 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	191 (29)	363	1.90	1473 (29)	363	0.24	210 (29)	363	1.72
HPCS-002	216 (75)	335	1.55	606 (75)	335	0.55	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*1	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
	位相反転(-, -, +)*2	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

注記*1：括弧内の符号は、地震動の位相を表しており、「+」を基準の位相、「-」を基準の位相から反転された位相を表す。

*2：配管解析に用いる解析モデルは、線形モデルであり、各要素及び拘束条件に対称性を持っていることから、地震慣性のモーメントに対称性がある。したがって、地震動の位相の組合せは、以下の通り、実質的には4ケースとなる。なお、対称性があることの確認として、発生値が最大となった位相反転ケース(+, +, -)とその全位相反転ケース(-, -, +)の応力値が一致していることも確認した。

± (x, +y, +z)

± (x, +y, -z)

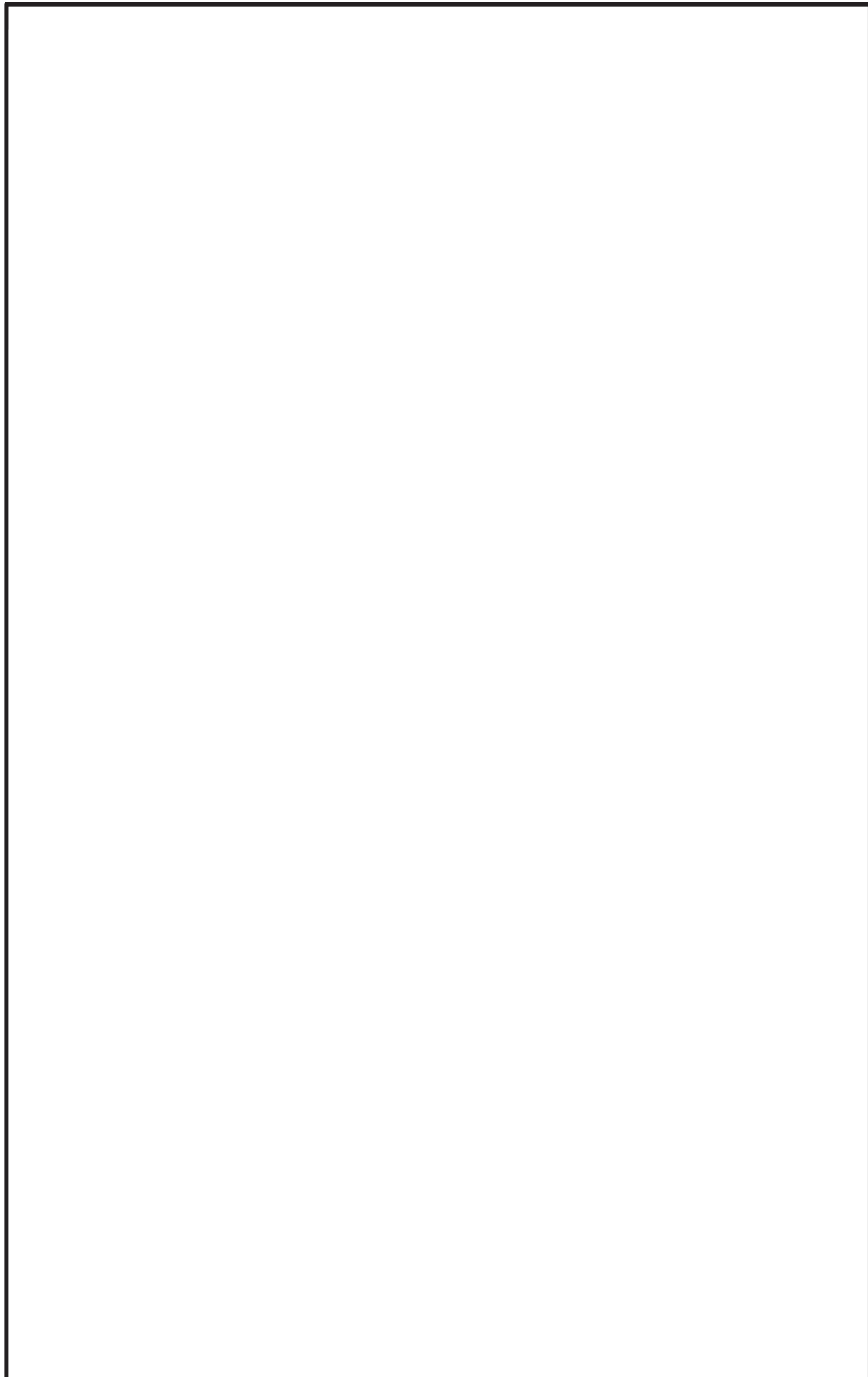
± (x, -y, +z)

± (x, -y, -z)

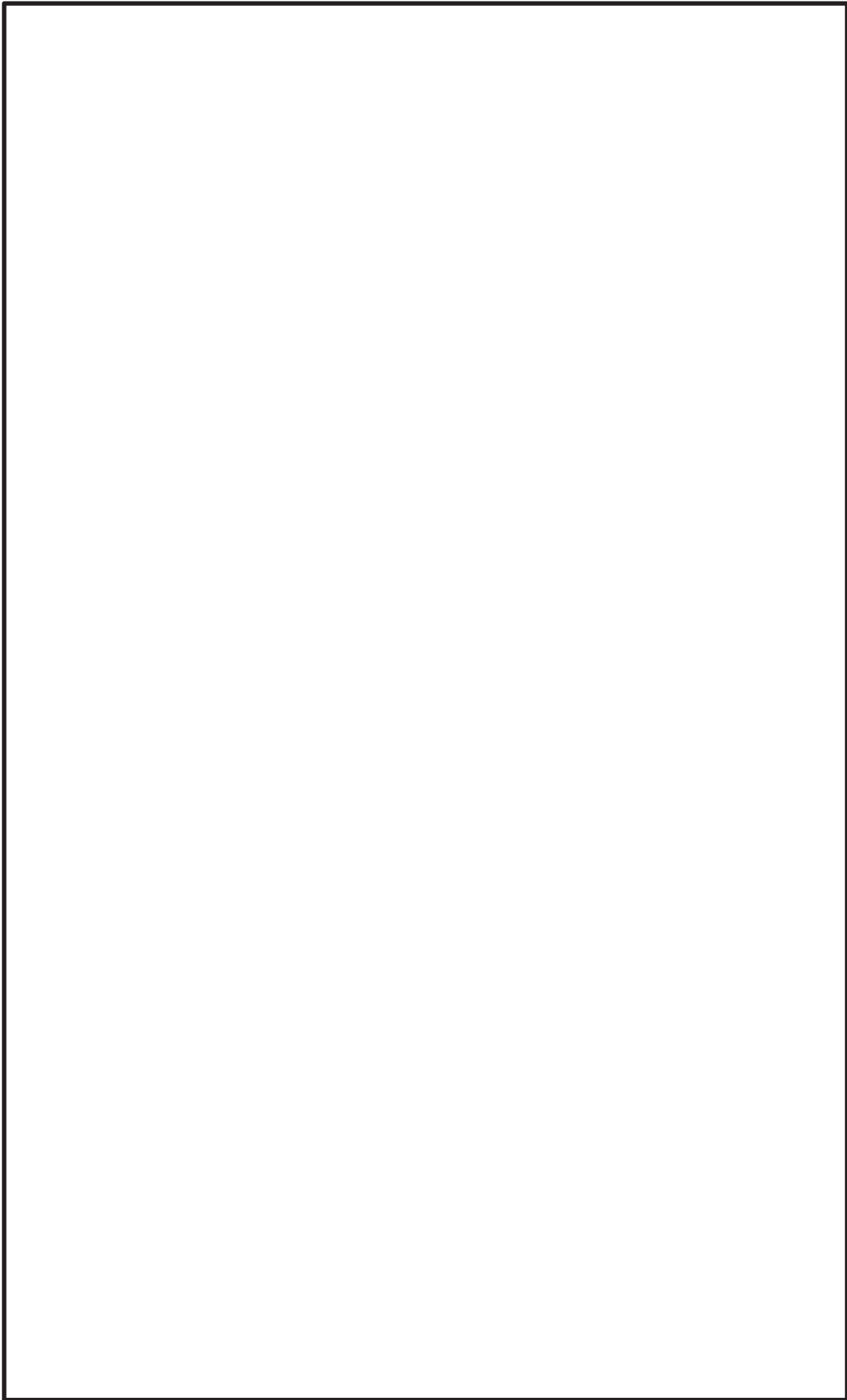
表 6 ストレーナ取付部の応力比較結果

評価部位	①工認耐震計算 (MPa)	多入力時刻歴応答解析 (MPa)							②包絡	応力比 ②/①
		基本	時間シフト +10%	時間シフト -10%	位相反転 (-+-)	位相反転 (-++)	位相反転 (++-)			
ストレーナ取付部	31	26	23	29	29	30	32	32	1.04	

