

補足-027-10-51 配管系の支持装置の評価手法の精緻化について

目次

1.	はじめに	1
2.	適用範囲	2
3.	支持装置の構造及び作動原理.....	3
3.1	支持装置に要求される基本機能.....	3
3.2	メカニカルスナッパ.....	4
3.3	オイルスナッパ.....	8
3.4	ロッドレストレイント.....	13
4.	支持装置の耐震設計.....	14
4.1	既工認における評価.....	14
4.2	支持装置の定格荷重.....	15
4.3	今回工認における評価.....	17
4.3.1	評価手順.....	17
4.3.2	支持装置の耐震設計に係る技術基準及び適用規格.....	19
4.3.3	既工認と今回工認の差異.....	22
4.3.4	電力共同研究の知見の今回工認への適用の妥当性.....	24
5.	今回工認の二次評価において適用する新規基準値の設定.....	31
5.1	評価部位及び評価項目の抽出.....	32
5.2	J E A G 4 6 0 1 に規定の許容限界に対する定格荷重の裕度の算出.....	72
5.3	耐力試験において確認された限界耐力値に対する定格荷重の裕度の算出.....	76
5.3.1	耐力試験において確認された限界耐力値の概要.....	76
5.3.2	限界耐力値に対する定格荷重の裕度の算出.....	78
5.4	新規基準値の設定.....	81
6.	結論	88

別紙1 スナッパ確性試験の概要

別紙2 支持装置の耐震設計に係る技術基準及び適用規格の内容

別紙3 支持装置の強度評価方法（構造部材に対する強度評価）

別紙4 スナッパの電力共同研究の概要

別紙5 スナッパの J N E S 研究の概要

別紙6 スナッパの限界耐力設定にあたってのばらつきの考え方

別紙7 ロッドレストレイント耐力試験の概要

別紙8 ロッドストレイントの新規耐力係数にあたってのばらつきの考え方

用語の定義

本資料中に用いる以下の用語の定義は以下のとおり。

No.	用語	定義	初出箇所
1	構造部材	支持装置を構成する部品のうち、荷重伝達経路上にあり、配管から伝達される荷重（配管反力）に対して支持機能を発揮するための強度部材	P. 4 3.2 メカニカル スナッパ
2	機能部品	・支持装置を構成する部品のうち、荷重伝達経路上にあり、支持装置の動作機能に必要な部品 ・試験結果に基づき限界耐力値を設定する部品	P. 4 3.2 メカニカル スナッパ
3	定格荷重	各製品の設計強度に基づき支持装置メーカーが定めた型式別の許容荷重	P. 1 1. はじめに
4	(今回工認の) 一次評価	支持装置の地震時荷重に対して、あらかじめ設定した設計上の基準値を評価基準値として行う評価（既工認の評価と同様）	P. 17 4.3 今回工認に おける評価
5	(今回工認の) 二次評価	設計用地震力の増大により、支持装置に負荷される地震時荷重があらかじめ設定した設計上の基準値を超過した箇所に対して実施する評価	P. 17 4.3 今回工認に おける評価
6	新規耐力係数	構造部材の許容限界に対する定格荷重の裕度及び機能部品の耐力を考慮して設定した係数であって、定格荷重に乗じる係数	P. 17 4.3 今回工認に おける評価
7	新規基準値	・定格荷重に新規耐力係数を乗じて設定した今回工認の二次評価において適用する評価基準値	P. 1 1. はじめに
8	スナッパの機能	支持機能と動作機能の 2 つがあり、支持機能とは支持構造物として要求される構造強度及び動剛性、動作機能とは配管や機器の熱移動を拘束することなく追従する機能	P. 15 4.2 支持装置の 定格荷重
9	耐力試験	今回工認の二次評価において適用する新規基準値を設定するにあたり参照した既往研究等の耐力試験 【電力共同研究】 平成 12 年度 耐震設計に関する新知見に対する機器耐震評価法の研究 (Phase2) 【JNES 研究】 平成 21～22 年度 耐震機能限界試験 (スナバ) に係る報告書 【自社研究】 平成 21～22 年度 ロッドレストレイント耐力試験に係る報告書	P. 1 1. はじめに
10	確性試験	支持装置メーカーにおいて支持装置の基本性能を確認及び担保する目的で実施している試験	P. 15 4.2 支持装置の 定格荷重

No.	用語	定義	初出箇所
11	限界耐力評価法	<ul style="list-style-type: none"> ・電共研において策定された支持装置の限界耐力評価手法 ・支持装置を構成する荷重伝達経路上の構造部材の許容限界により定まる耐力並びに機能維持評価法及び座屈評価法等により機能部品の動作機能が担保された荷重のうち小さい方の値により定まる限界耐力値を用いて、地震時荷重に対する支持装置の健全性を評価する手法 	P. 23 4.3 今回工認における評価
12	動剛性	<ul style="list-style-type: none"> ・スナッパが地震時荷重を受ける際に支持構造物として持つ剛性であり、本資料においてはばね定数と同じ意味で用いる。 ・JNES研究においては、動ばね定数と記載されている。 	P. 15 4.2 支持装置の定格荷重
13	振動応答試験	<ul style="list-style-type: none"> ・スナッパを定格荷重が発生するよう一定の振動数で加振し、地震時荷重に対して要求される動剛性を示すことを確認する試験 ・電共研においては、振動試験と記載されている。 	P. 16 4.2 支持装置の定格荷重
14	過負荷振動試験	スナッパを定格荷重×1.5が発生するよう一定の振動数で加振し、地震時荷重に対して要求される動剛性を示すことを確認する試験	P. 16 4.2 支持装置の定格荷重
15	低速走行試験	スナッパのピストン部を配管や機器の熱膨張による変位発生時に想定される速度で移動させ、要求される抵抗力以下で追従できることを確認する試験	P. 16 4.2 支持装置の定格荷重
16	最大負荷荷重	機能喪失に至った荷重を除いた試験全体の中の最大荷重。(電共研及び自社試験)(図5-11参照)	P. 77 5.3 耐力試験において確認された限界耐力値に対する定格荷重の裕度の算出
17	耐力確認荷重	機能喪失する試験ケースを除いた試験ケースにおける最大荷重(電共研及び自社試験)(図5-11参照)	P. 25 4.3 今回工認における評価

No.	用語	定義	初出箇所
18	限界耐力値	<ul style="list-style-type: none"> ・スナップの破壊試験の結果を踏まえて必要に応じて補正した耐力評価式を用いて算出した机上計算による構造部材及び機能部品の耐力値，あるいはそれらの耐力値のうち支持装置全体での最小値 ・機能部品の限界耐力値については，試験結果に基づいて策定した耐力算出方法により算出する。 ・JNES研究においては耐力値と記載されている。 	<p>P. 1</p> <p>1. はじめに</p>
19	耐力評価式	支持装置の限界耐力値算出に用いる評価式であり，構造部材においては応力算出式と許容応力から各部材の限界耐力値を算出する評価式，機能部品においては試験の結果を踏まえて策定した評価式	<p>P. 25</p> <p>4.3 今回工認における評価</p>
20	ストローク	スナップのピストンが移動できる限界長さ	<p>P. 27</p> <p>4.3 今回工認における評価</p>
21	実際の耐力値	スナップが実際の破損又は機能喪失に至る直前の耐力値	<p>P. 77</p> <p>5.3 耐力試験において確認された限界耐力値に対する定格荷重の裕度の算出</p>
22	耐力評価手法	JNES研究において策定されたスナップの評価手法であり，電共研における限界耐力評価法に相当	<p>P. 25</p> <p>4.3 今回工認における評価</p>
23	予想耐力	スナップの限界耐力評価法を策定するために実施した電共研の破壊試験において，各構造部材に対してJEAG4601により定まる許容応力と各構造部材の構造に基づいて選定した耐力評価式を用いて，試験前に机上計算により算出した各部位の耐力値，あるいはそれら各構造部材の予想耐力のうちスナップ全体での最小値	<p>別紙 4-2</p> <p>3. スナップ限界耐力評価法の策定方針</p>
24	評価耐力	電共研において，公称応力により部位ごとに計算した予想耐力	<p>別紙 4-30</p> <p>4.5 破壊試験結果の考察 (図 3-1 フロー (8) ~ (10))</p>

No.	用語	定義	初出箇所
25	実耐力	応力算出式に含まれる裕度を取り除くとともに、使用材料のミルシート強度や構造を考慮して部位ごとに計算した実力ベースの耐力	別紙 4-30 4.5 破壊試験結果の考察 (図 3-1 フロー (8) ~ (10))
26	型式	支持装置の名称 (例: SMS-01, SMS-03 等)	P. 3 3.1 支持装置に要求される基本機能
27	基本型式	基本構造が同様となる型式の総称 (例: SMS, SHP 等)	P. 81 5.4 新規基準値の設定
28	破損荷重	支持装置を構成する部品のいずれかが試験により破損した時の荷重	別紙 4-66 添付-3 スナッパの耐力確認荷重における引張側と圧縮側の考え方

1. はじめに

本資料は、以下に示す図書について補足する図書である。

- ・VI-2-1-12「配管及び支持構造物の耐震計算について」

島根原子力発電所第2号機（以下「島根2号機」という。）の機器・配管系の支持構造物の設計にあたっては、原子力発電所耐震設計技術指針（重要度分類・許容応力編 J E A G 4 6 0 1・補-1984, J E A G 4 6 0 1-1987 及び J E A G 4 6 0 1-1991 追補版）（(社)日本電気協会）（以下「J E A G 4 6 0 1」という。）にしたがい、地震時荷重に対して十分な強度を持たせた耐震設計としている。

機器・配管系の支持構造物のうち支持装置に分類されるメカニカルスナッパ、オイルスナッパ及びロッドレストレイントは、J E A G 4 6 0 1の直接支持構造物に該当するため、強度評価によって支持機能を評価する。

既工認における耐震設計では、J E A G 4 6 0 1を踏まえ、メカニカルスナッパ及びオイルスナッパについては、あらかじめ計算により定格荷重*1 及び定格荷重×1.5 に対する各構成部品の応力を求めて許容応力状態ⅢA S 及び許容応力状態ⅣA S の許容限界を満足することを確認していることから、定格荷重及び定格荷重×1.5 を設計上の基準値として定め、メカニカルスナッパ及びオイルスナッパに負荷される地震時荷重と比較することによって耐震性を確認している。ロッドレストレイントについては、あらかじめ計算により定格荷重及び定格荷重×1.2 に対する各構成部品の応力を求めて許容応力状態ⅢA S 及び許容応力状態ⅣA S の許容限界を満足することを確認していることから、定格荷重及び定格荷重×1.2 を設計上の基準値として定め、ロッドレストレイントに負荷される地震時荷重と比較することによって耐震性を確認している。

今回工認の支持装置の耐震設計においても、既工認同様、あらかじめ設定した設計上の基準値を評価基準値として適用することを基本とする。ただし、あらかじめ設定した設計上の基準値は J E A G 4 6 0 1 に規定の許容限界及び耐力試験*2 において確認された限界耐力値*3 に対して十分な裕度を有していることから、設計用地震力が増大したことにより支持装置に負荷される地震時荷重があらかじめ設定した設計上の基準値を超える場合は、J E A G 4 6 0 1 に規定の許容限界及び耐力試験において確認された限界耐力値を踏まえて新たに設定した新規基準値*4 を評価基準値として適用する。

注記*1：用語の定義 No. 3 参照

*2：用語の定義 No. 9 参照

*3：用語の定義 No. 18 参照

*4：用語の定義 No. 7 参照

2. 適用範囲

島根2号機の機器・配管系に設置する支持装置のうちメカニカルスナッパ、オイルスナッパ及びロッドレストレイントとし、設計用地震力の増大により地震時荷重があらかじめ設定した設計上の基準値を超える場合に新規基準値を適用した評価を実施する。

3. 支持装置の構造及び作動原理

3.1 支持装置に要求される基本機能

支持装置は、被支持体である配管系の設計において要求される機能に応じて、適切となる型式*等を選定し、設置される。本資料の適用範囲であるメカニカルスナッパ、オイルスナッパ及びロッドレストレイントに要求される基本機能を表 3-1 に示す。

表 3-1 支持装置の基本機能

支持装置	プラント通常運転時	地震時
メカニカルスナッパ	配管の熱膨張のような緩やかな配管移動は拘束しない機能	地震時に発生する配管変位のような急速な配管移動は拘束する機能
オイルスナッパ		
ロッドレストレイント	配管変位を拘束する機能	

注記*：用語の定義 No. 26 参照

3.2 メカニカルスナッパ

(1) 構造

メカニカルスナッパは、プラント運転時に熱膨張が発生する高温配管の耐震用の支持装置として、地震時に発生する配管変位のような急速な配管移動は拘束するが、配管の熱膨張のような緩やかな配管移動は拘束しない機能を持った製品である。図 3-1 にメカニカルスナッパの構造概要を示す。また、メカニカルスナッパの外観を図 3-2 に示す。

メカニカルスナッパは、ボールねじ、ボールナット等にて配管移動を回転運動に変換し、入力加速度が小さい（緩やかな配管移動）場合は小さな抵抗力で自由に移動するが、入力加速度が大きい（急速な配管移動）場合は大きな抵抗力が発生して配管を拘束する機構を有しており、配管移動拘束時に発生する荷重（配管反力）を支持するための構造部材*1 及び配管移動に追従するための機能部品*2 としての役割を持った部品等で構成されている。

支持機能としては、後述のオイルスナッパと同一の機能を有しているが、オイルスナッパは作動油及びそのシール材が必要であることに対し、メカニカルスナッパはそれらが不要となる特徴を有しており、主たる点検項目であるシール性に対する点検が不要であることから、メカニカルスナッパはオイルスナッパと比較してメーカーにて推奨される点検頻度が少ない。また、全て機械的な部品で構成されていることから、放射線により性能が変化する心配がない。一方で、オイルスナッパは比較的小さいため、設置性に優れる等の特徴があり、これらを総合的判断し、メカニカルスナッパとオイルスナッパを使い分ける。

注記*1：用語の定義 No.1 参照

*2：用語の定義 No.2 参照

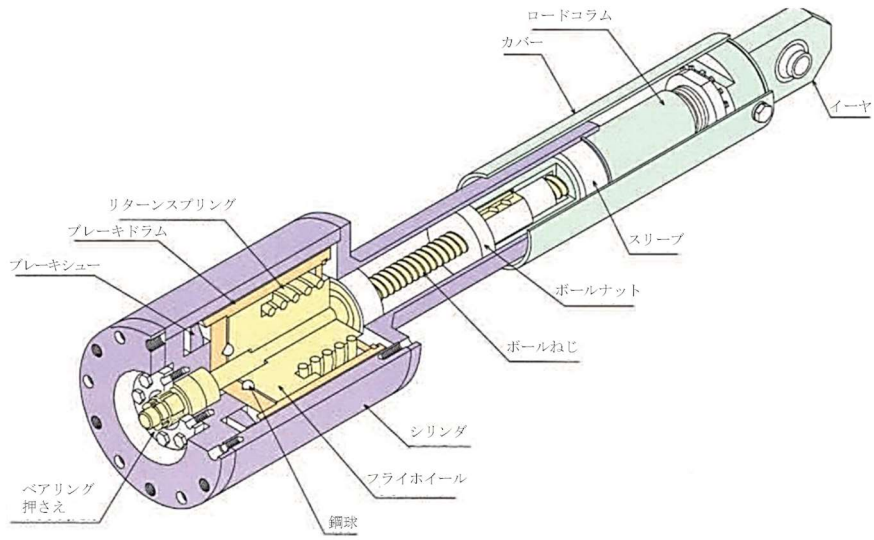


図 3-1 メカニカルスナッパの構造概要



図 3-2 SMS 型メカニカルスナッパの外観

(2) 作動原理

メカニカルスナッパの作動原理の概要を図3-3に示す。また、ボールねじ及びボールナット部の概要図を図3-4に示す。メカニカルスナッパの作動原理は、ボールナットの往復運動に対して、ボールナット内部でボールねじのねじ溝に沿ってボールが循環することで、ボールねじを介してフライホイールの回転運動に変換することが基本原理である。ボールナットに往復運動（振動）が加わると、ボールねじは回転を開始しようとするが、フライホイールの慣性によって回転が阻止されるため、ボールナットは往復運動ができずに外力に抵抗する荷重が発生する。

外力に抵抗する荷重（抵抗力）は以下の式で表される。

$$F = M \cdot \alpha$$

ここで、

F：抵抗力

M：フライホイール質量

α ：加速度

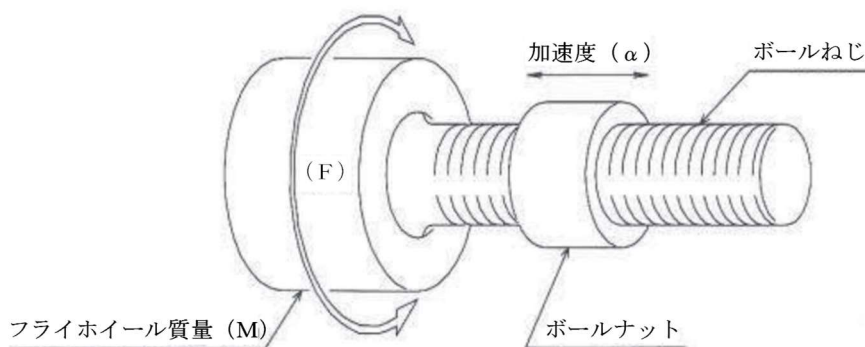


図3-3 メカニカルスナッパの作動原理

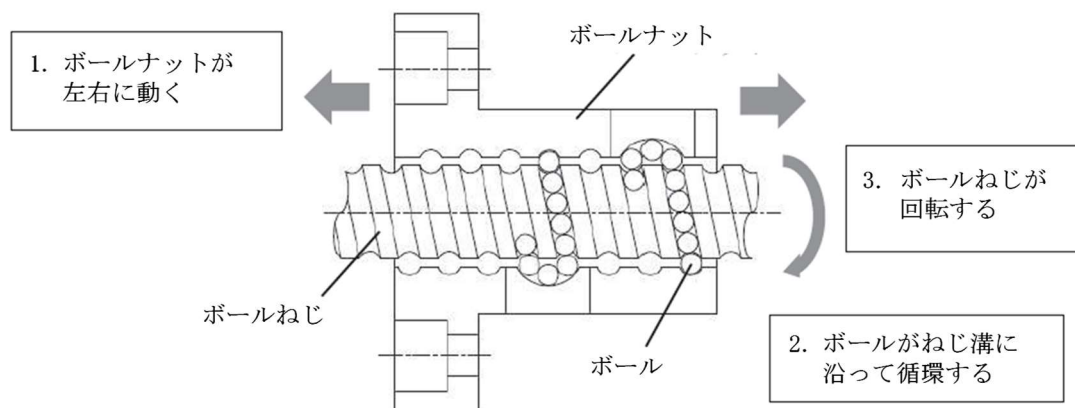


図3-4 ボールねじ及びボールナット部の概要図

また、メカニカルスナップの動作の様子を図 3-5 に示す。入力加速度が小さい（緩やかな配管移動）場合は、メカニカルスナップの軸方向に作用した力は、ボールねじによってシリンダ内のフライホイールの回転運動に変換されるとともに、メカニカルスナップ全体が伸縮する。

入力加速度が大きい（急速な配管移動）場合は、フライホイールの回転慣性が抵抗となって支持機能が発揮され、メカニカルスナップ全体の伸縮も拘束される。



図 3-5 メカニカルスナップの動作の様子

3.3 オイルスナッパ

(1) 構造

オイルスナッパは、メカニカルスナッパと同様に、プラント運転時に熱膨張が発生する高温配管の耐震用の支持装置として、地震時に発生する配管変位のような急速な配管移動は拘束するが、配管の熱膨張のような緩やかな配管移動は拘束しない機能を持った製品である。図 3-6 にオイルスナッパの構造概要を示す。また、オイルスナッパの外観を図 3-7 及び図 3-8 に示す。

オイルスナッパは、作動油が充填されたシリンダ、ピストンロッド等にて配管移動を作動油の流体抗力に変換し、入力速度が小さい（緩やかな配管移動）場合は小さな抵抗力で自由に移動するが、入力速度が大きい（急速な配管移動）場合は大きな抵抗力が発生して配管を拘束する機構を有しており、配管移動拘束時に発生する荷重（配管反力）を支持するための構造部材及び配管移動に追従するための機能部品としての役割を持った部品等で構成されている。

なお、本資料で示すオイルスナッパは SHP 型オイルスナッパ（旧型）と SN 型オイルスナッパ（新型）の 2 種類あるが、SHP 型オイルスナッパは作動油の流路及びオイルリザーバ（油タンク）が外付けの構造となり、SN 型オイルスナッパでは本体に内蔵する構造が採用されている。また、SN 型オイルスナッパではシール材を金属シールに変更することで、シール性を向上させている。具体的な構造の比較を図 3-9 に示す。

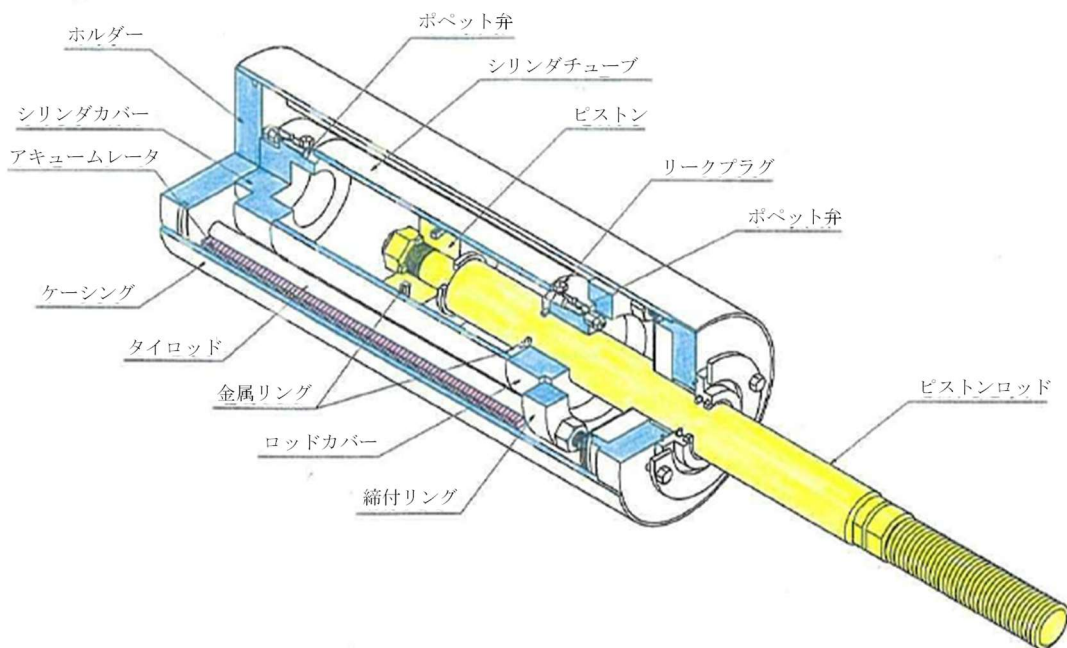


図 3-6 オイルスナッパの構造概要



図 3-7 SHP 型オイルスナッパの外観

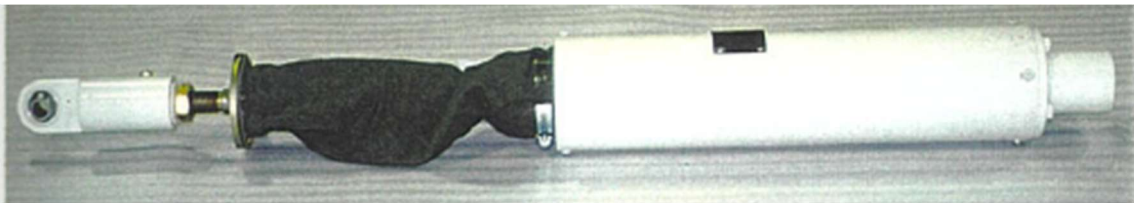


図 3-8 SN 型オイルスナッパの外観

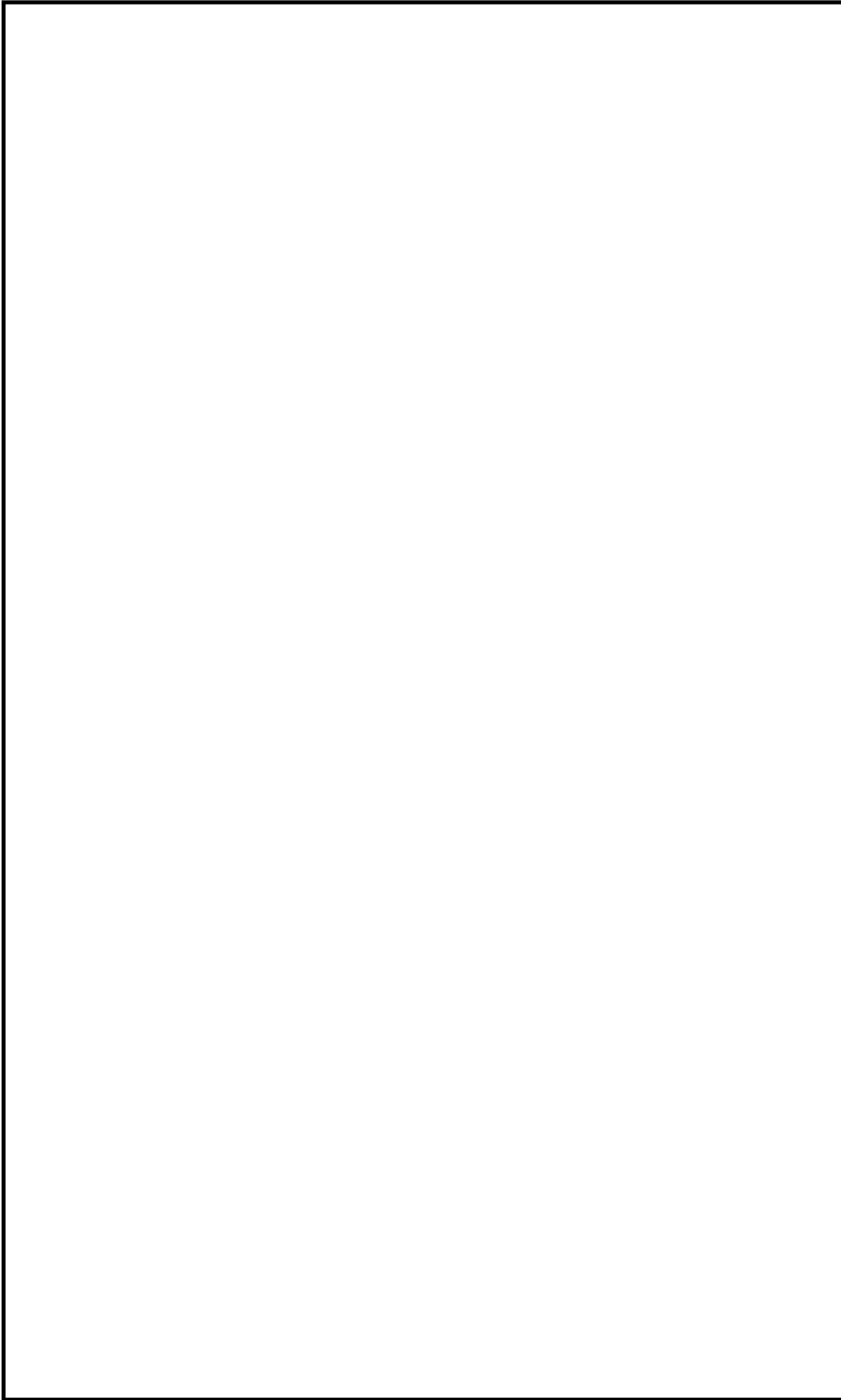


図 3-9 オイルスナツバの構造比較

(2) 作動原理

オイルスナップの作動原理の概要を図 3-10 に示す。また、シリンダ内におけるピストンロッド及びポペット弁の概要図を図 3-11 に示す。オイルスナップの作動原理は、ピストンロッドの往復運動に対して、シリンダ内部に設置されるポペット弁に生じる流体抗力を弁の開動作に変換することが基本原理である。図 3-11 に示すとおり、ポペット弁は通常開状態となるよう弁体をばねにより押し上げた状態で構成されており、配管熱膨張程度の緩やかなピストンロッドの移動では、弁体に生じる流体抗力が小さいことから、ポペット弁が開状態で維持されるため、ピストンロッドが移動可能な状態が維持される。一方で、地震時にみられる急速なピストンロッドの移動では、ポペット弁に生じる流体抗力がばね反力に打ち勝って、弁が閉じることで、ピストンロッドが往復運動ができずに外力に抵抗する荷重が発生する。

なお、表 3-1 に示すオイルスナップの基本機能に直接関係するものではないが、ピストンの振動により作動油内に生じたポペット弁近傍の気泡の除去や、地震等によりポペット弁が閉じた後でも、配管熱膨張に追従できるようにすることを目的としたリーク穴が設けられている。

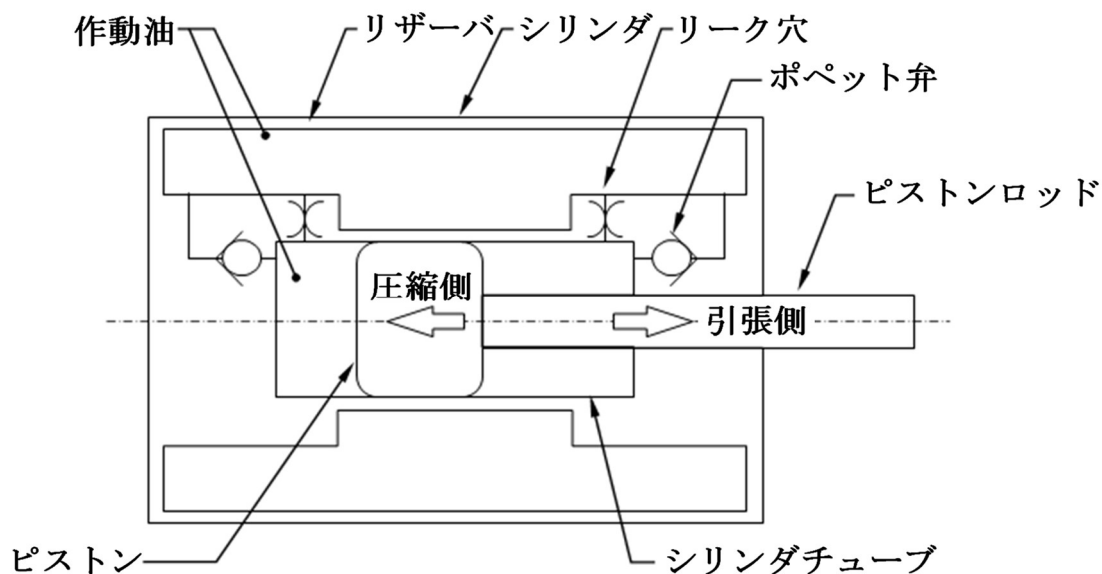


図 3-10 オイルスナップの作動原理

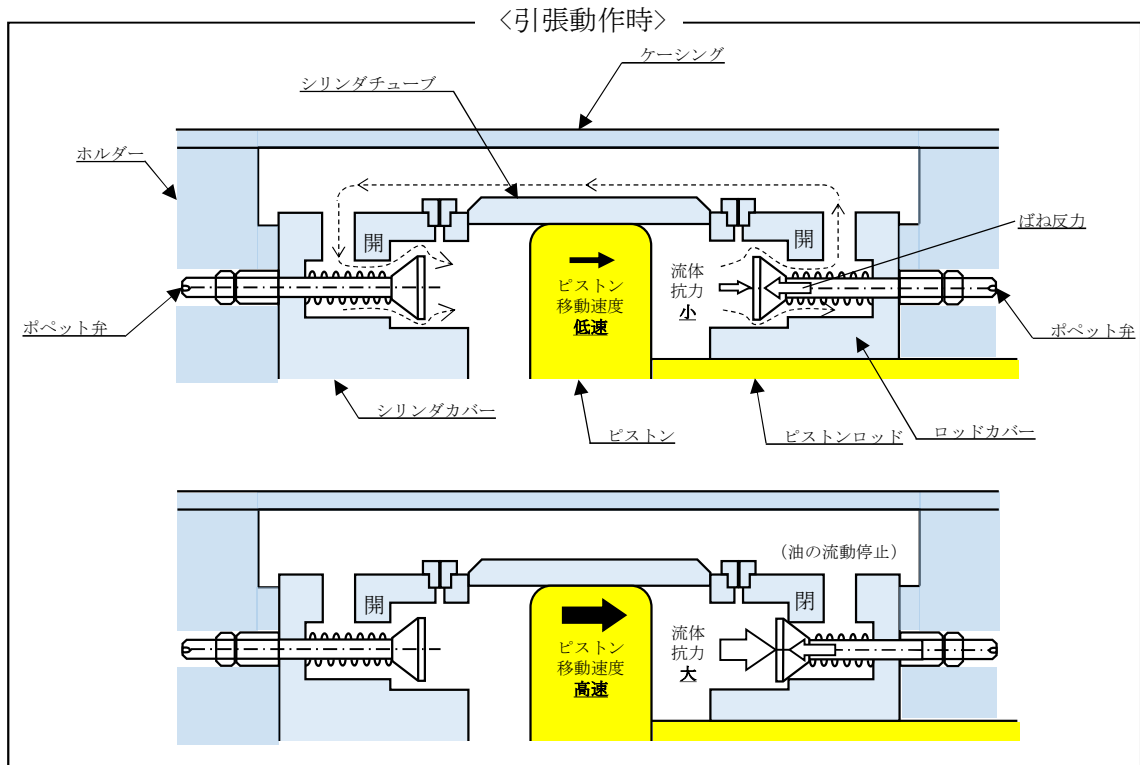


図 3-11 シリンダ内におけるピストンロッド及びポペット弁の概要図

3.4 ロッドレストレイント

ロッドレストレイントは、配管の耐震用の支持装置として、配管変位を拘束する機能を持った製品である。図 3-12 にロッドレストレイントの構造概要を示す。また、オイルスナップバの外観を図 3-13 及び図 3-14 に示す。

ロッドレストレイントは、メカニカルスナップバやオイルスナップバとは異なり、機能部品から構成される動的機構を有しておらず、地震時に発生する配管変位のような急速な配管移動に加え、配管の熱膨張のような緩やかな配管移動も拘束する。

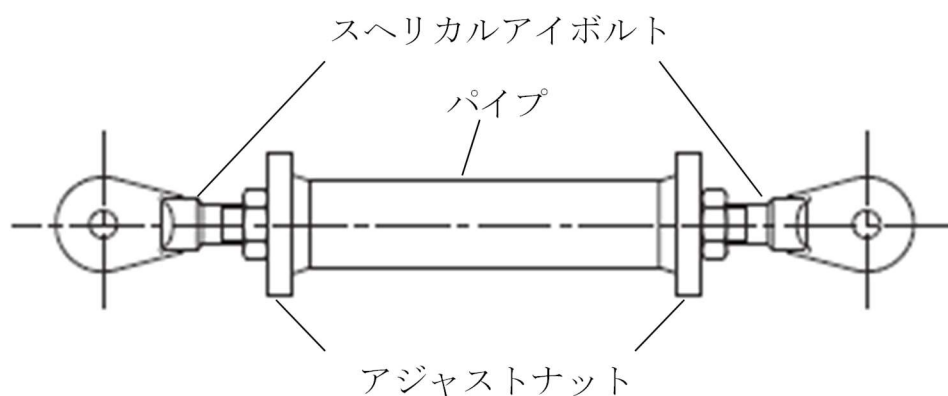


図 3-12 ロッドレストレイントの構造概要



図 3-13 RSA 型ロッドレストレイントの外観



図 3-14 RTS 型ロッドレストレイントの外観

4. 支持装置の耐震設計

4.1 既工認における評価

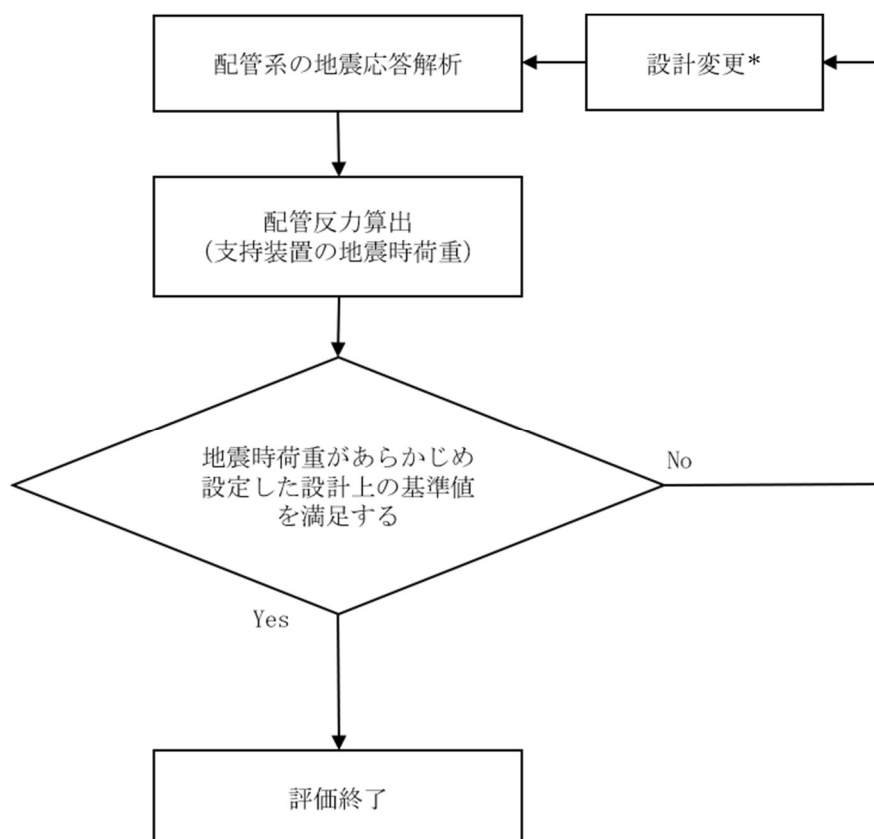
既工認における支持装置の評価手順を図 4-1 に示す。

既工認における支持装置の耐震評価では、支持装置に対する荷重による評価として、配管系の地震応答解析から算出された支持装置に負荷される配管反力（地震時荷重）が、あらかじめ設定した設計上の基準値を満足していることを確認している。

ここで、あらかじめ設定した設計上の基準値とは、支持装置に対する荷重による評価における評価基準値に相当するものであり、評価基準値に対する支持装置の強度評価として、各構造部材の応力が J E A G 4 6 0 1 に規定の許容応力状態Ⅲ_AS 及び許容応力状態Ⅳ_AS の許容限界を満足することを確認している。

支持装置の耐震設計に係る技術基準及び適用規格については、4.3.2 に詳細を記載している。

なお、支持装置に対して J E A G 4 6 0 1 に規定の強度評価を行う場合、構造部材ごとに評価を実施する必要があるが、評価作業の合理化を目的として、既工認の評価においてはあらかじめ設定した設計上の基準値を用いた評価を実施している。



注記*：支持装置を含む支持構造物の追設，容量変更，位置変更等

図 4-1 既工認における支持装置の評価手順

4.2 支持装置の定格荷重

支持装置は、支持装置メーカーによる構造部材及び機能部品の市場調達性、製作性等を考慮して標準化された製品であり、製造設計にあたって設定する定格荷重は、構造部材の許容限界や機能部品の限界耐力値に対して十分に余裕のある設計となっている。

支持装置の製造設計では、定格荷重を用いて構造部材の構造強度が J E A G 4 6 0 1 に規定の直接支持構造物の許容限界を十分満足し、定格荷重に対して余裕のある設計であることを確認している。

したがって、荷重による評価として、支持装置の地震時荷重が定格荷重を踏まえてあらかじめ設定した設計上の基準値を満足する場合、構造部材ごとに評価を実施しなくても各評価部位の応力が J E A G 4 6 0 1 に規定の許容限界を満足することになる。

また、機能部品を有しているメカニカルスナッパ及びオイルスナッパについては、スナッパの機能*1確認試験として、表 4-1 に示す確性試験*2によって地震時荷重に対して想定される動剛性*3を発揮できること、配管の熱変位に対して抵抗なく追従できること、使用環境で機能を発揮できること等を確認している。確性試験の詳細については、別紙 1 に示す。

注記*1：用語の定義 No. 8 参照

*2：用語の定義 No. 10 参照

*3：用語の定義 No. 12 参照

表 4-1 メカニカルスナップ及びオイルスナップ確性試験の概要

要求機能	試験項目	試験内容
耐震性	振動応答試験* ¹ (定格荷重)	定格荷重, 定格荷重×1.5が発生する変位で加振し, 地震時荷重に対して要求される動剛性を有していることを確認する。
	過負荷振動試験* ² (定格荷重×1.5)	
	低速走行試験* ³	ピストン部を熱膨張による変位時に想定される速度で移動させ, 配管の熱変位に対して抵抗なく追従できることを確認する。
	リリース試験又はブリードレート試験* ⁴	熱移動を想定した速度での移動時に, 拘束力が生じる変位を与え, ブレーキ機構が作動した後も, スティックせずに熱移動に追従することを確認する。
耐震性以外	その他環境試験* ⁵	高温, 高湿度, 放射線照射時等の環境状態で機能が維持されることを確認する。

注記*1: 用語の定義 No. 13 参照

*2: 用語の定義 No. 14 参照

*3: 用語の定義 No. 15 参照

*4: 熱変位を想定した緩やかな変位を与えているところに, 地震を想定した素早い変位を与えることで, 地震によりブレーキ機構が作動した後の熱移動への追従を確認するものである。メカニカルスナップにおいてはリリース試験, オイルスナップにおいてはブリードレート試験と呼ぶ。

*5: 各環境試験後に振動試験及び低速走行試験を実施する。

4.3 今回工認における評価

4.3.1 評価手順

今回工認における支持装置の評価手順を図4-2に示す。

今回工認における支持装置の耐震評価では、一次評価*¹として既工認と同様、地震応答解析から算出された配管反力（地震時荷重）があらかじめ設定した設計上の基準値以下であることを確認する。

支持装置の地震時荷重があらかじめ設定した設計上の基準値を超過する場合は、二次評価*²として、今回工認において新たに設定した新規基準値以下であることを確認する。

今回工認の二次評価において適用する新規基準値は、以下の手順で設定する。
なお、新規基準値設定の詳細は、「5. 今回工認の二次評価において適用する新規基準値の設定」に示す。

・メカニカルスナッパ及びオイルスナッパ：

荷重伝達経路を踏まえて抽出した評価部位及び評価項目について、J E A G 4 6 0 1に規定の許容限界及び耐力試験において確認された限界耐力値に対する定格荷重の裕度の最小値以下となる新規耐力係数*³を設定し、定格荷重に乗ることにより、新規基準値を設定する。

・ロッドレストレイント：

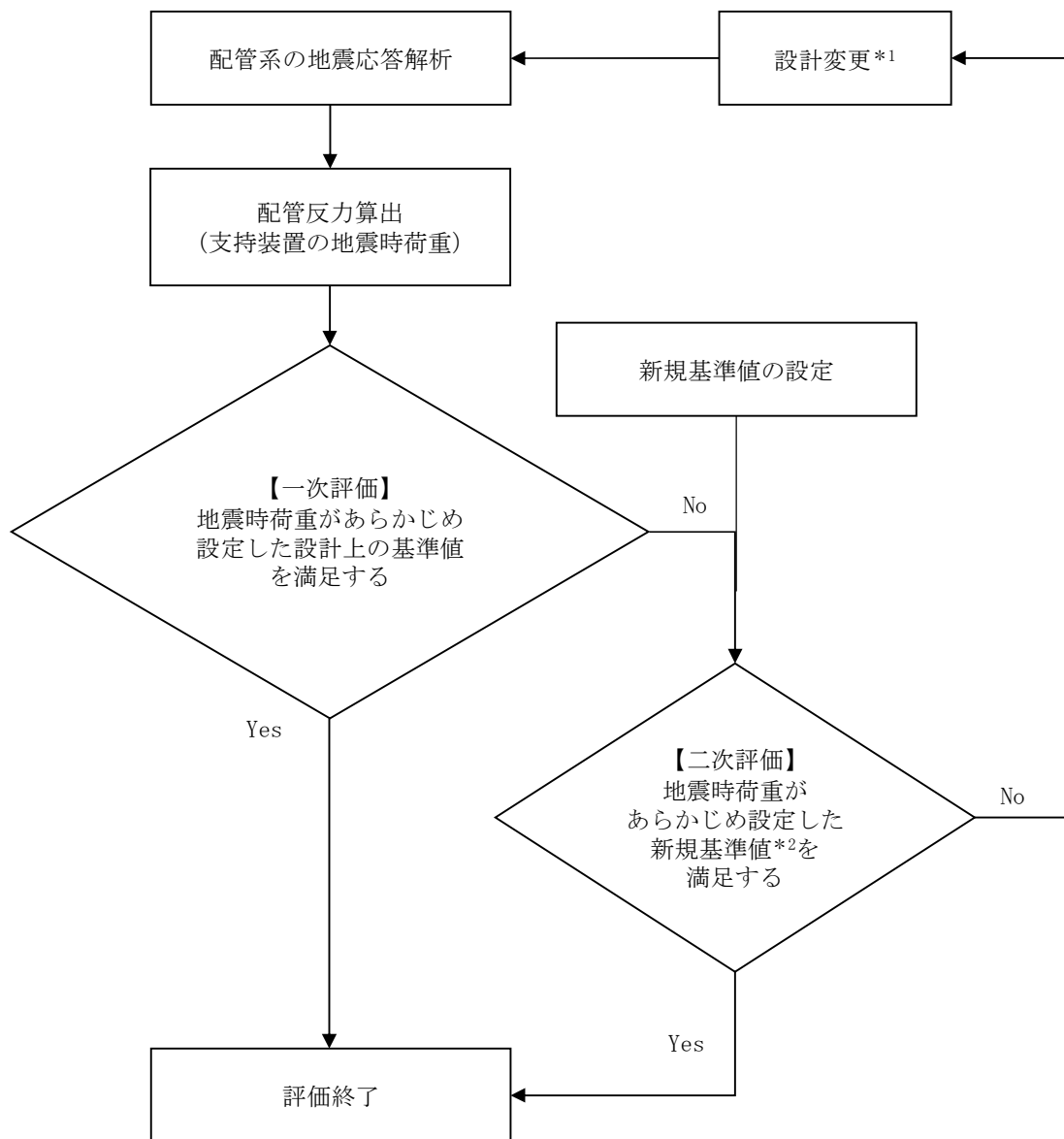
荷重伝達経路を踏まえて抽出した評価部位及び評価項目について、J E A G 4 6 0 1に規定の許容限界値に対する定格荷重の裕度の最小値以下となる新規耐力係数を設定し、定格荷重に乗ることにより、新規基準値を設定する。

今回工認における支持装置の耐震評価として、上記の一次評価及び二次評価を実施し、支持装置の耐震性を担保する。

注記*1：用語の定義 No. 4 参照

*2：用語の定義 No. 5 参照

*3：用語の定義 No. 6 参照



注記*1：支持装置を含む支持構造物の追設，容量変更，位置変更等

*2：J E A G 4 6 0 1 に規定の許容限界及び耐力試験において確認された限界耐力値を踏まえて設定した値（設定の詳細は「5. 今回工認の二次評価において適用する新規基準値の設定」に示す。）

図 4-2 今回工認における支持装置の評価手順

4.3.2 支持装置の耐震設計に係る技術基準及び適用規格

支持装置の耐震設計に係る技術基準及び適用規格の概要を図4-3に示すとともに、該当部の抜粋を別紙2に示す。

機器・配管系の支持構造物である支持装置は、実用発電用原子炉及びその附属施設の技術基準に関する規則の第5条（地震による損傷の防止）に基づき、「施設の機能を維持していること又は構造強度を確保していること」が要求される。

支持装置の耐震設計では、J E A G 4 6 0 1の直接支持構造物に該当し、支持装置の構造部材の強度評価が求められるため、配管から伝達される荷重（配管反力）に対する支持装置の発生応力がJ E A G 4 6 0 1に規定の許容限界を満足することを確認する。

J E A G 4 6 0 1では、機器・配管系の強度評価は応力計算を行って許容応力と比較することを基本としているが、機能維持上の評価が必要な場合は試験による設計も可能であること、強度評価における許容限界内にあることの確認では、荷重による評価として、あらかじめ計算により求めた標準荷重等や試験で確認した許容荷重を用いる場合があると記載されている。

なお、VI-2-1-12「配管及び支持構造物の耐震計算について」における支持構造物の種別に対する評価方法の一覧を表4-2に示す。

実用発電用原子炉及びその附属施設の技術基準に関する規則

- ・実用発電用原子炉及びその附属施設の技術基準に関する規則及びその解釈第5条（地震による損傷の防止）
「施設の機能を維持していること又は構造強度を確保していること」

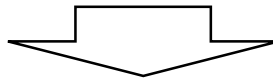
J E A G 4 6 0 1

J E A G 4 6 0 1 ・ 補-1984

- ・耐震支持装置は「直接支持構造物」に該当する
- ・構造部材に対する強度評価が求められる。

J E A G 4 6 0 1-1987

- ・機器・配管系の耐震評価（応力が許容限界内であること）は解析による設計を基本とする。
- ・機能維持上の評価が必要な場合は試験による設計もできる。
- ・許容限界内にあることの確認はあらかじめ計算により求めた標準荷重（定格荷重等に相当）を用いる場合等がある。



支持装置の耐震評価

【既工認及び今回工認における一次評価】

- ・あらかじめ計算により求めた標準荷重による評価を適用し，地震時荷重があらかじめ設定した設計上の基準値を満足すること

【今回工認における二次評価】

- ・J E A G 4 6 0 1 に規定の許容限界及び耐力試験において確認された限界耐力値を踏まえて設定した新規基準値を満足すること

図 4-3 支持装置の耐震設計に係る技術基準及び適用規格の概要

表 4-2 今回工認における支持構造物の評価方法

No.	種別		評価方法	評価方法の選定理由
1	メカニカルスナッパ		定格荷重評価（一次評価）及び新たに設定した許容荷重による評価（二次評価）	左記支持構造物は定格荷重等を標準荷重として設計される製品であるため、荷重による評価を行う。
2	オイルスナッパ			
3	ロッドレストレイント			
4	スプリングハンガ		定格荷重評価	
5	コンスタントハンガ			
6	リジットハンガ			
7	粘性ダンパ		使用荷重	
8	レストレイント	ラグ	Ⅲ _A S/Ⅳ _A S評価	支持構造物に応じた耐震設計とし、各構造部材の強度評価を行う。
9		Uボルト		
10		支持架構		
11		埋込金物		

4.3.3 既工認と今回工認の差異

支持装置に対する既工認の評価及び今回工認における評価は、図 4-1 及び図 4-2 のとおり、荷重による評価として、支持装置の地震時荷重があらかじめ設定した設計上の基準値を満足できなかった場合の扱いが異なる。

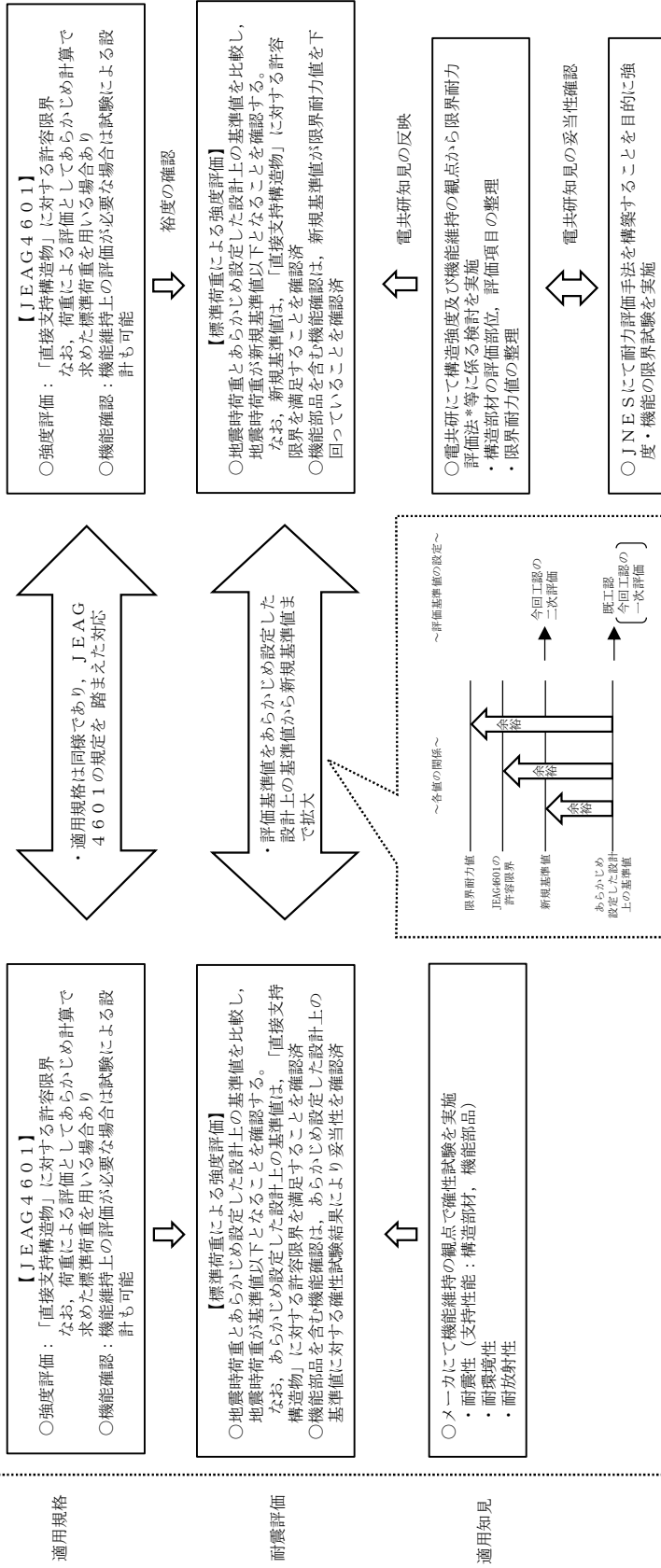
既工認では、即座に設計変更へ移行することに対して、今回工認においては、あらかじめ設定した設計上の基準値に余裕があること及び耐力試験において確認された限界耐力値を踏まえて、新規基準値による二次評価を適用し、支持装置の耐震性を確認することである。なお、二次評価を満足しない場合は、設計変更を行う。

二次評価における新規基準値の設定にあたっては、J E A G 4 6 0 1 に規定の許容限界及び耐力試験において確認された限界耐力値を踏まえて、支持装置の構造部材の強度評価及び機能部品を含む機能確認に係る内容を検討した。

既工認と今回工認の評価方法の差異を表 4-3 に示し、既工認及び今回工認の評価基準値に係る考え方を図 4-4 に示す。

表 4-3 既工認と今回工認の評価方法の差異

No.	種別		評価方法	
			既工認	今回工認
1	メカニカルスナッパ		定格荷重評価	定格荷重評価（一次評価）及び新たに設定した許容荷重による評価（二次評価）
2	オイルスナッパ			
3	ロッドレストレイント			
4	スプリングハンガ			
5	コンスタントハンガ			
6	リジットハンガ			
7	粘性ダンパ		—	使用荷重
8	レストレイント	ラグ	ⅢA S /ⅣA S 評価	同左
9		Uボルト		
10		支持架構		
11		埋込金物		



注記*：用語の定義 No. 11 参照

図 4-4 既工認及び今回工認の評価基準値に係る考え方

4.3.4 電力共同研究の知見の今回工認への適用の妥当性

今回工認の二次評価における新規基準値の設定にあたっては、耐力試験を実施した、「平成 12 年度 共同研究報告書 耐震設計に関する新知見に対する機器耐震評価法の研究(Phase2)」(以下「電共研」という。)の知見を適用した。電共研の詳細を別紙 4 に示す。

電共研では、メカニカルスナッパ及びオイルスナッパの振動試験として「スナッパ機能維持評価法のための破壊試験」を実施しており、その試験結果を使用して構造強度及び機能維持の観点から限界耐力評価法を策定している。

今回工認の二次評価においては、機能部品を含むメカニカルスナッパ及びオイルスナッパの機能確認として、電共研において策定された振動試験及び低速走行試験の結果に基づく限界耐力値を適用することとした。なお、電共研の知見の適用にあたり、確性試験や第三者機関による研究成果との比較等により妥当性を検討した結果、今回工認の支持装置の二次評価において適用する新規基準値の設定に対して、電共研の知見を適用することは妥当であることを確認した。妥当性確認結果を以下に示す。また、ロッドレストレイントについては、電共研及び後述の J N E S 研究における試験条件を踏まえた耐力試験を実施し、新規基準値の設定の妥当性を確認している。詳細を別紙 7 に示す。

(1) 試験項目の妥当性

電共研においては、機能部品を含むメカニカルスナッパ及びオイルスナッパの機能確認として、耐震性の観点から振動試験及び低速走行試験にて行うこととしているが、これらの試験項目について、確性試験における試験項目と比較を実施し、妥当性を検討した。検討結果を表 4-4 に示す。検討の結果、電共研の試験項目は妥当であることを確認した。

(2) 試験条件の妥当性

電共研については、限界耐力値の策定に関する振動試験及び低速走行試験の試験条件が、確性試験と同様であるとともに、島根 2 号機の設計仕様と整合するため、新規基準値の設定に適用することは妥当であることを確認した。試験条件と島根 2 号機の設計仕様の比較結果を表 4-5 に示す。また、表 4-5 の記載内容の詳細については別紙 4 に示す。

(3) 試験結果の妥当性

電共研の試験結果の妥当性確認のため、第三者機関による検討事例である、「J N E S 平成 21~22 年度 耐震機能限界試験 (スナッパ) に係る報告書」(以

下「JNES研究」という。)との比較を実施した。JNES研究の概要及び電共研との比較結果の詳細を別紙5に示す。

JNES研究では、メカニカルスナップ及びオイルスナップの耐力評価手法^{*1}を策定することを目的として、地震に対する強度・機能の限界値を試験で確認しており、振動応答試験及び低速走行試験にて耐力確認荷重^{*2}が得られている。

電共研で策定された試験結果に基づく限界耐力値が妥当であることの検証として、JNES研究における一連の検討プロセスが電共研と同様であること、試験条件が同等であること、及び試験結果より得られた耐力確認荷重に対して耐力評価式^{*3}を用いて設定した限界耐力値が同等であることを確認した。電共研とJNES研究における限界耐力値（JNES研究では耐力値と記載）及び耐力確認荷重の比較を表4-6に示す。

注記*1：用語の定義 No. 22 参照

*2：用語の定義 No. 17 参照

*3：用語の定義 No. 19 参照

表 4-4 新規基準値設定に対する各試験項目の適用要否

確性試験の項目	確認内容	新規基準値設定にあたっての適用要否	電共研
振動応答試験 過負荷振動試験	所定の地震時荷重に対して想定される動剛性であること	要	振動試験
低速走行試験	配管の熱変位に追従すること	要	低速走行試験 (振動試験後)
レリーズ試験 又はブリード レート試験*1	地震時荷重を受けてブレーキ機構が働いた後で、配管の熱移動に追従すること	不要 (地震条件と熱条件の重畳の影響は考慮不要のため*2)	—
その他環境試験等	その他環境条件等で健全であること	不要 (環境条件等に変更がないため)	—

注記*1：熱変位を想定した緩やかな変位を与えているところに、地震を想定した素早い変位を与えることで、地震によりブレーキ機構が作動した後の熱移動への追従を確認するものである。メカニカルスナップにおいてはレリーズ試験、オイルスナップにおいてはブリードレート試験と呼ぶ。地震後の熱移動への追従性は、本試験ではなく振動試験後の低速走行試験によって確認する。

*2：本試験の変位速度（2mm/sec～4mm/sec）に比べて、原子力プラントの温度変化条件による変位速度は十分に小さいため、速度の大きい熱変位と地震の重畳による影響確認を目的とした本試験は実施不要と考えられる。確性試験時は、一般産業向け製品と同等の条件にて性能確認を行っているため、本試験も実施している。

表 4-5 電共研における試験条件と島根 2 号機的设计仕様の比較

項目	電共研 試験条件	島根 2 号機 設計仕様	比較結果																												
加振波	正弦波	ランダム波	ランダム波では最大振幅の負荷は限定的だが、正弦波では最大振幅が繰り返し負荷されるため、試験側が保守的な設定である。																												
加振振動数	9Hz	10Hz 前後	同様																												
加振時間	10 秒程度	数十から百秒未満	継続時間は試験側が短い、正弦波入力により試験側の負荷が保守的な設定である。																												
振動試験の 判定基準	動剛性	動剛性	相違なし(具体的には以下基準を満足すること) <div style="display: flex; justify-content: space-around;"> <div style="text-align: center;"> <p>・メカニカルスナッパ</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>型式</th> <th>動剛性 (kgf/mm)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>SMS-03</td><td></td></tr> <tr><td>SMS-1</td><td></td></tr> <tr><td>SMS-3</td><td></td></tr> <tr><td>SMS-6</td><td></td></tr> <tr><td>SMS-10</td><td></td></tr> </tbody> </table> </div> <div style="text-align: center;"> <p>・オイルスナッパ</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>型式</th> <th>動剛性 (kgf/mm)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>SHP-03</td><td></td></tr> <tr><td>SHP-3</td><td></td></tr> <tr><td>SHP-16</td><td></td></tr> <tr><td>SN-03</td><td></td></tr> <tr><td>SN-3</td><td></td></tr> <tr><td>SN-6</td><td></td></tr> <tr><td>SN-16</td><td></td></tr> </tbody> </table> </div> </div>	型式	動剛性 (kgf/mm)	SMS-03		SMS-1		SMS-3		SMS-6		SMS-10		型式	動剛性 (kgf/mm)	SHP-03		SHP-3		SHP-16		SN-03		SN-3		SN-6		SN-16	
型式	動剛性 (kgf/mm)																														
SMS-03																															
SMS-1																															
SMS-3																															
SMS-6																															
SMS-10																															
型式	動剛性 (kgf/mm)																														
SHP-03																															
SHP-3																															
SHP-16																															
SN-03																															
SN-3																															
SN-6																															
SN-16																															
加振開始位置	ストローク 1/2 (中央)	ストローク 1/2 (中央)	相違なし。加振はストローク*1/2 の位置で開始する。																												
低速走行試験 の試験速度	2.1 (+0, - 0.5) mm/sec	10 ⁻³ から 10 ⁻² mm/sec 程度	試験側の速度が大きく、保守的な設定である。																												
低速走行試験 の判定基準	抵抗値	抵抗値	相違なし(具体的には以下基準を満足すること) <div style="display: flex; justify-content: space-around;"> <div style="text-align: center;"> <p>・メカニカルスナッパ</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>型式</th> <th>抵抗力 (kgf)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>SMS-03</td><td></td></tr> <tr><td>SMS-1</td><td></td></tr> <tr><td>SMS-3</td><td></td></tr> <tr><td>SMS-6</td><td></td></tr> <tr><td>SMS-10</td><td></td></tr> </tbody> </table> </div> <div style="text-align: center;"> <p>・オイルスナッパ</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>型式</th> <th>抵抗力 (kgf)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>SHP-03</td><td></td></tr> <tr><td>SHP-3</td><td></td></tr> <tr><td>SHP-16</td><td></td></tr> <tr><td>SN-03</td><td></td></tr> <tr><td>SN-3</td><td></td></tr> <tr><td>SN-6</td><td></td></tr> <tr><td>SN-16</td><td></td></tr> </tbody> </table> </div> </div>	型式	抵抗力 (kgf)	SMS-03		SMS-1		SMS-3		SMS-6		SMS-10		型式	抵抗力 (kgf)	SHP-03		SHP-3		SHP-16		SN-03		SN-3		SN-6		SN-16	
型式	抵抗力 (kgf)																														
SMS-03																															
SMS-1																															
SMS-3																															
SMS-6																															
SMS-10																															
型式	抵抗力 (kgf)																														
SHP-03																															
SHP-3																															
SHP-16																															
SN-03																															
SN-3																															
SN-6																															
SN-16																															

注記* : 用語の定義 No. 20 参照

表 4-6 電共研の限界耐力値と J N E S 研究における耐力値及び耐力確認荷重との比較 (メカニカルスナツバ) (1/3)

型式	定格荷重 (kN)	電共研				J N E S 研究				J N E S 耐力値 / 電共研限界耐力値 [D/B]
		耐力確認荷重 (kN) [A]	限界耐力値 (kN) [B]	最小裕度部品	最小裕度部品の分類	耐力確認荷重 (kN) [C]	耐力値 (kN) [D]	最小裕度部品	最小裕度部品の分類	
SMS-01	1	—	19.0	六角ボルト	構造部材					
SMS-03	3	29.9	18.8	六角ボルト	構造部材					
SMS-06	6	—	16.8	ベアリング押さえ	構造部材					
SMS-1	10	56.2	53.9	コネクティングチェーン	構造部材					
SMS-3	30	94.2	75.3	アンギュラ玉軸受	機能部品					
SMS-6	60	190.5	170.6	ベアリング押さえ	構造部材					
SMS-10	100	244.7	224.5	ベアリング押さえ	構造部材					
SMS-16	160	—	344.2	ベアリング押さえ	構造部材					
SMS-25	250	—	490.3	ベアリング押さえ	構造部材					
SMS-40	400	—	941.4	コネクティングチェーン	構造部材					
SMS-60	600	—	1353.3	ダイレクトアタッチブレード	構造部材					

表 4-6 電共研の限界耐力値と J N E S 研究における耐力値及び耐力確認荷重との比較 (オイルスナツバ) (2/3)

型式	定格荷重 (kN)	電共研				J N E S 研究				J N E S 耐力値 / 電共研限界耐力値 [D/B]
		耐力確認荷重 (kN) [A]	限界耐力値 (kN) [B]	最小裕度部品	最小裕度部品の分類	耐力確認荷重 (kN) [C]	耐力値 (kN) [D]	最小裕度部品	最小裕度部品の分類	
SHP-03	3	17.4	5.3	全長座屈	構造部材					
SHP-06	6	—	14.1	全長座屈	構造部材					
SHP-1	10	—	22.7	全長座屈	構造部材					
SHP-3	30	69.3	50.8	全長座屈	構造部材					
SHP-6	60	—	141.8	全長座屈	構造部材					
SHP-10	100	—	196.1	全長座屈	構造部材					
SHP-16	160	388.2	318.7	全長座屈	構造部材					
SHP-25	250	—	514.8	ターンバックル	構造部材					

表 4-6 電共研の限界耐力値と J N E S 研究における耐力値及び耐力確認荷重との比較 (オイルスナツバ) (3/3)

型式	定格荷重 (kN)	電共研				J N E S 研究				J N E S 耐力値 / 電共研限界耐力値 [D/B]	
		耐力確認荷重 (kN) [A]	限界耐力値 (kN) [B]	最小裕度部品	最小裕度部品の分類	耐力確認荷重 (kN) [C]	耐力値 (kN) [D]	最小裕度部品	最小裕度部品の分類		
SN-03	3	20.3	9.1	全長座屈	構造部材						
SN-06	6	—	16.4	全長座屈	構造部材						
SN-1	10	—	26.2	全長座屈	構造部材						
SN-3	30	89.3	70.6	全長座屈	構造部材						
SN-6	60	144.1	125.5	タイロッド (シール性)	機能部品						
SN-10	100	—	205.9	ジャンクシヨコラムアダプタ	構造部材						
SN-16	160	409.1	321.6	タイロッド (シール性)	機能部品						
SN-25	250	—	465.8	ダイレクトトイヤー	構造部材						

5. 今回工認の二次評価において適用する新規基準値の設定

今回工認における二次評価において適用する新規基準値の設定手順を以下に示す。また、各手順（手順1～手順4）における内容の詳細をそれぞれ、5.1～5.4に示す。

・手順1：評価部位及び評価項目の抽出

電共研及びJNES研究並びに地震時の荷重伝達経路を考慮して、支持装置の強度評価及び機能確認対象となる構造部材及び機能部品を抽出する。また、構造部材については、評価部位及び評価項目を設定する。

・手順2：JEAG4601に規定の許容限界に対する定格荷重の裕度の算出

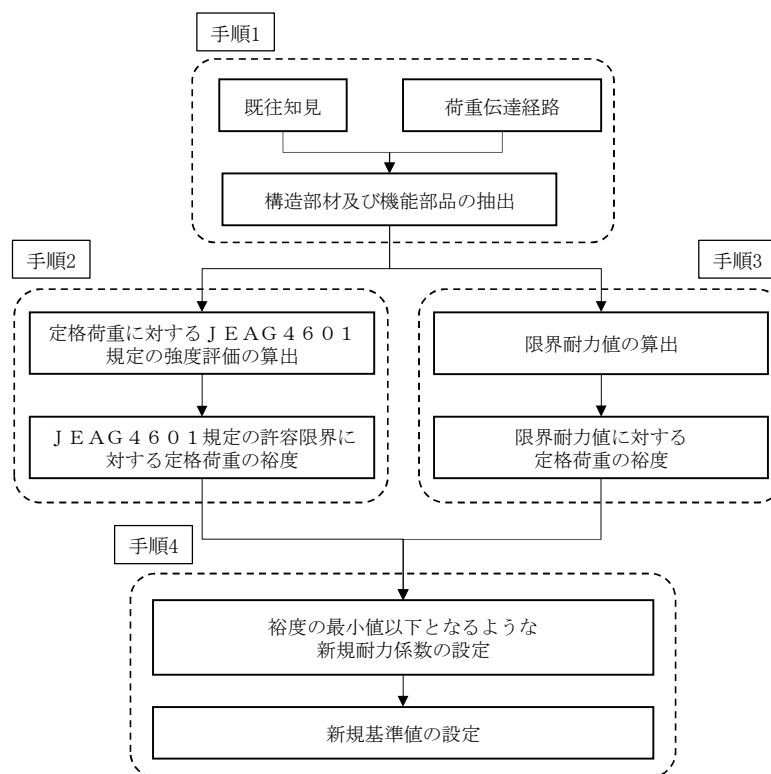
構造部材の評価部位及び評価項目について、定格荷重を用いてJEAG4601に規定の強度評価を実施しJEAG4601に規定の許容応力に対する発生応力の裕度を算出する。

・手順3：耐力試験において確認された限界耐力値に対する定格荷重の裕度の算出

電共研及びJNES研究の耐力試験において確認された限界耐力値を踏まえて構造部材及び機能部品の限界耐力値を比較し、限界耐力値に対する定格荷重の裕度を算出する。

・手順4：新規基準値の設定

算出したJEAG4601に規定の許容限界及び限界耐力値に対する定格荷重の裕度の最小値以下の数値で新規耐力係数を設定し、定格荷重に乗じることにより、新規基準値を設定する。



5.1 評価部位及び評価項目の抽出

今回工認における支持装置の二次評価において適用する新規基準値の設定にあたり、電共研及びJNES研究を踏まえて設定した支持装置の異常要因分析に基づき、支持装置を構造部材と、機能部品に分類した。評価部位及び評価項目の抽出にあたり確認した異常要因分析を表5-1に示す。

また、構造部材に対する強度評価及び機能部品を含む機能確認に係る評価部位及び評価項目を抽出した。抽出内容の概要を表5-2に示す。

なお、既工認においては、代表的な構造部材についての評価結果が記載されているが、今回工認においては、電共研及びJNES研究並びに地震時の荷重伝達経路を考慮して評価部位及び評価項目を追加した。

表 5-1 異常要因分析

対象	要求機能	要因	現象	喪失機能
オイル スナッパ	地震時の機能	配管系応答過大	構造部材の損傷	構造部材損傷*1
			機能部品の損傷	スナッパ変形 シール性喪失*3 ボベット弁機能喪失*2
メカニカル スナッパ	地震後の作動と性能確保	低速走行抵抗増大	構造部材の損傷	構造部材変形*4
			機能部品の損傷	ボベット弁機能喪失 シール性喪失
メカニカル スナッパ	地震時の機能	配管系応答過大	構造部材の損傷	構造部材損傷*1
			機能部品の損傷	スナッパ変形 ボールネジ機能喪失*5 プレキードラム機能喪失
メカニカル スナッパ	地震後の作動と性能確保	低速走行抵抗増大	構造部材の損傷	構造部材変形*4
			機能部品の損傷	ボールネジ機能喪失*5
ロッドレス トレイント	地震時の機能	配管系応答過大	構造部材の損傷	構造部材損傷*1 ロッドレストレイント座屈

注記*1：各支持装置の構造部材の強度評価。

*2：ボベット弁損傷においては、弁のパネ力の変化が考えられる。地震時には所定の抵抗力が得られないことが考えられる。また、地震後においては低速走行時の抵抗力増大が考えられる。但し、地震時にはボベット弁のパネ力が変化するような地震荷重は作用しない。

*3：シール性喪失には、系内リークと系外リークが考えられる。系内リークの場合は、ピストン部のシール性が低下し、所定の抵抗力が得られない事が考えられる。系外リークの場合は、ピストンとロッドカバパ間のシール性が低下し、所定の抵抗力が得られない事が考えられる。

*4：構造部材の変形により、低速走行時の抵抗力を増大させるもの。例えば、ピストンロッド、ロッドコラム等の変形。

*5：地震時には、ボールネジ部のボールの圧砕により支持機能喪失が考えられる。地震後においては、低速走行時の抵抗力増大が考えられる。

表 5-2 評価部位及び評価項目の抽出内容の概要

項目	対象	評価部位の抽出方法	評価項目の抽出方法
強度評価	構造部材	支持装置の各部を抽出し、構造部材と機能部品に分類する。	構造部材ごとに荷重伝達経路を抽出し、想定される応力分類（引張，圧縮，せん断，曲げ，支圧，座屈）に分類する。
機能確認	機能部品		機能部品は，想定される発生荷重が，電共研及びJNES研究の破壊試験にて機能維持を確認した荷重値以下となることの確認を実施項目とする。ただし，比較的単純な構造となる機能部品については，構造部材と同様の強度評価を実施項目とする。

(1) SMS 型メカニカルスナップ

a. 構造及び荷重伝達経路

SMS 型メカニカルスナップの構造及び荷重伝達経路を図 5-1 に示すとともに、構成部品を構造部材及び機能部品に分類した結果を表 5-3 に示す。なお、基本的に構造及び荷重伝達経路は全ての型式において同一である。

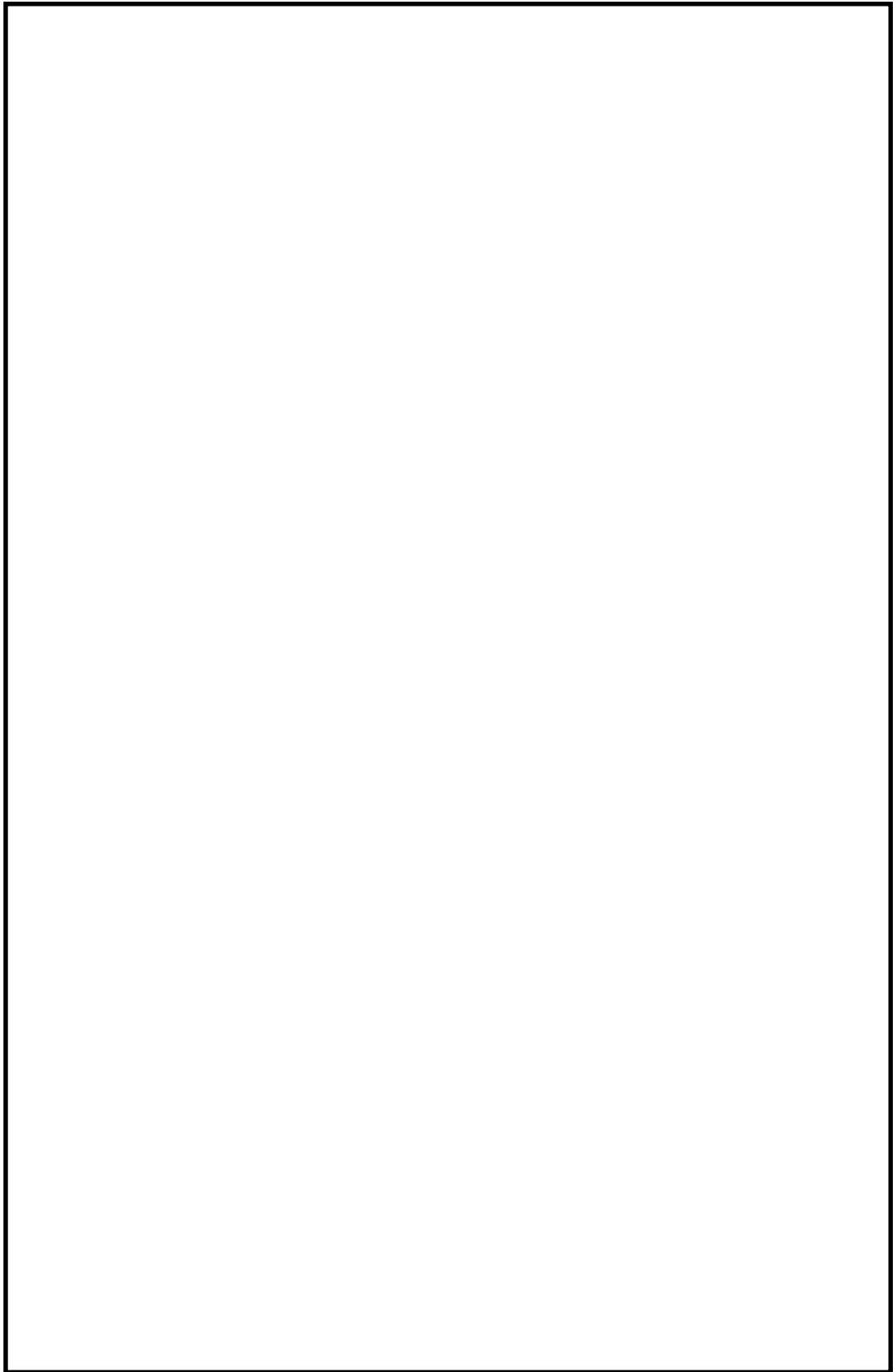


図 5-1 SMS 型メカニカルスナップの構造及び荷重伝達経路

表 5-3 SMS 型メカニカルスナッパの構造部材と機能部品

部品名	構造部材	機能部品	既工認	今回工認	備考
①ブラケット	○	—	○	○	
②ジャンクションコラム	○	—	○	○	
③ロードコラム	○	—	○	○	
④ピン	○	—	○	○	
⑤コネクティングチューブ	○	—	○	○	
⑥ケース，ベアリング押さえ及び六角ボルト	○	—	○	○	
⑦イーヤ	○	—	○	○	
⑧ユニバーサルボックス	○	—	○	○	
⑨コネクティングチューブイーヤ部	○	—	○	○	
⑩ユニバーサルブラケット	○	—	○	○	
⑪ダイレクトアタッチブラケット	○	—	○	○	
⑫クランプ*1	—	—	—	—	
⑬ベアリングナット	○	—	—	○	追加項目*2
⑭ボールねじ	—*3	○*3	—	○	追加項目*2
⑮アンギュラー玉軸受	—	○	—	○	追加項目*2
⑯球面軸受	—	○	—	○	追加項目*2
全長座屈*4	—	—	—	○	追加項目*2

注記*1：メカニカルスナッパ本体ではなく、付属部品として J E A G 4 6 0 1 の強度評価を実施しているため、メカニカルスナッパ本体の強度評価対象外とする。（付属部品の強度評価例を別紙 3 添付 1 に示す。）

*2：既工認では、評価結果記載対象外となっているが、今回工認では、電共研及び J N E S 研究並びに地震時の荷重伝達経路を考慮し、評価対象として追加する。

*3：ボールねじは機能部品だが比較的単純な構造のため、構造部材と同様の強度評価を実施する。

*4：特定の部位ではないが、支持装置全体の座屈評価を項目として追加している。

b. 荷重伝達経路を踏まえた強度評価部位の抽出結果

荷重伝達経路を踏まえた強度評価部位の抽出結果を図 5-2 に、この抽出結果に基づく構造部材に対する評価部位及び評価項目の抽出結果を表 5-4 に示す。

この抽出結果にしたがって設定した SMS 型メカニカルスナップの評価部位及び評価項目に対する詳細については、別紙 3 に示す。

また、今回工認の二次評価において適用する新規基準値の検討にあたって追加した評価部位及び評価項目を表 5-5 に示す。比較のとおり、今回工認の二次評価にあたっては、発生荷重の増大を考慮して評価項目を追加した。個々の評価部位及び評価項目の追加理由については同表の「評価項目の相違及び評価項目追加根拠」欄に記載する。

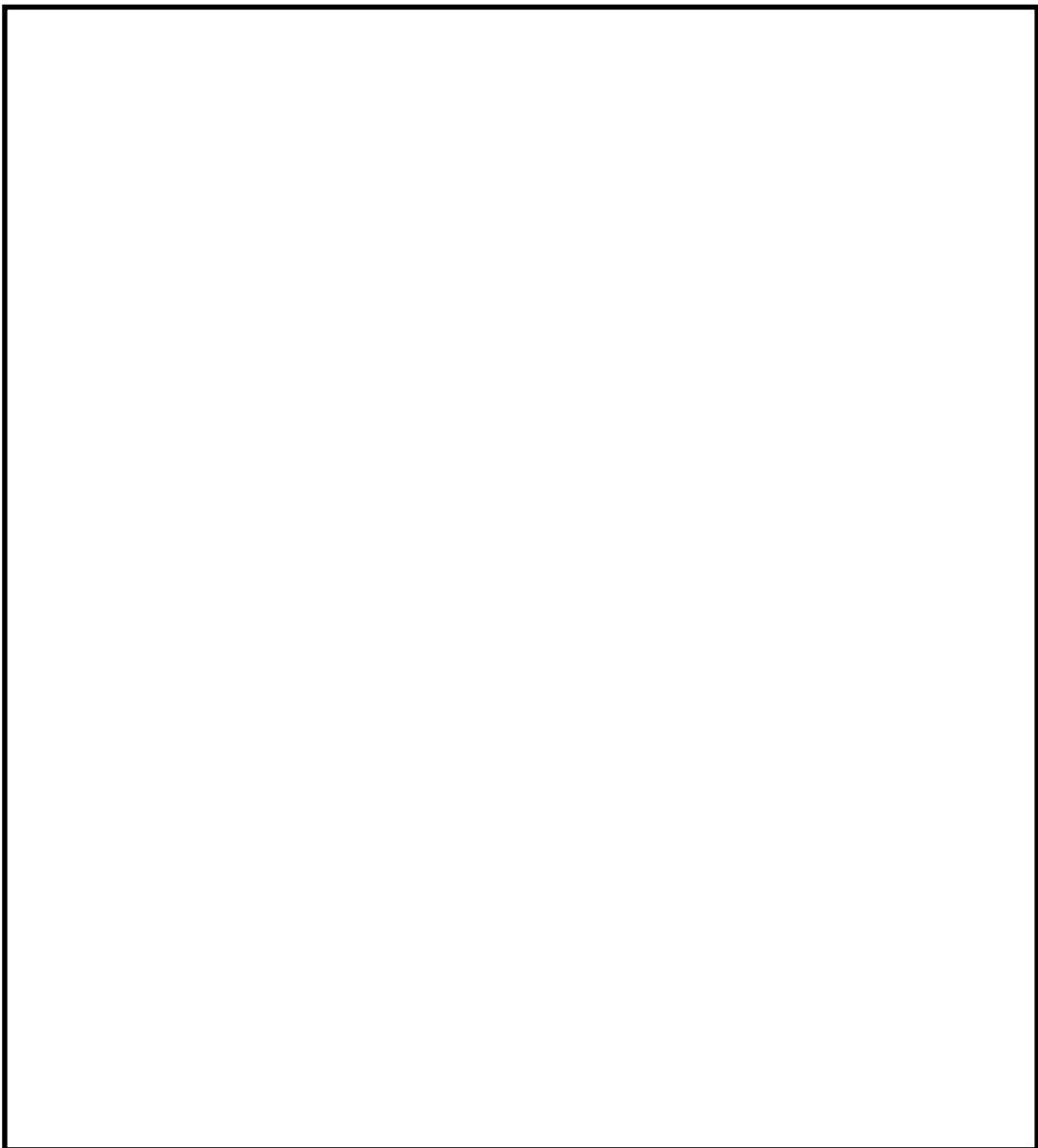


図 5-2 SMS 型メカニカルスナップの強度評価部位

表 5-4 SMS 型メカニカルスナップの構造部材に対する評価部位及び評価項目

評価部位*	評価項目
①ブラケット	引張応力
	せん断応力
	支圧応力
②ジャンクションコラム	引張応力
	せん断応力
③ロードコラム	引張応力
	せん断応力
④ピン	せん断応力
⑤コネクティングチューブ	引張応力
	せん断応力
	圧縮応力
⑥ケース	引張応力
	せん断応力
	支圧応力
⑥ベアリング押さえ	せん断応力
	支圧応力
	曲げ応力
⑥六角ボルト	引張応力
⑦イーヤ	引張応力
	せん断応力
	支圧応力
⑧ユニバーサルボックス	引張応力
	せん断応力
	支圧応力
⑨コネクティングチューブイーヤ部	引張応力
	せん断応力
	支圧応力
⑩ユニバーサルブラケット	引張応力
	せん断応力
	支圧応力
⑪ダイレクトアタッチブラケット	引張応力
	せん断応力
	支圧応力
⑬ベアリングナット	せん断応力
⑭ボールねじ	引張応力
全長座屈	圧縮応力

注記*：各種構造部材の座屈評価は全長座屈にて評価する。

表 5-5 SMS 型メカニカルスナップの
構造部材に対する評価項目の比較及び追加根拠 (1/4)

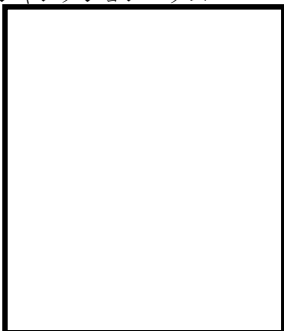


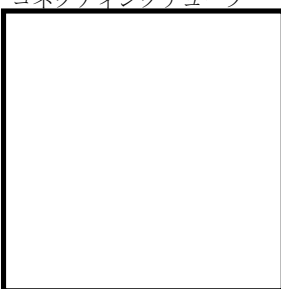
品番	評価部位	評価項目	今回 工認	既工認	評価項目の相違及び 評価項目追加根拠
①	ブラケット 	穴部引張	○	○	相違なし
		穴部せん断	○	○	相違なし
		穴部支圧	○	○	相違なし
②	ジャンクションコラム 	ボルト引張	○	○	相違なし
		溶接部引張	○	○	相違なし
		溶接部せん断	○	○	相違なし
		コラム引張	○	—	基本的に溶接部評価の方が厳しいが、評価項目の網羅性のため追加
③	ロードコラム 	引張	○	○	相違なし
		ねじ部せん断 (部品全体)	○	—	基本的に引張応力評価の方が厳しいが、評価項目の網羅性のため追加
		ねじ部せん断 (ねじ山)	○	—	
④	ピン 	ピンせん断	○	○	相違なし
⑤	コネクティングチューブ 	チューブ圧縮	○	○	相違なし
		チューブ引張	○	—	基本的にチューブ部の圧縮応力評価の方が厳しいが、評価項目の網羅性のため追加
		溶接部引張	○	—	
		溶接部せん断	○	—	

表 5-5 SMS 型メカニカルスナッパの
構造部材に対する評価項目の比較及び追加根拠 (2/4)

品番	評価部位	評価項目	今回 工認	既工認	評価項目の相違及び 評価項目追加根拠
⑥	ケース	引張	○	○	相違なし
		せん断	○	○	相違なし
		支圧	○	○	相違なし
⑥	ベアリング押さえ	せん断	○	○	相違なし
		支圧	○	○	相違なし
		曲げ	○	—	発生荷重の増大に伴い、電共研 及び J N E S 研究の知見を採用 して評価項目の網羅性のため追 加
⑥	六角ボルト	引張	○	○	相違なし

表 5-5 SMS 型メカニカルスナッパの
構造部材に対する評価項目の比較及び追加根拠 (3/4)

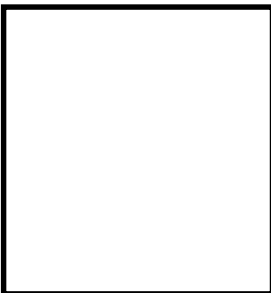



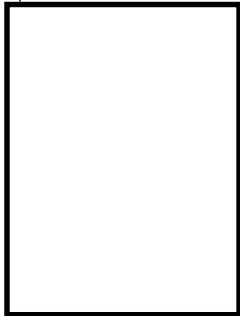

品番	評価部位	評価項目	今回 工認	既工認	評価項目の相違及び 評価項目追加根拠
⑦	イーヤ 	穴部引張	○	○	相違なし
		穴部せん断	○	○	相違なし
		穴部支圧	○	○	相違なし
		ねじ部引張	○	—	基本的に穴部の評価の方が厳しいが、評価項目の網羅性のため追加
		ねじ部せん断 (部品全体)	○	—	
		ねじ部せん断 (ねじ山)	○	—	
⑧	ユニバーサルボックス 	穴部引張	○	○	相違なし
		穴部せん断	○	○	相違なし
		穴部支圧	○	○	相違なし
⑨	コネクティングチューブイーヤ部 	穴部引張	○	○	相違なし
		穴部せん断	○	○	相違なし
		穴部支圧	○	○	相違なし
⑩	ユニバーサルブラケット 	穴部引張	○	○	相違なし
		穴部せん断	○	○	相違なし
		穴部支圧	○	○	相違なし

表 5-5 SMS 型メカニカルスナッパの
構造部材に対する評価項目の比較及び追加根拠 (4/4)

品番	評価部位	評価項目	今回 工認	既工認	評価項目の相違及び 評価項目追加根拠
⑪	ダイレクトアタッチブラケット 	穴部引張	○	○	相違なし
		穴部せん断	○	○	相違なし
		穴部支圧	○	○	相違なし
		溶接部せん断	○	—	基本的に穴部の強度評価の方が 厳しいが、評価項目の網羅性の ため追加
⑬	ベ어링ナット 	ねじ部せん断	○	—	発生荷重の増大に伴い、電共研 及び J N E S 研究の知見を採用 して評価項目の網羅性のため追 加
⑭	ボールねじ	引張	○	—	発生荷重の増大に伴い、電共研 及び J N E S 研究の知見を採用 して評価項目の網羅性のため追 加
—	全長	座屈	○	—	発生荷重の増大に伴い、電共研 及び J N E S 研究の知見を採用 して評価項目の網羅性のため追 加

(2) SHP 型オイルスナッパ

a. 構造及び荷重伝達経路

SHP 型オイルスナッパの構造及び荷重伝達経路を図 5-3 に示すとともに，構成部品を構造部材及び機能部品に分類した結果を表 5-6 に示す。なお，基本的に構造及び荷重伝達経路は全ての型式において同一である。

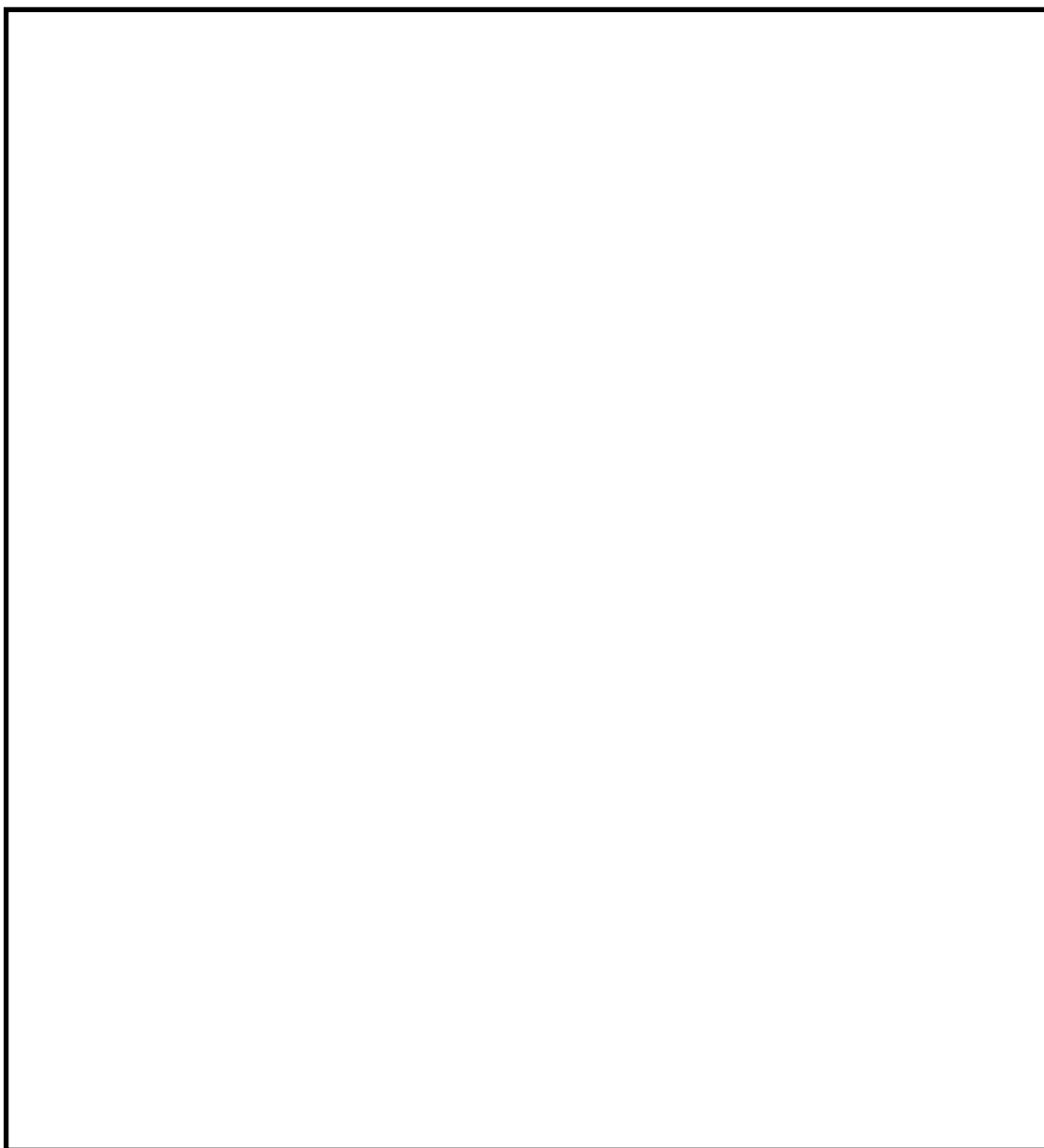


図 5-3 SHP 型オイルスナッパの構造及び荷重伝達経路(1/2)

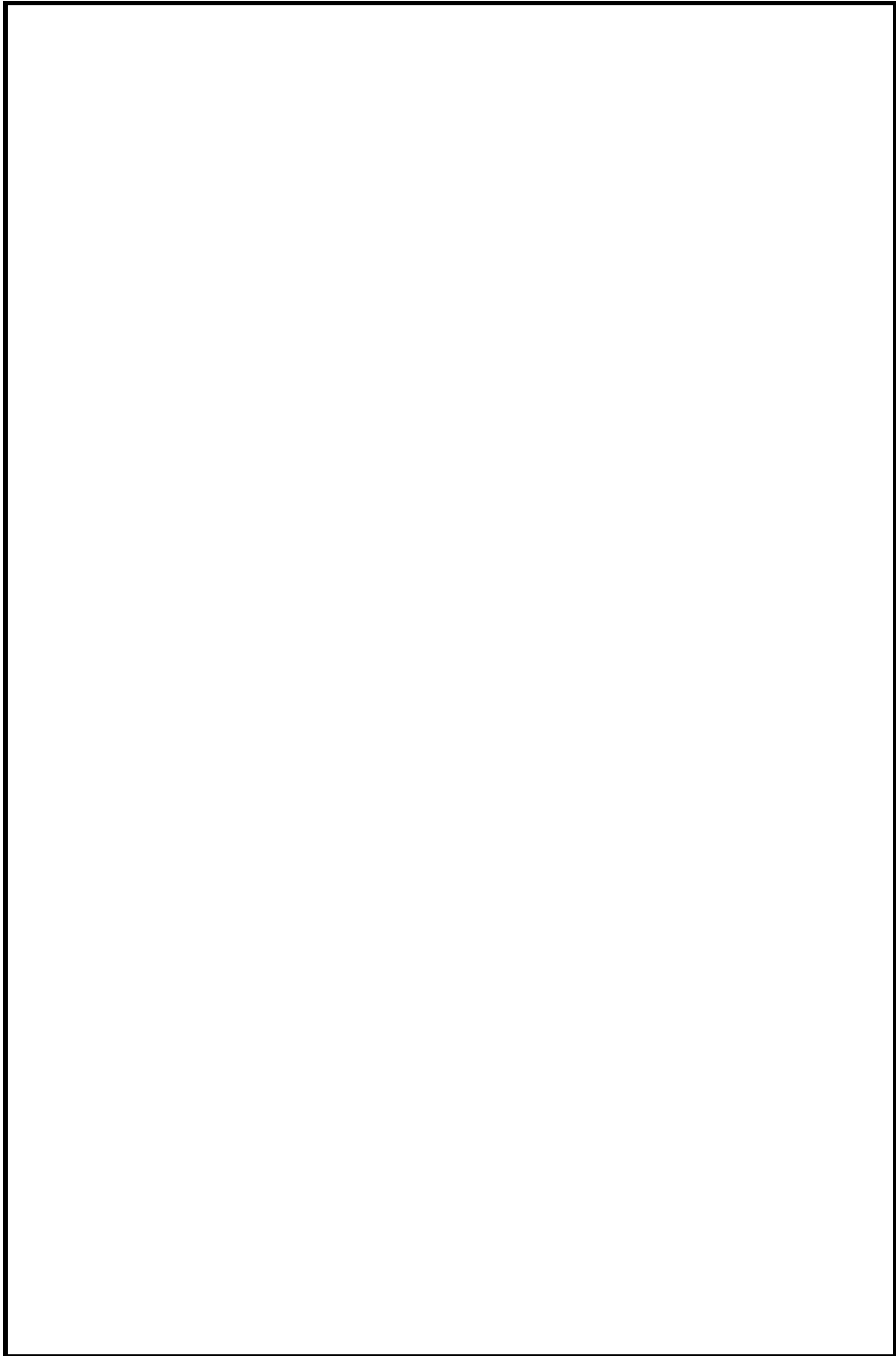


図 5-3 SHP 型オイルスナッパの構造及び荷重伝達経路 (2/2)

表 5-6 SHP 型オイルスナッパの構造部材と機能部品

部品名	構造部材	機能部品	既工認	今回工認	備考
①ブラケット	○	—	○	○	
②ピストンロッド	○	—	○	○	
③コネクティングパイプ	○	—	○	○	
④ピン	○	—	○	○	
⑤シリンダチューブ	○	—	○	○	
⑥六角ボルト	○	—	○	○	
⑦イーヤ	○	—	○	○	
⑧スヘリカルアイボルト	○	—	○	○	
⑨コンロッド (Bタイプ)	○	—	○	○	
⑩コンロッド (Cタイプ)	○	—	○	○	
⑪ターンバックル	○	—	○	○	
⑫シリンダカバー	○	—	○	○	
⑬タイロッド	○	—	○	○	
⑭アダプタ	○	—	○	○	
⑮クランプ*1	—	—	—	—	
⑯ロッドカバー	○	—	—	○	追加項目*2
⑰球面軸受	—	○	—	○	追加項目*2
⑱ポペット弁	—	○	—	○	追加項目*2
シール性*3	—	○	—	○	追加項目*2
全長座屈*4	—	—	—	○	追加項目*2

注記*1：オイルスナッパ本体ではなく、付属部品として J E A G 4 6 0 1 の強度評価を実施しているため、オイルスナッパ本体の強度評価対象外とする。(付属部品の強度評価例を別紙 3 添付 1 に示す。)

*2：既工認では、評価結果記載対象外となっているが、今回工認では、電共研及び J N E S 研究並びに地震時の荷重伝達経路を考慮し、評価対象として追加する。

*3：特定の部位ではないが、部品間のシール部についての評価を項目として追加している。

*4：特定の部位ではないが、支持装置全体の座屈評価を項目として追加している。

b. 荷重伝達経路を踏まえた強度評価部位の抽出結果

荷重伝達経路を踏まえた強度評価部位の抽出結果を図 5-4 に、この抽出結果に基づく構造部材に対する評価部位及び評価項目の抽出結果を表 5-7 に示す。

この抽出結果にしたがって設定した SHP 型オイルスナッパの評価部位及び評価項目に対する詳細については、別紙 3 に示す。

また、今回工認の二次評価において適用する新規基準値の検討にあたって追加した評価部位及び評価項目を表 5-8 に示す。比較のとおり、今回工認の二次評価にあたっては、発生荷重の増大を考慮して評価項目を追加した。個々の評価部位及び評価項目の追加理由については同表の「評価項目の相違及び評価項目追加根拠」欄に記載する。



図 5-4 SHP 型オイルスナッパの強度評価部位 (1/2)

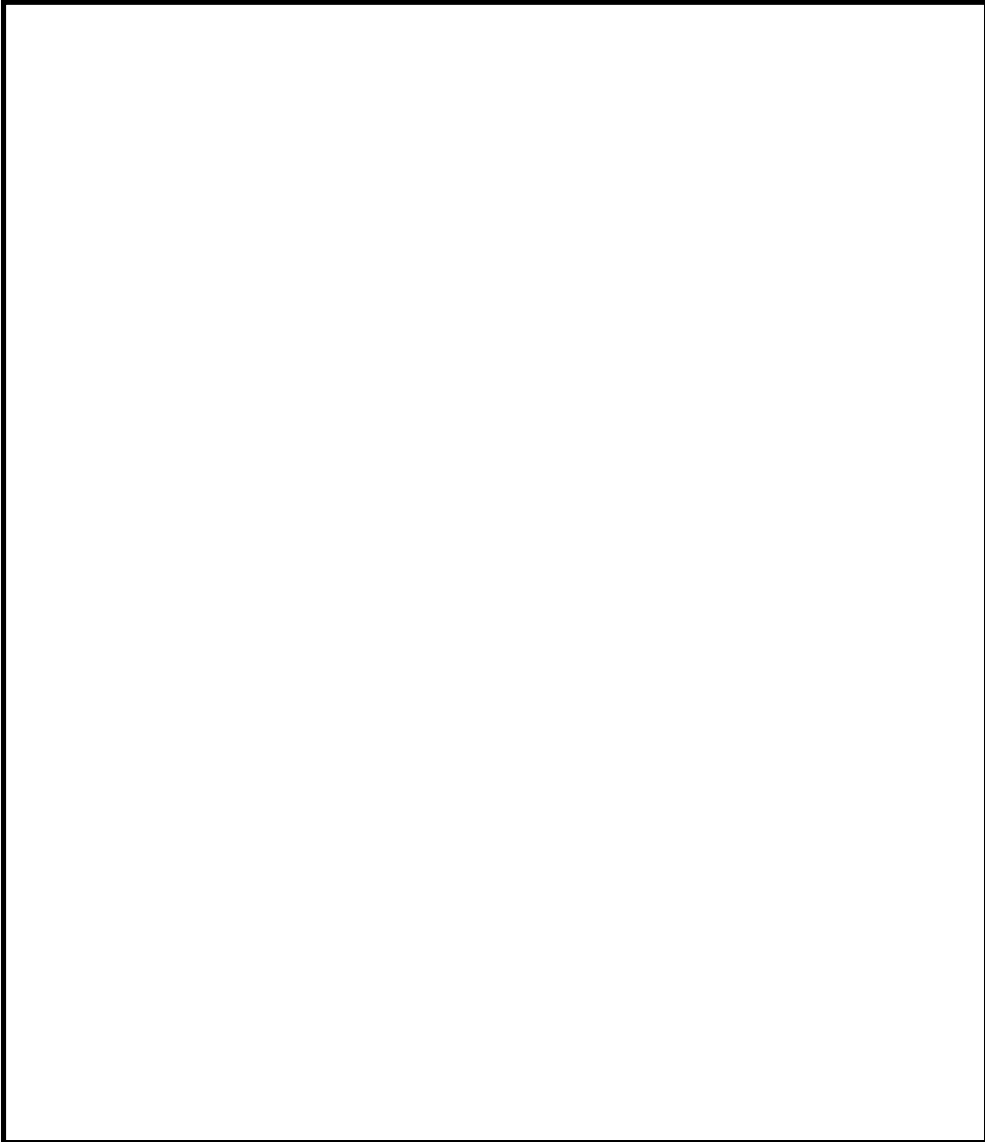


図 5-4 SHP 型オイルスナップの強度評価部位 (2/2)

表 5-7 SHP 型オイルスナッパの構造部材に対する評価部位及び評価項目 (1/2)

評価部位*	評価項目
①ブラケット	引張応力
	せん断応力
	支圧応力
②ピストンロッド	引張応力
③コネクティングパイプ	圧縮応力
	引張応力
	せん断応力
	支圧応力
④ピン	せん断応力
⑤シリンダチューブ	引張応力
	圧縮応力
⑥六角ボルト	引張応力
⑦イーヤ	引張応力
	せん断応力
	支圧応力
⑧スヘリカルアイボルト	引張応力
	せん断応力
	支圧応力
⑨コンロッド (Bタイプ) ⑩コンロッド (Cタイプ)	引張応力
	せん断応力
	支圧応力

表 5-7 SHP 型オイルスナップの構造部材に対する評価部位及び評価項目 (2/2)

評価部位	評価項目
⑪ターンバックル	引張応力
	せん断応力
⑫シリンダカバー	せん断応力
⑬タイロッド	引張応力
⑭アダプタ	引張応力
	せん断応力
⑯ロッドカバー	せん断応力
全長座屈	圧縮応力

注記*：各種構造部材の座屈評価は全長座屈にて評価する。

表 5-8 SHP 型オイルスナッパの構造部材に対する評価項目の比較及び追加根拠 (1/3)

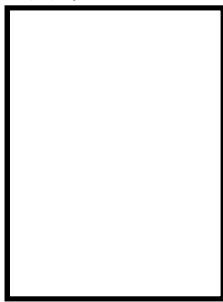




品番	評価部位	評価項目	今回 工認	既工認	評価項目の相違及び 評価項目追加根拠
①	ブラケット 	穴部引張	○	○	相違なし
		穴部せん断	○	○	相違なし
		穴部支圧	○	○	相違なし
②	ピストンロッド 	ロッド部引張	○	○	相違なし
		ねじ部引張	○	—	基本的にロッド部の評価の方が 厳しいが、評価項目の網羅性の ため追加
③	コネクティングパイプ 	パイプ部圧縮	○	○	相違なし
		穴部引張	○	—	発生荷重の増大に伴い、電共研 及び J N E S 研究の知見を採用 して評価項目の網羅性のため追 加
		穴部せん断	○	—	
		穴部支圧	○	—	
溶接部せん断	○	—			
④	ピン 	せん断	○	○	相違なし
⑤	シリンダチューブ 	引張	○	○	相違なし
		圧縮	○	—	基本的に引張応力評価の方が厳 しいが、評価項目の網羅性のた め追加

表 5-8 SHP 型オイルスナッパの構造部材に対する評価項目の比較及び追加根拠 (2/3)


品番	評価部位	評価項目	今回 工認	既工認	評価項目の相違及び 評価項目追加根拠
⑥	六角ボルト	引張	○	○	相違なし
					
⑦	イーヤ	穴部引張	○	○	相違なし
		穴部せん断	○	○	相違なし
		穴部支圧	○	○	相違なし
		溶接部せん断	○	○	相違なし
⑧	スヘリカルアイボルト	穴部引張	○	○	相違なし
		穴部せん断	○	○	相違なし
		穴部支圧	○	○	相違なし
		ボルト部引張	○	○	相違なし
⑨ ⑩	コンロッド (Bタイプ) コンロッド (Cタイプ)	ロッド部引張	○	○	基本的にロッド部評価の方が厳しいが、評価項目の網羅性のため追加
		溶接部せん断	○	○	
		穴部引張	○	—	
		穴部せん断	○	—	
		穴部支圧	○	—	

表 5-8 SHP 型オイルスナッパの構造部材に対する評価項目の比較及び追加根拠 (3/3)

品番	評価部位	評価項目	今回 工認	既工認	評価項目の相違及び 評価項目追加根拠
⑪	ターンバックル	引張	○	○	相違なし
		溶接部せん断	○	—	基本的にターンバックル本体の評価の方が厳しいが、評価項目の網羅性のため追加
⑫	シリンダカバー	せん断	○	○	相違なし
⑬	タイロッド	ロッド部引張	○	○	相違なし
		ねじ部引張	○	—	基本的にロッド部の評価の方が厳しいが、評価項目の網羅性のため追加
⑭	アダプタ	引張	○	○	相違なし
		溶接部せん断	○	—	基本的にアダプタ本体の評価の方が厳しいが、評価項目の網羅性のため追加
⑯	ロッドカバー	せん断	○	—	発生荷重の増大に伴い、電共研及びJNES研究の知見を採用して評価項目の網羅性のため追加
—	全長	座屈	○	—	発生荷重の増大に伴い、電共研及びJNES研究の知見を採用して評価項目の網羅性のため追加

(3) SN 型オイルスナッパ

a. 構造及び荷重伝達経路

SN 型オイルスナッパの構造及び荷重伝達経路を図 5-5 に示すとともに，構成部品を構造部材及び機能部品に分類した結果を表 5-9 に示す。なお，基本的に構造及び荷重伝達経路は全ての型式において同一である。

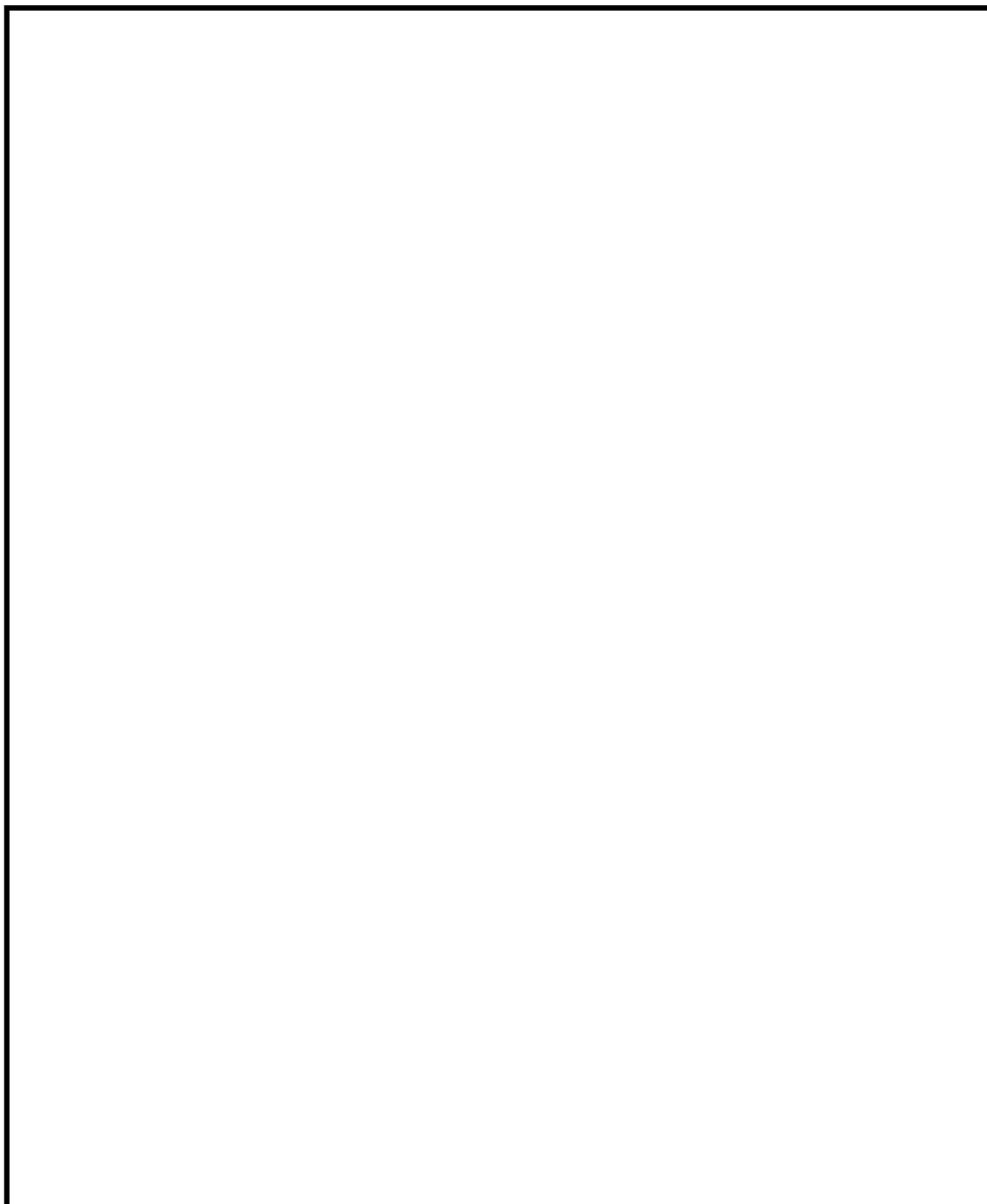


図 5-5 SN 型オイルスナッパの構造及び荷重伝達経路

表 5-9 SN 型オイルスナッパの構造部材と機能部品

部品名	構造部材	機能部品	既工認	今回工認	備考
①ブラケット	○	—	○	○	
②ピストンロッド	○	—	○	○	
③コネクティングパイプ	○	—	○	○	
④ピン	○	—	○	○	
⑤シリンダチューブ	○	—	○	○	
⑥六角ボルト	○	—	○	○	
⑦イーヤ*1	○	—	○	○	
⑧ロッドエンド	○	—	○	○	
⑨シリンダカバー	○	—	○	○	
⑩タイロッド	○	—	○	○	
⑪アダプタ	○	—	○	○	
⑫ロッドカバー	○	—	○	○	
⑬クランプ*2	—	—	—	—	
⑭ホルダ	○	—	—	○	追加項目*3
⑮球面軸受	—	○	—	○	追加項目*3
⑯ポペット弁	—	○	—	○	追加項目*3
シール性*4	—	○	—	○	追加項目*3
全長座屈*5	—	—	—	○	追加項目*3

注記*1：Bタイプにおけるダイレクトイーヤを含む。

*2：オイルスナッパ本体ではなく、付属部品としてJ E A G 4 6 0 1の強度評価を実施しているため、オイルスナッパ本体の強度評価対象外とする。(付属部品の強度評価例を別紙3添付1に示す。)

*3：既工認では、評価結果記載対象外となっているが、今回工認では、電共研及びJ N E S 研究並びに地震時の荷重伝達経路を考慮し、評価対象として追加する。

*4：特定の部位ではないが、部品間のシール部についての評価を項目として追加している。

*5：特定の部位ではないが、支持装置全体の座屈評価を項目として追加している。

b. 荷重伝達経路を踏まえた強度評価部位の抽出結果

荷重伝達経路を踏まえた強度評価部位の抽出結果を図 5-6 に、この抽出結果に基づく構造部材に対する評価部位及び評価項目の抽出結果を表 5-10 に示す。

この抽出結果にしたがって設定した SN 型オイルスナップの評価部位及び評価項目に対する詳細については、別紙 3 に示す。

また、今回工認の二次評価において適用する新規基準値の検討にあたって追加した評価部位及び評価項目を表 5-11 に示す。比較のとおり、今回工認の二次評価にあたっては、発生荷重の増大を考慮して評価項目を追加した。個々の評価部位及び評価項目の追加理由については同表の「評価項目の相違及び評価項目追加根拠」欄に記載する。

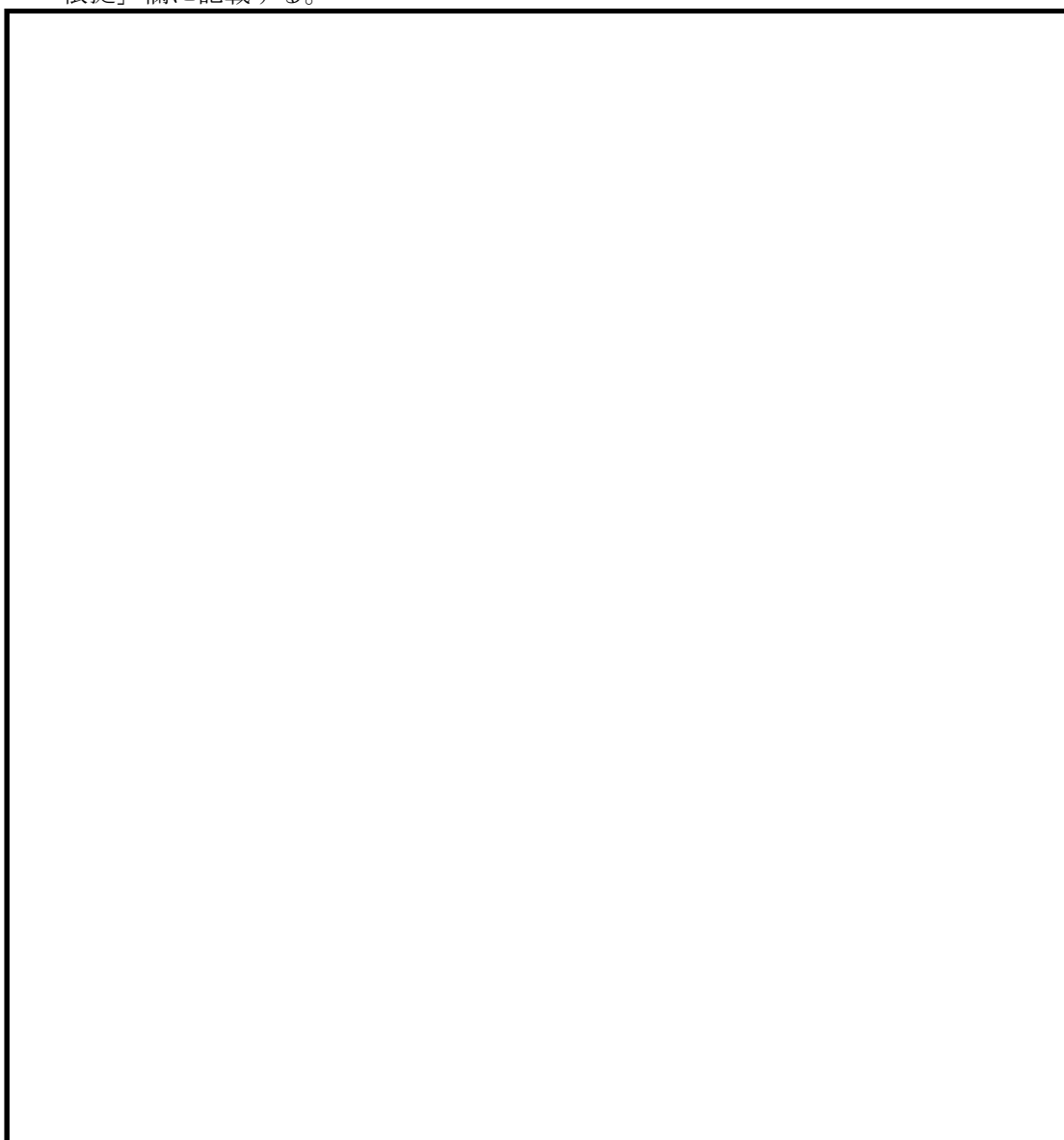


図 5-6 SN 型オイルスナップの強度評価部位

表 5-10 SN 型オイルスナッパの構造部材に対する評価部位及び評価項目

評価部位* ¹	評価項目
①ブラケット	引張応力
	せん断応力
	支圧応力
②ピストンロッド	引張応力
	せん断応力
③コネクティングパイプ	圧縮応力
	引張応力
	せん断応力
	支圧応力
④ピン	せん断応力
⑤シリンダチューブ	引張応力
	圧縮応力
⑥六角ボルト	引張応力
⑦イーヤ* ²	引張応力
	せん断応力
	支圧応力
	圧縮応力
⑧ロッドエンド	引張応力
	せん断応力
	支圧応力
⑨シリンダカバー	せん断応力
⑩タイロッド	引張応力
⑪アダプタ	引張応力
	せん断応力
⑫ロッドカバー	せん断応力
⑭ホルダ	せん断応力
全長座屈	圧縮応力

注記*1：各種構造部材の座屈評価は全長座屈にて評価する。

*2：Bタイプにおけるダイレクトイーヤを含む。

表 5-11 SN 型オイルスナッパの構造部材に対する評価項目の比較及び追加根拠 (1/3)

品番	評価部位	評価項目	今回工認	既工認	評価項目の相違及び評価項目追加根拠
①	ブラケット	穴部引張	○	○	相違なし
		穴部せん断	○	○	相違なし
		穴部支圧	○	○	相違なし
②	ピストンロッド	ロッド部引張	○	○	相違なし
		ねじ部引張	○	—	基本的にロッド部の評価の方が厳しいが、評価項目の網羅性のため追加
		カラー部せん断	○	—	
③	コネクティングパイプ	パイプ部圧縮	○	○	相違なし
		穴部引張	○	—	基本的にパイプ部の評価の方が厳しいが、評価項目の網羅性のため追加
		穴部せん断	○	—	
		穴部支圧	○	—	
	溶接部せん断	○	—	発生荷重の増大に伴い、電共研及び J N E S 研究の知見を採用して評価項目の網羅性のため追加	
④	ピン	せん断	○	○	相違なし
⑤	シリンダチューブ	引張	○	○	相違なし
		圧縮	○	—	基本的に引張応力評価の方が厳しいが、評価項目の網羅性のため追加

表 5-11 SN 型オイルスナッパの構造部材に対する評価項目の比較及び追加根拠 (2/3)


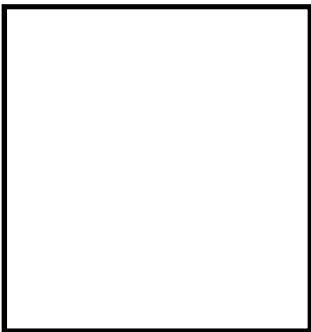




品番	評価部位	評価項目	今回工認	既工認	評価項目の相違及び評価項目追加根拠
⑥	六角ボルト 	引張	○	○	相違なし
⑦	イーヤ (Bタイプのダイレクトイーヤを含む。) 	穴部引張	○	○	相違なし
		穴部せん断	○	○	相違なし
		穴部支圧	○	○	相違なし
		溶接部せん断	○	○	相違なし
		ボルト取付部引張	○	—	基本的に穴部の評価の方が厳しいが、評価項目の網羅性のため追加
		ねじ部せん断	○	—	
		パイプ部圧縮	○	—	
⑧	ロッドエンド 	穴部引張	○	○	相違なし
		穴部せん断	○	○	相違なし
		穴部支圧	○	○	相違なし
		ボルト部引張	○	—	基本的に穴部の評価の方が厳しいが、評価項目の網羅性のため追加
		ねじ部せん断	○	—	発生荷重の増大に伴い、電共研及びJNES研究の知見を採用して評価項目の網羅性のため追加
⑨	シリンダカバー 	せん断	○	○	相違なし
⑩	タイロッド 	ねじ部引張	○	○	相違なし
⑪	アダプタ 	引張	○	○	相違なし
		溶接部せん断	○	○	相違なし

表 5-11 SN 型オイルスナッパの構造部材に対する評価項目の比較及び追加根拠 (3/3)

品番	評価部位	評価項目	今回 工認	既工認	評価項目の相違及び 評価項目追加根拠
⑫	ロッドカバー 	せん断	○	○	相違なし
⑭	ホルダ 	せん断	○	—	発生荷重の増大に伴い、電共研及びJNES研究の知見を採用して評価項目の網羅性のため追加
—	全長	座屈	○	—	発生荷重の増大に伴い、電共研及びJNES研究の知見を採用して評価項目の網羅性のため追加

(4) RSA 型ロッドレストレイント

a. 構造及び荷重伝達経路

RSA 型ロッドレストレイントの構造及び荷重伝達経路を図 5-7 に示すとともに、構成部品を構造部材及び機能部品に分類した結果を表 5-12 に示す。なお、基本的に構造及び荷重伝達経路は全ての型式において同一である。



図 5-7 RSA 型ロッドレストレイントの構造及び荷重伝達経路

表 5-12 RSA 型 ロッドレストレイントの構造部材と機能部品

部品名	構造部材	機能部品	既工認	今回工認	備考
①ブラケット	○	—	○	○	
②ピン	○	—	○	○	
③スヘリカルアイボルト	○	—	○	○	
④アジャストナット	○	—	○	○	
⑤パイプ	○	—	○	○	
⑥クランプ*1	—	—	—	—	
全長座屈*2	○	—	○	○	

注記*1：ロッドレストレイント本体ではなく、付属部品として J E A G 4 6 0 1 の強度評価を実施しているため、ロッドレストレイント本体の強度評価対象外とする。
 (付属部品の強度評価例を別紙 3 添付 1 に示す。)

*2：構造強度評価については⑤パイプの圧縮応力評価にて実施している。

b. 荷重伝達経路を踏まえた強度評価部位の抽出結果

荷重伝達経路を踏まえた強度評価部位の抽出結果を図 5-8 に、この抽出結果に基づく構造部材に対する評価部位及び評価項目の抽出結果を表 5-13 に示す。

この抽出結果にしたがって設定した RSA 型ロッドレストレイントの評価部位及び評価項目に対する詳細については、別紙 3 に示す。

また、今回工認の二次評価において適用する新規基準値の検討にあたって、評価部位及び評価項目の既工認との比較及び追加根拠について比較したものを表 5-14 に示す。



図 5-8 RSA 型ロッドレストレイントの強度評価部位

表 5-13 RSA 型ロッドレストレイントの構造部材に対する評価部位及び評価項目

評価部位*	評価項目
①ブラケット	引張応力
	せん断応力
	支圧応力
②ピン	せん断応力
③スヘリカルアイボルト	引張応力
	せん断応力
	支圧応力
④アジャストナット	引張応力
⑤パイプ	圧縮応力
全長座屈	圧縮応力

注記*：各種構造部材の座屈評価は全長座屈にて評価する。

表 5-14 RSA 型ロッドレストレイントの構造部材に対する評価項目の比較及び追加根拠

品番	評価部位	評価項目	今回 工認	既工認	評価項目の相違及び 評価項目追加根拠
①	ブラケット	穴部引張	○	○	相違なし
		穴部せん断	○	○	相違なし
		穴部支圧	○	○	相違なし
②	ピン	せん断	○	○	相違なし
③	スヘリカルアイボルト	穴部引張	○	○	相違なし
		穴部せん断	○	○	相違なし
		穴部支圧	○	○	相違なし
		ボルト部引張	○	○	相違なし
④	アジャストナット	溶接部引張	○	○	相違なし
⑤	パイプ	圧縮	○	○	相違なし
—	全長	圧縮	○	○	相違なし (⑤パイプの圧縮応力 評価にて実施)

(5) RTS 型ロッドレストレイント

a. 構造及び荷重伝達経路

RTS 型ロッドレストレイントの構造及び荷重伝達経路を図 5-9 に示すとともに、構成部品を構造部材及び機能部品に分類した結果を表 5-15 に示す。なお、基本的に構造及び荷重伝達経路は全ての型式において同一である。

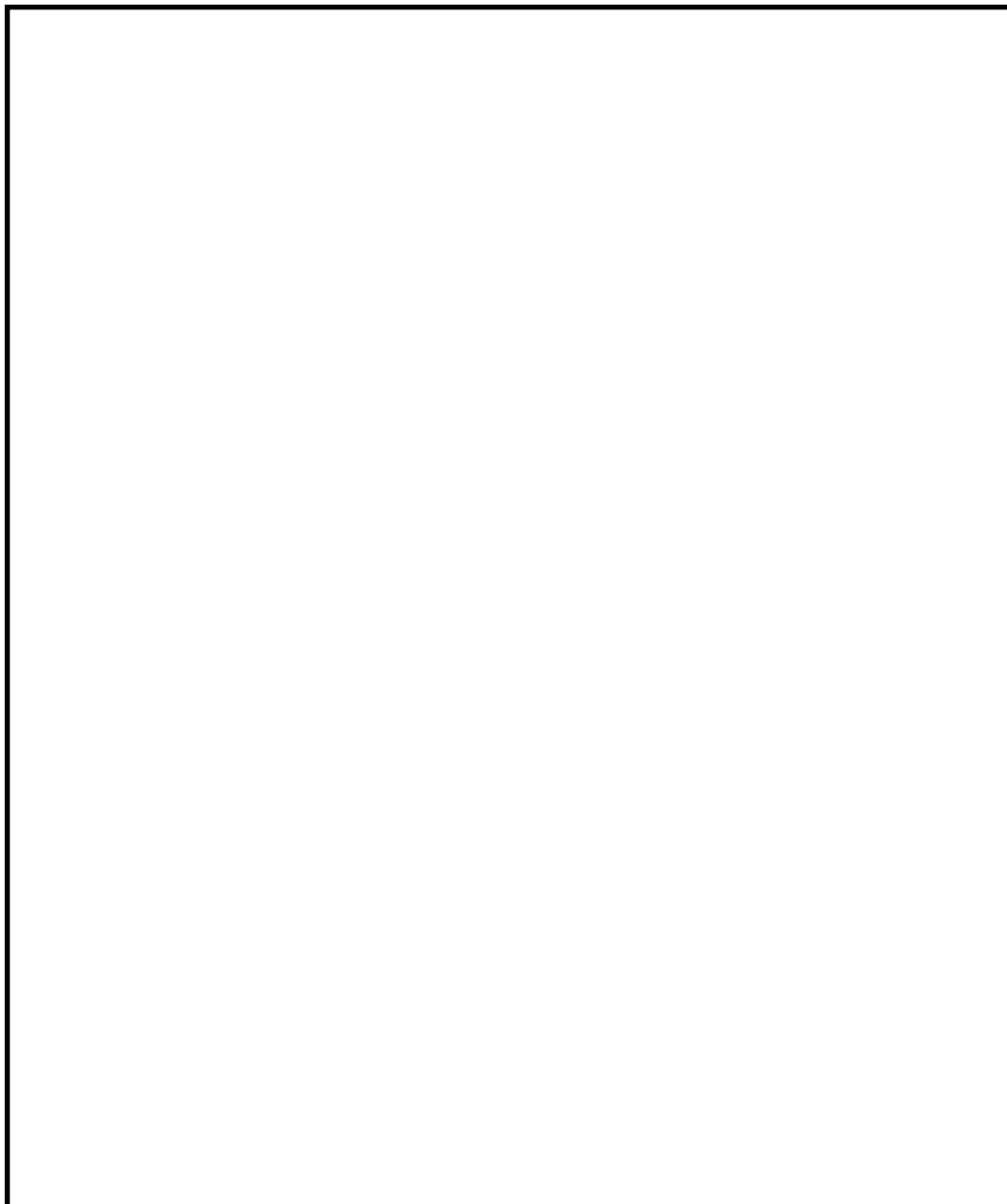


図 5-9 RTS 型ロッドレストレイントの構造及び荷重伝達経路

表 5-15 RTS 型ロッドレストレイントの構造部材と機能部品

部品名	構造部材	機能部品	既工認	今回工認	備考
①ブラケット	○	—	○	○	
②ピン	○	—	○	○	
③パイプ	○	—	○	○	
④コネクティングパイプ溶接部	○	—	○	○	
⑤コネクティングイーヤ	○	—	○	○	
⑥インナーチューブ	○	—	○	○	
⑦クランプ*1	—	—	—	—	
全長座屈*2	○	—	○	○	

注記*1：ロッドレストレイント本体ではなく，付属部品として J E A G 4 6 0 1 の強度評価を実施しているため，ロッドレストレイント本体の強度評価対象外とする。
 (付属部品の強度評価例を別紙 3 添付 1 に示す。)

*2：構造強度評価については③パイプの圧縮応力評価にて実施している。

b. 荷重伝達経路を踏まえた強度評価部位の抽出結果

荷重伝達経路を踏まえた強度評価部位の抽出結果を図 5-10 に、この抽出結果に基づく構造部材に対する評価部位及び評価項目の抽出結果を表 5-16 に示す。

この抽出結果にしたがって設定した RTS 型ロッドレストレイントの評価部位及び評価項目に対する詳細については、別紙 3 に示す。

また、今回工認の二次評価において適用する新規基準値の検討にあたって、評価部位及び評価項目の既工認との比較及び追加根拠について比較したものを表 5-17 に示す。

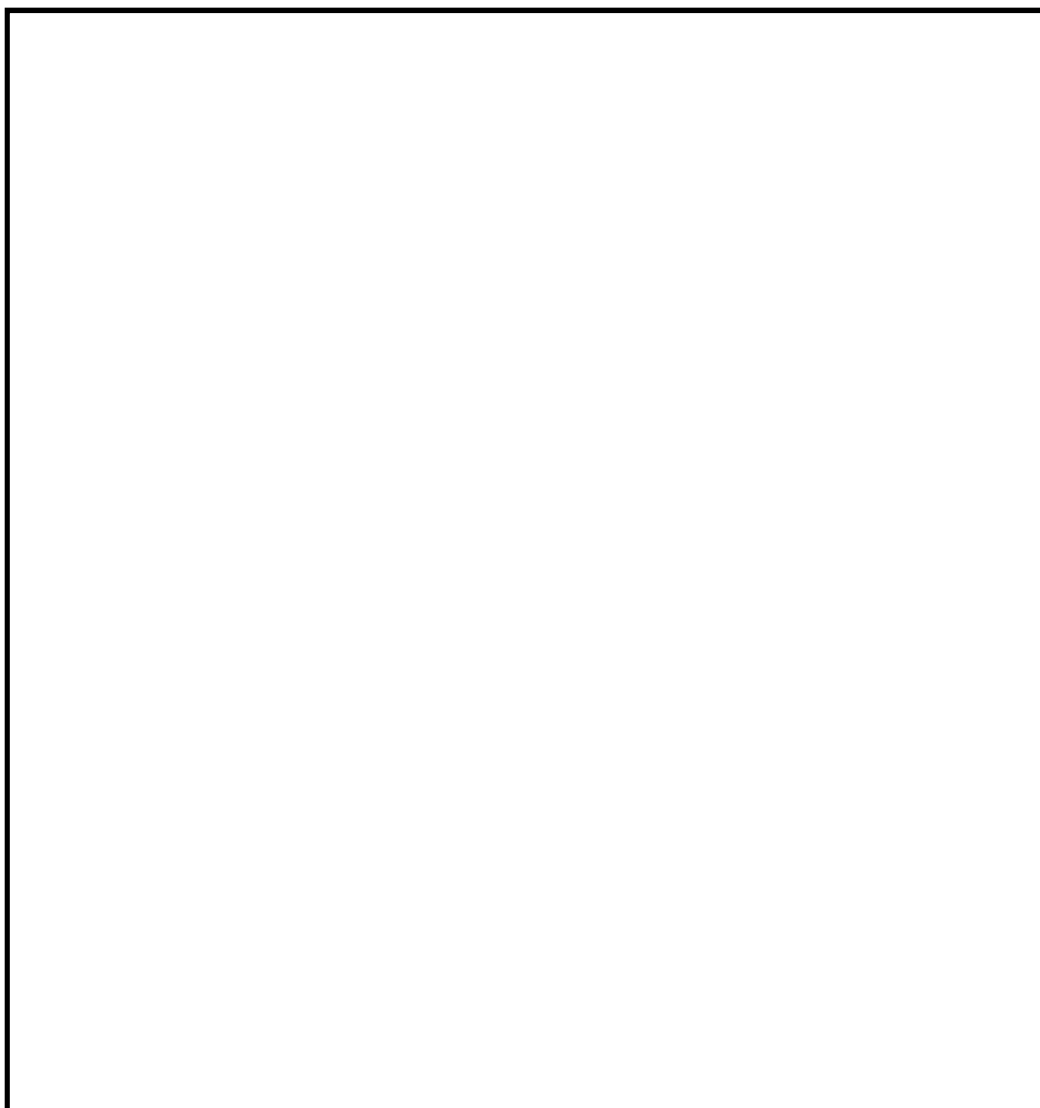


図 5-10 RTS 型ロッドレストレイントの強度評価部位

表 5-16 RTS 型ロッドレストレイントの構造部材に対する評価部位及び評価項目

評価部位*	評価項目
①ブラケット	引張応力
	せん断応力
	支圧応力
②ピン	せん断応力
③パイプ	せん断応力
	圧縮応力
④コネクティングパイプ溶接部	せん断応力
⑤コネクティングイーヤ	引張応力
	せん断応力
	支圧応力
⑥インナーチューブ	引張応力
	せん断応力
	支圧応力
全長座屈	圧縮応力

注記*：各種構造部材の座屈評価は全長座屈にて評価する。

表 5-17 RTS 型ロッドレストレイントの
構造部材に対する評価項目の比較及び追加根拠 (1/2)

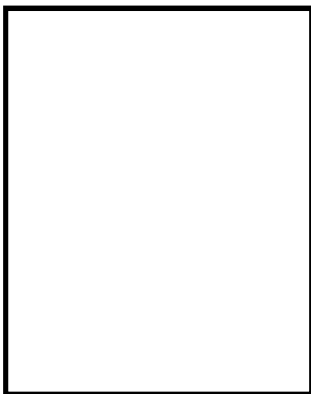

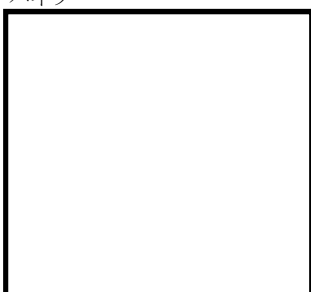
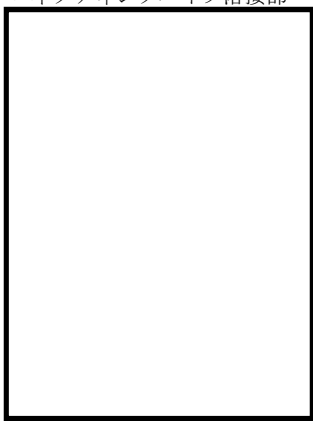

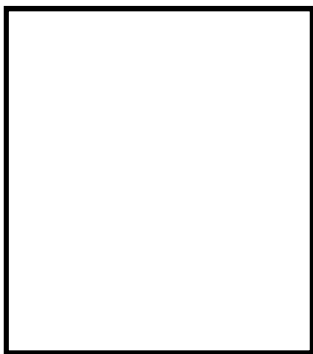
品番	評価部位	評価項目	今回 工認	既工認	評価項目の相違及び 評価項目追加根拠
①	ブラケット 	穴部引張	○	○	相違なし
		穴部せん断	○	○	相違なし
		穴部支圧	○	○	相違なし
②	ピン 	せん断	○	○	相違なし
③	パイプ 	圧縮	○	○	相違なし
		溶接部せん断	○	○	相違なし

表 5-17 RTS 型ロッドレストレイントの
構造部材に対する評価項目の比較及び追加根拠 (2/2)

品番	評価部位	評価項目	今回 工認	既工認	評価項目の相違及び 評価項目追加根拠
④	コネクティングパイプ溶接部 	溶接部せん断	○	○	相違なし
⑤	コネクティングイーヤ 	穴部引張	○	○	相違なし
		穴部せん断	○	○	相違なし
		穴部支圧	○	○	相違なし
⑥	インナーチューブ 	イーヤ穴部 引張	○	○	相違なし
		イーヤ穴部 せん断	○	○	相違なし
		イーヤ穴部 支圧	○	○	相違なし
		せん断	○	○	相違なし
—	全長	座屈	○	○	相違なし (③パイプの圧縮応力評 価にて実施)

5.2 J E A G 4 6 0 1 に規定の許容限界に対する定格荷重の裕度の算出

J E A G 4 6 0 1 に規定の許容限界に対する定格荷重の裕度の算出にあたり，5.1 で抽出した評価部位及び評価項目について，定格荷重を用いて J E A G 4 6 0 1 に規定の強度評価を実施する。また，J E A G 4 6 0 1 に規定の許容限界に対する定格荷重の裕度として，許容応力に対する発生応力の裕度を算出した結果を表 5-18～表 5-20 に示す。

表5-18 J E A G 4 6 0 1 に規定の許容限界に対する定格荷重の裕度（メカニカルスナッパ）

型式	定格荷重 (kN)	許容応力状態ⅢA S の評価結果					許容応力状態ⅣA S の評価結果				
		最小裕度部品*	応力分類	発生応力 (MPa)	許容応力 (MPa)	裕度	最小裕度部品*	応力分類	発生応力 (MPa)	許容応力 (MPa)	裕度
SMS-01	1	六角ボルト					六角ボルト				
SMS-03	3	六角ボルト					六角ボルト				
SMS-06	6	ベアリング押さえ					ベアリング押さえ				
SMS-1	10	コネクティングチューブ					コネクティングチューブ				
SMS-3	30	ボールねじ					ボールねじ				
SMS-6	60	コネクティングチューブ					ベアリング押さえ				
SMS-10	100	ベアリング押さえ					ベアリング押さえ				
SMS-16	160	ベアリング押さえ					ベアリング押さえ				
SMS-25	250	ベアリング押さえ					ベアリング押さえ				
SMS-40	400	コネクティングチューブ					コネクティングチューブ				
SMS-60	600	コネクティングチューブ					コネクティングチューブ				

注記*：最小裕度部位は、対応する許容応力状態の一次応力及び一次+二次応力評価結果の中から、最小裕度となる部位を選定している。

表 5-19 J E A G 4 6 0 1 に規定の許容限界に対する定格荷重の裕度 (オイルスナツバ)

型式	定格荷重 (kN)	許容応力状態Ⅲ A S の評価結果				許容応力状態Ⅳ A S の評価結果					
		最小裕度部品*1	応力分類	発生応力 (MPa)	許容応力 (MPa)	裕度	最小裕度部品*1	応力分類	発生応力 (MPa)	許容応力 (MPa)	裕度
SHP-03	3	コネクティングパイプ					コネクティングパイプ				
SHP-06	6	アダプタ					アダプタ				
SHP-1	10	コネクティングパイプ					コネクティングパイプ				
SHP-3	30	コネクティングパイプ					コネクティングパイプ				
SHP-6	60	イーヤ及びコンロッド					イーヤ及びコンロッド				
SHP-10	100	イーヤ					イーヤ				
SHP-16	160	イーヤ及びコンロッド					イーヤ及びコンロッド				
SHP-25	250	ターンバックル					ターンバックル				
SN-03	3	コネクティングパイプ					コネクティングパイプ				
SN-06	6	コネクティングパイプ					コネクティングパイプ				
SN-1	10	コネクティングパイプ					コネクティングパイプ				
SN-3	30	コネクティングパイプ					コネクティングパイプ				
SN-6	60	コネクティングパイプ					コネクティングパイプ				
SN-10	100	コネクティングパイプ					コネクティングパイプ				
SN-16	160	コネクティングパイプ					イーヤ				
SN-25	250	コネクティングパイプ					イーヤ				
SN-40	400	ダイレクトイーヤ					ピストンロッド				
SN-60	600	ダイレクトイーヤ					ダイレクトイーヤ				
SN-100	1000	ダイレクトイーヤ					六角ボルト				

注記*1：最小裕度部位は、対応する許容応力状態の一次応力及び一次+二次応力評価結果の中から、最小裕度となる部位を選定している。

*2：ダイレクトイーヤは、イーヤ部とパイプ部の評価項目があり、Ⅲ A S はパイプ部、一次+二次応力はイーヤ部が最小裕度となる。

表5-20 J E A G 4 6 0 1 に規定の許容限界に対する定格荷重の裕度 (ロッドレストレイント)

型式	定格荷重 (kN)	許容応力状態Ⅲ△Sの評価結果				許容応力状態Ⅳ△Sの評価結果					
		最小裕度部品*	応力分類	発生応力 (MPa)	許容応力 (MPa)	裕度	最小裕度部品*	応力分類	発生応力 (MPa)	許容応力 (MPa)	裕度
RSA-06	9	パイプ (全長座屈)									
RSA-1	15	パイプ (全長座屈)									
RSA-3	45	パイプ (全長座屈)									
RSA-6	90	スヘリカルアイボルト									
RSA-10	150	スヘリカルアイボルト									
RSA-16	240	スヘリカルアイボルト									
RSA-25	375	スヘリカルアイボルト									
RTS-06	9	パイプ (全長座屈)									
RTS-1	15	パイプ (全長座屈)									
RTS-3	45	パイプ (全長座屈)									
RTS-6	90	コネクティングイーヤ									
RTS-10	150	コネクティングイーヤ									
RTS-16	240	コネクティングイーヤ									
RTS-25	375	コネクティングイーヤ									
RTS-60	900	インナーチューブ									

注記*：最小裕度部位は、対応する許容応力状態の一次応力及び一次十二次応力評価結果の中から、最小裕度となる部位を選定している。

5.3 耐力試験において確認された限界耐力値に対する定格荷重の裕度の算出

5.3.1 耐力試験において確認された限界耐力値の概要

今回工認の二次評価において適用する新規基準値については、電共研において策定された限界耐力値を踏まえて設定を行うが、必要に応じて他の研究成果により得られた知見を取り込むこととする。限界耐力値は、機能部品も含めてスナッパの機能を確認した耐力値であり、振動試験及び低速走行試験の試験結果から策定されたものである。

電共研では、スナッパの耐力評価手法を構築することを目的として、地震に対する強度・機能の限界値を試験で確認するため、スナッパが破損するまで段階的に荷重を増加させる振動試験を実施している。また、それぞれの振動試験後には、加振後のスナッパの機能維持を確認するため、低速走行試験も併せて実施している。これらの試験により、当該荷重の負荷後も機能維持できる荷重値として、各型式の限界耐力値が策定されている。限界耐力値策定手順の詳細については別紙4に示す。

【限界耐力値の策定手順】

・手順 1 :

振動試験により機能喪失する試験ケースを除いた試験ケースにおける最大荷重（耐力確認荷重）を取得する。

・手順 2 :

試験結果から得られた破損時の最大負荷荷重*²（図 5-11 参照）に基づいて、耐力評価式を用いて算出した耐力値を限界耐力値として設定する。この際、限界耐力値は耐力確認荷重を下回るように安全側に設定される。また、別型式の試験結果から得られた知見を踏まえ、必要に応じて限界耐力値が保守的な設定となるように耐力評価式を見直している。

また、電共研においては、耐力算出式から限界耐力値を算出する際に、構造部材についてはより実際の耐力値*¹に近い限界耐力値を設定するため、許容応力算出式の規格に基づいた式からの見直し、許容応力へのミルシート値の適用等を考慮して限界耐力値を設定していた。（詳細は別紙 4 を参照）これに対し、今回工認では新規基準値の設定に際し、新規基準値による各構成部品の強度評価を実施しており（詳細は別紙 3 に示す）、この評価では、許容応力算出式及び許容応力値は規格に基づいた式及び値を適用していることから、この評価結果によって新規基準値が有する保守性が確認できる。

今回工認において適用する限界耐力値は破損時の最大負荷荷重及び耐力確認荷重に基づいて設定しており、試験のばらつきを考慮する必要があることから、電共研に加えて J N E S 研究の試験結果も考慮し設定した。

注記*1：用語の定義 No. 21 参照

*2：用語の定義 No. 16 参照

■ : 機能維持された状態 ■ : 機能喪失した状態

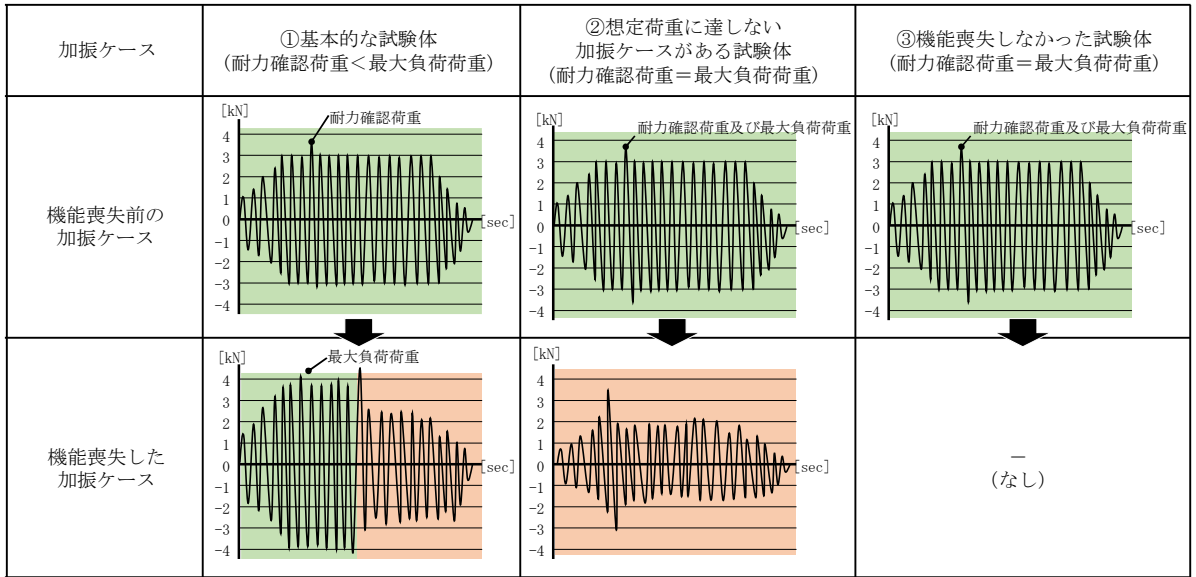


図 5-11 最大負荷荷重及び耐力確認荷重の考え方

5.3.2 限界耐力値に対する定格荷重の裕度の算出

耐力試験において確認された限界耐力値に対する定格荷重の裕度を表 5-21, 22 に示す。なお, 限界耐力値については, 電共研及び J N E S 研究で対象としている全ての構造部材及び機能部品の中から, 型式ごとに最小値となるものを算出している。

表 5-21 耐力試験において確認された限界耐力値に対する定格荷重の裕度 (メカニカルスナッパ)

型式	電共研			JNES研究				
	① 定格 荷重 (kN)	② 限界 耐力値 (kN)	②/① 限界耐力値に対す る定格荷重の裕度	最小裕度 部品の 分類	③ 限界 耐力値 (kN)	③/① 限界耐力値に対す る定格荷重の裕度	最小裕度部品	最小裕度 部品の 分類
SMS-01	1	19.0	19.00	六角ボルト 構造部材				
SMS-03	3	18.8	6.26	六角ボルト 構造部材				
SMS-06	6	16.8	2.80	ベアリング押さえ 構造部材				
SMS-1	10	53.9	5.39	コネクティング チューブ 構造部材				
SMS-3	30	75.3	2.51	アンギュラー 玉軸受 機能部品				
SMS-6	60	170.6	2.84	ベアリング押さえ 構造部材				
SMS-10	100	224.5	2.24	ベアリング押さえ 構造部材				
SMS-16	160	344.2	2.15	ベアリング押さえ 構造部材				
SMS-25	250	490.3	1.96	ベアリング押さえ 構造部材				
SMS-40	400	941.4	2.35	コネクティング チューブ 構造部材				
SMS-60	600	1353.3	2.25	ダイレクトアタッチ ブラケット 構造部材				

表5-22 耐力試験において確認された限界耐力値に対する定格荷重の裕度（オイルスナッパ）

型式	電共研				JNES研究			
	① 定格 荷重 (kN)	② 限界 耐力値 (kN)	②/① 限界耐力値に対す る定格荷重の裕度	最小裕度 部品の 分類	③ 限界 耐力値 (kN)	③/① 限界耐力値に対す る定格荷重の裕度	最小裕度部品	最小裕度 部品の 分類
SHP-03	3	5.3	1.76	全長座屈 構造部材				
SHP-06	6	14.1	2.35	全長座屈 構造部材				
SHP-1	10	22.7	2.27	全長座屈 構造部材				
SHP-3	30	50.8	1.69	全長座屈 構造部材				
SHP-6	60	141.8	2.36	全長座屈 構造部材				
SHP-10	100	196.1	1.96	全長座屈 構造部材				
SHP-16	160	318.7	1.99	全長座屈 構造部材				
SHP-25	250	514.8	2.05	ターンバックル 構造部材				
SN-03	3	9.1	3.03	全長座屈 構造部材				
SN-06	6	16.4	2.73	全長座屈 構造部材				
SN-1	10	26.2	2.62	全長座屈 構造部材				
SN-3	30	70.6	2.35	全長座屈 構造部材				
SN-6	60	125.5	2.09	タイロッド (シール性) 機能部品				
SN-10	100	205.9	2.05	ジャンクシヨン コラムアダプタ 構造部材				
SN-16	160	321.6	2.01	タイロッド (シール性) 機能部品				
SN-25	250	465.8	1.86	ダイレクトトイヤー 構造部材				
SN-40	400	—	—	—				
SN-60	600	—	—	—				
SN-100	1000	—	—	—				

5.4 新規基準値の設定

5.2 及び 5.3 にて算出した J E A G 4 6 0 1 に規定の許容限界及び耐力試験において確認された限界耐力値に対する定格荷重の裕度を比較し、それらの最小値以下の数値で新規耐力係数を設定し、定格荷重に乗じることにより、新規基準値を設定した。なお、新規耐力係数については、設計時の作業の効率化を考慮して、基本型式* (SMS, SN, SHP, RSA, RTS) ごとに一律の値で設定することを基本としているが、新規基準値を設定することによる支持装置の評価基準値引き上げの効果も踏まえて設定する。新規基準値の設定に関する主要なパラメータの設定方法を図 5-12 に、SMS 型メカニカルスナッパを例に新規耐力係数の具体的な設定方法を表 5-23 に示す。

また、支持装置の構造部材の評価部位及び評価項目について、設定した新規基準値に対する強度評価を実施し、J E A G 4 6 0 1 に規定の許容限界を満足することを確認した。

設定した新規耐力係数を表 5-24～表 5-26、新規基準値を表 5-27～表 5-29 に示す。また、設定した新規基準値に対する強度評価結果を別紙 3 に示す。本項にて設定した新規基準値を今回工認の二次評価において適用する。

注記*：用語の定義 No. 27 参照

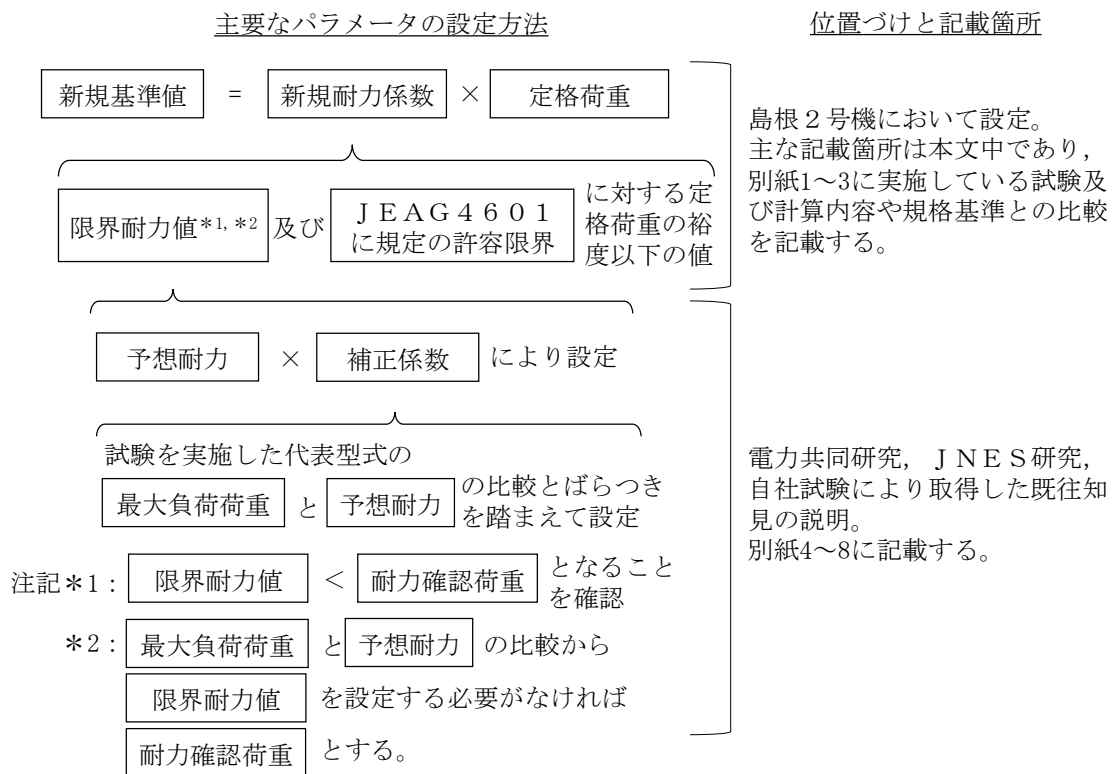


図 5-12 新規基準値の設定に関する主要なパラメータの設定方法

表 5-23 新規耐力係数の具体的な設定方法
(基本型式：SMS 型メカニカルスナッパの例)

		① 裕度の算出				② 一律の新規耐力係数の仮設定		③ 新規耐力係数の設定	
		J E A G 4 6 0 1 に規定の許容限界及び耐力試験において確認された限界耐力値に対する定格荷重の裕度を算出する。				①にて算出した最小裕度を基に、設計の簡便性を考慮して、最小裕度以下となる一律の新規耐力係数を仮設定する。		②で仮設定した一律の新規耐力係数のうち、①にて算出した裕度に対して余裕がある型式については、評価基準値の引き上げの効果も踏まえて、精緻に設定する。	
型式	定格荷重 (kN)	定格荷重の裕度				一律の新規耐力係数 (仮設定)		新規耐力係数	
		J E A G 4 6 0 1 に規定の許容限界		耐力試験において確認された限界耐力値		Ⅲ A S	Ⅳ A S	Ⅲ A S	Ⅳ A S
Ⅲ A S	Ⅳ A S	電共研	J N E S 研究	Ⅲ A S	Ⅳ A S				
SMS-01	1			19.00					
SMS-03	3			6.26					
SMS-06	6			2.80					
SMS-1	10			5.39					
SMS-3	30			2.51					
SMS-6	60			2.84					
SMS-10	100			2.24					
SMS-16	160			2.15					
SMS-25	250			1.96					
SMS-40	400			2.35					
SMS-60	600			2.25					

■ : 各評価における最小裕度

太字 : ②で仮設定した一律の新規耐力係数よりも精緻に設定した新規耐力係数

表 5-24 J E A G 4 6 0 1 に規定の許容限界及び耐力試験において確認された限界耐力値に対する定格荷重の裕度を考慮して設定した新規耐力係数 (メカニカルスナッパ)

型式	定格荷重 (kN)	定格荷重の裕度				新規耐力係数	
		J E A G 4 6 0 1 に規定の許容限界*1		耐力試験において確認された限界耐力値*2		Ⅲ A S	Ⅳ A S
		Ⅲ A S	Ⅳ A S	電共研	J N E S 研究		
SMS-01	1			19.00			
SMS-03	3			6.26			
SMS-06	6			2.80			
SMS-1	10			5.39			
SMS-3	30			2.51			
SMS-6	60			2.84			
SMS-10	100			2.24			
SMS-16	160			2.15			
SMS-25	250			1.96			
SMS-40	400			2.35			
SMS-60	600			2.25			

注記*1 : (J E A G 4 6 0 1 に規定の許容限界) / (定格荷重) により算出

*2 : (電共研または J N E S 研究において策定した限界耐力値) / (定格荷重) により算出

表 5-25 J E A G 4 6 0 1 に規定の許容限界及び耐力試験において確認された限界耐力値に対する定格荷重の裕度を考慮して設定した新規耐力係数（オイルスナッパ）

型式	定格荷重 (kN)	定格荷重の裕度				新規耐力係数	
		J E A G 4 6 0 1 に規定の許容限界*1		耐力試験において確認された限界耐力値*2, *3			
		Ⅲ A S	Ⅳ A S	電共研	J N E S 研究	Ⅲ A S	Ⅳ A S
SHP-03	3			1.76			
SHP-06	6			2.35			
SHP-1	10			2.27			
SHP-3	30			1.69			
SHP-6	60			2.36			
SHP-10	100			1.96			
SHP-16	160			1.99			
SHP-25	250			2.05			
SN-03	3			3.03			
SN-06	6			2.73			
SN-1	10			2.62			
SN-3	30			2.35			
SN-6	60			2.09			
SN-10	100			2.05			
SN-16	160			2.01			
SN-25	250			1.86			
SN-40	400			—			
SN-60	600			—			
SN-100	1000			—			

注記*1：（J E A G 4 6 0 1 に規定の許容限界）／（定格荷重）により算出

*2：（電共研または J N E S 研究において策定した限界耐力値）／（定格荷重）により算出

*3：耐力試験にて限界耐力値を確認していない場合は「—」と記載する。

表 5-26 J E A G 4 6 0 1 に規定の許容限界及び耐力試験において確認された限界耐力値に対する定格荷重の裕度を考慮して設定した新規耐力係数（ロッドレストレイント）

型式	定格荷重 (kN)	定格荷重の裕度				新規耐力係数	
		J E A G 4 6 0 1 に規定の許容限界*1		耐力試験において確認された限界耐力値*2, *3			
		Ⅲ A S	Ⅳ A S	電共研	J N E S 研究	Ⅲ A S	Ⅳ A S
RSA-06	9			—			
RSA-1	15			—			
RSA-3	45			—			
RSA-6	90			—			
RSA-10	150			—			
RSA-16	240			—			
RSA-25	375			—			
RTS-06	9			—			
RTS-1	15			—			
RTS-3	45			—			
RTS-6	90			—			
RTS-10	150			—			
RTS-16	240			—			
RTS-25	375			—			
RTS-60	900			—			

注記*1：（J E A G 4 6 0 1 に規定の許容限界）／（定格荷重）により算出

*2：（電共研または J N E S 研究において策定した限界耐力値）／（定格荷重）により算出

*3：耐力試験にて限界耐力値を確認していない場合は「—」と記載する。

*4：本型式は、今回工認にて新規に設計したものであり、地震時荷重が増大した特定の箇所に適用している。当該特定箇所における地震時荷重は定格荷重もしくは定格荷重×1.2 以下となることが確認できていることから、新規耐力係数はそれぞれ と として設定している。

表 5-27 今回工認の二次評価において適用する新規基準値（メカニカルスナッパ）

型式	定格荷重 (kN)	新規耐力係数		新規基準値*1 (二次評価荷重)	
		Ⅲ _A S	Ⅳ _A S	Ⅲ _A S (kN)*2	Ⅳ _A S (kN)*3
SMS-01	1				
SMS-03	3				
SMS-06	6				
SMS-1	10				
SMS-3	30				
SMS-6	60				
SMS-10	100				
SMS-16	160				
SMS-25	250				
SMS-40	400				
SMS-60	600				

注記*1：（新規耐力係数）×（定格荷重）により算出

*2：配管反力が定格荷重を超えた場合に，二次評価を行うための許容応力状態Ⅲ_AS
に対する許容荷重を示す。

*3：配管反力が定格荷重を超えた場合に，二次評価を行うための許容応力状態Ⅳ_AS
に対する許容荷重を示す。

表 5-28 今回工認の二次評価において適用する新規基準値（オイルスナッパ）

型式	定格荷重 (kN)	新規耐力係数		新規基準値*1 (二次評価荷重)	
		Ⅲ _A S	Ⅳ _A S	Ⅲ _A S (kN)*2	Ⅳ _A S (kN)*3
SHP-03	3				
SHP-06	6				
SHP-1	10				
SHP-3	30				
SHP-6	60				
SHP-10	100				
SHP-16	160				
SHP-25	250				
SN-03	3				
SN-06	6				
SN-1	10				
SN-3	30				
SN-6	60				
SN-10	100				
SN-16	160				
SN-25	250				
SN-40	400				
SN-60	600				
SN-100	1000				

注記*1：（新規耐力係数）×（定格荷重）により算出

*2：配管反力が定格荷重を超えた場合に、二次評価を行うための許容応力状態Ⅲ_AS に対する許容荷重を示す。

*3：配管反力が定格荷重を超えた場合に、二次評価を行うための許容応力状態Ⅳ_AS に対する許容荷重を示す。

表 5-29 今回工認の二次評価において適用する新規基準値（ロードレストレイント）

型式	定格荷重 (kN)	新規耐力係数		新規基準値* ¹ (二次評価荷重)	
		Ⅲ _A S	Ⅳ _A S	Ⅲ _A S (kN)* ²	Ⅳ _A S (kN)* ³
RSA-06	9				
RSA-1	15				
RSA-3	45				
RSA-6	90				
RSA-10	150				
RSA-16	240				
RSA-25	375				
RTS-06	9				
RTS-1	15				
RTS-3	45				
RTS-6	90				
RTS-10	150				
RTS-16	240				
RTS-25	375				
RTS-60	900				

注記*1：(新規耐力係数) × (定格荷重) により算出

*2：配管反力が定格荷重を超えた場合に、二次評価を行うための許容応力状態Ⅲ_AS に対する許容荷重を示す。

*3：配管反力が定格荷重を超えた場合に、二次評価を行うための許容応力状態Ⅳ_AS に対する許容荷重を示す。

6. 結論

島根2号機の機器・配管系の支持構造物のうち支持装置の設計では、既工認と同様、地震時における支持装置の発生荷重がJ E A G 4 6 0 1を踏まえてあらかじめ設定した設計上の基準値を満足することを一次評価として確認している。また、設計上の基準値を超えた場合には、あらかじめ設定した設計上の基準値に余裕があること等を考慮し、J E A G 4 6 0 1に定める許容限界を満足する範囲内で新たに設定した設計上の基準値を設定し、その基準値を用いた二次評価を評価手順に追加することとした。

今回工認の二次評価において適用する新規基準値は、支持装置の構造部材に対する強度評価及び機能部品を含む機能確認に対する荷重評価に基づいて設定することとし、構造部材に対する強度評価においては、J E A G 4 6 0 1に基づく評価方法、地震時の荷重伝達経路を踏まえて、評価部位及び評価項目を追加した評価を行い、許容応力状態Ⅲ A S及びⅣ A Sの許容限界を満足するように設定した。また、機能部品を含む機能確認に対する荷重評価においては、耐力試験の限界耐力値に対する定格荷重の裕度の最小値以下となるように新規耐力係数を設定した。

以上より、今回工認における支持装置の評価は、耐震性が確保される評価手法であることを確認した。

スナップ確性試験の概要

1. はじめに

機器・配管系の支持装置として用いるスナップは、地震によって生じる配管反力（地震荷重）のような急速な配管移動は拘束する一方、熱膨張などによって生じる緩やかな配管移動に対しては拘束せず自由に伸縮する機能を有している。

このスナップの機能については、定格荷重や定格荷重×1.5の負荷後においても維持されることを確認する確性試験が実施されており、振動等に対して拘束する機能については振動応答試験や過負荷振動試験、低速度移動に対して自由に伸縮する機能については低速走行試験でそれぞれの機能維持が確認されている。なお、スナップの確性試験については、メカニカルスナップもオイルスナップもほぼ同様の項目について実施していることから、本資料での説明はメカニカルスナップを代表として示す。

2. メカニカルスナップの確性試験の概要

2.1 試験内容

確性試験では、振動負荷後の性能維持を確認するため、振動応答試験、定格荷重×1.5の荷重に対する過負荷振動試験及び低速走行試験等の試験を実施している。確性試験のフローを図2-1に示す。

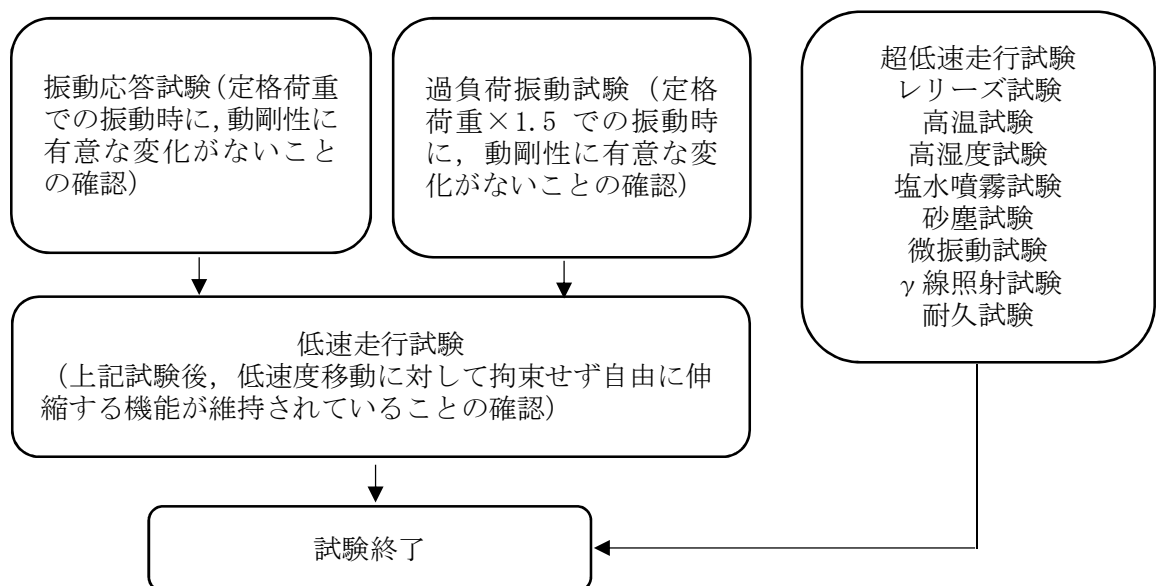


図 2-1 確性試験フロー

2.2 スナッパ試験方法（振動応答試験，過負荷振動試験，低速走行試験）



確性試験の試験項目と試験内容を表 2-1 に示す。

表 2-1 確性試験の各試験項目（メカニカルスナップの例）

試験項目	確認事項	試験内容
振動応答試験		
過負荷振動試験		
低速走行試験		
超低速走行試験		
リリース試験*2		
高温試験*3		
高湿度試験*3		
塩水噴霧試験*3		
砂塵試験*3		
微振動試験*3		
γ線照射試験*3		
耐久試験		

注記*1：スティックスリップ現象は、機械部品の摩擦面において、静止摩擦力が作用する付着状態と、動摩擦力が作用する滑り状態が交互に発生することによる自励振動現象である。

*2：リリース試験は、熱変位を想定したゆっくりとした変位を与えているところに、地震を想定した素早い変位を与えることで、地震によりブレーキ機構が作動した後での熱移動への追従を確認するものである。

*3：各環境試験後に振動試験及び低速走行試験を実施する。

2.3 メカニカルスナッパ確性試験の結果

振動応答試験により定格荷重となる振動を負荷した後、あるいは過負荷振動試験により定格荷重×1.5 となる振動を負荷した後であっても、振動による顕著な性能への影響は認められず、低速走行試験においても発生抵抗力は判定基準（設計要求値）以下であったため、メカニカルスナッパに要求される性能を維持できることが確認された。

また、環境試験では、原子炉格納容器内における冷却材喪失事故時の環境に曝されても性能を維持すること、プラント寿命中に定期的なメンテナンスを必要とせずに機能を維持すること、砂塵やγ線照射等の環境でも機能を維持することが確認された。

支持装置の耐震設計に係る技術基準及び適用規格の内容

1. 実用発電用原子炉及びその附属施設の技術基準に関する規則

実用発電用原子炉及びその附属施設の技術基準に関する規則では、地震力に対して「施設の機能を維持していること又は構造強度を確保していること」を要求している。

実用発電用原子炉及びその附属施設の技術基準に関する規則	実用発電用原子炉及びその附属施設の技術基準に関する規則の解釈
<p>(地震による損傷の防止)</p> <p>第五条 設計基準対象施設は、これに作用する地震力（設置許可基準規則第四条第二項の規定により算定する地震力をいう。）による損壊により公衆に放射線障害を及ぼさないように施設しなければならない。</p> <p>2 耐震重要施設（設置許可基準規則第三条第一項に規定する耐震重要施設をいう。以下同じ。）は、基準地震動による地震力（設置許可基準規則第四条第三項に規定する基準地震動による地震力をいう。以下同じ。）に対してその安全性が損なわれるおそれがないように施設しなければならない。</p>	<p>第5条（地震による損傷の防止）</p> <p>1 第1項の規定は、設置許可基準規則第4条第1項の規定に基づき設置許可で確認した設計方針に基づき、設計基準対象施設が、設置許可基準規則第4条第2項の地震力に対し、施設の機能を維持していること又は構造強度を確保していることをいう。</p> <p>2 第2項の規定は、設置許可基準規則第4条第3項の規定に基づき設置許可で確認した設計方針に基づき、耐震重要施設が、設置許可基準規則第4条第3項の基準地震動による地震力に対し、<u>施設の機能を維持していること又は構造強度を確保していること</u>をいう。</p>

2. 耐震設計に係る工認審査ガイド

耐震設計に係る工認審査ガイドでは、適用可能な規格及び基準として J E A G 4 6 0 1 が記載されている。

4. 機器・配管系に関する事項

4.3 許容限界

【審査における確認事項】

機器・配管系の耐震設計においては、安全上適切と認められる規格及び基準等に基づき許容限界を設定していることを確認する。

【確認内容】

許容限界については以下を確認する。

- (1) 「安全上適切と認められる規格及び基準等」として、適用可能な規格及び基準等を以下に示す。なお、Bクラス、Cクラスの機器・配管系の基準地震動 S_s による地震力に対する波及的影響の検討を実施する際の許容限界については、J E A G 4 6 0 1 又は既往の研究等を参考に設定していること。

- ・ J E A G 4 6 0 1

- ・ 発電用原子力設備規格設計・建設規格（(社)日本機械学会，2005/2007）

3. 原子力発電所耐震設計技術指針 J E A G 4 6 0 1-1987

原子力発電所耐震設計技術指針 J E A G 4 6 0 1-1987 の配管支持構造物に関する規定を以下に記載する。

- ① 設計用地震力による適切な応力・強度解析に基づいた地震応力と、他の荷重による応力との組み合わせがその許容限界内にあることを確認すること（「解析による設計」）を基本とし、許容限界だけから律することができない機器の機能維持上の評価が必要な場合、振動試験等によって確認すること（「試験による評価」）もできる。（J E A G 4 6 0 1-1987「6.1.1 耐震設計の基本方針（2）耐震設計と安全性評価」による）
- ② 「解析による設計」が行われる場合はその耐震重要度に応じた設計用地震力と組み合わせるべき他の荷重による各種応力が、それぞれに対応する許容応力限度以内となることの確認を基本とする。また、「試験による設計」の場合は、強度評価のみならず機能維持の観点からの評価も含まれる。（J E A G 4 6 0 1-1987「6.1.7 耐震安全性評価」による）
- ③ 強度評価は、応力計算を行って許容応力と比較するものが大部分であるが、荷重による評価を行う場合、機器の機能維持評価が必要な場合がある。荷重の評価では、あらかじめ計算により標準荷重あるいは限界荷重を求めておく場合、試験により許容荷重を確認しておく場合などがある。（J E A G 4 6 0 1-1987「6.6.1 荷重・応力の組合せ（2）地震応力算定の概要」による）

① J E A G 4 6 0 1-1987 「6.1.1 耐震設計の基本方針 (2) 耐震解析と安全性評価」

(2) 耐震解析と安全性評価

機器・配管系は、その耐震上の重要度に応じて適切に分類され、それぞれの耐震クラス (As, A, B, C) に応じた設計用地震力に対して安全であることを確認しなければならない。

設計用地震力は、それぞれの耐震クラスに対応した水平静的震度による地震力と、As, A クラスでは更に設計用限界地震及び設計用最強地震による基準地震動 S_2 , S_1 に対し適切な地震応答解析に基づいた動的地震力と鉛直震度による静的地震力を算定しなければならない。

機器・配管系の耐震安全性評価は、上記設計用地震力による適切な応力・強度解析に基づいた地震応力と、組合すべき他の荷重による応力との組合せ応力がその許容限界内にあることを確認すること (解析による設計) を基本とする。しかし、系の解析の複雑さ、信頼度の問題、あるいは系の耐震安全性が応力許容限界だけから律することが出来ない機器の機能維持上の評価が必要な場合は振動試験等によって確認すること (試験による評価) もできる。

設計用地震力 (各クラスの静的地震力及び As, A クラスの基準地震動 S_1 に基づく動的地震力) による系の 1 次応力は、使用材料の降伏点以内、1 次 + 2 次応力を算定する必要のある系では、それが過大な歪を与えない範囲にあることを基本とするが、これは系の地震応答が巨視的にみて線形・弾性挙動の範囲にあることを意図している。したがって、解析による設計では、系の地震時 1 次応力は適切に算定することが必要であるが、2 次応力は系の線形・弾性挙動、あるいは地震時の低サイクル疲労等に影響があると判断される場合に評価することを基本とする。ただし、耐震 As, A クラスのものはその構造の重要性からみて、著しい 2 次応力の発生が考えられるところはその 2 次応力を適切に評価するものとする。

耐震 As クラスの基準地震動 S_2 に基づく動的地震力に対しては、非線形・弾塑性挙動の範囲に入ることは差支えないが、この場合は系の靱性を十分考慮し、系の限界強度又は機能維持上妥当な安全性を有していることを確認しなければならない。

試験による評価の場合は、相似率、据付位置の地震動特性等を考慮した適切な振動試験又はこれと同等な試験を実施し、組合せるべき他の荷重の効果を考慮して強度又は機能上妥当な安全性を有していることを確認するものとする。

② J E A G 4 6 0 1 -1987 「6.1.7 耐震安全性評価」

6.1.7 耐震安全性評価

原子炉施設の機器・配管系の耐震安全性評価は、「解析による設計」が行われる場合は、その耐震重要度に応じた設計用地震力と組合せるべき他の荷重による各種応力が、それぞれに対応する許容応力限度以内にあることを確認することを基本とする。しかし、機器系の種別によってはその機能が、強度評価だけでは不十分な場合があるので十分留意しなければならない。この点「試験による評価」の場合は、強度評価のみならず機能維持の観点からの評価も含まれるが、試験体の相似性、地震入力特性等の妥当性確認が重要である。

なお、 S_2 地震時の A_s クラス機器系の耐震安全性評価に当たって、建屋の弾塑性応答が顕著な場合には、建屋自体の弾塑性応答特性、変形特性、床応答への影響、弾塑性挙動の信頼度等に留意することが必要であろう。

③ J E A G 4 6 0 1 -1987 「6.1.1 荷重・応力の組合せ (2) 地震応力算定概要」

(2) 地震応力算定の概要

本項では、「6.5 地震応答解析」で述べた地震応答解析から得られた地震荷重をもとに行う応力・強度評価について、その一般的な事項について述べる。

機器系の耐震設計における強度評価は応力計算を行って許容応力と比較するものが大部分であるが、このほか、荷重による評価を行う場合もあり、また、ひずみあるいは変形制限、機器の機能維持評価が必要な場合もある。

応力・強度解析の手法は対象機器に応じ、それぞれ適切な方法で行っているが、基本的な流れは図6.6.1-1のとおりである。

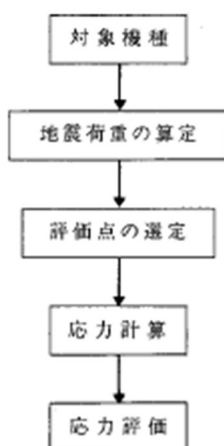


図 6.6.1-1 応力・強度解析の基本的な流れ

ここで応力評価については、大別すると次の二つの方法がある。

応力強さによる評価：第1種容器、配管、第2種容器に適用し、詳細な応力解析を行って評価する。

最大応力による評価：一般機器、支持構造物に適用し、比較的簡便に応力計算を行って評価する。

また、応力計算においても、対象機種の重要度、形状の複雑さ等に応じ、精密な手法から比較的簡便な手法までである。すなわち、有限要素法、シェル構造解析、はりによる

解析、骨組構造解析等、大型計算機を利用した計算から、単純な形状のものでは材料力学の基本的な式による計算から求める場合もある。

また、容器類の局部応力を求める場合は、Bijlaardの方法あるいは有限要素法が用いられる。

応力評価以外の強度評価法としては、荷重による評価があり、これは、あらかじめ計算により標準荷重あるいは限界荷重を求めておく場合、試験により許容荷重を確認しておく場合などがある。

4. 原子力発電所耐震設計技術指針 J E A G 4 6 0 1 ・ 補-1984

支持装置に対する要求事項として、原子力発電所耐震設計技術指針 J E A G 4 6 0 1 ・ 補-1984 の「直接支持構造物」に関する規定を以下に記載する。

- ① 支持装置は、被支持体となる設備に直接取り付けられる支持構造物であり、このような支持構造物は J E A G 4 6 0 1 ・ 補-1984 「3.3 適用にあたっての留意事項」 c. における「直接支持構造物」に該当する。
- ② なお、 J E A G 4 6 0 1 ・ 補-1984 「2.9.1 その他の支持構造物の許容応力の解説」に、「直接支持構造物」はさらに「告示で規定される支持構造物」と「その他の支持構造物」に分類される。
- ③ 告示で規定される支持構造物の許容応力は J E A G 4 6 0 1 ・ 補-1984 「2.8 支持構造物の許容応力」に、告示で規定される種別に応じて規定されている。
- ④ その他の支持構造物の許容応力は J E A G 4 6 0 1 ・ 補-1984 「2.9.1 その他の支持構造物の許容応力」に、「2.8.1 第1種支持構造物」(2) の規定を準用し、使用材料に応じて規定されている。

以上より、支持装置は J E A G 4 6 0 1 の「直接支持構造物」に該当し、構造部材に対する強度評価のみが求められている。

3.3 適用にあたっての留意事項

当該施設に課せられる機能は、その機能に直接的に関連するもののほか、補助的な役割をもつもの、支持構造物等の間接的な施設をも含めた健全性が保たれて初めて維持し得るものであることを考慮し、これらを主要設備、補助設備、直接支持構造物、間接支持構造物及び設備相互間の影響を考慮すべき設備に区分する。

安全上要求される同一の機能上の分類に属する主要設備、補助設備及び直接支持構造物については同一の耐震重要度とするが、間接支持構造物の支持機能及び設備相互間の影響の評価については、それぞれ関連する設備の耐震設計に適用される地震動に対して安全上支障ないことを確認するものとする。

各区分ごとの設備とは、次のものをいう。

- a. 主要設備とは、当該機能に直接的に関連する系統設備をいう。
- b. 補助設備とは、当該機能に間接的に関連し、主要設備の補助的役割をもつものをいう。⁽¹⁾
- c. 直接支持構造物とは、主要設備、補助設備に直接取り付けられる支持構造物、若しくはこれらの設備の荷重を直接的に受ける支持構造物をいう。⁽²⁾
- d. 間接支持構造物とは、直接支持構造物から伝達される荷重を受ける鉄筋コンクリート、鉄骨等の構造物（建物、構築物）をいう。
- e. 設備相互間の影響を考慮すべき設備とは、⁽³⁾下位の耐震クラスに属するものの破損によって上位の分類に属するものに波及的影響を及ぼすおそれのある設備をいう。

注：(1) 主要設備が補助的役割をもつ機能を必要とせずに、それ自体で安全上の当該機能を満す場合には、主要設備の付属設備については、補助設備とみなさない。
たとえば、安全機能上の「閉」の動作を要求されるような格納容器隔離弁（主要設備）がフェイルセーフの設計になっている場合は、通常動作を与える付属設備（電気・計装設備）は、補助設備とみなさない。

(2) 直接支持構造物の範囲は、次のとおりとする。

- a. 昭和55年通商産業省告示 501 号「発電用原子力設備に関する構造等の技術基準」（以下告示という。）で規定している支持構造物の範囲

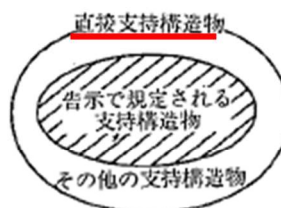
② J E A G 4 6 0 1 ・ 補-1984 「2.9.1 その他の支持構造物の許容応力の解説」

その他の支持構造物の許容応力の解説

(1) 本項では「その他の支持構造物」の許容応力と「その他の支持構造物」に含まれるもの
のうち「電気計装設備」「換気空調設備」については具体例を示した。

(2) 「その他の支持構造物」とは本指針の直接支持構造物の範囲であって告示で規定される
支持構造物の範囲外を意味している。

図 2 - 12

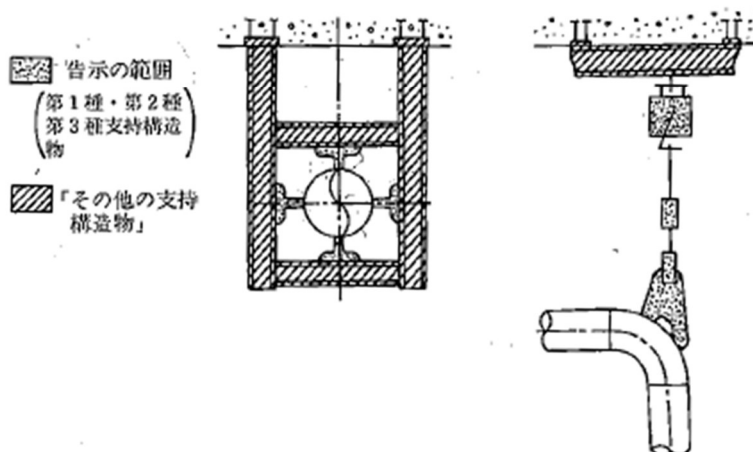


例えば、次のものがある。

- a. 耐震用サポーター, 耐震用スナッパー
- b. 使用済燃料ラック, 配管, ケーブルトレイ及び電線
管の支持架構
- c. 電気盤の主体構造等骨組構造物
- d. 空調ユニット, フィルタユニット等の骨組構造物

(3) 「その他の支持構造物」と告示で規定される支持構造
物との取り合いは、耐圧部から「その他の支持構造物」の鉄骨部表面を境とし溶接部及び
ボルトまでを、告示の適用範囲とする。(図 2 - 13参照)

図 2 - 13



② J E A G 4 6 0 1 ・ 補-1984 「2.8 支持構造物の許容応力」

2.8 支持構造物の許容応力

2.8.1 第1種支持構造物の許容応力

(1) 容器に溶接により取付けられる支持構造物

容器に溶接により取付けられる支持構造物であって、その損壊が耐圧部の損壊を生じさせるおそれのあるものについては容器の耐圧部と同じ許容応力とする。

(2) 上記以外の支持構造物（ボルト等を除く）

応力分類 許容 応力状態	1 次 応 力					1 次 + 2 次 応 力				
	引張	せん断	圧縮	曲げ	支圧	引張 圧縮	せん断	曲げ	支圧	座 屈
設計条件	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
I _A	f_t	f_s	f_c	f_b	f_p	$3f_t$	$3f_s^{(1)}$	$3f_b$	$1.5f_p^{(3)}$	$1.5f_s$ 又は $1.5f_c^{(3)}$
II _A	f_t	f_s	f_c	f_b	f_p	$3f_t$	$3f_s^{(1)}$	$3f_b$	$1.5f_p^{(3)}$	$1.5f_s$ 又は $1.5f_c^{(3)}$
III _A	$1.5f_t$	$1.5f_s$	$1.5f_c$	$1.5f_b$	$1.5f_p$	—	—	—	—	—
IV _A	$1.5f_t^*$	$1.5f_s^*$	$1.5f_c^*$	$1.5f_b^*$	$1.5f_p^*$	—	—	—	—	—
III _A S	$1.5f_t$	$1.5f_s$	$1.5f_c$	$1.5f_b$	$1.5f_p$	$3f_t$	$3f_s^{(1)}$	$3f_b^{(2)}$	$1.5f_p^{(4)}$	$1.5f_b^{(2)(4)}$
IV _A S	$1.5f_t^*$	$1.5f_s^*$	$1.5f_c^*$	$1.5f_b^*$	$1.5f_p^*$	(S_1 又は S_2 地震動のみによる応力振幅について評価する)			$1.5f_p^{(4)}$	$1.5f_s$ 又は $1.5f_c$

- 注：(1) すみ肉溶接部にあつては最大応力に対して $1.5f_s$ とする。
 (2) 告示第88条第3項第一号イ同により求めた f_b とすること。
 (3) 応力の最大圧縮値について評価する。
 (4) 自重、熱膨張等により常時作用する荷重に、地震動による荷重を重ね合せて得られる応力の圧縮最大値について評価を行うこと。
 (5) 鋼構造設計規準（日本建築学会（1970年度制定））等の幅厚比の制限を満足すること。
 (6) 上記応力の組合せが考えられる場合には、組合せ応力に対しても評価を行うこと。
 (7) 耐圧部に溶接等により直接取付けられる支持構造物であつて耐圧部と一体の応力解析を行うものについては耐圧部と同じ許容応力とする。

2.8.2 第2種支持構造物の許容応力

2.8.1の(2)、(3)及び(4)の規定を準用する。

2.8.3 第3種支持構造物の許容応力

2.8.1の(2)、(3)及び(4)の規定を準用する。

③ J E A G 4 6 0 1 ・ 補-1984 「2.8 支持構造物の許容応力」

**2.9 その他の支持構造物，電気計装設備，換気空調設備，埋込金物の許容
応力**

2.9.1 その他の支持構造物の許容応力

使用済燃料ラック，ケーブルトレイ，電線コンジット，配管の支持架構等その他の支持構造物の地震時許容応力については2.8.1の(2)，(3)及び(4)の規定を準用し，この場合のF値は次に定める値とする。

「告示別表第9に定める値又は告示別表第10に定める値の0.7倍の値のいずれか小さい方の値。ただし，使用温度が40度を超えるオーステナイト系ステンレス鋼及び高ニッケル合金にあつては，告示別表第9に定める値の1.35倍の値，告示別表第10に定める値の0.7倍の値又は室温における告示別表第9に定める値のいずれか小さい方の値。」

なお，その他の支持構造物であつて，告示に規定される機器（第1種，第2種及び第3種）の耐圧部に直接溶接される部分については，2.8の規定による。また使用済燃料ラックの地震時の許容応力については，2.8.1の(2)の規定を準用する。

支持装置の強度評価方法（構造部材に対する強度評価）

1. 記号の定義

支持装置の強度計算式に使用する記号は、次の通りとする。

記号	単位	定 義
A_c	mm^2	圧縮応力計算に用いる断面積
A_p	mm^2	支圧応力計算に用いる断面積
A_s	mm^2	せん断応力計算に用いる断面積
A_t	mm^2	引張応力計算に用いる断面積
B	mm	せん断寸法
C, C_1	mm	引張断面寸法
$D, d, D_1 \sim D_4$	mm	外径, 内径, 穴径, 軸径
E	MPa	縦弾性係数
e, T_{e1}, T_{e2}	mm	溶接部のど厚
F	MPa	支持構造物の許容応力を決定するための基準値
F_b	MPa	曲げ応力
F_c	MPa	圧縮応力
F_p	MPa	支圧応力
F_s	MPa	せん断応力
F_t	MPa	引張応力
f_c	MPa	許容圧縮応力
h, h_1	mm	すみ肉溶接部脚長
I	mm^4	断面二次モーメント
i	mm	断面二次半径
K	MPa	内圧
L	mm	部材長さ
ℓ_k	mm	座屈長さ
M	mm	ねじ径
n	本	本数
P	kN, N	許容荷重
R, r_1, r_2	mm	半径, 内半径, 外半径
T, t	mm	厚さ
β	deg	開先角度
β_{10}	—	ベアリング押さえ曲げ応力係数 （「機械工学便覧 A4 材料力学」による）
Λ	—	限界細長比
λ	—	部材有効細長比

記号	単位	定義
a, b, c, d, e, f, g, h, i, j, k, m, p, Q	mm	座屈計算に用いる部材代表長さ
$I_1 \sim I_8$	mm ⁴	座屈計算に用いる断面二次モーメント

2. 評価手法

支持装置（構造部材）の強度評価は、二次評価荷重に対して各強度部位の最弱部に発生する各応力を次の計算式により算出し、許容応力以下であることを確認する。

なお、適用型式を明記している評価項目以外は評価部位及び評価式について、型式ごとの違いはない。

2.1 SMS 型メカニカルスナッパ

① ブラケット

i 引張応力評価

引張応力が許容引張応力以下であることを確認する。

ii せん断応力評価

せん断応力が許容せん断応力以下であることを確認する。

iii 支圧応力評価

支圧応力が許容支圧応力以下であることを確認する。

② ジャンクションコラム (Aタイプ)

i 六角ボルト引張応力評価

六角ボルト引張応力が許容引張応力以下であることを確認する。

ii 溶接部せん断応力評価 (型式 01~1)

溶接部せん断応力が許容せん断応力以下であることを確認する。

iii 溶接部引張応力評価 (型式 3~60)

溶接部引張応力が許容引張応力以下であることを確認する。

iv コラム引張応力評価

コラムの引張応力が許容引張応力以下であることを確認する。

③ ロードコラム (型式 01~25)

i 引張応力評価

引張応力が許容引張応力以下であることを確認する。

ii ねじ部せん断応力評価 (部品全体の評価)

ねじ部のせん断応力が, 許容せん断応力以下であることを確認する。

iii ねじ部せん断応力評価 (ねじ山のせん断の評価)

ねじ部のせん断応力が, 許容せん断応力以下であることを確認する。

④ ピン


i せん断応力評価

せん断応力が許容せん断応力以下であることを確認する。

⑤ コネクティングチューブ（Aタイプ）

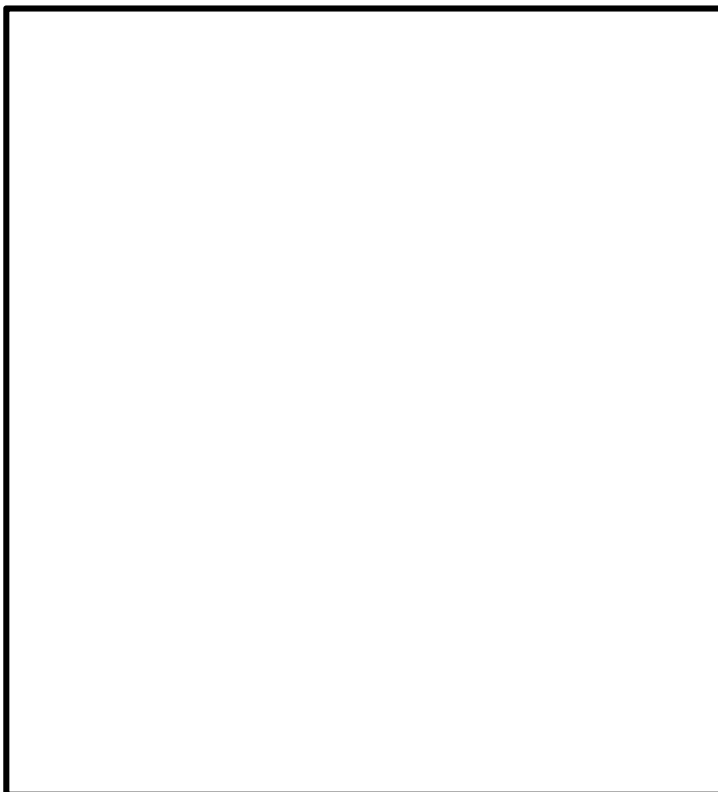
i 圧縮応力評価

圧縮応力が許容圧縮応力以下であることを確認する。

A series of approximately 12 horizontal rectangular redaction boxes of varying lengths, stacked vertically, covering the content of the compression stress evaluation section.

ii 引張応力評価

引張応力が許容引張応力以下であることを確認する。

A single horizontal rectangular redaction box covering the content of the tensile stress evaluation section.A large, empty rectangular box with a black border, occupying the lower half of the page.

iii 溶接部せん断応力評価 (型式 01~1)

溶接部せん断応力が許容せん断応力以下であることを確認する。

iv 溶接部引張応力評価 (型式 3~25)

溶接部引張応力が許容引張応力以下であることを確認する。

v 溶接部せん断応力評価 (型式 40, 60)

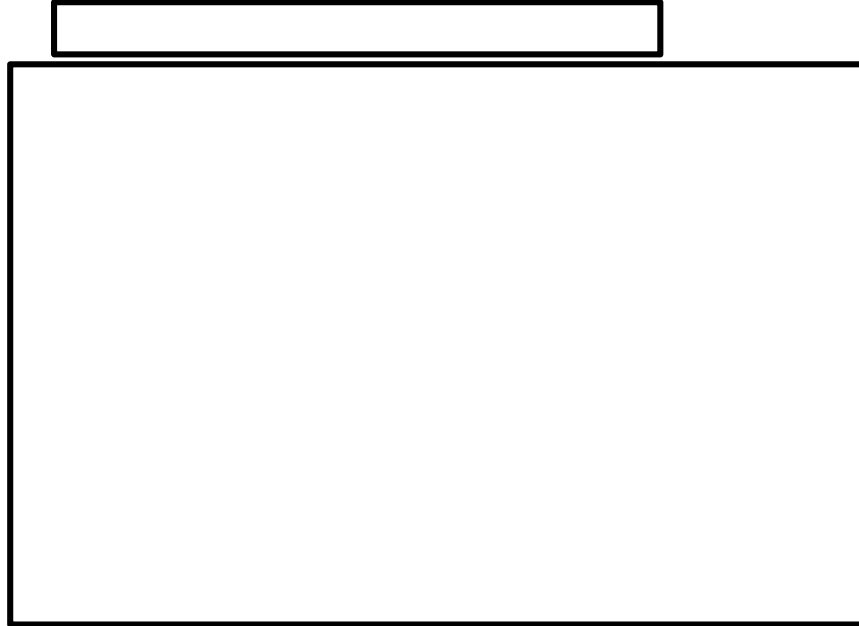
溶接部せん断応力が許容せん断応力以下であることを確認する。

vi 現地溶接部せん断応力評価 (型式 01~3)

現地溶接部せん断応力が許容せん断応力以下であることを確認する。

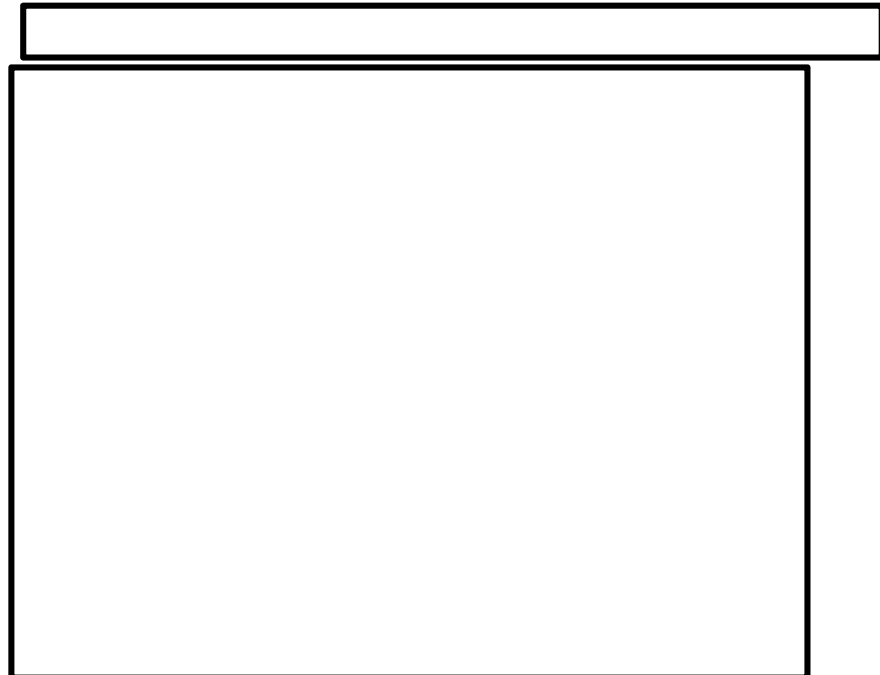
vii 現地溶接部せん断応力評価（型式 6～25）

現地溶接部せん断応力が許容せん断応力以下であることを確認する。

A large rectangular area that has been redacted with a thick black border, covering the majority of the page's content for item vii.

viii 現地溶接部せん断応力評価（型式 40, 60）

現地溶接部せん断応力が許容せん断応力以下であることを確認する。

A large rectangular area that has been redacted with a thick black border, covering the majority of the page's content for item viii.

⑥ ケース、ベアリング押さえ及び六角ボルト

i ケース

(i) 引張応力評価

引張応力が許容引張応力以下であることを確認する。

(ii) せん断応力評価

せん断応力が許容せん断応力以下であることを確認する。

(iii) 支圧応力評価

支圧応力が許容支圧応力以下であることを確認する。

ii ベアリング押さえ

(i) せん断応力評価

せん断応力が許容せん断応力以下であることを確認する。

(ii) 支圧応力評価

支圧応力が許容支圧応力以下であることを確認する。

(iii) 曲げ応力評価

曲げ応力が許容曲げ応力以下であることを確認する。

iii 六角ボルト

(i) 引張応力評価

引張応力が許容引張応力以下であることを確認する。

⑦ イーヤ

i 引張応力評価

引張応力が許容引張応力以下であることを確認する。

ii せん断応力評価

せん断応力が許容せん断応力以下であることを確認する。

iii 支圧応力評価

支圧応力が許容支圧応力以下であることを確認する。

iv ねじ部引張応力評価

引張応力が許容引張応力以下であることを確認する。

v ねじ部せん断応力評価 (部品全体の評価)

ねじ部のせん断応力が、許容せん断応力以下であることを確認する。

vi ねじ部せん断応力評価 (ねじ山のせん断の評価)

ねじ部のせん断応力が、許容せん断応力以下であることを確認する。

⑧ ユニバーサルボックス

i 引張応力評価

引張応力が許容引張応力以下であることを確認する。

ii せん断応力評価

せん断応力が許容せん断応力以下であることを確認する。

iii 支圧応力評価

支圧応力が許容支圧応力以下であることを確認する。

⑨ コネクティングチューブイーヤ部 (Aタイプ)

i 引張応力評価

引張応力が許容引張応力以下であることを確認する。

ii せん断応力評価

せん断応力が許容せん断応力以下であることを確認する。

iii 支圧応力評価

支圧応力が許容支圧応力以下であることを確認する。



⑩ ユニバーサルブラケット

i 引張応力評価

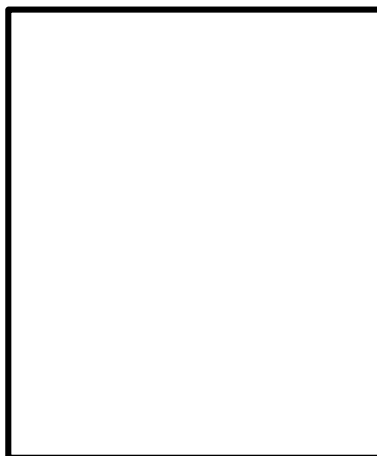
引張応力が許容引張応力以下であることを確認する。

ii せん断応力評価

せん断応力が許容せん断応力以下であることを確認する。

iii 支圧応力評価

支圧応力が許容支圧応力以下であることを確認する。



⑪ ダイレクトアタッチブラケット（Bタイプ）

i 引張応力評価

引張応力が許容引張応力以下であることを確認する。

ii せん断応力評価

せん断応力が許容せん断応力以下であることを確認する。

iii 支圧応力評価

支圧応力が許容支圧応力以下であることを確認する。

iv 溶接部せん断応力評価

溶接部せん断応力が許容せん断応力以下であることを確認する。

⑬ ベ어링ナット

i ねじ部せん断応力評価

ねじ部せん断応力が許容せん断応力以下であることを確認する。

⑭ ボールねじ

i 引張応力評価

引張応力が許容引張応力以下であることを確認する。

全長座屈

座屈耐力 P_c は以下の式から算出する。なお、座屈耐力 P_c は、電共研の知見で定められた最弱部位に応じて求まる補正係数 α を考慮して算定する。

上記式より、座屈耐力 であることを確認する。なお、座屈耐力 P_c の計算に用いる各種記号は以下の通り。

座屈長さ比 L' 及び関係する断面二次モーメント比 I' は以下の通り。

ここで、

各部の断面二次モーメント I は以下より求める。

各部断面に係る寸法 $a \sim m$ 及び座屈長さ l_k は下図の通り。

2.2 SHP 型オイルスナッパ

① ブラケット

i 引張応力評価

引張応力が許容引張応力以下であることを確認する。

ii せん断応力評価

せん断応力が許容せん断応力以下であることを確認する。

iii 支圧応力評価

支圧応力が許容支圧応力以下であることを確認する。

② ピストンロッド

i 引張応力評価

引張応力が許容引張応力以下であることを確認する。

ii ねじ部引張応力評価

ねじ部引張応力が許容引張応力以下であることを確認する。

③ コネクティングパイプ(Aタイプ及びBタイプ)

i 圧縮応力評価

圧縮応力が許容圧縮応力以下であることを確認する。

[Redacted content]

ii 穴部引張応力評価

穴部引張応力が許容引張応力以下であることを確認する。

[Redacted content]

iii 穴部せん断応力評価

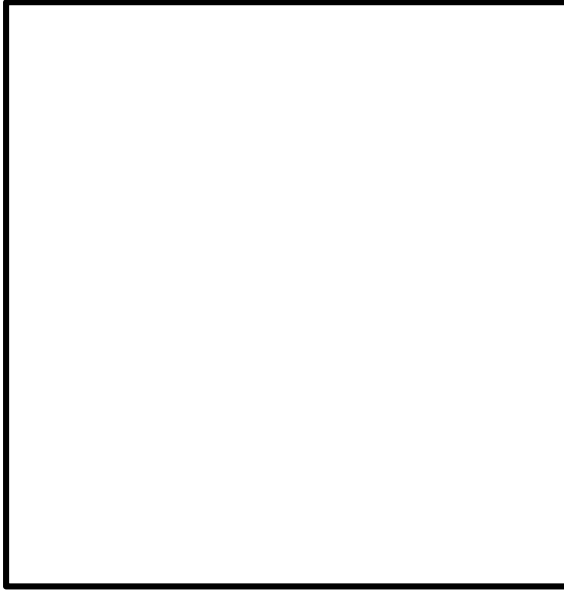
せん断応力が許容せん断応力以下であることを確認する。

[Redacted content]

iv 穴部支圧応力評価

支圧応力が許容支圧応力以下であることを確認する。

[Redacted content]



v 溶接部せん断応力評価

溶接部せん断応力が許容せん断応力以下であることを確認する。



④ ピン

i せん断応力評価

せん断応力が許容せん断応力以下であることを確認する。

⑤ シリンダチューブ

i 引張応力評価

内圧により生ずる引張応力が許容引張応力以下であることを確認する。

ii 圧縮応力評価

内圧により生ずる圧縮応力が許容圧縮応力以下であることを確認する。

⑥ 六角ボルト

i 引張応力評価

引張応力が許容引張応力以下であることを確認する。

⑦ イーヤ (Cタイプ)

i 穴部引張応力評価

穴部引張応力が許容引張応力以下であることを確認する。

ii 穴部せん断応力評価

穴部せん断応力が許容せん断応力以下であることを確認する。

iii 穴部支圧応力評価

穴部支圧応力が許容支圧応力以下であることを確認する。

iv 溶接部せん断応力評価

溶接部せん断応力が許容せん断応力以下であることを確認する。

⑧ スペリカルアイボルト（Aタイプ）

i 穴部引張応力評価

引張応力が許容引張応力以下であることを確認する。

ii 穴部せん断応力評価

せん断応力が許容せん断応力以下であることを確認する。

iii 穴部支圧応力評価

支圧応力が許容支圧応力以下であることを確認する。

iv ボルト部引張応力評価

引張応力が許容引張応力以下であることを確認する。

⑨ コンロッド (Bタイプ), ⑩ コンロッド (Cタイプ)

i ロッド部引張応力評価

引張応力が許容引張応力以下であることを確認する。

ii 溶接部せん断応力評価

せん断応力が許容せん断応力以下であることを確認する。

iii 穴部引張応力評価

穴部引張応力が許容引張応力以下であることを確認する。

iv 穴部せん断応力評価

せん断応力が許容せん断応力以下であることを確認する。

v 穴部支圧応力評価

支圧応力が許容支圧応力以下であることを確認する。

⑪ ターンバックル（Aタイプ）

i 引張応力評価

引張応力が許容引張応力以下であることを確認する。

ii 溶接部せん断応力評価（型式 16 及び 25）

溶接部せん断応力が許容せん断応力以下であることを確認する。

⑫ シリンダカバー

i せん断応力評価

内圧により生ずるせん断応力が許容せん断応力以下であることを確認する。

⑬ タイロッド

i 引張応力評価

引張応力が許容引張応力以下であることを確認する。

ii ねじ部引張応力評価

ねじ部引張応力が許容引張応力以下であることを確認する。

⑭ アダプタ(Aタイプ及びBタイプ)

i 引張応力評価

引張応力が許容引張応力以下であることを確認する。

ii 溶接部せん断応力評価

溶接部せん断応力が許容せん断応力以下であることを確認する。



iii 現場溶接部せん断応力評価

現場溶接部せん断応力が許容せん断応力以下であることを確認する。



⑯ ロッドカバー

i せん断応力評価

せん断応力が許容せん断応力以下であることを確認する。



全長座屈

座屈耐力 P_c は以下の式から算出する。なお、座屈耐力 P_c は、電共研の知見で定められた最弱部位に応じて求まる補正係数 α を考慮して算定する。

上記式より、座屈耐力 であることを確認する。なお座屈耐力 P_c の計算に用いる各種記号は以下の通り。

座屈長さ比 L' 及び関係する断面二次モーメント比 I' は以下の通り。

ここで、

各部の断面二次モーメント I は以下より求める。

- ・型式 03~25 の場合

各部断面に係る寸法 $a\sim m$ 及び座屈長さ l_k は下図の通り。

2.3 SN型オイルスナップ

① ブラケット

i 引張応力評価

引張応力が許容引張応力以下であることを確認する。

ii せん断応力評価

せん断応力が許容せん断応力以下であることを確認する。

iii 支圧応力評価

支圧応力が許容支圧応力以下であることを確認する。



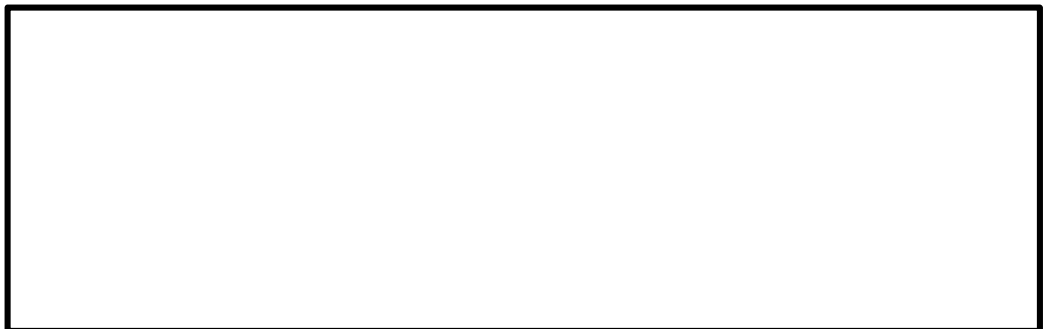
② ピストンロッド

i 引張応力評価

引張応力が許容引張応力以下であることを確認する。

ii ねじ部引張応力評価

ねじ部引張応力が許容引張応力以下であることを確認する。



iii カラー部せん断応力評価 (型式 40~100)

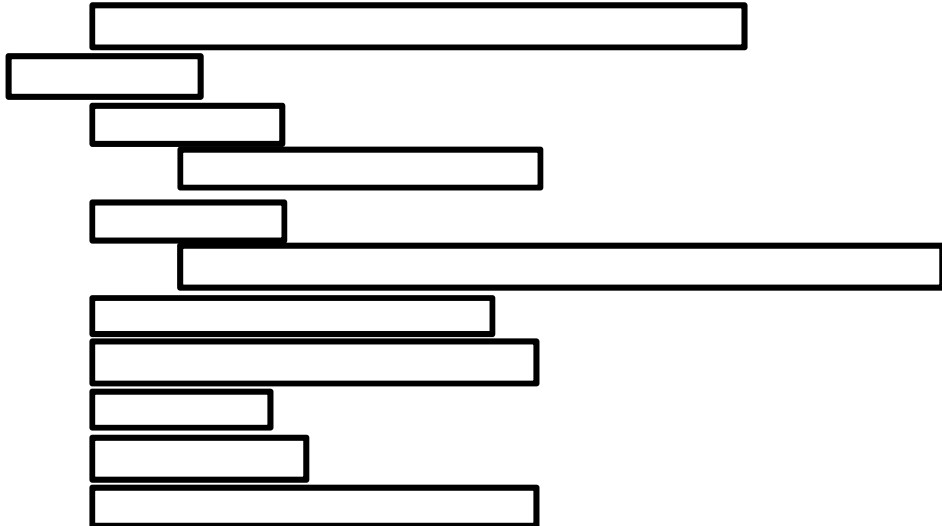
せん断応力が許容せん断応力以下であることを確認する。



③ コネクティングパイプ (型式 03~25)

i 圧縮応力評価

圧縮応力が許容圧縮応力以下であることを確認する。



ii 穴部引張応力評価

穴部引張応力が許容引張応力以下であることを確認する。



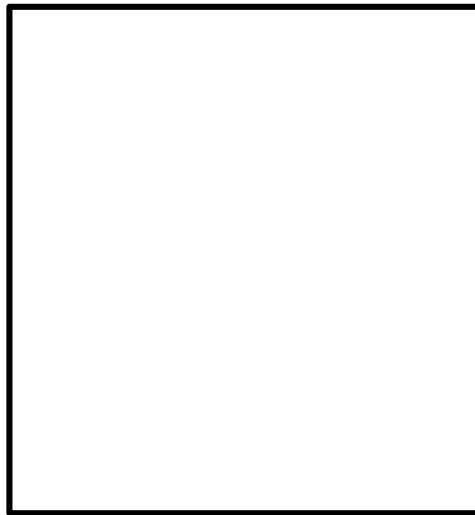
iii 穴部せん断応力評価

穴部せん断応力が許容せん断応力以下であることを確認する。



iv 穴部支圧応力評価

穴部支圧応力が許容支圧応力以下であることを確認する。



v 溶接部せん断応力評価


溶接部せん断応力が許容せん断応力以下であることを確認する。



④ ピン

i せん断応力評価

せん断応力が許容せん断応力以下であることを確認する。



⑤ シリンダチューブ

i 引張応力評価

内圧により生ずる引張応力が許容引張応力以下であることを確認する。

ii 圧縮応力評価 (型式 03~25)

内圧により生ずる圧縮応力が許容圧縮応力以下であることを確認する。

⑥ 六角ボルト

i 引張応力評価

引張応力が許容引張応力以下であることを確認する。

⑦ イーヤ

i 穴部引張応力評価

穴部引張応力が許容引張応力以下であることを確認する。

ii 穴部せん断応力評価

穴部せん断応力が許容せん断応力以下であることを確認する。

iii 穴部支圧応力評価

穴部支圧応力が許容支圧応力以下であることを確認する。

iv 溶接部せん断応力評価 (型式 03～25)

溶接部せん断応力が許容せん断応力以下であることを確認する。

v ボルト取付部引張応力評価 (型式 40～100)

ボルト取付部引張応力が許容引張応力以下であることを確認する。

vi ねじ部せん断応力評価 (型式 40～100)

ねじ部せん断応力が許容せん断応力以下であることを確認する。

vii パイプ部圧縮応力評価（型式 40～100）

圧縮応力が許容圧縮応力以下であることを確認する。

[Redacted content]

[Redacted content]

⑧ ロッドエンド

i 引張応力評価

引張応力が許容引張応力以下であることを確認する。

ii せん断応力評価

せん断応力が許容せん断応力以下であることを確認する。

iii 支圧応力評価

支圧応力が許容支圧応力以下であることを確認する。

iv ボルト部引張応力評価

ボルト部引張応力が許容引張応力以下であることを確認する。

v ねじ部せん断応力評価

ねじ部せん断応力が許容せん断応力以下であることを確認する。

⑨ シリンダカバー

i せん断応力評価

内圧により生ずるせん断応力が許容せん断応力以下であることを確認する。

⑩ タイロッド

i 引張応力評価

引張応力が許容引張応力以下であることを確認する。

⑪ アダプタ

i 引張応力評価

引張応力が許容引張応力以下であることを確認する。

ii 溶接部せん断応力評価

溶接部せん断応力が許容せん断応力以下であることを確認する。

⑫ ロッドカバー

i せん断応力評価

内圧により生ずるせん断応力が許容せん断応力以下であることを確認する。

⑭ ホルダ（型式 03～25）

i せん断応力評価

せん断応力が許容せん断応力以下であることを確認する。



全長座屈

座屈耐力 P_c は以下の式から算出する。なお、座屈耐力 P_c は、電共研の知見で定められた最弱部位に応じて求まる補正係数 α を考慮して算定する。

上記式より、座屈耐力 であることを確認する。なお、座屈耐力 P_c の計算に用いる各種記号は以下の通り。

座屈長さ比 L' 及び関係する断面二次モーメント比 I' は以下の通り。

ここで、

各部の断面二次モーメント I は以下より求める。

各部断面に係る寸法 $a \sim m$, p , Q 及び座屈長さ l_k は下図の通り。

2.4 RSA 型ロッドレストレイント

① ブラケット

i 引張応力評価

引張応力が許容引張応力以下であることを確認する。

A rectangular box with a black border, used to redact information.

ii せん断応力評価

せん断応力が許容せん断応力以下であることを確認する。

A rectangular box with a black border, used to redact information.

iii 支圧応力評価

支圧応力が許容支圧応力以下であることを確認する。

A rectangular box with a black border, used to redact information.A large rectangular box with a black border, used to redact a significant portion of the page's content.

② ピン

i せん断応力評価

せん断応力が許容せん断応力以下であることを確認する。

A rectangular box with a black border, used to redact information.A rectangular box with a black border, used to redact information.

③ スヘリカルアイボルト

i 穴部

(i) 引張応力評価

引張応力が許容引張応力以下であることを確認する。

(ii) せん断応力評価

せん断応力が許容せん断応力以下であることを確認する。

(iii) 支圧応力評価

支圧応力が許容支圧応力以下であることを確認する。

ii ボルト部

(i) 引張応力評価

引張応力が許容引張応力以下であることを確認する。

④ アジャストナット溶接部

i 引張応力評価

引張応力が許容引張応力以下であることを確認する。

⑤ パイプ

i 圧縮応力評価（全長座屈評価）

圧縮応力が許容圧縮応力以下であることを確認する。



2.5 RTS 型ロッドレストレイント

① ブラケット

i 引張応力評価

引張応力が許容引張応力以下であることを確認する。

ii せん断応力評価

せん断応力が許容せん断応力以下であることを確認する。

iii 支圧応力評価

支圧応力が許容支圧応力以下であることを確認する。

② ピン

i せん断応力評価

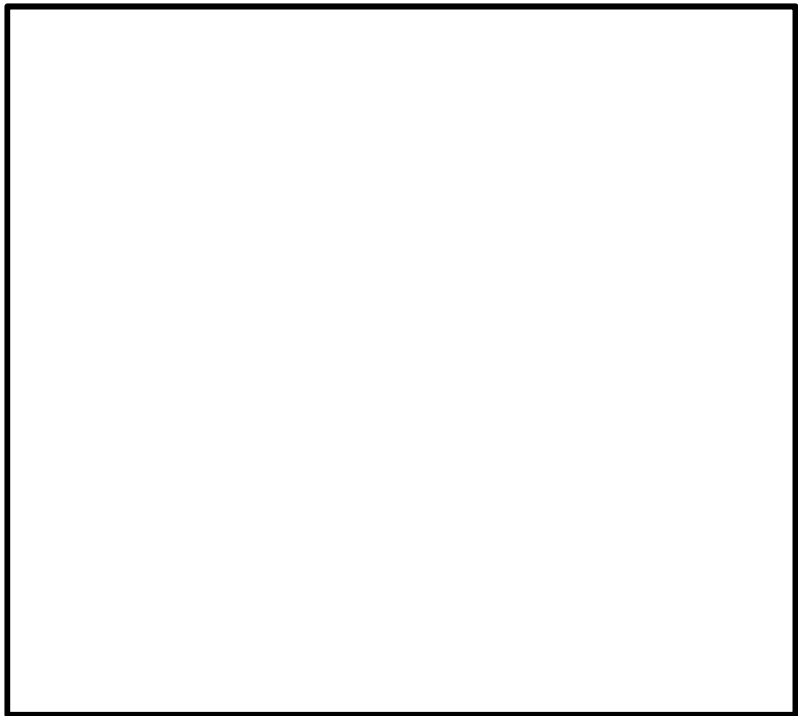
せん断応力が許容せん断応力以下であることを確認する。

③ パイプ

i パイプ部

(i) 圧縮応力評価（全長座屈評価）

圧縮応力が許容圧縮応力以下であることを確認する。



ii 溶接A部（型式 60）

(i) せん断応力評価

せん断応力が許容せん断応力以下であることを確認する。

iii 溶接B部（型式 60）

(i) せん断応力評価

せん断応力が許容せん断応力以下であることを確認する。

④ コネクティングパイプ溶接部（型式 06～25）

i せん断応力評価

せん断応力が許容せん断応力以下であることを確認する。

⑤ コネクティングイーヤ（型式 06～25）

i 引張応力評価

引張応力が許容引張応力以下であることを確認する。

ii せん断応力評価

せん断応力が許容せん断応力以下であることを確認する。

iii 支圧応力評価

支圧応力が許容支圧応力以下であることを確認する。

⑥ インナーチューブ (型式 60)

i イーヤ穴部

(i) 引張応力評価

引張応力が許容引張応力以下であることを確認する。

(ii) せん断応力評価

せん断応力が許容せん断応力以下であることを確認する。

(iii) 支圧応力評価

支圧応力が許容支圧応力以下であることを確認する。

ii 溶接部

(ii) せん断応力評価

せん断応力が許容せん断応力以下であることを確認する。

付属部品（クランプ及びブラケット）の強度計算例

クランプ及びブラケットは、支持装置本体ではなく、支持装置の付属部品として扱う。クランプ及びブラケットは、支持装置本体の型式とは別に、支持する配管や設置場所の条件によってサイズが異なるため、支持装置本体とは別に評価を実施する。具体的には、支持装置の二次評価荷重に対しそれぞれの部品毎に構造強度評価を行い、J E A G 4 6 0 1のその他の支持構造物の許容応力状態ⅢA S及びⅣA Sの許容応力を満足することを確認している。

クランプ及びブラケットの強度評価式及び強度評価例（代表として定格容量 3ton(30kN)とした）を以下に示す。なお、表1に支持装置のクランプ強度評価における記号の定義を示す。

(1) クランプの強度評価式

i 引張応力評価

引張応力が、許容引張応力以下であることを確認する。

ii せん断応力評価

せん断応力が、許容せん断応力以下であることを確認する。

iii 支圧応力評価

支圧応力が、許容支圧応力以下であることを確認する。

表 1 支持装置のクランプ強度評価における記号の定義

記号	単位	定 義
A _p	mm ²	支圧応力計算に用いる断面積
A _s	mm ²	せん断応力計算に用いる断面積
A _t	mm ²	引張応力計算に用いる断面積
B	mm	クランプ穴部せん断面寸法
C	mm	クランプ引張断面寸法
D	mm	クランプ穴径
d	mm	ピン径
F _p	MPa	支圧応力
F _s	MPa	せん断応力
F _t	MPa	引張応力
P	N	二次評価荷重
T	mm	クランプ厚さ

(2) 支持装置におけるクランプの強度評価結果

表 2 に許容応力状態Ⅳ_AS での二次評価荷重に対するクランプの強度評価結果を示す。全ての発生応力が許容応力以下であり、クランプの耐震性が確保されることを確認した。

表2 支持装置のクランプ強度評価例 (定格容量 3ton (30kN) の例)

配管口径	二次評価 荷重* (kN) (A)	引張応力		せん断応力		支圧応力	
		発生応力 (MPa)	許容応力 (MPa)	発生応力 (MPa)	許容応力 (MPa)	発生応力 (MPa)	許容応力 (MPa)
150A							
300A							
500A							
600A							

(3) ブラケットの強度評価式

i X-X 軸に関する本体の曲げ応力評価

曲げ応力が、許容引張応力以下であることを確認する。

ii Y-Y 軸に関する本体の曲げ応力評価

曲げ応力が、許容引張応力以下であることを確認する。

iii 本体の引張応力評価

引張応力が、許容引張応力以下であることを確認する。

iv 本体のせん断応力評価

せん断応力が、許容せん断応力以下であることを確認する。

v 本体の組合せ応力評価

組合せ応力が、許容引張応力以下であることを確認する。

ここで、

vi 穴部引張応力評価

引張応力が，許容引張応力以下であることを確認する。

vii 穴部せん断応力評価

せん断応力が，許容せん断応力以下であることを確認する。

viii 穴部支圧応力評価

支圧応力が，許容支圧応力以下であることを確認する。

表3 支持装置のブラケット強度評価における記号の定義

記号	単位	定義
A	mm ²	本体の応力計算に用いる断面積
A _p	mm ²	穴部支圧応力計算に用いる断面積
A _s	mm ²	穴部せん断応力計算に用いる断面積
A _t	mm ²	穴部引張応力計算に用いる断面積
B	mm	穴部せん断面寸法
C	mm	穴部引張断面寸法
D	mm	穴径
d	mm	ピン径
F _{bx}	MPa	X-X 軸に関する曲げ応力
F _{by}	MPa	Y-Y 軸に関する曲げ応力
F _p	MPa	支圧応力
F _s	MPa	せん断応力
F _t	MPa	引張応力
F _r	MPa	組合せ応力
H	mm	モーメントアーム
P	N	二次評価荷重
S	mm	ブラケット幅
T	mm	ブラケット厚さ
Z _x	mm ³	X 軸回りの断面係数
Z _y	mm ³	Y 軸回りの断面係数
α	deg	取り付け角度
θ	deg	取り付け角度

(4) 支持装置におけるブラケットの強度評価結果

表4に許容応力状態IV_ASでの二次評価荷重に対するブラケットの強度評価結果を示す。全ての発生応力が許容応力以下であり、ブラケットの耐震性が確保されることを確認した。

表 4 支持装置のブラケット強度評価例 (定格容量 3ton (30kN) の例) (1/2)

型式	二次 評価 荷重* (kN) (A)	本体												
		曲げ応力 (X-X 軸)		曲げ応力 (Y-Y 軸)		引張応力		せん断応力		組合せ応力				
		発生応力 (MPa)	許容応力 (MPa)	発生応力 (MPa)	許容応力 (MPa)	発生応力 (MPa)	許容応力 (MPa)	発生応力 (MPa)	許容応力 (MPa)	発生応力 (MPa)	許容応力 (MPa)			
3														

表 4 支持装置のブラケット強度評価例 (定格容量 3ton (30kN) の例) (2/2)

型式	二次 評価 荷重* (kN) (A)	穴部									
		引張応力		せん断応力		支圧応力					
		発生応力 (MPa)	許容応力 (MPa)	発生応力 (MPa)	許容応力 (MPa)	発生応力 (MPa)	許容応力 (MPa)				
3											

スナッパの電力共同研究の概要

1. はじめに

本資料では、今回工認で参照した「平成 12 年度 共同研究報告書 耐震設計に関する新知見に対する機器耐震評価法の研究(Phase2)」(以下「電共研」という。)の概要について説明する。

2. 研究の目的

原子力安全委員会は、平成 7 年の兵庫県南部地震を踏まえ耐震設計審査指針の妥当性が損なわれないことを確認したが、同時に耐震安全性に対する信頼性の向上を求めている。

また、地震学会や建築学会においても地震学の知見、耐震設計等が議論されており、特に敷地近傍の活断層による地震動の評価、直下地震の考え方等の地震学の新知見を、耐震設計関連指針に取り込むべきとの議論もあった。さらに、建築基準法の改正、動的な上下地震動の評価等の周辺状況を鑑み、耐震設計関連指針の改訂を総合的に検討する必要性が生じていた。

そこで、本電共研では、「共同研究報告書 耐震設計に関する新知見に対する機器耐震評価法の研究(Phase1)」(以下「Phase1 研究」という。)の研究成果を踏まえ、耐震設計関連の法規、指針類との整合性の検討を行うとともに、耐震設計評価手法の総合的検討を行っている。具体的な実施内容は以下のとおりである。

耐震設計評価手法の総合的検討

a. 架構類の耐震評価法の検討

配管系の耐震評価法のうち、特に架構類の合理的な許容応力体系を構築するとともに、バックチェック評価法としてスナッパの実力の耐力値を把握するために以下の検討を実施する。

(a) 既往研究の調査

スナッパの実力の耐力値及び架構類の許容応力緩和に関する既往研究を調査する。

(b) スナッパ限界耐力評価法の検討

スナッパの破壊試験により、スナッパの実力の耐力値を明らかにするとともに、メーカーが従来から用いている設計手法が、スナッパの許容限界(定格荷重)を超える荷重に対しても適用可能であるかを確認し、構造強度及び機能維持の面からのスナッパ限界耐力評価法を策定する。

(c) 架構類の許容応力体系の構築

架構類の弾塑性挙動を考慮した許容応力基準案を作成し、策定のための課題を抽出する。

b. 耐震設計評価手法の総合的検討

a. 項で抽出された課題を検討するとともに、構築された新しい耐震評価手法に対して、それが有する信頼性、裕度、実設計上の変更ポイント等について評価を実施し、現行指針との比較評価を実施する。

以降では、電共研における上記の取り組みのうち、a. (b)スナップ限界耐力評価法の検討におけるスナップについての検討の概要をまとめる。

3. スナップ限界耐力評価法の策定方針

スナップの異常要因分析等に基づき試験対象として選定されたスナップの破壊試験により、スナップの実力の耐力値を明らかにするとともに、メーカーが従来から用いている設計手法が、スナップの許容限界（定格荷重）を超える荷重に対しても適用可能であるかを確認し、構造強度及び機能維持の面からのスナップ限界耐力評価法を策定する。

スナップ限界耐力評価法策定のための検討フローを図 3-1 に示す。フローの (5) スナップの構造・強度の観点からの裕度推定にあたっては、J E A G 4 6 0 1 に基づく許容応力体系を用いており、機能維持の観点からの裕度推定にあたっては、部品メーカーの許容値の考え方を参考値として用いている。

また、フローの (8) 予想耐力*と試験結果（耐力確認荷重）の比較及び (9) ～ (10) 限界耐力評価法の見直しに関して、概念図を図 3-2 に示す。図のとおり、耐力確認荷重が最小裕度部位の予想耐力を上回る結果となった場合は予想耐力を上方修正するよう限界耐力評価法を見直し、耐力確認荷重が最小裕度部位の予想耐力を下回る結果となった場合又は想定していなかった部位が破損ないし機能喪失した場合は予想耐力を下方修正するよう限界耐力評価法を見直す。

注記*：用語の定義 No. 23 参照

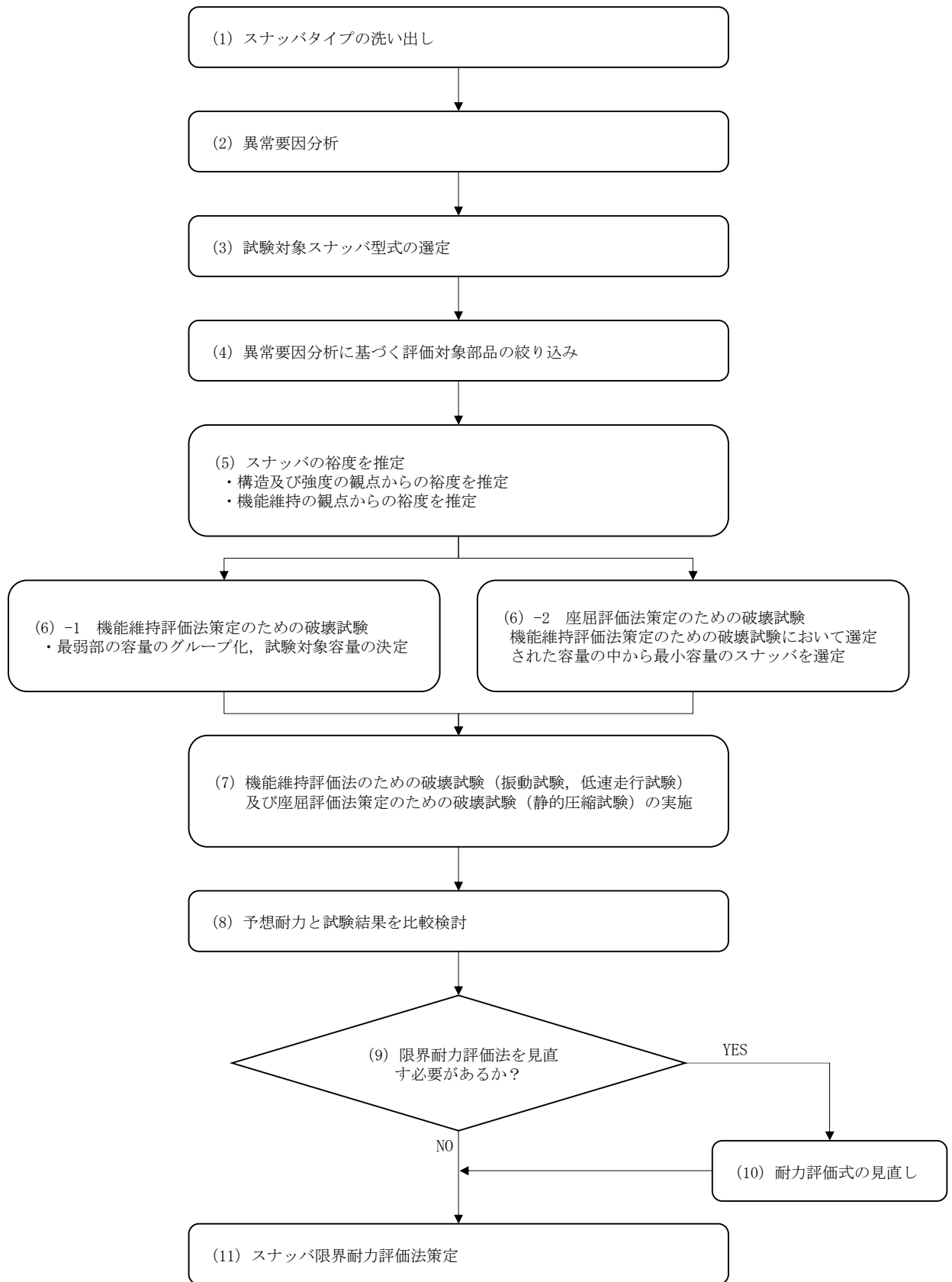


図 3-1 スナッパ限界耐力評価法策定フロー

	机上計算による 予想耐力算出	試験における耐力確認 荷重の確認	限界耐力値の設定
耐力確認荷重が 予想耐力を上 回った場合	予想耐力	耐力確認荷重	限界耐力値 ↑ 予想耐力を 上方修正
耐力確認荷重が 予想耐力を下 回った場合、又 は想定していな かった部位が破 損ないし機能喪 失した場合	予想耐力	耐力確認荷重	↓ 限界耐力値 予想耐力を 下方修正

図 3-2 限界耐力評価法の見直し方針の概要図

ここで、試験で確認した耐力確認荷重が予想耐力を下回った場合又は想定していなかった部位が破損ないし機能喪失した場合（図 3-2 の下段）は、予想耐力の算出に用いた応力算出式又は評価項目が試験結果にあっていないと考えられる。したがって、応力算出式又は評価項目を見直すことにより適切な限界耐力評価式を策定する。また、許容応力についてもミルシート記載の設計引張強さ（ S_u ）から算出した値を用いて、試験結果と比較して適切な限界耐力値を設定する。

なお、試験において実際に耐力確認荷重が予想耐力を下回ったことにより評価式又は評価項目を見直した部位を、「4.5.1 予想耐力との比較等による破壊試験結果の考察」の中の「(2) 耐力確認荷重が予想耐力を下回ったもの」及び「(3) 想定していなかった部位が破損ないし機能喪失した場合」に示している。

また許容応力を J E A G 4 6 0 1 に基づく値から見直した部位については、別紙 4 の添付-4 の表 1 及び表 2 に示す。

4. スナッパ破壊試験

4.1 破壊試験対象の選定（図3-1フロー（1）～（6））

電共研当時における国内 PWR 及び BWR のプラントを対象にスナッパの使用状況が調査され、以下に示すタイプが抽出された。以降では、抽出されたもののうち、島根2号機で使用している SMS 型メカニカルスナッパ、SHP 型及び SN 型オイルスナッパに限定して試験対象の選定について説明する。またこれらの構造図を図4-1～図4-3に示す。



図4-1 SMS 型メカニカルスナッパ構造図

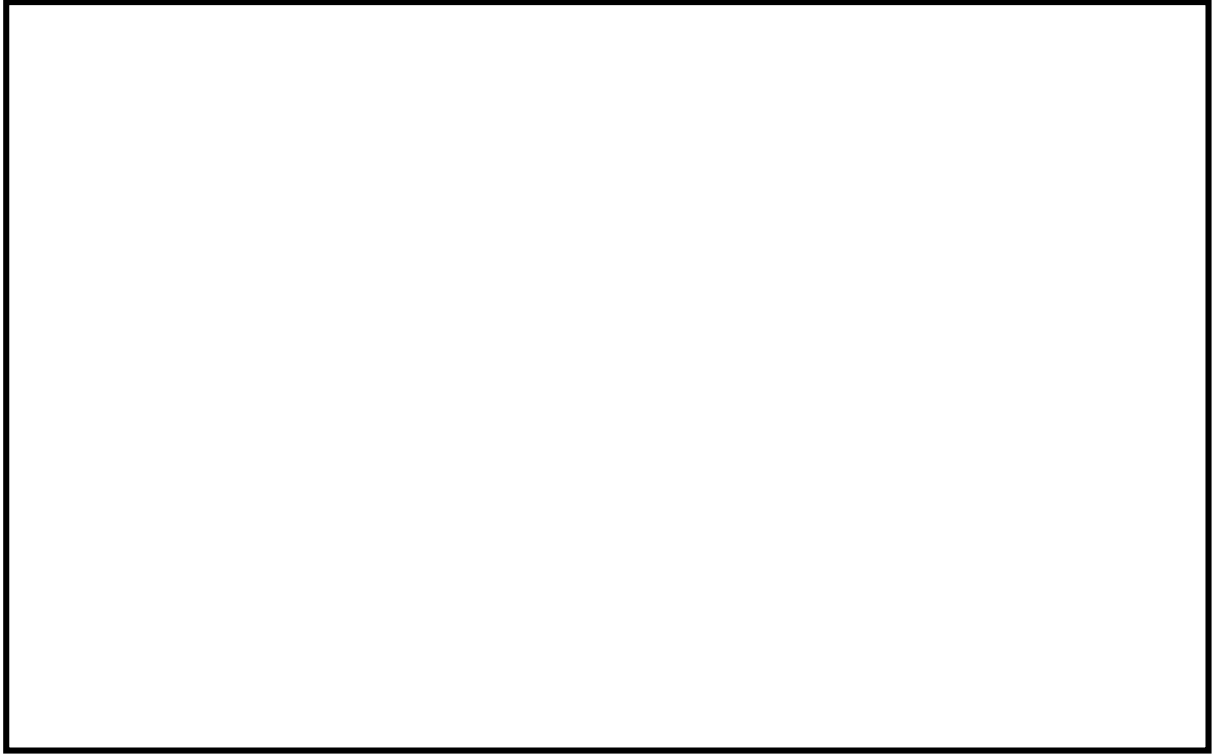


図 4-2 SHP 型オイルスナッパ構造図

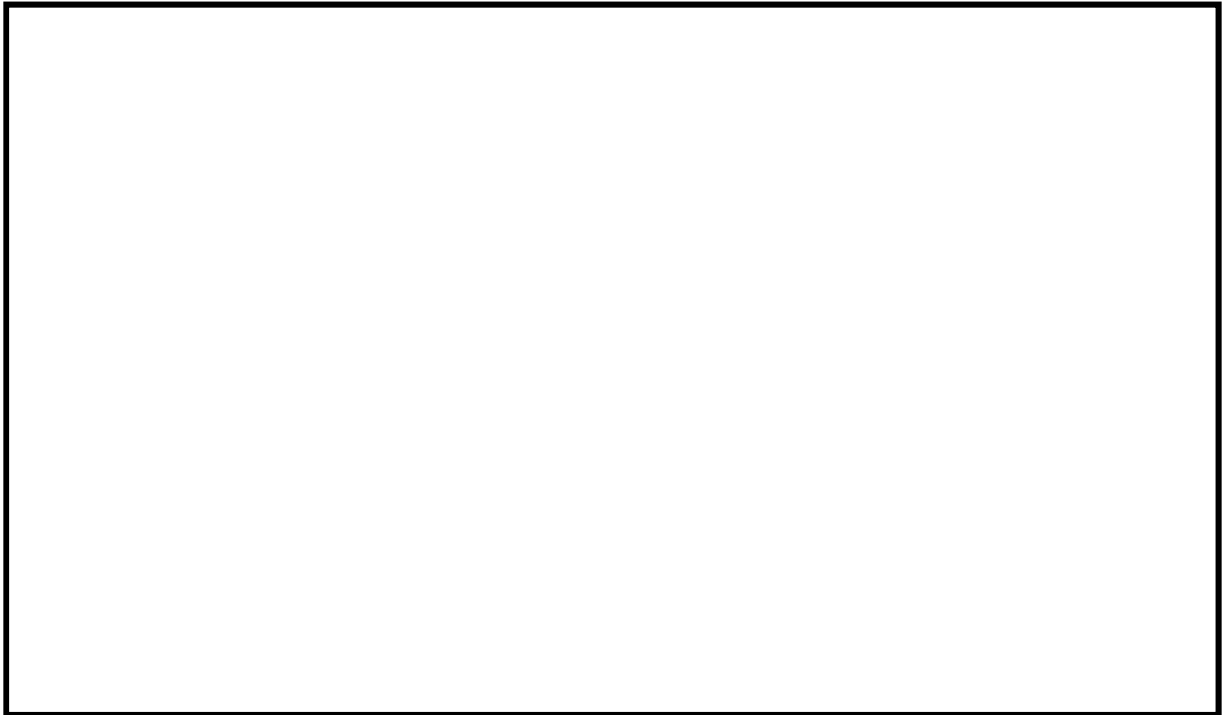


図 4-3 SN 型オイルスナッパ構造図

表 4-1 SMS 型オイルスナップの構造部材と機能部品

部品名	構造部材	機能部品
②ジャンクションコラム	○	—
③ロードコラム	○	—
④ピン	○	—
⑤コネクティングチューブ	○	—
⑥ケース, ベアリング押さえ及び六角ボルト	○	—
⑦イーヤ	○	—
⑧ユニバーサルボックス	○	—
⑨コネクティングチューブイーヤ部	○	—
⑩ユニバーサルブラケット	○	—
⑪ダイレクトアタッチブラケット	○	—
⑬ベアリングナット	○	—
⑭ボールねじ	—*	○*
⑮アンギュラー玉軸受	—	○
⑯球面軸受	—	○

注記* : ボールねじは機能部品だが比較的単純な構造のため, 機能評価及び構造部材と同様の強度評価も実施する。

表 4-2 SHP 型オイルスナッパの構造部材と機能部品

部品名	構造部材	機能部品
②ピストンロッド	○	—
③コネクティングパイプ	○	—
④ピン	○	—
⑤シリンダチューブ	○	—
⑥六角ボルト	○	—
⑦イーヤ	○	—
⑧スヘリカルアイボルト	○	—
⑪ターンバックル	○	—
⑫シリンダカバー	○	—
⑬タイロッド	○	—
⑭アダプタ	○	—
⑯ロッドカバー	○	—
⑰球面軸受	—	○
⑱ポペット弁	—	○*1
シール性*2	—	○

注記*1：ポペット弁損傷においては、弁のばね力の変化が考えられる。地震時には所定の抵抗力が得られないことが考えられる。また、地震後において低速走行時の抵抗力増大が考えられる。ただし、地震時にはポペット弁のばね力が変化するような地震荷重は採用しない。

*2：特定の部位ではないが、部品間のシール部についての評価を項目として追加している。

表 4-3 SN 型オイルスナッパの構造部材と機能部品

部品名	構造部材	機能部品
②ピストンロッド	○	—
③コネクティングパイプ	○	—
④ピン	○	—
⑤シリンダチューブ	○	—
⑥六角ボルト	○	—
⑦イーヤ	○	—
⑧ロッドエンド	○	—
⑨シリンダカバー	○	—
⑩タイロッド	○	—
⑪アダプタ	○	—
⑫ロッドカバー	○	—
⑭ホルダ	○	—
⑮球面軸受	—	○
⑯ポペット弁	—	○*1
シール性*2	—	○

注記*1：ポペット弁損傷においては、弁のばね力の変化が考えられる。地震時には所定の抵抗力が得られないことが考えられる。また、地震後において低速走行時の抵抗力増大が考えられる。ただし、地震時にはポペット弁のばね力が変化するような地震荷重は採用しない。

*2：特定の部位ではないが、部品間のシール部についての評価を項目として追加している。

4.1.2 機能維持評価法策定のための破壊試験対象型式の選定

構造部材の強度評価又は機能部品の機能評価の観点から、破壊試験における評価対象となる構造部材と機能部品の予想耐力を推定した上で、座屈を除く裕度（予想耐力／定格荷重）を推定した。

さらに、各型式で裕度が最小の部品を特定し、最小裕度部品が同じ型式でグループ化を行った。（最弱部のグループ化）なお、ここでは予想耐力による最小裕度部品をもとにグループ化しているため、後述する限界耐力評価法による最小裕度部品とは一部異なる。

各型式の最小裕度部品の特定結果を表 4-4～表 4-6 に示す。（部品ごとの耐力値*一覧表は添付-1 参照）

破壊試験対象型式は、原則として表 4-4～表 4-6 に示したグループの中から、最小の定格荷重となる型式として選定した。なお、各型式の試験体は 1 体とし、各型式において定格容量 3ton(30kN)のもののみ試験のばらつきを確認するために 3 体とした。各型式の試験体選定結果を表 4-7～表 4-9 に示す。

なお、ばらつきの確認は最小裕度部位、耐力確認荷重が異なる試験体間で同様の結果となることを確認するために実施するものであり、最大負荷荷重のばらつきを評価するためのものではない。

注記*：各部品に対し耐力評価式を用いて算出した限界耐力値を示す。

表 4-4 SMS 型メカニカルスナッパの最小裕度部品

グループ	型式	最小裕度部品
1	SMS-01, 03	六角ボルト
2	SMS-06, 3, 16	ボールねじ
3	SMS-1	コネクティングチューブ
4	SMS-6	ベアリングナット（せん断）
5	SMS-10, 25～60	ダイレクトアタッチブラケット（ピンせん断） ユニバーサルブラケット（ピンせん断）

表 4-5 SHP 型オイルスナッパの最小裕度部品

グループ	型式	最小裕度部品
1	SHP-03, 06, 10, 40, 60	シール性
2	SHP-1, 3, 6	アイボルト、コネクティングパイプ（イーヤ引張）
3	SHP-16, 25	ターンバックル（溶接部せん断）

表 4-6 SN 型オイルスナッパの最小裕度部品

グループ	型式	最小裕度部品
1	SN-03, 06, 1	ロッドエンド（イーヤ引張）
2	SN-3	コネクティングパイプ（溶接部せん断）
3	SN-6, 10	アダプタ部（溶接部せん断）
4	SN-16, 25	ダイレクトイーヤ（せん断）

表 4-7 SMS 型メカニカルスナッパ試験体選定結果

グループ	型式	定格荷重	試験体数
1	SMS-03	0.3ton(3kN)	1
2	SMS-3	3ton(30kN)	3
3	SMS-1	1ton(30kN)	1
4	SMS-6	6ton(60kN)	1
5	SMS-10	16ton(160kN)	1

表 4-8 SHP 型オイルスナッパ試験体選定結果

グループ	型式	定格荷重	試験体数
1	SHP-03	0.3ton(3kN)	1
2	SHP-3	3ton(30kN)	3
3	SHP-16	16ton(160kN)	1

表 4-9 SN 型オイルスナッパ試験体選定結果

グループ	型式	定格荷重	試験体数
1	SN-03	0.3ton(3kN)	1
2	SN-3	3ton(30kN)	3
3	SN-6	6ton(60kN)	1
4	SN-16	16ton(160kN)	1

4.1.3 座屈評価法策定のための破壊試験対象型式の選定

座屈評価法のための破壊試験対象型式は、試験装置の制約があるため、機能維持評価法策定のための破壊試験において選定された型式（表 4-7～表 4-9）の中から最小の定格荷重となる型式として以下のとおり選定した。

座屈評価法のための破壊試験は静的試験であり、動的試験と比較し、結果にばらつきがでにくいこと、座屈強度はスナップの基本構造と寸法から決まること、基本構造はどの型式も同じであることから、材料力学の考え方にに基づき試験結果を他の式に展開できるため、代表として試験体は 1 体とした。なお、いずれの試験体においてもピン間長さは、型式ごとに設定される標準寸法の範囲のうち最大寸法としている。

- SMS-03（定格荷重 0.3ton(3kN)）
- SHP-03（定格荷重 0.3ton(3kN)）
- SN-03（定格荷重 0.3ton(3kN)）

4.2 破壊試験における試験項目（図 3-1 フロー（7））

4.2.1 機能維持評価法策定のための破壊試験

スナップが地震時及び地震後に維持しなければならない機能は以下のとおりである。

地震時：スナップの動剛性が判定基準値以下にならないこと

地震後：地震後のプラント停止時の配管内部流体の温度変動による配管熱移動を拘束しないこと

上記の機能を確認するための試験項目を以下のとおりとした。

地震時の機能維持確認：振動試験

地震後の機能維持確認：低速走行試験

4.2.2 座屈評価法策定のための破壊試験

試験項目としては、静的圧縮試験とした。

4.3 破壊試験における試験内容（図 3-1 フロー（7））

4.3.1 機能維持評価法策定のための破壊試験

ある荷重レベルの振動試験とその後の低速走行試験を 1 パッケージの試験として、スナップの機能が維持できなくなった加振荷重レベルまで加振荷重を段階的に増加させて試験を実施した。目標加振荷重レベルを表 4-10 に示す。

表 4-10 目標加振荷重レベル(単位:kgf)

型式	SMS 型メカニカルスナツバ						SHP 型オイルスナツバ				SN 型オイルスナツバ				ケース数
	SMS-03	SMS-1	SMS-3	SMS-6	SMS-10	SHP-03	SHP-3	SHP-16	SN-03	SN-3	SN-6	SN-16	ケース数		
目標加振 荷重レベル (段階的に増 加)	300	1000	3000	6000	10000	300	3000	16000	300	3000	6000	16000	1		
	450	1500	4500	9000	15000	450	4500	24000	450	4500	9000	24000	2		
	1000	2500	6000	12000	17000	1000	6000	28000	1000	5500	11000	27000	3		
	1500	3500	7000	15000	20000	1500	7000	32000	2000	6500	12000	30000	4		
	1800	4500	8000	17000	24000	2000	8000	36800	2500	7500	13000	33600	5		
	2000	5500	9000	18600	28000	2500	9000	40000	3000	8500	13800	36000	6		
	—	7000	10000	22000	32000	3000	10000	—	—	—	16000	—	—	7	
	—	—	—	—	—	3300	11000	—	—	—	—	—	—	8	
	—	—	—	—	—	3700	11800	—	—	—	—	—	—	9	
	—	—	—	—	—	—	13000	—	—	—	—	—	—	10	

(1) 振動試験

a. 試験方法

試験体を実機での据付状態と同様に両端をピン拘束とした状態で振動試験機に取り付け、ストローク 1/2 (中央) の位置で 9Hz の振動数で約 10 秒間加振し、データレコーダで記録した。

(正弦波を 100 波入力)

なお、加振条件は、一般的な配管系で卓越する固有振動数である 9Hz で、応答が安定する秒数として 10 秒を目安として設定している。対象設備において卓越する固有振動数を基準に加振条件を決める考え方は、他の一般的な機器の振動試験と同様の考え方となっている。

試験は変位制御とし、変位を入力することで荷重を発生させた。

b. 試験装置

振動試験装置の概要を図 4-5 に示す。

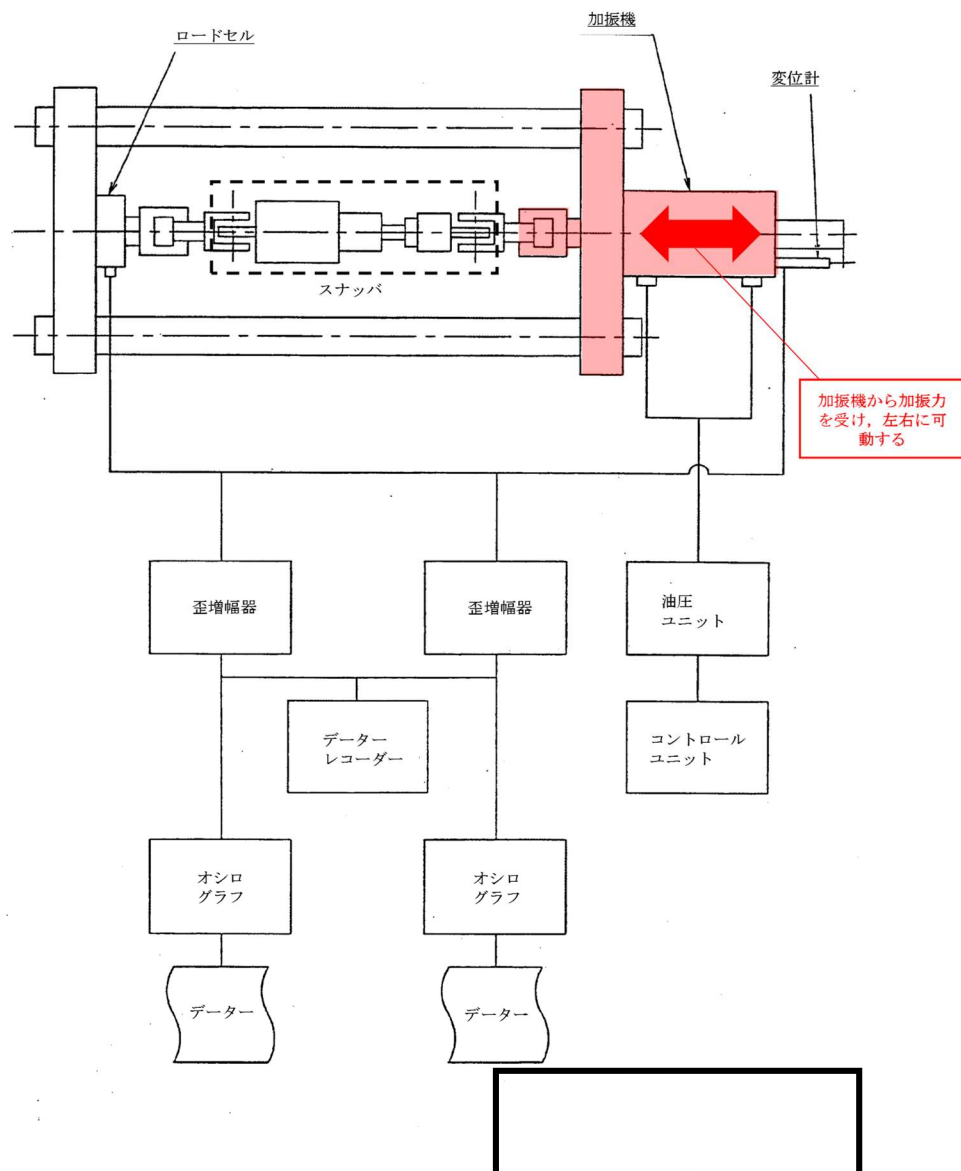
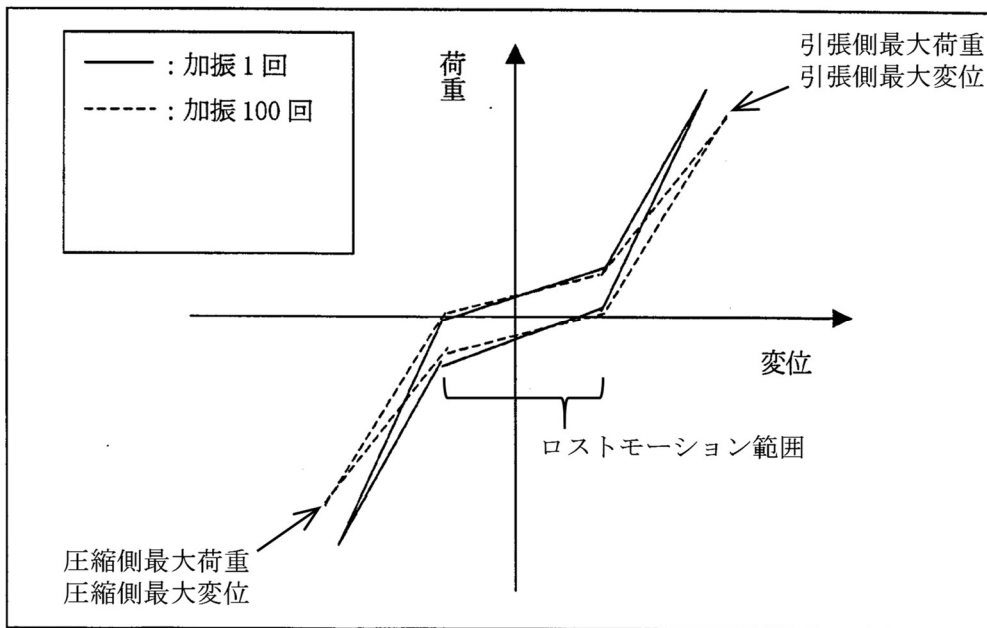


図 4-5 振動試験装置の概要

c. 評価項目

変位制御による正弦波加振で得られるスナップの荷重・変位特性から、以下の式で動剛性を求め、必要動剛性が確保されているかについて評価した。動剛性の計算例を以下の図に示す。動剛性の判定基準値は表 4-11～表 4-13 のとおり。また、試験結果から得られた動剛性の値は、表 4-18～表 4-20 に示す。

動剛性＝



(参考) スナップの荷重・変位特性イメージ



表 4-11 SMS 型メカニカルスナッパ 振動試験中の動剛性（動ばね定数）判定基準値

定格容量	0.3ton (3kN)	1ton (10kN)	3ton (30kN)	6ton (60kN)	10ton (100kN)
動剛性					

表 4-12 SHP 型オイルスナッパ 振動試験中の動剛性（動ばね定数）判定基準値

定格容量	0.3ton (3kN)	3ton (30kN)	16ton (160kN)
動剛性			

表 4-13 SN 型オイルスナッパ 振動試験中の動剛性（動ばね定数）判定基準値

定格容量	0.3ton (3kN)	3ton (30kN)	6ton (60kN)	16ton (160kN)
動剛性				

(2) 低速走行試験

a. 試験方法

試験体を低速走行試験機に両端をピン拘束とした状態で取り付け、2.1mm/sec の速度で試験体を伸縮させたときの抵抗力を測定・記録する。

b. 試験装置

低速走行試験装置の概要を図 4-6 に示す。

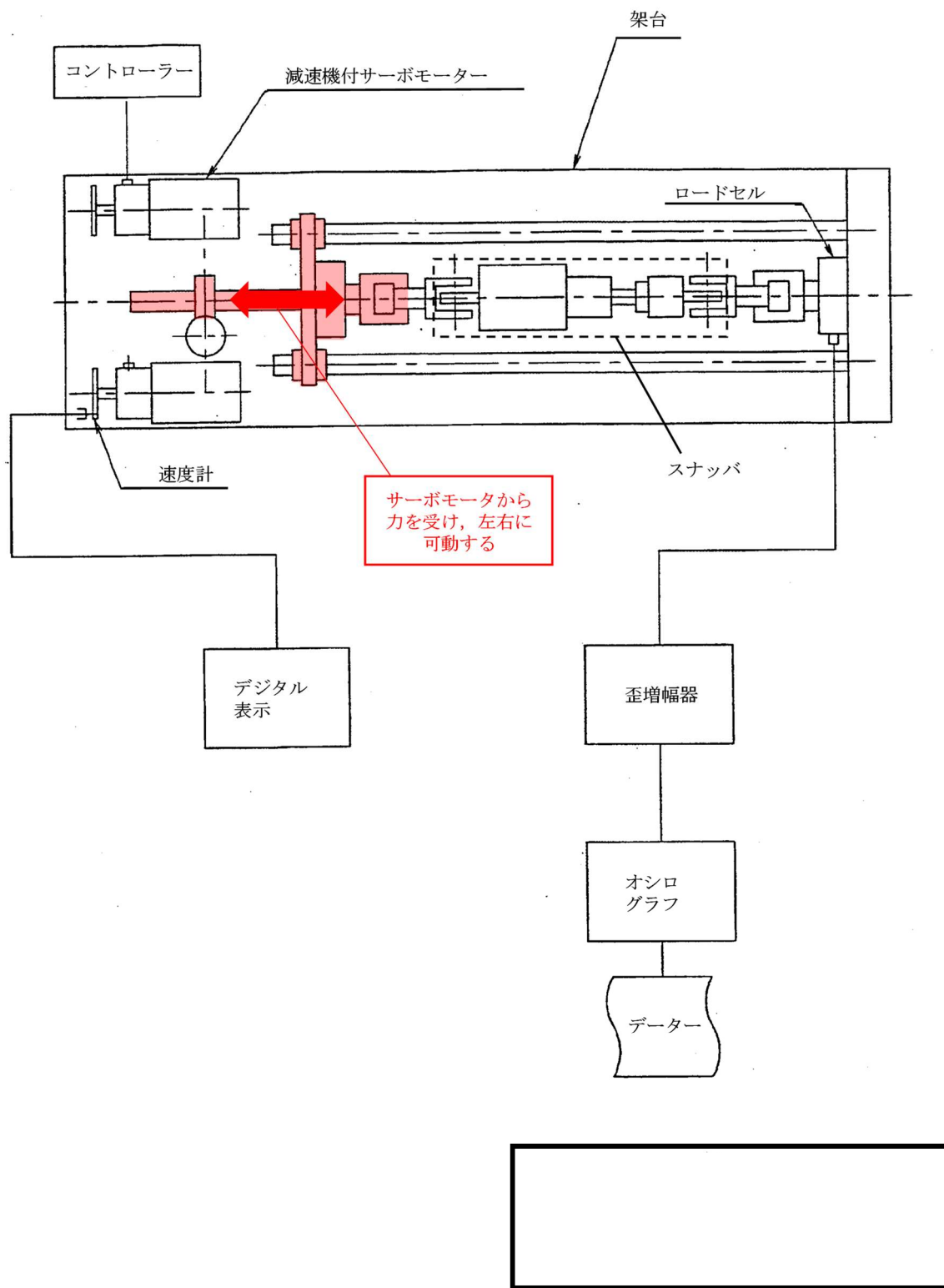


図 4-6 低速走行試験装置の概要

c. 評価項目

低速走行試験中の抵抗力測定結果が判定基準値を満足しているかどうかを評価する。抵抗力の判定基準値は表 4-14～表 4-16 のとおり。

表 4-14 SMS 型メカニカルスナッパ 低速走行試験中の抵抗力の判定基準値

定格容量	0.3ton (3kN)	1ton (10kN)	3ton (30kN)	6ton (60kN)	10ton (100kN)
抵抗力					

表 4-15 SHP 型オイルスナッパ 低速走行試験中の抵抗力の判定基準値

定格容量	0.3ton (3kN)	3ton (30kN)	16ton (160kN)
抵抗力			

表 4-16 SN 型オイルスナッパ 低速走行試験中の抵抗力の判定基準値

定格容量	0.3ton (3kN)	3ton (30kN)	6ton (60kN)	16ton (160kN)
抵抗力				

4.3.2 座屈評価法策定のための破壊試験（静的圧縮試験）

a. 試験方法

試験体を低速走行試験機に両端をピン拘束とした状態に取り付け、圧縮方向に変位を入力し、発生する荷重を記録する。変位の入力は本体が座屈するまで入力する。

b. 試験装置概要

試験装置の概要を図 4-7 に示す。

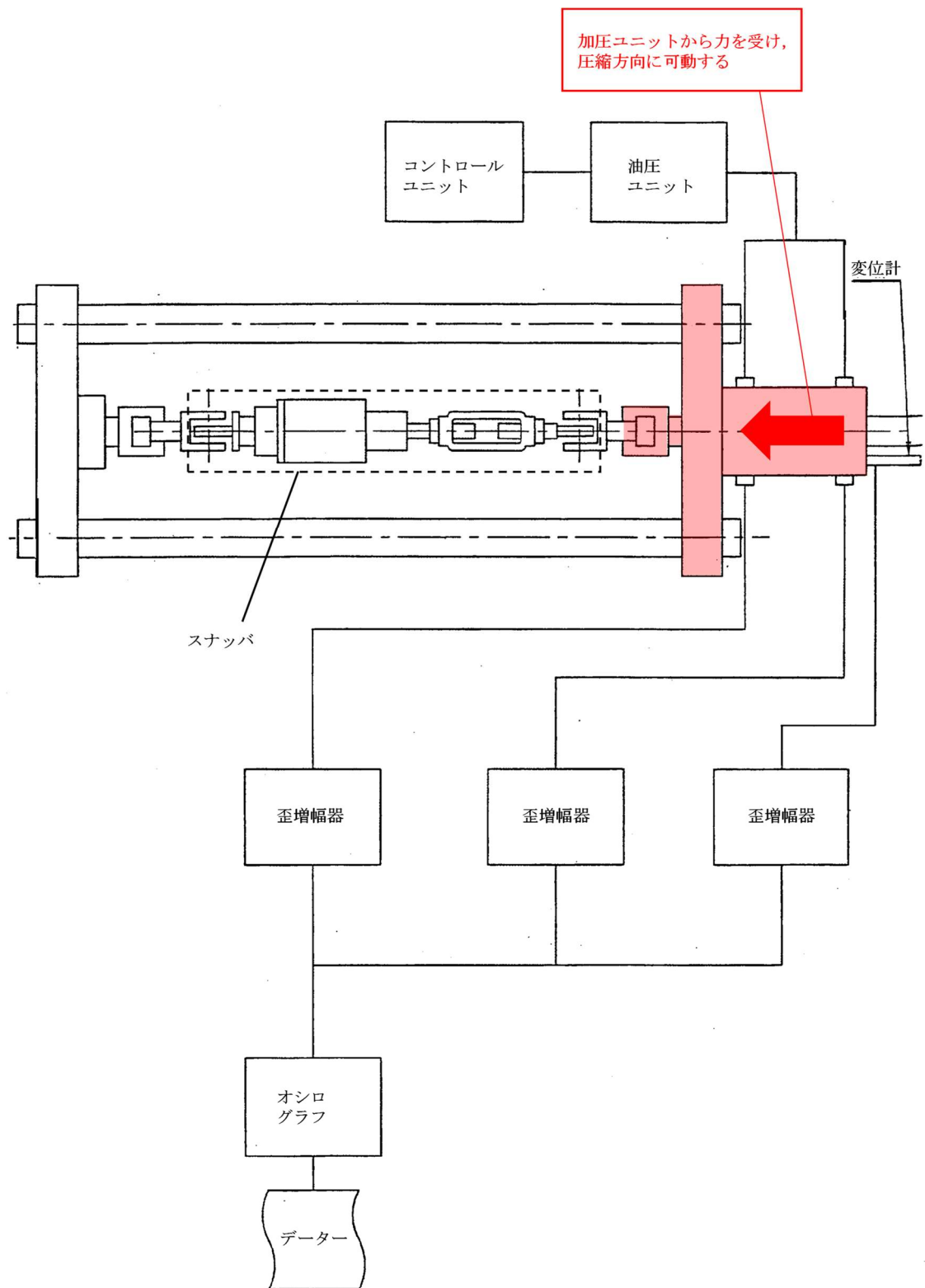


図 4-7 静的圧縮試験装置の概要

c. 評価項目

試験によって得られた座屈荷重と計算上求められる座屈荷重とを比較し、その結果を座屈評価法へ反映させた。(別紙 3 座屈評価 参照)

