

| | |
|-------------------|----------------------|
| 島根原子力発電所第2号機 審査資料 | |
| 資料番号 | NS2-補-027-10-86 改 04 |
| 提出年月日 | 2023年5月31日 |

サプレッションチェンバ内に設置される機器・配管及び
サプレッションチェンバ外に接続される配管に適用する
設計用地震力に関する補足説明資料

2023年5月

中国電力株式会社

本資料のうち、枠囲みの内容は機密に係る事項のため公開できません。

目 次

| | |
|---|----|
| 1. はじめに | 1 |
| 2. サプレッションチェンバ内に設置される柔構造の機器・配管の評価概要 | 3 |
| 3. サプレッションチェンバ内に設置される剛構造の機器の評価概要 | 4 |
| 4. サプレッションチェンバ内に設置される剛構造の配管の評価概要及びサプレッション チェンバ外に接続される配管の評価概要 | 5 |
| 4.1 サプレッションチェンバ接続配管の配置概要 | 5 |
| 4.2 適用する耐震条件 | 7 |
| 4.2.1 パターンA（原子炉建物内～サプレッションチェンバ貫通部） | 8 |
| 4.2.2 パターンB（サプレッションチェンバ貫通部～サプレッションチェンバ内） | 11 |
| 4.2.3 パターンC（原子炉格納容器内～ベント管貫通部） | 13 |
| 4.2.4 パターンD（ベント管貫通部～サプレッションチェンバ内） | 24 |
| 5. まとめ | 26 |

添付資料－1 サプレッションチェンバ接続配管の地震応答に関する影響確認

参考資料－1 サプレッションチェンバ接続配管の時刻歴解析手法について

1. はじめに

VI-2-9-2-2「サブプレッションチェンバの耐震性についての計算書」に示すとおり、サブプレッションチェンバに作用する地震力はスペクトルモーダル解析を用いて算出する。このため、解析から得られたサブプレッションチェンバの応答加速度を用いて、サブプレッションチェンバ内に設置される機器・配管を評価するための設計用震度は作成できるが、設計用床応答スペクトルは作成できない。

以上より、サブプレッションチェンバ内に設置される機器・配管のうち、固有周期が 0.05 秒以下であり剛構造である機器・配管については、VI-2-1-7「設計用床応答スペクトルの作成方針」に記載している「サブプレッションチェンバ」又は「サブプレッションチェンバ（補強リング及びサポート）」の設計用震度を用いて耐震評価を実施する。一方、サブプレッションチェンバの設計用床応答スペクトルは作成しないため、固有周期が 0.05 秒を超え柔構造となる機器・配管については、サブプレッションチェンバ及びサブプレッションチェンバサポートと連成させた 3 次元はりモデルを作成し、地震応答解析から得られた地震力を用いて耐震評価を実施する。

本資料は、上記のとおり、サブプレッションチェンバ内に設置される機器・配管は設備ごとに適用する耐震条件が異なることから、サブプレッションチェンバ内に設置される機器・配管の耐震条件について、補足説明するものである。

なお、本資料が関連する図書は以下のとおりである。

- ・ VI-2-1-7 「設計用床応答スペクトルの作成方針」
- ・ VI-2-5-3-1-2 「管の耐震性についての計算書（主蒸気系）」
- ・ VI-2-5-4-1-3 「残留熱除去系ストレーナの耐震性についての計算書」
- ・ 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性についての計算書（残留熱除去系）」
- ・ VI-2-5-4-1-6 「残留熱除去系ストレーナ取付部コネクタの耐震性についての計算書」
- ・ VI-2-5-4-1-7 「残留熱除去系ストレーナ取付部サポートの耐震性についての計算書」
- ・ VI-2-5-5-1-2 「高圧炉心スプレイ系ストレーナの耐震性についての計算書」
- ・ 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性についての計算書（高圧炉心スプレイ系）」
- ・ VI-2-5-5-1-5 「高圧炉心スプレイ系ストレーナ取付部コネクタの耐震性についての計算書」
- ・ VI-2-5-5-1-6 「高圧炉心スプレイ系ストレーナ取付部サポートの耐震性についての計算書」
- ・ VI-2-5-5-2-2 「低圧炉心スプレイ系ストレーナの耐震性についての計算書」
- ・ 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性についての計算書（低圧炉心スプレイ系）」
- ・ VI-2-5-5-2-5 「低圧炉心スプレイ系ストレーナ取付部コネクタの耐震性についての計算書」

- ・VI-2-5-5-2-6「低圧炉心スプレイ系ストレーナ取付部サポートの耐震性についての計算書」
- ・VI-2-5-5-3-2「管の耐震性についての計算書（高圧原子炉代替注水系）」
- ・VI-2-5-5-4-1「原子炉隔離時冷却系ストレーナの耐震性についての計算書」
- ・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-2-5-6-1-4「ストレーナ部ティーの耐震性についての計算書（原子炉隔離時冷却系）」
- ・VI-2-6-5-24「サプレッションプール水温度の耐震性についての計算書」
- ・VI-2-6-5-30「サプレッションチェンバ温度（SA）の耐震性についての計算書」
- ・VI-2-6-5-31「サプレッションプール水温度（SA）の耐震性についての計算書」
- ・VI-2-9-2-9「サプレッションチェンバアクセスハッチの耐震性についての計算書」
- ・VI-2-9-4-4-1-2「サプレッションチェンバスプレイ管の耐震性についての計算書」
- ・VI-2-9-4-4-4-2「管の耐震性についての計算書（残留熱代替除去系）」
- ・VI-2-9-4-5-1-1「管の耐震性についての計算書（非常用ガス処理系）」
- ・VI-2-9-4-5-2-1「管の耐震性についての計算書（可燃性ガス濃度制御系）」
- ・VI-2-9-4-5-4-1「管の耐震性についての計算書（窒素ガス代替注入系）」
- ・VI-2-9-4-6-1-1「管の耐震性についての計算書（窒素ガス制御系）」
- ・VI-2-9-4-7-1-1「管の耐震性についての計算書（格納容器フィルタベント系）」
- ・NS2-補-027-10-14「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」
- ・NS2-補-027-10-45「サプレッションチェンバ及びサプレッションチェンバサポートの耐震評価手法について」

2. サプレッションチェンバ内に設置される柔構造の機器・配管の評価概要

サプレッションチェンバ内に設置される柔構造の機器・配管を表 2-1 に示す。表 2-1 に示す機器・配管は、サプレッションチェンバ及びサプレッションチェンバサポートとの連成モデルを作成し、スペクトルモーダル解析にて耐震評価を実施する。なお、高圧炉心スプレイ系及び低圧炉心スプレイ系の各設備は、残留熱除去系と同形状であることから、各系統で最大となる荷重条件を用いて、評価結果を残留熱除去系の計算書に代表して記載している。そのため、表 2-1 には残留熱除去系の計算書のみを代表して記載する。

表 2-1 サプレッションチェンバ内に設置され柔構造である機器・配管
(連成モデルを作成して耐震評価を実施する機器・配管)

| 図書番号 | 機器名 | 固有周期(s) *1 | 解析モデルを記載している耐震計算書 |
|----------------|---------------------|------------|--|
| VI-2-5-4-1-3 | 残留熱除去系ストレナ*2 | | VI-2-9-2-2「サプレッションチェンバの耐震性についての計算書」 |
| VI-2-5-4-1-5 | ストレナ部ティー(残留熱除去系)*2 | | |
| VI-2-5-4-1-6 | 残留熱除去系ストレナ取付部コネクタ*2 | | |
| VI-2-5-4-1-7 | 残留熱除去系ストレナ取付部サポート*2 | | |
| VI-2-9-4-4-1-2 | サプレッションチェンバスプレイ管 | | VI-2-9-4-4-1-2「サプレッションチェンバスプレイ管の耐震性についての計算書」 |

注記*1：水平方向及び鉛直方向の1次固有周期のうち、大きい方を記載

*2：高圧炉心スプレイ系及び低圧炉心スプレイ系を含む。

3. サプレッションチェンバ内に設置される剛構造の機器の評価概要

サプレッションチェンバ内に設置される剛構造の機器を表 3-1 に示す。表 3-1 に示す機器は、VI-2-1-7「設計用床応答スペクトルの作成方針」に記載している「サプレッションチェンバ」又は「サプレッションチェンバ（補強リング及びサポート）」の設計用震度を用いて耐震評価を実施する。

表 3-1 サプレッションチェンバ内に設置され剛構造である機器
(設計用震度を用いて耐震評価を実施する機器)

| 図書番号 | 機器名 | 固有周期 (s) *1 | 据付場所*2 |
|--------------|-----------------------|-------------|------------------------------|
| VI-2-5-5-4-1 | 原子炉隔離時冷却系ストレーナ | | サプレッションチェンバ |
| VI-2-5-6-1-4 | ストレーナ部ティール（原子炉隔離時冷却系） | | |
| VI-2-6-5-24 | サプレッションプール水温度 | | サプレッションチェンバ （補強リング及びサポート） |
| VI-2-6-5-30 | サプレッションチェンバ温度（S A） | | サプレッションチェンバ （補強リング及びサポート） |
| VI-2-6-5-31 | サプレッションプール水温度（S A） | | サプレッションチェンバ （補強リング及びサポート） |
| VI-2-9-2-9 | サプレッションチェンバアクセスハッチ | | サプレッションチェンバ |

注記*1：水平方向及び鉛直方向の1次固有周期のうち、大きい方を記載

*2：VI-2-1-7「設計用床応答スペクトルの作成方針」に記載の構造物名を示す。

4. サプレッションチェンバ内に設置される剛構造の配管の評価概要及びサプレッションチェンバ外に接続される配管の評価概要

4.1 サプレッションチェンバ接続配管の配置概要

サプレッションチェンバ内に設置される剛構造の配管及びサプレッションチェンバ外に接続される配管（以下「サプレッションチェンバ接続配管」という。）は、大別すると以下の4パターンとなる。サプレッションチェンバ接続配管の配置概要を図4.1-1に、サプレッションチェンバ接続配管を含む耐震計算書、配管モデル及び各パターンとの対応を表4.1-1に示す。

- ・パターンA：原子炉建物内～サプレッションチェンバ貫通部
- ・パターンB：サプレッションチェンバ貫通部～サプレッションチェンバ内
- ・パターンC：原子炉格納容器内～ベント管貫通部
- ・パターンD：ベント管貫通部～サプレッションチェンバ内

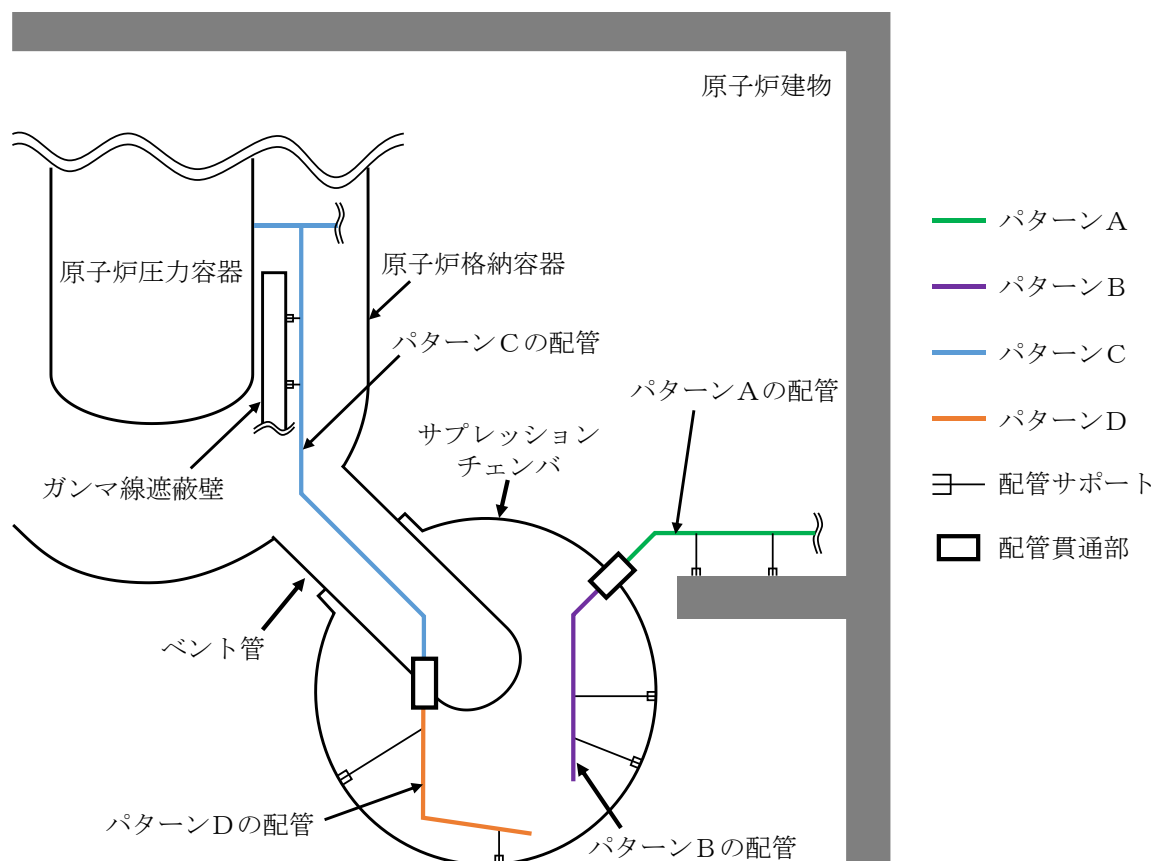


図 4.1-1 サプレッションチェンバ接続配管の配置概要

表 4.1-1 サプレッションチェンバ接続配管を含む耐震計算書,
配管モデル及び各パターンとの対応

| 管の耐震性についての計算書 | | 配管モデル | パターン |
|----------------------------------|--------------------------|-----------|------|
| 図書番号 | 系統名 | | |
| VI-2-5-3-1-2 | 主蒸気系 | MS-PD-1 | C |
| | | MS-PD-2 | C |
| | | MS-PD-3 | C |
| | | MS-PD-4 | C |
| | | MS-PS-6 | D |
| | | MS-PS-7 | D |
| | | MS-PS-8 | D |
| | | MS-PS-9 | D |
| | | MS-PS-10 | D |
| | | MS-PS-11 | D |
| | | MS-PS-12 | D |
| | | MS-PS-13 | D |
| | | MS-PS-14 | D |
| | | MS-PS-15 | D |
| | | MS-PS-16 | D |
| MS-PS-17 | D | | |
| VI-2-5-4-1-4 | 残留熱除去系 | RHR-R-1 | A |
| | | RHR-R-6 | A |
| | | RHR-R-7 | A |
| | | RHR-R-12 | A |
| | | RHR-R-14 | A |
| | | RHR-PS-9 | B |
| | | RHR-PS-10 | B |
| VI-2-5-4-1-4 VI-2-9-4-4-4-2 | 残留熱除去系 残留熱代替除去系 | RHR-R-2 | A |
| VI-2-5-4-1-4 VI-2-5-5-3-2 | 残留熱除去系 高压原子炉代替注水系 | RHR-R-3 | A |
| VI-2-5-5-1-3 | 高压炉心スプレイ系 | HPCS-R-1 | A |
| VI-2-5-5-2-3 | 低压炉心スプレイ系 | LPCS-R-1 | A |
| VI-2-5-6-1-3 | 原子炉隔離時冷却系 | RCIC-R-1 | A |
| | | RCIC-PS-2 | B |
| VI-2-5-6-1-3 VI-2-5-5-3-2 | 原子炉隔離時冷却系 高压原子炉代替注水系 | RCIC-R-4 | A |
| VI-2-9-4-5-1-1 VI-2-9-4-7-1-1 | 非常用ガス処理系 格納容器フィルタベント系 | SGT-R-1 | A |
| VI-2-9-4-5-2-1 | 可燃性ガス濃度制御系 | FCS-R-3 | A |
| | | FCS-R-4 | A |
| VI-2-9-4-5-4-1 | 窒素ガス代替注入系 | ANI-R-6SP | A |
| VI-2-9-4-6-1-1 | 窒素ガス制御系 | NGC-R-1 | A |

4.2 適用する耐震条件

以下にサプレッションチェンバ接続配管の耐震条件の設定手順を示す。また、サプレッションチェンバ接続配管の耐震条件の概要を表 4.2-1 に、具体的な耐震条件についてパターン毎に 4.2.1～4.2.4 項に示す。

○耐震条件の設定手順

STEP1：建物・構築物ごとの耐震支持点数を確認。

STEP2：最も耐震支持点数の多い建物・構築物を選定。

STEP3：配管モデルの重心位置を算出し、当該建物・構築物のうち、重心位置の上階の質点を選定する。

STEP4：配管系に生じる建物・構築物間相対変位を確認し、変位量を設定する。

表 4.2-1 サプレッションチェンバ接続配管の耐震条件の概要

| パターン | 設置位置 | 地震応答 加速度 | 相対変位 | 構造 |
|-----------|---|-----------------|-----------------------------|------------|
| パターン A | 原子炉建物内～ サプレッションチェンバ貫通部 (サプレッションチェンバ外) | 原子炉建物 | サプレッショ ンチェンバと の相対変位*1 | 剛構造 柔構造 |
| パターン B | サプレッションチェンバ貫通部 ～サプレッションチェンバ内 (サプレッションチェンバ内) | サプレッショ ンチェンバ | — | 剛構造 |
| パターン C | 原子炉格納容器内～ ベント管貫通部 (サプレッションチェンバ外) | ガンマ線 遮蔽壁 | ベント管との 相対変位*2 | 柔構造 |
| パターン D | ベント管貫通部～ サプレッションチェンバ内 (サプレッションチェンバ内) | サプレッショ ンチェンバ | ベント管との 相対変位*2 | 剛構造 |

注記*1：サプレッションチェンバ接続部に入力する相対変位について示す。

*2：ベント管接続部に入力する相対変位について示す。

4.2.1 パターンA（原子炉建物内～サプレッションチェンバ貫通部）

パターンAのモデルは図4.2.1-1及び図4.2.1-2のとおり、片端がアンカ（機器等の接続部含む）、もう片端がサプレッションチェンバ接続部となるモデルである。設計用床応答スペクトル及び設計用震度は主な支持点である原子炉建物の耐震条件を適用し、サプレッションチェンバとの接続点は相対変位を入力することでサプレッションチェンバの応答を表現する。

なお、サプレッションチェンバの地震応答に関する影響について添付資料-1にて確認した。

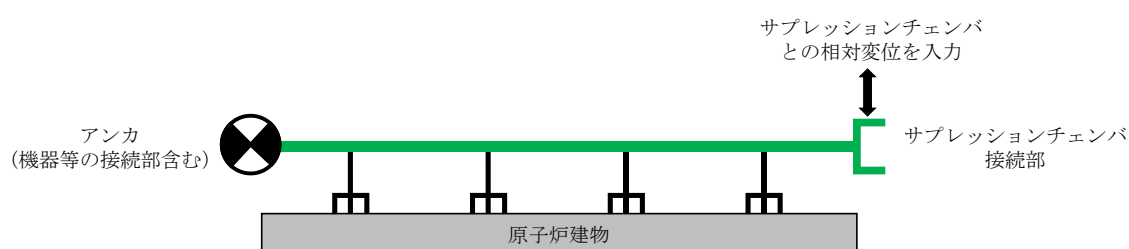


図4.2.1-1 パターンAの配管モデルのイメージ図

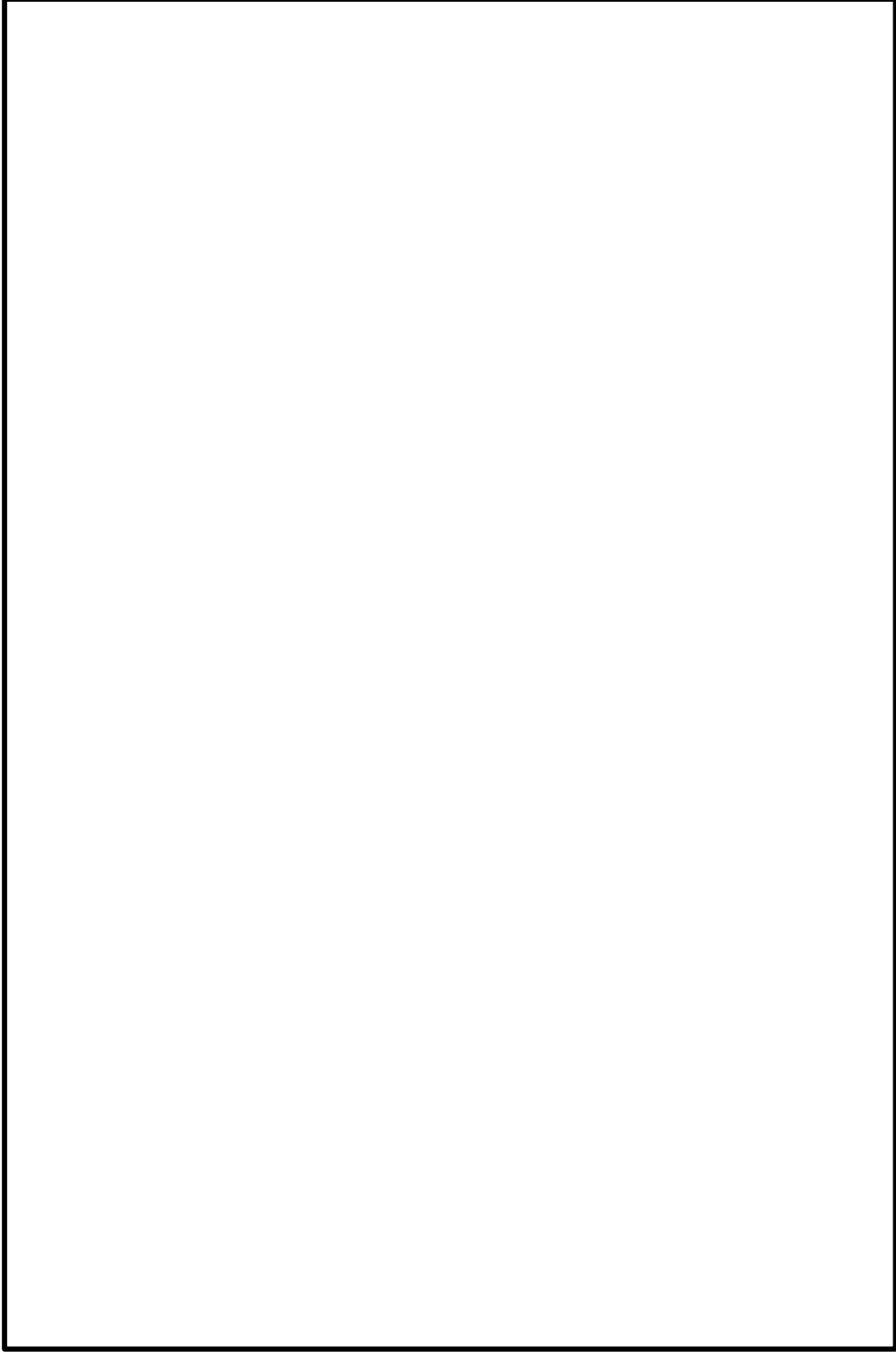


図 4.2.1-2 パターンAの配管モデルの例：RHR-R-7 (1/2)

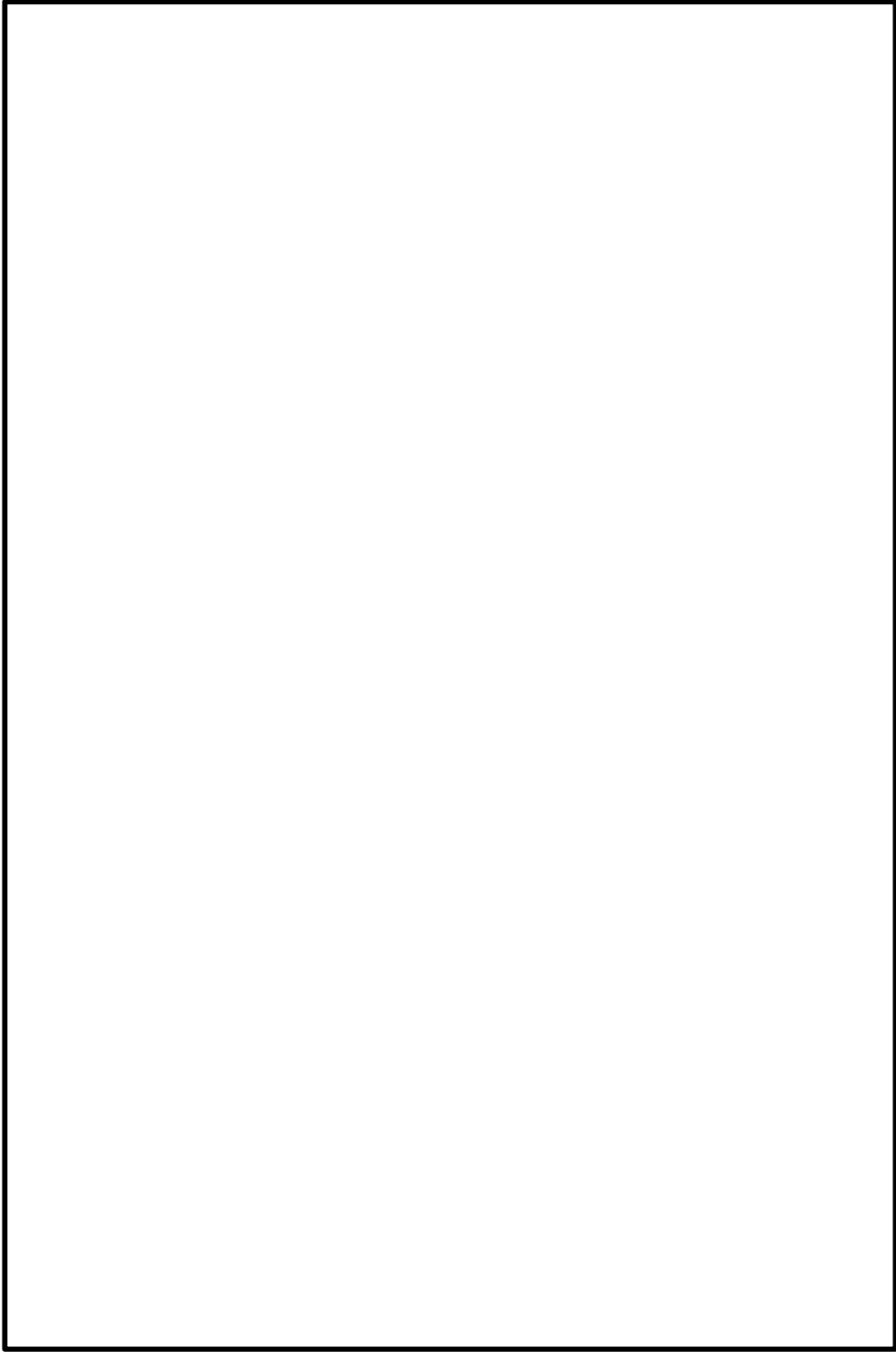


図 4.2.1-2 パターンAの配管モデルの例：RHR-R-7 (2/2)

4.2.2 パターンB（サブプレッションチェンバ貫通部～サブプレッションチェンバ内）

パターンBのモデルは図4.2.2-1及び図4.2.2-2のとおり、片端がフリー端、もう片端がサブプレッションチェンバ接続部となるモデルである。設計用床応答スペクトル及び設計用震度は全ての支持点がサブプレッションチェンバに位置するため、サブプレッションチェンバの耐震条件を適用する。また、パターンBは全ての支持点がサブプレッションチェンバであることから、相対変位の入力は不要である。なお、パターンBの配管は全て剛構造であるため、評価手法は3項に記載の機器と同様である。

