

補足説明

島根原子力発電所第2号機
工事計画認可申請（補正）に係る論点整理について
[機器・配管関係]

2022年9月

中国電力株式会社

目 次

NS2-補-027-10-62 「配管系に設置する三軸粘性ダンパの設計方針」

(通し頁)

1. 概要	7
2. 基本方針	7
2.1 要求事項	7
2.2 構造の概要	11
2.3 設計方針	16
2.4 適用規格・基準等	20
2.5 適用実績	22
3. 耐震評価方針	23
3.1 評価方針	23
3.2 三軸粘性ダンパの配置検討	23
3.3 性能試験及び解析モデル	23
3.4 地震応答解析手法	33
3.5 三軸粘性ダンパ評価	37
3.6 配管系評価	38
4. 実機配管系の耐震評価結果	39
5. 実機配管系への適用性	39
5.1 設工認において適用実績のある制震装置との比較結果	39
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	41
5.3 新規制基準への適合性を踏まえた検討	42
6. 三軸粘性ダンパの設置方法及び点検・保守	42
6.1 三軸粘性ダンパの配管系への設置方法	42
6.2 三軸粘性ダンパの点検・保守	46
7. まとめ	48
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	49
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	55
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	66
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	70
添付資料 3-3 三軸粘性ダンパの特性試験	75

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	84
添付資料 3-5 三軸粘性ダンパの性能試験方法	86
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	91
添付資料 3-7 三軸粘性ダンパの減衰性能と配管系の応答の関係	97
添付資料 3-8 多入力の時刻歴応答解析の適用について	98
添付資料 5-1 新規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	102
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	106

NS2-補-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」

(通し頁)

I. 主蒸気管における耐震重要度分類及び評価用に適用する地震動の考え方について	115
II. 評価用地震動における評価結果	119
添付資料 1 地盤物性等の不確かさによる固有周期の変動に対する考慮について	137
添付資料 2 主蒸気管に設置する三軸粘性ダンパの段階的な減衰性能の設定	139
添付資料 3 主蒸気管の振動モード	140
添付資料 4 主蒸気止め弁及び蒸気加減弁の解析モデルについて	154

NS2-補-027-10-51 「支持装置の評価手法の精緻化について」

(通し頁)

1. はじめに	161
2. 適用範囲	162
3. 支持装置の構造及び作動原理	163
3.1 支持装置に要求される基本機能	163
3.2 メカニカルスナップ	164
3.3 オイルスナップ	167
3.4 ロッドレストレイント	170
4. 支持装置の耐震設計	171
4.1 既工認における評価	171
4.2 支持装置の定格荷重	172
4.3 今回工認における評価	174
4.3.1 評価手順	174

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	176
4.3.3 既工認と今回工認の差異	179
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	181
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	186
5.1 評価部位及び評価項目の整理	187
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整理	227
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整理	231
5.3.1 耐力試験において確認された限界耐力値の概要	231
5.3.2 限界耐力値に対する定格荷重の裕度の整理	232
5.4 新規基準値の設定	235
6. 結論	242
別紙1 スナッパ確性試験の概要	243
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	247
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）	258
別紙4 スナッパの電力共同研究の概要	311
別紙5 スナッパの J N E S 研究の概要	384
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	503
別紙7 ロッドレストレイント耐力確認試験の概要	514

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 要求事項	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	27
3.5 三軸粘性ダンパ評価	31
3.6 配管系評価	32
4. 実機配管系の耐震評価結果	33
5. 実機配管系への適用性	33
5.1 設工認において適用実績のある制震装置との比較結果	33
5.2 海外の原子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	35
5.3 新規制基準への適合性を踏まえた検討	36
6. 三軸粘性ダンパの設置方法及び点検・保守	36
6.1 三軸粘性ダンパの配管系への設置方法	36
6.2 三軸粘性ダンパの点検・保守	40
7. まとめ	42
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 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 3-8 多入力の時刻歴応答解析の適用について	
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	

1. 概要

島根 2 号機において、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。

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。

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 要求事項

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S d機能維持設計とする。S d機能維持設計の考え方は、NS2-補-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 S 1 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

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。

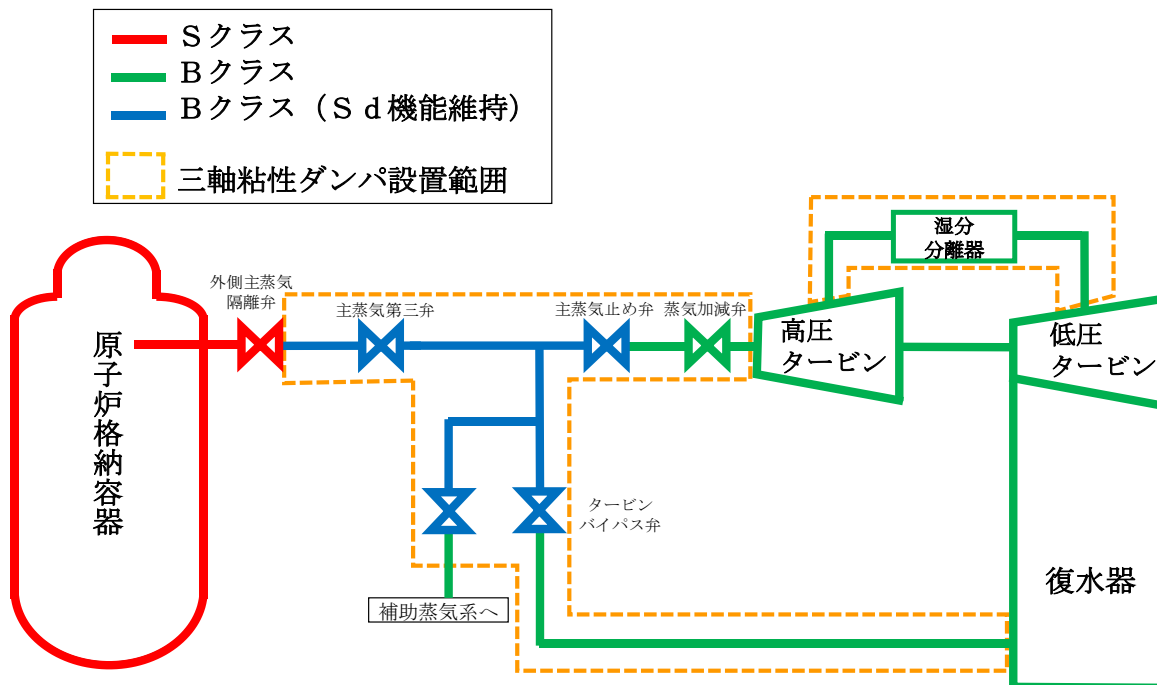


図 2-1 三軸粘性ダンパの設置範囲及び耐震クラス (1/2)

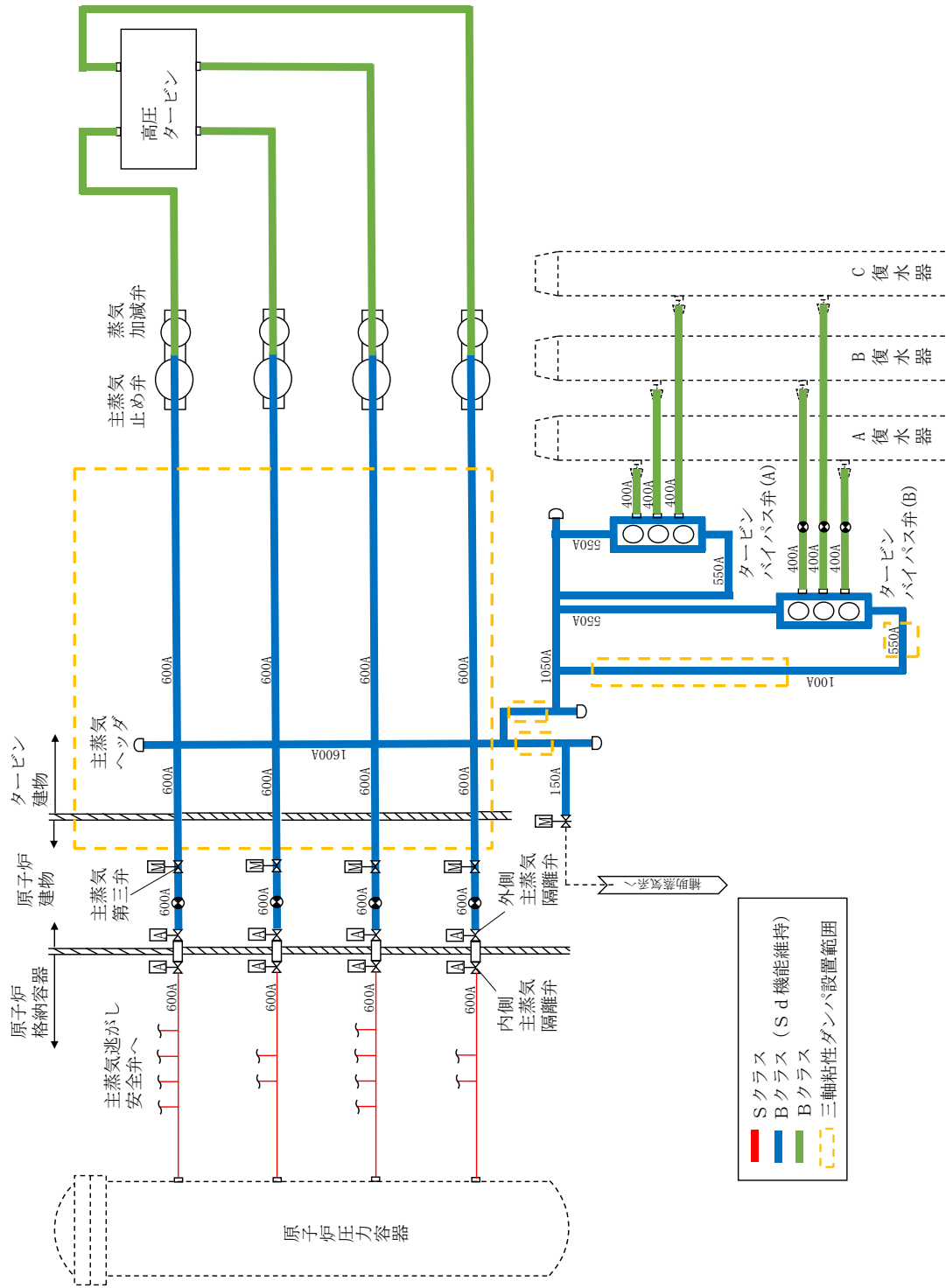


図 2-1 三軸粘性ダンパの設置範囲及び耐震クラス (2/2)

表 2-2 配管系に設置する制震装置の検討

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	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			抵抗力は鉛の期剛性、二次剛性で決まる。				
粘性型	粘性ダンパ (非線形)	粘性体の流動抵抗を利用してエネルギーを吸収するダンパ	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、1 方向のみに減衰性能を発揮する。	
	粘性ダンパ (線形)	粘性体の流動抵抗を利用してエネルギーを吸収するダンパ			抵抗力は速度に比例し、履歴曲線は楕円に近い。				排気筒への適用例あり
	オイルダンパ	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	粘性ダンパ	粘性体の流動抵抗を利用してエネルギーを吸収するダンパ	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、三方向に応答する配管系に適している。	

凡例 ◎：適用可能 (有効性が最も高い) ○：適用可能 △：適用するため課題がある ×：適用不可

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。

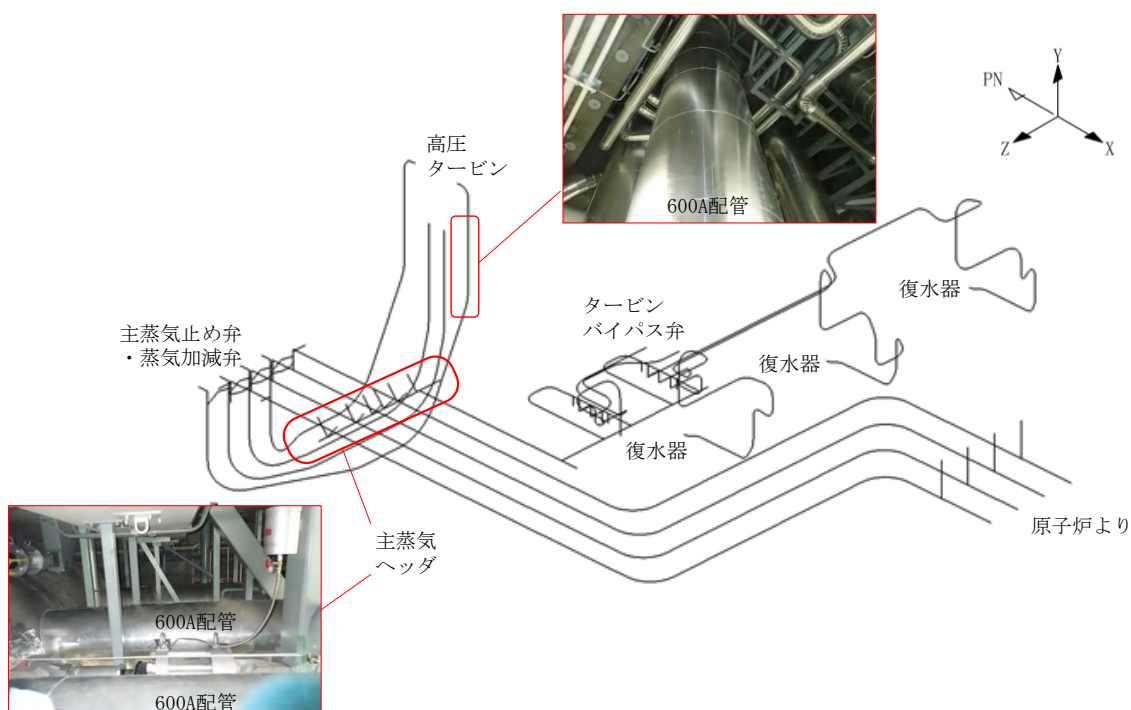


図2-2 主蒸気系配管等の構成概要

(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。

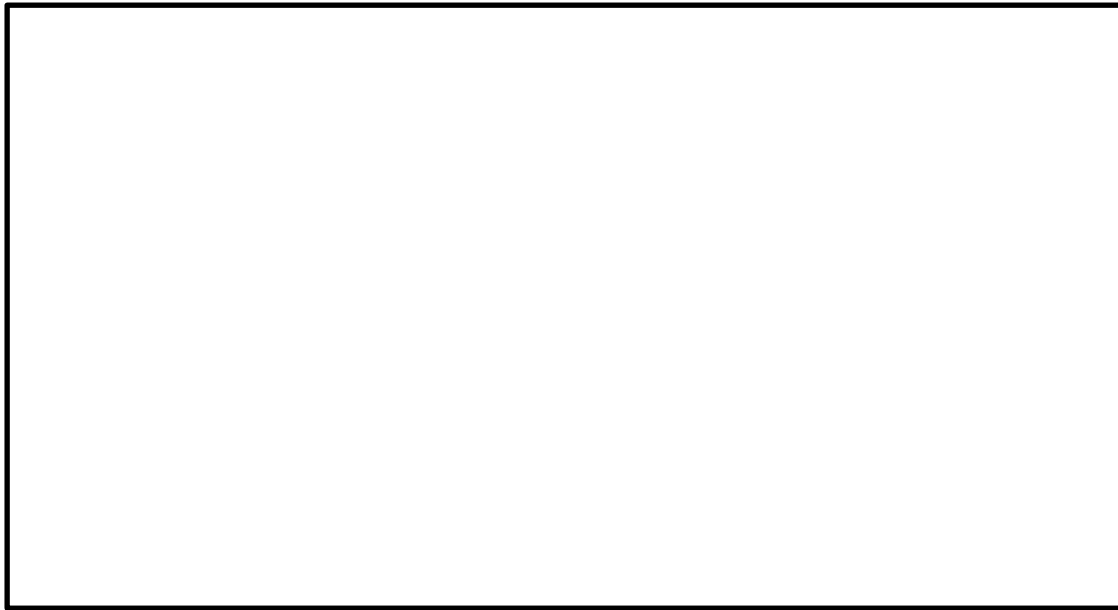
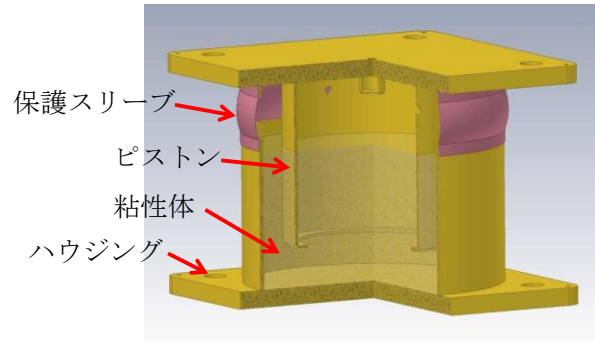


図 2-3 三軸粘性ダンパの外観及び構造

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。

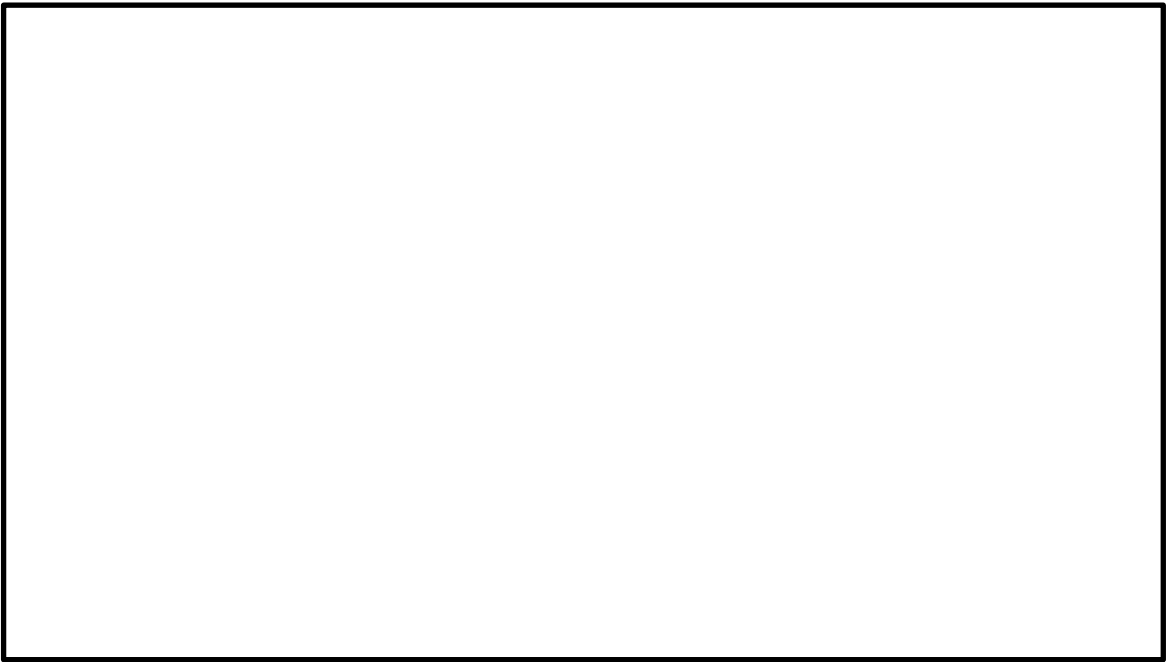
[水平方向の動作（図 2-4(a)）]

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。

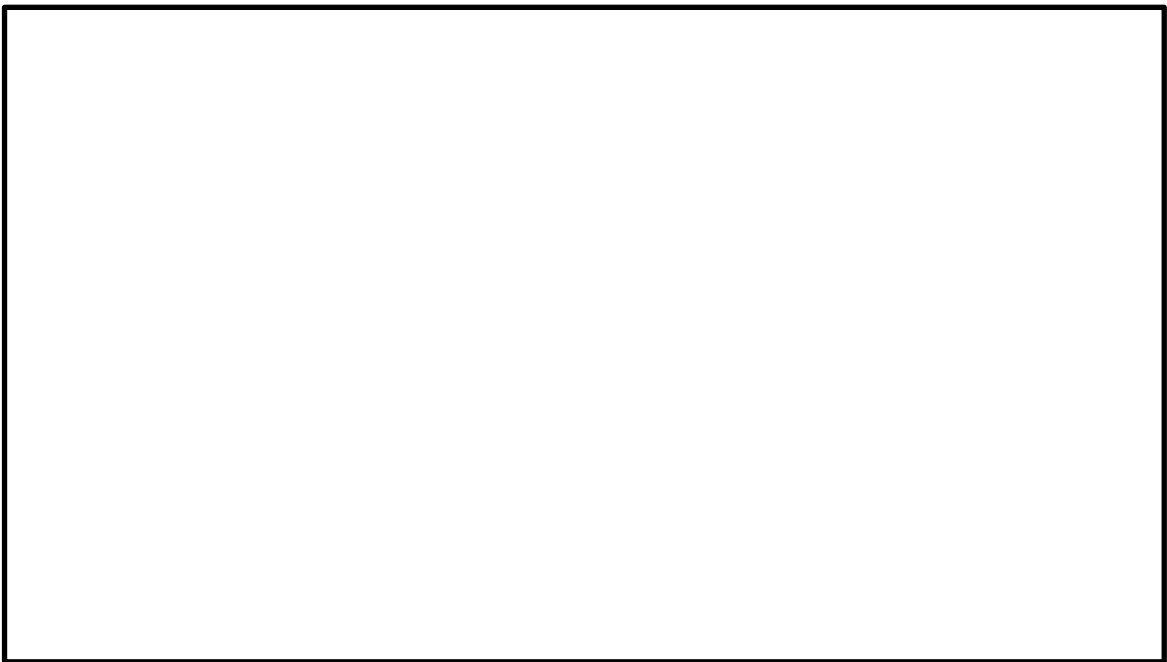
[鉛直方向の動作（図 2-4(b)）]

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。

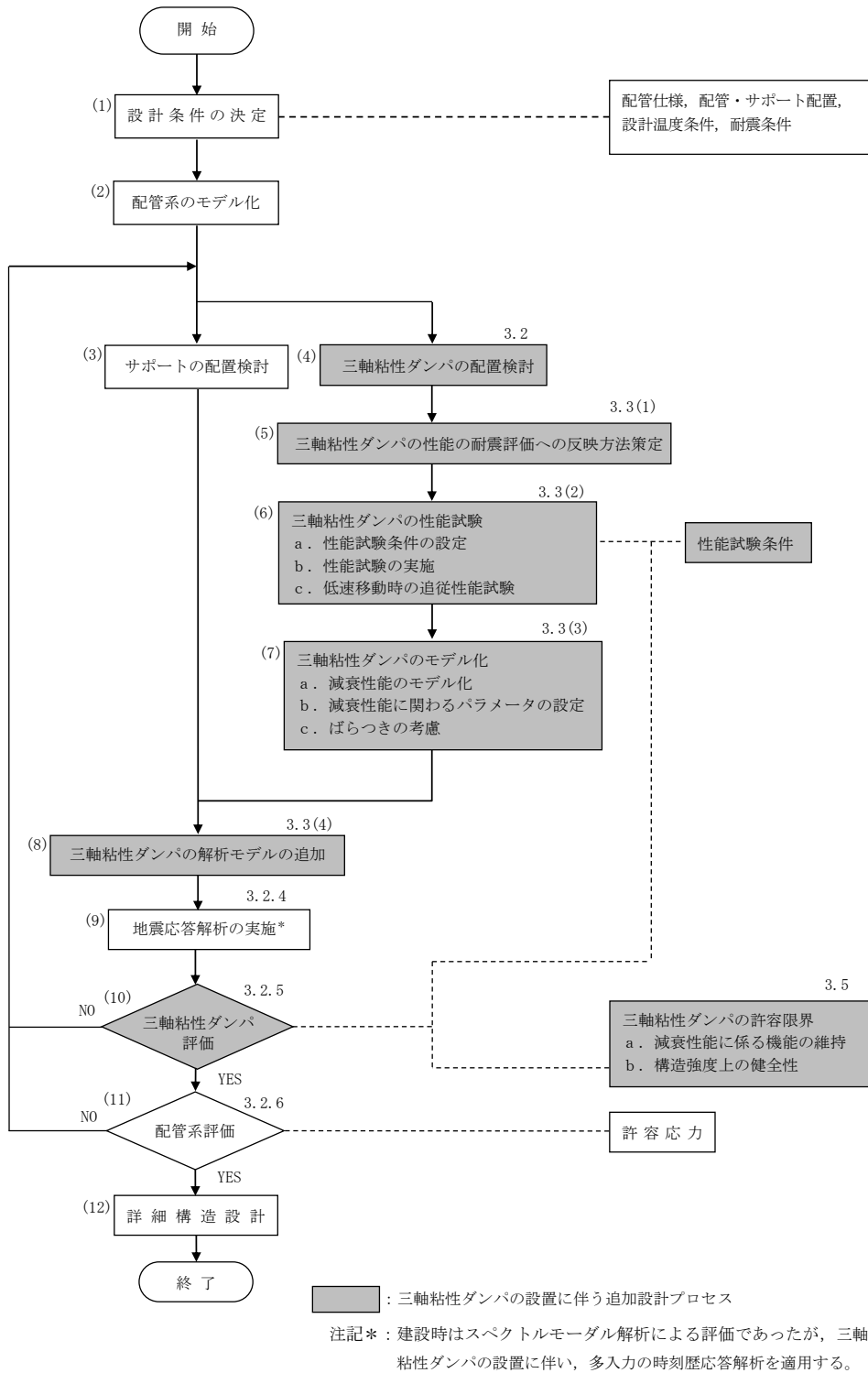


図 2-5 三軸粘性ダンパを設置した配管系の耐震設計フロー

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 2-7 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も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。

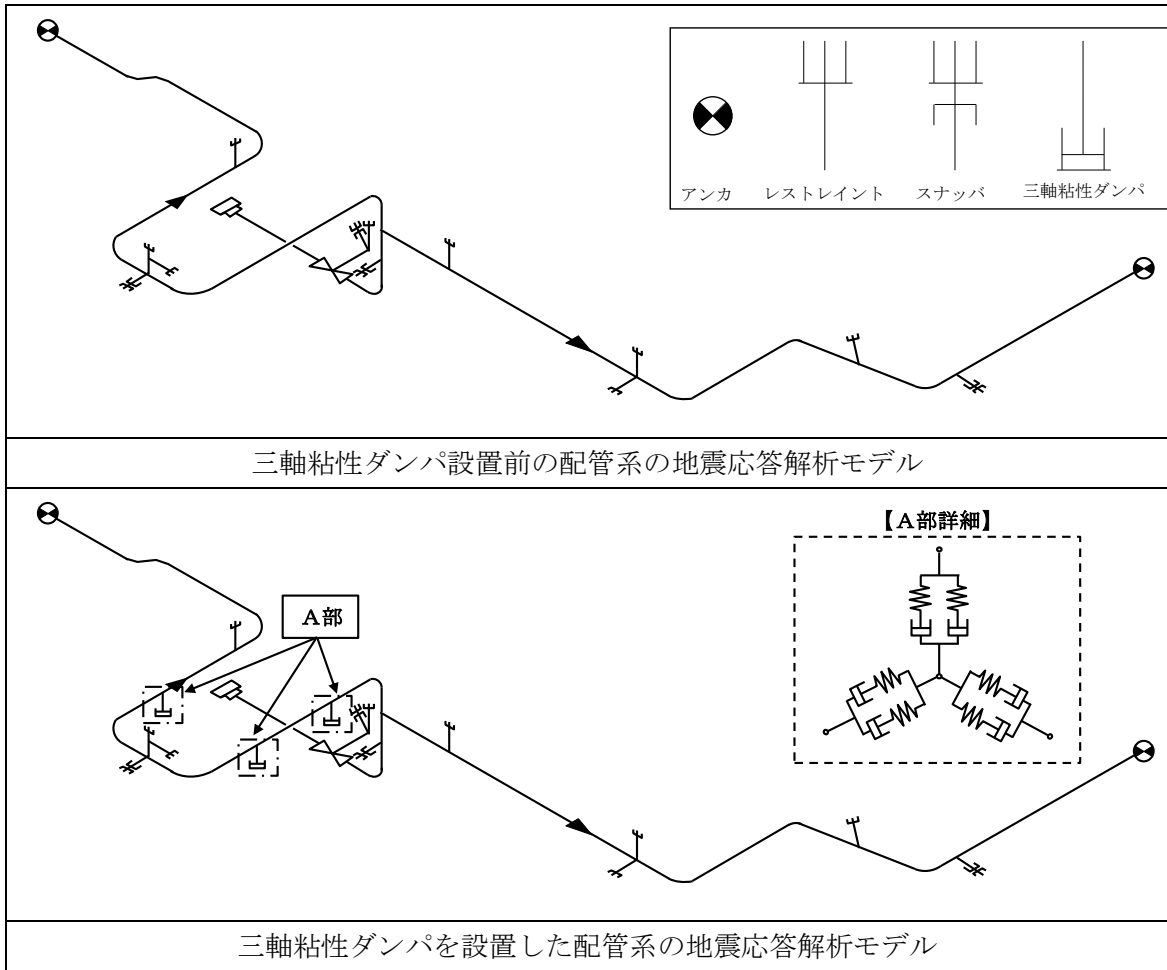


図 2-6 配管系の地震応答解析モデル

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 (□開い：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 設計の考え方
		① 原子力発電所耐震設計技術指針 (J E A G 4 6 0 1 *1) 原子力施設における機器・配管系等	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) 免震型原子力施設における建屋(免震層含む)・機器 長周期帯域を考慮した、耐震重要度分類に応じた地震力 死荷重+圧力荷重+機械荷重+地震荷重 絶対値和 動的地震力と静的地震力	
1	適用範囲			一般的な配管系と同様。
2	設計用地震動			一般的な配管系と同様。
3	荷重の組合せ			一般的な配管系と同様。
4	地震荷重 (水平/鉛直) の組合せ			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			一般的な配管系と同様。
6	地震応答解析法			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ベクトルモード解析は適用できず、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%) — (記載無し)	設計用減衰定数 (3.0%) (3.0%)
		三軸粘性ダンパ	— (記載無し)	性能試験により設定 ①を適用*2
8	評価手法	配管	「4種管」に該当	一般的な配管と同様。
		支持構造物 (三軸粘性ダンパ除く) 三軸粘性ダンパ	「その他の支持構造物」に該当 「その他の支持構造物」に該当	一般的な配管に取付く支持構造物と同様。 一般的な配管に取付く支持構造物と同様。
9	三軸粘性ダンパの不確かさの考慮	構造強度上の健全性	— (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する。(詳細は、3.5項を参照)
		機能維持評価	— (記載無し)	性能試験により確認 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 許容心力編 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にて整理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なり、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の設計においては上限の減衰性能に基づく最大荷重を適用するためである。

b. 性能試験の実施

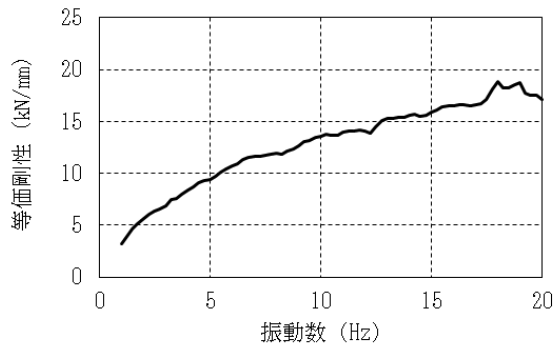
設定した性能試験条件により、三軸粘性ダンパの性能試験を実施する。性能試験の詳細について添付資料 3-5 に示す。地震応答解析に適用する三軸粘性ダンパの減衰性能は、実機に設置する各型式の三軸粘性ダンパについて性能試験を実施の上、設定する。

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。

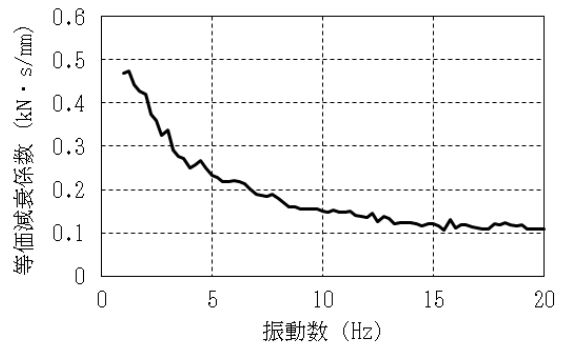
表 3-2 三軸粘性ダンパの性能試験条件の設定

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*

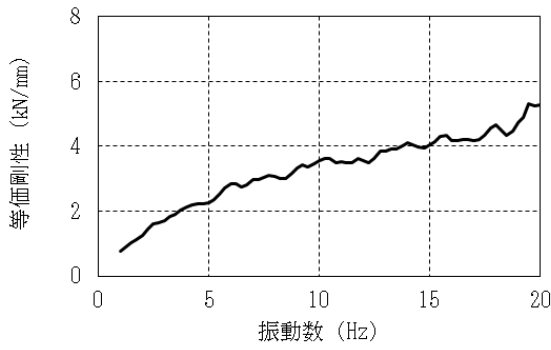
注記*：実機使用条件を想定して設定する。



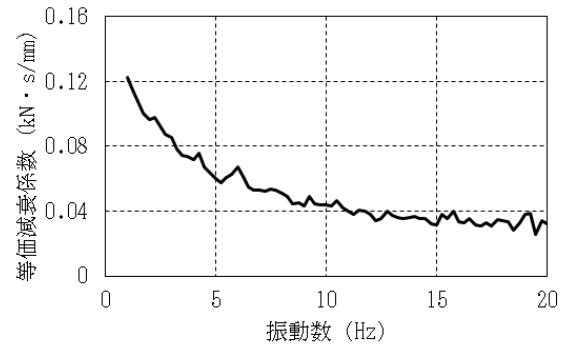
(H-1) 等価剛性 K_{High} (水平方向)



(H-2) 等価減衰係数 C_{High} (水平方向)

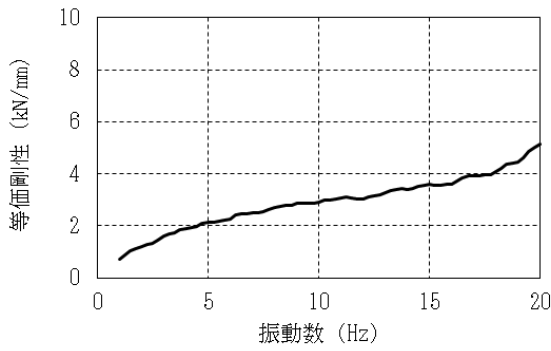


(V-1) 等価剛性 K_{High} (鉛直方向)

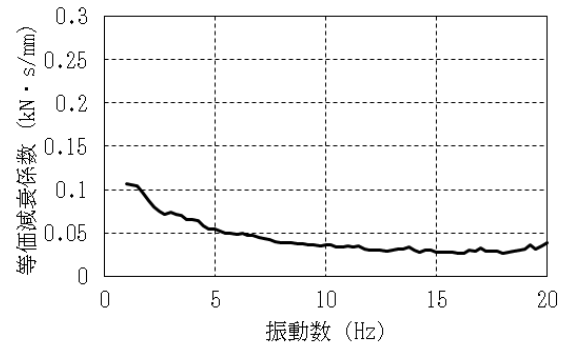


(V-2) 等価減衰係数 C_{High} (鉛直方向)

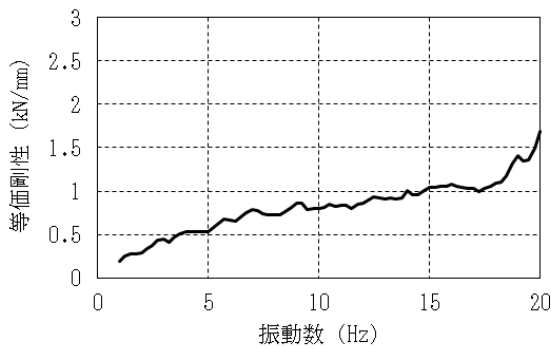
図 3-1 高側ダンパ試験性能 (型式 325/159 の例)



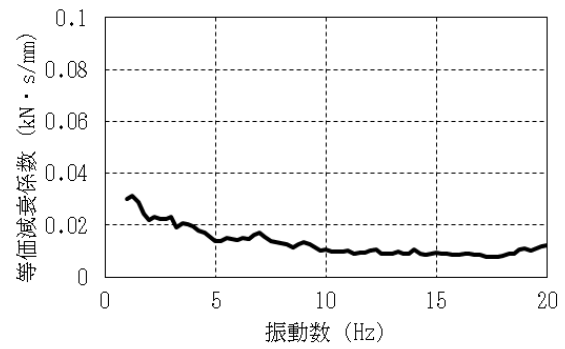
(H-1) 等価剛性 K_{Low} (水平方向)



(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

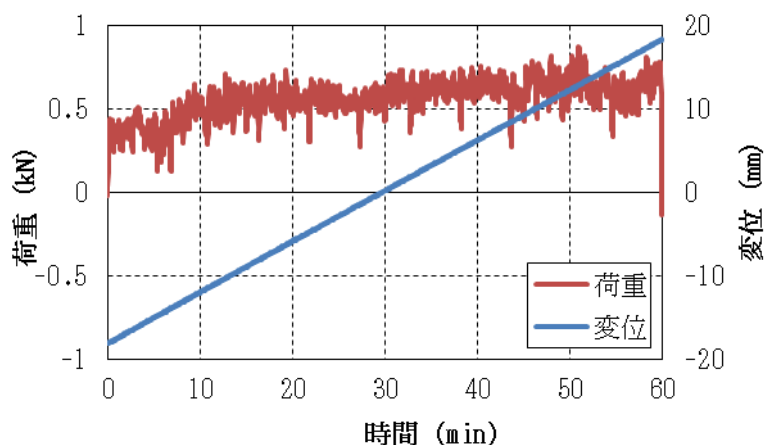


図 3-3 水平方向の低速移動に対する発生荷重

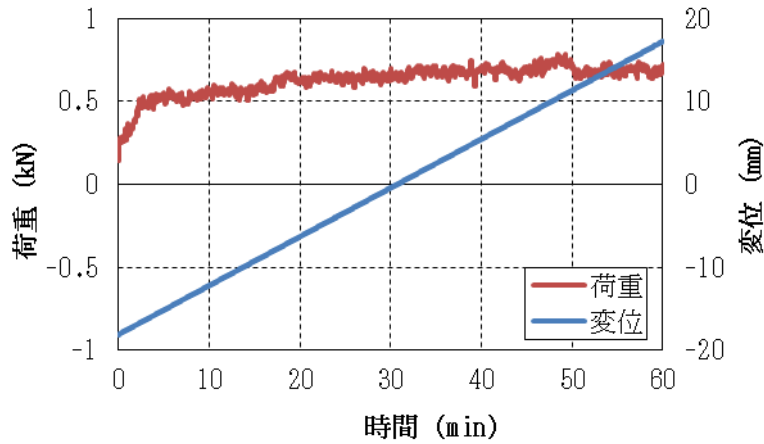


図 3-4 鉛直方向（ピストンを上げる方向）の低速移動に対する発生荷重

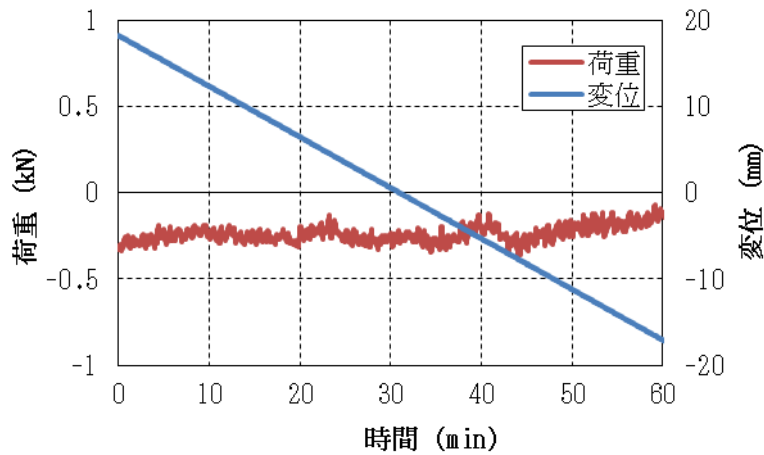


図 3-5 鉛直方向（ピストンを下げる方向）の低速移動に対する発生荷重

(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。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。

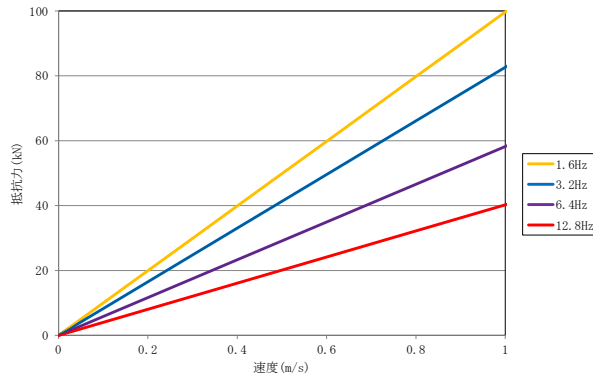
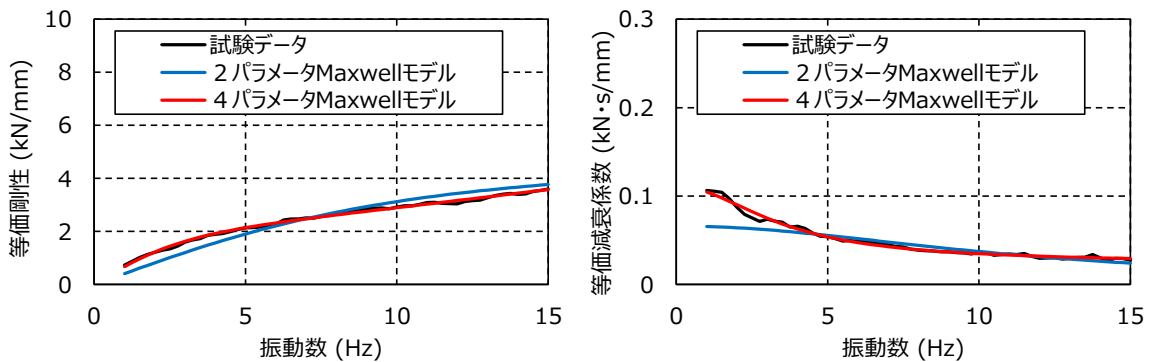


図 3-6 振動数を変化させた場合の速度と抵抗力の関係



(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 ($K_1=1.3 \times K_{High}$, $C_1=1.3 \times C_{High}$) 及び下限 ($K_5=0.7 \times K_{Low}$, $C_5=0.7 \times C_{Low}$) 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。

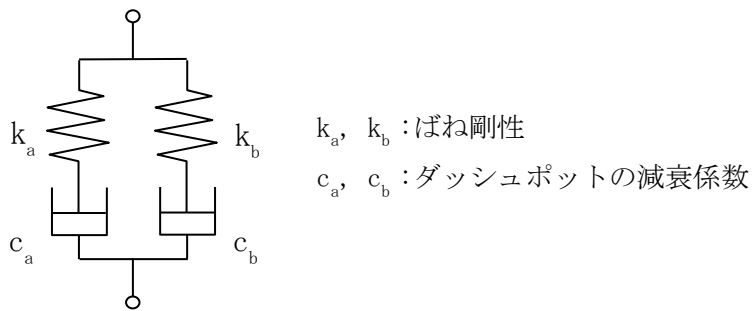
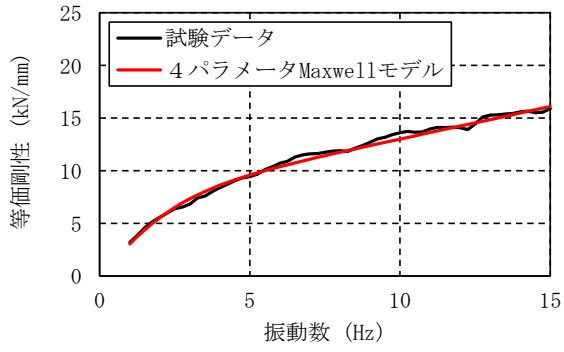
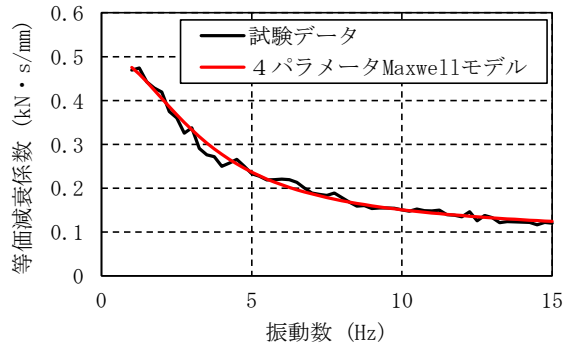


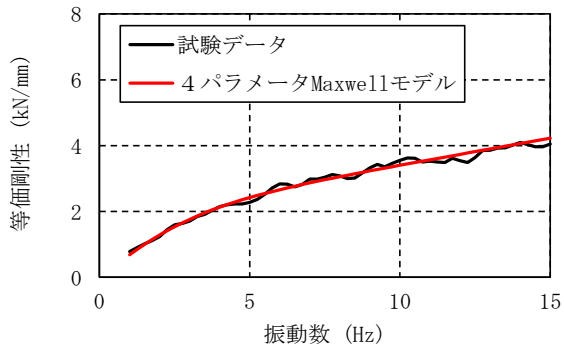
図3-8 三軸粘性ダンパの4パラメータ Maxwell モデル



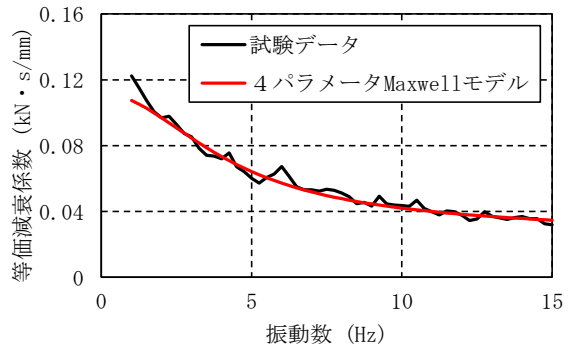
(H-1) 等価剛性 K_{High} (水平方向)



(H-2) 等価減衰係数 C_{High} (水平方向)

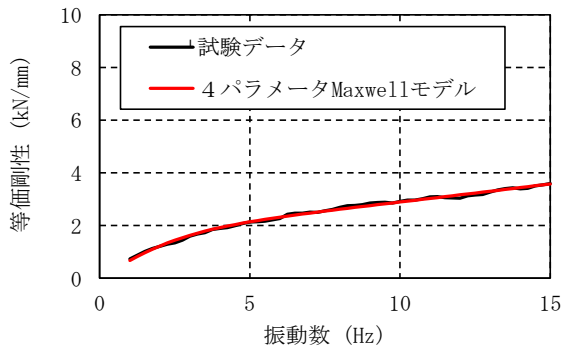


(V-1) 等価剛性 K_{High} (鉛直方向)

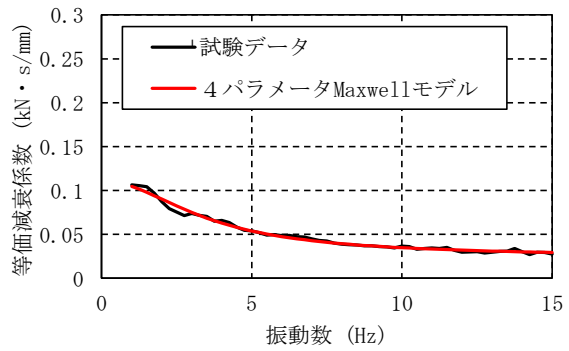


(V-2) 等価減衰係数 C_{High} (鉛直方向)

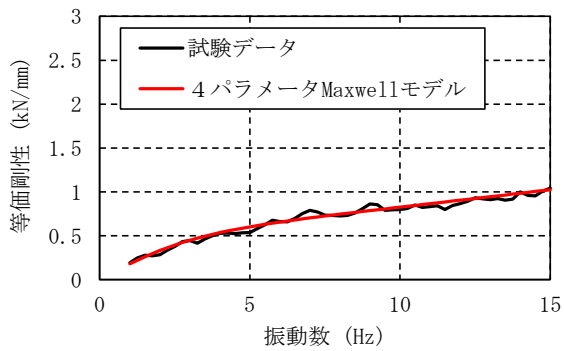
図 3-9 高側ダンパ試験性能のモデル化 (型式 325/159 の例)



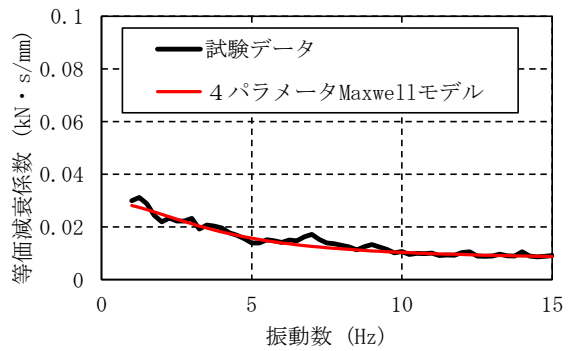
(H-1) 等価剛性 K_{Low} (水平方向)



(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)

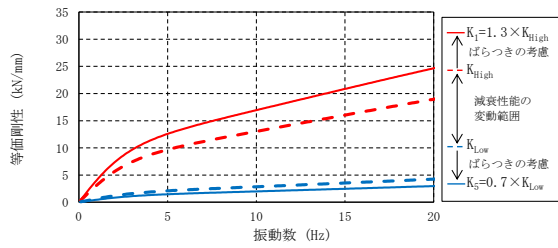


(V-2) 等価減衰係数 C_{Low} (鉛直方向)

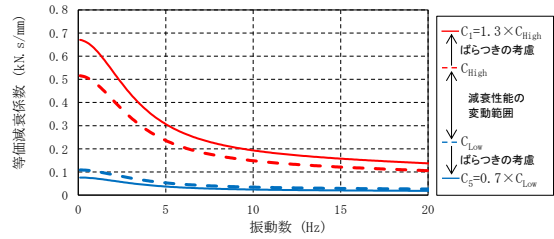
図 3-10 低側ダンパ試験性能のモデル化 (型式 325/159 の例)

表 3-4 地震応答解析モデルにおける減衰性能の設定

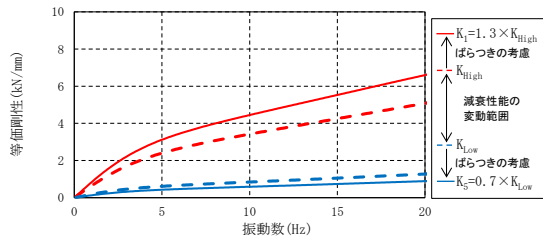
解析ケース	減衰性能	設定内容
1	K_1, C_1	等価剛性及び等価減衰係数上限値
2	K_2, C_2	
3	K_3, C_3	
4	K_4, C_4	
5	K_5, C_5	等価剛性及び等価減衰係数下限値



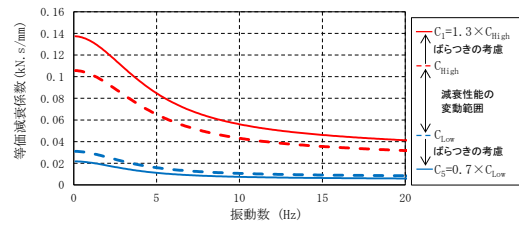
(H-1) 等価剛性 (水平方向)



(H-2) 等価減衰係数 (水平方向)

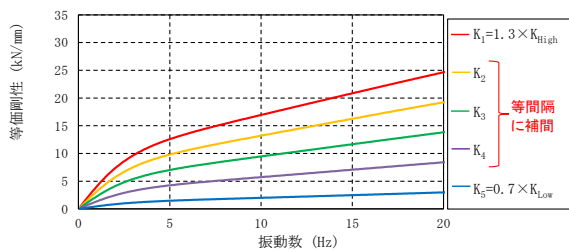


(V-1) 等価剛性 (鉛直方向)

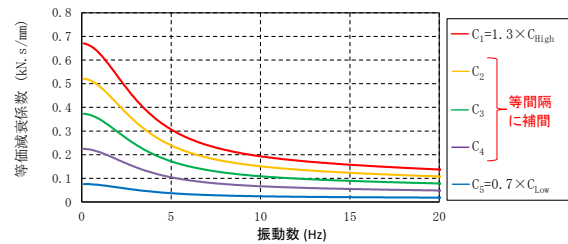


(V-2) 等価減衰係数 (鉛直方向)

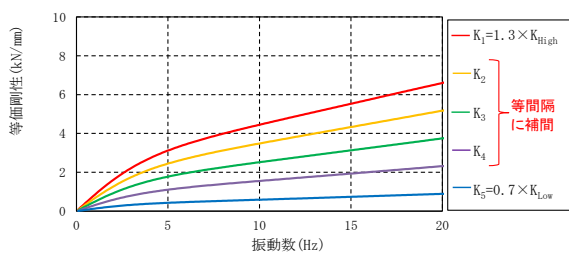
図 3-11 性能試験による減衰性能の上限と下限の設定 (型式 325/159 の例)



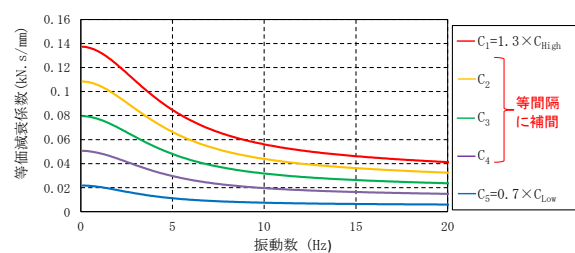
(H-1) 等価剛性 (水平方向)



(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（型式 630/426 の例）*1

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
1 (上限)								
2								
3								
4								
5 (下限)								

注記*1：記載の数値は小数点以下第1位を四捨五入値し、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

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（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時刻歴応答解析を適用する（添付資料 3-8 参照）。

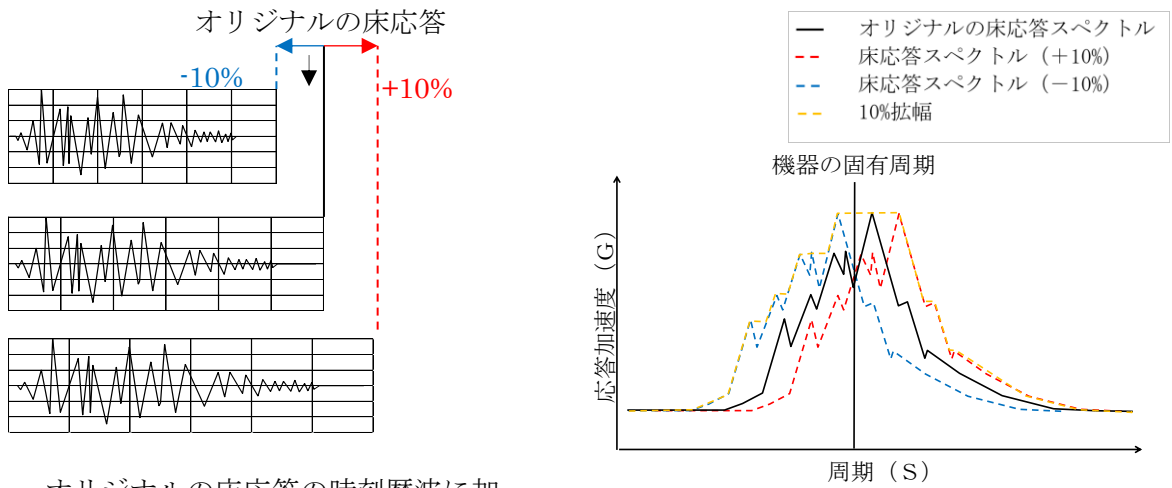
三軸粘性ダンパの減衰性能については、三軸粘性ダンパの減衰性能の上限と下限を含めた5段階の減衰性能に対応した地震応答解析を行い、これらの最大応答を用いて耐震評価を行う。5段階の減衰性能を適用した際の三軸粘性ダンパの減衰性能と配管系の応答の関係を添付資料 3-7 に示す。

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。

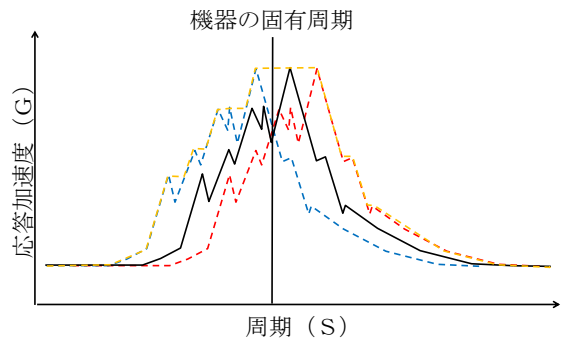
(2) 入力加速度

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。



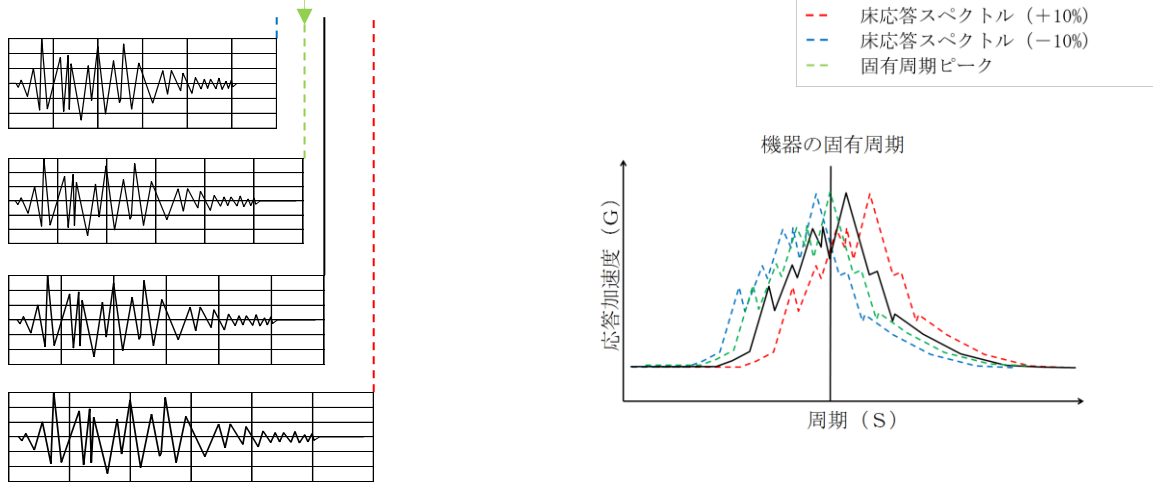
- オリジナルの床応答の時刻歴波に加えて時間刻みを±10%シフトさせた時刻歴波を作成



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 3-6 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 3-6 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の有する裕度については、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3-7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ことを基本とする。

表3-7 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3-6 参照	表3-6 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3-6 参照	表3-6 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3-6 参照	表3-6 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、NS2-補-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、管及び支持構造物は十分な裕度をもって健全性が確保されることを確認した。

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 に整理した。整理の結果、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 適用実績のある制震装置との差異の整理

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	Maxwell モデル (4パラメータ)	—	—
	解析手法 時刻歴応答解析	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。

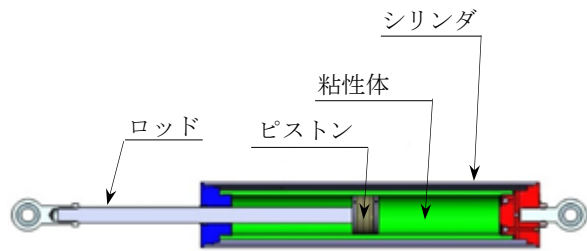


図 5-1 島根 2 号機の排気筒に設置した単軸粘性ダンパの外観及び構造

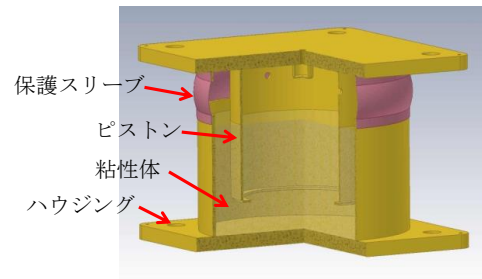


図 5-2 島根 2 号機の配管系に設置した三軸粘性ダンパの外観及び構造

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。

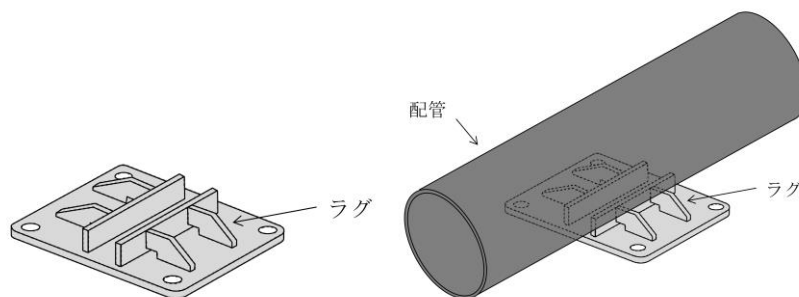


図 6-1 ラグの構造概要

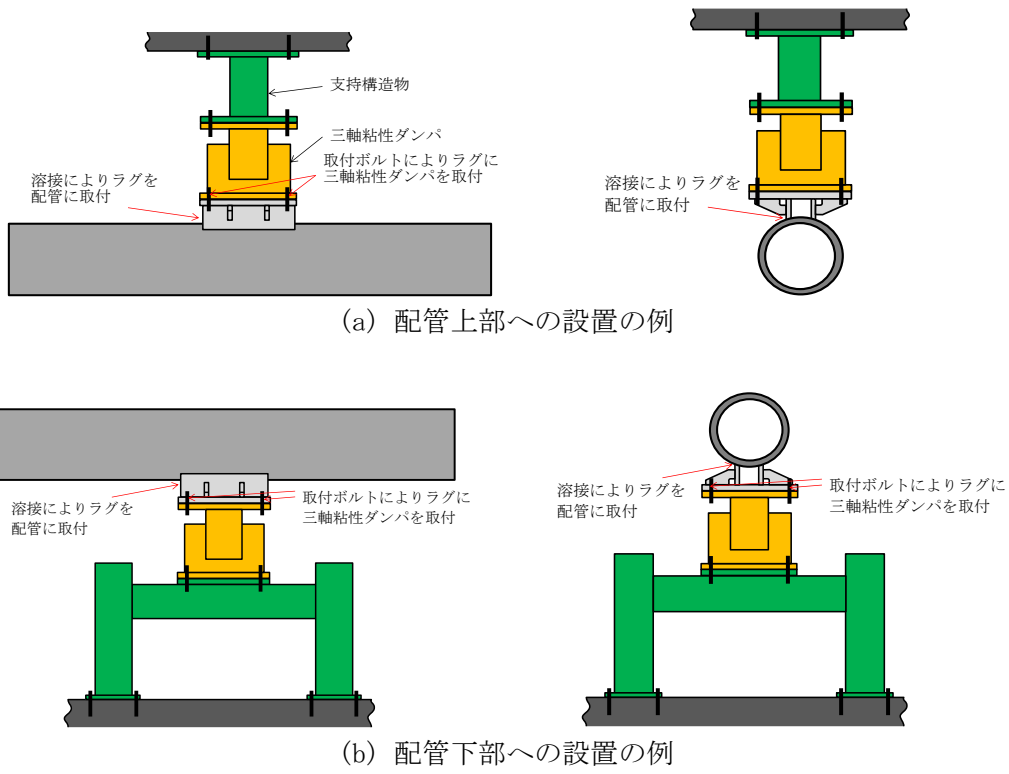


図 6-2 ラグの配管への取付及び三軸粘性ダンパへの接続

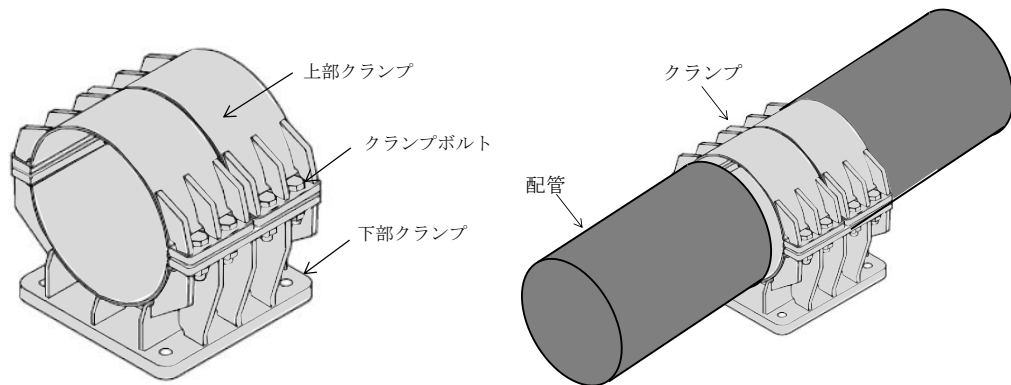
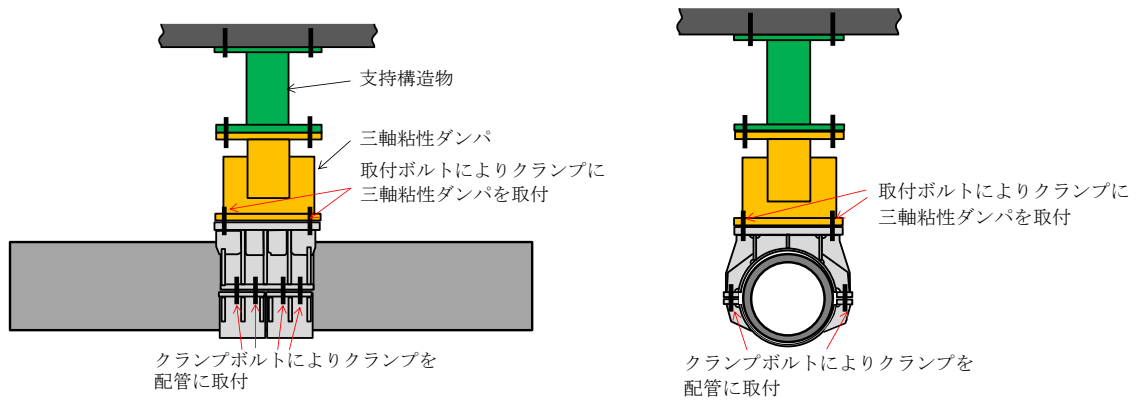
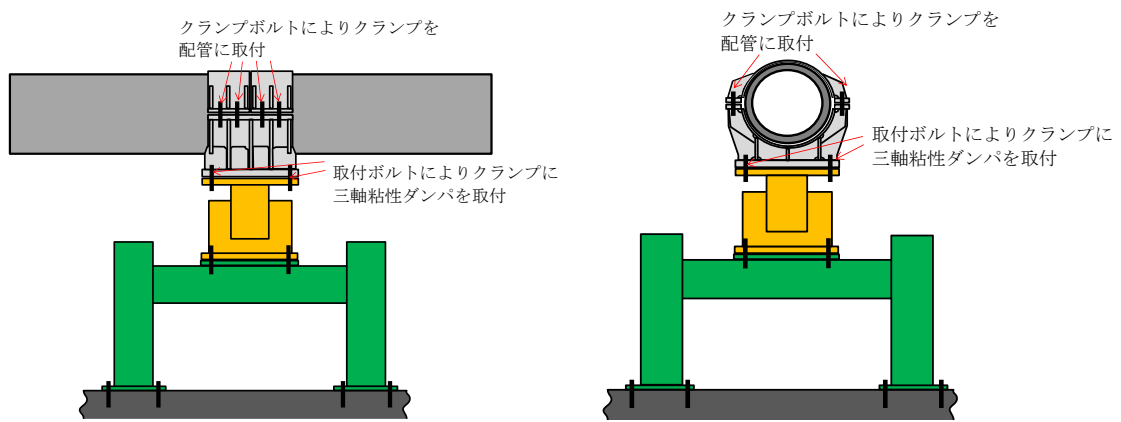


図 6-3 クランプの構造概要



(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

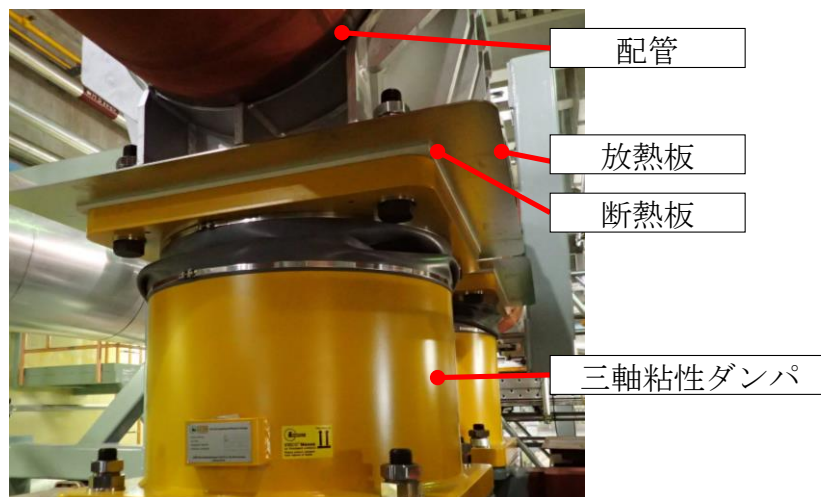


図 6-5 断熱板及び放熱板を設置した三軸粘性ダンパ

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*

(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。

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。

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。

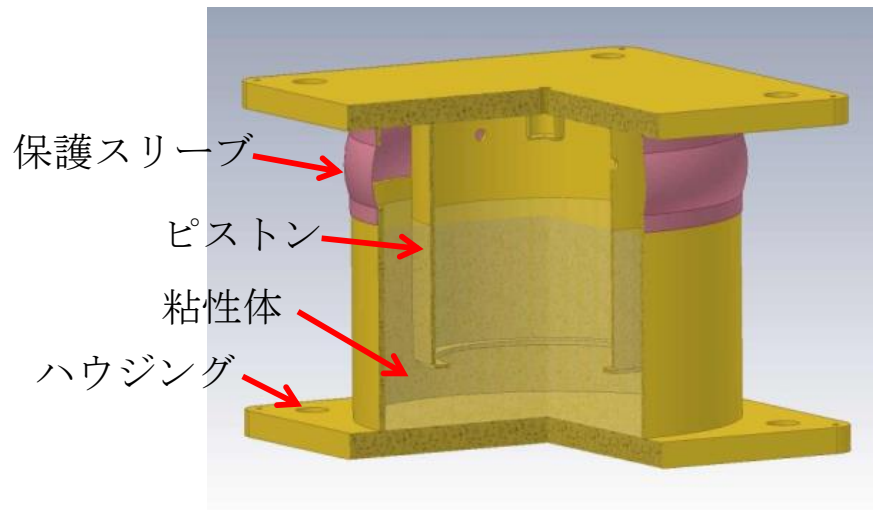


図 6-6 三軸粘性ダンパの概要

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整理し、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に、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。

したがって、三軸粘性ダンパのモデル化は妥当であり、減衰性能の変動及びばらつきを適切に考慮していることから、地震応答解析手法として妥当と考える。

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、新規制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 SECTIONIII, DIVISION1-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	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2-3-1参照) されている。
	NF-1200 TYPES OF SUPPORTS AND ATTACHMENTS	NF-1210 TYPES OF SUPPORTS	NF-1214 Standard Supports	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2-3-1参照) されている。

表 2-1-1-1 ASME Boiler and Pressure Vessel Code SECTION III, DIVISION I-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 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 2-1-1-1 ASME Boiler and Pressure Vessel Code SECTIONIII, DIVISIONI-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	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.	
同上	同上		同上

表 2-1-1-1 ASME Boiler and Pressure Vessel Code SECTIONIII, DIVISIONI-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	NF-E-1230 APPLICATIONS	Dampers are utilized to provide vibration control, restraint to pressure pulses in piping systems, and response to seismic motion and other dynamic events.	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。
同上	NF-E-1240 MODELING	Dampers are dynamic restraint supports that are inactive during static loading. Devices of this type transmit their velocity proportional loads directly into the piping system or component. Several computer programs allow the introduction of single dampers into the piping system or component model. Conventional analysis may be used where (a) modal system analysis is performed with damping as stipulated in the Design Specification	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 2-1-1-1 ASME Boiler and Pressure Vessel Code SECTIONIII, DIVISIONI-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	<p>(b) increased piping system damping is as determined by tests</p> <p>(c) an equivalent stiffness parameter is derived for each damper type from tests</p> <p>(d) stiffness is a function of damper fluid temperature</p> <p>Alternatively, a time history analysis may be performed with programs that allow the use of single element damping.</p>	同上

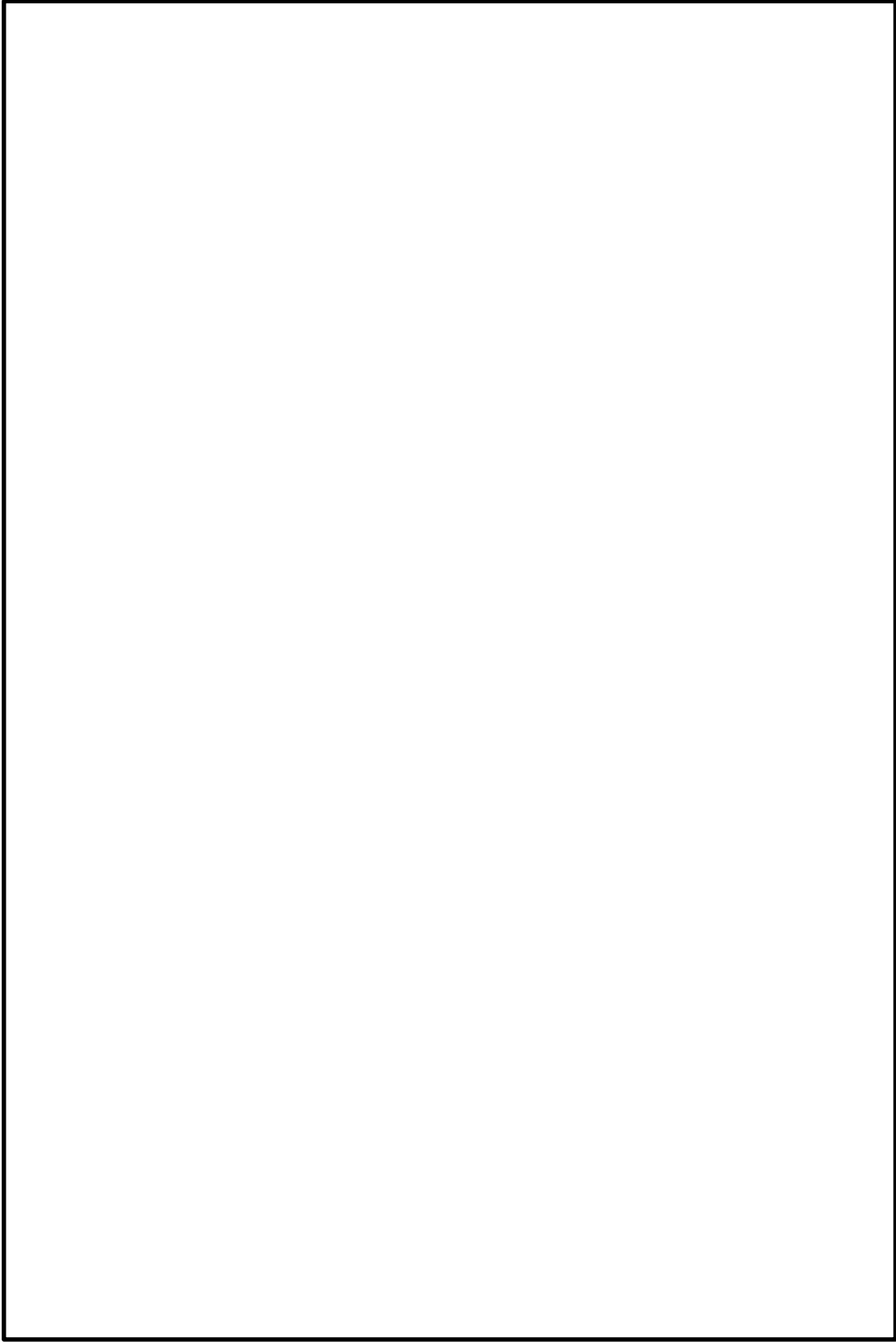


図 2-1-1-1 ASME Boiler and Pressure Vessel Code の関連図

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

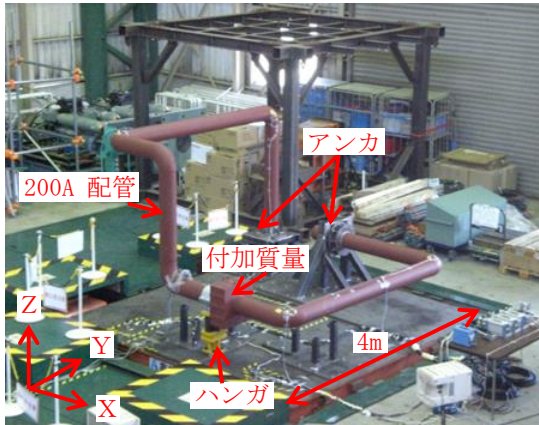
寸法	4m×4m	
最大積載量	60t	
運転周波数帯域	DC-70Hz	
最大加速度*	水平	3.0G
	鉛直	3.0G

注記*：定格積載量（20t）での最大加速度を示す。

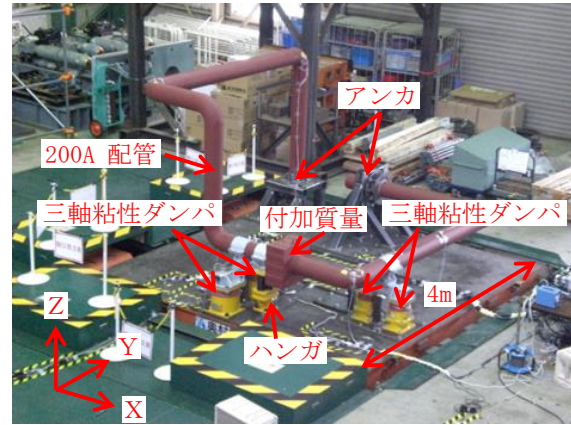
2. 加振試験条件

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

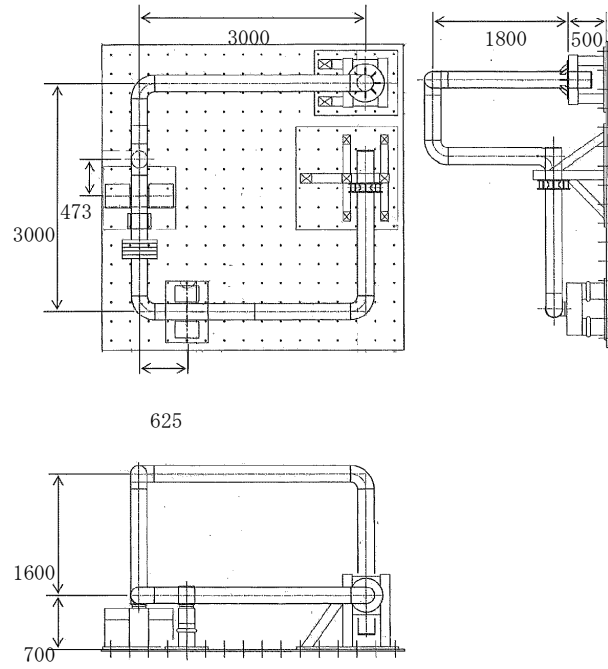
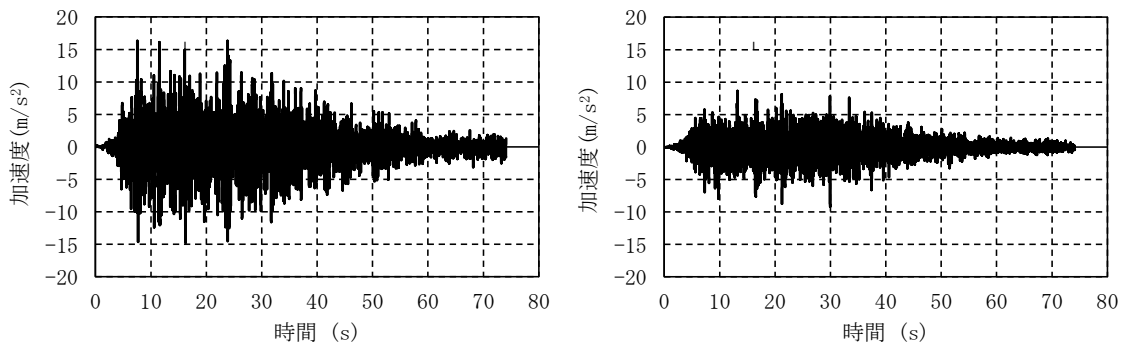


図 2-2-2 配管系試験体の構造図

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。

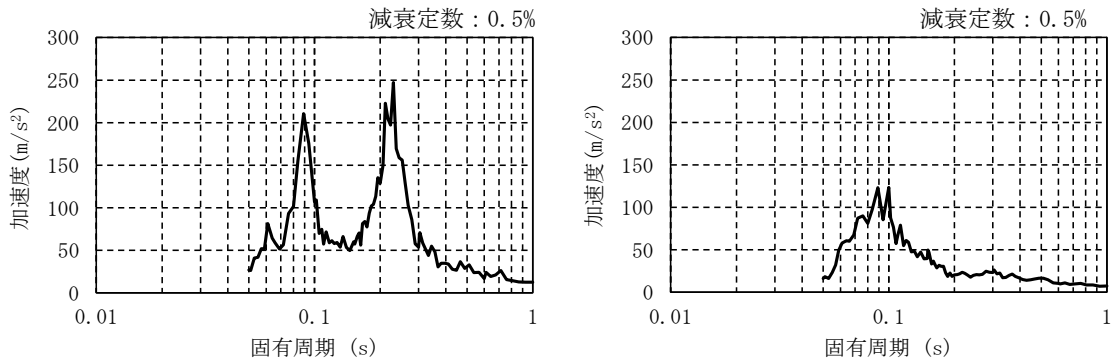
配管系試験体は Y 方向加振時の応答よりも X 方向加振時の応答が大きくなる傾向があるため、水平方向加振は X 方向を代表とし、地震波加振は X + Z 方向について実施した。各試験ケースにおける目標加速度レベルを表 2-2-3 に示す。



(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

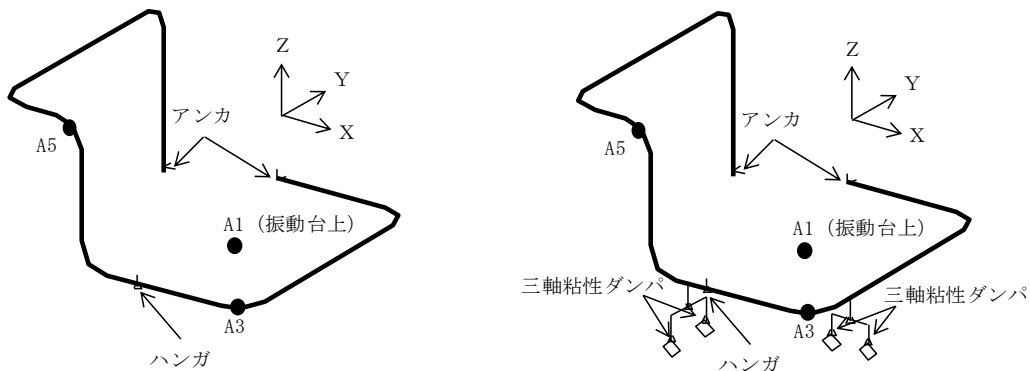
表 2-2-3 地震波加振の試験ケース

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

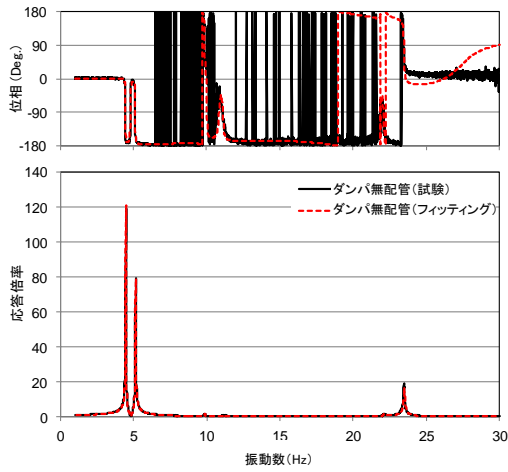
配管系試験体の概略図を図 2-2-5 に示す。また、ダンパ無配管における X 方向の正弦波掃引試験結果について、振動台上の加振方向の加速度に対する配管位置の加振方向の応答加速度の振動伝達特性を図 2-2-6 に、カーブフィットにより得られた配管系試験体の固有振動数とモード減衰比を表 2-2-4 に示す。同様にダンパ設置配管での振動伝達特性を図 2-4-7 に、配管系試験体の固有振動数とモード減衰比を表 2-2-5 に示す。表 2-2-5 において、固有振動数とモード減衰比の値は概略値で示す。ダンパ設置配管の場合、配管系の減衰が非常に大きくなり、カーブフィットに対して固有振動数、モード減衰比の感度が低くなるため、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。



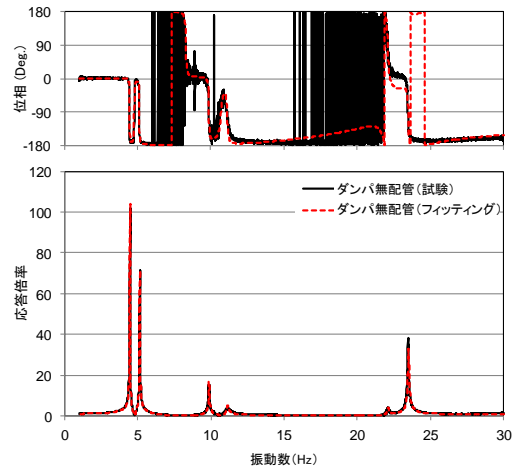
配管系試験体 (ダンパ無配管)

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

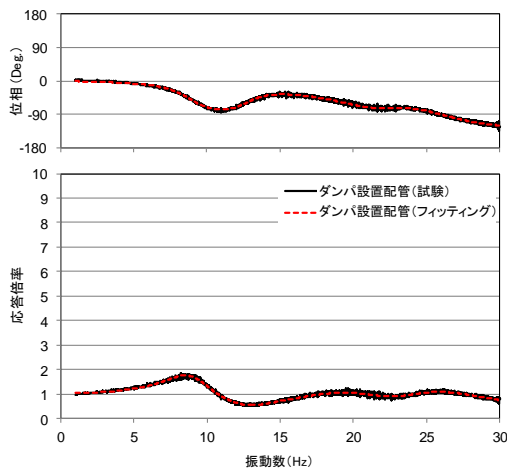


(1) A3X/A1X

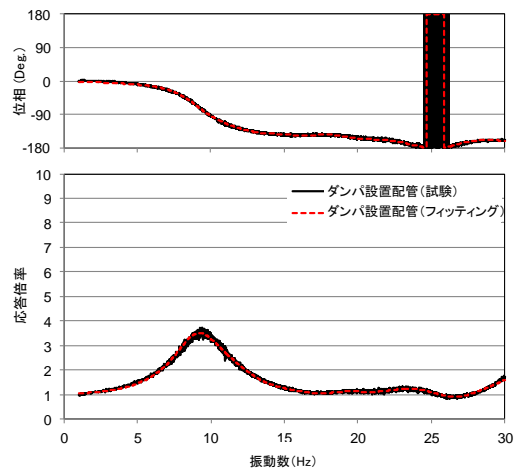


(2) A5X/A1X

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。

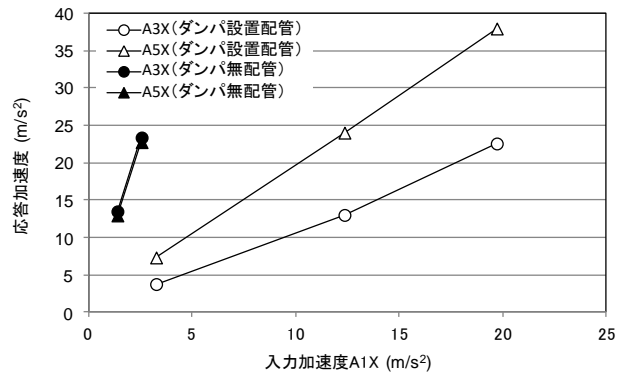


図 2-2-8 入力加速度 A1X に対する X 方向の応答加速度
(地震波 X + Z 方向加振)

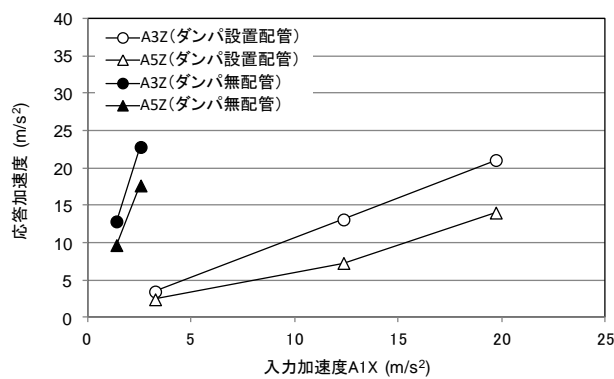
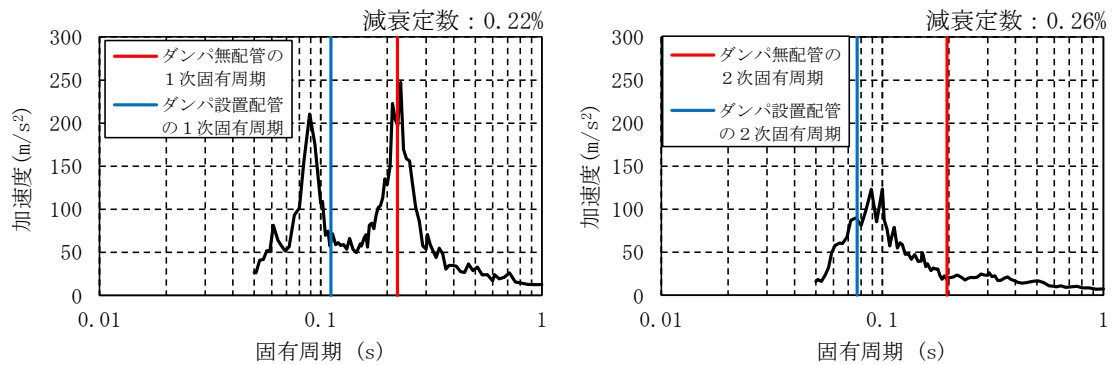


図 2-2-9 入力加速度 A1X に対する Z 方向の応答加速度
(地震波 X + Z 方向加振)



(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。

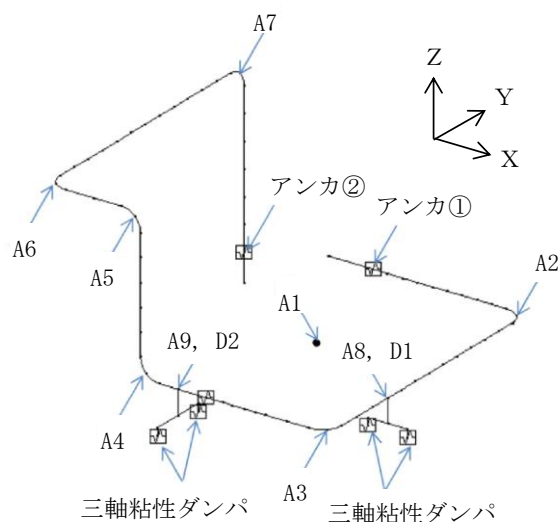


図2-2-11 解析モデル

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。

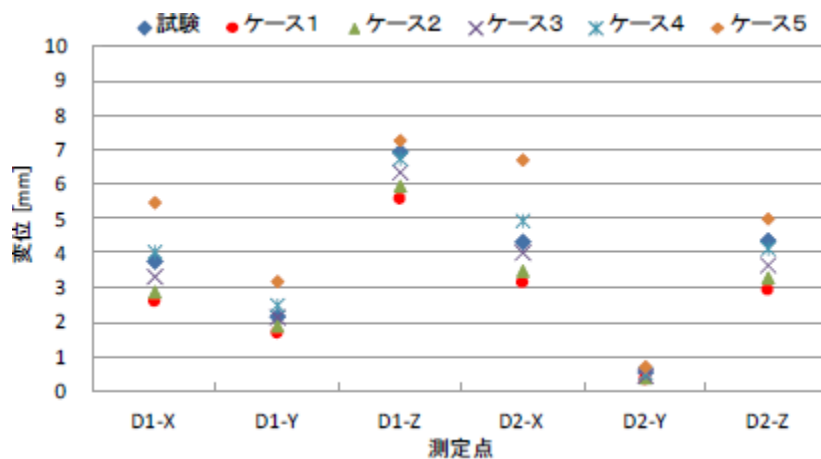
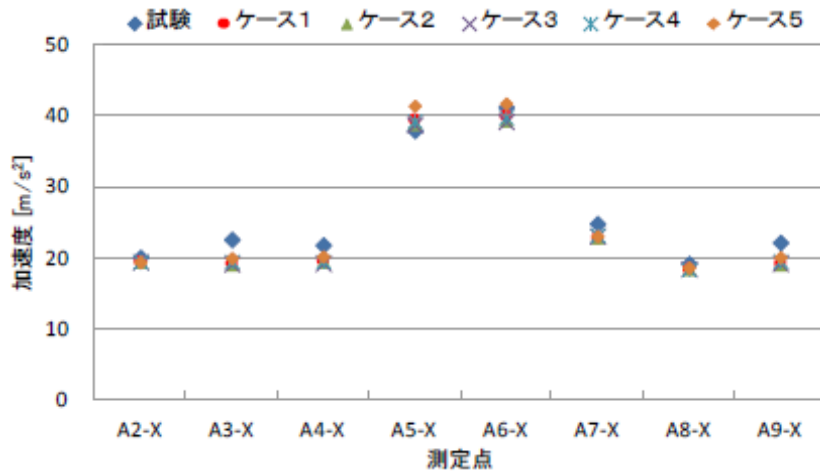
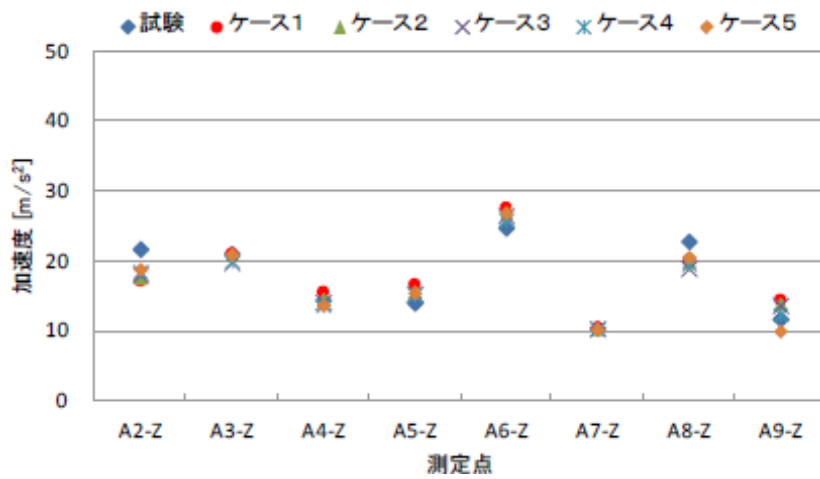


図2-2-12 三軸粘性ダンパ最大応答変位



(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)

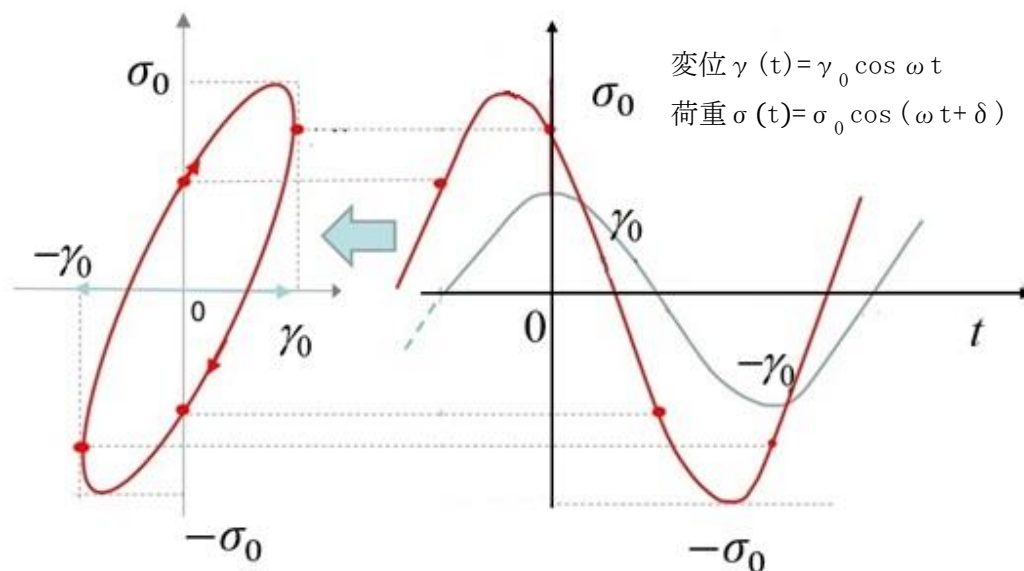


図 3-1-1 典型的な粘弾性体の荷重-変位特性
 (左: 荷重-変位, 右: 荷重-時間)

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。

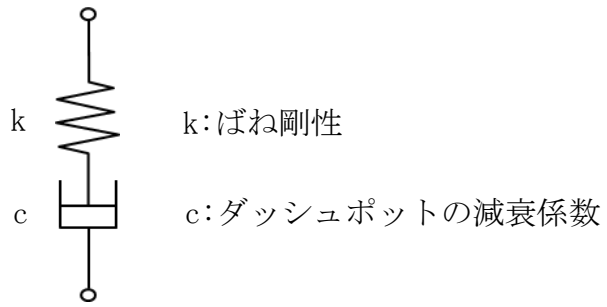


図 3-1-2 Maxwell モデル

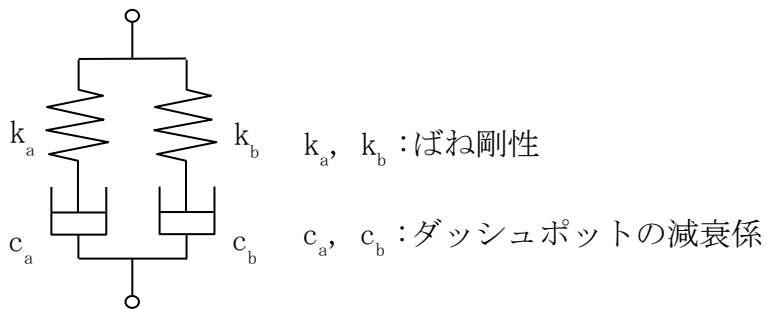
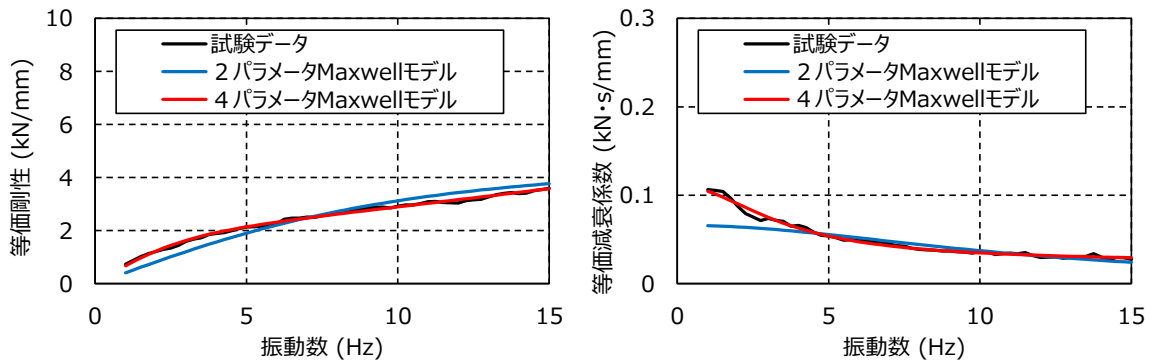


図 3-1-3 4パラメータ Maxwell モデル



(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 に整理した。各項目について三軸粘性ダンパの構造、使用条件、性能試験方法を踏まえて、減衰性能への影響の検討要否を表 3-2-2 に整理した。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。また、免震装置に係る他の知見として「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」における免震装置に関する記載を確認した。確認の結果、「免震構造の審査手引き」に記載の内容に包絡されることを確認した。

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減衰特性変化の考慮 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減衰特性変化の考慮 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減衰特性変化の考慮 p.42</p>

表 3-2-2-1 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。	<p>【本文】 5.4.6 p.30</p> <p>【解説】 5.4.6 p.33</p>
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。	<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○地震時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○地震時免震機能の変化の考慮 p.41</p>
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。	<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○地震時免震機能の変化の考慮 p.31</p>
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。	<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○地震時免震機能の変化の考慮 p.36</p>
⑦ 連続加振	作動中の減衰性能の変化について検討する。	<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○地震時免震機能の変化の考慮 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 (3/4)

項目	内容	記載箇所
⑧ 経年劣化	<p>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>	<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	<p>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>	<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	<p>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>	<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。	【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の外的事象に対する免震機能の変化の考慮 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○地震以外の津波や風等の外的事象に対する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○地震以外の津波や風等の外的事象に対する免震機能の変化の考慮 p.42

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价体を使用しており、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。
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ループ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。

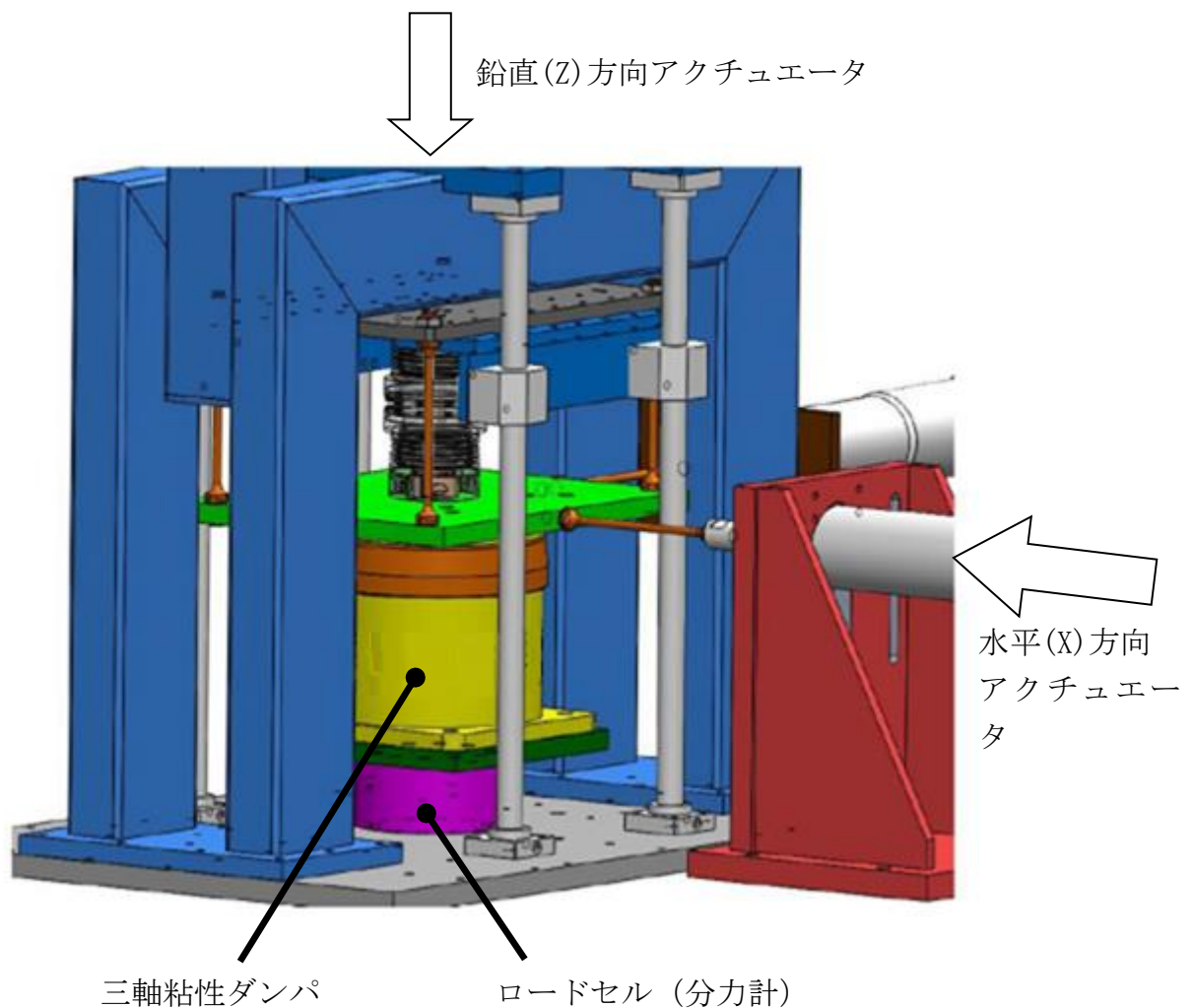


図3-3-1 水平・鉛直同時加振試験

表 3-3-1 水平・鉛直同時加振試験条件

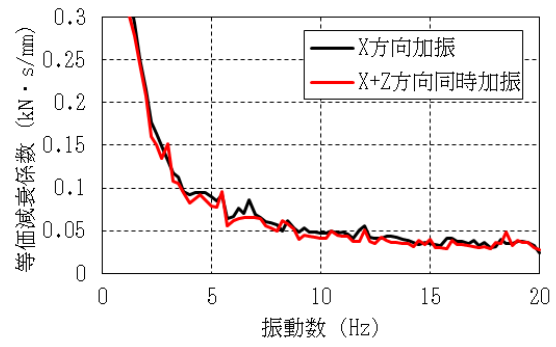
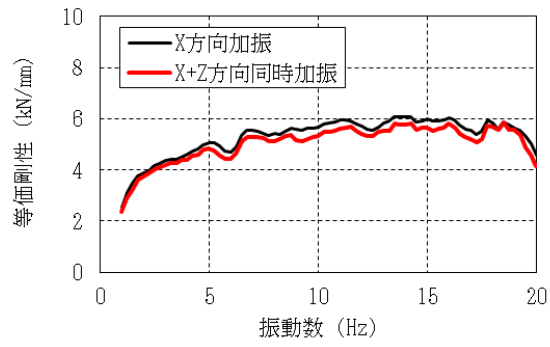
No.	型式	温度 (°C)	加振 方向	入力波形	振幅 (mm)	継続時間 (s)
1	型式 325/159	20	水平	ランダム波	3	32
2			鉛直			
3			水平 ・ 鉛直			



(H) 水平方向

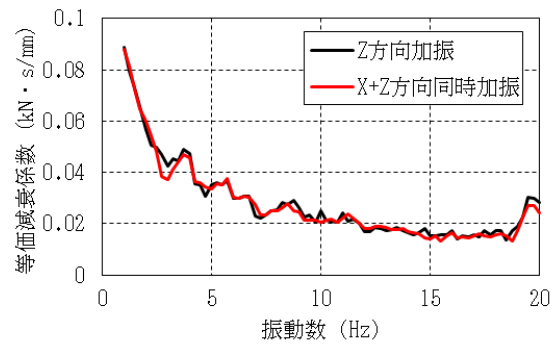
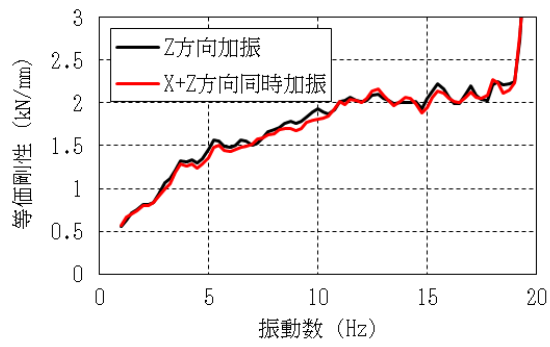
(V) 鉛直方向

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

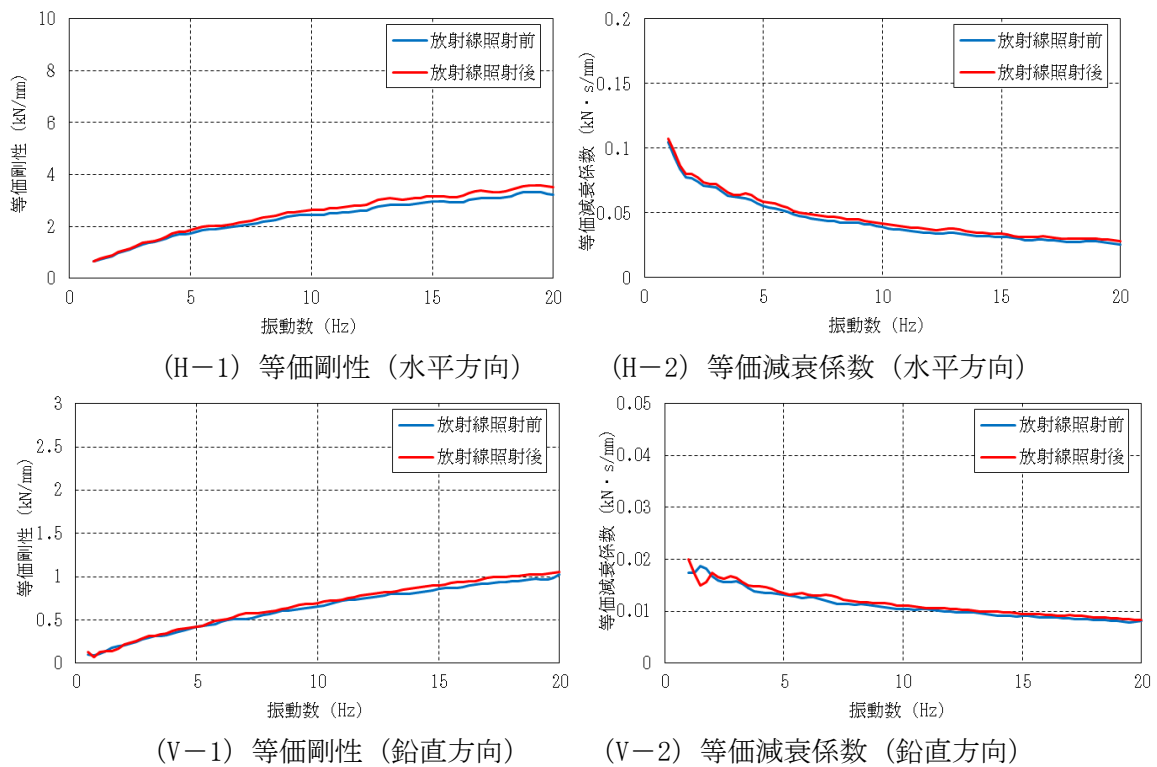


図3-3-4 放射線による減衰性能への影響確認結果

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				

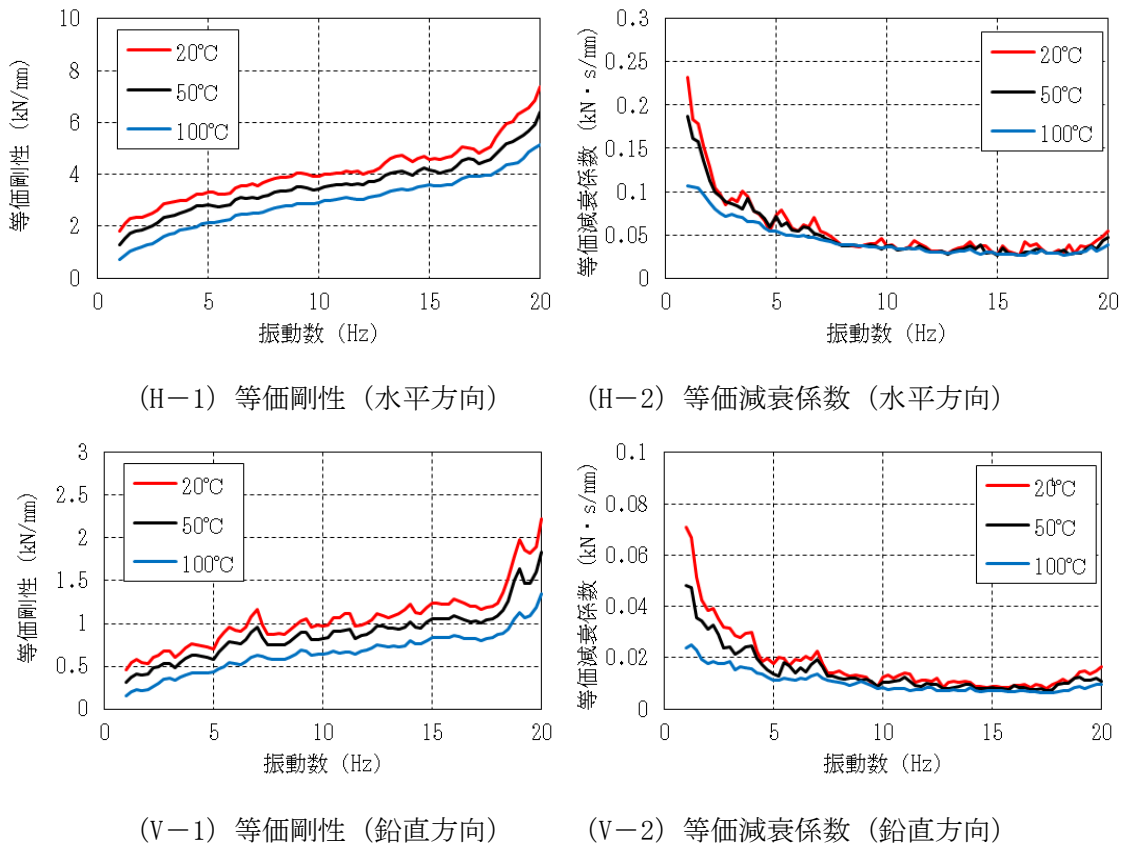


図 3-3-5 粘性体温度による減衰性能への影響確認結果

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			

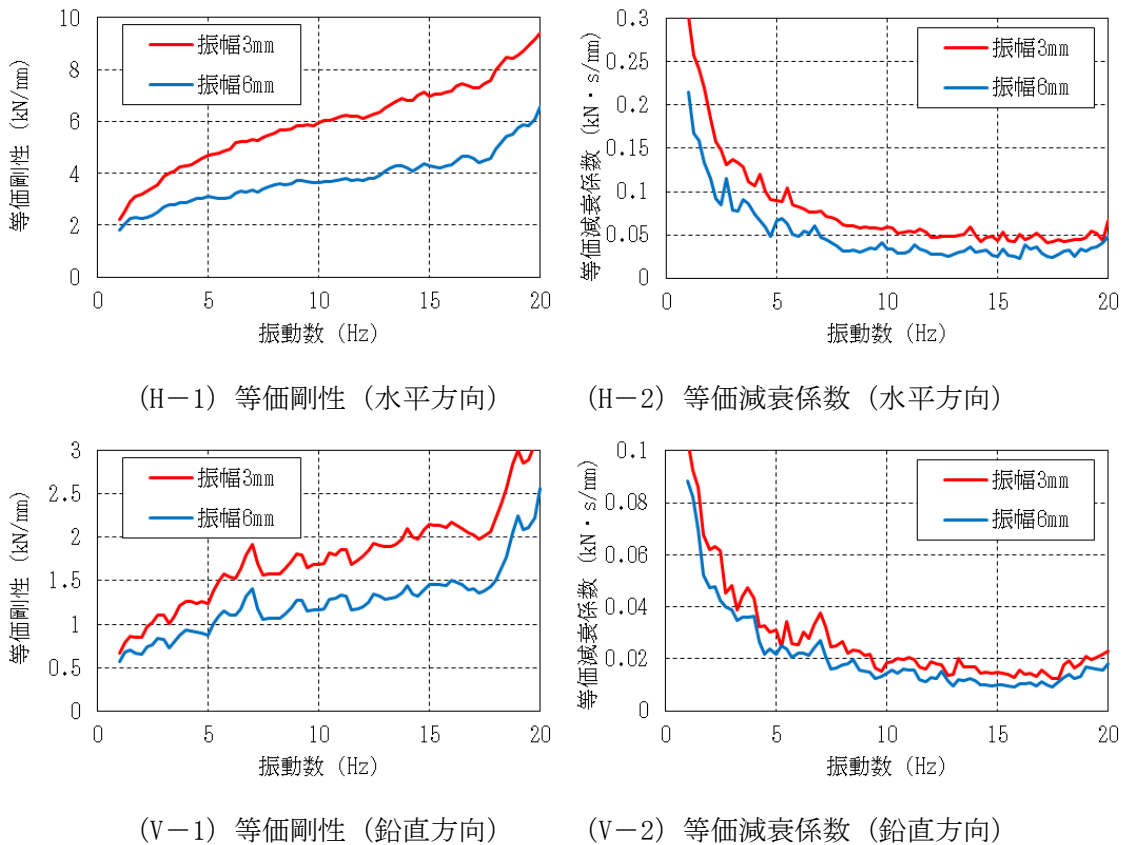


図 3-3-6 振幅による減衰性能への影響確認結果

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。

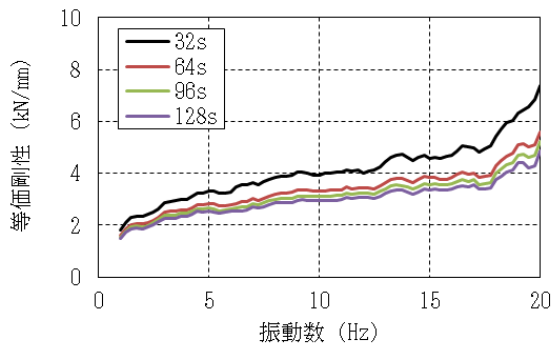
$$W = \int_0^T F(t) \frac{dx(t)}{dt} dt \quad (1)$$