4.4 破壊試験結果（図 3-1 フロー（7））

4.4.1 機能維持評価法策定のための破壊試験

支持装置の機能が維持された状態における最大荷重（最大負荷荷重）、破損箇所及び機能喪失する試験ケースを除いた試験ケースにおける最大荷重（耐力確認荷重）等をまとめた結果を表 4-17 に示す。また、これらの詳細データは、添付-2 に示す。なお、機能喪失した加振ケースにおける最大負荷荷重及び耐力確認荷重は、以下の観点から試験結果より読み取った。

- ① 破損したサイクル*（9Hz、10 秒間）での荷重履歴から耐力確認荷重を読み取る時、破損時まで荷重が定常状態にならないものは、破損前の荷重サイクルの履歴から耐力確認荷重を読み取った。
- ② 最大負荷荷重は破損したサイクルの破損に至る前の最大荷重を読み取った。
- ③ スナッパの加振サイクル初期の 1 波で発生する最大荷重は最大荷重とみなさないこととした。

注記*：正弦波加振における変位入力開始時を基点とし引張側と圧縮側の振幅 1 回分を 1 つのサイクルとしている。

また、各試験ケースにおける動剛性及び抵抗力（低速走行時抵抗値）の判定結果を表 4-18～表 4-20 に示す。表のとおり、SMS-1 の供試体 1-1 の抵抗力（低速走行時抵抗値）及び座屈損傷した SHP-3 の供試体 3-1、3-2 を除き、予想耐力相当の負荷荷重ケースであっても動剛性及び抵抗力（低速走行時抵抗値）は判定基準を満足している。

4.4.2 座屈評価法策定のための破壊試験

静的座屈試験を実施した結果を表 4-17 に合わせて示す。同じく詳細データは添付-2 に示す。

表 4-17 試験結果まとめ表

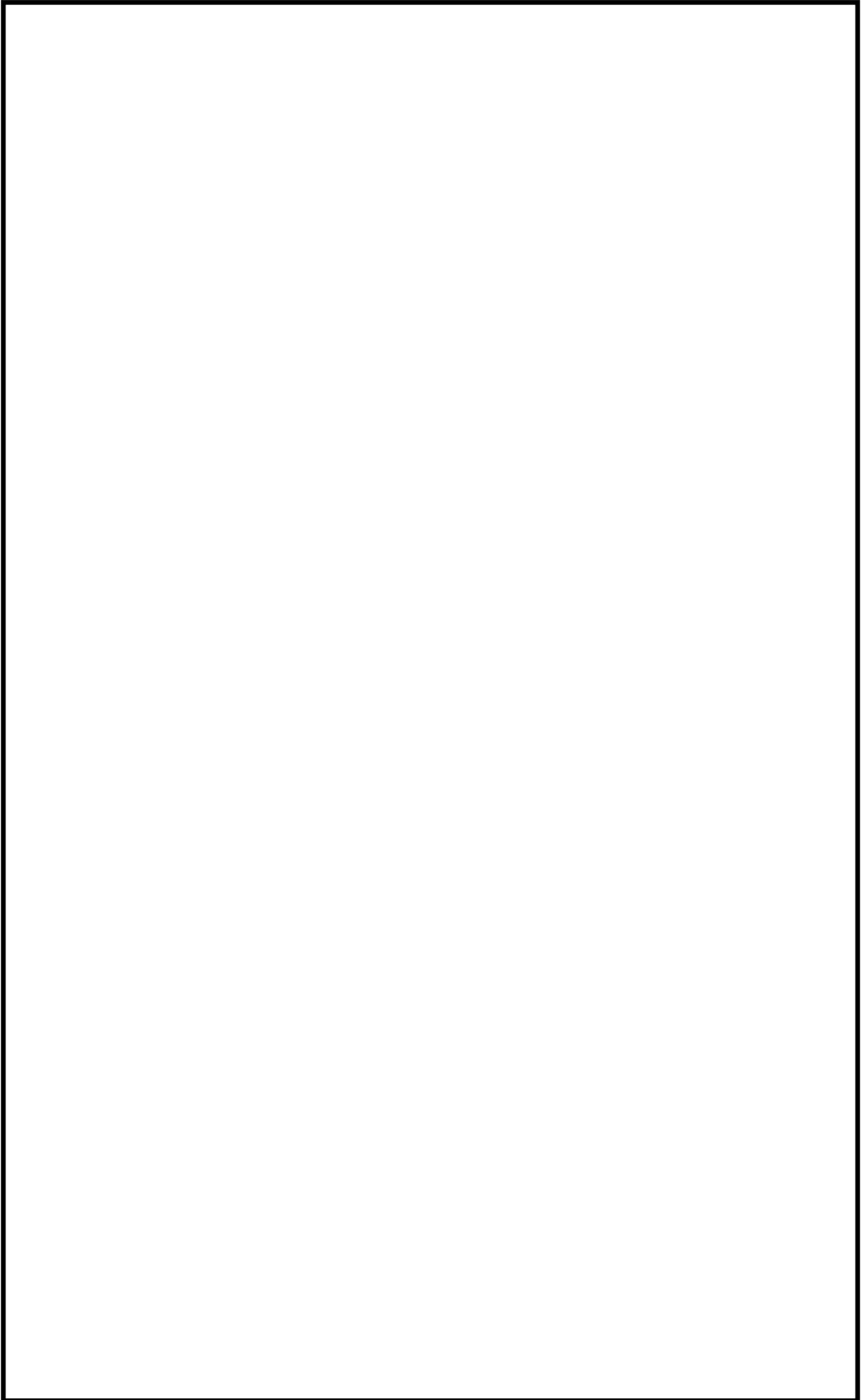


表 4-18 SMS 型メカニカルスナツバ 各試験ケースにおける判定結果(1/2)

--

表 4-18 SMS 型メカニカルスナツバ 各試験ケースにおける判定結果(2/2)

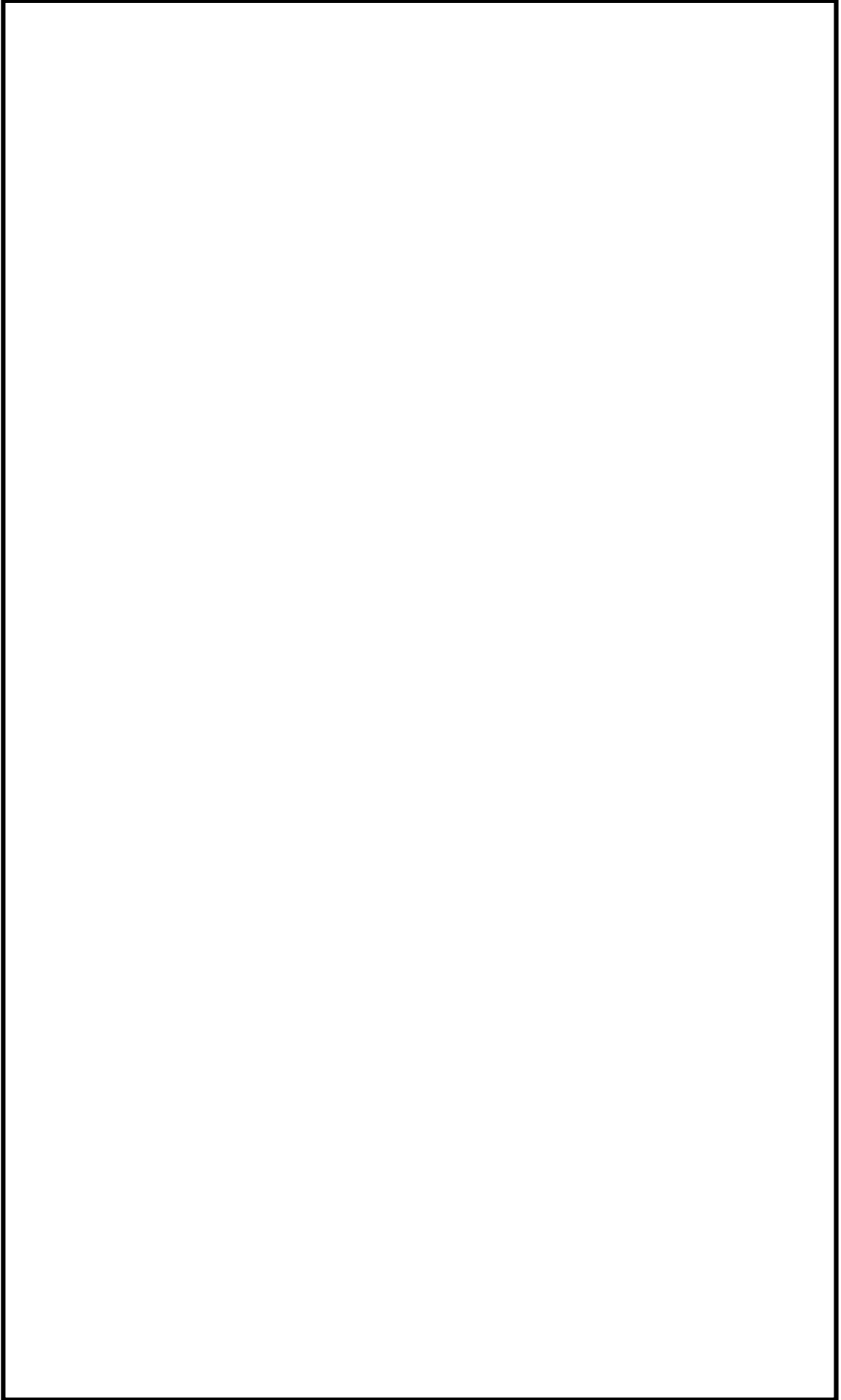


表 4-19 SHP 型オイルスナツバ 各試験ケースにおける判定結果(1/2)

--

表 4-19 SHP 型オイルスナツバ 各試験ケースにおける判定結果 (2/2)

--

表 4-20 SN型オイルスナツバ 各試験ケースにおける判定結果(1/2)

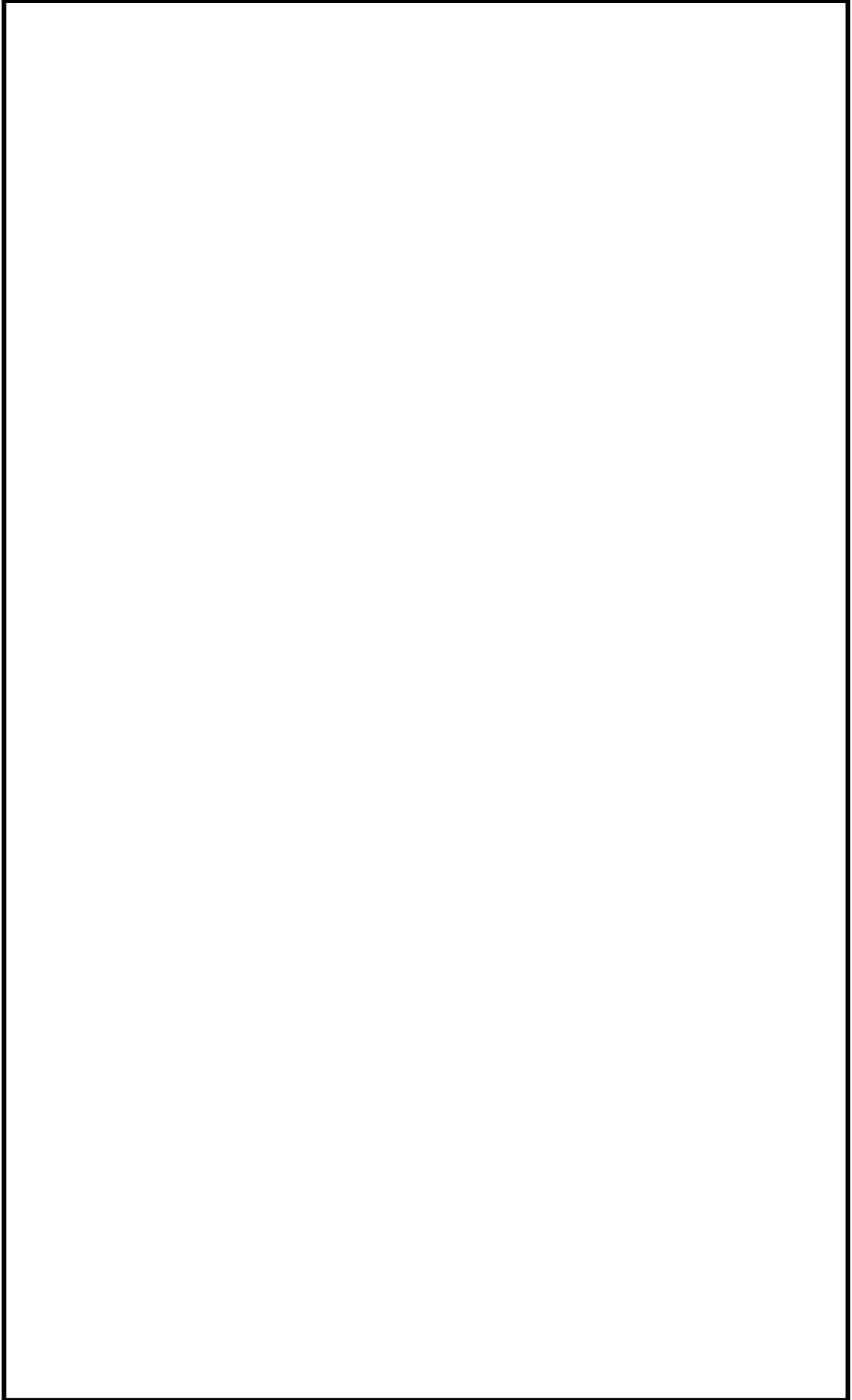


表 4-20 SN 型オイルスナツバ 各試験ケースにおける判定結果 (2/2)

--

4.5 破壊試験結果の考察（図3-1フロー（8）～（10））

破壊試験結果より，公称応力による予想耐力と破壊試験で得られた耐力確認荷重（破損又は機能喪失が確認される前の試験条件における最大荷重）との関係を比較・検討し考察を行うとともに，破壊試験の再現性について確認を行った。

4.5.1 予想耐力との比較等による破壊試験結果の考察

評価対象部位について，破壊試験結果から得られる耐力確認荷重を予想耐力と比較し，以下のように大別した。

- (1) 耐力確認荷重が予想耐力を上回ったもの（図3-2の上段の場合）
- (2) 耐力確認荷重が予想耐力を下回ったもの（図3-2の下段の場合）
- (3) 想定していなかった部位が破損ないし機能喪失したもの（図3-2の下段の場合）

これらについて，考察の上，限界耐力評価法に反映した。

(1) 耐力確認荷重が予想耐力を上回ったもの

公称応力による予想耐力を超えても破損せず，耐力確認荷重が予想耐力を上回った部位は，予想耐力を求めた評価式に保守性があると考えられるため，評価式を限界耐力評価法として採用するにあたり，その保守性を低減することが可能と考えられる。

耐力確認荷重が予想耐力を上回った部位について，公称応力により部位ごとに計算した予想耐力（表4-21～表4-23の「評価耐力*1」），使用材料のミルシート強度や構造を考慮して部位ごとに計算した実耐力（表4-21～表4-23の「実耐力*2」）及び試験で得られた最大負荷荷重（表4-21～表4-23の「最大荷重」）と比較したものを表4-21～表4-23に型式ごとにまとめた。赤枠で示すとおり，最大負荷荷重が予想耐力（表4-21～表4-23の「評価耐力」）を上回っている。なお，一部の予想耐力は最大負荷荷重を上回っているが，評価式における最大応力を平均応力に見直した場合の影響を比較するために記載している。

これらのうち，予想耐力に対して試験で確認できた最大負荷荷重が余裕を有するものについては，限界耐力評価法を見直した。見直したものについて以降で説明する。

予想耐力を最大負荷荷重が上回った理由は，主に以下の仮定で予想耐力を算出していたためである。

- a. 材料の許容値を引張り強さ(S_u)の0.7倍又は降伏点(S_y)の1.2倍のいずれか小さい値としていたこと
- b. 断面積の算定を安全側にしていたこと
- c. せん断について平均応力でなく最大応力で評価していたこと

これらのうち、予想耐力に対し最大負荷荷重が大きなものに関しては予想耐力の耐力評価式を見直すこととする。

注記*1：用語の定義 No. 24 参照

*2：用語の定義 No. 25 参照

表 4-21 SMS 型メカニカルスナッパ 公称応力による予想耐力を超えても破損しなかった部位のまとめ表* (1/2)

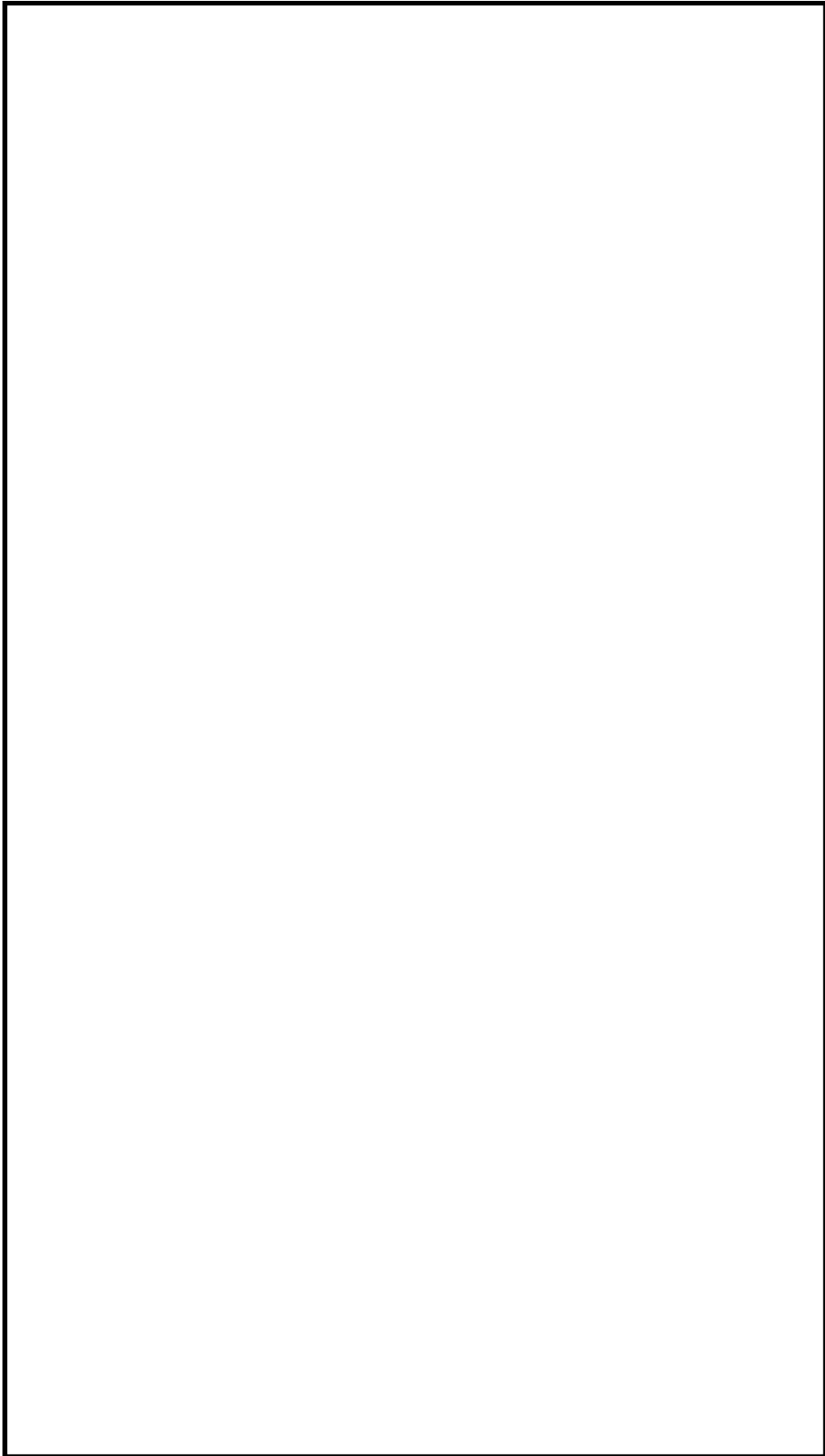


表 4-21 SMS 型メカニカルスナッパ 公称応力による予想耐力を超えても破損しなかった部位のまとめ表* (2/2)

--

表 4-22 SHP 型オイルスナツバ 公称応力による予想耐力を超えても破損しなかった部位のまとめ表*1



表 4-23 SN 型オイルスナツバ 公称応力による予想耐力を超えても破損しなかった部位のまとめ表*



(a) 部位ごとの考察

イ. メカニカルスナップ

・六角ボルト (表 4-21 中の⑤)

SMS-03 における試験結果の最大荷重は kgf であり、ねじ部の有効断面積において引張強さ (S_u) が生じることを想定することで算定される耐力 (実耐力) である kgf とほぼ同一の値である。また、SMS-3 における試験結果の最大荷重は kgf であることに対して、実耐力は kgf であり、試験結果は実耐力の 倍であった。

このことから、メカニカルスナップの六角ボルトの限界耐力値の評価式を以下の式に見直すこととする。

$$F=0.8 \cdot S_u \cdot A$$

ここで、

S_u : 引張強さ

A : ねじ部の有効断面積

・ボールねじ (表 4-21 中の⑫)

SMS-3 における試験結果の最大荷重は kgf であり、シャフトの有効断面積*において引張強さ (S_u) が生じることを想定することで算定される耐力 (実耐力) である kgf に対して 倍の値であった。

このことから、ボールねじの限界耐力値の評価式を以下に見直すこととする。

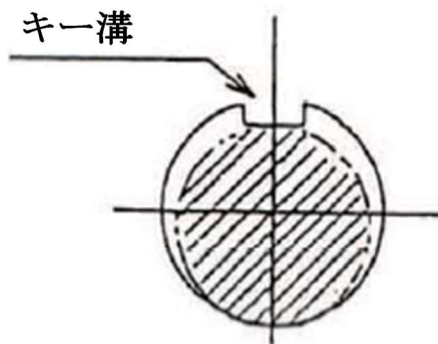
$$F=0.7 \cdot S_u \cdot A$$

ここで、

S_u : 引張強さ

A : シャフト部の有効断面積*

注記* : シャフトのキー溝がある範囲の断面積は、予想耐力算出時は簡易的に「キー溝部の内接円の面積 (補足図の斜線部)」としていたが、試験結果を踏まえた見直しに伴い、「シャフト径の断面積からキー溝の断面を差し引いた断面 = シャフト部の有効断面積 (補足図全体)」とした。



- ・ピンせん断（表 4-21 中の⑧, ⑩）

ユニバーサルブラケット及びダイレクトアタッチブラケットのピンのせん断に関し、SMS-3 の試験結果の最大荷重を見ると平均応力より算出した使用材料強度による実耐力に比べ 倍の値となる。

$$F=0.7 \cdot (S_u / \sqrt{3}) \cdot A$$

ここで、

S_u : 引張強さ

A : ピンの断面積 (2 面せん断)

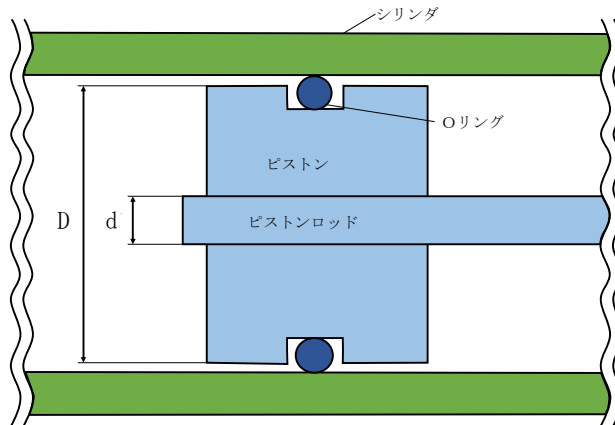
ロ. オイルスナップ

- ・シール性（表 4-22 中の①）

SHP 型オイルスナップのシール部（ピストンとシリンダ間）は、いずれの型式においても、ゴム製の Oリング が使用されており、シール性の予測耐力については、以下の式のとおり、メーカー推奨の許容圧力 P に受圧面積 A を乗じることで求まる荷重 F を適用している。

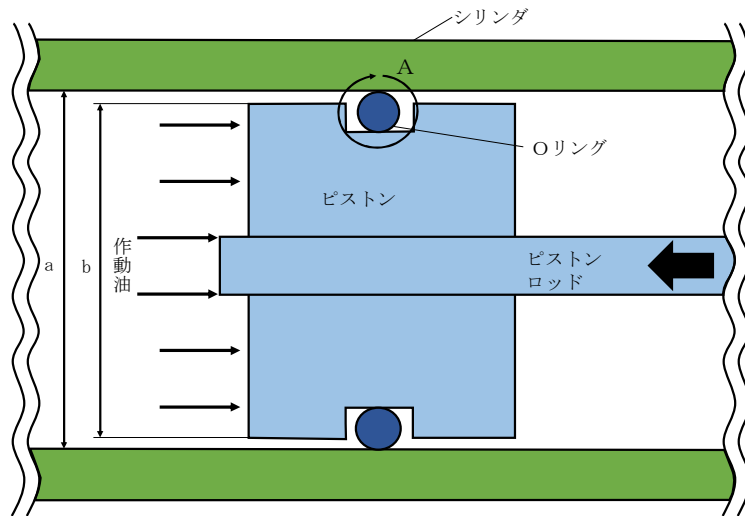
- ・予測耐力評価式：予測耐力 $F = P \times A$ ($A = \pi \cdot (D^2 - d^2) / 4$)

ここで、 D はピストン直径、 d はピストンロッド直径である（下図参照）。



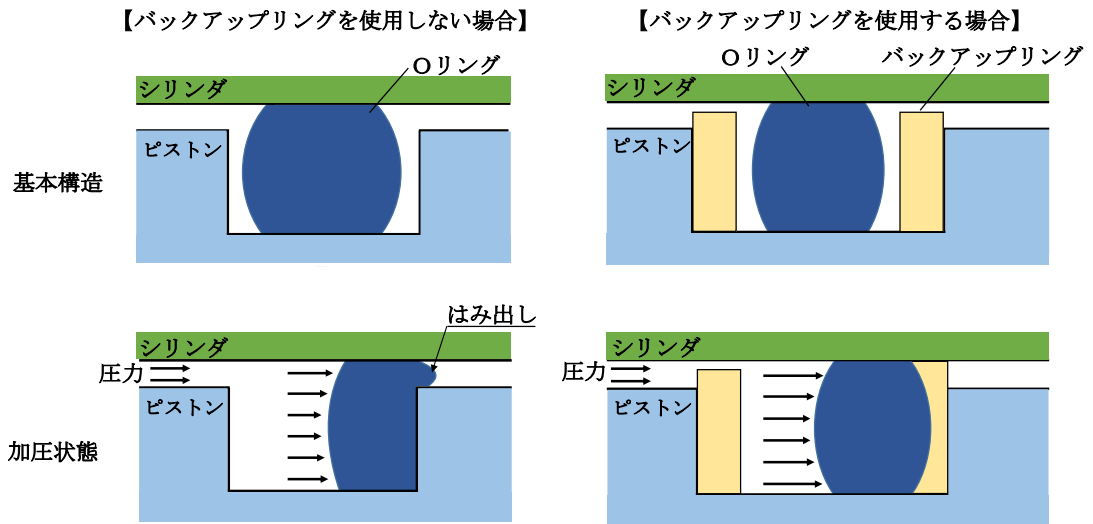
シール部の構造を図 4-8 に示す。Oリングはピストンに設けた溝に収められ、ゴムの収縮性を利用して、シリンダ内の作動油の漏えいを防止している。オイルスナップは、地震時にみられる急速なピストンロッドの移動で生じる流体抗力によってポップアップ弁が閉じることで、シリンダ内に密閉状態が形成され、この状態においては、Oリングに対してピストンロッドに作用する荷重に応じた圧力が負荷される。この関係から、シール性はOリングの許容圧力によって決定される。なお、高い耐圧性が求められる型式については、図 4-8 に示すようなバックアップリング を設置し、圧力によるOリングの変形によって生じるはみ出しを防止することで、シール性を保持している。

また、SHP 型オイルスナップのシール部に使用されるOリングは、いずれの型式においても同一仕様のため、許容圧力は型式によらずバックアップリングの設置有無により決定される。



直径すきま $c = a - b$

(a) シール部



(b) A部拡大図

図 4-8 シール部の構造

バックアップリングを使用していない型式は SHP-03 及び SHP-06 であり、これらの型式については、予測耐力値としてはシール性が最弱となるが、代表で試験を実施した SHP-03 の試験結果の最大荷重と比較すると、試験結果がメーカ推奨値の 倍であったため、バックアップリングを使用していない型式の SHP-03 及び SHP-06 の耐力値はメーカ推奨値の 倍として見直すこととした。なお、前述の通り、Oリングの許容圧力は定格荷重によらずバックアップリングの設置有無により決定され、SHP-03 におけるシール性の知見はバックアップリングを使用していない型式共通のものであり、SHP-03 で得られた傾向を製品サイズとしても同じ区分である SHP-06 に適用している。なお、SN 型オイルスナッパはシール性の向上の観点から、シール部にゴム製の Oリングではなく、金属製のメタルタッチを使用しており、破損を想定していない機能部品であった。そのため、SN 型オイルスナッパのシール性は、(3)の「想定していない部位が破損ないし機能喪失したもの」で詳細を説明する。

(2) 耐力確認荷重が予想耐力を下回ったもの

耐力確認荷重が予測耐力を下回った評価項目としては、座屈耐力が該当する。

座屈損傷については、静的座屈試験結果の他に、加振試験においても確認された。座屈した型式の計算座屈荷重と試験座屈荷重を比較したものを表 4-24 に示す。また、座屈耐力の検討のために、表 4-24 の記載データ及び過去データも含め、グラフにしたものを図 4-9 に示す。

SHP 型オイルスナッパはターンバックルを有した構造であり、SMS 型メカニカルスナッパや SN 型オイルスナッパ等に比べて最弱部（ピストンロッド部）の位置が座屈計算上のスナッパ全長（＝ピン間距離）の中央に位置する構造である。ピン間距離の中央に最弱部が位置すると、理論値と試験値との差異が大きくなる傾向が確認された。このように、最弱部（ピストンロッドのターンバックル付近）が中央に位置するものは理論値の 倍、端に位置するものは理論値の 倍を座屈の限界耐力とした。

なお、座屈耐力を決定する構造上の特徴は、スナッパのどの型式においても同様（受荷重面は円筒もしくは円柱断面であり、軸荷重のみを支持する棒形状）であることから、異なる型式であっても計算座屈荷重と試験座屈荷重の関係は同様となることが考えられ、試験のばらつきを考慮しても、本試験結果から設定した評価手法が適用可能であるものと考えられる。

表 4-24 計算座屈荷重と試験

--

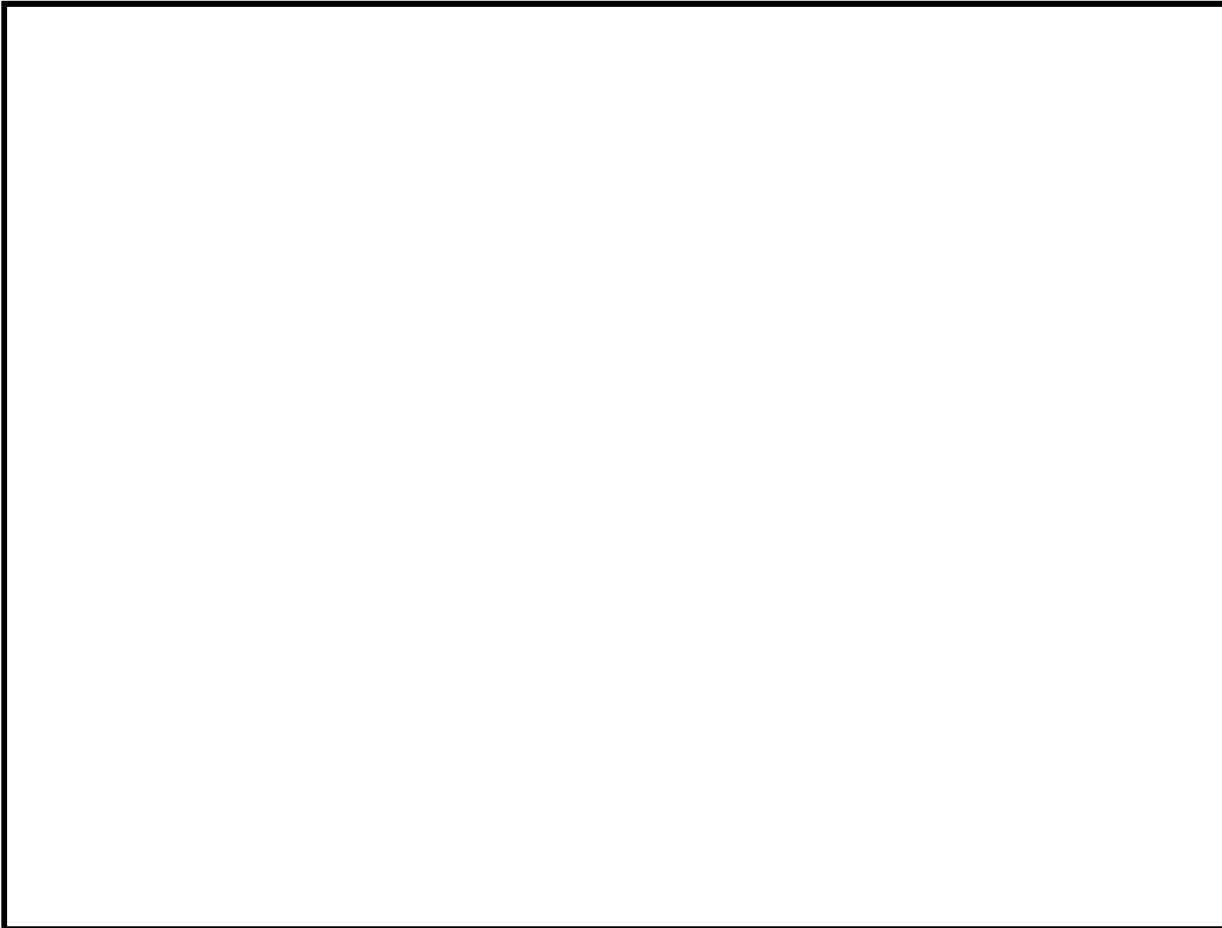


図 4-9 本試験及び過去データによる座屈耐力に関する試験値と理論値

(3) 想定していなかった部位が破損ないし機能喪失したもの

a. 共通部位

(a) つば付き球面軸受の割れ

つば付き球面軸受の割れは、定格荷重 3ton (3kN) の型式 (SMS-3, SHP-3, SN-3) で発生しており、ピンの変形により、球面軸受のつばを起点とした割れが発生している。球面軸受が損傷してもスナッパの機能 (支持機能, 低速走行機能) は喪失しなかった。ピンの実耐力と最大負荷荷重を比較した結果を表 4-25 に示す。最大負荷荷重に対するピンの実耐力の比は最小のもので、倍となったことから、球面軸受の限界耐力値は、ピンの限界耐力の倍として求めることとした。なお、表 4-25 に示す実力値, 引張強さは使用材料のミルシートの引張強さを記載している。

表 4-25 つば付き球面軸受の実耐力と最大負荷荷重

--

--

b. メカニカルスナップ

(a) ベ어링押さえ板の変形

SMS-3 の供試体 No. 3-2 及び SMS-6 の供試体 No. 6-1 においてベ어링押さえ板が曲げ変形して荷重が伝わらず、スナップの機能を喪失した。当初の評価法は押さえ板のせん断にて評価していたため、実耐力が大きかったが、曲げ評価に見直すと実耐力が低下する。ベ어링押さえ板を円板とし曲げで評価した結果と、変形に至った型式の破損荷重を比較すると表 4-26 のとおりである。

表 4-26 ベ어링押さえ板の実耐力と破壊荷重



周辺固定の円板モデルにより実耐力を算出すると、上記の曲げ評価の実耐力(A)の荷重となる。これより、供試体の破損荷重(B)と比較すると計算ベースの実耐力の 倍以上の耐力である。したがって、ベ어링押さえ板の限界耐力値は周辺固定条件の円板のベ어링外径に荷重がかかる計算モデルで算出し、補正係数として 0.9 を乗じて求めることとする。

以下に本手法で見直したベ어링押さえ板の限界耐力値及び耐力評価式を示す。



(b)アンギュラー玉軸受の損傷

SMS 型メカニカルスナップのアンギュラー玉軸受の限界耐力値は、破壊試験の結果を反映し、標準スラスト荷重の□倍とする。

【以下電共研試験報告書抜粋】

(2)-5 メカニカルスナップのアンギュラー玉軸受の損傷

アンギュラー玉軸受の限界耐力値は標準スラスト荷重をもとに試験で決めている。損傷が発見された型式の標準スラスト荷重と最大負荷荷重を比較すると、以下に示すとおり□倍となっている。以下の表は、試験時にアンギュラー玉軸受に損傷が確認された型式のみを記載しており、SMS-3 及び SMS-6 においてはアンギュラー玉軸受の損傷が確認されなかったため、記載していない。

表 4.2.1.2.9-8 メカニカルスナップのアンギュラー玉軸受のメカ保証値と最大負荷荷重

型式	メーカー保証値(A) (kgf)	最大負荷荷重(B) (kgf)	B/A
SMS-03 ^T			
SMS-1 ^T			
SMS-10 ^T			

損傷を受けた荷重を最大負荷荷重と考え、アンギュラー玉軸受の限界耐力値は標準スラスト荷重の□倍として求めることとした。

なお、軸受メーカーの設定するアンギュラー玉軸受の標準スラスト荷重よりも、アンギュラー玉軸受が組み込まれたメカニカルスナップの定格荷重は大きく設定されている。これは、軸受メーカーがアンギュラー玉軸受の標準スラスト荷重を設定した際に想定した使用条件（軸受に常に荷重がかかり、高速で回転し続ける状態）に比べ、メカニカルスナップのアンギュラー玉軸受の使用条件（短期的にゆっくり回転する）の負荷が小さいためであり、メカニカルスナップ製造者での確性試験時に、メカニカルスナップ全体に対する試験を実施して妥当性を確認している。メカニカルスナップの定格荷重はアンギュラー玉軸受の標準スラスト荷重に対して最大で□倍に設定されていることから、電共研の振動試験結果から得られたアンギュラー玉軸受の限界耐力値（標準スラスト荷重の□倍）は、定格荷重にて適用しているアンギュラー玉軸受の耐力（標準スラスト荷重の□倍）との関係は約□倍となっている。他の機能部品の評価においても、これと同様の考え方で、メカニカルスナップ全体に対する試験によって機能維持の評価を実施している。

c. オイルスナッパ

(a) シリンダ室からの漏えい

SN型オイルスナッパのシリンダ室を形成するシリンダとロッドカバー、シリンダカバーの接触部はメタルタッチであり、タイロッドの締付力によりシール性を保持している。スナッパに引張荷重が作用することによりタイロッドが伸び、その結果メタルタッチ部の押さえが効かなくなり、内部ではオイルリークが生じ、一定値以上の荷重が支持できなくなる事象が確認された。タイロッドが伸ばされる方向である引張方向の最大負荷荷重と、タイロッド締付力（軸力）の比較を表4-27に示す。表4-27の結果から、SN型オイルスナッパのシール性（タイロッド引張）の限界耐力はタイロッドのボルト部締付力の 倍として求めることとした。

表4-27 タイロッド締付力と引張方向最大負荷荷重

--

4.5.2 破壊試験の再現性

再現性を確認するための各型式における定格容量 3ton(30kN)の試験体 3 体に対する試験では、以下の結果を確認した。

(1) SMS 型メカニカルスナップ

いずれも球面軸受が破損した。試験体 3 体のうち 1 体 (供試体 No. 3-2) はスナップの機能を確認するため、球面軸受が破損しても、更に加振力を上げて試験を実施した。

目標負荷荷重 9,000kgf の加振ケースにて、供試体 No. 3-1, 3-3 は圧縮荷重がそれぞれ [] kgf, [] kgf となりイヤ側の球面軸受内側が破損しているが、供試体 No. 3-2 の圧縮荷重は [] kgf と同等の荷重となった。

供試体 No. 3-2 はそのまま加振力を上げて試験を行った結果、目標負荷荷重 12,000kgf の加振ケースにて、圧縮荷重 [] kgf 以上の荷重でユニバーサルボックス側のピンが曲がるとともに、イヤ側の球面軸受内側が破損した。

破損のタイミングは異なるが、発生荷重が目標負荷荷重を超えた条件において同じ箇所が破損しているため、これらの試験は再現性を有していると考えられる。

(2) SHP 型オイルスナップ

ターンバックル部を微調整することでスナップのピン間長さを変えて試験を実施した。標準寸法である供試体 No. 3-1 は [] kgf, 標準寸法より 25mm 長くした供試体 No. 3-3 は [] kgf の荷重で座屈し、標準より 25mm 短くした供試体 No. 3-2 は、座屈せず [] kgf で球面軸受が破損した。座屈の損傷挙動を示した供試体 No. 3-1, 3-3 の座屈損傷箇所については、いずれもターンバックルとピストンロッド間を起点としていることが確認され、ほぼ再現性を有すると考えられる。

(3) SN 型オイルスナップ

いずれも球面軸受が破損しており、供試体 No. 3-1 は [] kgf, 供試体 No. 3-2 は [] kgf, 供試体 No. 3-3 は [] kgf であり、再現性を有していると考えられる。

破損時の荷重のばらつきについては、いずれの試験体も目標負荷荷重を超えて破損していること、限界耐力値は確認された耐力確認荷重の最小値に対して、更に低減を考慮して設定されることから、目標負荷荷重を超えて破損した際の荷重のばらつきは限界耐力値の設定には影響しないと考えられる。

また、試験に基づき一部の型式で評価式、評価項目等を見直した場合は、他の型式にも当該の評価手法を展開して限界耐力値を算出している。スナップに使用している部品の寸法は型式ごとに異なるが、部品の種類・基本的な構造は同じであるため、一部の型式の試験結果による知見を他の型式にも展開することにより、試験のばらつきを考慮している。

4.6 限界耐力評価法の策定（図3-1フロー（11））

スナップの機能維持評価法を策定するために実施した振動試験の結果から、表4-28に示す異常要因分析の機能喪失要因に対する影響確認方法をもとに、スナップの構造部材については材料力学ベースの強度評価式、機能部品については規格品の選定方法（評価式）を見直し、機能維持面の限界耐力評価式を策定した。

策定した限界耐力評価式は、添付-4に電共研における発生応力及び許容応力の計算式として示す。また当該の限界耐力評価式から算出された各部材の限界耐力値及び型式ごとの限界耐力値を添付-1に示す。

電共研にて策定した限界耐力評価法においては、スナップの発生荷重と添付-1に示す限界耐力値を比較することにより、スナップの構造部材の強度評価及び機能評価を行う。

表4-28 スナップの機能喪失要因の影響確認方法

種類	要求機能	機能喪失要因	影響確認手法	対象
メカニカル スナップ	地震時の 支持機能	構造部材損傷	構造強度評価	構造部材
		スナップ座屈	座屈強度評価	全体
		機能部品機能喪失	振動試験	機能部品
			構造強度評価	ボールねじ
		ブレーキ機能喪失	振動試験	ブレーキ機構を 構成する機能部品
	地震後の 作動と性能	構造部材変形	構造強度評価	構造部材
		リリース機能喪失	低速走行試験	リリース機構を 構成する機能部品
	オイル スナップ	地震時の 支持機能	構造部材損傷	構造強度評価
スナップ座屈			座屈強度評価	全体
機能部品機能喪失			振動試験	機能部品
シール性喪失			構造強度評価	シール性に 係る構造部材
地震後の 作動と性能		構造部材変形	構造強度評価	構造部材
		リリース機能喪失	低速走行試験	リリース機構を 構成する機能部品

4.7 確性試験と電共研の試験条件の比較

確性試験と電共研の試験条件の比較を表 4-29 に示す。表のとおり、振動試験の主要な試験条件である加振波、振動数及び加振時間は、確性試験と電共研で同一である。また、電共研での荷重条件は、確性試験における定格荷重×1.5 を上回る荷重（損傷したと判定されるまで）となっており、電共研の方がより厳しい試験条件となっている。なお、損傷の判定基準の考え方は確性試験と同様であるが、確性試験の荷重が小さいため損傷には至っていない。

表 4-29 確性試験と電共研の試験条件の比較

比較項目	確性試験 (過負荷振動試験)	電共研 (振動試験)
加振波		正弦波
振動数		9Hz
加振時間		10 秒程度
荷重条件		荷重を段階的に増加 (損傷したと判断されるまで)
計測項目		動剛性, 低速走行時抵抗力
加振開始位置		1/2 ストローク (中央)

5. 電共研の試験の妥当性

電共研における限界耐力評価法策定のための試験について、試験条件が妥当であることの確認を行った。

具体的には、地震時の機能維持確認として実施されている振動試験に対する条件と、地震後の機能維持確認として実施されている低速走行試験に対する条件について、妥当性を確認した。振動試験における試験結果を左右する条件は以下に示す項目となる。

- i. 加振波が正弦波であること
- ii. 加振振動数が 9Hz であること
- iii. 加振時間が 10 秒程度であること
- iv. 判定基準が動剛性（動ばね定数）であり、判定基準値が表 4-11～表 4-13 に示す値であること
- v. 加振開始位置が 1/2 ストロークであること

また、低速走行試験における試験結果を左右する条件は以下に示す項目となる。

- vi. 低速走行試験における試験速度が 2.1(+0, -0.5)mm/sec であること
- vii. 低速走行試験時の判定基準が抵抗値であり、判定基準値が表 4-14～表 4-16 に示す値であること

以降に、上記 i～vii の各項目に対して適切性の確認を行った結果を示す。

i. 加振波が正弦波であること

実際にスナッパが受ける地震荷重は振幅がランダムな荷重であり、最大の荷重が連続してスナッパに負荷されるものではない。一方で、振動試験では加振波として正弦波を適用しており、振幅安定後、一定時間ほぼ同一の荷重が加わることとなるため、最大振幅が同じであれば、振動試験の方が保守的であると言える。したがって、試験で得られた最大負荷荷重を超えない範囲での荷重の設定であれば、振動試験の入力波が正弦波であることに問題は無いと考える。

ii. 加振振動数が 9Hz であること

振動試験では、正弦波の加振振動数を 9Hz としている。原子力発電プラントに設置される配管系の固有振動数は概ね 10Hz 前後であること、以下に示す文献においても、試験の加振振動数を 9Hz としていることなどから、9Hz という加振振動数は妥当であると考えられる。

- ・日本機械学会規格「J S M E S 014-1999 原子力発電用動的機器の検証規格」

iii. 加振時間が 10 秒程度であること

スナッパに負荷される地震荷重は、概ね数十秒から数百秒である。一方で、地震荷重はそのランダム性から、最大振幅が継続して発生し続ける訳ではなく、加振中に最大振幅相当の加振状態が生じるのは限定的である。また、スナッパの機能喪失の要因は、過大荷重による構造部材の損傷や変形、あるいは機能部品の機能喪失であると考えられる。

過大荷重により上記事象が発生した場合は、振動試験において波形が安定する一定時間以上の加振を実施さえしていれば、動剛性の低下や、別途実施する低速走行試験時の抵抗値の上昇として計測されるものと推定される。したがって、加振時間が10秒程度であることは妥当であると判断する。

iv. 判定基準が動剛性（動ばね定数）であり判定基準値が表4-11～表4-13に示す値であること

表4-11～表4-13に示す動剛性の判定基準値は、メーカーにて定められた基準値であり、島根原子力発電所第2号機におけるスナッパ設計要求値と同じ値である。したがって、表4-11～表4-13に示す動剛性を判定基準値とすることは妥当である。

v. 加振開始位置が1/2ストロークであること

スナッパは1/2ストロークの位置を基準として据え付けられるため、試験において加振開始位置を1/2ストロークとすることは妥当である。

vi. 低速走行試験における試験速度が $2.1(+0, -0.5)$ mm/secであること

試験速度 $2.1(+0, -0.5)$ mm/secは、島根原子力発電所第2号機において想定される配管の移動速度($10^{-3} \sim 10^{-2}$ mm/sec)に対して十分大きく保守的であることから、試験条件として適切である。したがって、設定されている試験速度は妥当である。

vii. 低速走行試験時の判定基準が抵抗値であり判定基準値が表4-14～表4-16に示す値であること

表4-14～表4-16に示す抵抗値の判定基準値は、メーカーにて定められた基準値であり、島根原子力発電所第2号機における設計要求値と同じ値である。したがって、表4-14～表4-16に示す抵抗値を判定基準値とすることは妥当である。

上記i～viiに示した検討結果から、電共研で実施された各試験の試験条件が、島根原子力発電所第2号機の設計要求と比較して妥当であることを確認した。

また、電共研の限界耐力値は適切な試験条件により実施された試験結果に基づいて、保守的に策定されている。

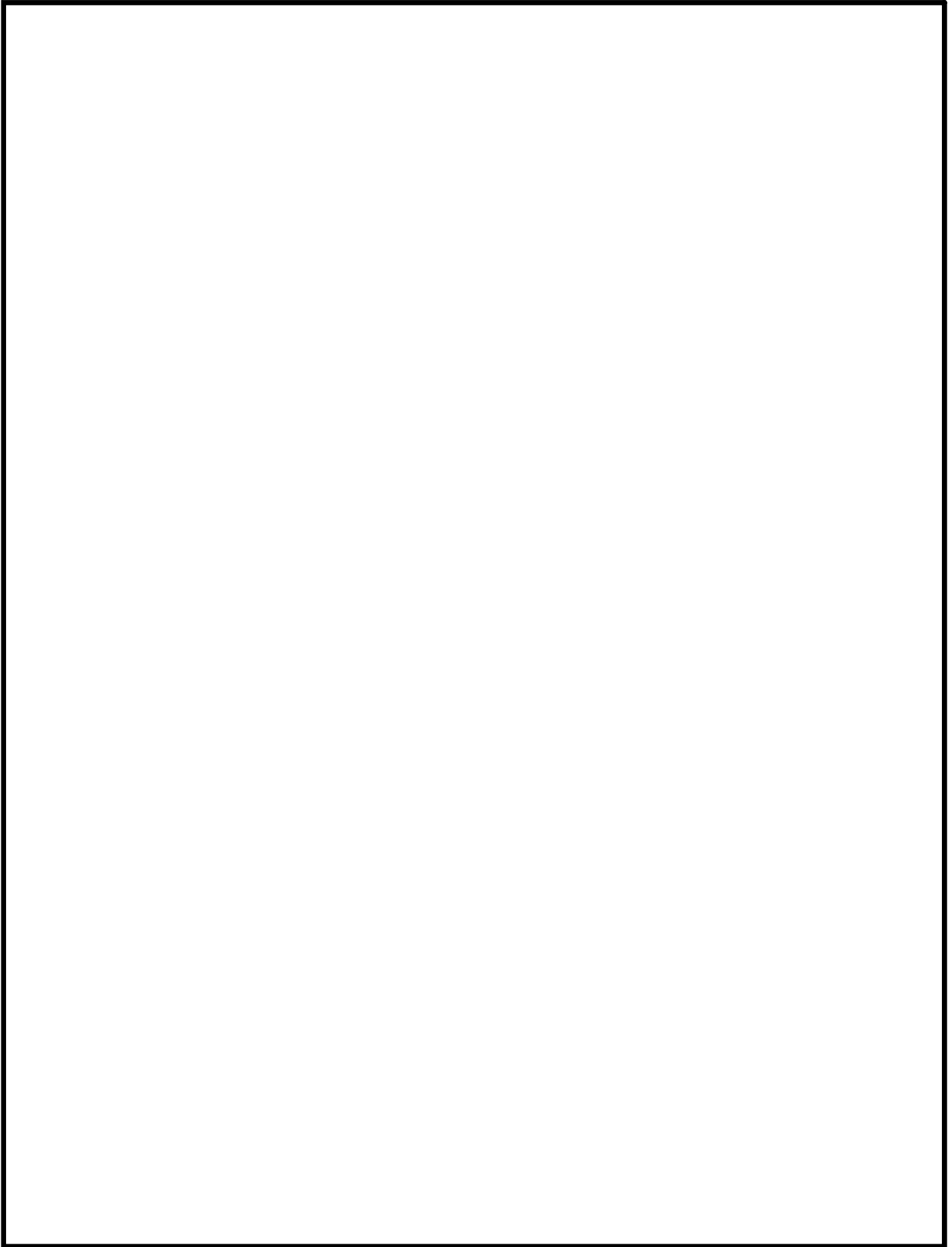
これにより、電共研の試験結果及び試験結果をもとに策定した限界耐力値を島根原子力発電所第2号機へ適用することは妥当であると判断する。

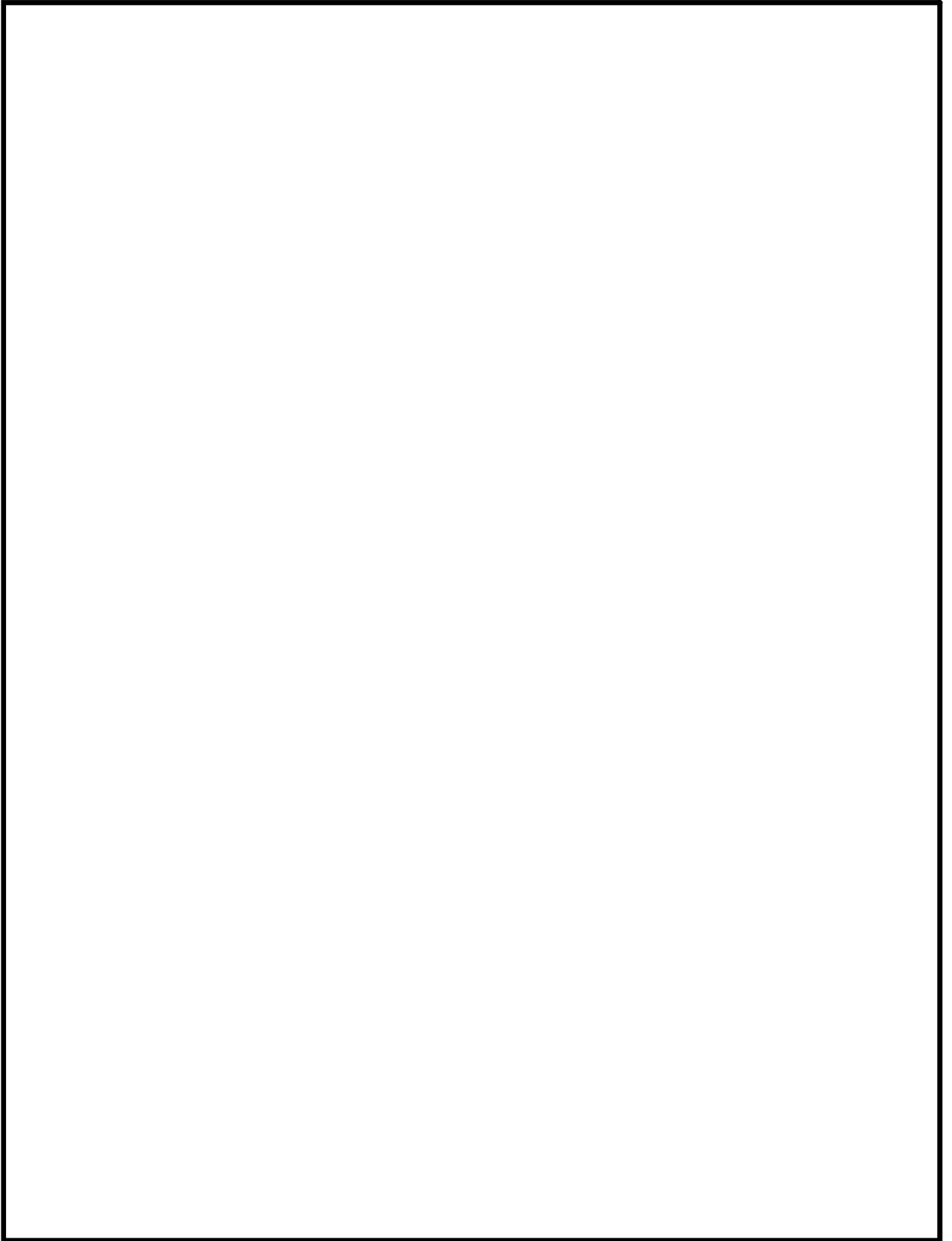
6.まとめ

電共研における耐震設計評価手法の総合的検討のうち、スナッパ限界耐力評価法の検討の概要として、振動試験、低速走行試験及び座屈試験の概要をまとめるとともに、限界耐力評価法の策定方法をまとめた。

その上で、電共研における限界耐力評価法策定のための試験について、試験条件が妥当であることを確認した。

添付-1





振動試験結果データ

電共研の振動試験の結果を表 1 に示す。表中の耐力確認荷重は、加振後の低速走行試験にて判定基準を満足した荷重ケースにおいて、引張方向及び圧縮方向の振動試験における最大荷重であり、荷重負荷後も機能維持できると考えられる荷重値である。

また、耐力確認荷重を得た加振ケース（加振後も破損せずに機能維持できたケース）の振動試験における時刻歴の変位波形及び荷重波形を図 1～図 18 に示す。引張方向と圧縮方向の荷重値が異なるのは、メカニカルスナッパの引張方向と圧縮方向で動剛性が異なり、かつ変位振幅制御で加振しているためである。

なお、SMS-3 の供試体 No. 3-1 及び供試体 No. 3-3 は、球面軸受が破損した時点で破損ケースと判断して試験を終了したが、SMS-3 の供試体 No. 3-2 にて球面軸受が破損しても支持機能及び低速走行機能を維持できることが確認できたため、SMS-3 の供試体 No. 3-1 及び供試体 No. 3-3 は破損ケースから耐力確認荷重を求めている。

表 1 電共研における振動試験の試験結果

型式	供試体 No.	定格荷重 (kN)	耐力確認荷重 (kN)	
			引張側	圧縮側
SMS-03	03-1	3	27.1	29.9
SMS-1	1-1	10	44.8	56.2
SMS-3	3-1	30	88.0	101.1
SMS-3	3-2	30	98.1	113.5
SMS-3	3-3	30	85.1	94.2
SMS-6	6-1	60	154.0	190.5
SMS-10	10-1	100	199.1	244.7
SHP-03	03-1	3	20.0	17.4
SHP-3	3-1	30	69.3	78.4
SHP-3	3-2	30	106.6	122.2
SHP-3	3-3	30	73.1	90.1
SHP-16	16-1	160	388.2	523.1
SN-03	03-1	3	20.3	53.4
SN-3	3-1	30	91.0	129.2
SN-3	3-2	30	93.4	127.0
SN-3	3-3	30	89.3	109.7
SN-6	6-1	60	144.1	235.3
SN-16	16-1	160	409.1	510.7

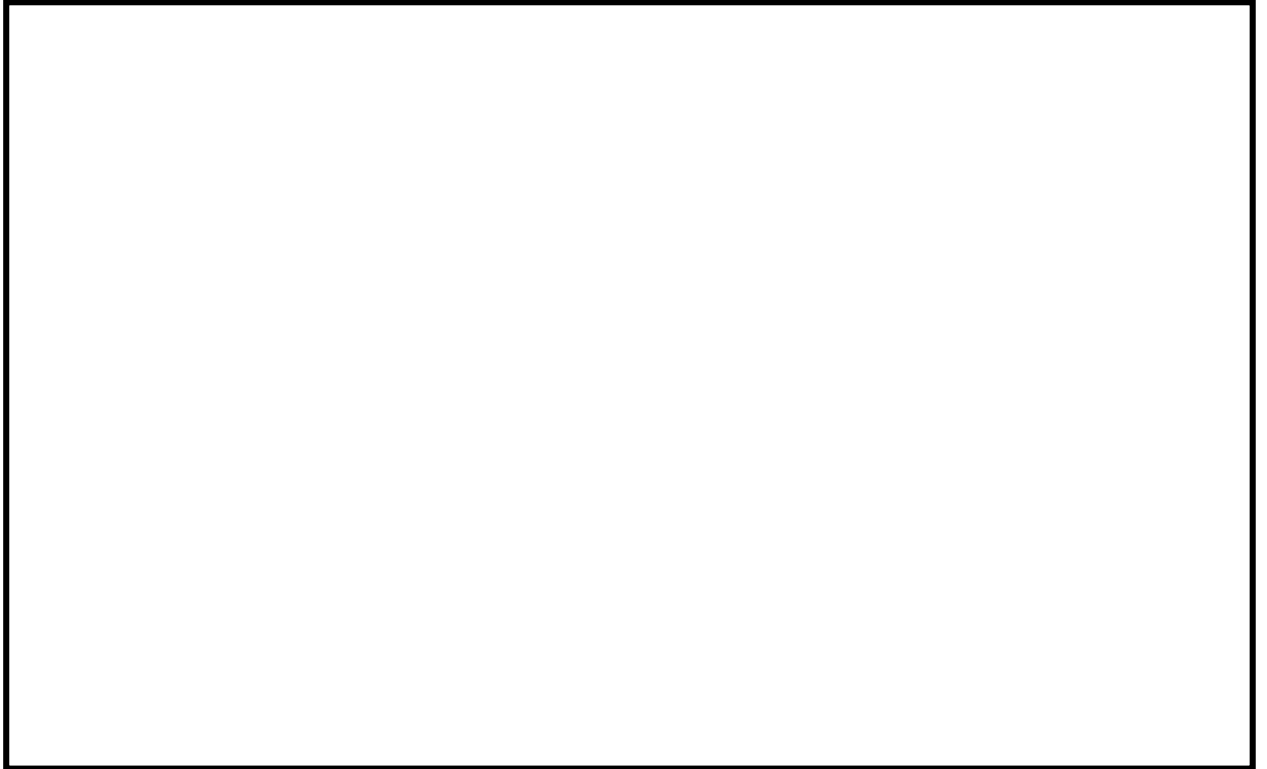


図1 SMS型メカニカルスナップ 供試体 No. 03-1 の振動試験における時刻歴波形及び荷重波形

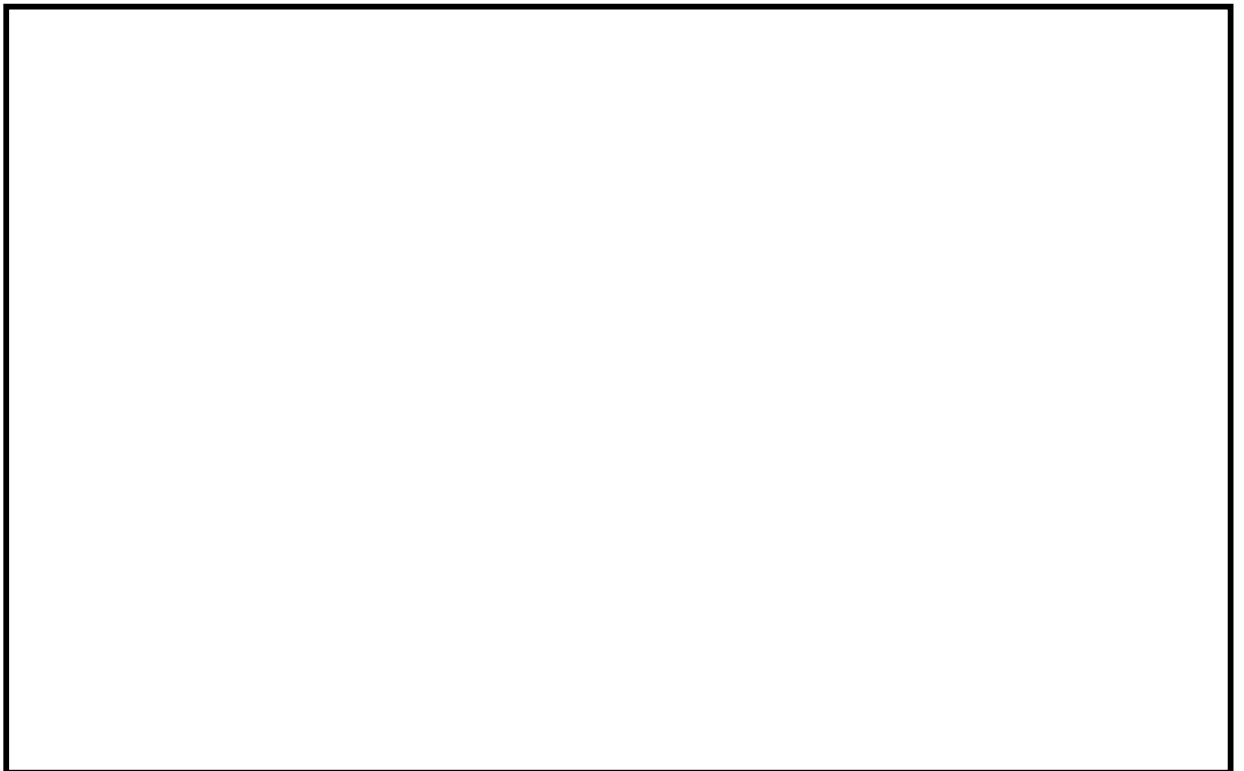


図2 SMS型メカニカルスナップ 供試体 No. 1-1 の振動試験における時刻歴波形及び荷重波形

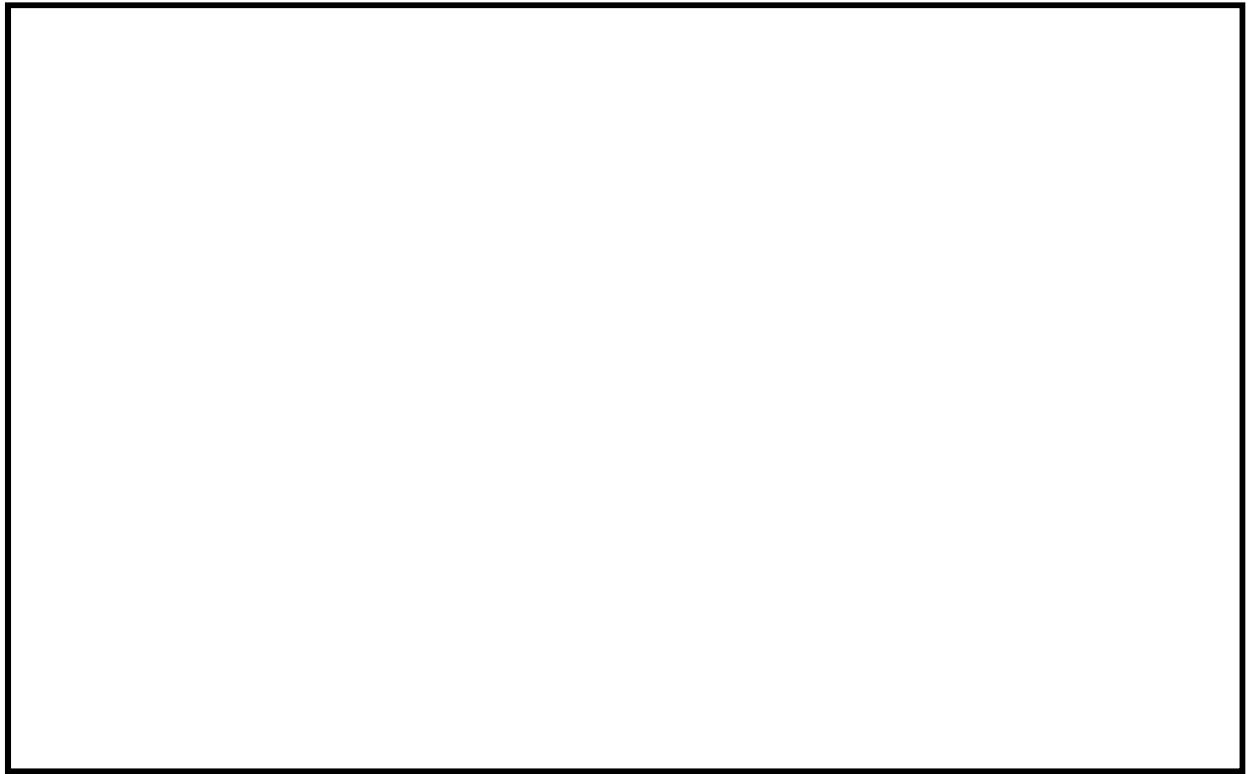


図 3 SMS 型メカニカルスナップ 供試体 No. 3-1 の振動試験における時刻歴波形及び荷重波形

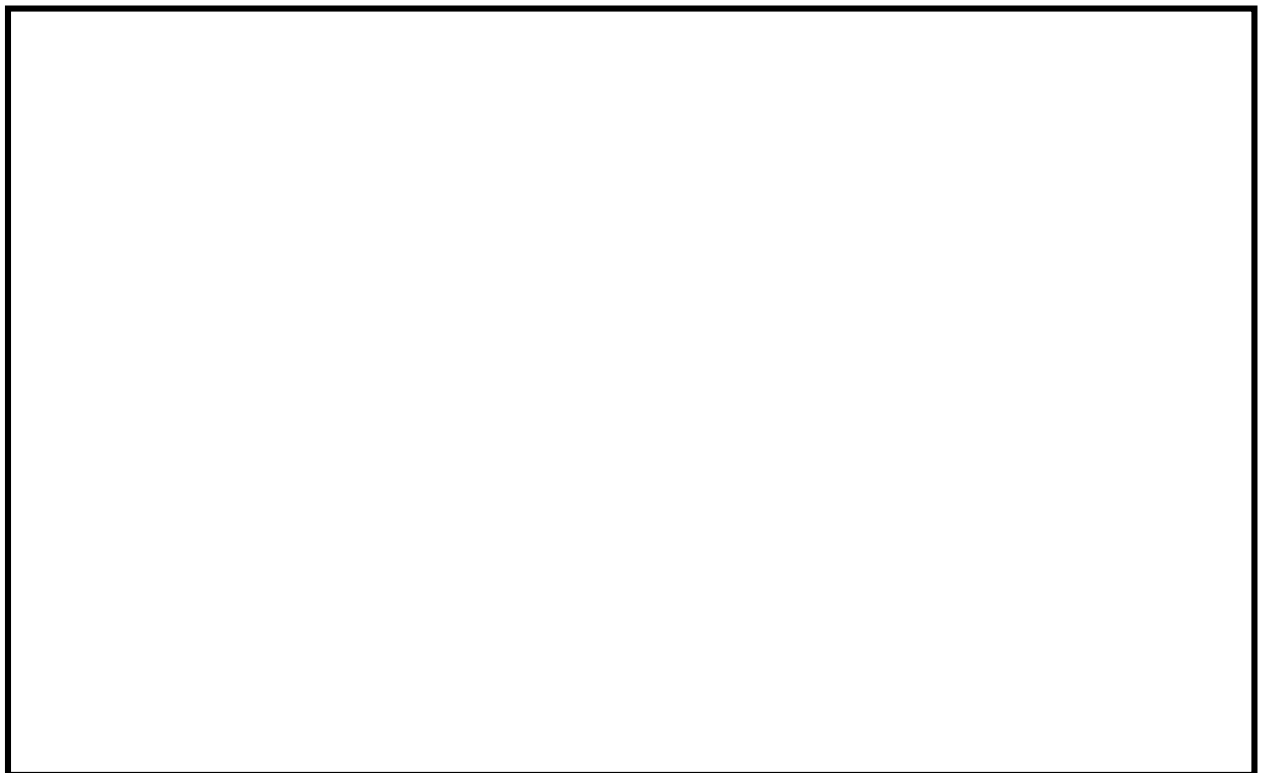


図 4 SMS 型メカニカルスナップ 供試体 No. 3-2 の振動試験における時刻歴波形及び荷重波形

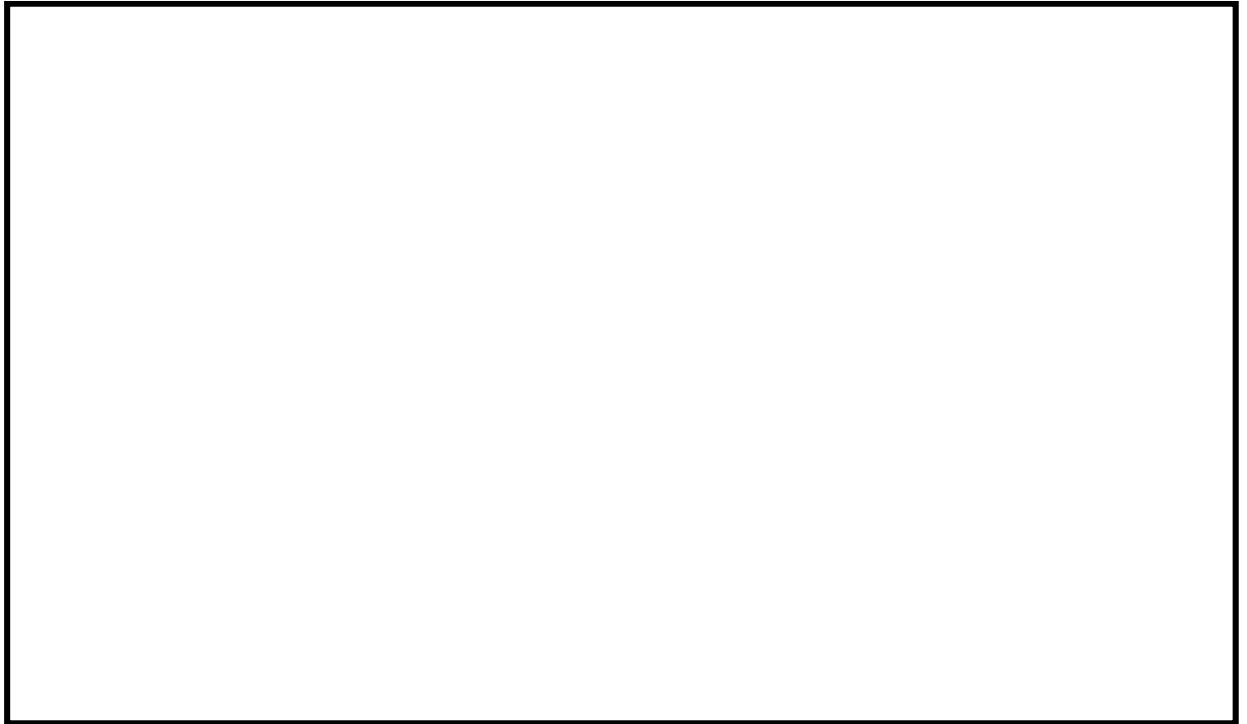


図 5 SMS 型メカニカルスナップ 供試体 No. 3-3 の振動試験における時刻歴波形及び荷重波形

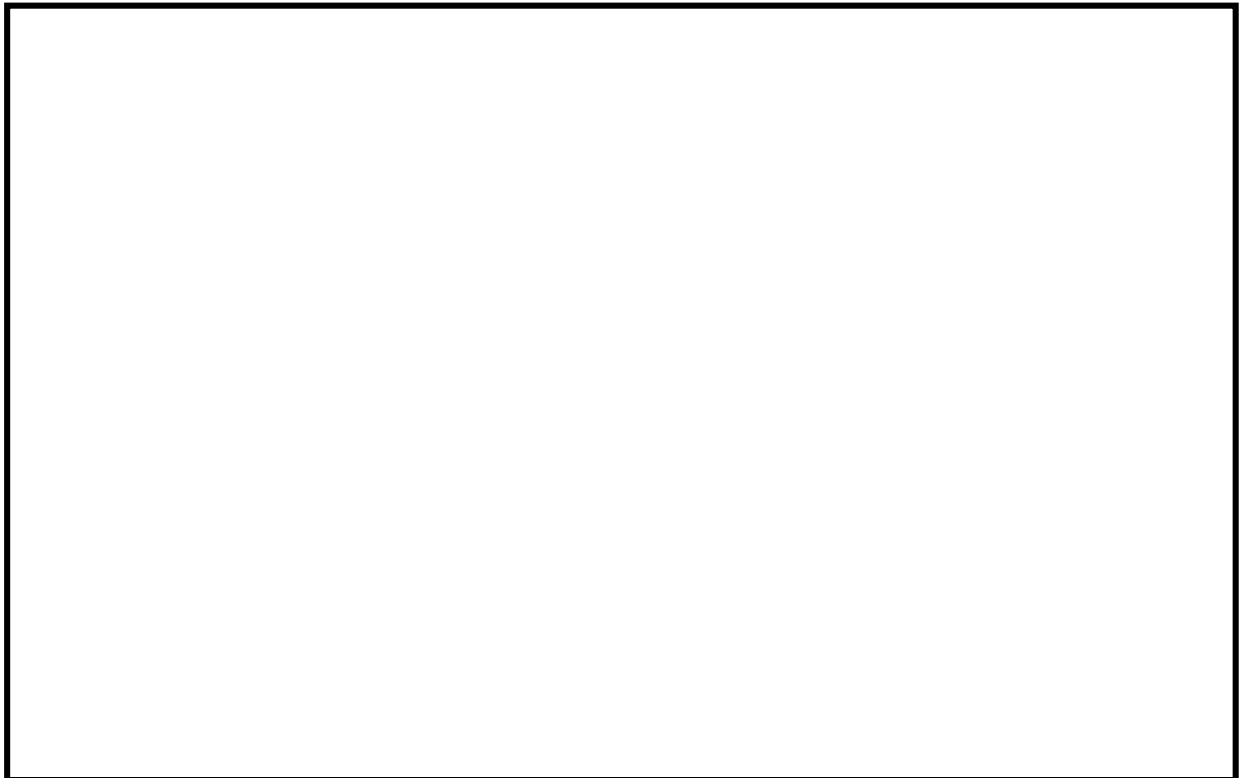


図 6 SMS 型メカニカルスナップ 供試体 No. 6-1 の振動試験における時刻歴波形及び荷重波形



図7 SMS型メカニカルスナッパ 供試体 No. 10-1 の振動試験における時刻歴波形及び荷重波形

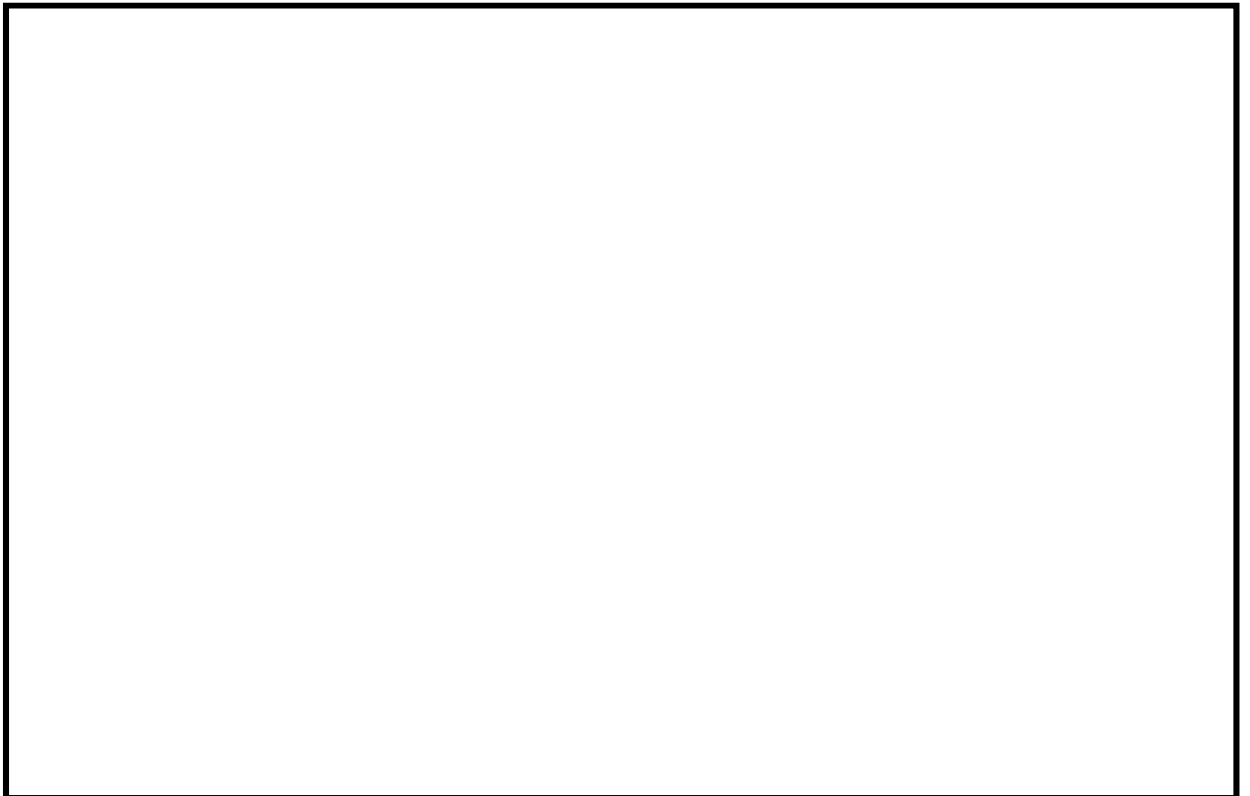


図8 SHP型オイルスナッパ 供試体 No. 03-1 の振動試験における時刻歴波形及び荷重波形

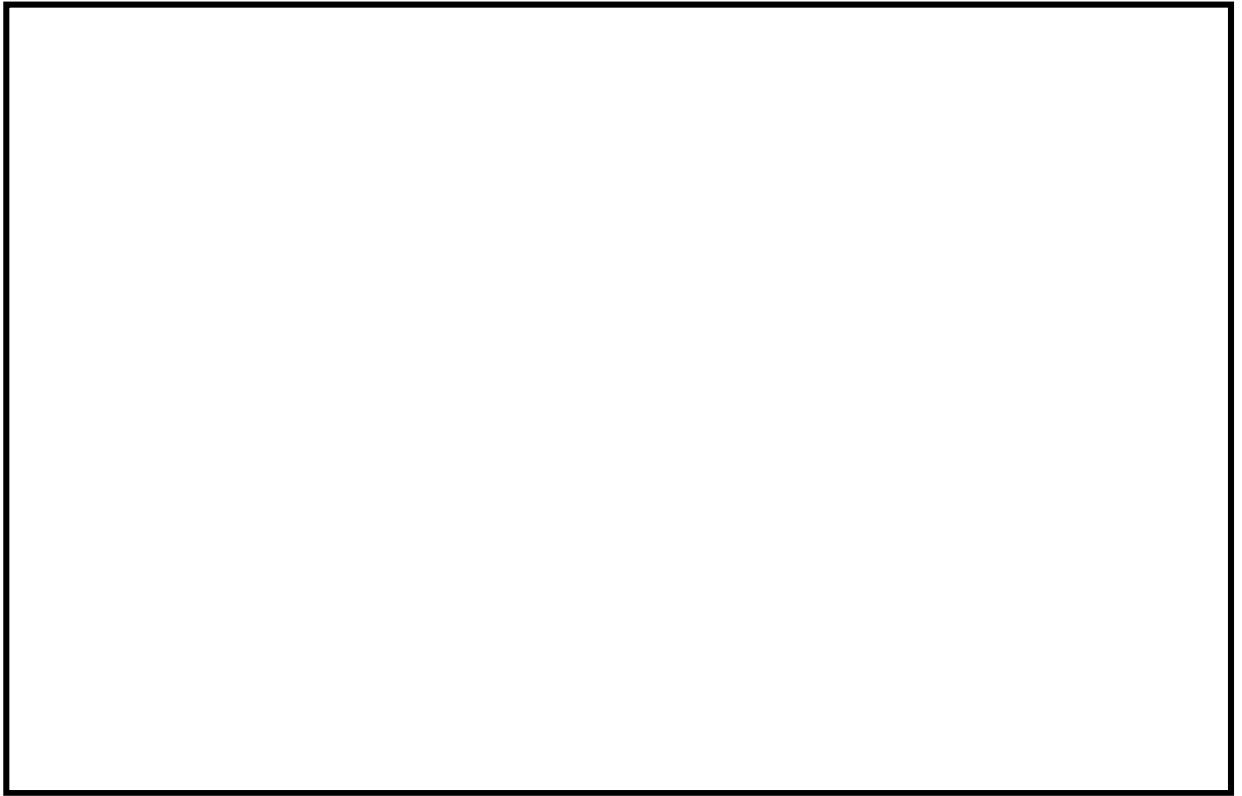


図 9 SHP 型オイルスナックバ 供試体 No. 3-1 の振動試験における時刻歴波形及び荷重波形

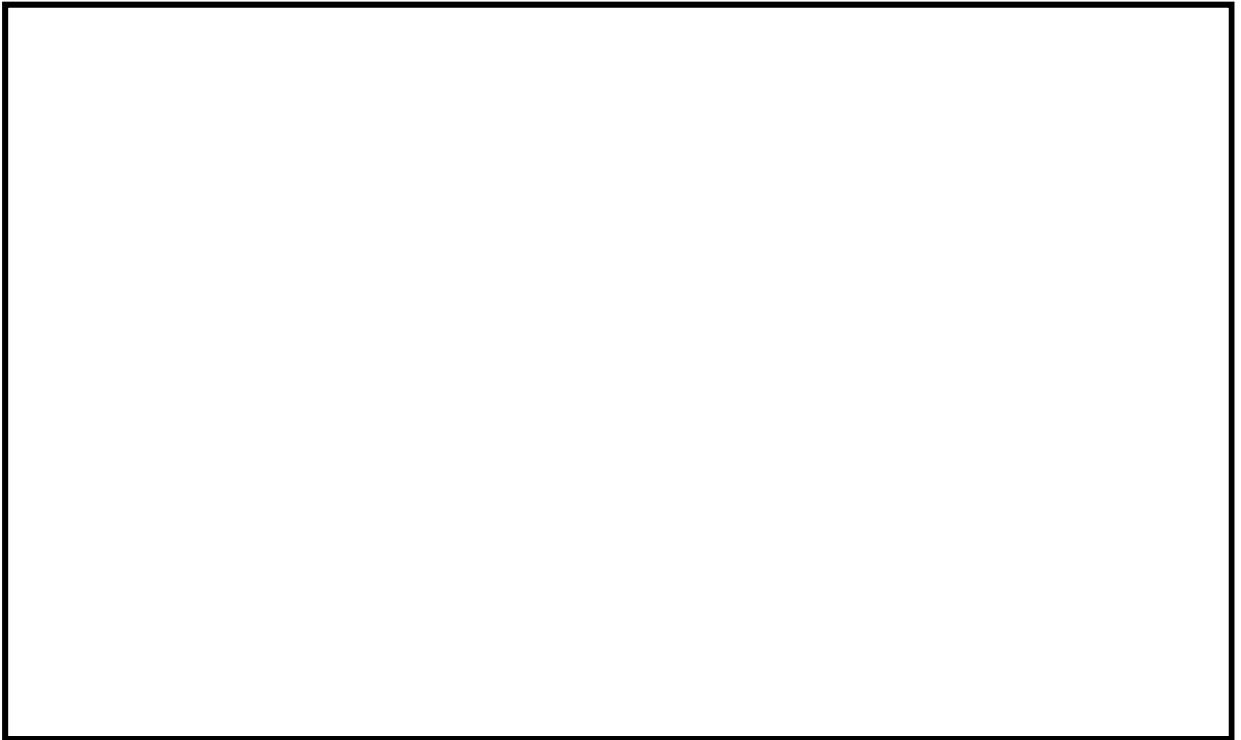


図 10 SHP 型オイルスナックバ 供試体 No. 3-2 の振動試験における時刻歴波形及び荷重波形

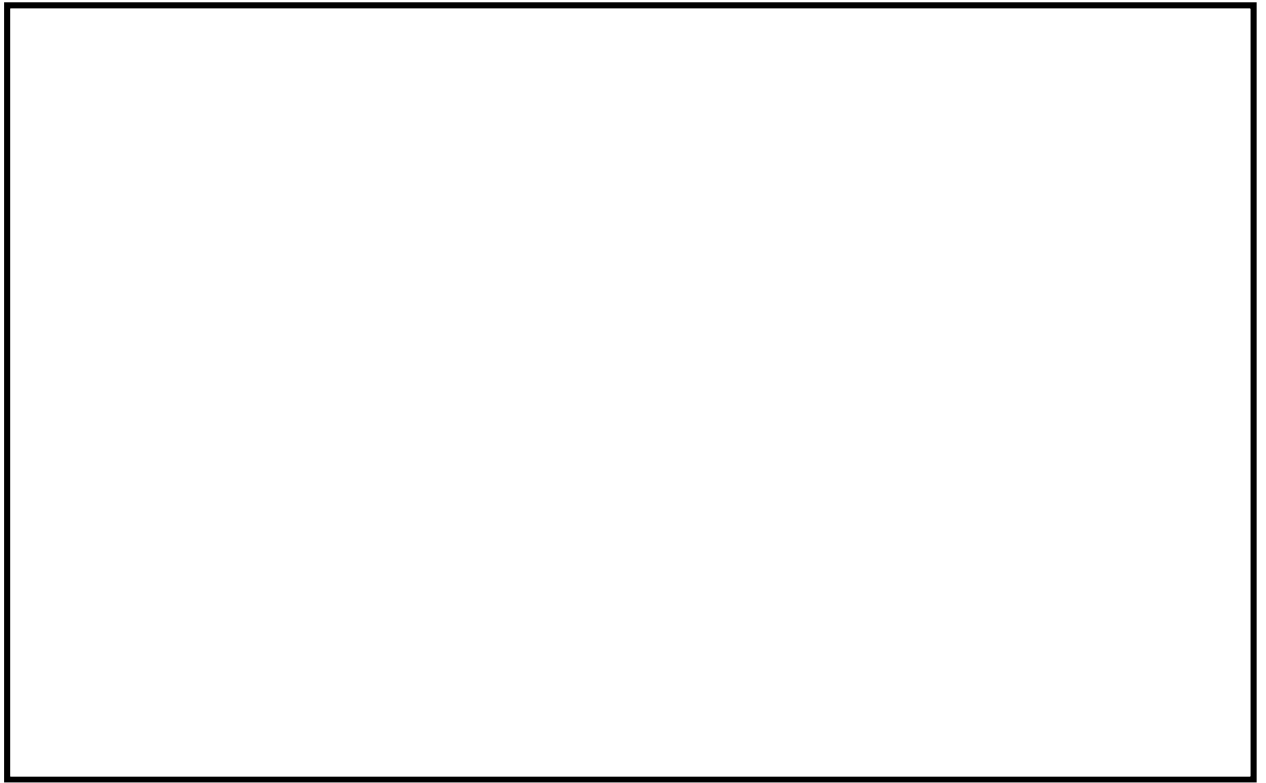


図 11 SHP 型オイルスナックバ 供試体 No. 3-3 の振動試験における時刻歴波形及び荷重波形

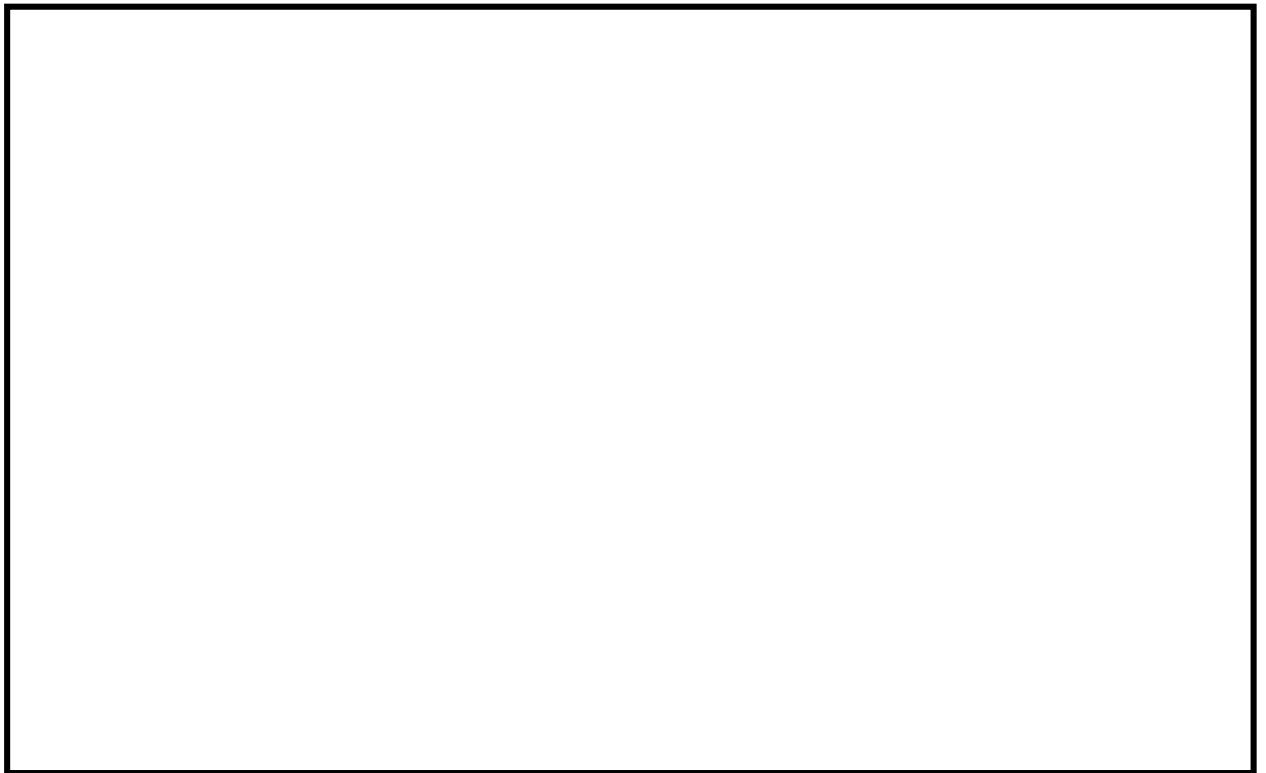


図 12 SHP 型オイルスナックバ 供試体 No. 16-1 の振動試験における時刻歴波形及び荷重波形

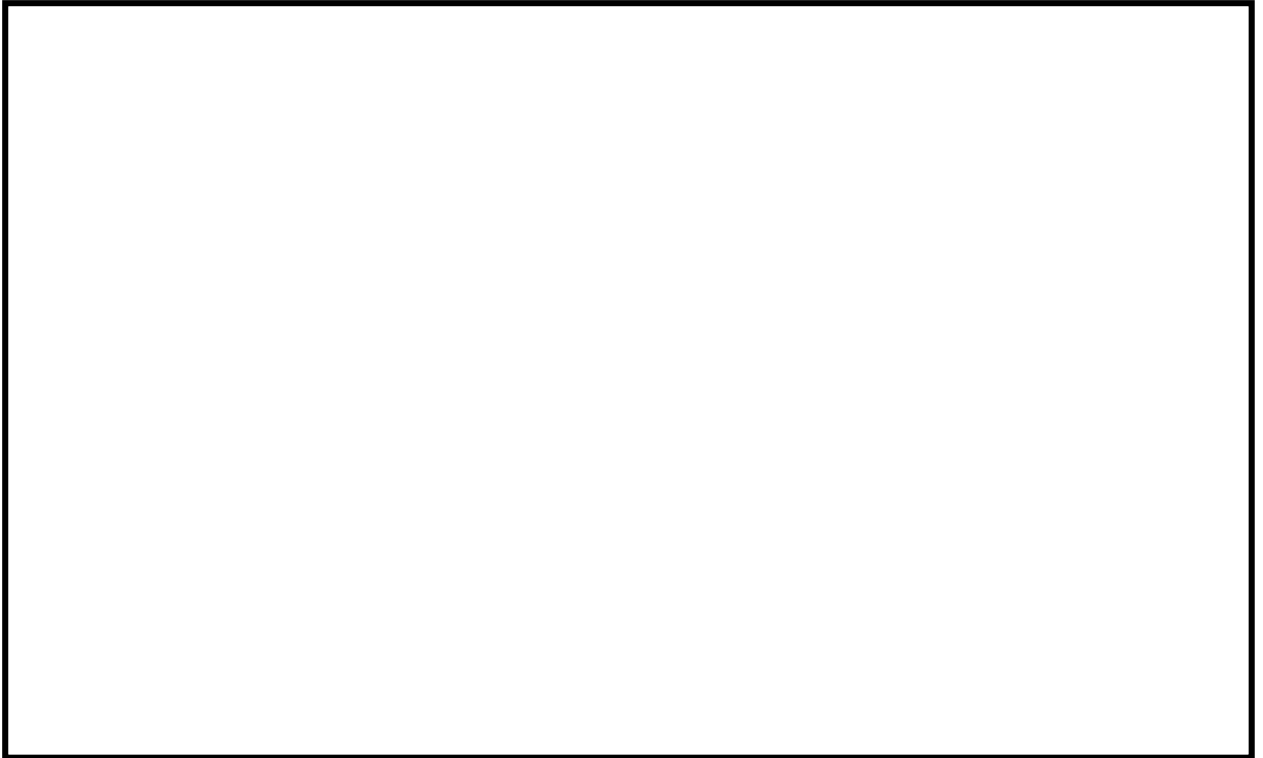


図 13 SN 型オイルスナップ 供試体 No. 03-1 の振動試験における時刻歴波形及び荷重波形

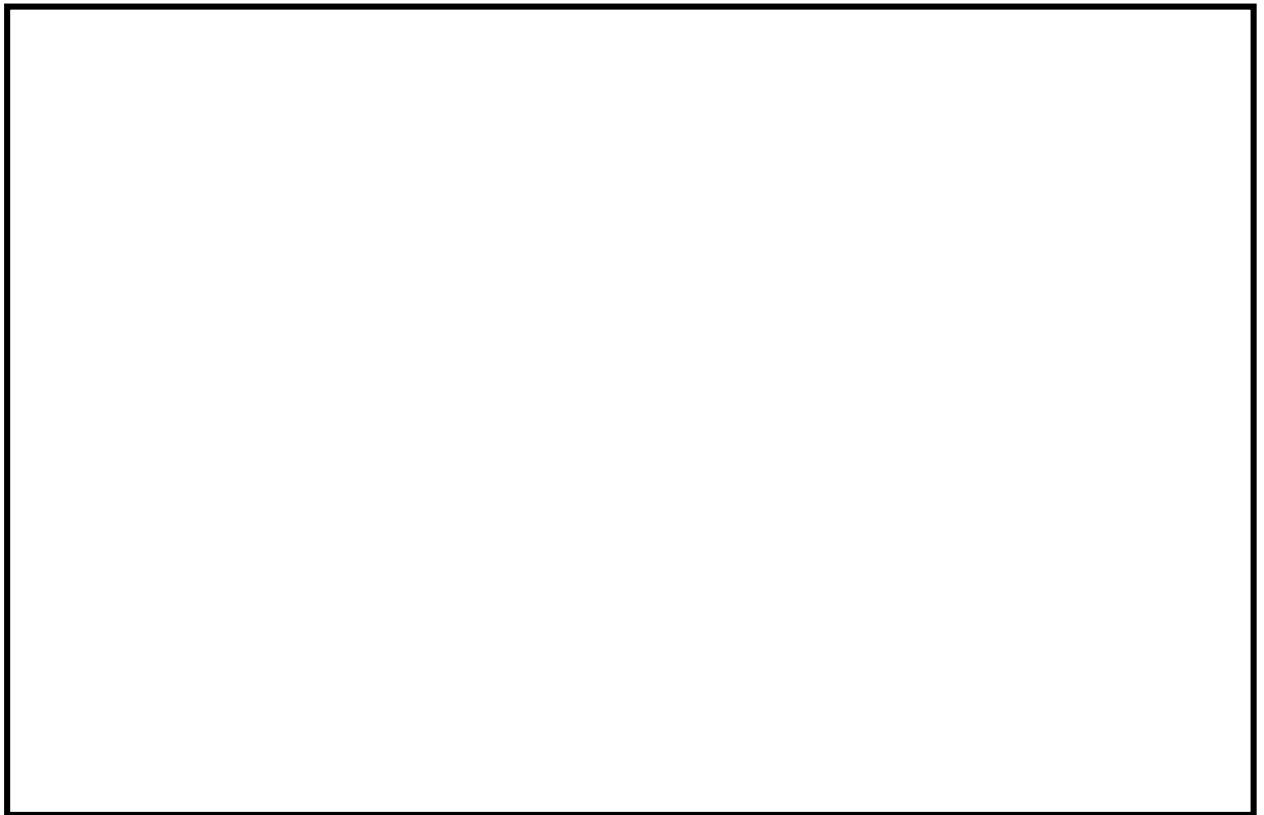


図 14 SN 型オイルスナップ 供試体 No. 3-1 の振動試験における時刻歴波形及び荷重波形

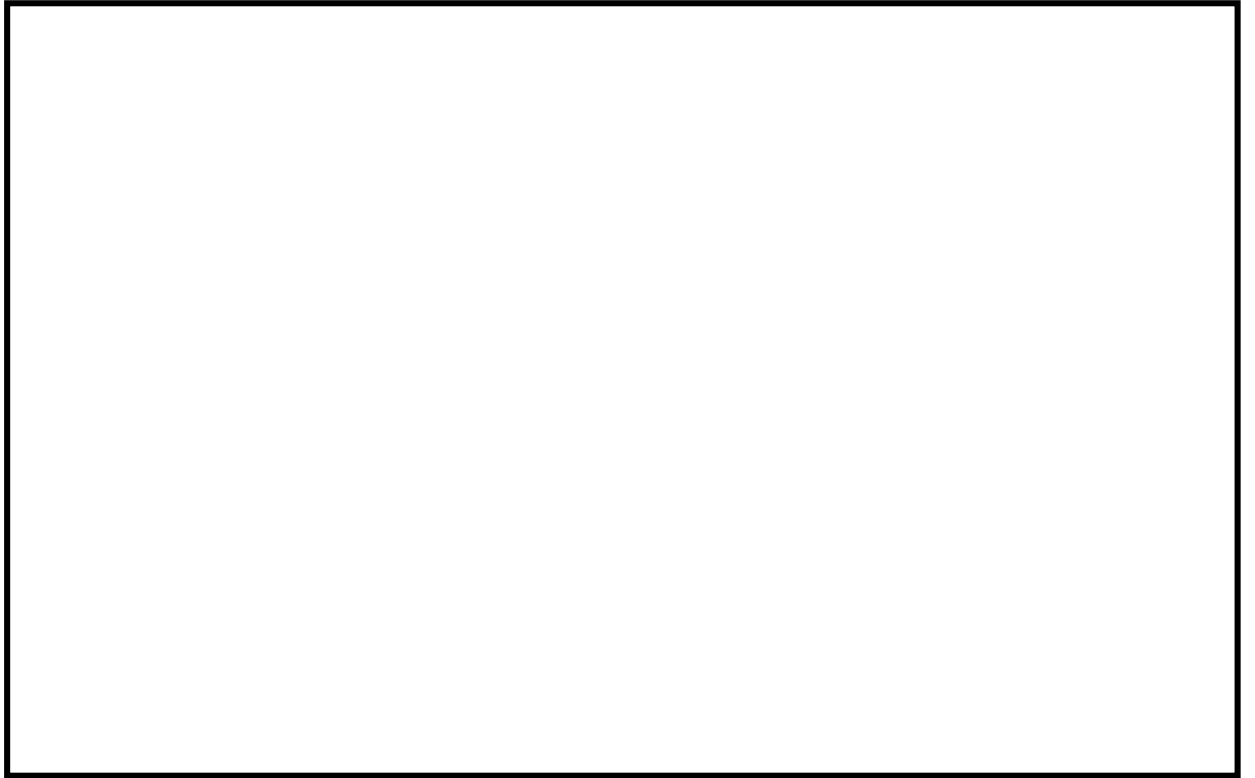


図 15 SN型オイルスナップ 供試体 No. 3-2 の振動試験における時刻歴波形及び荷重波形

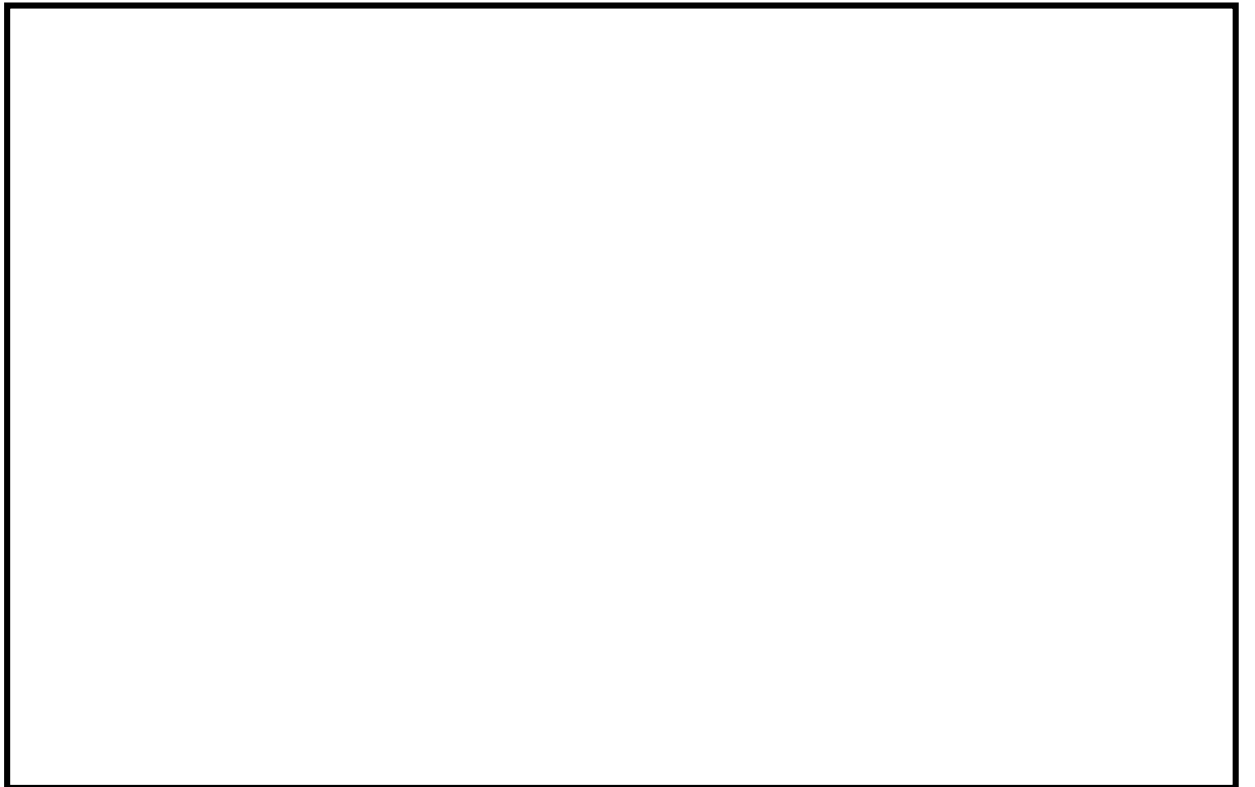


図 16 SN型オイルスナップ 供試体 No. 3-3 の振動試験における時刻歴波形及び荷重波形

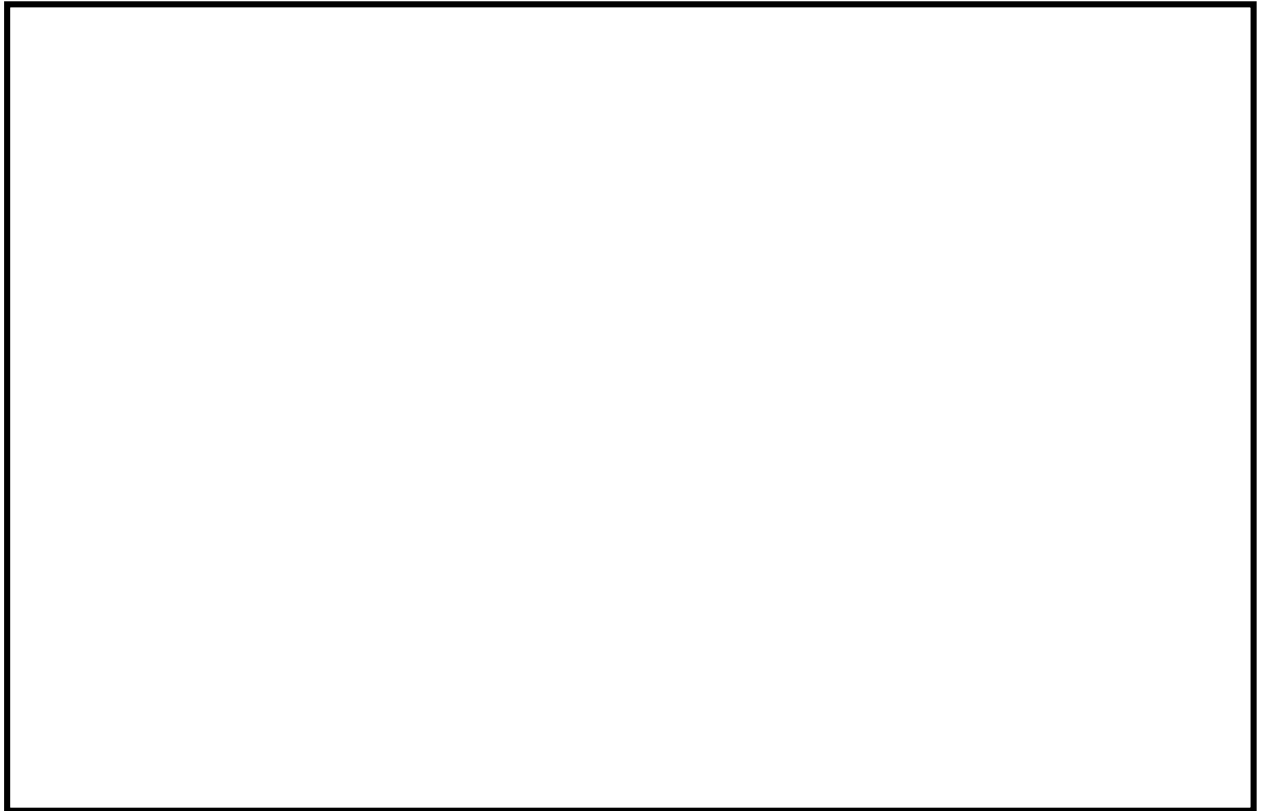


図 17 SN型オイルスナップ 供試体 No. 6-1 の振動試験における時刻歴波形及び荷重波形

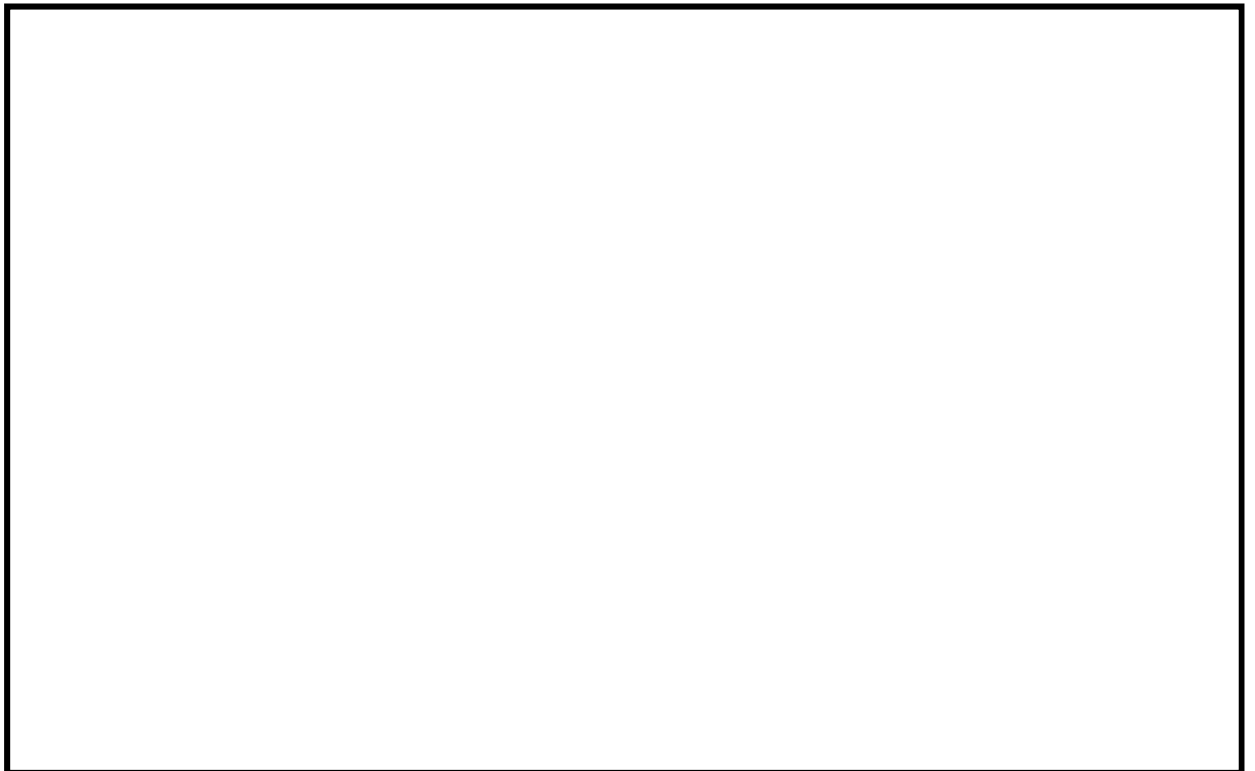


図 18 SN型オイルスナップ 供試体 No. 16-1 の振動試験における時刻歴波形及び荷重波形

また、電共研による破壊試験（振動試験、低速走行試験及び静的圧縮試験）で機能維持が確認された耐力確認荷重と、その試験結果を基に耐力評価式を見直して策定された限界耐力評価法による限界耐力値との比較を表2に示す。耐力確認荷重は、原則として表1の耐力確認荷重について引張側及び圧縮側のいずれか小さい方の荷重とするが、SMS型メカニカルスナッパについては、添付-3の考え方に従い、表1の耐力確認荷重の引張側及び圧縮側のうち大きい方の荷重値とした。試験が実施されているすべての型式について、試験による耐力確認荷重は限界耐力値よりも大きいため、限界耐力値が負荷された場合においても、スナッパの機能維持に問題がないと判断できる。

なお、各型式の限界耐力値は、添付-4に示す電共研の発生応力及び許容応力の計算式から各部位の限界耐力値を求めた上で、スナッパ全部位での最小値を計算することで求める。

表2 電共研における耐力確認荷重と限界耐力値（1/2）

型式	定格荷重 (kN)	耐力確認荷重 (kN)	限界耐力値 (kN)	最小裕度部位	最小裕度部品の分類	限界耐力値／定格荷重	耐力確認荷重／限界耐力値
SMS-01	1	—	19.0	六角ボルト	構造部材	19.00	—
SMS-03	3	29.9	18.8	六角ボルト	構造部材	6.26	1.59
SMS-06	6	—	16.8	ベアリング押さえ	構造部材	2.80	—
SMS-1	10	56.2	53.9	コネクティングチューブ	構造部材	5.39	1.04
SMS-3	30	94.2	75.3	アンギュラー玉軸受	機能部品	2.51	1.25
SMS-6	60	190.5	170.6	ベアリング押さえ	構造部材	2.84	1.11
SMS-10	100	244.7	224.5	ベアリング押さえ	構造部材	2.24	1.08
SMS-16	160	—	344.2	ベアリング押さえ	構造部材	2.15	—
SMS-25	250	—	490.3	ベアリング押さえ	構造部材	1.96	—
SMS-40	400	—	941.4	コネクティングチューブ	構造部材	2.35	—
SMS-60	600	—	1353.3	ダイレクトアタッチブラケット	構造部材	2.25	—

表 2 電共研における耐力確認荷重と限界耐力値 (2/2)

型式	定格荷重 (kN)	耐力確認荷重 (kN)	限界耐力値 (kN)	最小裕度部位	最小裕度部品の分類	限界耐力値／定格荷重	耐力確認荷重／限界耐力値
SHP-03	3	17.4	5.3	全長座屈	構造部材	1.76	3.28
SHP-06	6	—	14.1	全長座屈	構造部材	2.35	—
SHP-1	10	—	22.7	全長座屈	構造部材	2.27	—
SHP-3	30	69.3	50.8	全長座屈	構造部材	1.69	1.36
SHP-6	60	—	141.8	全長座屈	構造部材	2.36	—
SHP-10	100	—	196.1	全長座屈	構造部材	1.96	—
SHP-16	160	388.2	318.7	全長座屈	構造部材	1.99	1.24
SHP-25	250	—	514.8	ターンバックル	構造部材	2.05	—
SN-03	3	20.3	9.1	全長座屈	構造部材	3.03	2.23
SN-06	6	—	16.4	全長座屈	構造部材	2.73	—
SN-1	10	—	26.2	全長座屈	構造部材	2.62	—
SN-3	30	89.3	70.6	全長座屈	構造部材	2.35	1.26
SN-6	60	144.1	125.5	タイロッド (シール性)	機能部品	2.09	1.14
SN-10	100	—	205.9	ジャンクションコラムアダプタ	構造部材	2.05	—
SN-16	160	409.1	321.6	タイロッド (シール性)	機能部品	2.01	1.27
SN-25	250	—	465.8	ダイレクトイーヤ	構造部材	1.86	—

スナップの耐力確認荷重における引張側と圧縮側の考え方

振動試験では、引張側と圧縮側の耐力確認荷重が得られるが、耐力確認荷重を限界耐力評価手法の検討にあたって、引張側と圧縮側のどちらを参照すべきか、考え方を以下にまとめた。

スナップは構造上の特徴から引張方向と圧縮方向で剛性が異なるため、変位振幅制御による振動試験では、引張側と圧縮側の発生荷重が異なり、圧縮側の発生荷重が大きく計測される傾向が確認されている。これに対し、スナップの構成部材への荷重伝達が引張方向と圧縮方向で等しく、引張方向と圧縮方向で発生応力算出式と許容応力が等しい場合、試験で確認された引張側及び圧縮側の発生荷重のいずれに対しても機能維持されるものとの判断ができるため、引張側と圧縮側のいずれか大きい方の荷重を耐力確認荷重として採用することに問題はない。

メカニカルスナップについては、引張又は圧縮の軸方向荷重を回転運動に変換する構造上の特徴から引張方向と圧縮方向で荷重伝達経路は同一である（本文図 5-1 参照）。また、コネクティングチューブ以外の最小裕度部位（六角ボルト、アンギュラー玉軸受、ベアリング押さえ、ダイレクトアタッチブラケット）については、引張方向と圧縮方向で発生応力算出式と許容応力が等しいことから、引張側と圧縮側のいずれか大きい方の荷重を耐力確認荷重として採用することに問題はない。しかしながら、メカニカルスナップの最小裕度部位のうちコネクティングチューブは、引張方向と圧縮方向で発生応力算出式と許容応力が異なる構成部材であるが、当該部品についても引張側と圧縮側のうち大きい荷重（＝圧縮荷重）を耐力確認荷重として採用することに問題がないことを、数値を使った例を挙げて説明する。

前述の通り、変位振幅制御による加振試験では、圧縮側の発生荷重が大きく測定される。また、コネクティングチューブの圧縮側の破損荷重*は引張側の破損荷重よりも小さい。ここでは引張側破損荷重を 30kN、圧縮側破損荷重を 25kN として説明する。（図 1 及び図 2 参照）

図 1 と図 2 は振動試験の荷重データを示したものであり、図 1 が破損前の試験ケース、図 2 が破損ケースを示したものである。図 1 のケースの試験負荷荷重は圧縮側で 23kN、引張側で 18kN となり、機能維持が確認されている。図 2 のケースでは圧縮側荷重がコネクティングチューブの圧縮方向破損荷重である 25kN に達し、破損が確認されたため、破損前のケースとなる図 1 の試験荷重が耐力確認荷重の採用対象ケースとなり、耐力確認荷重は圧縮側を採用し、23kN となる。この耐力確認荷重 23kN は実際に破損する圧縮側破損荷重 25kN 及び引張側破損荷重 30kN いずれに対しても保守的な設定となるため、コネクティングチューブに対しても耐力確認荷重として、発生荷重が大きい圧縮側試験負荷荷重である 23kN を採用することで問題ない。

一方で、オイルスナップについては、構造上の特徴から引張方向と圧縮方向で荷重伝達経路が異なる構成部材が一部に含まれる（本文図 5-3～5-6 参照）ことから、引張側と圧縮側のいずれか小さい方を採用することとする。

注記*：用語の定義 No. 28 参照

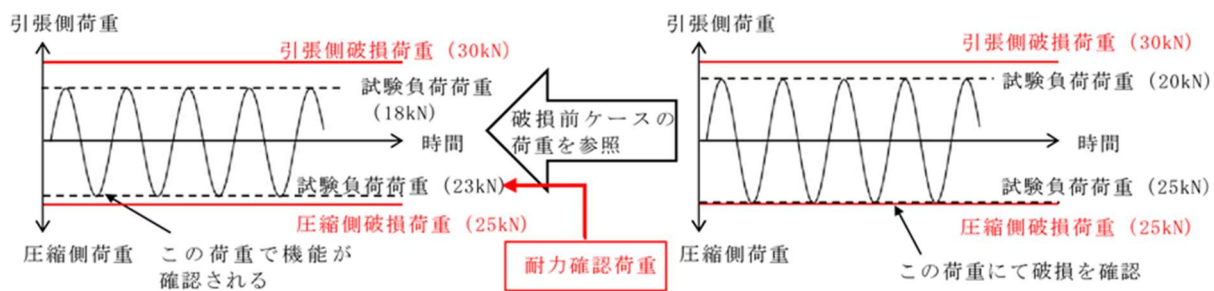


図1 振動試験の荷重波形(破損前の試験ケース, 機能確保)

図2 振動試験の荷重波形(破損ケース)

電共研におけるスナップの限界耐力評価法

表1 電共研における限界耐力値の設定に係る計算式(SMS*¹型メカニカルスナップ) (1/2)








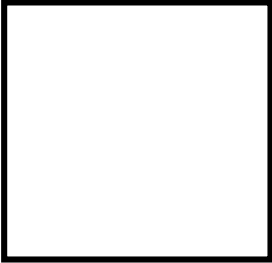


品番	評価部位	評価項目	電共研計算式		
			発生応力	許容応力	今回工認に係る評価との相違点* ²
②	ジャンクションコラム 				
③	ロードコラム 				
④	ピン 				
⑤	コネクティングチューブ 				
⑥-1	ケース 				
⑥-2	ベアリング押さえ 				
⑥-3	六角ボルト 				

表1 電共研における限界耐力値の設定に係る計算式(SMS*1型メカニカルスナッパ) (2/2)

品番	評価部位	評価項目	電共研計算式		
			発生応力	許容応力	今回工認に係る評価との相違点*2
⑦	イーヤ 				
⑧	ユニバーサルボックス 				
⑬	ベアリングナット 				
⑭	ボールねじ				
⑮	アンギュラー玉軸受	(試験結果をもとに耐力値を設定)			
⑯	球面軸受	(試験結果をもとに耐力値を設定)			
—	全長	座屈	(予想耐力の記載のみ)		— (発生応力, 許容値算出式の記載なし)

注記*1：代表として SMS-10 の評価式にて比較を行った。また、表中の計算式における断面積や断面係数の算出方法は、特記箇所以外は別紙3の各型式における各部位の評価式と同様である。

*2：許容値の扱い(降伏点と引張強さのいずれか小さい値を採用するか、いずれかの値を採用するか)及び端数処理以外の相違点を記載した。

表2 電共研における限界耐力値の設定に係る計算式(SHP*1型オイルスナッパ)(1/2)











品番	評価部位	評価項目	電共研計算式		
			発生応力	許容応力	今回工認に係る評価との相違点*2
②	ピストンロッド 				
③	コネクティングパイプ 				
④	ピン 				
⑤	シリンダチューブ 				
⑥	六角ボルト 				
⑧	スヘリカルアイボルト 				
⑩	ターンバックル 				
⑬	タイロッド 				

表 2 電共研における限界耐力値の設定に係る計算式(SHP*¹型オイルスナッパ) (2/2)

品番	評価部位	評価項目	電共研計算式		
			発生応力	許容応力	今回工認に係る評価との相違点* ²
⑭	アダプタ 				
⑮	ロッドカバー 				
⑰	球面軸受		(試験結果をもとに耐力値を設定)		
—	シール性		(試験結果をもとに耐力値を設定)		
—	全長	座屈	(予想耐力の記載のみ)	— (発生応力, 許容値算出式の記載なし)	

注記*1: 代表として SHP-3 の評価式にて比較を行った。また, 表中の計算式における断面積や断面係数の算出方法は, 特記箇所以外は別紙 3 の各型式における各部位の評価式と同様である。

*2: 許容値の扱い(降伏点と引張強さのいずれか小さい値を採用するか, いずれかの値を採用するか)及び端数処理以外の相違点を記載した。

表3 電共研における限界耐力値の設定に係る計算式(SN*1型オイルスナッパ)(1/2)






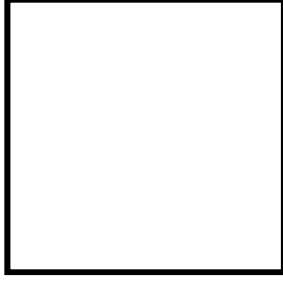






品番	評価部位	評価項目	電共研計算式		
			発生応力	許容応力	今回工認に係る評価との相違点*2
②	ピストンロッド 				
③	コネクティングパイプ 				
④	ピン 				
⑤	シリンダチューブ 				
⑥	六角ボルト 				
⑦	イーヤ 				
⑧	ロッドエンド 				

表 3 電共研における限界耐力値の設定に係る計算式(SN*1型オイルスナッパ) (2/2)

品番	評価部位	評価項目	電共研計算式		
			発生応力	許容応力	今回工認に係る評価との相違点*2
⑨	シリンダカバー 				
⑩	タイロッド 				
⑪	アダプタ 				
⑫	ロッドカバー 				
⑬	ホルダ 				
⑮	球面軸受		(試験結果をもとに耐力値を設定)		
—	シール性		(試験結果をもとに耐力値を設定)		
—	全長	座屈	(予想耐力の記載のみ)		— (発生応力, 許容値算出式の記載なし)

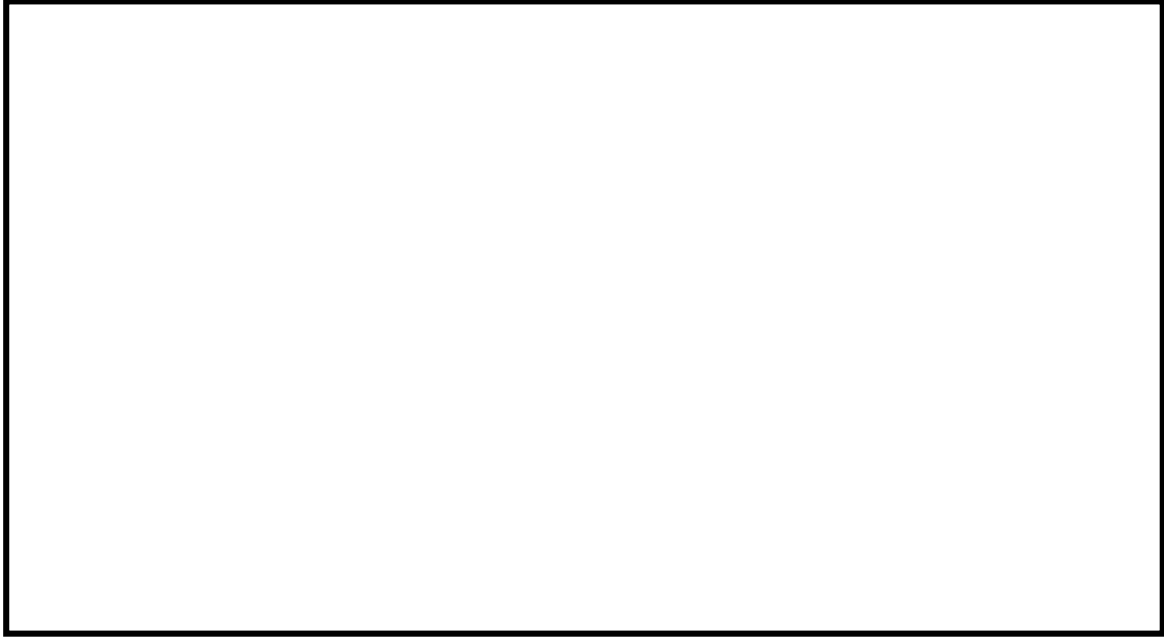
注記*1：代表として SN-3 の評価式にて比較を行った。また、表中の計算式における断面積や断面係数の算出方法は、特記箇所以外は別紙 3 の各型式における各部位の評価式と同様である。

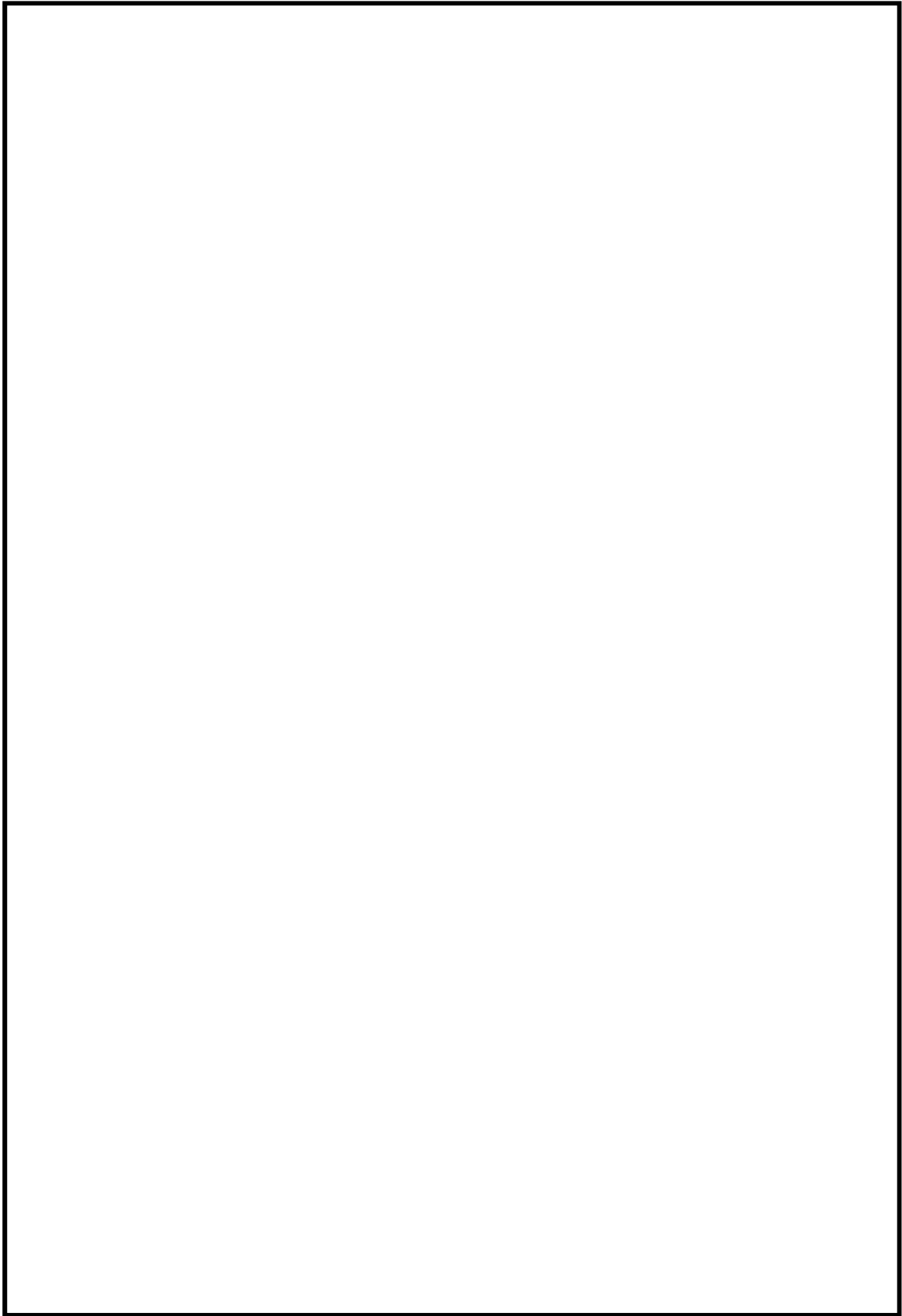
*2：許容値の扱い(降伏点と引張強さのいずれか小さい値を採用するか、いずれかの値を採用するか)及び端数処理以外の相違点を記載した。

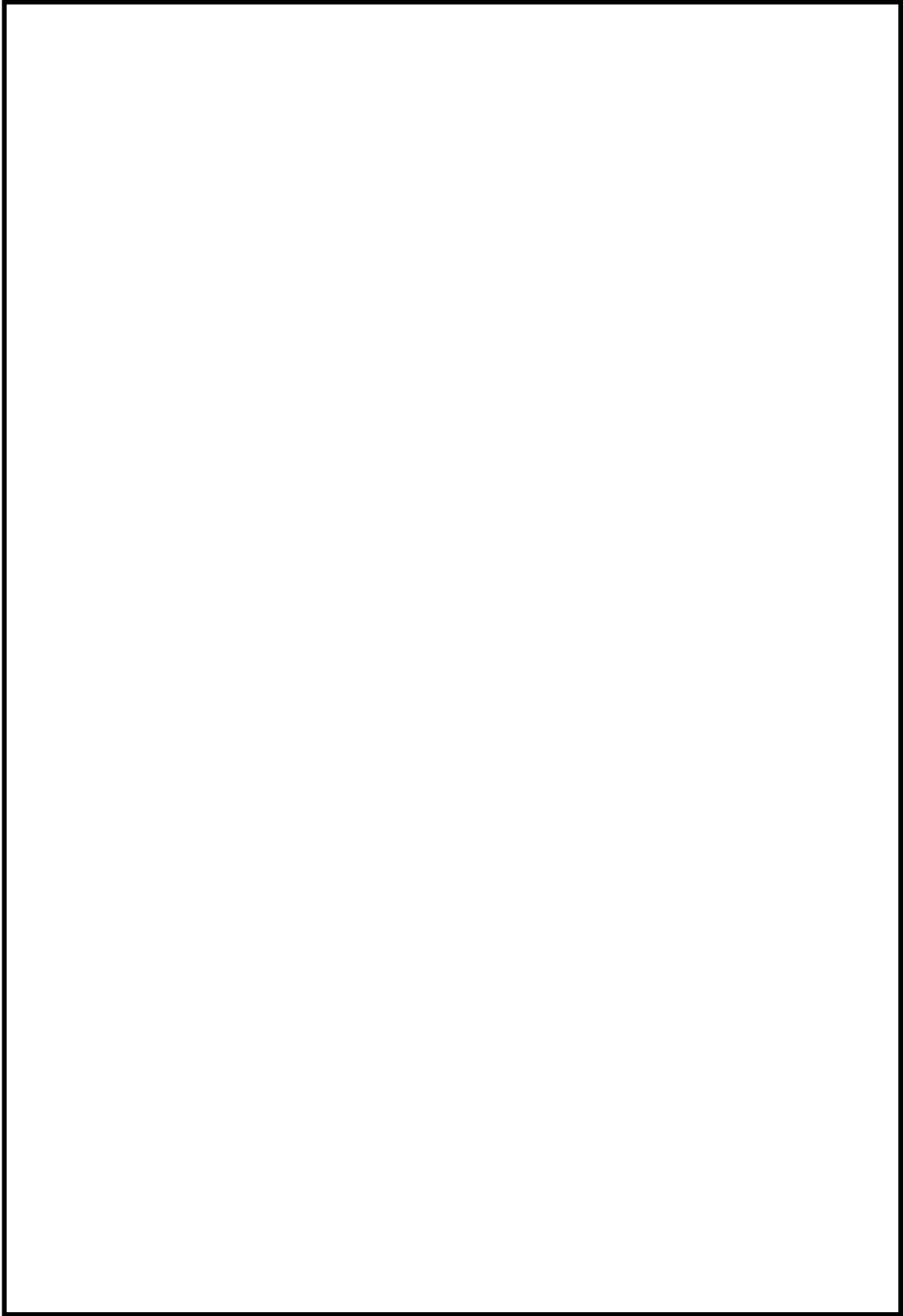
スナッパの J N E S 研究の概要

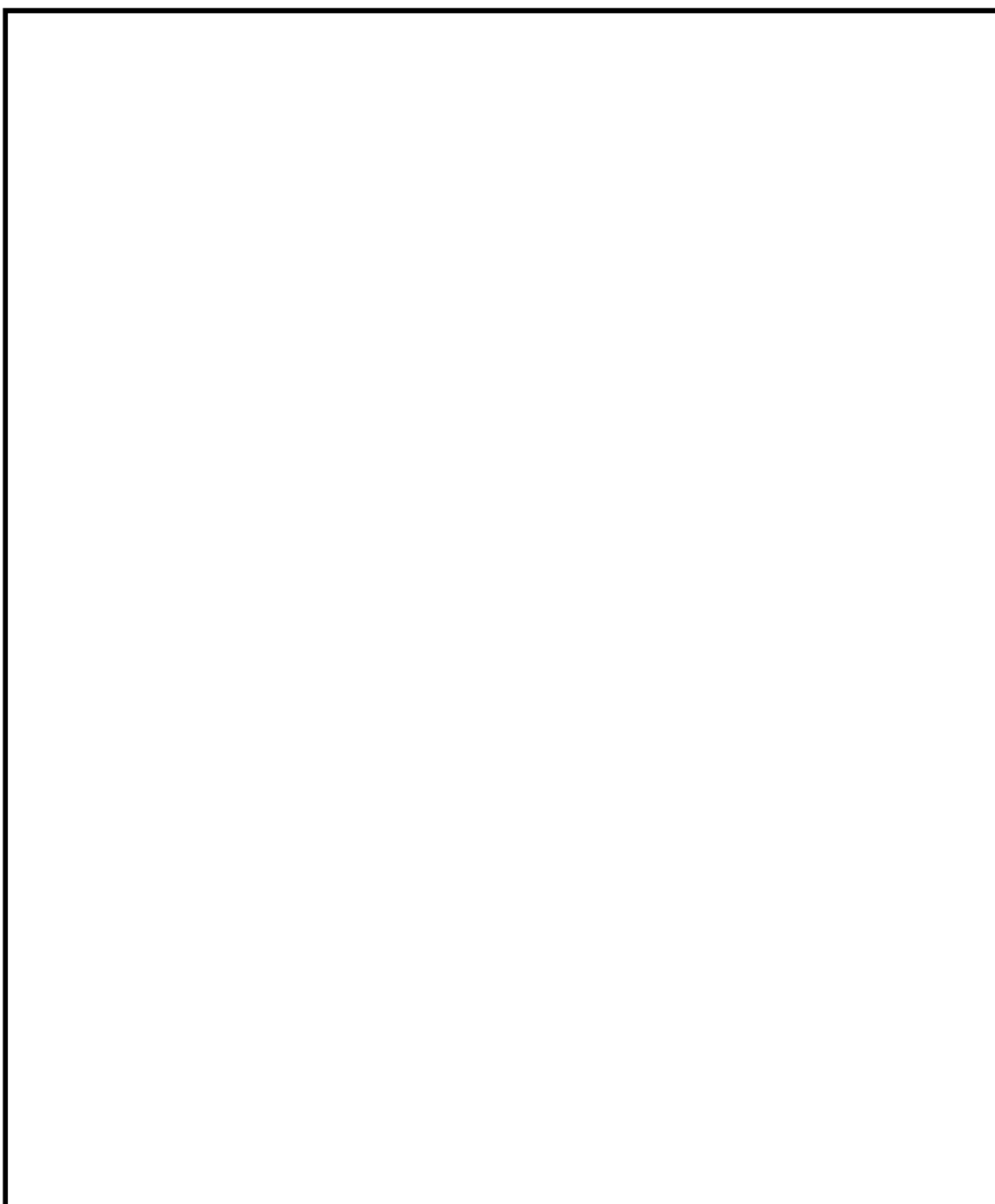
1. はじめに

本資料では、今回工認で参照した「J N E S 平成 21～22 年度耐震機能限界試験（スナバ）に係る報告書」（以下「J N E S 研究」という。）の概要について説明する。