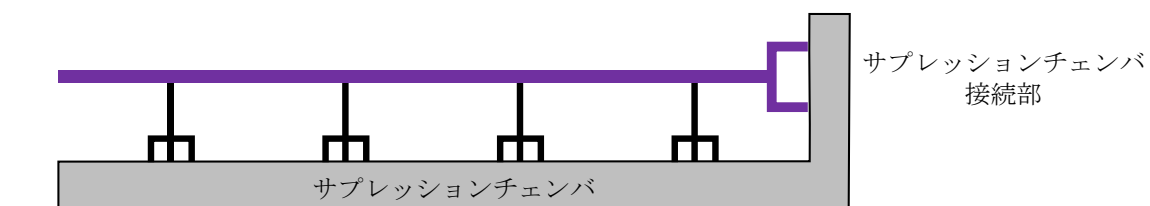


図 4.2.2-1 パターンBの配管モデルのイメージ図

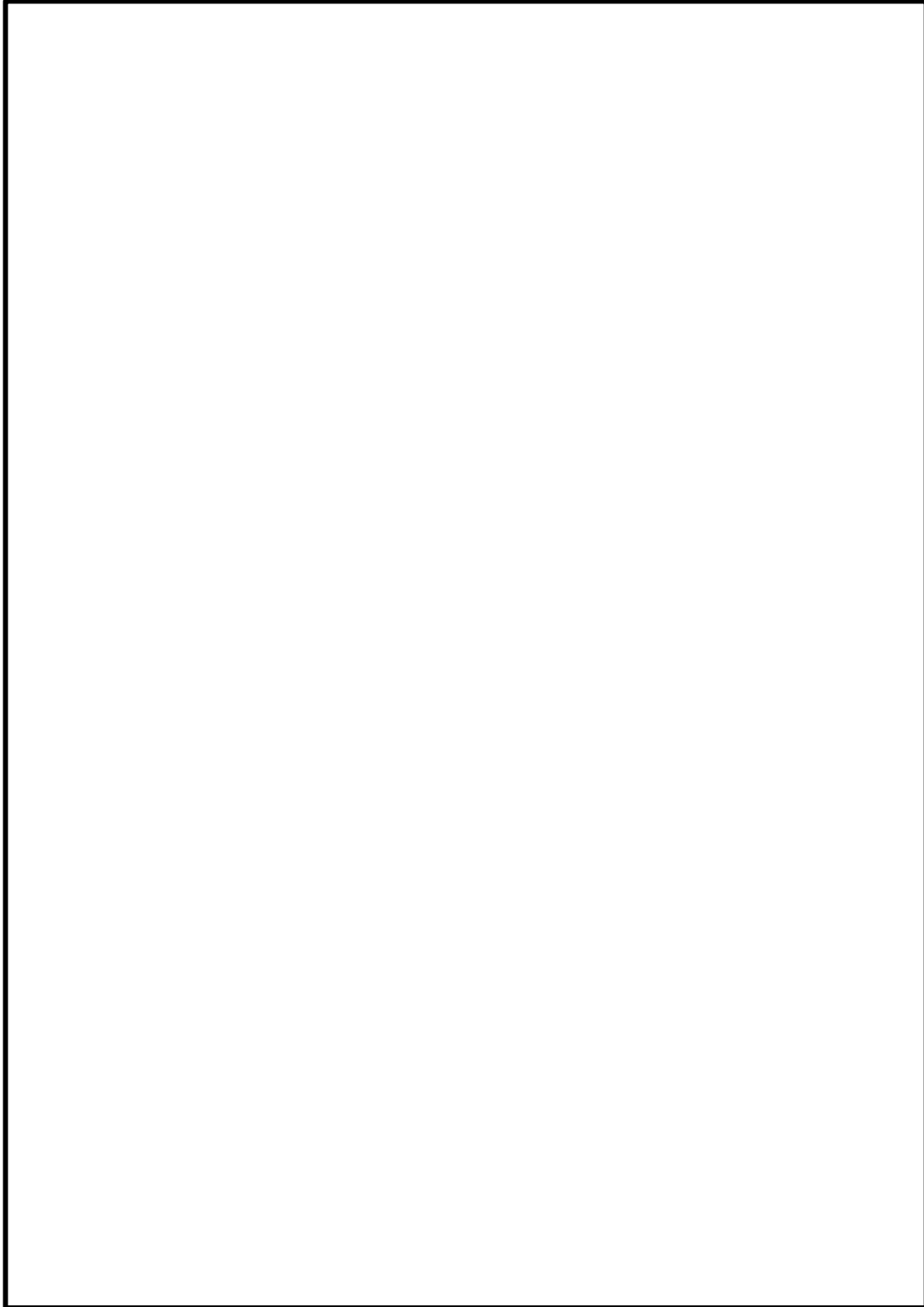


図 4. 2. 2-2 パターン B の配管モデルの例：RHR-PS-9

4.2.3 パターンC（原子炉格納容器内～ベント管貫通部）

パターンCのモデルは図4.2.3-1及び図4.2.3-2のとおり、片端が原子炉圧力容器接続部、もう片端がベント管貫通部に接続されるモデルである。設計用床応答スペクトル及び設計用震度は主な支持点であるガンマ線遮蔽壁の耐震条件を適用する。なお、パターンCはサプレッションチェンバに支持点を持たないことから、サプレッションチェンバの耐震条件は適用していない。

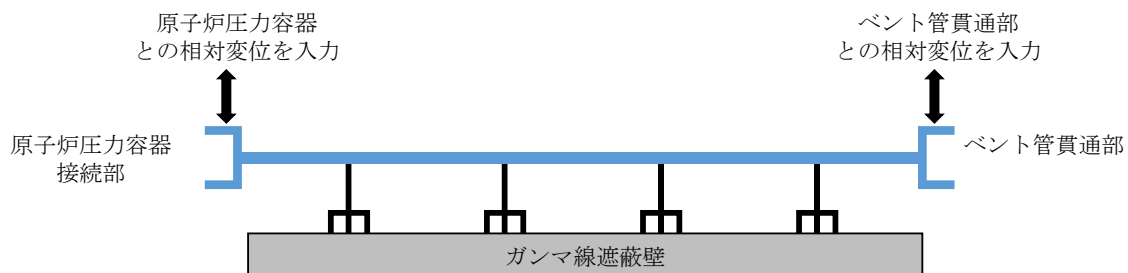


図4.2.3-1 パターンCの配管モデルのイメージ図

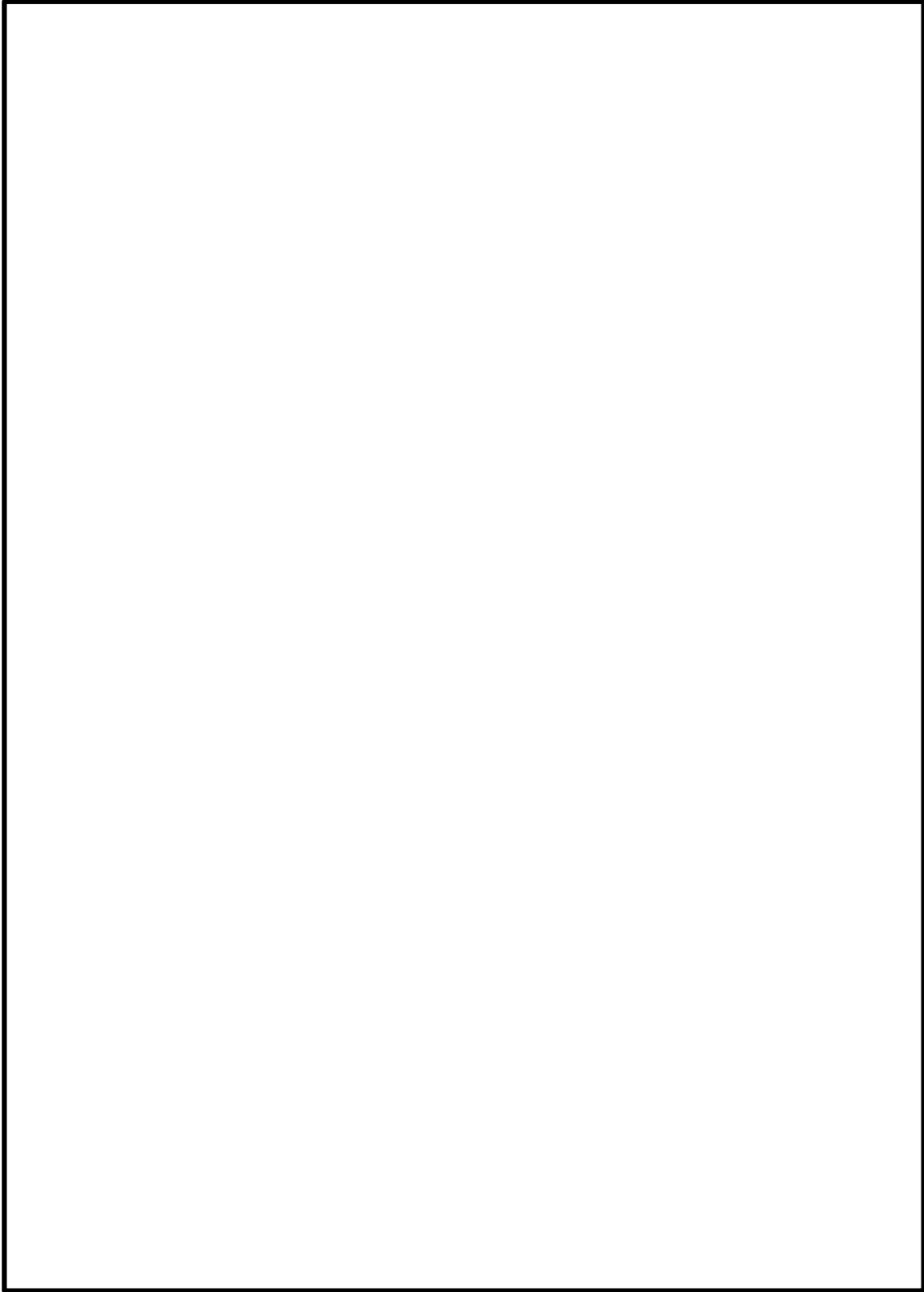


図 4. 2. 3-2 パターンCの配管モデルの例：MS-PD-4 (1/10)

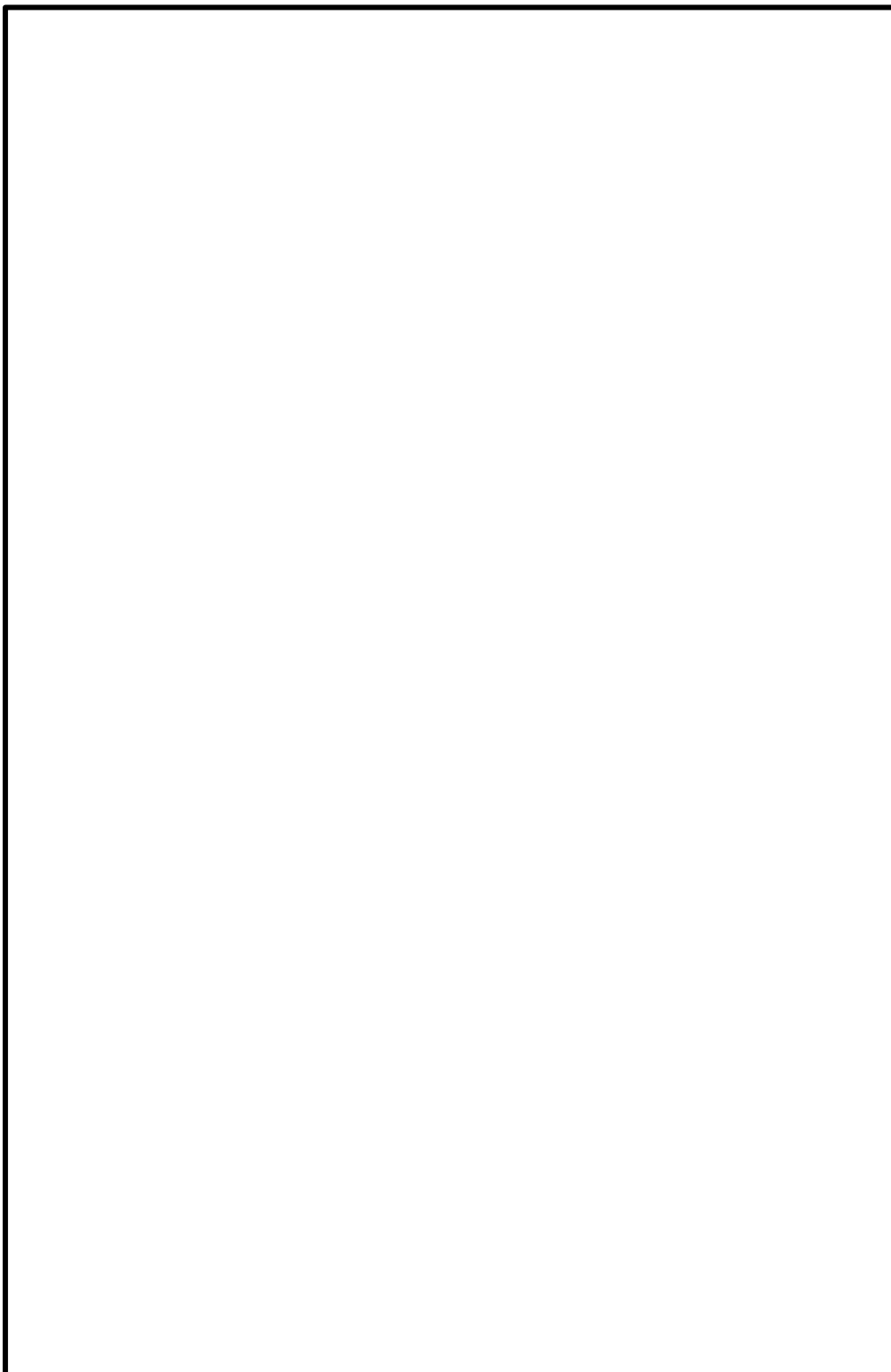


図 4.2.3-2 パターンCの配管モデルの例：MS-PD-4 (2/10)

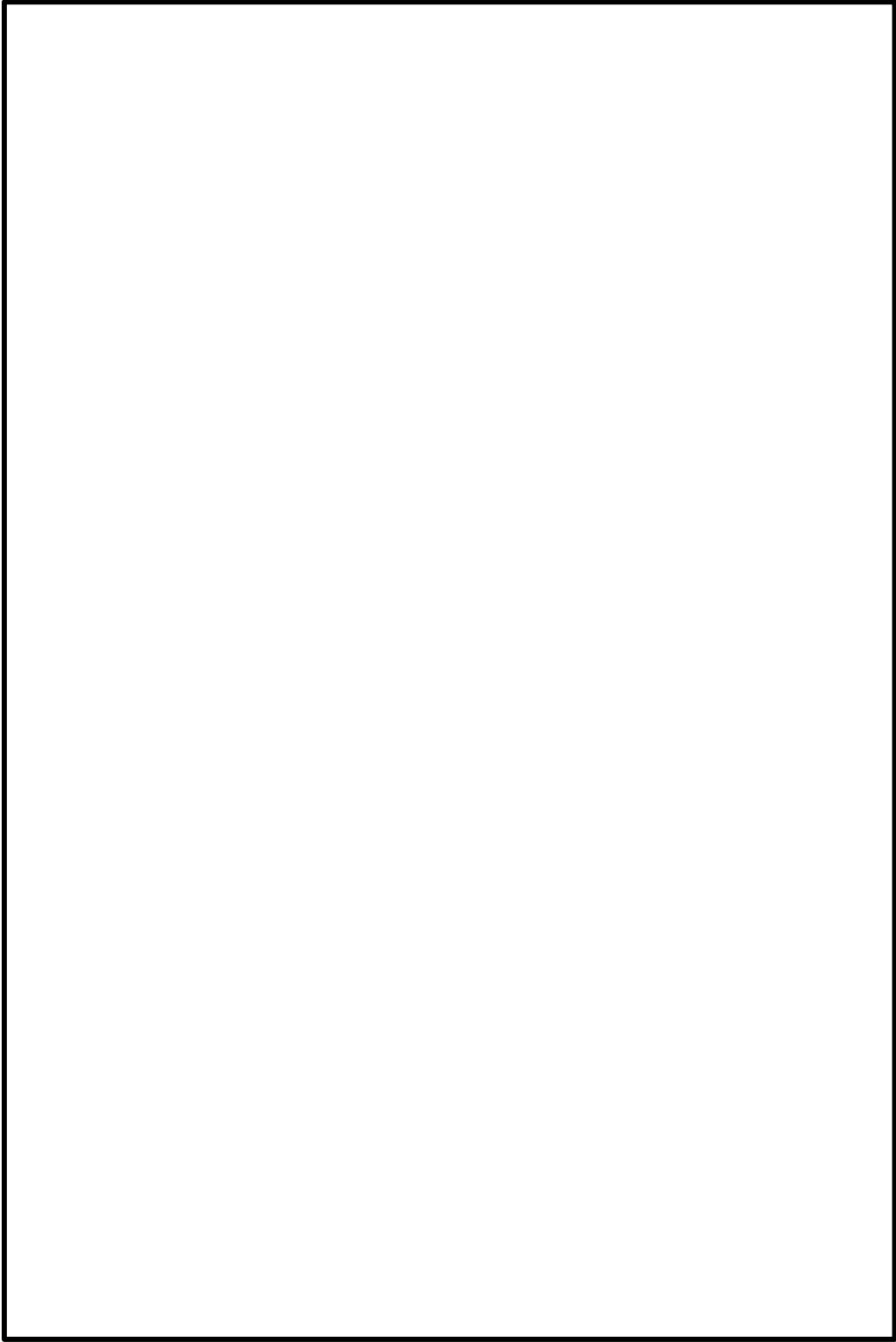


図 4.2.3-2 パターン C の配管モデルの例：MS-PD-4 (3/10)

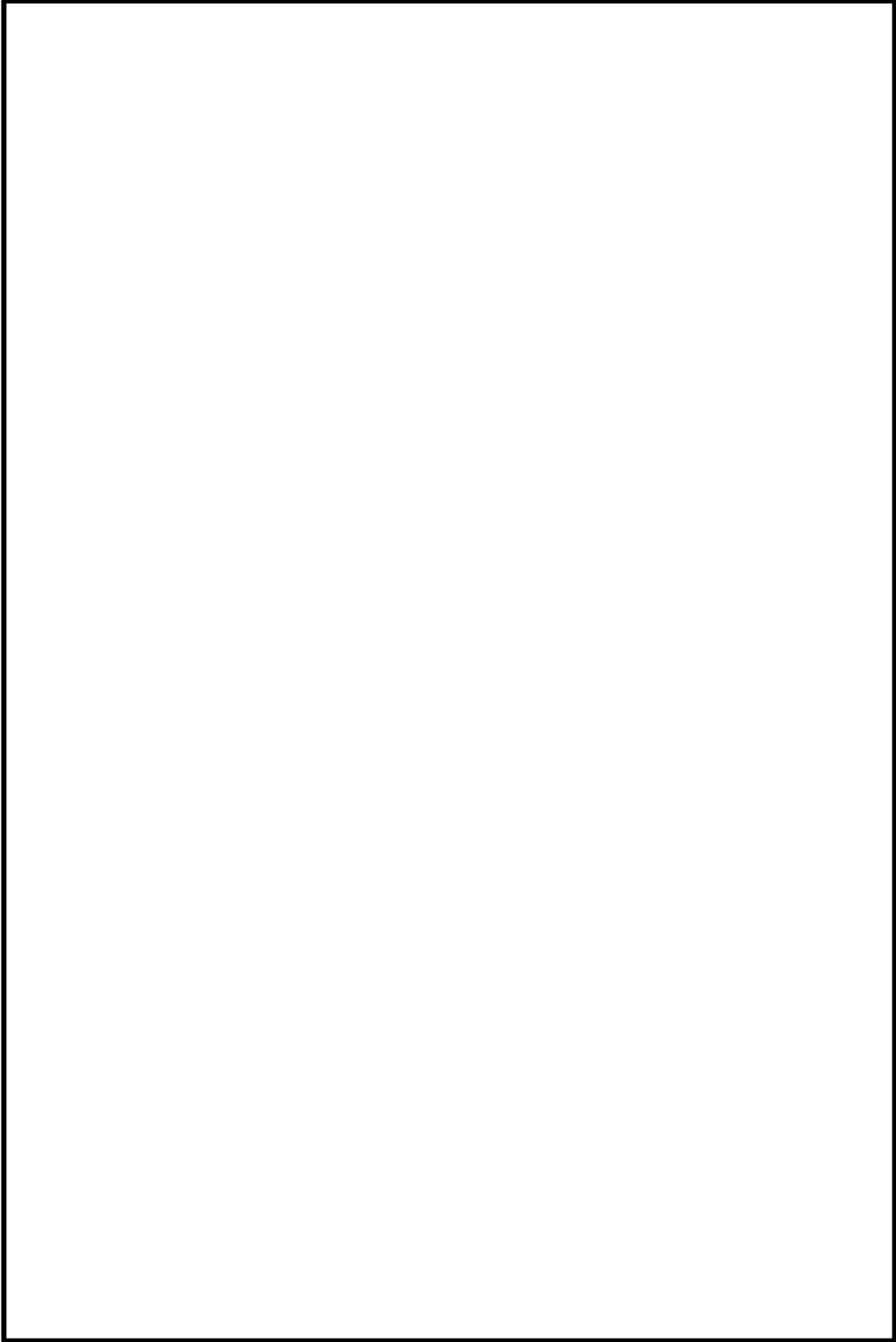


図 4.2.3-2 パターンCの配管モデルの例：MS-PD-4 (4/10)

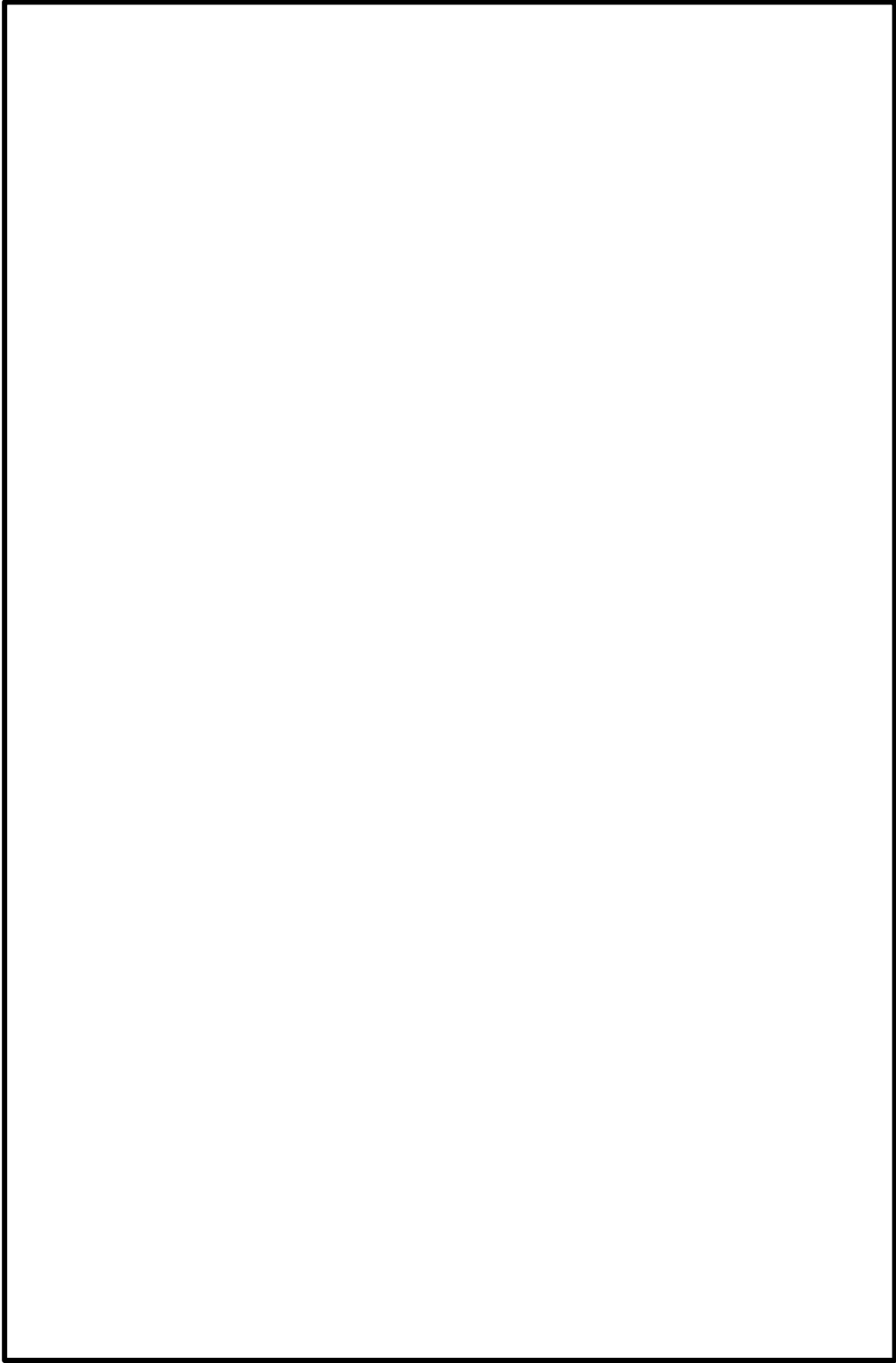


図 4.2.3-2 パターンCの配管モデルの例：MS-PD-4 (5/10)

