

高浜発電所 4 号炉 審査資料	
資料番号	KTN4-PLM40-コンクリート 改 3
提出年月日	令和5年9月27日

高浜発電所 4 号炉 劣化状況評価
(コンクリート構造物および鉄骨構造物)

補足説明資料

令和 5 年 9 月 2 7 日

関西電力株式会社

本資料のうち、枠囲みの内容は機密に係る
事項ですので公開することはできません。

目次

1. 概要	1
2. 基本方針	3
3. 代表構造物の選定	7
4. 代表構造物の技術評価	17
5. 代表構造物以外の評価	29
6. まとめ	30

別紙

別紙1. 高浜3号炉の劣化状況評価との相違点について	1-1
別紙2. 社内標準における目視点検の項目、方法および判定基準について	2-1
別紙3. 対象構造物および代表構造物の選定過程について	3-1
別紙4. 耐火能力の考え方および耐火能力が要求されている壁の位置について	4-1
別紙5. 土木建築設備に係る保全管理の文書体系について	5-1
別紙6. 炉心領域部および原子炉容器サポート直下部の1次遮蔽壁における 温度分布解析の方法などについて	6-1
別紙7. 放射線照射量の算出方法などについて	7-1
別紙8. 中性子照射量に対する耐力評価について	8-1
別紙9. 中性化の評価対象および評価点の選定過程について	9-1
別紙10. 中性化深さの推定値の算定過程および結果について	10-1
別紙11. 塩分浸透の評価対象および評価点の選定過程について	11-1
別紙12. 塩化物イオン濃度の測定位置、測定方法、測定結果について	12-1
別紙13. 塩分浸透における鉄筋の腐食減量の算定過程および結果について	13-1
別紙14. 機械振動の評価対象の選定過程について	14-1
別紙15. モルタルバー法等の試験結果について	15-1
別紙16. アルカリ骨材反応に関する特別点検手法の選定プロセスおよび 評価結果の妥当性確認について	16-1
別紙17. 高浜4号炉周辺の地下水による劣化影響について	17-1
別紙18. アルカリ骨材反応に関する潜在膨張性の評価について	18-1

1. 概要

本資料は、「実用発電用原子炉の設置、運転等に関する規則」第 113 条の規定に基づき実施した劣化状況評価のうち、コンクリート構造物および鉄骨構造物の評価結果について、補足説明するものである。

コンクリート構造物および鉄骨構造物の経年劣化事象、劣化要因は表 1 に示すとおり、多岐にわたるため、それぞれの劣化要因ごとに評価が必要である。

表1 コンクリート構造物および鉄骨構造物の経年劣化事象および劣化要因

構造物	経年劣化事象	劣化要因	
コンクリート構造物	強度低下	熱	コンクリートが熱を受けると、温度条件によってはコンクリート中の水分の逸散に伴う乾燥に起因する微細なひび割れ、あるいは水分の移動に起因する空隙の拡大などにより強度が低下する可能性がある。
		放射線照射	コンクリートは、中性子照射やガンマ線照射に起因する内部発熱によるコンクリート中の水分の逸散などにより、強度が低下する可能性がある。
		中性化	コンクリートは空気中の二酸化炭素の作用を受けると、徐々にそのアルカリ性を失い中性化する。中性化がコンクリートの内部に進行しアルカリ性が失われると鉄筋周囲に生成されていた不動態被膜も失われ、鉄筋はコンクリート中の水分、酸素の作用により腐食し始める。さらに、鉄筋の腐食が進行すると酸化生成物による体積膨張からコンクリートにひび割れや剥離が生じ、コンクリート構造物としての健全性が損なわれる可能性がある。
		塩分浸透	コンクリート中に塩化物イオンが浸透して鉄筋位置まで達すると、鉄筋表面の不動態被膜が破壊されるため、鉄筋はコンクリート中の水分、酸素の作用により腐食し始める。腐食が進行すると酸化生成物による体積膨張からコンクリートにひび割れや剥離が生じ、コンクリート構造物としての健全性が損なわれる可能性がある。
		機械振動	機械振動により、コンクリート構造物が長期間にわたって繰返し荷重を受けると、ひび割れの発生、ひいては損傷に至る可能性がある。
		アルカリ骨材反応	コンクリート中の反応性シリカを含む骨材と、セメントなどに含まれるアルカリ（ナトリウムイオンやカリウムイオン）が、水の存在下で反応してアルカリ珪酸塩を生成し、この膨張作用によりコンクリートにひび割れが生じ、コンクリート構造物としての健全性が損なわれる可能性がある。
		凍結融解	コンクリート中の水分が凍結し、それが気温の上昇や日射を受けることなどにより融解する凍結融解を繰り返すことでコンクリートにひび割れが生じ、コンクリート構造物としての健全性が損なわれる可能性がある。
	遮蔽能力低下	熱	コンクリートは、周辺環境からの伝熱および放射線照射に起因する内部発熱により、コンクリート中の水分が逸散し、放射線に対する遮蔽能力が低下する可能性がある。
	耐火能力低下	火災時などの熱	コンクリート構造物は、断面厚により耐火能力を確保する設計であるが、火災時に熱により剥落が生じ、部分的な断面厚の減少に伴う耐火能力の低下によりコンクリートの健全性が損なわれる可能性がある。
鉄骨構造物	強度低下	腐食	鉄は一般に大気中の酸素、水分と化学反応を起こして腐食する。また、海塩粒子などにより、腐食が促進される。腐食が進行すると鉄骨の断面欠損に至り、鉄骨の強度低下につながる可能性がある。
		風などによる疲労	風による振動などの繰返し荷重が継続的に鉄骨構造物にかかることにより、疲労による損傷が蓄積され、鉄骨の強度低下につながる可能性がある。

2. 基本方針

コンクリート構造物および鉄骨構造物の経年劣化事象および劣化要因に対する評価の基本方針は、対象構造物について、表1の経年劣化事象の発生の可能性について評価し、その可能性が将来にわたって発生することが否定できない場合は、その発生および進展に係る健全性評価を行い、運転開始後60年時点までの期間において「実用発電用原子炉の運転の期間の延長の審査基準」、「実用発電用原子炉の運転期間延長認可申請に係る運用ガイド」、「実用発電用原子炉施設における高経年化対策審査ガイド」および「実用発電用原子炉施設における高経年化対策実施ガイド」の要求事項を満たすことを確認することである。

コンクリート構造物および鉄骨構造物評価についての要求事項を表2に整理する。

表2 コンクリート構造物および鉄骨構造物評価についての要求事項 (1/3)