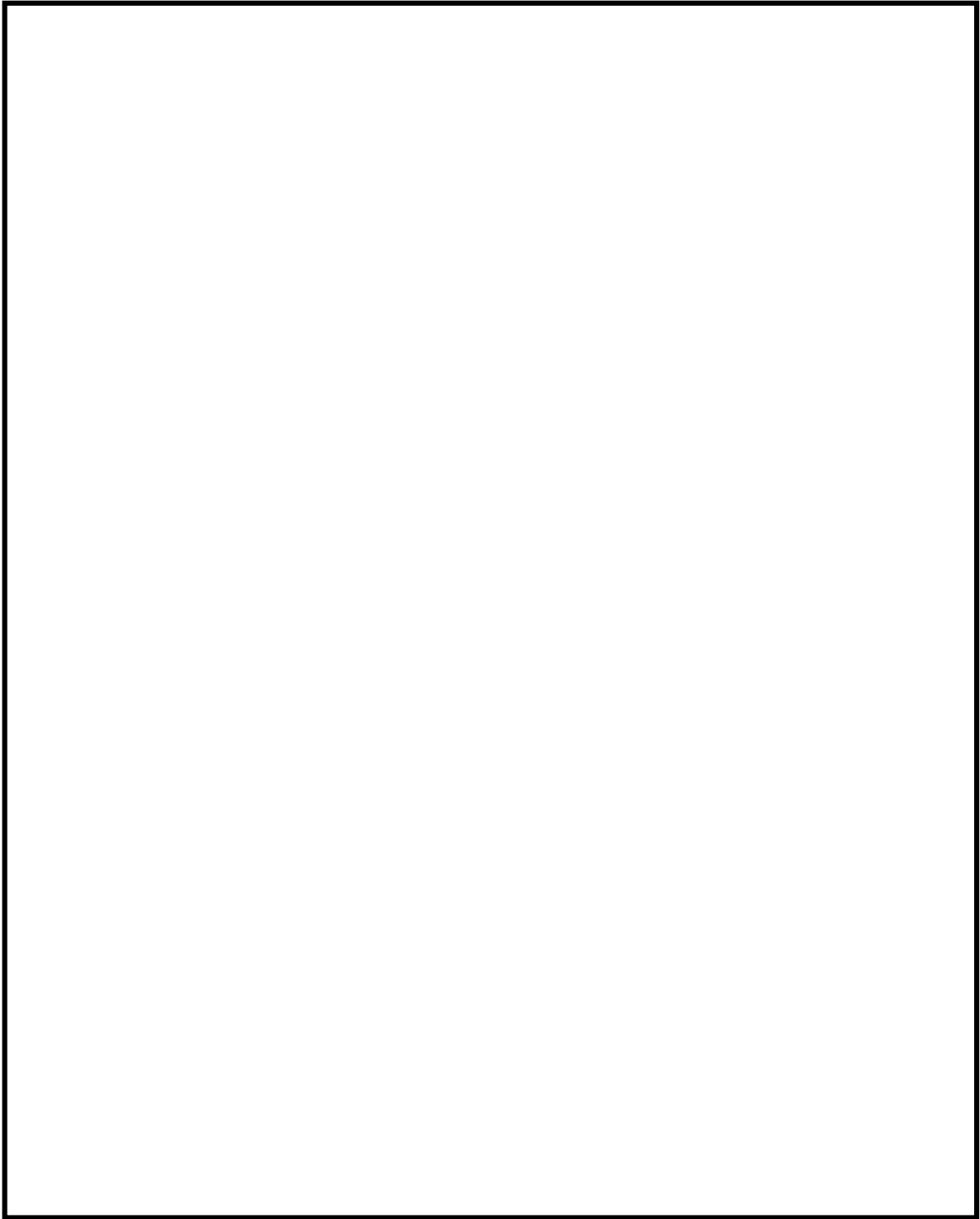


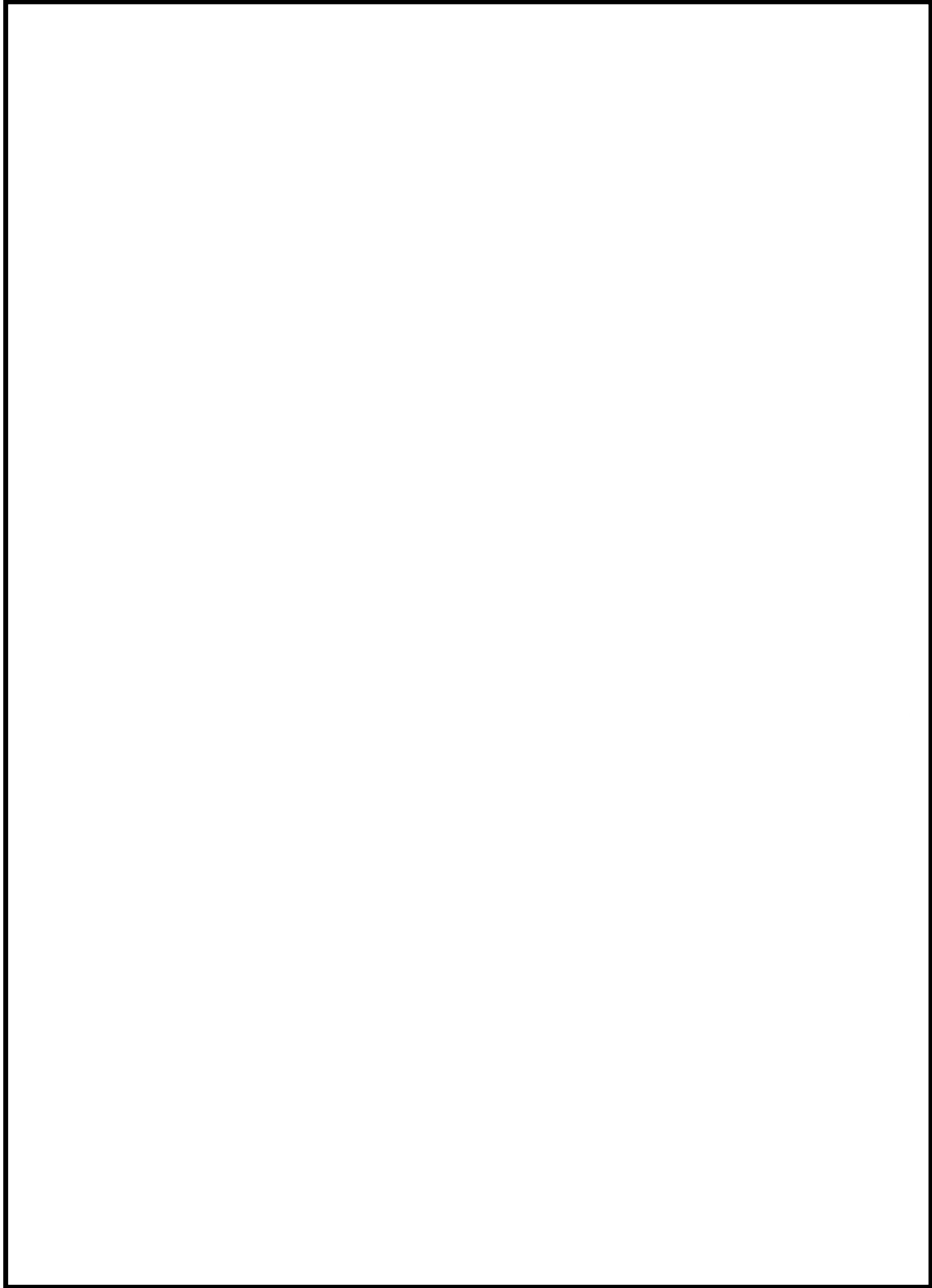


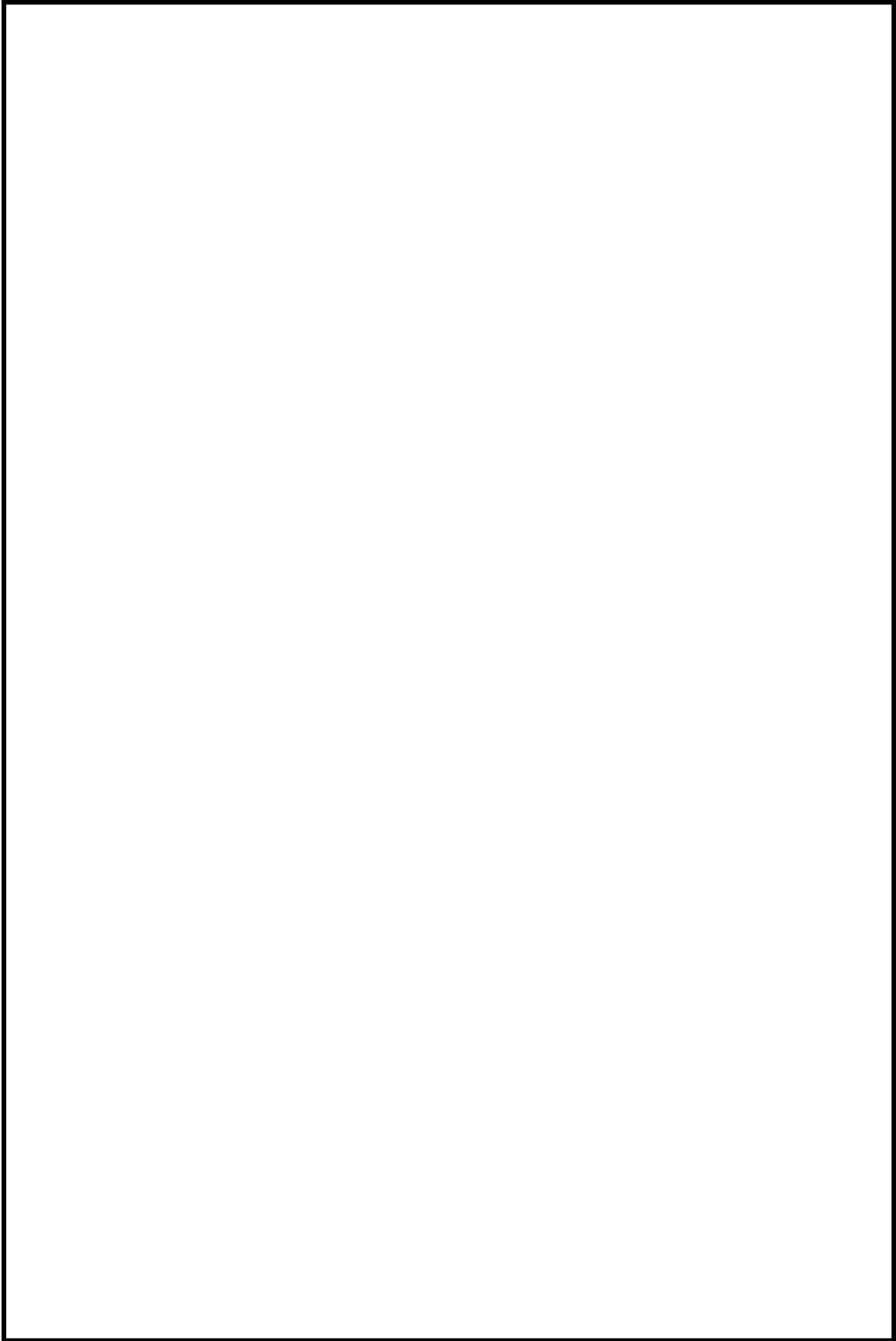


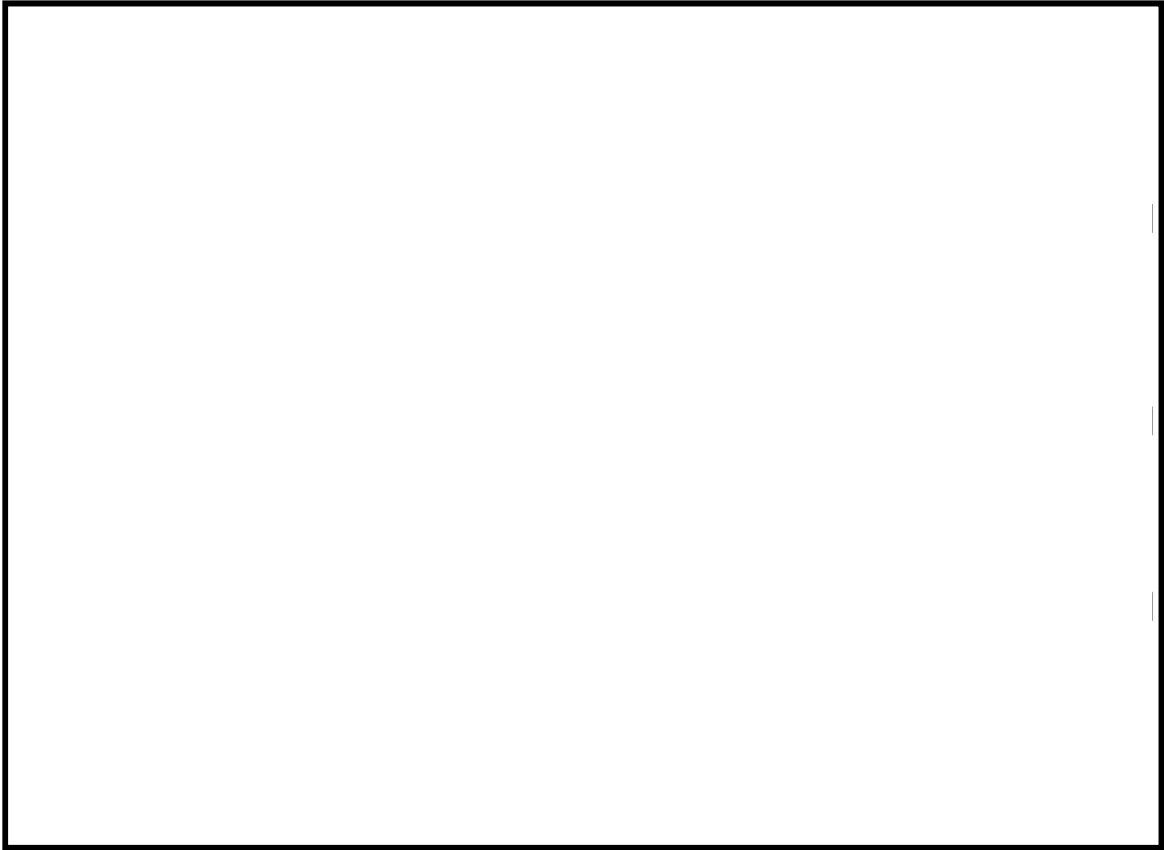


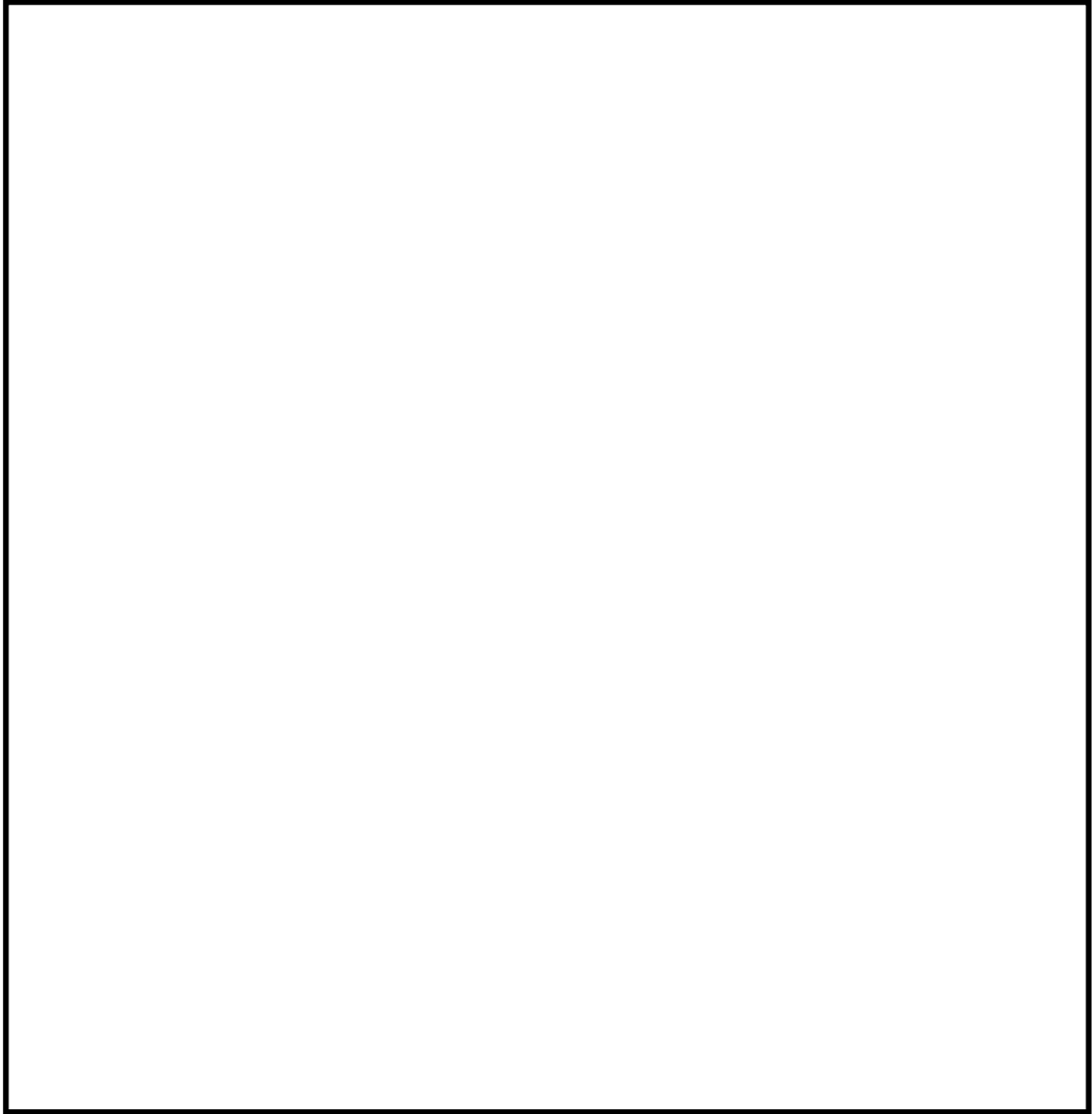


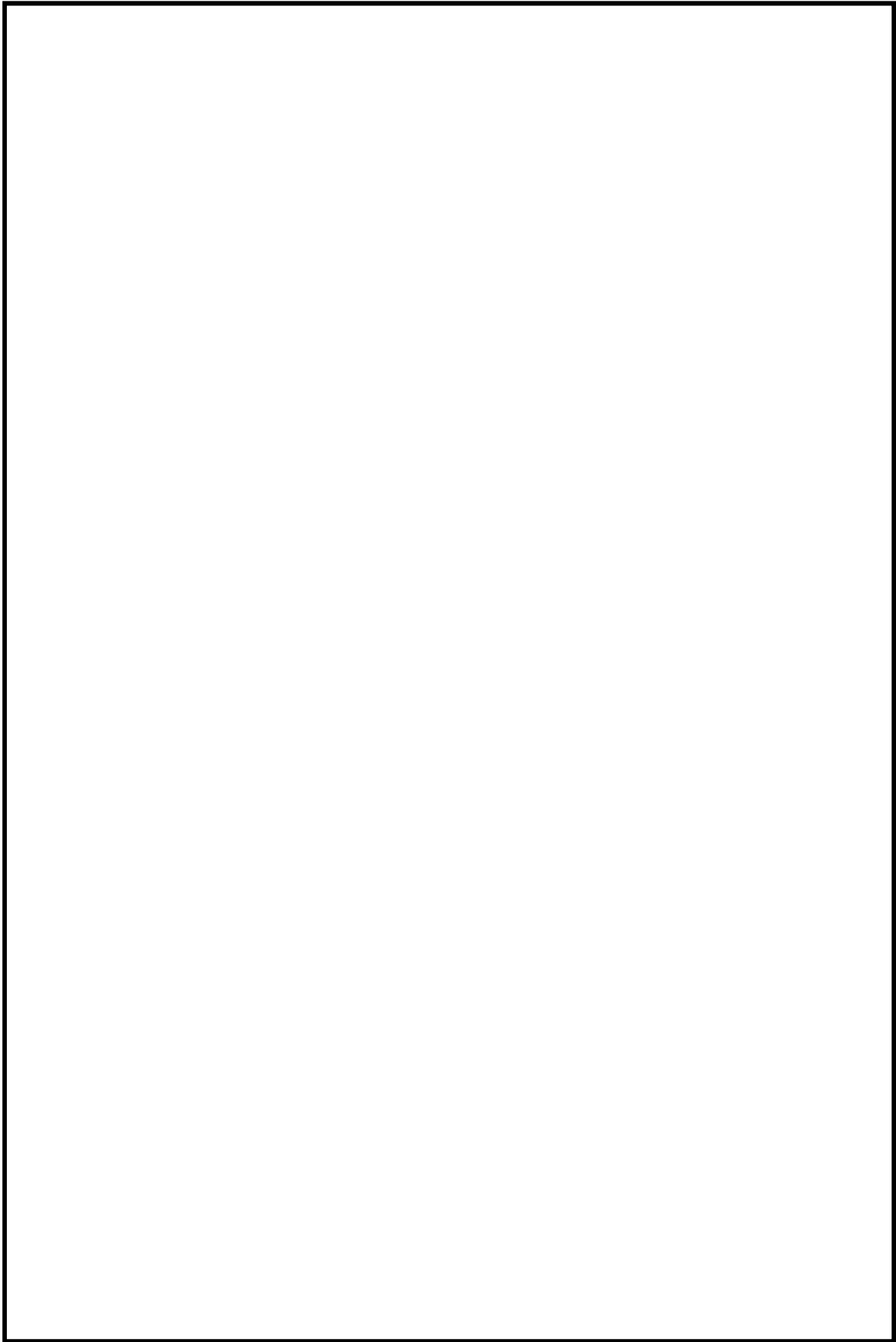


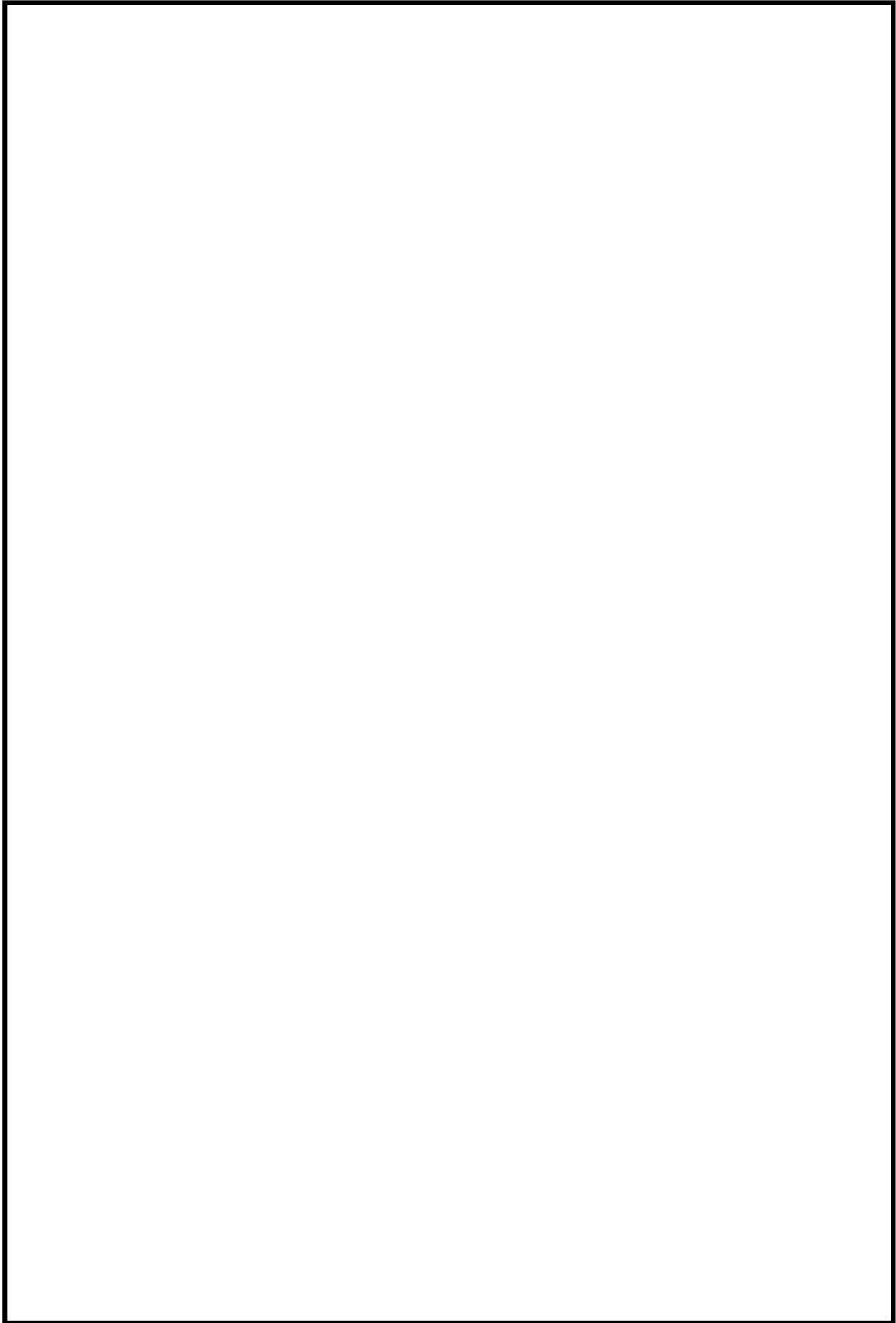


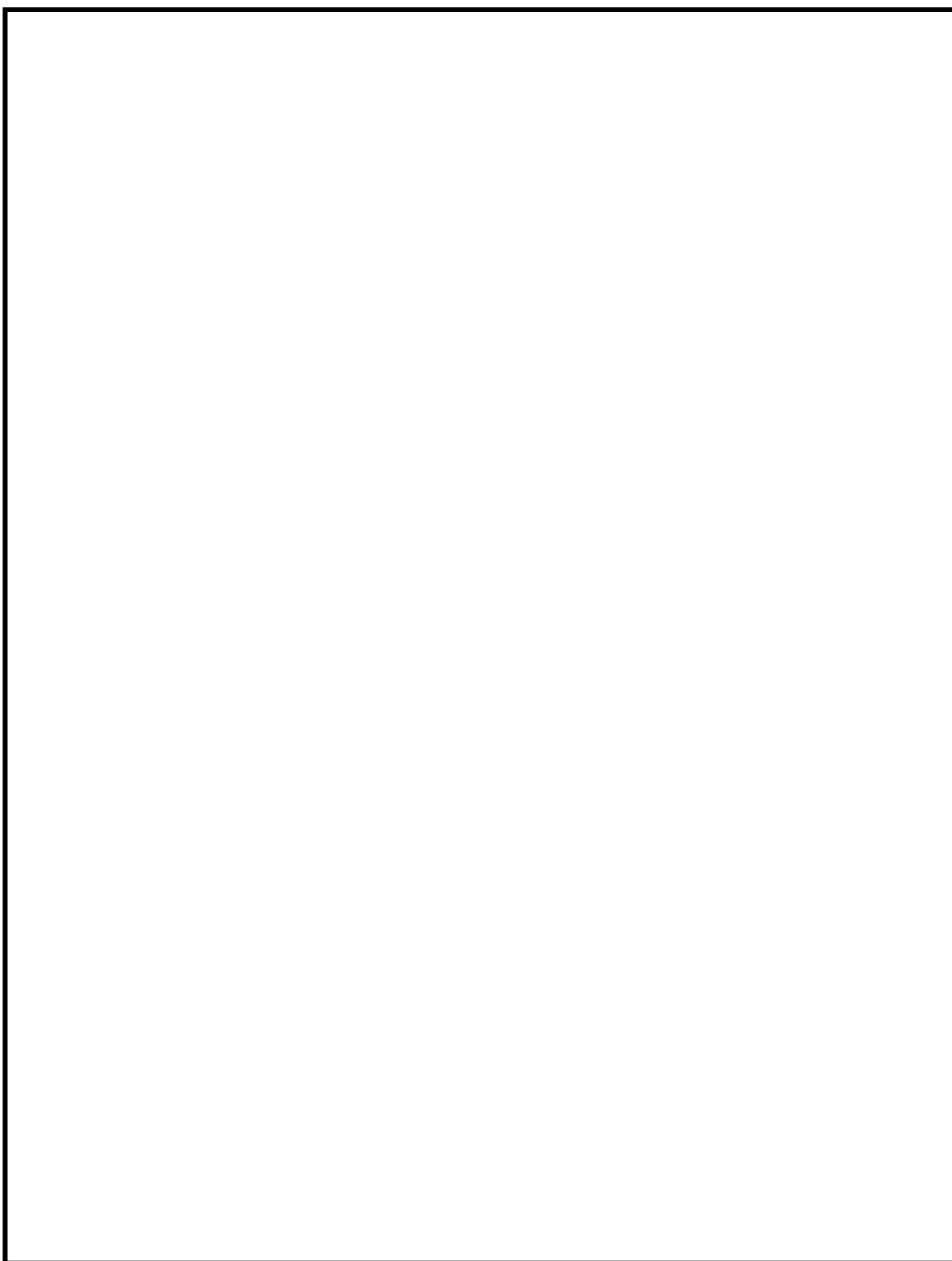


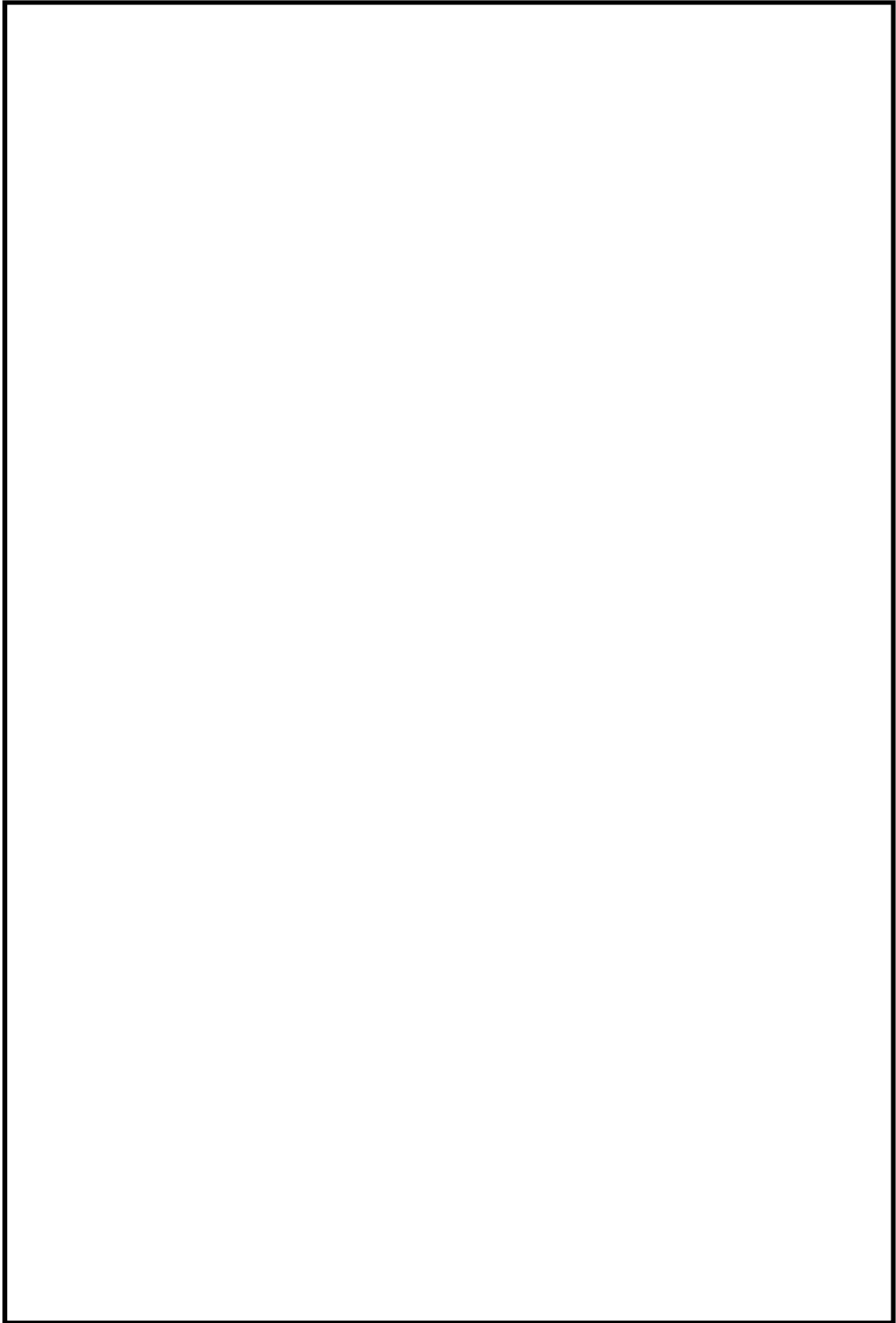


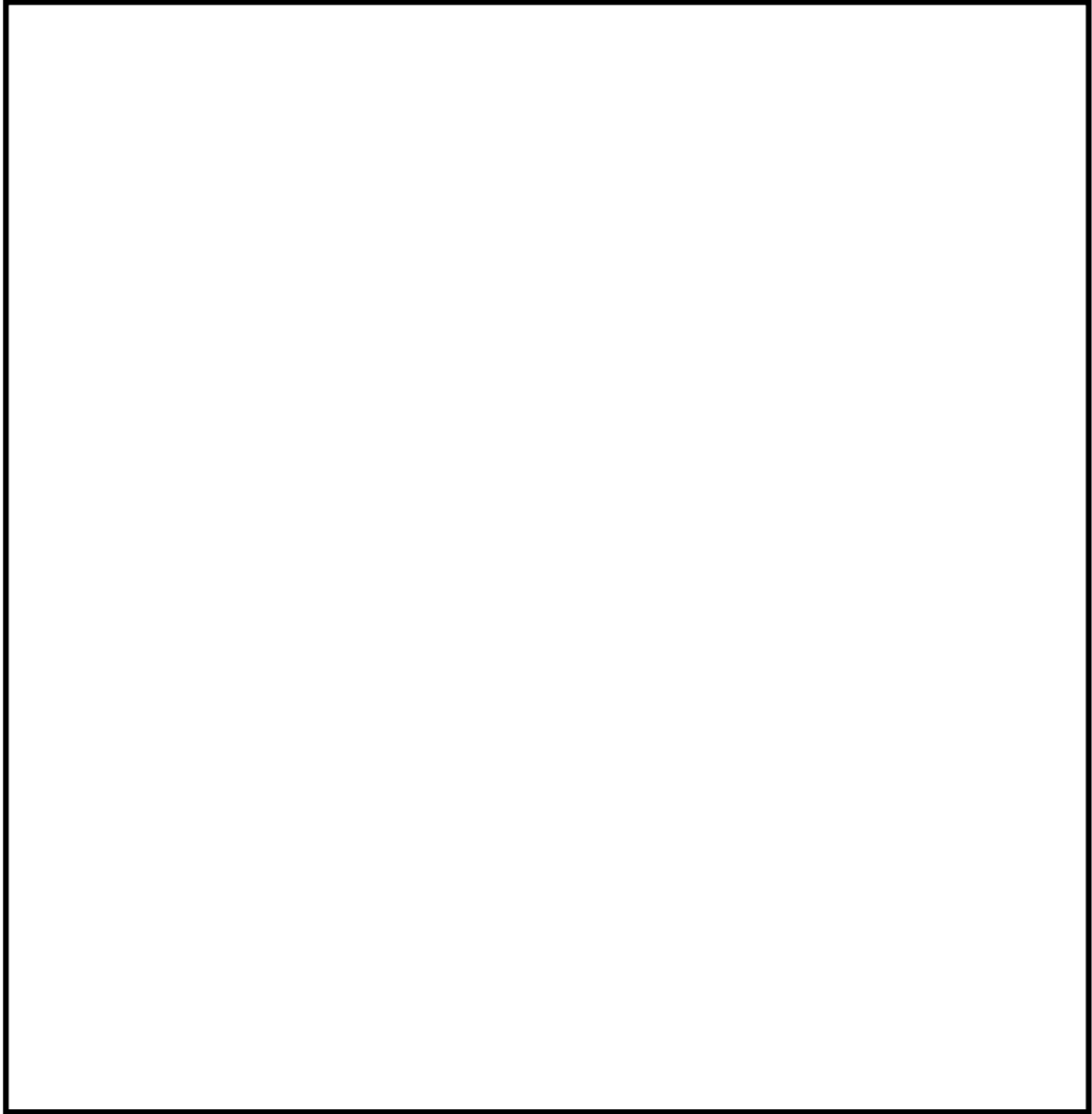


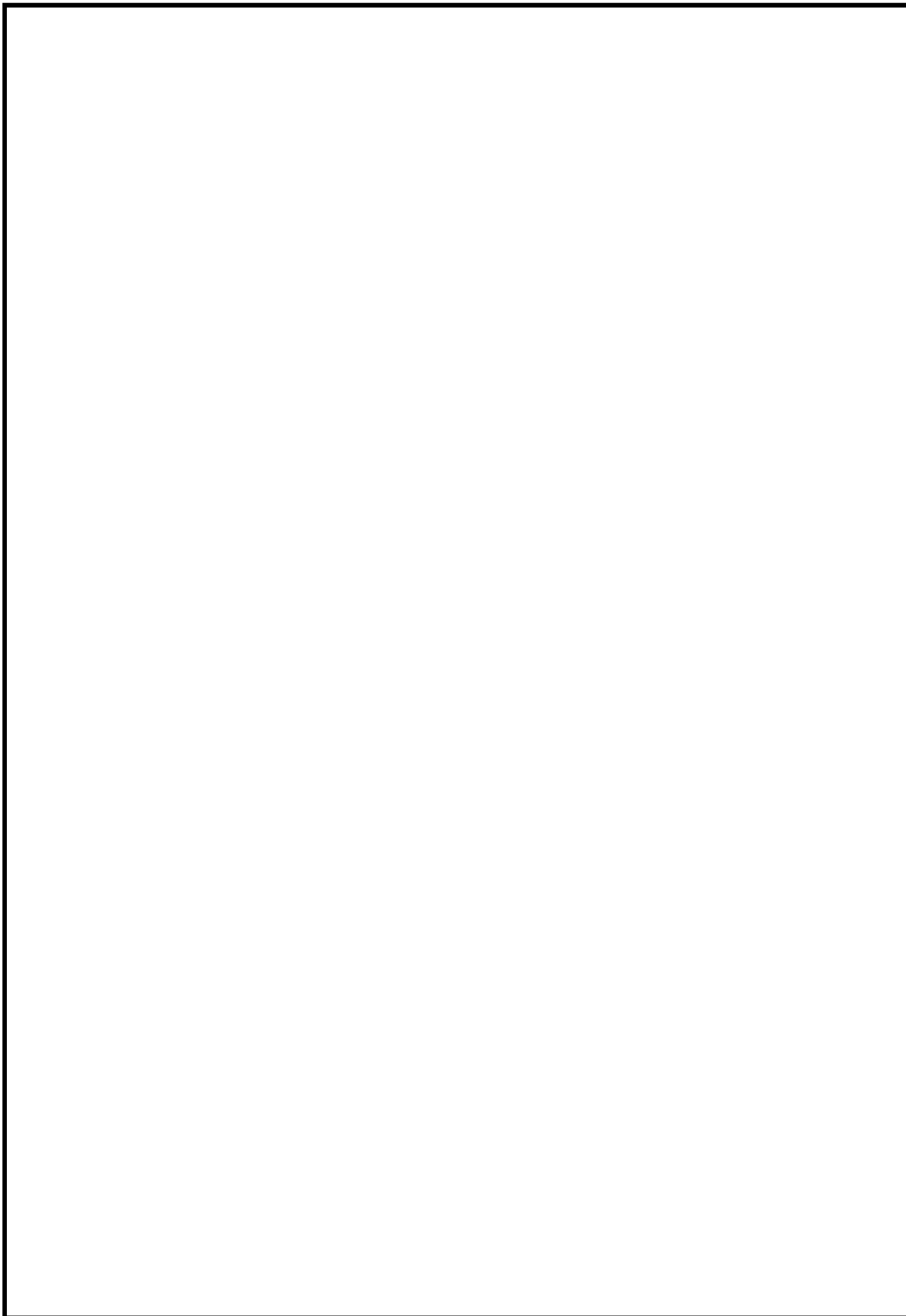


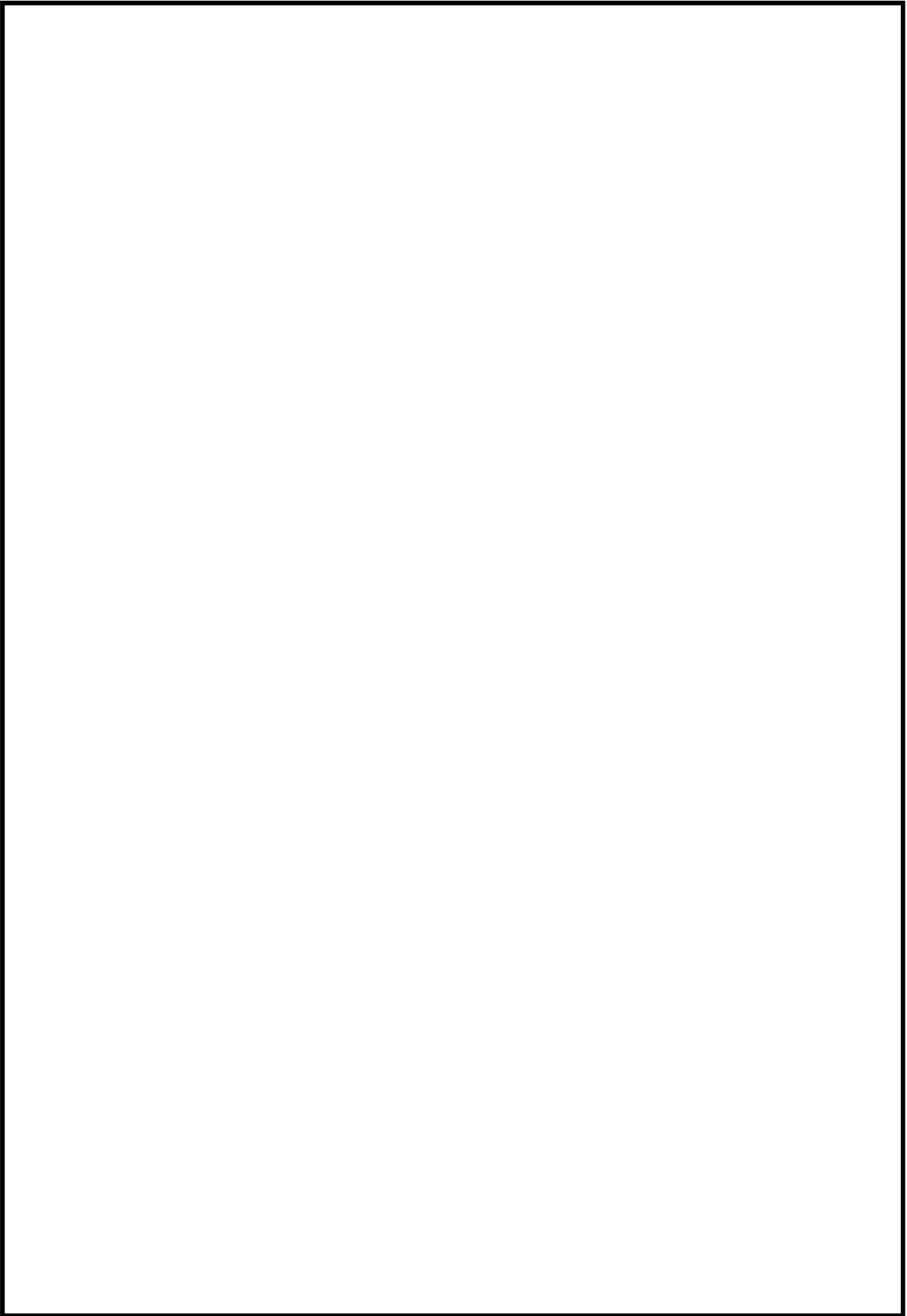


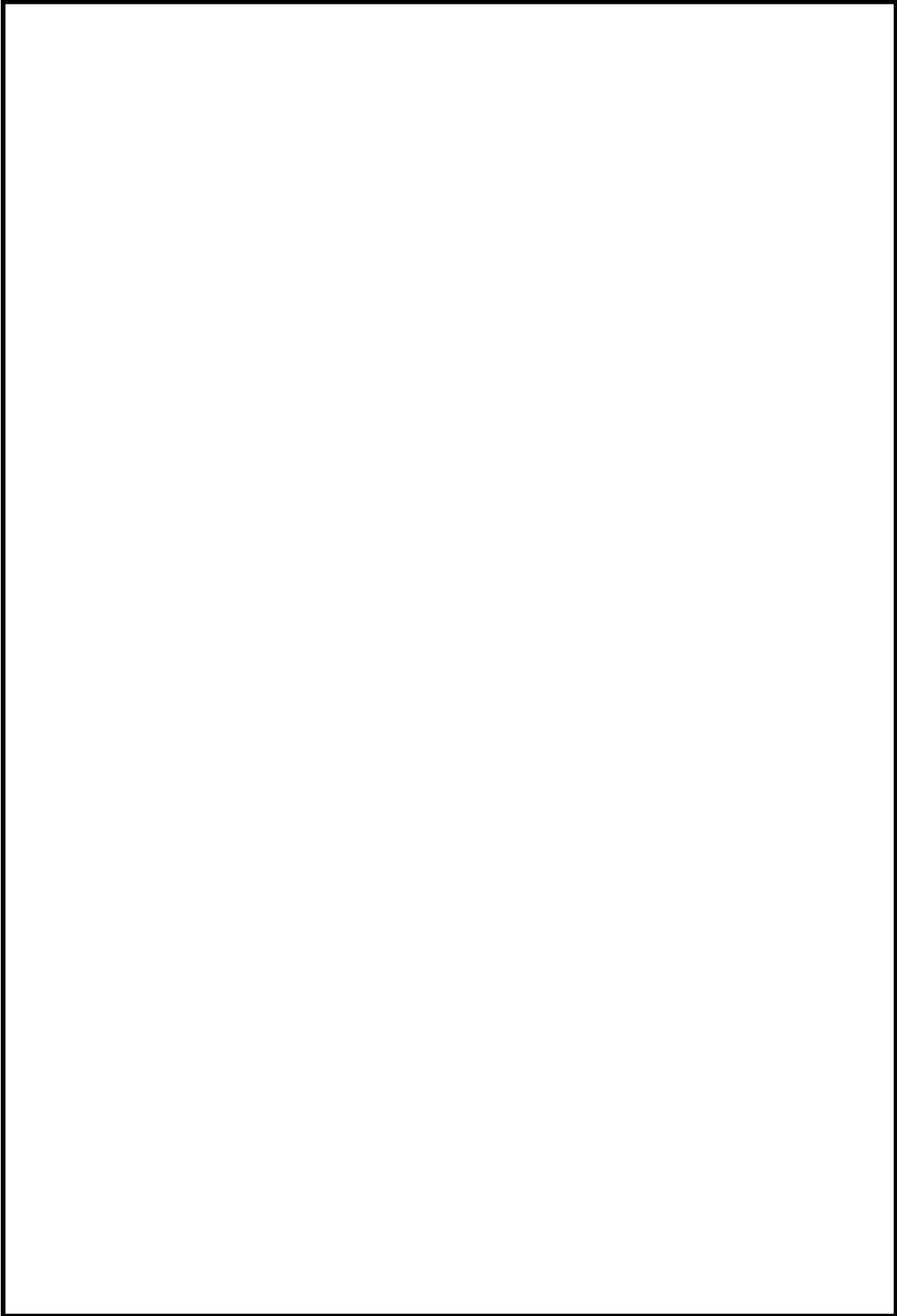


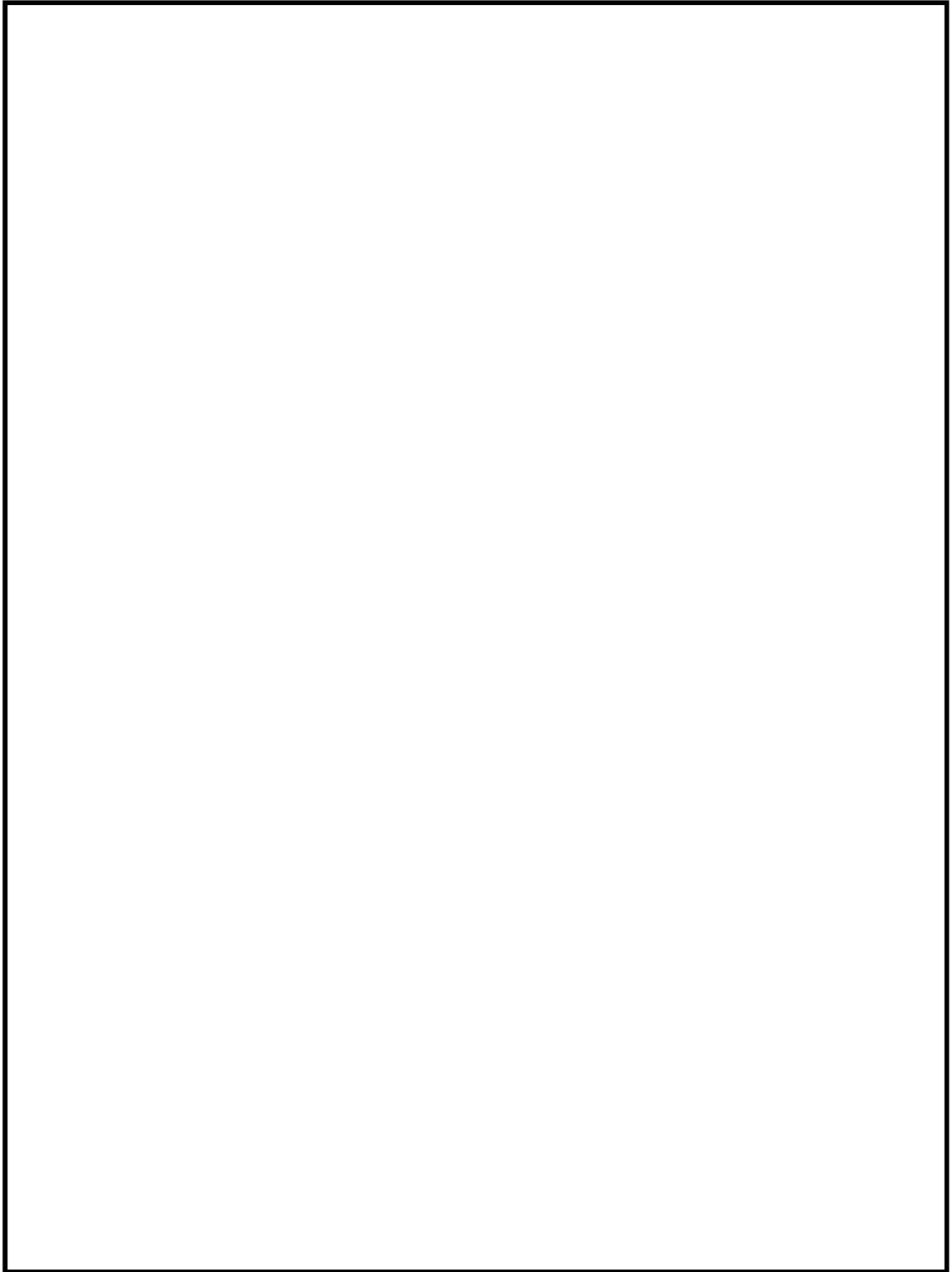


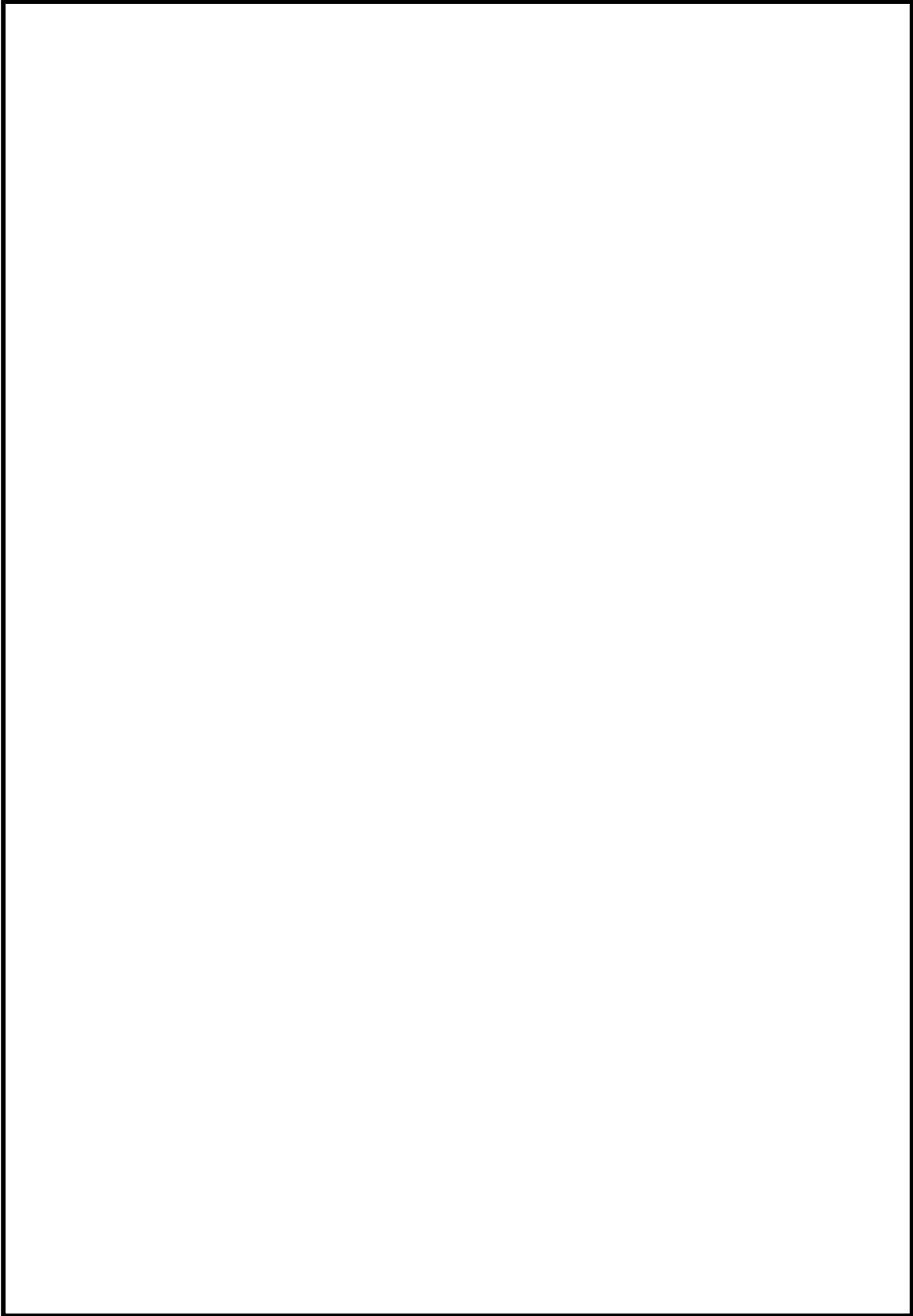


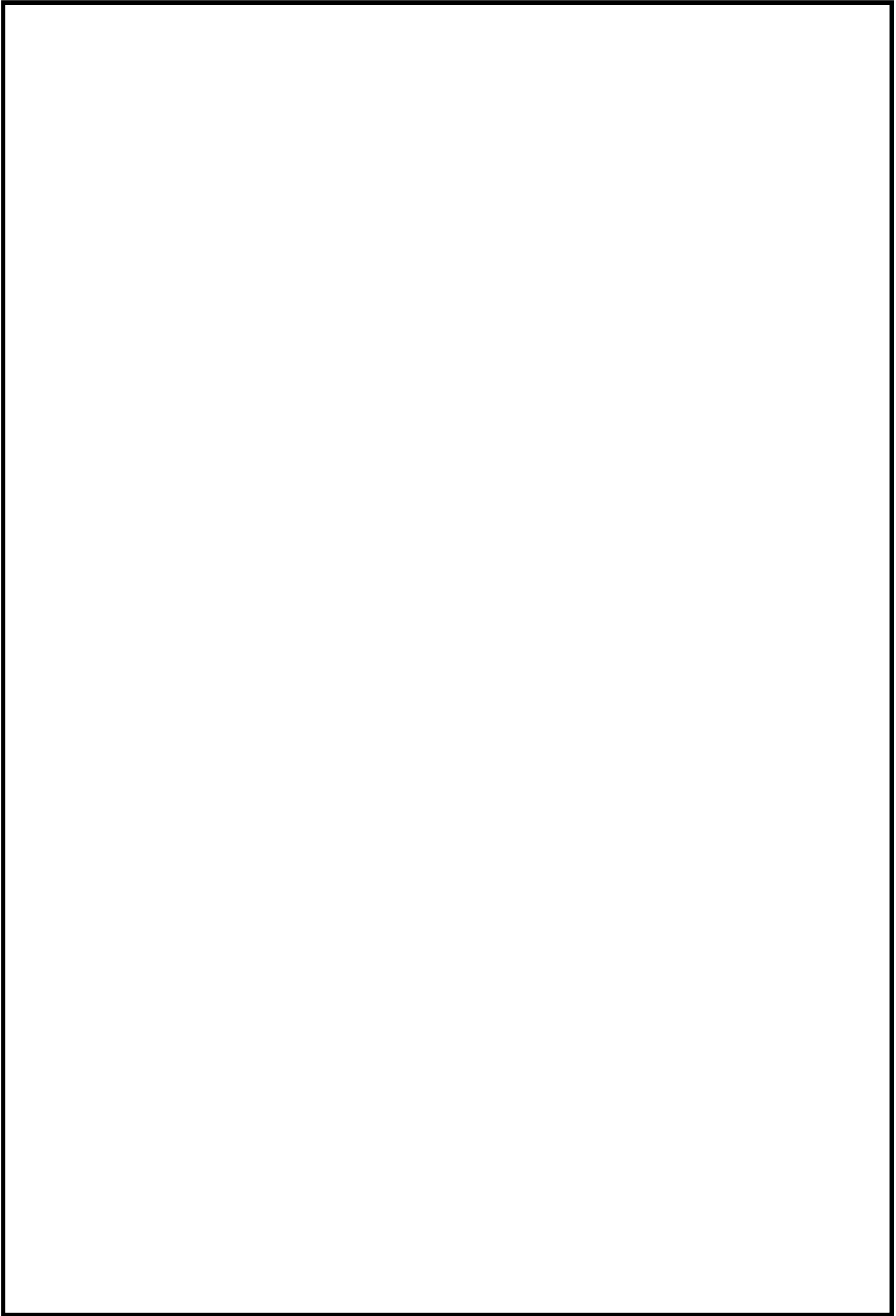


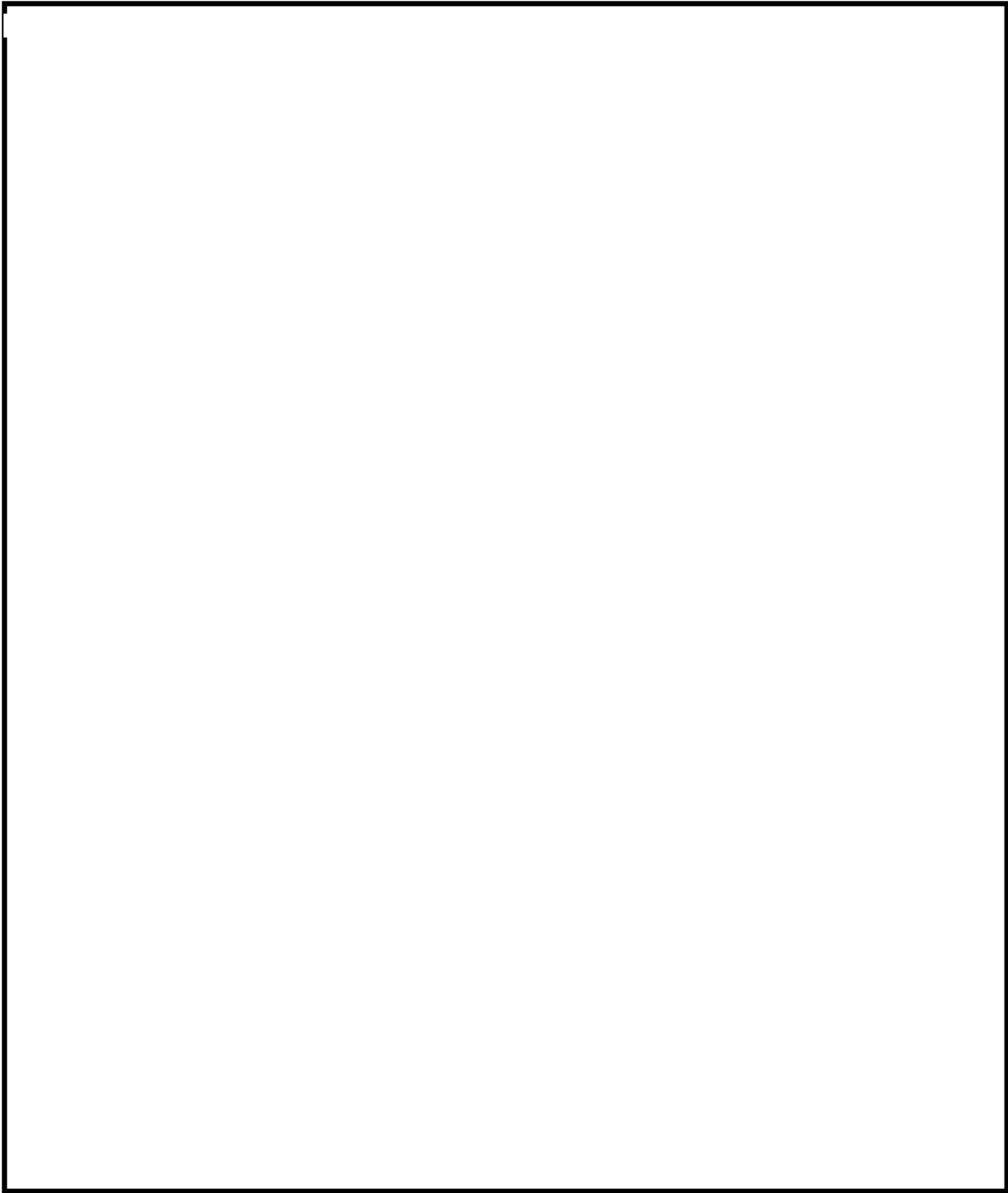


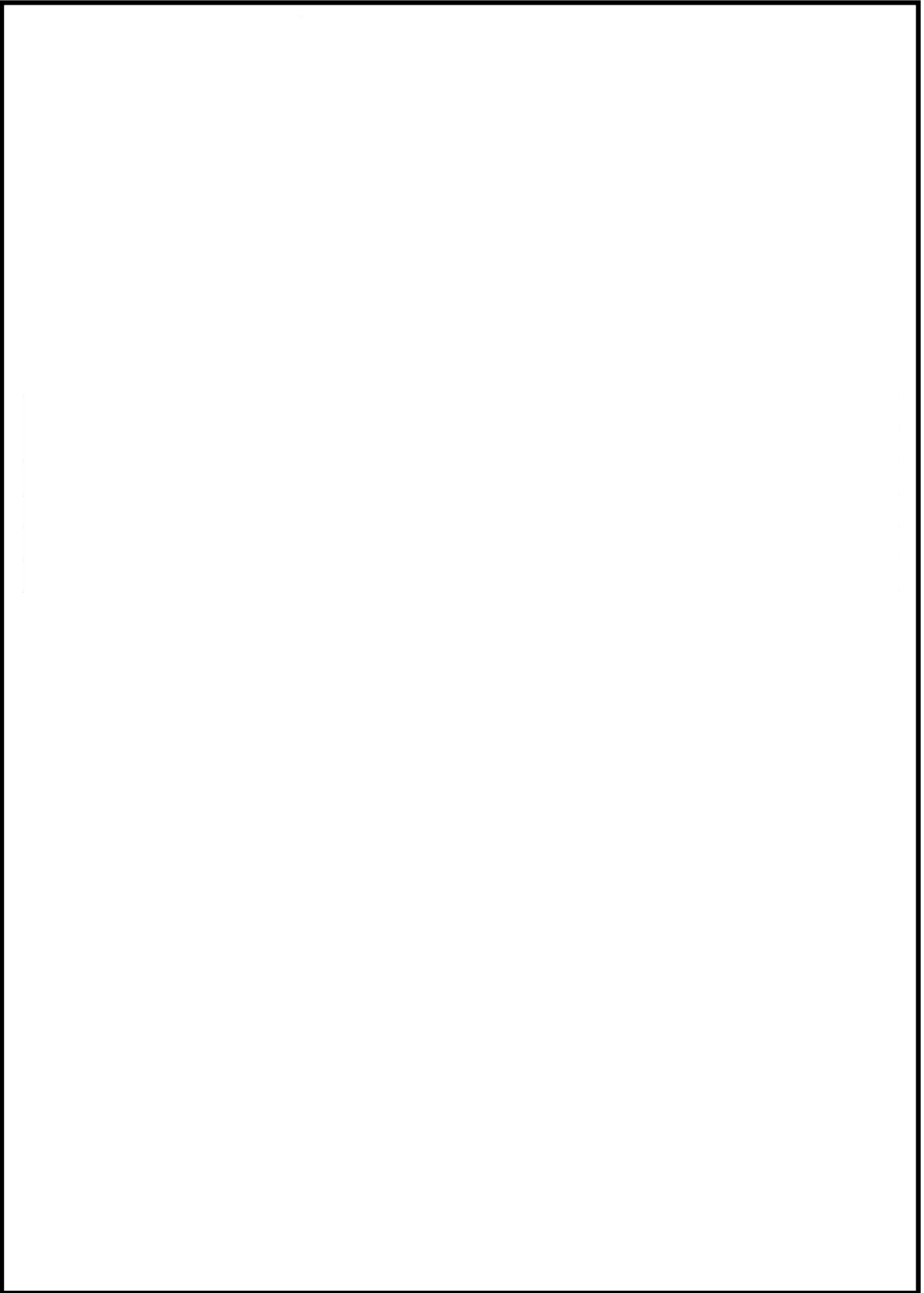


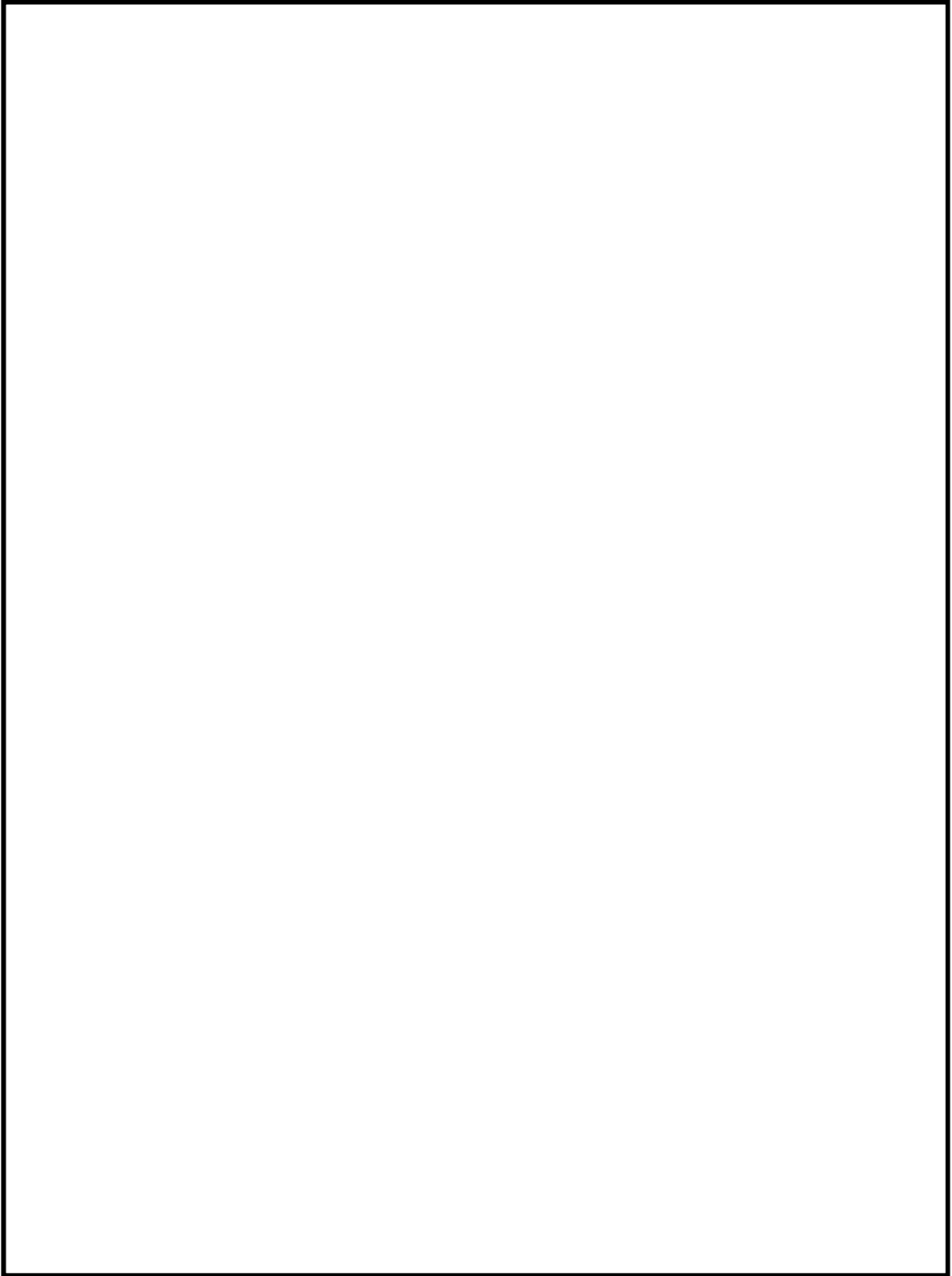




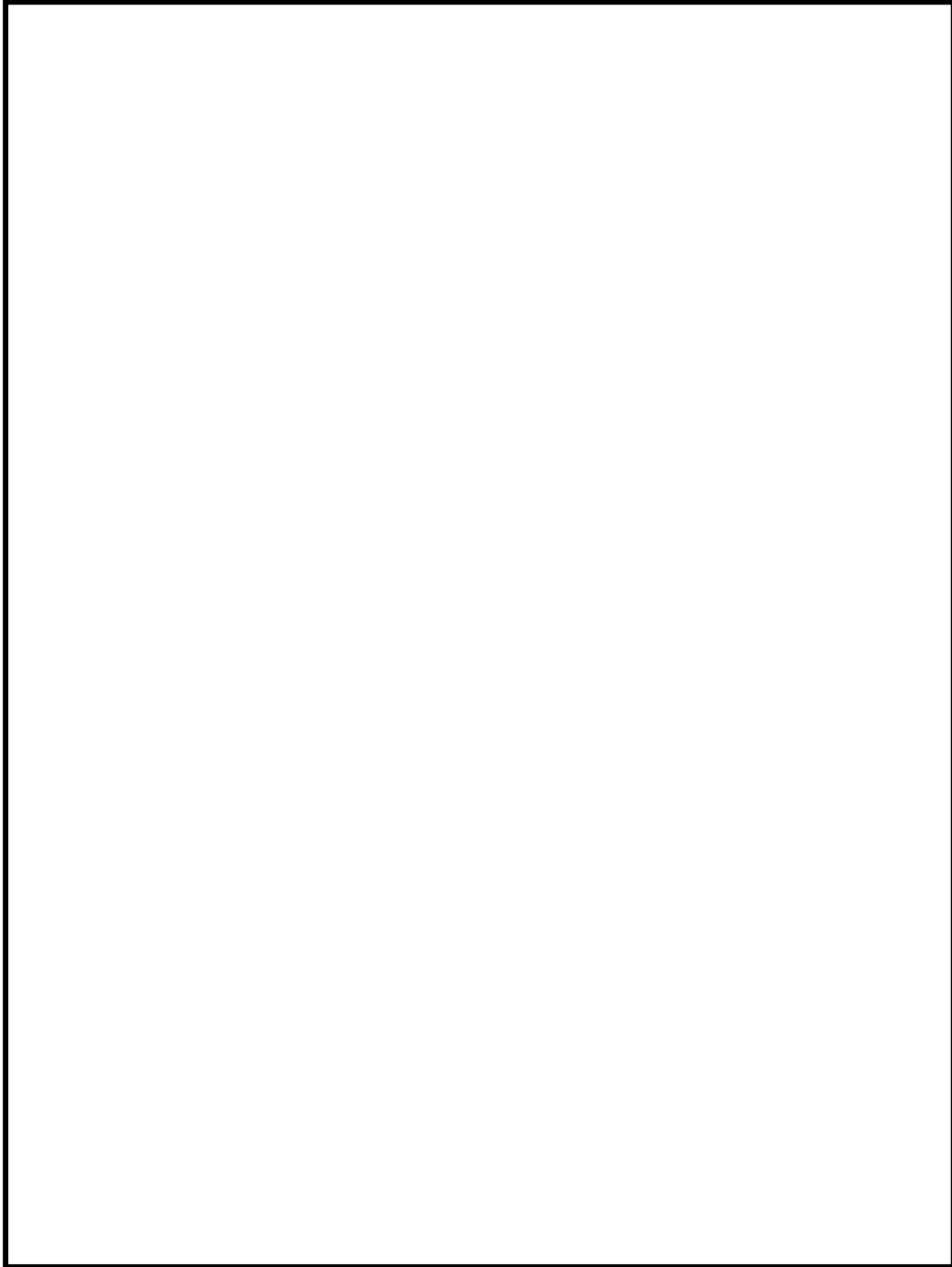


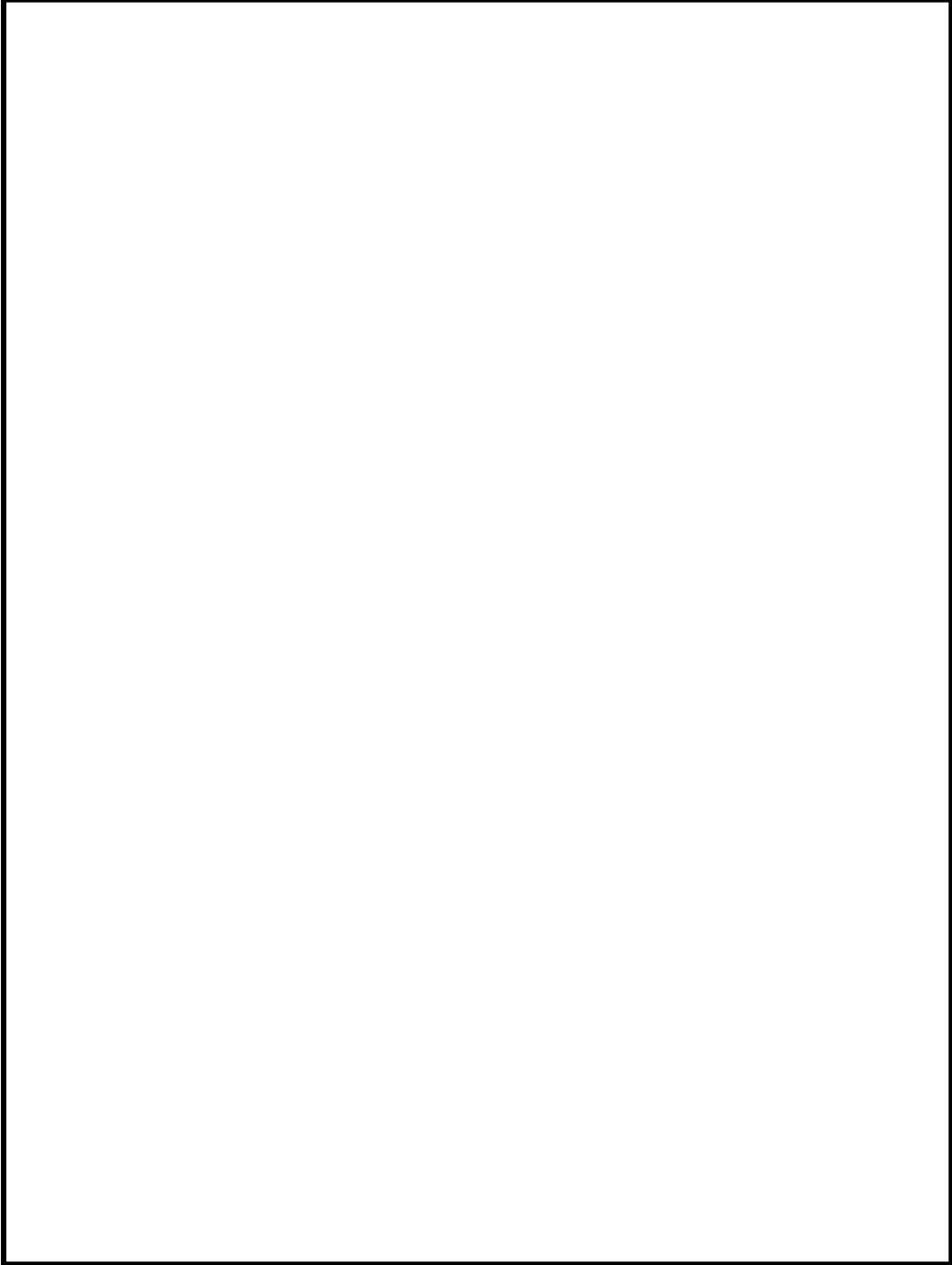


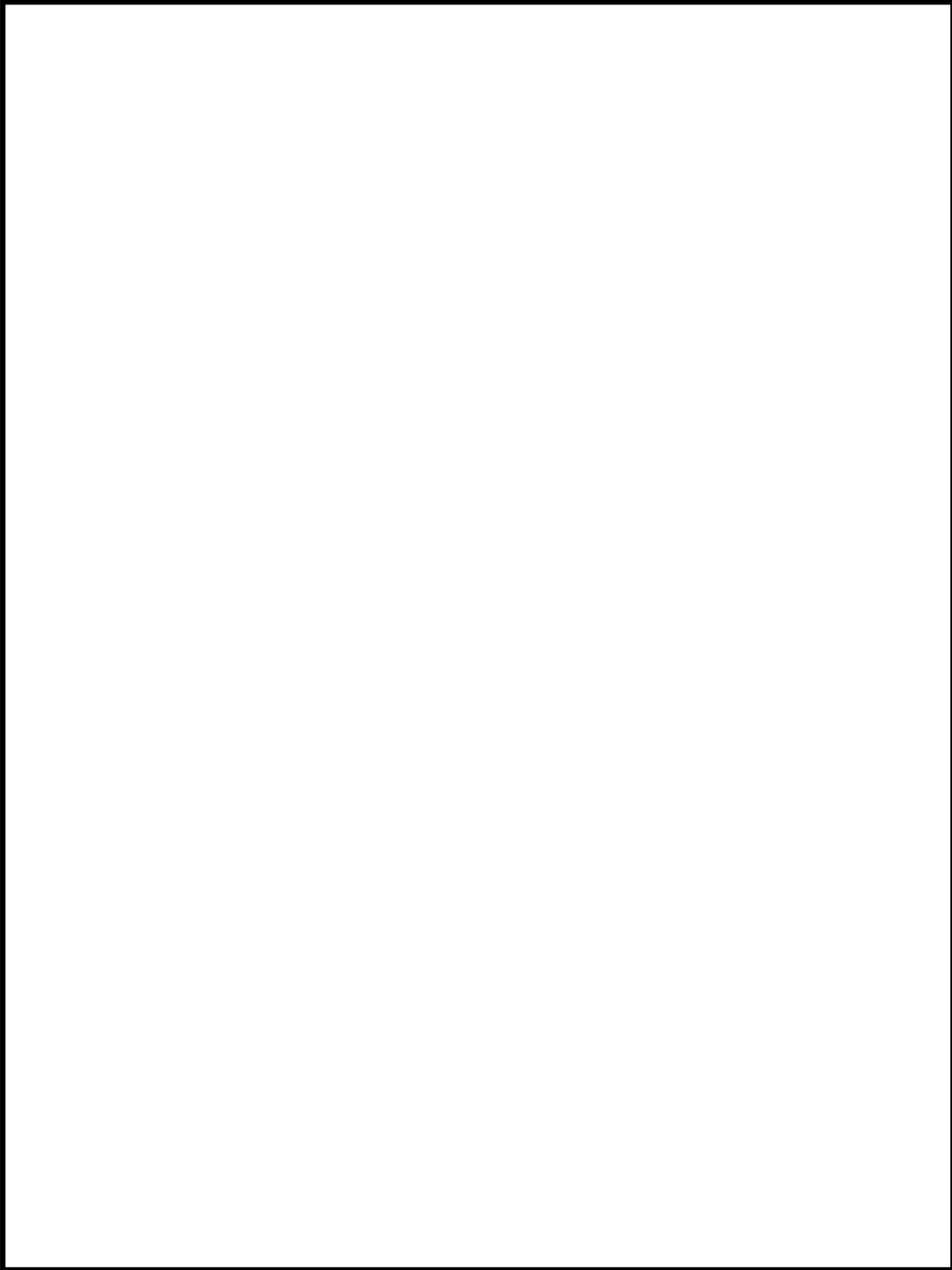


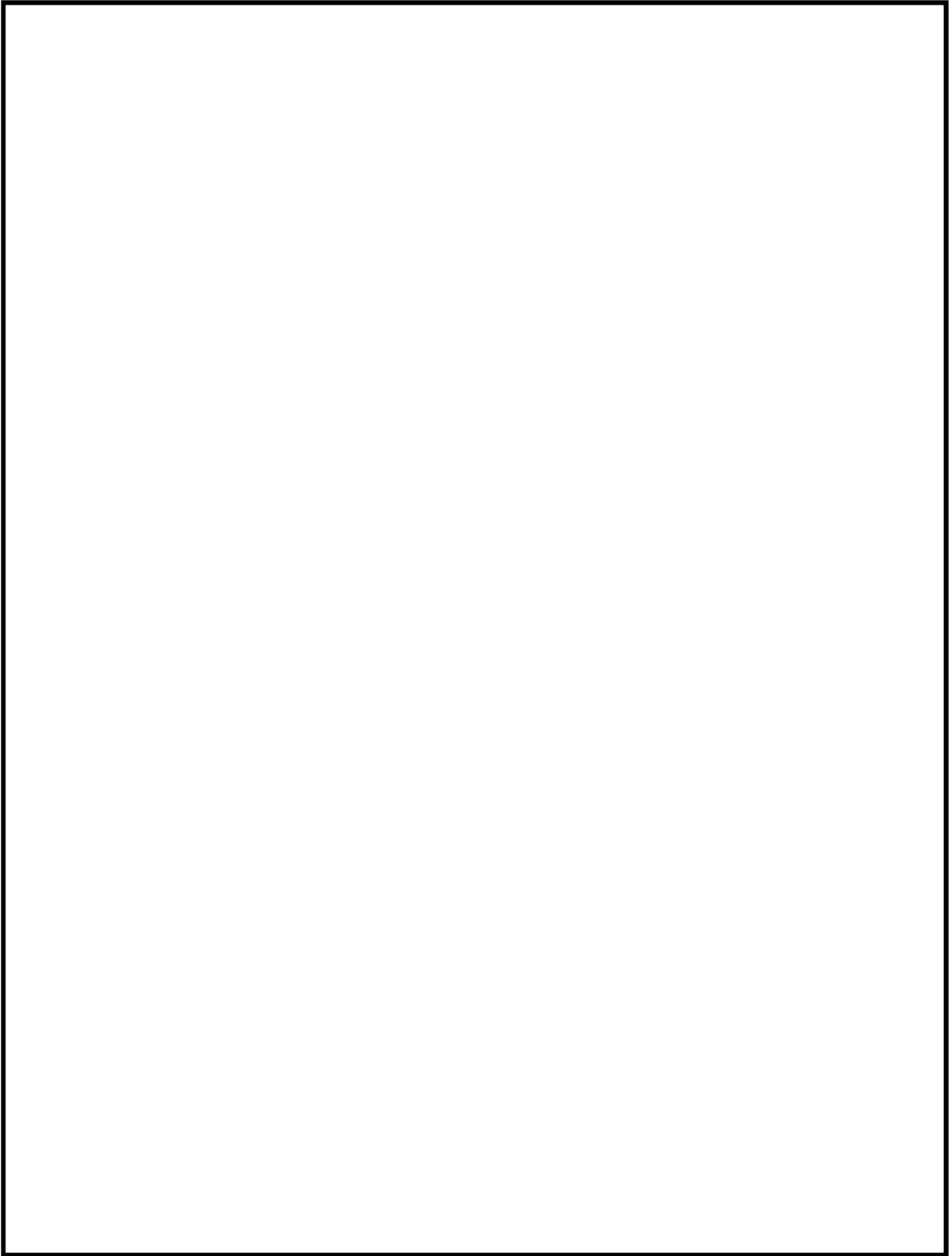


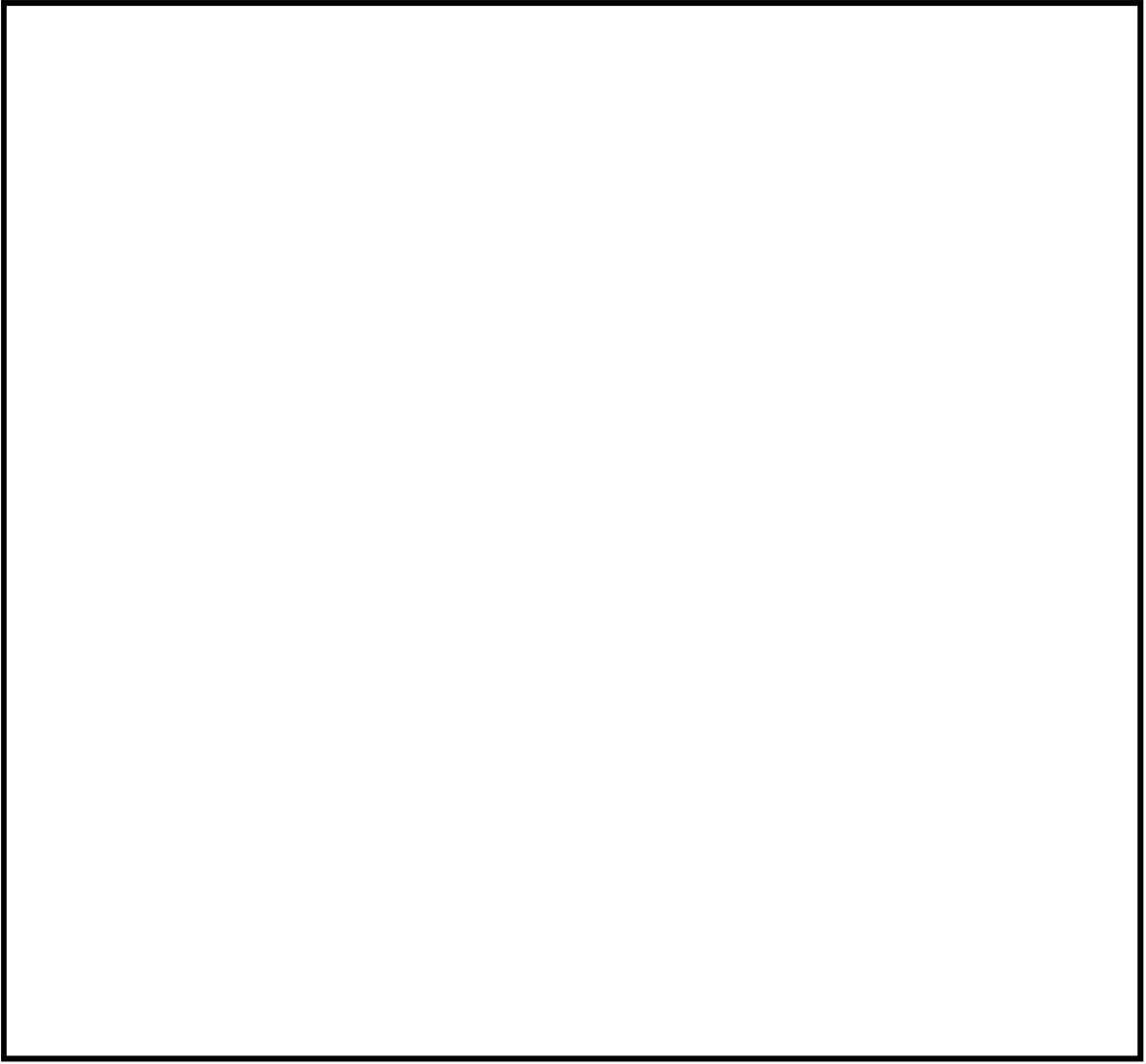


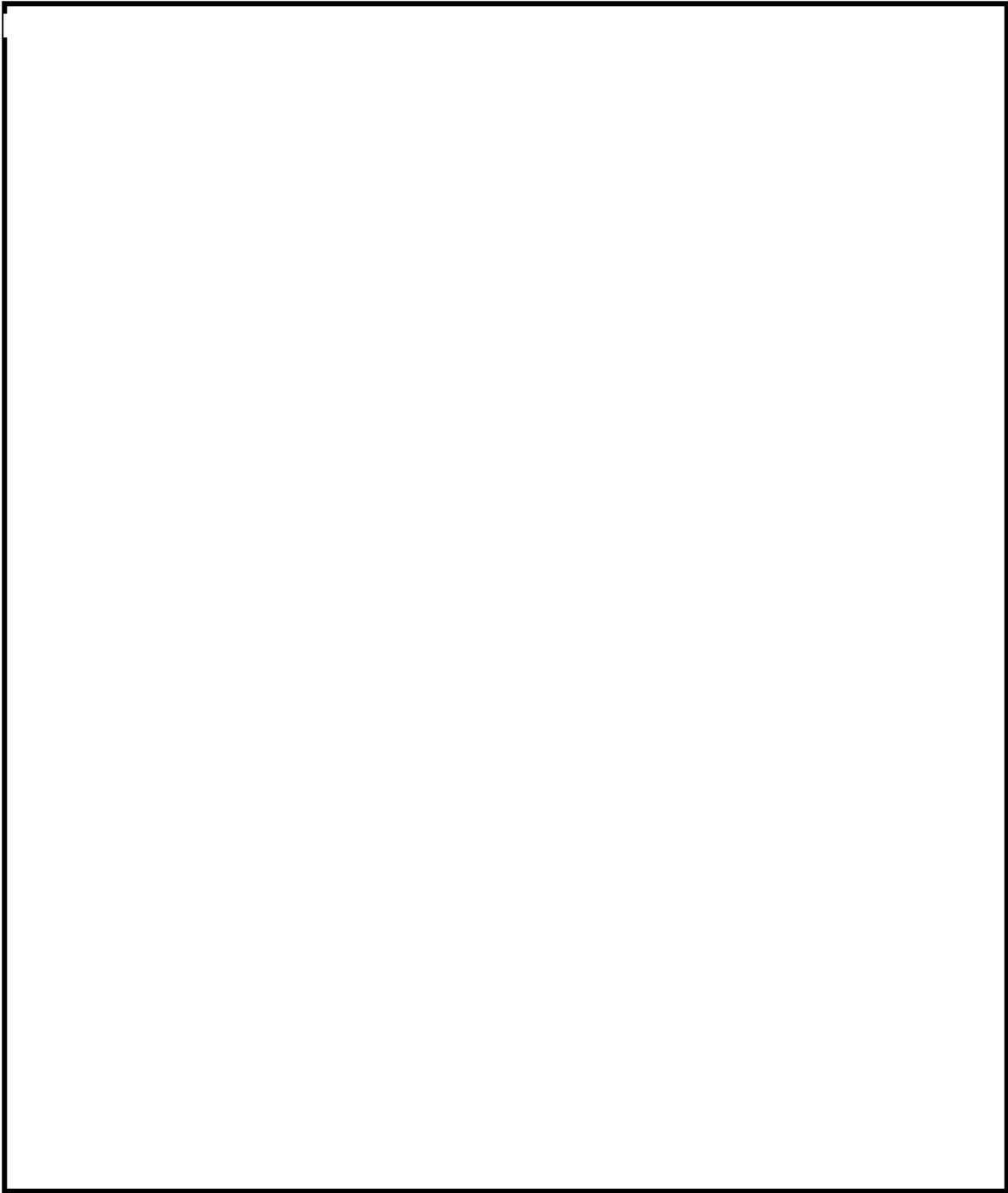


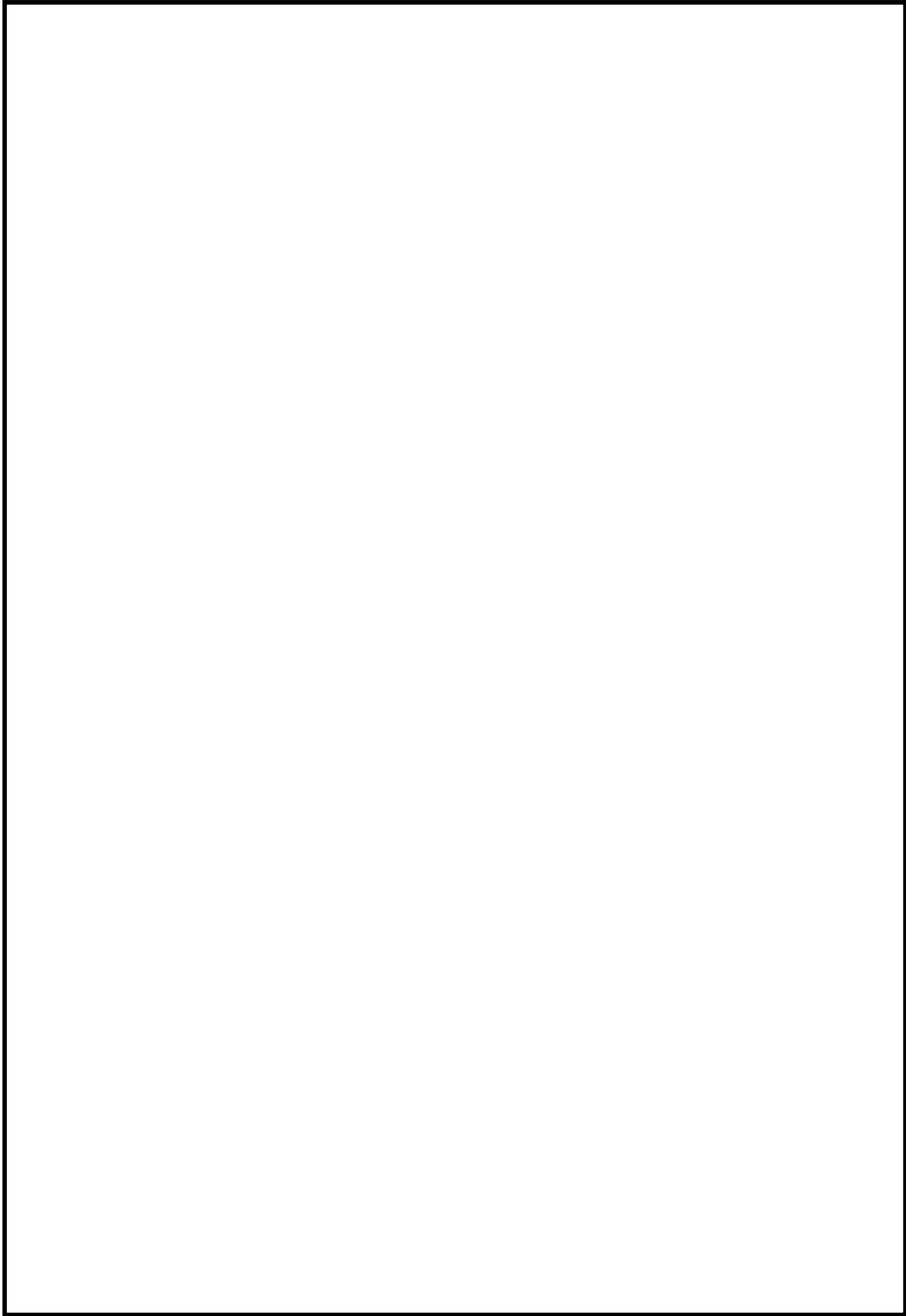


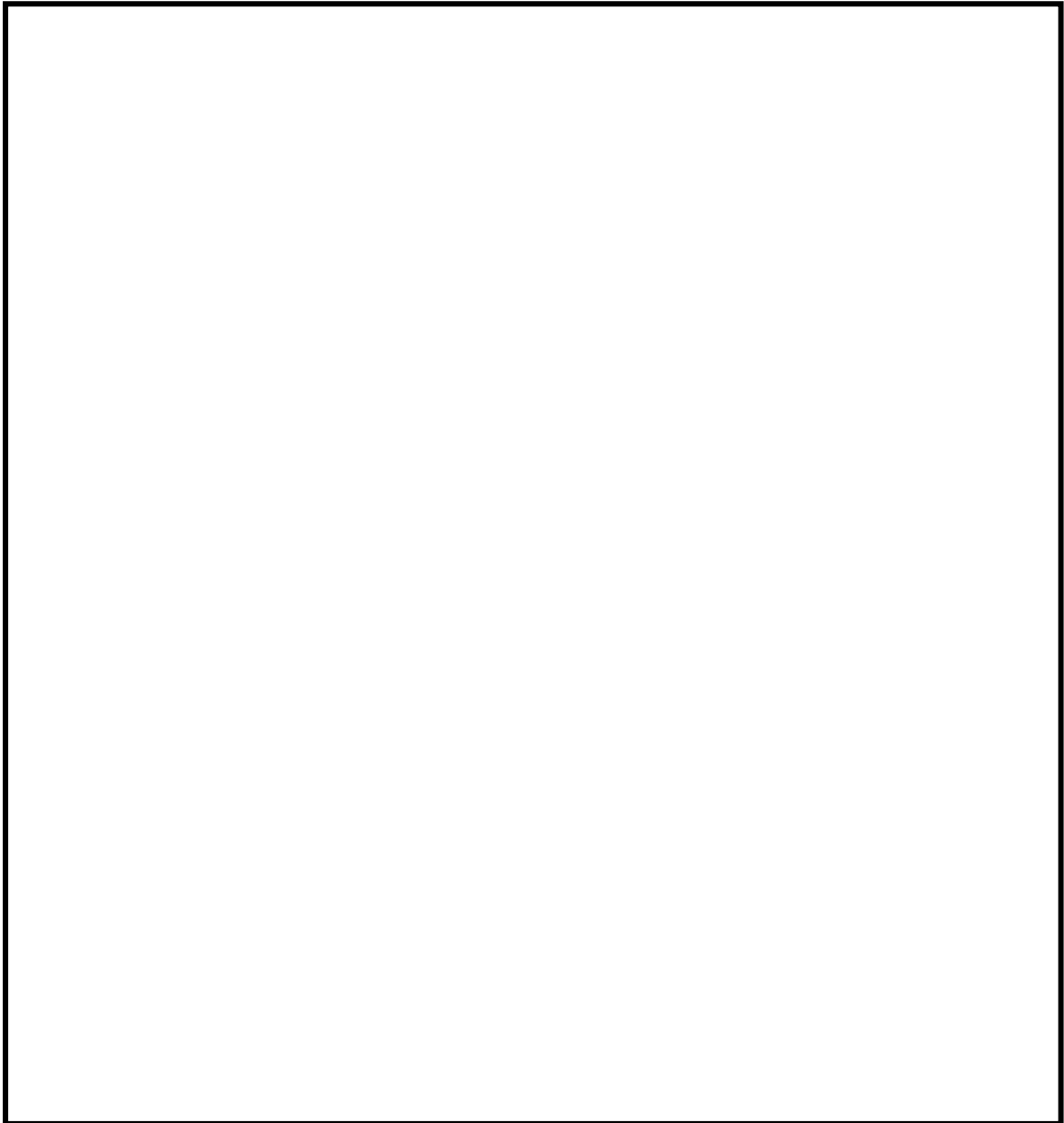


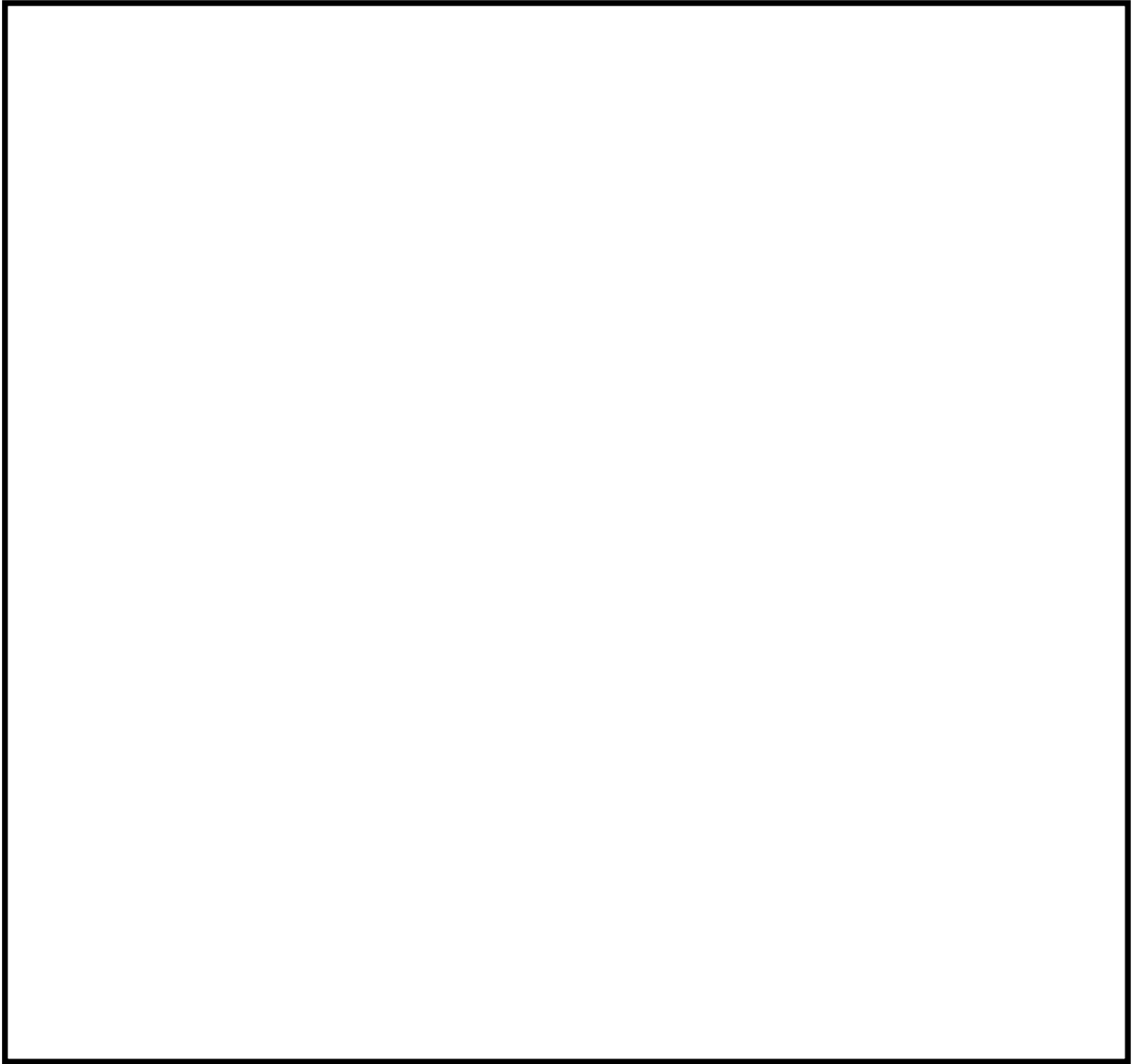




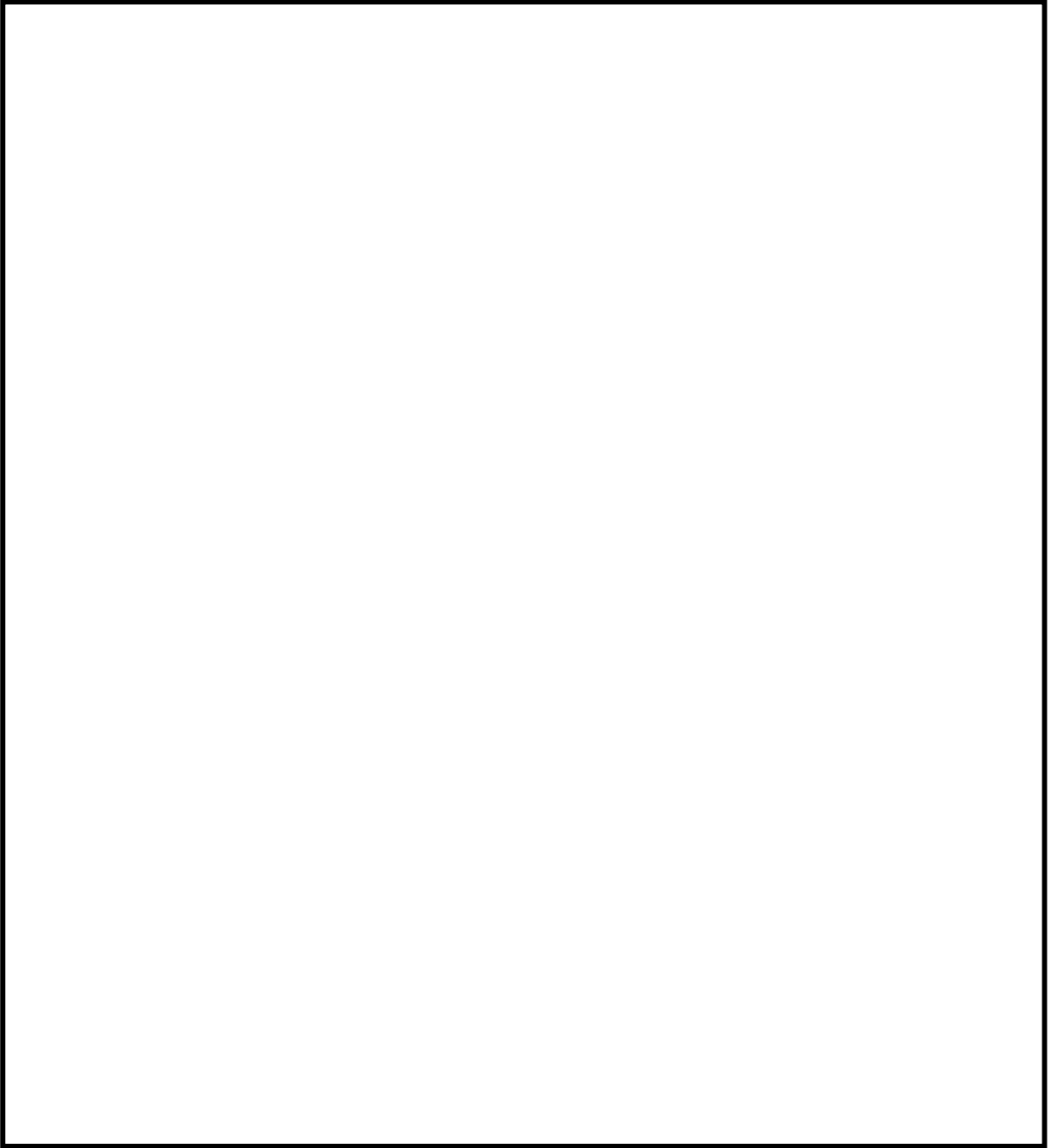


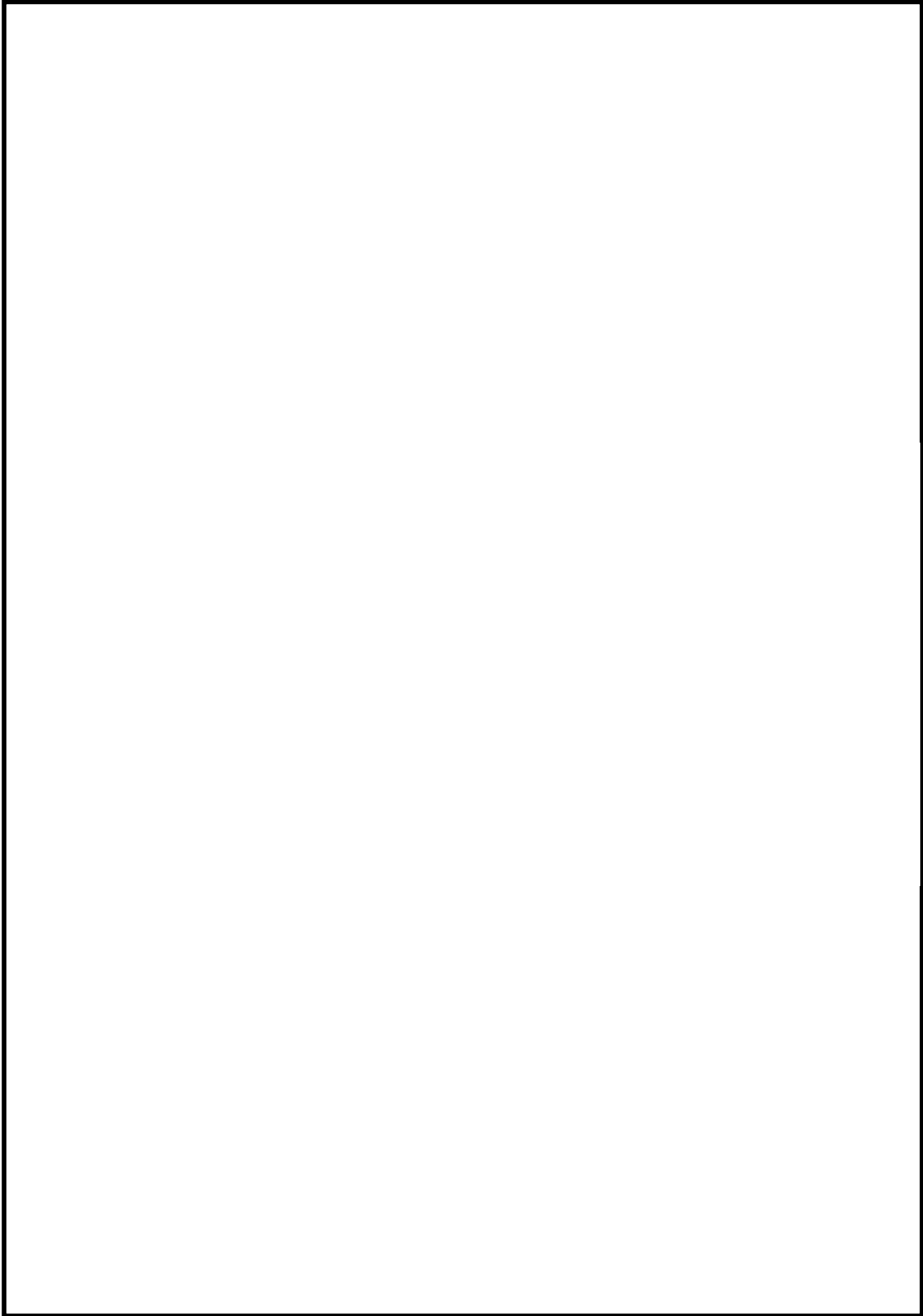




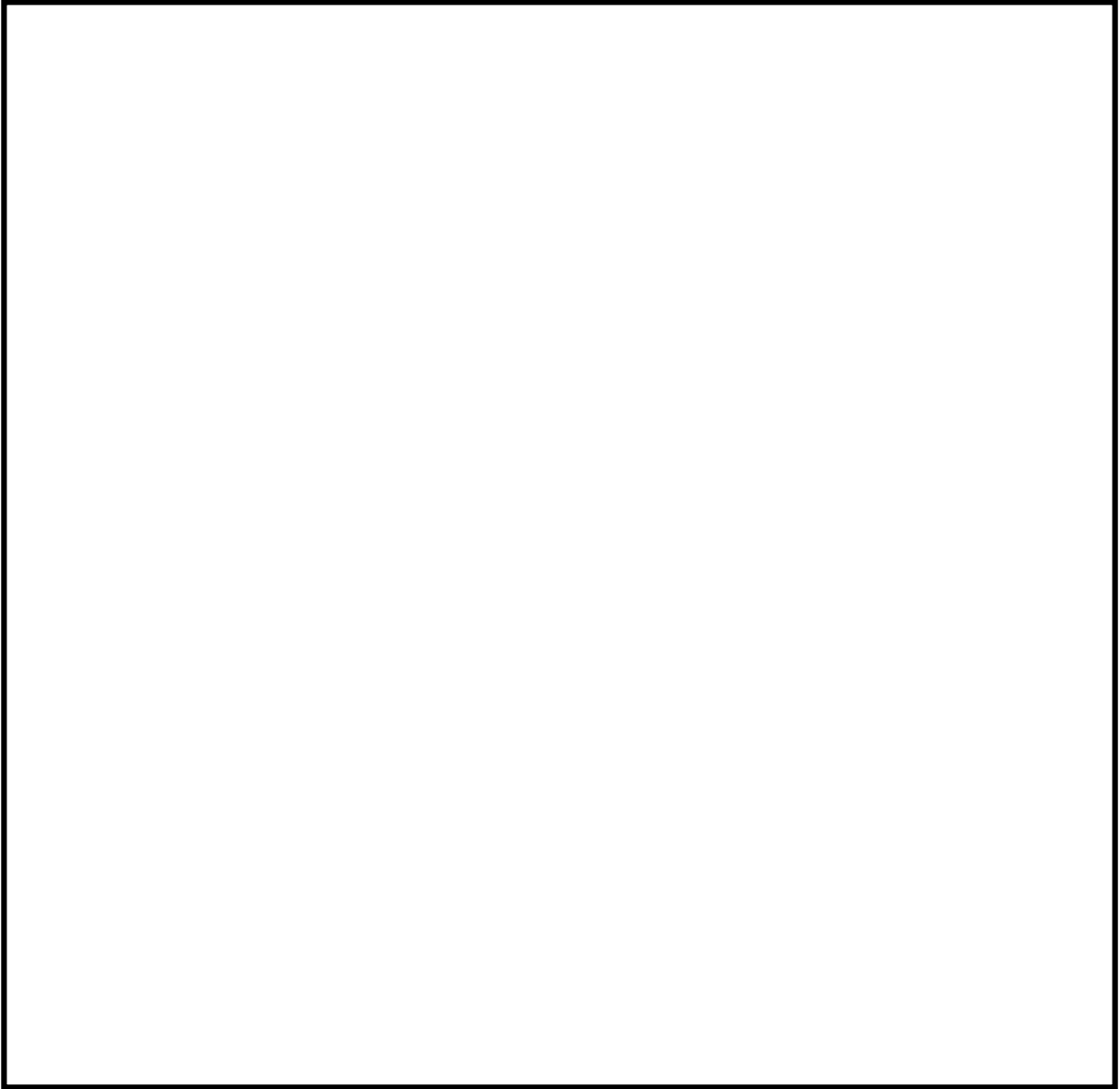


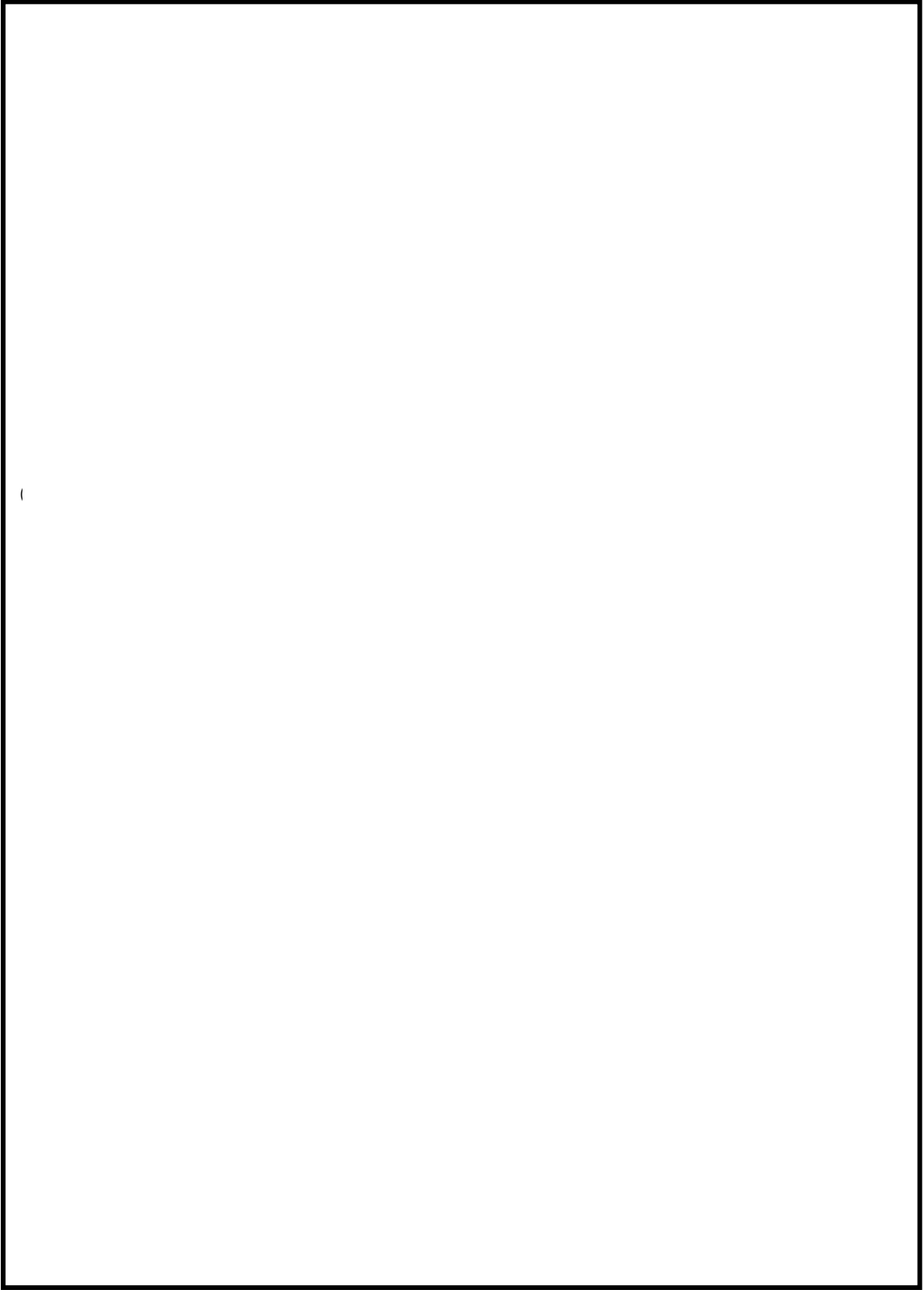


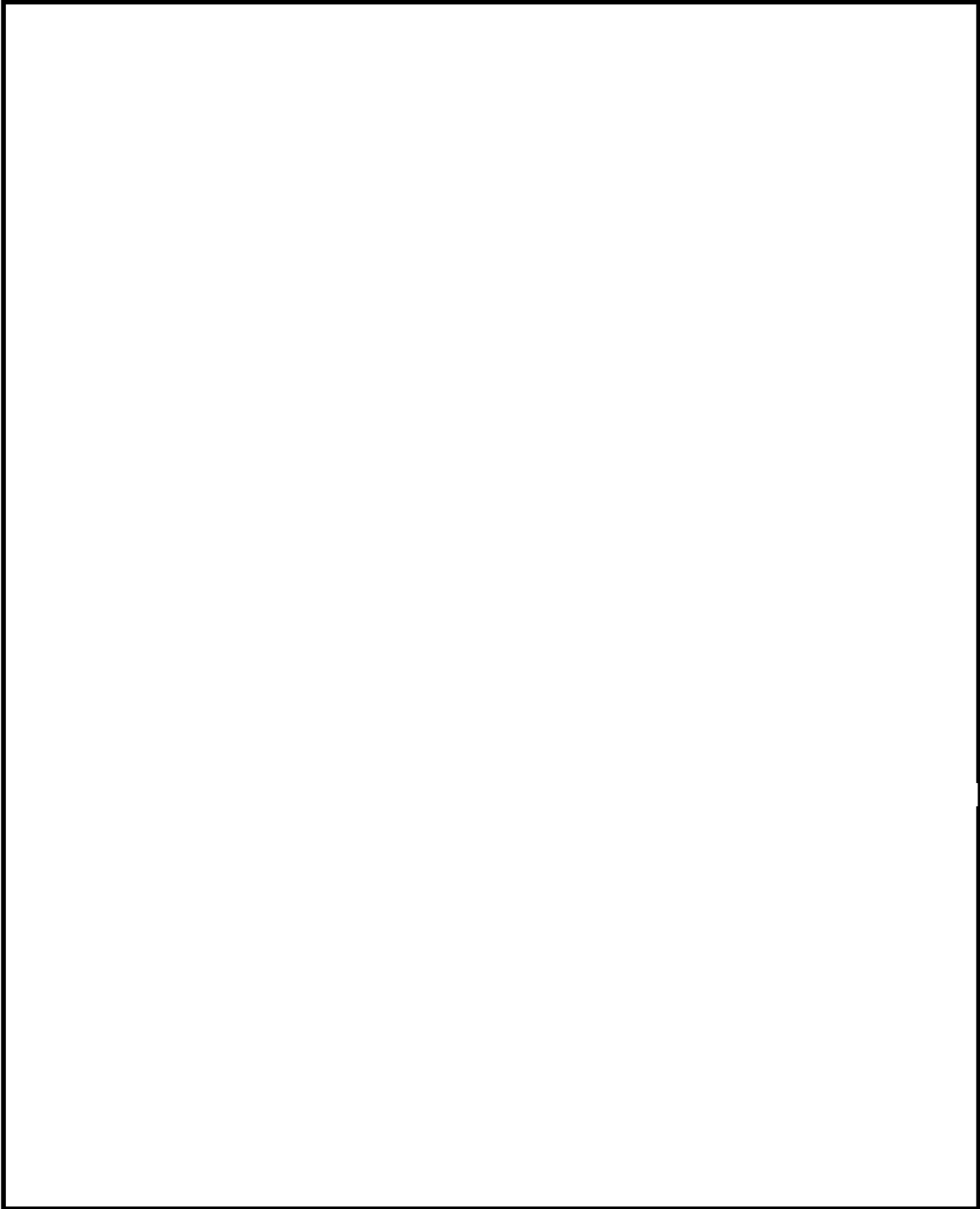


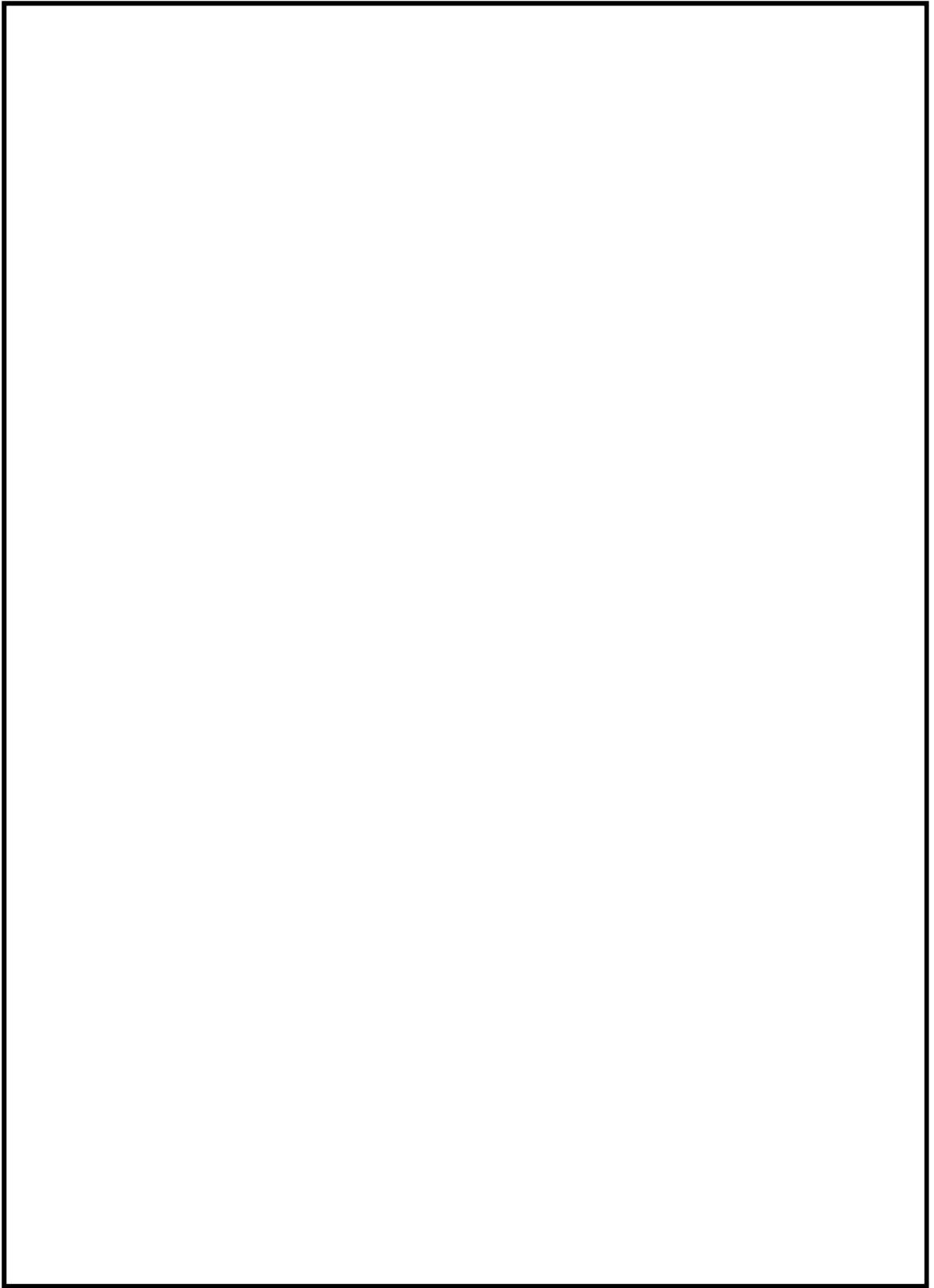


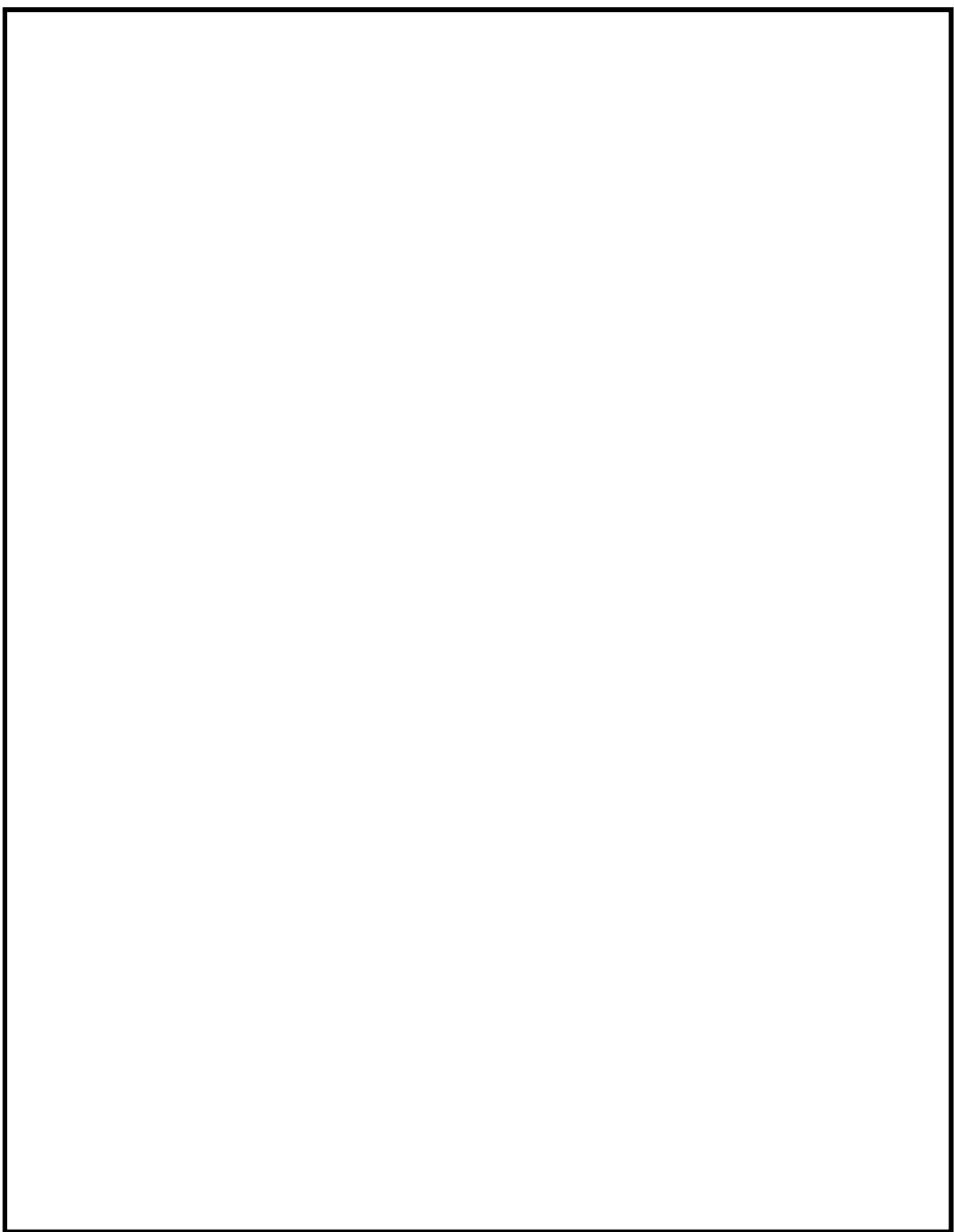


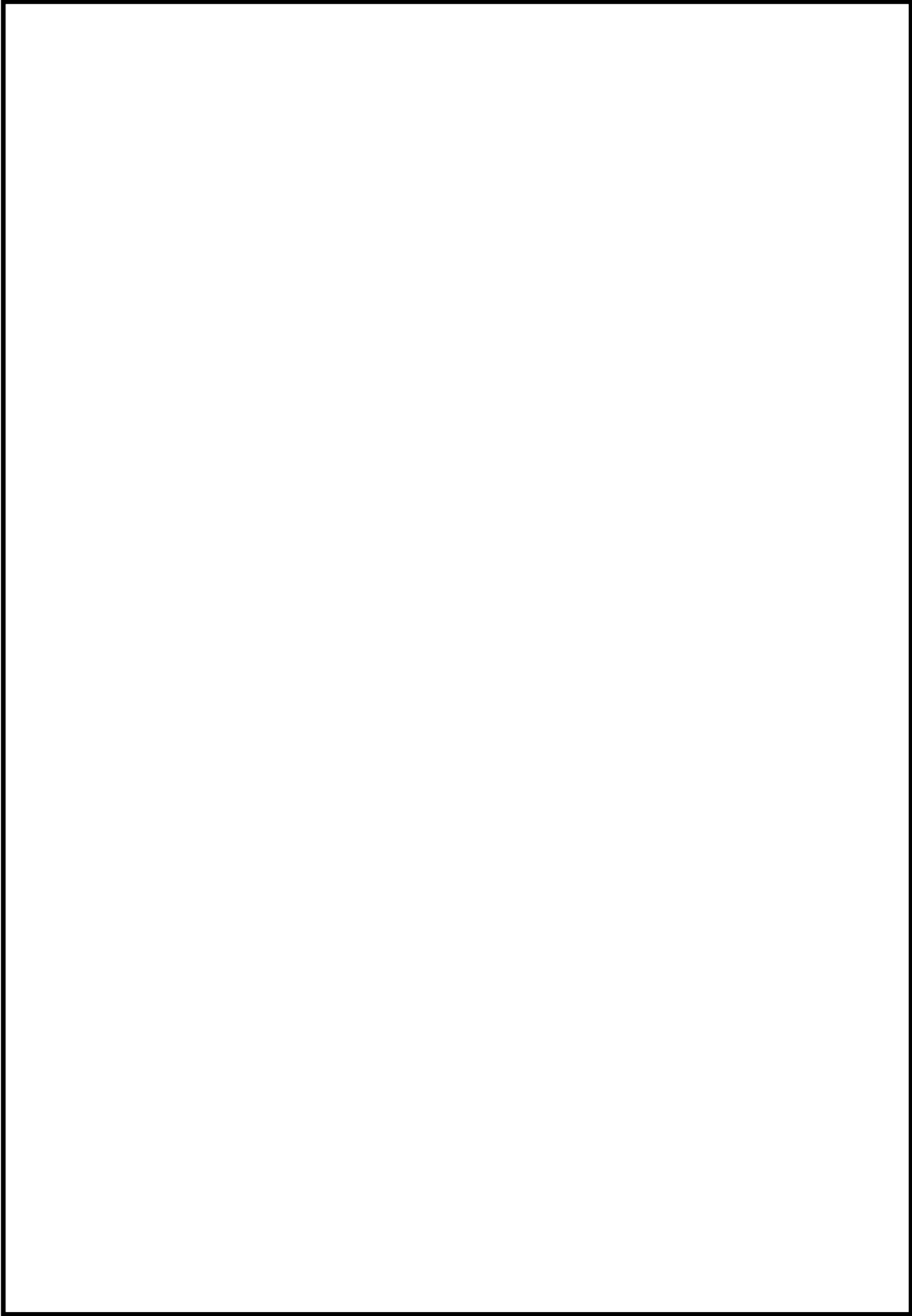




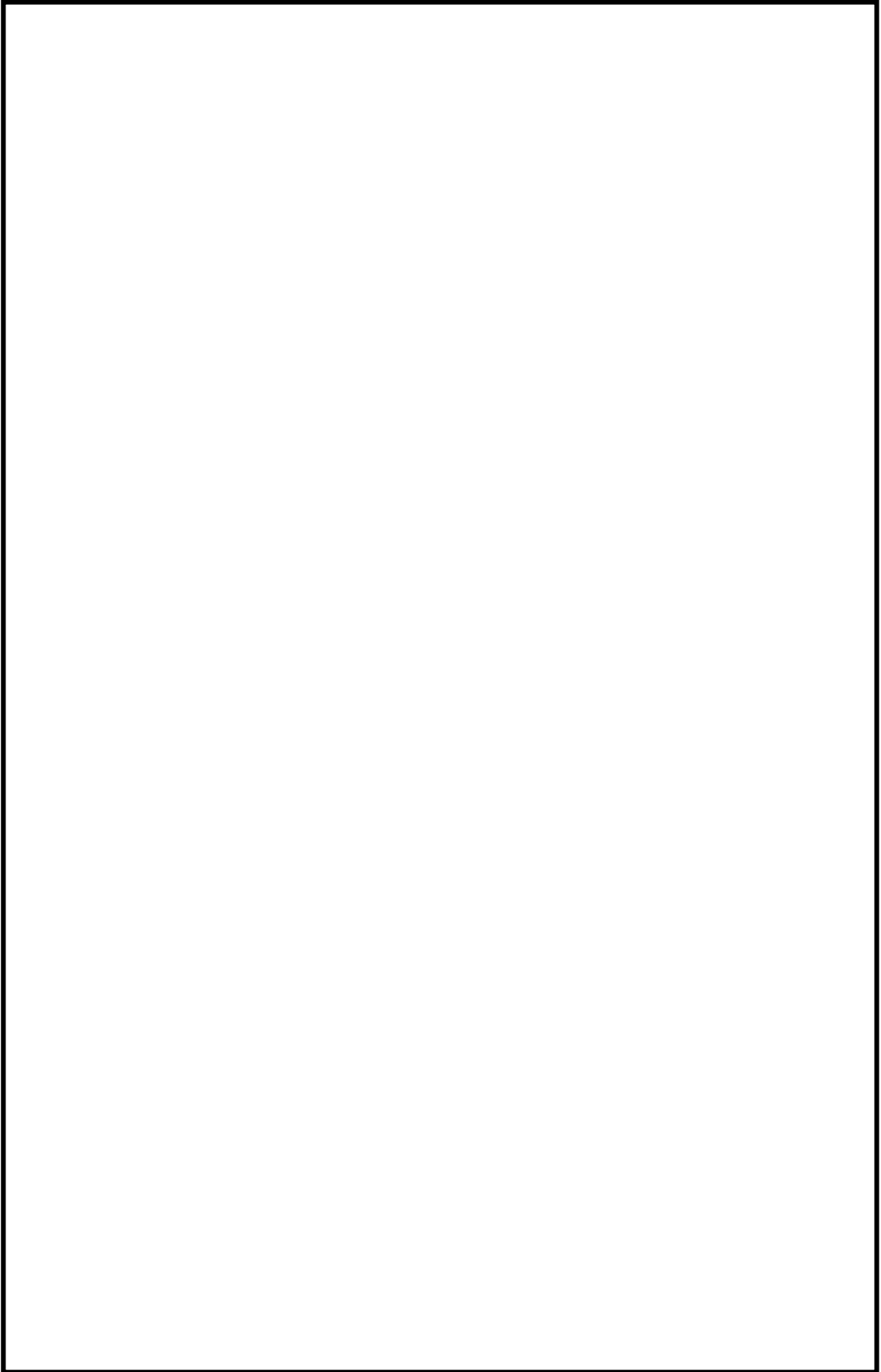


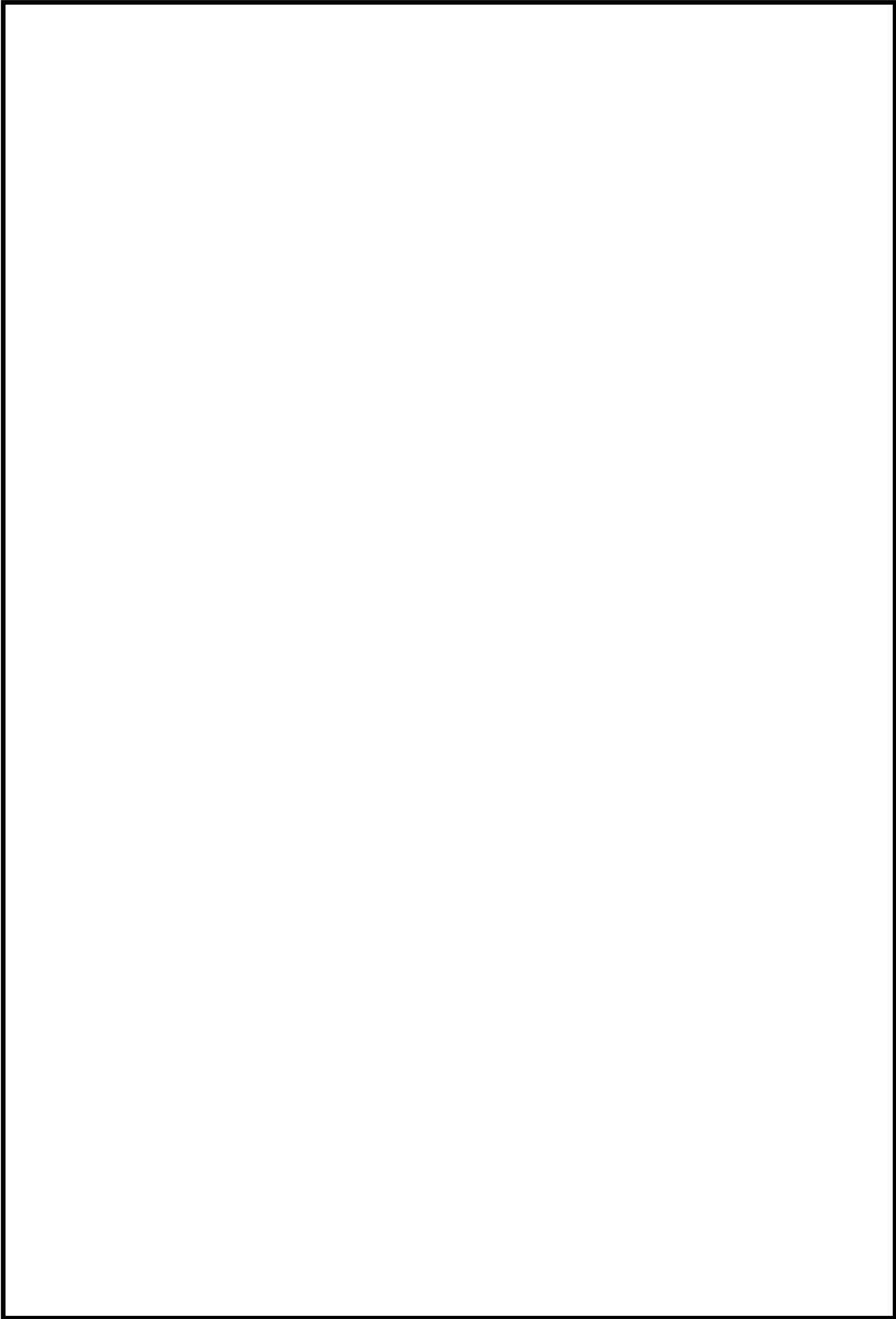


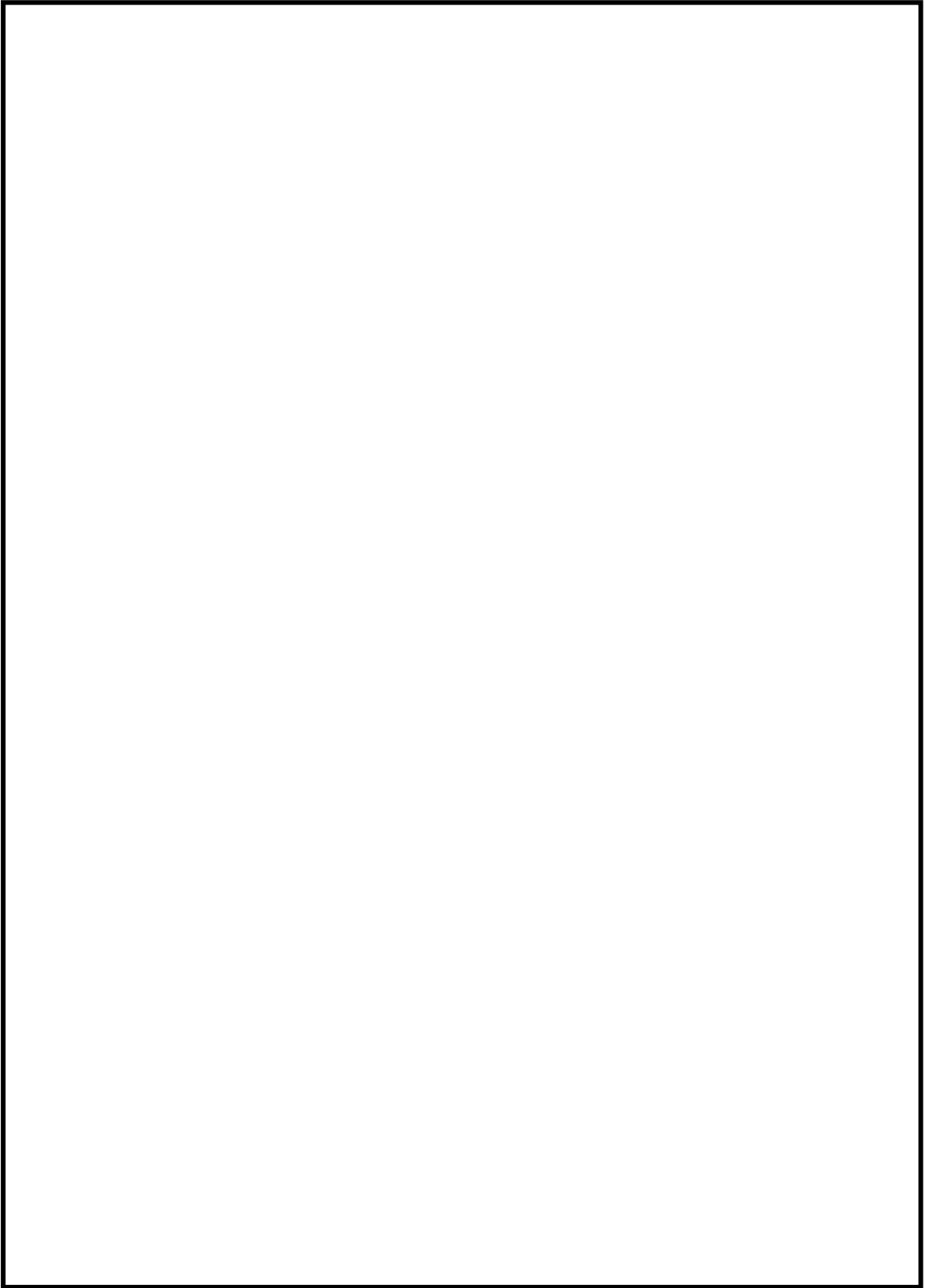


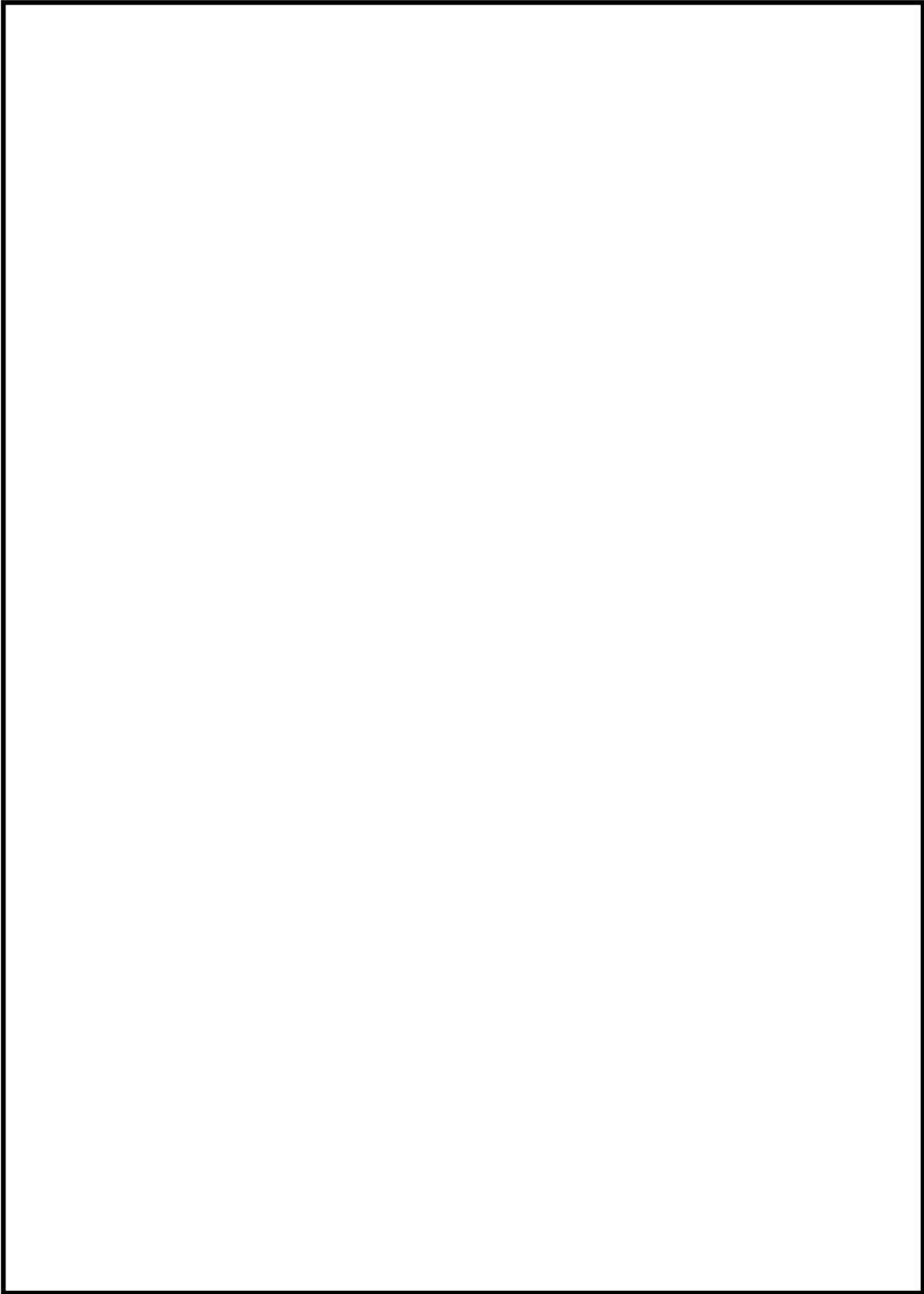


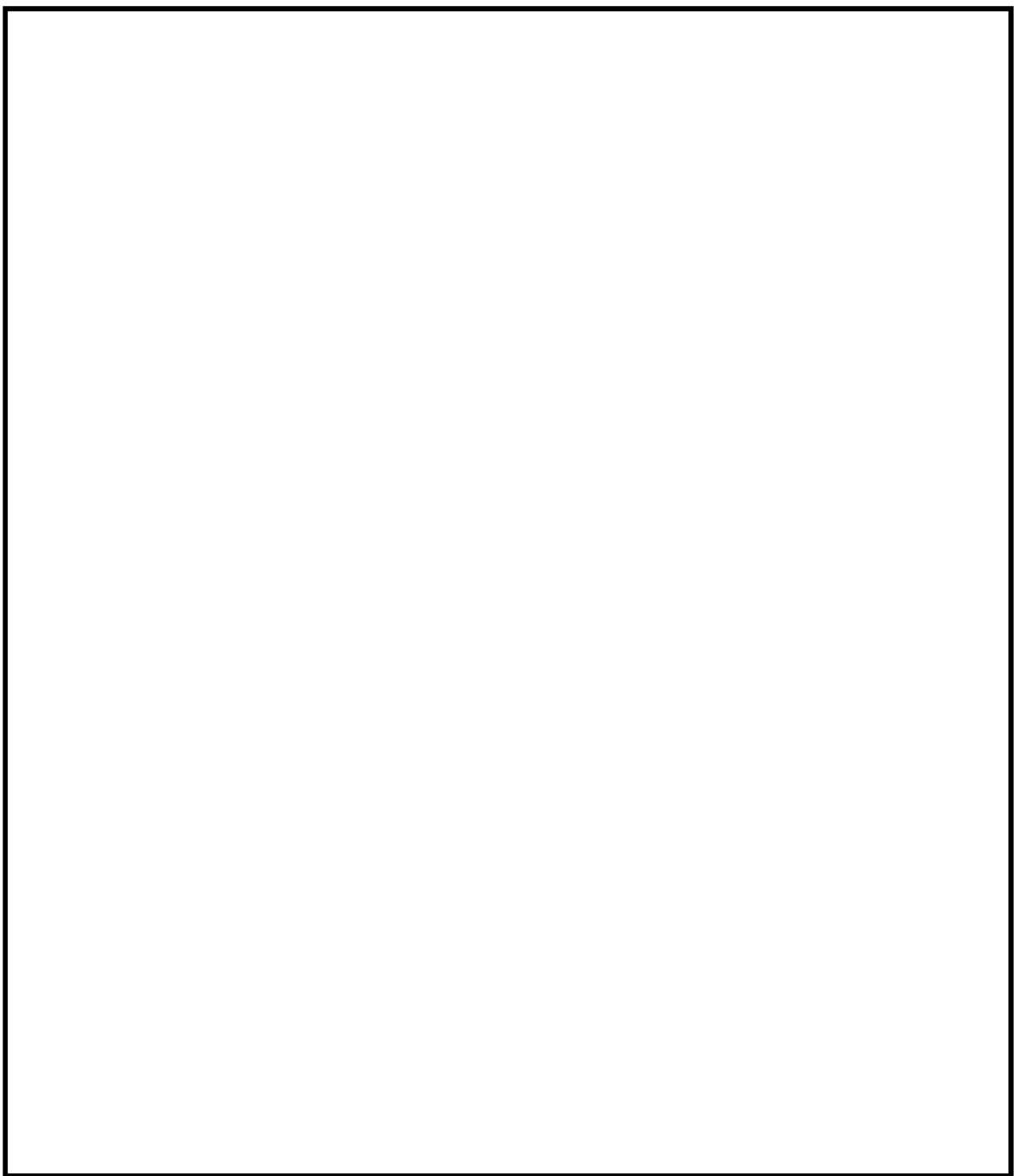


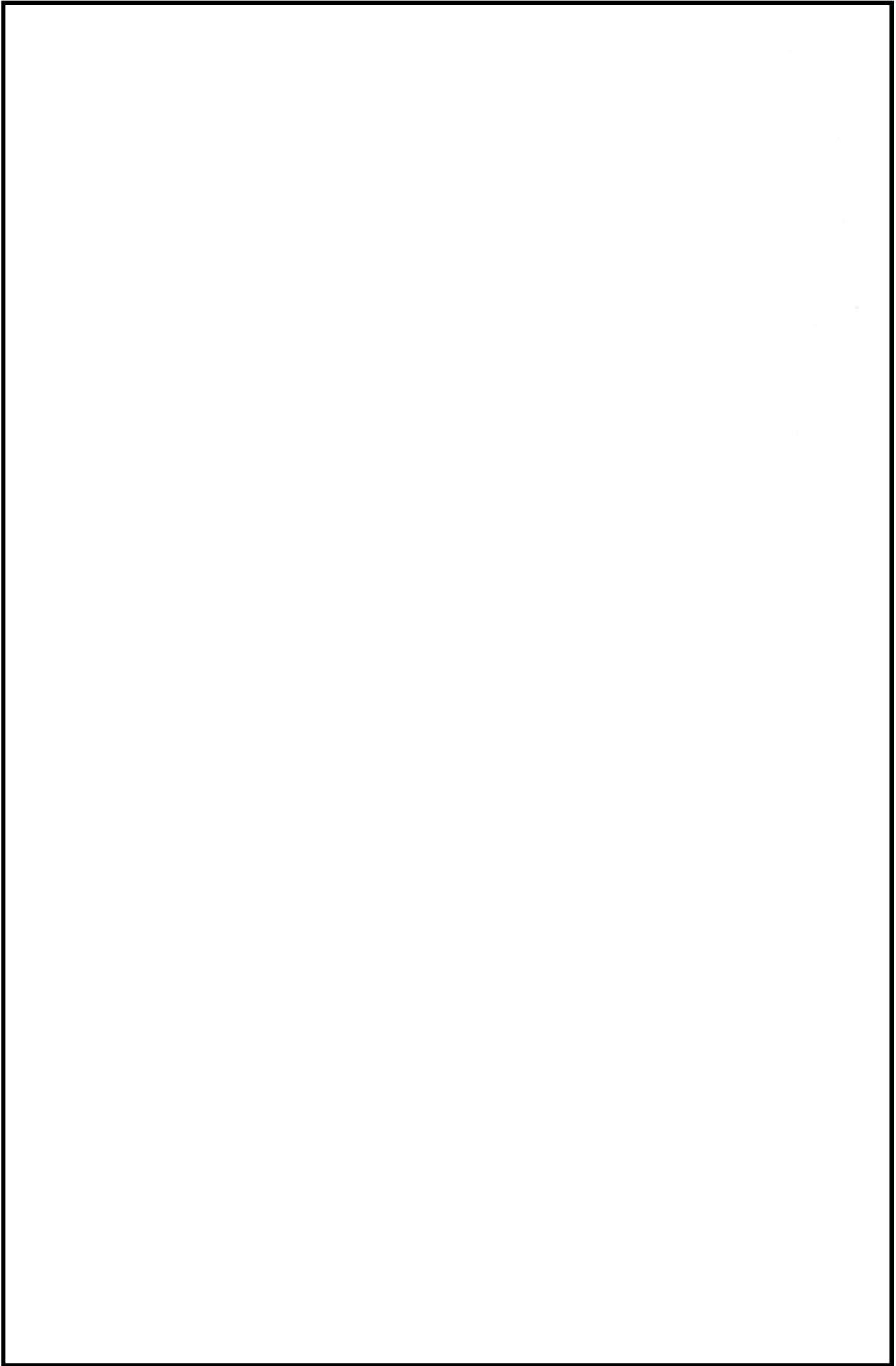


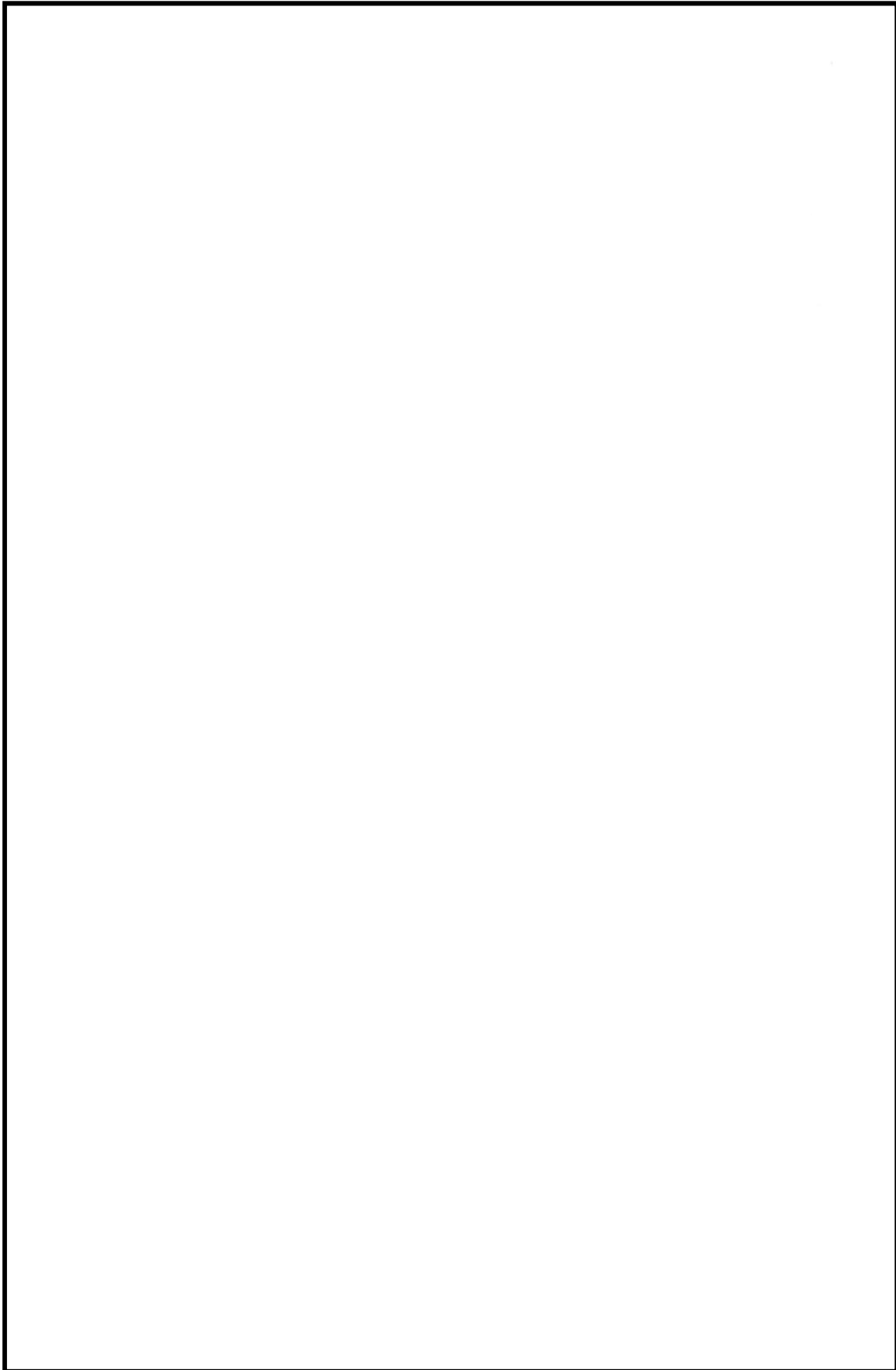


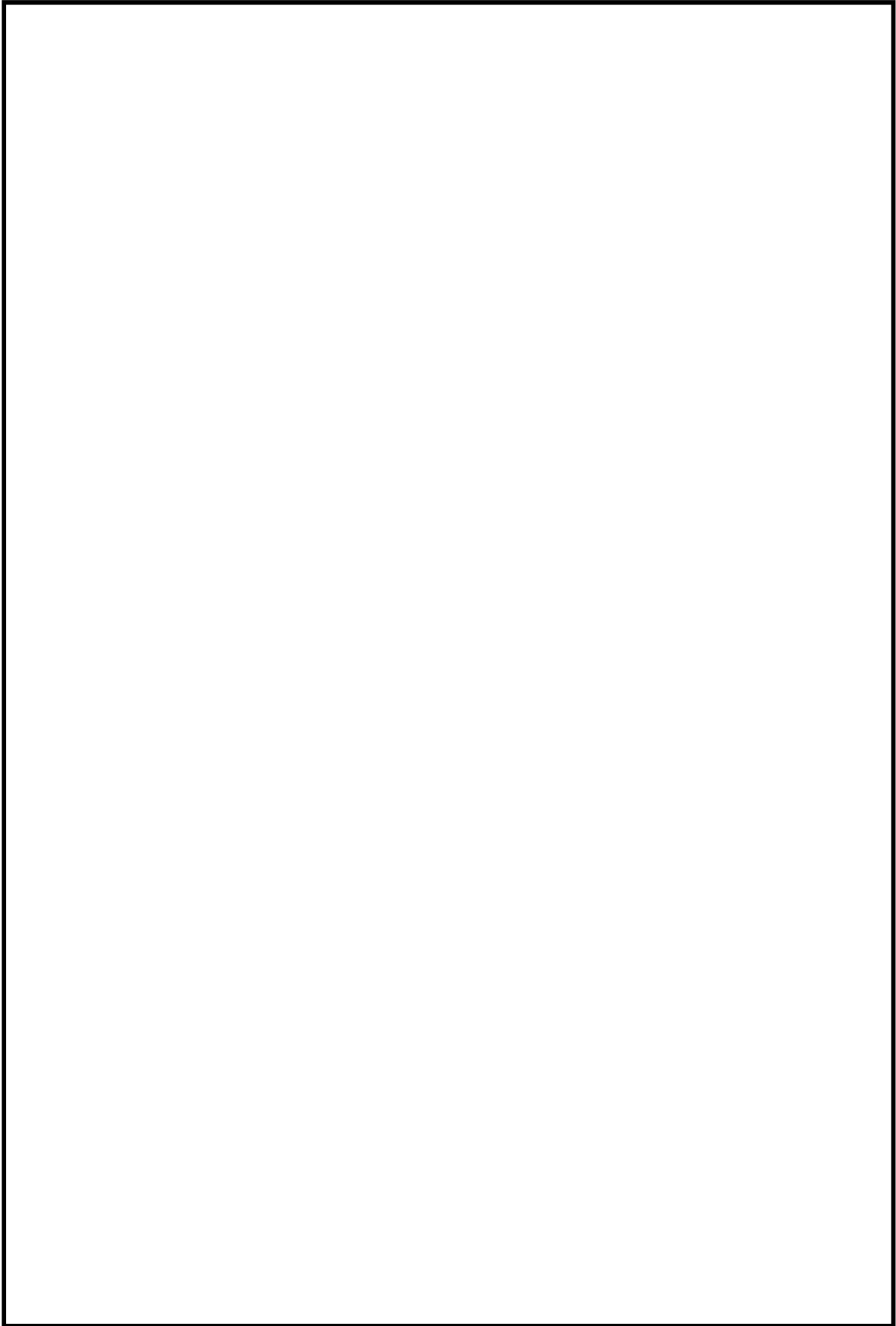


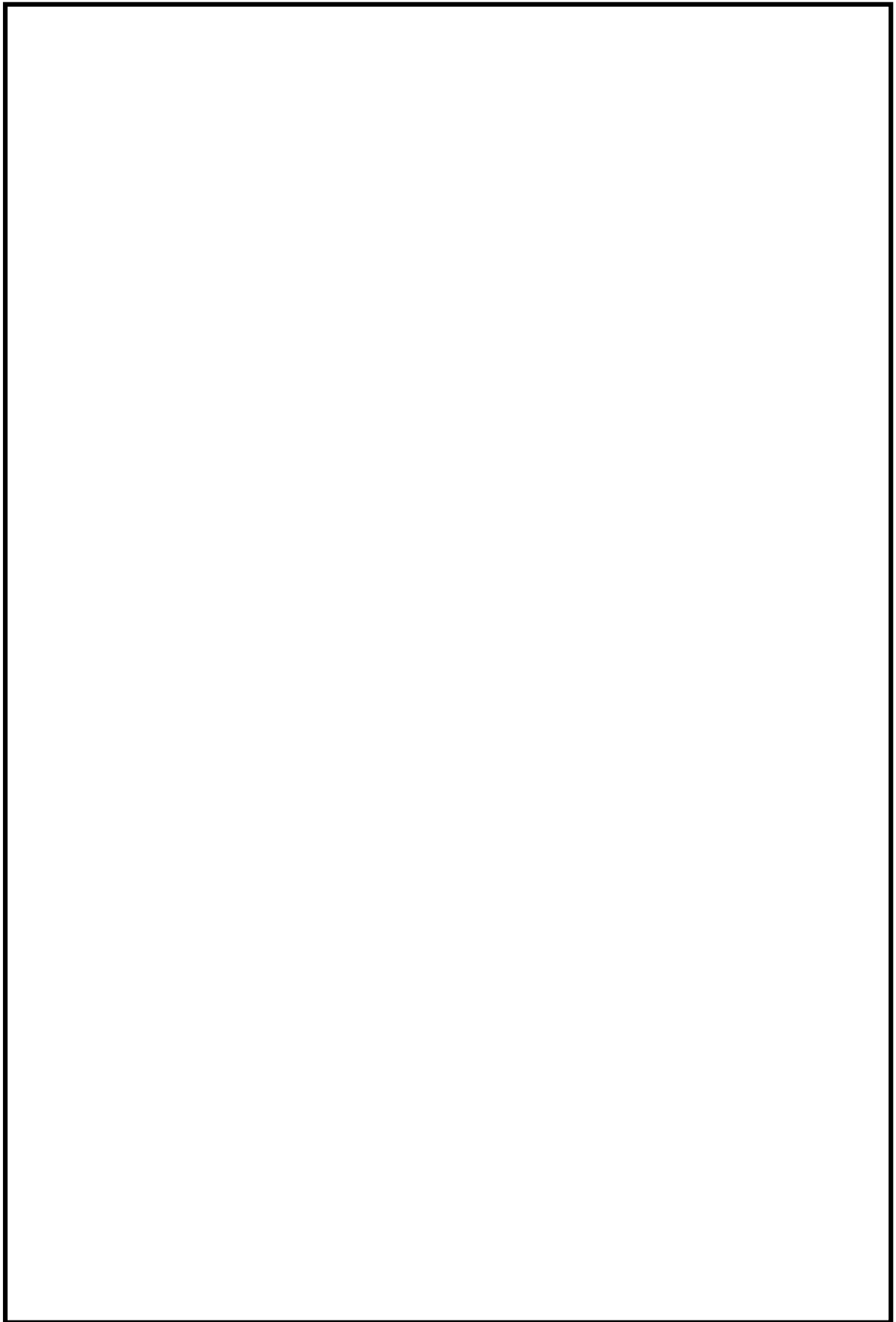


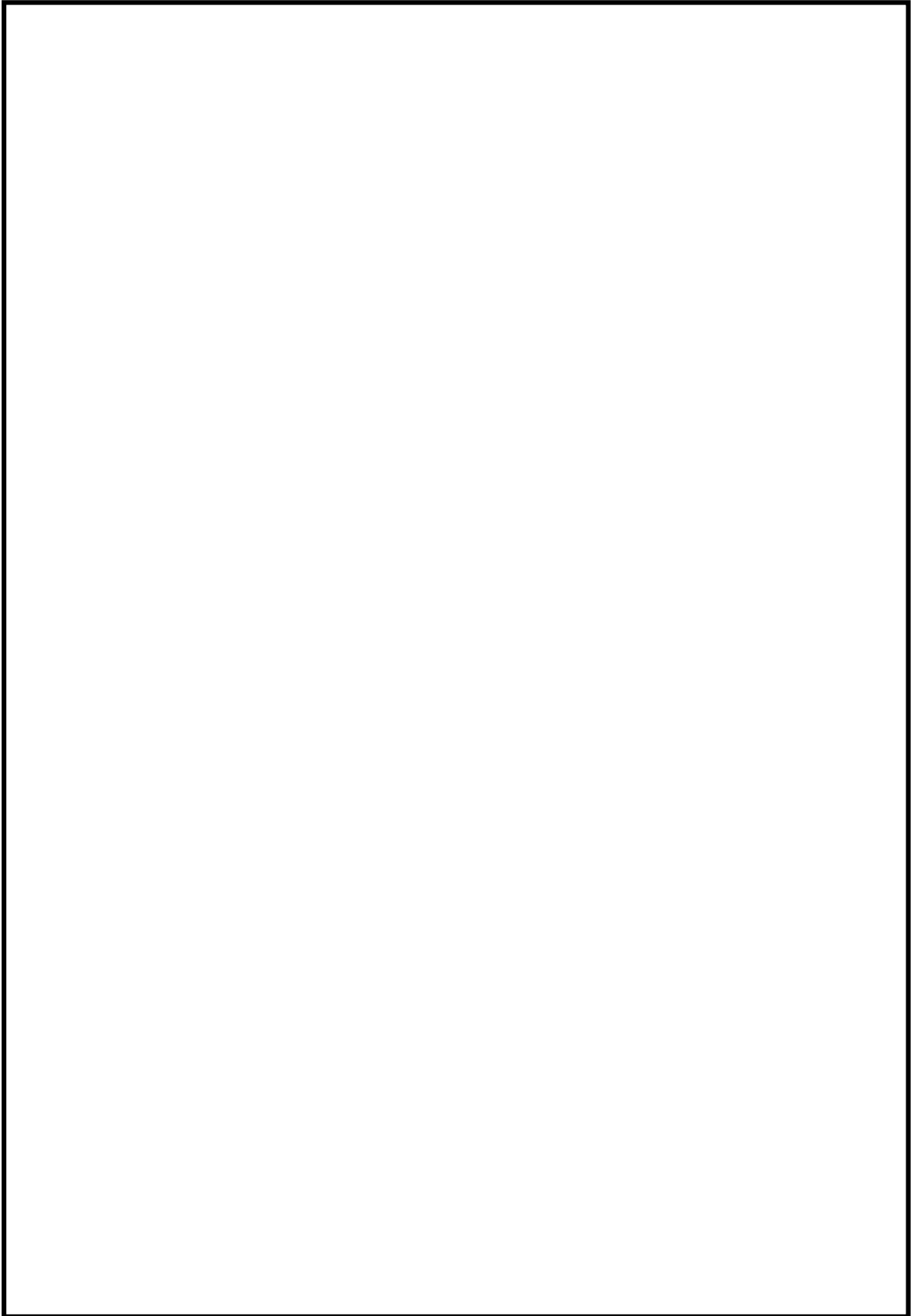




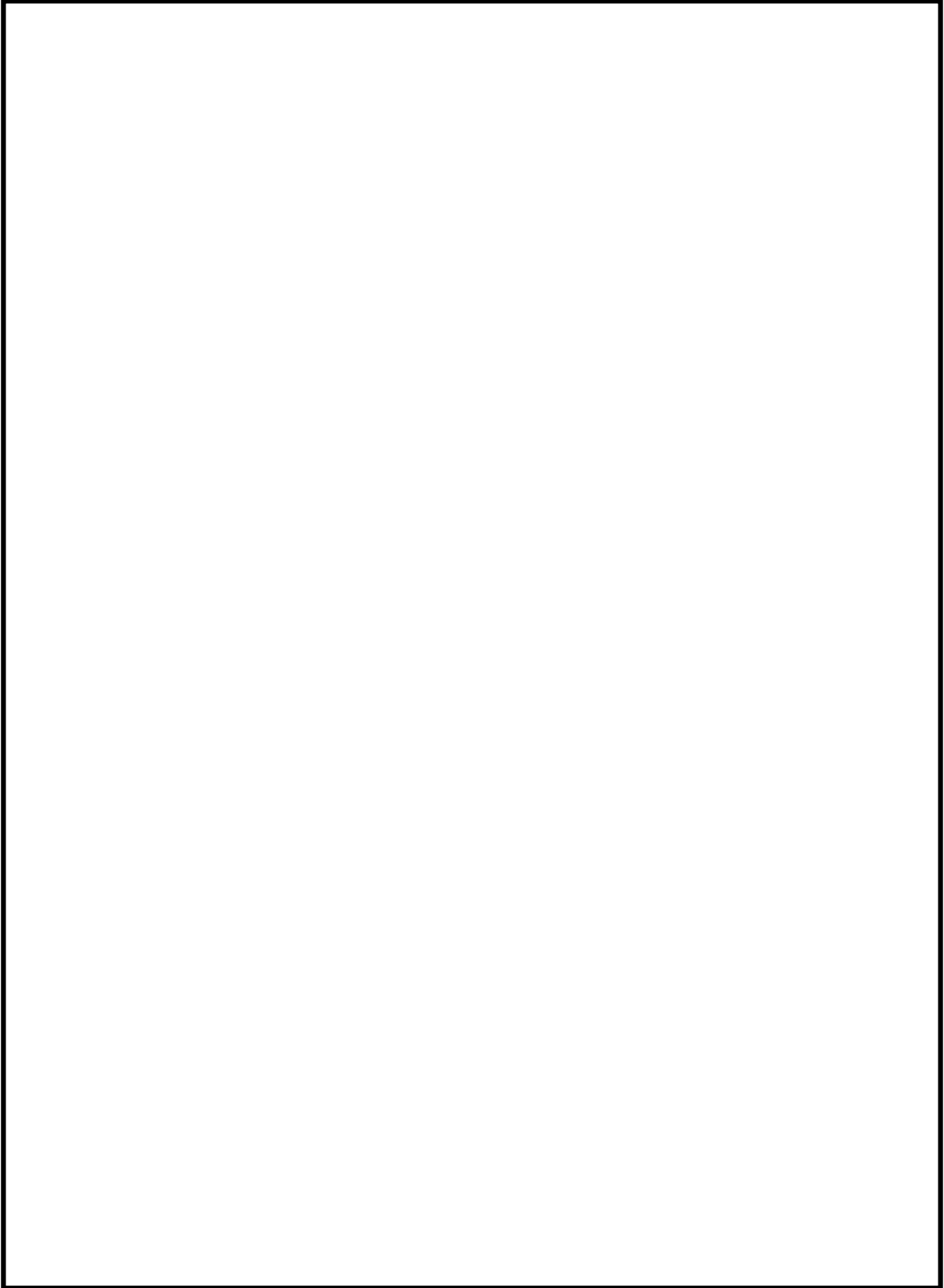


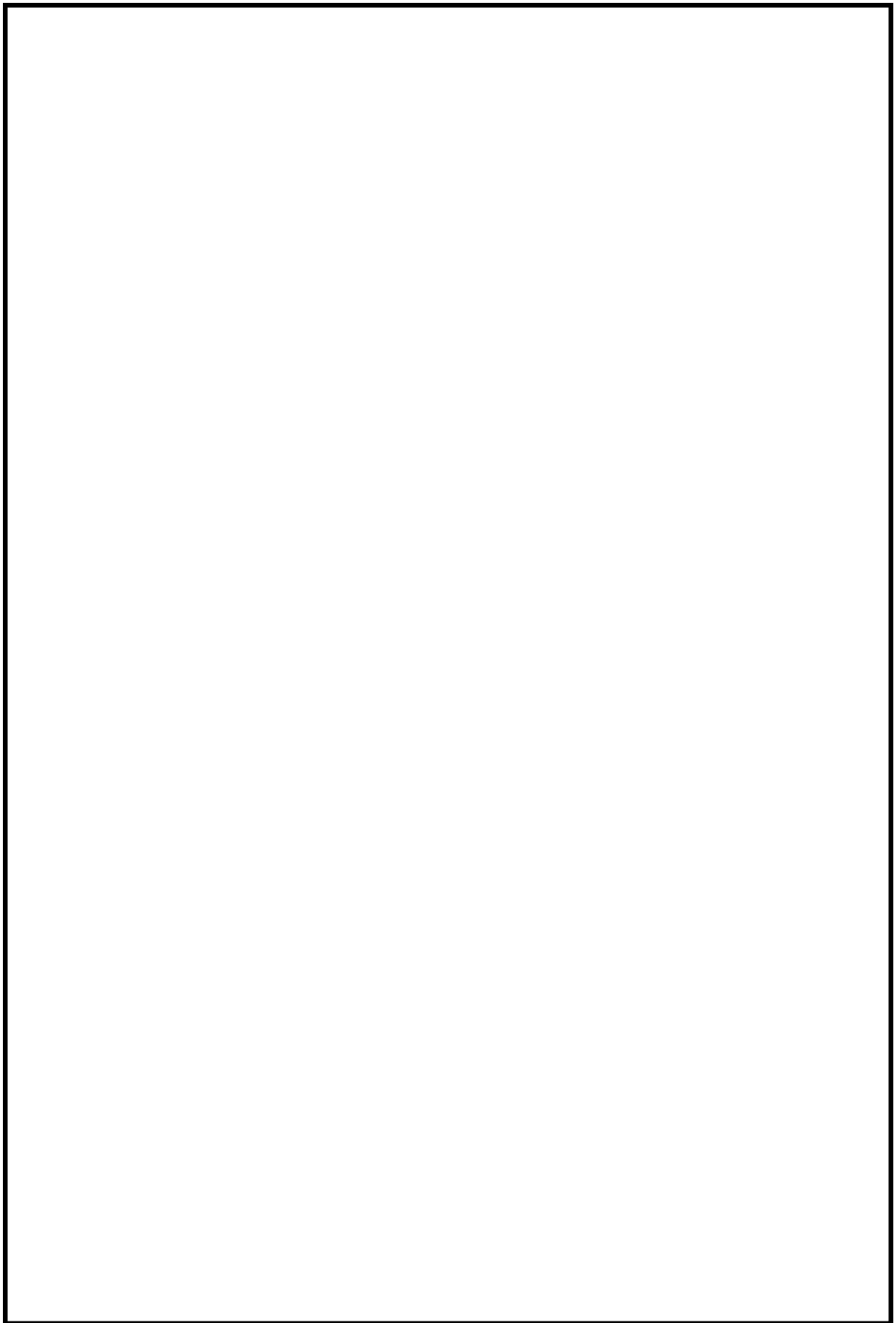


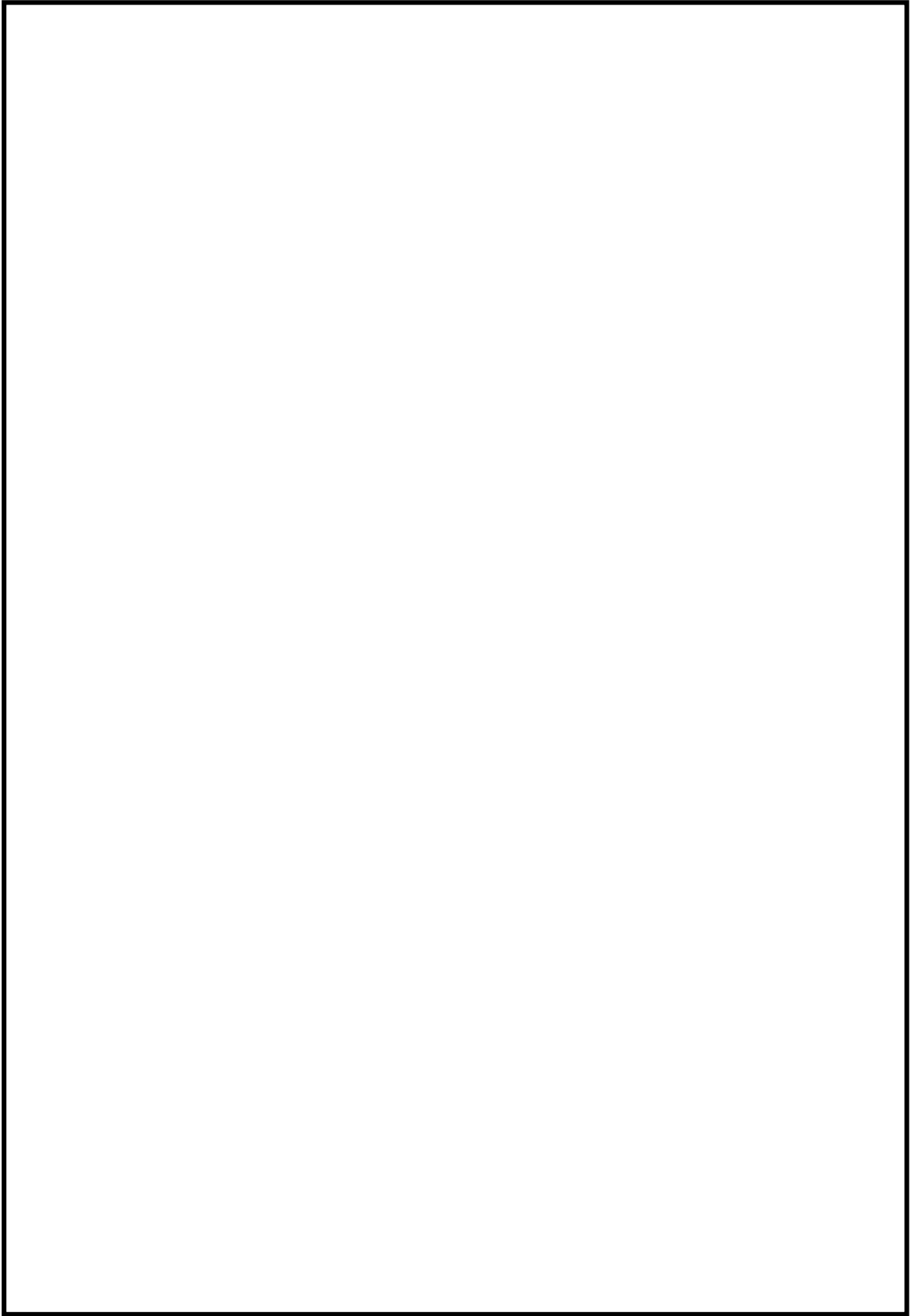


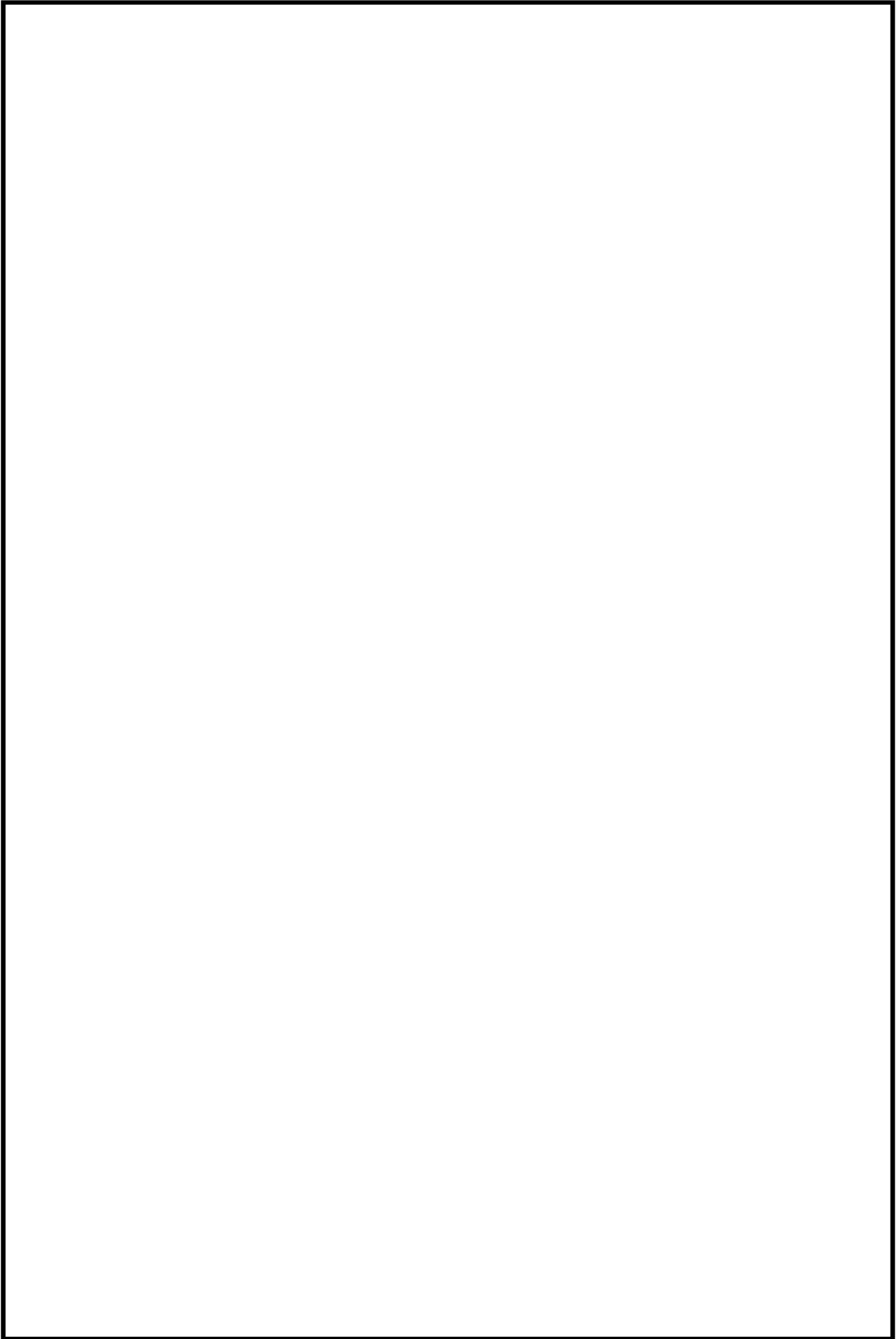


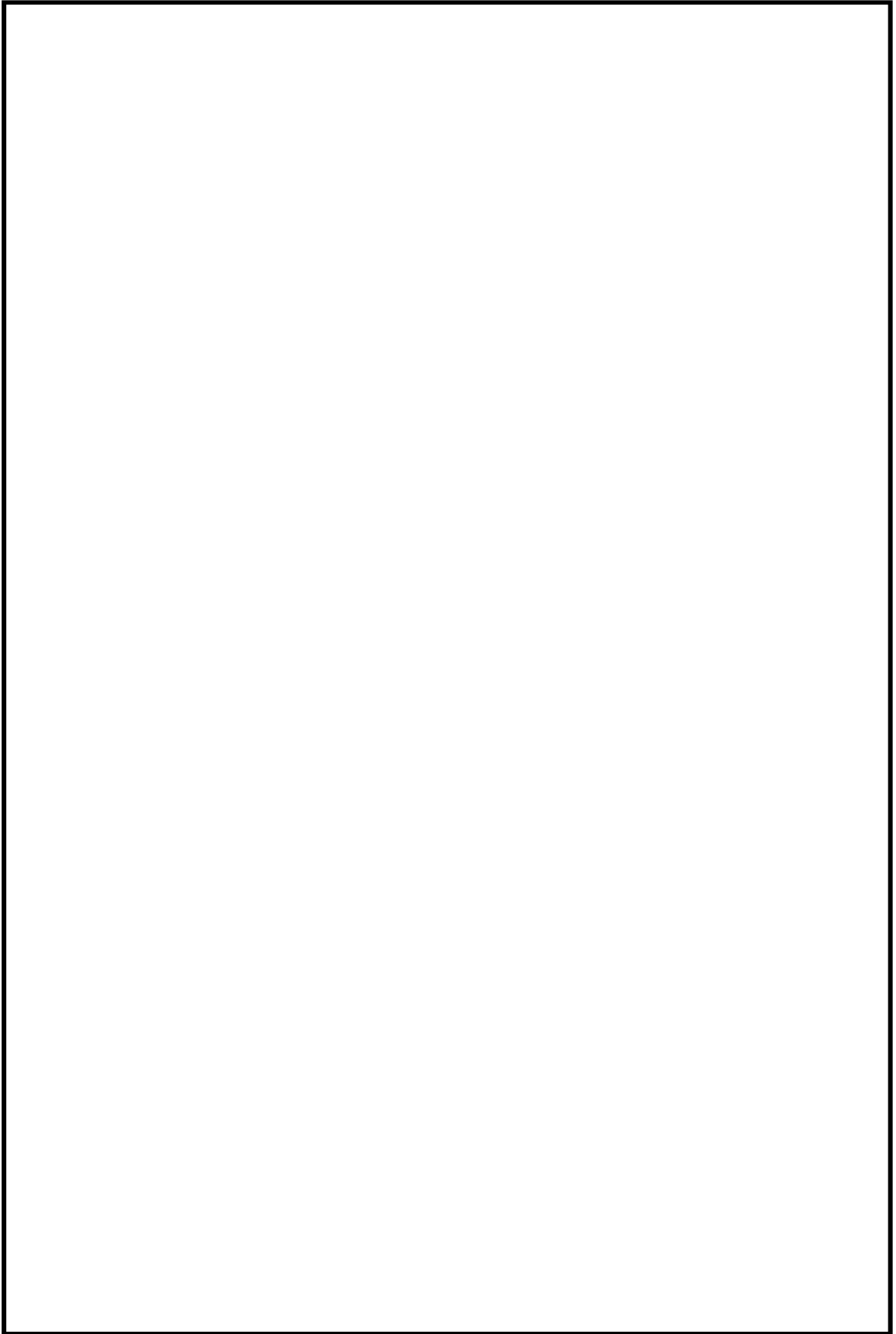


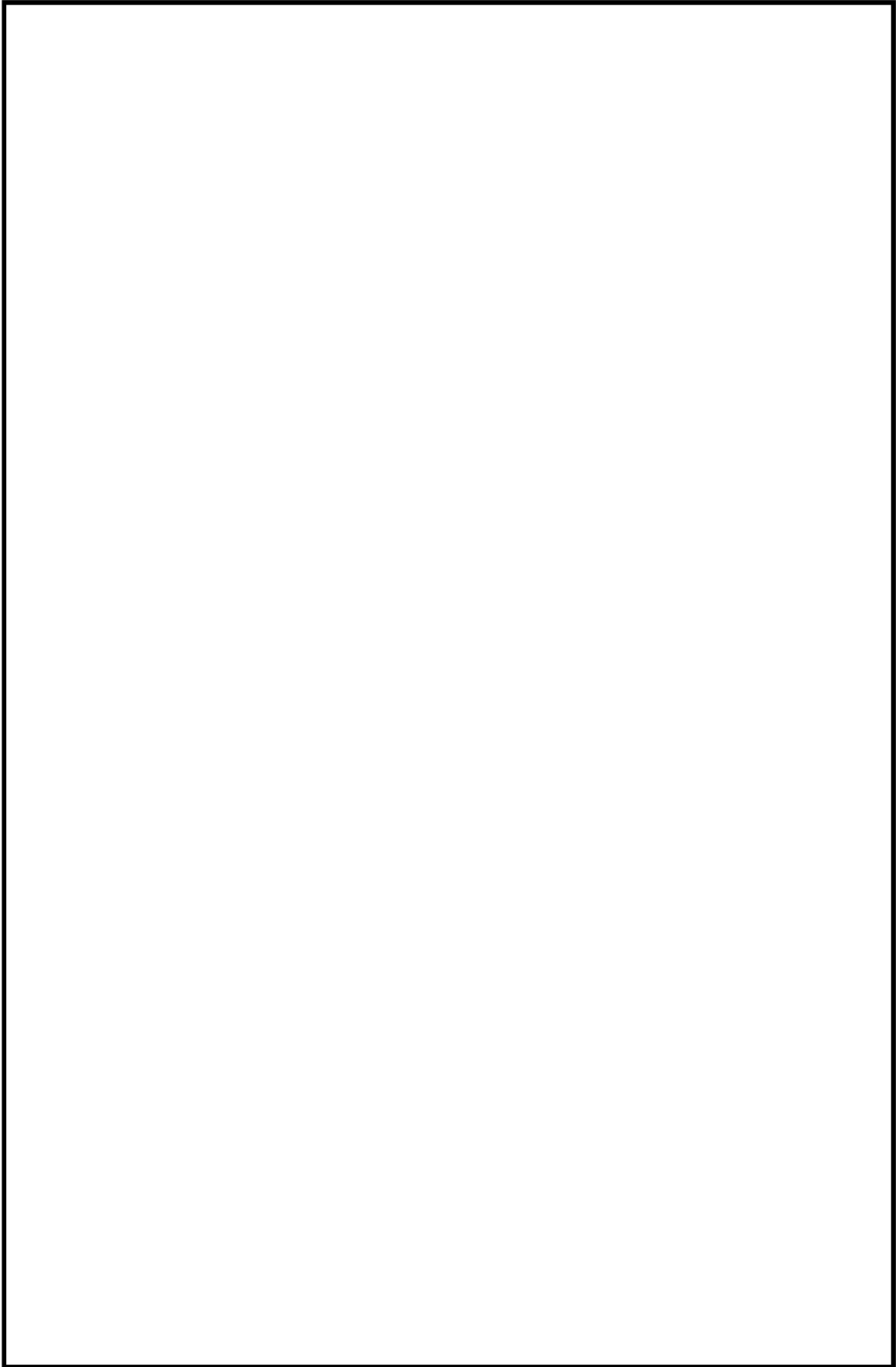


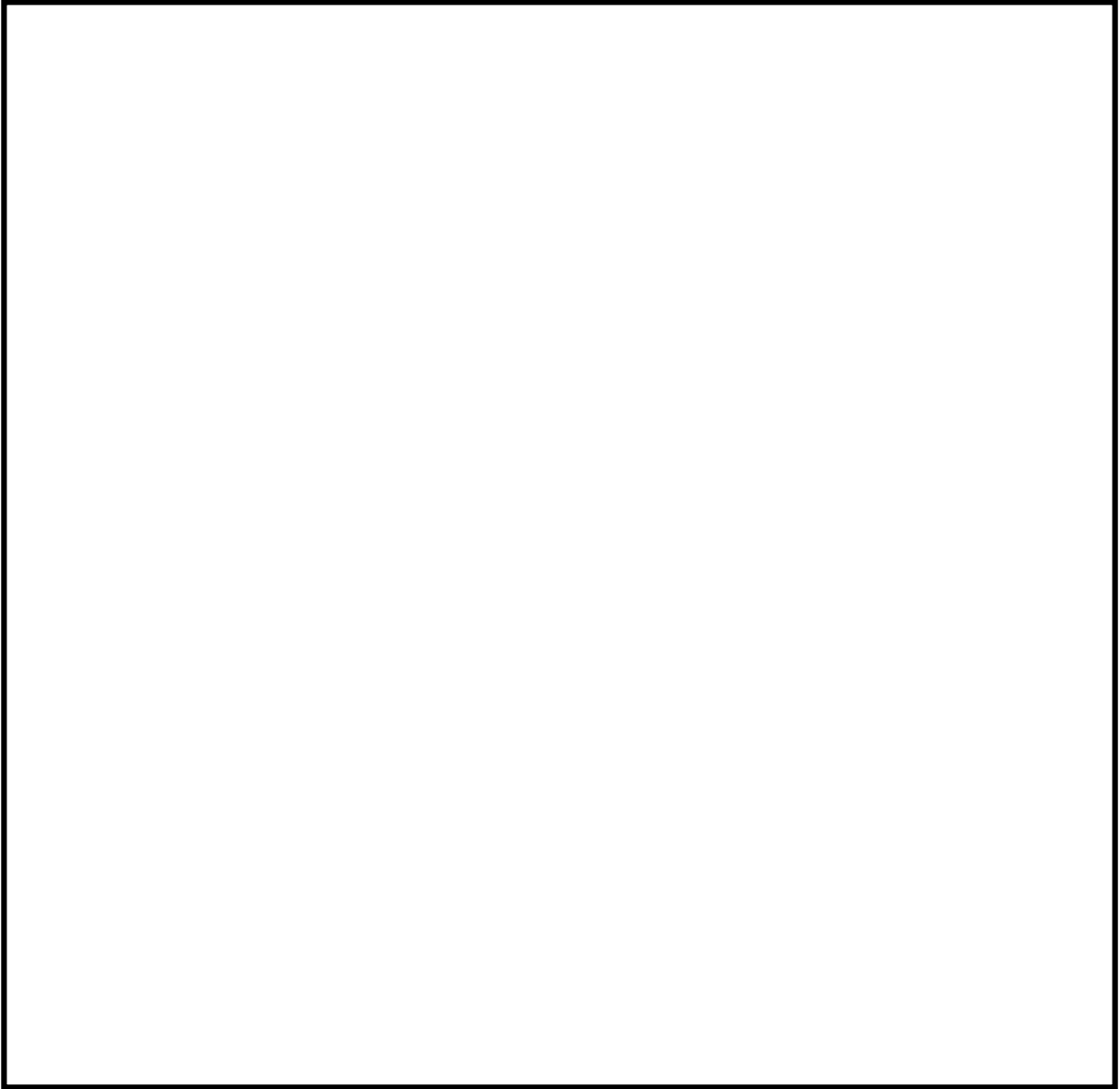


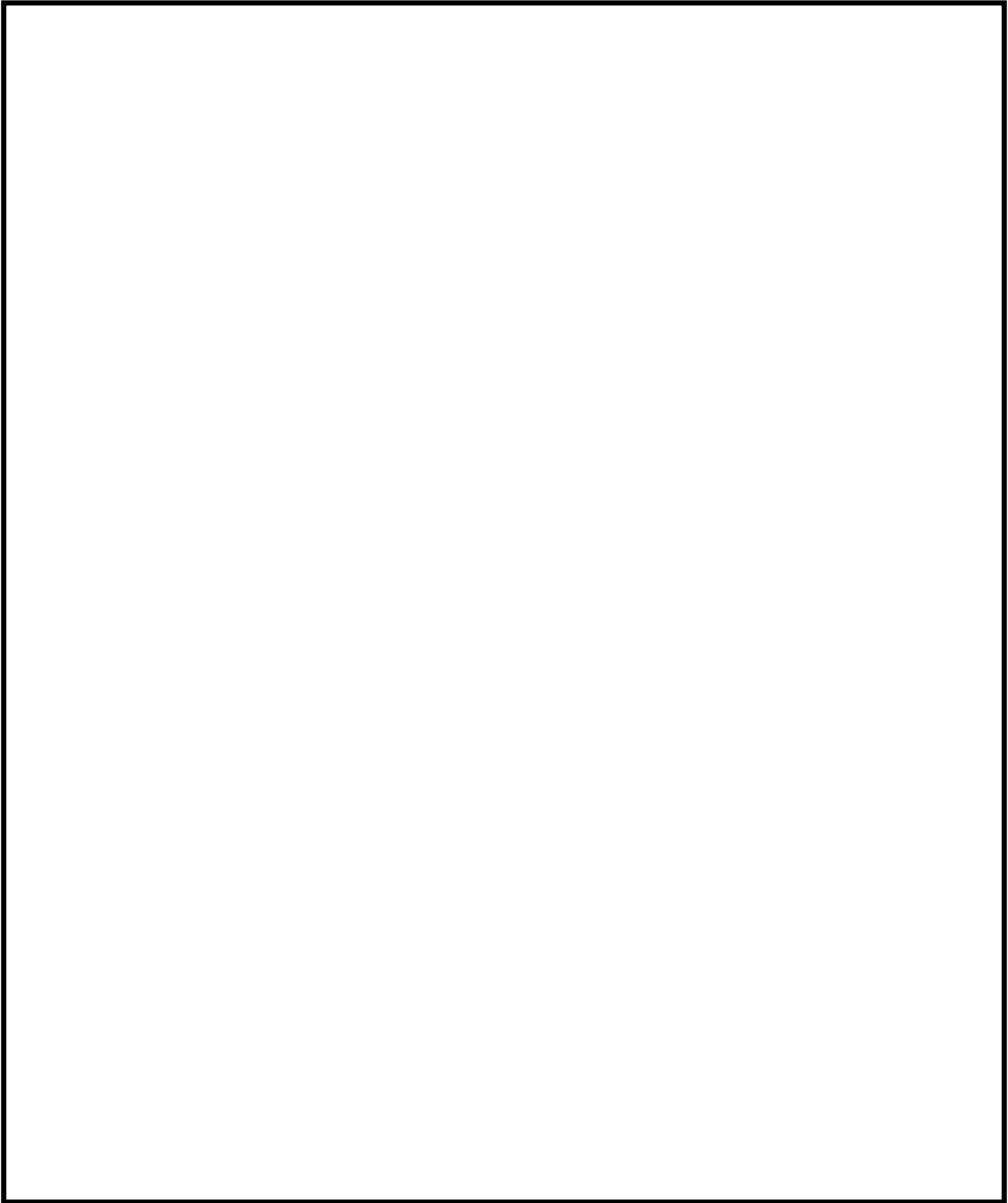


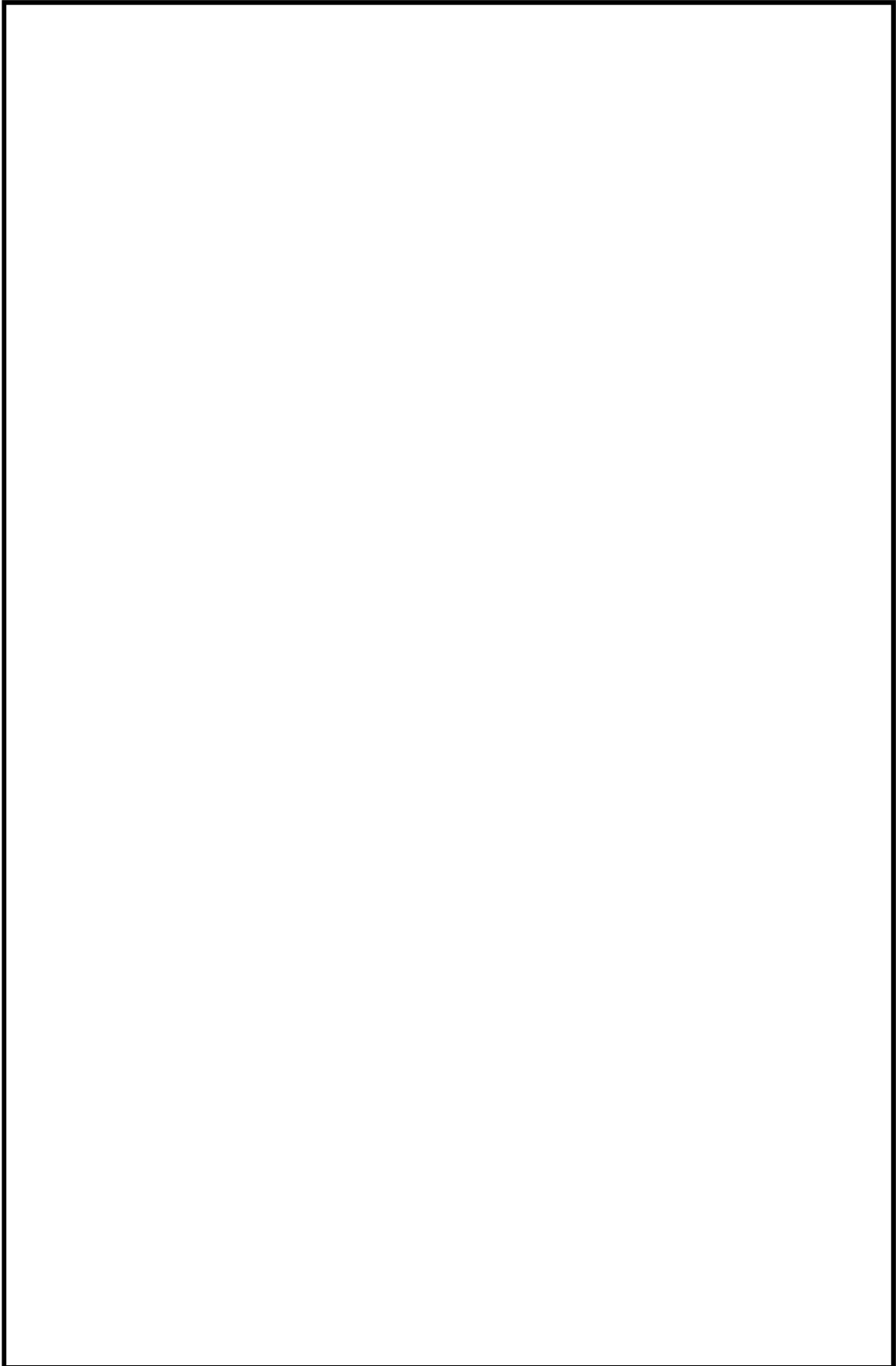


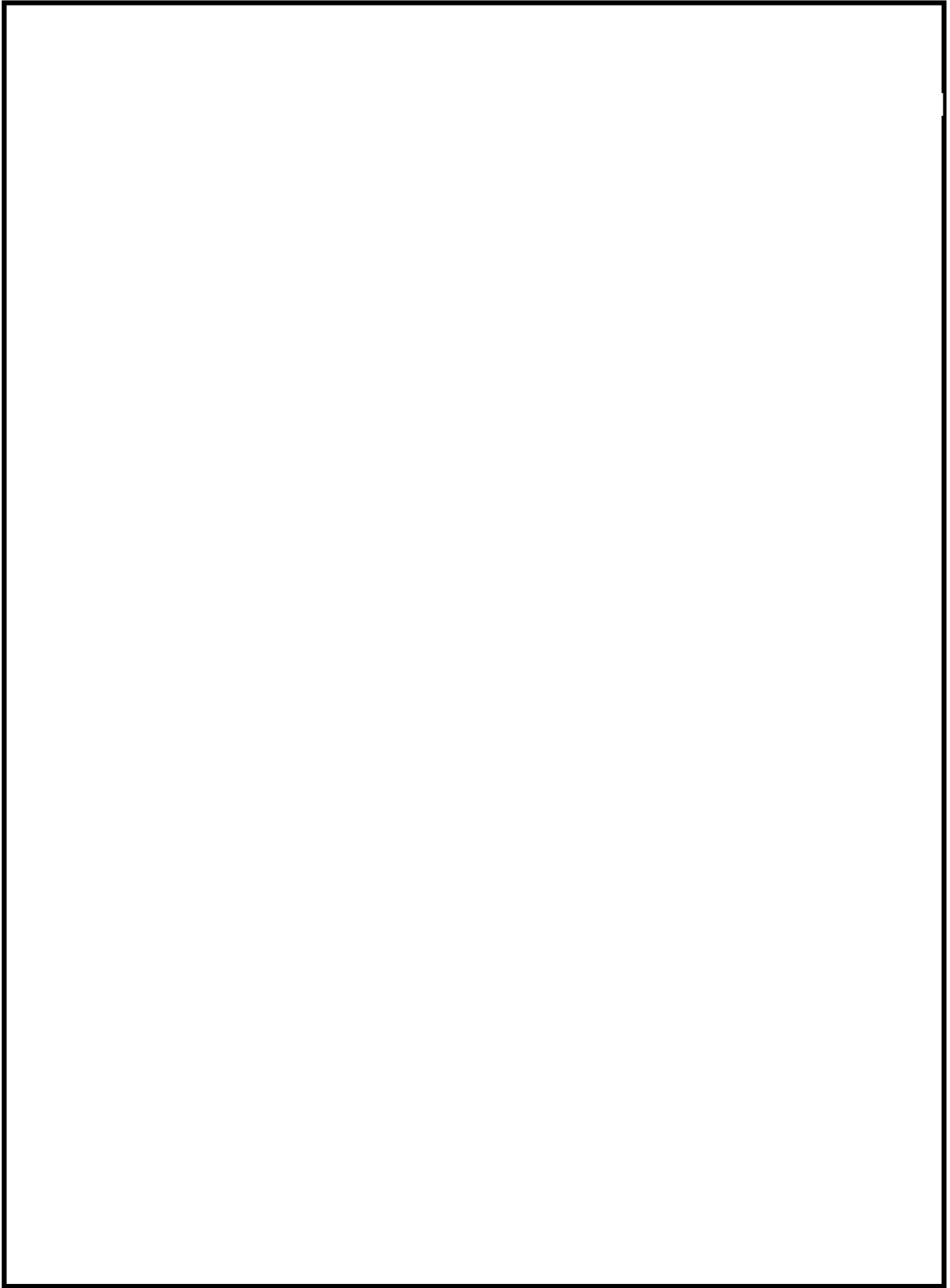


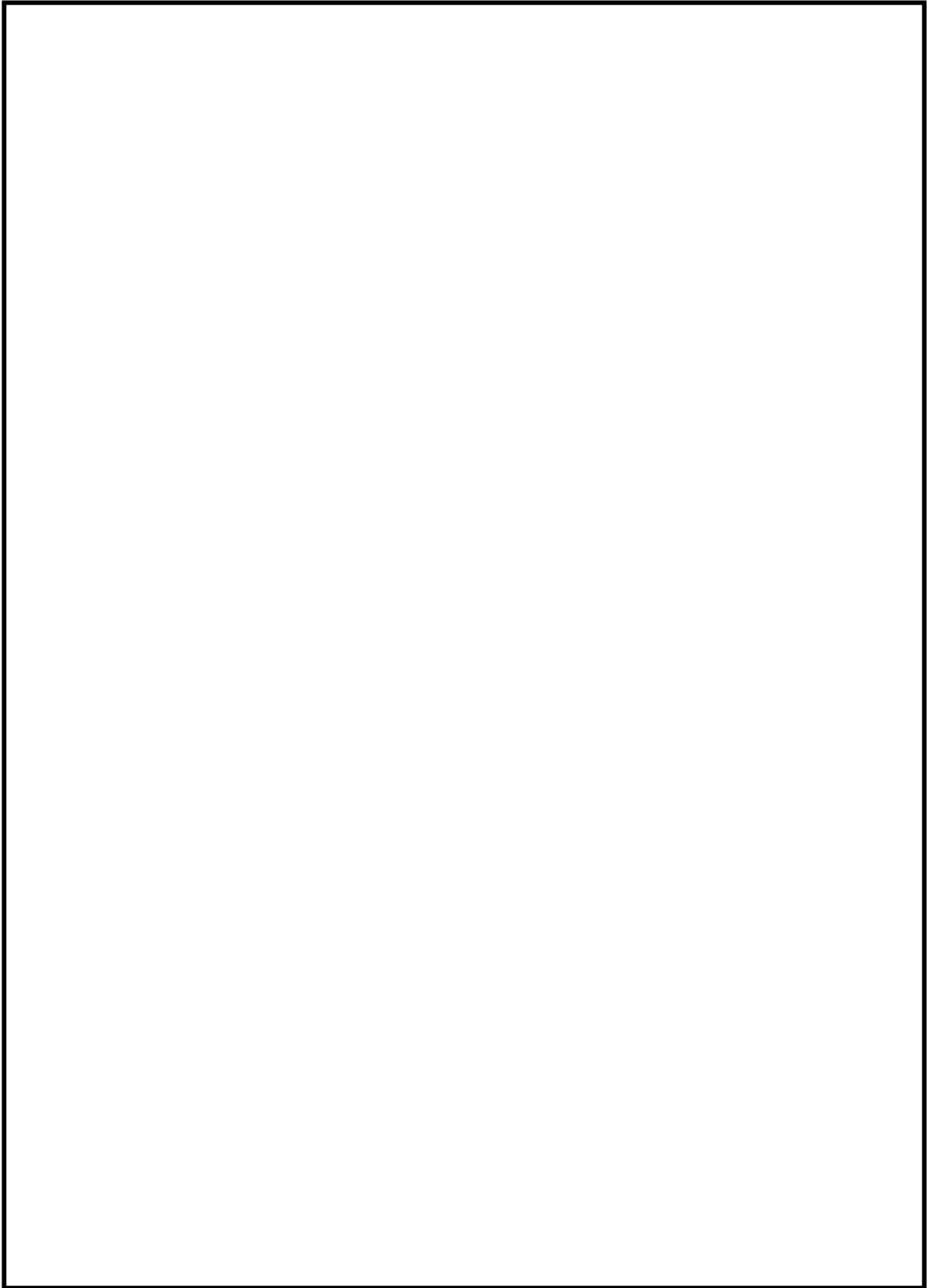


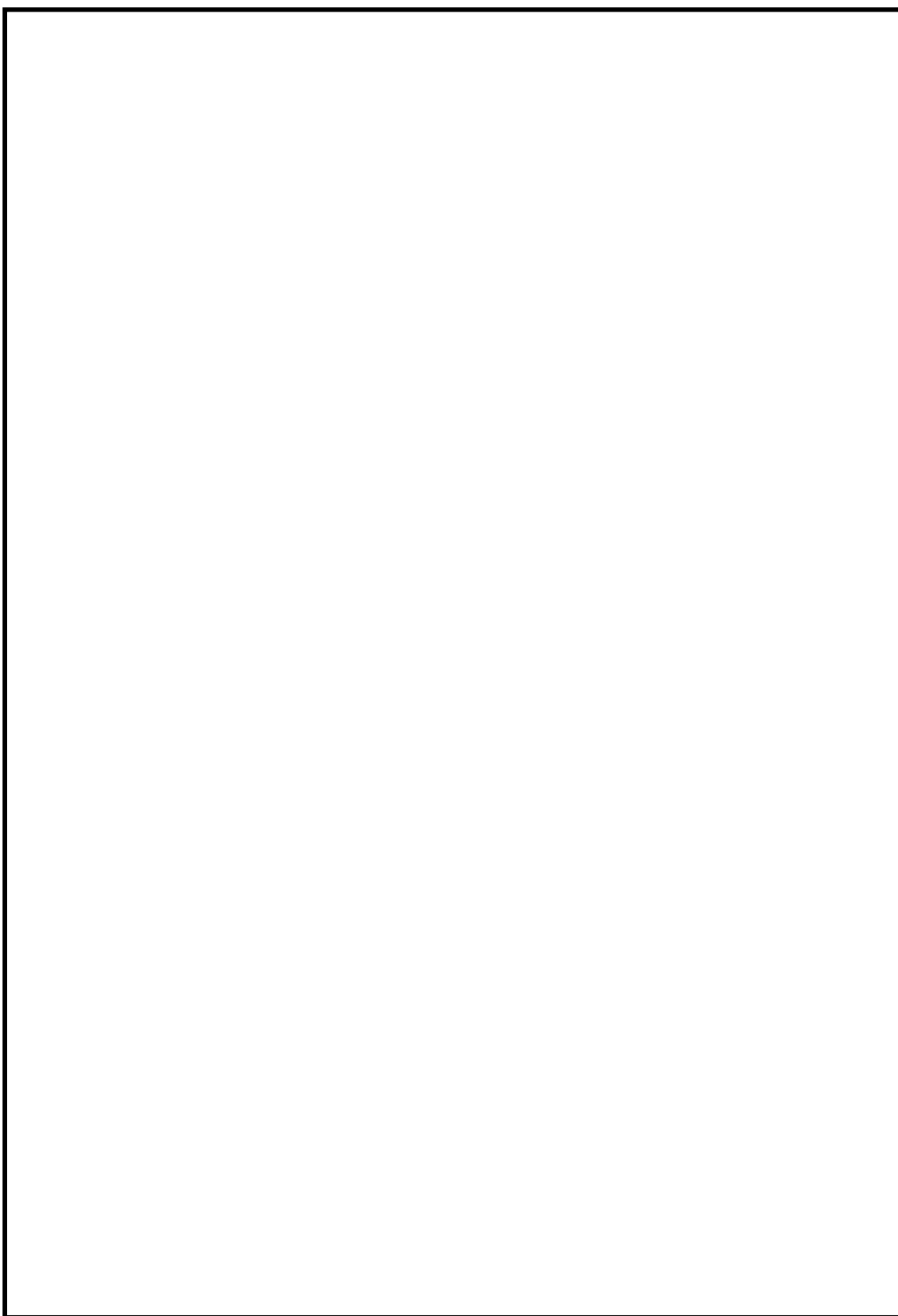


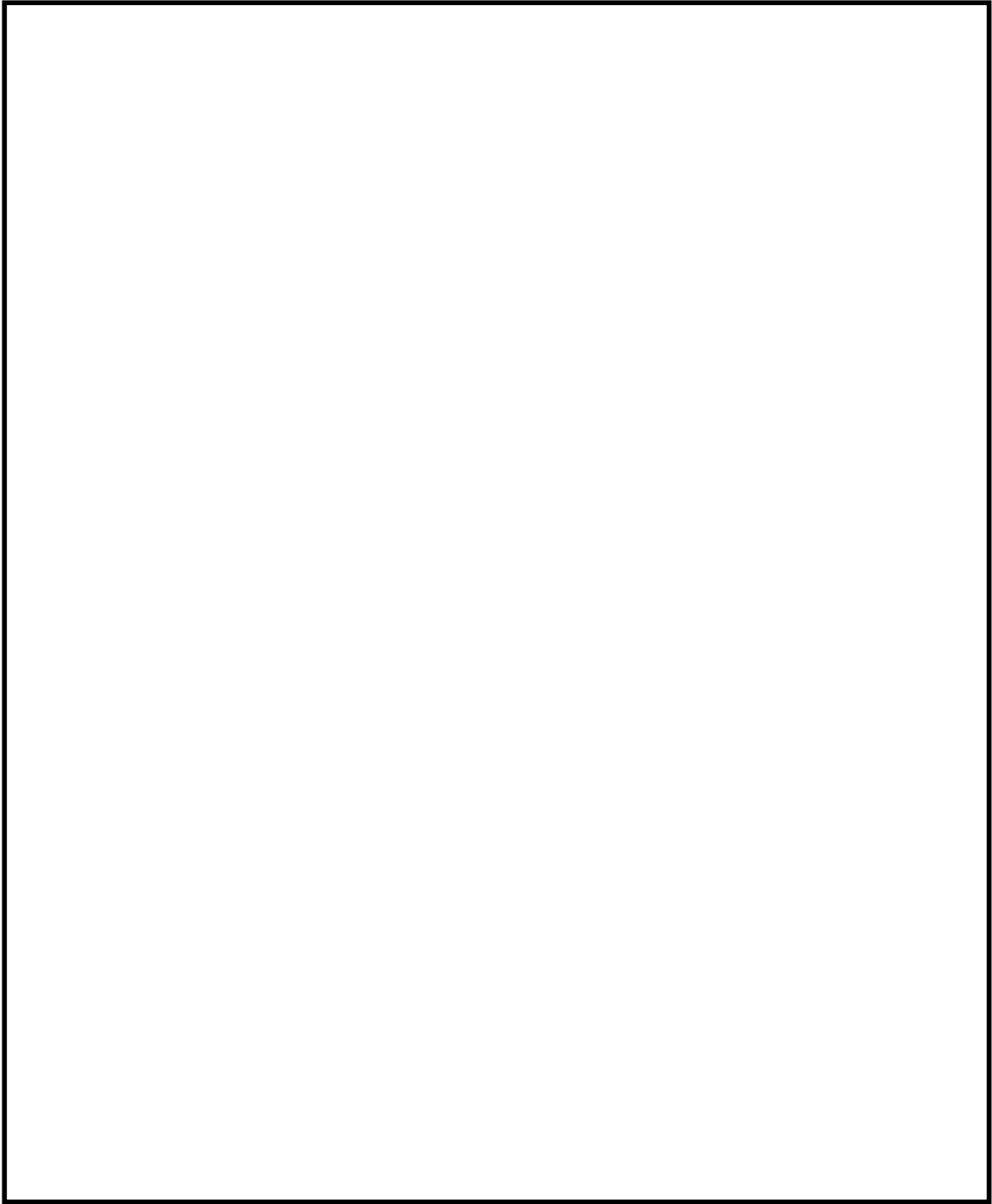


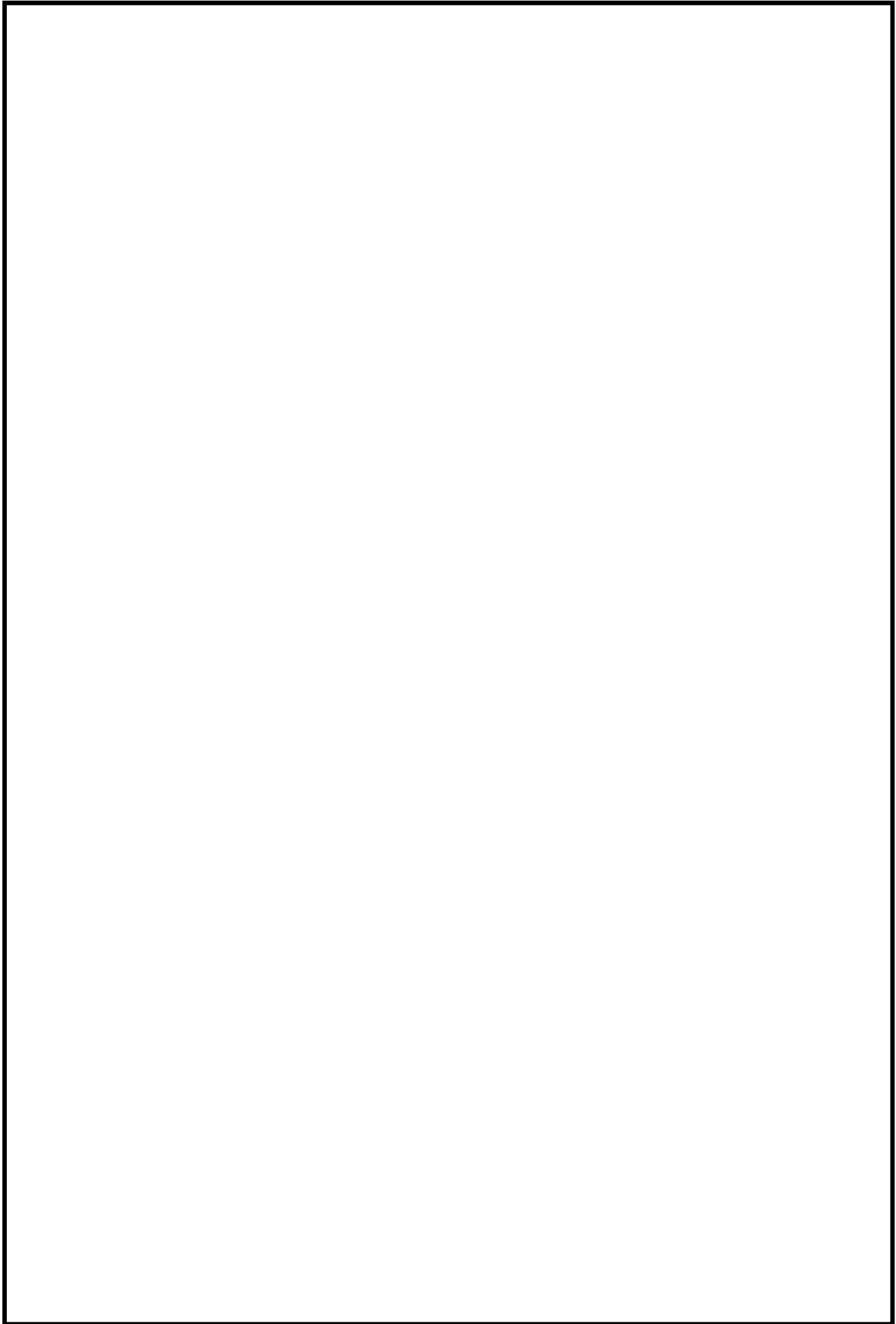


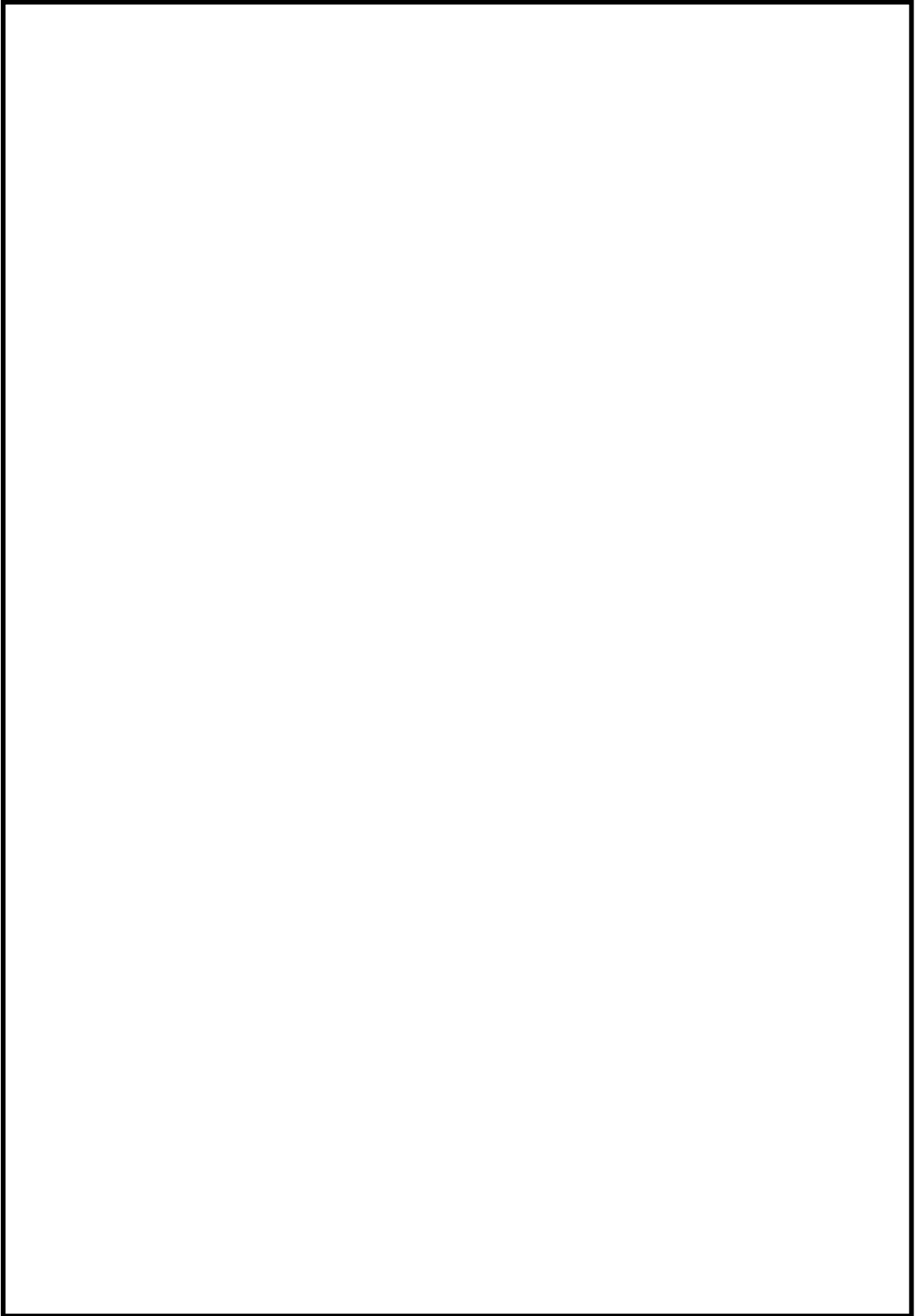


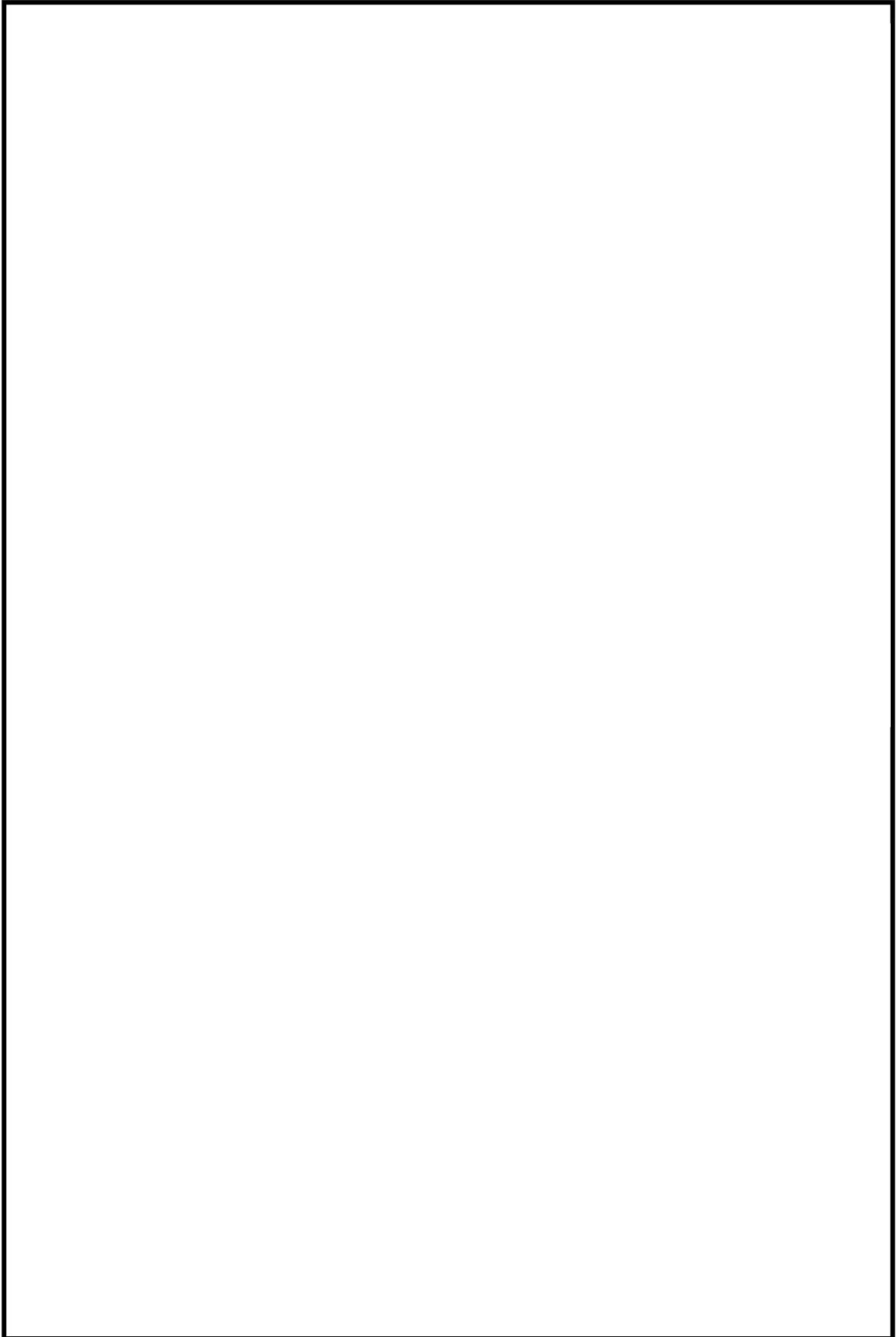


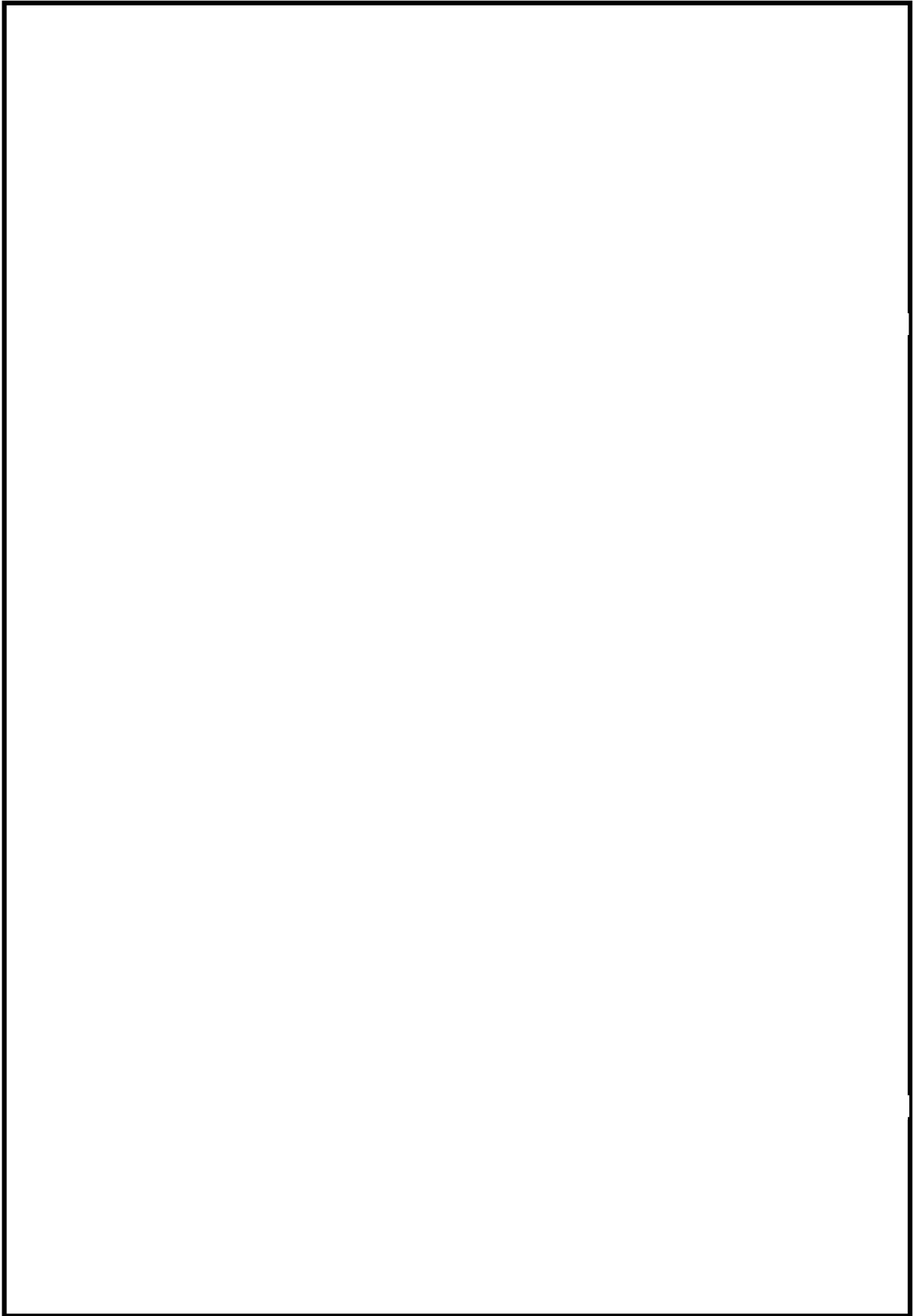


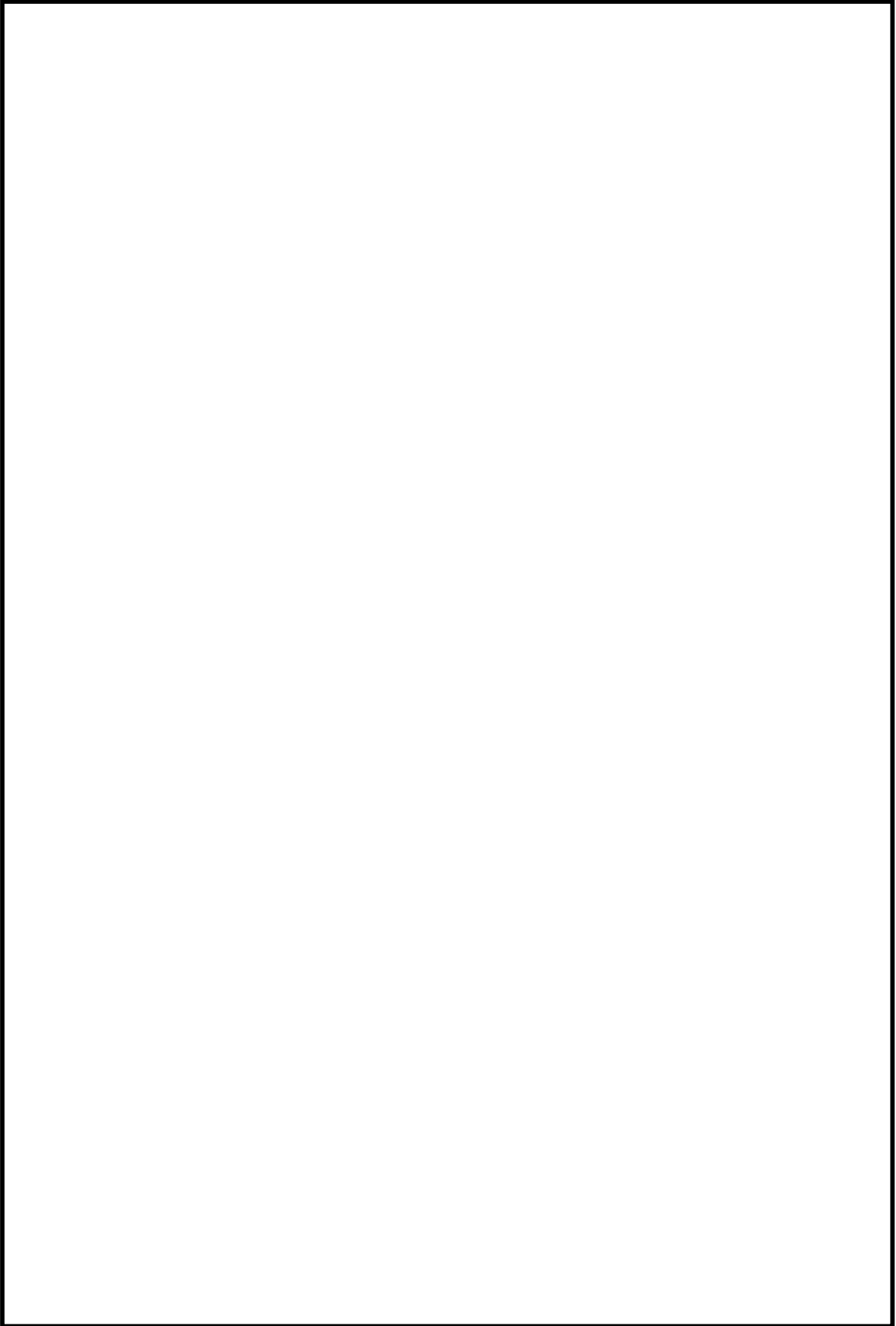




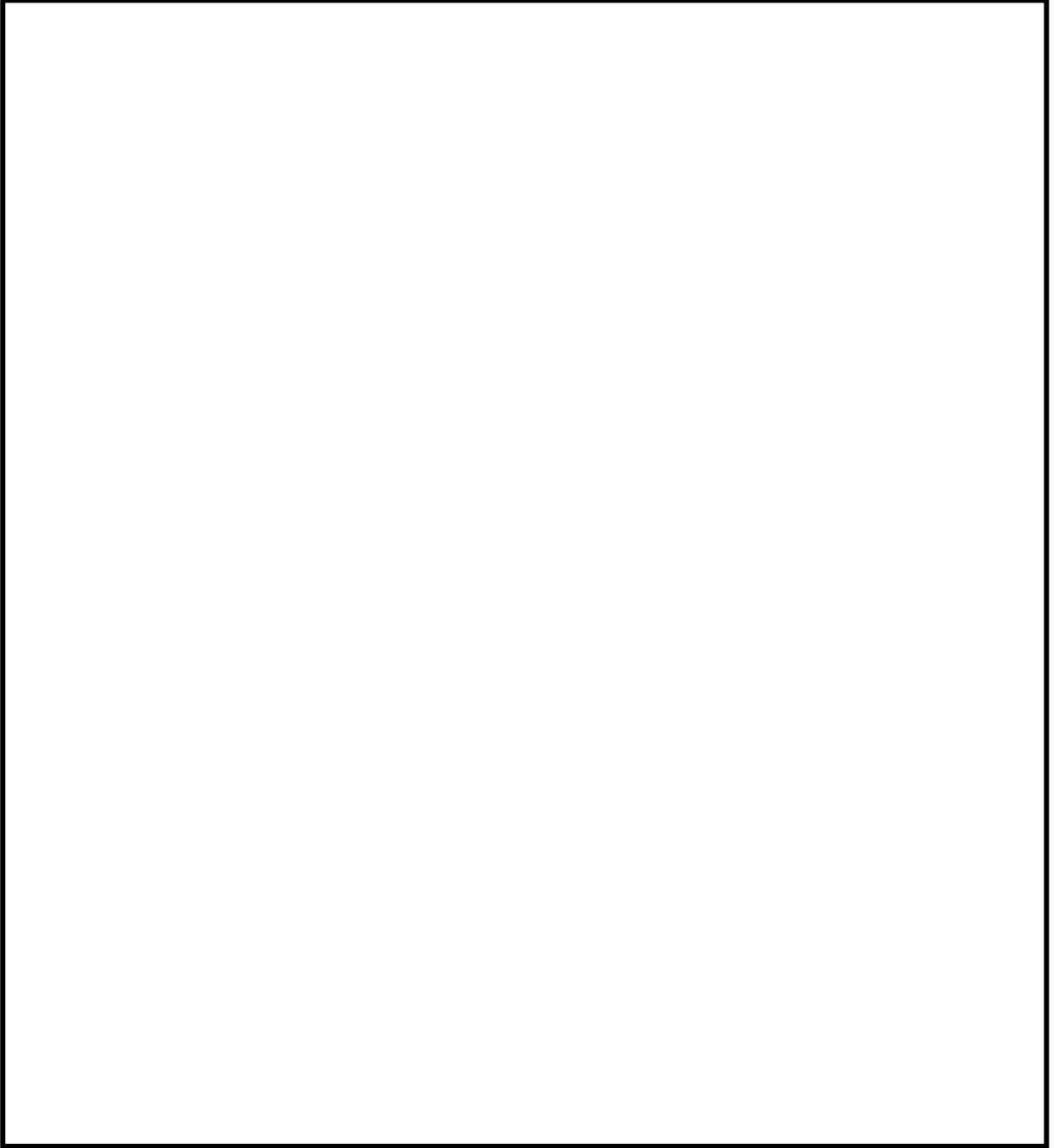


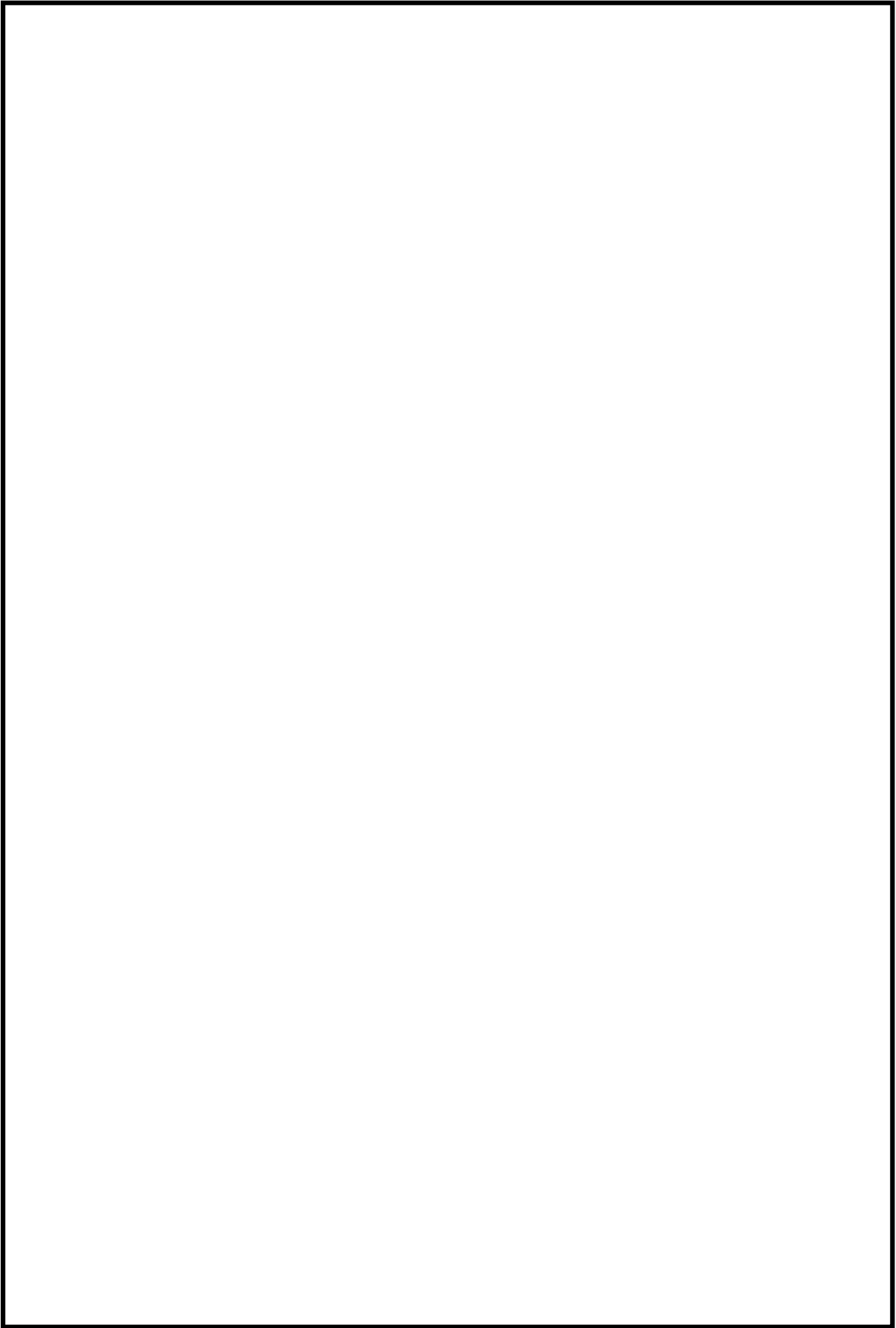












5. JNES研究の知見を踏まえた電共研の妥当性確認

5.1 JNES研究の試験方法

JNES研究におけるスナッパの耐力評価手法の構築に係る検討では、想定される損傷モード等を踏まえた試験対象型式選定や試験項目設定等を行ったうえで耐震機能限界試験を実施し、得られた試験結果に基づき耐力評価手法の構築の検討を行っている。こうした一連の検討プロセスは電共研のスナッパの限界耐力評価法に係る検討と同様である。(別紙4参照)

JNES研究における加振試験と、電共研における振動試験の試験条件の比較を表5-1に示す。どちらの試験も、加振後に低速走行試験を実施し、機能維持確認として低速走行時抵抗力を測定している。

表5-1に示すとおり、試験条件のうち加振波は、地震波を用いたケースを除き、JNES研究と電共研で同じ正弦波である。振動数はJNES研究よりも電共研の方が高いが、加振はどちらの試験も発生荷重を基準とした変位制御で行っているため、振動数の違いによる影響は小さいと考えられる。また、加振時間は電共研の方が短い、加振回数はいずれも100回程度と同等である。荷重条件は、どちらも定格荷重×1.5を上回る荷重(損傷したと判断されるまで)となっており同等である。よって、電共研の振動試験の試験条件は、JNES研究の加振試験の試験条件と同等と考えられる。また、電共研とJNES研究において試験体として選定したスナッパの仕様の比較を表5-2に示す。

表5-1 電共研とJNES研究の試験条件の比較

比較項目	電共研 振動試験	JNES研究 加振試験
加振波	正弦波	
振動数	9Hz	
加振時間	10秒程度	
荷重	荷重を段階的に増加 (損傷したと判断されるまで)	
計測項目	動剛性、低速走行時抵抗力	
加振開始位置	ストローク 1/2 (中央)	

表 5-2 スナッパ試験体仕様の比較

試験種類	電共研		J N E S 研究	
	型式	試験体 No.	型式	試験体 No.
振動試験	SMS-03	SMS-03-1		
	SMS-1	SMS-1-1		
	SMS-3	SMS-3-1~3		
	SMS-6	SMS-6-1		
	SMS-10	SMS-10-1		
	—	—		
	SHP-03	SHP-03-1		
	SHP-3	SHP-3-1~3		
	—	—		
	SHP-16	SHP-16-1		
	—	—		
	SN-03	SN-03-1		
	SN-3	SN-3-1~3		
	—	—		
	SN-6	SN-6		
	SN-16	SN-16		
—	—			
座屈試験	SMS-03	—		
	SHP-03			
	SN-03			

5.2 J N E S 研究の試験結果

電共研における耐力確認荷重及び限界耐力値と J N E S 研究における耐力確認荷重及び耐力値との比較を表 5-3 に示す。なお、J N E S 研究の耐力値は、J N E S にて加振試験を実施するにあたり、過去の知見を収集し、型式ごとに構造部材と機能部品の耐力値を算定した最小値である。(添付-1 参照) また、耐力確認荷重及び耐力値の定義は電共研と J N E S 研究で同様である。

表 5-3 に示すとおり、スナッパが損傷に至るまで加振できなかった型式を除き、J N E S 研究における耐力値は電共研の限界耐力値と同等であることが確認できる。また、J N E S 研究における耐力確認荷重についても、電共研で策定した限界耐力値より大きな値が確認されており、電共研で策定した限界耐力値の妥当性が確認できる。

なお、表中の電共研及び J N E S 研究の最小裕度部品は、各部品の耐力評価により裕度が最小となった部品を表しているが、一部の型式については、耐力評価に使用する計算式の考え方が両方で異なるものがある(例えば、表 5-3 の注記*4 に記載したボールねじの断面積など、J N E S 研究では計算を簡略化している場合がある) ため、電共研と J N E S 研究との最小裕度部品も異なるものがある。なお、スナッパは概ね型式によらず、使用する構成部品の種類や組合せを標準化した製品であり、各構成部品のサイズは要求される定格荷重に応じて設定されているが、製作性等を考慮し、構成部品の一部に共通して同じサイズのものを使用しているものや、材質を変更しているものが含まれる等の理由から、型式ごとの最小裕度部品が異なっている。

以上より、J N E S 研究の試験結果を含めた知見として比較しても、電共研の限界耐力値を含めたスナッパの限界耐力評価法に係る検討及びその知見は妥当であると考えられる。

表 5-3 電共研の限界耐力値と J N E S 研究における耐力値及び耐力確認荷重との比較 (1/3)

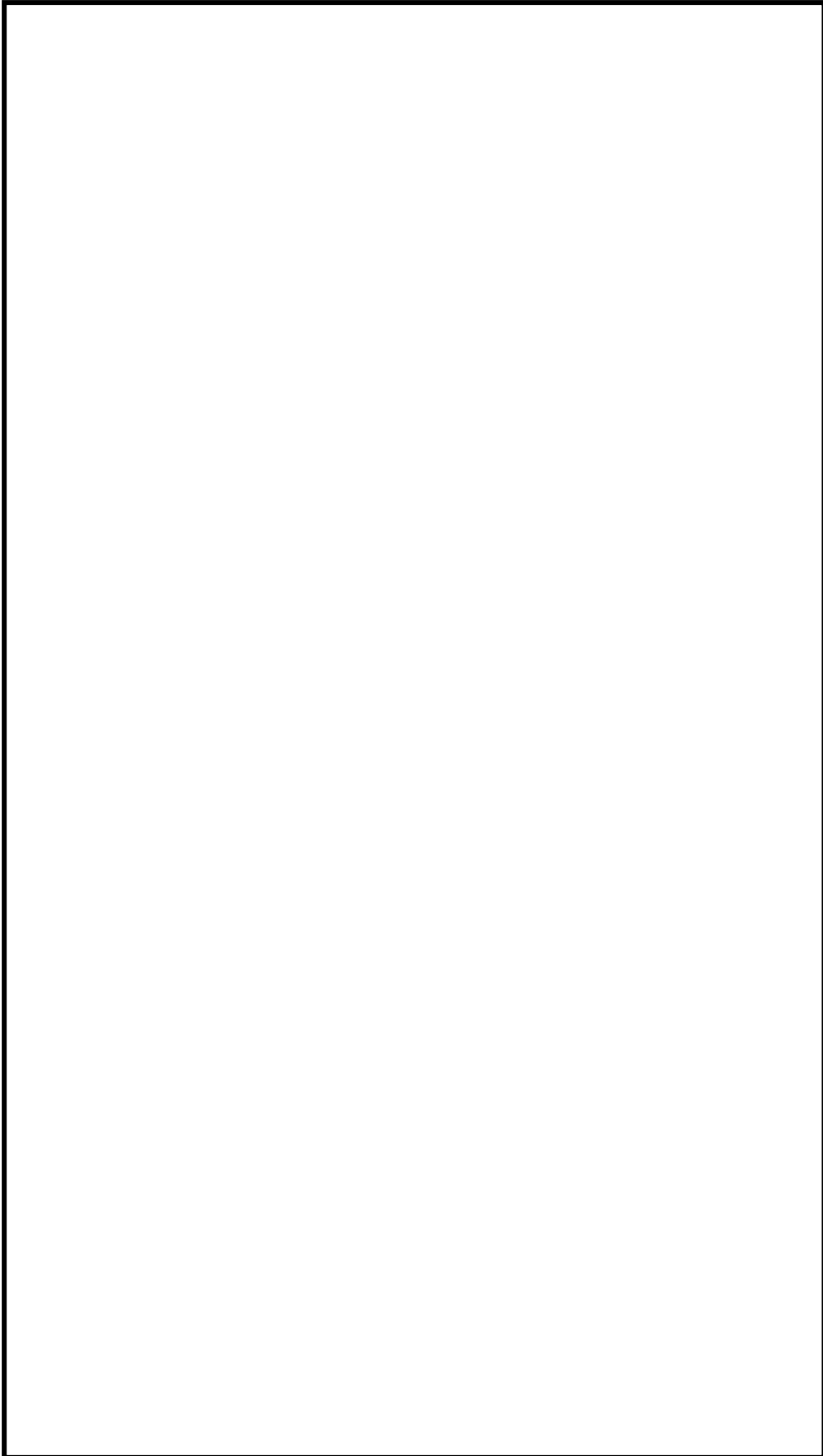
型式	定格荷重 (kN)	電共研				J N E S 研究				J N E S 耐力値 / 電共研限界耐力値 [D/B]
		耐力確認荷重 (kN) [A]	限界耐力値 (kN) [B]	最小裕度部品	最小裕度部品の分類	耐力確認荷重 (kN) [C]	耐力値 (kN) [D]	最小裕度部品	最小裕度部品の分類	
SMS-01	1	—	19.0	六角ボルト	構造部材					
SMS-03	3	29.9	18.8	六角ボルト	構造部材					
SMS-06	6	—	16.8	ベアリング押さえ*2	構造部材					
SMS-1	10	56.2	53.9	コネクティングチューブ	構造部材					
SMS-3	30	94.2	75.3	アンギュラ玉軸受*3	機能部品					
SMS-6	60	190.5	170.6	ベアリング押さえ*2	構造部材					
SMS-10	100	244.7	224.5	ベアリング押さえ*2	構造部材					
SMS-16	160	—	344.2	ベアリング押さえ*2	構造部材					
SMS-25	250	—	490.3	ベアリング押さえ*2	構造部材					
SMS-40	400	—	941.4	コネクティングチューブ	構造部材					
SMS-60	600	—	1353.3	ダイレクトアタッチブラケット*4	構造部材					

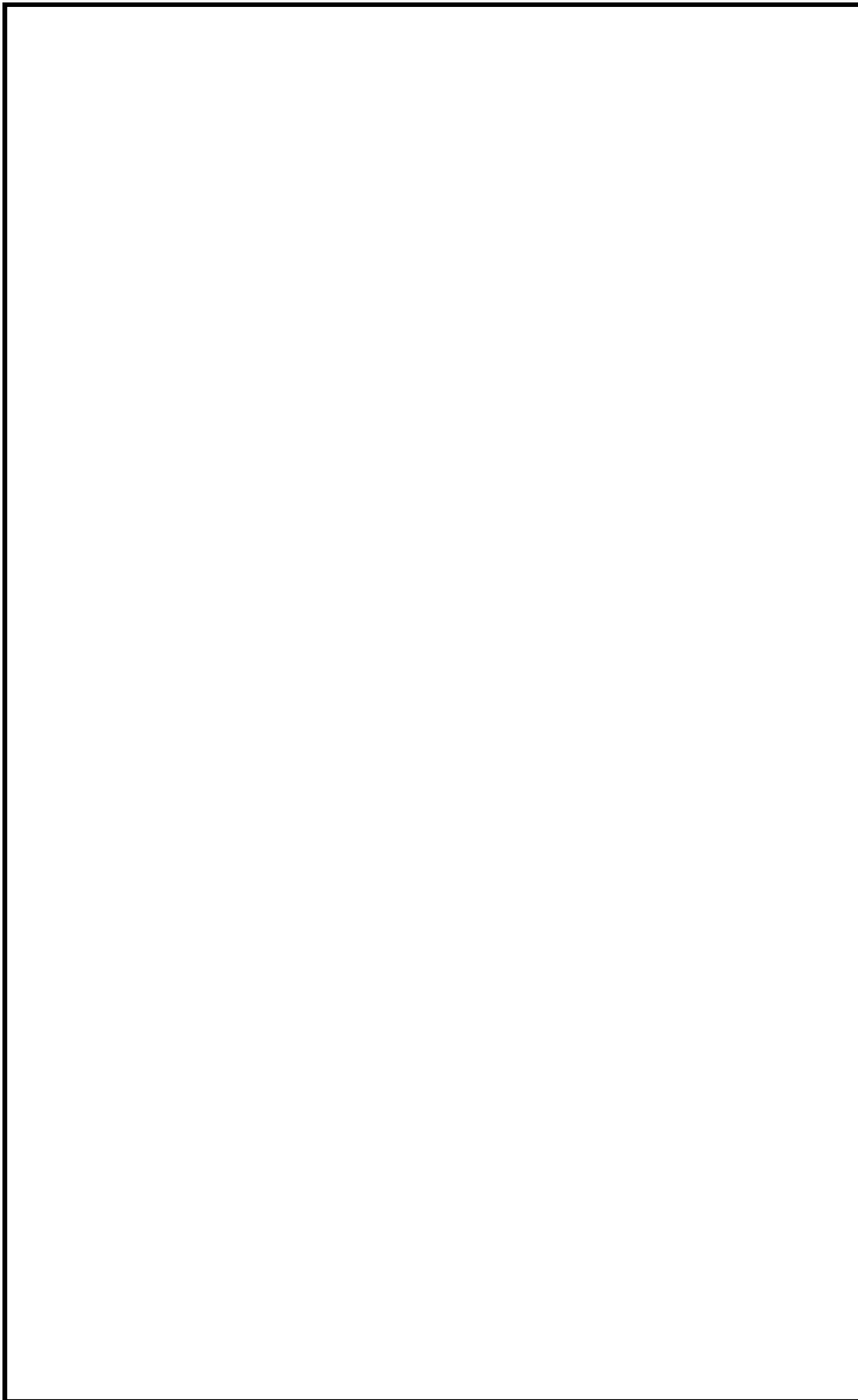
表 5-3 電共研の限界耐力値と J N E S 研究における耐力値及び耐力確認荷重との比較 (2/3)

型式	定格荷重 (kN)	電共研			J N E S 研究				J N E S 耐力値 / 電共研限界耐力値 [D/B]
		耐力確認荷重 (kN) [A]	限界耐力値 (kN) [B]	最小裕度部品の分類	耐力確認荷重 (kN) [C]	耐力値 (kN) [D]	最小裕度部品の分類	耐力確認荷重 / 電共研限界耐力値 [C/B]	
SHP-03	3	17.4	5.3	全長座屈*6	構造部材				
SHP-06	6	—	14.1	全長座屈*6	構造部材				
SHP-1	10	—	22.7	全長座屈	構造部材				
SHP-3	30	69.3	50.8	全長座屈	構造部材				
SHP-6	60	—	141.8	全長座屈	構造部材				
SHP-10	100	—	196.1	全長座屈	構造部材				
SHP-16	160	388.2	318.7	全長座屈	構造部材				
SHP-25	250	—	514.8	ターンバックル	構造部材				

表 5-3 電共研の限界耐力値と J N E S 研究における耐力値及び耐力確認荷重との比較 (3/3)

型式	定格荷重 (kN)	電共研			J N E S 研究				J N E S 耐力値 / 電共研限界耐力値 [D/B]
		耐力確認荷重 (kN) [A]	限界耐力値 (kN) [B]	最小裕度部品の種類	耐力確認荷重 (kN) [C]	耐力値 (kN) [D]	最小裕度部品の種類	最小裕度部品の種類	
SN-03	3	20.3	9.1	全長座屈	構造部材				
SN-06	6	—	16.4	全長座屈	構造部材				
SN-1	10	—	26.2	全長座屈	構造部材				
SN-3	30	89.3	70.6	全長座屈	構造部材				
SN-6	60	144.1	125.5	タイロッド (シール性) *7	機能部品				
SN-10	100	—	205.9	ジャンクションコラムアダプタ	構造部材				
SN-16	160	409.1	321.6	タイロッド (シール性) *7	機能部品				
SN-25	250	—	465.8	ダイレクタートイヤー**8	構造部材				

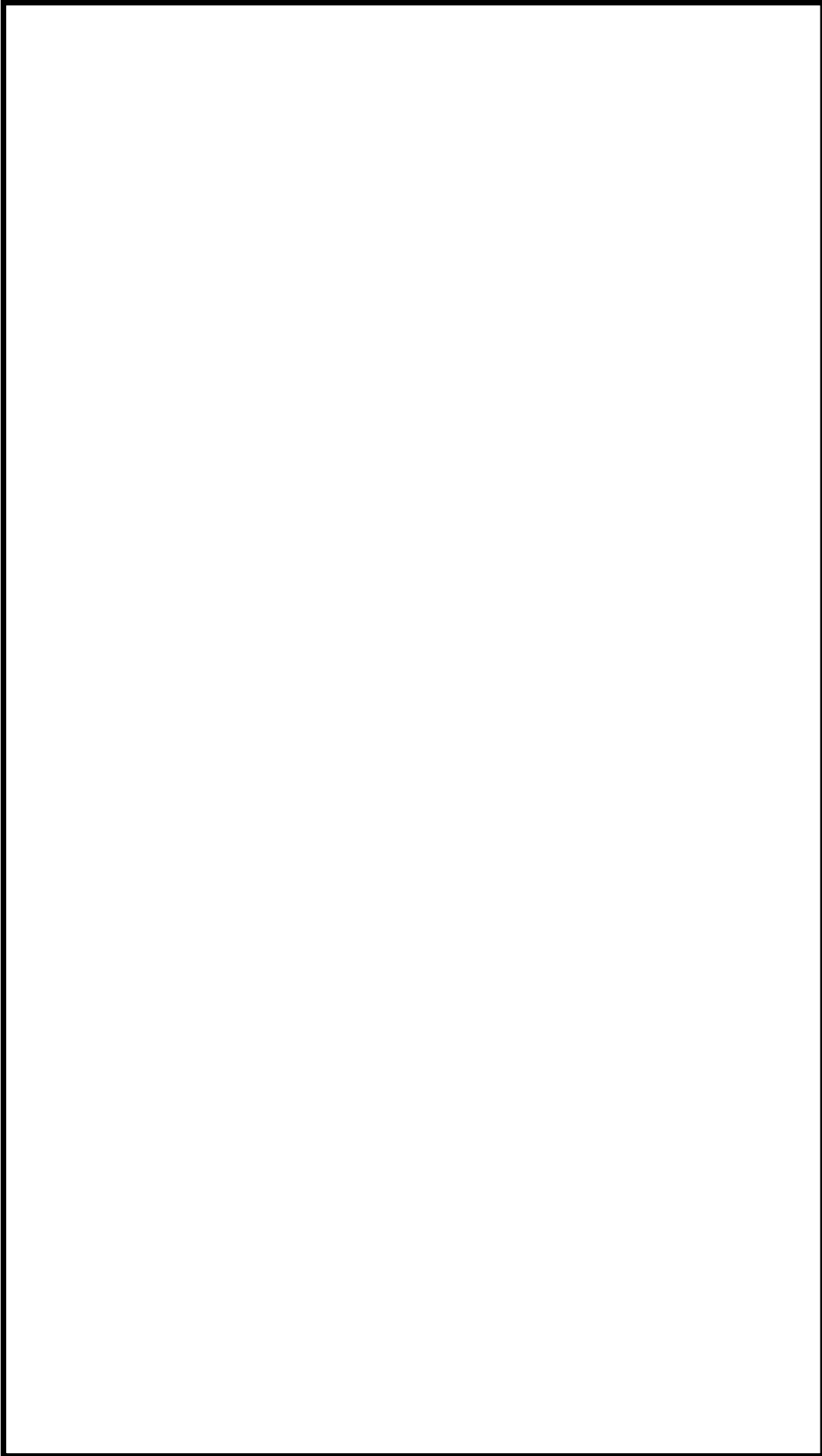


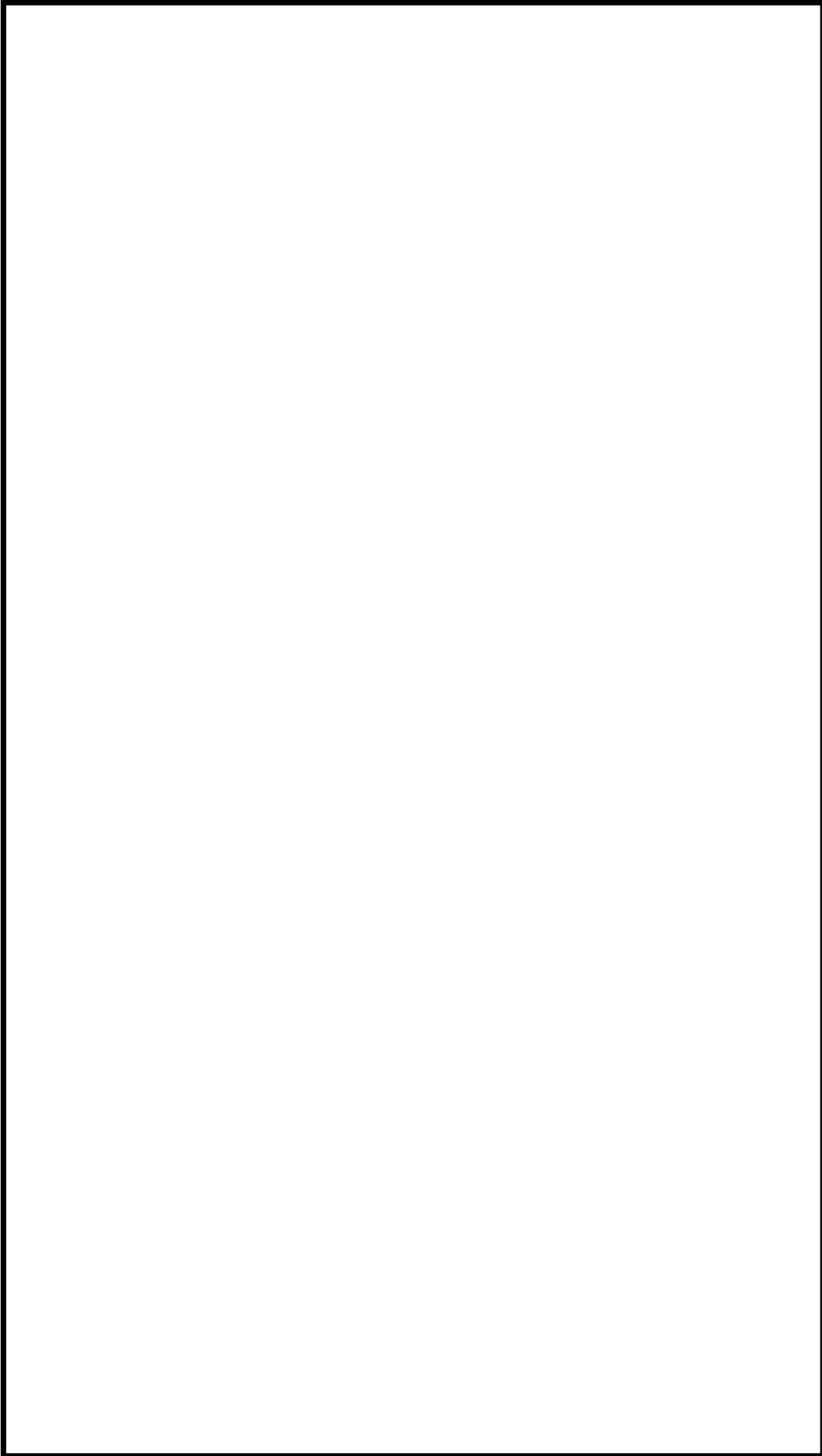


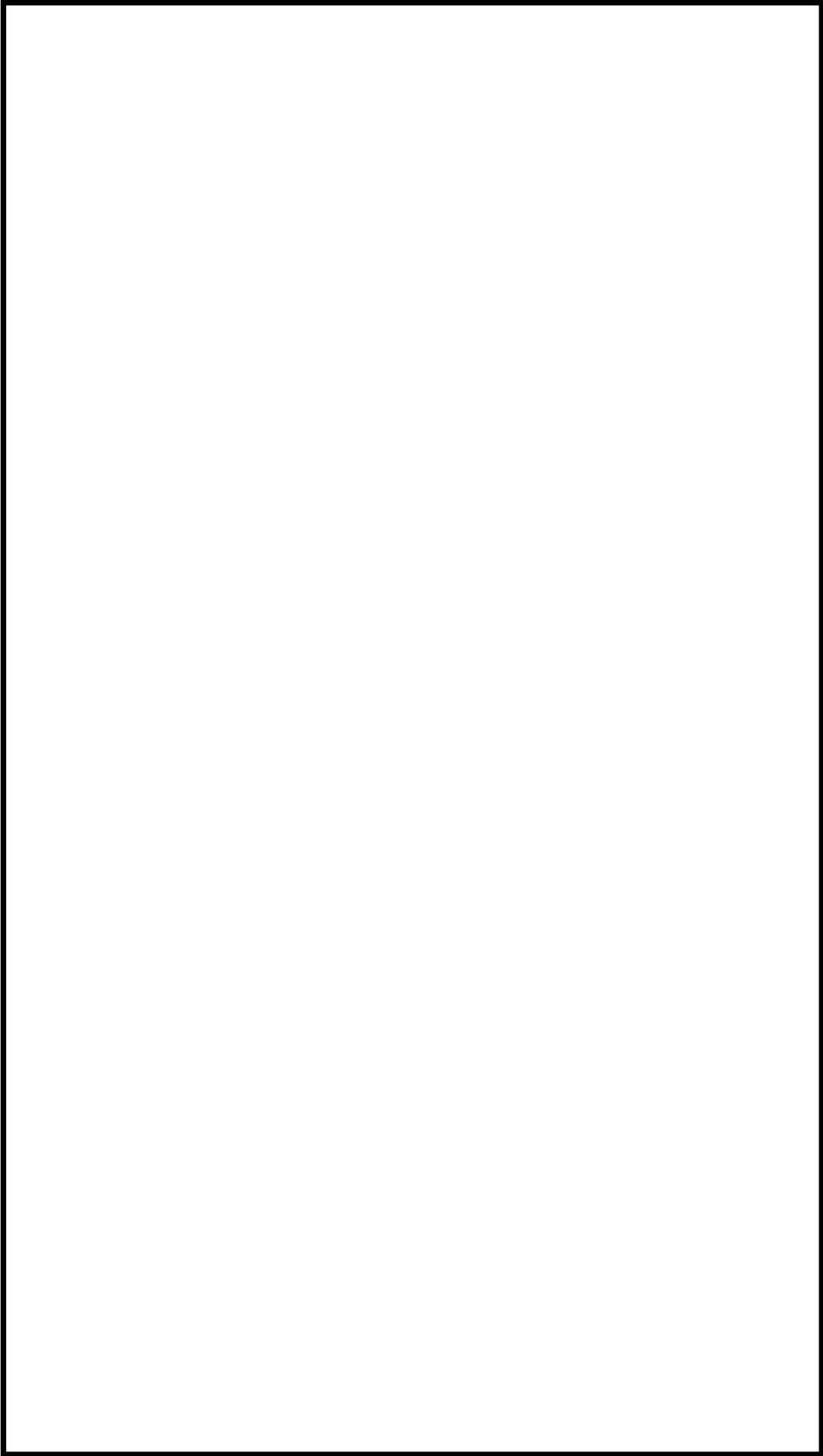
6. まとめ

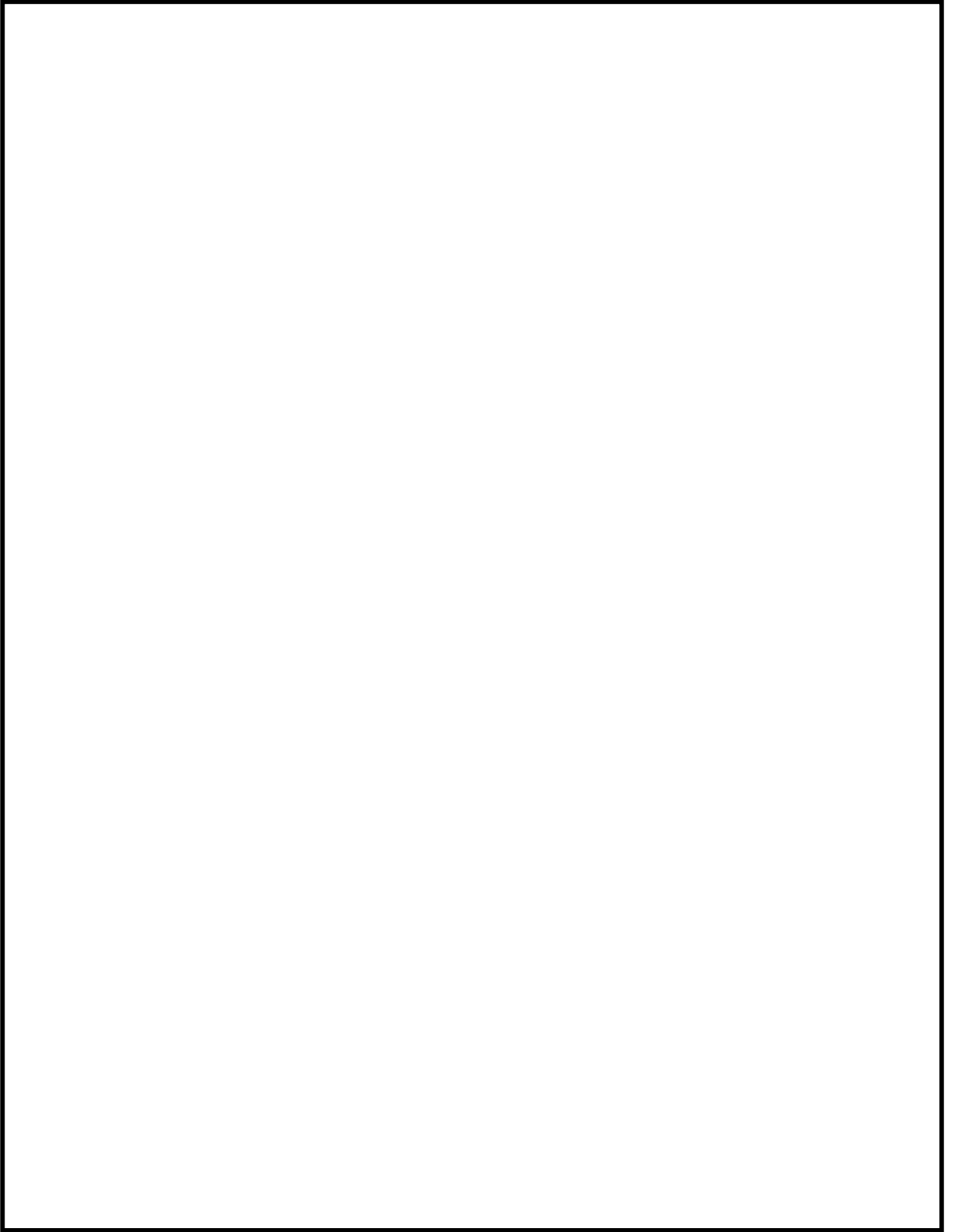
JNES研究におけるスナッパの耐震機能限界試験を含む耐力評価手法の構築に係る検討の概要をまとめるとともに、その検討プロセスや耐力確認荷重等について、電共研のスナッパの限界耐力評価法に係る検討との比較を行った。

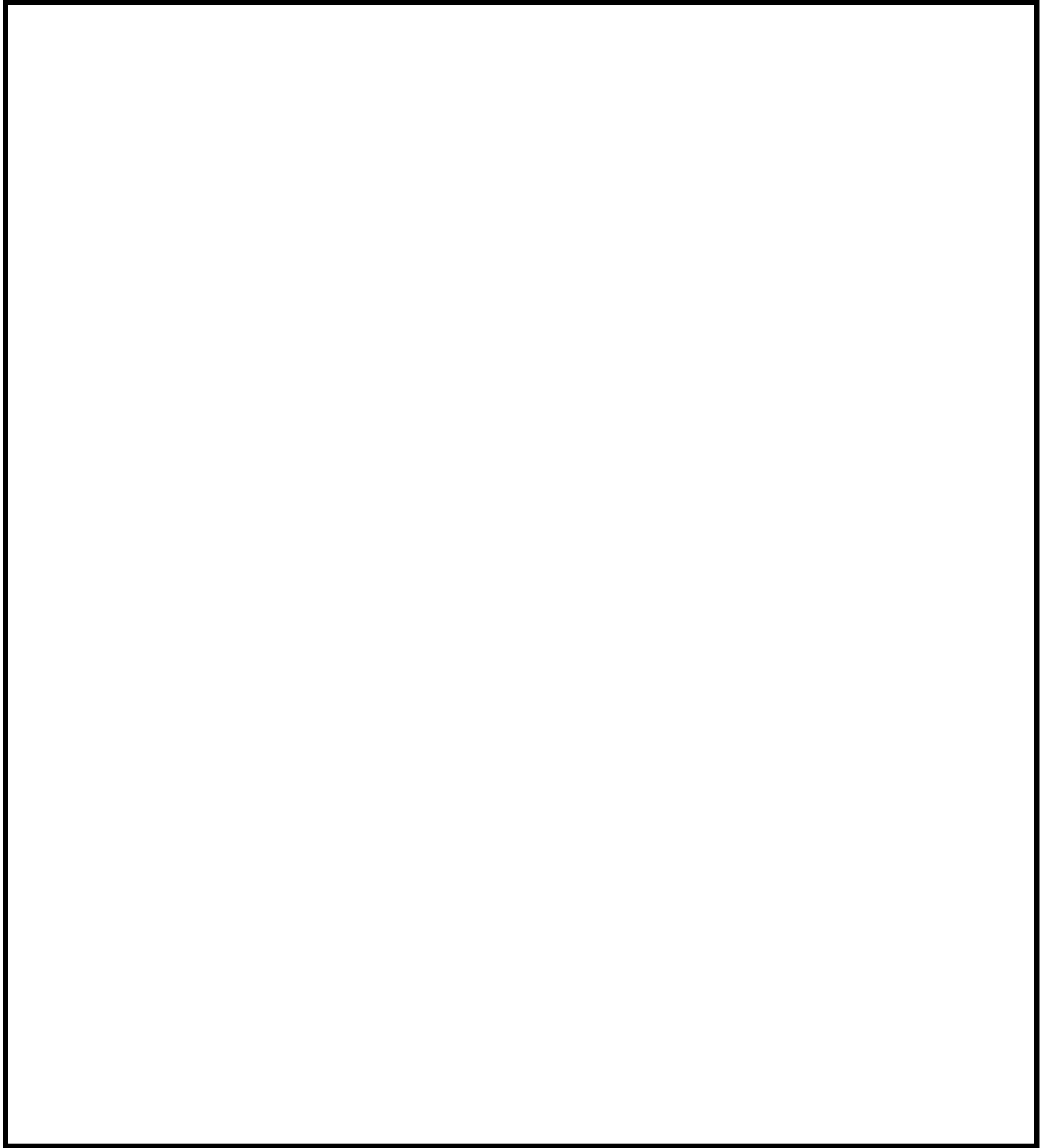
その結果、JNES研究の知見を考慮しても、電共研の限界耐力値を含めたスナッパの限界耐力評価法に係る検討は妥当であることを確認した。

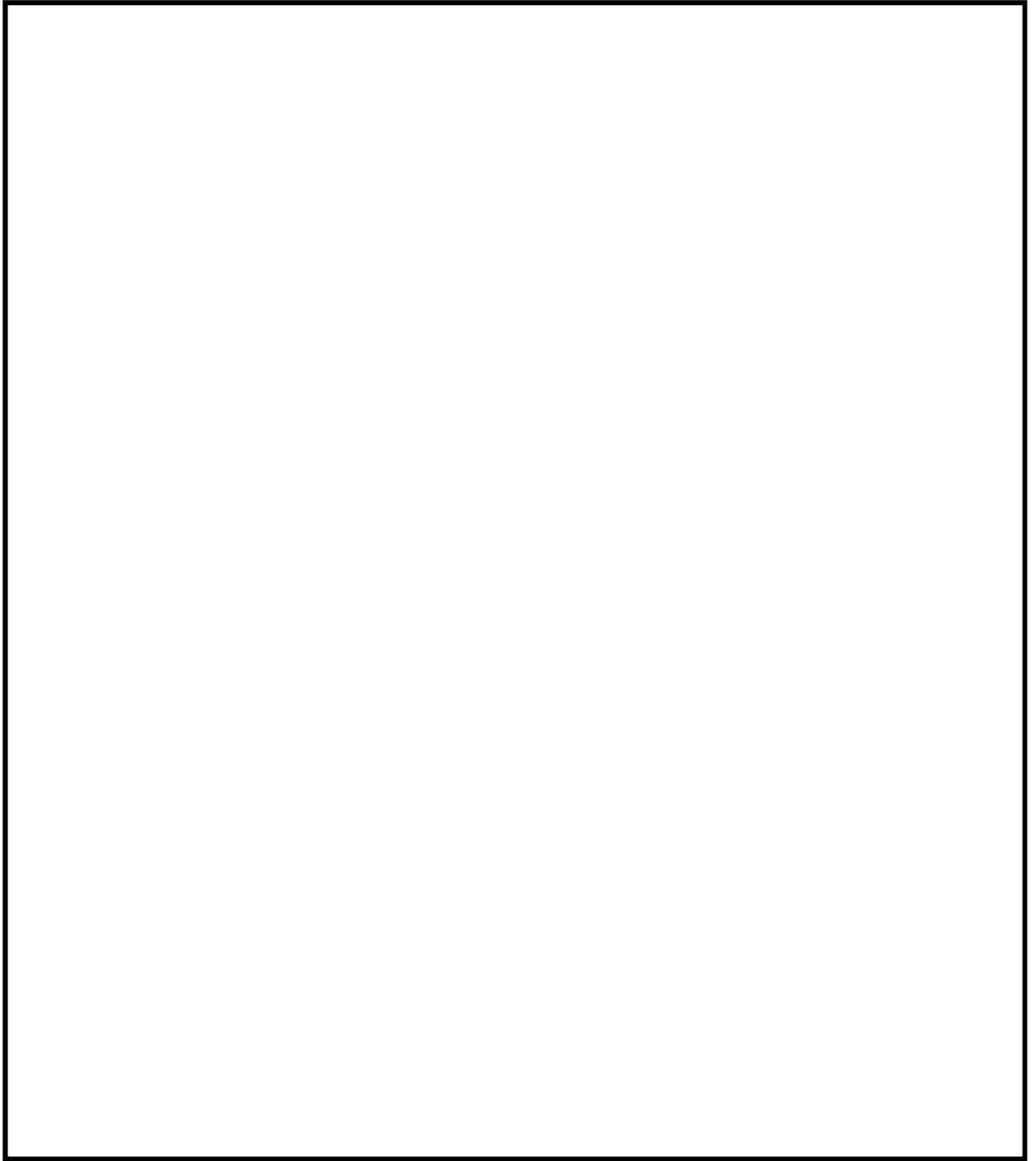


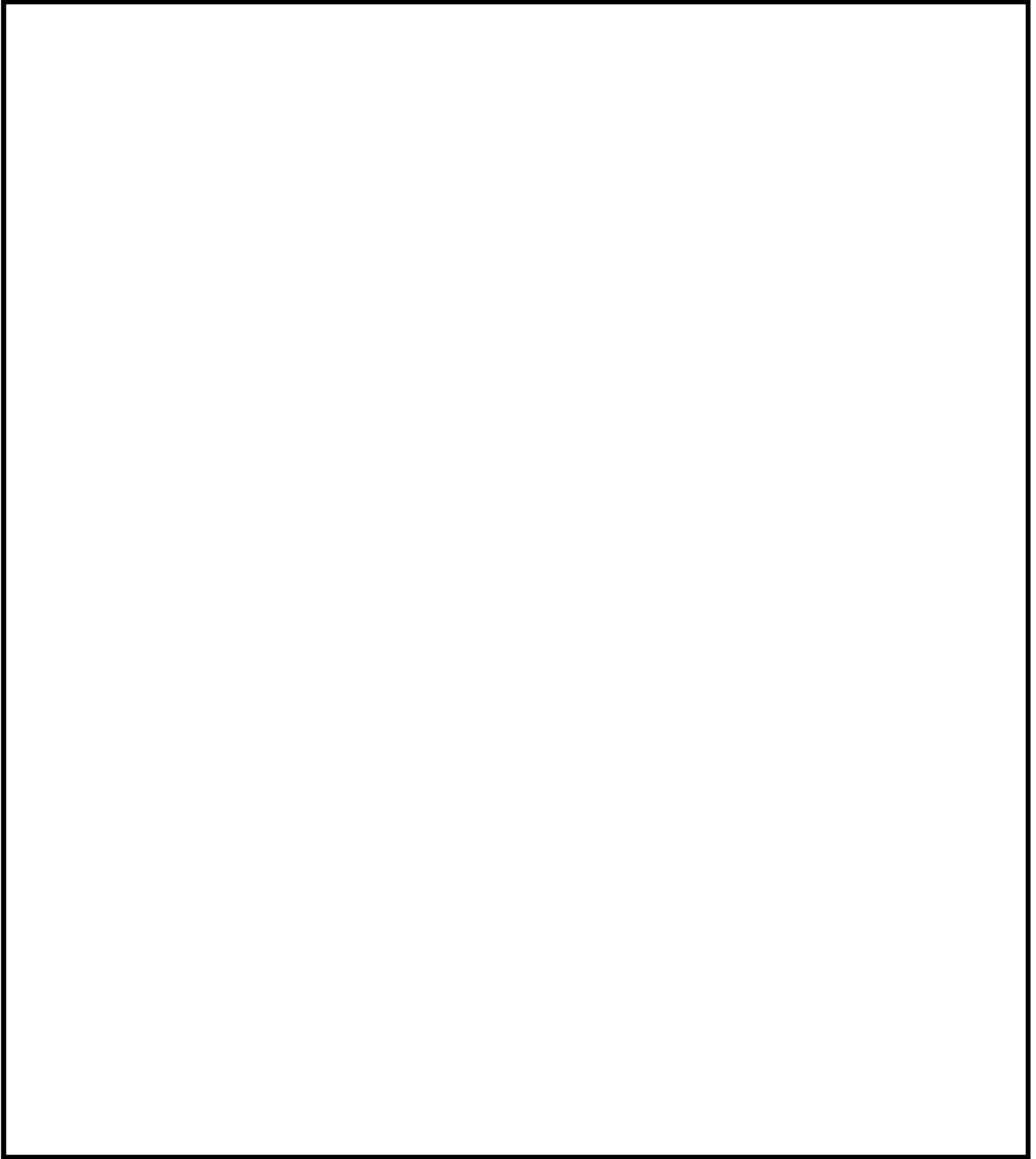


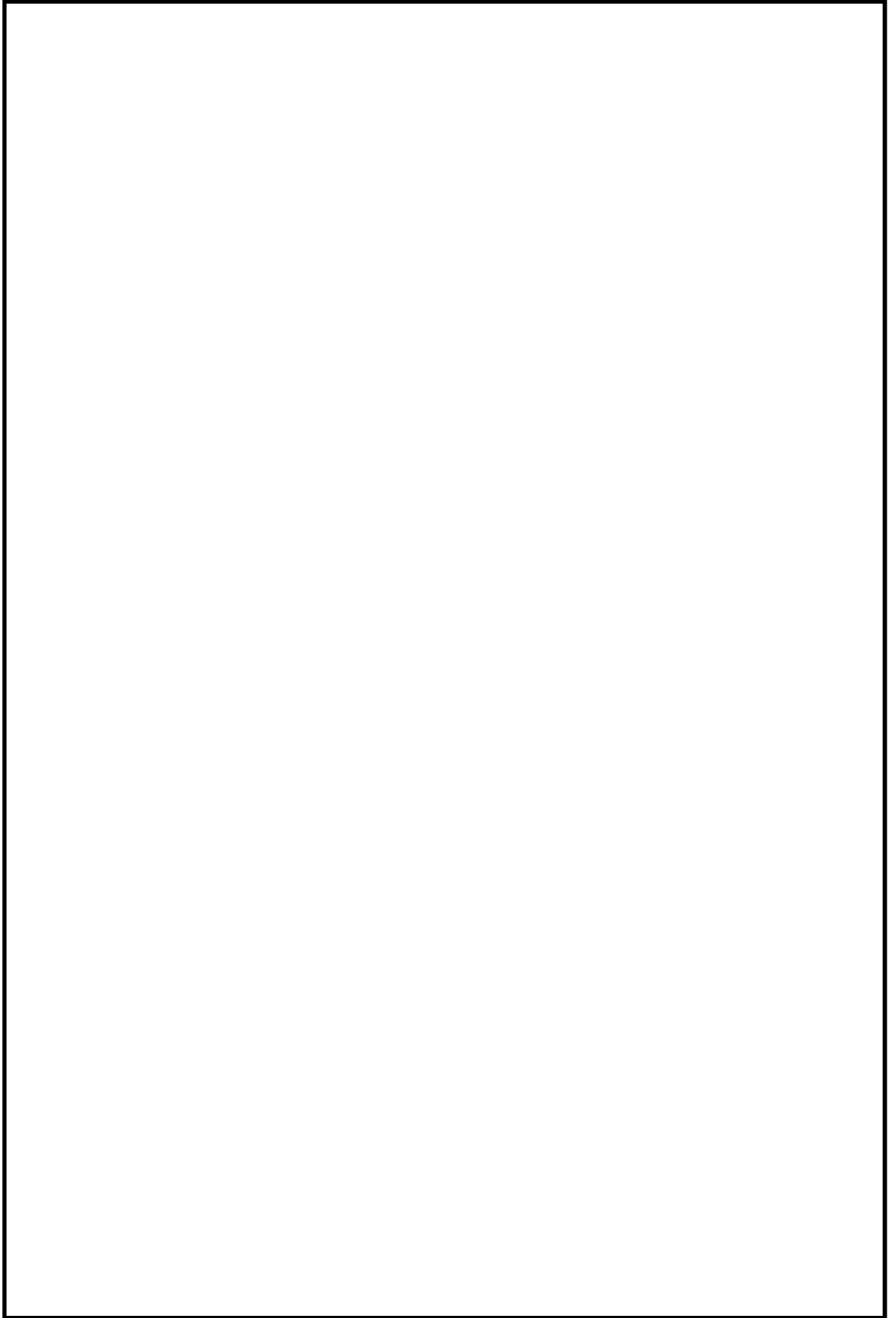


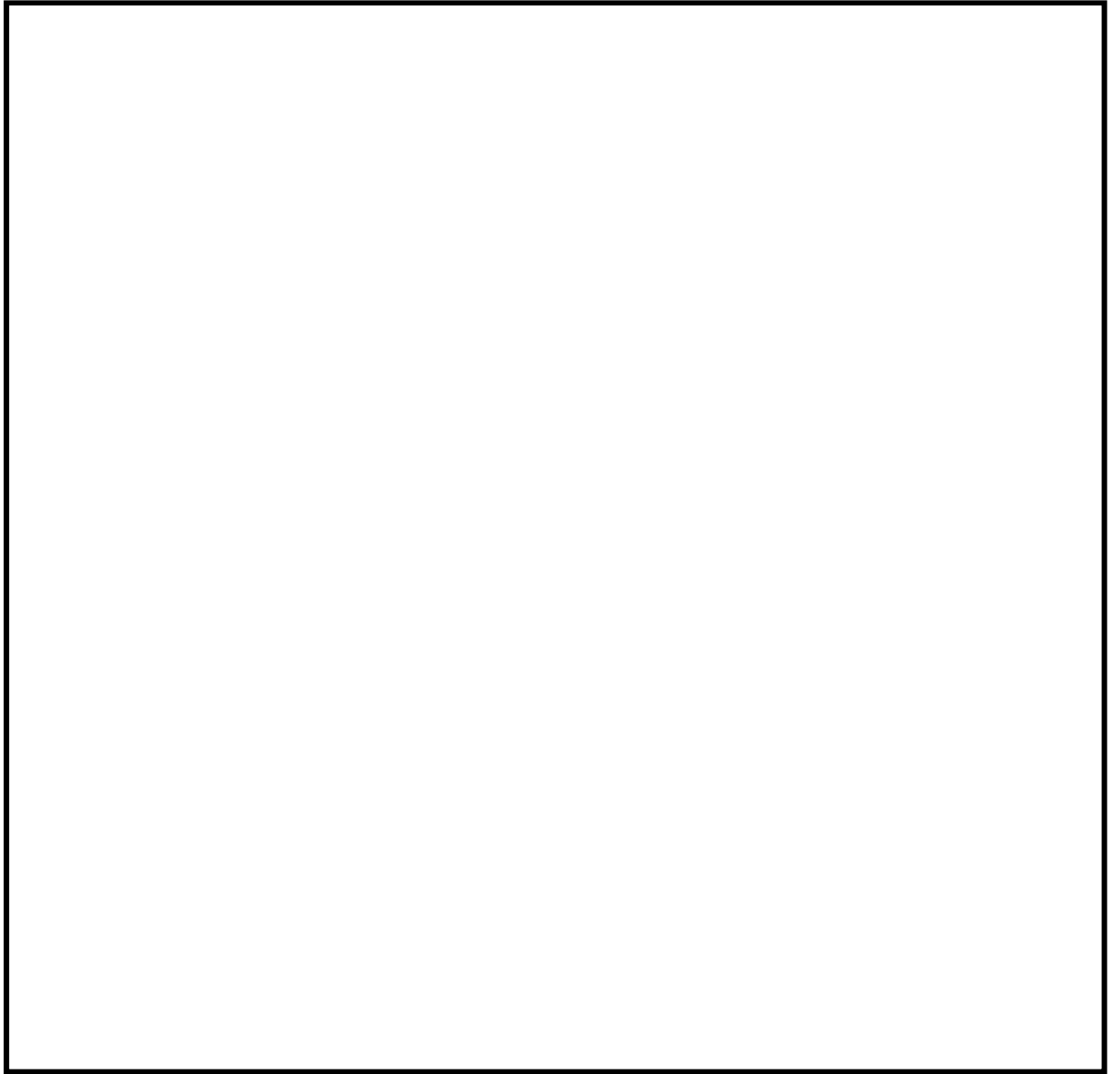


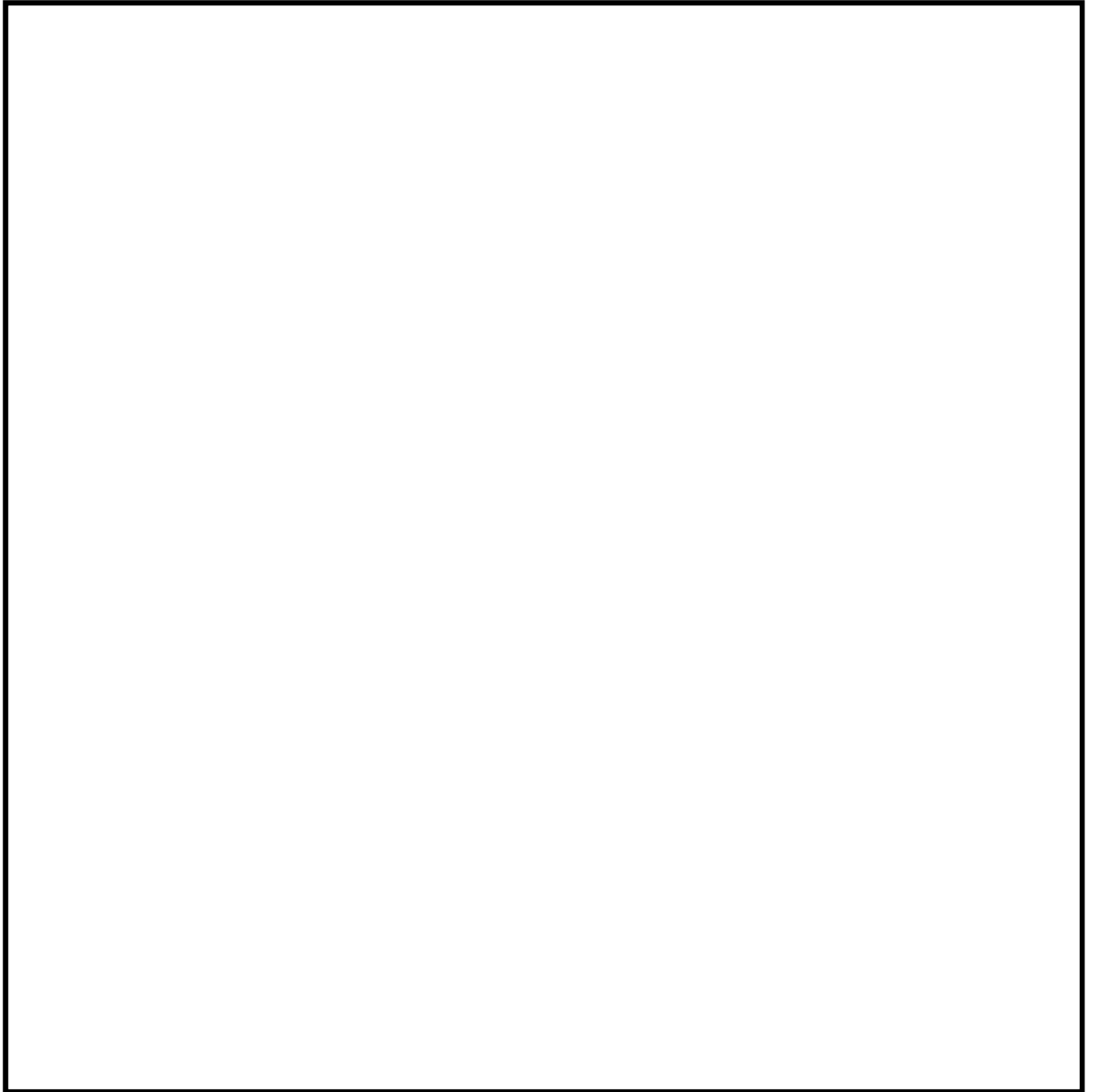


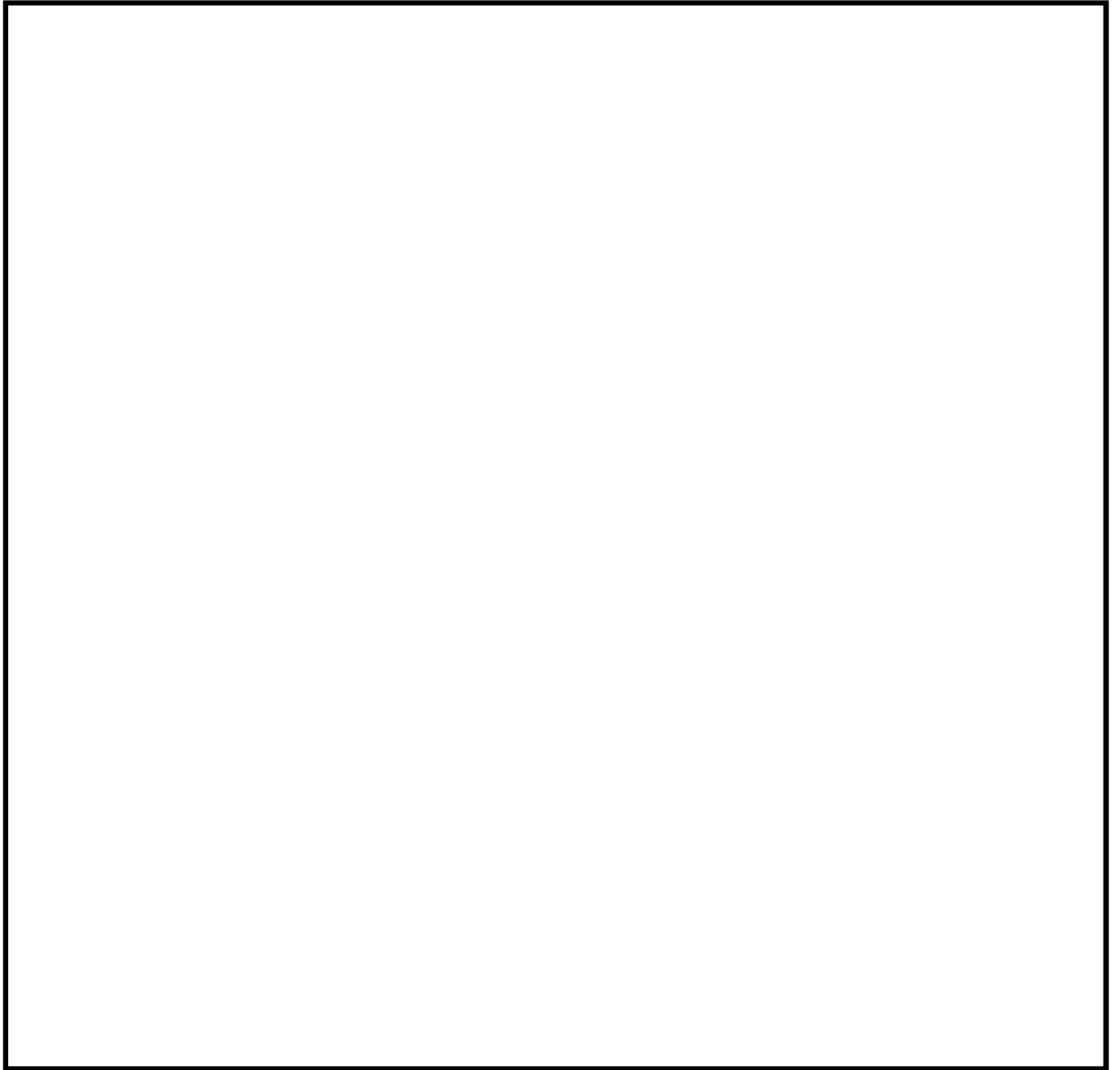


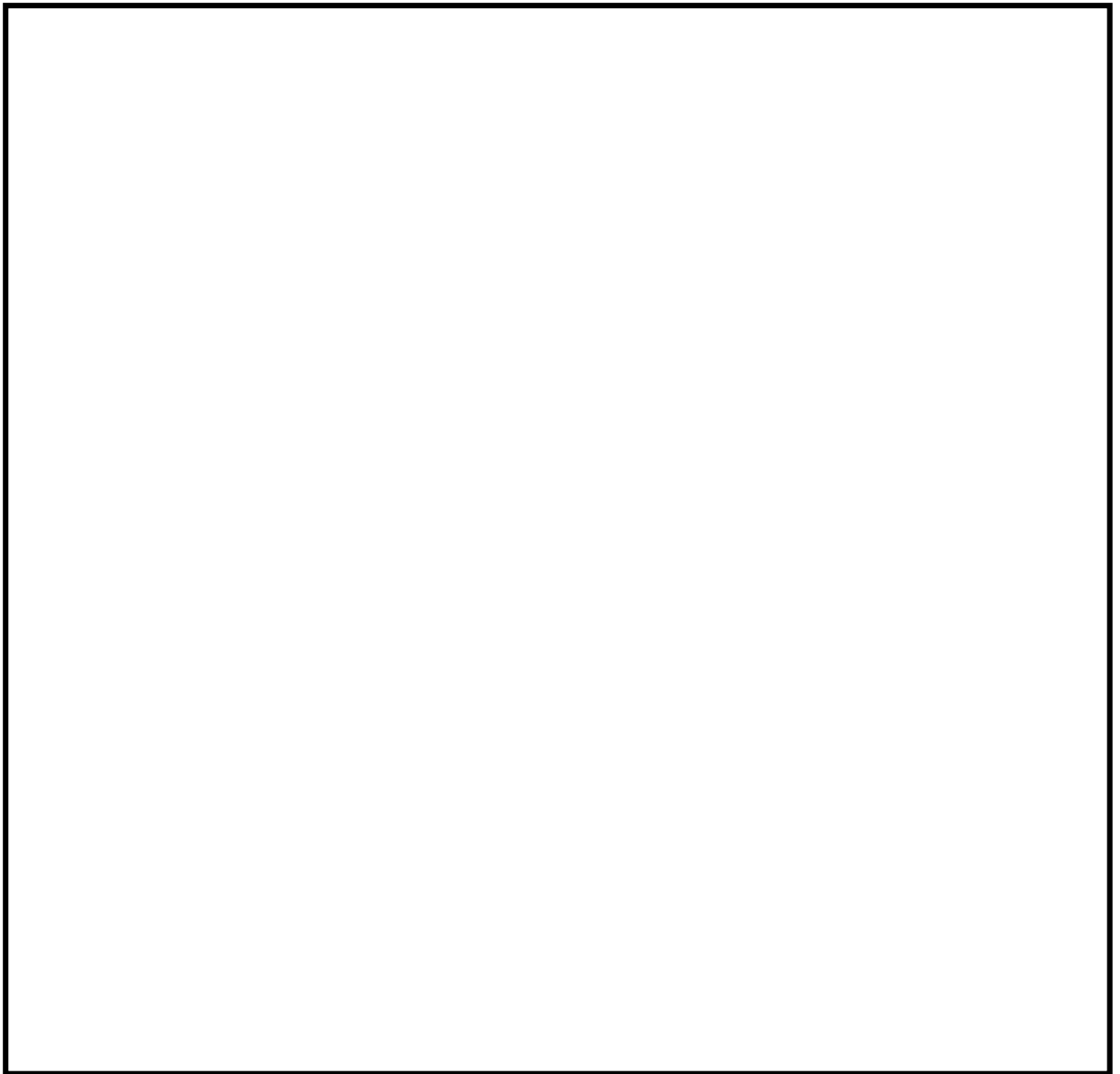


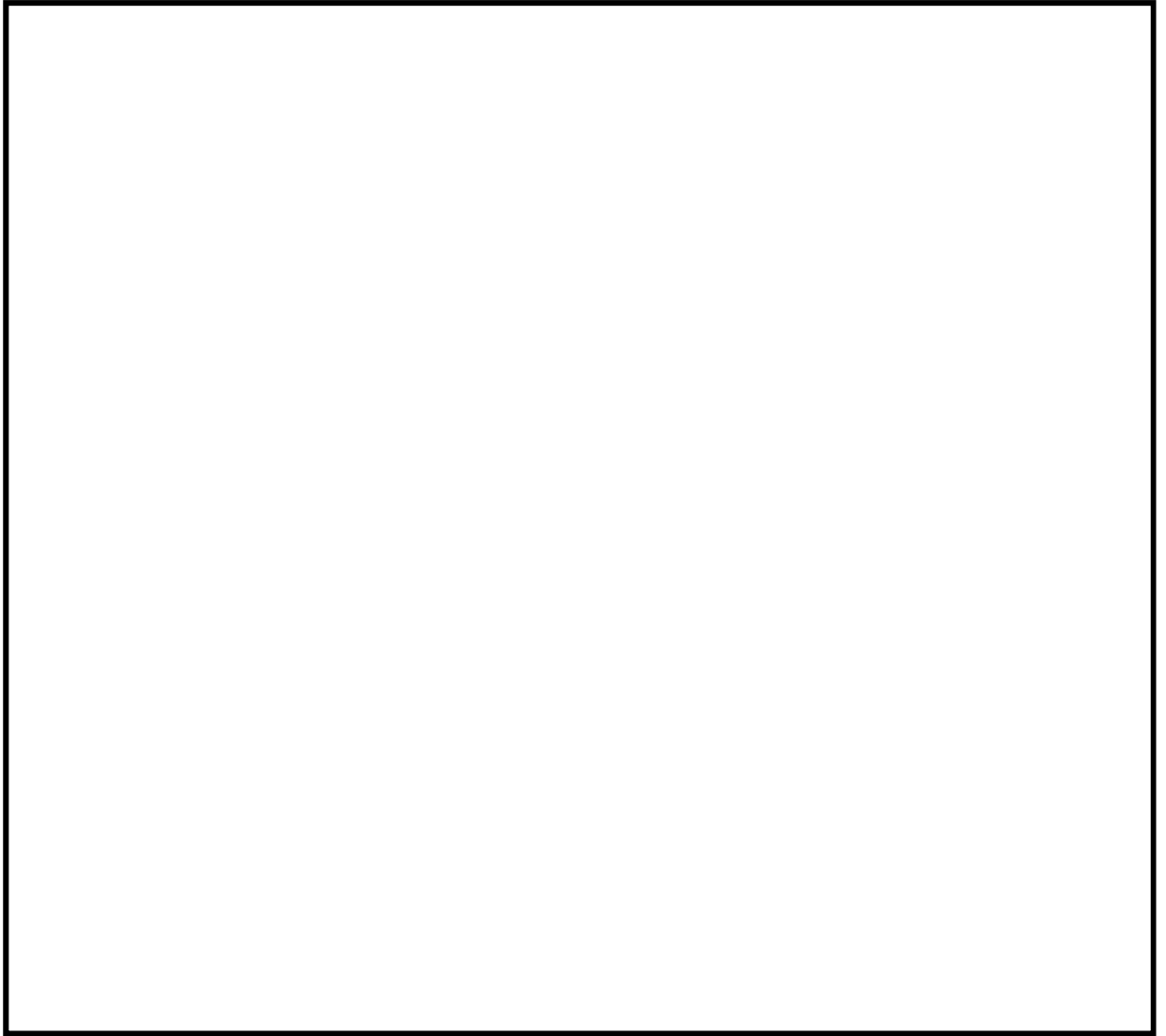


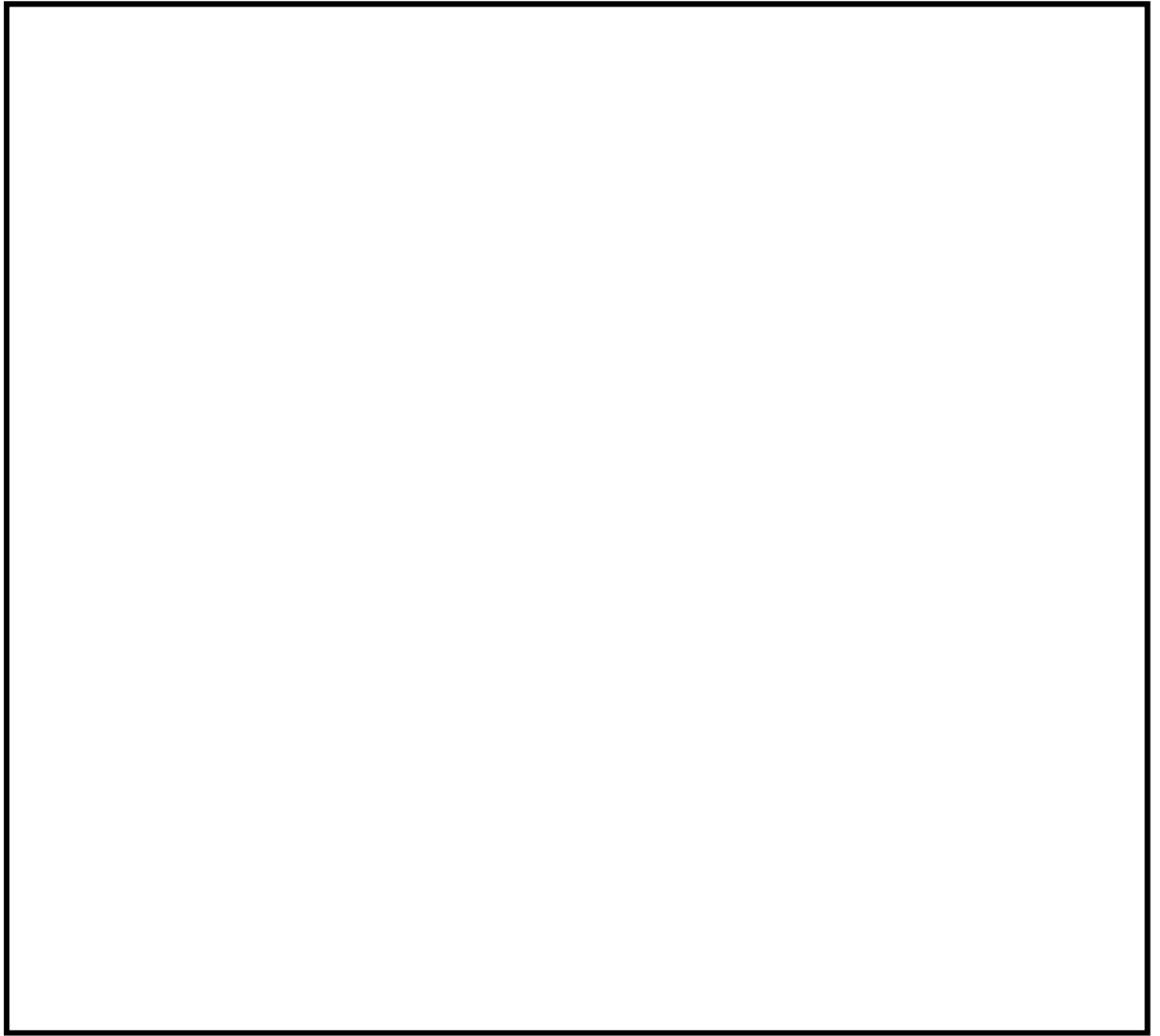


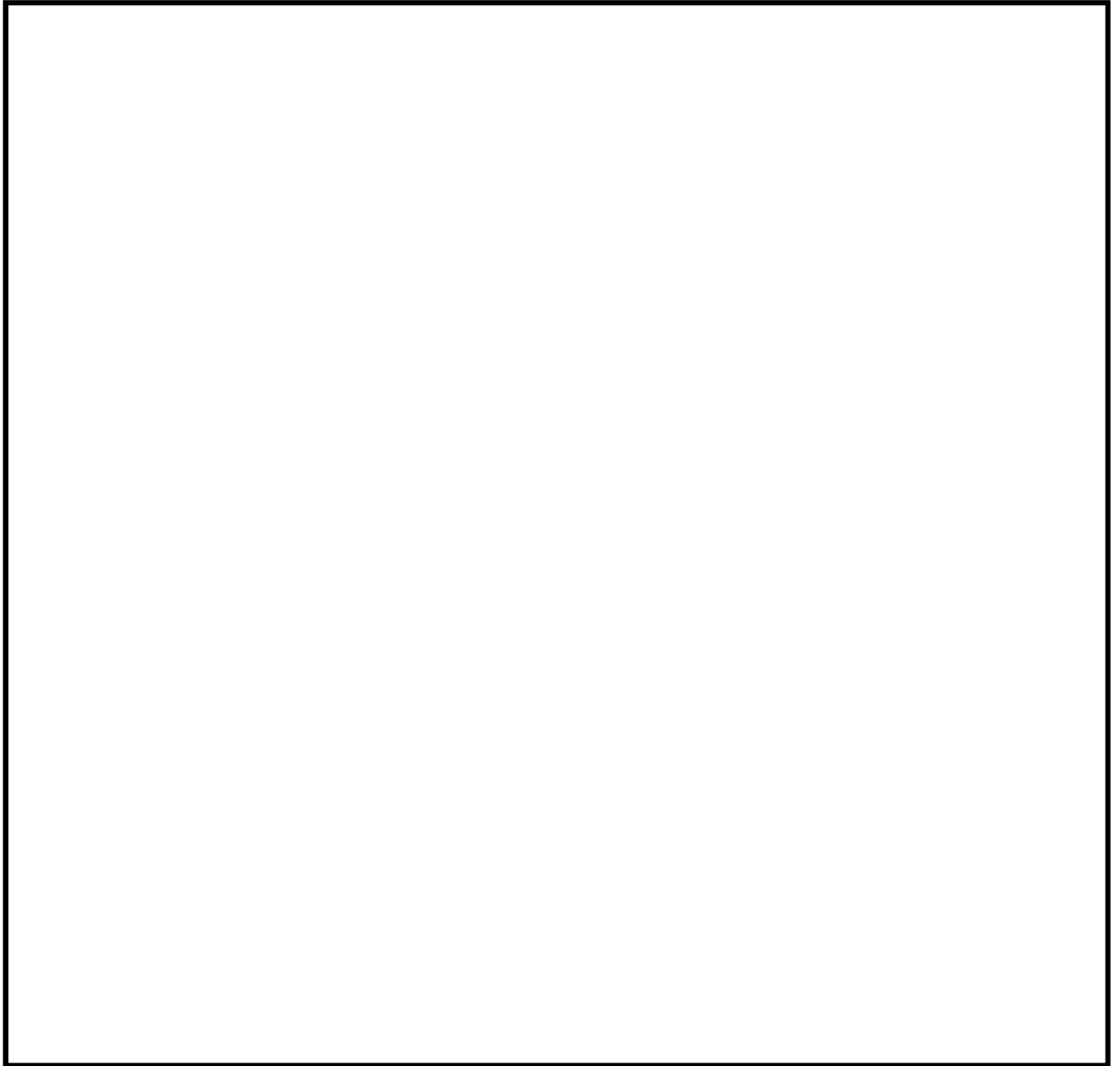


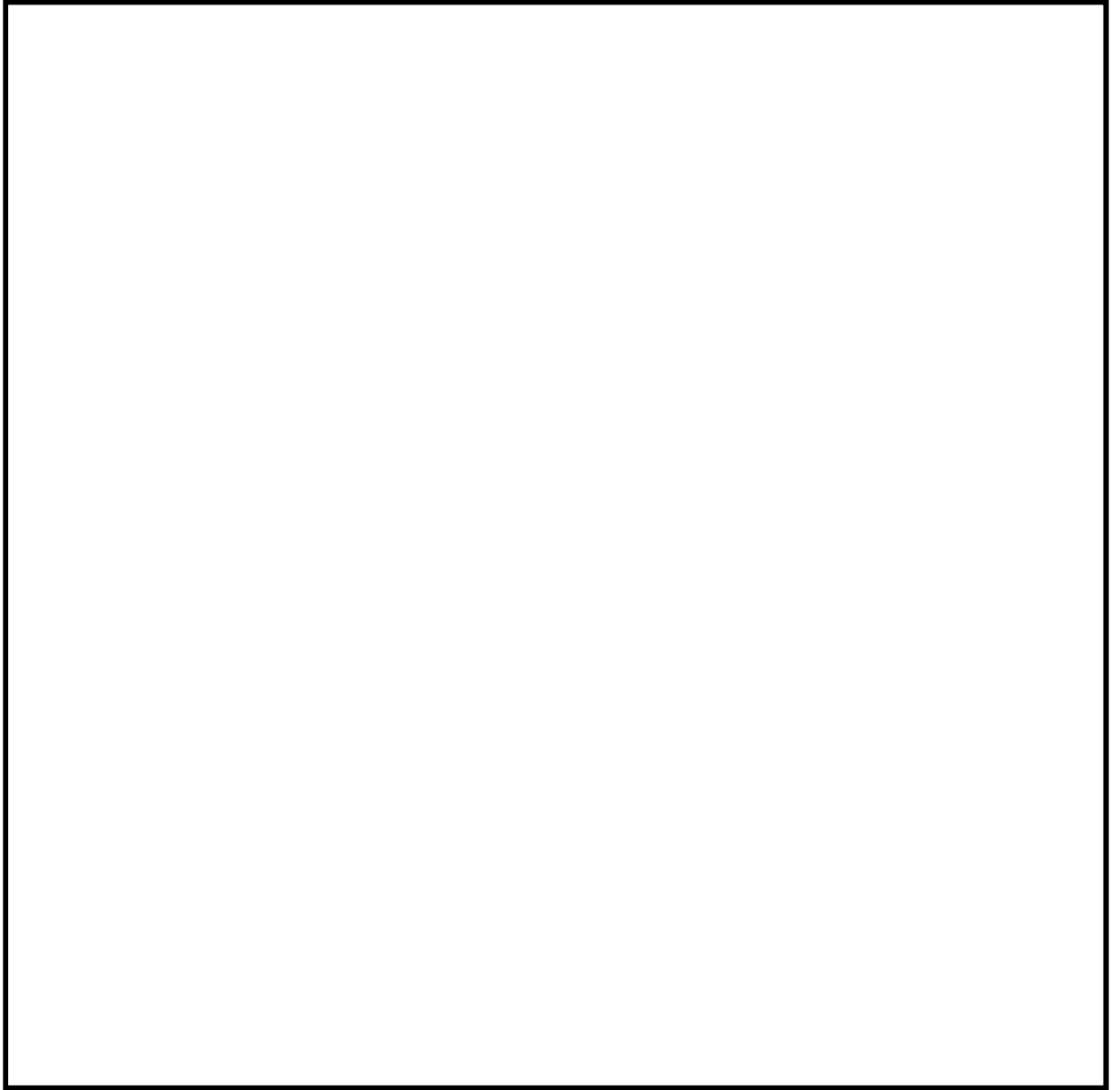


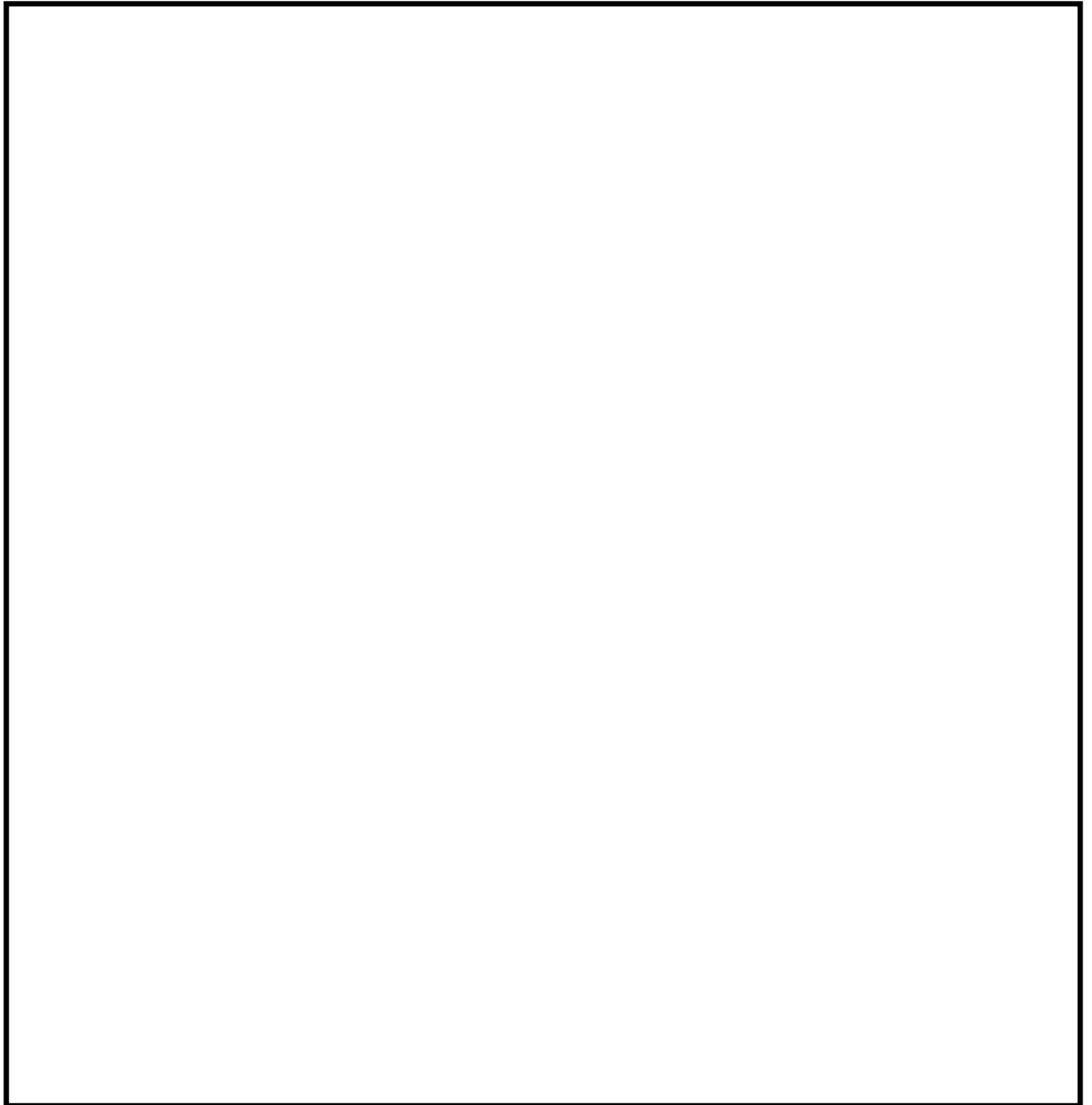


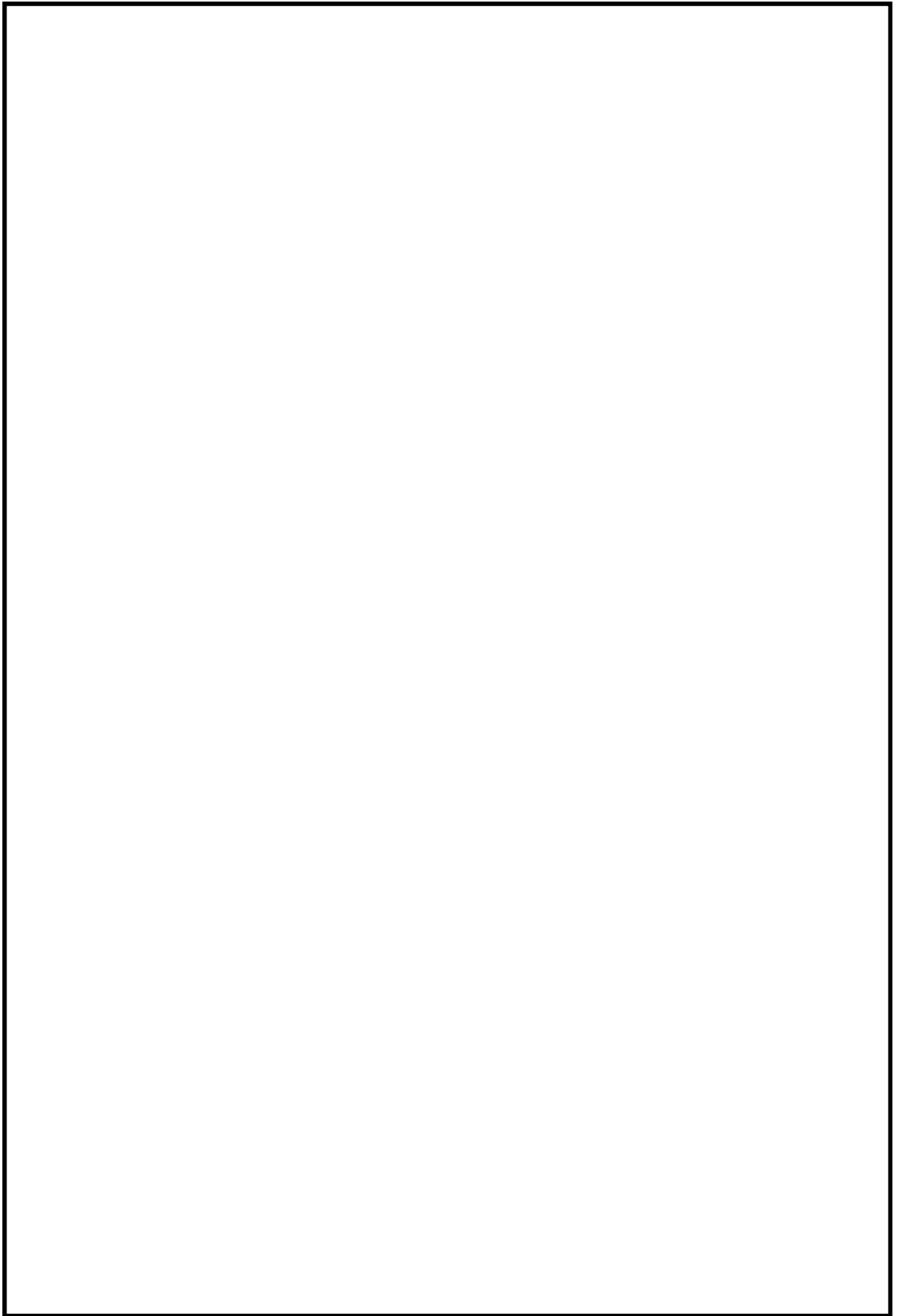


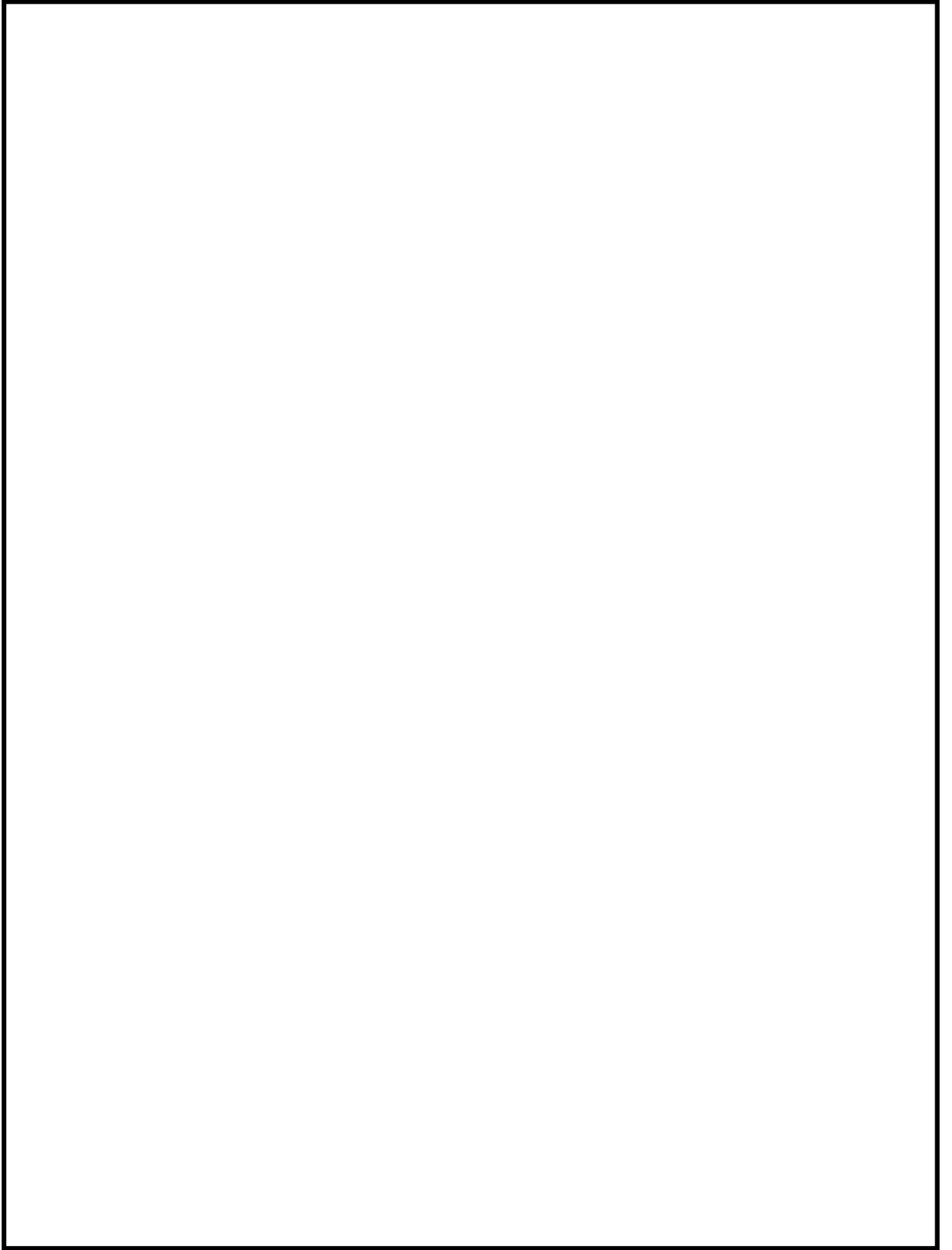


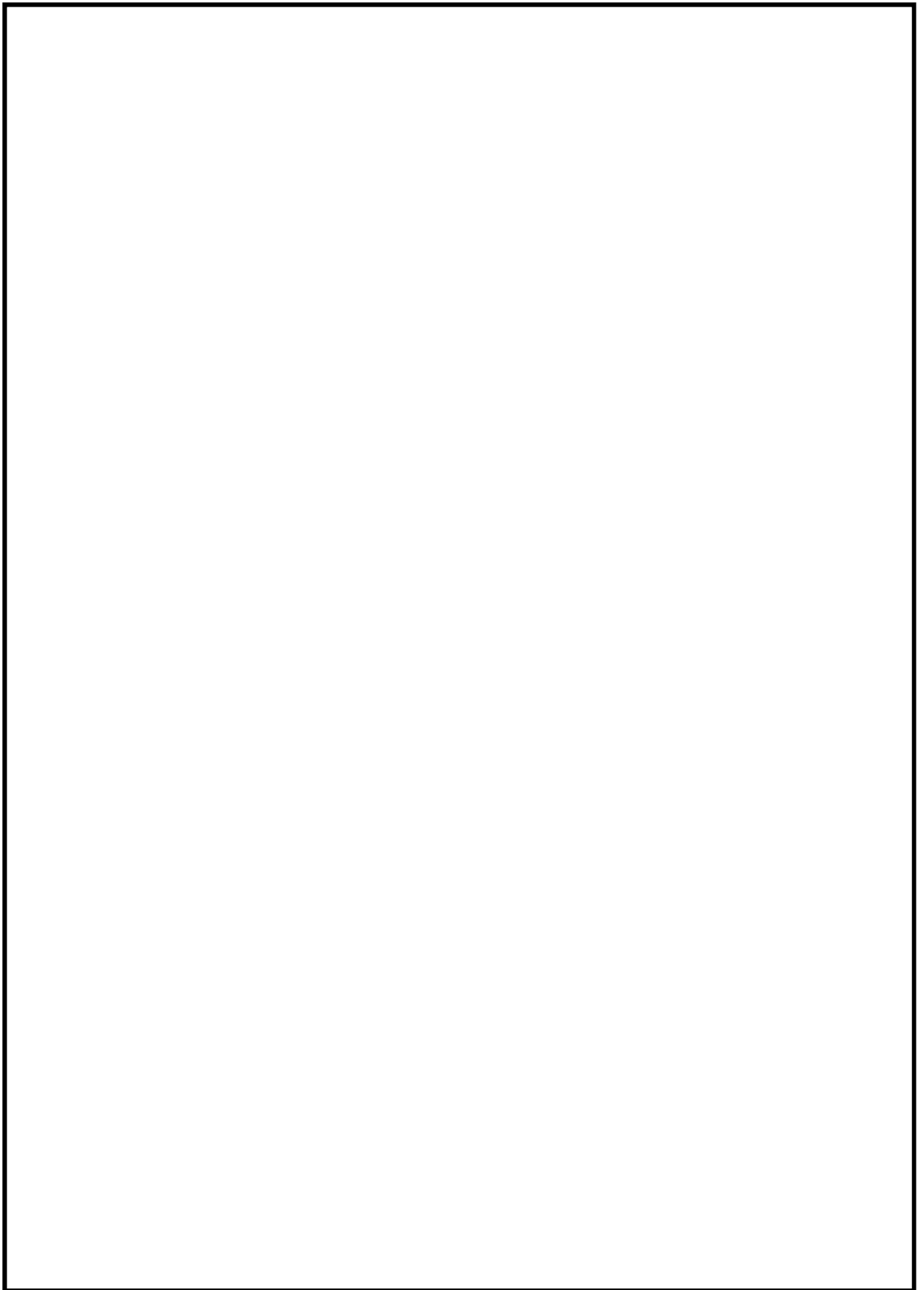




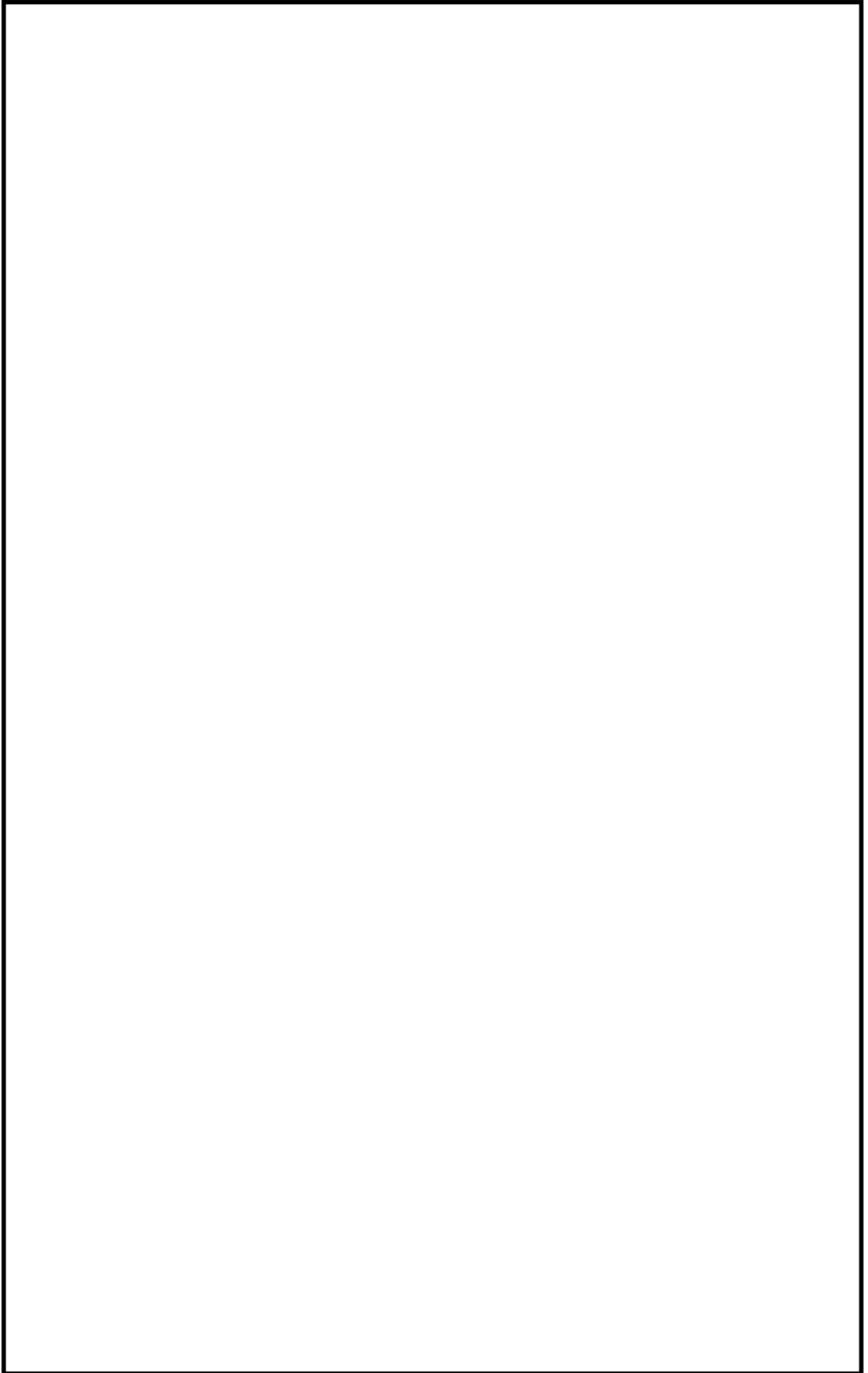




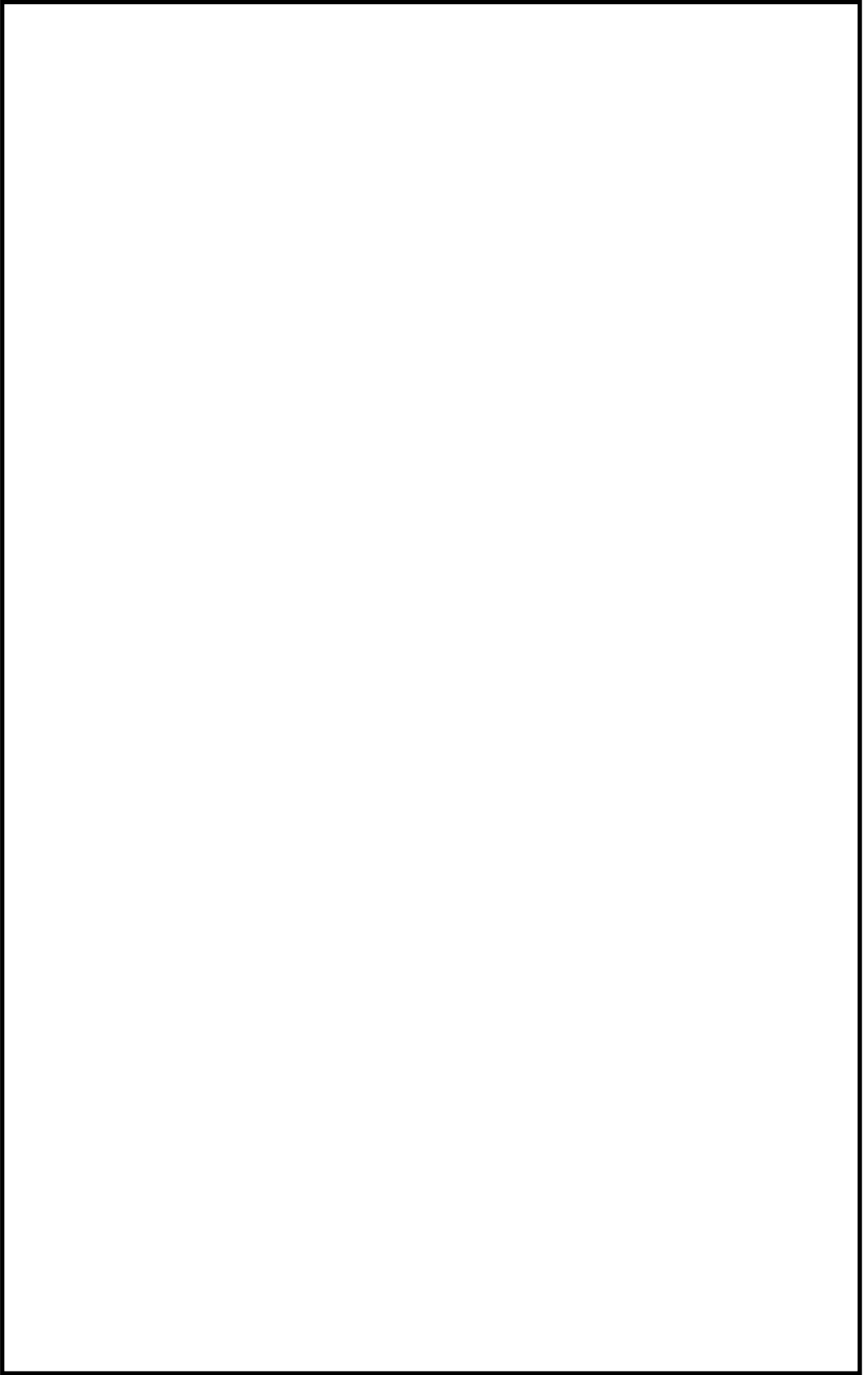


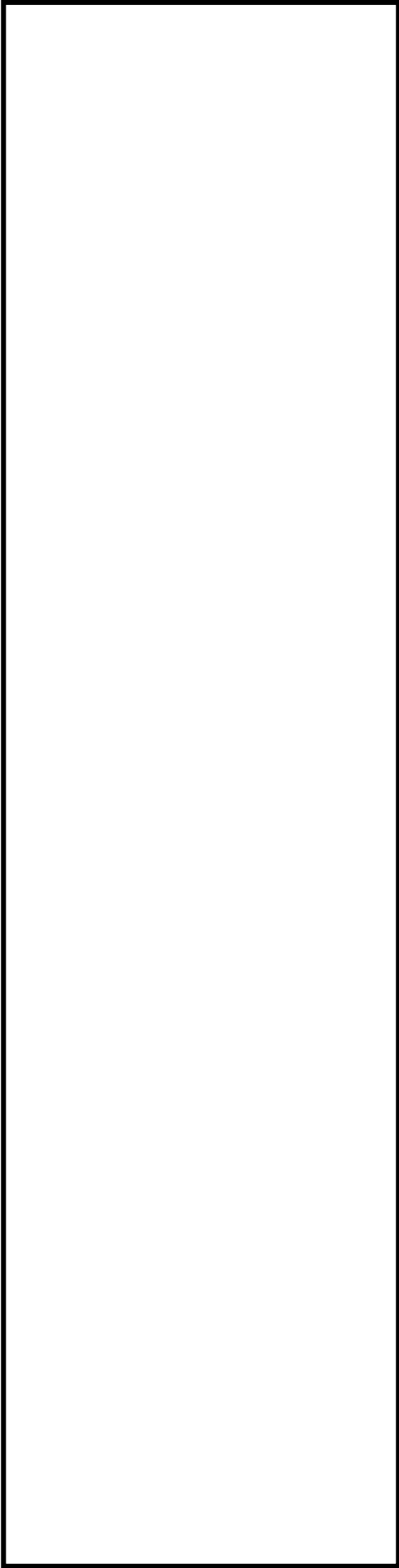


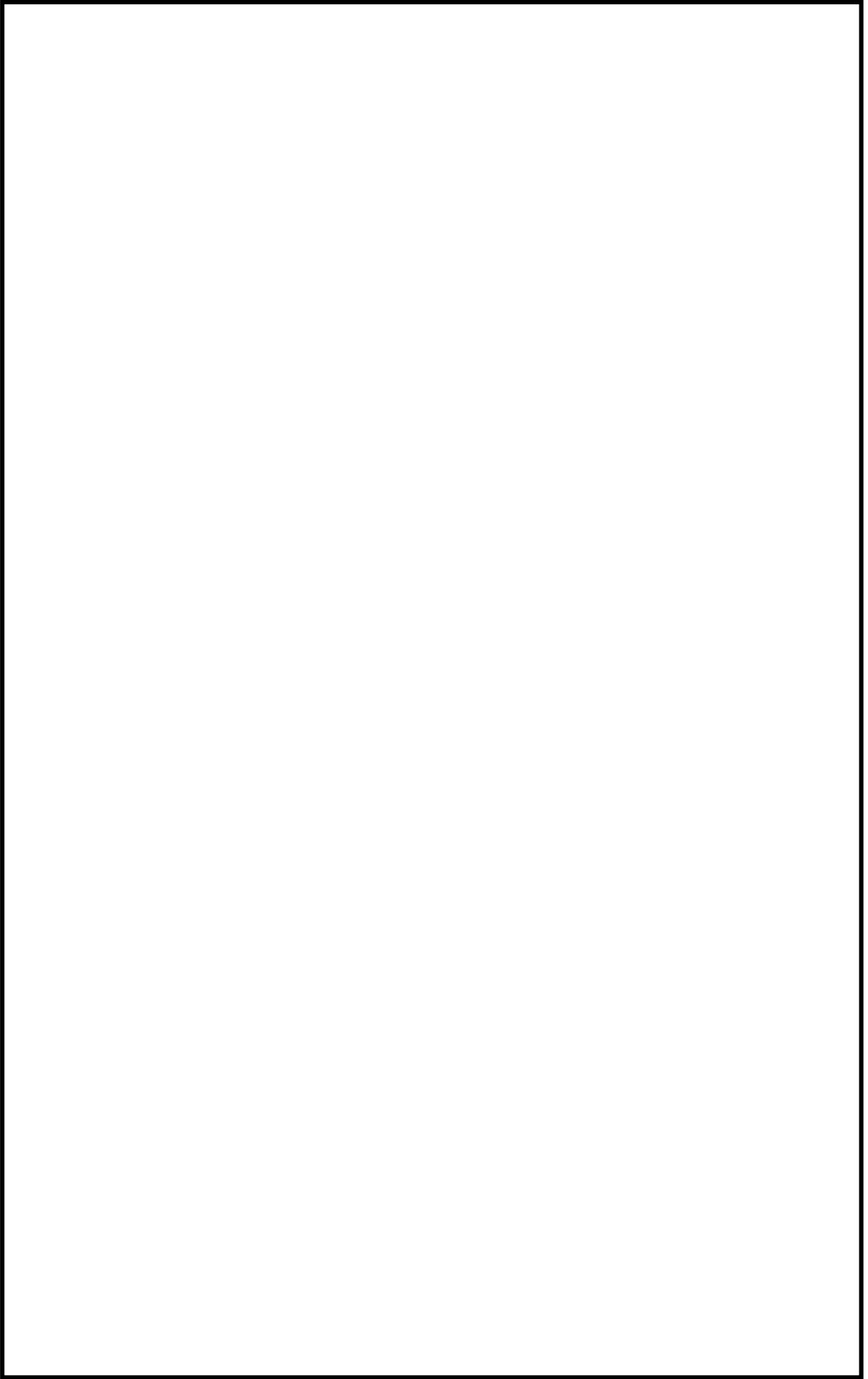


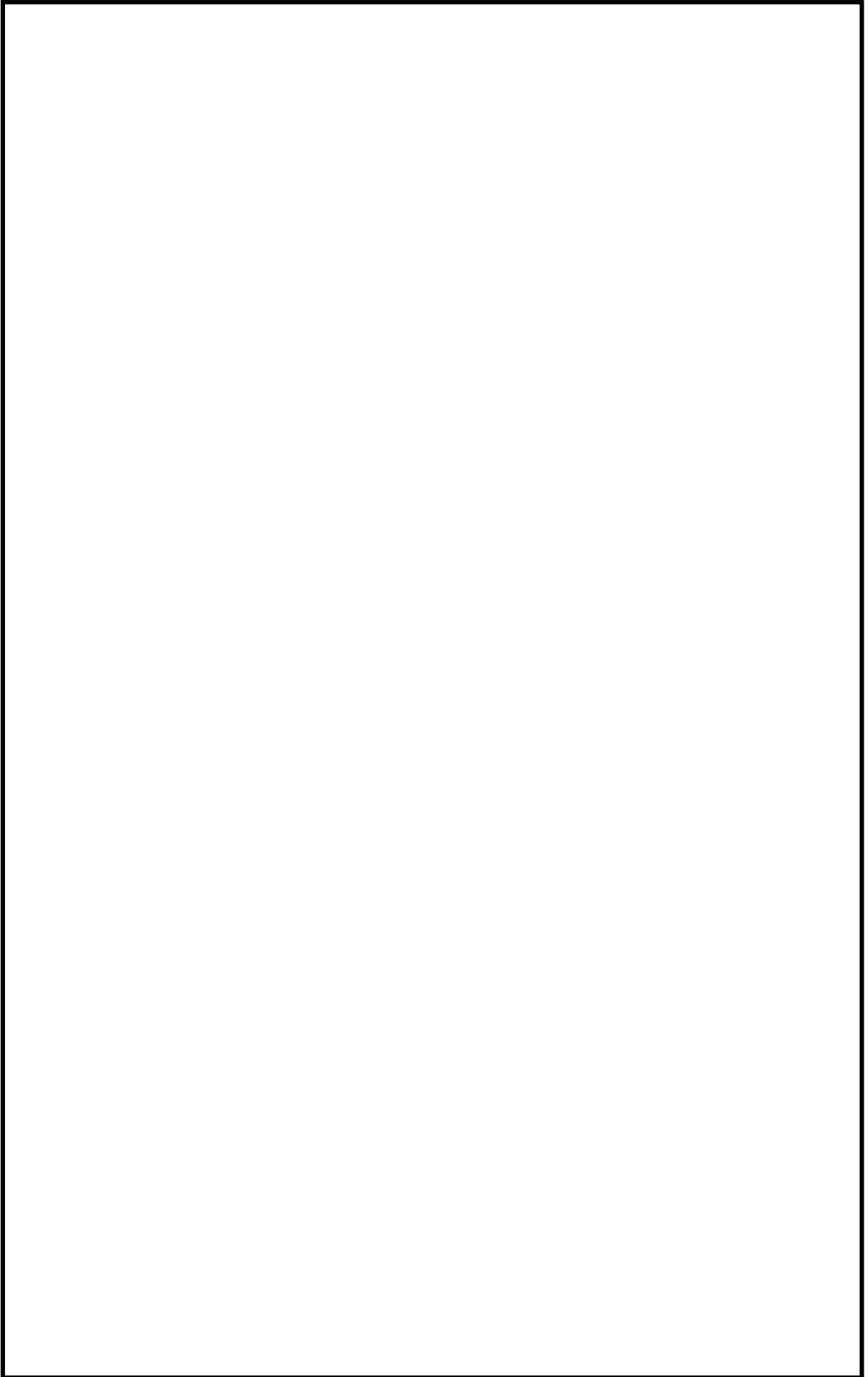


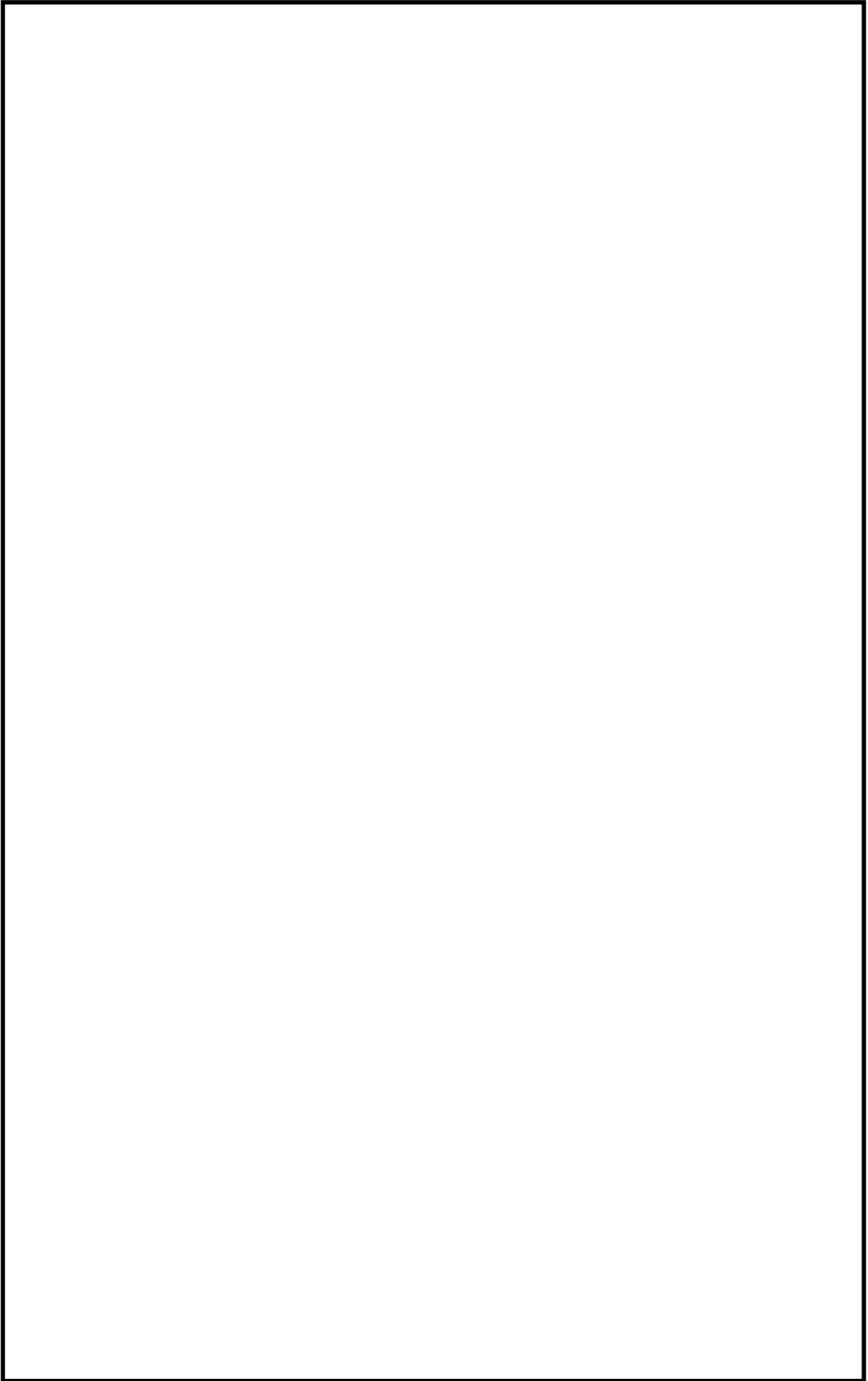


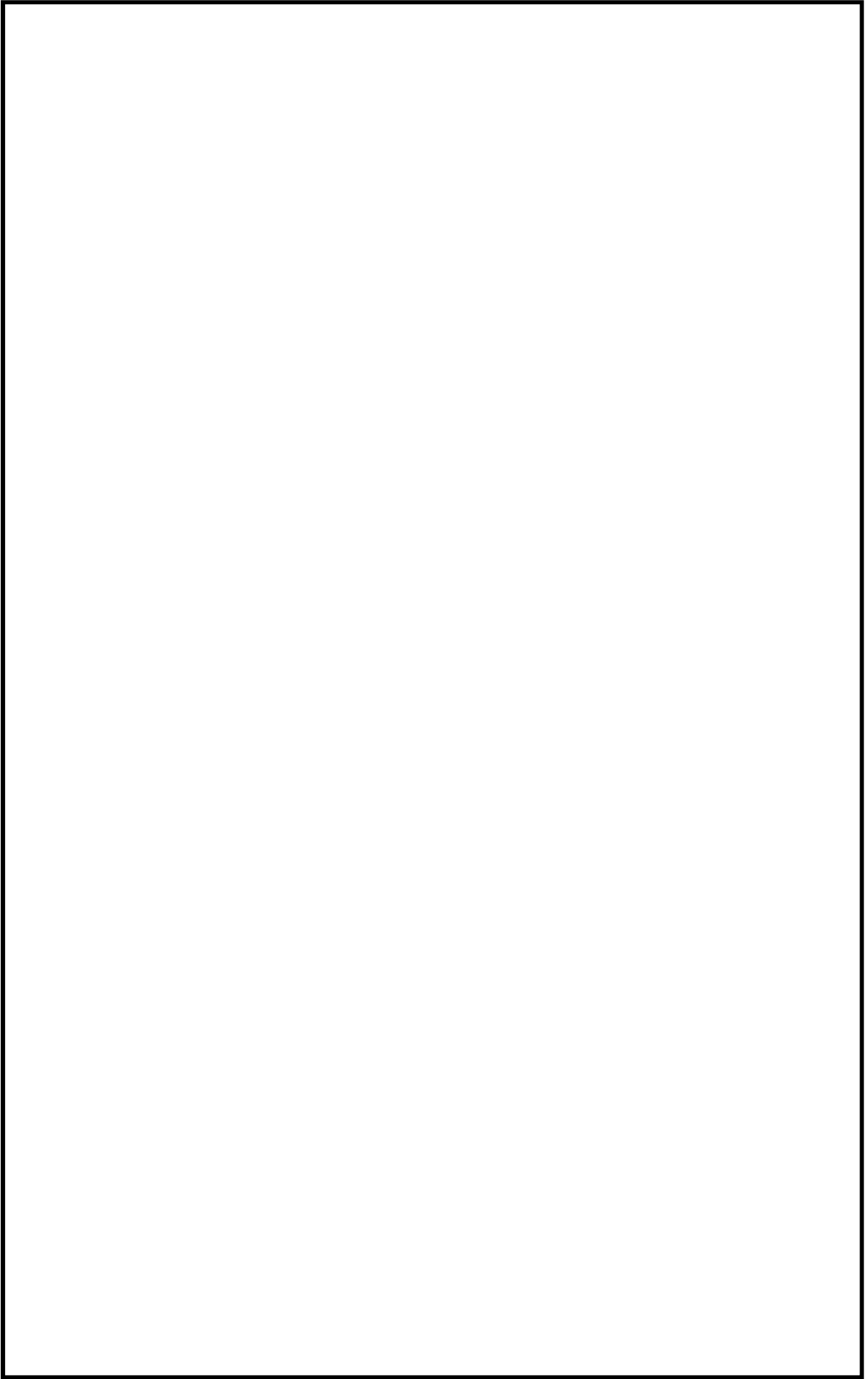


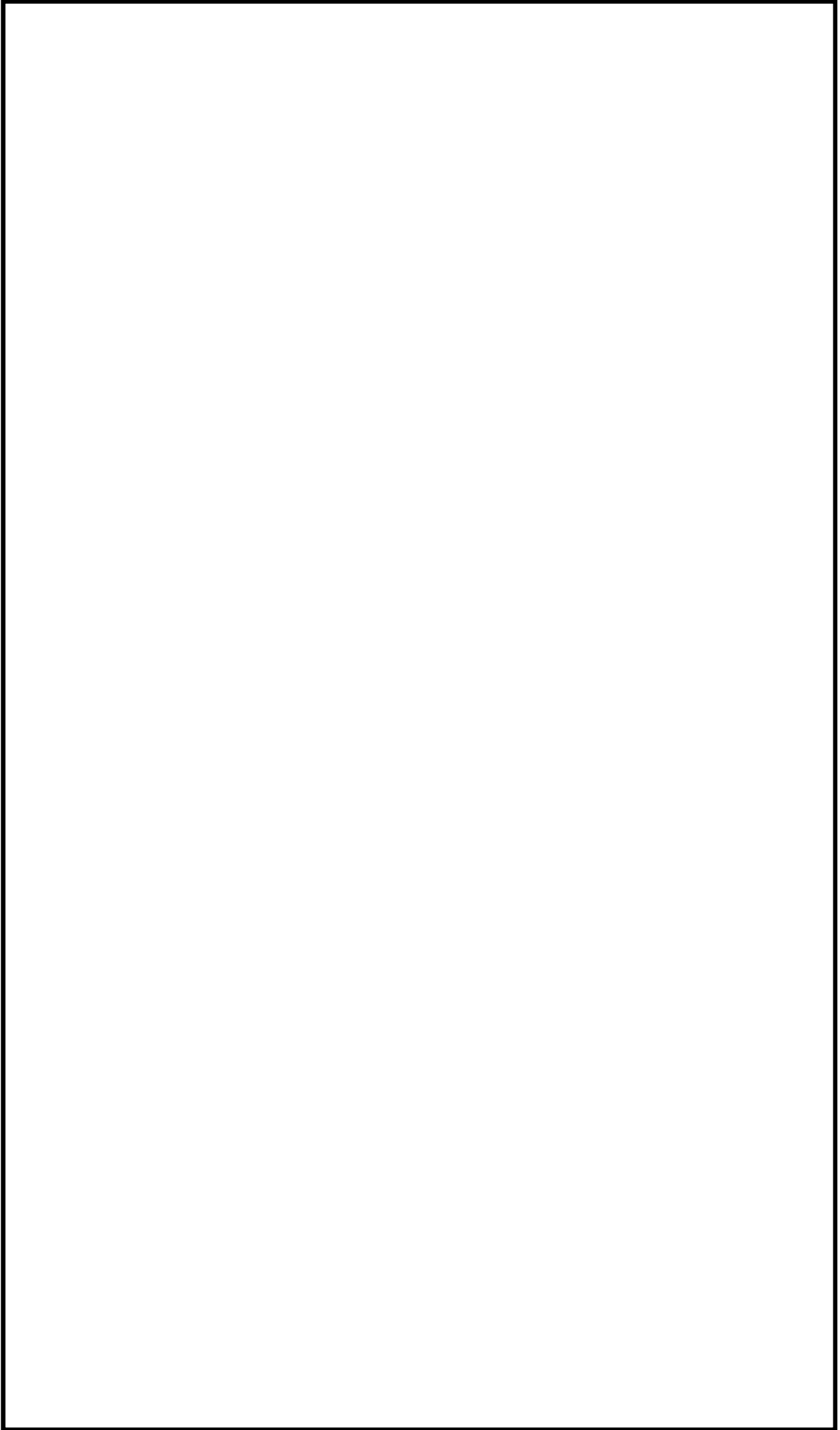


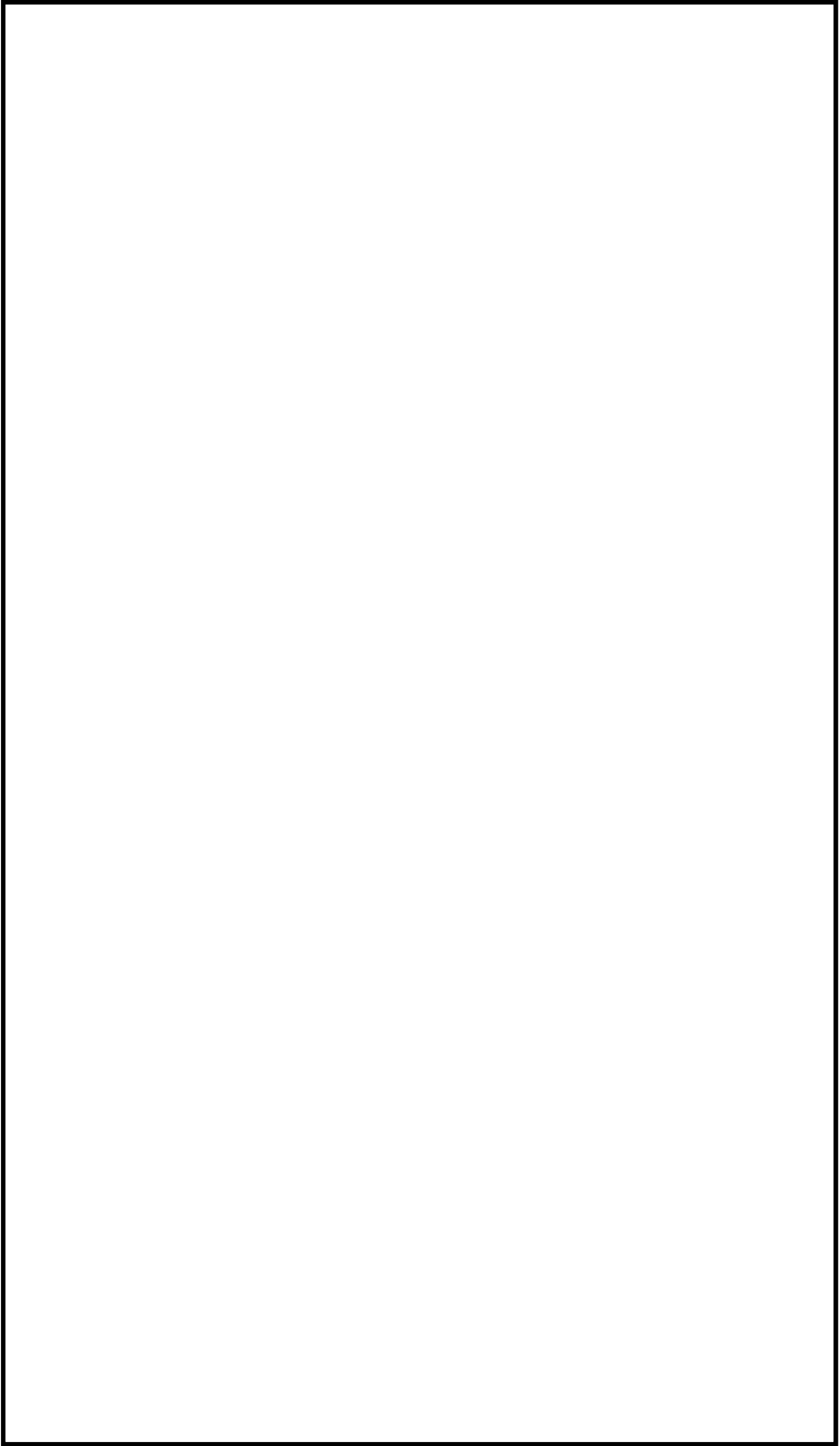


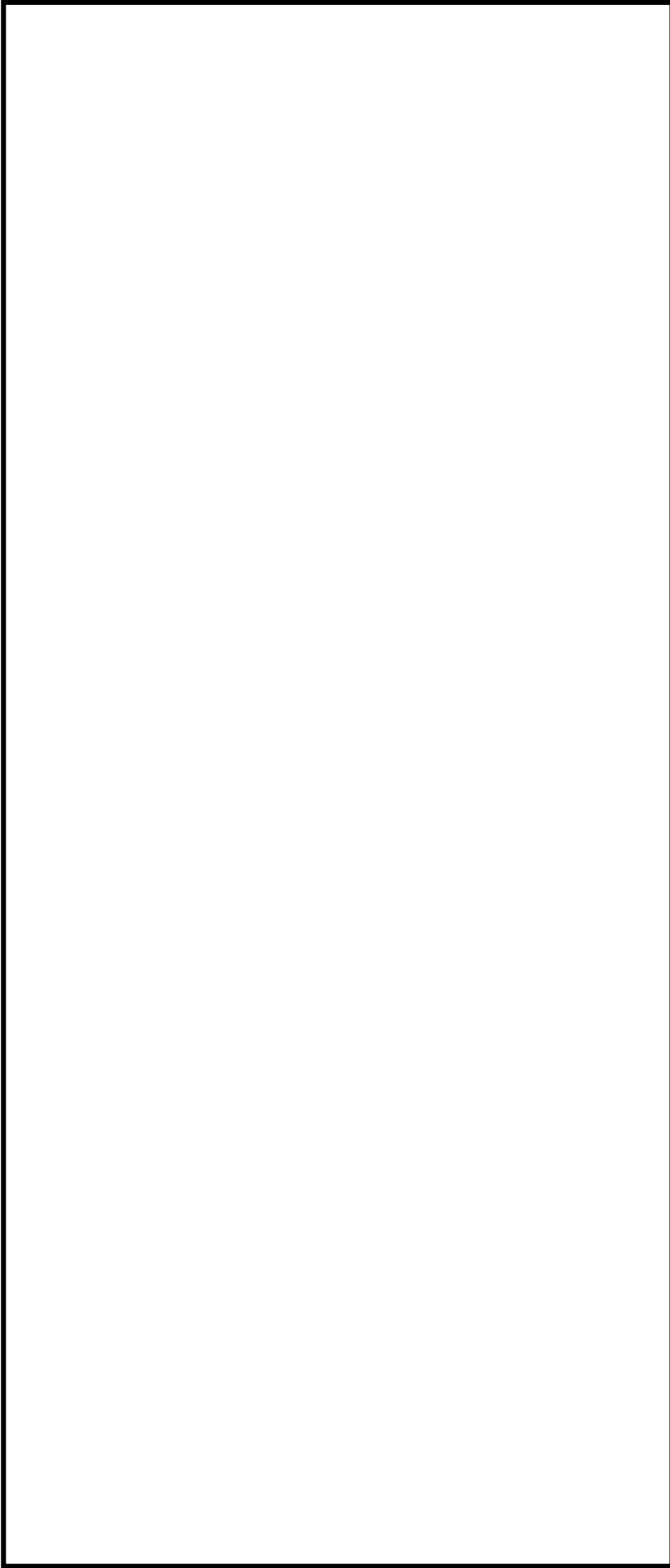












スナッパの限界耐力設定にあたってのばらつきの考え方

1. はじめに

スナッパの限界耐力値設定にあたり、電共研破壊試験結果に対するばらつきの考え方について、本資料に示す。

2. スナッパのばらつきの考え方

ばらつきの考え方の観点を以下に示す。

- (1) スナッパの個体差
- (2) 構造部材の耐力評価式による限界耐力値の設定方法
- (3) 機能部品の耐力評価式における補正係数
- (4) スナッパ全体の座屈の耐力評価式における補正係数

(1) スナッパの個体差

スナッパは精密部品で構成され、品質管理（材料、製作等）が十分実施されている工業製品であることから、スナッパの個体差によるばらつきは基本的に小さいと考えられるが、限界耐力値の設定にあたっては、余裕を持たせている。

電共研においては定格容量 3ton の試験体 3 体に対して試験を実施した結果、座屈の損傷形態を示した SHP 型オイルスナッパ以外は、いずれも球面軸受が最初に損傷していることが確認された。定格容量 3ton の試験体の損傷確認箇所の情報を表 1 に示す。なお、表 1 については、圧縮荷重について示したものであるが、SHP 型オイルスナッパ以外は各型式 3 体ともに同じ部品が同じ損傷モードにて損傷しており、ばらつきが小さいことを示す結果と考えられるが、最大負荷荷重が得られるまで荷重を上げて試験を実施した試験体は限られているため、最大負荷荷重に係るばらつきについて分析することはできない。

従って、ばらつきの影響については、以下 (2)、(3) 及び (4) に示す内容により考慮する。

表 1 電共研の知見 損傷確認箇所の情報

型式	供試体 No	損傷確認箇所	損傷を確認した 試験ケースの情報			最大圧縮 負荷荷重*2 (kgf)	圧縮側 耐力確 認荷重 (kgf)
			目標負 荷荷重 (kgf)	最大圧 縮荷重 (kgf)	判定*1		
SMS-3	SMS-3-1						
	SMS-3-2						
	SMS-3-3						
SN-3	SN-3-1						
	SN-3-2						
	SN-3-3						
SHP-3	SHP-3-1						
	SHP-3-2						
	SHP-3-3						

注記*1:「○」は、当該試験ケースで取得した動剛性（構造強度の判定指標）と、低速走行時抵抗値（機能維持の判定指標）がいずれも基準値を満足したことを示し、「×」は、動剛性あるいは低速走行時抵抗値のいずれかが基準値以下となったことを示す。

*2: スナップの破損又は機能喪失が確認された試験条件の荷重記録のうち、スナップの機能が維持された状態における圧縮側の最大荷重を示す。

(2) 構造部材の耐力評価式による限界耐力値の設定方法

構造部材については試験結果により得られたスナップの最大負荷荷重（支持装置の機能が維持された状態における最大荷重）から直接的に限界耐力値を定めるのではなく、最大負荷荷重に対して余裕を考慮して設定した耐力確認荷重（機能喪失する試験ケースを除いた試験ケースにおける最大荷重）に対して、安全側に耐力評価式を設定し、さらに別型式の試験結果も反映して安全側に設定した耐力評価式を用いて構造部材の限界耐力値を算出している。従って、耐力評価式による限界耐力値の設定にあたり十分な余裕を取っていることから、最大負荷荷重に対するばらつきの影響は耐力評価式により設定した限界耐力値に含まれる。図1に限界耐力値と最大負荷荷重等との関係を示す。

また材料の許容限界については、規格に基づいた許容応力を適用していることから、ばらつきは考慮されている。

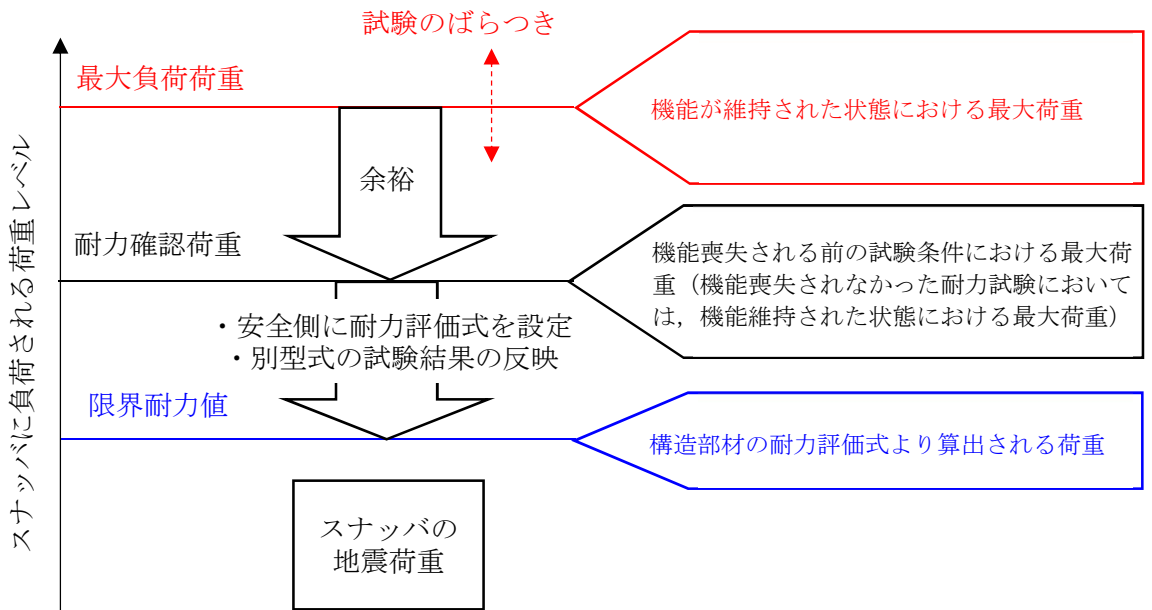


図1 スナップの構造部材に対する限界耐力値設定のイメージ

(3) 機能部品の耐力評価式における補正係数

機能部品は、耐力評価式と規格の許容応力により限界耐力値を算出している構造部材と異なり、試験結果から得られた最大負荷荷重に基づき直接的に限界耐力値を設定していることから、試験時のばらつきを考慮する必要がある。

a. 共通部品

各型式において共通の機能部品である球面軸受については、構造部材と同様の耐力評価式に基づいた限界耐力値を設定する手法に見直している（別紙 4-40 参照）ため、ばらつきは考慮されている。

b. SMS 型メカニカルスナップ

機能部品にはアンギュラー玉軸受及びボールねじがあるが、ボールねじについては、構造部材と同様の耐力評価式にて強度評価が可能であり、耐力評価式を用いて限界耐力値が設定されること（別紙 4-35 参照，別紙 5 添付-3 表 1(5/5)⑭），試験にて損傷が確認されておらず最小裕度部位とならないことから、試験におけるばらつきの影響は考慮不要である。

一方、アンギュラー玉軸受は、試験における最大負荷荷重に基づき直接的に限界耐力値を設定していることから、試験時のばらつきを考慮する必要がある。

電共研の知見では、アンギュラー玉軸受の限界耐力値は、表 2 に示すアンギュラー玉軸受が損傷した試験の最大負荷荷重とベアリングメーカーにて設定している標準スラスト荷重の比（以下「荷重比」という。）の最小値（）から 倍と設定していた。

表 2 アンギュラー玉軸受の標準スラスト荷重と最大負荷荷重（電共研）

型式	(A) 標準スラスト荷重 (kgf)	(B) 最大負荷荷重 (kgf)	比率 (B)/(A)
SMS-03			
SMS-1			
SMS-10			

試験のばらつきを考慮するにあたり、電共研の試験結果に加えて類似の試験結果として J N E S 研究を参照し、信頼性向上の観点から試験データの拡充を図ることとした。J N E S 研究のうち、アンギュラー玉軸受の最大負荷荷重を確認した試験結果及び電共研の試験結果を表 3 に示す。アンギュラー玉軸受のばらつきを検討するにあたって、表 3 に示す荷重比から保守的に標準偏差値の 2 倍 (-2σ) を考慮すると、荷重比は 倍となり、電共研の知見にて設定した 倍を下回ることから、 倍での評価を行い、アンギュラー玉軸受の限界耐力値とする。

表 3 アンギュラー玉軸受の標準スラスト荷重，最大負荷荷重及び荷重比
(電共研の試験結果+ J N E S 研究の試験結果)

型式	試験	(A) 標準スラスト荷重 (kN)	(B) 最大負荷荷重 (kN)	比率 (B)/(A)
SMS-03	電共研			
SMS-1	電共研			
SMS-10	電共研			
	J N E S			
SMS-25	J N E S			
平均値				
標準偏差値 (σ)				
平均値- 2σ				

b. SHP 型オイルスナップ

機能部品はポペット弁とシール性としてシール材があるが、ポペット弁については、異常要因分析（別紙4 図4-3 参照）で示した通り、地震荷重の作用は考えられないことから、試験荷重のばらつきの考慮の対象外である。シール性については、試験における最大負荷荷重に基づき直接的に限界耐力値を設定しているため、ばらつきの考慮にあたって検討が必要となる。

別紙4 に示す通り、バックアップリングを使用していない型式については、最小裕度がシール性となることを予想していたが、耐力確認荷重が予想耐力を超えてもシール性の損傷は確認されなかった。また、試験結果で確認された損傷形態は座屈損傷であり、シール性の損傷は確認されなかったため、シール性は耐力確認荷重に対し一定の余裕があることが推測される。これを踏まえ、バックアップリングを使用していない型式である SHP-03 及び SHP-06 についての限界耐力値は、耐力確認荷重に相当する値まで上方修正されている。

これに対し、試験結果で確認された損傷形態である座屈損傷については、試験結果を踏まえて座屈耐力値については下方修正され、バックアップリングを使用していない型式においても座屈が最小裕度となっている。なお、座屈損傷のばらつきについては、後述の(4)に示す通り、複数の試験結果に基づき設定した耐力評価式に対する補正係数を考慮して限界耐力を策定している。

したがって、SHP 型オイルスナップの新規基準値は、複数の試験結果を踏まえて下方修正された座屈耐力値に基づき設定されており、ばらつきを考慮した評価と言える。

表4 に SHP 型オイルスナップの予想耐力と、限界耐力の比較を示す。

表4 バックアップリングを使用していない型式のシール性の耐力値の検討

型式	電共研 試験での 供試体 No	シール性 予測耐力 (kgf)	耐力確認 荷重*2 (kgf)	限界耐力 (kgf)		
				シール性	最小裕度部位	
					部位	耐力値

注記*1：電共研試験では実施せず。

*2：シール性については引張荷重と圧縮荷重で評価内容に相違が生じないことから、引張側と圧縮側のうち大きい方の値を採用している。

*3：SHP-03 の耐力確認荷重に基づき、予想耐力を 倍した値

c. SN型オイルスナッパ

機能部品はポペット弁とシール性としてメタルタッチを構成するタイロッドがあるが、ポペット弁については、異常要因分析（別紙4 図4-4参照）で示した通り、地震荷重の作用は考えられないことから、試験荷重のばらつきの考慮の対象外である。タイロッドについては、構造部材と同様の耐力評価式に基づいた限界耐力値を設定する手法に見直している（別紙4, 別紙5添付-3表3(3/4)⑩参照）ため、ばらつきは考慮されている。

(4) スナッパ全体の座屈の耐力評価式における補正係数

電共研の知見では、座屈強度の確認のために静的座屈試験を実施しているが、加振試験においても座屈損傷を確認している。このため、電共研では座屈に対する限界耐力値は、静的座屈試験と加振試験の結果から得られた補正係数を計算式より算出した座屈荷重に対して考慮する手法により設定している。補正係数は、試験結果により得られた最大負荷荷重と計算による座屈荷重の比から直接的に設定していることから、補正係数に対してばらつきの影響を考慮する必要がある。電共研では、この補正係数に対し、スナッパの複数の試験体に対する試験結果から、試験結果のばらつきの影響を検討している。表5に電共研において座屈損傷を確認した型式の試験結果を示す。

なお、静的座屈試験は、一般的な材料試験の同様、静的に荷重を負荷する試験であり、結果にばらつきがでにくいこと、座屈強度は基本構造と寸法（断面二次モーメント及び長さ）から決まること、基本構造には型式間の相違はないことから、試験結果を他の型式に展開できると考え、電共研では試験体はスナッパの各型式より1体としている。試験にて確認された座屈発生時の荷重（試験座屈荷重）と座屈の評価式により算出された座屈荷重（計算座屈荷重）の比は、 $\text{試験座屈荷重}/\text{計算座屈荷重} = \square$ となっている。なお、試験体のピン間長さは標準寸法の範囲のうち最大寸法としており、座屈の観点で最も厳しい条件としている。

表5に示される通り、SHP型オイルスナッパについては、加振試験結果における試験座屈荷重/計算座屈荷重 = \square となる結果が得られている。

SHP型オイルスナッパは図2に示す通り、ターンバックルを有した構造であり、他の基本型式と比べて部位間の剛性差が大きくなる箇所（以下「最弱部」という。）が装置全長に対し中央に位置する構造である。他の基本型式の構造例として図3にSMS型メカニカルスナッパの概略構造を示す。

また、加振試験では、座屈以外の構造部材及び機能部品の限界耐力取得に特化するため、装置全長を短く設定していることから、SHP型オイルスナッパの加振試験における供試体は、静的座屈試験の供試体よりも最弱部が中央に位置する構造となっていたことから、試験座屈荷重/計算座屈荷重から求まる比が小さい結果となったと考えられる。

表 5 静的座屈試験と加振試験における座屈荷重

--

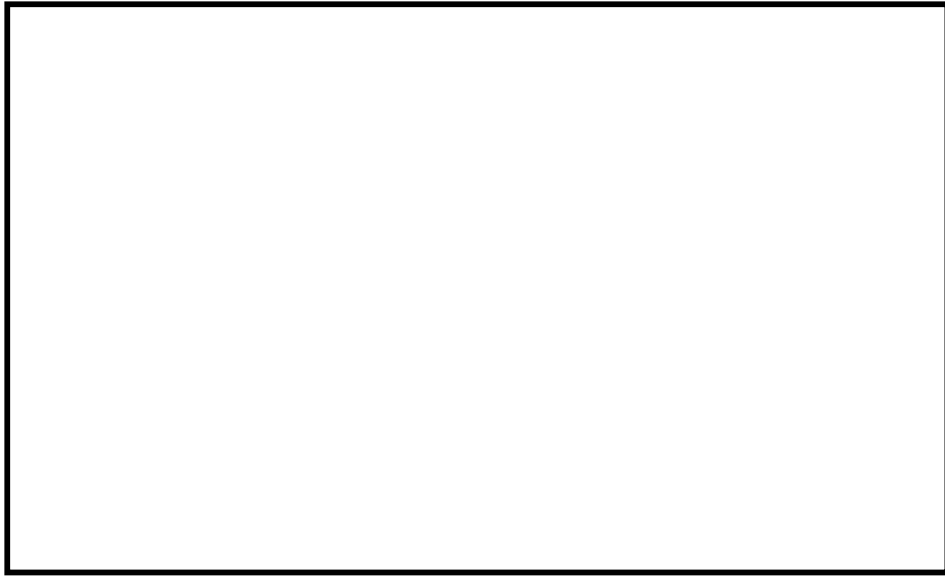


図2 SHP型オイルスナッパの概略構造及びターンバックル部

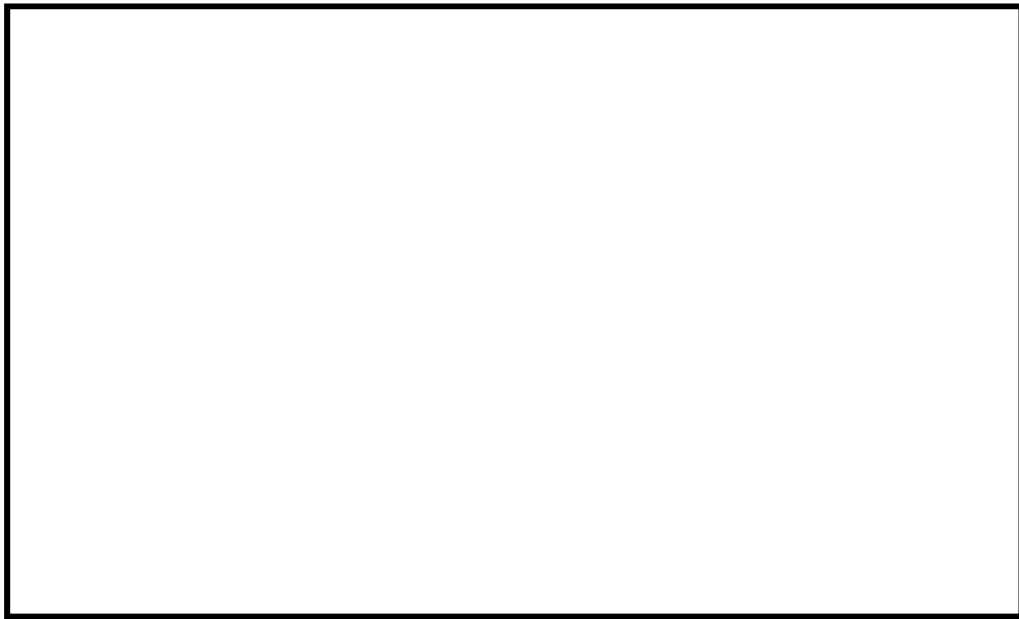


図3 メカニカルスナッパの概略構造

これらの構造特徴を踏まえ、電共研では、電共研以前に実施されたオイルスナッパの座屈試験結果についても図4に示すような分析を実施し、座屈強度に係る補正係数を設定している。図中の「試験値」は試験座屈荷重（最大負荷荷重に相当）、「理論値」は計算座屈荷重（予想耐力に相当）を示す。電共研の知見においてはこの最弱部が中央寄りとなる場合（下図①）は計算座屈耐力に対する係数として \square 倍、最弱部が端に位置する場合（下図②）は係数として \square 倍を用いることとしている。なお、メカニカルスナッパにおいては、オイルスナッパのターンバックルに相当する部位

がなく、 $1/L$ が表記できないため、便宜的に $1/L=0$ の位置に、試験値/理論値の値を示す。

電共研での試験結果では、試験座屈荷重が計算座屈荷重を下回っているが、計算座屈荷重は計算式により算出された座屈荷重であり、実際のメカニカルスナップ、オイルスナップにおいては芯ずれ等の実機固有の理由により、計算座屈荷重より低い荷重にて座屈することがあるため、試験結果より座屈の補正係数を設定し評価することは適切である。