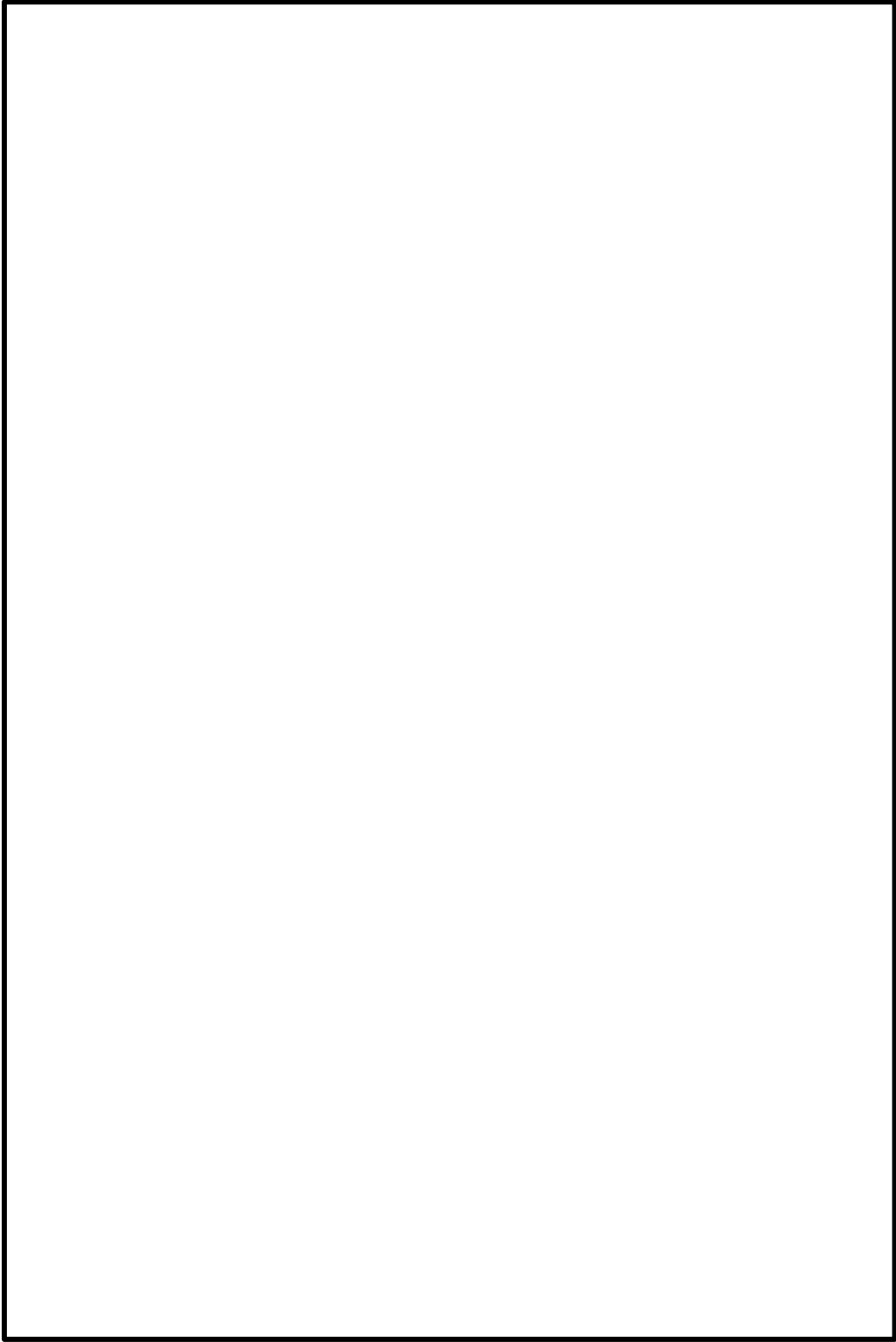


図 4.2.3-2 パターン C の配管モデルの例：MS-PD-4 (6/10)

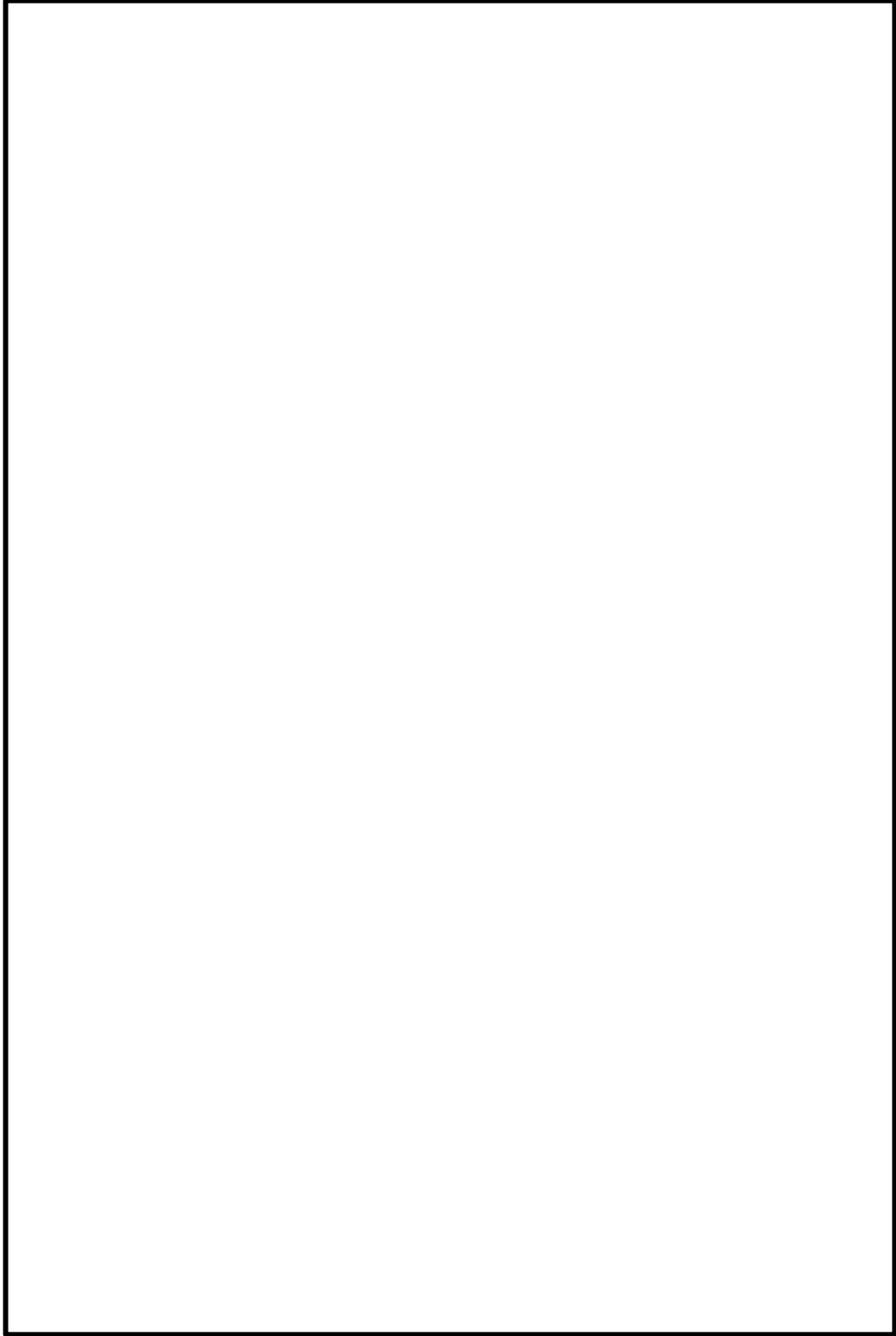


図 4.2.3-2 パターンCの配管モデルの例：MS-PD-4 (7/10)

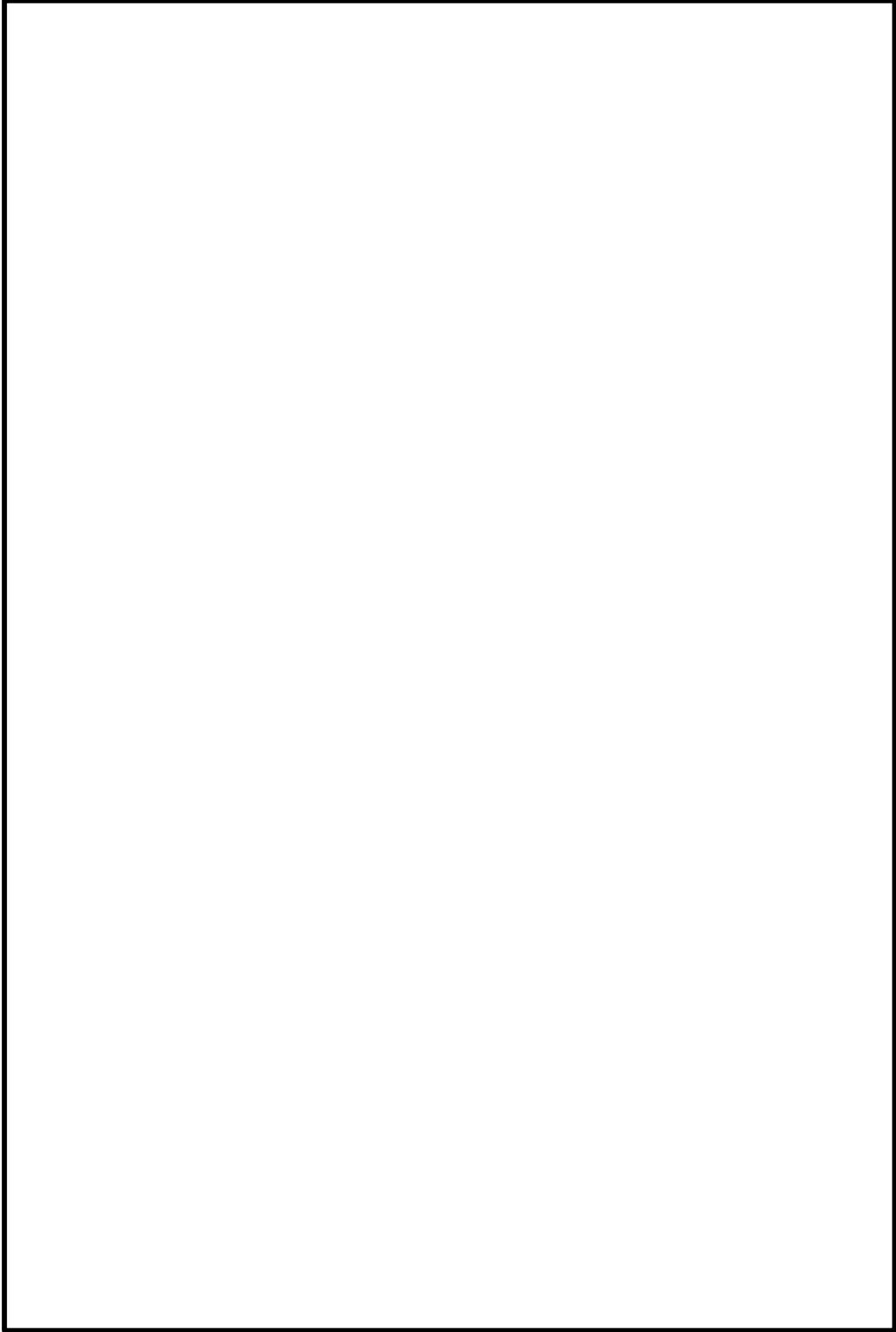


図 4.2.3-2 パターンCの配管モデルの例：MS-PD-4 (8/10)

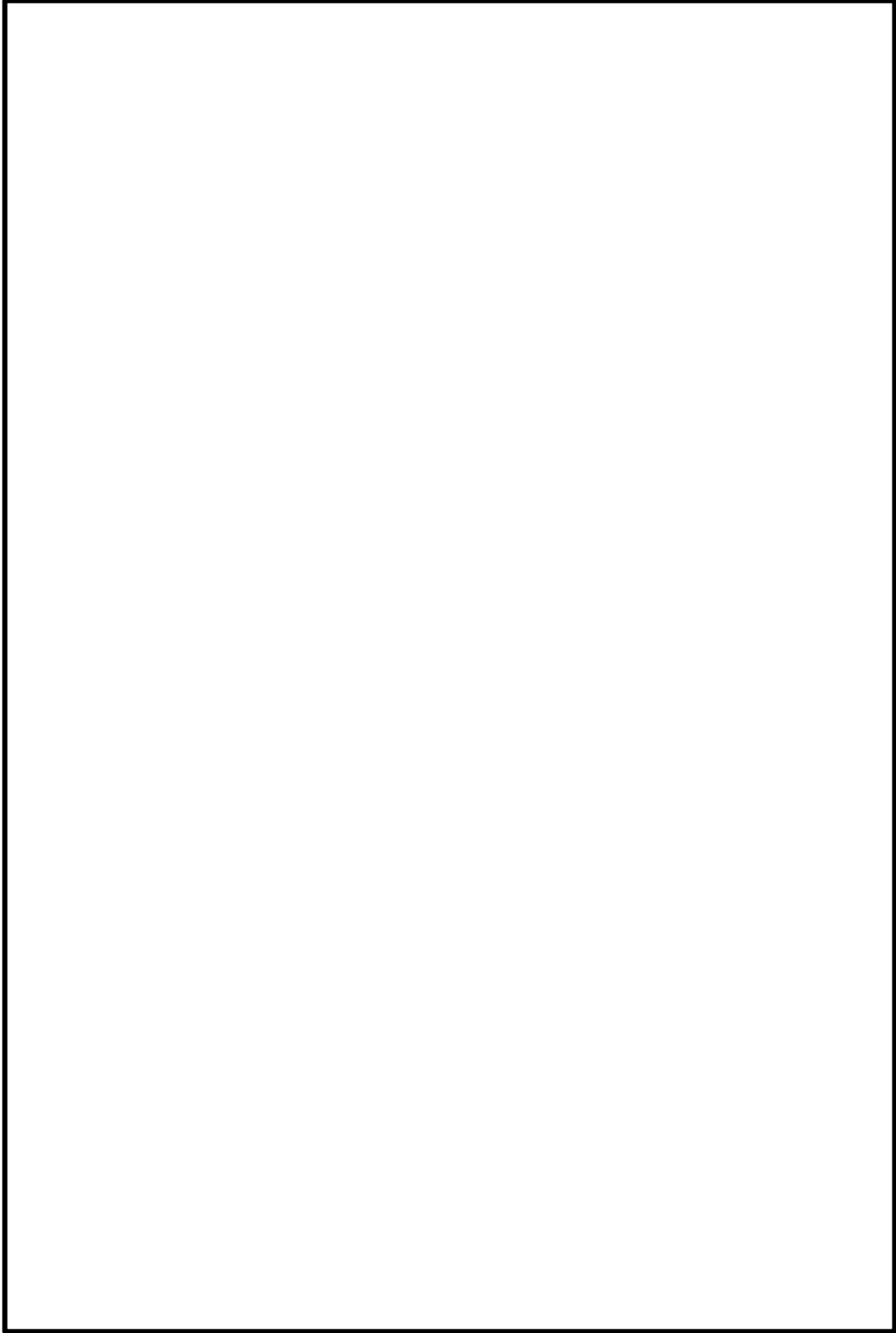


図 4.2.3-2 パターンCの配管モデルの例：MS-PD-4 (9/10)

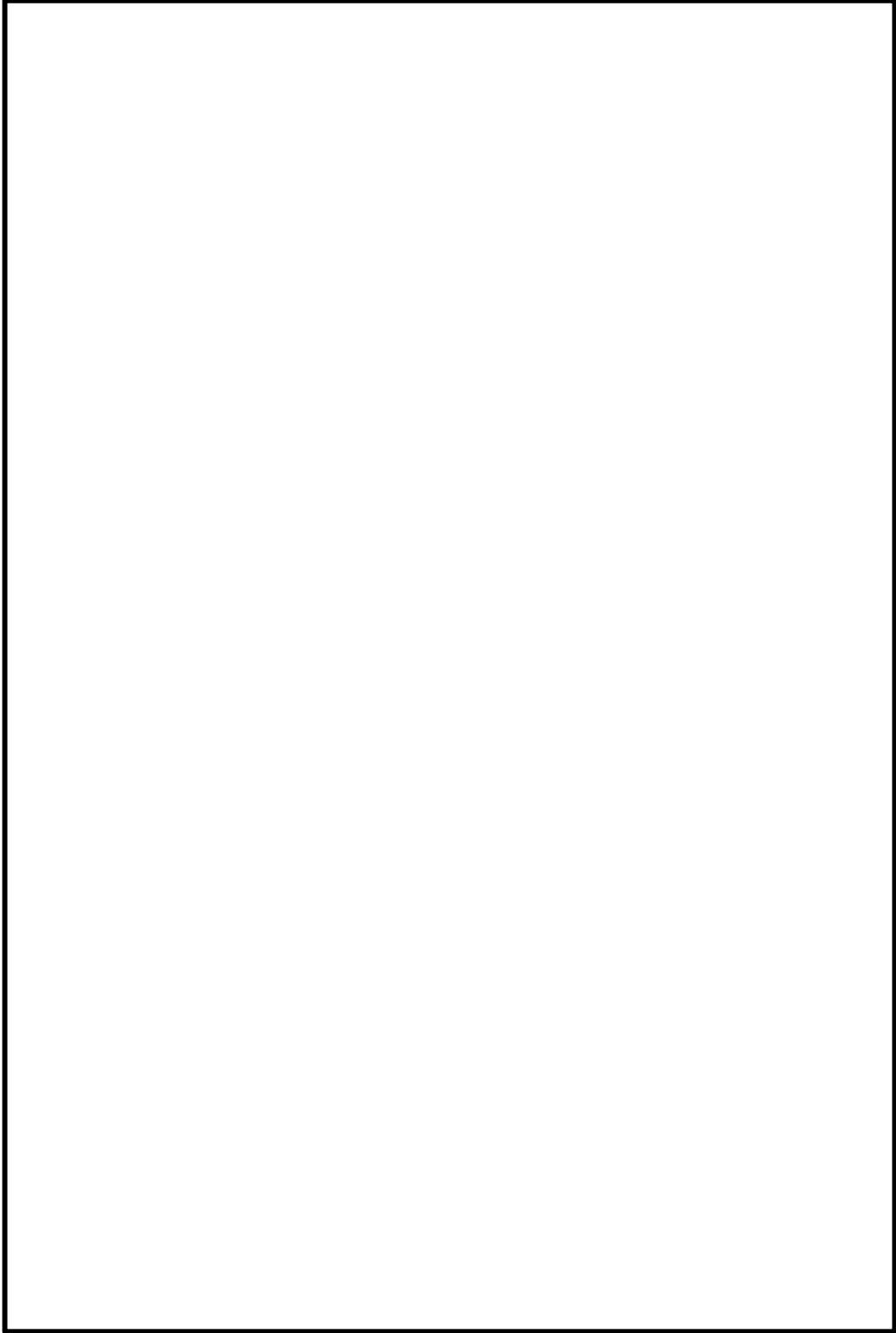


図 4.2.3-2 パターンCの配管モデルの例：MS-PD-4 (10/10)

4.2.4 パターンD (ベント管貫通部～サプレッションチェンバ内)

パターンDのモデルは図4.2.4-1及び図4.2.4-2のとおり、片端がフリー端、もう片端がベント管接続部となるモデルである。設計用床応答スペクトル及び設計用震度は主な支持点であるサプレッションチェンバの耐震条件を適用し、ベント管との接続点は相対変位を入力することでベント管の応答を表現する。なお、パターンDの配管は全て剛構造である。

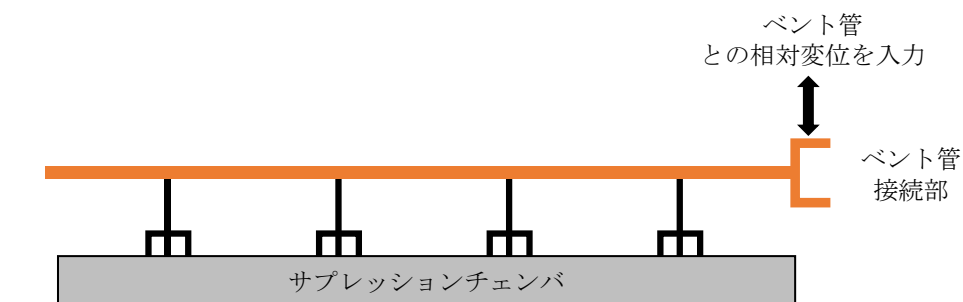


図 4.2.4-1 パターンDの配管モデルのイメージ図

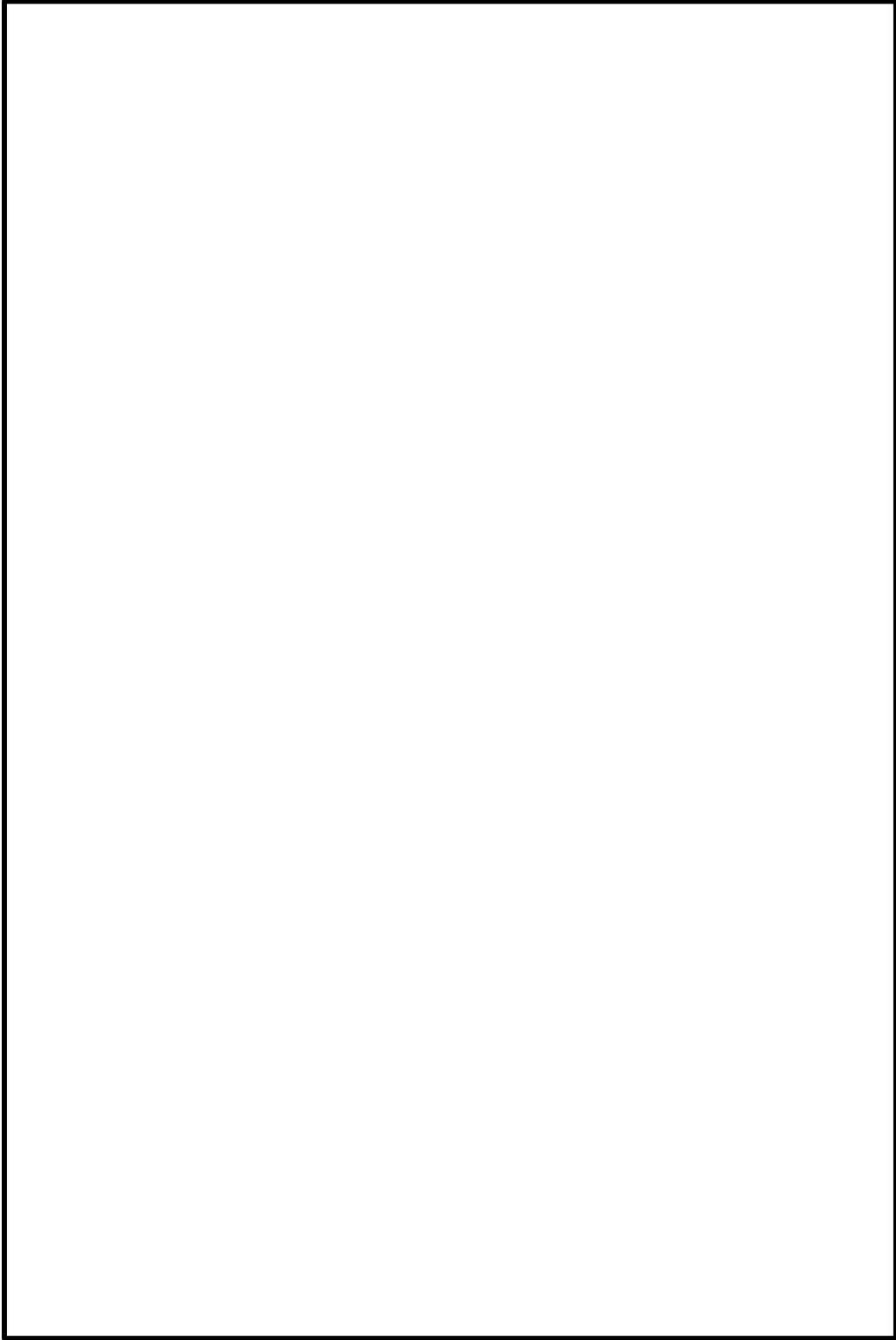


図 4.2.4-2 パターンDの配管モデルの例：MS-PS-17

5. まとめ

2.～4.に記載のとおり，サプレッションチェンバに設置される機器・配管については，剛構造の機器・配管と柔構造の機器・配管それぞれについて適切な耐震条件を適用している。

サブプレッションチェンバ接続配管の地震応答に関する影響確認

1. 概要

島根 2 号機における配管系の評価は、主な支持点を有する建物・構築物等の地震応答加速度を適用している。パターン A（原子炉建物内～サブプレッションチェンバ貫通部）の配管においても、設計用床応答スペクトル及び設計用震度は主な支持点である原子炉建物の地震応答加速度を適用し、主な支持点を有する建物・構築物等でないサブプレッションチェンバの地震応答加速度は、系全体に影響するものではないことから耐震条件として入力していない。

本資料は、サブプレッションチェンバの地震応答を考慮してもサブプレッションチェンバ接続配管の耐震成立性への影響がないことを説明するものである。

2. サプレッションチェンバの地震応答に関する影響確認方針

サブプレッションチェンバ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、今回工認におけるサブプレッションチェンバ接続配管の耐震評価方法がより実態に応じた評価方法であることを定量的に説明するため、サブ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、より実態に応じた精緻な耐震評価として多入力時刻歴応答解析による影響確認を行う。なお、パターン B 及びパターン D はサブプレッションチェンバの地震応答加速度を入力としており、パターン C はサブプレッションチェンバに支持点を持たないことから、パターン A の配管モデルについて影響を確認する。

3. 地震応答解析方法

サブプレッションチェンバと原子炉建物の時刻歴応答加速度を用いた多入力時刻歴応答解析を行い、今回工認におけるサブプレッションチェンバ接続配管の耐震評価結果と比較する。なお、地震応答解析モデルにおいて複数の入力点に地震応答加速度を考慮することができる地震応答解析手法として、多入力時刻歴応答解析に加えて多入力スペクトルモーダル解析があるが、より実態に応じた精緻な解析を行う観点で、多入力時刻歴応答解析を用いた。

4. 多入力時刻歴応答解析における入力地震動

サプレッションチェンバの地震応答加速度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、サプレッションチェンバの1次固有周期で応答加速度が大きいS_s-D（詳細は「サプレッションチェンバ及びサプレッションチェンバサポートの耐震評価手法について（NS2-補-027-10-45）」を参照）とし、サプレッションチェンバとの接続位置にはサプレッションチェンバの時刻歴加速度、原子炉建物で支持するサポートの位置には設置位置に応じた原子炉建物の時刻歴加速度を入力する。

5. 影響確認

(a) 確認対象配管モデル

サプレッションチェンバの応答影響を定量的に検討するため、以下の手順にて確認対象配管モデルを選定する。

【確認対象配管モデル選定手順】

- ① スペクトルモーダル解析によるモード毎の応力の抽出
パターンAの配管モデル（計16モデル）について、サプレッションチェンバ近傍（ペネ接続部から1つ目の2方向拘束点の間）で一次応力の裕度が最小となる評価点の発生応力をモード及び方向毎に抽出。
- ② 原子炉建物の床応答スペクトルから地震応答加速度を抽出
各モデルの固有周期毎に原子炉建物の床応答スペクトルから地震応答加速度を抽出。
- ③ 1.0G当たりの応力の算出
①で抽出したスペクトルモーダル解析によるモード毎の応力を②の原子炉建物の床応答スペクトルから抽出した地震応答加速度で除し、モード及び方向毎に1.0G当たりの応力を算出。
- ④ サプレッションチェンバの床応答スペクトルから地震応答加速度を抽出
各モデルの固有周期毎にサプレッションチェンバの床応答スペクトルから地震応答加速度を抽出。
- ⑤ S/C近傍推定応力の算出
③で算出した1.0G当たりの応力に④のサプレッションチェンバの床応答スペクトルの中から抽出した地震応答加速度を乗じた後、SRSS及びモード合成した応力（以下「S/C近傍推定応力」という。）を算出し、その裕度が最小となる配管モデルを確認対象配管モデルとして選定。ただし、一次＋二次応力の評価にて疲労評価を実施している場合は疲労累積係数が最大の配管モデルを確認対象配管モデルとして選定。

具体的なS/C近傍推定応力の算定方法を添表1に、確認対象配管モデル選定結果を添表2に示す。添表2のとおり、RHR-R-2を確認対象配管モデルとして選定した。

なお、添表2に示す配管のうちRHR-R-7、RHR-R-14及びFCS-R-4は、S/C近傍推定応力が大きいことから、S/C近傍推定応力を低減させるため耐震補強工事を実施しており、添表2の値は耐震補強工事後の値である。