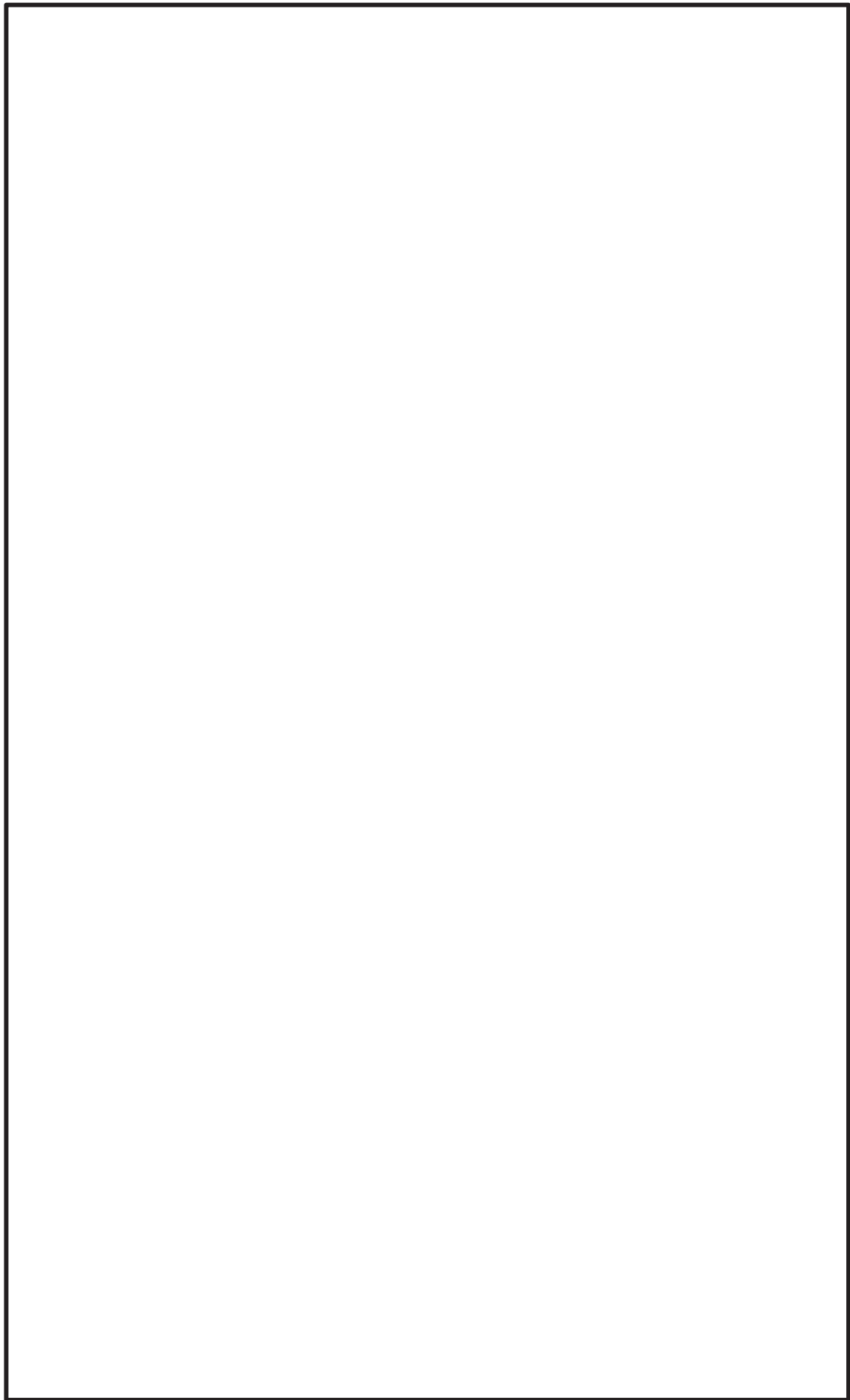
サプレッションチェンバ接続配管の解析モデル図



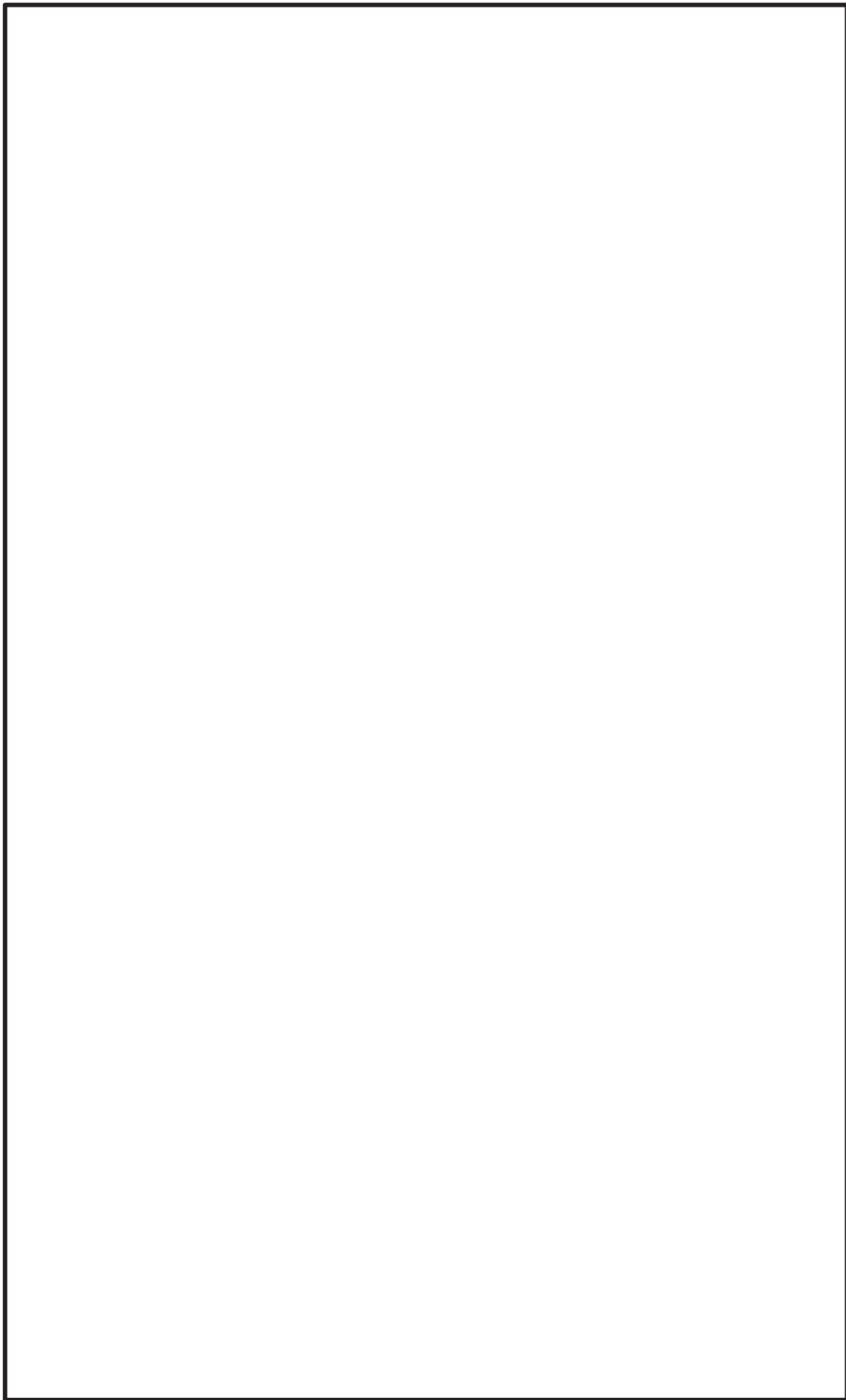
別図 1-1 解析モデル図 (RHR-006)



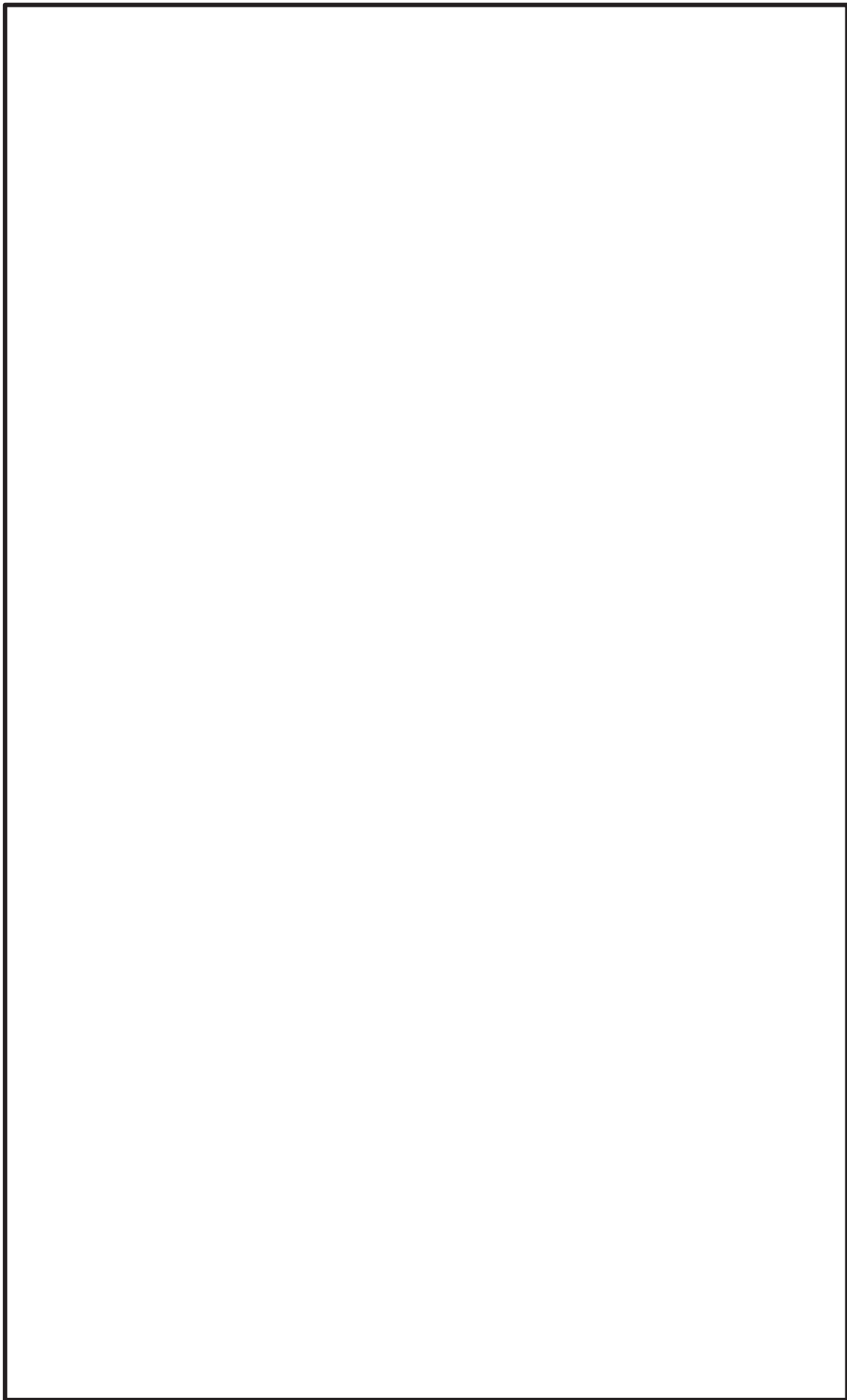
別図 1-2 解析モデル図 (RHR-010)



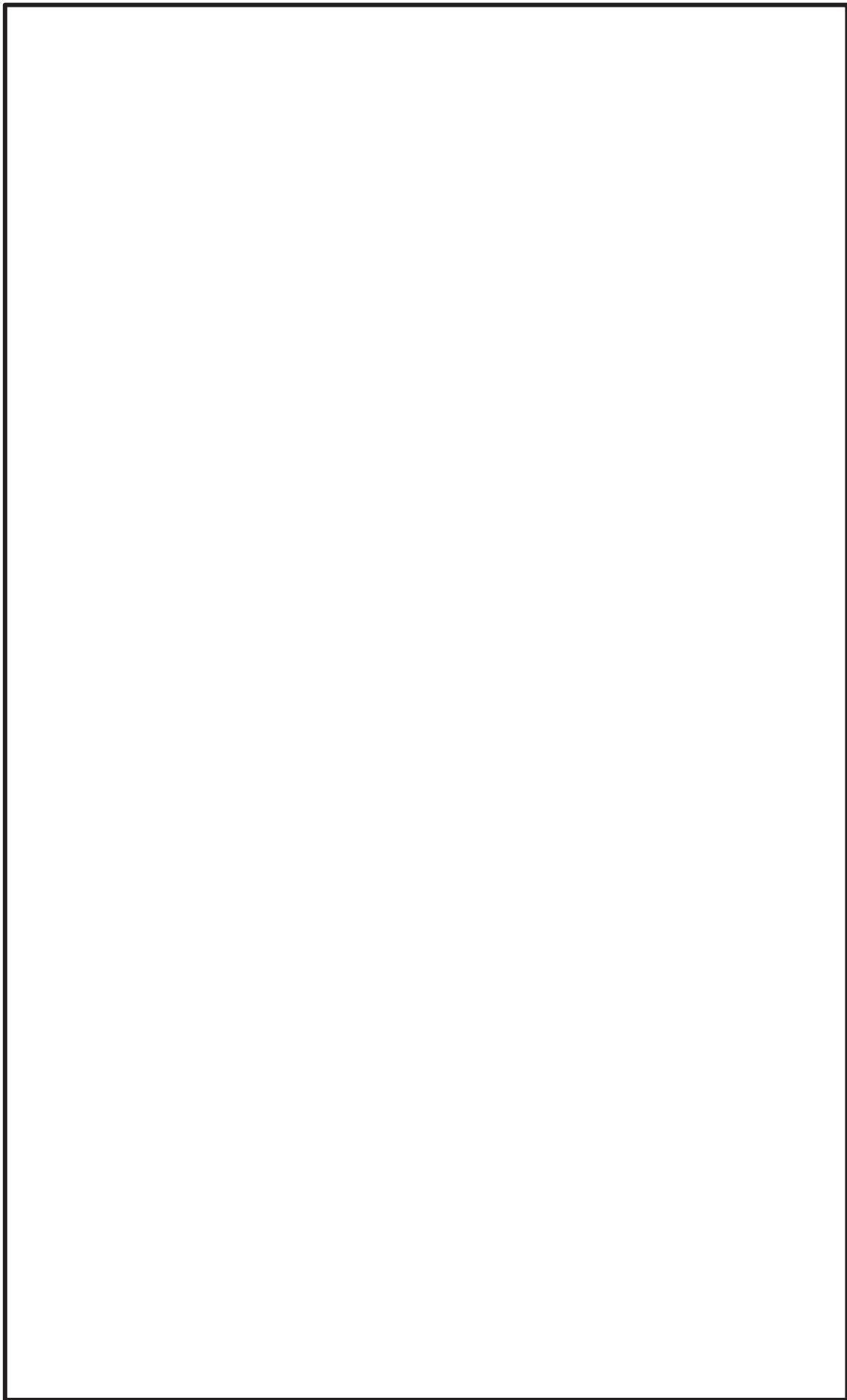
別図 1-3 解析モデル図 (RHR-011)



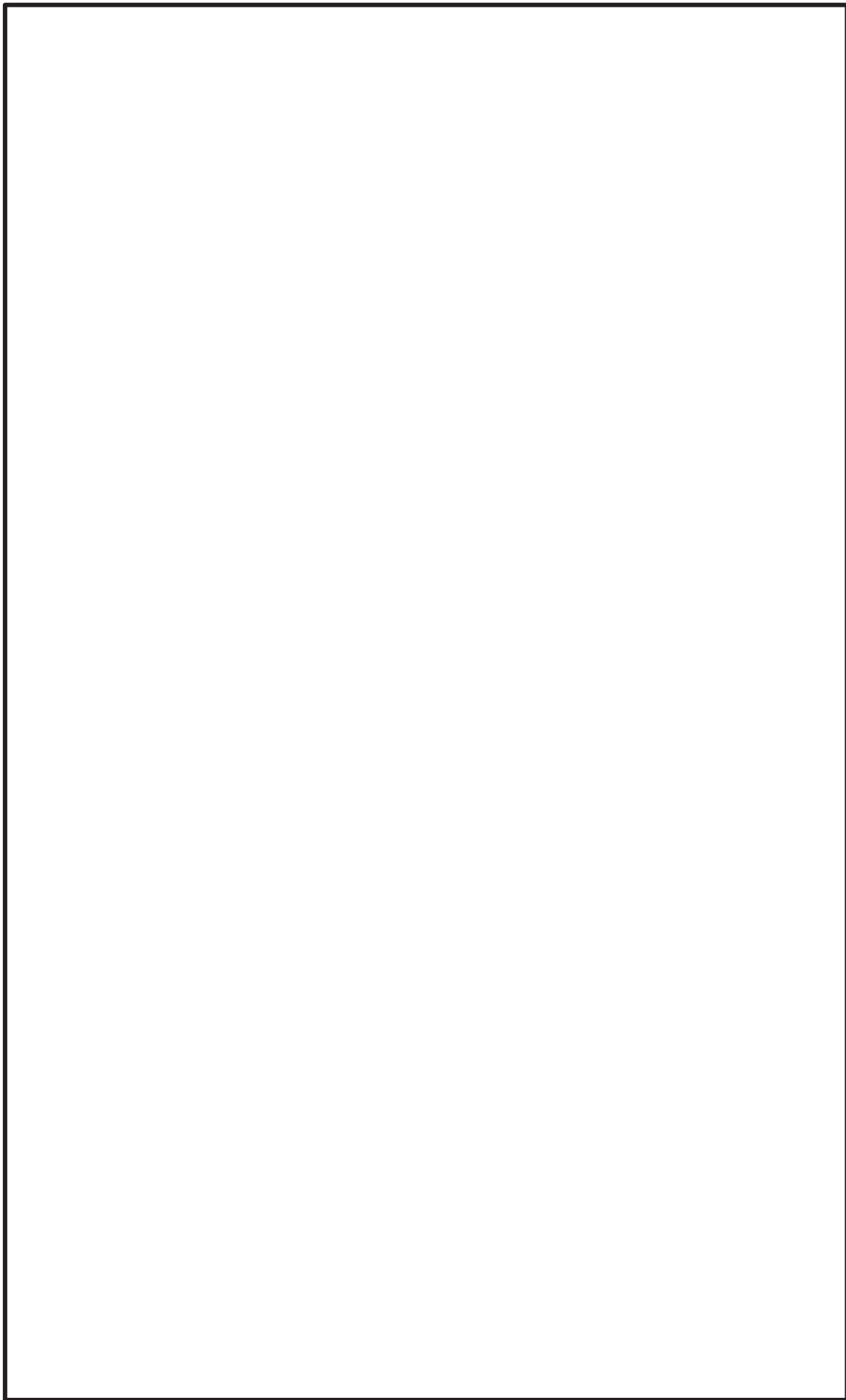
別図 1-4 解析モデル図 (RHR-015)