審査基準、ガイド	要求事項		
実用発電用原子炉の運転の期間の延長の審査基準	2. 実用炉規則第113条第2項第2号に掲げる原子炉その他の設備の劣化の状況に関する技術的な評価の結果、延長しようとする期間において、同評価の対象となる機器・構造物が下表に掲げる要求事項（以下「要求事項」という。）に適合すること、又は同評価の結果、要求事項に適合しない場合には同項第3号に掲げる延長しようとする期間における原子炉その他の設備に係る施設管理方針の実施を考慮した上で、延長しようとする期間において、要求事項に適合すること。		
	コンクリート構造物	熱	○評価対象部位のコンクリートの温度が制限値（貫通部は90℃、その他の部位は65℃）を超えたことがある場合は、耐力評価を行い、その結果、当該部位を構成する部材又は構造体の耐力が設計荷重を上回ること。
		放射線照射	○評価対象部位の累積放射線照射量が、コンクリート強度に影響を及ぼす可能性のある値を超えている又は超える可能性が認められる場合は、耐力評価を行い、その結果、当該部位を構成する部材又は構造体の耐力が設計荷重を上回ること。
		中性化	○評価対象部位の中性化深さが、鉄筋が腐食し始める深さまで進行しているか又は進行する可能性が認められる場合は、耐力評価を行い、その結果、当該部位を構成する部材又は構造体の耐力が設計荷重を上回ること。
		塩分浸透	○評価対象部位に塩分浸透による鉄筋腐食により有意なひび割れが発生しているか又は発生する可能性が認められる場合は、耐力評価を行い、その結果、当該部位を構成する部材又は構造体の耐力が設計荷重を上回ること。
		アルカリ骨材反応	○評価対象部位にアルカリ骨材反応による有意なひび割れが発生している場合は、耐力評価を行い、その結果、当該部位を構成する部材又は構造体の耐力が設計荷重を上回ること。
		機械振動	○評価対象機器のコンクリート基礎への定着部周辺コンクリート表面に機械振動による有意なひび割れが発生している場合は、耐力評価を行い、その結果、当該部位を構成する部材又は構造体の耐力が設計荷重を上回ること。
		凍結融解	○評価対象部位に凍結融解による有意なひび割れが発生している場合は、耐力評価を行い、その結果、当該部位を構成する部材又は構造体の耐力が設計荷重を上回ること。
	コンクリートの遮蔽能力低下	熱	○中性子遮蔽のコンクリートの温度が88℃又はガンマ線遮蔽のコンクリートの温度が177℃を超えたことがある場合は、評価を行い、その結果、当該部位を構成する部材又は構造体の遮蔽能力が原子炉設置（変更）許可における遮蔽能力を下回らないこと。
	鉄骨の強度低下	腐食	○評価対象部位に腐食による断面欠損が生じている場合は、耐力評価を行い、その結果、当該部位を構成する部材又は構造体の耐力が設計荷重を上回ること。
風などによる疲労		○評価対象部位に風などの繰り返し荷重による疲労破壊が発生している又は発生する可能性が認められる場合は、耐力評価を行い、その結果、当該部位を構成する部材又は構造体の耐力が設計荷重を上回ること。	

表2 コンクリート構造物および鉄骨構造物評価についての要求事項 (2/3)

審査基準、ガイド	要求事項
<p>実用発電用原子炉の運転期間延長認可申請に係る運用ガイド</p>	<p>3. 2 (1) 「延長しようとする期間における運転に伴い生ずる原子炉その他の設備の劣化の状況に関する技術的な評価」(以下「劣化状況評価」という。)の記載内容について評価の対象とする機器・構造物及び評価手法は、実用炉規則第8 2条第2項に規定する運転開始後40年を迎える発電用原子炉に係る発電用原子炉施設についての経年劣化に関する技術的な評価におけるものと同様とする。特に運転期間延長認可申請に伴うものとして評価を行い、その結果の記載が求められる事項は次のとおり。</p> <p>①上記3. 1の特別点検の結果を踏まえた劣化状況評価。</p> <p>④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(平成25年原子力規制委員会規則第6号。以下「技術基準規則」という。)(運転開始以後40年を経過する日において適用されているものに限る。)に定める基準に照らした評価。</p> <p>3. 3 (1) 「延長しようとする期間における原子炉その他の設備に係る施設管理方針」(以下「施設管理方針」という。)の策定に係る手法は、実用炉規則第8 2条第2項に規定する運転開始後40年を迎える発電用原子炉に係る発電用原子炉施設についての施設管理に関する方針の策定と同様とする。特に運転期間延長認可申請に伴い策定するものとして記載が求められる事項は次のとおり。なお、3. 2 (2) ⑯の評価結果を申請の補正として示す場合には、当該評価結果に関する施設管理方針について、当該評価結果と合わせて申請の補正として示すことができる。</p> <p>①上記3. 2の劣化状況評価を踏まえた施設管理方針。</p>
<p>実用発電用原子炉施設における高経年化対策審査ガイド</p>	<p>3. 高経年化技術評価等の審査の視点・着眼点</p> <p>(1) 高経年化技術評価の審査</p> <p>⑫健全性の評価 実施ガイド3. 1⑤に規定する期間の満了日までの期間について、高経年化対策上着目すべき経年劣化事象の発生又は進展に係る健全性を評価していることを審査する。</p> <p>⑬現状保全の評価 健全性評価結果から現状の保全策の妥当性が評価されていることを審査する。</p> <p>⑭追加保全策の抽出 現状保全の評価結果から、現状保全に追加する必要がある新たな保全策が抽出されていることを審査する。</p> <p>(2) 長期施設管理方針の審査</p> <p>①長期施設管理方針の策定 すべての追加保全策について長期保守管理方針として策定されているかを審査する。</p>

表2 コンクリート構造物および鉄骨構造物評価についての要求事項 (3/3)

審査基準、ガイド	要求事項
<p>実用発電用原子炉施設における高経年化対策実施ガイド</p>	<p>3.1 高経年化技術評価の実施及び見直し 高経年化技術評価の実施及び見直しに当たっては、以下の要求事項を満たすこと。</p> <p>⑤ 抽出された高経年化対策上着目すべき経年劣化事象について、以下に規定する期間の満了日までの期間について機器・構造物の健全性評価を行うとともに、必要に応じ現状の施設管理に追加すべき保全策（以下「追加保全策」という。）を抽出すること。</p> <p>ロ 実用炉規則第82条第2項又は第3項の規定に基づく高経年化技術評価プラントの運転を開始した日から40年間に同条第2項又は第3項に規定する延長する期間を加えた期間</p> <p>3.2 長期施設管理方針の策定及び変更</p> <p>3.2 長期施設管理方針の策定及び変更 長期施設管理方針の策定及び変更にあたっては、以下の要求事項を満たすこと。</p> <p>①高経年化技術評価の結果抽出された全ての追加保全策（発電用原子炉の運転を断続的に行うことを前提として抽出されたもの及び冷温停止状態が維持されることを前提として抽出されたものの全て。）について、発電用原子炉ごとに、施設管理の項目及び当該項目ごとの実施時期を規定した長期施設管理方針を策定すること。</p> <p>なお、高経年化技術評価の結果抽出された追加保全策について、発電用原子炉の運転を断続的に行うことを前提とした評価から抽出されたものと冷温停止状態が維持されることを前提とした評価から抽出されたもの間で、その対象の経年劣化事象及び機器・構造物の部位が重複するものについては、双方の追加保全策を踏まえた保守的な長期施設管理方針を策定すること。</p>

3. 代表構造物の選定

3.1 代表構造物の選定手順

コンクリート構造物および鉄骨構造物の強度低下、遮蔽能力低下、耐火能力低下が想定される構造物は多数存在するため、劣化状況評価では、評価対象となる構造物の中から代表構造物を選定して評価を行う。評価対象構造物、代表構造物などは、以下の手順にて選定する。

3.1.1 評価対象構造物の選定とグループ化

多数の構造物の中から、「重要度指針におけるクラス1、2に該当する構造物または該当する機器を支持する構造物」「重要度指針におけるクラス3に該当する高温・高圧の環境下にある機器を支持する構造物」「浸水防護施設に属する構造物」「常設重大事故等対処設備、常設重大事故等対処設備を支持する構造物」に該当する構造物を選定し、コンクリート構造物と鉄骨構造物にグループ化を実施した。