添表1 S/C近傍推定応力の算定方法 (RHR-R-2の例)

| モード | 固有周期 (S) | ① | | | ② | | | ③ | | | ④ | | | ⑤ | | | | モード 合成*3 (MPa) |
|--------------|--------------|-----------------------------|------------|------------|--------------------------------|--------------|--------------|----------------------|------------|------------|--------------------------------------|--------------|--------------|-----------------------|--------|-------|---------------|----------------------|
| | | スペクトルモーダル解析 によるモード毎の応力*1 | | | 原子炉建物の 床応答スペクトルの 地震応答加速度 | | | 1.0G 当たりの応力 (①/②) | | | サブプレッションチェンバ 床応答スペクトルの 地震応答加速度 | | | S/C近傍推定応力の算出 (③×④) | | | | |
| | | 水平 | | 鉛直 | 水平 | | 鉛直 | 水平 | | 鉛直 | 水平*2 | | 鉛直 | 水平 | | 鉛直 | SRSS (MPa) | |
| X方向 (MPa) | Z方向 (MPa) | Y方向 (MPa) | X方向 (G) | Z方向 (G) | Y方向 (G) | X方向 (MPa) | Z方向 (MPa) | Y方向 (MPa) | X方向 (G) | Z方向 (G) | Y方向 (G) | X方向 (MPa) | Z方向 (MPa) | Y方向 (MPa) | | | | |
| 1 | | 2.06 | 1.33 | 1.13 | 3.03 | 2.94 | 2.77 | 0.68 | 0.46 | 0.41 | 7.75 | 7.75 | 3.37 | 5.27 | 3.56 | 1.38 | 6.51 | 378.38 |
| 2 | | 7.94 | 12.82 | 0.51 | 3.13 | 3.13 | 3.07 | 2.54 | 4.10 | 0.17 | 11.01 | 11.01 | 3.54 | 27.96 | 45.13 | 0.60 | 53.10 | |
| 3 | | 25.21 | 26.37 | 5.96 | 2.50 | 3.17 | 2.75 | 10.08 | 8.33 | 2.17 | 28.19 | 28.19 | 5.91 | 284.20 | 234.86 | 12.82 | 368.91 | |
| 4 | | 0.04 | 0.04 | 0.06 | 2.52 | 3.21 | 2.72 | 0.02 | 0.02 | 0.03 | 33.10 | 33.10 | 7.20 | 0.66 | 0.66 | 0.22 | 0.96 | |
| 5 | | 0.25 | 0.28 | 0.01 | 2.55 | 3.34 | 2.44 | 0.10 | 0.09 | 0.01 | 49.58 | 49.58 | 11.03 | 4.96 | 4.46 | 0.11 | 6.67 | |
| 6 | | 0.00 | 0.46 | 0.00 | 2.59 | 3.45 | 2.19 | 0.00 | 0.14 | 0.00 | 56.01 | 56.01 | 12.91 | 0.00 | 7.84 | 0.00 | 7.84 | |
| 7 | | 0.01 | 0.00 | 0.00 | 2.99 | 3.70 | 1.68 | 0.01 | 0.00 | 0.00 | 24.58 | 24.58 | 6.58 | 0.25 | 0.00 | 0.00 | 0.25 | |
| 8 | | 0.00 | 0.00 | 0.03 | 3.03 | 3.77 | 1.94 | 0.00 | 0.00 | 0.02 | 17.09 | 17.09 | 6.01 | 0.00 | 0.00 | 0.12 | 0.12 | |
| 9 | | 8.57 | 0.84 | 0.71 | 3.00 | 3.83 | 2.04 | 2.86 | 0.22 | 0.35 | 17.09 | 17.09 | 6.01 | 48.89 | 3.76 | 2.10 | 49.08 | |
| 10 | | 0.15 | 0.91 | 0.35 | 2.37 | 3.50 | 2.64 | 0.07 | 0.27 | 0.14 | 7.56 | 7.56 | 17.04 | 0.53 | 2.04 | 2.39 | 3.18 | |
| 11 | | 2.90 | 3.73 | 0.21 | 2.09 | 3.27 | 2.55 | 1.39 | 1.14 | 0.09 | 7.37 | 7.37 | 11.61 | 10.24 | 8.40 | 1.04 | 13.29 | |
| 12 | | 4.93 | 13.96 | 1.75 | 2.09 | 3.24 | 2.46 | 2.37 | 4.31 | 0.72 | 7.31 | 7.31 | 9.34 | 17.33 | 31.51 | 6.72 | 36.58 | |
| 13 | | 0.27 | 5.20 | 0.83 | 2.08 | 3.18 | 2.24 | 0.14 | 1.64 | 0.37 | 6.98 | 6.98 | 8.76 | 0.98 | 11.44 | 3.24 | 11.93 | |
| 14 | | 0.05 | 0.16 | 0.03 | 1.74 | 2.49 | 2.44 | 0.03 | 0.07 | 0.02 | 5.82 | 5.82 | 5.54 | 0.17 | 0.41 | 0.11 | 0.46 | |
| 15 | | 0.57 | 2.25 | 0.41 | 1.73 | 2.47 | 2.45 | 0.33 | 0.91 | 0.17 | 5.82 | 5.82 | 5.54 | 1.92 | 5.29 | 0.94 | 5.71 | |
| 16 | | 0.04 | 0.02 | 0.05 | 1.72 | 2.23 | 2.47 | 0.03 | 0.02 | 0.03 | 5.65 | 5.65 | 4.80 | 0.17 | 0.11 | 0.14 | 0.25 | |

注記*1: サブプレッションチェンバ近傍 (ペネ接続部から1つ目の2方向拘束点の間) で一次応力の裕度が最小となる評価点の発生応力をモード及び方向毎に抽出

*2: サブプレッションチェンバの床応答スペクトルは、円筒座標系にて算出しており、①のスペクトルモーダル解析の座標軸と異なるため、水平方向 (X方向及びZ方向) の地震応答加速度は、円筒座標系における水平方向 (円周方向及び半径方向) の最大値とする。

*3: 各モードのSRSSした応力を二乗和平方根にて足し合わせた応力

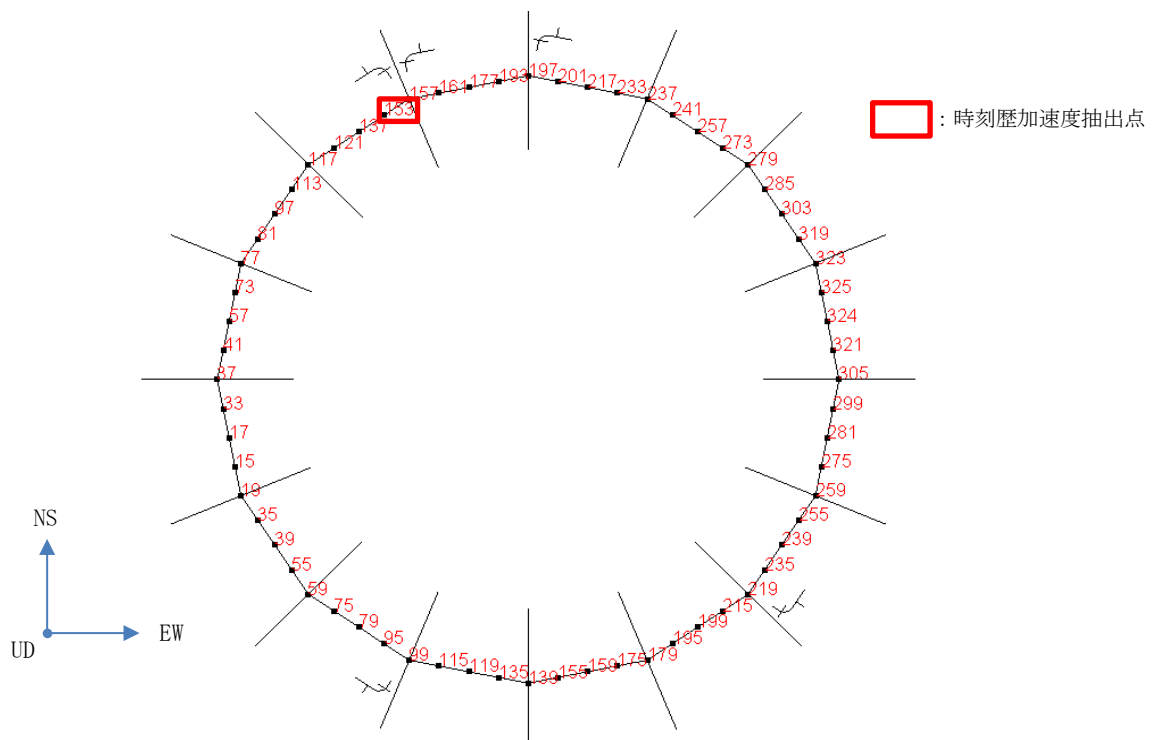
添表2 確認対象配管モデル選定結果

| 配管モデル | 一次応力 | | | | 一次＋二次応力 | | | | | 備考 |
|-----------|-------------------------|---------------|-------|------|--------------------------|---------------|------|------------|------|----------------|
| | S/C 近傍 推定応力 (MPa) | 許容応力 (MPa) | 裕度 | 確認対象 | S/C 近傍 推定応力* (MPa) | 許容応力 (MPa) | 裕度 | 疲労累積 係数 | 確認対象 | |
| RHR-R-1 | 6 | 335 | 55.83 | — | 172 | 398 | 2.31 | — | — | |
| RHR-R-2 | 379 | 335 | 0.88 | ○ | 912 | 398 | 0.43 | 1.0 以上 | ○ | |
| RHR-R-3 | 127 | 335 | 2.63 | — | 343 | 398 | 1.16 | — | — | |
| RHR-R-6 | 54 | 363 | 6.72 | — | 228 | 414 | 1.81 | — | — | |
| RHR-R-7 | 95 | 363 | 3.82 | — | 241 | 420 | 1.74 | — | — | |
| RHR-R-12 | 109 | 363 | 3.33 | — | 295 | 414 | 1.4 | — | — | |
| RHR-R-14 | 10 | 363 | 36.3 | — | 79 | 420 | 5.31 | — | — | |
| HPCS-R-1 | 2 | 335 | 167.5 | — | 235 | 398 | 1.69 | — | — | |
| LPCS-R-1 | 207 | 335 | 1.61 | — | 547 | 398 | 0.72 | 0.4673 | — | |
| RCIC-R-1 | 139 | 396 | 2.84 | — | 335 | 438 | 1.3 | — | — | |
| RCIC-R-4 | 36 | 363 | 10.08 | — | 223 | 418 | 1.87 | — | — | |
| SGT-R-1 | 31 | 363 | 11.7 | — | 322 | 386 | 1.19 | — | — | |
| FCS-R-3 | 84 | 363 | 4.32 | — | 362 | 438 | 1.2 | — | — | |
| FCS-R-4 | 17 | 363 | 21.35 | — | 164 | 438 | 2.67 | — | — | |
| ANI-R-6SP | — | 363 | — | — | — | 414 | — | — | — | 剛構造であるため、検討対象外 |
| NGC-R-1 | 10 | 335 | 33.5 | — | 94 | 438 | 4.65 | — | — | |

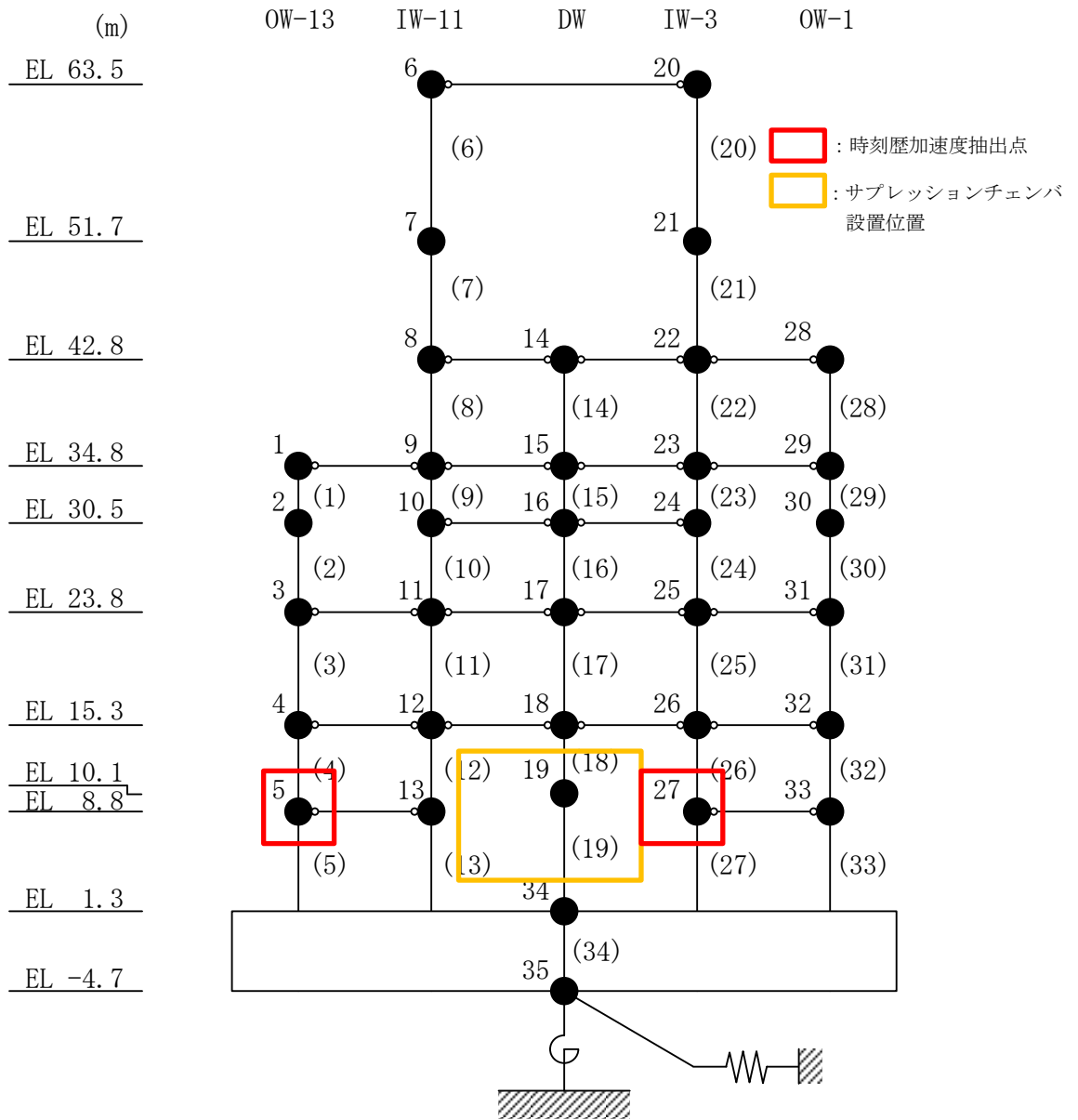
注記*：添表1の手法で算出した S/C 近傍推定応力の両振幅ベースの応力に、今回工認のスペクトルモーダル解析で得られた相対変位による応力を足し合わせて算出した応力

(b) 入力条件

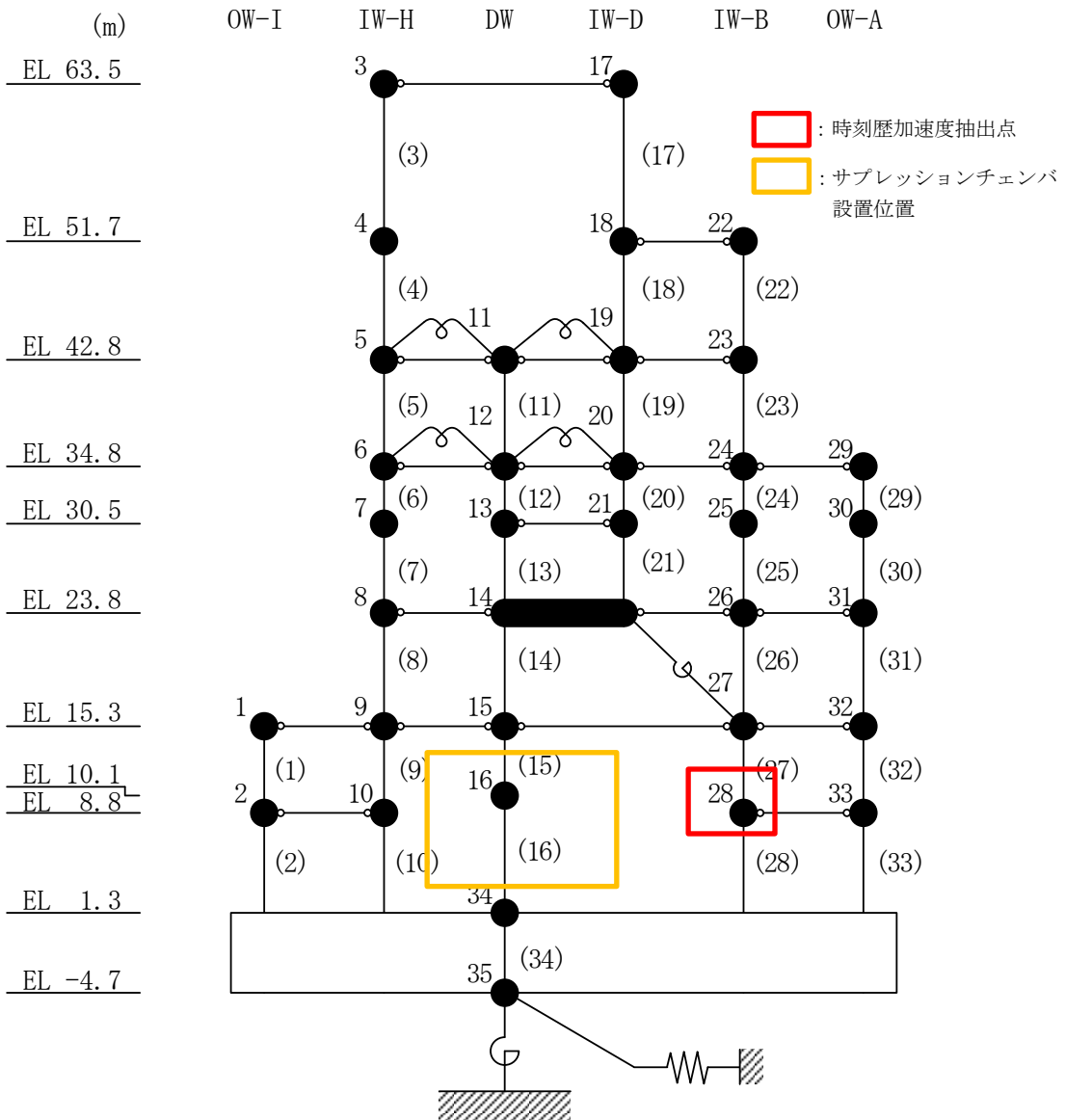
RHR-R-2 の多入力時刻歴解析の入力条件として、添図 1 にサブプレッションチェンバの時刻歴加速度取り出し位置、添図 2 に原子炉建物の時刻歴加速度取り出し位置、添図 3 にサブプレッションチェンバの時刻歴加速度、添図 4 に原子炉建物の時刻歴加速度、添図 5 に解析モデルと時刻歴加速度入力位置の関係を示す。なお、4 項のとおり、入力地震動はサブプレッションチェンバの 1 次固有周期で応答加速度が大きい S s -D とする。



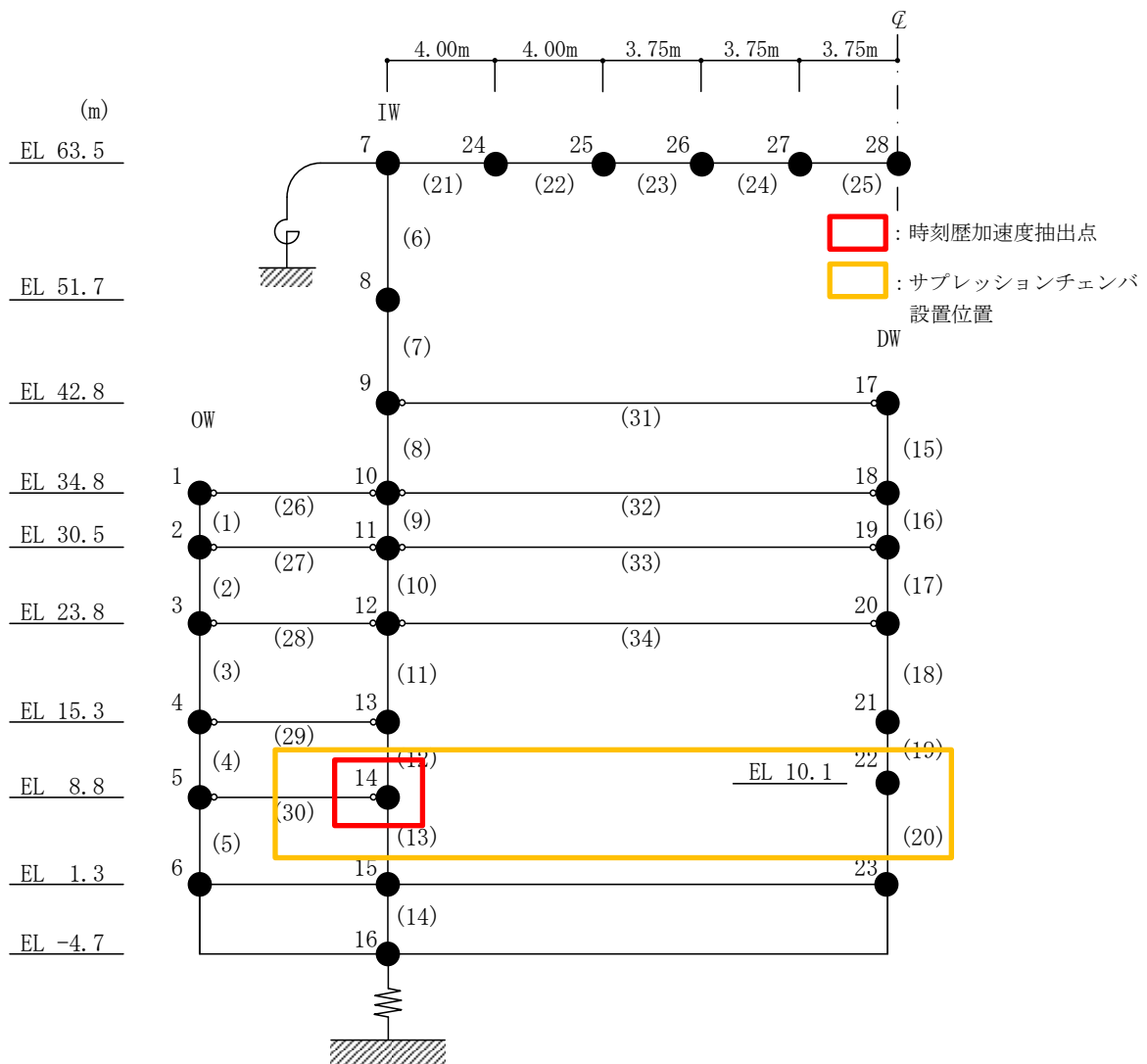
添図 1 サプレッションチェンバの時刻歴加速度取り出し位置



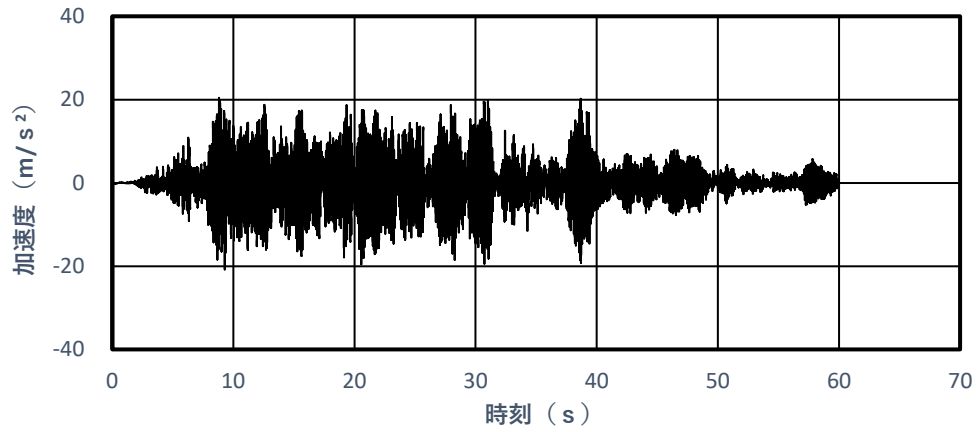
添図 2 原子炉建物の時刻歴加速度取り出し位置 (N S 方向) (1/3)



添図 2 原子炉建物の時刻歴加速度取り出し位置 (EW方向) (2/3)

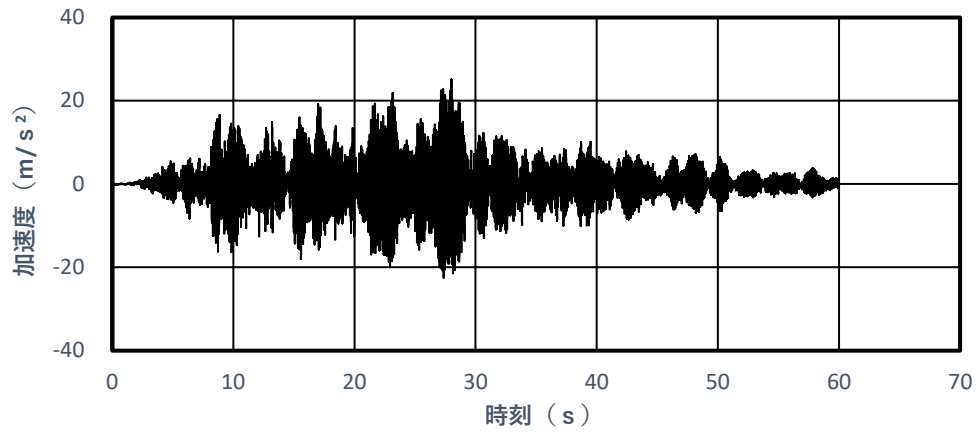


添図 2 原子炉建物の時刻歴加速度取り出し位置（鉛直方向）（3/3）



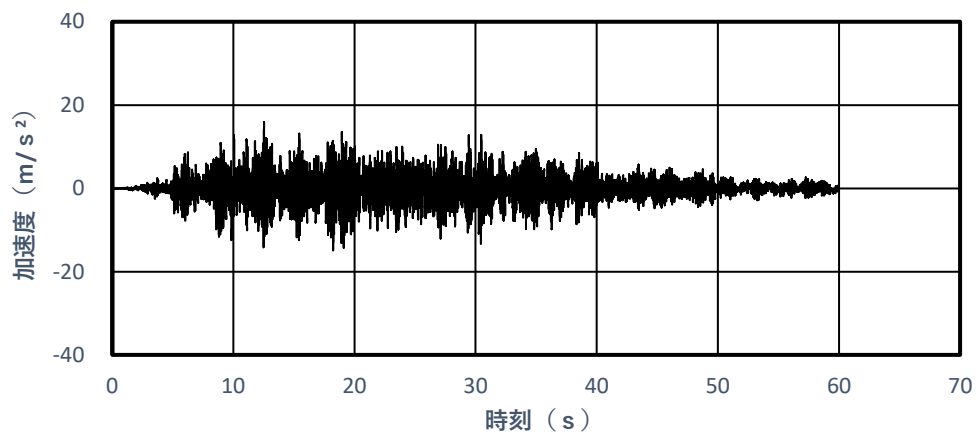
添図3 時刻歴加速度 (1/3)

(S s -D地震動, サプレッションチェンバ, NS方向, 質点番号: 153)