ここで、

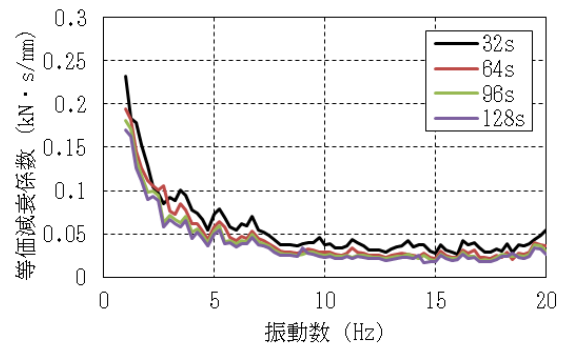
$F(t)$: 三軸粘性ダンパ反力, $x(t)$: 三軸粘性ダンパ変位, T : 加振継続時間

表 3-3-5 連続加振試験条件

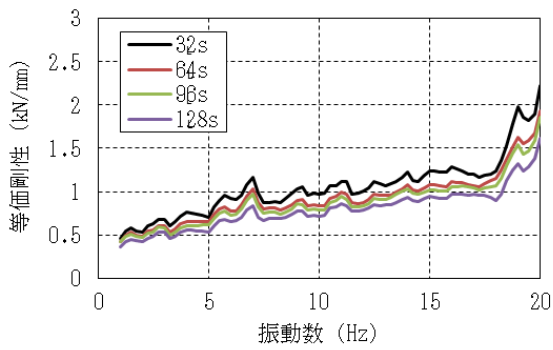
No.	型式	温度 (°C)	加振 方向	入力波形	振幅 (mm)	継続時間 (s)
1	325/159	20	水平	ランダム波	6	32
2			鉛直			
3			水平			64
4			鉛直			
5			水平			96
6			鉛直			
7			水平			128
8			鉛直			



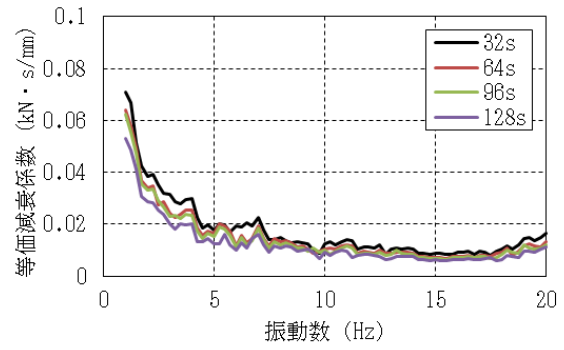
(H-1) 等価剛性 (水平方向)



(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。

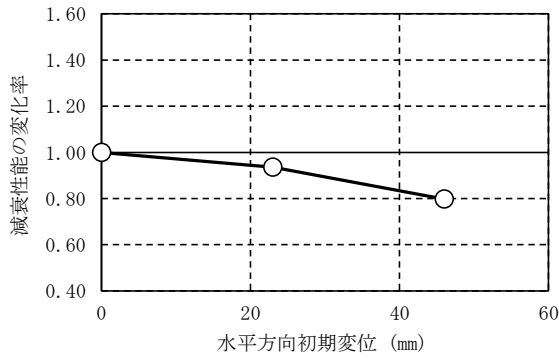
三軸粘性ダンパの初期変位による減衰性能への影響確認試験の試験ケースを表 3-4-1 に、試験結果を図 3-4-1～図 3-4-2 に示す。三軸粘性ダンパの減衰性能は振動数依存性を有するため、減衰性能の変化率は 5～15Hz の平均値で示す。また、等価剛性及び等価減衰係数のうち、より大きい変化率を減衰性能の変化率と整理する。

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 に整理する。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。

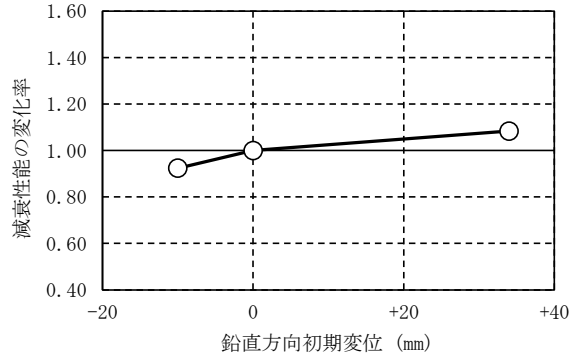
表 3-4-1 初期変位の影響確認試験条件

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。

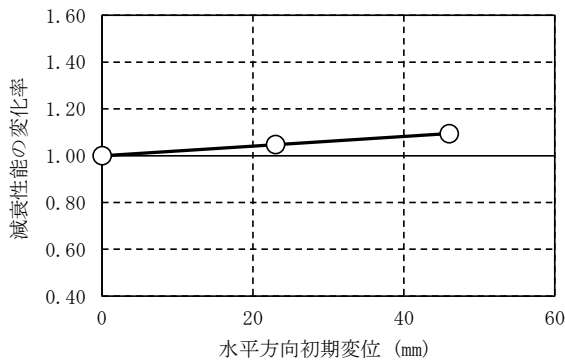


(H) 水平方向初期変位

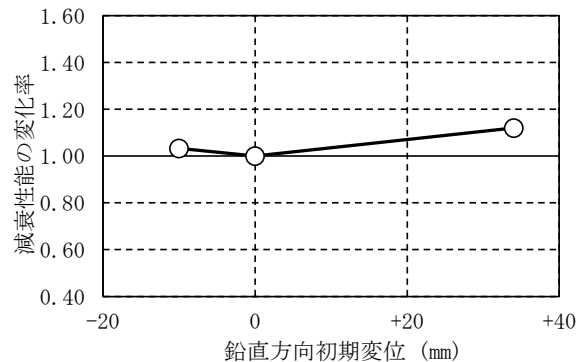


(V) 鉛直方向初期変位

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（ <u>最大で-20%となる</u> ）。	上向きの初期変位に対しては減衰性能が低下する（ <u>-10mm</u> 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（ <u>最大で+10%未満</u> ）。
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（ <u>最大で+10%未満</u> ）。	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（ <u>最大で+13%未満</u> ）。

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，型式 325/159）の例

項目	試験条件設定の考え方	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。

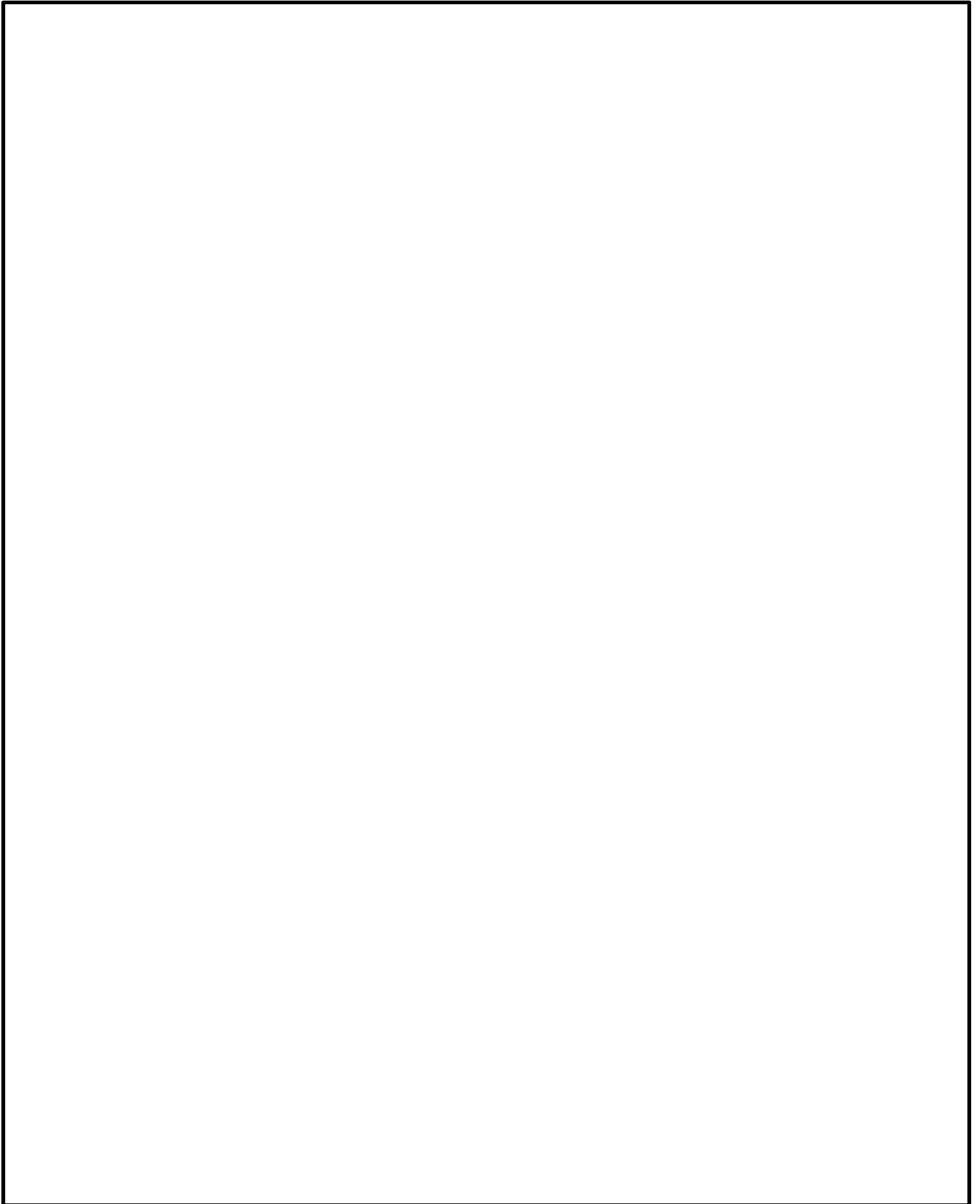


図 3-5-1 性能試験フロー(1/3)

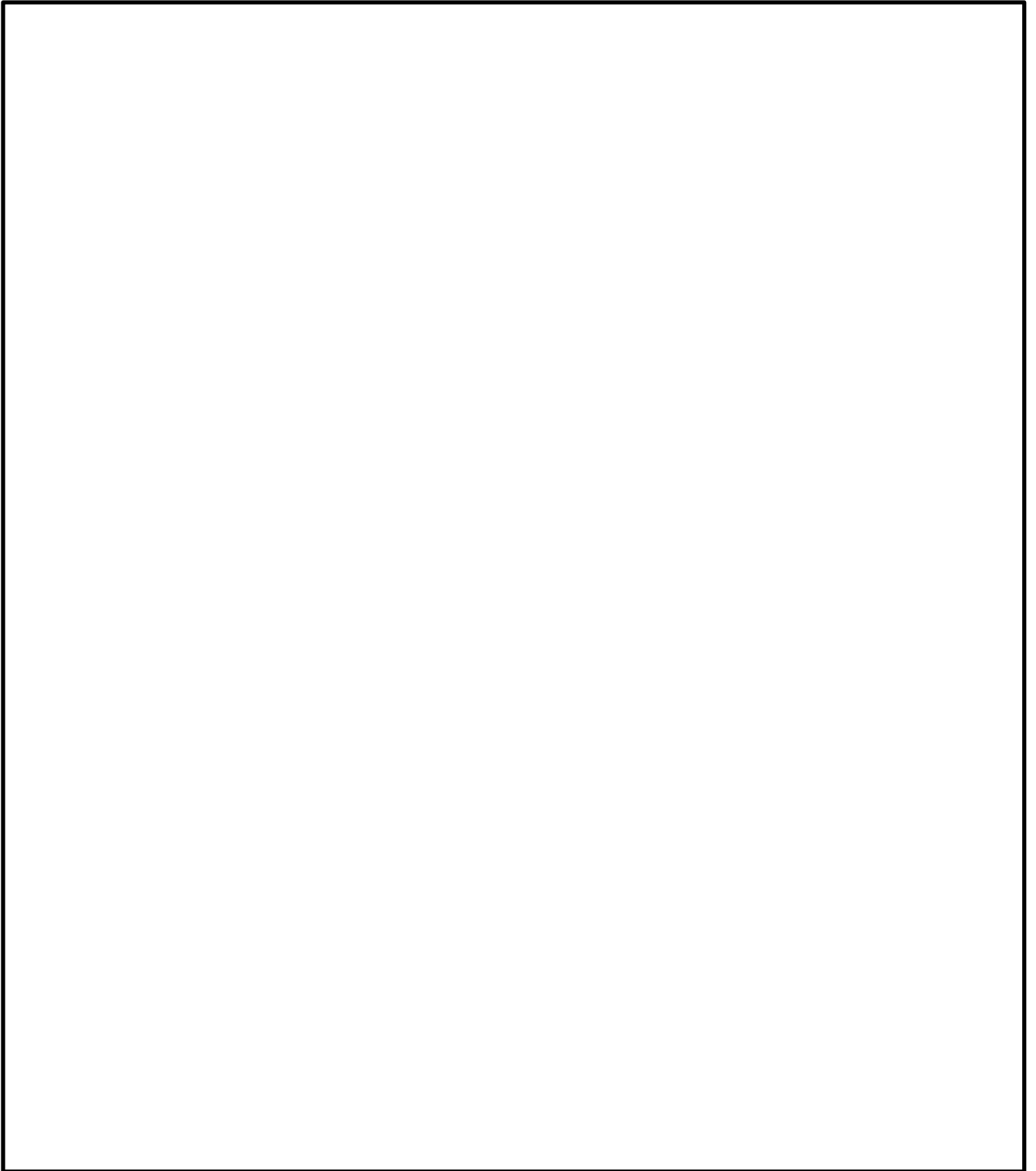


図 3-5-1 性能試験フロー(2/3)

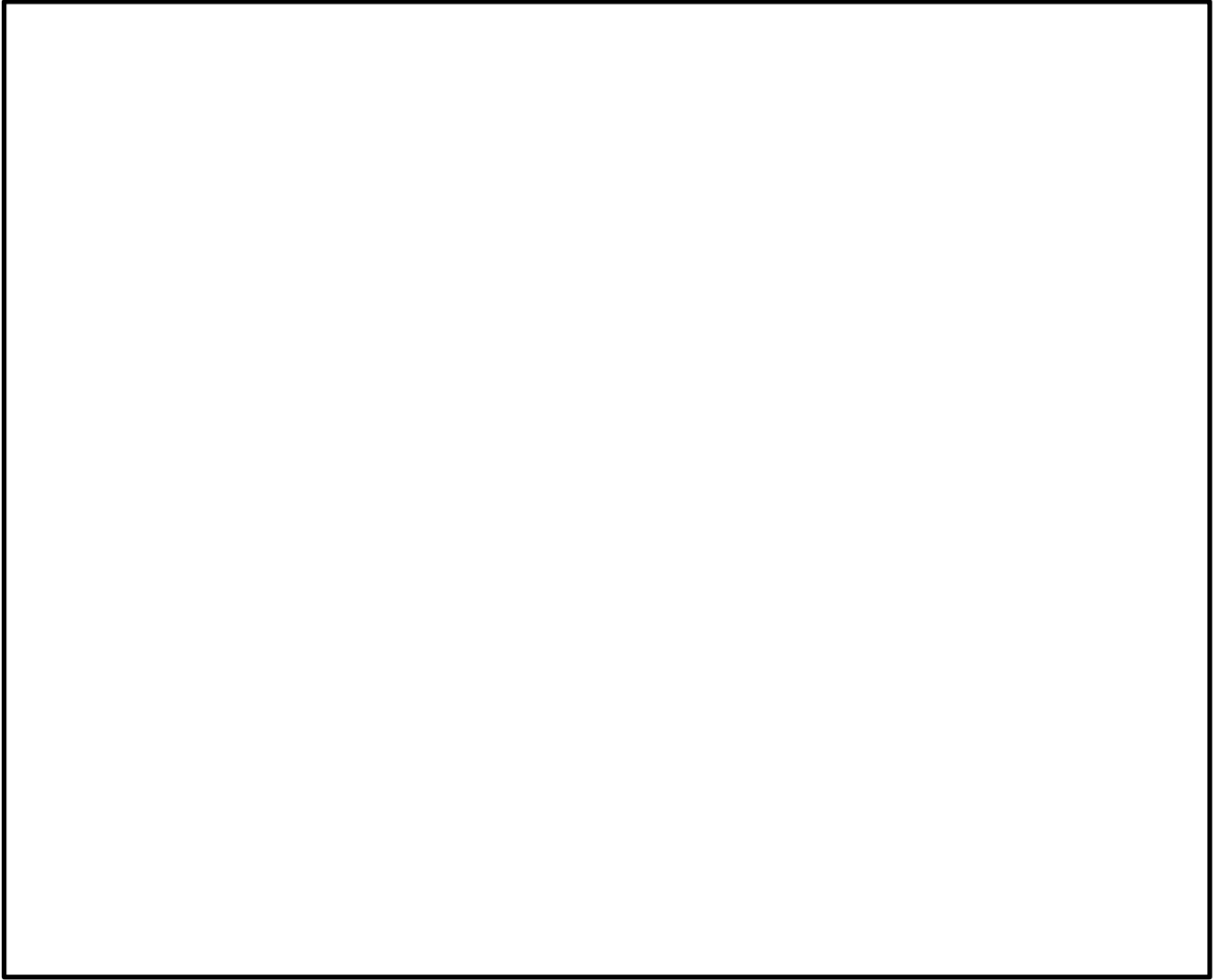


図 3-5-1 性能試験フロー (3/3)

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。

$$\begin{bmatrix} \ddots & & 0 \\ & m_i & \\ 0 & & \ddots \end{bmatrix} \{\ddot{q}_i\} + \begin{bmatrix} \ddots & & 0 \\ & c_i & \\ 0 & & \ddots \end{bmatrix} \{\dot{q}_i\} + \begin{bmatrix} \ddots & & 0 \\ & k_i & \\ 0 & & \ddots \end{bmatrix} \{q_i\} = -[\Lambda]^T [M] \{I\} \ddot{y} \quad (5)$$

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 $[C]$ が大きな値となり対角化できないため, 上記の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。

$$\begin{aligned} [\Lambda]^T \left(\frac{[M]}{\Delta t^2} + \frac{[C]}{2\Delta t} + \frac{[K]}{3} \right) [\Lambda] \{q\}_{t+\Delta t} \\ = [\Lambda]^T \left(\frac{2[M]}{\Delta t^2} - \frac{[K]}{3} \right) [\Lambda] \{q\}_t + [\Lambda]^T \left(-\frac{[M]}{\Delta t^2} + \frac{[C]}{2\Delta t} - \frac{[K]}{3} \right) [\Lambda] \{q\}_{t-\Delta t} \\ + \frac{[\Lambda]^T}{3} (\{f\}_{t+\Delta t} + \{f\}_t + \{f\}_{t-\Delta t}) \end{aligned} \quad (7)$$

$\{f\}$: 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、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なり、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。

$$\frac{[\Lambda]^T [C_p] [\Lambda]}{[\Lambda]^T [M] [\Lambda]} \cong \begin{bmatrix} \ddots & & 0 \\ & 2\zeta_i\omega_i & \\ 0 & & \ddots \end{bmatrix} \quad (9)$$

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。

【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の記述について

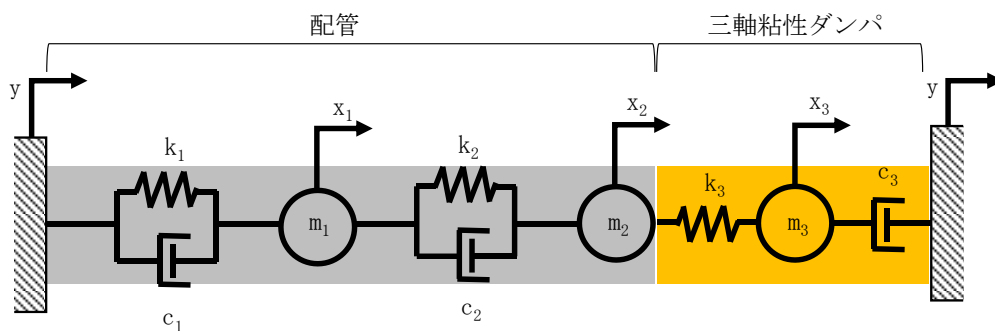
1. 概要

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。

$$\begin{cases} -m_1\ddot{x}_1 - c_1\dot{x}_1 - c_2(\dot{x}_1 - \dot{x}_2) - k_1x_1 - k_2(x_1 - x_2) = m_1\ddot{y} & (2-1) \\ -m_2\ddot{x}_2 - c_2(\dot{x}_2 - \dot{x}_1) - k_2(x_2 - x_1) - k_3(x_2 - x_3) = m_2\ddot{y} & (2-2) \\ -m_3\ddot{x}_3 + c_3\dot{x}_3 - k_3(x_3 - x_2) = m_3\ddot{y} & (2-3) \end{cases}$$

$$\begin{aligned} & \begin{bmatrix} m_1 & 0 & 0 \\ 0 & m_2 & 0 \\ 0 & 0 & m_3 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{x}_3 \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} c_1 + c_2 & -c_2 & 0 \\ -c_2 & c_2 & 0 \\ 0 & 0 & -c_3 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{x}_3 \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} k_1 + k_2 & -k_2 & 0 \\ -k_2 & k_2 + k_3 & -k_3 \\ 0 & -k_3 & k_3 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{Bmatrix} \\ & = - \begin{bmatrix} m_1 & 0 & 0 \\ 0 & m_2 & 0 \\ 0 & 0 & m_3 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{Bmatrix} \ddot{y} \end{aligned} \quad (3)$$

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 $[C_b]$ によって記述すると(5)のように表される。

$$\begin{bmatrix} c_1 + c_2 & -c_2 & 0 \\ -c_2 & c_2 & 0 \\ 0 & 0 & -c_3 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{x}_3 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} c_1 + c_2 & -c_2 & 0 \\ -c_2 & c_2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{x}_3 \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -c_3 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{x}_3 \end{Bmatrix} \quad (4)$$

$$[M]\{\ddot{x}\} + [C_p]\{\dot{x}\} + [C_b]\{\dot{x}\} + [K]\{x\} = -[M]\{\ddot{y}\} \quad (5)$$

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。

$$\{x\} = [\Lambda]\{q\} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} & [\Lambda]^T[M][\Lambda]\{\ddot{q}\} + [\Lambda]^T[C_p][\Lambda]\{\dot{q}\} + [\Lambda]^T[C_b][\Lambda]\{\dot{q}\} + [\Lambda]^T[K][\Lambda]\{q\} \\ & = -[\Lambda]^T[M]\{\ddot{y}\} \end{aligned} \quad (7)$$

$[C_p]$ 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 $[C_b]$ は値が大きいため、 $[\Lambda]^T[C_b][\Lambda]$ 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 $[\Lambda]^T[C][\Lambda]$ ($=[\Lambda]^T[C_p][\Lambda] + [\Lambda]^T[C_b][\Lambda]$)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、配管系よる減衰と、三軸粘性ダンパよる減衰について、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

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 3-7-1 及び表 3-7-2 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、NS2-補-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 3-7-1 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 3-7-2 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

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

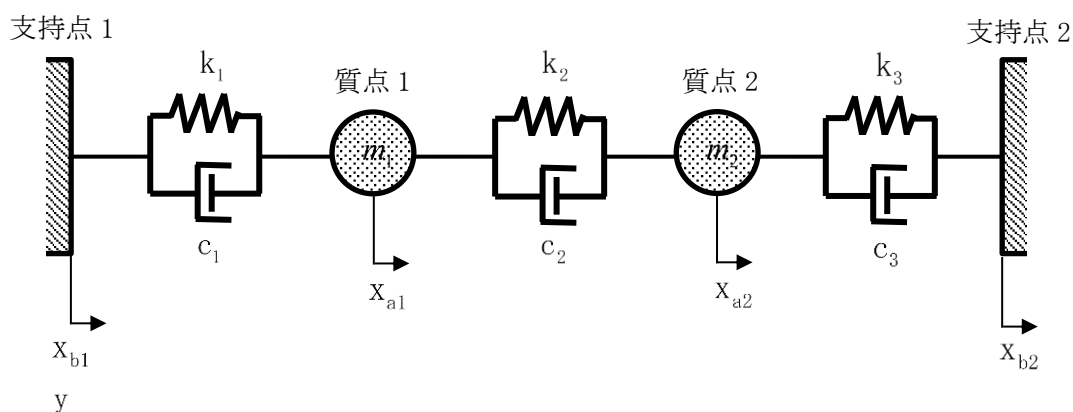
式(1)の左辺は地震による慣性力を受ける配管系の運動方程式である。右辺第一項は、基準入力点の加速度を用いており、右辺第二項及び右辺第三項は、入力点の相対変位、相対速度により生じる力を表している。式(1)は、単一入力の場合と同様に、モード座標系の運動方程式に変換することが可能であり、今回の評価では、モード空間での連成した運動方程式に対して時間積分を行う方法を適用する。

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3-8-1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3-8-1 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して整理すると、

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

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。

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

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

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^(6.5.4-2) 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の変位の和で定義したことを特徴とするもので、最終的には系の運動方程式は次の式(6.5.4-8)となる。

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

M : 質量マトリクス

C : 減衰マトリクス

K : 剛性マトリクス

\ddot{U}_b : 支持点の絶対加速度

H : 静的平衡関係から得られる変換マトリクス

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

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。

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。

確認の結果を表 5-1-1 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。

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)

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	追加検討 事項の有無 (○：有 —：無)
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。	— (考慮済) — (考慮済)

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, DIVISION 1—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)

<p>検討事項 (工認審査ガイド) 4. 機器・配管系 に関する事項)</p>	<p>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</p>	<p>追加検討 事項の有無 (○：有 ー：無)</p>
<p>4. 2 荷重及び荷重の 組合せ</p>	<p>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。</p>	<p>ー (考慮済)</p>
<p>4. 3 許容限界</p>	<p>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。</p>	<p>ー (考慮済)</p>
<p>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</p>	<p>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。</p>	<p>ー (考慮済)</p>
<p>4. 4. 2 入力地震力</p>	<p>入力地震力は、配管系設置位置の応答波を用いる。</p>	<p>ー (考慮済)</p>

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)

<p>検討事項 (工認審査ガイド 4. 機器・配管系 に関する事項)</p>	<p>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</p>	<p>追加検討 事項の有無 (○：有 ー：無)</p>
<p>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</p>	<p>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。</p>	<p>ー (考慮済)</p>
<p>4.5.2 水平方向及び鉛 直方向地震力の 組合せ</p>	<p>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。</p>	<p>ー (考慮済)</p>
<p>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</p>	<p>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。</p>	<p>ー (対象外)</p>

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)

<p>検討事項 (工認審査ガイド 4. 機器・配管系 に関する事項)</p>	<p>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</p>	<p>追加検討 事項の有無 (○：有 ー：無)</p>
<p>4.6.2 動的機能</p>	<p>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。</p>	<p>ー (対象外)</p>
<p>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</p>	<p>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。</p>	<p>ー (考慮済)</p>

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立性について

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、配置計画の成立性に問題はないと判断している。

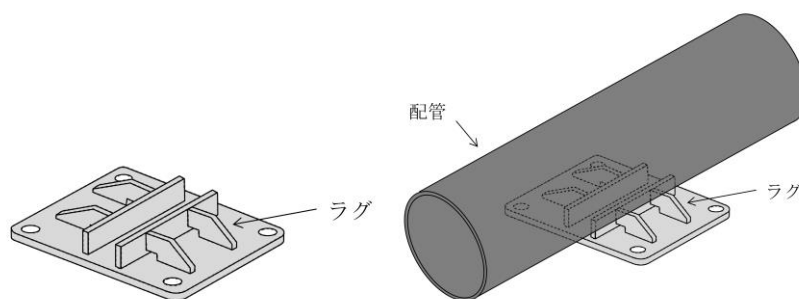


図 6-1-1 ラグの構造概要

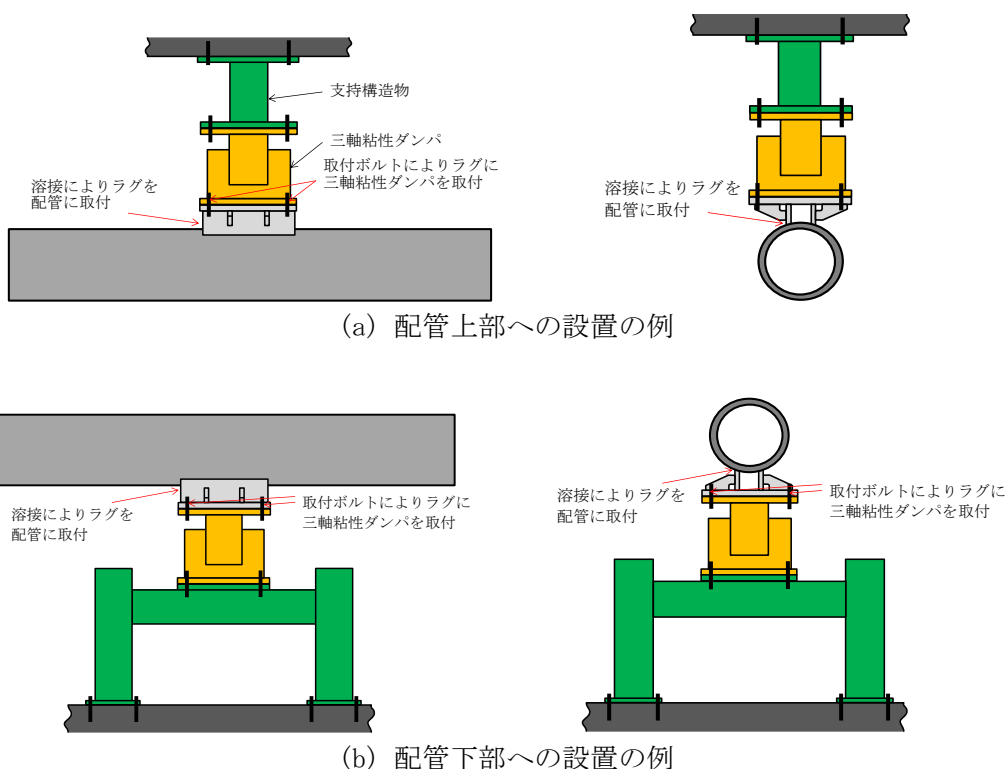


図 6-1-2 ラグの配管への取付及び三軸粘性ダンパへの接続

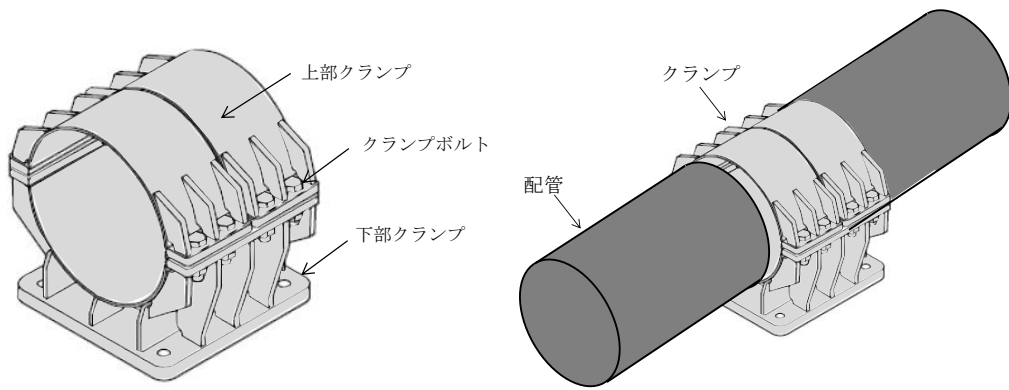
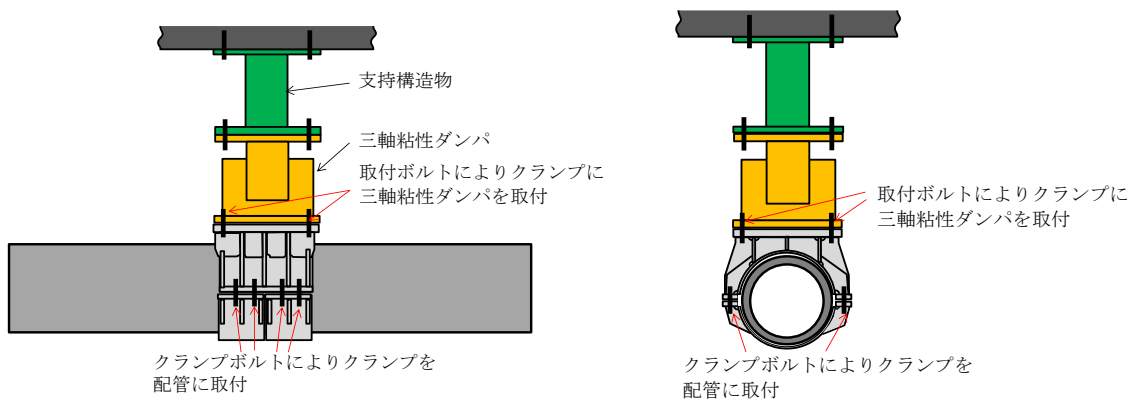
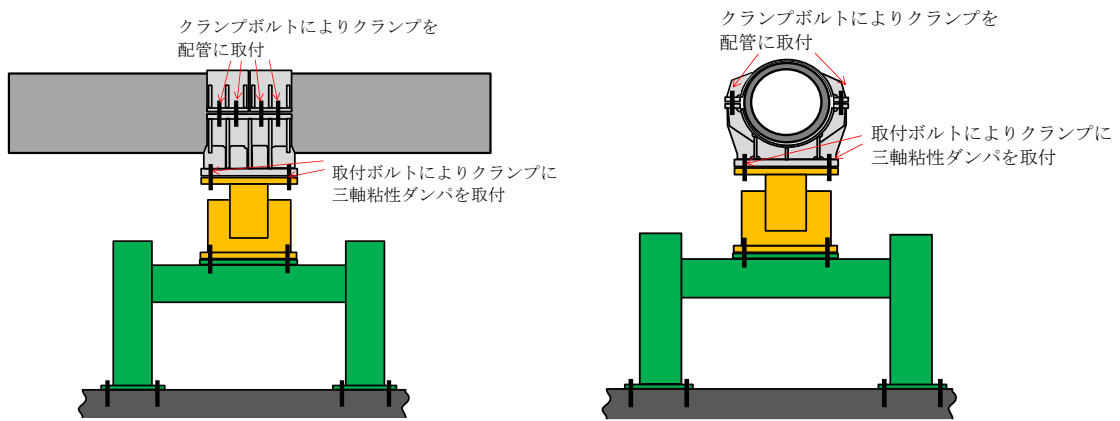


図 6-1-3 クランプの構造概要



(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

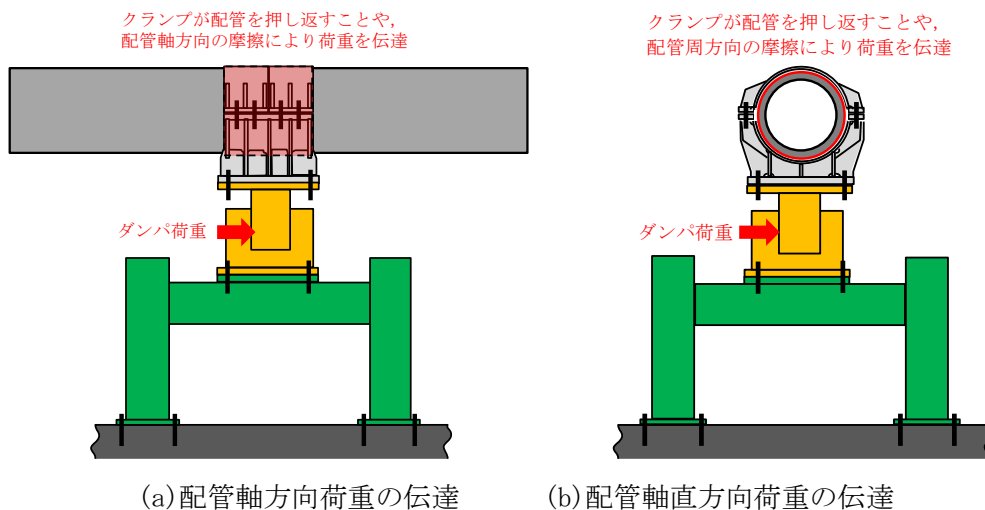


図 6-1-5 クランプによる水平方向の荷重伝達機構

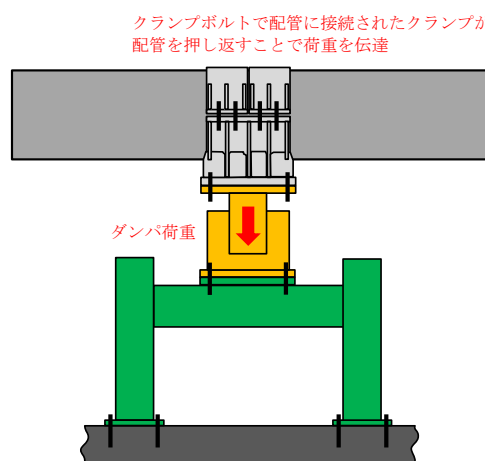


図 6-1-6 クランプによる鉛直方向の荷重伝達機構

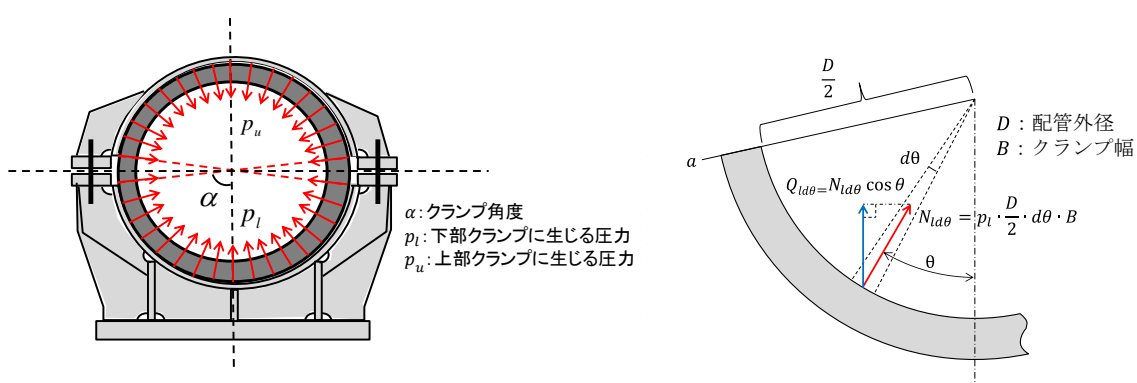


図 6-1-7 クランプ締付力による鉛直方向の力の算出

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

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

本資料では、主蒸気管のうち外側主蒸気隔離弁より主蒸気止め弁までの範囲及び主蒸気ヘッドから分岐しタービンバイパス弁並びに補助蒸気系との境界弁までの範囲の管（以下「主蒸気管」という。）における耐震重要度分類の考え方及び耐震評価結果について示す。

- I. 主蒸気管における耐震重要度分類及び評価用に適用する地震動の考え方について
- II. 評価用地震動における評価結果

なお、本資料が関連する図書は以下のとおり。

- ・ VI-2 「耐震性に関する説明書」

添付資料 1 地盤物性等の不確かさによる固有周期の変動に対する考慮について

添付資料 2 主蒸気管に設置する三軸粘性ダンパの段階的な減衰性能の設定

添付資料 3 主蒸気管の振動モード

添付資料 4 主蒸気止め弁及び蒸気加減弁の解析モデルについて

I. 主蒸気管における耐震重要度分類及び評価用に適用する地震動の考え方について

1. はじめに

主蒸気管については、耐震Bクラスに分類され、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。

本資料においては、主蒸気管の耐震重要度分類の考え方及び評価に適用する地震動の考え方について示す。

2. 耐震クラス設定の考え方

耐震重要度分類において、主蒸気管は、以下のクラス分類の規定に基づき、Bクラスに分類している。

「安全機能を有する施設のうち、機能喪失した場合の影響がSクラス施設と比べ小さい施設であって、原子炉冷却材圧力バウンダリに直接接続されていて、一次冷却材を内蔵しているか又は内蔵し得る施設」

さらに、主蒸気管については、仮に破断した場合に、一次冷却系から直接外部へ放射性気体（核分裂生成物）を放出する事象が引き起こされる可能性があることに配慮して、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た。

設備の耐震上の重要度分類にあたって、原子力発電所耐震設計技術指針 重要度分類・許容応力編 JEAG 4601・補-1984（以下「JEAG 4601・補-1984」という。）において検討した内容が整理されている。（図1参照）

この中で、「放射性物質に関連する設備の耐震重要度分類と被ばく線量」に関して、設備単体が破損したときに全身0.5レム以上の被ばくを与えるものは基準地震動S₁による機能維持の確認を行うべき、としている。これにより、基準地震動S₂による設備の同時破損を想定しても、被ばく線量を「原子炉立地審査指針及びその適用に関する判断のめやすについて」のめやす線量に対して十分小さくすることができることになる。

また、主蒸気管については、仮に原子炉格納容器外で破損した場合の被ばく線量は、小児甲状腺1.5レム以下となることが当時の評価方法で得られており、基準地震動S₁に対し機能維持をする必要は必ずしもない。一方で、複数基立地の発電所で主蒸気管の同時破損を想定すると、仮定の仕方によりめやす線量を超える場合もあり得るとして、主蒸気止め弁までの部分は、基準地震動S₁で破損しないことの確認を行っておくことが望ましいとしている。さらに、被ばく評価の基準が見直されたら、基準地震動S₁に対する検討も再度見直す必要があるとしている。

被ばく評価の基準に関しては、「発電用軽水型原子炉施設の安全評価に関する審査指針」（平成2年8月30日原子力安全委員会決定）で判断基準が示されている。主蒸気管については、破損時に上記審査指針に定められている事故時の実効線量に関する判断基準（5mSv）

を超えないという条件が満たされる必要がある。島根原子力発電所2号機の原子炉設置変更許可申請書における主蒸気管破断時の評価結果によると、被ばく量は約 $6.8 \times 10^{-2} \text{mSv}$ であり、上記の判断基準（5mSv）と比較して小さい。このことから、主蒸気管は耐震Bクラスとすることは妥当である。一方で、主蒸気管が破断した場合、一次冷却系から直接外部へ放射性気体（核分裂生成物）を放出する事象が引き起こされる可能性があることに配慮することとし、念のため、主蒸気管を弾性設計用地震動 S_d で破損しないことの検討を行うこととしたものである。

なお、弾性設計用地震動 S_d で破損しないことの検討にあたって考慮する許容応力状態については、J E A G 4 6 0 1 ・ 補-1984 に規定のとおり許容応力状態IV A Sを適用する（図2参照）。

【参考：耐震設計審査指針改訂（平成18年9月）による耐震重要度と適用する地震動との関連について】

次に耐震重要度分類と適用する地震動に関して、J E A G 4 6 0 1 ・ 補-1984 発刊当時は、耐震Aクラスのうち特に重要な施設を耐震A_sクラスとし、耐震Aクラス施設に対して基準地震動 S_1 を、耐震A_sクラス施設に対して基準地震動 S_1 、 S_2 を適用することとなっていた。その後、平成18年に改訂された耐震設計審査指針において、耐震重要度分類については、A_sクラス及びAクラスを統合してSクラスとし、適用する地震動は基準地震動 S_s のみとなった。さらに、施設の安全機能の保持を高い精度で確認するため弾性設計用地震動 S_d を規定し、Sクラス施設に適用することとなった。

上記のような改訂経緯から、基準地震動 S_1 と弾性設計用地震動 S_d とは直接関連するものではない。



図1 J E A G 4 6 0 1 ・ 補-1984 における耐震重要度分類と被ばく線量に関する記載

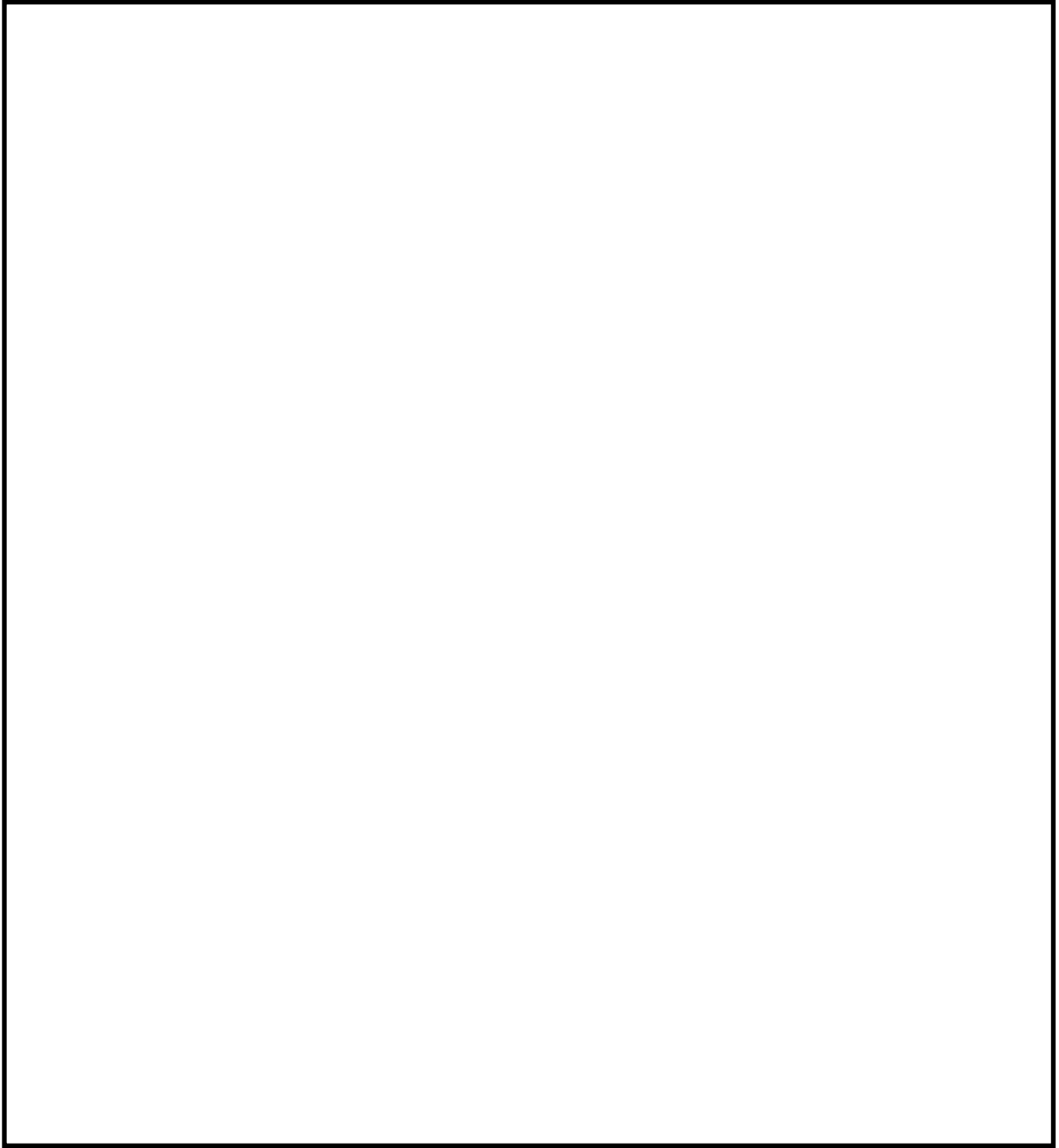


図2 J E A G 4 6 0 1 ・ 補-1984 における施設の耐震重要度と地震動の対応に関する記載

II. 評価用地震動における評価結果

1. はじめに

「I. 主蒸気管における耐震重要度分類及び評価用に適用する地震動の考え方について」において、主蒸気管は、耐震Bクラス、かつ、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。

ここでは、主蒸気管について、弾性設計用地震動S_dを作用させた場合の応力評価を示す。

2. 評価方法

2.1 概要

評価対象は原子炉格納容器外側主蒸気隔離弁より主蒸気止め弁までの範囲及び主蒸気ヘッドから分岐しタービンバイパス弁並びに補助蒸気系との境界弁までの範囲の管とする。評価対象である配管系の鳥瞰図を図3に示す。主蒸気管には、三軸粘性ダンパ設置しており、高減衰による地震応答低減を図っている。三軸粘性ダンパの配管系地震応答解析への適用方法については、NS2-補-027-10-62「配管系に設置する三軸粘性ダンパの設計方針」に示す。地震応答解析法については、このような高減衰箇所の応答が考慮可能であるモーダル時刻歴解析を適用する。

また、主蒸気管は原子炉建物、タービン建物及び蒸気タービンの基礎に支持点（地震入力点）を有しており、それぞれの支持点に対応した建物・構築物の加速度時刻歴波を入力する。なお、水平2方向及び鉛直方向地震力の組合せを考慮して、解析入力は3方向同時入力とする。

2.2 評価条件

入力地震動については、弾性設計用地震動S_{d-1}、S_{d-D}、S_{d-F1}、S_{d-F2}、S_{d-N1}、S_{d-N2}とし、各地震動が配管系に与える影響を検討するため、減衰性能の上・下限である減衰性能1（上限）及び5（下限）にて評価した。評価の結果、最も厳しい地震動は、表6のとおりS_{d-1}であったため、S_{d-1}については減衰性能1（上限）及び5（下限）に加え、内挿する3つの減衰（減衰性能2～4）について評価を実施した。なお、本資料では評価上最も厳しい地震動であるS_{d-1}について、減衰性能1～5にて評価した結果を示す。また、地盤物性等の不確かさによる固有周期の変動に対する考慮について添付資料1に示す。

適用した入力地震動のうちS_{d-1}についての加速度時刻歴波を図4に示す。なお、速度、変位はプログラム内で加速度時刻歴波より算出している。

配管系の構造減衰についてはVI-2-1-6「地震応答解析の基本方針」に記載の減衰定数を用いる。主蒸気管に設置する三軸粘性ダンパの減衰性能の設定方法を添付資料2に示す。また、表1に評価条件を示す。

地震応答解析に用いる解析コードは「MSC NASTRAN Version 2013.1.1」とする。

表 1 評価条件

系統名称 (鳥瞰図番号)	耐震設計上の 重要度分類	建物・構築物	標高	減衰定数*1 (%)
主蒸気系 (MS-T-1)	B*2	原子炉建物		
		タービン建物		
		蒸気タービンの基礎		

注記*1：配管系の構造減衰について示す。

*2：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。

3. 評価結果

3.1 配管応力評価結果

主蒸気管 (MS-T-1) の最大応力評価点の応力評価結果を表 2 に示す。また、各弾性設計用地震動による最大応力評価点の応力評価結果を表 6 に示す。以下の結果から、計算値が許容値以下であり、主蒸気管が弾性設計用地震動 S d に対して破損しないことを確認した。また、主蒸気管の振動モードについて、添付資料 3 に示す。

表 2 主蒸気管 (MS-T-1) の配管応力評価結果

許容応力 状態	最大応力区分 (許容応力)	鳥瞰図 番号	最大応力 評価点	応力評価		疲労評価
				計算応力 (MPa)	許容応力 (MPa)	疲労累積 係数
IVAS*	一次応力 ($0.9 \cdot S_u$)	MS-T-1	264	108	377	—
	一次+二次応力 ($2 \cdot S_y$)	MS-T-1	264	120	396	—

注記*：JEAG 4601・補-1984 の規定 (図 2 参照) に基づき許容応力 IVAS として評価する。

3.2 三軸粘性ダンパ評価結果

主蒸気管に適用している三軸粘性ダンパについては、NS2-補-027-10-62「配管系に設置する三軸粘性ダンパの設計方針」に示す評価方法に基づき、以下の内容の評価している。評価結果を表3に示す。

(1) 構造強度評価

三軸粘性ダンパの設置箇所における支持点荷重が、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。なお、使用荷重は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に規定の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であり、三軸粘性ダンパの使用荷重の有する裕度については、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。

(2) 減衰性能が維持されることを確認するための評価

a. 変位振幅評価

三軸粘性ダンパに生じる地震による変位振幅が、性能試験で減衰性能の維持を確認した許容振幅以下となることを確認する。

b. 累積消費エネルギー評価

三軸粘性ダンパに生じる地震による累積消費エネルギーが、性能試験で減衰性能の維持を確認した許容値以下となることを確認する。

表 3 三軸粘性ダンパの構造強度評価結果及び減衰性能確認結果

下表に示すとおり計算値はそれぞれの許容値以下である。
なお、下表は各評価において最小裕度となる三軸粘性ダンパについて示す。

許容応力 状態	支持構造物 番号	型式 ^{*3}	材質 ^{*4}	温度 (°C)	方向	構造強度評価結果		機能維持評価			
						荷重評価		変位振幅評価		累積消費エネルギー評価	
						計算値(kN)	許容値(kN)	計算値(mm)	許容値(mm)	計算値(kJ)	許容値(kJ)
IVAS ^{*1}	DMP-MS-017 ^{*2}	630/426	STKM13A	66	水平	191	350	4.3		18.5	
					鉛直	64	140	2.8		6.7	
IVAS ^{*1}	DMP-MS-016 ^{*2}	630/426	STKM13A	66	水平	162	350	4.3		18.5	
					鉛直	61	140	2.8		6.8	

注記*1：J E A G 4 6 0 1・補-1984の規定(図2参照)に基づき許容応力状態IVASとして評価する。

*2：DMP-MS-017は荷重評価及び累積消費エネルギー評価で、DMP-MS-016は変位振幅評価で最小裕度となる三軸粘性ダンパである。

*3：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。

*4：支持装置の構成部材のうち主たる構成部材の材質を記載

3.3 支持構造物評価結果

三軸粘性ダンパ以外の支持構造物について、下表に示すとおり計算応力及び計算荷重はそれぞれの許容値以下である。

表 4 支持構造物評価結果 (荷重評価)

許容応力 状態	支持構造物 番号	種類	型式	材質*2	温度 (°C)	評価結果		
						計算荷重 (kN)	一次評価*3	二次評価*4
IVAS*1	SN0-MS-716	オイルスナツバ	ODP-1000	STKM13A	66	1050	1500	—
	RE-MS-746	ロッドストレイント	MSV用100t	SF490A	66	1369	1800	—

注記*1：J E A G 4 6 0 1・補-1984の規定(図2参照)に基づき許容応力状態IVASとして評価する。

*2：支持装置の構成部材のうち主たる構成部材の材質を記載

*3：あらかじめ設定した設計上の基準値を許容荷重として実施する評価





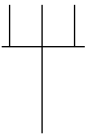
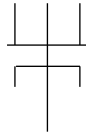
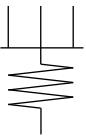
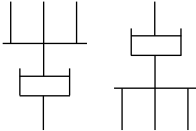
*4：計算荷重があらかじめ設定した設計上の基準値を超過した箇所に対して、J E A G 4 6 0 1に定める許容限界を満足する範囲内で新たに設定した設計上の基準値を許容荷重として実施する評価。なお、一次評価を満足する場合は「—」を記載する。

表 5 支持構造物評価結果 (応力評価)

許容応力 状態	支持構造物 番号	種類	型式	材質	温度 (°C)	支持点荷重						評価結果		
						反力(kN)			モーメント(kN・m)			応力 分類	許容 応力 (MPa)	
						Fx	Fy	Fz	Mx	My	Mz			
IVAS*	RE-MS-221	レストレイント	ラグ	SGV410	302	0	117	78	—	—	—	圧縮	16	114
	AN-MS-206	アソカ	ラグ	SGV480	302	340	130	133	78	112	106	組合せ	18	137

注記*：J E A G 4 6 0 1・補-1984の規定(図2参照)に基づき許容応力状態IVASとして評価する。

鳥観図記号凡例

記 号	内 容
 (太線)	耐震Bクラス範囲の管であって，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範囲の管
 (破線)	上記以外の範囲の管
	質点
	アンカ
	レストレイント
	スナッパ
	ハンガ
	三軸粘性ダンパ

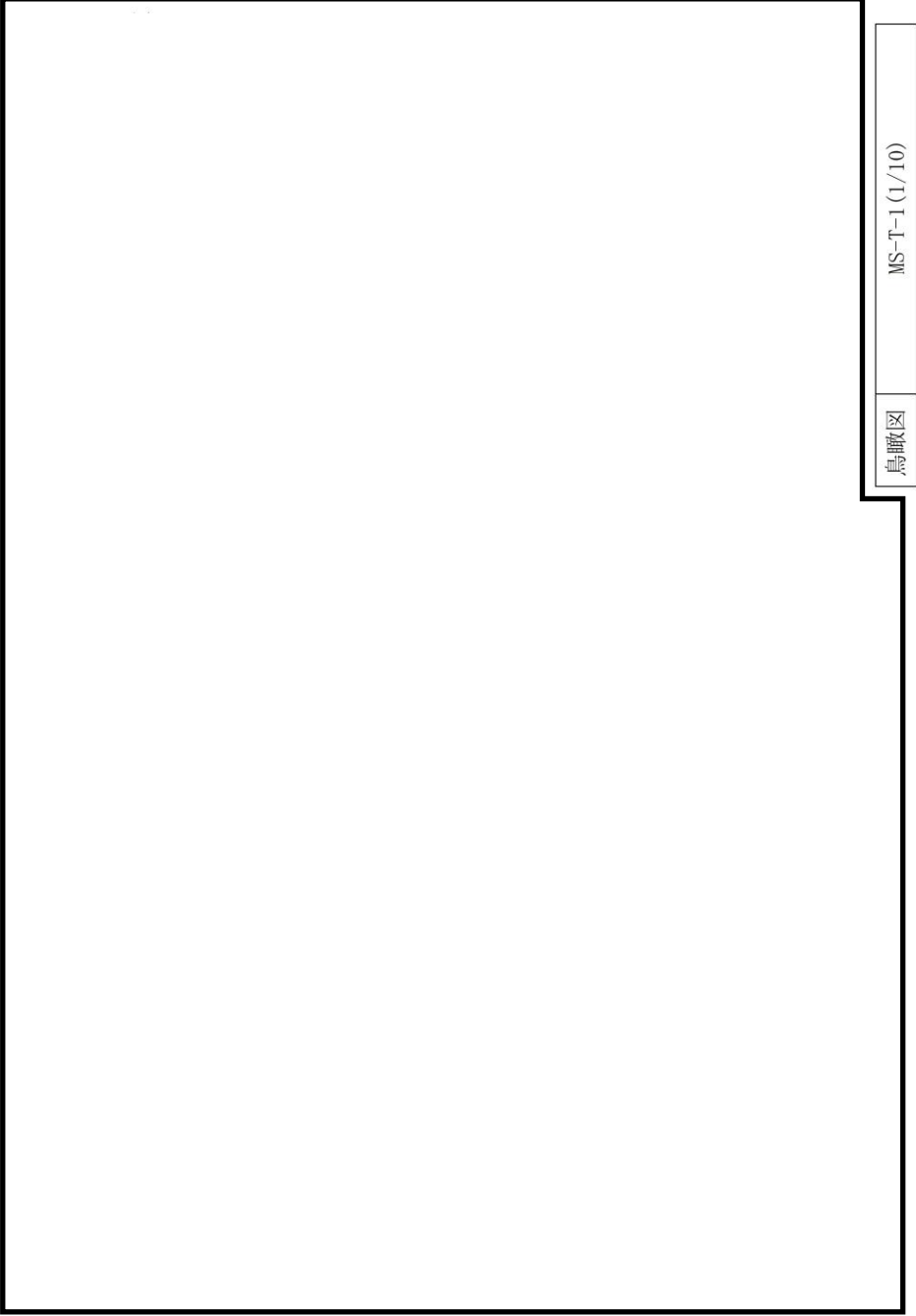


図 3 主蒸気配管モデル (1/10)

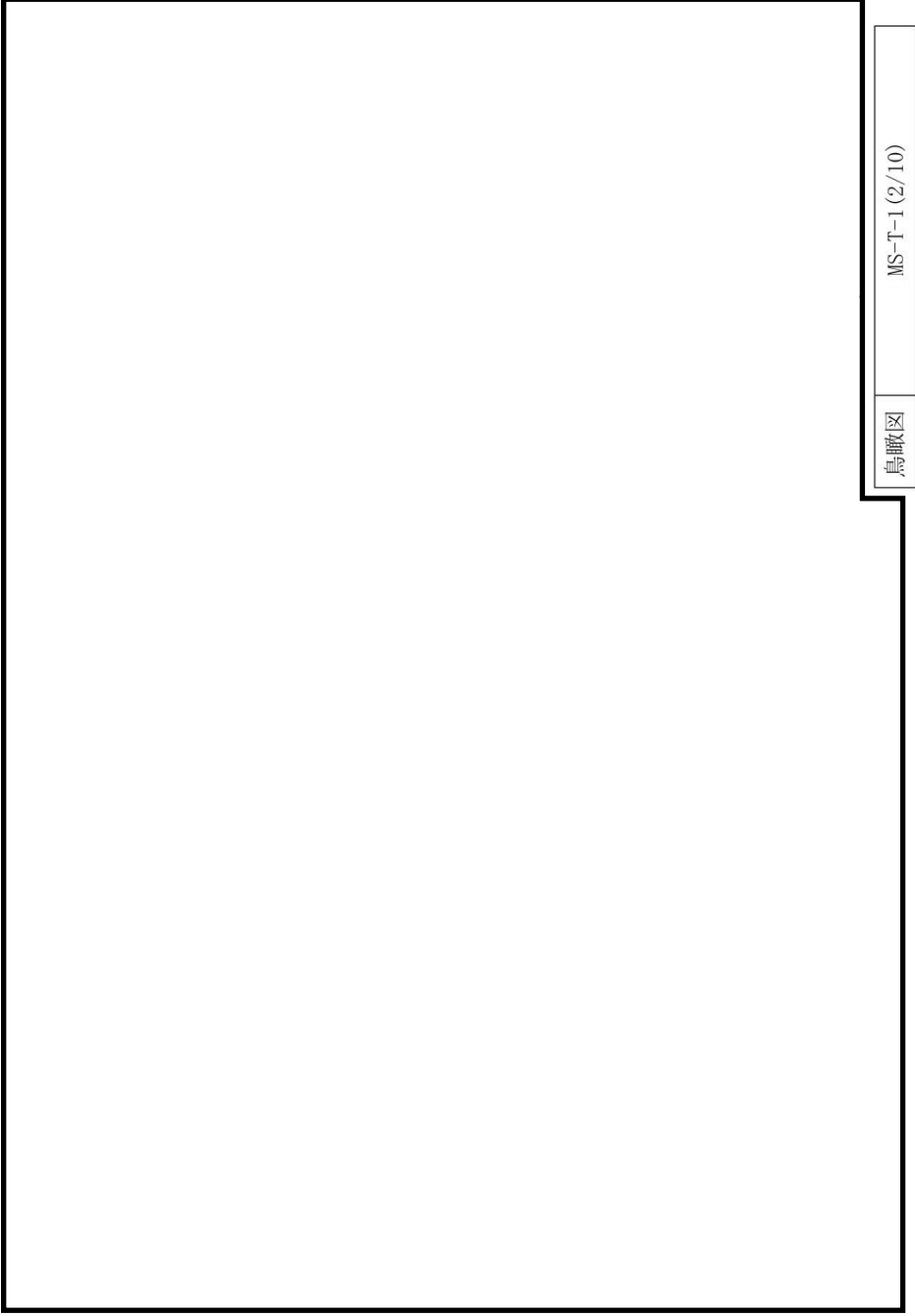


図 3 主蒸気配管モデル (2/10)

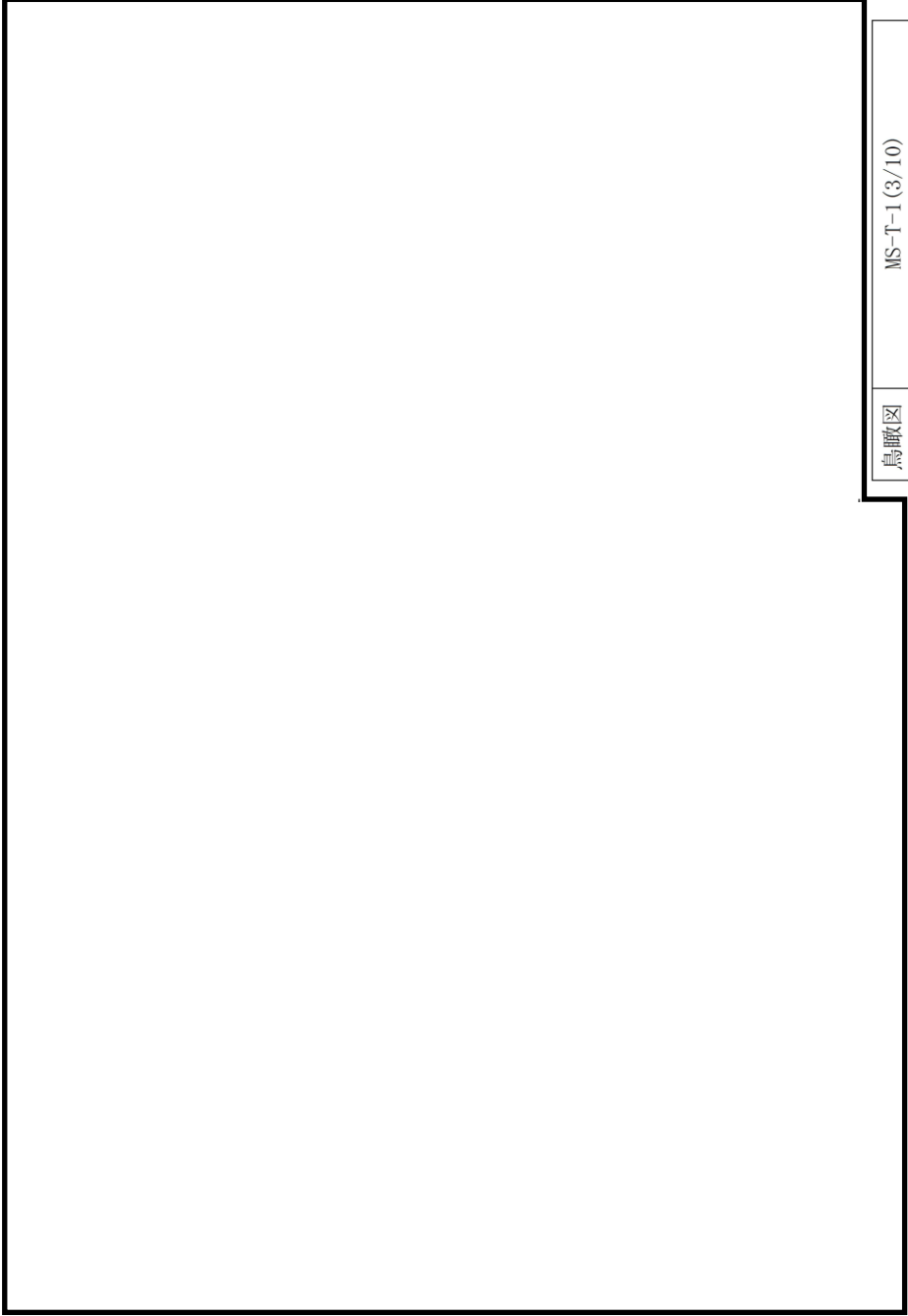


図 3 主蒸気配管モデル (3/10)

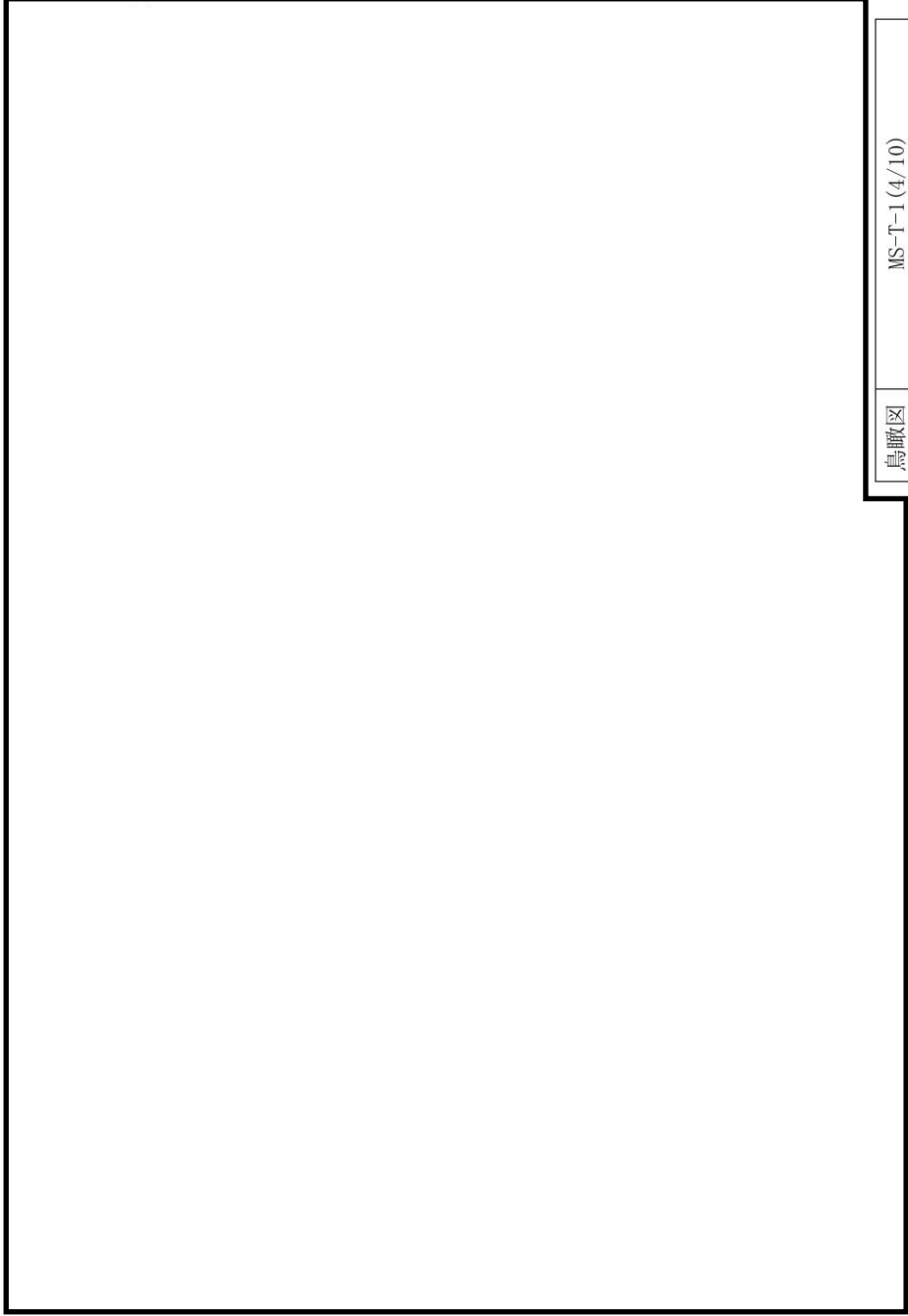


図 3 主蒸気配管モデル (4/10)

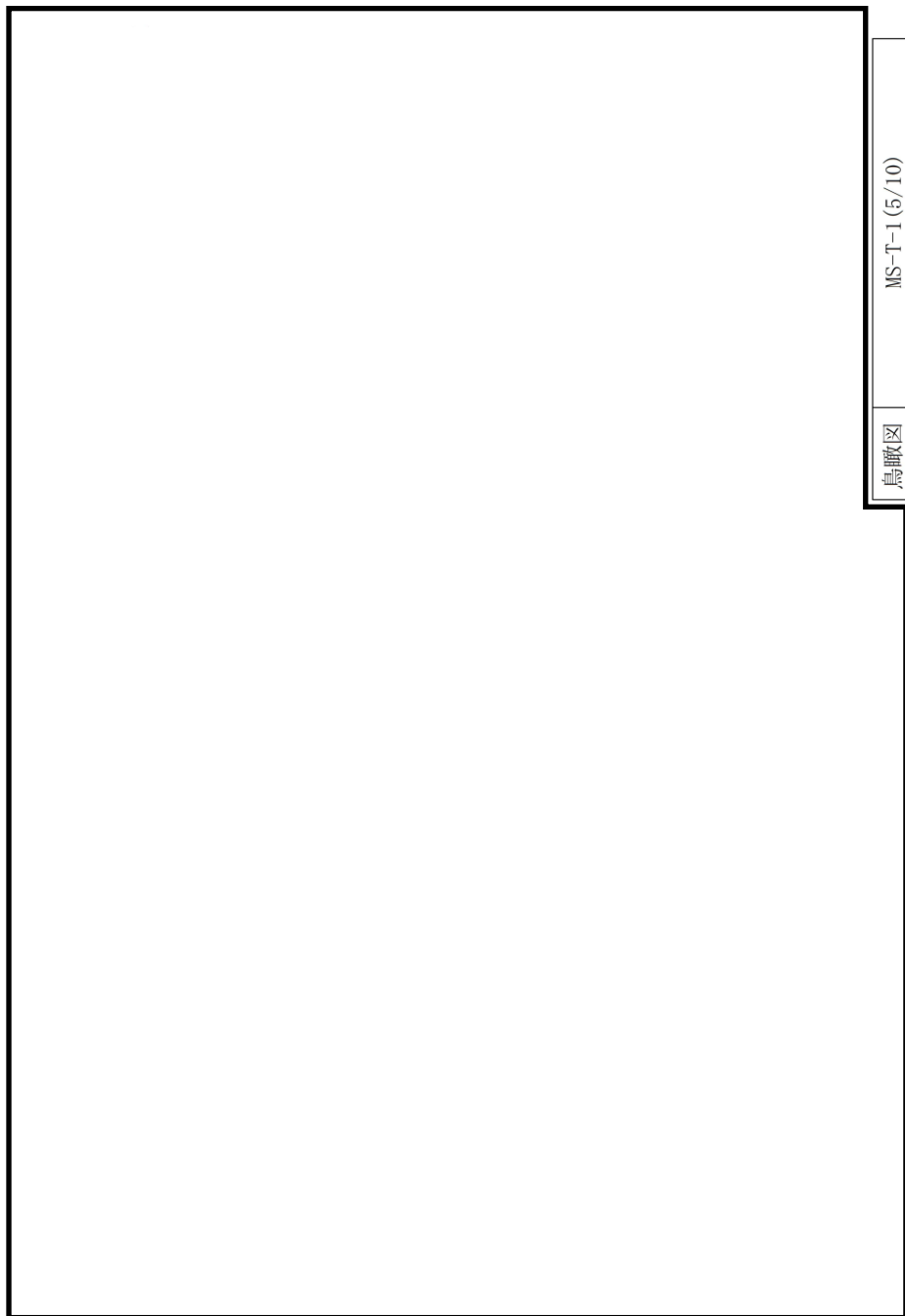


図 3 主蒸気配管モデル (5/10)

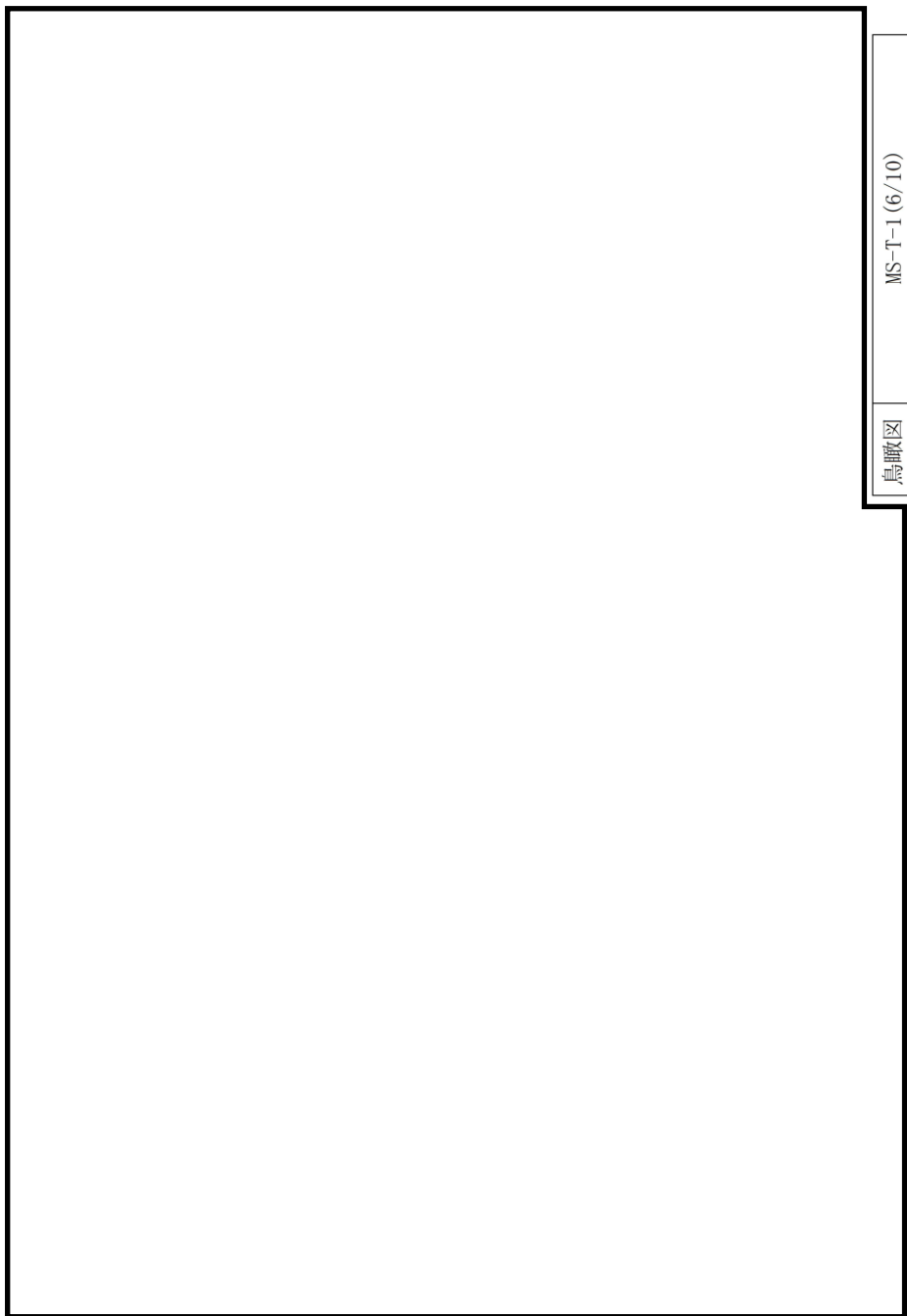


図 3 主蒸気配管モデル (6/10)

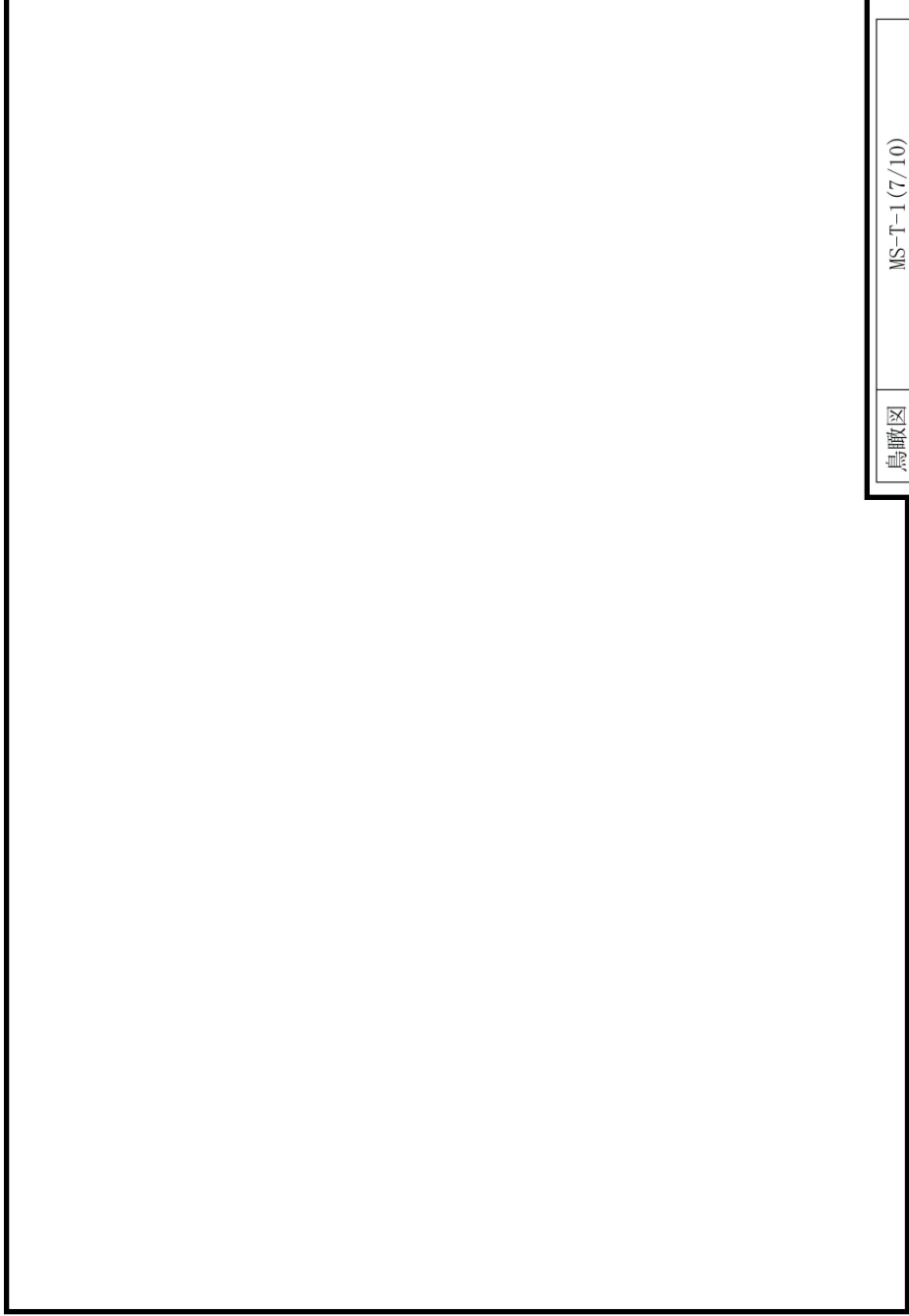


図 3 主蒸気配管モデル (7/10)

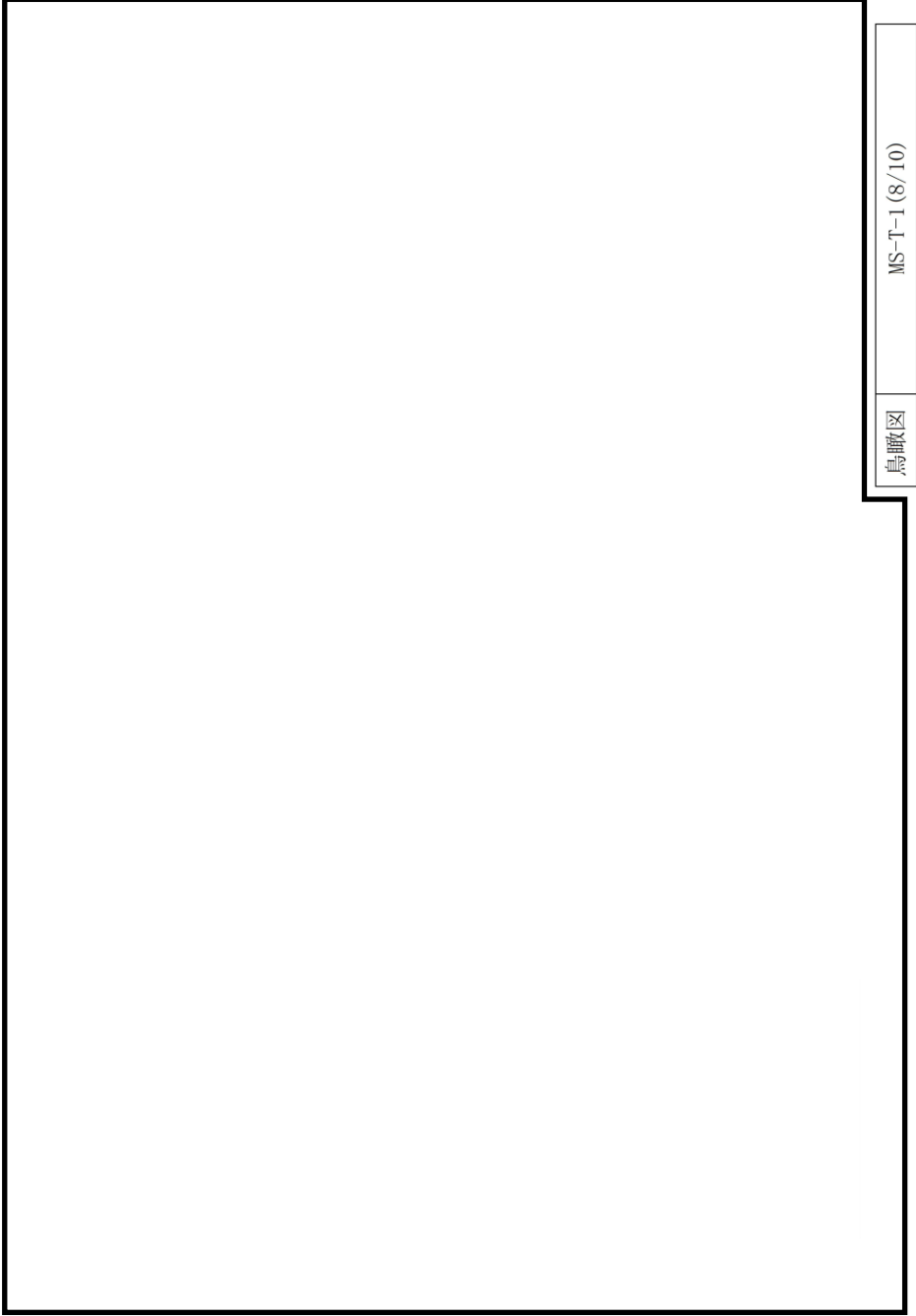


図 3 主蒸気配管モデル (8/10)

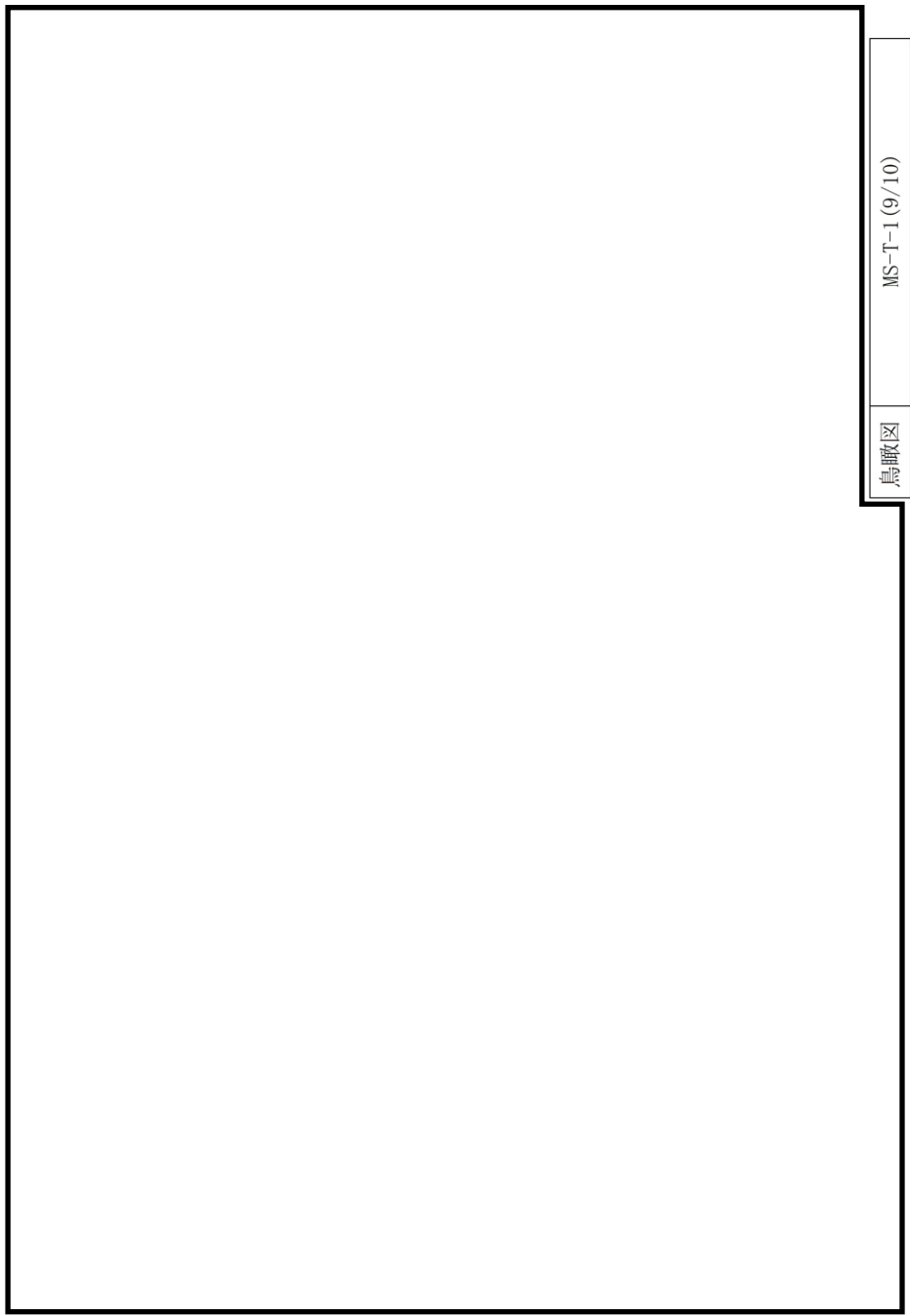


図 3 主蒸気配管モデル (9/10)

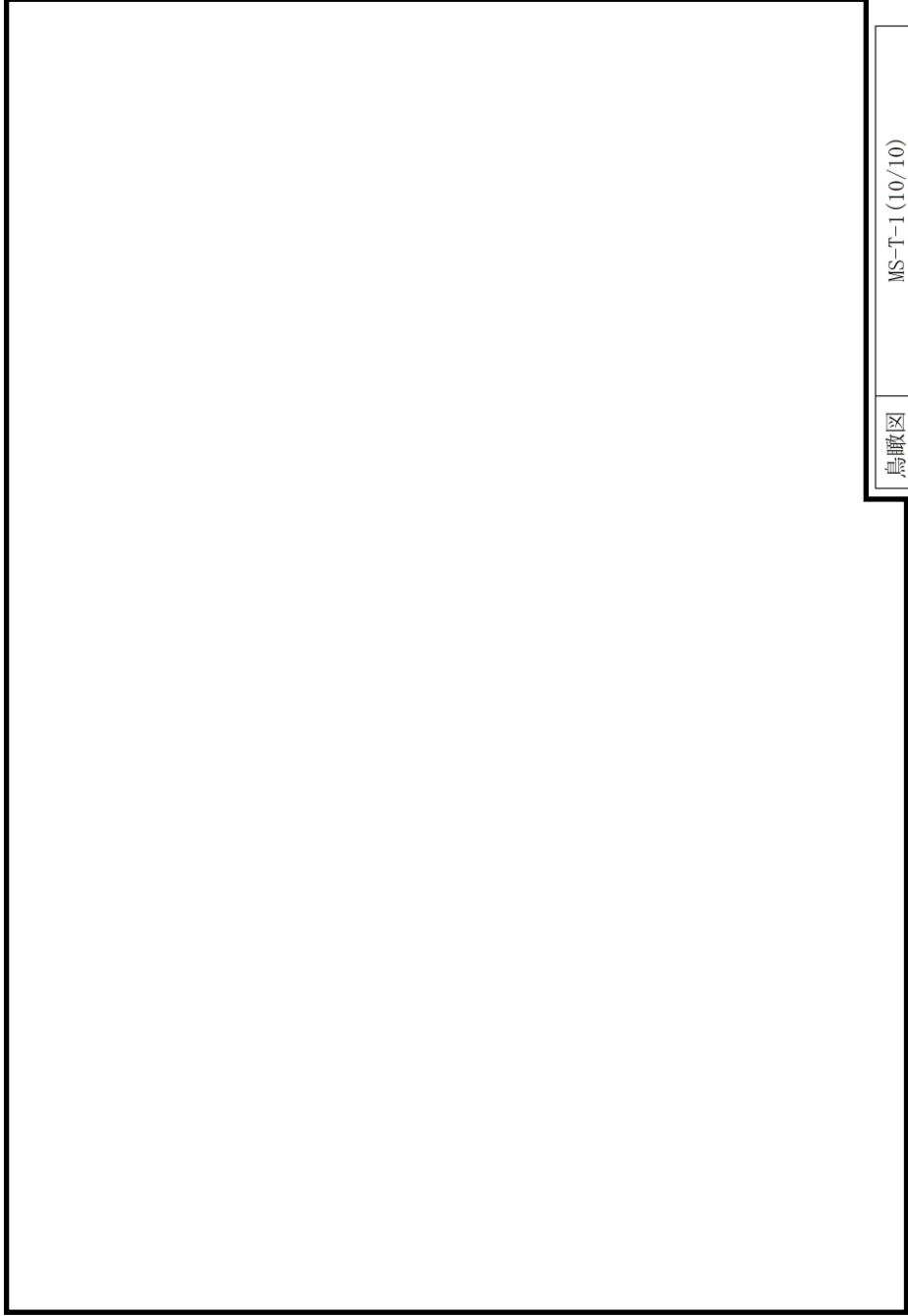


図3 主蒸気配管モデル (10/10)

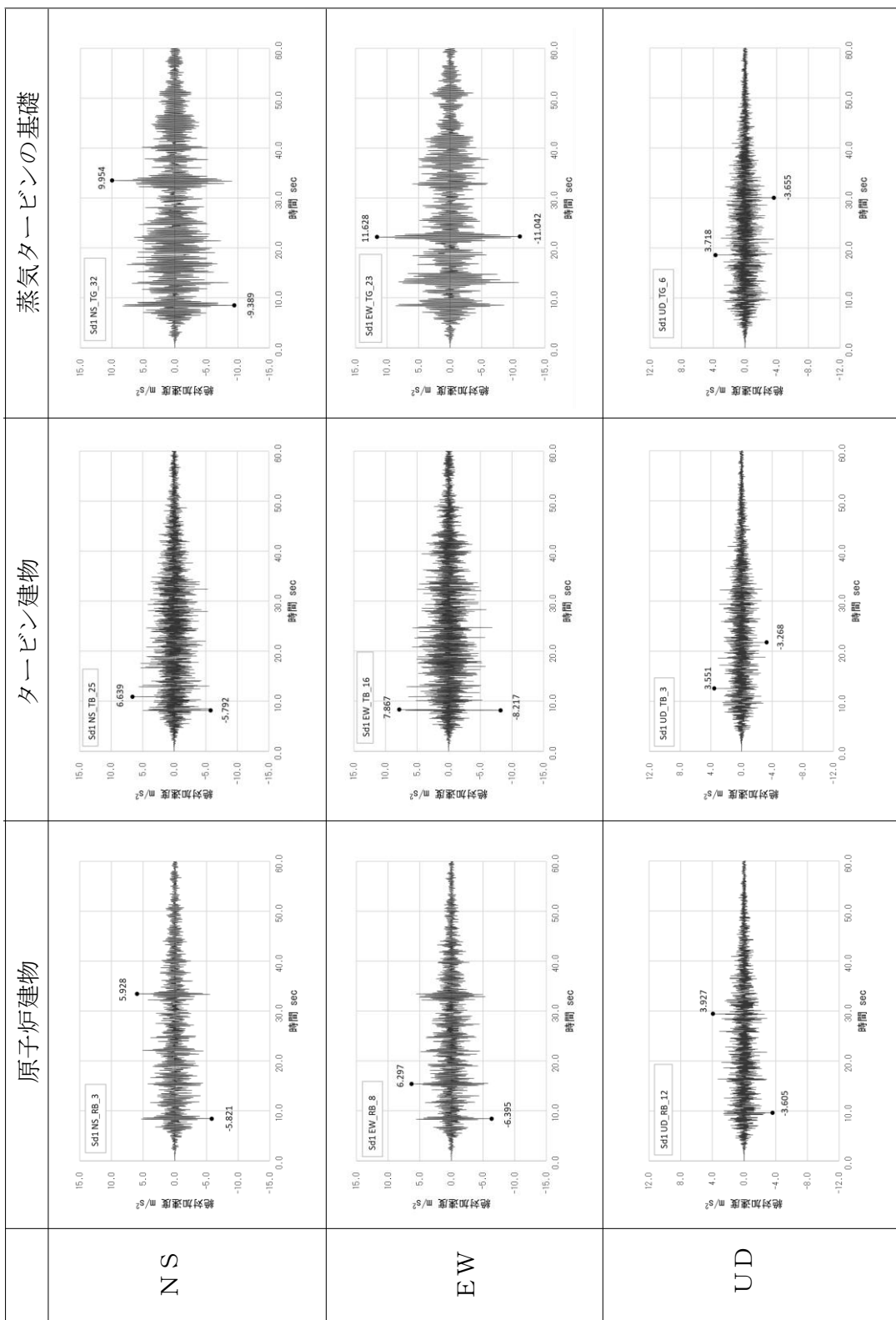


図 4 入力地震動の加速度時刻歴波 (S d - 1)

表 6 弾性設計用地震動による最大応力評価点の評価結果

No	地震動 種類	許容応力状態ⅣA S										
		一次応力評価					一次+二次応力評価					
		評価点	計算応力 (MPa)	許容応力 (MPa)	裕度	最小 裕度	評価点	計算応力 (MPa)	許容応力 (MPa)	裕度	疲労累積係数	最小 裕度
1	S d - I	264	108	377	3.49	○	264	120	396	3.30	—	○
2	S d - D	462	99	394	3.97		264	91	396	4.35	—	
3	S d - F 1	462	102	394	3.86		264	88	396	4.50	—	
4	S d - F 2	264	88	377	4.28		264	75	396	5.28	—	
5	S d - N 1	462	81	394	4.86		264	54	396	7.33	—	
6	S d - N 2	462	105	394	3.75		462	83	374	4.50	—	

地盤物性等の不確かさによる固有周期の変動に対する考慮について

1. 概要

スペクトルモード解析では、床応答加速度は地盤物性等の不確かさによる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て影響評価を実施する。

なお、地盤物性等の不確かさによる固有周期の変動に対する評価は、機器の固有周期と床応答スペクトルのピークが合うように時刻歴の横軸を±10%する手法があるが、配管系の固有周期は1次モードが支配的であるとは限らず、また減衰性能に応じて固有周期が変動することから、時刻刻みを±10%シフトした時刻歴波にて評価を実施し、機器が持つ裕度と時刻歴波をシフトすることへの影響度合を考慮して実施する。

2. 評価結果

地盤物性等の不確かさによる固有周期の変動を考慮した配管の応力評価結果を表 1 に示す。なお、評価結果は機器評価への影響が大きい地震動である S d - 1 のうち、減衰が小さく、地盤物性等の不確かさによる固有周期の影響を受けやすい減衰性能 5（下限）について示す。

評価の結果、いずれの結果においても計算値が許容値以下であることを確認した。また、時刻刻みを±10%シフトした場合の計算応力への影響は 14%程度であり、機器が持つ裕度に対して微小な変動であることから、地盤物性等の不確かさによる固有周期の変動は本設備の成立性に影響がないことを確認した。

表 1 配管応力評価結果 (減衰性能 5)

No	地震動種類	許容応力状態Ⅳ A S									
		一次応力評価					一次+二次応力評価				
		評価点	計算 応力 (MPa)	許容 応力 (MPa)	裕度	変動率* (%)	評価点	計算 応力 (MPa)	許容 応力 (MPa)	裕度	疲労累 積係数
1	S d - 1 (オリジナル)	264	103	377	3.66	—	221	108	396	3.66	—
2	S d - 1 +10%シフト	221	98	377	3.84	95.1	221	102	396	3.88	94.4
3	S d - 1 -10%シフト	462	100	394	3.94	97.1	221	93	396	4.25	86.1

注記* : 時刻刻みを±10%シフトした場合の計算応力への影響を示すパラメータとして、以下の計算をした値

$$S d - 1 \pm 10\% \text{シフトの計算応力} / S d - 1 \text{ (オリジナル) の計算応力} \times 100$$

主蒸気管に設置する三軸粘性ダンパの段階的な減衰性能の設定

1. 概要

本資料では、主蒸気管に設置する三軸粘性ダンパの段階的な減衰性能の設定について示す。なお、表 1 に主蒸気管に設置している三軸粘性ダンパの型式を示す。

表 1 主蒸気管に設置している三軸粘性ダンパの型式

設置箇所	型式*
主蒸気管	630/426

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。

2. 段階的な減衰性能の設定

主蒸気管に設置する三軸粘性ダンパの段階的な減衰性能の設定を図 1 に示す。

三軸粘性ダンパのモデル化にあたっては、性能試験結果に基づいて設定した高側及び低側の減衰性能に対して、製造公差及び据付公差による±30%のばらつきを考慮し設定している。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しており、上限と下限を含めた 5 段階の減衰性能を設定している。

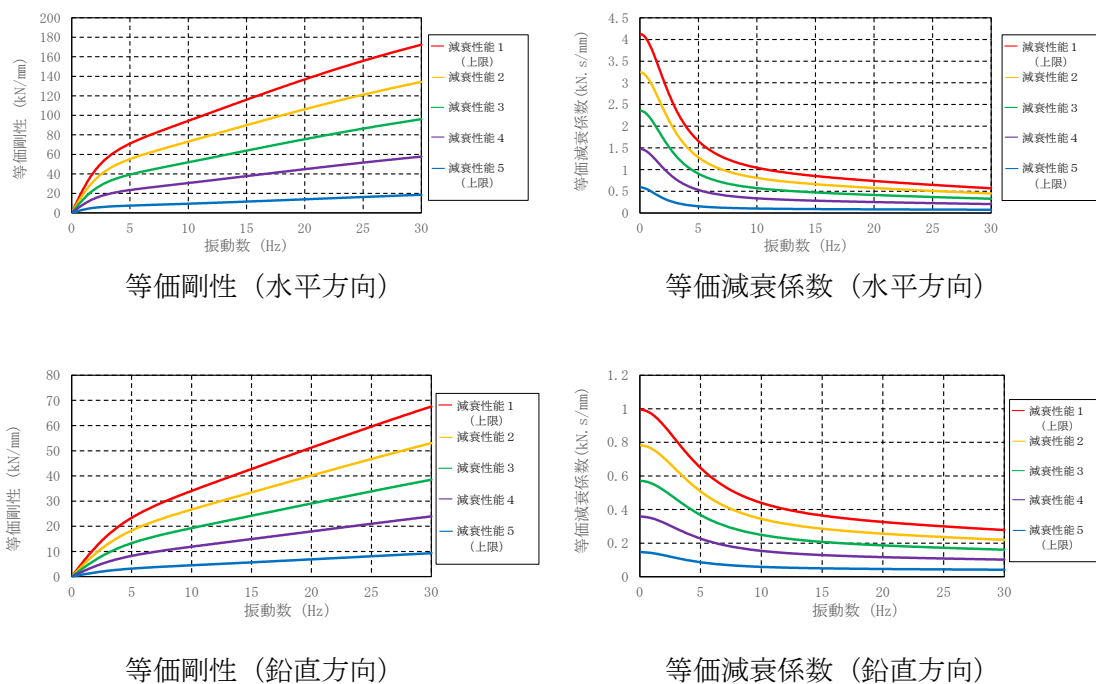


図 1 主蒸気管に設置する三軸粘性ダンパの段階的な減衰性能の設定 (型式 630/426)

主蒸気管の振動モード

1. 概要

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]が大きな値となり対角化できず[M], [C], [K]の3つのマトリクスを解く複素固有値解析になる。

本資料では、三軸粘性ダンパの設置による主蒸気管の振動性状の変化の傾向を示すため、三軸粘性ダンパ設置前の実固有値解析及び設置後の複素固有値解析の結果を示す。

2. 複素固有値解析における振動モードについて

減衰マトリクス[C]を対角化できる場合の実固有値解析においては、ある固有モードでの各自由度の振幅の最大値は同一時刻に生じるため、振動モードを見ることで、系全体の応答を把握することが可能である。

一方、複素固有値解析では、固有モードが複素数になり位相を有するため、ある固有モードにおいて各自由度間で位相差があり、振幅が最大になる時刻が異なる。したがって、複素固有値解析における振動モードは、各自由度がそれぞれ異なる位相で振動している状態のうち、ある一瞬を切り取ったものとなり、振動モードを見ることで、系全体の応答を把握することが難しい。本資料では、三軸粘性ダンパの設置による主蒸気管の振動性状の変化の傾向を示すため、複素固有値解析の振動モードにおいても振幅の最大値をプロットし、各自由度の位相差を無視した形で振動モードを示すこととする。

3. 固有値解析結果

主蒸気管 (MS-T-1) の振動モード、固有周期及びモード減衰比の一覧を表 1、各解析ケースにおける振動モードを図 1~12 に示す。なお、固有周期、モード減衰比及び振動モードは、2次モードまでを代表で示すが、実固有値解析における1次モードは三軸粘性ダンパを複数設置する主蒸気止め弁から高圧タービンまでの配管が応答するモードであり、2次モードは三軸粘性ダンパを設置しないタービンバイパスラインが応答するモードである。また、振動モードでは、各質点の変位の相対量・方向を実線で図示する。

実固有値解析における1次モードでは、三軸粘性ダンパを設置することによりモード減衰比が高くなるとともに、剛性も増すため固有周期が短周期側に変化していることが分かる。また、減衰性能が高いほどモード減衰比及び固有周期の変化が大きくなっている。一方、実固有値解析における2次モードでは、固有周期はほぼ一致しており、モード減衰比も配管系の設計用減衰定数として設定した値 (3.00%) から変化はない。

以上の傾向は三軸粘性ダンパ設置前後の主蒸気管に対して想定される振動性状と整合している。

表1 主蒸気管 (MS-T-1) の振動モード, 固有周期及びモード減衰比
(破線: 変形前 実線: 変形後)

項目		実固有値解析における 1次モード*	実固有値解析における 2次モード*
実固有値解析 (ダンパ設置前)			
複素固有 値解析 (ダンパ 設置後)	減衰性能 5 (減衰性 能低)		
	減衰性能 4		
	減衰性能 3		
	減衰性能 2		
	減衰性能 1 (減衰性 能高)		

注記*: 複素固有値解析結果は, 実固有値解析に対応するモードを示す。

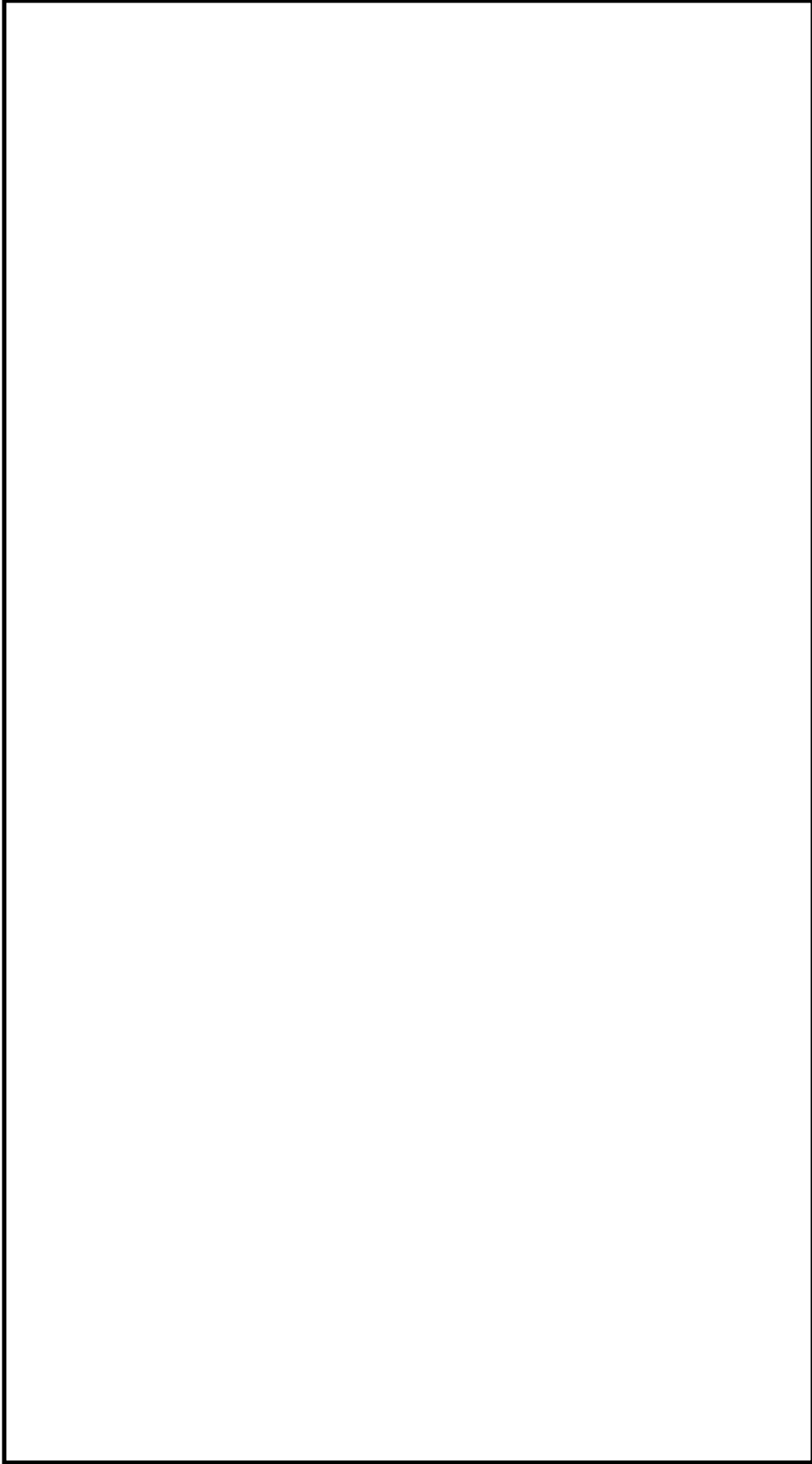


図1 実固有値解析における代表的振動モード(1次)