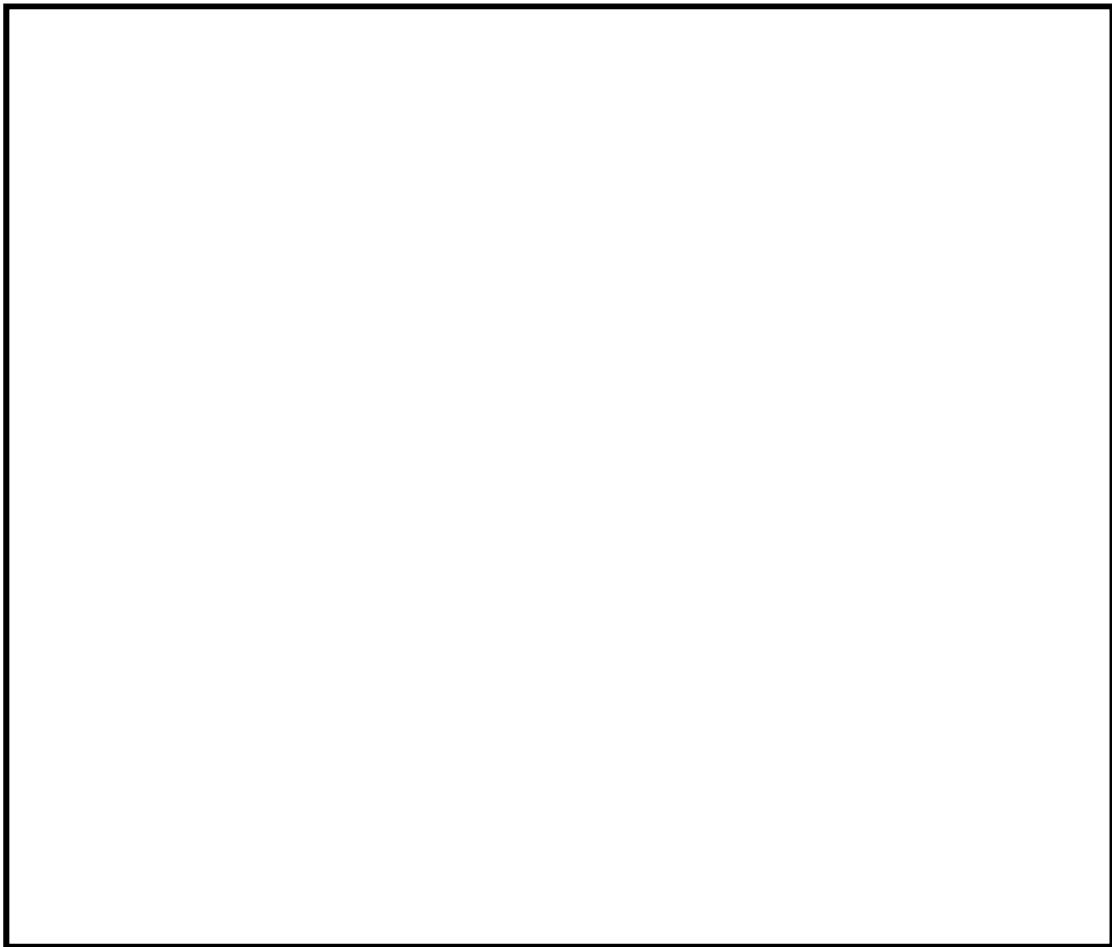


図 4 電共研及び電共研以前に実施されたオイルスナップの座屈試験結果

メカニカルスナップの試験結果及びオイルスナップの検討結果により、スナップの座屈荷重評価においては、複数の試験体における試験結果から、ばらつきを考慮しても、計算座屈荷重に対する補正係数として 倍もしくは 倍を採用することで適切に評価可能と考えられる。

3. ばらつきの影響を考慮した限界耐力値

2.におけるばらつきの検討結果を踏まえ、機能部品（アンギュラー玉軸受）の限界耐力値の低減を反映した限界耐力値を表 6 に示す。表 6 に記載の無い型式のメカニカルスナップについては、ばらつきの影響を考慮しても電共研の限界耐力値からの変更が発生しないものである。今回工認の詳細評価において、表 6 の 2 つの型式のメカニカルスナップに対しては、ばらつきの検討結果反映後の限界耐力値を適用し評価を行う。

表 6 ばらつきの影響を考慮した限界耐力値

型式	定格容量 (kN)	ばらつきの検討結果反映前		ばらつきの検討結果反映後	
		最小裕度 部位	限界耐力値 (kN)	最小裕度 部位	限界耐力値 (kN)
SNS-3	30				
SMS-10	100				

ロッドレストレイント耐力試験の概要

1. はじめに

本資料では、今回工認にて新規に設定したロッドレストレイントの設計評価における基準値（許容荷重）が、ロッドレストレイントの実耐力に対して十分な余裕をもった値であることを確認する目的で実施されたロッドレストレイント耐力試験の概要について説明する。

2. 耐力試験の目的

ロッドレストレイントの耐力試験により、ロッドレストレイントの実力の耐力値を明らかにすることとともに、メーカーが従来から使用している設計手法が、ロッドレストレイントの許容限界（定格荷重）を超える荷重に対しても適用可能であるかを確認し、ロッドレストレイントの限界耐力確認を実施する。

また、ロッドレストレイントの限界耐力を確認することで、今回工認で新規に設定したロッドレストレイントの基準値（許容荷重）の妥当性を検証する。

2.1 限界耐力確認及び新規の基準値確認手順

ロッドレストレイント限界耐力評価法策定のための検討フローを図 2-1 に示す。フローのロッドレストレイントの裕度推定にあたっては、J E A G 4 6 0 1 に基づく許容応力体系を用いる。

また、フローの予想耐力と試験結果（耐力確認荷重）の比較及び限界耐力評価の再検討に関して、概念図を図 2-2 に示す。図 2-2 のとおり、耐力確認荷重が最小裕度部位の予想耐力を上回る結果となった場合は予想耐力を上方修正するよう限界耐力評価法を見直し、耐力確認荷重が最小裕度部位の予想耐力を下回る結果となった場合又は想定していなかった部位が破損ないし機能喪失した場合は予想耐力を下方修正するよう限界耐力評価法を見直す。

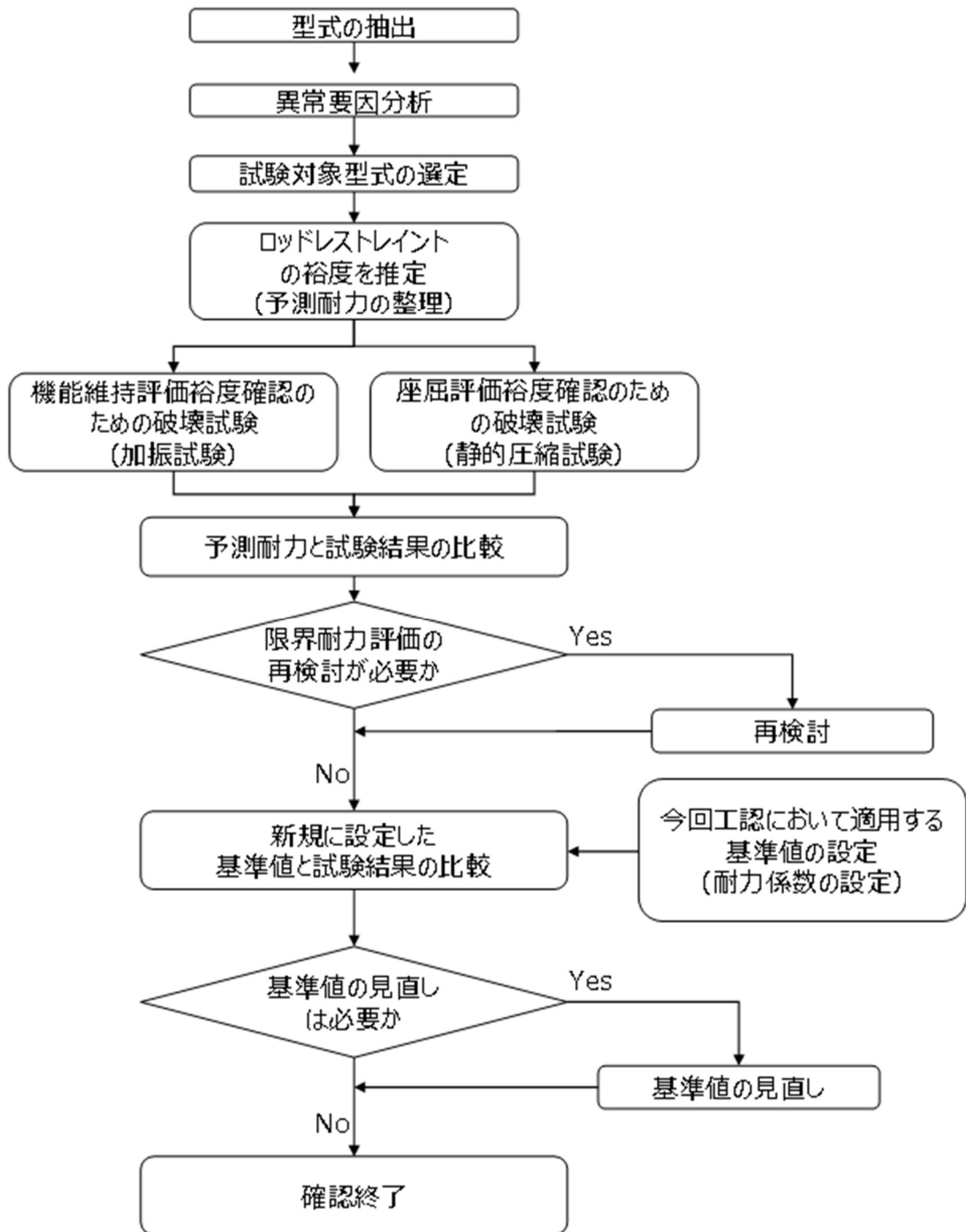


図 2-1 ロッドレストレイント限界耐力確認手順







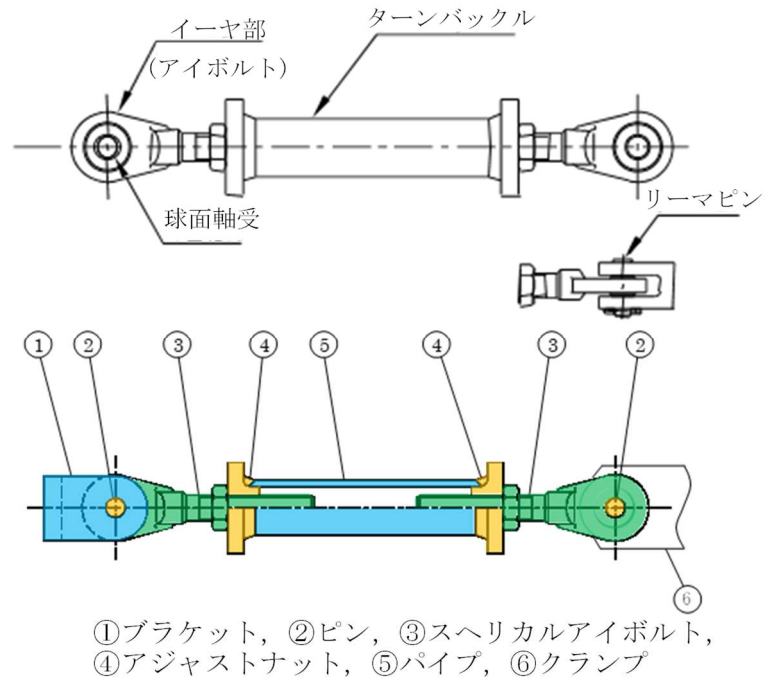
	机上計算による 予想耐力算出	試験における耐力確認 荷重の確認	限界耐力値の設定
耐力確認荷重が 予想耐力を上 回った場合	予想耐力 	耐力確認荷重 	限界耐力値  必要に応じて 予想耐力を 上方修正
耐力確認荷重が 予想耐力を下 回った場合、又 は想定していな かった部位が破 損ないし機能喪 失した場合	予想耐力 	耐力確認荷重 	予想耐力を 下方修正 限界耐力値 

図 2-2 限界耐力評価の再検討方針の概要図

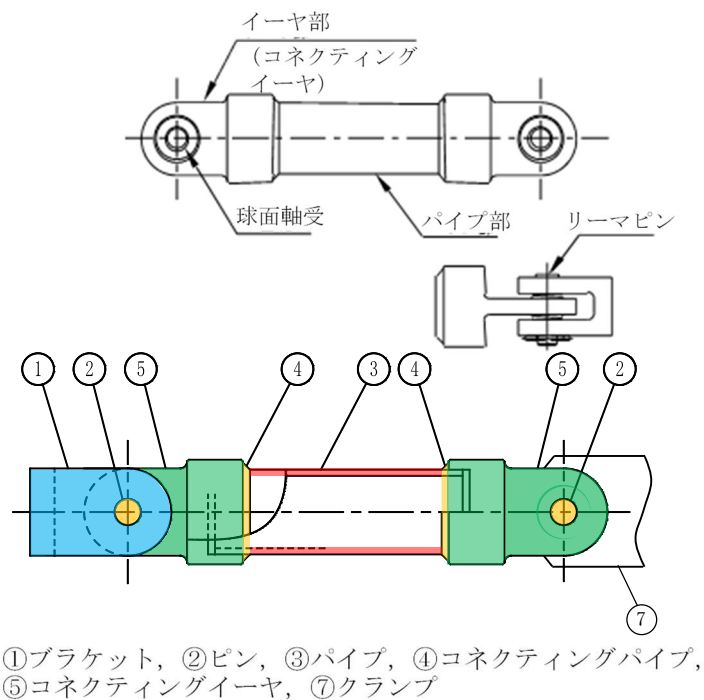
3. ロッドレストレイント耐力試験

3.1 試験対象の選定

島根 2 号機における使用実績を調査し、特に地震動の増加が懸念される箇所である S クラス及び S s 機能維持範囲に設置されるロッドレストレイントの型式を抽出した。代表となる基本型式の構造図を図 3-1 に示す。



基本型式：RSA 型ロッドレストレイント



基本型式：RTS 型ロッドレストレイント (型式 06～25)

図 3-1 RSA 型及び RTS 型ロッドレストレイント構造図

3.1.1 異常要因分析を踏まえた耐力試験における評価対象選定の基本的な考え方

ロッドレストレイントの耐力試験における評価項目を明らかにするために異常要因分析を実施した。

その結果，表 3-1 に示すロッドレストレイントの異常要因モードで代表できることが確認された。

また，構造部材の損傷として，構造部材の部材ごとの変形等に加えてロッドレストレイント全長に対する座屈が考えられることから，ロッドレストレイントの地震時及び地震後の機能を確認するための「機能維持評価のための耐力試験」に加えて「座屈評価のための耐力試験」を行うこととした。

異常要因分析を踏まえて耐力試験における評価対象となる部位を基本型式ごとに一覧化したものを表 3-2-1 及び表 3-2-2 に示す。

各々のロッドレストレイントは，型式及び容量ごとに若干の差異はあるものの，構成部品は概ね同様であることから，代表型式及び容量について限界耐力を確認すれば，他の型式及び容量へ展開可能であることを確認した。

表 3-1 ロッドレストレイントの異常要因モード

表 3-2-1 RSA 型ロッドレストレイントの構造部材

番号	部品
②	ピン
③	スヘリカルアイボルト
④	アジャストナット
⑤	パイプ

表 3-2-2 RTS 型ロッドレストレイントの構造部材

番号	部品
②	ピン
③	パイプ
④	コネクティングパイプ
⑤	コネクティングイーヤ

3.1.2 支持機能評価裕度確認のための耐力試験対象の選定

構造部材の強度評価から、耐力試験における評価対象となる構造部材の予想耐力を推定した上で、座屈を除く裕度（予想耐力／定格荷重）を推定した。

さらに、各型式で裕度が最小の部品を特定し、最小裕度部品が同じ型式でグループ化を行った。（最弱部のグループ化）なお、ここでは予想耐力による最小裕度部品をもとにグループ化しているため、後述する限界耐力による最小裕度部品とは一部異なる。

各型式の最小裕度部品の特定結果を表 3-3-1 及び表 3-3-2 に示す。

耐力試験対象型式は、表 3-3-1 及び表 3-3-2 に示したグループの中から、代表的な定格荷重となる型式を選定した。なお、各型式の試験体は 1 体とし、各型式において RSA-6（定格容量 60kN）のもののみ試験のばらつきを確認するために 3 体とした。各型式の試験体選定結果を表 3-4-1 及び表 3-4-2 に示す。

なお、ばらつきの確認は最小裕度部位、耐力確認荷重が異なる試験体間で同様の結果となることを確認するために実施するものであり、破損時の荷重（最大負荷荷重）のばらつきを評価するためのものではない。

表 3-3-1 RSA 型ロッドレストレイントの最小裕度部品

グループ	型式	最小裕度部品
1	RSA-06, 6, 10, 16, 25	スヘリカルアイボルト (穴部引張)
2	RSA-1	スヘリカルアイボルト (ボルト部引張)
3	RSA-3	球面軸受 (支圧) *

注記* : 球面軸受については, SMS 型メカニカルスナッパ及び SN 型オイルスナッパと同一仕様のものを使用しており, 電共研の試験結果が代用可能である。

表 3-3-2 RTS 型ロッドレストレイントの最小裕度部品

グループ	型式	最小裕度部品
1	RTS-6, 10, 16, 25	コネクティングイーヤ (穴部引張)
2	RTS-06, 1	コネクティングパイプ (溶接部せん断)
3	RTS-3	球面軸受 (支圧) *

注記* : 球面軸受については, SMS 型メカニカルスナッパ及び SN 型オイルスナッパと同一仕様のものを使用しており, 電共研の試験結果が代用可能である。

表 3-4-1 RSA 型ロッドレストレイント試験体選定結果

グループ	型式	定格荷重	試験体数	備考
1	RSA-06	6kN	1	最小容量
	RSA-6	60kN	3	ばらつき確認対象
	RSA-25	250kN	1	最大容量
2	RSA-1	10kN	1	
3	—	—	—	スナッパ (電共研) にて知見有

表 3-4-2 RTS 型ロッドレストレイント試験体選定結果

グループ	型式	定格荷重	試験体数	備考
1	—	—	—	RSA 側で代表して実施
2	RTS-1	10kN	1	同一グループ内の最大容量
3	—	—	—	スナッパ (電共研) にて知見有

3.1.3 座屈評価裕度確認のための耐力試験対象の選定



構造部材の強度評価から、耐力試験における評価対象となる構造部材の予想耐力を推定した上で、座屈を含む裕度（予想耐力／定格荷重）を推定した。

この推定に基づき、座屈裕度最小となる型式が 60kN 以下のもの（06, 1, 3, 6）であることが確認されたことから、この中から代表として RSA-6 を静的座屈試験の試験体として選定した。

なお、電共研におけるスナッパの静的座屈試験における知見では、座屈の限界耐力は、耐震支持装置全長（ピン間距離）L に対する最弱部*の位置 l の関係から以下に示す傾向変化を確認している。



ロッドレストレイントにおいても同様の傾向となることを確認する目的から、以下に示す試験体を選定した。

- ・ RSA-6（定格荷重 60kN） ピン間距離=  1 体
- ・ RSA-6（定格荷重 60kN） ピン間距離=  1 体

また、座屈評価法のための耐力試験は静的試験であり結果にばらつきがでにくいこと、座屈強度はロッドレストレイントの基本構造と寸法から決まること、基本構造はどの型式も同じであることから、材料力学の考え方に基づき試験結果を他の式に展開できるため、代表として試験体は 1 体とした。

注記*：電共研の知見では、断面二次モーメントが大きく変化する点としており、具体的には本体部とイヤ部が接続する点のことを示し、主にねじによる締結部のことを示している。ロッドレストレイントの場合、RSA 型ロッドレストレイントのスヘリカルアイボルトのボルト締結部が相当する。

4.1 耐力試験における試験項目

4.1.1 支持機能評価裕度確認のための耐力試験

ロッドレストレイントの地震時等における支持機能に係る評価裕度確認のため、定格荷重以上の負荷荷重による加振試験を実施した。

4.1.2 座屈評価裕度確認のための耐力試験

ロッドレストレイントの座屈評価裕度確認のため、定格荷重以上の負荷荷重による静的圧縮試験を実施した。

4.2 耐力試験における試験内容

4.2.1 支持機能評価裕度確認のための耐力試験（加振試験）

所定の目標加振荷重レベルから開始し、ロッドレストレイントの支持機能が維持できなくなった加振荷重レベルまで加振荷重を段階的に増加させて試験を実施した。なお、入力の変位制御にて行った。試験入力条件を表 4-1 に示す。

耐力試験の試験入力条件は、地震による繰返し交番荷重を想定し既往知見での配管試験同様、正弦波入力としている。なお、ロッドレストレイントは静的機器でありメカニカルスナップのような動剛性の振動数依存性（別紙 5 図 4-18 参照）はないことから、入力波の振動数等の設定が耐力値の取得に与える影響はないが、定格荷重の大きな型式における加振試験では加振荷重が大きくなるため、加振機の性能を考慮して加振条件を設定した。このような条件設定方法については、J N E S 研究における設定と同様である。（別紙 5 4.2.2 正弦波加振試験(1)及び(2)参照）

表 4-1 試験入力条件

試験名	加振条件		入力変位
	入力波	サイクル数	

a. 試験方法

なお、ロッドレストレイントは静的機器であり、配管の自重・熱膨張等、長期荷重を支持すること、及びスナップのような動的機構の応答速度に起因した周波数特性はないことを踏まえ、加振条件は、加振器の性能制限などを考慮して設定した。試験は変位制御とし、変位を入力することで荷重を発生させた。

b. 試験装置

振動試験装置の概要を図 4-1 に示す。

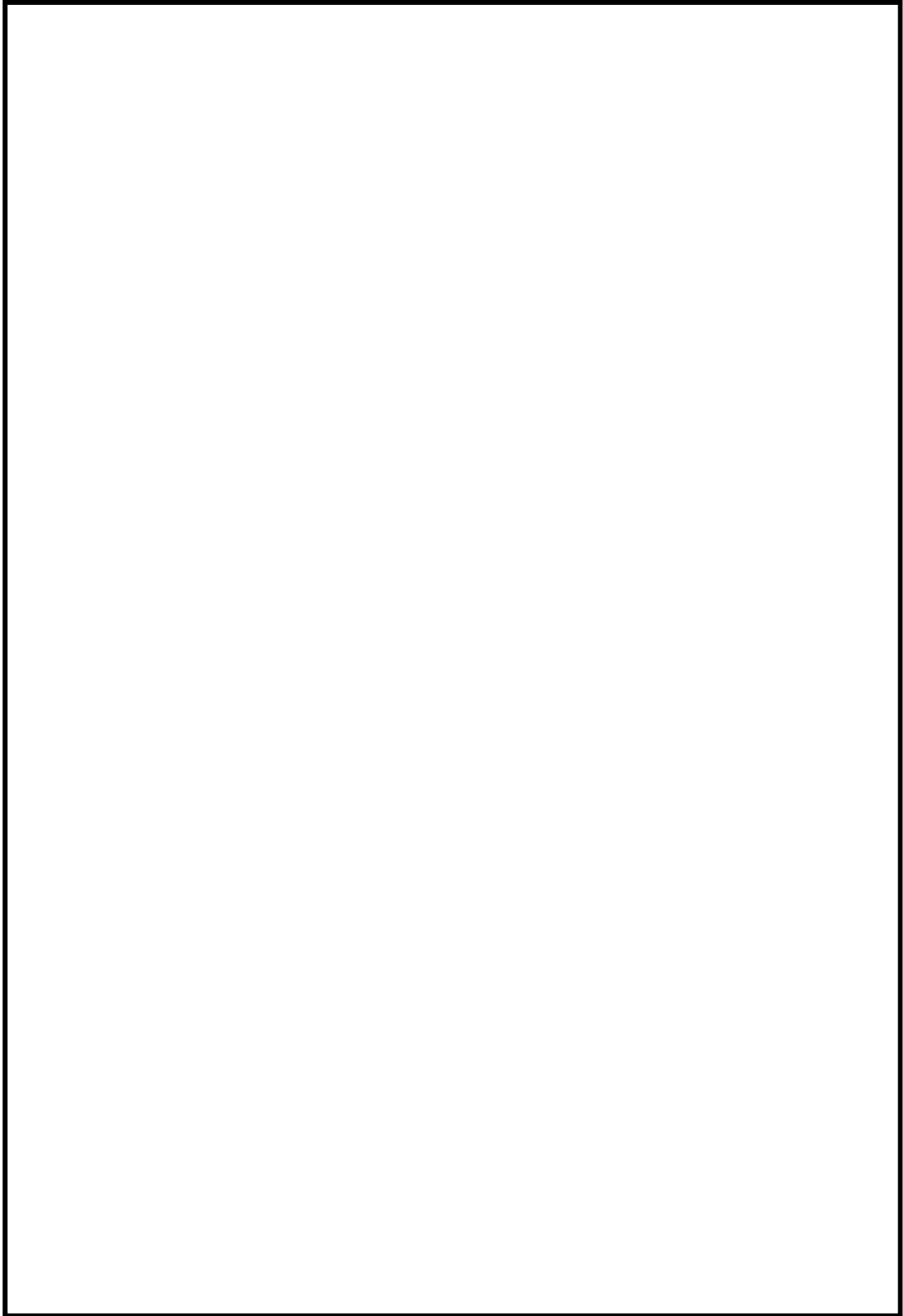
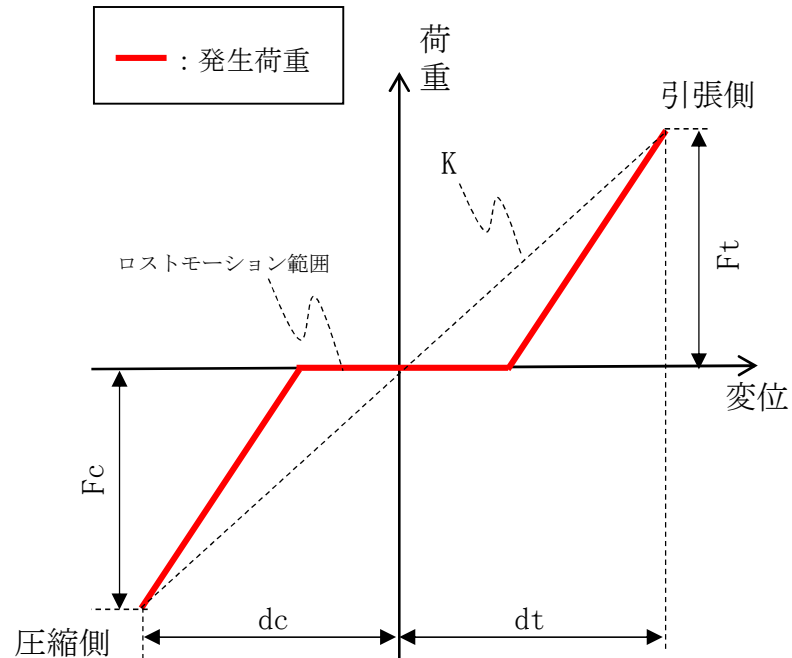


図 4-1 加振試験体系図

c. 取得データ

構造部材の耐力確認のため、損傷に至るまでの最大変位及び最大荷重についての荷重変位特性を取得した。試験結果から得られる荷重変位特性イメージを図4-2に示す。



F_t, F_c : 平均ばね定数算出用荷重(引張, 圧縮)

d_t, d_c : 平均ばね定数算出用変位(引張, 圧縮)

K : ばね定数 ($K = (|F_t| + |F_c|) / (|d_t| + |d_c|)$)

図4-2 荷重変位特性のイメージ

4.3.2 座屈評価裕度確認のための耐力試験 (静的圧縮試験)

a. 試験方法

試験体を試験機に取り付け、圧縮方向に変位を入力し、発生する荷重を記録する。変位の入力は本体が座屈するまで入力する。

b. 試験装置概要

静的圧縮試験の装置概要を図4-3に示す。

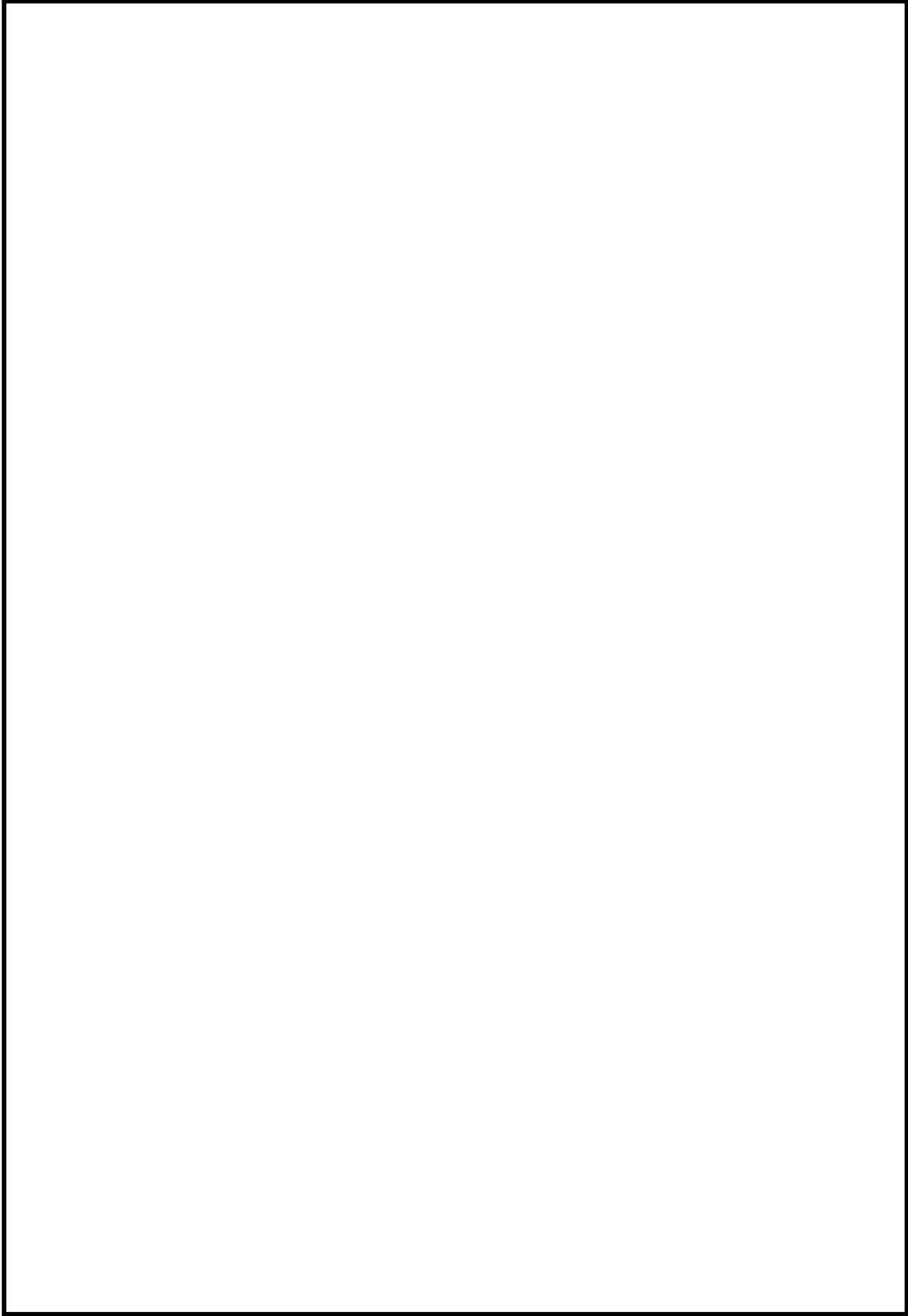


図 4-3 静的圧縮試験装置の概要

4.3 耐力試験結果

4.3.1 支持機能評価裕度確認のための耐力試験（加振試験）

ロッドレストレイントが損傷し、支持装置の機能が維持された状態における最大荷重（最大負荷荷重）と機能喪失する試験ケースを除いた試験ケースにおける最大荷重（耐力確認荷重）等をまとめた結果を表4-2に示す。RSA型ロッドレストレイント及びRTS型ロッドレストレイントの加振試験における時刻歴荷重波形の代表を図4-4及び図4-5に示す。

なお、いずれの供試体においても共通して以下の損傷モードが確認された。

- (1) イーヤ穴部径拡大（ギャップ拡大）
- (2) イーヤねじ部曲り，き裂発生及び破断
- (3) ピン破断（せん断破壊）

4.3.2 座屈評価裕度確認のための耐力試験（静的圧縮試験）

静的圧縮試験を実施した表4-2にあわせて示す。

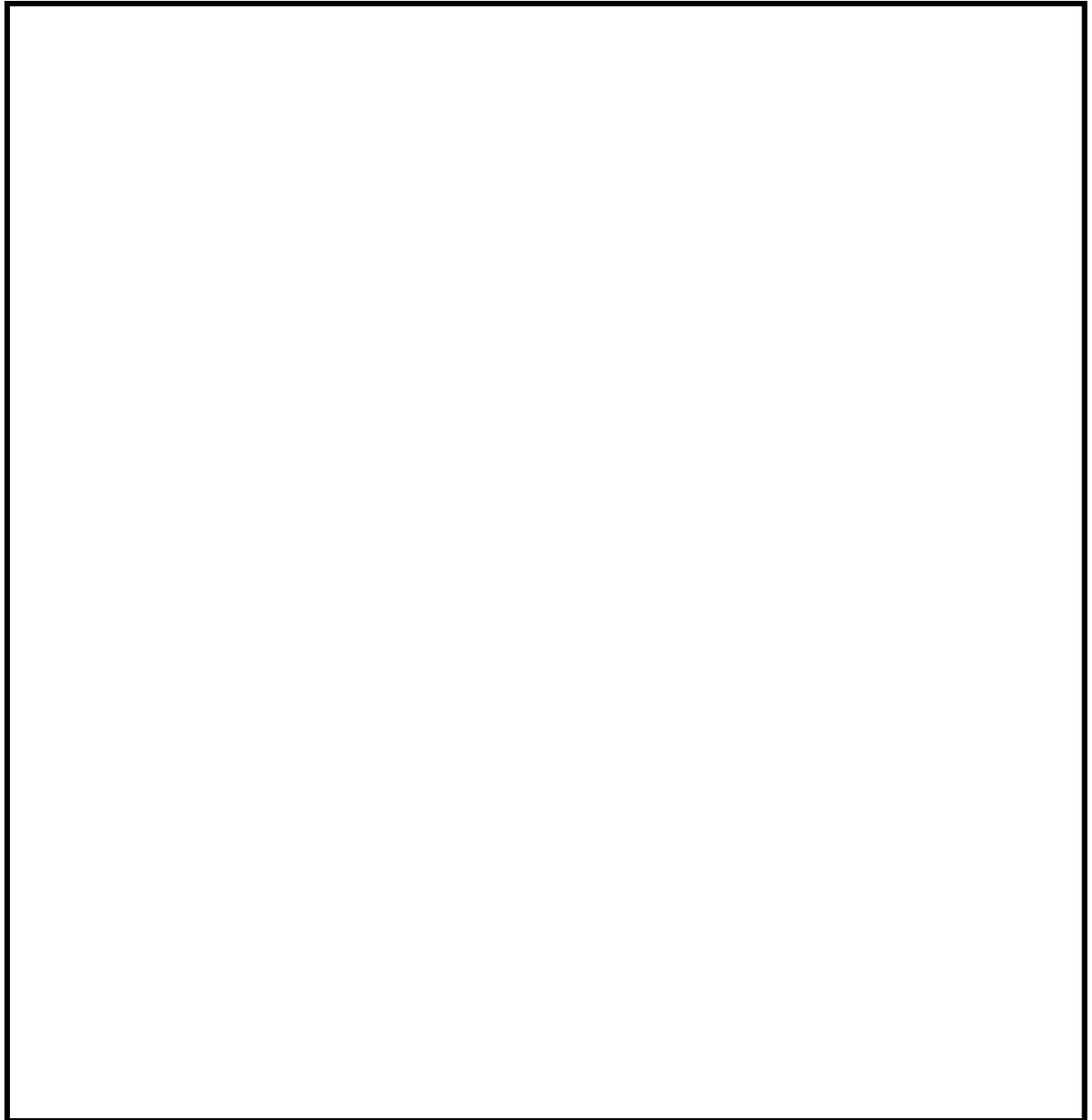


図 4-4 供試体 No. RSA-06-1 の加振試験における時刻歴荷重波形

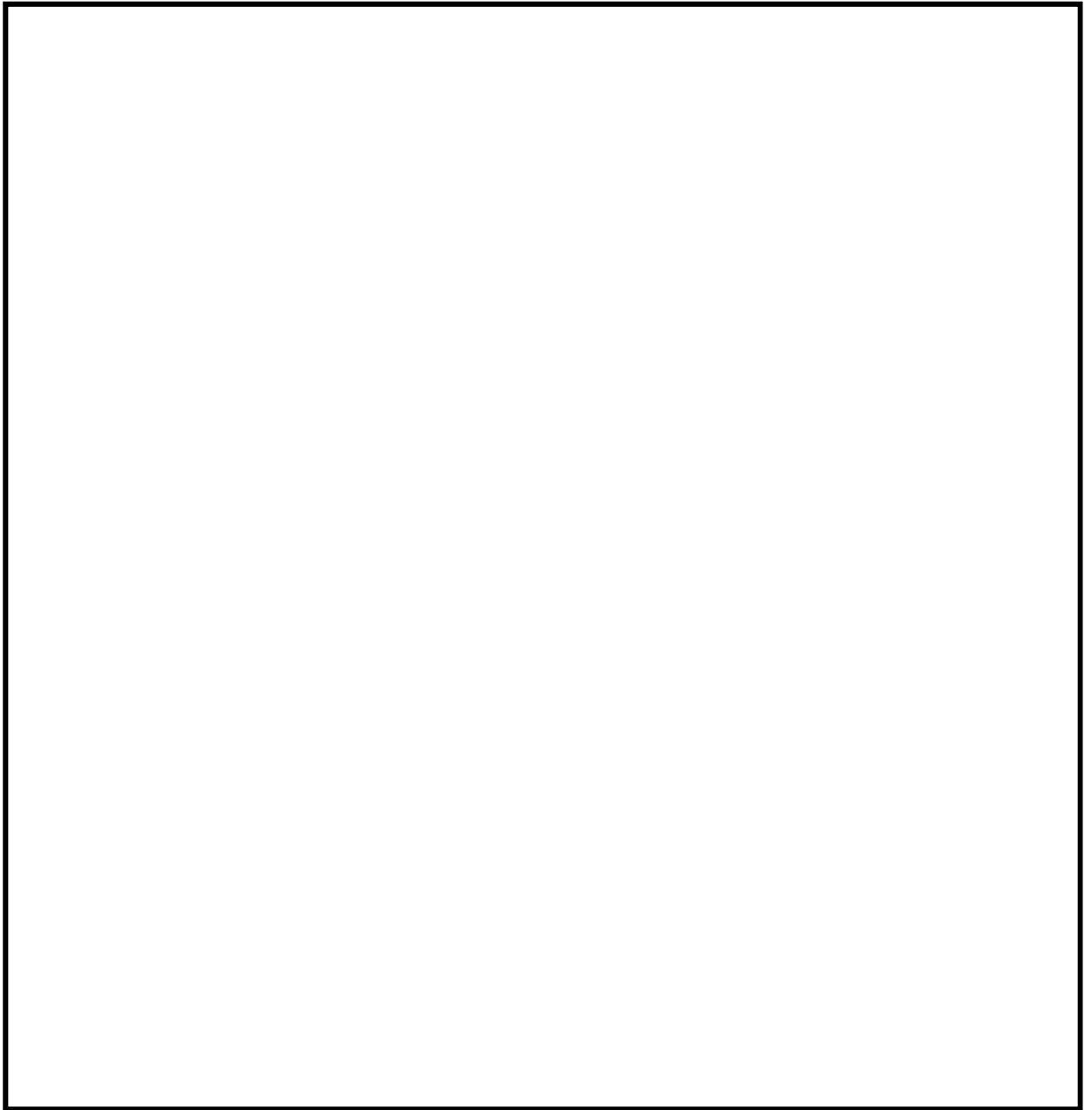


図 4-5 供試体 No. RTS-1-3 の加振試験における時刻歴荷重波形

表 4-2 ロッドレストレイント耐力試験結果

供試体 No.	型式	① 定格荷重 (kN)		試験結果		強度計算結果 (予測値)			③ 耐力確認荷重 (kN)	③/②	③/①
		引張	圧縮	最大負荷荷重 (kN)	損傷箇所	② 予測値 (kN)	最小裕度部位	評価区分			
RSA-06-1	RSA-06	9			・イーヤ穴部 穴径拡大 ・イーヤねじ部曲り						
RSA-1-2	RSA-1	15			・イーヤ穴部 穴径拡大 ・イーヤねじ部曲り						
RSA-6-4	RSA-6	90			・イーヤ穴部 穴径拡大 ・イーヤねじ部曲り						
RSA-6-5	RSA-6	90			・イーヤ穴部 穴径拡大 ・イーヤねじ部曲り						
RSA-6-6	RSA-6	90			・イーヤ穴部 穴径拡大 ・イーヤねじ部曲り						
RSA-25-7	RSA-25	375			・イーヤ穴部 穴径拡大 ・イーヤねじ部曲り						
RTS-1-3	RTS-1	15			・イーヤ穴部 穴径拡大 ・ピン破断 (せん断破壊)						
RSA-6-11	RSA-6	90			・イーヤねじ部曲り						
RSA-6-12	RSA-6	90			・イーヤねじ部曲り						

注記* : RSA-6-11 及び RSA-6-12 は座屈評価裕度確認のための耐力試験 (静的圧縮試験) の供試体であるため, 最大負荷荷重は圧縮荷重のみを取得している。なお, RSA-6 における引張荷重は, 供試体 No. RSA-6-4~6 にて確認している。

4.4 耐力試験結果の考察

耐力試験結果より、公称応力による予想耐力と耐力試験で得られた耐力確認荷重との関係を比較・検討し考察を行うとともに、耐力試験の再現性についても確認した。

4.4.1 予想耐力との比較等による耐力試験結果の考察

評価対象部位について、耐力試験結果から得られる耐力確認荷重を予想耐力と比較し、以下のよう到大別した。

(1) 耐力確認荷重が予想耐力を上回った場合（図2-2の上段の場合）

加振試験で得られた耐力確認荷重については、いずれの供試体においても、予想耐力を上回ることを確認した。

(2) 耐力確認荷重が予想耐力を下回った場合（図2-2の下段の場合）

耐力確認荷重が予想耐力を下回った評価項目としては、RSA-6-11 [] 座屈耐力が該当する。RSA-6-11については短尺の装置に対する座屈強度確認のために実施したものであり、座屈予想耐力が [] kN に対し、耐力確認荷重は [] kN となり、耐力確認荷重が予想耐力を下回った。RSA型ロッドレストレイントはいずれの型式においても共通して、イーヤねじ部曲りによる損傷が確認されており、この部位の曲げ強度がRSA型ロッドレストレイントの最弱部であることが考えられる。このことから、RSA-6-11の静的圧縮挙動においても、座屈損壊が生じる前にイーヤねじ部の曲げが生じていたものと考えられる。このため、RSA-6-11の座屈耐力は、耐力確認荷重に基づく定量的な確認はできないものの、耐力確認荷重よりも高いことが推定される。

また、長尺の装置を想定したRSA-6-12 [] についても、ほぼ同様な損傷形態及び耐力確認荷重が確認され、耐力確認荷重が [] kN に対し、座屈予想耐力の [] kN を上回る結果となった。

これらのことから、RSA型ロッドレストレイントの耐力はイーヤねじ部曲げ変形に基づき設定することが適切であると考えられる。

4.4.2 耐力試験の再現性

再現性を確認するためのRSA-6の試験体3体に対する試験では、いずれも、①イーヤ穴部における穴径拡大と、②イーヤねじ部曲りを確認した。表4-2に示すとおり、最大負荷荷重は圧縮及び引張側ともに同程度の値を示し、損傷箇所、損傷の様相もほぼ同一のものであったことから、再現性を有していると考えられる。

5. ロッドレストレイントの二次評価荷重の妥当性確認

ロッドレストレイント耐力試験は、その試験結果が、試験実施対象以外の型式にも適用可能となるよう、損傷要因分析の網羅的な確認に基づき、供試体の選定及び試験条件を設定し試験を実施した。また、試験結果は再現性を有することを確認した。この試験結果に基づき、ロッドレストレイントの二次評価荷重の設定の妥当性を確認する。

耐力試験にて確認した耐力確認荷重に対する定格荷重の裕度（表4-2の③/①の値）と、J E A G 4 6 0 1に規定の許容限界に対する定格荷重の裕度の比較を表5-1に示す。なお、ロッドレストレイントは、すべての加振試験において耐力確認荷重が予想耐力を上回っており、かつ予想耐力を上方修正する必要がないため、限界耐力値は設定せず、J E A G 4 6 0 1に規定の許容限界及び試験結果として耐力確認荷重との比較を行う。

表5-1に示すとおり、今回工認で適用する新規耐力係数は、いずれの裕度よりも保守的に設定されていることから、新規耐力係数に基づき設定されるロッドレストレイントの二次評価において適用する新規基準値は妥当であることを確認した。

表5-1 ロッドレストレイント耐力試験結果と新規耐力係数の比較結果

型式	定格荷重 (kN)	定格荷重の裕度			新規耐力係数	
		J E A G 4 6 0 1 に規定の許容限界		耐力試験における 耐力確認荷重	Ⅲ A S	Ⅳ A S
		Ⅲ A S	Ⅳ A S			
RSA-06	9					
RSA-1	15					
RSA-3	45					
RSA-6	90					
RSA-10	150					
RSA-16	240					
RSA-25	375					
RTS-06	9					
RTS-1	15					
RTS-3	45					
RTS-6	90					
RTS-10	150					
RTS-16	240					
RTS-25	375					
RTS-60	900					

ロッドレストレイントの新規耐力係数にあたってのばらつきの考え方

1. はじめに

ロッドレストレイントの新規耐力係数設定にあたり、ロッドレストレイント耐力試験結果に対するばらつきの考え方について、本資料に示す。

2. ロッドレストレイントのばらつきの考え方

ばらつきの考え方の観点を以下に示す。

- (1) ロッドレストレイントの個体差及び構造
- (2) ロッドレストレイント耐力試験結果

(1) ロッドレストレイントの個体差及び構造

ロッドレストレイントは精密部品で構成され、品質管理（材料、製作等）が十分実施されている工業製品であることから、ロッドレストレイントの個体差によるばらつきは基本的に小さい。

また、ロッドレストレイントは静的機器であり、スナップのように機能部品を有さないことから、J E A G 4 6 0 1 に規定の許容限界に基づき新規耐力係数を設定することで、一般的な支持構造物と同様にばらつきを考慮した評価が可能である。なお、材料の許容限界については、規格に基づいた許容応力を適用していることから、ばらつきは考慮されている。

(2) ロッドレストレイント耐力試験

(1)のとおり、ロッドレストレイントは、個体差が少なく、静的機器であるため、一般的な支持構造物と同様に J E A G 4 6 0 1 に規定の許容限界に基づき新規耐力係数を設定することでばらつきを考慮することが可能であるが、ロッドレストレイント耐力試験において実施したばらつき確認結果からも、ばらつきに対する妥当性を検討する。

ばらつき確認として実施したロッドレストレイント耐力試験結果を表 2-1 に示す。ロッドレストレイント耐力試験においては、RSA-6 をばらつき確認対象として 3 体の試験を実施しており、損傷箇所は全てイーヤ穴部の穴径拡大及びイーヤねじ部の曲りであり、損傷箇所は全て同一であった。また、最大負荷荷重の差は、最大でも圧縮側荷重の RSA-6-6 (kN) と RSA-6-5 (kN) の差 : kN であり、最大値に対し 10% 程度の差であった。

耐力試験を実施している型式の耐力試験結果と新規耐力係数の比較結果を表 2-2 に示す。ロッドレストレイントのばらつきは最大でも 10% 程度であることに対し、新規耐力係数は最低でも 20% 程度の裕度を持って新規耐力係数を設定している。従って、新規耐力係数の設定にあたり十分な余裕を取っていることから、ばらつきの影響は新規耐力係数の持つ裕度に含まれる。

表 2-1 ロッドレストレイント耐力試験結果 (ばらつき確認)

供試体 No.	型式	定格 荷重 (kN)	試験結果		
			最大負荷荷重(kN)		損傷箇所
			引張	圧縮	
RSA-6-4	RSA-6	90			・イーヤ穴部 穴径拡大 ・イーヤねじ部曲り
RSA-6-5	RSA-6	90			・イーヤ穴部 穴径拡大 ・イーヤねじ部曲り
RSA-6-6	RSA-6	90			・イーヤ穴部 穴径拡大 ・イーヤねじ部曲り

表 2-2 ロッドレストレイント耐力試験結果と新規耐力係数の比較結果

型式	定格荷重 (kN)	① 耐力試験における 耐力確認荷重 (定 格荷重の裕度)	② 新規耐力係数 IV _A S	耐力確認荷重に対 する新規耐力係数 の裕度 (1-②/①) ×100 (%)
RSA-06	9			
RSA-1	15			
RSA-6	90			
RSA-25	375			
RTS-1	15			

3. まとめ

ロッドレストレイントは精密部品で構成されているため個体差によるばらつきは小さく、静的機器であり J E A G 4 6 0 1 に規定の許容限界に基づき新規耐力係数を設定しているため、ばらつきは考慮されている。また、ロッドレストレイント耐力試験で生じたばらつきは、新規耐力係数が持つ裕度より小さい。

以上のことから、島根 2 号機で設置したロッドレストレイントの新規基準値は、ばらつきを考慮した許容値である。

補足-027-10-52 立形ポンプの応答解析モデルの精緻化について

目 次

1. 概要	1
2. 解析モデルの変更点	1
3. 鉛直ばね定数の算定方法	3
3.1 電動機上部軸受部の鉛直ばね定数の算定方法	3
3.2 バレルケーシングフランジ部の鉛直ばね定数の算定方法	4
4. バレルケーシングフランジ部の回転ばね定数の算定方法	6
5. 結論	7

1. 概要

本資料では立形ポンプの応答解析モデルの精緻化内容を整理し、既工認における立形ポンプの応答解析モデルからの変更点を示す。また、今回新たに考慮している回転ばね及び鉛直ばねのばね定数の算定方法について説明する。本資料が関連する工認図書は以下のとおり。

- ・ VI-2-5-4-1-2 「残留熱除去ポンプの耐震性についての計算書」
- ・ VI-2-5-5-1-1 「高圧炉心スプレイポンプの耐震性についての計算書」
- ・ VI-2-5-5-2-1 「低圧炉心スプレイポンプの耐震性についての計算書」
- ・ VI-2-5-7-1-3 「原子炉補機海水ポンプの耐震性についての計算書」
- ・ VI-2-5-7-2-3 「高圧炉心スプレイ補機海水ポンプの耐震性についての計算書」
- ・ VI-2-10-2-11 「隔離弁、機器・配管の耐震性についての計算書」

2. 解析モデルの変更点

既工認における立形ポンプの応答解析モデルは、実機構造を踏まえた振動特性とするため、設備の寸法、質量情報に基づき、主要部であるロータ、コラムパイプ、バレルケーシング及びディスチャージケーシングを相互にばね等で接続した多質点モデルとして構築していた。

今回工認では、最新の知見に基づくモデル化を行う観点から、既工認モデルに対して J E A G 4 6 0 1 - 1991 追補版に基づき、バレルケーシングフランジ部の剛性を回転ばねとして考慮する。また、鉛直方向の動的地震力を適用することに伴い、鉛直方向の固有周期を精緻に算出するため、はり要素に鉛直方向剛性を設定したうえで、新たに鉛直ばね（電動機上部軸受部及びバレルケーシングフランジ部）を考慮している（図 1 参照）。今回工認における解析モデルの変更点を表 1 に示す。

なお、東海第二新規制工認及び柏崎刈羽 7 号機新規制工認にて同様の立形ポンプ応答解析モデルの適用実績がある。

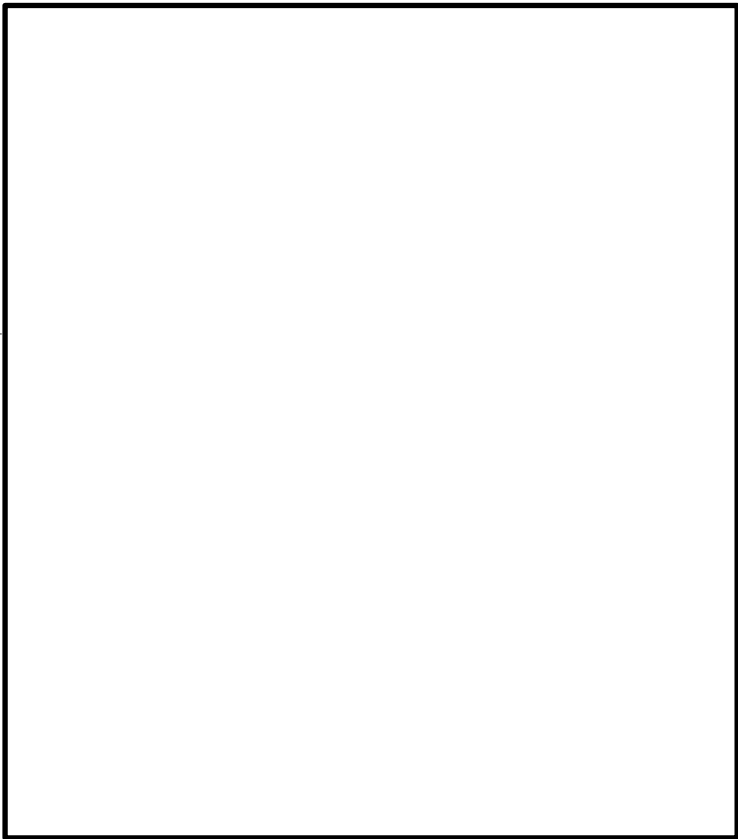
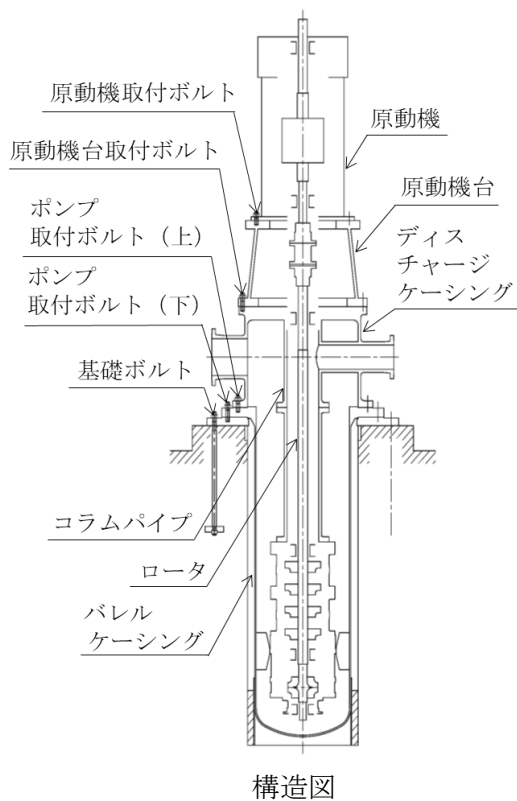


図1 残留熱除去ポンプ応答解析モデル図

表1 今回工認における解析モデルの変更点

No.	変更点	既工認	今回工認
1	自由度	2自由度 ・水平 (X) ・回転 (Z 軸回り)	3自由度 ・水平 (X) ・鉛直 (Y) ・回転 (Z 軸回り)
2	鉛直方向剛性	鉛直方向は「剛」として 自由度なし	以下の鉛直方向剛性を考慮 ・ロータ、コラムパイプ及びバレルケーシング等の鉛直方向剛性 (はり要素に剛性を設定) ・電動機上部軸受部の鉛直方向剛性 (鉛直ばね) ・バレルケーシングフランジ部の鉛直方向剛性 (鉛直ばね)
3	バレルケーシングフランジ部 回転剛性	考慮していない	考慮 (回転ばね)

3. 鉛直ばね定数の算定方法

以下では代表として残留熱除去ポンプにおける鉛直ばね定数の算定方法について示すが、他の立形ポンプについても同様である。

3.1 電動機上部軸受部の鉛直ばね定数の算定方法

電動機上部軸受部の鉛直ばね定数 K_{BV} は、スラスト軸受の鉛直方向剛性 K_{B1} 、ラジアル軸受の鉛直方向剛性 K_{B2} 並びに軸受支持構造物（図 2 参照）の鉛直方向剛性 K_{S1} 及び K_{S2} を直列ばねとして合算したものであり、軸受メーカーの試験結果に基づいて算定する。算定結果を表 2 に示す。

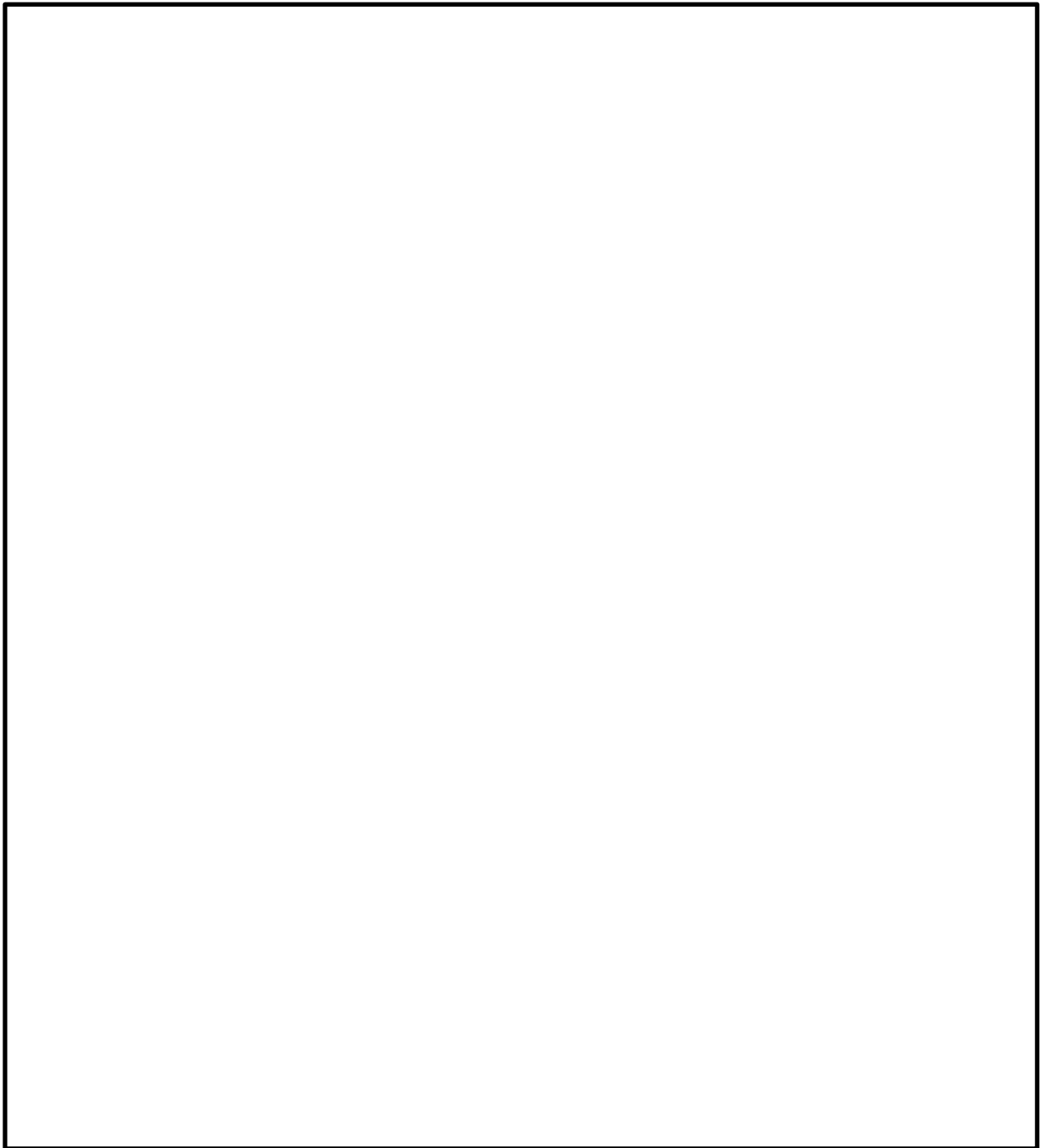


図 2 電動機上部軸受部の構造及び荷重伝達機構

表2 電動機上部軸受部の鉛直ばね定数の算定結果

鉛直ばね定数の算定結果	備考
K_{BV} (N/mm)	
軸受メーカーの試験結果に基づいて算定	

3.2 バレルケーシングフランジ部の鉛直ばね定数の算定方法

バレルケーシングフランジ部の鉛直ばねについては、図3のように外周固定の円輪板に輪形荷重を負荷した状態でのたわみの計算式(3.1)を変形することにより、式(3.2)により鉛直ばね定数 K_{FV} を算定している。計算諸元及び計算結果を表3に示す。

$$w_{\max} = \alpha_{10} \frac{P \cdot a^2}{E \cdot h^3} \dots (3.1)$$

w_{\max} : たわみの最大値

P : 輪形荷重

α_{10} : たわみ係数 (図4からの読取值)

a : 円輪板の外半径 (取付ボルトのピッチ円の半径)

b : 円輪板の内半径 (バレルケーシングの外半径)

b/a : 円輪板の内外半径比 (図4の読取に使用)

E : バレルケーシングフランジの縦弾性係数

h : 円輪板の厚さ (バレルケーシングフランジの板厚)

(出典：機械工学便覧 ((社) 日本機械学会, 1987年) A4-55 表26 No.10)

$$\text{鉛直ばね定数 } K_{FV} = \frac{P}{w_{\max}} = \frac{E \cdot h^3}{\alpha_{10} \cdot a^2} \dots (3.2)$$

表3 バレルケーシングフランジ部の鉛直ばね定数の計算諸元及び計算結果

計算諸元						鉛直ばね定数の 計算結果
a (mm)	b (mm)	b/a (-)	α_{10} (-)	E (MPa)	h (mm)	K_{FV} (N/mm)

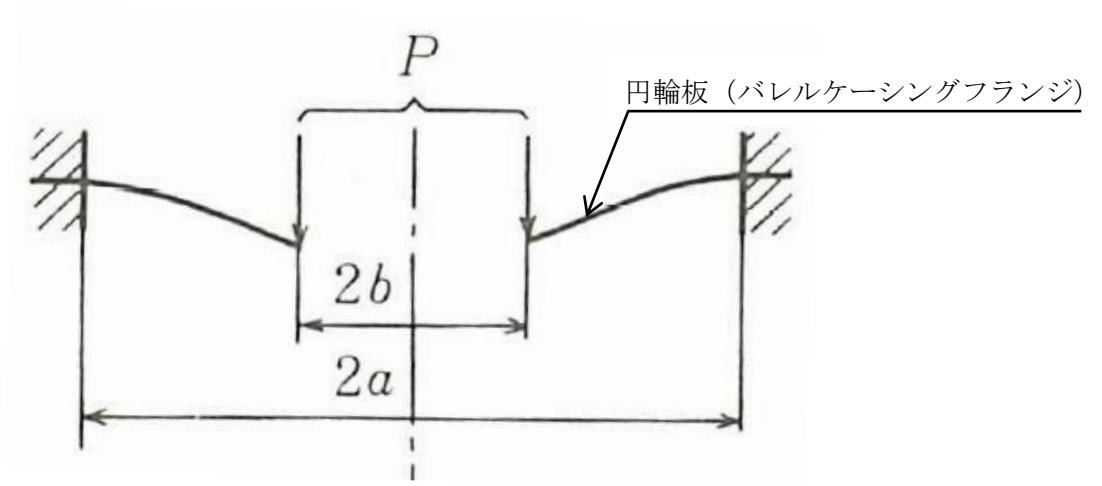


図3 荷重状態とたわみの形

(出典：機械工学便覧 ((社) 日本機械学会, 1987年) A4-55 表 26 No.10)

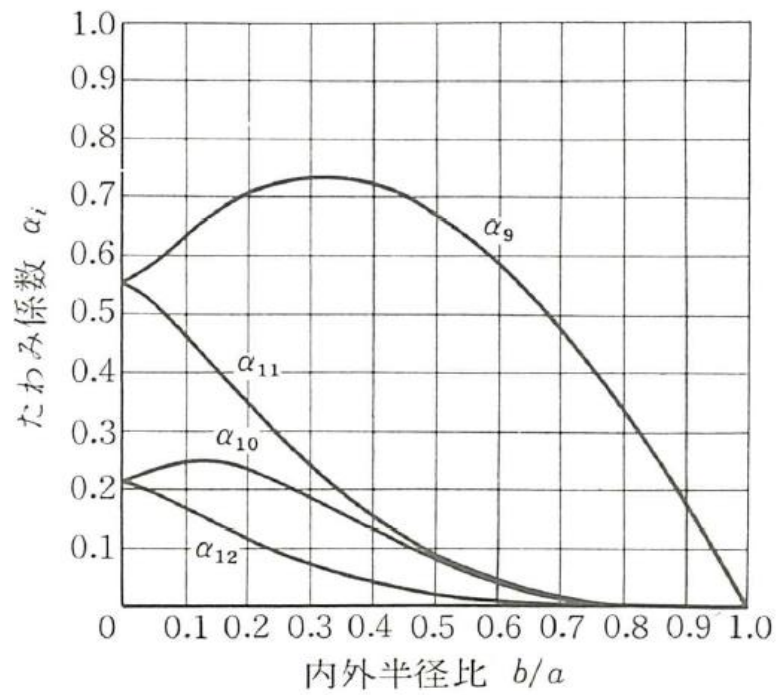


図4 たわみ係数の読取図

(出典：機械工学便覧 ((社) 日本機械学会, 1987年) A4-58 図 83)

4. バレルケーシングフランジ部の回転ばね定数の算定方法

以下では代表として残留熱除去ポンプにおける回転ばね定数の算定方法について示すが、他の立形ポンプについても同様である。

バレルケーシングフランジ部の回転ばねについては、J E A G 4 6 0 1 -1991 追補版に規定される算定式(4.1)により回転ばね定数 $K_{F\theta}$ を算定している。計算諸元及び計算結果を表4に示す。係数 α について、J E A G 4 6 0 1 -1991 追補版では参考図書

「Roark, R. J. and Young, W. C. :Formulas of Stress and Strain, 1975, McGraw-Hill.」が引用されていることから、表5に示す文献値を線形補間し、回転ばね定数を算出している。他の記号の定義は式(3.1)と同じである。

$$\text{回転ばね定数 } K_{F\theta} = \frac{E \cdot h^3}{\alpha} \dots \dots (4.1)$$

表4 バレルケーシングフランジ部の回転ばね定数の計算諸元及び計算結果

計算諸元						回転ばね定数の 計算結果
a (mm)	b (mm)	b/a (-)	α (-)	E (MPa)	h (mm)	$K_{F\theta}$ (N・mm/rad)

表5 回転ばね定数の算出に用いる係数 α

--

5. 結論

今回工認では, 本資料で説明したとおり立形ポンプの応答解析モデルの精緻化を行っており, 精緻化した応答解析モデルによる耐震評価を実施している。

補足-027-10-53 サプレッションチェンバ内設備に対する
スロッシング荷重等の影響評価について

目 次

1. 概要	1
2. 対象設備の整理	2
3. スロッシング影響検討	5
3.1 スロッシング影響検討方針	5
3.2 影響検討に用いるスロッシング荷重及び水位	7
3.3 影響検討結果	8
4. まとめ	11

別紙1 サプレッションチェンバ内部水によるスロッシング荷重等の算定

別紙2 応力評価におけるスロッシング荷重の考慮方法

1. 概要

島根原子力発電所第2号機の今回工認では、サブプレッションチェンバ内部水に対して有効質量を適用し、水平方向の地震慣性力を算出するとともに、スロッシング荷重を個別評価し、耐震評価に考慮することとしている。

本資料では、これに関連して、サブプレッションチェンバに関連する設備に対する有効質量の適用の有無及びスロッシング影響について、個別に検討した結果について示すものである。

なお、本資料が関連する工認図書は以下のとおり。

- ・ VI-2-5-3-1-2 管の耐震性についての計算書（主蒸気系）
- ・ VI-2-5-4-1-3 残留熱除去系ストレーナの耐震性についての計算書
- ・ VI-2-5-4-1-5 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-2-5-5-1-4 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-2-5-5-2-4 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-2-5-5-4-1 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-2-5-6-1-4 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-2-9-4-1 真空破壊装置の耐震性についての計算書
- ・ VI-2-9-4-2-1 ダウンカマの耐震性についての計算書
- ・ VI-2-9-4-2-2 ベントヘッダの耐震性についての計算書
- ・ VI-2-9-4-3 ベント管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-3-3-7-1-17 配管貫通部ベローズ及びベント管ベローズの強度計算書

2. 対象設備の整理

対象設備の整理に当たっては、サブプレッションチェンバに関連する設備を抽出し、抽出された設備に対して、有効質量適用の有無及びスロッシング影響検討の要否を整理する。サブプレッションチェンバの断面概要図を図1に示す。なお、本書におけるサブプレッションチェンバ水位は、すべてサブプレッションチェンバ下端からの高さを表す。

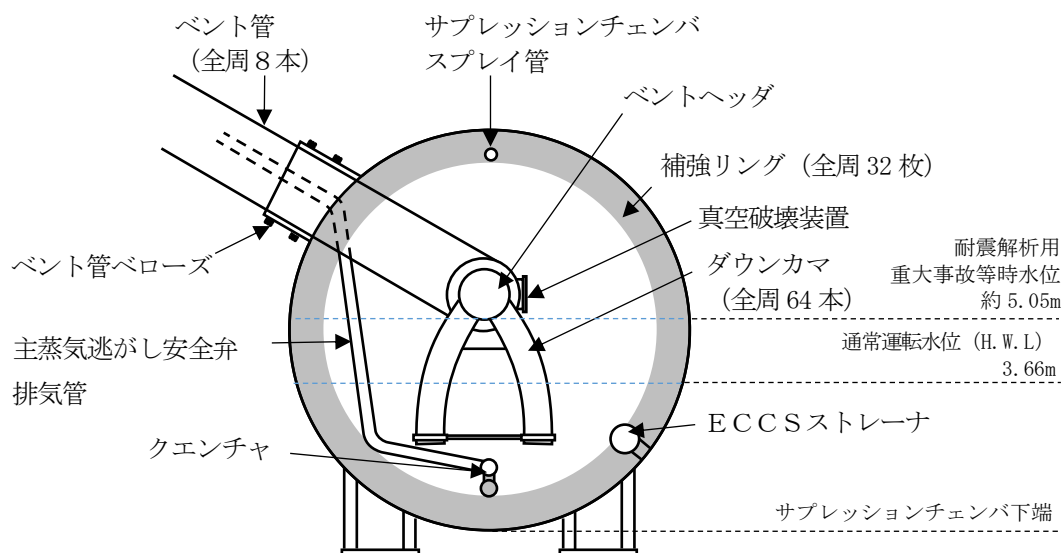


図1 サブプレッションチェンバ断面概要図

(1) 有効質量適用の有無

より実態に応じた地震慣性力を算定するために有効質量を適用する設備は、サブプレッションチェンバ、サブプレッションチェンバサポートである。また、サブプレッションチェンバスプレイ管及びECCSストレーナ、ベント管ベローズについては、有効質量を適用したサブプレッションチェンバの地震応答解析から得られる荷重及び変位を用いて評価を行っているため、有効質量を適用する設備とする。

有効質量を適用することで、地震による発生応力が低減すると考えられる。

(2) スロッシング影響検討の要否

サブプレッションチェンバ内部水によるスロッシング影響検討の要否は、水位（水位変動含む）と設備の設置位置との関係、設備の構造及び運転状態と地震との組合せの観点から判断し、スロッシング影響は、応力評価と要求機能（圧力抑制機能、蒸気凝縮機能）が維持されることについて検討する。

なお、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、ベント管ベローズは、スロッシング荷重を考慮した耐震評価を行っており、その結果を工認図書に記載している。このため、これらの設備は本検討の対象外としている。

(3) 整理結果

(1)及び(2)を踏まえた有効質量適用の有無及びスロッシング影響検討の要否の整理結果を表1に示す。

表 1(1/2) 有効質量適用の有無及びスロッシング影響検討の要否の整理結果

対象設備	評価項目	耐震クラス	重大事故等対処設備の設備分類	有効質量適用の有無 (○：適用， －：適用外)		スロッシング影響検討の要否 (○：要， －：否)		スロッシング影響検討を否とする理由
				DB	SA	DB	SA	
サプレッションチェンバ	応力評価	S	常設耐震重要重大事故防止設備 常設重大事故緩和設備	○	○	－	－	スロッシング荷重を耐震評価に考慮している。
サプレッションチェンバ サポート	応力評価	S	常設耐震重要重大事故防止設備 常設重大事故緩和設備	○	○	－	－	スロッシング荷重を耐震評価に考慮している。
真空破壊装置	応力評価	S	常設耐震重要重大事故防止設備 常設重大事故緩和設備	－	－	－	○	DB条件では真空破壊装置の設置位置に比べ水位が十分低いことからスロッシング影響はない。
ダウンコマ	応力評価	S	常設耐震重要重大事故防止設備 常設重大事故緩和設備	－	－	○	○	*1, *2
	圧力抑制機能					－*1	－*2	
ベントヘッダ	応力評価	S	常設耐震重要重大事故防止設備 常設重大事故緩和設備	－	－	－	○	水位条件からDB時のスロッシング影響はない。
ベント管	応力評価	S	常設耐震重要重大事故防止設備 常設重大事故緩和設備	－	－	－	○	水位条件からDB時のスロッシング影響はない。

注記*1：機能要求時（運転状態Ⅳ（S））において、独立事象として地震との組合せの発生確率が 10^{-7} /年以下となるため、地震時の圧力抑制機能の検討が不要

*2：機能要求時（運転状態Ⅴ（S））において、独立事象として地震との組合せの発生確率が 10^{-8} /年以下となるため、地震時の圧力抑制機能及び蒸気凝縮機能の検討が不要

表 1(2/2) 有効質量適用の有無及びスロッシング影響検討の要否の整理結果

対象設備	評価項目	耐震クラス	重大事故等対処設備の設備分類	有効質量適用の有無 (○：適用， －：適用外)		スロッシング影響検討の要否 (○：要， －：否)		スロッシング影響検討を否とする理由
				DB	SA	DB	SA	
サプレッションチェンバ スプレイ管	応力評価	S	常設耐震重要重大事故防止設備 常設重大事故緩和設備	○	○	－	－	水位条件からDB/SA時のスロッシング影響はない。
ECCSストレーナ*1	応力評価	S	常設重大事故防止設備	○	○	－	－	ストレーナがメッシュ構造であり，ストレーナに接続するティー配管表面積が十分に小さいことからスロッシング影響は小さい。
クエンチャ (主蒸気逃がし安全弁 排気管を含む)	応力評価	B	常設耐震重要重大事故防止設備 常設重大事故緩和設備	－	－	－	○	DB条件はSA条件に包絡
	蒸気凝縮機能					○	－*2	
ベント管ベローズ	応力評価 (疲労評価)	S	常設耐震重要重大事故防止設備 常設重大事故緩和設備	○	○	－	－	スロッシング荷重を耐震評価に考慮している。

注記*1：ストレーナ部ティーを含む。また，耐震Sクラスの原子炉隔離時冷却系配管も含む。

*2：機能要求時（運転状態V（S））において，独立事象として地震との組合せの発生確率が 10^{-8} /年以下となるため，地震時の圧力抑制機能及び蒸気凝縮機能の検討が不要

3. スロッシング影響検討

3.1 スロッシング影響検討方針

スロッシング影響検討が必要な設備及びその影響検討方針について表 2 に示す。各設備の応力評価では、今回工認における基準地震動 S_s による評価に対して、流体解析から得られるスロッシング荷重による影響を確認する。応力評価のフローを図 2 に示す。

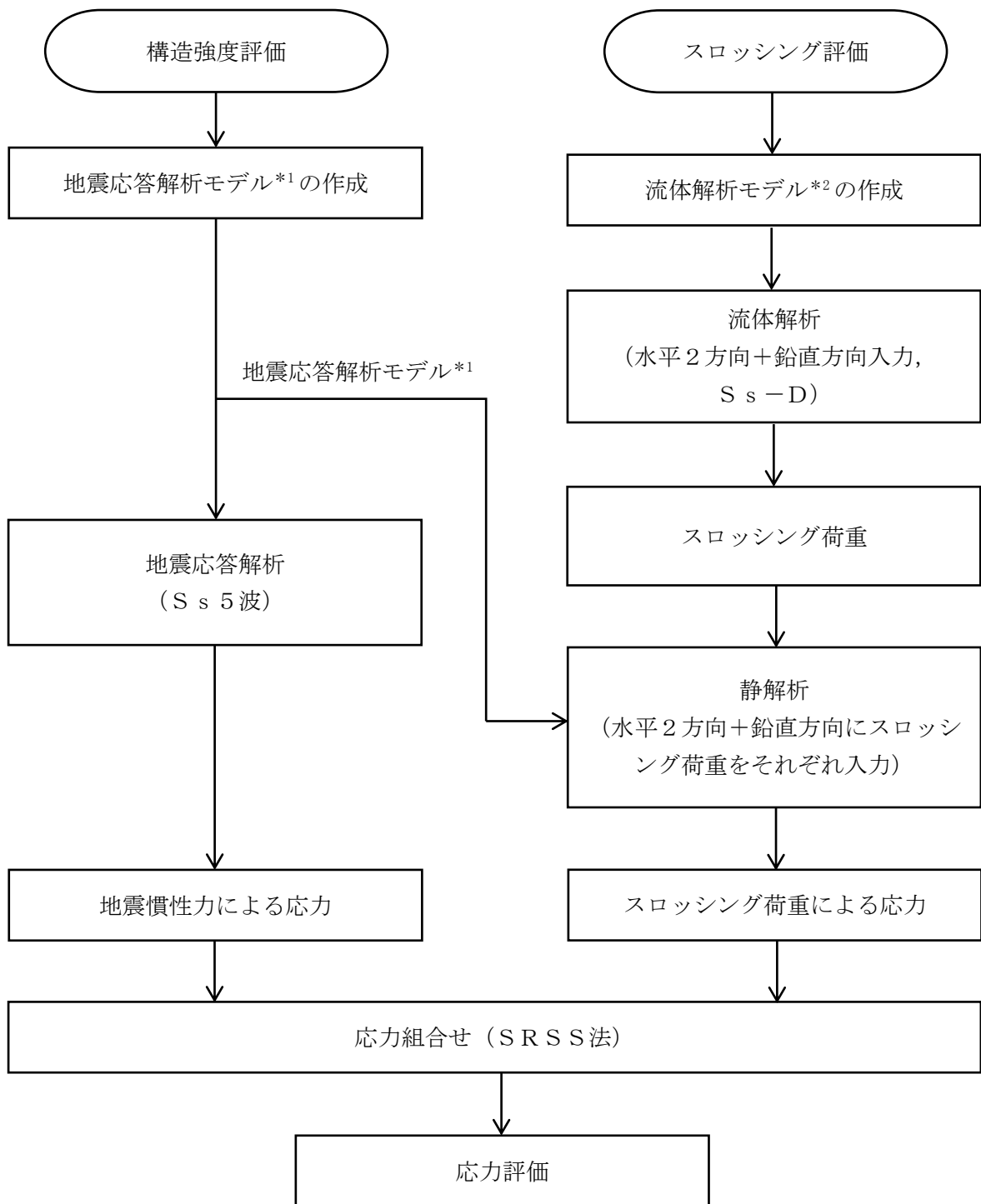
また、クエンチャの要求機能である蒸気凝縮機能は、流体解析結果から得られるクエンチャ位置でのスロッシングによる水位と既往知見*で機能確認された水位との比較によりスロッシングによる影響を確認する。

注記* : NEDE-21864-P “MARK I CONTAINMENT PROGRAM, FINAL REPORT MONTICELLO T-QUENCHER TEST” (試験の詳細は、補足-011「工事計画に係る補足説明資料(原子炉格納施設)」資料 No. 1 に記載。)

表 2 スロッシング影響検討設備及びその影響検討方針

対象設備	評価項目	スロッシング影響検討の要否 (○ : 要, - : 否)		影響検討方針
		DB	SA	
真空破壊装置	応力評価	-	○	スロッシング荷重による発生応力(ダウンカマ, ベントヘッダ, ベント管の最大値)を真空破壊装置の地震慣性力による発生応力に加えて評価する。
ダウンカマ	応力評価	○	○	スロッシング荷重(ダウンカマとベント管及びベントヘッダに対する最大荷重の合算値)をダウンカマに負荷させて応力評価を実施する。
ベントヘッダ	応力評価	-*	○	
ベント管	応力評価	-*	○	
クエンチャ	応力評価	-	○	スロッシング荷重による応力評価を実施する。
	蒸気凝縮機能	○	-	既往知見で機能確認された水位との比較を実施する。

注記* : ダウンカマに作用するスロッシング荷重により当該設備に応力が発生するため、本資料では評価結果を記載する。



注記*1：別紙2の図1及び図4に示す解析モデル

*2：別紙1の図1に示す解析モデル

図2 スロッシング影響評価フロー (応力評価)

3.2 影響検討に用いるスロッシング荷重及び水位

スロッシング荷重及び水位は、流体解析により算出する。流体解析の詳細を別紙1に示し、流体解析により算出したスロッシング荷重を表3に、スロッシングによるクエンチャ位置の最低水位を表4に、クエンチャ位置で最低水位となる時刻（16.0秒）における水位コンター図を図3に示す。

なお、工認図書のDB評価においては、通常運転水位条件に対する保守的な条件として耐震解析用重大事故等時水位条件を適用している。本検討でのDB評価においては、地震慣性力による発生応力は工認図書と同様に耐震解析用重大事故等時水位条件を用いて算出し、スロッシング荷重の算出には通常運転水位条件を適用する。

また、スロッシングによる水位変動によってクエンチャ位置の水位がクエンチャに求められる蒸気凝縮機能に必要な水位（没水高さ）を下回らないことを確認するため、流体解析によりクエンチャ位置の最低水位を求めている。

表3 スロッシング荷重

対象設備	スロッシング荷重(kN)					
	通常運転水位条件*1			耐震解析用重大事故等時水位条件*2		
	NS 方向	EW 方向	鉛直方向	NS 方向	EW 方向	鉛直方向
真空破壊装置				*3	*3	*3
ダウンコマ	6.84	7.49	0.97	18.69	18.28	8.55
ベント管及びベントヘッド				252.36	228.67	728.44
クエンチャ				2.95	6.49	3.77

注記*1：DBの水位条件（3.66m）

*2：SAの水位条件（約5.05m）

*3：スロッシング荷重による発生応力（ダウンコマ，ベント管，ベントヘッドの最大値）を真空破壊装置の地震慣性力による発生応力に加えて評価

表4 スロッシングによる最低水位（通常運転水位条件*）

対象設備	最低水位
クエンチャ	2.93m

注記*：DBの水位条件（3.66m）



図3 水位コンター図

(水平2方向+鉛直方向入力, S s -D, クエンチャ位置での最低水位時点 16.0 秒)

3.3 影響検討結果

(1) 応力評価

今回工認の耐震評価結果とスロッシング荷重を考慮した影響検討結果との比較を表 5 に、疲労評価の詳細を表 6 に示す。応力評価部位は、各設備の裕度最小部位としている。

比較結果から、真空破壊装置及びダウンコマ、ベントヘッダ、ベント管については、「スロッシング荷重考慮」の評価の発生応力が「今回工認」の評価における発生応力より小さくなることを確認した。これらの設備は、「今回工認」の評価では設計用床応答スペクトル I を上回る設計用床応答スペクトルにより得られる震度を用いており、「スロッシング荷重考慮」の評価では設計用床応答スペクトル I により得られる震度を用いている。このため、「スロッシング荷重考慮」の評価の方が地震慣性力による応力が小さい。この地震慣性力による応力の差分よりもスロッシング荷重による応力が小さいため、「スロッシング荷重考慮」の評価の発生応力が「今回工認」の評価における発生応力より小さくなる。

また、クエンチャについてはスロッシング影響による応力の増分は 1%程度である。

以上より、いずれの設備も許容値を満足することを確認した。

なお、応力評価におけるスロッシング荷重の考慮方法については別紙 2 に示す。

表5 スロッシング荷重による影響評価結果（基準地震動S_s）

対象設備	応力評価部位	運転状態	応力分類	今回工認 ^{*1}		スロッシング荷重考慮 ^{*2, *3}		応力比 (②/①)
				①算出応力	許容応力	②算出応力	許容応力	
真空破壊装置	スリーブと ベント管との結合部	S A	一次+二次応力	600 ^{*4}	452	528 ^{*4}	452	0.88
			疲労評価	0.410	1	0.230	1	—
ダウンカマ	ベントヘッドと ダウンカマの結合部	D B	一次+二次応力	884 ^{*4}	458	836 ^{*4}	458	0.95
			疲労評価	0.771	1	0.627	1	—
		S A ^{*5}	一次+二次応力	884 ^{*4}	458	846 ^{*4}	458	0.96
			疲労評価	0.771	1	0.657	1	—
ベントヘッド	サプレッションチェンバ 補強リング	D B ^{*6}	組合せ応力	—	—	—	—	—
		S A	組合せ応力	250	271	202	271	0.81
ベント管	ヘッド接続部	D B	一次+二次応力	798 ^{*4}	393	622 ^{*4}	393	0.78
			疲労評価	0.871	1	0.324	1	—
		S A	一次+二次応力	798 ^{*4}	393	636 ^{*4}	393	0.80
			疲労評価	0.808	1	0.327	1	—
クエンチャ	配管本体	S A	一次+二次応力	228	394	229	394	1.01

注記*1：真空破壊装置及びダウンカマ，ベントヘッド，ベント管は，設計用床応答スペクトルⅠを上回る設計用床応答スペクトルにより得られる震度を用いて評価している。クエンチャは，サプレッションチェンバの設計用震度を上回る震度を用いて評価している。

*2：真空破壊装置及びダウンカマ，ベントヘッド，ベント管は，設計用床応答スペクトルⅠにより得られる震度を用いて評価している。クエンチャは，サプレッションチェンバの設計用震度を上回る震度を用いて評価している。

*3：表3に示すスロッシング荷重又はこれを上回る荷重を用いて評価している。

*4：一次+二次応力評価は許容値を満足しないが，設計・建設規格 PVB-3300 に基づいて疲労評価を行い，十分な構造強度を有していることを確認している。

*5：今回工認における評価では，D B評価の荷重の組合せに包絡されるため，評価を省略している。本影響評価においては，地震慣性力による応力としてD B評価結果を用いて評価している。

*6：S A評価の荷重の組合せに包絡されるため，評価を省略している。

表 6 疲労評価結果の詳細（基準地震動 S s）

対象設備	評価部位	運転状態	スロッシング 荷重の考慮の 有無	S _n (MPa)	K _e	S _p (MPa)	S _σ (MPa)	S _{σ'} (MPa)	N _a (回)	N _c (回)	疲労 累積 係数 N _c /N _a
真空破壊装置	スリーブと ベント管との結合部	S A	無	600							0.410
			有	528							0.230
ダウンカメラ	ベントヘッドと ダウンカメラの結合部	D B	無	884							0.771
			有	836							0.627
		S A	無	884							0.771
			有	846							0.657
ベント管	ヘッド接続部	D B	無	798							0.871
			有	622							0.324
		S A	無	798							0.808
			有	636							0.327

注記*：本疲労評価は、個別に設定した等価繰返し回数 回を適用し評価を実施した。

(2) 蒸気凝縮機能

既往知見では、サブマージェンス（水面からクエンチャ上端位置までの没水高さ）が m 以上あれば蒸気凝縮機能が確保できることが確認されている。

スロッシングによる最低水位が 2.93m に対してクエンチャ上端位置が m であることからサブマージェンスは m となり、既往知見を踏まえると蒸気凝縮機能が確保される。

表7 スロッシングによる最低水位（通常運転水位条件*）

対象設備	最低水位	サブマージェンス
クエンチャ	2.93m	<input type="text"/> m

注記*：DBの水位条件（3.66m）

4. まとめ

本資料では、サプレッションチェンバに関連する設備に対する有効質量の適用の有無及びスロッシング影響について、個別に検討した。3.の検討結果から、スロッシング影響検討が必要な設備について、スロッシング荷重を考慮した場合においても耐震性を有することを確認した。またクエンチャについて、蒸気凝縮機能が確保されることを確認した。

サプレッションチェンバ内部水によるスロッシング荷重等の算定

1. はじめに

サプレッションチェンバ内部水によるスロッシング影響を評価するため、流体解析を行い、各設備に加わるスロッシング荷重及びクエンチャ位置の水位について算定する。本資料では、流体解析の詳細について説明する。

2. 流体解析方法

2.1 解析モデル

解析モデルを図 1 に、解析諸元を表 1 に示す。

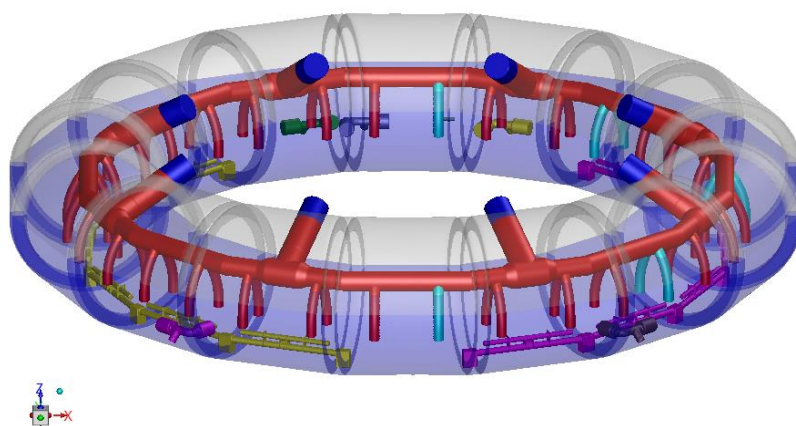


図 1 解析モデル図

表 1 解析諸元

格子数	
格子サイズ	

2.2 解析条件

解析条件を表 2、基準地震動 S s におけるサプレッションチェンバ設置床の応答加速度スペクトルを図 2 に示す。

表 2 解析条件

項目	内容
モデル化範囲	サプレッションチェンバ内
水位	通常運転水位 (3.66m) 耐震解析用重大事故等時水位 (約 5.05m)
評価用地震動	基準地震動 S s - D (水平方向及び鉛直方向) *1 に対する 原子炉建物 EL 1300mm における建物床応答 (水平 2 方向 + 鉛直方向入力)
解析コード	汎用流体解析コード F l u e n t (VOF 法を用いた流体解析)
その他	内部構造物のモデル化範囲：ベントヘッド，ダウンカマ， クエンチャ，ECCS ストレーナ
解析条件	気相物性 粘性係数： $1.896 \times 10^{-5} \text{ Pa} \cdot \text{s}$ 密度：理想気体の状態方程式より算出 (参照温度 35°C) 液相物性 粘性係数： $7.528 \times 10^{-4} \text{ Pa} \cdot \text{s}$ 密度： 993.4 kg/m^3 境界条件：全境界面*2 で不透過滑りなし条件

注記*1：スロッシングの卓越周期帯及びサプレッションチェンバの一次固有周期で応答加速度が大きい S s - D を用いる。

*2：サプレッションチェンバ胴の壁面及び内部構造物の表面

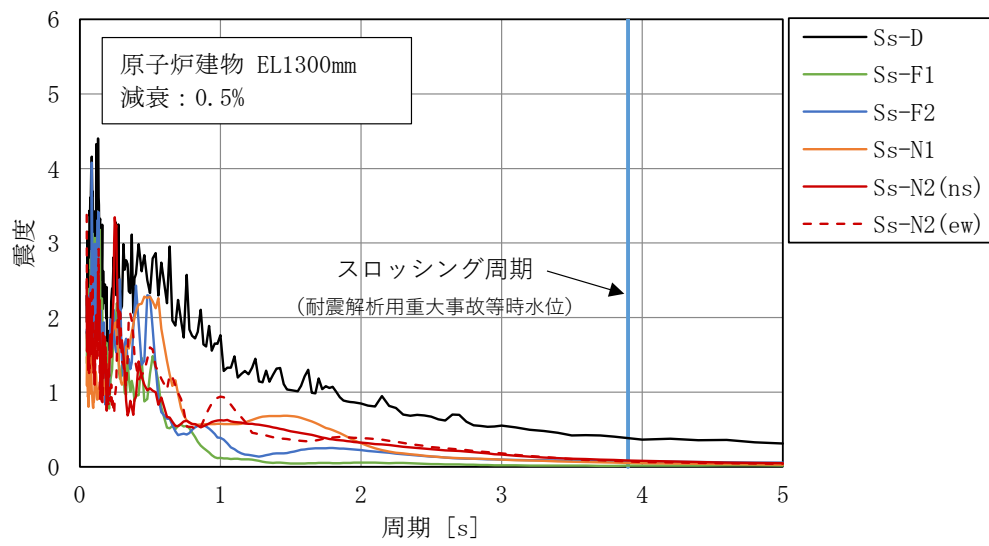


図2 サプレッションチェンバ設置床の床応答スペクトル (NS方向, 拡幅無し)

2.3 スロッシング荷重算定方法

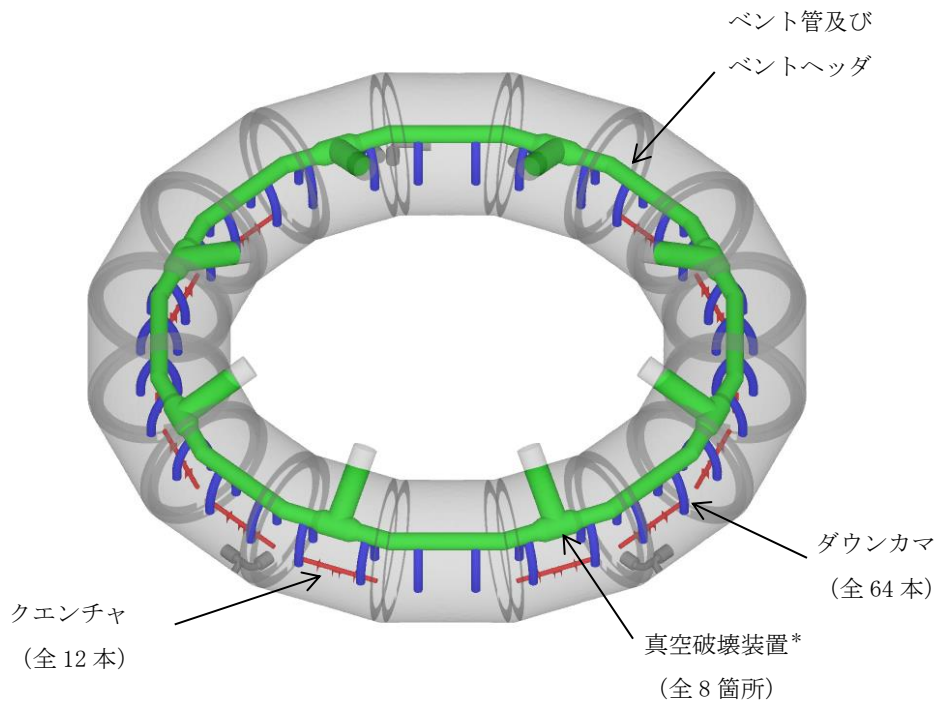
流体解析から求めるスロッシング荷重 F は、影響検討を行う設備の表面 S について、圧力 p と表面の法線ベクトル n の積を積分したものをを用い、下式で表される。

$$F = \oint_S npdS$$

ここで、上式の荷重 F は、スロッシング荷重とサプレッションチェンバ内部水の有効質量による荷重が含まれるが、ここでは簡便に両者の荷重をスロッシング荷重として扱い、それに対する影響を検討する。

2.4 スロッシング荷重算定位置

スロッシング荷重算定位置について、図3に示す。



注記*：詳細にモデル化していないため、ベント管先端における最大圧力と、真空破壊装置（取付部のスリーブを含む）の表面積から簡便に算出する。

図3 スロッシング荷重算定位置

3. 解析結果

スロッシング解析から求めたスロッシング荷重の最大値を表 3 に、クエンチャ位置でのスロッシングによる最低水位を表 4 に、スロッシング荷重時刻歴及びクエンチャ位置での最低水位時刻歴を図 4～8 に示す。

表 3 スロッシング荷重

対象設備	スロッシング荷重 (kN)					
	通常運転水位条件* ¹			耐震解析用重大事故等時 水位条件* ²		
	NS 方向	EW 方向	鉛直方向	NS 方向	EW 方向	鉛直方向
真空破壊装置 (1 箇所)				6.28* ³	6.73* ³	0.91* ³
ダウンカマ (1 本)	6.84	7.49	0.97	18.69	18.28	8.55
ベント管及び ベントヘッド				252.36	228.67	728.44
クエンチャ (1 本)				2.95	6.49	3.77

注記*1：DBの水位条件 (3.66m)

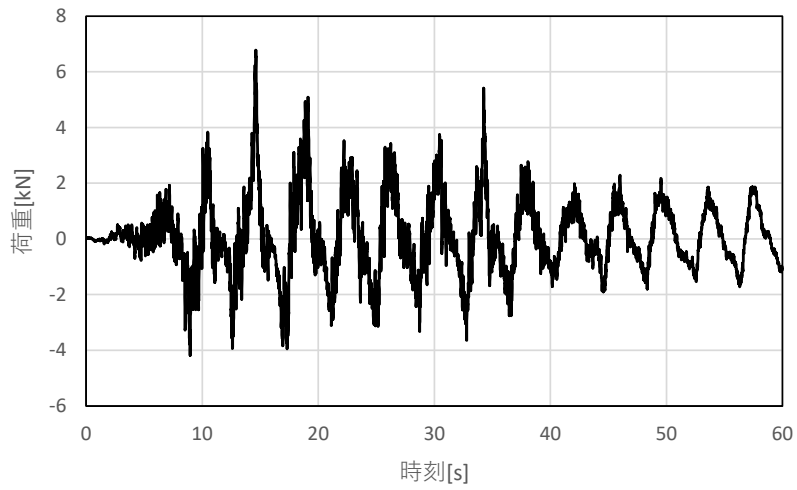
*2：SAの水位条件 (約 5.05m)

*3：詳細にモデル化していないため、ベント管先端における最大圧力と、真空破壊装置 (取付部のスリーブを含む) の表面積から簡便に算出

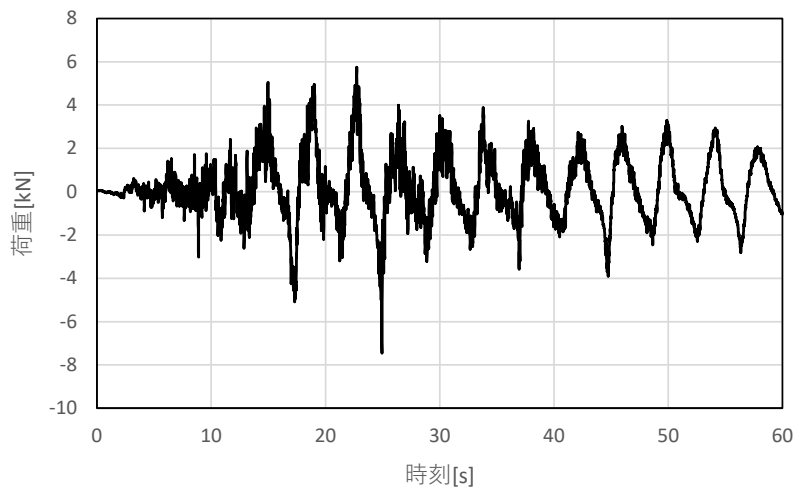
表 4 スロッシングによる最低水位 (通常運転水位条件*)

対象設備	最低水位
クエンチャ	2.93m

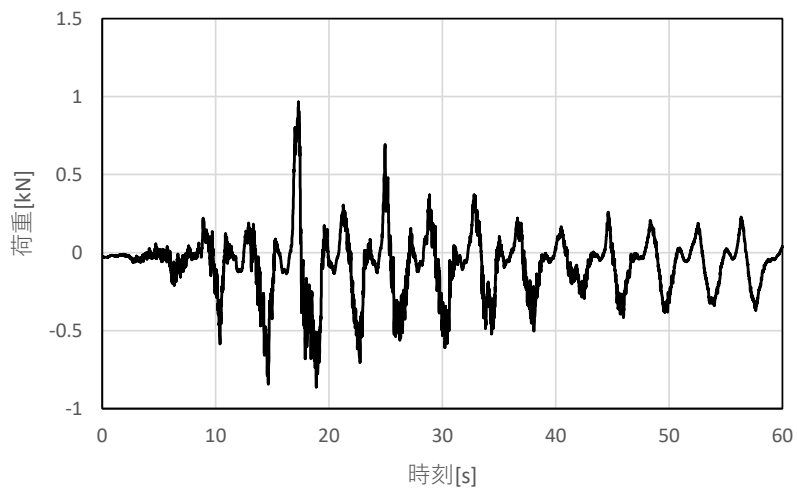
注記*：DBの水位条件 (3.66m)



(a) NS方向

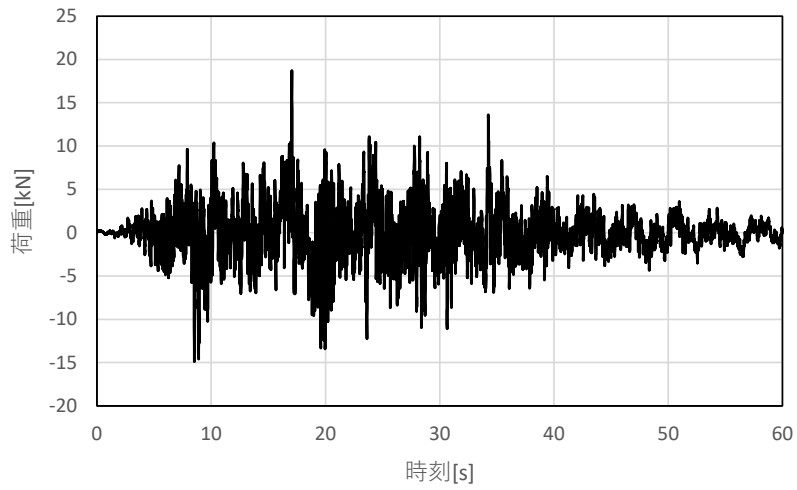


(b) EW方向

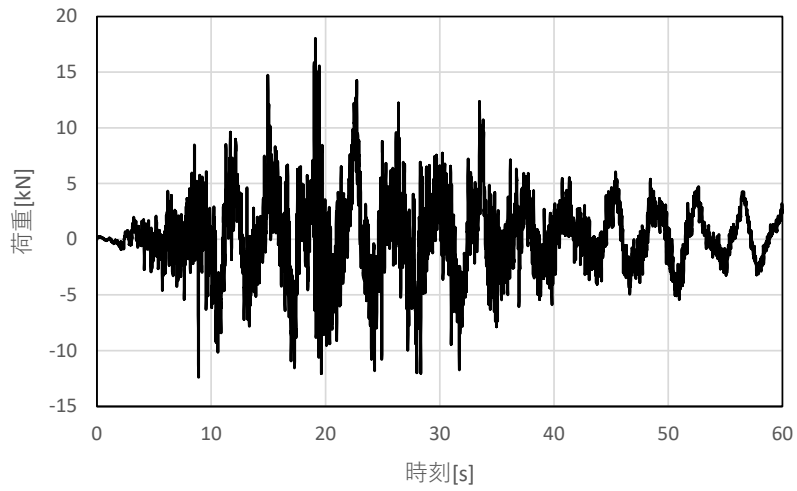


(c) 鉛直方向

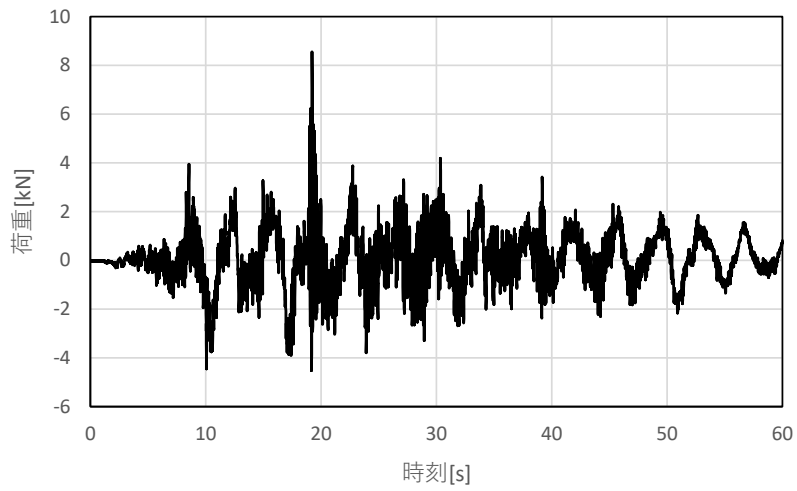
図4 ダウンカマのスロッシング荷重時刻歴
(通常運転水位条件)



(a) NS方向

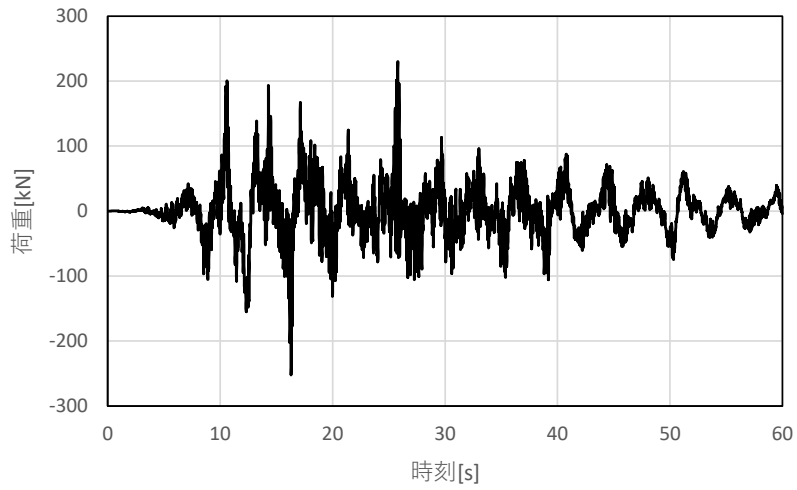


(b) EW方向

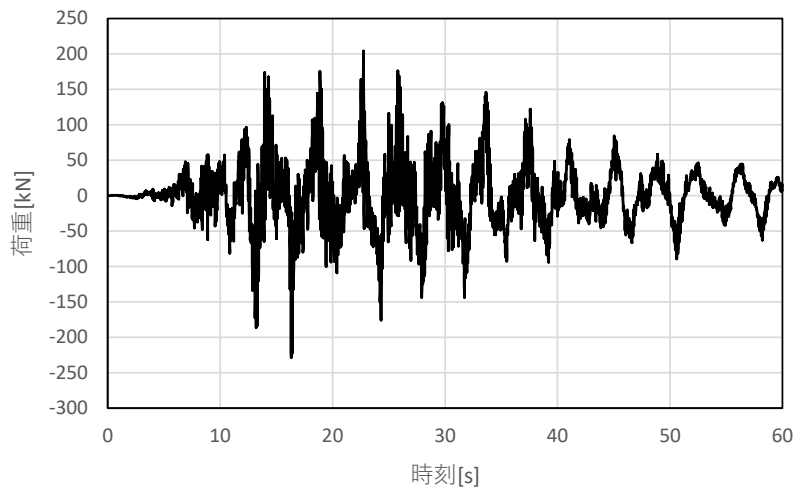


(c) 鉛直方向

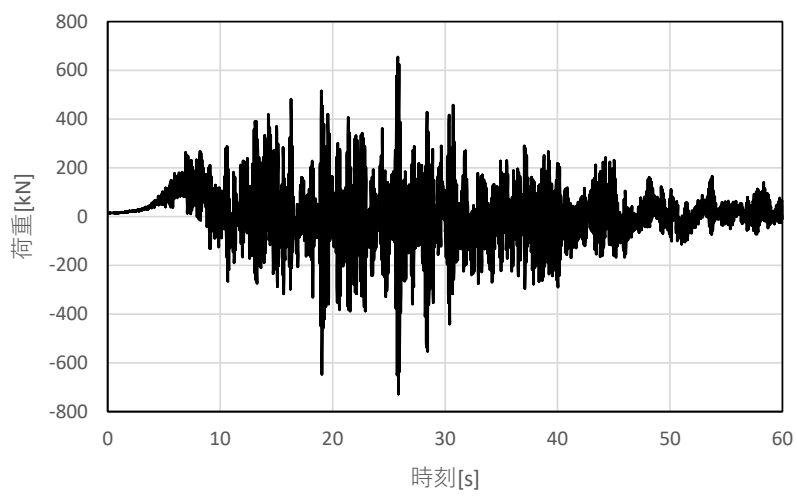
図5 ダウンカマのスロッシング荷重時刻歴
(耐震解析用重大事故等時水位条件)



(a) NS方向

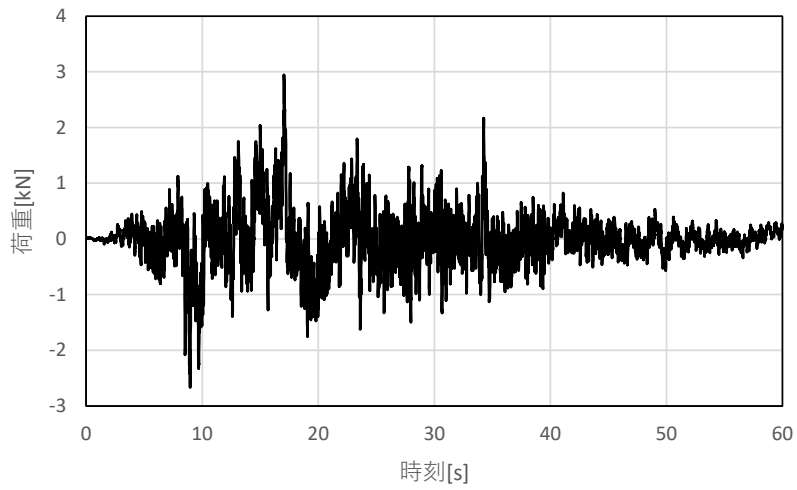


(b) EW方向

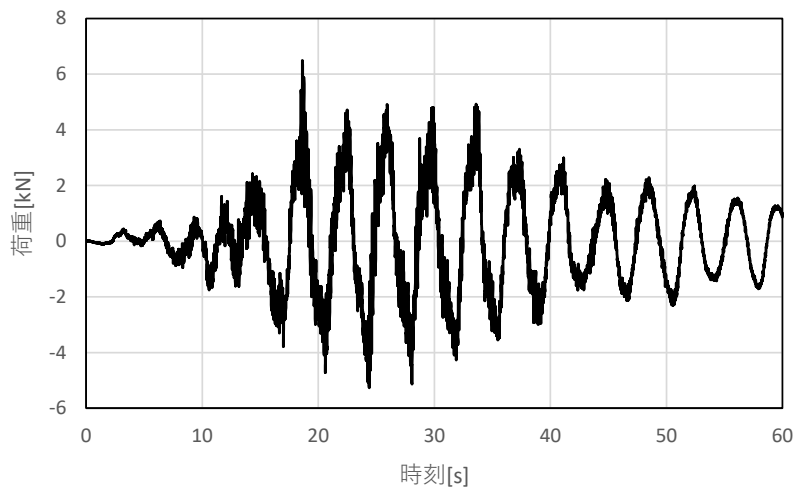


(c) 鉛直方向

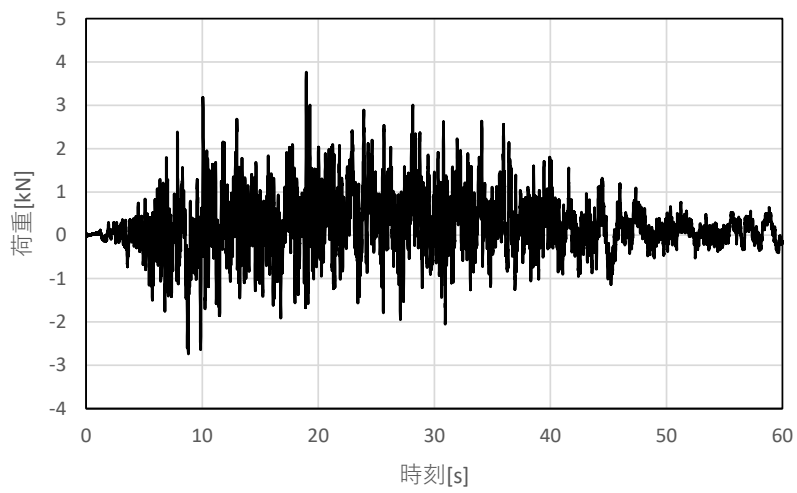
図6 ベント管及びベントヘッダのスロッシング荷重時刻歴
(耐震解析用重大事故等時水位条件)



(a) NS方向



(b) EW方向



(c) 鉛直方向

図7 クエンチャのスロッシング荷重時刻歴
(耐震解析用重大事故等時水位条件)

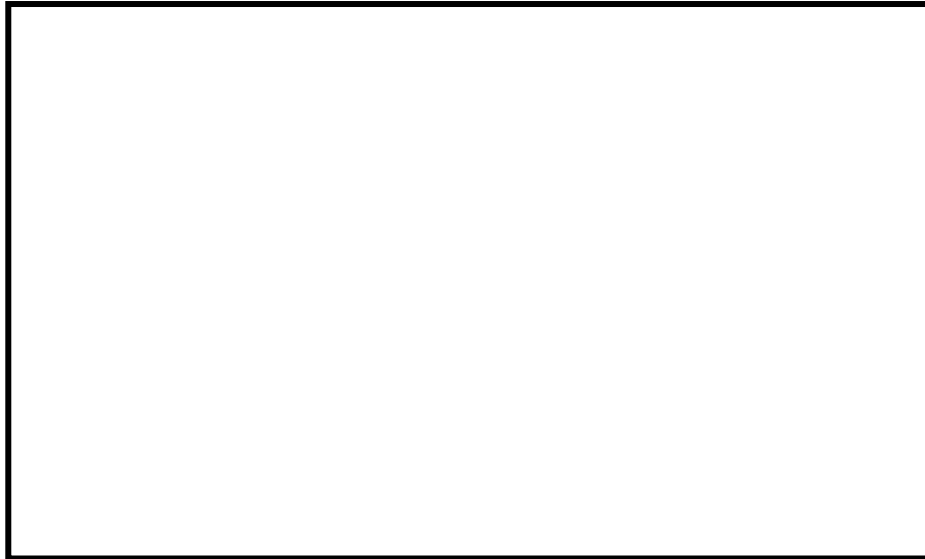


図8 クエンチャ位置の最低水位時刻歴（通常運転水位条件）

応力評価におけるスロッシング荷重の考慮方法

1. はじめに

サプレッションチェンバ内部水によるスロッシング影響を評価するため、各設備に加わるスロッシング荷重による発生応力を算定し、応力評価を実施する。本資料では、応力評価におけるスロッシング荷重の考慮方法について説明する。

2. ベント系（ダウンカマ，ベントヘッド，ベント管）の応力評価

ベント系の評価に当たっては、ベント系の拘束点が設備の上端位置（ドライウェルとベント管の接続位置）であることを踏まえ、ダウンカマのスロッシング荷重に加えて、保守的にベント管及びベントヘッドのスロッシング荷重もダウンカマに入力する。ベント系の解析モデルを図 1 に示す。なお、ベント管及びベントヘッドのスロッシング荷重は、ダウンカマ全 64 本に均等に作用するものと考え、ダウンカマ 1 本当たりのスロッシング荷重の総和を以下のとおり算出する（算出結果は表 1 参照）。

(③ダウンカマ 1 本当たりのスロッシング荷重の総和)

$$= (\text{①ダウンカマのスロッシング荷重}) + (\text{②ベント管及びベントヘッドのスロッシング荷重}) / 64$$

表 1 ダウンカマ 1 本当たりのスロッシング荷重の総和

対象設備	スロッシング荷重 (kN)					
	通常運転水位条件*1			耐震解析用重大事故等時 水位条件*2		
	NS 方向	EW 方向	鉛直方向	NS 方向	EW 方向	鉛直方向
①ダウンカマ	6.84	7.49	0.97	18.69	18.28	8.55
②ベント管及び ベントヘッド				252.36	228.67	728.44
③ダウンカマ 1 本当たりのス ロッシング荷 重の総和	6.84	7.49	0.97	22.64	21.86	19.93

注記*1：DBの水位条件（3.66m）

*2：SAの水位条件（約 5.05m）

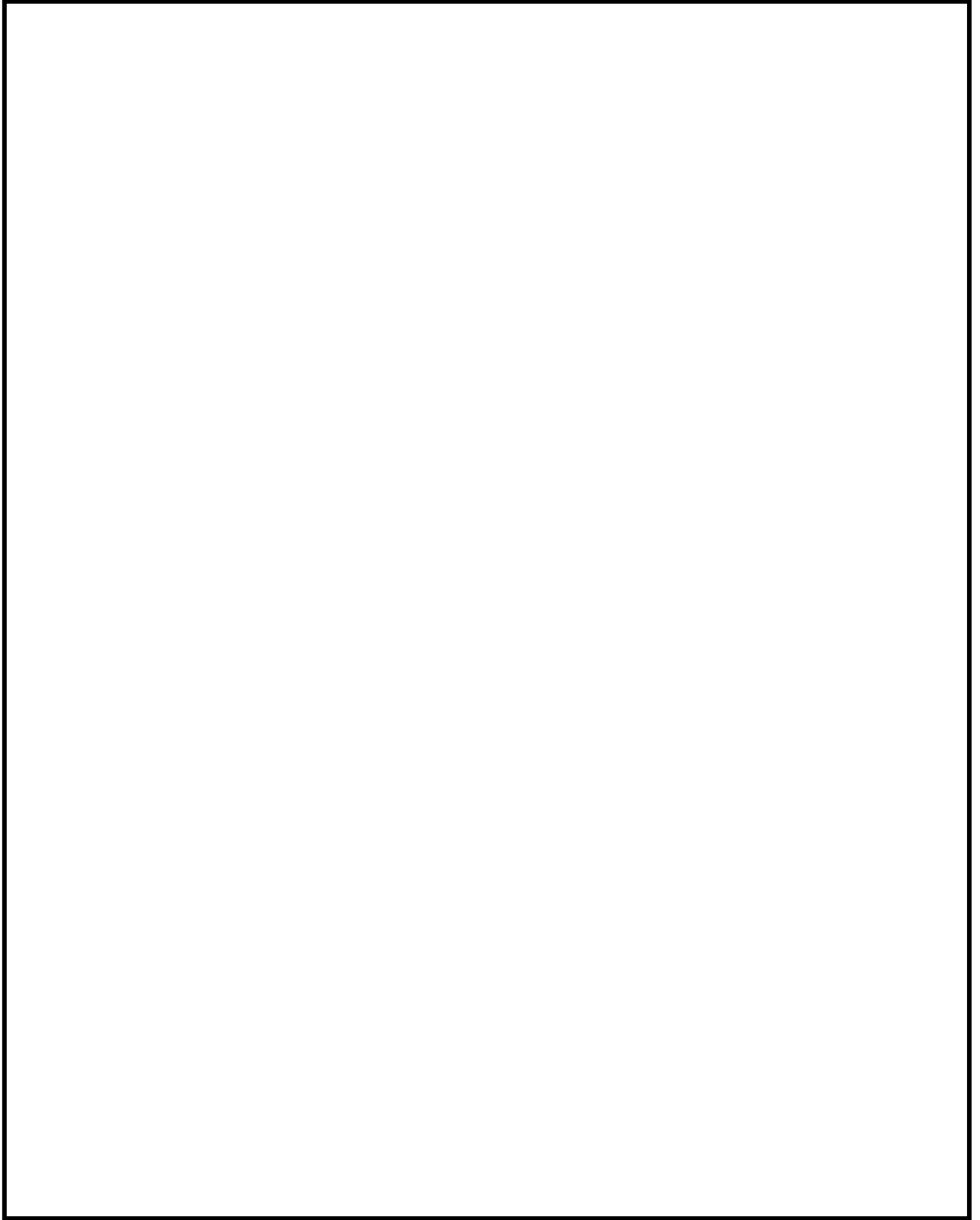


図1 ベント系の解析モデル

図2に示すとおり、通常運転水位条件（DB評価）においてはダウンカマの一部のみ没水しているため、スロッシング荷重は保守的にダウンカマ下端に集中荷重として入力する。また、耐震解析用重大事故等時水位条件（SA評価）においてはダウンカマ全体が没水しているが、スロッシング荷重は、ダウンカマの解析モデルのより要素に対して等分布荷重として入力する。スロッシング荷重入力のイメージ図を図3に示す。

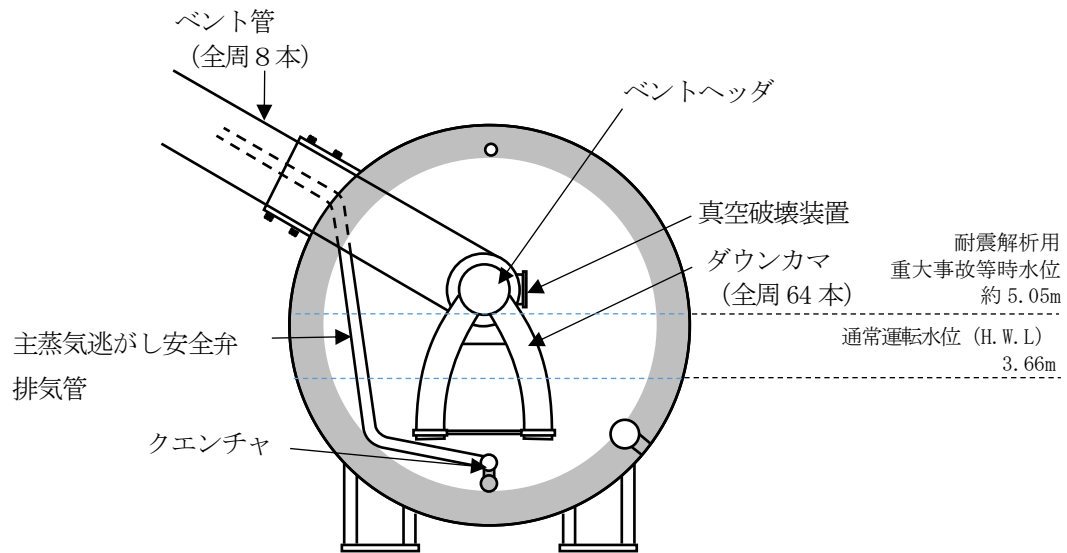


図2 サプレッションチェンバ断面概要図

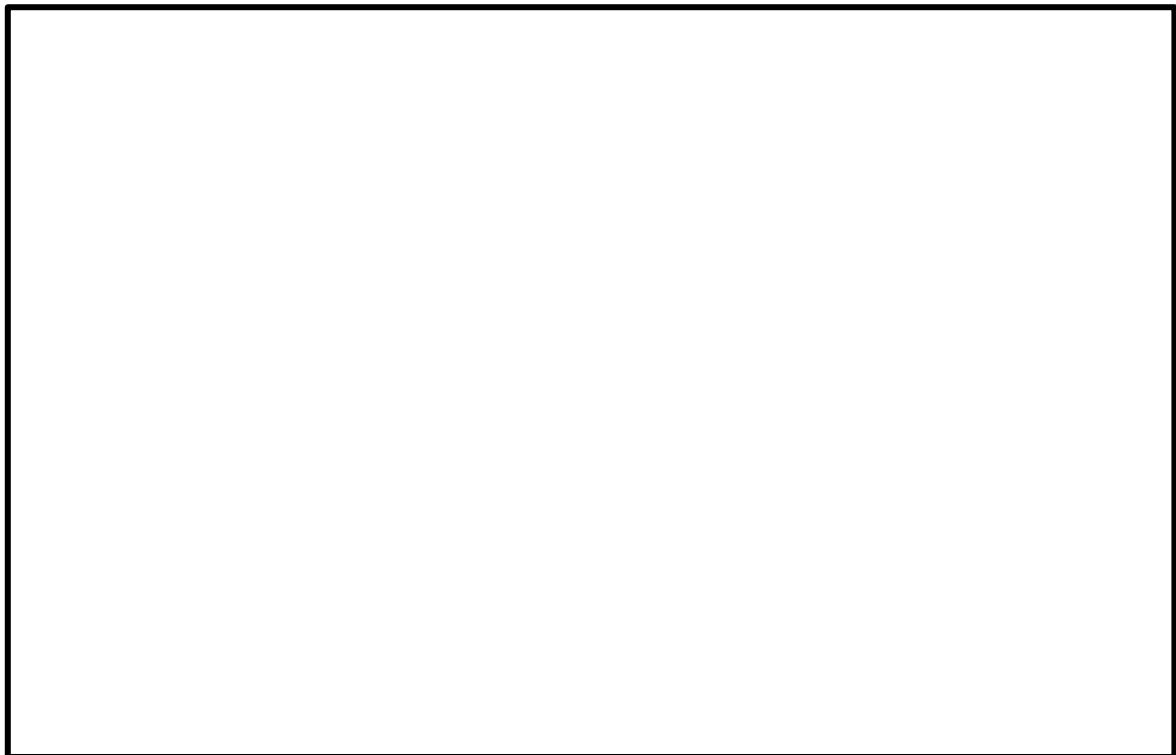


図3 スロッシング荷重入力のイメージ図

3. クエンチャ及び主蒸気逃がし安全弁排気管の応力評価

クエンチャ及び主蒸気逃がし安全弁排気管の鳥観図を図 4 に示す。本影響検討に用いる流体解析モデル（別紙 1 図 1 参照）では、クエンチャは詳細にモデル化しているが、主蒸気逃がし安全弁排気管はモデル化していない。そのためクエンチャ及び主蒸気逃がし安全弁排気管の評価に当たっては、クエンチャに作用するスロッシング荷重を圧力に換算し、その圧力をクエンチャ及び主蒸気逃がし安全弁排気管全体に入力する。スロッシングによる圧力は、クエンチャの表面積（ m²）を用いて以下のとおり算出する（算出結果は表 2 参照）。

$$(\text{②スロッシングによる圧力}) = (\text{①スロッシング荷重}) / (\text{クエンチャの表面積})$$

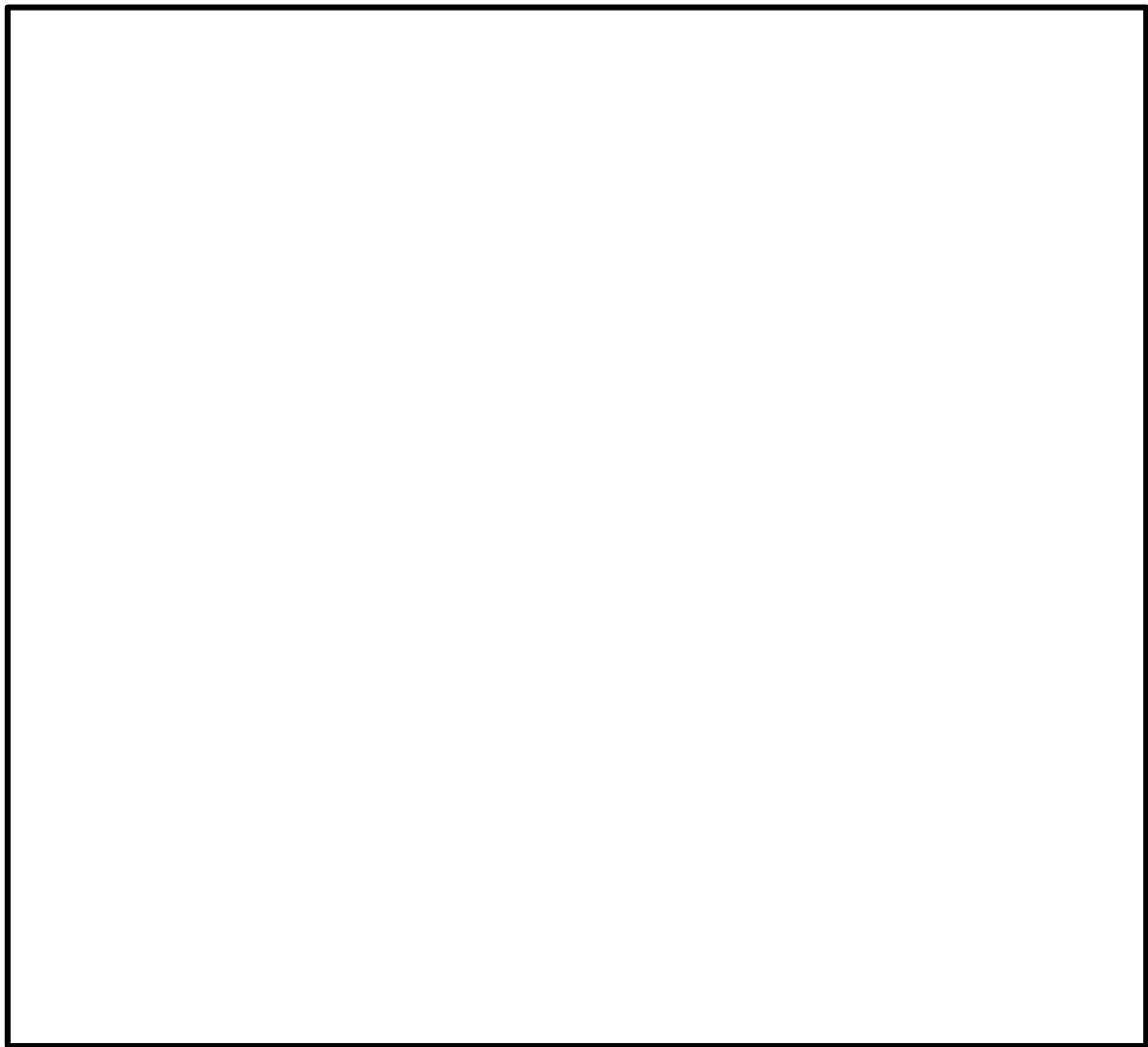


図 4 クエンチャ及び主蒸気逃がし安全弁排気管の鳥観図

表2 クエンチャに作用するスロッシングによる圧力

	NS 方向	EW 方向	鉛直方向
①スロッシング荷重	2.95kN	6.49kN	3.77kN
②スロッシングによる圧力	<input type="text"/> kN/m ²	<input type="text"/> kN/m ²	<input type="text"/> kN/m ²

補足-027-10-54 原子炉格納容器ベント系設備の
地震応答解析モデルの精緻化等に関する補足説明資料

目 次

1. はじめに	1
2. 原子炉格納容器ベント系設備等	3
2.1 原子炉格納容器ベント系設備等の構造	3
2.2 原子炉格納容器ベント系設備等の耐震補強対策	5
2.2.1 耐震補強対策の目的	5
2.2.2 耐震補強対策の内容	5
3. 耐震評価に係る原子炉格納容器ベント系設備等の既工認からの相違点の詳細	9
4. 地震応答解析及び応力解析モデルの詳細	14
5. 既工認からの相違点に関する島根2号機への適用性のまとめ	20
参考 地震応答解析モデルに適用する180°モデルについて	21

1. はじめに

本書は、島根原子力発電所第2号機（以下「島根2号機」という。）のVI-2-9-4-2-1「ダウンカマの耐震性についての計算書」、VI-2-9-4-2-2「ベントヘッドの耐震性についての計算書」及びVI-2-9-4-3「ベント管の耐震性についての計算書」における既工認からの相違点を説明する資料である。ここでは、ベント管、ベントヘッド、ダウンカマ及びその付属構造物を原子炉格納容器ベント系設備という。

島根2号機の既工認及び今回工認における原子炉格納容器ベント系設備等に係る耐震評価フローを図1に示す。耐震評価フローの比較結果から、①地震応答解析モデル及び応力解析モデルの設定、②地震応答解析及び応力解析手法、③解析手法に応じた設計用地震力、④ドライウェルベント開口部の応力解析モデルの設定及び応力解析手法、⑤耐震補強対策が既工認からの相違点として抽出される。また、ベント管等は、既工認においては3次元はりモデルを用いた地震応答解析により得られた荷重から3次元シェルモデルを用いた応力解析で応力を算定しているが、今回工認においては3次元シェラーはりモデルを用いた地震応答解析で当該部位のシェル要素に発生する応力を算出している。

なお、原子炉格納容器ベント系設備のうち原子炉格納容器バウンダリを構成するベント管を除くベントヘッド及びダウンカマの耐震重要度分類がAクラスからSクラスに見直されたため、今回工認の耐震評価としては、弾性設計用地震動 S_d による評価（許容応力状態Ⅲ_AS）に加え、基準地震動 S_s による評価（許容応力状態Ⅳ_AS）が求められる。また、重大事故等対処設備であるため、重大事故等時の耐震評価が求められることも既工認からの相違点となる。

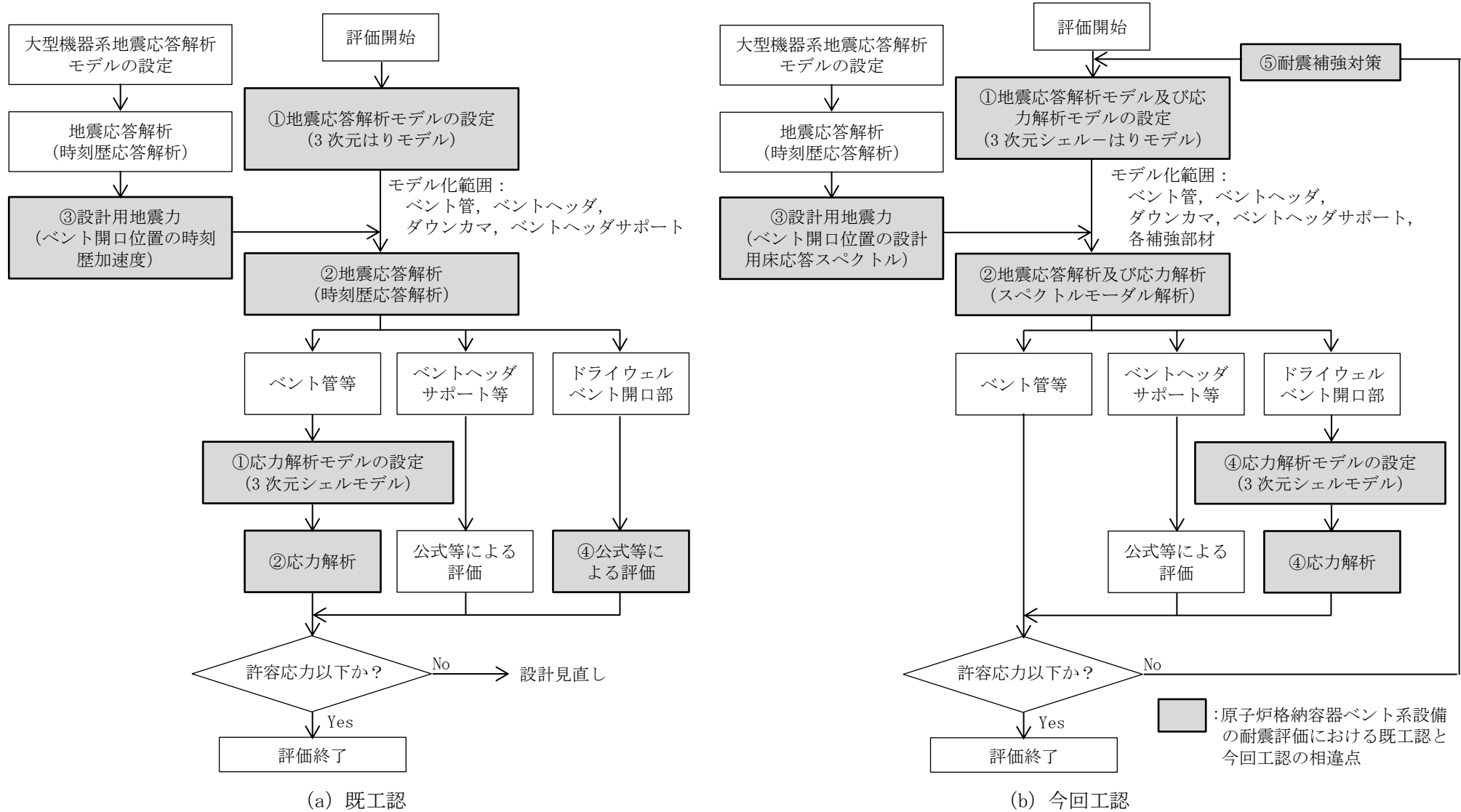


図1 原子炉格納容器ベント系設備等に係る耐震評価フロー

2. 原子炉格納容器ベント系設備等

2.1 原子炉格納容器ベント系設備等の構造

原子炉格納容器ベント系設備は、ドライウエル空間とサブプレッションチェンバ水中とを接続し、ベント管、ベントヘッドより分岐してサブプレッションチェンバ内の水中に開口する一連のダウンカマにより構成される。また、原子炉格納容器ベント系設備は、ドライウエルに設けられたドライウエルベント開口部で支持される。

ベント管はドライウエルとサブプレッションチェンバの間に等間隔に8本設けられた内径 mm、板厚 mm 及び mm の鋼製円筒構造物である。ベントヘッドは16本の内径 mm、板厚 mm の鋼製円筒構造物を円環形に接合した構造物で、ベント管に接続する。ベントヘッドの各接合部近傍にはベントヘッドサポートを備える。ダウンカマはサブプレッションチェンバ全周にわたって出来るだけ一様に分布するよう64本配置した内径 mm、板厚 mm の管形の鋼製構造物であり、ベントヘッドに接続する。

各ベント管のドライウエルベント開口部には、ジェット力等がベント系設備に直接作用するのを防ぐためにジェットデフレクタを設ける。

原子炉格納容器ベント系設備の構造を図2及び図3に示す。

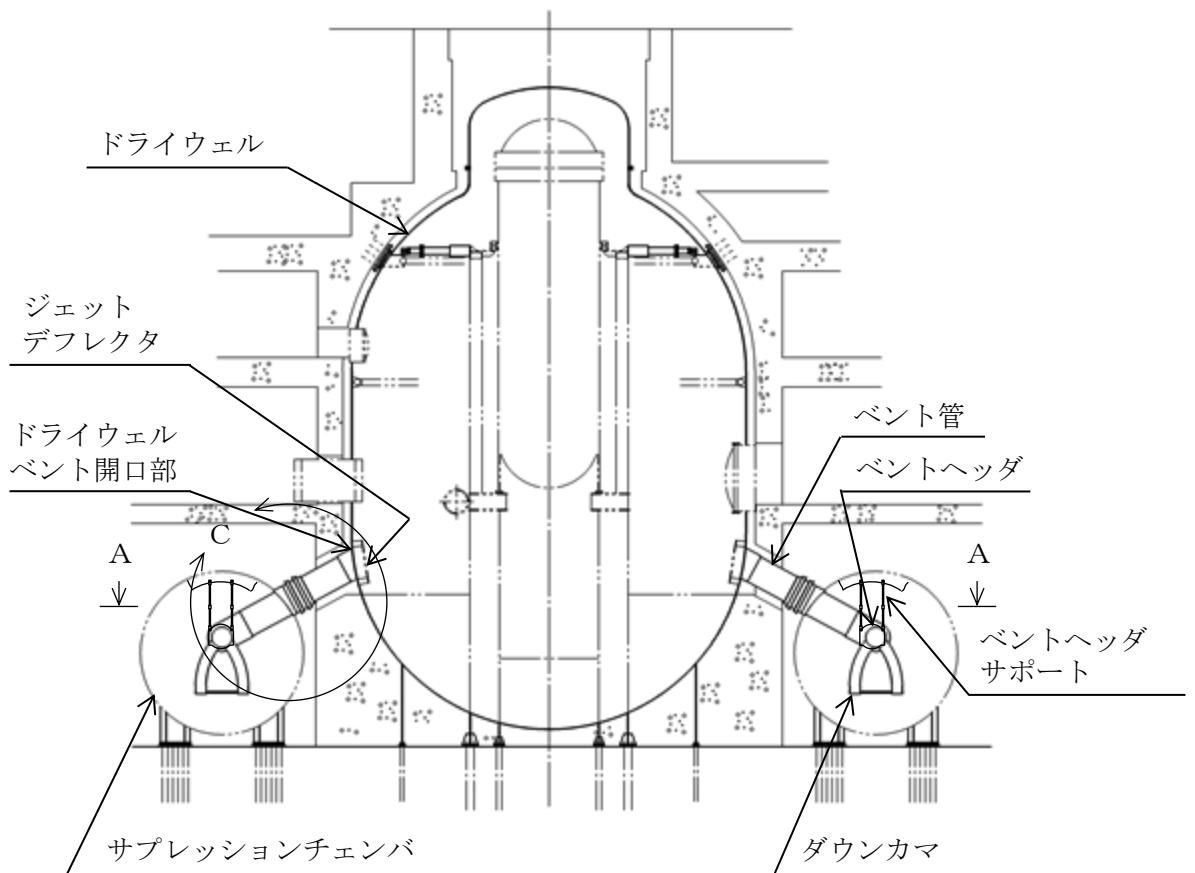
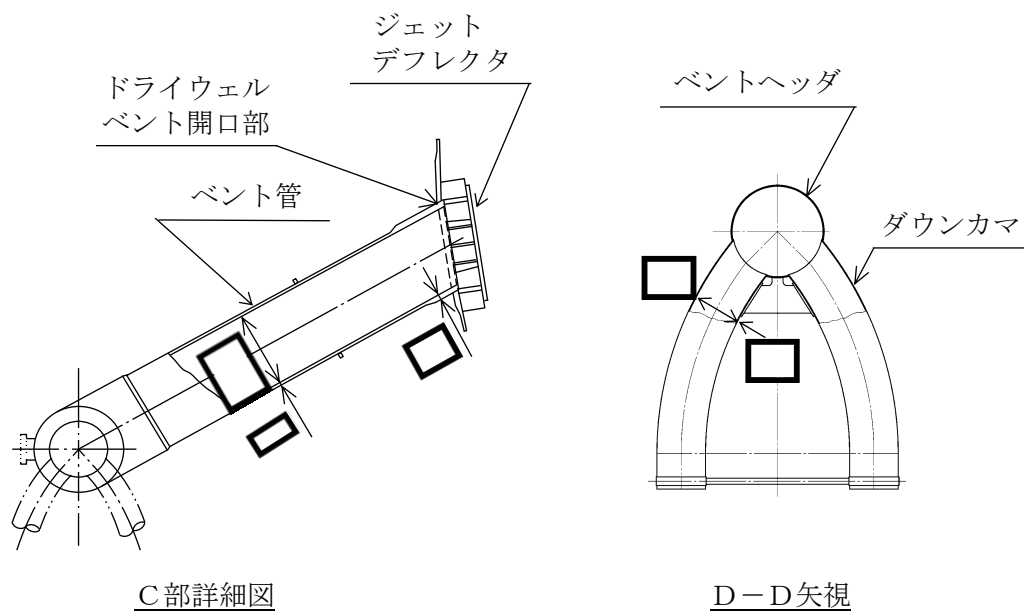
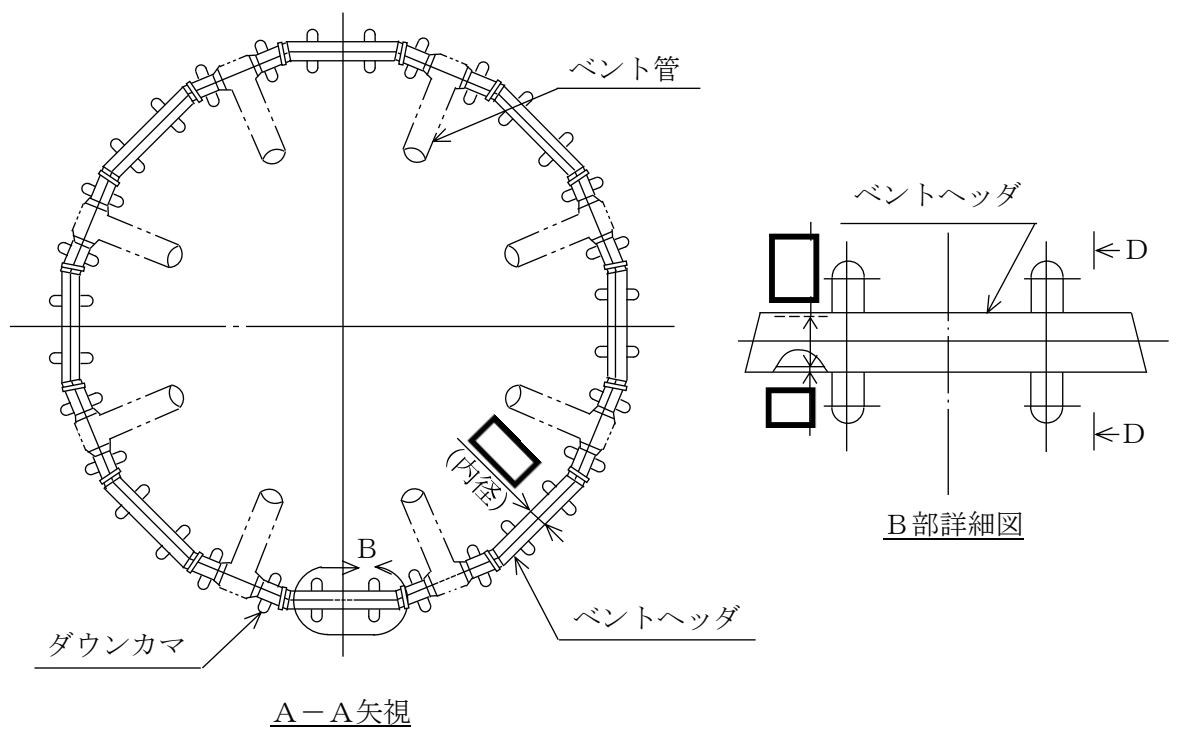


図2 原子炉格納容器ベント系設備構造図 (その1)



(単位：mm)

図3 原子炉格納容器ベント系設備構造図 (その2)

2.2 原子炉格納容器ベント系設備等の耐震補強対策

2.2.1 耐震補強対策の目的

原子炉格納容器バウンダリを構成するベント管を除く原子炉格納容器ベント系設備の耐震重要度分類の変更（AクラスからSクラス）、重大事故等時のサブプレッションチェンバの水位上昇に伴う付加質量の増加、基準地震動の増大等を踏まえ、原子炉格納容器ベント系設備の耐震性を向上させるための耐震補強対策を実施し、必要な強度を確保することを目的としている。また、原子炉格納容器ベント系設備からの反力も増大することを踏まえ、ドライウェルベント開口部の耐震性を向上させるための耐震補強対策も実施し、必要な強度を確保することを目的としている。

2.2.2 耐震補強対策の内容

(1) 原子炉格納容器ベント系設備

耐震評価の結果を踏まえた耐震性を向上させるための補強対策について、補強の目的とその内容について、表1に示し、ベントヘッド及びダウンカマの補強構造を図4～図6に示す。

表1 補強の目的とその内容

補強の目的	内容
①ベントヘッド及びダウンカマの応力を抑制	<ul style="list-style-type: none">・ベントヘッドとダウンカマの接続部に補強リブを追加
②ベントヘッドサポートの応力を抑制	<ul style="list-style-type: none">・サポートの主要材質及び外径を変更・サポートが取り付く接続部として、サブプレッションチェンバ補強リング（サブプレッションチェンバ側との接続部）及びベントヘッド補強リング（ベントヘッド側との接続部）との取り合い部にパッドを追加し、ピンの材質を変更・ベントヘッドサポート構造を中実（棒）構造から中空（パイプ）構造に変更

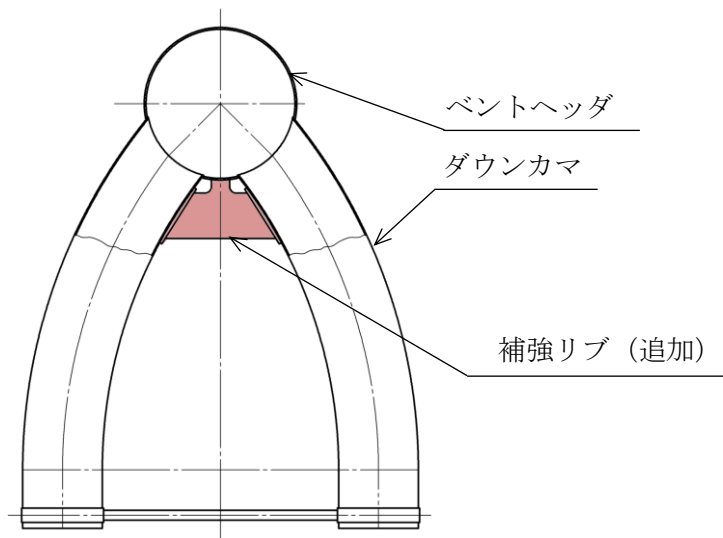


図4 ベントヘッド及びダウンカマの補強構造

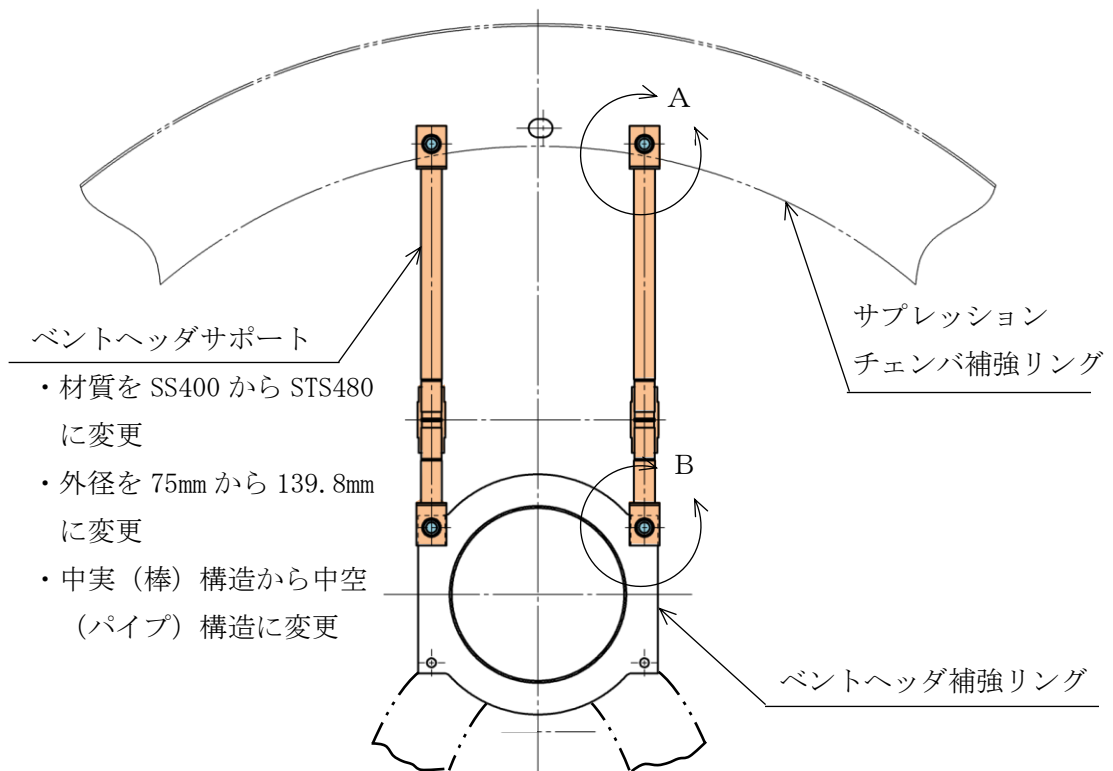
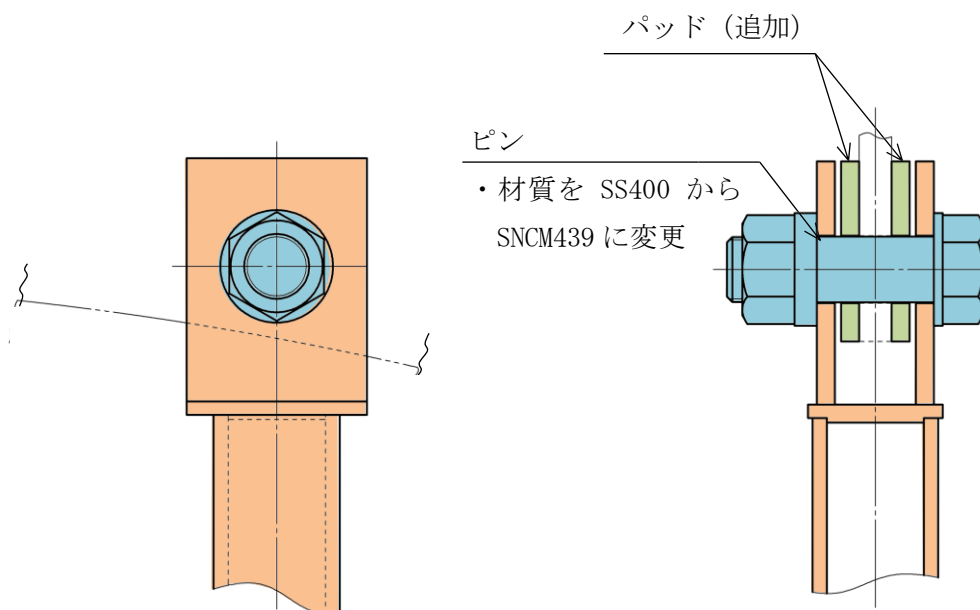
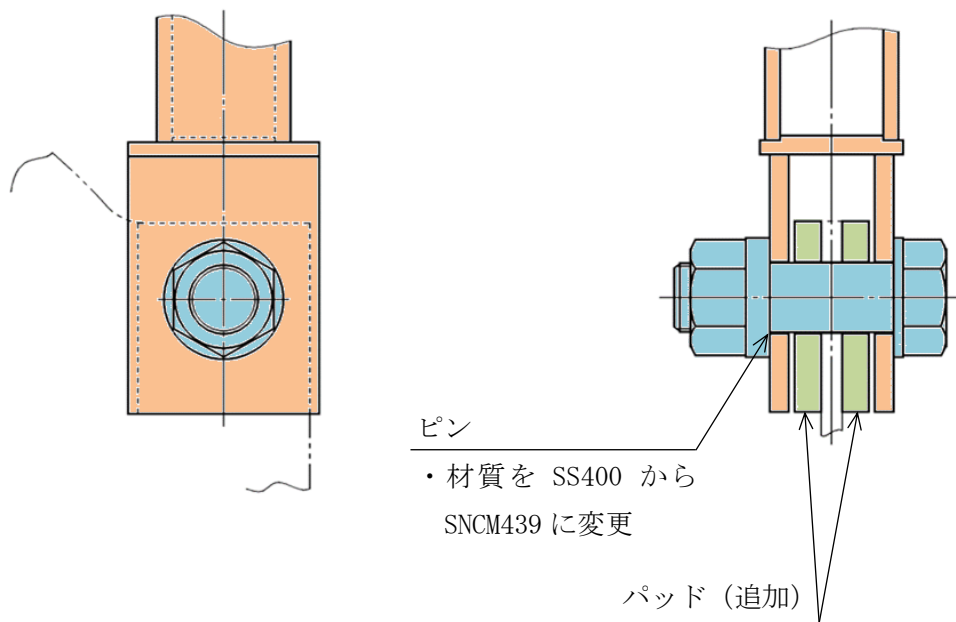


図5 ベントヘッドサポートの補強構造 (その1)



A部詳細図



B部詳細図

図6 ベントヘッドサポートの補強構造 (その2)

(2) ドライウェルベント開口部

耐震評価結果を踏まえ、ドライウェルベント開口部の応力を抑制するため、ドライウェルベント開口部に補強リブを追加する。ドライウェルベント開口部の補強構造を図7に示す。

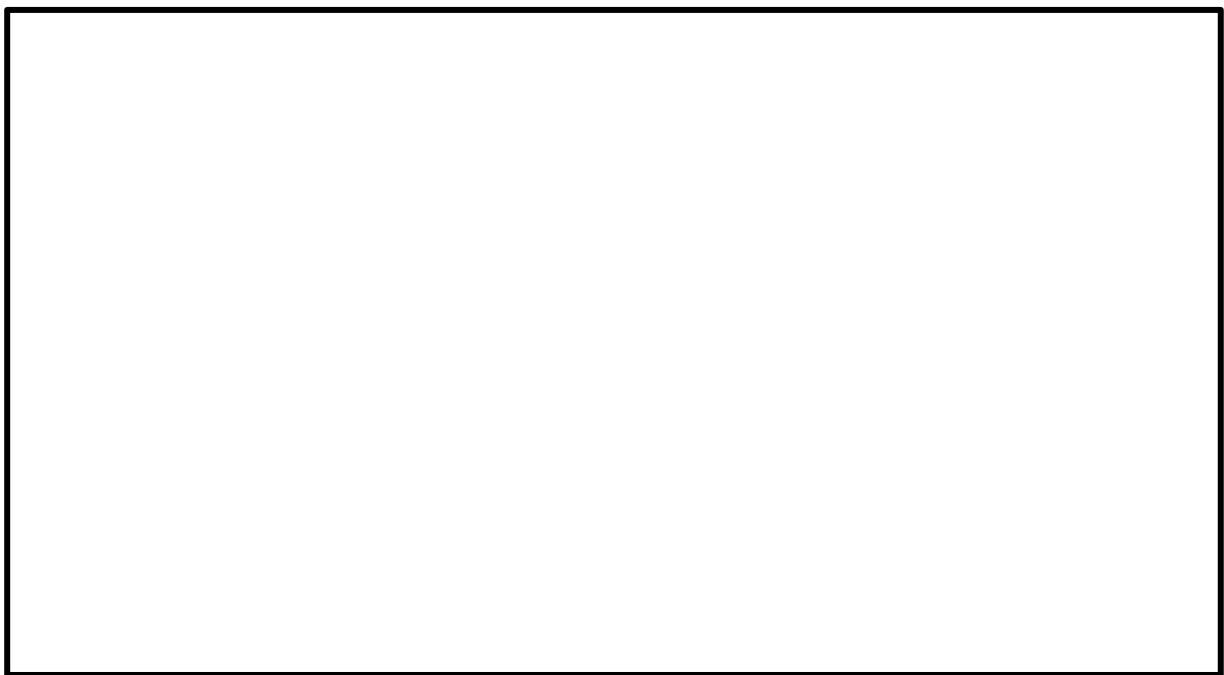
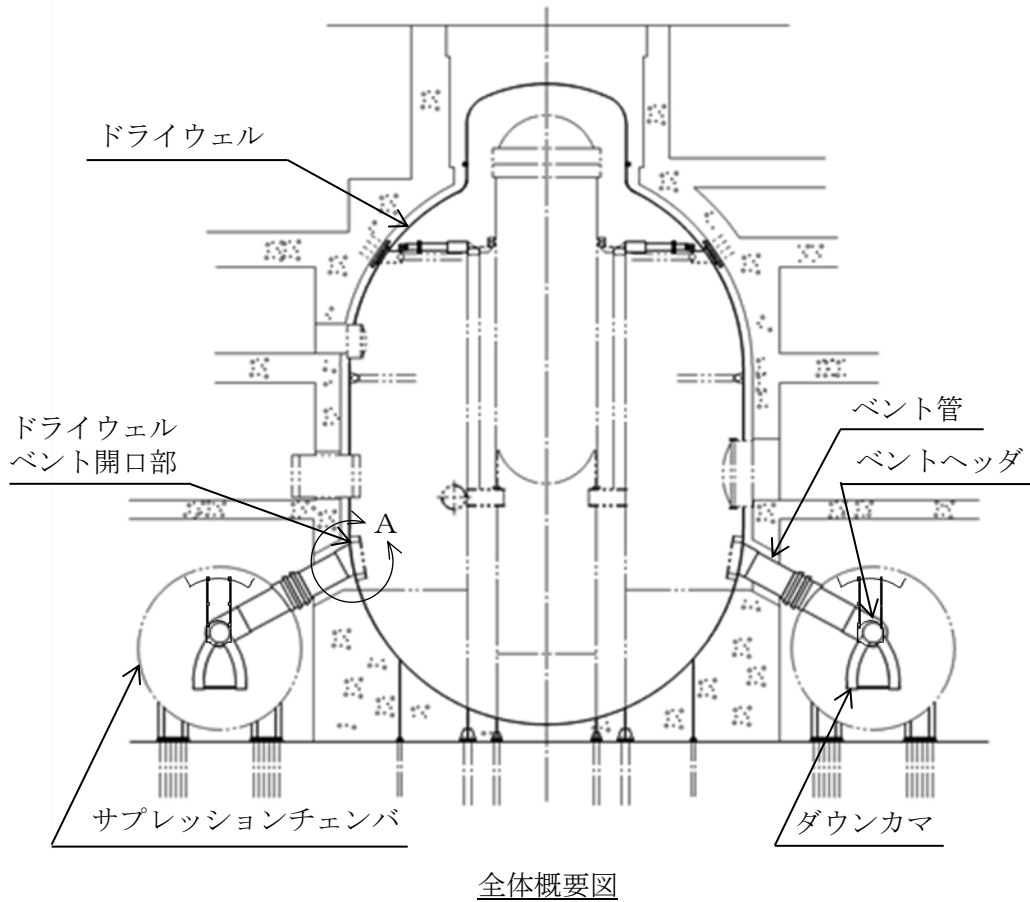


図7 ドライウェルベント開口部の補強構造

3. 耐震評価に係る原子炉格納容器ベント系設備等の既工認からの相違点の詳細

今回工認では、重大事故等時のサブプレッションチェンバの水位上昇に伴う付加質量の増加、基準地震動の増大等を踏まえ、耐震補強対策を実施し、その効果を考慮した精緻な耐震評価を実施するため、地震応答解析モデル及び応力解析モデルの精緻化、それを踏まえた解析手法の精緻化等を実施する。

(1) 原子炉格納容器ベント系設備

表2に原子炉格納容器ベント系設備の既工認及び今回工認における地震応答解析及び応力解析の比較結果を示す。

既工認における原子炉格納容器ベント系設備の地震応答解析は、ベント管、ベントヘッド、ダウンカマ及びベントヘッドサポートをはり要素でモデル化した地震応答解析モデル（3次元はりモデル）を用いて時刻歴応答解析を行っていた。

応力解析は、ベント管のヘッド接続部周辺をシェル要素でモデル化した応力解析モデル（3次元部分シェルモデル）を用いて応力を算定していた。また、ヘッド接続部以外のベント管の応力評価点、ベントヘッド（ベントヘッドサポート含む）及びダウンカマは、はり要素の地震荷重から公式等による評価で応力を算出していた。

今回工認における原子炉格納容器ベント系設備の地震応答解析は、ベント管のヘッド接続部、ベントヘッド及びベントヘッドとダウンカマの結合部をシェル要素で、ベント管とダウンカマの一般部及びベントヘッドサポートをはり要素でモデル化した地震応答解析モデル及び応力解析モデル（3次元シェルはりモデル）を作成し、スペクトルモーダル解析を行っている。解析に用いた地震力は、大型機器系地震応答解析モデルのドライウエルベント開口部位置の設計用床応答スペクトルを用いた。

ベント管、ベントヘッド及びダウンカマ等のシェル要素でモデル化した部位の応力は、3次元シェルはりモデルを用いた地震応答解析からシェル要素に発生する応力を算定し、ベントヘッドサポート等のはり要素でモデル化した部位の応力は、地震応答解析からはり要素に発生する地震荷重を算定し、公式等による評価により応力を算定した。

今回工認におけるスペクトルモーダル解析に適用する減衰定数は、溶接構造物の1%とし、解析コードは既工認の「SAP-IV」からシェル要素の解析が実施可能な「MSC NASTRAN」に見直した。また、地震応答解析では、解析モデル全体に設計用床応答スペクトルを入力している。入力する設計用床応答スペクトルは、ベントヘッドサポートよりもベント管の剛性が大きいことから、ドライウエルベント開口部位置のものをを用いている。参考として、ドライウエルベント開口部とベントヘッドサポートの地震荷重比較を表3に、ベント系設備の地震荷重のイメージを図8に示す。荷重比較からベント管側の剛性が十分に高いことから、ベント系設備は、ドライウエルベント開口部からの地震荷重が支配的となる。

表2 原子炉格納容器ベント系設備の地震応答解析及び応力解析の比較結果

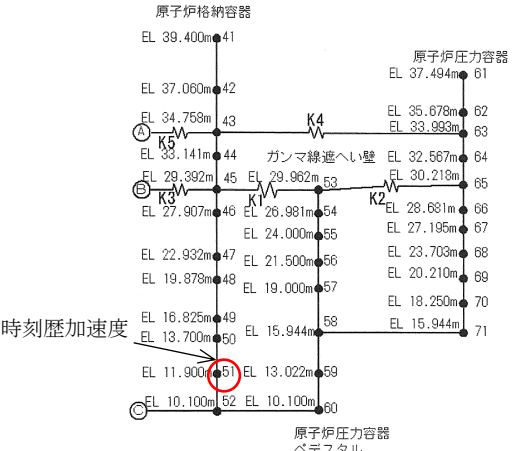
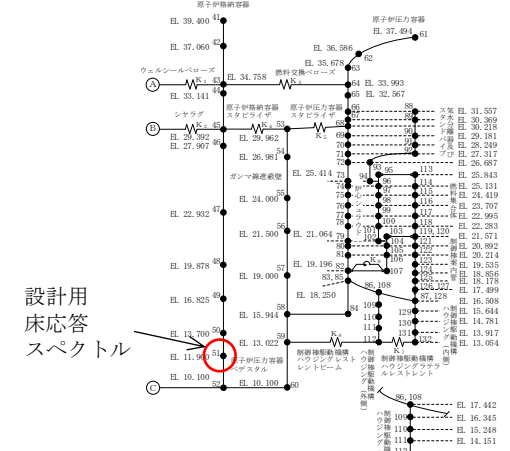
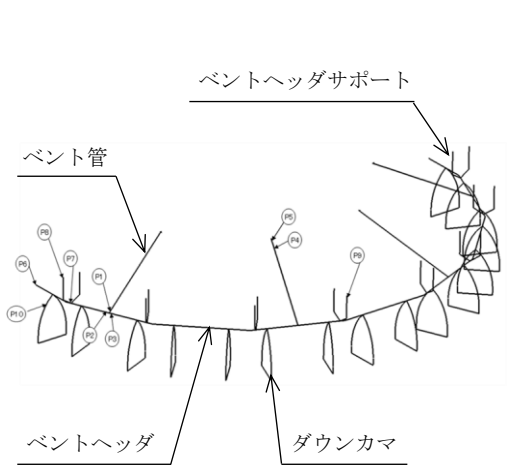
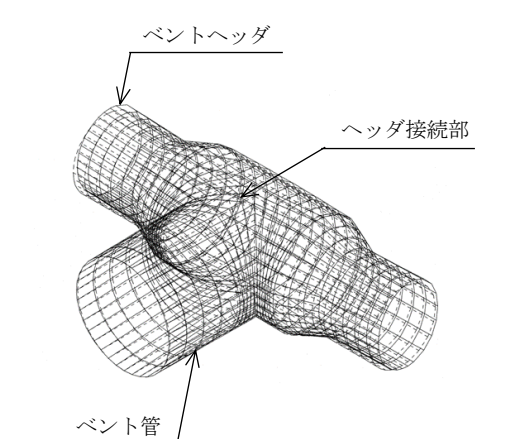
評価	既工認	今回工認
地震応答解析	 <p>時刻歴加速度</p> <p>大型機器系地震応答解析モデル 【大型機器部分の抜粋】（時刻歴応答解析）</p>	 <p>設計用床応答スペクトル</p> <p>大型機器系地震応答解析モデル 【大型機器部分の抜粋】（時刻歴応答解析）</p>
	 <p>3次元はりモデル（時刻歴応答解析）</p>	
応力解析	 <p>3次元部分シェルモデル （ヘッド接続部以外:公式等による評価）</p>	

表3 ドライウェルベント開口部とベントヘッドサポートの地震荷重比較

荷重条件	方向	地震荷重	
		ドライウェル ベント開口部	ベントヘッド サポート(上端)
運転状態V (LL) 基準地震動Ss	並進 (N)	半径方向 F_R	
		周方向 F_θ	
		鉛直方向 F_Z	
	回転 (N・mm)	半径方向まわり M_R	
		周方向まわり M_θ	
		鉛直方向まわり M_Z	

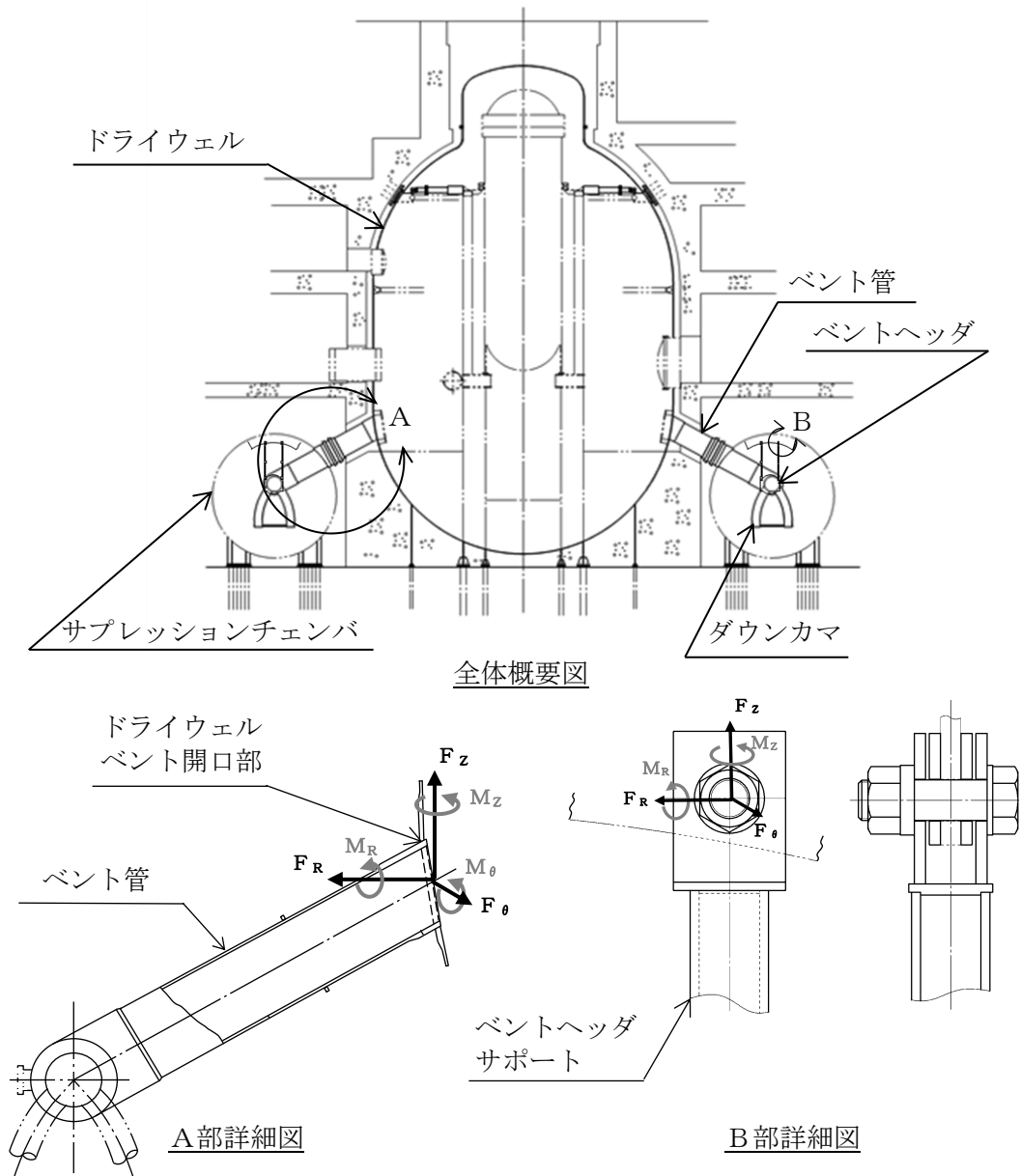


図8 ベント系設備の地震荷重のイメージ

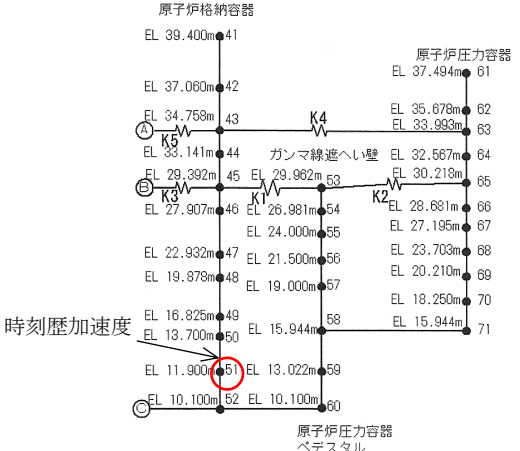
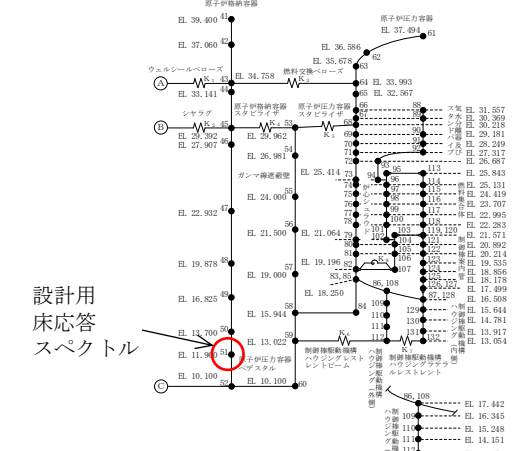
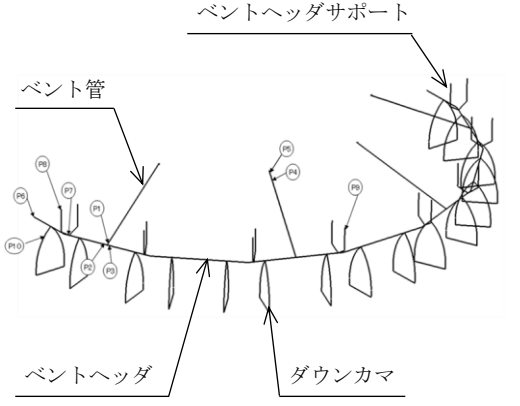
(2) ドライウェルベント開口部

表 4 にドライウェルベント開口部の既工認及び今回工認における地震応答解析及び応力解析の比較結果を示す。

既工認では、原子炉格納容器ベント系設備の地震応答解析（詳細は 3. (1) を参照）からドライウェルベント開口部に作用するベント管反力を算出し、その反力を用いて Bijlaard の方法で応力を算出していた。

今回工認では、原子炉格納容器ベント系設備の地震応答解析（詳細は 3. (1) を参照）からドライウェルベント開口部に作用するベント管反力を算出し、その反力をドライウェルベント開口部についてシェル要素でモデル化した 3 次元シェルモデルに入力し、応力解析により応力を算出した。応力解析モデルは、基準地震動の増大等によるベント管反力の増大を踏まえた耐震補強対策の効果も考慮した精緻な耐震評価を行うため、ドライウェル、ベント管、ジェットデフレクタ及びリブ（既設リブ及び補強リブ）をモデル化している。

表4 ドライウェルベント開口部の地震応答解析及び応力解析の比較結果

評価	既工認	今回工認
地震応答解析	 <p>時刻歴加速度</p> <p>大型機器系地震応答解析モデル 【大型機器部分の抜粋】（時刻歴応答解析）</p>	 <p>設計用床応答スペクトル</p> <p>大型機器系地震応答解析モデル 【大型機器部分の抜粋】（時刻歴応答解析）</p>
	 <p>3次元はりモデル（時刻歴応答解析）</p>	
応力解析	<p>地震応答解析で算出したベント管反力を用いて、ドライウェルベント開口部に対してBijlaardの方法により応力を算出（公式等による評価）</p>	

4. 地震応答解析及び応力解析モデルの詳細

(1) 原子炉格納容器ベント系設備

ベント管、ベントヘッド及びダウンカマのうち、接続部の局部応力の評価が必要となるベント管のヘッド接続部、ベントヘッド及びベントヘッドとダウンカマの結合部はシェル要素でモデル化し、構造が単純であり円管としてモデル化できるベント管とダウンカマの一般部及び支持構造物として評価するベントヘッドサポートは、はり要素でモデル化した。

原子炉格納容器ベント系設備のモデル化詳細を表5に、原子炉格納容器ベント系設備の地震応答解析モデル図を図9に示す。ここで、ベントヘッドサポートとサブプレッションチェンバ補強リング及びベントヘッド補強リングの締結部については、熱膨張を吸収する構造とするため、図5及び図6に示すピン支持構造としており、地震応答解析モデルとしては、これを模擬する支持条件を与える。なお、ベント管とドライウエルとの結合部のばね剛性は、4.(2)に示すドライウエルベント開口部の解析モデルでの荷重-変位特性により算定している。

表5 ベント系設備のモデル化詳細 (その1)

モデル化項目		内容	備考
シェル要素			
はり要素			
拘束条件	①ベントヘッドサポートとサブレッションチェンバ補強リングとの結合部		
	②ベントヘッドサポートとベントヘッド補強リングとの結合部		
	③ベント管とドライウェルとの結合部		

表5 ベント系設備のモデル化詳細 (その2)

モデル化項目	内容	備考
水の付加質量	付加質量を用いた水位条件： ・ダウンカマ外側 DB条件：EL 7049mm (保守的にSA条件と同じとする) SA条件：EL 7049mm ・ダウンカマ内側 DB条件：EL 7049mm (保守的にSA条件と同じとする) SA条件：EL 7049mm	・ダウンカマ外側 (はり要素) 機械工学便覧に示される付加質量算定方法 (無限水中の円柱構造物と見なして算出した付加質量) により算出 ・ダウンカマ内側 (はり要素)
減衰定数	VI-2-1-6「地震応答解析の基本方針」に記載の溶接構造物に対する減衰1.0%を用いる	・ダウンカマに内包する水の質量を考慮 ・ダウンカマ外側及び内側並びにベントヘッダ (シェル要素) NASTRAN の仮想質量法により定義

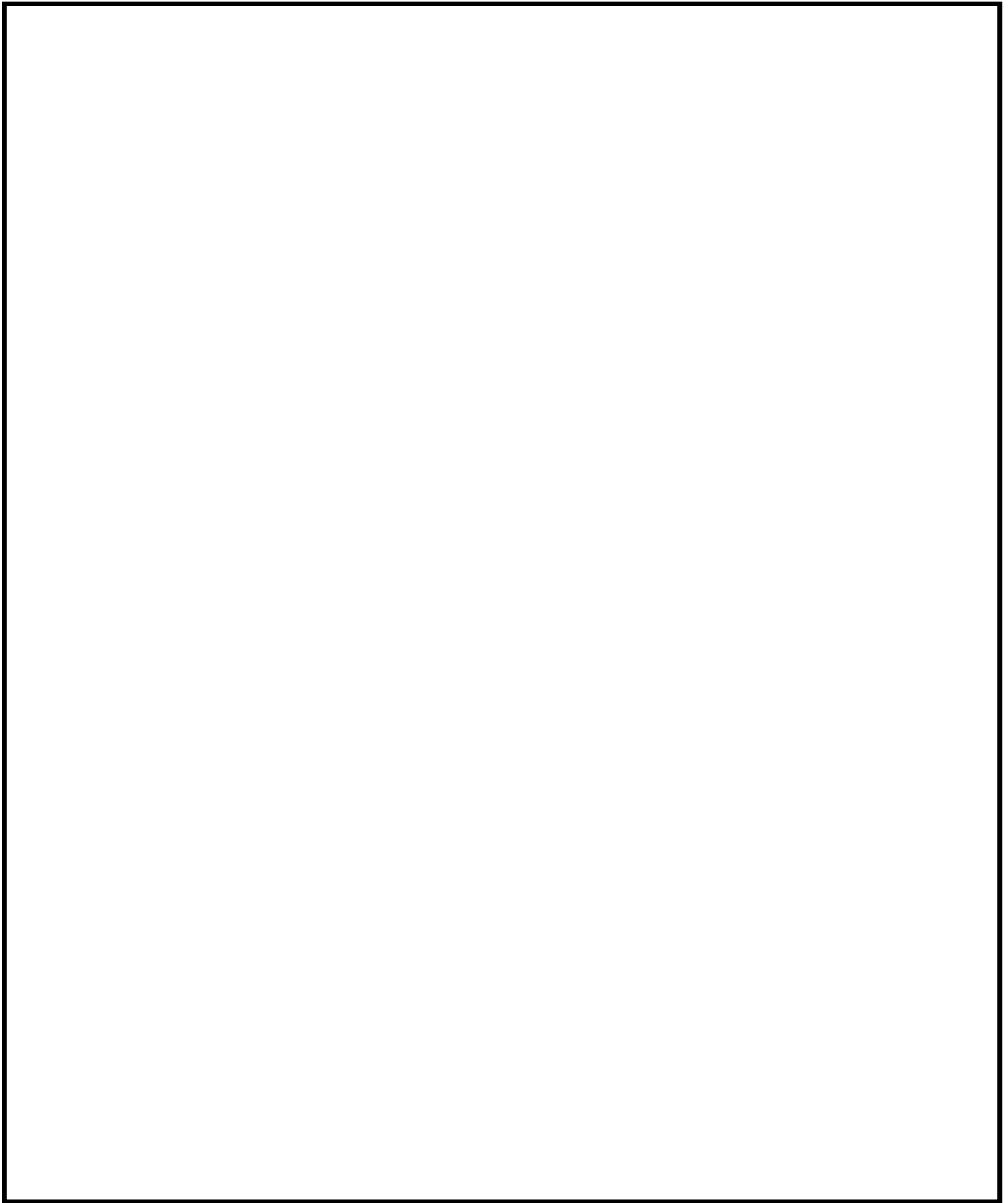


図9 原子炉格納容器ベント系設備の地震応答解析モデル図

(2) ドライウェルベント開口部

ドライウェルベント開口部の耐震評価では、より精緻な評価を実施するためドライウェル、ベント管、ジェットデフレクタ及びリブ（既設リブ及び補強リブ）をモデル化している。

ドライウェルベント開口部のモデル化詳細を表 6 に、ドライウェルベント開口部の解析モデル図を図 10 及び図 11 に示す。

表 6 ドライウェルベント開口部のモデル化詳細

モデル化項目		内容	備考
シェル要素 (図 10 及び図 11 参照)			
拘束条件	①ドライウェル円筒部 (モデル上端部)		
	②ドライウェル円筒部 及び球形部 (モデル側端部)		
	③サンドクッション部 下端以下		

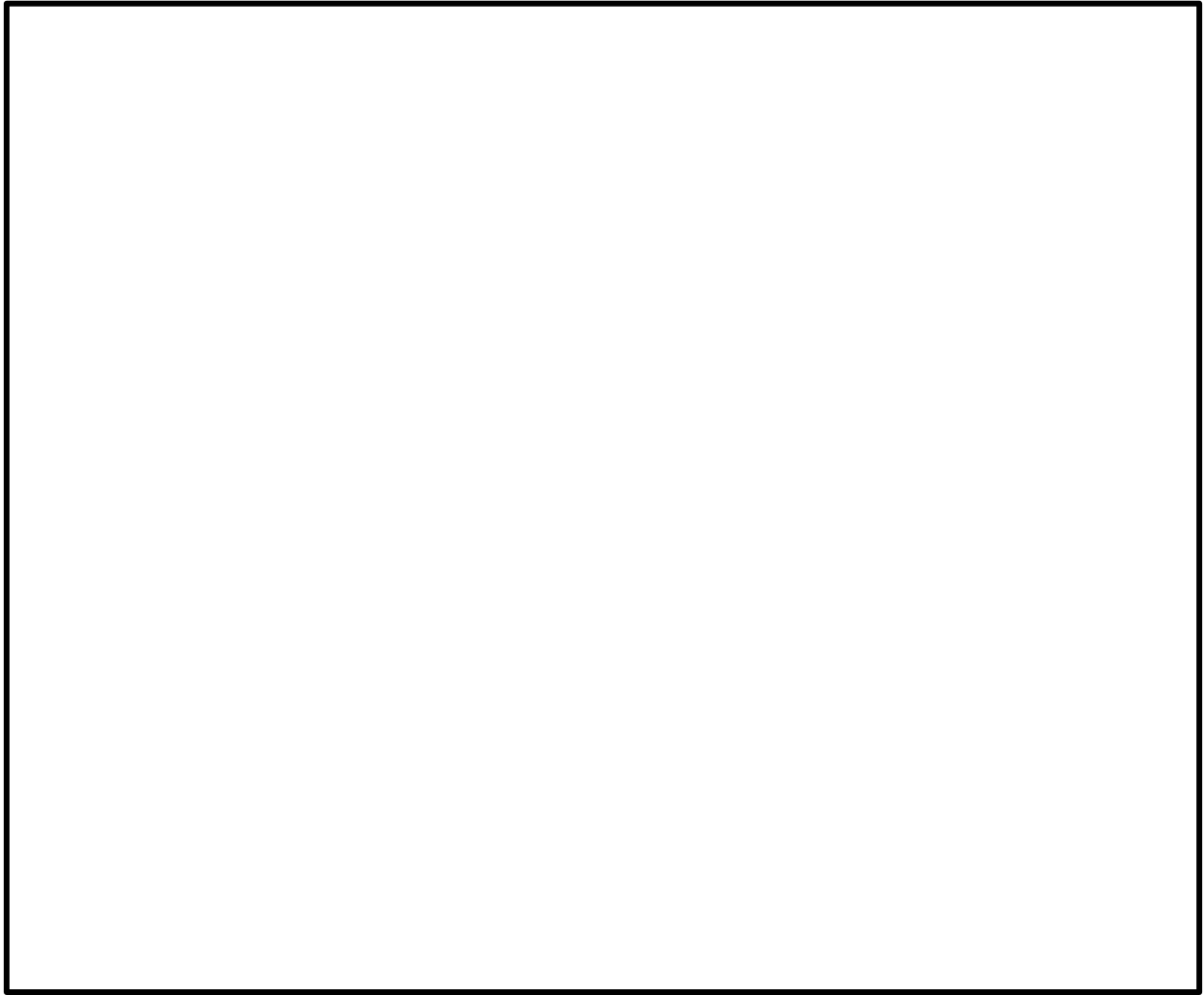


図 10 ドライウェルベント開口部の解析モデル図（全体）

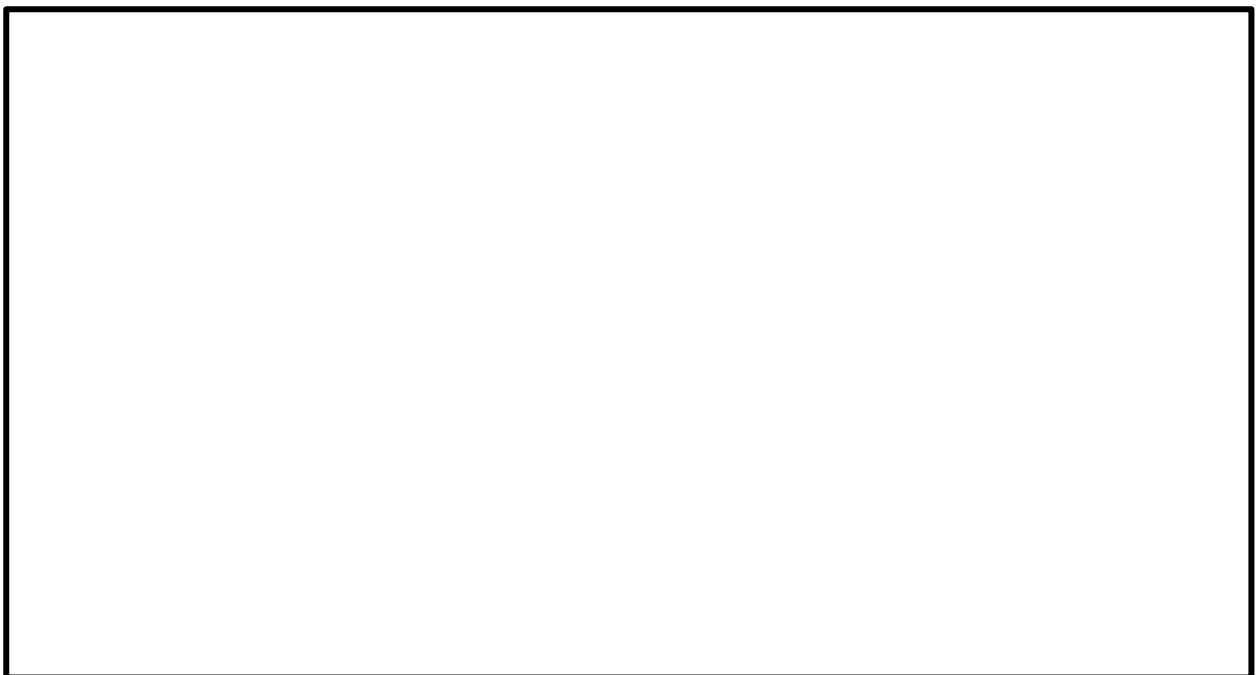


図 11 ドライウェルベント開口部の解析モデル図（D/W 内側から見る）

5. 既工認からの相違点に関する島根2号機への適用性のまとめ

島根2号機の原子炉格納容器ベント系設備等の今回工認における耐震評価は、地震応答解析モデルの設定、地震応答解析手法、解析手法に応じた設計用地震力、応力解析モデルの設定及び耐震補強対策の観点で既工認からの相違点がある。既工認からの相違点及び既工認等での適用実績等の整理結果を表7に示す。

整理結果から、既工認からの相違点は、既工認での適用実績があること及び耐震評価・対策における標準的な手法であることから、今回工認に適用する方法として問題ないと判断している。

表7 原子炉格納容器ベント系設備の既工認からの相違点及び既工認での適用実績等

項目	既工認	今回工認	既工認での適用実績等
地震応答解析モデル	3次元はりモデル	3次元シェルはりモデル	先行プラントの原子炉格納容器ベント系設備で3次元シェルはりモデルを適用
地震応答解析手法	時刻歴応答解析	スペクトルモーダル解析	配管等で地震応答解析にスペクトルモーダル解析を適用
解析手法に応じた設計用地震力	ドライウエルベント開口部の時刻歴加速度	ドライウエルベント開口部の設計用床応答スペクトル	配管等で地震応答解析にスペクトルモーダル解析を実施する際に設計用床応答スペクトルを適用
ドライウエルベント開口部における応力解析モデルの設定	Bijlaardの方法で評価	3次元シェルモデル	原子炉格納容器ベント系設備の既工認においてベント管のヘッダ接続部の評価に3次元シェルモデルを適用
耐震補強対策	—	<ul style="list-style-type: none"> 発生応力を抑制するための部材追加（補強リブ、パッド）及びベントヘッダサポートの主要材質の変更 ベントヘッダサポートの断面構造変更（中空（パイプ）構造） 	既工認での構造設計や先行プラントの耐震対策と同等

地震応答解析モデルに適用する 180° モデルについて

1. 概要

原子炉格納容器ベント系設備は水平方向に対称形状であることを考慮し、既工認より地震応答解析モデルに、原子炉格納容器ベント系設備のうち半分をモデル化した解析モデル^[1]（以下「180° モデル」という。）を適用している。本書では、180° モデルにおける境界条件の考え方及び地震応答解析への適用性について説明する。

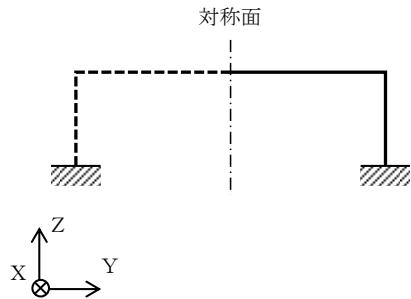
2. 境界条件

原子炉格納容器ベント系設備では、地震応答解析に適用する 180° モデルとして、境界条件を対称条件とする解析モデル（以下「対称モデル」という。）及び境界条件を反対称条件とする解析モデル（以下「反対称モデル」という。）を用いている。

ここで、荷重入力条件と対称モデル及び反対称モデルの関係を図 1 に示す。図 1 の関係を踏まえ、対称モデル及び反対称モデルを地震応答解析に適用する場合には、対称面に沿う方向（図 1 の X 方向及び Z 方向）の加振時は対称モデルを適用し、対称面に対して直角方向（図 1 の Y 方向）の加振時には反対称モデルを適用する。対称モデル及び反対称モデルを地震応答解析モデルに適用する場合の振動モードのイメージを図 2 に示す。図 2 では、図の簡略化のため、原子炉格納容器ベント系設備と同様に円環形状であるサブプレッションチェンバの振動モードのイメージを示す。

注：サブプレッションチェンバの地震応答解析モデルは、既工認では 180° モデルを適用しているが、今回工認では 360° モデルに見直す（補足-027-10-45「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の耐震評価手法について」参照）。

< 解析対象物の例 >



← : 荷重

□ : 地震応答解析に適用する解析モデル

荷重の入力方向	対称モデル	反対称モデル
X方向	<p>対称面に対して荷重は同方向</p>	<p>対称面に対して荷重は逆方向</p>
Y方向	<p>対称面に対して荷重は逆方向</p>	<p>対称面に対して荷重は同方向</p>
Z方向	<p>対称面に対して荷重は同方向</p>	<p>対称面に対して荷重は逆方向</p>

図1 荷重入力条件と対称モデル及び反対称モデルの関係

赤線：変形前の形状
黒線：変形後の形状

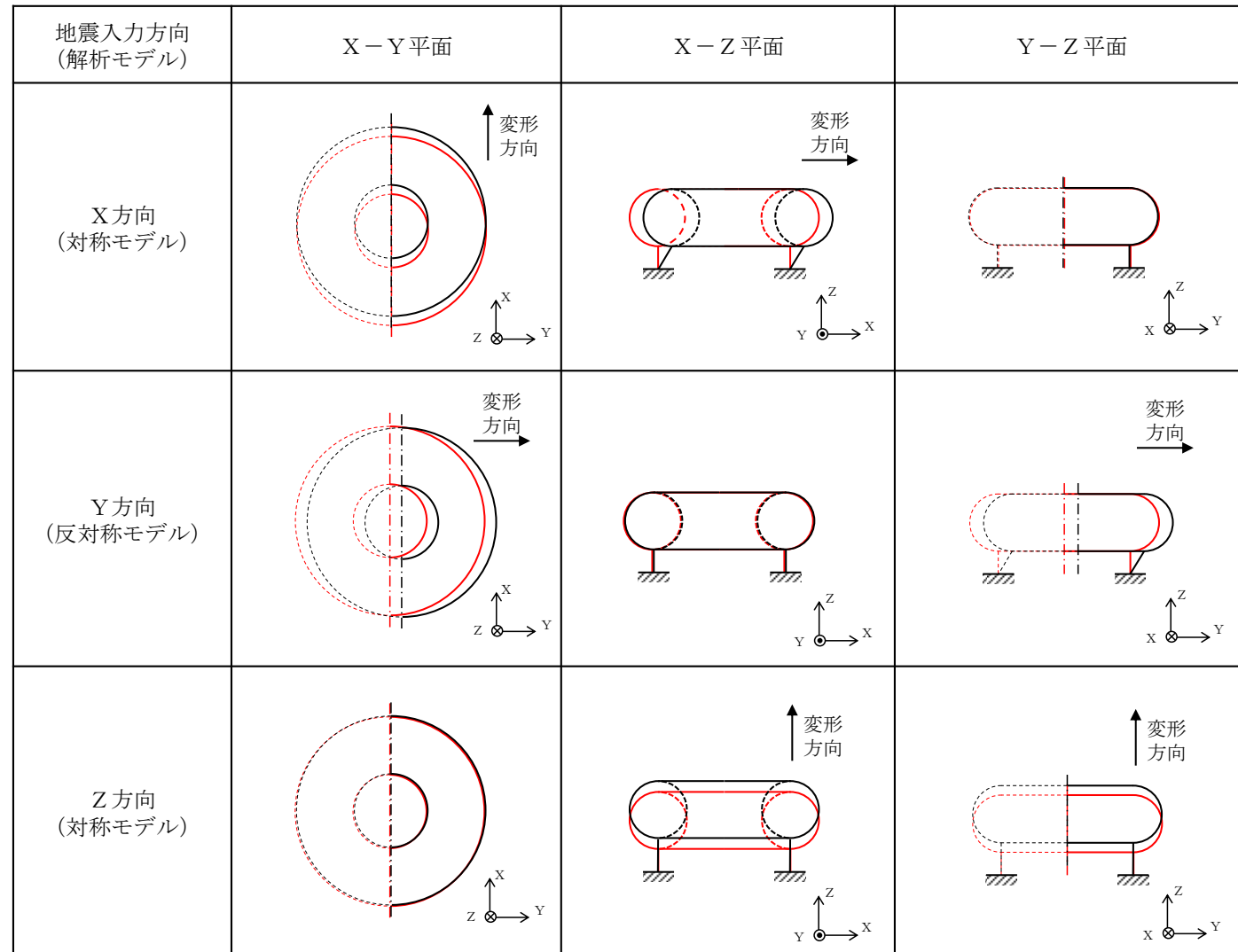


図2 地震応答解析モデルの振動モードのイメージ

3. 180° モデルの適用性

原子炉格納容器ベント系設備の 180° モデルと全体をモデル化した解析モデル（以下「360° モデル」という。）の固有値解析結果の比較により，地震応答解析に 180° モデルを適用可能なことを確認する。

3.1 解析モデル

固有値解析に適用する解析モデルを図 3-1 及び図 3-2 に示す。180° モデルでは，図 3-1 における X 方向及び Z 方向の地震応答解析モデルとして対称モデルを適用し，Y 方向の地震応答解析モデルとして反対称モデルを適用する。

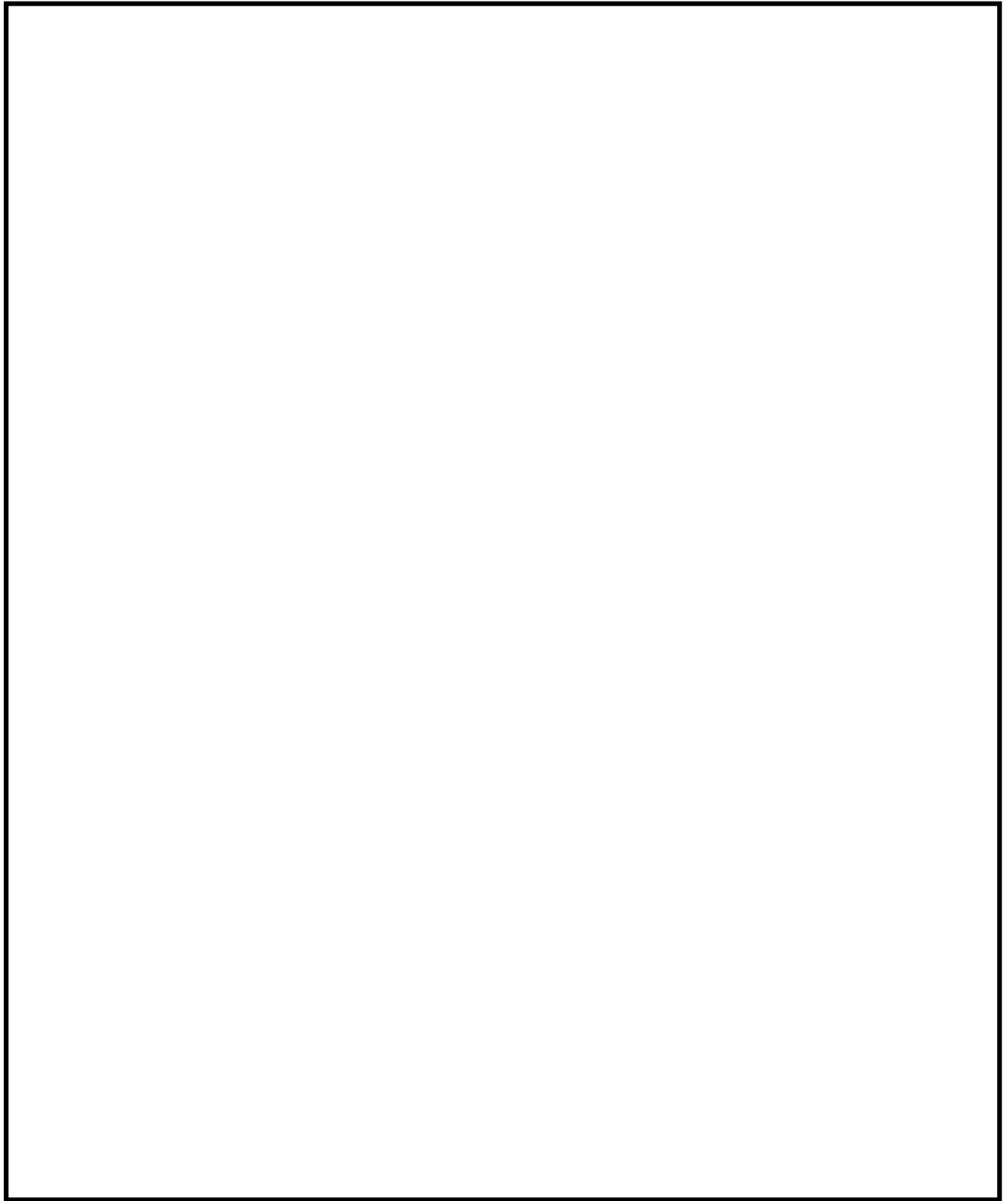


図 3-1 解析モデル (180° モデル)

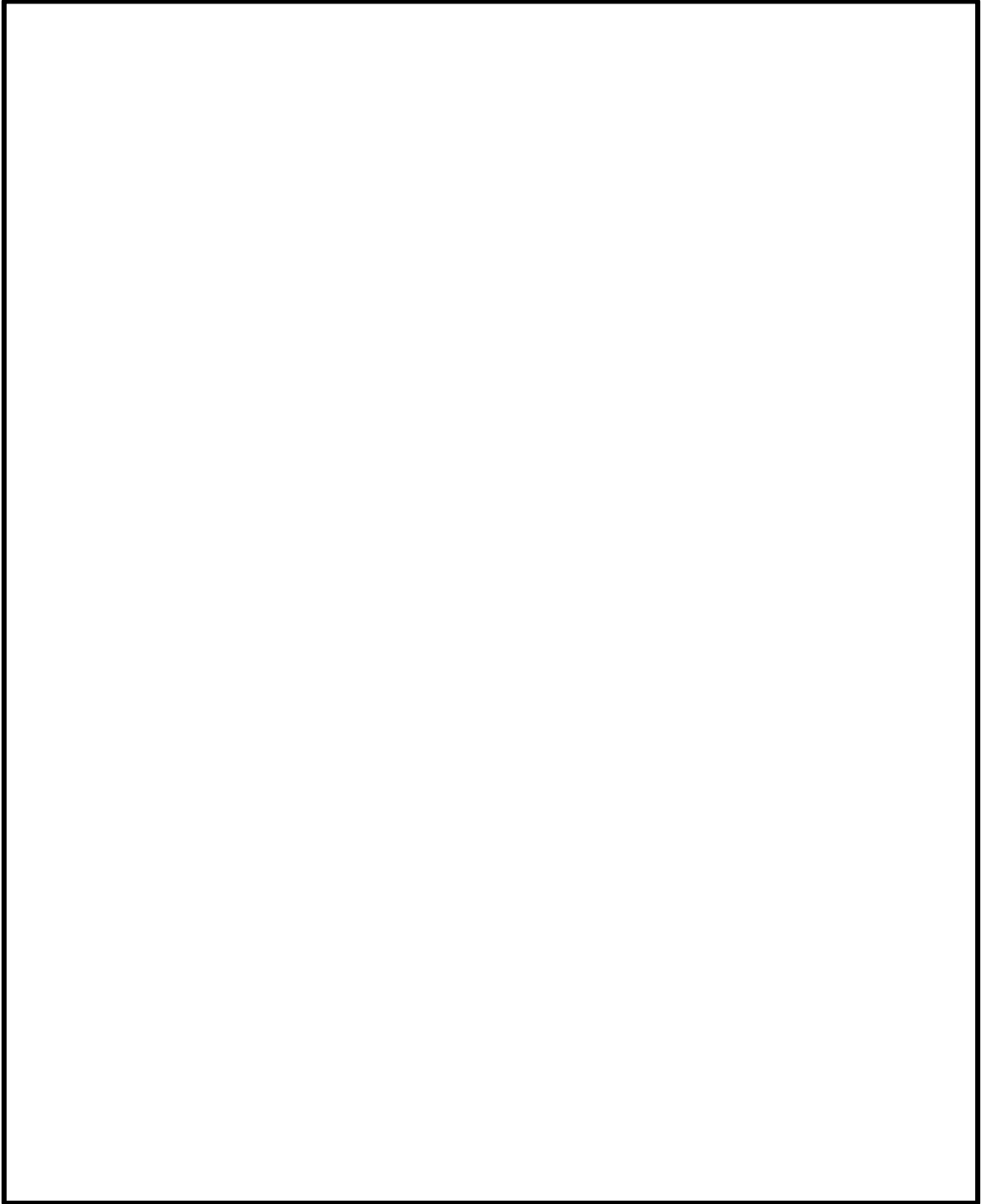


図 3-2 解析モデル (360° モデル)

3.2 固有値解析結果

固有値解析結果として得られる固有周期及び有効質量比について、360°モデルにより得られる振動モードと、180°モデルの対称モデルと反対称モデルで得られる振動モードを固有周期の順に並べて比較した結果を表1に示す。ここで、表1では全ての方向で有効質量比が表示桁数の範囲で0の振動モードについては記載を省略している。また、180°モデルの固有値解析結果は、VI-2-9-4-3「ベント管の耐震性についての計算書」における固有値解析結果と同じ結果を示す。ただし、原子炉格納容器ベント系設備は鉛直方向（Z方向）に対して剛構造であるため、耐震性についての計算書にはZ方向に卓越する振動モードは記載していないが、ここでは固有値解析結果の比較のためにZ方向に卓越する振動モードについても記載する。

表1より、以下の結果が確認できる。

- 360°モデルの振動モードの固有周期は、180°モデルにおける対称モデル又は反対称モデルのどちらかの解析モデルにおける振動モードの固有周期と一致する。
- Z方向の有効質量比は360°モデルと180°モデルで全て一致する。
- 180°モデルの振動モードにおけるX方向又はY方向の有効質量比は、360°モデルの同じ固有周期の振動モードにおける同じ方向の有効質量比の合計に一致する（表1に青字で例を示す。）。これは、360°モデルでは同じ固有周期にX方向及びZ方向に変形する振動モードが現れ、各方向に有効質量が分散するが、180°モデルでは一つの固有周期に有効質量が集約されるためである。

以上より、180°モデルとして対称モデル及び反対称モデルの両方を用いた固有値解析結果は360°モデルと一致し、180°モデルを用いた地震応答解析を適用することにより、360°モデルと同じ地震応答解析結果が得られることを確認した。

表 1 固有値解析結果

固有周期 sのY方向有効質量比の合計： (端数処理前の合計) 固有周期 sのY方向有効質量比：

360° モデル				180° モデル						
モード	固有周期 (s)	有効質量比			解析モデル	モード	固有周期 (s)	有効質量比		
		X方向	Y方向	Z方向				X方向	Y方向	Z方向
2次					反対称	2次				
3次					対称	1次				
13次					反対称	6次				
14次					対称	8次				
26次					反対称	13次				
27次					対称	14次				
40次					対称	21次				
47次					反対称	22次				
48次					対称	26次				
52次					対称	28次				
53次					反対称	25次				
54次					対称	29次				
74次					反対称	38次				
75次					対称	37次				
86次					反対称	44次				
87次					対称	43次				
102次					反対称	51次				
103次					対称	52次				
111次					反対称	56次				
112次					対称	56次				
118次					対称	60次				
119次					反対称	59次				
120次					対称	61次				
122次					対称	62次				
123次					反対称	61次				
124次					対称	63次				
125次					反対称	62次				
126次					対称	64次				
134次					対称	68次				
138次					反対称	68次				
139次					対称	71次				
169次					対称	85次				
170次					反対称	85次				
171次					対称	86次				
199次					反対称	100次				
200次					対称	100次				
226次					反対称	113次				
227次					対称	114次				
236次					対称	118次				
246次					対称	124次				
247次					反対称	123次				
248次					対称	125次				
255次					反対称	128次				
256次					対称	128次				
270次					対称	136次				
271次					反対称	135次				
272次					対称	137次				

4. まとめ

原子炉格納容器ベント系設備の地震応答解析に適用する 180° モデルについて、360° モデルによる固有値解析結果との比較により、解析モデルの妥当性の検討を行った。検討の結果、180° モデルとして対称モデル及び反対称モデルの両方を用いた固有値解析結果は 360° モデルと一致し、180° モデルを用いた地震応答解析を適用することにより、360° モデルと同じ地震応答解析結果が得られることを確認した。

原子炉格納容器ベント系設備の地震応答解析では、加振方向に応じて対称モデル及び反対称モデルを用いた地震応答解析を行っており、各方向の地震応答解析結果を組み合わせた耐震評価を行っていることから、耐震評価に 180° モデルを用いることは妥当である。

参考文献[1] 岸正彦：「構造解析のための有限要素法実践ハンドブック」、森北出版

補足-027-10-55 制御棒貯蔵ハンガの耐震性についての
計算書に関する補足説明資料

目 次

1. はじめに	1
2. 制御棒貯蔵ハンガの配置	1
3. 今回工認における制御棒貯蔵ハンガの変更点	2
3.1 運用制限	2
3.2 制御棒落下防止治具の追設	2
4. 制御棒貯蔵ハンガによる波及的影響の検討に係る評価対象部位	2
4.1 制御棒貯蔵ハンガ（その1）の構造	2
4.2 波及的影響の検討に係る評価対象部位	4
4.3 評価対象外とした部位（ハンガ及び振れ止め）に対する落下評価	7
5. 制御棒落下防止ポールの効果	7
6. 制御棒貯蔵ハンガの耐震解析モデルにおける制御棒の拘束条件	9
6.1 概要	9
6.2 等価な単振り子の長さの導出	12
6.3 単振り子の振動モードの導出	13
7. まとめ	14
8. 参考文献	15

1. はじめに

制御棒貯蔵ハンガは、燃料プール内に設置され、近傍に設置された上位クラス施設である使用済燃料貯蔵ラックに対して、波及的影響を及ぼさないことを目的として、基準地震動 S_s に対する耐震性を評価しており、その結果を「VI-2-11-2-7-5 制御棒貯蔵ハンガの耐震性についての計算書」に示している。

制御棒貯蔵ハンガは、耐震性の確保を目的として運用を制限する方針（貯蔵本数の変更）としていることから、本資料ではこれを踏まえた耐震評価手法について示す。

2. 制御棒貯蔵ハンガの配置

図1に示すとおり、制御棒貯蔵ハンガは燃料プール内に設置されており、近傍に上位クラス施設である使用済燃料貯蔵ラックが設置されている。したがって、制御棒貯蔵ハンガが地震時に損傷、転倒することで、使用済燃料貯蔵ラックに波及的影響を及ぼす可能性があるため、基準地震動 S_s に対して上位クラス施設に波及的影響を及ぼさないことを確認する。

波及的影響の検討内容については、補足-023-03「下位クラス施設の波及的影響の検討について」に詳細を示す。

なお、制御棒ハンガ（その2）については、地震等の影響で制御棒が脱落した場合でも制御棒貯蔵ハンガ（その1）と干渉し、上位クラス施設である使用済燃料貯蔵ラックに波及的影響を及ぼすことはないことから、本資料では制御棒ハンガ（その1）について述べる。



図1 制御棒貯蔵ハンガの配置図

3. 今回工認における制御棒貯蔵ハンガの変更点

3.1 運用制限

制御棒貯蔵ハンガ（その1）について、波及的影響に関する評価対象部位の基準地震動 S_s に対する構造健全性を満足するため、表1に示すとおり、制御棒貯蔵本数に対する運用を制限する方針（貯蔵本数の変更）としている。

表1 制御棒貯蔵本数の比較

	変更前（既工認）	変更後（今回工認）
制御棒貯蔵ハンガ（その1）	96本 (6本×16列)	64本 (4本×16列)

3.2 制御棒落下防止治具の追設

地震等の影響で、ハンガで保持している制御棒が脱落した場合でも、上位クラス施設である使用済燃料貯蔵ラックに制御棒が落下しないよう、制御棒落下防止ポール及びポール支持金具からなる制御棒落下防止治具を設置する。

4. 制御棒貯蔵ハンガによる波及的影響の検討に係る評価対象部位

制御棒貯蔵ハンガによる波及的影響の検討を実施するにあたり、今回工認において制御棒貯蔵ハンガの制御棒貯蔵本数を変更することによって制御棒貯蔵ハンガに対する荷重付加条件が変わること及び制御棒貯蔵ハンガの構造部材の役割等を踏まえて、改めて評価対象部位を選定する。

4.1 制御棒貯蔵ハンガ（その1）の構造

制御棒貯蔵ハンガ（その1）は、ハンガ、サポート、制御棒落下防止治具、振れ止め、ボルト等で構成されている。また、今回工認では3.1に示した通り、貯蔵本数を1ハンガ（片側）あたりハンガ固定部寄りに2本までに制限し、また3.2に示した通り制御棒落下防止治具を追設することから、これらを踏まえた概略構造図を図2に示す。

なお、既工認では、貯蔵本数を1ハンガ（片側）あたり3本までとしていた。

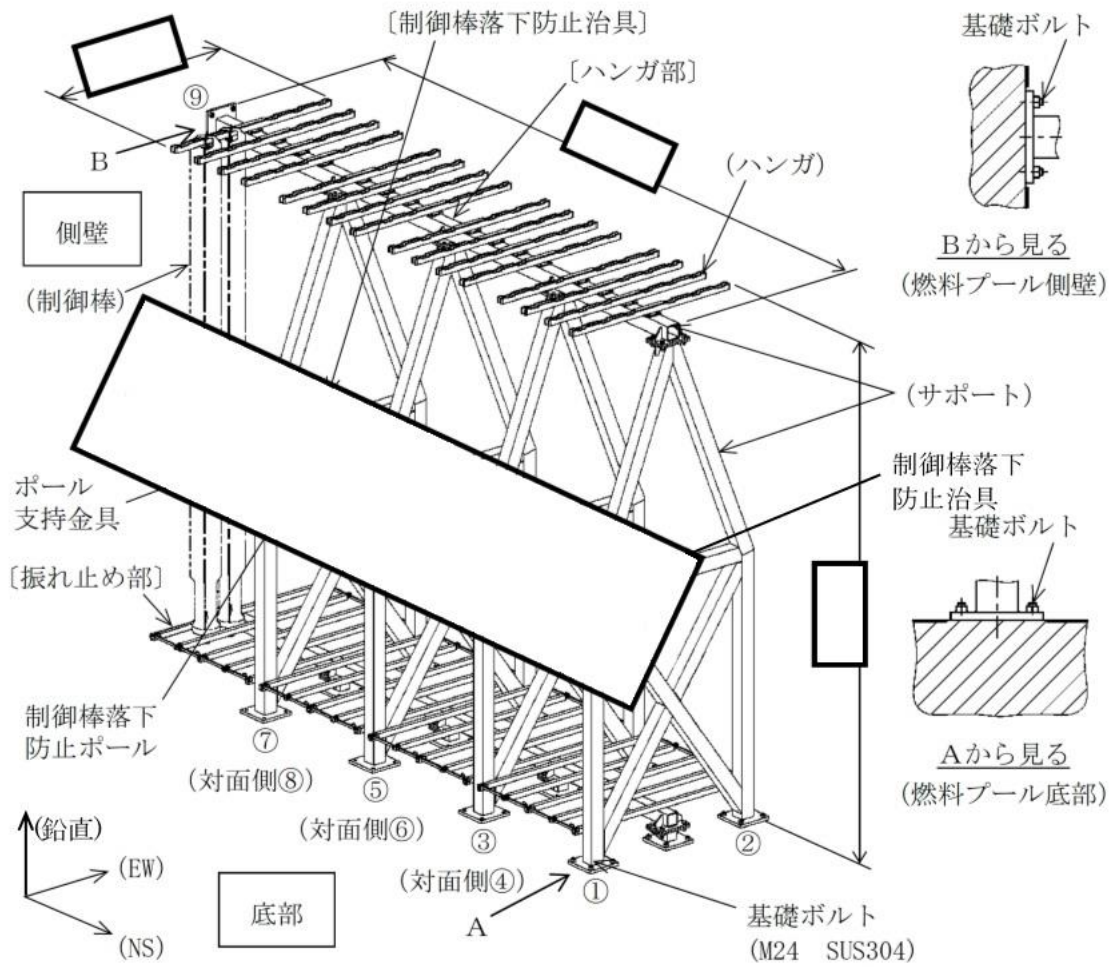


図2 制御棒貯蔵ハンガ（その1）の概略構造図（今回工認）

4.2 波及的影響の検討に係る評価対象部位

今回工認において制御棒貯蔵ハンガの制御棒貯蔵本数を変更することを踏まえ、制御棒貯蔵ハンガの構造部材ごとに、役割、制御棒貯蔵による荷重負荷条件及び波及的影響に対する評価結果を確認し、改めて波及的影響に係る評価対象部位を検討した結果を表 2 に示す。

検討の結果、制御棒貯蔵ハンガによる波及的影響の検討に係る評価対象部位としては、基礎ボルト、制御棒落下防止ポール及びポール支持金具を選定する。

表2 制御棒貯蔵ハンガ（その1）の評価対象部位の検討結果（1/2）

構造部材名称	役割	評価対象部位		波及的影響に対する評価結果
		既工認 (貯蔵本数 96 本) Bクラス評価	今回工認 (貯蔵本数 64 本) 波及的影響	
ハンガ	制御棒をハンガに吊り下げる（1ハンガ（片側）あたり制御棒2本）	○	対象外	ハンガが損傷した場合にも、制御棒落下防止治具（制御棒落下防止ポール及びポール支持金具）が健全であれば上位クラス施設への波及的影響を防止できる。また、自重が軽量であるため、損傷した場合にも波及的影響を及ぼすおそれはない。 なお、当該部が破損し落下する場合について、重量物落下評価方法の評価条件と比較した結果、影響のないことを確認した。【4.3参照】
サポート	制御棒を吊り下げたハンガ及び制御棒落下防止治具からの荷重を受け、それらの荷重をプール床及び壁へ伝達する。	○	対象外	基礎ボルト及び制御棒落下防止治具が健全であれば、上位クラス施設への波及的影響を及ぼすおそれはない。
振れ止め	吊り下げた制御棒の下部を囲うことで振れを抑制する。	○	対象外	振れ止めが損傷した場合にも、制御棒落下防止治具（制御棒落下防止ポール及びポール支持金具）が健全であれば上位クラス施設への波及的影響を防止できる。また、自重が軽量であるため、損傷した場合にも波及的影響を及ぼすおそれはない。 なお、当該部が破損し落下する場合について、重量物落下評価方法の評価条件と比較した結果、影響のないことを確認した。【4.3参照】

表2 制御棒貯蔵ハンガ（その1）の評価対象部位の検討結果（2/2）

構造部材名称	役割	評価対象部位		波及的影響に対する評価結果
		既工認 (貯蔵本数 96 本) Bクラス評価	今回工認 (貯蔵本数 64 本) 波及的影響	
基礎ボルト	制御棒貯蔵ハンガ部をプール床，壁面に固定する。	○	○	基礎ボルトが損傷した場合には，制御棒貯蔵ハンガ全体が転倒する可能性があるため，波及的影響を及ぼすおそれがある。
制御棒落下防止ポール	保管中の制御棒が落下したとしても，制御棒貯蔵ハンガの設置範囲内に制御棒を留める。	－ (新設)	○	制御棒落下防止治具(制御棒落下防止ポール及びポール支持金具)が損傷した場合，ハンガから脱落した制御棒が使用済燃料貯蔵ラックに向かって転倒する可能性があるため，波及的影響を及ぼすおそれがある。
ポール支持金具	制御棒落下防止ポールを支持する。	－ (新設)	○	

4.3 評価対象外とした部位（ハンガ及び振れ止め）に対する落下評価

制御棒貯蔵ハンガによる波及的影響の評価対象外とした部位（ハンガ及び振れ止め）について、仮に当該部位が損傷し落下する場合の上位クラス施設への波及的影響の可能性を確認することを目的として添付書類「VI-1-3-3 燃料体等又は重量物の落下による使用済燃料貯蔵槽内の燃料体等の破損の防止及び使用済燃料貯蔵槽の機能喪失の防止に関する説明書」に示されている、燃料プールライニングに対する模擬燃料集合体を用いた気中落下試験条件と制御棒貯蔵ハンガ及び振れ止めの落下条件の比較を表3に示す。

検討の結果、制御棒貯蔵ハンガのハンガ又は振れ止めが損傷し落下した場合においても、評価条件が模擬燃料集合体を用いた気中落下試験に包絡されることから、上位クラス施設である燃料プールや使用済燃料貯蔵ラックに対して波及的影響を及ぼすことはないと判断できる。

表3 気中落下試験条件と制御棒貯蔵ハンガのハンガ及び振れ止めの落下条件の比較

	模擬燃料集合体 気中落下試験	ハンガ	振れ止め
質量	310kg		
高さ	5.1m		

5. 制御棒落下防止ポールの効果

ハンガ破損時の制御棒の動態のイメージを図3に示す。



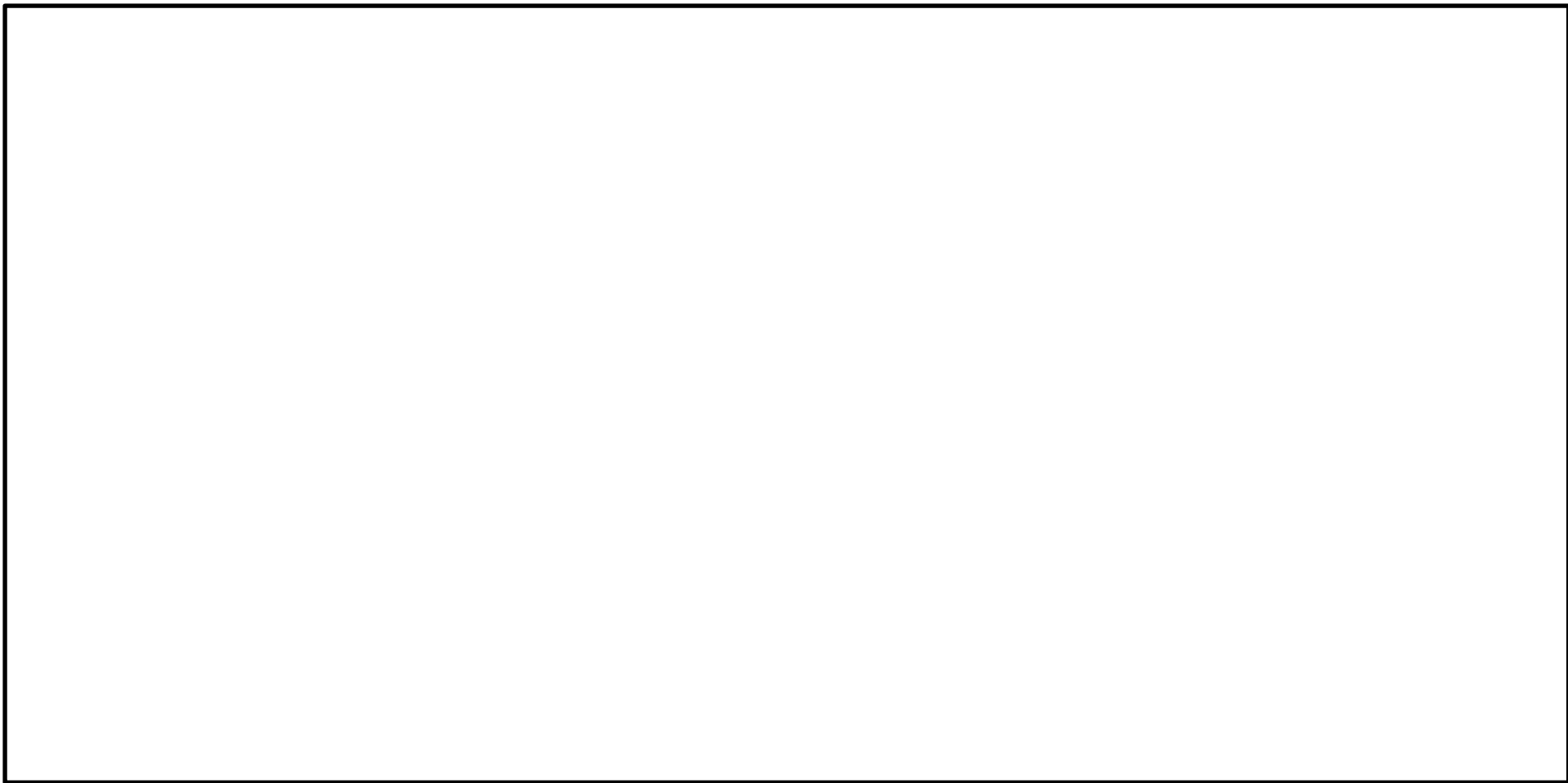


図3 ハンガ破損時の制御棒の動態のイメージ

6. 制御棒貯蔵ハンガの耐震解析モデルにおける制御棒の拘束条件

6.1 概要

制御棒貯蔵ハンガの解析モデルには制御棒が含まれている。解析モデルにおける制御棒の拘束条件として制御棒の上端のみを支持した場合は制御棒の位置（角度）が一意に定まらず解析結果が求められないため、以下の1)、2)を根拠として図4に示すように制御棒上端に加えて上端から $(2/3)L$ の点をピン支持(水平並進運動を拘束)している。ここで、 L は制御棒の長さを指す。

- 1) 制御棒の振動が、ハンガの制御棒支持部の振動に対して逆位相の振り子運動となる。
- 2) 1)の振り子運動における「節」（制御棒貯蔵ハンガに対して不動の点）が、上端から $(2/3)L$ の点となるため、並進運動を拘束しても振動に影響しないと考えられる。

以下、制御棒の振動モード及び節の位置を導出する。

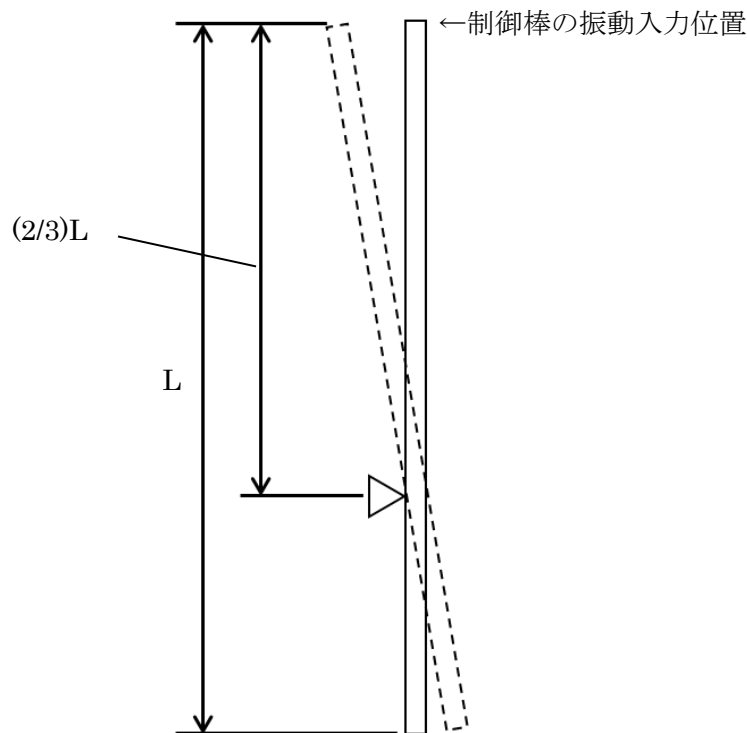


図4 支持点を追加した制御棒モデルの概略

まず、長さ L 、質量 M の制御棒は図5に示すように上端で支持された物理振り子（水平な回転軸を持つ剛体）とみなせる。慣性モーメントの関係から、図6に示すような質量 M を先端に持ち長さが $(2/3)L$ の単振り子（先端に集中質量を持つ通常の振り子）は、図5の物理振り子と等価であり、同じ入力を与えれば同じ挙動を示す（=同じ角度で運動する）。

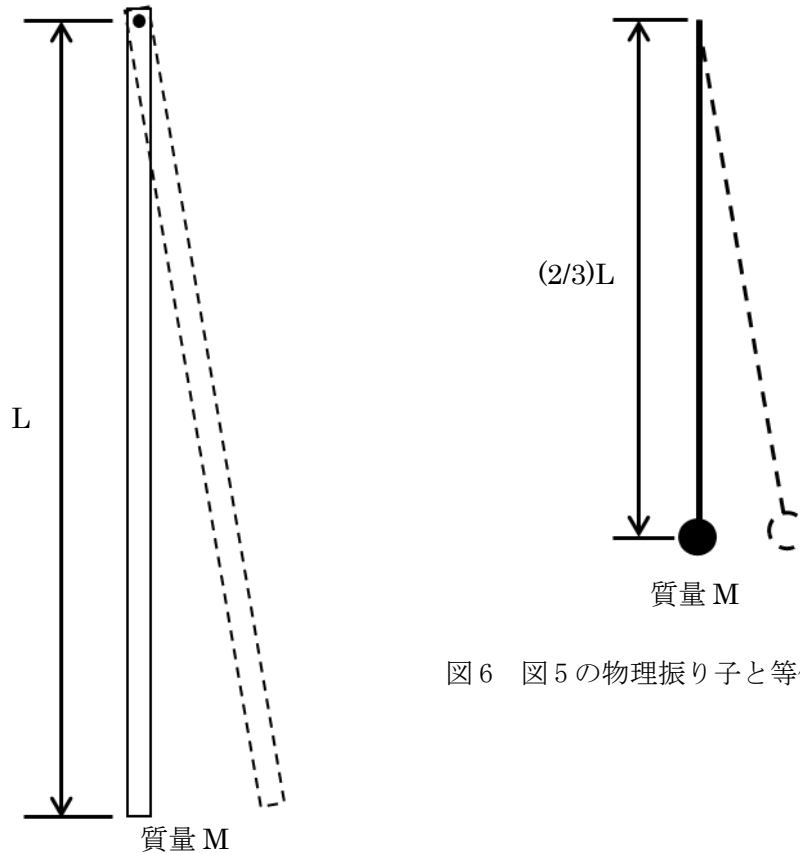


図6 図5の物理振り子と等価な単振り子

図5 制御棒を模擬した物理振り子

前段落で示した関係を利用し、制御棒を単振り子に置き換えることで、1質点系として振動モードを求める。まず図6の単振り子に対して制御棒貯蔵ハンガの固有振動数と等しい振動数 ω の強制外力を与えると、この単振り子の固有振動数 ω_n との関係は $\omega > \omega_n$ となることから、図7に示すような逆位相の振動モードとなり、先端の集中質量は不動点となる。

したがって、元の制御棒も図8に示す逆位相の振動モードとなる。また単振り子と制御棒の長さの関係より、制御棒の上端から $(2/3)L$ の点が不動点となる。よって図4に示すピン支持条件で解析を行っている。

次節以降に、単振り子の長さや振動モードの詳細な導出過程を示す。

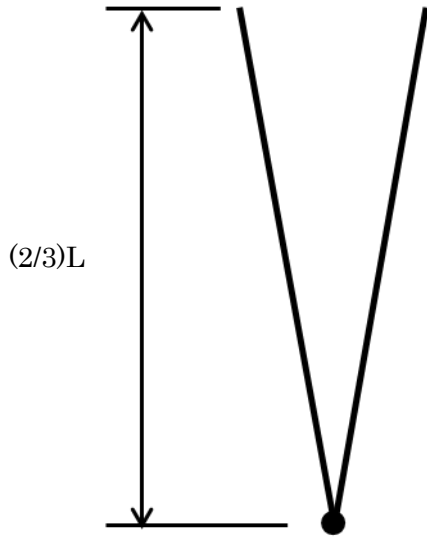


図 7 等価な単振り子の振動モード

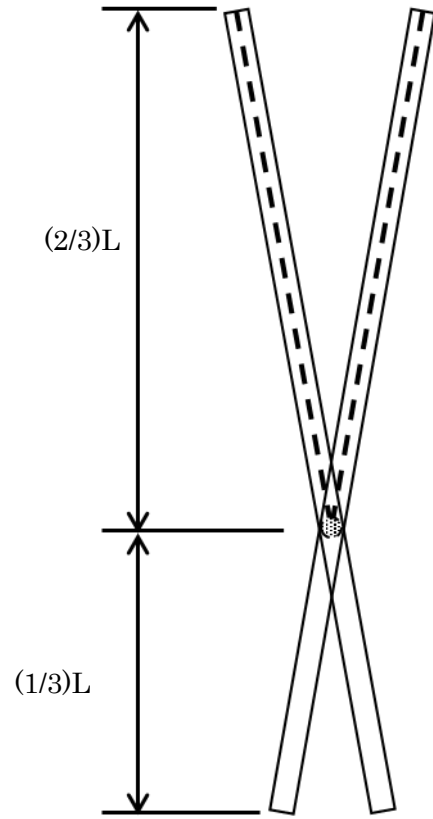


図 8 制御棒の振動モード

6.2 等価な単振り子の長さの導出

6.1 節では、制御棒を物理振り子（水平な回転軸を持つ剛体）とみなしたうえで、検討を容易にするため、それと同様な振動特性を持つ単振り子（先端に集中質量を持つ通常の振り子）に置き換えており、制御棒の長さが L のとき単振り子の長さは $(2/3)L$ になると述べた。本節ではこの導出過程について述べる。

機械工学便覧（参考文献(1)）によれば、図 9 に示した物理振り子の運動方程式は式(1)で表される。ここで I は回転軸まわりの慣性モーメント、 M は質量、 h は回転軸 O から重心 G までの距離、 ϕ は OG と鉛直軸とのなす角度、 g は重力加速度である。

$$I \frac{d^2\phi}{dt^2} = -M g h \sin \phi \quad (1)$$

一方、図 10 に示した単振り子（先端に集中質量を持つ通常の振り子）の運動方程式は式(2)で表される。ここで ℓ は単振り子の長さである。

$$M \ell^2 \frac{d^2\phi}{dt^2} = -M g \ell \sin \phi \quad (2)$$

式(1)と式(2)を比較すると、物理振り子と単振り子が等価となるような単振り子の長さ ℓ は式(3)で表され、 $\ell = (2/3)L$ である。ここで回転軸から重心までの距離 $h = (1/2)L$ を用いた。

$$\ell = \frac{I}{M h} = \frac{M \frac{L^2}{3}}{M \frac{L}{2}} = \frac{2}{3} L \quad (3)$$

なお、物理振り子の端点周りの慣性モーメントは、制御棒を直線とみなすことで参考資料(1)に従い式(4)で算出される。

$$I = M \frac{L^2}{3} \quad (4)$$

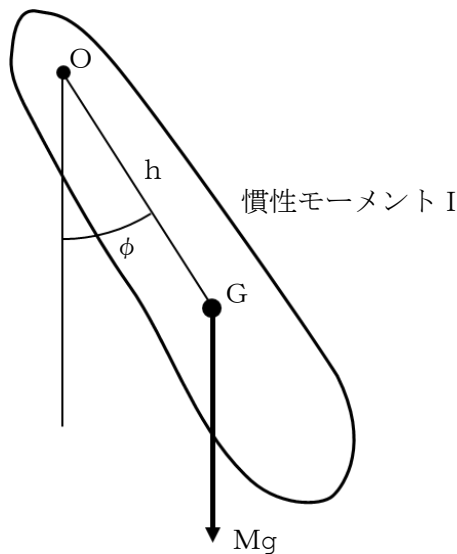


図 9 物理振り子

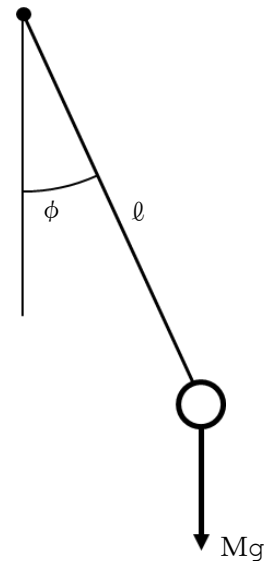


図 10 単振り子

6.3 単振り子の振動モードの導出

6.1 節では、制御棒貯蔵ハンガの固有振動数 ω と、等価単振り子の固有振動数 ω_n との関係は $\omega > \omega_n$ になると述べた。この導出を示す。

強制振動による振り子の挙動は、参考文献(2)によれば、振動モードは入力振動数と固有振動数の関係によって図 11 のように 3 種類に分類される。ここで、 ω は振り子への入力角振動数、 ω_n は振り子の固有角振動数である。

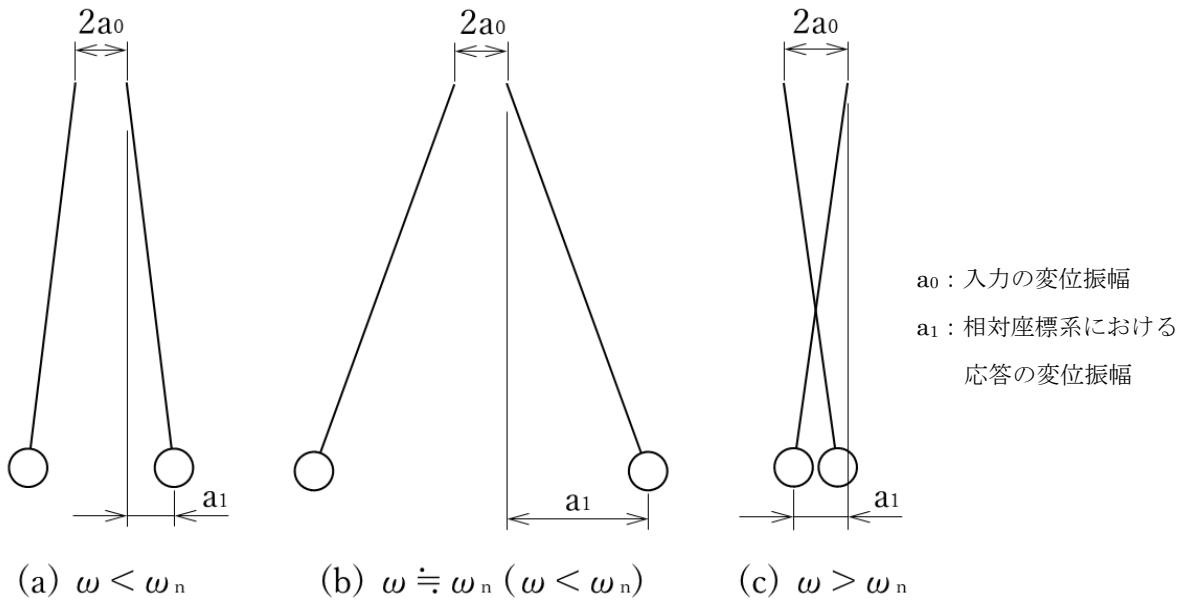


図 11 振り子の振動モード

ω [rad/s] は制御棒貯蔵ハンガの固有角振動数のため、代わりに制御棒貯蔵ハンガの水平方向固有振動数 f [Hz] を用いることにすると、水平方向固有周期 T (水平 X 方向の卓越モードの固有周期) を用いて式(5)で算出される。

$$f = \frac{1}{T} = \frac{1}{\boxed{}} = \boxed{} \text{ Hz} \quad (5)$$

次に ω_n の代わりに振り子の固有振動数 f_n を算出して f と比較する。制御棒と等価の単振り子の長さ ℓ は式(3)に基づき式(6)のようになり、その固有角振動数は参考文献(1)によれば式(7)で表されるため、固有振動数は式(8)で表される。ここで制御棒の長さ $L = \boxed{}$ m を用いた。

$$\ell = \frac{2}{3}L = \frac{2}{3} \times \boxed{} = \boxed{} \text{ m} \quad (6)$$

$$\omega_n = \sqrt{\frac{g}{\ell}} = \sqrt{\frac{9.80665}{\boxed{}}} = \boxed{} \text{ rad/s} \quad (7)$$

$$f_n = \frac{\omega_n}{2\pi} = \frac{\boxed{}}{2\pi} = \boxed{} \text{ Hz} \quad (8)$$

以上の計算結果より, $f = \square \text{ Hz} > f_n = \square \text{ Hz}$ すなわち $\omega > \omega_n$ となることから, 図 11 に示した (c) のような逆位相の振動モードとなる。

なお, $\omega / \omega_n = f / f_n = \square / \square = \square$ となり 1 より十分大きいいため, 参考文献(2) によれば振幅比は $a_1 / a_0 \approx 1$ となる。すなわち, 単振り子の振動の寸法関係は, 図 11 に基づき下記の図 12 のようになる (先端が静止する)。

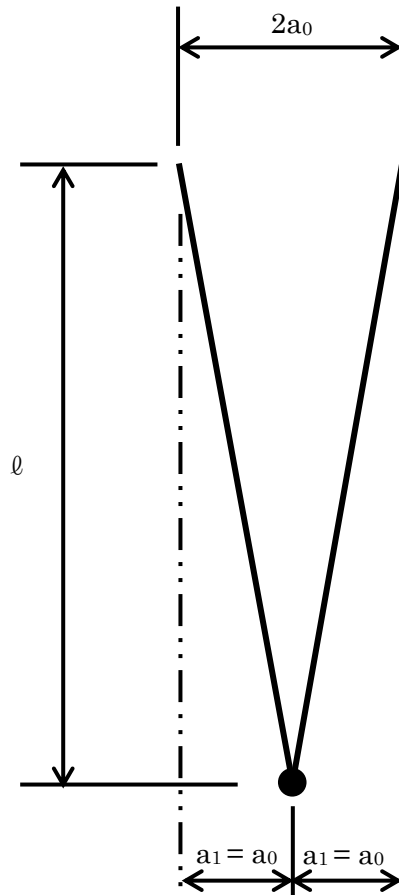


図 12 等価単振り子の振動の寸法関係

7. まとめ

制御棒貯蔵ハンガ (その 1) については, 今回工認において制御棒貯蔵本数を変更 (96 本から 64 本) し, また制御棒落下防止治具を追設することで, 制御棒貯蔵ハンガの転倒及び制御棒脱落時にも上位クラス施設への波及的影響を防止する。

なお, 制御棒貯蔵ハンガによる波及的影響の検討に係る耐震評価対象部位については, 上位クラス施設への波及的影響を踏まえて基礎ボルト, 制御棒落下防止ポール及びポール支持金具とする。

また, 制御棒貯蔵ハンガの耐震評価における制御棒の拘束条件については, その振動特性を踏まえ, 上端及び上端から $(2/3)L$ の点をピン支持している。

8. 参考文献

- (1) 機械工学便覧 基礎編 α2 機械力学
- (2) 山田伸志, 1987, 振動工学入門 第2版, パワー社

補足-027-10-59 地震相対変位に対する伸縮継手を用いた
配管設計について

目 次

1. はじめに	1
2. 伸縮継手の構造について	3
3. 地震相対変位を吸収可能であることの確認	8
4. 変位に対する疲労評価	8

1. はじめに

建物間に跨る配管系には、地震時において両建物の地震応答に伴う相対変位（以下「地震相対変位」という。）が入力されるため、大きな変位が生じる箇所については、変形の緩和を目的として伸縮継手を設置している。

本資料は、伸縮継手が地震相対変位を吸収可能であることについて説明するものである。なお、本資料では、地震相対変位が最大となる格納容器フィルタベント系配管に設置の伸縮継手を代表とした。また、表 1-1 に対象箇所（原子炉建物—第 1 ベントフィルタ格納槽間）の地震相対変位を示し、図 1-1 に伸縮継手の設置箇所を示す。

なお、本資料が関連する図書は以下のとおり。

- ・ VI-2-5-5-5-2 「管の耐震性についての計算書（低圧原子炉代替注水系）」
- ・ 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）」
- ・ VI-2-10-1-2-3-6 「管の耐震性についての計算書（ガスタービン発電機）」
- ・ VI-2-10-2-11 「隔離弁、機器・配管の耐震性についての計算書」
- ・ VI-2-11-2-8 「管の耐震性についての計算書（波及的影響）」

表 1-1 代表箇所の配管系に入力される地震相対変位（基準地震動 S_s）

設置箇所			地震相対変位(mm)		
系統	エリア	鳥瞰図 番号	X 方向 (NS 方向)	Y 方向 (鉛直方向)	Z 方向 (EW 方向)
格納容器フィルタ ベント系	原子炉建物—第 1 ベントフィルタ格 納槽間	FCVS-F-6	25.0	4.3	11.4

注：本表記載の数値は、原子炉建物—第 1 ベントフィルタ格納槽間の地震相対変位に基づき設定される配管解析への入力変位量であり、入力変位量の計算方法の詳細については、補足-027-10-35 「管の耐震評価における地震相対変位の考慮方法について」に示す。

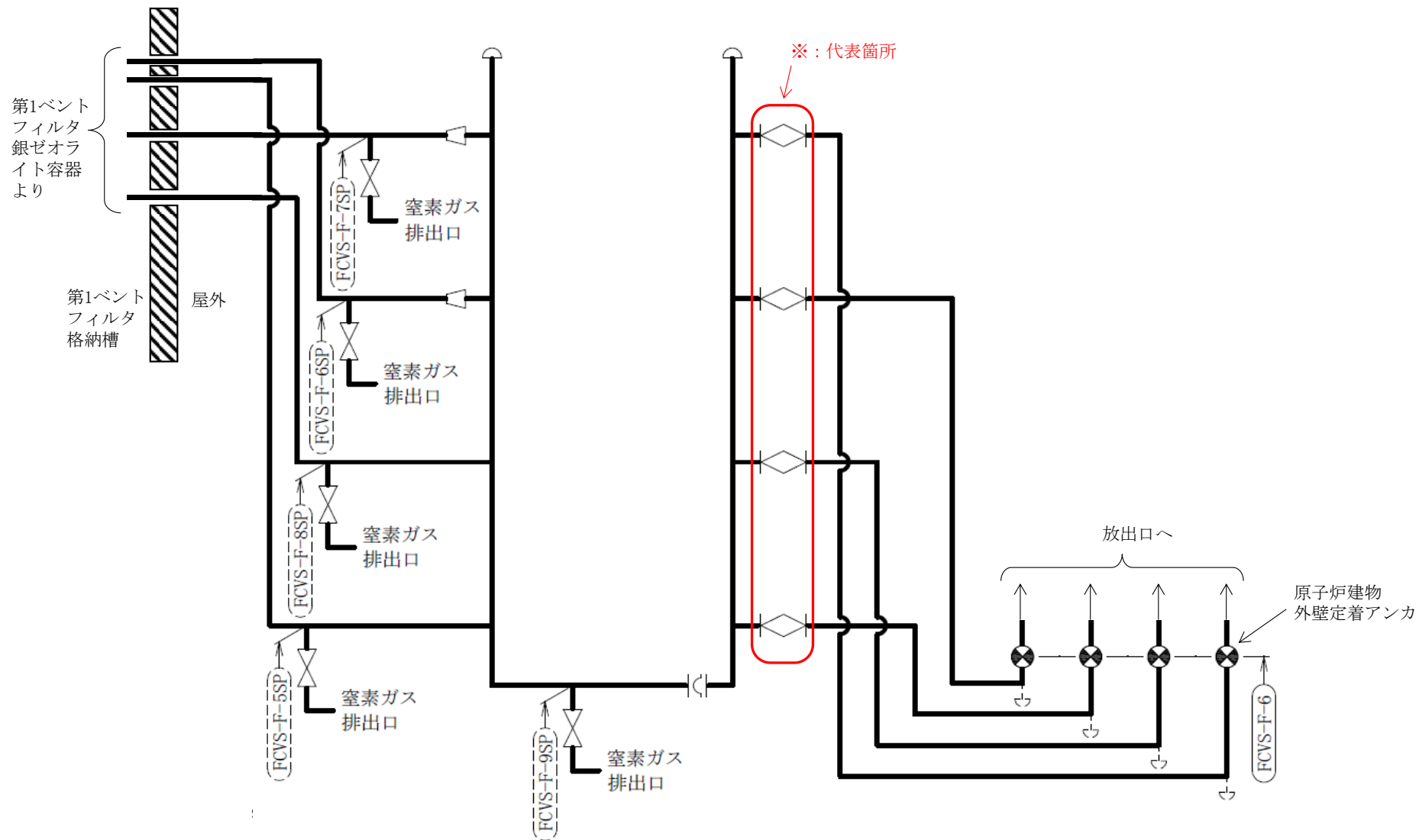


図1-1 代表箇所の伸縮継手が設置される箇所（格納容器フィルタベント系）

2. 伸縮継手の構造について

代表箇所伸縮継手の構造図を図 2-1、鳥瞰図を図 2-2、材質を表 2-1 示す。

伸縮継手は、図 2-1 のように端管とベローズから構成され、本体中央に備えられたベローズによって、軸方向及び軸直角方向の変位を吸収する構造である。代表箇所においては表 1-1 に示すとおり、X 方向（NS 方向）の地震相対変位が大きい傾向であることを踏まえ、図 2-2 に示すとおり、伸縮継手の軸方向を X 方向（NS 方向）に合わせて設置している。

表 2-1 代表箇所伸縮継手材質

部品名称	材質
端管	SUS316LTP/SF440A
ベローズ	SUS316L



図 2-1 代表箇所伸縮継手構造図

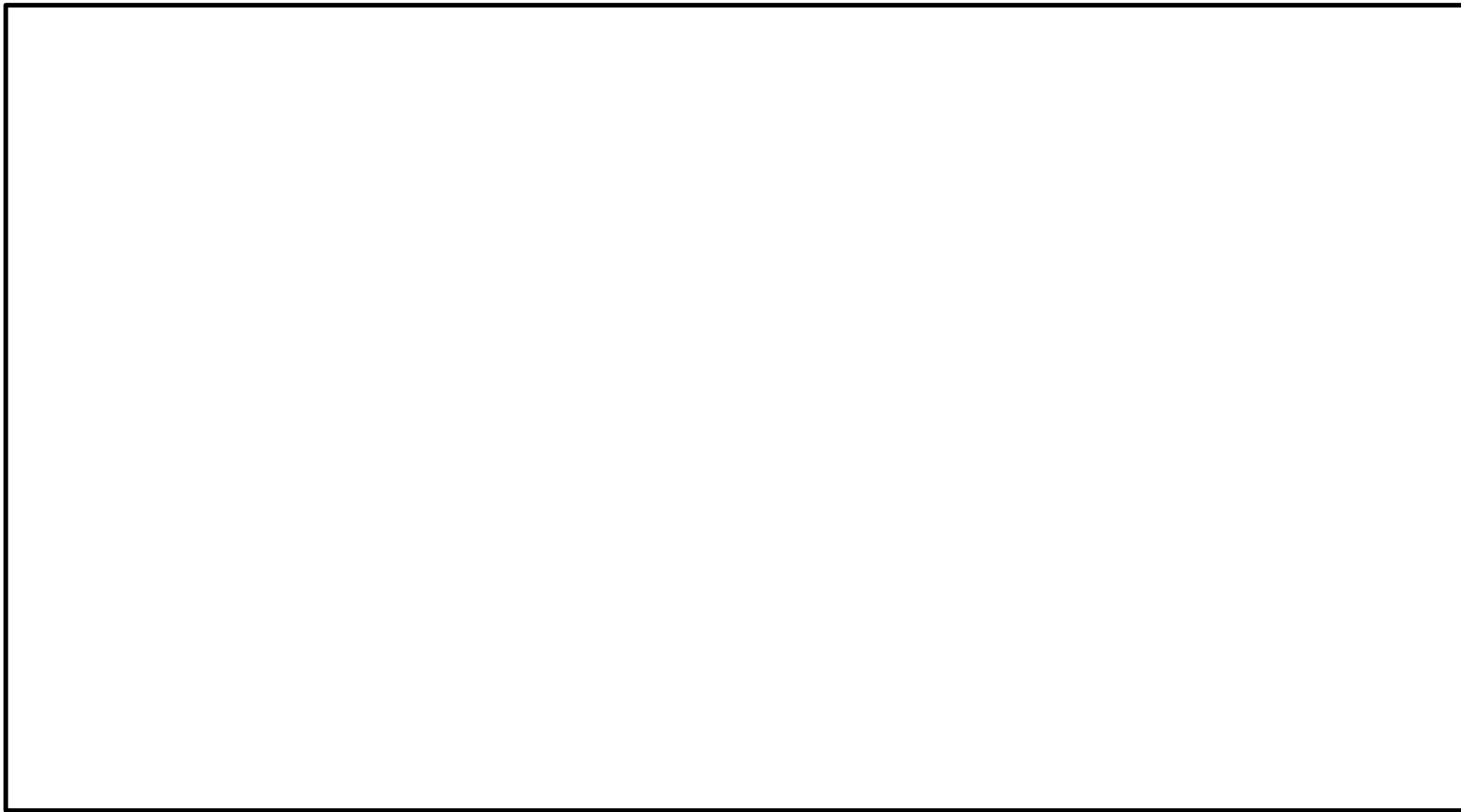


図 2-2 代表箇所の伸縮継手が設置される鳥瞰図 (FCVS-F-6) (1/4)

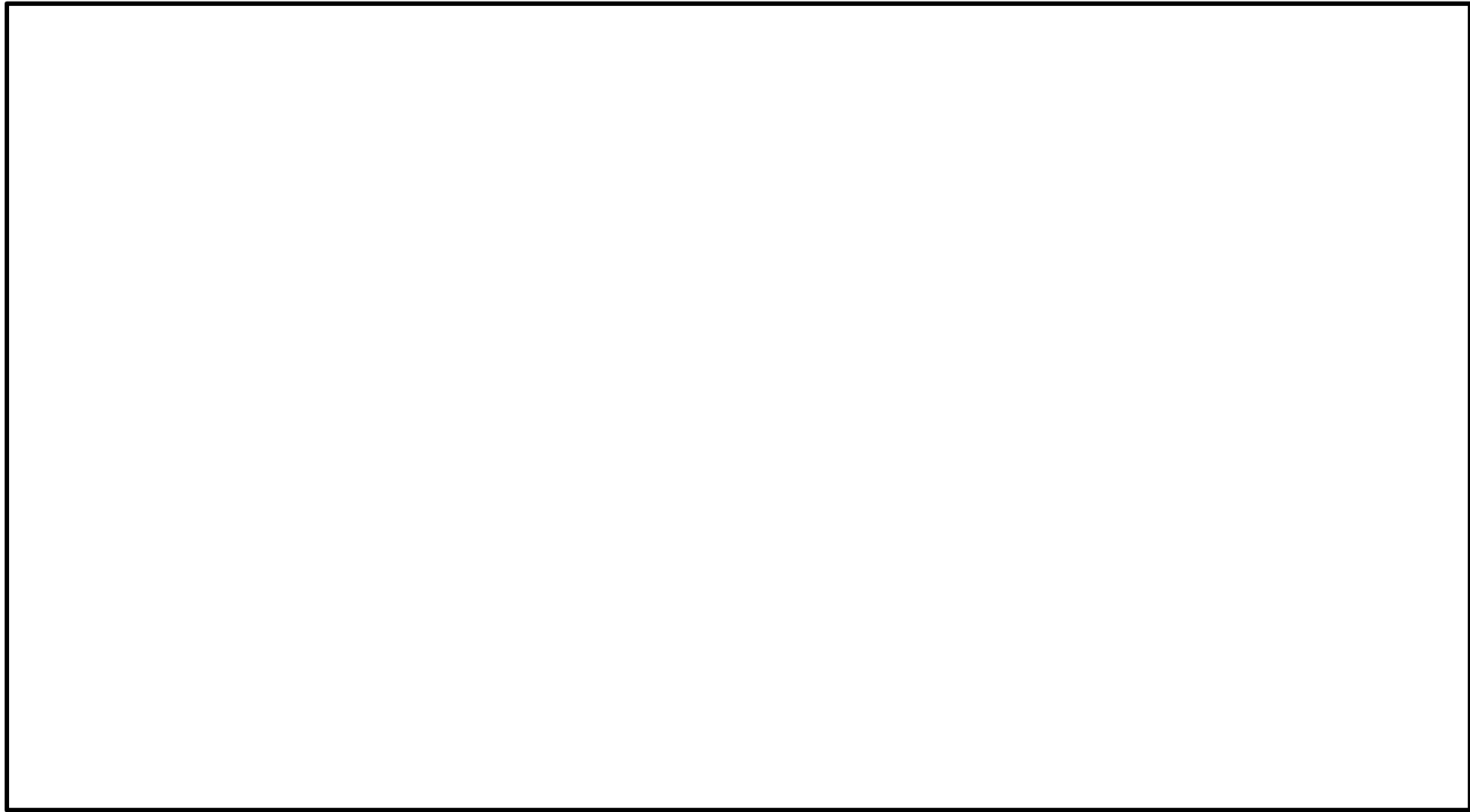


図 2-2 代表箇所伸縮継手が設置される鳥瞰図 (FCVS-F-6) (2/4)

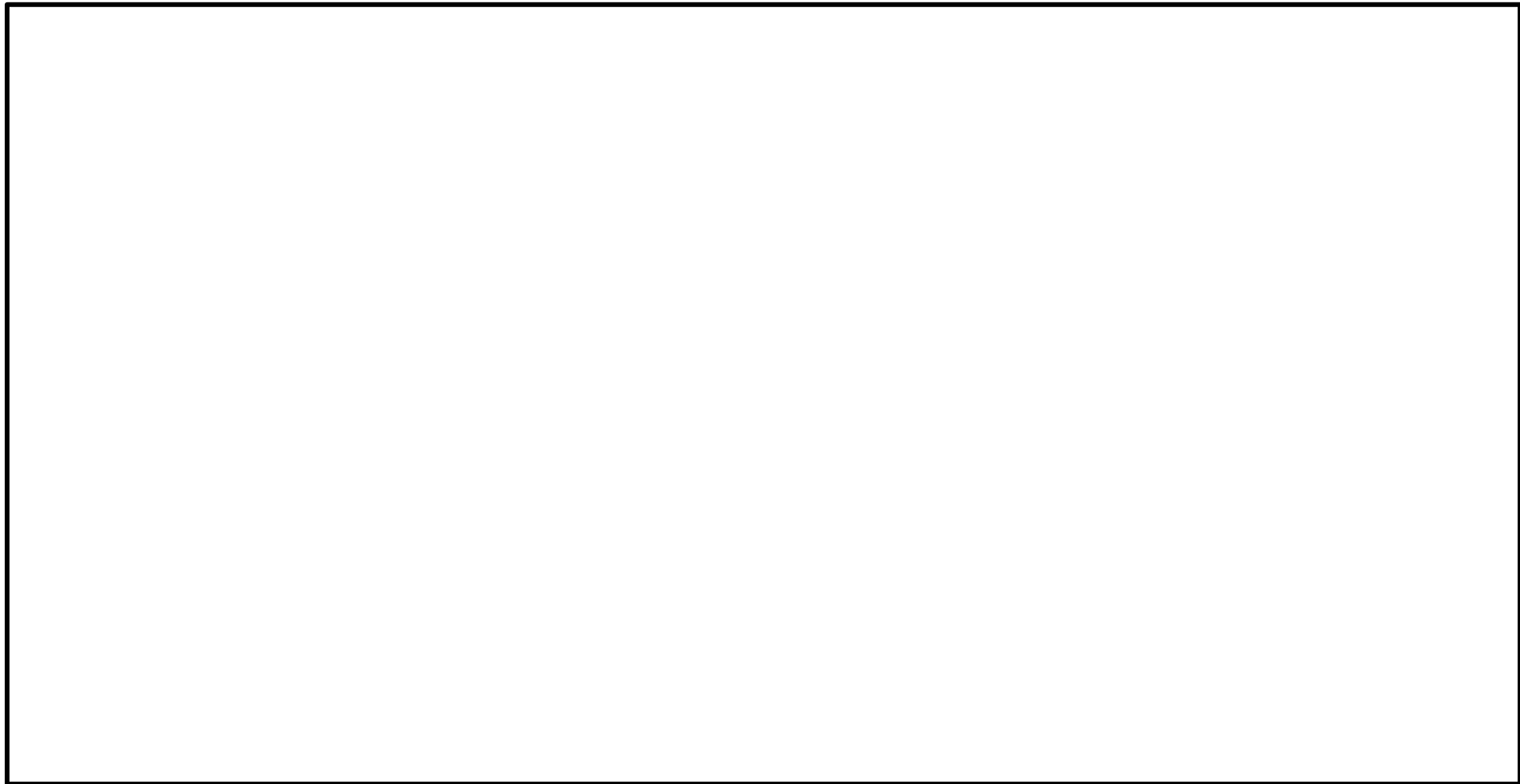


図 2-2 代表箇所伸縮継手が設置される鳥瞰図 (FCVS-F-6) (3/4)

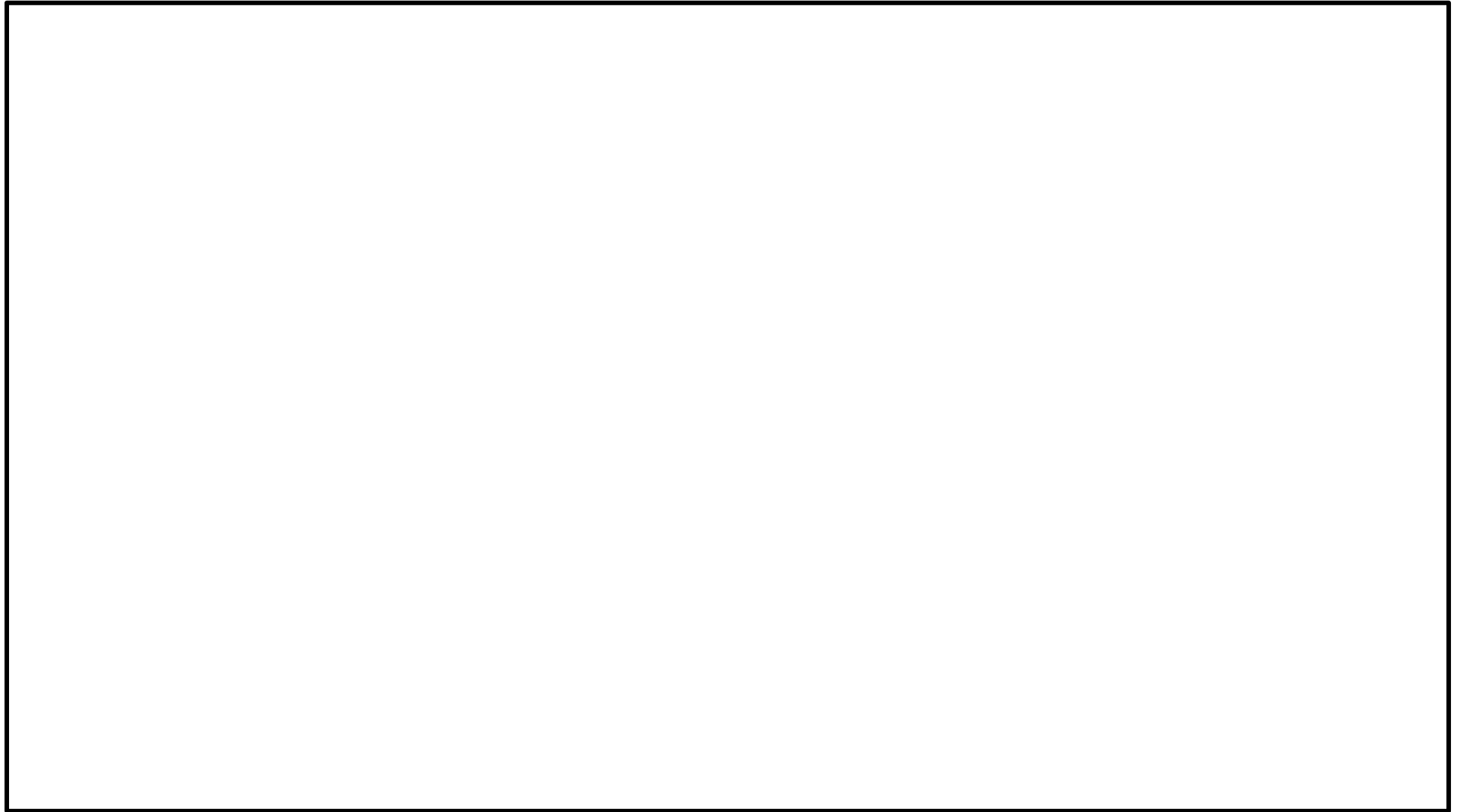


図 2-2 代表箇所伸縮継手が設置される鳥瞰図 (FCVS-F-6) (4/4)

3. 地震相対変位を吸収可能であることの確認

代表箇所の伸縮継手は、原子炉建物と第 1 ベントフィルタ格納槽との間に生じる地震相対変位を吸収するために設置しており、表 1-1 に示す変位が伸縮継手を含む配管系に入力される。このため、地震相対変位により、伸縮継手に生じる変位については、表 1-1 を入力値とした地震応答解析により算定する。

また、耐震評価においては、地震相対変位に加えて地震慣性力により伸縮継手に生じる変位を、設計用地震力（設計用床応答スペクトル及び設計用震度）を入力した地震応答解析により算定して加算している。このため、本評価においても、地震慣性力変位としてこの変位を加算して考慮する。

伸縮継手に生じる変位量及び変位可能量を表 3-1 に示す。表 3-1 に示すとおり、伸縮継手が地震相対変位を十分に吸収可能であることを確認した。なお、代表箇所の伸縮継手については、軸直角方向の変位可能量を踏まえ、軸直角方向変位の入力を緩和する目的から、図 2-2 に示すような、伸縮継手前後への軸直角方向拘束を設けている。

表 3-1 伸縮継手に生じる変位量（基準地震動 S_s）及び変位可能量

種類	計算変位(mm)		変位可能量(mm)	
	軸方向*	軸直角方向*	軸方向	軸直角方向
①地震相対変位	25.8	1.9	83.8	21.2
②地震慣性力変位	1.1	3.0		
③合計変位（①+②）	26.9	4.9		

注記*：伸縮継手を基準とした方向であり、図 2-2 に示すとおり、当該伸縮継手の軸方向は X 方向、軸直角方向は Y 及び Z 方向に対応している。軸直角方向変位については、Y 方向変位と Z 方向変位をベクトル和にて算出した値

4. 変位に対する疲労評価

代表箇所の伸縮継手は重大事故等クラス 2 管に区分されることから、疲労評価については、VI-3-2-9「重大事故等クラス 2 管の強度計算方法」に記載のとおり、設計・建設規格 PPC-3416 に基づき実施する。疲労評価に使用する記号の説明を表 4-1 に示し、評価結果を表 4-2 に示す。