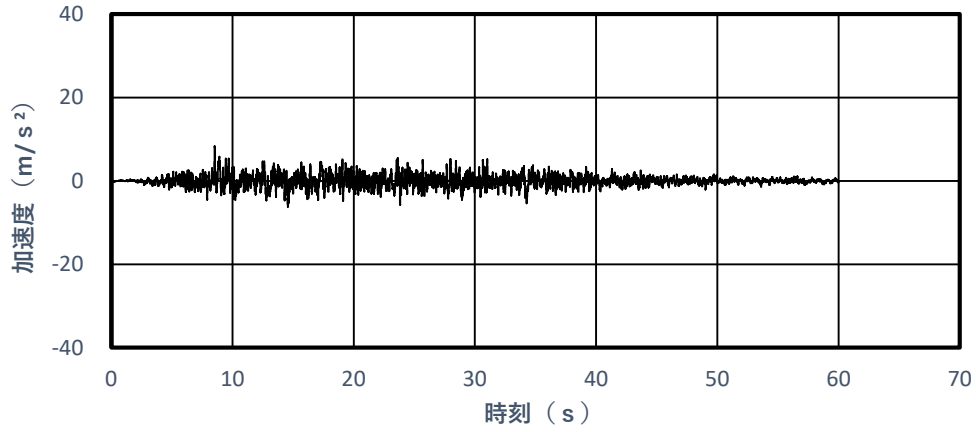
添図3 時刻歴加速度 (2/3)

(S s -D地震動, サプレッションチェンバ, EW方向, 質点番号: 153)



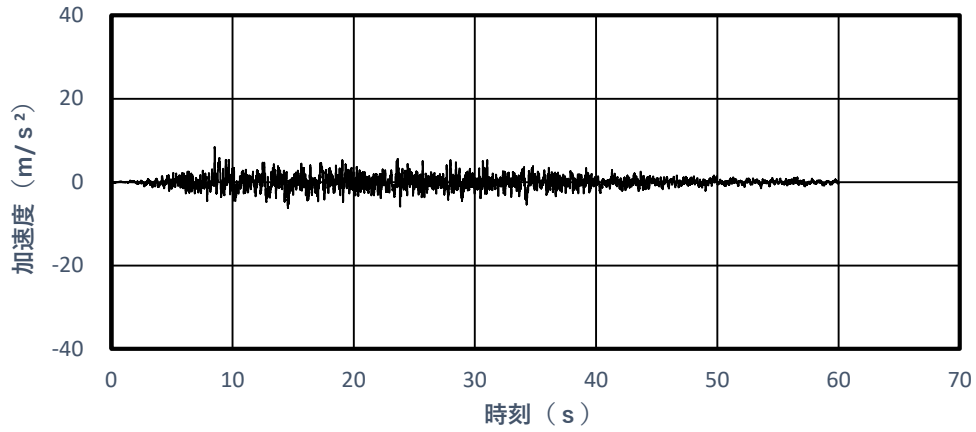
添図3 時刻歴加速度 (3/3)

(S s -D地震動, サプレッションチェンバ, UD方向, 質点番号: 153)



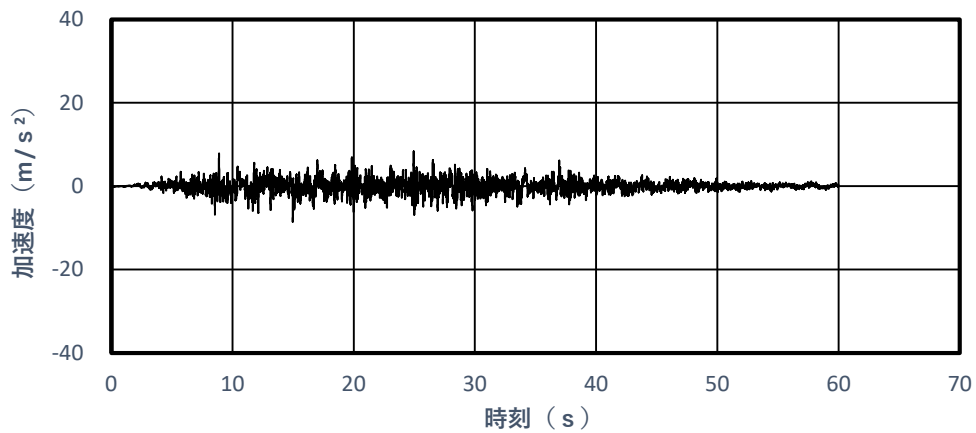
添図4 時刻歴加速度 (1/4)

(S s - D地震動, 原子炉建物 : EL 8.800m, NS方向, 質点番号 : 5)



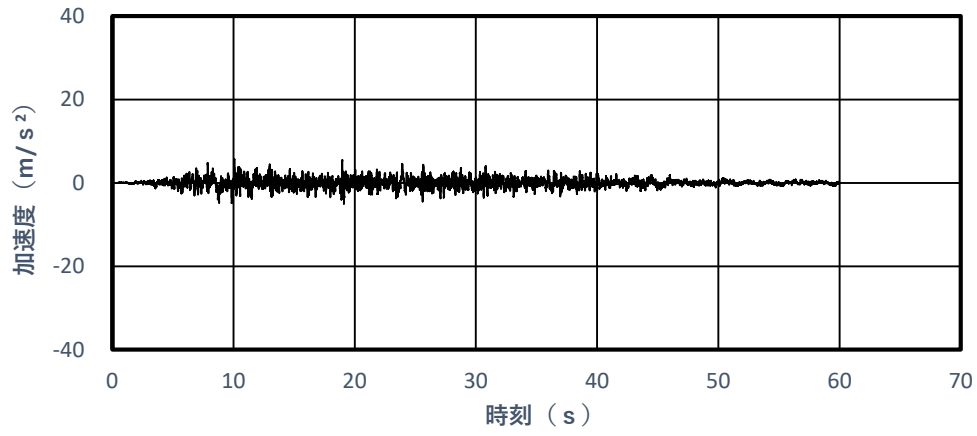
添図4 時刻歴加速度 (2/4)

(S s - D地震動, 原子炉建物 : EL 8.800m, NS方向, 質点番号 : 27)



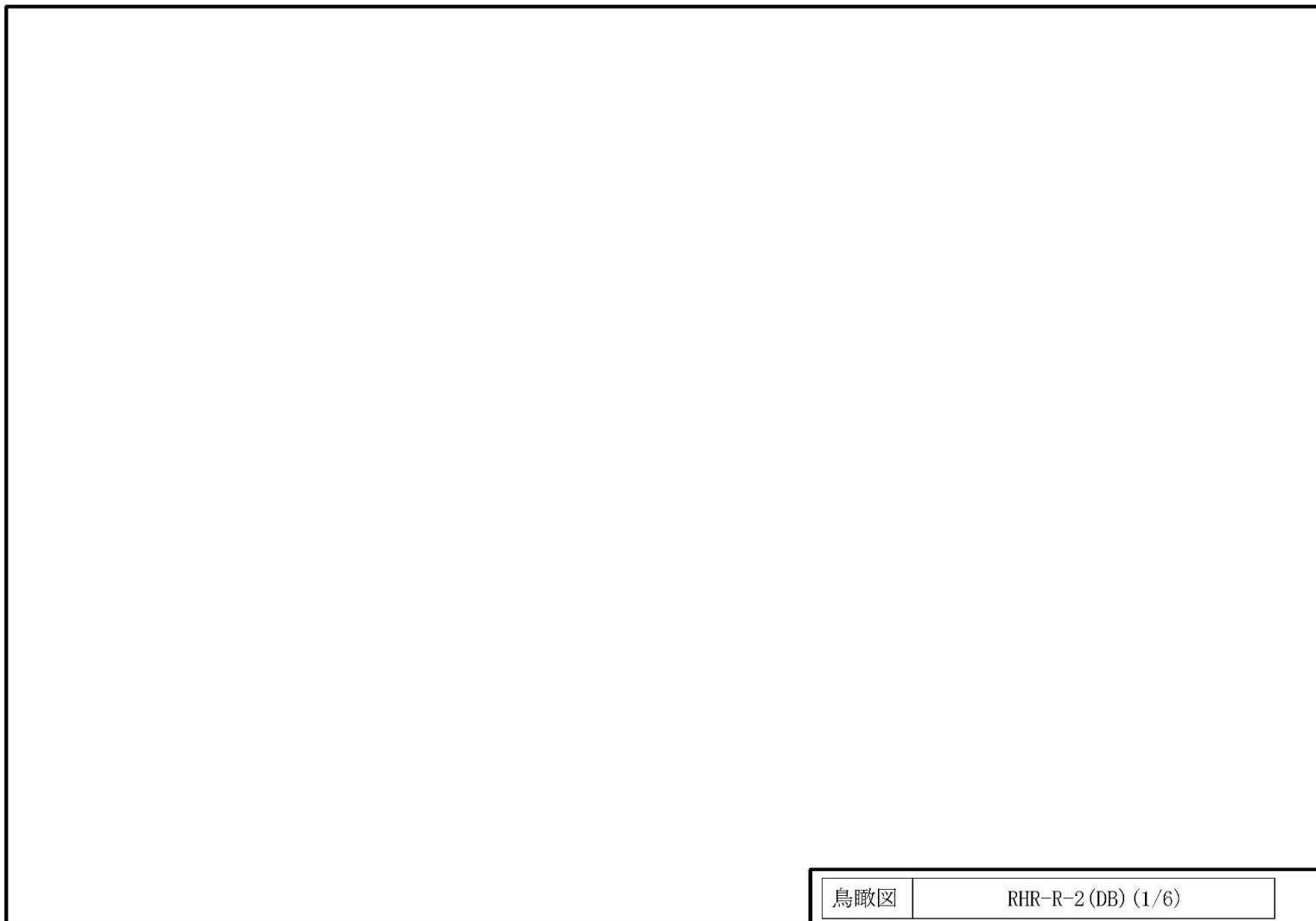
添図4 時刻歴加速度 (3/4)

(S s - D地震動, 原子炉建物 : EL 8.800m, EW方向, 質点番号 : 28)



添図 4 時刻歴加速度 (4/4)

(S s - D地震動, 原子炉建物 : EL 8.800m, UD方向, 質点番号 : 14)



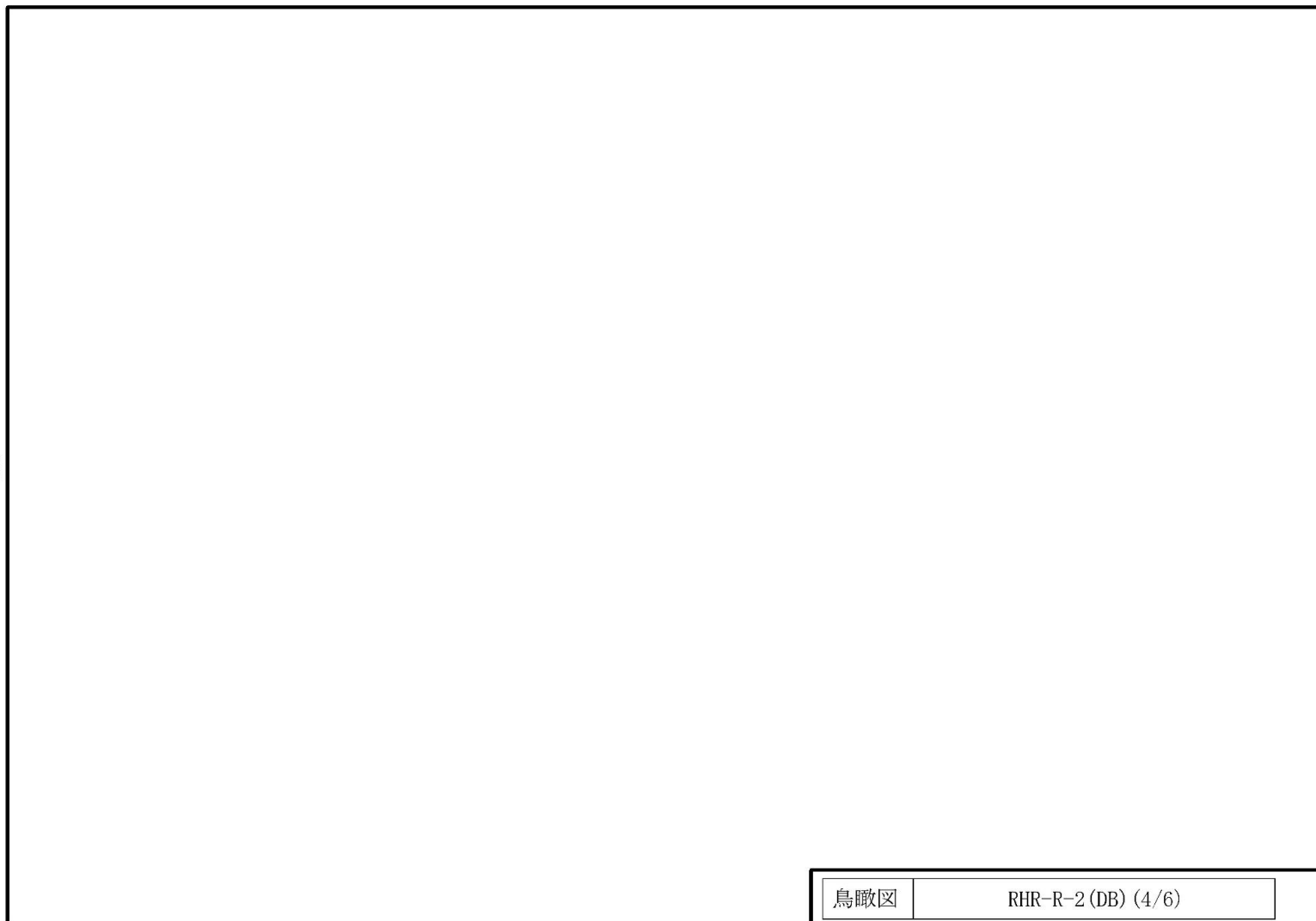
添図 5 解析モデルと時刻歴加速度入力位置の関係 (1/6)



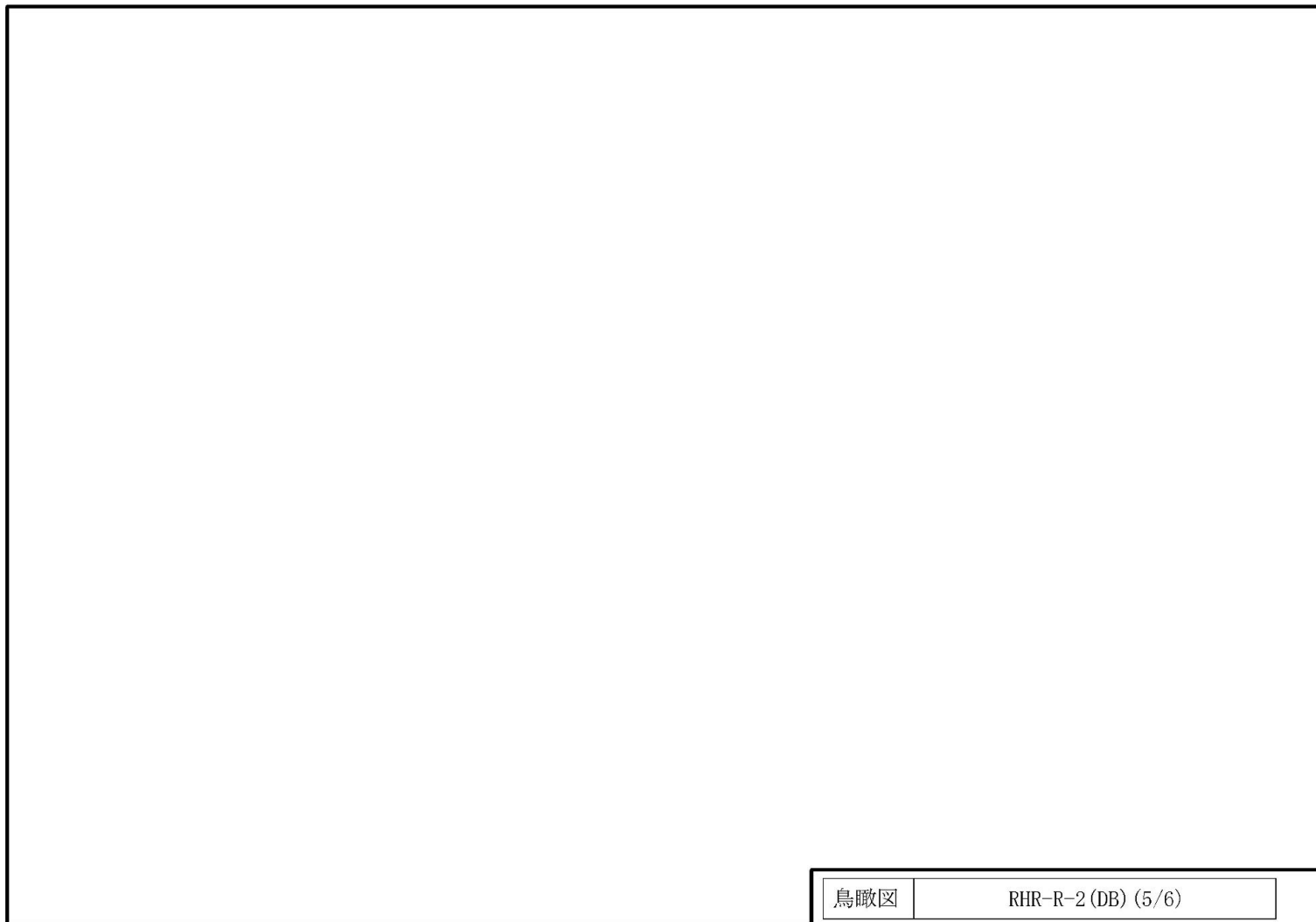
添図 5 解析モデルと時刻歴加速度入力位置の関係 (2/6)



添図 5 解析モデルと時刻歴加速度入力位置の関係 (3/6)



添図 5 解析モデルと時刻歴加速度入力位置の関係 (4/6)



添図 5 解析モデルと時刻歴加速度入力位置の関係 (5/6)



添図 5 解析モデルと時刻歴加速度入力位置の関係 (6/6)

(c) 影響確認結果

RHR-R-2 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に関する影響確認として、サプレッションチェンバの地震応答加速度を考慮した多入力時刻歴応答解析と今回工認の評価結果を添表 3 に示す。

サプレッションチェンバの地震応答加速度を考慮した多入力時刻歴応答解析による発生応力は、今回工認の評価結果に比べて、一次応力と一次＋二次応力で増減はあるものの、大きな差はなく、許容値を十分に満足することを確認した。

なお、サプレッションチェンバの地震応答加速度を考慮した多入力時刻歴応答解析の一次応力は 2.0 倍以上の高い裕度があるため、入力時刻歴の時間シフト及び時刻歴の位相反転を考慮した解析においても許容値を満足すると考えられる。また、一次＋二次応力については、一定の裕度（裕度：1.39）があること、及び応力評価の裕度が 1.0 を下回る場合は疲労評価を実施する方針としており、疲労評価においては十分な裕度があることから疲労累積係数は 1.0 を下回ると考えられる。

また、サプレッションチェンバの地震応答加速度を考慮した多入力時刻歴応答解析による発生応力は、S/C 近傍推定応力に比べて、半分以下の値となることを確認した。

添表3 RHR-R-2 の評価結果

| 配管 モデル | 一次応力 | | | | 一次+二次応力 | | | | |
|--|------|---------------|---------------|------|---------|---------------|---------------|------|------------|
| | 評価点 | 発生応力 (MPa) | 許容応力 (MPa) | 裕度 | 評価点 | 発生応力 (MPa) | 許容応力 (MPa) | 裕度 | 疲労累積 係数 |
| サプレッションチェンバの 地震応答加速度を考慮した 多入力時刻歴応答解析 | 27 | 147 | 335 | 2.27 | 27 | 283 | 394 | 1.39 | — |
| 今回工認 (配管の重心位置等を考慮し た原子炉建物の設計用床応答 スペクトルを適用したスペク トルモーダル解析) | 27 | 141 | 335 | 2.37 | 21 | 294 | 394 | 1.34 | — |
| (参考) S/C 近傍推定応力 | 3 | 379 | 335 | 0.88 | 3 | 912 | 398 | 0.43 | 1.0 以上 |

(d) 影響確認結果に対する考察

RHR-R-2 の固有周期とサプレッションチェンバの床応答スペクトルの関係を添図 6 に、モード図を添図 7 に示す。なお、サプレッションチェンバは、円周方向と半径方向で応答傾向が異なることから、直交座標系（ES 方向及び NS 方向）ではなく、円筒座標系（円周方向及び半径方向）にて床応答スペクトルを作成した。添図 6 のとおり、サプレッションチェンバの床応答スペクトルは、水平が 0.085s、鉛直が 0.085s 及び 0.061s でピークを持つ形状である。

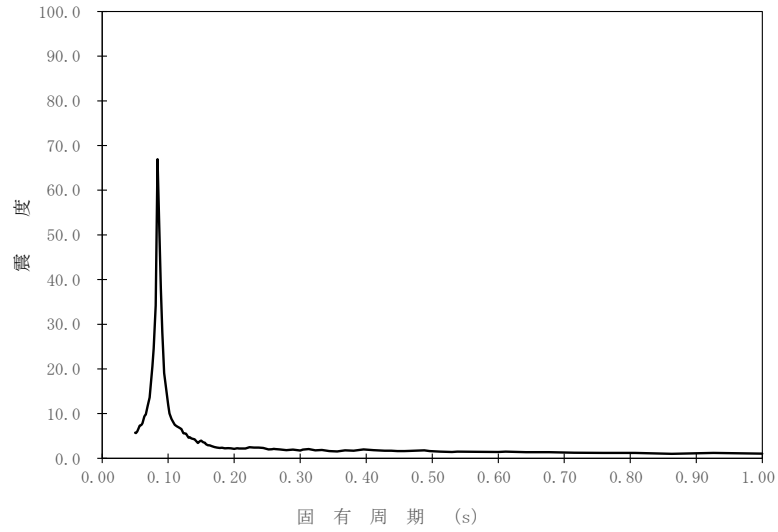
添表 1 のうち③の 1.0G 当たりの応力のおり、RHR-R-2 のサプレッションチェンバ近傍の 1.0G 当たりの応力は、全ての方向で 3 次モードが最大となる。また、3 次モードにおいてはサプレッションチェンバの床応答スペクトルのピーク近傍のモードであるため、サプレッションチェンバの地震応答加速度も比較的高くなる。このように RHR-R-2 は、1.0G 当たりの応力が大きくなり、地震応答加速度が高くなるモードを有するため、サプレッションチェンバの地震応答加速度を考慮した多入力時刻歴応答解析で算出した応力が、今回工認におけるスペクトルモーダル解析で算出した応力と同程度の応力になったと考えられる。

また、S/C 近傍推定応力は、サプレッションチェンバ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結果と同等以上*となる応力である。RHR-R-2 以外の配管モデルは添表 2 のとおり S/C 近傍推定応力が許容応力を下回るため、RHR-R-2 以外の配管モデルもサプレッションチェンバの床応答スペクトルを考慮した多入力のスペクトルモーダル解析や時刻歴解析を実施しても許容応力を下回ると考えられる。

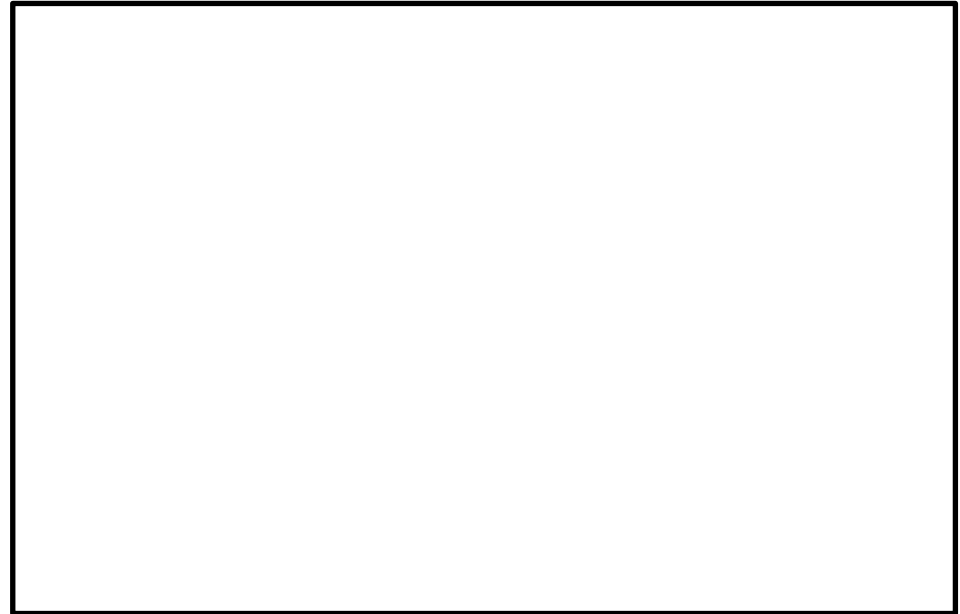
なお、多入力時刻歴解析の最小裕度点がサプレッションチェンバから少し離れた位置にあり、S/C 近傍推定応力の算出点と異なる質点であるが、原子炉建物の耐震条件の影響（スペクトルモーダル解析で考慮済の条件）によるものであり、サプレッションチェンバの地震応答加速度に関する影響が大きいモデルは、上記のとおり以下の 2 つの条件が該当するモードを有するモデルである。S/C 近傍推定応力はこの 2 つの条件を数値化したパラメータであり、S/C 近傍推定応力が最も大きいモデルである RHR-R-2 をサプレッションチェンバの地震応答加速度に関する影響確認の代表として選定したことは妥当である。

- ・サプレッションチェンバ近傍で応答する（サプレッションチェンバ近傍で 1.0G 当たりの応力が大きい）モードを有する。
- ・上記のモードが、サプレッションチェンバの床応答スペクトルのピーク又はピーク近傍のモードである。

注記* : サプレッションチェンバ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結果と同等になる手法であり、保守的な耐震条件を適用（円周方向及び半径方向の最大値を水平震度として適用）していることから、サプレッションチェンバ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結果と同等以上の応力となる。