なお、選定した対象構造物には、火災防護設備に属する構造物を含む。

評価対象構造物の選定とグループ化の結果を表3に示す。

3.1.2 代表構造物の選定

グループ化した評価対象構造物について、使用条件などを考慮して代表構造物を選定した。コンクリート構造物の選定結果を表4に、鉄骨構造物の選定結果を表5にそれぞれ示す。

3.1.3 劣化要因ごとの評価対象部位などの選定

代表構造物について、劣化要因ごとに使用環境などを考慮して評価対象部位、評価点を選定した。

表3 評価対象構造物のグループ化

対象構造物	重要度分類	コンクリート 構造物	鉄骨構造物
外部遮蔽壁	クラス1支持設備	○	—
外部遮蔽壁（3号炉）	常設重大事故等 対処設備支持	○	—
内部コンクリート	クラス1支持設備	○	○ （鉄骨部）
原子炉格納施設基礎	クラス1支持設備	○	—
原子炉補助建屋	クラス1支持設備	○	○ （鉄骨部）
原子炉補助建屋 （1・2号炉）	クラス3支持設備	○	○ （鉄骨部）
原子炉補助建屋 （3号炉）	クラス1支持設備	○	○ （鉄骨部）
取水構造物	クラス1支持設備 浸水防護施設	○	○ （浸水防止蓋）
取水構造物 （1・2号炉）	浸水防護施設支持	○	—
タービン建屋	クラス3支持設備	○	○ （鉄骨部）
緊急時対策所建屋	常設重大事故等 対処設備支持	○	—
非常用ディーゼル発電 用燃料油貯油槽基礎 （配管トレンチ含む）	クラス1支持設備	○	—
復水タンク基礎	クラス1支持設備	○	—
防潮ゲート （道路部、水路部）	浸水防護施設	○ （道路部、水路部）	○ （水路部）
放水口側防潮堤 （防潮扉含む）	浸水防護施設	○	○
屋外排水路 逆流防止設備	浸水防護施設	—	○
放水ピット止水板	浸水防護施設	—	○

表4 高浜4号炉 コンクリート構造物における代表構造物選定結果

対象構造物 (コンクリート構造物)	重要度分類等	使用条件								選定	選定理由
		運転開始後 経過年数*1	高温部の 有無	放射線の 有無	振動の 有無	設置環境		供給 塩化物量	耐火要求 の有無		
						屋 内	屋 外				
① 外部遮蔽壁	クラス1 設備支持	37	◇	◇	—	一部 仕上げ無し	仕上げ有り	◇	—	◎	屋内で仕上げ無し
② 外部遮蔽壁 (3号炉)	常設重大事故等 対処設備	37	◇	◇	—	一部 仕上げ無し	仕上げ有り	◇	—	◎	屋内で仕上げ無し
③ 内部コンクリート	クラス1 設備支持	37	○ (1次遮蔽壁)	○ (1次遮蔽壁)	—	一部 仕上げ無し	—	—	—	◎	高温部、放射線の影響、 屋内で仕上げ無し
④ 原子炉格納施設基礎	クラス1 設備支持	37	—	◇	—	一部 仕上げ無し	埋設*2	◇	/	◎	代表構造物を支持する構 造物 屋内で仕上げ無し
⑤ 原子炉補助建屋	クラス1 設備支持	37	◇	◇	○ (非常用ディーゼル 発電機基礎)	一部 仕上げ無し	仕上げ有り	◇	—	◎	振動の影響、 屋内で仕上げ無し
⑥ 原子炉補助建屋 (1・2号炉)	クラス3 設備支持	47	◇	◇	—	一部 仕上げ無し	仕上げ有り	◇	—	◎	屋内で仕上げ無し 運転開始後経過年数
⑦ 原子炉補助建屋 (3号炉)	クラス1 設備支持	37	◇	◇	—	一部 仕上げ無し	仕上げ有り	◇	—	◎	屋内で仕上げ無し
⑧ 取水構造物	クラス1 設備支持	37	—	—	—	/	仕上げ無し	○ (海水と接触)	—	◎	屋外で仕上げ無し、 供給塩化物量の影響 運転開始後経過年数
⑨ 取水構造物 (1・2号炉)	浸水防護施設支持	47	—	—	—	/	仕上げ無し	○ (海水と接触)	—	◎	屋外で仕上げ無し、 供給塩化物量の影響 運転開始後経過年数
⑩ タービン建屋	クラス3 設備支持	37	—	—	○ (タービン架台)	一部 仕上げ無し	埋設*2	◇	/	◎	振動の影響、 屋内で仕上げ無し
⑪ 緊急時対策所建屋	常設重大事故等 対処設備支持	3	—	—	—	一部 仕上げ無し	仕上げ有り	◇	—		
⑫ 非常用ディーゼル発電用燃料油貯 油槽基礎 (配管トレンチ含む)	クラス1 設備支持	37	—	—	—	/	仕上げ無し	◇	—		
⑬ 復水タンク基礎	クラス1 設備支持	37	—	—	—	/	仕上げ無し	◇	/		
⑭ 防潮ゲート (道路部、水路部)	浸水防護施設	6	—	—	—	/	仕上げ無し	○ (海水と接触)	/		
⑮ 放水口側防潮堤 (防潮扉含む)	浸水防護施設	6	—	—	—	/	仕上げ無し	◇	/		

*1: 運転開始後経過年数は、2022年10月時点の年数としている。

*2: 環境条件の区分として、土中は一般の環境として区分されることから、他の屋外で仕上げがない構造物で代表させる。

【凡例】

○: 影響大

◇: 影響小

—: 影響極小、または無し

表5 高浜4号炉 鉄骨構造物における代表構造物選定結果

対象構造物 (鉄骨構造物)	重要度分類等	使用条件				選定	選定理由
		運転開始後 経過年数*1	設置環境		使用材料		
			屋内	屋外			
① 内部コンクリート (鉄骨部)	クラス1設備支持	37	仕上り有り		炭素鋼	◎	使用材料、運転開始後経過年数
② 原子炉補助建屋 (鉄骨部)	クラス2設備支持	37	仕上り有り		炭素鋼	◎	使用材料、運転開始後経過年数
③ 原子炉補助建屋 (1・2号炉) (鉄骨部)	クラス3設備支持	47	仕上り有り		炭素鋼	◎	使用材料、運転開始後経過年数
④ 原子炉補助建屋 (3号炉) (鉄骨部)	クラス2設備支持	37	仕上り有り		炭素鋼	◎	使用材料、運転開始後経過年数
⑤ タービン建屋 (鉄骨部)	クラス3設備支持	37	仕上り有り		炭素鋼	◎	使用材料、運転開始後経過年数
⑥ 取水構造物 (浸水防止蓋)	浸水防護施設	6		仕上り有り	ステンレス鋼		
⑦ 防潮ゲート (水路部)	浸水防護施設	6		仕上り有り	炭素鋼		
⑧ 放水口側防潮堤 (防潮扉含む)	浸水防護施設	6		仕上り有り	炭素鋼 Al合金		
⑨ 屋外排水路逆流防止設備	浸水防護施設	6		仕上り有り	ステンレス鋼		
⑩ 放水ピット止水板	浸水防護施設	6		仕上り有り	炭素鋼		