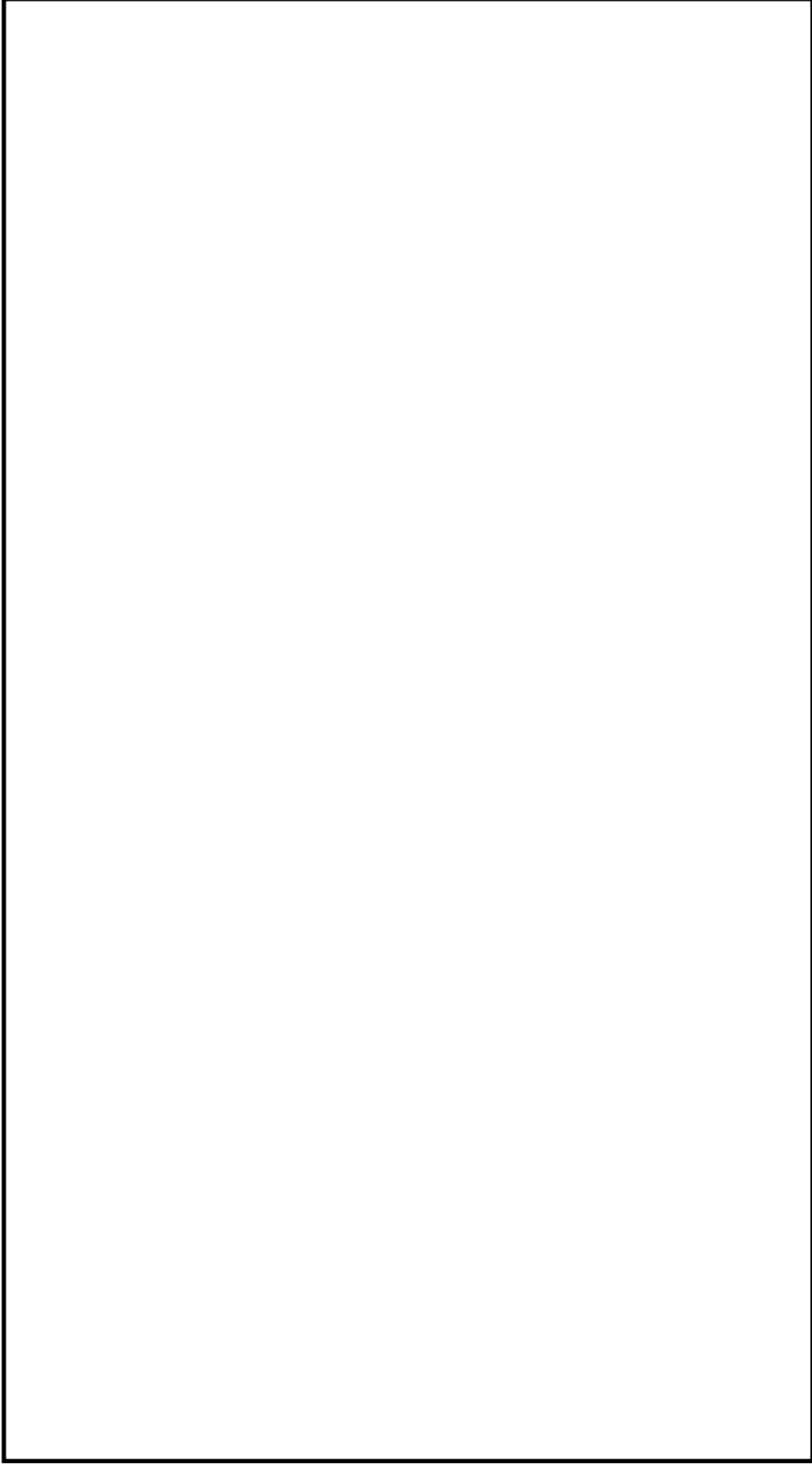


図2 実固有値解析における代表的振動モード(2次)

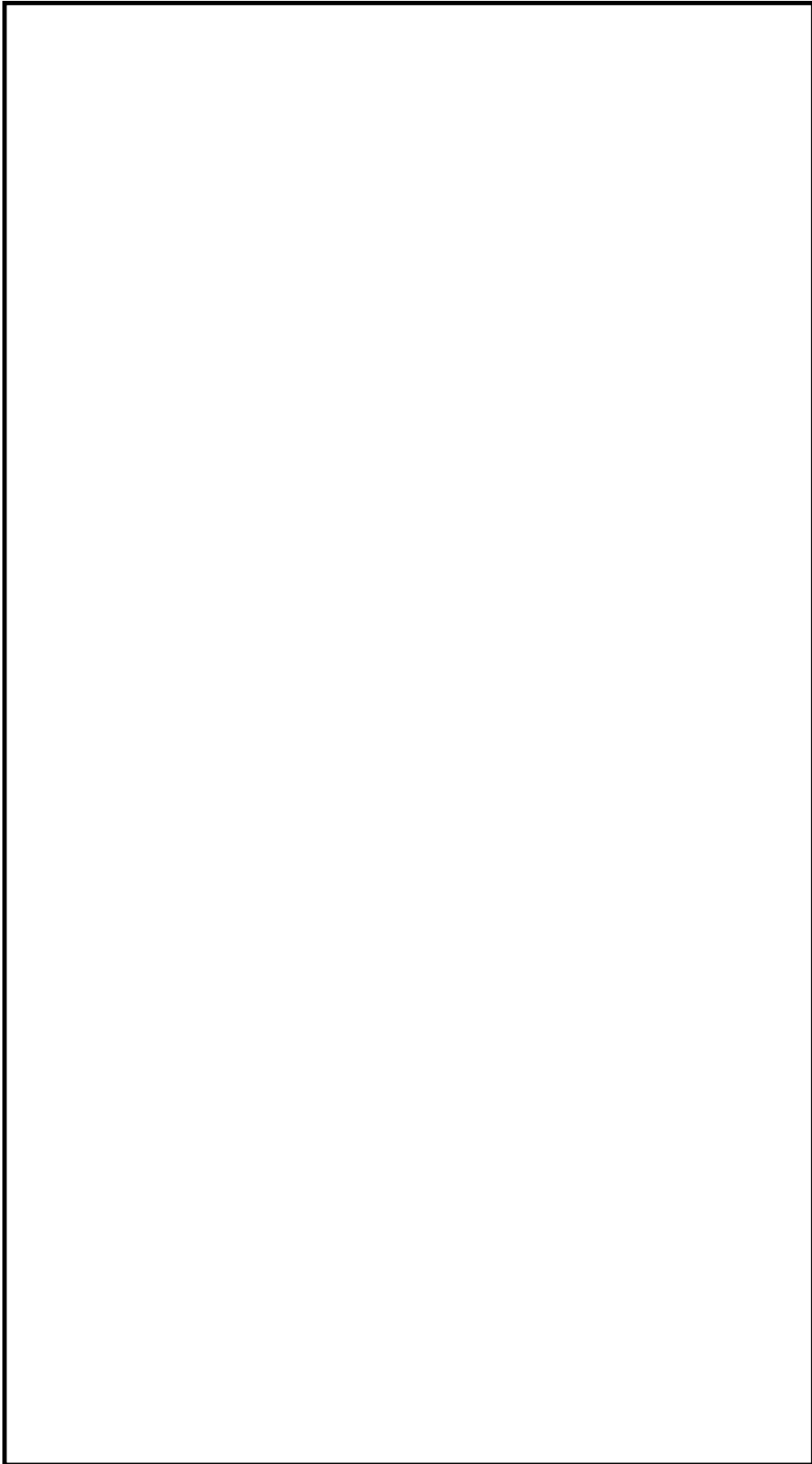


図3 複素固有値解析 (減衰性能5) における代表的振動モード (2次)
(実固有値解析における1次モードに対応するモード)

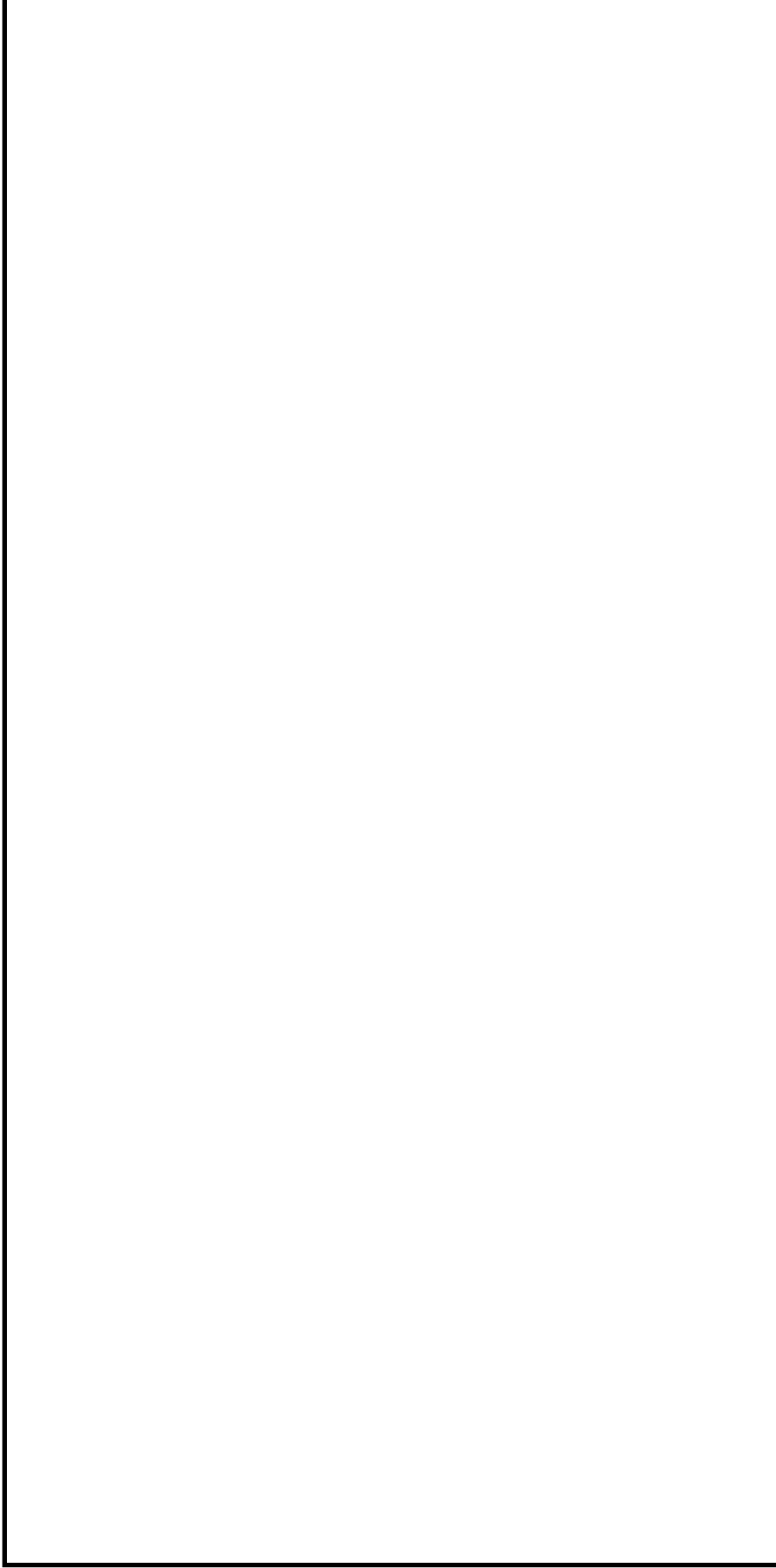


図 4 複素固有値解析 (減衰性能 5) における代表的振動モード (1 次)
(実固有値解析における 2 次モードに対応するモード)

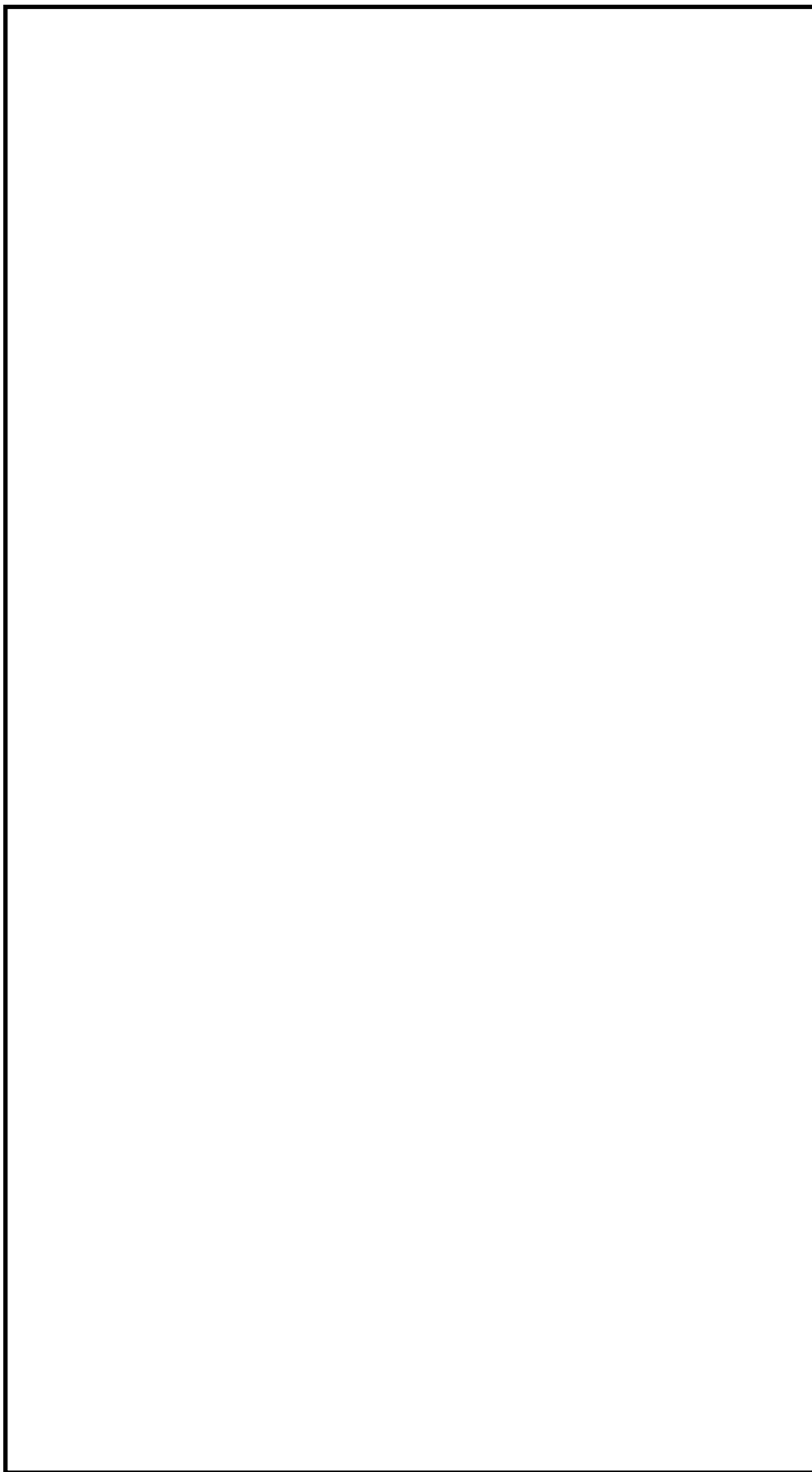


図5 複素固有値解析 (減衰性能4) における代表的振動モード (2次)
(実固有値解析における1次モードに対応するモード)

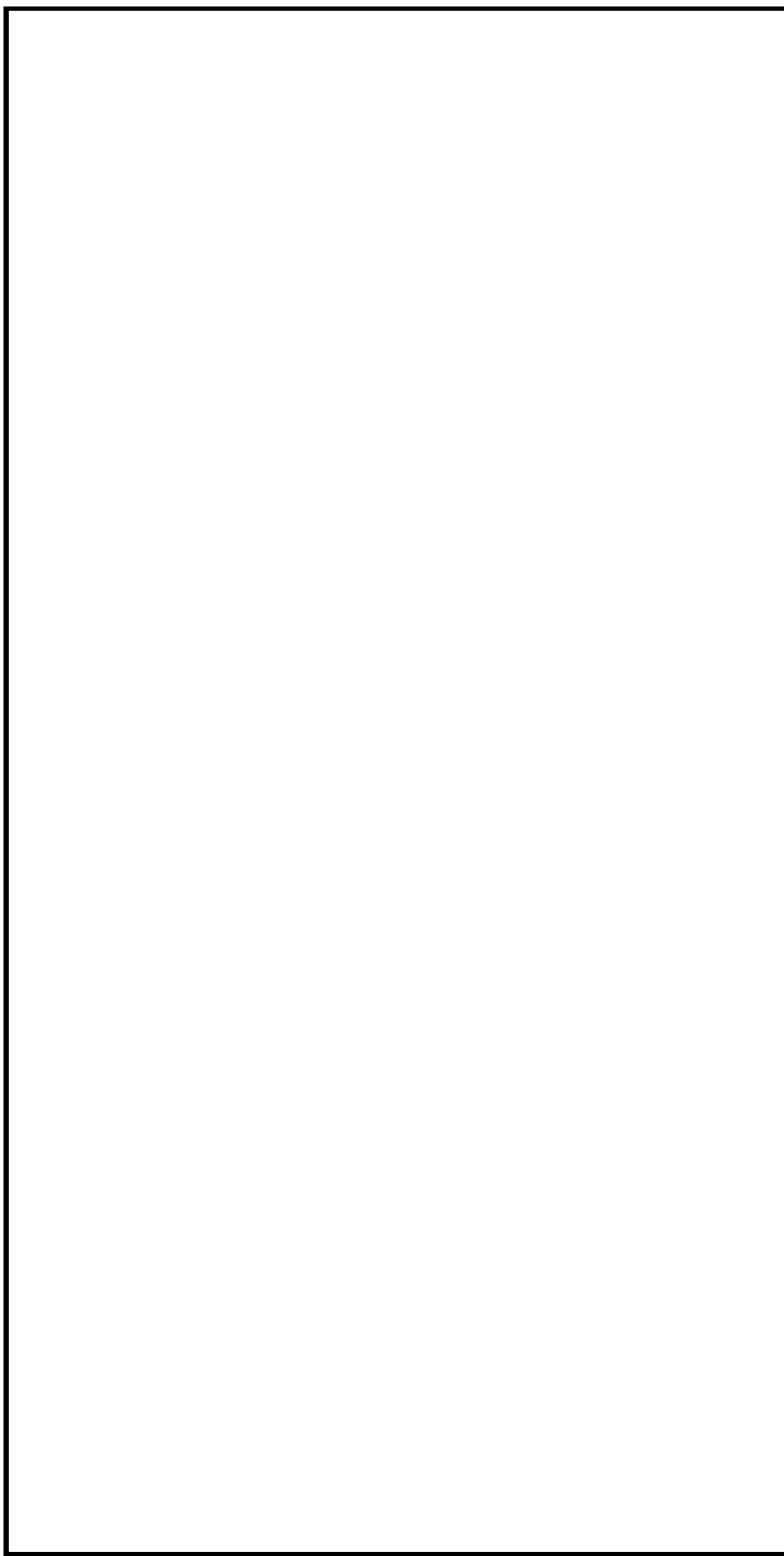


図 6 複素固有値解析 (減衰性能 4) における代表的振動モード (1 次)
(実固有値解析における 2 次モードに対応するモード)

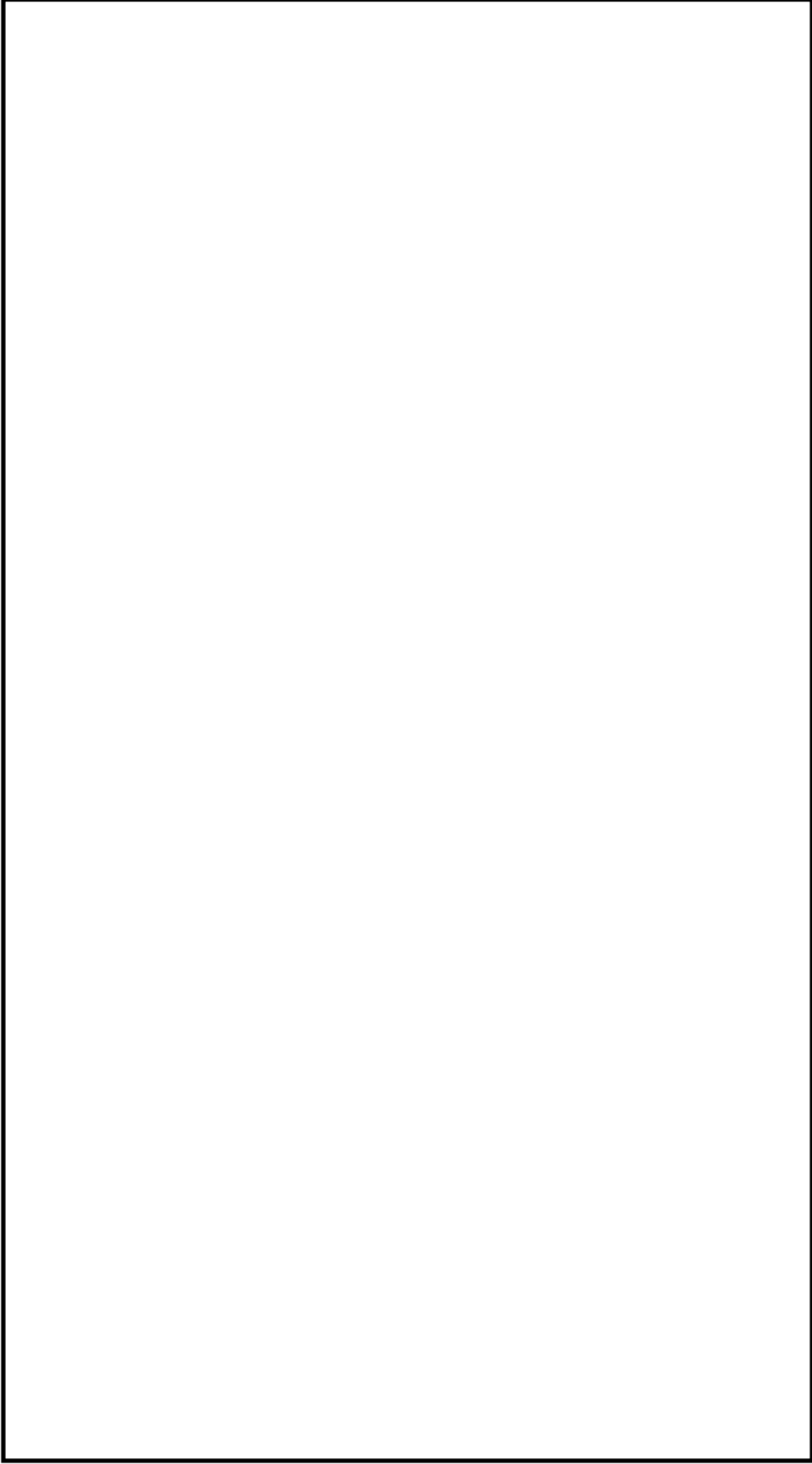


図7 複素固有値解析（減衰性能3）における代表的振動モード（2次）
（実固有値解析における1次モードに対応するモード）

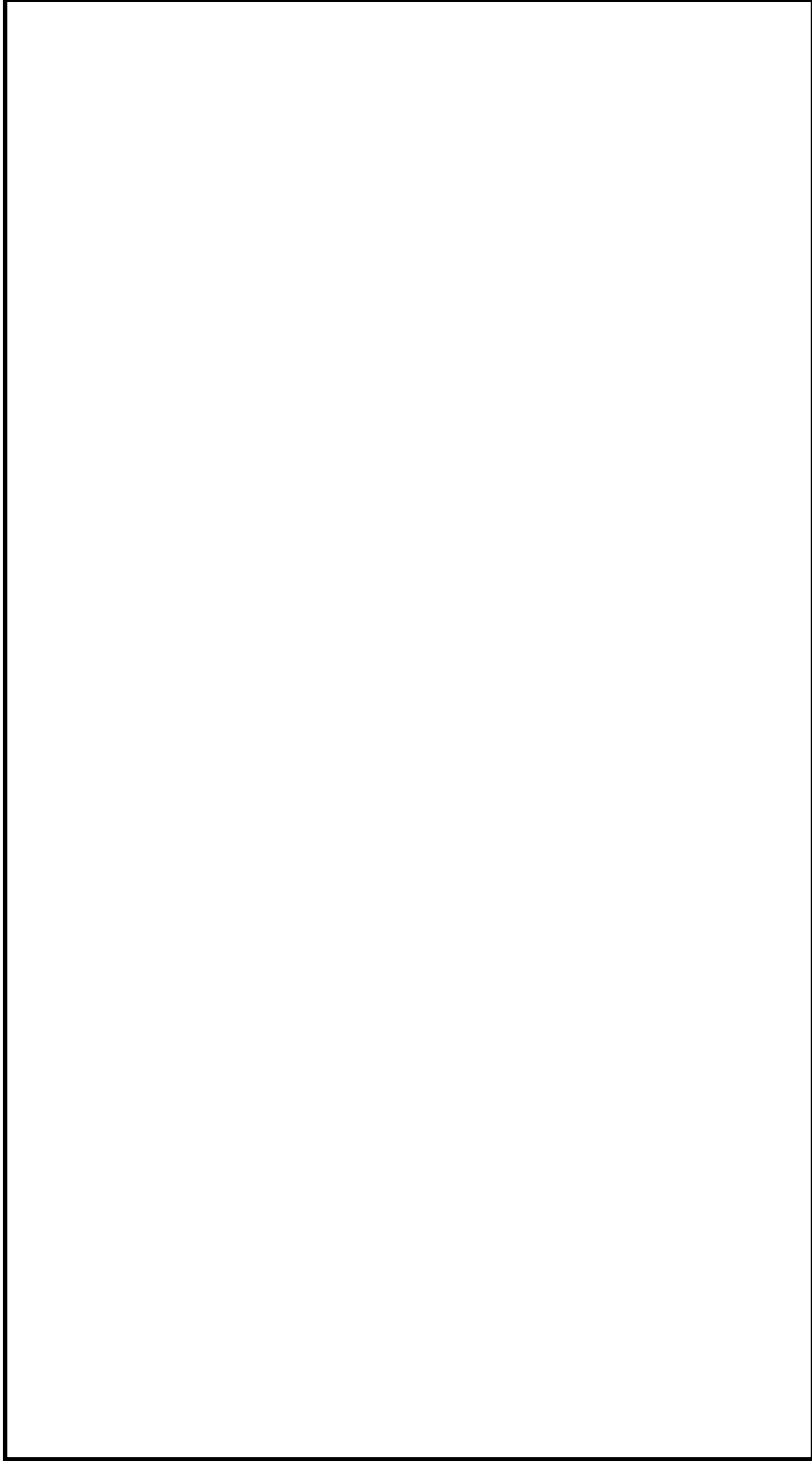


図 8 複素固有値解析 (減衰性能 3) における代表的振動モード (1 次)
(実固有値解析における 2 次モードに対応するモード)

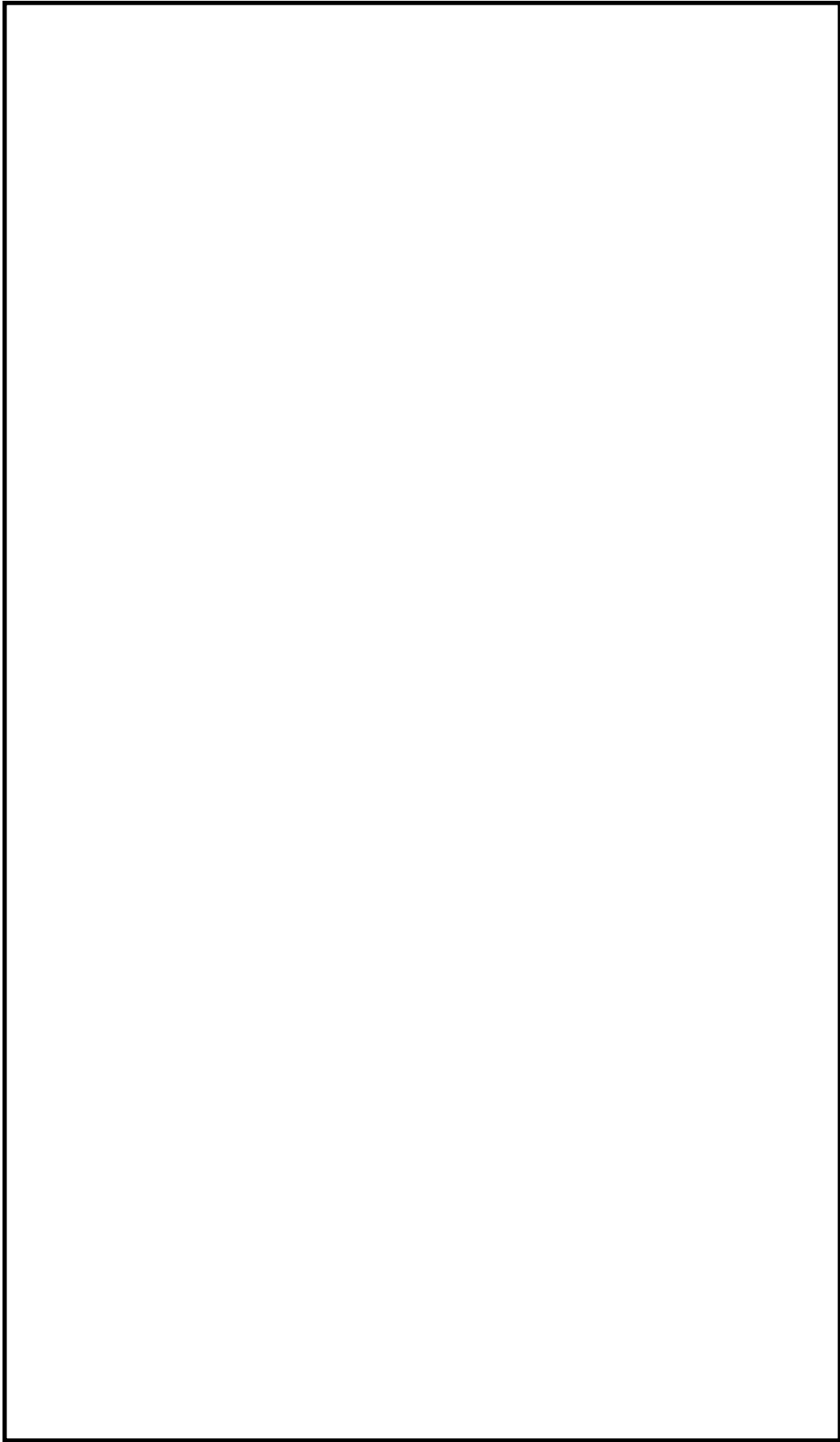


図9 複素固有値解析（減衰性能2）における代表的振動モード（2次）
（実固有値解析における1次モードに対応するモード）

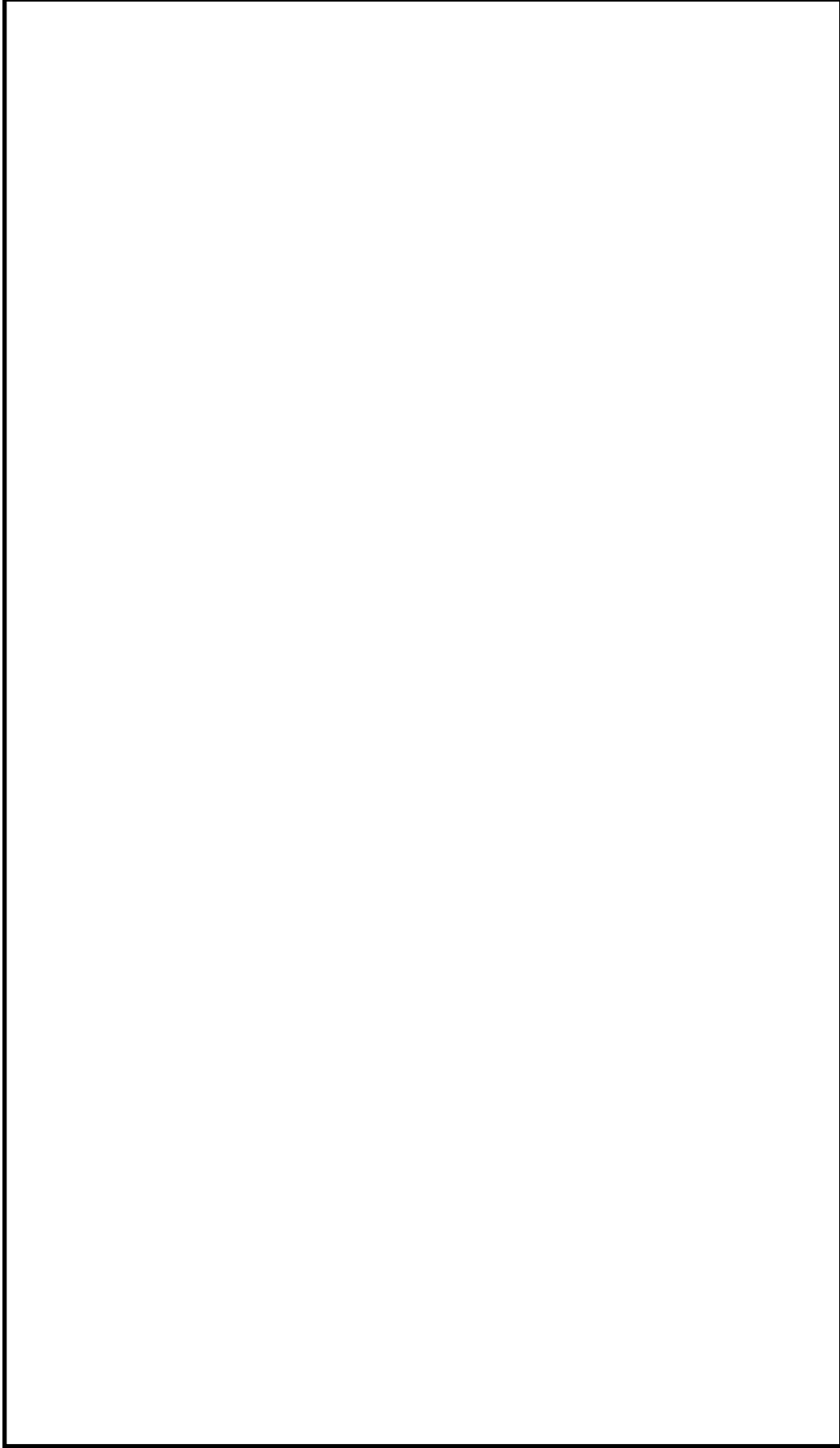


図 10 複素固有値解析 (減衰性能 2) における代表的振動モード (1 次)
(実固有値解析における 2 次モードに対応するモード)

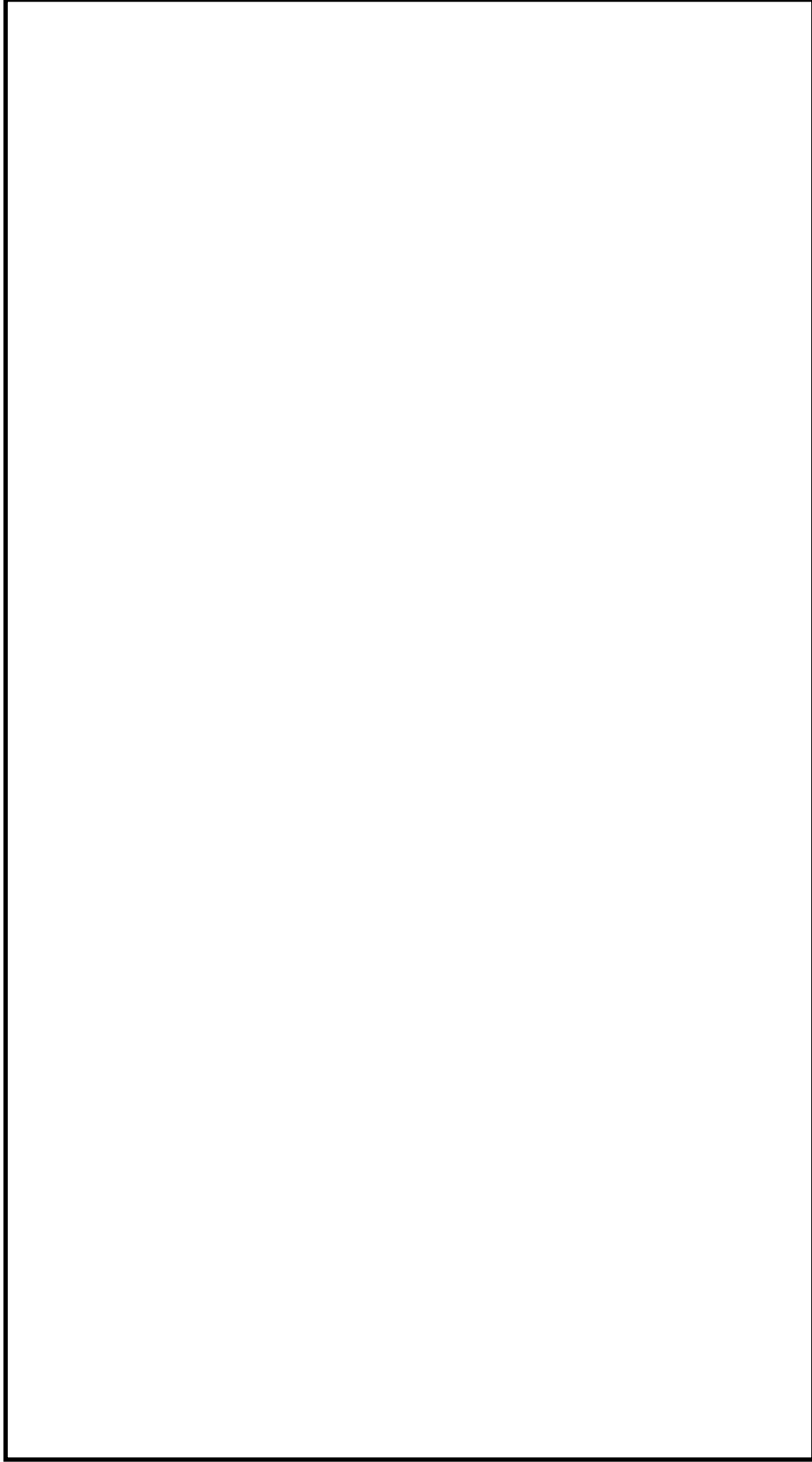


図 11 複素固有値解析 (減衰性能 1) における代表的振動モード (2 次)
(実固有値解析における 1 次モードに対応するモード)

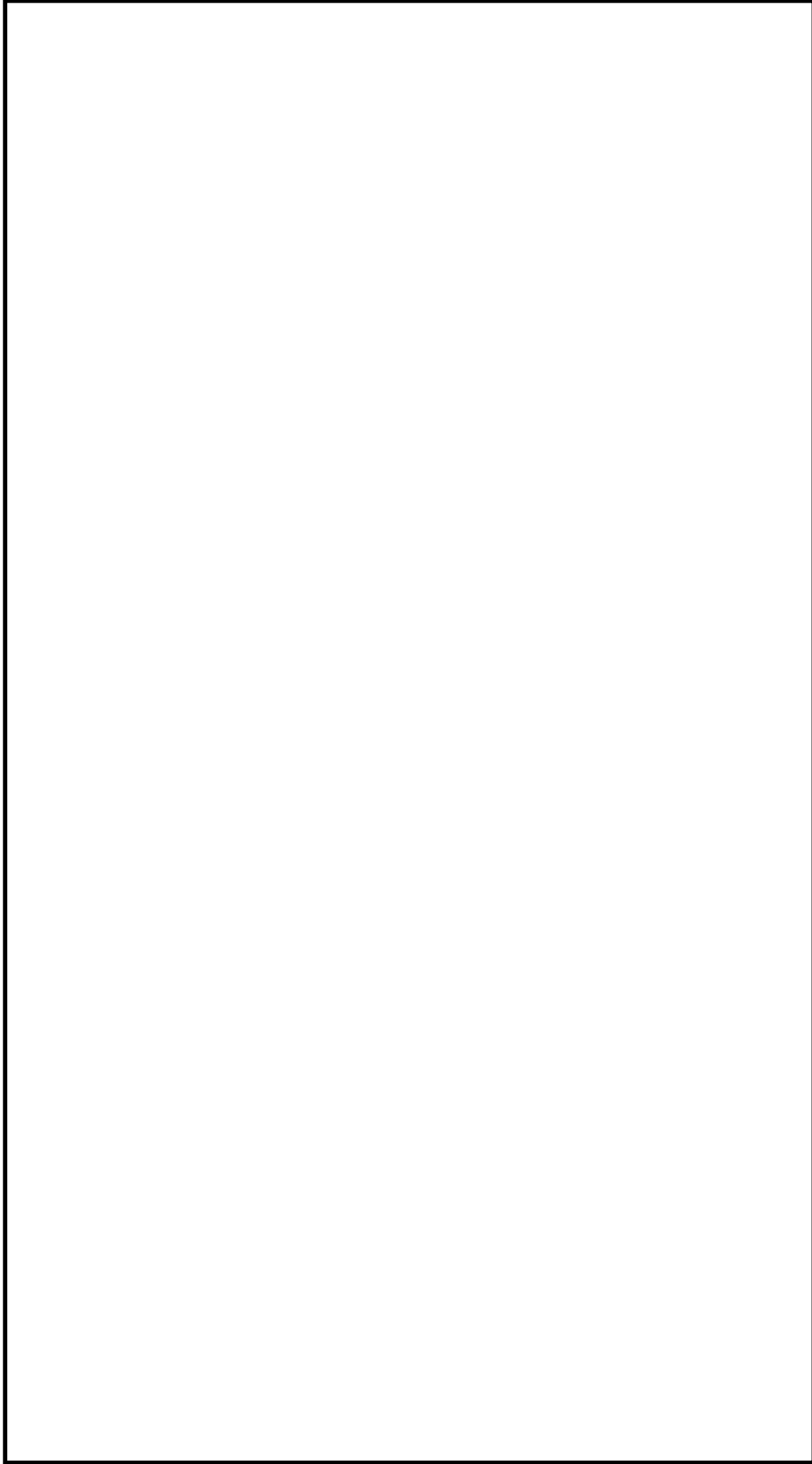


図 12 複素固有値解析 (減衰性能 1) における代表的振動モード (1 次)
(実固有値解析における 2 次モードに対応するモード)

主蒸気止め弁及び蒸気加減弁の解析モデルについて

主蒸気管における主蒸気止め弁と蒸気加減弁は、互いに接合された一連の構造物であり、主蒸気管の地震応答を実施するにあたって、当該構造物を解析モデル化し配管系の地震応答解析モデルに考慮している。図1に主蒸気止め弁と蒸気加減弁の全体概要を示し、図2に鳥観図上に主蒸気止め弁と、蒸気加減弁のモデル化範囲を着色で区分したものを示す。



図1 主蒸気止め弁及び蒸気加減弁の全体概要図

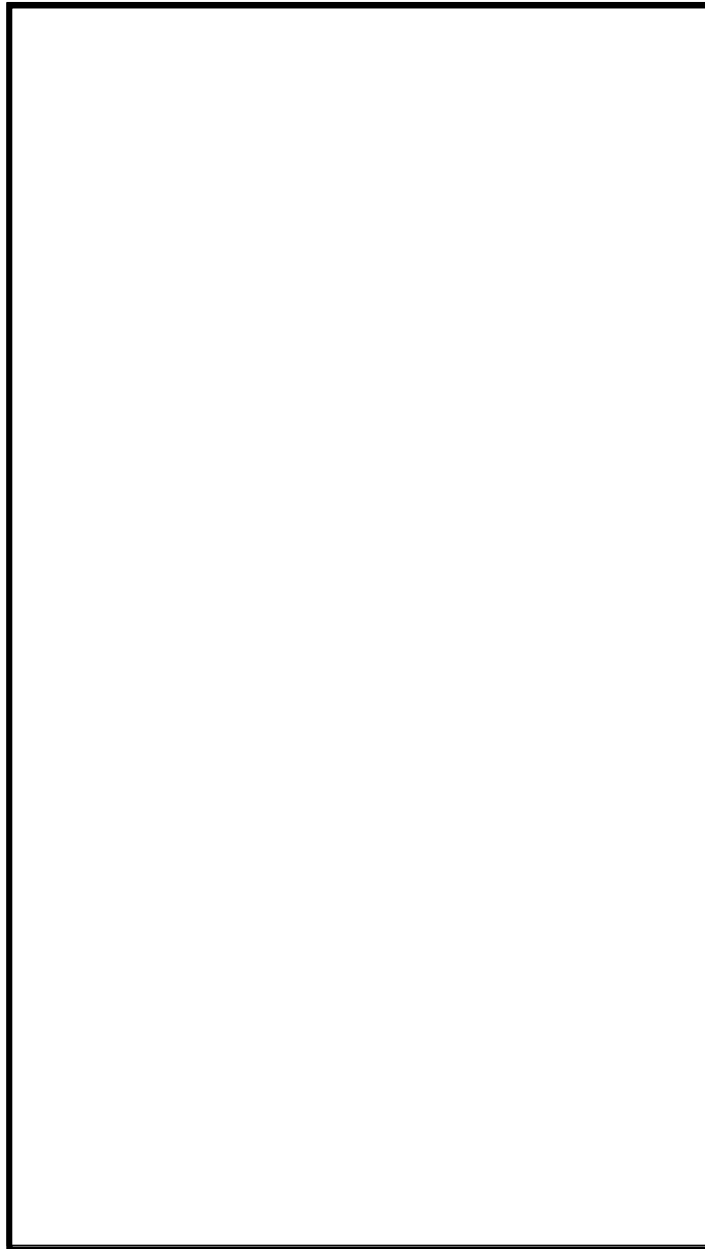


図2 主蒸気止め弁及び蒸気加減弁の鳥観図（解析モデル）

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	7
3.4	ロッドレストレイント	10
4.	支持装置の耐震設計	11
4.1	既工認における評価	11
4.2	支持装置の定格荷重	12
4.3	今回工認における評価	14
4.3.1	評価手順	14
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	16
4.3.3	既工認と今回工認の差異	19
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	21
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	26
5.1	評価部位及び評価項目の整理	27
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整理	67
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整理	71
5.3.1	耐力試験において確認された限界耐力値の概要	71
5.3.2	限界耐力値に対する定格荷重の裕度の整理	72
5.4	新規基準値の設定	75
6.	結論	82

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

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. 14 4.3.1 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. 14 4.3.1 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. 14 4.3.1 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. 12 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. 12 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. 21 4.3.4 今回工認における評価
12	動剛性	<ul style="list-style-type: none"> ・スナップ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. 23 4.3.4 支持装置の定格荷重
13	振動応答試験	<ul style="list-style-type: none"> ・スナップ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. 13 4.2 支持装置の定格荷重
14	過負荷振動試験	スナップを定格荷重×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. 13 4.2 支持装置の定格荷重
15	低速走行試験	スナップ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. 13 4.2 支持装置の定格荷重
16	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（電共研及び自社試験）（図 5-11 参照）	P. 72 5.3.1 耐力試験において確認された限界耐力に対する定格荷重の裕度の整理
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. 22 4.3.4 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"> ・スナッパ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. 1 1. はじめに
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. 22 4. 3. 4 今回工認における評価
20	ストローク	スナッパのピストンが移動できる限界長さ	P. 24 4. 3. 4 今回工認における評価
21	実際の耐力値	スナッパが実際の破損又は機能喪失に至る直前の耐力値	P. 72 5. 3. 1 耐力試験において確認された限界耐力に対する定格荷重の裕度の整理
22	耐力評価手法	JNES研究において策定されたスナッパの評価手法であり，電共研における限界耐力評価法に相当	P. 22 4. 3. 4 今回工認における評価
23	予想耐力	スナッパ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J E A G 4 6 0 1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パ全体での最小値	別紙 4-2 3. スナッパ限界耐力評価法の策定方針
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	別紙 4-29 4. 5. 1 予想耐力との比較等による破壊試験結果の考察

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 4-29 4.5.1 予想耐力との比較等による破壊試験結果の考察
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. 75 5.4 新規基準値の設定

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*1：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。

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いる。この特徴から、メカニカルスナッパはメンテナンス性及び耐放射線性に優れる。また、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

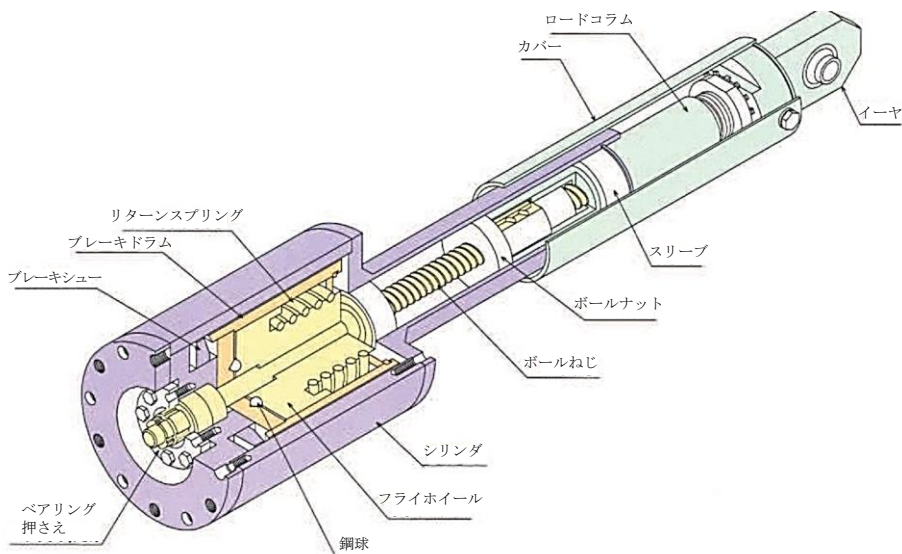


図 3-1 メカニカルスナッパの構造概要

(2) 作動原理

メカニカルスナップの作動原理の概要を図 3-2 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 3-3 に示す。メカニカルスナップの作動原理は、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

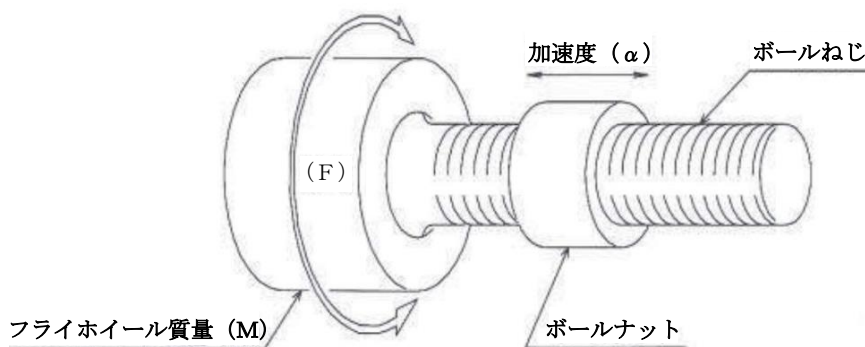


図 3-2 メカニカルスナップの作動原理

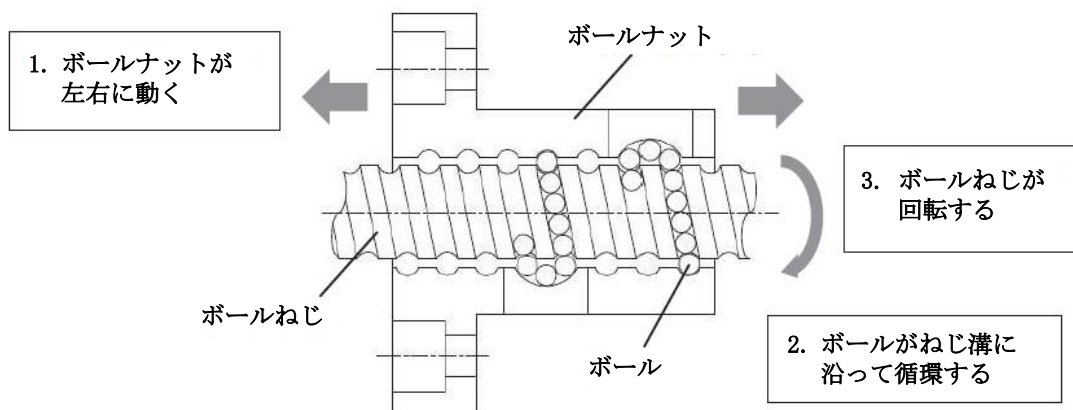


図 3-3 ボールねじ及びボールナット部の概要図

また、メカニカルスナップの動作の様子を図 3-4 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。

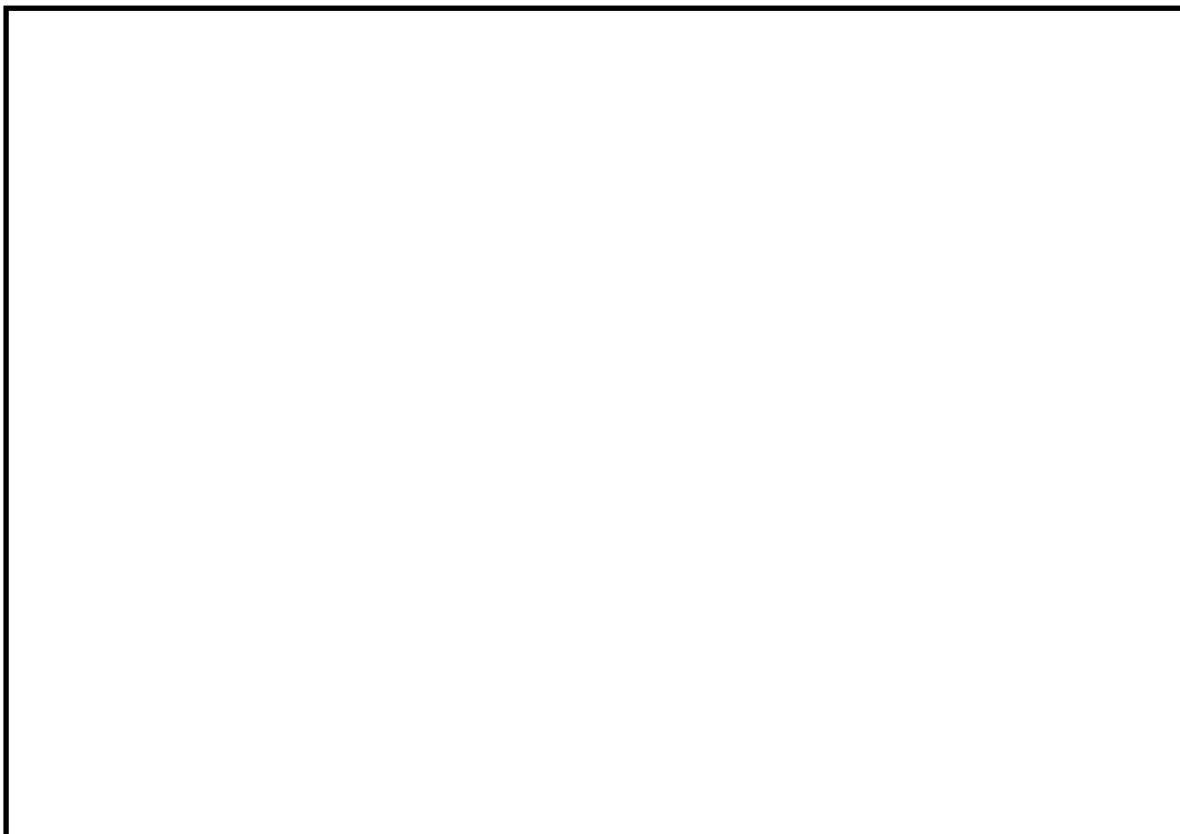


図 3-4 メカニカルスナップの動作の様子

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3-5にオイルスナッパの構造概要を示す。

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。

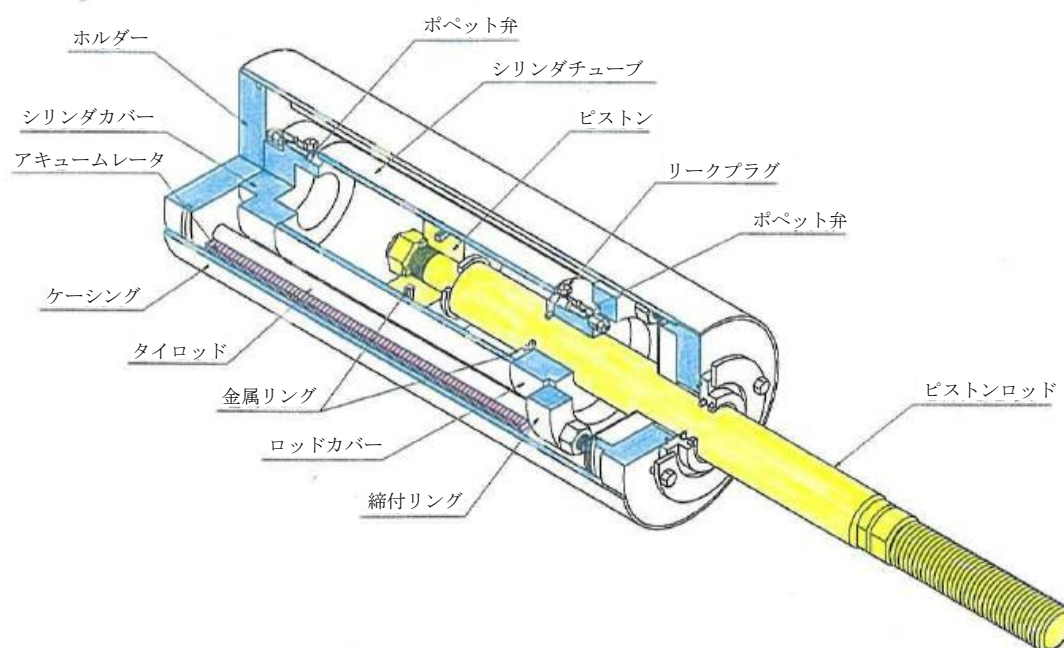


図3-5 オイルスナッパの構造概要

(2) 作動原理

オイルスナップの作動原理の概要を図 3-6 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 3-7 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 3-7 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。

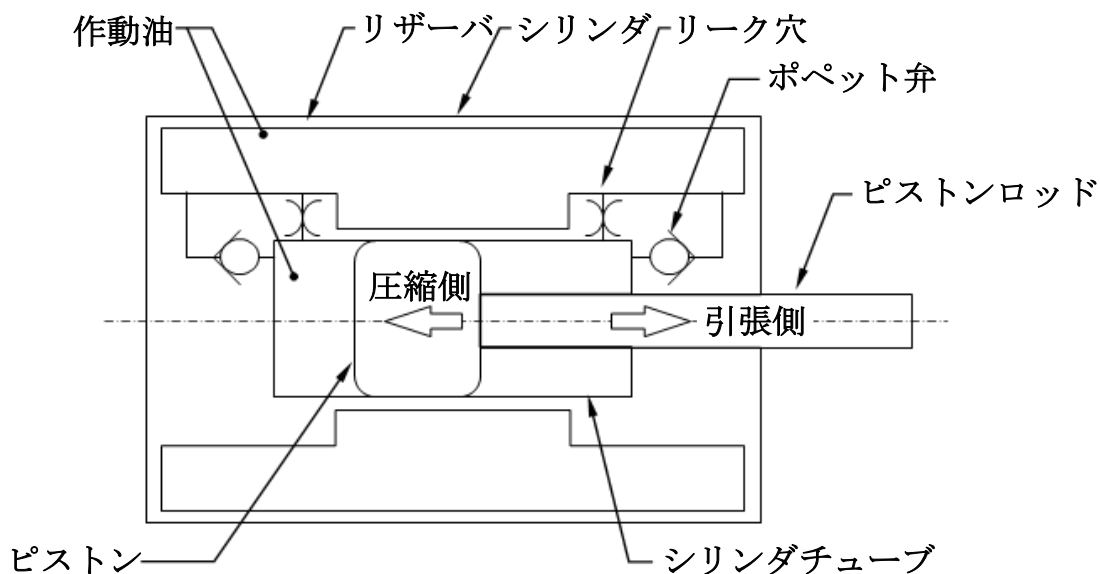


図 3-6 オイルスナップの作動原理

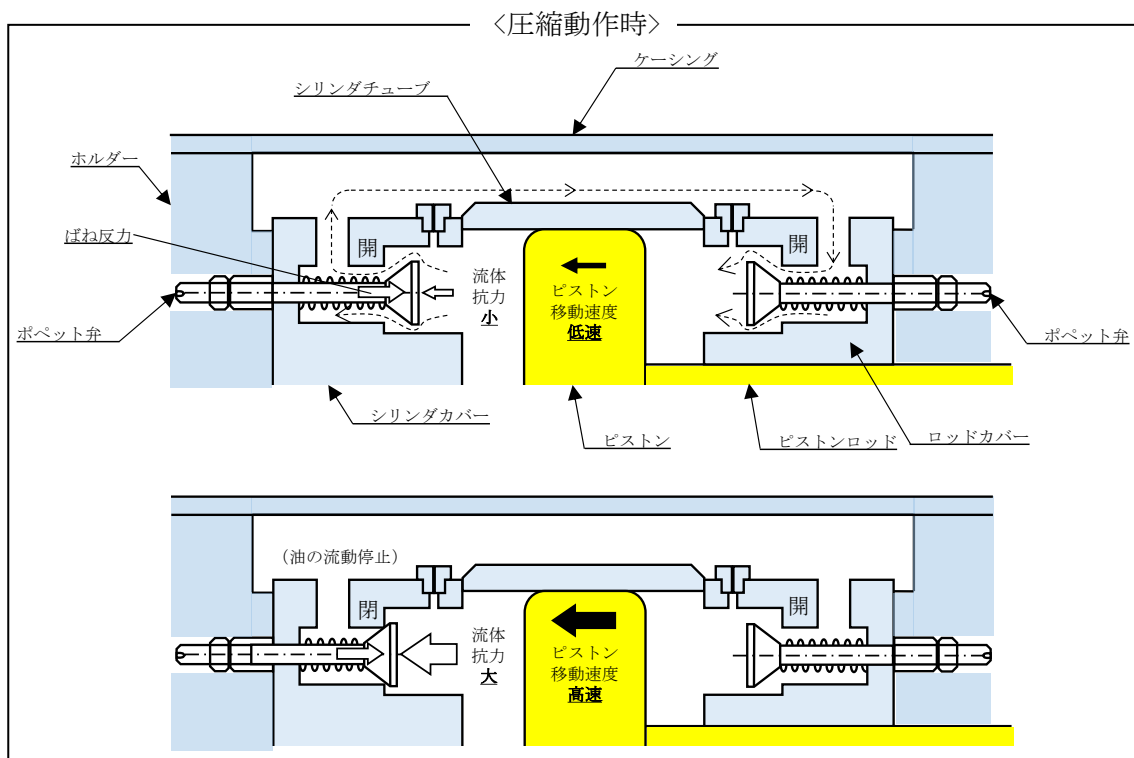
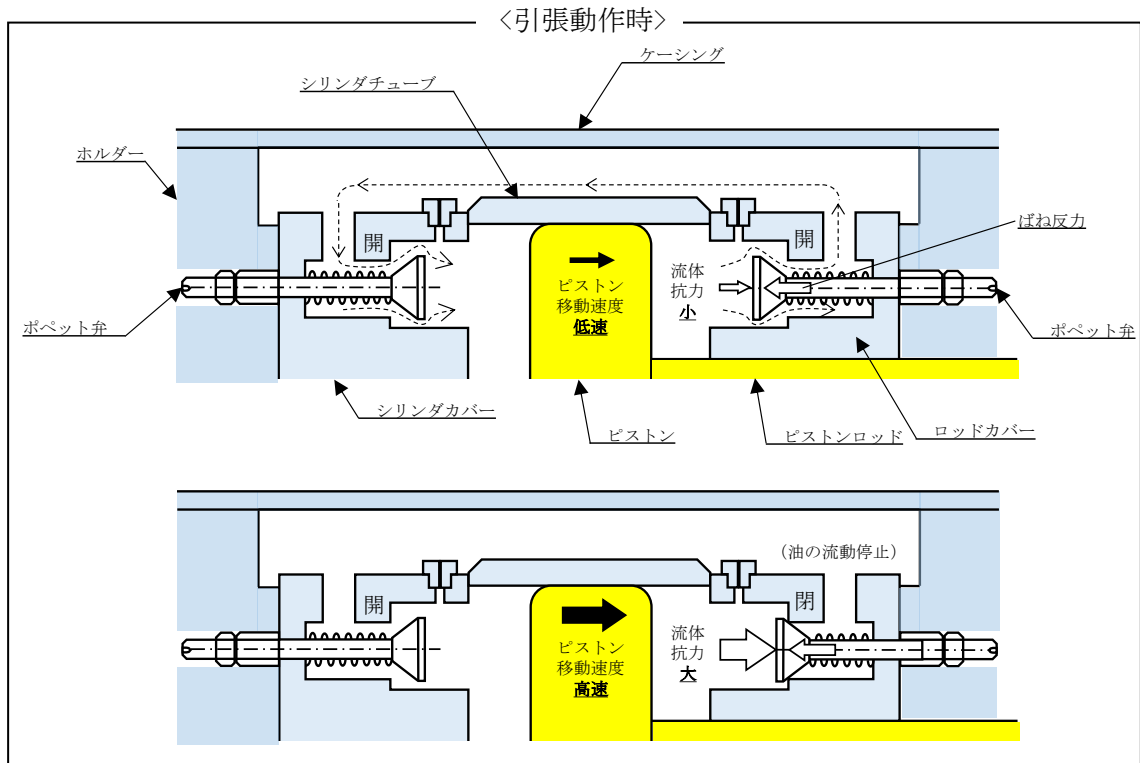


図 3-7 シリンダ内におけるピストンロッド及びポペット弁の概要図

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3-8にロッドレストレイントの構造概要を示す。

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。

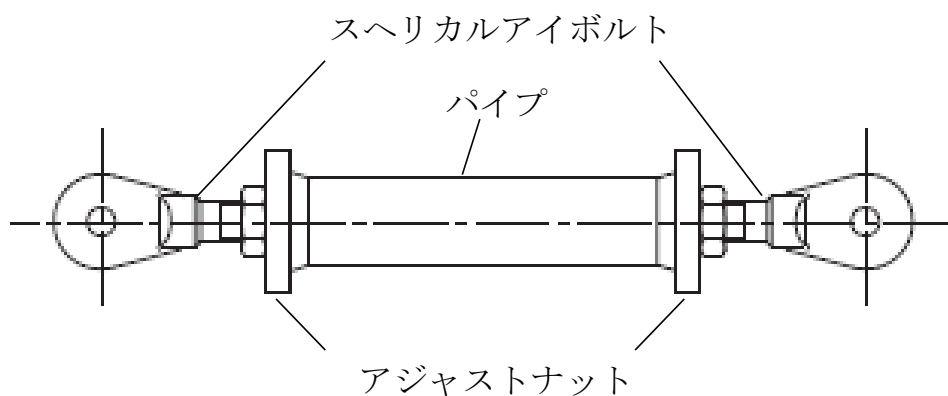


図3-8 ロッドレストレイントの構造概要

4. 支持装置の耐震設計

4.1 既工認における評価

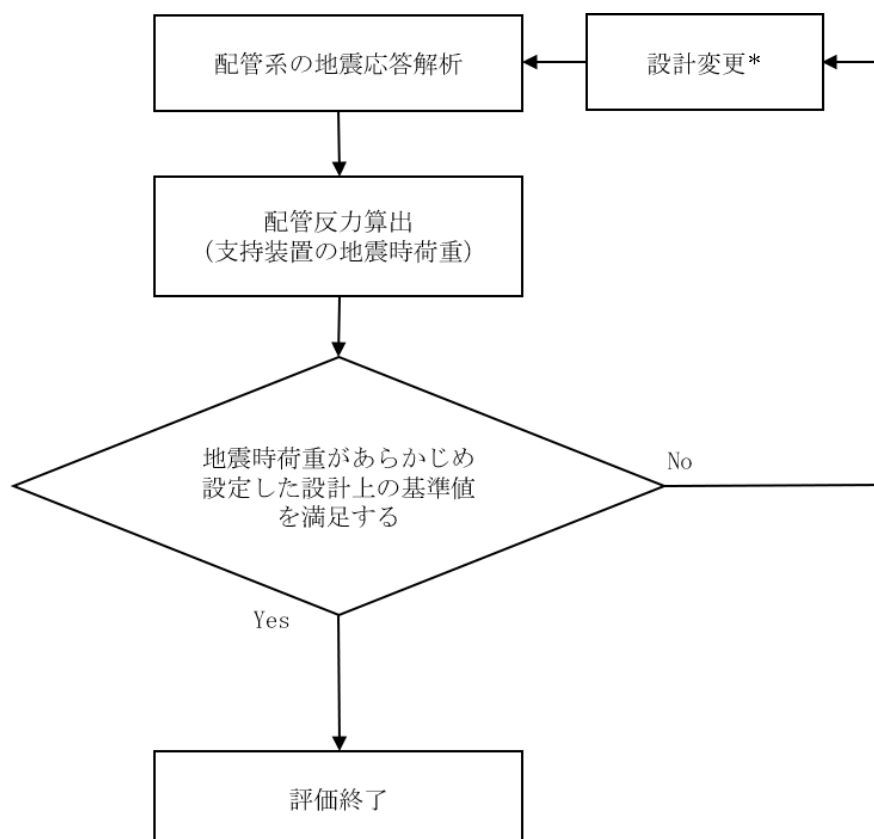
既工認における支持装置の評価手順を図 4-1 に示す。

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、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整理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：

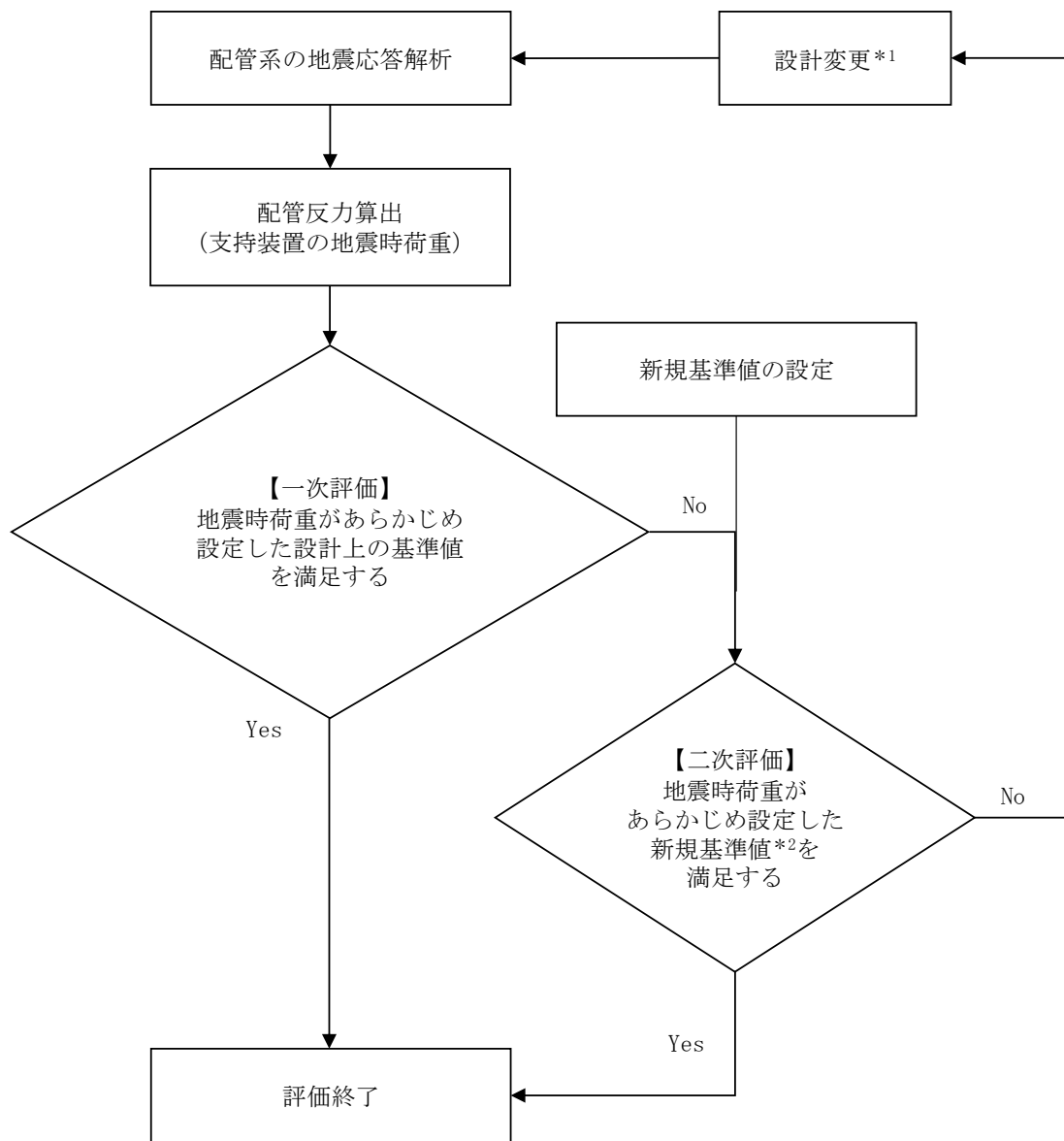
荷重伝達経路を踏まえて整理した評価部位及び評価項目について、J E A G 4 6 0 1に規定の許容限界値に対する定格荷重の裕度の最小値以下となる新規耐力係数を設定し、定格荷重に乗ることにより、新規基準値を設定する。

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」

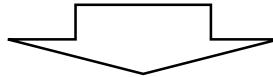
J E A G 4 6 0 1

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。

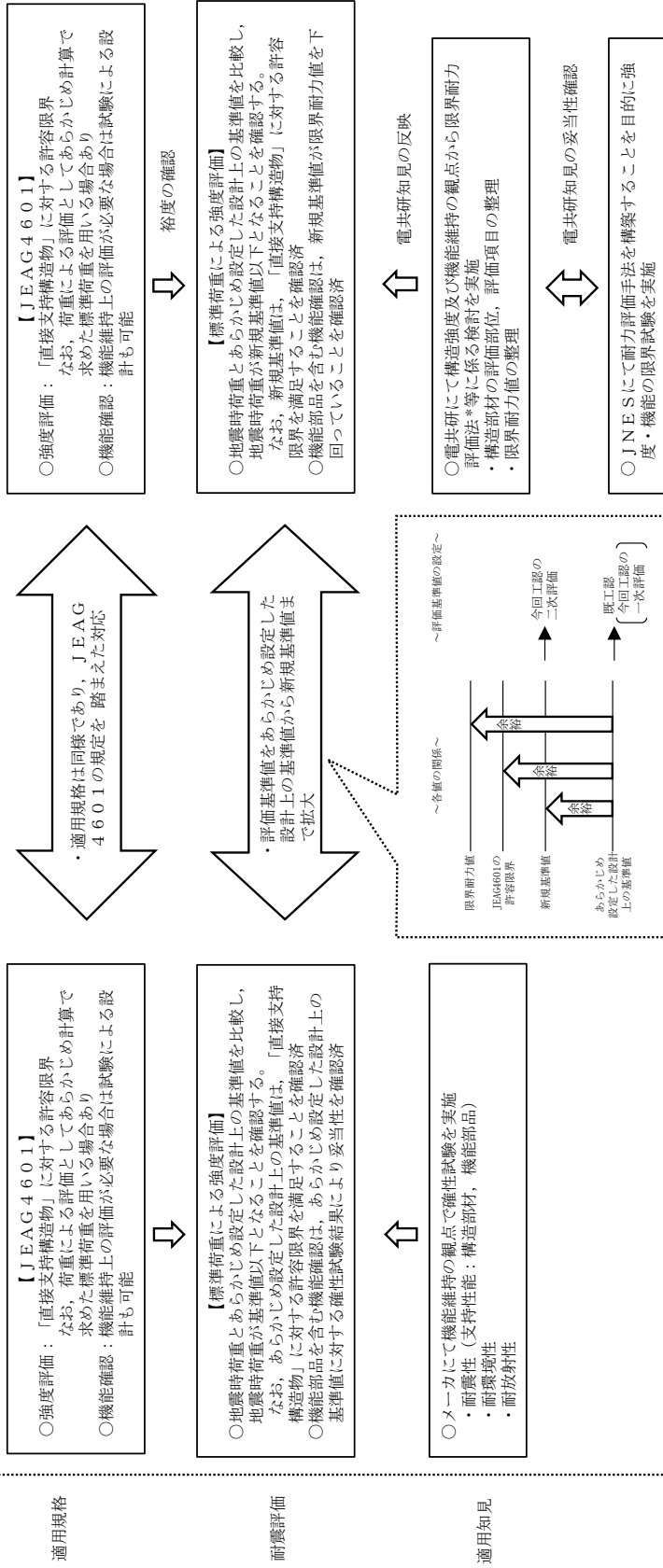
既工認では、即座に設計変更へ移行することに対して、今回工認においては、あらかじめ設定した設計上の基準値に余裕があること及び耐力試験において確認された限界耐力値を踏まえて、新規基準値による二次評価を適用し、支持装置の耐震性を確認することである。なお、二次評価を満足しない場合は、設計変更を行う。

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 / IV A 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）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)
リリース試験 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。メカニカルスナッパにおいてはリリース試験、オイルスナッパ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	<p>相違なし(具体的には以下基準を満足すること)</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="2">・メカニカルスナップ</th> <th colspan="2">・オイルスナップ</th> </tr> <tr> <th>型式</th> <th>動剛性 (kgf/mm)</th> <th>型式</th> <th>動剛性 (kgf/mm)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>SMS-03</td> <td rowspan="5"></td> <td>SHP-03</td> <td rowspan="6"></td> </tr> <tr> <td>SMS-1</td> <td>SHP-3</td> </tr> <tr> <td>SMS-3</td> <td>SHP-16</td> </tr> <tr> <td>SMS-6</td> <td>SN-03</td> </tr> <tr> <td>SMS-10</td> <td>SN-3</td> </tr> <tr> <td></td> <td>SN-6</td> </tr> <tr> <td></td> <td></td> <td>SN-16</td> </tr> </tbody> </table>	・メカニカルスナップ		・オイルスナップ		型式	動剛性 (kgf/mm)	型式	動剛性 (kgf/mm)	SMS-03		SHP-03		SMS-1	SHP-3	SMS-3	SHP-16	SMS-6	SN-03	SMS-10	SN-3		SN-6			SN-16
・メカニカルスナップ		・オイルスナップ																										
型式	動剛性 (kgf/mm)	型式	動剛性 (kgf/mm)																									
SMS-03		SHP-03																										
SMS-1		SHP-3																										
SMS-3		SHP-16																										
SMS-6		SN-03																										
SMS-10		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	<p>相違なし(具体的には以下基準を満足すること)</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="2">・メカニカルスナップ</th> <th colspan="2">・オイルスナップ</th> </tr> <tr> <th>型式</th> <th>抵抗力 (kgf)</th> <th>型式</th> <th>抵抗力 (kgf)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>SMS-03</td> <td rowspan="5"></td> <td>SHP-03</td> <td rowspan="6"></td> </tr> <tr> <td>SMS-1</td> <td>SHP-3</td> </tr> <tr> <td>SMS-3</td> <td>SHP-16</td> </tr> <tr> <td>SMS-6</td> <td>SN-03</td> </tr> <tr> <td>SMS-10</td> <td>SN-3</td> </tr> <tr> <td></td> <td>SN-6</td> </tr> <tr> <td></td> <td></td> <td>SN-16</td> </tr> </tbody> </table>	・メカニカルスナップ		・オイルスナップ		型式	抵抗力 (kgf)	型式	抵抗力 (kgf)	SMS-03		SHP-03		SMS-1	SHP-3	SMS-3	SHP-16	SMS-6	SN-03	SMS-10	SN-3		SN-6			SN-16
・メカニカルスナップ		・オイルスナップ																										
型式	抵抗力 (kgf)	型式	抵抗力 (kgf)																									
SMS-03		SHP-03																										
SMS-1		SHP-3																										
SMS-3		SHP-16																										
SMS-6		SN-03																										
SMS-10		SN-3																										
	SN-6																											
		SN-16																										

注記* : 用語の定義 No. 20 参照

表 4-6 電共研と J N E S 研究における限界耐力値の比較

型式	定格荷重 (kN)	電共研				J N E S 研究				J N E S 研究 耐力値/電共 研限界耐力値
		耐力確認荷重 (kN)	限界耐力値 (kN)	最小裕度部品	最小裕度部品の分類	耐力確認荷重 (kN)	耐力値 (kN)	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 チューブ	構造部材	—	—	—	—	—
SMS-3	30	94.2	75.3	アンギュラー 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	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

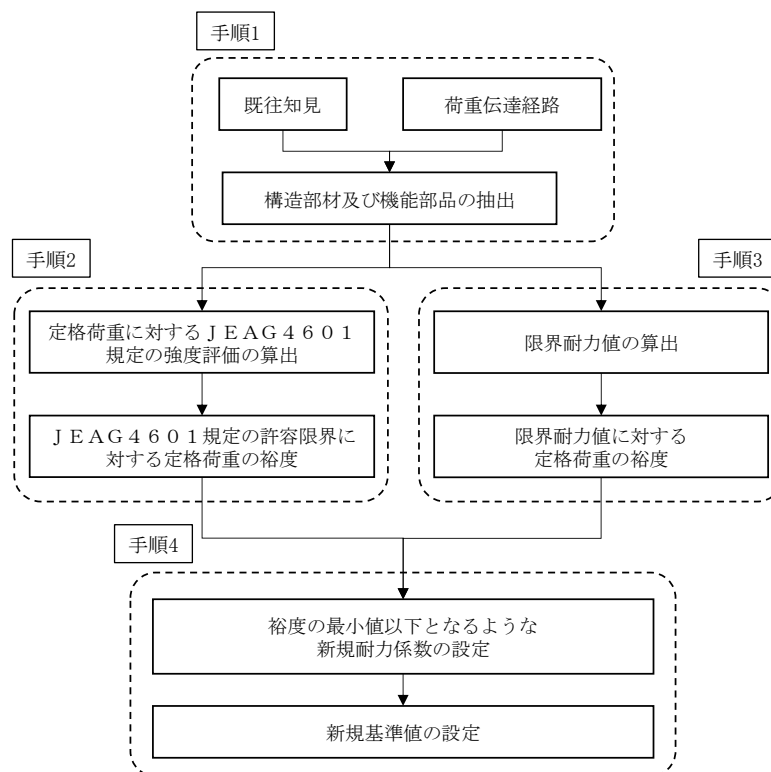
構造部材の評価部位及び評価項目について、定格荷重を用いてJEAG4601に規定の強度評価を実施しJEAG4601に規定の許容応力に対する発生応力の裕度を算出する。

・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

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整理し、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

整理した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整理

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研究を踏まえて整理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整理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整理した。整理内容の概要を表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	スナッパ歪屈 シール性喪失 ^{*3} ポベット弁機能喪失 ^{*2}
メカニカル スナッパ	地震後の作動と性能確保	低速走行抵抗力増大	構造部材の損傷	構造部材変形 ^{*4}
			機能部品の損傷	ポベット弁機能喪失 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	スナッパ歪屈 ボールネジ機能喪失 ^{*5} ブレーキドラム機能喪失
メカニカル スナッパ	地震後の作動と性能確保	低速走行抵抗力増大	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 ^{*3}
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歪屈

注記 * 1 : 各支持装置の構造部材の強度評価。

* 2 : ポ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、地震時にはポ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一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整理内容の概要

項目	対象	評価部位の整理方法	評価項目の整理方法
強度評価	構造部材	支持装置の各部を、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整理し、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パ

a. 構造及び荷重伝達経路

SMS 型メカニカルスナッパ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。

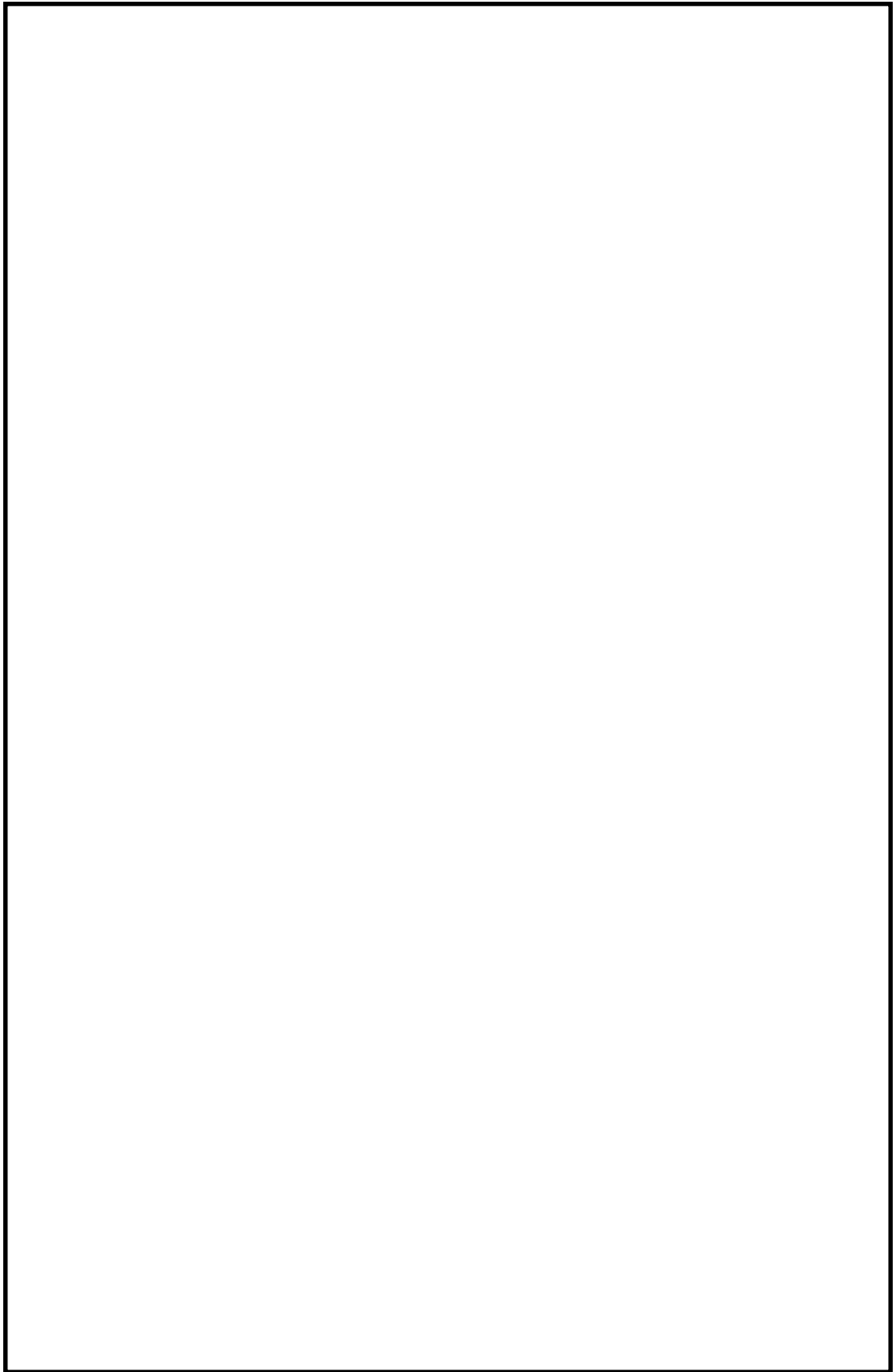


図 5-1 SMS 型メカニカルスナップの構造及び荷重伝達経路

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整理結果を表 5-4 に示す。

この整理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。

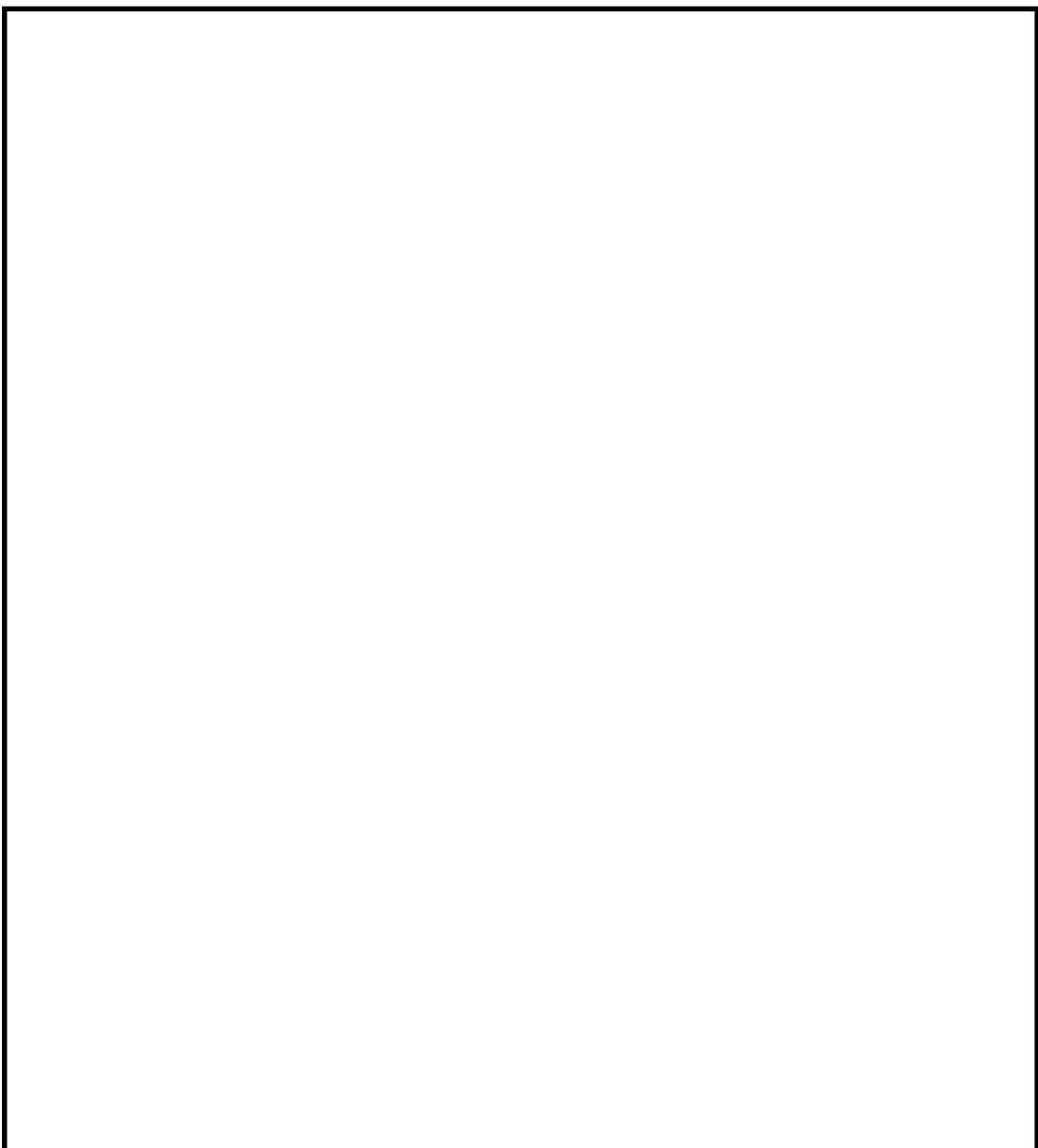


図 5-2 SMS 型メカニカルスナップの強度評価部位

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

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)

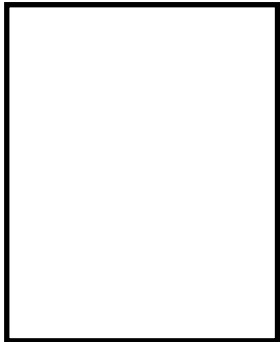
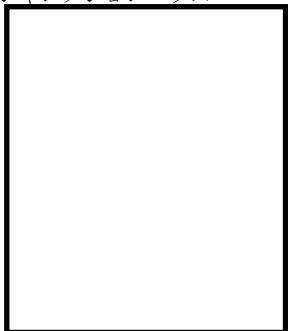


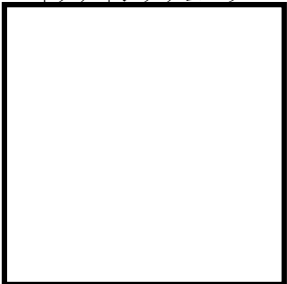
品番	評価部位	評価項目	今回 工認	既工認	評価項目の相違及び 評価項目追加根拠
①	ブラケット 	穴部引張	○	○	相違なし
		穴部せん断	○	○	相違なし
		穴部支圧	○	○	相違なし
②	ジャンクションコラム 	ボルト引張	○	○	相違なし
		溶接部引張	○	○	相違なし
		溶接部せん断	○	○	相違なし
		コラム引張	○	—	基本的に溶接部評価の方が厳しいが、評価項目の網羅性のため追加
③	ロードコラム 	引張	○	○	相違なし
		ねじ部せん断 (部品全体)	○	—	基本的に引張応力評価の方が厳しいが、評価項目の網羅性のため追加
		ねじ部せん断 (ねじ山)	○	—	
④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

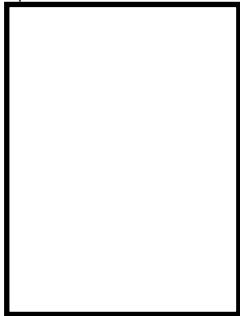

表 5-5 SMS 型メカニカルスナッパの
構造部材に対する評価項目の比較及び追加根拠 (2/4)

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プの
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。

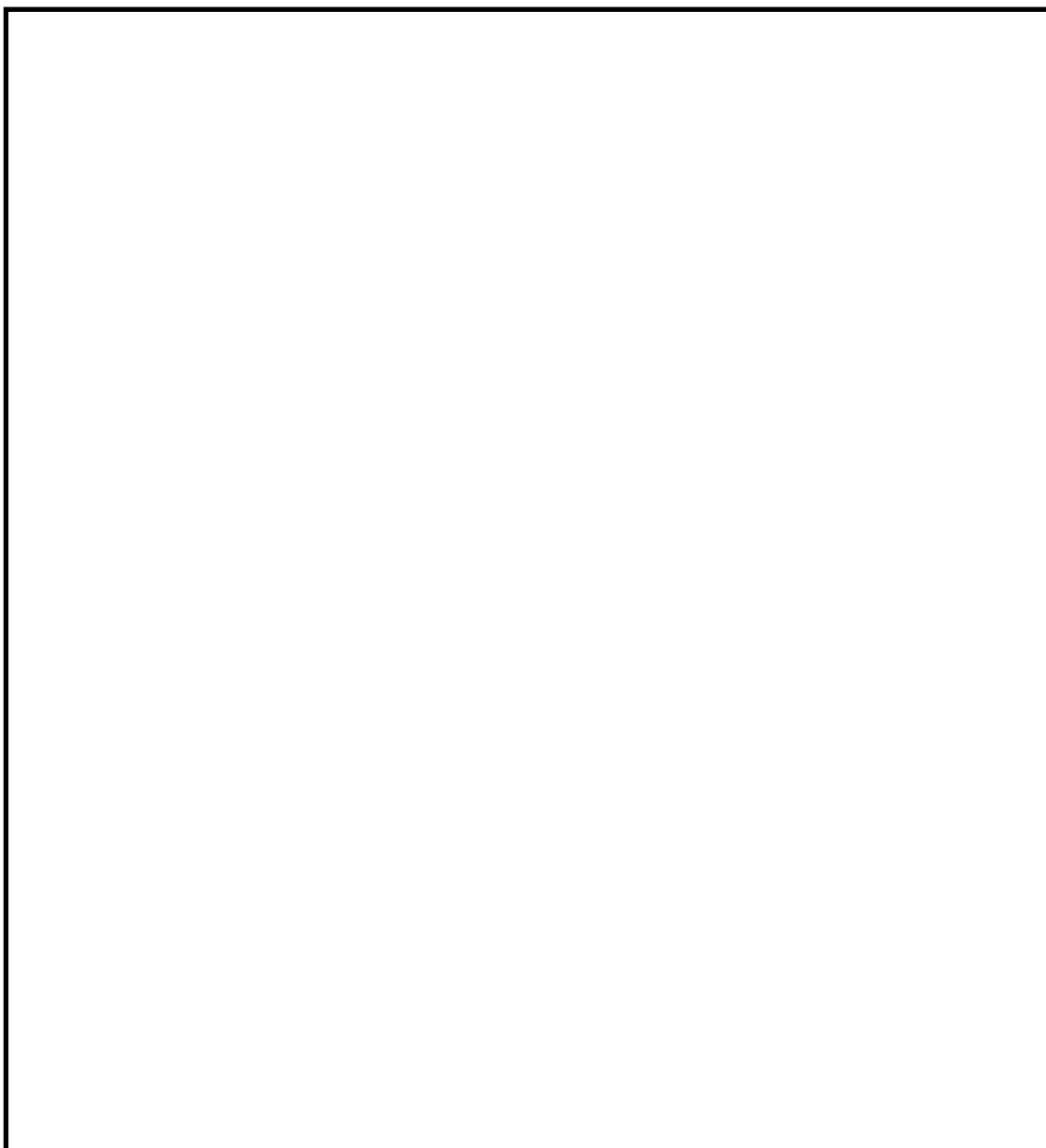


図 5-3 SHP 型オイルスナッパの構造及び荷重伝達経路(1/2)

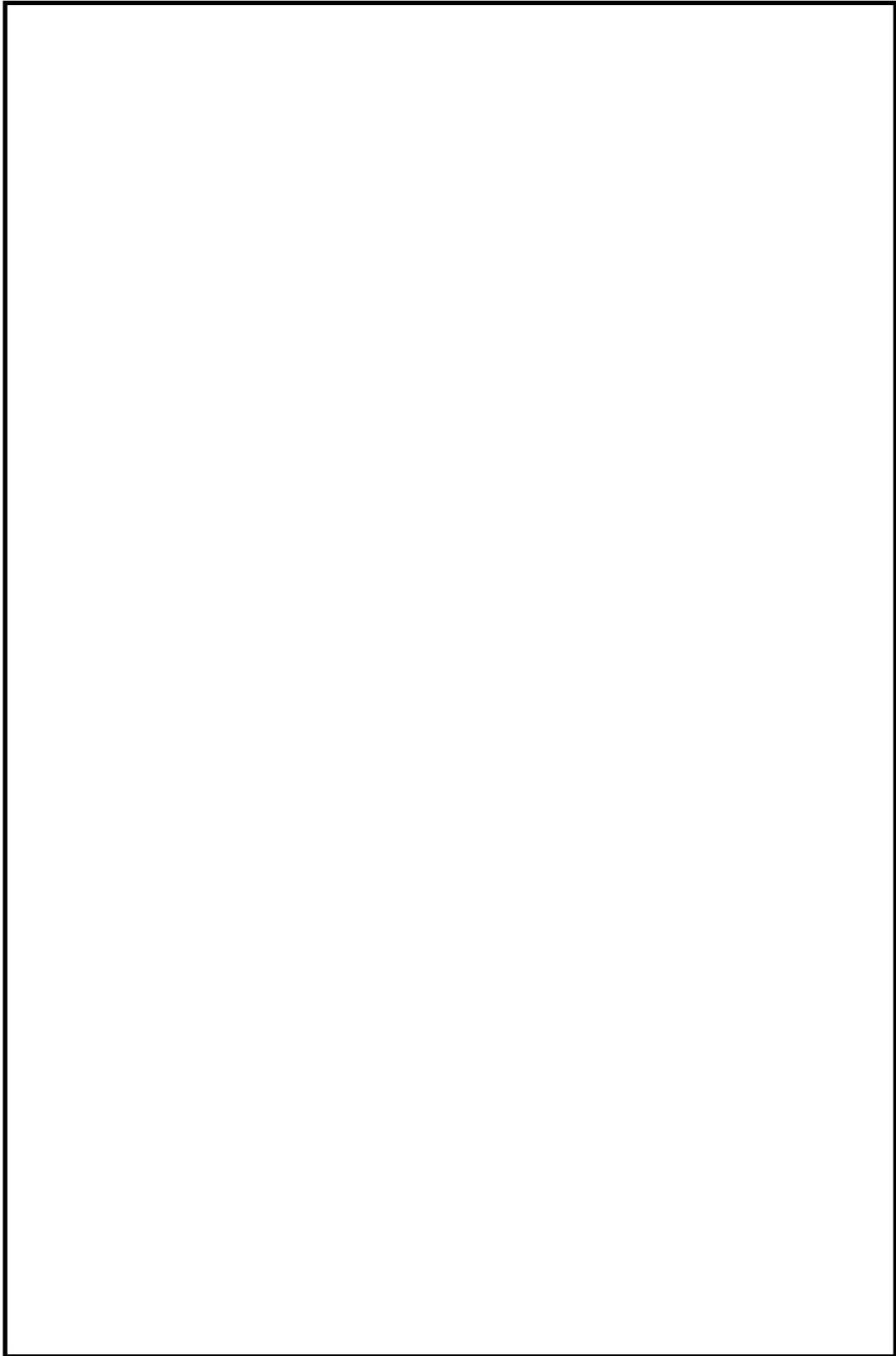


図 5-3 SHP 型オイルスナップの構造及び荷重伝達経路 (2/2)

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整理結果を表 5-7 に示す。

この整理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)

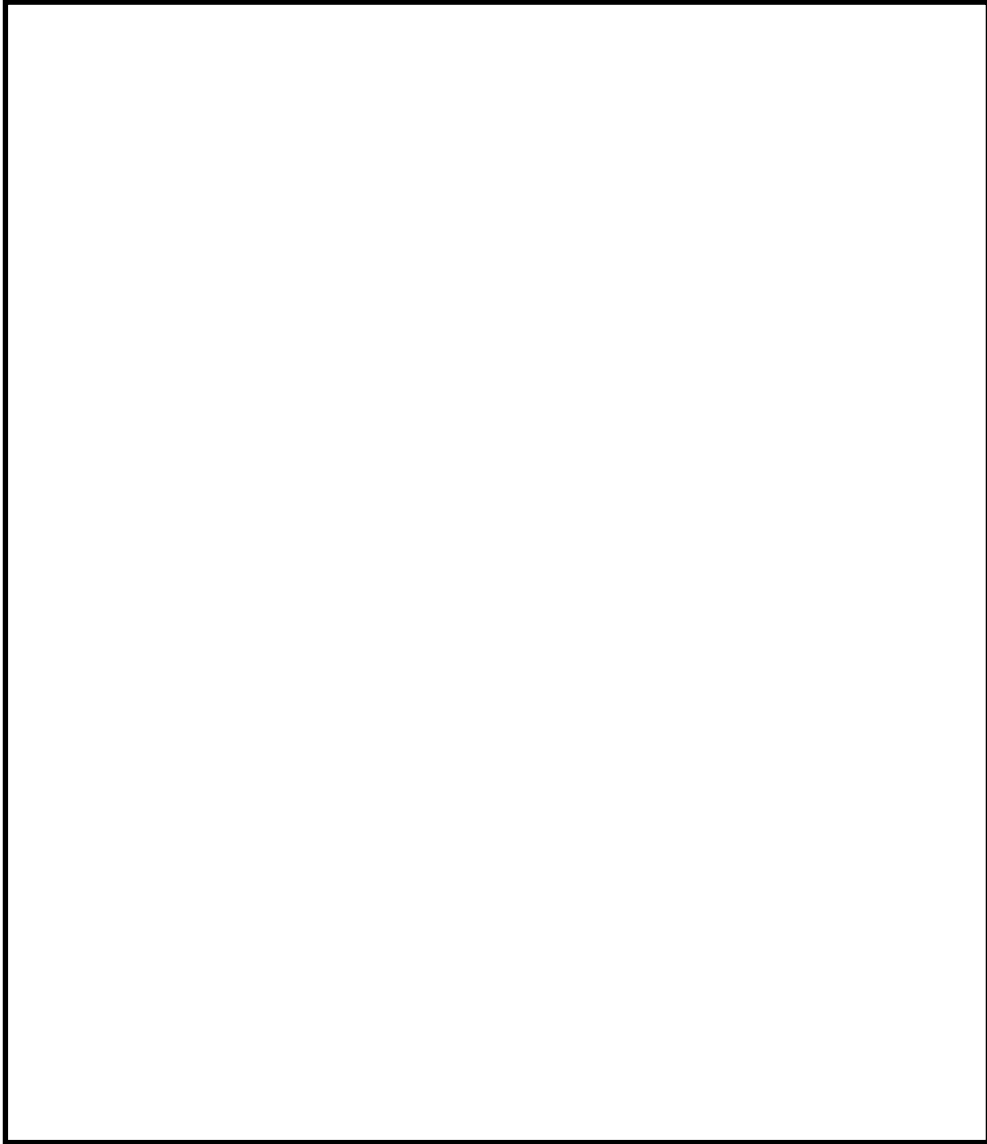


図 5-4 SHP 型オイルスナップの強度評価部位 (2/2)

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

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)

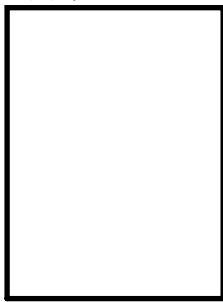


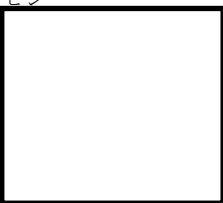

品番	評価部位	評価項目	今回 工認	既工認	評価項目の相違及び 評価項目追加根拠
①	ブラケット 	穴部引張	○	○	相違なし
		穴部せん断	○	○	相違なし
		穴部支圧	○	○	相違なし
②	ピストンロッド 	ロッド部引張	○	○	相違なし
		ねじ部引張	○	—	基本的にロッド部の評価の方が 厳しいが、評価項目の網羅性の ため追加
③	コネクティングパイプ 	パイプ部圧縮	○	○	相違なし
		穴部引張	○	—	発生荷重の増大に伴い、電共研 及び J N E S 研究の知見を採用 して評価項目の網羅性のため追 加
		穴部せん断	○	—	
		穴部支圧	○	—	
溶接部せん断	○	—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


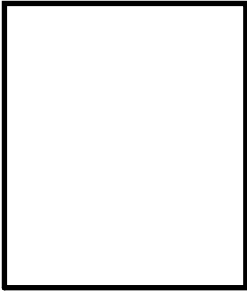
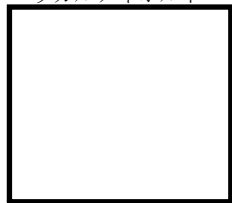



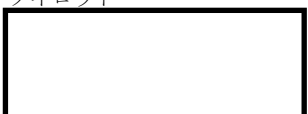
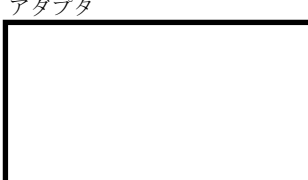

品番	評価部位	評価項目	今回 工認	既工認	評価項目の相違及び 評価項目追加根拠
⑥	六角ボルト 	引張	○	○	相違なし
⑦	イーヤ 	穴部引張	○	○	相違なし
		穴部せん断	○	○	相違なし
		穴部支圧	○	○	相違なし
		溶接部せん断	○	○	相違なし
⑧	スヘリカルアイボルト 	穴部引張	○	○	相違なし
		穴部せん断	○	○	相違なし
		穴部支圧	○	○	相違なし
		ボルト部引張	○	○	相違なし
⑨ ⑩	コンロッド (Bタイプ) コンロッド (Cタイプ) 	ロッド部引張	○	○	相違なし
		溶接部せん断	○	○	相違なし
		穴部引張	○	—	基本的にロッド部評価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

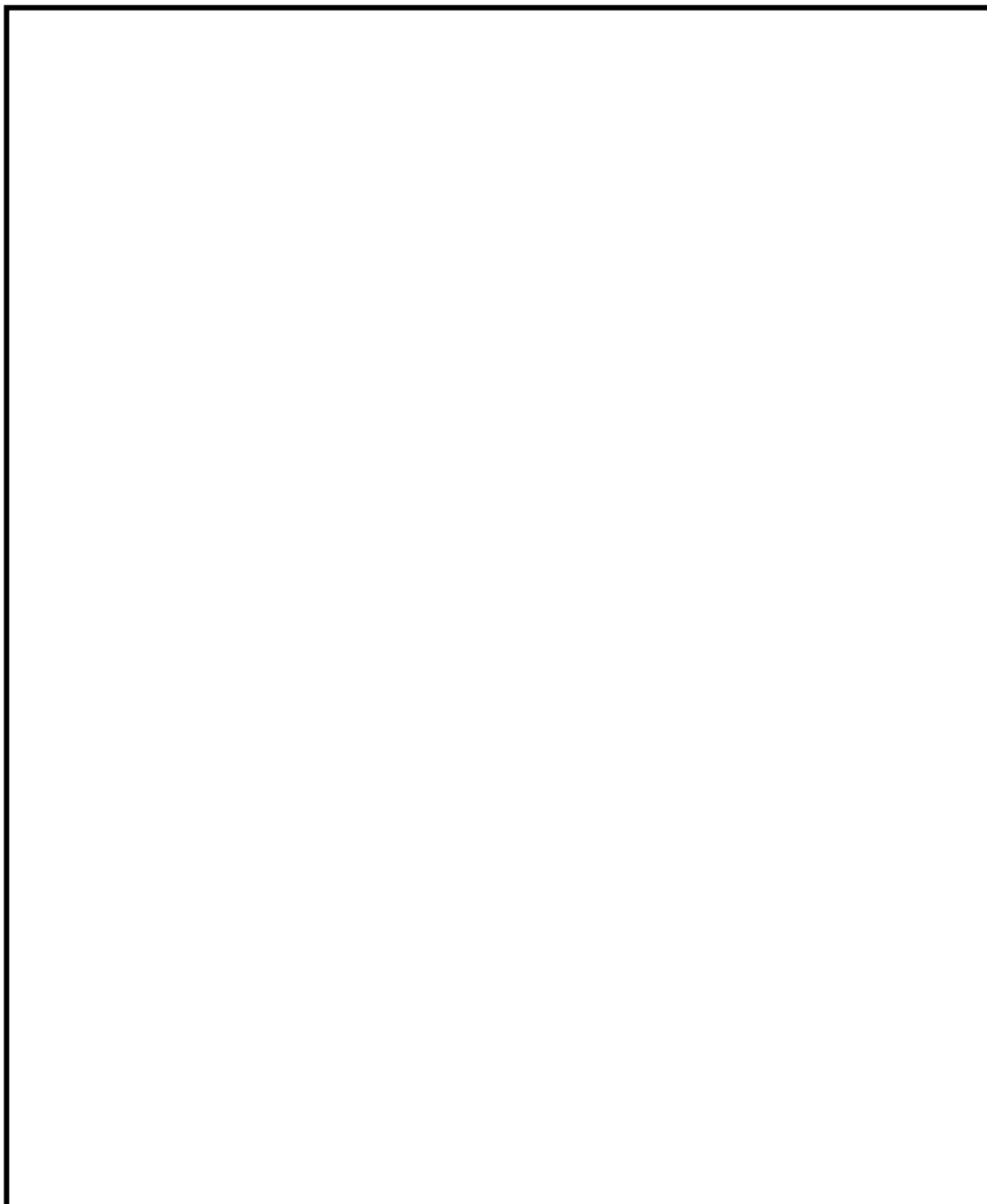


図 5-5 SN 型オイルスナッパの構造及び荷重伝達経路

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整理結果を表 5-10 に示す。

この整理結果にしたがって設定した SN 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 5-11 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。