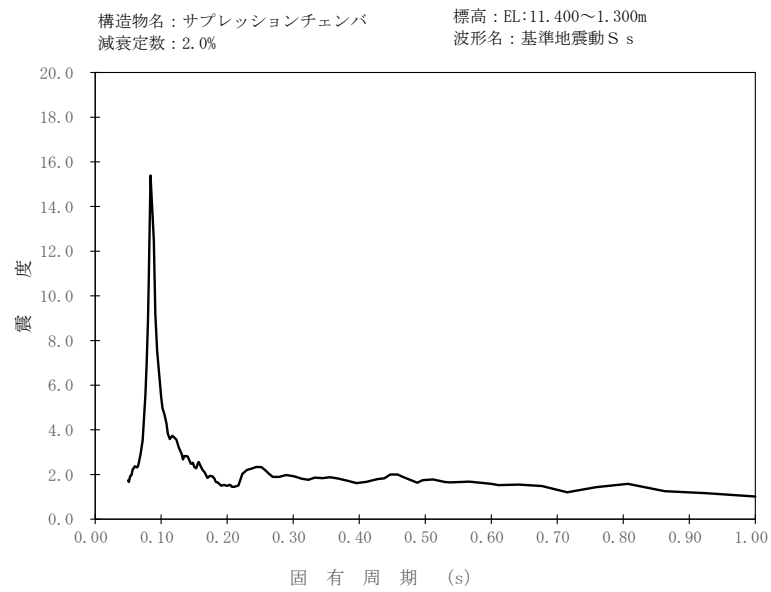


(a) スペクトル全体

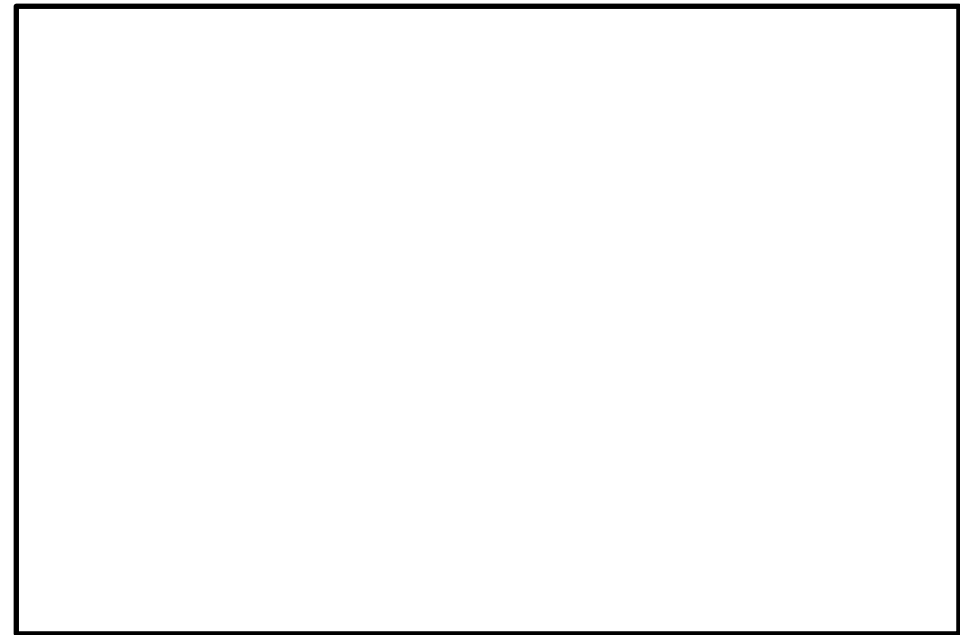


(b) ピーク近傍と配管の固有周期

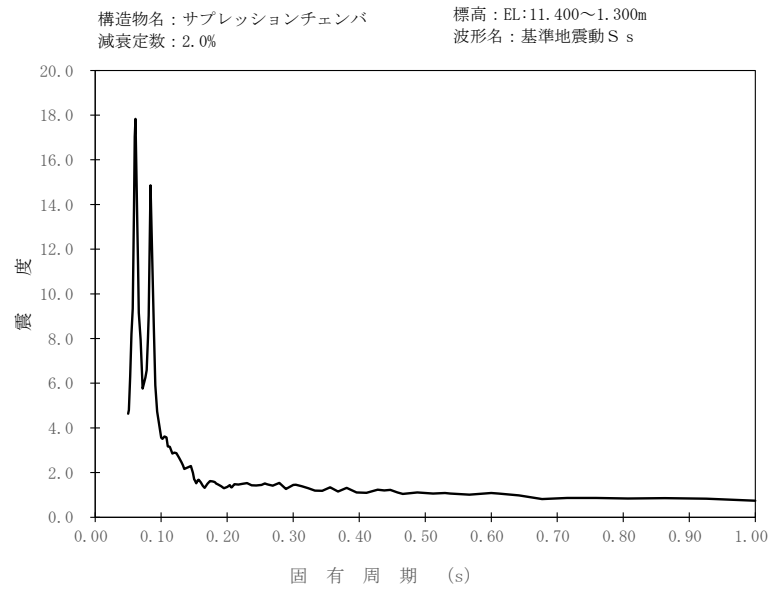
添図 6 RHR-R-2 の固有周期とサプレッションチェンバの床応答スペクトルの関係 (半径方向) (1/3)



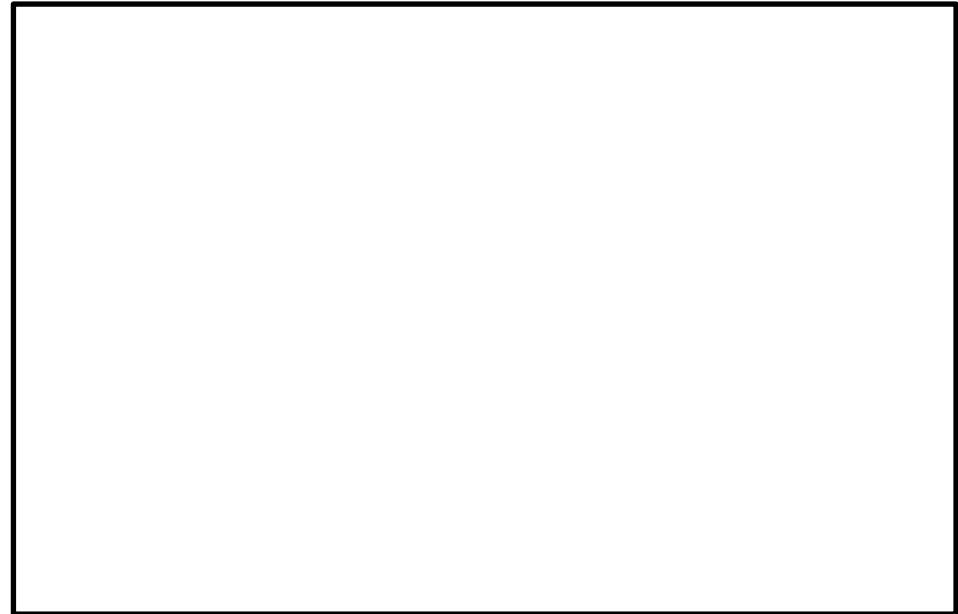
(a) スペクトル全体



添図 6 RHR-R-2 の固有周期とサプレッションチェンバの床応答スペクトルの関係 (円周方向) (2/3)

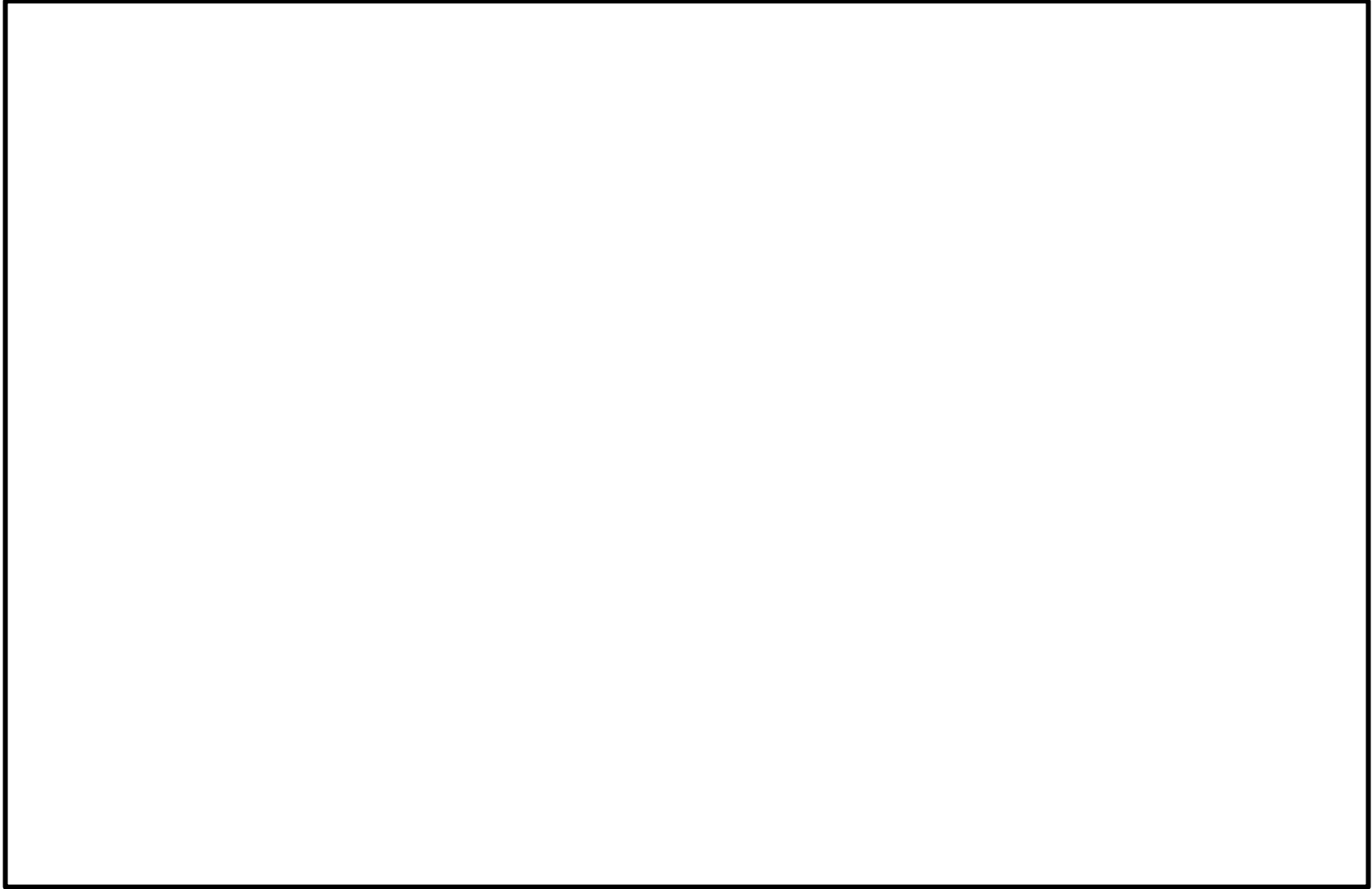


(a) スペクトル全体

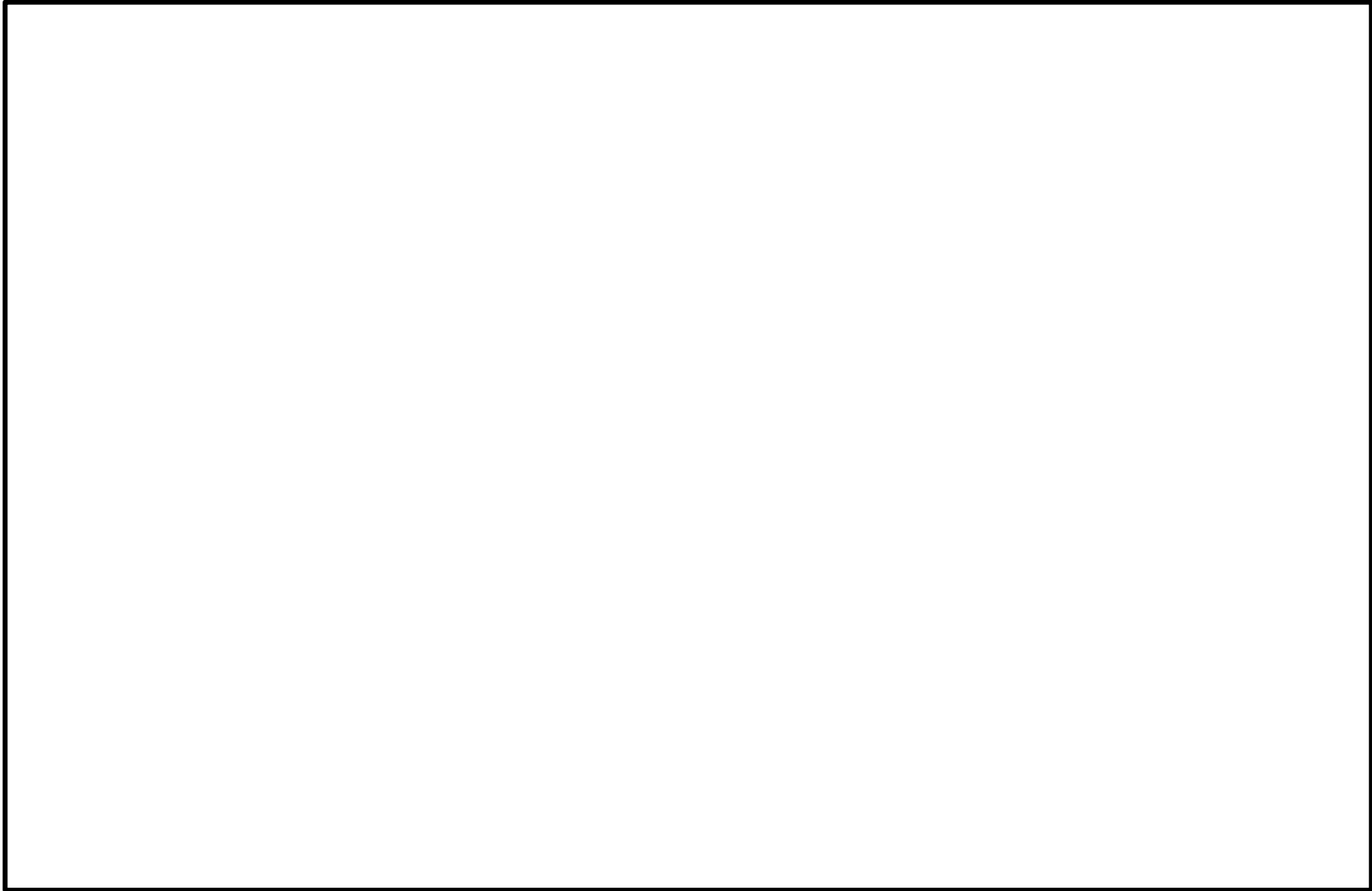


(b) ピーク近傍と配管の固有周期

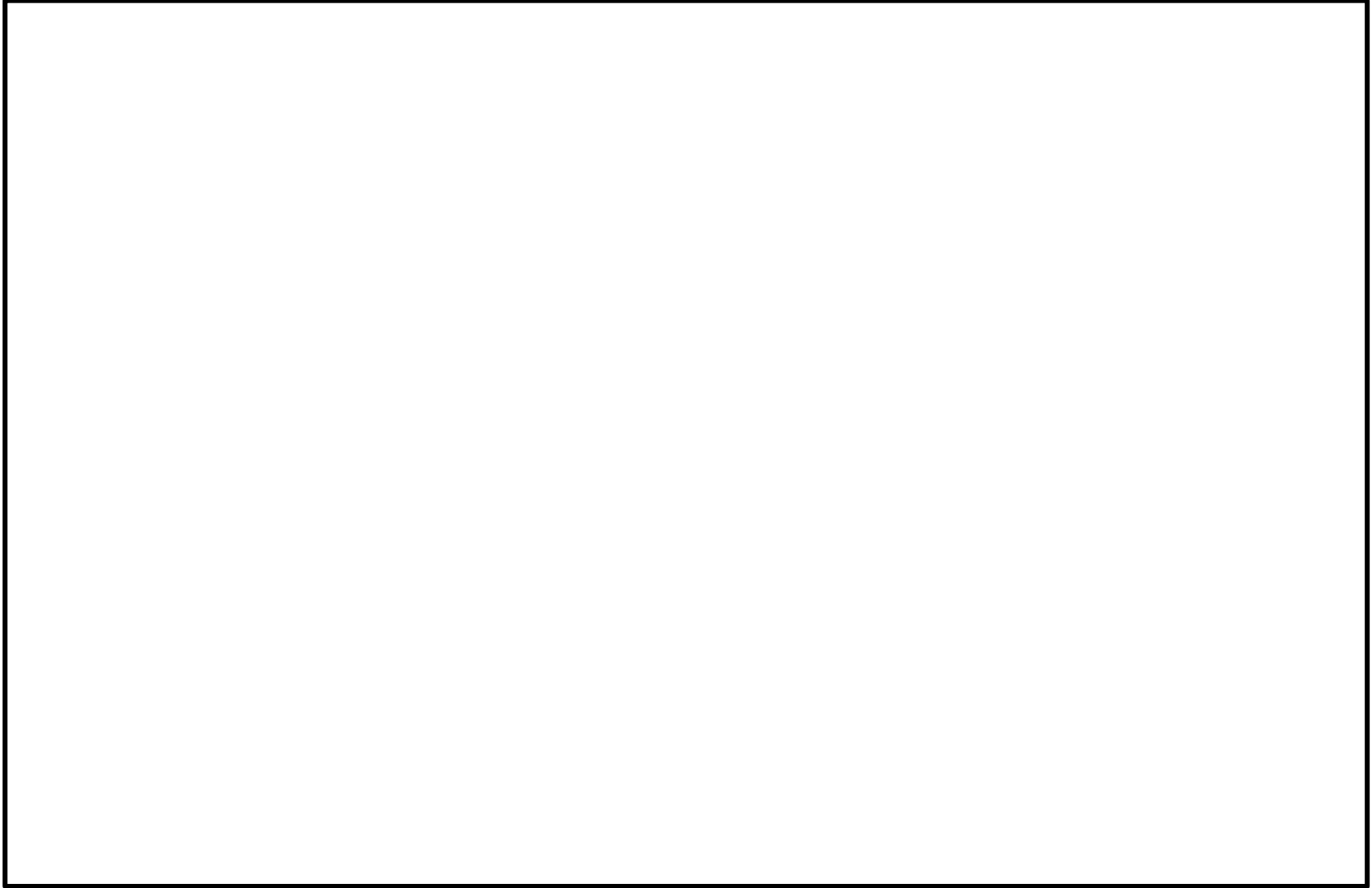
添図 6 RHR-R-2 の固有周期とサプレッションチェンバの床応答スペクトルの関係 (鉛直方向) (3/3)



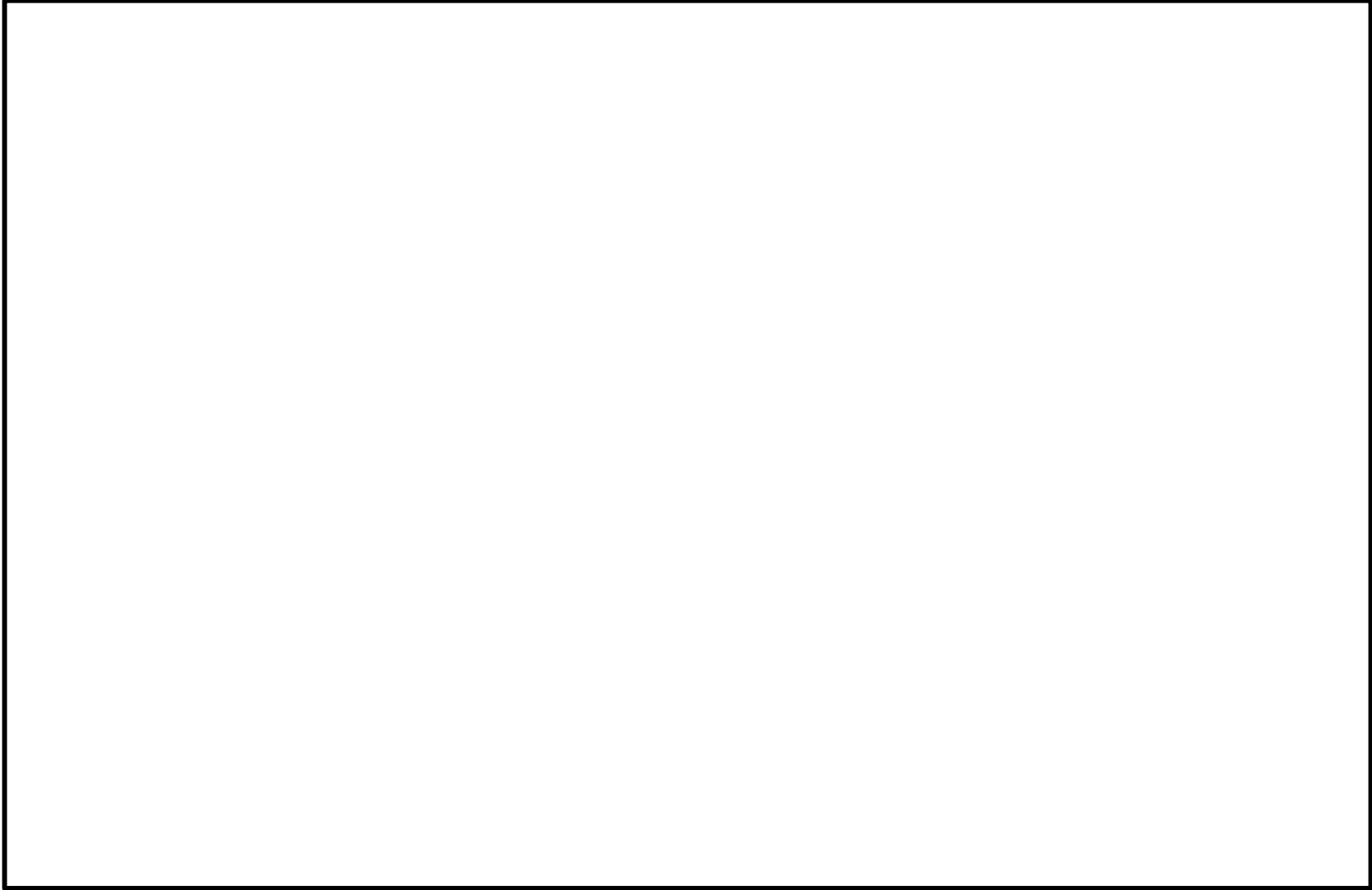
添図 7 振動モード図 (RHR-R-2, 1 次モード) (1/16)



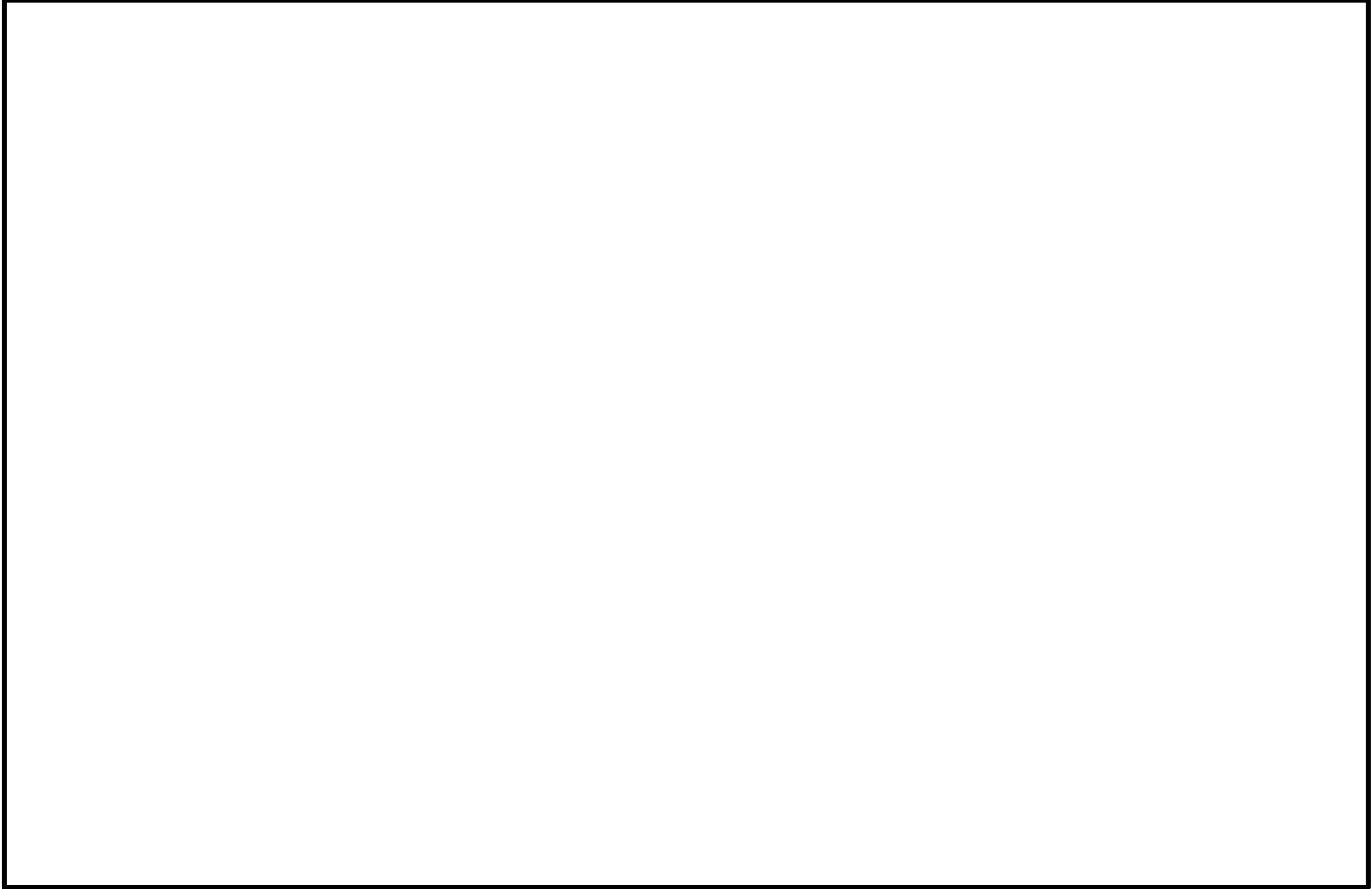
添図 7 振動モード図 (RHR-R-2, 2次モード) (2/16)



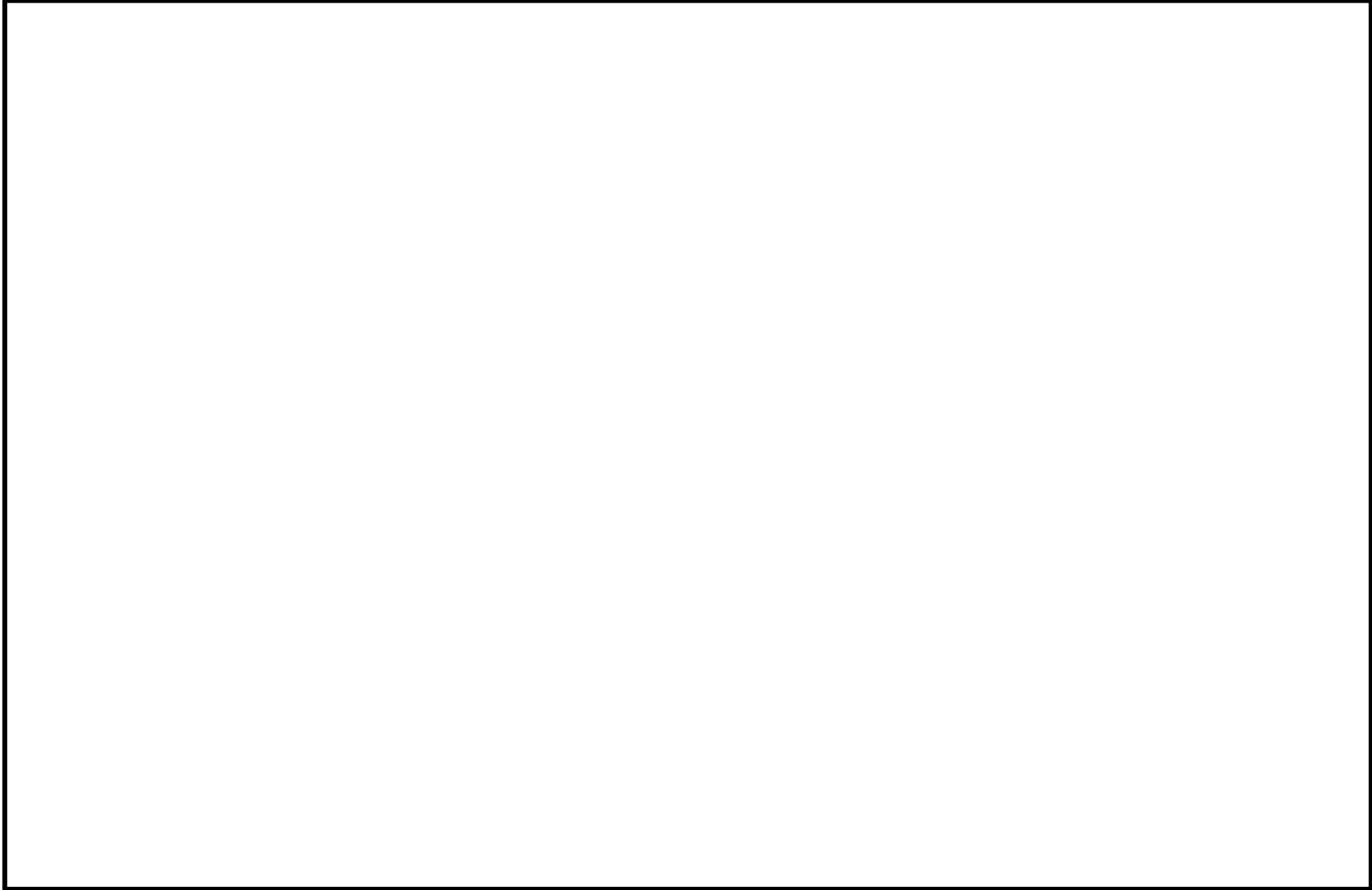
添図 7 振動モード図 (RHR-R-2, 3 次モード) (3/16)