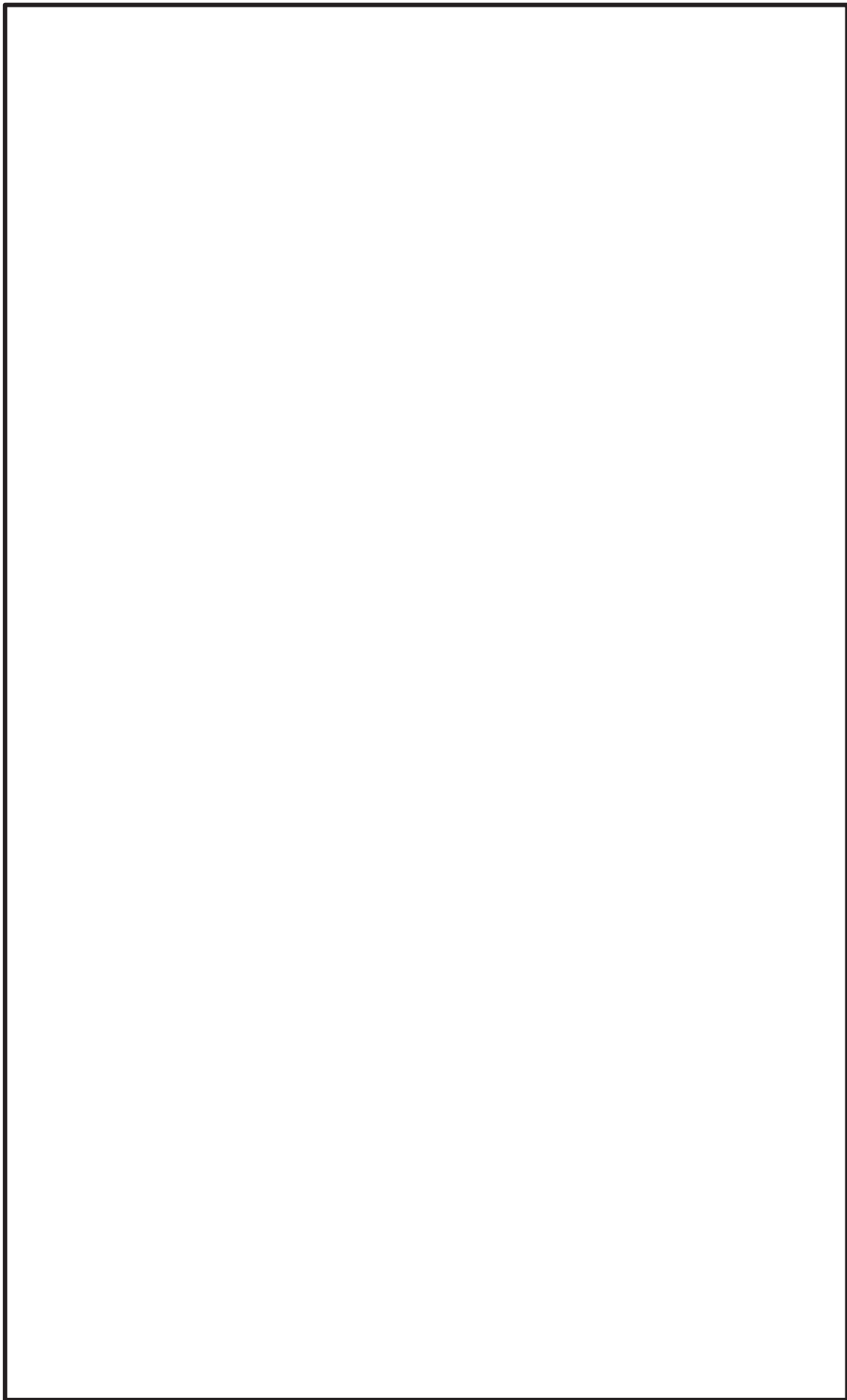
別図 1-5 解析モデル図 (RHR-016)



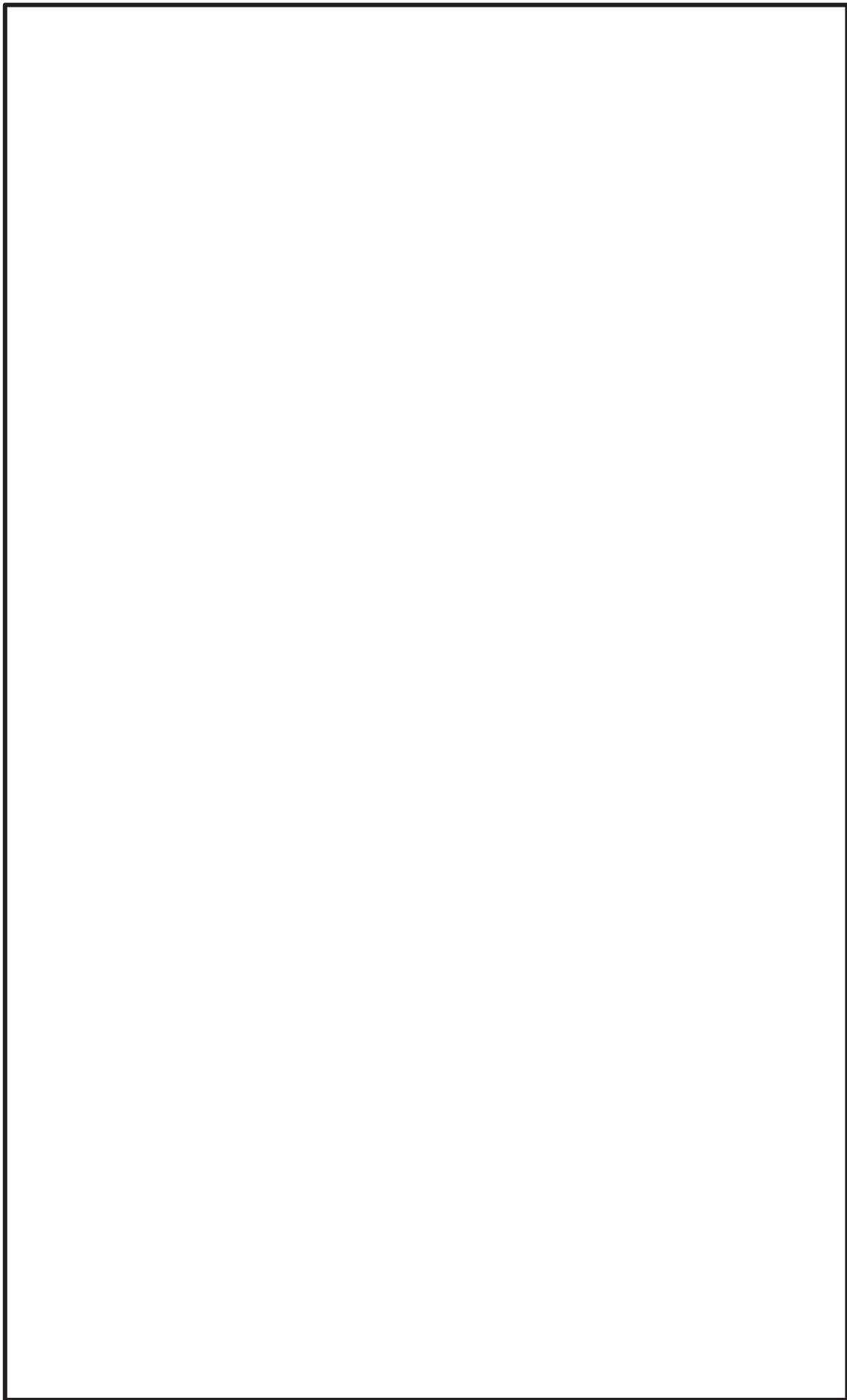
別図 1-6 解析モデル図 (HPCS-002)



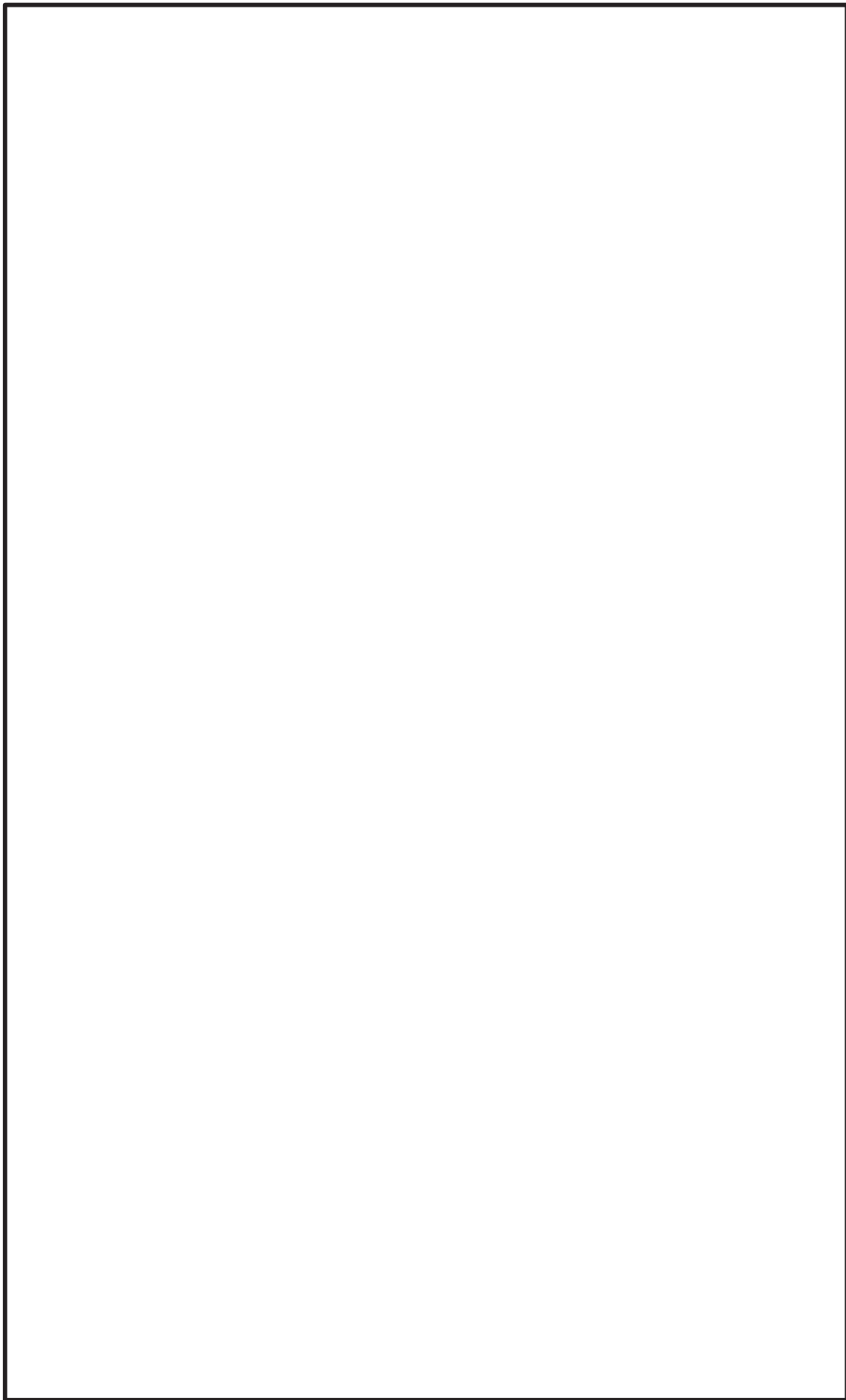
別図 1-7 解析モデル図 (HPCS-003)