*1: 運転開始後経過年数は、2022年10月時点の年数としている。

3.2 高経年化対策上着目すべき経年劣化事象の抽出

高経年化対策上着目すべき経年劣化事象を表6に示す。表1に示した経年劣化事象のうち、後述する①と②以外について、高経年化対策上着目すべき経年劣化事象として抽出した。

表6 高経年化対策上着目すべき経年劣化事象

構造物	経年劣化事象	劣化要因
コンクリート 構造物	強度低下	熱
		放射線照射
		中性化
		塩分浸透
		機械振動
	遮蔽能力低下	熱

① 高経年化対策上着目すべき経年劣化事象ではない事象（日常劣化管理事象）

表 7 に示す経年劣化事象については、想定した劣化傾向等を踏まえ適切な保全活動を行っていることから、高経年化対策上着目すべき経年劣化事象ではない事象と判断した。なお、コンクリート構造物および鉄骨構造物の保全活動は、「高浜発電所土木建築業務所則」（以下、「土建業務所則」という。）に基づき実施している。

具体的な点検および補修の実績を表 8 に示す。また、土建業務所則における目視点検の項目、方法および判定基準を別紙 2 に示す。

表 7 日常劣化管理事象

構造物	経年劣化事象	劣化要因	高経年化対策上着目すべき経年劣化事象ではない事象とする理由
コンクリート構造物	強度低下	アルカリ骨材反応	使用している骨材については、試験によりコンクリート構造物の健全性に影響を与えるような反応性がないことを確認しており、また、定期的に土建業務所則に基づく目視点検を行っており、アルカリ骨材反応に起因すると判断されるひび割れ等は認められていない。
		凍結融解	日本建築学会「建築工事標準仕様書・同解説 J A S S 5 鉄筋コンクリート工事（2018）」に示される凍害危険度の分布図によると高浜 4 号炉の周辺地域は凍害危険度が設定されておらず、凍害の予想程度が「ごく軽微」とされる凍害危険度 1 よりさらに危険度が低い。また、定期的に土建業務所則に基づく目視点検を行っており、凍結融解に起因すると判断されるひび割れ等は認められていない。
	耐火能力低下	火災時などの熱	コンクリート構造物は通常の使用環境において、コンクリート構造物の断面厚が減少することはなく、また、定期的に土建業務所則に基づく目視点検を行っており、火災時などの熱に起因すると判断される断面厚の減少は認められていない。
鉄骨構造物	強度低下	腐食	定期的に土建業務所則に基づく目視確認を実施しており、強度に支障をきたす可能性のあるような鋼材の腐食は認められていない。また、鉄骨の強度に支障をきたす可能性があるような鋼材の腐食に影響する塗装の劣化等が認められた場合には、その部分の塗装の塗替え等を行うこととしている。

表8 日常劣化管理事象に関する点検および補修の実績

構造物	経年劣化事象	劣化要因	代表構造物	点検方法	点検頻度	点検結果	補修実績
コンクリート構造物	強度低下	アルカリ骨材反応	外部遮蔽壁 外部遮蔽壁（3号炉） 内部コンクリート 原子炉格納施設基礎 原子炉補助建屋	目視点検	1回／年	アルカリ骨材反応に起因すると判断されるひび割れは認められていない	補修実績なし
		凍結融解	原子炉補助建屋（1・2号炉） 原子炉補助建屋（3号炉）	目視点検	1回／年	凍結融解に起因すると判断されるひび割れは認められていない	補修実績なし
	耐火能力低下	火災時などの熱	取水構造物※ ¹ 取水構造物（1・2号炉）※ ¹ タービン建屋	目視点検	1回／年	火災時などの熱に起因すると判断される断面厚の減少は認められていない	補修実績なし
鉄骨構造物	強度低下	腐食	内部コンクリート（鉄骨部） 原子炉補助建屋（鉄骨部） 原子炉補助建屋（1・2号炉）（鉄骨部） 原子炉補助建屋（3号炉）（鉄骨部） タービン建屋（鉄骨部）	目視点検	1回／年	有害な腐食は認められていない	補修実績なし

※1 取水構造物（水路部）の点検頻度は1回／4年

② 高経年化対策上着目すべき経年劣化事象ではない事象（日常劣化管理事象以外）

表9 に示す経年劣化事象については、対象となる構造物が無く、高経年化対策上着目すべき経年劣化事象ではない事象と判断した。

表9 日常劣化管理事象以外

構造物	経年劣化事象	劣化要因	高経年化対策上着目すべき経年劣化事象ではない事象とする理由
鉄骨	強度低下	風などによる疲労	煙突などの形状の構造物は、比較的アスペクト比（高さの幅に対する比）が大きく、風の直交方向に振動が発生する恐れがある（日本建築学会「原子力施設における建築物の維持管理指針・同解説（2015）」）。日本建築学会「建築物荷重指針・同解説（2015）」において、アスペクト比が4以上の構造物は風による振動の検討が必要とされているが、鉄骨構造物にアスペクト比が4以上の構造物はない。

3.3 劣化要因ごとの評価対象部位の選定結果

経年劣化事象に対する劣化要因ごとの評価対象部位について、選定した結果を表 10 に示す。

表 10 高浜 4 号炉 コンクリート構造物および鉄骨構造物に想定される経年劣化事象と評価対象とする構造物

構造種別		コンクリート構造物								鉄骨構造物		
経年劣化事象		強度低下						遮蔽能力低下	耐火能力 低下	強度低下		
要因		熱	放射線照射	中性化	塩分 浸透	機械 振動	アルカリ 骨材反応	凍結融解		熱	腐食	風などに よる疲労
代 表 構 造 物	外部遮蔽壁						△	△		△		
	外部遮蔽壁（3号炉）						△	△		△		
	内部コンクリート	1次遮蔽壁* ○	1次遮蔽壁* ○	ループ室* ○			△	△	1次遮蔽壁* ○	△	鉄骨部 △	鉄骨部 ▲
	原子炉格納施設基礎						△	△				
	原子炉補助建屋					非常用ディーゼル 発電機基礎* ○	△	△		△	鉄骨部 △	鉄骨部 ▲
	原子炉補助建屋 （1・2号炉）			基礎マット* ○			△	△		△	鉄骨部 △	鉄骨部 ▲
	原子炉補助建屋 （3号炉）						△	△		△	鉄骨部 △	鉄骨部 ▲
	取水構造物			気中帯* ○	気中帯* 干満帯* 海中帯* ○		△	△		△		
	取水構造物 （1・2号炉）			気中帯* ○	気中帯* 干満帯* 海中帯* ○		△	△		△		
	タービン建屋			タービン架台* ○		タービン架台* ○	タービン架台 △	タービン架台 △			鉄骨部 △	鉄骨部 ▲