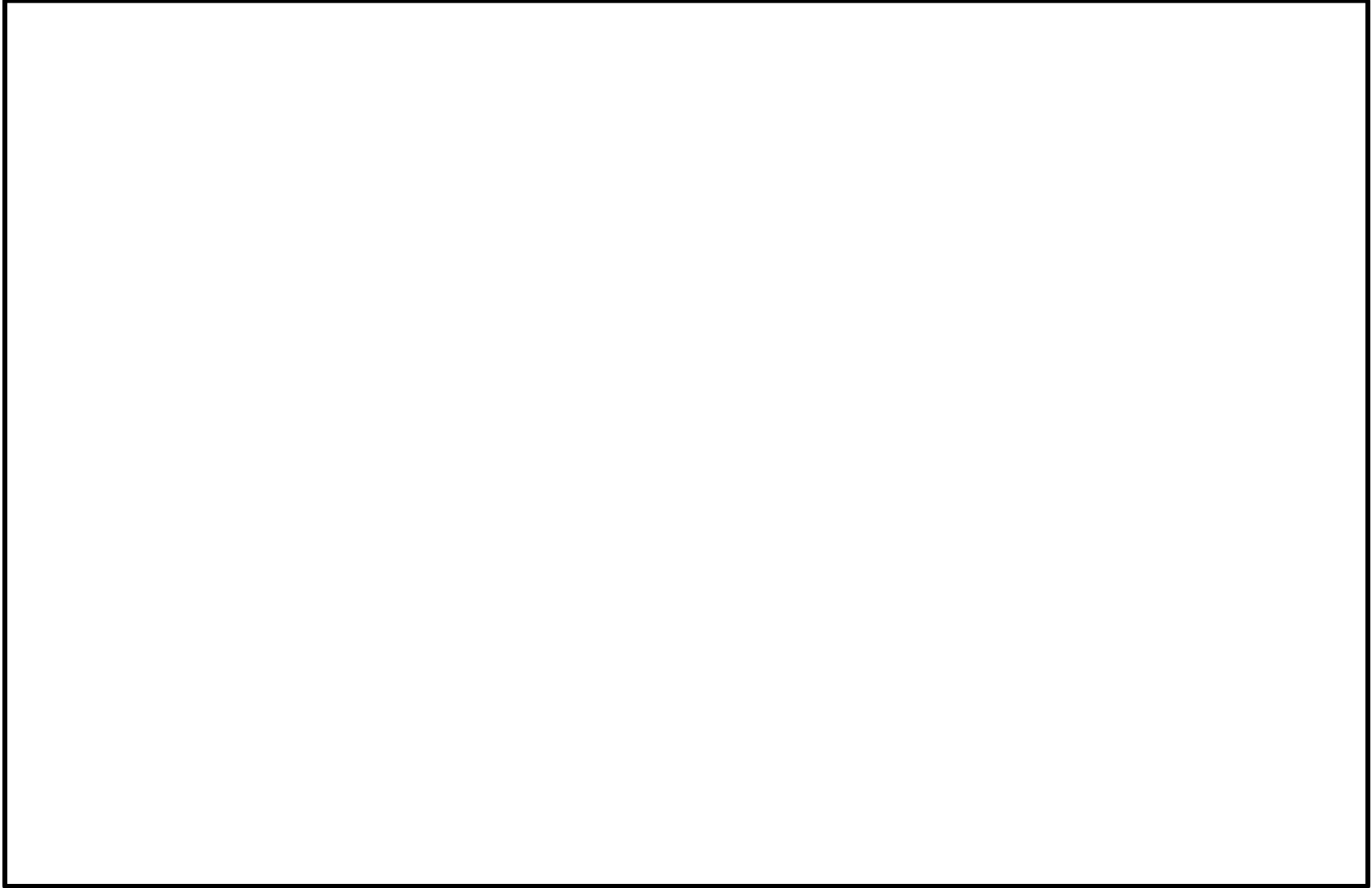
添図 7 振動モード図 (RHR-R-2, 4次モード) (4/16)



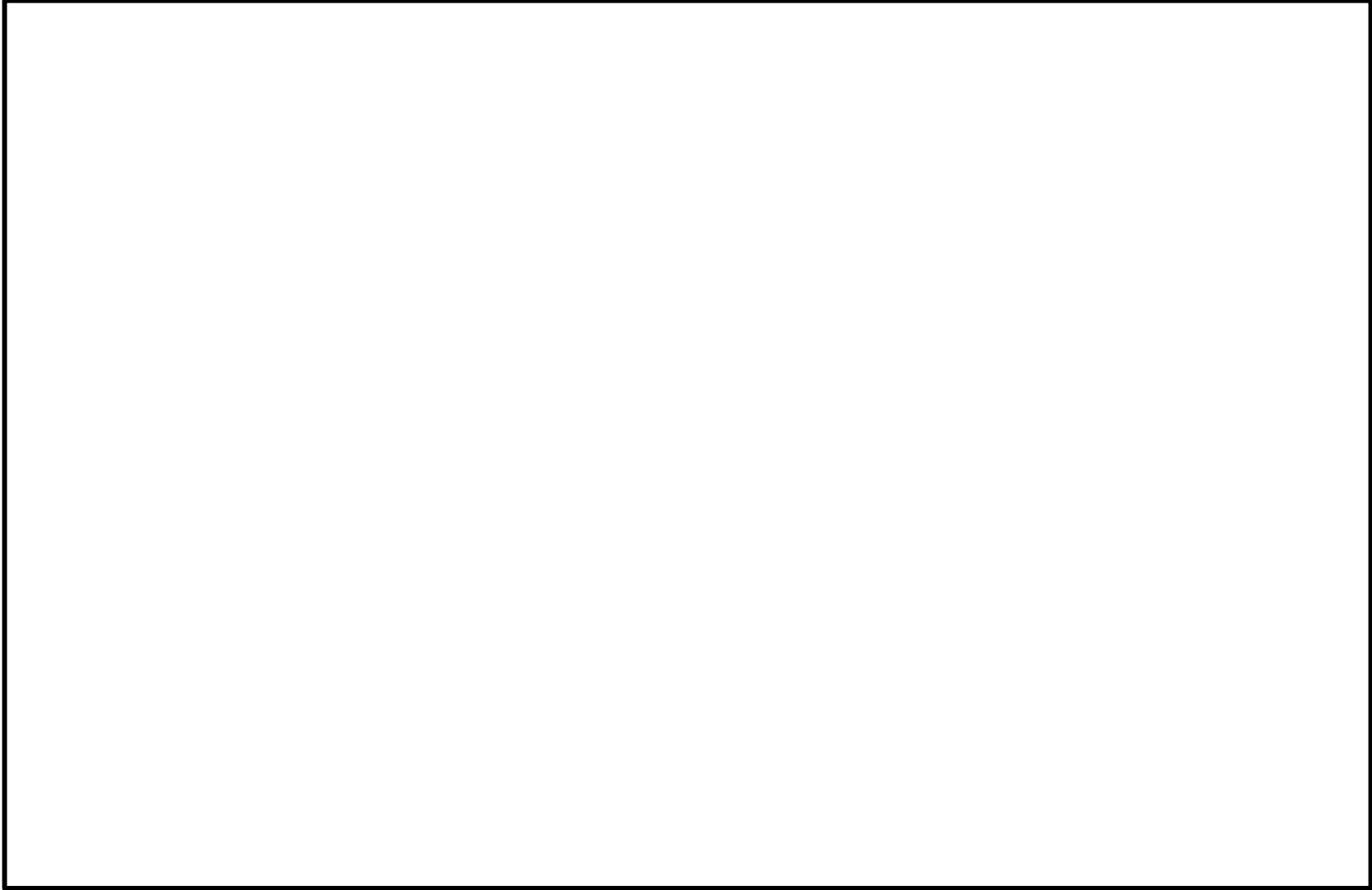
添図 7 振動モード図 (RHR-R-2, 5 次モード) (5/16)



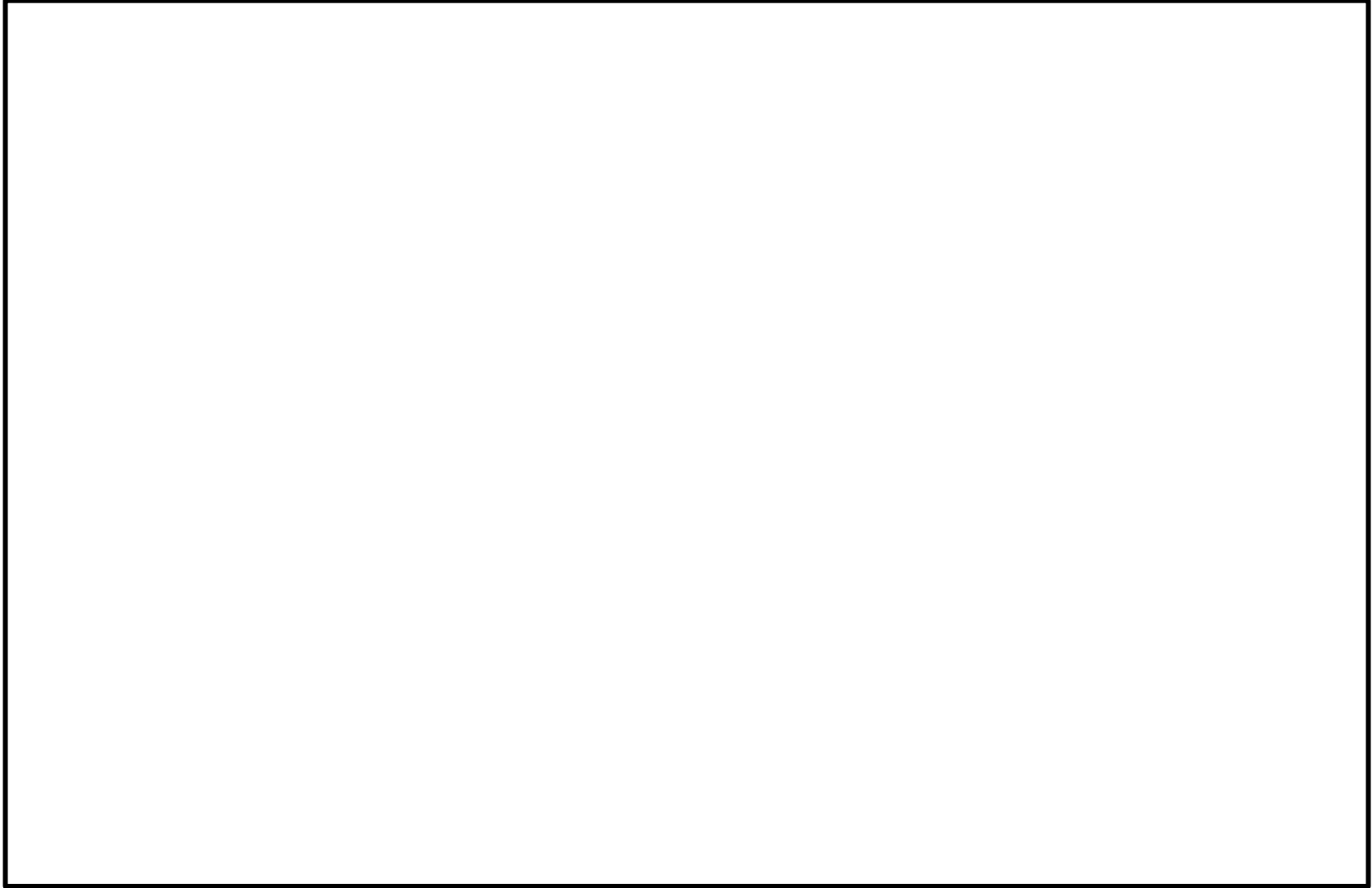
添図 7 振動モード図 (RHR-R-2, 6 次モード) (6/16)



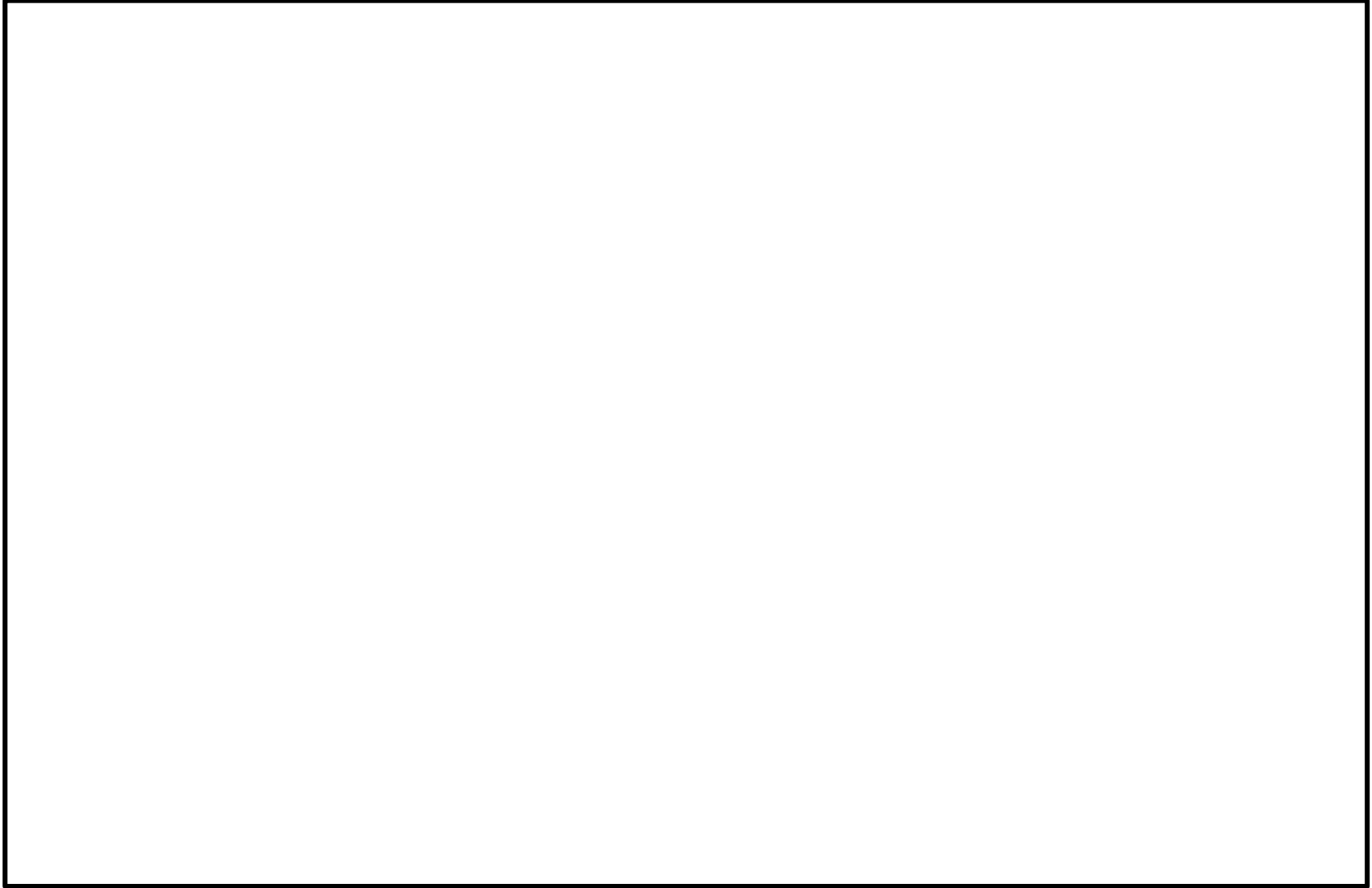
添図 7 振動モード図 (RHR-R-2, 7 次モード) (7/16)



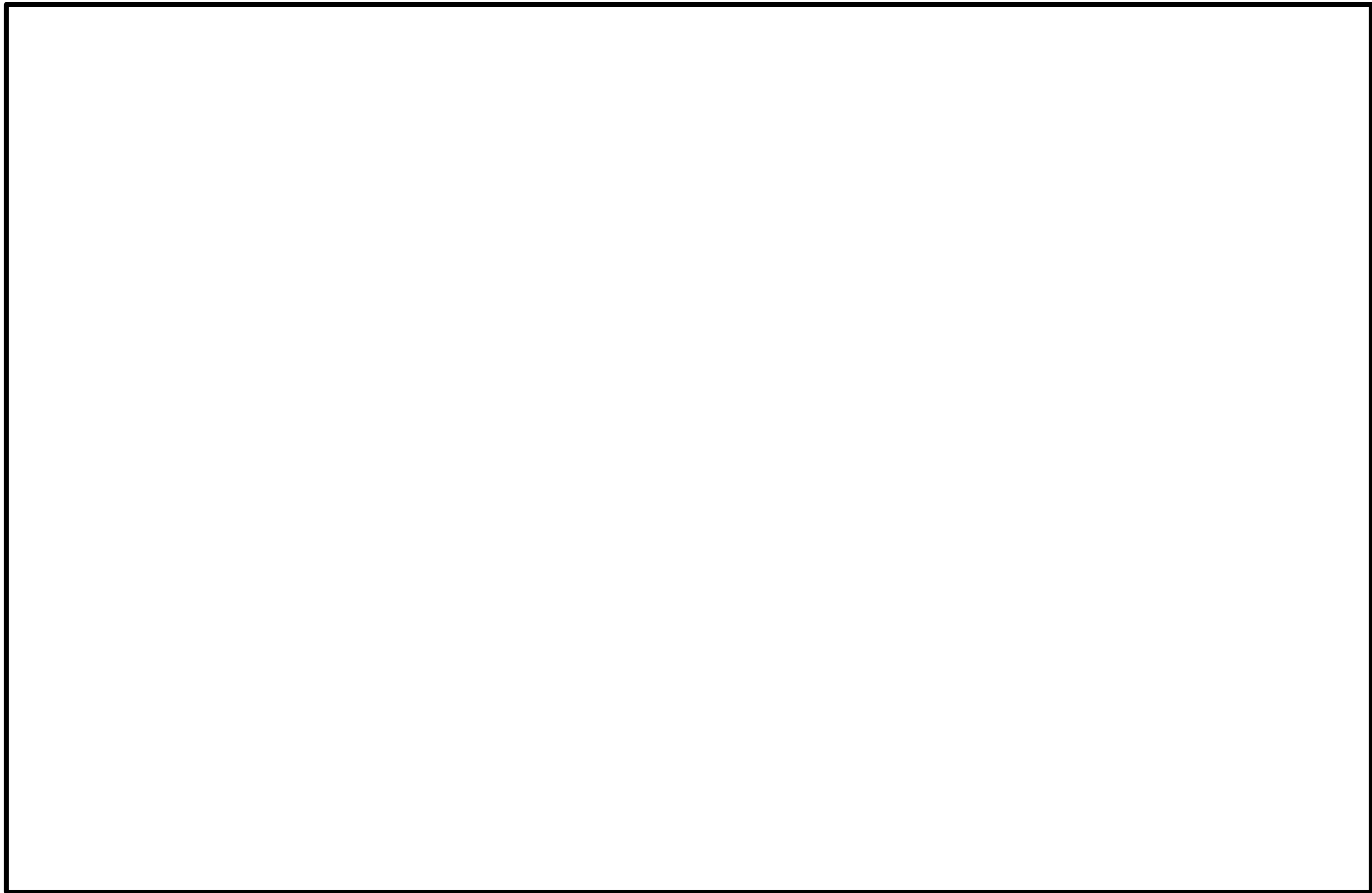
添図 7 振動モード図 (RHR-R-2, 8 次モード) (8/16)



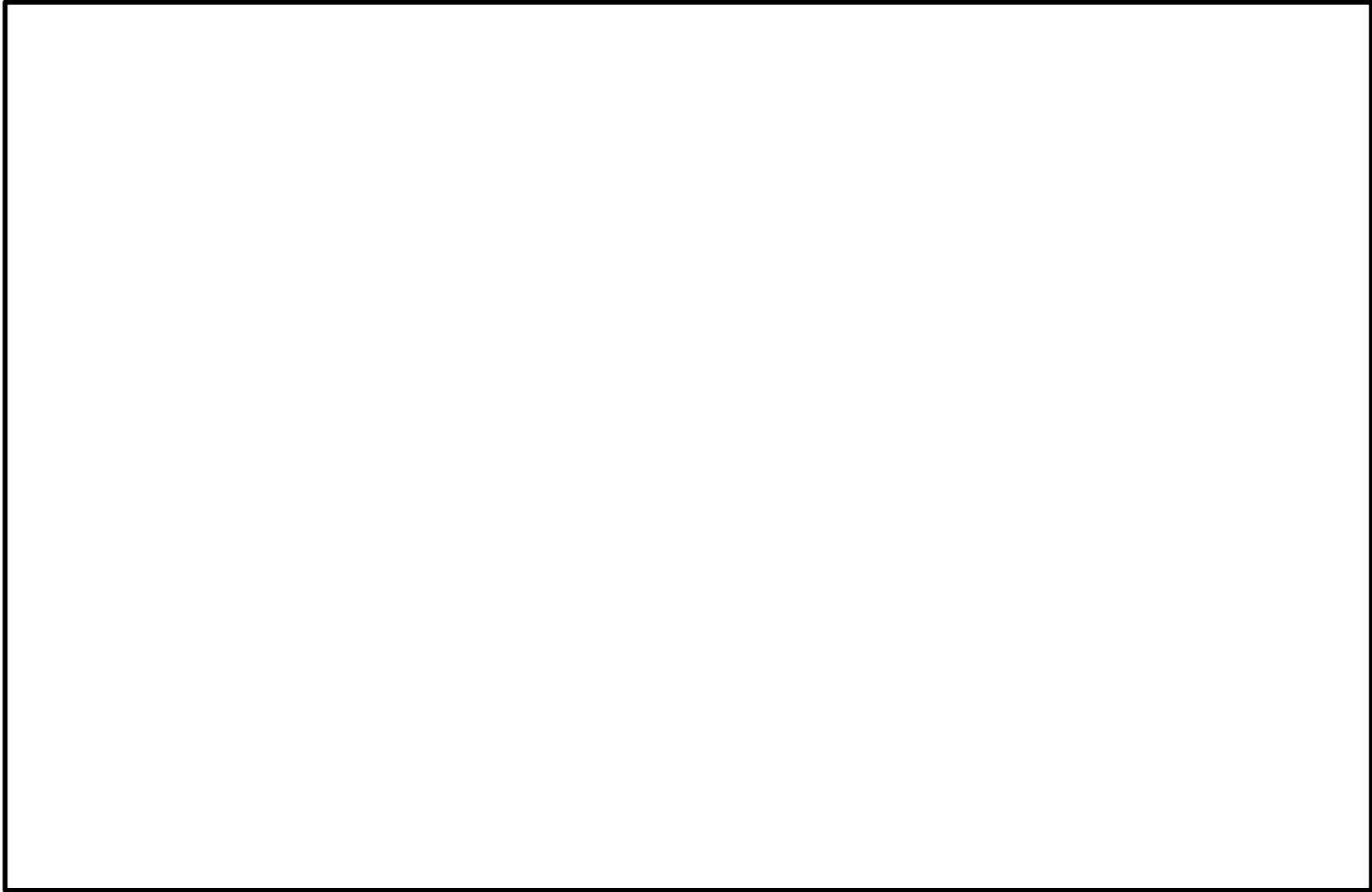
添図 7 振動モード図 (RHR-R-2, 9 次モード) (9/16)



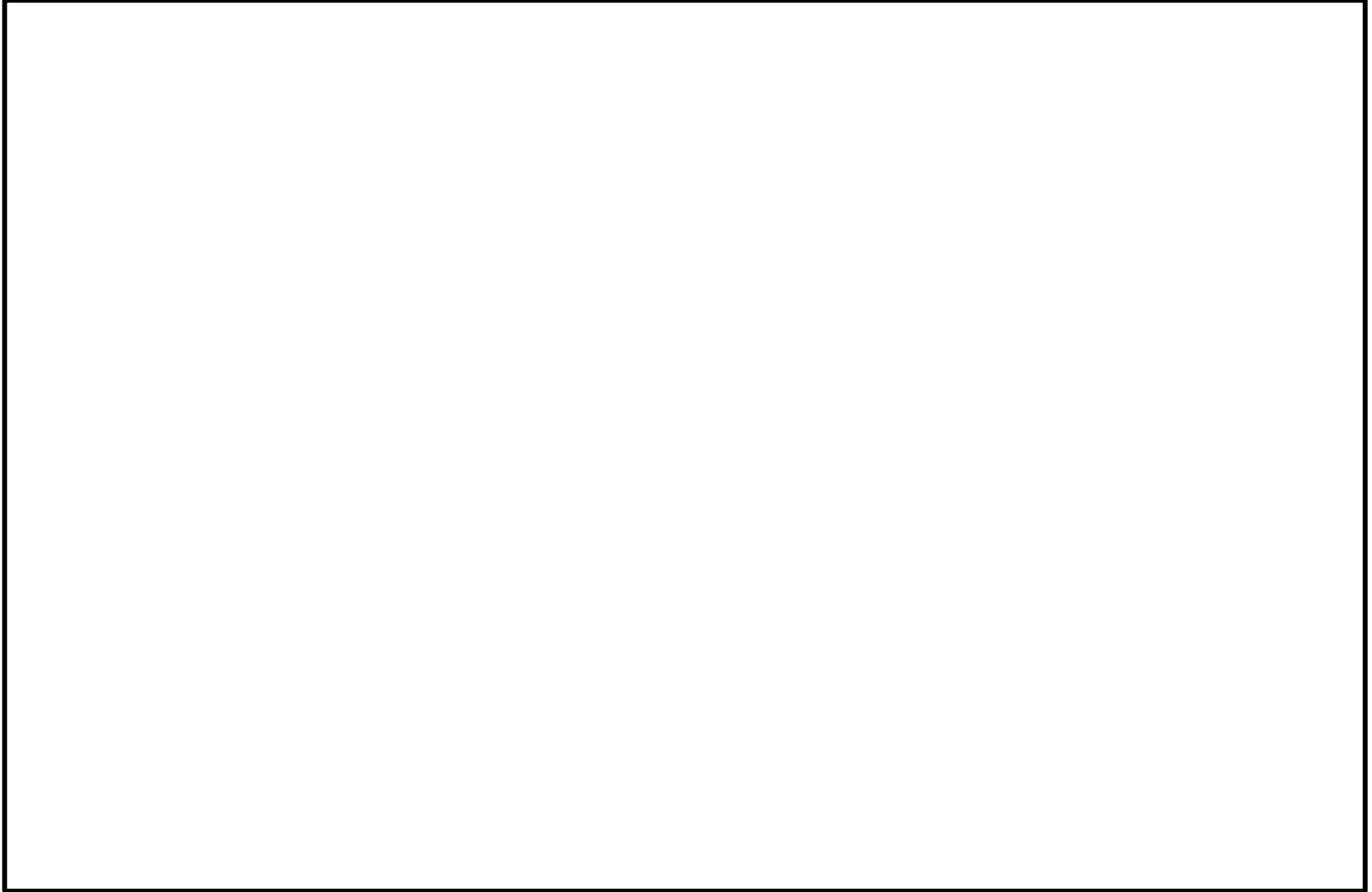
添図 7 振動モード図 (RHR-R-2, 10 次モード) (10/16)