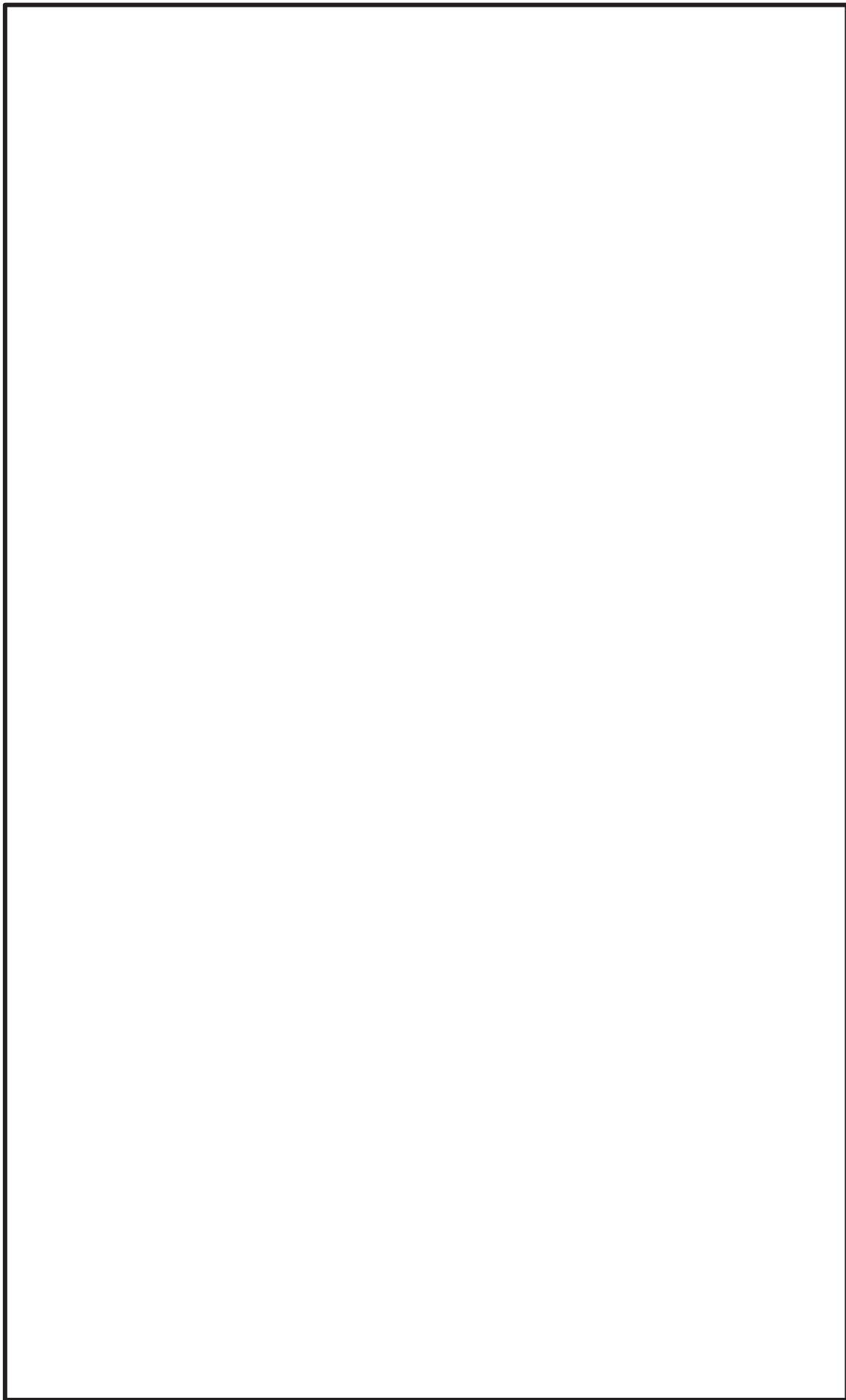
別図 1-8 解析モデル図 (LPCS-002)



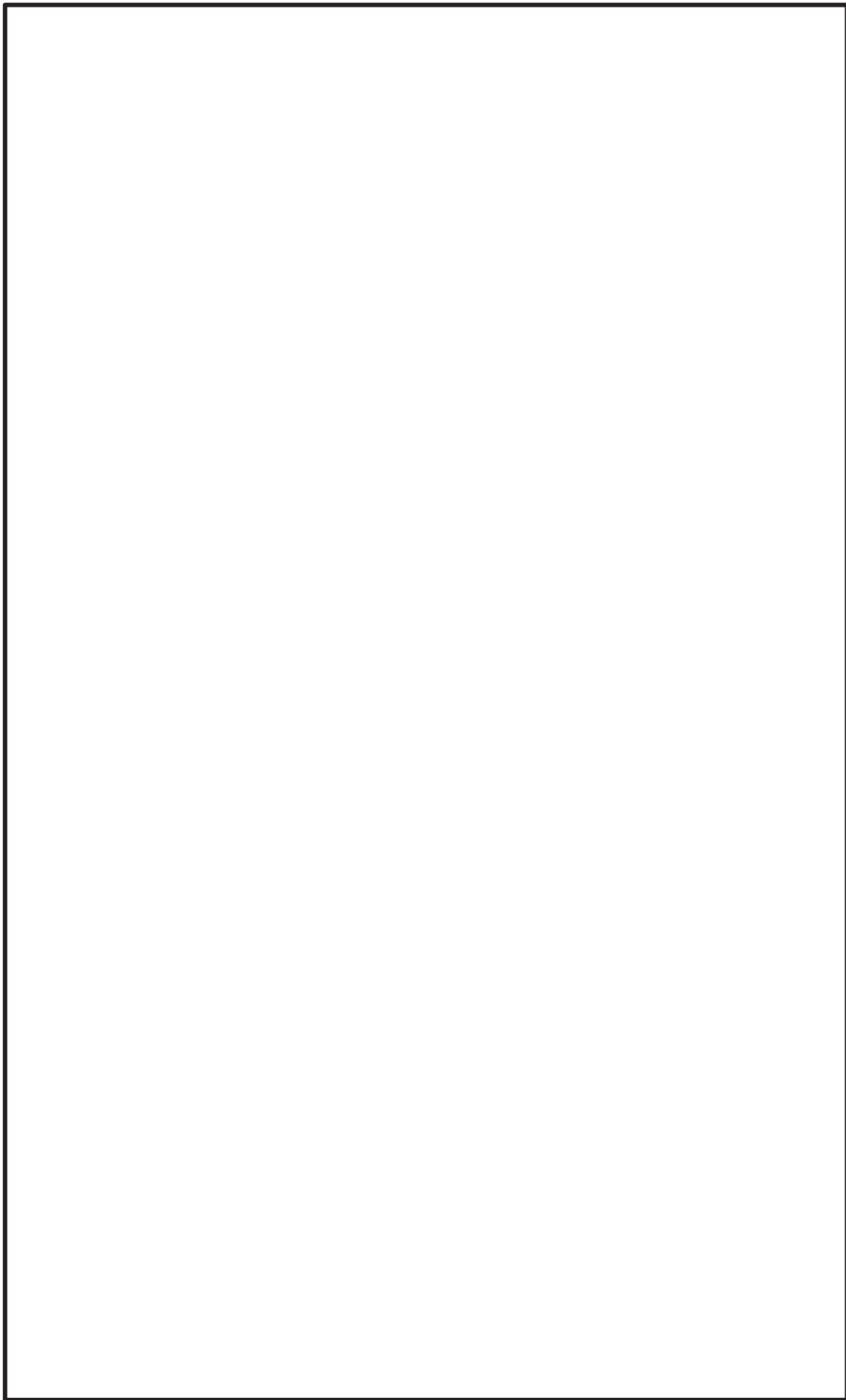
別図 1-9 解析モデル図 (LPCS-003)



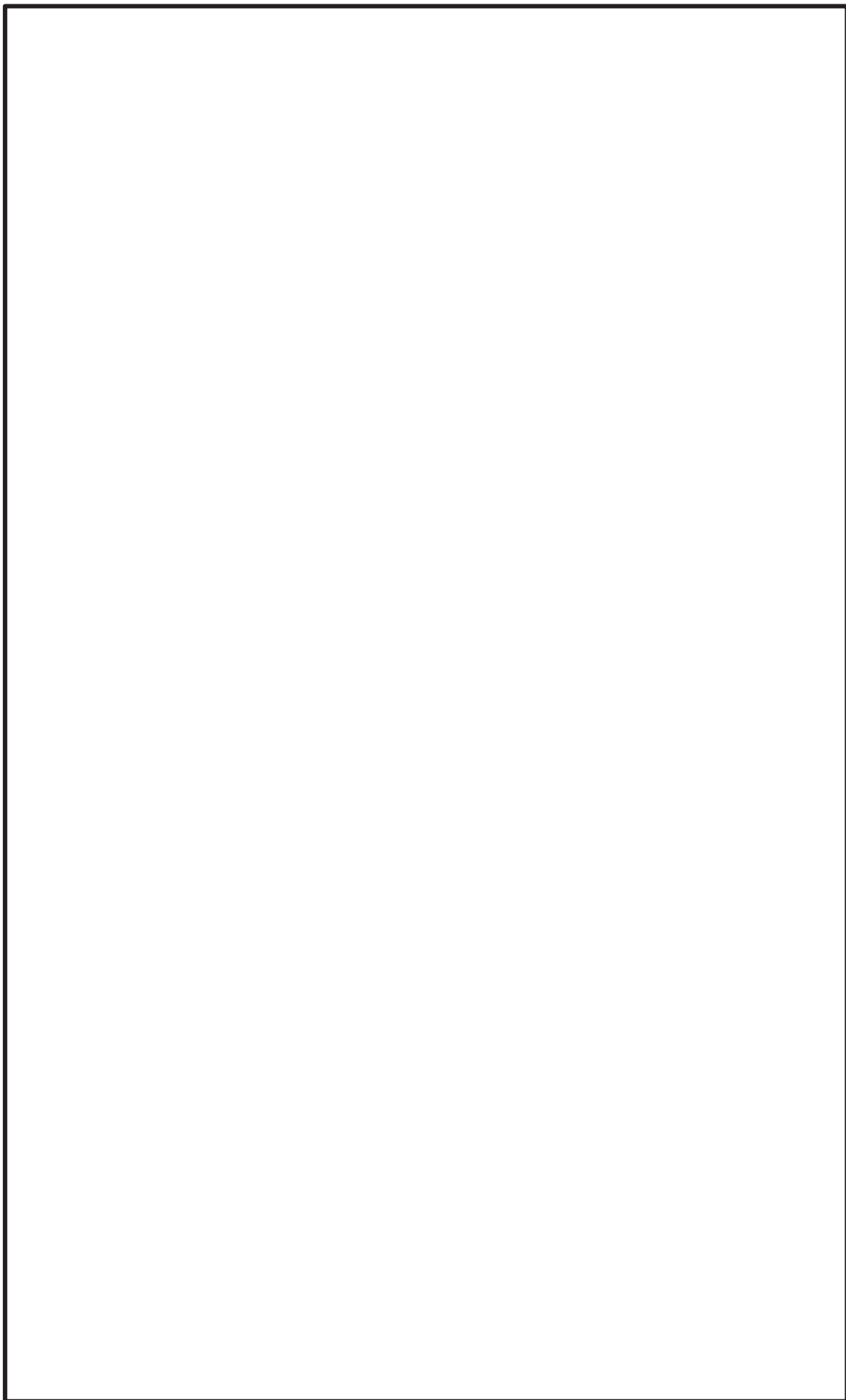
別図 1-10 解析モデル図 (RCIC-001)



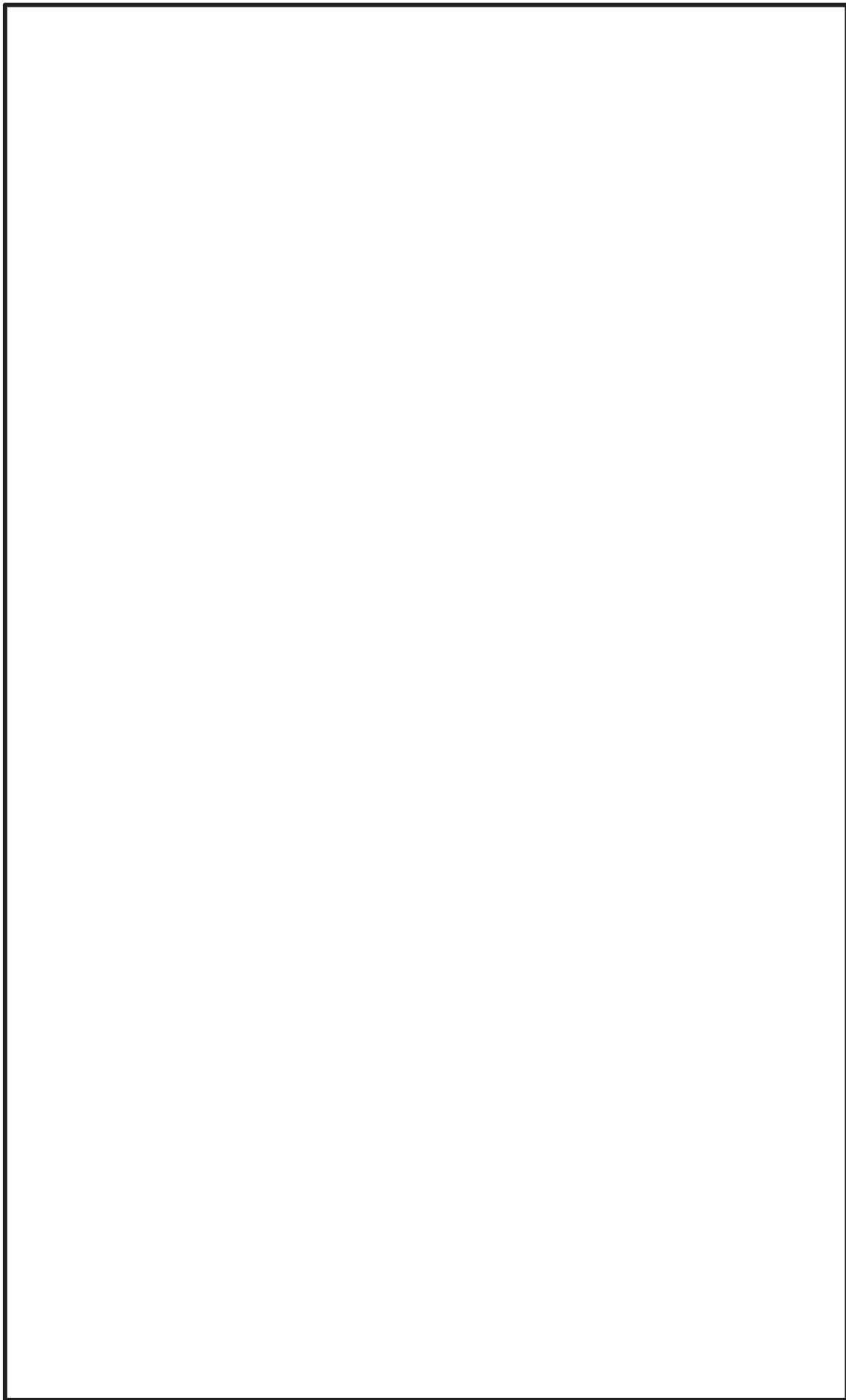
別図 1-11 解析モデル図 (RCIC-005)