○：高経年化対策上着目すべき経年劣化事象（表中の○に対応する代表構造物：評価対象とする構造物）

△：高経年化対策上着目すべき経年劣化事象ではない事象（日常劣化管理事象）

▲：高経年化対策上着目すべき経年劣化事象ではない事象（日常劣化管理事象以外）

*：評価対象部位

4. 代表構造物の技術評価

4.1 コンクリートの強度低下

4.1.1 熱による強度低下

(1) 評価の概要

評価対象部位は、代表構造物のうち、運転時に最も高温状態となる内部コンクリートの（1次遮蔽壁）とした。

評価点は、ガンマ発熱の影響の最も大きい炉心領域部および原子炉容器サポート（RVサポート）直下部とした。1次遮蔽壁の概要を図1に示す。

評価については、コンクリートの温度制限値と温度分布解析の結果を比較した。

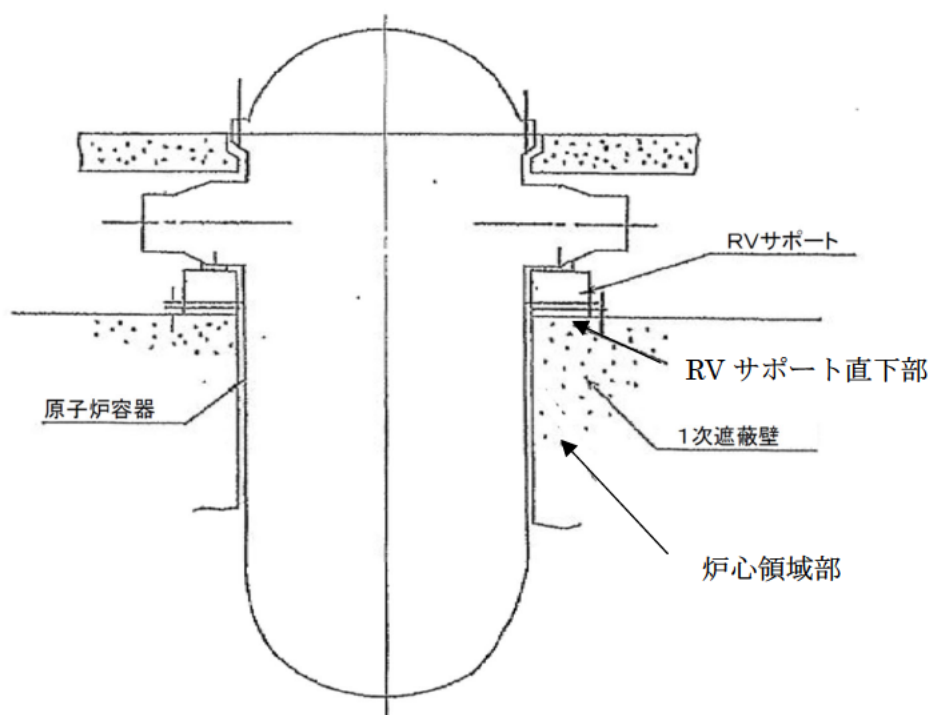


図1 1次遮蔽壁の概要

(2) 評価結果

解析の結果、コンクリートの最高温度は約56℃であり、制限値¹⁾である65℃以下であるため、健全性評価上問題とはならない。

なお、強度・機能に影響を及ぼさない範囲で熱の評価点に最も近い位置から採取したコアサンプルについて、特別点検において強度試験を行った結果、平均圧縮強度が設計基準強度を上回っていることを確認した（表 11）。

表 11 熱の評価点近傍におけるコンクリートの強度試験結果

	実施時期	平均圧縮強度	設計基準強度
内部コンクリート (1次遮蔽壁)	2022年	37.7 N/mm ²	24.5 N/mm ²

また、運転時に高温状態となる内部コンクリートにおいては、定期的な目視確認を実施しているが、熱に起因すると考えられるひび割れ等の有意な欠陥は認められていない。

4.1.2 放射線による強度低下

(1) 評価の概要

評価対象部位を内部コンクリートの1次遮蔽壁、評価点を中性子およびガンマ線照射量が最大となる1次遮蔽壁炉心側コンクリートとした。

評価については、評価点における運転開始後60年時点で予想される中性子照射量およびガンマ線照射量と、既往の知見によりコンクリート強度の低下が確認されている中性子照射量およびガンマ線照射量の閾値を比較した。

(2) 評価結果

a) 中性子照射量

中性子照射と強度の関係に関しては、従来 Hilsdorf 他の文献²⁾における「中性子照射したコンクリートの圧縮強度 (fcu) と照射しないコンクリートの圧縮強度 (fcuo) の変化」を参照していた。一方、小嶋ほかの試験結果³⁾を踏まえた最新知見によると、コンクリートの圧縮強度は、およそ $1 \times 10^{19} \text{n/cm}^2$ ($E > 0.1 \text{ MeV}$) の中性子照射量から低下する可能性が確認されている。

高浜4号炉の運転開始後60年時点における中性子照射量は約 $5.62 \times 10^{19} \text{n/cm}^2$ ($E > 0.098 \text{ MeV}$) で、照射量が $1 \times 10^{19} \text{n/cm}^2$ ($E > 0.098 \text{ MeV}$) を超える範囲は、1次遮蔽壁の厚さ(最小壁厚279cm)に比べて小さく、深さ方向に最大でも12cm程度であることを踏まえ、耐力評価として、保守的に内部コンクリート(1次遮蔽壁)からこの範囲を除いても、コンクリートの圧縮耐力が地震時の鉛直荷重などの設計荷重を上回ることを踏まえ、また、日本電気協会「原子力発電所耐震設計技術指針 (JEAG 4601-1987)」に基づく内部コンクリートの最大せん断ひずみ評価に対して影響がないことを確認している。

b) ガンマ線照射量

ガンマ線照射量と強度の関係に関する Hilsdorf 他の文献²⁾によると、少なくとも $2 \times 10^8 \text{ Gy}$ ($2 \times 10^{10} \text{ rad}$) 程度のガンマ線照射量では有意な強度低下はみられない。

高浜4号炉の運転開始後60年時点におけるガンマ線照射量は約 $1.75 \times 10^{10} \text{ rad}$ で、照射量が $2 \times 10^{10} \text{ rad}$ を下回っていることから、内部コンクリート(1次遮蔽壁)の強度への影響はないものと考えられる。

以上から、放射線照射による強度低下に対しては、健全性評価上問題とはならない。

なお、強度・機能に影響を及ぼさない範囲で放射線照射の評価点に最も近い位置から採取したコアサンプルについて、特別点検において強度試験を行った結果、平均圧縮強度が設計基準強度を上回っていることを確認した（表 12）。

表 12 放射線照射の評価点近傍におけるコンクリートの強度試験結果

	実施時期	平均圧縮強度	設計基準強度
内部コンクリート (1次遮蔽壁)	2022年	37.7 N/mm ²	24.5 N/mm ²

また、運転時に放射線照射の影響を受ける内部コンクリートにおいては、定期的な目視確認を実施しているが、放射線照射に起因すると考えられるひび割れ等の有意な欠陥は認められていない。

4.1.3 中性化による強度低下

(1) 評価の概要

評価対象部位の候補として、代表構造物全て（外部遮蔽壁、内部コンクリート、原子炉格納施設基礎、原子炉補助建屋、取水構造物およびタービン建屋）が該当する。

このうち、評価点として、空気環境の違いが中性化の進展に影響を与えることを踏まえ、屋内については空気環境の実測値を踏まえた中性化への影響度が最も大きい内部コンクリート、屋外については空気環境に大きな違いが生じないため空気との接触時間が長い取水構造物のうち気中帯を選定した。加えて特別点検の実測値が最大であったタービン建屋のうちタービン架台を選定した。

さらに、運転開始後の経過年が大きい原子炉補助建屋（1・2号炉）および取水構造物（1・2号炉）についても評価対象とし、高浜1・2号炉における特別点検の結果を踏まえ、原子炉補助建屋（1・2号炉）（基礎マット）および取水構造物（1・2号炉）（気中帯）をそれぞれ評価対象として選定した。