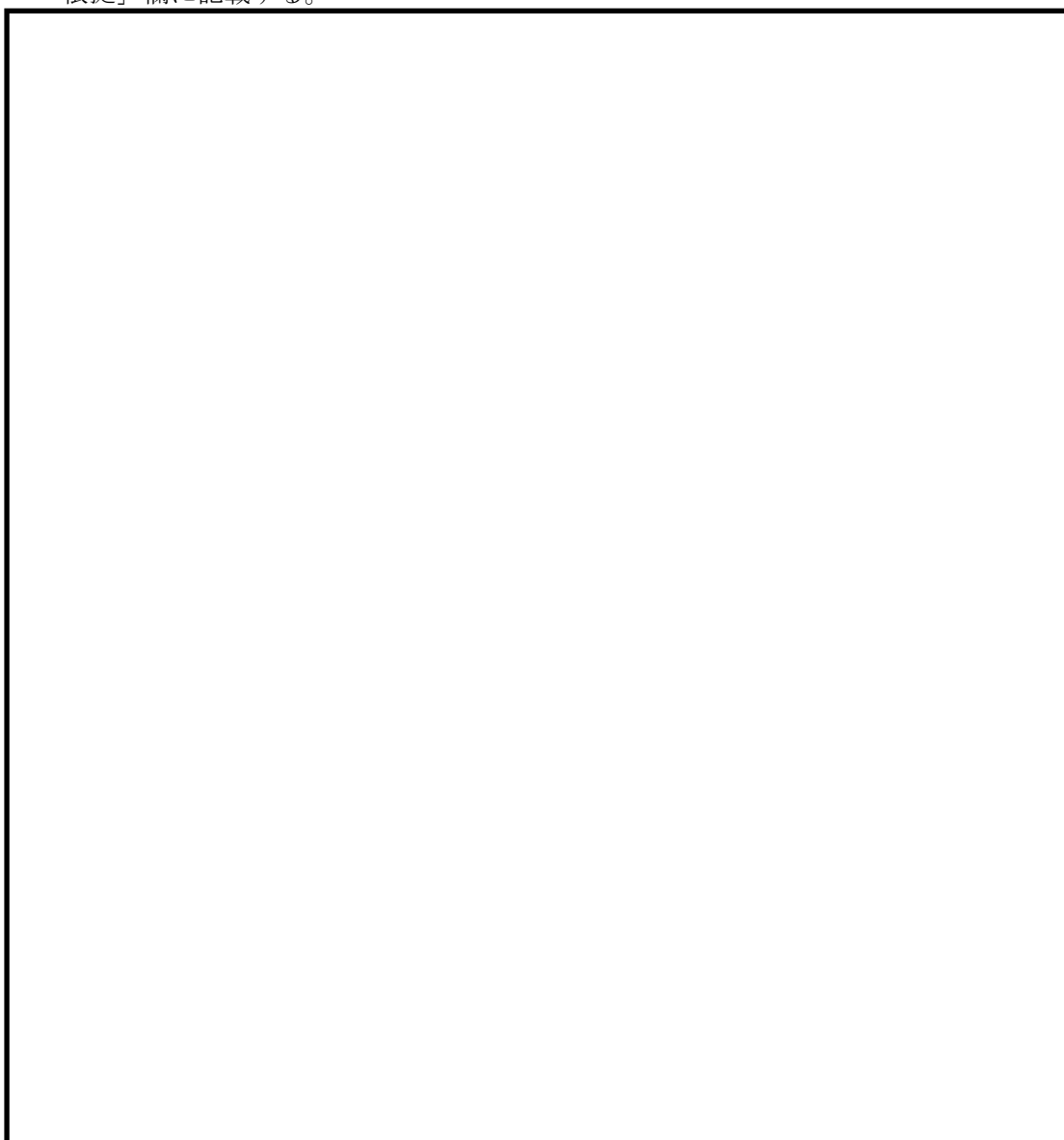


図 5-6 SN 型オイルスナッパの強度評価部位

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	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*	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* : 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)


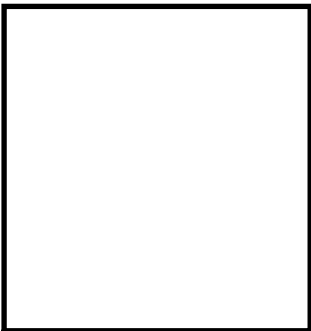





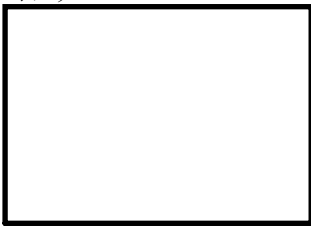
品番	評価部位	評価項目	今回 工認	既工認	評価項目の相違及び 評価項目追加根拠
⑥	六角ボルト 	引張	○	○	相違なし
⑦	イーヤ (Bタイプのダイレクトイーヤを含む。) 	穴部引張	○	○	相違なし
		穴部せん断	○	○	相違なし
		穴部支圧	○	○	相違なし
		溶接部せん断	○	○	相違なし
		ボルト取付部 引張	○	—	基本的に穴部の評価の方が厳しい が、評価項目の網羅性のため追加
		ねじ部せん断	○	—	
		パイプ部圧縮	○	—	
⑧	ロッドエンド 	穴部引張	○	○	相違なし
		穴部せん断	○	○	相違なし
		穴部支圧	○	○	相違なし
		ボルト部引張	○	—	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整理結果を表 5-13 に示す。

この整理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整理したものを表 5-14 に示す。

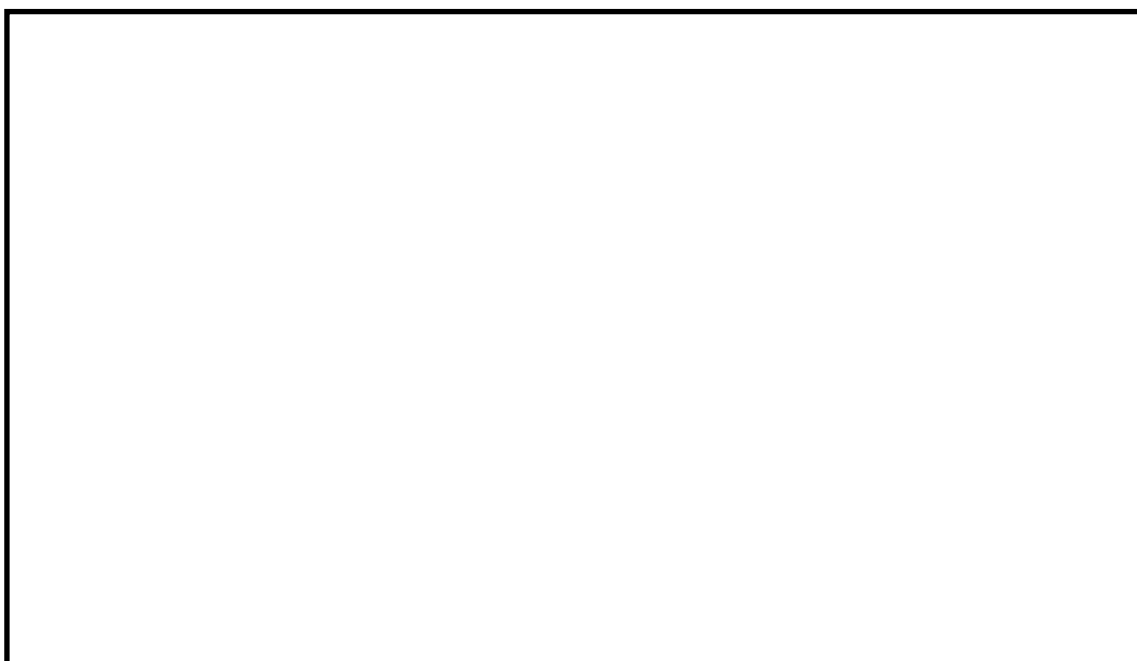


図 5-8 RSA 型ロッドレストレイントの強度評価部位

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

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。

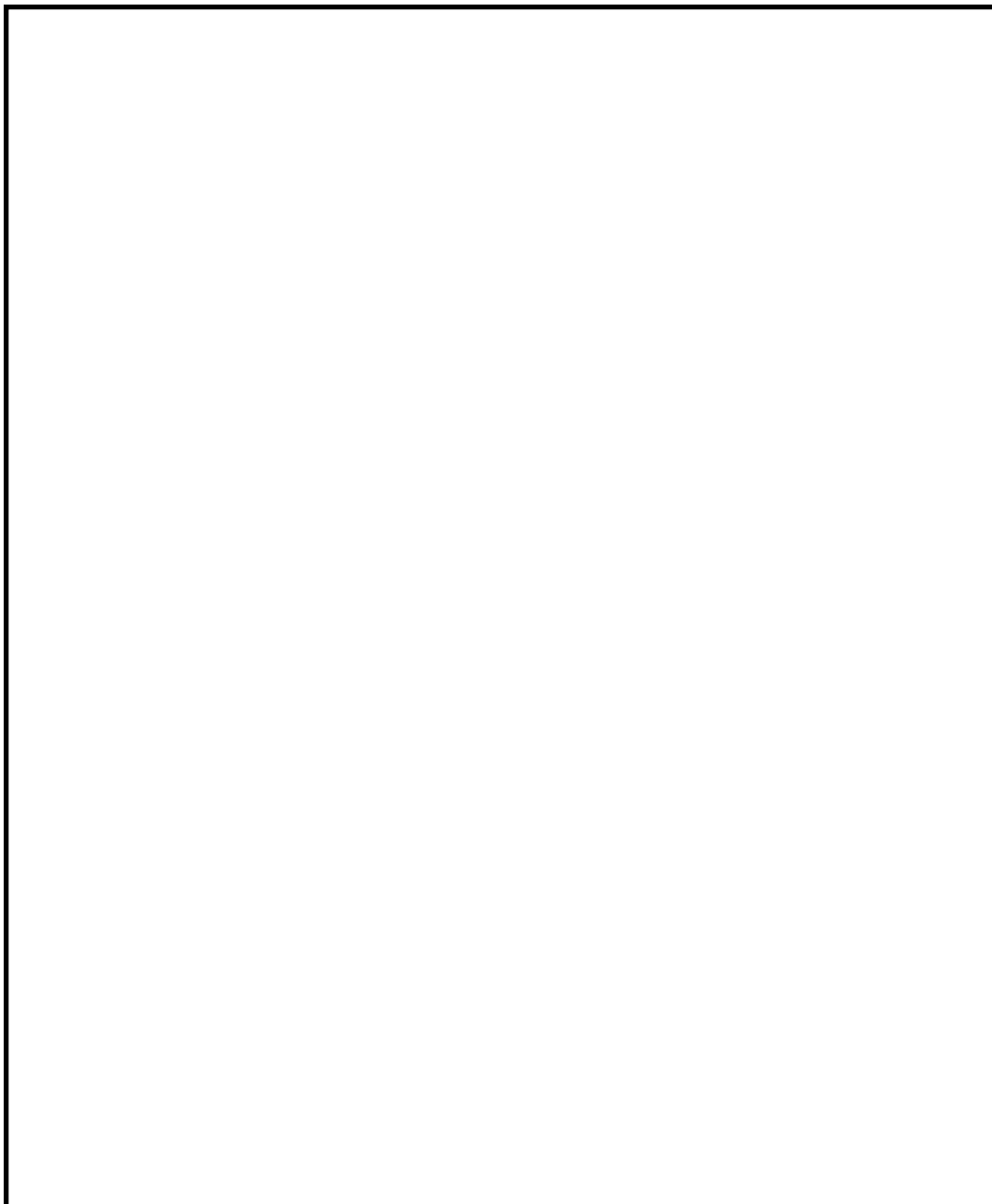


図 5-9 RTS 型ロッドレストレイントの構造及び荷重伝達経路

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整理結果を表 5-16 に示す。

この整理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整理したものを表 5-17 に示す。

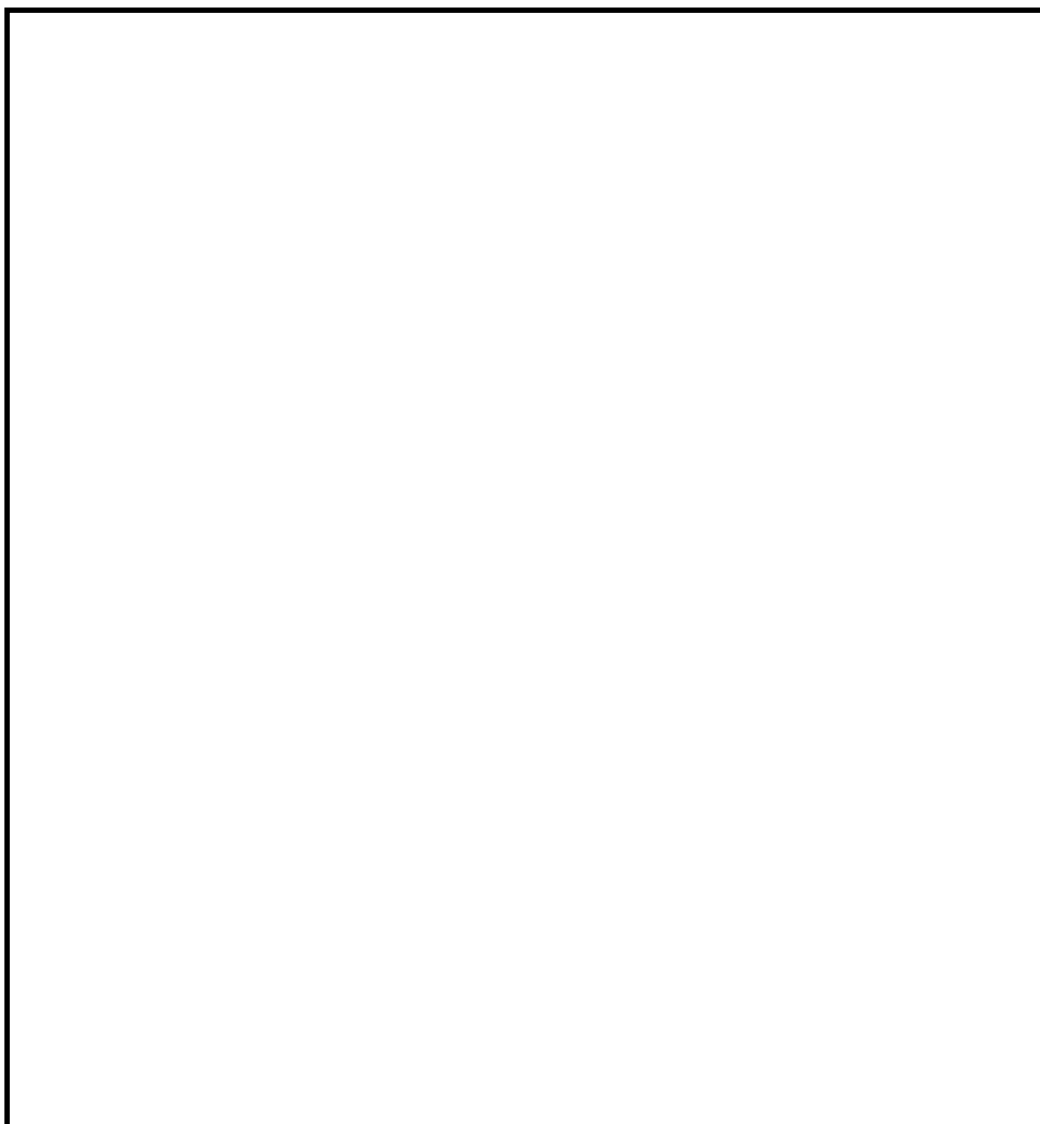


図 5-10 RTS 型ロッドレストレイントの強度評価部位

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

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)

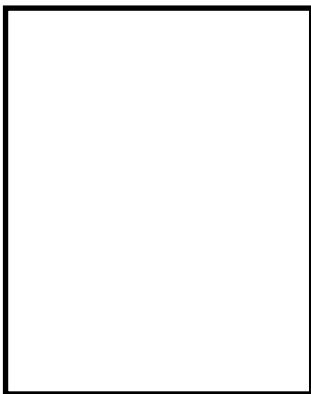

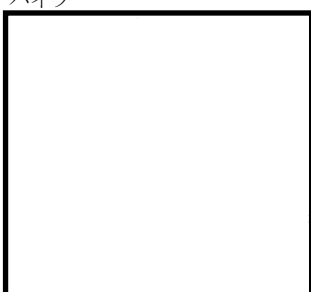
品番	評価部位	評価項目	今回 工認	既工認	評価項目の相違及び 評価項目追加根拠
①	ブラケット 	穴部引張	○	○	相違なし
		穴部せん断	○	○	相違なし
		穴部支圧	○	○	相違なし
②	ピン 	せん断	○	○	相違なし
③	パイプ 	圧縮	○	○	相違なし
		溶接部せん断	○	○	相違なし

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整理

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整理にあたり，5.1 で整理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し，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整理した結果を表 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*	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*	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
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					コネクティングパイプ				
SN-25	250	コネクティングパイプ					コネクティングパイプ				
SN-40	400	ダイレクトイーヤ					ダイレクトイーヤ				
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* : 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 5-20 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 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*	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)					パイプ (全長座屈)				
RSA-1	15	パイプ (全長座屈)					パイプ (全長座屈)				
RSA-3	45	パイプ (全長座屈)					ピン				
RSA-6	90	スヘリカルアイボルト					スヘリカルアイボルト				
RSA-10	150	スヘリカルアイボルト					スヘリカルアイボルト				
RSA-16	240	スヘリカルアイボルト					スヘリカルアイボルト				
RSA-25	375	スヘリカルアイボルト					スヘリカルアイボルト				
RTS-06	9	パイプ (全長座屈)					パイプ (全長座屈)				
RTS-1	15	パイプ (全長座屈)					コネクティングパイプ				
RTS-3	45	パイプ (全長座屈)					溶接部				
RTS-6	90	コネクティングイヤー					ピン				
RTS-10	150	コネクティングイヤー					コネクティングイヤー				
RTS-16	240	コネクティングイヤー					コネクティングイヤー				
RTS-25	375	コネクティングイヤー					コネクティングイヤー				
RTS-60	900	インナーチューブ					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整理

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：

振動試験により耐力確認荷重を取得する。

・手順2：

試験結果から得られた耐力確認荷重を踏まえて、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*2(図5-11参照)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JNES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

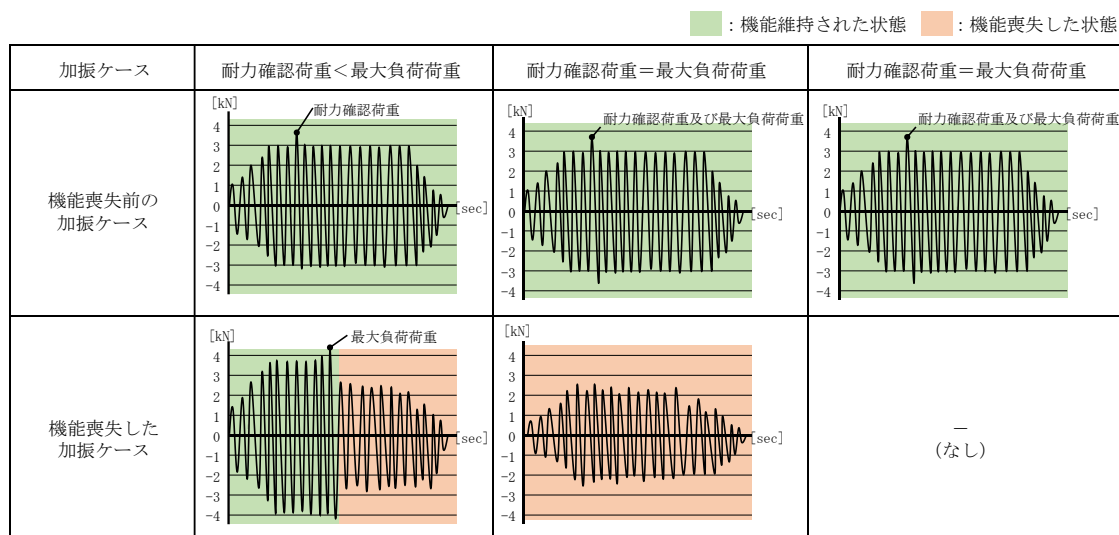


図5-11 最大負荷荷重及び耐力確認荷重の考え方

5.3.2 限界耐力値に対する定格荷重の裕度の整理

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JNES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整理している。

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	① 定格 荷重 (kN)	電共研				JNES 研究			
		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	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	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 にて整理した 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。SMS 型を例に新規耐力係数の設定の考え方を表 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。

表 5-23 新規耐力係数の設定方法（基本型式：SMS 型の例）

型式		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	電共研	J N E S 研究	Ⅲ A S	Ⅳ A S	Ⅲ A S	Ⅳ A S
SMS-01	1	[Blank]	[Blank]	[Blank]	17.90	[Blank]	[Blank]	[Blank]	
SMS-03	3				3.53				
SMS-06	6				4.05				
SMS-1	10				4.99				
SMS-3	30				2.16				
SMS-6	60				2.09				
SMS-10	100				2.27				
SMS-16	160				2.30				
SMS-25	250				2.55				
SMS-40	400				2.22				
SMS-60	600				2.08				

① 裕度の算出
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。

② 一律の新規耐力係数の仮設定
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。

③ 新規耐力係数の設定
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。

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

黄色背景：各評価における最小裕度

注記*：用語の定義 No.27 参照

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	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			

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			
		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

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（ロードレストレイント）

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			
		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*3	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：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も適用している。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 1.0 と 1.2 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（ロッドレストレイント）

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_AS及びⅣ_AS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。

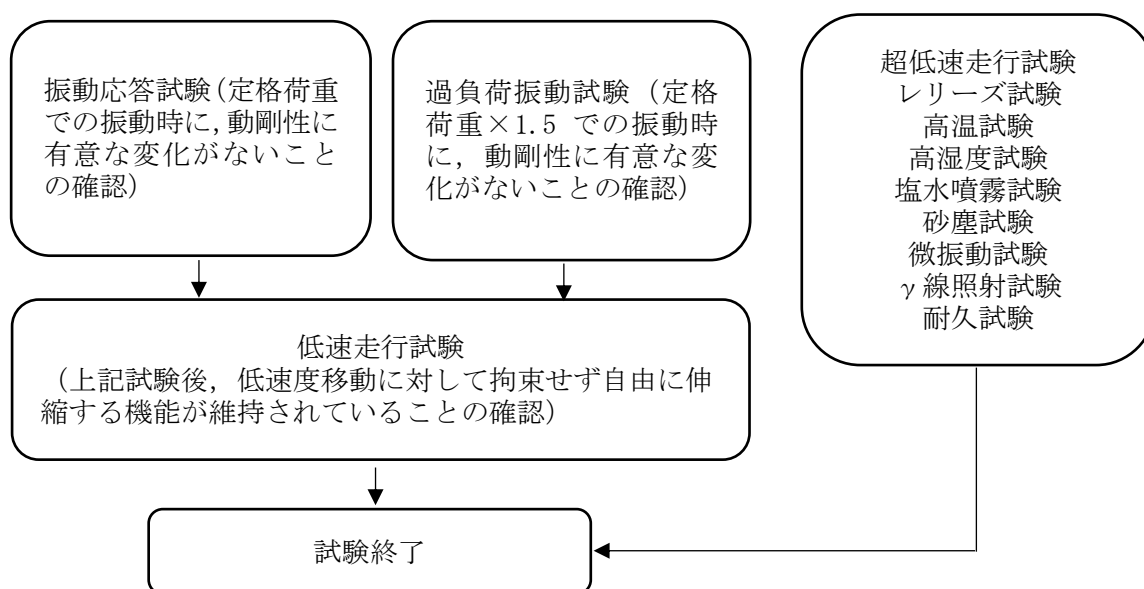


図 2-1 確性試験フロー

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（メカニカルスナッパの例）

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 メカニカルスナッチ確性試験の結果

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、メカニカルスナッチ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、S₂地震時のAs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。

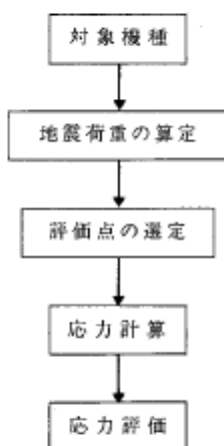


図 6.6.1-1 応力・強度解析の基本的な流れ

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⁾
- ただし、アンカボルト、アンカプレート及び埋込金物はこれに含まれる。
- 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。

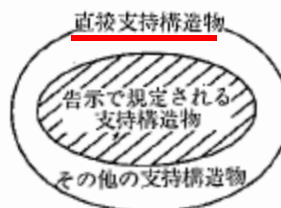
- a. 昭和55年通商産業省告示 501 号「発電用原子力設備に関する構造等の技術基準」（以下告示という。）で規定している支持構造物の範囲

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。

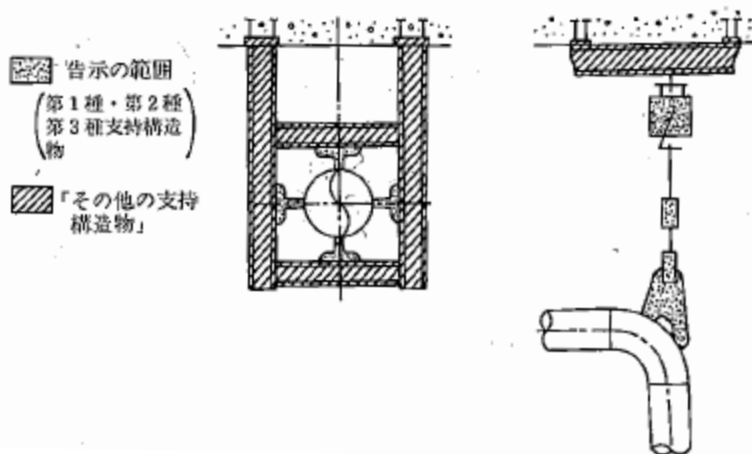
図 2-12



例えば、次のものがある。

- a. 耐震用サポート、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



2.8 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)		$1.5f_p^{(4)}$	$1.5f_p^*$	$1.5f_s$ 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。



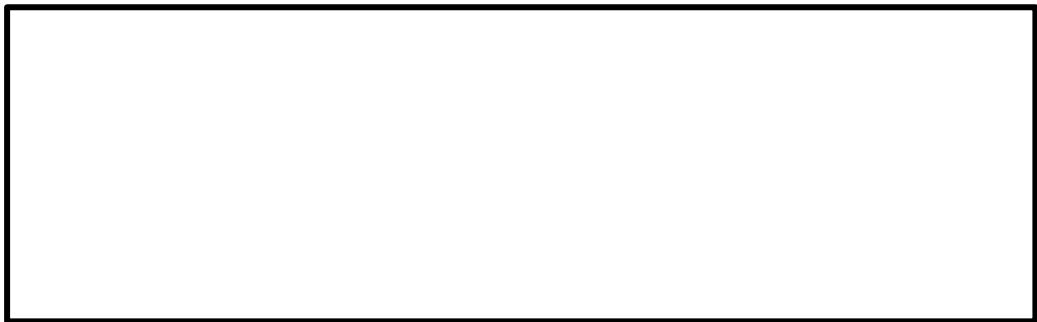
ii ねじ部せん断応力評価 (部品全体の評価)

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。

[Redacted content]

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。

[Redacted content]

[Redacted content]

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)

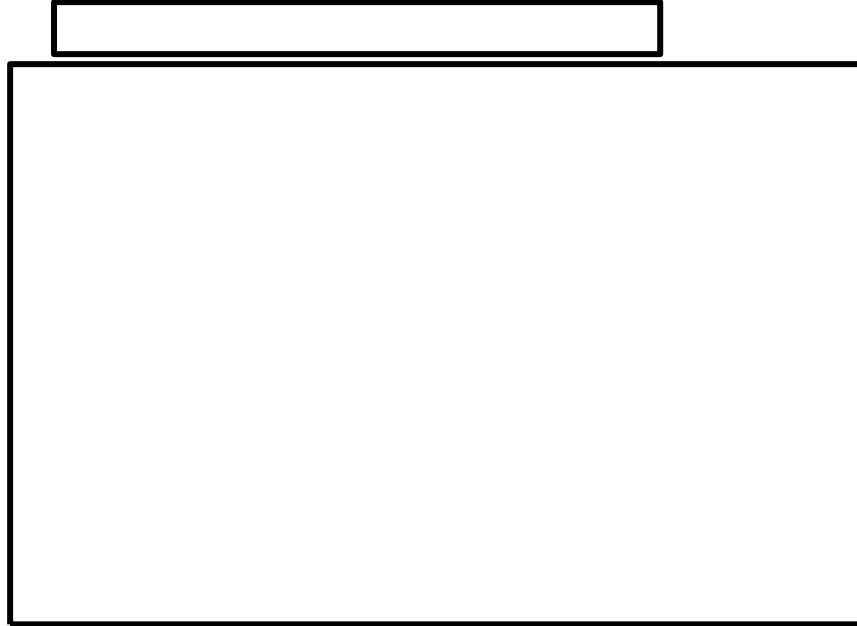
溶接部せん断応力が許容せん断応力以下であることを確認する。

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。

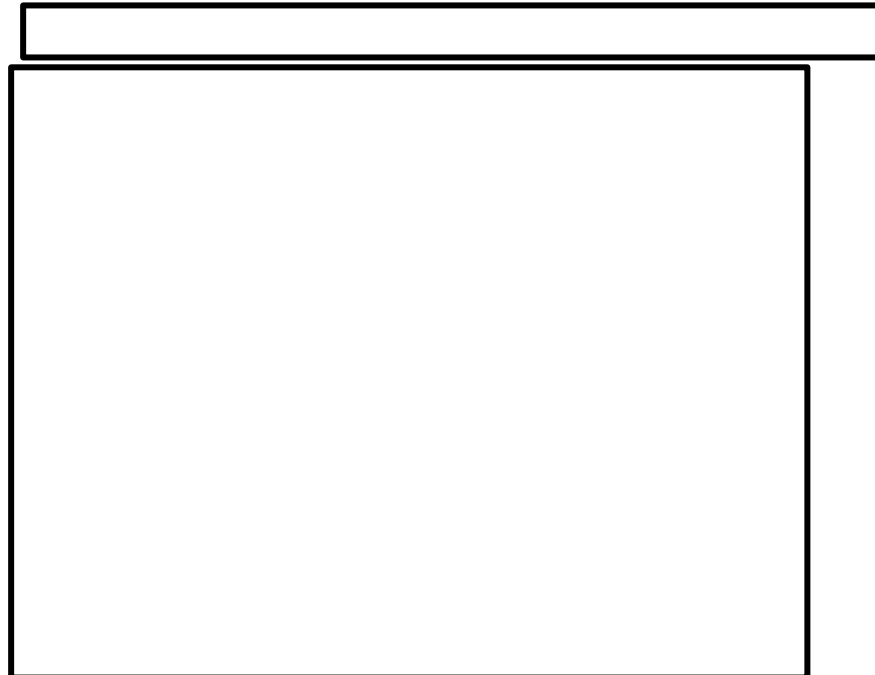
vii 現地溶接部せん断応力評価（型式 6～25）

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

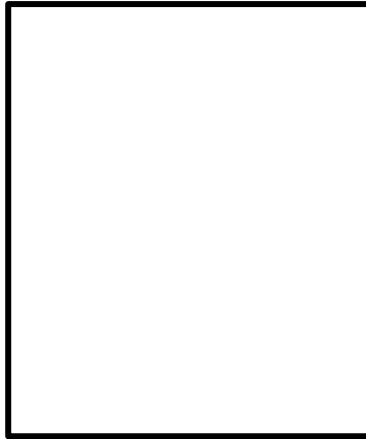
引張応力が許容引張応力以下であることを確認する。

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

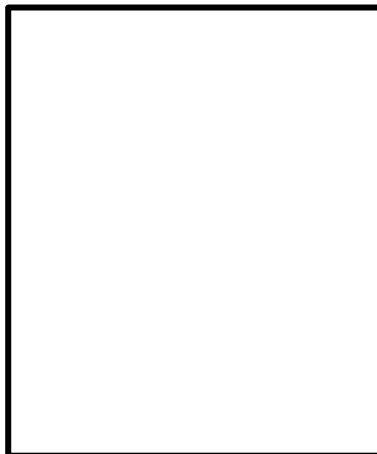
引張応力が許容引張応力以下であることを確認する。

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。



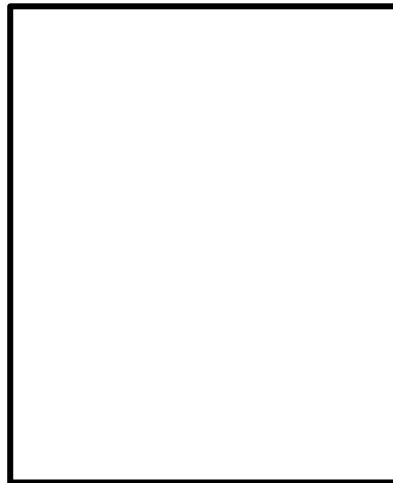
ii せん断応力評価

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

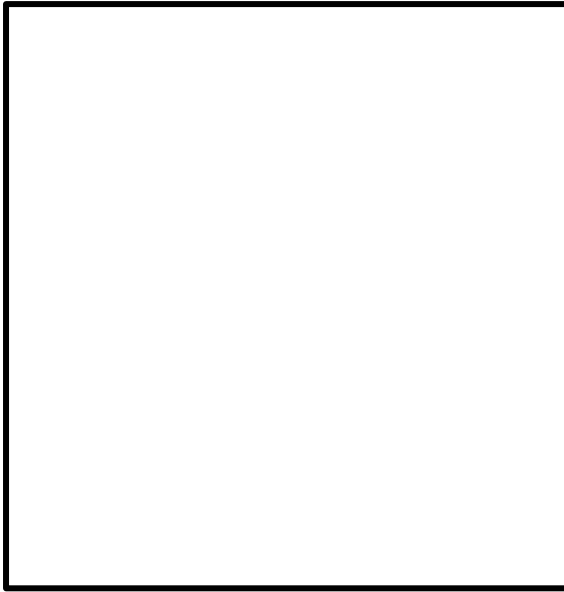
せん断応力が許容せん断応力以下であることを確認する。

[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)

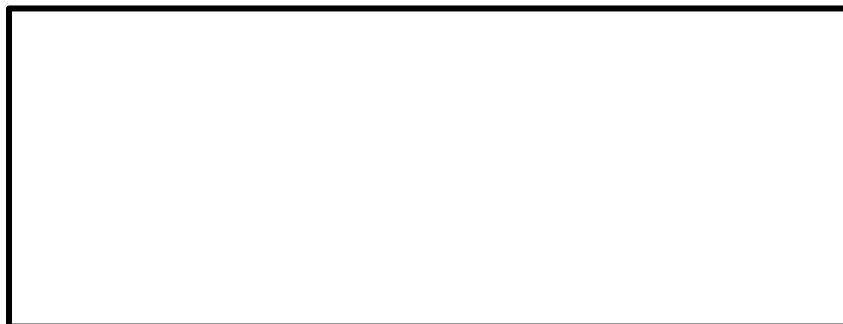
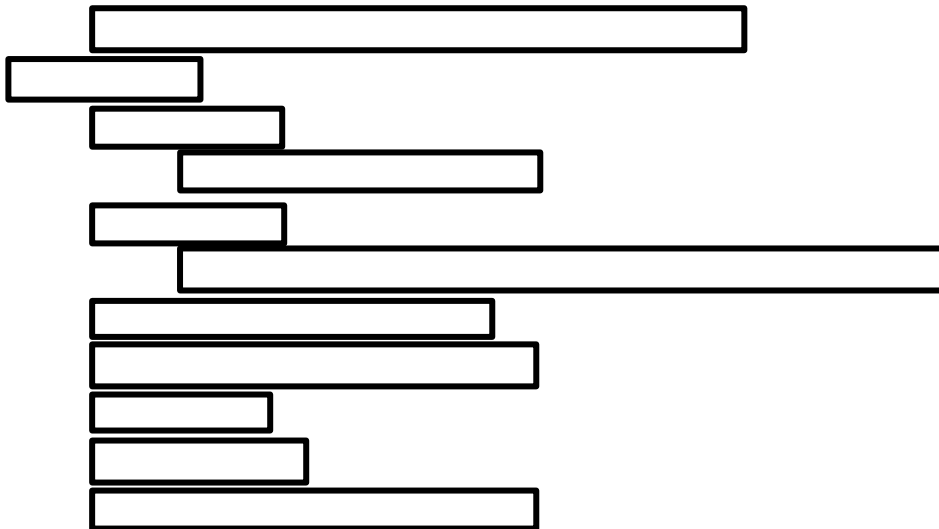
せん断応力が許容せん断応力以下であることを確認する。



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。



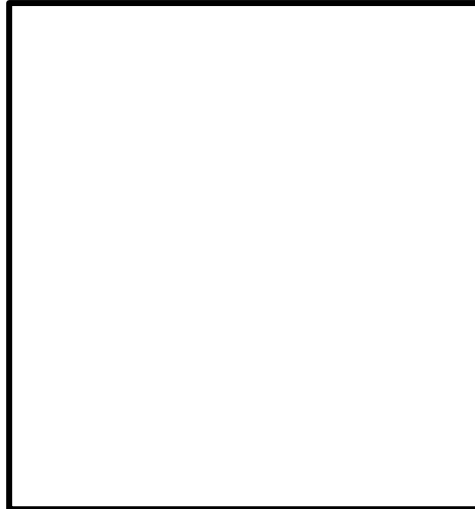
iii 穴部せん断応力評価

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。

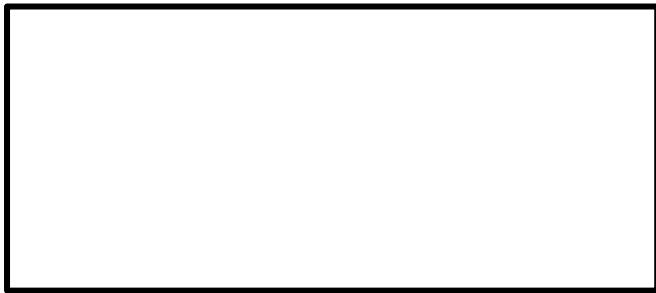
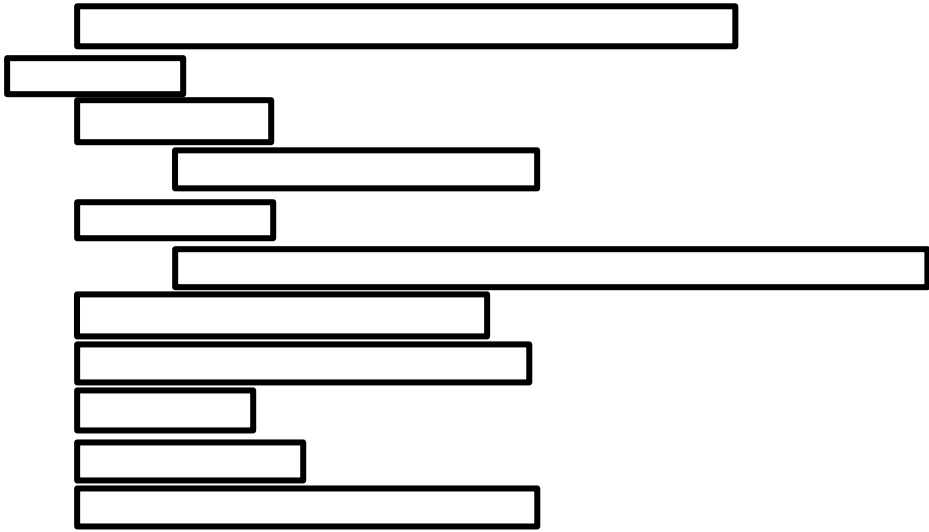
vi ねじ部せん断応力評価 (型式 40～100)

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。



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。

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 for redaction of 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 for redaction of information.

iii 支圧応力評価

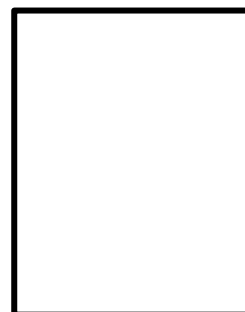
支圧応力が許容支圧応力以下であることを確認する。

A rectangular box with a black border, used for redaction of information.A large rectangular box with a black border, used for redaction of a significant portion of the document.

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 for redaction of information.A rectangular box with a black border, used for redaction of 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

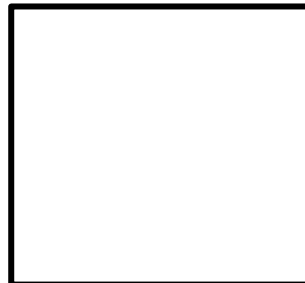
支圧応力が許容支圧応力以下であることを確認する。



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)スナップバ限界耐力評価法の検討におけるスナップバについての検討の概要をまとめる。

3. スナップバ限界耐力評価法の策定方針

スナップバ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バの破壊試験により、スナップバ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、スナップバの許容限界（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バ限界耐力評価法を策定する。

スナップバ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) スナップバの構造・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

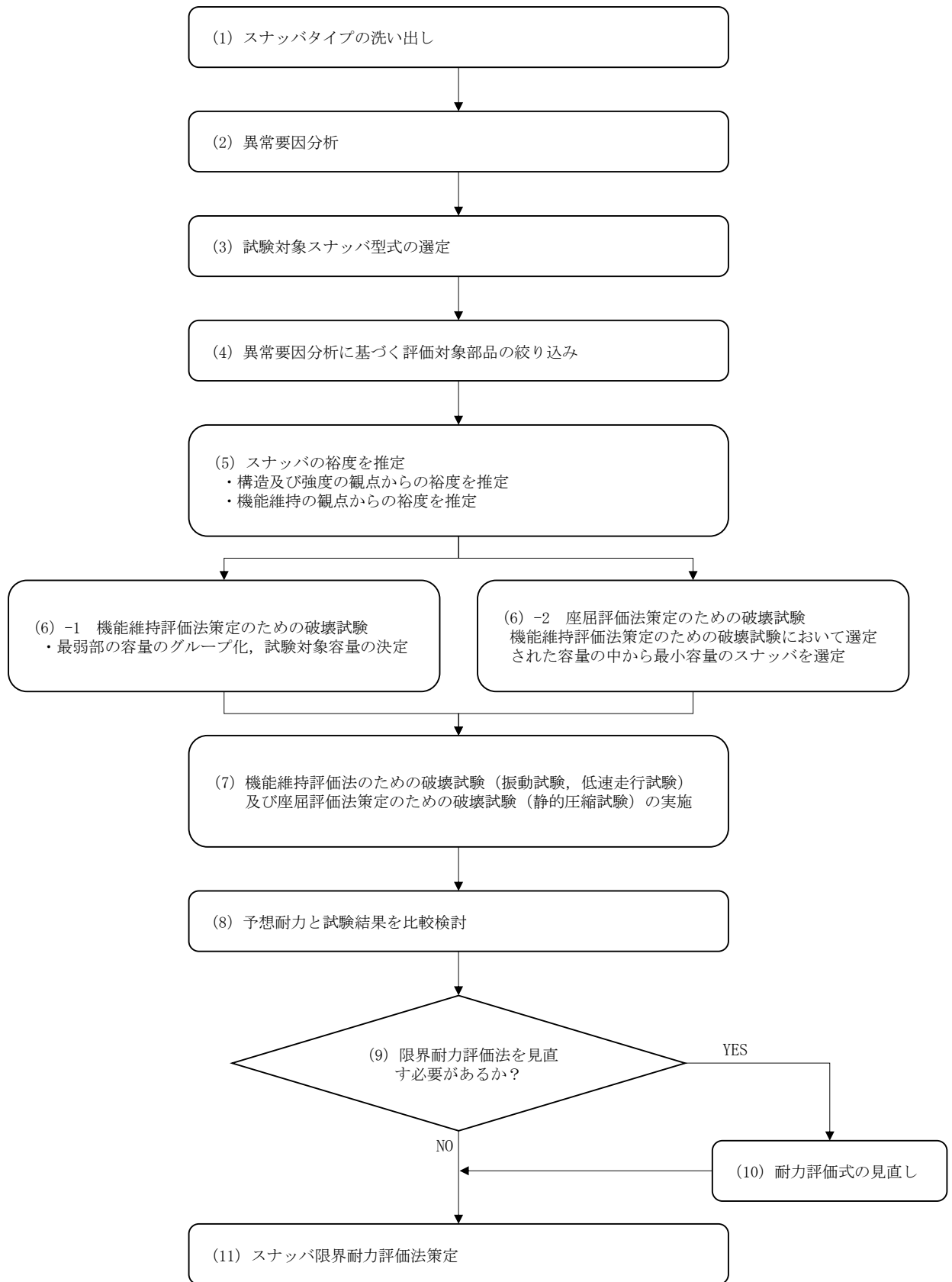


図 3-1 スナッパ限界耐力評価法策定フロー







	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。

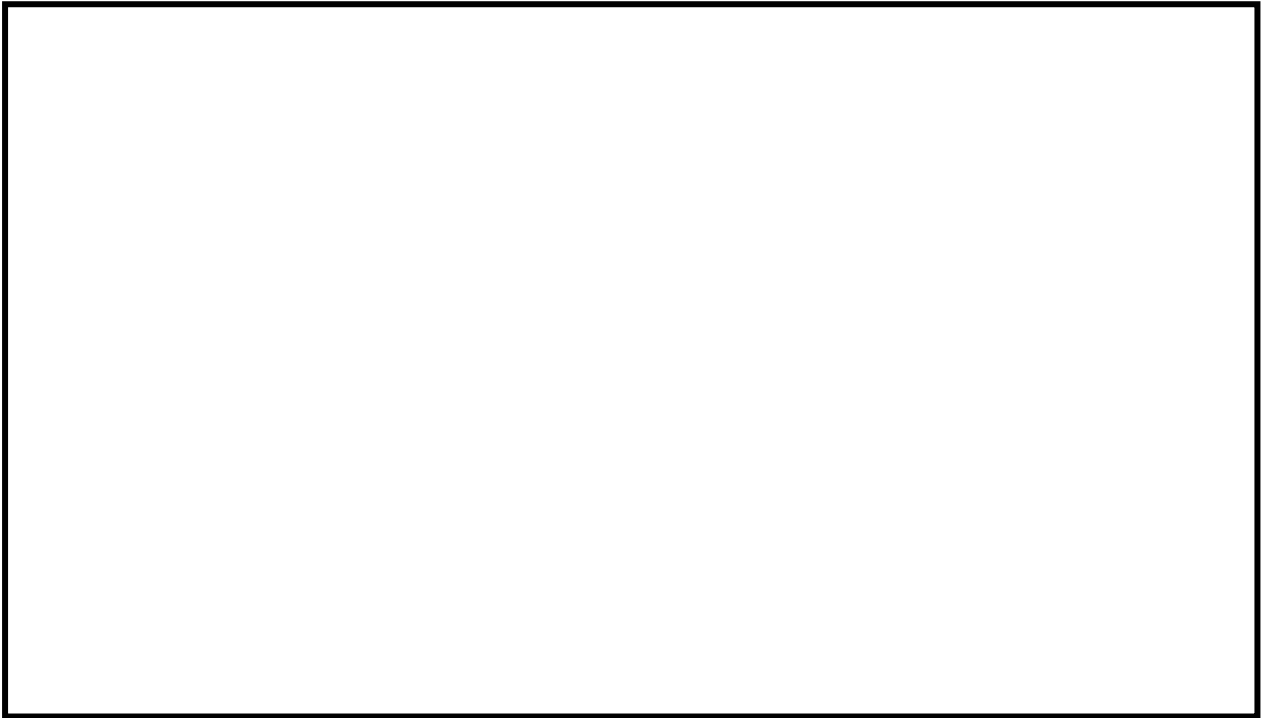


図4-1 SMS 型メカニカルスナッパ構造図



図 4-2 SHP 型オイルスナッパ構造図

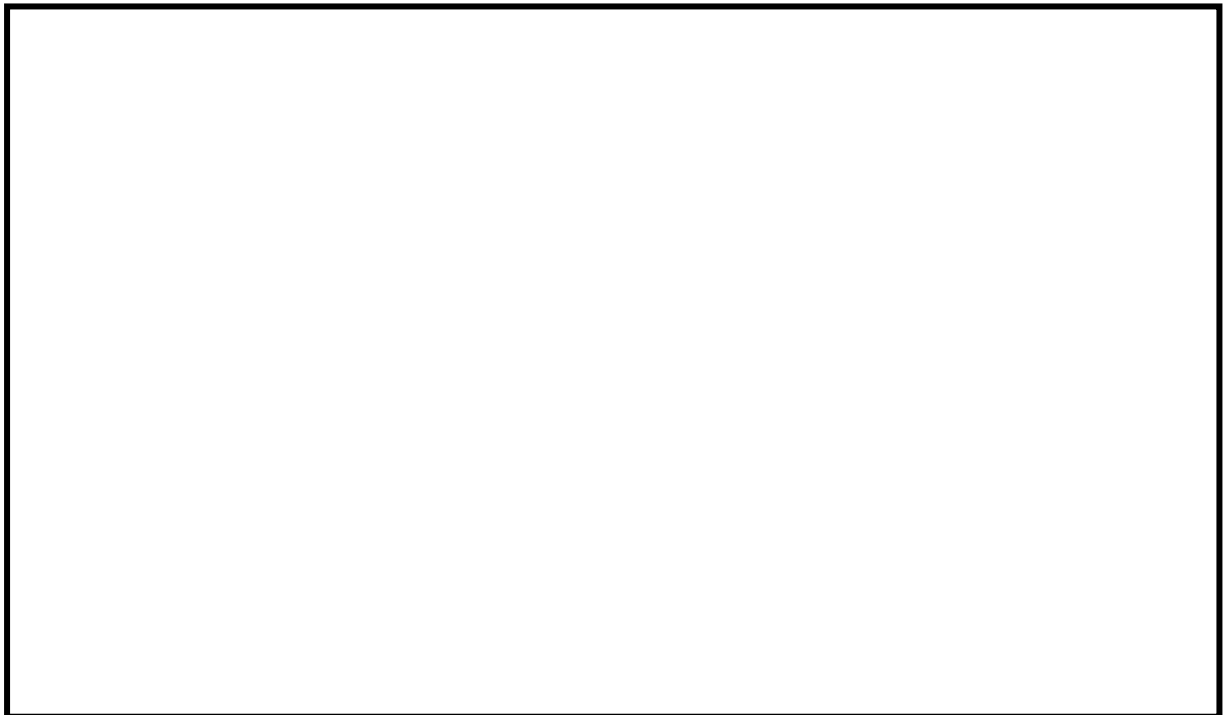


図 4-3 SN 型オイルスナッパ構造図

4.1.1 異常要因分析を踏まえた破壊試験における評価対象選定の基本的な考え方

スナッパの破壊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、メカニカルスナッパ及びオイルスナッパは図4-4の異常要因モードで概ね代表できること、及び異常要因モードとして以下の2つがあるため、破壊試験における評価項目として、構造部材の強度評価及び機能部品の機能評価が必要であることが確認された。

- ・地震時の機能要求に対し、配管系応答過大に伴う構造部材及び機能部品の損傷によるスナッパ支持機能喪失
- ・地震後の作動と性能確保要求に対し、低速走行抵抗力増大に伴う構造部材及び機能部品の損傷によるスナッパ機能喪失

また、構造部材及び機能部品の損傷として、構造部材の部材ごとの変形等に加えてスナッパ全長に対する座屈が考えられることから、スナッパの地震時及び地震後の機能を確保するための「機能維持評価法策定のための破壊試験」に加えて「座屈評価法策定のための破壊試験」を行うこととした。

異常要因分析を踏まえて破壊試験における評価対象となる部位（構造部材と機能部品からなる評価対象部品）を基本型式ごとに分けて、一覧化したものを表4-1～表4-3に示す。構造部材と機能部品の構成部品は概ね同様であることから、スナッパにおいて代表型式について限界耐力評価法を策定すれば、他の型式へ展開可能であることを確認した。

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 → スナッパ座屈 機能部品の損傷 → シール性喪失*3 → 油漏れ → ポベット弁機能喪失*2	スナッパ支持機能喪失
	地震後の作動と性能確保	低速走行抵抗力増大	構造部材の損傷 → 構造部材変形*4 機能部品の損傷 → ポベット弁機能喪失 → シール性喪失	スナッパ機能喪失
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 → スナッパ座屈 機能部品の損傷 → ボールネジ機能喪失*5 → プレーキドラム機能喪失	スナッパ支持機能喪失
	地震後の作動と性能確保	低速走行抵抗力増大	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	スナッパ機能喪失

*1：各スナッパの構造部材の強度評価。
 *2：ポ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事が考えられる。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、地震時にはポ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ー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、ロードコラム等の変形。
 *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。

図4-4 スナッパ異常要因モード

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-1	1ton(30kN)	1
3	SMS-3	3ton(30kN)	3
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結果にばらつきがでにくいこと、座屈強度はスナッパ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

スナッパ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：スナッパ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、スナッパ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					SHP 型				SN 型				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		
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。

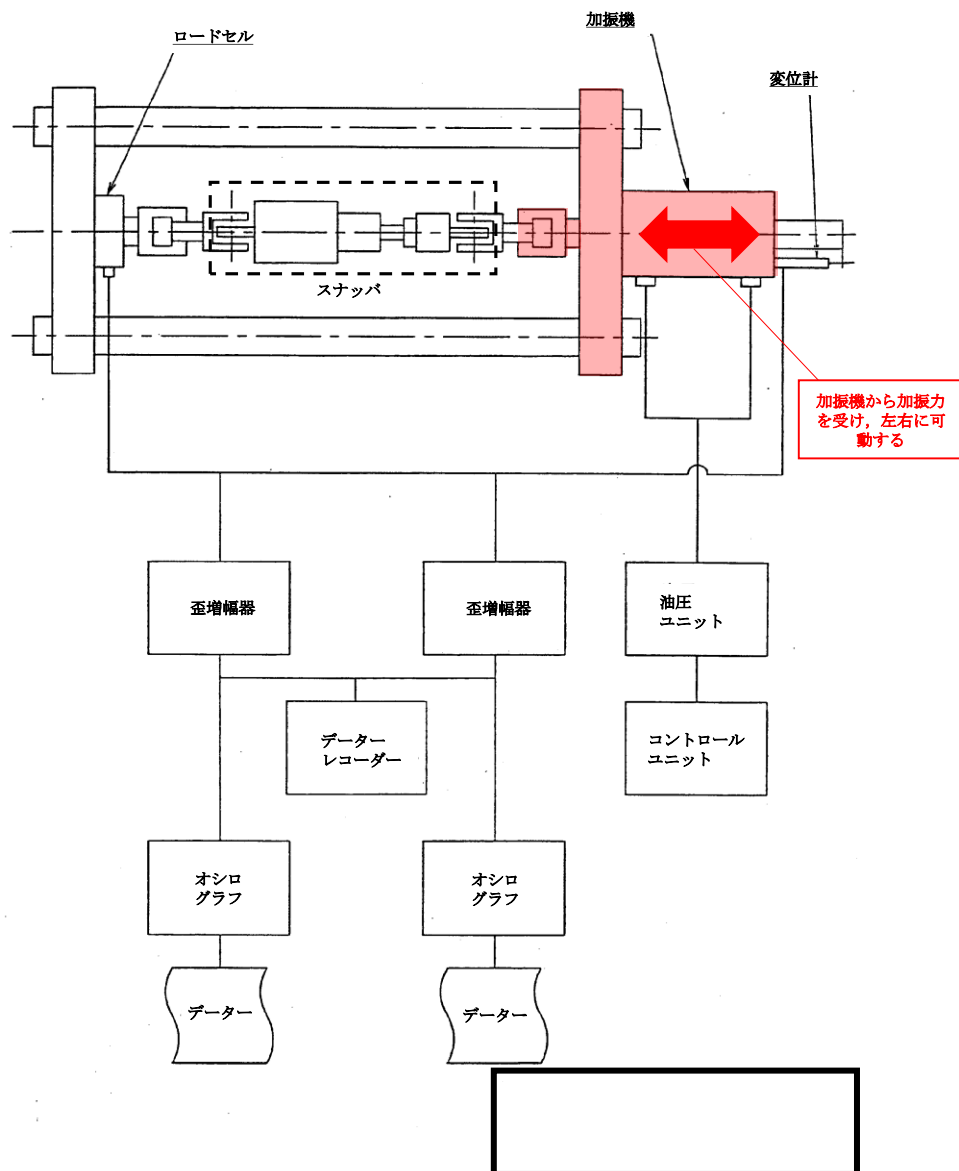
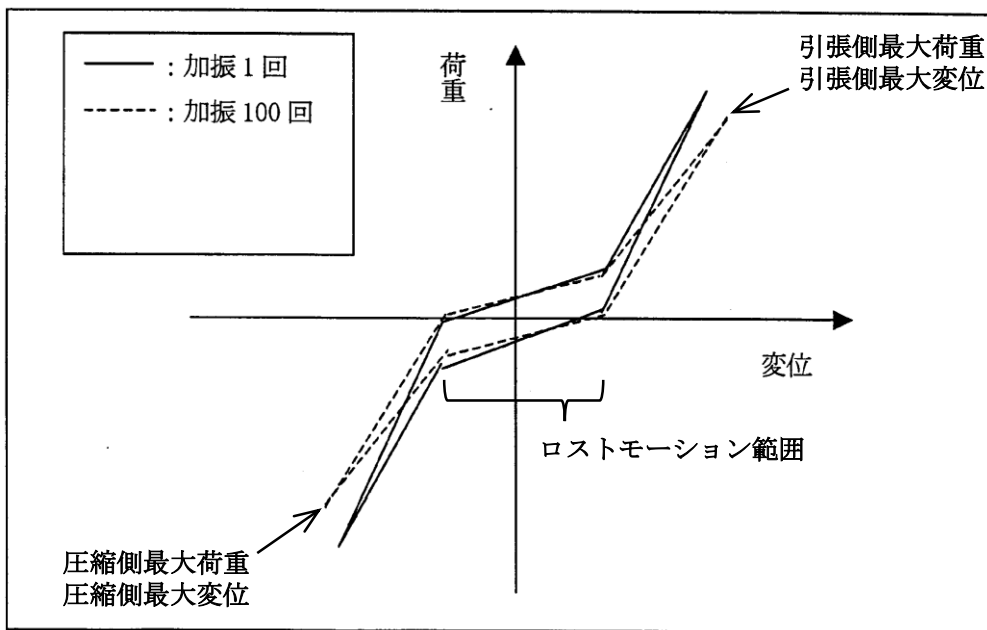


図 4-5 振動試験装置の概要

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

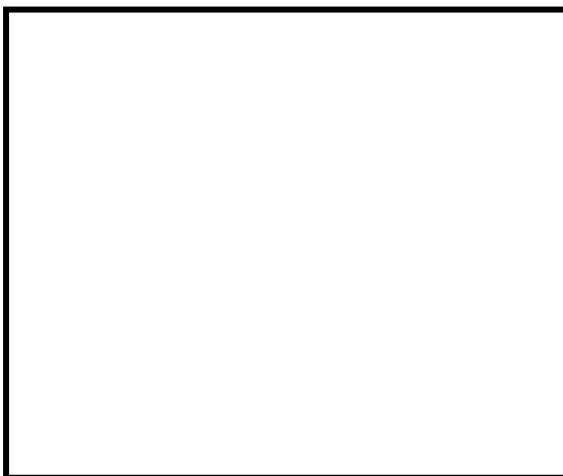


表 4-11 SMS 型メカニカルスナップ 振動試験中の動剛性（動ばね定数）判定基準値

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

表 4-12 SHP 型オイルスナップ 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 型オイルスナップ 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。

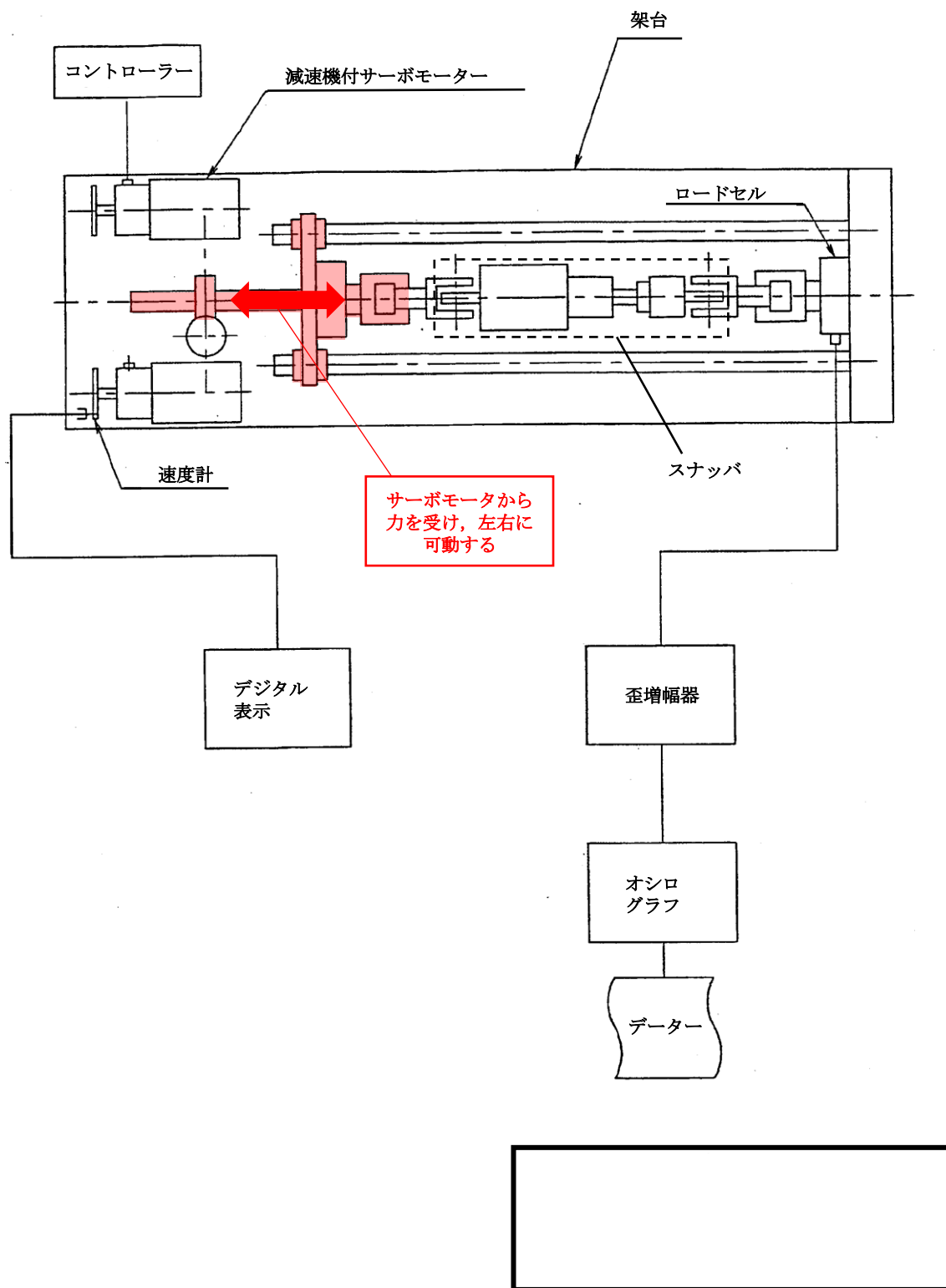


図 4-6 低速走行試験装置の概要

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。

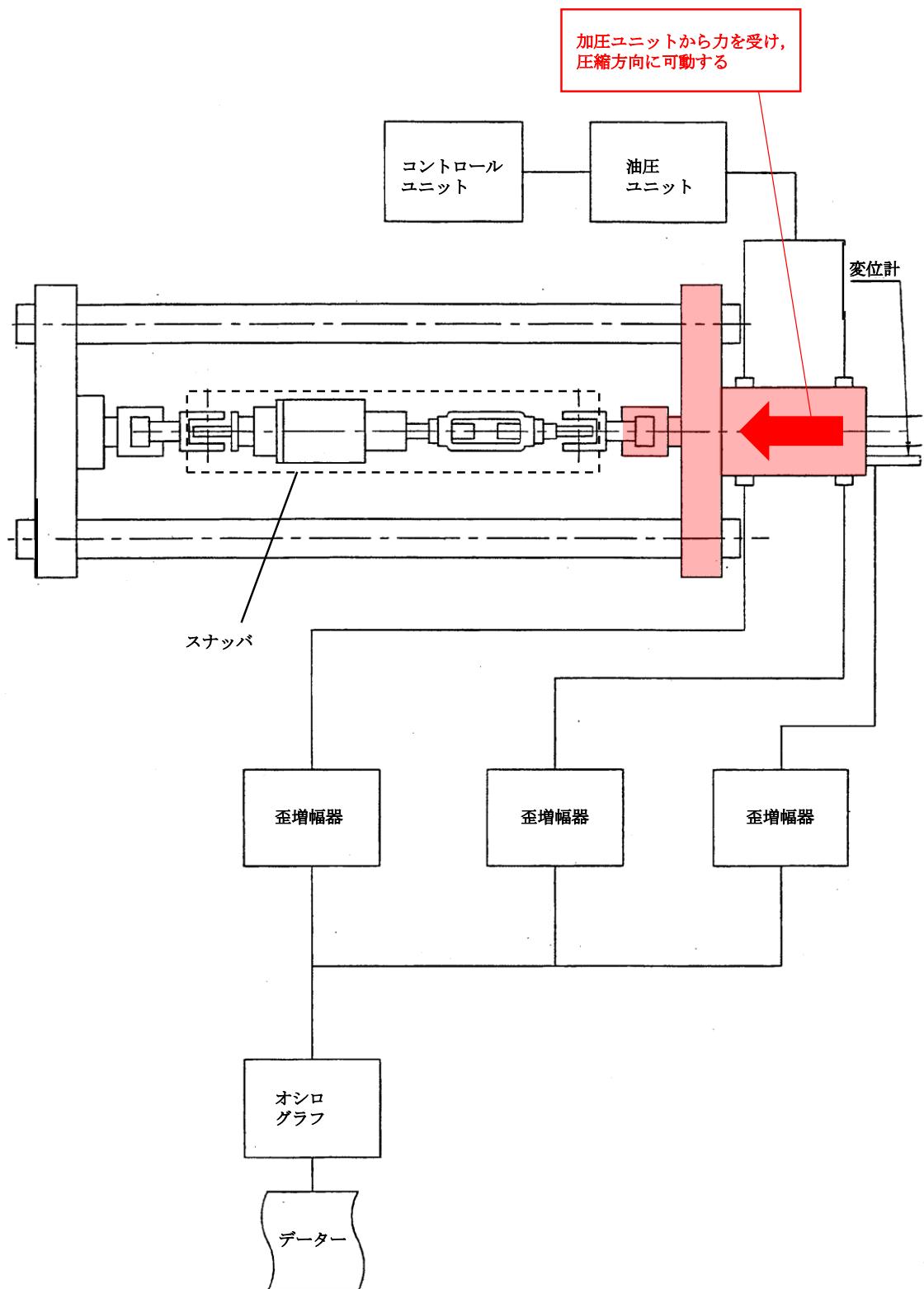


図 4-7 静的圧縮試験装置の概要

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

最大負荷荷重、破損箇所及び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、破損時までに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

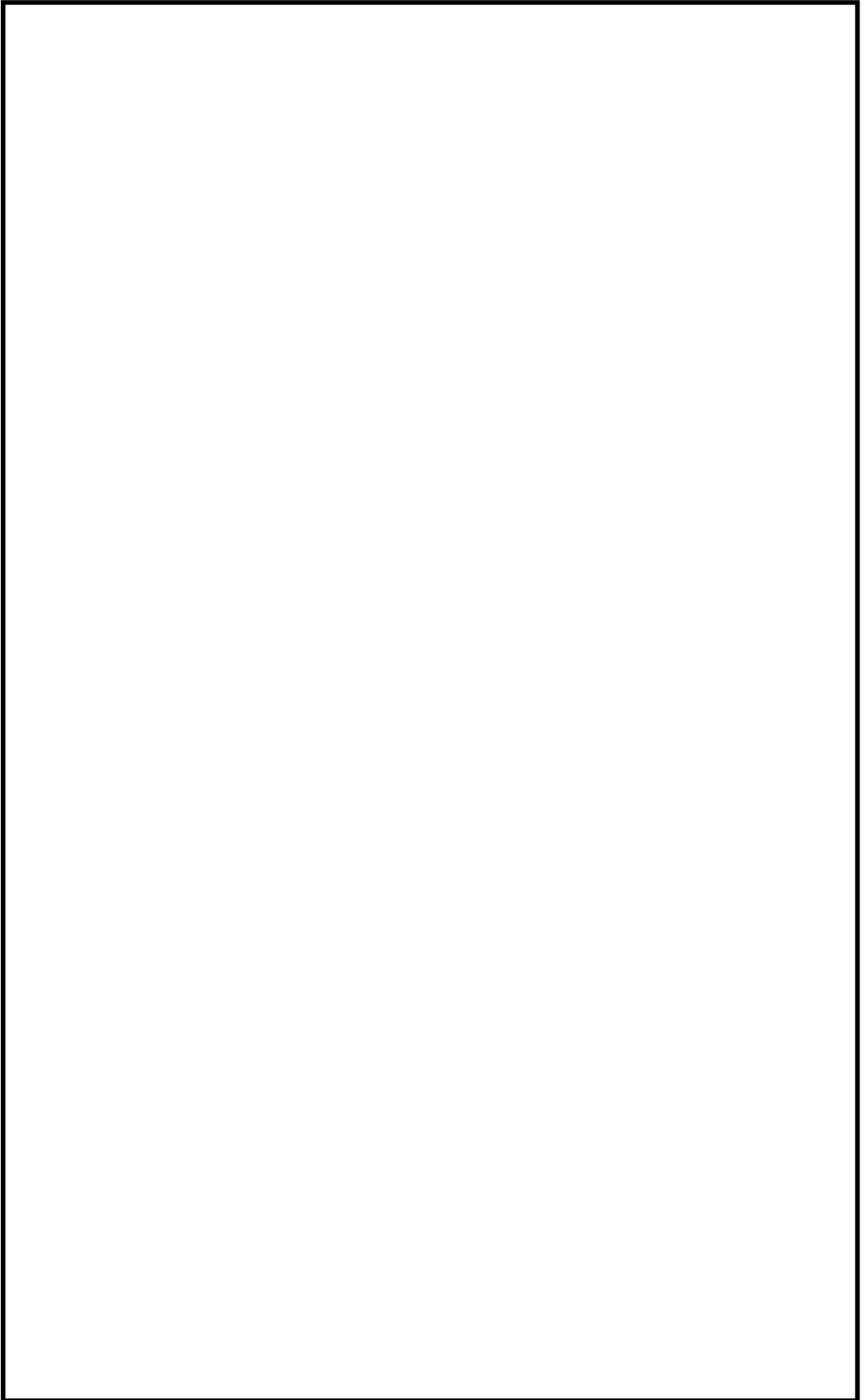


表 4-18 SMS 型メカニカルスナツバ 各試験ケースにおける判定結果(1/2)

--

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)

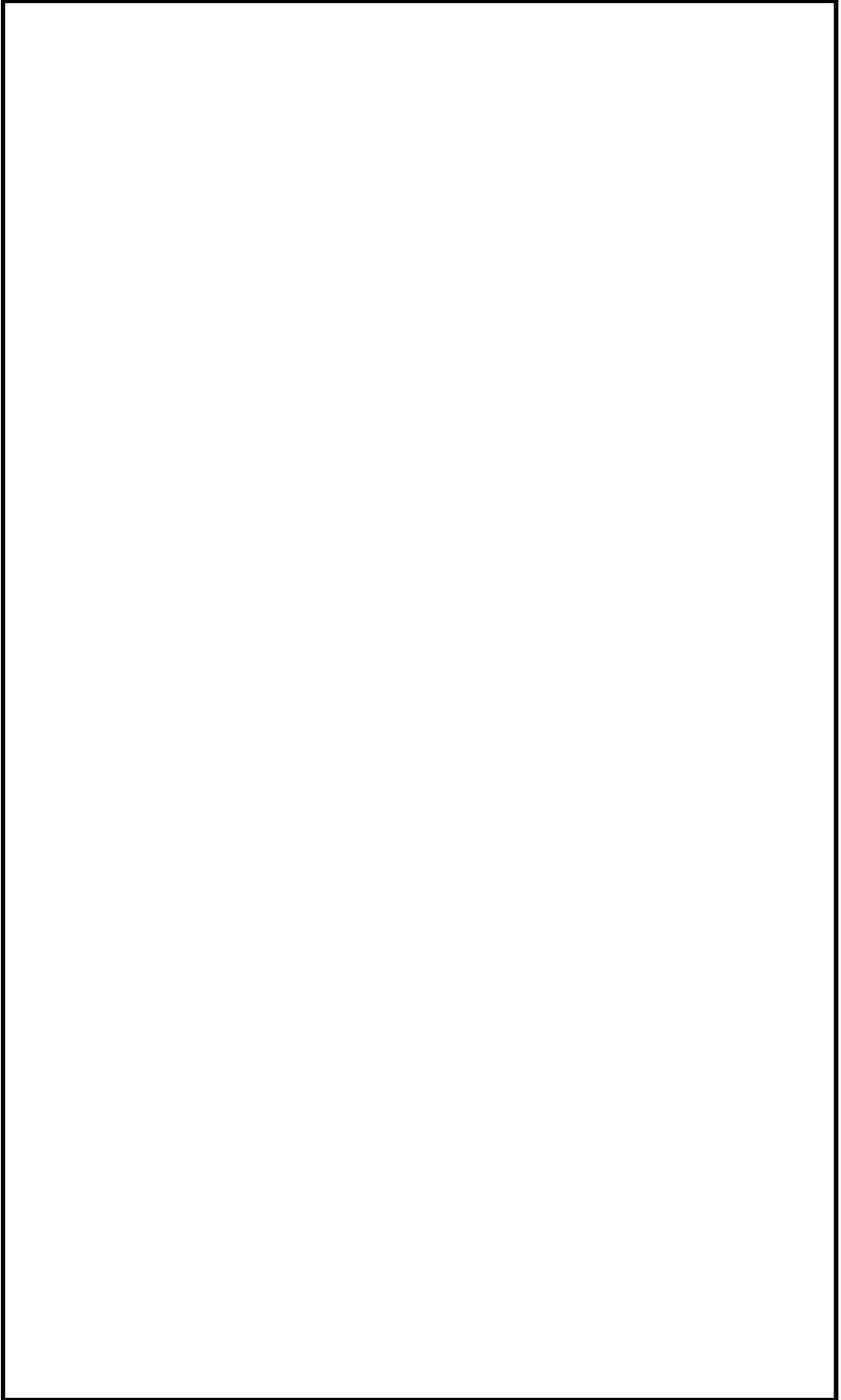


表 4-19 SHP 型オイルスナツバ 各試験ケースにおける判定結果(1/2)

--

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)

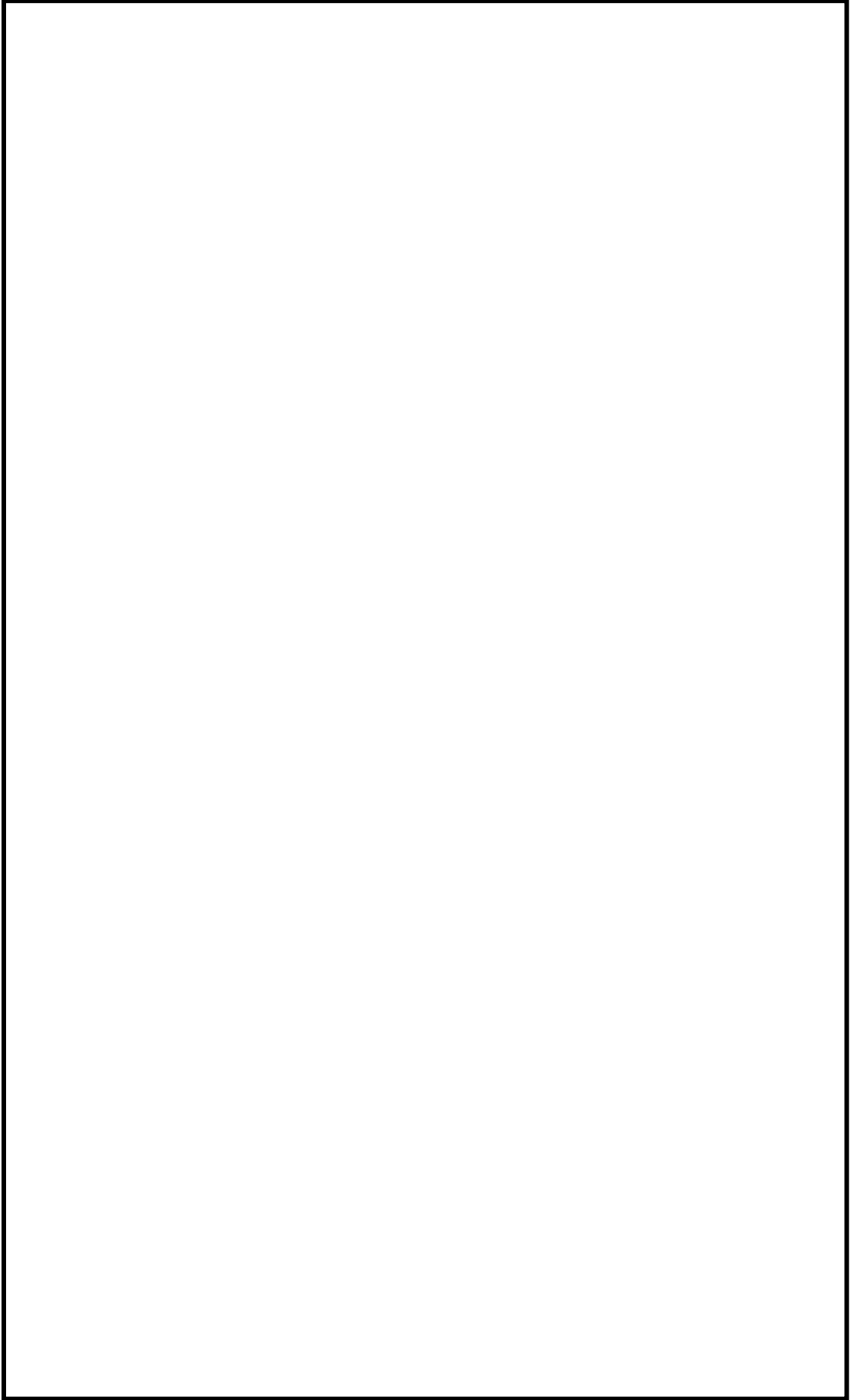


表 4-20 SN 型オイルスナツバ 各試験ケースにおける判定結果 (2/2)

--

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・整理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チバ 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* (1/2)

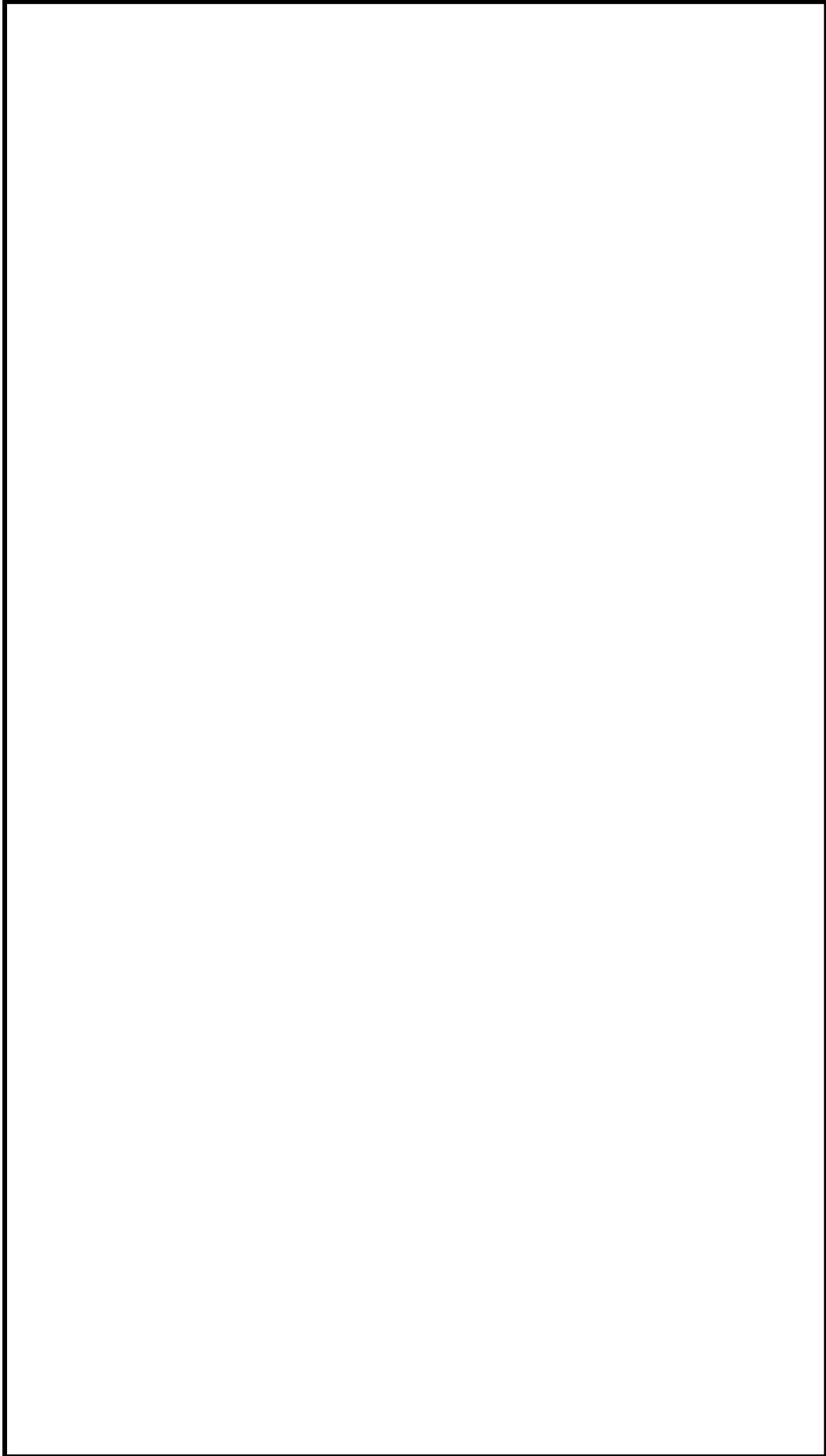


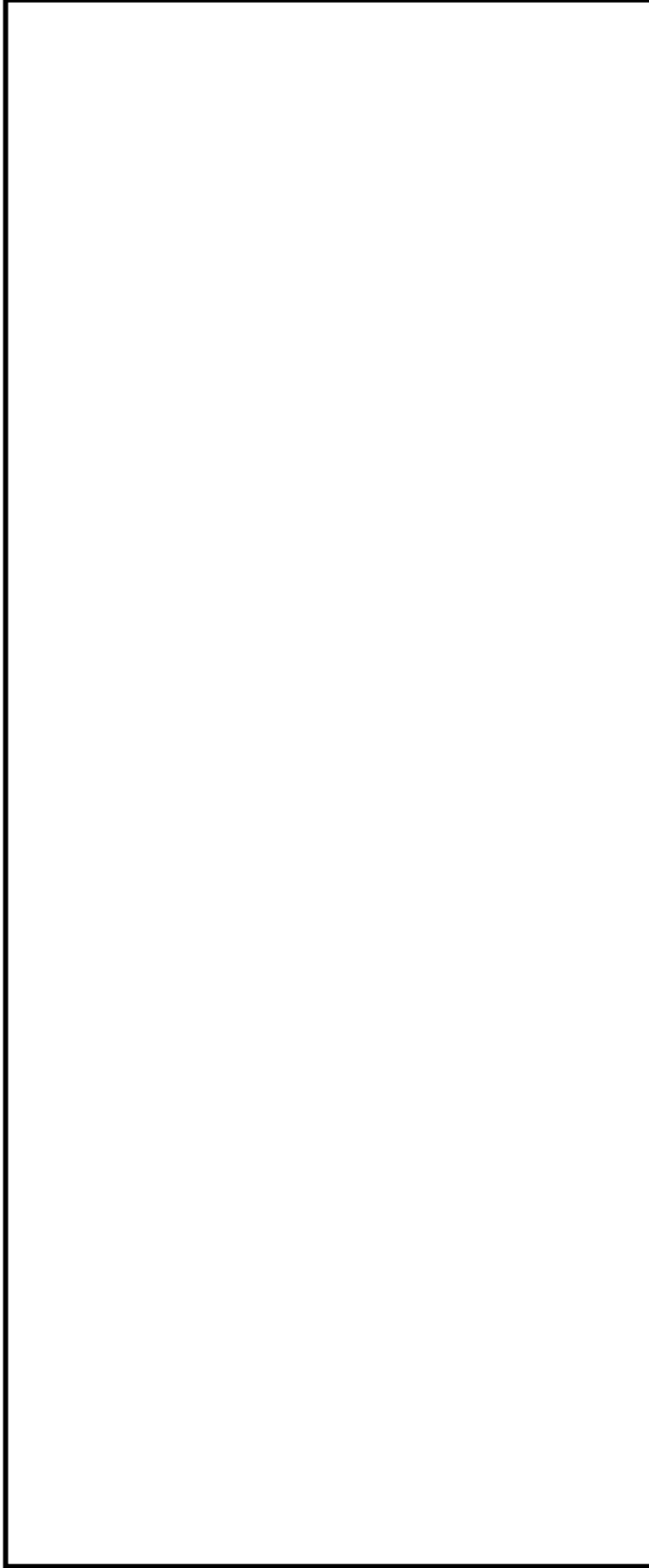
表 4-21 SMS 型メカニカルスナッパ 公称応力による予想耐力を超えても破損しなかった部位のまとめ表* (2/2)

--

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。

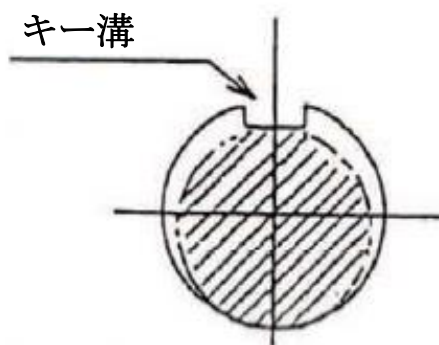
$$F=0.7 \cdot S u \cdot A$$

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)

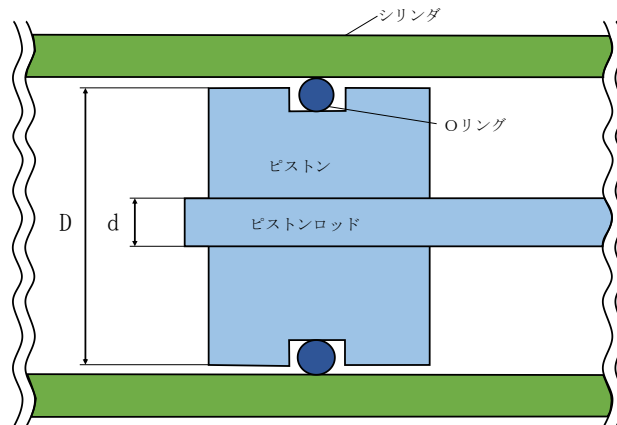
ロ. オイルスナップ

・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。

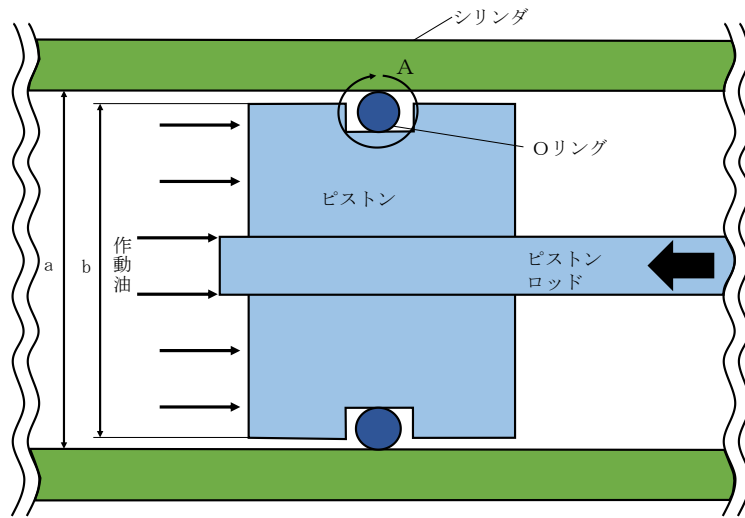
・予測耐力評価式：予測耐力 $F = P \times A$ ($A = \pi \cdot (D^2 - d^2) / 4$)

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）。



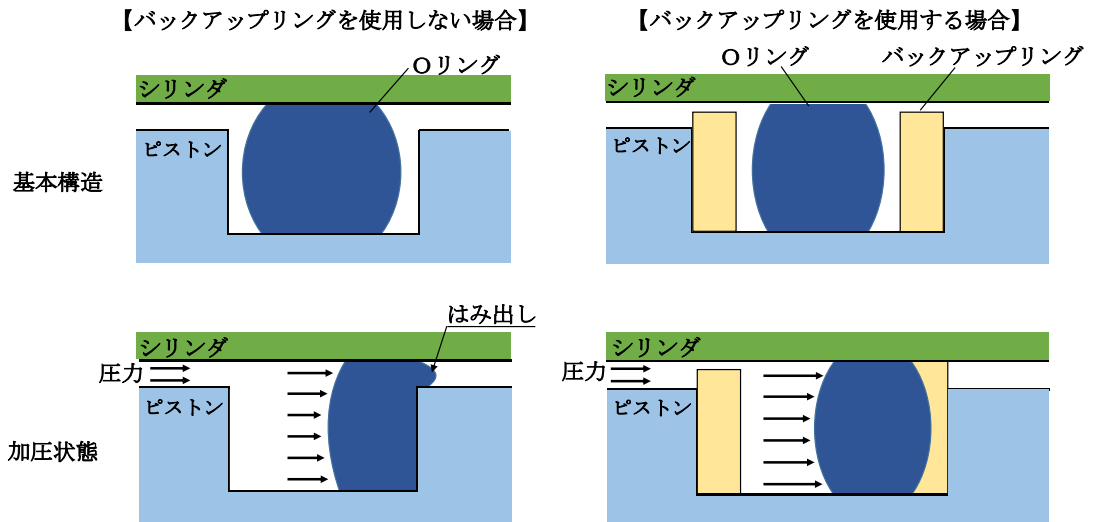
シール部の構造を図 4-8 に示す。Oリングはピストンに設けた溝に収められ、ゴムの収縮性を利用して、シリンダ内の作動油の漏えいを防止している。オイルスナップは、地震時にみられる急速なピストンロッドの移動で生じる流体抗力によってポペット弁が閉じることで、シリンダ内に密閉状態が形成され、この状態においては、Oリングに対してピストンロッドに作用する荷重に応じた圧力が負荷される。この関係から、シール性はOリングの許容圧力によって決定される。なお、高い耐圧性が求められる型式については、図 4-8 に示すようなバックアップリングを設置し、圧力によるOリングの変形によって生じるはみ出しを防止することで、シー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

(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、座屈耐力の整理のために、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 4-8 に示す。

SHP 型はターンバックルを有した構造であり、SMS 型や SN 型等に比べて最弱部（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

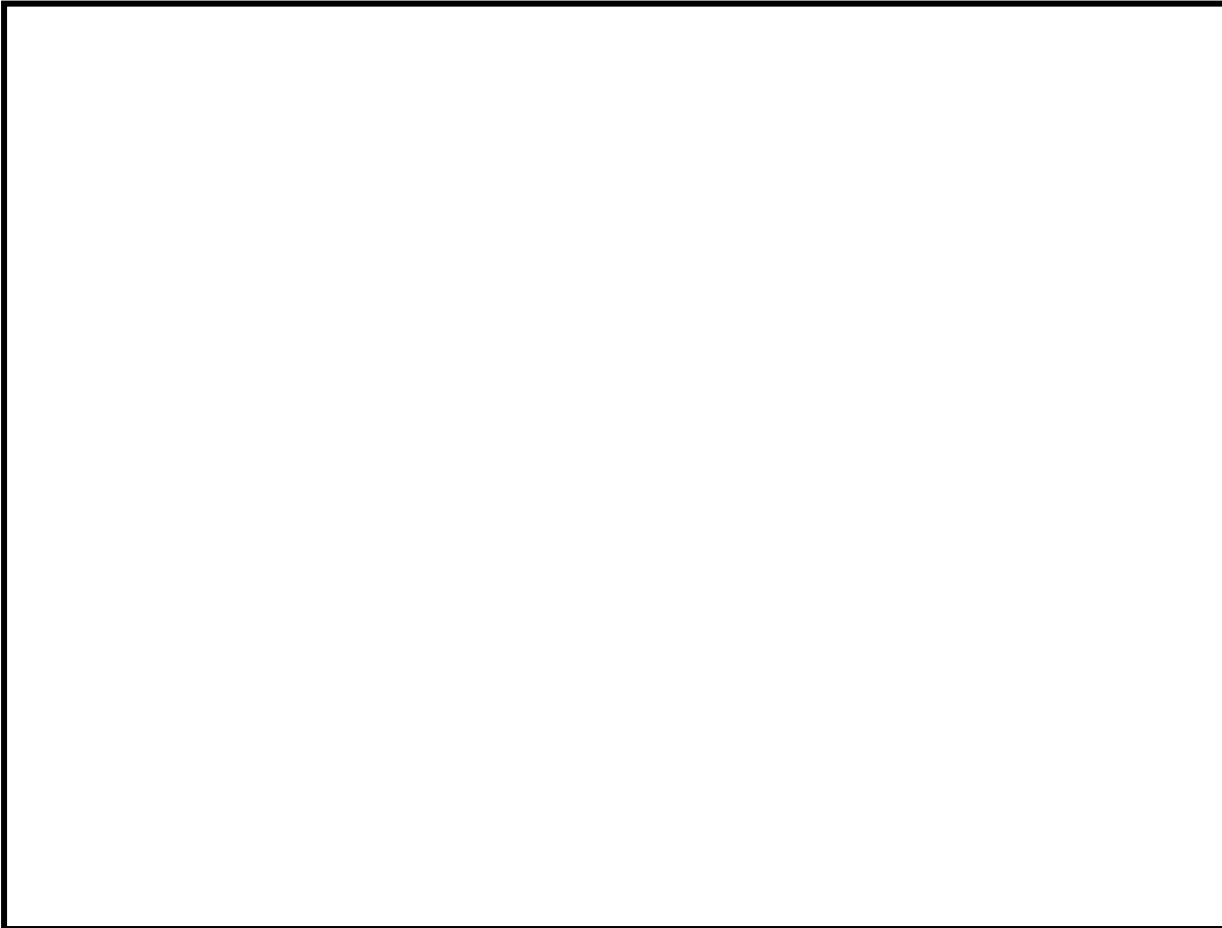
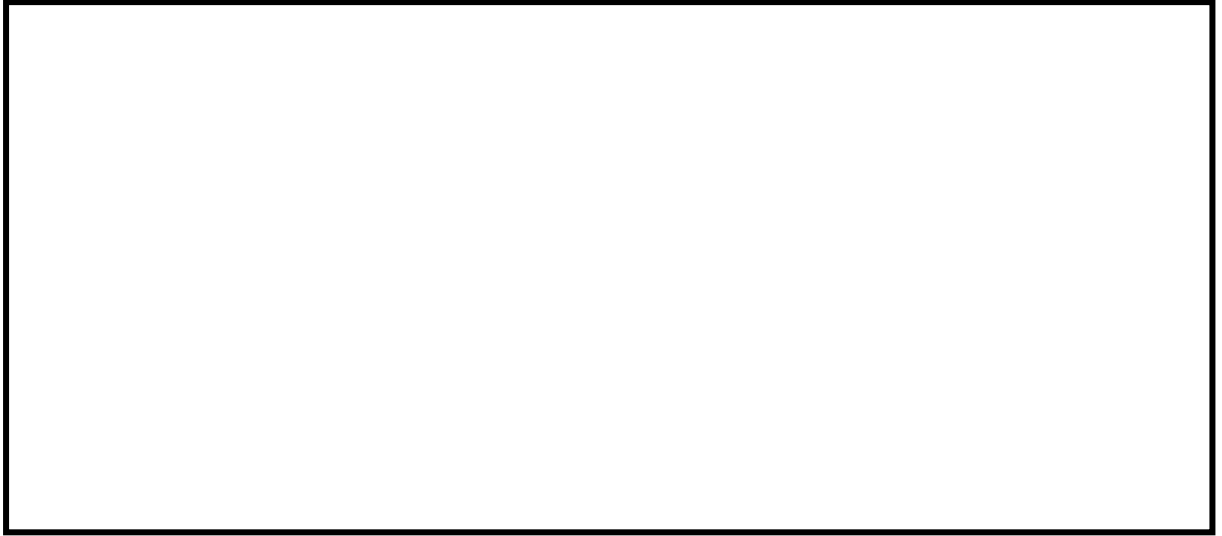


図 4-8 本試験及び過去データによる座屈耐力に関する試験値と理論値の整理

(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. オイルスナップ

(a) シリンダ室からの漏えい

SN型オイルスナップ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。スナップ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える。

- ・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、メカニカルスナップ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