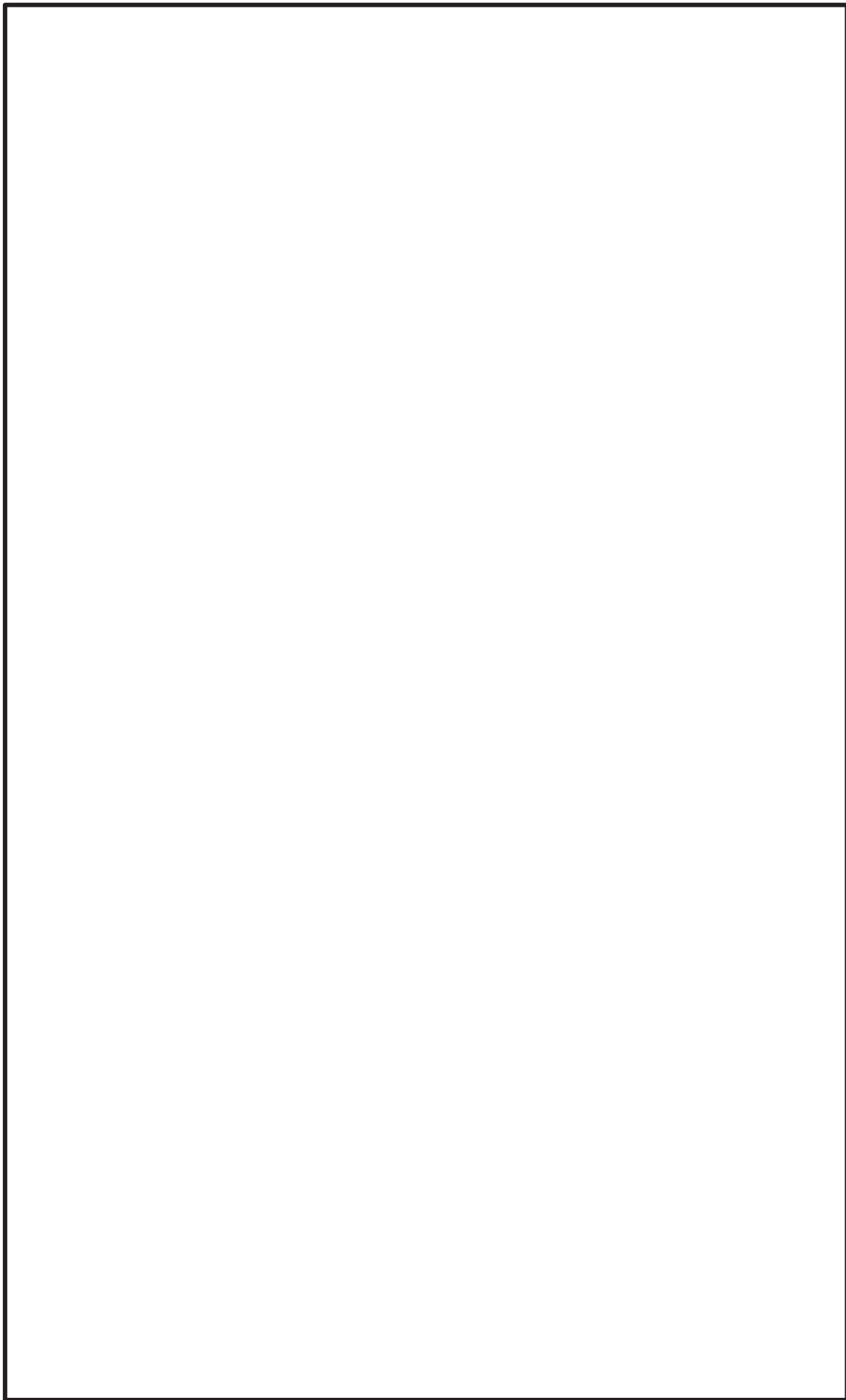
別図 1-12 解析モデル図 (FCS-002)



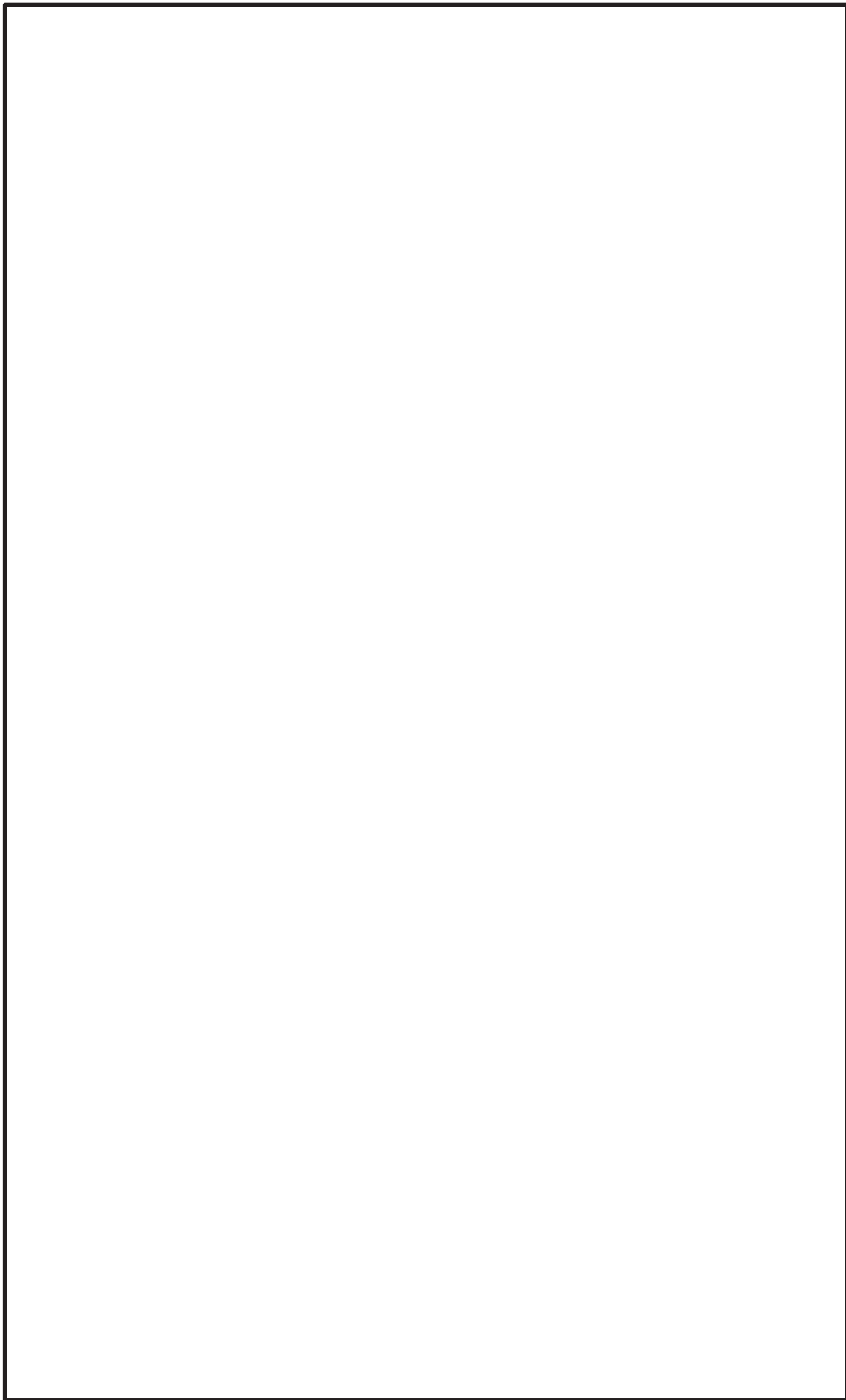
別図 1-13 解析モデル図 (FCS-004)



別図 1-14 解析モデル図 (AC-014)



別図 1-15 解析モデル図 (AC-001)



別図 1-16 解析モデル図 (AC-002)

H P C S - 0 0 2 の算出値に対する考察

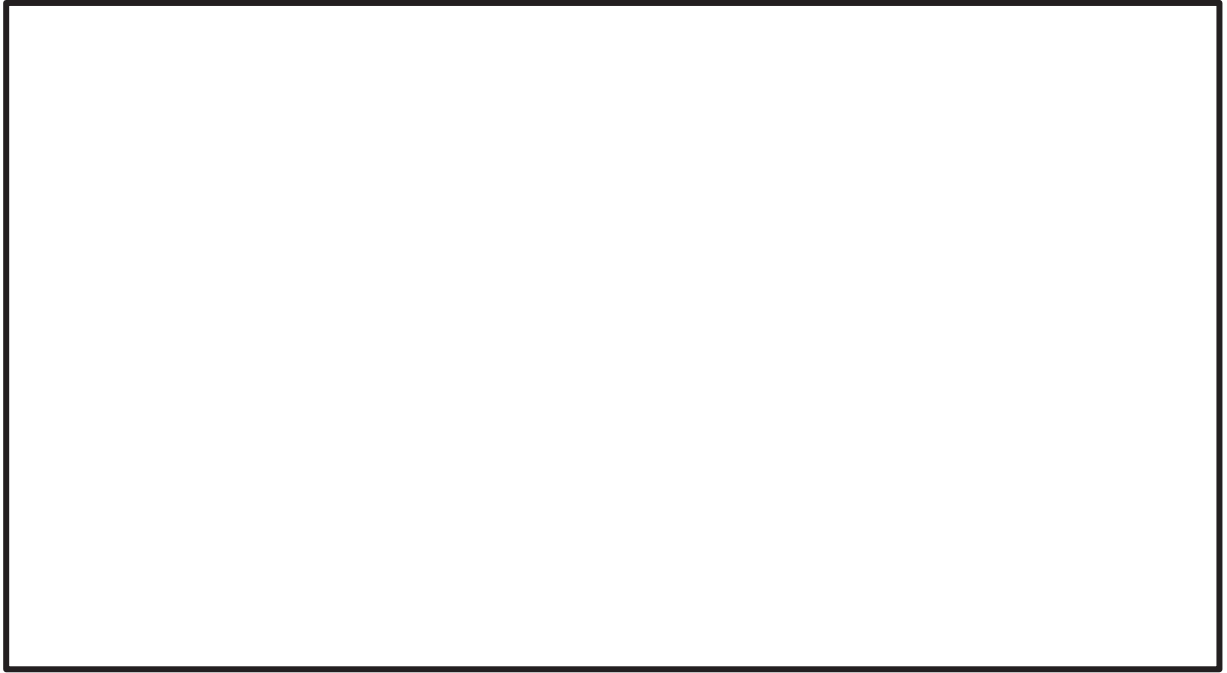
H P C S - 0 0 2 に対する影響確認の結果（本文表 4 記載），サブプレッションチェンバの地震応答を考慮した多入力時刻歴応答解析の一次応力の算出値（216MPa）が今回工認の算出値（172MPa）よりも大きくなった要因について考察する。

H P C S - 0 0 2 の評価の結果，一次応力が最小裕度となった評価点（質点 75）は，サブプレッションチェンバから比較的近い位置にある H P C S 系ポンプノズル部（アンカー点）である。（別図 2-1 参照）

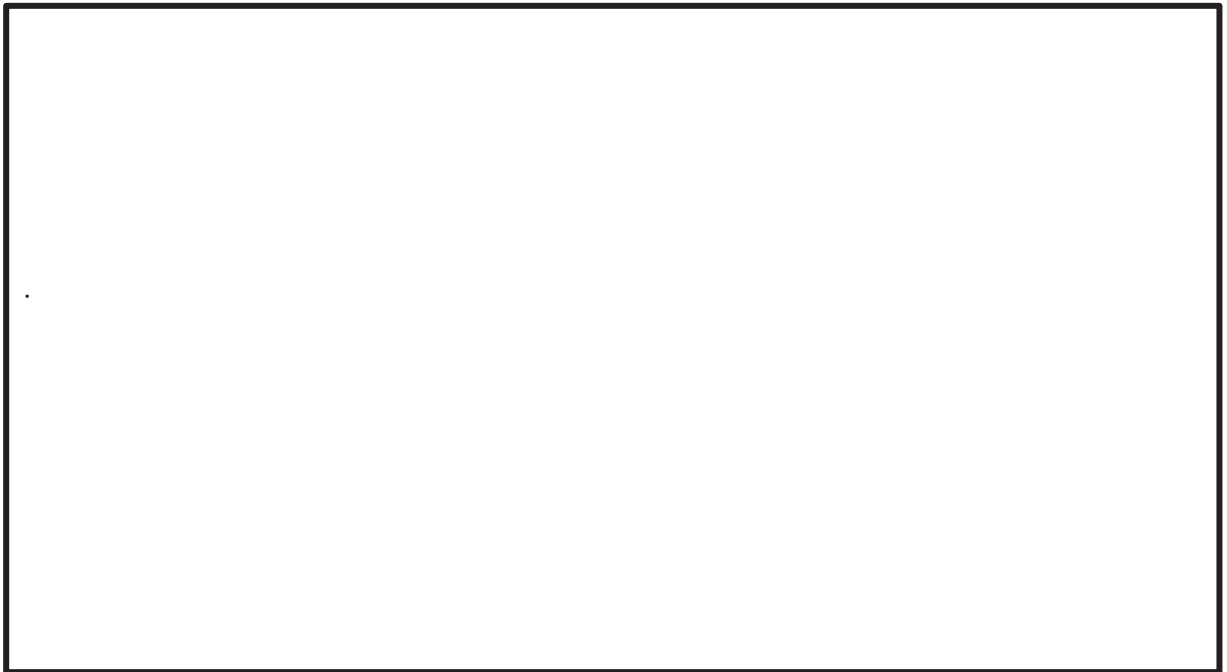
当該評価点の応力に対して支配的な振動モードは 4 次及び 7 次モードである。ここで，多入力時刻歴応答解析に入力したサブプレッションチェンバの時刻歴加速度から作成した床応答スペクトルでは，特に 4 次モードにおいて NS 方向の地震応答加速度が大きくなっている。振動モード図を別図 2-2 に，各モードに対応する刺激係数を別表 2-1 に，床応答スペクトルを別図 2-3 に示す。