評価については、以下の手順にて実施した。

a) 運転開始後60年時点における中性化深さの算出

中性化深さの実測値、空気環境測定値などを入力とした中性化速度式（岸谷式⁴⁾（原子炉補助建屋（1・2号炉）（基礎マット）および取水構造物（1・2号炉）（気中帯）のみ）、森永式⁵⁾および実測値に基づく \sqrt{t} 式⁶⁾により、運転開始後60年経過時点の中性化深さを算出

b) 最大中性化深さ推定値の抽出

中性化速度式により得られる中性化深さのうち、最大値となる中性化深さを抽出

c) 鉄筋が腐食し始める時の中性化深さの算出

鉄筋が腐食し始める時の中性化深さとして、屋内はかぶり厚さに2cmを加えた値、屋外はかぶり厚さの値をそれぞれ算出

d) 運転開始後60年経過時点の中性化深さの評価

b)とc)の中性化深さを比較

(2) 評価結果

表13に示すとおり、運転開始後60年経過時点における中性化深さが最大となる評価点において、鉄筋が腐食し始める時点の中性化深さを下回っていることから、健全性評価上問題とはならない。

表 13 運転開始後 60 年後時点と鉄筋が腐食し始める時点の中性化深さの比較

	調査時点の中性化深さ			4 号炉運転開始後 60 年経過時点の 中性化深さ (cm) (推定式)	鉄筋が腐食 し始める時の 中性化深さ (cm)
	経過年数	実測値 (cm)	推定値 (cm) (推定式)		
タービン建屋 (タービン架台)	36 年	3.9	2.4 (森永式)	5.0 ^{*4} (\sqrt{t} 式)	8.5
内部コンクリート (ループ室)	37 年	0.2	2.4 (森永式)	3.0 ^{*4} (森永式)	8.8
取水構造物 (気中帯)	36 年	0.5	0.6 (森永式)	0.7 ^{*4} (\sqrt{t} 式)	8.5
原子炉補助建屋 (1・2号炉) (基礎マット)	29 年 ^{*1}	3.5	4.4 ^{*3} (岸谷式)	5.8 ^{*5*6} (岸谷式)	10.0
取水構造物 (1・2号炉) (気中帯)	29 年 ^{*2}	0.4	2.3 ^{*3} (岸谷式)	3.0 ^{*5*7} (岸谷式)	8.5

- * 1 : 4 号炉運転開始後の経過年数を示す。1 号炉運転開始後の経過年数は 40 年。
- * 2 : 4 号炉運転開始後の経過年数を示す。2 号炉運転開始後の経過年数は 39 年。
- * 3 : 岸谷式および森永式による評価結果のうち最大値を記載
- * 4 : 森永式および実測値に基づく \sqrt{t} 式による評価結果のうち最大値を記載
- * 5 : 岸谷式、森永式および実測値に基づく \sqrt{t} 式による評価結果のうち最大値を記載
- * 6 : 1 号炉運転開始後の経過年数は 71 年。
- * 7 : 2 号炉運転開始後の経過年数は 70 年。

なお、中性化の評価点の一部の近傍から採取したコアサンプルについて、特別点検において強度試験を行った結果、設計基準強度を上回っている (表 14)。

表 14 中性化の評価点 (一部) の近傍におけるコンクリートの強度試験結果

	実施時期	平均圧縮強度	設計基準強度
タービン建屋 (タービン架台)	2022 年	26.7 N/mm ²	20.6 N/mm ²
取水構造物 (気中帯)	2022 年	57.2 N/mm ²	23.5 N/mm ²

4.1.4 塩分浸透による強度低下

(1) 評価の概要

評価対象部位の候補として、代表構造物のうち屋外の構造物である外部遮蔽壁、原子炉補助建屋および取水構造物が該当する。

このうち、海水に接触するため供給塩分量が多い取水構造物を評価対象部位とし、評価点として、最高潮位および最低潮位を考慮したうえで、環境条件が異なる気中帯、干満帯および海中帯を選定した。

評価については、以下の手順にて実施した。

a) 運転開始後60年時点における鉄筋腐食減量の算出

①拡散方程式：点検による塩化物イオン濃度の測定結果をもとに、運転開始経過年ごとの鉄筋位置における塩化物イオン量を算出

②森永式⁵⁾：塩化物イオン量を用いて運転開始経過年数ごとの鉄筋腐食減量を算出

b) かぶりコンクリートにひび割れが発生する時点における鉄筋腐食減量の算出

森永式：鉄筋径およびかぶり厚さを用いて、かぶりコンクリートにひび割れが発生する時点における鉄筋腐食減量を算出

c) 運転開始後60年時点における鉄筋腐食減量の評価

a)とb)の鉄筋腐食減量を比較

(2) 評価結果

表15に示すとおり、運転開始後60年経過時点における鉄筋腐食減量は、かぶりコンクリートにひび割れが発生する時点の鉄筋腐食減量を下回っていることから、健全性評価上問題とはならない。

表 15 運転開始後 60 年経過時点と

かぶりコンクリートにひび割れが発生する時点の鉄筋腐食減量の比較

	経過年数	鉄筋位置での 塩化物イオン 濃度および量 上段 (%) 下段 (kg/m ³)	鉄筋の腐食減量 ($\times 10^{-4}$ g/cm ²)		
			調査時点	4号炉運転 開始後60 年経過時点	かぶりコンク リートにひび 割れが発生す る時点
取水構造物 (気中帯)	36年	0.01 (0.19)	3.0	5.1	90.1
取水構造物 (干満帯)	37年	0.01 (0.27)	7.4	11.8	88.1
取水構造物 (海中帯)	37年	0.04 (1.04)	0.6	1.9	88.1
取水構造物 (1・2号炉) (気中帯)	29年* ²	0.21 (5.11)	10.7	26.6* ⁴	90.1
取水構造物 (1・2号炉) (干満帯)	29年* ¹	0.05 (1.23)	11.4	21.6* ³	90.1
取水構造物 (1・2号炉) (海中帯)	29年* ¹	0.33 (7.83)	7.2	19.3* ³	90.1

*1：4号炉運転開始後の経過年数を示す。1号炉運転開始後の経過年数は40年。

*2：4号炉運転開始後の経過年数を示す。2号炉運転開始後の経過年数は39年。

*3：1号炉運転開始後の経過年数は71年。

*4：2号炉運転開始後の経過年数は70年。

なお、塩分浸透の評価点の一部の近傍から採取したコアサンプルについて、特別点検において強度試験を行った結果、設計基準強度を上回っている(表16)。

表 16 塩分浸透の評価点(一部)の近傍におけるコンクリートの強度試験結果

	実施時期	平均圧縮強度	設計基準強度
取水構造物 (干満帯)	2022年	50.1N/mm ²	23.5N/mm ²
取水構造物 (海中帯)	2022年	41.5N/mm ²	23.5N/mm ²

4.1.5 機械振動による強度低下

(1) 評価の概要

評価対象部位の候補として、振動の影響を受けるタービン架台（タービン建屋）および非常用ディーゼル発電機基礎（原子炉補助建屋）、評価点として、局部的に影響を受ける可能性がある基礎ボルト周辺のコンクリートを評価点として選定した。

(2) 評価結果

60年間の供用を想定すると、基礎ボルト周辺に機械振動によるひび割れが発生し強度低下が生じる可能性は否定できないが、機械振動により機器のコンクリート基礎への定着部の支持力が失われるような場合、機械の異常振動や定着部周辺コンクリート表面に有害なひび割れが発生するものと考えられる。したがって、機械振動による荷重が作用してもコンクリートのひび割れ発生には至らないと考えられるものの、目視確認でひび割れの発生が検知可能である。