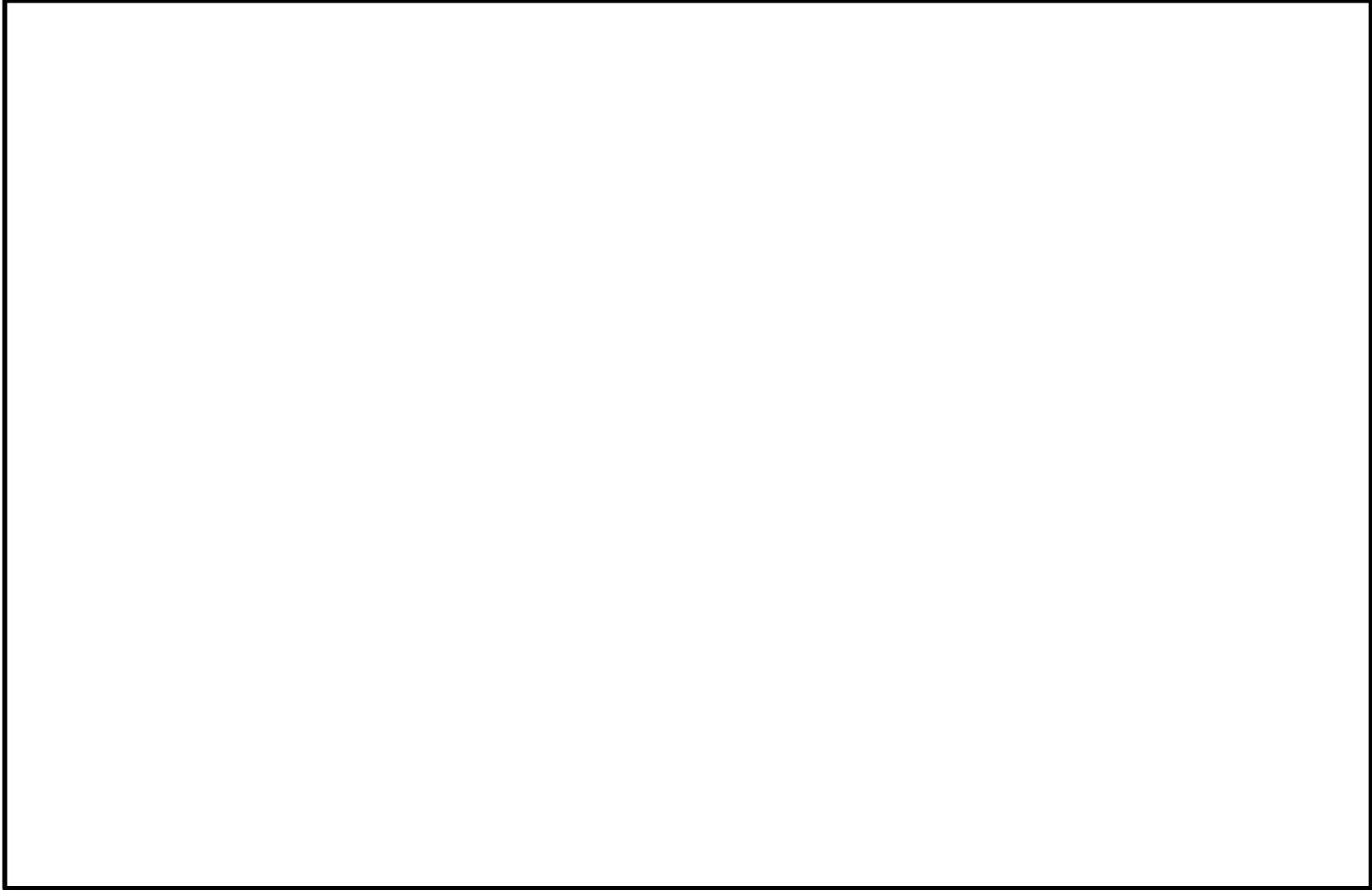
添図 7 振動モード図 (RHR-R-2, 11 次モード) (11/16)



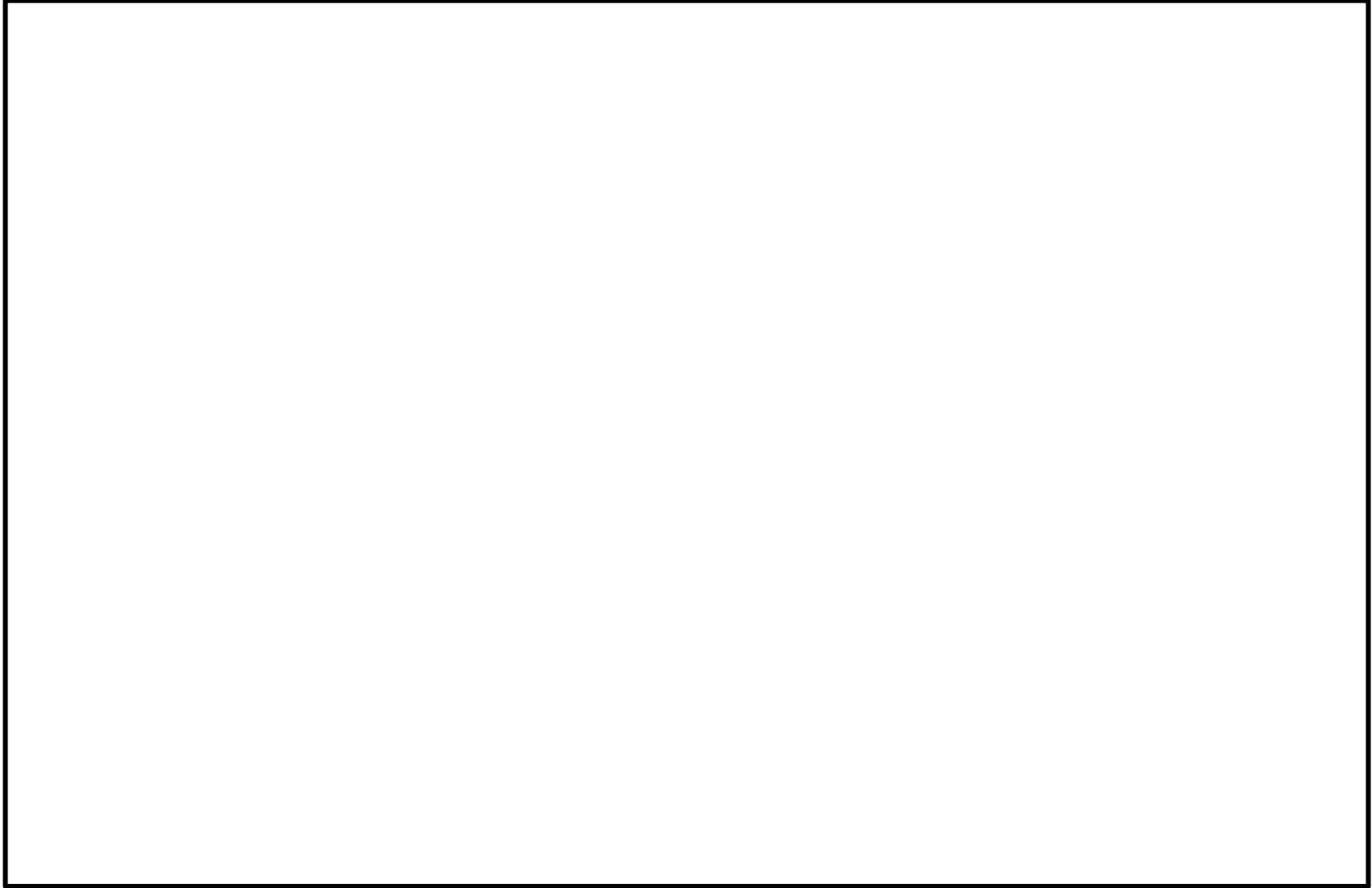
添図 7 振動モード図 (RHR-R-2, 12 次モード) (12/16)



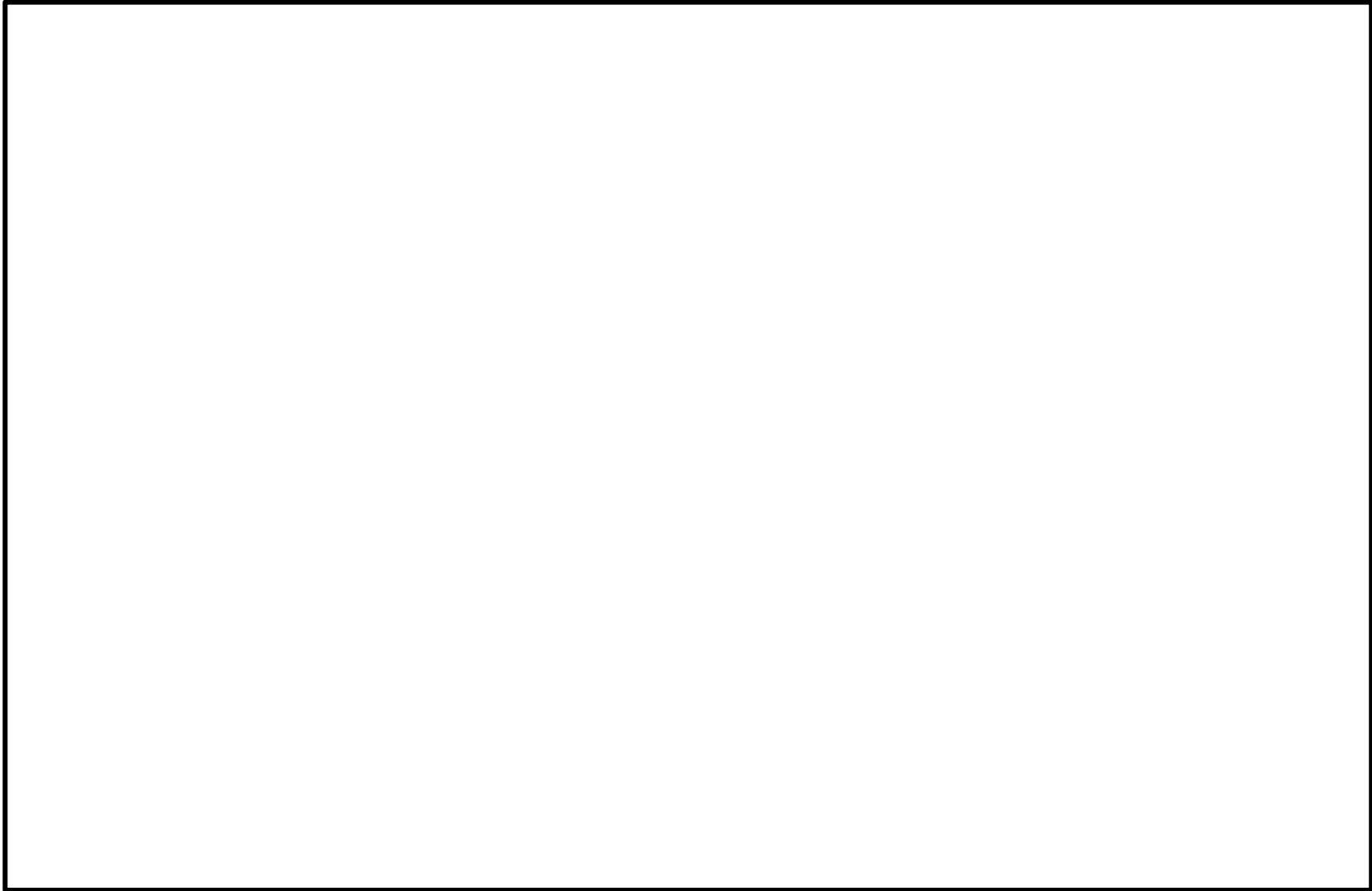
添図 7 振動モード図 (RHR-R-2, 13 次モード) (13/16)



添図 7 振動モード図 (RHR-R-2, 14 次モード) (14/16)



添図 7 振動モード図 (RHR-R-2, 15 次モード) (15/16)



添図 7 振動モード図 (RHR-R-2, 16 次モード) (16/16)

6. 結言

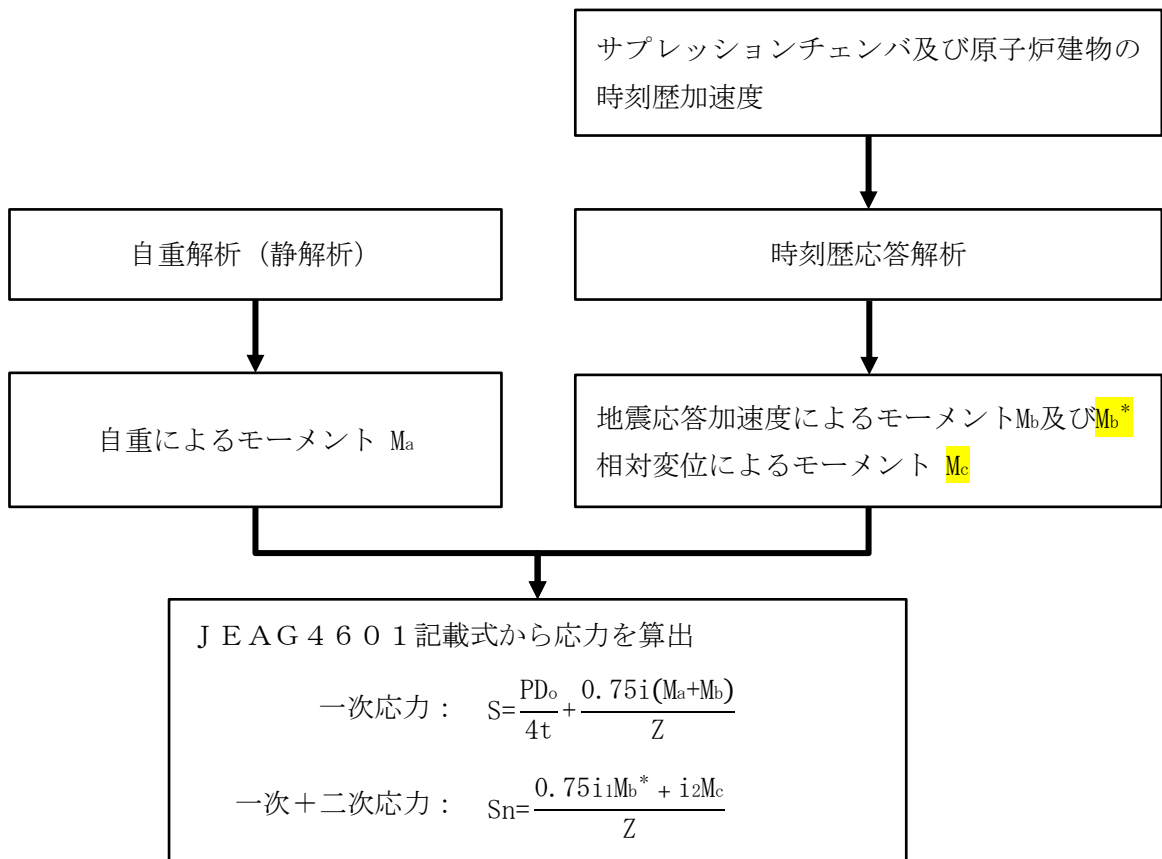
S/C 近傍推定応力の算出の結果、RHR-R-2 以外は S/C 近傍推定応力が許容応力を下回る結果となった。また、RHR-R-2 は、サプレッションチェンバの地震応答加速度を考慮した多入力時刻歴応答解析を行い、多入力時刻歴応答解析による発生応力は、今回工認の評価結果に比べて大きな差はなく、許容値を十分に満足することを確認した。

以上のことから、サプレッションチェンバの地震応答加速度による耐震性への影響はないことを確認した。

サプレッションチェンバ接続配管の時刻歴解析手法について

1 緒言

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多入力時刻歴応答解析方法について示すものである。参図1に多入力時刻歴応答解析方法の評価概要を示す。



- S : 一次応力
- P : 圧力
- D_o : 管外径
- t : 管の厚さ
- i, i₁, i₂ : 応力係数
- M_a : 自重により生じるモーメント
- M_b : 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
- S_n : 一次+二次応力
- M_b^{*} : 地震の慣性力により生じるモーメントの全振幅
- M_c : 地震の相対変位により生じるモーメントの全振幅

参図1 多入力時刻歴応答解析方法の評価概要

2 多入力時刻歴応答解析の概要

配管の時刻歴応答解析（モーダル解析）の理論式を以下に示す。減衰は、モード減衰として \square を用いる。解析コードは、「MSC NASTRAN」を用いる。

3 多入力時刻歴応答解析手法

多入力時刻歴応答解析では、基準とする入力点（基準入力点）に対する配管系の相対変位及び入力点の相対変位を用いると、地震による慣性力を受ける配管系の運動方程式は以下となる。

$$[M]\{\ddot{x}_a\} + [C]\{\dot{x}_a\} + [K]\{x_a\} = -[M]I\ddot{y}_0 - [\tilde{C}]\{\dot{x}_b\} - [\tilde{K}]\{x_b\} \quad (1)$$

$[M]$, $[C]$, $[K]$: 配管系の質量, 減衰, 剛性マトリクス

$\{I\}$: 単位ベクトル

$\{x_a\}$: 基準入力点に対する配管系の相対変位ベクトル

$\{x_b\}$: 基準入力点に対する入力点の相対変位ベクトル

y_0 : 基準入力点の絶対変位

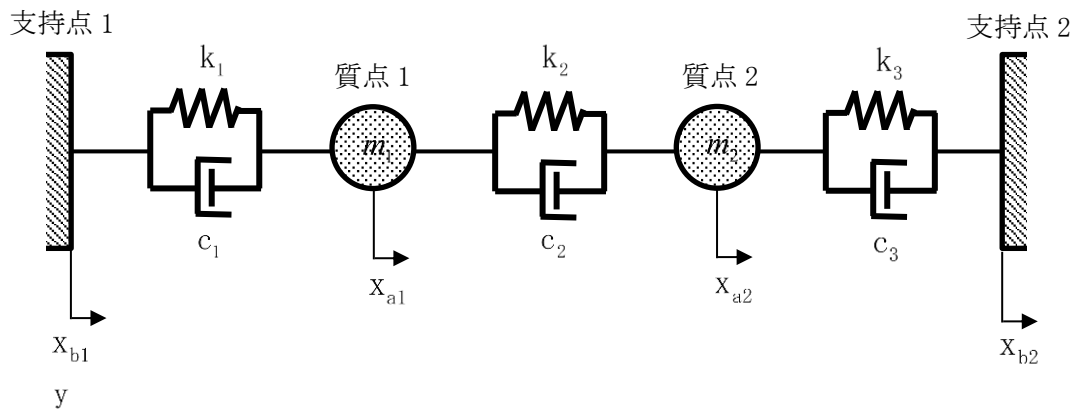
$[\tilde{C}]$: 入力点の相対速度に対応した減衰マトリクス

$[\tilde{K}]$: 入力点の相対変位に対応した剛性マトリクス

式(1)の左辺は地震による慣性力を受ける配管系の運動方程式である。右辺第一項は、基準入力点の加速度を用いており、右辺第二項及び右辺第三項は、入力点の相対変位、相対速度により生じる力を表している。式(1)は、単一入力の場合と同様に、モード座標系の運動方程式に変換することが可能であり、今回の評価では、モード空間での連成した運動方程式に対して時間積分を行う方法を適用する。

4 多入力の2自由度系の運動方程式の例

多入力の時刻歴応答解析手法は、いくつかの定式化が可能であるが、前項に示した系全体の絶対変位を「基準とする支持点の絶対変位」と「基準とする支持点からの相対変位」の和で表す場合の定式化について、多入力の場合の2自由度系の運動方程式の例を以下に示す。多入力の場合の2自由度系の概念図を参図2に示す。



- y : 基準とする支持点 1 の絶対変位
- x_{a1}, x_{a2} : 支持点 1 に対する各質点の相対変位
- x_{b1}, x_{b2} : 支持点 1 に対する各支持点の相対変位 ($x_{b1} = 0$)
- m_1, m_2 : 質量
- k_1, k_2, k_3 : ばね定数
- c_1, c_2, c_3 : 減衰係数

参図 2 多入力の場合の 2 自由度系

地震による慣性力を受ける配管系の運動方程式を以下に示す。

$$\begin{cases} m_1(\ddot{x}_{a1} + \ddot{y}) + c_1(\dot{x}_{a1} - \dot{x}_{b1}) - c_2(\dot{x}_{a2} - \dot{x}_{a1}) + k_1(x_{a1} - x_{b1}) - k_2(x_{a2} - x_{a1}) = 0 & (2) \\ m_2(\ddot{x}_{a2} + \ddot{y}) + c_2(\dot{x}_{a2} - \dot{x}_{a1}) - c_3(\dot{x}_{b2} - \dot{x}_{a2}) + k_2(x_{a2} - x_{a1}) - k_3(x_{b2} - x_{a2}) = 0 & (3) \end{cases}$$

基準とする支持点 1 に関する項を右辺に移項すると、

$$\begin{cases} m_1\ddot{x}_{a1} + (c_1 + c_2)\dot{x}_{a1} - c_2\dot{x}_{a2} + (k_1 + k_2)x_{a1} - k_2x_{a2} - c_1\dot{x}_{b1} - k_1x_{b1} = -m_1\ddot{y} & (4) \\ m_2\ddot{x}_{a2} - c_2\dot{x}_{a1} + (c_2 + c_3)\dot{x}_{a2} - k_2x_{a1} + (k_2 + k_3)x_{a2} - c_3\dot{x}_{b2} - k_3x_{b2} = -m_2\ddot{y} & (5) \end{cases}$$

となる。式 (4) 及び式 (5) を行列で表現すると、

$$\begin{bmatrix} m_1 & 0 \\ 0 & m_2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{x}_{a1} \\ \ddot{x}_{a2} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} c_1 + c_2 & -c_2 \\ -c_2 & c_2 + c_3 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{x}_{a1} \\ \dot{x}_{a2} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} k_1 + k_2 & -k_2 \\ -k_2 & k_2 + k_3 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} x_{a1} \\ x_{a2} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} -c_1 & 0 \\ 0 & -c_3 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{x}_{b1} \\ \dot{x}_{b2} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} -k_1 & 0 \\ 0 & -k_3 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} x_{b1} \\ x_{b2} \end{Bmatrix} = - \begin{bmatrix} m_1 & 0 \\ 0 & m_2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} 1 \\ 1 \end{Bmatrix} \ddot{y} \quad (6)$$

となる。

ここで、質量マトリクスを $[M]$ ，入力点の相対速度に対応した減衰マトリクスを $[\tilde{C}]$ ，入力点以外の相対速度に対応した減衰マトリクスを $[C]$ ，入力点の相対変位に対応した剛性マトリクスを $[\tilde{K}]$ ，入力点以外の相対変位に対応した剛性マトリクスを $[K]$ とし、ベクトルについては、 $\{X_a\} = \begin{Bmatrix} X_{a1} \\ X_{a2} \end{Bmatrix}$ ， $\{X_b\} = \begin{Bmatrix} X_{b1} \\ X_{b2} \end{Bmatrix}$ にて記述した上でこれらを右辺に移項すると、以下の式となる。

$$[M]\{\ddot{x}_a\} + [C]\{\dot{x}_a\} + [K]\{x_a\} = -[M]\{I\}\ddot{y} - [\tilde{C}]\{\dot{x}_b\} - [\tilde{K}]\{x_b\} \quad (7)$$

式 (7) の左辺は質点の変位 x_a で表されるため各質点の応答を示した運動方程式であり、右辺は支持点の変位 x_b 及び y で表されるため系への入力を示した運動方程式である。なお、この式は前項に示す式 (1) と同様の方程式となる。

式 (7) を解くと慣性力成分 (一次応力) 及び相対変位成分 (二次応力) を含む解が算出される。配管系における評価では、一次応力と一次+二次応力をそれぞれ評価する必要があるため、式 (7) を解く際に質量マトリクスをゼロマトリクスとすることで、慣性力成分を除去した相対変位成分のみを算出し、式 (7) の解から差をとることで一次応力を算出する。

なお、系を静的平衡関係から得られる疑似静的変位と動の変位の和で定義することを特徴とするCloughの方法が J E A G 4 6 0 1 * に示されているが、変位等の定義の仕方が異なるだけであり、系の運動方程式としては、式 (1) と同等である (参図3を参照)。

注記* : 原子力発電所耐震設計技術指針 J E A G 4 6 0 1 -1987 (社団法人日本電気協会)

(3) 配 管

A クラス配管の地震応答解析手法として設計において最も多く用いられている方法は、「6.5.4(2) 容器」で示したスペクトルモーダル解析法であるが、「6.5.4(1) 建屋連成系の機器」で述べた時刻歴解析法による場合もある。配管系は、多数の支持点にて支持されていることから多入力解析を用いることが合理的と考えられる。この多入力解析法については、いくつかの定式化が考えられるが、配管を対象とした多入力解析の場合は Clough により提案された方法^(6.5.4-2)を用いることが多い。この Clough の方法は、系を静的平衡関係から得られる疑似静的変位と動の変位の和で定義したことを特徴とするもので、最終的には系の運動方程式は次の式 (6.5.4-8) となる。

$$M\ddot{U} + C\dot{U} + KU = -MH\ddot{U}_b \quad \dots\dots\dots (6.5.4-8)$$

M : 質量マトリクス

C : 減衰マトリクス

K : 剛性マトリクス

\ddot{U}_b : 支持点の絶対加速度

H : 静的平衡関係から得られる変換マトリクス

式 (6.5.4-8) はこれまでに扱ってきた運動方程式と同様な形式となっているため、時刻歴による多入力解析はもちろんであるが支持点の応答スペクトルを用いたスペクトル多入力解析をも可能としている。ただし、膨大な数のモデルを対象とする配管設計においては、簡便さと安全側の観点から各々の支持部の入力を包絡し、単一入力として解析する場合が多い。

つまり、配管系の地震応答解析は「6.5.2(3) 配管」において述べたように曲げせん断はり (ビーム、管要素) により 3 次元のモデル化が行われスペクトルモーダル解析により地震力を求める解析法が主となっている。そして、スペクトルモーダル解析においてモード合成により部材力を求める場合は「SRSS」法が用いられ、地震入力方向の合成には絶対値和法を用いるのが普通である。

参図3 J E A G 4 6 0 1 -1987 (6.5.4 地震応答解析法 (3)配管 抜粋)