こうした状況を踏まえると，サブプレッションチェンバ内に設置されたストレーナが振動する固有周期帯（特に 4 次モード）の地震応答の影響が，サブプレッションチェンバ外に伝達し，サブプレッションチェンバに比較的近い H P C S 系ポンプノズル部（アンカー点）応力が発生したものと考えられる。

以上のことから，H P C S - 0 0 2 に対する影響確認の結果，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算出値（216MPa）が今回工認の算出値（172MPa）よりも大きくなったのは，サブプレッションチェンバ内に設置されたストレーナが振動することによる地震応答の影響がサブプレッションチェンバ外に伝達し，当該評価点の地震応答が大きくなったことによるものと考えられる。なお，いずれの算出値も許容値（335MPa）を十分満足するものである。



別図 2-1 解析モデル図 (質点 75 の位置抜粋)

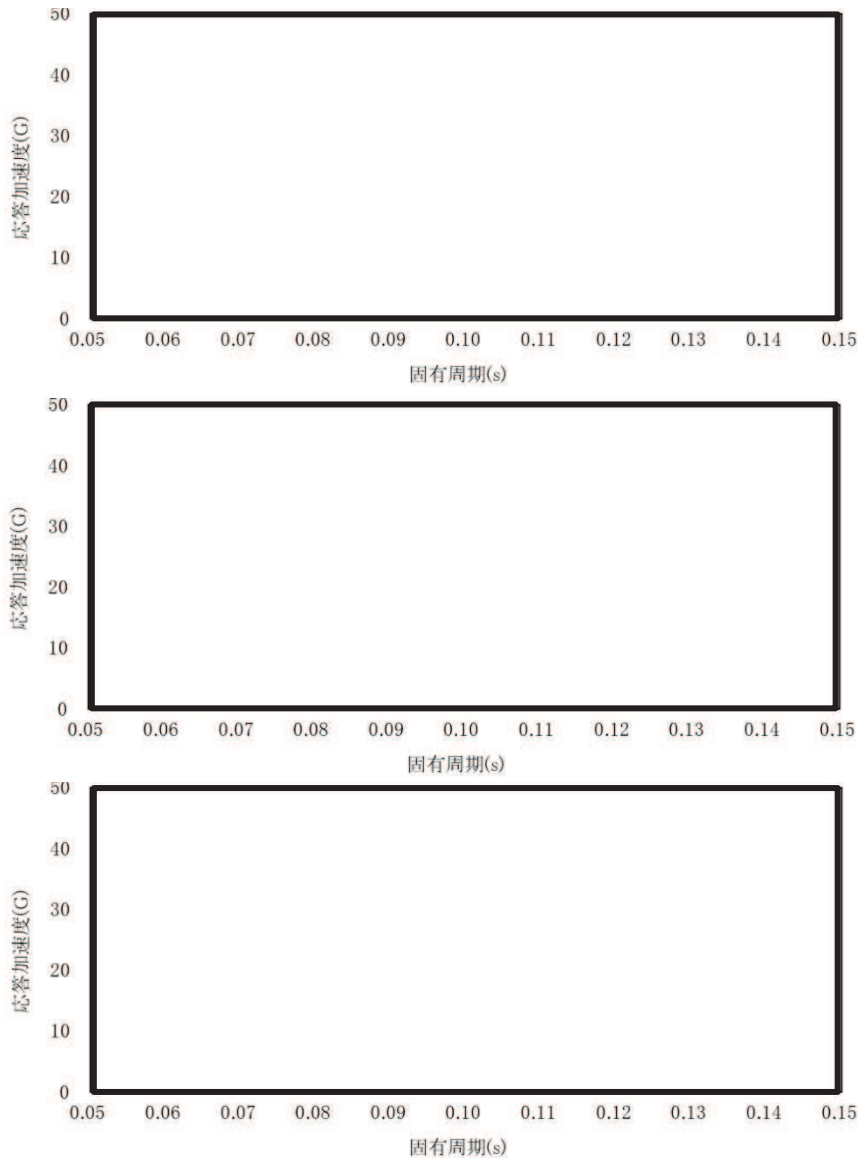


別図 2-2 振動モード図 (4次モード)

別表 2-1 各モードに対応する刺激係数

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。



別図 2-3 当該評価点の入力となる加速度時刻歴から作成した床応答スペクトルと固有周期との関係（上段：NS 方向, 中段：EW 方向, 下段：UD 方向）

サブプレッションチェンバの地震応答加速度を包絡した

設計用床応答曲線を用いたスペクトルモーダル解析による影響確認

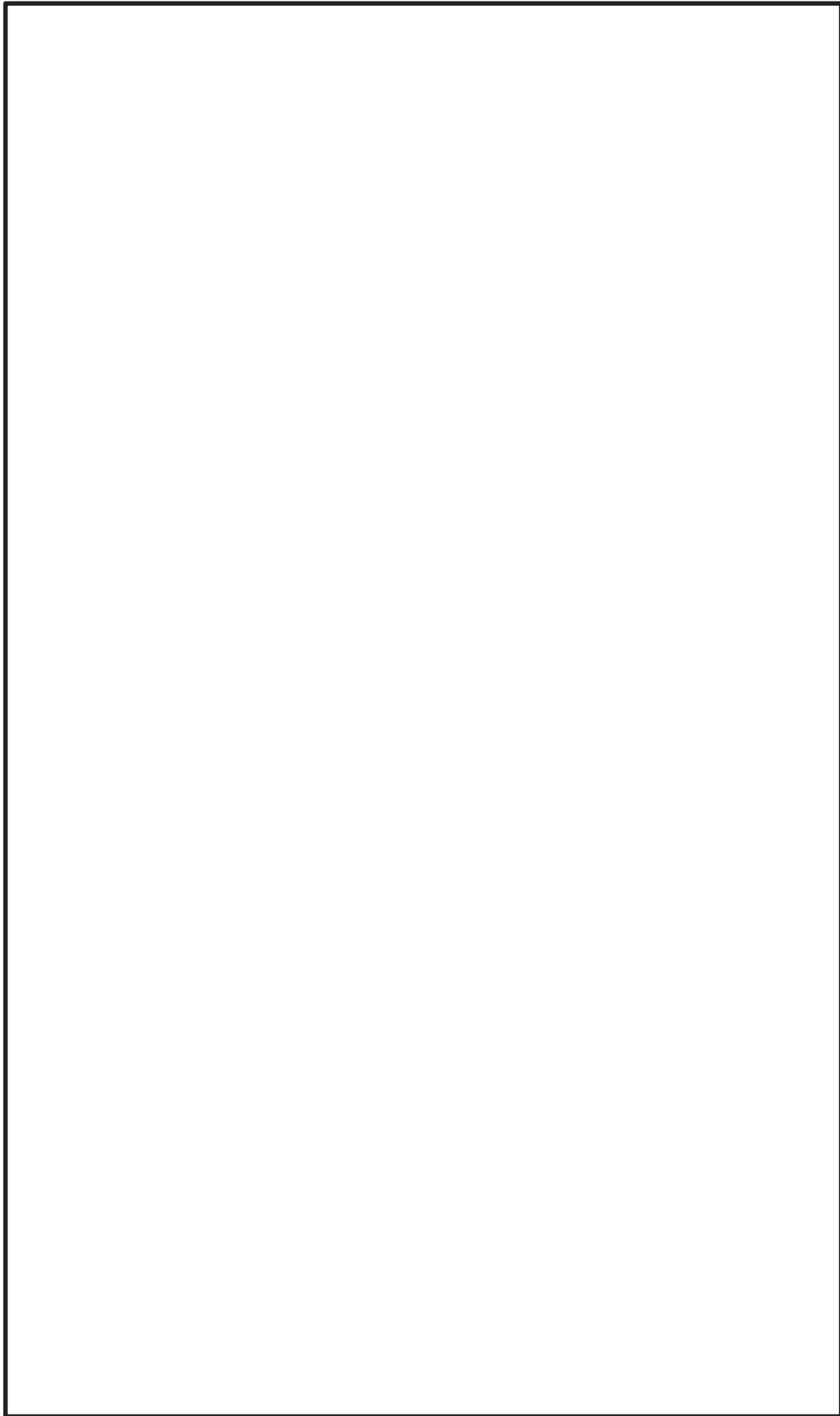
本書は、サブプレッションチェンバに接続する配管（以下「SC接続配管」という）に対して、サブプレッションチェンバの地震応答加速度と原子炉建屋の地震応答加速度を包絡した設計用床応答曲線を用いたスペクトルモーダル解析（以下「包絡スペクトル解析」という）による影響確認結果を纏める。

影響確認としては、サブプレッションチェンバの地震応答の影響を確認するために選定したRHR-010及びHPCS-002を確認対象配管モデルとして、SC接続配管に対する包絡スペクトル解析による評価結果と、より精緻な耐震評価としての多入力時刻歴応答解析による評価結果（本文4項記載）を応力比として比較した。ここで、応力比は、包絡スペクトル解析による応力/多入力時刻歴解析による応力である。

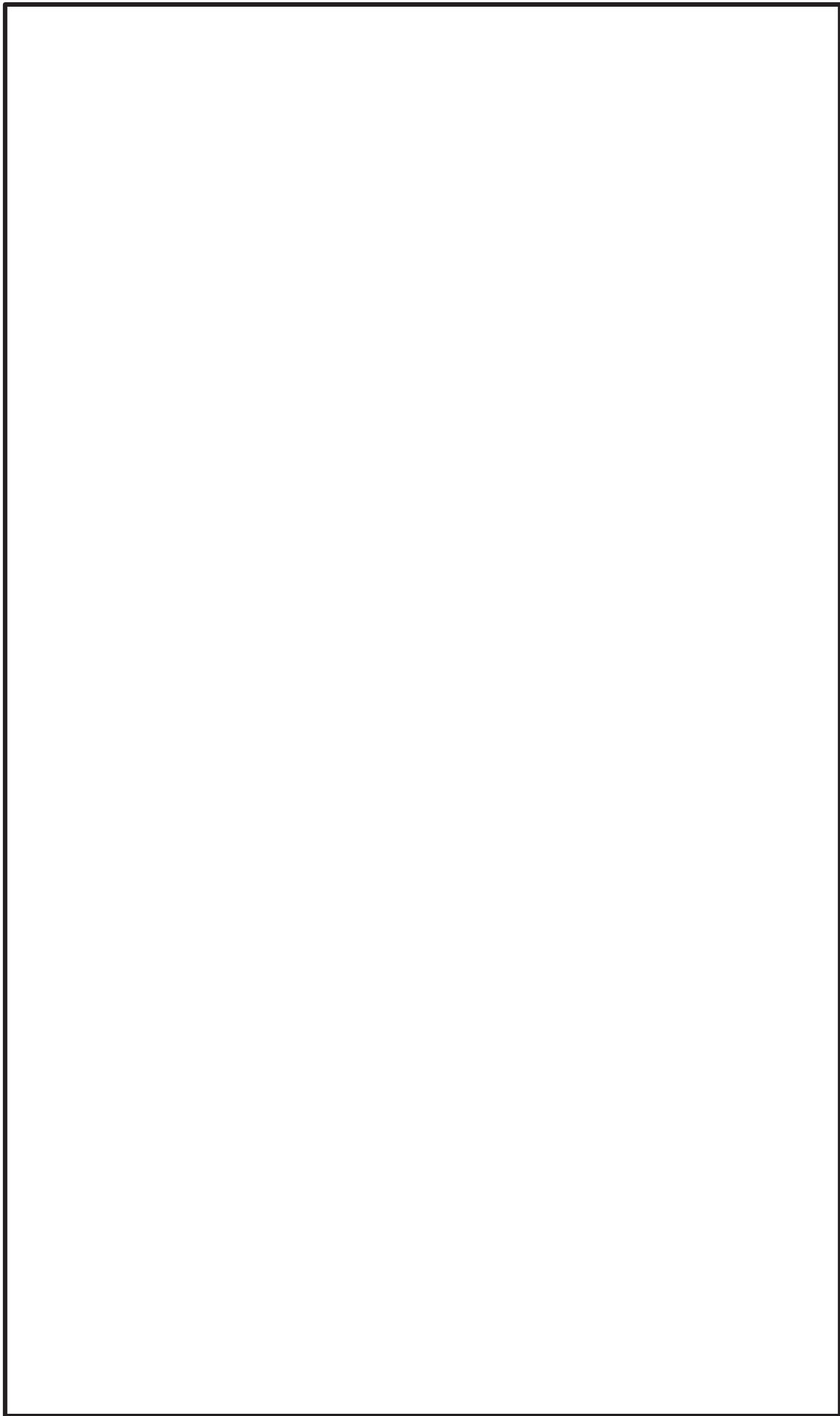
RHR-010及びHPCS-002に対する応力比の結果を別図3-1, 2に示す。