定期的な目視確認を実施しているが、機械振動に起因する有害なひび割れなどは発見されていないことから、健全性評価上問題とならない。

4.1.6 コンクリートの強度試験結果

技術的な評価に加え、コンクリート構造物から採取したコアサンプルについて、特別点検において強度試験を行った結果、表 17 に示すとおり、試験結果（平均圧縮強度）が設計基準強度を上回っていることを確認した。

表 17 コンクリートの強度試験結果

代表構造物	実施時期	試験箇所数	平均圧縮強度 (N/mm ²)	設計基準強度 (N/mm ²)
外部遮蔽壁	2022年	3	41.1	24.5
内部コンクリート	2022年	3	37.7	24.5
原子炉格納施設基礎	2022年	3	58.0	24.5
原子炉補助建屋	2022年	12	47.4	24.5
タービン建屋	2022年	9	50.4	20.6
取水構造物	2022年	9	49.6	23.5

4.2 コンクリートの遮蔽能力低下

4.2.1 熱による強度低下

(1) 評価の概要

評価対象部位として内部コンクリートの1次遮蔽壁、評価点として運転時に最も高温となる炉心領域部を選定し、評価については、制限値と温度分布解析の結果を比較した。

(2) 評価結果

解析の結果、コンクリートの最高温度は炉心領域部で約56℃であり、中性子遮蔽の88℃、ガンマ線遮蔽の177℃の制限値⁷⁾以下であることから、健全性評価上問題とはならない。

なお、評価点近傍から採取したコアサンプルについて、特別点検として確認した乾燥単位容積質量は2.260 g/cm³であり、高浜4号機の内部コンクリート（1次遮蔽壁）のコンクリート密度の設計値は2.2 g/cm³である。特別点検として確認した乾燥単位容積質量が工事計画認可申請書に記載されているコンクリート密度を上回っていることから、放射線障害を防止するために必要な遮蔽能力を有することを確認した。

4.3 現状保全

コンクリートの強度低下については、強度に支障をきたす可能性のあるような有意な欠陥がないことを目視点検により定期的に確認し、必要に応じて塗装の塗替えなどの補修を実施している。あわせて、強度に急激な経年劣化が生じていないことを、非破壊試験による点検において、定期的に確認している。

コンクリートの遮蔽能力低下については、遮蔽能力に支障をきたす可能性があるひび割れなどの有意な欠陥がないことを目視点検により定期的に確認している。

4.4 総合評価

コンクリートの強度低下については、現状において、設計基準強度を上回っており、強度低下が急激に発生する可能性は極めて小さいと考えられる。また、ひび割れなどについては目視確認で検知可能であり、必要に応じて塗装の塗替えなどの補修を実施していることから、保全方法は適切であり、現状保全を継続することにより健全性の維持は可能である。

コンクリートの遮蔽能力低下については、現状において要求値を上回っており、今後遮蔽能力低下が急激に発生する可能性は極めて小さいと考えられる。また、ひび割れなどについては目視確認で検知可能であり、保全方法として適切であり、健全性の維持は可能であるとする。

4.5 高経年化への対応

今後も現状の保全方法により健全性を確認していくものとし、現状保全項目に、高経年化対策の観点から追加すべきものはない。

5. 代表構造物以外の評価

グループ内全構造物への展開

コンクリート構造物および鉄骨構造物の技術評価については、代表構造物について、各経年劣化事象に影響を及ぼす要因ごとに使用条件などを考慮して実施しており、グループ内構造物の使用条件は代表構造物の使用条件に含まれているため、技術評価結果も代表構造物の評価結果に含まれた結果となる。

6. まとめ

6.1 審査基準適合性

以上の評価結果について、原子力規制委員会「実用発電用原子炉の運転の期間の延長の審査基準」に規定されている延長しようとする期間における要求事項との対比を表18に示す。

表18 延長しようとする期間における要求事項との対比 (1/4)

審査基準、ガイド	要求事項	劣化状況評価結果	
実用発電用原子炉の運転の期間の延長の審査基準	2. 実用炉規則第113条第2項第2号に掲げる原子炉その他の設備の劣化の状況に関する技術的な評価の結果、延長しようとする期間において、同評価の対象となる機器・構造物が下表に掲げる要求事項(以下「要求事項」という。)に適合すること、又は同評価の結果、要求事項に適合しない場合には同項第3号に掲げる延長しようとする期間における原子炉その他の設備に係る施設管理方針の実施を考慮した上で、延長しようとする期間において、要求事項に適合すること。	-	
	コンクリート構造物 コンクリートの強度低下	熱	○評価対象部位のコンクリートの温度が制限値(貫通部は90℃、その他の部位は65℃)を超えたことがある場合は、耐力評価を行い、その結果、当該部位を構成する部材又は構造体の耐力が設計荷重を上回ることを確認した。
		放射線照射	○評価対象部位の累積放射線照射量が、コンクリート強度に影響を及ぼす可能性のある値を超えている又は超える可能性が認められる場合は、耐力評価を行い、その結果、当該部位を構成する部材又は構造体の耐力が設計荷重を上回ることを確認した。
		中性化	○評価対象部位の中性化深さが、鉄筋が腐食し始める深さまで進行しているか又は進行する可能性が認められる場合は、耐力評価を行い、その結果、当該部位を構成する部材又は構造体の耐力が設計荷重を上回ることを確認した。
		塩分浸透	○評価対象部位に塩分浸透による鉄筋腐食により有意なひび割れが発生しているか又は発生する可能性が認められる場合は、耐力評価を行い、その結果、当該部位を構成する部材又は構造体の耐力が設計荷重を上回ることを確認した。
		アルカリ骨材反応	○評価対象部位にアルカリ骨材反応による有意なひび割れが発生している場合は、耐力評価を行い、その結果、当該部位を構成する部材又は構造体の耐力が設計荷重を上回ることを確認した。
		機械振動	○評価対象機器のコンクリート基礎への定着部周辺コンクリート表面に機械振動による有意なひび割れが発生している場合は、耐力評価を行い、その結果、当該部位を構成する部材又は構造体の耐力が設計荷重を上回ることを確認した。
凍結融解		○評価対象部位に凍結融解による有意なひび割れが発生している場合は、耐力評価を行い、その結果、当該部位を構成する部材又は構造体の耐力が設計荷重を上回ることを確認した。	
		「4.1.1 熱による強度低下」に示すとおり、評価対象部位のコンクリート温度が制限値以下であることを確認した。	
		「4.1.2 放射線による強度低下」に示すとおり、評価対象部位における中性子照射量がコンクリート強度に影響を及ぼす可能性のある値を超える部分があるため、構造体の耐力が設計荷重を上回ることを確認した。	
		「4.1.3 中性化による強度低下」に示すとおり、評価対象部位の中性化深さが、鉄筋が腐食し始める深さまで進行する可能性が認められないことを確認した。	
		「4.1.4 塩分浸透による強度低下」に示すとおり、評価対象部位に塩分浸透による鉄筋腐食によりひび割れが発生する可能性が認められないことを確認した。	
		「3.2 高経年化対策上着目すべき経年劣化事象の抽出」に示すとおり、アルカリ骨材反応に起因すると判断されるひび割れ等は認められておらず、使用している骨材が反応性骨材ではないことを確認している。また、特別点検においてコンクリート構造物の健全性に影響を与えるような反応性がないことを確認した。以上から、今後も経年劣化の進展が考えられない、または進展傾向が極めて小さいと考えられることから、高経年化対策上着目すべき劣化事象ではないと判断した。	
		「4.1.5 機械振動による強度低下」に示すとおり、評価対象機器のコンクリート基礎への定着部周辺コンクリート表面に機械振動による有意なひび割れが認められていないことを確認した。	
		「3.2 高経年化対策上着目すべき経年劣化事象の抽出」に示すとおり、高浜4号炉は凍害危険度が設定されておらず、当該の予想程度が「ごく軽微」とされる凍害危険度1よりさらに危険度が低く、凍結融解に起因すると判断されるひび割れ等は認められていないことから、今後も経年劣化の進展が考えられない、または進展傾向が極めて小さいと考えられるため、高経年化対策上着目すべき劣化事象ではないと判断した。	