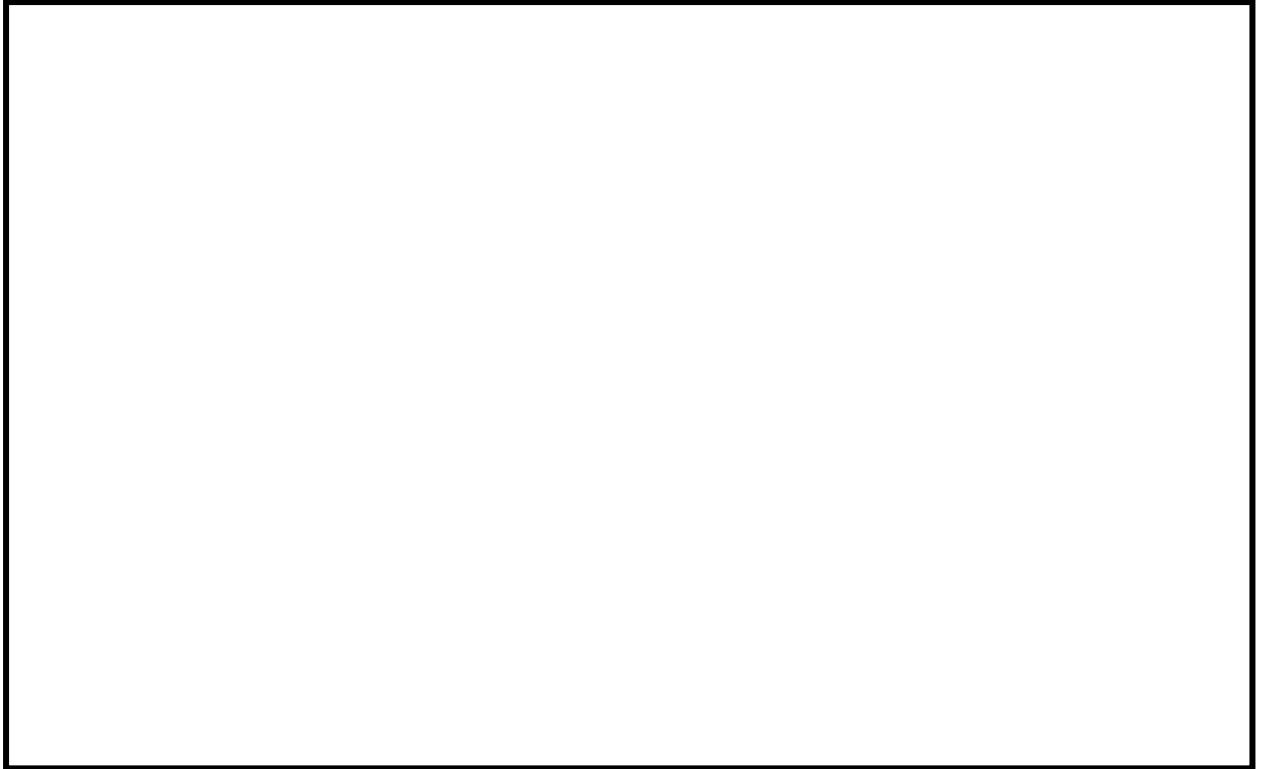


図1 SMS型メカニカルスナップ 供試体 No. 03-1 の振動試験における時刻歴波形及び荷重波形

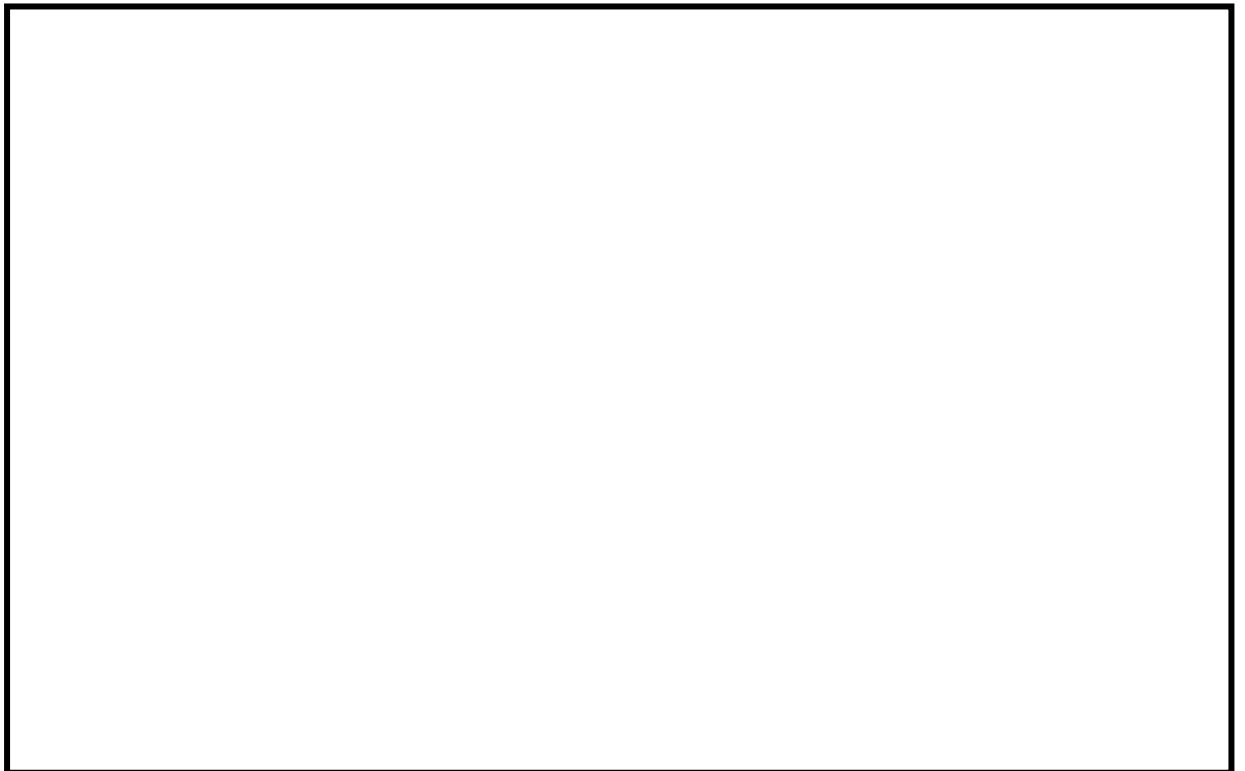


図2 SMS型メカニカルスナップ 供試体 No. 1-1 の振動試験における時刻歴波形及び荷重波形

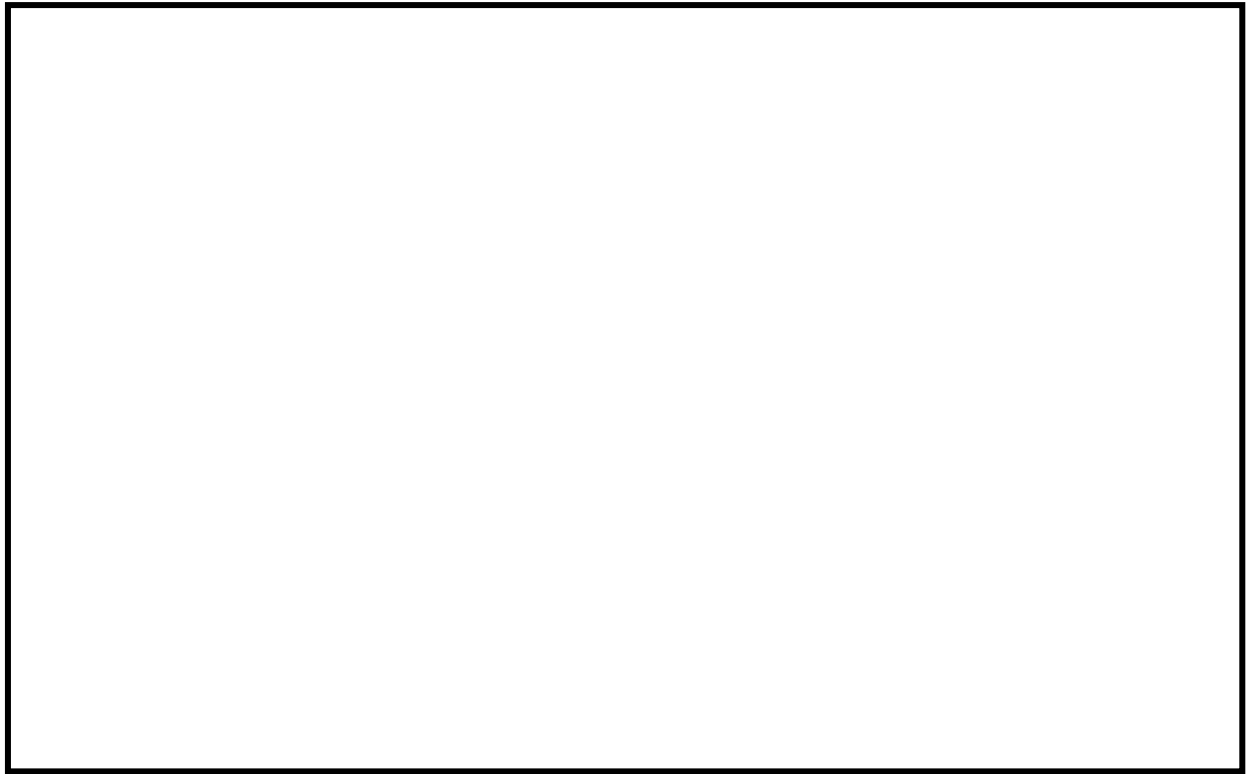


図 3 SMS 型メカニカルスナップ 供試体 No. 3-1 の振動試験における時刻歴波形及び荷重波形

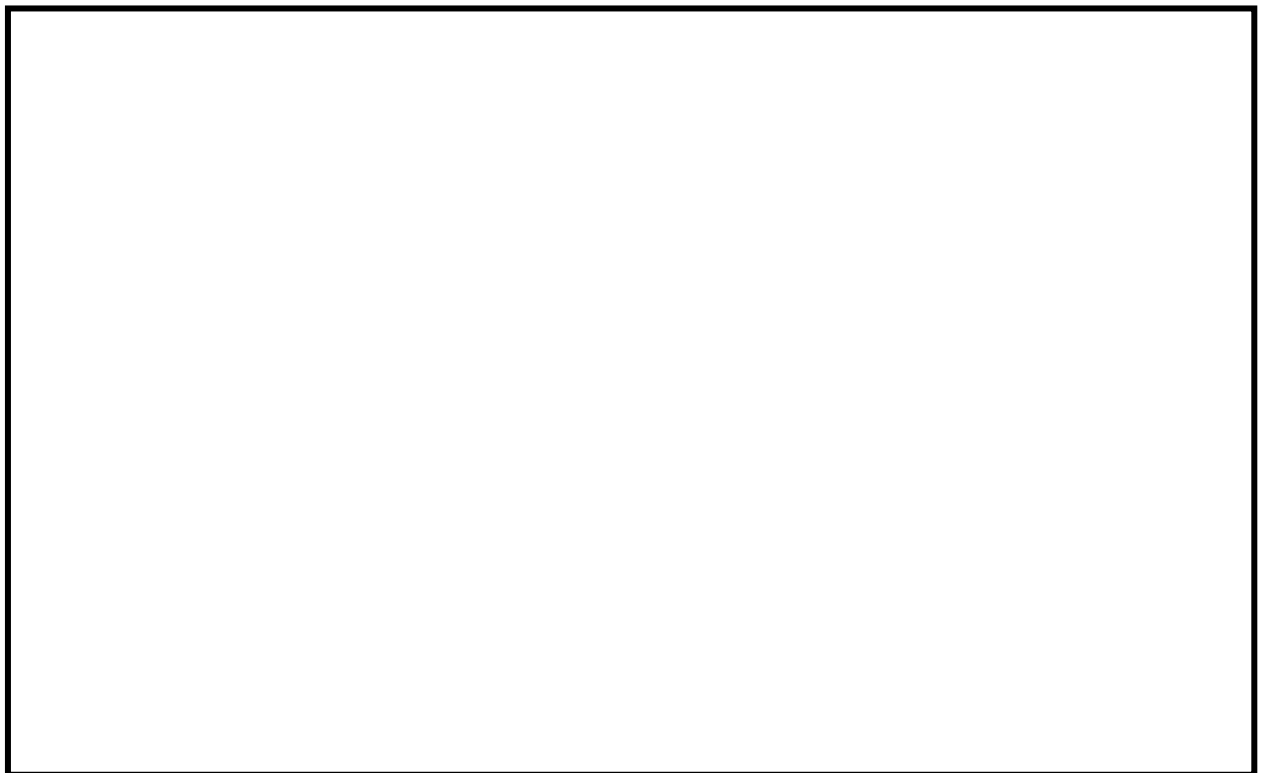


図 4 SMS 型メカニカルスナップ 供試体 No. 3-2 の振動試験における時刻歴波形及び荷重波形

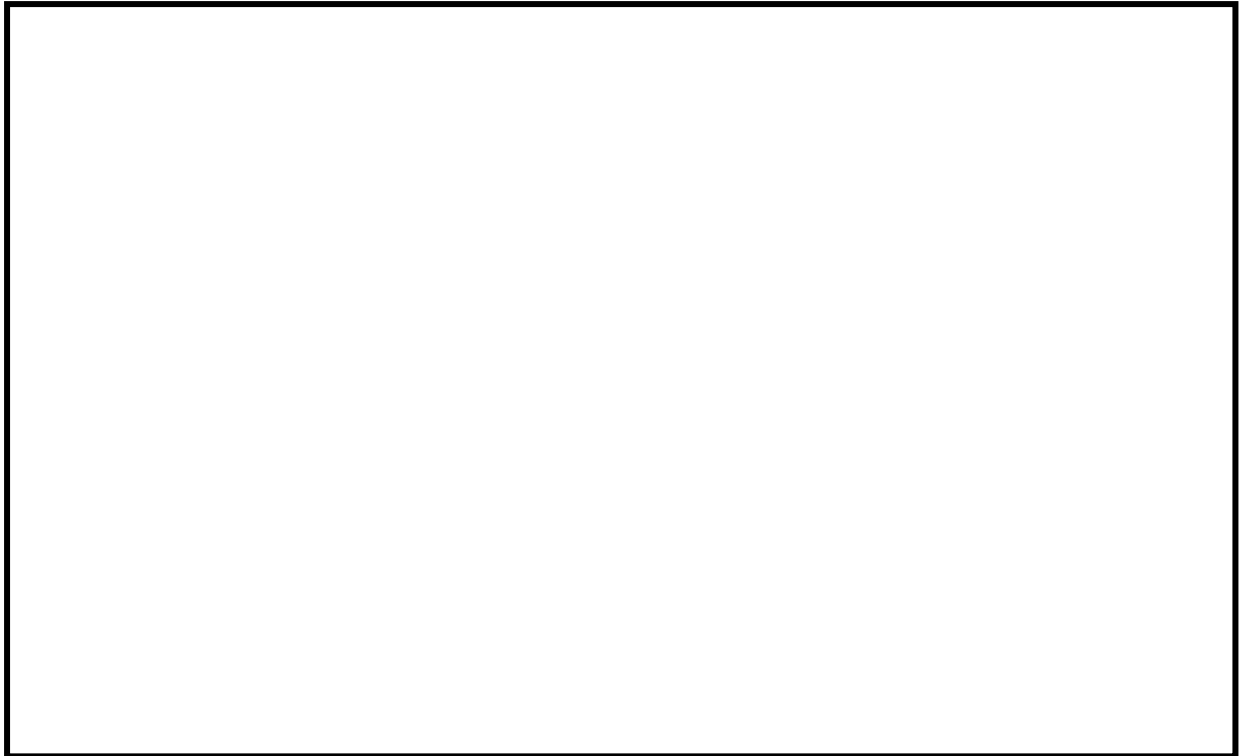


図 5 SMS 型メカニカルスナップ 供試体 No. 3-3 の振動試験における時刻歴波形及び荷重波形

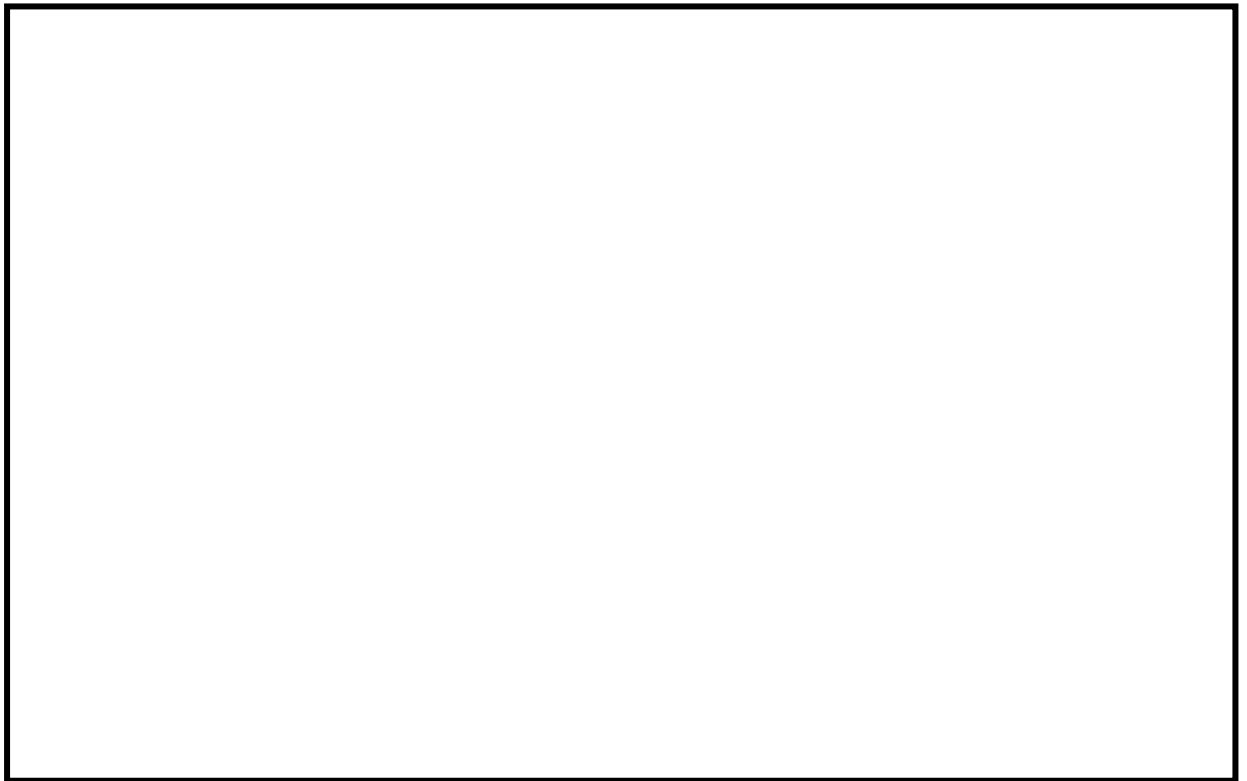


図 6 SMS 型メカニカルスナップ 供試体 No. 6-1 の振動試験における時刻歴波形及び荷重波形



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

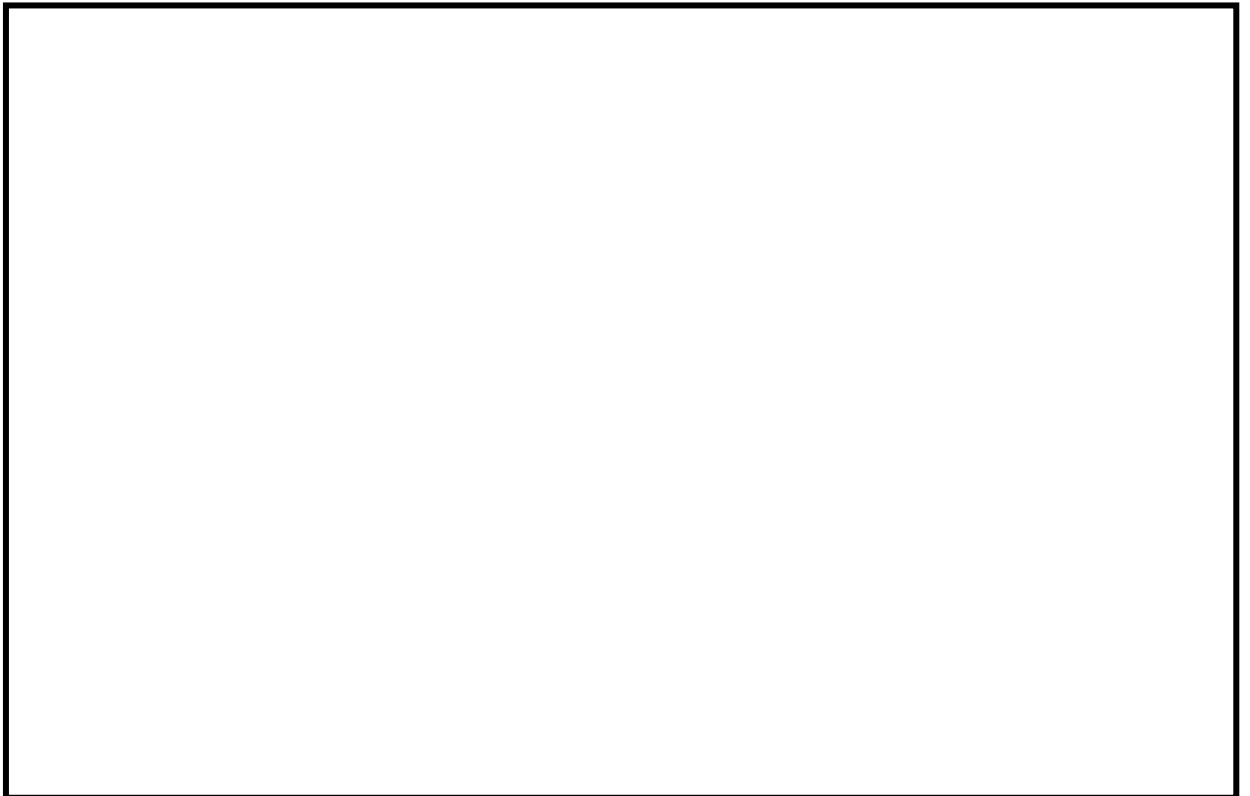


図8 SHP型オイルスナッパ 供試体 No. 03-1 の振動試験における時刻歴波形及び荷重波形

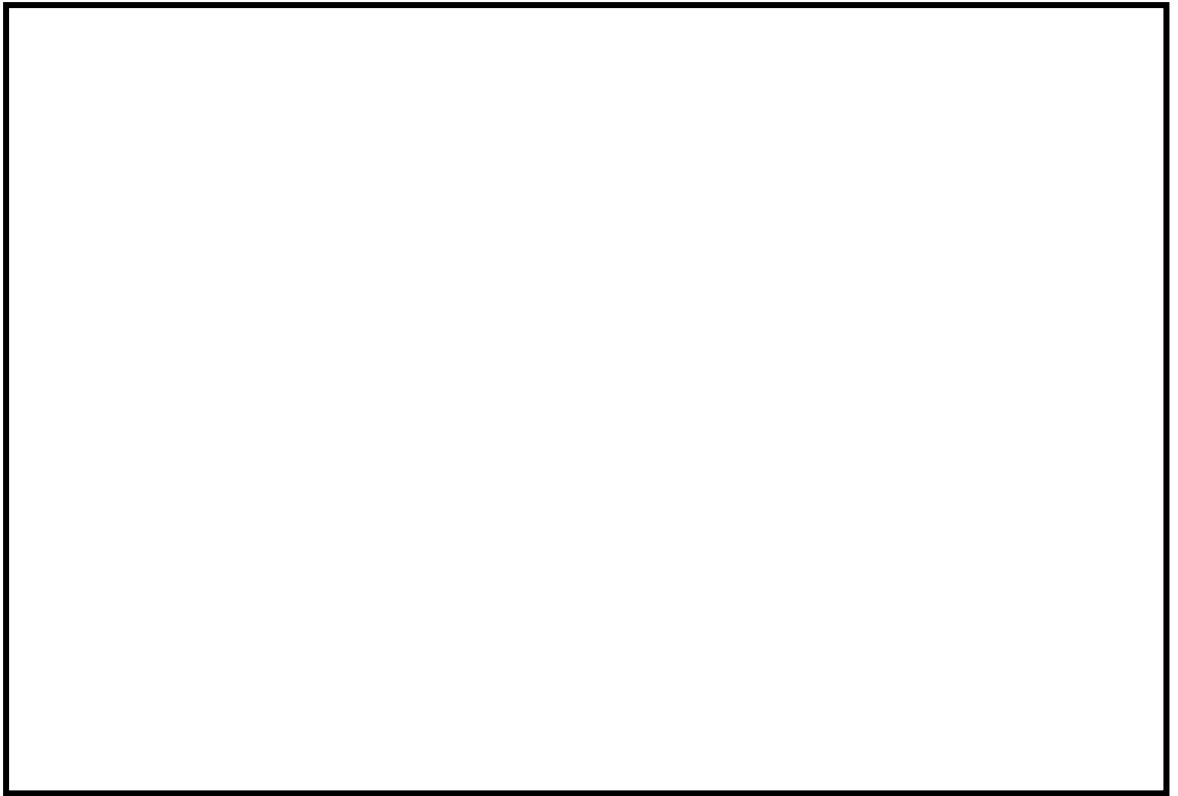


図9 SHP型オイルスナックバ 供試体 No. 3-1 の振動試験における時刻歴波形及び荷重波形

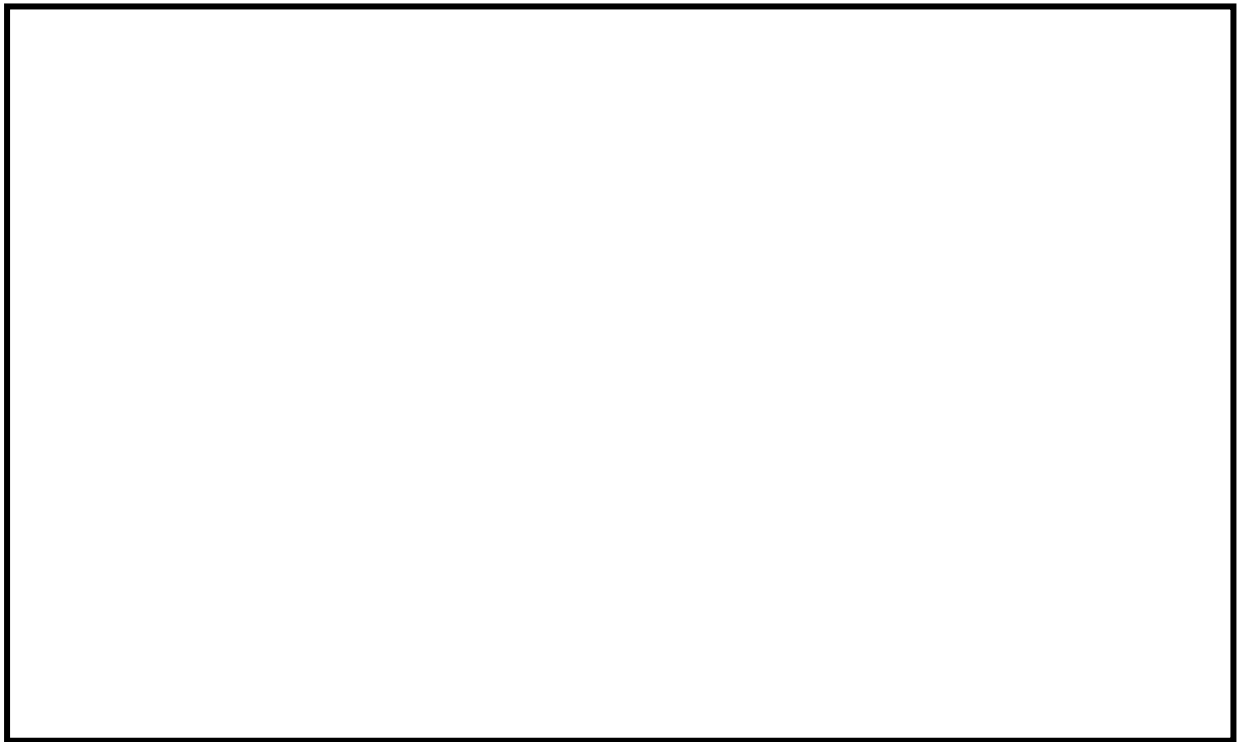


図10 SHP型オイルスナックバ 供試体 No. 3-2 の振動試験における時刻歴波形及び荷重波形

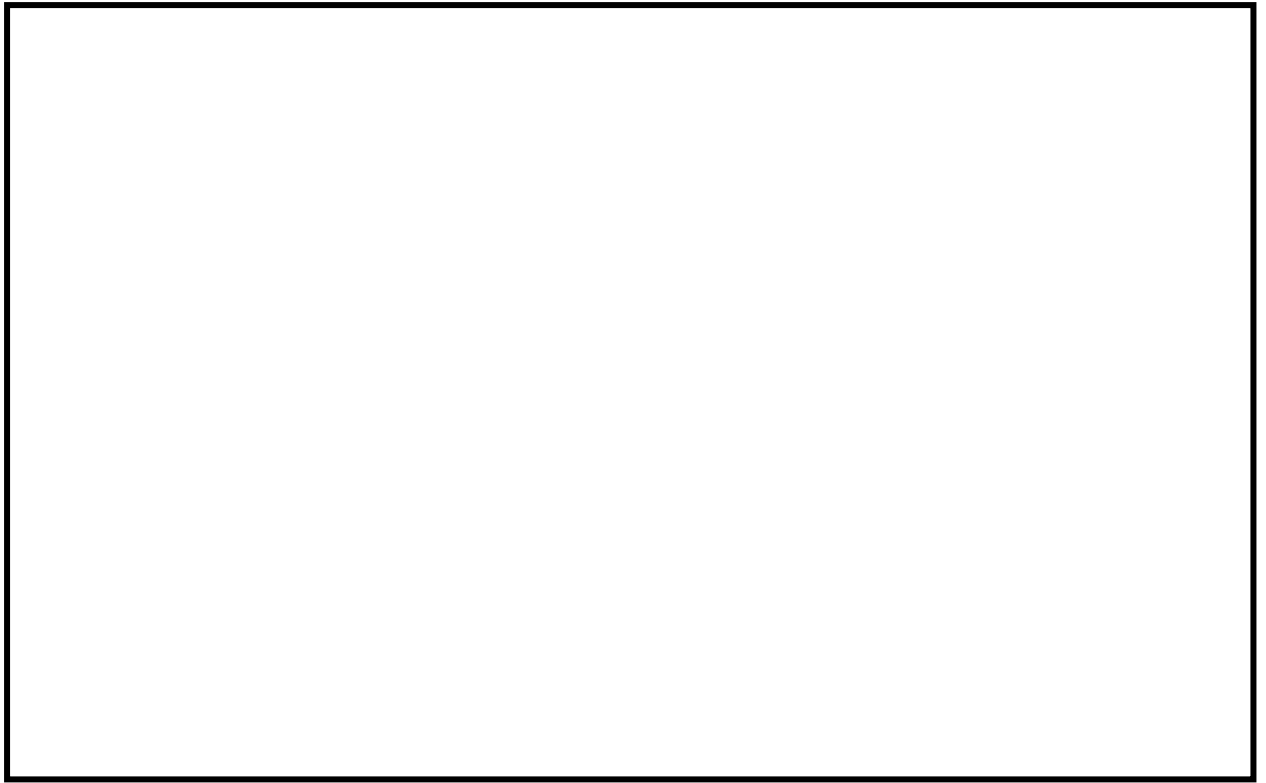


図 11 SHP 型オイルスナックバ 供試体 No. 3-3 の振動試験における時刻歴波形及び荷重波形

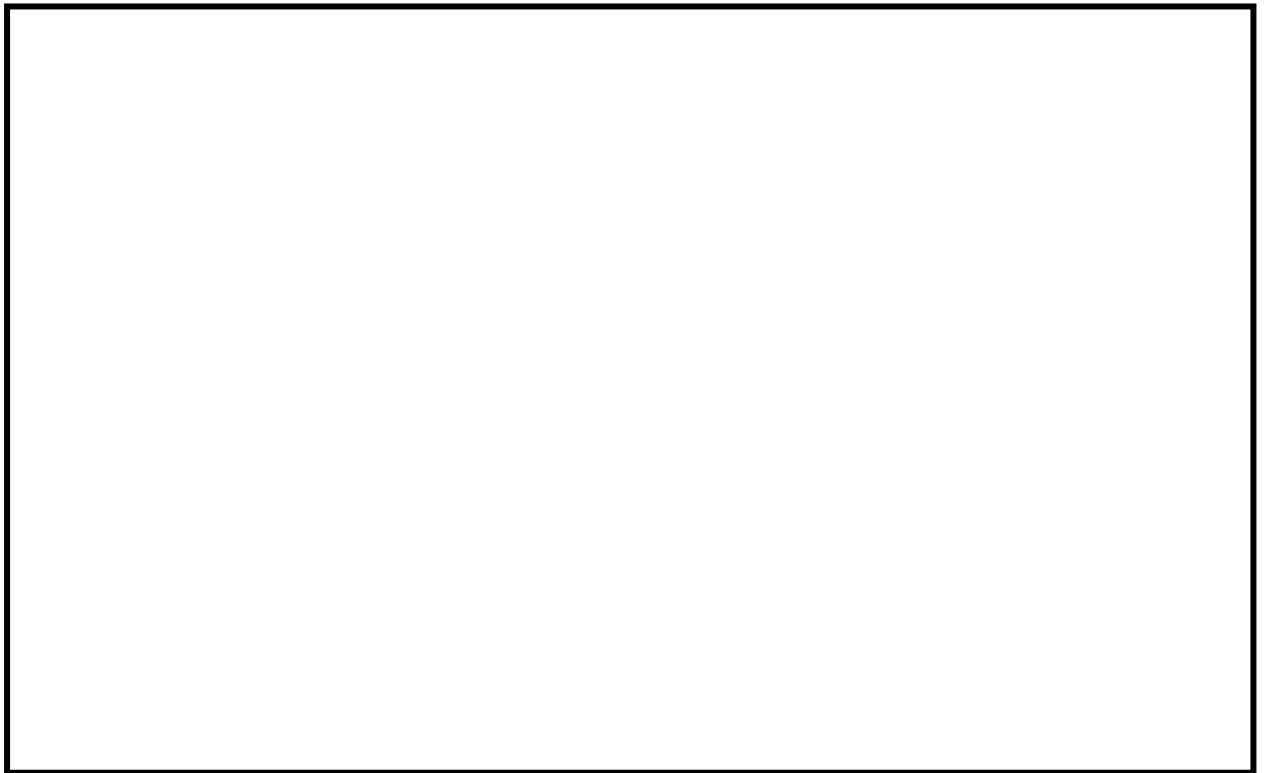


図 12 SHP 型オイルスナックバ 供試体 No. 16-1 の振動試験における時刻歴波形及び荷重波形

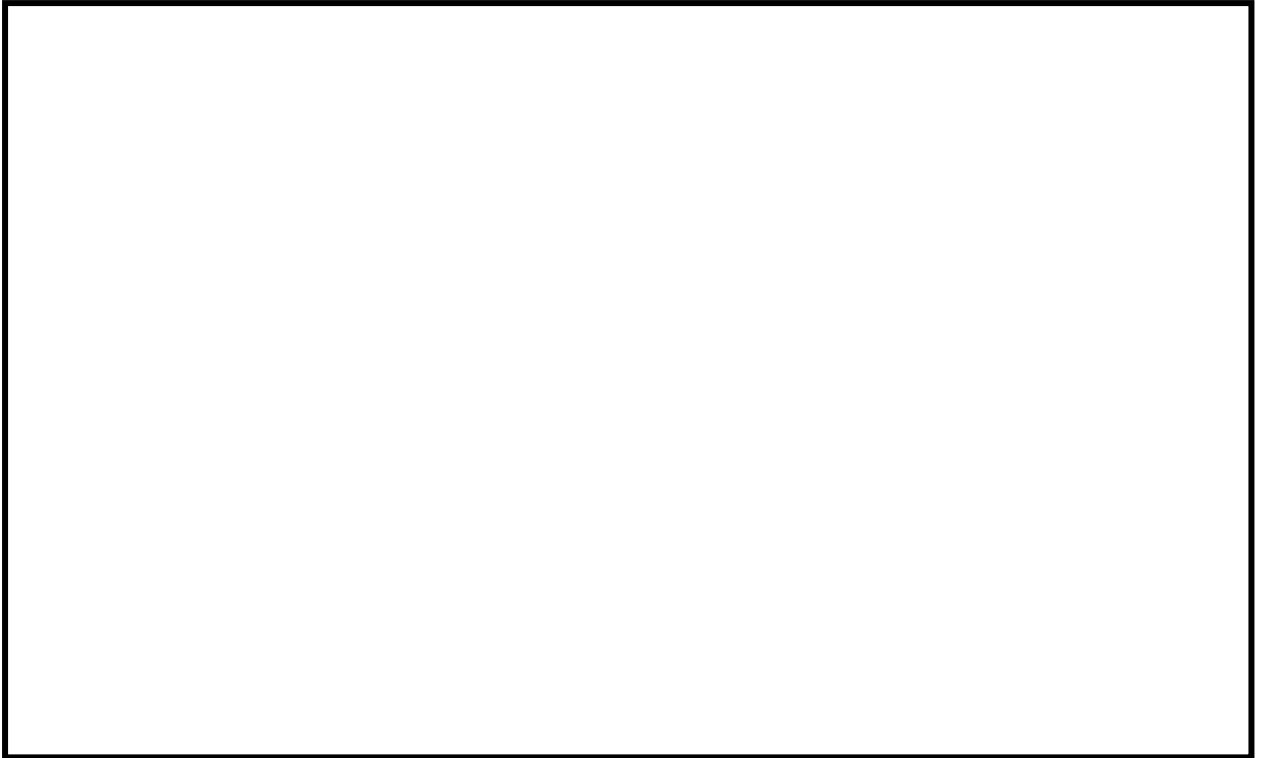


図 13 SN 型オイルスナップ 供試体 No. 03-1 の振動試験における時刻歴波形及び荷重波形

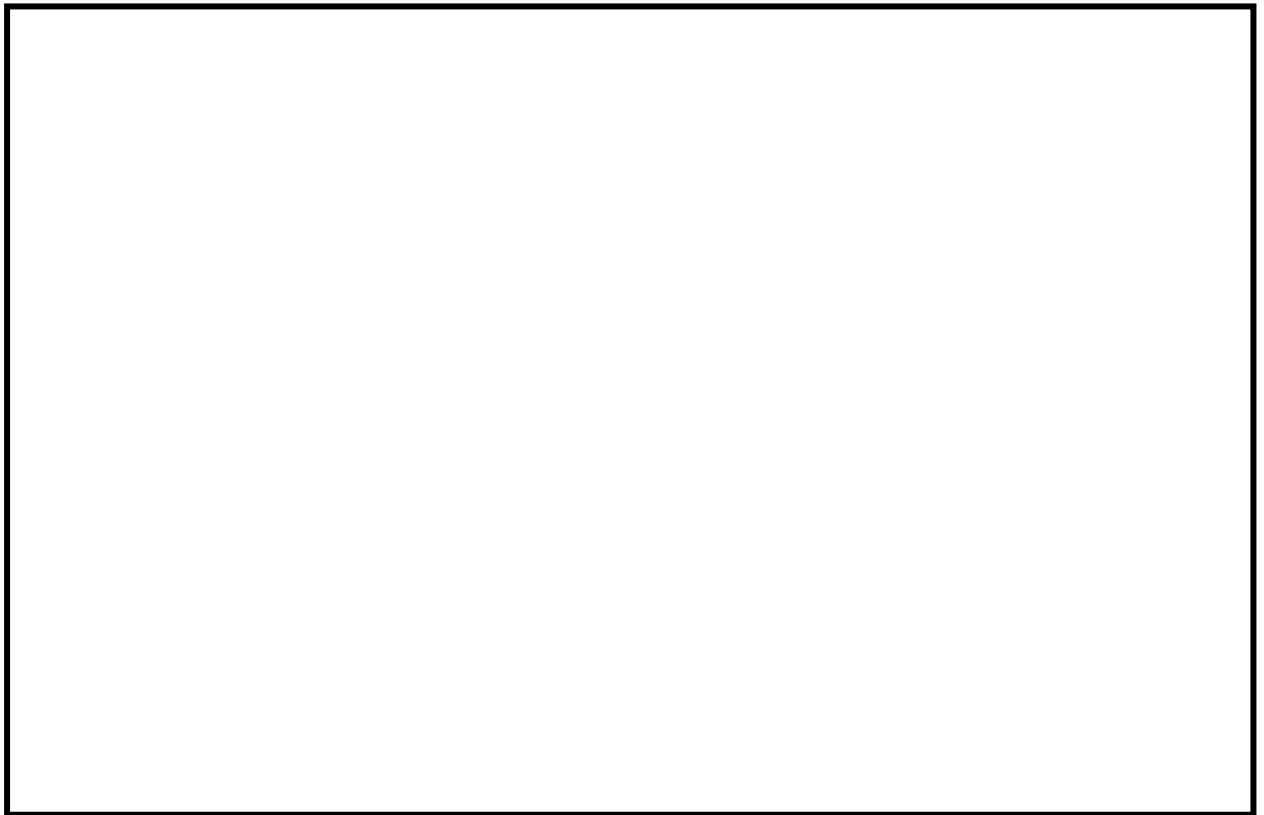


図 14 SN 型オイルスナップ 供試体 No. 3-1 の振動試験における時刻歴波形及び荷重波形

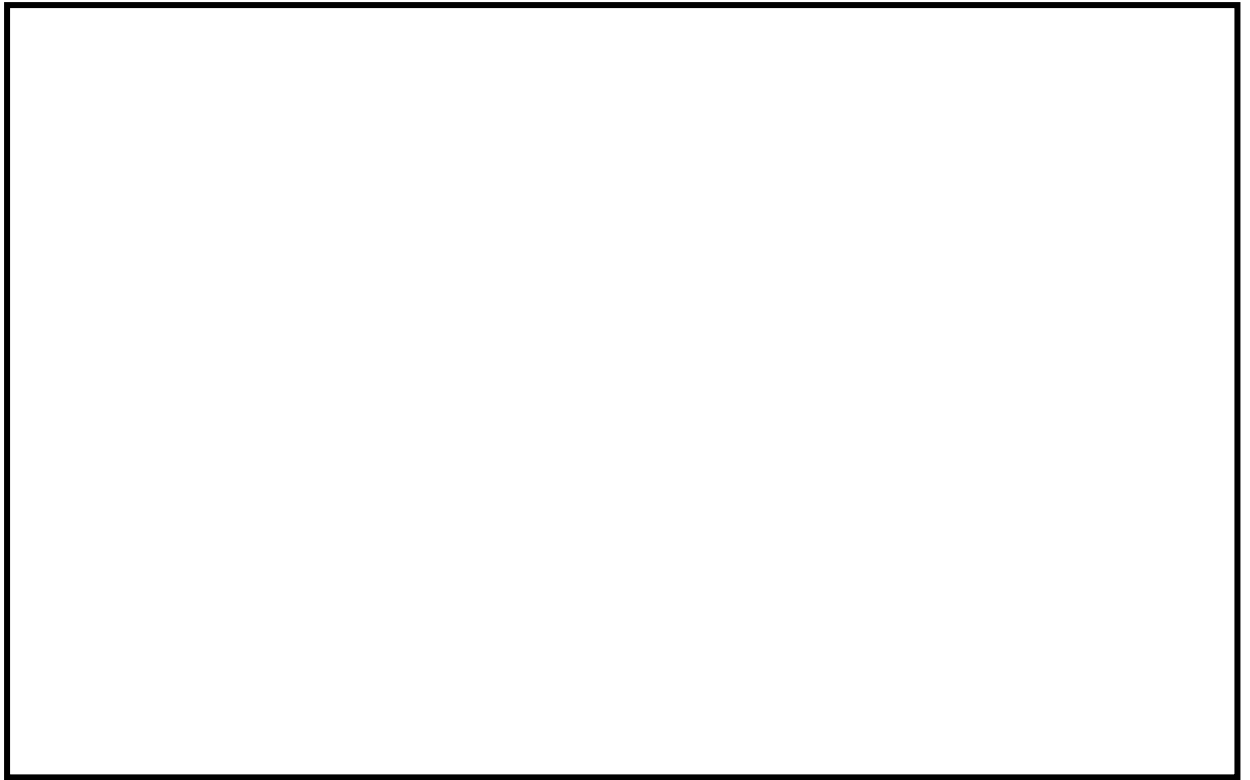


図 15 SN型オイルスナップ 供試体 No. 3-2 の振動試験における時刻歴波形及び荷重波形

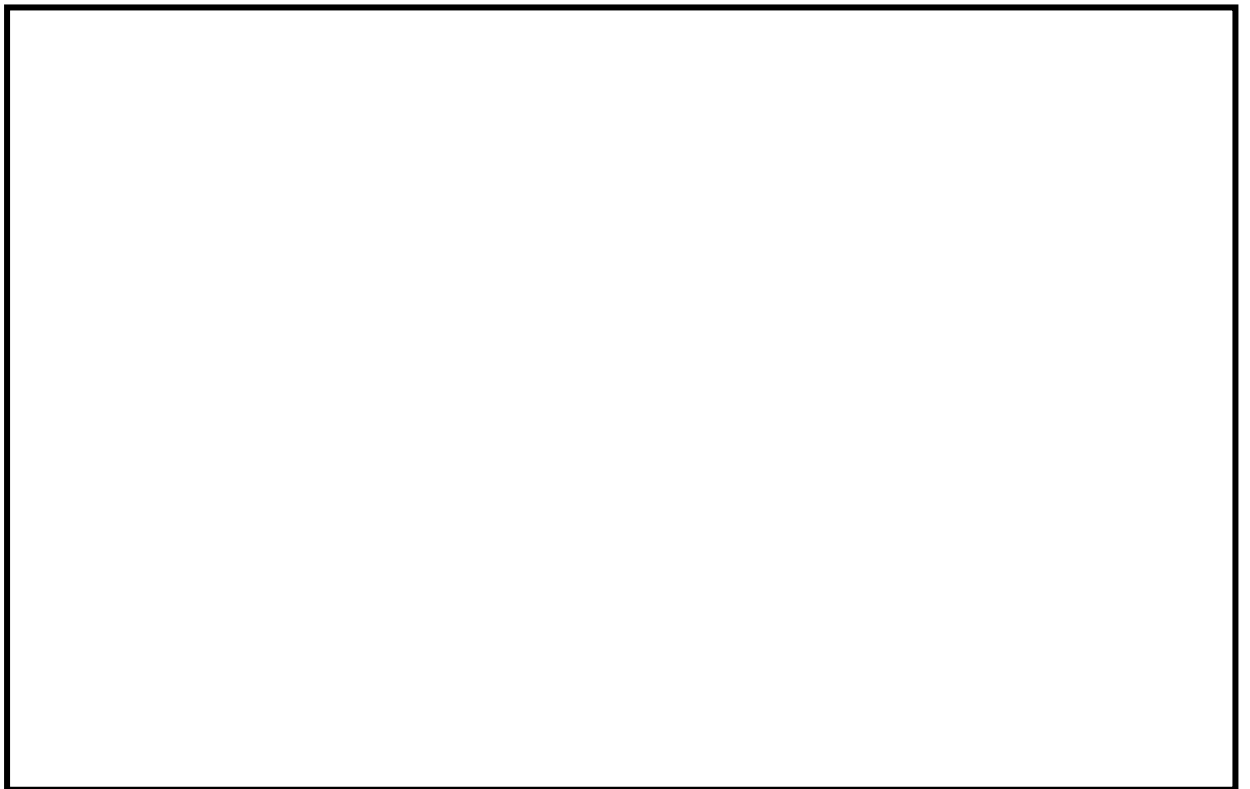


図 16 SN型オイルスナップ 供試体 No. 3-3 の振動試験における時刻歴波形及び荷重波形

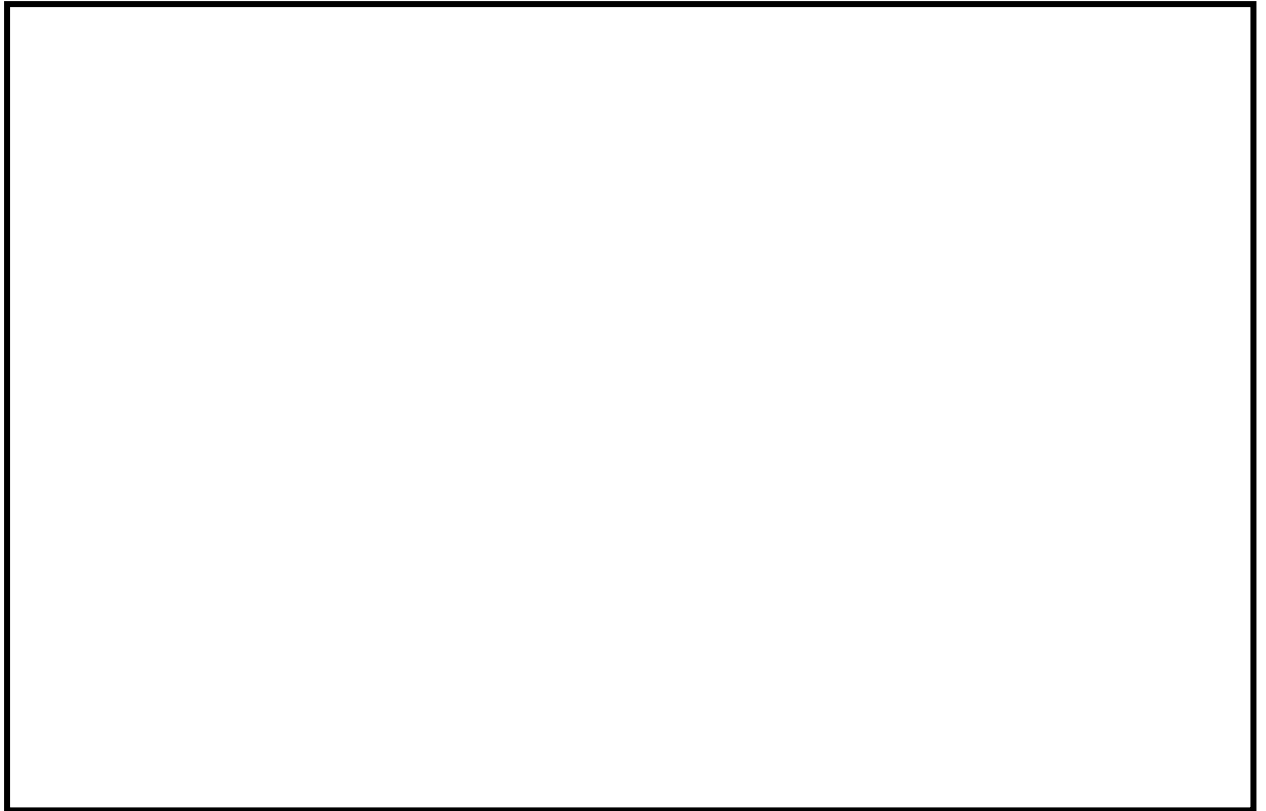


図 17 SN型オイルスナップ 供試体 No. 6-1 の振動試験における時刻歴波形及び荷重波形

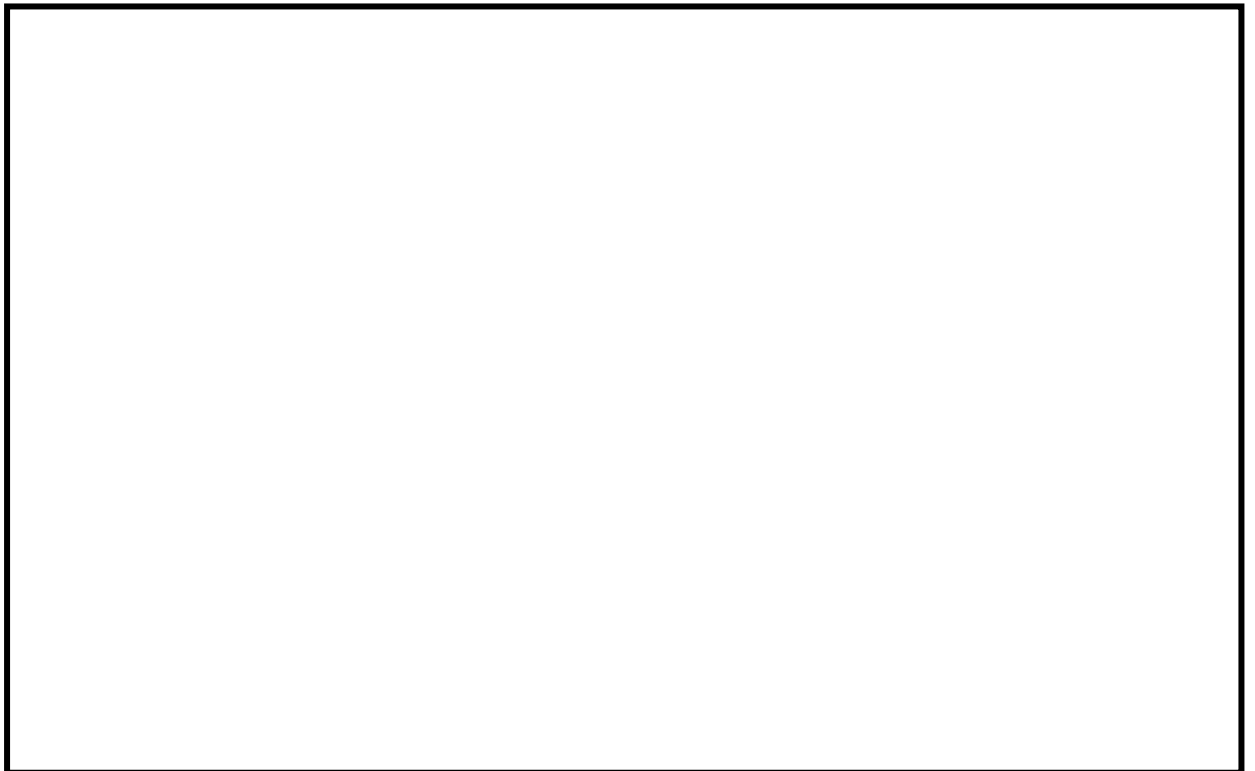


図 18 SN型オイルスナップ 供試体 No. 16-1 の振動試験における時刻歴波形及び荷重波形

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	78.4	50.8	全長座屈	構造部材	1.69	1.54
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	523.1	318.7	全長座屈	構造部材	1.99	1.64
SHP-25	250	—	514.8	ターンバックル	構造部材	2.05	—
SN-03	3	53.4	9.1	全長座屈	構造部材	3.03	5.86
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	109.7	70.6	全長座屈	構造部材	2.35	1.55
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	—

スナッパ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。

スナッパ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、スナッパ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。

メカニカルスナッパについては、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、メカニカルスナッパ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損傷荷重である 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、オイルスナッパについては、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。

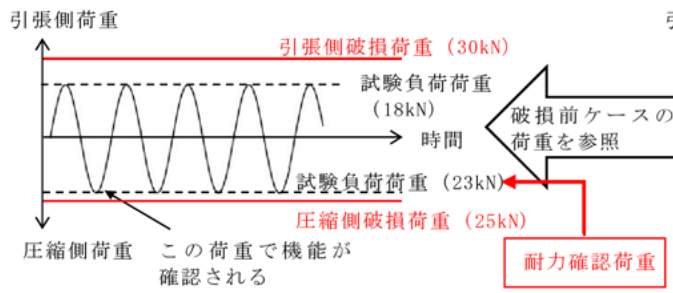


図1 振動試験の荷重波形(破損前の試験ケース, 機能確保)

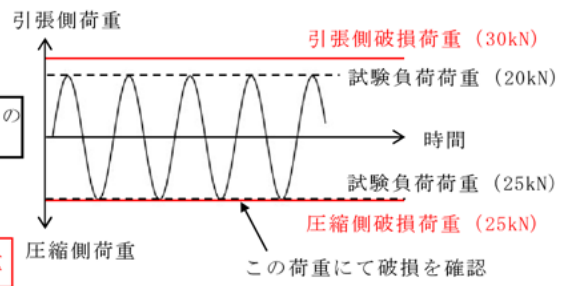


図2 振動試験の荷重波形(破損ケース)

電共研におけるスナッパの限界耐力評価法

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) (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)(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) (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) (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) (1/2)

品番	評価部位	評価項目	電共研計算式	
				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) (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。

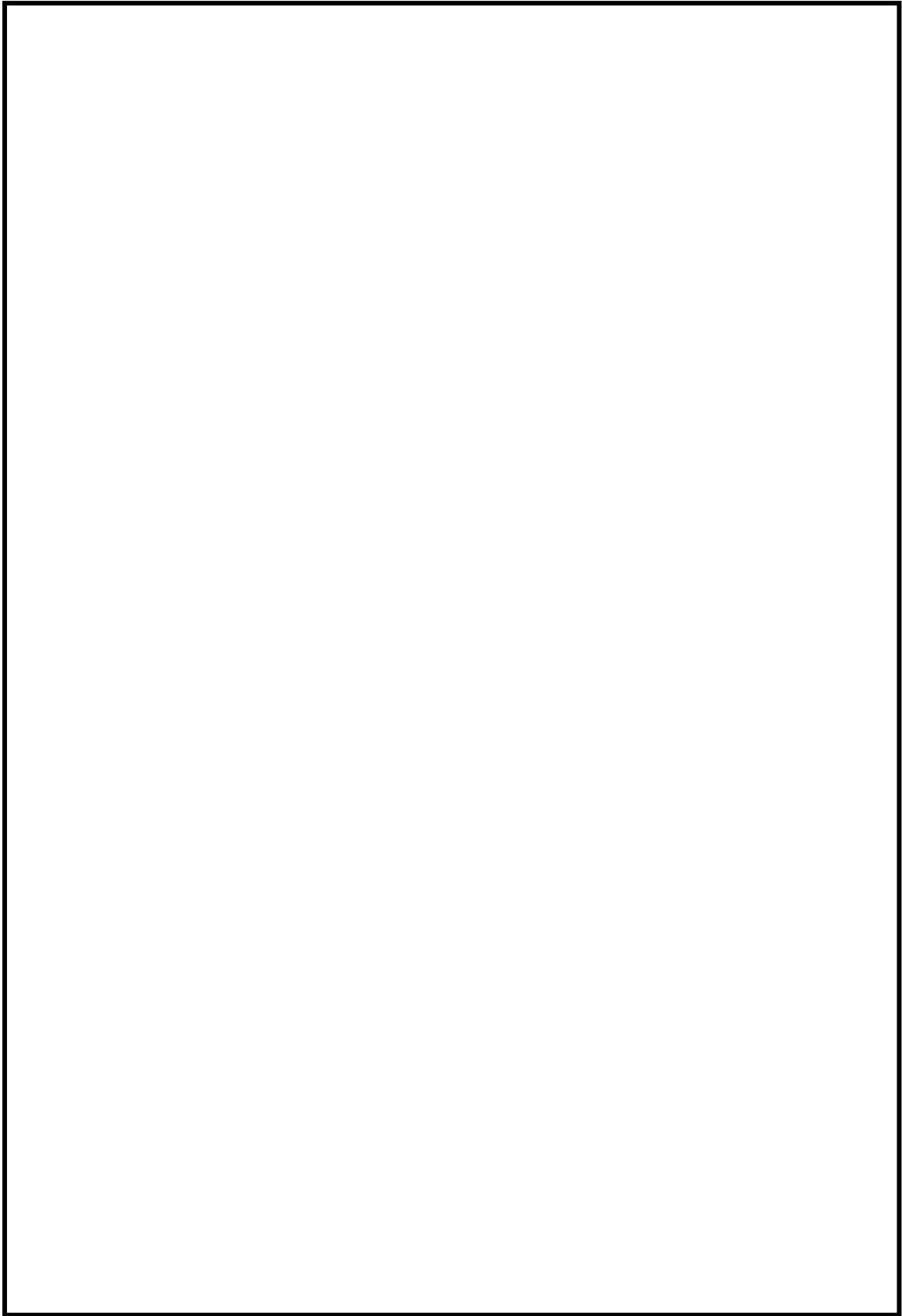
*2：許容値の扱い(降伏点と引張強さのいずれか小さい値を採用するか、いずれかの値を採用するか)及び端数処理以外の相違点を記載した。