別図3-1, 2に示す応力比の結果から、いずれもサブプレッションチェンバの地震応答加速度の影響が小さいと考えられるサブプレッションチェンバから遠く離れた評価位置において、包絡スペクトル解析による評価結果が、解析上、サブプレッションチェンバの地震応答が考慮されることになるため、より精緻な多入力時刻歴解析による評価結果よりも応力が大きくなっていることが分かる。

このことは、サブプレッションチェンバの地震応答加速度と原子炉建屋の地震応答加速度を包絡した設計用床応答曲線を用いたスペクトルモーダル解析は、解析上、過度に保守的な（合理性に欠ける）評価結果になっていることを示すものである。



別図 3-1 RHR-010 の応力比の結果



別図 3-2 HPCS-002 の応力比の結果

枠囲みの内容は商業機密の観点から公開できません。

時刻歴応答解析とスペクトルモーダル解析との比較

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った。

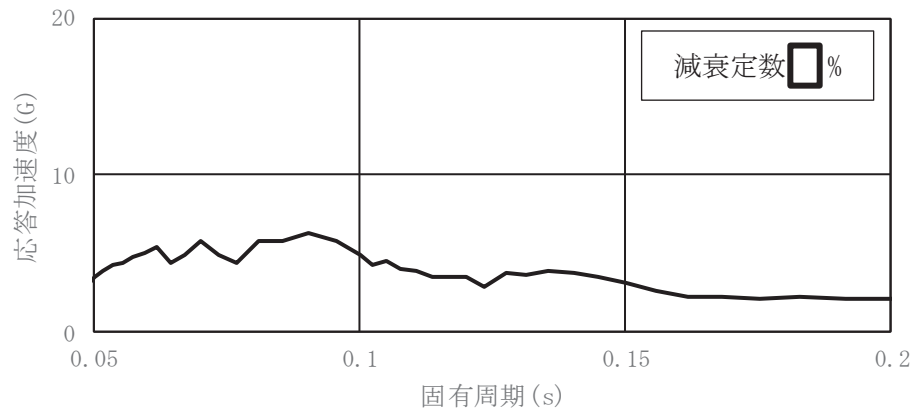
(1) 検討対象配管

検討に用いた対象配管は、本文 4. a. と同じものとし、RHR-010 及び HPCS-002 とする。

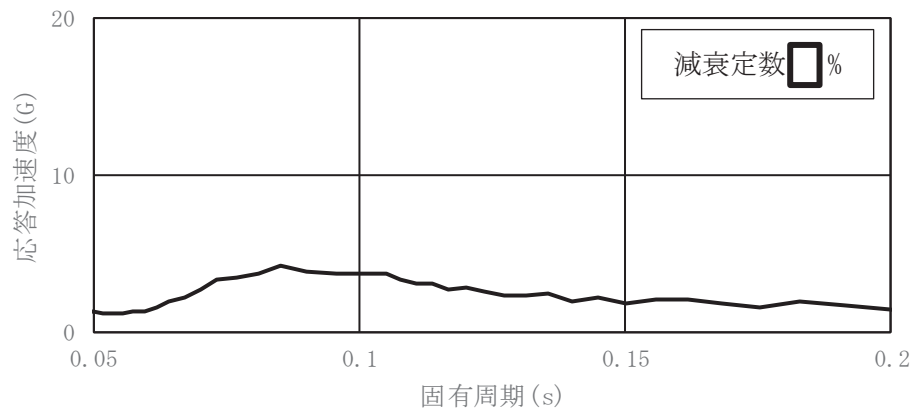
(2) 入力地震動

多入力時刻歴応答解析及びスペクトルモーダル解析に用いる入力地震動は、S_s-D2 とする。また、スペクトルモーダル解析では、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-010 及び HPCS-002 のスペクトルモーダル解析に用いる床応答スペクトルを参図 1-1, 2 に示す。なお、多入力時刻歴応答解析に用いた時刻歴加速度は、本文 4. c. と同じものを用いる。



参図 1-1 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))



参図 1-2 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)

(3) 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参表 2-1 示す。

参表 1-1 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, 基準地震動 S s 7 波) ・原子炉建屋 (O. P. <input type="text"/> m)	時刻歴応答加速度 (基準地震動 S s - D 2) ・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 (基準地震動 S s - D 2, 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。

(4) 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参表2-2の①, ②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 (1.48×172=255) であっても, 許容値に対して余裕 (335/255=1.31) がある。

参表 1-2 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	191 (29)	363	1.90	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。

*2: 許容値/算出値を表す。

*3: 括弧内は応力評価点を表す。

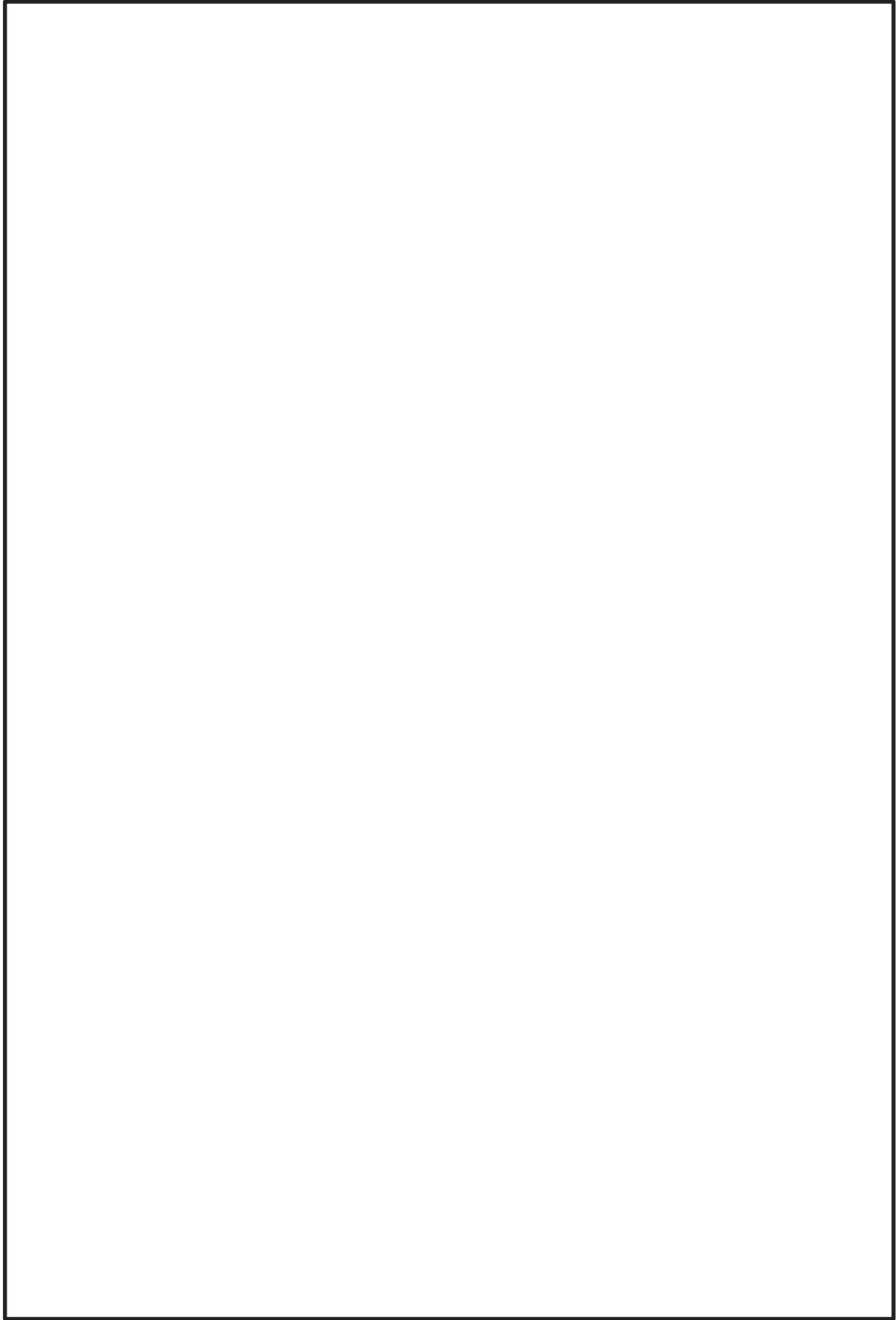
確認対象配管の固有値解析結果

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

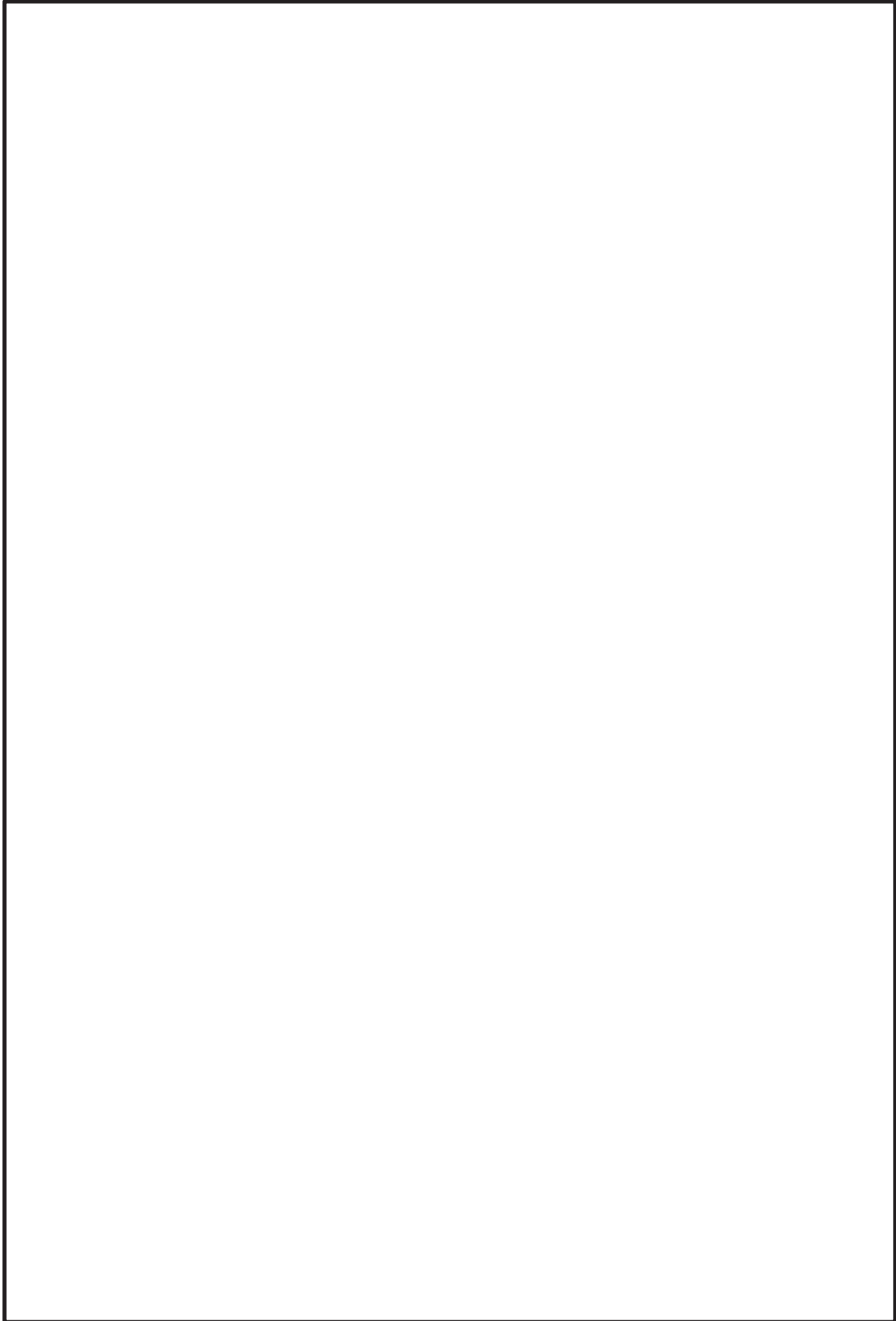
参表 2-1 固有値解析結果

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 2-1 振動モード図（上段：1次モード，下段：2次モード）