評価の結果、実際の繰返し回数（N_r）と許容繰返し回数（N）の比（ $U = N_r / N$ ）は 1 以下であり、伸縮継手の強度は十分であることを確認した。

表 4-1 記号の説明

記号	内 容	単 位
b	継手部の波のピッチの 2 分の 1	mm
c	継手部の層数	—
E	材料の縦弾性係数 設計・建設規格 付録材料図表 Part6 表 1 による。	MPa
h	継手部の波の高さ	mm
N	許容繰返し回数	—
N_r	実際の繰返し回数	—
n	継手部の波数の 2 倍の値	—
t	継手部の板の厚さ	mm
U	実際の繰返し回数 (N_r) / 許容繰返し回数 (N) より 計算される値	—
δ	全伸縮量	mm
σ	継手部応力	MPa

表 4-2 伸縮継手の疲労評価結果

対象	最高 使用 圧力 (MPa)	最高 使用 温度 (°C)	材料	E (MPa)	t (mm)	δ^{*1} (mm)	b (mm)	h (mm)	n	c	σ^{*2} (MPa)	N $\times 10^{3*3}$	N r $\times 10^3$	U
格納容器フィ ルタベント系 伸縮継手	0.427	200	SUS316L	183000	1.20	38.00	25.00	53.00	20	2	334	207.0	0.15	0.0008

注記*1：伸縮継手の疲労評価に用いる全伸縮量 δ は表 3-1 に記載の軸方向及び軸直角方向変位を用い、補足-028-10「重大事故等クラス 2 管のうち、伸縮継手の全伸縮量算出について」に基づき算定した値である。

*2：継手部応力 σ は以下の計算式による。

$$\sigma = \frac{1.5 \cdot E \cdot t \cdot \delta}{n \cdot \sqrt{b \cdot h^3}} + \frac{P \cdot h}{t \cdot c}$$

*3：許容繰返し回数は以下の計算式による。

$$N = \left(\frac{11031}{\sigma} \right)^{3.5}$$

評価： $U \leq 1$ ，よって十分である。

補足-027-10-62 配管系に設置する三軸粘性ダンパの設計方針

目 次

1. 概要	1
2. 基本方針	1
2.1 採用目的及び選定理由	1
2.2 構造の概要	5
2.3 設計方針	10
2.4 適用規格・基準等	14
2.5 適用実績	16
3. 耐震評価方針	17
3.1 評価方針	17
3.2 三軸粘性ダンパの配置検討	17
3.3 性能試験及び解析モデル	17
3.4 地震応答解析手法	28
3.5 三軸粘性ダンパ評価	33
3.6 配管系評価	34
4. 実機配管系の耐震評価結果	35
5. 実機配管系への適用性	35
5.1 既工認において適用実績のある制震装置との比較結果	35
5.2 海外の原子力プラントにおいて実績のある耐震評価方法との比較結果	37
5.3 新規制基準への適合性を踏まえた検討	38
6. 三軸粘性ダンパの設置方法及び点検・保守	38
6.1 三軸粘性ダンパの配管系への設置方法	38
6.2 三軸粘性ダンパの点検・保守	42
7. まとめ	44
添付資料 2-1 三軸粘性ダンパに関する ASME Boiler and Pressure Vessel Code の記載	
添付資料 2-2 三軸粘性ダンパを設置した配管系の加振試験の概要	
添付資料 3-1 粘弾性を有する構造物の減衰性能の基本式及びモデル化	
添付資料 3-2 制震装置の減衰性能に影響する検討項目の抽出	
添付資料 3-3 三軸粘性ダンパの特性試験	
添付資料 3-4 三軸粘性ダンパの据付公差による減衰性能への影響	
添付資料 3-5 三軸粘性ダンパの性能試験方法	
添付資料 3-6 三軸粘性ダンパを設置した配管系の地震応答解析手法	
添付資料 3-7 多入力の時刻歴応答解析の適用について	
添付資料 3-8 三軸粘性ダンパの減衰性能と配管系の応答の関係	
添付資料 5-1 新規制基準適合性審査の実績等を踏まえた検討事項に対する考察	
添付資料 6-1 三軸粘性ダンパの配管への取付部の設計について	
添付資料 6-2 三軸粘性ダンパの高温環境下における使用について	
添付資料 6-3 三軸粘性ダンパの高温曝露試験結果について	

1. 概要

大きな地震力が作用する機器・配管系に対して、耐震構造による補強では設計及び施工が困難となる場合、制震装置の設置により地震応答を低減することは有効な耐震補強の手法のひとつである。島根2号機においては、Bクラスの配管系に耐震性向上を目的として制震装置を設置する。

本資料では、制震装置のうち、三軸粘性ダンパの構造、作動原理等を示した上で、三軸粘性ダンパの減衰性能を適切に考慮したモデル化、地震応答解析手法及び耐震評価方法を示し、実機配管系の耐震評価結果について説明する。加えて、制震装置の適用実績と新規規制基準への適合性の確認を踏まえ、実機配管系への適用性について示すとともに、三軸粘性ダンパの設置方法及び保守管理について示し、配管系に設置する三軸粘性ダンパの設計方針について説明する。

なお、本資料が関連する図書は以下のとおり。

- ・VI-2-1-11「機器・配管の耐震支持設計方針」
- ・VI-2-1-12「配管及び支持構造物の耐震計算について」

2. 基本方針

2.1 採用目的及び選定理由

三軸粘性ダンパは外側主蒸気隔離弁から低圧タービン、復水器までの主蒸気系配管及び蒸気タービン本体に属する配管（以下「主蒸気系配管等」という。）に設置する。三軸粘性ダンパの設置範囲を図2-1に示す。当該配管の耐震重要度分類はBクラスである。

また、外側主蒸気隔離弁から主蒸気止め弁までの範囲はSd機能維持設計とする。Sd機能維持設計の考え方は、補足-027-10-29「主蒸気管の弾性設計用地震動Sdでの耐震評価について」に示す。

なお、既工認では基準地震動S1の最大加速度の1/2の値を鉛直震度とし、鉛直方向地震力を考慮していたが、今回工認では鉛直方向の動的地震力を考慮する。表2-1に既工認と今回工認での変更点を示す。大口径の主蒸気系配管等に対しては、鉛直方向の動的地震力の影響は大きく、耐震構造による補強では支持構造物及び基礎部に非常に大きな荷重が作用することから、設計及び施工が困難である。そのため、地震応答を低減できる制震装置による耐震補強を行う。制震装置の選定にあたっては、主蒸気配管等は運転時に高温となるため、熱膨張による配管変位を考慮した設計が必要であることから、粘性型の制震装置を採用する。また、配管系はその構造の特徴上、3次元的な地震応答を示すことから、3方向に同時に減衰性能を発揮できる制震装置が効果的な対策となる。これらのことを踏まえ、主蒸気系配管等に対しては、三軸粘性ダンパを適用する。主蒸気配管等に設置する制震装置の選定についての詳細は表2-2に示す。

表 2-1 既工認と今回工認での変更点

範囲	項目			既工認	今回工認
主蒸気系配管のうち外側主蒸気隔離弁から主蒸気止め弁*	耐震重要度分類			Bクラス (S 1 機能維持設計)	Bクラス (S d 機能維持設計)
	適用する動的地震力*	B _A S	水平	弾性設計用地震動 S 1 による地震力の 1/2	弾性設計用地震動 S d による地震力の 1/2
			鉛直	基準地震動 S 1 の最大加速度の 1/4	弾性設計用地震動 S d による地震力の 1/2
		IV _A S	水平	弾性設計用地震動 S 1 による地震力	弾性設計用地震動 S d による地震力
			鉛直	基準地震動 S 1 の最大加速度の 1/2	弾性設計用地震動 S d による地震力
	主な耐震対策			耐震サポート設置	制震装置追設

注記*：本設備は共振のおそれのある耐震重要度分類Bクラスの設備であり、また弾性設計用地震動S dに対して破損しないことの検討を行うこととしている。

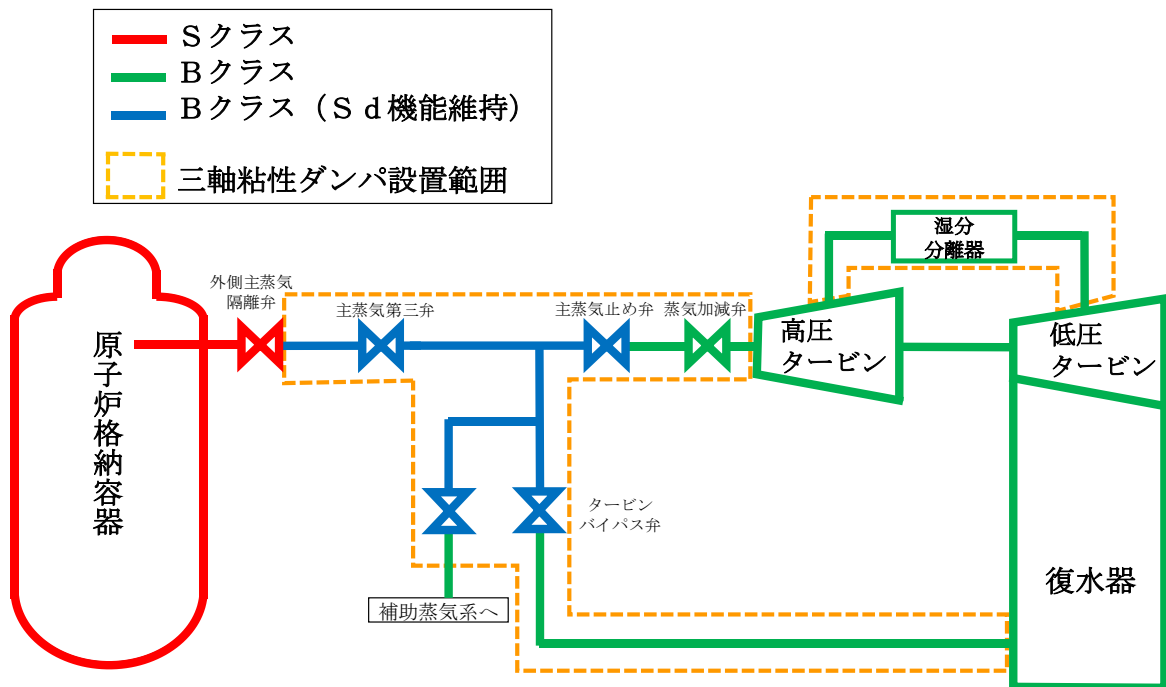


図 2-1 三軸粘性ダンパの設置範囲及び耐震クラス (1/2)

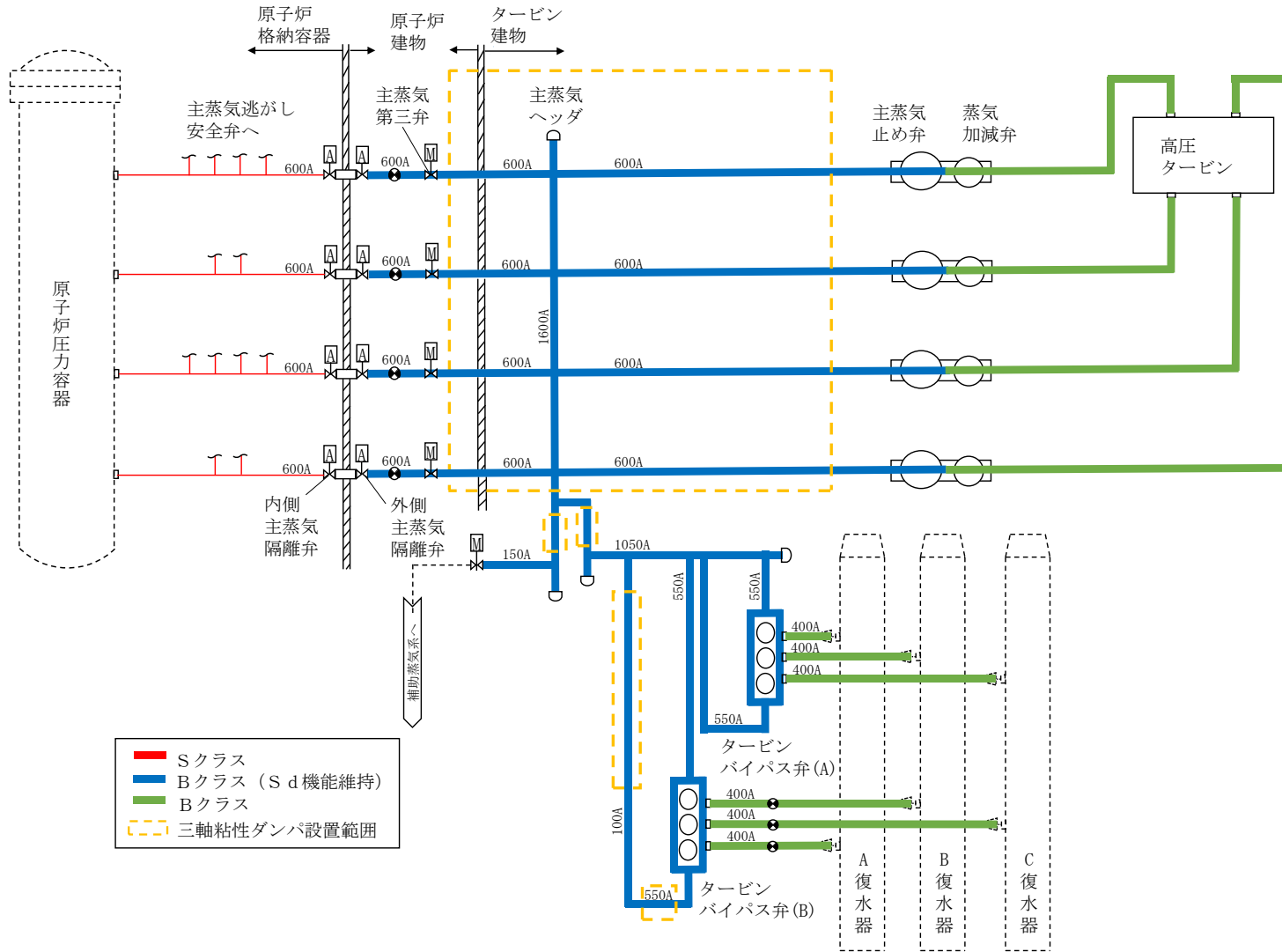


図 2-1 三軸粘性ダンパの設置範囲及び耐震クラス (2/2)

表 2-2 配管系に設置する制震装置の検討

凡例 ◎：適用可能（有効性が最も高い） ○：適用可能 △：適用するために課題がある ×：適用不可

分類	ダンパの種類	原理	作動方向	支持荷重	抵抗力の特性	原子力施設における適用実績	適用性	理由
履歴型	弾塑性 ⁽¹⁾ ダンパ	材料の弾塑性挙動を利用してエネルギーを吸収するダンパ	1方向 又は 2方向	熱膨張 地震荷重	抵抗力は、材料の初期剛性、二次剛性で決まる。	なし	△	装置単体では熱膨張を拘束するため、別途熱膨張を逃がす据付方法を検討する必要がある。
	摩擦 ⁽¹⁾ ダンパ	摩擦抵抗力を利用してエネルギーを吸収するダンパ			抵抗力は、摩擦材の締め付け力等で決定し、履歴曲線は矩形に近い。		△	
	鉛ダンパ ⁽¹⁾	鉛の塑性流動抵抗力を利用してエネルギーを吸収するダンパ			抵抗力は鉛の初期剛性、二次剛性で決まる。		△	
粘性型	単軸	粘性 ⁽²⁾ ダンパ（非線形）	1方向	地震荷重	抵抗力は速度のべき乗(0.1~1)に比例し、0.1乗の場合、履歴曲線は矩形に近い。	なし	○	三方向に応答する配管系に対して、一方方向のみに減衰性能を発揮する。
		粘性 ⁽²⁾ ダンパ（線形）			抵抗力は速度に比例し、履歴曲線は楕円に近い。		○	
		オイル ⁽²⁾ ダンパ			オイルの流動抵抗を利用してエネルギーを吸収するダンパ		抵抗力は速度のべき乗(0.4~1)に比例し、履歴曲線は楕円に近い。	
	三軸	粘性 ⁽³⁾ ダンパ	3方向	抵抗力は速度に比例し、履歴曲線は楕円に近い。	海外での適用例あり	◎	三方向に減衰性能を発揮するため、三方向に응答する配管系に適している。	

【参考文献（各種ダンパが記載されている代表的な文献について示す）】

- (1) 免震構造設計指針 日本建築学会
- (2) 原子力発電所耐震設計技術規程 J E A C 4 6 0 1-2008 ((社) 日本電気協会)
- (3) ASME Boiler and Pressure Vessel Code SECTIONIII, DIVISION1-Subsection NF-Supports 2013

2.2 構造の概要

(1) 主蒸気系配管等の構成概要

外側主蒸気隔離弁から低圧タービン、復水器までの主蒸気系配管等は、大口径配管（主流路は600A～1600A程度）であり、地震により大きな慣性力が生じる特徴を有している。また、運転時には高温となるため、熱膨張の過度な拘束を回避しつつ、耐震性を確保する必要がある。主蒸気系配管等のうち、S d機能維持範囲となる原子炉格納容器外側隔離弁から主蒸気止め弁を含む配管系の構成概要を図2-2に示す。

なお、三軸粘性ダンパの合計質量（約50台想定）は、建物の配管系設置床の質点質量に対して0.1%以下であり、建物の地震応答解析結果への影響は軽微である。また、三軸粘性ダンパを設置する配管系については三軸粘性ダンパ設置に伴う質量増加を踏まえてモデル化を行う。

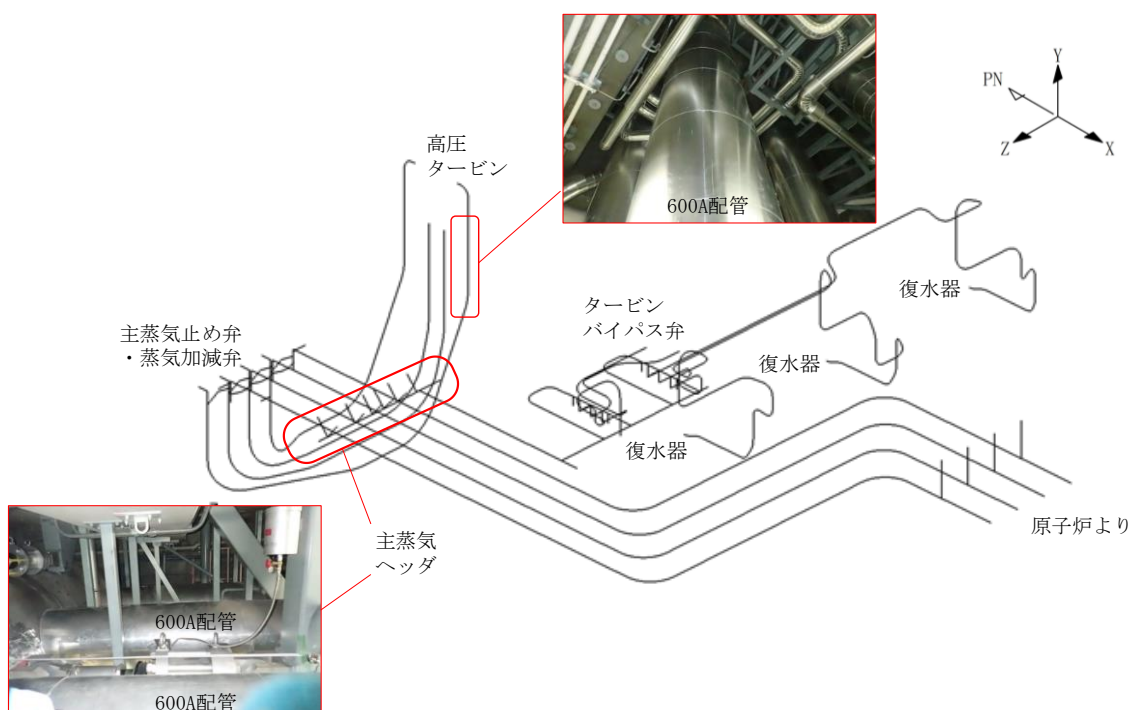


図2-2 主蒸気系配管等の構成概要

(2) 三軸粘性ダンパの構造及び動作原理

a. 構造概要

三軸粘性ダンパの外観及び構造を図 2-3 に、仕様を表 2-3 に示す。三軸粘性ダンパは、主にピストン、ハウジング及び粘性体から構成されており、粘性体への異物等の混入防止のために保護スリーブが取り付けられている。三軸粘性ダンパの粘性体は化学的に安定であり、消防法で定められている危険物に該当しない。粘性体には、シリコーン系のポリマーを使用する。粘性体の主要な特徴を以下に示す。

- ・無色透明である。
- ・温度による粘度変化が比較的小さい。
- ・引火点が 300℃以上、発火点が 400℃以上と高い。また、外部からの熱の供給がない限り燃焼は継続しない。
- ・150℃以下の温度では熱酸化安定性に優れている。
- ・凝固点が約-30℃と低い。
- ・比熱は約 1.55J/g・K、熱伝導率は約 0.15W/m・K である。
- ・せん断に対する抵抗が大きい。
- ・化学的安定性に優れている。
- ・腐食性がない。
- ・生理的に不活性である。

三軸粘性ダンパは、粘性体が入ったハウジングにピストンが挿入された構造であり、粘性体とピストンの間に相対運動が生じることで、相対運動の方向と逆向きに流動抵抗による減衰性能を発揮する。水平方向については回転対称な構造であるため、方向による減衰性能の違いはないが、鉛直方向については動作機構が異なるため、水平方向とは減衰性能が異なる。三軸粘性ダンパは自重等の静的荷重は支持せず、熱膨張のような低速度の運動を拘束しない。

また、三軸粘性ダンパを配管系に設置した場合の有効性を確認するため、配管系を対象とした加振試験を実施し、地震応答の低減に有効であることを確認した。加振試験の詳細は添付資料 2-2 に示す。

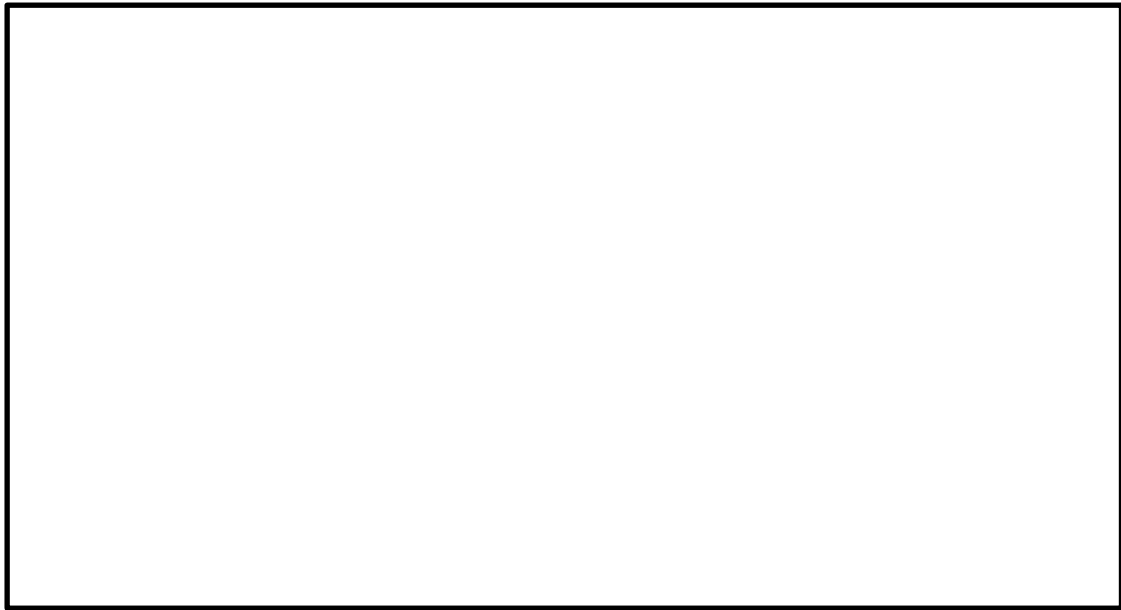
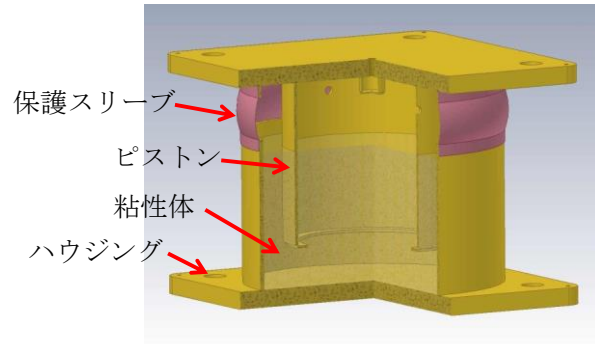


図 2-3 三軸粘性ダンパの外観及び構造

表 2-3 三軸粘性ダンパの仕様

型式*	外径 (mm)	高さ (mm)	質量 (kg)	許容荷重 (kN)		許容変位 (mm)	
				水平	鉛直	水平	鉛直
325/159	325	343	111	68	27		
630/426	630	586	691	350	140		

注記* : 型式に使用される数値は主要寸法である「ハウジング径/ピストン径」を呼称した値である。

b. 動作原理の詳細

三軸粘性ダンパの動作原理について図 2-4 に示す。

流体中を物体が運動するとき、物体の運動と逆向きに抗力が作用する。抗力は物体の表面に垂直に働く圧力抵抗と物体の表面に平行に働く粘性抵抗（又は摩擦抵抗という）に大別され、これらを合わせたものが三軸粘性ダンパの抵抗力となる。三軸粘性ダンパの設計では、内部のピストン等の形状の工夫や高粘度の粘性流体を使用することにより、大きな抵抗力を得られる設計としている。

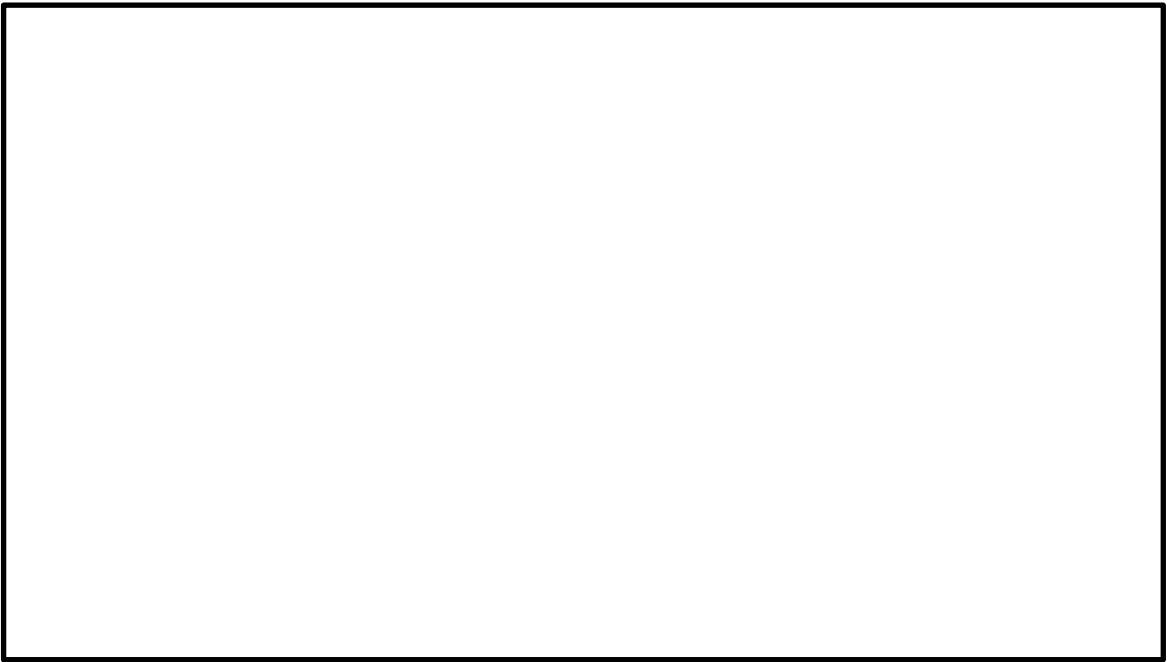
[水平方向の動作（図 2-4(a)）]

ピストンが左方向に移動する際、ピストンの左側には粘性体を押しよけることで圧力抵抗（正圧）が作用し、ピストンの右側はピストンが移動したことにより圧力抵抗（負圧）が作用し、速度に応じた抵抗力が生じる。また、ピストンには、ピストン表面と平行に粘性体の速度勾配に応じた粘性抵抗（ピストン上下の矢印参照）の合力が生じる。

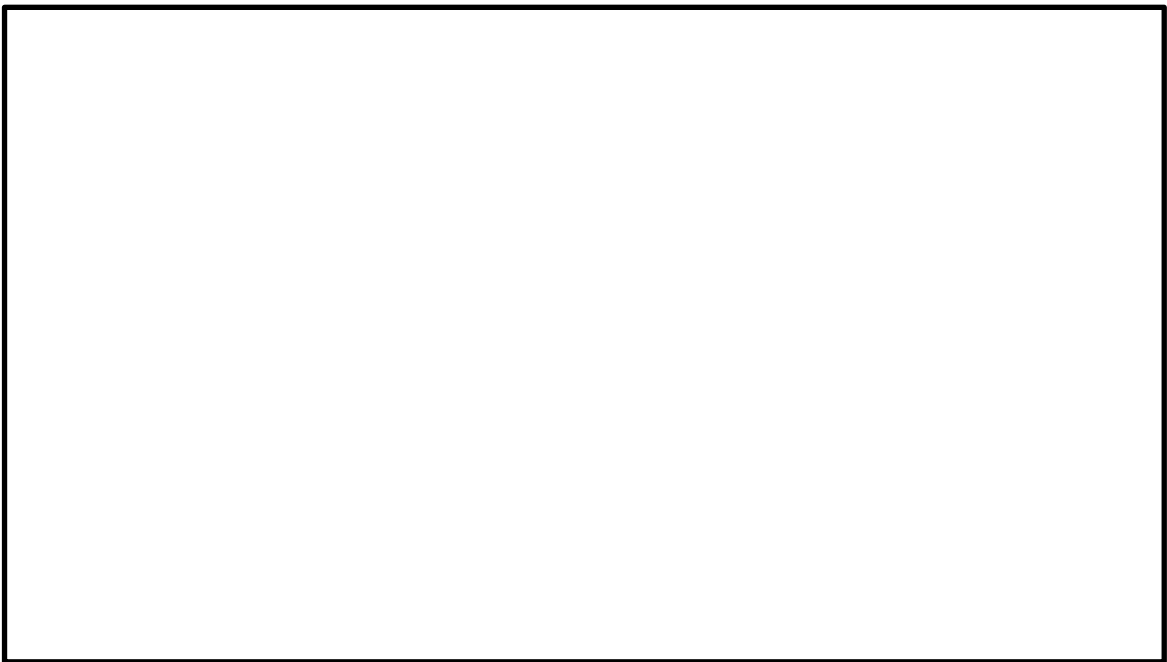
[鉛直方向の動作（図 2-4(b)）]

ピストンが下方方向に移動する際、水平方向の動作原理と同様にピストン下部のプレートの上に圧力抵抗（上面が負圧、下面が正圧）が生じ、ピストンの表面には粘性抵抗が生じる。

実際の三軸粘性ダンパの減衰性能は、内部流体が理想的な粘性体ではなく粘弾性の特性を有していることから、粘性的特性（速度成分に応じた抵抗力）及び弾性的特性（変位成分に応じた抵抗力）の両者を有している。粘弾性体としての三軸粘性ダンパの具体的な減衰性能は、当該粘性ダンパを用いた性能試験により確認している（添付資料 3-5 参照）。また、粘弾性体としての減衰性能は、Maxwell モデルにより表現することができる（添付資料 3-1 参照）。



(a) 水平方向における動作原理



(b) 鉛直方向における動作原理

図 2-4 三軸粘性ダンパの動作原理

2.3 設計方針

三軸粘性ダンパを設置した配管系の耐震設計フローを図 2-5 に、設計プロセスを表 2-4 に示す。また、三軸粘性ダンパ設置前の配管系と三軸粘性ダンパを設置した配管系の地震応答解析モデルの一例を図 2-6 に示す。三軸粘性ダンパ設置前の地震応答解析モデルに制震装置を適切にモデル化して追加するという考え方は、既工認実績のある排気筒のモデル化の考え方と同様である。また、4パラメータ Maxwell モデルによる三軸粘性ダンパのモデル化は、海外の原子力発電所において実績のあるモデル化手法である。

図 2-5 の耐震設計フローは、基本的に一般的な配管系の設計フローと同じであるが、図 2-5 における三軸粘性ダンパを設置することに伴う追加の設計プロセスについて、3.2, 3.3, 3.5 項にて詳細に説明する。

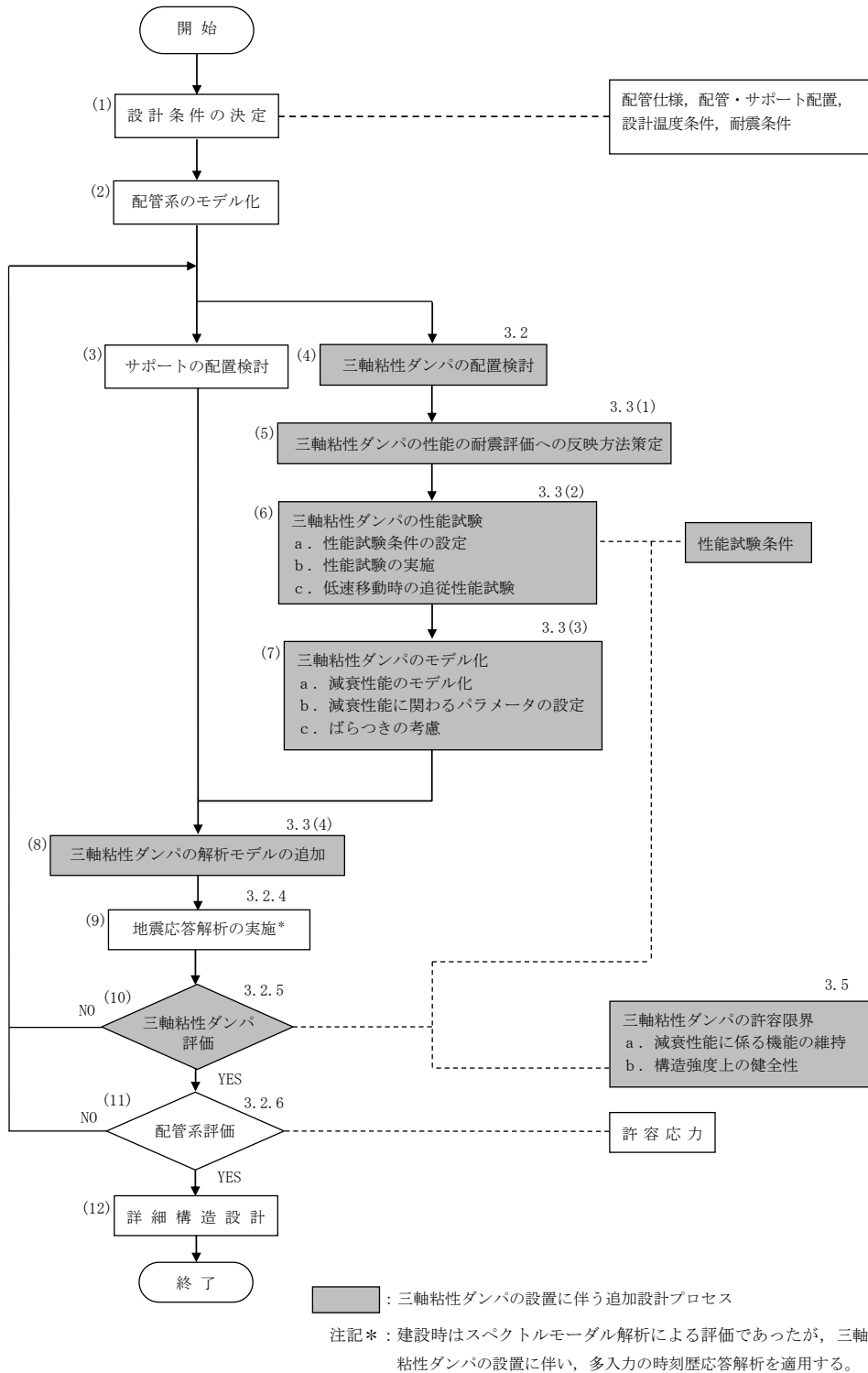


図 2-5 三軸粘性ダンパを設置した配管系の耐震設計フロー

表 2-4 三軸粘性ダンパを設置した配管系の設計プロセス

番号*1	実施事項	内容	追加設計プロセス*2
(1)	設計条件の決定	配管系の仕様, 配置他設計条件を決定する。	—
(2)	配管系のモデル化	配管系を3次元はりモデルによりモデル化する。	—
(3)	サポートの配置検討	サポートの配置を検討する。	—
(4)	三軸粘性ダンパの配置検討	三軸粘性ダンパの配置を検討する。	○
(5)	三軸粘性ダンパの性能の耐震評価への反映方法策定	三軸粘性ダンパの減衰性能への影響の検討を要する項目を抽出し, 性能試験及びモデル化の方法を策定する。	○
(6)	三軸粘性ダンパの性能試験	三軸粘性ダンパの実機使用条件を踏まえた性能試験条件により, 性能試験を実施する。	○
(7)	三軸粘性ダンパのモデル化	性能試験結果から三軸粘性ダンパの減衰性能を4パラメータ Maxwell モデルによりモデル化する。また, 減衰性能のばらつきを考慮して, 地震応答解析モデルにおける減衰性能を設定する。	○
(8)	三軸粘性ダンパの解析モデルの追加	配管系の地震応答解析モデルに三軸粘性ダンパをモデル化した4パラメータ Maxwell モデルを追加する。	○
(9)	地震応答解析の実施	地震応答解析を実施し, 応力, 変位等を求める*3。	—
(10)	三軸粘性ダンパ評価	地震応答解析により得られた応答値が性能試験条件の範囲内であること及び三軸粘性ダンパの許容限界が満たされていることを確認する。	○
(11)	配管系評価	地震応答解析結果を基に, 配管系の発生応力が許容応力を満たしていることを確認する。	—
(12)	詳細構造設計	地震応答解析結果を基に, 各部の詳細構造設計を行う。	—

注記*1: 番号は図 2-5 の耐震設計フローの番号に対応している。

*2: 「—」は一般的な設計プロセスと同じであり, 三軸粘性ダンパの設置にあたっては同様に実施する設計プロセスであることを示し, 「○」は三軸粘性ダンパを設置することに伴う追加の設計プロセスであることを示す。

*3: 建設時はスペクトルモーダル解析による評価であったが, 三軸粘性ダンパの設置に伴い, 多入力の時刻歴応答解析を適用する。

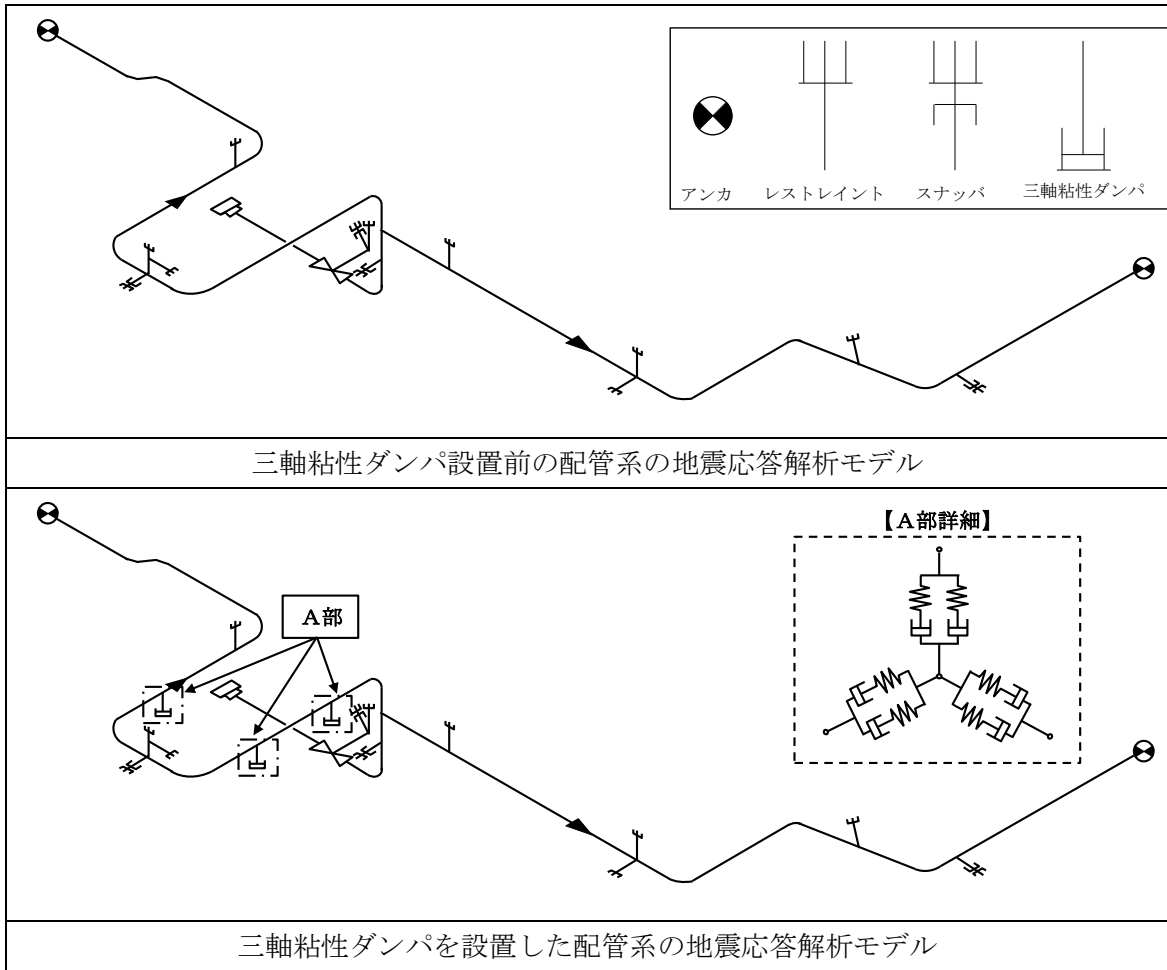


図 2-6 配管系の地震応答解析モデル

2.4 適用規格・基準等

配管系の設計に用いる規格としては、原子力発電所の施設設計に用いる J E A G 4 6 0 1 等を基本とする。

各機器の設計における適用規格及び適用範囲について表 2-5 に示す。表 2-5 に示すとおり、三軸粘性ダンパに係る適用規格・基準等については、以下を基本とする。

- ・構造強度評価：J E A G 4 6 0 1 等の許容限界に基づく確認
- ・減衰性能の設定：性能試験による確認

表 2-5 三軸粘性ダンパを設置した配管系の適用規格及び適用範囲

No.	項目	規格・基準 (□囲い：適用する設計手法)		島根 2 号機 三軸粘性ダンパを設置した配管系の設計		
		① 原子力発電所耐震設計技術指針 (J E A G 4 6 0 1 *1)	② 原子力発電所免震構造設計技術指針 (J E A G 4 6 1 4-2019)	島根 2 号機における設計手法	設計の考え方	
1	適用範囲	原子力施設における機器・配管系等	免震型原子力施設における建屋(免震層含む)・機器	①を適用	一般的な配管系と同様。	
2	設計用地震動	耐震重要度分類に応じた地震力	長周期帯域を考慮した、耐震重要度分類に応じた地震力	①を適用	一般的な配管系と同様。	
3	荷重の組合せ	死荷重+圧力荷重+機械荷重+地震荷重	死荷重+圧力荷重+機械荷重+地震荷重	①を適用	一般的な配管系と同様。	
4	地震荷重(水平/鉛直)の組合せ	絶対値和	絶対値和, 代数和法のいずれか	S R S S 法	時間的な概念を取り入れた荷重の組合せ方法として, S R S S 法を適用する。(VI-2-1-9「機能維持の基本方針」の設計方針に従う)	
5	地震力の種類	動的地震力と静的地震力	動的地震力と静的地震力	①を適用	一般的な配管系と同様。	
6	地震応答解析法	時刻歴応答解析又はスペクトルモーダル解析	時刻歴応答解析又はスペクトルモーダル解析	①を適用	三軸粘性ダンパを設置した配管系は減衰が大きくなるため, 地震応答解析手法としてスペクトルモーダル解析は適用できず, 時刻歴応答解析を適用する。また, 複数の建物を跨ぐ配管系の解析においては多入力時刻歴応答解析を適用する。(詳細は, 3.4 項を参照)	
7	減衰	配管	設計用減衰定数 (2.5%)	設計用減衰定数 (3.0%)	設計用減衰定数 (3.0%)	振動試験結果を踏まえ設計評価用として安全側に設定した減衰定数を適用する。(VI-2-1-6「地震応答解析の基本方針」の設計方針に従う)
		三軸粘性ダンパ	— (記載無し)	— (記載無し)	性能試験により設定	「免震構造の審査手引きの提案(平成 26 年 1 月) 独立行政法人原子力安全基盤機構」を参照して検討項目を抽出し, 必要な試験及び検討を行い設定する。(詳細は, 3.3 項を参照)
8	評価手法	配管	「4 種管」に該当	「クラス 3 管」に該当	①を適用*2	一般的な配管と同様。
		支持構造物 (三軸粘性ダンパ除く)	「その他の支持構造物」に該当	「クラス 3 支持構造物」及び「その他の支持構造物」に該当	①を適用	一般的な配管に取付く支持構造物と同様。
		三軸粘性ダンパ 構造強度上の健全性	「その他の支持構造物」に該当	「その他の支持構造物」に該当	①を適用	一般的な配管に取付く支持構造物と同様。
		機能維持評価	— (記載無し)	— (記載無し)	性能試験の試験条件の範囲内であることを確認	三軸粘性ダンパの減衰性能を取得した性能試験の試験条件の範囲内であることを確認する。(詳細は, 3.5 項を参照)
9	三軸粘性ダンパの不確かさの考慮	— (記載無し)	— (記載無し)	性能試験により確認	「免震構造の審査手引きの提案(平成 26 年 1 月) 独立行政法人原子力安全基盤機構」を参照して検討項目を抽出し, 必要な試験及び検討を行い確認する。(詳細は, 添付資料 3-2 を参照)	

注記*1: 以下の 3 指針を指す。

- ・原子力発電所耐震設計技術指針 重要度分類・許容応力編 J E A G 4 6 0 1 ・補-1984 ((社) 日本電気協会)
- ・原子力発電所耐震設計技術指針 J E A G 4 6 0 1 -1987 ((社) 日本電気協会)
- ・原子力発電所耐震設計技術指針 J E A G 4 6 0 1 -1991 追補版 ((社) 日本電気協会)

*2: 4 種管を発電用原子力設備規格 設計・建設規格 ((社) 日本機械学会, 2005/2007) におけるクラス 3 に読み替えて設計する。

2.5 適用実績

三軸粘性ダンパは、原子力発電所に用いることができる制震装置として ASME Boiler and Pressure Vessel Code SECTION III, DIVISION1-Subsection NF- Supports に記載されており（添付資料 2-1 参照）、海外の原子力発電所において振動対策及び地震対策として設置実績がある。海外の原子力発電所における三軸粘性ダンパの設置の例を図 2-7 に示す。なお、国内においては原子力分野以外で、石油プラントの配管系（口径 300A）、コンサートホール等の大規模建物の制振システム及び振動台等の機械装置の防振対策等への設置実績があり、設置の例を図 2-8 に示す。

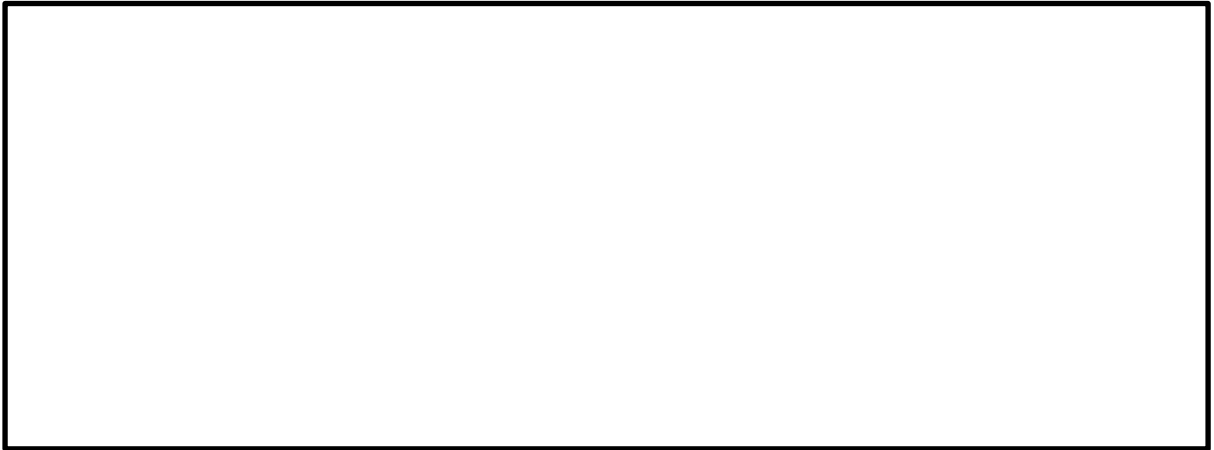


図 2-7 海外の原子力発電所における三軸粘性ダンパの設置の例

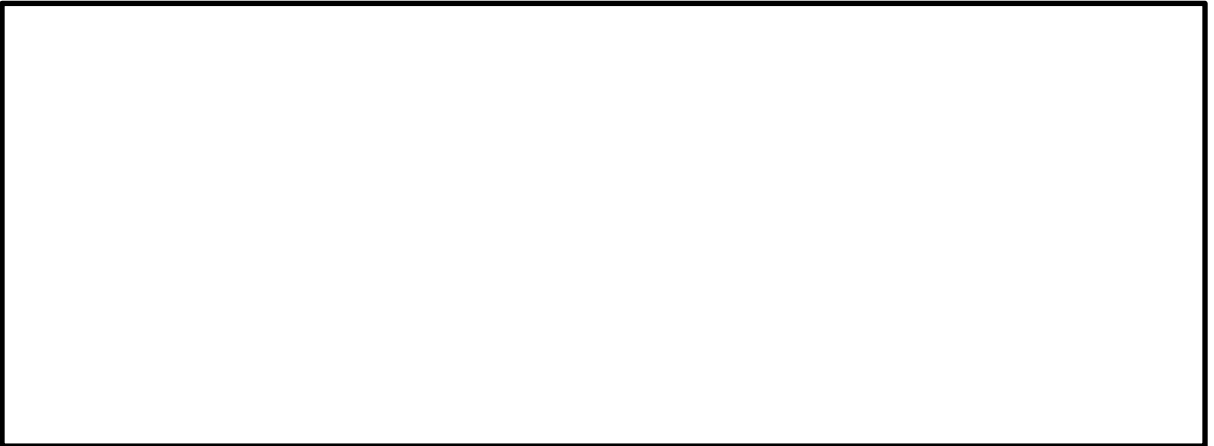


図 2-8 国内における三軸粘性ダンパの設置の例

3. 耐震評価方針

3.1 評価方針

2.3 項で示した三軸粘性ダンパの設置に伴う追加の設計プロセスについて、三軸粘性ダンパを設置した配管系の評価方針を以下に示す。

まず、配管系の地震荷重の低減に効果的な三軸粘性ダンパの配置を検討する。次に、三軸粘性ダンパの減衰性能への影響の検討を要する項目を抽出し、性能試験及びモデル化の方法を策定する。三軸粘性ダンパのモデル化を行うために、実機使用条件を踏まえた性能試験条件により、三軸粘性ダンパを用いた性能試験を実施する。性能試験の結果に基づき減衰性能を設定し、三軸粘性ダンパを4パラメータ Maxwell モデルによりモデル化する。この4パラメータ Maxwell モデルを配管系の地震応答解析モデルに追加し、地震応答解析を行う。三軸粘性ダンパの評価として、地震応答解析により得られた応答値が性能試験条件の範囲内であること及び三軸粘性ダンパの許容限界以下であることを確認する。

3.2 三軸粘性ダンパの配置検討

配管系の地震荷重の低減に効果的な三軸粘性ダンパの配置を検討する。三軸粘性ダンパは粘性体とピストンの間に相対運動が生じることで減衰性能を発揮するため、配管系の変位が大きく、かつ設置が可能な箇所に設置する。

3.3 性能試験及び解析モデル

(1) 三軸粘性ダンパの性能の耐震評価への反映方法策定

三軸粘性ダンパの粘性体のように粘弾性を有する構造物の減衰性能は等価剛性 K 及び等価減衰係数 C によって表される（添付資料 3-1 参照）。また、三軸粘性ダンパはその構造から水平方向加振に対する減衰性能は各方向で等しいが、水平方向加振と鉛直方向加振では減衰性能が異なるため、各方向で減衰性能を考慮する。

三軸粘性ダンパを設置した配管系の評価においては三軸粘性ダンパの減衰性能を適切に取得して設定することが重要であるため、三軸粘性ダンパの性能試験及びモデル化にあたって、減衰性能への影響の検討を要する項目を「免震構造の審査手引きの提案（平成 26 年 1 月） 独立行政法人原子力安全基盤機構」を参照して抽出した（添付資料 3-2 参照）。抽出した減衰性能に影響する項目の耐震評価への反映方法を表 3-1 に示す。減衰性能に影響する項目については、減衰性能を取得するための性能試験条件の設定において適切に考慮する、若しくは地震応答解析においてばらつきとして考慮する方針とする。

表 3-1 減衰性能に影響する項目の耐震評価への反映方法

No.	影響確認項目	影響確認結果	反映方法
1	水平・鉛直同時加振	水平方向及び鉛直方向の同時加振と 1 方向加振との減衰性能に差異がないことを試験により確認している（添付資料 3-3 参照）。	—
2	放射線	放射線による減衰性能への影響が十分小さいことを試験により確認している（添付資料 3-3 参照）。	—
3	温度	粘性体は高温になるほど粘度が低下する性質があることから、粘性体の温度によって三軸粘性ダンパの減衰性能が変動することを試験により確認している（添付資料 3-3 参照）。	減衰性能を取得する性能試験条件の設定において考慮する。
4	振幅	減衰性能は加振振幅が大きいほど低下することを試験により確認している（添付資料 3-3 参照）。	
5	連続加振	減衰性能は連続加振により累積消費エネルギーが増大すると低下することを試験により確認している（添付資料 3-3 参照）。	
6	製造公差*1	製造公差による減衰性能のばらつきは±10%以内で管理している。	左記のばらつき要因を合わせて±30%の減衰性能のばらつきを地震応答解析条件に適用することで考慮する。
7	据付公差*2	減衰性能のばらつきが±20%以内となる範囲をあらかじめ規定し、その値内で管理する。	

注記*1：製造公差の管理は、構成部材ごとの寸法管理等を行うとともに、製品出荷時において性能試験を実施し、製品ごとに減衰性能のばらつきが標準値の±10%以内となることを出荷可否の判定基準とした管理を実施している。

*2：添付資料 3-4 に示すように、減衰性能が±20%となる範囲（標準位置からの初期設置位置及び取付角度のずれ）を確認し、この値以下となるよう実際の装置据付位置及び取付角度を管理する。

(2) 三軸粘性ダンパの性能試験

a. 性能試験条件の設定

三軸粘性ダンパの実機使用条件を踏まえ、性能試験条件を設定する。三軸粘性ダンパはその構造から水平方向加振に対する減衰性能は各方向で等しいが、水平方向加振と鉛直方向加振では減衰性能が異なるため、水平方向及び鉛直方向でそれぞれ性能試験を実施する。

減衰性能への影響確認結果（表 3-1 参照）に基づき、三軸粘性ダンパの減衰性能については、変動及びばらつきを包絡するように減衰性能の上限と下限を設定する。表 3-1 のうち温度、振幅及び連続加振による変動を踏まえた表 3-2 に示す性能試験条件により、高側ダンパ試験性能 (K_{High} , C_{High}) と、低側ダンパ試験性能 (K_{Low} , C_{Low}) を性能試験で取得する。具体的な性能試験条件の設定例について添付資料 3-5 に示す。なお、減衰性能の設定において上限及び下限を設定する理由は、減衰性能が低いほど配管系の応答は大きくなる傾向であるが、三軸粘性ダンパを支持する構造物への荷重は、減衰性能が高いほど大きくなる傾向であるためである。

b. 性能試験の実施

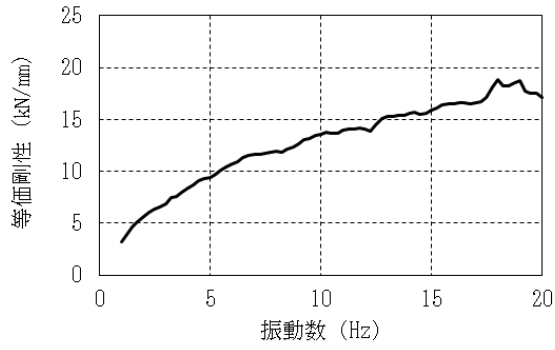
設定した性能試験条件により、三軸粘性ダンパの性能試験を実施する。性能試験の詳細について添付資料 3-5 に示す。地震応答解析に適用する三軸粘性ダンパの減衰性能は、実機に設置する各型式の三軸粘性ダンパについて性能試験を実施の上、設定する。

表 3-2 に示す性能試験条件に基づいて取得した三軸粘性ダンパの高側ダンパ試験性能 (K_{High} , C_{High}) と、低側ダンパ試験性能 (K_{Low} , C_{Low}) を図 3-1 及び図 3-2 に示す。

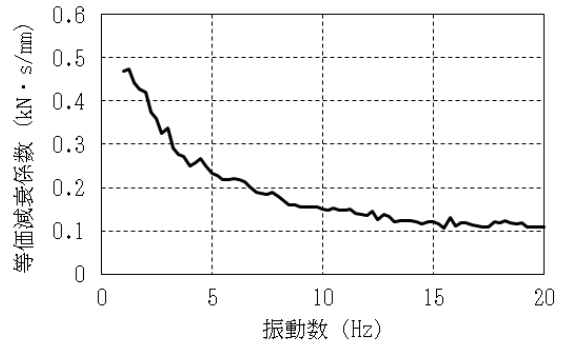
表 3-2 三軸粘性ダンパの性能試験条件の設定

取得性能	試験条件設定の考え方	性能試験条件		
		温度	加振振幅	累積消費エネルギー
高側ダンパ試験性能 (K_{High} , C_{High})	実機使用条件より減衰性能を高く取得するため、室温、微小加振振幅、微小累積消費エネルギーとする。	常温	小	小
低側ダンパ試験性能 (K_{Low} , C_{Low})	実機使用条件より減衰性能を低く取得するため、実機使用で想定される最高温度、最大加振振幅、最大累積消費エネルギーとする。	高温*	大*	大*

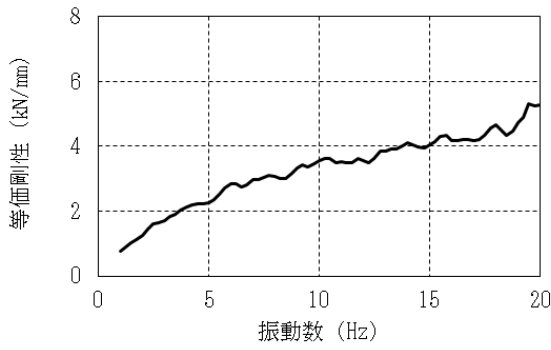
注記*：実機使用条件を想定して設定する。



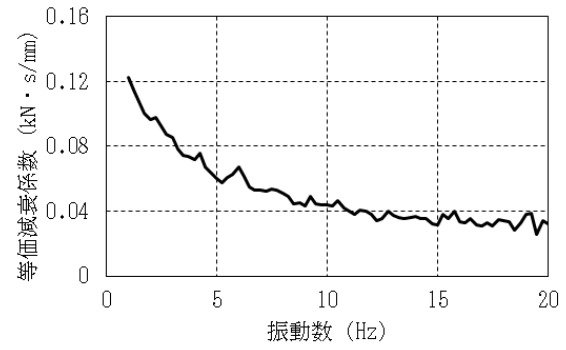
(H-1) 等価剛性 K_{High} (水平方向)



(H-2) 等価減衰係数 C_{High} (水平方向)

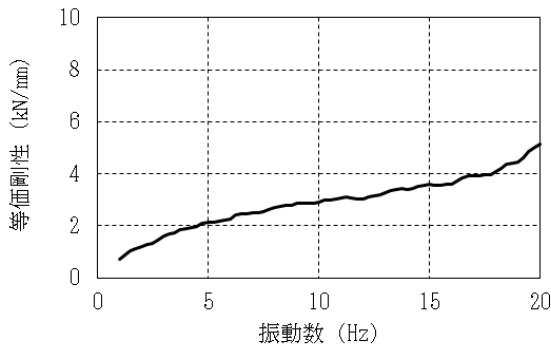


(V-1) 等価剛性 K_{High} (鉛直方向)

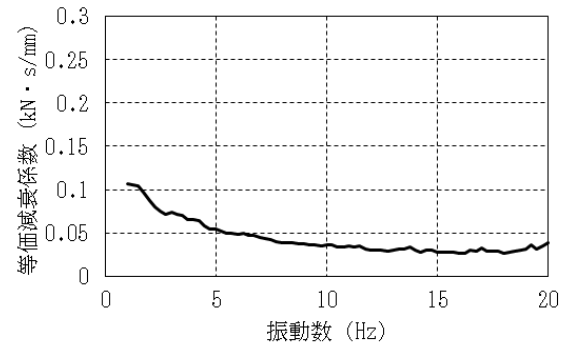


(V-2) 等価減衰係数 C_{High} (鉛直方向)

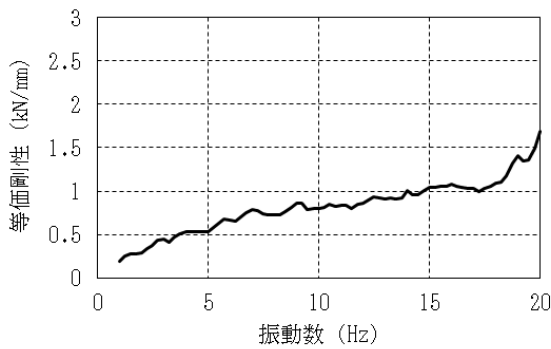
図 3-1 高側ダンパ試験性能 (型式 325/159 の例)



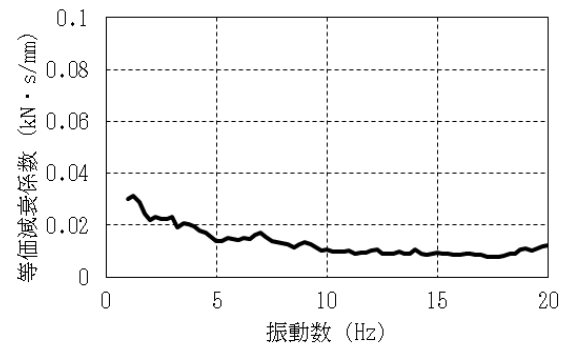
(H-1) 等価剛性 K_{Low} (水平方向)



(H-2) 等価減衰係数 C_{Low} (水平方向)



(V-1) 等価剛性 K_{Low} (鉛直方向)



(V-2) 等価減衰係数 C_{Low} (鉛直方向)

図 3-2 低側ダンパ試験性能 (型式 325/159 の例)

c. 低速移動時の追従性能確認試験

三軸粘性ダンパは熱膨張のような低速度の運動を拘束しないものであるが、低速移動時の拘束力（抵抗力）を定量的に確認するため、低速移動試験を実施した。低速移動試験の試験条件を表 3-3 に示す。熱膨張が大きい主蒸気系配管等がプラント起動時に約 4.5 時間で通常運転温度まで昇温することから、型式 630/426 の水平方向許容変位 72mm と等しい熱変位が約 4.5 時間で生じることを想定した場合の速度 0.005mm/s に余裕を見て、試験条件は 0.01mm/s とした。試験結果を図 3-3～図 3-5 に示す。熱膨張を想定した低速移動に対して三軸粘性ダンパの発生荷重は、試験結果における発生荷重は微小な変動がみられるものの、三軸粘性ダンパの許容荷重（水平：350kN、鉛直 140kN）に対し、1kN を下回る十分に小さな値となり、三軸粘性ダンパは熱膨張のような低速度の運動を拘束しないことが確認された。

表 3-3 低速移動試験の試験条件

試験体	速度
型式 630/426	0.01mm/s

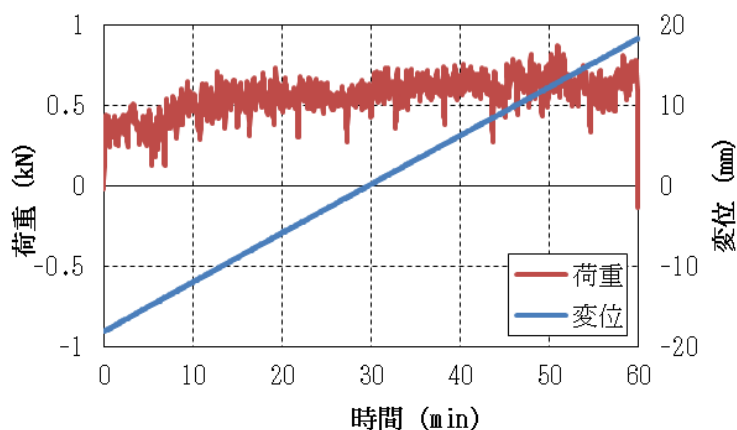


図 3-3 水平方向の低速移動に対する発生荷重

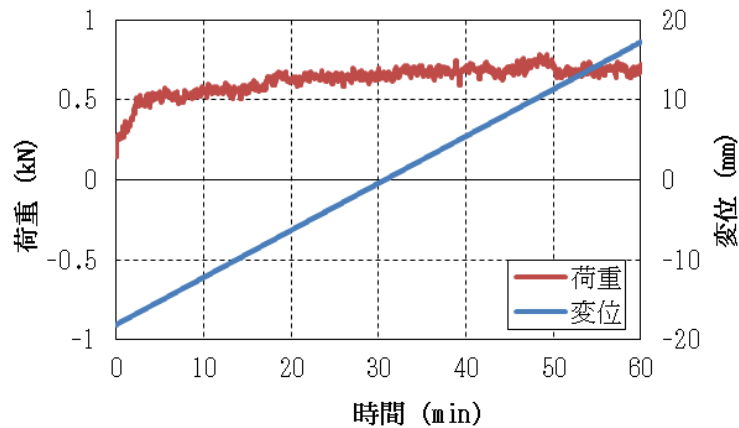


図 3-4 鉛直方向（ピストンを上げる方向）の低速移動に対する発生荷重

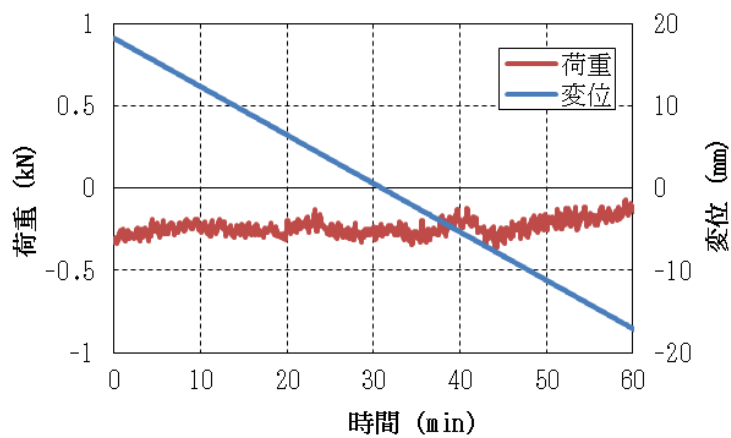


図 3-5 鉛直方向（ピストンを下げる方向）の低速移動に対する発生荷重

(3) 三軸粘性ダンパのモデル化

a. 減衰性能のモデル化

三軸粘性ダンパの振動数の変化に対する応答速度と抵抗力の関係を図 3-6 に示す。三軸粘性ダンパの振動特性は、応答速度と抵抗力がほぼ比例関係にあり、振動数の変化に対して応答速度と抵抗力の関係の変化が大きい。このように三軸粘性ダンパの振動特性は振動数依存性が大きいことから、各振動数における等価剛性及び等価減衰係数を用いることによって振動特性を模擬する。

等価剛性及び等価減衰定数を用いた解析のモデル化としては、Maxwell モデルを使用する。一般的な Maxwell モデルのパラメータ数は 2 つであるが、精度良く振動数特性を表現することを目的として、パラメータ数を増やした 4 パラメータ Maxwell モデルを使用する⁽¹⁾。図 3-7 に 4 パラメータ Maxwell モデルの等価剛性及び等価減衰係数の振動数特性と性能試験結果の比較の例を示す。

【参考文献】

- (1)V. Kostarev, A. Berkovsky, O. Kireev, P. Vasiliev, 1993, " Application of Mathematical Model of High Viscoelastic Damper in Dynamic Analysis of NPP piping and Equipment" , SMIRT-12

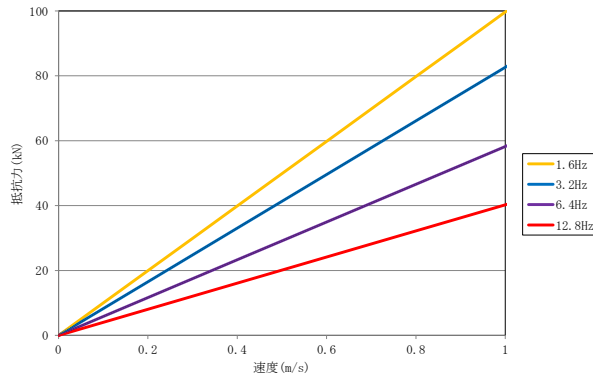
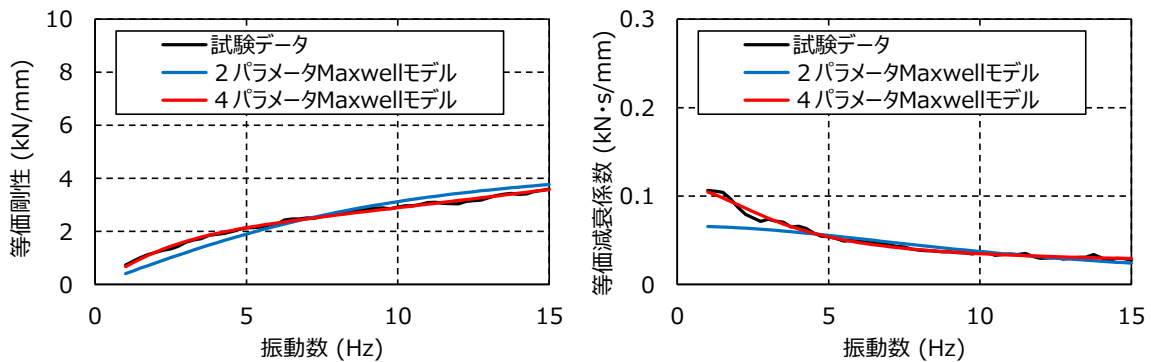


図 3-6 振動数を変化させた場合の速度と抵抗力の関係



(H-1) 等価剛性 (水平方向) (H-2) 等価減衰係数 (水平方向)

図 3-7 三軸粘性ダンパの減衰性能のモデル化

b. 減衰性能に係るパラメータの設定

性能試験の結果に基づき、三軸粘性ダンパの減衰性能をモデル化する。三軸粘性ダンパの等価剛性 K 及び等価減衰係数 C は振動数依存性を有しているが、4パラメータ Maxwell モデルにより、その振動数特性を精度良くモデル化できる。4パラメータ Maxwell モデルを図 3-8 に、4パラメータ Maxwell モデルによる性能試験結果のモデル化を図 3-9 及び図 3-10 に示す。

三軸粘性ダンパの減衰性能は、水平方向及び鉛直方向でそれぞれ高側ダンパ試験性能 (K_{High} , C_{High}) 及び低側ダンパ試験性能 (K_{Low} , C_{Low}) を性能試験により取得するため、4パラメータ Maxwell モデルは各方向に対して高側及び低側を設定する。

c. ばらつきの考慮

三軸粘性ダンパの減衰性能のばらつきを考慮して、地震応答解析に用いる解析モデルを設定する。性能試験結果に基づいてモデル化した三軸粘性ダンパの高側及び低側の減衰性能に対して、更に表 3-1 のうち製造公差による $\pm 10\%$ のばらつきと、据付公差による $\pm 20\%$ のばらつきを合わせて $\pm 30\%$ のばらつきとして考慮し、解析上の減衰性能の上限 ($K_1=1.3 \times K_{\text{High}}$, $C_1=1.3 \times C_{\text{High}}$) 及び下限 ($K_5=0.7 \times K_{\text{Low}}$, $C_5=0.7 \times C_{\text{Low}}$) を図 3-11 のように設定する。また、保守的に変動及びばらつきを考慮することで上限と下限の減衰性能の差が大きくなるため、等間隔に補間した減衰性能も設定することとし、上限と下限を含めた 5 段階の減衰性能を設定する。地震応答解析モデルにおける減衰性能の設定を表 3-4, 図 3-12 に示す。

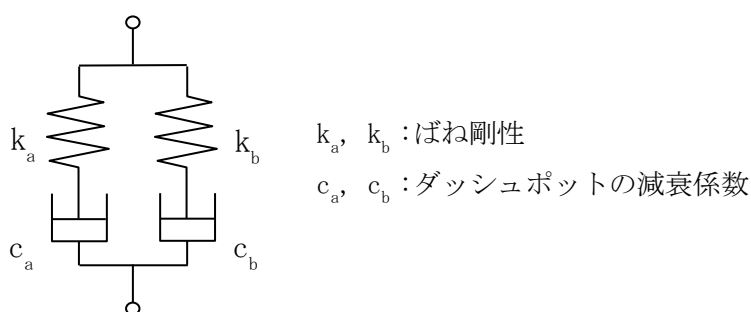
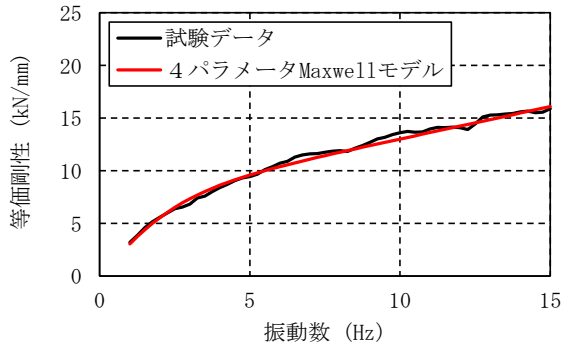
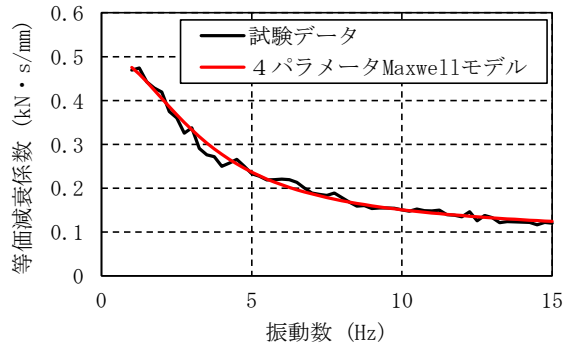


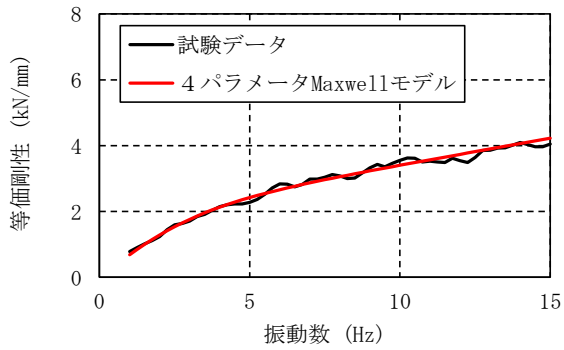
図 3-8 三軸粘性ダンパの 4 パラメータ Maxwell モデル



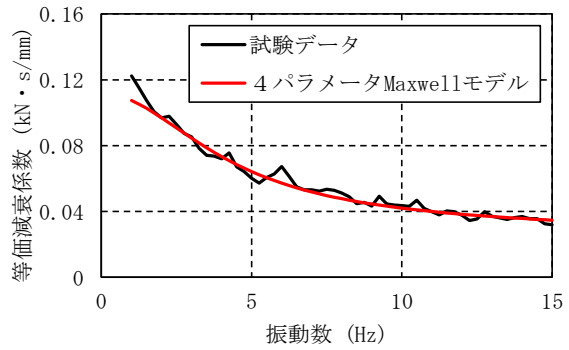
(H-1) 等価剛性 K_{High} (水平方向)



(H-2) 等価減衰係数 C_{High} (水平方向)

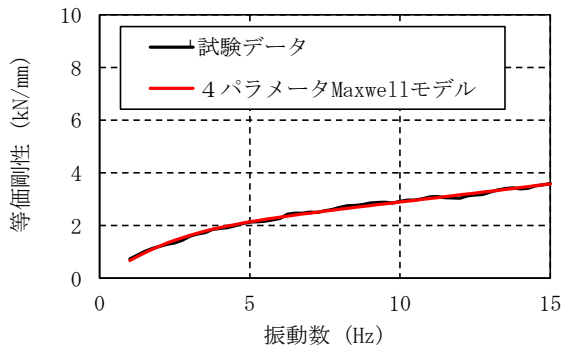


(V-1) 等価剛性 K_{High} (鉛直方向)

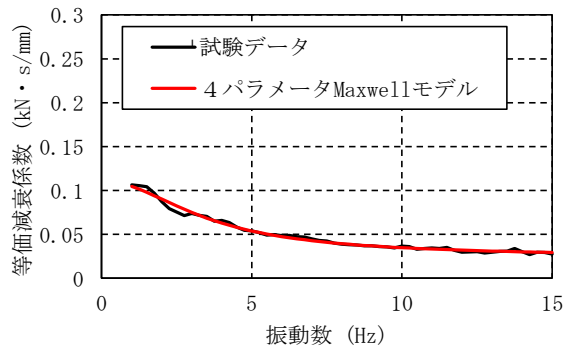


(V-2) 等価減衰係数 C_{High} (鉛直方向)

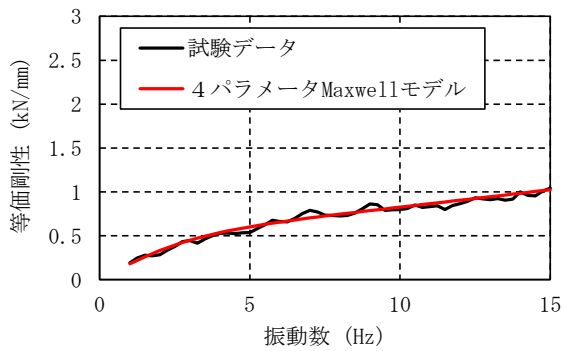
図 3-9 高側ダンパ試験性能のモデル化 (型式 325/159 の例)



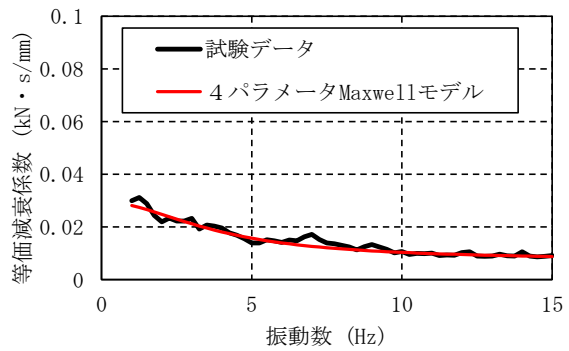
(H-1) 等価剛性 K_{Low} (水平方向)



(H-2) 等価減衰係数 C_{Low} (水平方向)



(V-1) 等価剛性 K_{Low} (鉛直方向)

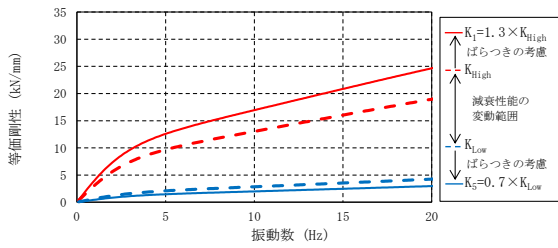


(V-2) 等価減衰係数 C_{Low} (鉛直方向)

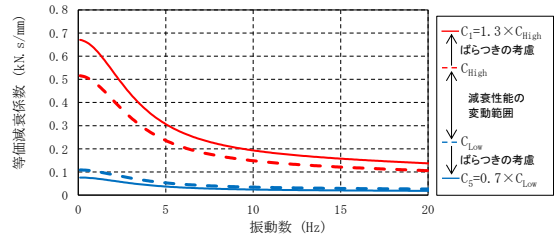
図 3-10 低側ダンパ試験性能のモデル化 (型式 325/159 の例)

表 3-4 地震応答解析モデルにおける減衰性能の設定

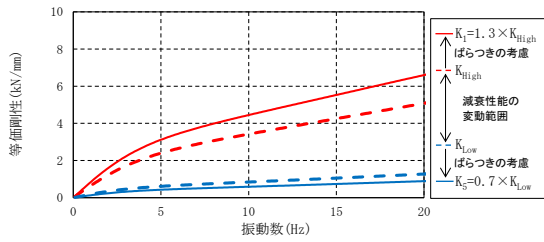
解析ケース	減衰性能	設定内容
1	K_1, C_1	等価剛性及び等価減衰係数上限値
2	K_2, C_2	
3	K_3, C_3	
4	K_4, C_4	
5	K_5, C_5	等価剛性及び等価減衰係数下限値



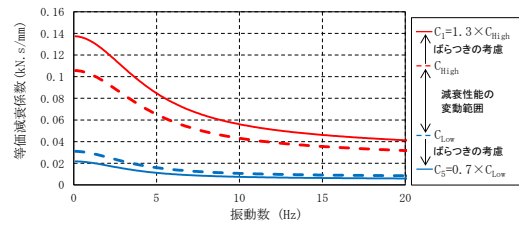
(H-1) 等価剛性 (水平方向)



(H-2) 等価減衰係数 (水平方向)

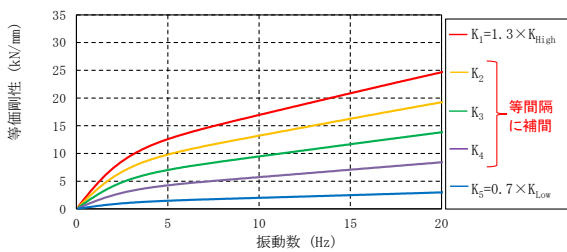


(V-1) 等価剛性 (鉛直方向)

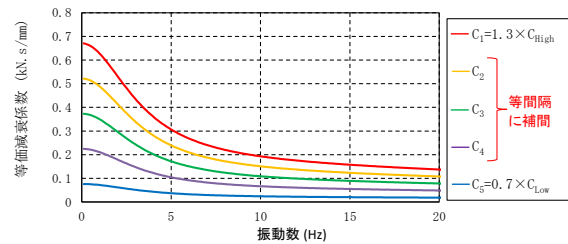


(V-2) 等価減衰係数 (鉛直方向)

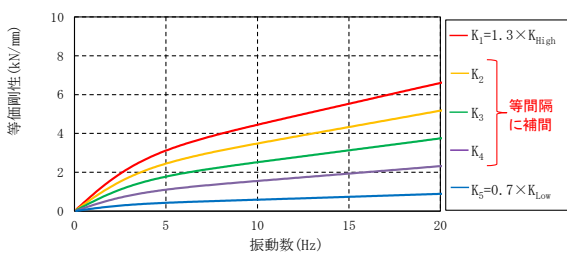
図 3-11 性能試験による減衰性能の上限と下限の設定 (型式 325/159 の例)



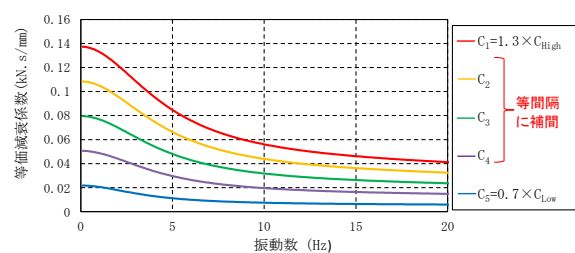
(H-1) 等価剛性 (水平方向)



(H-2) 等価減衰係数 (水平方向)



(V-1) 等価剛性 (鉛直方向)



(V-2) 等価減衰係数 (鉛直方向)

図 3-12 地震応答解析モデルにおける段階的な減衰性能の設定 (型式 325/159 の例)

d. 三軸粘性ダンパの解析諸元

a. ～c. に示す検討を踏まえた三軸粘性ダンパのモデル化に係る解析諸元（4パラメータ Maxwell モデルに設定するパラメータ）を表 3-5 に示す。

表 3-5 三軸粘性ダンパのモデル化に関する解析諸元*1

型式	減衰性能 段階	ばね定数 (kN/mm)				減衰係数 (kN・s/mm)			
		k_a^{*2}		k_b^{*2}		c_a^{*2}		c_b^{*2}	
		水平	鉛直	水平	鉛直	水平	鉛直	水平	鉛直
型式 630/ 426	1 (上限)								
	2								
	3								
	4								
	5 (下限)								
型式 325/ 159	1 (上限)								
	2								
	3								
	4								
	5 (下限)								

注記*1：記載の数値は小数点以下第3位を四捨五入し、小数点第2位表記している。

*2：図 3-8 に記載の記号に対応

(4) 三軸粘性ダンパの解析モデルの追加

三軸粘性ダンパをモデル化した4パラメータ Maxwell モデルを配管系の地震応答解析モデルに追加することにより、三軸粘性ダンパを設置した配管系の地震応答解析モデルを作成する。

3.4 地震応答解析手法

(1) 解析手法

配管系の各地震応答解析手法と三軸粘性ダンパを設置した配管系への適用性を表 3-6 に示す。三軸粘性ダンパを設置した配管系は減衰が大きくなるため、地震応答解析手法として実固有値を用いた一般的なスペクトルモーダル解析は適用できず、時刻歴応答解析を適用する（添付資料 3-6 参照）。また、複数の建物を跨ぐ配管系の解析においては多入力の時刻歴応答解析を適用する（添付資料 3-7 参照）。

三軸粘性ダンパの減衰性能については、三軸粘性ダンパの減衰性能の上限と下限を含めた 5 段階の減衰性能に対応した地震応答解析を行い、これらの最大応答を用いて耐震評価を行う。5 段階の減衰性能を適用した際の三軸粘性ダンパの減衰性能と配管系の応答の関係を添付資料 3-8 に示す。

配管系の水平方向及び鉛直方向の減衰定数については、最新の知見を反映して設定する。

表 3-6 各地震応答解析手法と三軸粘性ダンパを設置した配管系への適用性

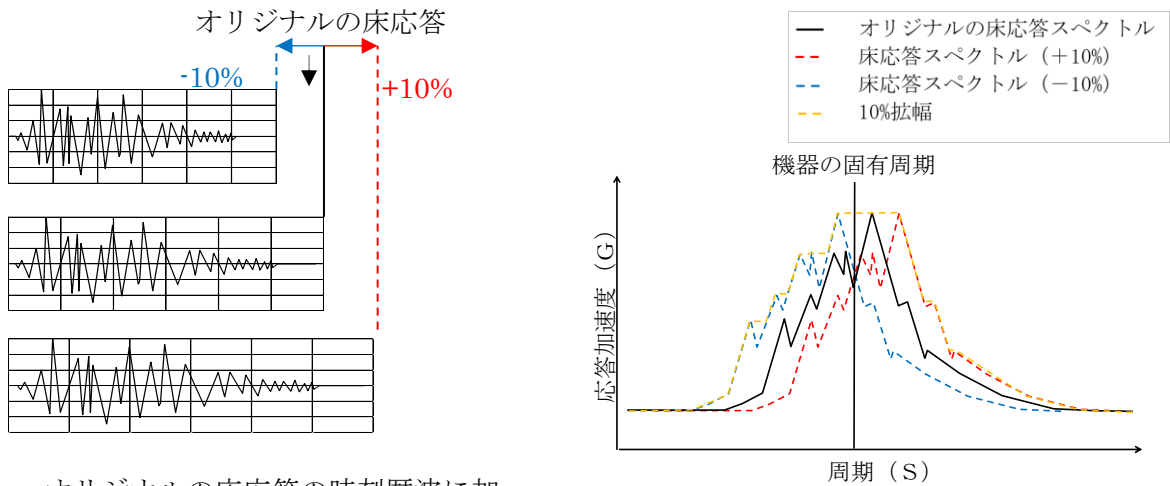
手法	運動方程式	概要	三軸粘性ダンパを設置した配管系への適用性 【凡例】○：適用可能 △：適用可能だが検討事項有り ×：適用不可			
			運動方程式	累積消費エネルギーの評価手法	配管系の減衰	判定
スペクトルモード解析	*1 モード非連成	モーダル座標系の非連成の運動方程式を解き、各モードの固有周期及び減衰に基づく応答スペクトルから応答を求める。配管系の耐震評価等に適用されている実固有値を用いた一般的なスペクトルモード解析手法。	× モーダル座標系で連成された運動方程式となるため適用できない。	— 左記より適用不可	× 三軸粘性ダンパを適用した配管系の運動方程式が表現できない。	
	*2 モード連成	モーダル座標系の連成された運動方程式を解き、各モードの固有周期及び減衰に基づく応答スペクトルから応答を求める。制震装置を適用した配管等、運動方程式を非連成とできない構造物に適用できる手法。	○ モーダル座標系において連成された運動方程式となるため適用できる。	× 累積消費エネルギーは変位量の総計により算出するため、変位量の最大値のみを算出するスペクトルモード解析では算出できない。	○ 配管の減衰にモード減衰を適用できる。	× 三軸粘性ダンパの累積消費エネルギーの算出ができない。
時刻歴解析(直接積分)	連成	物理座標系の連成された運動方程式を時間とともに変化する外力を入力として解き、構造物の過渡的な応答を求める。スペクトルモード解析よりも精緻に応答を算出可能であり、様々な構造物に適用されている手法。	○ 物理座標系において連成された運動方程式となるため適用できる。	○ 時刻歴解析であるため、累積消費エネルギーを算出できる。	△ モード減衰を適用できないため、配管の減衰の設定方法を検討する必要がある。	△ 適用可能だが、配管の減衰の設定方法を検討する必要がある。
モーダル時刻歴解析	*1 モード非連成	モーダル座標系の非連成の運動方程式を時間とともに変化する外力を入力として解き、構造物の過渡的な応答を求める。スペクトルモード解析よりも精緻に応答を算出可能であり、モーダル座標系において非連成となる構造物に適用できる手法。	× モーダル座標系で連成された運動方程式となるため適用できない。	— 左記より適用不可	× 三軸粘性ダンパを適用した配管系の運動方程式が表現できない。	
	*2 モード連成	モーダル座標系の連成された運動方程式を時間とともに変化する外力を入力として解き、構造物の過渡的な応答を求める。スペクトルモード解析よりも精緻に応答を算出可能であり、様々な構造物に適用できる手法。	○ モーダル座標系において連成された運動方程式となるため適用できる。	○ 時刻歴解析であるため、累積消費エネルギーを算出できる。	○ 配管の減衰にモード減衰を適用できる。	○ 問題なく適用できる。

注記*1：モード非連成は、モード座標系において対角行列として表される運動方程式を解く解析手法

*2：モード連成は、モード座標系において非対角項を有する行列を含む運動方程式を解く解析手法

(2) 入力加速度

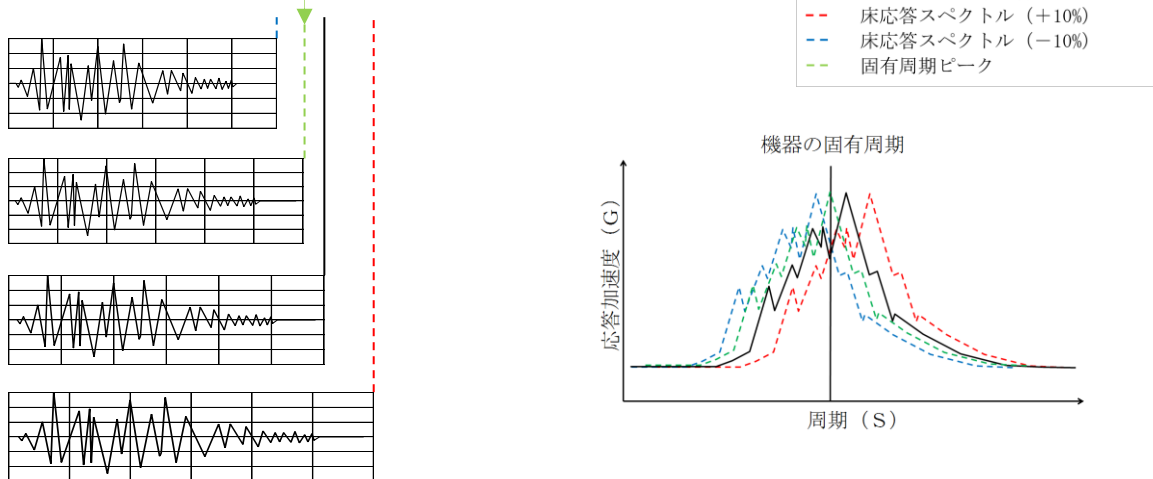
スペクトルモーダル解析では、床応答加速度は地盤物性等の不確かさによる建物等の固有周期の変動を考慮して周期方向に±10%拡幅した設計用床応答スペクトルを用いている。三軸粘性ダンパを設置した配管系の地震応答解析では、時刻歴応答解析を採用することから、地盤物性等の不確かさによる建物等の固有周期の変動の影響を考慮し、機器評価への影響が大きい地震動に対し、「ASME Boiler and Pressure Vessel Code SECTION III, DIVISION1—NONMANDATORY APPENDIX N (ARTICLE N-1222.3 Time History Broadening)」に規定された手法等により床応答加速度を設定する。図 3-13 に床応答加速度の設定方法を図 3-14 に示し、「ASME Boiler and Pressure Vessel Code SECTION III, DIVISION1—NONMANDATORY APPENDIX N (ARTICLE N-1222.3 Time History Broadening)」の概要を示す。



- オリジナルの床応答の時刻歴波に加えて時間刻みを±10%シフトさせた時刻歴波を作成

各時刻歴波を床応答スペクトル化

固有周期と合致するように調整した時刻歴波



- 機器の固有周期が床応答スペクトルピークの谷間に存在する場合、ピークと合うような時刻歴波を作成し、時刻歴応答解析を実施する。

図 3-13 適用する床応答加速度の設定方法

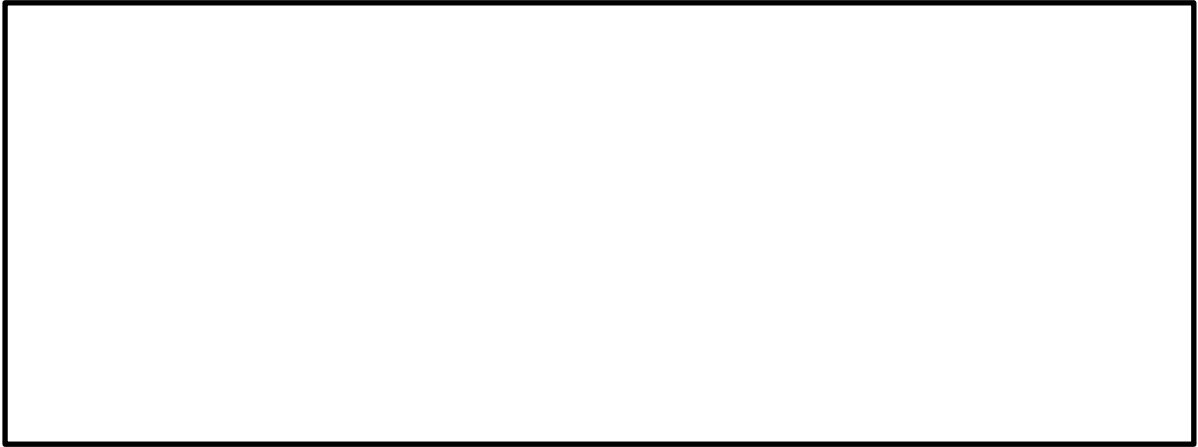


図 3-14 「ASME Boiler and Pressure Vessel Code SECTION III, DIVISION 1—
NONMANDATORY APPENDIX N (ARTICLE N-1222.3 Time History Broadening)」の概要

3.5 三軸粘性ダンパ評価

表 3-7 に三軸粘性ダンパ評価方法及び許容限界について示す。三軸粘性ダンパを設置した配管系の地震応答解析によって得られた応答値が、三軸粘性ダンパの減衰性能を取得した性能試験（詳細について添付資料 3-5 に示す。）の試験条件の範囲内であることを確認することで、減衰性能が維持されることを確認する。

また、三軸粘性ダンパを設置した配管系の地震応答解析によって得られた支持点荷重が、三軸粘性ダンパを構成する部材の許容限界に基づきあらかじめ設定した許容荷重（以下「使用荷重」という。）以下となることを確認することで、地震に対して十分な構造強度を有することを確認する。

表 3-7 三軸粘性ダンパ評価方法及び許容限界

評価する項目	評価方法	確認指標	許容限界
減衰性能に係る機能の維持	地震応答解析で得られる応答値が、減衰性能を確認した性能試験の試験条件の範囲内となることを確認する	変位振幅*1	性能試験に用いた加振振幅及び累積消費エネルギー
		累積消費エネルギー*2	
構造強度上の健全性	地震応答解析で得られる支持点荷重が、使用荷重以下となることを確認する	支持点荷重	使用荷重*3

注記*1：三軸粘性ダンパのピストンとハウジングの相対変位量（片振幅）

*2：三軸粘性ダンパで消費されるエネルギーの総和であり、下式から算出される。

$$W = \int_0^T F(t) \frac{dx(t)}{dt} dt$$

F(t)：三軸粘性ダンパ反力，x(t)：三軸粘性ダンパ変位，T：加振継続時間

*3：三軸粘性ダンパを構成する部材に生じる発生応力が J E A G 4 6 0 1 に規定される許容限界を一定の裕度をもって満足するようにあらかじめ設定した許容荷重のことを示す。三軸粘性ダンパの使用荷重については、VI-2-1-12「配管及び支持構造物の耐震計算について」にて詳細を示す。

3.6 配管系評価

三軸粘性ダンパを設置する外側主蒸気隔離弁から低圧タービン，復水器までの主蒸気系配管等の耐震重要度分類はBクラスであり，外側主蒸気隔離弁から主蒸気止め弁までの範囲はS d機能維持設計とするため，応力評価等における許容限界は表3-8のとおりとする。許容限界は，J E A G 4 6 0 1等に基づき設定する。

表3-8 配管系評価における評価方法及び許容限界

範囲	地震力	部位	評価方法	許容限界
外側主蒸気隔離弁から主蒸気止め弁まで	静的地震力及び弾性設計用地震動S dに2分の1を乗じたものによる地震力	配管	部材に発生する応力が許容限界を超えないことを確認する。	許容応力状態 B A S の許容応力
		支持構造物	部材に発生する応力が許容限界を超えないことを確認する。	許容応力状態 B A S の許容応力
		三軸粘性ダンパ	表3-7 参照	表3-7 参照
	弾性設計用地震動S dによる地震力	配管	部材に発生する応力が許容限界を超えないことを確認する。	許容応力状態 I V A S の許容応力
		支持構造物	部材に発生する応力が許容限界を超えないことを確認する。	許容応力状態 I V A S の許容応力
		三軸粘性ダンパ	表3-7 参照	表3-7 参照
上記以外の範囲	静的地震力及び弾性設計用地震動S dに2分の1を乗じたものによる地震力	配管	部材に発生する応力が許容限界を超えないことを確認する。	許容応力状態 B A S の許容応力
		支持構造物	部材に発生する応力が許容限界を超えないことを確認する。	許容応力状態 B A S の許容応力
		三軸粘性ダンパ	表3-7 参照	表3-7 参照

4. 実機配管系の耐震評価結果

三軸粘性ダンパは主蒸気配管等に適用しており、主蒸気配管等の耐震評価結果については、補足-027-10-29「主蒸気管の弾性設計用地震動 S_d での耐震評価について」に示すとおり、三軸粘性ダンパに期待する地震応答低減効果により、管及び支持構造物が健全であることを確認した。

5. 実機配管系への適用性

5.1 既工認において適用実績のある制震装置との比較結果

配管系に設置する三軸粘性ダンパと島根2号機の既工認において実績のある島根2号機排気筒に設置した制震装置（単軸粘性ダンパ）との差異に着目し、機器・配管系への適用性や減衰性能への影響の観点から検討を要する項目を表5-1に示す。検討の結果、追加の検討項目は抽出されず、必要な検討が行われていることを確認した。

表5-1 島根2号機の既工認において適用実績のある制震装置との差異

項目	単軸粘性ダンパ*1	三軸粘性ダンパ	差異*2	差異に対する対応内容
適用対象	排気筒	配管系	○	適用対象機器に応じたモデル化の方法を設定（3.3参照）
環境条件	屋外	屋内	○	屋内の環境条件による制震装置の減衰性能への影響を確認（添付3-3参照）
制震装置	単軸線形タイプ (図5-1参照)	三軸非線形タイプ (図5-2参照)	○	制震装置のモデル化の方法を検討（3.3参照）
解析	制震装置モデル	Maxwellモデル (4パラメータ)	—	—
	解析手法	時刻歴応答解析	—	—

注記*1：他プラント（柏崎刈羽原子力発電所7号機）においても適用実績がある。

*2：「○」は差異がある場合を示し、「—」は差異がない場合を示す。

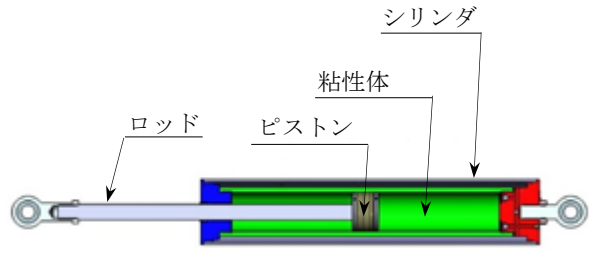


図 5-1 島根 2 号機の排気筒に設置した単軸粘性ダンパの外観及び構造

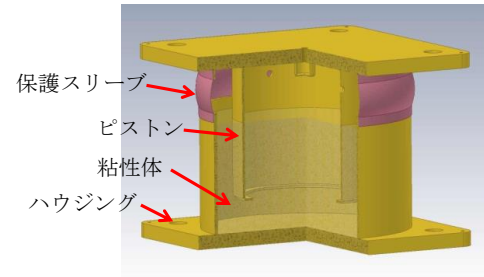


図 5-2 島根 2 号機の配管系に設置した三軸粘性ダンパの外観及び構造

5.2 海外の原子力プラントにおいて実績のある耐震評価方法との比較結果

三軸粘性ダンパについて、海外の原子力プラントにおいて実績のある耐震評価方法と島根2号機における耐震評価方法の比較を表5-2に示す。三軸粘性ダンパを設置する場合の耐震評価方法は同様であるが、島根2号機では、海外実績における耐震評価方法に加えて減衰性能の変動及びばらつきを考慮しており、これは「免震構造の審査手引きの提案（平成26年1月）独立行政法人原子力安全基盤機構」及び工認審査ガイドを踏まえて考慮することとしたものである。

表5-2 海外実績と島根2号機における耐震評価方法の比較

項目	海外実績	島根2号機
減衰性能の パラメータ設定方法	三軸粘性ダンパの性能試験結果に基づき、等価剛性及び等価減衰係数のフィッティングにより4パラメータ Maxwell モデルのパラメータを設定している。	同左
地震応答解析手法	時刻歴応答解析を適用している。	同左
三軸粘性ダンパの 許容限界	地震応答解析結果から三軸粘性ダンパの荷重及び変位を算出し、許容値と比較している。	地震応答解析結果から三軸粘性ダンパの荷重、変位及び累積エネルギーを算出し、許容値と比較する。
減衰性能の変動 及びばらつき	—	減衰性能の変動及びばらつきを包絡するように上限及び下限の減衰性能を設定した上で、5段階の段階的な減衰性能を設定する。

5.3 新規制基準への適合性を踏まえた検討

制震装置を設置する場合の耐震評価方法について、原子炉施設の耐震設計の体系及び新規制基準適合性審査の実績を踏まえて重点的に検討すべき事項を抽出し、耐震評価方法において考慮していることを確認するため、「耐震設計に係る工認審査ガイド（最終改正 平成 29 年 11 月 15 日，原規技発第 1711152 号）」に基づき、耐震評価方法の設定にあたって必要な検討を実施していることを確認した。確認の結果を添付資料 5-1 に示す。工認審査ガイドに基づいて抽出した検討事項は、耐震評価方法の設定にあたって考慮されており、追加の検討を要する事項はないことを確認した。

6. 三軸粘性ダンパの設置方法及び点検・保守

6.1 三軸粘性ダンパの配管系への設置方法

三軸粘性ダンパは、ラグ又はクランプにより配管に取り付ける。ラグの構造の概要を図 6-1 に示し、クランプの構造の概要を図 6-3 に示す。ラグの構造については、従来のアンカサポート等の設計と同様であり、配管と溶接により一体となる構造とする。ラグと三軸粘性ダンパは図 6-2 のとおり取付ボルトにより接続する。クランプは上部クランプ及び下部クランプから構成され、図 6-4 のように上部クランプと下部クランプをクランプボルトにより締め付けることで配管に取り付ける。クランプと三軸粘性ダンパは取付ボルトにより接続する。ラグ及びクランプの設計の詳細については添付資料 6-1 に示す。

また、三軸粘性ダンパは、減衰性能を取得した性能試験の最高温度（100℃）以下となるよう、適切な大きさの断熱板及び放熱板をクランプ又はラグと三軸粘性ダンパの間に設置する。断熱板及び放熱板を設置した三軸粘性ダンパを図 6-5、断熱板及び放熱板の仕様を表 6-1 に示す。表 6-1 のとおり、三軸粘性ダンパ（鋼材部）や配管を構成する材質の熱伝導率と比較し、断熱材は高い断熱性を有する。また、放熱板を設置し、表面積を多くすることにより、高い放熱性を有する構造としている。

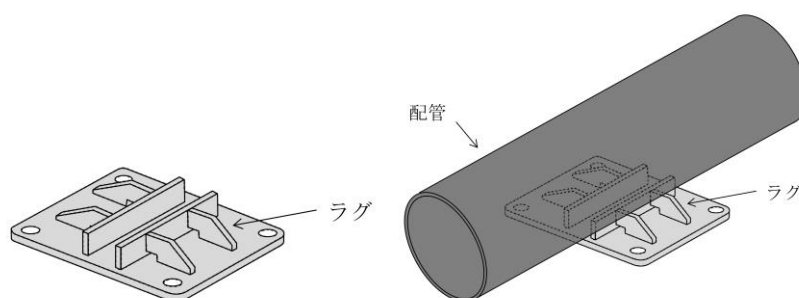


図 6-1 ラグの構造概要

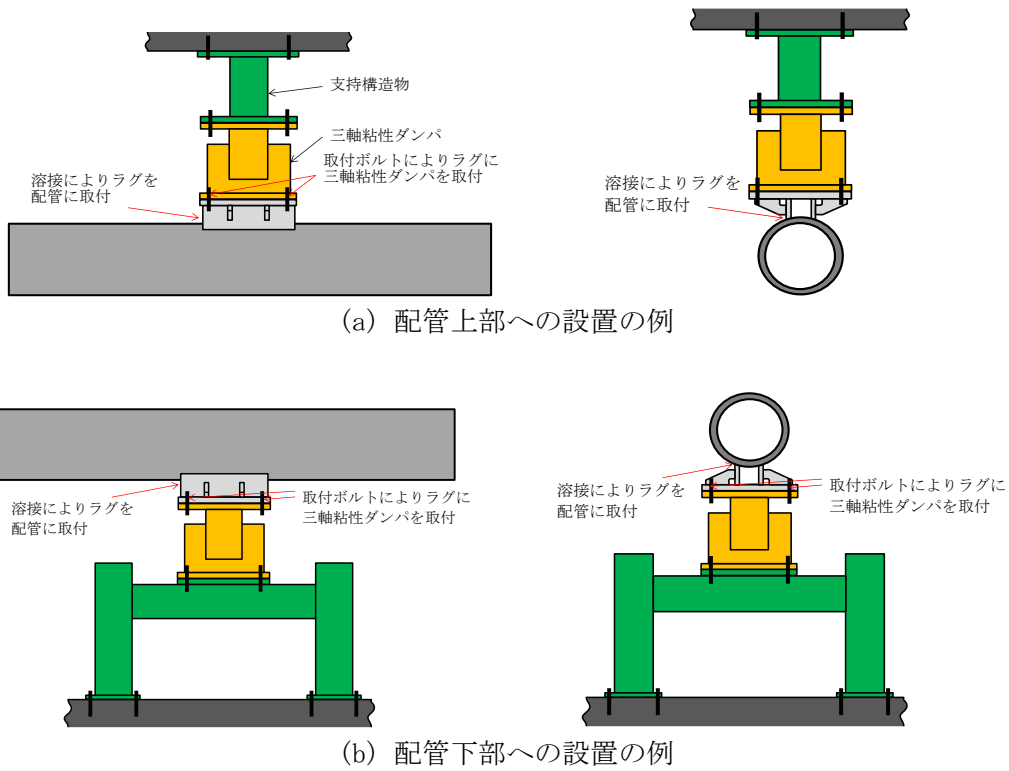


図 6-2 ラグの配管への取付及び三軸粘性ダンパへの接続

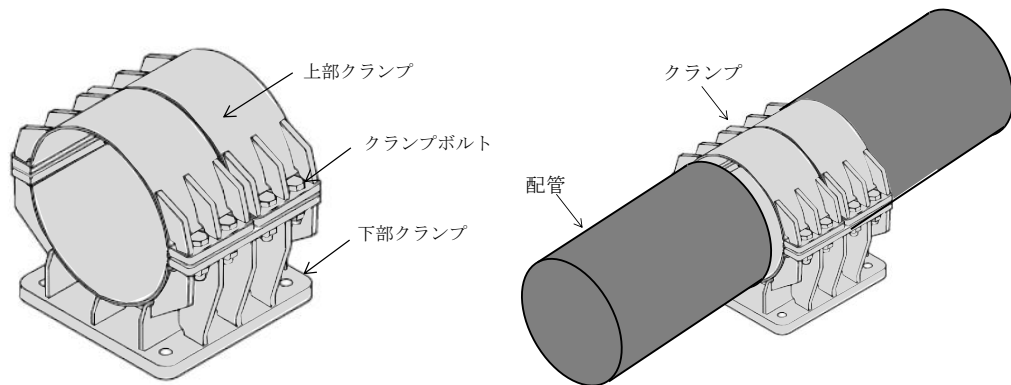
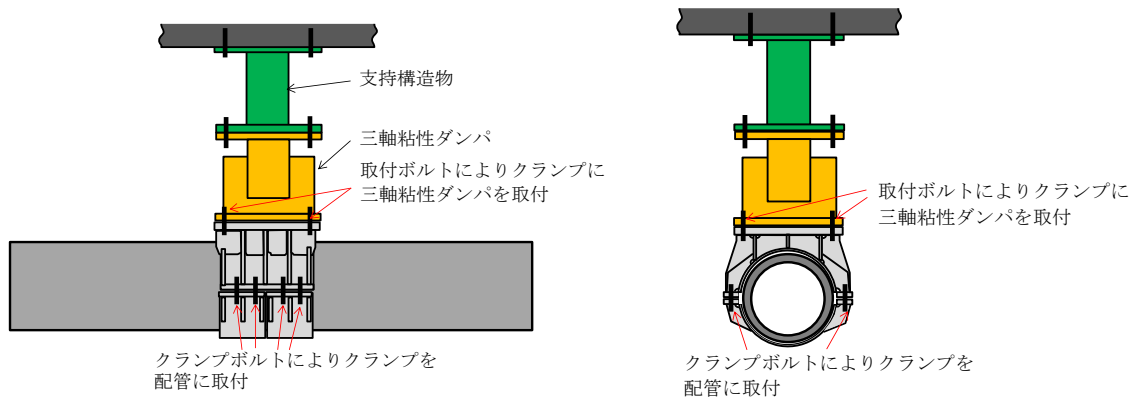
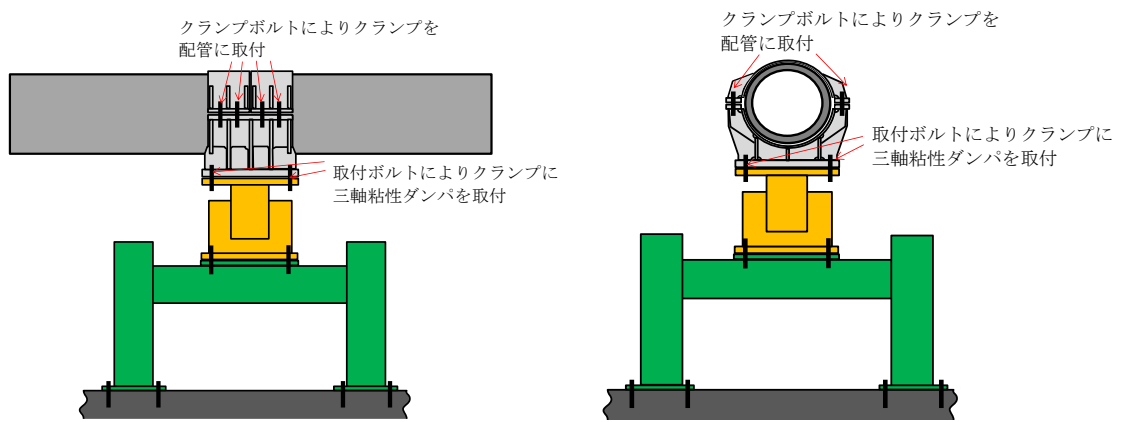


図 6-3 クランプの構造概要



(a) 配管上部への設置の例



(b) 配管下部への設置の例

図 6-4 クランプの配管への取付及び三軸粘性ダンパへの接続

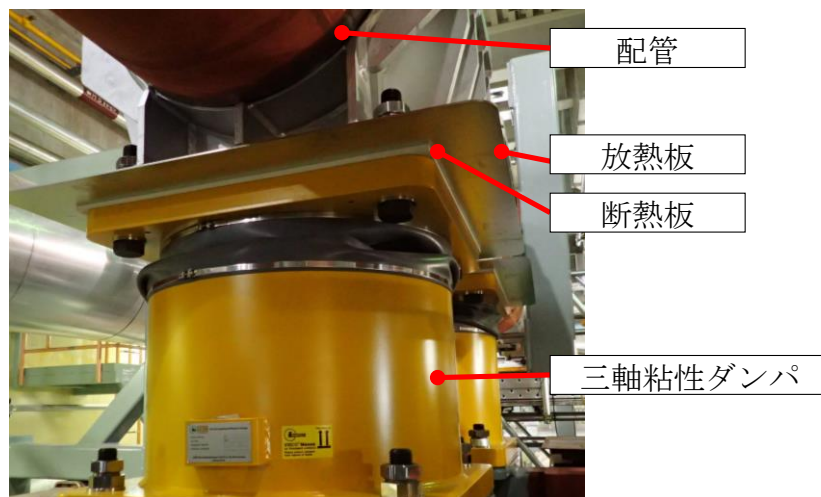


図 6-5 断熱板及び放熱板を設置した三軸粘性ダンパ

表 6-1 断熱板及び放熱板の仕様 (型式 630/426)

(a) 断熱板

項目	仕様
材質	セラミック
厚さ (mm)	10mm
熱伝導率 (W/m・K)	0.15*

注記* : 三軸粘性ダンパ (鋼材部) 及び配管等の熱伝導率は、約 67 W/m・K (20°C) である。

(b) 放熱板

項目	仕様
形状 (mm)	□900×3.2*

注記* : 三軸粘性ダンパの大きさは、□686mm である。

6.2 三軸粘性ダンパの点検・保守

三軸粘性ダンパは、設置環境や動作頻度を踏まえた故障及び経年劣化事象を考慮した適切な周期による定期的な点検（時間基準保全）により、性能を維持する。

三軸粘性ダンパは、本体（ハウジング、ピストン）、粘性体、保護スリーブ及び取付ボルトにより構成（図 6-6 参照）され、機械的・電子的な機構や摺動部はない構造となっている。三軸粘性ダンパの点検項目及び点検内容等を表 6-2 に示す。本体及び取付ボルトは金属製であり、想定される経年劣化事象は腐食である。したがって、点検項目としては、目視により腐食等の有無を確認する。

粘性体はシリコーンを使用しており、化学的に安定であるものの、液量の変化や、劣化による粘度の変化が生じた場合は減衰性能に影響する。したがって、点検項目としては、目視により粘性体の液量及び粘性体に異物・変色等がないことを確認するとともに、粘性体の粘度を測定する。

保護スリーブは異物等の混入防止のための樹脂製のカバーであり、減衰性能に直接関係するものではないものの、保護スリーブが損傷した場合は粘性体に異物等が混入し、減衰性能に影響を与える可能性がある。したがって、点検項目としては、目視によりき裂等の損傷の有無を確認する。

表 6-2 三軸粘性ダンパの点検項目及び点検内容

点検部位	想定される経年劣化事象	点検項目	点検内容	点検周期*1
本体	腐食	外観点検	き裂，変形，腐食がないことを確認する	1回／定期事業者検査
取付ボルト	腐食	外観点検	き裂，変形，腐食がないことを確認する	1回／定期事業者検査
粘性体	劣化	外観点検	異物，変色，汚れがないことを確認する 粘性体の液量を確認する	1回／5定期事業者検査
		性状確認*2	粘性体の粘度を確認する	1回／5定期事業者検査
保護スリーブ	劣化	外観点検	き裂，損傷がないことを確認する	1回／定期事業者検査

注記*1：メーカー推奨の点検周期及び島根 2 号機の点検実績から総合的に判断して設定した。

*2：粘性体の性状確認については、実機と同一環境に設置する性状確認用試験体から粘性体を採取し、実施する。

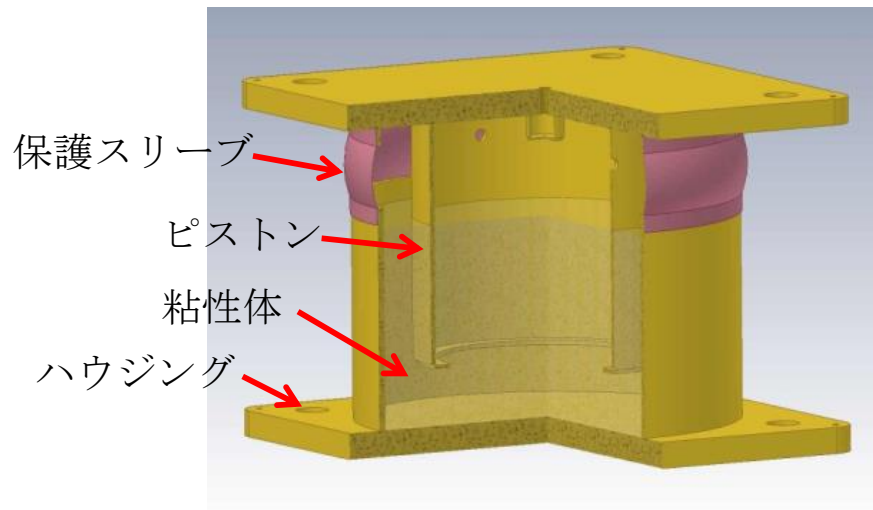


図 6-6 三軸粘性ダンパの概要

7. まとめ

主蒸気管等については、既工認からの設計用地震動の変更等への対応として、耐震性向上のために制震装置での対策を実施することとした。また、制震装置については、主蒸気管等に要求される項目（高温配管，Sd 機能維持等）を踏まえて、種別ごとの構造特徴及び性能特性を検討し、三軸粘性ダンパを選択した。

三軸粘性ダンパは、その減衰性能を4パラメータ Maxwell モデルにより精度良くモデル化できることを、性能試験結果を踏まえた検討にて確認したことから、配管系の地震応答解析において三軸粘性ダンパは、4パラメータ Maxwell モデルにてモデル化した。なお、環境条件や加振条件等、減衰性能に影響を与えうる項目について検討し、減衰性能の変動及びばらつきを考慮できるよう、減衰性能を段階的に設定した。三軸粘性ダンパが設置される配管系の耐震評価は、減衰性能の段階ごとに地震応答解析を実施し、これらの最大応答を用いることとした。

上記の地震応答解析手法を実機配管系の地震応答解析に適用し、この結果から得られる各種応答値が、配管系を構成する各部位に要求されるそれぞれの許容値以下となることを確認した。

なお、三軸粘性ダンパの適用にあたって必要な検討が実施されていることを確認するため、既工認及び海外における制震装置の適用実績を比較するとともに、新規基準への適合性を踏まえた検討を行い、実機配管系への適用性を確認した。また、三軸粘性ダンパの減衰性能が発揮・維持されるように、三軸粘性ダンパの配管系への設置方法と、保守管理方法について整備した。

三軸粘性ダンパに関する ASME Boiler and Pressure Vessel Code の記載

海外における実績の調査として ASME Boiler and Pressure Vessel Code の三軸粘性ダンパに係る記載を抽出し、規定の内容を確認した。三軸粘性ダンパは ASME Boiler and Pressure Vessel Code において、原子力発電所に設置できる典型的なダンパとして例示されている。三軸粘性ダンパに関する ASME Boiler and Pressure Vessel Code の記載について表 2-1-1 に示す。

表 2-1-1 ASME Boiler and Pressure Vessel Code SECTION III, DIVISION 1-Subsection NF-Supports 2013 の記載 (1/5)

主な記載箇所				規定の記載	規定内容の説明
ARTICLE NF-1000 INTRODUCTION	NF-1100 SCOPE AND GENERAL REQUIREMENTS	NF-1130 BOUNDARIES OF JURISDICTION	NF-1132 Boundary Between Supports and the Building Structure	(a) Supports may bear on or may be welded, bolted, pinned, or clamped to the building structure. Typical examples of jurisdictional boundaries defined between supports and building structures are shown in Figure NF-1132-1.	支持構造物と建物・構築物との境界の定義についての記述において、支持構造物の典型例一つとして三軸粘性ダンパが図示 (Figure NF-1132-1 : 図2-1-1参照) されている。
	NF-1200 TYPES OF SUPPORTS AND ATTACHMENTS	NF-1210 TYPES OF SUPPORTS	NF-1214 Standard Supports	Typical catalog items are shown in Figure NF-1214-1. The capacities of standard supports may be determined using plate and shell analysis or linear analysis or load rating. Examples of standard supports are (中略) (f) dampers	支持構造物のうち標準品の典型例として三軸粘性ダンパが図示 (Figure NF-1214-1 : 図2-1-1参照) されている。

表 2-1-1 ASME Boiler and Pressure Vessel Code SECTION III, DIVISION 1-Subsection NF-Supports 2013 の記載 (2/5)

主な記載箇所		規定の記載	規定内容の説明	
NONMANDATORY APPENDIX NF-E DAMPERS, ENERGY ABSORBERS, AND SNUBBERS ARTICLE NF-E-1000	NF-E-1210 DAMPERS	NF-E-1210 DESCRIPTION	Dampers are dynamic restraint supports used to reduce cyclic motions caused by earthquakes, shock, or operational excitations such as those from vibration coupled machinery or pressure pulses in the pipe system (see NF-3412.5). Locally installed dampers reduce rapid displacements of the system and increase overall system damping.	ダンパは動的振動を低減させる機能を持つ支持装置として使用され、系に減衰を付加することが記載されている。
		NF-E-1220 FUNCTION	One particular type of damper is a viscous damper. Dampers of this type usually consist of a piston surrounded by a highly viscous fluid in a damper housing. They react to displacement immediately, and are therefore effective against operational vibration with a wide range of amplitude and frequency as well as cyclic displacements caused	三軸粘性ダンパを例として、構造、動作等について記載されている。

表 2-1-1 ASME Boiler and Pressure Vessel Code SECTIONIII, DIVISION1-Subsection NF-Supports 2013 の記載 (3/5)

主な記載箇所			規定の記載	規定内容の説明
同上	同上	同上	<p>by earthquakes and other dynamic events. The amount of damping provided is proportional to the relative velocity between the damper piston and the housing. When immersed in the viscous liquid, the piston can move in all directions, limited only by the dimensions of the damper housing. Damping is therefore possible in all six degrees of freedom at the damper attachmentpoint to the piping system. The amount of damping and stiffness is dependent on the damper fluid temperature. Some types of dampers may cause significant resistance and load on the piping system due to restraint of thermal movement at low start-up temperatures of the damper fluid.</p>	同上

表 2-1-1 ASME Boiler and Pressure Vessel Code SECTION III, DIVISION 1-Subsection NF-Supports 2013 の記載 (4/5)

主な記載箇所		規定の記載	規定内容の説明
同上	同上	NF-E-1230 APPLICATIONS	ダンパは振動対策や地震対策等に用いられることが記載されている。
		NF-E-1240 MODELING	ダンパは動的な支持装置であり静的荷重に対しては機能しないことが記載されている。また、機器・配管系にダンパを設置した場合の数値解析法として、モーダル解析及び時刻歴解析が記載されており、ダンパの解析パラメータを試験により設定することが記載されている。

表 2-1-1 ASME Boiler and Pressure Vessel Code SECTIONIII, DIVISION1-Subsection NF-Supports 2013 の記載 (5/5)

主な記載箇所			規定の記載	規定内容の説明
同上	同上	同上	(b) increased piping system damping is as determined by tests (c) an equivalent stiffness parameter is derived for each damper type from tests (d) stiffness is a function of damper fluid temperature Alternatively, a time history analysis may be performed with programs that allow the use of single element damping.	同上

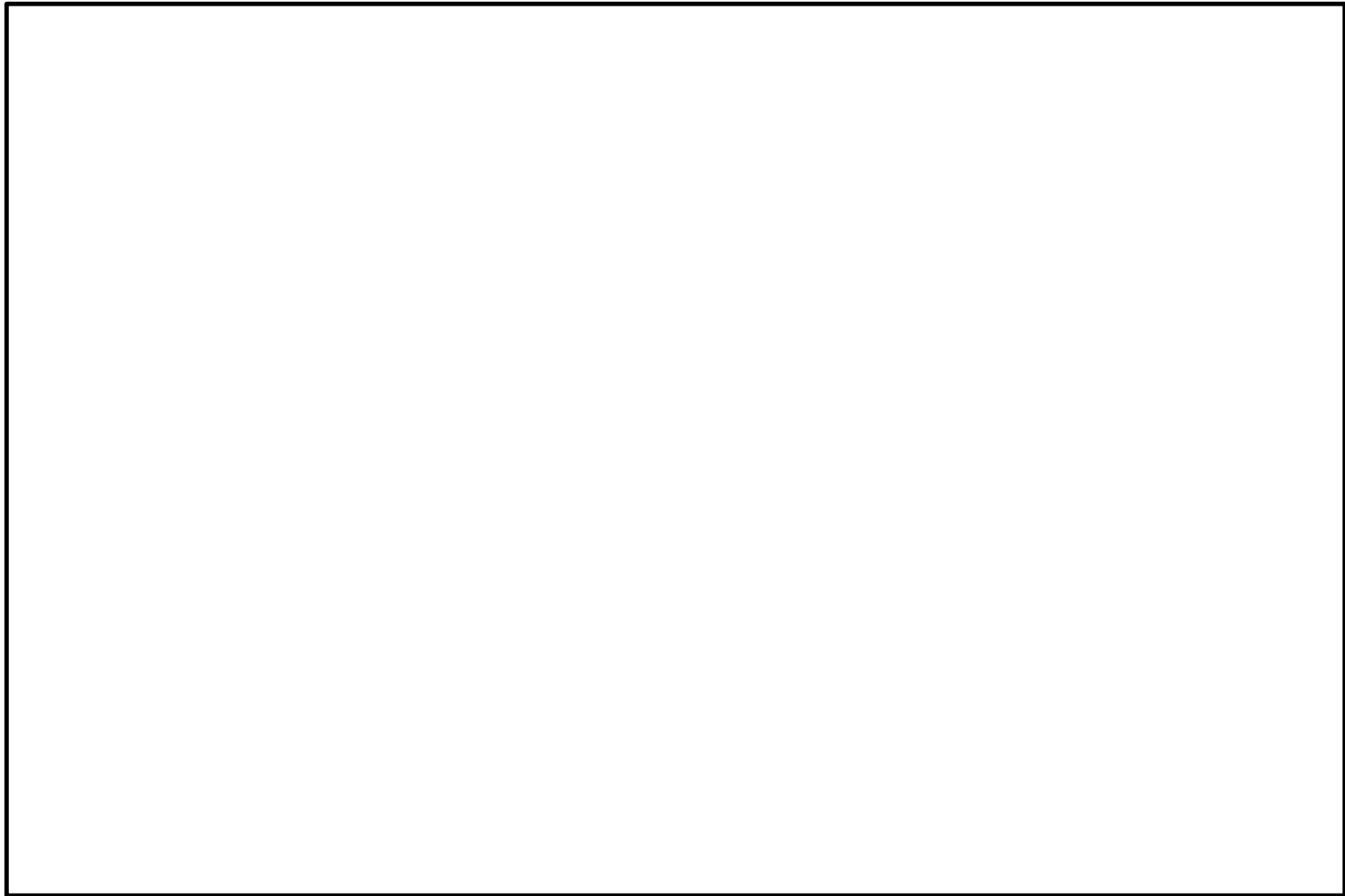


図 2-1-1 ASME Boiler and Pressure Vessel Code の関連図

三軸粘性ダンパを設置した配管系の加振試験の概要

1. 試験の概要

配管系に三軸粘性ダンパを設置した場合の効果を検証するため、配管系の加振試験を実施し、配管応答の低減効果を確認した。試験の概要を表 2-2-1 に、加振台仕様を表 2-2-2 に示す。

表 2-2-1 試験の概要

実施期間	2014. 6. 9～2014. 6. 13
実施場所	奥村組技術研究所振動台

表 2-2-2 加振台仕様

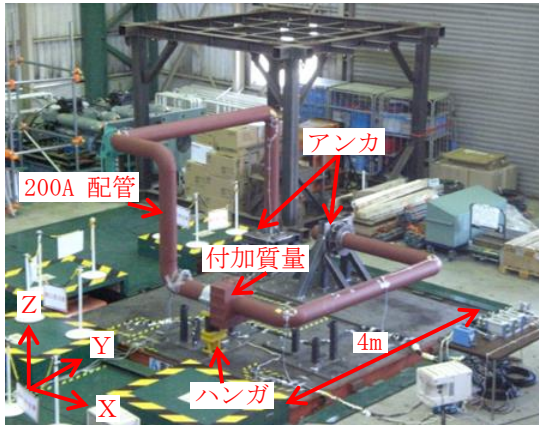
寸法	4m×4m	
最大積載量	60t	
運転周波数帯域	DC-70Hz	
最大加速度*	水平	3.0G
	鉛直	3.0G

注記*：定格積載量（20t）での最大加速度を示す。

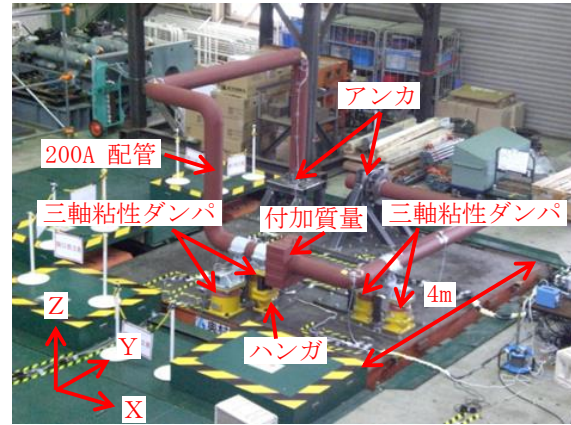
2. 加振試験条件

2.1 試験体

三軸粘性ダンパを設置した配管系（以下「ダンパ設置配管」という。）と三軸粘性ダンパを設置しない配管系（以下「ダンパ無配管」という。）の2種類の試験体を用いて加振試験を実施した。配管系試験体を図 2-2-1 に、配管系試験体構造図を図 2-2-2 に示す。いずれの配管系も配管部は 200A Sch40 の直管（STPT410）及びショートエルボ（STPT410）で構成している。また、配管系は終端 2 箇所アンカにより固定され、1 箇所スプリングハンガにより支持されており、弁を模擬した付加質量（372kg）を有する。ダンパ設置配管には、三軸粘性ダンパを配管系の 2 箇所に合計 4 台（2 箇所×2 台）設置した。



配管系試験体（ダンパ無配管）



配管系試験体（ダンパ設置配管）

図 2-2-1 配管系試験体

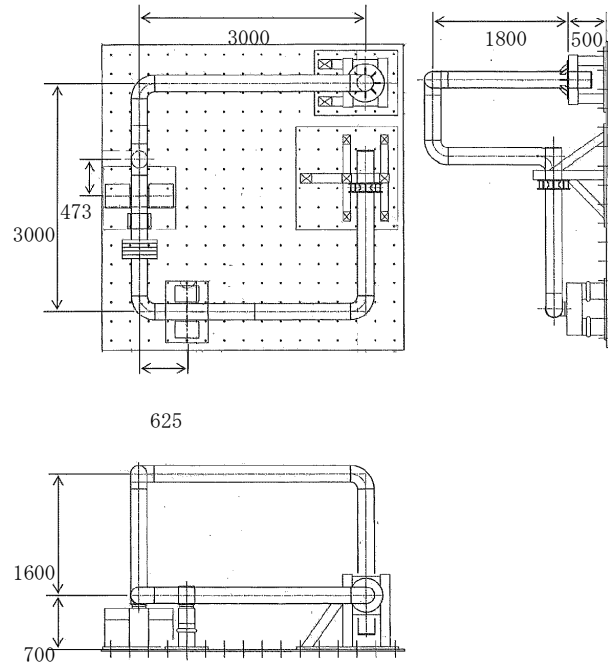
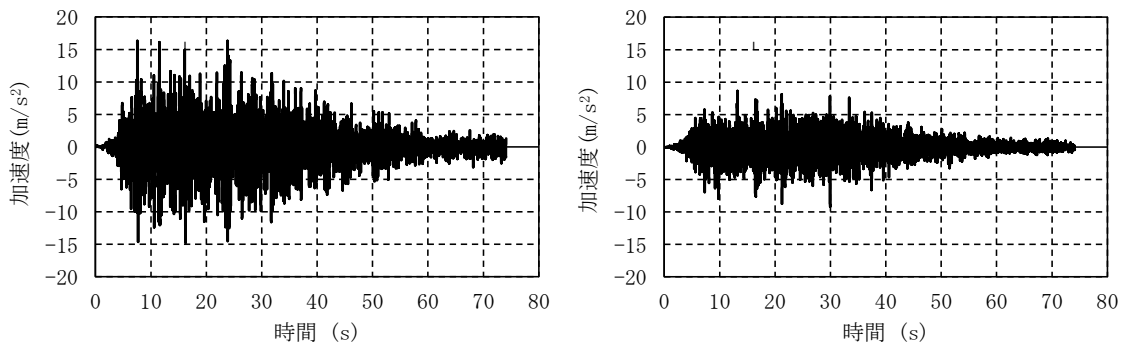


図 2-2-2 配管系試験体の構造図

2.2 入力地震波

地震波加振における入力地震波は、耐震バックチェック評価用地震動 $S_s - 1$ (600gal) に対して島根原子力発電所 2 号機原子炉建物の地震応答解析により算出した床応答波を参考に設定した地震波を用いた。入力地震波の加速度時刻歴波形を図 2-2-3 に、応答スペクトルを図 2-2-4 に示す。加振レベルは、配管系が弾性域に留まり、三軸粘性ダンパ設置位置の変位及び荷重が三軸粘性ダンパの許容範囲内となる最大加振レベルを目安として設定した。

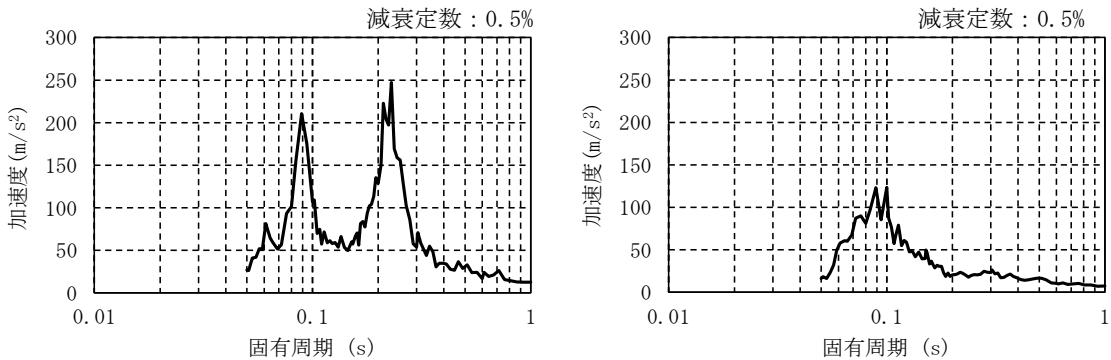
配管系試験体は Y 方向加振時の応答よりも X 方向加振時の応答が大きくなる傾向があるため、水平方向加振は X 方向を代表とし、地震波加振は X + Z 方向について実施した。各試験ケースにおける目標加速度レベルを表 2-2-3 に示す。



(a) 水平方向 (X 方向)

(b) 鉛直方向 (Z 方向)

図 2-2-3 入力地震波の加速度時刻歴波形



(a) X 方向

(b) Z 方向

図 2-2-4 入力地震波の応答スペクトル

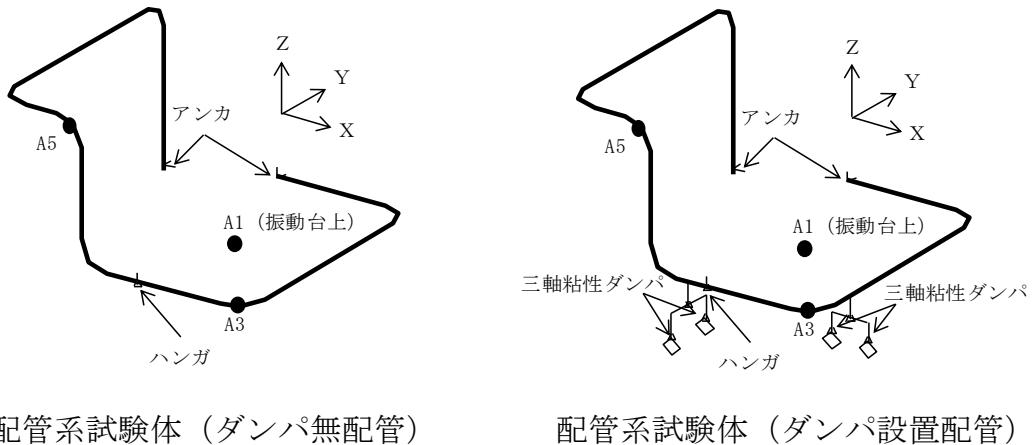
表 2-2-3 地震波加振の試験ケース

No.	試験体条件	目標加速度レベル(m/s ²)	
		X方向	Z方向
1	ダンパ無配管	1.5	0.84
2		2.5	1.41
3	ダンパ設置配管	2.5	1.41
4		10	5.6
5		18	10.1

3. 加振試験結果

3.1 正弦波掃引試験結果

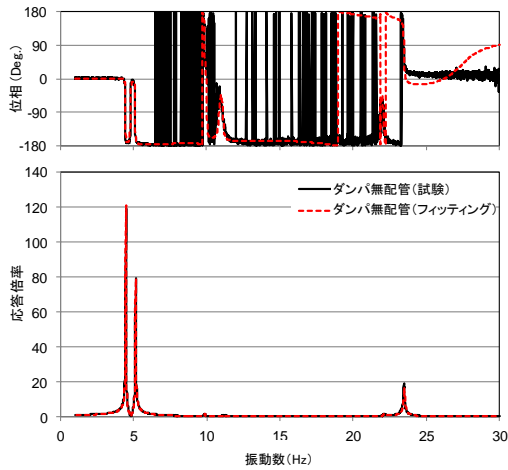
配管系試験体の概略図を図 2-2-5 に示す。また、ダンパ無配管における X 方向の正弦波掃引試験結果について、振動台上の加振方向の加速度に対する配管位置の加振方向の応答加速度の振動伝達特性を図 2-2-6 に、カーブフィットにより得られた配管系試験体の固有振動数とモード減衰比を表 2-2-4 に示す。同様にダンパ設置配管での振動伝達特性を図 2-4-7 に、配管系試験体の固有振動数とモード減衰比を表 2-2-5 に示す。表 2-2-5 において、固有振動数とモード減衰比の値は概略値で示す。ダンパ設置配管の場合、配管系の減衰が非常に大きくなり、カーブフィットに対して固有振動数、モード減衰比の感度が低くなるため、モード減衰比を一律 20% とした概略値で試験結果とカーブフィットが良好に一致する。これらの結果から、ダンパ無配管では最大で 120 倍程度の応答倍率を持つ複数のピークがあったが、ダンパ設置配管での応答倍率は最大で 4 倍程度まで低減されたことを確認した。また、ダンパ無配管は減衰比が非常に小さいが、ダンパ設置配管は減衰比が非常に大きいことが確認された。



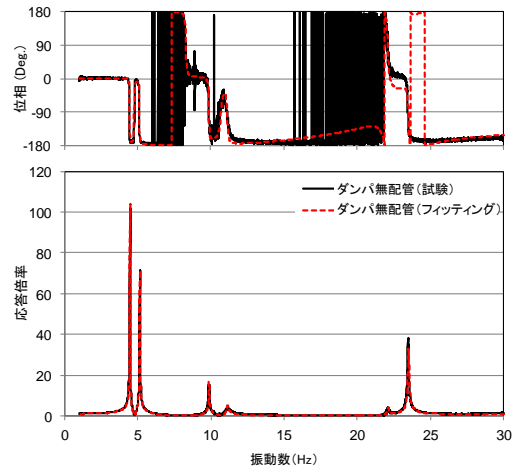
配管系試験体 (ダンパ無配管)

配管系試験体 (ダンパ設置配管)

図 2-2-5 配管系試験体の概略図

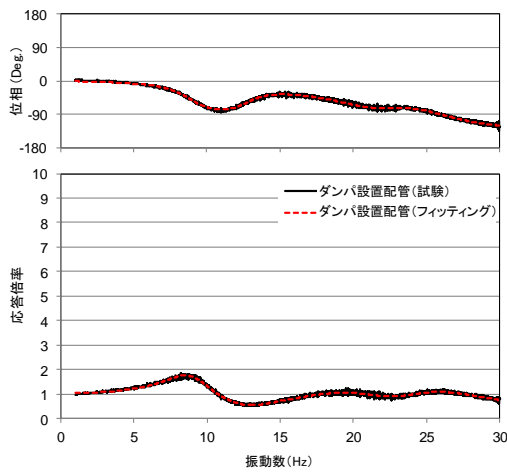


(1) A3X/A1X

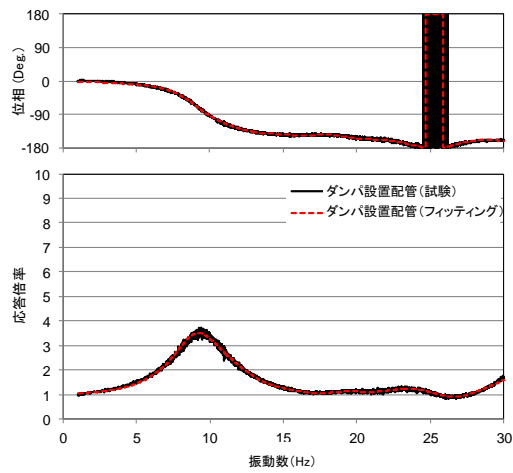


(2) A5X/A1X

図 2-2-6 振動伝達特性 (ダンパ無配管, X方向加振, 入力加速度, 0.5m/s^2)



(1) A3X/A1X



(2) A5X/A1X

図 2-2-7 振動伝達特性 (ダンパ設置配管, X方向加振, 入力加速度 1.0m/s^2)

表 2-2-4 固有振動数とモード減衰比 (ダンパ無配管)

No.	固有振動数 (Hz)	モード減衰比 (%)
1	4.5	0.22
2	5.1	0.26
3	9.9	0.26
4	11.1	0.55
5	22.1	0.30
6	23.5	0.15

表 2-2-5 固有振動数とモード減衰比 (ダンパ設置配管)

No.	固有振動数 (Hz)	モード減衰比 (%)
1	9	20
2	13	20
3	17	20
4	19	20
5	23	20
6	25	20

3.2 地震波加振の試験結果

入力地震波（X＋Z方向）により加振した場合のダンパ無配管とダンパ設置配管の配管応答加速度を図2-2-8及び図2-2-9に示す。図2-2-8では、ダンパ無配管の応答倍率（応答／入力）がA3及びA5の位置で10倍程度であるのに対し、ダンパ設置配管の場合の応答倍率はA3の位置で1倍程度、A5の位置で2倍程度であり、応答がそれぞれ1/10、1/5に低減されている。また、図2-2-9では、ダンパ無配管の応答倍率がA3及びA5の位置で10倍程度であるのに対し、ダンパ設置配管の場合の応答倍率はA3の位置で1倍程度、A5の位置で0.7倍程度であり、応答がそれぞれ1/10、7/100に低減されている。

地震波加振試験において応答が低減した要因には、ダンパ設置配管のモード減衰比が大きくなったことに加えて、ダンパ設置配管の固有振動数が剛側に変動することによる影響も含まれる。固有振動数の変動による影響について考察するため、X方向の応答が卓越する1次モードと、Z方向の応答が卓越する2次モードに着目し、ダンパ設置前後における床応答スペクトルの値を図2-2-10にて比較した。X方向入力では、1次固有周期における床応答スペクトルの値がダンパ設置前後で0.3倍程度となっており、Z方向入力では、2次固有周期における床応答スペクトルの値がダンパ設置前後で5倍程度となっている。これに対して、地震波加振試験におけるダンパ設置前後の応答倍率の変化はX方向で1/10、1/5であり、床応答スペクトルの低下率よりも大きく低減されている。また、Z方向では床応答スペクトルの値は大きくなっているにも関わらず応答倍率は1/10、7/100に低減されている。床応答スペクトルの変化よりも大きく応答倍率が低減されていることは、三軸粘性ダンパの設置による減衰の効果と考えられる。

以上より、正弦波掃引試験により確認された三軸粘性ダンパの応答低減効果は、地震波加振試験の結果においても確認された。

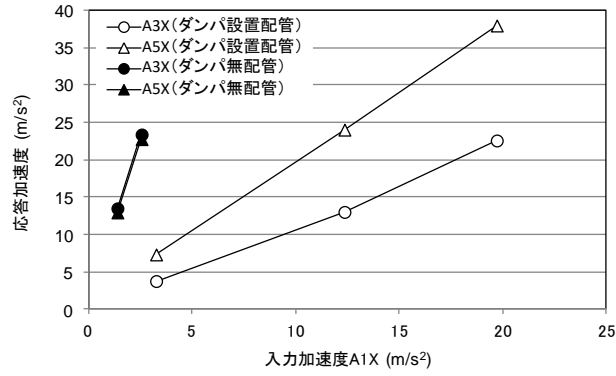


図 2-2-8 入力加速度 A1X に対する X 方向の応答加速度
(地震波 X + Z 方向加振)

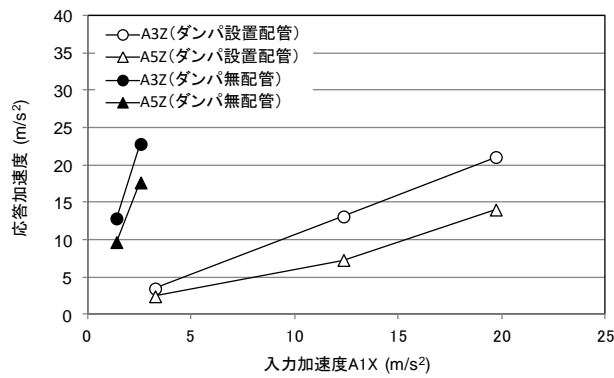
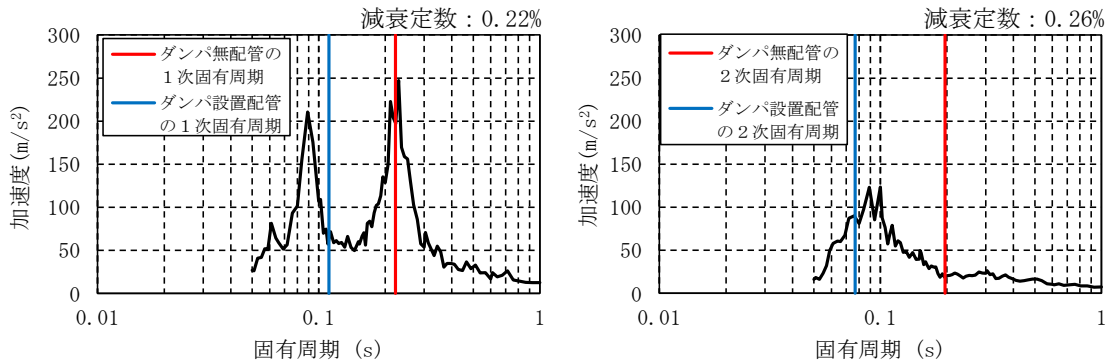


図 2-2-9 入力加速度 A1X に対する Z 方向の応答加速度
(地震波 X + Z 方向加振)



(a) X 方向入力

(b) Z 方向入力

図2-2-10 卓越モードの固有周期における応答スペクトルの比較

4. 三軸粘性ダンパを適用した配管系の加振試験結果による妥当性確認

三軸粘性ダンパを適用した配管系の地震応答解析法の妥当性を加振試験結果と解析結果の比較により確認する。

4.1 解析モデル

三軸粘性ダンパを適用した配管系の加振試験の試験体をモデル化して地震応答解析を実施した。解析モデルを図2-2-11に示す。なお、解析手法は「3.4 地震応答解析手法」のとおりであり、その詳細を添付資料3-6に示す。

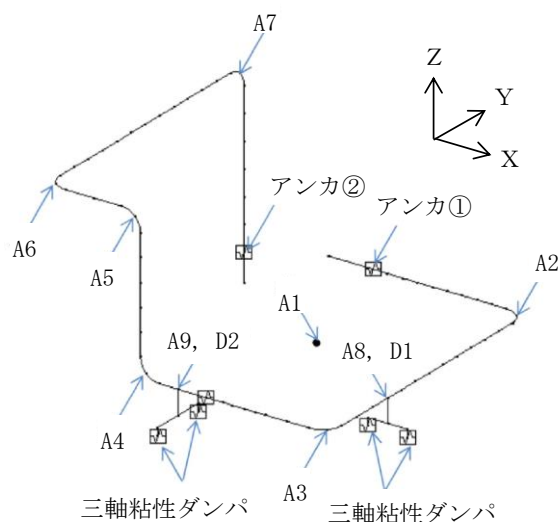


図2-2-11 解析モデル

4.2 解析ケース

「3.3 項(3)b. ばらつきの考慮」に基づき、三軸粘性ダンパの減衰性能のばらつきを考慮して設定した上限の減衰性能 (K_1, C_1)、下限の減衰性能 (K_5, C_5) 及びその間の3つの内挿点の計5ケースの減衰性能により地震応答解析を実施した。地震応答解析ケースを表2-2-6に示す。なお、地震応答解析の対象とする試験ケースは、X方向及びZ方向の最大加振ケース (X方向: 19.7m/s^2 , Z方向: 10.6m/s^2) とした。

表2-2-6 解析ケース

解析ケース	減衰性能	設定内容
1	K_1, C_1	性能上限
2	K_2, C_2	上限と下限より 均等に内挿
3	K_3, C_3	
4	K_4, C_4	
5	K_5, C_5	性能下限界

4.3 解析結果

三軸粘性ダンパの最大応答変位の試験結果と解析結果を図2-2-12に示す。X方向及びZ方向の最大応答加速度の試験結果と解析結果を図2-2-13に示す。三軸粘性ダンパの最大応答変位は、地震応答解析ケース1～5の最大値が試験結果を上回る保守的な評価となっている。また、配管最大応答加速度は、地震応答解析ケース1～5の最大値が試験結果に対して-10%程度以上の精度で一致している。

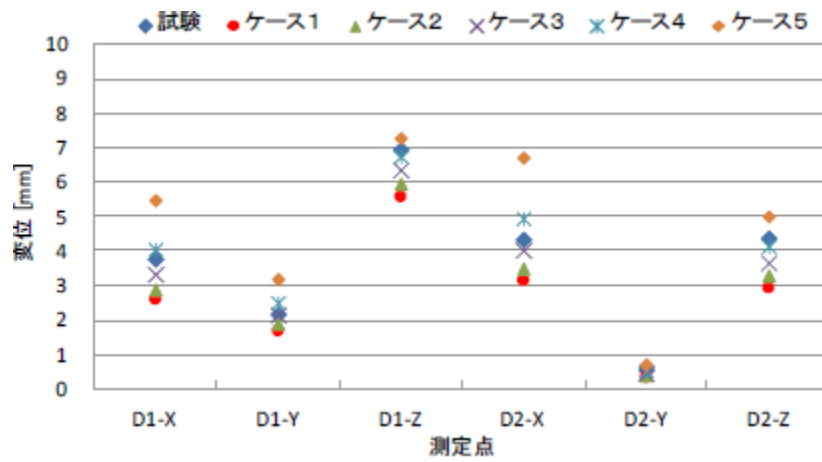
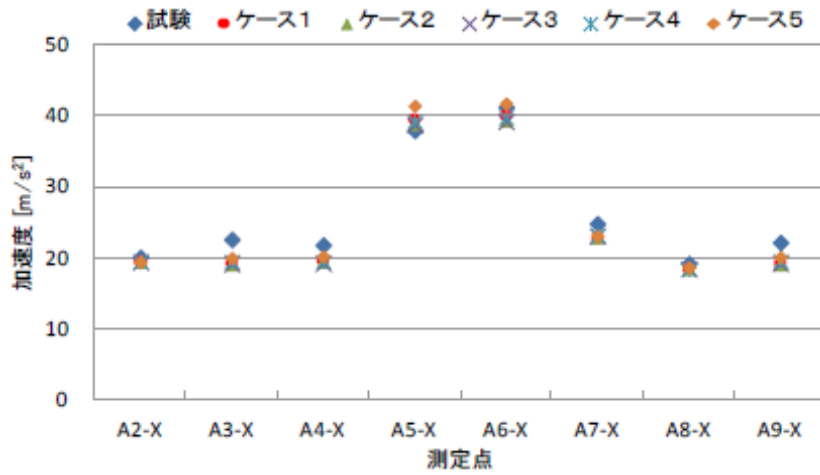
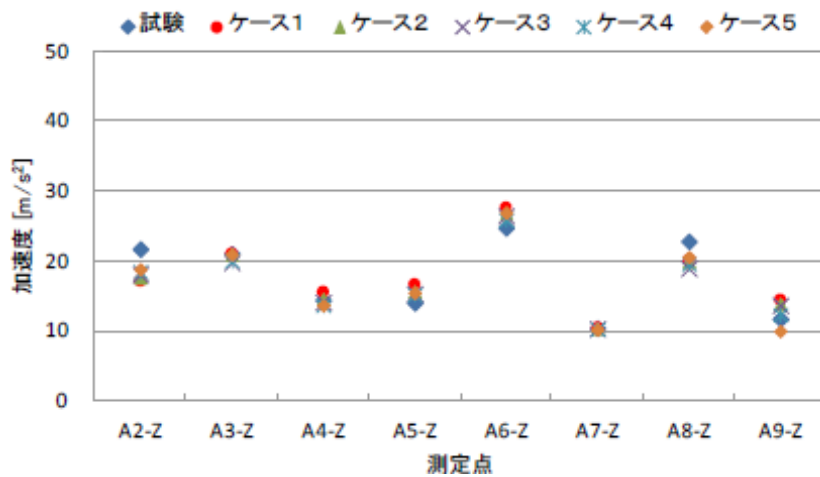


図2-2-12 三軸粘性ダンパ最大応答変位



(a) X方向



(b) Z方向

図2-2-13 最大応答加速度

4.4 解析結果の考察

上限の減衰性能 (K_1, C_1), 下限の減衰性能 (K_5, C_5) 及びその間に内挿した減衰性能で地震応答解析を行い, 最大応答変位及び最大応答加速度を適切に評価できることを確認した。最大応答変位については, 解析結果が試験結果を上回っており, 地震動による配管応力を保守的に評価することができる。

粘弾性を有する構造物の減衰性能の基本式及びモデル化

1. 減衰性能の基本式

三軸粘性ダンパに使用される粘性体は粘弾性を有しており、三軸粘性ダンパの減衰性能は粘弾性を表すパラメータにより表現される。一般に粘弾性体を式(1)に示す正弦波変位 $\gamma(t)$ で加振すると、図3-1-1に示すように位相が変位に対して δ ($0 \sim \pi/2$) 進んだ荷重 $\sigma(t)$ (式(2))が生じる。

$$\gamma(t) = \gamma_0 \cos \omega t \quad (1)$$

$$\sigma(t) = \sigma_0 \cos(\omega t + \delta) \quad (2)$$

γ_0 : 変位の振幅 ω : 変位の角振動数 σ_0 : 荷重の振幅
 δ : 位相角 (変位及び荷重の位相差)

荷重 $\sigma(t)$ は、式(3)に示すとおり変位成分に比例する弾性応答成分と速度成分に比例する粘性応答成分の和として表現することができる。

$$\begin{aligned} \sigma(t) &= \sigma_0 \cos(\omega t + \delta) \\ &= \sigma_0 \cos \delta \cdot \cos \omega t - \sigma_0 \sin \delta \cdot \sin \omega t \\ &= \frac{\sigma_0}{\gamma_0} \cos \delta \cdot \gamma_0 \cos \omega t - \frac{\sigma_0}{\gamma_0} \sin \delta \cdot \gamma_0 \sin \omega t \end{aligned} \quad (3)$$

式(3)の最大変位 γ_0 と最大荷重 σ_0 の比 σ_0/γ_0 を等価剛性 K と呼ぶ。等価剛性 K は粘弾性体の剛性を定量的に定義する一般的なパラメータである。

荷重の式(3)に対して一周分積分を行うと変位成分に比例する弾性応答成分の項は0、速度成分に比例する粘性応答成分の項は $\pi \sigma_0 \gamma_0 \sin \delta$ となり、粘性応答成分による散逸エネルギーが求められる。散逸エネルギーは図3-1-1のリサージュ曲線で囲まれる面積に相当する。このような減衰性能を定量的に定義するため、粘弾性体を散逸エネルギーの等しい理想的な粘性体である速度比例型ダッシュポットに置き換えた場合の比例係数を等価減衰係数 C と定義する。一周分の変位 $\gamma(t)$ を減衰係数 C のダッシュポットに入力した場合の散逸エネルギーが $C \gamma_0^2 \omega \pi$ であるので、散逸エネルギーに関して式(4)の関係となる。したがって、等価減衰係数 C は式(5)となる。

$$\pi \sigma_0 \gamma_0 \sin \delta = C \gamma_0^2 \omega \pi \quad (4)$$

$$C = \frac{\sigma_0}{\gamma_0 \omega} \sin \delta \quad (5)$$

三軸粘性ダンパの減衰性能は、これまで述べた粘弾性体の基本的な性質と同様に、等価剛性 K 及び等価減衰係数 C により表現することができる。

三軸粘性ダンパの等価剛性 K 及び等価減衰係数 C は振動数依存性を有しており、一般に振動数が高いほど等価剛性 K は大きく、等価減衰係数 C は小さくなる傾向がある。

γ_0 : 変位の振幅

ω : 変位の角振動数

σ_0 : 荷重の振幅

δ : 位相角 (変位及び荷重の位相差)

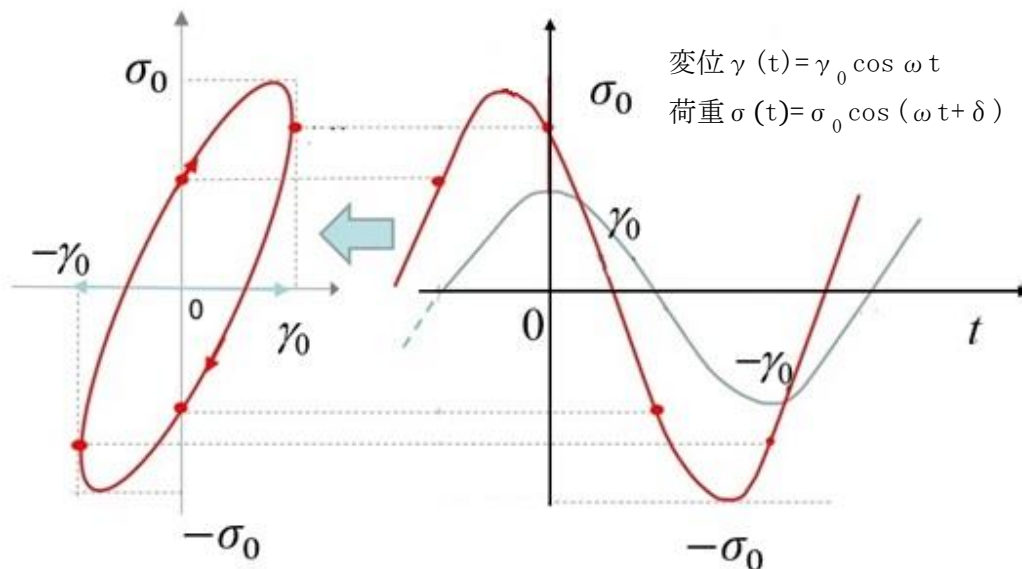


図 3-1-1 典型的な粘弾性体の荷重-変位特性

(左: 荷重-変位, 右: 荷重-時間)

2. 粘弾性体の解析モデル化

粘弾性体のモデル化には、Voigt モデル、Maxwell モデル及びそれらを混合したモデル等が一般的に用いられている。三軸粘性ダンパの減衰性能は振動数依存性を有するため、その振動数特性を表現できる Maxwell モデルを採用する。Maxwell モデルは、図 3-1-2 に示すばね剛性 ($=k$) とダッシュポットの減衰係数 ($=c$) を直列につないだものである。また、 k/c を Maxwell モデルの特性振動数 ($=\omega_0$) とする。Maxwell モデルに変位 $\gamma = \gamma_0 \cos \omega t$ を与えた場合の荷重 $\sigma(t)$ を以下に示す。

$$\sigma(t) = \gamma_0 K_e \cos \omega t + \gamma_0 K_v \sin \omega t \quad (6)$$

γ_0 : 変位の振幅 ω : 変位の角振動数,

K_e : 三軸粘性ダンパの貯蔵弾性率, K_v : 三軸粘性ダンパの損失弾性率

又は,

$$\sigma(t) = \gamma_0 K \cos(\omega t + \delta) \quad (7)$$

$$K : \text{三軸粘性ダンパの等価剛性} \left(= \sqrt{K_e^2 + K_v^2} \right) \quad \delta : \text{位相角} \left(= \tan^{-1}(K_v/K_e) \right)$$

Maxwell モデルの場合, K_e 及び K_v は以下の式で与えられる。

$$\begin{aligned} K_e &= k(\omega/\omega_0)^2 / (1 + (\omega/\omega_0)^2) \\ K_v &= k(\omega/\omega_0) / (1 + (\omega/\omega_0)^2) \end{aligned} \quad (8)$$

k : Maxwell モデルのばね剛性 ω_0 : Maxwell モデルの特性振動数

三軸粘性ダンパのモデル化にあたっては, その減衰性能の振動数特性をより精度良く表現するため, Maxwell モデルを2つ並列にした4パラメータ Maxwell モデル(図3-1-3 参照)を用いる(図3-1-4 参照)。4パラメータ Maxwell モデルでは, K_e 及び K_v は式(9)となり, 等価減衰係数は式(10)で与えられる。

$$\begin{aligned} K_e &= k_a(\omega/\omega_a)^2 / (1 + (\omega/\omega_a)^2) + k_b(\omega/\omega_b)^2 / (1 + (\omega/\omega_b)^2) \\ K_v &= k_a(\omega/\omega_a) / (1 + (\omega/\omega_a)^2) + k_b(\omega/\omega_b) / (1 + (\omega/\omega_b)^2) \end{aligned} \quad (9)$$

ここで, $\omega_a = k_a/c_a$, $\omega_b = k_b/c_b$

$$C = K \sin \delta / \omega \quad (10)$$

C : 三軸粘性ダンパの等価減衰係数

4パラメータ Maxwell モデルのパラメータは, 三軸粘性ダンパの性能試験結果に基づいて設定する。

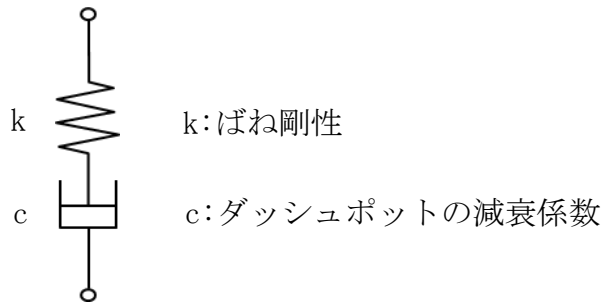


図 3-1-2 Maxwell モデル

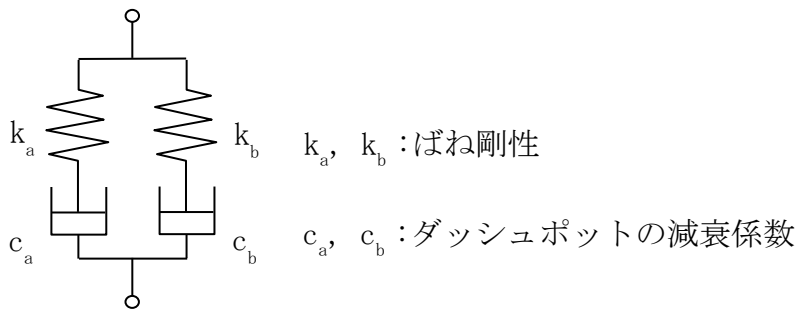
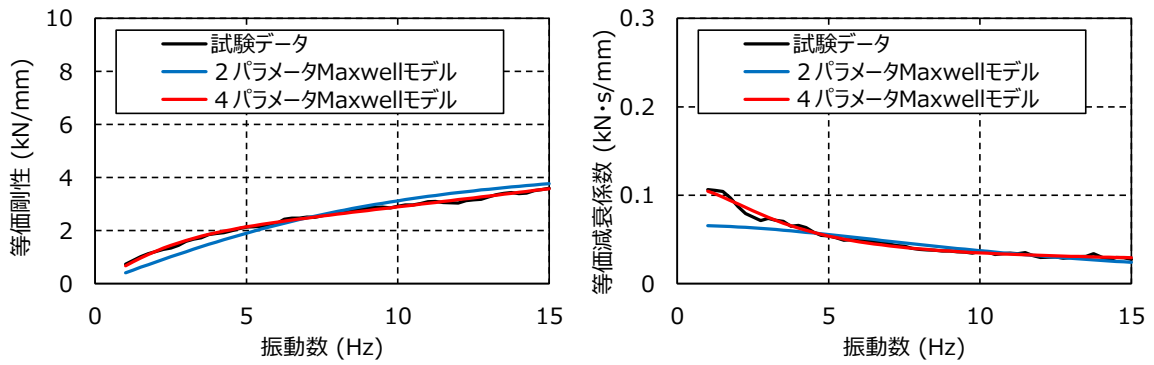


図 3-1-3 4パラメータ Maxwell モデル



(H-1) 等価剛性 (水平方向) (H-2) 等価減衰係数 (水平方向)

図 3-1-4 4パラメータ Maxwell モデルと Maxwell モデルの比較
(型式 325/159 の例)

制震装置の減衰性能に影響する検討項目の抽出

制震装置の減衰性能の設定における考慮すべき事項について「免震構造の審査手引きの提案（平成 26 年 1 月） 独立行政法人原子力安全基盤機構」（以下「免震構造の審査手引き」という。）を参照して表 3-2-1 に示す。各項目について三軸粘性ダンパの構造，使用条件，性能試験方法等を踏まえて，減衰性能への影響の検討要否を表 3-2-2 に示す。表 3-2-2 で検討要となった項目については，制震装置のモデル化にあたって減衰性能への影響を検討する。

表 3-2-1 免震構造の審査手引きの提案における検討項目 (1/4)

項目	内容	記載箇所
① 制震装置 に応じた減衰性能の設定	制震装置に応じた減衰性能の設定方法について検討する。	<p>【本文】 5.4.8(機器免震に係る考慮事項)(2)免震装置の構造に起因する応答特性の考慮 p.31</p> <p>【解説】 5.4.8(機器免震に係る考慮事項)(2)免震装置の構造に起因する応答特性の考慮 p.38</p> <p>【審査等のポイント】 5.4.8(機器免震に係る考慮事項)(2)免震装置の構造に起因する応答特性の考慮 p.42</p>
② 地震入力方向	地震入力方向による減衰性能の変化について検討する。	<p>【本文】 5.4.8(機器免震に係る考慮事項)(1)地震入力方向による免震特性変化の考慮 p.31</p> <p>【解説】 5.4.8(機器免震に係る考慮事項)(1)地震入力方向による免震特性変化の考慮 p.38</p> <p>【審査等のポイント】 5.4.8(機器免震に係る考慮事項)(1)地震入力方向による免震特性変化の考慮 p.42</p>

表 3-2-1 免震構造の審査手引きの提案における検討項目 (2/4)

項目	内容	記載箇所
③使用環境	使用環境を踏まえて減衰性能を設定する。	【本文】 5.4.6 p.30 【解説】 5.4.6 p.33
④温度	減衰性能の変化要因として温度による影響を検討する。	【本文】 5.4.8(建屋免震・機器免震共通の考慮事項)(3)免震装置の性能の変化に係る考慮○免震要素特性のばらつきの考慮 p.31 【解説】 5.4.8(建屋免震・機器免震共通の考慮事項)(3)免震装置の性能の変化に係る考慮○地震時免震機能の変化の考慮 p.36 【審査等のポイント】 5.4.8(建屋免震・機器免震共通の考慮事項)(3)免震装置の性能の変化に係る考慮○地震時免震機能の変化の考慮 p.41
⑤速度	減衰性能の変化要因として速度による影響を検討する。	【本文】 5.4.8(建屋免震・機器免震共通の考慮事項)(3)免震装置の性能の変化に係る考慮○地震時免震機能の変化の考慮 p.31
⑥振動数	減衰性能の変化要因として振動数による影響を検討する。	【解説】 5.4.8(建屋免震・機器免震共通の考慮事項)(3)免震装置の性能の変化に係る考慮○地震時免震機能の変化の考慮 p.36
⑦連続加振	作動中の減衰性能の変化について検討する。	【審査等のポイント】 5.4.8(建屋免震・機器免震共通の考慮事項)(3)免震装置の性能の変化に係る考慮○地震時免震機能の変化の考慮 p.41

表 3-2-1 免震構造の審査手引きの提案における検討項目 (3/4)

項目	内容	記載箇所
⑧ 経年劣化	経年劣化による減衰性能のばらつきについて検討する。	<p>【本文】 5.4.8(建屋免震・機器免震共通の考慮事項)(3)免震装置の性能の変化に係る考慮○免震要素特性のばらつきの考慮 p.31</p> <p>【解説】 5.4.8(建屋免震・機器免震共通の考慮事項)(3)免震装置の性能の変化に係る考慮○免震要素特性のばらつきの考慮 p.35</p> <p>【審査等のポイント】 5.4.8(建屋免震・機器免震共通の考慮事項)(3)免震装置の性能の変化に係る考慮○免震要素特性のばらつきの考慮 p.41</p> <p>【参考資料-4】</p>
⑨ 製造公差	製造公差による減衰性能のばらつきについて検討する。	<p>【本文】 5.4.8(建屋免震・機器免震共通の考慮事項)(3)免震装置の性能の変化に係る考慮○免震要素特性のばらつきの考慮 p.31</p> <p>【解説】 5.4.8(建屋免震・機器免震共通の考慮事項)(3)免震装置の性能の変化に係る考慮○免震要素特性のばらつきの考慮 p.35</p> <p>【審査等のポイント】 5.4.8(建屋免震・機器免震共通の考慮事項)(3)免震装置の性能の変化に係る考慮○免震要素特性のばらつきの考慮 p.41</p>
⑩ 据付公差	据付公差による減衰性能のばらつきについて検討する。	<p>【解説】 5.4.8(建屋免震・機器免震共通の考慮事項)(3)免震装置の性能の変化に係る考慮○免震要素特性のばらつきの考慮 p.35</p> <p>【審査等のポイント】 5.4.8(建屋免震・機器免震共通の考慮事項)(3)免震装置の性能の変化に係る考慮○免震要素特性のばらつきの考慮 p.41</p>

表 3-2-1 免震構造の審査手引きの提案における検討項目 (4/4)

項目	内容	記載箇所
⑪ 制震装置の構造上の動作制限	制震装置の構造上，動作に影響を与える機構等があれば，その影響を検討する。	【解説】5.4.8(建屋免震・機器免震共通の考慮事項)(3)免震装置の性能の変化に係る考慮○免震装置変位防止用ストッパー，台座，擁壁，塵埃防止カバー，結露に対する免震機能の変化の考慮 p.36
⑫ 地震以外の外的事象	地震以外の外的事象による減衰性能への影響を検討する。	<p>【本文】5.4.8(建屋免震・機器免震共通の考慮事項)(3)免震装置の性能の変化に係る考慮○地震以外の津波や風等外的事象に対する免震機能の変化の考慮 p.31</p> <p>【解説】5.4.8(建屋免震・機器免震共通の考慮事項)(3)免震装置の性能の変化に係る考慮○地震以外の津波や風等外的事象に対する免震機能の変化の考慮 p.36</p> <p>【審査等のポイント】5.4.8(建屋免震・機器免震共通の考慮事項)(3)免震装置の性能の変化に係る考慮○地震以外の津波や風等外的事象に対する免震機能の変化の考慮 p.42</p>

注：項目及び内容は、「免震構造の審査手引き」のうち，制震装置の減衰性能の設定に関する記載を要約した内容について示す。また，記載箇所は，「免震構造の審査手引き」のうち，項目及び内容に関する記載が示されている箇所を示す。

表 3-2-2 減衰性能への影響の検討項目の抽出

項目*1		三軸粘性ダンパ	
		要否	理由
①制震装置に応じた減衰性能の設定		－	三軸粘性ダンパの性能試験結果を踏まえて減衰性能を適切にモデル化する。
②地震入力方向		○	三軸粘性ダンパは、水平方向は回転対称な構造であり方向による減衰性能の違いはないが、水平方向及び鉛直方向では動作機構が異なるためそれぞれ性能試験を実施して減衰性能を取得する。また、三軸に動作するものであることから、水平・鉛直同時加振による減衰性能への影響を確認する。
③ 使用 環境 条件	④温度	○	屋内の使用環境温度による減衰性能への影響を確認する。
	放射線	○	放射線による減衰性能への影響を確認する。
	⑧経年劣化	－	化学的に安定な粘性体を使用しており、減衰性能の劣化は生じない。三軸粘性ダンパは10年以上の継続使用の実績がある。また、高温曝露試験により経年劣化の影響による減衰性能の変化はないことを確認している（詳細は添付資料6-3参照）。
⑥振動数		－	三軸粘性ダンパの減衰性能は振動数依存性を有することから、この振動数特性を適切にモデル化する。
⑤速度		○	速度（振幅）*2による減衰性能への影響を確認する。
⑦連続加振		○	連続加振による減衰性能への影響を確認する。
ばら つき	⑨製造公差	○	製造公差による減衰性能のばらつきが生じる。
	⑩据付公差	○	据付公差による減衰性能のばらつきが生じる。
⑪制震装置の構造上の動作制限		－	変位防止用ストッパー、台座、擁壁等の制震装置の動作を制限するものは設置しておらず、塵埃防止カバーにあたる保護スリーブは柔軟性を有しておりピストンの動作に影響するものではないため、減衰性能に影響はない。また、屋内で使用し、使用環境において結露は生じない。
⑫地震以外の外的事象		－	屋内で使用するため、津波、風、積雪等の外的事象による減衰性能への影響はない。

注記*1：本表の各項目番号は、表3-2-1内の各項目番号に対応している。

*2：三軸粘性ダンパの減衰性能は振動数に応じて表現しており、ある振動数において加振速度を変更することは加振振幅を変更することと等しいため、加振振幅を変更することにより減衰性能の速度依存性を把握する。

三軸粘性ダンパの特性試験

三軸粘性ダンパの減衰性能に影響する特性を把握するために実施した特性試験の結果を以下に示す。なお、三軸粘性ダンパは型式によらず使用する粘性体が同一であり、振動特性（等価剛性，等価減衰）に関わる構造は同じであることから，特性試験結果については，型式 325/159 及び型式 219/108（実機適用なし）の試験結果で代表して示す。

<試験項目>

1. 水平・鉛直同時加振試験（水平・鉛直同時加振）
2. 放射線照射試験（放射線）
3. 粘性体温度を変えた性能試験（温度）
4. 加振振幅を変えた性能試験（振幅）
5. 連続加振試験（連続加振）

1. 水平・鉛直同時加振試験

三軸粘性ダンパの性能試験は、水平、鉛直の各方向で1方向加振を行う方法により実施する。一方、地震時に三軸粘性ダンパは3方向同時加振されることから、水平方向加振と鉛直方向加振で相互に減衰性能に影響を及ぼす場合は、性能試験で取得した減衰性能と地震時の減衰性能に差が生じる可能性がある。そのため、水平方向及び鉛直方向の同時加振と1方向加振との減衰性能の比較を行った。水平・鉛直同時加振試験の概略図を図3-3-1に示す。試験条件を表3-3-1に、変位の時刻歴波形を図3-3-2に、試験結果を図3-3-3に示す。図3-3-3のとおり、水平方向及び鉛直方向の同時加振と1方向加振では減衰性能に差がないことを確認した。

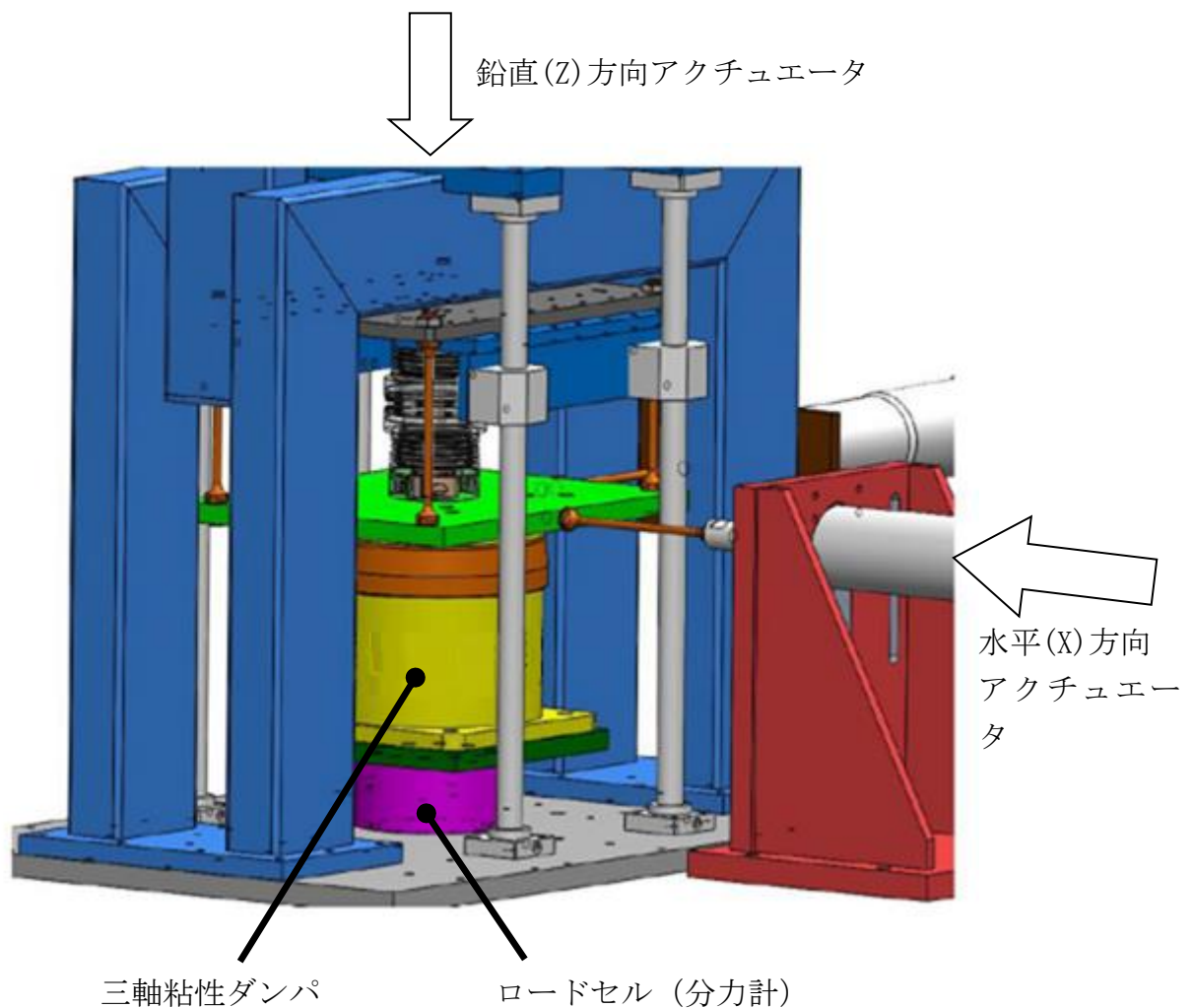


図3-3-1 水平・鉛直同時加振試験

表 3-3-1 水平・鉛直同時加振試験条件

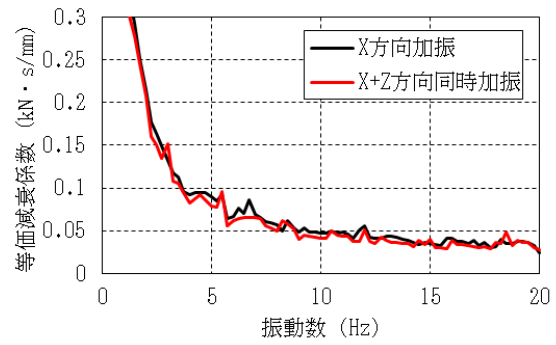
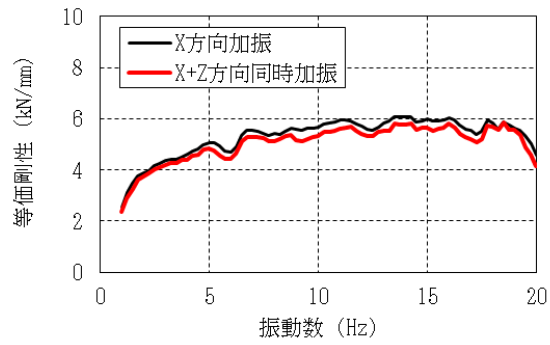
No.	型式	温度 (°C)	加振 方向	入力波形	振幅 (mm)	継続時間 (s)
1	型式 325/159	20	水平	ランダム波	3	32
2			鉛直			
3			水平 ・ 鉛直			



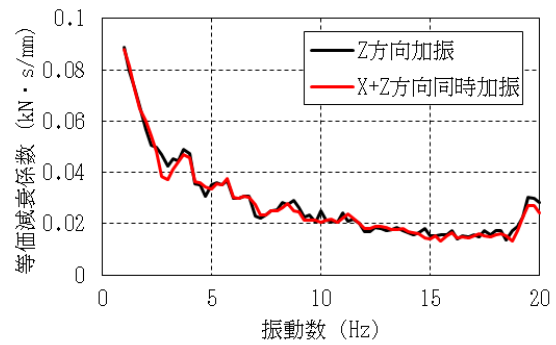
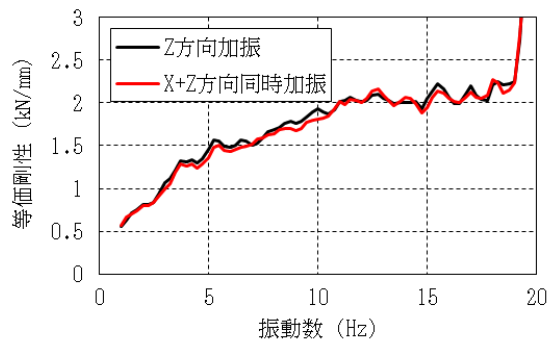
(H) 水平方向

(V) 鉛直方向

図 3-3-2 変位の時刻歴波形



(H-1) 等価剛性 (水平単独と比較) (H-2) 等価減衰係数 (水平単独と比較)



(V-1) 等価剛性 (鉛直単独と比較) (V-2) 等価減衰係数 (鉛直単独と比較)

図 3-3-3 水平・鉛直同時加振による減衰性能への影響確認結果

2. 放射線照射試験

放射線による三軸粘性ダンパの減衰性能への影響を確認するため、 γ 線照射量を変えた表3-3-2に示す試験条件にて三軸粘性ダンパの性能試験を実施した。 γ 線照射量は、島根2号機の一般管理区域における40年間積算放射線量0.004kGyに余裕を見た1kGyとした。

結果を図3-3-4に示す。図3-3-4のとおり、1kGyの照射では減衰性能は変化しておらず、影響がないことが確認された。

表3-3-2 放射線照射試験条件

No.	型式	温度 (°C)	加振方向	入力波形	振幅 (mm)	継続時間 (s)	γ 線照射量
1	219/108	20	水平	ランダム波	1	32	照射なし
2							1kGy
3			鉛直				照射なし
4							1kGy

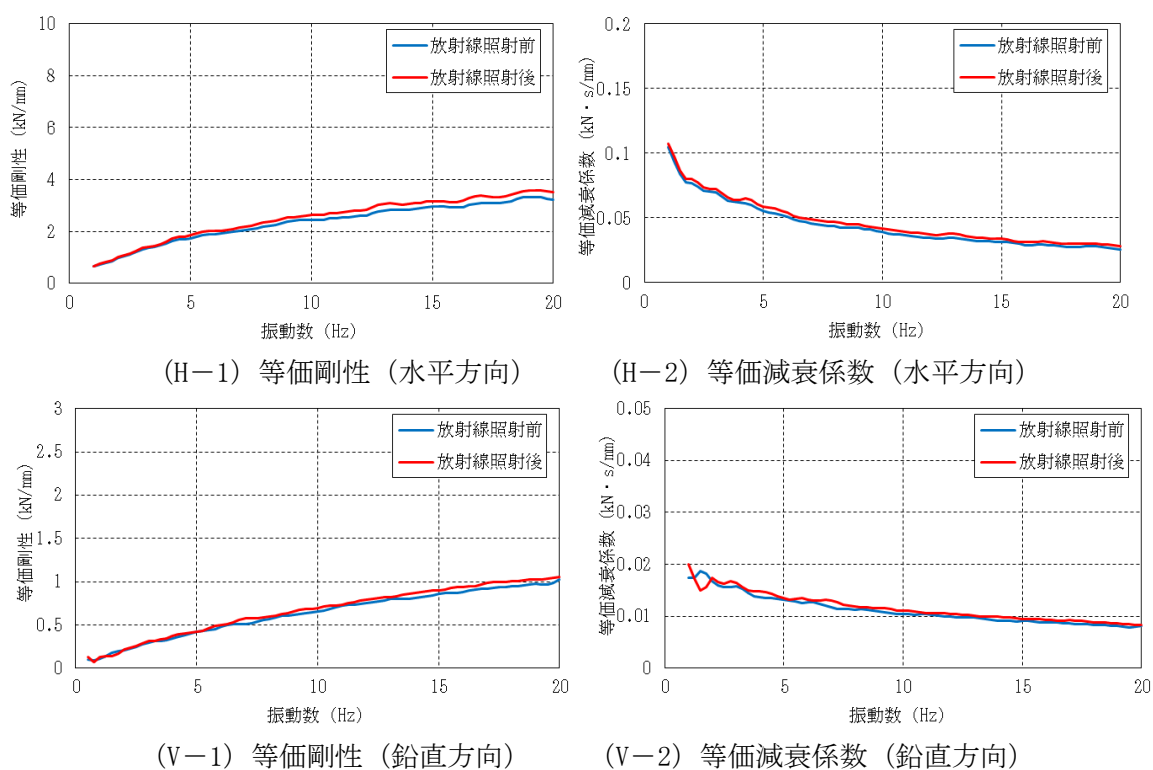


図3-3-4 放射線による減衰性能への影響確認結果

3. 粘性体温度を変えた性能試験

粘性体温度による三軸粘性ダンパの減衰性能への影響を確認するため、粘性体温度を変えた表 3-3-3 の試験条件にて三軸粘性ダンパの性能試験を実施した。評価温度はプラントの冷間温度から、設計で考慮している高温状態の温度（主蒸気配管室 60℃）を保守的にカバーできるように 20℃、50℃、100℃とした。

試験結果を図 3-3-5 に示す。図 3-3-5 のとおり、粘性体温度が高くなるほど三軸粘性ダンパの減衰性能が低下することが確認された。これは、粘性体の温度が上昇するほどその粘度が低下することが要因と考えられる。

表 3-3-3 粘性体温度を変えた性能試験条件

No.	型式	温度 (°C)	加振方向	入力波形	振幅 (mm)	継続時間 (s)
1	325/159	20	水平	ランダム波	6	32
2		50				
3		100				
4		20	鉛直			
5		50				
6		100				

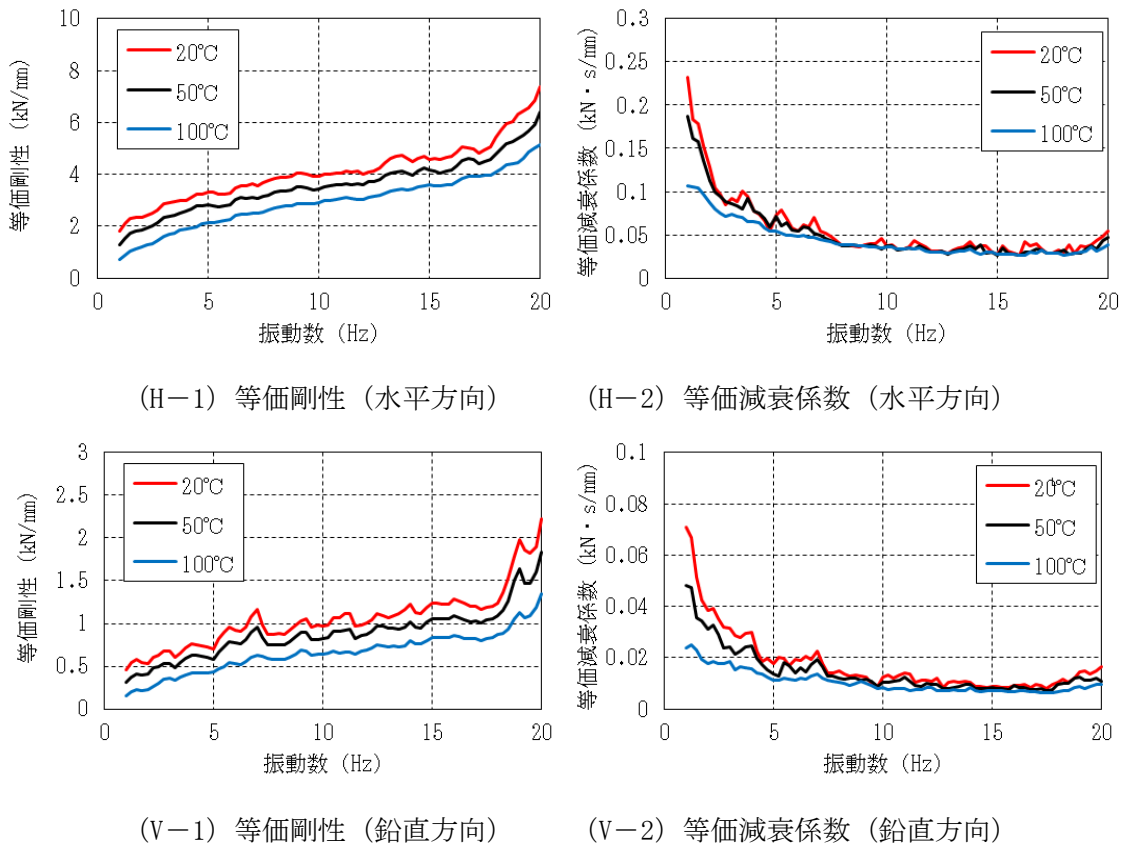


図 3-3-5 粘性体温度による減衰性能への影響確認結果

4. 加振振幅を変えた性能試験

振幅の大きさによる三軸粘性ダンパの減衰性能への影響を確認するため、振幅を変えた表 3-3-4 の試験条件にて三軸粘性ダンパの性能試験を実施した。

試験結果を図 3-3-6 に示す。図 3-3-6 のとおり、振幅が大きいほど三軸粘性ダンパの減衰性能が低下することが確認された。これは、三軸粘性ダンパで消費されたエネルギーにより粘性体温度が上昇したこと、粘性体が内部で流動し、ダンパピストンとの接触状態が変化したことが要因と考えられる。

表 3-3-4 加振振幅を変えた性能試験条件

No.	型式	温度 (°C)	加振方向	入力波形	振幅 (mm)	継続時間 (s)
1	325/159	20	水平	ランダム波	3	32
2			鉛直			
3			水平		6	
4			鉛直			

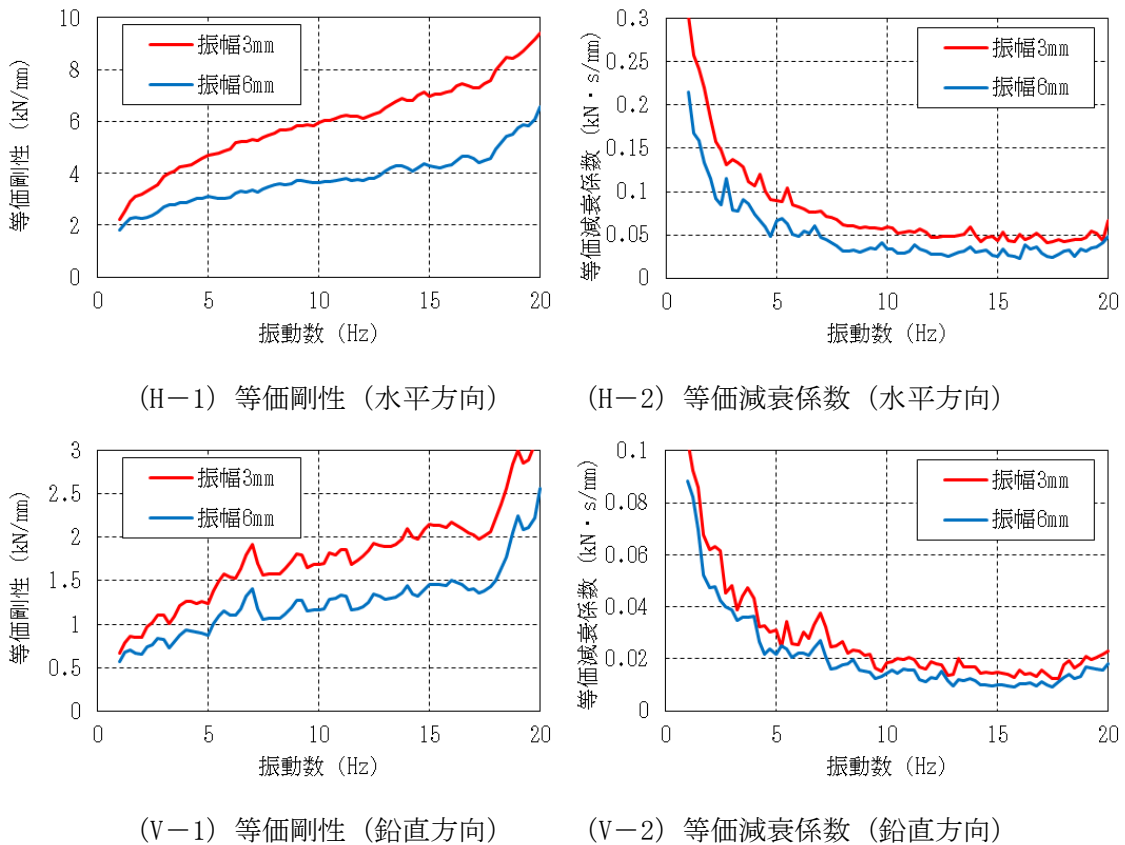


図 3-3-6 振幅による減衰性能への影響確認結果

5. 連続加振試験

連続加振による三軸粘性ダンパの減衰性能への影響を確認するため、表 3-3-5 に示す試験条件により、連続加振試験を実施した。

試験結果を図 3-3-7 に示す。図 3-3-7 のとおり、三軸粘性ダンパの累積消費エネルギー W が増大すると単調に減衰性能が低下することが確認された。これは、三軸粘性ダンパで消費されたエネルギーにより粘性体温度が上昇したこと、粘性体が内部で流動し、ダンパピストンとの接触状態が変化したことが要因と考えられる。累積消費エネルギー W とは加振により三軸粘性ダンパで消費されるエネルギーの総和をいい、以下の式 (1) で表される。

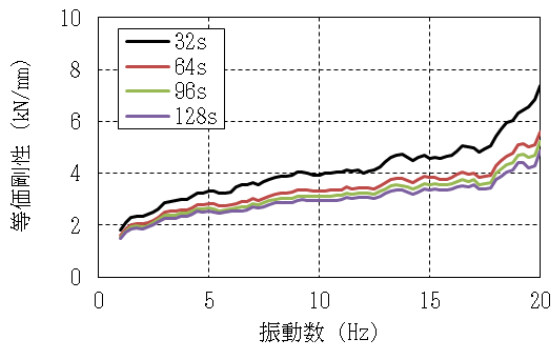
$$W = \int_0^T F(t) \frac{dx(t)}{dt} dt \quad (1)$$

ここで、

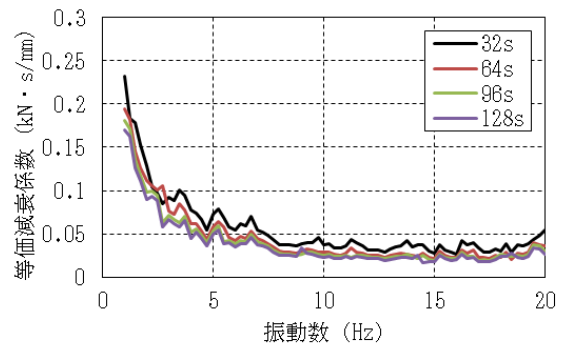
$F(t)$: 三軸粘性ダンパ反力, $x(t)$: 三軸粘性ダンパ変位, T : 加振継続時間

表 3-3-5 連続加振試験条件

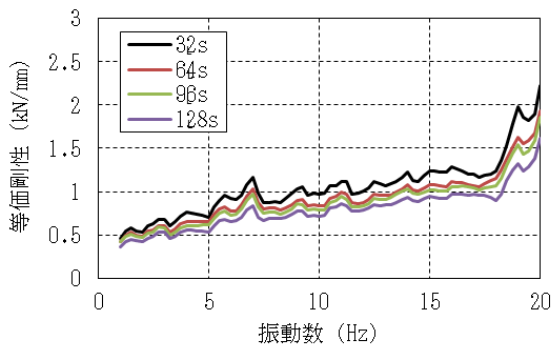
No.	型式	温度 (°C)	加振 方向	入力波形	振幅 (mm)	継続時間 (s)
1	325/159	20	水平	ランダム波	6	32
2			鉛直			
3			水平			64
4			鉛直			
5			水平			96
6			鉛直			
7			水平			128
8			鉛直			



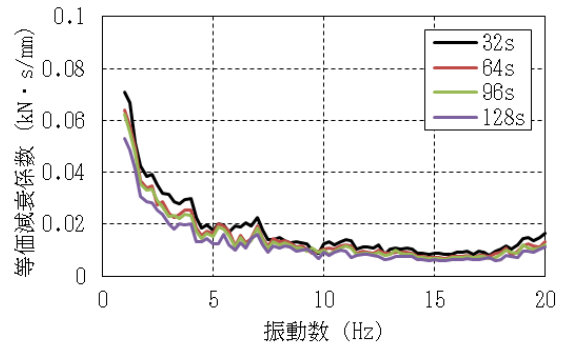
(H-1) 等価剛性 (水平方向)



(H-2) 等価減衰係数 (水平方向)



(V-1) 等価剛性 (鉛直方向)



(V-2) 等価減衰係数 (鉛直方向)

図 3-3-7 連続加振による減衰性能への影響確認結果

三軸粘性ダンパの据付公差による減衰性能への影響

三軸粘性ダンパは、配管系の熱移動も考慮した上で、運転時にハウジング中心付近の標準位置にピストンが位置するように据付を行うことから、標準位置からのピストンの初期変位は小さいと考えられるが、その影響の程度を把握するため、三軸粘性ダンパのピストンに標準位置からの初期変位を与えた場合の減衰性能への影響を試験により確認した。なお、ピストン及びハウジングの角度については、水準器を用いて水平を保って据付を行うこと及び配管の熱移動により生じる配管のねじれは微小であることから、減衰性能への影響は軽微と判断する。

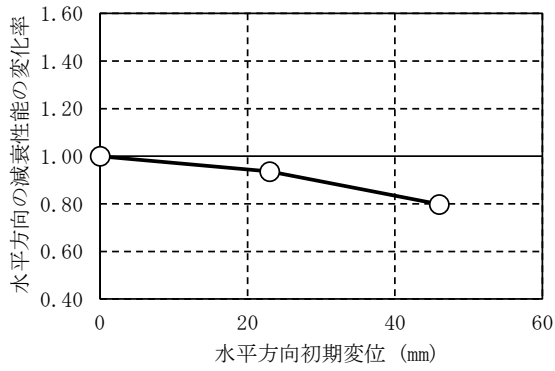
三軸粘性ダンパの初期変位による減衰性能への影響確認試験の試験ケースを表 3-4-1 に、試験結果を図 3-4-1 及び図 3-4-2 に示す。三軸粘性ダンパの減衰性能は振動数依存性を有するため、減衰性能の変化率は 5~15Hz の平均値で示す。また、等価剛性及び等価減衰係数のうち、より大きい変化率を減衰性能の変化率とする。

試験により把握した初期変位による減衰性能への影響を表 3-4-2 に示す。試験結果に基づき、初期変位による減衰性能への影響が±20%以内となるようにピストン位置の基準を定めて管理する。なお、本資料では、型式 325/159 の三軸粘性ダンパを代表として試験結果を示したが、型式 630/426 の三軸粘性ダンパについても初期変位による減衰性能への影響について同様の管理を行う。

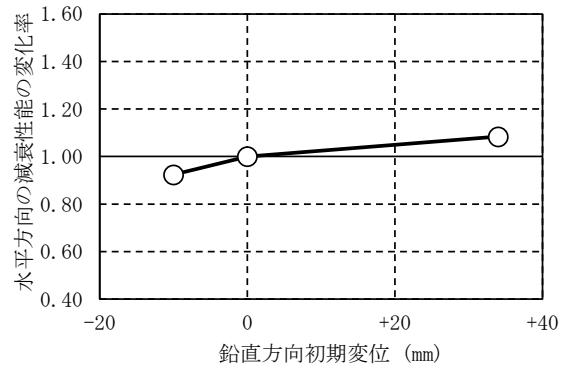
表 3-4-1 初期変位の影響確認試験条件

No.	型式	温度 (°C)	加振 方向	入力波形	振幅 (mm)	継続 時間 (s)	初期変位 (mm)	
							水平	鉛直*
1	325/159	20	水平	ランダム波	6	32	0	0
2			鉛直					
3			水平				23	0
4			鉛直					
5			水平				46	0
6			鉛直					
7			水平				0	34
8			鉛直					
9			水平				0	-10
10			鉛直					

注記*：鉛直方向の初期変位についてはピストンを引き抜く方向をマイナスとする。

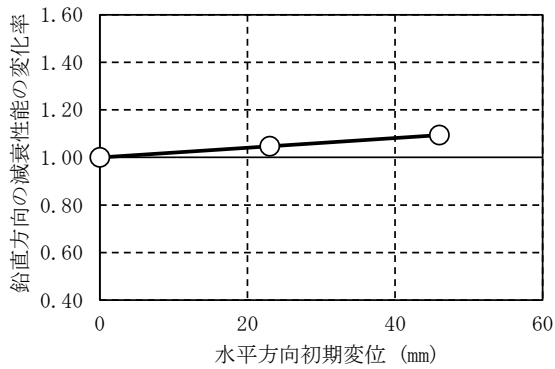


(H) 水平方向初期変位

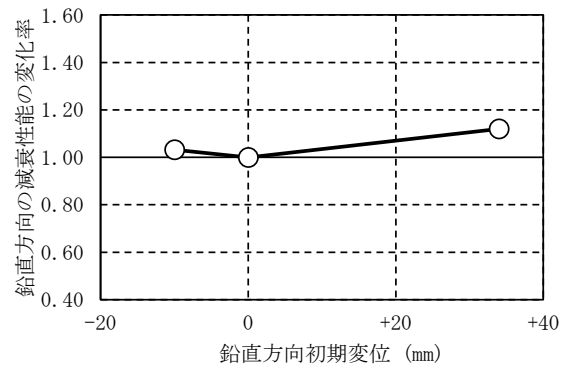


(V) 鉛直方向初期変位

図 3-4-1 水平方向の減衰性能の変化



(H) 水平方向初期変位



(V) 鉛直方向初期変位

図 3-4-2 鉛直方向の減衰性能の変化

表 3-4-2 三軸粘性ダンパの初期変位による減衰性能への影響

	減衰性能への影響	
	水平方向初期変位	鉛直方向初期変位
水平方向の減衰性能	初期変位が大きいほど直線的に減衰性能が低下する（最大で-20%となる）。	上向きの初期変位に対しては減衰性能が低下する（-10mmに対して-10%未満）。 下向きの初期変位に対しては減衰性能が高くなる（最大で+10%未満）。
鉛直方向の減衰性能	初期変位が大きいほど直線的に減衰性能が大きくなる（最大で+10%未満）。	上向きの初期変位に対しては減衰性能の変化は軽微である。 下向きの初期変位に対しては減衰性能が高くなる（最大で+13%未満）。

三軸粘性ダンパの性能試験方法

三軸粘性ダンパの減衰性能は等価剛性 K 及び等価減衰係数 C によって表現し、減衰性能の振動数特性を精度良く表現できる 4 パラメータ Maxwell モデルによりモデル化する。ここでは、三軸粘性ダンパの等価剛性 K 及び等価減衰係数 C を取得し、4 パラメータ Maxwell モデルのパラメータを決定するための性能試験方法について示す。

1. 性能試験方法

三軸粘性ダンパの等価剛性 K 及び等価減衰係数 C を取得し、4 パラメータ Maxwell モデルの 4 つのパラメータを決定するための性能試験は、以下の流れで実施する。

最初に粘性体が均一に所定の温度となるように三軸粘性ダンパを恒温槽等で加温する。次に、試験機を用いて三軸粘性ダンパを所定の変位波形で加振し、加振中の変位及び荷重を測定する。なお、減衰性能は水平方向加振と鉛直方向加振で異なることから、水平方向及び鉛直方向のそれぞれで加振を行い、データを取得する。加振中に測定した変位及び荷重の時刻歴波形からフーリエ変換によりフーリエスペクトルを求めて、伝達関数を算出し、三軸粘性ダンパの等価剛性 K 及び等価減衰係数 C を得る。最後に、性能試験により取得した三軸粘性ダンパの等価剛性 K 及び等価減衰係数 C に基づき、4 パラメータ Maxwell モデルの 4 つのパラメータを決定する。性能試験のフローを図 3-5-1 に示す。

三軸粘性ダンパの性能試験においては、温度、加振振幅及び連続加振による減衰性能の変動を考慮して、高側ダンパ試験性能 ($K_{\text{High}}, C_{\text{High}}$) と低側ダンパ試験性能 ($K_{\text{Low}}, C_{\text{Low}}$) を取得する。高側ダンパ試験性能 ($K_{\text{High}}, C_{\text{High}}$) は実際の使用条件よりも高い減衰性能となる試験条件で、低側ダンパ試験性能 ($K_{\text{Low}}, C_{\text{Low}}$) は実際の使用条件よりも低い減衰性能となる試験条件で取得する性能である。試験条件の設定例を表 3-5-1 に示す。

表 3-5-1 三軸粘性ダンパの性能試験条件（水平方向）の例

項目	試験条件設定の考 え方	型式 325/159			型式 630/426		
		温度 (°C)	加振振幅 (mm)	累積消費 エネルギー (kJ)	温度 (°C)	加振振幅 (mm)	累積消費 エネルギー (kJ)
高側ダンパ試験性能 (K_{High} , C_{High})	実機使用条件より減衰性能を高く取得するため、室温、微小加振振幅、微小累積消費エネルギーとする。						
実機使用条件	—						
低側ダンパ試験性能 (K_{Low} , C_{Low})	実機使用条件より減衰性能を低く取得するため、実機使用で想定される最高温度、最大加振振幅、最大累積消費エネルギーとする。						

注記*：減衰性能を確認した試験条件であり、本試験条件により三軸粘性ダンパの減衰性能に係る機能維持評価の許容値を設定する。

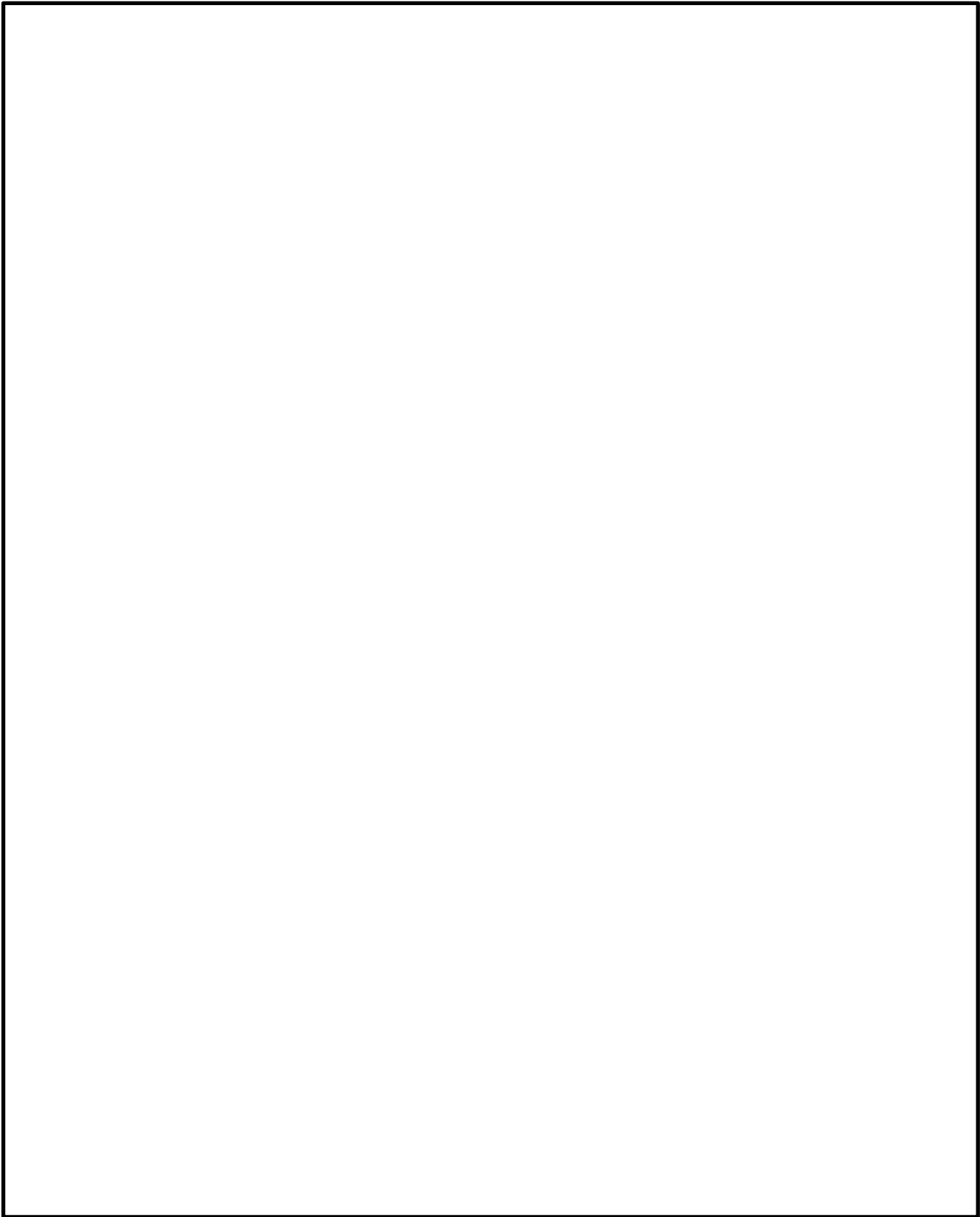


図 3-5-1 性能試験フロー(1/3)

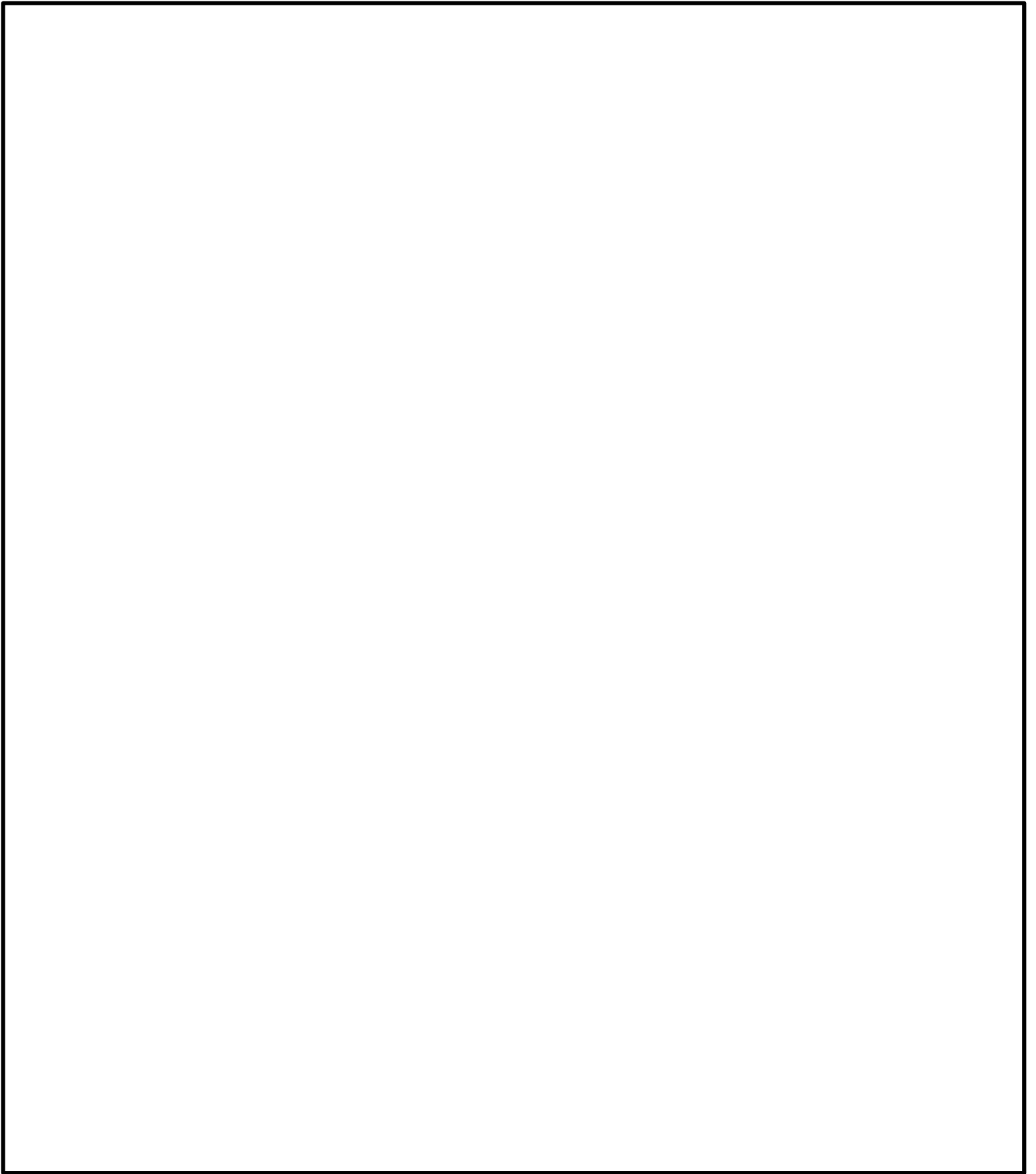


図 3-5-1 性能試験フロー(2/3)

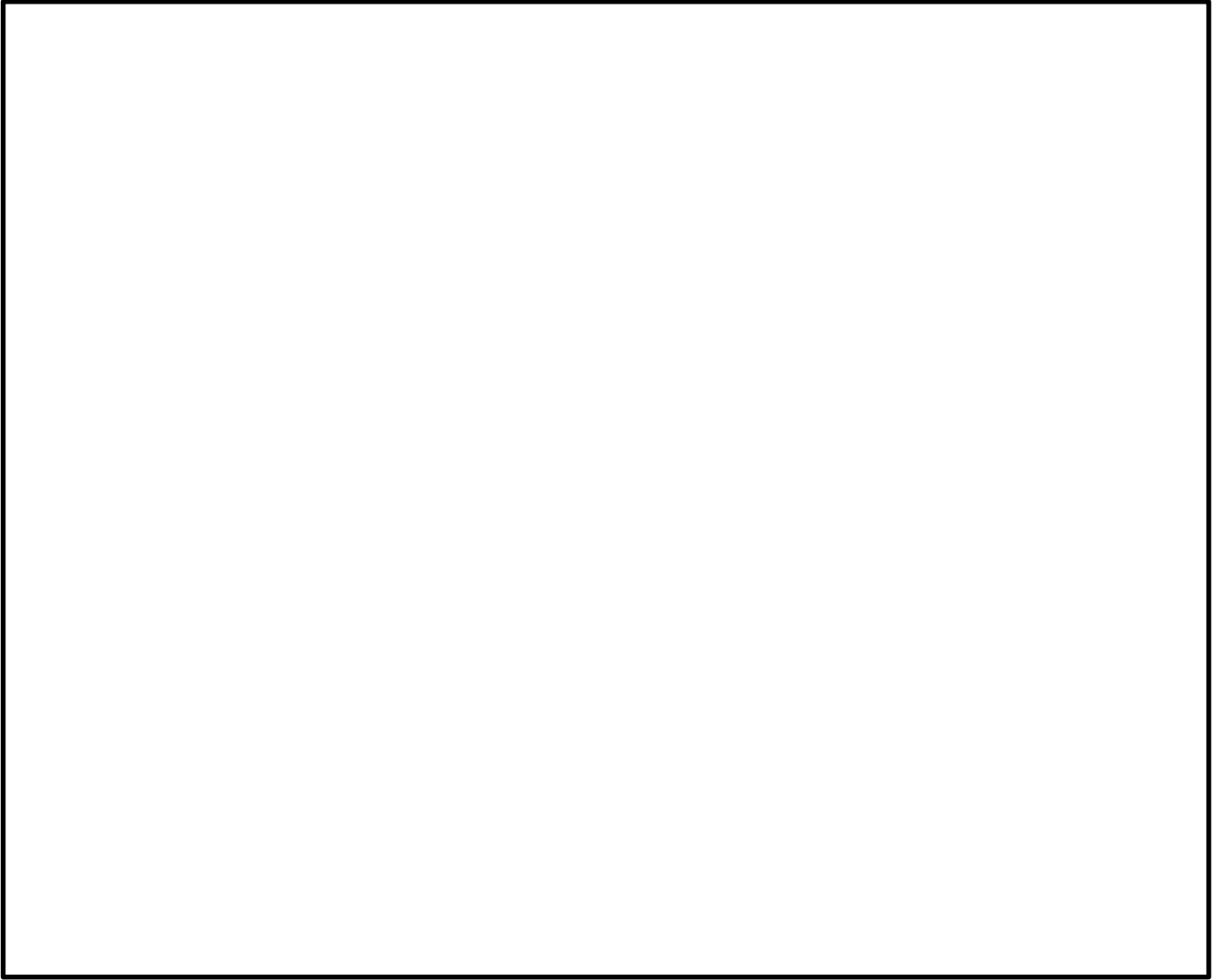


図 3-5-1 性能試験フロー (3/3)

三軸粘性ダンパを設置した配管系の地震応答解析手法

本資料では、三軸粘性ダンパを設置した配管系の地震応答解析に用いる時刻歴応答解析手法を説明する。

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。

$$[M]\{\ddot{x}\} + [C]\{\dot{x}\} + [K]\{x\} = -[M]\{I\}\ddot{y} \quad (1)$$

$[M]$, $[C]$, $[K]$: 配管系の質量, 減衰, 剛性マトリクス
 $\{x\}$: 配管系の変位ベクトル
 $\{I\}$: 単位ベクトル
 \ddot{y} : 入力加速度

ここで、減衰マトリクスの値が小さいとして $[C]=0$ と仮定し、 $-[M]\{I\}\ddot{y}=0$ とすると、

$$[M]\{\ddot{x}\} + [K]\{x\} = 0 \quad (2)$$

となる。この式を用いて実固有値解析を行うことにより各モードの固有角振動数 ω_i とモードマトリクス $[\Lambda]$ が算出される。モードマトリクス $[\Lambda]$ を使い $\{x\}$ を以下の式で表現する。

$$\{x\} = [\Lambda]\{q\} \quad \{q\} : \text{各次モードの応答} \quad (3)$$

式(3)を式(1)に代入して左側から $[\Lambda]^T$ を掛けると以下の式になる。

$$[\Lambda]^T [M] [\Lambda] \{\ddot{q}\} + [\Lambda]^T [C] [\Lambda] \{\dot{q}\} + [\Lambda]^T [K] [\Lambda] \{q\} = -[\Lambda]^T [M] \{I\} \ddot{y} \quad (4)$$

式(4)について、 $[C]$ の値が小さく、対角化できると仮定して展開すると以下の式になる。

$$\begin{bmatrix} \ddots & & 0 \\ & m_i & \\ 0 & & \ddots \end{bmatrix} \{\ddot{q}\} + \begin{bmatrix} \ddots & & 0 \\ & c_i & \\ 0 & & \ddots \end{bmatrix} \{\dot{q}\} + \begin{bmatrix} \ddots & & 0 \\ & k_i & \\ 0 & & \ddots \end{bmatrix} \{q\} = -[\Lambda]^T [M] \{I\} \ddot{y} \quad (5)$$

式(5)は式(6)に示すモード空間での非連成の運動方程式となる。

$$\ddot{q}_i + 2 \zeta_i \omega_i \dot{q}_i + \omega_i^2 q_i = -\beta_i \ddot{y} \quad (6)$$

ここで,

ζ_i : i 次のモード減衰比 ω_i : i 次の固有角振動数

$$\beta_i : i \text{ 次モードの刺激係数} \quad \left(= \frac{\{\lambda_i\}^T [M] \{I\}}{\{\lambda_i\}^T [M] \{\lambda_i\}} \right)$$

λ_i : i 次モードの固有ベクトル q_i : i 次モードの応答

減衰マトリクス $[C]$ の値が小さい場合は, 式 (6) に示したモード空間での非連成の運動方程式から, i 次モードのモードベクトル $\{\Lambda\}_i$, 刺激係数 β_i 及び i 次モードの固有角振動数 ω_i の応答スペクトル値を用いて, スペクトルモーダル解析を行うことができる。

一方で, 配管系に三軸粘性ダンパを設置した場合, 減衰マトリクス $[C]$ の値が大きくなり対角化できないため, 一般的に用いられるスペクトルモーダル解析は適用できない。

三軸粘性ダンパの減衰性能を解析モデルへ反映して解析を行う方法としては, モード解析を用いて, 三軸粘性ダンパによって与えられる減衰が非対角項にある状態のまま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手法がある。本手法は, MSC.Nastran⁽¹⁾の標準機能として実装されている。MSC.Nastran における運動方程式は式 (7) に示すとおりであり, 時刻 $t + \Delta t$ における変位, 速度, 加速度を, 時刻 t 及び時刻 $t - \Delta t$ の変位, 速度, 加速度より求める。

$$\begin{aligned} & [\Lambda]^T \left(\frac{[M]}{\Delta t^2} + \frac{[C]}{2\Delta t} + \frac{[K]}{3} \right) [\Lambda] \{q\}_{t+\Delta t} \\ &= [\Lambda]^T \left(\frac{2[M]}{\Delta t^2} - \frac{[K]}{3} \right) [\Lambda] \{q\}_t + [\Lambda]^T \left(-\frac{[M]}{\Delta t^2} + \frac{[C]}{2\Delta t} - \frac{[K]}{3} \right) [\Lambda] \{q\}_{t-\Delta t} \\ & \quad + \frac{[\Lambda]^T}{3} (\{f\}_{t+\Delta t} + \{f\}_t + \{f\}_{t-\Delta t}) \end{aligned} \quad (7)$$

$\{f\}$: 荷重ベクトル ($-[M]\{I\}\ddot{y}$ に対応するベクトル)

式 (7) は, モード座標を用いること以外は, 一般的な陽解法による直接積分法と同様である。また, 一般的に用いられるモーダル時刻歴解析との違いは, 減衰マトリクスが非対角項を持つか否かのみであり, 対角化できない減衰マトリクスが存在する場合における運動方程式の解法として妥当な手法である。この方法を用いることで配管系の設計用減衰定数と対応したモード減衰を考慮することができる。三軸粘性ダンパを設置した配管系では減衰マトリクス $[C]$ は, 三軸粘性ダンパによって配管系に付与される減衰に対応した減衰マトリクス $[C_D]$ と, 各モードに一律付与する配管系の減衰定数に対応した減衰マトリクス $[C_P]$ の和として式 (8) のように設定することが可能である (参考資料 (1) 参照)。

$$[C] = [C_P] + [C_D] \quad (8)$$

ここで、 $[C_p]$ は一般的な配管系と同様の減衰マトリクスであり、値が小さいためモード空間では対角項が配管の減衰定数に関する要素、非対角項がすべてゼロ要素からなる対角行列とみなし、モード座標における質量マトリクスで割ると式(9)となる。なお、 $[C_D]$ は、値が大きいことから式(9)のように対角行列とすることはできない。

$$\frac{[\Lambda]^T [C_p] [\Lambda]}{[\Lambda]^T [M] [\Lambda]} \cong \begin{bmatrix} \cdot & & 0 \\ & 2\zeta_i\omega_i & \\ 0 & & \cdot \end{bmatrix} \quad (9)$$

なお、多入力の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。

$$[M]\{\ddot{x}_a\} + [C]\{\dot{x}_a\} + [K]\{x_a\} = -[M][I]\ddot{y}_0 - [\tilde{C}]\{\dot{x}_b\} - [\tilde{K}]\{x_b\} \quad (10)$$

$\{x_a\}$: 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(10)の左辺は式(1)と同様である。右辺第一項は、入力加速度に替えて基準入力点の加速度を用いるが、その意味は式(1)の右辺と同様である。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(10)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。

なお、式(10)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、一次応力は、式(10)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(10)の解から差をとることで一次応力を算出する。

【参考文献】

- (1) MSC.Nastran ユーザーガイド 基礎動解析

三軸粘性ダンパを考慮した場合の減衰マトリクス of 記述について

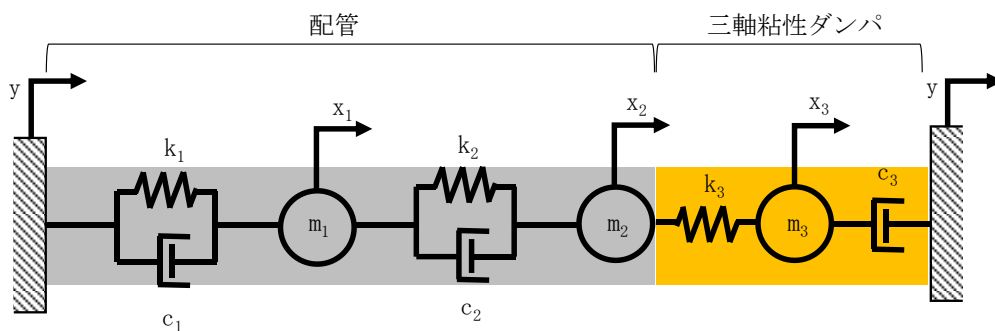
1. 概要

三軸粘性ダンパを設置した配管系において、減衰マトリクス $[C]$ は、下式（1）に示すとおり、各モードに一律付与する配管系の減衰定数に対応した減衰（以下「配管系による減衰」という。）マトリクス $[C_p]$ と、三軸粘性ダンパによって配管系に付与される減衰（以下「三軸粘性ダンパによる減衰」という。）に対応した減衰マトリクス $[C_D]$ と、和として表される。具体的な減衰マトリクスの設定方法についてを3自由度系の例により説明する。

$$[C] = [C_p] + [C_D] \quad (1)$$

2. 三軸粘性ダンパを考慮した場合の減衰マトリクス

2自由度系の配管に三軸粘性ダンパを表す Maxwell モデルによる仮想的な質点を加えた3自由度系を例として説明する（図1参照）。この振動系における減衰は、配管系による減衰定数 C_1 及び C_2 、そして三軸粘性ダンパによる減衰定数 C_3 が対象となる。また、質点 m_3 は、Maxwell モデルの解法のため、仮想的に設定するものであり、質量は0である。なお、実機配管系の地震応答解析に適用する三軸粘性ダンパは4パラメータ Maxwell モデルにてモデル化するが、本資料では簡単のため、図1に示すとおり、2パラメータ Maxwell モデルにて説明する。



- y : 支持点の絶対変位
- x_1, x_2, x_3 : 支持点に対する各質点の相対変位
- m_1, m_2 : 配管の質量
- k_1, k_2 : 配管の剛性
- c_1, c_2 : 配管系によって付与される減衰
- m_3 : 仮想質点 (=0)
- k_3 : 三軸粘性ダンパの剛性
- c_3 : 三軸粘性ダンパによって配管系に付与される減衰

図1 三軸粘性ダンパが設置された3自由度系の振動系

この3自由度系における運動方程式は以下の式(2-1)～(2-3)のように記述でき、行列式にて記述すると式(3)のように表される。

$$\begin{cases} -m_1\ddot{x}_1 - c_1\dot{x}_1 - c_2(\dot{x}_1 - \dot{x}_2) - k_1x_1 - k_2(x_1 - x_2) = m_1\ddot{y} & (2-1) \\ -m_2\ddot{x}_2 - c_2(\dot{x}_2 - \dot{x}_1) - k_2(x_2 - x_1) - k_3(x_2 - x_3) = m_2\ddot{y} & (2-2) \\ -m_3\ddot{x}_3 + c_3\dot{x}_3 - k_3(x_3 - x_2) = m_3\ddot{y} & (2-3) \end{cases}$$

$$\begin{aligned} & \begin{bmatrix} m_1 & 0 & 0 \\ 0 & m_2 & 0 \\ 0 & 0 & m_3 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{x}_1 \\ \ddot{x}_2 \\ \ddot{x}_3 \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} c_1 + c_2 & -c_2 & 0 \\ -c_2 & c_2 & 0 \\ 0 & 0 & -c_3 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{x}_3 \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} k_1 + k_2 & -k_2 & 0 \\ -k_2 & k_2 + k_3 & -k_3 \\ 0 & -k_3 & k_3 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{Bmatrix} \\ = & - \begin{bmatrix} m_1 & 0 & 0 \\ 0 & m_2 & 0 \\ 0 & 0 & m_3 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{Bmatrix} \ddot{y} \end{aligned} \quad (3)$$

式(3)における第二項がこの振動系の減衰項であり、式(1)との比較のため、配管系よる減衰(C_1, C_2)と三軸粘性ダンパによる減衰(C_3)を区別し、式(4)のように表すことができ、更にこの式をマトリクス表記する際に、配管系よる減衰に対応した減衰マトリクス $[C_p]$ 、三軸粘性ダンパよる減衰に対応した減衰マトリクス $[C_D]$ によって記述すると(5)のように表される。

$$\begin{bmatrix} c_1 + c_2 & -c_2 & 0 \\ -c_2 & c_2 & 0 \\ 0 & 0 & -c_3 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{x}_3 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} c_1 + c_2 & -c_2 & 0 \\ -c_2 & c_2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{x}_3 \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -c_3 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{x}_3 \end{Bmatrix} \quad (4)$$

$$[M]\{\ddot{x}\} + [C_p]\{\dot{x}\} + [C_D]\{\dot{x}\} + [K]\{x\} = -[M]\{I\}\ddot{y} \quad (5)$$

ここで、振動系の解は式(6)で与えられ、式(6)を式(5)に代入して、左側から $[\Lambda]^T$ を掛けると以下の式(7)を得る。

$$\{x\} = [\Lambda]\{q\} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} & [\Lambda]^T[M][\Lambda]\{\ddot{q}\} + [\Lambda]^T[C_p][\Lambda]\{\dot{q}\} + [\Lambda]^T[C_D][\Lambda]\{\dot{q}\} + [\Lambda]^T[K][\Lambda]\{q\} \\ = & -[\Lambda]^T[M]\{I\}\ddot{y} \end{aligned} \quad (7)$$

$[C_p]$ は値が小さいため、一般的に $[\Lambda]^T[C_p][\Lambda]$ は対角行列とみなすことができる。一方で $[C_D]$ は値が大きいため、 $[\Lambda]^T[C_D][\Lambda]$ は対角行列とみなすことができない。したがって系全体の減衰項 $[\Lambda]^T[C][\Lambda]$ ($=[\Lambda]^T[C_p][\Lambda] + [\Lambda]^T[C_D][\Lambda]$)については、対角成分を配管系よる減衰にて設定し、非対角成分を三軸粘性ダンパよる減衰にて設定すればよい。このように、系全体の減衰は、配管系に

よる減衰と，三軸粘性ダンパによる減衰について，マトリクスの中で対角項成分と非対角成分で明確に分離して考えることができる。

また，この関係からも示されるとおり，モーダル解析では，配管系に一律付与する減衰をモードごとに設定可能である。このため，三軸粘性ダンパを設置した配管系の地震応答解析には，J E A G 4 6 0 1 に規定される配管系の一律減衰定数の適用を踏まえ，モーダル時刻歴応答解析法を選択する。

なお，式（2-3）のうち m_3 は，Maxwellモデルの解法のために仮想的に設定するものであり，質量は0となるため， $m_3 = 0$ とすると，式（8）となる。

$$c_3 \dot{x}_3 = k_3(x_3 - x_2) \quad (8)$$

また， c_3 及び k_3 は，直列に接続されているため，式（9）のとおり， c_3 の要素に発生する変位(x_3)と k_3 の要素に発生する変位($x_2 - x_3$)を足し合わせると三軸粘性ダンパ全体の変位(x_2)となる。

$$x_3 + (x_2 - x_3) = x_2 \quad (9)$$

（8）及び（9）はMaxwellモデルの基本式と言われており，式（3）を解くことで，三軸粘性ダンパの振動数特性を表現することができる⁽¹⁾。

【参考文献】

- (1) 村田賢，飯嶋俊比古．雑学 構造力学と数値解析．p.116-1 - p.116-2

多入力の時刻歴応答解析の適用について

1. 概要

三軸粘性ダンパを設置した配管系の地震応答解析では、多入力の時刻歴応答解析手法を適用するため、本資料にて、その解析手法を説明する。なお、本解析手法は、原子炉建物等の建物・構築物の地震応答解析において、他プラントを含む既工認にて適用実績がある。

2. 多入力の時刻歴応答解析法

多入力の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

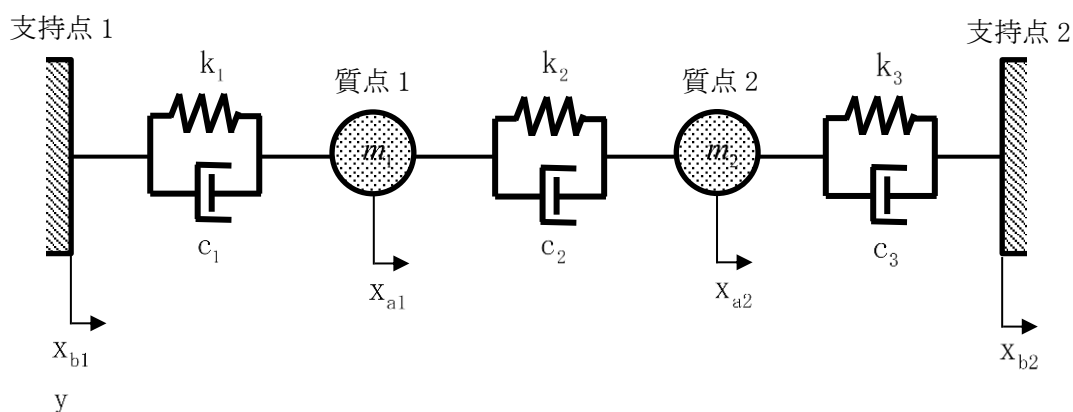
式(1)の左辺は地震による慣性力を受ける配管系の運動方程式である。右辺第一項は、基準入力点の加速度を用いており、右辺第二項及び右辺第三項は、入力点の相対変位、相対速度により生じる力を表している。式(1)は、単一入力の場合と同様に、モード座標系の運動方程式に変換することが可能であり、今回の評価では、モード空間での連成した運動方程式に対して時間積分を行う方法を適用する。

3. 多入力の場合の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。対象とする2自由度系を図3-7-1に示す。

なお、系を静的平衡関係から得られる疑似静的変位と動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(参考資料(1)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)



- 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

図3-7-1 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,

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

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。

$$[M]\{\ddot{x}_a\} + [C]\{\dot{x}_a\} + [K]\{x_a\} = -[M]\{1\}\ddot{y} - [\tilde{C}]\{\dot{x}_b\} - [\tilde{K}]\{x_b\} \quad (7)$$

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。

J E A G 4 6 0 1 - 1987 (抜粋)

6.5.4 地震応答解析法 (3)配管

(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擬似静的変位と動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。

三軸粘性ダンパの減衰性能と配管系の応答の関係

三軸粘性ダンパの減衰性能と配管系の応答の関係を表 3-8-1 及び表 3-8-2 に示す。なお、本資料では、主蒸気管 (MS-T-1) に取付く三軸粘性ダンパの S d - 1 の慣性力による結果について示す (詳細な条件等は、補足-027-10-29「主蒸気管の弾性設計用地震動 Sd での耐震評価について」を参照)。配管モーメント及び三軸粘性ダンパの最大変位は、減衰性能が低いほど算出値が大きくなる傾向であり、三軸粘性ダンパの減衰性能が低くなるほど配管系の応答が大きくなるといえる。また、三軸粘性ダンパの最大荷重は、減衰性能が高いほど算出値が大きくなる傾向であり、これは三軸粘性ダンパの減衰性能が高いことにより三軸粘性ダンパが負担する荷重が大きくなるためである。

表 3-8-1 配管モーメント

項目	減衰性能* 2	発生値
配管モーメント* 1 (N・m)	K ₁ , C ₁	1.54×10 ⁶
	K ₂ , C ₂	1.56×10 ⁶
	K ₃ , C ₃	1.59×10 ⁶
	K ₄ , C ₄	1.65×10 ⁶
	K ₅ , C ₅	1.75×10 ⁶

注記* 1 : 最も厳しい結果を記載

* 2 : 「3.3 性能試験及び解析モデル」にて設定した減衰性能

表 3-8-2 三軸粘性ダンパの荷重及び変位

項目	減衰性能* 2	発生値	
		水平	鉛直
最大荷重* 1 (kN)	K ₁ , C ₁	123	39
	K ₂ , C ₂	108	33
	K ₃ , C ₃	90	27
	K ₄ , C ₄	78	20
	K ₅ , C ₅	35	10
最大変位* 1 (mm)	K ₁ , C ₁	1.69	1.35
	K ₂ , C ₂	1.56	1.85
	K ₃ , C ₃	1.87	2.03
	K ₄ , C ₄	2.54	2.20
	K ₅ , C ₅	4.27	2.80

注記* 1 : 最も厳しい結果を記載

* 2 : 「3.3 性能試験及び解析モデル」にて設定した減衰性能

新規制基準適合性審査の実績等を踏まえた検討事項に対する考察

制震装置を設置する場合の耐震評価方法について、原子炉施設の耐震設計の体系及び新規制基準適合性審査の実績を踏まえて重点的に検討すべき事項を抽出し、耐震評価方法において考慮されていることを確認する。具体的には、「耐震設計に係る工認審査ガイド（最終改正平成 29 年 11 月 15 日，原規技発第 1711152 号）」（以下「工認審査ガイド」という。）に基づき、耐震評価方法の設定にあたって必要な検討が実施されていることを確認する。

なお、その他の知見として、「建物・構築物の免震構造に関する審査ガイド（令和 4 年 2 月）原子力規制委員会」（以下「免震審査ガイド」という。）の免震装置に関する記載についても確認した。なお、免震審査ガイドは建物全体を免震構造とした施設を適用範囲としていること、及び「免震審査ガイド」に基づく検討項目は「工認審査ガイド」において基本的に包絡されるため、免震審査ガイドで確認する項目は、減衰装置（本資料における制震装置に該当）に関する記載とした。

工認審査ガイドに対する確認の結果を表 5-1-1 に、免震審査ガイドに対する確認の結果を表 5-1-2 示す。抽出した検討事項は、耐震評価方法の設定にあたって考慮されており、追加の検討を要する事項はないことを確認した。

表 5-1-1 工認審査ガイドに基づく検討事項の耐震評価方法への反映要否 (1/4)

【凡例】 ○：満足している ×：満足していない —：対象外

検討事項 (工認審査ガイド) 4. 機器・配管系 に関する事項	工認審査ガイドに対応した耐震評価方法の設定にあたっての検討内容	要求事項を 満足してい るか
4.1 使用材料及び材 料定数	機器・配管系の地震応答解析及び構造設計において、工認審査ガイドにしたがって適用可能な規格及び基準等を使用する。	○
	地震応答解析に用いる材料定数は、地盤の諸定数も含めて材料のばらつきによる変動幅*を適切に考慮する。	○

注記*：制震装置により機器・配管系に付与される減衰が大きくなるため、影響は軽微であると考えているが、ASME Boiler and Pressure Vessel Code SECTION III, DIVISION1-NONMANDATORY APPENDIX N (ARTICLE N-1222.3 Time History Broadening) に規定された手法等により検討を行い、影響が軽微であることを確認する。

表 5-1-1 工認審査ガイドに基づく検討事項の耐震評価方法への反映要否 (2/4)

【凡例】 ○：満足している ×：満足していない —：対象外

検討事項 (工認審査ガイド) 4. 機器・配管系 に関する事項	工認審査ガイドに対応した耐震評価方法の設定にあたっての検討内容	要求事項を 満足してい るか
4.2 荷重及び荷重の 組合せ	地震力と地震力以外の荷重は、工認審査ガイドに例示されている規格及び基準等に基づき適切に組み合わせる。	○
4.3 許容限界	配管、支持構造物に係る許容限界及び三軸粘性ダンパの許容荷重は、工認審査ガイドに例示されている規格及び基準等に基づき設定する。 三軸粘性ダンパの許容変位は、その構造、寸法に基づき設定する。	○
4.4 地震応答解析 4.4.1 地震応答解析手 法及び地震応答 解析モデル	地震応答解析手法は、工認審査ガイドに例示されている規格及び基準等を参考に設定する。 配管系の地震応答解析モデルは、工認審査ガイドに例示されている規格及び基準等を参考に設定する。また、三軸粘性ダンパの減衰性能は、性能試験結果に基づいてモデル化し、減衰性能の変動及びばらつきを考慮する。 配管系の水平方向及び鉛直方向の減衰定数については、最新の知見を反映して設定する。	○
4.4.2 入力地震力	入力地震力は、配管系設置位置の応答波を用いる。	○

表 5-1-1 工認審査ガイドに基づく検討事項の耐震評価方法への反映要否 (3/4)

【凡例】 ○：満足している ×：満足していない —：対象外

検討事項 (工認審査ガイド) 4. 機器・配管系 に関する事項	工認審査ガイドに対応した耐震評価方法の設定にあたっての検討内容	要求事項を 満足してい るか
4.5 構造設計手法 4.5.1 構造解析手法及 び構造解析モデ ル	構造解析手法及び構造解析モデルは、工認審査ガイドに例示されている規格及び基準等並びに新規制審査実績を参考に設定する。構造解析モデルの材料定数は、「4.1 使用材料及び材料定数」による。	○
4.5.2 水平方向及び鉛 直方向地震力の 組合せ	水平2方向及び鉛直方向の動的地震力の組合せに関しては、三方向同時入力により地震応答解析を行う。	○
4.6 基準地震動 S_s による地震力に 対する耐震設計 4.6.1 構造強度	三軸粘性ダンパを設置する配管系はBクラス(一部 S_d 機能維持設計)であり、基準地震動 S_s による地震力に対する耐震設計の対象に該当しない。	—

表 5-1-1 工認審査ガイドに基づく検討事項の耐震評価方法への反映要否 (4/4)

【凡例】 ○：満足している ×：満足していない —：対象外

検討事項 (工認審査ガイド) 4. 機器・配管系 に関する事項	工認審査ガイドに対応した耐震評価方法の設定にあたっての検討内容	要求事項を 満足してい るか
4.6.2 動的機能	三軸粘性ダンパを設置する配管系はBクラス(一部Sd機能維持設計)であり, 動的機能維持の対象に該当しない。	—
4.7 弾性設計用 地震動Sdによる 地震力・静的地 震力に対する耐 震設計	三軸粘性ダンパを設置する配管系はBクラス(一部Sd機能維持設計)である。構造強度に関する耐震設計においては, 耐震性を確認する上で必要な評価対象部位を選定し, 施設に作用する応力等が工認審査ガイドに例示されている規格及び基準等に基づき設定した許容限界を超えていないことを確認する。	○

表 5-1-2 免震審査ガイドに基づく検討事項の耐震評価方法への反映要否

【凡例】 ○：満足している ×：満足していない —：対象外

検討事項 (免震審査ガイド) 3.5 免震構造物の 設計に係る事項	免震審査ガイドに対応した耐震評価方法の設定にあたっての検討内容	要求事項を 満足してい るか
(2) 免震装置の設計 ③ 減衰装置	装置の構造及び仕様に応じた指標に基づき、配管系に要求される地震力と地震力以外の荷重を組み合わせ、その結果発生する荷重等により、減衰機能が喪失していないことを確認する。	○

三軸粘性ダンパの配管への取付部の設計について

三軸粘性ダンパは、ラグ又はクランプにより配管に取り付ける。本資料では、配管への取付部の構造概要、荷重伝達機構及び構造成立性を示す。また、配管系への三軸粘性ダンパの配置計画の成立性について説明する。

1. ラグの設計について

1.1 構造概要

ラグの構造の概要を図 6-1-1 に示す。ラグの構造については、従来のアンカサポート等の設計と同様であり、配管と溶接により一体となる構造とする。ラグと三軸粘性ダンパは図 6-1-2 のとおり取付ボルトにより接続する。

1.2 荷重の伝達機構

地震により配管に振動が生じた場合、ラグは配管と一体となって運動し、取付ボルトを介して三軸粘性ダンパに運動が伝達される。これを受けて、三軸粘性ダンパのピストンが粘性体中を移動し、抵抗力が生じる。この抵抗力は、三軸粘性ダンパのピストンから取付ボルト及びラグを介して配管へ伝達される。

1.3 構造成立性について

ラグは三軸粘性ダンパを接続すること以外は従来の構造及び設計と同様であり、三軸粘性ダンパの発生荷重に対して十分な構造強度を持つように設計する。

なお、取付ボルトは、三軸粘性ダンパの構造強度評価において、三軸粘性ダンパの許容荷重に対する評価を行う。

2. クランプの設計について

2.1 構造概要

クランプの構造の概要を図 6-1-3 に示す。クランプは上部クランプ及び下部クランプから構成され、図 6-1-4 のように上部クランプと下部クランプをクランプボルトにより締め付けることで配管に取り付ける。クランプと三軸粘性ダンパは取付ボルトにより接続する。

2.2 荷重の伝達機構

地震により配管に振動が生じた場合、クランプは配管と一体となって運動し、取付ボルトを介して三軸粘性ダンパに運動が伝達される。これを受けて、三軸粘性ダンパのピストンが粘性体中を移動し、抵抗力が生じる。この抵抗力は、三軸粘性ダンパのピストンから取付ボルト及びクランプを介して配管へ伝達される。クランプから配管への荷重伝達機構は、荷重の方向により異なることから、各方向の荷重伝達機構を以下に示す。

【クランプから配管への荷重伝達機構】

(1) 水平方向

水平方向の荷重伝達機構を図 6-1-5 に示す。水平方向については、配管軸方向及び配管軸直角方向に分けて説明する。

a. 配管軸方向

図 6-1-5(a)に示すように、クランプが配管を押し返すことや、配管軸方向の摩擦によりクランプが配管を拘束することで荷重が伝達される。

b. 配管軸直方向

図 6-1-5 (b)に示すように、クランプが配管を押し返すことや、配管周方向の摩擦によりクランプが配管を拘束することで荷重が伝達される。

(2) 鉛直方向

鉛直方向の荷重伝達機構を図 6-1-6 に示す。クランプボルトで配管に取り付けられたクランプが配管を押し返すことで荷重が伝達される。

2.3 構造成立性について

クランプに対して水平方向及び鉛直方向における三軸粘性ダンパの荷重伝達機構を考慮の上、許容荷重を設定する。クランプに接続される三軸粘性ダンパの地震応答解析における最大荷重と設定した許容荷重を比較することで構造成立性を確認する。

(1) 水平方向荷重に対するクランプの構造成立性

水平方向の荷重はクランプと配管の摩擦によって制限されるため、クランプの最大摩擦力と等しくなる時の三軸粘性ダンパのピストンに生じる荷重をクランプの許容荷重とする。許容荷重の算出方法を以下に示す。

上部クランプと下部クランプにおいて、許容荷重の算出方法は同様であるため、下部クランプを例に説明する。クランプ締付力により、下部クランプに一樣な圧力 p_1 が生じた状態を考える。図 6-1-7 に示すとおり、下部クランプと配管が接している範囲の角度 $-\alpha \leq \theta \leq \alpha$ の中で微小角度 $d\theta$ を考えると、 $d\theta$ においてクランプの締付により鉛直方向に生じる力 $Q_{1d\theta}$ は式 (1) となる。

$$Q_{1d\theta} = N_{1d\theta} \cdot \cos \theta = p_1 \cdot \frac{D}{2} \cdot d\theta \cdot B \cdot \cos \theta \quad (1)$$

ここで、 $N_{1d\theta}$ は微小角度 $d\theta$ においてクランプ面に垂直な方向に生じる力、 D は配管外径、 B はクランプ幅である。

$Q_{1d\theta}$ をクランプが配管と接している角度 $-\alpha \leq \theta \leq \alpha$ で積分すると、鉛直方向の力の総和 Q_1 は式 (2) となる。

$$Q_1 = \int_{-\alpha}^{\alpha} Q_{1d\theta} = \int_{-\alpha}^{\alpha} p_1 \cdot \frac{D}{2} \cdot B \cdot \cos \theta \cdot d\theta = p_1 \cdot \frac{D}{2} \cdot B \cdot 2\sin \alpha \quad (2)$$

この鉛直方向の力 Q_1 はクランプの締付力 F_c と等しいため、

$$F_c = Q_1 = p_1 \cdot \frac{D}{2} \cdot B \cdot 2 \sin \alpha \quad (3)$$

となり，クランプの締付による下部クランプに生じる圧力 p_1 は式 (4) となる。

$$p_1 = \frac{F_c}{D \cdot B \cdot \sin \alpha} \quad (4)$$

この圧力 p_1 が角度 $-\alpha \leq \theta \leq \alpha$ の部分の面積に加わるため，クランプの締付により下部クランプに生じる垂直抗力 F_{1N} は式 (5) となる。

$$F_{1N} = p_1 \cdot \frac{D}{2} \cdot 2 \alpha \cdot B = \frac{F_c}{D \cdot B \cdot \sin \alpha} \cdot \frac{D}{2} \cdot 2 \alpha \cdot B = \frac{F_c \cdot \alpha}{\sin \alpha} \quad (5)$$

摩擦係数を μ とすると下部クランプに生じる静止摩擦力 F_{1f} は式 (6) となる。

$$F_{1f} = \mu \cdot F_{1N} = \frac{\mu \cdot F_c \cdot \alpha}{\sin \alpha} \quad (6)$$

上部クランプについても同様に静止摩擦力 F_{uf} を計算すると，上部クランプと下部クランプによる摩擦力 F_f は式 (7) となる。

$$F_f = F_{uf} + F_{1f} = 2F_{1f} = 2 \frac{\mu \cdot F_c \cdot \alpha}{\sin \alpha} \quad (7)$$

配管軸方向の拘束については F_f が許容荷重となる。

配管軸直角方向の拘束については，三軸粘性ダンパの抵抗力がピストンと粘性体の接触面で生じることから，荷重作用点を考慮して算出したモーメントに対してすべりが生じることのない摩擦力を確保する。そのため，配管外径を D ，荷重発生箇所のモーメントアームを L_m とすると，モーメントのつり合いから式 (8) により配管軸直角方向の許容荷重 F_a が得られる。

$$F_f \cdot \frac{D}{2} = F_a \cdot L_m \quad (8)$$

$$F_a = \frac{F_f D}{2L_m}$$

許容荷重 F_f 及び F_a を式 (7)，(8) 及びクランプの諸元により算出した結果を表 6-1-1 に示す。なお，クランプの構造成立性の確認にあたっては，値の小さい軸直角方向の許容荷重 F_a を水平方向の共通の許容荷重として表 6-1-2 のとおり設定する。

(2) 鉛直方向荷重に対するクランプの構造成立性

三軸粘性ダンパは鉛直方向の許容荷重が 140(kN) であり、水平方向と比べて小さいため、クランプの許容荷重も表 6-1-2 のとおり接続する三軸粘性ダンパと同じ 140(kN) に設定する。三軸粘性ダンパ及びクランプ共通の許容荷重 140(kN) に対して、クランプの構成部品の中で余裕が小さいと想定される評価対象部位としてクランプボルトの構造強度評価を J E A G 4 6 0 1 等に基づいて実施した。評価の結果は表 6-1-3 のとおりであり、構造成立性を確認した。

3. 配管系への三軸粘性ダンパの配置計画の成り立ちについて

三軸粘性ダンパは、配管への取付方法としてラグ又はクランプを選択可能であり、配管の上部及び下部のいずれの位置にも設置することができる。配管への取付方法及び設置位置は設置スペース、干渉物、施工性等を考慮して現場状況に応じて選択することから、配置計画の成り立ちに問題はないと判断している。

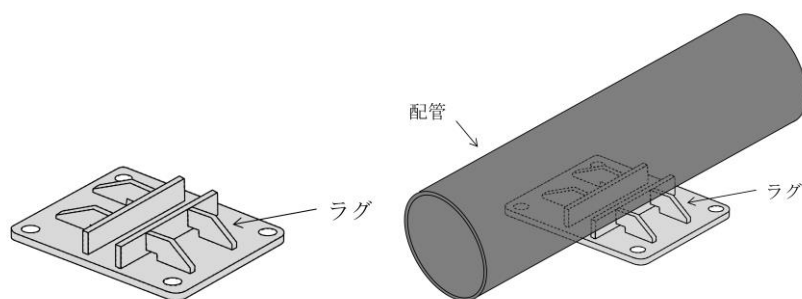


図 6-1-1 ラグの構造概要

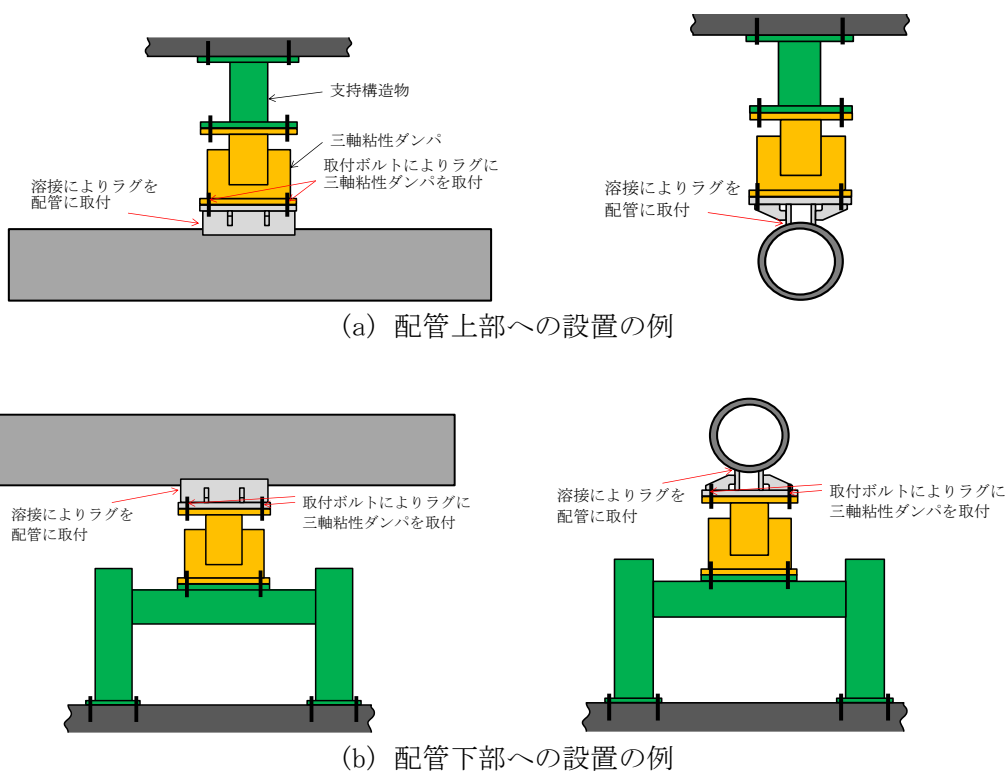


図 6-1-2 ラグの配管への取付及び三軸粘性ダンパへの接続

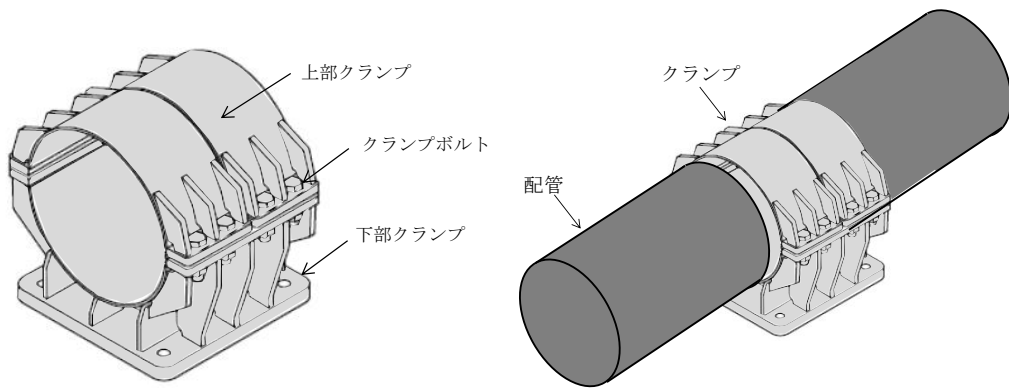
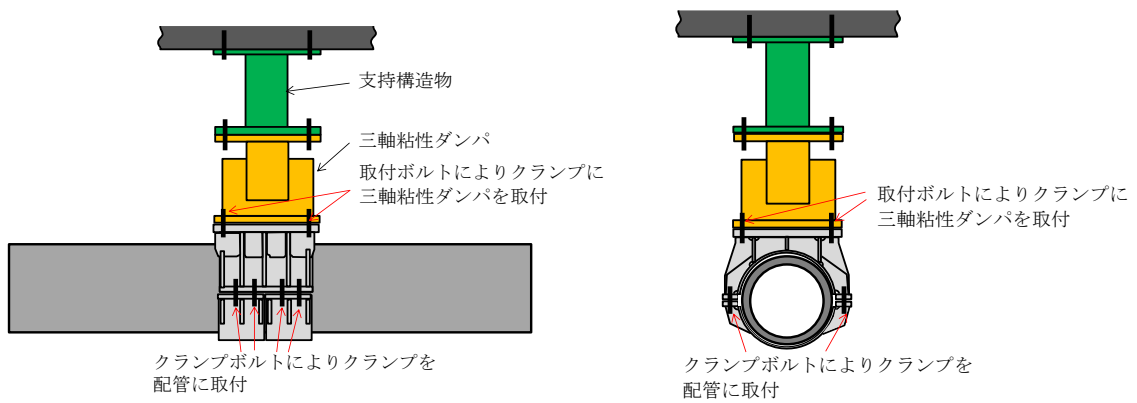
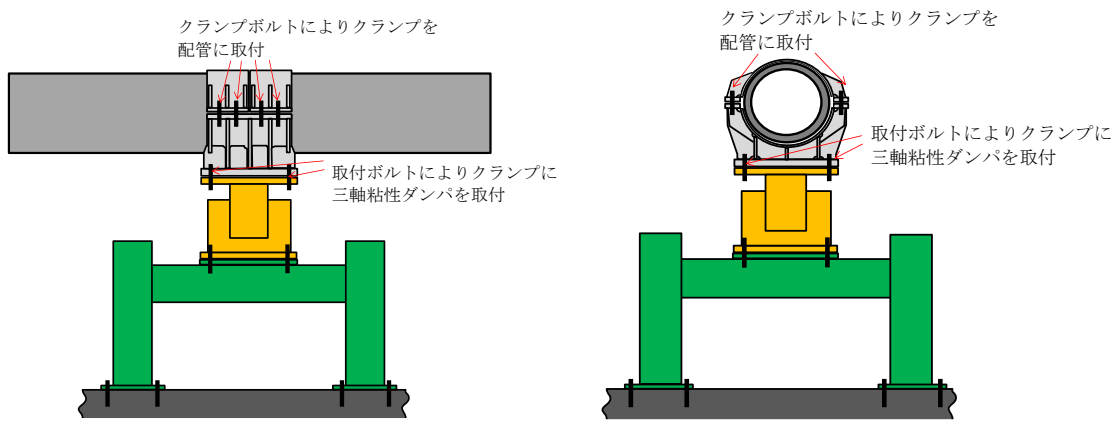


図 6-1-3 クランプの構造概要



(a) 配管上部への設置の例



(b) 配管下部への設置の例

図 6-1-4 クランプの配管への取付及び三軸粘性ダンパへの接続

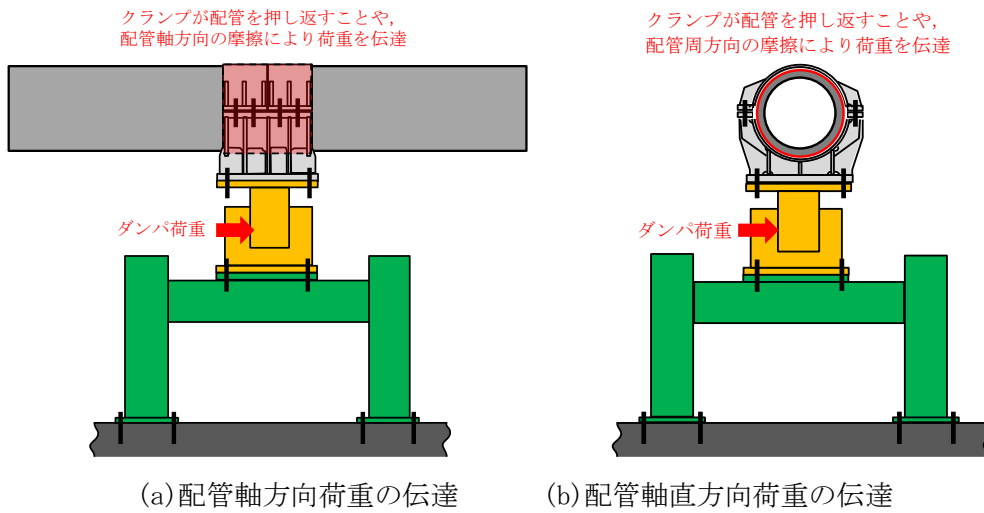


図 6-1-5 クランプによる水平方向の荷重伝達機構

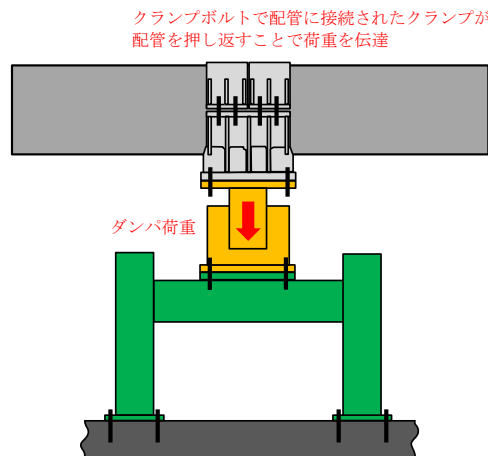


図 6-1-6 クランプによる鉛直方向の荷重伝達機構

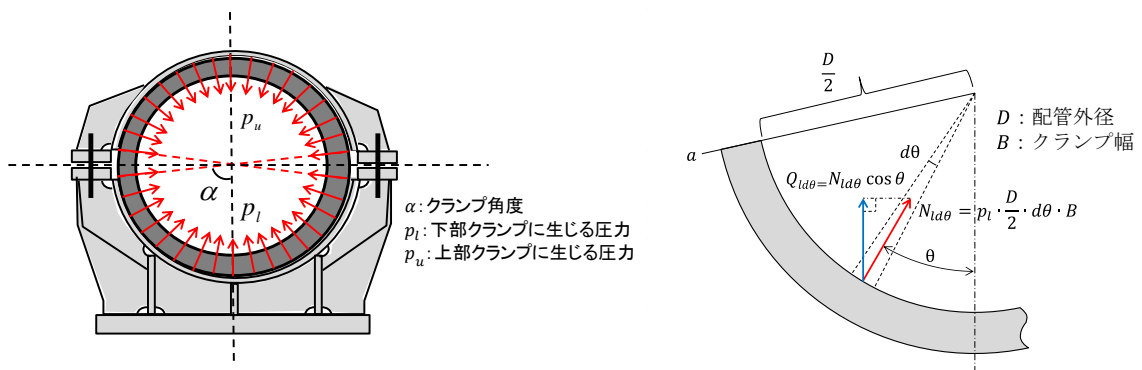


図 6-1-7 クランプ締付力による鉛直方向の力の算出

表 6-1-1 クランプの諸元及び水平方向許容荷重の算出値

摩擦係数 μ	締付力 F_c (kN)	クランプ角度 α (rad)	配管 直径 D (mm)	モーメント アーム L_m (mm)	算出値	
					F_f (kN)	F_a (kN)
0.3	660.8	$(85/180)\pi$	609.6	1150	590	156

表 6-1-2 クランプの許容荷重

方向		許容荷重
水平方向	配管軸直角方向	156 (kN)
	配管軸方向	156 (kN) * 1
鉛直方向		140 (kN) * 2

注記* 1 : より厳しい配管軸直角方向の許容荷重に合わせて設定

* 2 : 三軸粘性ダンパの鉛直方向の許容荷重に合わせて設定

表 6-1-3 鉛直方向許容荷重によるクランプボルトの評価結果

評価項目	発生値	許容限界*
引張応力	25 (MPa)	398 (MPa)

注記* : 許容応力状態 B_AS の許容応力

三軸粘性ダンパの高温環境下における使用について

1. 概要

三軸粘性ダンパの減衰性能を取得した性能試験の最高温度が 100℃である一方で、三軸粘性ダンパが設置される配管の内部流体は最大 300℃近くになるものがある。このような環境下における三軸粘性ダンパ内部の粘性体温度を確認するため、配管内部流体を熱源とした定常伝熱解析を実施する。

2. 解析方法

(1) 解析条件

表 6-2-1 に解析条件を示す。

表 6-2-1 解析条件

評価対象配管	MS-T-1
代表ダンパ	DMP-MS-017
内部流体温度	286℃*
周囲環境温度	60℃

注記*：原子炉圧力容器出口圧力に対する飽和温度として設定

(2) 解析コード

ANSYS

(3) 三軸粘性ダンパ 3次元モデル

解析モデルの概要を図 6-2-1、解析諸元について表 6-2-2 に示す。解析モデルは、実機に設置されているダンパの形状を 3次元有限要素で模擬する。ダンパの形状は、熱源である配管と三軸粘性ダンパ内部の粘性体の距離が最も短くなるため、最も厳しい条件となる配管の上部に設置するタイプとする。三軸粘性ダンパを設置する際は、内部の粘性体への伝熱量を低減する目的で、図 6-2-1 に示すように放熱板と断熱板を取り付けている。

(4) 伝熱解析モデル

定常伝熱解析は、フーリエの法則を 3次元的に解くことによって実施する。この際に、配管内部流体からダンパに直接伝わる熱伝導、配管保温材表面及びダンパ表面から空気への自由対流及び輻射を考慮する。自由対流による放熱については、ヌセルト数により熱伝達係数を計算することで考慮する。輻射による放熱については、表 6-2-2 に示すとおり、材料ごとに一律の放射率を設定することで考慮する。輻射は、面に対して垂直方向に生じると仮定し、安全側の評価とするため、垂直方向に他の部品が有る場合は、輻射面として定義しないこととする。なお、図 6-2-2 に示すように、解析で輻射を考慮するクランプのリブ部については、実機構造でも輻射による放熱が可能な構造としている。また、メッシュは、自動メッシュにより作成する。

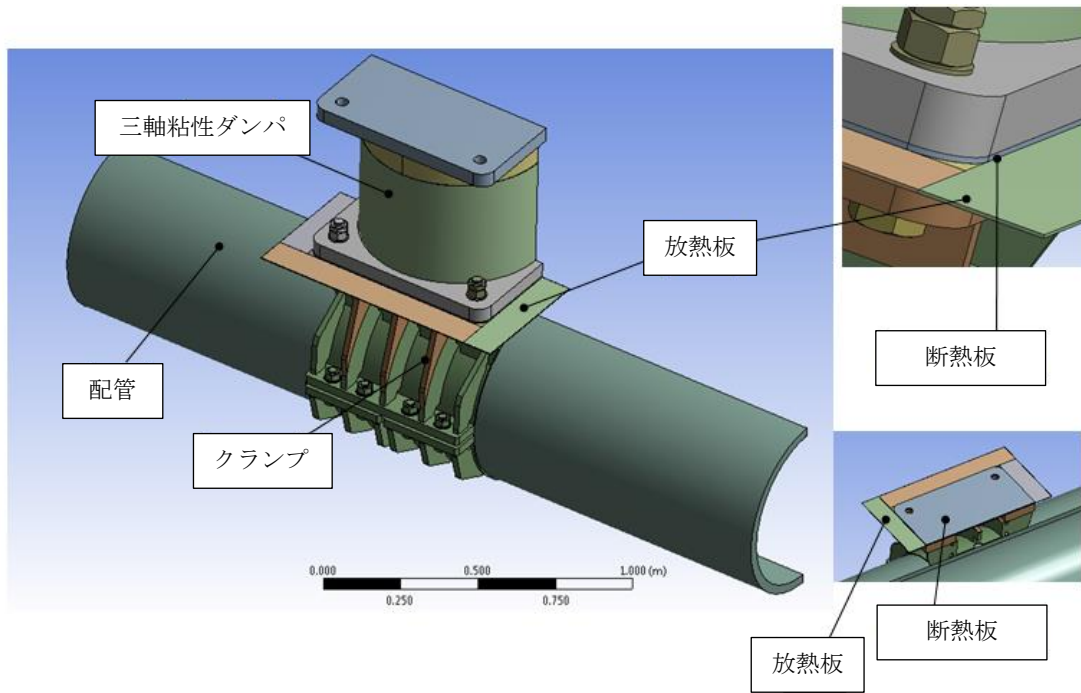


図 6-2-1 解析モデル

表 6-2-2 解析諸元

項目		入力値
形状	配管	$\phi 609.6\text{mm} \times t30.9\text{mm}$
	配管保温材	t90mm
	断熱板	t10mm
	放熱板	$\square 900\text{mm} \times t3.2\text{mm}$
材料	配管	SB49
	ダンパ, クランプ, 放熱板	S355J2N
	ボルト	SNB16
	断熱板	isoplan 1100 (ガスケット)
熱伝導率	配管	$49\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})^*$
	配管保温材	$0.0616\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$
	ダンパ, クランプ, 放熱板	$38\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})^*$
	ボルト	$37\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})^*$
	断熱板	$0.11\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$
	粘性体	$1.5\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$
放射率	配管保温材	0.2
	その他	0.5

注記*：温度依存性を持たせて設定する。表中の数値は 300℃ の例とする。

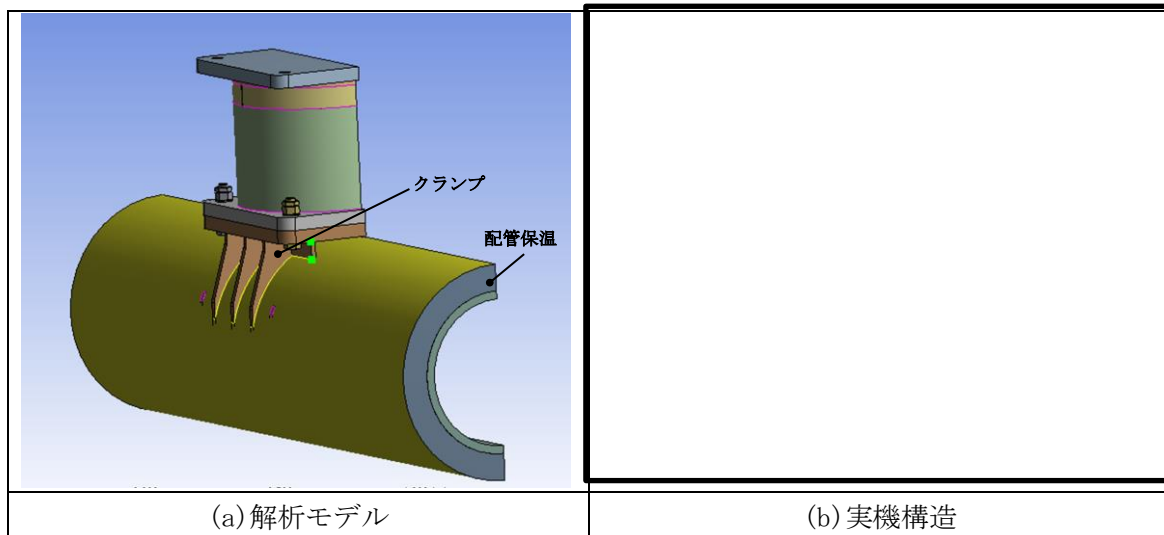


図 6-2-2 解析モデルと実機構造の比較

3. 評価結果

図 6-2-3 に解析結果を示す。

図 6-2-3 に示すとおり，粘性体の底部では，最大で 103℃程度まで上昇しているが，100℃超の部分は底面から 40mm 以内の領域であり，ピストン下端（底面から 80mm 程度）から 40mm 程度離れている。

三軸粘性ダンパは，ピストンが移動する際に，ピストンに粘性体の速度勾配に応じた圧力抵抗及び粘性抵抗の合力が生じることで減衰性能を発揮するものであり，抵抗力に影響するのはピストンの動作範囲付近の粘性体である。ピストン近傍（変位振幅評価における鉛直方向への許容値 6mm を考慮し，ピストン下端から 6mm 付近）では粘性体温度が 100℃未満であること，また，粘性体全体の平均温度は約 90℃という解析結果が得られたことに対し，性能試験においては，粘性体全体を 100℃以上に保持した状態で試験を実施していることから，性能試験で取得した減衰性能は実機条件より低いと考えられる。

以上より，100℃における性能試験で取得した減衰性能を実機環境の三軸粘性ダンパに用いることは問題ないことを確認した。

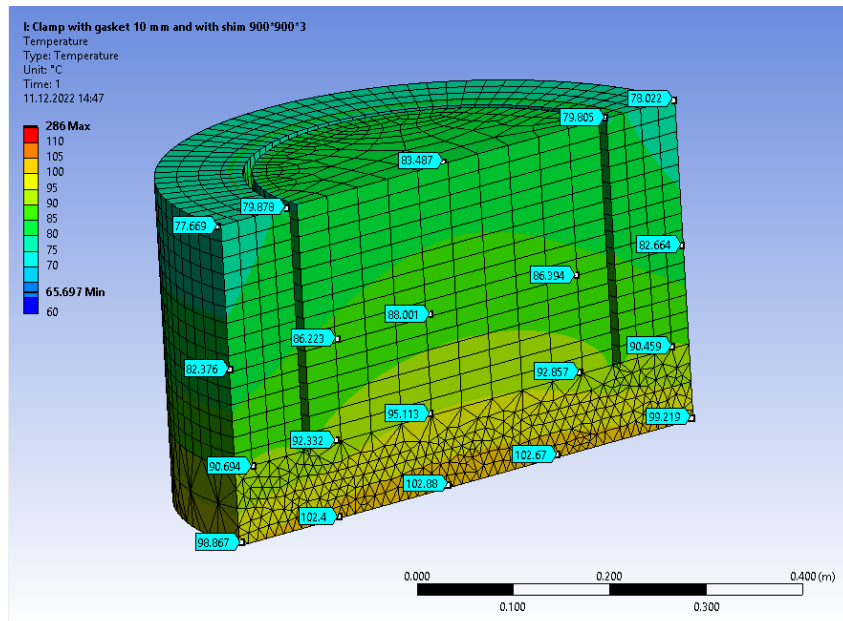


図 6-2-3 評価結果

4. 引用文献

- [1] The Physical Properties of Steel “The 100 Steels Programme”. Part I: Tables and Figures. Friedhelm Richter, Mulheim a.d. Ruhr.
- [2] Analysis conditions in heat transfer analysis work for 3D viscous dampers.
- [3] Isoplan 1100 data sheet, Frenzelit.
- [4] The Test Pipe Clamp for VDJ 325/159-15 Thermal Analysis (pipe diameter D=267.4mm) GERB Project J-159/14/B, issued: 29.09.2015 (Rev.0), Petr Zabiropkin, Peter Vasilyev.
- [5] Incropera, F.P., DeWitt, D.P, Bergman, T.L., & Lavine, A.S., Fundamentals of Heat and Mass Transfer, 6th Ed., Hoboken, NJ, John Wiley & Sons, 2007
- [6] LumaSense Technologies. Table of Emissivity of Various Surfaces, data sheet.