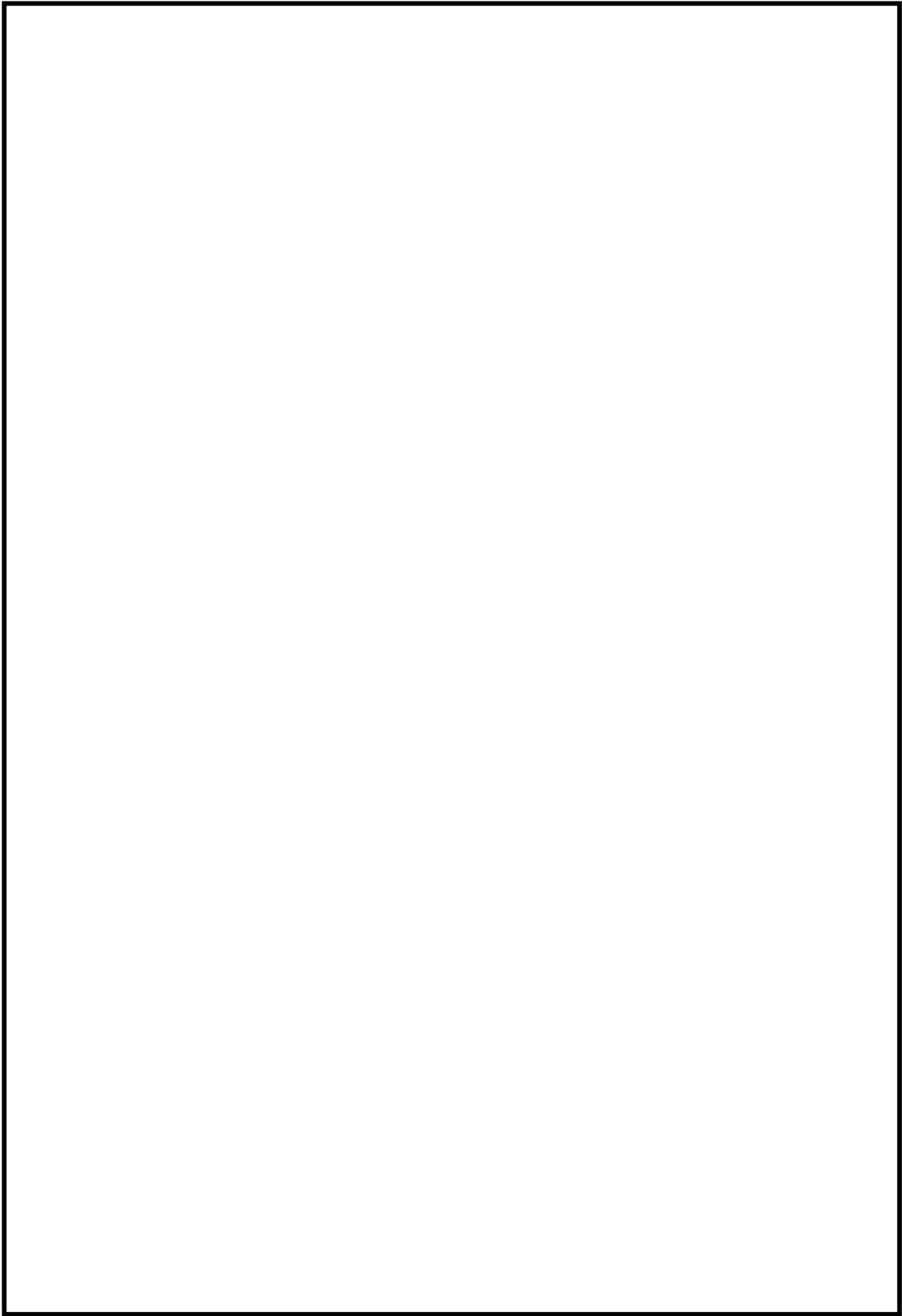
スナッパの J N E S 研究の概要

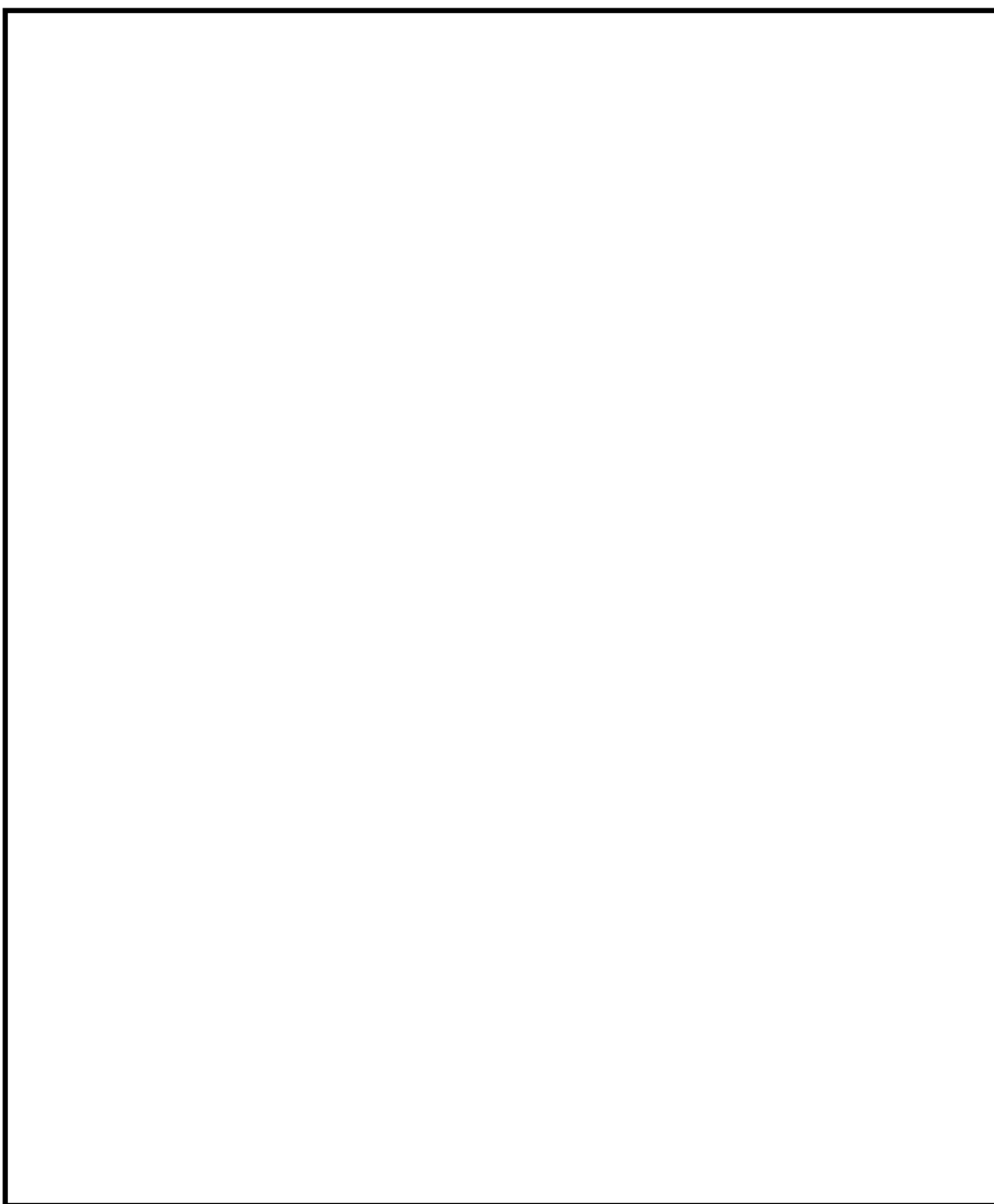
1. はじめに

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。

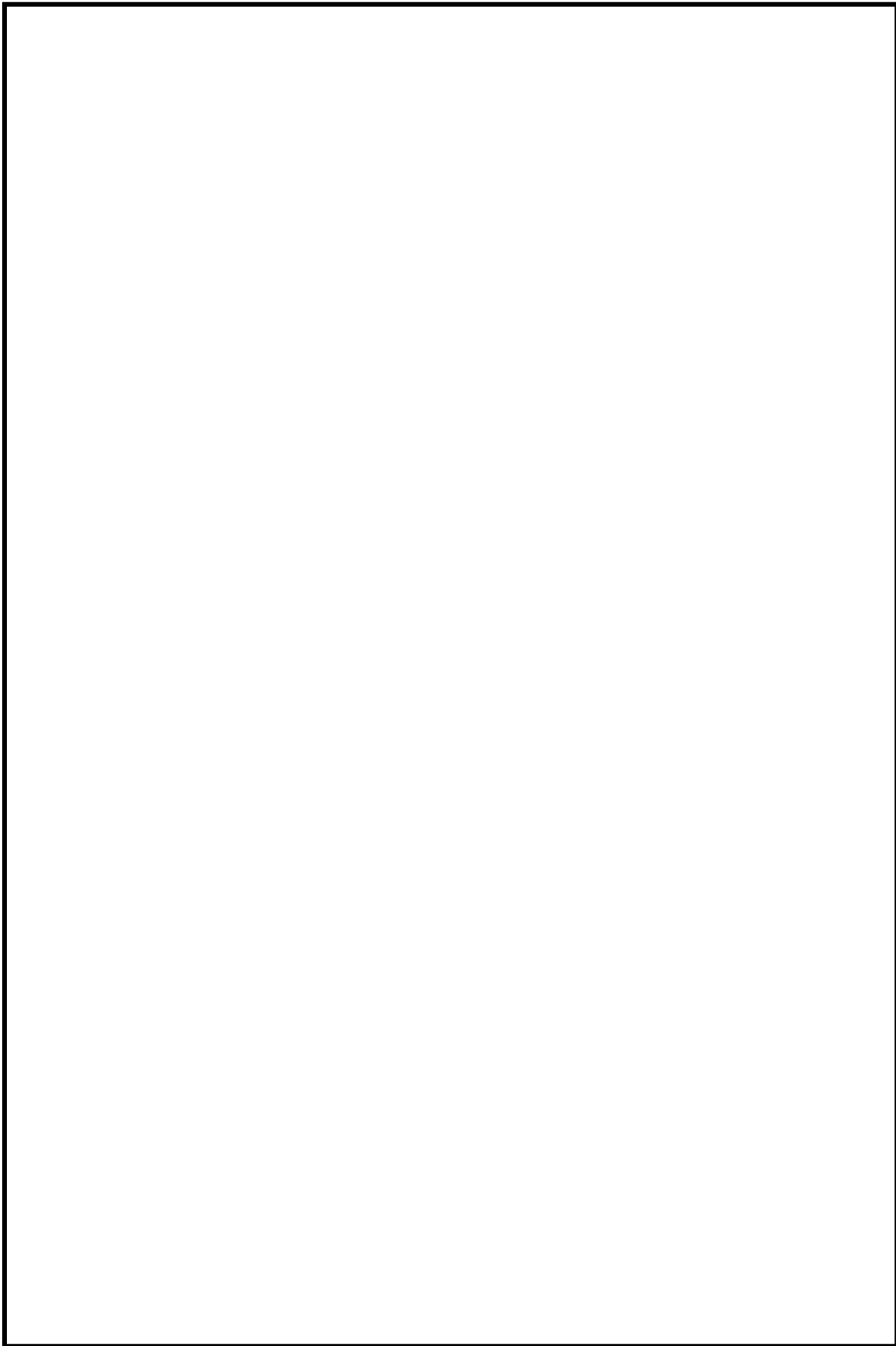


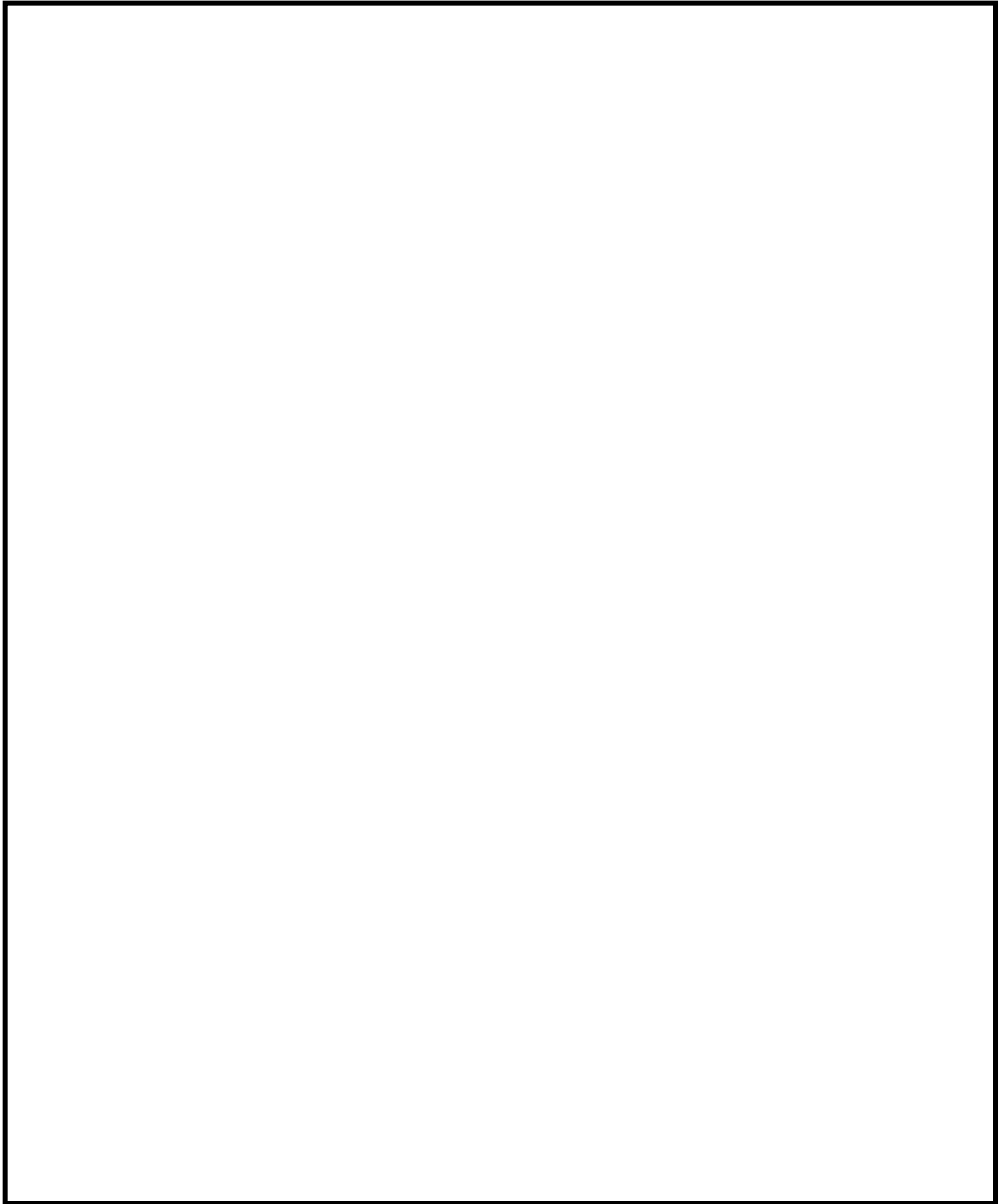


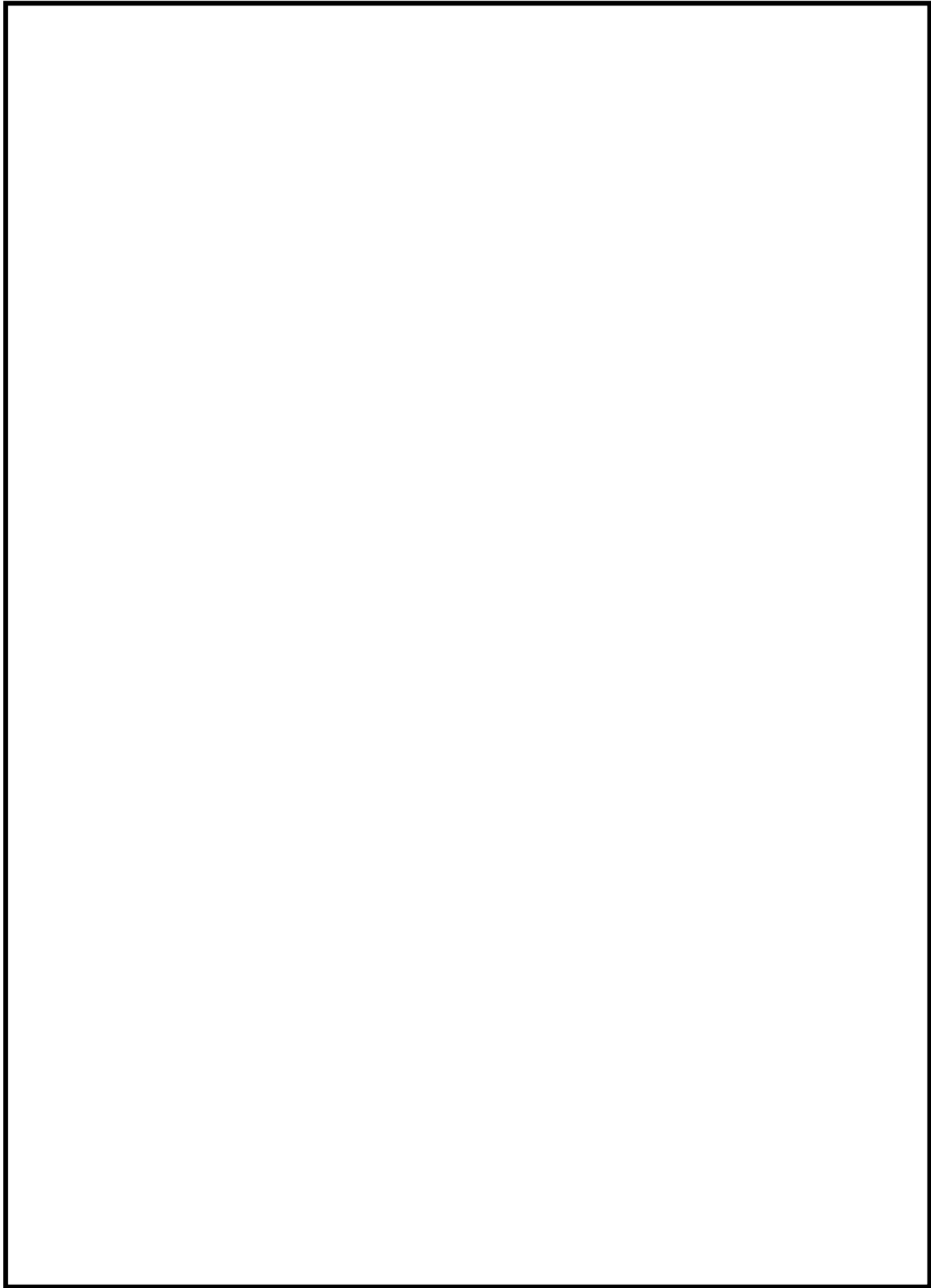


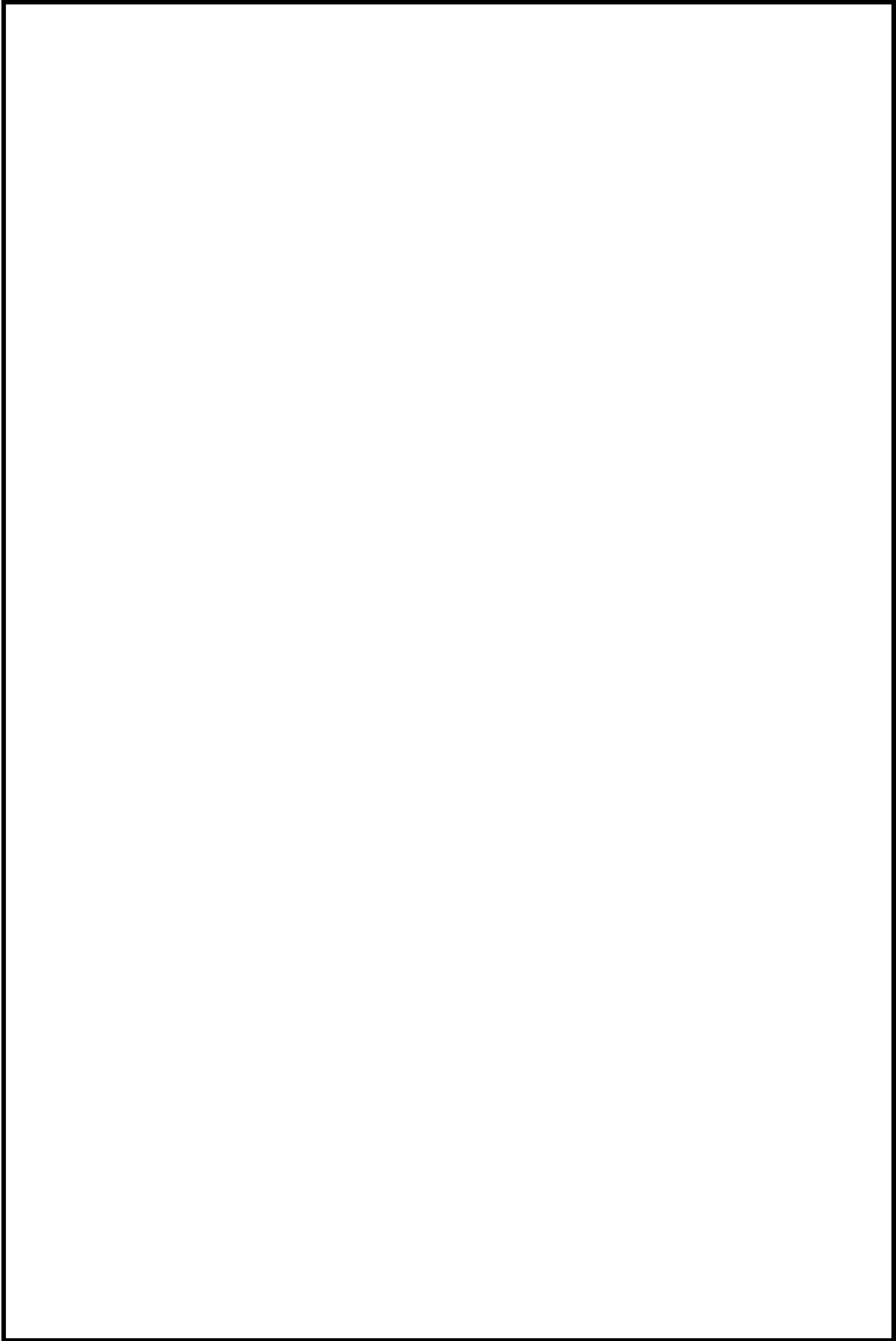




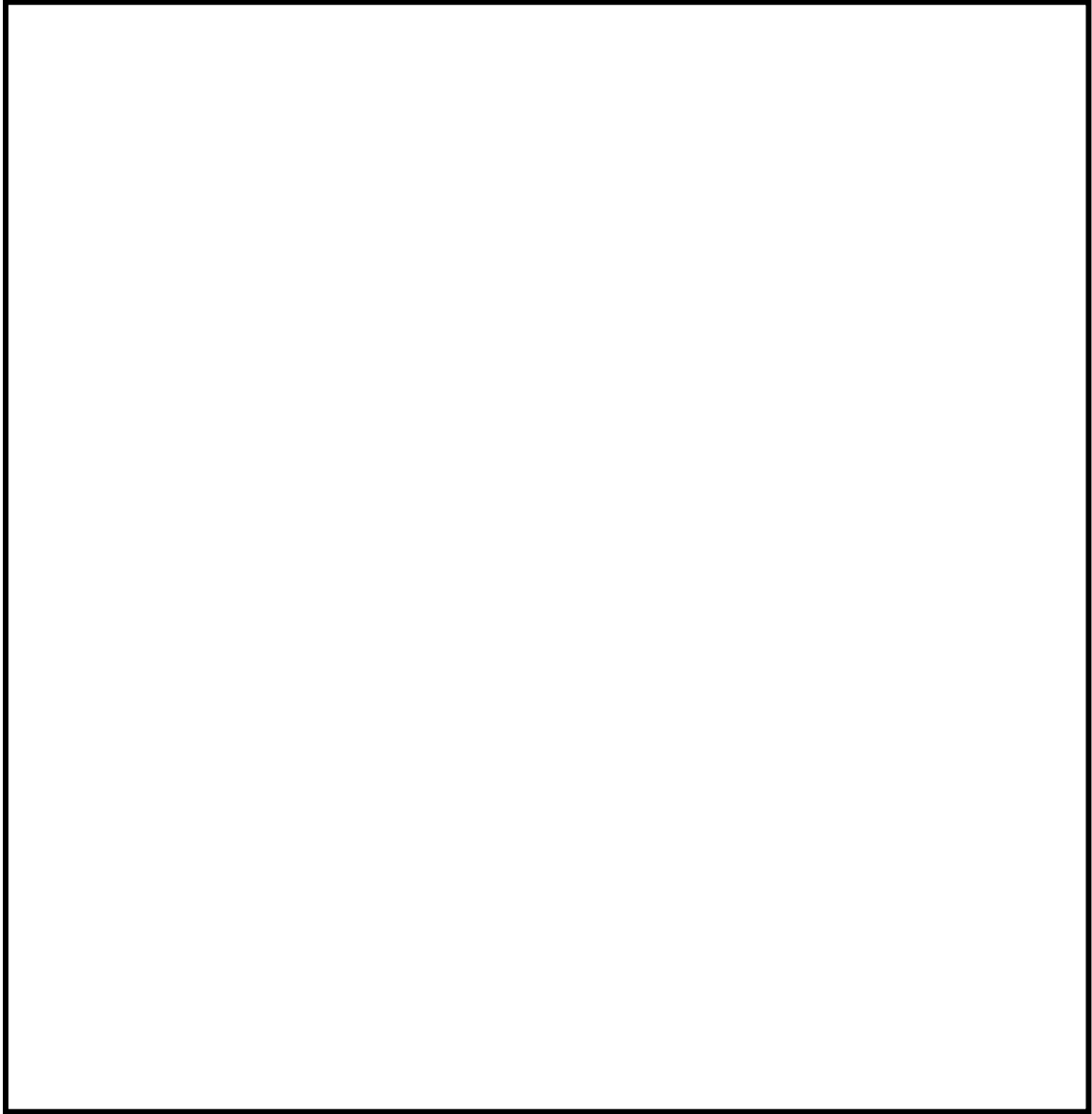


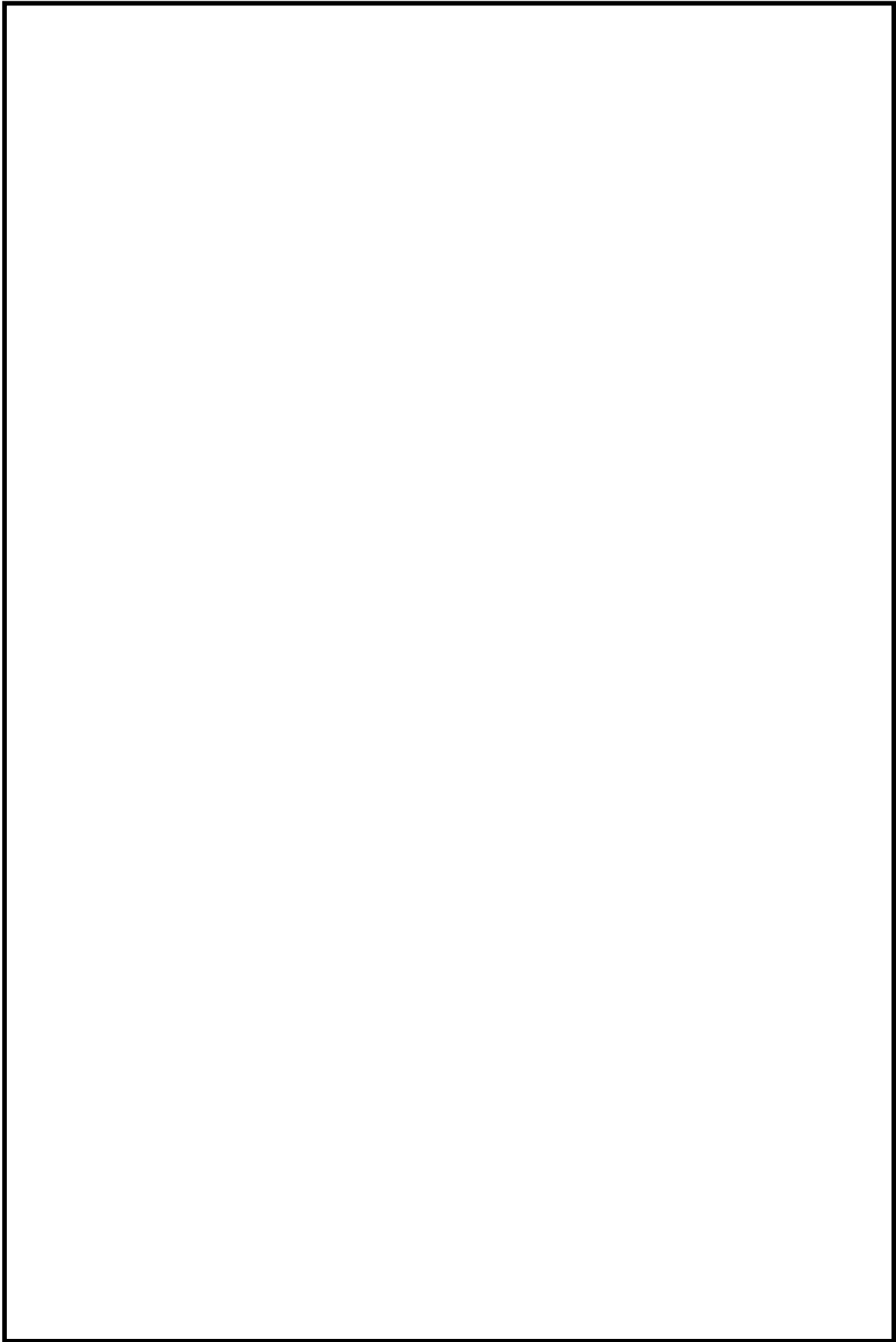


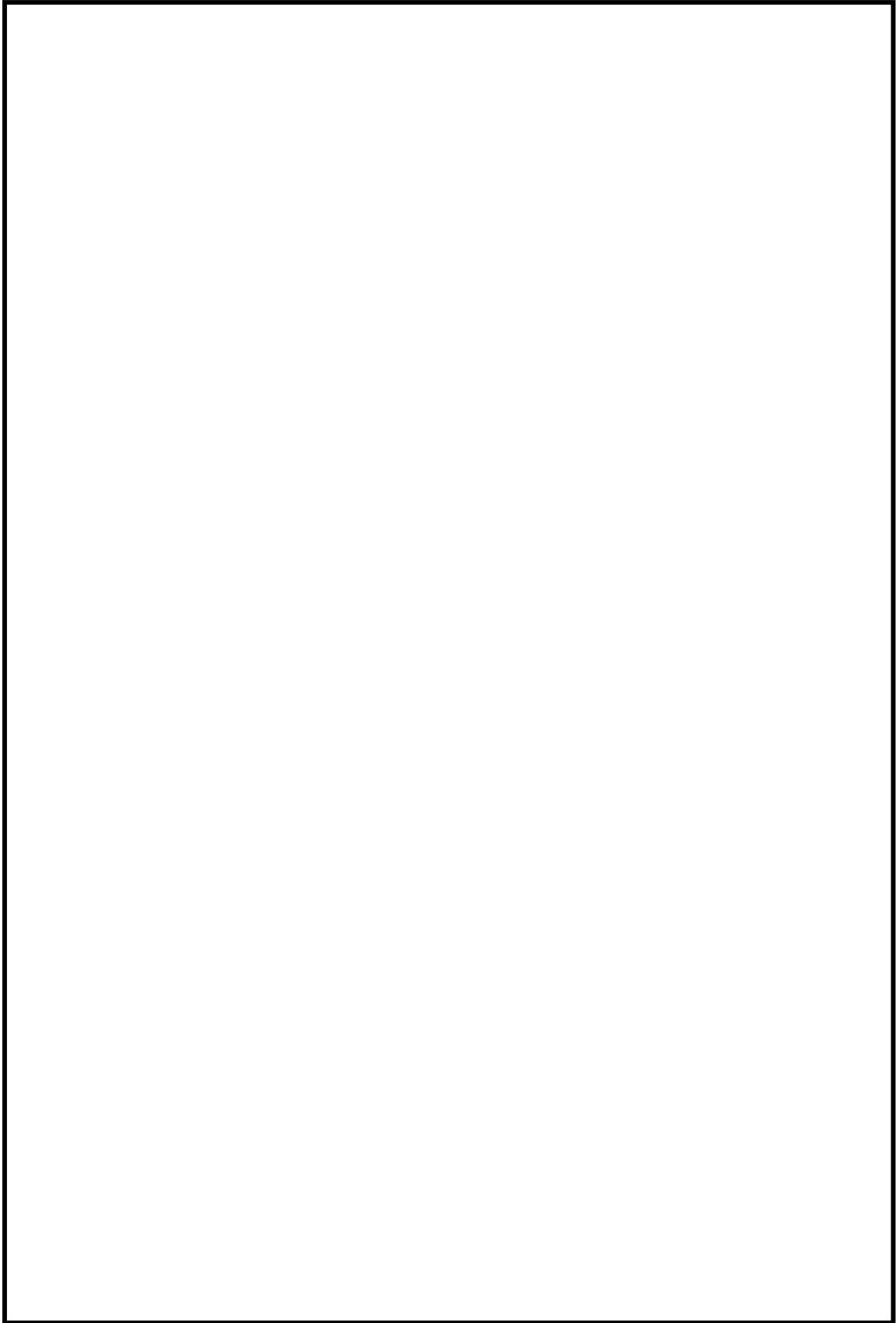


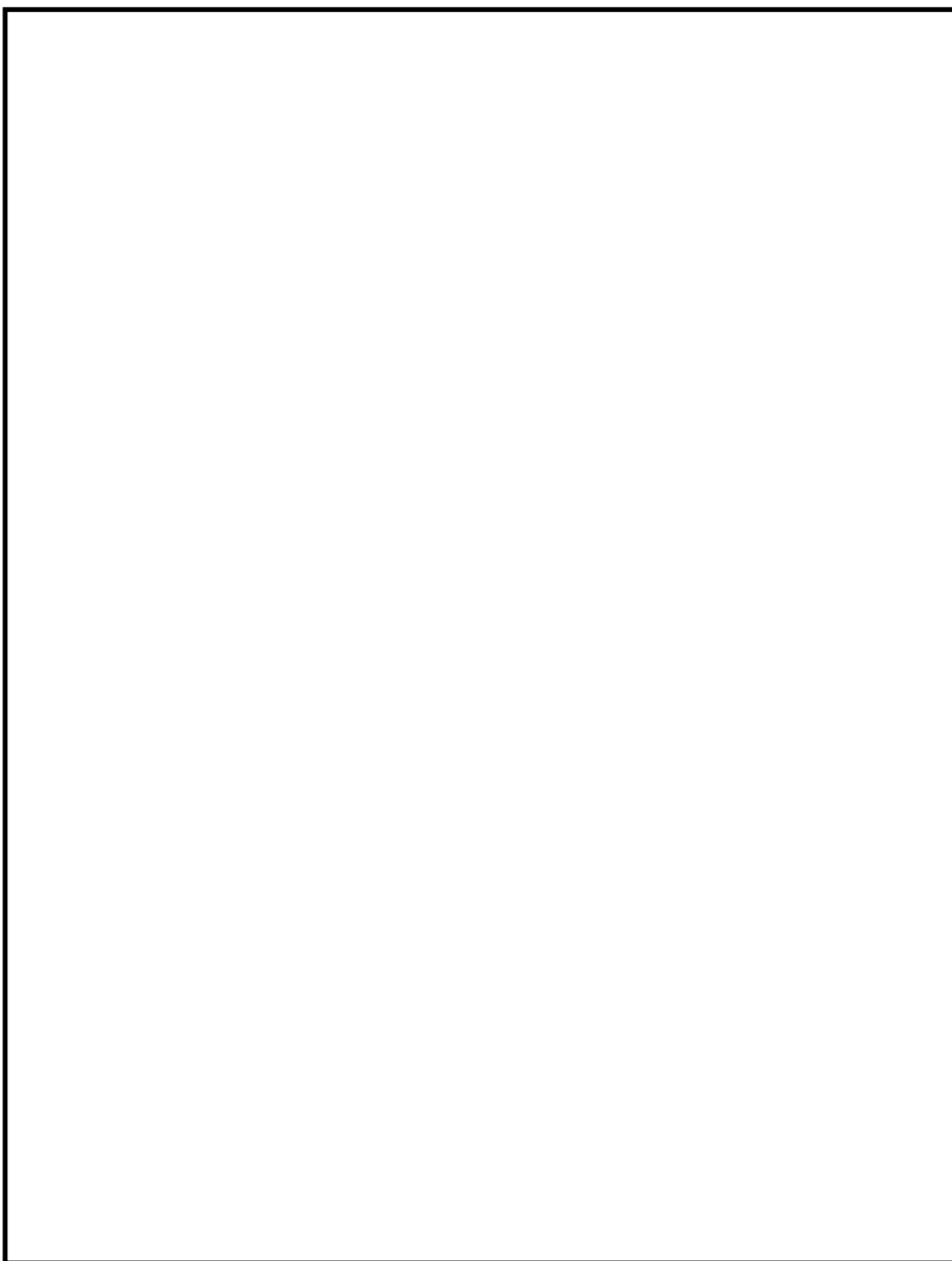


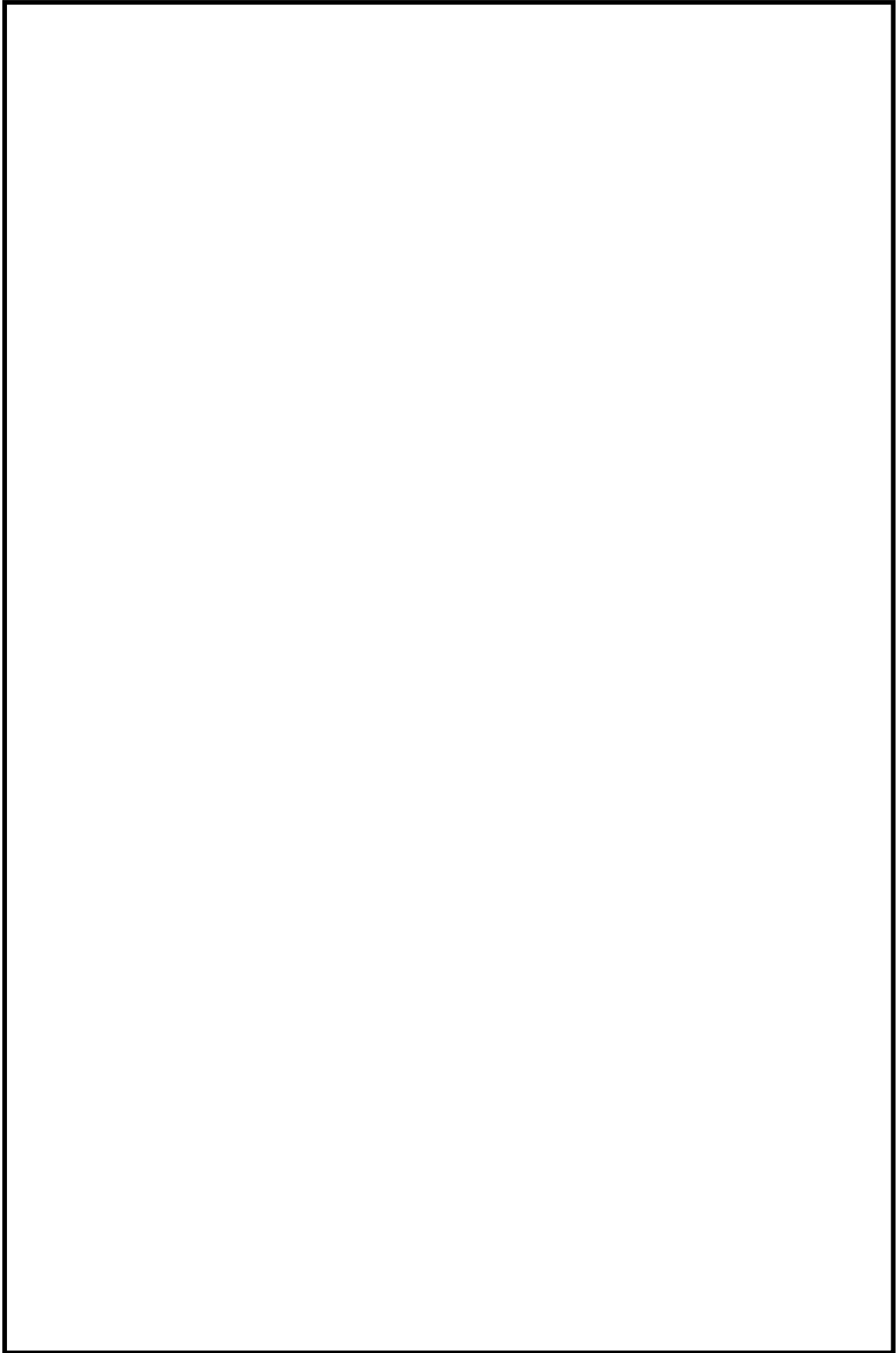


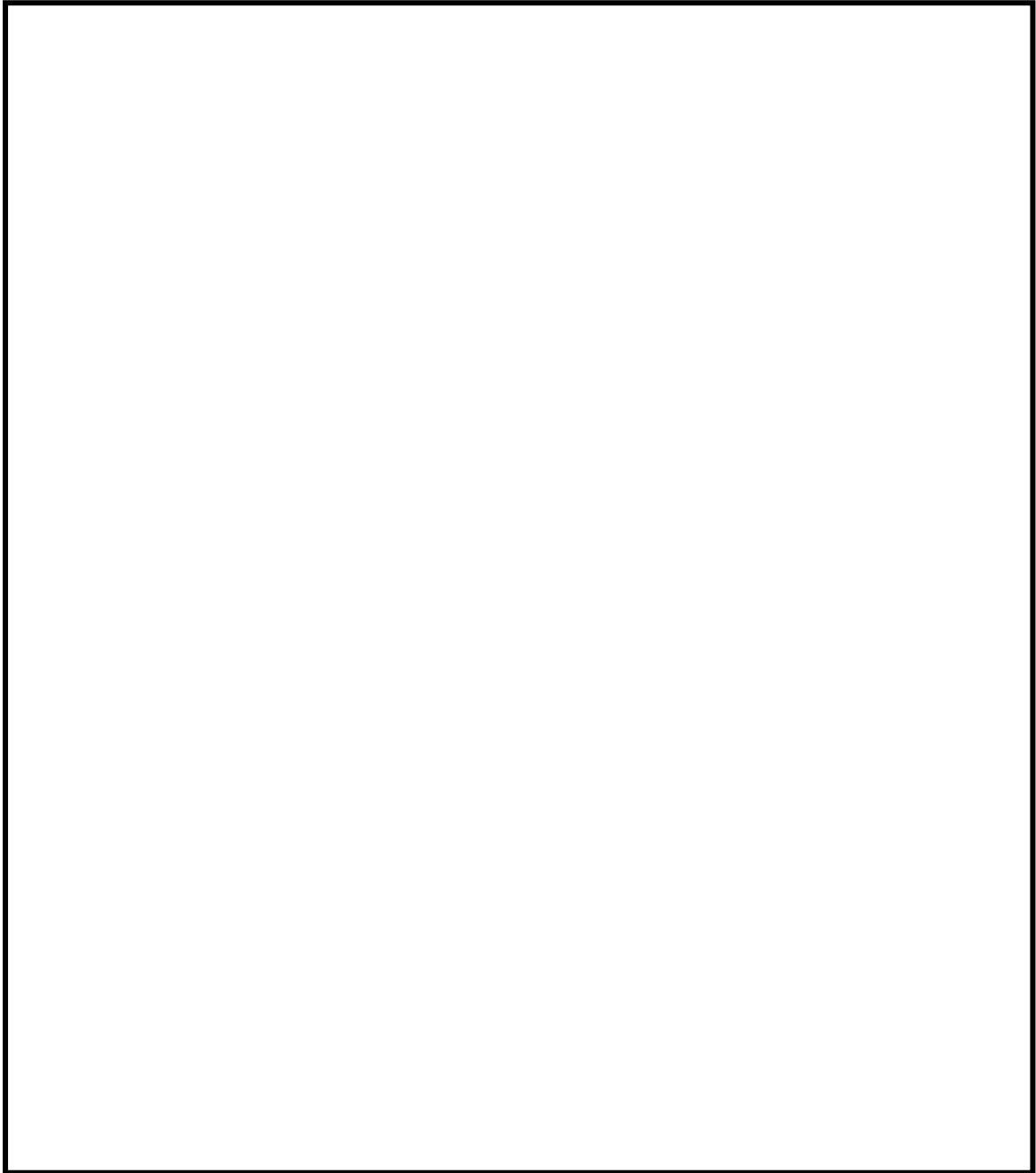


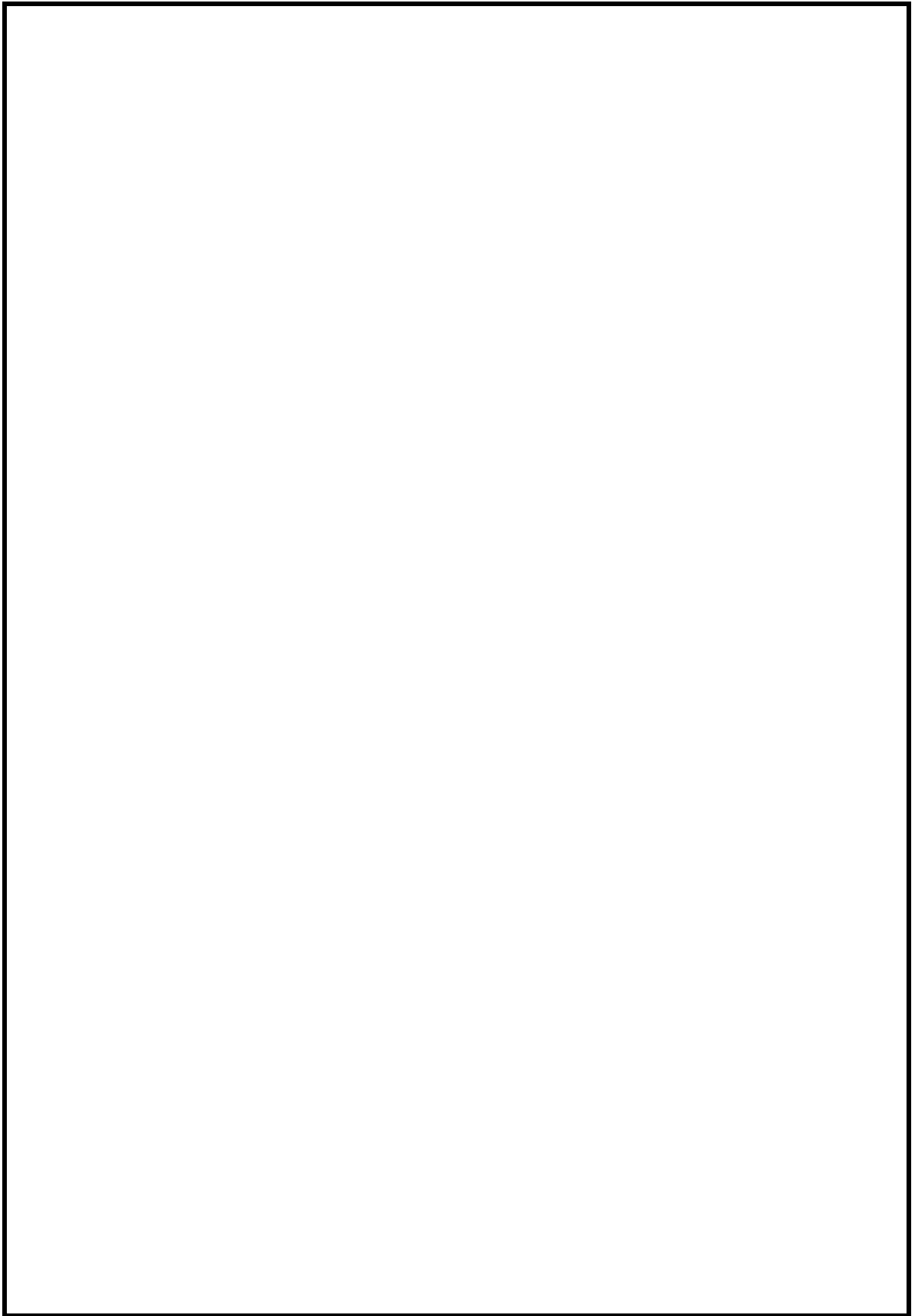


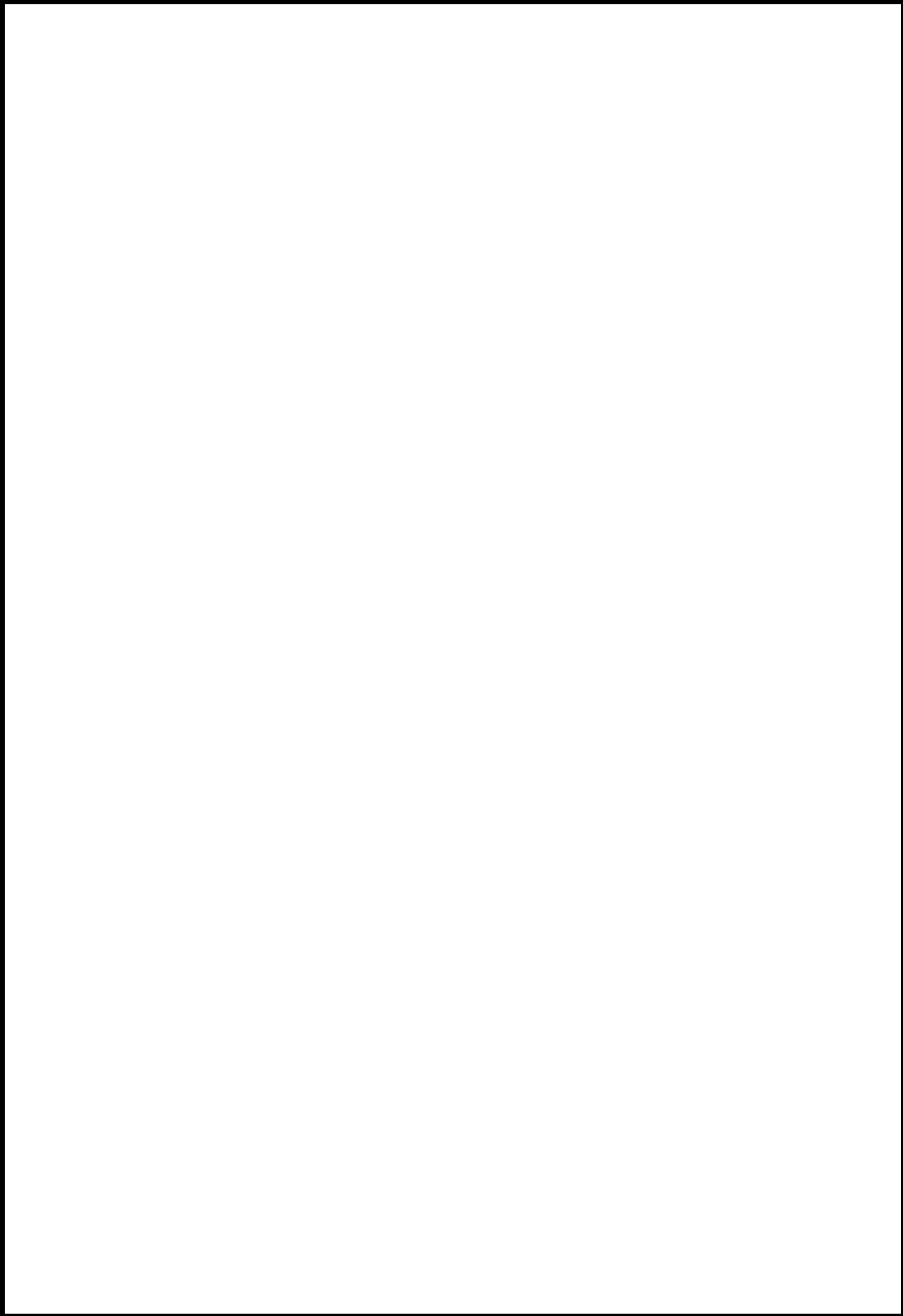


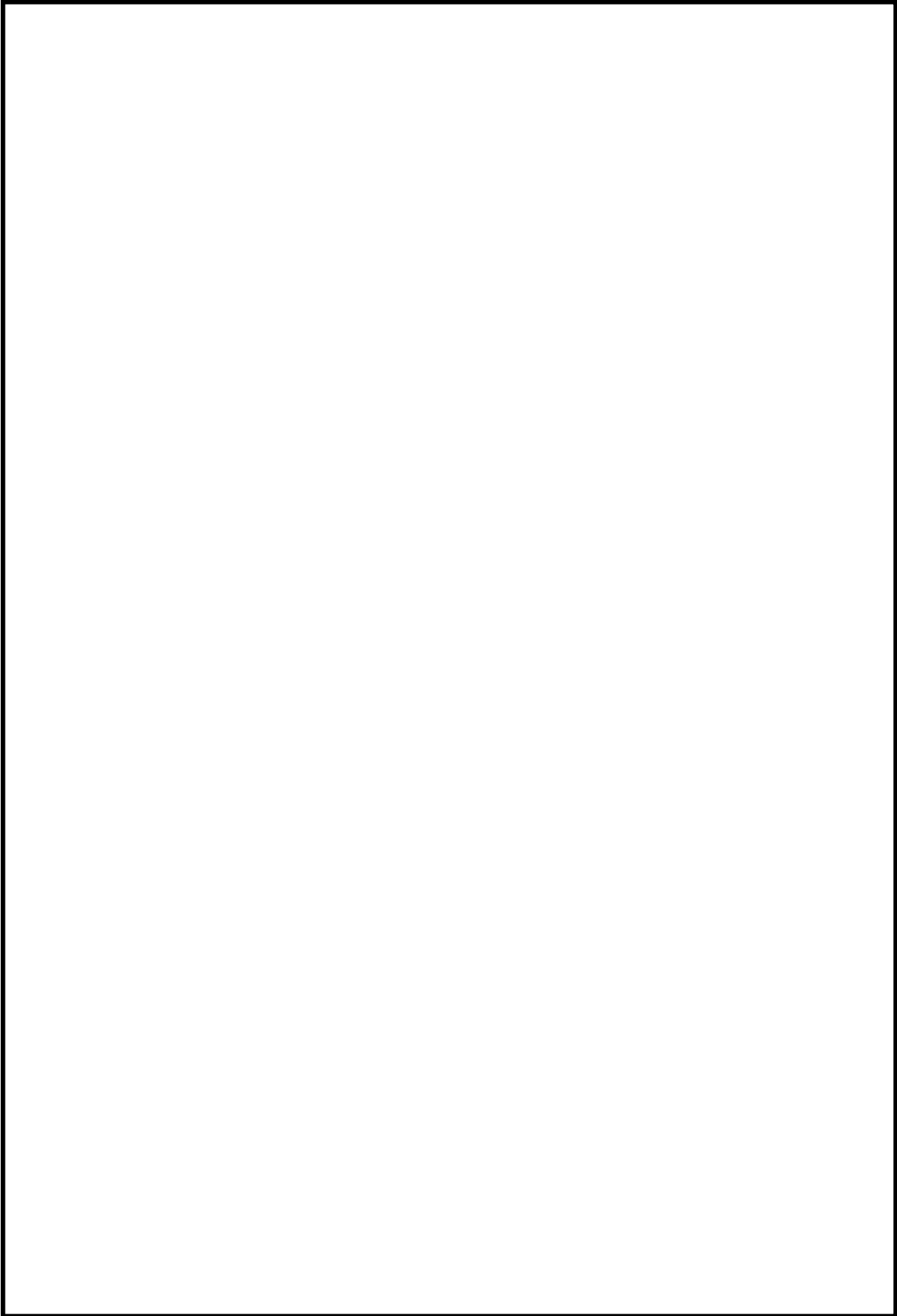


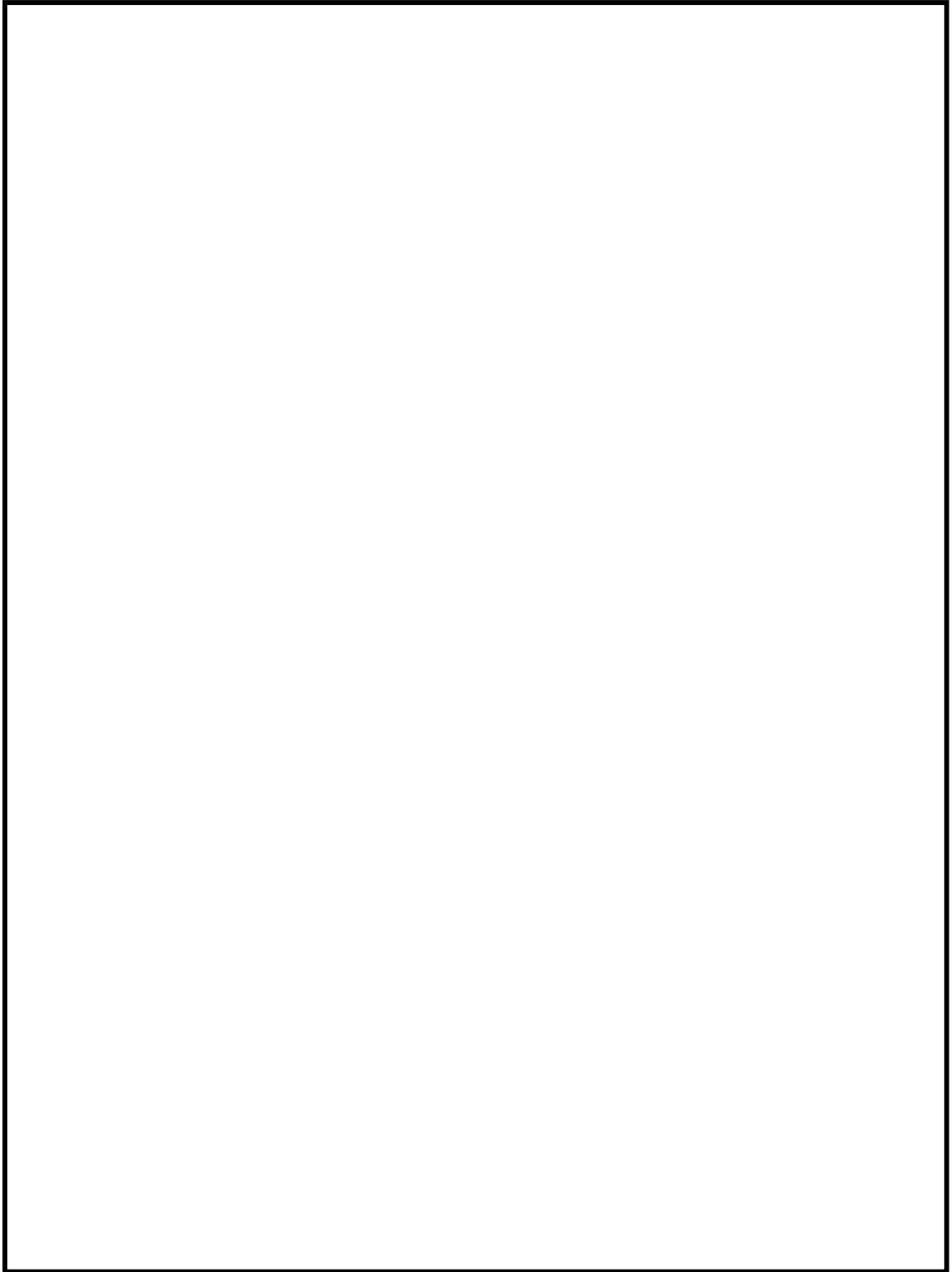


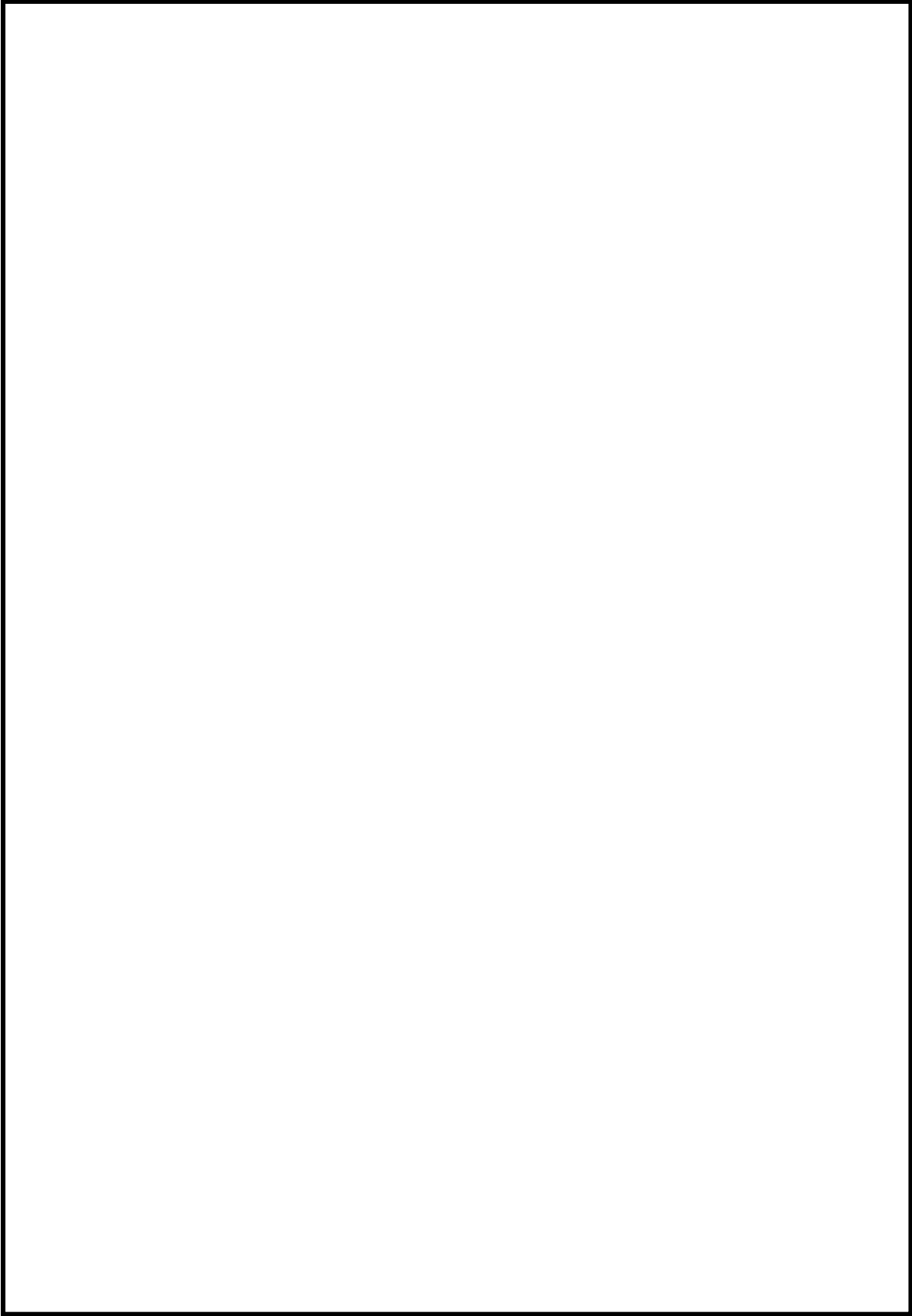


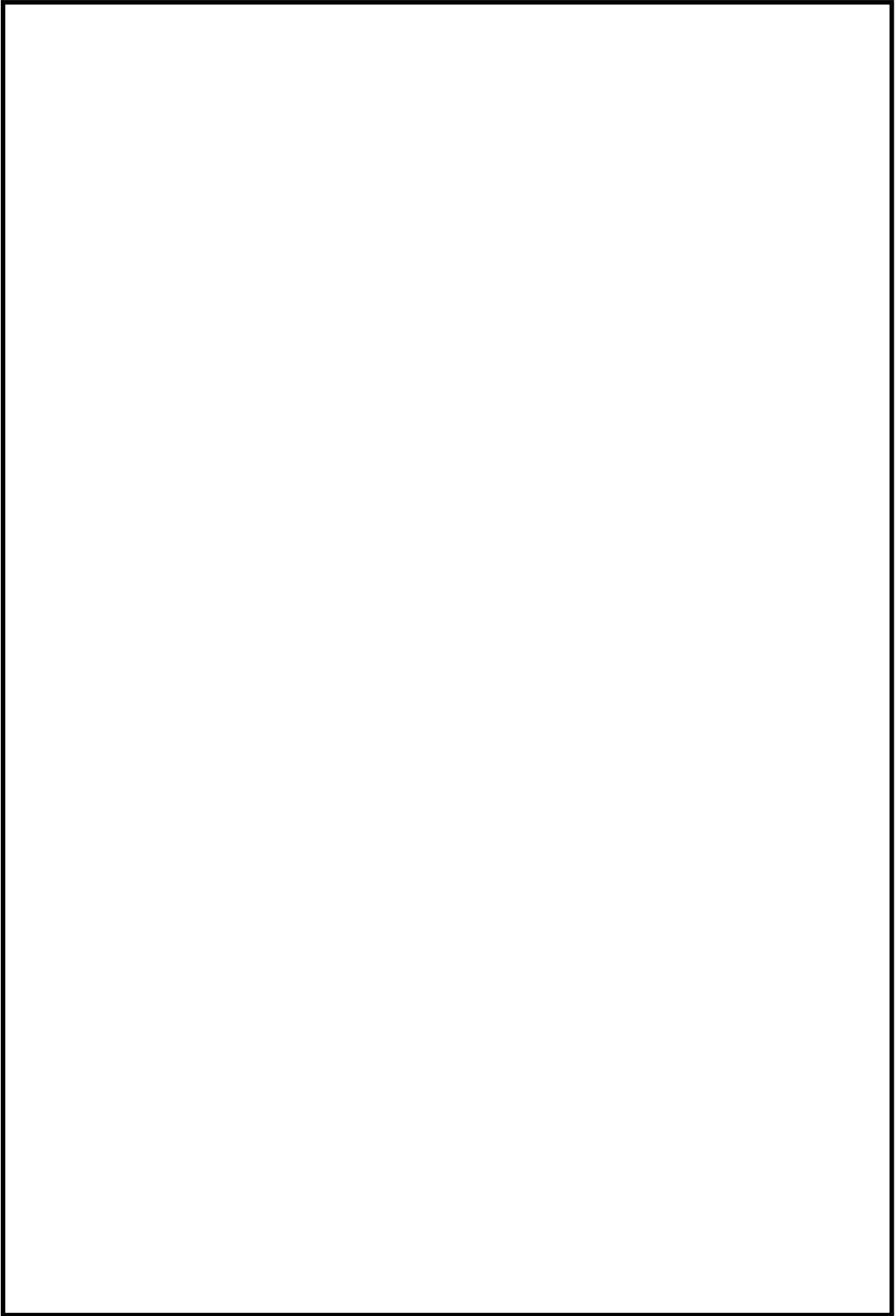


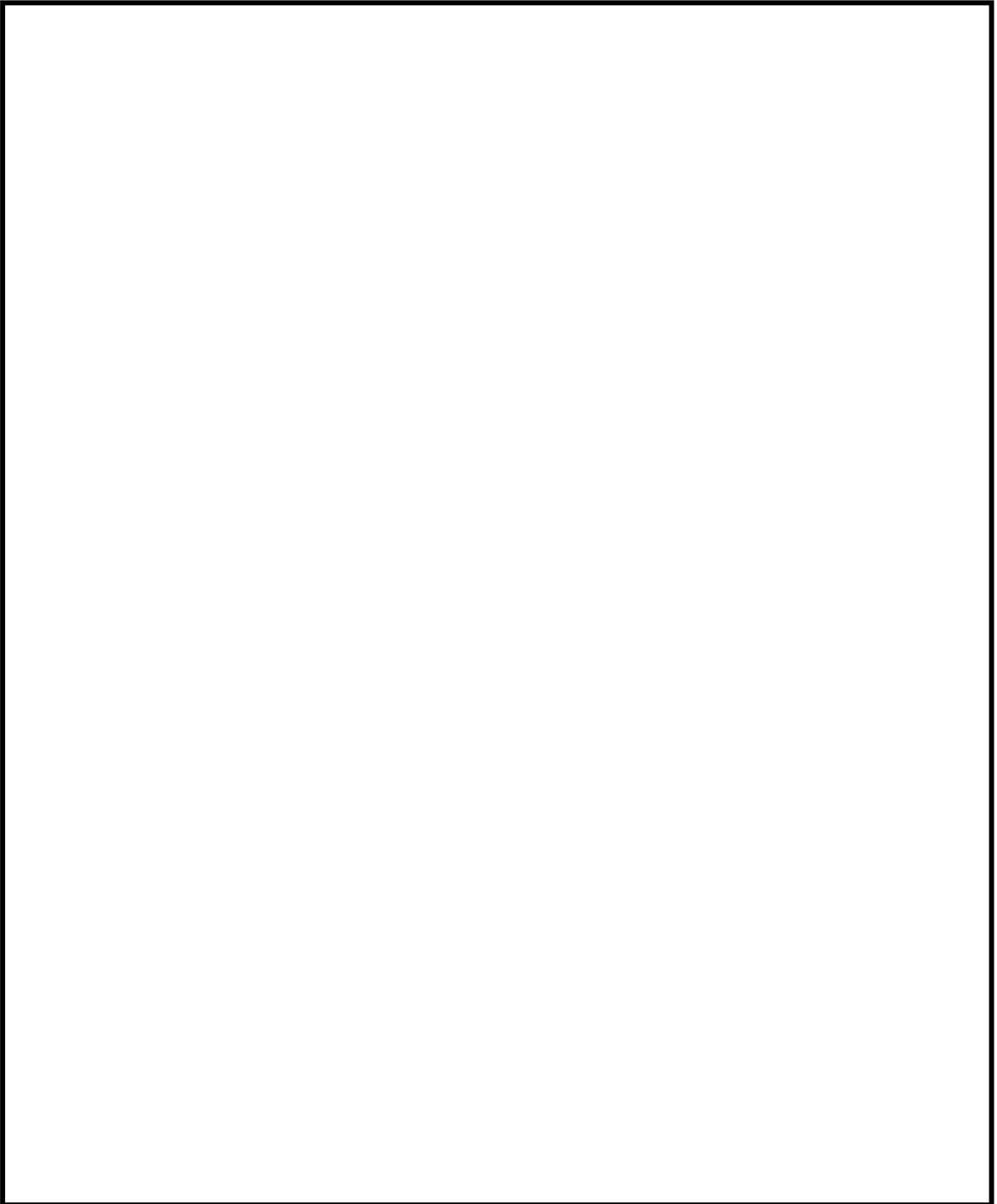


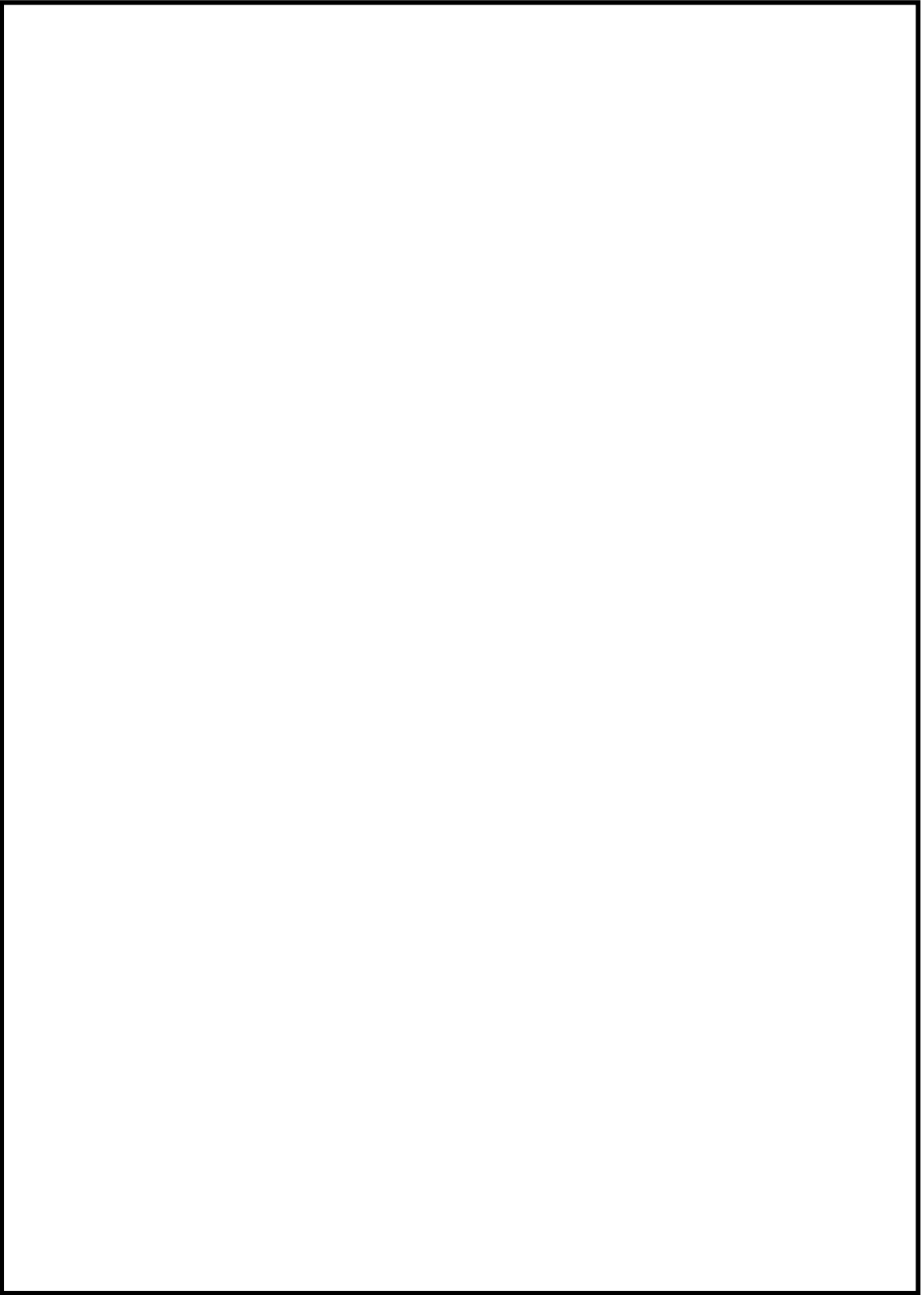


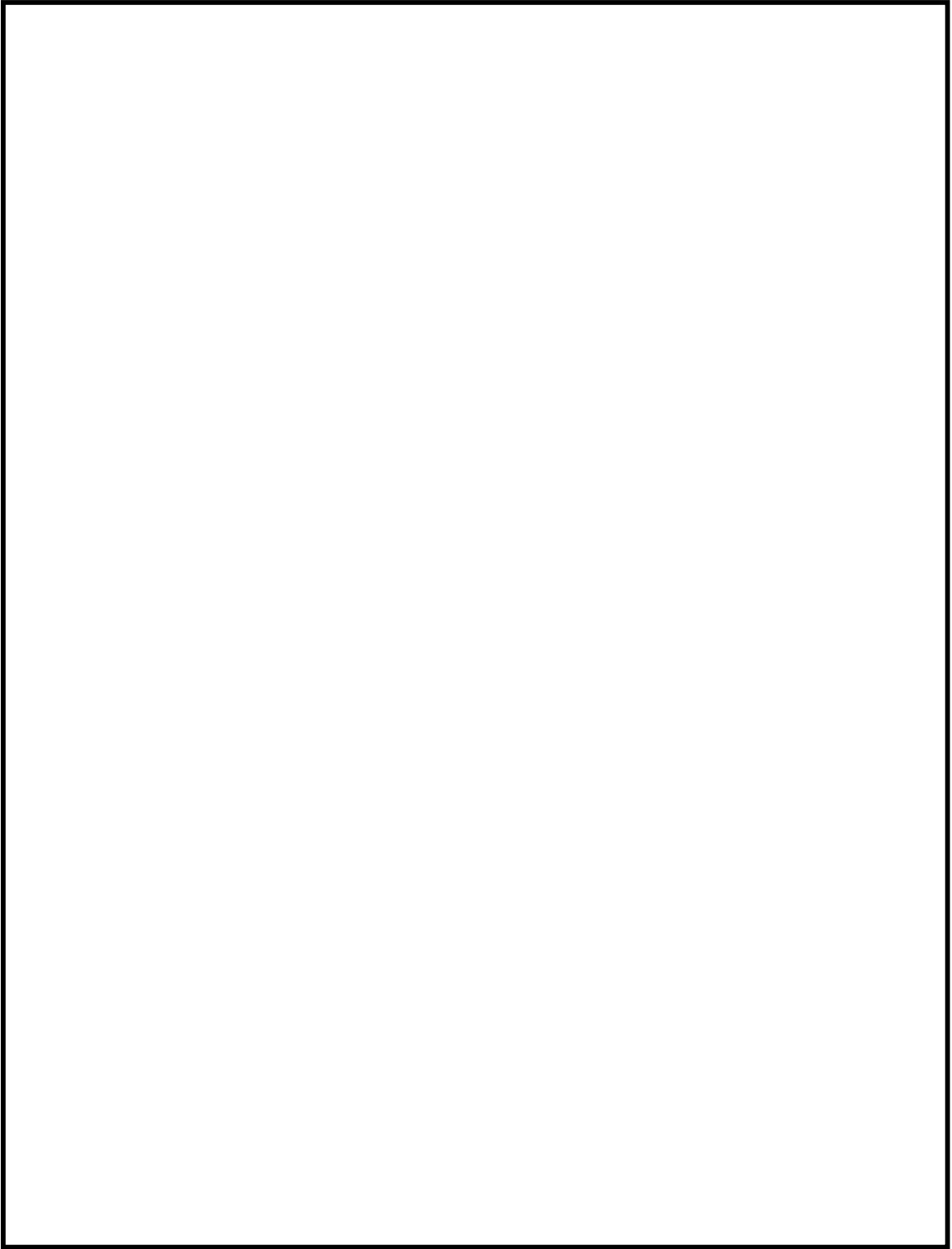




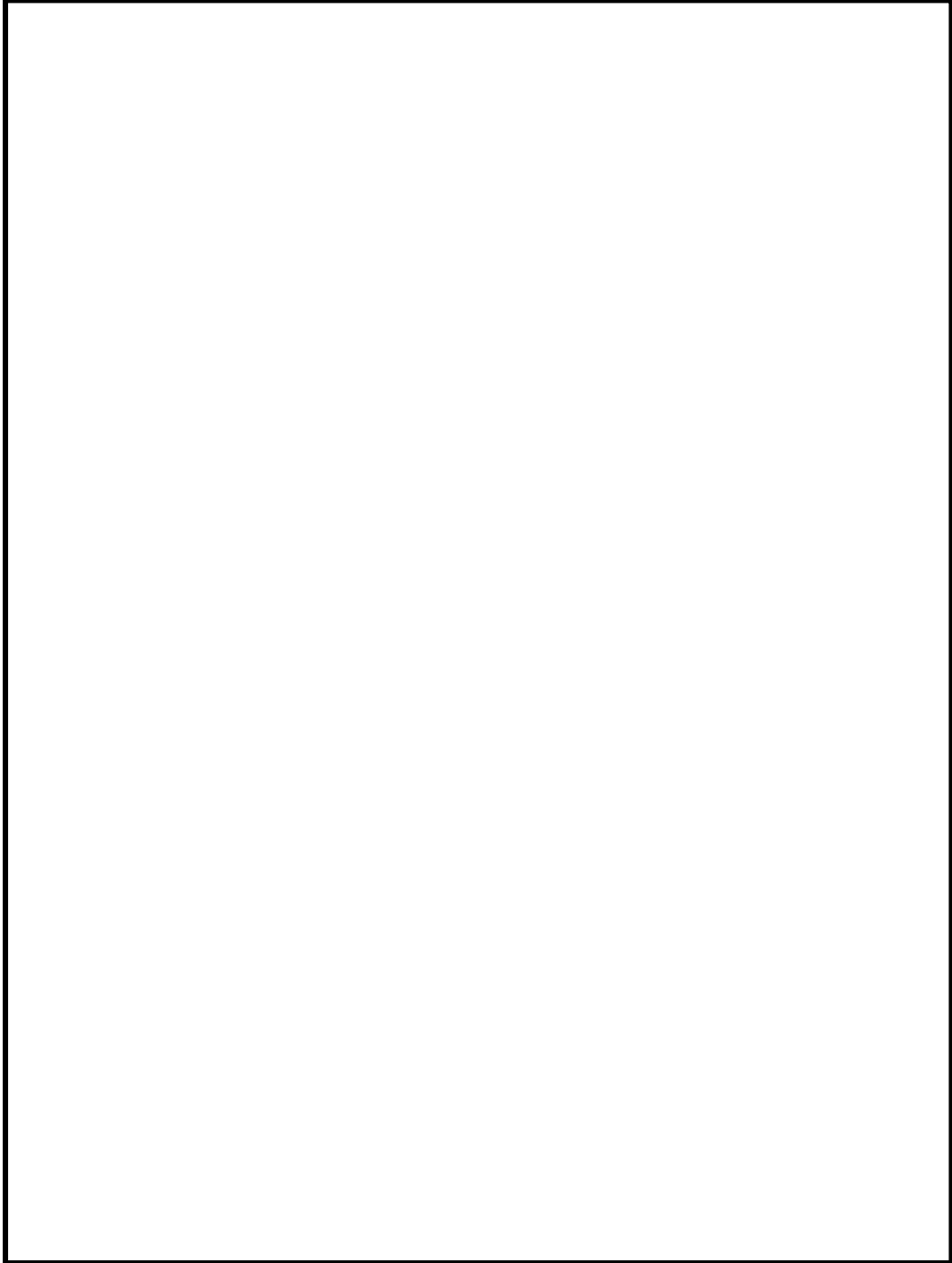


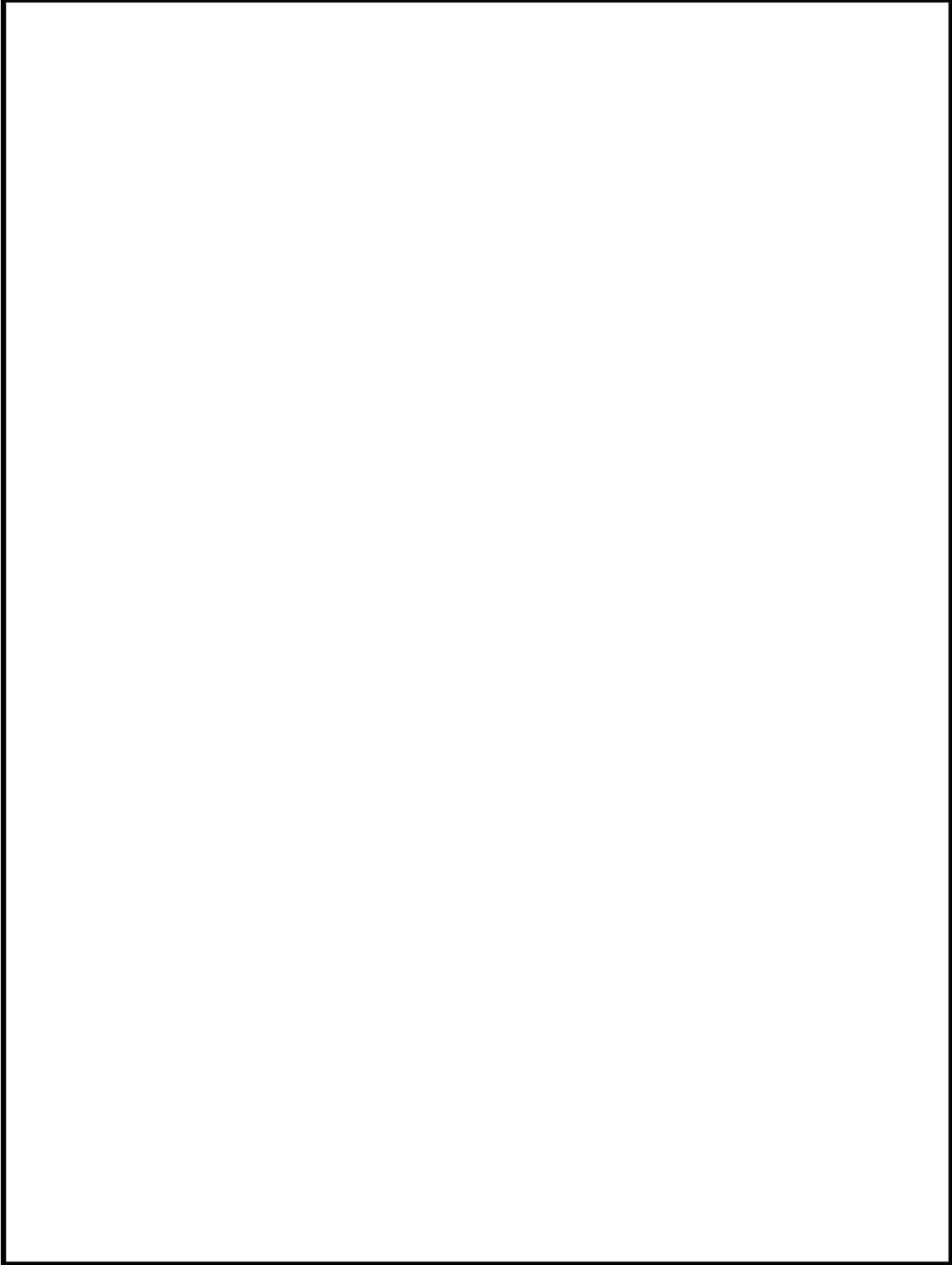


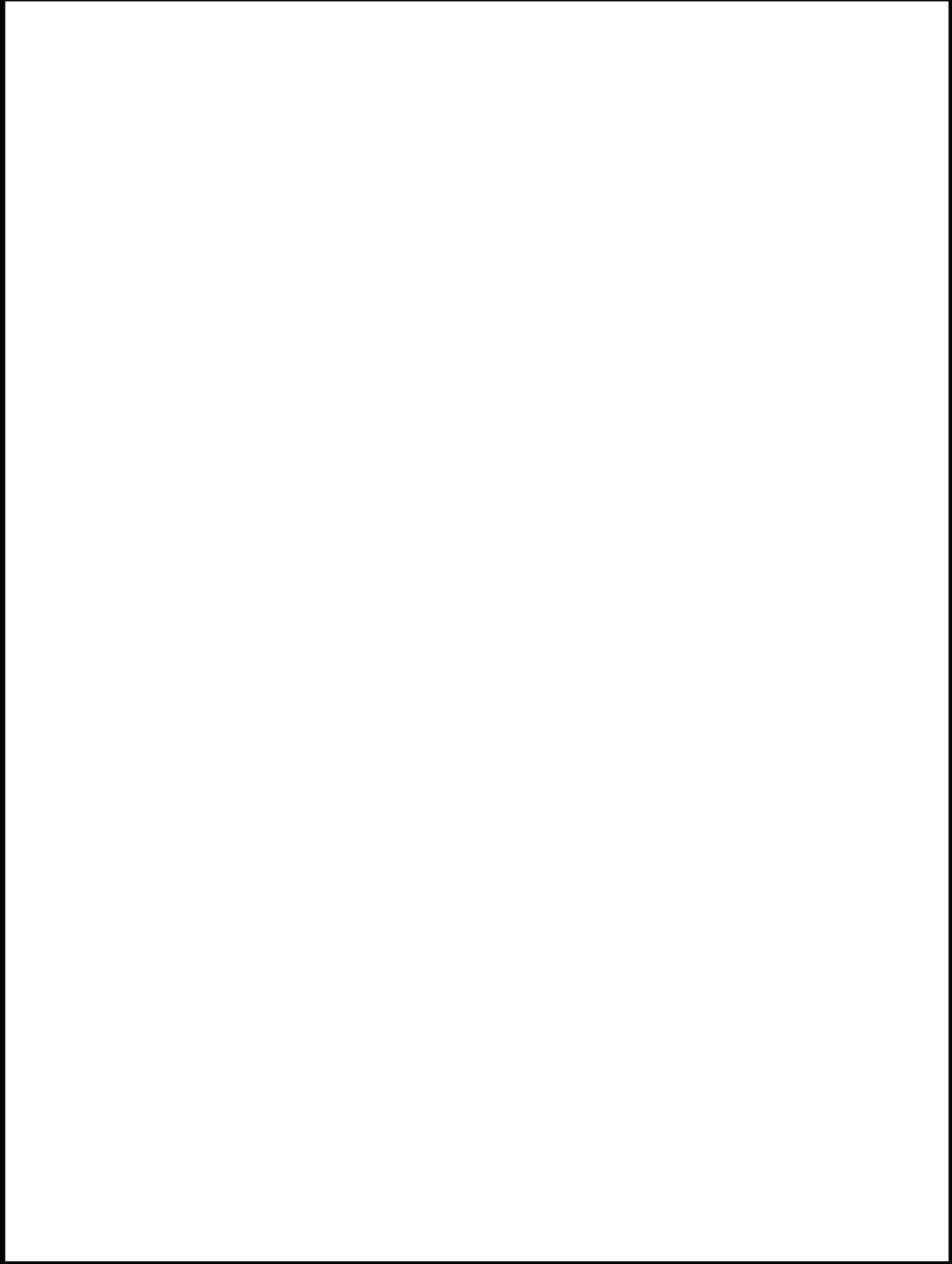


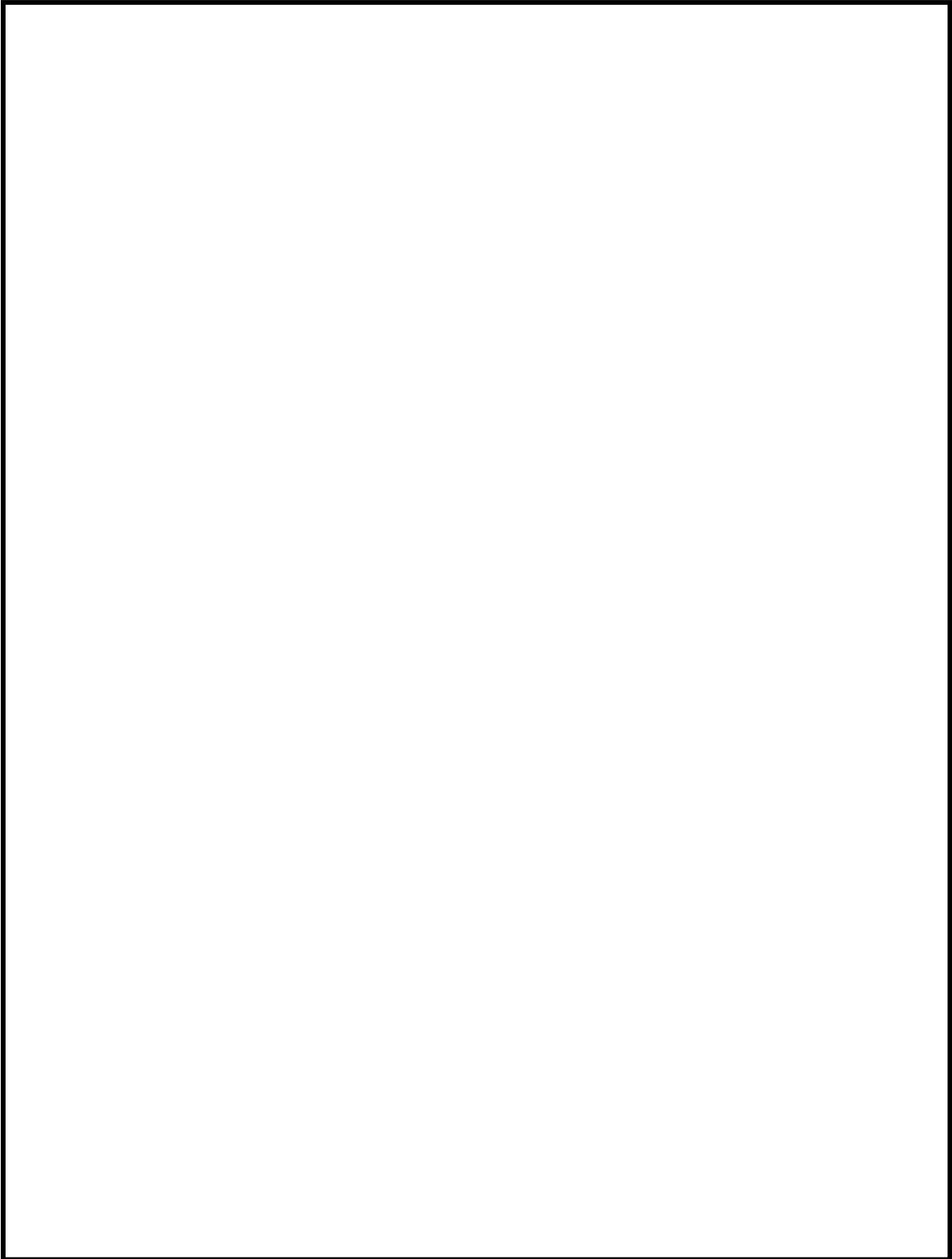


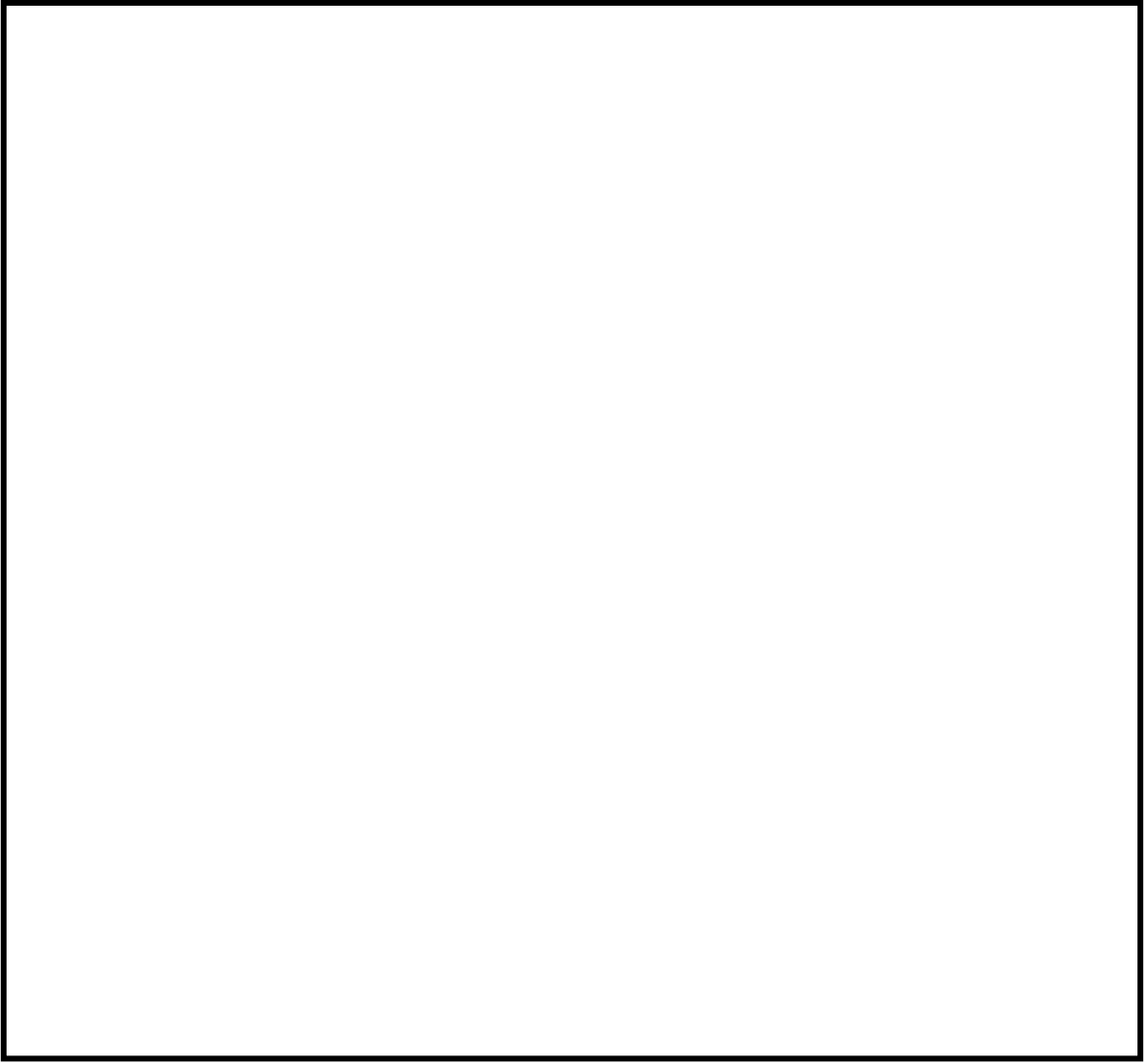


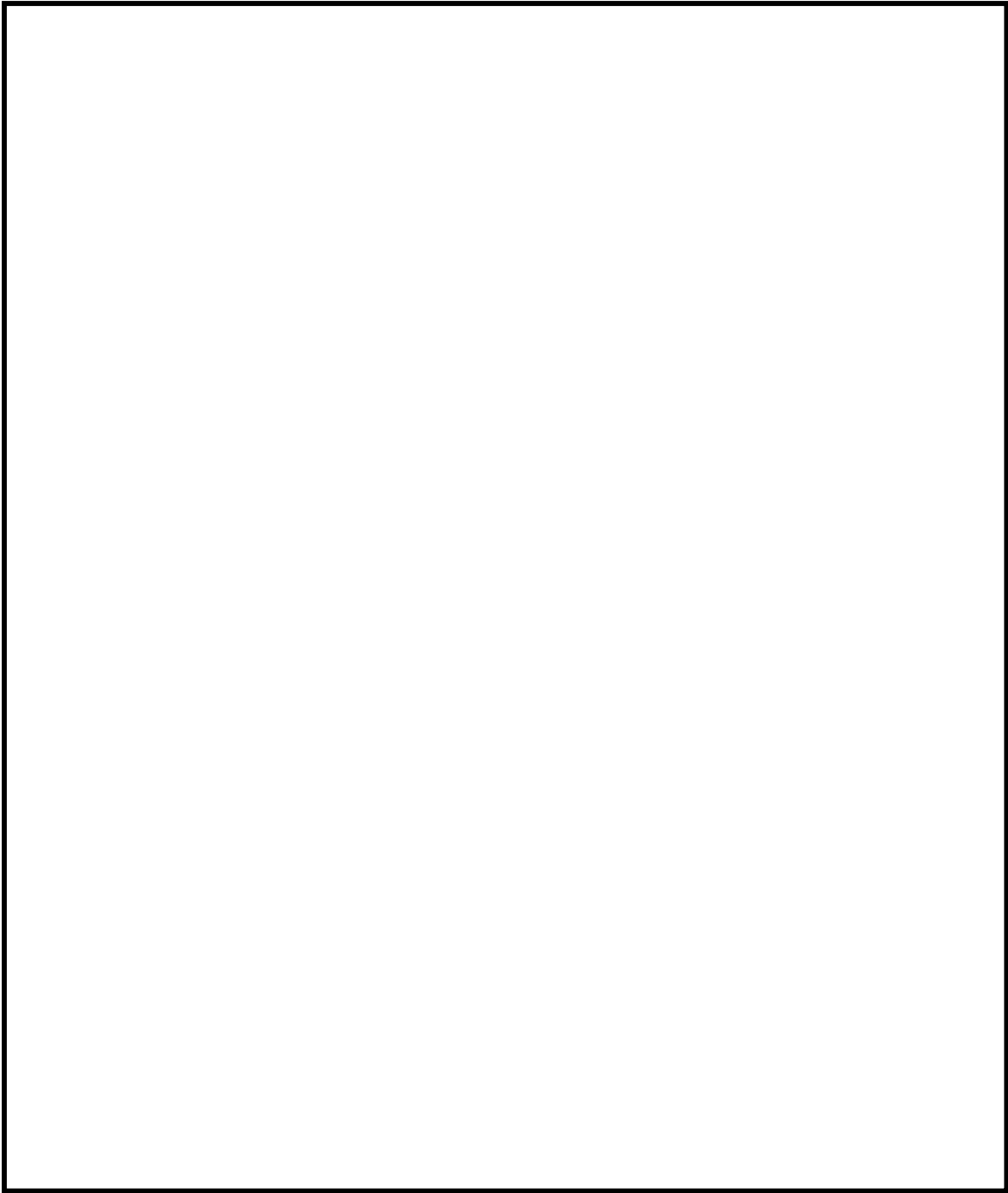


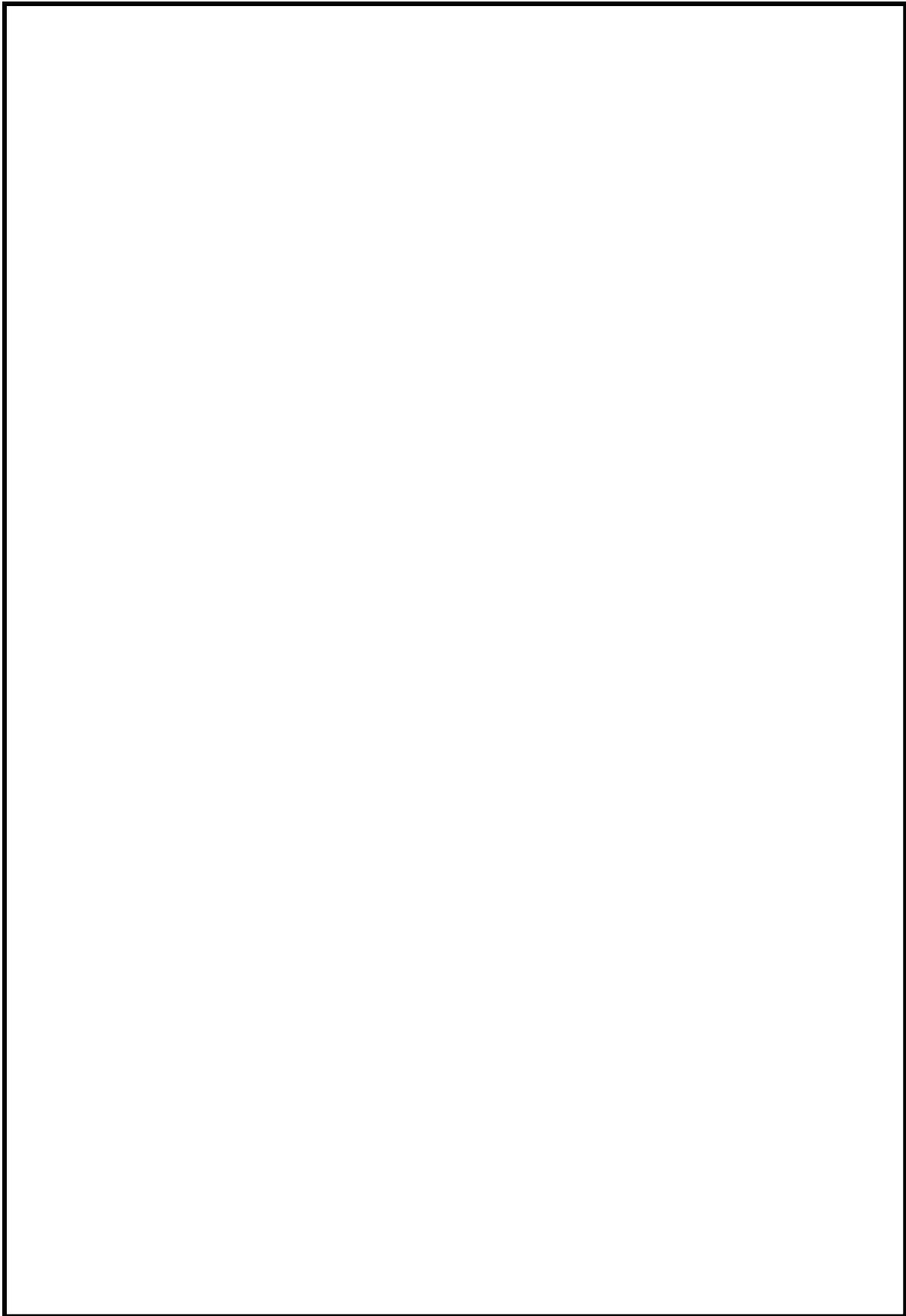


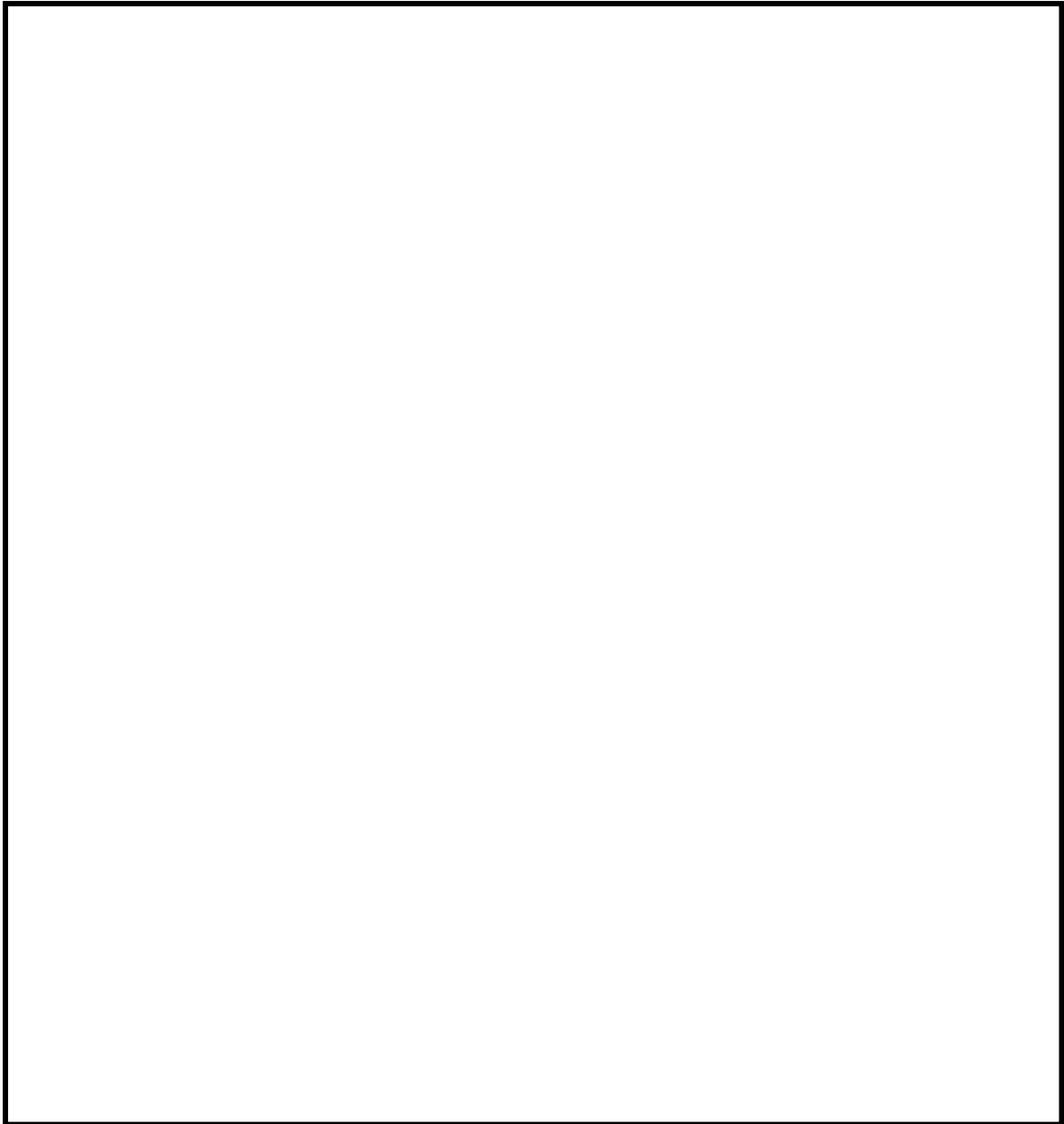


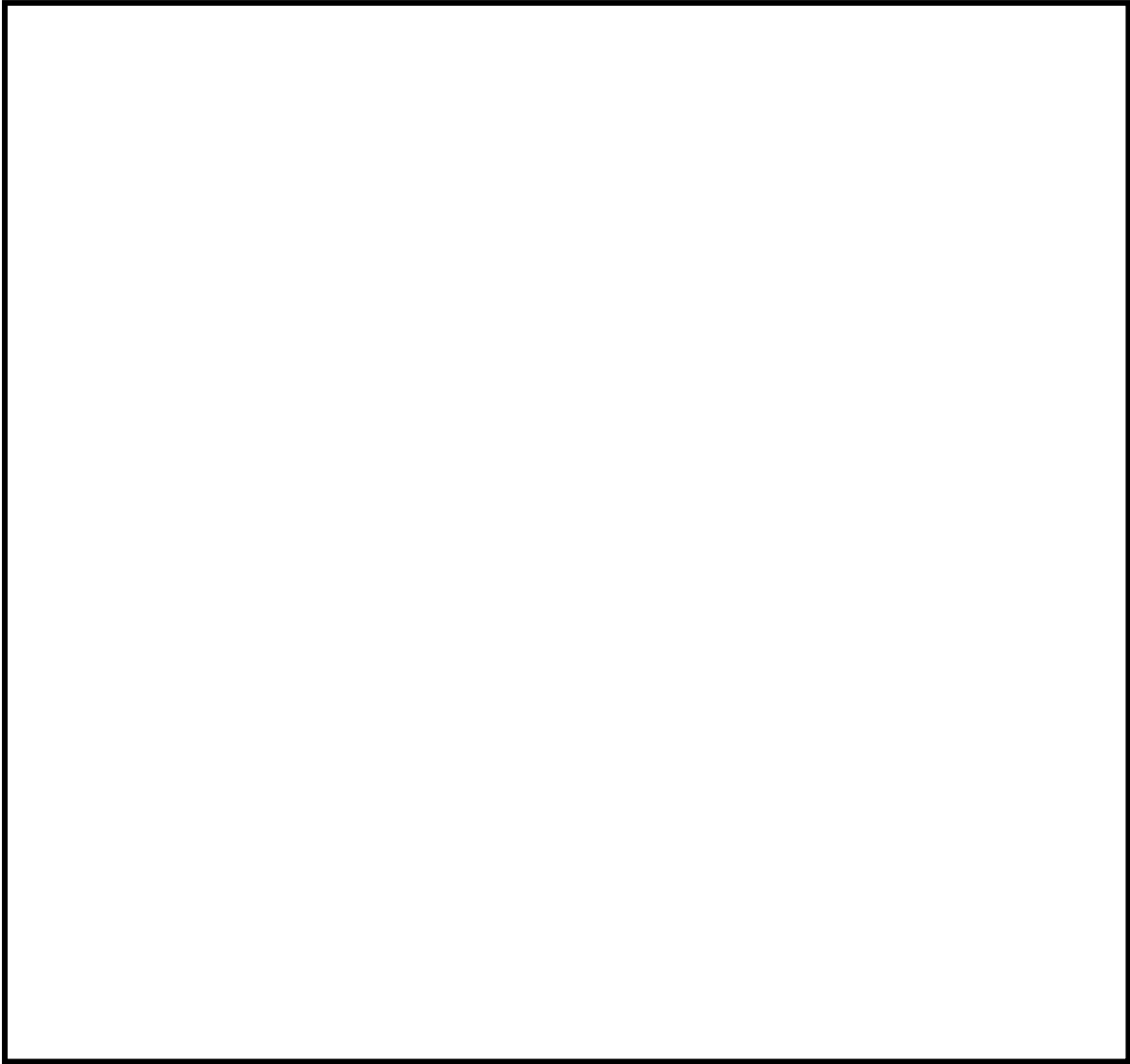




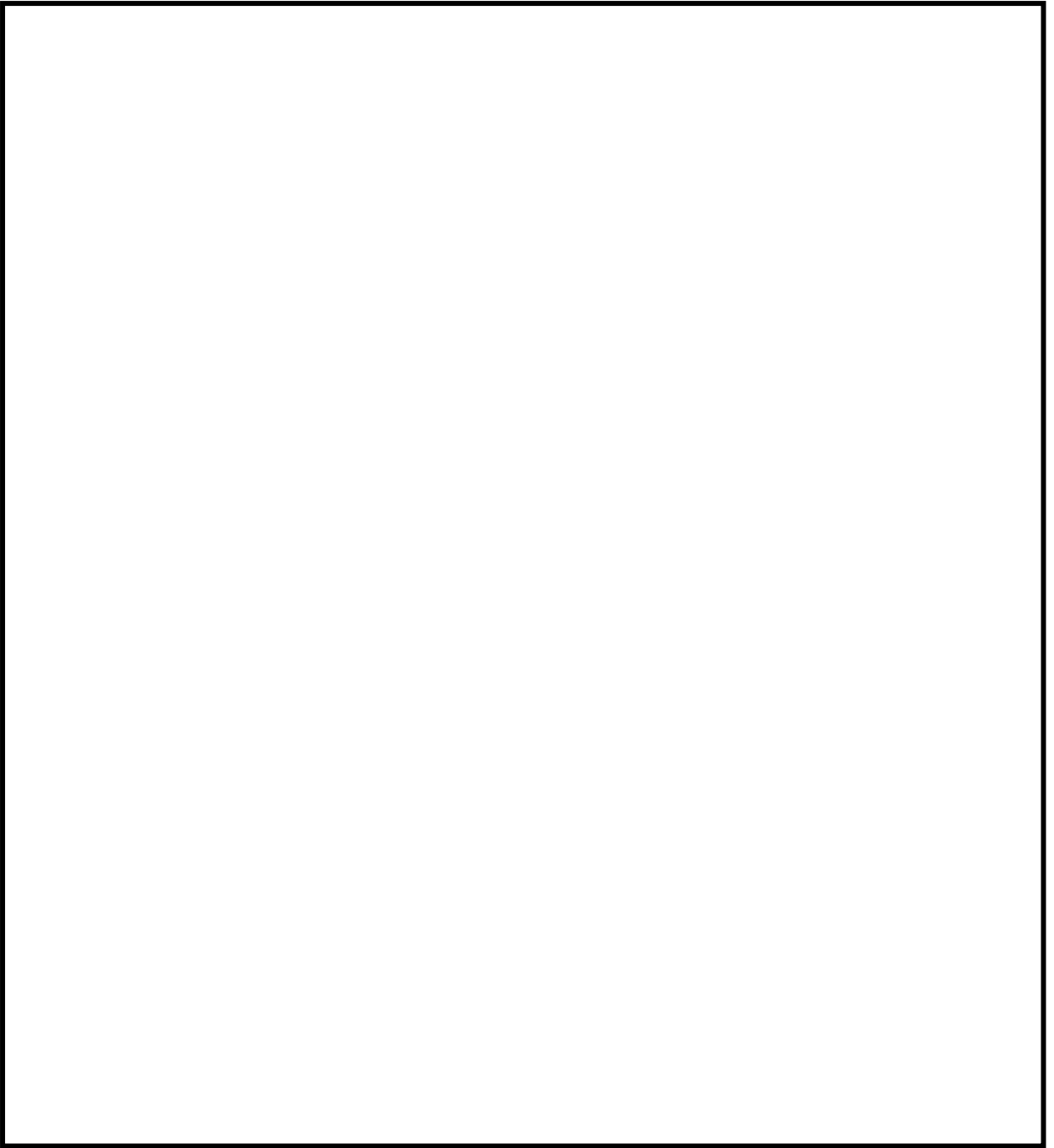


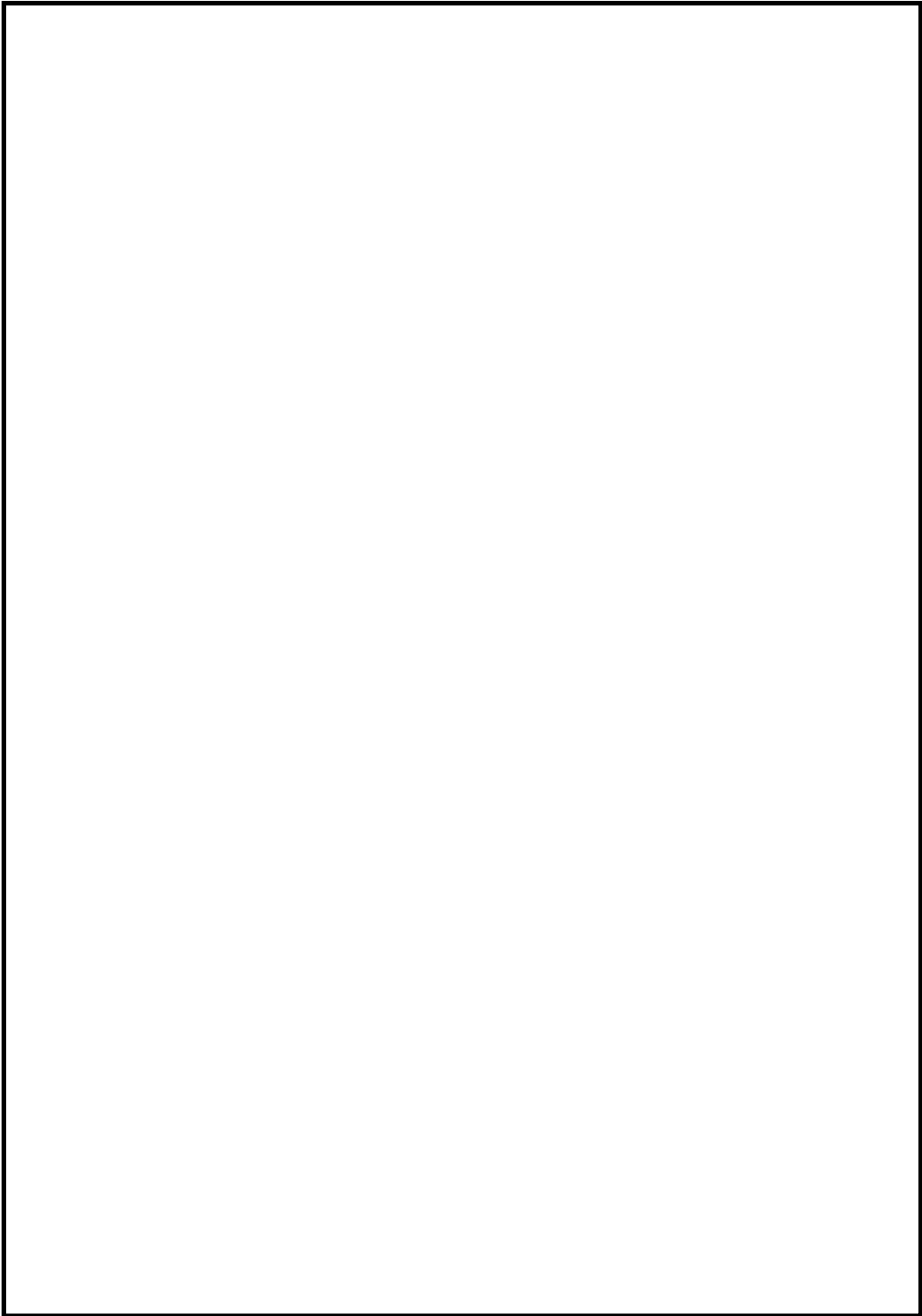


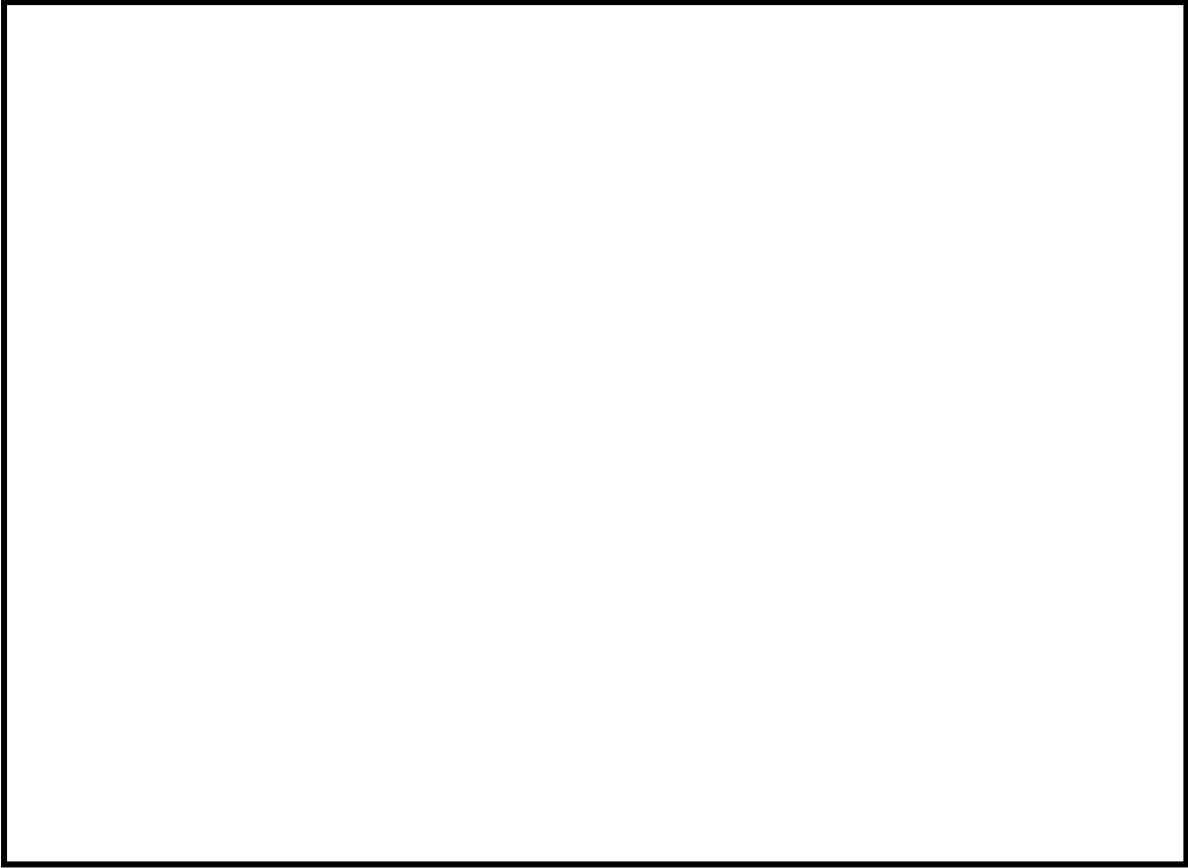


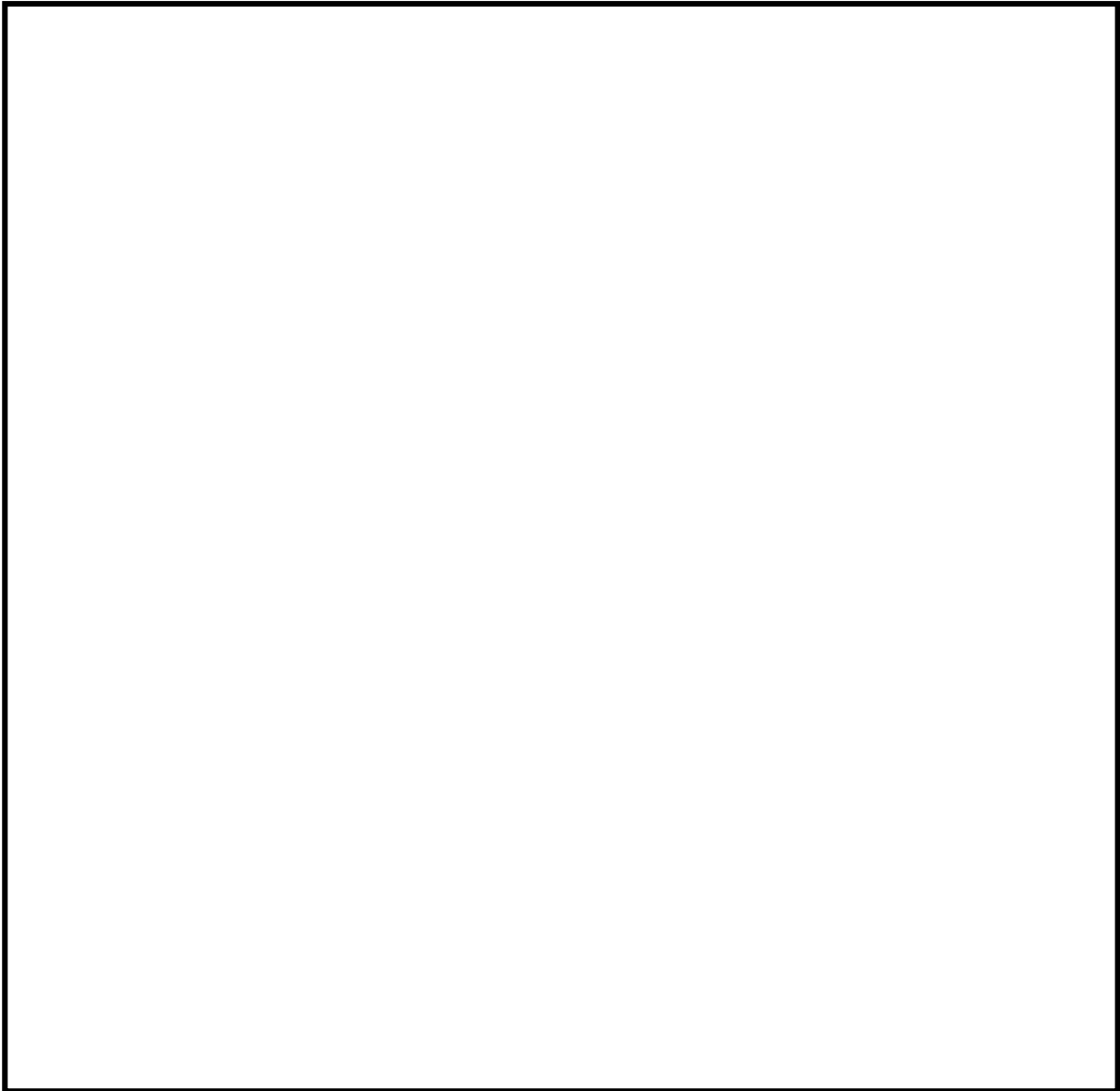




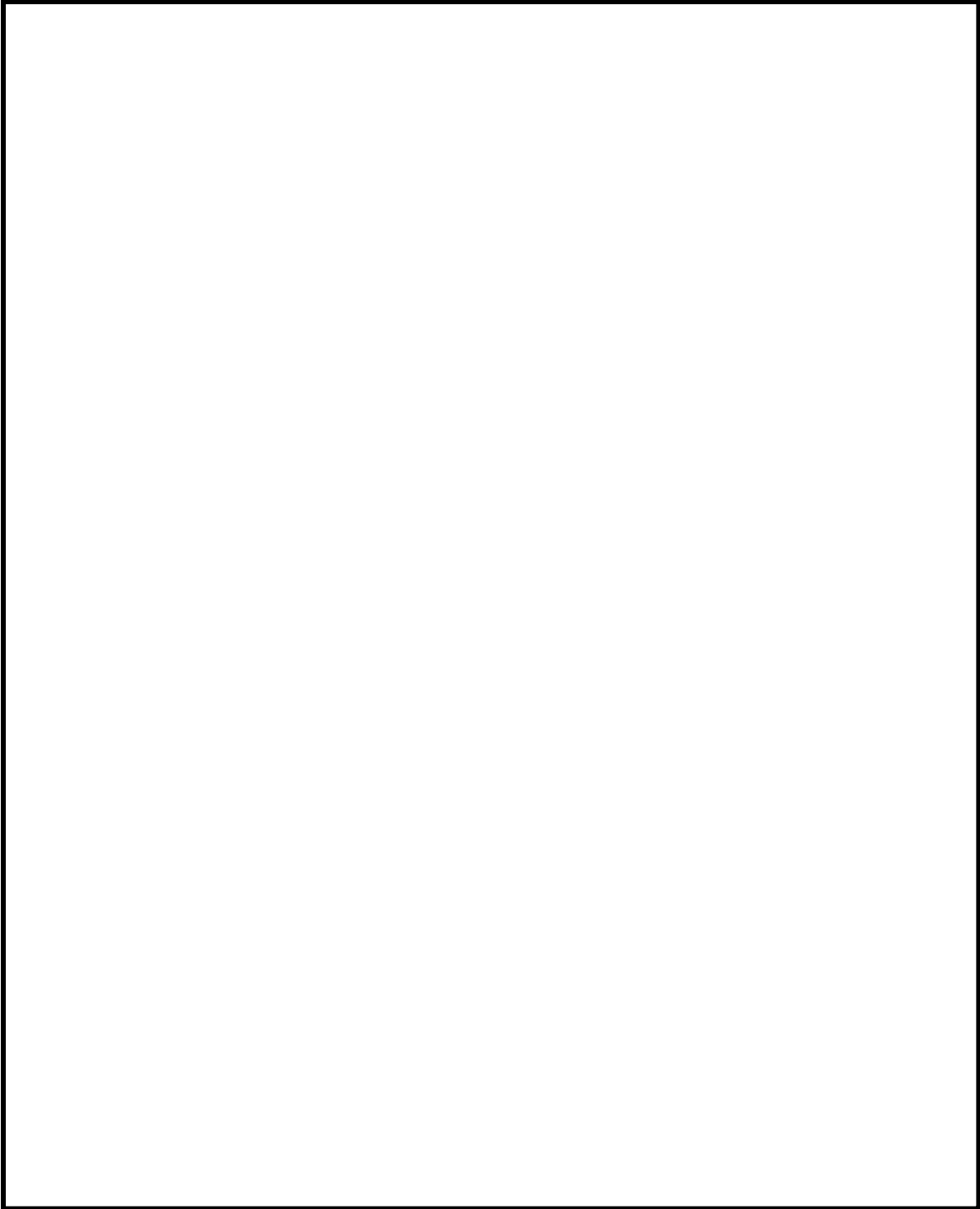


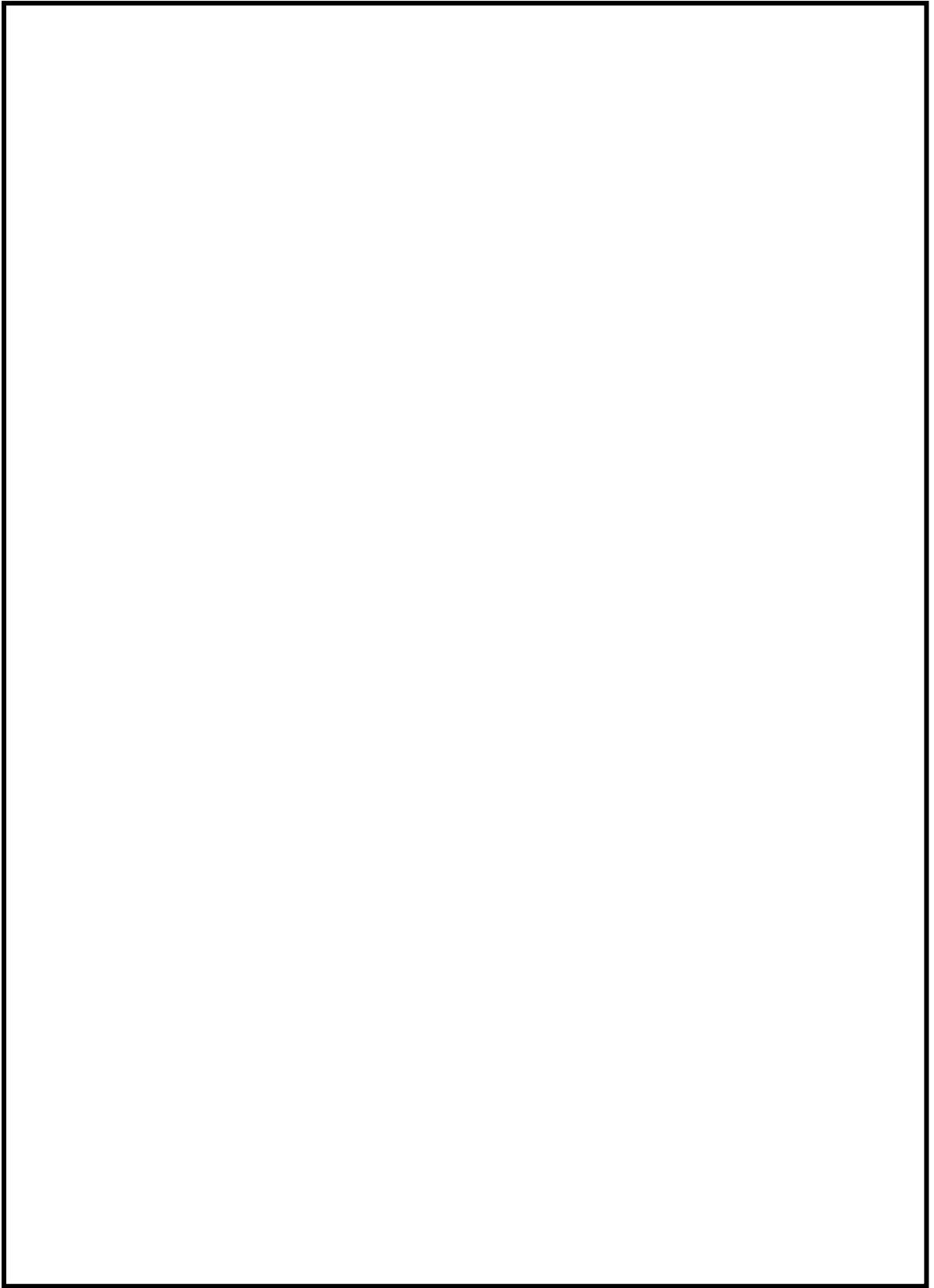


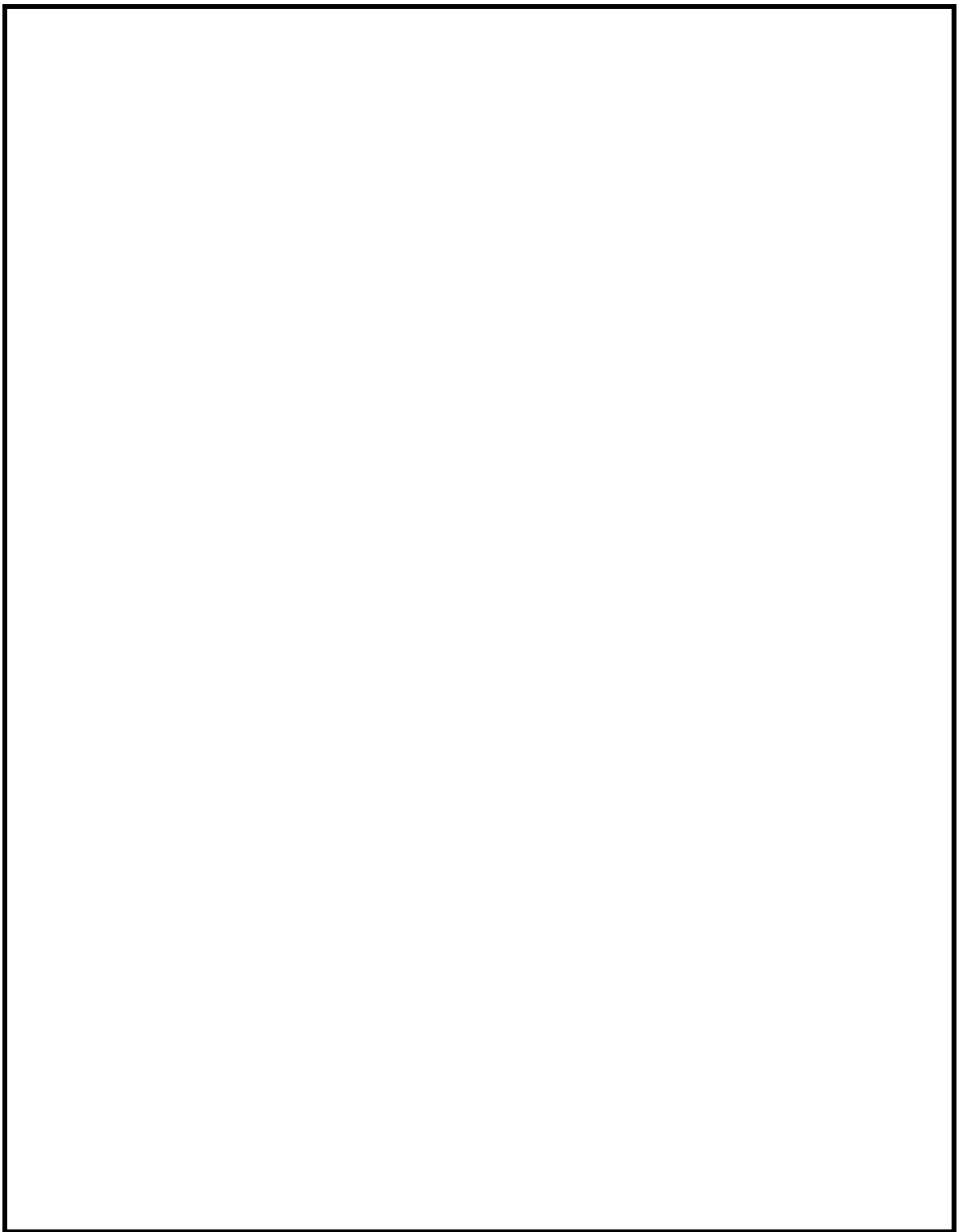


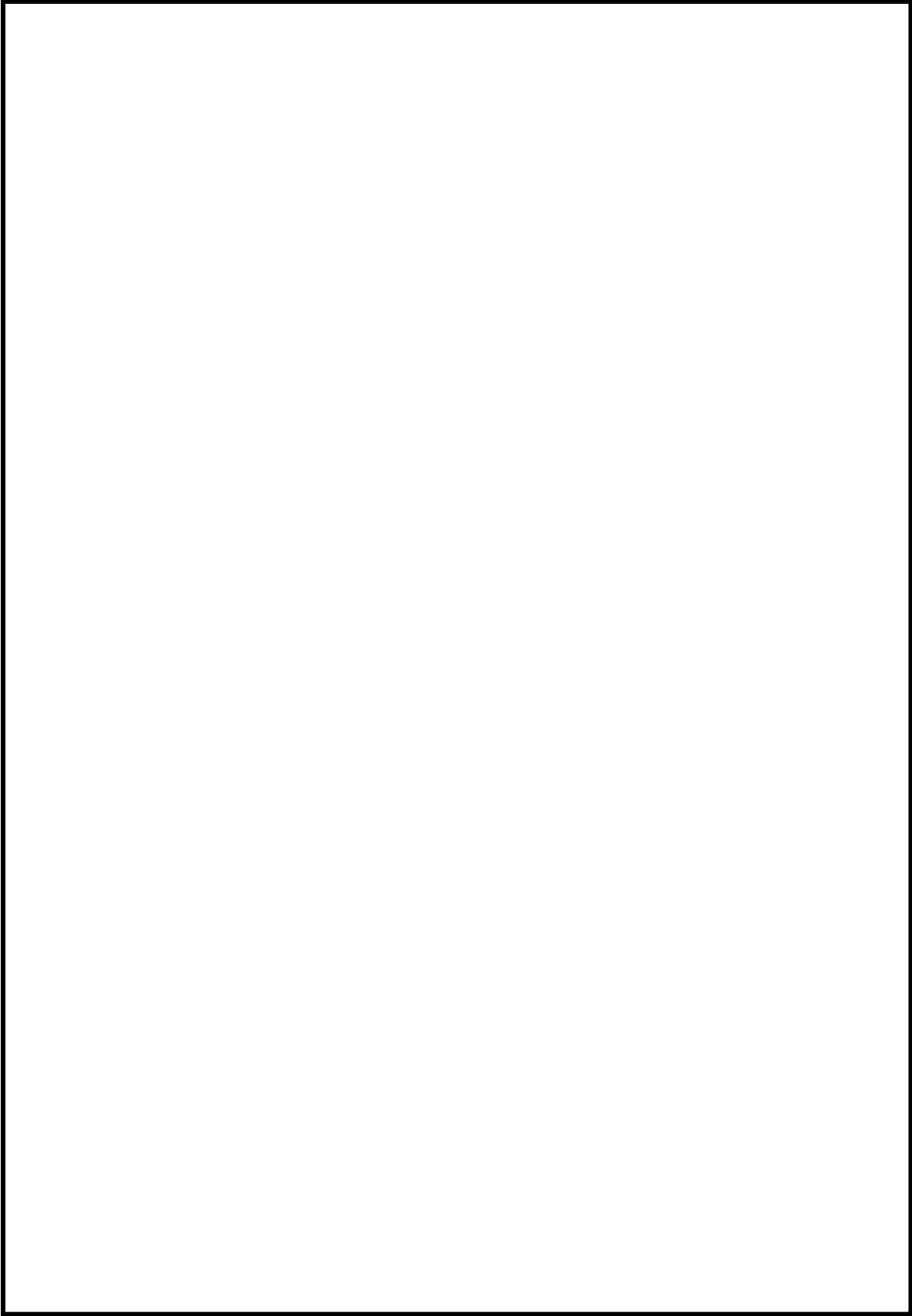




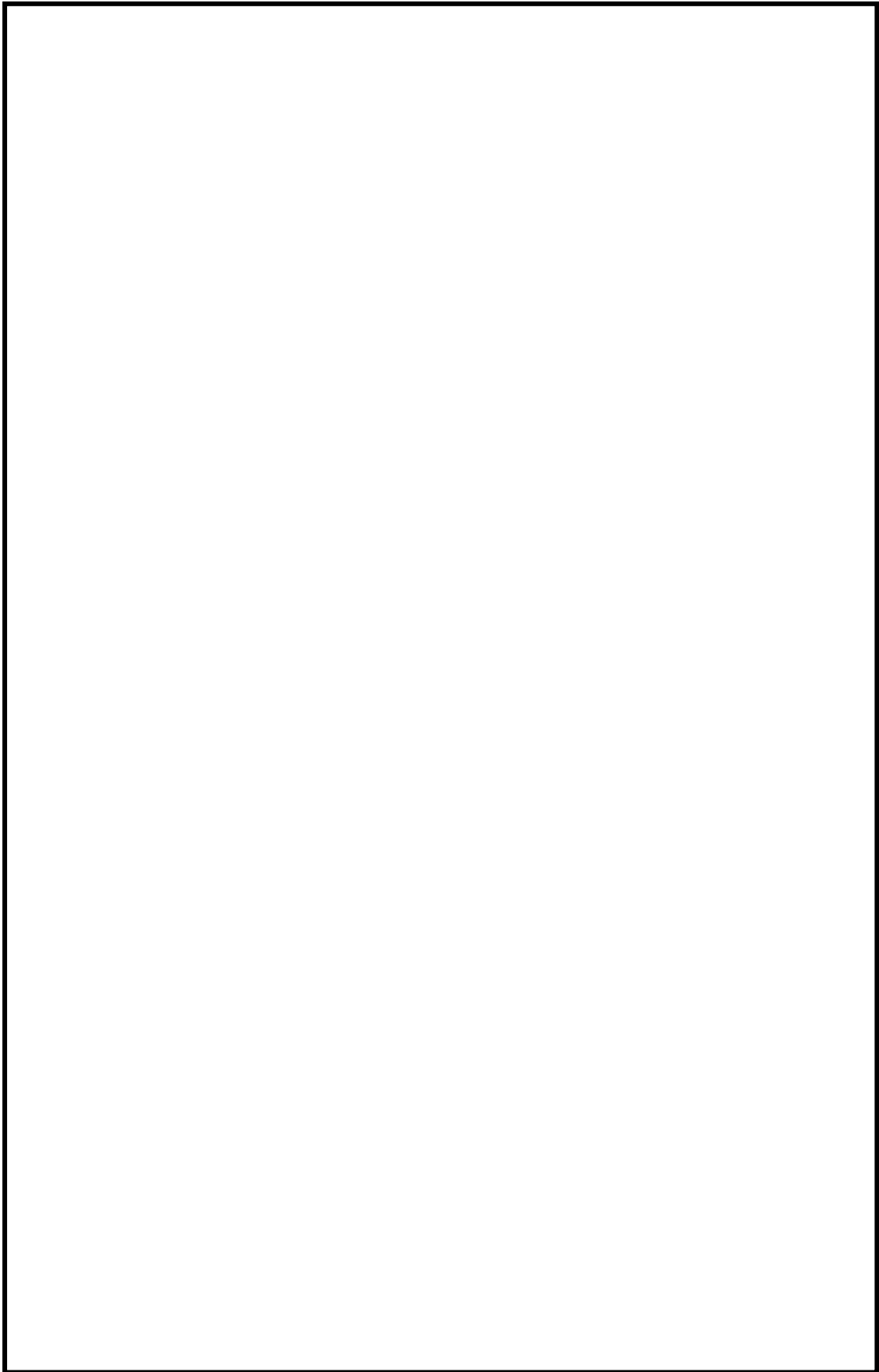


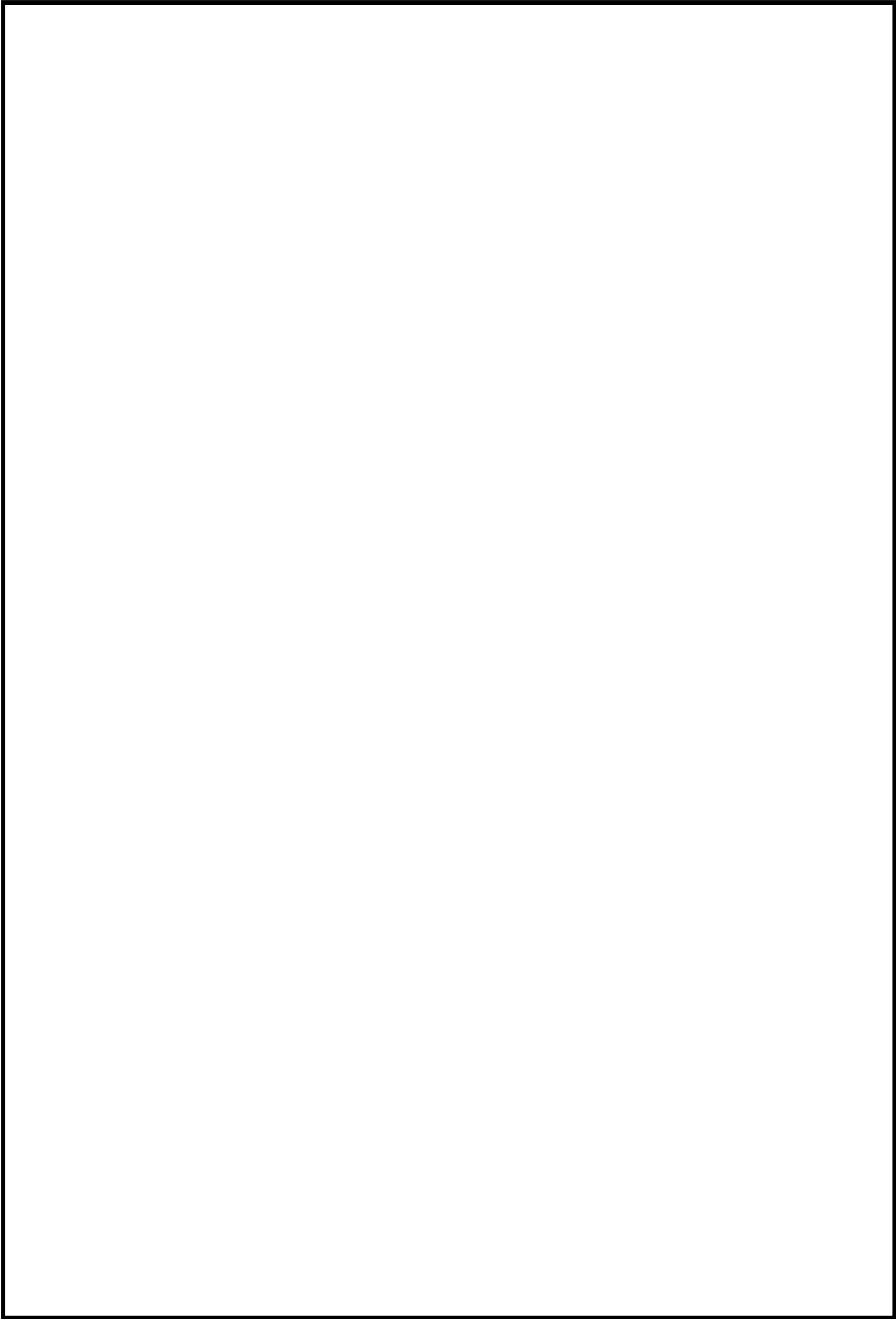


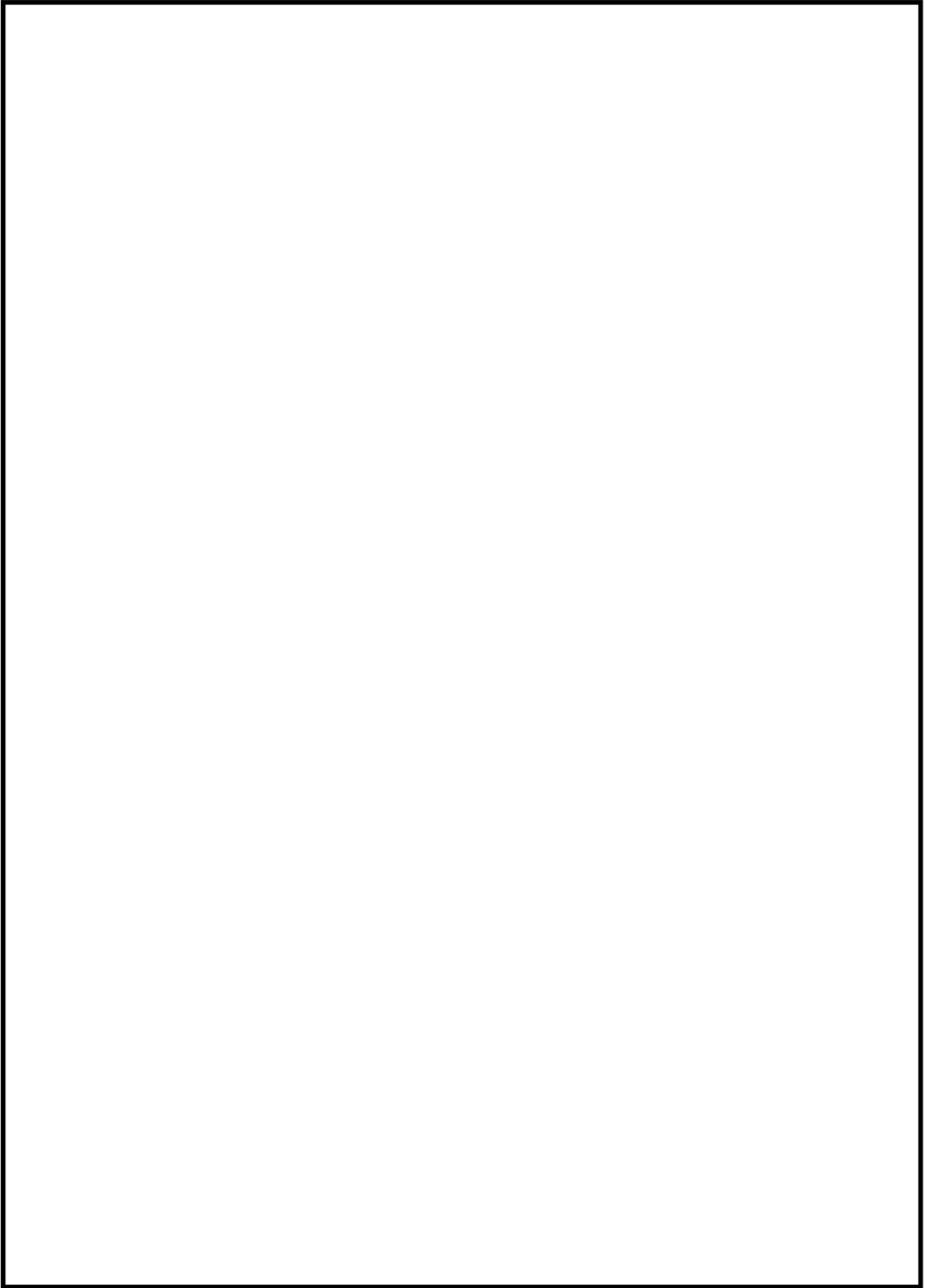


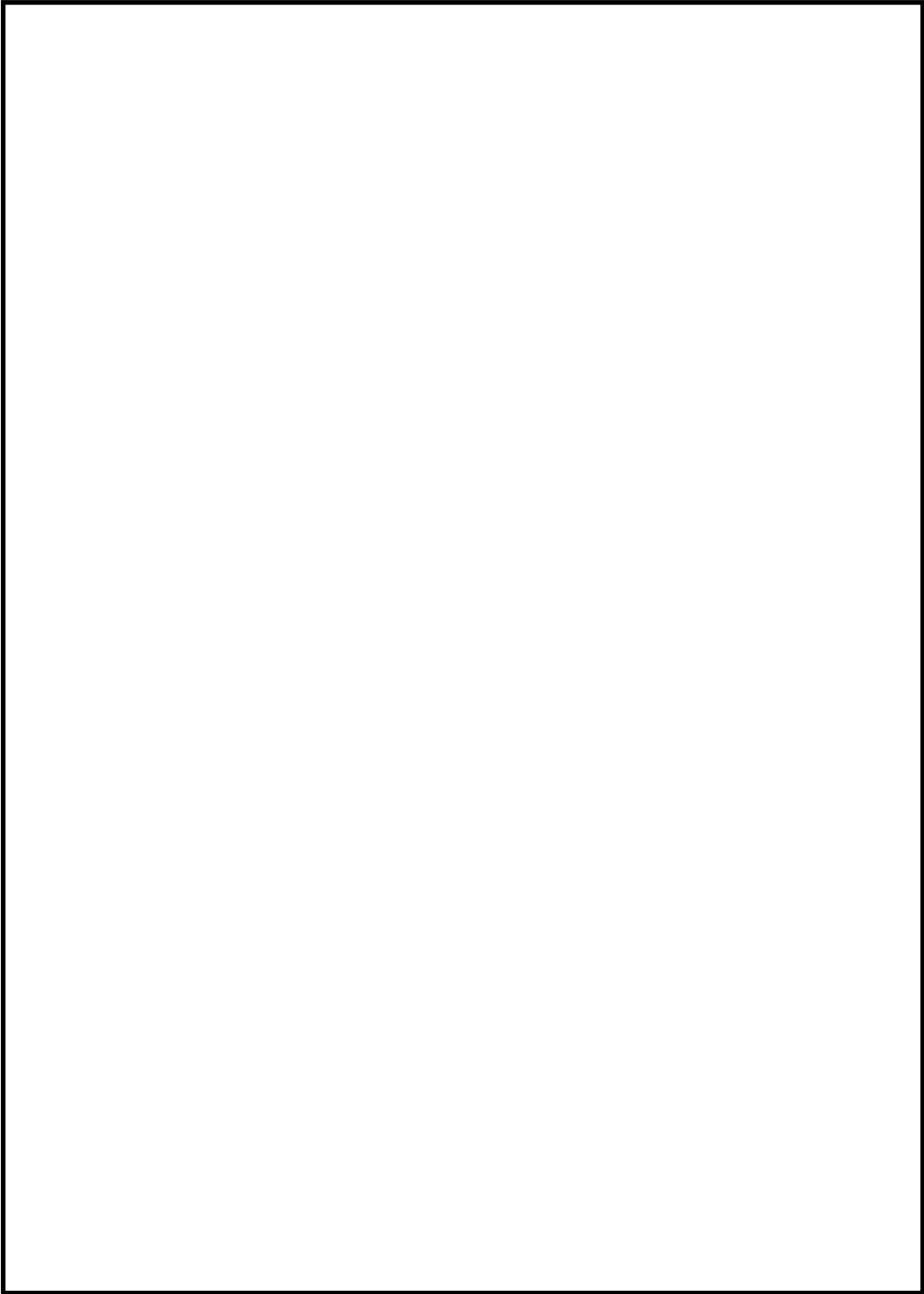


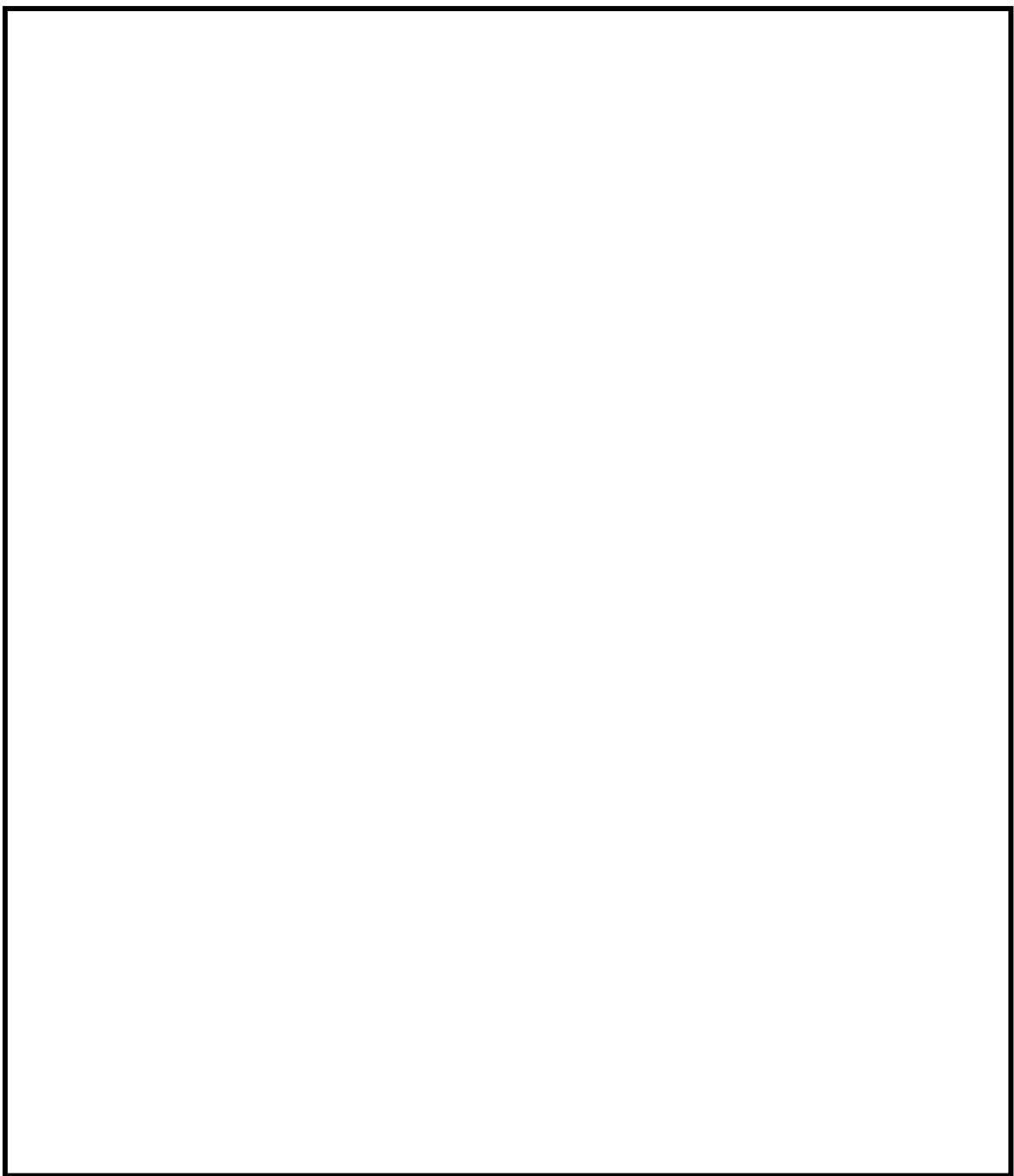


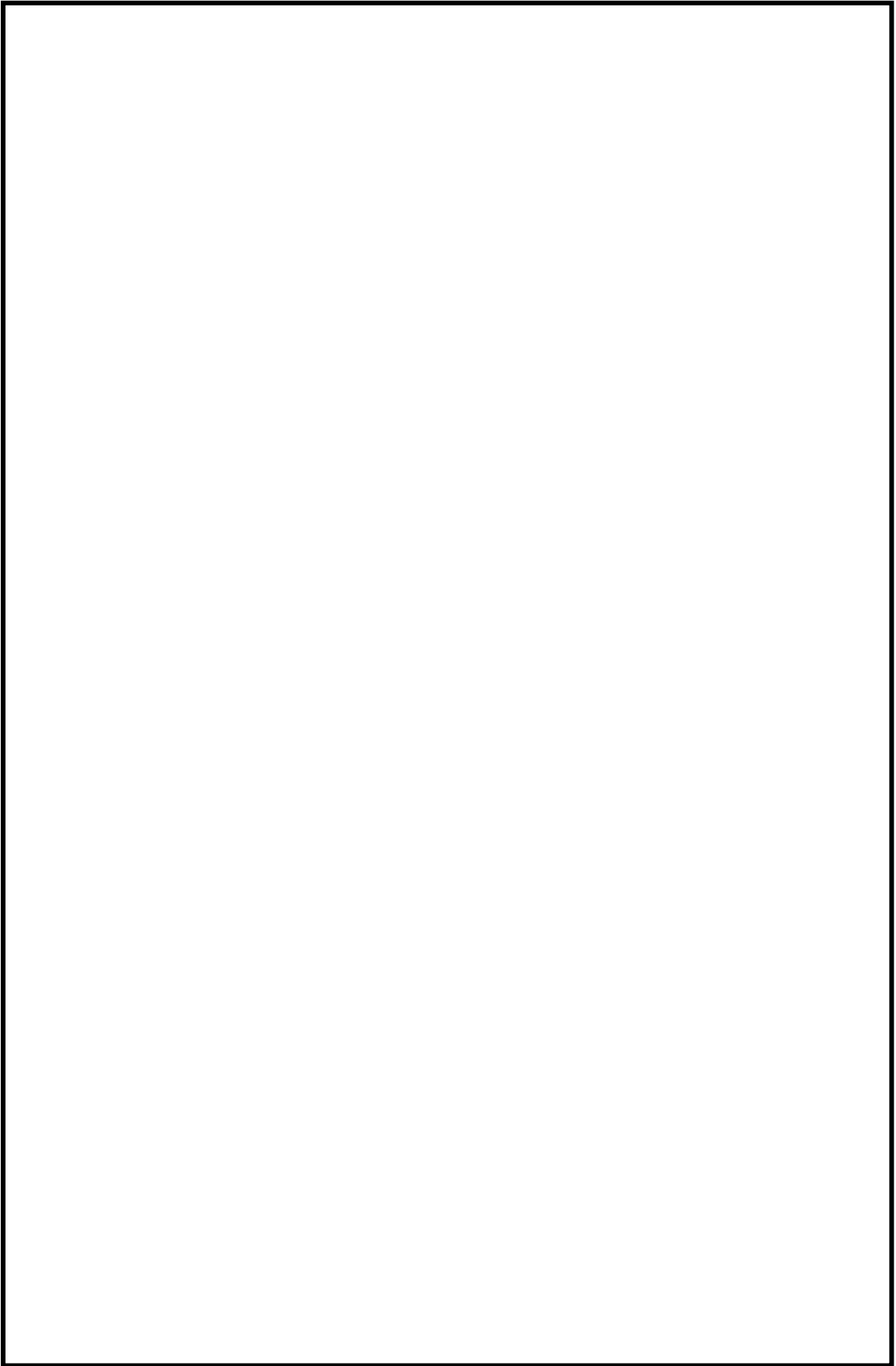


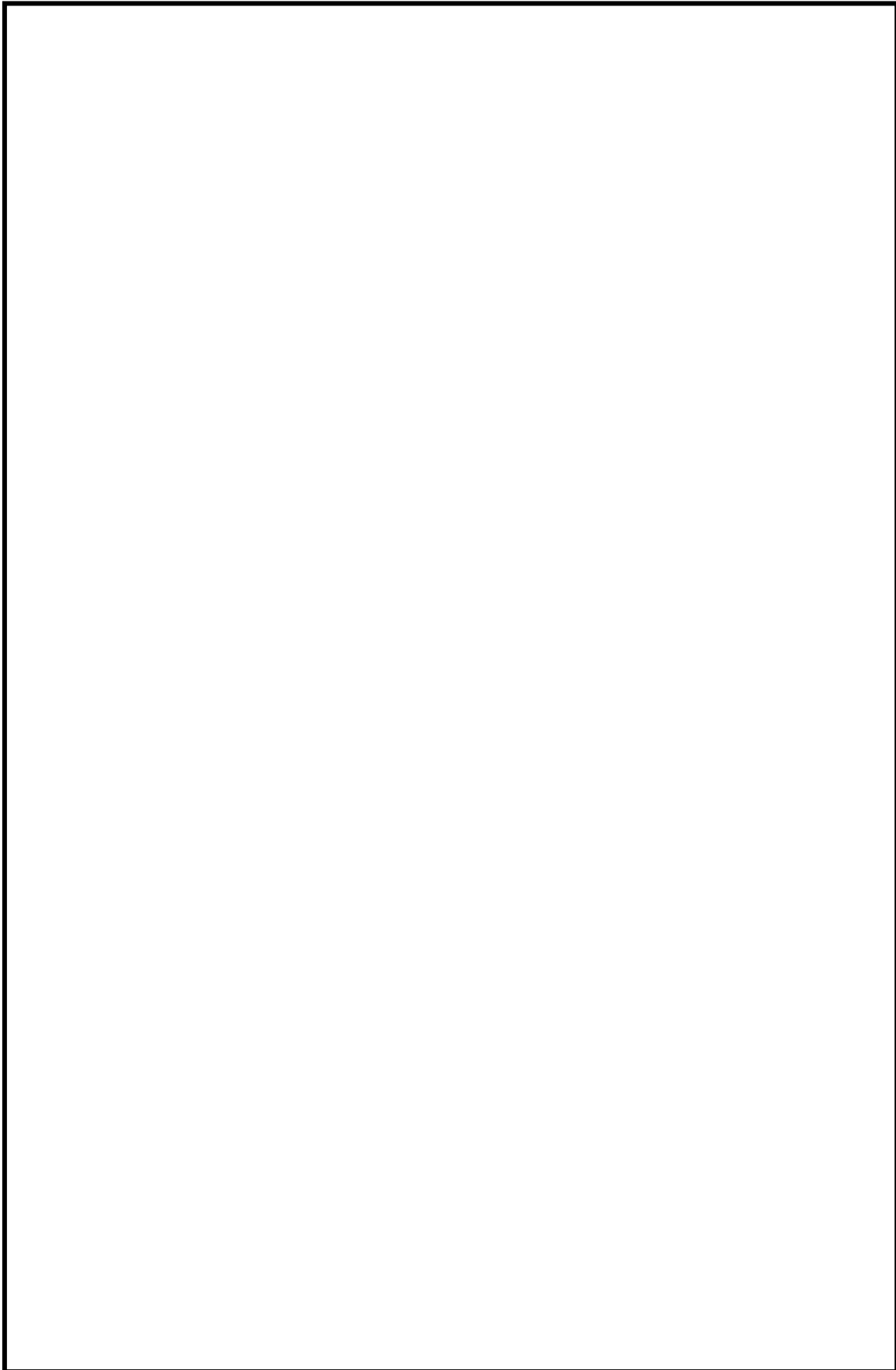


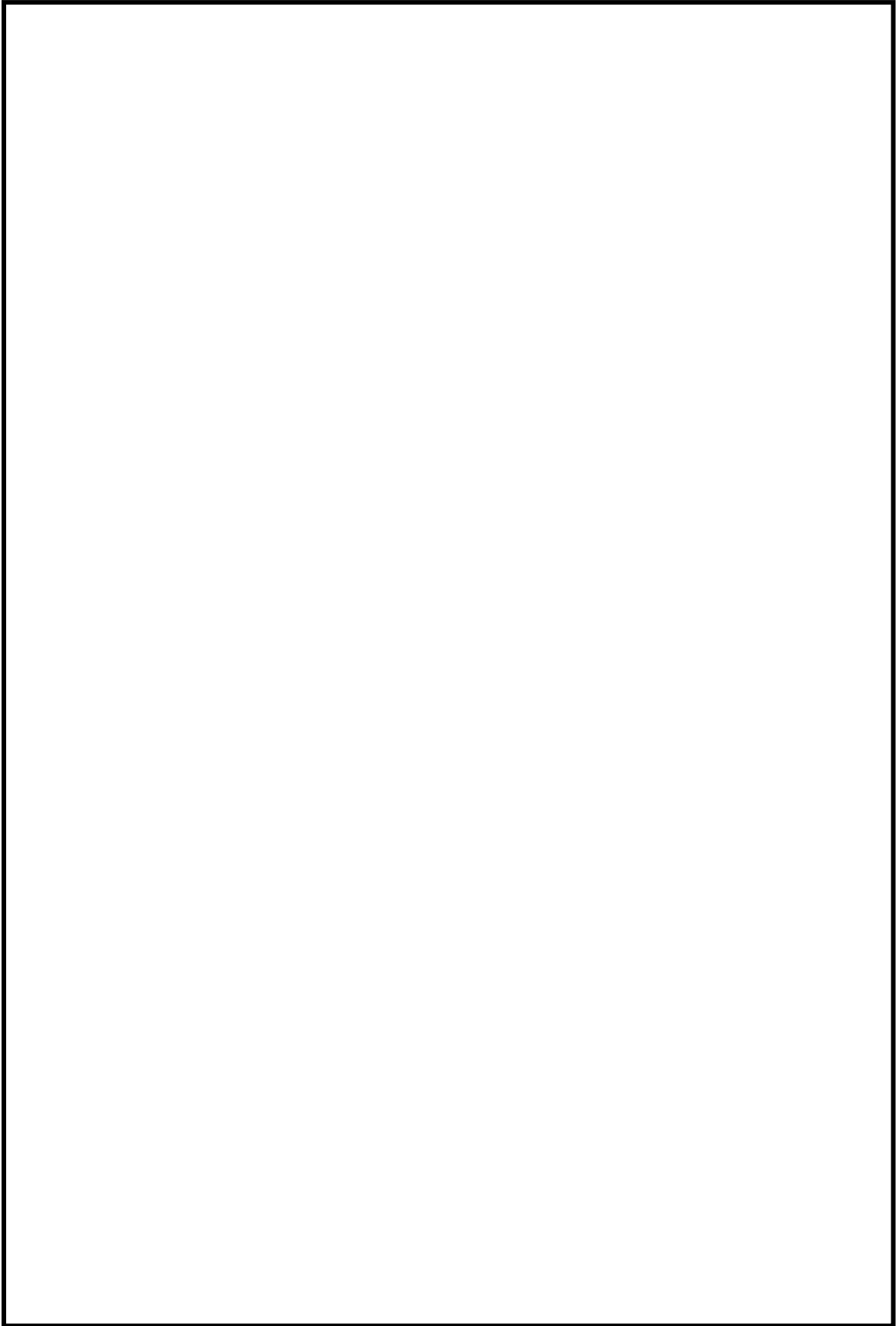


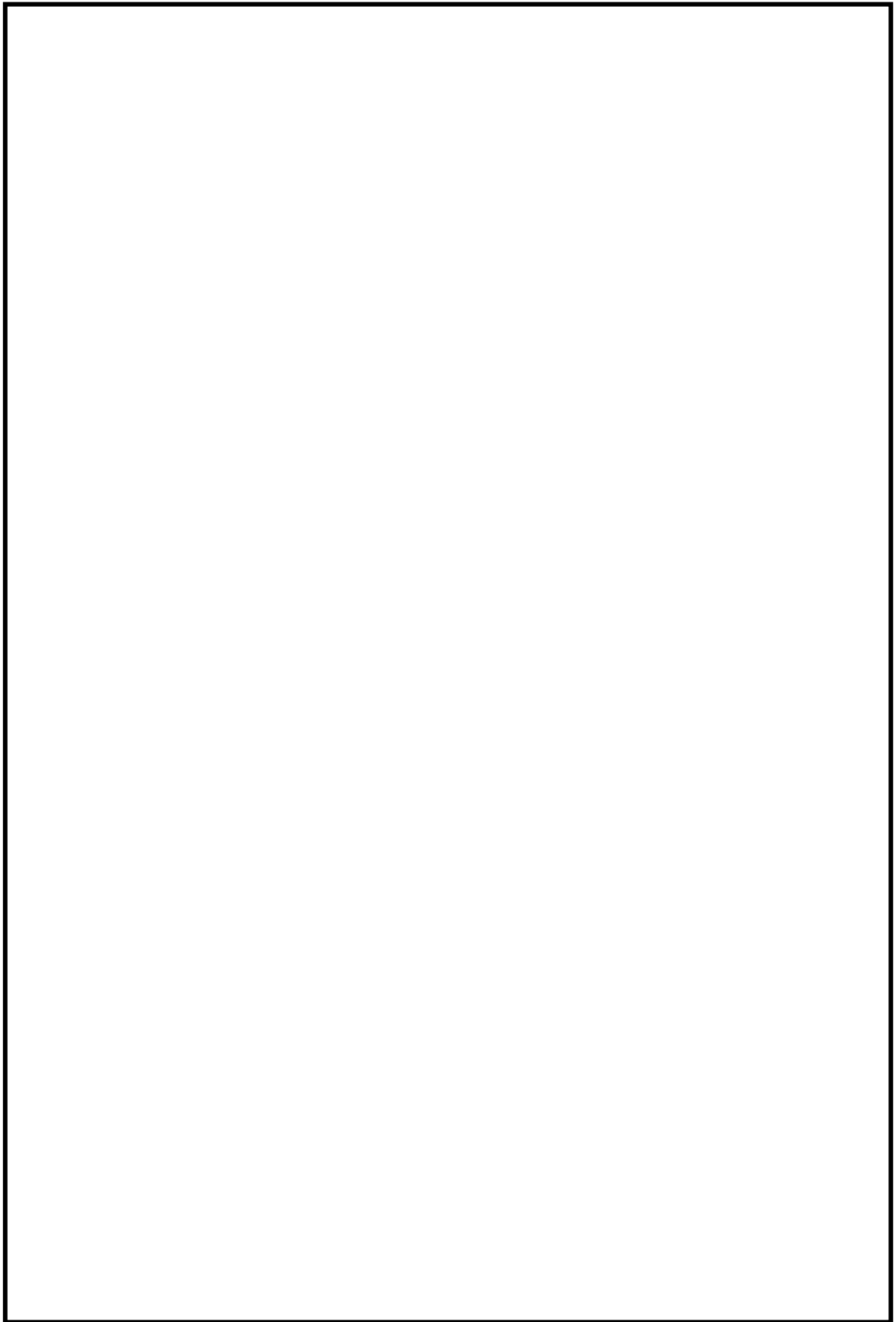


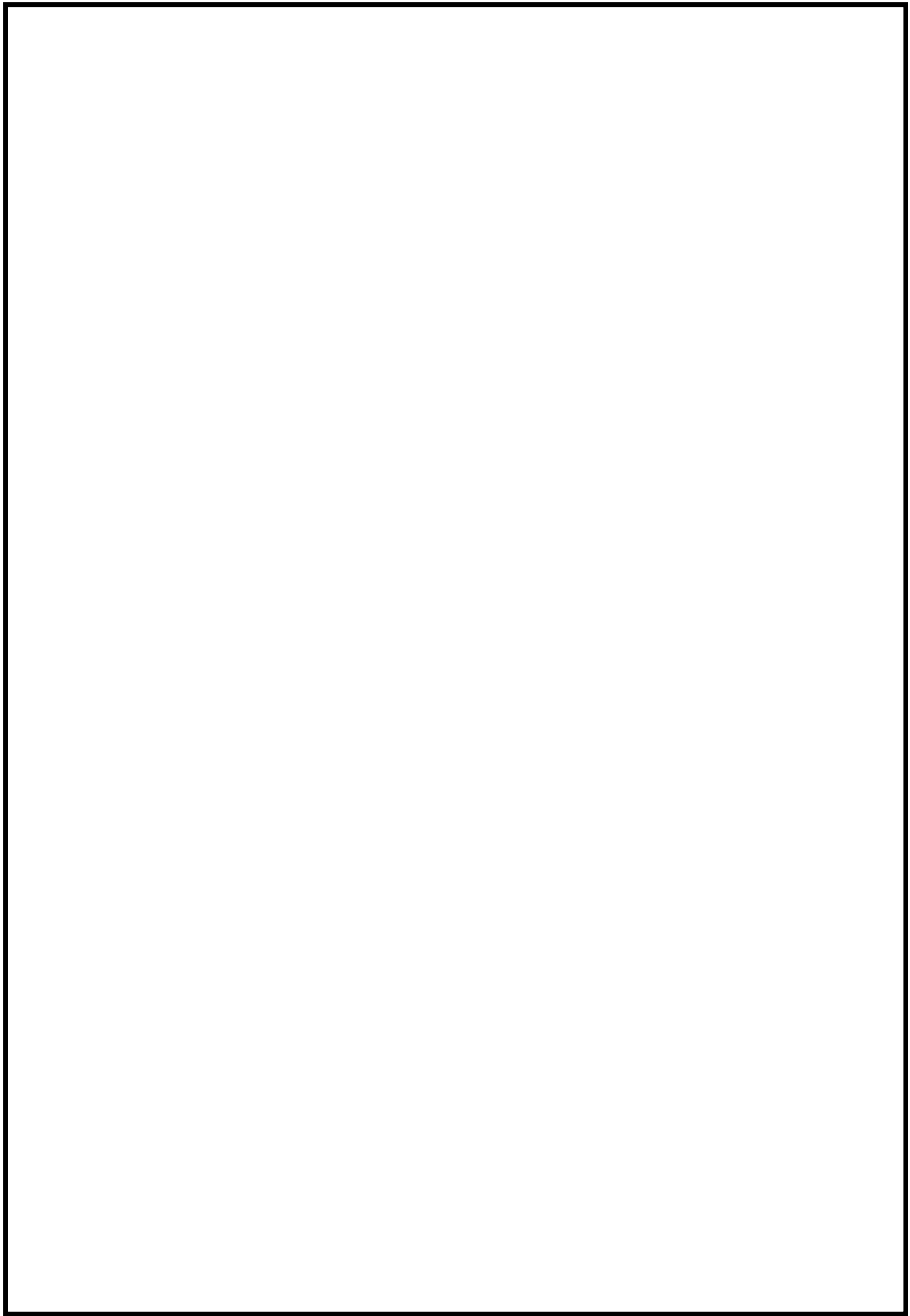


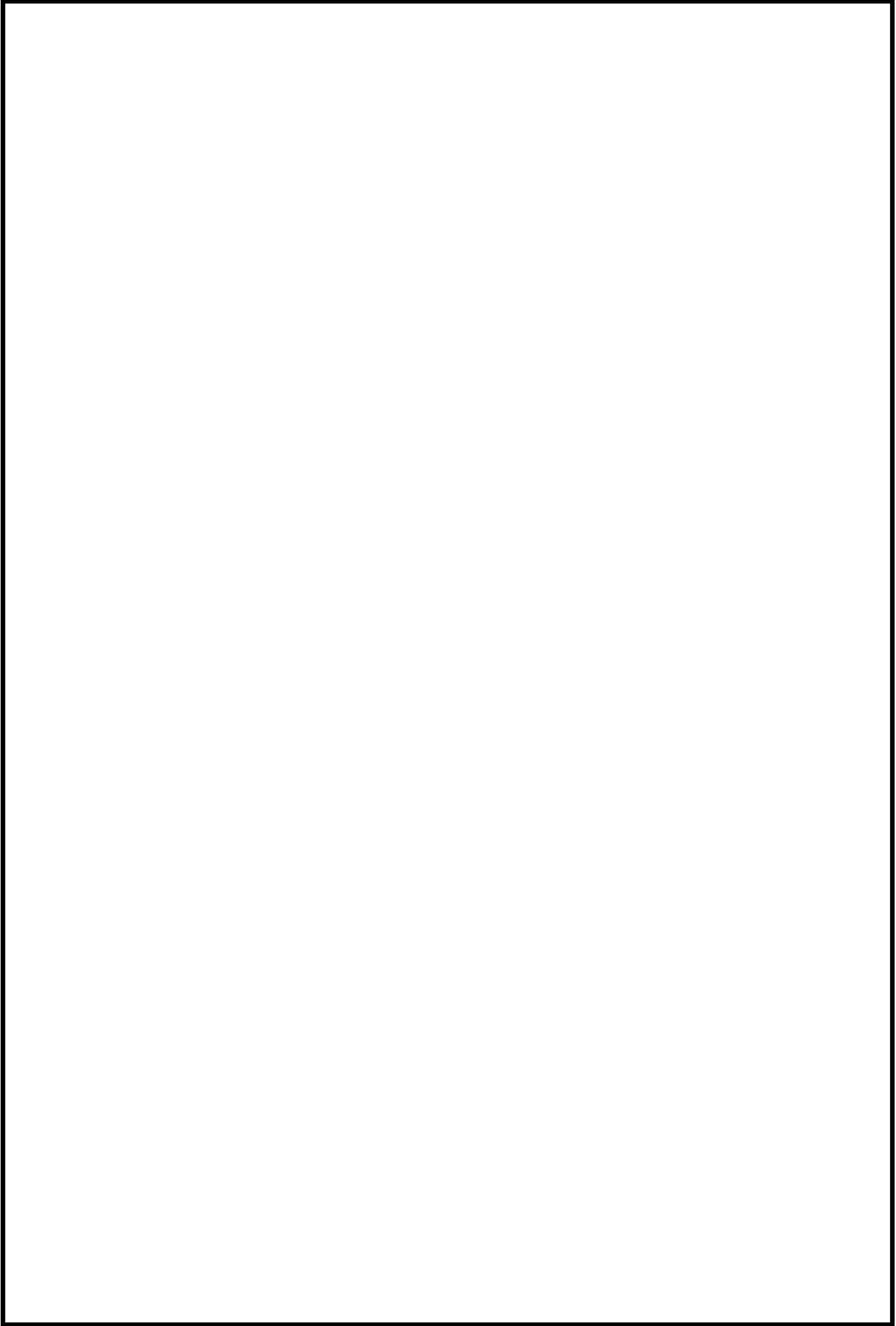


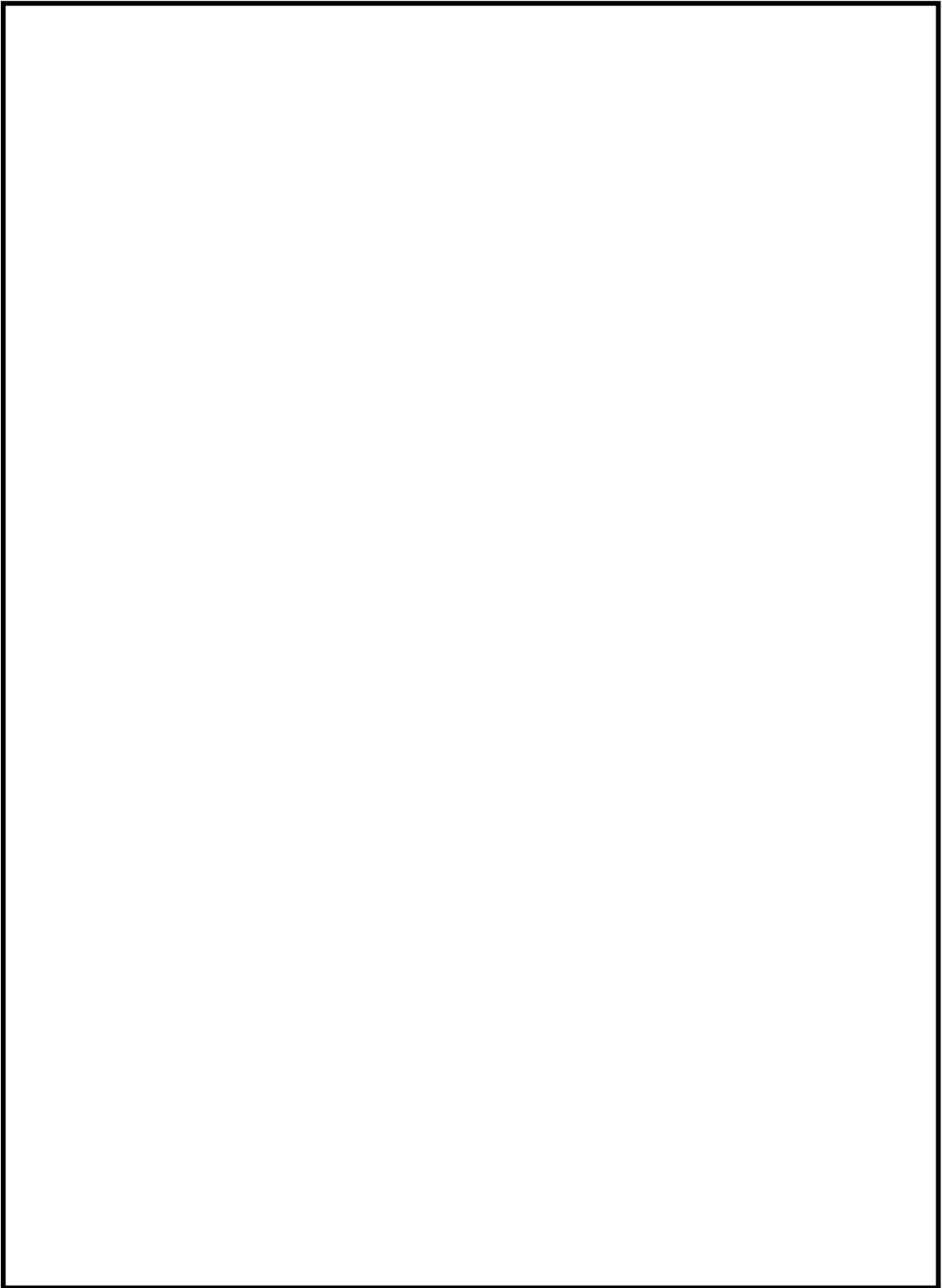


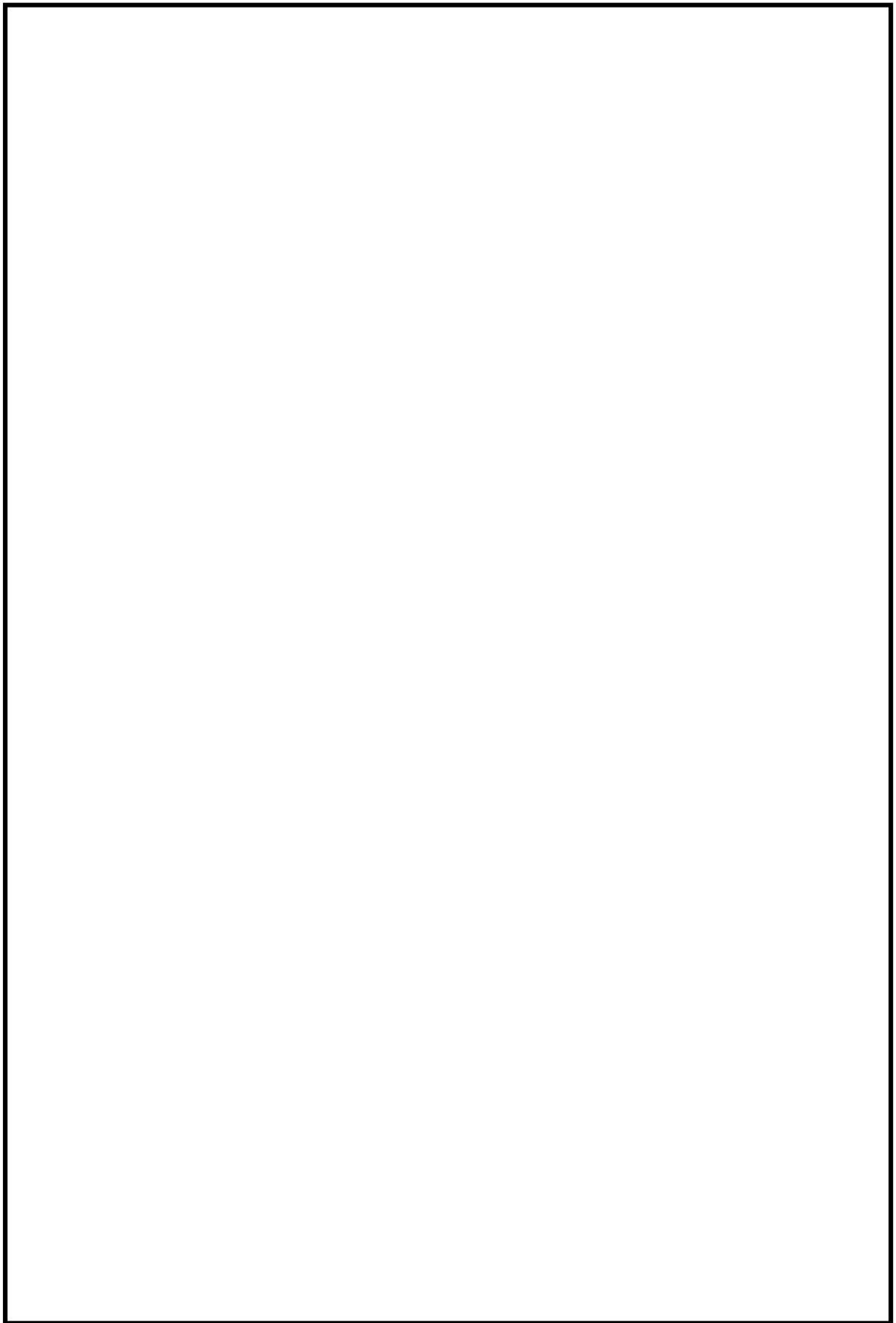


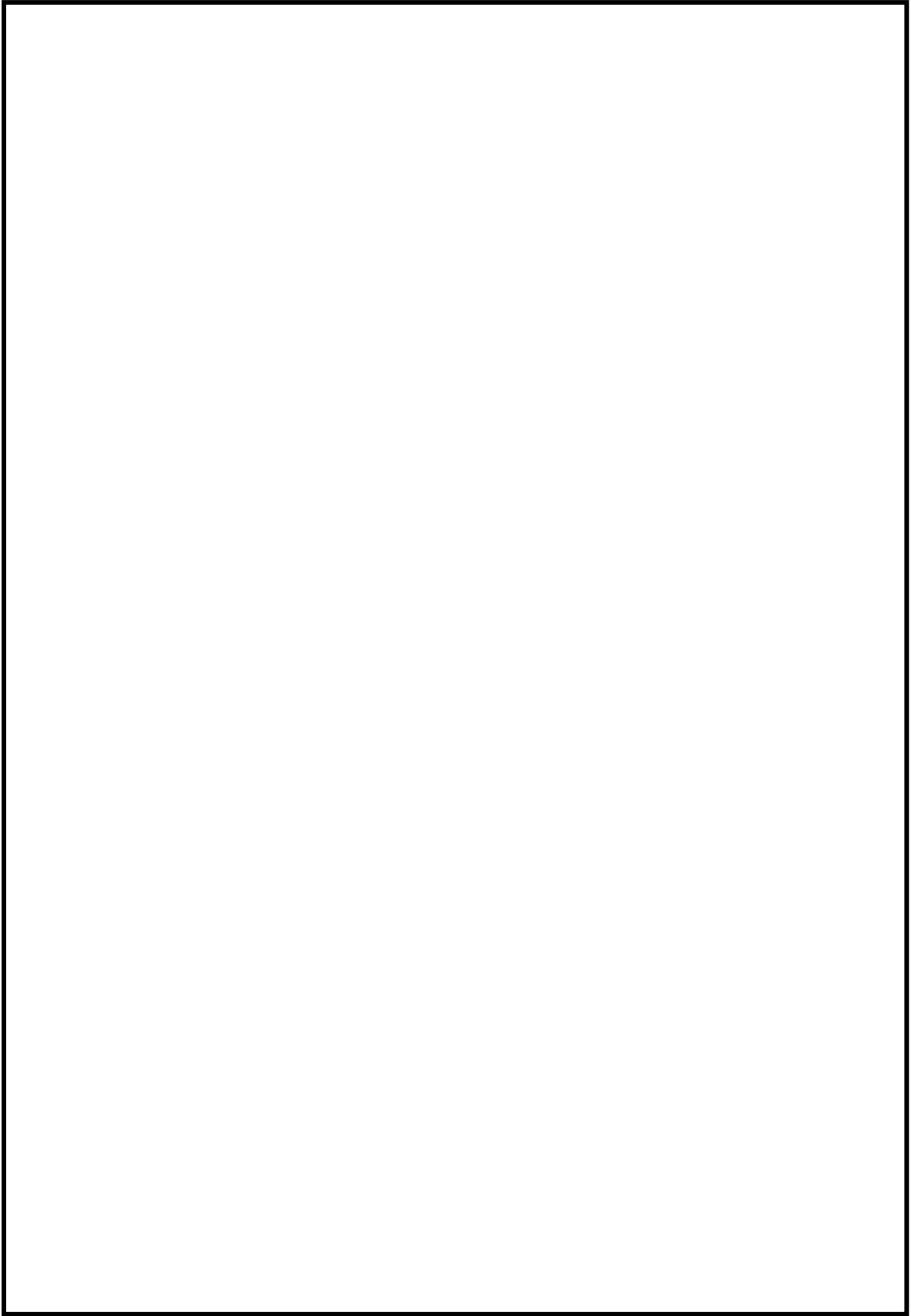


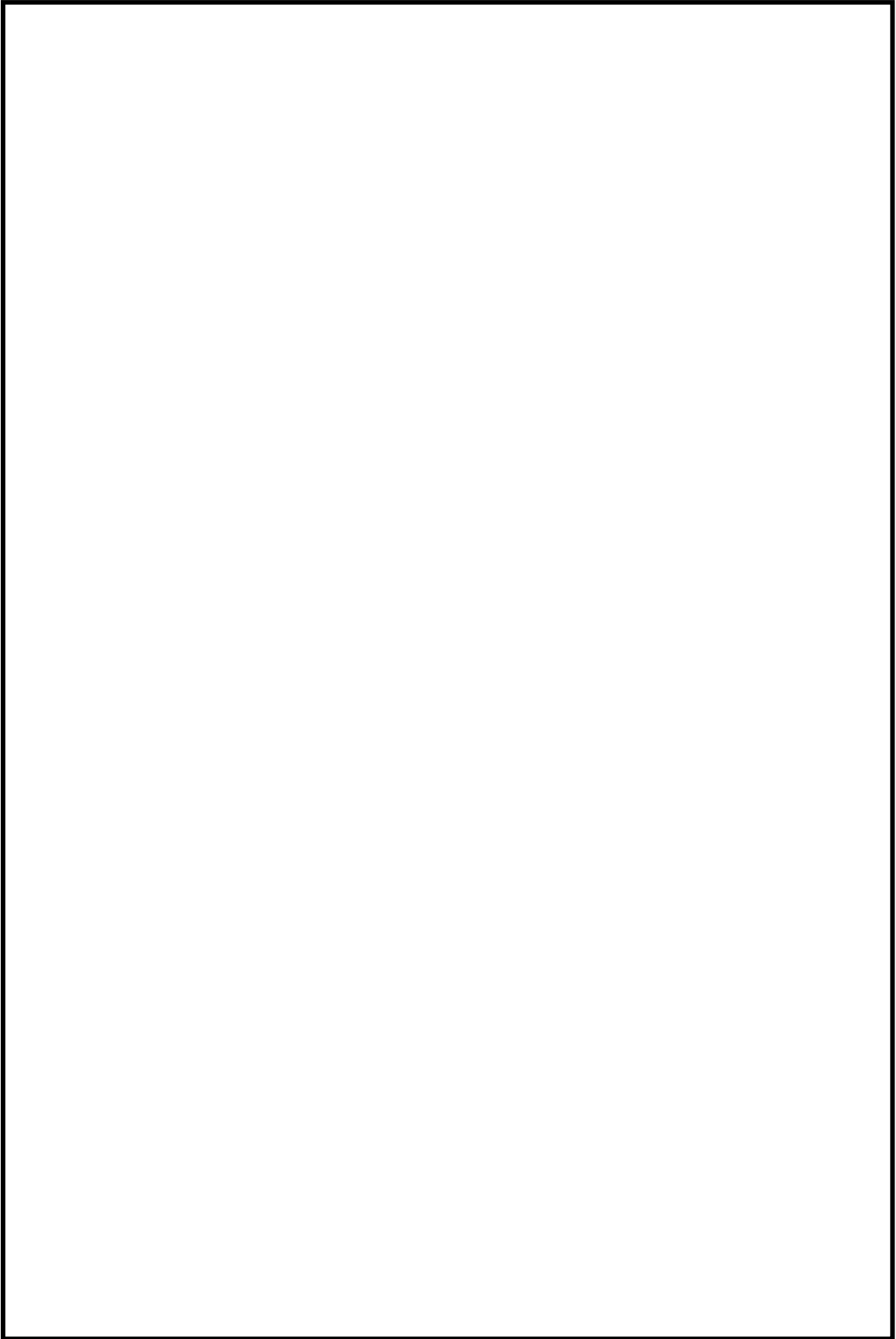


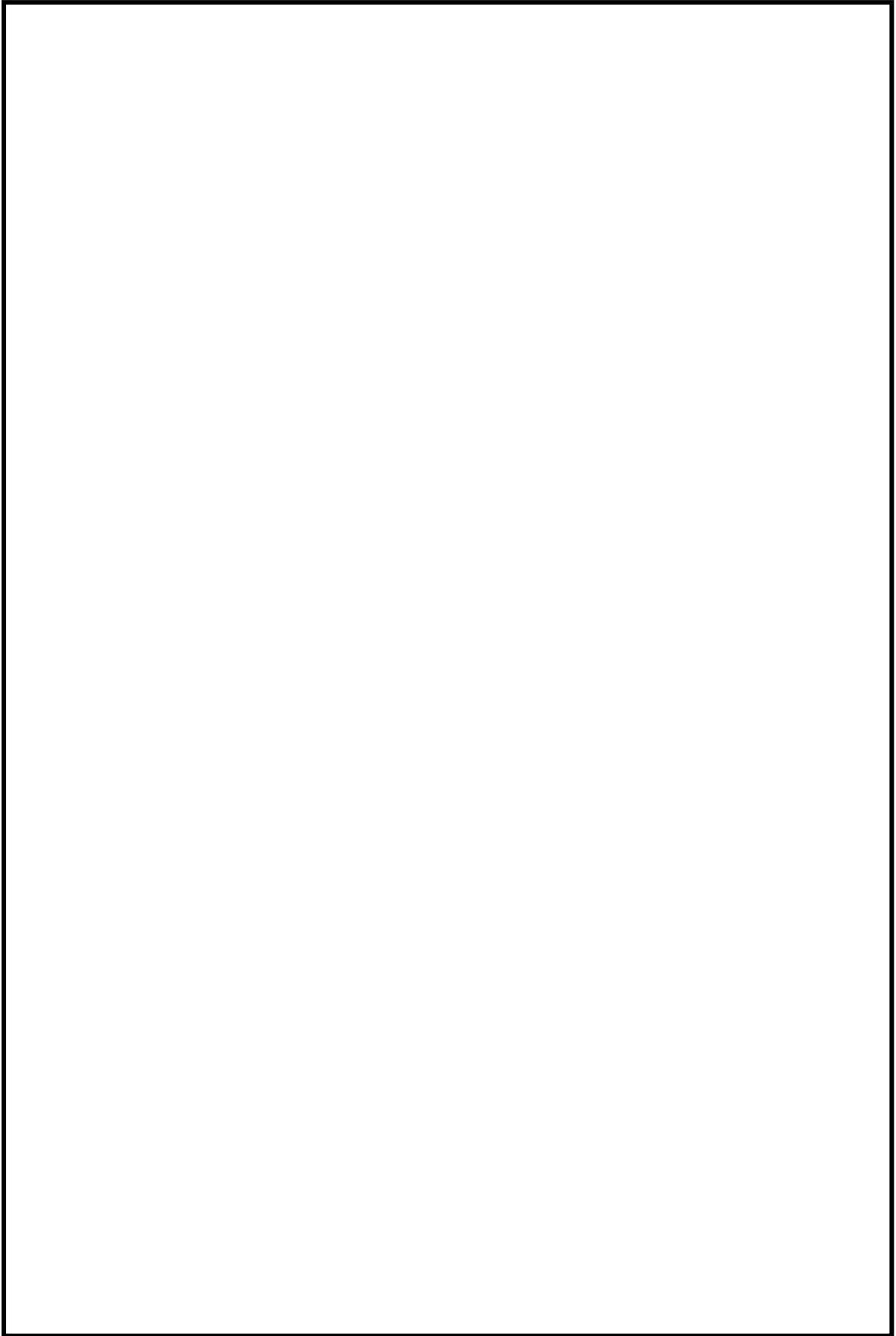


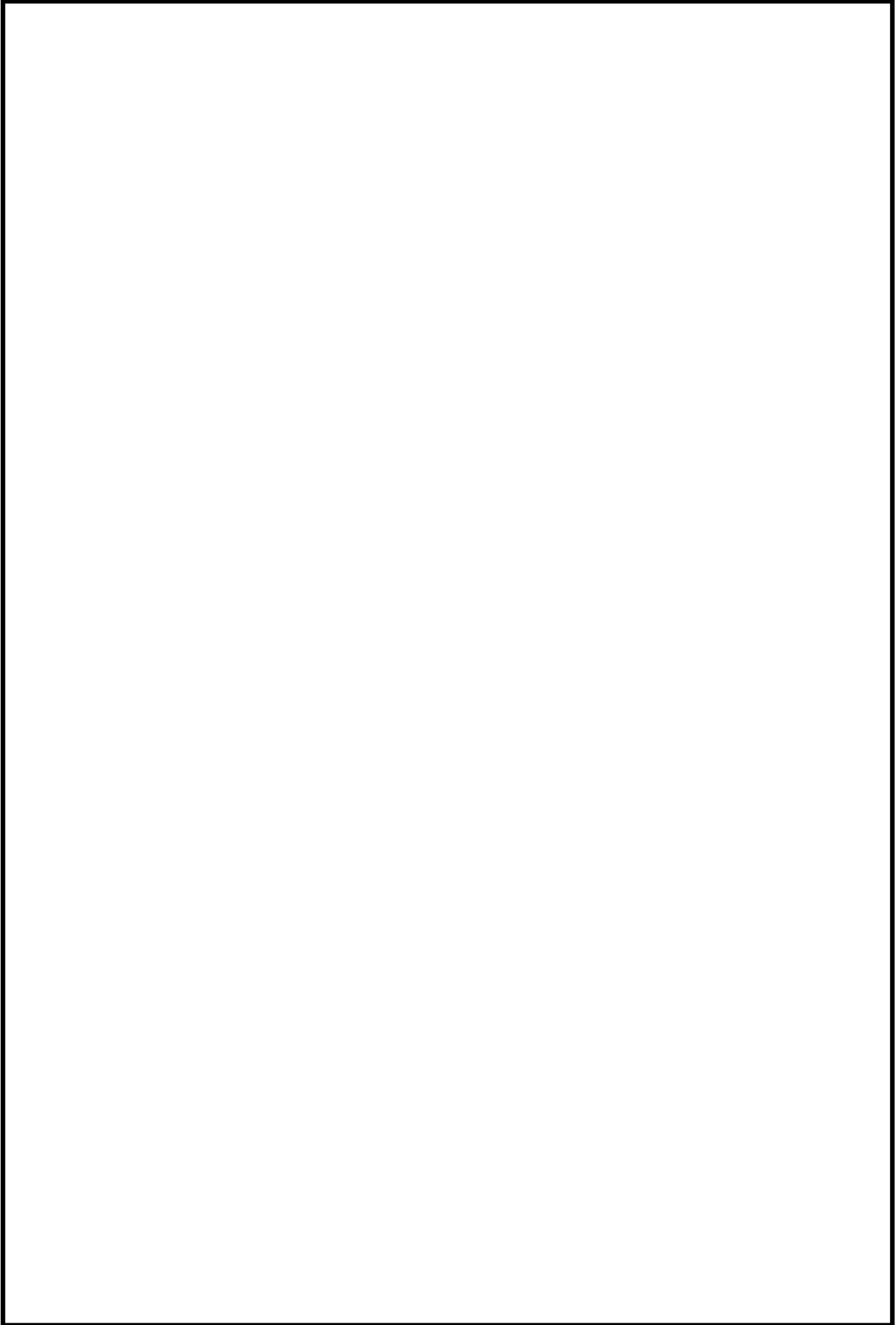