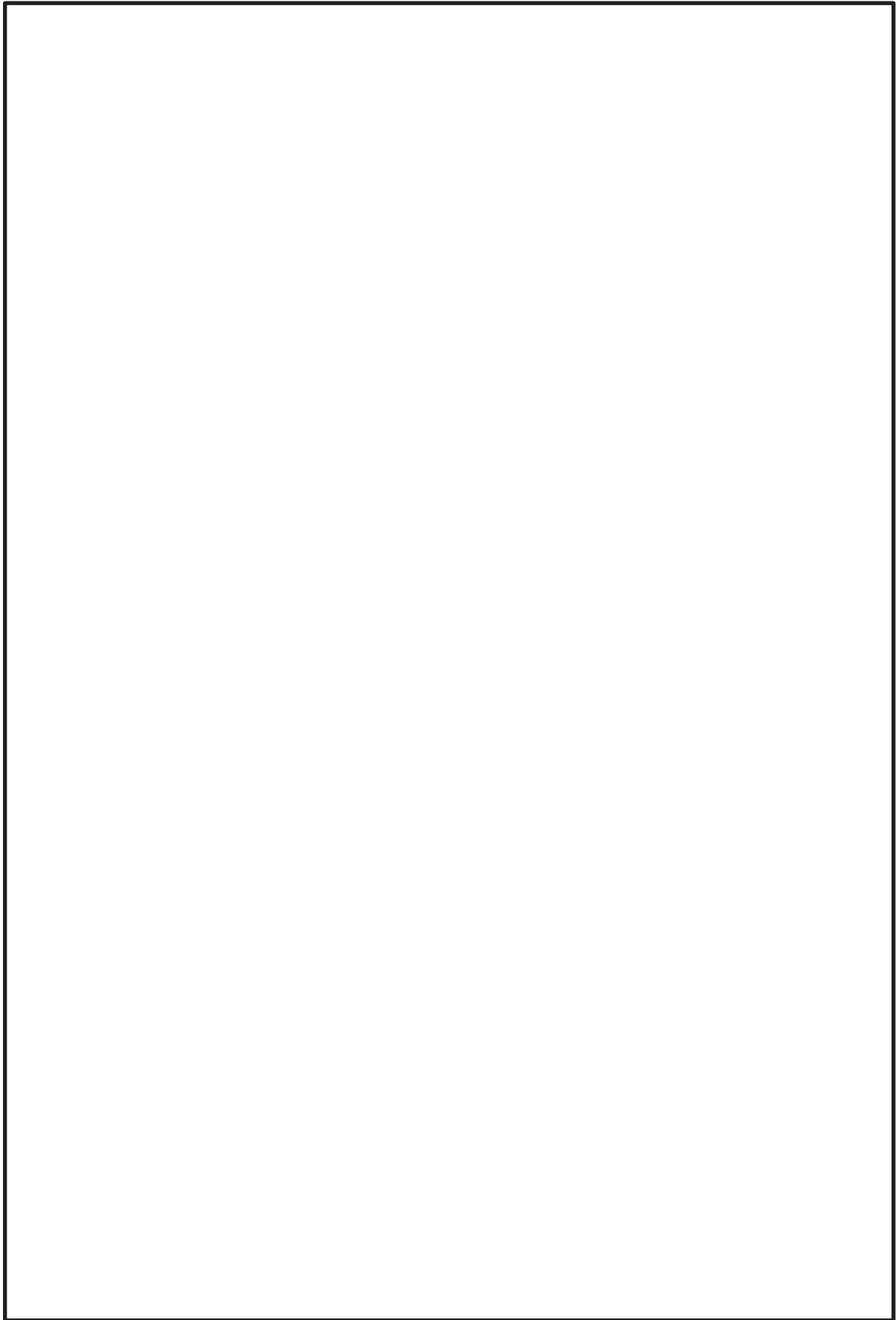


参図 2-2 振動モード図（上段：3次モード，下段：4次モード）

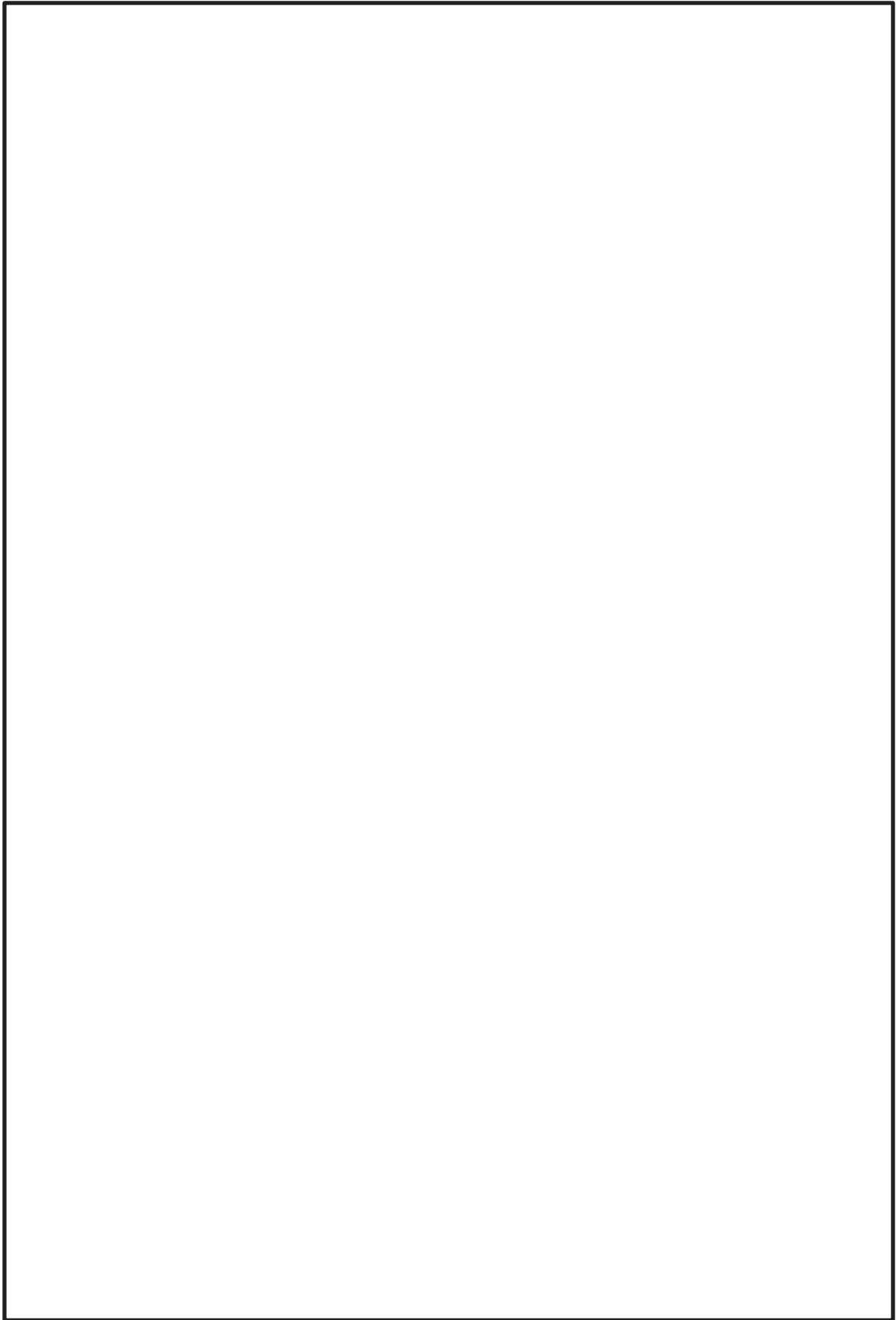
参表 2-2 固有値解析結果

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 2-3 振動モード図（上段：1次モード，下段：2次モード）



参図 2-4 振動モード図（上段：3次モード，下段：4次モード）

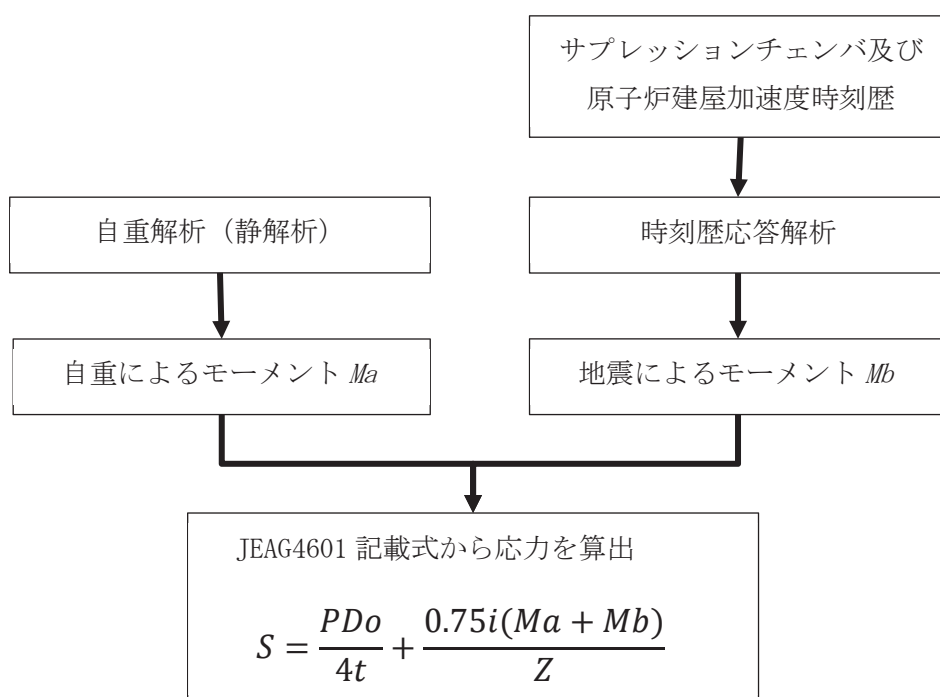
サプレッションチェンバ接続配管の時刻歴解析に用いた応力算出方法

1. はじめに

本書は、サプレッションチェンバ接続配管の影響評価として用いた時刻歴解析方法をまとめたものである。

2. 評価概要

サプレッションチェンバ接続配管の影響評価として用いた時刻歴解析について、以下に評価概要を示す。



S : 一次応力

P : 圧力

Do : 管外径

t : 管の厚さ

i : 応力係数

Ma : 自重により生じるモーメント

Mb : 地震を含めた短期荷重により生じるモーメント

Z : 管の断面係数

3. 時刻歴応答解析の概要

配管の時刻歴応答解析の理論式を以下に示す。

減衰は、を用いている。

3.1 理論

3.1.1 釣合い方程式

多点入力を受ける配管の釣合い方程式を次に示す。

$$\begin{bmatrix} m_p & m_{ps} \\ m_{ps}^T & m_s \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{u} \\ \ddot{z} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} c_p & c_{ps} \\ c_{ps}^T & c_s \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{u} \\ \dot{z} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} k_p & k_{ps} \\ k_{ps}^T & k_s \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u \\ z \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 0 \\ F_s \end{Bmatrix} \cdot \cdot \cdot (1)$$

$[m_p]$: 配管系の質量マトリクス

$[c_p]$: 配管系の減衰マトリクス

$[k_p]$: 配管系の剛性マトリクス

$[m_s]$: 拘束具の質量マトリクス

$[c_s]$: 拘束具の減衰マトリクス

$[k_s]$: 拘束具の剛性マトリクス

$[m_{ps}]$: 配管系と支持具の連成質量マトリクス

$[c_{ps}]$: 配管系と支持具の連成減衰マトリクス

$[k_{ps}]$: 配管系と支持具の連成剛性マトリクス

$\{\ddot{u}\}$, $\{\dot{u}\}$, $\{u\}$: 配管の応答加速度, 速度, 変位

$\{\ddot{z}\}$, $\{\dot{z}\}$, $\{z\}$: 拘束具の応答加速度, 速度, 変位

$\{F_s\}$: 支持具からの荷重ベクトル

配管の応答変位は慣性応答と相対変位成分を有するため下式で表記する。

$$\{u\} = \{u_D\} + \{u_s\} \cdot \cdot \cdot (2)$$

$\{u_D\}$: 慣性力による応答変位

$\{u_s\}$: 拘束点間の相対変位による応答変位

(2)式の相対変位成分は拘束点の変位を用いて以下のとおり表せる。

$$\{u_s\} = -[k_p]^{-1}[k_{ps}]\{z\} \cdot \cdot \cdot (3)$$

(2), (3)式を(1)式に当てはめると, 多点入力の影響下にある配管の慣性応答についての運動方程式が得られる。

$$[m_p]\ddot{u}_D + [c_p]\dot{u}_D + [k_p]u_D = [m_p][k_p]^{-1}[k_{ps}]\ddot{z} \cdot \cdot \cdot (4)$$

3.1.2 固有値解析

固有値解析は、次の固有方程式の解を求めることで固有値の算出を行う。

$$[k_p]\{\Phi\} = \omega^2[m_p]\{\Phi\} \cdots (5)$$

ω : 固有角振動数

$\{\Phi\}$: 固有ベクトル

p 次までのみの固有値及び固有ベクトルを定義することで、(5)式は次のごとく表される。

$$[k_p][\Phi] = [m_p][\Phi]\Omega^2 \cdots (6)$$

$$\Omega^2 = \text{diag}(\omega^2)$$

$[\Phi]$: 直交する固有ベクトル $\{\phi_1, \phi_2, \cdots, \phi_P\}$ を列にもつマトリクス

(6)式を解くことで固有値の算出を行う。

3.1.3 モーダル解析法による時刻歴応答解析

モーダル解析法では、構造物の応答は、配管の変位がモードマトリクスとモード変位の重ね合わせにより表現される。

$$\{u_D\} = [\Phi]\{x\} \cdots (7)$$

$[\Phi]$: モードマトリクス

$\{x\}$: モード変位ベクトル

上記に基づき、配管の i 次モードにおける、拘束点 j の入力に対するモード座標系上の力のつり合いは以下で表される。

$$\ddot{x}_i^{(j)} + 2\xi_i\omega_i\dot{x}_i^{(j)} + \omega_i^2x_i^{(j)} = [\Phi]^T[m_p][k_p]^{-1}[k_{ps}]z^{(j)} \cdots (8)$$

ω_i : i 次モードの固有角振動数

ξ_i : i 次モードの減衰比

$z^{(j)}$: 拘束点 j の加速度入力

モーダル時刻歴解析では、時間ステップごとにつり合い式を解くことで、配管応答を求め、各部材にはたらく内力（モーメント）を求める。