三軸粘性ダンパの高温曝露試験結果について

1. 概要

高温曝露による粘性体の性状変化及びダンパ性能の変化を確認するため、温度 100℃の環境に 360 日曝露し、経年的な変化の有無を確認した。

2. 試験条件

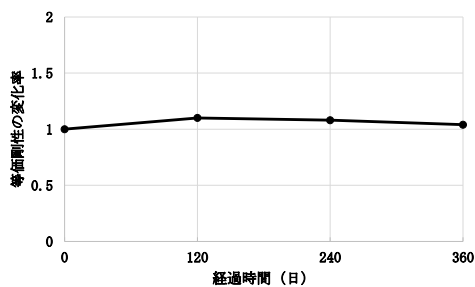
高温曝露試験の試験条件を表 6-3-1 に示す。温度は実機環境条件より設定した。また、曝露時間はダンパ性能の変化を確認する上で十分長い時間を設定した。なお、高温曝露による粘度の増加は酸化により生じるため、曝露中は定期的に換気を行い、酸素濃度を維持する。

表 6-3-1 高温曝露試験の試験条件

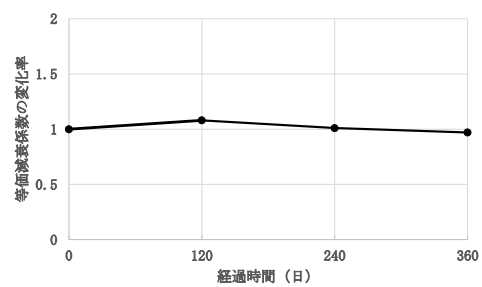
試験体	加振方向	入力波形	温度	曝露時間
型式 325/159	水平 鉛直	ランダム波 (振幅 6mm)	100℃	0 日 (曝露なし)
				120 日
				240 日
				360 日

3. 試験結果

高温曝露前後でのダンパ性能（等価剛性，等価減衰係数）の変化率を図 6-3-1 及び図 6-3-2 に示す。粘性体温度 100℃で長期間曝露してもダンパ性能の低下はないことを確認した。

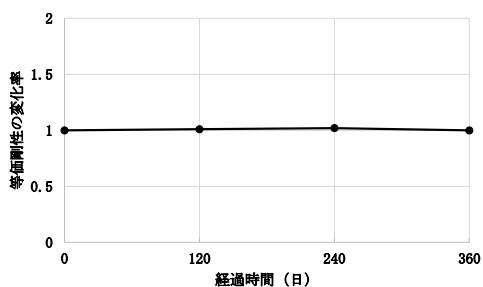


(a) 等価剛性

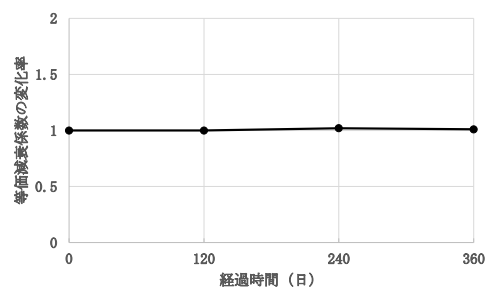


(b) 等価減衰係数

図 6-3-1 高温曝露によるダンパ性能の変化率（水平方向）



(a) 等価剛性



(b) 等価減衰係数

図 6-3-2 高温曝露によるダンパ性能の変化率（鉛直方向）

補足-027-10-63 原子炉圧力容器のノズル外荷重に関する補足説明資料

目 次

1. 適用	1
2. RPV ノズルの限界荷重の設定方法	1
2.1 限界荷重の適用について	1
2.2 記号の説明	1
2.3 限界荷重の設定方法	2
2.3.1 前提条件	2
2.3.2 限界荷重の設定手順	2
2.4 検討結果	2
2.4.1 限界荷重の係数 β の検討結果	2
2.4.2 RPV ノズル外荷重の設定	3

1. 適用

本資料は、VI-2-3-3-1-1「原子炉圧力容器の応力解析の方針」において設定している島根原子力発電所第2号機 原子炉圧力容器（以下「RPV」という。）のノズル外荷重について説明するものである。

2. RPV ノズルの限界荷重の設定方法

2.1 限界荷重の適用について

限界荷重とは、RPVノズルの耐震評価において余裕が確認できる最大の地震荷重であり、配管解析の途中経過の反力値にマージンを加えて配管解析結果の反力値を上回るように設定した荷重を示す。

RPVノズル荷重として、配管解析結果を直接使用せずにRPVノズルの耐震評価を進めることが可能となるため、配管解析結果が算出される前に限界荷重を設定する。

2.2 記号の説明

記号	記号の説明	単位
H	RPV ノズル先端に作用する水平方向荷重	kN
F _z	RPV ノズル先端に作用する軸方向荷重	kN
M	RPV ノズル先端に作用するモーメント荷重	kN・m
M _z	RPV ノズル先端に作用するねじりモーメント荷重	kN・m
S _d *	弾性設計用地震動S _d により定まる地震力又はSクラス設備に適用される静的地震力のいずれか大きい方の地震力	—
S _s	基準地震動S _s により定まる地震力	—
U _f	疲労累積係数 (U _n +U _{S_d} 又はU _n +U _{S_s})	—
U _n	運転状態 I 及び II における疲労累積係数	—
U _{S_d}	地震荷重 S _d *による疲労累積係数	—
U _{S_s}	地震荷重 S _s による疲労累積係数	—
β	耐震余裕を確保した荷重の比例係数の最大値	—

2.3 限界荷重の設定方法

2.3.1 前提条件

限界荷重を設定するための前提条件を以下に示す。

- (1) 限界荷重を設定するにあたり，RPVノズル毎の荷重成分（ H ， F_z ， M ， M_z ）に比例倍する係数 β を設定するため，配管解析の途中経過の反力値を限界荷重設定の単位荷重とする（この単位荷重を本書では「ベース荷重」という）。表2-1及び表2-2にサーマルスリーブが接続しないノズルの再循環水出口ノズル（N1）とサーマルスリーブ付きノズルの再循環水入口ノズル（N2）を代表としてベース荷重を示す。
- (2) 地震の等価繰り返し回数は，弾性設計用地震動 S_d ：300回，基準地震動 S_s ：150回とする。

2.3.2 限界荷重の設定手順

以下の①～④に従って限界荷重を設定する。



上記の①～④のフロー図を図2-1に示す。例として，再循環水出口ノズル（N1）の地震荷重 S_s における計算プロセスを図2-2に示す。

なお，十分大きい係数 β を設定できない場合，個別に検討を行うものとする。

2.4 検討結果

2.4.1 限界荷重の係数 β の検討結果

図2-1のフローに従い，RPVノズルの限界荷重を決める係数 β の算出結果を表2-3に示す。なお，係数 β を決定する制限となった応力評価の種別（ P_m ， $P_L + P_b$ ， U_f ）も併せて表2-3に示す。

2.4.2 RPVノズル外荷重の設定

2.4.1で設定した限界荷重の係数 β をベース荷重に乗ずることで限界荷重を設定した。設定したRPVノズル外荷重をVI-2-3-3-1-1「原子炉圧力容器の応力解析の方針」の表4-1(4),(5)の外荷重としている。なお、最終的に配管解析結果の反力値が限界荷重に収まっていることを確認する。

表2-1 限界荷重設定のベース荷重の例（ノズル）

機器名称	地震荷重	条件	力 (kN)		モーメント (kN・m)	
			H	F _z	M	M _z
再循環水出口 ノズル (N1)	S _s	一次				
		二次				
再循環水入口 ノズル (N2) *	S _s	一次				
		二次				

注記*：サーマルスリーブ付きノズルである。

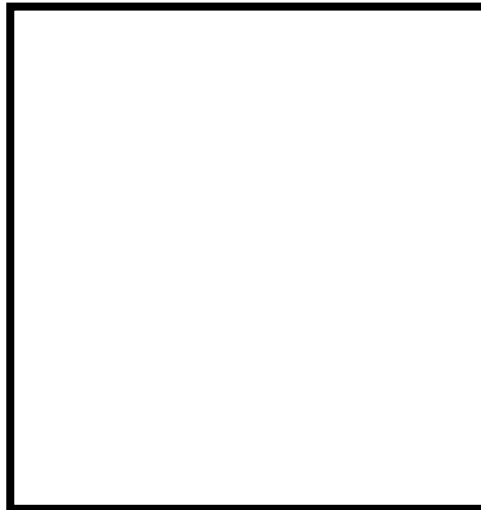
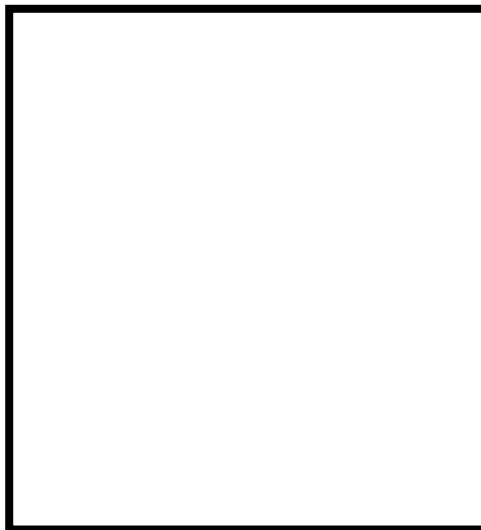


表2-2 限界荷重設定のベース荷重の例（ノズルサーマルスリーブ）

機器名称	地震荷重	条件	力 (kN)		モーメント (kN・m)	
			H	F _z	M	M _z
再循環水入口 ノズル (N2)	S _s	一次				
		二次				



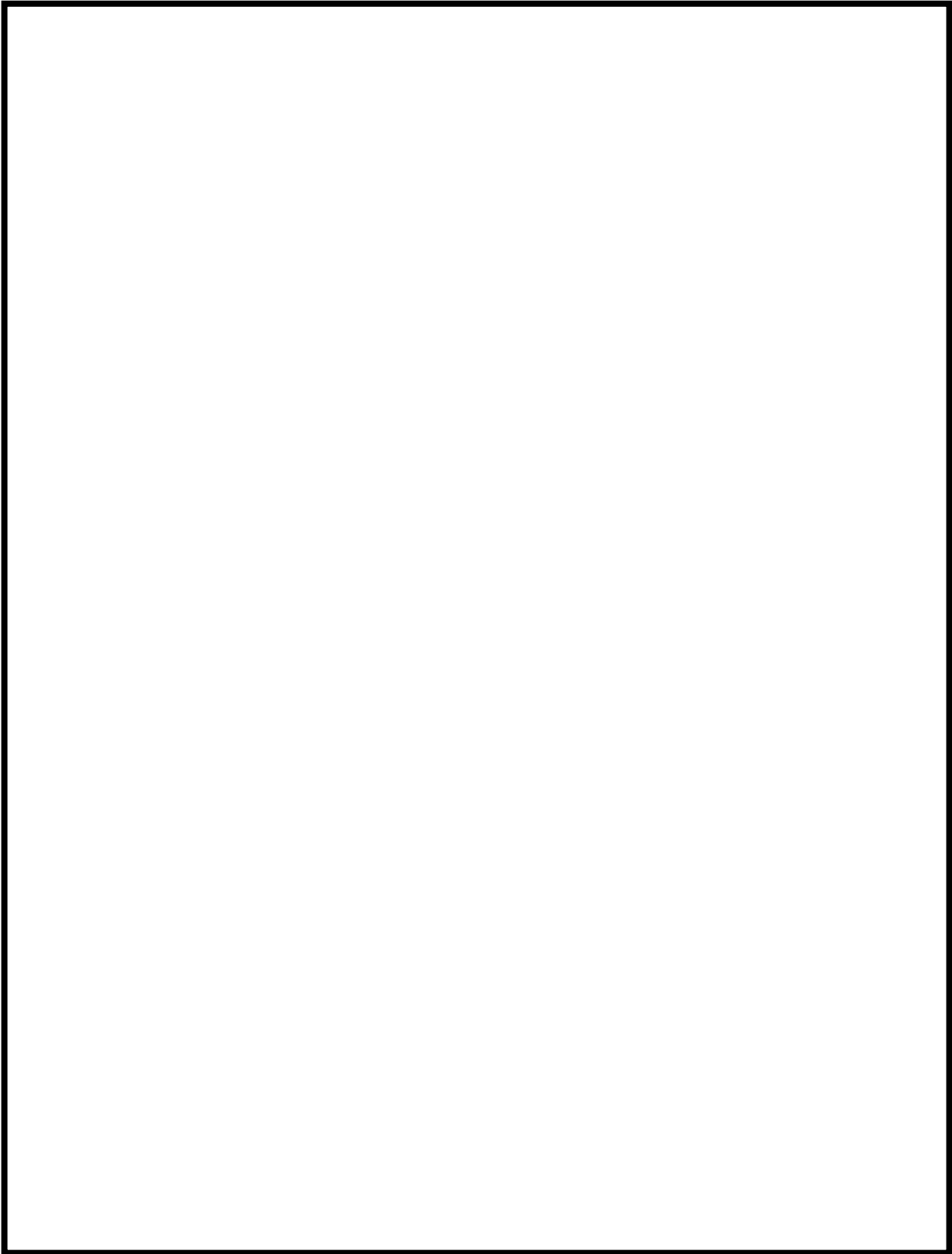


図2-1 RPVノズルの限界荷重設定フロー

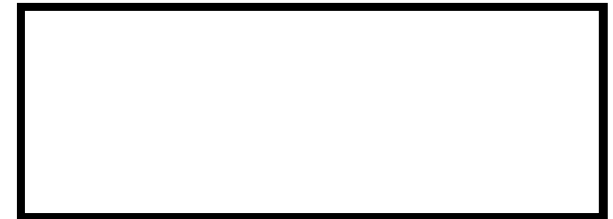
【ベース荷重 ($\beta =$)】

地震荷重	条件	力 (kN)		モーメント (kN・m)	
		H	F _z	M	M _z
S _s	一次	<input type="text"/>			
	二次				



係数 β	項目	P _m (MPa)	P _L + P _b (MPa)	疲労累積係数		
				U _f	U _n	U _{S_s}
<input type="text"/>	判定	○	○	○		
	応力値 (許容値)	<input type="text"/>				
4.9	判定	—*	×	—*		
	応力値 (許容値)		<input type="text"/>			

注記* : 一次応力 (P_L + P_b) が許容値を超えるため, 評価省略とした。



係数 β



ベース荷重に係数 $\beta =$ を乗じる。

【設定した限界荷重 ($\beta =$)】

地震荷重	条件	力 (kN)		モーメント (kN・m)	
		H	F _z	M	M _z
S _s	一次	<input type="text"/>			
	二次				

図2-2 限界荷重の計算例 (再循環水出口ノズル (N1) の地震荷重 S_s の場合)

表2-3 限界荷重の係数 β の検討結果

機器名称	地震荷重	係数 β	係数 β の設定根拠
再循環水出口ノズル (N1)	S d *		
	S s		
再循環水入口ノズル (N2)	S d *		
	S s		
主蒸気ノズル (N3)	S d *		
	S s		
給水ノズル (N4)	S d *		
	S s		
低圧炉心スプレイノズル (N5)	S d *		
	S s		
低圧注水ノズル (N6)	S d *		
	S s		
上ぶたスプレイノズル (N7)	S d *		
	S s		
計測及びベントノズル (N8)	S d *		
	S s		
ジェットポンプ計測ノズル (N9)	S d *		
	S s		
ほう酸水注入及び炉心 差圧計測ノズル (N11)	S d *		
	S s		
計測ノズル (N12, N13, N14)	S d *		
	S s		
ドレンノズル (N15)	S d *		
	S s		
高圧炉心スプレイノズル (N16)	S d *		
	S s		

補足-027-10-64 主排気ダクトの座屈評価で用いる係数の
設定根拠についての説明書

目 次

1. はじめに	1
2. 矩形ダクトの許容座屈曲げモーメント係数 (K_S) の設定根拠について	1
3. 円形ダクトの許容座屈曲げモーメント係数 (K_R) の設定根拠について	2
4. 手法1, 2による断面二次モーメントとの比較	4
5. 手法1, 2による許容座屈曲げモーメントとの比較	4
6. 引用文献	5

1. はじめに

主排気ダクトの耐震計算においては、手法3（VI-2-1-13「ダクト及び支持構造物の耐震計算書について」）を用い、ダクトの発生曲げモーメントが許容座屈曲げモーメントを満足するものとしている。

本資料は、矩形ダクト及び円形ダクトの許容座屈曲げモーメントの評価の際に用いる以下の係数の設定根拠、並びに断面二次モーメント及び許容座屈曲げモーメントの算出式の妥当性について、補足説明するものである。

矩形ダクトの許容座屈曲げモーメント係数（ K_s ）（=)

円形ダクトの許容座屈曲げモーメント係数（ K_R ）（=)

なお、本資料が関連する図書は以下のとおり。

- ・ VI-2-1-13「ダクト及び支持構造物の耐震計算書について」
- ・ VI-2-11-2-7-13「主排気ダクトの耐震性についての計算書」

2. 矩形ダクトの許容座屈曲げモーメント係数（ K_s ）の設定根拠について

矩形ダクトの許容座屈モーメントは以下に示すとおりである。

本式は、鶴戸口の式⁽¹⁾を基に安全裕度を考慮して定めたものである。

$$M = K_s \cdot \sqrt{\frac{\pi^2 \cdot E \cdot S_y}{1 - \nu^2}} \cdot b \cdot t^2$$

ここで、記号は以下のとおりである。

M : 許容座屈曲げモーメント (kN・m)

K_s : 矩形ダクトの許容座屈曲げモーメント係数 () (-)

E : 縦弾性係数 (MPa)

S_y : 設計・建設規格 付録材料図表 Part5 表8に定める値 (MPa)

ν : ポアソン比 (-)

b : 矩形ダクトの短辺長 (mm)

t : ダクト板厚 (mm)

本式の K_s は であり、導出過程は以下に示すとおりである。

矩形ダクトの許容座屈曲げモーメントに用いる K_s は、メーカーの試験結果を基に安全裕度を考慮して定めたものである。

メーカーにて実施した曲げ試験の結果を上記算出式に当てはめると、以下のとおり係数が算出できる⁽²⁾。

$$M' = \text{} \cdot \sqrt{\frac{\pi^2 \cdot E \cdot S_y}{1 - \nu^2}} \cdot b \cdot t^2$$

矩形ダクトの座屈モーメント式の安全率として、クラスMC容器の地震時の座屈評価に対する安全率 1.5 を準用すると以下の式となる。

$$M = \frac{1}{1.5} \cdot M' = \frac{1}{1.5} \cdot \boxed{} \cdot \sqrt{\frac{\pi^2 \cdot E \cdot S_y}{1 - \nu^2}} \cdot b \cdot t^2$$

$$= \boxed{} \cdot \sqrt{\frac{\pi^2 \cdot E \cdot S_y}{1 - \nu^2}} \cdot b \cdot t^2$$

上記より、 $K_s = \boxed{}$ となる。

3. 円形ダクトの許容座屈曲げモーメント係数 (K_R) の設定根拠について
円形ダクトの許容座屈曲げモーメントは以下に示すとおりである。

$$M = K_R \cdot \frac{E}{1 - \nu^2} \cdot \frac{D}{2} \cdot t^2$$

ここで、記号は以下のとおりである。

- M : 許容座屈曲げモーメント (kN・m)
 K_R : 円形ダクトの許容座屈曲げモーメント係数 ($\boxed{}$) (-)
 E : 縦弾性係数 (MPa)
 ν : ポアソン比 (-)
 D : 円形ダクト口径 (mm)
 t : ダクト板厚 (mm)

円形ダクトの許容座屈曲げモーメントは、円筒かくの屈服座屈の式⁽³⁾を基に安全裕度を考慮して定めたものである。なお、基にする式は、手法 1, 2 と同様である。

本式は、下記に示す機械工学便覧の薄肉円筒かくの座屈における曲げモーメントの最大値より設定している。

$$M = \frac{\beta}{S_R} \cdot \frac{E}{1 - \nu^2} \cdot R \cdot t^2$$

ここで、記号は以下のとおりである。

- β : 円筒かくの屈服座屈における曲げモーメントの係数
 理論値 : 0.99
 実験値 : 平均値1.14 最小値0.72
 S_R : メーカーにて設定した安全率
 R : 円形ダクト半径 (mm)

Rは円形ダクト半径であるため、円形ダクト口径Dに書き直すと以下のとおりである。

$$M = \frac{\beta}{S_R} \cdot \frac{E}{1 - \nu^2} \cdot \frac{D}{2} \cdot t^2$$

β は実験値の最小値 0.72 を用い、メーカーにて設定した安全率 ($S_R = \square$ *) を考慮している。 β と S_R を考慮すると以下の式となる。

$$M = \square \cdot \frac{E}{1-\nu} \cdot \frac{D}{2} \cdot t^2$$

上記より、 $K_R = \square$ となる。

注記*：メーカーにて実施した曲げ試験や施工実績に基づき、設定している。

なお、座屈応力の設計式によると、安全率 S_R は以下の式で定義される⁽⁴⁾。

$$S_R = \frac{3}{2} + \frac{2}{3} \cdot \left(\frac{\lambda'}{\Lambda} \right)^2$$

ここで主排気ダクトにおける λ' 及び Λ は以下のとおりである。

λ' ：相当細長比 (= 25.8) (－)

Λ ：オイラー式との境界の細長比 (= 119.9) (－)

以上より S_R は 1.53 となるため、3次元はりモデルでの主排気ダクト及び支持構造物の連成評価で S_R を \square として設定することは妥当である。

4. 手法1, 2による断面二次モーメントとの比較

手法1, 2における評価式を用いて算出した断面二次モーメントと、主排気ダクトの耐震計算に用いた断面二次モーメントの比較について、表1に示す。

表1に示すとおり、断面二次モーメントについては、手法1, 2と比較して同等からやや剛と言える。手法1, 2については、断面二次モーメントが柔側になるほうが安全側の評価となるため、柔側になるよう設定しているの、主排気ダクトの評価手法における断面二次モーメントは妥当な値と言える。

表1 手法1, 2による断面二次モーメントとの比較

設計項目	形状（主排気ダクト仕様）	主排気ダクトの耐震評価手法 (①)	手法 1, 2 による算出値 (②)	②/①
円形の断面二次モーメント ($\times 10^{10} \text{mm}^4$)	$\phi 3818 \times 9.0 \text{t}$			
	$\phi 2718 \times 9.0 \text{t}$			
矩形の断面二次モーメント ($\times 10^{10} \text{mm}^4$)	$5018 \times 2518 \times 9.0 \text{t}$ (弱軸)			

5. 手法1, 2による許容座屈曲げモーメントとの比較

手法1, 2における評価式を用いて算出した許容座屈曲げモーメントと、主排気ダクトの耐震計算に用いた許容座屈曲げモーメントの比較について、表2に示す。

表2に示すとおり、許容座屈曲げモーメントについては、手法1, 2と比較してほぼ同等から安全側の評価となっている。主排気ダクトの耐震評価に用いた許容座屈曲げモーメントについて、一部手法1, 2のほうが小さい値となるが、ダクト評価においては、2項及び3項に示すメーカーの試験結果等に基づいた安全係数を用いて耐震性を確認できているため、問題ない。

表2 手法1, 2による許容座屈曲げモーメントとの比較

設計項目	形状（主排気ダクト仕様）	主排気ダクトの耐震評価手法 (①)	手法 1, 2 による算出値 (②)	②/①
円形の許容座屈曲げモーメント ($\times 10^3 \text{kN} \cdot \text{m}$)	$\phi 3818 \times 9.0 \text{t}$			
	$\phi 2718 \times 9.0 \text{t}$			
矩形の許容座屈曲げモーメント ($\times 10^3 \text{kN} \cdot \text{m}$)	$5018 \times 2518 \times 9.0 \text{t}$			

6. 引用文献

- (1) 「薄肉長方形および箱形はりの座屈と強度」 (1963年8月日本機械学会 Journal of the J. S. M. E. Vol. 66, No. 535)
- (2) T. Kato, T. Nakatogawa, I. Ichihashi, M. Takenaka and T. Nomura, Limit Strength of Rectangular Air Ventilation Ducts Under-Seismic Design Condition, 10th International Conference on Structural Mechanics in Reactor Technology(1989)
- (3) 「新版機械工学便覧」 (1987年 日本機械学会編) A4-7.5.3a. iv項
- (4) 「新版機械工学便覧」 (1987年 日本機械学会編) A4-4.2.2c項

補足-027-10-65 使用済燃料貯蔵ラックのアンカー部評価

目 次

1. はじめに	1
2. 評価項目	1
3. 評価対象	2
4. 評価条件及び発生荷重評価方法	3
5. アンカー部許容引張荷重評価	6
6. 評価結果	9

1. はじめに

使用済燃料貯蔵ラック（以下「ラック」という。）は、設計基準対象施設においてはSクラス施設に、重大事故等対処設備においては常設耐震重要重大事故防止設備及び常設重大事故緩和設備に分類され、VI-2-4-2-2「使用済燃料貯蔵ラックの耐震性についての計算書」にて基準地震動 S_s に対する評価を行っている。

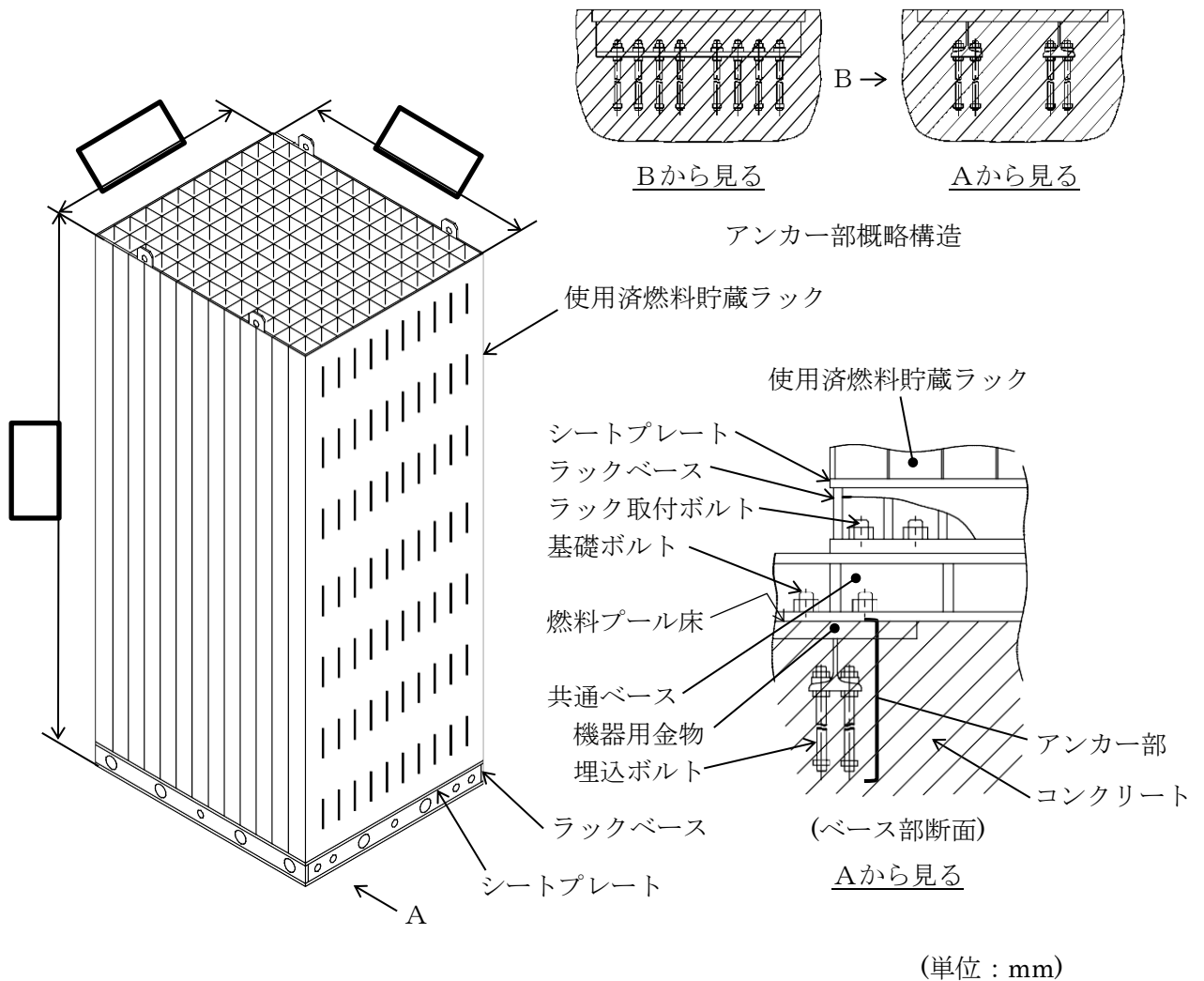
本書は、ラックのアンカー部が、基準地震動 S_s に対して十分な構造強度を有していることを説明するものである。

2. 評価項目

ラックのアンカー部概略構造図を図1に示す。

アンカー部の機器用金物、埋込ボルト、コンクリートのうち、機器用金物のプレート部上面には基礎ボルトが取り付けられている。埋込ボルトは、コンクリート中の鉄筋を避けて配置する必要があるが、基礎ボルト配置のピッチと一致しないため、ラックのアンカー部では2段構造の機器用金物を用いて異なるボルト配置に対応している。

耐震評価は、機器用金物、埋込ボルト、コンクリートに対して実施した。本書では、最も裕度が小さいコンクリートの引張評価について記載する。



3. 評価対象

ラックのアンカー部である燃料プール底部の機器用金物は、表 1 に示す 2 つのタイプがある。

このうちラック側基礎ボルトからの荷重が大きく作用し、かつコンクリートのコーン状破壊時の有効投影面積（埋込ボルト 1 本当たり）が小さくなるタイプ 2 の機器用金物を対象として評価を行う。

表 1 機器用金物の種類

タイプ 1	タイプ 2
ラック側：基礎ボルト <input type="checkbox"/> 本 コンクリート側：埋込ボルト <input type="checkbox"/> 本	ラック側：基礎ボルト <input type="checkbox"/> 本 コンクリート側：埋込ボルト <input type="checkbox"/> 本

4. 評価条件及び発生荷重評価方法

アンカー部の強度評価に必要な荷重として、地震発生時に機器用金物に作用する引張荷重を求める。機器用金物と共通ベース、ラック配置の概要を図2に、機器用金物の荷重状態を図3に示す。

引張荷重は、最大発生荷重としてラック（共通ベース含む）が互いに反対方向に転倒する場合を考慮する。

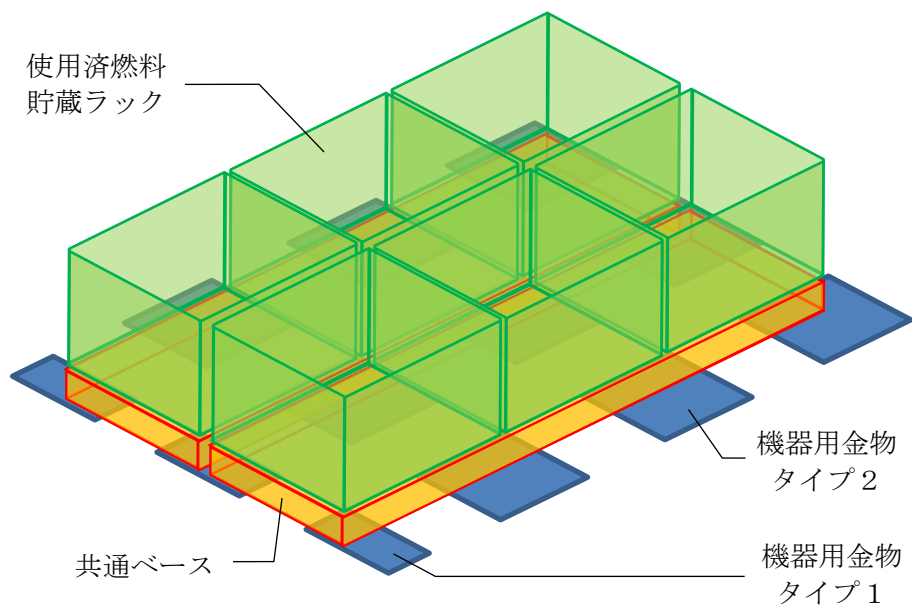


図2 配置概要図

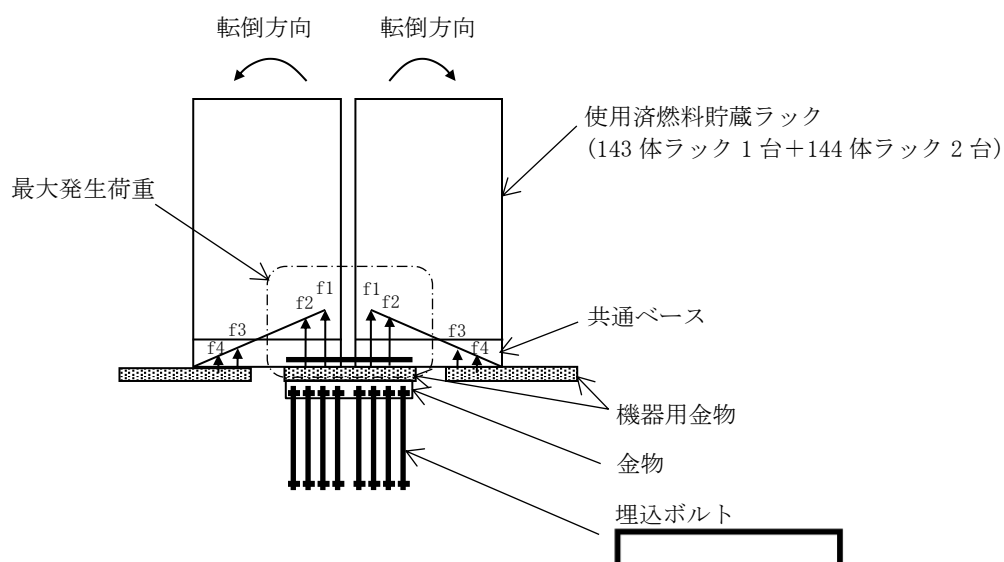


図3 荷重状態

以下に発生荷重の算出方法を示す。

- (1) 機器用金物に作用する荷重は、VI-2-4-2-2「使用済燃料貯蔵ラックの耐震性についての計算書」の基礎ボルトの応力計算で求めた基準地震動 S_s 時の荷重値を引用する。

地震の方向により発生する荷重値が異なるため、NS 方向、EW 方向地震時のうち、基礎ボルト 1 本当りの荷重が大きくなる方向時を選出し、機器用金物 1 枚に作用する引張荷重を計算する。

なお、引張荷重は、図 3 に示すとおり基礎ボルトの配列数に応じ基礎ボルト 1 本目 (f_1)、2 本目 (f_2) の引張力を求めて合算する。 f_1 、 f_2 の値は、VI-2-4-2-2「使用済燃料貯蔵ラックの耐震性についての計算書」に示す (4.6.8) 式により求めることができる。以下に計算式を示す。なお、(4.6.8) 式の i は方向を示すが、ここでは基礎ボルトの引張荷重が大きくなる NS 方向について記載することとし、以降 i の記載は省略する。

$$f_1 = \frac{l_1 \cdot \left\{ \sqrt{M_t^2 + (C_v \cdot m_t \cdot g \cdot l_g)^2} - m_t \cdot g \cdot l_g \right\}}{n_1 \cdot l_1^2 + n_2 \cdot l_2^2 + n_3 \cdot l_3^2 + n_4 \cdot l_4^2}$$
$$f_2 = \frac{l_2 \cdot \left\{ \sqrt{M_t^2 + (C_v \cdot m_t \cdot g \cdot l_g)^2} - m_t \cdot g \cdot l_g \right\}}{n_1 \cdot l_1^2 + n_2 \cdot l_2^2 + n_3 \cdot l_3^2 + n_4 \cdot l_4^2}$$

表 2 に示すアンカー一部発生荷重評価に用いる諸元を用いて計算した f_1 、 f_2 の値は以下のとおりである。

$$f_1 = 167400 \text{ (N)}$$

$$f_2 = 145200 \text{ (N)}$$

f_1 、 f_2 を合算することで、機器用金物 1 枚あたりの荷重値 F_m を求める。以下に計算式を示す。

$$F_m = (f_1 \cdot n_{m1} + f_2 \cdot n_{m2}) \cdot 2$$

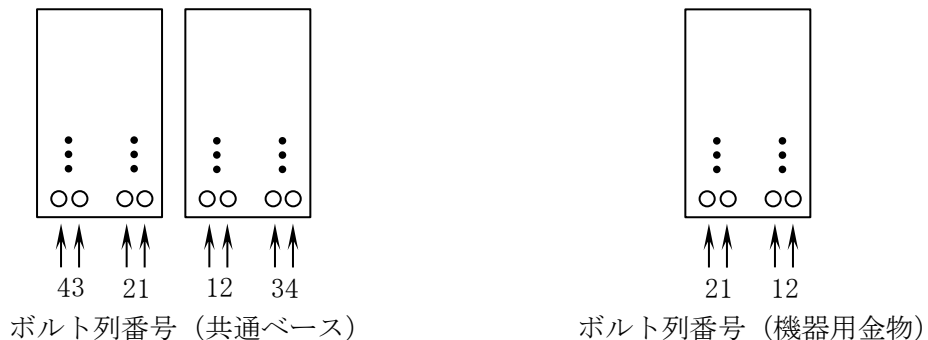
機器用金物タイプ 2 (共通ベース中央部) を例として、表 2 に示すアンカー一部発生荷重評価に用いる諸元を用いて計算した計算結果を以下に示す。

$$F_m = \boxed{\quad} \text{ (N)}$$

- (2) アンカー部の強度評価では埋込ボルト 1 本当りの荷重で評価するため、(1) で求めた機器用金物 1 枚当りの荷重値 F_m を埋込ボルト本数 (機器用金物タイプ 2 の場合、 $\boxed{\quad}$ 本) で除して評価に用いる荷重値を算出する。

表 2 アンカー部発生荷重評価に用いる諸元

記号	記号の説明	入力値
F_c	143 体ラックベース底部に働くせん断力	8.717×10^5 (N)
F_d	144 体ラックベース底部に働くせん断力	8.779×10^5 (N)
M_t	ラック据付時の全体の転倒モーメント	
M_b	共通ベース底部の転倒モーメント	8.385×10^3 (N・m)
M_c	143 体ラックベース底部の転倒モーメント	1.978×10^6 (N・m)
M_d	144 体ラックベース底部の転倒モーメント	1.991×10^6 (N・m)
M_e	143 体ラックのせん断力による共通ベース底部の転倒モーメント	
M_f	144 体ラックのせん断力による共通ベース底部の転倒モーメント	1.712×10^5 (N・m)
C_v	鉛直方向設計震度	1.73
m_t	ラック据付時の共通ベースの全質量	
g	重力加速度	9.80665 (m/s ²)
h	共通ベース高さ	0.195 (m)
l_1	共通ベース端の支点部からボルト列 1 の基礎ボルトまでの距離	1.538 (m)
l_2	共通ベース端の支点部からボルト列 2 の基礎ボルトまでの距離	1.334 (m)
l_3	共通ベース端の支点部からボルト列 3 の基礎ボルトまでの距離	0.314 (m)
l_4	共通ベース端の支点部からボルト列 4 の基礎ボルトまでの距離	0.11 (m)
l_g	共通ベース端の支点部から重心までの距離	0.83075 (m)
n_1	共通ベースのボルト列 1 の基礎ボルトの本数	12
n_2	共通ベースのボルト列 2 の基礎ボルトの本数	12
n_3	共通ベースのボルト列 3 の基礎ボルトの本数	12
n_4	共通ベースのボルト列 4 の基礎ボルトの本数	12
n_{m1}	機器用金物のボルト列 1 の基礎ボルトの本数	
n_{m2}	機器用金物のボルト列 2 の基礎ボルトの本数	



5. アンカー部許容引張荷重評価

原子力発電所耐震設計技術指針（J E A G 4 6 0 1 -1991 追補版）に基づいたアンカー部の評価方法を以下に示す。また、アンカー部許容引張荷重評価に用いる諸元を表3に示す。

$$p \leq p_a = \text{Min} (p_{a1}, p_{a2})$$

$$p_{a1} = 0.31K_1 A_C \sqrt{F_C}$$

$$p_{a2} = K_2 \alpha A_O F_C$$

p : 埋込ボルト1本当りの引張荷重 (N)

p_a : 埋込ボルト1本当りのコンクリート部の許容引張荷重 (N)

p_{a1} : コンクリート躯体がコーン状破壊する場合の埋込ボルト1本当りの許容引張荷重 (N)

p_{a2} : 埋込ボルト頭部に接するコンクリート部が支圧破壊する場合の埋込ボルト1本当りの許容引張荷重 (N)

K_1 : コーン状破壊する場合の引張耐力の低減係数

K_2 : 支圧破壊する場合の引張耐力の低減係数

F_C : コンクリート強度 (設計基準強度)

A_C : 埋込ボルト1本当りのコンクリートのコーン状破壊面の有効投影面積 (mm²)

α : 支圧面積と有効投影面積から定まる係数 ($=\sqrt{A_C/A_O}$ かつ 10 以下)

A_O : 支圧面積 (mm²)

なお、コンクリートのコーン状破壊面の有効投影面積を図4に示す。本評価では、機器用金物に取り付けられた埋込ボルトの群体としての投影面積を算出し、ボルト本数で除して1本当りの投影面積を算出している。機器用金物は、燃料プール床面に定ピッチで複数配置されているため、隣接する金物の投影範囲と重複する部分は有効投影面積として考慮しないものとする。

表 3 アンカー部許容引張荷重評価に用いる諸元

記号	入力値
	機器用金物 タイプ 2
p_{a1}	84560 (N)
p_{a2}	132000 (N)
K_1	0.6
K_2	0.75
F_c	23.536 (N/mm ²)
A_c	
α	
A_o	

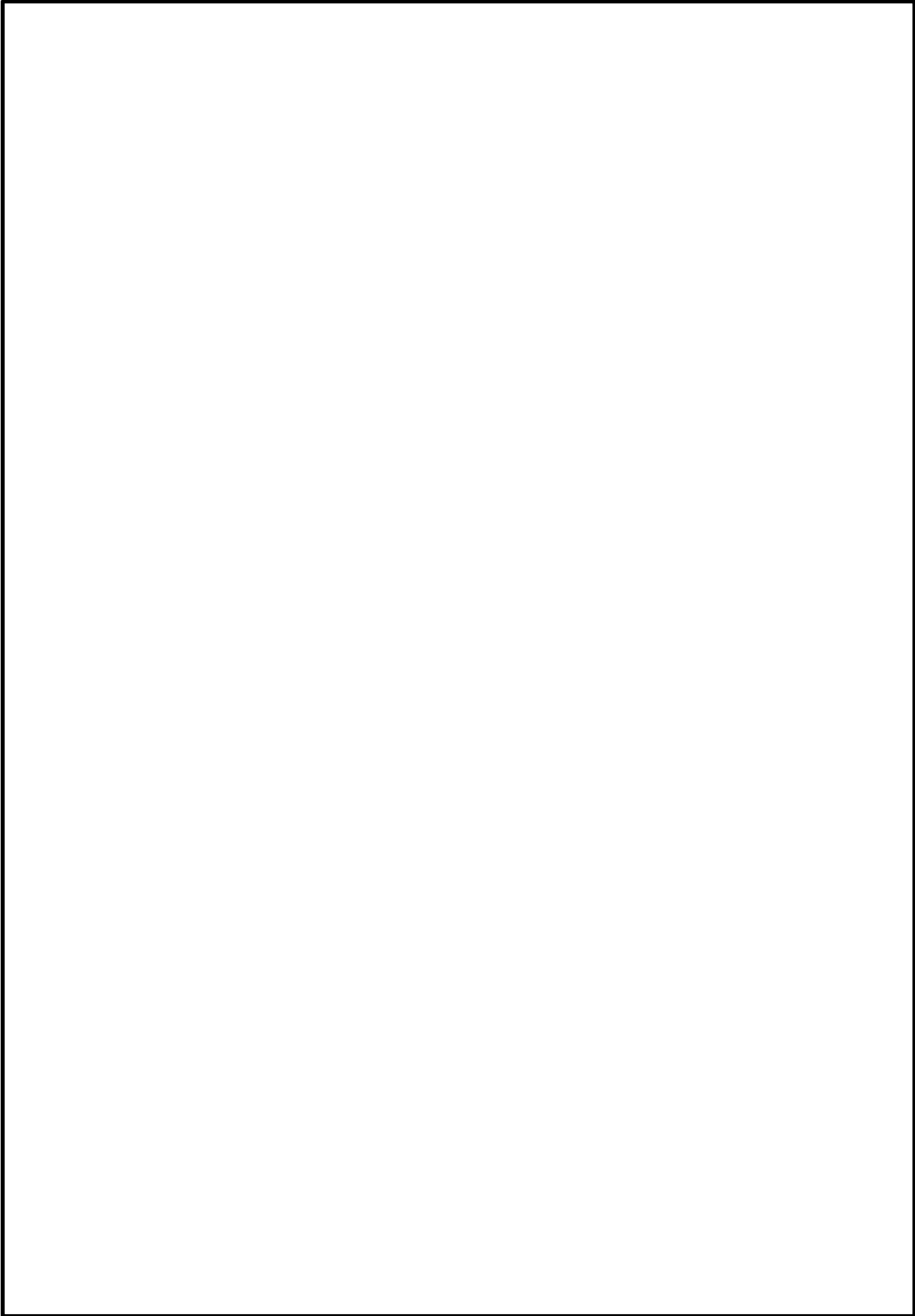


図4 機器用金物 タイプ2の有効投影面積

6. 評価結果

機器用金物 タイプ2のアンカー部耐震評価結果を表4に示す。引張荷重は、許容引張荷重以下であり、十分な構造強度を有していることを確認した。

表4 アンカー部の評価結果

機器用金物の種類	引張荷重 (N)	許容引張荷重 (N)	裕度
タイプ2	78160	84560	1.08

補足-027-10-66 シヤラグの耐震評価におけるコンクリートの
許容応力度について

目 次

1. 概要	1
2. コンクリートの評価位置及び許容応力度	1
3. 支圧応力度の適用性	2
(参考) 鉄筋コンクリート構造計算基準・同解説 (抜粋)	4

1. 概要

本資料は、VI-2-9-2-4「シヤラグの耐震性についての計算書」におけるコンクリートの許容応力度について、昭和59年9月17日付け59資庁第8283号にて認可された工事計画の添付書類（以下「既工認」という。）からの変更点を説明するものである。

2. コンクリートの評価位置及び許容応力度

既工認及び今回工認におけるコンクリートの評価位置を図1に示す。コンクリートの許容応力度は、既工認では許容圧縮応力度を適用していたが、評価位置1, 2に発生する応力度はいずれもコンクリートに対して局部的なものであるため、今回工認では許容支圧応力度を適用する。既工認及び今回工認で適用する許容応力度は、それぞれ表1, 2に示すとおりであり、J E A G 4 6 0 1・補-1984で規定されている。

なお、シヤラグの耐震評価におけるコンクリートの許容支圧応力度の適用については、東海第二新規制工認にて適用実績がある。

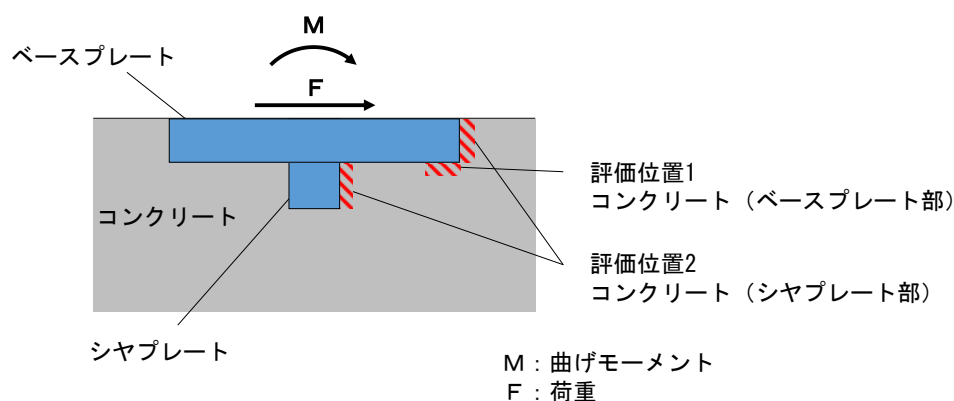


図1 コンクリートの評価位置

表1 コンクリートの許容応力度（既工認）

許容応力状態	許容圧縮応力度 f_c^*	
Ⅲ _A S	$f_c = 2/3 \cdot F_c$	160 kg/cm ² (15.6 N/mm ²)
Ⅳ _A S	$f_c = 0.75 \cdot F_c$	180 kg/cm ² (17.6 N/mm ²)

注記* : F_c = コンクリートの設計基準強度

表2 コンクリートの許容応力度 (今回工認)

許容応力状態	許容支圧応力度 f'_c *1	
Ⅲ _A S	$f'_c = f_c \cdot \sqrt{A_c/A_1}$ かつ $f'_c \leq 2 \cdot f_c$ 及び $f'_c \leq F_c$	23.5 N/mm ²
Ⅳ _A S		
V _A S *2		

注記*1: f_c = コンクリートの許容圧縮応力度

A_1 = 局部圧縮を受ける面積 (支圧面積)

A_c = 支圧端から離れて応力が一様分布となったところの面積 (支承面積)

F_c = コンクリートの設計基準強度

*2: V_ASとしてⅣ_ASの許容限界を用いる。

3. 支圧応力度の適用性

J E A G 4 6 0 1・補-1984では、日本建築学会「鉄筋コンクリート構造計算基準」を参照した上で、コンクリートの許容支圧応力度について、「圧縮力の作用面積が局部的な場合はコンクリート全体が圧縮力をうける場合より大きな耐力を有する」と記載されている。このため、コンクリート全体が圧縮荷重を受ける場合は許容圧縮応力度を、コンクリートが局部的に圧縮荷重を受ける場合は許容支圧応力度を適用することが適切であると考えられる。

表2のとおり、許容支圧応力度は許容圧縮応力度 f_c を $\sqrt{A_c/A_1}$ 倍に割り増した値が考慮されており、これは、局部的な荷重を受ける場合には、荷重はコンクリート内で広がり持って伝達されるものと考えることができる。許容圧縮応力度及び許容支圧応力度を適用する場合の荷重イメージを図2に示す。なお、表2のとおり、許容支圧応力度は「 $f'_c \leq F_c$ 」として制限されており、表1及び表2を踏まえると、 A_c が A_1 の2.25倍以上の場合には許容圧縮応力度 f'_c は F_c と等しくなる。

シヤラグの耐震評価においては、シヤラグからコンクリートが荷重を受ける範囲に対して、シヤラグ設置箇所のコンクリートは十分な大きさを有する(図3参照)ことから、コンクリート内で広がりを持った荷重の伝達に期待できると考えられるため、コンクリートの評価に許容支圧応力度を適用することは適切であると考えられる。

なお、シヤラグの許容支圧応力度算出においては、 A_c が A_1 より十分に大きいと考えられることから、 A_c 及び A_1 について具体的な面積については考慮せず、表2の「 $f'_c \leq F_c$ 」から F_c を許容支圧応力度 f'_c としている。

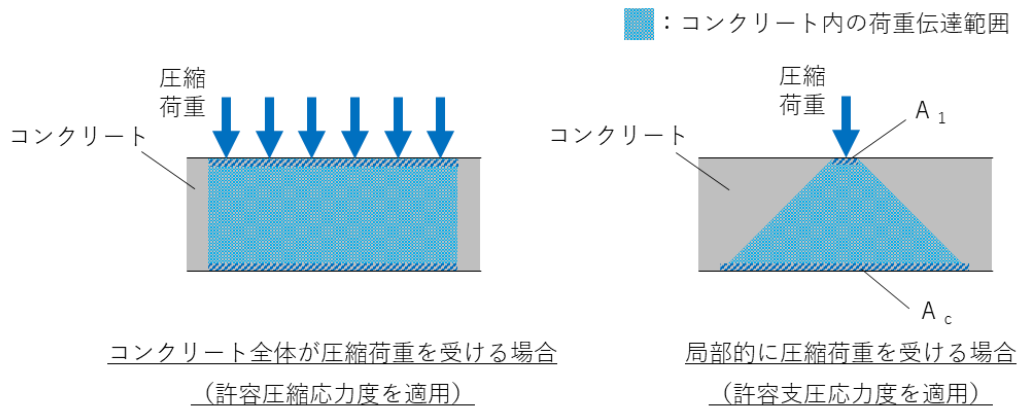


図2 荷重イメージ

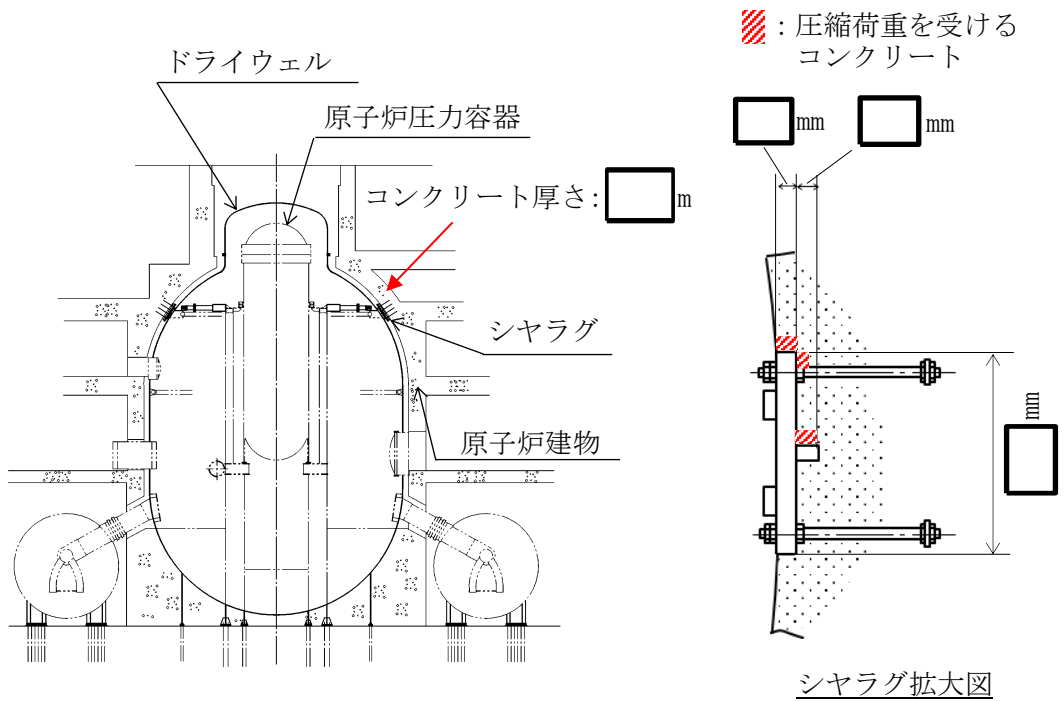


図3 シヤラグ設置概要

(参考) 鉄筋コンクリート構造計算基準・同解説 (抜粋)



補足-027-10-67 ガスタービン発電機の耐震性についての
計算書に関する補足説明資料

目 次

1. 概要	1
2. ガスタービン発電機の固有値解析モデル	2
3. ガスタービン機関の機能維持評価モデル	9
4. 発電機制御盤の固有値解析モデル.....	13

1. 概要

本資料は、VI-2-10-1-2-3-1「ガスタービン発電機ガスタービン機関及び発電機の耐震性についての計算書」及びVI-2-10-1-2-3-2「ガスタービン発電機励磁装置及び保護継電装置の耐震性についての計算書」のうち解析コードを使用して評価を実施する、ガスタービン発電機及び発電機制御盤の固有値解析モデル並びにガスタービン機関の機能維持評価モデルの詳細な考え方を説明するものである。

2. ガスタービン発電機の固有値解析モデル

ガスタービン機関を含むガスタービン発電機は、3次元FEMモデルにて固有値解析を実施する。解析モデルを図2-1に、解析モデルの詳細説明を以下に示す。

- (1) フレーム及びパッケージサポートははり要素、台板はシェル要素でモデル化する。
- (2) ガスタービン発電機の主要機器及び主要補機の質量は、それぞれの重心に集中するものとする。エンクロージャの扉は、質量のみ考慮することとし、扉取付部周辺フレームに付加する。エンクロージャの外板も質量のみ考慮することとし、フレームに分散して付加する。配管、ケーブル類は、等分布荷重として、当該質量のみをモデル全体に付加する。

【モデル化方針の詳細】

- a. ガスタービン発電機の主要機器 : 図2-2参照
主要機器の例として、ガスタービン機関及び発電機について説明する。ガスタービン機関及び発電機は(3)項記載のとおり、機器単体では剛構造として取り扱う。したがって、FEMモデルとしてはそれぞれの重心位置に質点でモデル化し、質点と台板の接続は剛なはり要素（剛体要素）でモデル化する。また、はり要素の台板への接続箇所は取付ボルト位置とし、6成分接続（接続位置において、はり要素と台板節点の回転3方向及び並進3方向の挙動が同じとなる）とする。
- b. ガスタービン発電機の主要補機 : 図2-3参照
主要補機の例として、潤滑油冷却器及び潤滑油冷却器ファンについて説明する。潤滑油冷却器及び潤滑油冷却器ファンは、支持構造物（強度部材）ではないため、重心位置に質点でモデル化する。また、内挿拘束要素*により質点とエンクロージャフレームを接続する。接続は取付ボルト位置とする。また、他の例として、吸気ダクトも同様に重心位置に質点でモデル化し、内挿拘束要素により質点と吸気消音器への取付ボルト位置で接続する。
- c. エンクロージャ扉 : 図2-4参照
上記の、主要補機のモデル化方針と同じである。
- d. エンクロージャフレーム及び台板等 : 図2-5～2-7参照
エンクロージャフレーム及び台板は、ガスタービン発電機の支持構造物であり、ガスタービン発電機の応答を精緻に算定するために、はり要素及びシェル要素でモデル化する。ここで、エンクロージャフレームは、角形鋼管、山形鋼及び溝形鋼を主な構成部材としているため、はり要素でモデル化する。また、台板は、H形鋼及びリブ形状の圧延鋼材を主な構成部材としているため、シェル要素でモデル化する。また、他の例として、吸気消音器も同様に角形鋼管及び山形鋼を主な構成部材としているため、はり要素でモデル化する。
- e. エンクロージャ外板、配管及びケーブル類
エンクロージャ外板、配管及びケーブル類は、支持構造物（強度部材）ではないこと、また、エンクロージャ外板はエンクロージャフレームに、配管及びケー

ブル類はエンクロージャ及び台板に対して取付されることから、それぞれの質量を取付位置となるエンクロージャフレーム及び台板に分散してモデル化する。

注記*：内挿拘束要素

「MSC NASTRAN」における「内挿拘束要素 (RBE3)」と呼ばれる要素。

本FEMモデルでは、内挿拘束要素を使用することで、主に以下の解析条件を設定する。

- 機器重心位置節点の質量、荷重及びモーメントを、取付ボルト位置節点に分配する。
- 分配する質量、荷重及びモーメントは、機器重心位置節点と取付ボルト位置節点の位置関係をもとに計算する（取付ボルト位置節点での各荷重の合力とモーメントが、機器重心位置節点での荷重とモーメントに等しくなるように分配する）。
- 一般的なはり要素とは異なり、剛性を持たない要素である。したがって、機器取付位置の剛性を実機より柔側に設定することで応答解析上、保守的な評価となる（はり要素の適切な剛性設定が困難な場合にも、有効な要素である）。

参考として、「剛体要素 (RBE2)」は、十分に大きな剛性を持つため変形しないはり要素である。ここで、機器重心位置節点に、ある加速度が付加された場合の変形図のイメージを図2-8及び図2-9に示す。

- (3) ガスタービン機関及び発電機は、1個の大きなブロック状をしており、重心の位置がブロック状のほぼ中心にあり、かつ、下面が取付ボルトにて固定されている。したがって、全体的に一つの剛体と見なせるため1質点でモデル化する。

【モデル化方針の詳細】

(2)項記載のとおり、ガスタービン機関及び発電機は、それぞれの重心位置に質点でモデル化し、質点と台板の接続は剛体要素でモデル化する。また、はり要素の台板への接続箇所は取付ボルト位置とし、6成分接続とする。

- (4) ガスタービン発電機の主要機器及び主要補機の重心位置については、公称値による重心位置を設定するものとする。

【モデル化方針の詳細】

詳細設計図面記載の重心位置を、FEMモデルに反映する。

- (5) 拘束条件は、基礎ボルトにて完全拘束とする。なお、基礎ボルトは剛体として評価する。パッケージサポートと壁面の拘束条件についても同様に完全拘束とする。

【モデル化方針の詳細】

台板は十分な板厚 (18mm) を有しており剛性が高いこと及び台板の外縁部を適切にトルク管理された基礎ボルト (40本) で締結していることから、ボルト中心位置に設定したモデル節点を完全拘束とする。

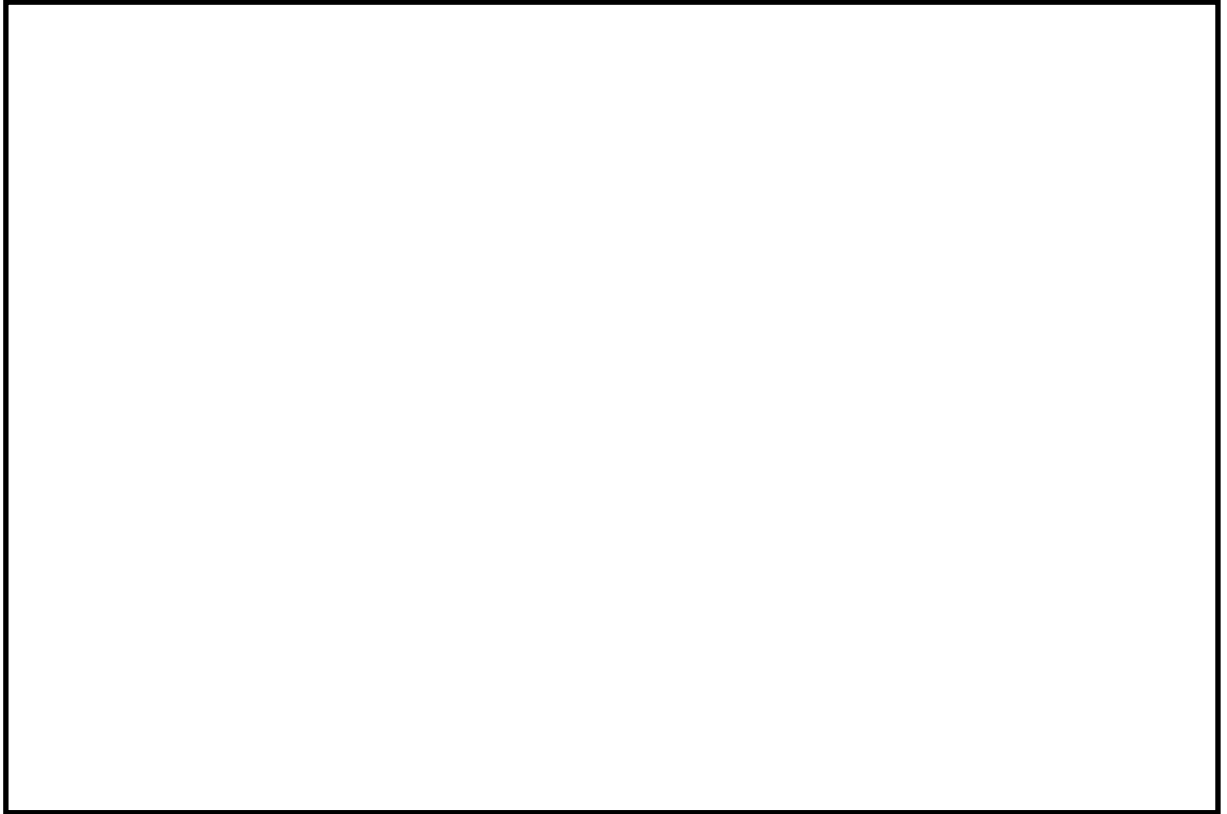
(6) 耐震計算に用いる寸法は、公称値を使用する。

【モデル化方針の詳細】

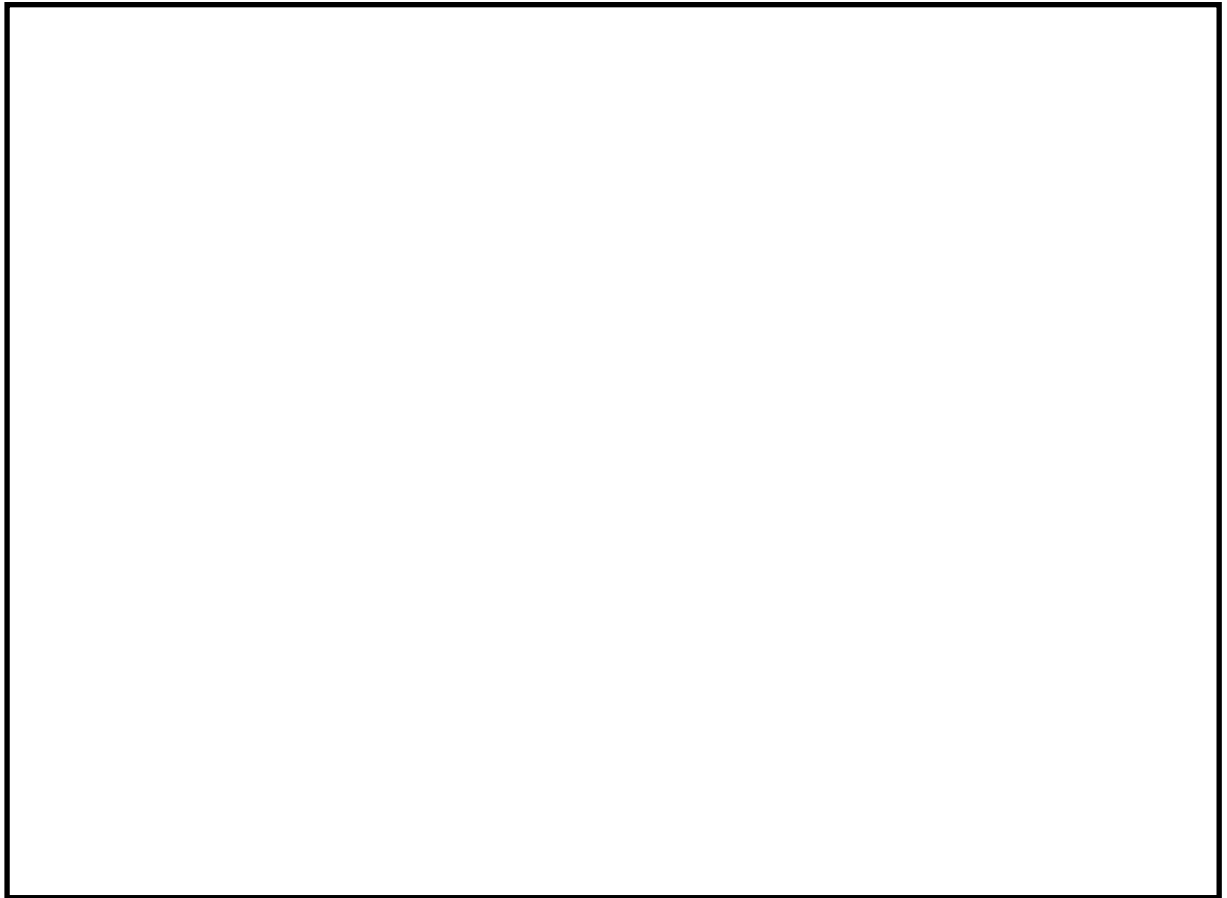
詳細設計図面記載の寸法を、FEMモデルに反映する。

(7) 解析コードは、「MSC NASTRAN」を使用し、固有値を求める。

なお、評価に用いる解析コードの検証及び妥当性確認等の概要については、VI-5「計算機プログラム（解析コード）の概要」に示す。



(解析モデル)



(実機構造)

図 2-1 ガスタービン発電機の解析モデル (詳細)



図 2-2 ガスタービン発電機の主要機器の例（ガスタービン機関及び発電機）



図 2-3 ガスタービン発電機の主要補機の例（潤滑油冷却器及び潤滑油冷却器ファン）



図 2-4 エンクロージャ扉

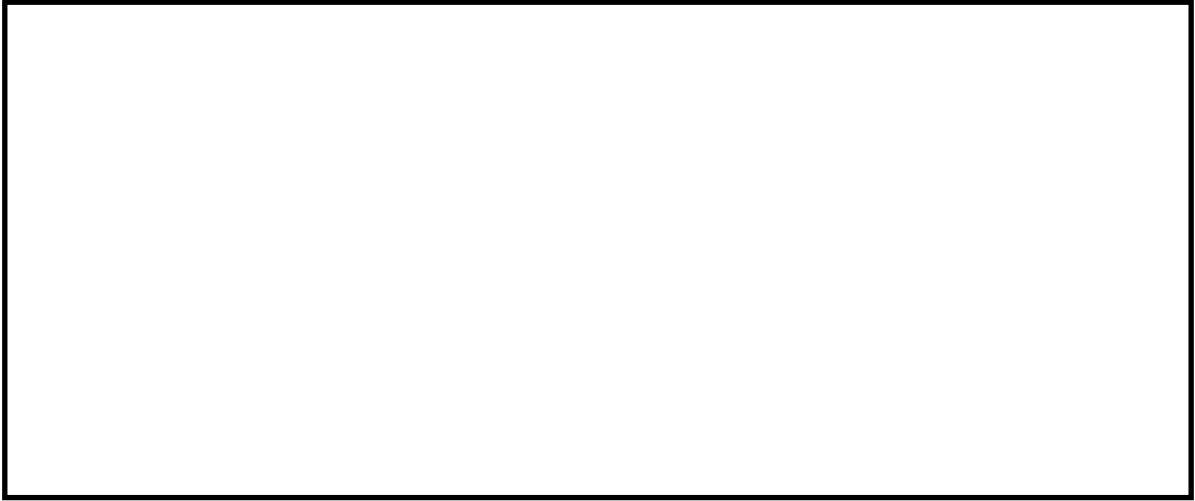


図 2-5 エンクロージャフレームの例（角形鋼管）

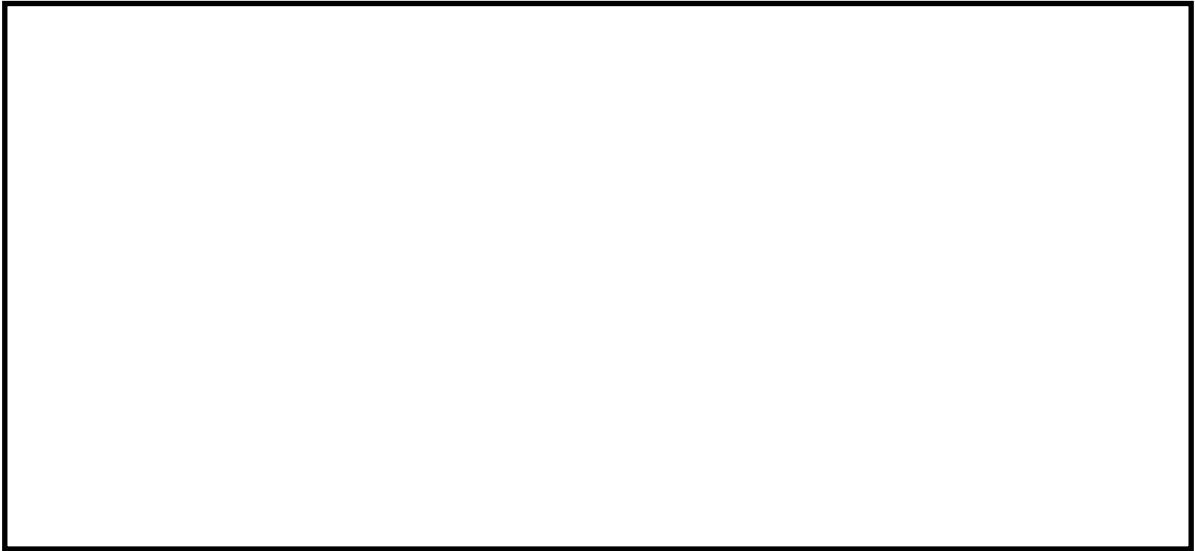


図 2-6 エンクロージャフレームの例（山形鋼，溝形鋼）

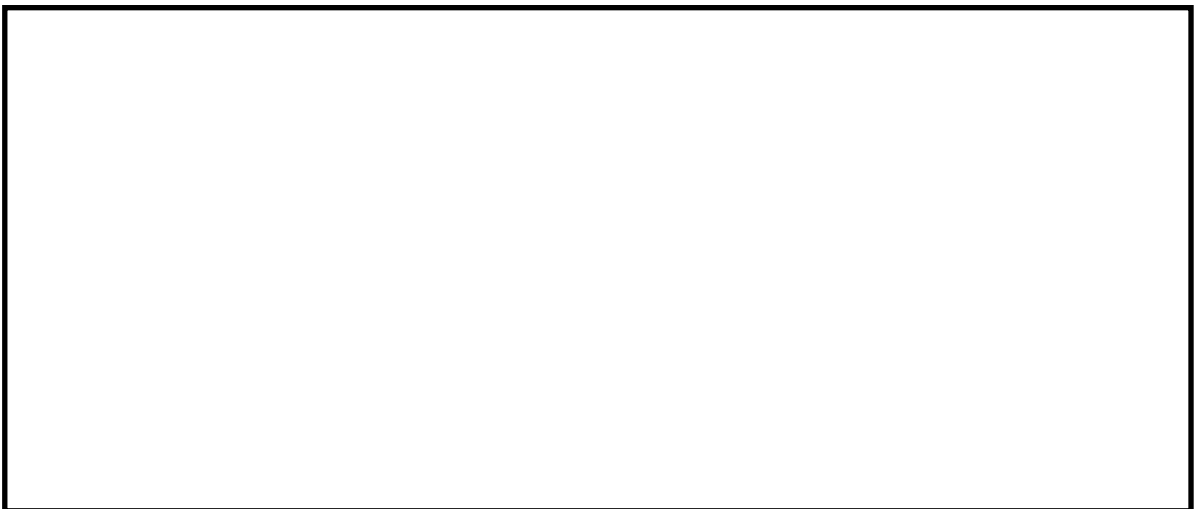


図 2-7 台板の例（H 形鋼，リブ形状の圧延鋼材）

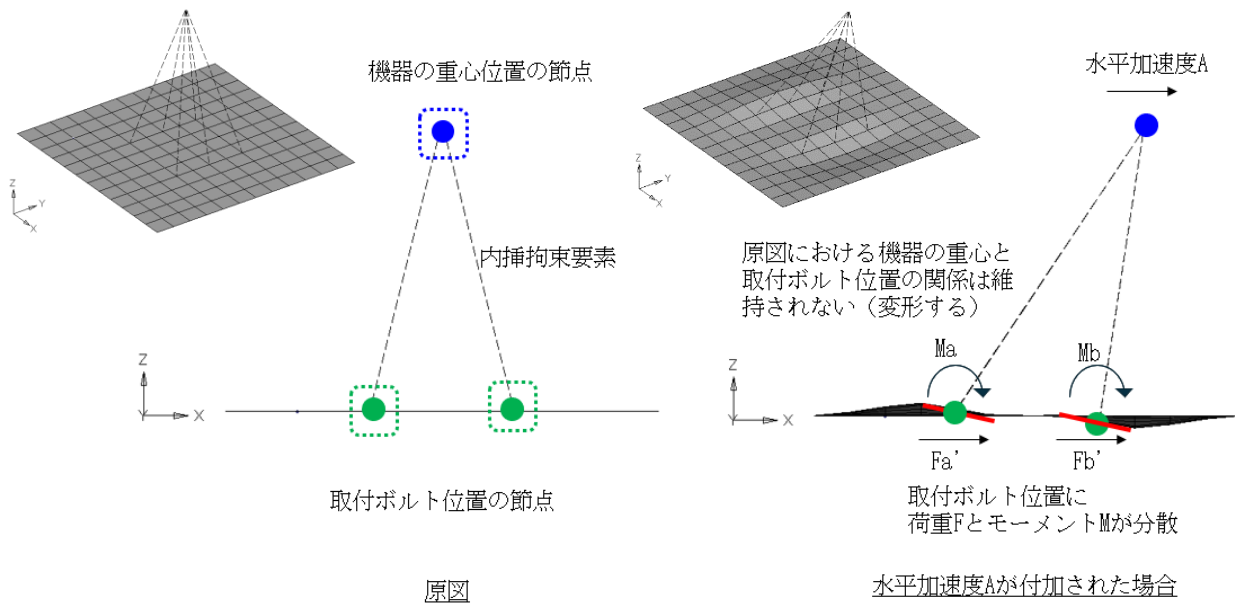


図 2-8 内挿拘束要素 (変形図のイメージ)

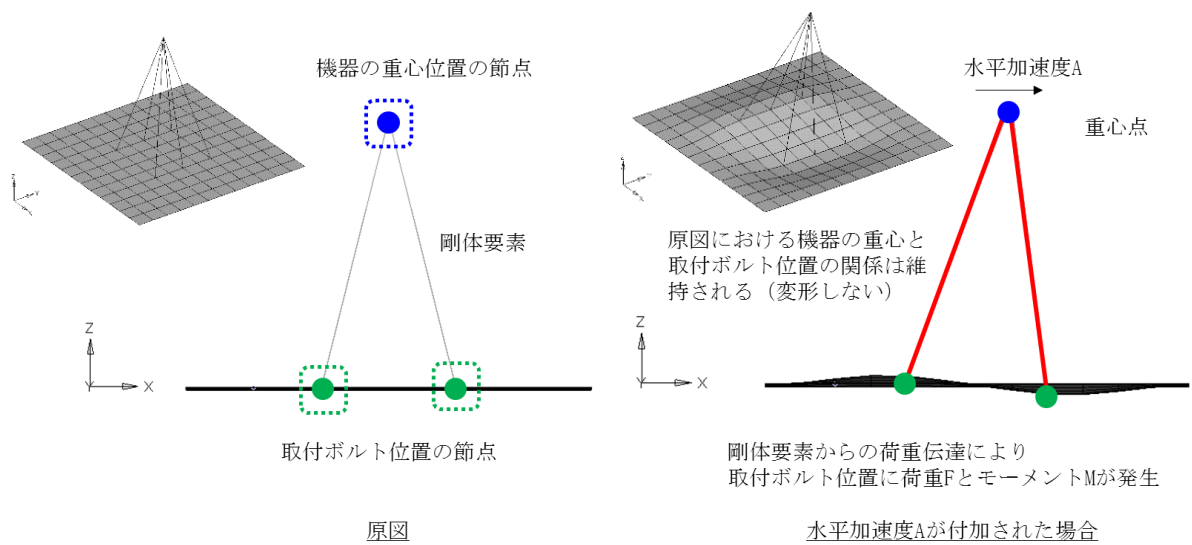


図 2-9 剛体要素 (変形図のイメージ)

3. ガスタービン機関の機能維持評価モデル

ガスタービン機関における動的機能維持評価として、はりモデルにて軸とケーシングのクリアランスを評価する。解析モデルを図3-1に、解析モデルの詳細説明を以下に示す。

- (1) クリアランスの評価にあたっては、ガスタービン機関回転軸とケーシングとの相対変位が評価対象となるが、ケーシングは運転時の高圧に耐えかつ高速回転する回転軸を支える厚肉構造であることから変形しない剛体として扱い、回転軸のみモデル化して地震時の応答加速度に対するたわみ量（変位量）を評価する。

【モデル化方針の詳細】

モデル化範囲は回転体である、メインシャフト及び外周部となるロータ部（第1段インペラ、第2段インペラ、カップリングロータ、第1段タービンディスク、第2段タービンディスク、第3段タービンディスク及びNO.2ベアリングシャフト）とする。回転体（ガスタービン機関回転軸）のたわみ量が、静止体（ケーシング）とのクリアランス以下であり、接触しないことを確認する。

- (2) ガスタービン機関回転軸は、メインシャフト及びロータ部からなる2重構造である。この内外2つの構造を各々はり要素でモデル化する。特に、インペラ、タービンディスク等の複雑な翼形状を持つロータ部品は、全体を一様なはり要素でモデル化できないため、実機構造と等価な剛性、質量を持つ円筒形状に諸元を置き換えてモデル化する。

【モデル化方針の詳細】 : 図3-2参照

メインシャフト及びロータ部をそれぞれ、はり要素でモデル化する。

- a. 中実なメインシャフトを模擬するはり要素、中空なロータ部を模擬するはり要素でモデル化する。
- b. メインシャフト及びロータ部の軸中心は、同じ位置である。
- c. はり要素の諸元設定にあたり、製作設計図面を基に等価な剛性となるように寸法を設定する。また、実機での打撃振動計測結果（固有振動数）とはりモデルの固有値解析結果を比較検証することで、諸元設定の妥当性を確認する。
- d. はり要素の諸元設定にあたり、製作設計図面を基に、はり要素の分割領域の長さに対応する質量を算出する。

- (3) 内側の中実形状のメインシャフトと外周の円筒形状に置き換えたロータを各々はり要素でモデル化し、2つのモデルを実機構造と同様に両端の第1段インペラ部及びNO.2ベアリングシャフト部と中央のカップリングロータ部の3箇所て結合する。

【モデル化方針の詳細】

実機構造における結合部は、はりモデルにおいても結合する。実機構造において、第1段インペラ、カップリングロータ及びNO.2ベアリングシャフトの3箇所は、メインシャフト及びロータ部が構造的に接触する結合部であるため、それぞれのはり要素の対応する分割領域も結合する。

- (4) 軸受は、軸受自体の変位は地震時に 程度と許容クリアランスに比べると十分小さいため剛体とし、拘束条件としては、軸受部A（玉軸受）を並進3方向固定、軸受部B（ころ軸受）を並進2方向（軸直方向）固定として設定する。

【モデル化方針の詳細】

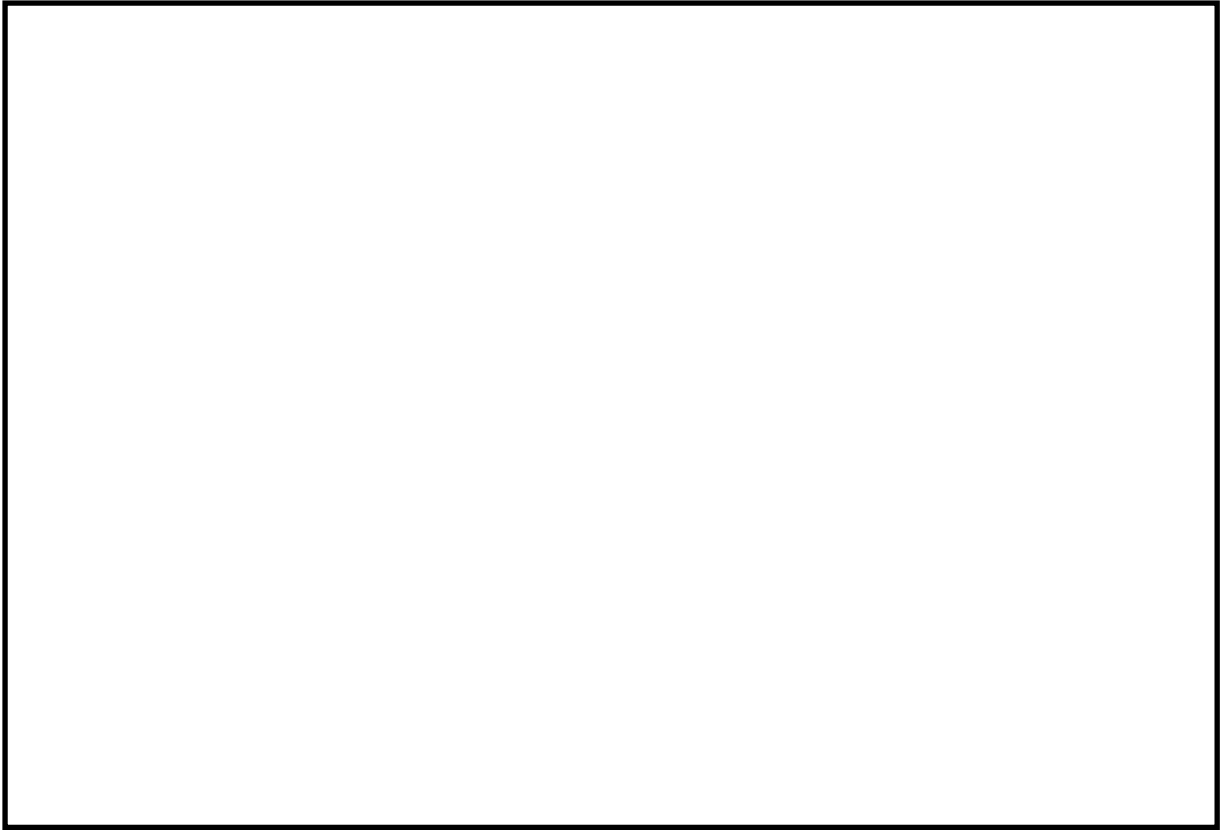
軸受部Aは、実機ではガスタービン機関運転時の軸方向への熱膨張の起点とするために固定されていることから、はり要素（回転体）は静止体に対して並進3方向固定とする。また、軸受部Bは、実機ではガスタービン機関運転時の軸方向への熱膨張を吸収するために固定されていないことから、はり要素は静止体に対して並進2方向（軸直方向）固定とする（並進軸方向は固定しない）。

- (5) アンバランス荷重による変位は、運転中に生じる主軸振動の管理値以下になるよう調整されているため、保守的に主軸振動に対するメーカー管理値をアンバランス荷重による変位として用いる。この変位を解析モデルから算出したたわみ量（変位量）に重畳（絶対和）する。

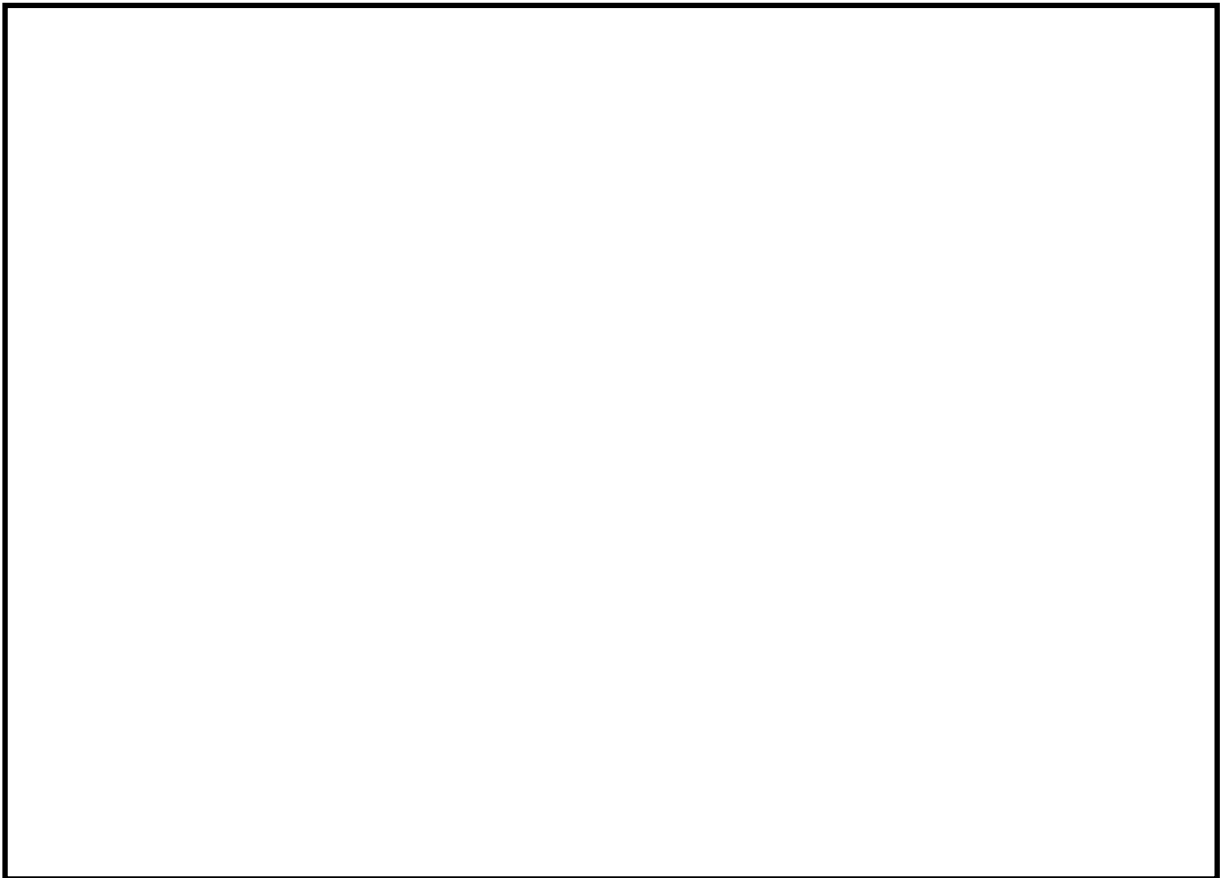
【モデル化方針の詳細】

アンバランス荷重による変位の最大値として、主軸振動に対するメーカー管理値の上限を設定する。

- (6) 解析コードは、「MSC NASTRAN」を使用する。なお、評価に用いる解析コード「MSC NASTRAN」の検証及び妥当性確認等の概要については、別紙「計算機プログラム（解析コード）の概要」に示す。



(解析モデル)



(実機イメージ)

図 3-1 軸とケーシングのクリアランス評価の解析モデル

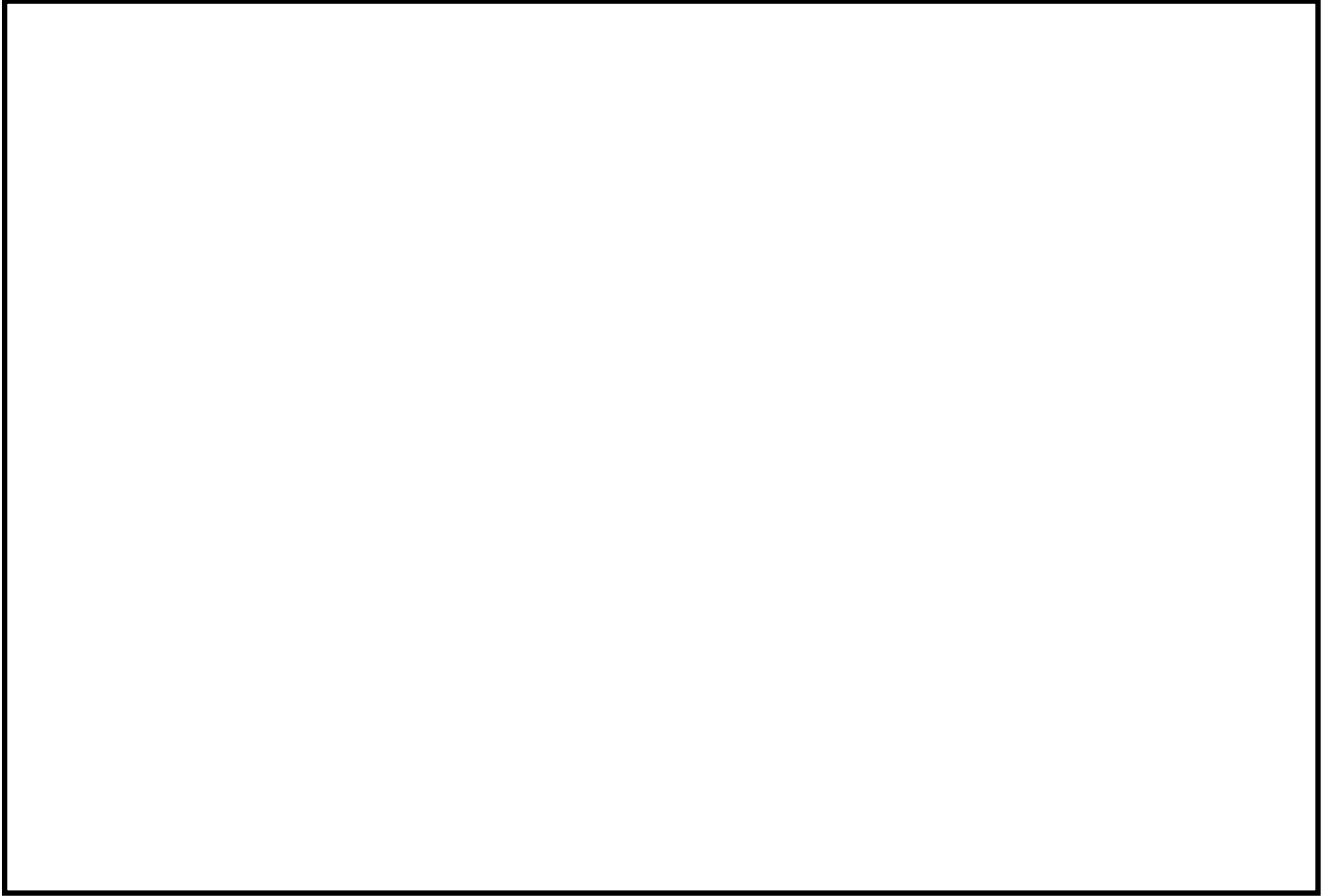


図 3-2 メインシャフト及びロータ部のはりモデル

4. 発電機制御盤の固有値解析モデル

発電機制御盤は、三次元シェル及びはりモデルにて固有値解析を実施する。解析モデルを図4-1に、解析モデルの詳細説明を以下に示す。

- (1) 盤を構成する鋼材ははり要素、鋼板及びチャンネルベースはシェル要素でモデル化する。

【モデル化方針の詳細】

- a. 盤を構成する鋼材：図4-2～図4-3参照
b. チャンネルベース：図4-4参照

チャンネルベースは、C形鋼及び補強板を主な構成部材としている。発電機制御盤の支持構造物であり、発電機制御盤の応答を精緻に算定するために、シェル要素でモデル化する。

- (2) 発電機制御盤の取付器具の質量は、それぞれの取付位置に質量要素として均等に配分する。金具、ケーブル類は、等分布荷重として、当該質量のみをモデル全体に付加する。

【モデル化方針の詳細】

- a. 発電機制御盤の取付器具：図4-5参照

取付器具について、例として左側面盤のモデルを用いて説明する。取付器具は(2)項記載のとおり、機器単体は剛性に寄与しないものとして取り扱う。したがって、FEMモデルとしてはそれぞれの取付位置に質点でモデル化する。

- b. 扉、カバー類：図4-5参照

上記の、取付器具のモデル化方針と同じである。

- c. 金具及びケーブル類

金具及びケーブル類は、支持構造物（強度部材）ではないこと、また、金具及びケーブル類は筐体に対して取付されることから、盤鋼材に分散してモデル化する。

- (3) 拘束条件は、基礎溶接部にて完全拘束とする。

【モデル化方針の詳細】

取付ボルトは、チャンネルベースと盤のボルト取付位置を結合（図4-6参照）する。

- (4) 列盤間の連結部は剛結合とする。

【モデル化方針の詳細】

列盤間の連結部（図4-7参照）を剛結合とする。

- (5) 耐震計算に用いる寸法は、公称値を使用する。

【モデル化方針の詳細】

詳細設計図面記載の寸法を、FEMモデルに反映する。

- (6) 解析コードは、「MSC NASTRAN」を使用し、固有値を求める。
なお、評価に用いる解析コードの検証及び妥当性確認等の概要については、VI-5「計算機プログラム（解析コード）の概要」に示す。

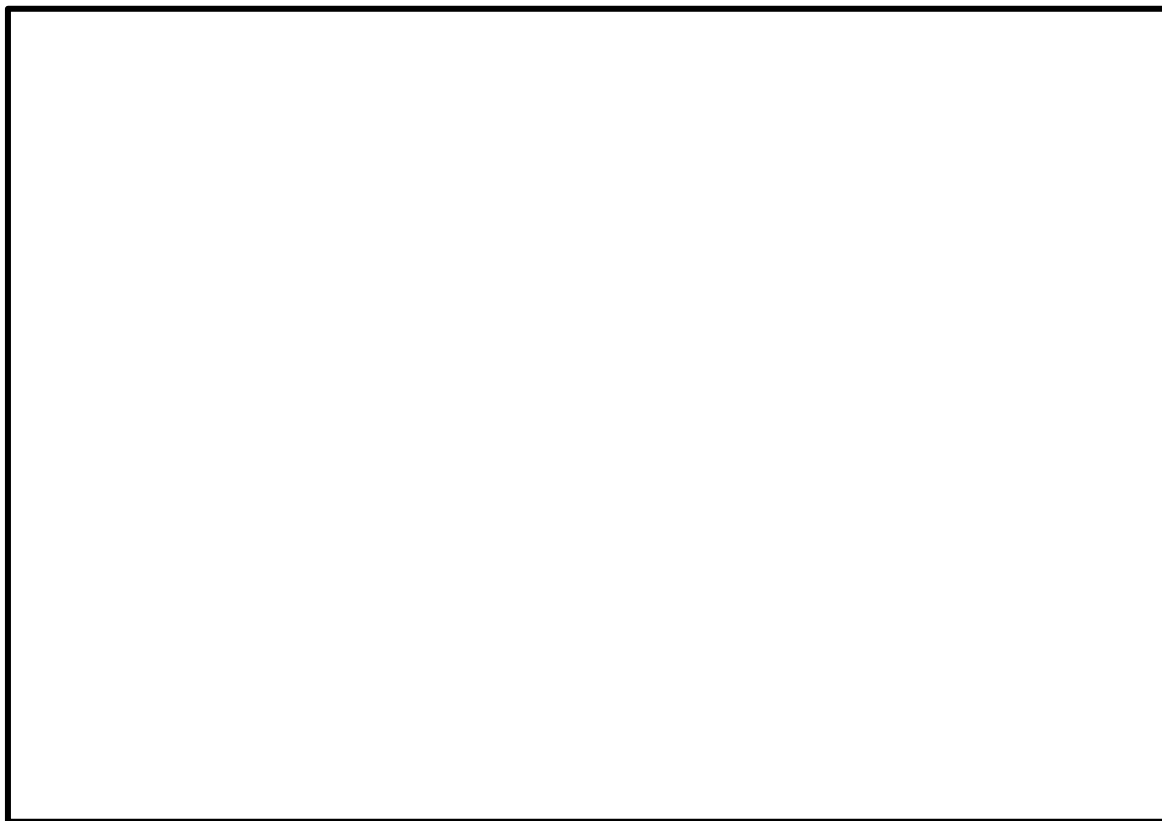


図 4-1 発電機制御盤の解析モデル



図 4-2 盤鋼材の例（角形鋼）

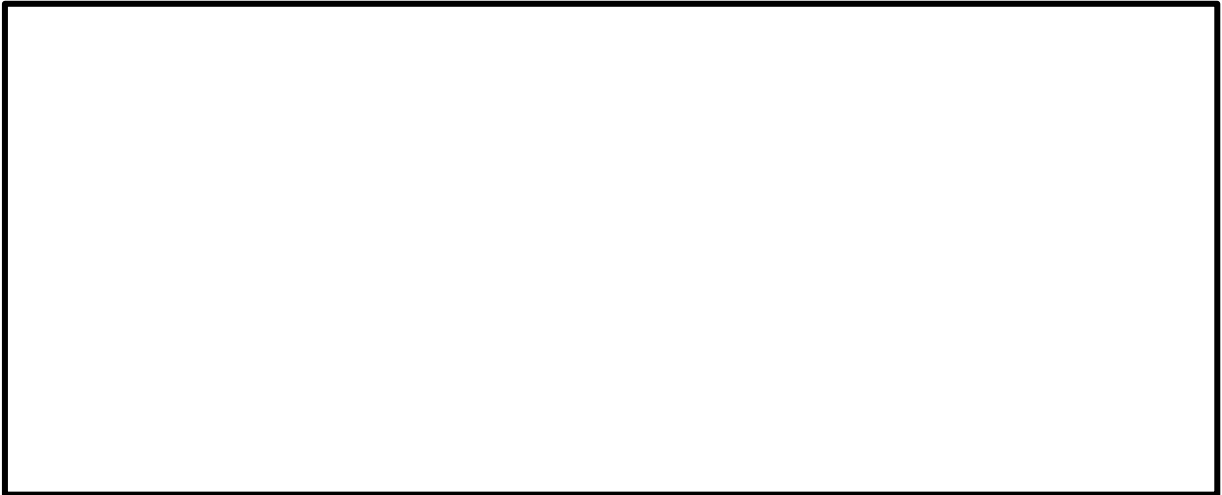


図 4-3 盤鋼材の例（山形鋼，溝形鋼）

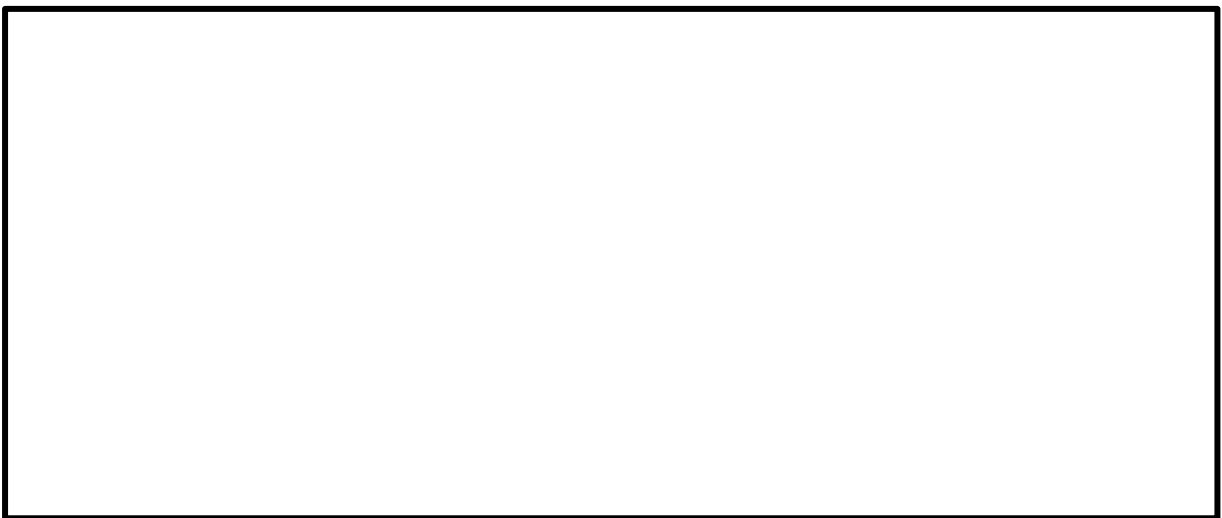


図 4-4 チャンネルベースの例（C 形鋼及び補強板）

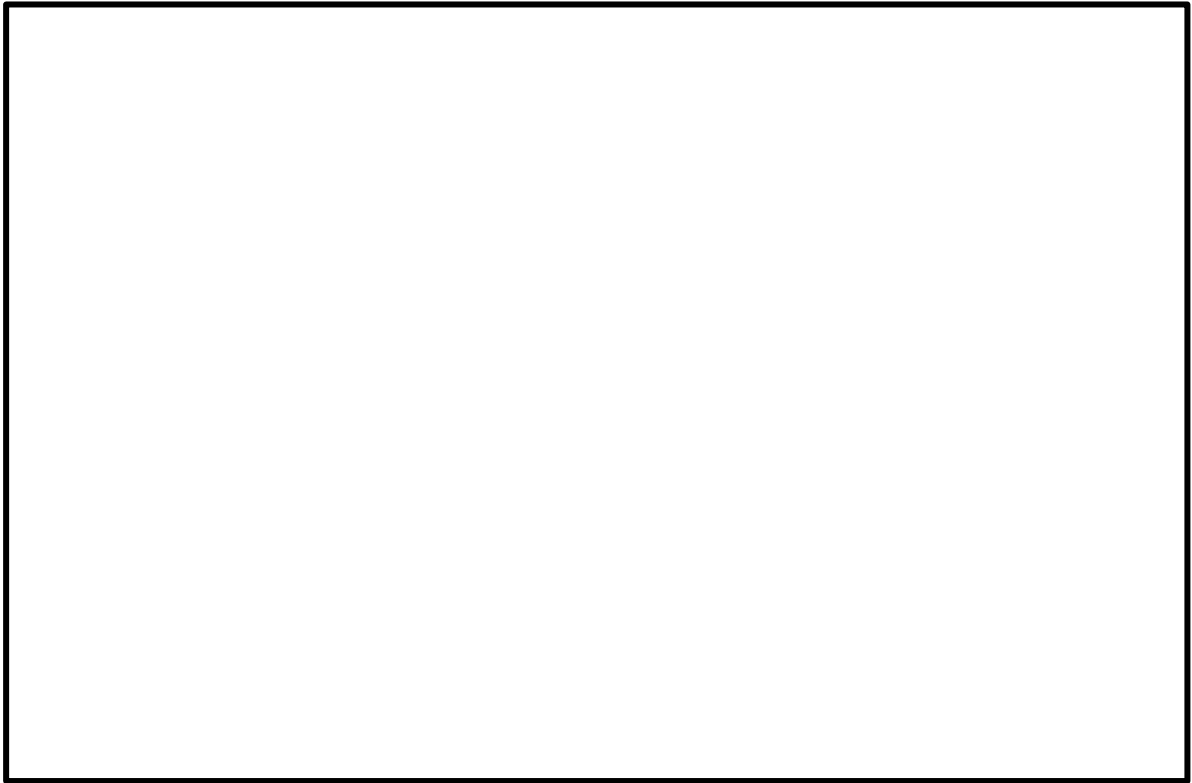


図 4-5 発電機制御盤（左側面盤）の取付器具

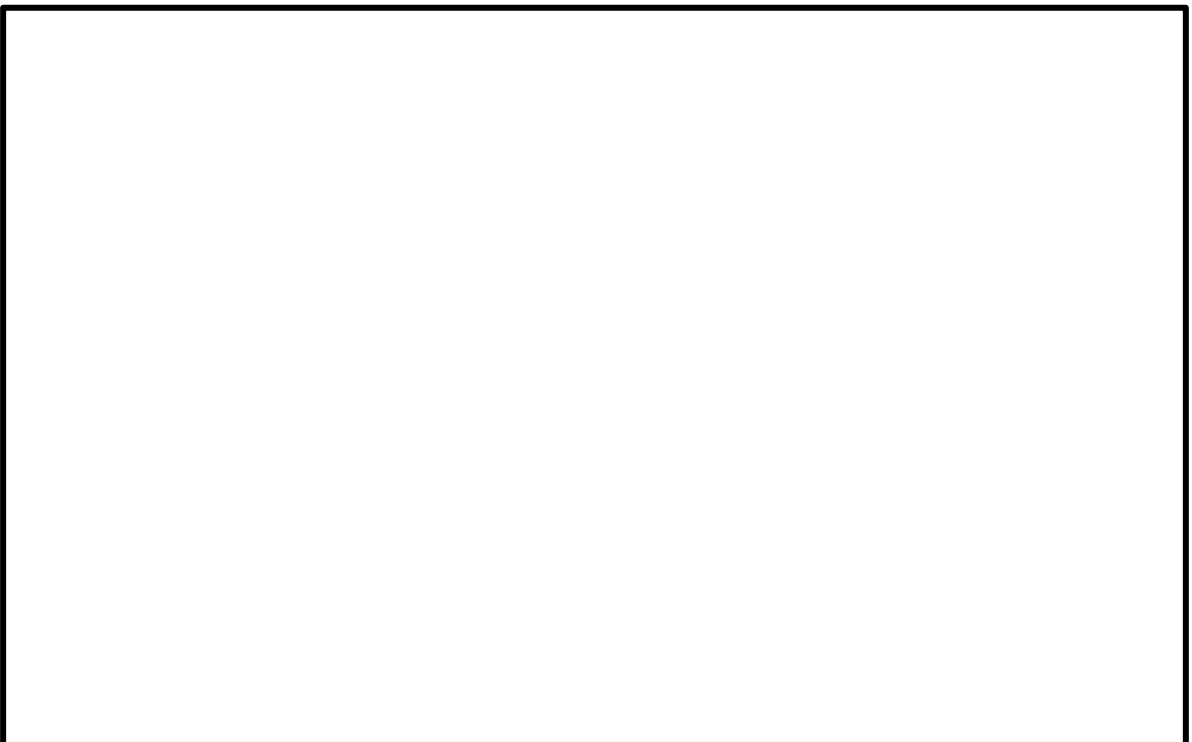


図 4-6 チャンネルベースと盤のボルト取付位置



図 4-7 列盤間の連結位置

補足-027-10-68 中央制御室待避室遮蔽の耐震性についての
計算書に関する補足説明資料

目 次

1. 概要	1
2. 設備概要	1
3. 要求機能及び評価対象部位の整理	11
4. 許容限界について	14
5. 評価対象部位ごとの評価方法及び適用規格	15
6. 解析モデル	16

添付資料-1 構造フレーム（鉄骨及び鋼板）の種別，断面サイズ及び解析モデル図

添付資料-2 遮蔽気密扉の重量設定方法

添付資料-3 中央制御室待避室を支持する壁の耐震評価

添付資料-4 遮蔽気密扉の健全性評価

1. 概要

本補足説明資料は、VI-2-1-9「機能維持の基本方針」にて設定している構造強度及び機能維持の設計方針に基づき耐震評価を実施し、VI-2-8-4-4「中央制御室待避室遮蔽の耐震性についての計算書」に評価結果をとりまとめている中央制御室待避室遮蔽の耐震評価について補足するものである。

2. 設備概要

2.1 中央制御室待避室の概要

中央制御室待避室は、重大事故等が発生した場合における炉心の著しい損傷後の格納容器フィルタベント系を作動させる場合に、運転員の被ばくを低減するため、中央制御室内に設置する。中央制御室待避室は、中央制御室待避室内への放射性物質の流入を防ぐため、設計上の圧力値を中央制御室に対して10Pa[gage]以上に設定する。

中央制御室待避室は、遮蔽性能及び気密性能を有し、その入口には、遮蔽性能及び気密性能を有する扉（以下「遮蔽気密扉」という。）を設置する。

中央制御室待避室へ待避した運転員が、一時的に中央制御室へ出入りする際の遮蔽気密扉開閉時においても中央制御室待避室内の正圧を維持できるよう、隣室を設置する。

中央制御室待避室と隣室は、制御室建物の南面及び東面の耐震壁である中央制御室遮蔽（壁）から支持する一体化構造としており、隣室と中央制御室間には出入り用の扉を設置する。

中央制御室待避室の平面概要図を図2-1に示す。

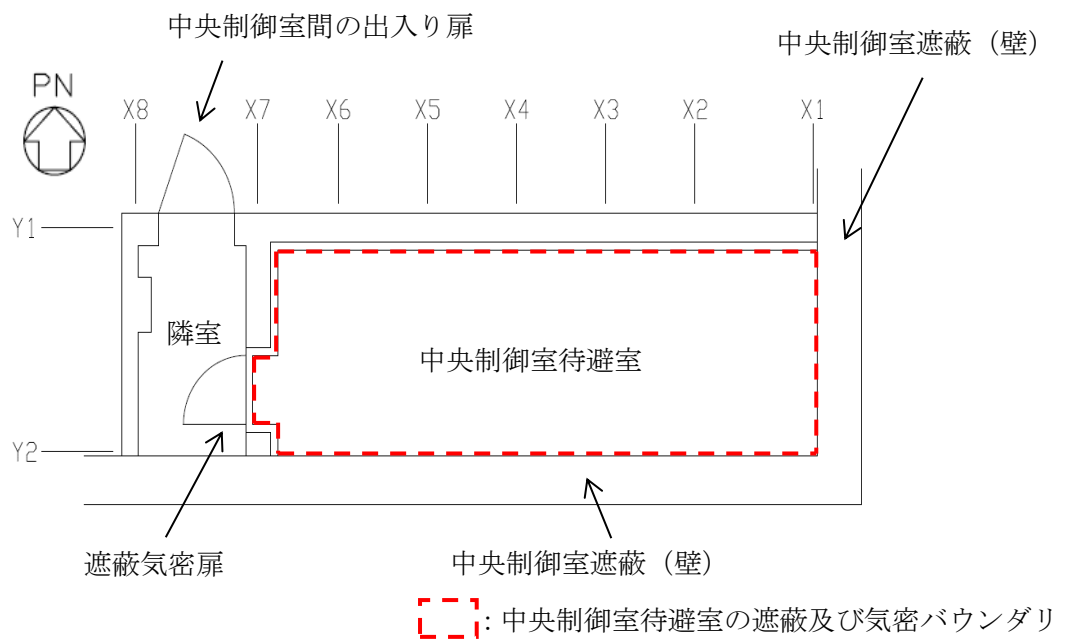


図 2-1 中央制御室待避室平面概要図

2.2 中央制御室待避室を構成する部材及び接合条件

中央制御室待避室は、主要な構成部材として、①構造フレーム（鉄骨）、②構造フレーム（鋼板）、③遮蔽パネル及び④気密用鋼板から構成される。

中央制御室待避室は、①構造フレーム（鉄骨）が十分剛性の高い中央制御室遮蔽（壁）に⑤基礎ボルト（ケミカルアンカ）で固定されることにより、制御室建物から支持される。

①構造フレーム（鉄骨）同士は、⑥構造フレーム接合部高力ボルトにて接合される。

②構造フレーム（鋼板）は、①構造フレーム（鉄骨）へ溶接にて接合され、また②構造フレーム（鋼板）同士も溶接にて接合される。

③遮蔽パネルは、①構造フレーム（鉄骨）、②構造フレーム（鋼板）へ、⑦遮蔽パネル接合部ボルトにて接合される。

④気密用鋼板は、②構造フレーム（鋼板）の凸型部へ溶接にて接合される。

中央制御室待避室の入口には⑧遮蔽気密扉が設置される。

各構成部材及びそれらの接合部に用いるボルトの材料・仕様を表 2-1 に示す。

表 2-1 各構成部材及びそれらの接合部に用いるボルトの材料・仕様

No.	構成部材	材料	仕様
①	構造フレーム（鉄骨）	SS400	H形鋼, 溝形鋼
②	構造フレーム（鋼板）	SS400（一部 SN490B）	平鋼
③	遮蔽パネル	鋼板：SS400 鉛	
④	気密用鋼板	SS400	
⑤	基礎ボルト（ケミカルアンカ）	SS400	M24
⑥	構造フレーム接合部高力ボルト	F10T, S10T	M16, M20, M22
⑦	遮蔽パネル接合部ボルト	強度区分 12.9	M8, M12, M16
⑧	遮蔽気密扉	鋼板：SS400 鉛（非構造部材）	

中央制御室待避室の全体概要及び中央制御室遮蔽（壁）との接合イメージを図 2-2 に示す。中央制御室待避室は，X1～X7 通り間が該当する。

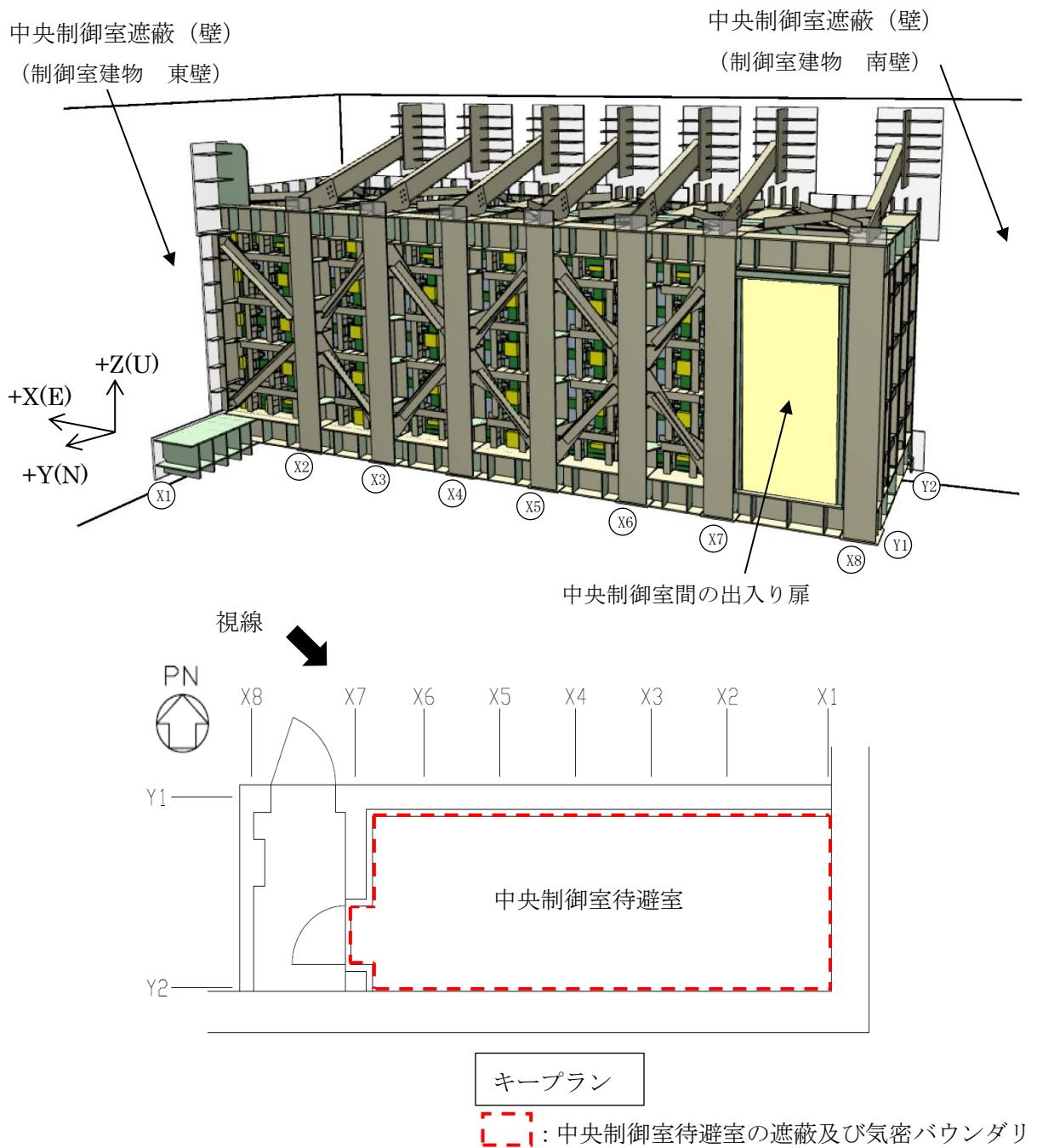


図 2-2 中央制御室待避室の全体概要及び中央制御室遮蔽（壁）との接合イメージ

Y1 通り壁を例に，①構造フレーム（鉄骨），②構造フレーム（鋼板），③遮蔽パネル，④気密用鋼板の接合イメージを図 2-3～図2-6 に示す。

中央制御室待避室の基本構成は，床・壁・天井の部位に依らず同一である。

中央制御室待避室の基本構成の詳細について，遮蔽パネル標準納まりのケースを例として，表 2-2 に示す。

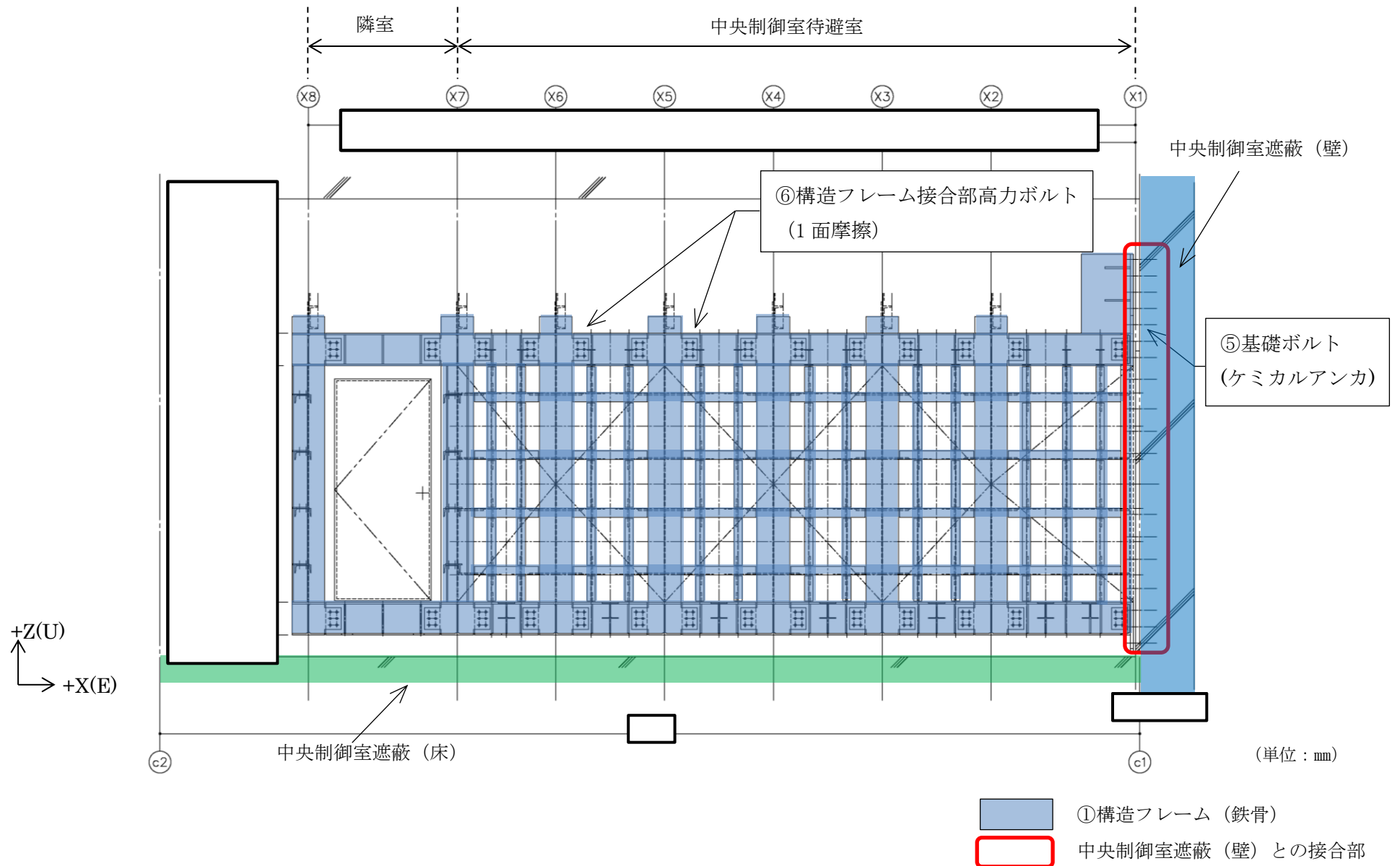


図 2-3 Y1 通り壁部における①構造フレーム (鉄骨) の接合イメージ

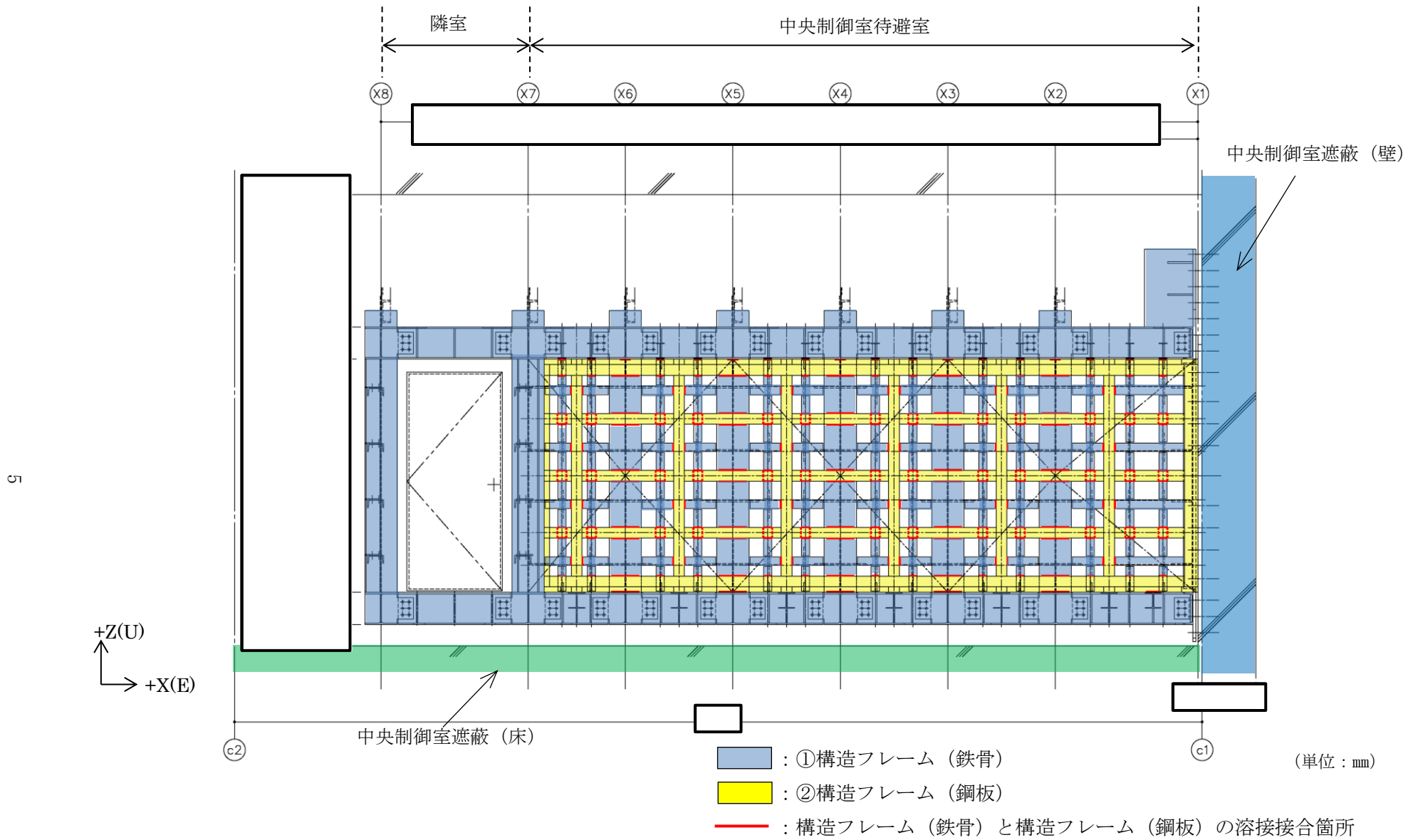


図 2-4 Y1 通り壁部における②構造フレーム (鋼板) の接合イメージ

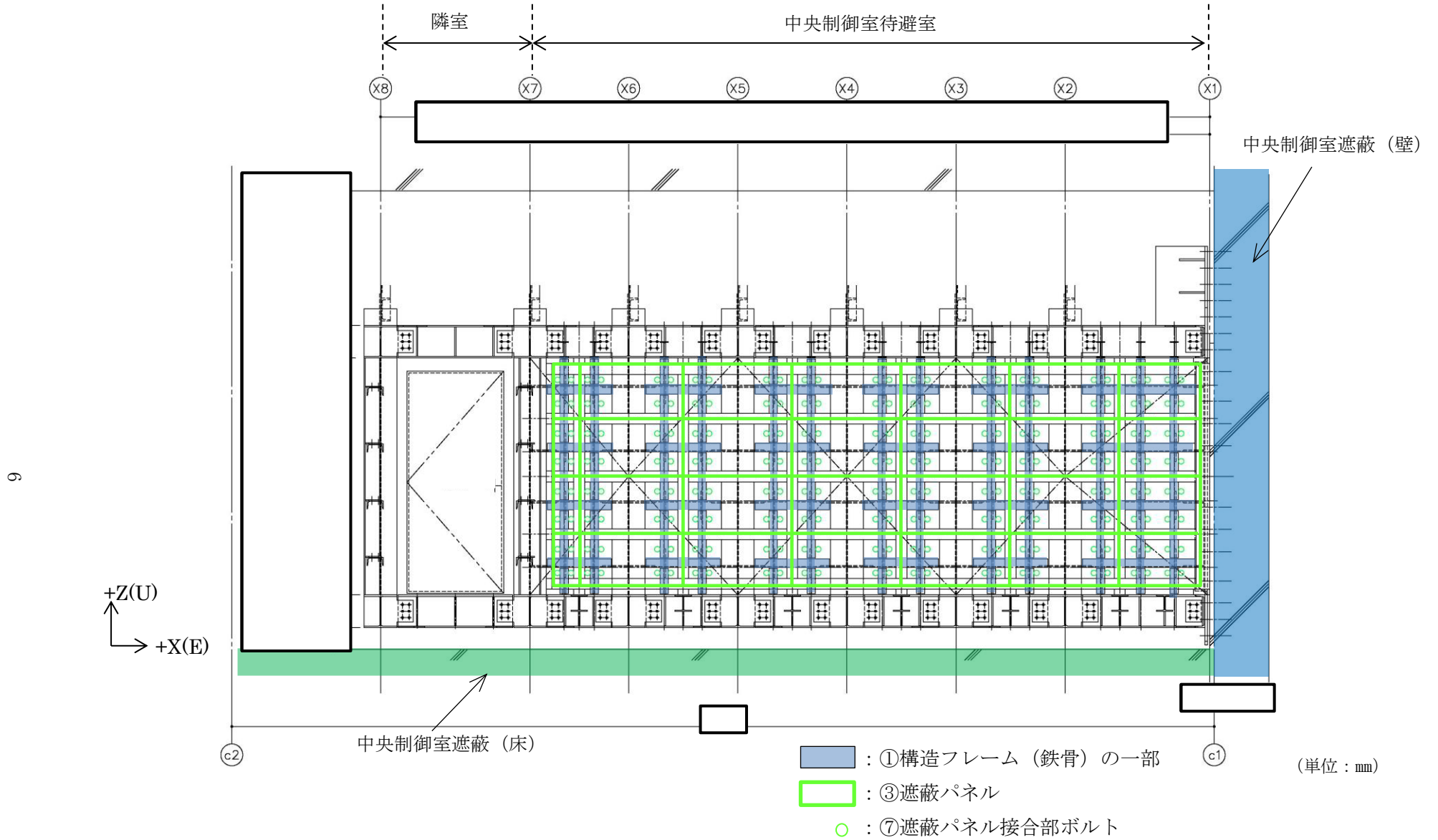


図 2-5 Y1 通り壁部における③遮蔽パネルの接合イメージ

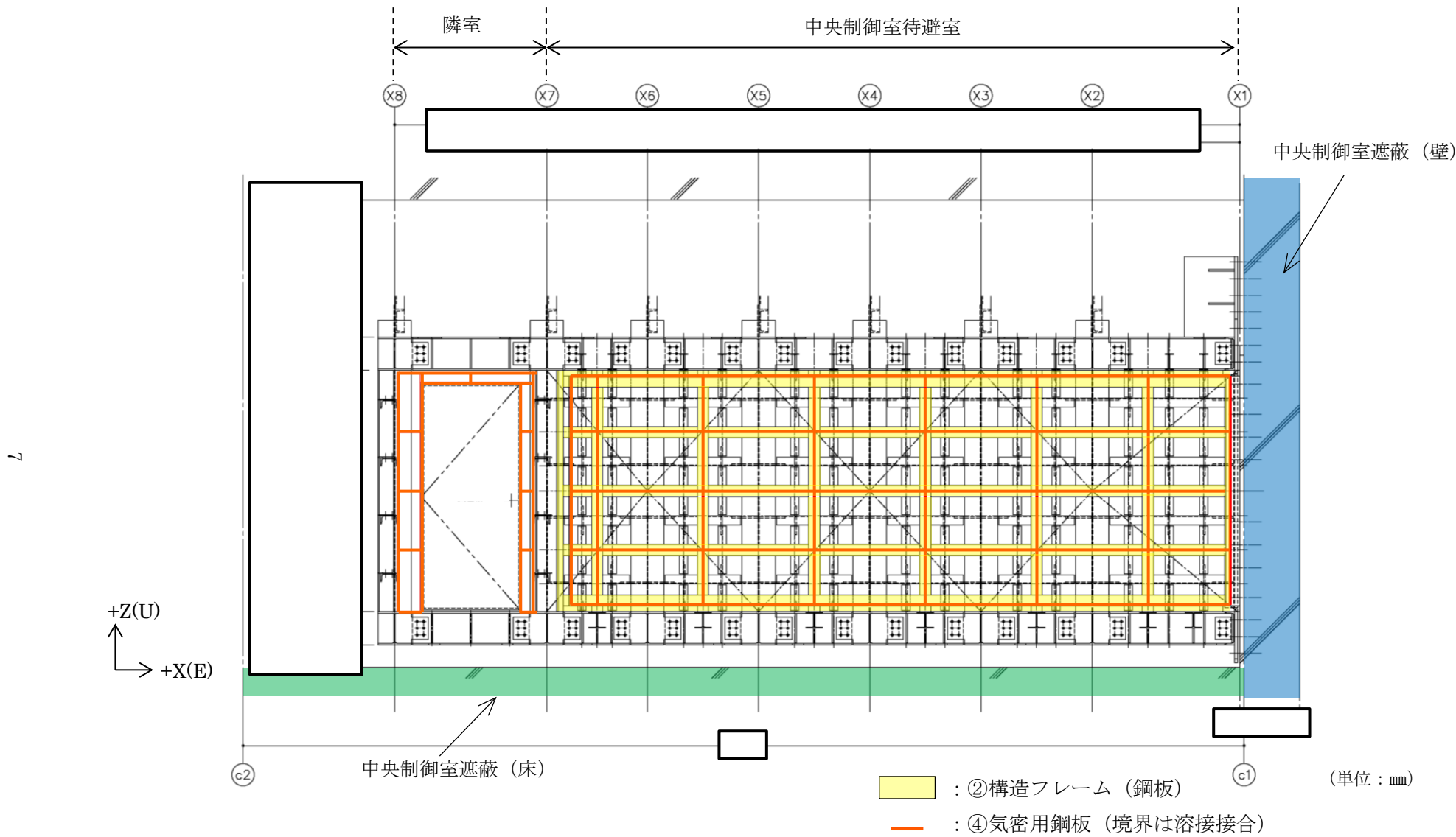
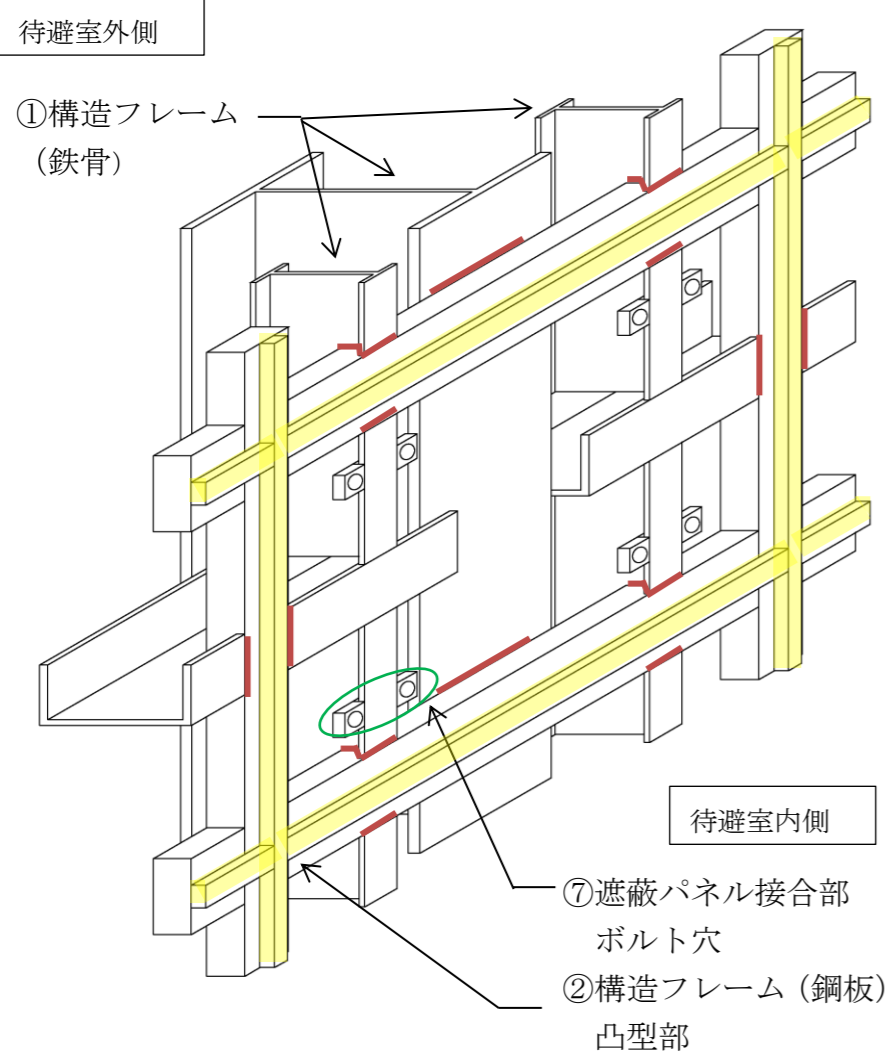
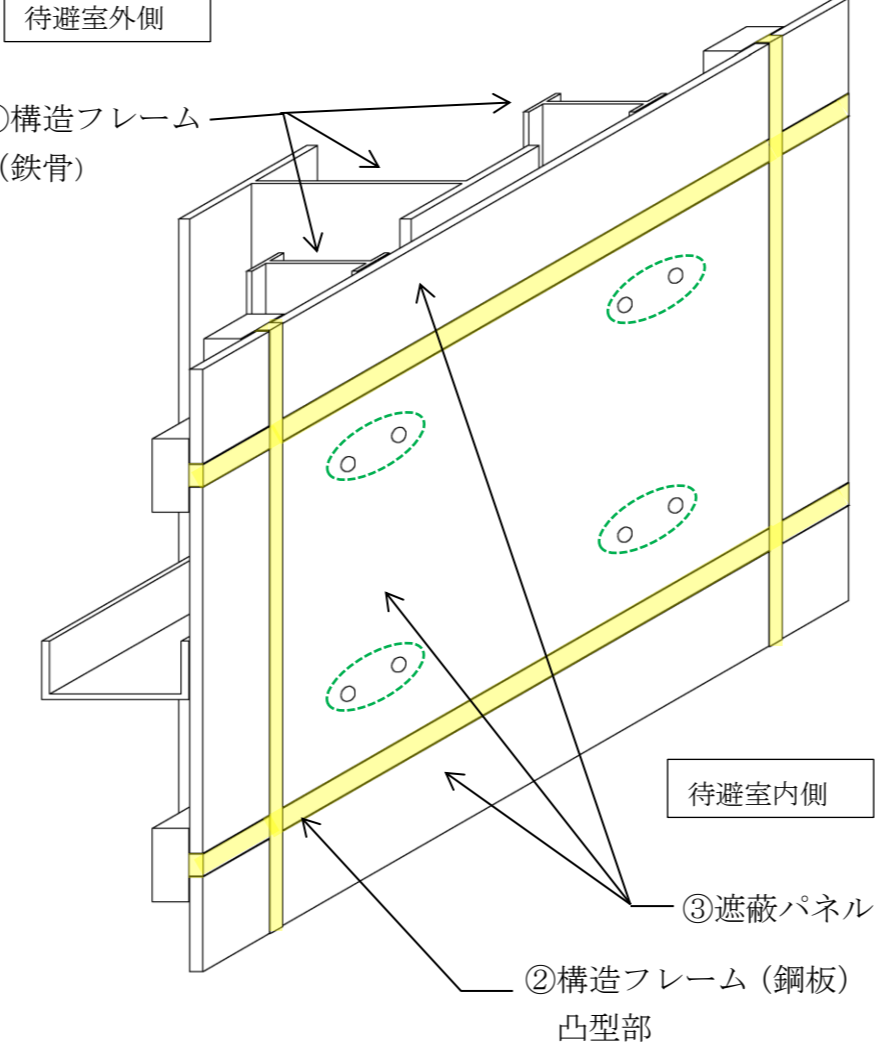
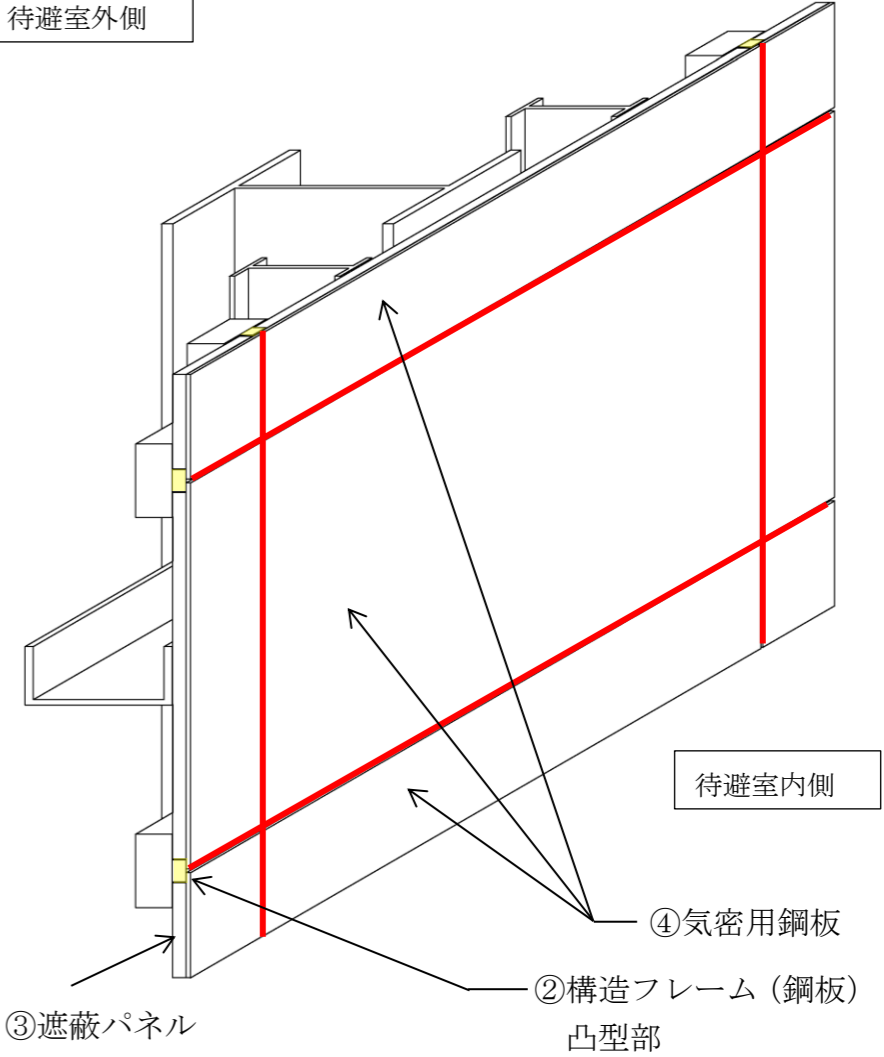


図 2-6 Y1 通り壁部における④気密用鋼板の接合イメージ

表 2-2 中央制御室待避室の基本構成の詳細（遮蔽パネル標準納まりのケース*）

(1) 構造フレームの接合状態	(2) 遮蔽パネル接合後	(3) 気密用鋼板接合後
<p>待避室外側</p>  <p>待避室内側</p>	<p>待避室外側</p>  <p>待避室内側</p>	<p>待避室外側</p>  <p>待避室内側</p>
<ul style="list-style-type: none"> ②構造フレーム（鋼板）は、①構造フレーム（鉄骨）に溶接にて接合する（—部）。 ②構造フレーム（鋼板）は、④気密用鋼板取付けのため凸型形状となっている（—部）。 	<ul style="list-style-type: none"> ③遮蔽パネルは、②構造フレーム（鋼板）の凸型部（—部）で囲まれる空間に取付く。 ③遮蔽パネルは、待避室外側から①構造フレーム（鉄骨）にボルトにて接合する（○部）。 	<ul style="list-style-type: none"> ④気密用鋼板は、③遮蔽パネルの待避室内側に取付く。 ④気密用鋼板同士は、②構造フレーム（鋼板）凸型部の上部で全周溶接にて接合する（—部）。

注記*：③遮蔽パネルは、②構造フレーム（鋼板）からボルト6本で固定される納まりもある。③遮蔽パネルの評価に際しては、両方のケースについて評価を実施している。

2.4 貫通部

中央制御室待避室には、中央制御室待避室への空気の供給、中央制御室待避室からの空気の排出等を目的とした配管布設のための貫通部が、天井部及び壁部に設けられている。貫通部には、鉛板 及び鋼板を使用したスリーブ及びボックスから構成される構造物（以下「貫通部遮蔽体」という。）を設置し、配管経路をクランク構造とすることにより、遮蔽性能を担保している。また、貫通部遮蔽体は溶接接合または耐火シールにより、貫通部遮蔽体と配管との取合い部はシリコンゴム等の充填により、貫通部の気密性能を担保している。

貫通部遮蔽体の概略構造（配管貫通部の例）について図 2-8 に示す。

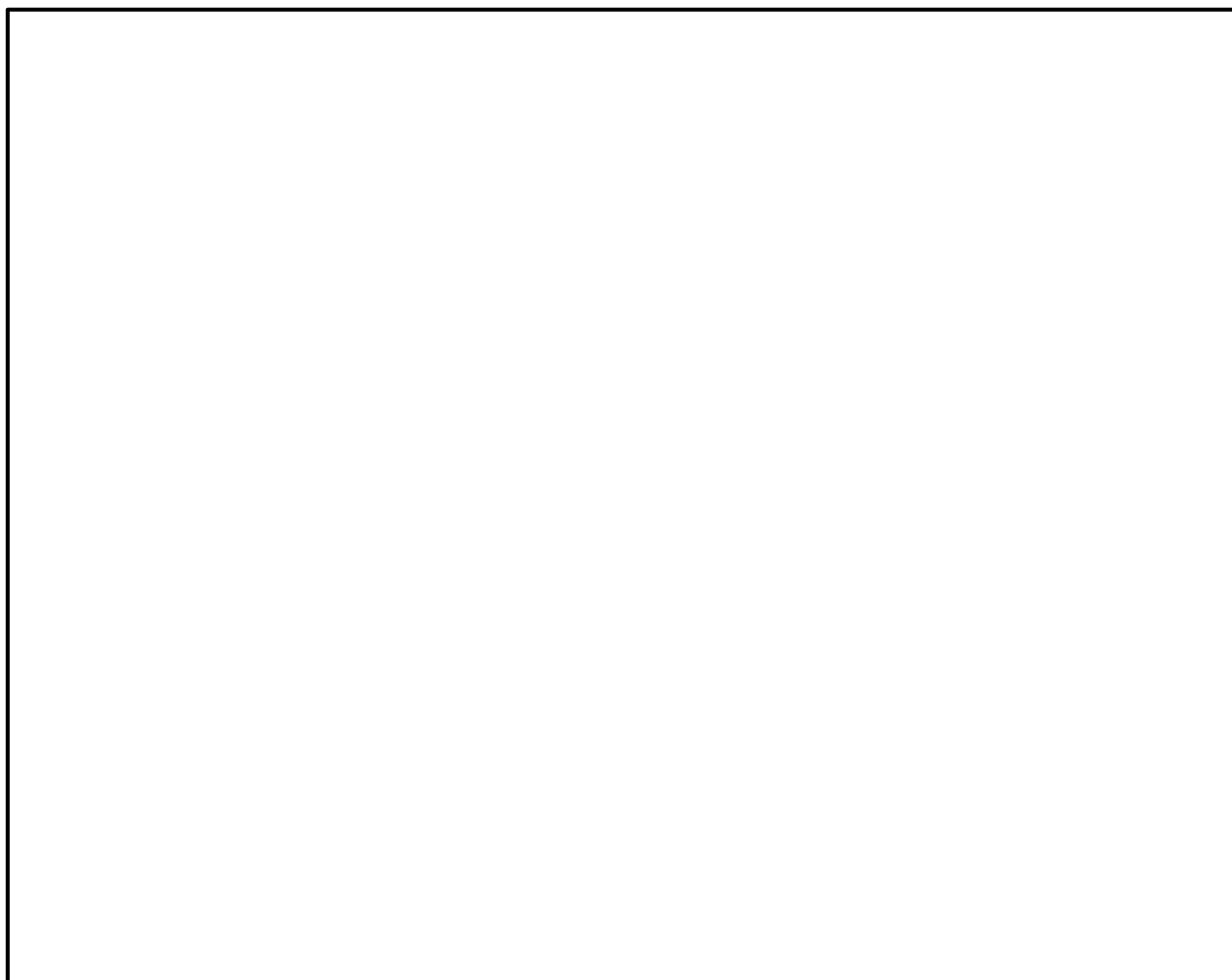


図 2-8 貫通部遮蔽体の概略構造図（配管貫通部の例）

3. 要求機能及び評価対象部位の整理

中央制御室待避室遮蔽は構造強度の確保並びに、気密性及び遮蔽性の維持が要求される設備に該当する。

気密性の維持については、VI-2-1-1「耐震設計の基本方針」において「気密性の維持が要求される施設は、(中略)重大事故等対処施設の施設区分に応じた地震動に対して「5.1 構造強度」に基づく構造強度の確保に加えて、構造強度の確保と換気設備の性能があいまって施設の気圧差を確保することで、十分な気密性を確保できる設計とする。」と記載している。

また、遮蔽性の維持については、VI-2-1-1「耐震設計の基本方針」において「遮蔽性の維持が要求される施設については、(中略)重大事故等対処施設の施設区分に応じた地震動に対して、「5.1 構造強度」に基づく構造強度を確保し、遮蔽体の形状及び厚さを確保することで、遮蔽性を維持する設計とする。」と記載している。

したがって、気密性及び遮蔽性の維持については基準地震動 S_s に対する構成部材の構造強度を確保し、更に気密性においては換気設備の性能と合わせて気圧差を確保できることを確認する。

要求機能毎の評価対象部位、機能維持の考え方及び許容限界について、表 3-1 に示す。

表 3-1 要求機能毎の評価対象部位，機能維持の考え方及び許容限界（1/2）

要求機能	機能設計上の性能目標	地震力	評価対象部位	機能維持のための考え方	許容限界
構造強度	構造強度を有すること。	基準地震動 S _s	①構造フレーム（鉄骨）	部材に生じる応力が構造強度を確保するための許容限界を超えないことを確認	Ⅲ _A S 短期許容応力度
			②構造フレーム（鋼板）	部材に生じる応力が構造強度を確保するための許容限界を超えないことを確認	Ⅲ _A S 短期許容応力度
			⑤基礎ボルト（ケミカルアンカ）	部材に生じる応力が構造強度を確保するための許容限界を超えないことを確認	Ⅳ _A S, Ⅴ _A S 短期許容応力度
			⑥構造フレーム接合部高力ボルト	部材に生じる応力が構造強度を確保するための許容限界を超えないことを確認	Ⅲ _A S 短期許容応力度
			中央制御室遮蔽（壁）*1, 2	最大応答せん断ひずみが構造強度を確保するための許容限界を超えないことを確認	せん断ひずみ 2.0×10 ⁻³
遮蔽性	遮蔽体の形状及び厚さを確保することで，地震後における残留ひずみを小さくし，ひび割れがほぼ閉鎖し，貫通するひび割れが直線的に残留しないこと。	基準地震動 S _s	②構造フレーム（鋼板）	部材に生じる応力が構造強度を確保するための許容限界を超えないことを確認	Ⅲ _A S 短期許容応力度
			③遮蔽パネル	部材に生じる応力が構造強度を確保するための許容限界を超えないことを確認	Ⅲ _A S 短期許容応力度
			⑧遮蔽気密扉	扉に生じる応力が構造強度を確保するための許容限界を超えないことを確認	Ⅲ _A S 短期許容応力度
			中央制御室遮蔽（壁）*1, 2	最大応答せん断ひずみが遮蔽性を維持するための許容限界を超えないことを確認	せん断ひずみ 2.0×10 ⁻³

注記*1：中央制御室待避室を支持する制御室建物の南面及び東面の耐震壁を指す。

*2：VI-2-8-4-3「中央制御室遮蔽（1，2号機共用）の耐震性についての計算書」にて評価を実施

中央制御室待避室を支持する基礎ボルト（ケミカルアンカ）の反力による影響評価については，添付資料-3に示す。

表 3-1 要求機能毎の評価対象部位，機能維持の考え方及び許容限界 (2/2)

要求機能	機能設計上の性能目標	地震力	評価対象部位	機能維持のための考え方	許容限界
気密性	構造強度を有すること。	基準地震動 S s	④気密用鋼板	部材に生じる応力が構造強度を確保するための許容限界を超えないことを確認	Ⅲ A S 短期許容応力度
			⑧遮蔽気密扉	扉に生じる応力が構造強度を確保するための許容限界を超えないことを確認	Ⅲ A S 短期許容応力度
	せん断ひずみを用いて空気漏えい量を算定し，設置する換気設備の性能以下であること。		中央制御室遮蔽 (壁) *1, 2	最大応答せん断ひずみが気密性を維持するための許容限界を超えないことを確認	せん断ひずみ 2.0×10^{-3}

注記*1：中央制御室待避室を支持する制御室建物の南面及び東面の耐震壁を指す。

*2：VI-2-8-4-3「中央制御室遮蔽（1，2号機共用）の耐震性についての計算書」にて評価を実施

中央制御室待避室を支持する基礎ボルト（ケミカルアンカ）の反力による影響評価については，添付資料-3に示す。

4. 許容限界について

VI-2-1-9「機能維持の基本方針」において常設重大事故緩和設備の許容応力状態はIV_AS及びV_ASが適用されるが、遮蔽性及び気密性の維持の観点から、当該構造物の変形能力に対して十分な余裕を有するよう、遮蔽及び気密機能に係る部材については、許容応力状態III_ASを適用する。

具体的には、基礎ボルト(ケミカルアンカ) (図4-1参照) 以外の部材について許容応力状態III_ASを適用する。

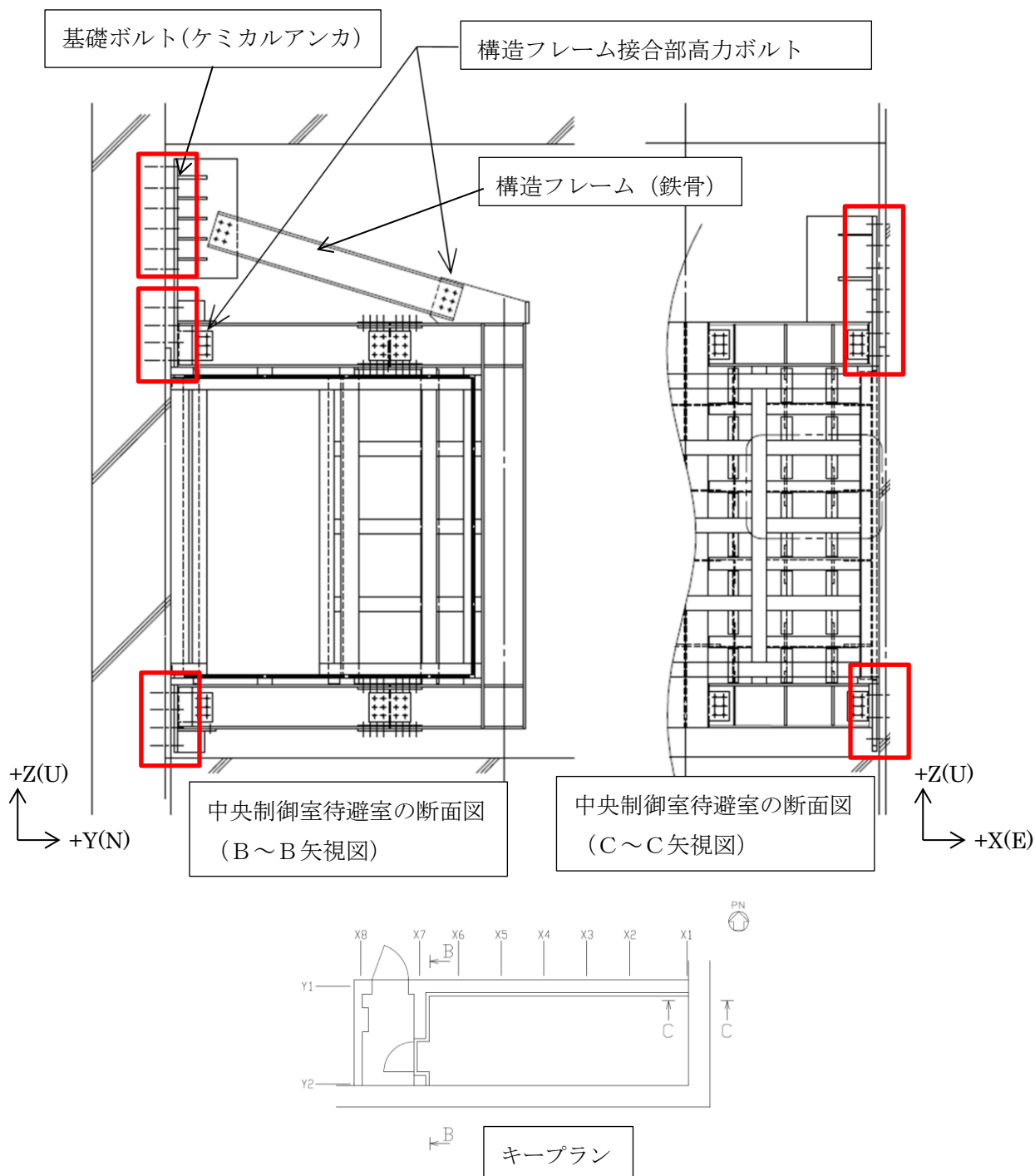


図4-1 許容応力状態III_ASを適用しない部位 (赤枠内参照)

5. 評価対象部位ごとの評価方法及び適用規格

表 5-1 評価対象部位ごとの評価方法及び適用規格

No.	評価対象部位	評価対象となる 応力（力）の種類	評価方法	適用規格
①	構造フレーム（鉄骨）	引張，圧縮，せん断， 曲げ，組合せ	発生する各種応力が，鋼構造設計規準にて 算出される許容応力を下回ることを確認	鋼構造設計規準 －許容応力度設計法－
②	構造フレーム（鋼板）	引張，圧縮，せん断， 曲げ，組合せ	発生する各種応力が，鋼構造設計規準にて 算出される許容応力を下回ることを確認	鋼構造設計規準 －許容応力度設計法－
③	遮蔽パネル	組合せ	発生する組合せ応力が，許容引張応力以下 であることを確認	鋼構造設計規準 －許容応力度設計法－
④	気密用鋼板	組合せ	発生する組合せ応力が，許容引張応力以下 であることを確認	鋼構造設計規準 －許容応力度設計法－
⑤	基礎ボルト （ケミカルアンカ）	引張，せん断，組合せ	発生する引張，せん断，組合せ力が，各々 の許容力を下回ることを確認	各種合成構造設計指針・同 解説
⑥	構造フレーム接合部 高力ボルト	せん断*1	発生するせん断力が，許容せん断力を下回 ることを確認	鋼構造設計規準 －許容応力度設計法－
⑦	遮蔽パネル接合部ボルト	引張，せん断，組合せ*2	発生する引張及びせん断力が，JIS B 1051 規定の保証荷重試験力に基づき鋼構造設計 規準にて算出する許容引張力，許容せん断 力を下回ることを確認	鋼構造設計規準 －許容応力度設計法－ JIS B 1051

注記*1：鋼構造設計規準には，引張り・圧縮各々に対する許容耐力が規定されているが，本高力ボルトは摩擦接合形式のため引張力は発生しない。

したがって，せん断のみを対象とする。

*2：組合せは，鋼構造設計規準に規定されている許容引張力の算定式に含まれる。

6. 解析モデル

中央制御室待避室遮蔽の耐震評価は図 6-1 に示す 3 つの解析モデルを用いて実施した。各解析モデルの目的及び概要を以下に示す。

なお、中央制御室待避室と隣室は一体構造のため、隣室を含めてモデル化の上、解析を実施した。

(1) モデル 1

a. 目的

- ・固有値解析
- ・構造フレームの断面算定
- ・基礎ボルト（ケミカルアンカ）評価用の反力算出
- ・モデル 2 及びモデル 3 の評価対象部位の選定（最大ひずみ発生箇所の抽出）
- ・遮蔽パネル接合部の応力評価

b. 概要

- ・構造フレームをはり要素としてモデル化する。構造フレームの種別、断面サイズ及び解析モデル図との対応を添付資料-1 に示す。
- ・上記部材は、原則として部材芯でモデル化する。
- ・遮蔽パネル・気密用鋼板をシェル要素としてモデル化する。
- ・制御室建物壁との取合い点は、剛部材（ピン結合）とする。
- ・構造フレーム（鉄骨）部材同士のウェブとウェブ、フランジとフランジを高力ボルト接合する場合は、剛結合とする。
- ・構造フレーム（鉄骨）部材同士のウェブのみを高力ボルト接合する場合は、剛部材（ピン結合）とする。
- ・モデル化を行っていない部材（扉等）の質量は、近傍の構造フレームやシェル要素の重量を割り増すことにより適切に反映する。扉重量は、扉枠を支持する近傍の構造フレーム（鉄骨、鋼板）へ付加する。積載荷重は、等分布荷重として床のシェル要素に付加する。扉の重量設定に係る具体的なイメージを添付資料-2 に示す。
- ・構造フレーム（鉄骨、鋼板）と遮蔽パネルは、遮蔽パネル接合部ボルトで固定しているため、接合部ボルト位置のはり上の節点とシェル上の節点を同一節点とする。
- ・構造フレーム（鋼板）と気密用鋼板は、溶接で固定しているため、溶接位置のはり上の節点とシェル上の節点を同一節点とする。
- ・モデル 1 の要素数は 4618 要素，節点数は 2646 節点
- ・モデル 1 のシェル要素のメッシュサイズは、22～705 mm

(2) モデル 2

a. 目的

- ・遮蔽パネルの応力評価

b. 概要

- ・モデル 1 で選定した評価対象部位の遮蔽パネル 1 枚をシェル要素として単体でモデル化し、構造フレーム（鉄骨，鋼板）との接合部位置を剛部材（ピン結合）とする。
- ・評価対象部位は，遮蔽パネルの接合条件に応じて，標準納まり及び床納まりの 2 ケースから選定する（それぞれ，モデル 2-1 及びモデル 2-2 という。）。
- ・モデル 1 のモデル化範囲に合わせ，部材芯範囲でモデル化する。
- ・接合部にモデル 1 の変位量を強制変位として与える。
- ・遮蔽パネルの慣性力を考慮する。
- ・モデル 2 のシェル要素の分割は，パネルに生じる応力を適切に表現できるようにする。
- ・シェル要素の要素数は 560～759 要素，節点数は 609～816 節点
- ・シェル要素のメッシュサイズは，21～26 mm

(3) モデル 3

a. 目的

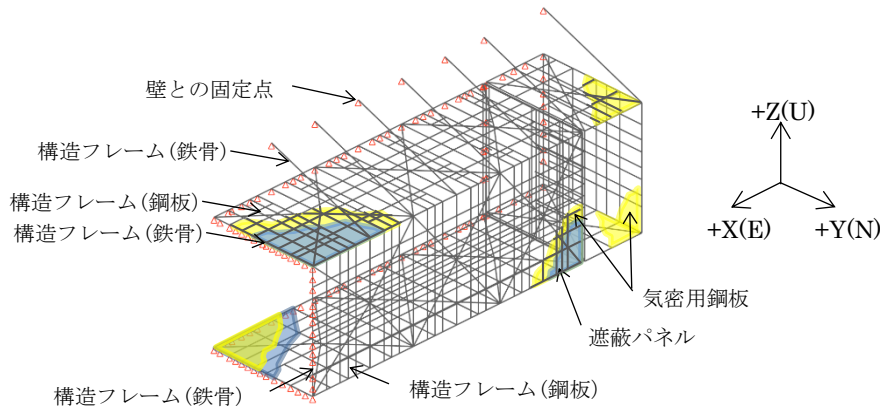
- ・気密用鋼板の応力評価

b. 概要

- ・モデル 1 で選定した評価対象部位の気密用鋼板 1 枚をシェル要素として単体でモデル化し，構造フレーム（鋼板）との接合部位置を剛結合とする。
- ・モデル 1 のモデル化範囲に合わせ，部材芯範囲でモデル化する。
- ・モデル 1 の接合部には，モデル 1 の変位量を強制変位として与える。その他の気密用鋼板と構造フレーム（鋼板）との接合部には，モデル 1 の接合部変位量を線形補間した変位量を，強制変位として与える。
- ・気密用鋼板の慣性力を考慮する。
- ・モデル 3 のシェル要素の分割は，パネルに生じる応力を適切に表現できるようにする。
- ・シェル要素の要素数は 952 要素，節点数は 1015 節点
- ・シェル要素のメッシュサイズは，21～28 mm

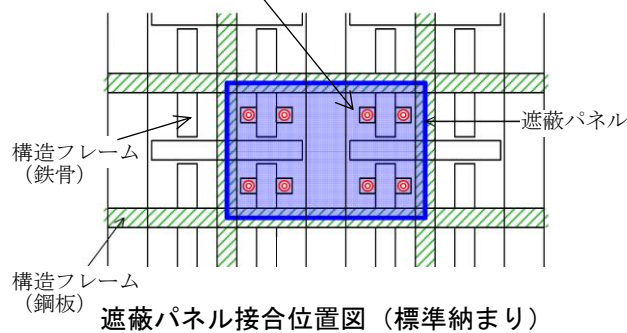
図 6-2 にモデル 1 における遮蔽パネルのひずみ分布と最大ひずみとなる遮蔽パネル位置及びモデル 2 における遮蔽パネル応力度分布を示す。

図 6-3 にモデル 1 における気密用鋼板のひずみ分布と最大ひずみとなる気密用鋼板位置及びモデル 3 における気密用鋼板応力度分布を示す。

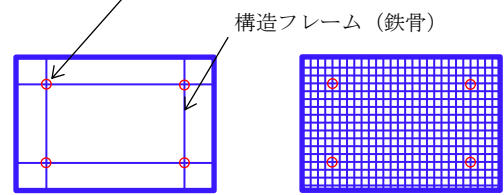


モデル 1

遮蔽パネルは、ボルトにて構造フレーム（鉄骨）と接合



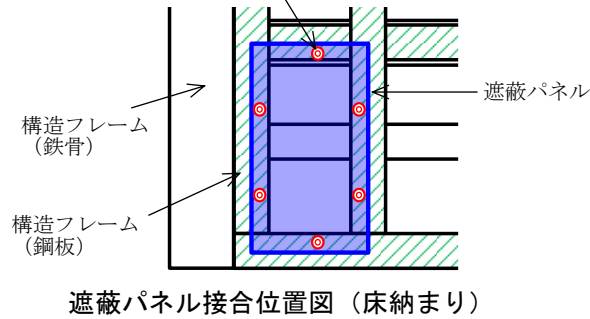
構造フレーム（鉄骨）と遮蔽パネルの接合点：剛部材（ピン結合）



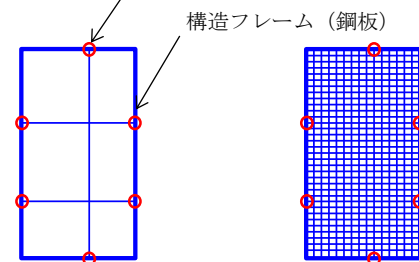
モデル 1
遮蔽パネル分割例

モデル 2-1
遮蔽パネル分割例 (*1)

遮蔽パネルは、ボルトにて構造フレーム（鋼板）と接合



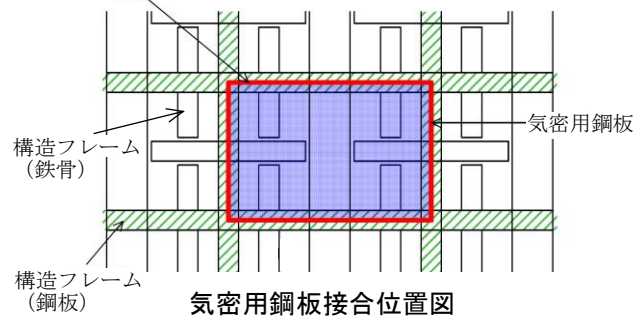
構造フレーム（鋼板）と遮蔽パネルの接合点：剛部材（ピン結合）



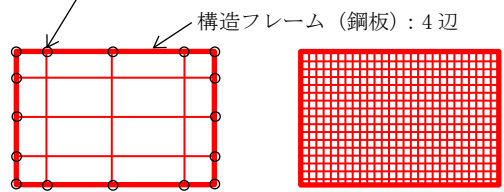
モデル 1
遮蔽パネル分割例

モデル 2-2
遮蔽パネル分割例 (*1)

気密用鋼板は、周囲を溶接にて構造フレーム（鋼板）と接合



構造フレーム（鋼板）と気密用鋼板の接合点：剛結合



モデル 1
気密用鋼板分割例

モデル 3
気密用鋼板分割例 (*2)

注記*1：モデル 1 の接合点を剛部材（ピン結合）とし、モデル 1 の変位量を与える。

*2：モデル 1 の接合点及びその他の構造フレーム（鋼板）と気密用鋼板の接合点を剛結合とする。

モデル 1 の接合点にはモデル 1 の変位量を与え、その他接合点には線形補間により算出した変位量を与える。

図 6-1 解析モデル概要図

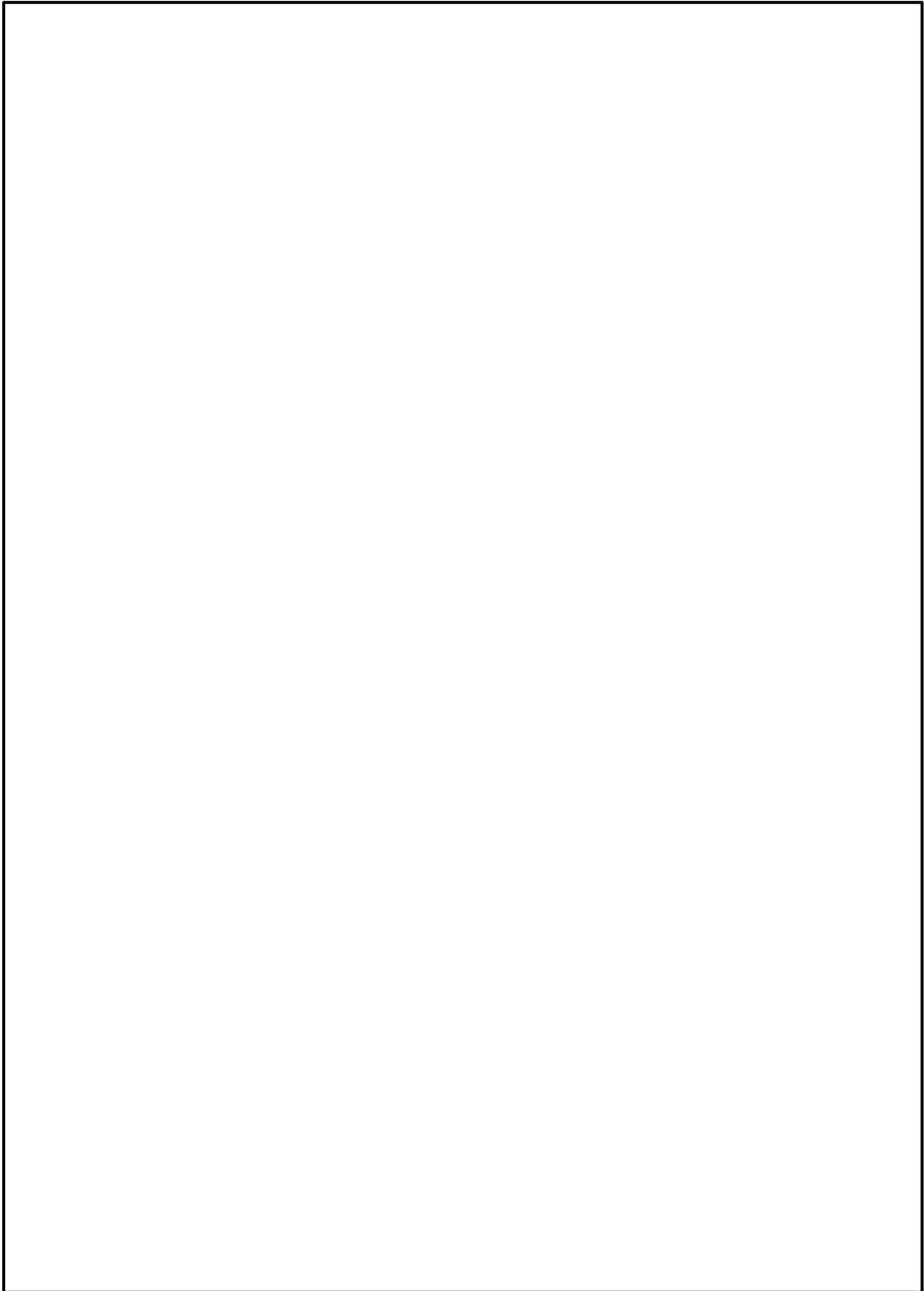


図 6-2 遮蔽パネルひずみ分布 (モデル 1) 及び応力度分布 (モデル 2) (1/2)

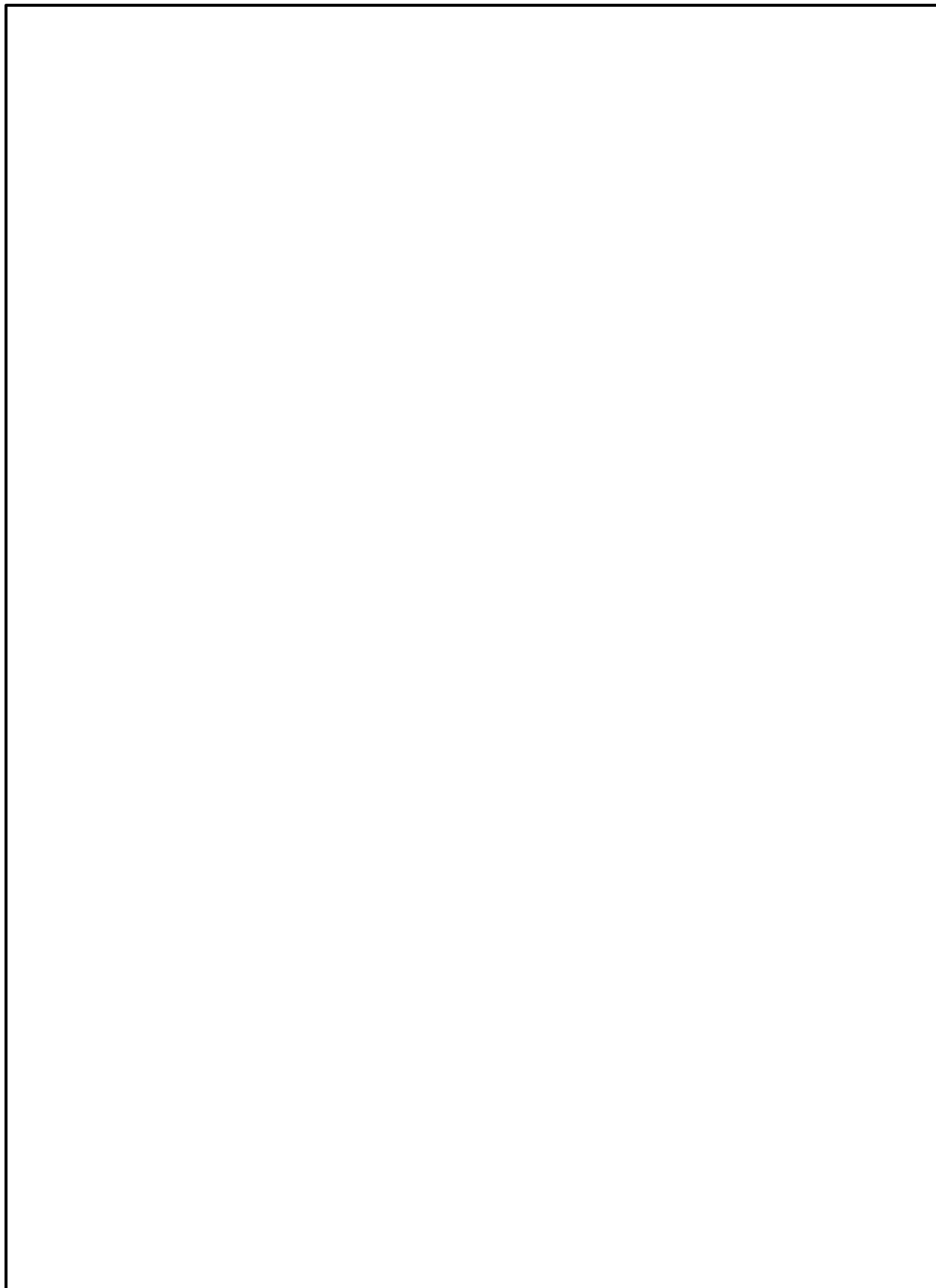


図 6-2 遮蔽パネルひずみ分布 (モデル 1) 及び応力度分布 (モデル 2) (2/2)

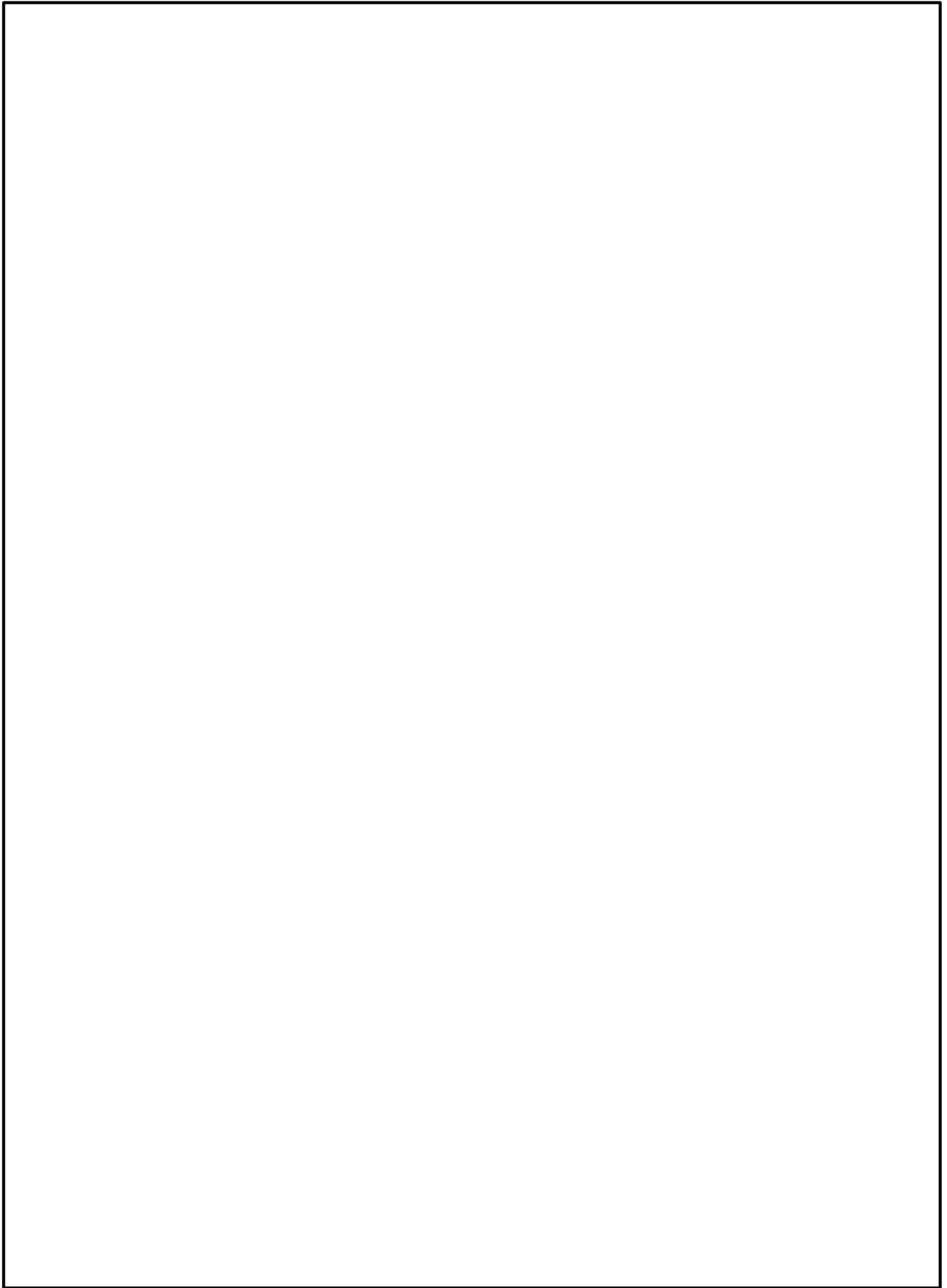
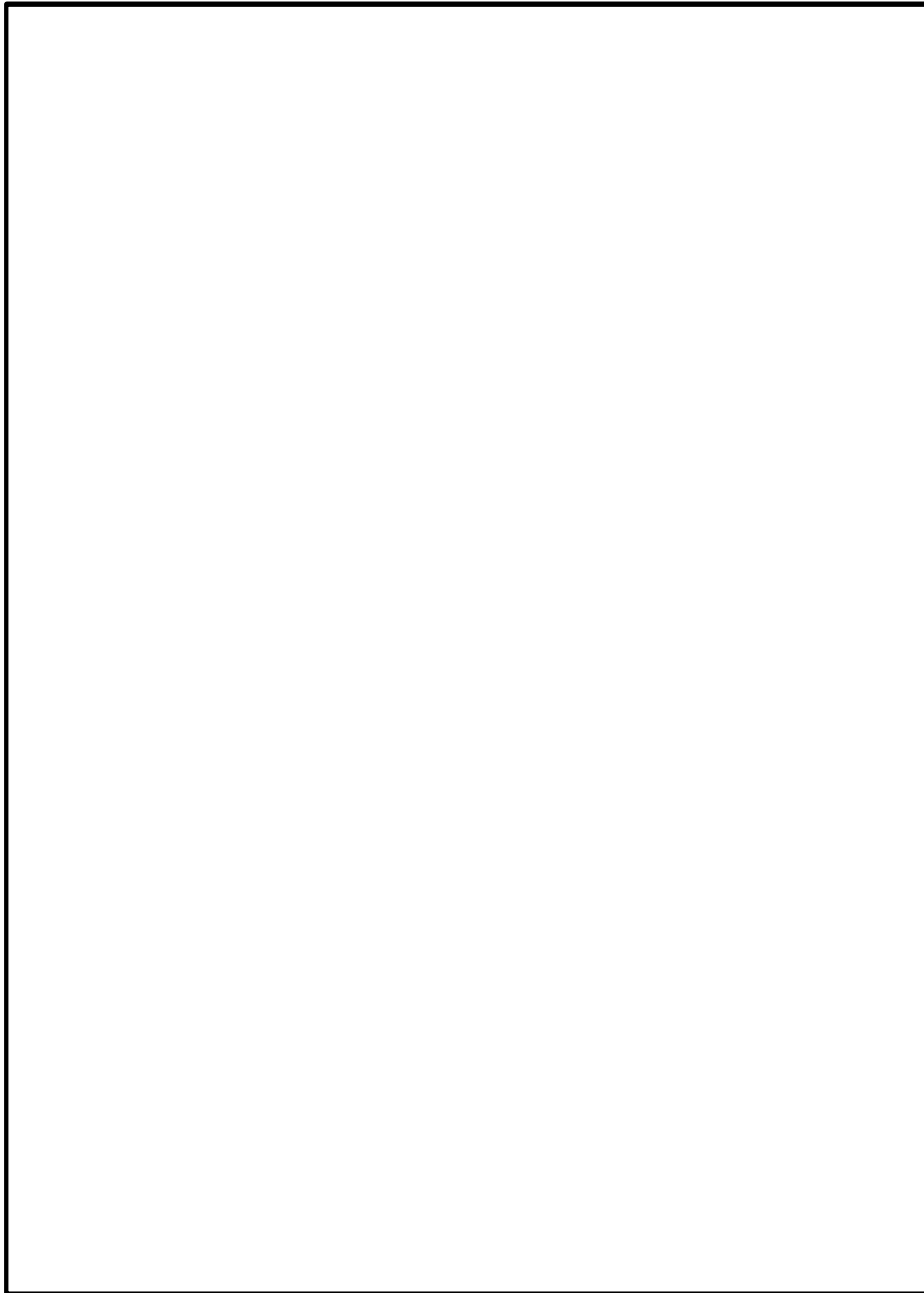
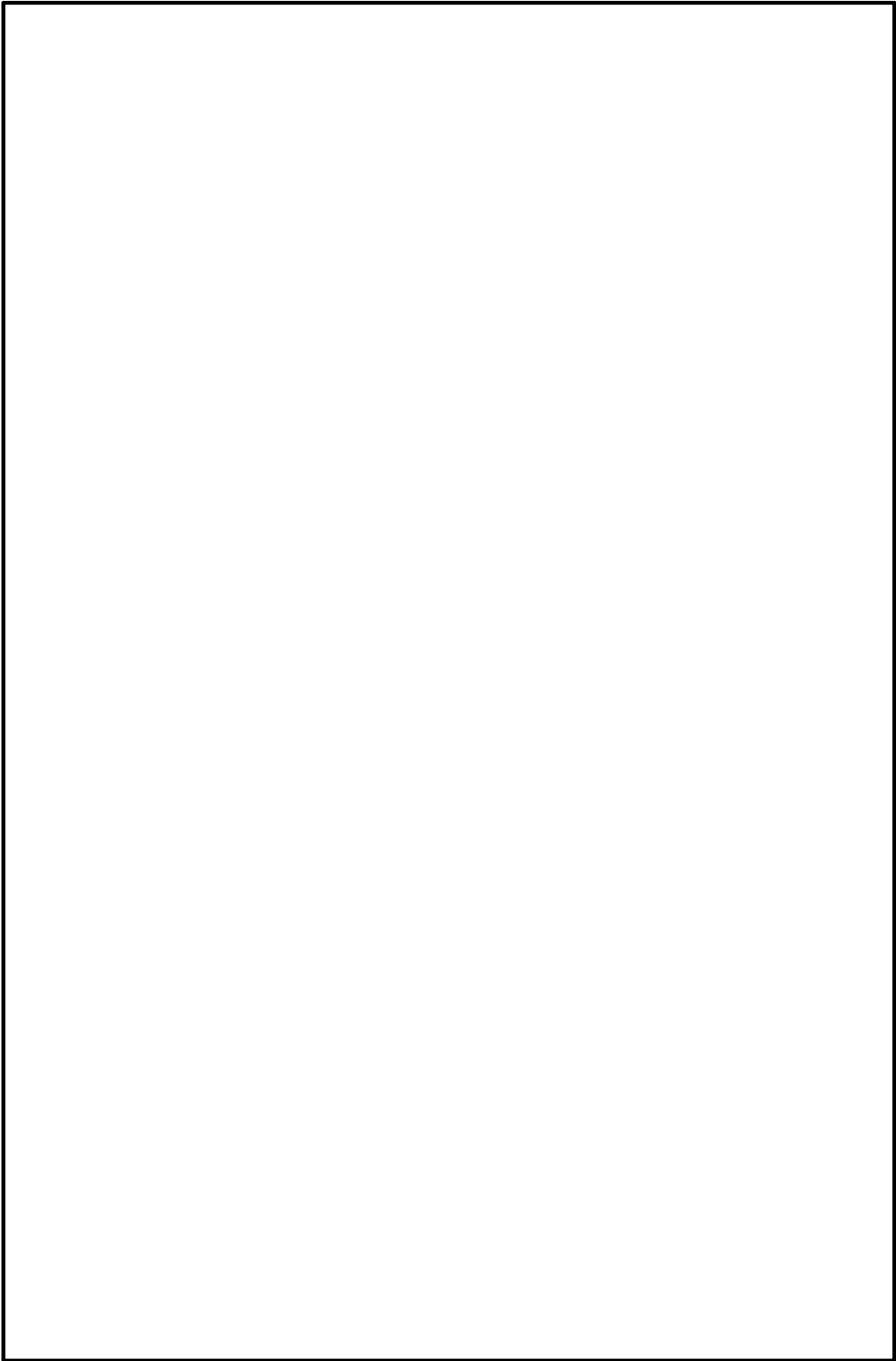


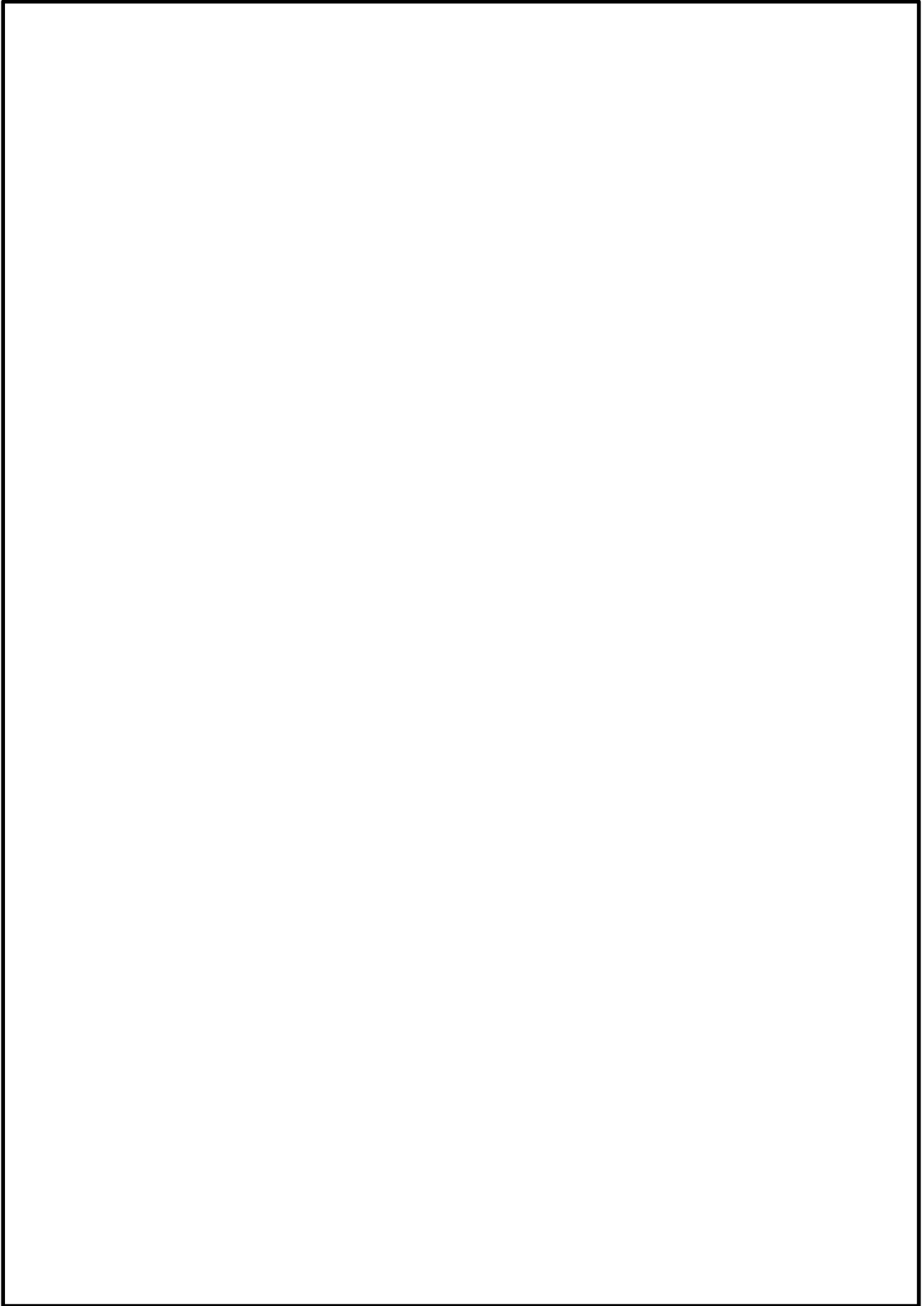
図 6-3 気密用鋼板ひずみ分布（モデル 1）及び応力度分布（モデル 3）

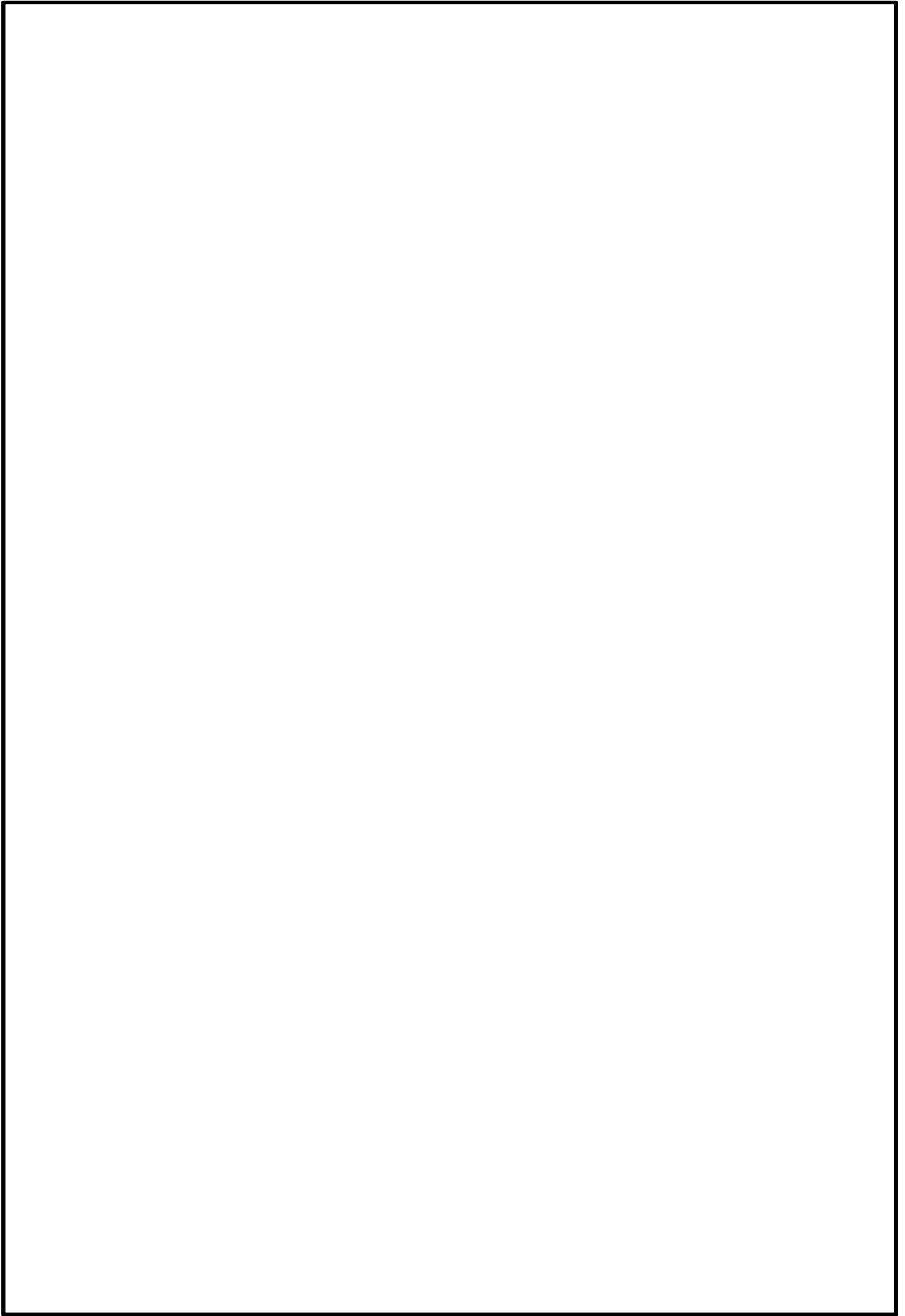
構造フレーム（鉄骨及び鋼板）の種別，断面サイズ及び解析モデル図

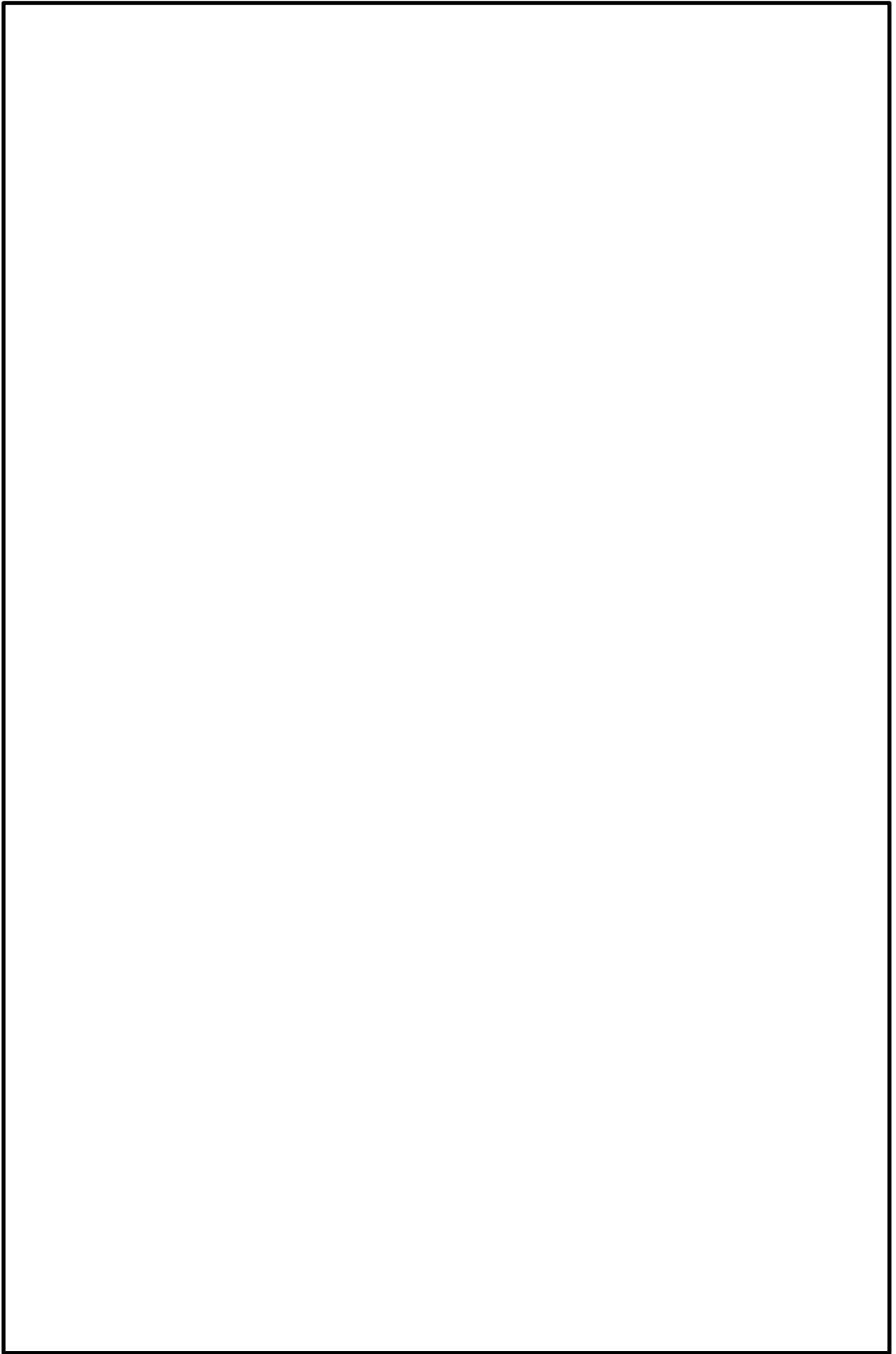


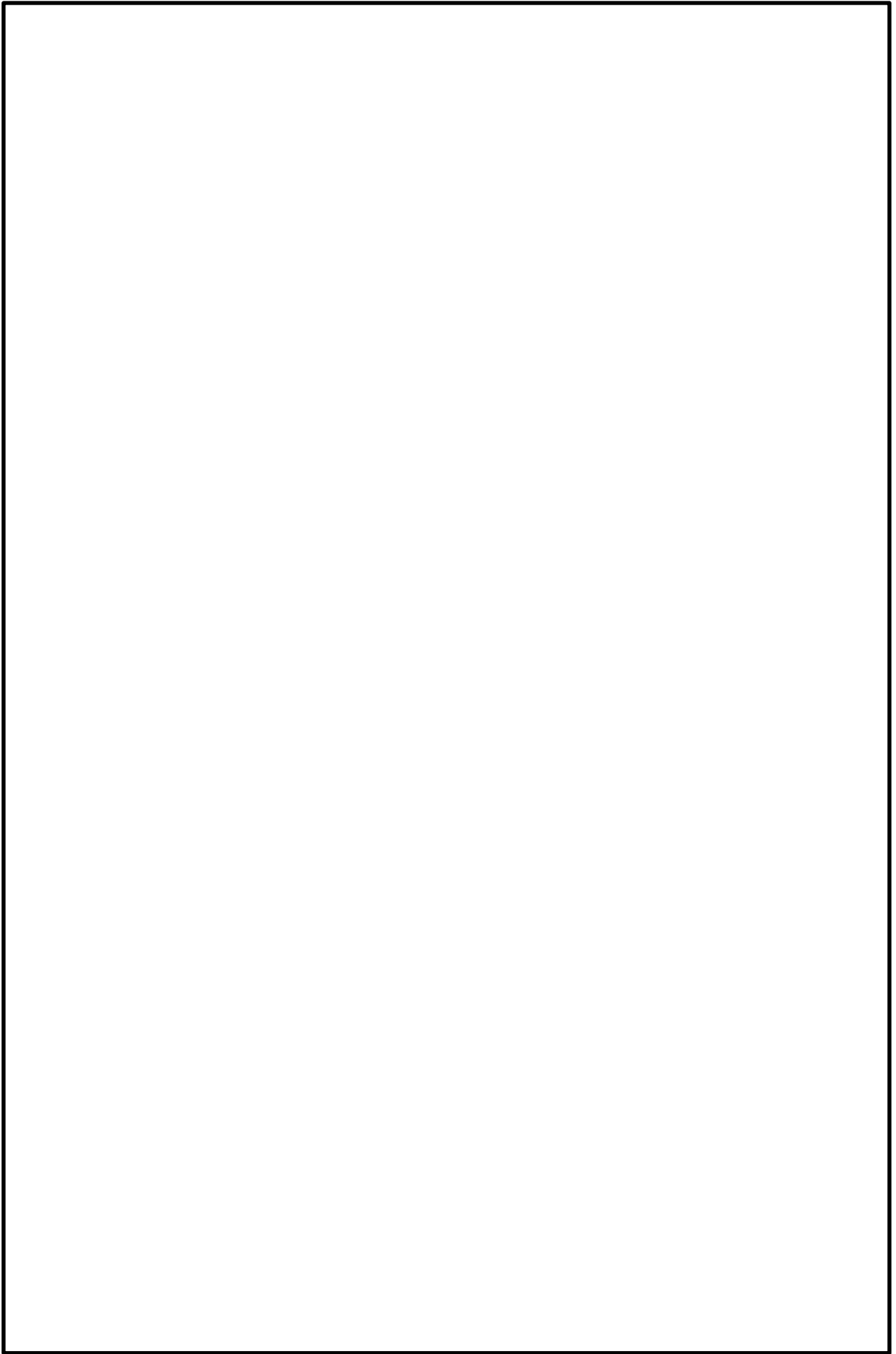
次頁以降に，構造フレーム（鉄骨）と構造フレーム（鋼板）の解析モデル図（凡例の記号は上表内の記号と対応）を示す。

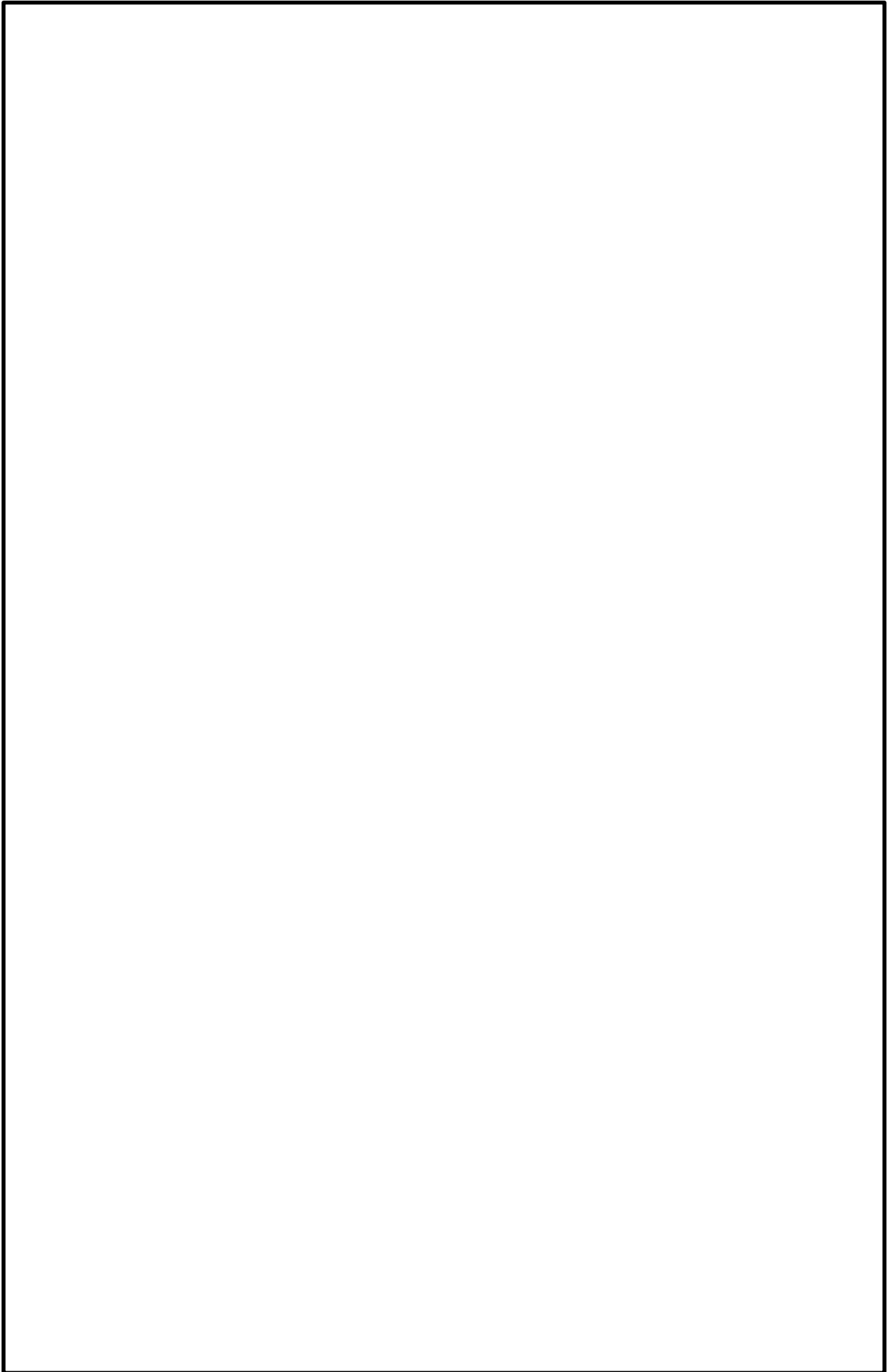














遮蔽気密扉の重量設定方法



中央制御室待避室を支持する壁の耐震評価

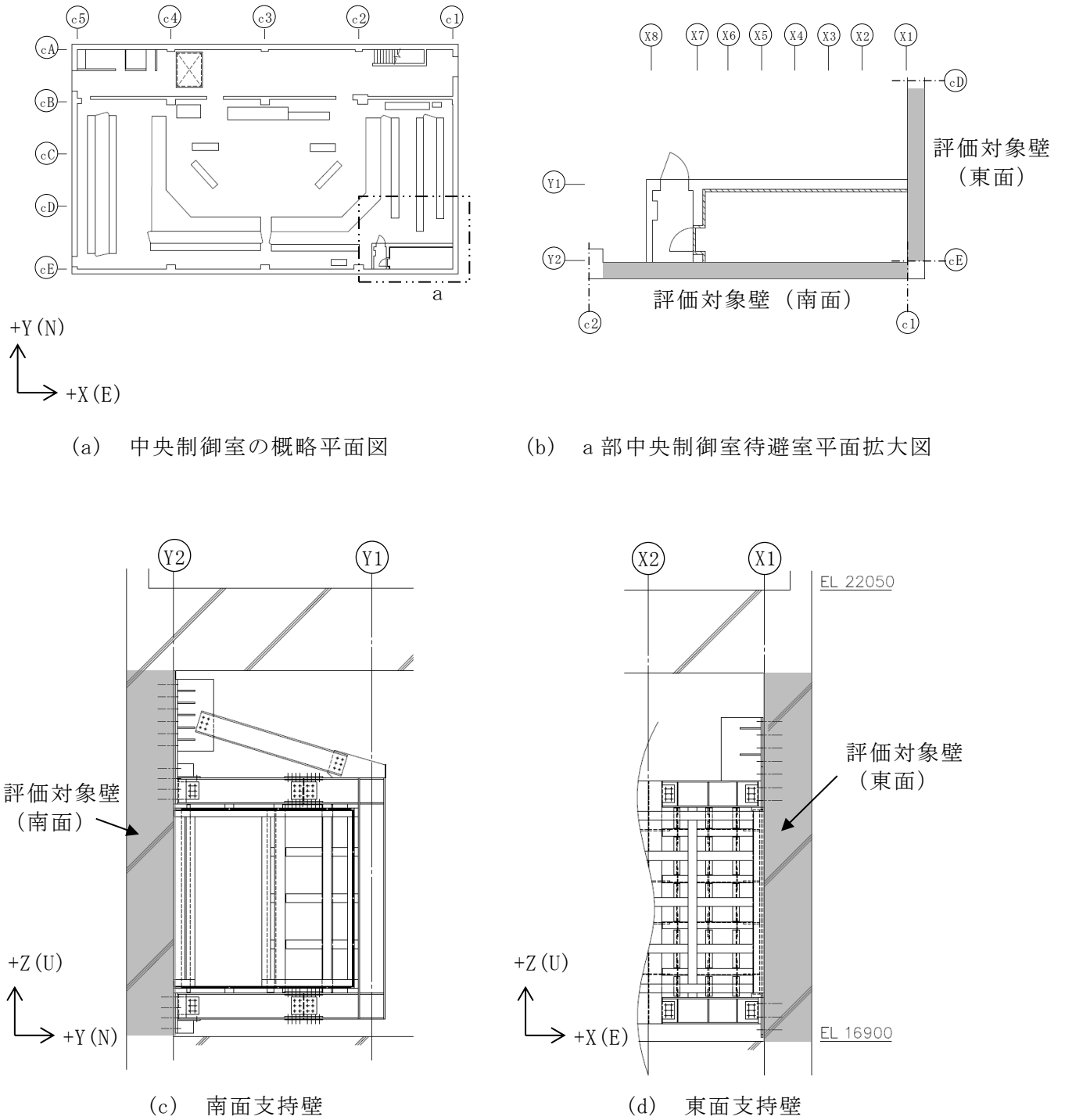
1. 検討概要

中央制御室待避室は、基礎ボルトを介して制御室建物の南面及び東面の耐震壁で支持する構造となっている。

本資料では、中央制御室待避室を支持する制御室建物の耐震壁（以下「待避室支持壁」という。）について、 S_s 地震時の中央制御室待避室の面外反力及び待避室支持壁の面外慣性力に対して十分な構造強度を有していることを確認する。

2. 構造概要

待避室支持壁の構造概要を図 2-1 に示す。



3. 検討方針

待避室支持壁の評価は、FEMモデルを用いた弾性応力解析により行う。

S_s地震時の中央制御室待避室の面外反力及び待避室支持壁の面外慣性力の組合せにより発生する応力が「原子力施設鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説（（社）日本建築学会，2005 制定）」（以下「RC-N規準」という。）に基づき設定した許容限界を超えないことを確認する。

4. 設計用地震力

(1) 中央制御室待避室の面外反力

中央制御室待避室の面外反力は、VI-2-8-4-4「中央制御室待避室遮蔽の耐震性についての計算書」による結果に基づく設計用震度Ⅱによる基礎ボルト反力を用いる。

(2) 待避室支持壁の面外慣性力

待避室支持壁の面外慣性力は、VI-2-2-5「制御室建物の地震応答計算書」の結果に基づき、材料物性の不確かさを考慮した EL22.05m における S_s地震時の水平方向最大応答加速度により設定した評価用震度に基づき算定する。

待避室支持壁の評価用震度を表 4-1 に示す。

表 4-1 待避室支持壁の評価用震度

方向	EL (m)	最大応答加速度* (cm/s ²)	評価用震度
NS (南面支持壁評価用)	22.05	1367 (S _s -D, ケース 1)	1.40
EW (東面支持壁評価用)		1984 (S _s -D, ケース 2)	2.03

注記*：VI-2-2-5「制御室建物の地震応答計算書」による結果に基づき材料物性の不確かさを考慮した値

5. 荷重及び荷重の組合せ

(1) 荷重

a. 固定荷重 (G)

固定荷重として待避室支持壁の自重を考慮する。

b. 地震荷重

(a) 面外慣性力 (S_s)

待避室支持壁の面外慣性力は、「4. 設計用地震力」で設定した評価用震度を用いて算定する。

(b) 中央制御室待避室の面外反力 (U_s)

中央制御室待避室の面外反力は、VI-2-8-4-4「中央制御室待避室遮蔽の耐震性についての計算書」の中央制御室待避室遮蔽の解析モデルによる応力解析により、基礎ボルト位置に生じる反力を考慮する。

(2) 荷重の組合せ

待避室支持壁の評価に用いる荷重の組合せを表 5-1 に示す。

表 5-1 荷重の組合せ

外力の状態	荷重の組合せ
S_s 地震時	$G + S_s + U_s$

G : 固定荷重

S_s : 面外慣性力

U_s : 中央制御室待避室の面外反力

6. 許容限界

(1) コンクリート

「RC-N規準」に基づき算定した短期許容応力度を表6-1に示す。

表6-1 コンクリートの短期許容応力度

(単位：N/mm²)

設計基準強度 F _c	圧縮	せん断
22.1	14.6	1.06

(2) 鉄筋

「RC-N規準」に基づく短期許容応力度を表6-2に示す。

表6-2 鉄筋の短期許容応力度

(単位：N/mm²)

種別	引張及び 圧縮	せん断
SD35 (SD345相当)	345*	345

注記*：設計に用いる材料強度は「平12建告第2464号」に基づき、
短期許容応力度を1.1倍して算定する。

7. 評価方法

(1) 解析モデル及び諸元

応力解析は、FEMモデルを用いた弾性応力解析とする。解析には、解析コード「MSC NASTRAN」を用いる。

解析モデルの概念図を図7-1に、解析モデル図を図7-2に示す。

解析モデルに使用するFEM要素はシェル要素とし、境界条件は柱及びはりを固定とする。

使用材料の物性値を表7-1に示す。

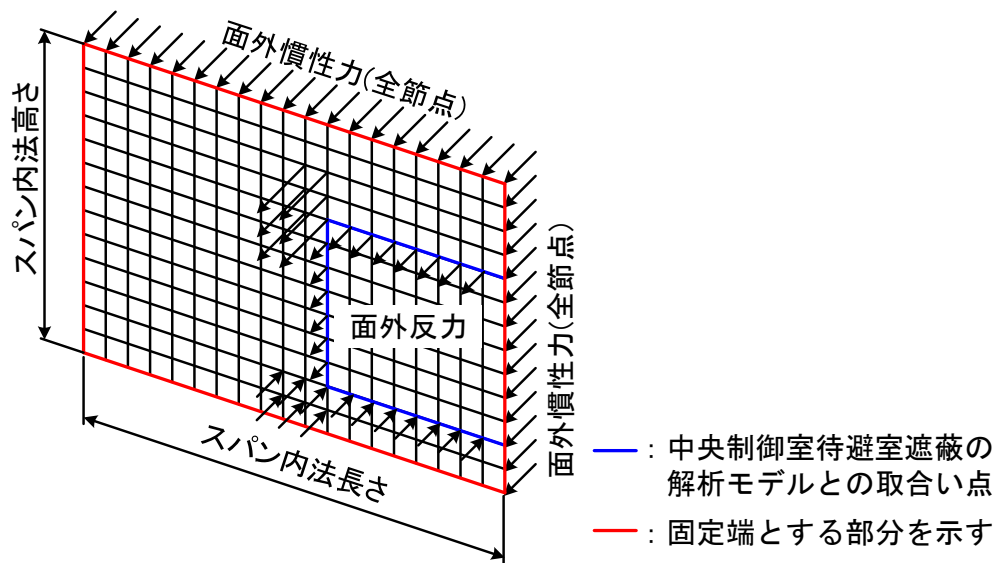


図7-1 解析モデルの概念図

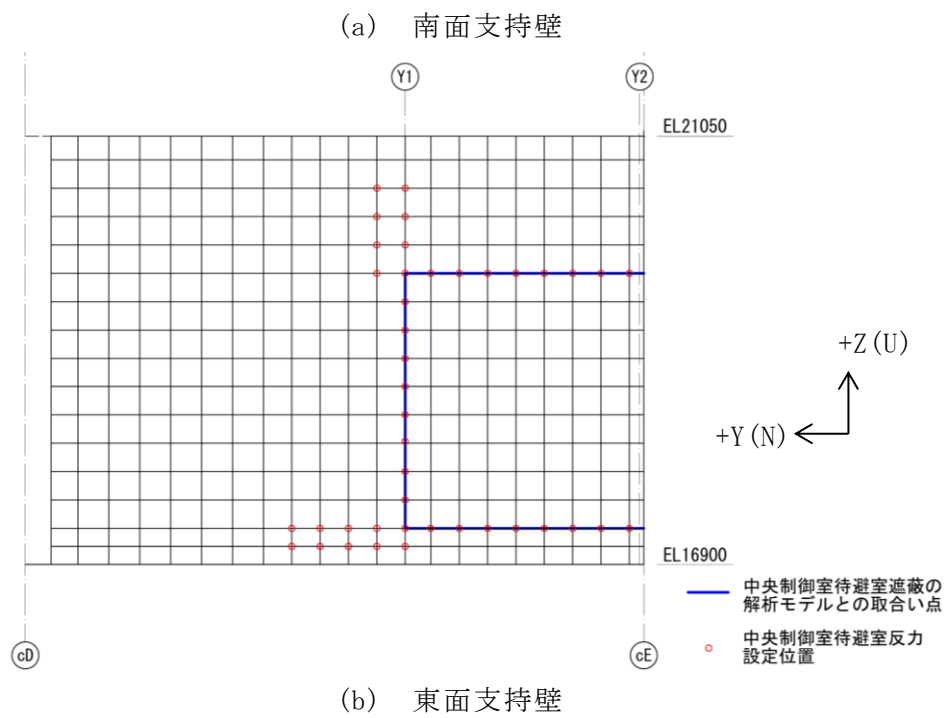
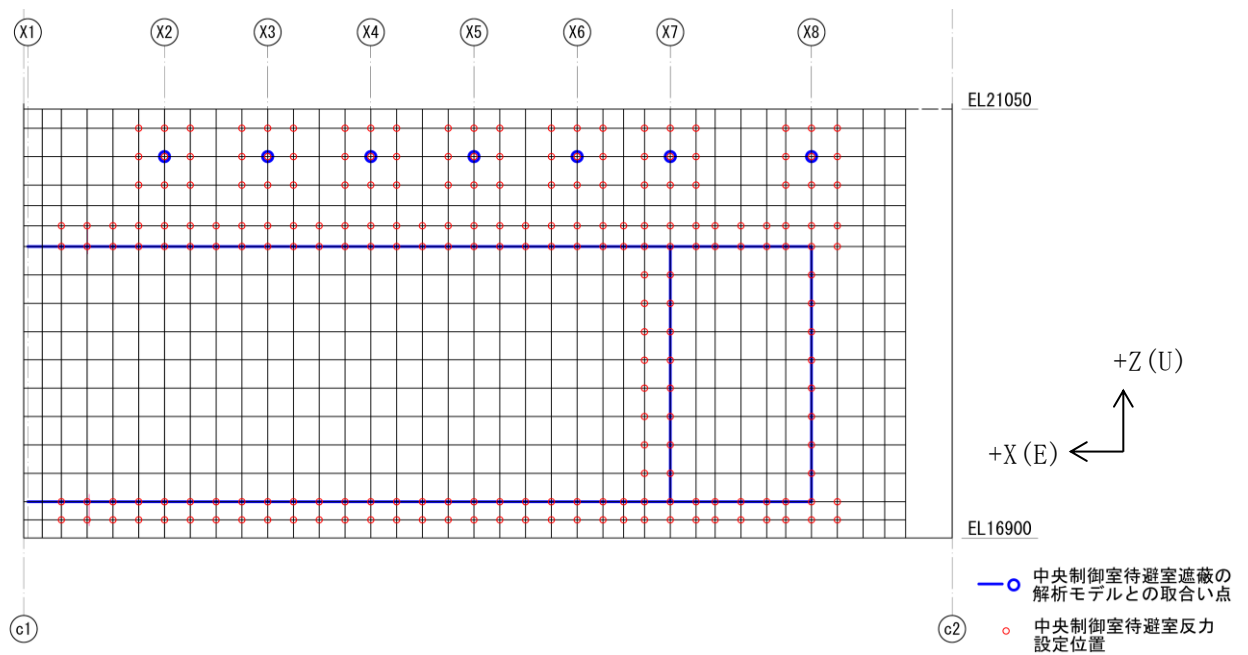


図 7-2 解析モデル図

表 7-1 使用材料の物性値

コンクリートの 設計基準強度 F_c (N/mm^2)	ヤング係数 E (N/mm^2)	ポアソン比 ν
22.1	2.20×10^4	0.2

(2) 荷重ケース

S_s 地震時の応力は，次の荷重を組み合わせて求める。

- G : 固定荷重
- $S_{s\ S\ N}$: S → N 方向 面外慣性力
- $S_{s\ W\ E}$: W → E 方向 面外慣性力
- $U_{s\ i}$: 中央制御室待避室の面外反力

(3) 荷重の組合せケース

VI-2-8-4-4「中央制御室待避室遮蔽の耐震性についての計算書」における中央制御室待避室の解析ケースに対して求まる面外反力と、待避室支持壁の評価用震度による面外慣性力を組み合わせる。

待避室支持壁評価における荷重の組合せケースを表 7-2 に示す。

表 7-2(1) 待避室支持壁評価における荷重の組合せケース

(a) 南面支持壁

外力の状態	ケース No.	荷重の組合せ*
S _s 地震時	1-1	$G + 1.0 S_s S_N + U_{s1}$
	1-2	$G + 1.0 S_s S_N + U_{s2}$
	1-3	$G + 1.0 S_s S_N + U_{s3}$
	1-4	$G + 1.0 S_s S_N + U_{s4}$
	1-5	$G - 1.0 S_s S_N + U_{s5}$
	1-6	$G - 1.0 S_s S_N + U_{s6}$
	1-7	$G - 1.0 S_s S_N + U_{s7}$
	1-8	$G - 1.0 S_s S_N + U_{s8}$
	1-9	$G + 0.4 S_s S_N + U_{s9}$
	1-10	$G - 0.4 S_s S_N + U_{s10}$
	1-11	$G + 0.4 S_s S_N + U_{s11}$
	1-12	$G - 0.4 S_s S_N + U_{s12}$
	1-13	$G + 0.4 S_s S_N + U_{s13}$
	1-14	$G - 0.4 S_s S_N + U_{s14}$
	1-15	$G + 0.4 S_s S_N + U_{s15}$
	1-16	$G - 0.4 S_s S_N + U_{s16}$
	1-17	$G + 0.4 S_s S_N + U_{s17}$
	1-18	$G + 0.4 S_s S_N + U_{s18}$
	1-19	$G - 0.4 S_s S_N + U_{s19}$
	1-20	$G - 0.4 S_s S_N + U_{s20}$
	1-21	$G + 0.4 S_s S_N + U_{s21}$
	1-22	$G + 0.4 S_s S_N + U_{s22}$
	1-23	$G - 0.4 S_s S_N + U_{s23}$
	1-24	$G - 0.4 S_s S_N + U_{s24}$

注記*：中央制御室待避室の面外反力 $U_{s1} \sim U_{s24}$ と中央制御室待避室遮蔽の解析ケースの対応は、「参考資料 中央制御室待避室の面外反力及び荷重の組合せ」に示す。

表 7-2(2) 待避室支持壁評価における荷重の組合せケース

(b) 東面支持壁

外力の状態	ケース No.	荷重の組合せ*
S _s 地震時	2-1	$G + 0.4 S_{sWE} + U_{s1}$
	2-2	$G - 0.4 S_{sWE} + U_{s2}$
	2-3	$G + 0.4 S_{sWE} + U_{s3}$
	2-4	$G - 0.4 S_{sWE} + U_{s4}$
	2-5	$G + 0.4 S_{sWE} + U_{s5}$
	2-6	$G - 0.4 S_{sWE} + U_{s6}$
	2-7	$G + 0.4 S_{sWE} + U_{s7}$
	2-8	$G - 0.4 S_{sWE} + U_{s8}$
	2-9	$G + 1.0 S_{sWE} + U_{s9}$
	2-10	$G + 1.0 S_{sWE} + U_{s10}$
	2-11	$G + 1.0 S_{sWE} + U_{s11}$
	2-12	$G + 1.0 S_{sWE} + U_{s12}$
	2-13	$G - 1.0 S_{sWE} + U_{s13}$
	2-14	$G - 1.0 S_{sWE} + U_{s14}$
	2-15	$G - 1.0 S_{sWE} + U_{s15}$
	2-16	$G - 1.0 S_{sWE} + U_{s16}$
	2-17	$G + 0.4 S_{sWE} + U_{s17}$
	2-18	$G - 0.4 S_{sWE} + U_{s18}$
	2-19	$G + 0.4 S_{sWE} + U_{s19}$
	2-20	$G - 0.4 S_{sWE} + U_{s20}$
	2-21	$G + 0.4 S_{sWE} + U_{s21}$
	2-22	$G - 0.4 S_{sWE} + U_{s22}$
	2-23	$G + 0.4 S_{sWE} + U_{s23}$
	2-24	$G - 0.4 S_{sWE} + U_{s24}$

注記* : 中央制御室待避室の面外反力 $U_{s1} \sim U_{s24}$ と中央制御室待避室遮蔽の解析ケースの対応は、「参考資料 中央制御室待避室の面外反力及び荷重の組合せ」に示す。

(4) 断面の評価方法

待避室支持壁の断面の評価は以下の方法で行う。

曲げモーメント及び面外せん断力を算定し、各許容限界を超えないことを確認する。

断面力成分を図 7-3 に示す。

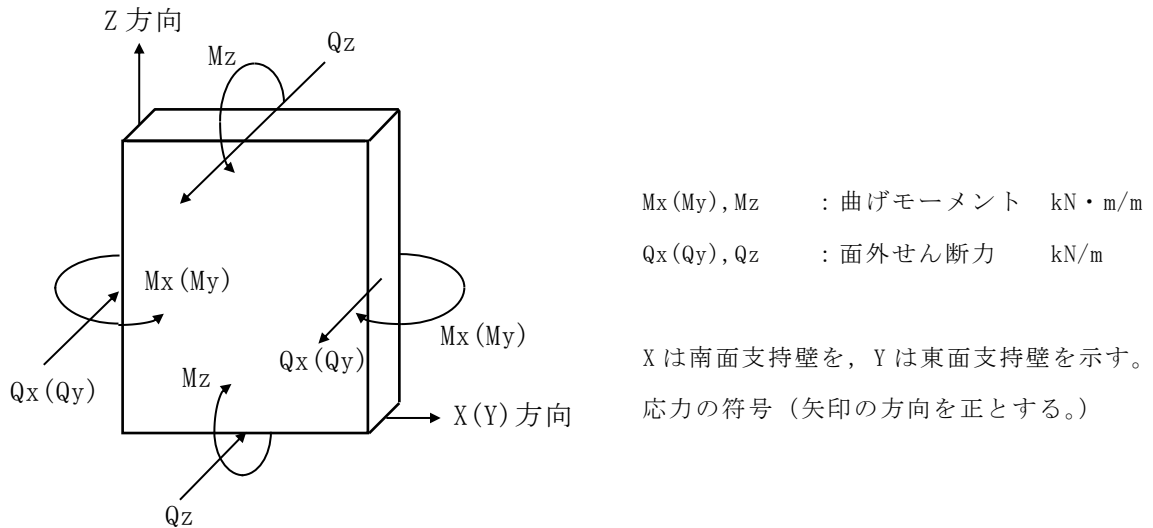


図 7-3 断面力成分

a. 曲げモーメントに対する断面の評価方法

断面の評価は、「RC-N規準」に基づき、評価対象部位に生じる曲げモーメントが次式をもとに計算した許容曲げモーメントを超えないことを確認する。

$$M_A = a_t \cdot f_t \cdot j$$

ここで、

M_A : 許容曲げモーメント ($\text{N} \cdot \text{mm}$)

a_t : 引張鉄筋断面積 (mm^2)

f_t : 鉄筋の許容引張応力度で、表 6-2 に示す値* (N/mm^2)

j : 断面の応力中心間距離で、断面の有効せいの 7/8 倍の値 (mm)

注記* : 「平 12 建告第 2464 号」に基づく鉄筋の材料強度 (F 値の 1.1 倍) による。

b. 面外せん断力に対する断面の評価方法

断面の評価は、「RC-N規準」に基づき、評価対象部位に生じる面外せん断力が、次式をもとに計算した許容面外せん断力を超えないことを確認する。

$$Q_A = b \cdot j \cdot \alpha \cdot f_s$$

ここで、

Q_A : 許容面外せん断力 (N)

b : 断面の幅 (mm)

j : 断面の応力中心間距離で、断面の有効せいの 7/8 倍の値 (mm)

α : 許容せん断力の割増し係数

(2 を超える場合は 2, 1 未満の場合は 1 とする。)

$$\alpha = \frac{4}{M/(Q \cdot d) + 1}$$

M : 曲げモーメント (N・mm)

Q : せん断力 (N)

d : 断面の有効せい (mm)

f_s : コンクリートの短期許容せん断応力度で、表 6-1 に示す値 (N/mm²)

8. 断面の評価結果

評価結果については、各待避室支持壁について曲げモーメント及び面外せん断力に対する検討において、検定値が最大となる要素をそれぞれ選定する。

待避室支持壁の断面の評価結果を表 8-1 に示す。

発生する曲げモーメント及び面外せん断力が許容限界を超えないことを確認した。

表 8-1 待避室支持壁の断面の評価結果

検討ケース		S s 地震時	
検討位置		南面支持壁	東面支持壁
厚さ t (mm) ×幅 b (mm)		□×1000	□×1000
有効せい d (mm)		□	□
配筋	縦筋 (鉄筋断面積)	D22@200 (1935 mm ² /m)	D19@200 (1435 mm ² /m)
	横筋 (鉄筋断面積)	D22@200 (1935 mm ² /m)	D19@200 (1435 mm ² /m)
曲げモーメント	方向	Z 方向	Z 方向
	発生曲げ モーメント M (kN・m/m)	65.6	95.9
	許容限界 (kN・m/m)	263.0	197.4
	検定値	0.25	0.49
面外せん断力	方向	Z 方向	Z 方向
	発生せん断力 Q (kN/m)	206.4	270.3
	許容限界 (kN/m)	760.5	769.8
	検定値	0.28	0.36
判定		可	可

中央制御室待避室の面外反力及び荷重の組合せ

VI-2-8-4-4「中央制御室待避室遮蔽の耐震性についての計算書」の中央制御室待避室遮蔽の評価における荷重の組合せと面外反力の対応を表1に示す。

表1 中央制御室待避室遮蔽の評価における荷重の組合せと面外反力の対応

外力の状態	面外反力	中央制御室待避室の荷重の組合せ*1			
		ケース No.	設計用震度*2		
			N S 方向	E W 方向	鉛直方向
S s 地震時	U_{s1}	1	$1.0C_H$	$0.4C_H$	$0.4C_V$
	U_{s2}	2	$1.0C_H$	$-0.4C_H$	$0.4C_V$
	U_{s3}	3	$1.0C_H$	$0.4C_H$	$-0.4C_V$
	U_{s4}	4	$1.0C_H$	$-0.4C_H$	$-0.4C_V$
	U_{s5}	5	$-1.0C_H$	$0.4C_H$	$0.4C_V$
	U_{s6}	6	$-1.0C_H$	$-0.4C_H$	$0.4C_V$
	U_{s7}	7	$-1.0C_H$	$0.4C_H$	$-0.4C_V$
	U_{s8}	8	$-1.0C_H$	$-0.4C_H$	$-0.4C_V$
	U_{s9}	9	$0.4C_H$	$1.0C_H$	$0.4C_V$
	U_{s10}	10	$-0.4C_H$	$1.0C_H$	$0.4C_V$
	U_{s11}	11	$0.4C_H$	$1.0C_H$	$-0.4C_V$
	U_{s12}	12	$-0.4C_H$	$1.0C_H$	$-0.4C_V$
	U_{s13}	13	$0.4C_H$	$-1.0C_H$	$0.4C_V$
	U_{s14}	14	$-0.4C_H$	$-1.0C_H$	$0.4C_V$
	U_{s15}	15	$0.4C_H$	$-1.0C_H$	$-0.4C_V$
	U_{s16}	16	$-0.4C_H$	$-1.0C_H$	$-0.4C_V$
	U_{s17}	17	$0.4C_H$	$0.4C_H$	$1.0C_V$
	U_{s18}	18	$0.4C_H$	$-0.4C_H$	$1.0C_V$
	U_{s19}	19	$-0.4C_H$	$0.4C_H$	$1.0C_V$
	U_{s20}	20	$-0.4C_H$	$-0.4C_H$	$1.0C_V$
	U_{s21}	21	$0.4C_H$	$0.4C_H$	$-1.0C_V$
	U_{s22}	22	$0.4C_H$	$-0.4C_H$	$-1.0C_V$
	U_{s23}	23	$-0.4C_H$	$0.4C_H$	$-1.0C_V$
	U_{s24}	24	$-0.4C_H$	$-0.4C_H$	$-1.0C_V$

注記*1： C_H 及び C_V はVI-2-8-4-4「中央制御室待避室遮蔽の耐震性についての計算書」の表4-5設計用地震力（重大事故等対処設備）における水平方向及び鉛直方向の設計用震度を示す。

*2：荷重の向きは，S→N，W→E，U→Dを正とする。

遮蔽気密扉の健全性評価

1. 概要

本計算書はVI-2-1-9「機能維持の基本方針」の構造強度及び機能維持の設計方針に基づき、中央制御室待避室遮蔽の遮蔽気密扉が地震力に対して十分な構造強度を有していることを説明するものである。

その耐震評価は、遮蔽気密扉に要求される機能の維持を確認するために、応力評価に基づく、構造部材の健全性評価により行う。

2. 一般事項

2.1 検討対象扉一覧

検討対象の遮蔽気密扉を表 2-1 に示す。

表 2-1 検討対象遮蔽気密扉

扉名称	設置高さ
	EL
中央制御室待避室遮蔽 遮蔽気密扉	16.900m

2.2 配置概要

遮蔽気密扉の設置位置図を図 2-1 に示す。

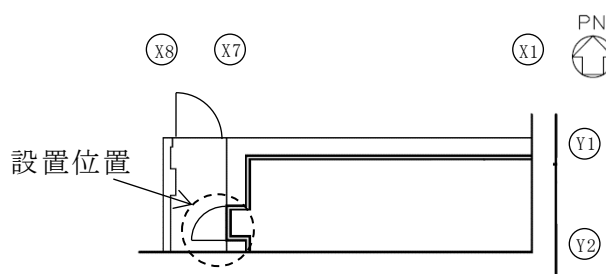


図 2-1 遮蔽気密扉の設置位置図

2.3 構造計画

遮蔽気密扉の構造計画を表 2-2 に示す。

表 2-2 遮蔽気密扉の構造計画

計画の概要		概略構造図
支持構造	主体構造	
<p>扉開放時においては、ヒンジにより扉が扉枠に固定され、扉閉止時においては、カンヌキにより扉と扉枠が一体化する構造とする。</p>	<p>片開型の鋼製扉とし、鋼製の扉板に芯材を取付け、扉に設置されたカンヌキを鋼製の扉枠に差込み、扉と扉枠を一体化させる構造とする。</p> <p>また、扉と扉枠の接続はヒンジを介する構造とする。</p> <p>扉枠は構造フレーム（鋼板）に溶接で接続する。</p> <p>気密性能を担保するため、遮蔽気密扉の、扉枠と接する 4 辺にわたって気密ゴムを取付ける。</p>	

2.4 評価方針

遮蔽気密扉の耐震評価は、VI-2-1-9「機能維持の基本方針」にて設定した荷重及び荷重の組合せ並びに許容限界に基づき、「2.3 構造計画」に示す遮蔽気密扉の構造を踏まえ、「4.1 評価対象部位」にて設定する評価部位において、「3.固有振動数及び設計用地震力」で算出した固有振動数に基づく設計用地震力により算出した応力等が許容限界内に収まることを、「4.4 評価方法」に示す方法にて確認する。応力評価の確認結果を「5. 評価結果」にて確認する。

耐震評価フローを図 2-2 に示す。遮蔽気密扉の耐震評価においては、その構造を踏まえ基準地震動 S_s による地震荷重の作用方向及び伝達経路を考慮し、評価対象部位を設定する。

遮蔽気密扉の耐震評価においては、荷重を静的に作用させる静的解析により、ヒンジ部（ヒンジ板、ヒンジピン、ヒンジボルト）及びカンヌキ部（カンヌキ）の発生応力を算定し、許容限界との比較を行う。

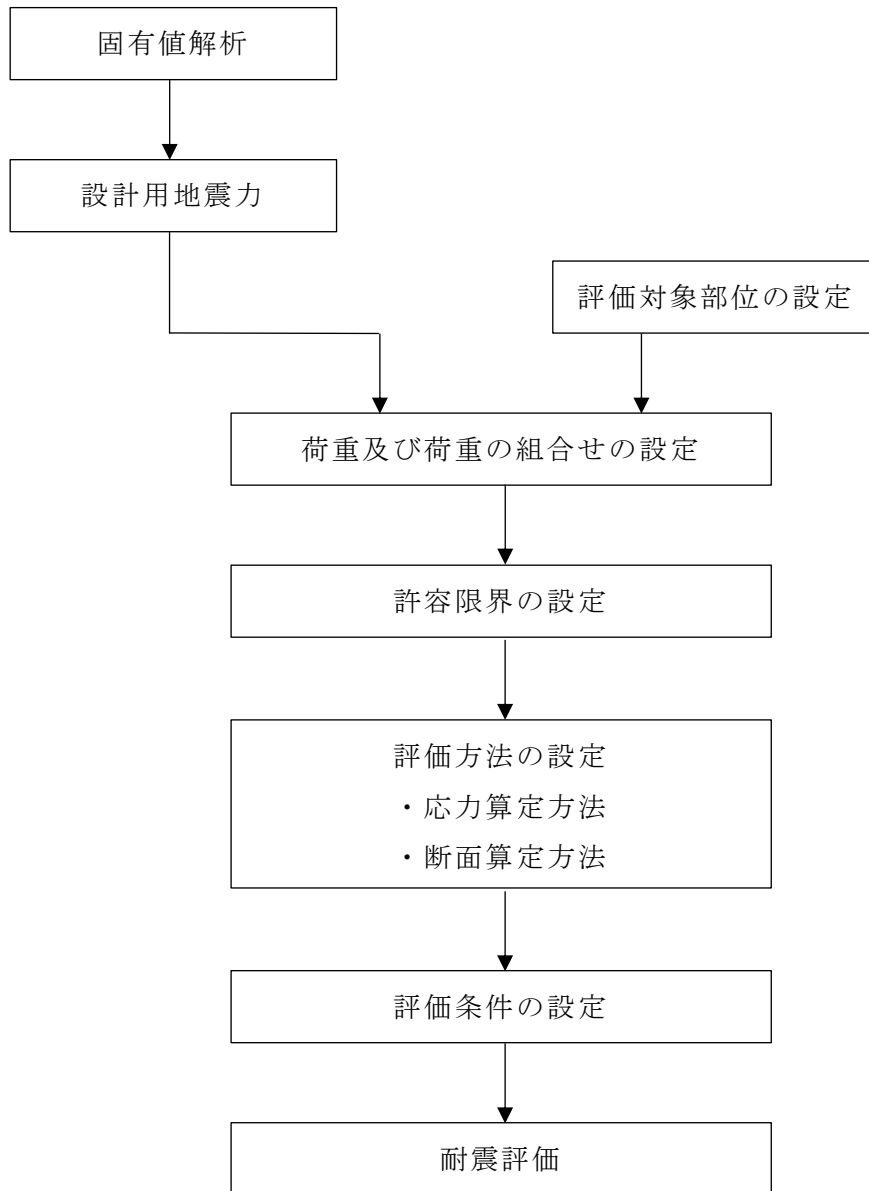


図 2-2 遮蔽気密扉の耐震評価フロー

2.5 適用規格・基準等

適用する規格・基準等を以下に示す。

- (1) 建築基準法・同施行令
- (2) 鋼構造設計規準－許容応力度設計法－（（社）日本建築学会，2005 改定）
- (3) J I S G 4 3 0 3－2012 ステンレス鋼棒
- (4) J I S G 4 0 5 1－2016 機械構造用炭素鋼鋼材
- (5) J I S G 4 0 5 3－2016 機械構造用合金鋼鋼材
- (6) 構造力学公式集（土木学会）

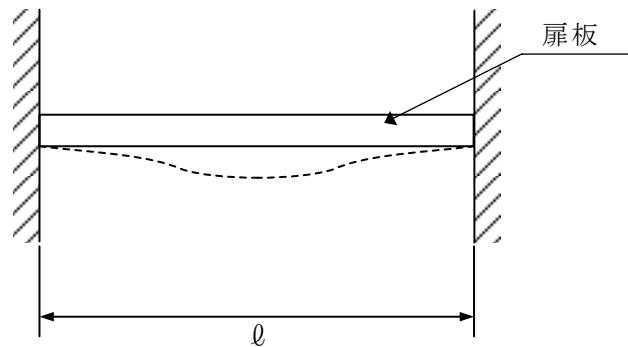
3. 固有振動数及び設計用地震力

3.1 固有値計算

遮蔽気密扉の構造に応じて解析モデルを設定し、1次固有振動数を算出する。

遮蔽気密扉は、ヒンジ部及びカンヌキ部により扉と扉枠を固定する構造であることから、扉閉止時については両端固定はり、扉開放時についてはヒンジ、自由端はりに単純化したモデルとし、モデル化に用いる扉板の長さは扉幅とする。解析モデル図を図3-1に示す。

扉閉止時



扉開放時

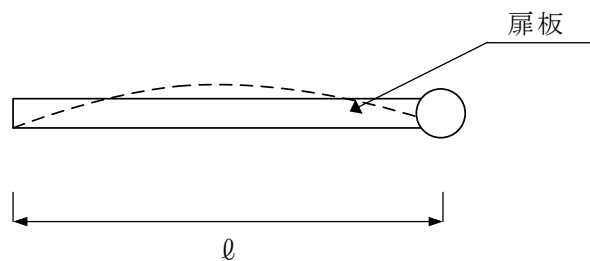


図3-1 固有値解析モデル

3.2 固有振動数の算出条件等

3.2.1 記号の説明

遮蔽気密扉の固有振動数算出に用いる記号を表 3-1 に示す。

表 3-1 固有振動数算出に用いる記号

記号	単位	定義
f	Hz	遮蔽気密扉の 1 次固有振動数
ϱ	m	モデル化に用いる扉板の長さ
E	N/m ²	ヤング率
I	m ⁴	断面二次モーメント
m	kg/m	質量分布

3.2.2 固有振動数の算出方法

遮蔽気密扉は、1 次固有振動数 f を「構造力学公式集（土木学会）（以下「構造力学公式集」という。）」に基づき以下の式より算出する。ここで、固有振動数は水平方向（扉体面外方向）について算出するものとし、鉛直方向（扉体面内方向）については、扉板の軸剛性が、面外方向の剛性に比べて十分に大きいため、固有振動数の算出を省略する。

(1) 扉閉止時

両端固定はりモデル

$$f = \frac{4.7300^2}{2\pi\varrho^2} \sqrt{\frac{EI}{m}}$$

(2) 扉開放時

扉開放時においては、面外方向については剛体モード（固有振動数がほぼゼロ）となり、これに伴う荷重の増幅は生じないが、本評価においては保守的に扉板が自由振動するものとして、下記の評価式にて固有振動数を算出する。

ヒンジ、自由端はりモデル

$$f = \frac{3.9266^2}{2\pi\varrho^2} \sqrt{\frac{EI}{m}}$$

3.2.3 固有振動数の算出条件

遮蔽気密扉の固有振動数の算出条件を表 3-2 に示す。

表 3-2 遮蔽気密扉の固有振動数の算出条件

扉名称	モデル化に用いる芯材の長さ ℓ (m)	ヤング率 E (N/m ²)	断面二次モーメント I (m ⁴)	質量分布 m (kg/m)
中央制御室待避室遮蔽 遮蔽気密扉				

3.3 固有振動数の算出結果

遮蔽気密扉の固有振動数の算出結果を表 3-3 に示す。固有振動数は、20Hz 以上であり、剛構造であることを確認した。

表 3-3 遮蔽気密扉の固有振動数の算出結果

扉名称	固有振動数 f (Hz)	
	扉開放時	扉閉止時
中央制御室待避室遮蔽 遮蔽気密扉		

3.4 設計用地震力

遮蔽気密扉の基準地震動 S_s による設計用地震力は、中央制御室待避室遮蔽で設定している設計震度に基づき設定する。

遮蔽気密扉の設計用地震力を表 3-4 に示す。

表 3-4 遮蔽気密扉の設計用地震力

据付場所及び 床面高さ (m)	基準地震動 S_s	
	水平方向設計震度	鉛直方向設計震度
制御室建物 EL 16.900 (EL 22.050 ^{*1})	$C_H = 3.65^{*2, *3}$	$C_V = 1.77^{*2}$

注記*1：基準床レベルを示す。

*2：設計用震度Ⅱ（基準地震動 S_s ）

*3：NS方向及びEW方向の最大値を用いる。

4. 耐震評価方法

4.1 評価対象部位

評価対象部位は「2.3 構造計画」に示す遮蔽気密扉の構造上の特徴を踏まえ選定する。基準地震動 S_s による地震荷重により遮蔽気密扉に生じる慣性力は、ヒンジ部（ヒンジ板、ヒンジピン、ヒンジボルト）及びカンヌキ部（カンヌキ）から扉枠に伝わることから、評価対象部位をヒンジ部及びカンヌキ部とする。

遮蔽気密扉に作用する荷重の作用図を図4-1に示す。



図 4-1 遮蔽気密扉に作用する荷重の作用図

4.2 荷重及び荷重の組合せ

4.2.1 荷重の組合せ

遮蔽気密扉の評価に用いる荷重の組合せを下記に示す。

$$G + S_s$$

ここで、 G : 固定荷重 (kN)

S_s : 基準地震動 S_s による地震荷重 (kN)

遮蔽気密扉は、上載物の荷重を負担する又は影響を受ける構造となっていないことから、積載荷重については考慮しない。

4.2.2 荷重

(1) 固定荷重 (G)

固定荷重として遮蔽気密扉の自重を考慮する。自重は「4.5 評価条件」に示す。

(2) 地震荷重 (S_s)

地震荷重は、基準地震動 S_s による荷重を考慮する。「3. 固有振動数及び設計用地震力」で設定した設計震度を用いて、次式により算定する。

$$S_s = G \cdot k$$

ここで、 S_s : 基準地震動 S_s による地震荷重 (kN)

G : 固定荷重 (kN)

k : 設計震度

なお、水平及び鉛直地震力による組合せ応力が作用する部位の評価は、水平方向と鉛直方向の地震力が同時に作用するものとして評価する。

4.3 許容限界

許容限界は、VI-2-1-9「機能維持の基本方針」にて設定している許容限界を踏まえて設定する。

4.3.1 使用材料

遮蔽気密扉を構成するヒンジ部及びカンヌキ部の使用材料を表4-1に示す。

表4-1 使用材料

評価対象部位		材質	仕様
ヒンジ部	ヒンジ板		
	ヒンジピン		
	ヒンジボルト		
カンヌキ部	カンヌキ		

4.3.2 許容限界

(1) ヒンジ部及びカンヌキ部

鋼材の許容限界は、「鋼構造設計規準－許容応力度設計法－（（社）日本建築学会，2005 改定）（以下「S規準」という。）」に基づき算定した短期許容応力度とする。表 4-2 に示す。

表 4-2 鋼材の許容限界

材質*2	短期許容応力度 (N/mm ²)			
	曲げ	引張	圧縮	せん断

注記*1：t は板厚を示す。

*2：許容応力度を決定する場合の基準値 F は，日本産業規格（J I S）に基づく。

4.4 評価方法

4.4.1 応力算定

(1) ヒンジ部

ヒンジ部は、ヒンジ板、ヒンジピン及びヒンジボルトで構成されており、次式により算定するスラスト荷重（回転軸線方向荷重）及び転倒力から、各部材に発生する応力を算定する。ヒンジ部に生じる荷重を図4-2に示す。

$$W_1 = G_D + k_{UD} \cdot G_D$$

$$F_1 = W_1 \cdot L_1 / L_3 + k_H \cdot G_D / 2$$

$$F_2 = W_1 \cdot L_2 / L_3$$

ここで、 W_1 : スラスト荷重 (kN)

G_D : 扉重量 (kN)

k_H : 水平震度

k_{UD} : 鉛直震度

F_1 : 扉幅方向の転倒力 (kN)

F_2 : 扉厚方向の転倒力 (kN)

L_1 : 扉幅方向の扉重心とヒンジ芯間距離 (mm)

L_2 : 扉厚方向の扉重心とヒンジ芯間距離 (mm)

L_3 : ヒンジ芯間距離 (mm)

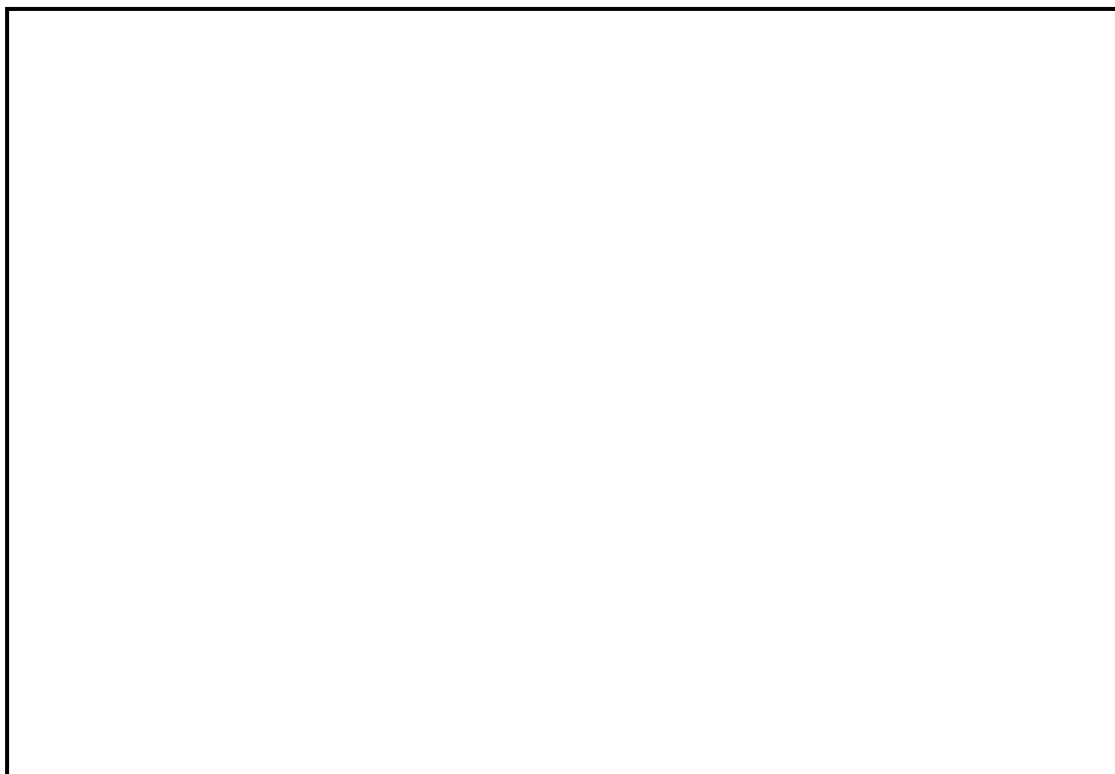


図4-2 ヒンジ部に生じる荷重

a. ヒンジ板

ヒンジ板に生じる応力は，次式により算定する。ヒンジ板に生じる荷重を図4-3に示す。

$$M_A = W_1 \cdot L_4 \cdot 10^{-3}$$

$$Q_A = W_1$$

$$T_A = F_1$$

ここで， M_A : ヒンジ板の曲げモーメント (kN・m)