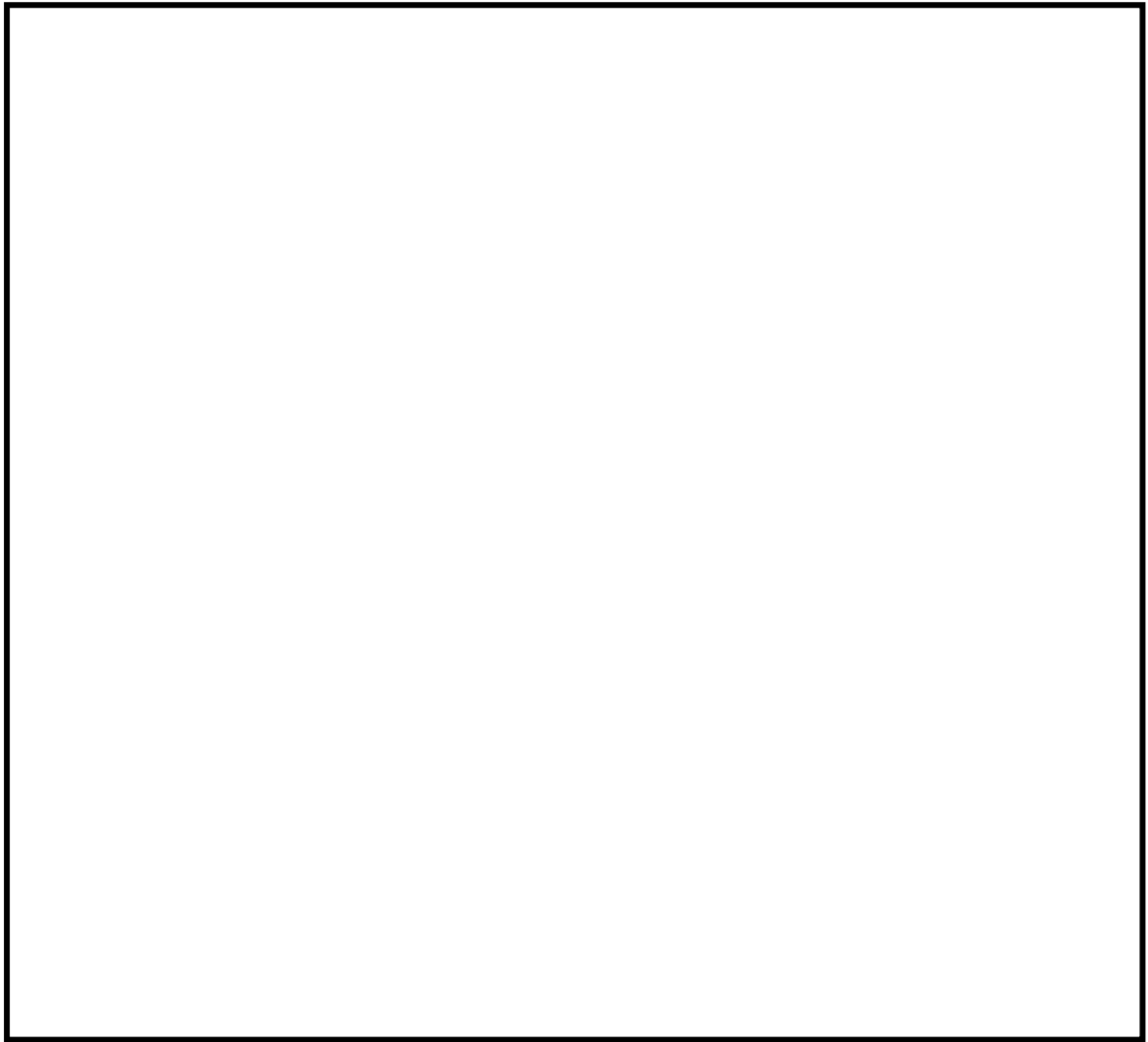


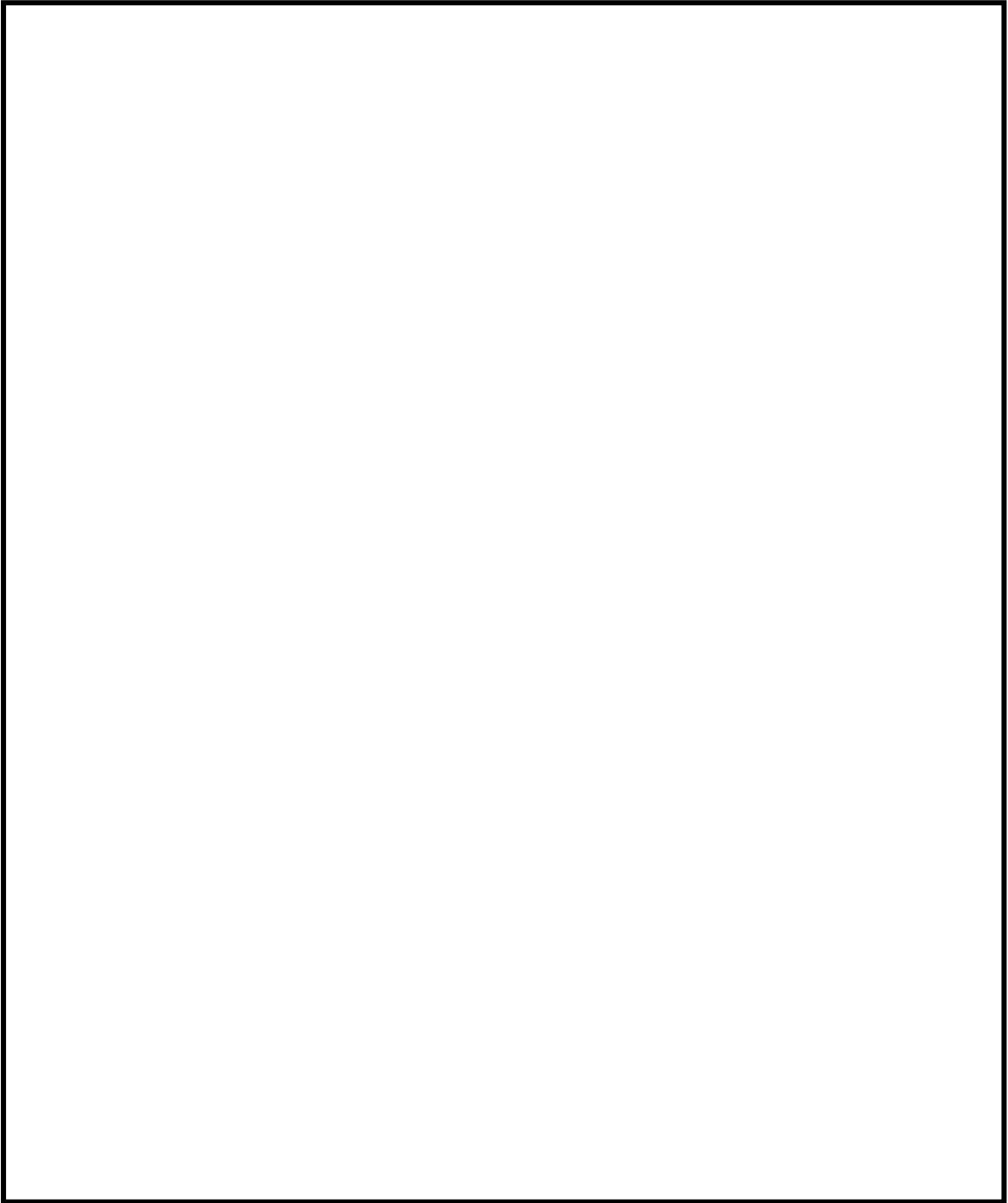


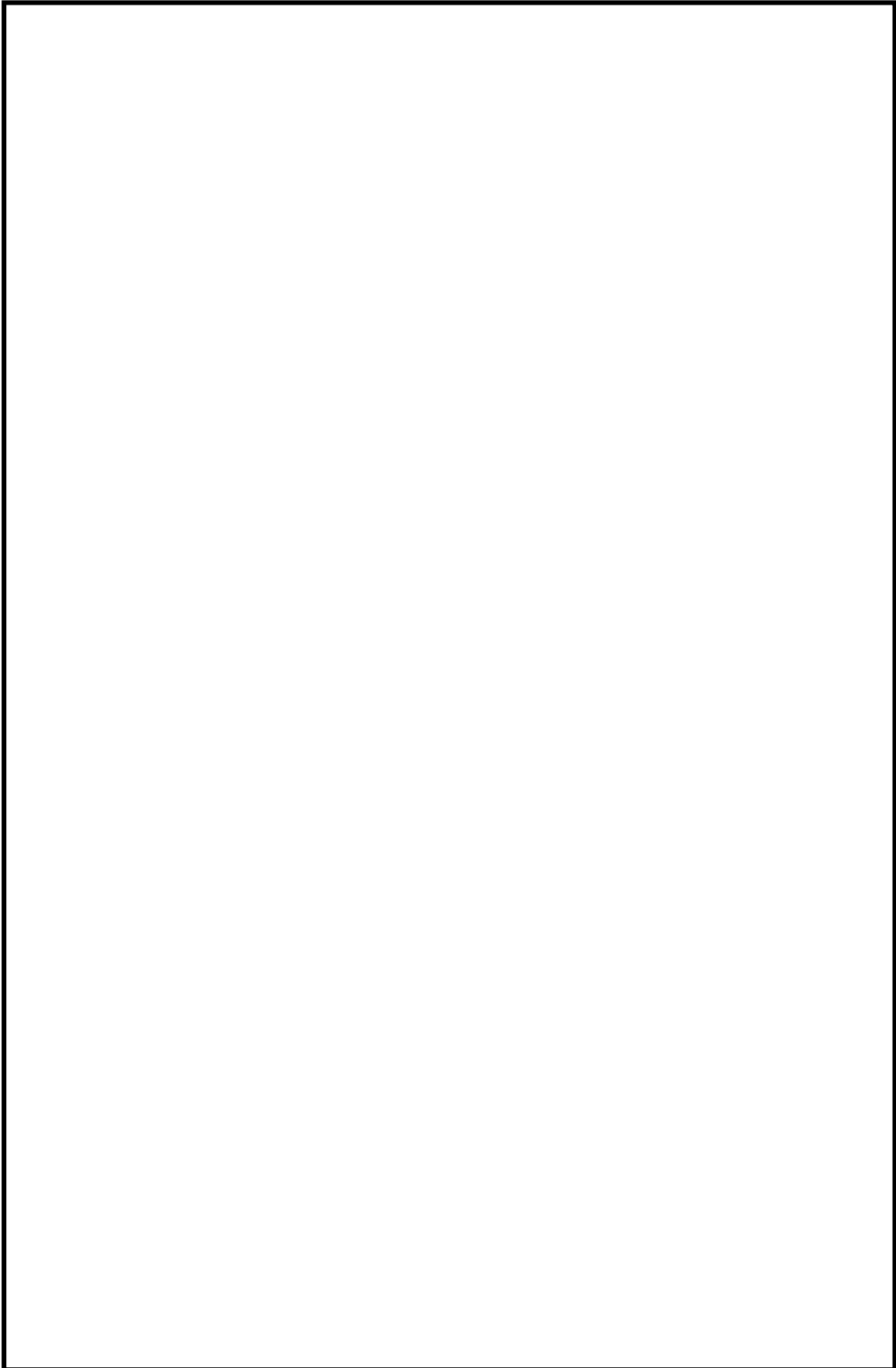


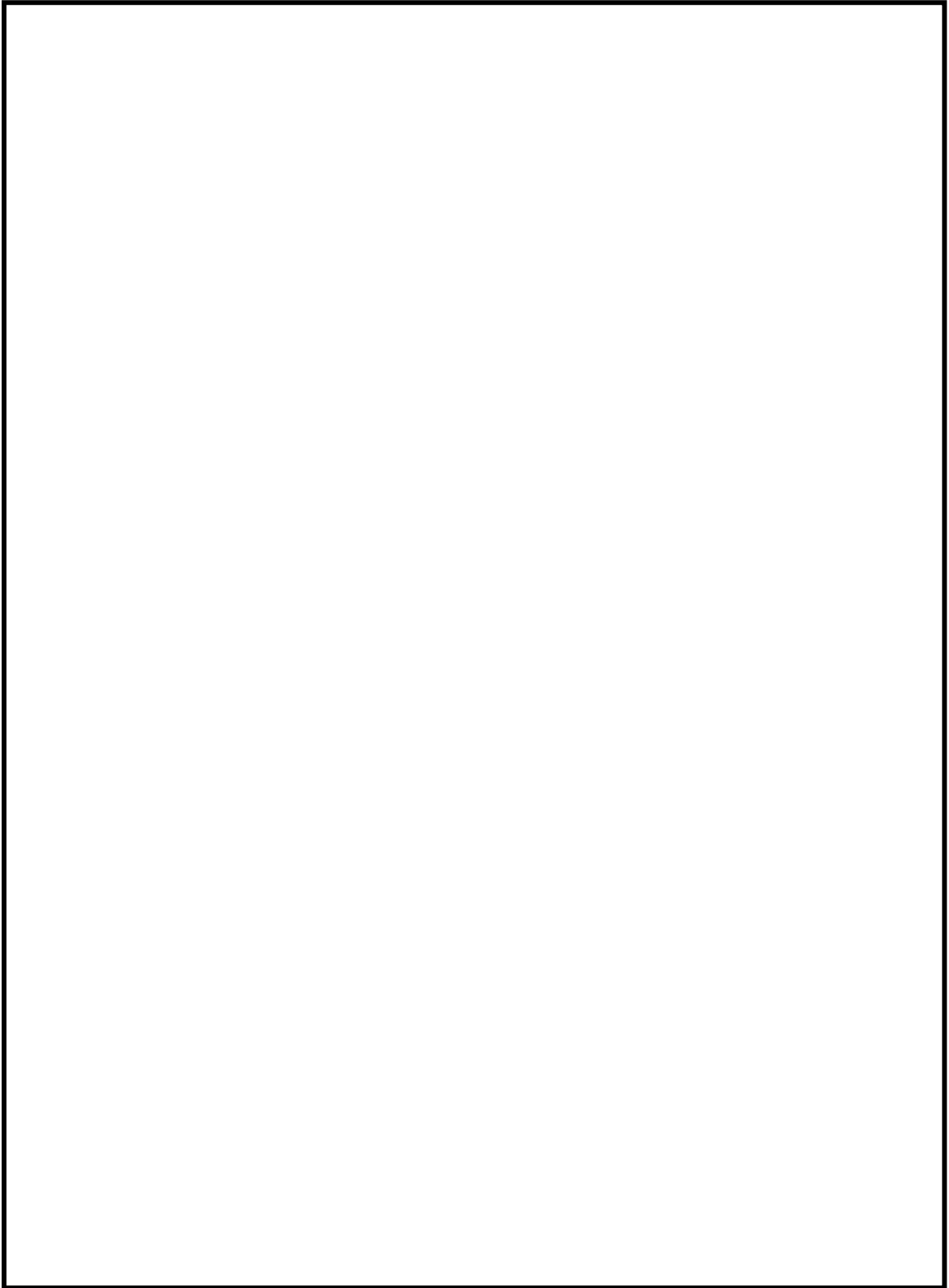


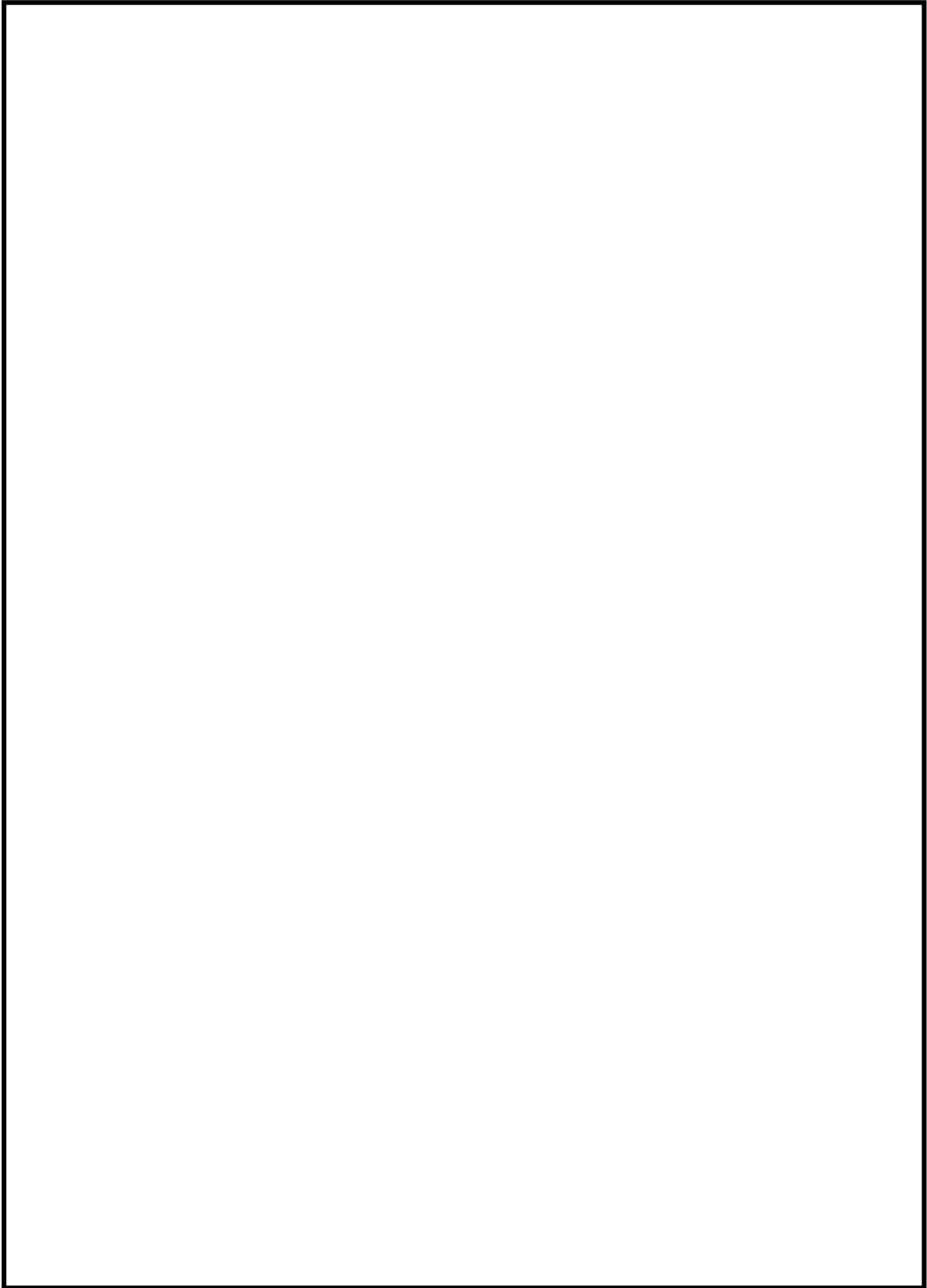


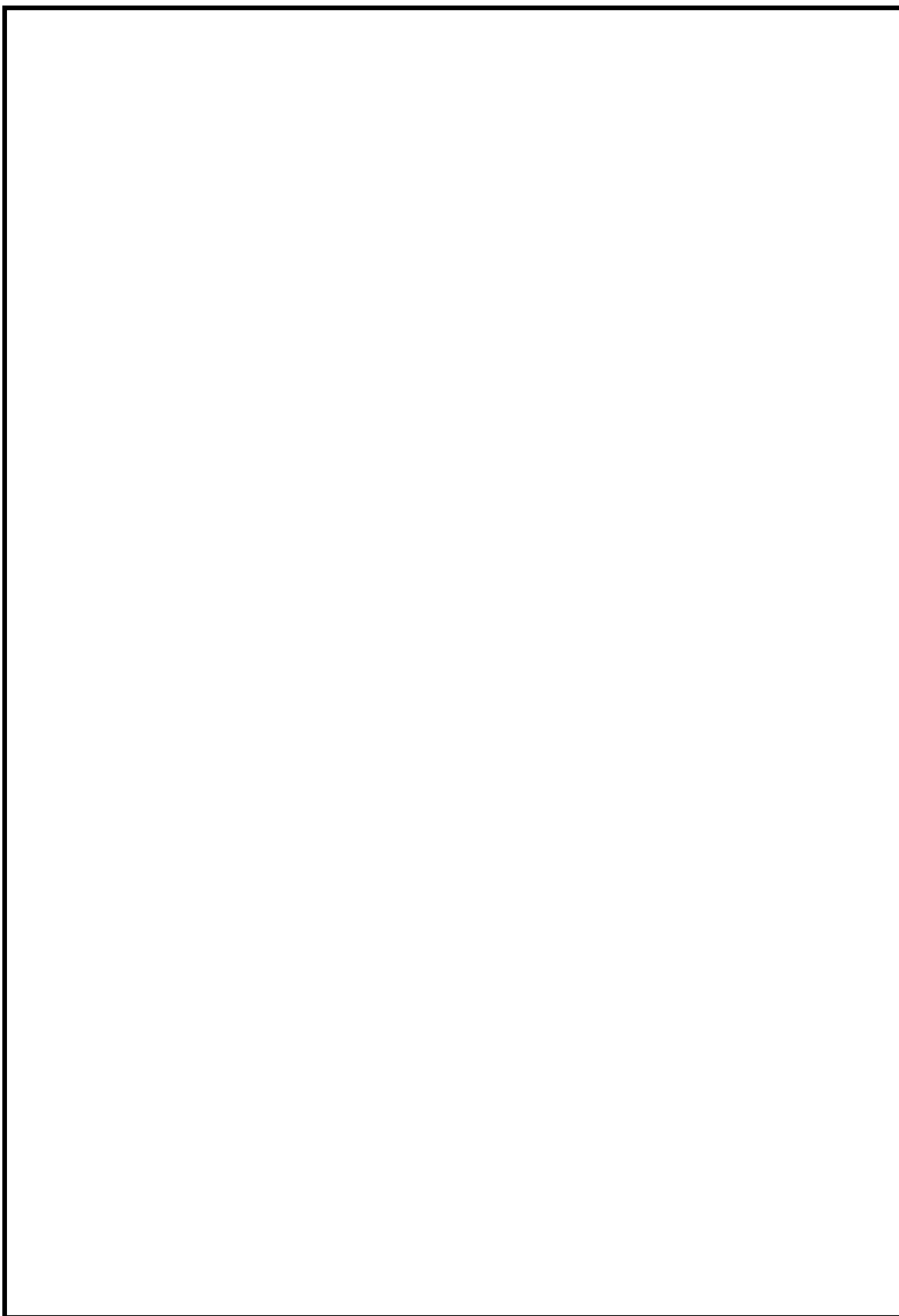


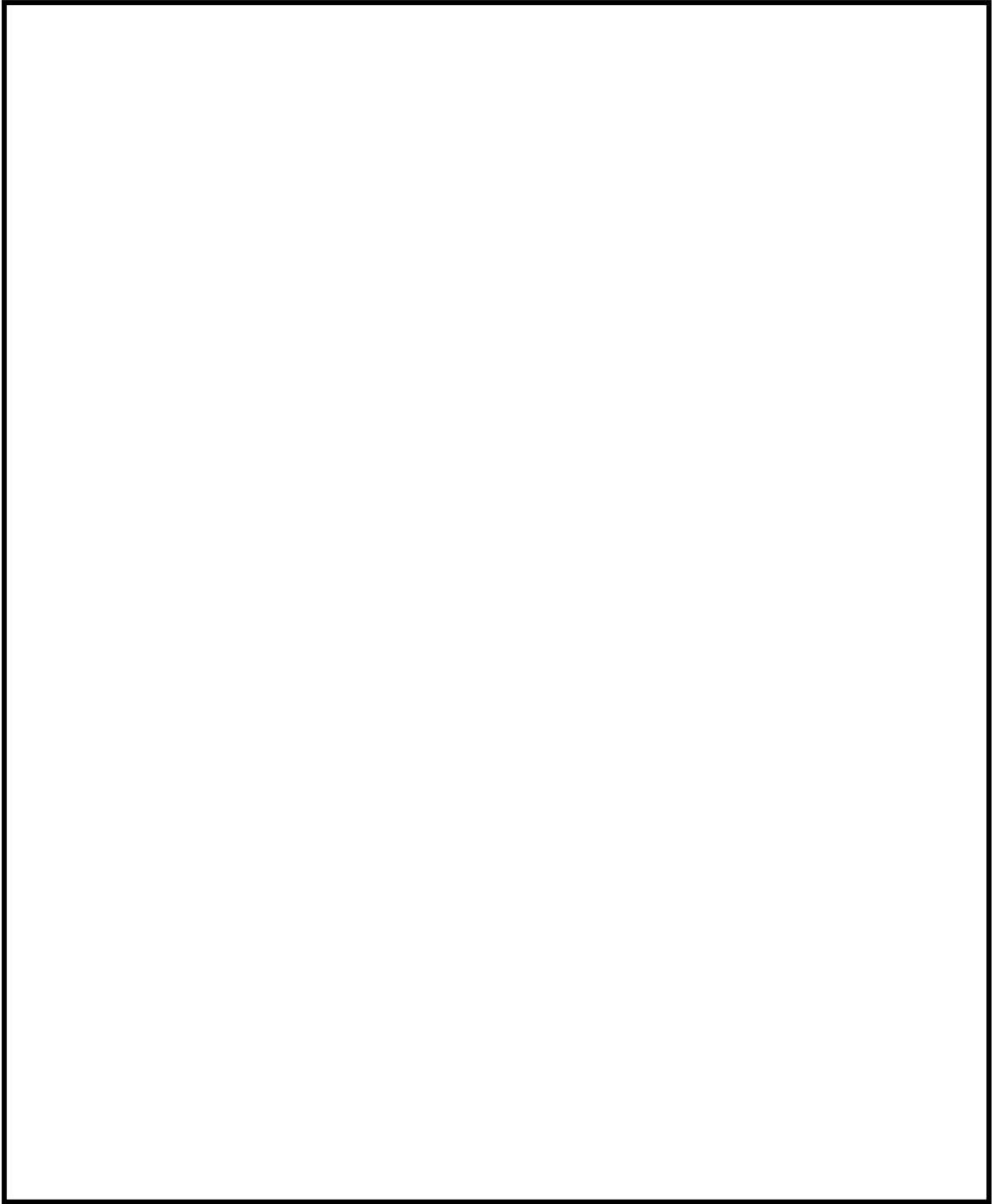


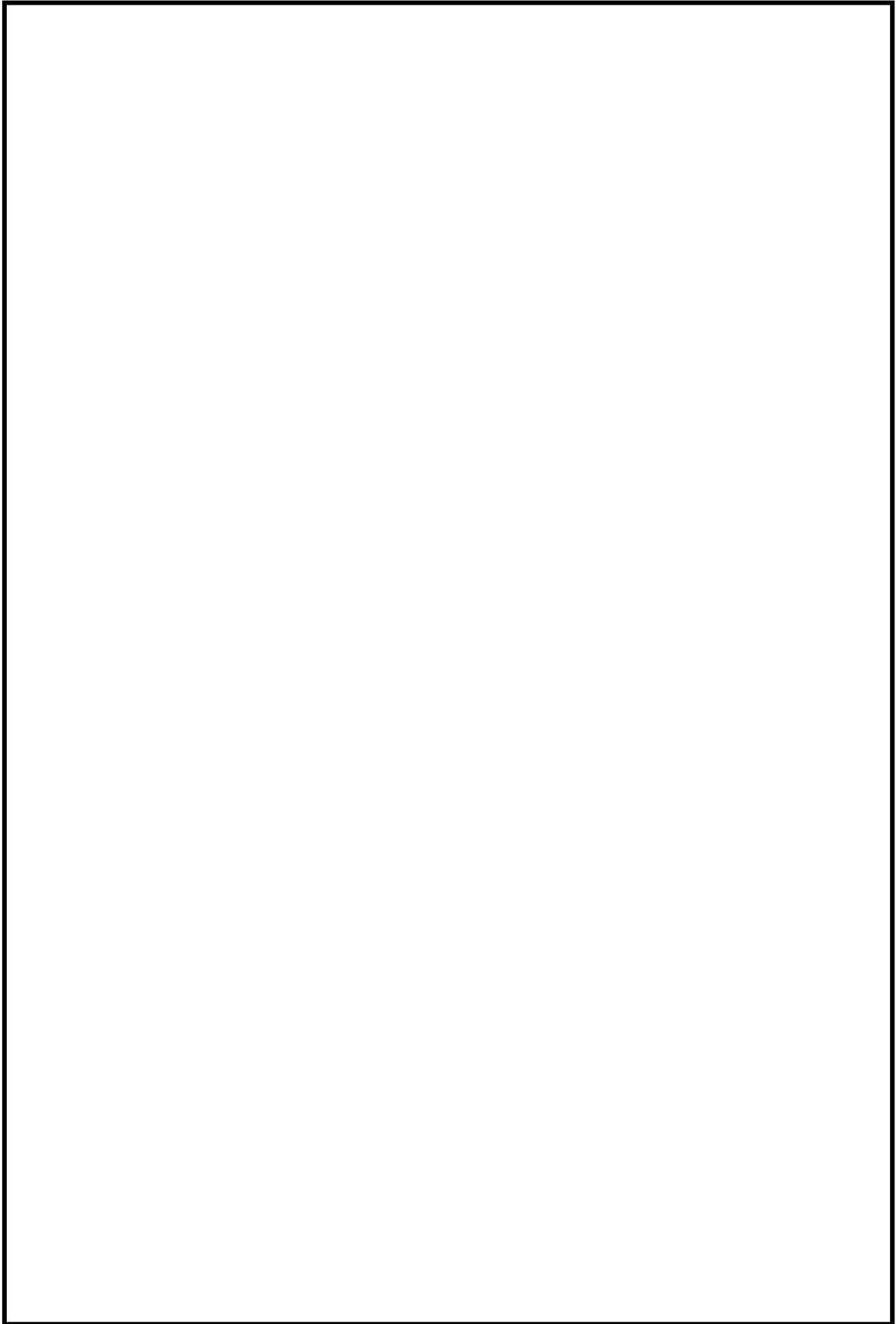




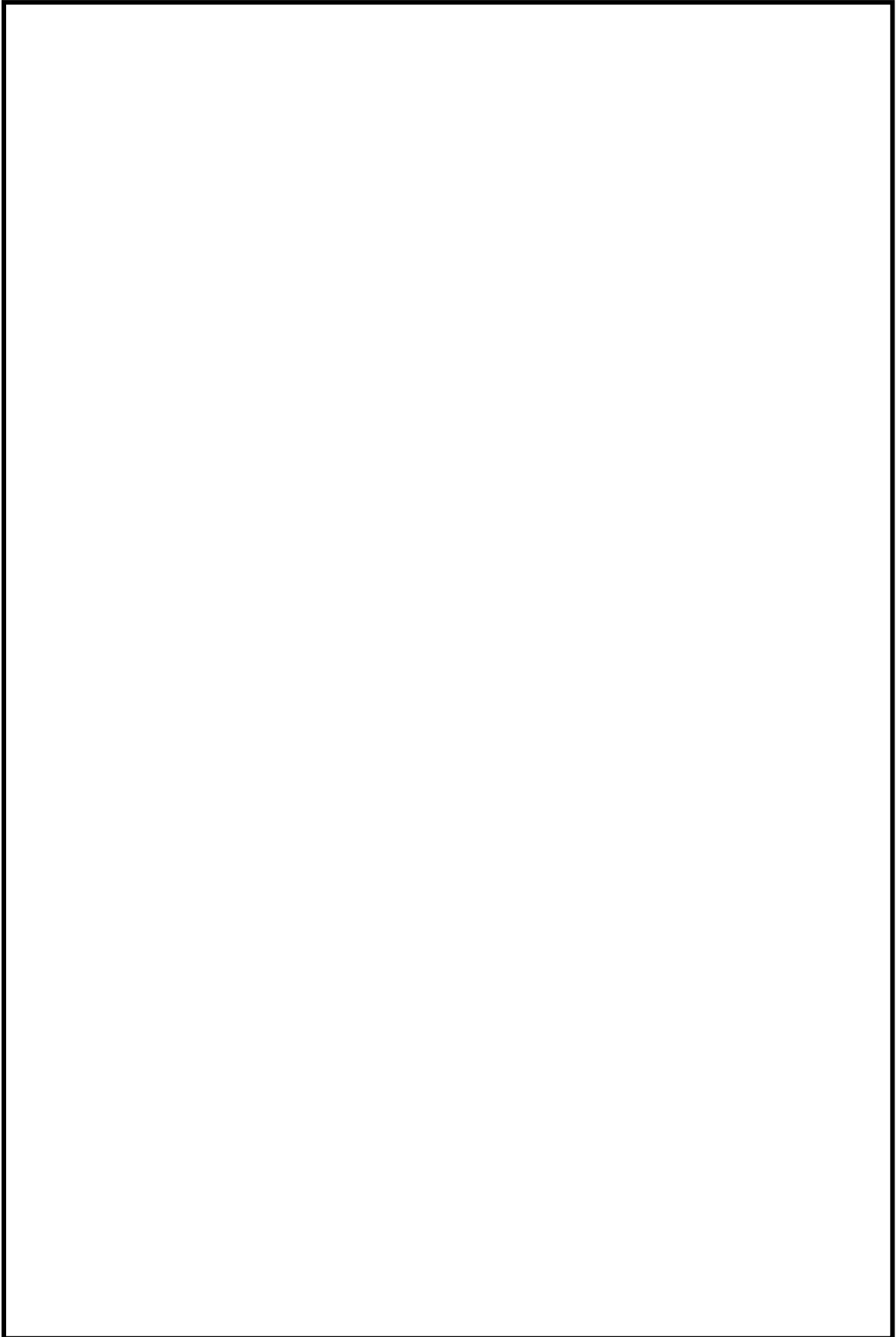


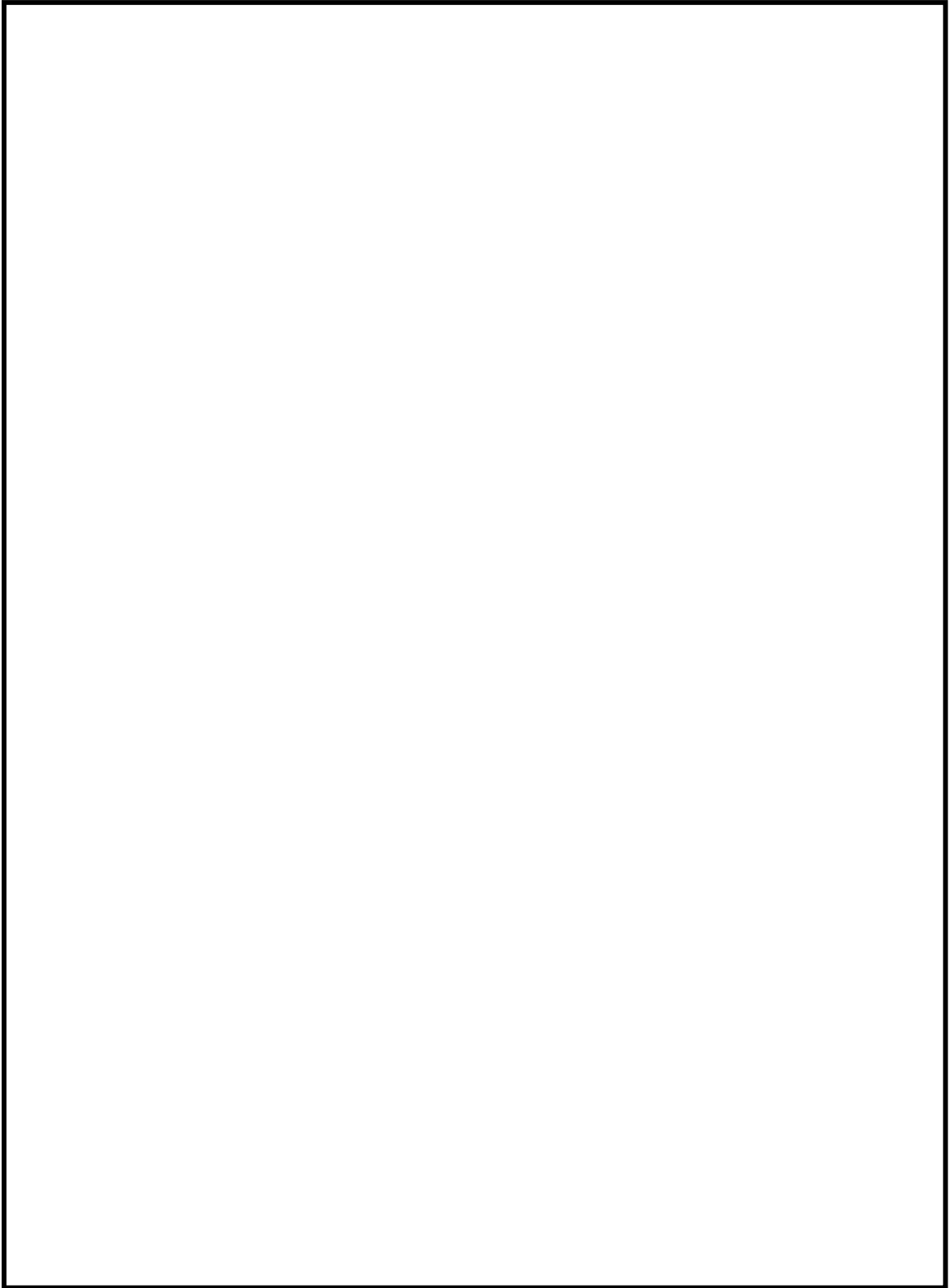


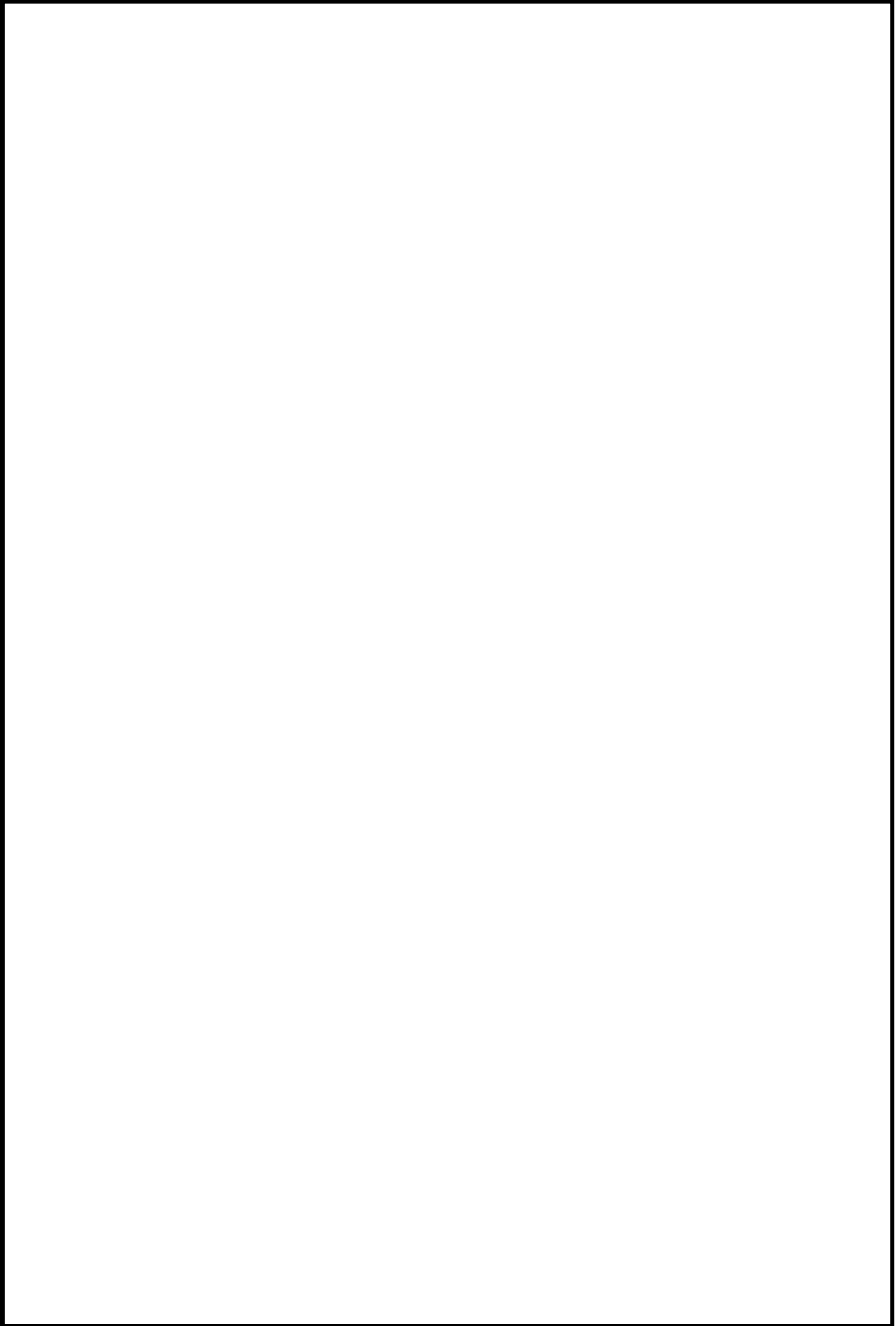


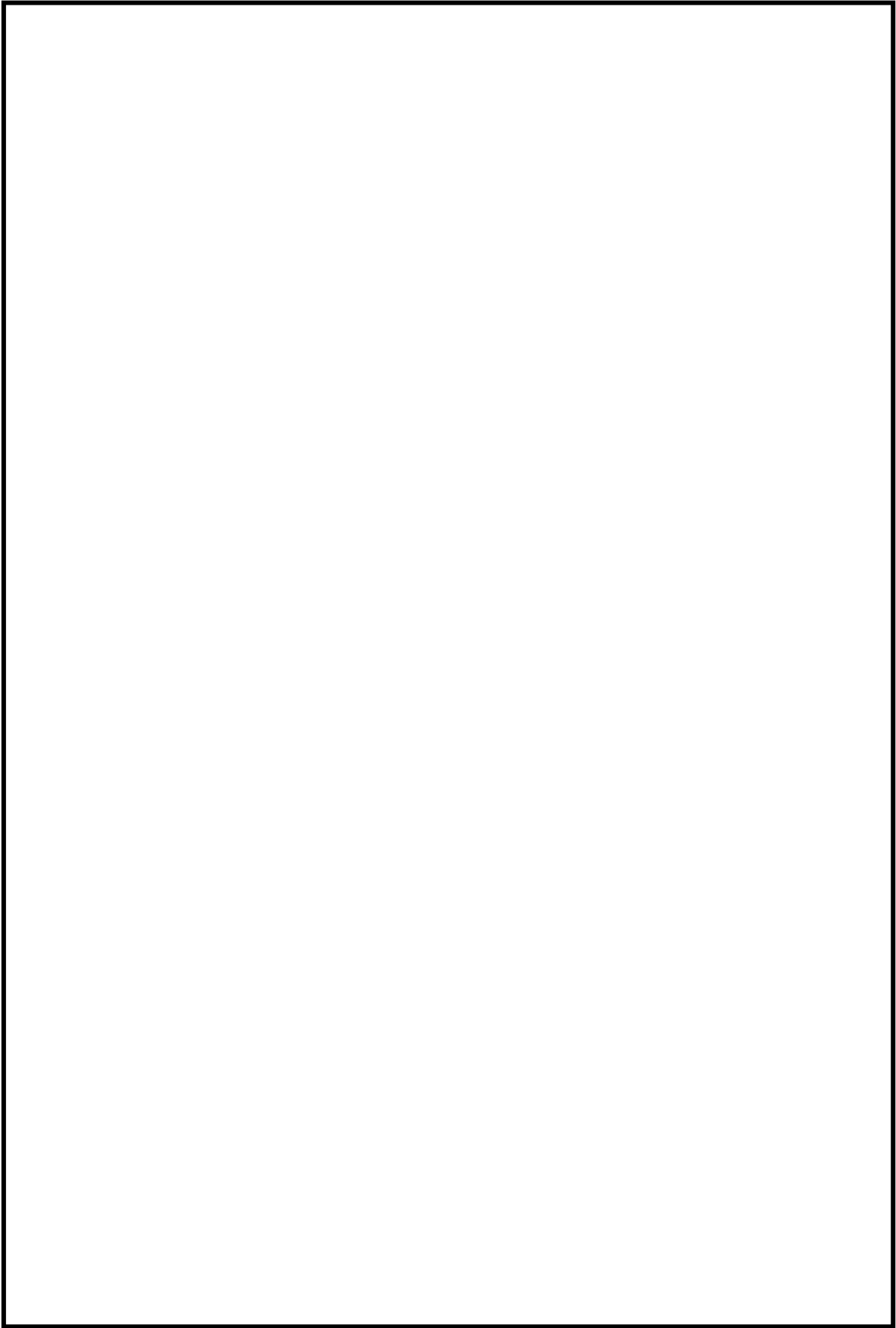


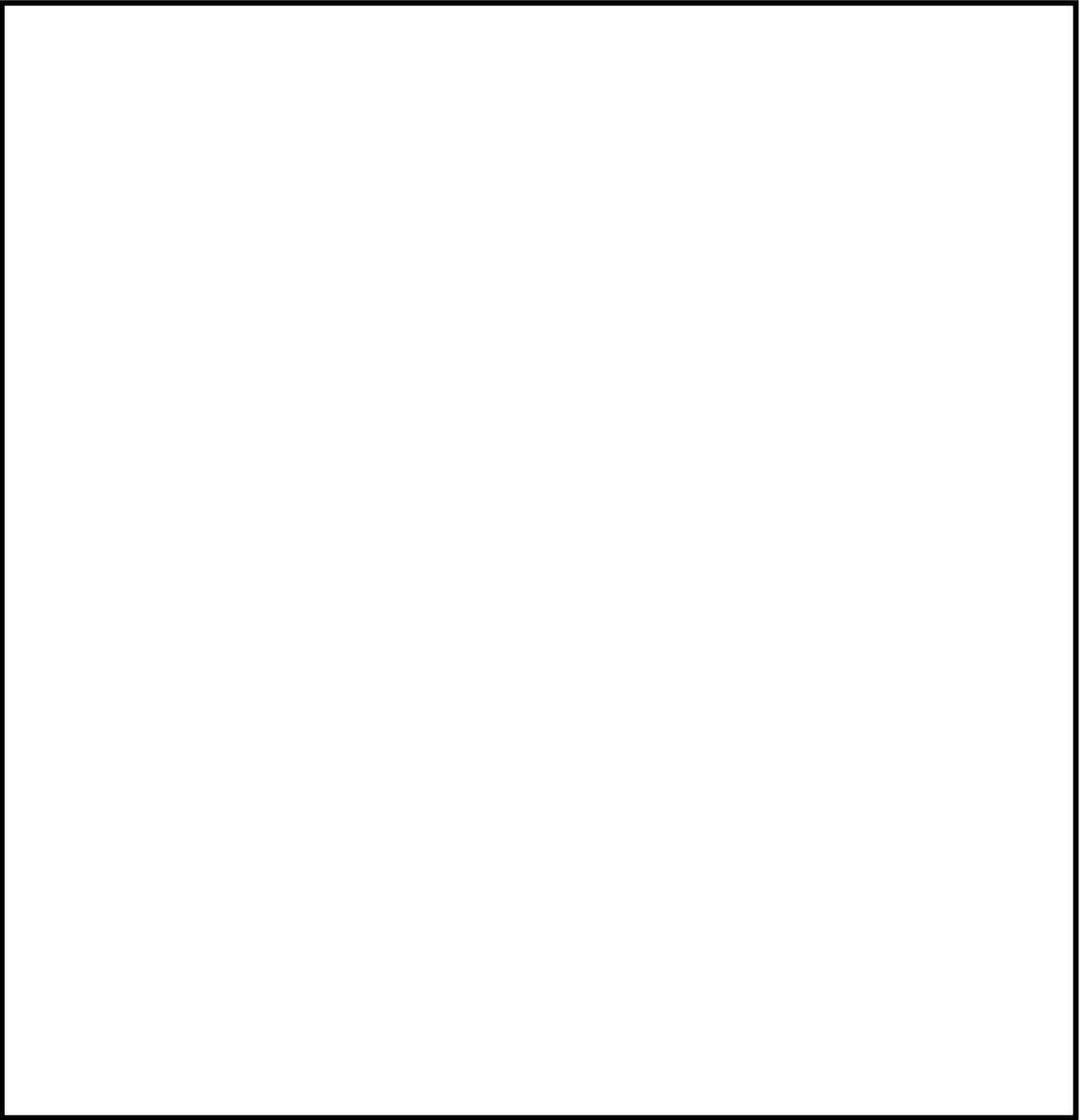


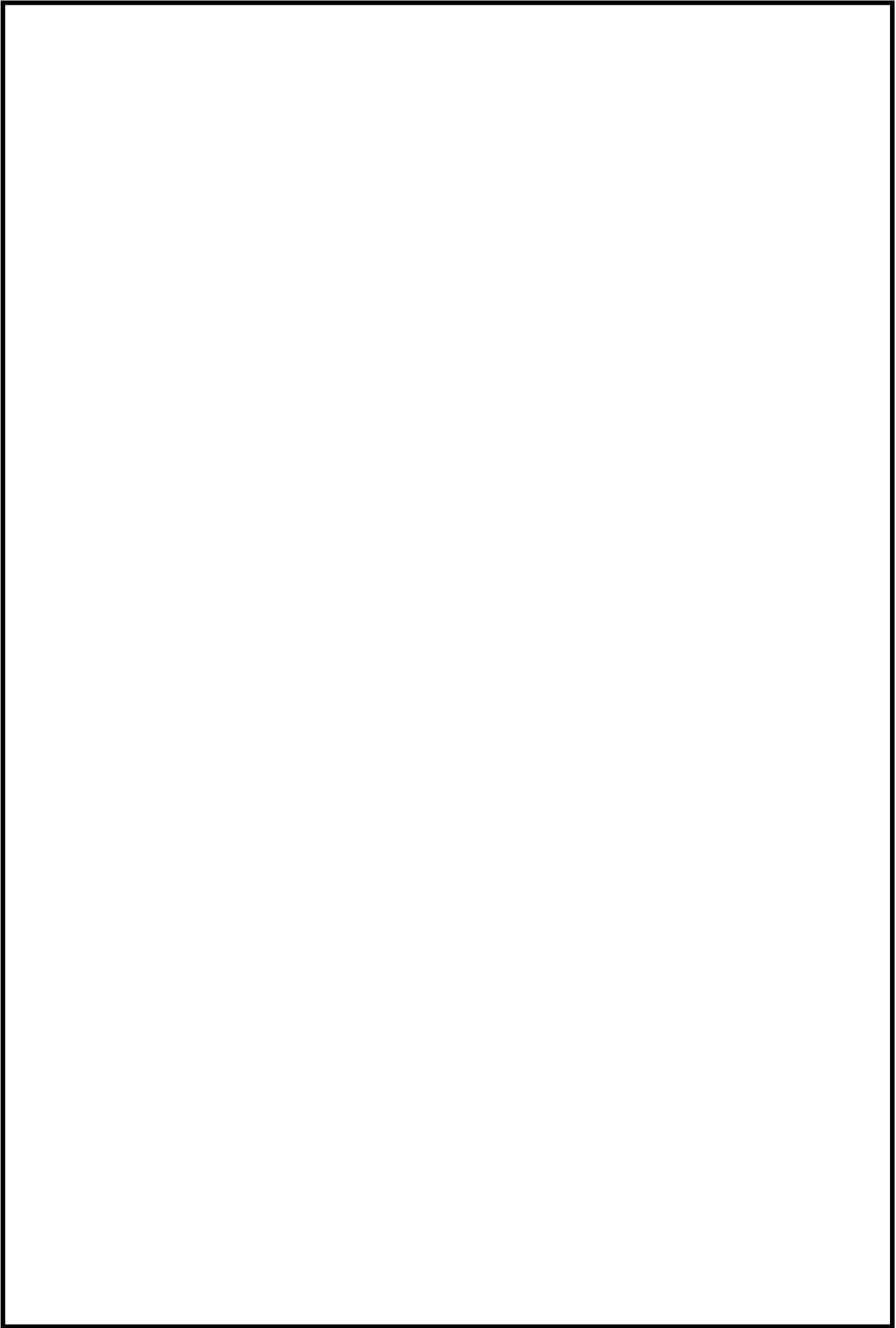












5. JNES研究の知見を踏まえた電共研の妥当性確認

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、加振回数はどちらも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 スナップ試験体仕様の比較

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、スナップ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者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)

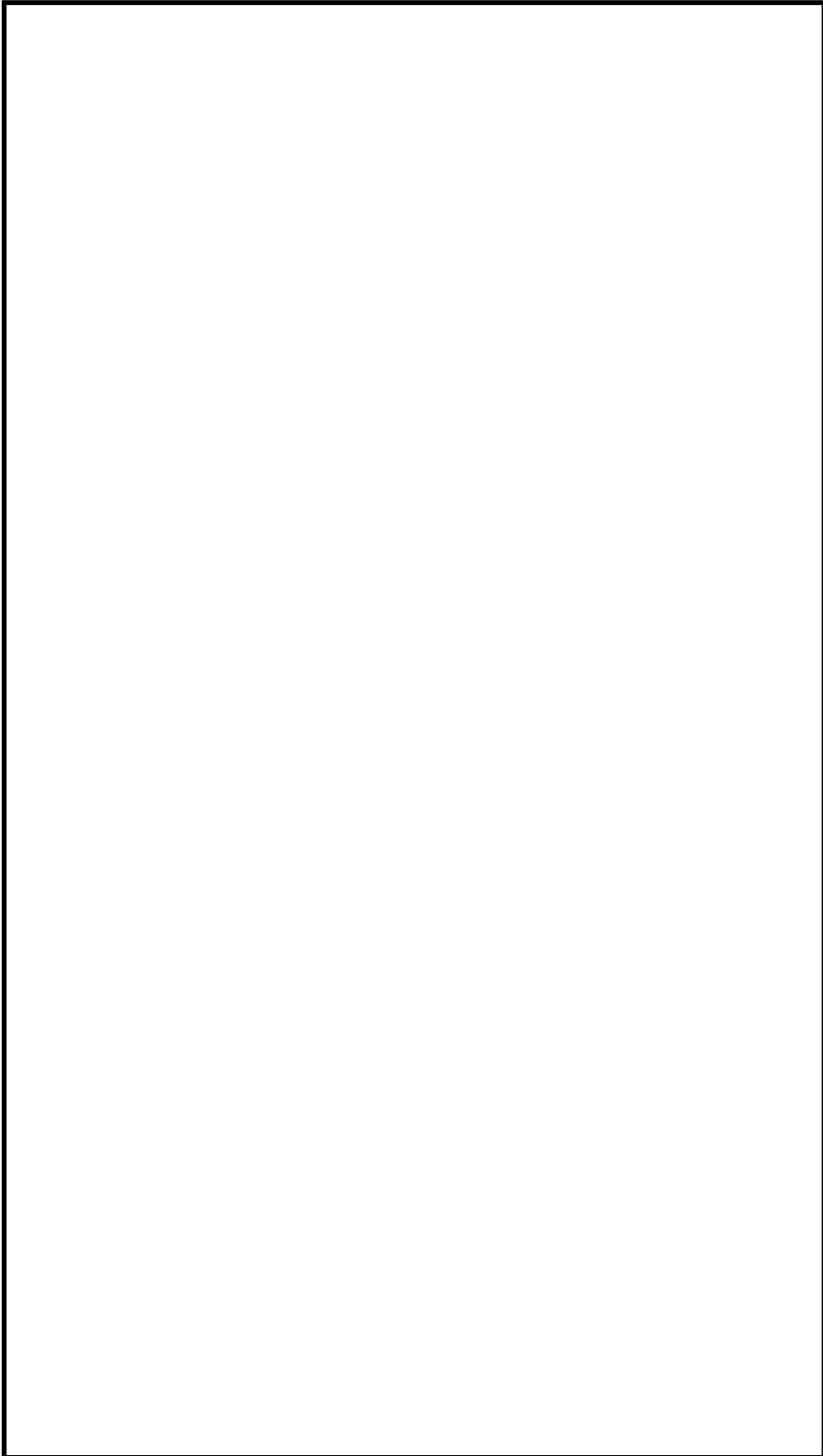
型式	定格荷重 (kN)	電共研			J N E S 研究				J N E S 耐力値 / 電共研限界耐力値 [D/B]
		耐力確認荷重 (kN) [A]	限界耐力値 (kN) [B]	最小裕度部品	最小裕度部品の分類	耐力確認荷重 (kN) [C]	耐力値 (kN) [D]	最小裕度部品	
SMS-01	1	—	19.0	六角ボルト	構造部材	—	—	—	—
SMS-03	3	29.9	18.8	六角ボルト	構造部材	—	—	—	—
SMS-06	6	—	16.8	ベアリング押さえ*2	構造部材	—	—	—	—
SMS-1	10	56.2	53.9	コネクティングチューブ	構造部材	—	—	—	—
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	—	—	—	—

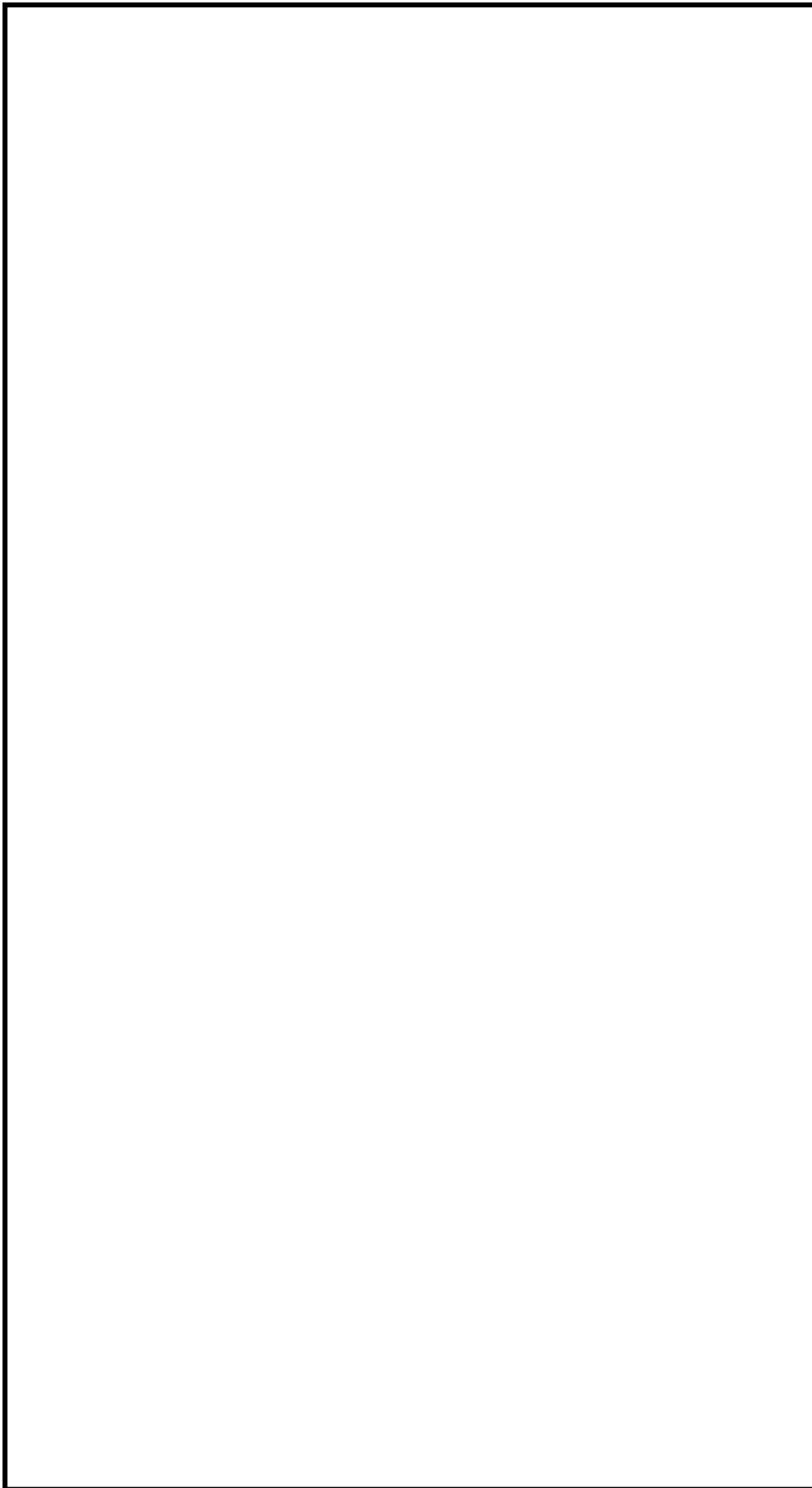
表 5-3 電共研の限界耐力値と J N E S 研究における耐力値及び耐力確認荷重との比較 (2/3)

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	最小裕度部品の分類	
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	最小裕度部品の分類		
SN-03	3	20.3	9.1	全長座屈	構造部材	構造部材	構造部材	構造部材	構造部材	構造部材
SN-06	6	—	16.4	全長座屈	構造部材	構造部材	構造部材	構造部材	構造部材	構造部材
SN-1	10	—	26.2	全長座屈	構造部材	構造部材	構造部材	構造部材	構造部材	構造部材
SN-3	30	89.3	70.6	全長座屈	構造部材	構造部材	構造部材	構造部材	構造部材	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	構造部材	構造部材	構造部材	構造部材	構造部材
SN-10	100	—	205.9	ジャンクションコラムアダプタ	構造部材	構造部材	構造部材	構造部材	構造部材	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	構造部材	構造部材	構造部材	構造部材	構造部材
SN-25	250	—	465.8	ダイレクタートイヤー*8	構造部材	構造部材	構造部材	構造部材	構造部材	構造部材

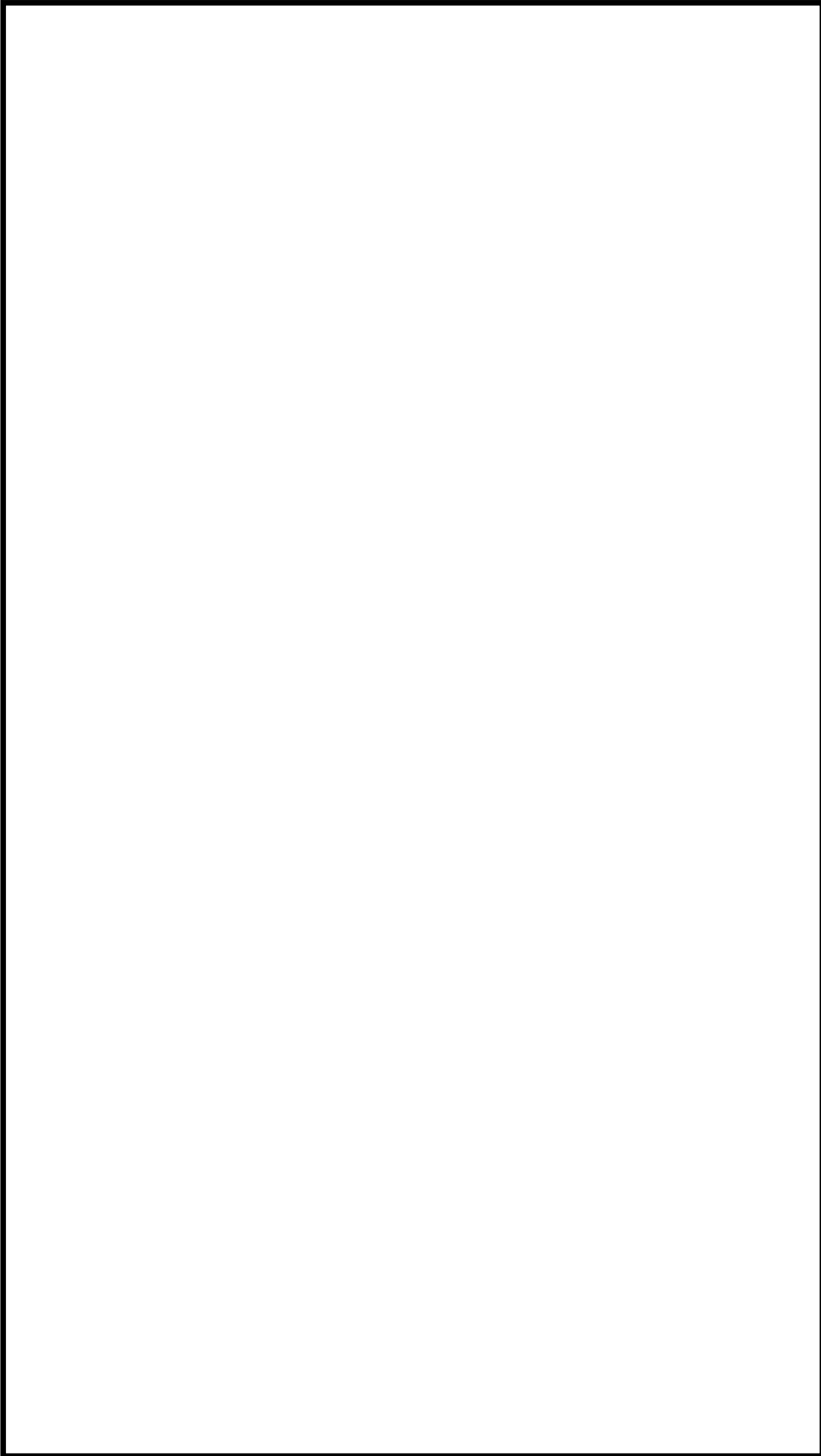


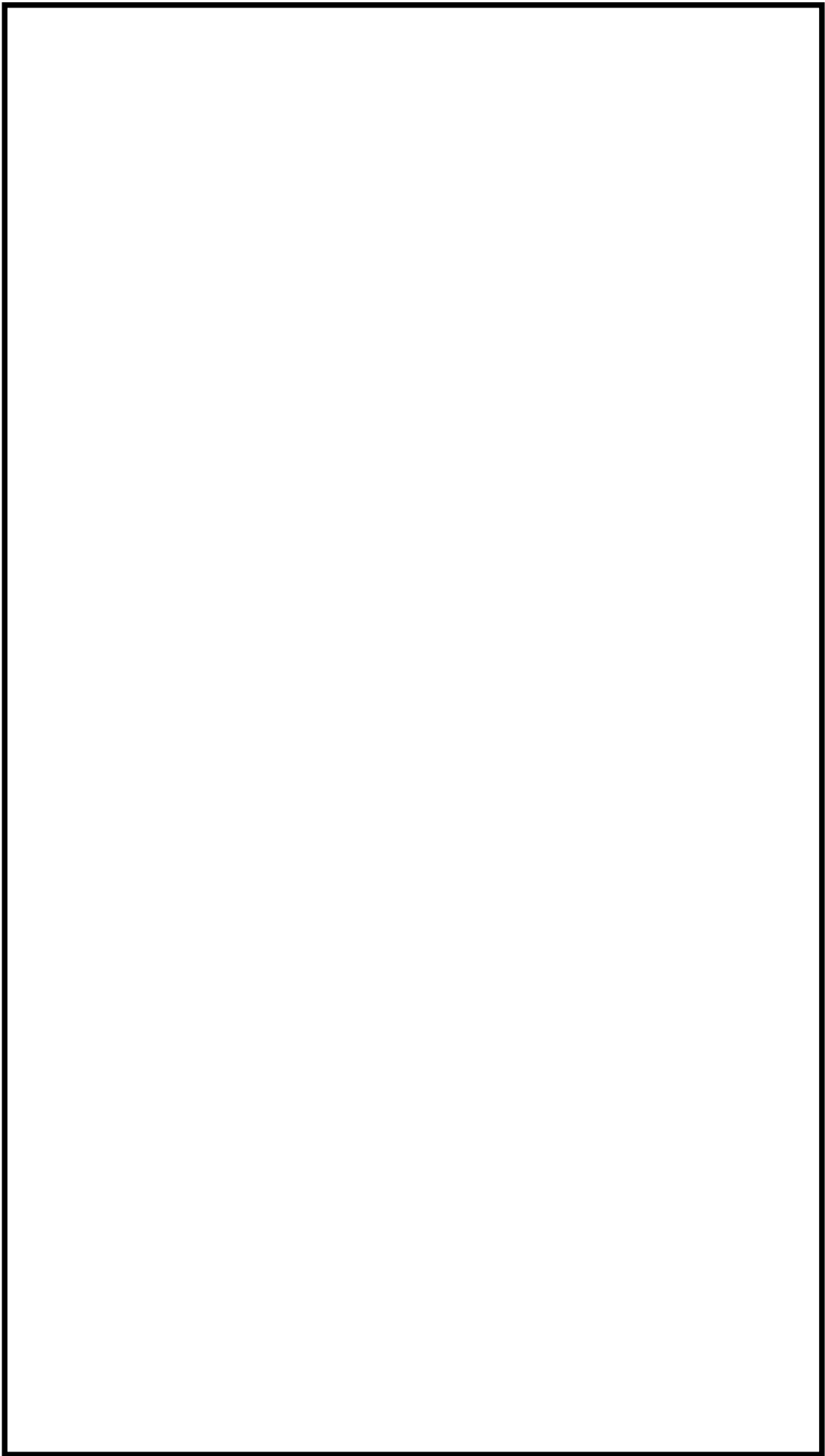


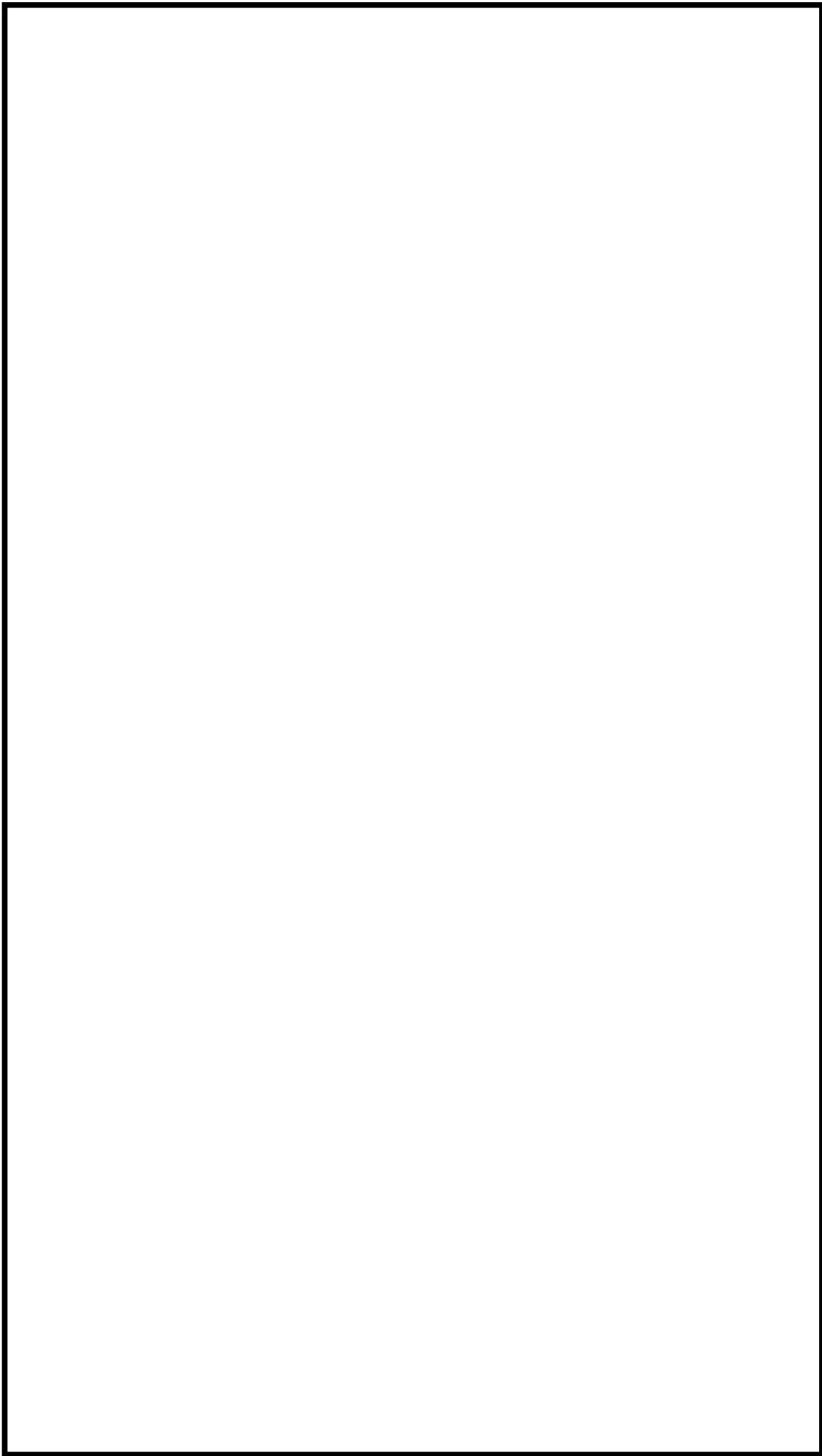
6. まとめ

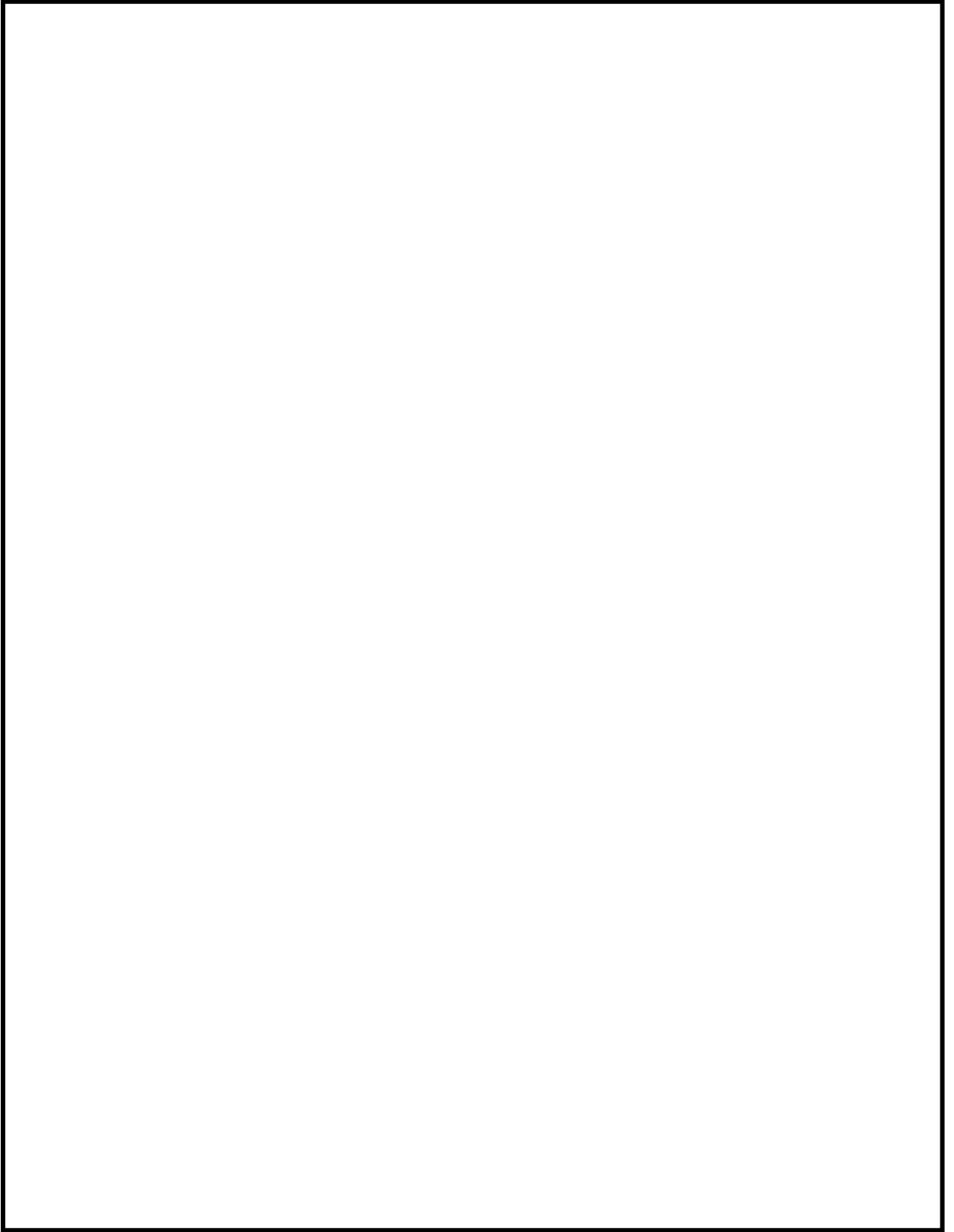
JNES研究におけるスナッパの耐震機能限界試験を含む耐力評価手法の構築に係る検討の概要をまとめるとともに、その検討プロセスや耐力確認荷重等について、電共研のスナッパの限界耐力評価法に係る検討との比較を行った。

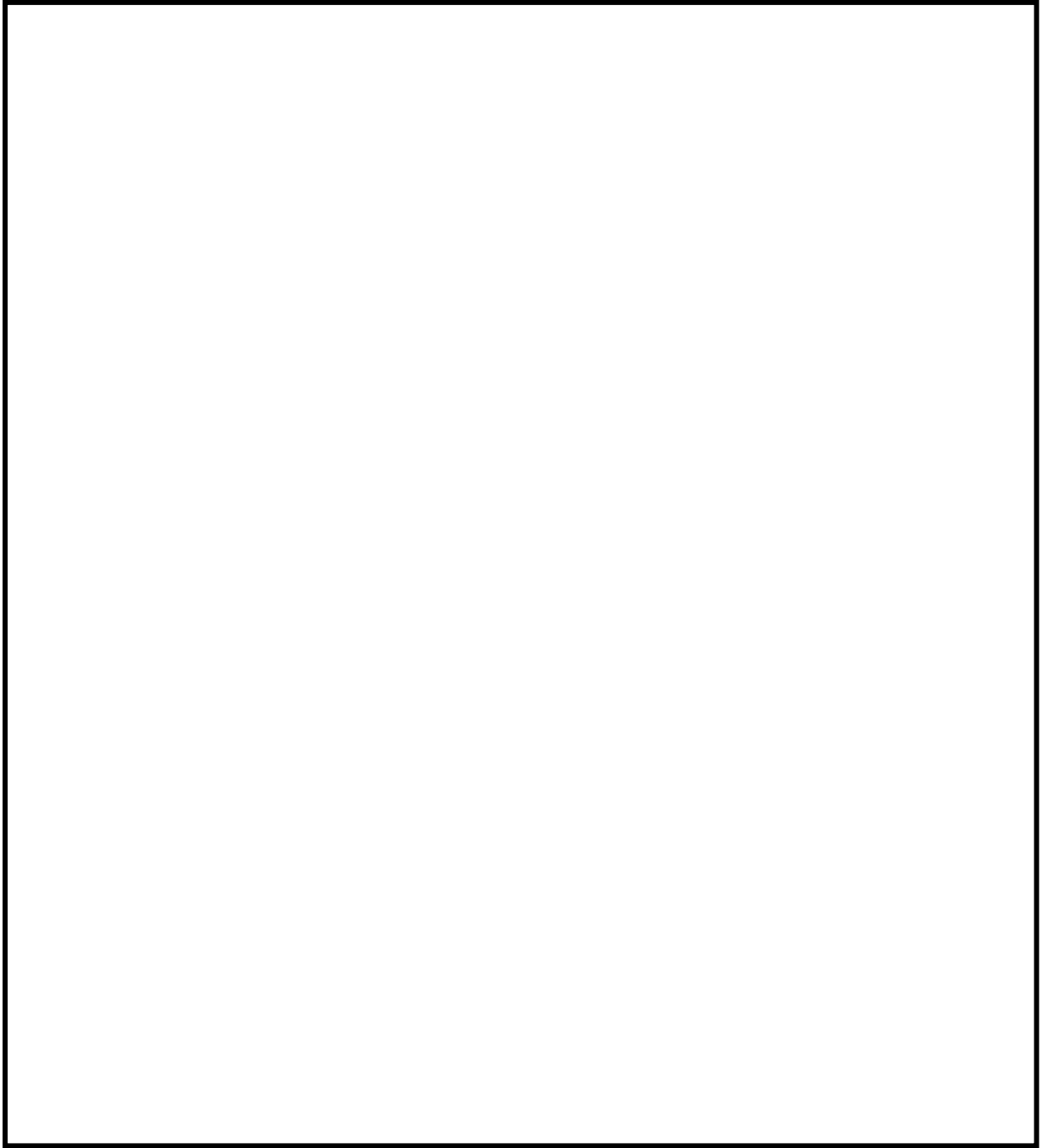
その結果、JNES研究の知見を考慮しても、電共研の限界耐力値を含めたスナッパの限界耐力評価法に係る検討は妥当であることを確認した。

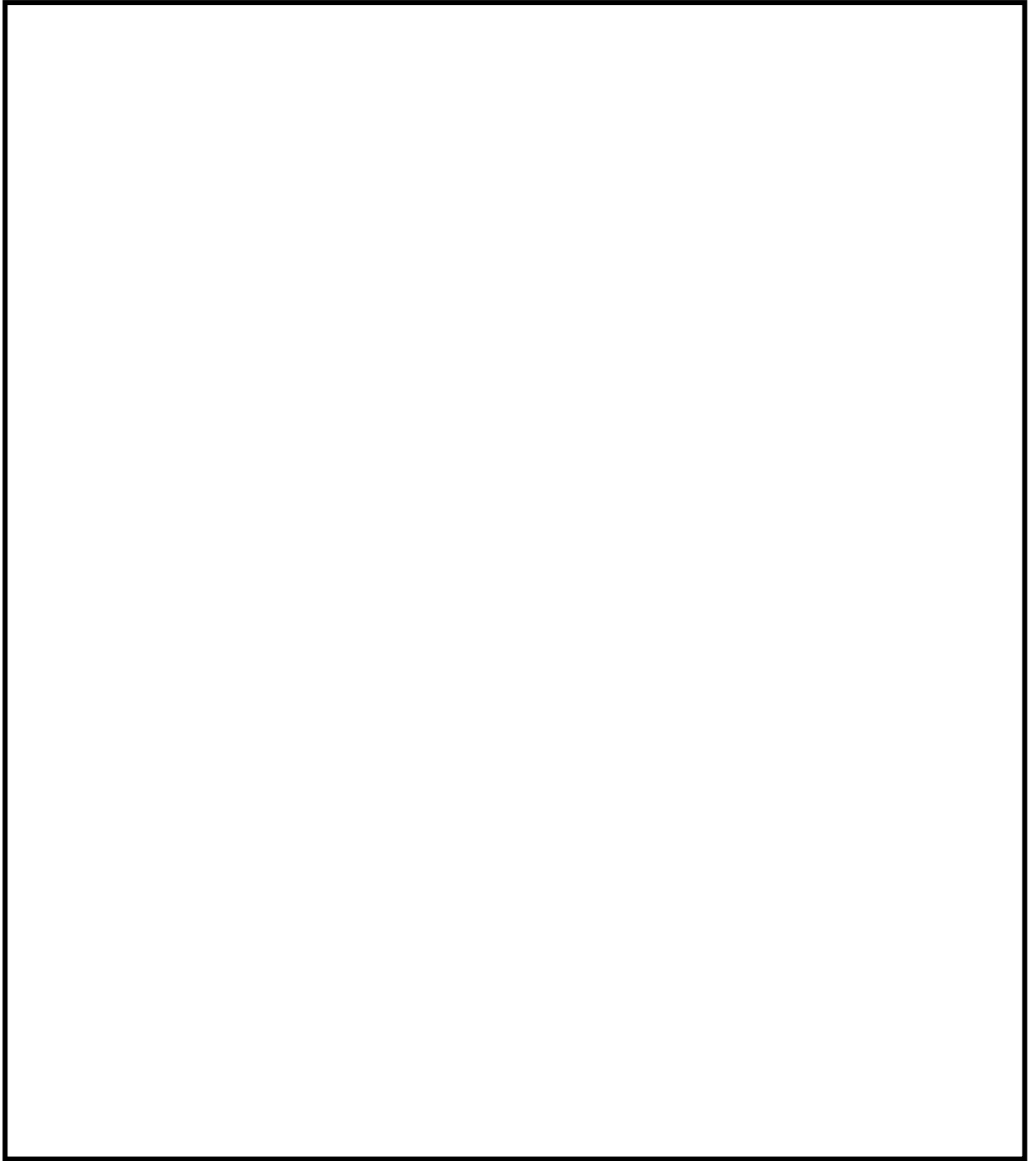


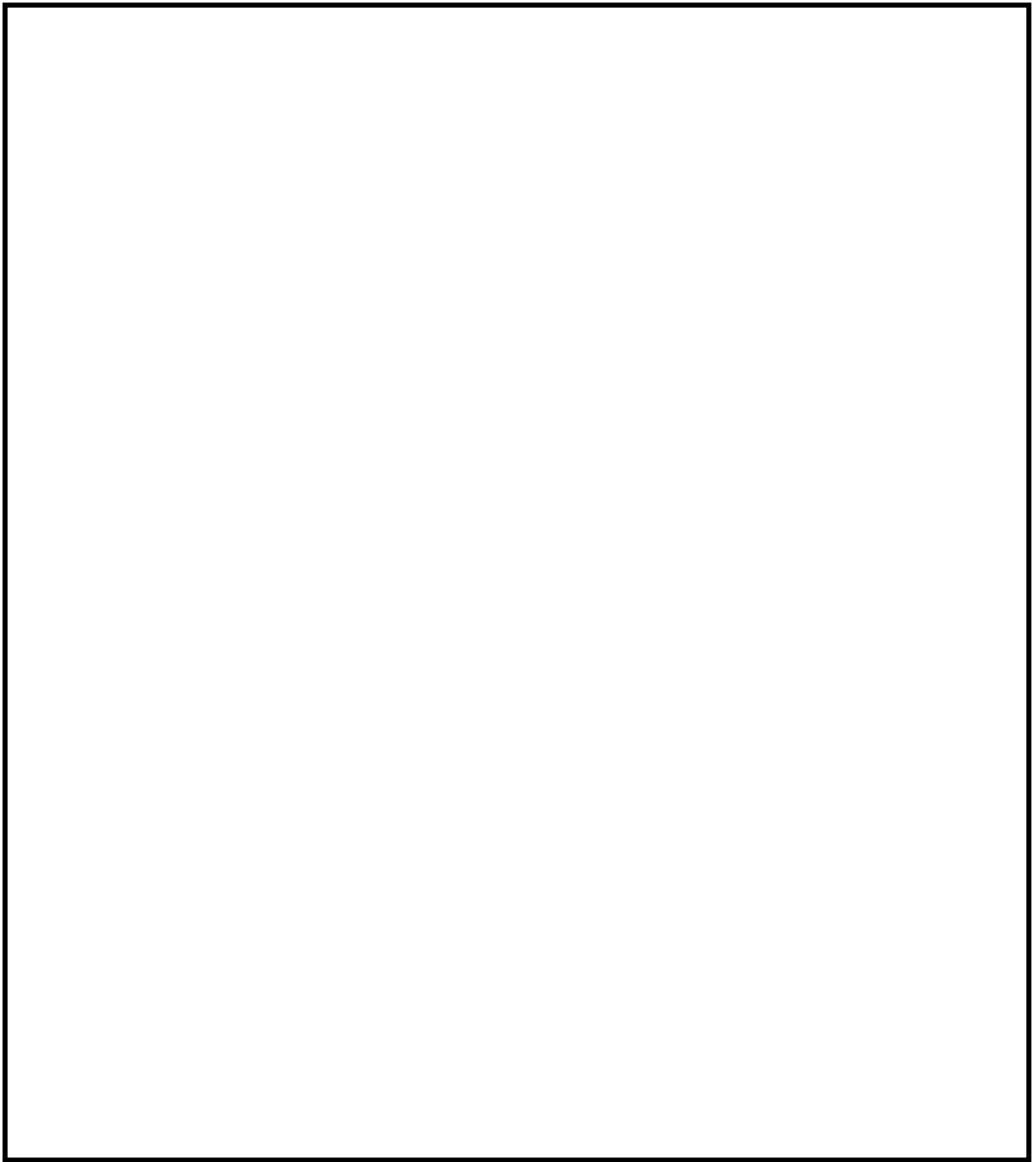


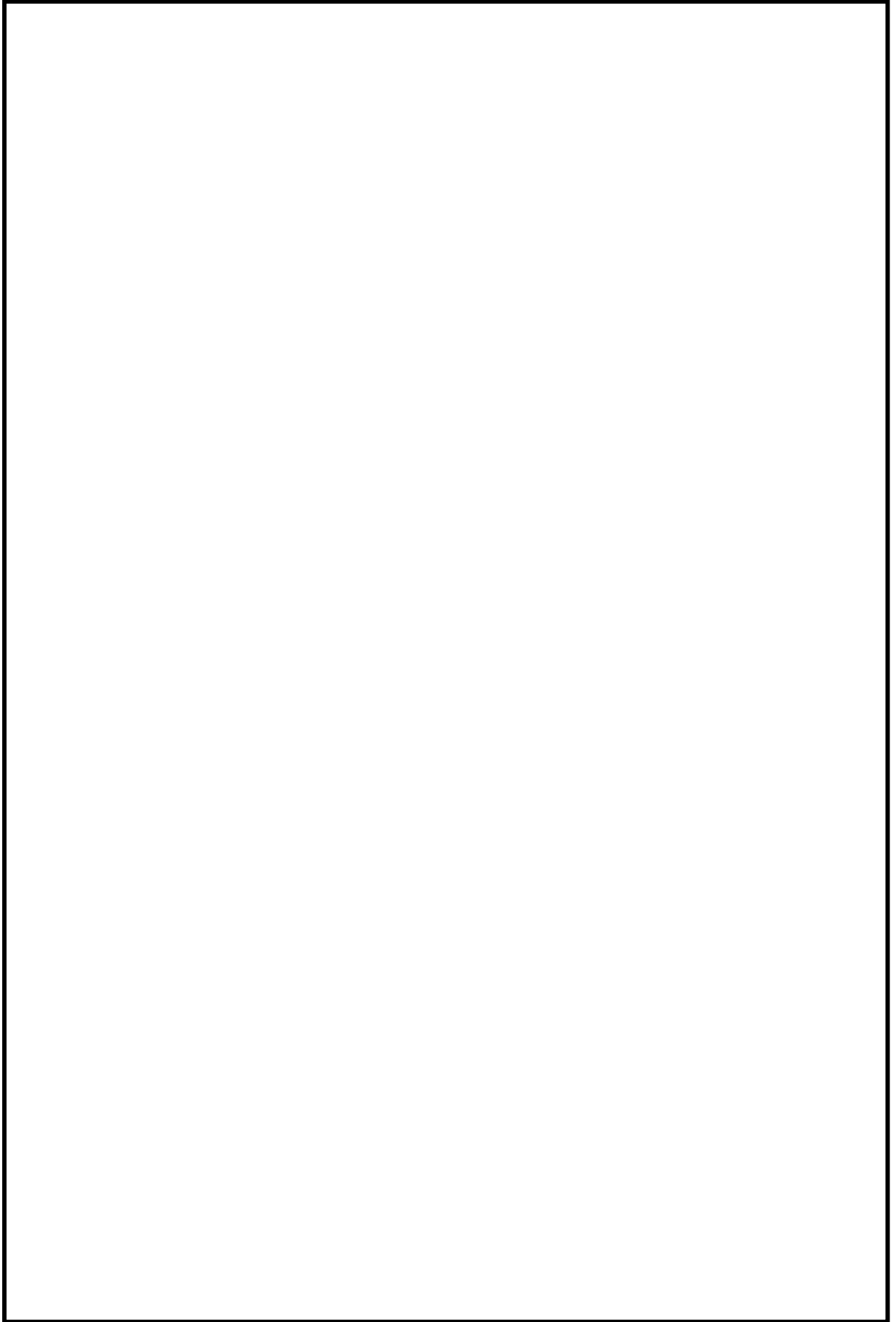


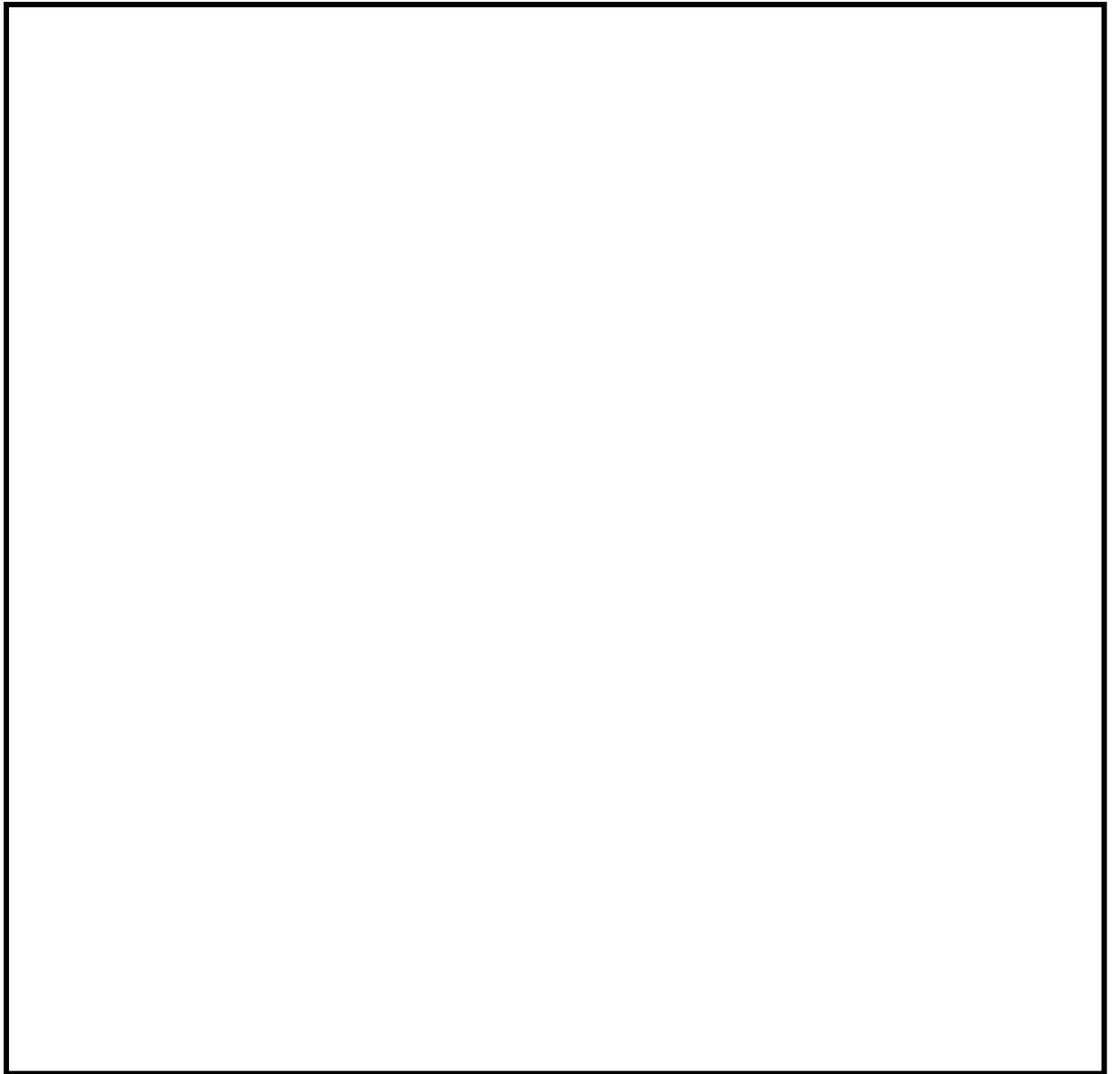


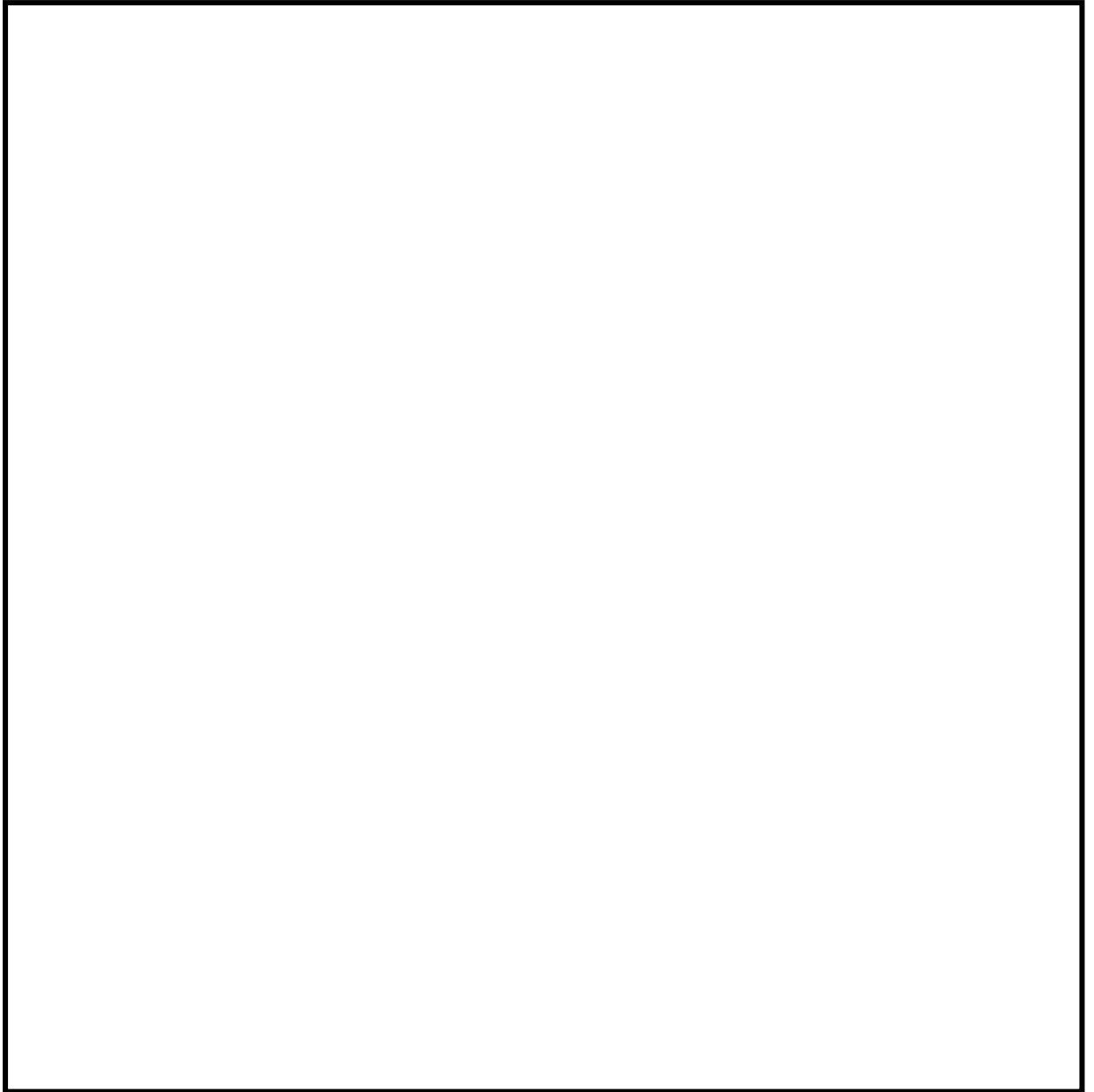


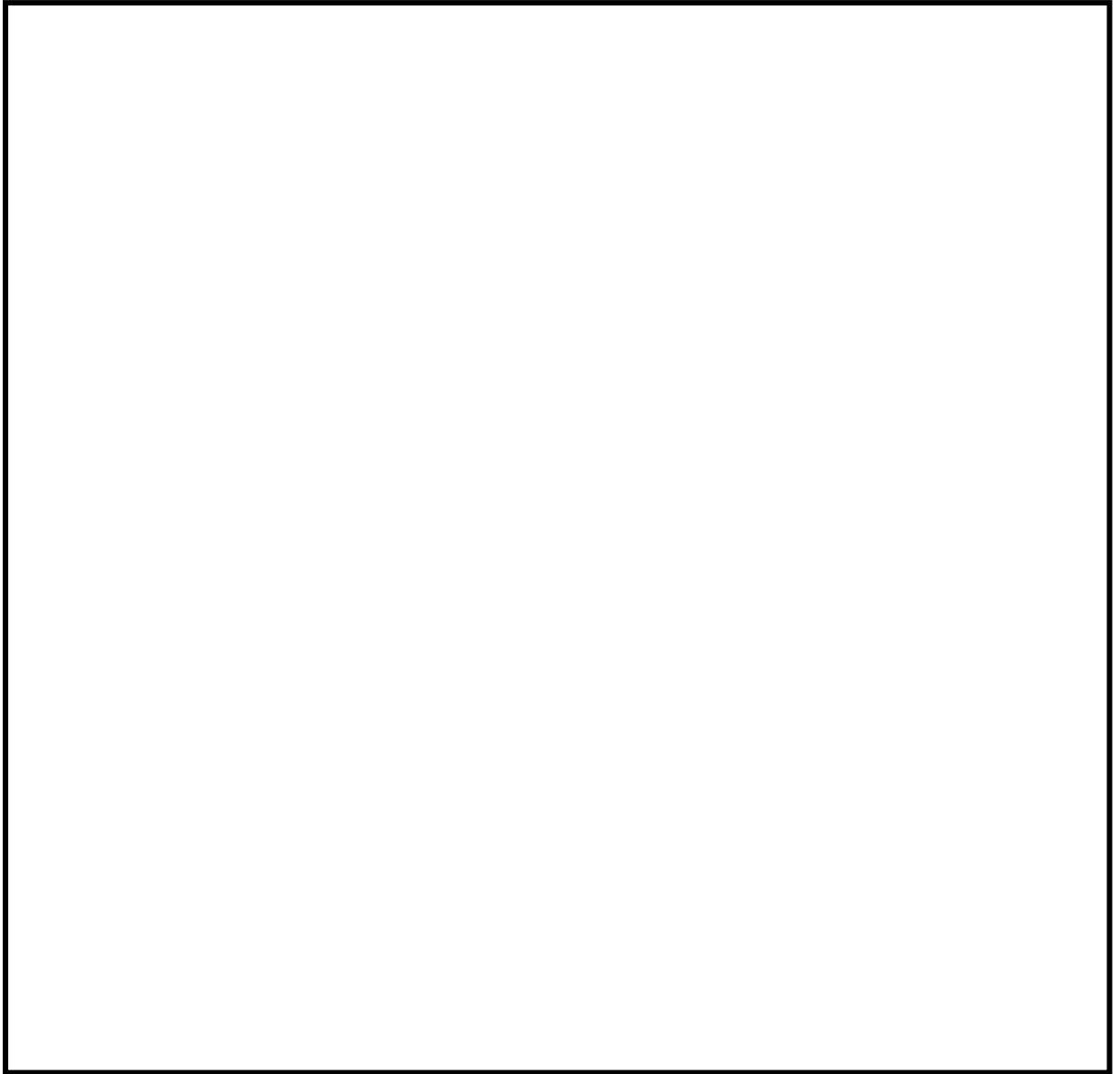


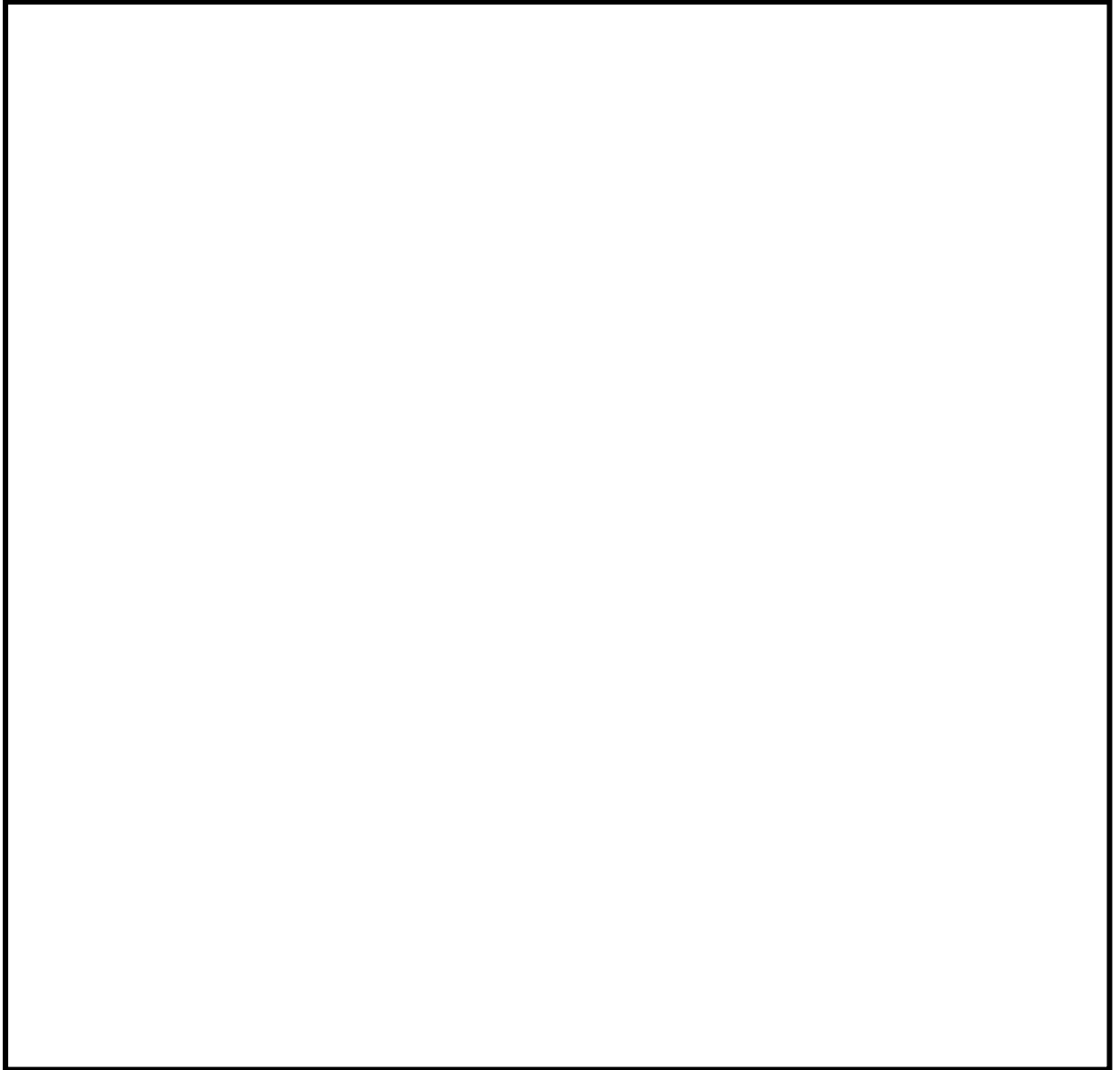


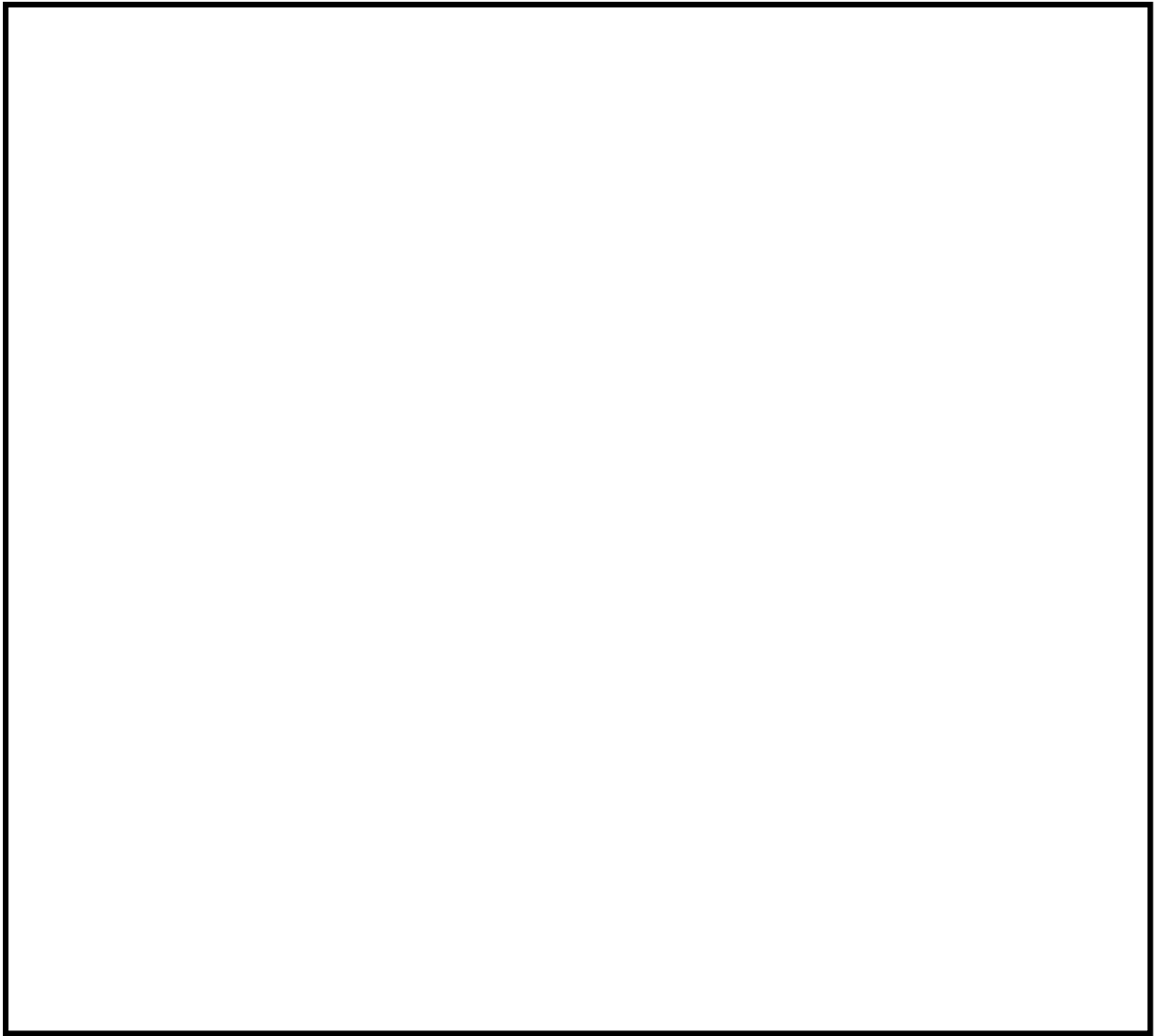




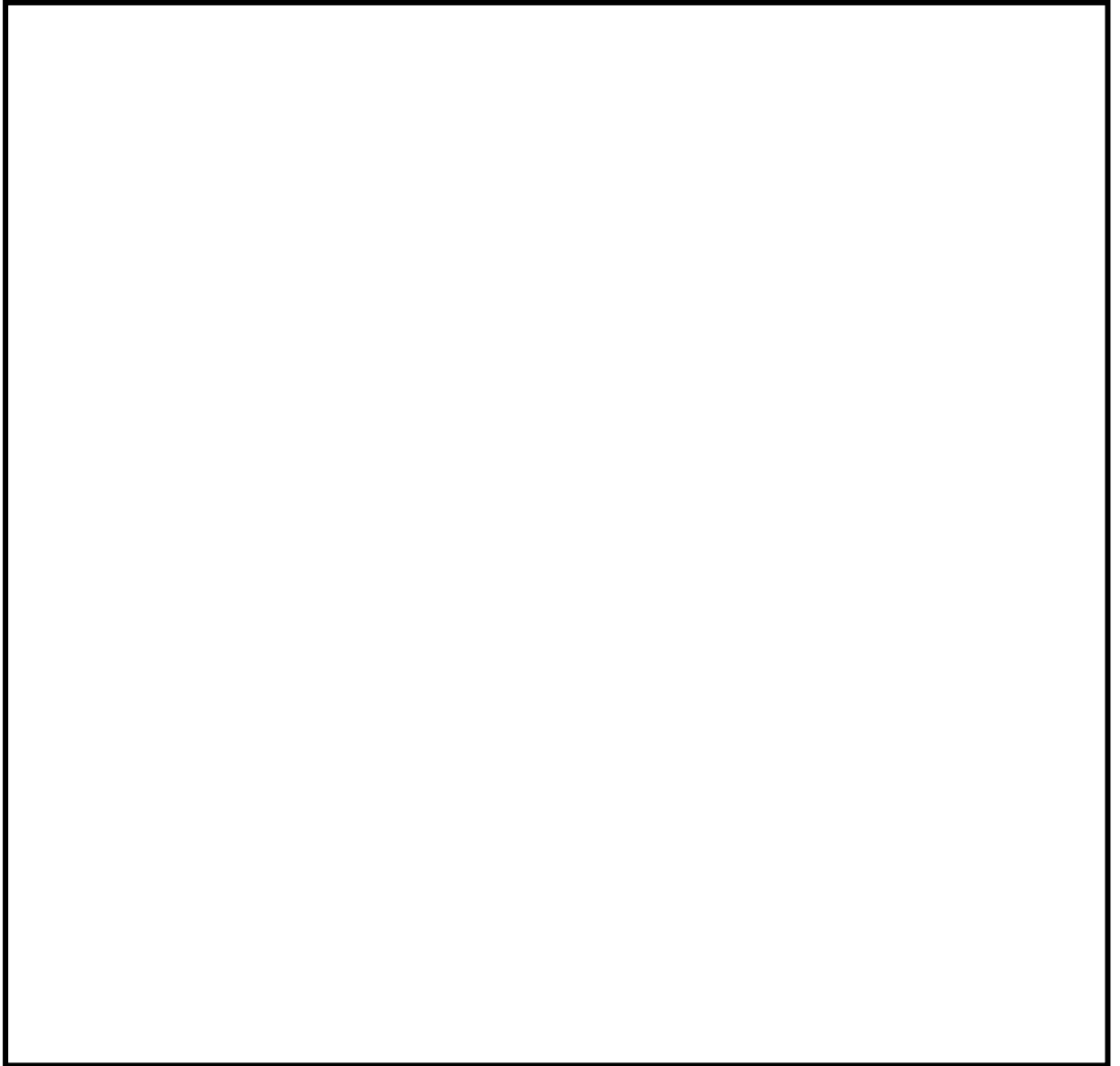


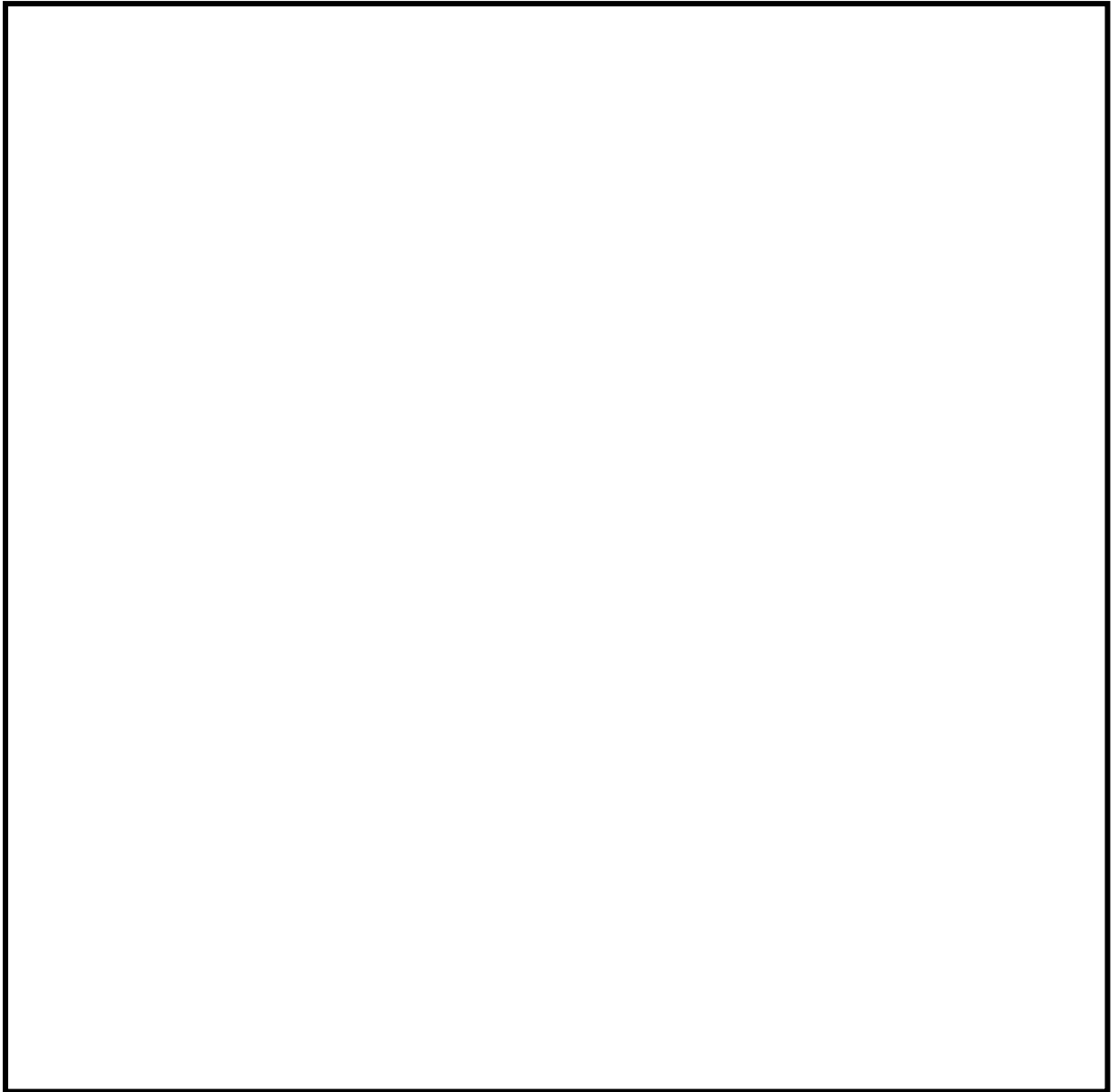


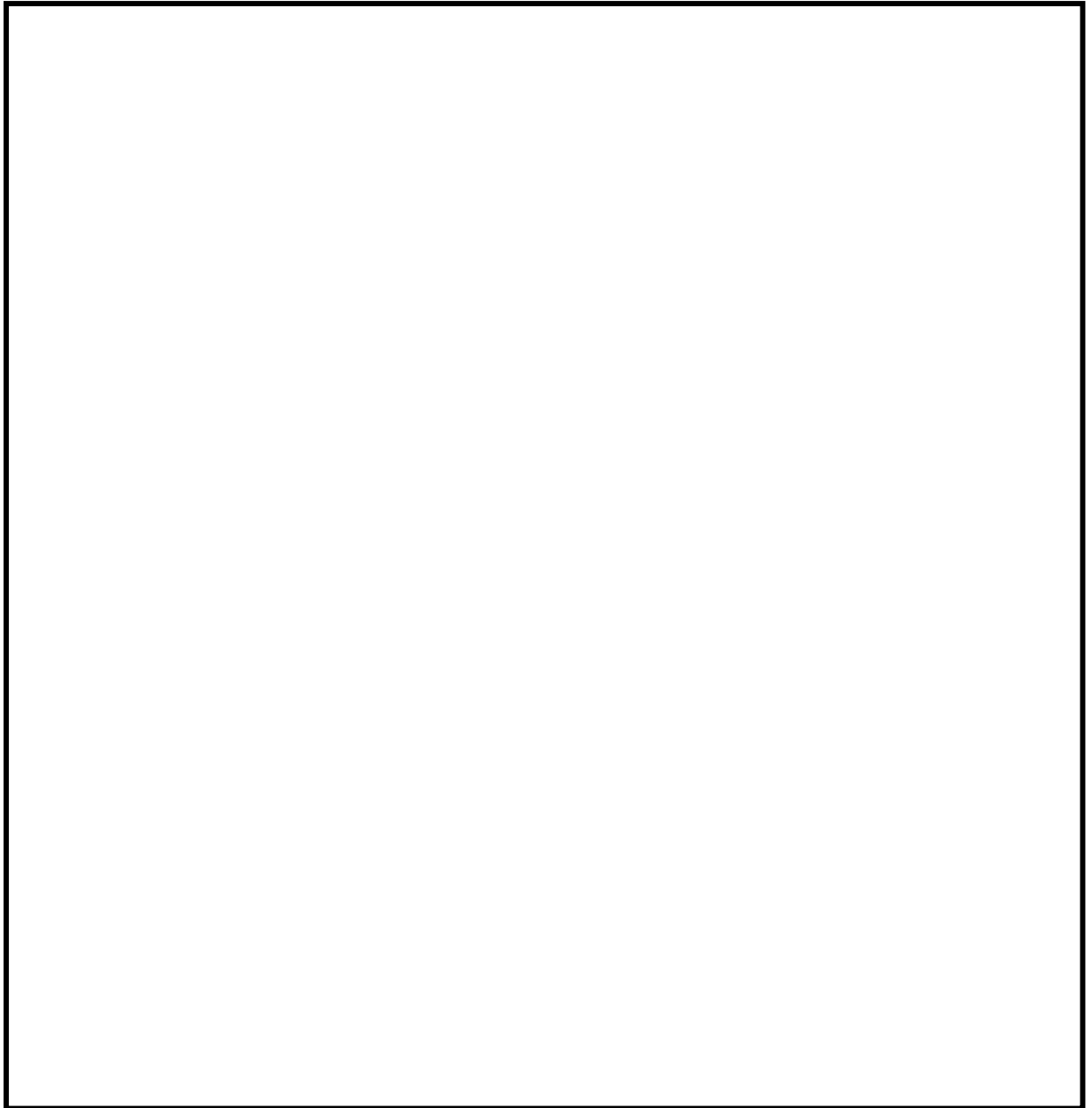


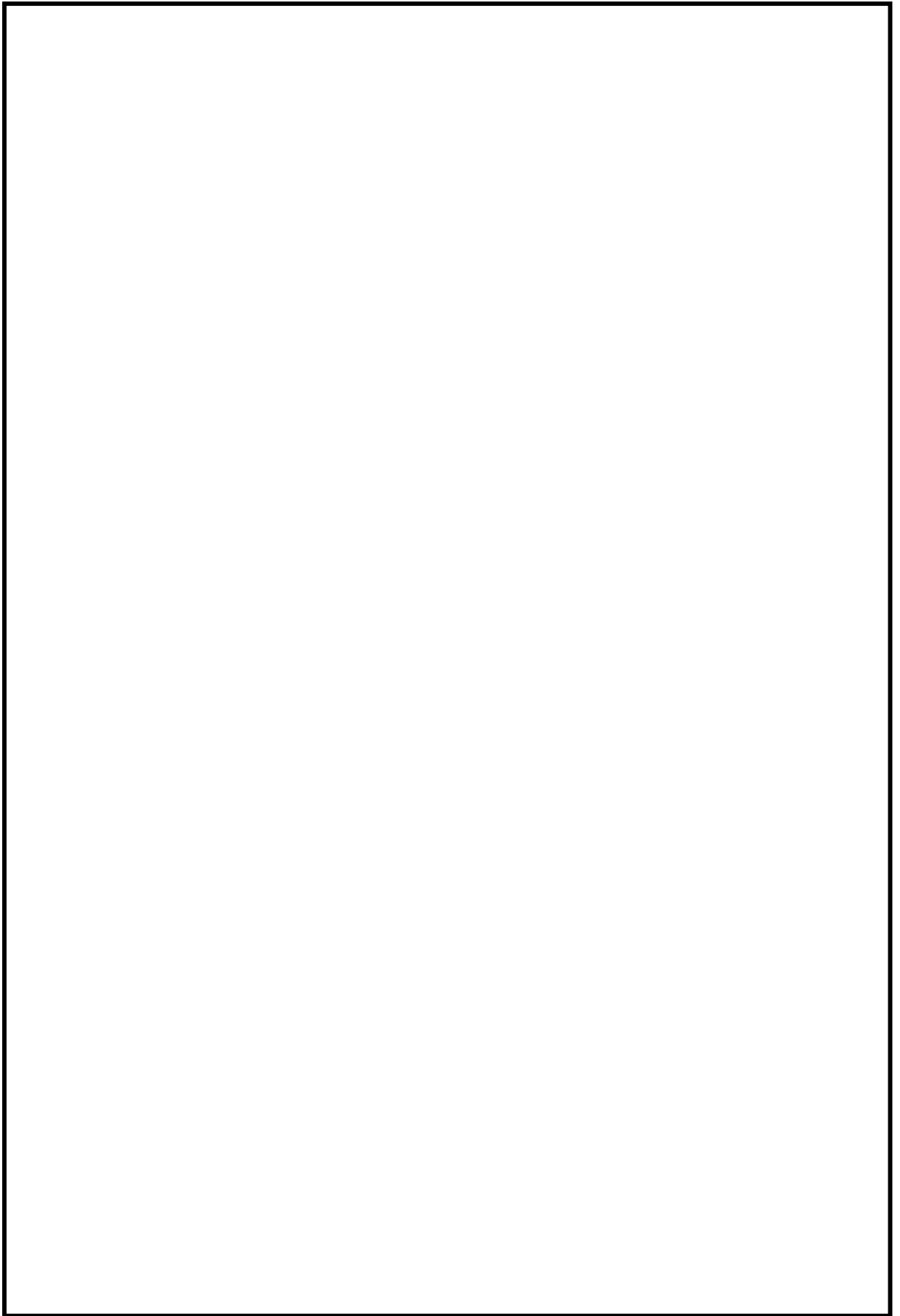


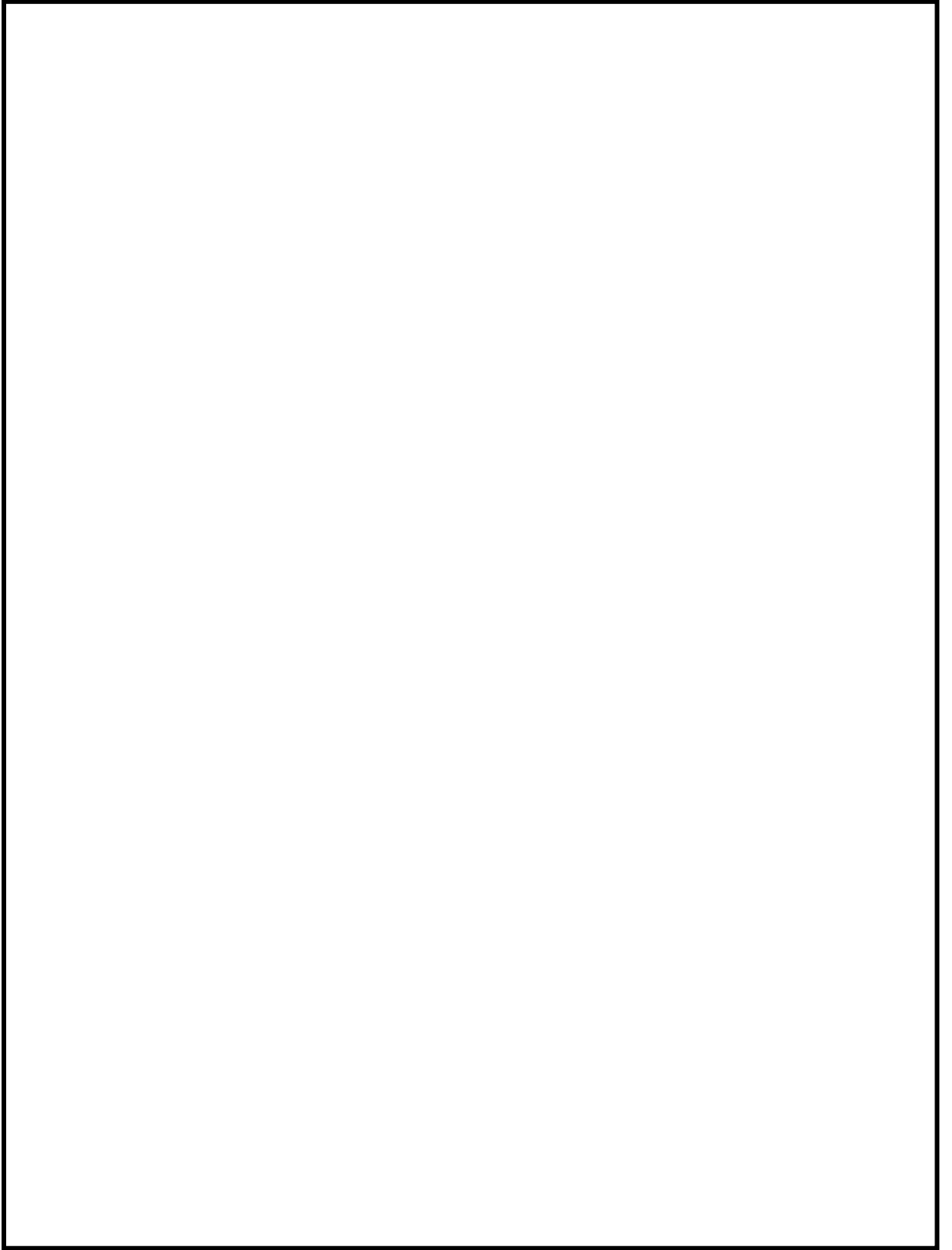


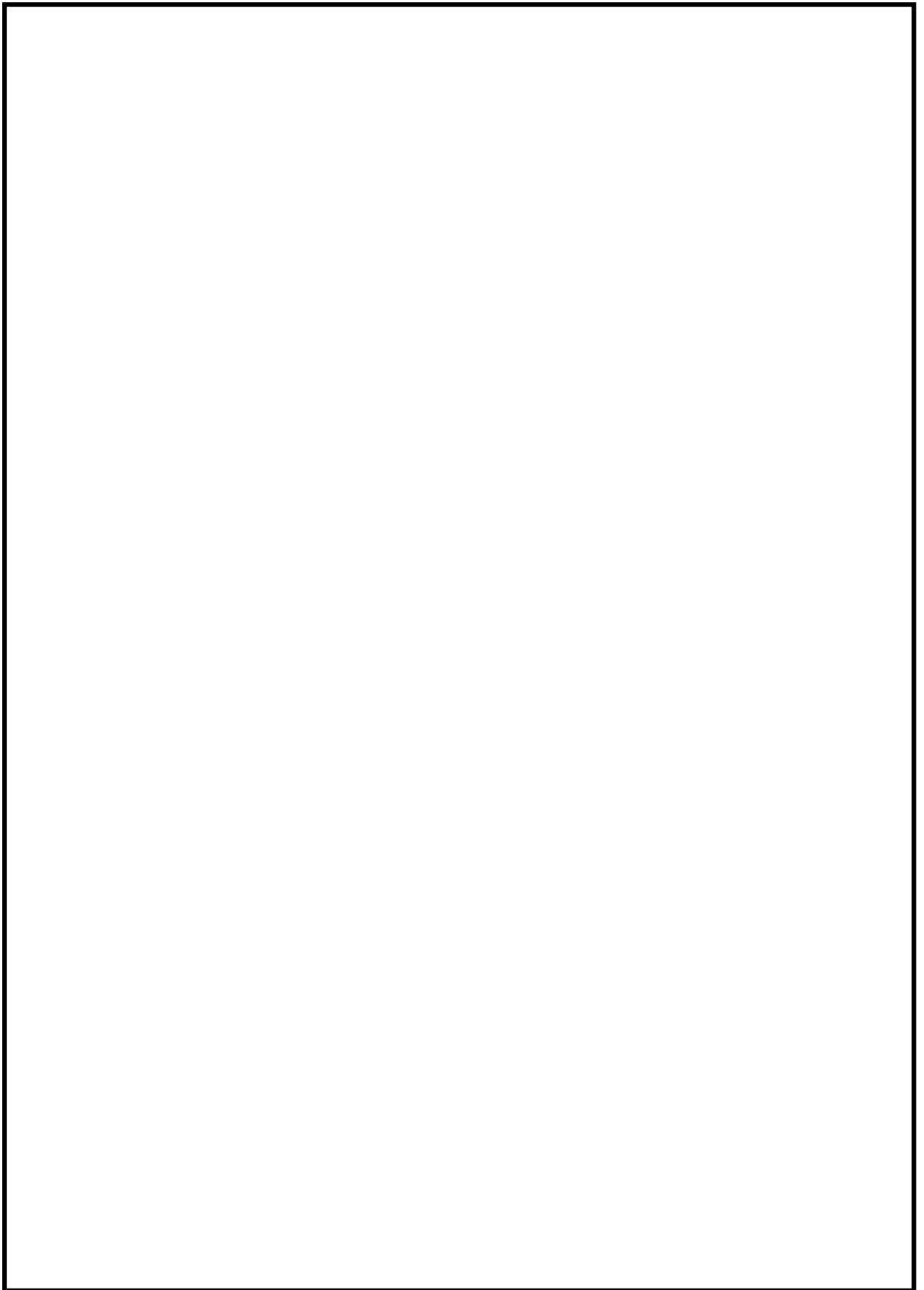




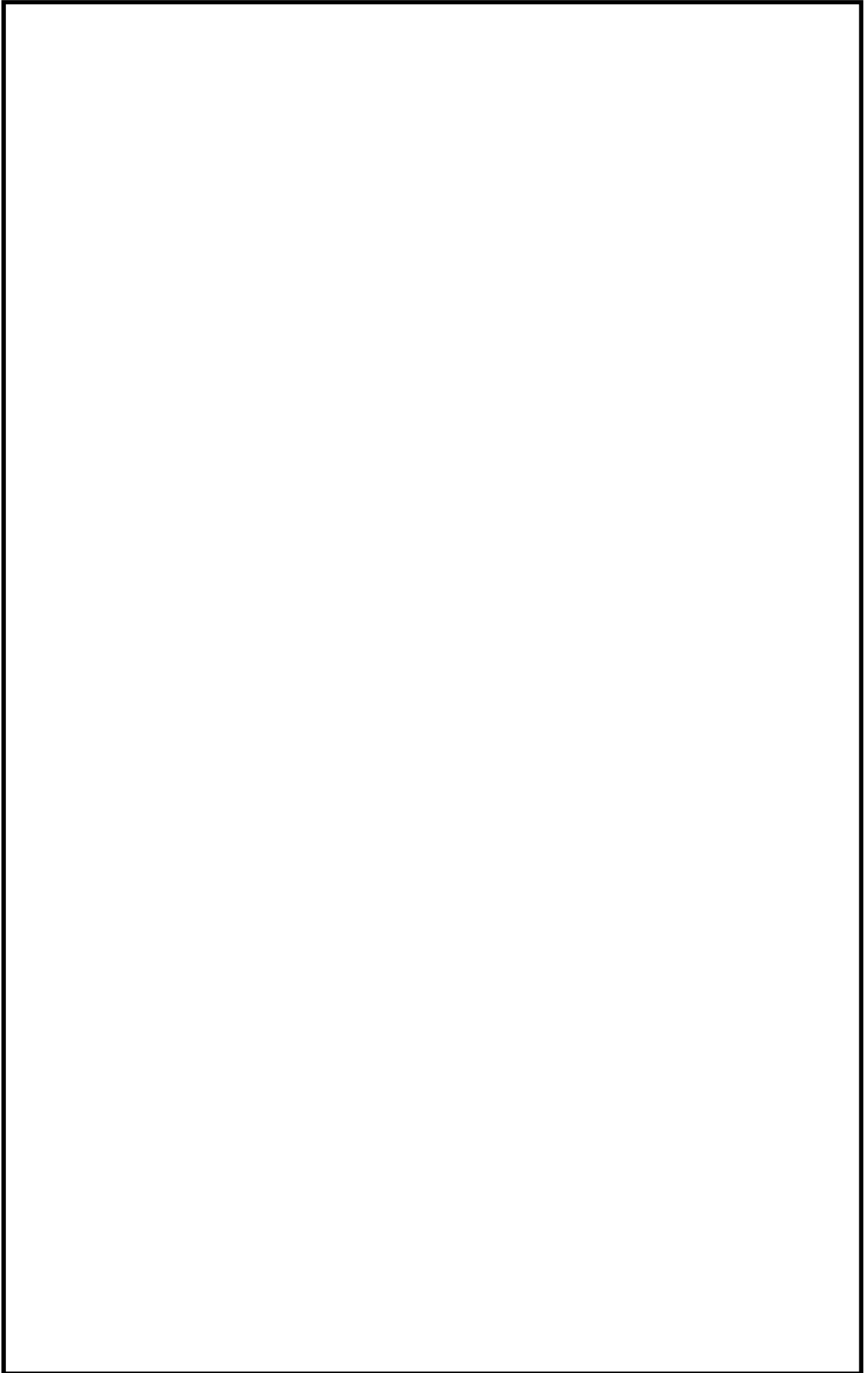




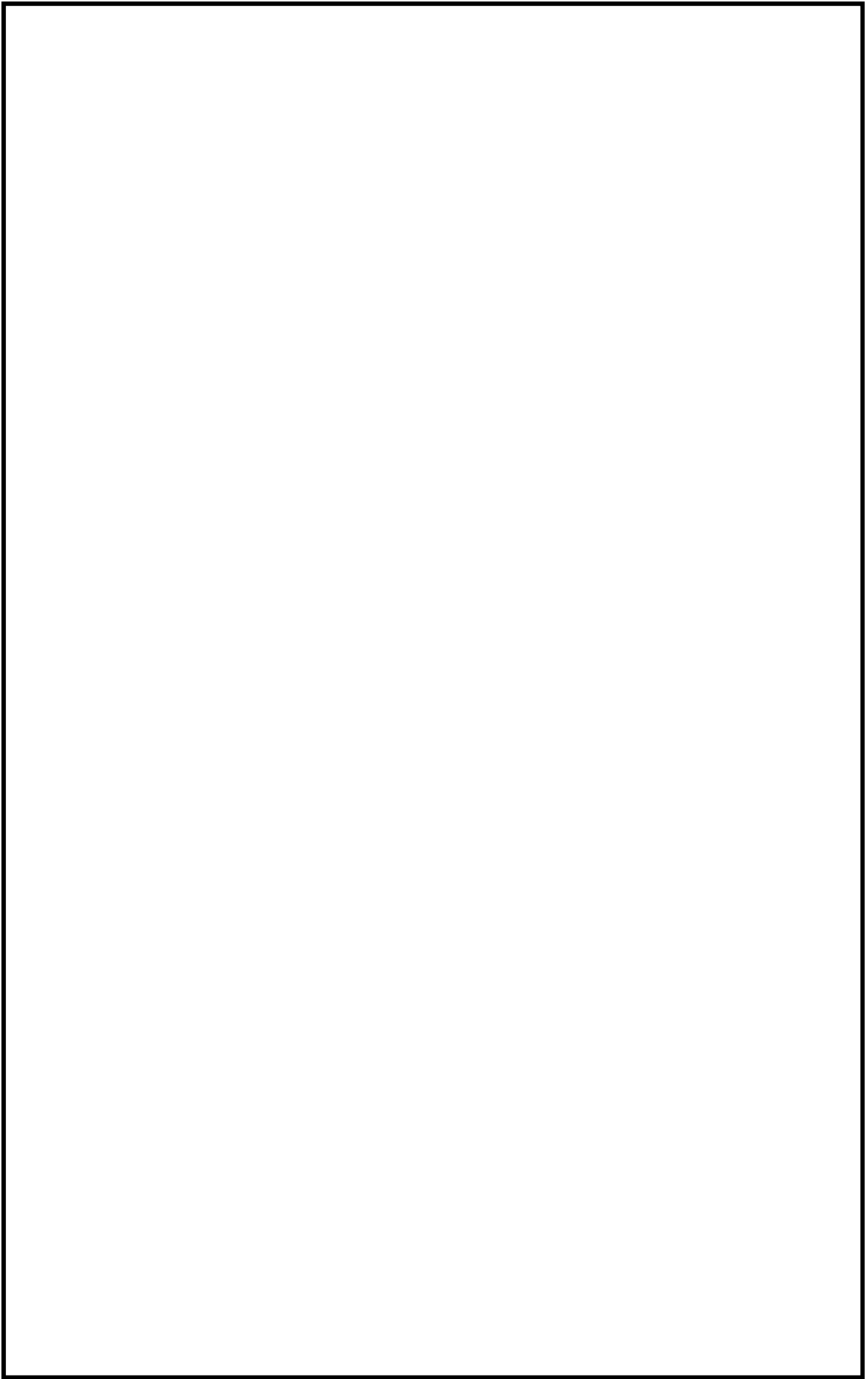


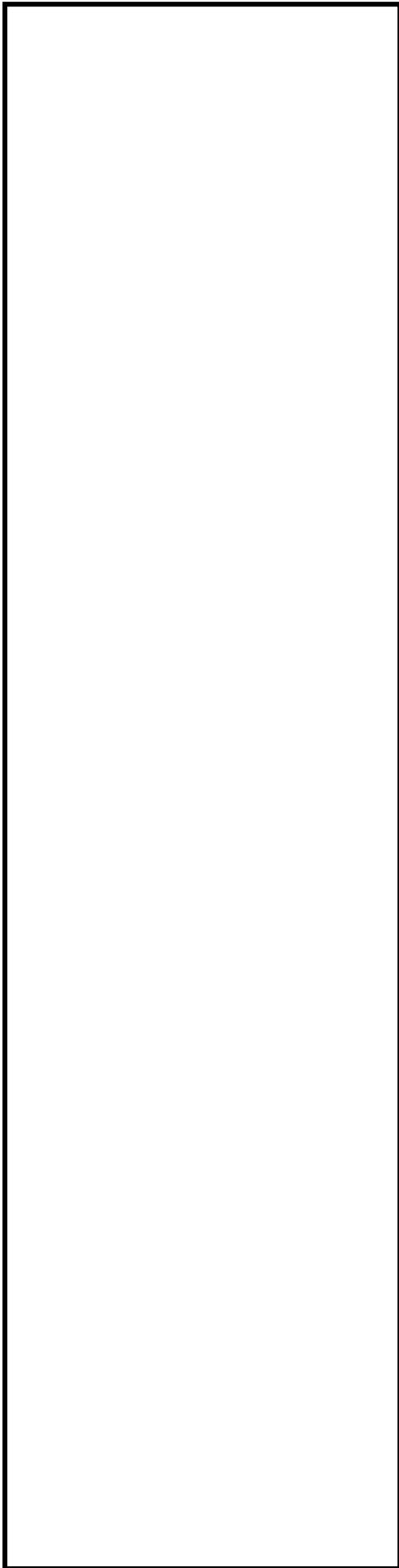


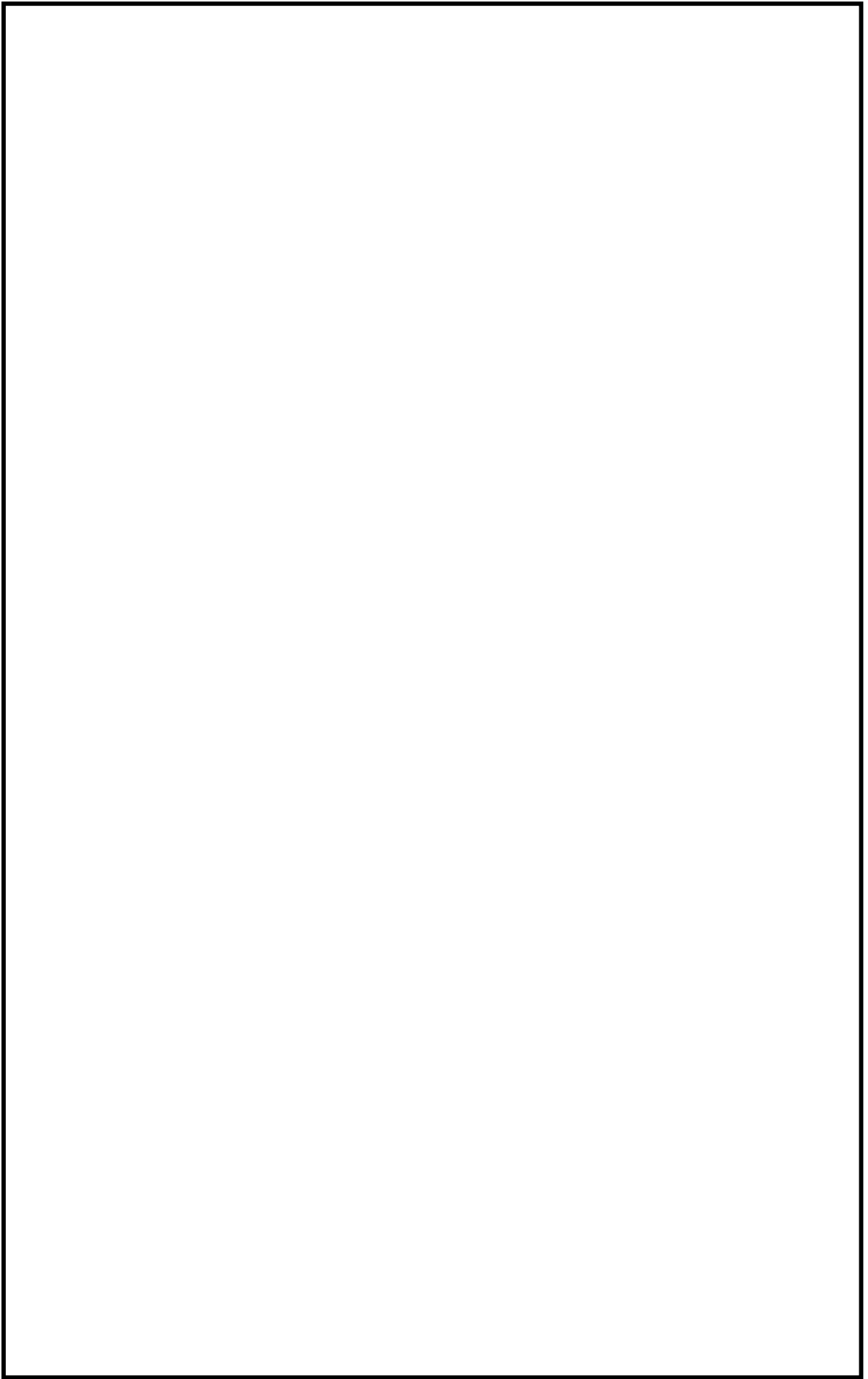


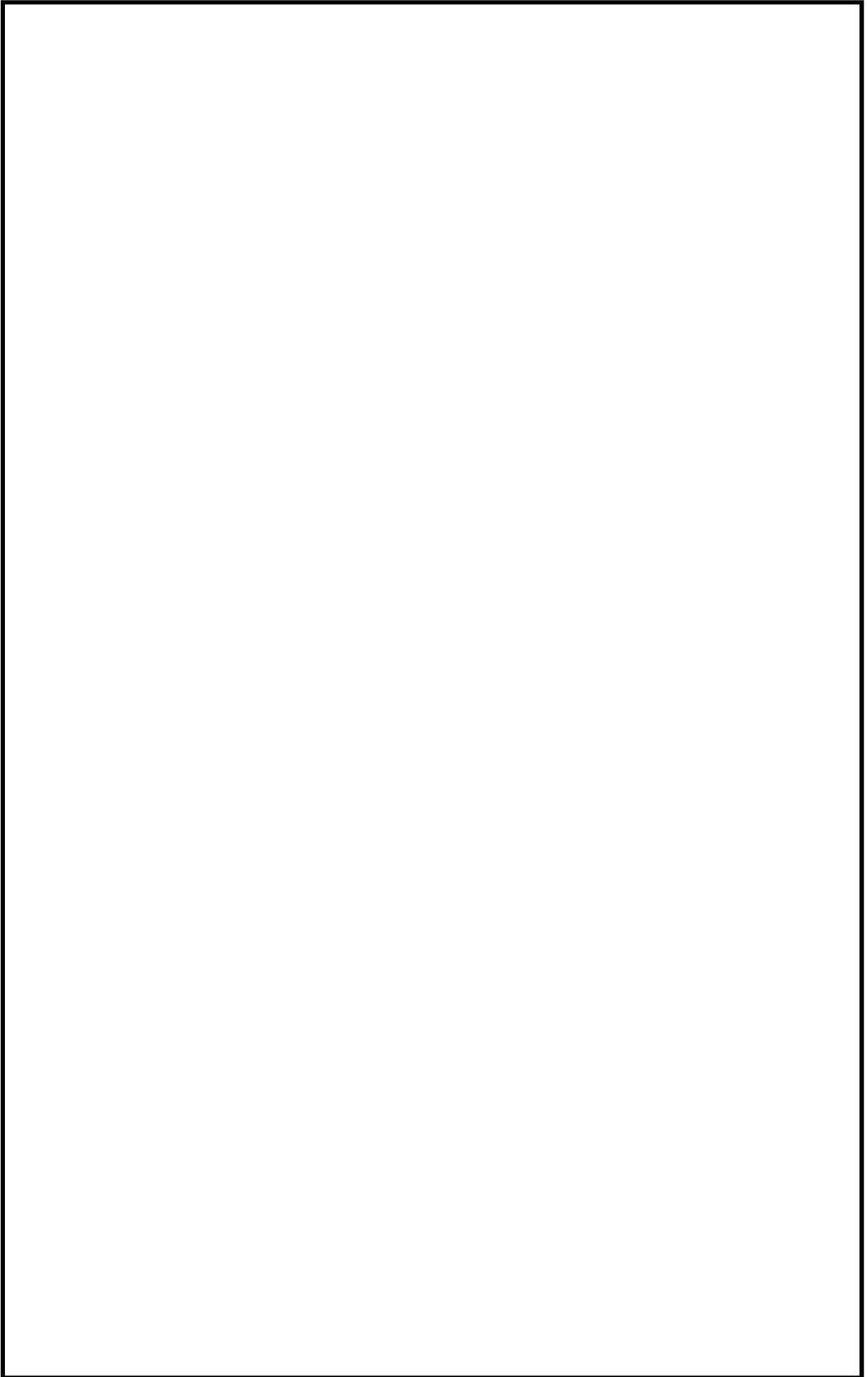


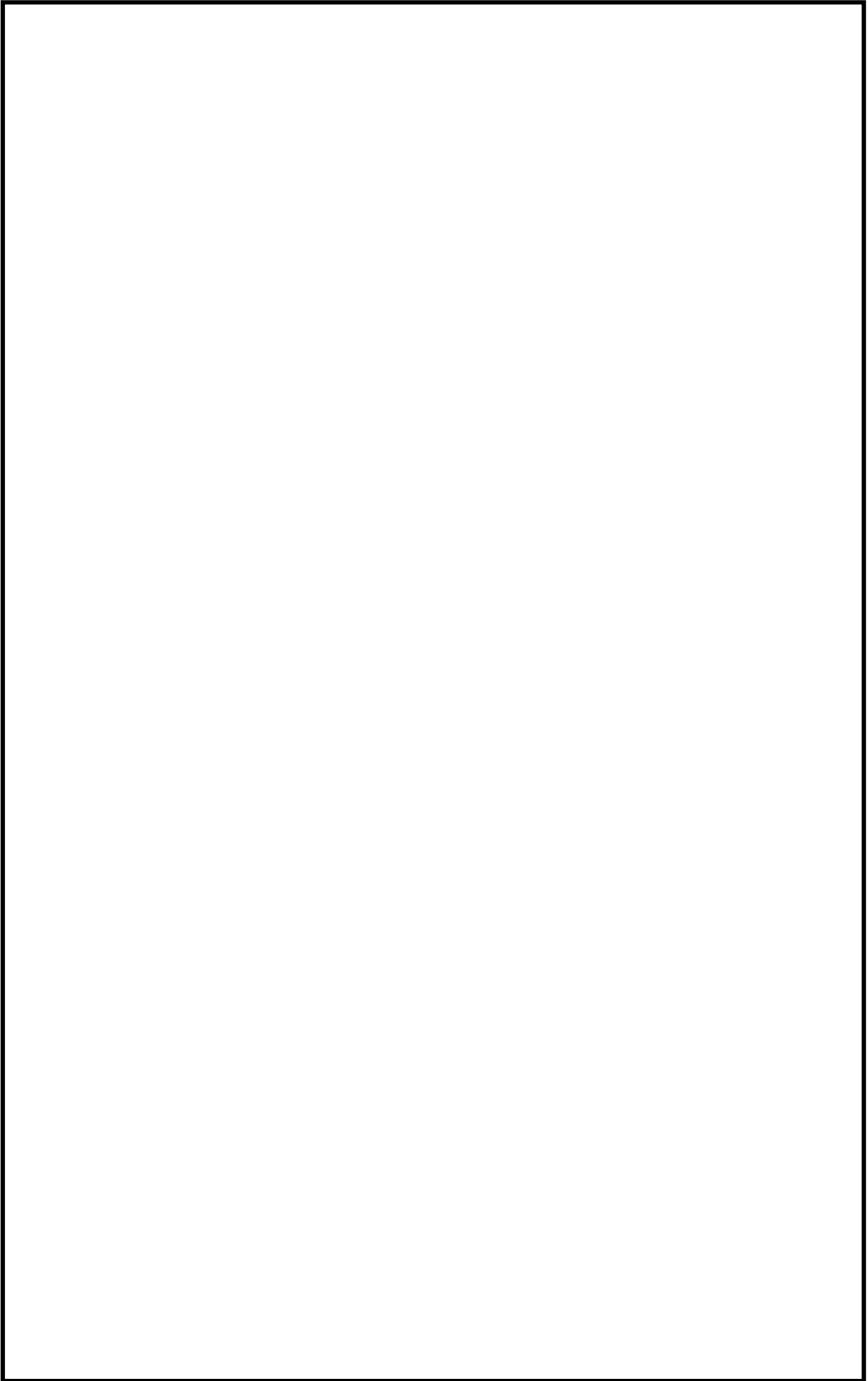


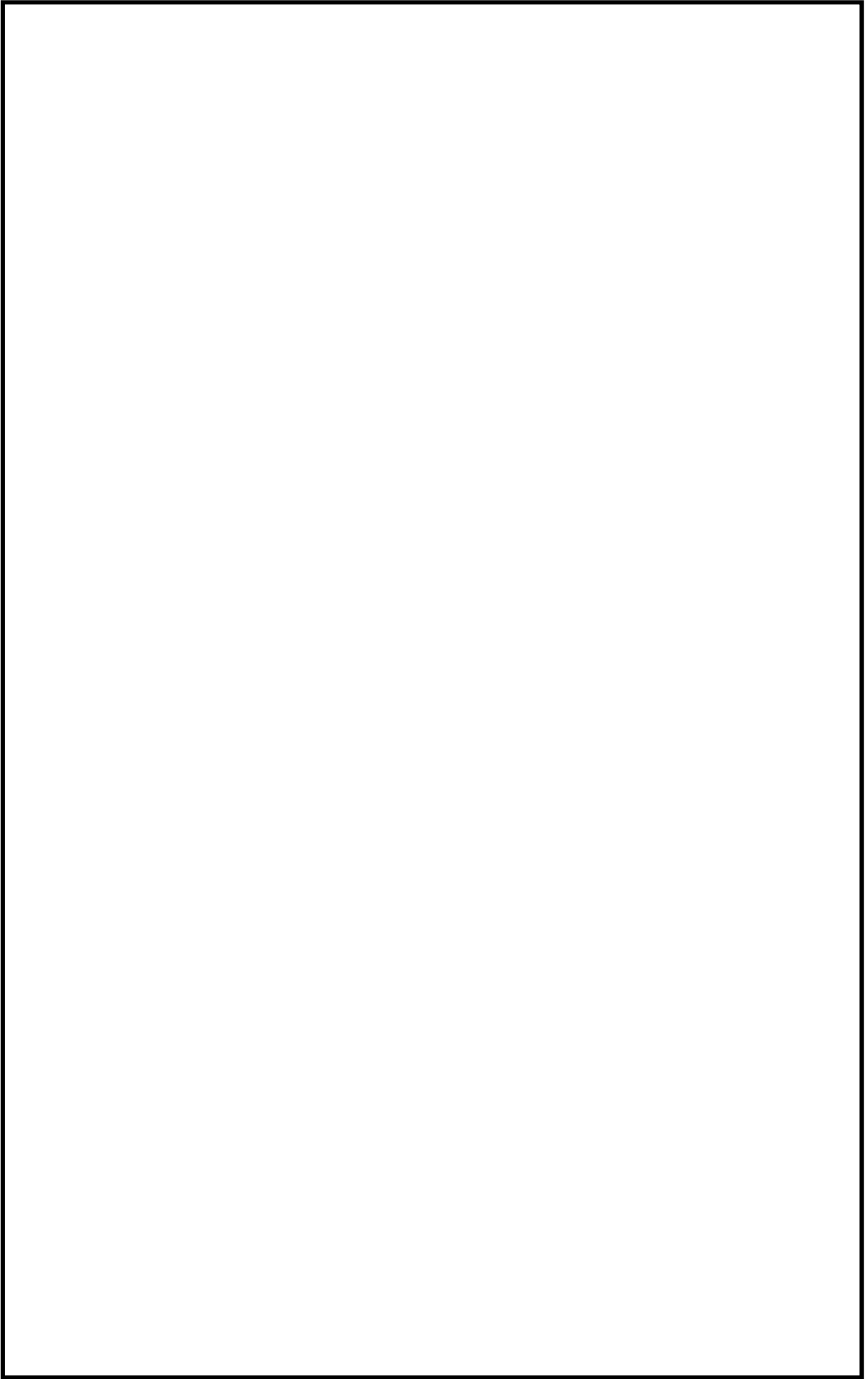


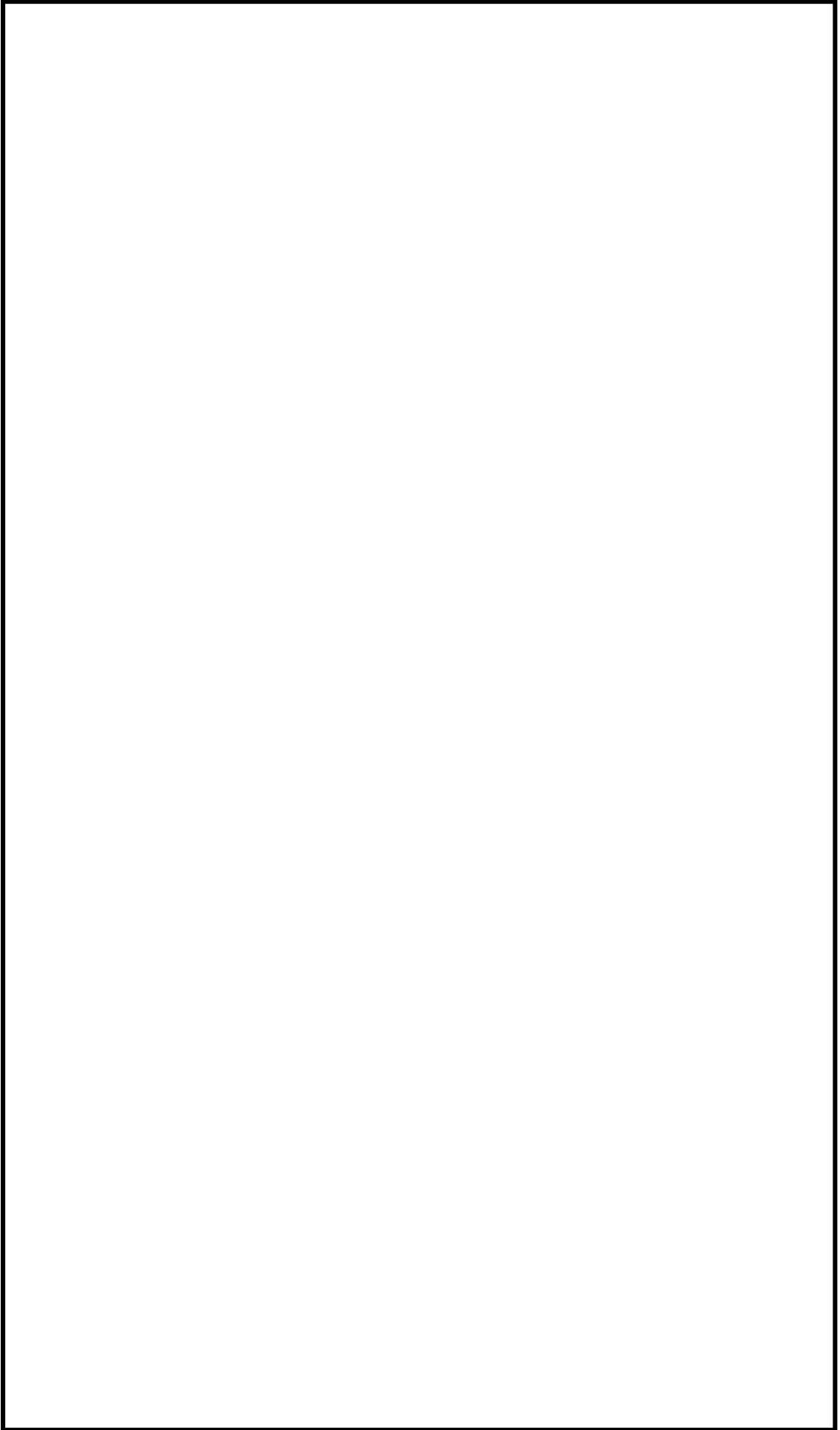


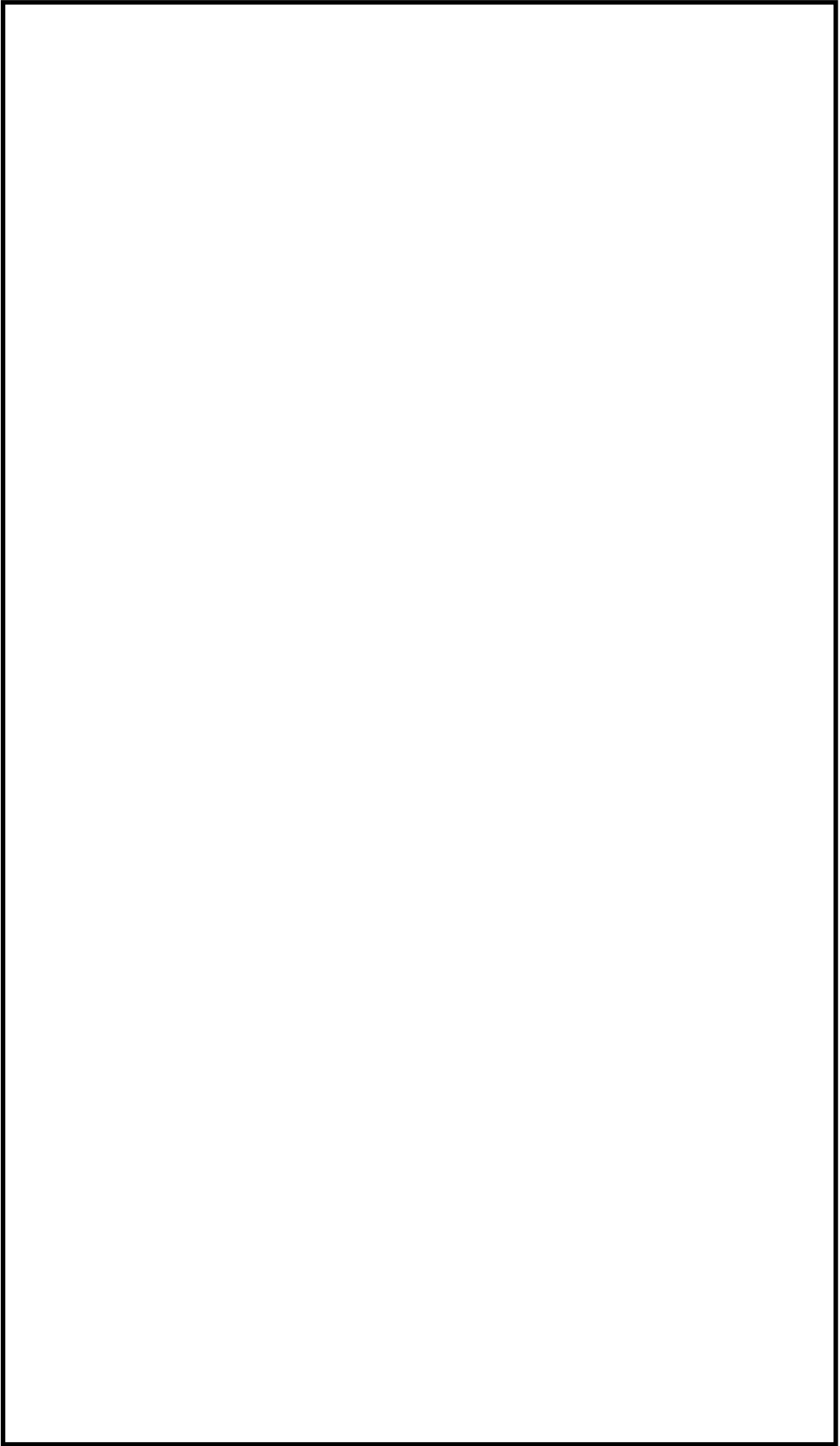


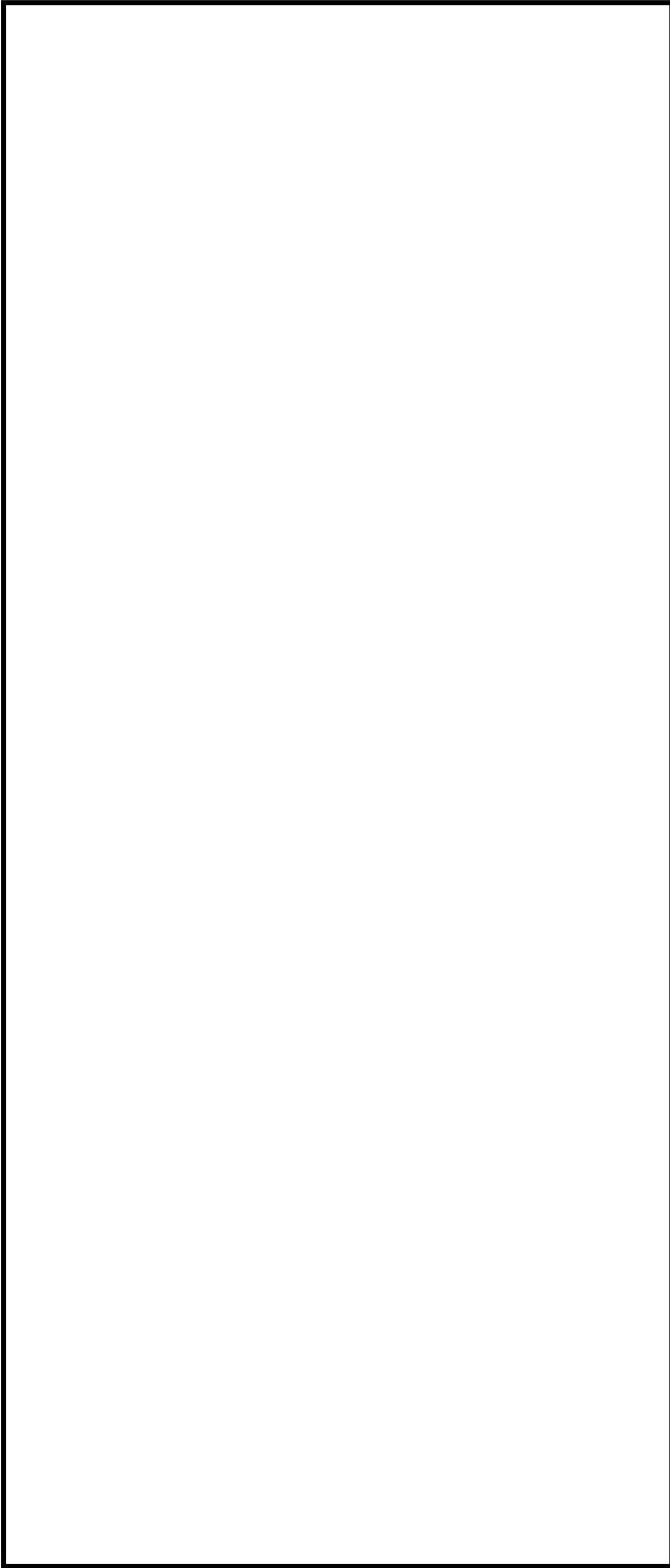












スナッパの限界耐力設定にあたってのばらつきの考え方

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，本資料に整理した。

2. スナッパのばらつきの考え方

ばらつきの考え方について，以下の観点で整理した。

- (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ものの，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 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，圧縮荷重について整理したものであるが，引張側 SHP 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 損傷確認箇所の整理

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。

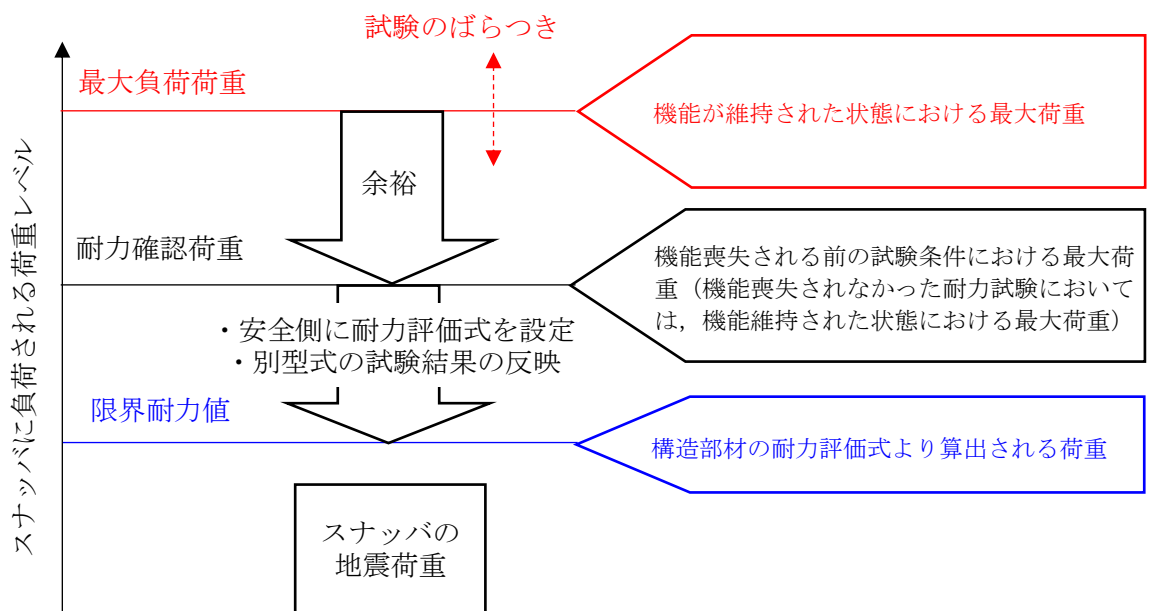


図 1 スナップの構造部材に対する限界耐力値設定のイメージ

(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 に整理した。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 に整理した荷重比から保守的に -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4-4 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。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、 $\text{試験座屈荷重}/\text{計算座屈荷重} = \square$ \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4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

--

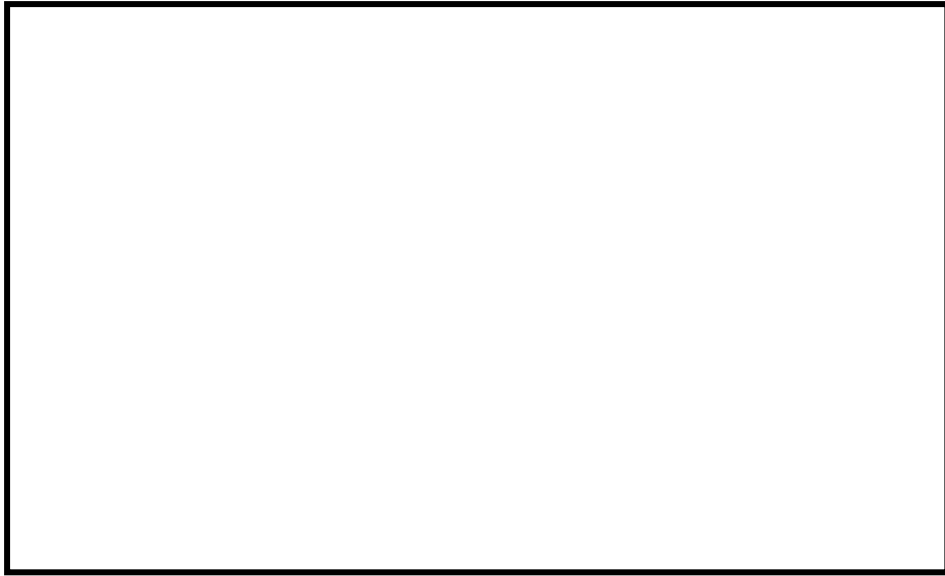


図2 SHP型オイルスナッパの概略構造及びターンバックル部

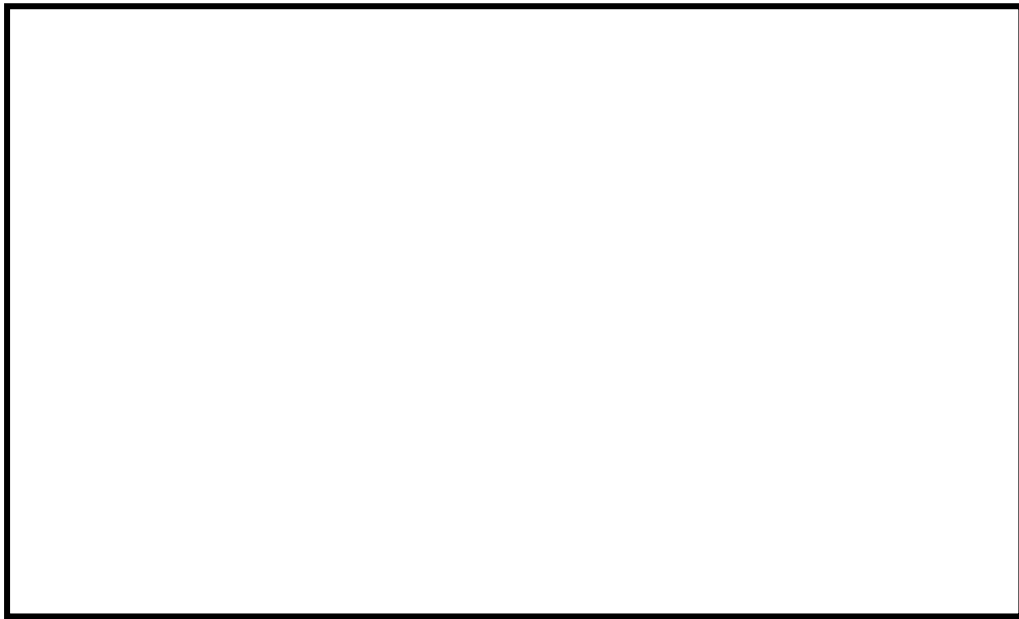


図3 メカニカルスナッパの概略構造

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に示すような整理を実施し、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 倍、最弱部が端に位置する場合（下図②）は係数として 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理想的な条件下における座屈荷重であり、実際のメカニカルスナッパ、オイルスナッパ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。

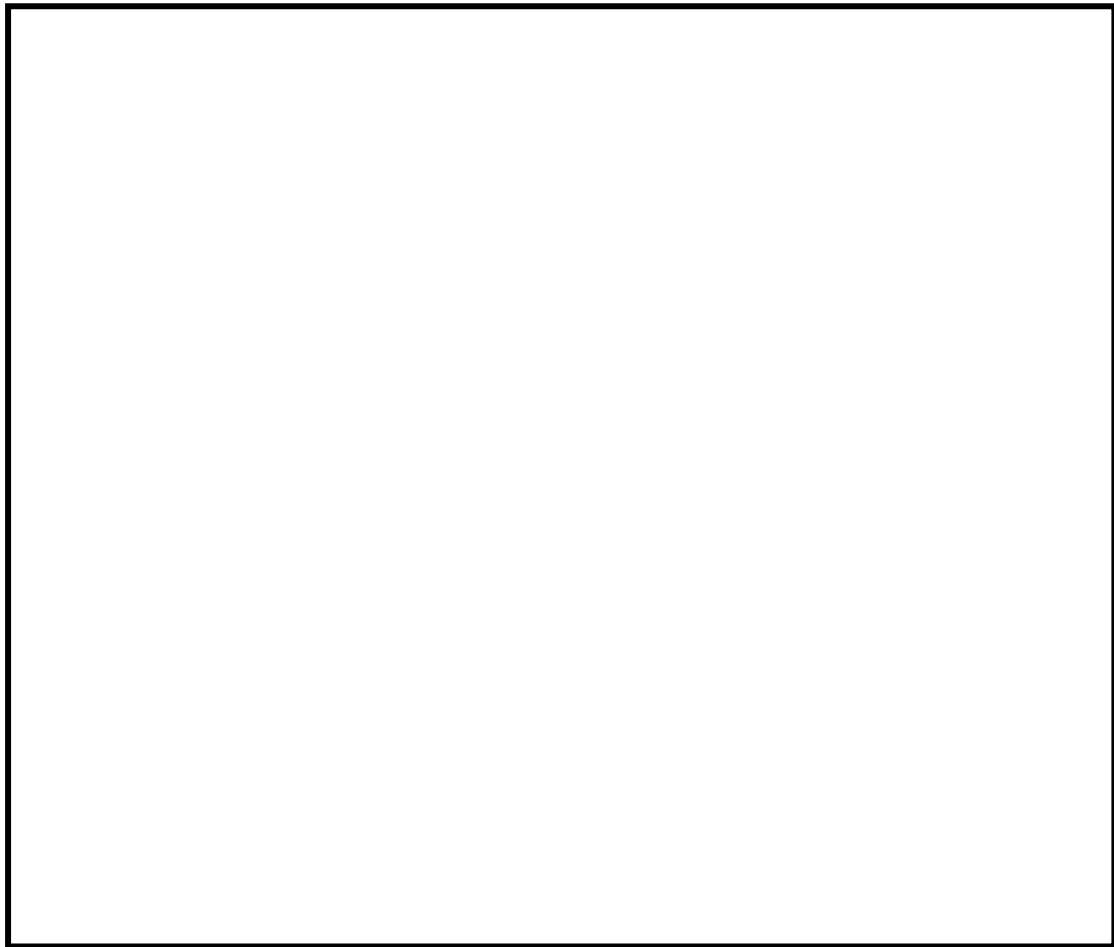


図 4 電共研及び電共研以前に実施されたオイルスナッパの座屈試験結果

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。

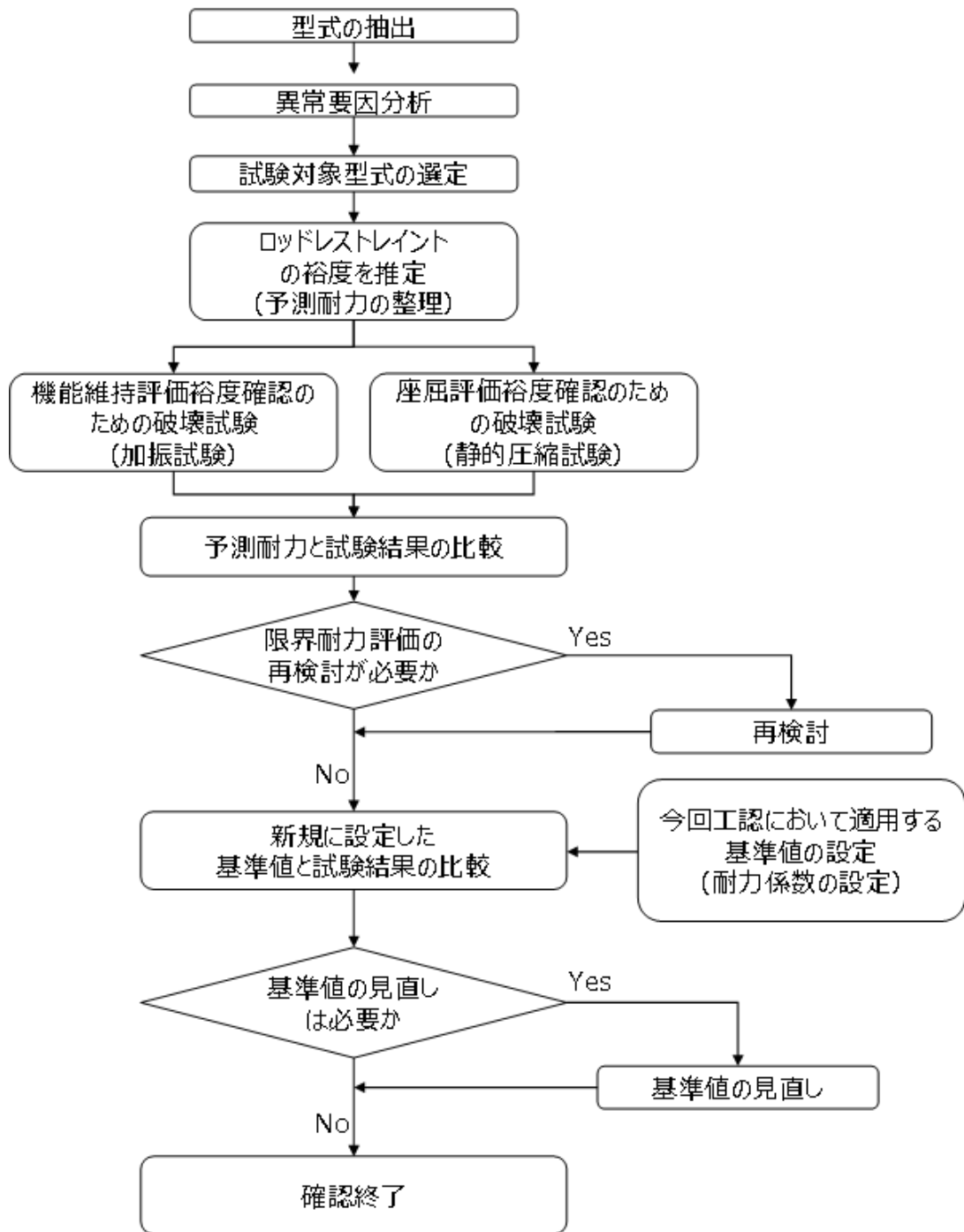


図 2-1 ロッドレストレイント限界耐力確認手順







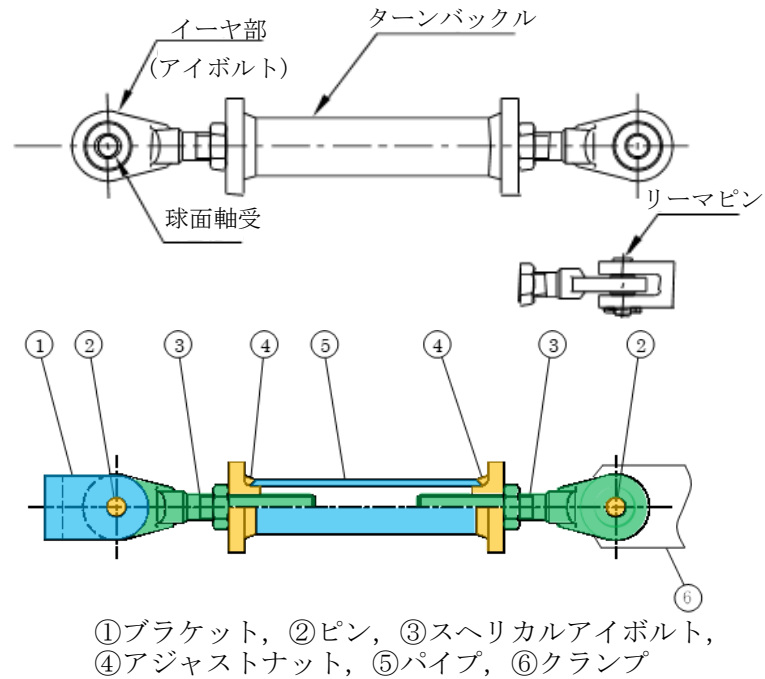
	机上計算による 予想耐力算出	試験における耐力確認 荷重の確認	限界耐力値の設定
耐力確認荷重が 予想耐力を上 回った場合	予想耐力 	耐力確認荷重 	限界耐力値  必要に応じて 予想耐力を 上方修正
耐力確認荷重が 予想耐力を下 回った場合、又 は想定していな かった部位が破 損ないし機能喪 失した場合	予想耐力 	耐力確認荷重 	予想耐力を 下方修正  限界耐力値

図 2-2 限界耐力評価の再検討方針の概要図

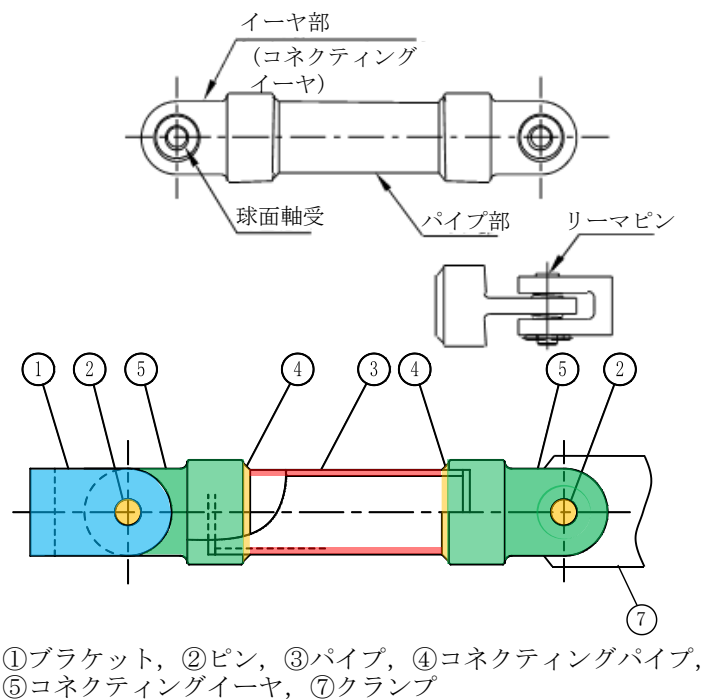
3. ロッドレストレイント耐力試験

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



基本型式：RTS 型 (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 型及び SN 型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 型及び SN 型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、JNES 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。他の一般的なレストレイントの構造強度限界確認試験（引張試験等）よりもプラントの供用状態に則した試験条件となっている。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 4-1 に示す。

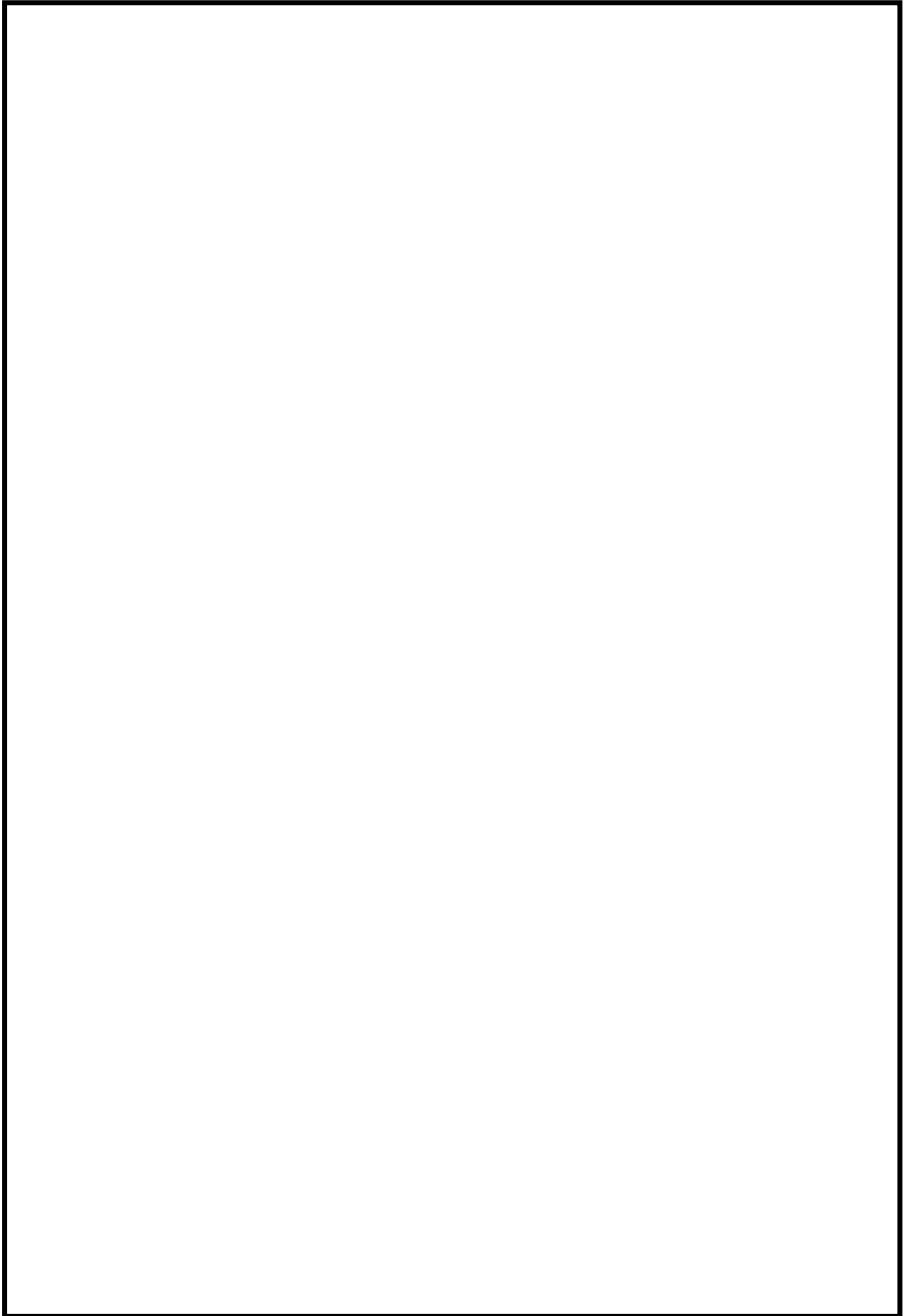
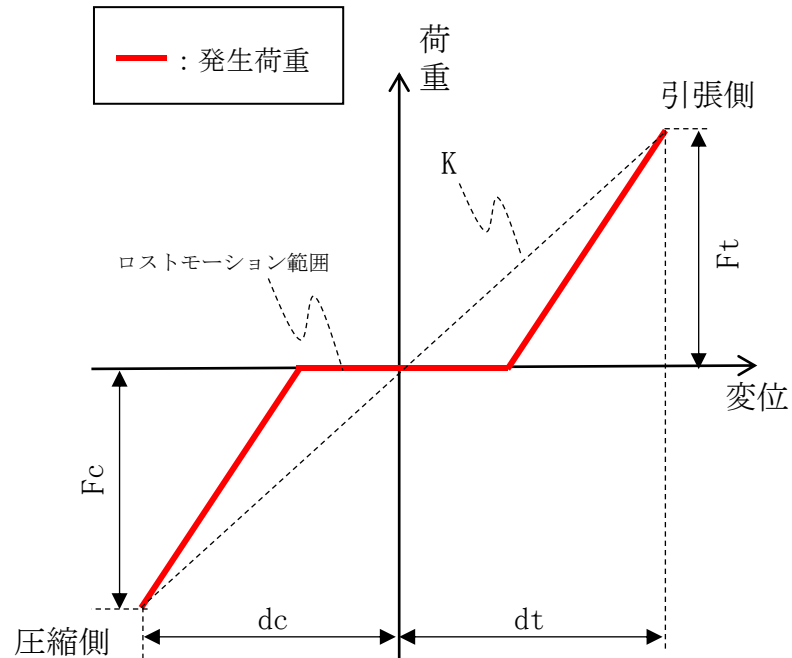


図 4-1 加振試験体系図

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。

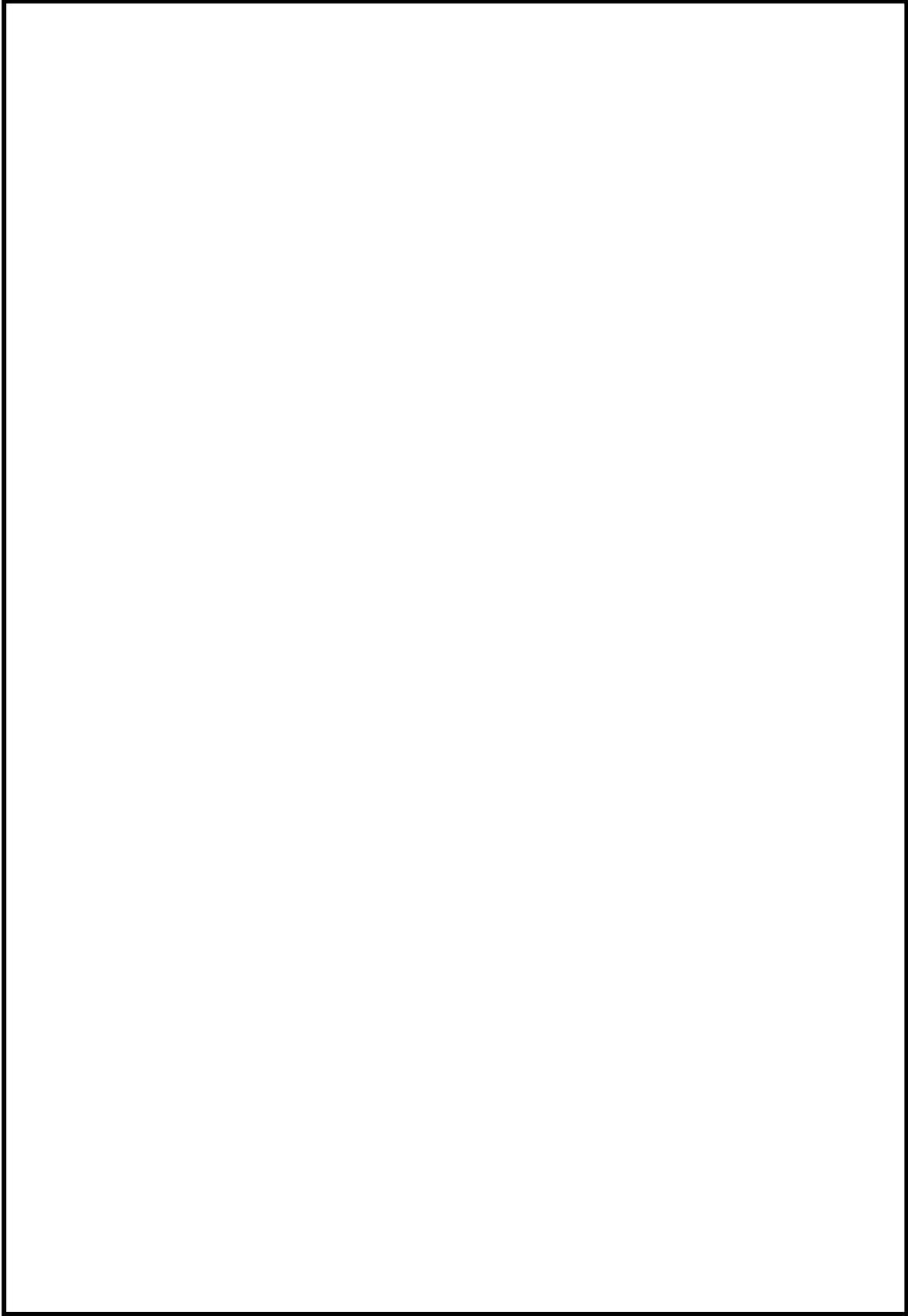


図 4-3 静的圧縮試験装置の概要

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、支持機能を喪失した状態と判断された際の荷重（最大負荷荷重）と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。

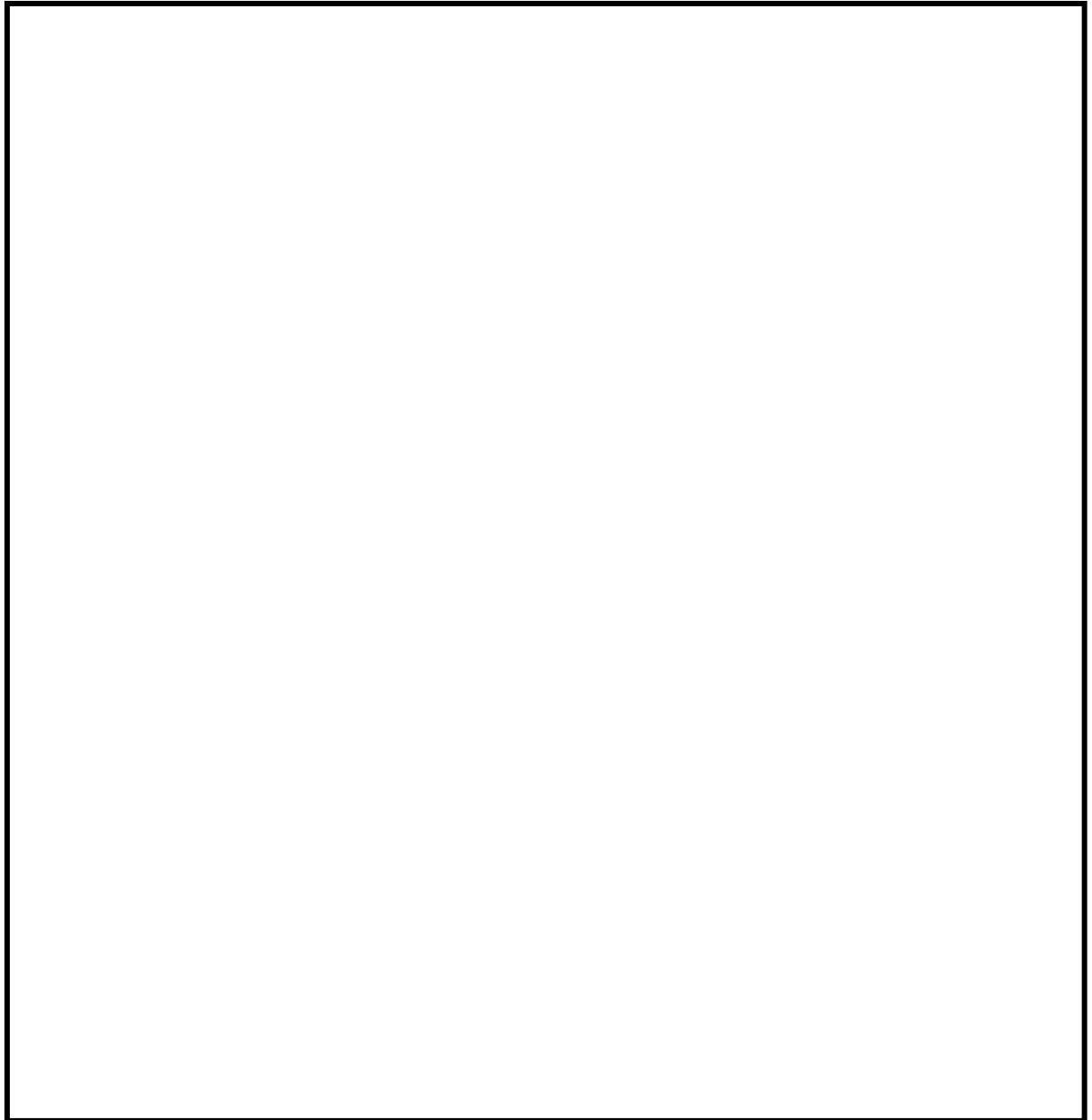


図 4-4 供試体 No. RSA-06-1 の加振試験における時刻歴荷重波形

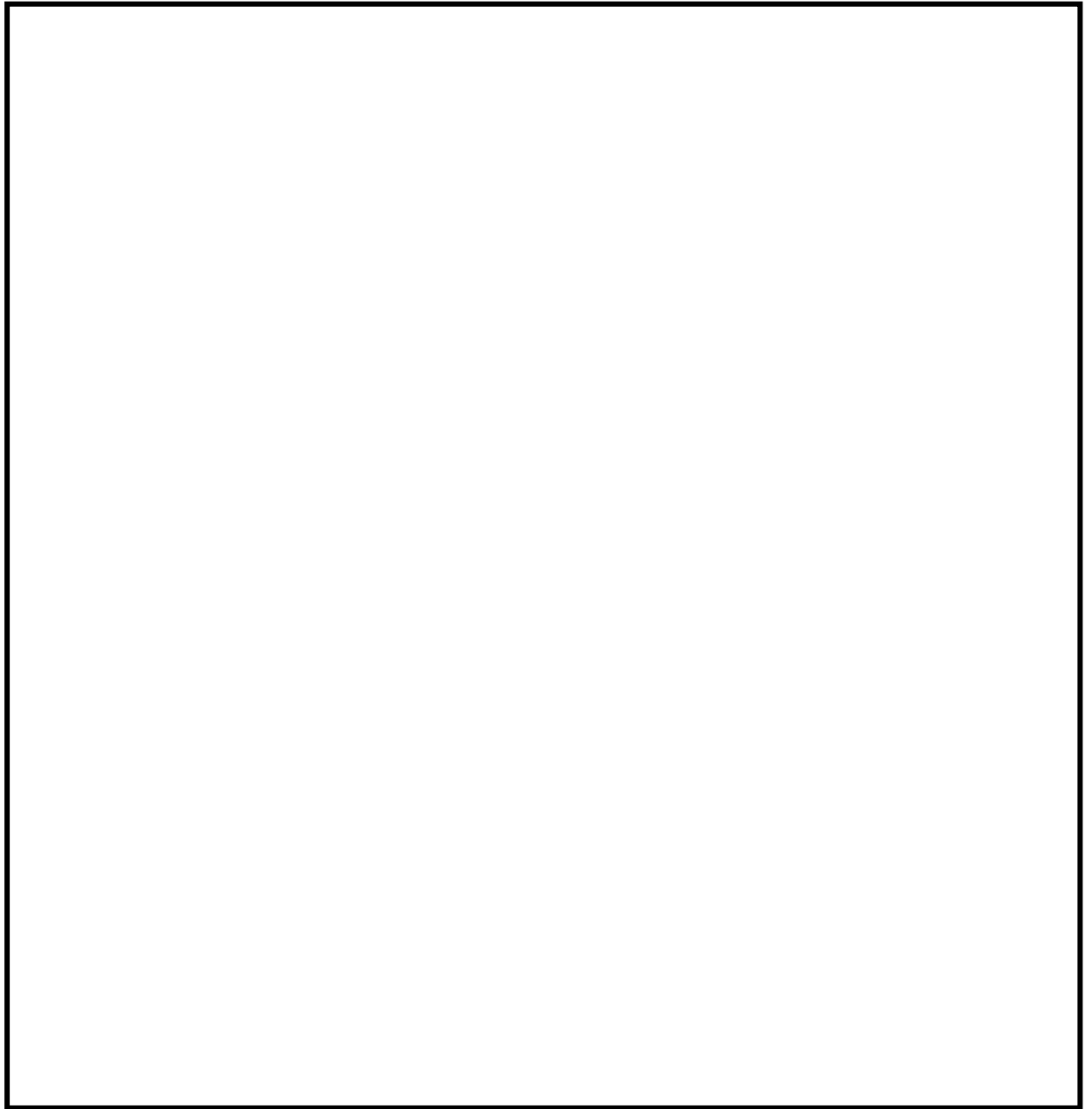


図 4-5 供試体 No. RTS-1-3 の加振試験における時刻歴荷重波形

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・整理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 [] 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。

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	新規耐力係数	
		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					