Q_A : ヒンジ板のせん断力 (kN)

T_A : ヒンジ板の引張力 (kN)

W_1 : スラスト荷重 (kN)

L_4 : ヒンジ板の2軸間距離 (mm)

F_1 : 扉幅方向の転倒力 (kN)

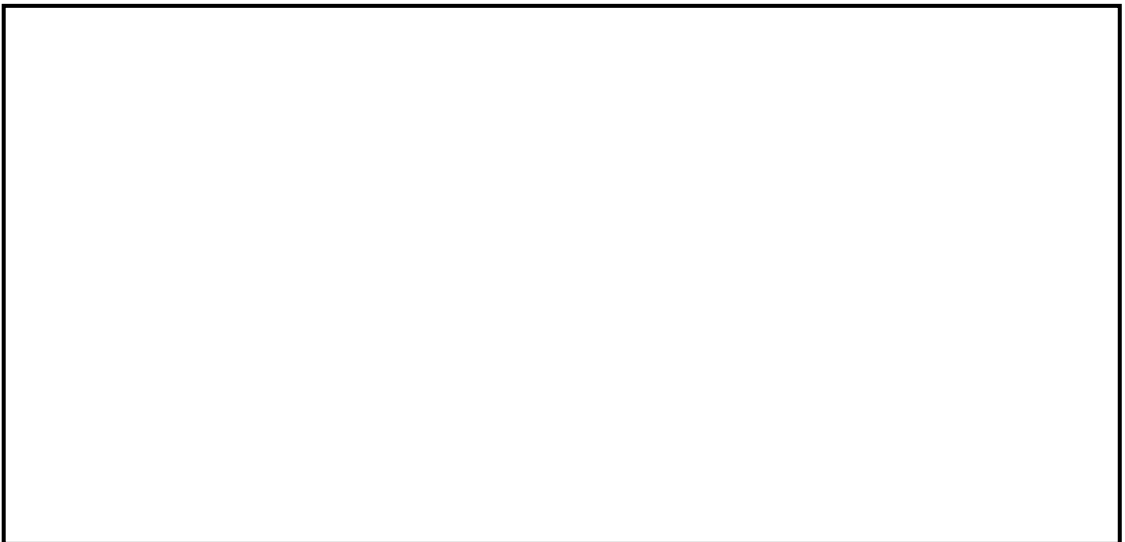


図4-3 ヒンジ板に生じる荷重

b. ヒンジピン

ヒンジピンに生じる応力は、次式により算定する。ヒンジピンに生じる荷重を図4-4に示す。

$$M_B = \sqrt{F_1^2 + F_2^2} \cdot L_5 \cdot 10^{-3}$$

$$Q_B = \sqrt{F_1^2 + F_2^2}$$

$$C_B = W_1$$

ここで、 M_B : ヒンジピンの曲げモーメント (kN・m)

Q_B : ヒンジピンのせん断力 (kN)

C_B : ヒンジピンの圧縮力 (kN)

F_1 : 扉幅方向の転倒力 (kN)

F_2 : 扉厚方向の転倒力 (kN)

L_5 : ヒンジ板と受板間距離 (mm)

W_1 : スラスト荷重 (kN)

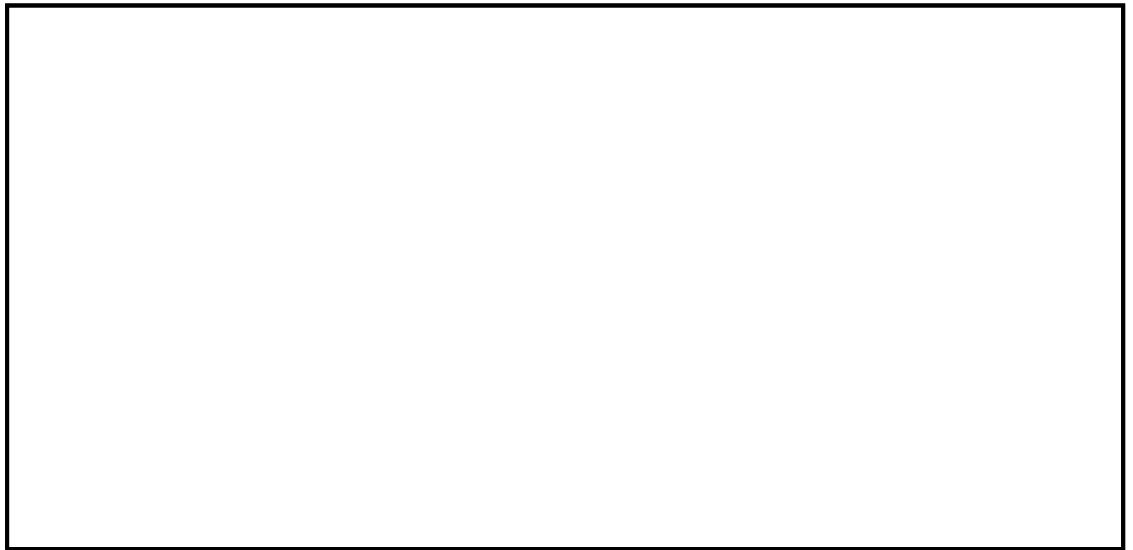


図4-4 ヒンジピンに生じる荷重

c. ヒンジボルト

ヒンジボルトに生じる応力は，次式により算定する。ヒンジボルトに生じる荷重を図 4-5 に示す。

$$Q_c = \frac{\sqrt{W_1^2 + F_1^2}}{n_1}$$

ここで， Q_c : ヒンジボルトのせん断力 (kN)

W_1 : スラスト荷重 (kN)

F_1 : 扉幅方向の転倒力 (kN)

n_1 : ヒンジボルトの本数 (本)

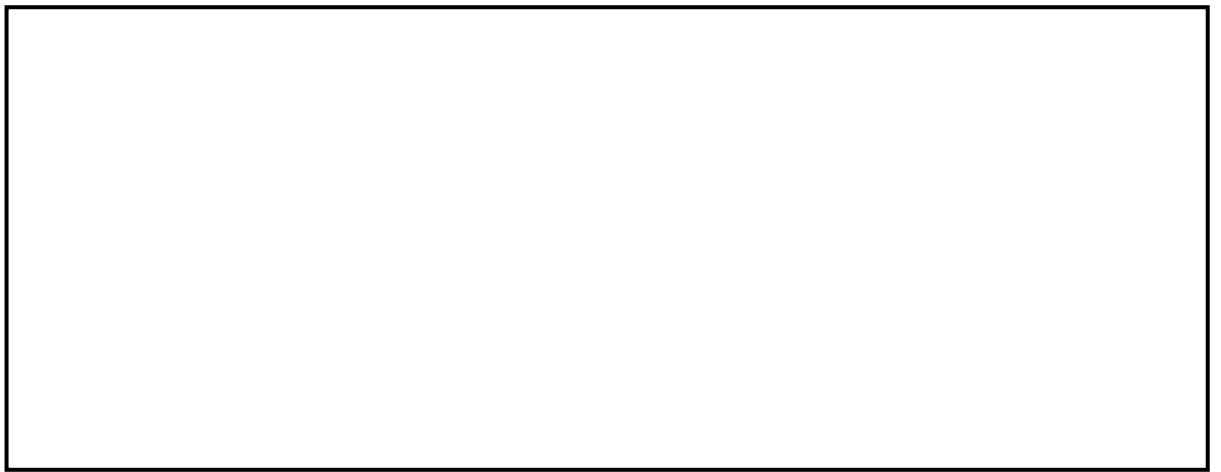


図 4-5 ヒンジボルトに生じる荷重

(2) カンヌキ部

カンヌキ部に生じる荷重は次式により算定する。カンヌキ部に作用する荷重を図4-6に示す。

$$R_1 = k_H \cdot G_D / n_2$$

ここで、 R_1 : 地震力に伴う荷重の反力 (kN)

k_H : 水平震度

G_D : 扉重量 (kN)

n_2 : カンヌキの本数 (本)

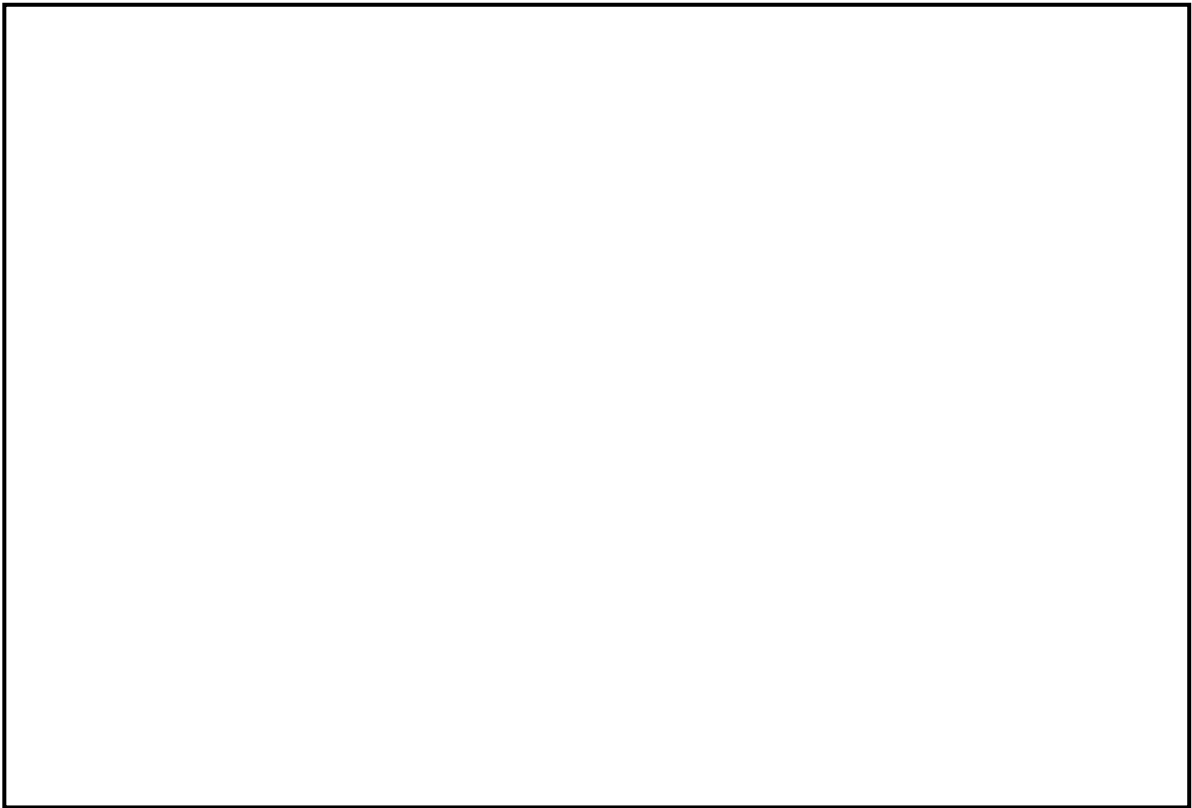


図4-6 カンヌキ部に作用する荷重

a. カンヌキ

カンヌキに生じる応力は、次式により算定する。なお、算定に当たっては、カンヌキ回転中心位置を固定端とした片持ちはりとして評価し、カンヌキの取付部位に応じて作用する応力を考慮する。カンヌキに生じる荷重の例を図 4-7 に示す。

$$M_D = R_1 \cdot L_6 \cdot 10^{-3}$$

$$Q_D = R_1$$

ここで、 M_D : カンヌキの曲げモーメント (kN・m)

Q_D : カンヌキのせん断力 (kN)

R_1 : 地震力に伴う荷重の反力 (kN)

L_6 : カンヌキの突出長さ (mm)

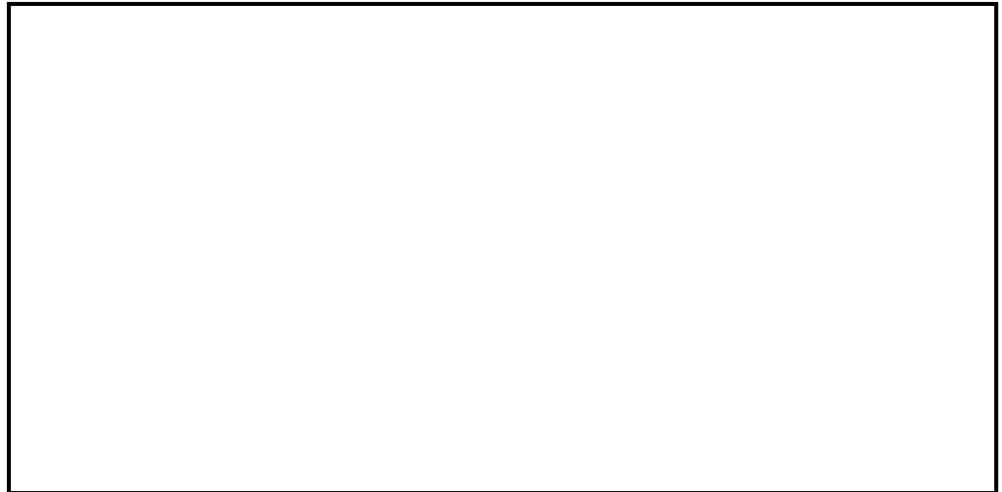


図 4-7 カンヌキに生じる荷重の例

4.4.2 断面検定

各部材に生じる応力より算定する応力度等が、許容限界値を下回ることを確認する。なお、異なる荷重が同時に作用する部材については、組合せを考慮する。

(1) ヒンジ

a. ヒンジ板

ヒンジ板に生じる曲げ応力度、せん断応力度及び引張応力度を算定し、ヒンジ板の短期許容応力度以下であることを確認する。

(a) ヒンジ板に生じる曲げ応力度

$$\sigma_A = (M_A \cdot 10^6) / Z_A$$

ここで、 σ_A : ヒンジ板の曲げ応力度 (N/mm²)

M_A : ヒンジ板の曲げモーメント (kN・m)

Z_A : ヒンジ板の断面係数 (mm³)

(b) ヒンジ板に生じるせん断応力度

$$\tau_A = (Q_A \cdot 10^3) / A_A$$

ここで、 τ_A : ヒンジ板のせん断応力度 (N/mm²)

Q_A : ヒンジ板のせん断力 (kN)

A_A : ヒンジ板の断面積 (mm²)

(c) ヒンジ板に生じる引張応力度

$$\sigma_{TA} = (T_A \cdot 10^3) / A_A$$

ここで、 σ_{TA} : ヒンジ板の引張応力度 (N/mm²)

T_A : ヒンジ板の引張力 (kN)

A_A : ヒンジ板の断面積 (mm²)

(d) ヒンジ板に生じる組合せ応力度

ヒンジ板に生じる曲げ応力度及びせん断応力度から、組合せ応力度を「S規準」に基づく次式により算定し、ヒンジ板の短期許容応力度以下であることを確認する。

$$x_A = \sqrt{\sigma_A^2 + 3 \cdot \tau_A^2}$$

ここで、 x_A : ヒンジ板の組合せ応力度 (N/mm²)

σ_A : ヒンジ板の曲げ応力度 (N/mm²)

τ_A : ヒンジ板のせん断応力度 (N/mm²)

b. ヒンジピン

ヒンジピンに生じる曲げ応力度，せん断応力度及び圧縮応力度を算定し，ヒンジピンの短期許容応力度以下であることを確認する。

(a) ヒンジピンに生じる曲げ応力度

$$\sigma_B = (M_B \cdot 10^6) / Z_B$$

ここで， σ_B : ヒンジピンの曲げ応力度 (N/mm²)

M_B : ヒンジピンの曲げモーメント (kN・m)

Z_B : ヒンジピンの断面係数 (mm³)

(b) ヒンジピンに生じるせん断応力度

$$\tau_B = (Q_B \cdot 10^3) / A_B$$

ここで， τ_B : ヒンジピンのせん断応力度 (N/mm²)

Q_B : ヒンジピンのせん断力 (kN)

A_B : ヒンジピンの断面積 (mm²)

(c) ヒンジピンに生じる圧縮応力度

$$\sigma_{CB} = (C_B \cdot 10^3) / A_B$$

ここで， σ_{CB} : ヒンジピンの圧縮応力度 (N/mm²)

C_B : ヒンジピンの圧縮力 (kN)

A_B : ヒンジピンの断面積 (mm²)

(d) ヒンジピンに生じる組合せ応力度

ヒンジピンに生じる曲げ応力度及びせん断応力度から，組合せ応力度を「S規準」に基づく次式により算定し，ヒンジピンの短期許容応力度以下であることを確認する。

$$x_B = \sqrt{\sigma_B^2 + 3 \cdot \tau_B^2}$$

ここで， x_B : ヒンジピンの組合せ応力度 (N/mm²)

σ_B : ヒンジピンの曲げ応力度 (N/mm²)

τ_B : ヒンジピンのせん断応力度 (N/mm²)

c. ヒンジボルト

ヒンジボルトに生じるせん断応力度を算定し，ヒンジボルトの短期許容応力度以下であることを確認する。

$$\tau_c = (Q_c \cdot 10^3) / A_c$$

ここで， τ_c : ヒンジボルトのせん断応力度 (N/mm²)

Q_c : ヒンジボルトのせん断力 (kN)

A_c : ヒンジボルトの断面積 (mm²)

(2) カンヌキ部

a. カンヌキ

カンヌキに生じる曲げ応力度及びせん断応力度を算定し、カンヌキの短期許容応力度以下であることを確認する。

(a) カンヌキに生じる曲げ応力度

$$\sigma_D = (M_D \cdot 10^6) / Z_D$$

ここで、 σ_D : カンヌキの曲げ応力度 (N/mm²)

M_D : カンヌキの曲げモーメント (kN・m)

Z_D : カンヌキの断面係数 (mm³)

(b) カンヌキに生じるせん断応力度

$$\tau_D = (Q_D \cdot 10^3) / A_D$$

ここで、 τ_D : カンヌキのせん断応力度 (N/mm²)

Q_D : カンヌキのせん断力 (kN)

A_D : カンヌキの断面積 (mm²)

(c) カンヌキに生じる組合せ応力度

カンヌキに生じる曲げ応力度及びせん断応力度から、組合せ応力度を「S規準」に基づく次式により算定し、カンヌキの短期許容応力度以下であることを確認する。

$$x_D = \sqrt{\sigma_D^2 + 3 \cdot \tau_D^2}$$

ここで、 x_D : カンヌキの組合せ応力度 (N/mm²)

σ_D : カンヌキの曲げ応力度 (N/mm²)

τ_D : カンヌキのせん断応力度 (N/mm²)

4.5 評価条件

耐震評価に用いる評価条件を表 4-3 に示す。

表 4-3 耐震評価に用いる条件

対象部位		記号	単位	定義	遮蔽 気密扉
共通		W_1	kN	スラスト荷重	
		G_D	kN	扉重量	
		k_H	—	水平震度	
		k_{UD}	—	鉛直震度	
		L_1	mm	扉幅方向の扉重心とヒンジ芯間距離	
		L_2	mm	扉厚方向の扉重心とヒンジ芯間距離	
		L_3	mm	ヒンジ芯間距離	
ヒンジ部	ヒンジ板	L_4	mm	ヒンジ板の 2 軸間距離	
		Z_A	mm ³	ヒンジ板の断面係数	
		A_A	mm ²	ヒンジ板の断面積	
	ヒンジピン	L_5	mm	ヒンジ板と受板間距離	
		Z_B	mm ³	ヒンジピンの断面係数	
		A_B	mm ²	ヒンジピンの断面積	
ヒンジボルト	n_1	本	ヒンジボルトの本数		
	A_C	mm ²	ヒンジボルトの断面積		
カンヌキ部	カンヌキ	n_2	本	カンヌキの本数	
		L_6	mm	カンヌキの突出長さ	
		Z_D	mm ³	カンヌキの断面係数	
		A_D	mm ²	カンヌキの断面積	

5. 評価結果

遮蔽気密扉の評価結果を表 5-1 に示す。各部材の断面検定を行った結果，発生値が許容限界値以下であることから，遮蔽気密扉が構造健全性を有することを確認した。

表 5-1 評価結果

対象評価部材		分類	発生値 (N/mm ²)	許容限界値 (N/mm ²)	発生値/ 許容限界値
ヒンジ部	ヒンジ板	曲げ			
		せん断			
		引張			
		組合せ			
	ヒンジピン	曲げ			
		せん断			
		圧縮			
組合せ					
	ヒンジボルト	せん断			
カンヌキ部	カンヌキ	曲げ			
		せん断			
		組合せ			

補足-027-10-69 原子炉圧力容器及び原子炉格納容器の
構造強度評価における形状係数の設定について

目 次

1. 概要	1
2. 設計・建設規格 解説 PVB -3111 に基づく形状係数について	1
3. 適用する部位と形状係数の設定	1
4. 結論	7

1. 概要

原子炉圧力容器及び原子炉格納容器の耐震計算における構造強度評価のうち、一次膜＋一次曲げ応力に対する許容応力を算出する際、設計・建設規格 PVB-3111 に基づき、純曲げによる全断面降伏荷重と初期降伏荷重の比または 1.5 のいずれか小さい方の値（ α ）（以下「形状係数」という。）を用いて評価する部位がある。

本書は、原子炉圧力容器及び原子炉格納容器の耐震計算の構造強度評価において、形状係数を適用する部位と部位ごとの形状係数の設定についてまとめたものである。

2. 設計・建設規格 解説 PVB-3111 に基づく形状係数について

設計・建設規格 解説 PVB-3111 より、管状断面形状の場合、形状係数は下式で求められる。ただし、管状断面形状において下式の計算結果が 1.5 を上回る場合は、形状係数として 1.5 を用いる。

$$\alpha = \frac{32(1 - Y^3)}{6\pi(1 - Y^4)}$$

ただし、 $Y = d_i/d_o$

d_i : 管の内径

d_o : 管の外径

なお、この形状係数はノズルと配管の接続部のような部材断面全体が外部荷重による曲げモーメントを受ける箇所に適用すべき係数であり、中空円形断面であっても軸力、水平力等、断面積で応力が決定されるような箇所には適用する必要がなく、この場合は 1.5 を用いてよい。

上記は管状断面形状の場合であり、中実円形及び三角形断面では、1.5 を超えるが、この場合は形状係数として 1.5 を用いる。

中実矩形断面の場合、形状係数は 1.5 である。

3. 適用する部位と形状係数の設定

(1) 原子炉圧力容器

添付書類 VI-2-3-3-1-2 「原子炉圧力容器の耐震性についての計算書」の構造強度評価において、形状係数を適用する部位及び部位ごとの形状係数を表 3-1 に示す。また、各部位の概要図及び形状係数を設定するための諸元を図 3-1 から図 3-19 に示す。（以下、応力評価面の表記において、P01-P02 等の表記には P01-P02 及び P01'-P02' の両方を含むものとする。）

原子炉圧力容器の評価部位は、基本的に中空円筒断面であるため、2 項に示す管状断面形状として形状係数を設定し、全断面降伏荷重と初期降伏荷重の比が 1.5 を上回る部位については 1.5 を用いる。ただし、上ぶたスプレイノズル (N7) の応力評価面 、計測及びベントノズル (N8) の応力評価面 及びブラケット類は、応力評価上の断面が中実矩形断面であるため、中実矩形断面の形状係数である 1.5 を用いる。

表 3-1 原子炉圧力容器の耐震計算における形状係数適用部位 (1/3)

適用部位	応力評価面	形状係数	備考
円筒胴	P01-P02, P03-P04, P05-P06, P07-P08, P09-P10		
下鏡	P01-P02, P03-P04, P05-P06, P07-P08, P09-P10, P11-P12, P13-P14		
	P15-P16		
制御棒貫通孔	P01-P02, P03-P04		
	P05-P06, P07-P08		
原子炉中性子計装孔	P01-P02, P03-P04		
再循環水出口ノズル (N1)	P01-P02, P03-P04		
	P05-P06, P07-P08, P09-P10		
	P11-P12		
再循環水入口ノズル (N2)	P01-P02, P03-P04		
	P05-P06, P07-P08, P09-P10, P11-P12		
	P13-P14		
	P15-P16		
	P17-P18		
主蒸気ノズル (N3)	P01-P02, P03-P04		
	P05-P06		
給水ノズル (N4)	P01-P02		
	P03-P04		
	P05-P06, P07-P08, P15-P16		
	P09-P10		
	P11-P12, P13-P14		
	P17-P18, P19-P20, P21-P22		
低圧炉心スプレイノズル (N5)	P01-P02		
	P03-P04		
	P05-P06		
	P07-P08		
	P09-P10, P11-P12		
	P13-P14, P15-P16, P17-P18		

注記* : 応力評価面 P01-P02, P03-P04, P05-P06, P07-P08, P09-P10, P11-P12 の α は
保守的に P13-P14 の値を適用する。

表 3-1 原子炉圧力容器の耐震計算における形状係数適用部位 (2/3)

適用部位	応力評価面	形状係数	備考
低圧注水ノズル (N6)	P01-P02		
	P03-P04, P05-P06, P11-P12		
	P07-P08		
	P09-P10		
	P13-P14		
	P15-P16, P17-P18		
上ぶたスプレイノズル (N7)	P01-P02, P03-P04		
	P05-P06		
計測及びベントノズル (N8)	P01-P02, P03-P04		
	P05-P06		
ジェットポンプ計測ノズル (N9)	P01-P02, P03-P04		
	P05-P06, P07-P08, P09-P10		
ほう酸水注入及び炉心差圧計測ノズル (N11)	P01-P02, P03-P04, P05-P06, P07-P08, P09-P10		
	P11-P12, P13-P14, P15-P16		
	P17-P18		
計測ノズル (N12 及び N13)	P01-P02, P03-P04, P05-P06, P07-P08, P09-P10, P11-P12, P13-P14		
計測ノズル (N14)	P01-P02		
	P03-P04		
	P05-P06, P07-P08, P09-P10, P11-P12		
ドレンノズル (N15)	P01-P02		
	P03-P04		
	P05-P06		
	P07-P08		
高圧炉心スプレイノズル (N16)	P01-P02		
	P03-P04		
	P05-P06		
	P07-P08		
	P09-P10, P11-P12		
	P13-P14, P15-P16, P17-P18		

注記*1：中実矩形断面の 1.5 を用いる。

*2：全断面降伏荷重と初期降伏荷重の比が 1.5 を上回るため 1.5 を用いる。

表 3-1 原子炉压力容器の耐震計算における形状係数適用部位 (3/3)

適用部位	応力評価面	形状係数	備考
原子炉压力容器支持スカート	P01-P02		
ブラケット類 (スタビライザブラケット, 蒸気乾燥器支持ブラケット, 給水スパーチャブラケット, 炉心スプレイブラケット)	—		

注記* : 中実矩形断面の 1.5 を用いる。

(2) 原子炉格納容器

原子炉格納容器の耐震計算の構造強度評価において、形状係数を適用する部位及び部位ごとの形状係数を表 3-2 に示す。

原子炉格納容器は、2 項に示す管状断面形状としての形状係数の影響を考慮し、中空円筒にモーメントが作用して生じる応力を膜応力として分類し評価している。これは、2 項に示す中空円形断面であっても軸力、水平力等、断面積で応力が決定されるような箇所に対応し、この場合の形状係数は 1.5 を用いてよいとされている。このため、応力評価上の断面を板厚部分の中実矩形断面とし、中実矩形断面の形状係数である 1.5 を用いる。

表 3-2 原子炉格納容器の耐震計算における形状係数適用部位 (1/2)

図書番号	図書名称	適用する評価部位	応力評価点番号	形状係数
VI-2-9-2-1	ドライウエルの耐震性についての計算書	ドライウエル	P1~P8	1.5
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	サプレッションチェンバ	P1~P10	1.5
VI-2-9-4-3	ベント管の耐震性についての計算書	ベント管	P1~P5	1.5
VI-2-9-2-4	シヤラグの耐震性についての計算書	シヤラグ取付部	P15	1.5
VI-2-9-2-5	機器搬入口の耐震性についての計算書	機器搬入口円筒胴	P8	1.5
		機器搬入口本体と補強板との結合部	P9	1.5
VI-2-9-2-6	逃がし安全弁搬出ハッチの耐震性についての計算書	逃がし安全弁搬出ハッチ円筒胴	P6	1.5
		逃がし安全弁搬出ハッチ本体と補強板との結合部	P7	1.5
VI-2-9-2-7	制御棒駆動機構搬出ハッチの耐震性についての計算書	制御棒駆動機構搬出ハッチ円筒胴	P6	1.5
		制御棒駆動機構搬出ハッチ本体と補強板との結合部	P7	1.5

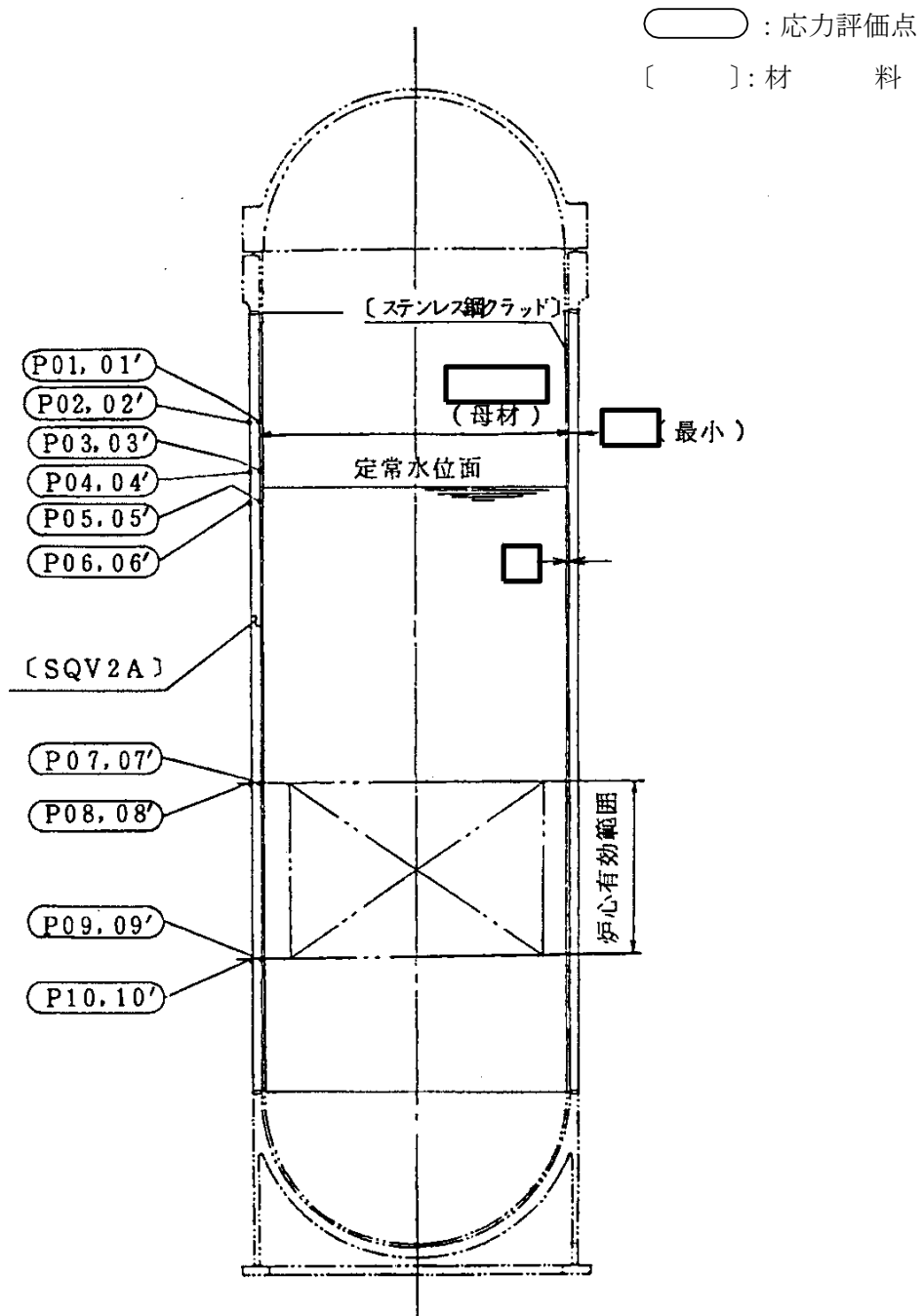
表 3-2 原子炉格納容器の耐震計算における形状係数適用部位 (2/2)

図書番号	図書名称	適用する評価部位	応力評価点番号	形状係数
VI-2-9-2-8	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	アクセスハッチスリーブ	P4	1.5
		アクセスハッチ本体とサプレッションチェンバとの結合部	P5	1.5
		アクセスハッチスリーブと補強リブとの結合部	P6	1.5
		補強リブとサプレッションチェンバとの結合部	P7	1.5
VI-2-9-2-9	所員用エアロックの耐震性についての計算書	所員用エアロック円筒胴	P11	1.5
		所員用エアロック本体と補強板との結合部	P12	1.5
VI-2-9-2-10	配管貫通部の耐震性についての計算書	原子炉格納容器とスリーブとの結合部	P1, P2	1.5
		スリーブ	P3, P4	1.5
VI-2-9-2-11	電気配線貫通部の耐震性についての計算書	ドライウェルとスリーブとの結合部	P1	1.5

4. 結論

以上のとおり、原子炉圧力容器及び原子炉格納容器の耐震計算の構造強度評価において、形状係数を適用する部位と部位ごとに設計・建設規格 解説 PVB-3111 に基づき設定した形状係数についてまとめた。原子炉圧力容器は、基本的には管状断面形状として形状係数を設定し、上ぶたスプレイング（N7）の応力評価面 ，計測及びベントノズル（N8）の応力評価面 及びブラケット類については、中実矩形断面の形状係数を設定している。原子炉格納容器は、応力評価上の断面を板厚部分の中実矩形断面とし、中実矩形断面の形状係数を設定している。

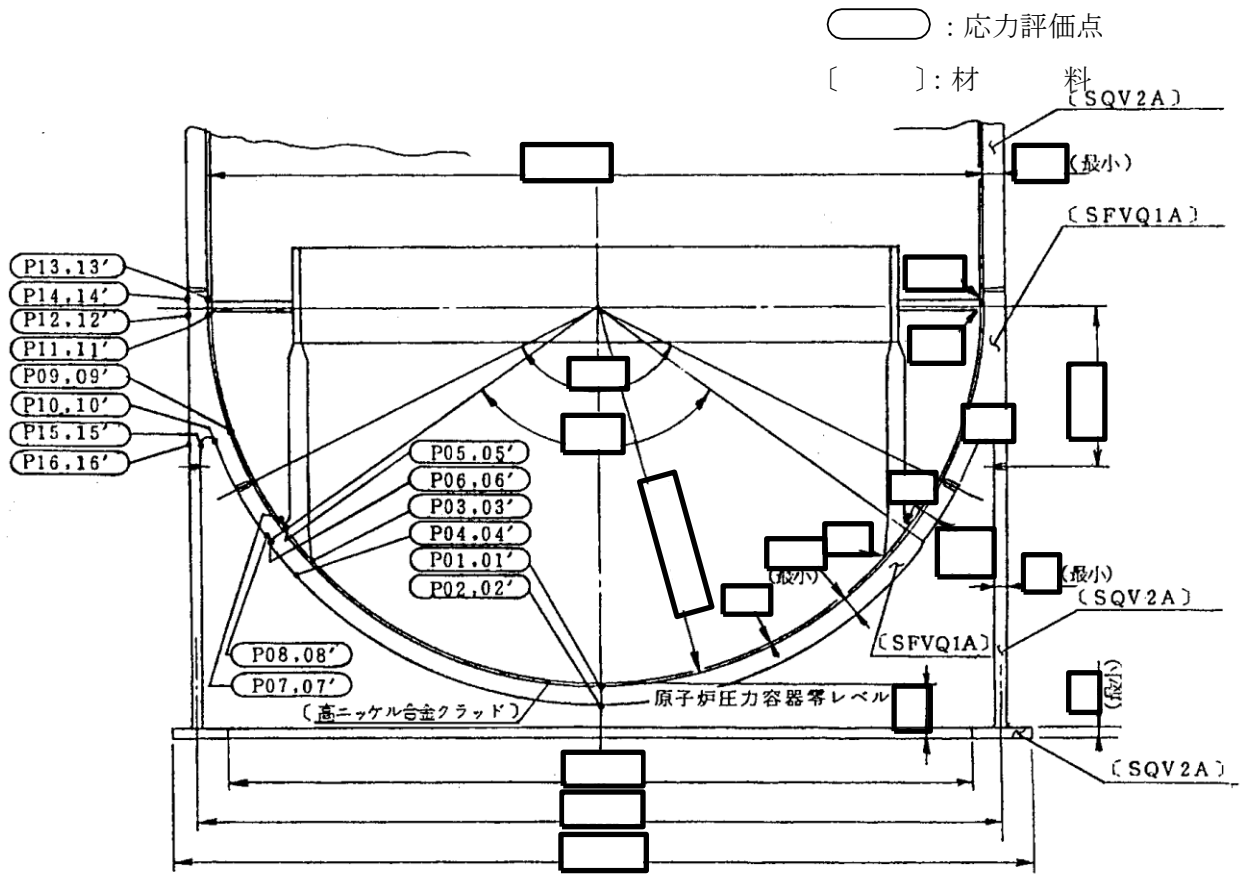
円筒胴



応力評価面	形状係数	内径 d_i (mm)	外径 d_o (mm)	備考
P01-P02				
P03-P04				
P05-P06				
P07-P08				
P09-P10				

図 3-1 円筒胴の概要図及び諸元

下鏡

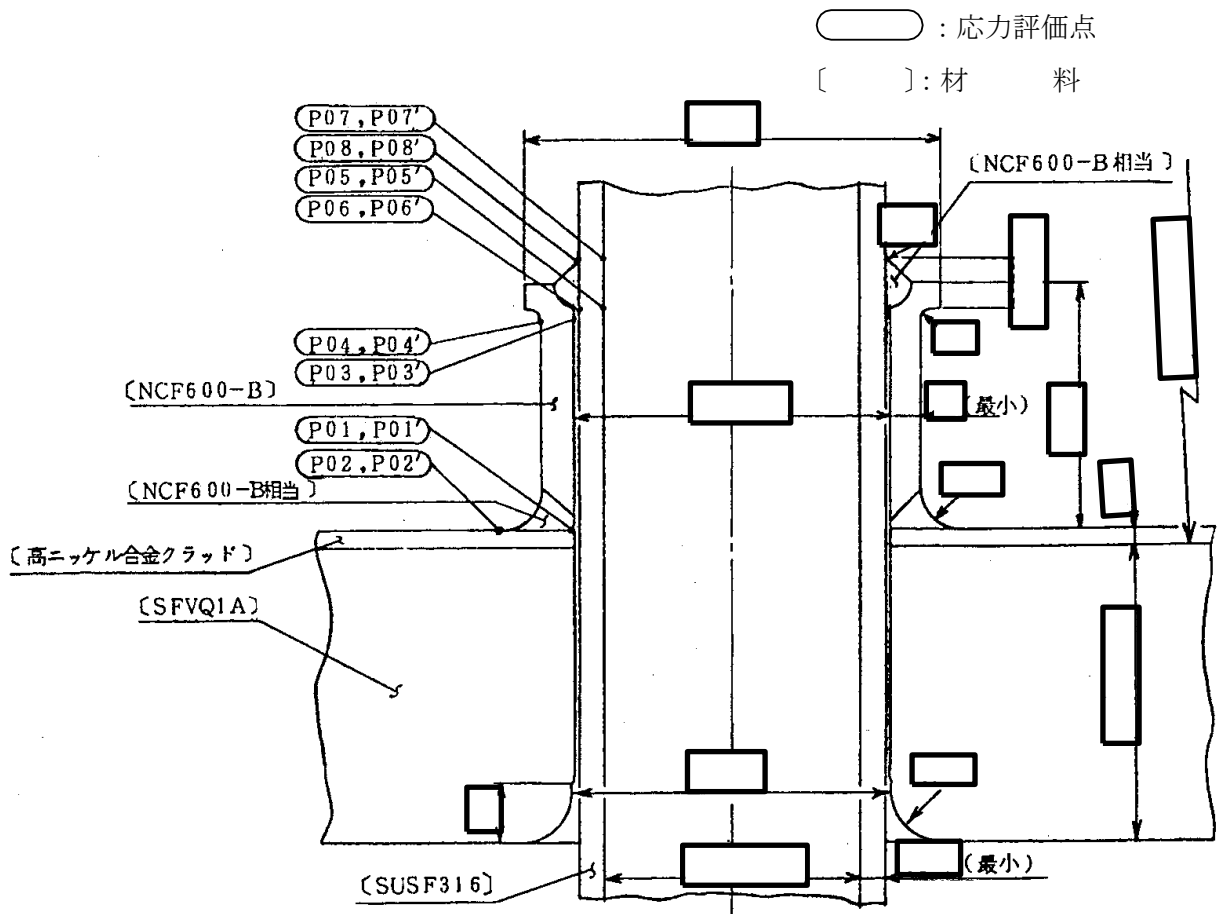


応力評価面	形状係数	内径 d_i (mm)	外径 d_o (mm)	備考
P01-P02				
P03-P04				
P05-P06				
P07-P08				
P09-P10				
P11-P12				
P13-P14				
P15-P16				

注記* : 応力評価面 P01-P02, P03-P04, P05-P06, P07-P08, P09-P10, P11-P12 の α は保守的に P13-P14 の値を適用する。

図 3-2 下鏡の概要図及び諸元

制御棒貫通孔

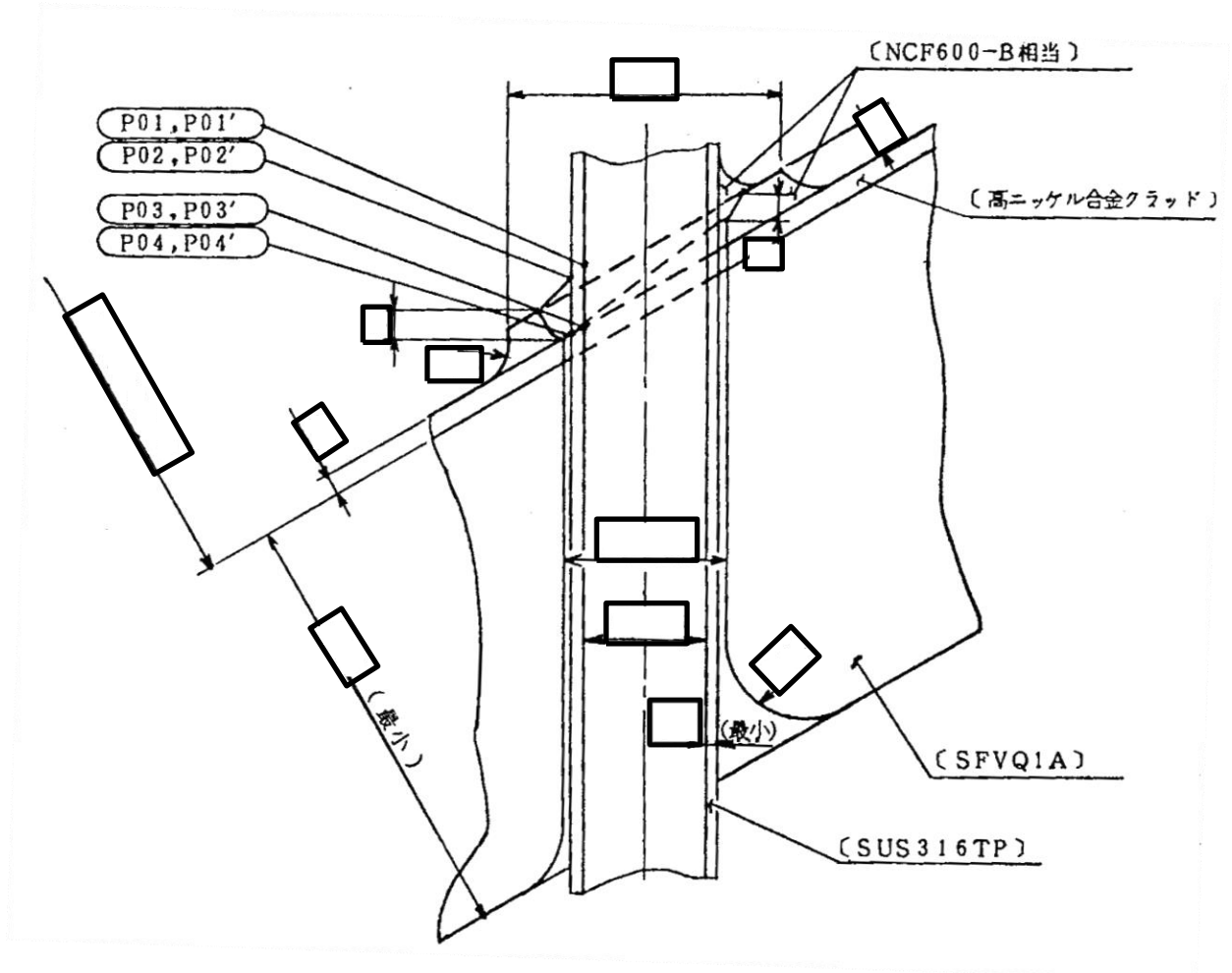


応力評価面	形状係数	内径 d_i (mm)	外径 d_o (mm)	備考
P01-P02				
P03-P04				
P05-P06				
P07-P08				

図 3-3 制御棒貫通孔の概要図及び諸元

原子炉中性子計装孔

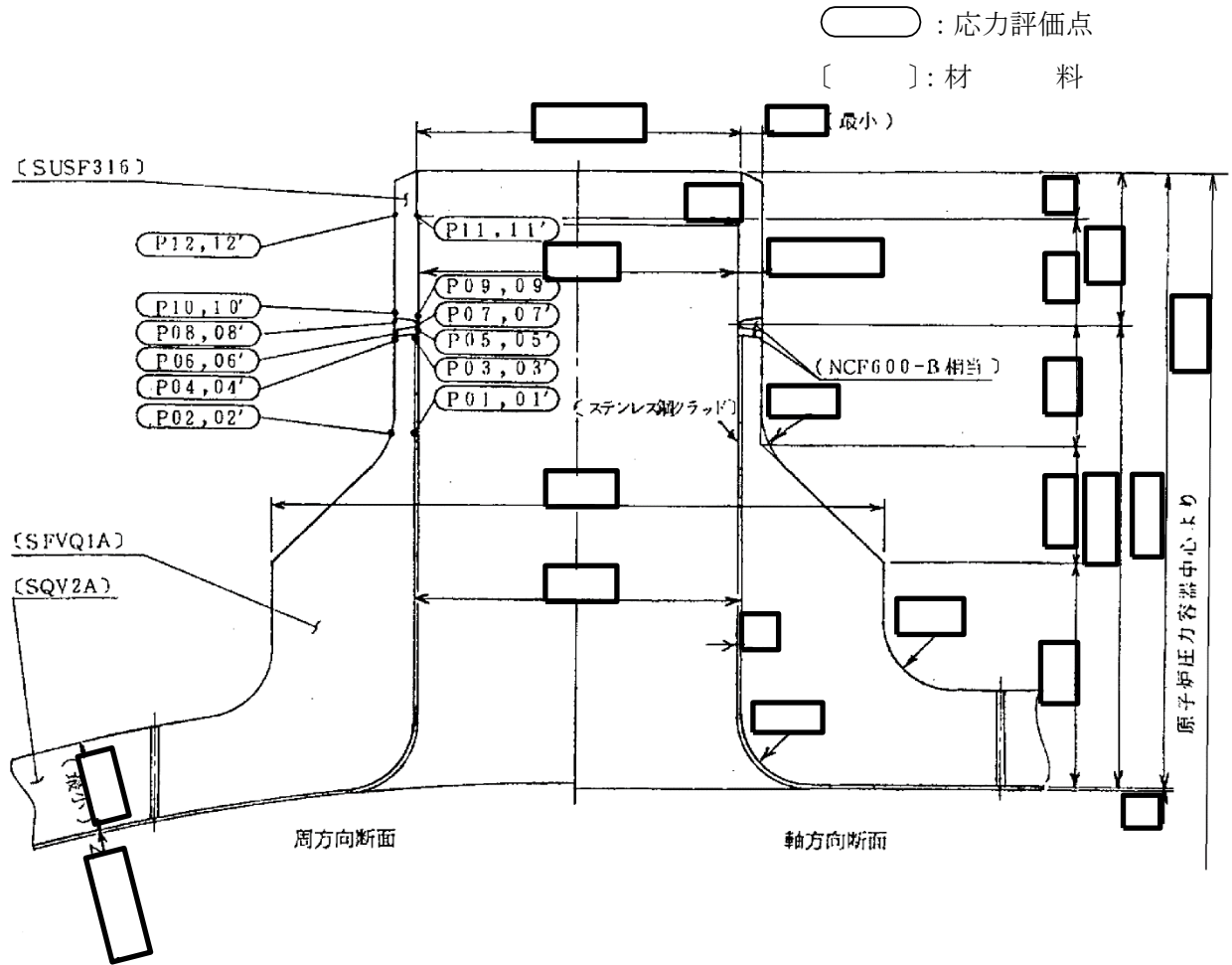
○ : 応力評価点
 [] : 材 料



応力評価面	形状係数	内径 d_i (mm)	外径 d_o (mm)	備考
P01-P02				
P03-P04				

図 3-4 原子炉中性子計装孔の概要図及び諸元

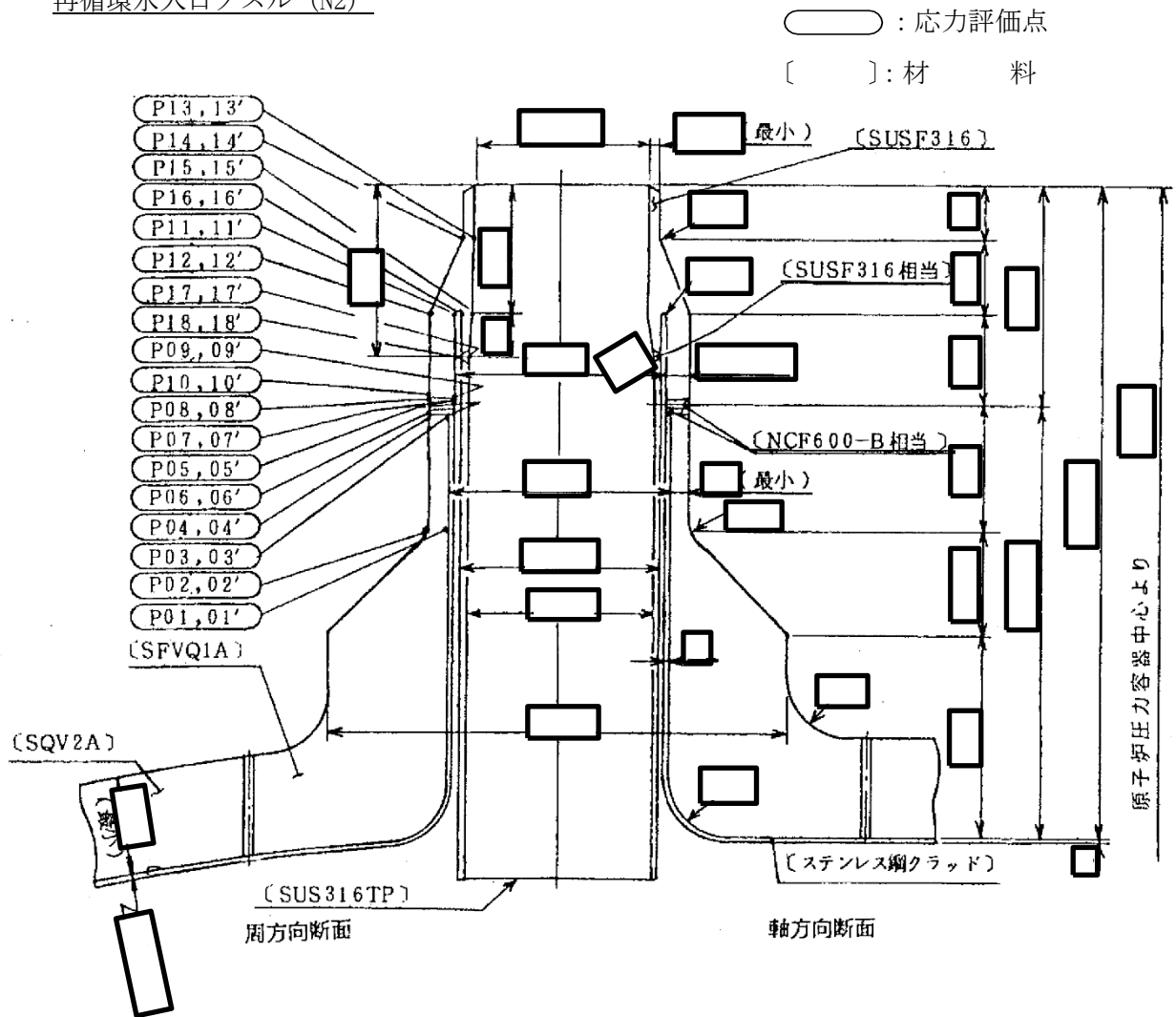
再循環水出口ノズル (N1)



応力評価面	形状係数	内径 d_i (mm)	外径 d_o (mm)	備考
P01-P02				
P03-P04				
P05-P06				
P07-P08				
P09-P10				
P11-P12				

図 3-5 再循環水出口ノズル (N1) の概要図及び諸元

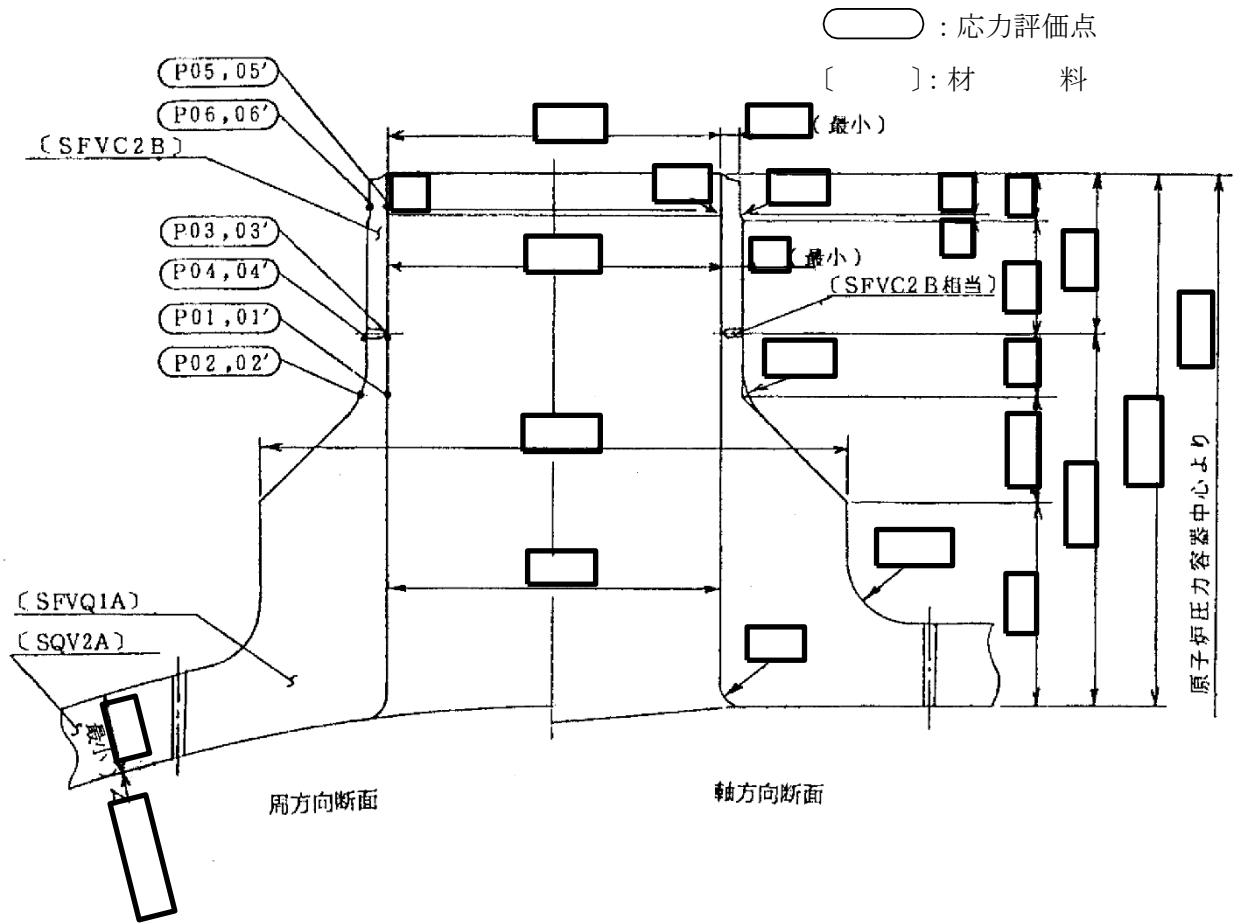
再循環水入口ノズル (N2)



応力評価面	形状係数	内径 d_i (mm)	外径 d_o (mm)	備考
P01-P02				
P03-P04				
P05-P06				
P07-P08				
P09-P10				
P11-P12				
P13-P14				
P15-P16				
P17-P18				

図 3-6 再循環水入口ノズル (N2) の概要図及び諸元

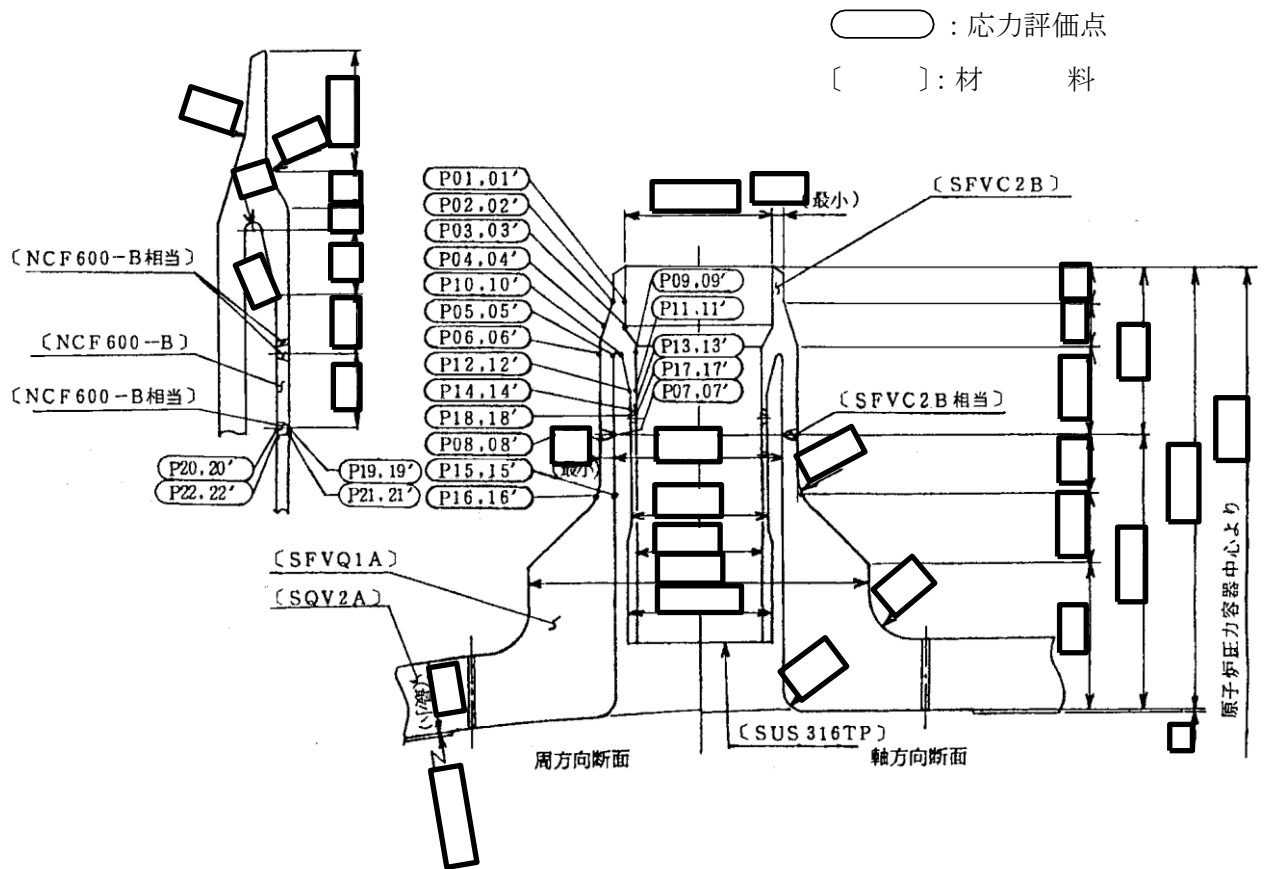
主蒸気ノズル (N3)



応力評価面	形状係数	内径 d_i (mm)	外径 d_o (mm)	備考
P01-P02				
P03-P04				
P05-P06				

図3-7 主蒸気ノズル (N3) の概要図及び諸元

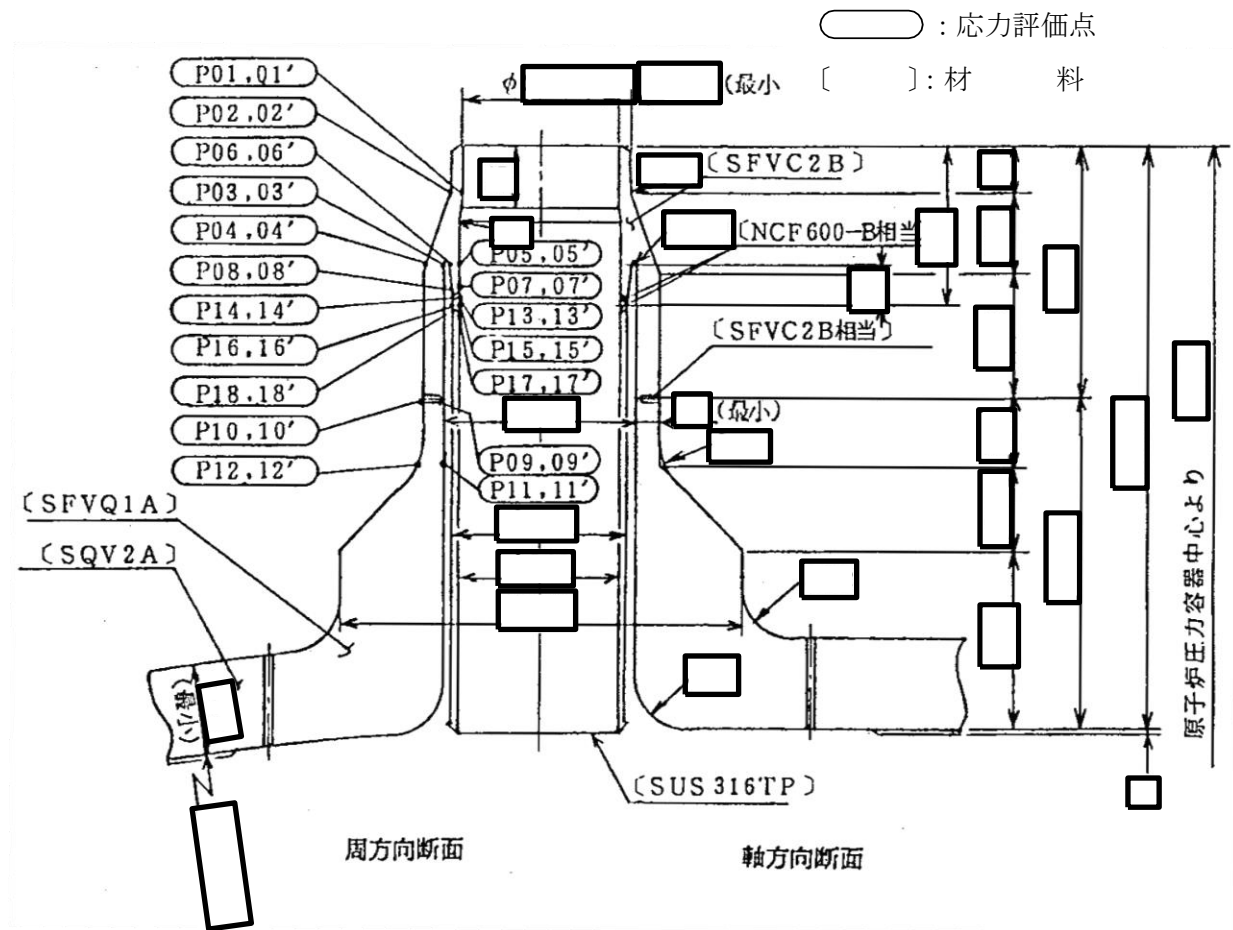
給水ノズル (N4)



応力評価面	形状係数	内径 d_i (mm)	外径 d_o (mm)	備考
P01-P02				
P03-P04				
P05-P06				
P07-P08				
P09-P10				
P11-P12				
P13-P14				
P15-P16				
P17-P18				
P19-P20				
P21-P22				

図 3-8 給水ノズル (N4) の概要図及び諸元

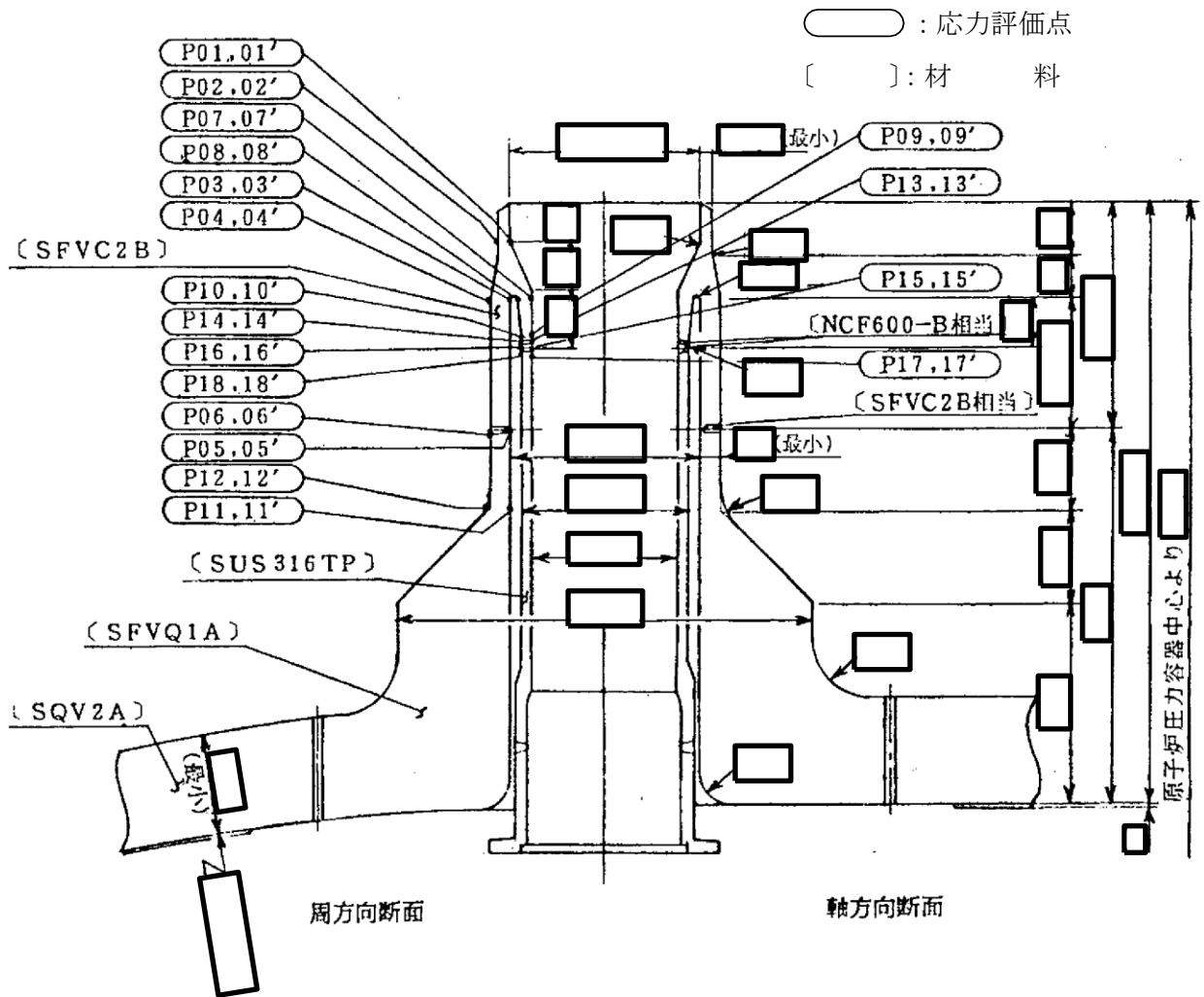
低圧炉心スプレイングズル (N5)



応力評価面	形状係数	内径 d_i (mm)	外径 d_o (mm)	備考
P01-P02				
P03-P04				
P05-P06				
P07-P08				
P09-P10				
P11-P12				
P13-P14				
P15-P16				
P17-P18				

図 3-9 低圧炉心スプレイングズル (N5) の概要図及び諸元

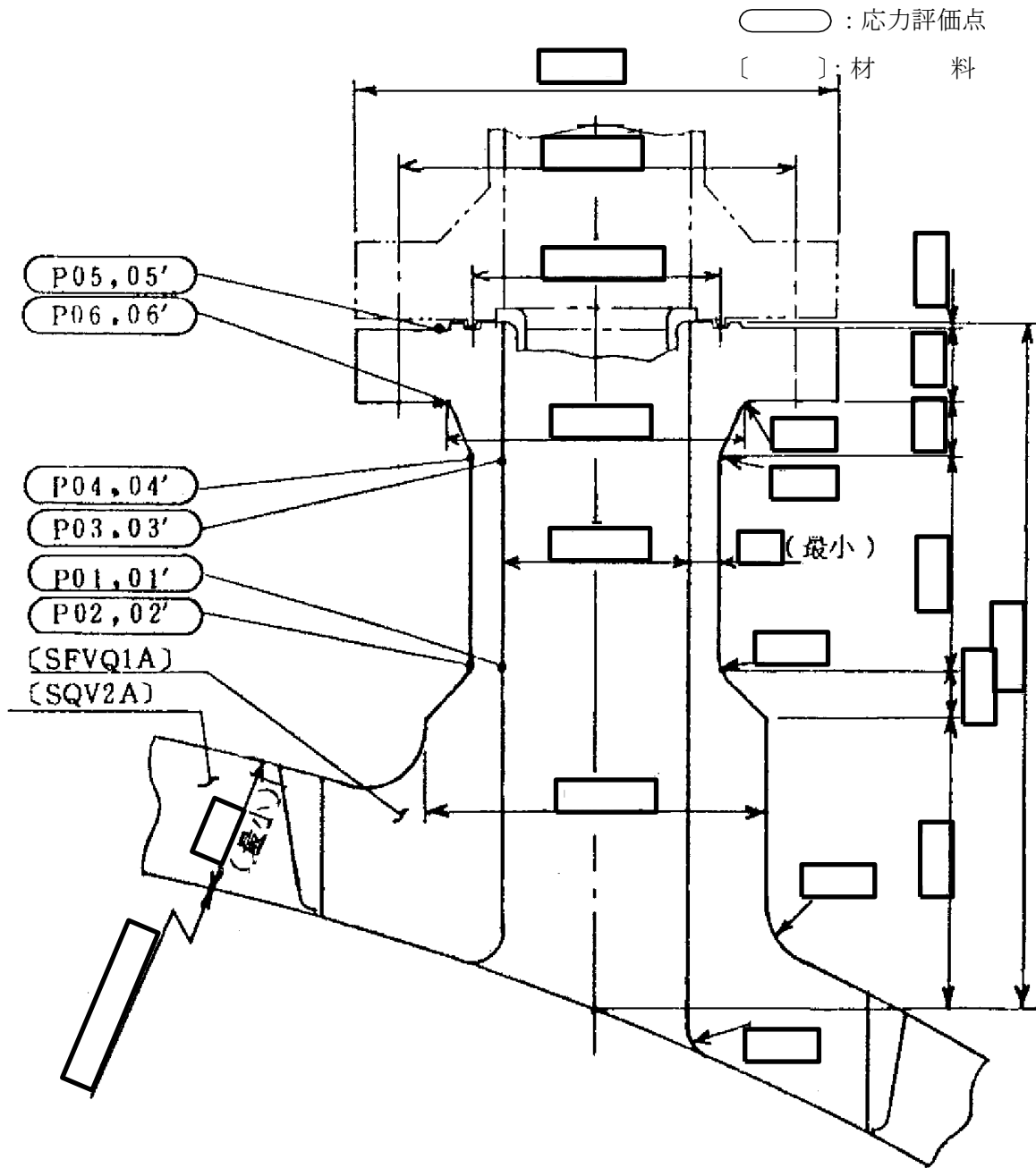
低圧注水ノズル (N6)



応力評価面	形状係数	内径 d_i (mm)	外径 d_o (mm)	備考
P01-P02				
P03-P04				
P05-P06				
P07-P08				
P09-P10				
P11-P12				
P13-P14				
P15-P16				
P17-P18				

図 3-10 低圧注水ノズル (N6) の概要図及び諸元

上ぶたスプレインズル (N7)

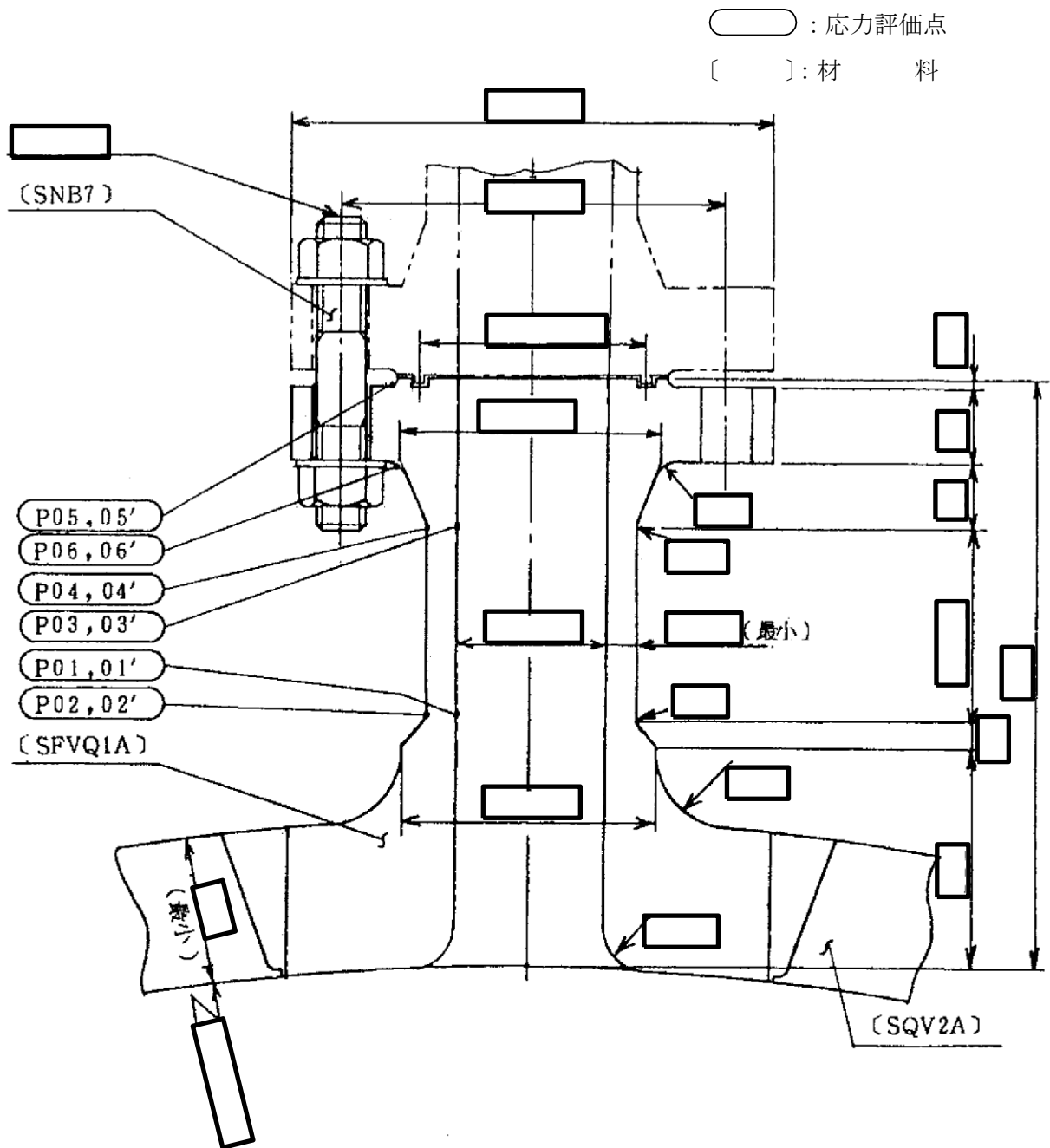


応力評価面	形状係数	内径 d_i (mm)	外径 d_o (mm)	備考
P01-P02				
P03-P04				
P05-P06				

注記* : 中実矩形断面の 1.5 を用いる。

図 3-11 上ぶたスプレインズル (N7) の概要図及び諸元

計測及びベントノズル (N8)



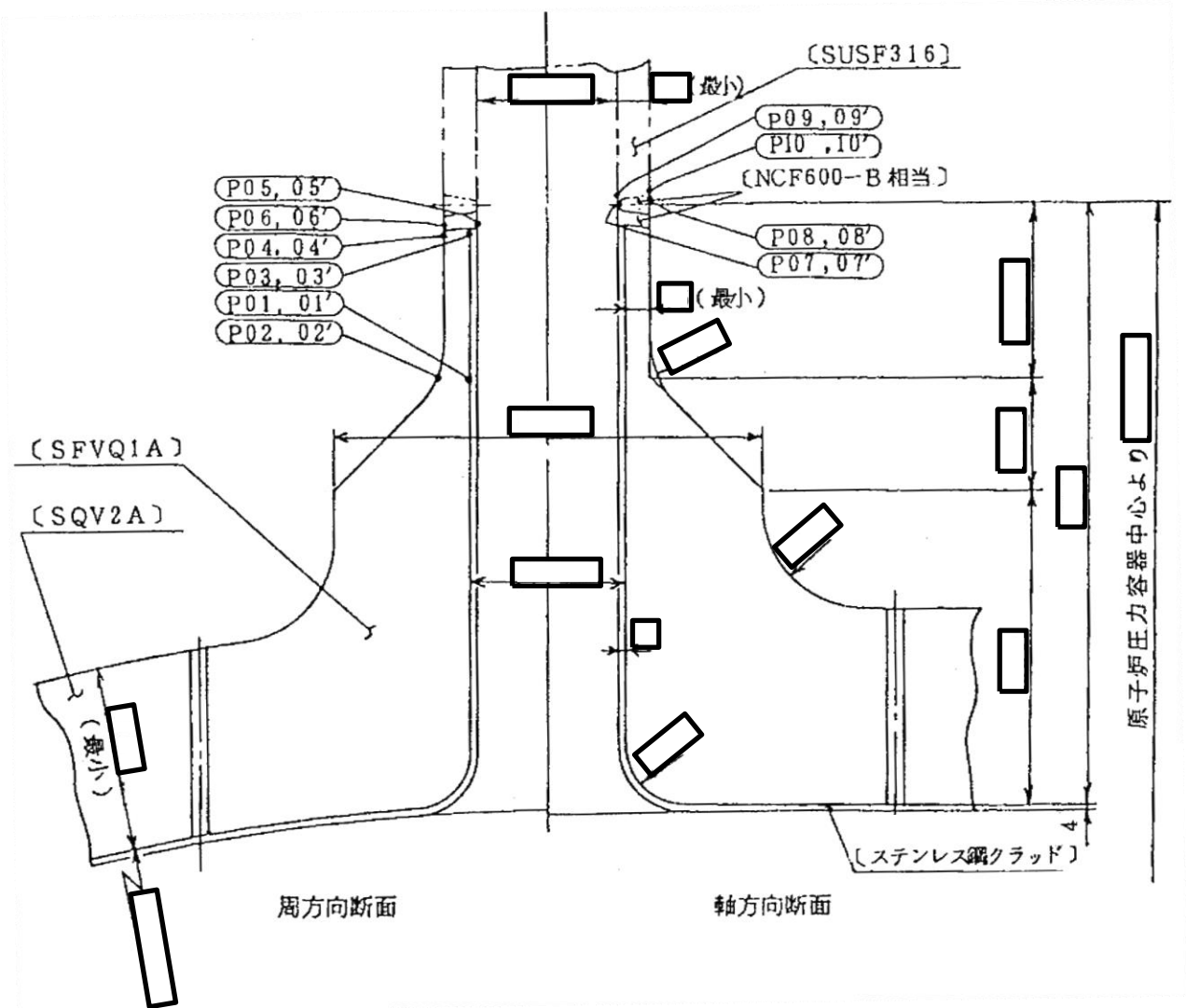
応力評価面	形状係数	内径 d_i (mm)	外径 d_o (mm)	備考
P01-P02				
P03-P04				
P05-P06				

注記* : 中実矩形断面の 1.5 を用いる。

図 3-12 計測及びベントノズル (N8) の概要図及び諸元

ジェットポンプ計測ノズル (N9)

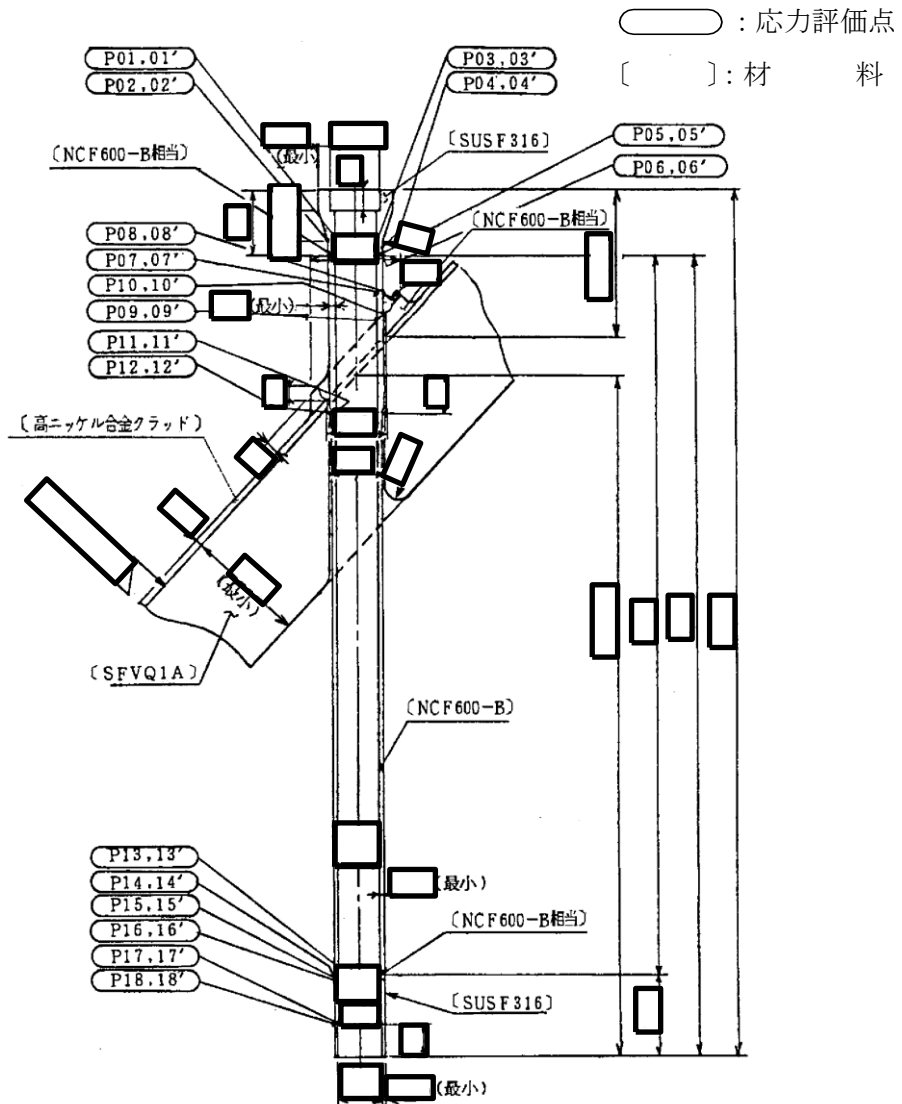
○ : 応力評価点
 [] : 材 料



応力評価面	形状係数	内径 d_i (mm)	外径 d_o (mm)	備考
P01-P02				
P03-P04				
P05-P06				
P07-P08				
P09-P10				

図 3-13 ジェットポンプ計測ノズル (N9) の概要図及び諸元

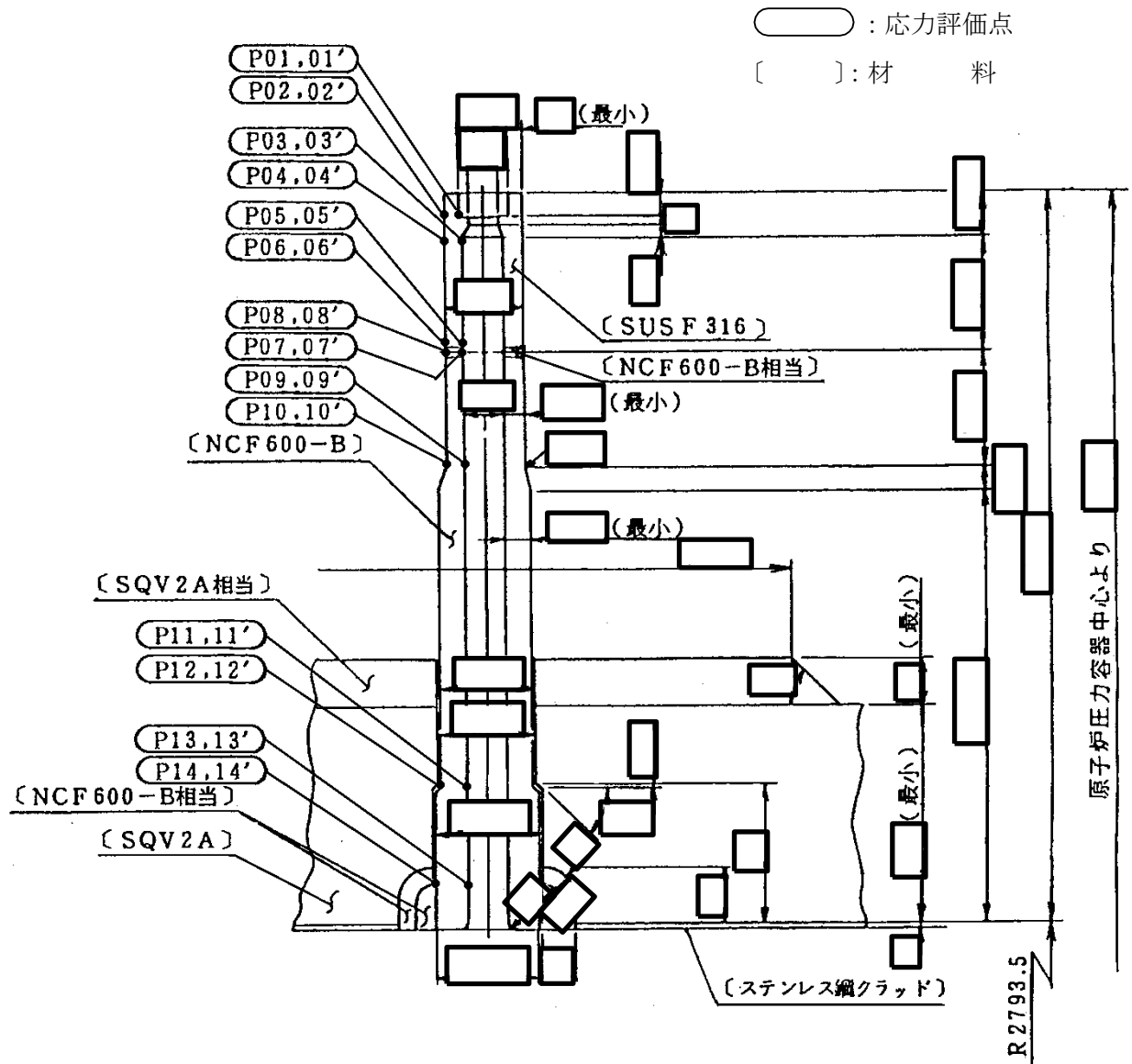
ほう酸水注入及び炉心差圧計測ノズル (N11)



応力評価面	形状係数	内径 d_i (mm)	外径 d_o (mm)	備考
P01-P02				
P03-P04				
P05-P06				
P07-P08				
P09-P10				
P11-P12				
P13-P14				
P15-P16				
P17-P18				

図 3-14 ほう酸水注入及び炉心差圧計測ノズル (N11) の概要図及び諸元

計測ノズル (N12 及び N13)

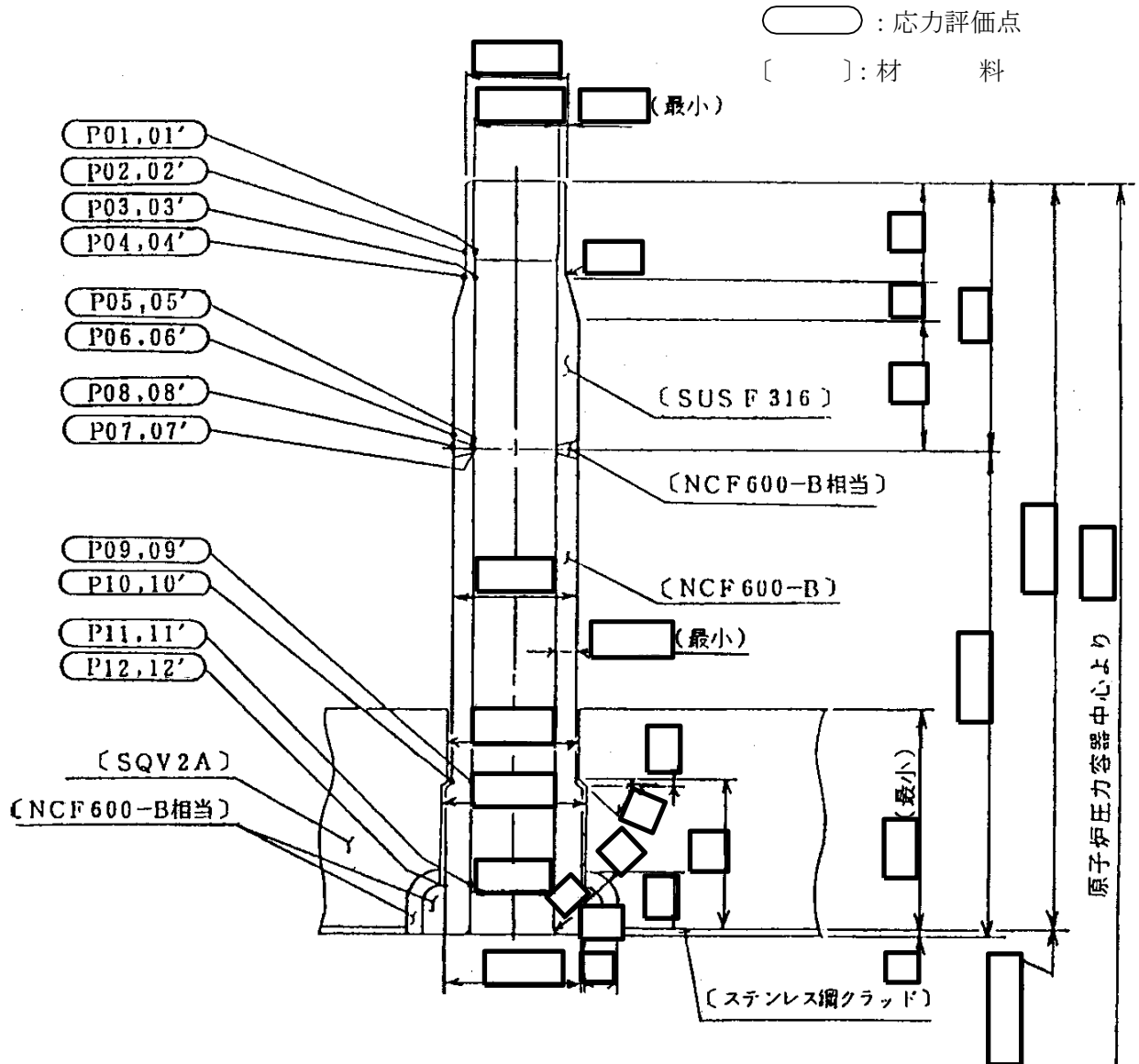


応力評価面	形状係数	内径 d_i (mm)	外径 d_o (mm)	備考
P01-P02				
P03-P04				
P05-P06				
P07-P08				
P09-P10				
P11-P12				
P13-P14				

注記* : 全断面降伏荷重と初期降伏荷重の比が 1.5 を上回るため 1.5 を用いる。

図 3-15 計測ノズル (N12 及び N13) の概要図及び諸元

計測ノズル (N14)

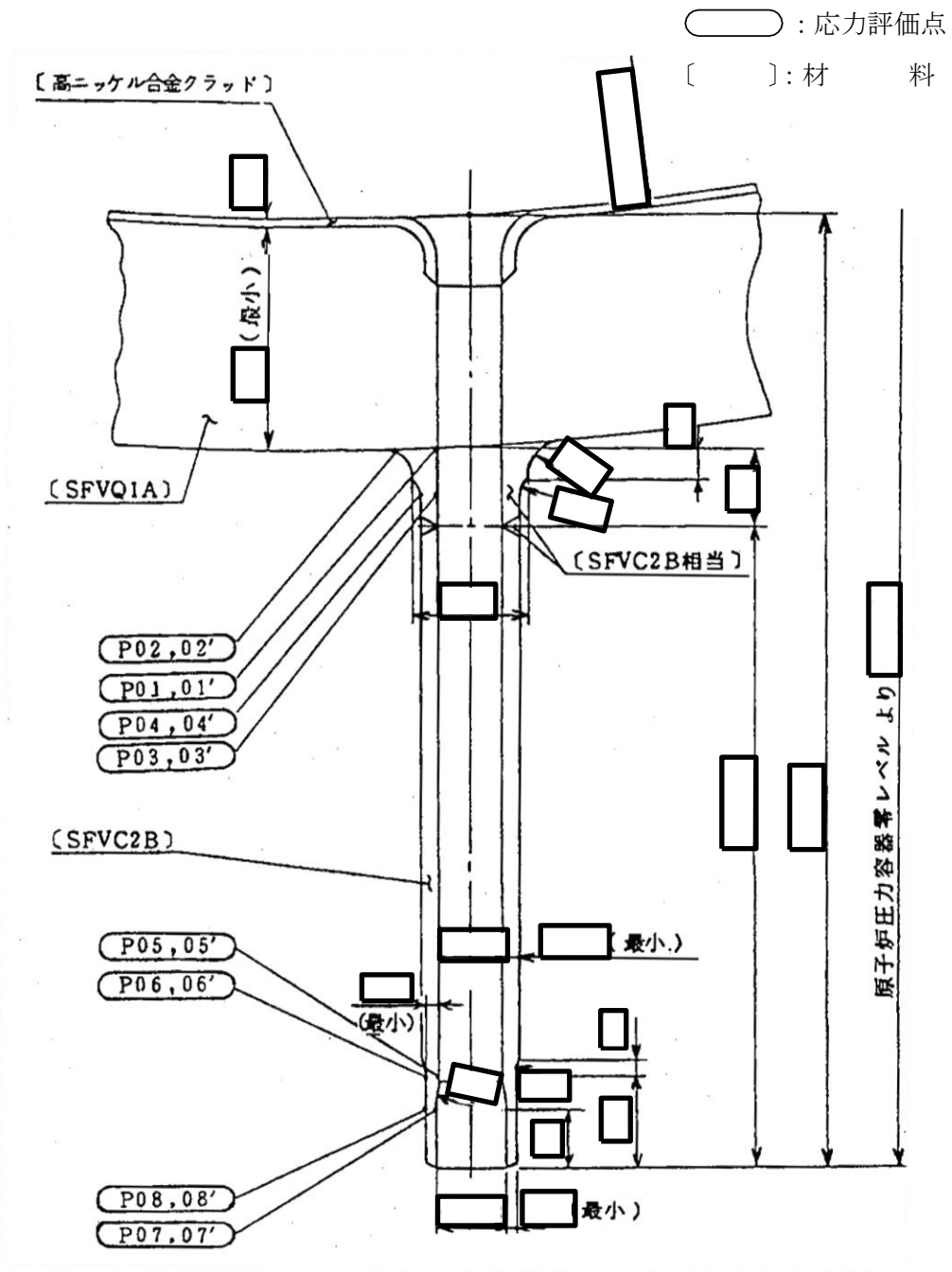


応力評価面	形状係数	内径 d_i (mm)	外径 d_o (mm)	備考
P01-P02				
P03-P04				
P05-P06				
P07-P08				
P09-P10				
P11-P12				

注記* : 全断面降伏荷重と初期降伏荷重の比が 1.5 を上回るため 1.5 を用いる。

図 3-16 計測ノズル (N14) の概要図及び諸元

ドレンノズル (N15)

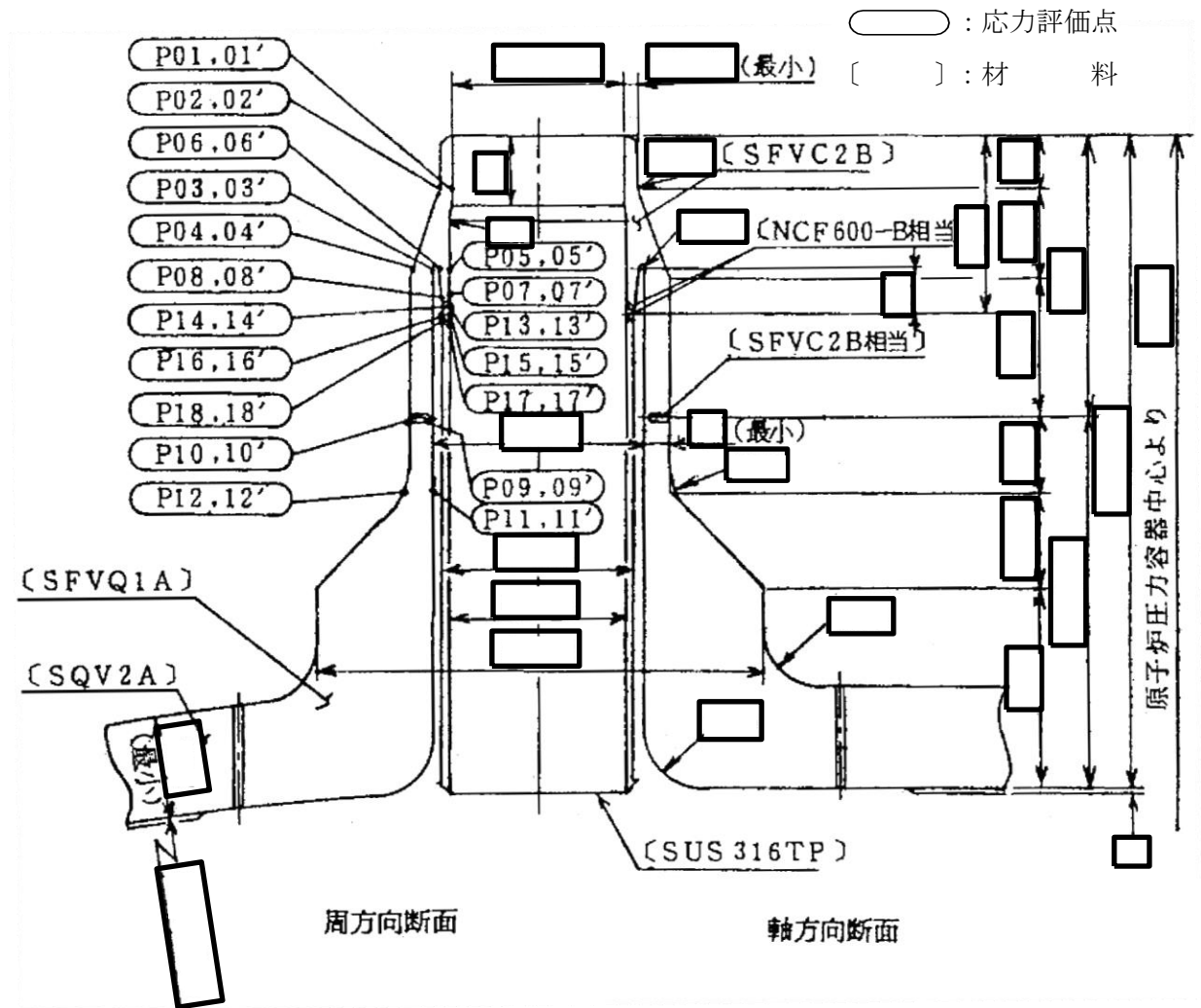


応力評価面	形状係数	内径 d_i (mm)	外径 d_o (mm)	備考
P01-P02				
P03-P04				
P05-P06				
P07-P08				

注記* : 全断面降伏荷重と初期降伏荷重の比が 1.5 を上回るため 1.5 を用いる。

図 3-17 ドレンノズル (N15) の概要図及び諸元

高压炉心スプレインズル (N16)



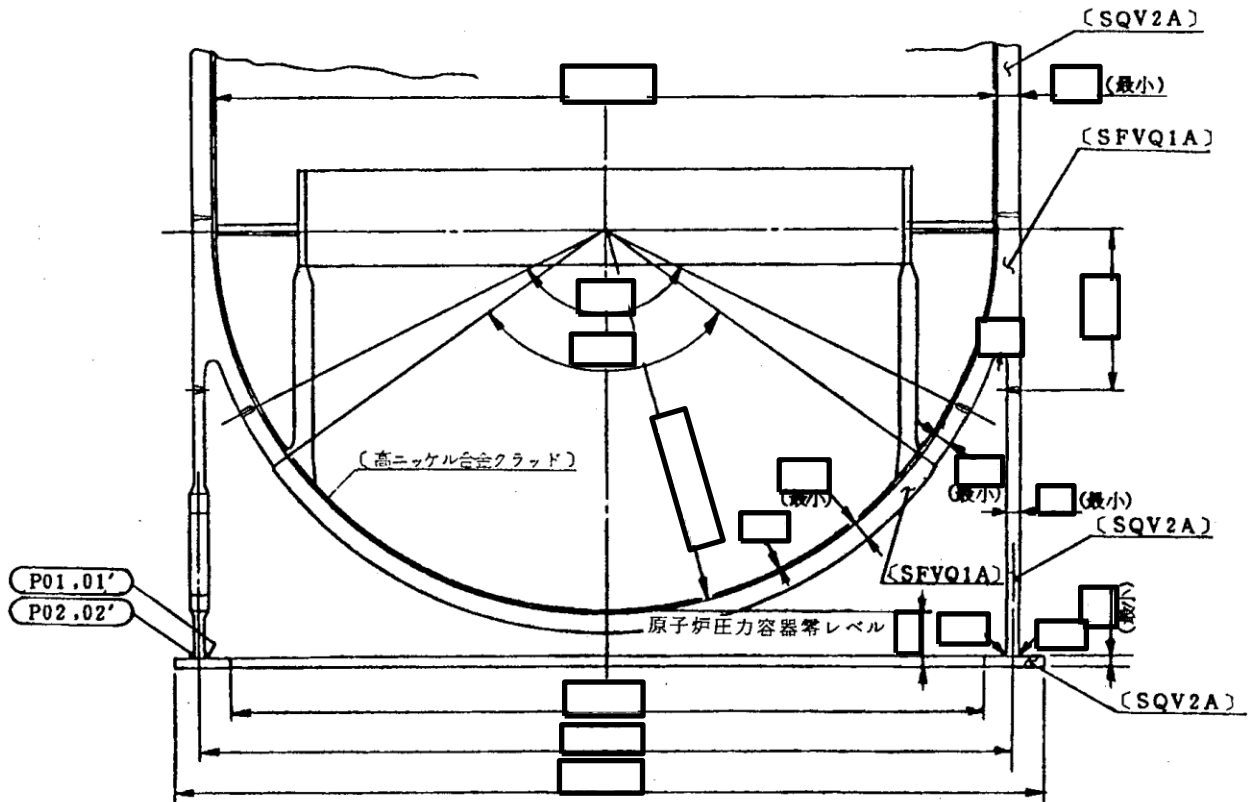
応力評価面	形状係数	内径 d_i (mm)	外径 d_o (mm)	備考
P01-P02				
P03-P04				
P05-P06				
P07-P08				
P09-P10				
P11-P12				
P13-P14				
P15-P16				
P17-P18				

図 3-18 高压炉心スプレインズル (N16) の概要図及び諸元

原子炉压力容器支持スカート

○ : 応力評価点

[] : 材 料



応力評価面	形状係数	内径 d_i (mm)	外径 d_o (mm)	備考
P01-P02				

図 3-19 原子炉压力容器支持スカートの概要図及び諸元

補足-027-10-70 差圧検出・ほう酸水注入系配管の解析モデル

目 次

1. 概要	1
2. 本設備の解析モデルの概要	1
3. 本設備の解析モデルにおける接続配管の影響	1
3.1 接続配管の概要	1
3.2 接続配管の影響	2
4. 炉内配管の解析モデルの質点位置の影響	8
4.1 炉内側サポートプレート間の配管の固有振動数の検討	8
5. まとめ	10

1. 概要

本資料は、差圧検出・ほう酸水注入系配管（以下「本設備」という）の地震応答解析に用いる解析モデルの設定方法の詳細を示すものである。

本資料において対象とする図書を以下に示す。

- ・VI-2-3-3-2-5「差圧検出・ほう酸水注入系配管（ティーより N11 ノズルまでの外管）の耐震性についての計算書」
- ・VI-2-3-3-3-10「差圧検出・ほう酸水注入系配管（原子炉圧力容器内部）の耐震性についての計算書」

2. 本設備の解析モデルの概要

本設備の解析モデルを図 1 に示す。本設備の解析モデルは、ティーより N11 ノズルまでの外管と炉内側の配管を一つの解析モデルとして作成している。モデル化の範囲は、

[REDACTED]
[REDACTED]
[REDACTED]
[REDACTED] としてい

る。

また、本設備の解析モデルの質点は、

[REDACTED]
[REDACTED]
[REDACTED] している。

なお、今回工認において本設備に適用している地震荷重は、建設工認の解析モデルで用いた地震荷重に建設工認との震度比を乗じて求めた値を適用している。

3. 本設備の解析モデルにおける接続配管の影響

本章では、接続配管の地震応答による影響を確認する。

接続配管の解析モデルでは、本設備の外管をモデル化範囲に含んでいる。ここでは、外管に加わる荷重について、接続配管及び本設備の解析モデルの地震応答解析結果を比較し、本設備の解析モデルにより得られる荷重が、接続配管の解析モデルにより得られる荷重を包絡することを確認する。

3.1 接続配管の概要

接続配管は、VI-2-6-4-1-3「管の耐震性についての計算書（ほう酸水注入系）」において「SLC-PD-1」としてモデル化されている。接続配管の地震応答解析モデルを図 3 に示す。モデル化範囲は、

[REDACTED]
[REDACTED]
[REDACTED]
[REDACTED]

3.2 接続配管の影響

ティーより先の接続配管の影響を確認するため、原子炉圧力容器ノズル（N11 ノズル）からティーまでの範囲に対し、配管解析モデルにより算出した地震荷重と、今回工認で本設備に適用する地震荷重を比較する。比較結果を表 1 に示す。

表 1 に示すとおり、本設備に適用する地震荷重は、接続配管の解析モデルにより算出した地震荷重より大きい結果が得られる。これは、以下の理由により本設備では接続配管に対して保守的な地震荷重が算出されることが要因である。

- ・本設備と接続配管で考慮する設置床高さの違いにより適用する設計震度が異なる（表 1 参照）。
- ・本設備の今回工認の耐震評価では、既工認の応力算出結果に水平方向又は鉛直方向の震度比のうち大きい値を乗じた評価を行っており、本検討においても同様の震度比を用いて荷重を算出している。なお、評価手法の詳細は補足-027-10-43「原子炉圧力容器関連及び原子炉格納容器関連における工事計画認可で実施する評価手法の概要と荷重比等による評価について」に示す。

以上の結果より、本設備に適用する地震荷重は、接続配管の地震応答の影響を包絡できていると言える。

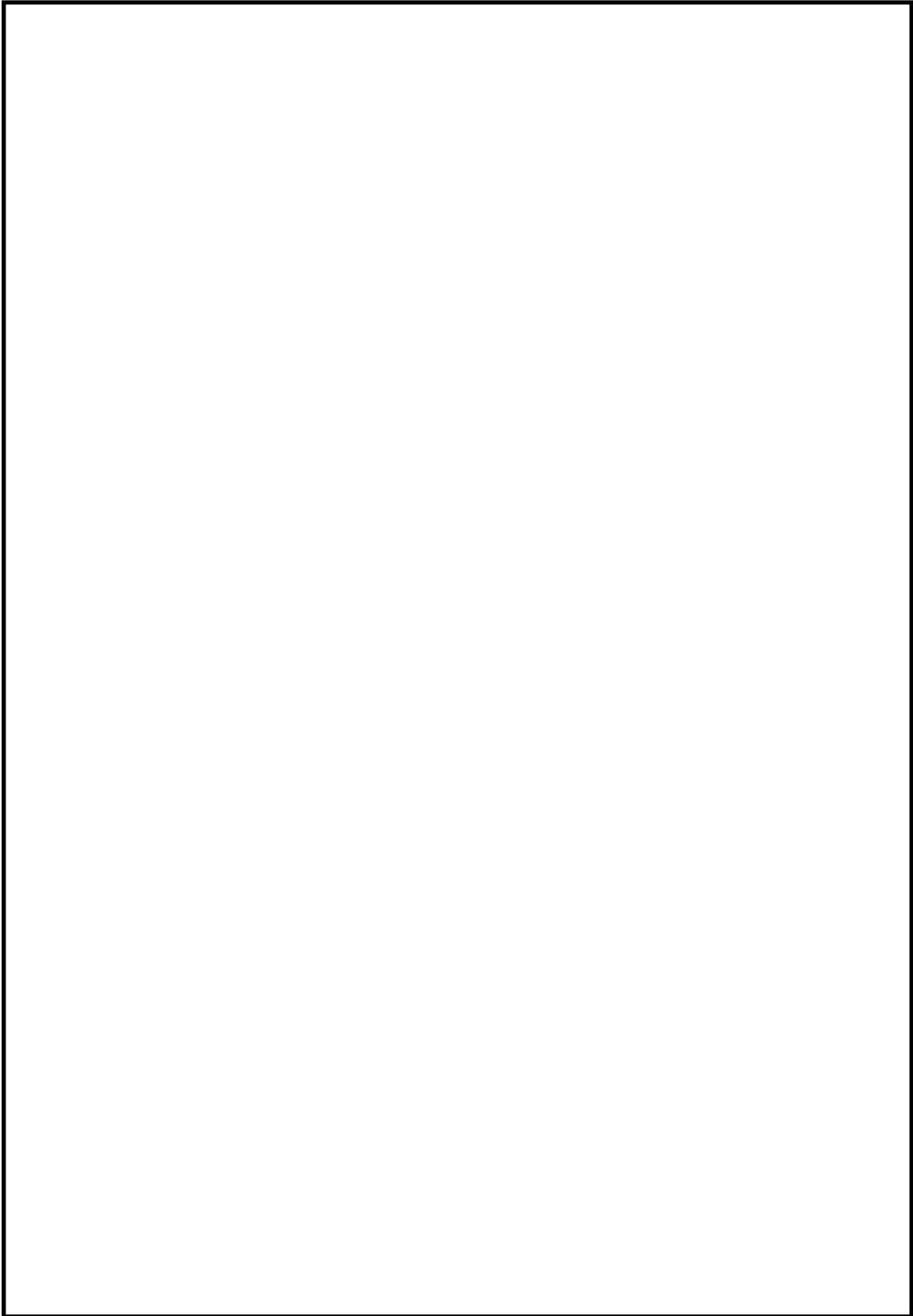


図1 本設備の解析モデル

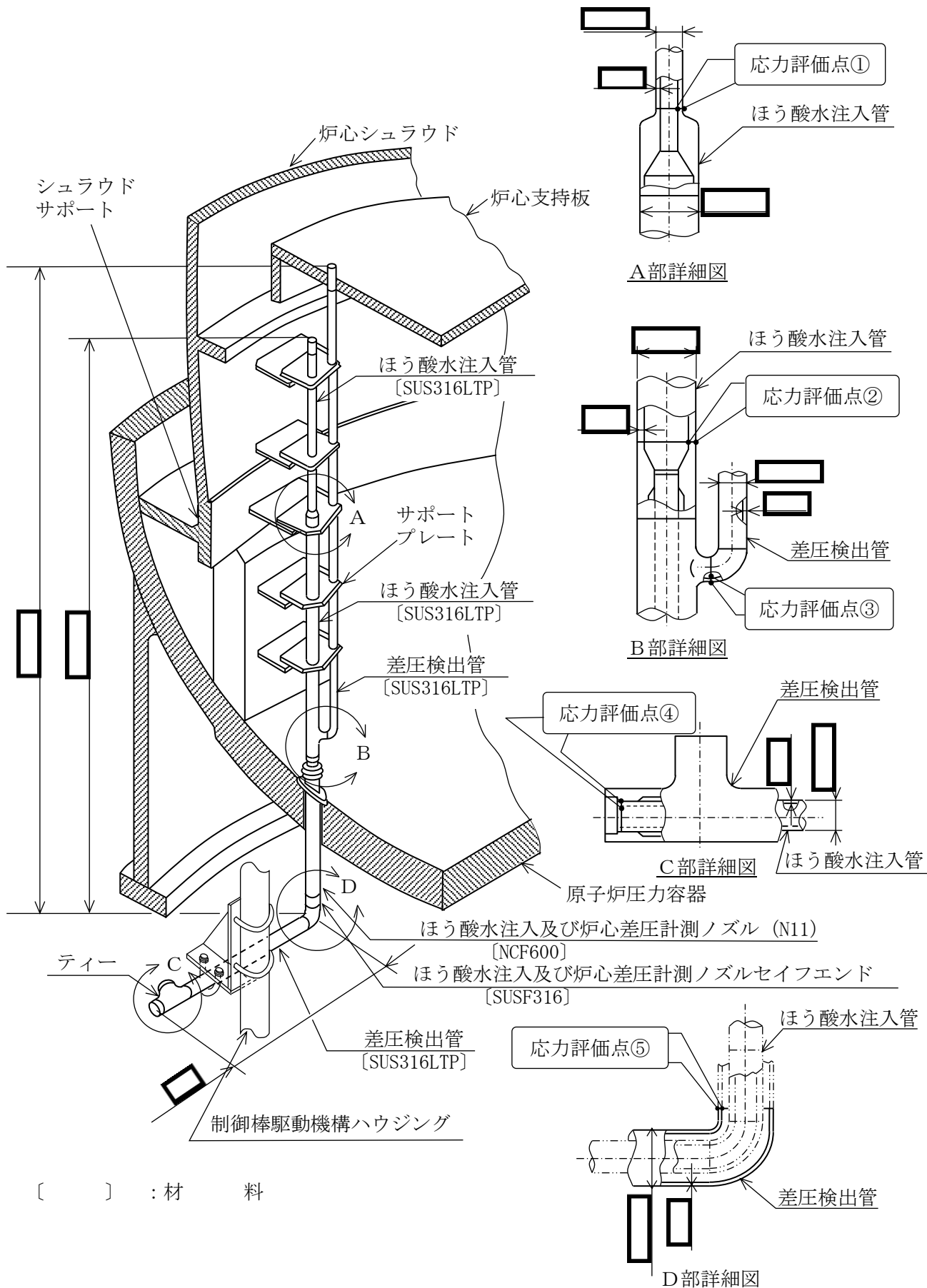


図2 本設備の応力評価点

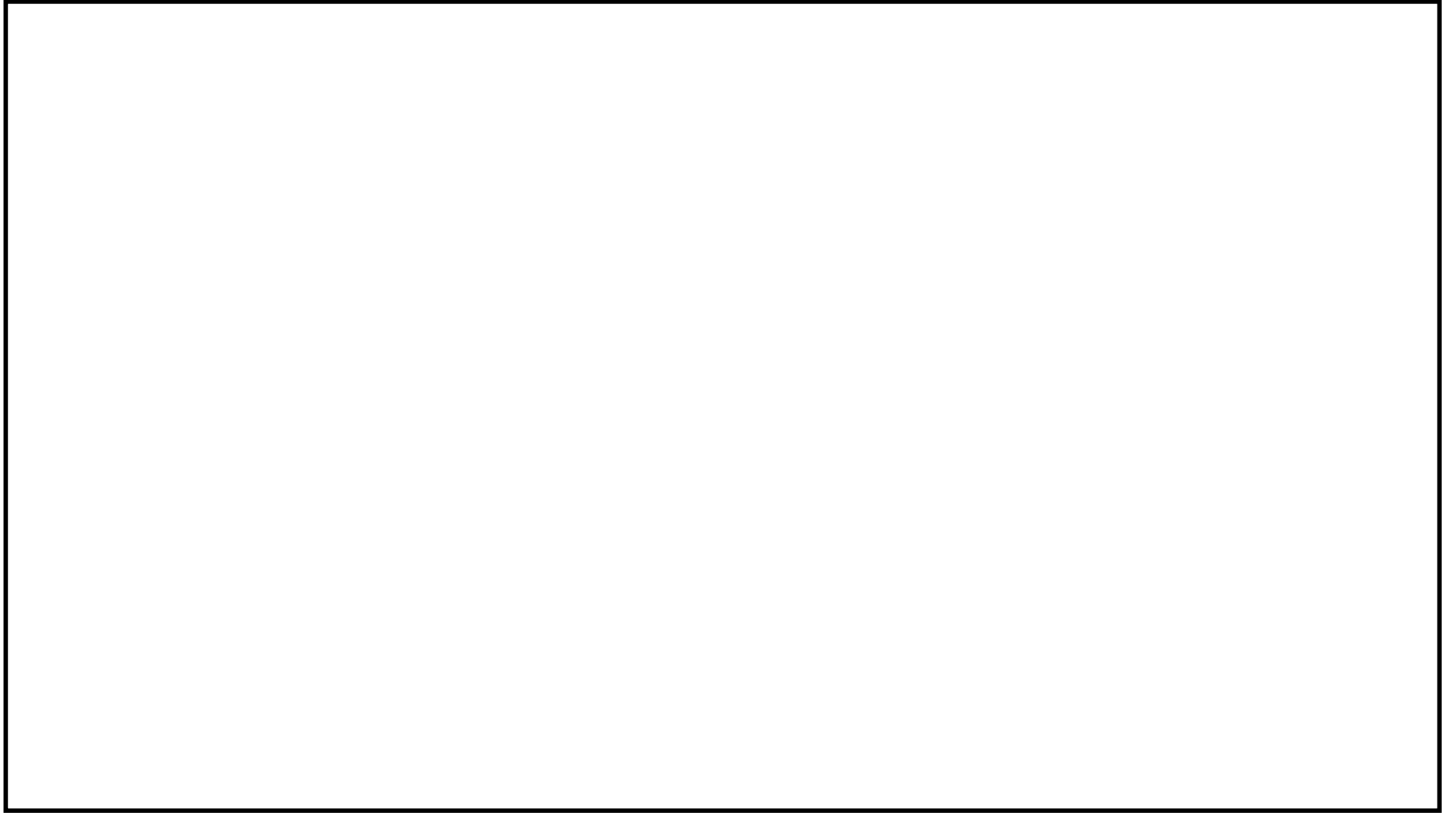


図3 接続配管の解析モデル



図4 J E A G 4 6 0 1 -1991 追補版における配管系
の設計用減衰定数の規定に係る記載抜粋

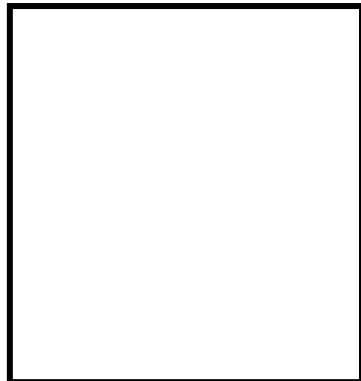
表1 本設備に適用する地震荷重と接続配管の解析モデルによる地震荷重の比較

地震動	質点番号	荷重	①本設備に適用する地震荷重				②接続配管の解析モデルによる地震荷重				比率 (①/②)			
			軸力 [N]	せん断力 [N]	ねじり モーメント [N・mm]	曲げ モーメント [N・mm]	軸力 [N]	せん断力 [N]	ねじり モーメント [N・mm]	曲げ モーメント [N・mm]	軸力 [-]	せん断力 [-]	ねじり モーメント [-]	曲げ モーメント [-]
補正工認 Ss	1~20	地震荷重 (一次)					2.52	5.16	7.06	4.49				
	20~24						2.32	3.21	5.39	2.05				
	20~24	地震荷重 (二次)					5.40	6.07	12.98	9.41				
補正工認 Sd	1~20	地震荷重 (一次)					1.83	3.73	4.57	3.24				
	20~24						1.68	2.18	3.62	1.51				
	20~24	地震荷重 (二次)					3.40	3.87	10.65	6.18				

解析モデル	1次固有周期	適用する耐震条件	据付場所及び床面高さ
本設備		設計用震度 I を上回る設計震度 {最小震度比*2 (補正工認 Ss : 1.5 倍, 補正工認 Sd : 1.06 倍)}	・炉心シュラウド (EL 19.196m~21.571m) ・原子炉圧力容器下鏡 (EL 16.508m~18.250m)
接続配管		設計用床応答スペクトル I 及び設計用震度 I	原子炉圧力容器ベDESTAL (EL 15.944m)

注記 *1 : 0.05 秒以下であり、剛構造である。

*2 : 本設備に適用する震度と設計用震度 I との比 (本設備に適用する震度 ÷ 設計用震度 I) を示す。



本設備の解析モデル



接続配管の解析モデル

4. 炉内配管の解析モデルの質点位置の影響

本設備の解析モデルのうち、

[REDACTED]

[REDACTED] 本章では、炉内側のサポート間の質点の有無が耐震評価に与える影響について検討する。

4.1 炉内側サポートプレート間の配管の固有振動数の検討

本設備のうち、炉内のサポートプレートに支持される区間について、簡易的にサポートプレートによる支持点間を1本の梁にモデル化し、固有振動数を算出する。鉛直方向（軸方向）については水平方向（軸直角方向）に対して剛性が高いため、本検討では水平方向（軸直角方向）を検討対象とする。

モデル化位置は、当該区間のうち、

[REDACTED]

[REDACTED]

としてモデル化した。

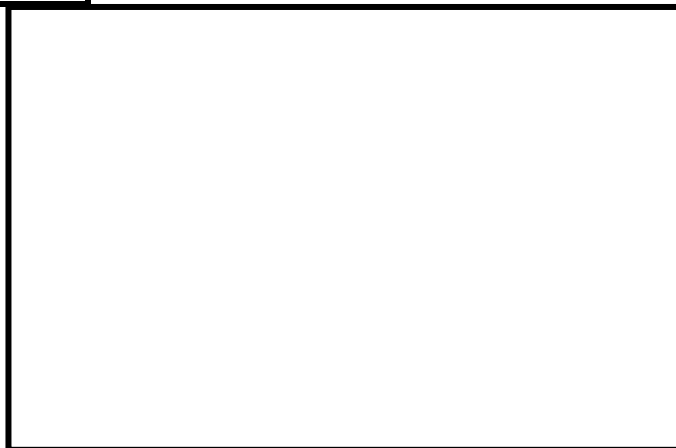
表2に固有振動数の算出結果を示す。表2に示す通り、当該区間の固有振動数は20[Hz]を大きく上回っており、この他の区間を含め、サポートに支持される区間は全て、剛構造である。このことから、炉内側配管のサポートプレート間の質点数の有無が耐震評価に与える影響は軽微と考えられる。

表2 炉内側のサポートプレート間の配管の固有振動数

項目	記号	単位	ほう酸水注入管 (質点番号 10~11)	差圧検出管 (質点番号 17~18)
材質	—	—	SUS316LTP	SUS316LTP
サポート間距離	L	m		
ヤング率	E	Pa		
密度 ^{*1}	ρ	kg/m ³		
外径	D _o	mm		
板厚	t	mm		
内径	D _i	mm		
断面積	A	m ²		
断面二次モーメント	I	m ⁴		
固有振動数 (一次) ^{*2}	f	Hz		

注記 *1 :

*2 : における梁の固有振動数を示す。なお、固有振動数の算出式は以下に示す。



5. まとめ

本設備の解析モデルに対し, 接続配管と炉内配管の解析モデルの質点位置が評価に及ぼす影響について検討を行った。検討の結果, いずれも評価に及ぼす影響は軽微であり, 本解析モデルにより評価を実施することは問題無いことを確認した。

補足-027-10-71 原子炉压力容器及び压力容器附属構造物の
簡易弾塑性解析結果について

目 次

1. 概要	1
2. 計算過程及び計算結果	1

1. 概要

原子炉圧力容器及び圧力容器付属構造物の地震荷重による評価において、設計・建設規格 PVB-3300 の簡易弾塑性解析を適用した応力評価点の疲労累積係数の計算過程及び計算結果を示す。

本資料において対象とする図書を以下に示す。

- ・ VI-2-3-3-1-2 「原子炉圧力容器の耐震性についての計算書」
- ・ VI-2-3-3-2-4 「ジェットポンプ計測配管貫通部シールの耐震性についての計算書」

2. 計算過程及び計算結果

原子炉圧力容器及び圧力容器付属構造物の地震荷重による評価において、一次＋二次応力の応力差最大範囲が許容応力を超える応力評価点については、設計・建設規格 PVB-3300 の簡易弾塑性解析を行っている。

評価対象機器毎に、簡易弾塑性解析を行った応力評価点の疲労累積係数の計算過程及び計算結果を表-1～4 にまとめて示す。なお、疲労累積係数の計算方法及び記号は、VI-2-3-3-1-1 「原子炉圧力容器の応力解析の方針」による。

原子炉圧力容器の地震荷重 S_d^* による疲労累積係数の計算を表-1 に、地震荷重 S_s による疲労累積係数の計算を表-2 に示す。ジェットポンプ計測配管貫通部シールの地震荷重 S_d^* による疲労累積係数の計算を表-3 に、地震荷重 S_s による疲労累積係数の計算を表-4 に示す。

表-1 原子炉圧力容器の地震荷重 S d *による疲労累積係数の計算

評価対象機器	応力評価点	材料	$S_n^{\#1}$ (MPa)	K_e	$S_p^{\#1}$ (MPa)	S^{ℓ} (MPa)	$S^{\ell'}$ (MPa)	E_o (MPa)	E (MPa)	N_a	N_c	$U_{s d}$
原子炉中性子計装孔	P02, P02'	SUS316TP	371	1.145	450	258	286			91431	300	0.004
主蒸気ノズル (N3)	P02, P02'	SFVQ1A	657	1.335	762	508	598			877	300	0.342
	P03, P03'	SFVC2B相当	544	1.622	544	441	491			1501	300	0.200
	P04, P04'	SFVC2B相当	582	1.717	582	500	556			1079	300	0.278
	P05, P05'	SFVC2B	485	1.441	553	398	443			1975	300	0.152
	P06, P06'	SFVC2B	714	1.973	714	704	783			413	300	0.727
給水ノズル (N4)	P02, P02'	SFVC2B	573	1.695	661	560	623			775	300	0.387
	P05, P05'	SFVC2B	505	1.516	942	714	795			399	300	0.752
	P12, P12'	SFVC2B	603	1.767	706	624	694			564	300	0.532
	P13, P13'	SFVC2B	507	1.514	507	384	427			2209	300	0.136
低圧炉心スプレイノズル (N5)	P08, P08'	SFVC2B	456	1.338	501	335	373			3394	300	0.089
低圧注水ノズル (N6)	P01, P01'	SFVC2B	409	1.146	483	277	308			6155	300	0.049
上ぶたスプレイノズル (N7)	P02, P02'	SFVQ1A	677	1.432	856	613	721			504	300	0.596
	P04, P04'	SFVQ1A	587	1.251	722	452	531			1218	300	0.247
計測及びベントノズル (N8)	P02, P02'	SFVQ1A	670	1.439	887	638	750			457	300	0.657
	P04, P04'	SFVQ1A	553	1.183	675	399	469			1693	300	0.178
ジェットポンプ計測ノズル (N9)	P10, P10'	SUSF316	394	1.180	394	232	258			159736	300	0.002
ほう酸水注入及び炉心差圧計測ノズル (N11)	P12, P12'	NCF600-B	660	1.534	904	693	682			1861	300	0.162
計測ノズル (N12)	P02, P02'	SUSF316	408	1.249	408	255	283			97120	300	0.003
	P04, P04'	SUSF316	403	1.223	403	246	273			117349	300	0.003
	P06, P06'	SUSF316	454	1.434	454	326	361			26770	300	0.012
	P10, P10'	NCF600-B	553	1.245	714	445	438			10340	300	0.029
計測ノズル (N13)	P02, P02'	SUSF316	408	1.249	408	255	283			97120	300	0.003
	P04, P04'	SUSF316	403	1.223	403	246	273			117349	300	0.003
	P06, P06'	SUSF316	454	1.434	454	326	361			26770	300	0.012
	P10, P10'	NCF600-B	553	1.245	714	445	438			10340	300	0.029
計測ノズル (N14)	P02, P02'	SUSF316	373	1.075	373	201	222			384777	300	0.001
	P04, P04'	SUSF316	417	1.289	479	309	342			34973	300	0.009
高圧炉心スプレイノズル (N16)	P07, P07'	SFVC2B	439	1.268	439	278	310			6056	300	0.050
	P08, P08'	SFVC2B	580	1.713	637	545	607			840	300	0.358
	P14, P14'	NCF600-B相当	501	1.075	550	296	291			82097	300	0.004
	P17, P17'	SUS316TP	414	1.272	414	263	292			81771	300	0.004

表-2 原子炉压力容器の地震荷重 S_s による疲労累積係数の計算 (その1)

評価対象機器	応力評価点	材料	$S_n^{\#2}$ (MPa)	K_e	$S_p^{\#2}$ (MPa)	S^{ℓ} (MPa)	$S^{\ell'}$ (MPa)	E_o (MPa)	E (MPa)	N_a	N_c	U_{S_s}
原子炉中性子計装孔	P02, P02'	SUS316TP	462	1.464	570	417	462			8293	150	0.018
	P04, P04'	SUS316TP	375	1.568	1714	1344	1489			163	150	0.921
再循環水出口ノズル (N1)	P02, P02'	SFVQ1A	629	1.279	731	468	550			1110	150	0.136
	P05, P05'	NCF600-B相当	531	1.155	531	307	302			67129	150	0.003
	P06, P06'	NCF600-B相当	506	1.059	506	268	264			140159	150	0.001
	P07, P07'	NCF600-B相当	524	1.128	524	296	291			82359	150	0.002
	P08, P08'	NCF600-B相当	515	1.093	515	281	277			107839	150	0.002
	P09, P09'	SUSF316	520	1.647	520	428	475			7444	150	0.021
	P10, P10'	SUSF316	501	1.591	501	399	442			9941	150	0.015
	P11, P11'	SUSF316	438	1.372	480	330	365			25157	150	0.006
再循環水入口ノズル (N2)	P12, P12'	SUSF316	499	1.586	499	396	439			10258	150	0.015
	P11, P11'	SUSF316	540	1.740	1345	1171	1297			241	150	0.623
	P14, P14'	SUSF316	735	2.072	853	883	979			570	150	0.264
主蒸気ノズル (N3)	P17, P17'	SUSF316相当	542	1.705	634	541	599			3014	150	0.050
	P02, P02'	SFVQ1A	776	1.606	900	723	851			339	150	0.443
	P03, P03'	SFVC2B相当	643	1.849	643	595	662			650	150	0.231
	P04, P04'	SFVC2B相当	688	1.930	688	664	738			475	150	0.316
	P05, P05'	SFVC2B	573	1.696	653	554	616			802	150	0.187
給水ノズル (N4)	P06, P06'	SFVC2B	843	2.146	843	905	1007			226	150	0.664
	P02, P02'	SFVC2B	681	1.920	787	755	840			349	150	0.430
	P05, P05'	SFVC2B	601	1.763	1121	988	1100			183	150	0.820
	P07, P07'	SFVC2B	414	1.157	414	240	267			9486	150	0.016
	P08, P08'	SFVC2B	411	1.144	411	235	262			10035	150	0.015
	P12, P12'	SFVC2B	719	1.981	841	833	927			276	150	0.544
	P13, P13'	SFVC2B	604	1.768	604	534	594	893	150	0.168		
	P14, P14'	SFVC2B	435	1.251	435	272	303	6464	150	0.024		
	P16, P16'	SFVQ1A	580	1.185	670	397	467	1713	150	0.088		
低圧炉心スプレインノズル (N5)	P17, P17'	NCF600-B相当	507	1.061	507	269	265	137634	150	0.001		
	P08, P08'	SFVC2B	456	1.338	501	335	373	3394	150	0.045		
低圧注水ノズル (N6)	P01, P01'	SFVC2B	673	1.905	796	758	844	345	150	0.435		
	P02, P02'	SFVC2B	528	1.577	528	416	463	1752	150	0.086		
	P03, P03'	SFVC2B	558	1.660	1141	947	1054	203	150	0.739		
	P05, P05'	SFVC2B相当	419	1.180	419	247	275	8628	150	0.018		
	P06, P06'	SFVC2B相当	423	1.198	423	253	282	8030	150	0.019		
	P12, P12'	SFVQ1A	604	1.228	697	428	503	1408	150	0.107		

表-2 原子炉压力容器の地震荷重 S s による疲労累積係数の計算 (その2)

評価対象機器	応力評価点	材料	$S_n^{\#2}$ (MPa)	K_e	$S_p^{\#2}$ (MPa)	S^{ℓ} (MPa)	$S^{\ell'}$ (MPa)	E_0 (MPa)	E (MPa)	N_a	N_c	U_{S_s}
上ぶたスプレインズル (N7)	P02, P02'	SFVQ1A	791	1.634	999	817	960			253	150	0.593
	P04, P04'	SFVQ1A	685	1.428	843	602	708			532	150	0.282
計測及びベントノズル (N8)	P02, P02'	SFVQ1A	769	1.602	1017	815	959			254	150	0.591
	P04, P04'	SFVQ1A	634	1.330	775	515	606			843	150	0.178
ジェットポンプ計測ノズル (N9)	P02, P02'	SFVQ1A	650	1.316	753	495	583			947	150	0.159
	P04, P04'	SFVQ1A	637	1.279	637	407	479			1607	150	0.094
	P06, P06'	NCF600-B相当	642	1.491	642	479	471			7648	150	0.020
	P08, P08'	NCF600-B相当	600	1.379	600	414	408			14602	150	0.011
	P09, P09'	SUSF316	392	1.172	392	230	255			169983	150	0.001
	P10, P10'	SUSF316	595	1.829	595	544	603			2951	150	0.051
ほう酸水注入及び炉心差圧計測ノズル (N11)	P12, P12'	NCF600-B	660	1.534	904	693	682			1861	150	0.081
計測ノズル (N12)	P02, P02'	SUSF316	544	1.711	544	466	516			5310	150	0.029
	P04, P04'	SUSF316	535	1.687	535	451	500			6050	150	0.025
	P06, P06'	SUSF316	596	1.832	596	546	605			2905	150	0.052
	P08, P08'	NCF600-B相当	615	1.419	615	436	429			11385	150	0.014
	P10, P10'	NCF600-B	713	1.652	919	759	748			1366	150	0.110
計測ノズル (N13)	P02, P02'	SUSF316	544	1.711	544	466	516			5310	150	0.029
	P04, P04'	SUSF316	535	1.687	535	451	500			6050	150	0.025
	P06, P06'	SUSF316	596	1.832	596	546	605			2905	150	0.052
	P08, P08'	NCF600-B相当	615	1.419	615	436	429			11385	150	0.014
	P10, P10'	NCF600-B	713	1.652	919	759	748	1366	150	0.110		
計測ノズル (N14)	P01, P01'	SUSF316	445	1.401	478	335	371	23177	150	0.007		
	P02, P02'	SUSF316	495	1.573	495	389	431	11141	150	0.014		
	P04, P04'	SUSF316	546	1.715	625	536	594	3113	150	0.049		
ドレンノズル (N15)	P04, P04'	SFVC2B相当	575	1.701	693	589	656	668	150	0.225		
	P06, P06'	SFVC2B	653	1.868	714	667	743	469	150	0.320		
	P07, P07'	SFVC2B	494	1.470	516	380	423	2290	150	0.066		
	P08, P08'	SFVC2B	606	1.772	606	537	598	879	150	0.171		
高圧炉心スプレインズル (N16)	P07, P07'	SFVC2B	439	1.268	439	278	310	6056	150	0.025		
	P08, P08'	SFVC2B	580	1.713	637	545	607	840	150	0.179		
	P14, P14'	NCF600-B相当	501	1.075	550	296	291	82097	150	0.002		
	P17, P17'	SUS316TP	414	1.272	414	263	292	81771	150	0.002		

表-3 ジェットポンプ計測配管貫通部シールの地震荷重 S_d^* による疲労累積係数の計算

評価対象機器	応力評価点	材料	$S_n^{\#1}$ (MPa)	K_e	$S_p^{\#1}$ (MPa)	S^{ℓ} (MPa)	$S^{\ell'}$ (MPa)	E_0 (MPa)	E (MPa)	N_a	N_c	U_{S_d}
ジェットポンプ計測配管貫通部シール	P01, P01'	SUSF316	381	1.328	646	429	476			7356	300	0.041
	P02, P02'	SUSF316	402	1.219	415	253	281			100000	300	0.003

表-4 ジェットポンプ計測配管貫通部シールの地震荷重 S_s による疲労累積係数の計算

評価対象機器	応力評価点	材料	$S_n^{\#2}$ (MPa)	K_e	$S_p^{\#2}$ (MPa)	S^{ℓ} (MPa)	$S^{\ell'}$ (MPa)	E_0 (MPa)	E (MPa)	N_a	N_c	U_{S_s}
ジェットポンプ計測配管貫通部シール	P01, P01'	SUSF316	576	1.788	976	873	967			592	150	0.254
	P02, P02'	SUSF316	607	1.855	627	582	645			2293	150	0.066

補足-027-10-72 使用済燃料貯蔵ラックの耐震解析のモデル化と
温度による固有値解析への影響について

目 次

1. 概要	1
2. 溶接部を簡略化した解析モデルの考え方	1
3. S A時の温度による固有周期への影響	4
4. 振動モードの次数の取扱い方	5
5. 参考文献	7

1. 概要

使用済燃料貯蔵ラック（以下「SFPラック」という。）の解析モデルでは、実際の溶接構造を模擬して解析すると応答が複雑になるため、簡略化した解析モデルで評価を実施している。

本補足説明資料は、VI-2-4-2-2「使用済燃料貯蔵ラックの耐震性についての計算書」における評価内容のうち以下の点について説明する。

- ・溶接部を簡略化した解析モデルの考え方
- ・S A時の温度による固有周期への影響
- ・振動モードの次数の取扱い方

2. 溶接部を簡略化した解析モデルの考え方

(1) 簡略化モデルの妥当性

SFPラックは大板、幅狭板（小板）、ベースプレートをそれぞれ溶接することで構成している。このうち大板、幅狭板の鉛直方向は断続溶接を行っているが、これを精密にモデル化すると、SFPラック全体の応力状態に大きく寄与しない幅狭板単独の振動モードの影響で解析が収束しにくい傾向にある。よって、解析モデル上はこれを連続溶接相当の扱いとし、断続溶接との剛性の違いによる解析結果への影響を、幅狭板の縦弾性係数を補正することで解析モデルに反映する。

(2) 耐震計算書の解析モデル

断続溶接を模擬したモデルと、連続溶接を模擬したモデルにおいて、静的な等分布荷重を加えた解析結果のたわみ量と、これが等しくなるよう算定した縦弾性係数の補正係数を表 1 及び図 1 に、補正方法のイメージを図 2 に示す。

表 1 縦弾性係数の補正係数

補正係数	たわみ量	備考

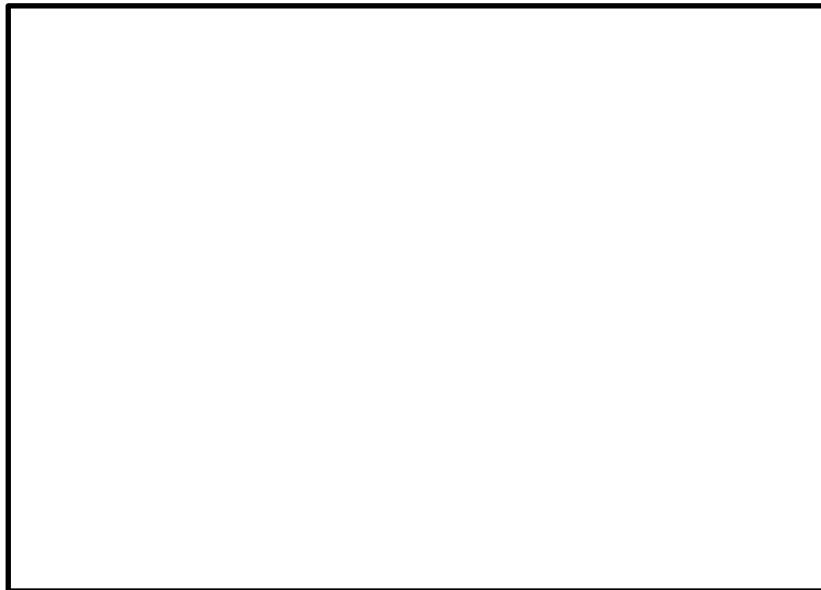
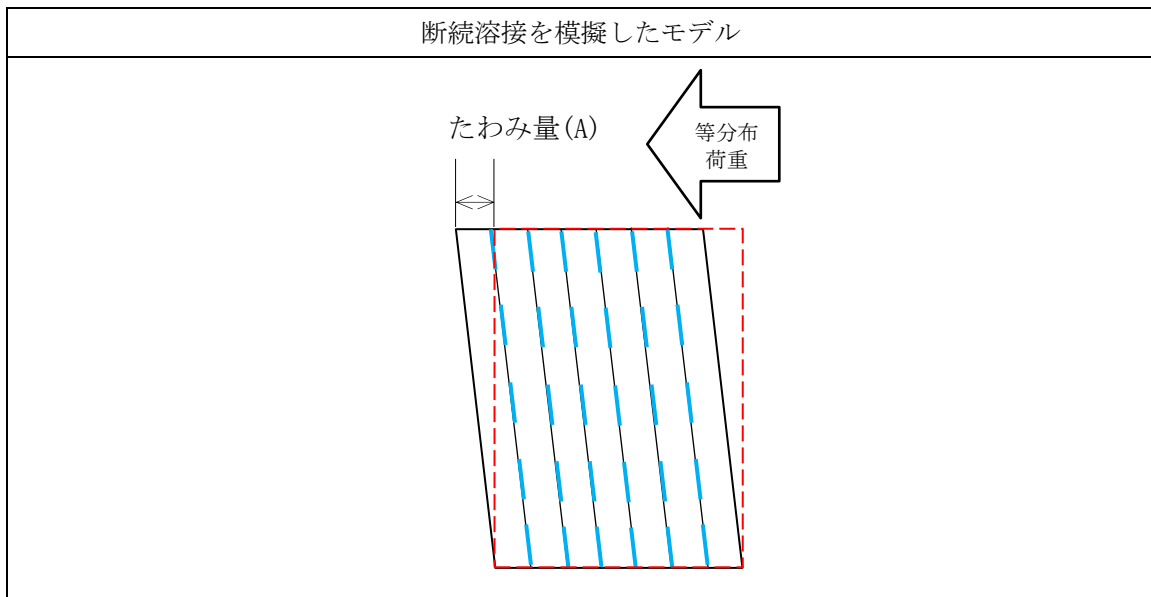


図 1 縦弾性係数の補正係数



連続溶接を模擬して縦弾性係数を補正したモデル [$E' = E \times \alpha$]
(E' : 解析に使用する縦弾性係数, E : 材料の縦弾性係数, α : 補正係数)

図 2 縦弾性係数の補正方法のイメージ図

3. SA時の温度による固有周期への影響

固有周期は66℃（DB条件）で算定しており、100℃（SA条件）における固有周期への影響を確認する。

SFPラックの []
[] 66℃におけるボロン
添加ステンレス鋼板のほう素添加割合に応じた縦弾性係数の実験データをもとに、保守的な
縦弾性係数（ [] MPa）を設定していた。今回工認のSFPラックの耐震計算書では、
この既工認における縦弾性係数の値を踏襲して固有周期を解析している。一方、 []
[] [1]が []、これに示されているボロン添加ステンレス鋼
板の100℃における縦弾性係数（212000 MPa）は、上記の通り保守的に設定した66℃におけ
る縦弾性係数より大きいため、このデータを反映して解析を行った場合の固有周期はより小
さな値となる。 [] [1]の該当箇所の引用を図3に示す。

以上より、SA条件であっても固有周期が0.05秒を超えることはない。

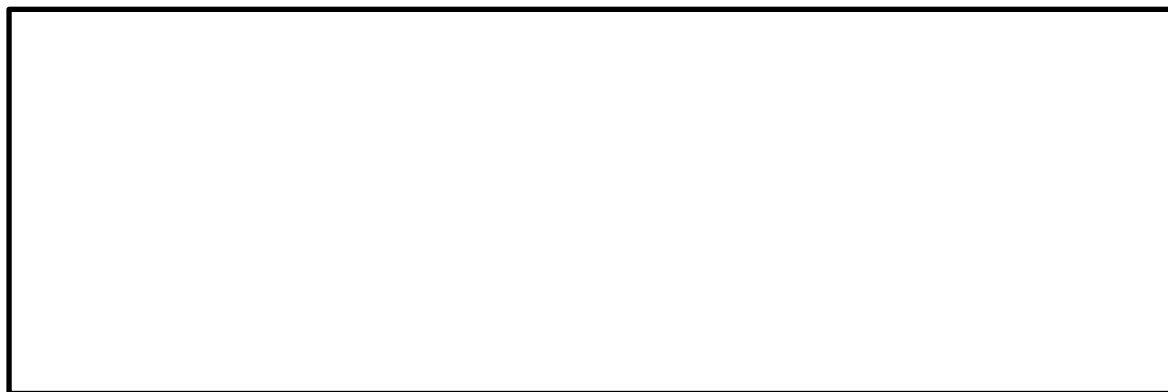


図3 ボロン添加ステンレス鋼板の縦弾性係数（ [] [1]より引用）

4. 振動モードの次数の取扱い方

振動モー

ド図を図 4 に示す。

表 2 既工認と今回工認の振動モードの次数の取扱い方

解析結果の モード次数	固有周期 (s)	水平方向刺激係数		鉛直方向 刺激係数	耐震評価での 振動モード
		X方向	Y方向		
1					
2					
3					
4					

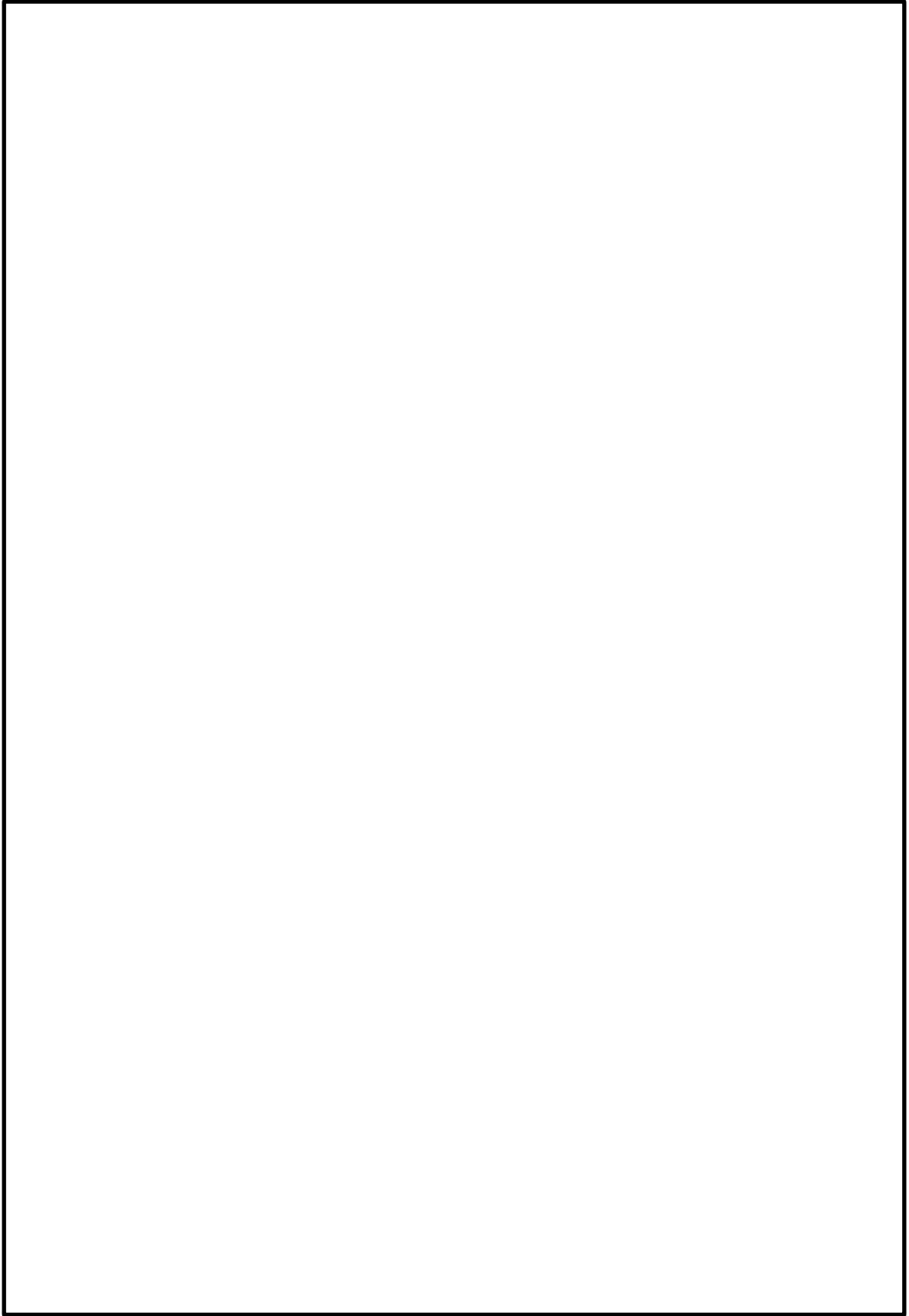


図 4 振動モード図

5. 参考文献

[1]

補足-027-10-73 炉心支持構造物及び原子炉压力容器内部構造物の
溶接部の継手効率の設定について

目 次

1. 概要	1
2. 継手効率の設定方法	1

1. 概要

本資料は、炉心支持構造物及び原子炉圧力容器内部構造物の溶接部の継手効率の設定方法について纏めたものである。

今回工認において、溶接部の継手効率の設定方法を既工認で適用した通商産業省告示第501号「発電用原子力設備に関する構造等の技術基準」（以下「告示」という。）から、発電用原子力設備規格（設計・建設規格（2005年版（2007年追補版含む。））J S M E S N C 1 - 2005/2007）（日本機械学会 2007年9月）（以下「設計・建設規格」という。）に見直すことにより、蒸気乾燥器（耐震用ブロック）、気水分離器及びスタンドパイプ（スタンドパイプ）の継手効率を既工認から変更した。

また、既工認には記載のない燃料支持金具（周辺燃料支持金具）の継手効率についても、今回工認にて設計・建設規格に基づき設定する。なお、その他の機器については、既工認における設定値から変更がないため、本資料では記載を省略する。

本資料において対象とする図書を以下に示す。

- ・ VI-2-3-2-2-1 「炉心支持構造物の応力解析の方針」
- ・ VI-2-3-2-2-6 「燃料支持金具の耐震性についての計算書」
- ・ VI-2-3-3-3-1 「原子炉圧力容器内部構造物の応力解析の方針」
- ・ VI-2-3-3-3-2 「蒸気乾燥器の耐震性についての計算書」
- ・ VI-2-3-3-3-3 「気水分離器及びスタンドパイプの耐震性についての計算書」

2. 継手効率の設定方法

既工認に記載される機器の継手効率は、各溶接部の継手形状と検査の種類をもとに、それぞれの溶接部を既工認で適用した告示に記載される溶接方法等の区分に分類し、各区分に対応する継手効率を採用して設定している。ここで、溶接方法等の区分は、「継手の種類」「継手の分類」「検査の種類」から決定され、そのうち、継手の種類は、告示の解説に示される継手形状の一般例をもとに設定している。

今回工認で適用する設計・建設規格の解説には、

既工認に記載のない機器のうち、燃料支持金具（周辺燃料支持金具）の継手効率については、設計・建設規格に記載される継手形状の一般例をもとに設定した「継手の種類」と当該溶接部に対する「検査の種類」から溶接方法等の区分を決定し、対応する継手効率を採用して決定した。

今回工認において継手効率を変更した蒸気乾燥器（耐震用ブロック）、気水分離器及びスタンドパイプ（スタンドパイプ）と、今回工認において継手効率を新たに設定した燃料支持金具（周辺燃料支持金具）の設定方法の詳細をそれぞれ以下に示す。

また、設計・建設規格の解説に記載される継手形状の一般例のうち、

[redacted]を図1に示す。

① 蒸気乾燥器（耐震用ブロック）

耐震用ブロックは、[redacted]
[redacted]
[redacted]
[redacted]
[redacted]
[redacted]
[redacted]
[redacted]
[redacted]に該当すると考えられる。また、[redacted]
[redacted]を実施している。よって、今回工認では、[redacted]
[redacted]
[redacted]とし

た。

なお、溶接部①-1，①-2，①-4における継手形状の考え方については、既工認からの変更は無い。

蒸気乾燥器（耐震用ブロック）の継手効率及び継手形状を表1に示す。

② 気水分離器及びスタンドパイプ（スタンドパイプ）

スタンドパイプは、[redacted]
[redacted]
[redacted]
[redacted]
[redacted]
[redacted]
[redacted]に該当すると考えられる。また、[redacted]
[redacted]が実施されている。よって、今回工認では、[redacted]
[redacted]
[redacted]とした。

気水分離器及びスタンドパイプ（スタンドパイプ）の継手効率及び継手形状を表2に示す。

③ 燃料支持金具（周辺燃料支持金具）

周辺燃料支持金具は []
[]
[] に該当すると考えられる。また、 []
[] が実施されている。よって、今回工認では、 []
[]
[] とした。

周辺燃料支持金具の継手効率及び継手形状を表 3 に示す。

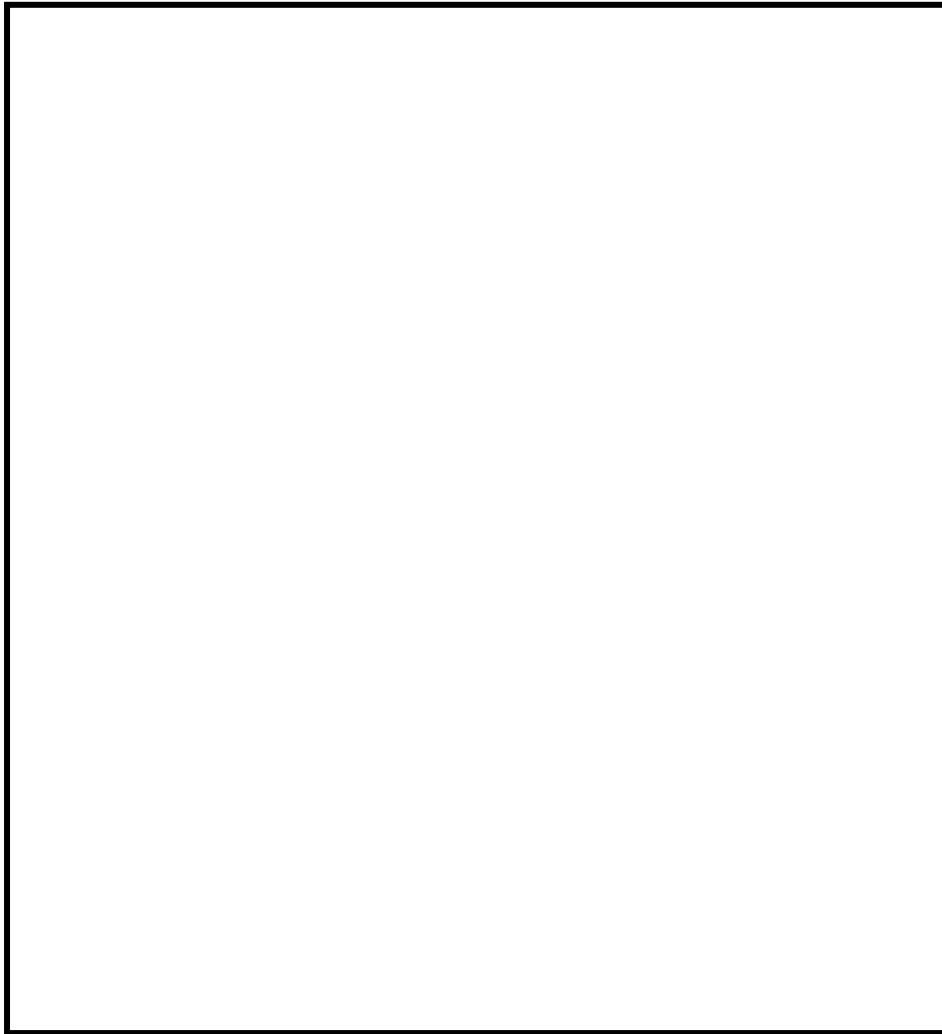


図1 設計・建設規格における継手の種類および継手形状の一般例

表1 蒸気乾燥器（耐震用ブロック）の継手効率

	適用区分		継手効率	見直し理由
	継手の種類	検査の種類		
既工認				
今回工認				

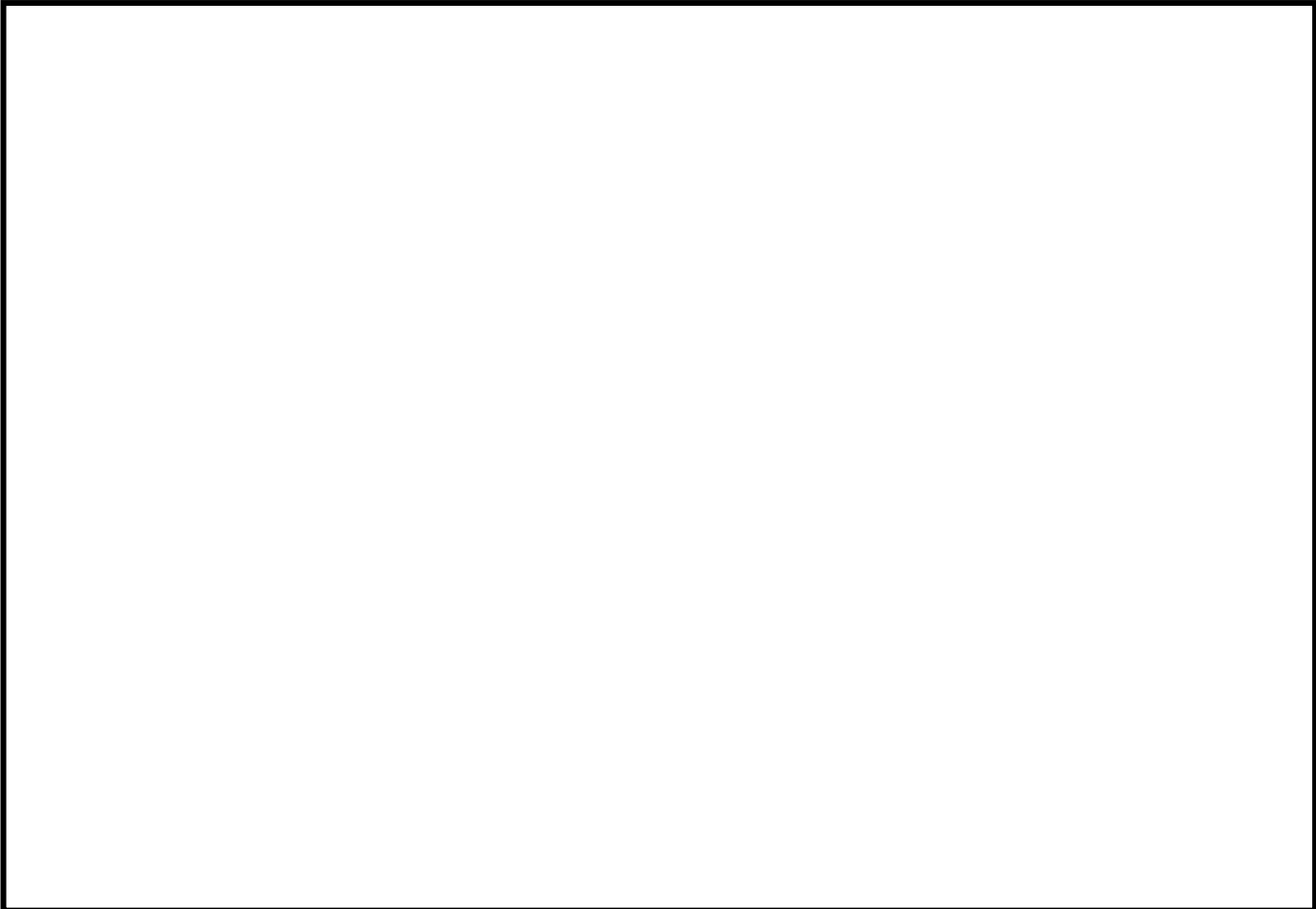
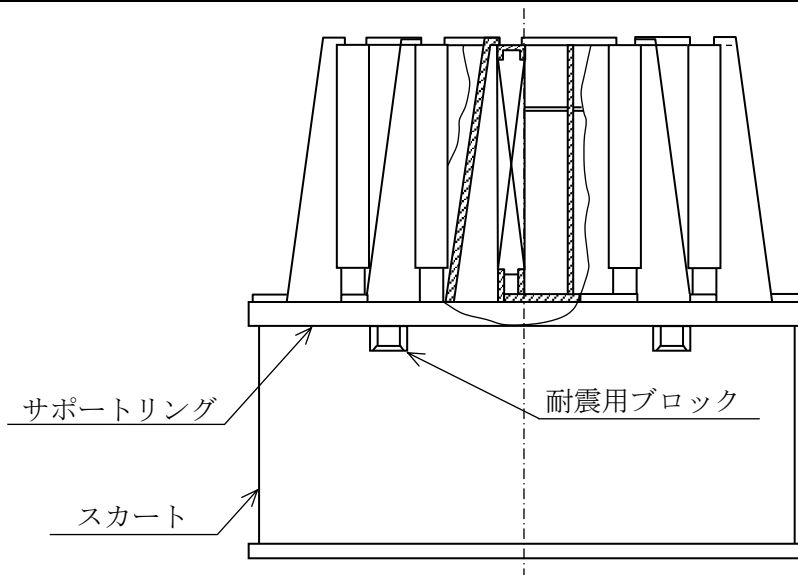


表2 気水分離器及びスタンドパイプ（スタンドパイプ）の継手効率

	適用区分		継手効率	見直し理由
	継手の種類	検査の種類		
既工認				
今回工認				

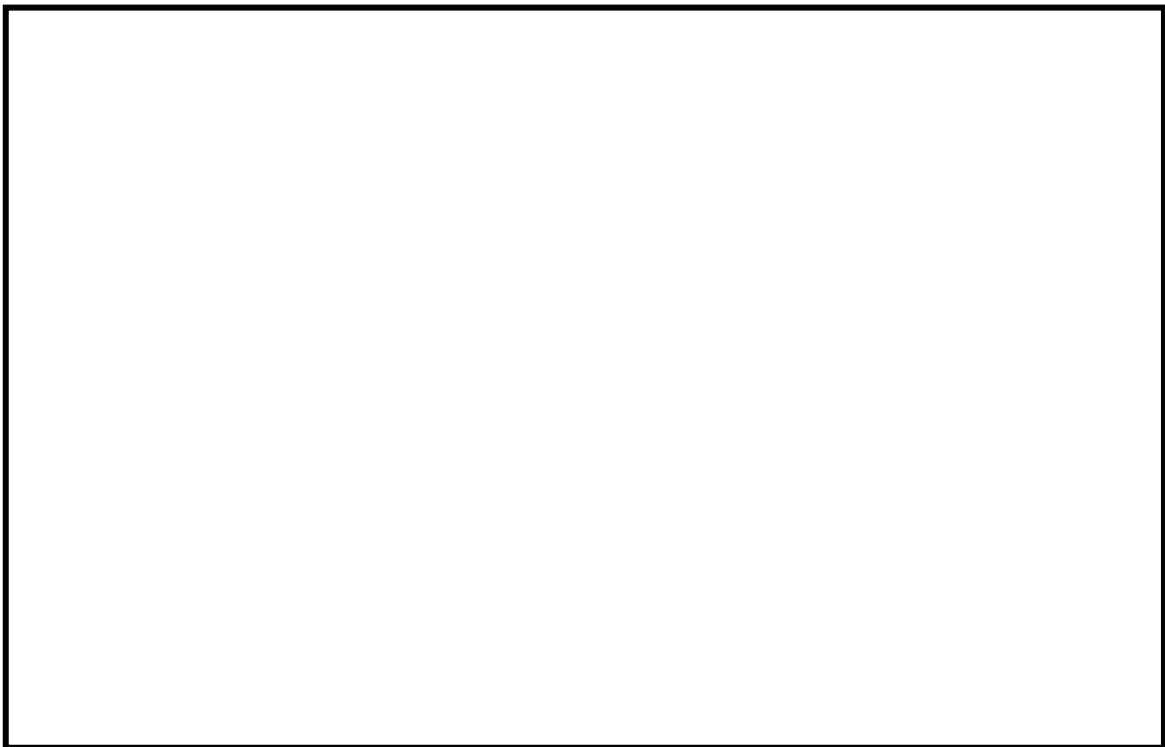
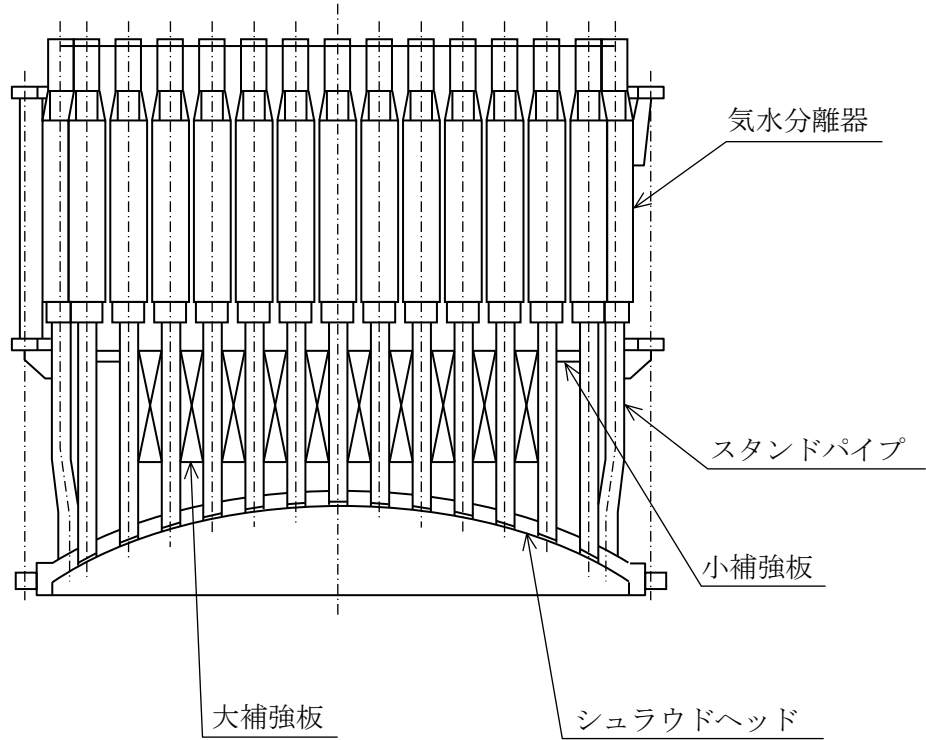
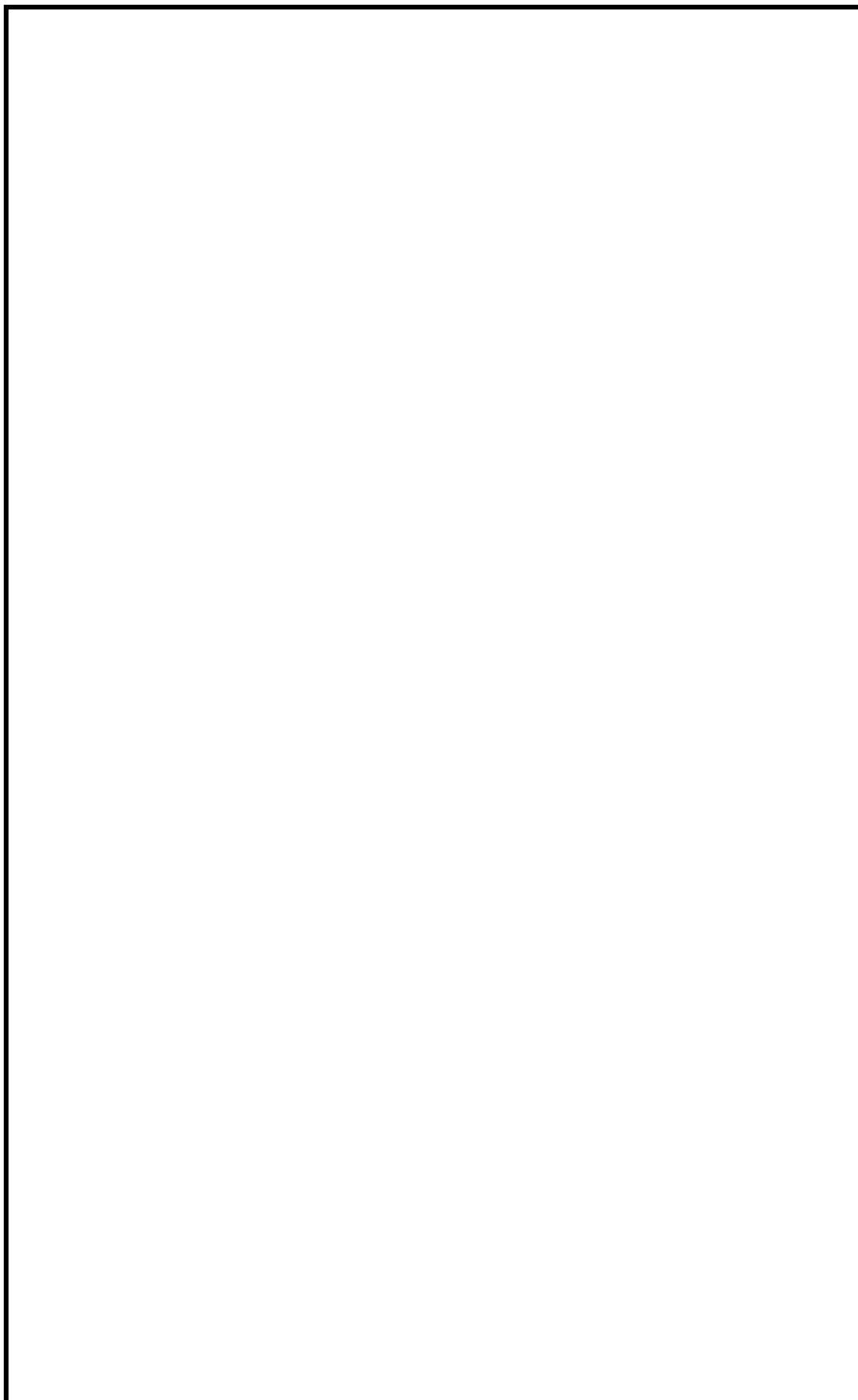


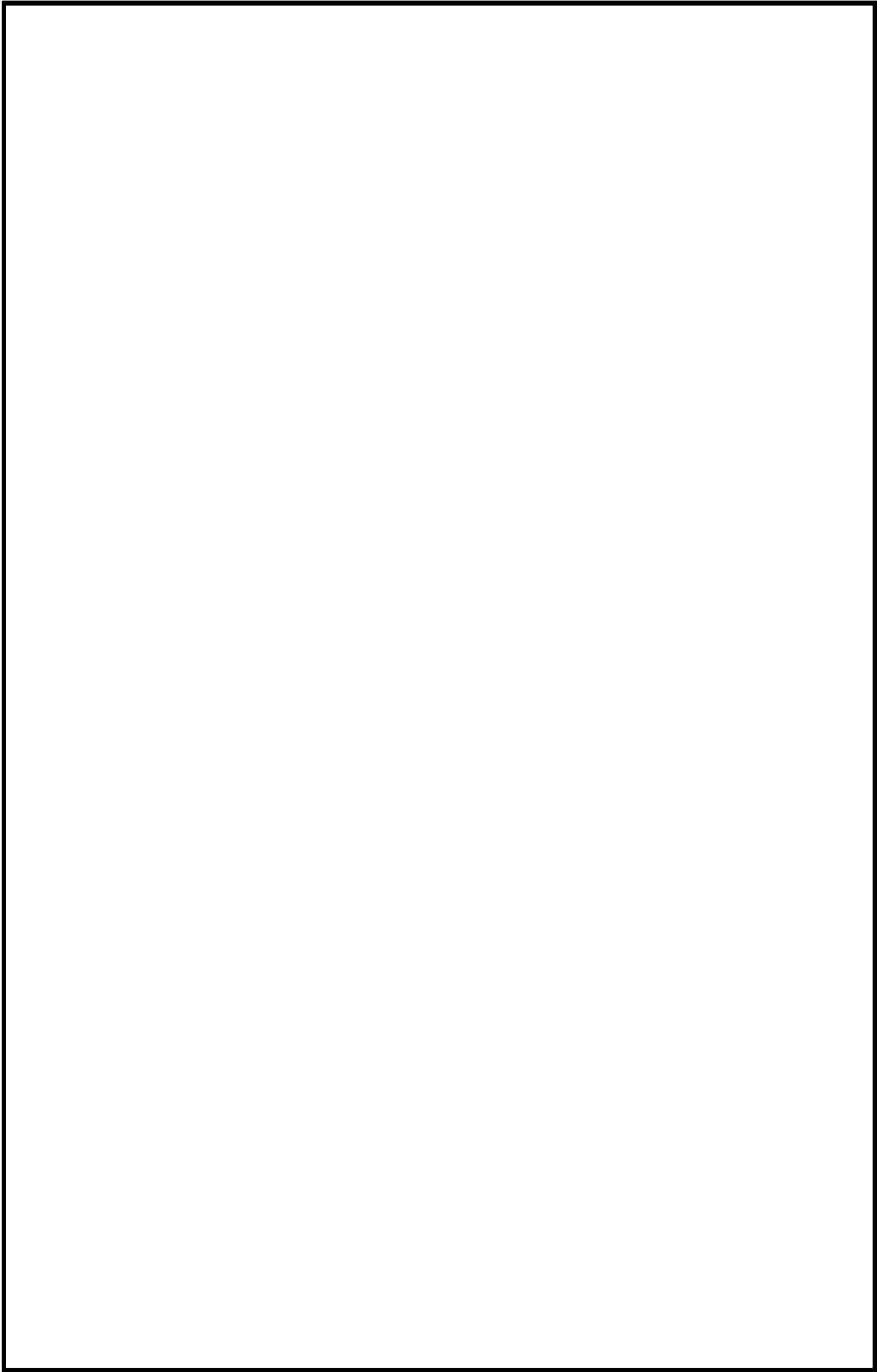
表3 燃料支持金具（周辺燃料支持金具）の継手効率

	適用区分		継手効率	見直し理由
	継手の種類	検査の種類		
今回工認				既工認に記載がなく 今回工認にて設定

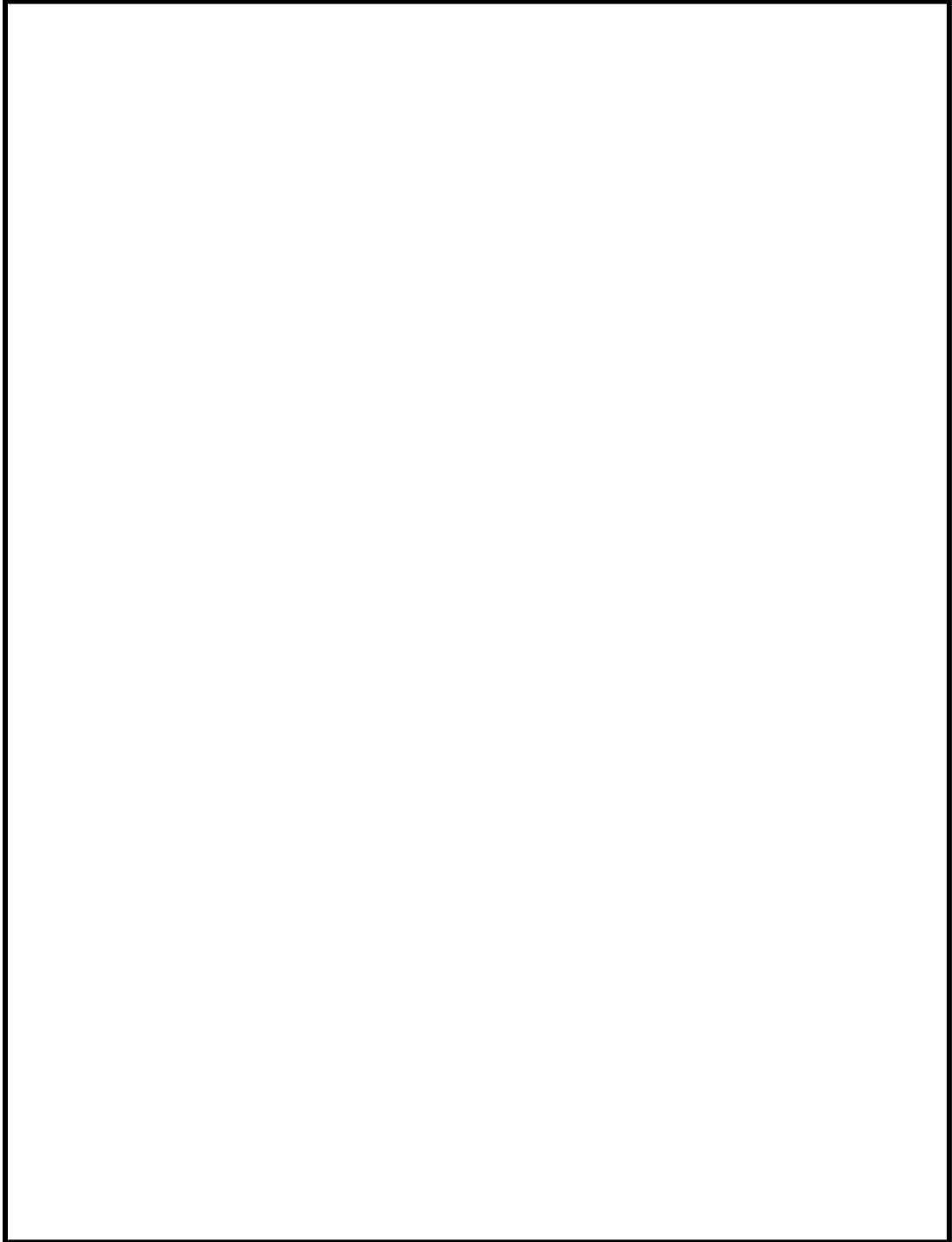
--	--	--	--	--

設計・建設規格（抜粋）





告示 (抜粋)



補足-027-10-74 大型タンク遮断弁の耐震性についての
計算書に関する補足説明資料

目 次

1. 概要.....	1
2. 加振試験の概要.....	3
3. 試験結果.....	9
4. 構造強度評価.....	9
5. まとめ.....	10

1. 概要

島根 2 号機の溢水防護に係る施設である大型タンク遮断弁は、VI-2-別添 2-1「溢水防護に係る施設の耐震計算の方針」に従い、溢水量低減を目的として、基準地震動 S_s に対して十分に動的機能を維持していることを確認する必要がある。

ここで、一般弁の動的機能維持評価については、JGAG4601-1991 及び補足-027-04「動的機能維持の詳細評価について（新たな検討又は詳細検討が必要な設備の機能維持評価について）」に基づき実施しているが、島根 2 号機の大型タンク遮断弁のうち、空気作動ボール弁の駆動部と弁本体構造の組合せは、JGAG4601 に規定されている機種、形式とは異なるため、機能確認済加速度 A_t を設定することを目的として、100A の空気作動ボール弁を用いて加振試験を実施し動的機能の健全性を確認する。なお、本資料が関連する図書は以下のとおり。

- ・ VI-2-別添 2-5 大型タンク遮断弁の耐震性についての計算書

1.1 検討対象

島根 2 号機では、動的機能維持評価の対象設備（耐震 S クラス設備ならびに重大事故等対処設備）として抽出される設備ではないが、地震発生時の内部・外部溢水事象において、大型タンク内の保有水が建物内に持ち込まれないように各大型タンクに接続する配管に隔離弁を設置しており、隔離弁として口径が 100A 及び 150A の空気作動ボール弁が使用されている。これらの弁は、地震後に「開」⇒「閉」となる必要があることから、動的機能維持評価を実施する。

大型タンク遮断弁のうち、動的機能維持評価対象空気作動ボール弁の仕様を表 1-1 に示す。

100A 及び 150A の空気作動ボール弁の構造図を図 1-1 に示す。ボール弁の本体構造は、貫通穴を持つ球状弁体を軸回転して開閉を行う弁構造となっている。

ピストン型の空気作動弁駆動部の構造図を図 1-2 に示す。駆動部型式は、シリンダの内部にばね機構を内蔵したピストン型を採用している。弁棒への駆動力伝達方式は、回転型でありピストンからの推力をラックアンドピニオン機構*により弁棒の回転運動に変換して弁体を回転させる。

注記*：板状又は棒状の歯車と円筒歯車を組み合わせることにより、回転運動を直線運動に、又は直線運動を回転運動に変換する機構

表 1-1 動的機能維持評価対象空気作動ボール弁

弁番号	系統略称	形式	口径	呼び圧力	耐震クラス
AV273-2A/B	FP	空気作動ボール弁	100	JIS10K	C(S_s *)
AV273-1A/B	FP	空気作動ボール弁	150	JIS10K	C(S_s *)

注記*：溢水量低減を目的として、基準地震動 S_s に対する評価を実施する。

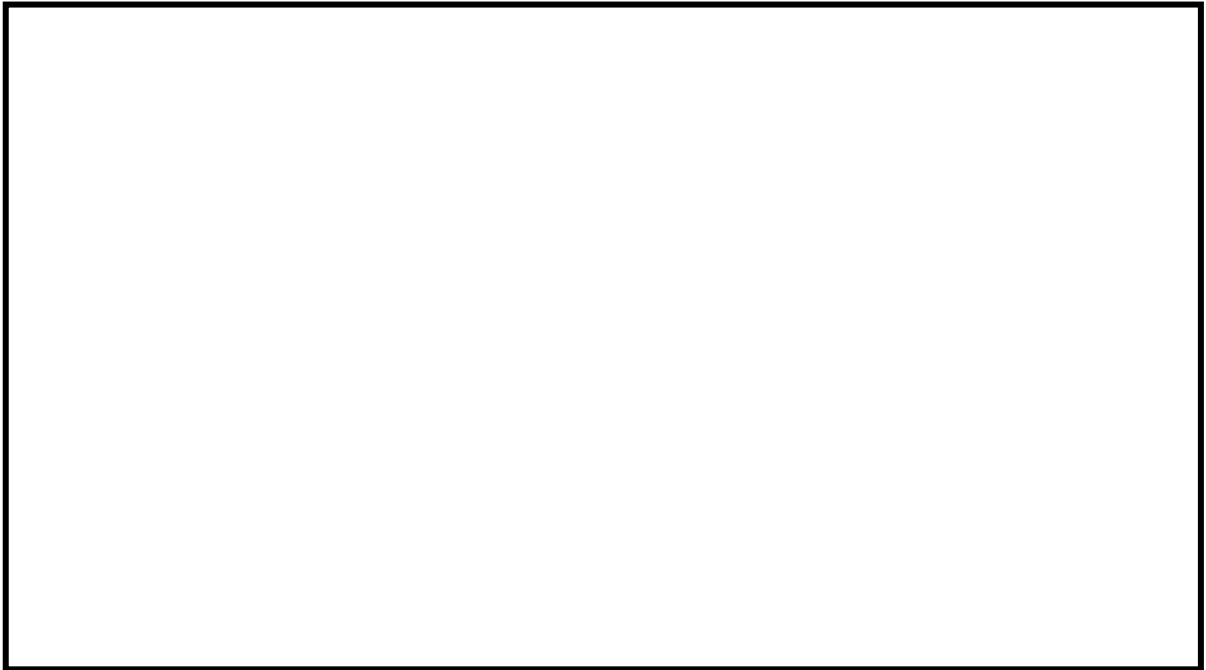


図 1-1 100A と 150A の空気作動ボール弁の構造図

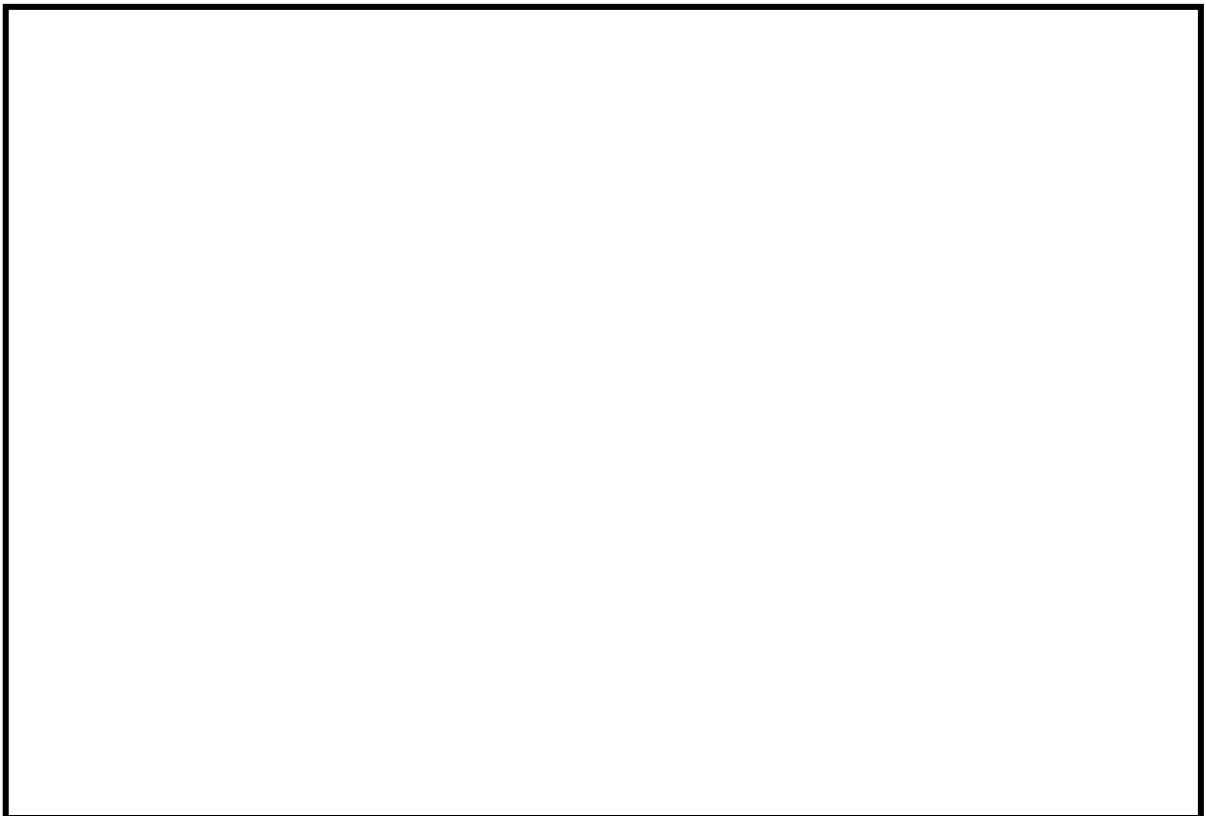


図 1-2 ピストン型の空気作動弁駆動部の構造図

1.2 検討内容

空気作動ボール弁の動的機能維持評価は、JEAG4601の規定を参考に、作動試験、弁座漏えい試験、グラウンド部漏えい試験および構造強度評価を実施した。

加振試験前後に、駆動部の作動機能・信号検出機能の確認としての作動確認、弁本体の耐圧・耐漏えい性の確認としての漏えい試験および流体を保持する弁箱・弁ふた、弁体を作動させる駆動部および両者を結合し駆動部を支持する部分（ヨークおよび弁ふた上部）の構造強度評価を実施する。

加振試験は駆動部、本体、付属品を含めた100Aの空気作動ボール弁を代表として供試体とするが、100Aおよび150Aの作動原理および構造は相似であるため、150Aの作動機能、信号検出機能、耐圧漏えい機能、グラウンド部のシール機能については、100Aの加振試験により確認され、150Aの最弱部の構造強度評価により動的機能維持が可能な加速度の適用性が評価できる。

2. 加振試験の概要

2.1 試験方法

加振試験方法は、振動特性把握試験を実施し固有振動数を求め、基準加速度(鉛直, 水平 6.0 G)の正弦波による加振試験を実施した。また、加振試験に加え、試験前後の性能比較および試験後に分解点検による目視検査を実施することで健全性を確認する。

2.2 試験装置

加振試験の振動試験装置外観を図2-1、加振台仕様を表2-1に示す。



図 2-1 振動試験装置外観

表 2-1 加振台仕様

寸法	1200mm×1200mm
最大積載質量	1000kg
加振力(正弦波)	176kN
運転周波数帯域	1～2000Hz

2.3 試験体

加振試験は駆動部, 本体, 付属品を含めた 100A の空気作動ボール弁を代表として試験体とする。図 2-2 及び表 2-2 に試験体の外形図及び仕様を示す。

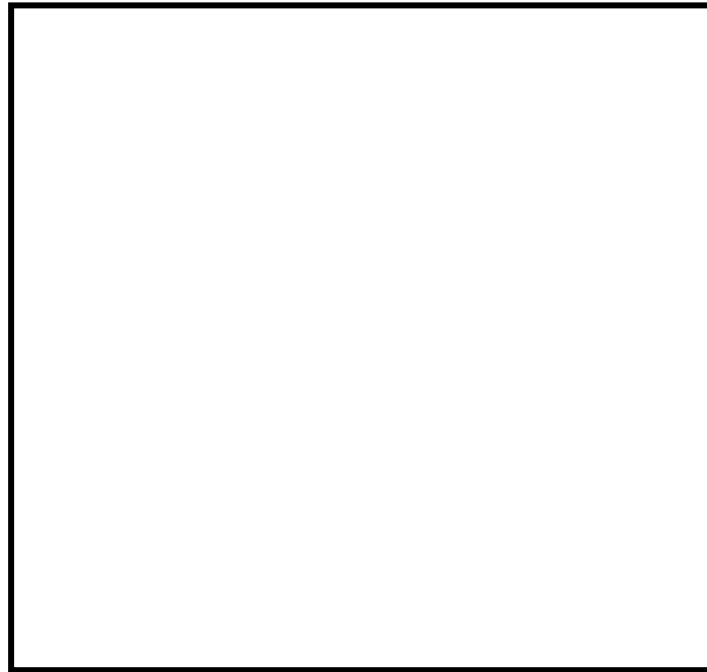


図 2-2 試験体外形図(100A)

表 2-2 試験体仕様(100A)

項目	仕様
弁番号	AV56-2A/B
駆動方式	空気作動式
弁型式	ボール弁
呼び圧力	JIS10K
呼び径	100A
最高使用圧力	0.98 MPa
最高使用温度	40℃
材質	SCPH2
内部流体	水(ろ過水)
耐震クラス	C
全体質量	
駆動部質量	
流路中心軸からの 重心位置	
面間距離	

2.4 振動特性把握試験

試験体に加速度計を取付け、振動特性把握試験を実施し、試験体の固有振動数（あるいは加振振動数範囲に固有振動数がないこと）を確認する。

加振条件は、振動数 5～33Hz の範囲で増加、減少させ、加振方向を 1 軸 3 方向(X 軸, Y 軸, Z 軸)とし、加速度は 0.1G とする。計測センサー取付位置を図 2-3 に示す。

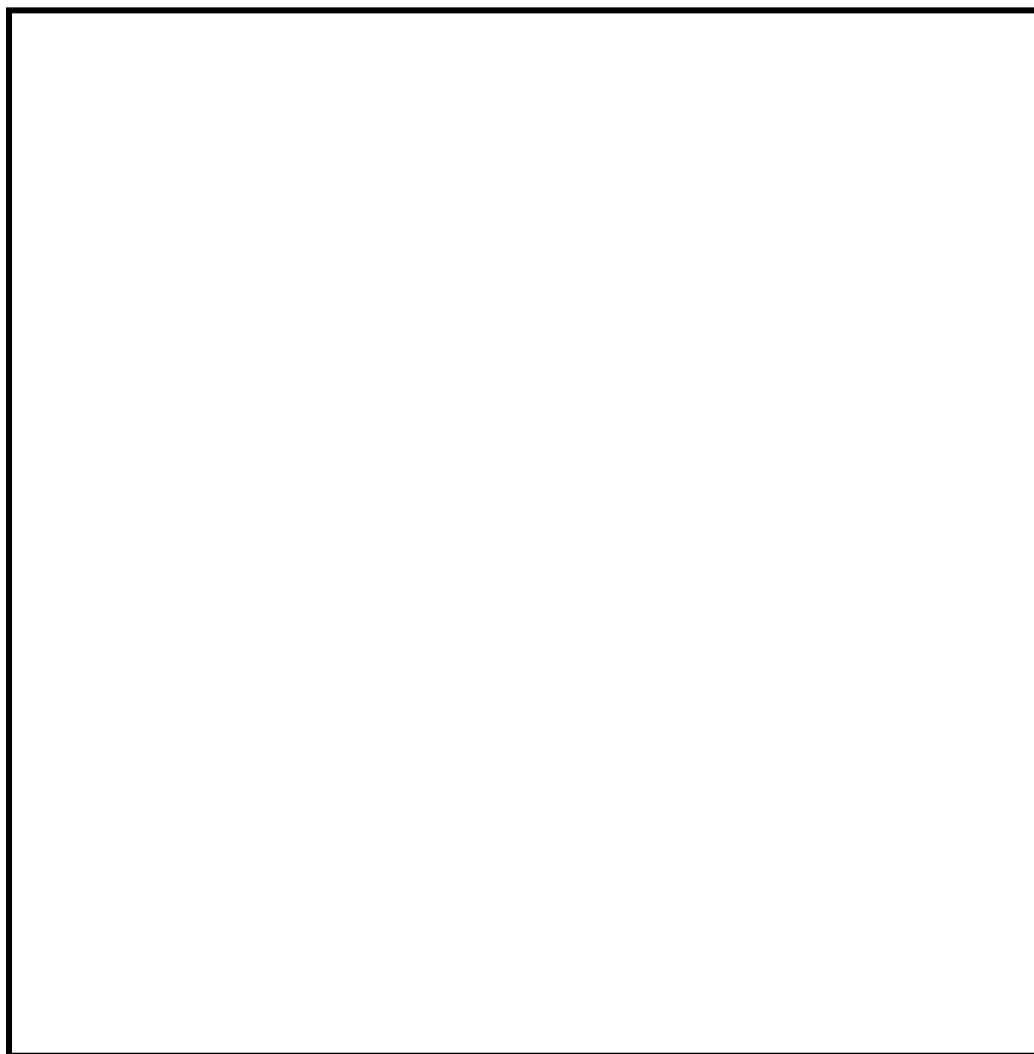


図 2-3 計測センサー取付位置

2.5 加振試験

振動特性把握試験を実施し、Z 方向については 33Hz 以上に固有振動数があるため 33Hz にて加振を実施した。X 方向, Y 方向については 33Hz 以下に固有振動数があるため、固有振動数での加振を実施した。試験により得られた周波数応答関数を図 2-4-1～図 2-4-3 に、各軸方向の固有周期を表 2-3 に示す。

加振時間は、島根 2 号機の等価繰返し回数 150 回を満たす時間以上とするため 15 秒以上とし加振波は正弦波とした。加振試験における試験条件を表 2-4 に示す。

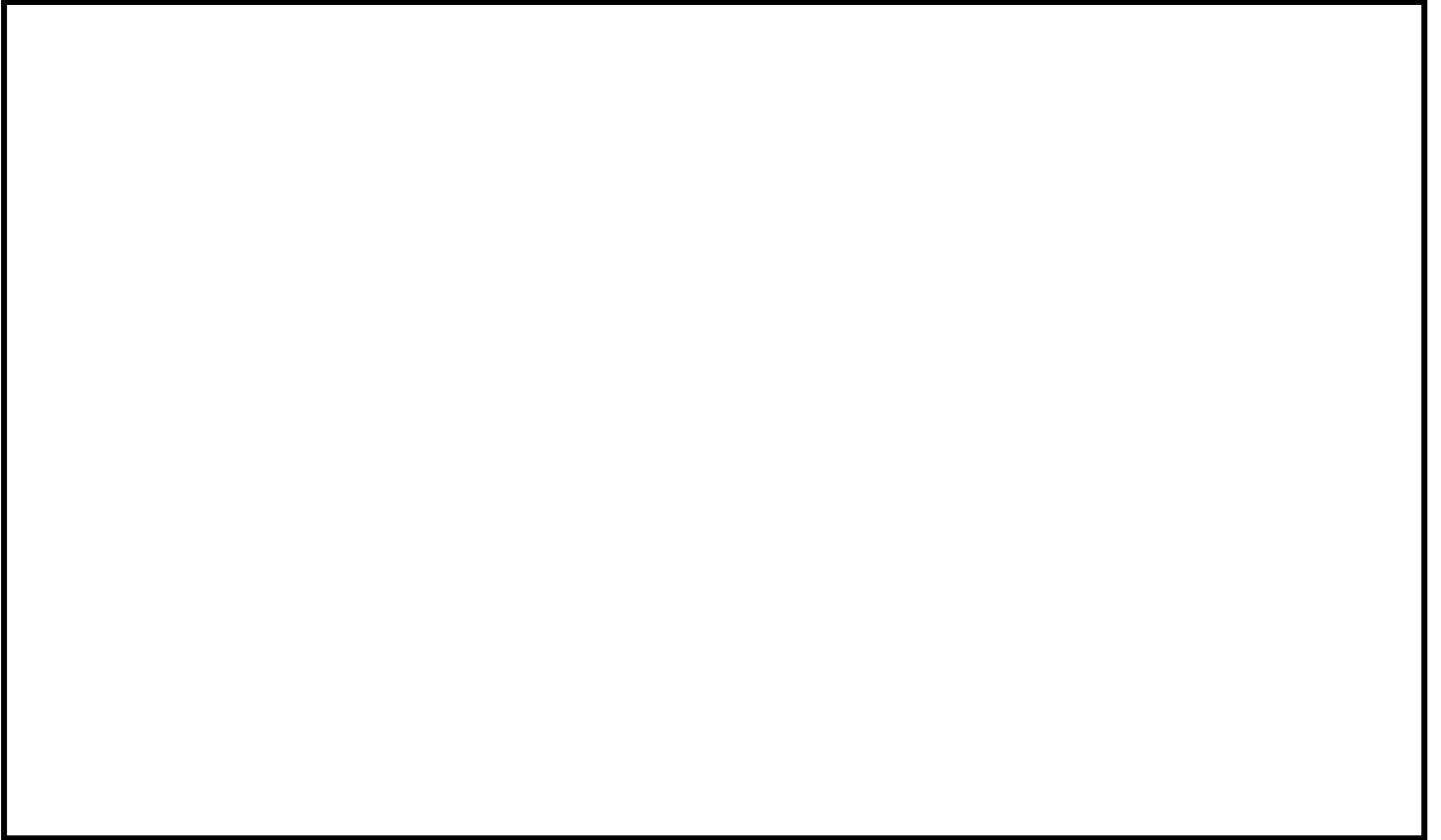


図 2-4-1 周波数応答関数 水平 X 方向

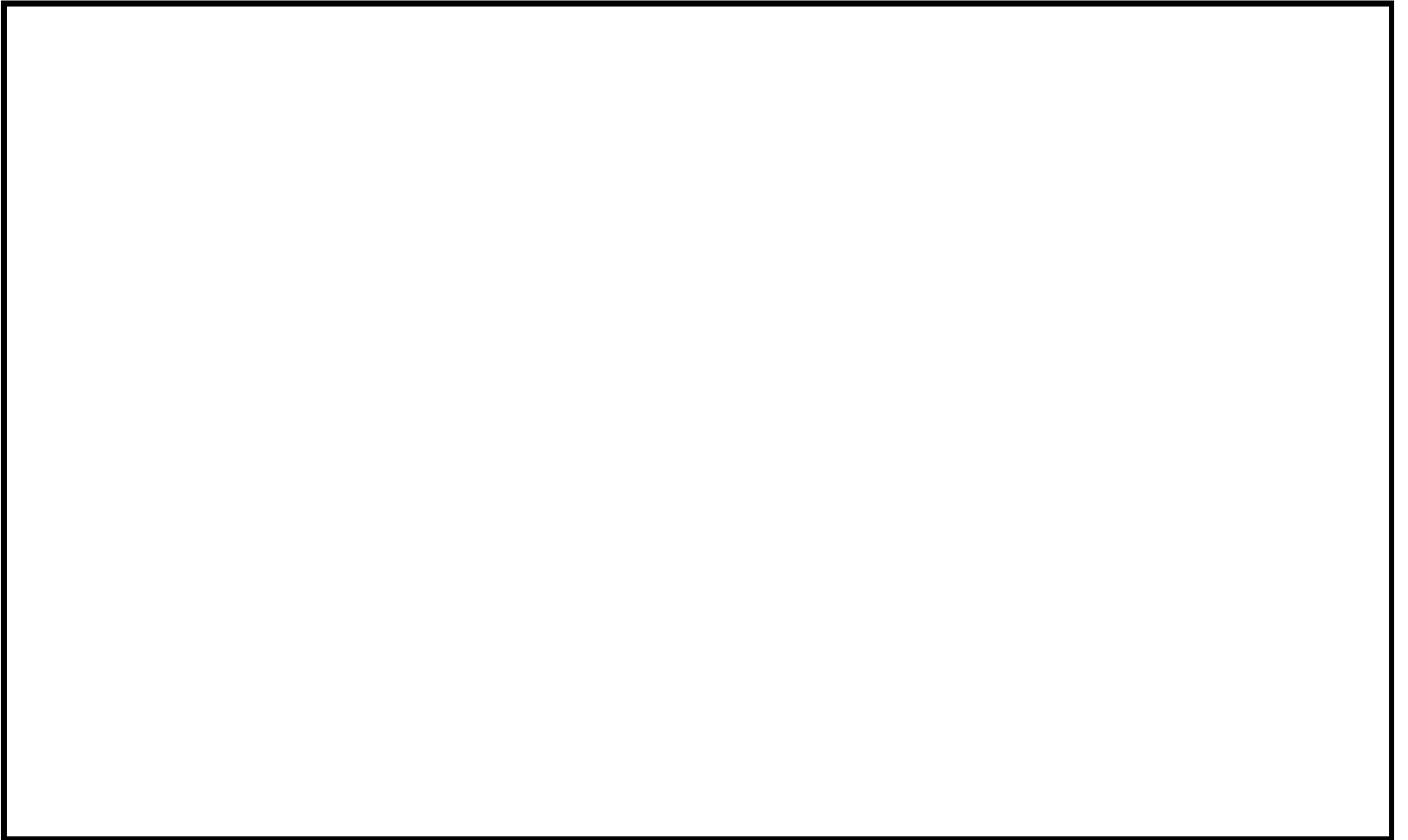


図 2-4-2 周波数応答関数 水平 Y 方向

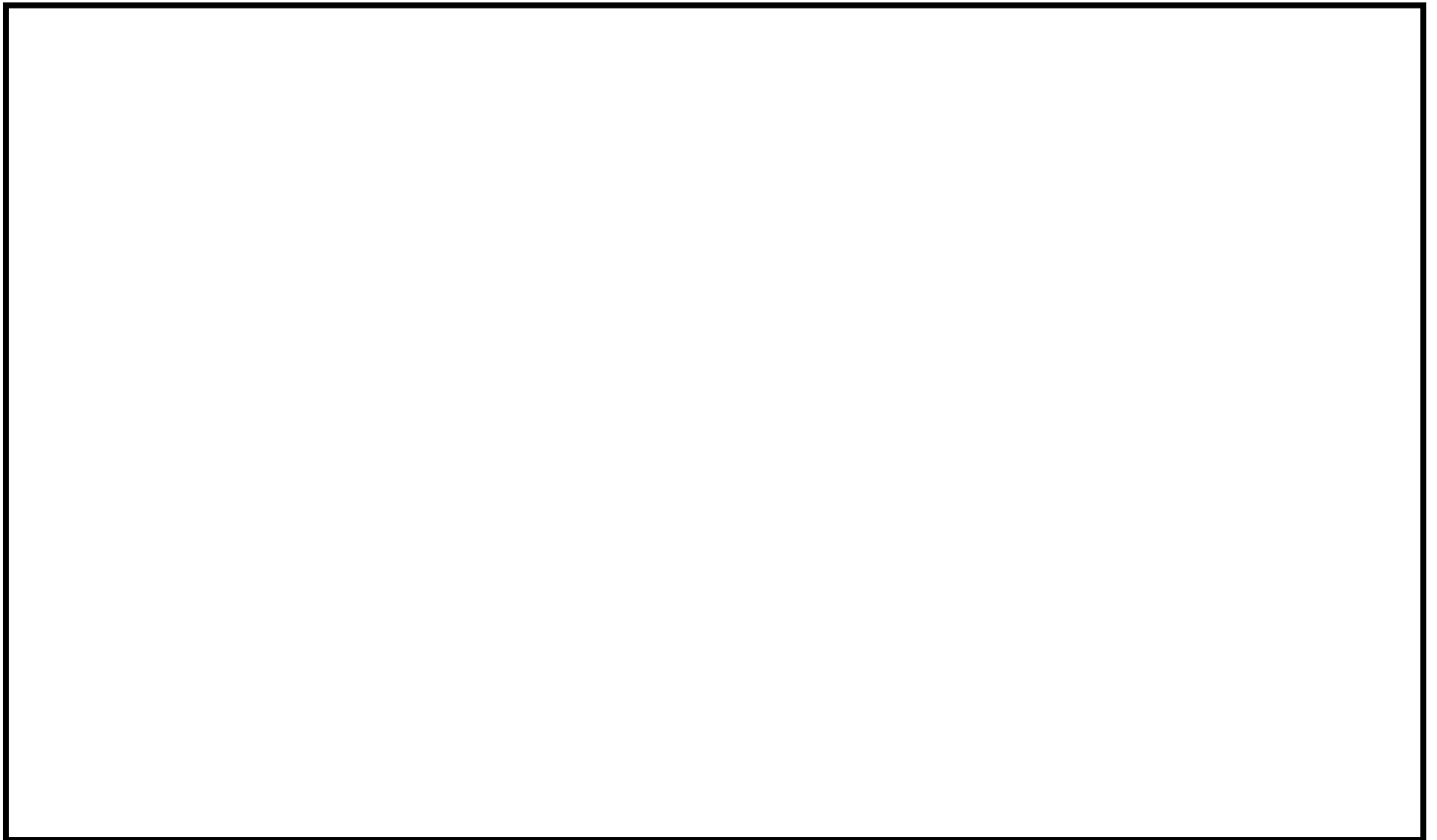


図 2-4-3 周波数応答関数 鉛直 Z 方向

表 2-3 各軸方向の固有周期

方向	固有周期(s)	固有振動数(Hz)
X		
Y		
Z		

表 2-4 加振試験における試験条件

項目	試験条件
加振地震波	正弦波
加振方向	水平 2 方向, 鉛直 1 方向の単軸加振
加振加速度	$6.0 \times 9.80665 \text{m/s}^2$
加振時間	15 秒以上
取付状態	加振台上に設置されたフランジ (治具) にボルトにて取付

3. 試験結果

加振試験中および加振後に、表 3-1 の項目について確認し、異常のないことをもって、本試験における機能確認済加速度を $6.0 \times 9.80665 \text{ m/s}^2$ とした。(表 3-2 に機能確認済加速度と試験時の最大加速度の比較を示す。)

表 3-1 加振試験後の確認結果

確認項目	確認結果
加振台の最大応答加速度が機能確認済加速度以上であること	加振台の最大応答加速度が機能確認済加速度以上であることを確認した。
シール部からの漏えいが基準値以下であること	耐圧漏えい試験において、シール部からの漏えいが無いことを確認した。
加振前後に作動試験を実施し、機器の健全性および動作に異常のないこと	弁単体試験において、加振試験前後で機器の健全性および動作に異常が無いことを確認した。
加振試験後の開放点検において、外観目視上の損傷がないこと	加振試験後の開放点検において、弁内部に弁機能に悪影響を及ぼすような傷、破損が無いことを確認した。

表 3-2 機能確認済加速度と試験時の最大加速度の比較

方向	機能確認済加速度	試験時最大加速度
X	$6.0 \times 9.80665 \text{ m/s}^2$	
Y	$6.0 \times 9.80665 \text{ m/s}^2$	
Z	$6.0 \times 9.80665 \text{ m/s}^2$	

4. 構造強度評価

加振試験は駆動部、本体、付属品を含めた 100A の空気作動ボール弁を代表として供試体とするが、100A および 150A の作動原理および構造は相似であるため、150A の作動機能、信号検出機能、耐圧漏えい機能、グランド部のシール機能については、100A の加振試験により確認され、150A の最弱部の構造強度評価により動的機能維持が可能な加速度の適用性が評価できる。

対象弁の耐震設計上の最弱部である駆動部のヨークにおいて、目標とする基準加速度(水平・鉛直 $6.0 \times 9.80665 \text{ m/s}^2$)により発生する応力をベクトル和により合成した応力が許容値を下回ることを確認した。空気作動ボール弁の最弱部構造強度評価結果を表 4-1 に示す。

表 4-1 空気作動ボール弁の最弱部構造強度評価結果

口径	評価部位	評価用加速度 (m/s^2)	水平方向 (MPa)	鉛直方向 (MPa)	合計* (MPa)	許容値(1.5Sy) (MPa)
100A	ヨーク下部	6.0×9.80665				323
150A	ヨーク下部					

注記*：水平方向の応力と鉛直方向の応力をベクトル和により合成した値

5. まとめ

項目 3, 4 に示す 100A の空気作動ボール弁を用いた加振試験及び 100A, 150A の空気作動ボール弁を用いた最弱部の構造強度評価の結果から、島根 2 号機の空気作動ボール弁の動的機能維持評価において、機能確認済加速度を水平・鉛直 $6.0 \times 9.80665 \text{m/s}^2$ として適用することが可能である。

補足-027-10-75 水圧制御ユニット支持架構の固有周期について

目次

1. はじめに	1
2. 構造	1
3. 解析モデル	3
4. 固有値解析結果	6

1. はじめに

水圧制御ユニット（以下「HCU」という。）の耐震評価では、HCUのフレームを十分に剛な支持架構に取付ボルトにより固定することを前提として、HCUフレーム及び取付ボルトを評価対象としている。

本補足説明資料は、VI-2-6-3-2-1-1「水圧制御ユニットの耐震性についての計算書」における支持架構が剛構造であることを説明するものである。

2. 構造

図 1 に支持架構構造図を示す。なお、HCUは西側と東側の2か所にあるが、同様な設備であるため西側で代表する。

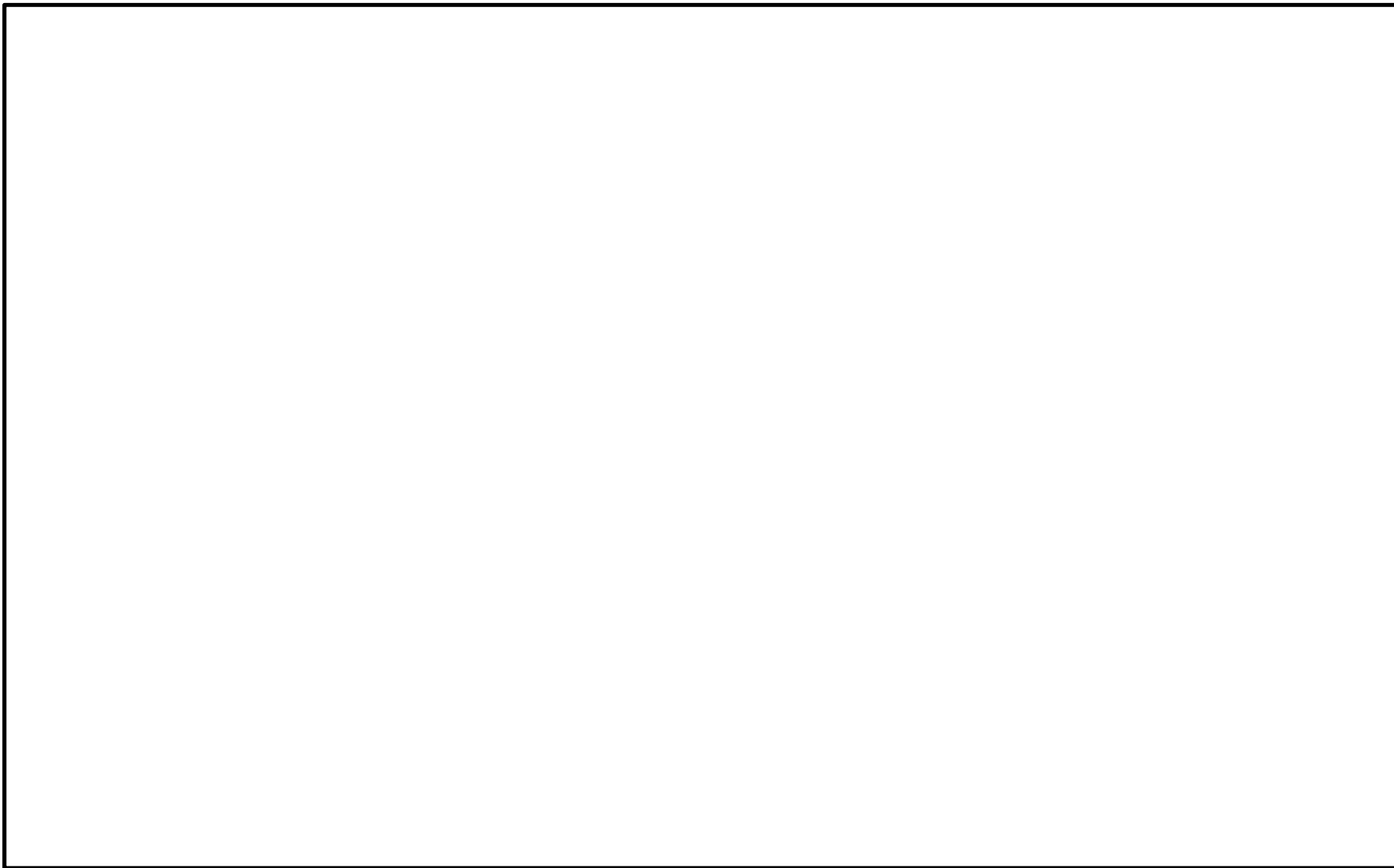


图 1 支持架构造图

3. 解析モデル

支持架構の解析モデルを図 2 に，HCU 支持架構の機器要目を表 1 に，解析モデルの概要を以下に示す。

- (1) 支持架構の解析モデルは HCU も連成させることとし，はり要素を用いた 3 次元の有限要素モデルとする。
- (2) 支持架構の質量は，各節点に等分布に付加する。HCU の質量は，各重心位置（図 2 中の ●）に集中質量として付加する。
- (3) 図 2 中黒線は支持架構（はり要素），青線は HCU の重心位置質点と支持架構を結ぶ剛要素（はり要素）を示す。
- (4) 支持架構の拘束条件は，支持架構下部を完全固定とする。
- (5) 解析コードは「MSC NASTRAN」を使用し，固有値を求める。

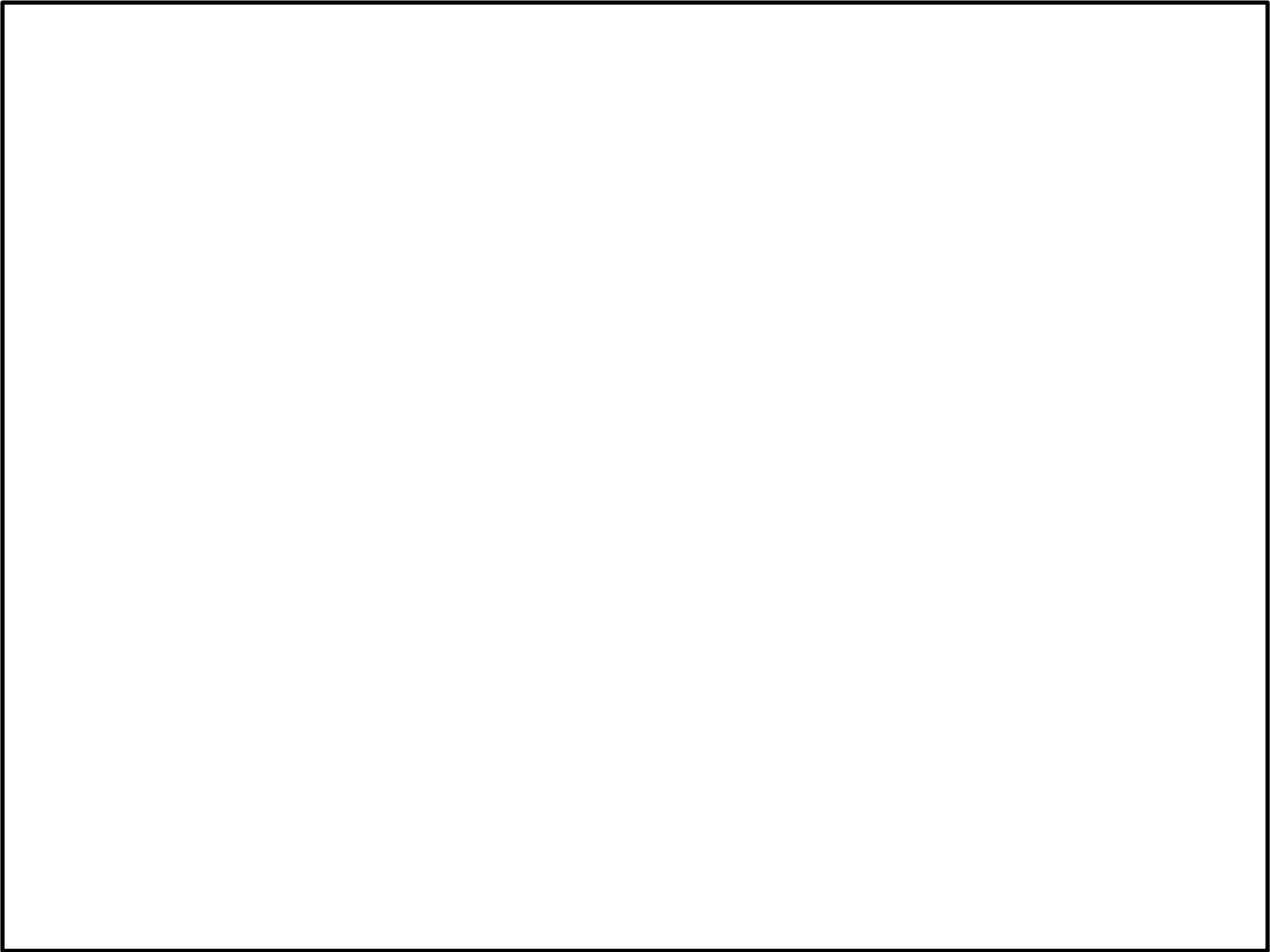




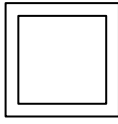



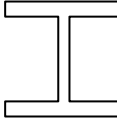

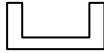




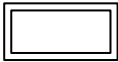







図 2 HCU 支持架構解析モデル

表 1 HCU 支持架構の機器要目

材料				
対象要素	①	②	③	④
断面形状	 	 	 	 
材料				
対象要素	⑤	⑥	⑦	
断面形状	 	 	 	

4. 固有値解析結果

支持架構の固有値解析結果を表 2 に、振動モード図を図 3 に示す。固有周期は 0.05 秒以下であり、剛構造であることを確認した。

表 2 固有値解析結果

モード	固有周期(s)	水平方向刺激係数		鉛直方向刺激係数
		X方向	Z方向	
1次	0.048	—	—	—

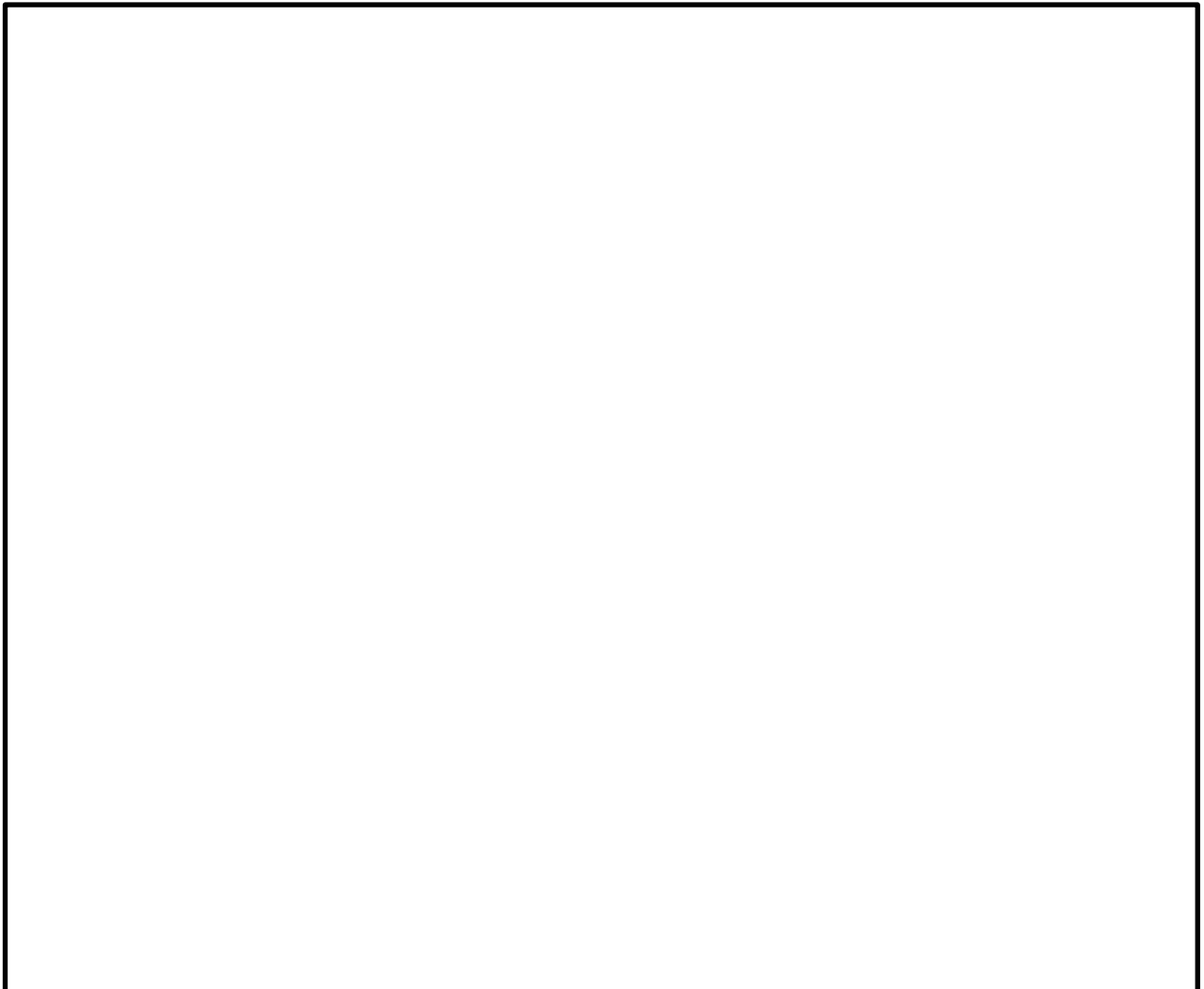


図 3 振動モード (1次モード 0.048s)

補足-027-10-76 弁の応答加速度と駆動部の
動作機能確認済加速度の比較の考え方について

目 次

1. はじめに.....	1
2. 弁の A_T 及び A_{T1} の設定	1
3. 機能確認済加速度 A_T 及び動作機能確認済加速度 A_{T1} の考え方(許容加速度の設定) について.....	3
4. 弁の応答加速度の算出方法について	4
5. 島根 2 号機における弁の動的機能維持評価手法について	6
6. まとめ.....	7

1. はじめに

島根 2 号機では、機能確認済加速度 A_T との比較による動的機能維持評価の結果、機能維持評価用加速度が機能確認済加速度 A_T を超える弁（以下「 A_T 超過弁」という。）について、弁駆動部の動作機能確認済加速度 A_{T1} を用いた詳細評価を実施する。

A_T 超過弁の詳細評価においては、水平及び鉛直方向それぞれに対して弁駆動部の動作機能確認済加速度 A_{T1} を設定し、水平及び鉛直方向それぞれの機能維持評価用加速度を合成した加速度と比較する方針としており、その考え方を本資料にて示す。

なお、本資料が関連する工認図書は以下のとおり。

- ・「VI-2-1-14 機器・配管系の計算書作成の方法」

2. 弁の A_T 及び A_{T1} の設定

原子力発電所耐震設計技術指針（以下「J E A G 4 6 0 1」という。）における弁の地震時機能維持評価では、機能維持評価用加速度と機能確認済加速度 A_T との比較による機能維持評価及び A_T 超過弁における動作機能確認済加速度 A_{T1} との比較及び構造強度評価による詳細評価が示されている。

弁を含む原子力発電所における安全上重要な系統に属する動的機器は、想定される地震動に対する構造健全性に加えて、動的機能維持が要求されることから、既往の動的機能維持確認試験によって、機能確認済加速度 A_T や動作機能確認済加速度 A_{T1} が設定されている。

弁の A_T 及び A_{T1} の設定方法を以下に示す。

(1) 機能確認済加速度 A_T の設定

「動的機器の地震時機能維持に関する研究」（昭和 55 年度上期～昭和 57 年度下期）において、動的機器を対象に試験又は解析による地震時の動的機能維持確認を実施し、本結果に基づく一般的解析手法の開発及び評価基準の確立を図った。

弁においては、加振試験から得られた弁最弱部の発生応力の余裕度評価により、水平地震動に対する機能確認済加速度 A_T を設定し、J E A G 4 6 0 1 に本成果が反映された。

その後、鉛直方向地震力についても水平地震動と同様に動的地震力を導入した場合の検討が進められ、「鉛直地震動を受ける設備の耐震評価手法に関する研究」（平成 10 年 11 月～平成 13 年 9 月）において、動的機器の鉛直地震動に対する機能維持確認試験を実施し、鉛直方向に関する機器・配管系の耐震設計手法を確立するための検討を実施した。

弁においては鉛直方向、水平＋鉛直方向の加振試験を実施することで、水平・鉛直地震動に対する機能確認済加速度 A_T を設定し、「原子力発電所耐震設計技術規程」（以下「J E A C 4 6 0 1」という。）に本成果が反映された。

<原子力発電所耐震設計技術規程(J E A C 4 6 0 1 -2015) A_T の記載抜粋>

- ・一般弁 : 水平 $6.0 \times 9.8 \text{m/s}^2$, 鉛直 $6.0 \times 9.8 \text{m/s}^2$
(グローブ弁, ゲート弁, バタフライ弁, 逆止弁)
- ・主蒸気隔離弁 : 水平 $10.0 \times 9.8 \text{m/s}^2$, 鉛直 $6.2 \times 9.8 \text{m/s}^2$
- ・主蒸気逃がし安全弁 : 水平 $9.6 \times 9.8 \text{m/s}^2$, 鉛直 $6.1 \times 9.8 \text{m/s}^2$

(2) 動作機能確認済加速度 A_{T1} の設定

動作機能確認済加速度 A_{T1} は, 既往試験等により駆動部の動作機能維持が確認されている弁駆動部の応答加速度と定義する。

A_{T1} は J E A C 4 6 0 1 に規定されていないため, 電力共通研究*1~*4(以下「電共研」という。)の加振試験の知見を適用する(詳細については, 補足-027-04「動的機能維持の詳細評価について」を参照)。

電共研の加振試験では, 水平2方向及び鉛直方向に対してそれぞれ1方向加振を行い, 動作機能確認済加速度を設定した。

注記*1: 電動弁駆動部の動作機能確認済加速度向上に関する研究(2013年2月~2016年12月)

*2: 空気作動弁駆動部の動作機能確認済加速度向上に関する研究(2017年3月~2021年3月)

*3: 主蒸気逃がし安全弁の機能維持確認済加速度向上に関する研究(2012年12月~2016年3月)

*4: 主蒸気隔離弁の機能維持確認済加速度向上に関する研究(2017年2月~2021年3月)

3. 機能確認済加速度 A_T 及び動作機能確認済加速度 A_{T1} の考え方（許容加速度の設定）について

(1) 機能確認済加速度 A_T の設定

機能確認済加速度 A_T の設定の際に実施された「鉛直地震動を受ける設備の耐震評価手法に関する研究」では、水平・鉛直方向の同時加振試験、解析による水平・鉛直の機能確認済加速度における最弱部発生応力の余裕度評価及び解析による水平・鉛直の機能確認済加速度における弃体挙動評価を実施していることから、機能維持が確認された領域は、図1に示すような円柱状の範囲を有すると考えられる。よって、水平及び鉛直方向それぞれ方向の機能維持評価用加速度が機能確認済加速度 A_T を下回っていることを確認することで、水平及び鉛直方向を合成した機能維持評価用加速度についても、機能維持が確認できる。

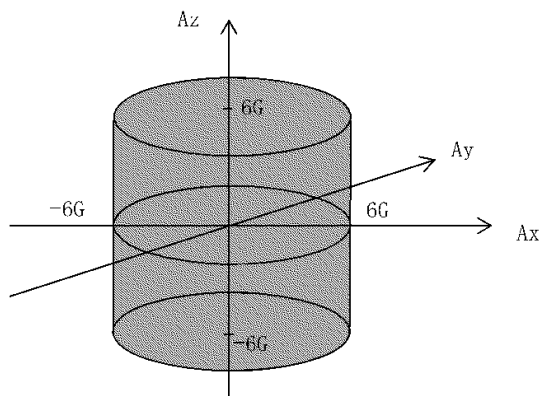


図1 機能確認済加速度 A_T の範囲

(2) 動作機能確認済加速度 A_{T1} の設定

動作機能確認済加速度 A_{T1} の設定の際に実施された電共研の加振試験では、試験体の形状や駆動方向等を考慮した主要な3軸方向に加振し、駆動部の動作機能維持確認を行っている。

加振方向の設定にあたっては、評価断面の剛性を考慮して弱軸方向を設定し、弱軸方向への加振による構造強度及び動作機能の確認を行っていることから、他の方向への加振に対して安全側の評価となっている。

以上のことから、加振試験に基づき機能維持が確認された領域は、図2に示すとおり、水平方向の動作機能確認済加速度 A_{T1H} 及び鉛直方向の動作機能確認済加速度 A_{T1V} を半径とした球形状の範囲を有すると考えられる。

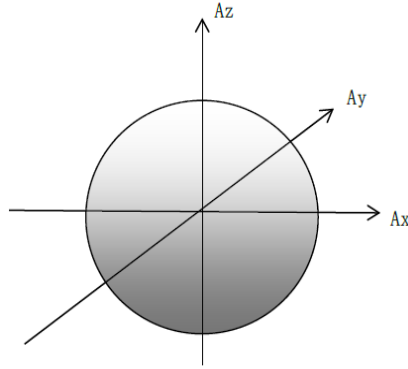


図2 動作機能確認済加速度 A_{T1} の範囲
(水平方向と鉛直方向の動作機能確認済加速度が同値の場合)

4. 弁の応答加速度の算出方法について

配管系は 3 次元の振動モードを有しており、建物等からの加振入力方向と異なる方向に対しても応答が生じるため、NS, EW, UD それぞれの入力方向に対し、x, y, z の各軸方向の応答加速度が得られる。i 次モードにおける各軸方向の弁駆動部の応答加速度の記号を表 1 のとおり定義すると、i 次モードにおける各軸方向の応答加速度は、NS, EW, UD それぞれの入力方向の非同時性を考慮して、以下の式で表される。

$$\alpha_{ix} = \sqrt{\alpha_{ix(NS)}^2 + \alpha_{ix(EW)}^2 + \alpha_{ix(UD)}^2}$$

$$\alpha_{iy} = \sqrt{\alpha_{iy(NS)}^2 + \alpha_{iy(EW)}^2 + \alpha_{iy(UD)}^2}$$

$$\alpha_{iz} = \sqrt{\alpha_{iz(NS)}^2 + \alpha_{iz(EW)}^2 + \alpha_{iz(UD)}^2}$$

上記にて求めた i 次モードにおける各軸方向の弁駆動部の応答加速度について、各モードの重ね合わせをすることで、各軸方向の弁駆動部の応答加速度が得られる。この時、各軸方向の弁駆動部の応答加速度は、各モードの非同時性を考慮して、以下の式で表される。

- x 方向応答加速度： $a_x = \sqrt{a_{1x}^2 + a_{2x}^2 + \dots + a_{ix}^2 + \dots}$
- y 方向応答加速度： $a_y = \sqrt{a_{1y}^2 + a_{2y}^2 + \dots + a_{iy}^2 + \dots}$
- z 方向応答加速度： $a_z = \sqrt{a_{1z}^2 + a_{2z}^2 + \dots + a_{iz}^2 + \dots}$

表 1 i 次モードにおける各軸方向の弁駆動部の応答加速度の記号

		入力地震動の方向		
		NS	EW	UD
応答 加 速 度 方 向	x	$a_{ix(NS)}$	$a_{ix(EW)}$	$a_{ix(UD)}$
	y	$a_{iy(NS)}$	$a_{iy(EW)}$	$a_{iy(UD)}$
	z	$a_{iz(NS)}$	$a_{iz(EW)}$	$a_{iz(UD)}$

5. 島根 2 号機における弁の動的機能維持評価手法について

島根 2 号機における機能確認済加速度 A_T 及び動作機能確認済加速度 A_{T1} と比較する機能維持評価用加速度については、機能確認済加速度 A_T 及び動作機能確認済加速度 A_{T1} （許容加速度）の設定方法を踏まえて設定する。2 及び 3 項に示すとおり、機能確認済加速度 A_T は水平+鉛直方向の加振試験及び解析により、動作機能確認済加速度 A_{T1} は水平 2 方向及び鉛直方向に対してそれぞれ 1 方向加振試験により設定している。機能確認済加速度 A_T 及び動作機能確認済加速度 A_{T1} の範囲のイメージを図 3 に示す。

機能確認済加速度 A_T は、水平+鉛直方向の加振試験及び解析により設定していることから、図 3 の赤枠のように表すことができる。したがって、水平及び鉛直方向それぞれの機能維持評価用加速度が機能確認済加速度 A_T 以下であれば、加振試験及び解析により機能維持が確認された範囲内であり、弁の動的機能維持が確認できる。

動作機能確認済加速度 A_{T1} は、水平 2 方向及び鉛直方向に対してそれぞれ 1 方向加振試験により設定していることから、図 3 の青枠のように表すことができる。水平及び鉛直方向それぞれの機能維持評価用加速度のベクトル和した値が各方向の動作機能確認済加速度 A_{T1} 以下であれば、加振試験により機能維持が確認された範囲内であり、弁の動的機能維持が確認できる。

島根 2 号機における弁の動的機能維持評価手法を表 2 に示す。

表 2 島根 2 号機における弁の動的機能維持評価手法

評価項目	各軸方向の弁駆動部の 応答加速度の合成方法	機能維持評価用 加速度	比較方法
機能確認済加速度 A_T との比較	水平：水平 2 方向の応答加 速度をベクトル和 鉛直：鉛直方向の応答加 速度	$\sqrt{\alpha_x^2 + \alpha_y^2}, (\alpha_z)$	$\sqrt{\alpha_x^2 + \alpha_y^2} \leq A_{TH},$ $\alpha_z \leq A_{TV}$
動作機能確認済 加速度 A_{T1} との比 較	水平 2 方向及び鉛直方向の 応答加速度をベクトル和	$\sqrt{\alpha_x^2 + \alpha_y^2 + \alpha_z^2}$	$\sqrt{\alpha_x^2 + \alpha_y^2 + \alpha_z^2}$ $\leq \text{MIN}(A_{T1H}, A_{T1V})$

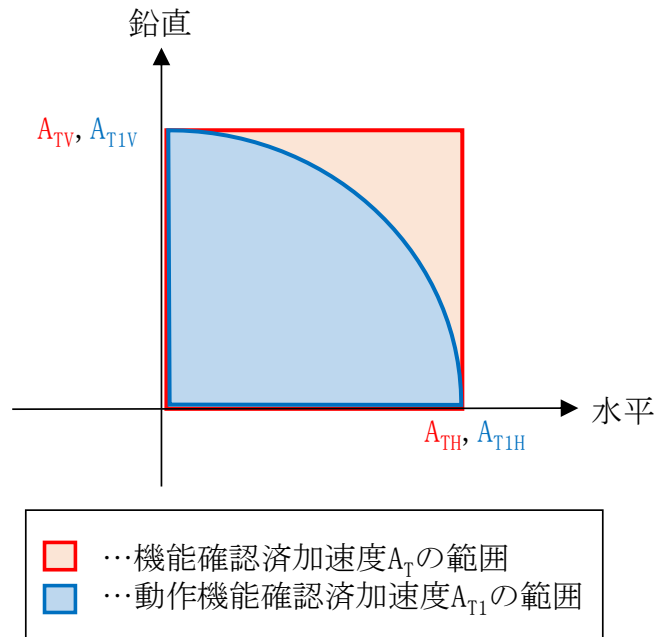


図3 機能確認済加速度 A_T 及び動作機能確認済加速度 A_{T1} の範囲のイメージ

6. まとめ

島根2号機においては、機能確認済加速度 A_T との比較では、機能維持評価用加速度として水平2方向をベクトル和した加速度及び鉛直方向の加速度を用いる。また、動作機能確認済加速度 A_{T1} との比較では、機能維持評価用加速度として水平2方向及び鉛直方向の加速度をベクトル和した加速度を用いる。具体的な耐震計算書の記載方法を図4に、補足説明資料の記載例を表3に示す。

・FORMAT 耐—12：

弁の動的機能維持の評価結果

下表に示すとおり水平及び鉛直方向の機能維持評価用加速度が機能確認済加速度以下又は水平及び鉛直方向を合成した機能維持評価用加速度が動作機能確認済加速度以下かつ計算応力が許容応力以下である。

弁 番号	形式	要求 機能*1	機能維持評価用 加速度 ($\times 9.8\text{m/s}^2$)			機能確認済 加速度 ($\times 9.8\text{m/s}^2$)		詳細評価*2, *3						
			水平	鉛直	合成*3, *4	水平	鉛直	動作機能確認済 加速度 ($\times 9.8\text{m/s}^2$)		構造強度評価結果 (MPa)				
								水平	鉛直	評価 部位	応力 分類	計算 応力	許容 応力	

注：評価対象がない場合はすべての欄に「—」と記載する。

構造強度評価について裕度が最小となる部位の評価結果を記載する。

注記*1：弁に要求される機能に応じて以下を記載する。

α (S s)：基準地震動 S s，弾性設計用地震動 S d 時に動的機能が要求されるもの

β (S s)：基準地震動 S s，弾性設計用地震動 S d 後に動的機能が要求されるもの

*2：水平又は鉛直方向の機能維持評価用加速度が機能確認済加速度を超過する場合は詳細評価を実施し，水平及び鉛直方向を合成した機能維持評価用加速度が動作機能確認済加速度の最小値以下かつ計算応力が許容応力以下であることを確認する。

*3：詳細評価を実施しない場合は「—」を記載する。

*4：水平及び鉛直方向の機能維持評価用加速度をベクトル和により合成した値であり，詳細評価を実施する場合に使用する。

図4 機器・配管系の計算書作成の方法における A_T 超過弁の記載方法

表 3 補足説明資料における A_T 超過弁の記載例*¹

No.	系統	弁番号	弁名称	弁型式	方向	MAX (50Hz, 1. 2ZPA)			MAX (100Hz, 1. 2ZPA)			増加率 (②/①)	50Hz→100Hz での増加値の 機能確認済加 速度に対する 比率* ⁴ ((②-①)/③)	判定 区分* ⁵
						機能維 持評価 用加速 度* ² (①)	機能又 は動作 機能確 認済加 速度* ³ (③)	裕度	機能維 持評価 用加速 度* ² (②)	機能又 は動作 機能確 認済加 速度* ³ (③)	裕度			
1	MS	RV202- 1A	A-主 蒸気逃 がし安 全弁	逃がし 安全弁	水平	12.05	20.00	1.65	12.05	20.00	1.65	1.00	—	A
						12.05			12.05					
						3.18			3.18					
					鉛直	5.52	20.00	3.62	5.62	20.00	3.55	1.02	—	
						5.52			5.62					
						1.44			1.44					
					合成	13.26	20.00	1.50	13.30	20.00	1.50	1.01	—	

注記*1：加速度の単位は[G]である。

*2：上段が動的解析結果（50Hz 又は 100Hz）と最大加速度（1. 2ZPA）における最大値，中段が動的解析結果（50Hz 又は 100Hz）の値，下段が最大加速度（1. 2ZPA）の値。配管系が剛構造の場合は中段の動的解析結果に「—」を記載する。

*3：機能確認済加速度以下となる弁については機能確認済加速度，機能確認済加速度を超過する弁については動作機能確認済加速度を記載する。

*4：機能確認済加速度を超過し詳細評価を実施する弁については，判断基準から除外する。

*5：機能確認済加速度を超過した評価値については「A」，振動数領域を 50Hz にした場合の応答加速度と振動数領域を 100Hz にした場合の応答加速度を比較して有意な応答増加が確認された評価値については「B」を記載する。

補足-027-10-77 蓄電池の耐震性についての計算書に関する
補足説明資料

目 次

1. 概要.....	1
2. 蓄電池架台評価.....	1
2.1 構造概要.....	1
2.2 蓄電池固定方法.....	4
2.3 代表蓄電池の選定.....	6
2.4 適用規格・基準等.....	6
2.5 記号の説明.....	7
2.6 評価方針.....	8
3. 評価部位及び評価方法.....	9
3.1 蓄電池架台の評価部位及び評価方法.....	9
3.1.1 柱 (①)	9
3.1.2 長側枠 (②)	10
3.1.3 短側枠 (③)	11
3.1.4 電池台 (④)	12
3.1.5 受梁 (⑤)	13
4. 固有周期.....	14
4.1 固有周期の確認.....	14
5. 構造強度評価.....	14
5.1 荷重の組合せ及び許容応力.....	14
5.1.1 荷重の組合せ及び許容応力状態.....	14
5.1.2 許容応力.....	14
5.1.3 使用材料の許容応力評価条件.....	14
5.2 設計用地震力.....	17
5.3 計算方法.....	18
5.3.1 柱 (①)	18
5.3.2 長側枠 (②)	19
5.3.3 短側枠 (③)	20
5.3.4 電池台 (④)	20
5.3.5 受梁 (⑤)	21
5.4 計算条件.....	23
5.4.1 蓄電池架台の応力計算条件.....	23
5.5 応力の評価.....	23
5.5.1 蓄電池架台の応力評価.....	23
6. 評価結果.....	25
6.1 重大事故等対処設備としての評価結果.....	25

1. 概要

本資料は、蓄電池の耐震性に関連して、蓄電池を設置する架台の構造強度について説明するものである。蓄電池架台の評価においては、代表蓄電池を選定して、地震力により蓄電池架台の各構成部材に生じる応力が許容限界内に収まることを確認する。

工認添付書類の関連図書を表 1-1 に示す。

表 1-1 工認添付書類の関連図書

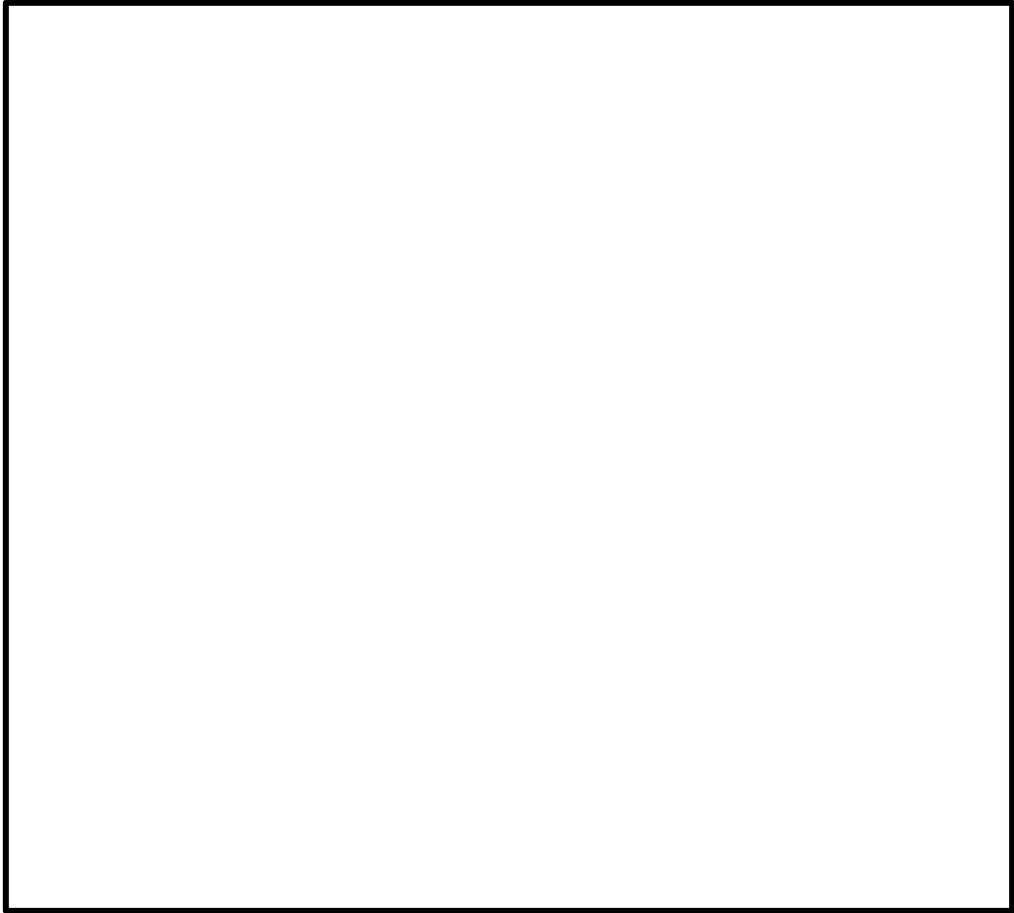
図書番号	図書名称
VI-2-10-1-2-3-7	緊急用直流 115V 蓄電池の耐震性についての計算書
VI-2-10-1-2-3-8	緊急用直流 60V 蓄電池の耐震性についての計算書
VI-2-10-1-3-5	230V 系蓄電池 (RCIC) の耐震性についての計算書
VI-2-10-1-3-6	A-115V 系蓄電池の耐震性についての計算書
VI-2-10-1-3-7	B-115V 系蓄電池の耐震性についての計算書
VI-2-10-1-3-8	B1-115V 系蓄電池 (SA) の耐震性についての計算書
VI-2-10-1-3-9	SA 用 115V 系蓄電池の耐震性についての計算書
VI-2-10-1-3-10	高圧炉心スプレイ系蓄電池の耐震性についての計算書
VI-2-10-1-3-11	原子炉中性子計装用蓄電池の耐震性についての計算書

2. 蓄電池架台評価

2.1 構造概要

蓄電池架台の鳥瞰図を図 2-1 に、正面図、上面図、右側面図を図 2-2 から図 2-4 に示す。

蓄電池架台は、柱 (①)、長側枠 (②)、短側枠 (③)、電池台 (④)、受梁 (⑤) で構成される。



(単位：mm)

図 2-1 蓄電池架台の鳥瞰図



図 2-2 蓄電池架台の正面図

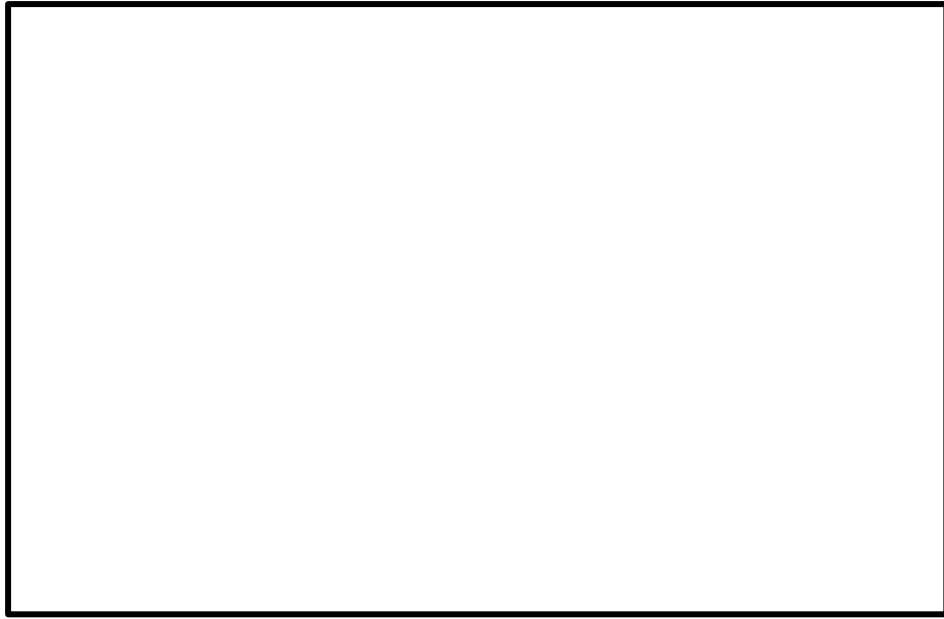


図 2-3 蓄電池架台の上面図

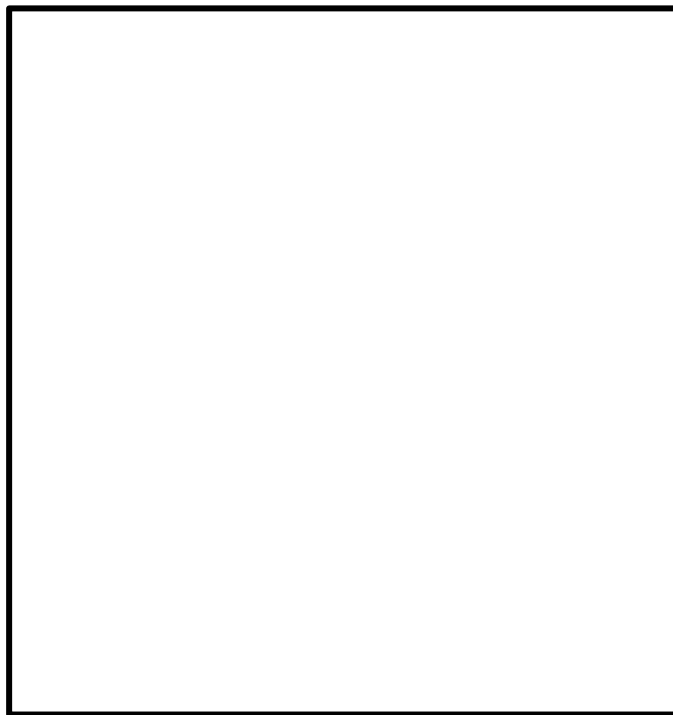


図 2-4 蓄電池架台の右側面図

2.2 蓄電池固定方法

蓄電池は四方側面を鋼材で直接押さえることで架台に固定している。

蓄電池は、前後方向について、架台背面側の長側枠を固定とし、前面側の長側枠を蓄電池と隙間無く密着して固定しており、左右方向について、架台外側の短側枠を固定とし、中央枠を蓄電池と隙間無く密着して固定している。

なお、蓄電池は架台に対して鉛直方向には固定されていないが、表 1-1 に示す蓄電池について、VI-2-1-7「設計用床応答スペクトルの作成方針」に基づく設計用震度 I (基準地震動 S_s) の鉛直方向の震度は表 2-1 に示すとおり、いずれも 1 未満であるため、蓄電池の浮き上がりは生じない。

蓄電池架台の固定概要図を図 2-5 に示す。

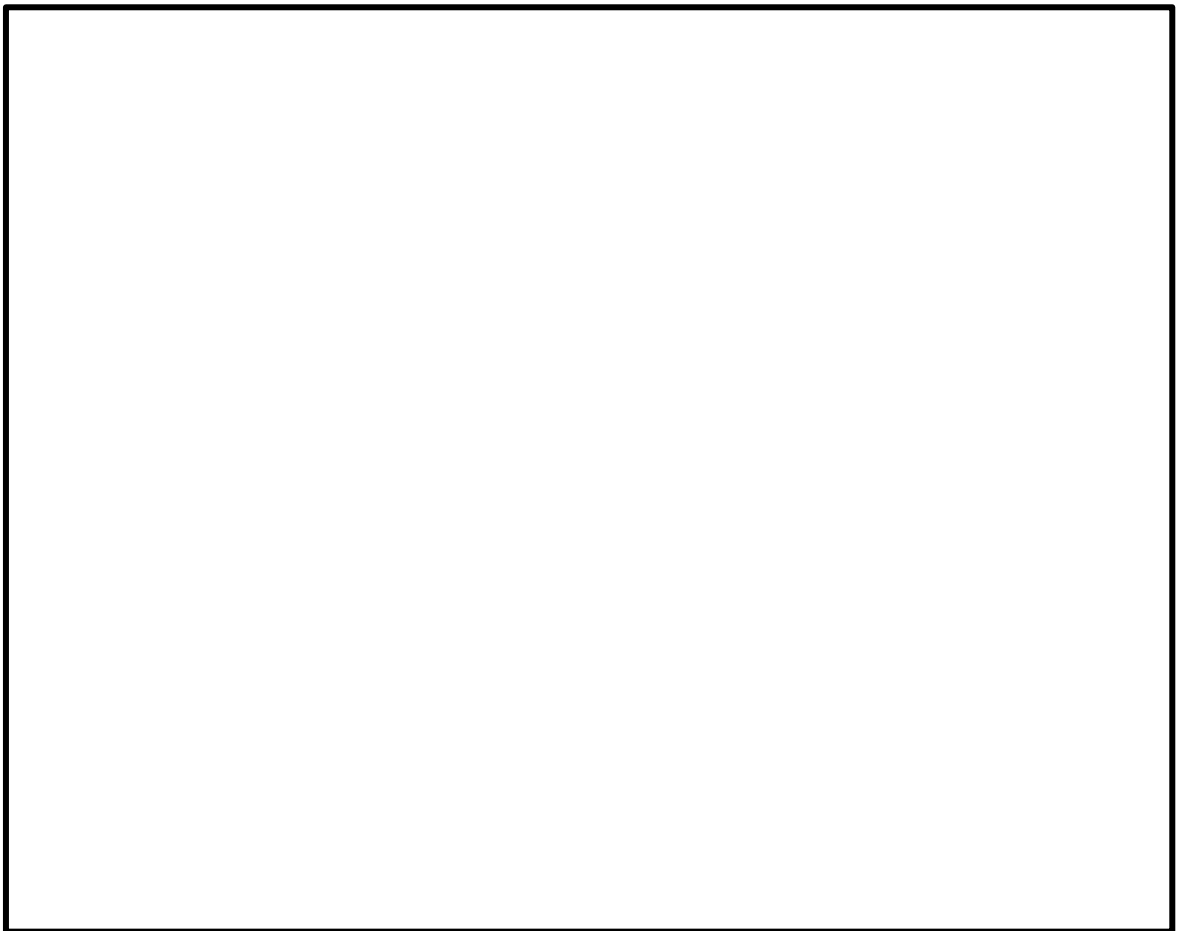


図 2-5 蓄電池架台の固定概要図

表 2-1 蓄電池据付場所における鉛直方向の設計用震度 I (基準地震動 S s)

設備名称	据付場所及び床面高さ (m)	設計用震度 I (鉛直方向) (基準地震動 S s)
緊急用直流 115V 蓄電池	ガスタービン発電機建物 EL 47.5	0.61
緊急用直流 60V 蓄電池	ガスタービン発電機建物 EL 47.5	0.61
230V 系蓄電池 (RCIC)	廃棄物処理建物 EL 12.3	0.70
A-115V 系蓄電池	廃棄物処理建物 EL 15.3 (EL 16.9)	0.81
B-115V 系蓄電池	廃棄物処理建物 EL 12.3	0.70
B1-115V 系蓄電池 (SA)	廃棄物処理建物 EL 12.3	0.70
SA 用 115V 系蓄電池	廃棄物処理建物 EL 15.3 (EL 16.9)	0.81
高圧炉心スプレイ系蓄電池	原子炉建物 EL 2.8 (EL 8.8)	0.64
原子炉中性子計装用蓄電池	廃棄物処理建物 EL 16.9, 12.3	0.81

2.3 代表蓄電池の選定

蓄電池架台の構造強度の確認に際して、耐震評価上厳しいと考えられる蓄電池を代表として、耐震評価を行う。代表蓄電池の選定にあたっては、以下を考慮する。

- ・蓄電池架台の構造
- ・蓄電池搭載時の総質量
- ・設計震度

蓄電池架台の構造について、柱、長側枠、短側枠、電池台、受梁で構成される点は、どの蓄電池架台についても同様であるため、蓄電池総質量が大きく、その中でも設計震度が大きいSA用115V系蓄電池を評価対象として選定する。

また、SA用115V系蓄電池において蓄電池架台は4個並び2段1列、3個並び2段1列、2,3個並び2段1列の3種類ある。最も重心高さが高く、最も総質量の大きい4個並び2段1列を代表蓄電池として評価する。

2.4 適用規格・基準等

本評価において適用する規格・基準等を以下に示す。

- ・原子力発電所耐震設計技術指針 重要度分類・許容応力編 JEAG4601・補-1984 ((社) 日本電気協会)
- ・原子力発電所耐震設計技術指針 JEAG4601-1987 ((社) 日本電気協会)
- ・原子力発電所耐震設計技術指針 JEAG4601-1991 追補版 ((社) 日本電気協会)
- ・発電用原子力設備規格 設計・建設規格 ((社) 日本機械学会, 2005/2007) (以下「設計・建設規格」という。)

2.5 記号の説明

記号	記号の説明	単位
A	鋼材の断面積	mm ²
A _f	圧縮フランジの断面積	mm ²
C	許容曲げ応力の計算に使用する係数	-
C _H	水平方向設計震度	-
C _V	鉛直方向設計震度	-
E	縦弾性係数	MPa
F [*]	設計・建設規格 SSB-3133 に定める値	MPa
F _x	鋼材に水平方向に作用する荷重 (x 方向)	N
F _y	鋼材に鉛直方向に作用する荷重	N
f _b , f _{b'} , f _{b1} , f _{b2}	許容曲げ応力	MPa
f _s	許容せん断応力	MPa
f _t	許容引張応力	MPa
g	重力加速度 (=9.80665)	m/s ²
h	据付面から重心までの距離	mm
H	梁のせい	mm
i, i _x , i _y	鋼材の断面二次半径	mm
l _b	支点間距離	mm
l _k	座屈長さ	mm
m	蓄電池 1 個あたりの質量	kg
m ₁	受梁 (⑤) が支持する電池台 (④) の質量	kg
m ₂	各鋼材の質量	kg
M, M _x , M _y , M _z	鋼材に作用する曲げモーメント	N・mm
n	鋼材が支持する蓄電池個数	-
Q, Q _x , Q _y , Q _z	鋼材に作用するせん断力	N
S _u	設計・建設規格 付録材料図表 Part5 表 9 に定める値	MPa
S _y	設計・建設規格 付録材料図表 Part5 表 8 に定める値	MPa
W	蓄電池架台込総質量	kg
w	鋼材に作用する等分布荷重	N/mm
w _x , w _{x1} , w _{x2}	鋼材に水平方向に作用する等分布荷重 (x 方向)	N/mm
w _y	鋼材に鉛直方向に作用する等分布荷重	N/mm
w _z	鋼材に水平方向に作用する等分布荷重 (z 方向)	N/mm
Z	鋼材の断面係数	mm ³

記号	記号の説明	単位
Λ	限界細長比	-
λ	有効細長比	-
ν	座屈に対する安全率	-
π	円周率	-
σ_b	鋼材に生じる曲げ応力	MPa
σ_c	鋼材に生じる引張又は圧縮応力	MPa
σ_w	鋼材に生じる組合せ応力	MPa
τ	鋼材に生じるせん断応力	MPa

2.6 評価方針

蓄電池架台の強度評価は、VI-2-1-9「機能維持の基本方針」にて設定した荷重及び荷重の組合せ並びに許容限界に基づき、「3.1 蓄電池架台の評価部位及び評価方法」にて設定する箇所において、「4. 固有周期」で測定した固有周期に基づく設計用地震力による応力等が許容限界内に収まることを、「5. 構造強度評価」にて示す方法にて確認することで実施する。確認結果を「6. 評価結果」に示す。

蓄電池架台の耐震評価フローを図2-6に示す。

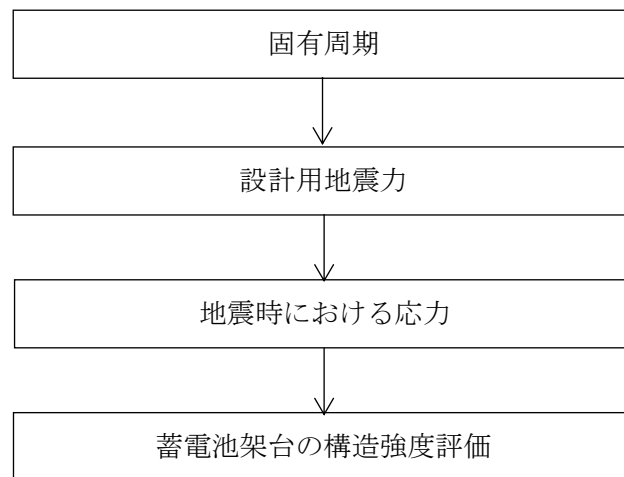


図2-6 蓄電池架台の耐震評価フロー

3. 評価部位及び評価方法

3.1 蓄電池架台の評価部位及び評価方法

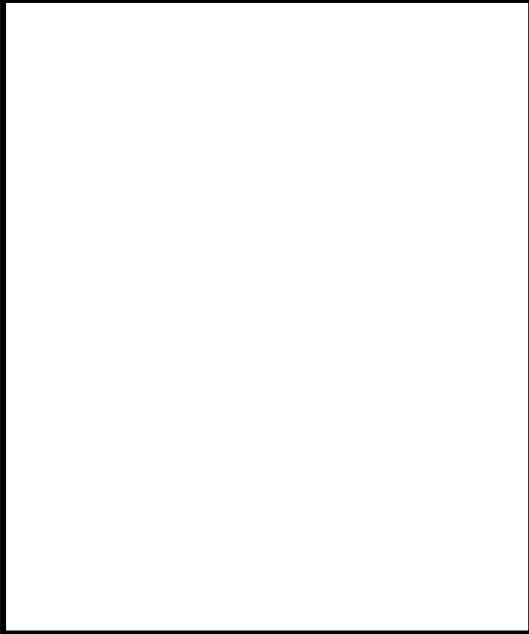
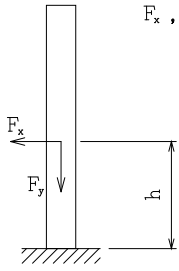
蓄電池架台の評価は、3.1.1～3.1.5項に示した部材に対して実施する。

3.1.1 柱 (①)

蓄電池架台における柱 (①) 使用箇所と部材強度評価モデル図を表 3-1 に示す。
部材強度評価方法は以下に示す。

- (1) 荷重は蓄電池架台重心位置に総質量に相当する水平力及び鉛直力が集中荷重として加わり、柱 6 本に対して均等に加わるとし、評価は柱 1 本あたりの強度の計算を行う。
- (2) 地震力は部材に対して、水平方向及び鉛直方向から個別に作用させる。
また、水平方向及び鉛直方向の動的地震力による荷重の組合せには、絶対値和を適用する。
- (3) 柱は取付ボルトによりチャンネルベースに固定された固定端とする。
- (4) 強度評価はせん断応力、曲げ応力、引張（圧縮）応力、組合せ応力の計算を行う。
- (5) 重心位置はVI-2-10-1-3-9「SA 用 115V 系蓄電池の耐震性についての計算書」に基づき代表蓄電池と同じ高さを設定する。
- (6) 強度計算に用いる寸法は、公称値を使用する。

表 3-1 柱 (①) 使用箇所と部材強度評価モデル図

構成部材使用箇所	強度計算モデル
	<p>片持ち梁</p>  <p>F_x, F_y : 柱 1 本あたりに加わる集中荷重 h : 荷重が加わる位置 (架台重心高さ)</p> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; width: fit-content; margin-left: auto;"> <p>曲げモーメント $M = F_x \times h$ せん断力 $Q = F_x$</p> </div>

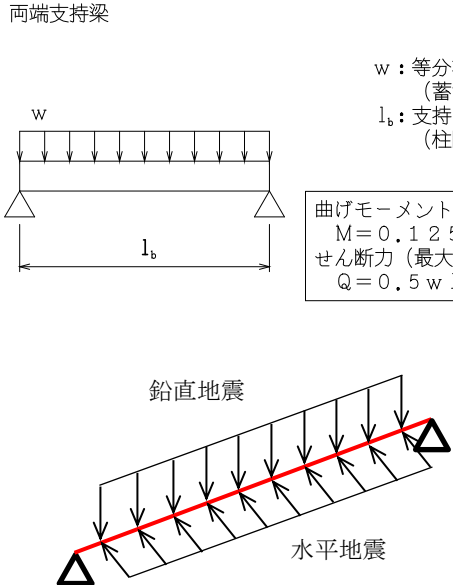
3.1.2 長側枠 (②)

蓄電池架台における長側枠 (②) 使用箇所と部材強度評価モデル図を表 3-2 に示す。

部材強度評価方法は以下に示す。

- (1) 荷重は長側枠に対して蓄電池質量及び長側枠の架台の質量が水平方向及び鉛直方向に均等に等分布荷重で加わるとし、長側枠は正面側 4 本、裏面側 4 本とも同様の構造であるため、評価は長側枠 1 箇所の強度計算を行う。
- (2) 地震力は部材に対して、水平方向及び鉛直方向から個別に作用させる。また、水平方向及び鉛直方向の動的地震力による荷重の組合せには、絶対値和を適用する。
- (3) 部材は梁両端の支点をピンとして両端支持梁で計算し、支持間隔は柱間距離とする。
- (4) 強度評価はせん断応力、曲げ応力、組合せ応力の計算を行う。
- (5) 強度計算に用いる寸法は、公称値を使用する。

表 3-2 長側枠 (②) 使用箇所と部材強度評価モデル図

構成部材使用箇所	強度計算モデル
	<p>両端支持梁</p>  <p> w: 等分布荷重 (蓄電池質量) l_b: 支持点間距離 (柱間距離) </p> <p> 曲げモーメント (最大値) $M = 0.125 w l_b^2$ せん断力 (最大値) $Q = 0.5 w l_b$ </p> <p>鉛直地震</p> <p>水平地震</p>

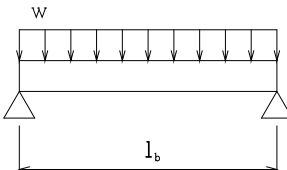
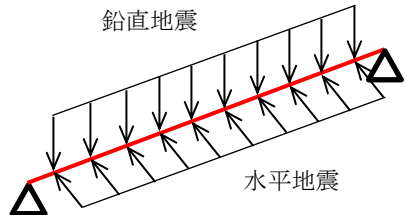
3.1.3 短側枠 (③)

蓄電池架台における短側枠 (③) 使用箇所と部材強度評価モデル図を表 3-3 に示す。

部材強度評価方法は以下に示す。

- (1) 荷重は短側枠に対して蓄電池質量と短側枠の架台の質量が水平方向及び鉛直方向に均等に等分布荷重で加わるものとし、短側枠 4 箇所とも同様の構造であるため、評価は短側枠 1 箇所の強度計算を行う。
- (2) 鋼材が支持する蓄電池個数は安全側に他方の蓄電池 2 個を加えて 4 個が作用するものとする。
- (3) 地震力は部材に対して、水平方向及び鉛直方向から個別に作用させる。
また、水平方向及び鉛直方向の動的地震力による荷重の組合せには、絶対値和を適用する。
- (4) 部材は梁両端の支点をピンとして両端支持梁で計算し、支持間隔は短側枠の固定ボルト間距離とする。
- (5) 強度評価はせん断応力、曲げ応力、組合せ応力の計算を行う。
- (6) 強度計算に用いる寸法は、公称値を使用する。

表 3-3 短側枠 (③) 使用箇所と部材強度評価モデル図

構成部材使用箇所	強度計算モデル
	<p>両端支持梁</p>  <p> w : 等分布荷重 (蓄電池質量) l_b : 支持点間距離 (柱間距離) </p> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; width: fit-content;"> <p> 曲げモーメント (最大值) $M = 0.125 w l_b^2$ せん断力 (最大值) $Q = 0.5 w l_b$ </p> </div>
	 <p>鉛直地震</p> <p>水平地震</p>

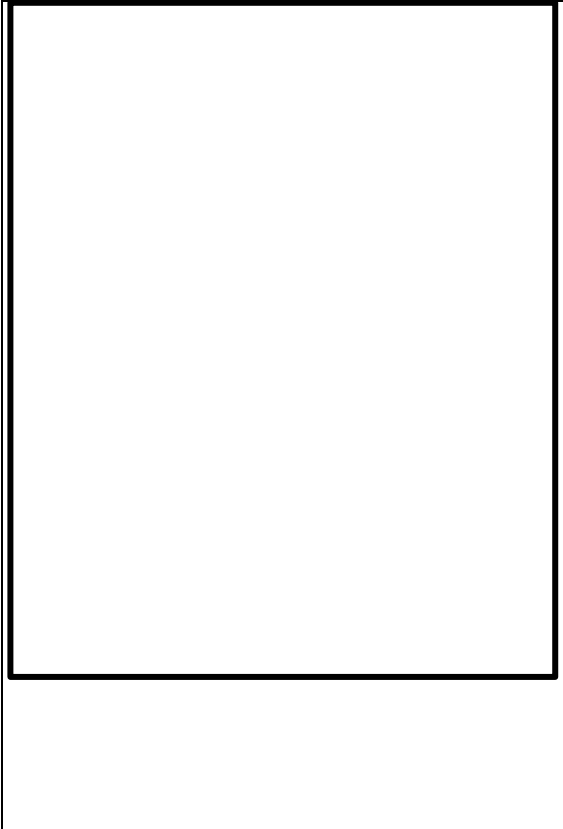
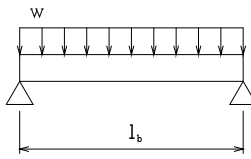
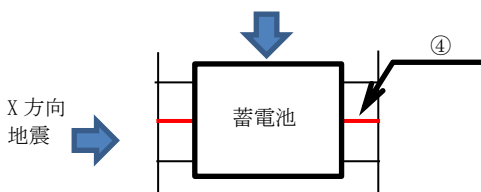
3.1.4 電池台 (④)

蓄電池架台における電池台 (④) 使用箇所と部材強度評価モデル図を表 3-4 に示す。

部材強度評価方法は以下に示す。

- (1) 鉛直方向の荷重は電池台に対して蓄電池質量及び電池台の質量が均等に等分布荷重で加わり，電池台上下段とも同様の構造であるため，評価は電池台 3 本に対して均等に加わるものとして，1 本あたりの強度の計算を行う。
- (2) 水平方向の評価は電池台の質量による荷重が作用するものとして，1 本あたりの強度の計算を行う。
- (3) 電池台は蓄電池架台正面より見て左右対称構造であり，左右それぞれで蓄電池 2 個を支持しているため，評価は片一方のみを対象として行う。
- (4) 地震力は部材に対して，水平方向及び鉛直方向から個別に作用させる。
また，水平方向及び鉛直方向の動的地震力による荷重の組合せには，絶対値和を適用する。
- (5) 部材は梁両端の支点をピンとして両端支持梁で計算するものとし，支持間隔は電池台の固定ボルト間距離とする。
- (6) 強度評価はせん断応力，曲げ応力，組合せ応力の計算を行う。
- (7) 強度計算に用いる寸法は，公称値を使用する。

表 3-4 電池台 (④) 使用箇所と部材強度評価モデル図

構成部材使用箇所	強度計算モデル
	<p>両端支持梁</p> <p>荷重方向：鉛直 w：等分布荷重 (蓄電池質量) l_b：支持点間距離 (柱間距離)</p>  <p>曲げモーメント (最大値) $M = 0.125 w l_b^2$ せん断力 (最大値) $Q = 0.5 w l_b$</p> <p>荷重方向：水平</p> <p>Z 方向地震</p>  <p>X 方向地震</p> <p>④</p>

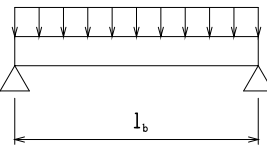
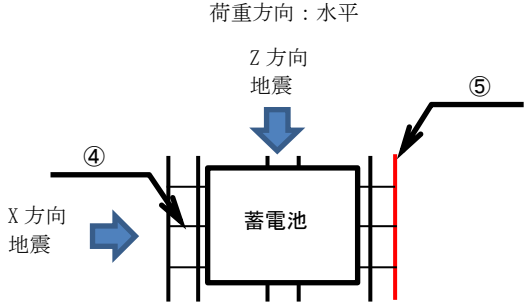
3.1.5 受梁 (⑤)

蓄電池架台における受梁 (⑤) 使用箇所と部材強度評価モデル図を表 3-5 に示す。

部材強度評価方法は以下に示す。

- (1) 荷重は受梁に対して蓄電池質量及び電池台質量が鉛直方向に均等に等分布荷重で加わり，受梁 6 本に対して均等に加わるとし，評価は受梁 1 本あたりの強度の計算を行う。
- (2) 水平方向の評価は電池台の質量及び受梁の質量による荷重が作用するものとして，1 本あたりの強度の計算を行う。
- (3) 地震力は部材に対して，水平方向及び鉛直方向から個別に作用させる。
また，水平方向及び鉛直方向の動的地震力による荷重の組合せには，絶対値和を適用する。
- (4) 部材は梁両端の支点をピンとして両端支持梁で計算し，支持間隔は柱間距離とする。
- (5) 強度評価はせん断応力，曲げ応力，組合せ応力の計算を行う。
- (6) 強度計算に用いる寸法は，公称値を使用する。

表 3-5 受梁 (⑤) 使用箇所と部材強度評価モデル図

構成部材使用箇所	強度計算モデル
	<p>両端支持梁</p> <p>荷重方向：鉛直 w：等分布荷重 (蓄電池質量，電池台質量) l_b：支持点間距離 (柱間距離)</p>  <p>曲げモーメント (最大值) $M = 0.125 w l_b^2$ せん断力 (最大值) $Q = 0.5 w l_b$</p> <p>荷重方向：水平</p>  <p>X 方向地震</p> <p>Z 方向地震</p> <p>蓄電池</p> <p>④</p> <p>⑤</p>

4. 固有周期

4.1 固有周期の確認

蓄電池架台の固有周期は、VI-2-10-1-3-9「SA用115V系蓄電池の耐震性についての計算書」に基づき、剛構造であることを確認している。

5. 構造強度評価

5.1 荷重の組合せ及び許容応力

5.1.1 荷重の組合せ及び許容応力状態

蓄電池架台の荷重の組合せ及び許容応力状態は、VI-2-10-1-3-9「SA用115V系蓄電池の耐震性についての計算書」に基づき、代表蓄電池と同じ設定とする。

5.1.2 許容応力

蓄電池架台の許容応力は、VI-2-1-9「機能維持の基本方針」に基づき表5-1のとおりとする。

5.1.3 使用材料の許容応力評価条件

蓄電池架台の使用材料の許容応力評価条件のうち重大事故等対処設備の評価に用いるものを表5-2に示す。

表 5-1 許容応力（重大事故等その他の支持構造物）

許容応力状態	許容限界*1, *2 (ボルト等以外)			
	一次応力			
	引張	せん断	圧縮	曲げ
IVAS				
VAS (VASとしてIVASの許容限界を用いる。)	$1.5 \cdot f_t^*$	$1.5 \cdot f_s^*$	$1.5 \cdot f_c^*$	$1.5 \cdot f_b^*$

注記*1：応力の組合せが考えられる場合には，組合せ応力に対しても評価を行う。

*2：当該の応力が生じない場合，規格基準で省略可能とされている場合及び他の応力で代表可能である場合は評価を省略する。

表 5-2 使用材料の許容応力評価条件（重大事故等対処設備）

評価部材	材料	温度条件 (°C)		S _y (MPa)	S _u (MPa)	S _y (R T) (MPa)
		周囲環境温度				
H形鋼 (柱 (①))	SS400 (厚さ ≤ 16mm)	周囲環境温度	40	245	400	—
溝形鋼 (長側枠 (②), 短側枠 (③), 受梁 (⑤))	SS400 (厚さ ≤ 16mm)	周囲環境温度	40	245	400	—
角形鋼管 (電池台 (④))	STKR400 (厚さ ≤ 16mm)	周囲環境温度	40	245	400	—

5.2 設計用地震力

評価に用いる設計用地震力を表 5-3 に示す。

設計用地震力は、VI-2-10-1-3-9「SA 用 115V 系蓄電池の耐震性についての計算書」に基づき代表蓄電池と同じ地震力を設定する。

表 5-3 設計用地震力

機器名称	据付場所 及び 床面高さ (m)	基準地震動 S_s	
		水平方向 設計震度	鉛直方向 設計震度
SA 用 115V 系蓄電池 (4 個並び 2 段 1 列)	廃棄物処理建物 EL 15.3 (EL 16.9 ^{*1})	$C_H=2.48^{*2}$	$C_V=1.47^{*2}$

注記*1：基準床レベルを示す。

*2：設計用震度Ⅱ（基準地震動 S_s ）を上回る設計震度

5.3 計算方法

5.3.1 柱 (①)

(1) 曲げ応力, せん断応力

柱には架台重心より水平力が加わるものとして, 柱 1 本あたりに加わる力 F_x は架台重心による力が柱 6 本に均等に加わるものとして計算する。

$$F_x = \frac{W \cdot g \cdot C_H}{6} \dots\dots\dots (5.3.1.1)$$

柱の荷重は重心位置で受けるものとして, 曲げモーメント M , せん断力 Q , せん断応力 τ , 曲げ応力 σ_b は以下のように表される。

$$M = F_x \cdot h \dots\dots\dots (5.3.1.2)$$

$$Q = F_x \dots\dots\dots (5.3.1.3)$$

$$\tau = \frac{Q}{A} \dots\dots\dots (5.3.1.4)$$

$$\sigma_b = \frac{M}{Z} \dots\dots\dots (5.3.1.5)$$

(2) 引張 (圧縮) 応力

柱には架台重心より引張 (圧縮) 力 F_y が柱 6 本に均等に加わるものとして引張 (圧縮) 応力 σ_c を計算する。

$$F_y = \frac{W \cdot g \cdot (1 + C_V)}{6} \dots\dots\dots (5.3.1.6)$$

$$\sigma_c = \frac{F_y}{A} \dots\dots\dots (5.3.1.7)$$

(3) 組合せ応力

a. 垂直応力とせん断応力の組合せ

$$\sigma_w = \sqrt{(\sigma_c + \sigma_b)^2 + 3 \cdot \tau^2} \dots\dots\dots (5.3.1.8)$$

b. 圧縮力と曲げモーメントの組合せ

圧縮力と曲げモーメントを受ける柱の組合せ応力は, 式 (5.3.1.9), (5.3.1.10) を満足することを確認する。ただし, 式 (5.3.1.10) については, 許容引張応力 f_t が許容曲げ応力 f_b' 以上であること, σ_c/f_t を減じていることから, 式 (5.3.1.9) に代表する。

$$\frac{\sigma_b}{f_b'} + \frac{\sigma_c}{f_c} \leq 1 \dots\dots\dots (5.3.1.9)$$

かつ

$$\frac{\sigma_b - \sigma_c}{f_t} \leq 1 \dots\dots\dots (5.3.1.10)$$

5.3.2 長側枠 (②)

(1) 曲げ応力, せん断応力

長側枠には鋼材に作用する等分布荷重が水平方向及び鉛直方向に加わるものとして計算する。曲げモーメント図及びせん断力図は、最も厳しい条件として図5-1で考える。

水平方向に作用する荷重

$$w_x = \frac{(m \cdot n + m_2) \cdot g \cdot C_H}{l_b} \dots\dots\dots (5.3.2.1)$$

曲げモーメント

$$M_x = 0.125 \cdot w_x \cdot l_b^2 \dots\dots\dots (5.3.2.2)$$

せん断力

$$Q_x = 0.5 \cdot w_x \cdot l_b \dots\dots\dots (5.3.2.3)$$

鉛直方向に作用する荷重

$$w_y = \frac{m_2 \cdot g \cdot (1 + C_V)}{l_b} \dots\dots\dots (5.3.2.4)$$

曲げモーメント

$$M_y = 0.125 \cdot w_y \cdot l_b^2 \dots\dots\dots (5.3.2.5)$$

せん断力

$$Q_y = 0.5 \cdot w_y \cdot l_b \dots\dots\dots (5.3.2.6)$$

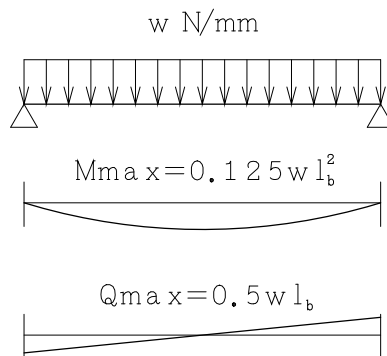


図5-1 曲げモーメント図及びせん断力図

ここで、水平方向と鉛直方向を合成して曲げモーメントMとせん断力Qを計算する。せん断応力 τ 、曲げ応力 σ_b は式(5.3.1.4)、(5.3.1.5)により求める。

$$M = M_x + M_y \dots\dots\dots (5.3.2.7)$$

$$Q = \sqrt{(Q_x)^2 + (Q_y)^2} \dots\dots\dots (5.3.2.8)$$

(2) 組合せ応力

$$\sigma_w = \sqrt{\sigma_b^2 + 3 \cdot \tau^2} \dots\dots\dots (5.3.2.9)$$

5.3.3 短側枠 (③)

短側枠は長側枠と同様に評価し、5.3.2項の式により求める。

5.3.4 電池台 (④)

(1) 曲げ応力、せん断応力

電池台には鋼材に作用する荷重が等分布荷重として鉛直方向に加わり、電池台3本に均等に加わるものとして計算する。

曲げモーメント図及びせん断力図を図5-1に示す。

鉛直方向に作用する荷重

$$w_y = \frac{(m \cdot n + 3 \cdot m_2) \cdot g \cdot (1 + C_v)}{3 \cdot l_b} \dots\dots\dots (5.3.4.1)$$

曲げモーメント

$$M_y = 0.125 \cdot w_y \cdot l_b^2 \dots\dots\dots (5.3.4.2)$$

せん断力

$$Q_y = 0.5 \cdot w_y \cdot l_b \dots\dots\dots (5.3.4.3)$$

水平方向の評価では、電池台の質量による荷重が加わるものとして計算する。

水平方向に作用する荷重

(電池台の質量による荷重)

$$w_z = \frac{m_2 \cdot g \cdot C_H}{l_b} \dots\dots\dots (5.3.4.4)$$

曲げモーメント

$$M_z = 0.125 \cdot w_z \cdot l_b^2 \dots\dots\dots (5.3.4.5)$$

せん断力

$$Q_z = 0.5 \cdot w_z \cdot l_b \dots\dots\dots (5.3.4.6)$$

ここで、水平方向と鉛直方向を合成して曲げモーメントMとせん断力Qを計算する。せん断応力 τ 、曲げ応力 σ_b は式(5.3.1.4)、(5.3.1.5)により求める。

$$M = M_y + M_z \dots\dots\dots (5.3.4.7)$$

$$Q = \sqrt{(Q_y)^2 + (Q_z)^2} \dots\dots\dots (5.3.4.8)$$

(2) 組合せ応力

組合せ応力 σ_w は式(5.3.2.9)により求める。

5.3.5 受梁 (⑤)

(1) 曲げ応力, せん断応力

受梁には鋼材に蓄電池、電池台及び受梁の質量による鉛直方向に作用する荷重が等分布荷重として加わり、受梁6本に均等に加わるものとして計算する。

曲げモーメント図及びせん断力図は図5-1として、曲げモーメント M_y 、せん断力 Q_y は式(5.3.4.2)、(5.3.4.3)により求める。

鉛直方向に作用する荷重

$$w_y = \frac{(m \cdot n + m_1 + 6 \cdot m_2) \cdot g \cdot (1 + C_v)}{6 \cdot l_b} \dots\dots\dots (5.3.5.1)$$

水平方向の評価では、受梁の質量及び電池台の質量による荷重が加わるものとして計算する。

水平方向に作用する荷重

(受梁の質量による荷重)

$$w_{x1} = \frac{m_2 \cdot g \cdot C_H}{l_b} \dots\dots\dots (5.3.5.2)$$

(電池台の質量による荷重)

$$w_{x2} = \frac{m_1 \cdot g \cdot C_H}{6 \cdot l_b} \dots\dots\dots (5.3.5.3)$$

曲げモーメント

$$M_x = 0.125 \cdot (w_{x1} + w_{x2}) \cdot l_b^2 \dots\dots\dots (5.3.5.4)$$

せん断力

$$Q_x = 0.5 \cdot (w_{x1} + w_{x2}) \cdot l_b \dots\dots\dots (5.3.5.5)$$

ここで、水平方向と鉛直方向を合成して曲げモーメントMとせん断力Qを計算する。せん断応力 τ , 曲げ応力 σ_b は式 (5.3.1.4) , (5.3.1.5) により求める。

$$M = M_x + M_y \dots\dots\dots (5.3.5.6)$$

$$Q = \sqrt{(Q_x)^2 + (Q_y)^2} \dots\dots\dots (5.3.5.7)$$

(2) 組合せ応力

組合せ応力 σ_w は式 (5.3.2.9) により求める。

5.4 計算条件

5.4.1 蓄電池架台の応力計算条件

蓄電池架台の応力計算に用いる計算条件は、本計算書の【SA用115V系蓄電池架台の強度計算結果】の設計条件及び機器要目に示す。

5.5 応力の評価

5.5.1 蓄電池架台の応力評価

5.3項で求めた蓄電池架台にかかるせん断応力 τ は表5-4に示す許容せん断応力 f_s 以下であること。

圧縮応力 σ_c は表5-4に示す許容圧縮応力 f_c 以下であること。

組合せ応力（垂直応力とせん断応力） σ_w は表5-4に示す許容引張応力 f_t 以下であること。

曲げ応力 σ_b は次式より求めた許容曲げ応力 $f_{b'}$ 以下であること。ただし、 f_b は表5-4による。

また、組合せ応力（圧縮力と曲げモーメント）が式(5.3.1.9)を満足すること。

(1) H形鋼の場合

$$f_{b1} = \left(1 - \frac{0.4 \cdot l_b^2}{C \cdot \Lambda^2 \cdot i^2}\right) \cdot \frac{F^*}{1.5} \cdot 1.5 \dots\dots\dots (5.5.1.1)$$

なお、限界細長比 Λ は次式により求め、係数 C は許容応力を小さくなるように安全側に最小値の $C = 1$ として計算する。

$$\Lambda = \sqrt{\frac{\pi^2 \cdot E}{0.6 \cdot F^*}} \dots\dots\dots (5.5.1.2)$$

$$f_{b2} = 1.5 \cdot \frac{0.433 \cdot E \cdot A_f}{l_b \cdot H} \dots\dots\dots (5.5.1.3)$$

$$f_{b'} = \text{Min} (\text{Max} (f_{b1}, f_{b2}), f_t) \dots\dots\dots (5.5.1.4)$$

(2) 溝形鋼の場合

$$f_{b'} = \text{Min} \left(1.5 \cdot \frac{0.433 \cdot E \cdot A_f}{l_b \cdot H}, f_t\right) \dots\dots\dots (5.5.1.5)$$

表5-4 許容応力

	基準地震動 S_s による 荷重との組合せの場合
許容せん断応力 f_s	$\frac{F^*}{1.5 \cdot \sqrt{3}} \cdot 1.5$
許容曲げ応力 f_b	$\frac{F^*}{1.5} \cdot 1.5$
許容引張応力 f_t	$\frac{F^*}{1.5} \cdot 1.5$
許容圧縮応力 f_c	$\left\{ 1 - 0.4 \cdot \left(\frac{\lambda}{\Lambda} \right)^2 \right\} \cdot \frac{F^*}{\nu} \cdot 1.5$

許容圧縮応力は以下の式を用いて計算する。なお、限界細長比 Λ は式(5.5.1.2)により求める。

$$\lambda = \frac{l_k}{i} \dots\dots\dots (5.5.1.6)$$

$$\nu = 1.5 + \frac{2}{3} \cdot \left(\frac{\lambda}{\Lambda} \right)^2 \dots\dots\dots (5.5.1.7)$$

6. 評価結果

6.1 重大事故等対処設備としての評価結果

蓄電池架台の重大事故等対処設備としての強度評価結果を以下に示す。発生値は許容限界を満足しており、設計用地震力に対して十分な構造強度を有していることを確認した。

(1) 構造強度評価結果

構造強度評価の結果を次頁以降の表に示す。

【SA用115V系蓄電池架台の強度計算結果】

1. 重大事故等対処設備

1.1 設計条件

機器名称	耐震重要度分類	据付場所及び床面高さ (m)	基準地震動 S s		周囲環境温度 (°C)
			水平方向 設計震度	鉛直方向 設計震度	
SA用115V系蓄電池 (4個並び2段1列)	常設耐震/防止 常設/緩和	廃棄物処理建物 EL 15.3 (EL 16.9*1)	$C_H=2.48^{*2}$	$C_V=1.47^{*2}$	40

注記*1: 基準床レベルを示す。

*2: 設計用震度II (基準地震動 S s) を上回る設計震度

1.2 機器要目 (1/2)

部材	鋼材仕様	W (kg)	m (kg)	m_1 (kg)	m_2 (kg)	h (mm)	H (mm)	i (mm)	l_b (mm)	l_k (mm)	A (mm ²)	A _f (mm ²)	Z (mm ³)	n
柱 (①)	H形鋼 125×125×6.5		—	—	—	683	125	31.3^{*2}	1150	2415	3000	1125	4.69×10^4	—
長側枠 (②)	溝形鋼 100×50×5	—	220^{*1}	—	7^{*1}	—	100	—	537.5	—	1192	375	7.52×10^3	2
短側枠 (③)	溝形鋼 100×50×5	—	220^{*1}	—	9^{*1}	—	100	—	761	—	1192	375	7.52×10^3	4
電池台 (④)	角形鋼管 75×45×3.2	—	220^{*1}	—	6^{*1}	—	—	—	489.5	—	700.7	—	1.01×10^4	2
受梁 (⑤)	溝形鋼 75×40×5	—	220^{*1}	40^{*1}	7^{*1}	—	75	—	711	—	881.8	280	4.47×10^3	4

注記*1: 質量を保守的な質量に設定して評価する。

*2: $i = \text{Min}[i_x, i_y]$

1.2 機器要目 (2/2)

部材	E (MPa)	S _y (MPa)	S _u (MPa)	F [*] (MPa)
柱 (①)	2.02×10 ⁵	245 (厚さ≦16mm)	400 (厚さ≦16mm)	280
長側枠 (②)	2.02×10 ⁵	245 (厚さ≦16mm)	400 (厚さ≦16mm)	280
短側枠 (③)	2.02×10 ⁵	245 (厚さ≦16mm)	400 (厚さ≦16mm)	280
電池台 (④)	2.02×10 ⁵	245 (厚さ≦16mm)	400 (厚さ≦16mm)	280
受梁 (⑤)	2.02×10 ⁵	245 (厚さ≦16mm)	400 (厚さ≦16mm)	280

27

1.3 計算数値

1.3.1 蓄電池架台に作用する力とモーメント

部材	M (N・mm)	Q (N)	F _y (N)
	基準地震動 S _s	基準地震動 S _s	基準地震動 S _s
柱 (①)			
長側枠 (②)			
短側枠 (③)			
電池台 (④)			
受梁 (⑤)			

1.4 結論

1.4.1 蓄電池架台の応力

(単位：MPa)

部材	材料	応力	基準地震動 S_s		備考
			算出応力	許容応力	
柱 (①)	SS400	せん断	$\tau = 3$	$f_s = 161$	—
		曲げ	$\sigma_b = 134$	$f_{b'} = 280$	—
		圧縮	$\sigma_c = 3$	$f_c = 182$	—
		組合せ (垂直+せん断)	$\sigma_w = 137$	$f_t = 280$	—
		組合せ (圧縮+曲げ)	0.50	1	単位無し
長側枠 (②)	SS400	せん断	$\tau = 5$	$f_s = 161$	—
		曲げ	$\sigma_b = 99$	$f_{b'} = 280$	—
		組合せ	$\sigma_w = 99$	$f_t = 280$	—
短側枠 (③)	SS400	せん断	$\tau = 9^*$	$f_s = 161$	—
		曲げ	$\sigma_b = 277^*$	$f_{b'} = 280$	—
		組合せ	$\sigma_w = 277^*$	$f_t = 280$	—
電池台 (④)	STKR400	せん断	$\tau = 3$	$f_s = 161$	—
		曲げ	$\sigma_b = 24$	$f_{b'} = 280$	—
		組合せ	$\sigma_w = 24$	$f_t = 280$	—
受梁 (⑤)	SS400	せん断	$\tau = 3$	$f_s = 161$	—
		曲げ	$\sigma_b = 84$	$f_{b'} = 280$	—
		組合せ	$\sigma_w = 84$	$f_t = 280$	—

注記*：保守的に蓄電池4個分の質量を考慮して応力を算出している。
すべて許容応力以下である。

補足-027-10-78 主排気ダクト及び支持構造物の
解析モデルについて

目 次

1. はじめに	1
2. 解析モデルについて	1
2.1 モデル化範囲	1
2.2 主排気ダクト本体のモデル化方法について	3
2.3 主排気ダクトー支持装置のモデル化方法について	4
2.4 支持装置ー支持構造物部材のモデル化方法について	4
2.5 支持構造物部材のモデル化方法について	5

別紙 えび状部の剛性低下について

1. はじめに

主排気ダクト及び支持構造物は、図1-1に示すように、主排気ダクト、支持構造物部材、支持装置から構成されており、それらを連成したモデルにより解析を実施している。

本資料はこのうち、主排気ダクト及び支持構造物の解析モデル化方法について、補足説明するものである。

なお、本資料が関連する工認図書は以下のとおり。

- ・VI-2-11-2-7-13「主排気ダクトの耐震性についての計算書」

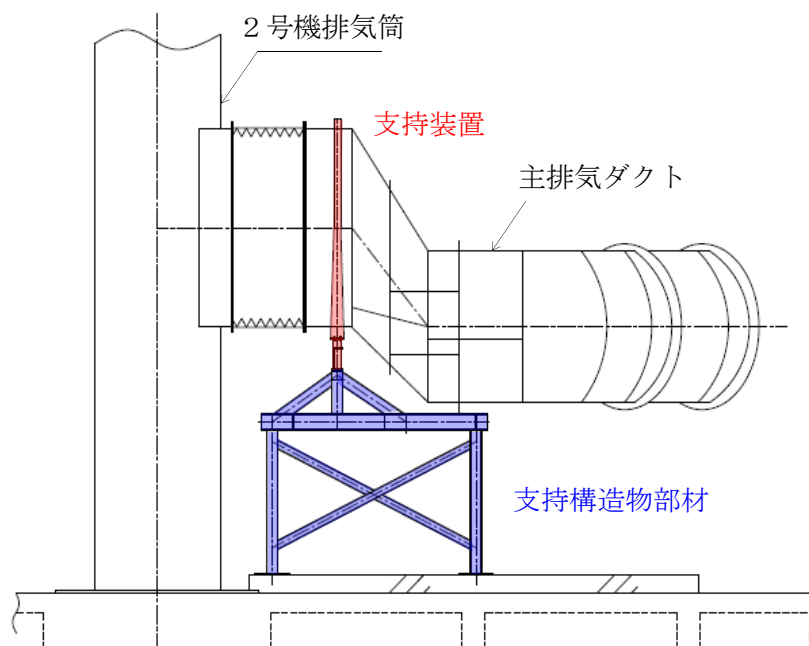


図1-1 概略構造図

2. 解析モデルについて

2.1 モデル化範囲

主排気ダクト及び支持構造物のモデル化範囲は、図2-1に示すように、上位クラス施設である2号機排気筒に対して波及的影響を及ぼさないよう、2号機排気筒及びタービン建物取合いの伸縮継手までとする。図2-2に解析モデル全体図を示す。

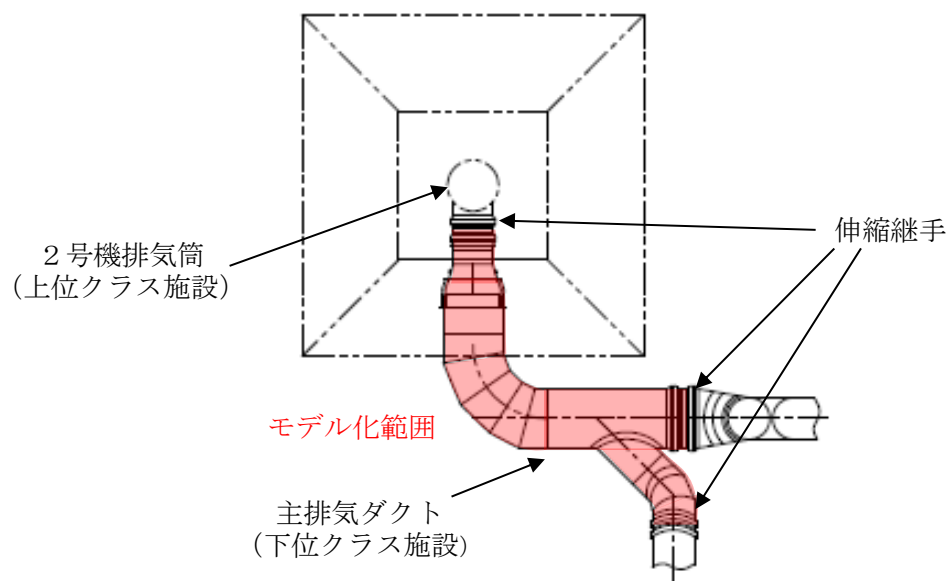


図2-1 主排気ダクトの位置関係図



図 2-2 解析モデル全体図

2.2 主排気ダクト本体のモデル化方法について

主排気ダクト本体は、以下のとおり、はり要素でモデル化する。

- ・曲管部でえび状の管の部分は、図 2-3 に示すとおり、複数の直管でモデル化し、分岐部は母管中心から母管外表面までを含めた範囲を、分岐側のダクト仕様でモデル化する。なお、えび状の管の部分については、剛性低下が想定されるが、解析結果に有意な影響を与えないことを確認した（別紙参照）。
- ・質点はモーメントが大きくなると考えられる点に設定するとともに、代表的な振動モードを十分に表現できるように適切な間隔で設ける。
- ・伸縮継手は片持ち形状でモデル化し、先端に伸縮継手の集中質量を付加することで、当該箇所の地震応答が大きくなるように保守的な解析モデルとする。
- ・断面二次モーメントについては、矩形ダクトの場合、ダクト長辺に対して平行軸回り及び直交軸回りの両方をそれぞれ設定する。



図 2-3 主排気ダクト： $\phi 3818 \times 9.0$ t 曲管部

2.3 主排気ダクトー支持装置のモデル化方法について

主排気ダクト及び支持装置は、図 2-4 に示すとおり、全周溶接されている構造のため、剛接合とする。このため、主排気ダクトの中心で発生する荷重が、支持装置及び支持構造物部材のボルト接合部に直接伝わるため、ダクト中心と支持構造物部材のボルト接合部を剛で接続したモデルとする。

2.4 支持装置ー支持構造物部材のモデル化方法について

支持装置及び支持構造物部材は、図 2-4 に示すとおり、ボルトで接合されている。ボルト接合部はピン結合としてモデル化する。

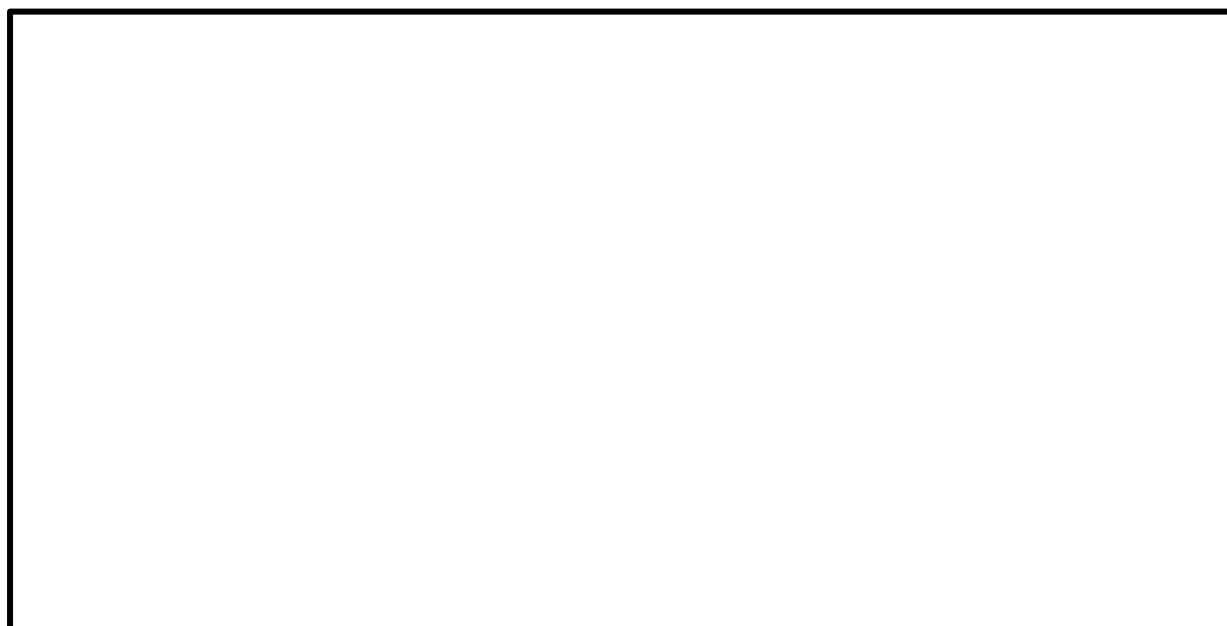


図 2-4 主排気ダクト、支持装置及び支持構造物部材
(例 支持構造物：S-22)

2.5 支持構造物部材のモデル化方法について

支持構造物部材は、図 2-5 に示すとおり、鋼材同士を溶接で接合しているため、剛結合とする。また、コンクリート床への取付部は固定とする。図 2-6 に支持構造物：S-22 の解析モデル図を、図 2-7 に支持構造物：S-24 の解析モデル図を示す。



図 2-5 支持構造物部材

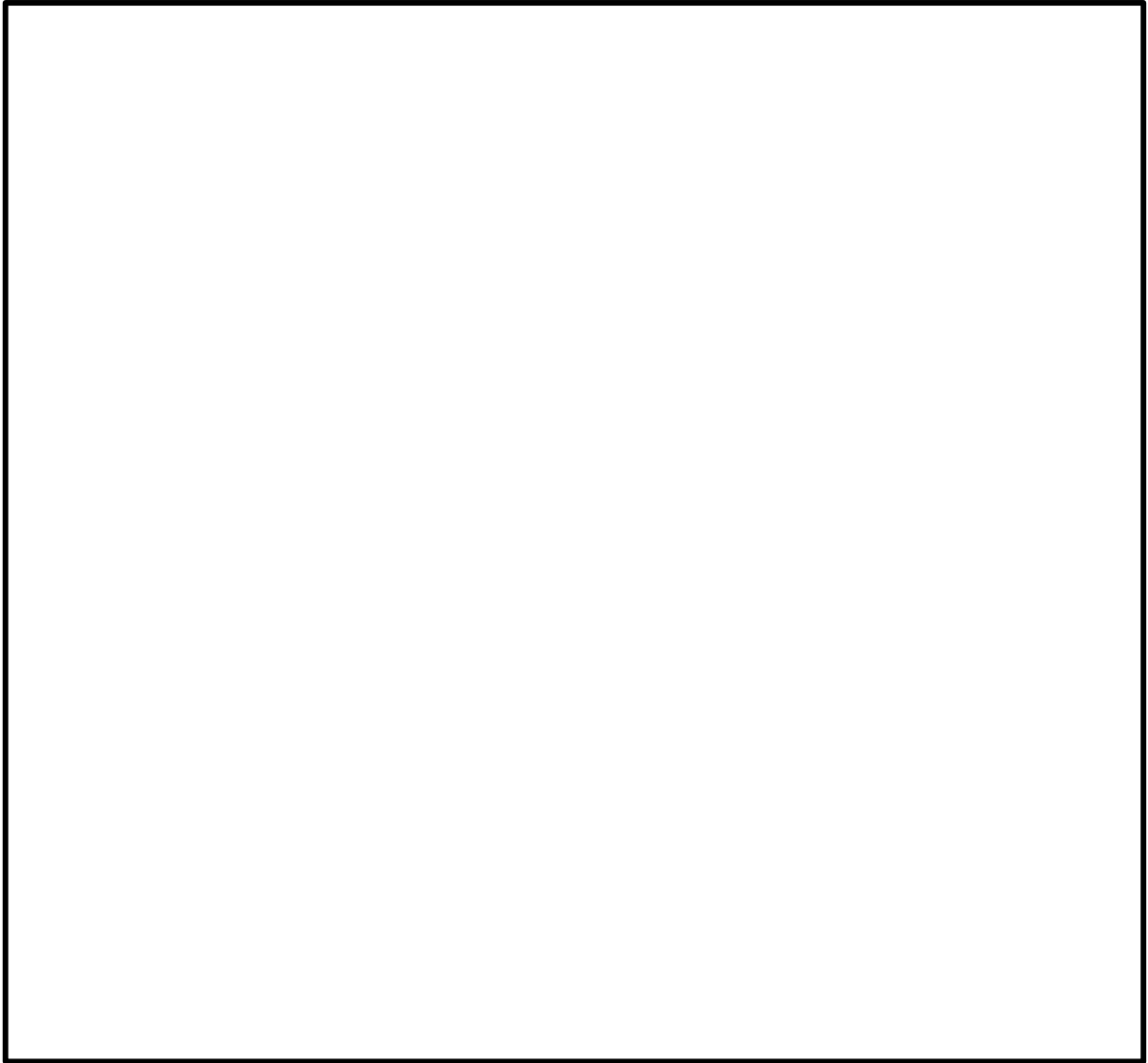


図 2-6 支持構造物 : S-22 解析モデル詳細

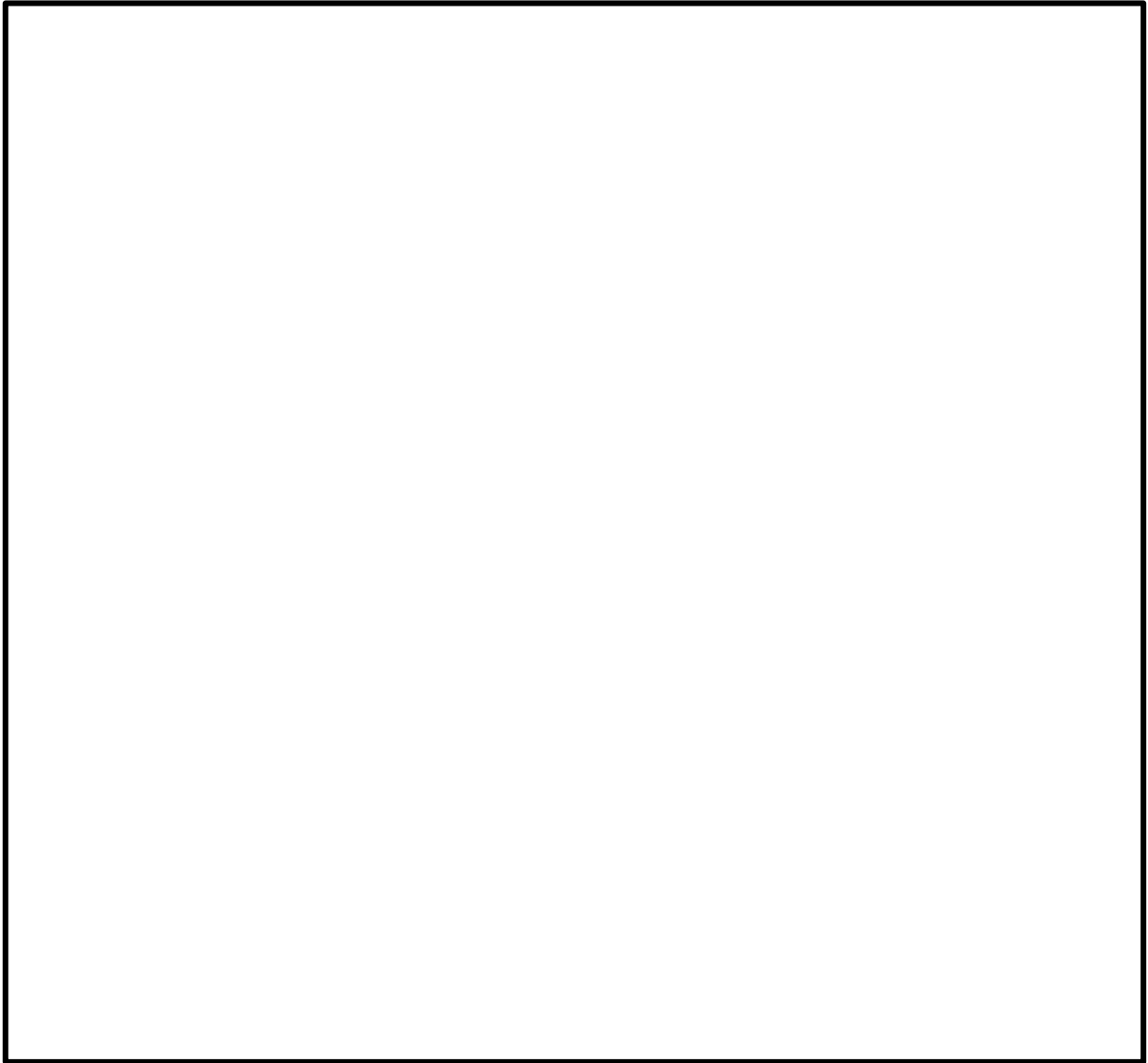


図 2-7 支持構造物：S-24 解析モデル詳細

えび状部の剛性低下について

1. 固有値解析

えび状部については、直管部と比較して剛性低下が想定されるが、フレキシビリティファクター⁽¹⁾などの剛性低下を表す係数を考慮していない。別紙では、剛性低下を考慮しないことの妥当性を確認するため、3次元シェルモデルによる固有値解析を行った。なお、えび状部による剛性低下の影響を確認するため、えび状部のみを3次元シェルモデル化し、えび状部以外は工認における評価と同じ3次元はりモデルにてモデル化した。固有値解析結果を表1に、5次までの振動モード図を図1から図5に示す。

表1 固有値解析結果

① 3次元はりモデル (解析コード：SAP2000)					
モード	固有周期(s)	水平方向刺激係数*		鉛直方向刺激係数*	
		EW 方向	NS 方向		
1次	0.383	-3.541	0.517	-0.106	
2次	0.199	1.328	-1.189	-0.237	
3次	0.160	4.419	1.043	-0.031	
4次	0.090	-0.209	5.496	0.125	
5次	0.060	0.094	-0.616	2.227	

② 3次元シェルモデル (解析コード：NASTRAN)					
モード	固有周期(s)	水平方向刺激係数*		鉛直方向刺激係数*	固有周期比較 (②/①)
		EW 方向	NS 方向		
1次	0.406	3.531	-0.566	0.285	1.060
2次	0.226	-1.202	1.255	0.517	1.139
3次	0.173	4.501	0.979	-0.131	1.084
4次	0.091	-0.081	5.522	0.135	1.009
5次	0.072	0.509	-1.082	1.402	1.193

注記*：モード質量を正規化するモードベクトルを用いる。

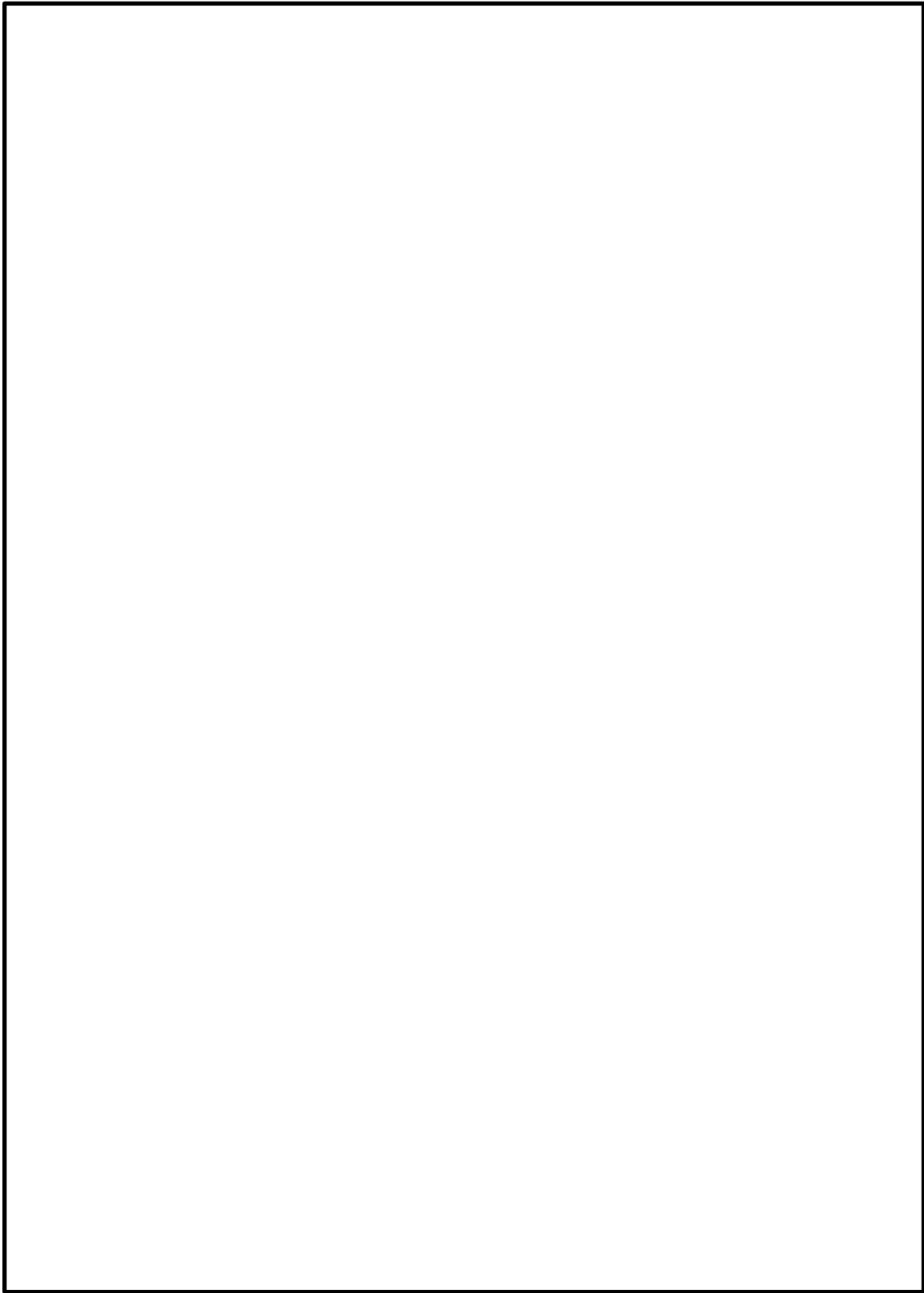


図1 代表振動モード図 (1次モード)

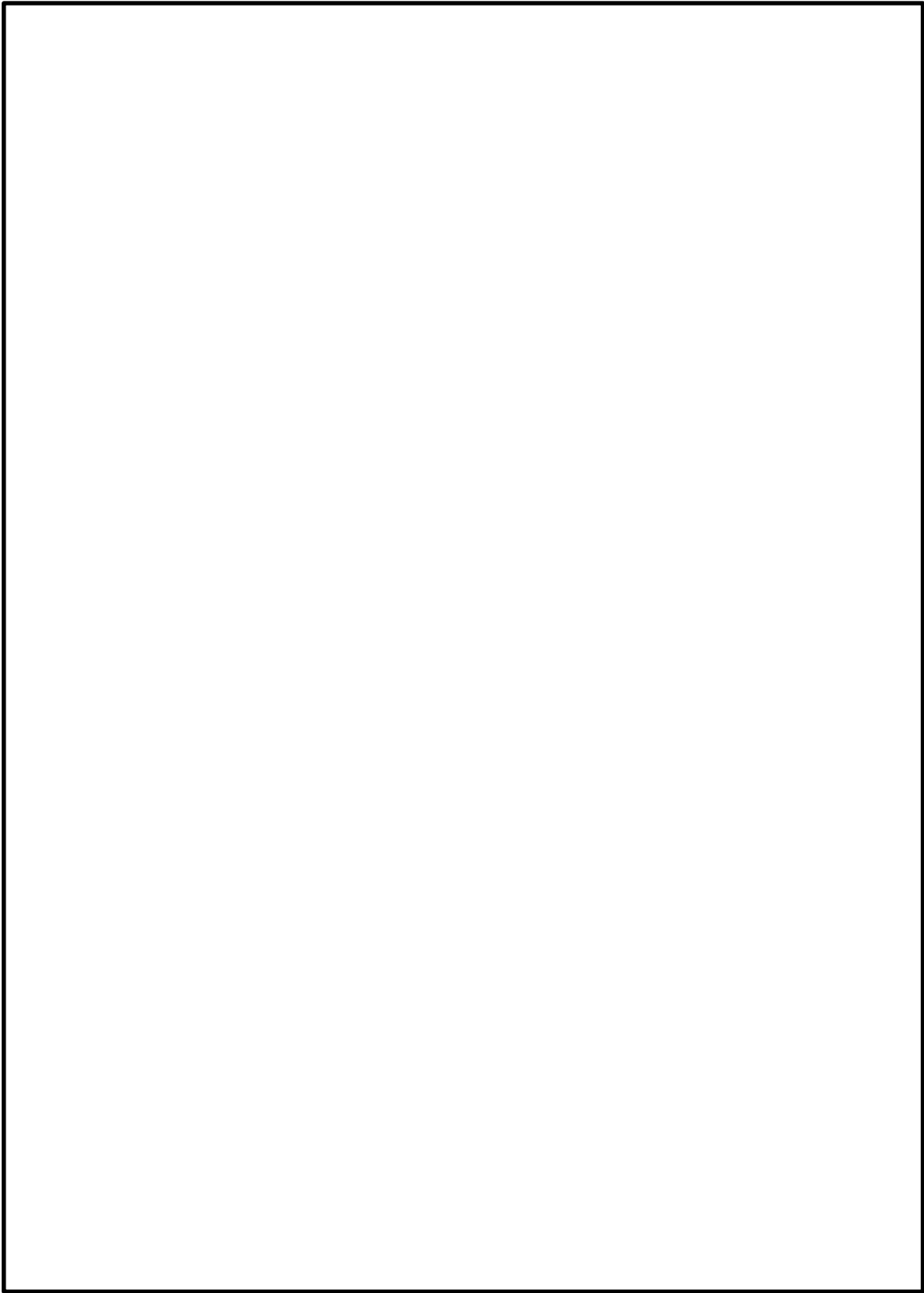


図2 代表振動モード図 (2次モード)

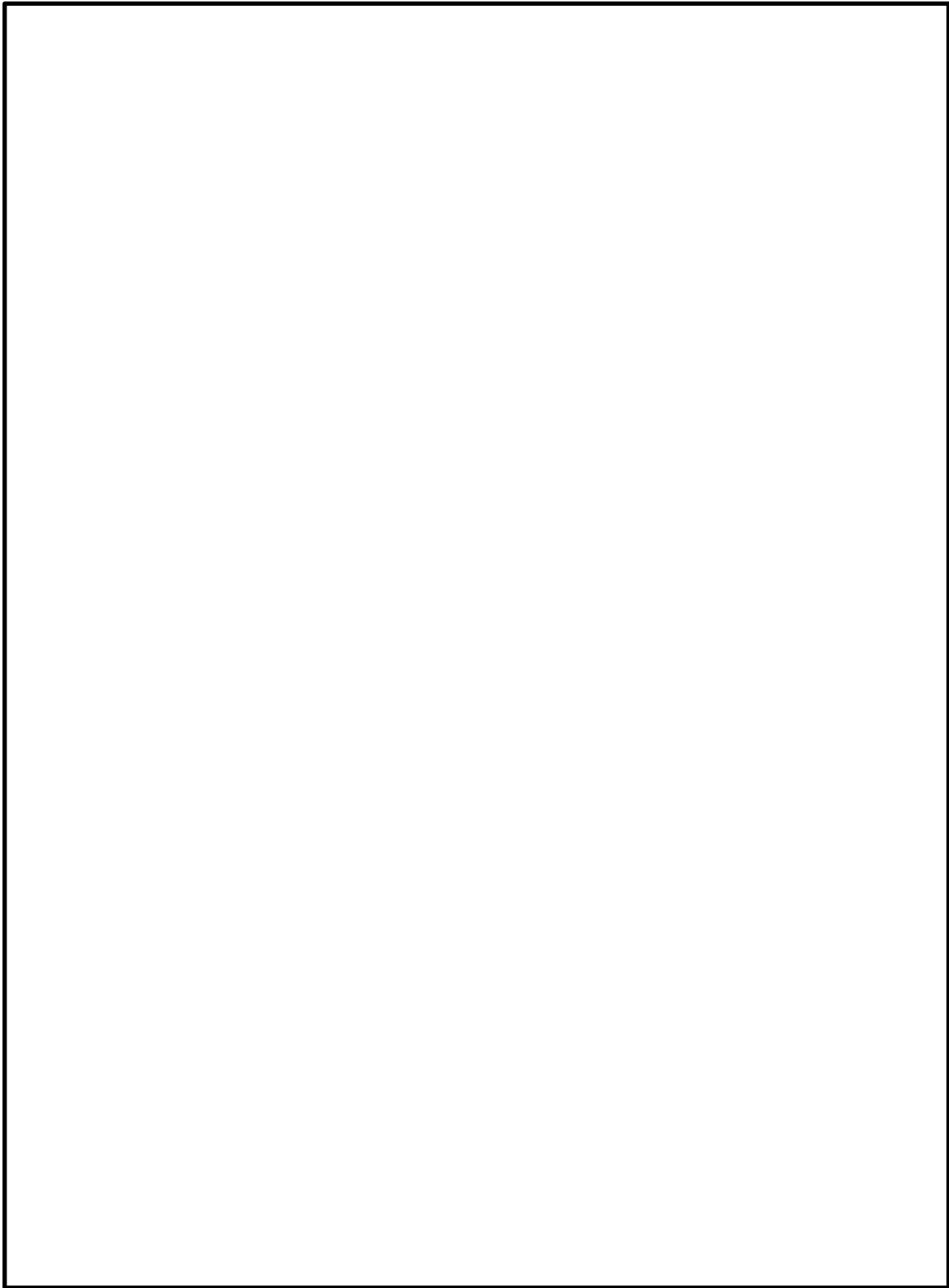


図3 代表振動モード図 (3次モード)

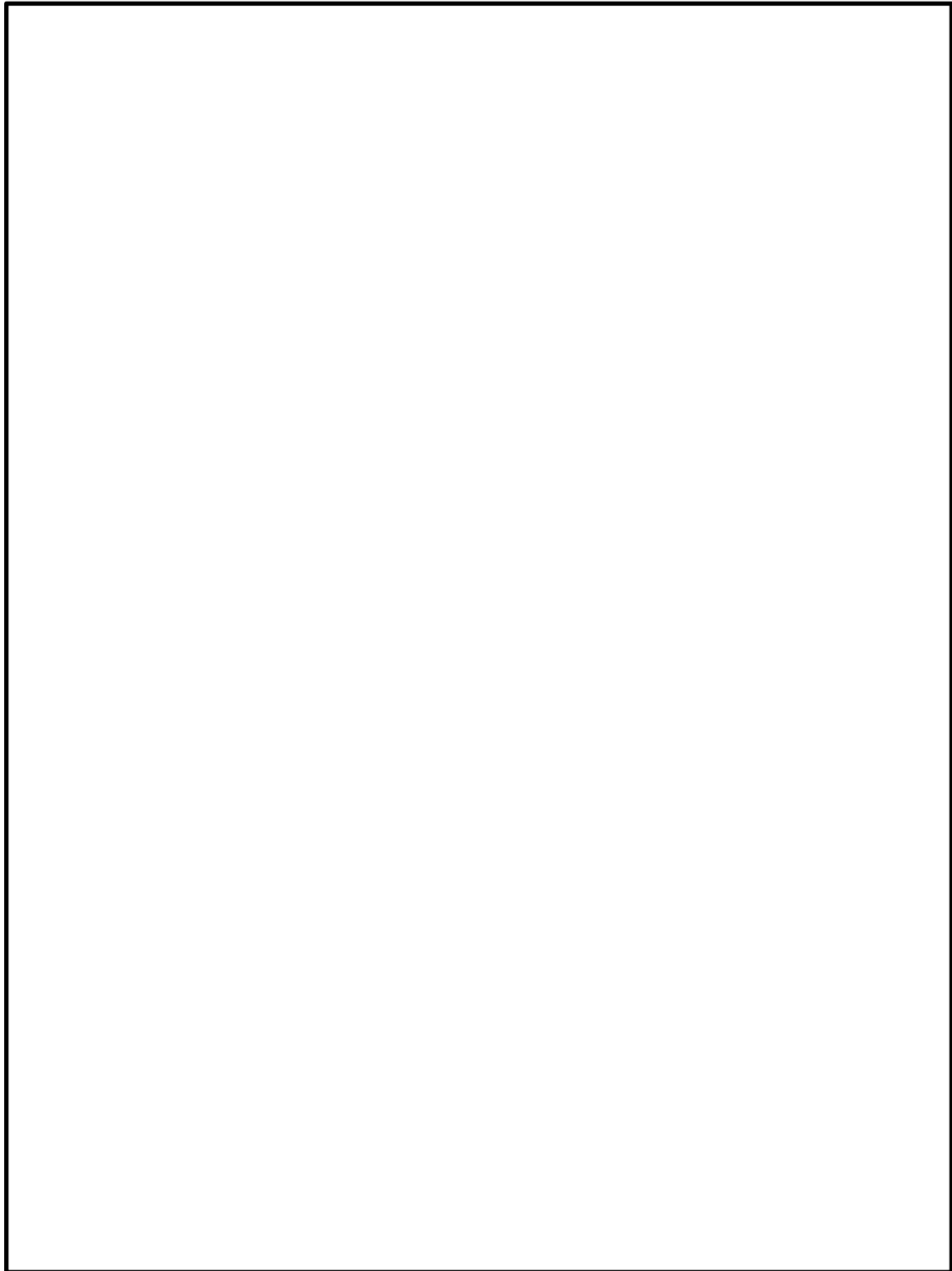


図4 代表振動モード図 (4次モード)

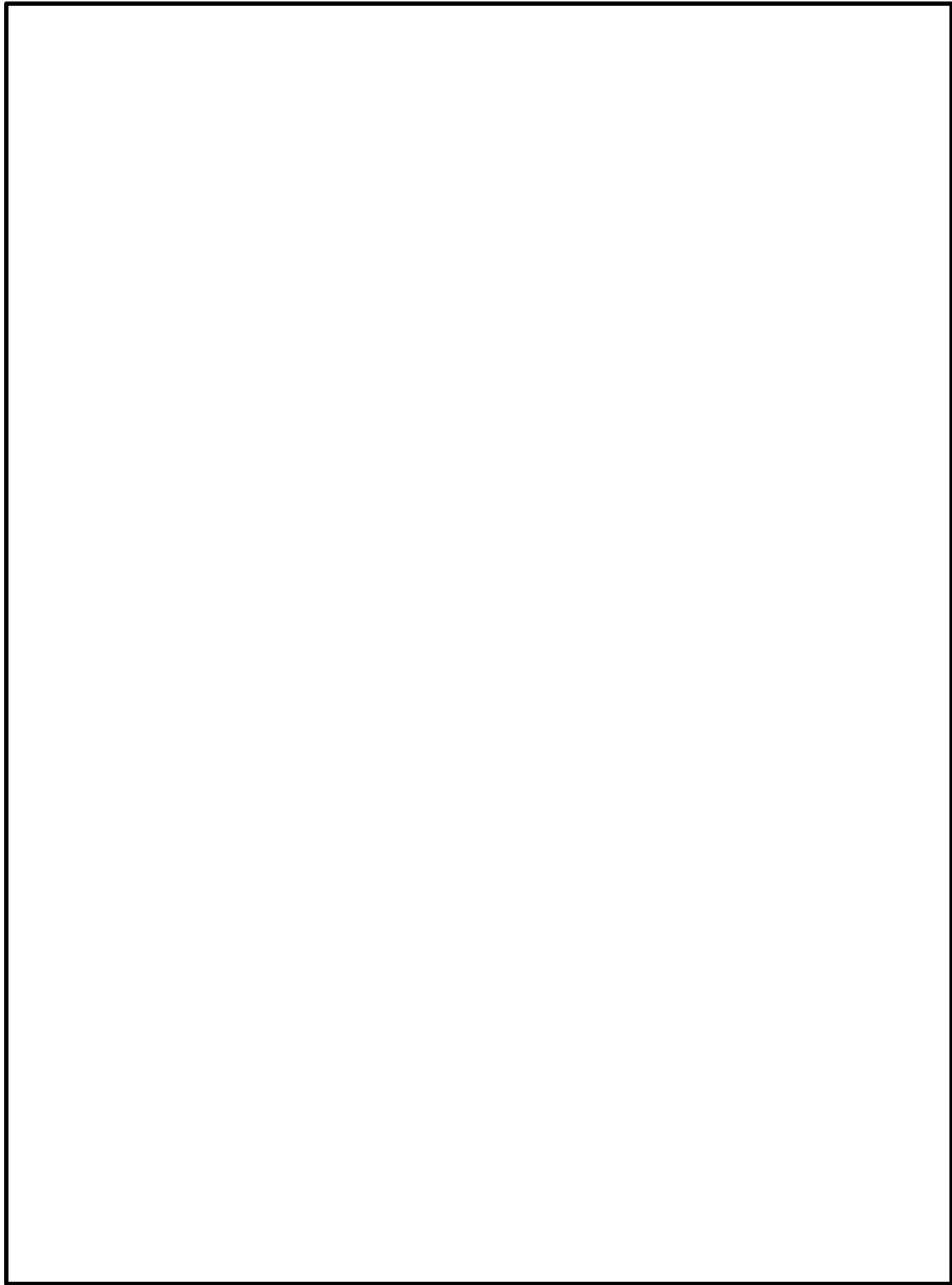


図5 代表振動モード図 (5次モード)

2. 影響評価

表 2 に最大発生曲げモーメント評価点における発生曲げモーメントのモード合成値に対する各モードの比率を示す。また、図 6 に最大発生曲げモーメント評価点を示す。

表 2 より、最大発生曲げモーメント評価点において、発生曲げモーメントは 1 次モードが支配的であることがわかる。また、表 1 より、えび状部の剛性低下を考慮していない 3 次元はりモデルと比較して、3 次元シェルモデルの 1 次モードの固有周期は 6% 程度の差である。これは設計床応答スペクトルの拡幅 10% の範囲内である。したがって、解析結果に有意な影響を与えないことを確認した。

表 2 発生曲げモーメントのモード合成値に対する各モードの比率

評価点	モード	曲げモーメント [kN・m]				モード合成値に対する比率	固有周期比較 (シェル／はり)
		Mx	My	Mz	SRSS		
38	モード合成	7.36×10^2	1.31×10^2	1.04×10^3	1.28×10^3	—	—
	1 次	6.08×10^2	6.98×10	9.65×10^2	1.15×10^3	0.90	1.060
	2 次	1.50×10^2	1.01×10	2.15	1.50×10^2	0.12	1.139
	3 次	3.87×10^2	9.95×10	2.98×10^2	4.98×10^2	0.39	1.084
	4 次	1.04	4.37×10	2.17×10^2	2.21×10^2	0.17	1.009
	5 次	8.23	1.50×10	1.81	1.72×10	0.01	1.193



図 6 最大発生曲げモーメント評価点

3. 引用文献

- (1) 発電用原子力設備規格（設計・建設規格（2005 年版（2007 年追補版含む。））J SME S N C 1-2005/2007）PPB-3860

補足-027-10-79 ガスタービン発電機の動的機能維持の
詳細評価について

目 次

1. はじめに	1
2. 評価項目の抽出方針	1
3. 構造及び動作原理の概要	2
4. 動的機能維持評価の評価項目の抽出	8
5. ガスタービン発電機の地震時異常要因分析による基本評価項目の抽出	10
5.1 異常要因分析	10
5.2 基本評価項目の抽出	17
6. 類似機種 of 地震時異常要因分析による基本評価項目	25
6.1 耐特委で検討された非常用ディーゼル発電機の基本評価項目との比較	25
6.2 耐特委で検討されたポンプ駆動用タービン（AFWP用）の基本評価項目 との比較	38
7. ガスタービン発電機の評価対象項目	42
7.1 ガスタービン発電機の評価対象項目の選定	42
7.2 類似機種の代表評価項目との比較	48
8. 工認耐震計算書における機能維持評価手法	51
8.1 ガスタービン発電機の評価内容及びその妥当性の検討	51
8.2 評価結果	53
9. まとめ	56

別紙1 ガスタービン発電機の加振試験について

1. はじめに

ガスタービン発電機の動的機能維持評価については、J E A G 4 6 0 1 に定められた機能確認済加速度との比較による評価方法が適用できる機種範囲から外れることから、新たに評価項目の検討が必要となる。本資料では、VI-2-10-1-2-3-1「ガスタービン発電機ガスタービン機関及び発電機の耐震性についての計算書」におけるガスタービン発電機の動的機能維持の評価内容詳細を示す。

2. 評価項目の抽出方針

ガスタービン発電機については、J E A G 4 6 0 1 に定められた適用範囲から外れ機能確認済加速度との比較による評価方法が適用できないことから、「新たな検討」（新たに評価項目の検討）が必要となる設備である。

J E A G 4 6 0 1 に定められた機能確認済加速度との比較による評価方法が適用できる機種範囲から外れた設備における動的機能維持の検討方針としては、公知化された検討として原子力発電耐震設計特別調査委員会（以下「耐特委」という。）での地震時機能維持評価についての検討^{*1}により取り纏められた類似機器における検討及び電力共通研究^{*2}

（以下「電共研」という。）にて取り纏められた類似機器の検討をもとに実施する。

具体的には、耐特委では動的機能の評価においては、対象機種ごとに現実的な地震応答レベルでの異常のみならず、破壊に至るような過剰な状態を念頭に地震時に考え得る異常状態を抽出し、その分析により動的機能上の評価点を検討し、動的機能維持を評価する際に確認すべき事項として、基本評価項目を選定している。また、電共研の検討では、耐特委及び原子力発電技術機構（以下「N U P E C」という。）での検討を踏まえて、動的機能維持の基本評価項目を選定している。

今回 J E A G 4 6 0 1 に定められた適用機種範囲から外れた設備については、作動原理、構造又は機能が類似している構成設備を有する機種／形式に対する耐特委及び電共研での検討を参考に、形式による構造の違いを踏まえたうえで地震時異常要因分析を実施し、基本評価項目を選定し動的機能維持評価を実施する。

なお、J E A G 4 6 0 1 においても、機能維持評価の基本方針として、地震時の異常要因分析を考慮し、動的機能の維持に必要な評価のポイントを明確にすることとなっている。注記*1：耐特委報告書「動的機器の地震時機能維持評価に関する調査報告書（昭和62年2月）」

*2：電力共通研究「動的機器の地震時機能維持の耐震余裕に関する研究（平成25年3月）」

3. 構造及び動作原理の概要

ガスタービン発電機の概略構造図及び概略構成図を図 3-1 及び図 3-2 に、ガスタービン機関の構造図を図 3-3 に示す。ガスタービン発電機の構造、動作原理は下記のとおりである。

全体構成

- ・ガスタービン発電機は、図 3-1 に示すように同一の台板上にガスタービン機関及び発電機が据え付けられた構造となっている。
- ・ガスタービン機関及び発電機は、軸継手によって連結されており、ガスタービン機関によって出力軸を回転させ、軸継手を介して発電機回転子を回転させて発電を行う。
- ・ガスタービン発電機には、運転に必要な空気の取り込み、排出を行うために、伸縮継手を介して専用のダクト（吸排気設備）を設けている。

ガスタービンの構成について

- ・ガスタービンは、図 3-3 に示すとおり、動力を発生させる機関部と軸の回転数を発電機に適した回転数に変換する減速機部で機能を分担している。
- ・機関部については、主に圧縮機、燃焼器、タービンで構成されており、圧縮機で燃焼用の空気の吸込み、圧縮を行い、燃焼器にて圧縮空気と噴霧状にした燃料油を混合、燃焼させて高温・高圧の燃焼ガスを発生させ、そのガスによってタービンを回転させて動力を得ている。
- ・タービンと圧縮機は同軸上に設けており、タービンで得た動力を利用し、圧縮機を回転させ自立運転を確立する。
- ・減速機部については、主に歯車で構成されており、ガスタービンの回転数を大小の歯車で変換し、発電機に適した回転数に変換するほか、ガスタービン付きの機械式のポンプ（主燃料油ポンプ）と歯車で連結させて動力伝達を行う。

以上より、ガスタービンにおいて要求される機能は回転の継続、駆動性能維持、機関回転速度（回転数）の減速であり、これらの機能の維持に必要な機器／部位として以下が挙げられる。（後述の各系統の関連機器／部位を除く）

- ・ガスタービン（機関）ケーシング
- ・ガスタービン（機関）軸系（軸・軸受）
- ・燃焼器
- ・ガスタービン（減速機）ケーシング
- ・ガスタービン（減速機）軸系（軸・歯車・軸受）

ガスタービンの出力制御系について

- ・ガスタービンは、燃料油の投入量によって回転数、出力を制御することができる。燃料油は、減速機部に設置された機械式の主燃料油ポンプによって供給するが、ガスタービンの回転軸より動力を得るため、ポンプ単体で燃料油の投入量を制御できない。そのため、ガスタービンの回転数を一定に保つべく、回転速度センサーの信号を受けて、燃料制御装置にて燃料油の投入量を制御する。また、燃焼状態は排気温度センサーにて監視する。
- ・燃料制御装置は、燃料制御ユニット、燃料制御ユニットを制御する燃料制御ユニットドライバ及び燃料油供給電磁弁で構成される。燃料制御ユニット及び燃料油供給電磁弁は、燃料油供給ライン上に設置しており、燃料油の投入量を燃料制御ユニットにて調整する。燃料油供給電磁弁は、燃料制御ユニットの下流に設けており、トリップ信号を受けた際に、燃料油供給ラインを遮断し、ガスタービンを緊急停止させることができる。

以上より、出力制御系において要求される機能は、機関回転速度の制御であり、その機能の維持に必要な機器として以下が挙げられる。また、出力制御系のブロックイメージ図を図 3-4 に示す。

- ・燃料制御ユニット
- ・燃料制御ユニットドライバ
- ・燃料油供給電磁弁
- ・回転速度センサー
- ・排気温度センサー

ガスタービンの着火系について

- ・燃焼器において噴霧状の燃料油と圧縮空気を混合し、点火プラグにて着火させる。一度着火すると燃焼ガスによって燃焼器内は高温となるため、燃料油は自然着火し、燃焼状態が維持される。したがって、点火プラグによる着火は始動時のみとなる。ここで、点火プラグは銅芯、電極及び絶縁体から構成され、高電圧で火花を飛ばすことで着火させる装置である。また、点火エキサイタは電気回路、コンデンサー及びコイルから構成され、直流電圧をコンデンサーに蓄電し、コイルで昇圧した高電圧を点火プラグへ供給する装置である。

以上より、着火系において要求される機能は、始動時の着火機能であり、その機能の維持に必要な機器として以下が挙げられる。

- ・点火プラグ
- ・点火エキサイタ

ガスタービンの始動系について

- ・ 始動時には、始動用蓄電池によりスタータモータを始動させ、減速機部の歯車を回転させることで、連結しているタービンの回転軸を回転させる。これにより圧縮機が回転し、空気の吸込み、圧縮が行われる。合わせて、始動用蓄電池により電気式の始動用燃料油ポンプを始動させて、燃料油を燃焼器に投入し、ガスタービンの着火系により燃焼させる。自立運転が可能となる回転数までスタータモータにより運転をアシストする。

以上より、始動系において要求される機能は、始動機能であり、その機能の維持に必要な機器として以下が挙げられる。

- ・ スタータモータ

ガスタービンの燃料油系について

- ・ 燃料油系には、機械式の主燃料油ポンプと、電気式の始動用燃料油ポンプが設けられている。始動用燃料油ポンプは、ガスタービンの始動系で示すように、主燃料油ポンプの吐出能力が低い始動時の低回転数での不足分を補うために設けている。

以上より、燃料油系において要求される機能は、燃料油供給機能であり、その機能の維持に必要な機器として以下が挙げられる。

- ・ 主燃料油ポンプ
- ・ 始動用燃料油ポンプ
- ・ 始動用燃料油ポンプ用モータ

ガスタービンの潤滑油系について

- ・ ガスタービンの軸受周りへ潤滑油を供給するために、減速機部に設置された機械式の潤滑油ポンプで潤滑油を循環する。

以上より、潤滑油系において要求される機能は、潤滑機能であり、その機能の維持に必要な機器として以下が挙げられる。

- ・ 潤滑油ポンプ

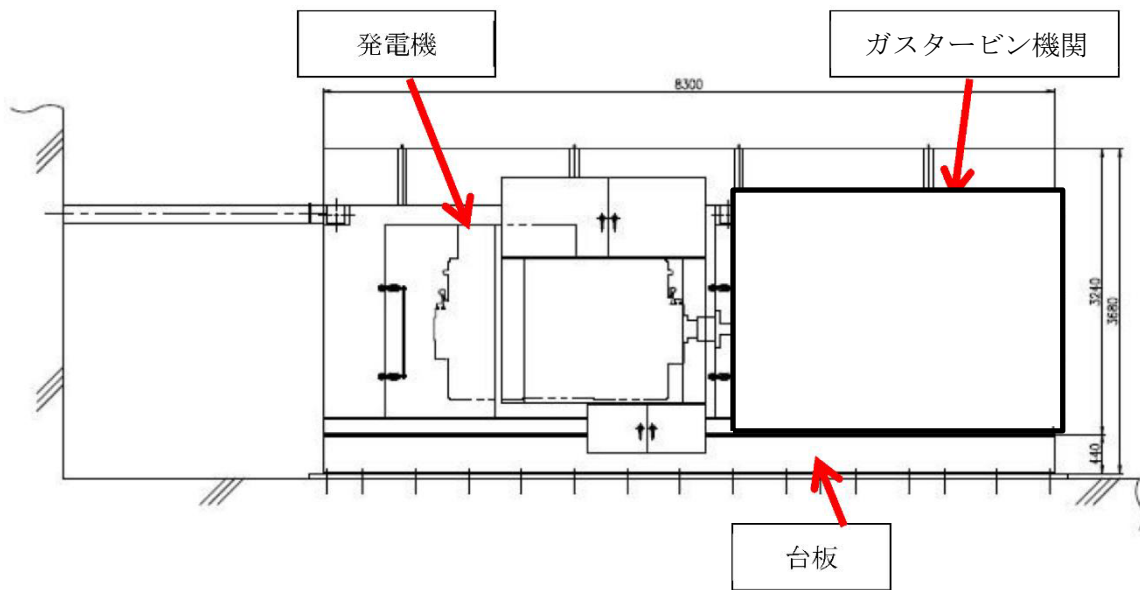


図 3-1 ガスタービン発電機の概略構造図

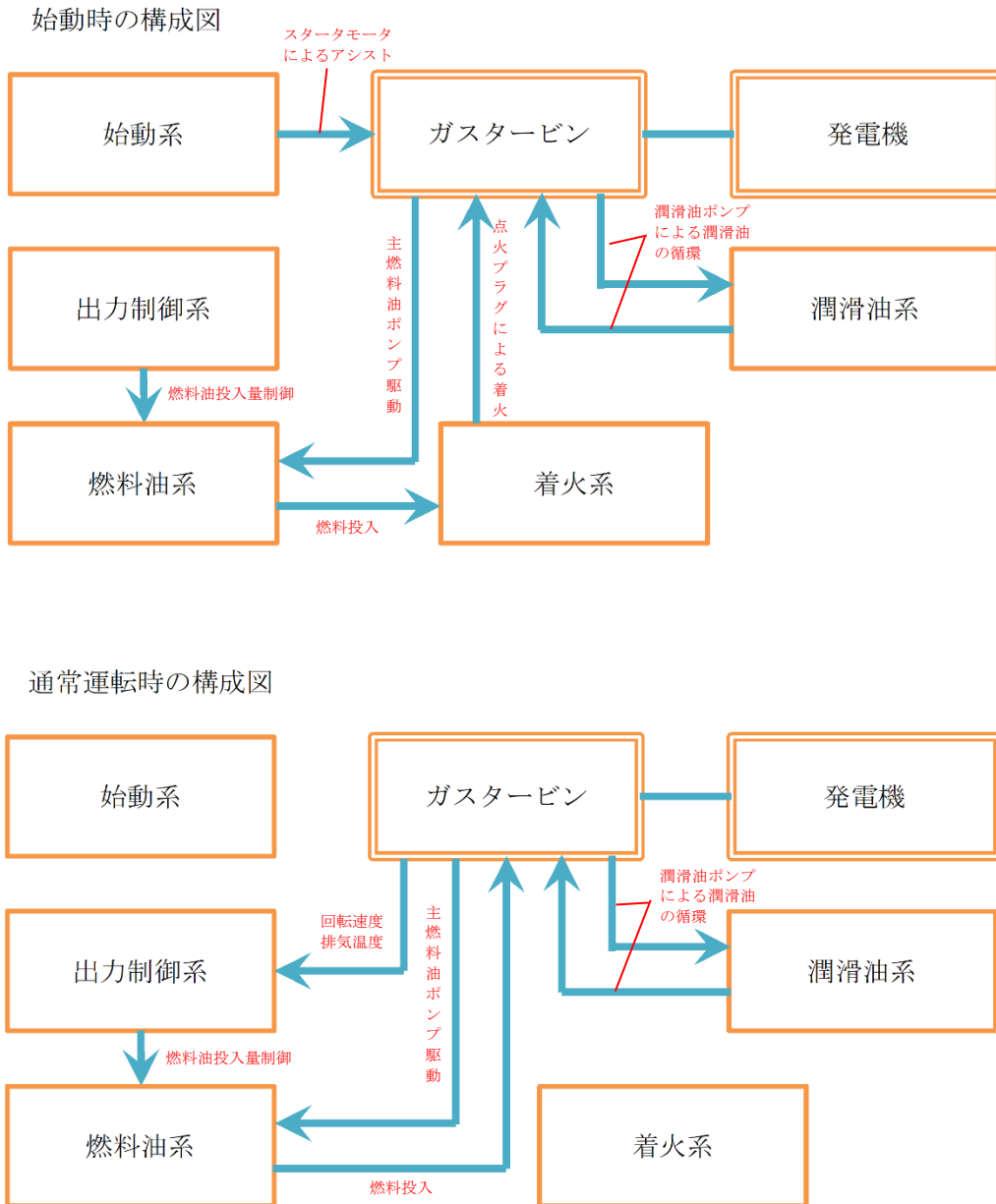
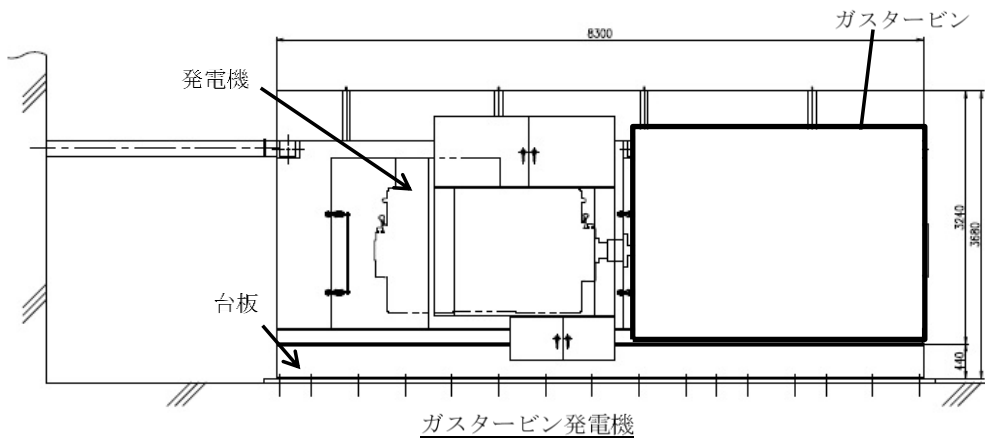
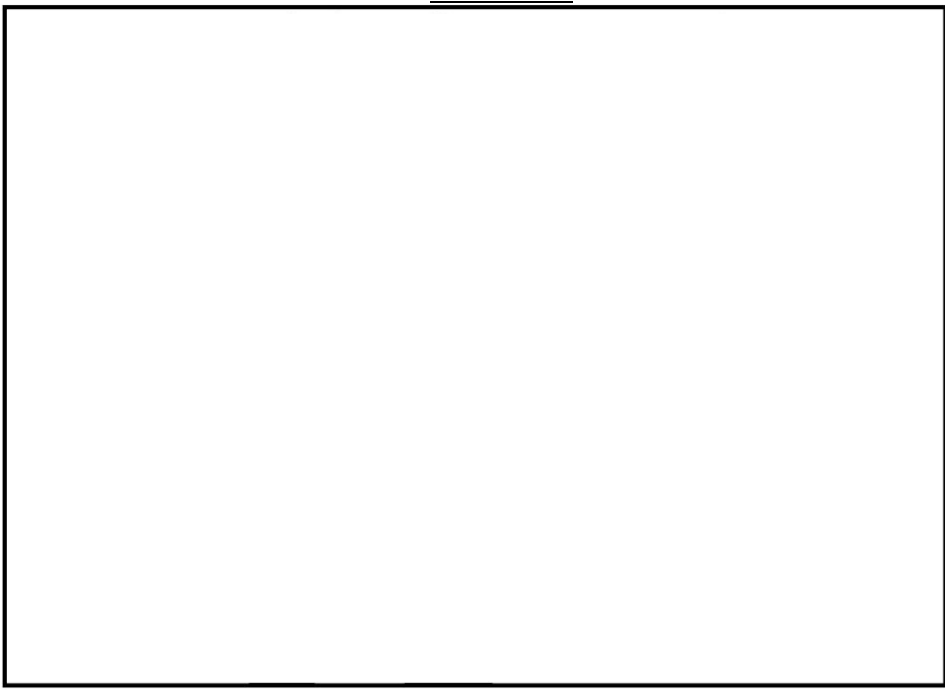


図 3-2 ガスタービン発電機の概略構成図



ガスタービン



ガスタービン機関

図 3-3 ガスタービン機関の構造概要図

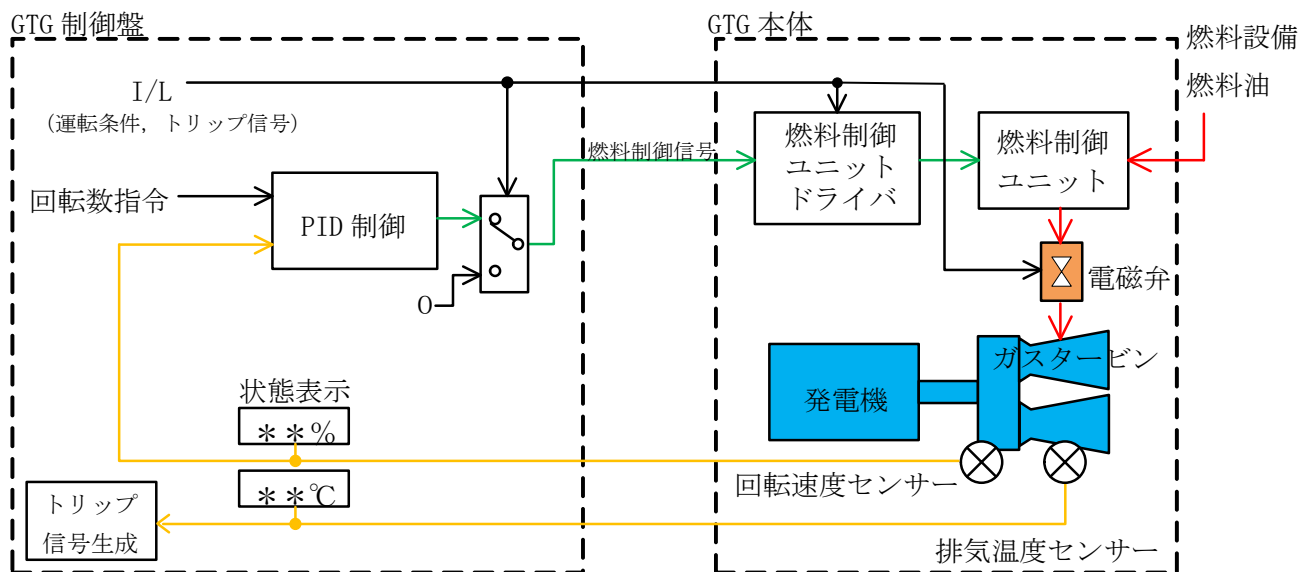


図 3-4 出力制御系のブロックイメージ図

4. 動的機能維持評価の評価項目の抽出

「新たな検討」が必要な設備であるガスタービン発電機の動的機能維持評価の評価項目については、ガスタービン発電機に対する地震時異常要因分析を踏まえて基本評価項目を抽出する。また、耐特委で検討された非常用ディーゼル発電機及びポンプ駆動用タービンに対する地震時異常要因分析による基本評価項目を参照し、ガスタービン発電機の基本評価項目の網羅性及び工認計算書に記載する基本評価項目（以下「評価対象項目」という。）を確認する。

ガスタービン発電機における動的機能維持評価のための基本評価項目の抽出及び工認計算書における評価対象項目の選定フローを図 4-1 に示す。

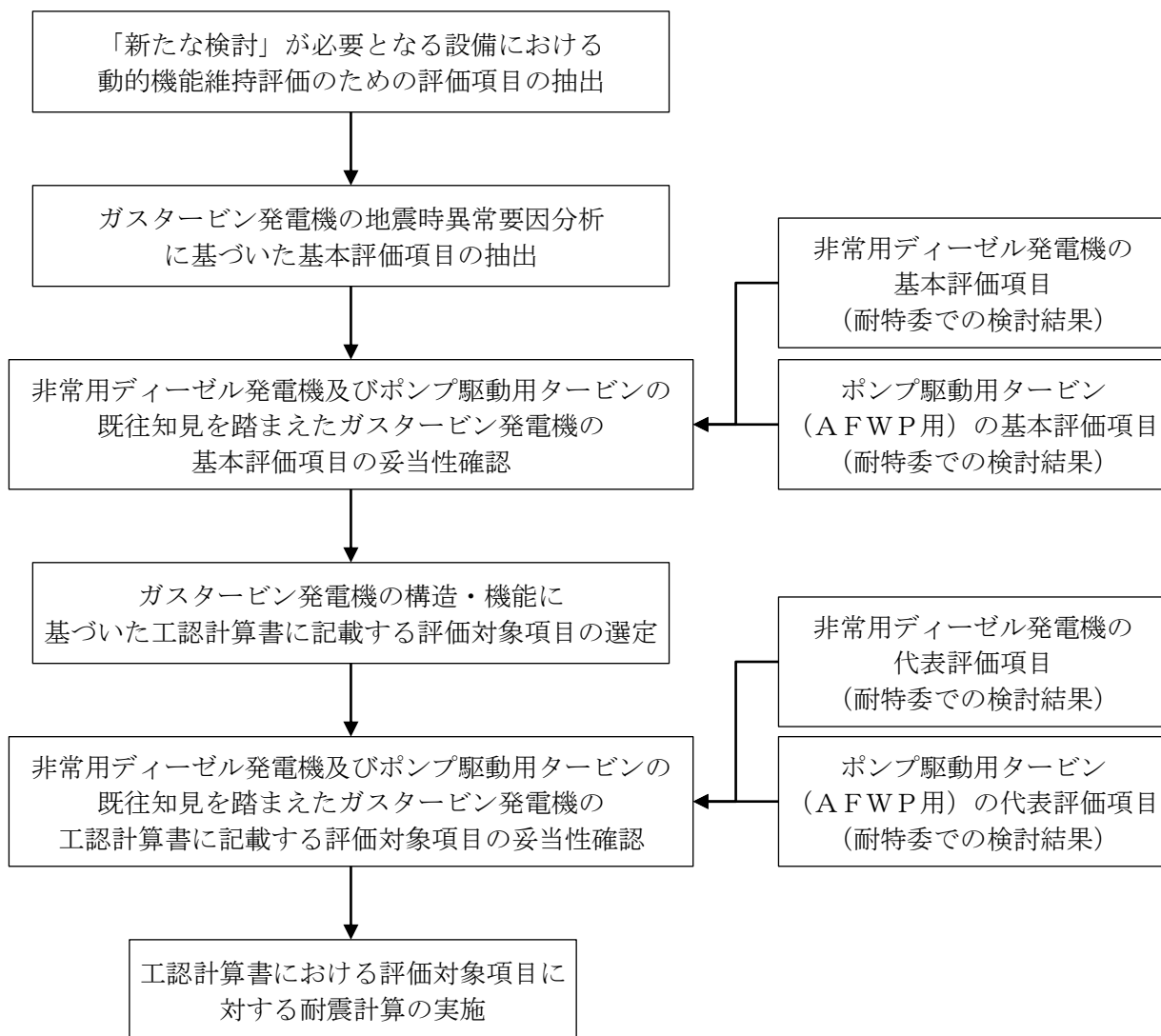


図 4-1 動的機能維持評価のための評価対象項目の選定フロー

5. ガスタービン発電機の地震時異常要因分析による基本評価項目の抽出

ガスタービン発電機の動的機能維持を評価するうえで、ガスタービン及びガスタービン付き機器を対象に評価項目を検討した。図 3-1 に示すガスタービン発電機のうち、台板等の構造物は動作を要求される機器ではないため、本検討の対象外とした。また、ガスタービン発電機の関連設備として、非常用ディーゼル発電機における吸排気設備やデイトンク等と同様の付帯設備として設置される設備も存在するが、既往の非常用ディーゼル発電機にて評価手法が確立されているため、本検討の対象外とした。発電機については、非常用ディーゼル発電機における発電機の評価と同様に、基本構造が同一である電動機における機能確認済加速度との比較により動的機能維持評価を行う。なお、ガスタービンと発電機は、軸継手により連結しているが、それぞれの軸は機器両端の軸受で支持されており、軸継手には変位吸収が可能なダイヤフラムカップリングを用いて、軸端の応答が互いに影響を及ぼさない構造となっているため、機器は個別に評価が可能である。

以降、ガスタービン及びガスタービン付き機器を対象に検討を行う。

5.1 異常要因分析

ガスタービン及びガスタービン付き機器の動的機能維持評価項目は、J E A G 4 6 0 1 -1991 追補版に定められる動的機能維持評価の考え方を参考に、異常要因分析によって、地震により機能喪失に至る要因・現象を検討することで、必要な評価項目を抽出する。

ガスタービン及びガスタービン付き機器の異常要因分析を、「3. 構造及び動作原理の概要」にて説明した設備構成や系統構成を踏まえて、以下の6つの区分に分類し、実施した。

<異常要因分析の検討区分>

- I ガスタービン（機関、減速機）
- II 出力制御系
- III 着火系
- IV 始動系
- V 燃料油系
- VI 潤滑油系

ガスタービン及びガスタービン付き機器を上記のように分類することで個々の評価対象を網羅的に分析することが可能である。各区分における異常要因モードは、構成機器の構造及び動作機構を考慮して検討した。異常要因分析図を図 5-1～図 5-6 に示す。なお、設備構成や系統構成により分割して異常要因分析を行う手法は、耐特委における非常用ディーゼル発電機の異常要因分析の手法に倣ったものである。上記に示した異常要因分析の検討区分は、非常用ディーゼル発電機と同様であることから、非常用ディーゼル発電機と同様の手法により異常要因分析を行うことで、同等の評価項目の網羅性を確保することができる。非常用ディーゼル発電機の異常要因分析結果の概要については、「6.1 耐特委で検討された非常用ディーゼル発電機の基本評価項目との比較」に記す。

また、ガスタービン部分の異常要因分析については、ターボ機械という観点で類似の動作

原理, 構造をもつポンプ駆動用タービンの異常要因分析結果も確認し, 同等な異常要因モードであることを確認している。ポンプ駆動用タービンの構造, 異常要因分析結果についても「6.2 耐特委で検討されたポンプ駆動用タービン(AFWP用)の基本評価項目との比較」に示す。

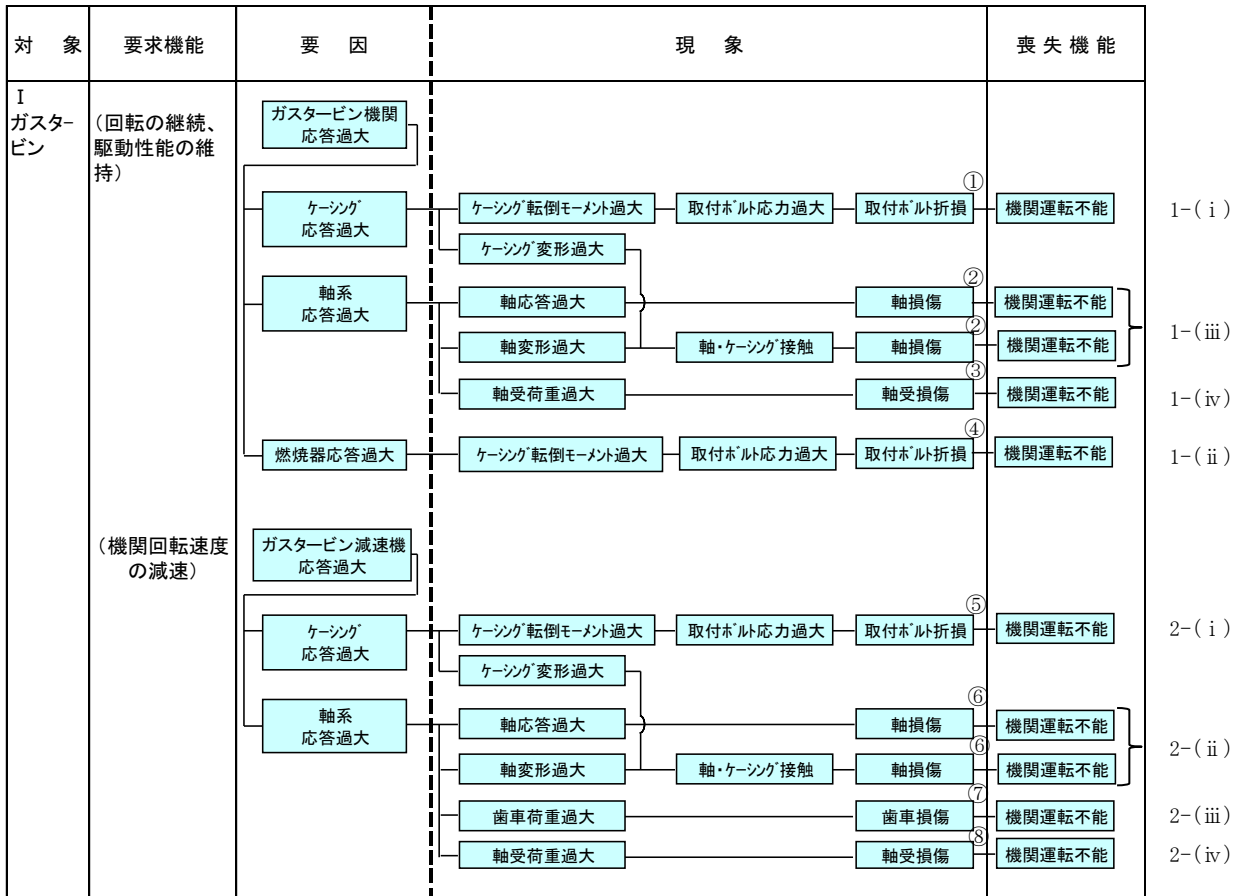
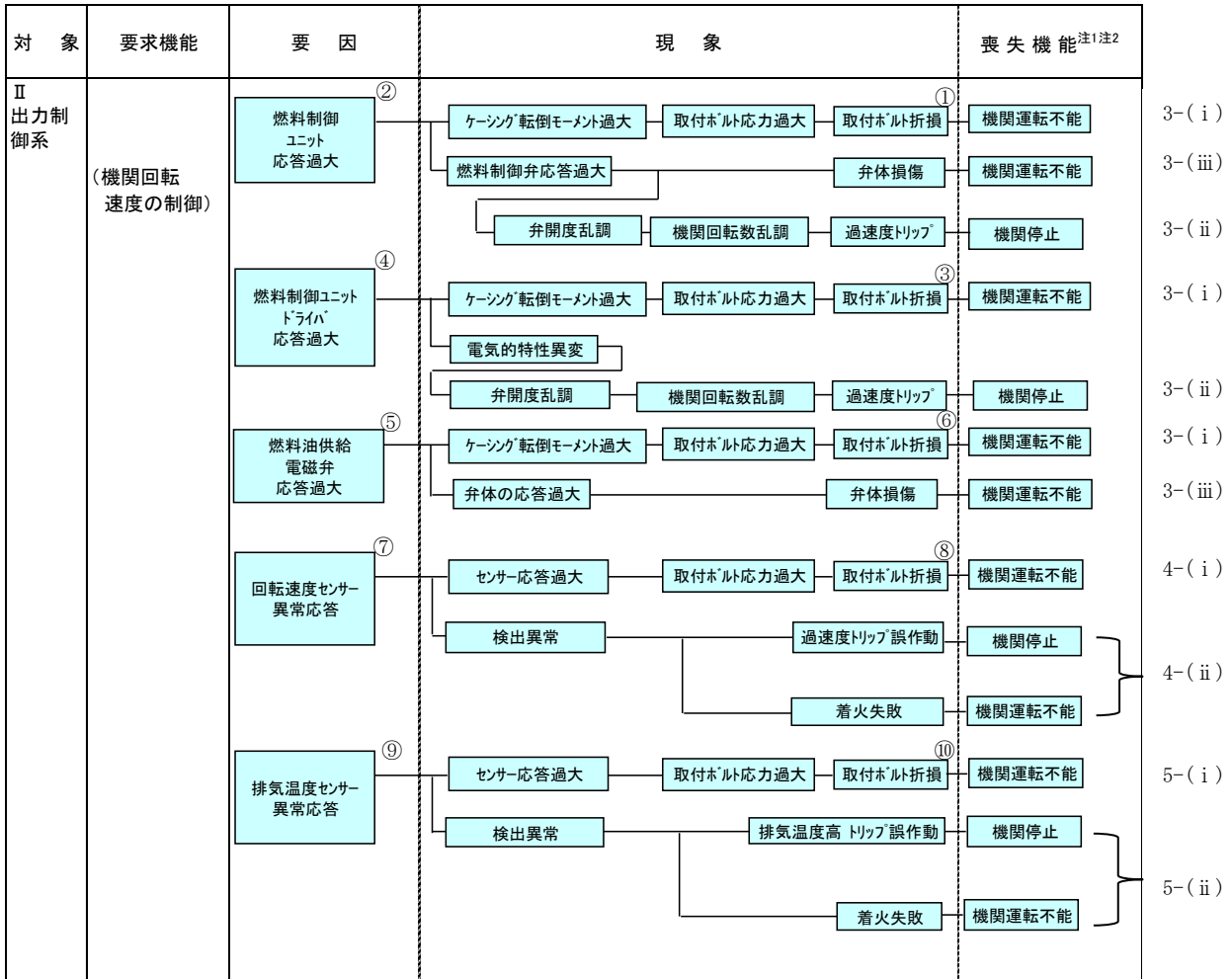


図 5-1 異常要因分析図と構造図 (ガスタービン)



注1 機関運転不能：構成機器の損傷や動作不良により運転が不能となる。

注2 機関停止：誤信号によるトリップにより運転が停止する（損傷に至らない）。

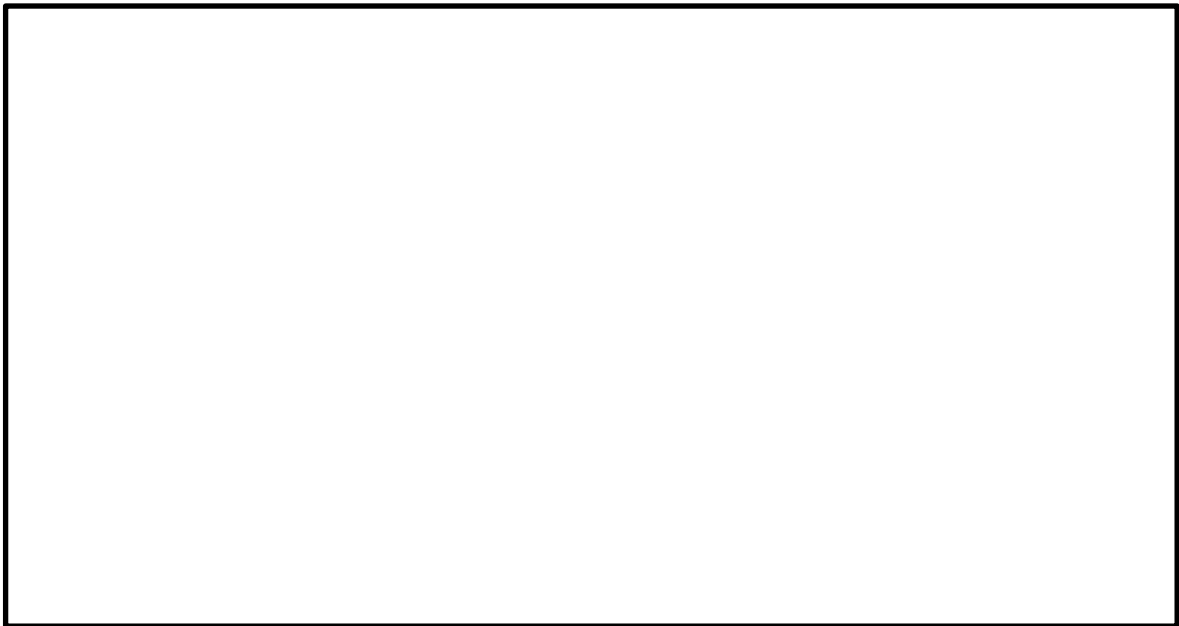


図5-2 異常要因分析図と構造図（出力制御系）

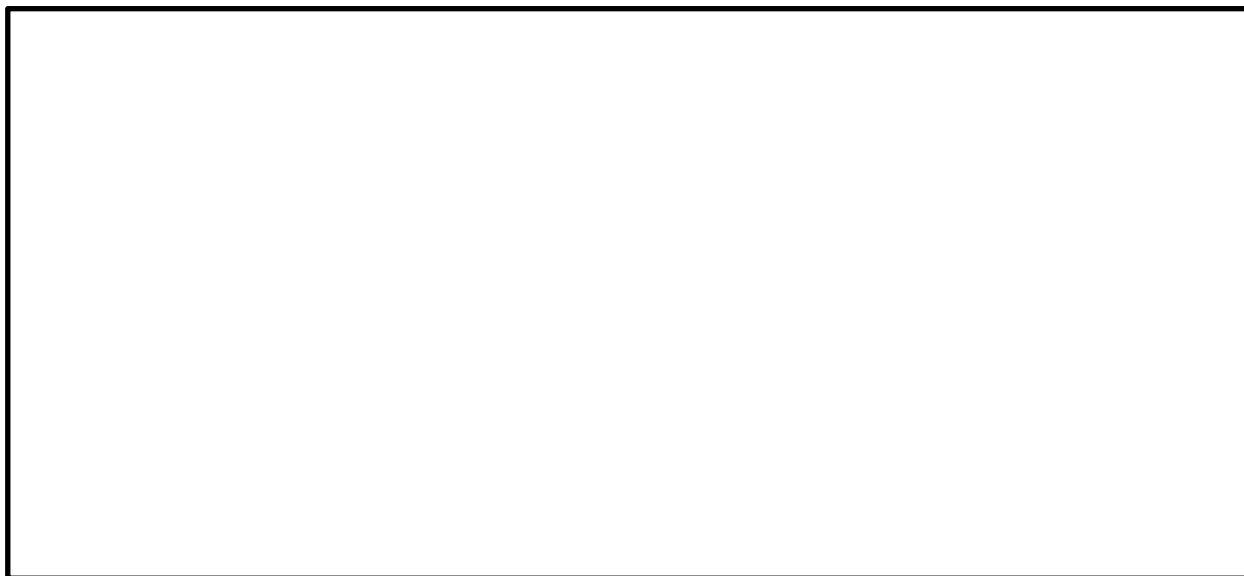
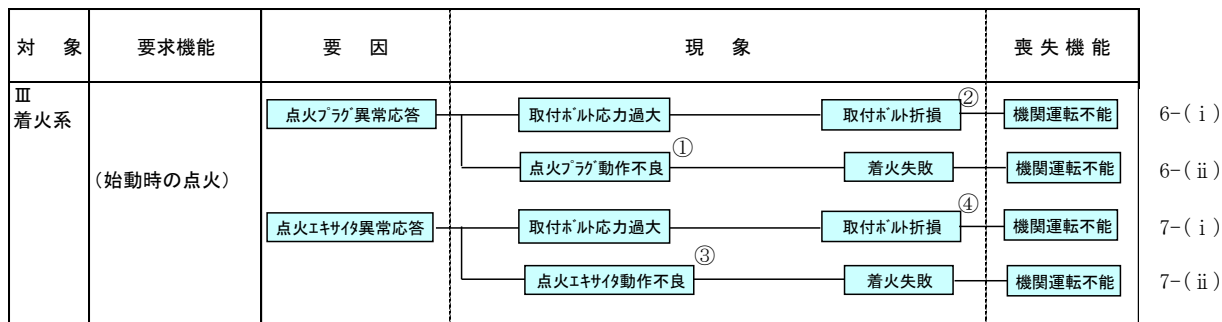


図 5-3 異常要因分析図と構造図 (着火系)

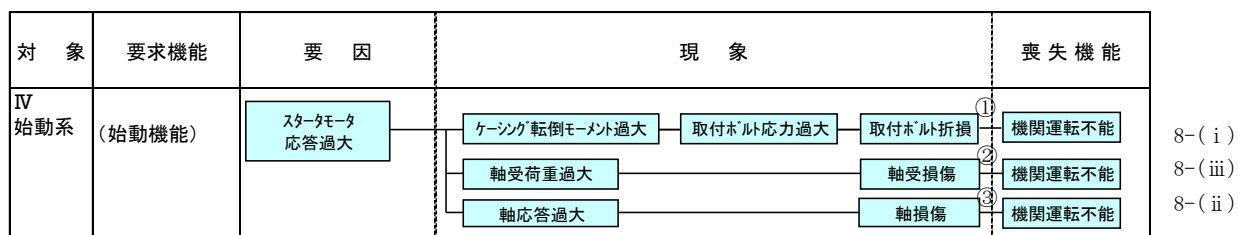


図 5-4 異常要因分析図と構造図 (始動系)

対象	要求機能	要因	現象	喪失機能				
V 燃油系	(燃料油供給機能)	主燃料油ポンプ 応答過大	ケース倒 モーメント過大	取付ホルド応答過大	取付ホルド折損 ^①	燃料噴射不能	機関運転不能	9-(i)
			軸受荷重過大	軸受損傷			機関運転不能	9-(iii)
			軸応答過大	軸損傷			機関運転不能	9-(ii)
		始動用燃料油ポンプ 応答過大	ケース倒 モーメント過大	取付ホルド応答過大	取付ホルド折損 ^④	燃料噴射不能	機関運転不能	10-(i)
			軸受荷重過大	軸受損傷			機関運転不能	10-(iii)
			軸応答過大	軸損傷			機関運転不能	10-(ii)
		始動用燃料油ポンプ用 モータ応答過大	ケース倒 モーメント過大	取付ホルド応答過大	取付ホルド折損 ^⑦		機関運転不能	11-(i)
			軸受荷重過大	軸受損傷			機関運転不能	11-(iii)
			軸応答過大	軸損傷			機関運転不能	11-(ii)

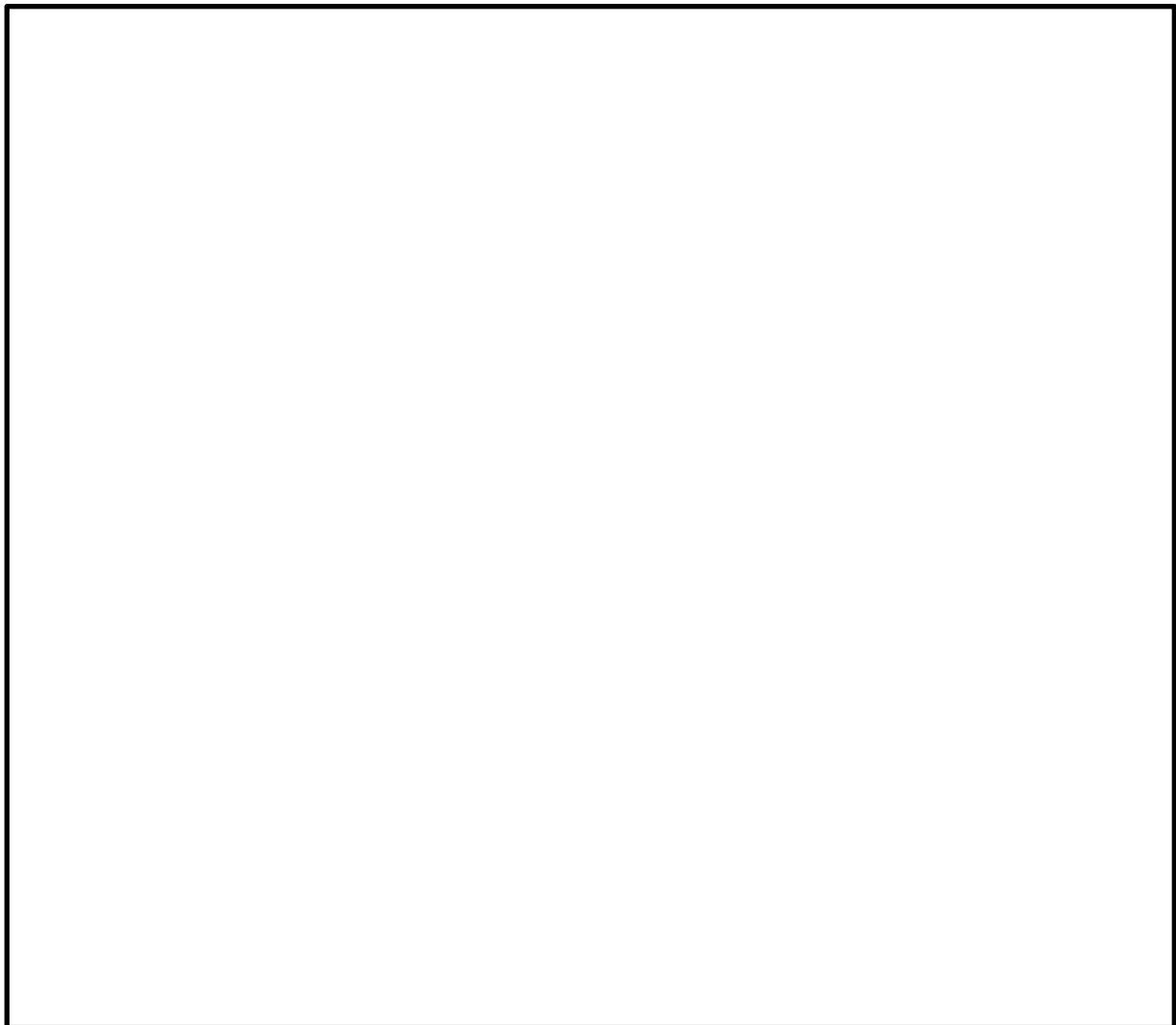


図 5-5 異常要因分析図と構造図 (燃料油系)

対象	要求機能	要因	現象	喪失機能
VI 潤滑油系	(潤滑機能)	潤滑油ポンプ 応答過大	<pre> graph LR A[潤滑油ポンプ 応答過大] --> B[ケージング転倒 モーメント過大] A --> C[軸受荷重過大] A --> D[軸応答過大] B --> E[取付ボルト応答過大] C --> F[軸受損傷] D --> G[軸損傷] E --> H[取付ボルト折損] F --> H G --> H H --> I[潤滑油流出] I --> J[機関運転不能] </pre>	機関運転不能 12-(i) 機関運転不能 12-(iii) 機関運転不能 12-(ii)

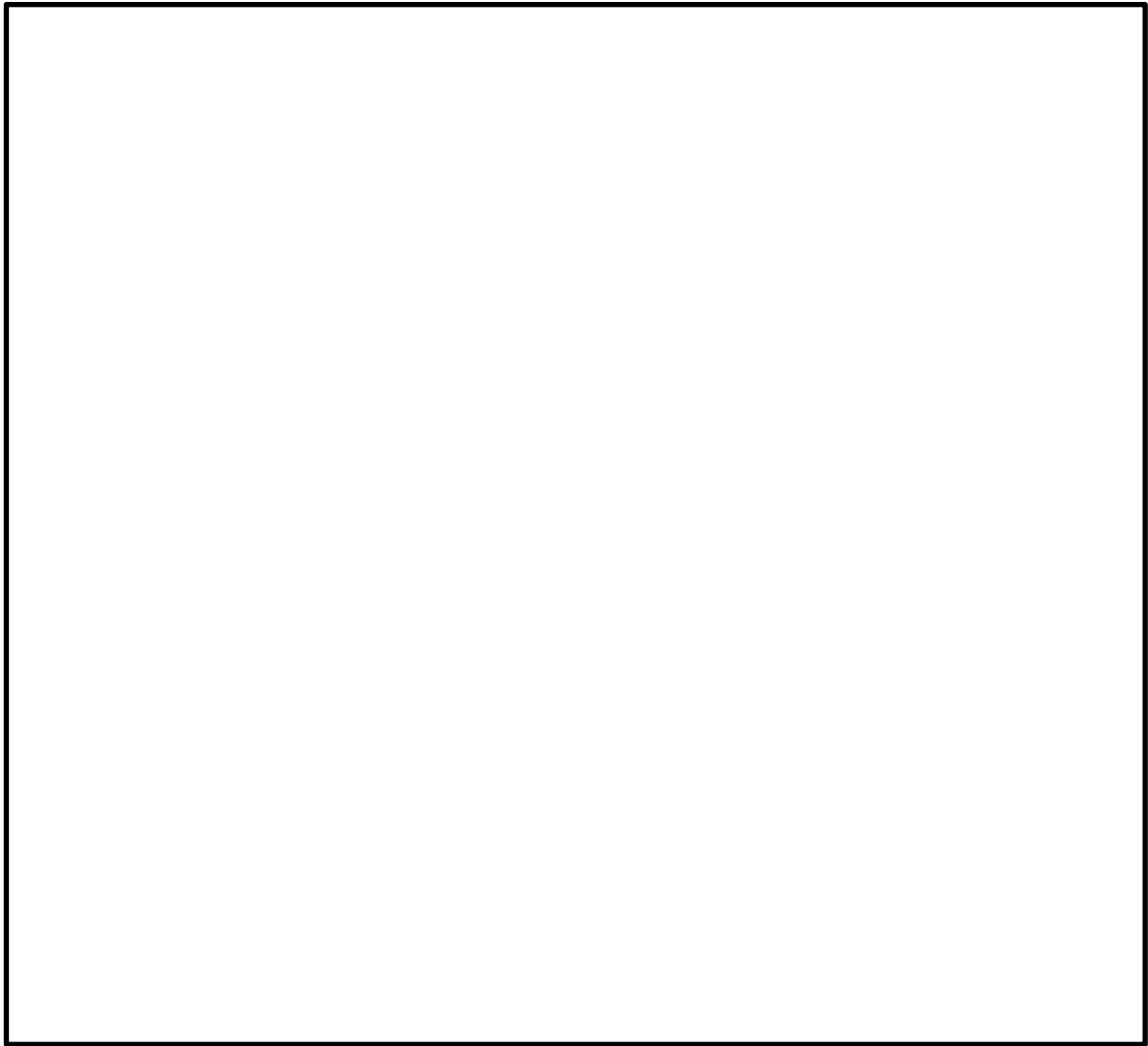


図 5-6 異常要因分析図と構造図（潤滑油系）

5.2 基本評価項目の抽出

異常要因分析に基づき、ガスタービン及びガスタービン付き機器に対して、以下に示すとおり全 34 項目の基本評価項目を抽出した。

なお、図 5-1～5-6 図の異常要因分析におけるガスタービン（機関）等の軸応答過大による軸損傷は、次の理由により軸とケーシングのクリアランス評価にて代替評価する。軸損傷は軸部のケーシングへの接触や破断がその対象となる。いずれも軸に作用する外力によって軸の変形を伴う事象であるが、構造的な特徴として破断に至る前に軸とケーシングが接触する。よって、軸の破断に対する強度評価は、軸とケーシングのクリアランスを評価することで包絡可能である。

異常要因分析に基づき抽出される評価項目は以下のとおりである。

I ガスタービン

1 - (i) ガスタービン（機関）ケーシング取付ボルトの健全性

ガスタービン（機関）の地震応答が過大となると、転倒モーメントによるガスタービン（機関）の取付ボルトの応力が過大となる。その結果、取付ボルトが損傷に至り、機関ケーシング部が脱落し、回転の継続及び駆動性能の維持機能を喪失する。

よって、基本評価項目として、ガスタービン（機関）のケーシング取付ボルト強度を選定する。

1 - (ii) 燃焼器取付ボルトの健全性

燃焼器の地震応答が過大となると、転倒モーメントによる取付ボルトの応力が過大となる。その結果、取付ボルトが損傷に至り、燃焼器が脱落し、燃焼ガスを保持できなくなり機関の回転の継続及び駆動性能の維持機能を喪失する。

よって、基本評価項目として、燃焼器の取付ボルト強度を選定する。

1 - (iii) ガスタービン（機関）摺動部（軸とケーシングのクリアランス）の健全性

ガスタービン（機関）の地震応答が過大となると、回転軸の応答が過大となり、軸部の変形によりケーシングに付随する静止部と接触する。その結果、軸部が損傷に至り、回転の継続及び駆動性能の維持機能を喪失する。

よって、基本評価項目として、軸（回転部）とケーシングのクリアランスを選定する。なお、クリアランスを形成する静止部は軸よりも外径側にあり、かつ耐圧構造で剛性の高いケーシングに固定するため、その変形量は微小となる。よって、変形量の評価は軸のみを対象とする。

1 - (iv) ガスタービン（機関）軸受の健全性

ガスタービン（機関）の地震応答が過大となると、軸受荷重が過大となり、軸受が損傷することにより回転の継続及び駆動性能の維持機能が喪失する。

よって、基本評価項目として、軸受強度を選定する。

2 - (i) ガスタービン（減速機）取付ボルトの健全性

ガスタービン（減速機）の地震応答が過大となると、転倒モーメントによるガスタービン（減速機）の取付ボルトの応力が過大となる。その結果、取付ボルトが損傷に至り、全体系（減速機、機関及び燃焼器）が転倒することで機関回転速度の減速機能を喪失する。

よって、基本評価項目として、ガスタービン（減速機）取付ボルト強度を選定する。

2 - (ii) ガスタービン（減速機）摺動部（軸とケーシングのクリアランス）の健全性

ガスタービン（減速機）の地震応答が過大となると、回転体である歯車の応答が過大となり、歯車軸部の変形によりケーシングと接触する。その結果、軸が損傷に至り、機関回転速度の減速機能を喪失する。

よって、基本評価項目として、軸とケーシングのクリアランスを選定する。なお、ガスタービン（減速機）のケーシングは鋳造の厚肉構造であり剛性が高く、その変形量は微小となる。よって、変形量の評価は軸のみを対象とする。

2 - (iii) ガスタービン（減速機）歯車の健全性

ガスタービン（減速機）の地震応答が過大となると、減速機歯車荷重が過大となる。その結果、歯車が損傷することで機関回転速度の減速機能を喪失する。

よって、基本評価項目として、歯車強度を選定する。なお、歯車同士の接触に伴って生じる歯元曲げ応力が過大となる場合に損傷すると考えられることから、歯元の曲げ応力を評価する。

2 - (iv) ガスタービン（減速機）軸受の健全性

ガスタービン（減速機）の地震応答が過大となると、軸受荷重が過大となり、軸受が損傷することにより機関回転速度の減速機能を喪失する。

よって、基本評価項目として、軸受強度を選定する。

II 出力制御系

3 - (i) 燃料制御ユニット，燃料制御ユニットドライバ，燃料油供給電磁弁取付ボルトの健全性

燃料制御ユニット，燃料制御ユニットドライバ，燃料油供給電磁弁の地震応答が過大となると、転倒モーメントによる取付ボルトの応力が過大となる。その結果、取付ボルトが損傷に至り、脱落することで機関回転速度の制御機能を喪失する。

よって、基本評価項目として、取付ボルト強度を選定する。

3 - (ii) 燃料制御ユニット，燃料制御ユニットドライバ制御機能の健全性

燃料制御ユニット，燃料制御ユニットドライバの地震応答が過大となると、燃料制御ドライバ内の回路の電気的特性に異変が生じ、制御信号に乱れが生じる可能性がある。制御信号が乱れると、燃料制御ユニット内の燃料制御弁の弁開度調整も乱れ、適切な

燃料投入量が得られなくなる。それにより機関回転数の乱調が発生し、過度な燃料が投入された場合は、過速度トリップによりガスタービンが停止する。

各機器の損傷には至らないため、機関回転速度の制御機能の喪失とはならないが、機関停止に至る事象への対策として、基本評価項目に電氣的機能維持確認を選定する。

3 - (iii) 燃料制御ユニット，燃料油供給電磁弁 弁体の健全性

燃料制御ユニット，燃料油供給電磁弁の地震応答が過大となると，弁体が損傷に至り，機関回転速度の制御機能を喪失する。

本弁は，電圧を印加することで開閉を行う電磁弁であり，その構造は単純なものである。弁体は，ばねによって保持されているため，地震による慣性力がばね力を上回ると，弁体が損傷に至る可能性がある。よって，基本評価項目として弁体のばね力評価を選定する。

4 - (i) 回転速度センサー 取付ボルトの健全性

回転速度センサーの地震応答が過大となると，転倒モーメントによる回転速度センサーの取付ボルトの応力が過大となる。その結果，取付ボルトが損傷に至り，回転速度センサーが脱落すると機関回転速度の制御機能を喪失する。

よって，基本評価項目として，回転速度センサーの取付ボルト強度を選定する。

4 - (ii) 回転速度センサーの健全性

回転速度センサーの地震応答が過大となると，定格運転中は検出異常による過速度トリップの誤作動が発生し，ガスタービンが停止する可能性がある。また，始動中は燃料制御異常による着火失敗（機関回転速度の制御機能の喪失）に至る可能性がある。

よって，基本評価項目として，回転速度センサーの電氣的機能維持確認を選定する。

5 - (i) 排気温度センサー取付ボルトの健全性

排気温度センサーの地震応答が過大となると，転倒モーメントによる排気温度センサーの取付ボルトの応力が過大となる。その結果，取付ボルトが損傷に至り，排気温度センサーが脱落することで，始動中の機関回転速度の制御機能を喪失する。

よって，基本評価項目として，排気温度センサーの取付ボルト強度を選定する。

5 - (ii) 排気温度センサーの健全性

排気温度センサーの地震応答が過大となると，定格運転中は検出異常による排気温度高トリップの誤作動が発生し，ガスタービンが停止する可能性がある。また，始動中は燃料制御異常による着火失敗（機関回転速度の制御機能の喪失）に至る可能性がある。

よって，基本評価項目として，排気温度センサーの電氣的機能維持確認を選定する。

III 着火系

6 - (i) 点火プラグ取付ボルトの健全性

点火プラグの地震応答が過大となると、転倒モーメントによる点火プラグの取付ボルトの応力が過大となる。その結果、取付ボルトが損傷に至り、点火プラグが脱落することで始動時の点火機能を喪失し、着火失敗に至る。

よって、基本評価項目として、点火プラグの取付ボルト強度を選定する。

6 - (ii) 点火プラグの健全性

点火プラグの地震応答が過大となることで、始動時に電氣的動作不良が発生すると、点火機能を喪失し、着火失敗に至る。

よって、基本評価項目として、点火プラグの電氣的機能維持確認を選定する。

7 - (i) 点火エキサイタ取付ボルトの健全性

点火エキサイタの地震応答が過大となることで、転倒モーメントによる点火エキサイタの取付ボルトの応力が過大となる。その結果、取付ボルトが損傷に至り、点火エキサイタが脱落することで始動時の点火機能を喪失し、着火失敗に至る。

よって、基本評価項目として、点火エキサイタの取付ボルト強度を選定する。

7 - (ii) 点火エキサイタの健全性

点火エキサイタの地震応答が過大となることで、電氣的動作不良が発生すると、始動時の点火機能を喪失し、着火失敗に至る。

よって、基本評価項目として、点火エキサイタの電氣的機能維持確認を選定する。

IV 始動系

8 - (i) スタータモータ取付ボルトの健全性

スタータモータの地震応答が過大となることで、転倒モーメントによる取付ボルトの応力が過大となる。その結果、取付ボルトが損傷に至り、スタータモータが転倒することで始動機能を喪失する。

よって、基本評価項目として、スタータモータの取付ボルト強度を選定する。

8 - (ii) スタータモータ摺動部（軸とケーシングのクリアランス）の健全性

スタータモータの地震応答が過大となることで、回転体である軸の応答が過大となり、軸部の変形によりケーシングと接触する。その結果、軸が損傷に至り、始動機能を喪失する。

よって、基本評価項目として、スタータモータの軸とケーシングのクリアランスを選定する。なお、クリアランスを形成する静止部はケーシングも含めて軸よりも外径側にあり、かつ肉厚も大きいことから剛性が高くその変形量は微小であるため、軸の変形量のみを評価する。

8 - (iii) スタータモータ軸受の健全性

スタータモータの地震応答が過大となることで、軸受荷重が過大となり、軸受が損傷することにより始動機能を喪失する。

よって、基本評価項目として、スタータモータの軸受強度を選定する。

V 燃料油系

9 - (i) 主燃料油ポンプ取付ボルトの健全性

主燃料油ポンプの地震応答が過大となることで、転倒モーメントによる取付ボルトの応力が過大となる。その結果、取付ボルトが損傷に至り、ポンプが脱落することで燃料油供給機能を喪失する。

よって、基本評価項目として、主燃料油ポンプの取付ボルト強度を選定する。

9 - (ii) 主燃料油ポンプ摺動部（軸とケーシングのクリアランス）の健全性

主燃料油ポンプの地震応答が過大となることで、回転軸の応答が過大となり、軸部の変形によりケーシングと接触する。その結果、軸が損傷に至り、燃料油供給機能を喪失する。

よって、基本評価項目として、主燃料油ポンプの軸とケーシングのクリアランスを選定する。なお、主燃料油ポンプのケーシングは厚肉構造であり、剛性が高くその変形量は微小であるため、軸の変形量のみを評価する。

9 - (iii) 主燃料油ポンプ軸受の健全性

主燃料油ポンプの地震応答が過大となることで、軸受荷重が過大となり、軸受が損傷することで燃料油供給機能を喪失する。

よって、基本評価項目として、主燃料油ポンプの軸受強度を選定する。

10 - (i) 始動用燃料油ポンプ取付ボルトの健全性

始動用燃料油ポンプの地震応答が過大となることで、転倒モーメントによる取付ボルトの応力が過大となる。その結果、取付ボルトが損傷に至り、ポンプが転倒することで燃料油供給機能を喪失する。

よって、基本評価項目として、始動用燃料油ポンプの取付ボルト強度を選定する。

10 - (ii) 始動用燃料油ポンプ摺動部（軸とケーシングのクリアランス）の健全性

始動用燃料油ポンプの地震応答が過大となることで、回転体軸の応答が過大となり、軸部の変形によりケーシングと接触する。その結果、軸が損傷に至り、燃料油供給機能を喪失する。

よって、基本評価項目として、始動用燃料油ポンプの軸とケーシングのクリアランスを選定する。なお、始動用燃料油ポンプのケーシングは厚肉構造であり、剛性が高くその変形量は微小であるため、軸の変形量のみを評価する。

10 - (iii) 始動用燃料油ポンプ軸受の健全性

始動用燃料油ポンプの地震応答が過大となることで、軸受荷重が過大となり、軸受が損傷することにより燃料油供給機能を喪失する。

よって、基本評価項目として、始動用燃料油ポンプの軸受強度を選定する。

11 - (i) 始動用燃料油ポンプ用モータ取付ボルトの健全性

始動用燃料油ポンプ用モータの地震応答が過大となることで、転倒モーメントによる取付ボルトの応力が過大となる。その結果、取付ボルトが損傷に至り、転倒することでモータの回転機能を喪失し、燃料油供給機能を喪失する。

よって、基本評価項目として、始動用燃料油ポンプ用モータの取付ボルト強度を選定する。

11 - (ii) 始動用燃料油ポンプ用モータ摺動部（軸とケーシングのクリアランス）の健全性

始動用燃料油ポンプ用モータの地震応答が過大となることで、回転軸の応答が過大となり、軸部の変形によりケーシングと接触する。その結果、軸が損傷に至り、モータの回転機能を喪失し、燃料油供給機能を喪失する。

よって、基本評価項目として、始動用燃料油ポンプ用モータの軸とケーシングのクリアランスを選定する。なお、始動用燃料油ポンプ用モータのケーシングは、厚肉構造であり、剛性が高くその変形量は微小であるため、軸の変形量のみを評価する。

11 - (iii) 始動用燃料油ポンプ用モータ軸受の健全性

始動用燃料油ポンプ用モータの地震応答が過大となることで、軸受荷重が過大となり、軸受が損傷することによりモータの回転機能を喪失し、燃料油供給機能を喪失する。

よって、基本評価項目として、始動用燃料油ポンプ用モータの軸受強度を選定する。

VI 潤滑油系

12 - (i) 潤滑油ポンプ取付ボルトの健全性

潤滑油ポンプの地震応答が過大となることで、転倒モーメントによる取付ボルトの応力が過大となる。その結果、取付ボルトの損傷に至り、ポンプが脱落することで、潤滑機能を喪失する。

よって、基本評価項目として、潤滑油ポンプの取付ボルト強度を選定する。

12 - (ii) 潤滑油ポンプ摺動部（軸とケーシングのクリアランス）の健全性

潤滑油ポンプの地震応答が過大となることで、回転軸の応答が過大となり、軸部の変形によりケーシングと接触する。その結果、軸が損傷に至り、潤滑機能を喪失する。

よって、基本評価項目として、潤滑油ポンプの軸とケーシングのクリアランスを選定する。なお、潤滑油ポンプのケーシングは厚肉構造であるため、剛性が高くその変形量は微小であり、軸の変形量のみを評価する。

12 - (iii) 潤滑油ポンプ軸受の健全性

潤滑油ポンプの地震応答が過大となることで、軸受荷重が過大となり、軸受が損傷することにより潤滑機能を喪失する。

よって、基本評価項目として、潤滑油ポンプの軸受強度を選定する。

以上のおり抽出した基本評価項目を表 5-1 に示す。

表 5-1 ガスタービン及びガスタービン付き機器における基本評価項目

No.	機器名称	基本評価項目
1	ガスタービン (機関)	(i) ケーシング取付ボルト強度
		(ii) 燃焼器取付ボルト強度
		(iii) 軸とケーシングのクリアランス (たわみ)
		(iv) 軸受強度
2	ガスタービン (減速機)	(i) 取付ボルト強度
		(ii) 軸とケーシングのクリアランス (たわみ)
		(iii) 歯元曲げ応力
		(iv) 軸受強度
3	燃料制御ユニット 燃料制御ユニットドライバ 燃料油供給電磁弁	(i) 取付ボルト強度
		(ii) 動的・電氣的機能維持確認
		(iii) 弁体のばね力評価
4	回転速度センサー	(i) 取付ボルト強度
		(ii) 電氣的機能維持確認
5	排気温度センサー	(i) 取付ボルト強度
		(ii) 電氣的機能維持確認
6	点火プラグ	(i) 取付ボルト強度
		(ii) 電氣的機能維持確認
7	点火エキサイタ	(i) 取付ボルト強度
		(ii) 電氣的機能維持確認
8	スタータモータ	(i) 取付ボルト強度
		(ii) 軸とケーシングのクリアランス (たわみ)
		(iii) 軸受強度
9	主燃料油ポンプ	(i) 取付ボルト強度
		(ii) 軸とケーシングのクリアランス (たわみ)
		(iii) 軸受強度
10	始動用燃料油ポンプ	(i) 取付ボルト強度
		(ii) 軸とケーシングのクリアランス (たわみ)
		(iii) 軸受強度
11	始動用燃料油ポンプ用モータ	(i) 取付ボルト強度
		(ii) 軸とケーシングのクリアランス (たわみ)
		(iii) 軸受強度
12	潤滑油ポンプ	(i) 取付ボルト強度
		(ii) 軸とケーシングのクリアランス (たわみ)
		(iii) 軸受強度

6. 類似機種地震時異常要因分析による基本評価項目

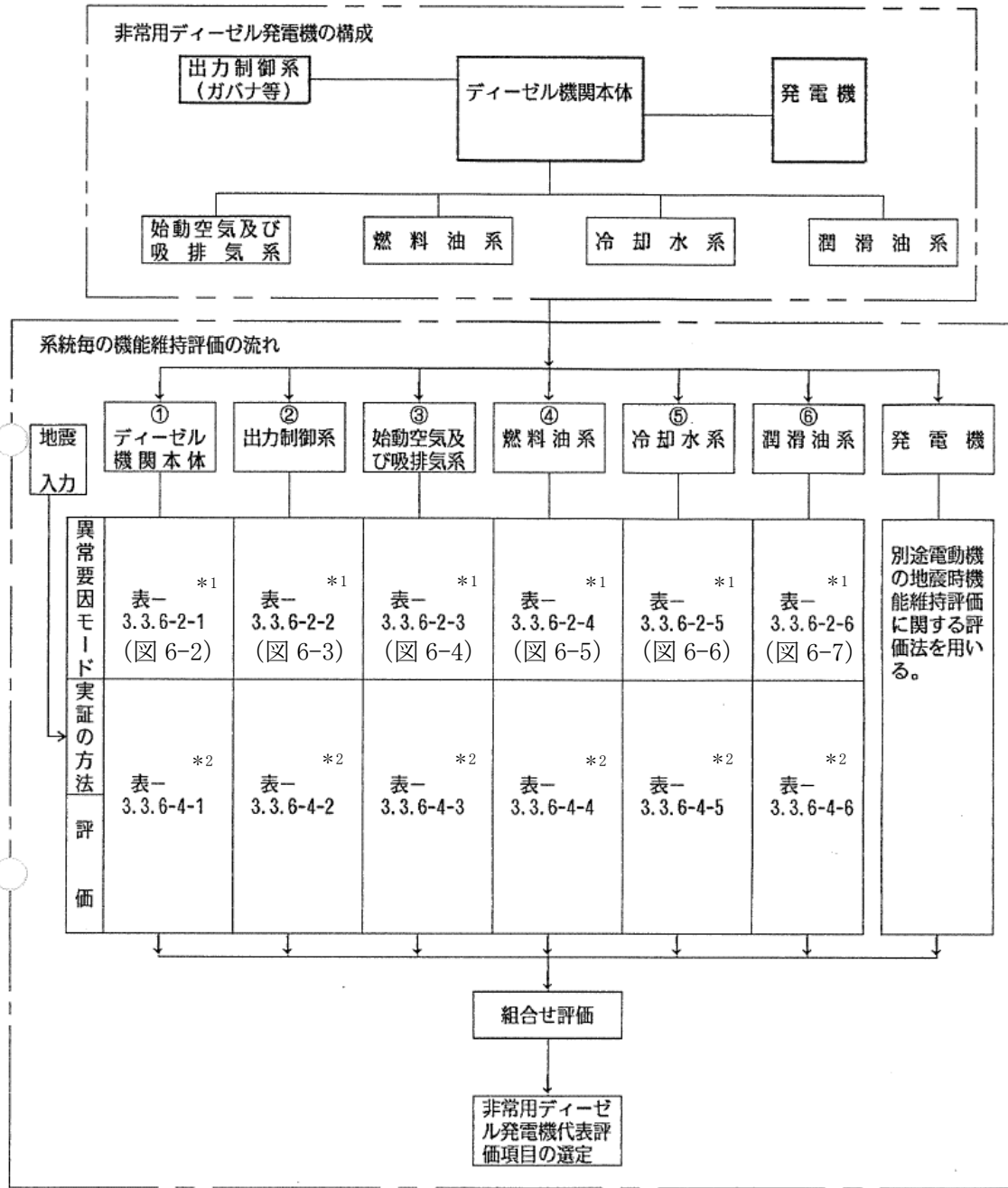
「5.1 異常要因分析」にて示したとおり、ガスタービン発電機の評価項目の選定にあたっては、同等の系統構成をもつ類似機種として非常用ディーゼル発電機のうち機関及び機関付き機器、ターボ機械という点で類似構造をもつポンプ駆動用タービンの評価項目の選定手法を参考とする。

6.1 耐特委で検討された非常用ディーゼル発電機の基本評価項目との比較

耐特委における非常用ディーゼル発電機では評価項目の選定のため、設備構成や系統構成から系統ごとに分割して異常要因分析を実施しており、同手法を用いることで網羅性を確保している。なお、各異常要因モードにおいては、構成機器の構造や動作原理を考慮して検討している。

耐特委における非常用ディーゼル発電機の構成と機能維持評価の流れを図6-1に、異常要因分析図を図6-2～図6-7に示す。

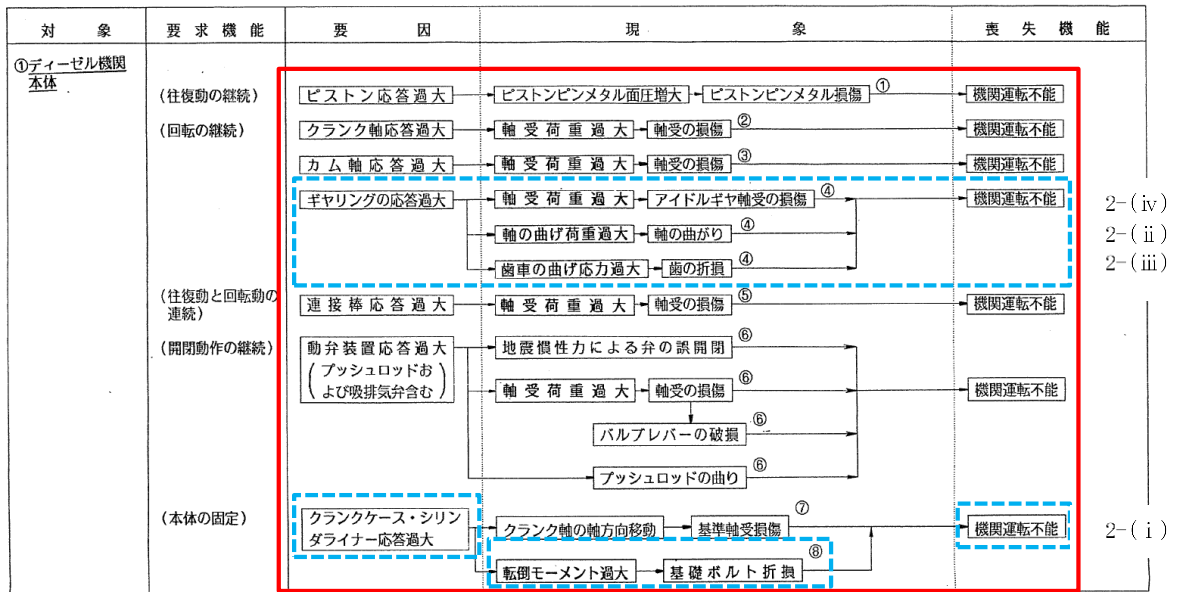
なお、図6-2～図6-7において、非常用ディーゼル発電機のうち、ディーゼル機関及び機関付き機器に該当する箇所を赤枠にて示す。



注記*1：本資料における図番号を括弧内に示す。

*2：本資料では、実証の方法及び評価に対応する当該の表は参照しない。

図 6-1 非常用ディーゼル発電機の構成と機能維持評価の流れ（耐特委）

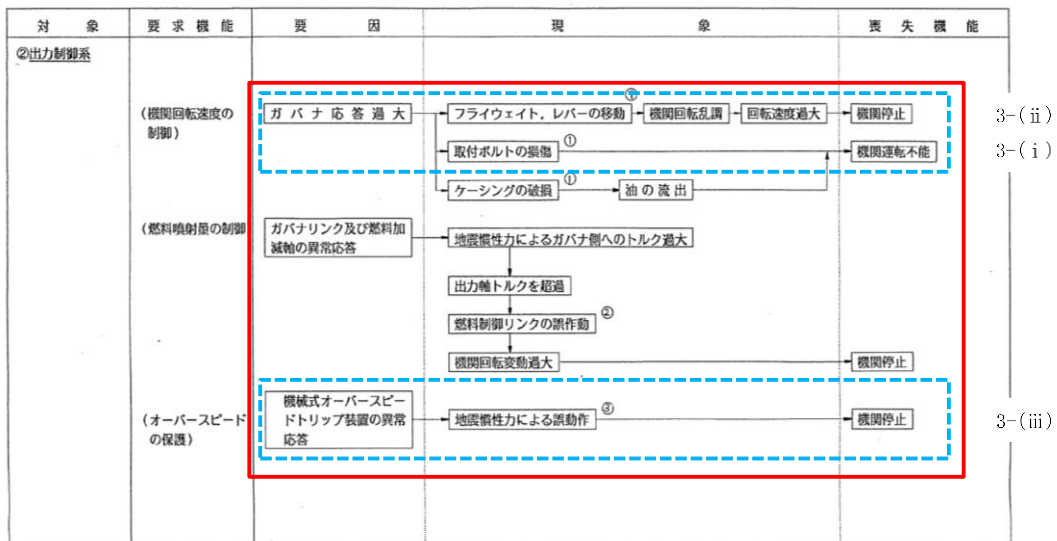


2-(iv)
2-(ii)
2-(iii)

2-(i)

□ : 非常用ディーゼル発電機のうち機関及び機関付き機器の項目
□ : ガスタービンとの類似評価項目

図 6-2 非常用ディーゼル発電機の異常要因分析図 (ディーゼル機関本体)

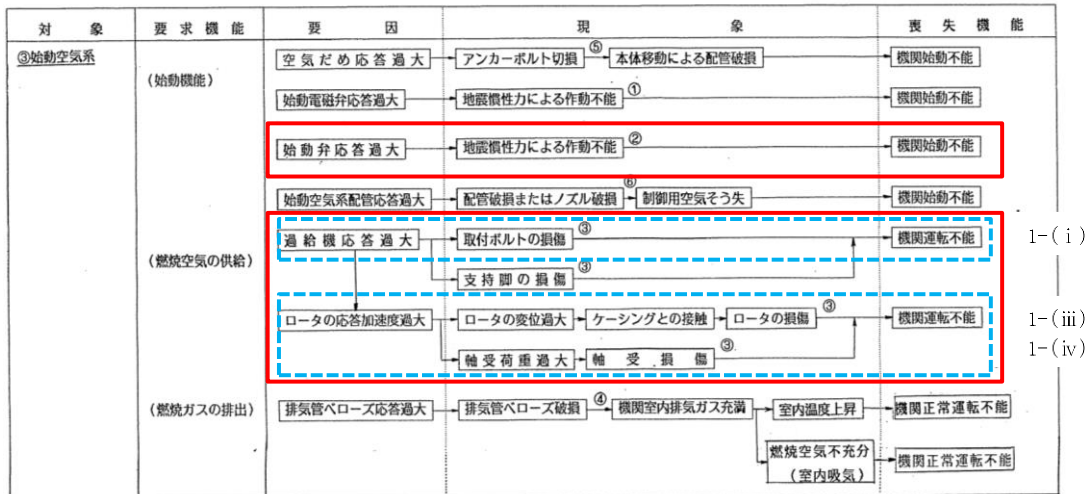


3-(ii)
3-(i)

3-(iii)

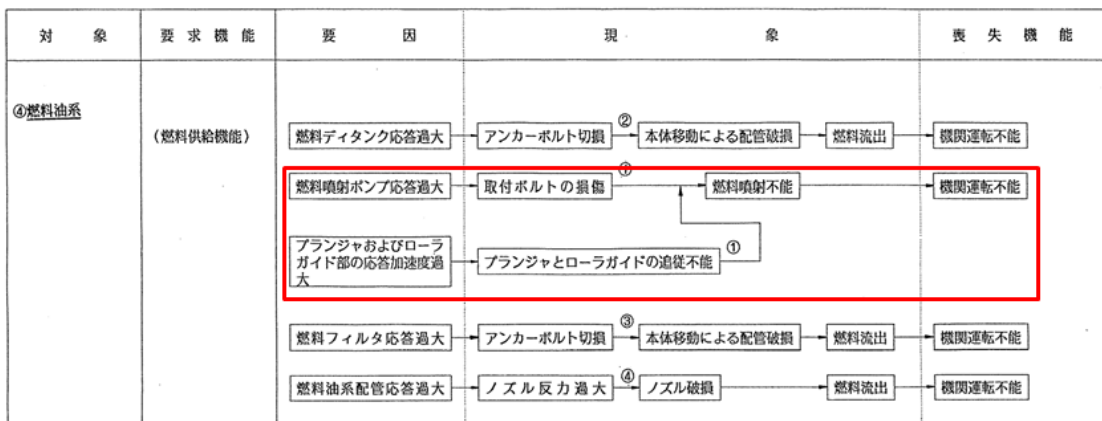
□ : 非常用ディーゼル発電機のうち機関及び機関付き機器の項目
□ : ガスタービンとの類似評価項目

図 6-3 非常用ディーゼル発電機の異常要因分析図 (出力制御系)



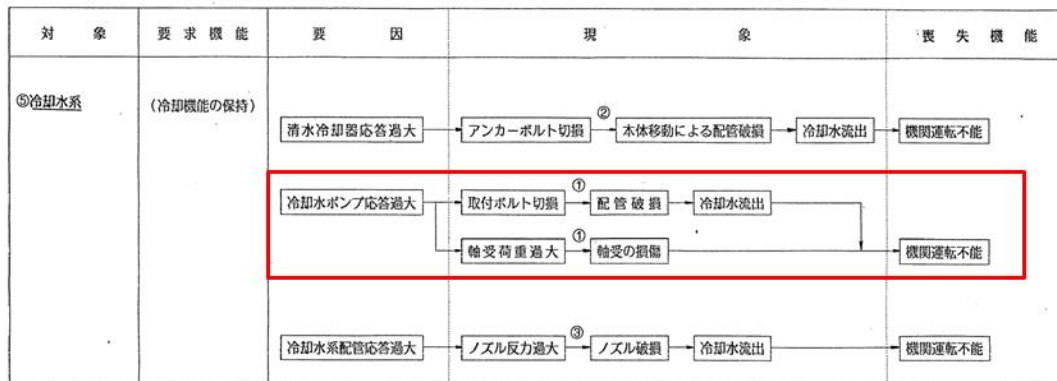
□ : 非常用ディーゼル発電機のうち機関及び機関付き機器の項目
□ : ガスタービンとの類似評価項目

図 6-4 非常用ディーゼル発電機の異常要因分析図 (始動空気及び吸排気系)



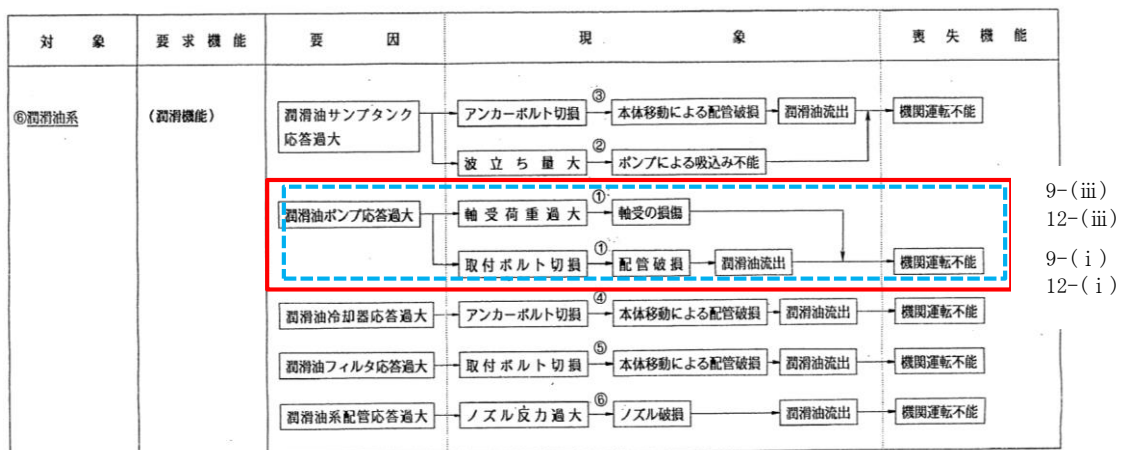
□ : 非常用ディーゼル発電機のうち機関及び機関付き機器の項目
□ : ガスタービンとの類似評価項目

図 6-5 非常用ディーゼル発電機の異常要因分析図 (燃料油系)



□ : 非常用ディーゼル発電機のうち機関及び機関付き機器の項目
□ : ガスタービンとの類似評価項目

図 6-6 非常用ディーゼル発電機の異常要因分析図 (冷却水系)



9-(iii)
 12-(iii)
 9-(i)
 12-(i)

□ : 非常用ディーゼル発電機のうち機関及び機関付き機器の項目
□ : ガスタービンとの類似評価項目

図 6-7 非常用ディーゼル発電機の異常要因分析図 (潤滑油系)

非常用ディーゼル発電機とガスタービン発電機は、系統構成が同等であり、機関の構造は異なるが、動力機関と発電機及び付帯設備からなる非常用発電装置という点で類似な設備であり、各構成設備においても、その機能・作動原理から類似といえる機器が存在する。

なお、「5. ガスタービン発電機の地震時異常要因分析による基本評価項目の抽出」で示したとおり、本書ではガスタービン発電機のうち、ガスタービン及びガスタービン付き機器を対象に評価項目を検討するため、比較対象とする非常用ディーゼル発電機においても、ディーゼル機関及び機関付き機器を対象とする。

以下に、類似性を有する構成機器及びその根拠を示し、その整理結果を表6-1に示す。

(1) ガスタービン (機関)

非常用ディーゼル発電機の過給機と以下の点において類似性を有する。

非常用ディーゼル発電機の過給機とガスタービン (機関) は共に昇圧した燃焼用空気を機関に送気する機能を有したターボ機械である。過給機は、燃焼後の排気ガスにて動力を得るための軸流型タービンと燃焼用空気を過給するためのインペラ型圧縮機を一軸上に配した回転軸を2つの軸受で支持した構造である。一方、ガスタービン (機関) も圧縮機とタービンを一軸上の回転軸に配し両端の軸受で支持した構造である。

共に高速で回転する回転軸が支持している軸受を介してケーシング内に内包された構造であり、このケーシングを本体取付面にボルト結合されている点で類似の構造である。また、共に回転軸は常用の回転速度において固有振動数が危険速度と一致しないように離調されており、この軸振動特性を確保するために回転軸のみならず軸受、及びこれを支えるケーシングに対しても変形を抑制する高い剛性が要求されている。このように機関全体が高い剛性を有しており振動特性の観点からも両者は類似している。

(2) ガスタービン (減速機)

非常用ディーゼル発電機のギアリングと以下の点において類似性を有する。

非常用ディーゼル発電機のギアリングは、クランクの回転より得た動力をクランクギヤ、アイドルギヤ、及びカムギヤ等で構成された歯車機構を介して燃料噴射系、排気動弁系の機器を駆動させるカムへ伝達する機能を有する。一方、ガスタービン (減速機) も遊星歯車等の歯車で構成された歯車機構を介してガスタービン (機関) 主軸より得た動力を適切な回転速度に減速調整して出力軸より発電機へ伝達する機能を有しており、類似の動力伝達の機能を有した機器である。また、共に回転する歯車軸が軸受を介してケーシング内に内包された構造であり、このケーシングを台板にボルト結合されている点で類似している。

また、動力伝達時に歯車同士が噛み合うことで生じる反力を歯車軸で受けながら円滑な回転を確保するために歯車軸をはじめ、軸受及びこれを支えるケーシングに対しても変形を抑制する高い剛性が要求されている。このように機関全体が高い剛性を有しており振動特性の観点からも類似性を有する。

(3) ガスタービン付きポンプ（主燃料油ポンプ，潤滑油ポンプ）

非常用ディーゼル発電機の潤滑油ポンプと以下の点において類似性を有する。

非常用ディーゼル発電機の潤滑油ポンプは，機関各部へ潤滑油を供給するため機関本体に付属して回転するクランク軸（クランクギヤ）より歯車を介して動力を得る回転式ポンプである。一方，ガスタービン付きポンプ（主燃料油ポンプ，潤滑油ポンプ）も機関各部へ燃料油や潤滑油を供給するためガスタービン（減速機）に付属して回転する減速機軸より動力を得る回転式ポンプであり，共に主機関より動力を得て媒体を輸送するポンプ機能を有する点で類似している。

また，共に媒体を押し出す回転部品とケーシングで構成された単純な構造の機器であり主機関にボルト結合された支持構造であることから振動特性の観点からも類似性を有している。

(4) 燃料制御装置（燃料制御ユニット，燃料制御ユニットドライバ，燃料油供給電磁弁）

非常用ディーゼル発電機のガバナ及びオーバースピードトリップ装置と以下の点において類似性を有する。

非常用ディーゼル発電機のガバナは，ディーゼル機関に備わったシリンダ（ピストン）毎に，直接，燃料噴射ポンプの燃料流路を機械的に開閉することで，燃料流量を制御している。一方，ガスタービン発電機の燃料制御装置は，制御信号により燃料流量を制御している。機構は異なるが，どちらも，回転数を一定に保つために燃料流量を制御しており，機能面で類似性を有している。

また，非常用ディーゼル発電機のオーバースピードトリップ装置とガスタービン発電機の燃料油供給電磁弁は，共に過速度トリップ機能として燃料油供給制御を行う点で類似性を有している。

表 6-1 ガスタービン発電装置とディーゼル発電機との類似性

ガスタービン 発電装置	非常用ディー ゼル発電機	類似性			表 6-2 の No.
		構造面	機能面	振動特性	
(1) ガスタービン (機関)	・ 過給機	・ ターボ機械 軸受両端支 持	・ 燃焼用空気圧 縮	・ 高速回転体の 軸振動特性	No. 13
(2) ガスタービン (減速機)	・ ギアリング	・ 歯車機構	・ 動力伝達	・ 歯車噛合反力 を伴う回転軸 振動特性	No. 5
	・ 機関本体	・ 基礎/取付ボ ルト	・ 床面/台板固 定	・ ボルトに働く 機関振動, 回 転モーメント 特性	No. 8
(3) ガスタービン付 きポンプ ・ 主燃料油ポンプ ・ 潤滑油ポンプ	・ 潤滑油 ポンプ	・ 機関駆動式	—	(共通) 主機関との支 持構造及び回 転体の振動特 性	No. 16
	・ 潤滑油 ポンプ	・ 機関駆動式	・ 潤滑油輸送		No. 16
(4) 燃料制御装置 ・ 燃料制御 ユニット ・ 燃料制御ユニッ トドライバ ・ 燃料油供給 電磁弁	・ ガバナ	—	・ 燃料流量制御	—	No. 9
	・ ガバナ	—	・ 燃料流量制御	—	No. 9
	・ オーバースピ ードトリッ プ装置	—	・ 燃料供給制御	—	No. 11

上記の類似性をもとに、図 6-2～図 6-7 に示した異常要因分析から抽出した非常用ディーゼル発電機の基本評価項目と、これら各評価項目に対応するガスタービン発電機の評価項目（機器）を表 6-2～表 6-5 に示す。

また、図 6-2～図 6-7 の非常用ディーゼル発電機の異常要因分析図に、ガスタービン発電機における類似評価項目を示す。

以上より、ガスタービン発電機に属する機器のうち、非常用ディーゼル発電機と類似性を有する機器については、異常要因分析に基づいて抽出された基本評価項目においても類似性を示していることが確認できる。

表 6-2 非常用ディーゼル発電機とガスタービン発電機の評価項目比較 (ディーゼル機関本体)

No.	非常用ディーゼル発電機				ガスタービン発電機で対応する評価項目	
	機器名称	異常要因分析 該当項目	基本評価項目	評価内容	No.	基本評価項目
1	ピストン	ピストンピンメタル損傷	軸受強度	軸受面圧の評価	—	該当なし
2	クランク軸	軸受の損傷	軸受強度	軸受面圧の評価	—	該当なし
3	連接棒	軸受の損傷	軸受強度	軸受面圧の評価	—	該当なし
4	カム軸	軸受の損傷	軸受強度	軸受面圧/スラスト軸受荷重 の評価	—	該当なし
5	ギヤリング	アイドルギヤ軸受の損傷	軸受強度	軸受面圧の評価	2-(iv)	ガスタービン (減速機) 軸受
		軸の曲がり	軸の強度	軸の応力の評価	2-(ii)	ガスタービン (減速機) 摺動部 (軸 とケーシングのクリアランス)
		歯の折損	歯車の強度	歯車の応力の評価	2-(iii)	ガスタービン (減速機) 歯車
6	動弁装置	バルブレバーの破損	軸受強度	軸受面圧の評価 (バルブレバ ー軸受)	—	該当なし
		ブッシュロッドの曲がり	ブッシュロッド強度	曲げ応力	—	該当なし
		バルブレバーの破損	バルブレバーの強度	バルブレバーの曲げ応力	—	該当なし
		地震慣性力による弁の誤 開閉	ブッシュロッド弁	弁体のばね力評価	—	該当なし
7	基準軸受	基準軸受損傷	軸受ハウジング強度	曲げ応力評価	—	該当なし
			軸受強度	軸受面圧	—	該当なし
8	機関本体	基礎ボルト折損	基礎ボルト強度	基礎ボルトの応力評価	2-(i)	減速機取付ボルト

表 6-3 非常用ディーゼル発電機とガスタービン発電機の評価項目比較（出力制御系）

No.	非常用ディーゼル発電機				ガスタービン発電機で対応する評価項目	
	機器名称	異常要因分析 該当項目	基本評価項目	評価内容	No.	基本評価項目
9	ガバナ	フライウエイト, レバー の移動	ガバナの健全性評価 (地震時の機能維持確 認)	機能確認済加速度との比較	3-(ii)	燃料制御ユニット, 燃料制御ユニ ットドライバ
		取付ボルトの損傷			3-(i)	燃料制御ユニット, 燃料制御ユニ ットドライバ, 燃料油供給電磁弁 取付ボルト
		ケーシングの破損			—	該当なし
10	ガバナリ ンク及び 燃料加減 軸	燃料制御リンクの誤作 動	地震時の抵抗	ガバナ駆動力と地震力との 比較	—	該当なし
			コントロールラック中 での燃料加減軸のつか え有無	地震慣性力による燃料加減 軸の変形評価	—	該当なし
11	オーバ ースピー ドトリ ップ 装置	地震慣性力による誤作 動	誤作動の有無	地震加速度と誤作動の起こ る加速度との比較	3-(iii)	燃料制御ユニット, 燃料油供給電 磁弁 弁体

表 6-4 非常用ディーゼル発電機とガスタービン発電機の評価項目比較（始動空気系，燃料油系，冷却水系）

No.	非常用ディーゼル発電機				ガスタービン発電機で対応する評価項目	
	機器名称	異常要因分析 該当項目	基本評価項目	評価内容	No.	基本評価項目
始動空気系						
12	始動弁	地震慣性力による 動作不能	弁棒の変形	変位評価（クリアランス）	—	該当なし
			弁棒の曲げ	曲げ応力評価	—	該当なし
			弁の誤開閉	弁体のばね力評価	—	該当なし
13	過給機	取付ボルトの損傷	取付ボルトの強度	取付ボルトの応力評価	1-(i)	ケーシング取付ボルト
		支持脚の損傷	支持脚の強度	支持脚の応力評価	—	該当なし
		ロータの損傷	軸とケーシングのクリアランス（たわみ）	変位評価	1-(iii)	ガスタービン機関摺動部（軸とケーシングとのクリアランス）
		軸受損傷	軸受強度	軸受荷重の評価	1-(iv)	ガスタービン機関軸受
燃料油系						
14	燃料噴射 ポンプ	取付ボルトの損傷	取付ボルトの強度	取付ボルトの応力評価	—	該当なし
		プランジャとローラガイドの追従不能	押付け力評価	地震加速度と押付け力の比較	—	該当なし
冷却水系						
15	冷却水 ポンプ	取付ボルト折損	取付ボルトの強度	取付ボルトの応力評価	—	該当なし
		軸受荷重過大	軸受強度	軸受面圧の評価	—	該当なし
			インペラとケーシングのクリアランス	変位評価	—	該当なし

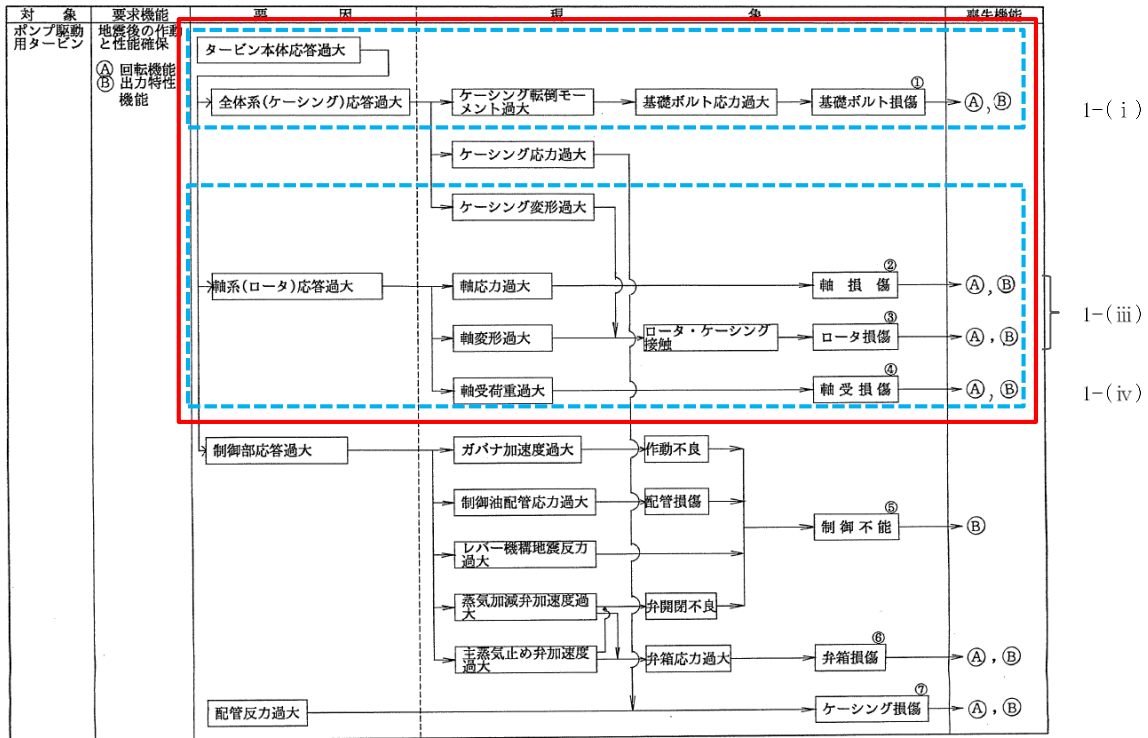
表 6-5 非常用ディーゼル発電機とガスタービン発電機の評価項目比較（潤滑油系）

No.	非常用ディーゼル発電機				ガスタービン発電機で対応する評価項目	
	機器名称	異常要因分析 該当項目	基本評価項目	評価内容	No.	基本評価項目
潤滑油系						
16	潤滑油 ポンプ	取付ボルト折損	取付ボルトの強度	取付ボルトの応力評価	9-(i)	主燃料油ポンプ取付ボルト
					12-(i)	潤滑油ポンプ取付ボルト
		軸受荷重過大	軸受強度	軸受面圧の評価	9-(iii)	主燃料油ポンプ軸受
					12-(iii)	潤滑油ポンプ軸受
			軸とケーシングのク リアランス	変位評価	9-(ii)	主燃料油ポンプ摺動部（軸とケーシ ングのクリアランス）
					12-(ii)	潤滑油ポンプ摺動部（軸とケーシ ングのクリアランス）

6.2 耐特委で検討されたポンプ駆動用タービン（AFWP用）の基本評価項目との比較

耐特委におけるポンプ駆動用タービンのうちAFWPタービン（以下「ポンプ駆動用タービン（AFWP用）」という。）では評価項目の選定のため、構成機器に対する異常要因分析を実施しており、その構成機器の構造や動作原理を考慮して異常要因モードを検討している。

耐特委におけるポンプ駆動用タービンの異常要因分析図を図6-8に示す。なお、図6-8において、ポンプ駆動用タービンのうち、タービン本体に該当する箇所を赤枠にて示す。



- : ポンプ駆動用タービンのうちタービン本体の項目
- : ガスタービンとの類似評価項目

図6-8 ポンプ駆動用タービンの異常要因分析図

ポンプ駆動用タービンとガスタービン（機関）の構造比較を図 6-9 に示す。ポンプ駆動用タービンとガスタービン（機関）は、以下の点において類似性を有するターボ機械である。

ポンプ駆動用タービンは、駆動用蒸気を動力とする軸流型タービンとポンプタービンを一軸上に配した回転軸を複数の軸受で支持した構造である。一方、ガスタービン（機関）も、圧縮機とタービンからなる一軸の回転軸を両端の軸受で支持した構造である。共に高速で回転する回転軸を支持する軸受を介してケーシング内に内包した構造であり、このケーシングを本体取付面にボルト結合している点で類似の構造である。

また、共に回転軸は常用の回転速度において固有振動数が危険速度と一致しないように離調されており、この軸振動特性を確保するために回転軸のみならず、軸受及びこれを支えるケーシングに対しても変形を抑制する高い剛性が要求されている。このように回転軸及び関連部位が高い剛性を有しており振動特性の観点からも両者は類似している。

上記の類似性をもとにポンプ駆動用タービン（タービン本体部分）の基本評価項目に対応したガスタービンの対象機器を表 6-6 に示す。

また、図 6-8 のポンプ駆動用タービンの異常要因分析図に、ガスタービン発電機における類似部位の基本評価項目を示す。

以上より、ガスタービン（機関）とポンプ駆動用タービン（タービン本体部分）は、異常要因分析に基づいて抽出された基本評価項目において類似性を示していることが確認できる。

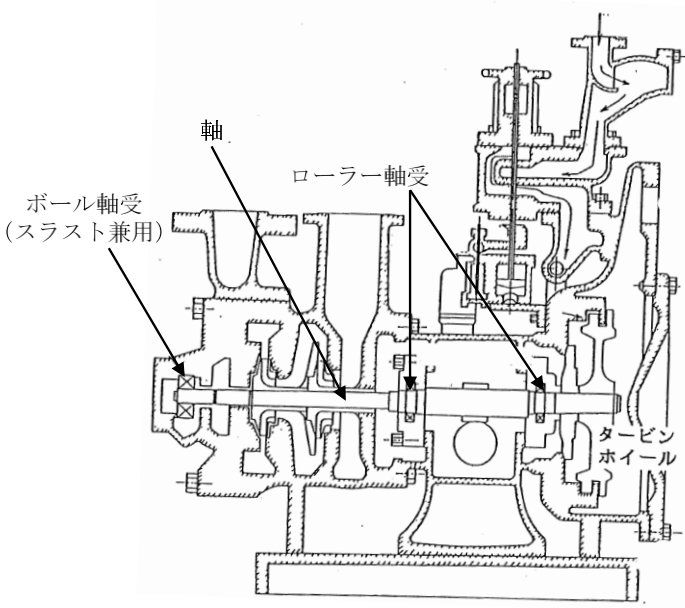
<p>ポンプ駆動用タービン</p>	
<p>ガスタービン (機関)</p>	
<p>類似点</p>	<ul style="list-style-type: none"> ・タービンにより高速で回転する回転軸を有する。 ・回転軸がケーシング内に内包されており、ケーシングがボルト結合されている。 ・回転軸及び関連部位が高い剛性を有する。

図 6-9 ポンプ駆動用タービンとガスタービン (機関) の比較

表 6-6 ポンプ駆動用タービンとガスタービン発電機の評価項目比較

No.	ポンプ駆動用タービン（タービン本体部分）				ガスタービン発電機で対応する評価項目	
	機器名称	異常要因分析 該当項目	基本評価項目	評価内容	No.	基本評価項目
1	ケーシング	基礎ボルト損傷	基礎ボルト強度	基礎ボルトの応力評価	1-(i)	ケーシング取付ボルト
2	軸系	軸損傷	ロータ変位	軸とケーシングのクリアランス	1-(iii)	ガスタービン機関摺動部（軸とケーシングとのクリアランス）
		ロータ損傷				
		軸受損傷	軸受強度	軸受面圧の評価	1-(iv)	ガスタービン機関軸受

7. ガスタービン発電機の評価対象項目の選定

ガスタービンの評価対象項目は、以下を選定する。

[構造強度評価項目]

I ガスタービン（減速機）の取付ボルト

[機能維持評価項目]

II ガスタービン（機関）の軸とケーシングのクリアランス

III ガスタービン（機関）の軸受

IV 燃料制御ユニット（調速装置）

ガスタービンは高温高圧の燃焼ガスによる熱的荷重、高速回転による遠心力に十分耐えられる材料、構造、強度を有しており、地震加速度による影響は小さいと考えられることから、「5.2 基本評価項目の抽出」にて抽出した基本評価項目のうち、上記の項目を評価対象項目として選定した。基本評価項目から評価対象項目を選定した考え方を以下に示す。

なお、評価対象項目の選定にあたっては、動力機関と発電機及び付帯設備から構成される非常用発電装置という点で類似である非常用ディーゼル発電機、並びにターボ機械という点で類似であるポンプ駆動用タービンの J E A G 4 6 0 1 - 1991 追補版における代表評価項目を参照した。

7.1 ガスタービン発電機の評価対象項目の選定

I ガスタービン（減速機）の取付ボルト強度

J E A G 4 6 0 1 - 1991 追補版には評価のポイントとして「動的機能の維持に必要な静的な機能（例えば、取付ボルト、基礎ボルト）については、これら进行评估対象とする。」との記載がある。

ガスタービン（減速機）の取付ボルトは、ガスタービン及びガスタービン付き機器の重量を支えるボルトであり、ガスタービン及びガスタービン付き機器で使用される取付ボルトの中で転倒モーメントが最も大きく、最小裕度となるため、本取付ボルトを評価対象項目として選定する。

II ガスタービン（機関）の軸とケーシングのクリアランス

ガスタービンの軸及びケーシングは十分に剛性の高い構造であり、地震による変形量は微小であるが、軸とケーシング間のクリアランスもわずかであること、軸とケーシングの接触に伴う軸損傷が運転に及ぼす影響が大きいことから評価対象項目として選定する。

なお、「5.2 基本評価項目の抽出」で説明したとおり、軸強度については外力により軸が破断に至る前に軸とケーシングが接触することから、軸とケーシングのクリアランスのみを評価対象項目とした。

なお、軸支持部において類似構造（「7.2 類似機種の代表評価項目との比較」にて詳述）をもつポンプ駆動用タービンにおいても代表評価項目としてロータ変位（軸とケーシングの

クリアランス) の評価が選定されている。

III ガスタービン (機関) の軸受強度

ガスタービン (機関) の軸は他の動的機器と比べても高速回転 (18,000rpm) であり, 軸受部は軸の回転を支持する動的機能維持上重要な部位である。また, 軸受の損傷は機関全体の重大な損傷につながる可能性がある。ガスタービン (機関) の軸受は, ガスタービン及びガスタービン付き機器で使用されている軸受の中で, ガスタービン (減速機) の一部の軸受を除いて最小裕度となる。ここで, ガスタービン (減速機) の軸受のうち, 運転時に加わる機械荷重が支配的となる軸受については, ガスタービン (機関) の軸受と比較して地震荷重の寄与分に対する強度上の裕度 (= (許容値-運転時荷重) /地震のみの荷重) が大きいことを確認している。一方, 地震荷重が支配的となる軸受については, ガスタービン (機関) の軸受と比較して耐震裕度が大きいことを確認している。したがって, 耐震評価上より厳しいと考えられるガスタービン (機関) の軸受を評価対象項目として選定する。選定にあたっては異常発生時の影響の大きさも考慮した。

なお, 軸支持部において類似構造 (「7.2 類似機種 of 代表評価項目との比較」にて詳述) をもつポンプ駆動用タービンにおいても評価項目として軸受の評価が選定されている。

IV 燃料制御ユニットの電氣的機能維持確認

高速回転機器であるガスタービンの回転数を制御する装置であり, 回転の機能維持上重要であることから評価対象項目として選定した。

なお, 非常用ディーゼル発電機の工認計算書には調速装置であるガバナの機能維持評価結果を記載している。ディーゼル機関のガバナは, ディーゼル機関の回転数を一定に保つために, 燃料油の投入量を制御しており, ガスタービンにおける燃料制御ユニットも同様の機能を担う。そのため, 非常用ディーゼル発電機のガバナと同様にガスタービン発電機の調速装置である燃料制御ユニットについても, 機能維持評価を工認計算書に記載する。

「5.2 基本評価項目の抽出」にて抽出した基本評価項目のうち, 上記以外の項目について工認計算書の記載対象外とした理由を次に示す。

a. ガスタービン (機関) のケーシング取付ボルト及び燃焼器取付ボルト強度

取付ボルトについては, 上述のとおり, 最小裕度のガスタービン (減速機) の取付ボルトで代替評価し, 工認計算書の記載対象外とした。

b. ガスタービン (減速機) の軸とケーシングのクリアランス, 軸受強度, 歯元曲げ応力

(a) 軸とケーシングのクリアランス

ガスタービン (減速機) の軸は, 歯車の両側近傍に軸受を有した構造であり, ガスタービン (機関) の軸と比較して軸受間距離が短く, たわみ発生量が小さい。また, クリアランスはガスタービン (機関) と比較して大きい傾向にあり, 最狭部でも同程度である。したがって, ガスタービン (機関) の軸とケーシングのクリアランスで代替評価し,

ガスタービン（減速機）については工認計算書の記載対象外とした。なお、ガスタービン（機関）とガスタービン（減速機）の軸の比較を図7-1に示す。

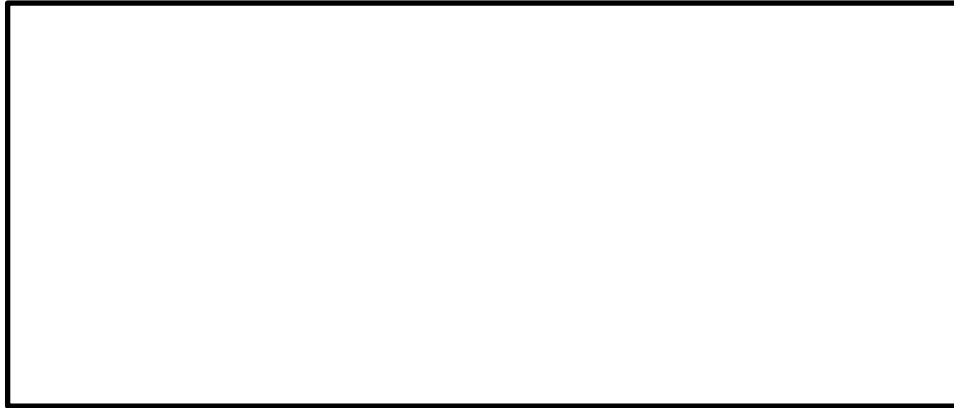


図7-1 ガスタービン(機関)とガスタービン(減速機)の軸の比較(等倍)

(b) 軸受強度

ガスタービン（減速機）の軸受は、上記ガスタービン（機関）の軸受強度にて記載のとおり、耐震評価上より厳しいと考えられるガスタービン（機関）の軸受で代替評価するため、ガスタービン（減速機）については工認耐震計算書の記載対象外とした。

(c) 歯元曲げ応力

ガスタービン（減速機）の歯元曲げ応力を支配するのは運転時に加わる機械荷重であり、地震により加わる荷重は十分小さく、耐震性を有することを確認していることから、工認計算書の記載対象外とした。(非常用ディーゼル発電機のギヤリングと同様の整理)

添付-1 にガスタービン（減速機）の地震による歯元曲げ応力と運転による歯元曲げ応力の比較を示す。

- c. ガスタービン付き機器（主燃料油ポンプ，始動用燃料油ポンプ，潤滑油ポンプ，始動用燃料油ポンプ用モータ及びスタータモータ）取付ボルト強度，軸とケーシングのクリアランス，軸受強度

(a) 取付ボルト強度

取付ボルトについては、上述のとおり、最小裕度のガスタービン（減速機）取付ボルトで代替評価し、工認計算書の記載対象外とした。

(b) 軸とケーシングのクリアランス

ガスタービン付きポンプはガスタービン（機関）に比べて小型軽量であり、ガスタービン（機関）の軸と比較して軸受間距離も短く、たわみ発生量が小さいことから、上述のとおり、ガスタービン（機関）の軸とケーシングで代替評価し、ガスタービン付きポンプについては工認計算書の記載対象外とした。なお、ガスタービン付きポンプの例を図7-2に示す。



図 7-2 ガスタービン付きポンプの例 (潤滑油ポンプ)

(c) 軸受強度

軸受強度については、上述のとおり、最小裕度のガスタービン (機関) の軸受で代替評価し、工認計算書の記載対象外とした。

なお、非常用ディーゼル発電機では、耐特委や NUPEC 試験において、機関付き機器は、十分に裕度があることが確認されている。結果として、J E A G 4 6 0 1-1991 追補版においては、これらの機器は評価を省略することができるとされている。

d. 燃料制御ユニットドライバの取付ボルト強度及び電氣的機能維持確認

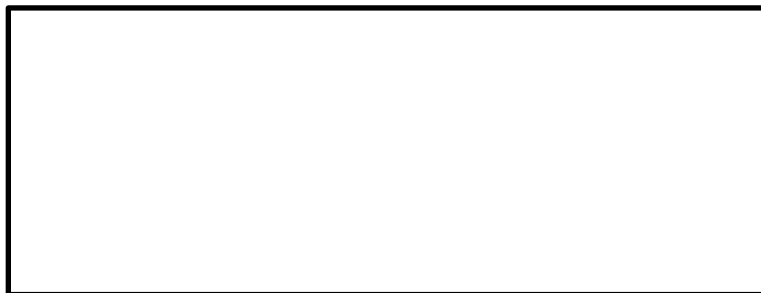
(a) 取付ボルト強度

取付ボルトについては、上述のとおり、最小裕度のガスタービン (減速機) で代替評価し、工認計算書の記載対象外とした。

(b) 電氣的機能維持確認

燃料制御ユニットドライバの電氣的機能維持については、下記理由により取付部の健全性を有することで機能維持を確保できると考えられることから、工認計算書の記載対象外とした。

- ① 本機器はソリッドステートの回路基盤が用いられており可動部がない。
- ② 軽量の設備であり、地震力により発生する荷重が小さい。



燃料制御ユニットドライバの外観

e. 燃料油供給電磁弁の取付ボルト強度、動的機能維持確認及び弁体のばね力評価

(a) 取付ボルト強度

取付ボルトについては、上述のとおり、最小裕度のガスタービン (減速機) で代替評

価し、工認計算書の記載対象外とした。

(b) 動的機能維持確認

燃料油供給電磁弁は軽量で地震力により発生する荷重が小さく、影響は軽微であることから、工認計算書の記載対象外とした。

(c) 弁体のばね力評価

ばね力については、ばね力を打ち消す方向の地震慣性力が弁体等の質量に比例するが、比較的軽量であり、その影響は軽微であることから、工認計算書の記載対象外とした。

f. 燃料制御ユニットの取付ボルト強度及び弁体のばね力評価

(a) 取付ボルト強度

取付ボルトについては、上述のとおり、最小裕度のガスタービン（減速機）で代替評価し、工認計算書の記載対象外とした。

(b) 弁体のばね力評価

ばね力については、ばね力を打ち消す方向の地震慣性力が弁体等の質量に比例するが、比較的軽量であり、その影響は軽微であることから、工認計算書の記載対象外とした。
(構造面の類似性の観点で、非常用ディーゼル発電機の始動弁・主始動弁と同様の整理)

g. 回転速度センサー及び排気温度センサーの取付ボルト強度及び電気的機能維持確認

(a) 取付ボルト強度

取付ボルトについては、上述のとおり、最小裕度のガスタービン（減速機）で代替評価し、工認計算書の記載対象外とした。

(b) 電気的機能維持確認

回転速度センサー及び排気温度センサーは、下記理由により、電気的機能維持に関して十分な裕度があると考えられるため、工認計算書の記載対象外とした。

- ① 回転速度センサーには電磁ピックアップ式センサー、排気温度センサーにはシース熱電対が用いられており可動部がない。
- ② 軽量かつ単純構造であり、地震力により発生する荷重が小さく、構造強度について十分な裕度を持っている。



回転速度センサーの外観

排気温度センサーの外観

h. 点火プラグ及び点火エキサイタの取付ボルト強度及び電氣的機能維持確認

(a) 取付ボルト強度

取付ボルトについては、上述のとおり、最小裕度のガスタービン（減速機）で代替評価し、工認計算書の記載対象外とした。

(b) 電氣的機能維持確認

点火プラグ及び点火エキサイタは、下記理由により、取付部の健全性を確認することで、電氣的機能維持を確保できるため、工認計算書の記載対象外とした。

- ① 点火プラグにはスパークプラグ，点火エキサイタには Capacitor Discharge Ignition 方式の点火装置が用いられており可動部がない。
- ② 軽量かつ単純構造であり，地震力により発生する荷重が小さく，構造強度について十分な裕度を持っている。



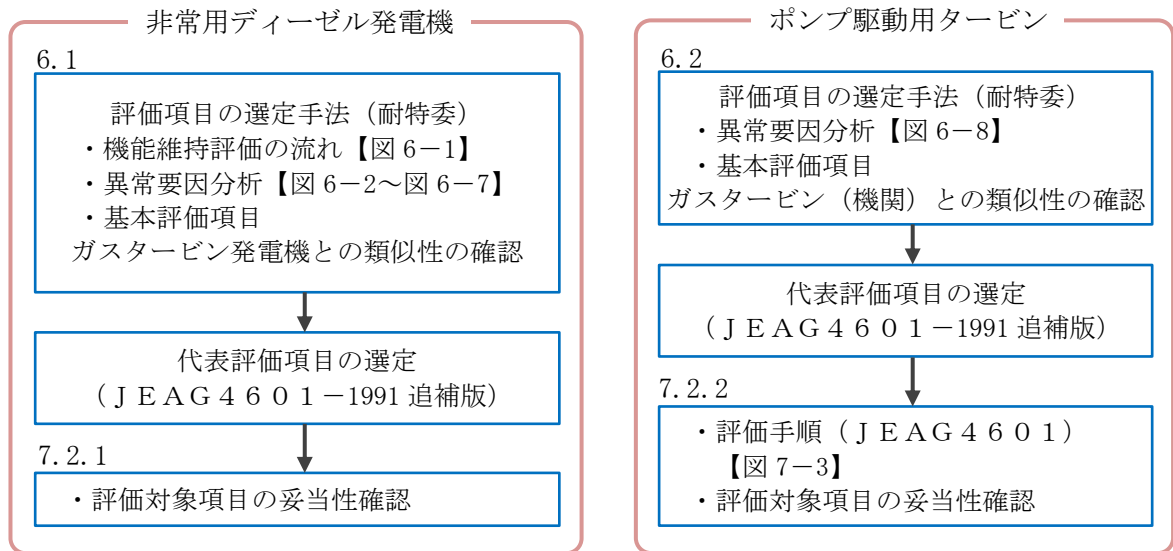
点火プラグの外観

点火エキサイタの外観

以上より、ガスタービンにおける、基本評価項目について機能維持上の重要度、裕度の大きさ、運転による荷重の影響度などを考慮し、ガスタービンの評価対象項目として、Ⅰガスタービン（減速機）の取付ボルト強度、Ⅱガスタービン（機関）の軸とケーシングのクリアランス、Ⅲガスタービン（機関）の軸受強度、Ⅳ燃料制御ユニットの電氣的機能維持確認を選定した。

7.2 類似機種の代表評価項目との比較

以下の流れに沿ってガスタービン発電機と既往研究における類似機種との比較を行い、これらの考え方を参考に「7.1 ガスタービン発電機の評価対象項目の選定」にて選定した評価対象項目の妥当性を確認する。



7.2.1 非常用ディーゼル発電機の代表評価項目との比較

各異常要因モードから抽出された基本評価項目に対して裕度を確認する耐特委の選定手法に基づき、J E A G 4 6 0 1 -1991 追補版では機関及び機関付き機器の中から特に裕度の低い以下の2項目が機能確認済加速度以下において評価する代表評価項目として選定されている。

- ・基礎ボルトの強度
- ・ガバナの健全性

異常要因分析の考え方について、非常用ディーゼル発電機での異常要因分析の手法に倣い、要求機能別の系統構成に分類した各機器の構造や作動原理から地震時に発生し得る異常現象を抽出した結果、ガスタービン発電機と非常用ディーゼル発電機の要因分析結果との類似性が示されていることから、耐特委報告書に基づいてまとめられたJ E A G 4 6 0 1 -1991 追補版の考え方と相違がないことが確認できる。

したがって、J E A G 4 6 0 1 -1991 追補版において、非常用ディーゼル発電機の代表評価項目が、ディーゼル機関の基礎ボルト強度及びガバナの健全性となっている背景を踏まえると、類似性を示しているガスタービン発電機に関し、評価対象項目として、ガスタービン (減速機) の取付ボルト強度及び燃料制御ユニットの健全性 (電氣的機能維持確認) を選定していることは、妥当と判断できる。

7.2.2 ポンプ駆動用タービンの代表評価項目との比較

各異常要因モードから抽出された基本評価項目に対して裕度を確認する耐特委の選定手法に基づき、J E A G 4 6 0 1 -1991 追補版では図 7-3 に示す評価手順が示され、ポンプ駆動用タービンのうちタービン本体部分に対して以下の 3 項目が機能確認済加速度以下において評価する代表評価項目として選定されている。

- ・ 基礎ボルトの強度
- ・ 軸とケーシングのクリアランス
- ・ 軸受強度

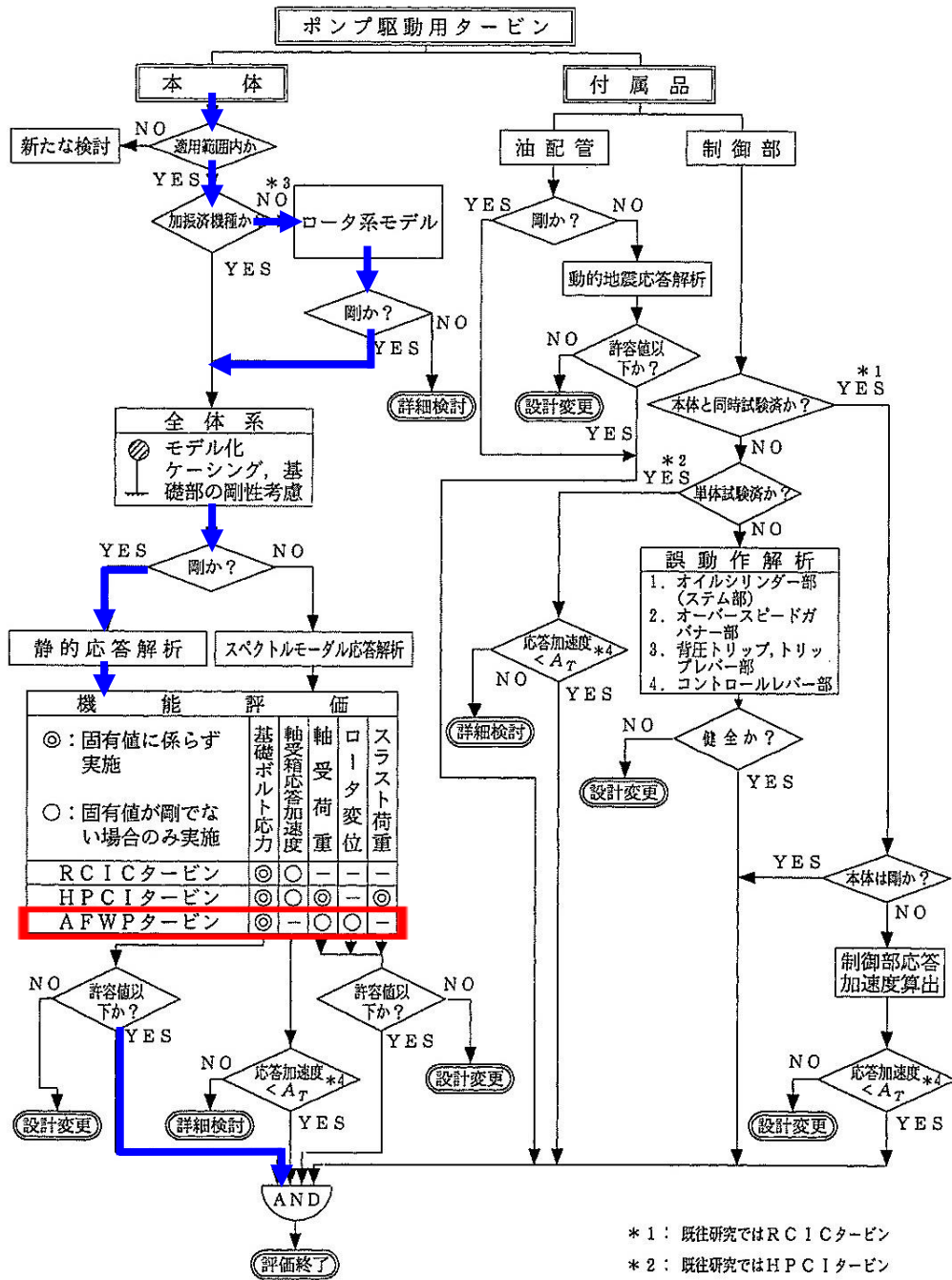


図 7-3 ポンプ駆動用タービンの評価手順 (J E A G 4 6 0 1 -1991 追補版)

異常要因分析の考え方について、異常要因分析結果の類似性が示されていることにより、耐特委報告書に基づいてまとめられた J E A G 4 6 0 1 -1991 追補版の考え方と相違がないことが確認できる。

したがって、J E A G 4 6 0 1 -1991 追補版において、ポンプ駆動用タービンの代表評価項目が、基礎ボルト強度、軸とケーシングのクリアランス、軸受強度となっている背景を踏まえると、類似性を示しているガスタービン（機関）に関し、評価対象項目として、取付ボルト強度、軸とケーシングのクリアランス、軸受強度を選定していることは、妥当と判断できる。

8. 工認耐震計算書における機能維持評価手法

「7.1 ガスタービン発電機の評価対象項目の選定」にて評価対象項目の選定を行い、「7.2 類似機種の評価項目との比較」において評価項目の妥当性について示した。本章では、選定した項目の評価内容とその妥当性及び評価結果を示す。

8.1 ガスタービン発電機の評価内容及びその妥当性の検討

I ガスタービン（減速機）の取付ボルト強度

(1) 評価内容

地震による水平及び鉛直加速度、運転により作用するモーメントによって生じる引張力及びせん断力を、1 質点系モデルを用いて J E A G 4 6 0 1 に適用されている式により算出している。

(2) 妥当性

ガスタービンと非常用ディーゼル発電機はいずれも剛性の高い設備であり、1 質点系モデルに置き換えることが可能である。したがって、ガスタービン（減速機）の取付ボルトも、非常用ディーゼル発電機と同様に 1 質点系モデルにより評価する。

II ガスタービン（機関）の軸とケーシングのクリアランス

(1) 評価内容

以下に示す解析条件により評価する。

- ・荷重条件：自重，地震荷重，アンバランスの組合せ荷重
- ・モデル：はり要素を用いた 1 次元 FEM モデル
- ・解析方法：1 次元 FEM 解析（MSC NASTRAN）

(2) 妥当性

ガスタービンとポンプ駆動用タービンは、回転機器として同様な軸系の構造を有しており、ケーシング、軸系とも剛性が高いことから類似構造であるといえる。したが

って、ガスタービンの軸とケーシングのクリアランスも、J E A G 4 6 0 1 -1991 追補版に示されるポンプ駆動用タービンの荷重条件を用いて軸の変位量を評価する。

なお、両端を軸受で支持された軸のたわみ量の算出において、軸受自体の剛性による変位は 程度と十分小さく、軸とケーシングのクリアランスを評価するうえでは有意とはならないため考慮は不要と判断する。一方、軸受による軸の支持条件は単純支持として、軸のたわみ量が大きくなるよう保守的に評価する。

III ガスタービン（機関）の軸受強度

(1) 評価内容

以下に示す解析条件により評価する。

- ・荷重条件：水平地震力及び運転時の最大スラスト荷重により算出されるアキシャル荷重、自重及び鉛直地震力により算出されるラジアル荷重
- ・評価方法：軸受に作用する荷重と基本静定格荷重（メーカー保証値）の比較

(2) 妥当性

ガスタービンとポンプ駆動用タービンは、回転機器として同様な軸系の構造を有しており、ケーシング、軸系とも剛性が高いことから類似構造であるといえる。したがって、ガスタービンの軸受も、J E A G 4 6 0 1 -1991 追補版に示されるポンプ駆動用タービンにおける軸受の評価方法を適用可能であるが、ここでは軸受荷重の許容値がメーカー規定の基本静定格荷重（メーカー保証値）で設定されていることから、J I S（J I S B 1 5 1 9-2009）に基づくメーカー規定の計算式（ガスタービン回転軸に地震力や運転中のスラスト荷重が作用することにより軸受に発生する静等価荷重）にて評価する。

軸受強度は、軸受の剛性に関わりなく軸受に作用する荷重が許容される荷重以下であることで評価する。

IV 燃料制御ユニットの電氣的機能維持確認

(1) 評価内容

加振試験により評価用加速度が機能確認済加速度以下であることを確認する。機能確認済加速度には、燃料制御ユニットの加振試験において、電氣的機能の健全性を確認した加振波の最大加速度を適用する。

(2) 妥当性

燃料制御ユニットは解析等による評価が困難であるため、実機を加振試験することにより電氣的機能維持の確認を行っている。加振試験により燃料制御ユニットの評価用加速度が機能確認済加速度以下であることを確認する。

加振試験の試験条件及び試験結果を添付-2に示す。

8.2 評価結果

本章では「8.1 ガスタービン発電機の評価内容及びその妥当性の検討」の検討結果に基づき、機能維持評価結果を示す。各評価対象項目における評価基準及び評価結果を表 8-1 及び表 8-2 に示す。

全ての評価対象項目に対して、評価基準を満足することを確認した。

表 8-1 評価基準値の設定

評価対象項目	評価基準値の設定
I ガスタービン機関摺動部 (軸とケーシングとのクリアランス)	回転の継続及び駆動性能の確保の観点から、メーカーが規定する軸とケーシング間の最小クリアランスを評価基準値とした。
II ガスタービン機関軸受	回転の継続及び駆動性能の確保の観点から、メーカーが規定する基本静定格荷重を評価基準値とした。
III 減速機取付ボルト	支持性能の確保の観点から、機関回転速度の減速機能に影響を与えるような優位な変形を伴わない(局所的に塑性化しても、全体としては弾性挙動となるような) IV_{AS} を評価基準値とした。
IV 燃料制御ユニット	機関回転速度の制御の観点から、加振試験により確認した機能確認済加速度である水平 13.0 ($\times 9.8m/s^2$), 鉛直 13.0 ($\times 9.8m/s^2$) を評価基準値とした。

表 8-2 ガスタービン発電機評価結果

評価対象項目	評価値	評価対象	算出式*1	発生値*1	評価基準値*1	評価
I ガスタービン 機関摺動部 (軸とケーシングとのクリアランス)	変位 (mm)		$\delta = \delta D + \delta S s + U$ δ : 評価部位における変位量 (mm) δD : 死荷重による変位量 (mm) $\delta S s : \delta H + \delta V$ δH : 水平方向設計用震度による変位量 (mm) δV : 鉛直方向設計用震度による変位量 (mm) U : アンバランスによる変位量 (mm) ここで, δD , δH 及び δV はFEM解析より算出	0.072		○
				0.087		○
				0.107		○
II ガスタービン 機関軸受	荷重 (N)	玉軸受	$P o = \text{Max} (X o \cdot F r + Y o \cdot F a, F r)$ $P o$: 軸受に発生する静等価荷重 (N) $X o$: 静ラジアル荷重係数 $Y o$: 静アキシアル荷重係数 $F a$: 軸受に作用するアキシアル荷重 (N) $F r$: 軸受に作用するラジアル荷重 (N)	6.880×10 ³		○
		ころ軸受		6.150×10 ³		○
III 減速機取付ボルト	応力 (MPa)	引張応力	$\sigma_{b t 2} = \frac{F_{b t 2}}{A_{b t 2}}$ $\sigma_{b t 2}$: 取付ボルトに生じる引張応力 (MPa) $F_{b t 2}$: 取付ボルトに作用する引張力 (1本あたり) (N) $A_{b t 2}$: 取付ボルト軸断面積 (mm ²)	109		○
		せん断応力	$\tau_{b 2} = \frac{Q_{b 2}}{n_2 \cdot A_{b t 2}}$ $\tau_{b 2}$: 取付ボルトに生じるせん断応力 (MPa) $Q_{b 2}$: 取付ボルトに作用するせん断力 (N) n_2 : 取付ボルト本数 $A_{b t 2}$: 取付ボルト軸断面積 (mm ²)	52		○
IV 燃料制御ユニット	加速度 (×9.8m/s ²)	水平方向	—	1.43	13.0	○
		鉛直方向	—	0.69	13.0	○

注：Ⅲは、構造強度評価の対象部位でもあることから、構造強度評価結果を動的機能維持の評価にも適用する。Ⅰ、Ⅱ及びⅣは、動的機能維持評価のみの対象であることから、動的機能維持評価における設計震度^{*2}、^{*3}で評価する。設計用震度はVI-2-1-7「設計用床応答スペクトルの作成方針」に基づき設定する。

注記*1：算出式・発生値・許容値については、VI-2-10-1-2-3-1「ガスタービン発電機ガスタービン機関及び発電機の耐震性についての計算書」に記載する。

*2：Ⅰ及びⅡは、設計用震度Ⅰ（基準地震動 S_s ）を上回る設計震度[水平：2.47（ $\times 9.8\text{m/s}^2$ ），鉛直：0.84（ $\times 9.8\text{m/s}^2$ ）]

Ⅳは、設計用震度Ⅰ（基準地震動 S_s ）[水平：1.43（ $\times 9.8\text{m/s}^2$ ），鉛直：0.69（ $\times 9.8\text{m/s}^2$ ）]

*3：最大応答加速度を1.0倍した震度

9. まとめ

本書におけるガスタービン発電機の機能維持基本評価項目、評価対象項目及びその選定の考え方を表 9-1 に示す。

具体的には、J E A G 4 6 0 1 -1991 追補版の「3.5 動的機能維持の考え方」に基づき、ガスタービン発電機の構造・作動原理を基に、異常要因分析にて機能喪失に影響を与える対象物及び基本評価項目を選定した。

さらに、各基本評価項目に対して、類似機種（非常用ディーゼル発電機及びポンプ駆動用タービン）の考え方を基に、評価対象項目の妥当性を示し、それらに対する評価内容、評価結果を示した。

表 9-1 ガスタービン発電機の動的機能維持評価における評価対象項目の検討結果 (1 / 2)

○：評価対象，－：対象外

No.	機器名称	異常要因分析に基づき選定した基本評価項目	動的機能維持評価における評価対象項目	主な理由
1	ガスタービン (機関)	(i) ケーシング取付ボルト強度	—	ガスタービン (減速機) 取付ボルトにて代替評価
		(ii) 燃焼器取付ボルト強度	—	ガスタービン (減速機) 取付ボルトにて代替評価
		(iii) 軸とケーシングのクリアランス (たわみ)	○	損傷時の影響が大きく、また、ポンプ駆動用タービンの代表評価項目
		(iv) 軸受強度	○	損傷時の影響が大きく、また、ポンプ駆動用タービンの代表評価項目
2	ガスタービン (減速機)	(i) 取付ボルト強度	○	支持機能の裕度最小
		(ii) 軸とケーシングのクリアランス (たわみ)	—	ガスタービン (機関) 軸とケーシングのクリアランス (たわみ) にて代替評価
		(iii) 歯元曲げ応力	—	運転時に加わる機械荷重が支配的であり、地震により加わる地震荷重は十分小さいことから工認計算書における評価部位としない
		(iv) 軸受強度	—	ガスタービン (機関) 軸受強度にて代替評価
3	燃料制御 ユニット	(i) 取付ボルト強度	—	ガスタービン (減速機) 取付ボルトにて代替評価
		(ii) 電氣的機能維持確認	○	損傷時の影響が大きく、また、非常用ディーゼル機関の代表評価項目 (ガバナに相当)
		(iii) 弁体のばね力評価	—	軽量であり地震力による影響は軽微であることから工認計算書における評価部位としない
	燃料制御 ユニット ドライバ	(i) 取付ボルト強度	—	ガスタービン (減速機) 取付ボルトにて代替評価
		(ii) 電氣的機能維持確認	—	軽量であり地震力による影響は軽微であることから工認計算書における評価部位としない
	燃料油供給 電磁弁	(i) 取付ボルト強度	—	ガスタービン (減速機) 取付ボルトにて代替評価
		(ii) 動的機能維持確認	—	軽量であり地震力による影響は軽微であることから工認計算書における評価部位としない
		(iii) 弁体のばね力評価	—	軽量であり地震力による影響は軽微であることから工認計算書における評価部位としない
	4	回転速度 センサー	(i) 取付ボルト強度	—
(ii) 電氣的機能維持確認			—	可動部がないため当該取付ボルトの構造強度にて評価

表 9-1 ガスタービン発電機の動的機能維持評価における評価対象項目の検討結果 (2 / 2)

No.	機器名称	異常要因分析に基づき選定した 基本評価項目	動的機能維持評価 における評価対象 項目	主な理由
5	排気温度 センサー	(i) 取付ボルト強度	—	ガスタービン (減速機) 取付ボルトにて代替評価
		(ii) 電氣的機能維持確認	—	可動部がないため当該取付ボルトの構造強度にて評価
6	点火プラグ	(i) 取付ボルト強度	—	ガスタービン (減速機) 取付ボルトにて代替評価
		(ii) 電氣的機能維持確認	—	可動部がないため当該取付ボルトの構造強度にて評価
7	点火エキサイタ	(i) 取付ボルト強度	—	ガスタービン (減速機) 取付ボルトにて代替評価
		(ii) 電氣的機能維持確認	—	可動部がないため当該取付ボルトの構造強度にて評価
8	スタータモータ	(i) 取付ボルト強度	—	ガスタービン (減速機) 取付ボルトにて代替評価
		(ii) 軸とケーシングのクリアランス (たわみ)	—	ガスタービン (機関) 軸とケーシングのクリアランス (たわみ) にて代替評価
		(iii) 軸受強度	—	ガスタービン (機関) 軸受強度にて代替評価
9	主燃料油ポンプ	(i) 取付ボルト強度	—	ガスタービン (減速機) 取付ボルトにて代替評価
		(ii) 軸とケーシングのクリアランス (たわみ)	—	ガスタービン (機関) 軸とケーシングのクリアランス (たわみ) にて代替評価
		(iii) 軸受強度	—	ガスタービン (機関) 軸受強度にて代替評価
10	始動用燃料油 ポンプ	(i) 取付ボルト強度	—	ガスタービン (減速機) 取付ボルトにて代替評価
		(ii) 軸とケーシングのクリアランス (たわみ)	—	ガスタービン (機関) 軸とケーシングのクリアランス (たわみ) にて代替評価
		(iii) 軸受強度	—	ガスタービン (機関) 軸受強度にて代替評価
11	始動用燃料油 ポンプ用モータ	(i) 取付ボルト強度	—	ガスタービン (減速機) 取付ボルトにて代替評価
		(ii) 軸とケーシングのクリアランス (たわみ)	—	ガスタービン (機関) 軸とケーシングのクリアランス (たわみ) にて代替評価
		(iii) 軸受強度	—	ガスタービン (機関) 軸受強度にて代替評価
12	潤滑油ポンプ	(i) 取付ボルト強度	—	ガスタービン (減速機) 取付ボルトにて代替評価
		(ii) 軸とケーシングのクリアランス (たわみ)	—	ガスタービン (機関) 軸とケーシングのクリアランス (たわみ) にて代替評価
		(iii) 軸受強度	—	ガスタービン (機関) 軸受強度にて代替評価

ガスタービン（減速機）歯車部 地震荷重と運転荷重の比較

部位	地震による 歯元曲げ応力 [MPa]	運転による 歯元曲げ応力 [MPa]	許容値 [MPa]
	175	259	
	107	264	
	56	187	
	15	198	
	8	238	

燃料制御装置加振試験

ガスタービン発電機については、解析又は材料力学等の理論式により耐震性評価を実施しているが、燃料制御装置（燃料制御ユニット、燃料制御ユニットドライバ、燃料油供給電磁弁）の動的機能維持については解析等による評価が困難であるため、加振試験を実施した。

試験対象装置である燃料制御装置及び試験装置を図1，加振台仕様を表1に示す。また、燃料制御ユニット及び燃料油供給電磁弁の実機取り付け状態を図2に示す。

1. 試験条件

加振試験は、正弦波掃引加振及びサインビート加振を実施した。

それぞれの目的と試験条件を以下に示す。

(1) 正弦波掃引加振試験

正弦波掃引加振試験は、供試体の固有振動数を確認するために実施した。

掃引振動数範囲は、5～50Hz。

正弦波掃引加振の条件を表2に示す。

(2) サインビート加振試験

サインビート加振試験は、供試体の機能維持確認のため実施した。

入力は、3軸方向それぞれに、最大13Gの加振力を与えて外観及び機能に問題ないことを確認した。なお、加振振動数としては、正弦波掃引試験にて十分に剛性が高いことが確認されたことから、30Hzを適用する。

サインビート加振条件を表3に示す。

表1 加振台仕様

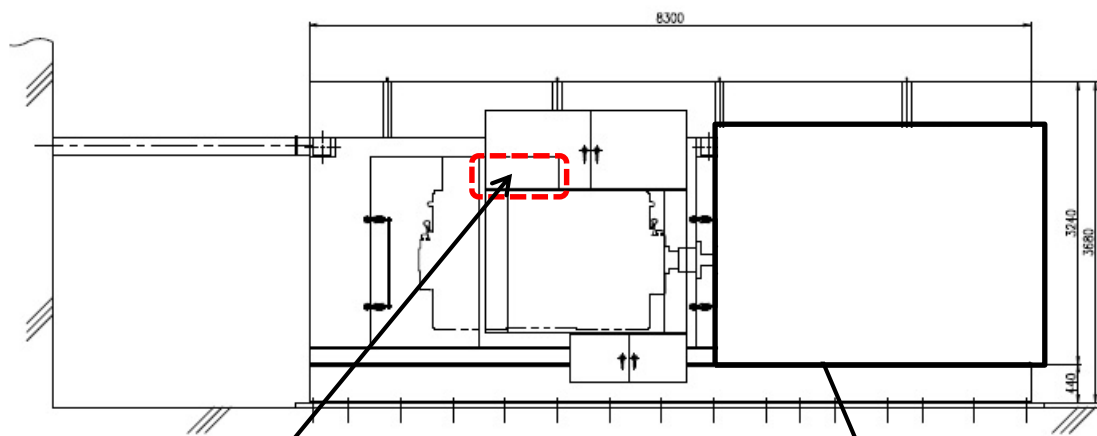
項目	水平	鉛直
加振力	60.0 kN	
最大加速度（無負荷時）	218.2 m/s ²	182.4 m/s ²
最大速度	1.78 m/s	
最大変位	60 mm	
振動数範囲	5～2000 Hz	5～500 Hz
最大搭載重量	500 kg	
加振テーブル寸法	□1200 mm	□1000 mm

表2 正弦波掃引加振試験条件

項目	内容
掃引振動数	5～50 Hz
掃引速度	1 オクターブ／1 分
加振レベル	0.1 G
加振方向	X, Y, Z 各方向単独

表3 サインビート試験条件

項目	内容
振動数	30 Hz
加振レベル	13 G
加振方向	X, Y, Z 各方向単独

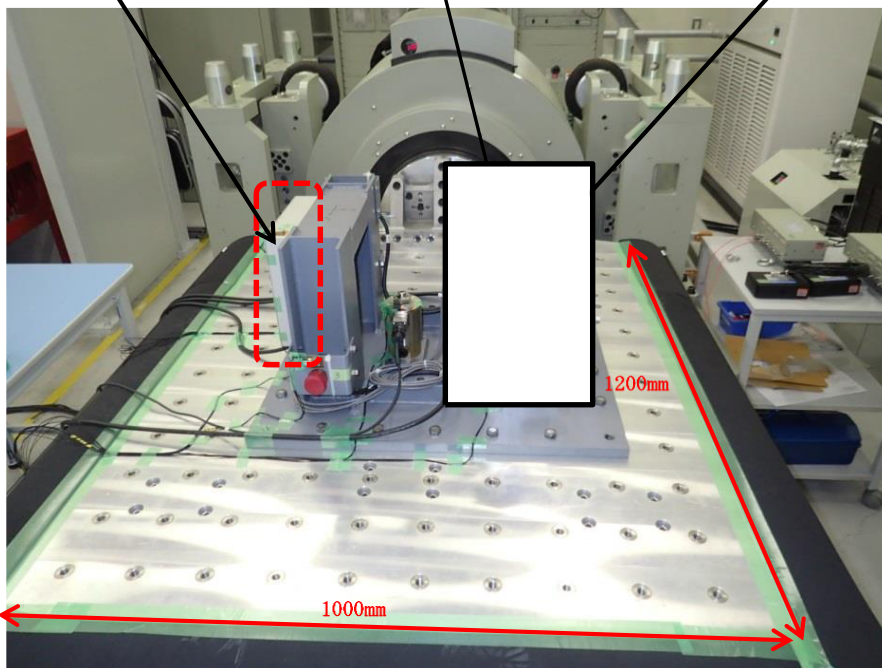


ガスタービン発電機

燃料制御ユニットドライバ

燃料油供給電磁弁

燃料制御ユニット



試験装置

図1 燃料制御装置加振試験

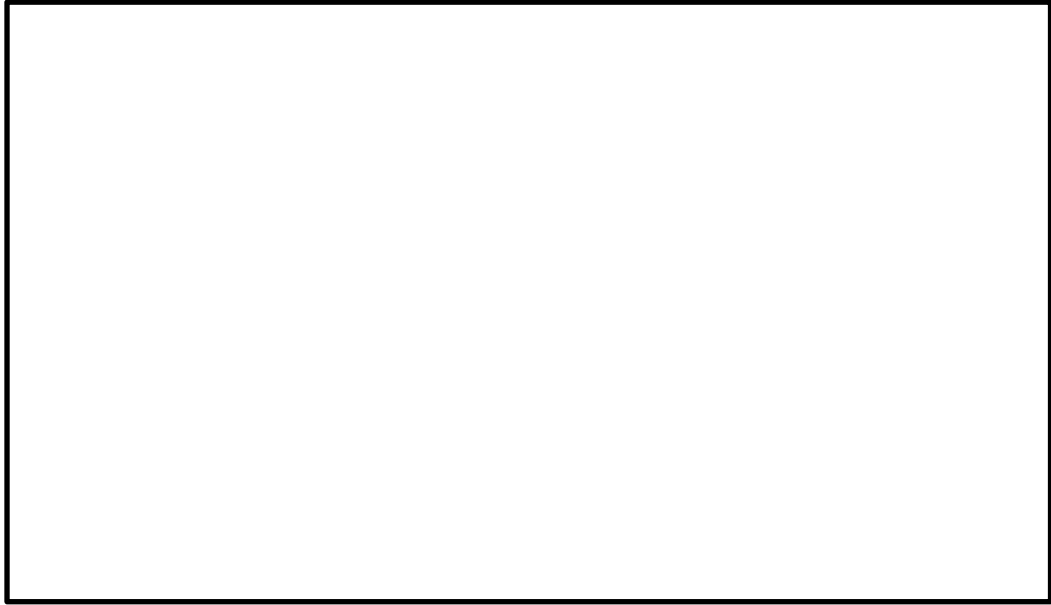


図2 燃料制御ユニット及び燃料油供給電磁弁の実機取り付け状態

2. 試験結果

試験結果を以下に示す。

(1) 正弦波掃引加振試験

供試体の各方向 (X, Y, Z 方向) に対して、それぞれ 5~50Hz の振動数範囲で経時的に加振振動数を増加させ、一定の入力加速度 (0.1 G=約 1.0 m/s²) で加振した。燃料制御装置の応答加速度を図 3 に、加振台の応答加速度及び加振振動数を図 4 に示す。

固有振動数付近の加振振動数では、共振により応答増幅するため、入力加速度より明確に大きな加速度で機器が応答する。5~50Hz の振動数範囲で正弦波掃引加振試験を実施した結果、図 3 に示すように燃料制御装置の応答加速度に明確な応答増幅は生じていない。したがって、燃料制御装置の固有振動数は 50Hz 以上であり、剛性が高い構造であることを確認した。

(2) サインビート加振試験

各試験前後で外観、出力信号、動作などを確認した。加振前後で、各供試体の異常は見られなかったことから、加振試験後に機能を維持できることを確認した。機能維持確認項目の詳細を表 4 に示す。

表 4 機能維持確認項目の詳細

機器名称	判定基準	確認結果
燃料制御ユニット及び 燃料制御ユニットドライバ	加振前後で外観に異常がないこと。	損傷やネジ・ケーブルの緩み、液漏れなどの異常は見られなかった。
	加振前後で同じ開度信号 (模擬信号) を入力した場合に出力信号 (開度指令信号, 開度フィードバック信号) が同等であること。	加振前後で出力信号は同等であり、かつ安定しており異常は見られなかった。
燃料油供給電磁弁	加振前後で外観に異常がないこと。	損傷やネジ・ケーブルの緩みなどの異常は見られなかった。
	加振後に、異音等がなく開閉状態の切り替えが可能なこと。	開閉の切替え動作、動作音に異常は見られなかった。

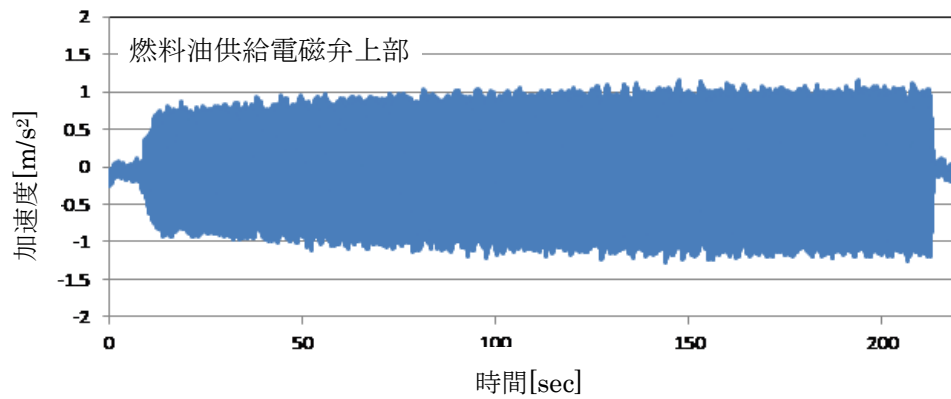
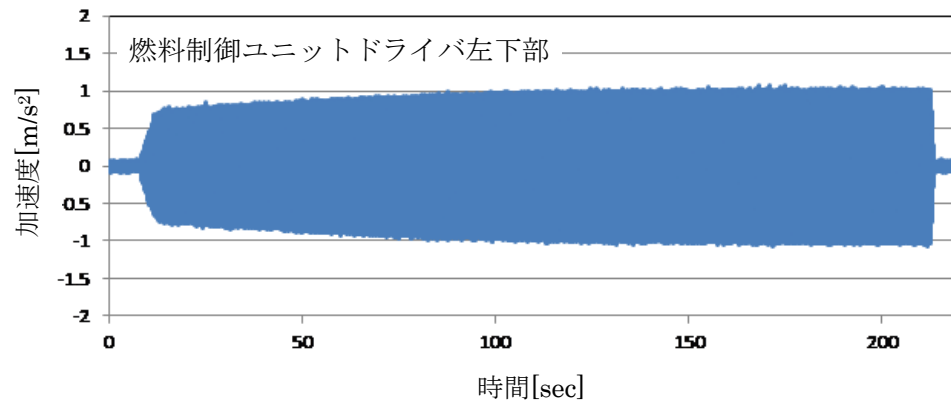
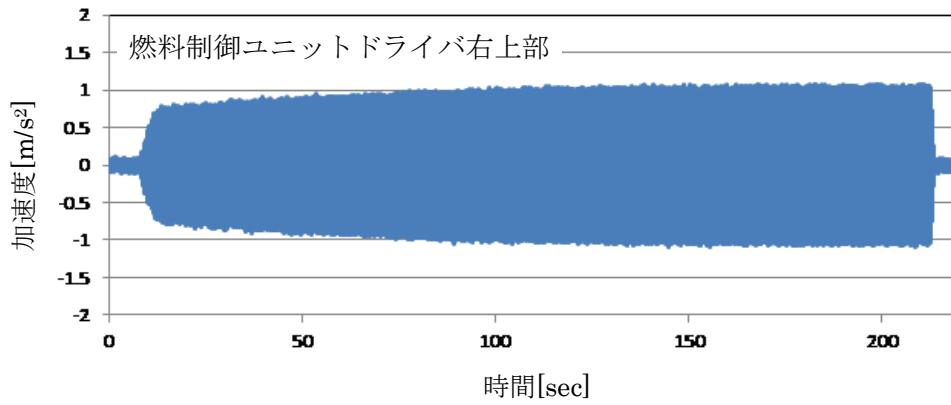
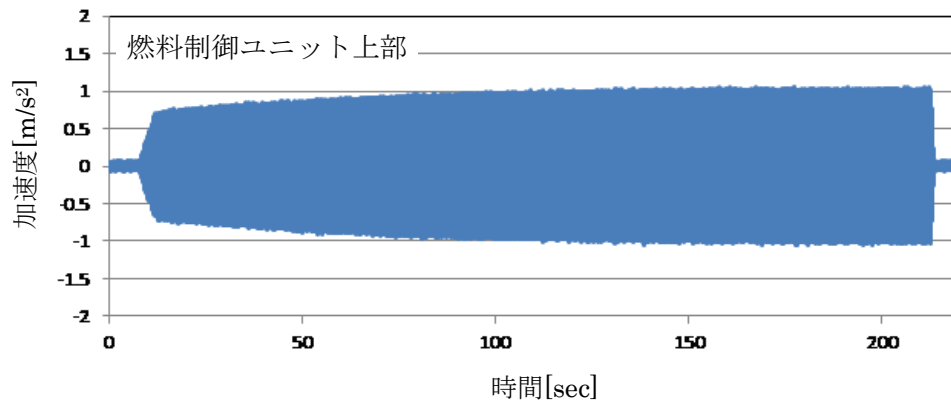


図3 燃料制御装置の応答加速度 (X方向) (1/3)

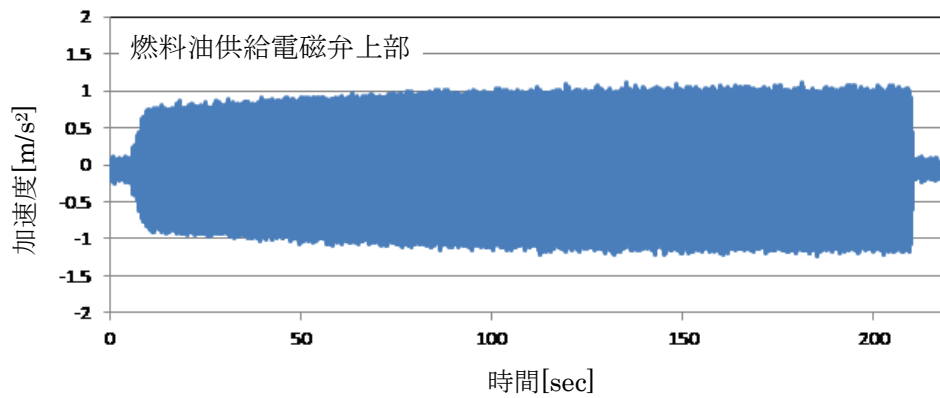
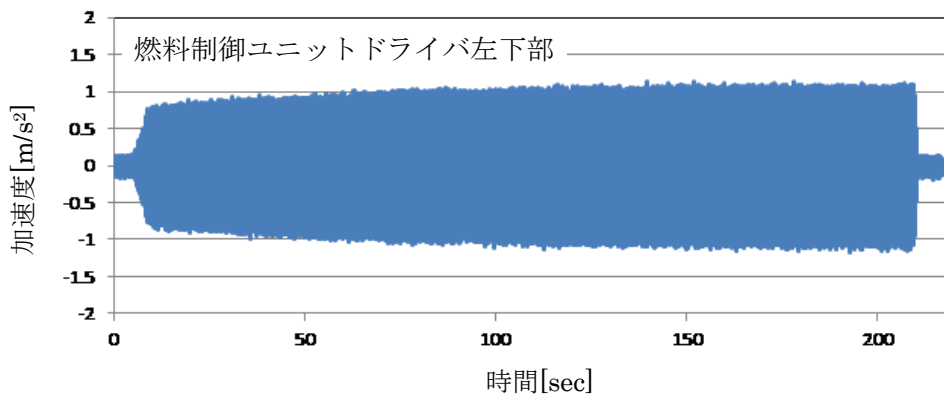
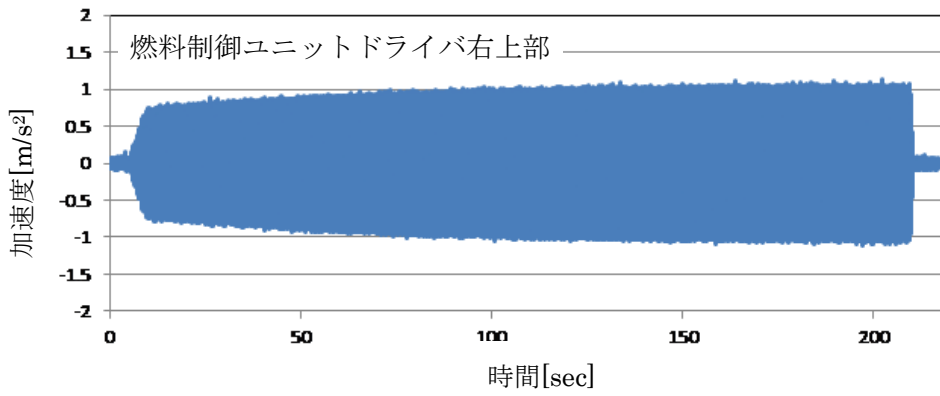
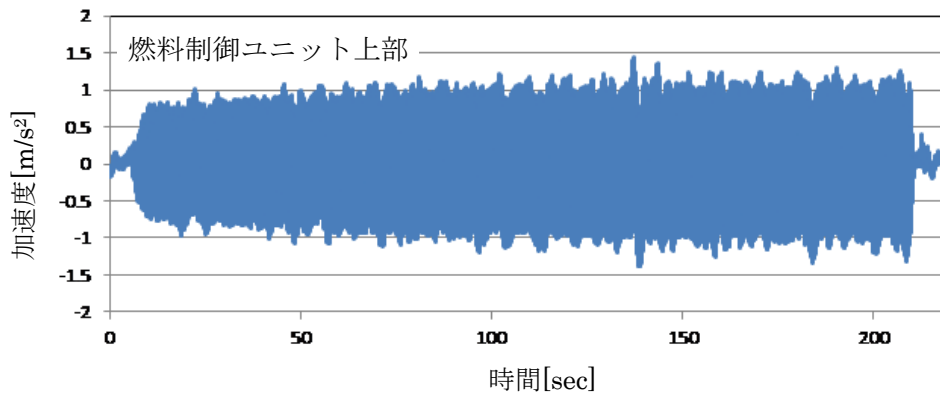


図3 燃料制御装置の応答加速度 (Y方向) (2/3)

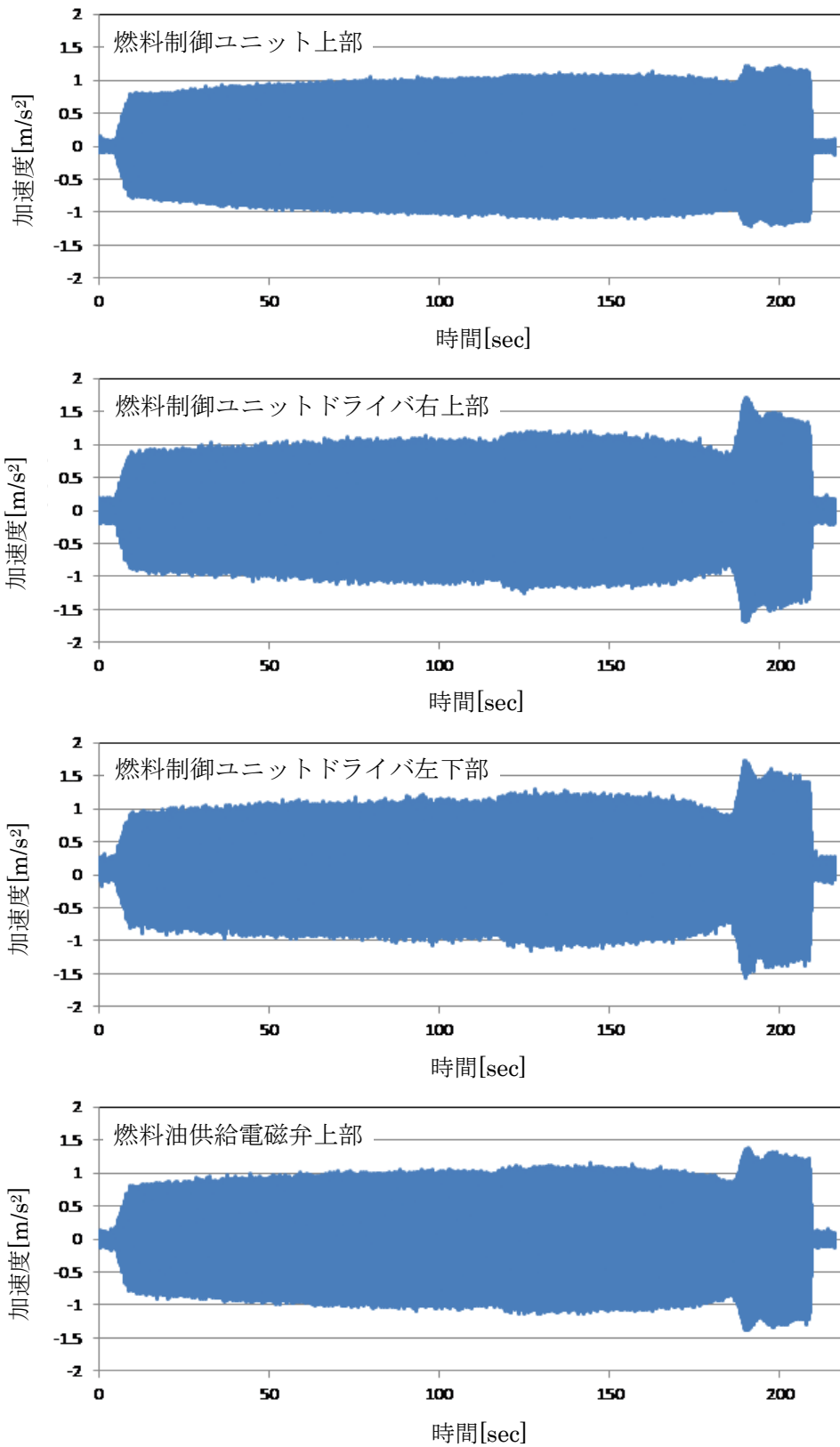


図3 燃料制御装置の応答加速度 (Z 方向) (3/3)

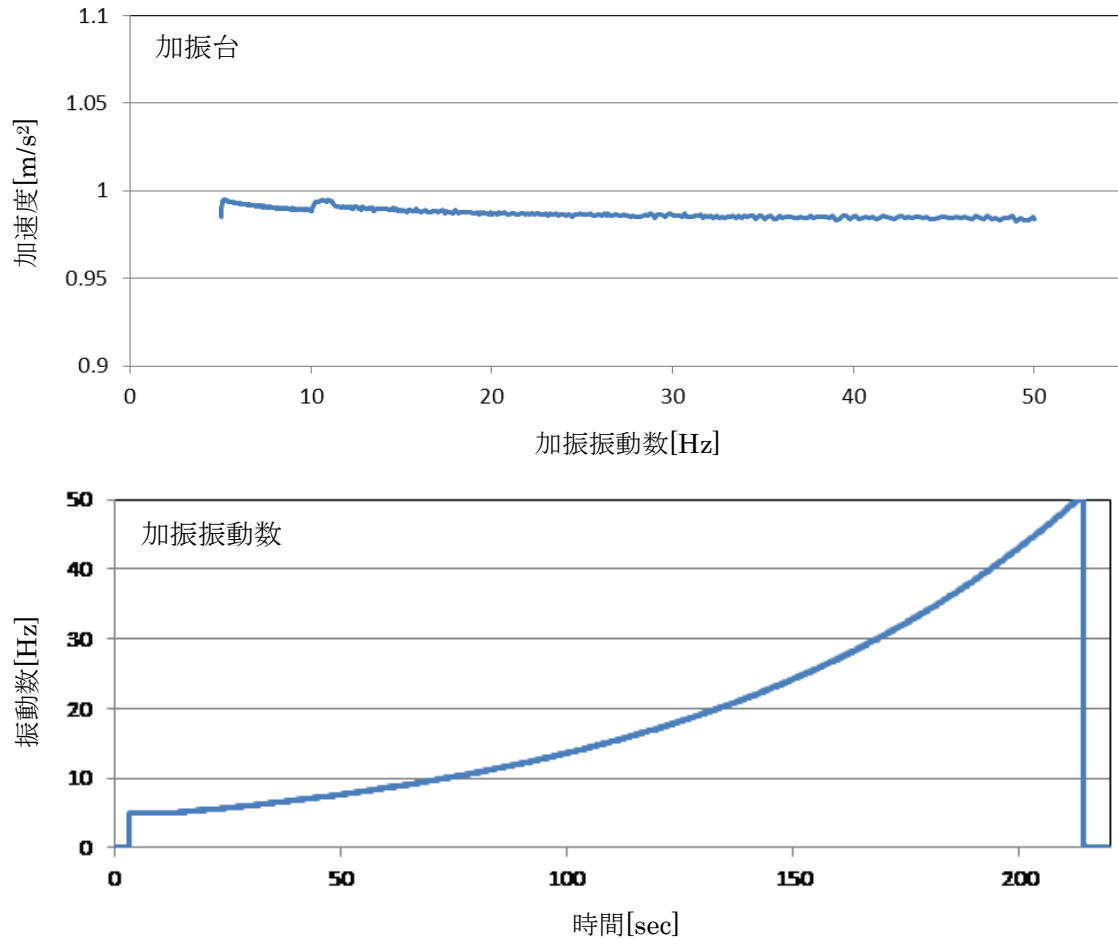


図4 加振台の応答加速度及び加振振動数 (X方向) (1/3)

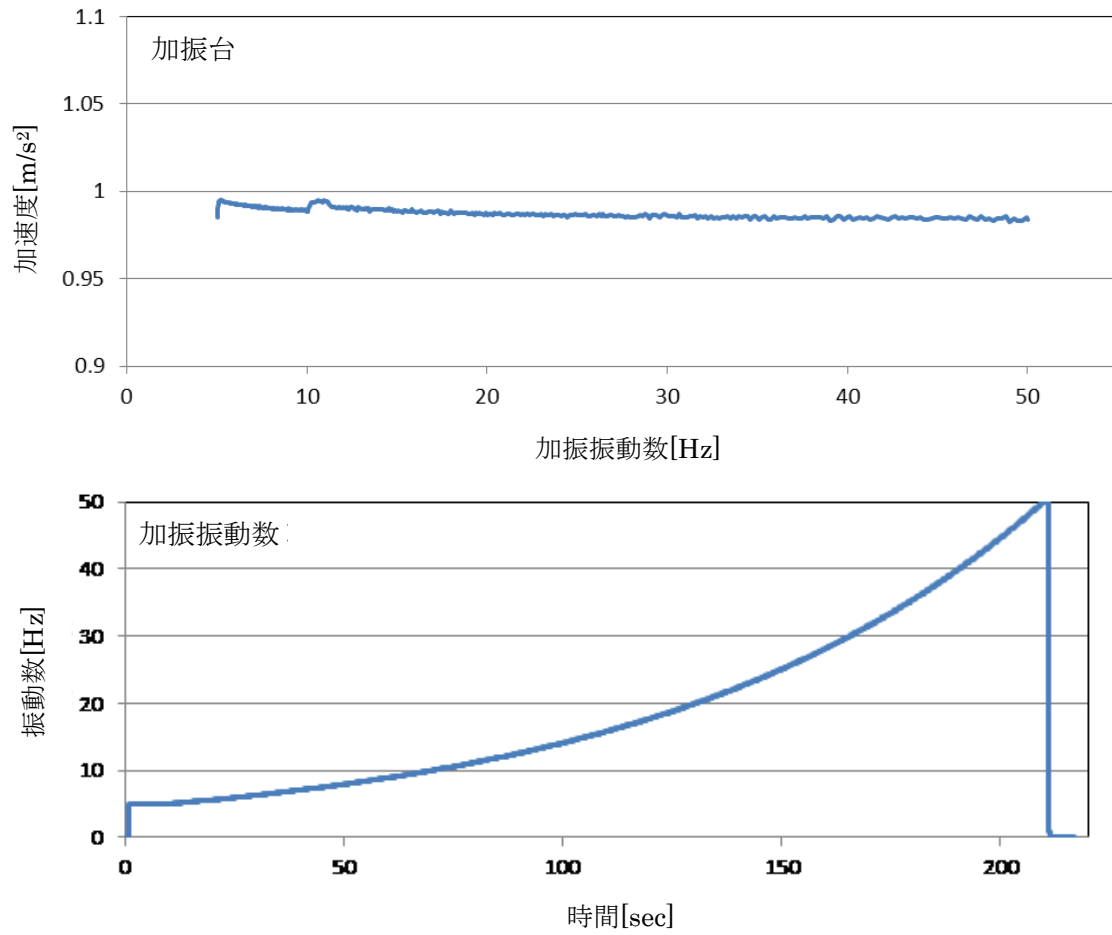


図4 加振台の応答加速度及び加振振動数 (Y方向) (2/3)

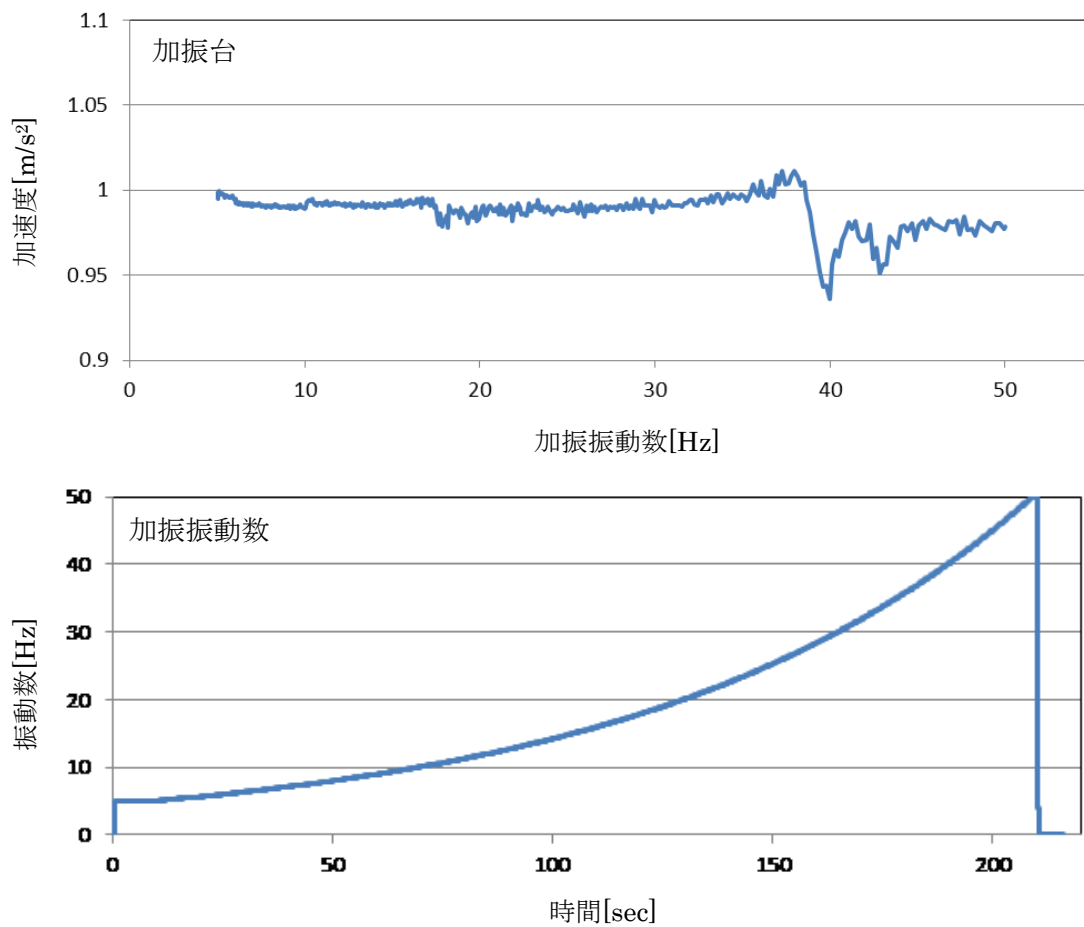


図4 加振台の応答加速度及び加振振動数 (Z方向) (3/3)

3. まとめ

燃料制御ユニット，燃料制御ユニットドライバ，及び燃料油供給電磁弁に対して加振試験を実施した。本試験では，地震後（加振後）の機能維持を確認した。

正弦波掃引加振，サインビート加振を実施し，以下の結果を確認した。

- ・正弦波掃引加振試験の結果，これら機器の固有振動数が 50Hz 以上であることを確認した。
- ・サインビート加振試験では，13G での加振を行い，加振前後で外観，機能に異常がみられなかったことから，加振後でも機能を維持できることを確認した。

ガスタービン発電機の加振試験について

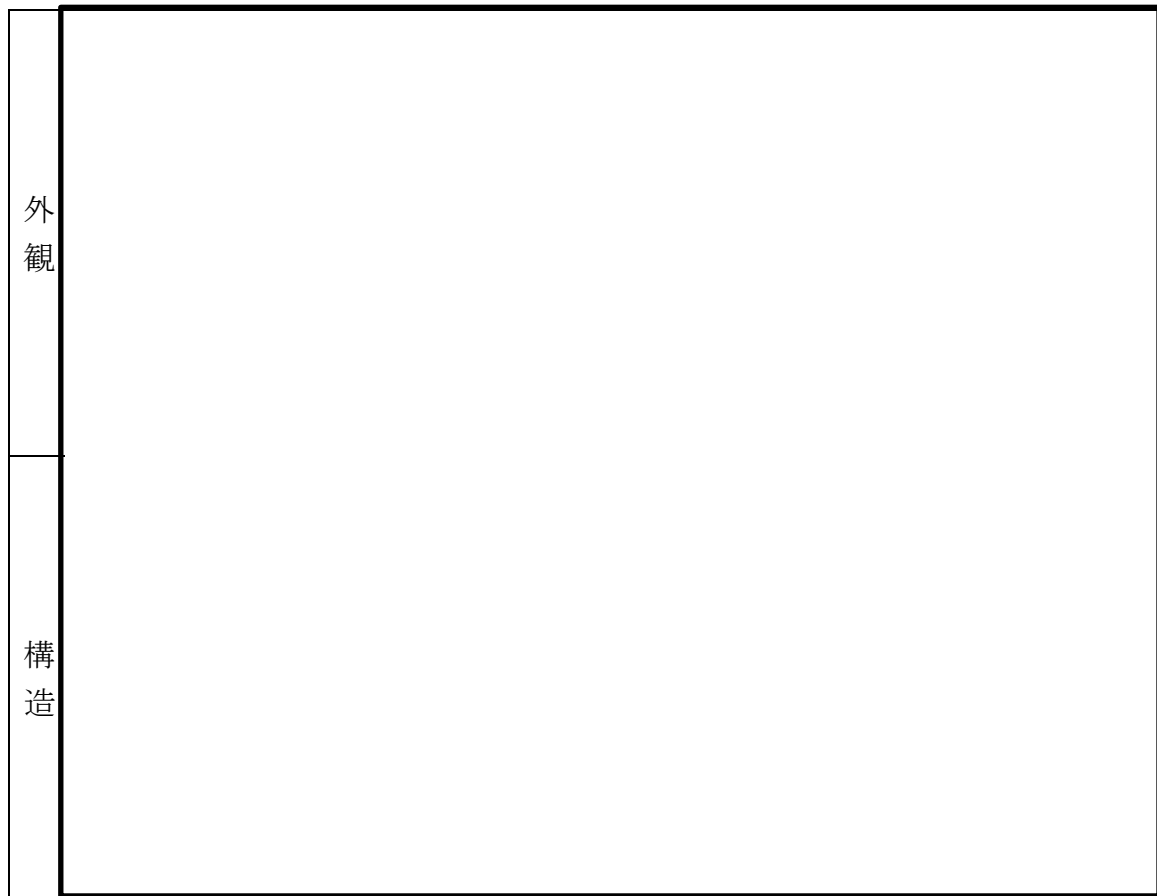
米国 PWR 向けのガスタービン（以下「US-APWR ガスタービン」という。）について、加振試験が実施されている^[1]。

島根原子力発電所第 2 号機のガスタービンと US-APWR ガスタービンは類似の仕様であることから、島根原子力発電所第 2 号機のガスタービン発電機に対する動的機能維持のための新たな検討の補足として、US-APWR ガスタービンに対する加振試験を示すとともに、US-APWR ガスタービンと島根原子力発電所第 2 号機のガスタービンの類似性を示す。

1. US-APWR ガスタービン加振試験

1.1 試験概要

US-APWR ガスタービンは、米国における電気設備の加振試験に関して規定されている IEEE Std 344^[2]に基づき試験が実施されている。実規模の試験における US-APWR ガスタービンの構造概要を別紙 1-1 図に示す。



別紙 1-1 図 US-APWR ガスタービンの構造概要

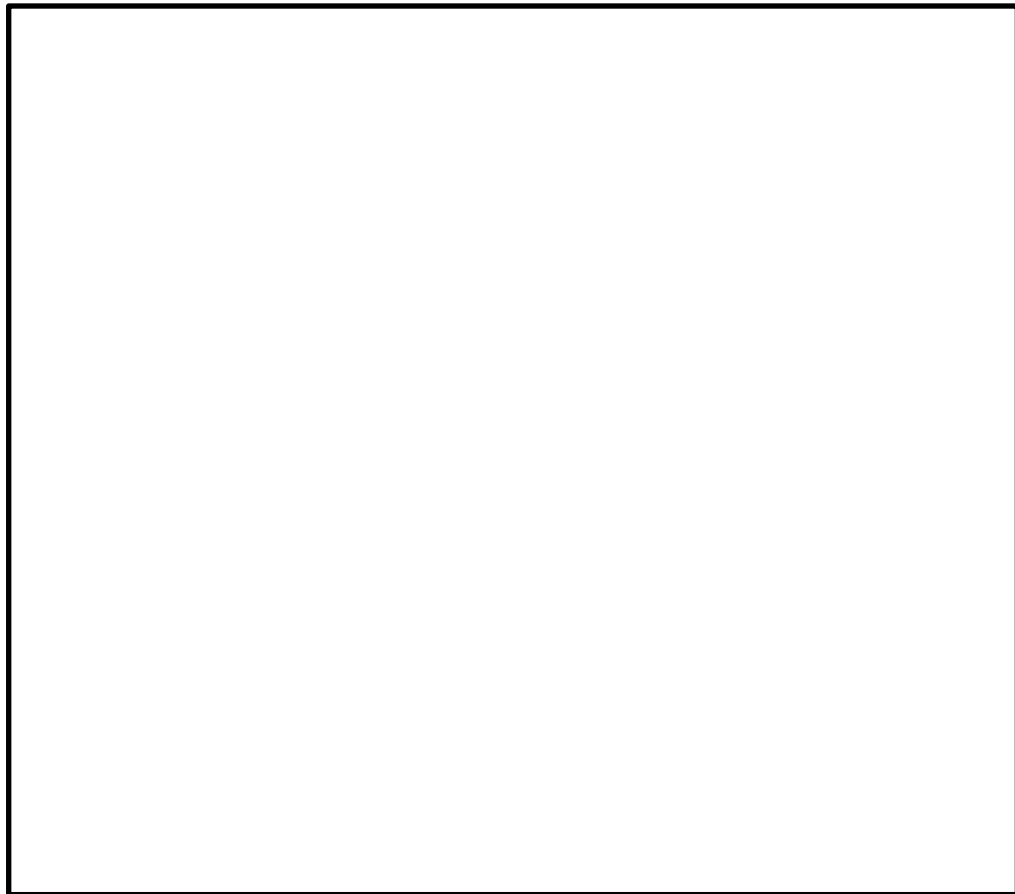
1.2 振動特性把握試験

1.2.1 試験条件

振動特性把握試験における試験条件を別紙 1-1 表に示す。水平（軸方向，軸直方向）及び鉛直方向に対して，それぞれ 1~50Hz の振動数範囲で加振レベル約 0.1 G の正弦波掃引加振を実施し，ガスタービンの固有振動数を確認した。計測センサー取付位置を別紙 1-2 図に示す。

別紙 1-1 表 正弦波掃引加振の試験条件

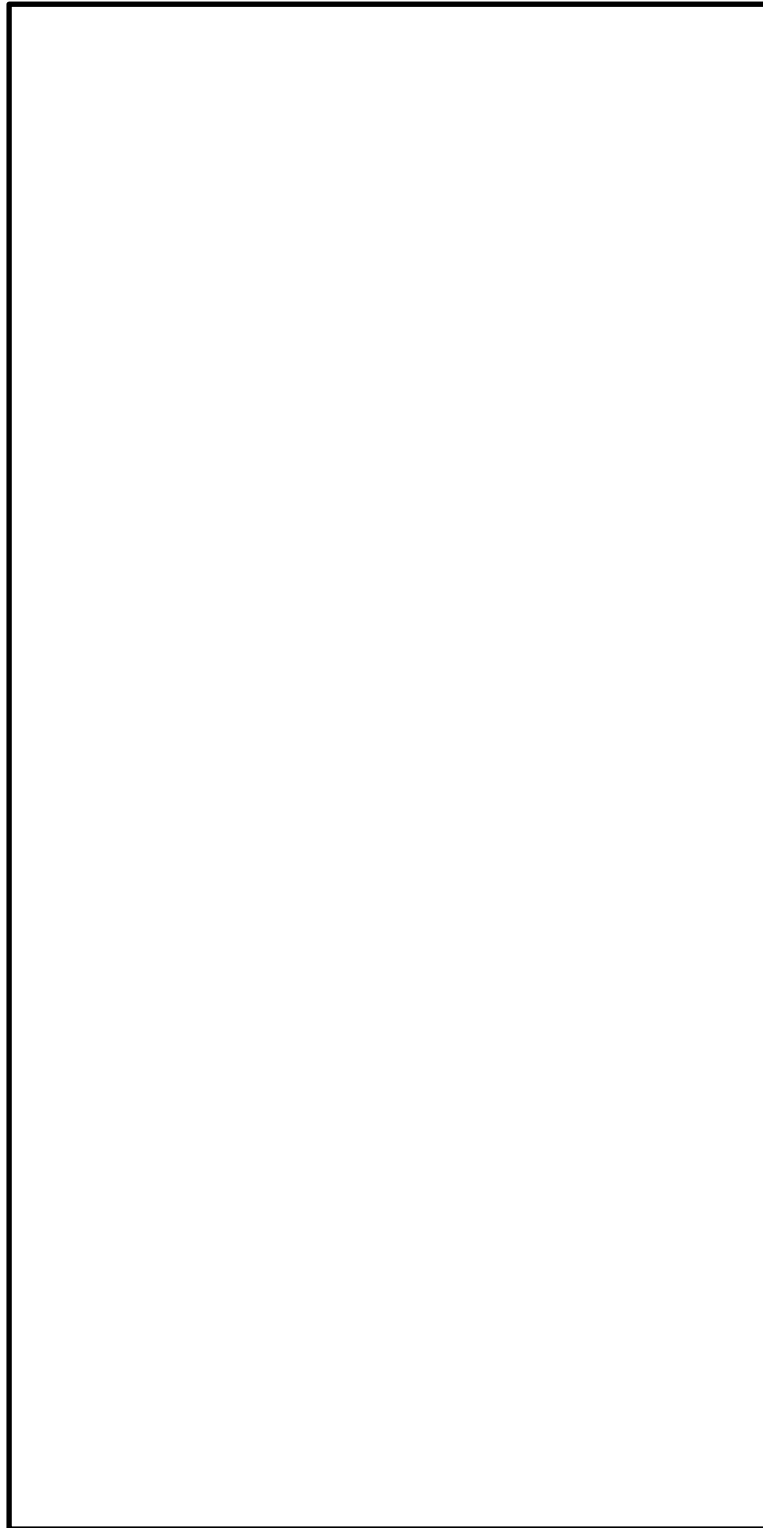
項目	試験条件
掃引振動数	1~50 Hz
加振レベル	0.1 G
加振方向	水平（軸方向，軸直方向）及び鉛直方向単独



別紙 1-2 図 計測センサー取付位置

1.2.2 試験結果

試験結果として得られた周波数応答関数を別紙 1-3 図に、各方向での固有振動数を別紙 1-2 表に示す。別紙 1-2 表より、ガスタービンが剛構造であることを確認した。



別紙 1-3 図 周波数応答関数

別紙 1-2 表 各方向の固有振動数

--

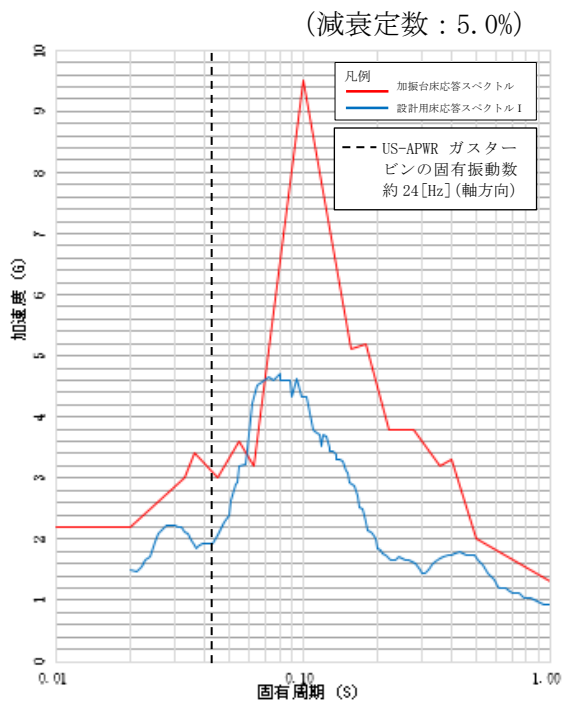
1.3 加振試験

1.3.1 試験条件

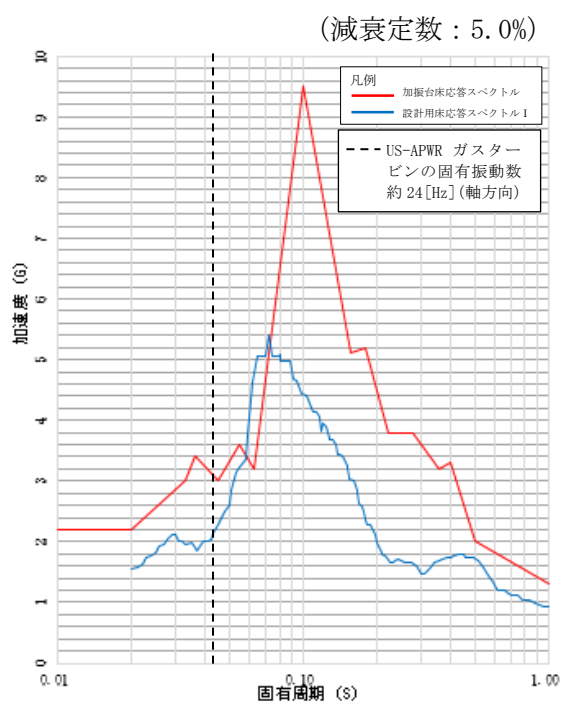
加振試験における試験条件を別紙 1-3 表に示す。また、US-APWR ガスタービンの加振試験は地震波加振により実施されているため、参考として加振台にて計測された波形の床応答スペクトル（以下「加振台床応答スペクトル」という。）と島根原子力発電所第 2 号機のカスタービン設置位置における設計用床応答スペクトル I の比較を別紙 1-4 図に示す。なお、別紙 1-4 図に示す加振台床応答スペクトルの減衰定数は、IEEE Std 344^[2]に基づき、米国の加振試験における加振波の設定において推奨されている減衰定数 5.0%を用いている。

別紙 1-3 表 加振試験条件

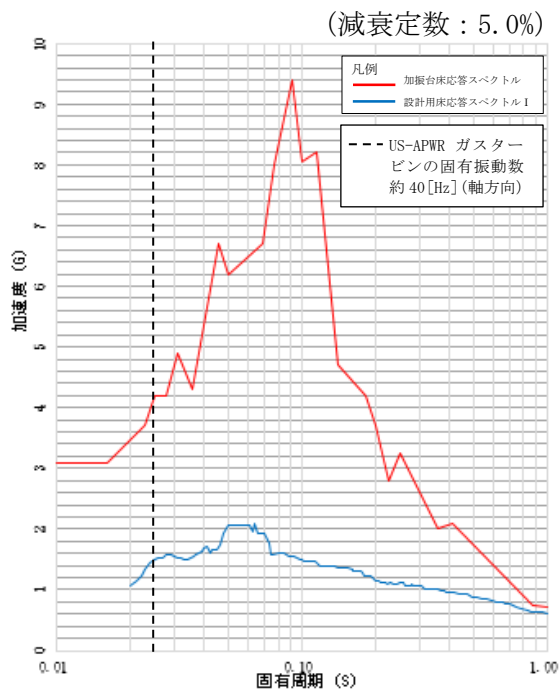
項目	試験条件
試験体	US-APWR ガスタービン（発電機部分を除く）
加振地震波	ランダム波
加振方向	水平 1 方向 + 鉛直方向の 2 軸同時加振試験
ガスタービン 運転状態	<ul style="list-style-type: none"> ・ 停止中加振 ・ 運転中加振 ・ 加振中起動
取付条件	振動台上に設置された台板にボルトにて取り付け



水平方向 (NS)



水平方向 (EW)



鉛直方向

別紙 1-4 図 加振台床応答スペクトルと設計用床応答スペクトル I の比較

1.3.2 試験結果

US-APWR ガスタービンの試験結果を別紙 1-4 表に示す。加振試験時及び加振試験後において、ガスタービンの運転性能に異常は確認されず、US-APWR ガスタービンの機能確認済加速度として、水平方向：2.2G、鉛直方向：3.1G が得られた。

別紙 1-4 表 加振試験結果

項目		試験結果
最大 加速度	水平	2.2 G
	鉛直	3.1 G
試験結果		すべての運転状態（停止中加振、運転中加振、加振中起動）において、ガスタービンの運転性能に異常のないことを確認した。
試験後確認		試験後の確認運転において、ガスタービンの運転性能に異常のないことを確認した。また、試験後の開放点検においても、外観、寸法、構成部品の動作に異常のないことを確認した。

2. 島根原子力発電所第 2 号機の高タービンと US-APWR ガスタービンの類似性

US-APWR ガスタービンと島根原子力発電所第 2 号機の高タービンの主な仕様の比較を別紙 1-5 表に、ガスタービン機関の構造概要の比較を別紙 1-5 図に示す。また、US-APWR ガスタービン加振試験における機能確認済加速度と、原子力発電所第 2 号機高タービンの動的機能維持における機能維持評価用加速度の比較を別紙 1-6 表に示す。

別紙 1-5 表及び別紙 1-5 図のとおり、US-APWR ガスタービンと島根原子力発電所第 2 号機の高タービンの構造及び仕様は類似している。また、島根原子力発電所第 2 号機の高タービンの機能維持評価用加速度を上回る加速度による加振試験により健全性が確認されている。このため、島根原子力発電所第 2 号機の高タービンにおいても、加振試験結果を確認した US-APWR ガスタービンと同等の耐震性を有しており、基準地震動 S_s による地震力に対して機能を維持できると考えられる。

なお、島根原子力発電所第 2 号機の高タービンの固有振動数として鉛直方向が 1 次モードで卓越するのは、エンクロージャを含む固有値解析を行っているためであり、エンクロージャを除くガスタービン本体の固有振動数は、US-APWR ガスタービンと同等であると考えられる。

別紙1-5表 ガスタービンの主な仕様の比較

		US-APWR ガスタービン	島根原子力発電所 第2号機ガスタービン
型式			
エンジン基数			
構造	圧縮機		
	タービン		
	燃焼器		
	減速機		
外形寸法		2877 mm(全長) 2180 mm(幅) 2275 mm(高さ)	同左
定格出力 [発電機出力]		5,625 kVA [4,500 kW]	6,000 kVA [4,800 kW]
電圧		6,900 V	同左
周波数		60 Hz	同左
回転数	ガスタービン		
	発電機	1,800 min ⁻¹	同左
始動方式*		空気始動方式	電気始動方式

注記*：基本評価項目は、始動方式の差異を考慮し、抽出する。

US-APWR ガスタービン	島根原子力発電所第2号機 ガスタービン

別紙1-5図 ガスタービン機関の構造概要の比較

別紙1-6表 US-APWR ガスタービンの機能確認済加速度と島根原子力発電所第2号機ガスタービン機能維持評価用加速度の比較

US-APWR ガスタービンの試験 により確認された 機能確認済加速度 [G]	島根原子力発電所第2号機 ガスタービン 機能維持評価用加速度 [G]
水平：2.2 鉛直：3.1	水平：1.43 鉛直：0.69

【参考文献】

- [1] Mitsubishi Heavy Industries, LTD., "Initial Type Test Result of Class 1E Gas Turbine Generator System" (MUAP-10023-NP[R7]), December 2013
- [2] IEEE Recommended Practice for Seismic Qualification of Class 1E Equipment for Nuclear Power Generating Stations

補足-027-10-80 建物・構築物として取り扱う原子炉格納容器内設備の
機器分類と許容応力について

目 次

1. はじめに	1
2. 建物・構築物として取り扱う原子炉格納容器内設備の許容応力について	1
3. まとめ	2

1. はじめに

鋼構造設計規準に従った許容応力度は、常温における物性値を用いた評価としていることから、本書では、建物・構築物として取り扱う原子炉格納容器内設備の機器分類と許容応力についての妥当性を説明するものである。

本書において対象とする図書を以下に示す。

- ・ VI-1-2-1 「原子炉本体の基礎に関する説明書」
- ・ VI-2-11-2-11 「ガンマ線遮蔽壁の耐震性についての計算書」

2. 建物・構築物として取り扱う原子炉格納容器内設備の許容応力について

原子炉格納容器内に設置された設備で建物・構築物として扱っている構築物とその組合せ許容応力度は表 2-1 に示すとおりである。いずれの構築物についても「鋼構造設計規準」に基づく常温による評価としている。なお、「鋼構造設計規準」に F 値の記載がない材料の降伏点及び引張強さは、設計・建設規格の付録材料図表 Part5 表 8 及び表 9 に記載の最小降伏点及び最小引張強さを用いている。

また、表 2-1 に示す構築物は既工認から「建物・構築物」として鋼構造設計規準を適用した常温による評価としている。

いずれも原子炉格納容器内に設置される構築物であり温度上昇による許容値の低下は無視できないことから、設計確認として評価温度を考慮した評価を実施した。評価結果を表 2-2 に示す。

表 2-1 建物・構築物として取り扱う原子炉格納容器内設備の組合せ許容応力度

書類番号	書類名称	機器等の区分	F (N/mm ²)	降伏点 (N/mm ²)	引張強さ (N/mm ²)	組合せ許容応力度 (N/mm ²)	既工認適用規格
VI-1-2-1	原子炉本体の基礎に関する説明書	建物・構築物	□*	□*	□*	□	鋼構造設計規準
VI-2-11-2-11	ガンマ線遮蔽壁の耐震性についての計算書	建物・構築物	215	—	—	215	鋼構造設計規準

注記*：「鋼構造設計規準」に F 値の記載がないため、設計・建設規格の付録材料図表 Part5 表 8 及び表 9 に記載の最小降伏点及び最小引張強さから F 値を算出

表 2-2 許容応力度に温度補正を考慮した評価結果

機器名称	荷重の組合せ	評価用温度 (°C)	応力評価点		発生応力 (MPa)	許容応力 (MPa)
原子炉本体の基礎	D + P + M + S s	171	P 1	円筒部◎部：外筒	335	□
ガンマ線遮蔽壁	D + P _{SAD} + M _{SAD} + S s	200	P 2	開口集中部	194	204

3. まとめ

以上のとおり，原子炉格納容器内設備の構造強度評価において，建物・構築物として取り扱う原子炉格納容器内設備の許容応力を「鋼構造設計規準」に基づいた常温による評価を行うことは妥当であると考えます。なお，いずれの構築物についても設計確認として評価温度を考慮した評価で許容値を満足することを確認している。