表 18 延長しようとする期間における要求事項との対比 (2/4)

審査基準、ガイド	要求事項			劣化状況評価結果
<p>実用発電用原子炉の運転の期間の延長の審査基準</p>	<p>コンクリート構造物</p>	<p>遮蔽能力低下 コンクリートの</p>	<p>熱</p> <p>○中性子遮蔽のコンクリートの温度が88℃又はガンマ線遮蔽のコンクリートの温度が177℃を超えたことがある場合は、評価を行い、その結果、当該部位を構成する部材又は構造体の遮蔽能力が原子炉設置(変更)許可における遮蔽能力を下回らないこと。</p>	<p>「4.2 コンクリートの遮蔽能力低下」に示すとおり、中性子遮蔽のコンクリートの温度が88℃以下、またガンマ線遮蔽のコンクリート温度が177℃以下であることを確認した。</p>
		<p>鉄骨の強度低下</p>	<p>腐食</p> <p>○評価対象部位に腐食による断面欠損が生じている場合は、耐力評価を行い、その結果、当該部位を構成する部材又は構造体の耐力が設計荷重を上回ること。</p>	<p>「3.2 高経年化対策上着目すべき経年劣化事象の抽出」に示すとおり、鉄骨は塗装により腐食を防止しており、塗膜が健全であれば腐食進行の可能性は小さい。また、定期的な目視確認により塗膜の状態を確認し、鋼材の腐食に影響する塗膜の劣化などが認められた場合は補修を実施することとしていることから、想定した劣化傾向と実際の劣化傾向の乖離が考えがたい経年劣化事象であって、想定した劣化傾向などに基づき適切な保全活動を行っているため、高経年化対策上着目すべき劣化事象ではないと判断した。</p>
		<p>風などによる疲労</p>	<p>○評価対象部位に風などの繰り返し荷重による疲労破壊が発生している又は発生する可能性が認められる場合は、耐力評価を行い、その結果、当該部位を構成する部材又は構造体の耐力が設計荷重を上回ること。</p>	<p>「3.2 高経年化対策上着目すべき経年劣化事象の抽出」に示すとおり、煙突などの形状の構造物は、比較的アスペクト比(高さの幅に対する比)が大きく、風の直行方向に振動が発生する恐れがある。アスペクト比が4以上の構造物が風による振動の検討が必要とされているが、鉄骨構造物にアスペクト比が4以上の構造物はないことから、今後も経年劣化の進展が考えられない、または進展傾向が極めて小さいと考えられるため、高経年化対策上着目すべき劣化事象ではないと判断した。</p>

表 18 延長しようとする期間における要求事項との対比 (3/4)

審査基準、ガイド	要求事項	劣化状況評価結果
<p>实用発電用原子炉の運転期間延長認可申請に係る運用ガイド</p>	<p>3. 2 (1) 「延長しようとする期間における運転に伴い生ずる原子炉その他の設備の劣化の状況に関する技術的な評価」(以下「劣化状況評価」という。)の記載内容について評価の対象とする機器・構造物及び評価手法は、实用炉規則第82条第2項に規定する運転開始後40年を迎える発電用原子炉に係る発電用原子炉施設についての経年劣化に関する技術的な評価におけるものと同様とする。特に運転期間延長認可申請に伴うものとして評価を行い、その結果の記載が求められる事項は次のとおり。</p> <p>①上記3. 1の特別点検の結果を踏まえた劣化状況評価。</p> <p>④实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(平成25年原子力規制委員会規則第6号。以下「技術基準規則」という。)(運転開始以後40年を経過する日において適用されているものに限る。)に定める基準に照らした評価。</p>	<p>「4. 代表構造物の技術評価」に示すとおり、代表構造物について特別点検を踏まえた劣化状況評価を実施した。</p>
<p>实用発電用原子炉施設における高経年化対策審査ガイド</p>	<p>3. 3 (1) 「延長しようとする期間における原子炉その他の設備に係る施設管理方針」(以下「施設管理方針」という。)の策定に係る手法は、实用炉規則第82条第2項に規定する運転開始後40年を迎える発電用原子炉に係る発電用原子炉施設についての施設管理に関する方針の策定と同様とする。特に運転期間延長認可申請に伴い策定するものとして記載が求められる事項は次のとおり。なお、3. 2 (2) ⑩の評価結果を申請の補正として示す場合には、当該評価結果に関する施設管理方針について、当該評価結果と合わせて申請の補正として示すことができる。</p> <p>①上記3. 2の劣化状況評価を踏まえた施設管理方針。</p> <p>3. 高経年化技術評価等の審査の視点・着眼点</p> <p>(1) 高経年化技術評価の審査</p> <p>⑫健全性の評価</p> <p>実施ガイド3. 1⑤に規定する期間の満了日までの期間について、高経年化対策上着目すべき経年劣化事象の発生又は進展に係る健全性を評価していることを審査する。</p> <p>⑬現状保全の評価</p> <p>健全性評価結果から現状の保全策の妥当性が評価されていることを審査する。</p> <p>⑭追加保全策の抽出</p> <p>現状保全の評価結果から、現状保全に追加する必要がある新たな保全策が抽出されていることを審査する。</p> <p>(2) 長期施設管理方針の審査</p> <p>①長期施設管理方針の策定</p> <p>すべての追加保全策について長期施設管理方針として策定されているかを審査する。</p>	<p>「4.5 高経年化への対応」に示すとおり、現状保全項目に、高経年化対策の観点から追加すべきものはなく、施設管理に関する方針として策定する事項はなかった。</p> <p>「4. 代表構造物の技術評価」に示すとおり、代表構造物について運転開始後60年時点を想定した健全性評価を実施した。</p> <p>「4.3 現状保全」に示すとおり、健全性評価結果から、現状の保全策が妥当であることを確認した。</p> <p>「4.5 高経年化への対応」に示すとおり、現状保全項目に、高経年化対策の観点から追加すべき新たな保全策はなかった。</p> <p>「4.5 高経年化への対応」に示すとおり、現状保全項目に、高経年化対策の観点から追加すべきものはなく、施設管理に関する方針として策定する事項はなかった。</p>

表 18 延長しようとする期間における要求事項との対比 (4/4)

審査基準、ガイド	要求事項	劣化状況評価結果
	<p>3.1 高経年化技術評価の実施及び見直し 高経年化技術評価の実施及び見直しに当たっては、以下の要求事項を満たすこと。</p> <p>⑤ 抽出された高経年化対策上着目すべき経年劣化事象について、以下に規定する期間の満了日までの期間について機器・構造物の健全性評価を行うとともに、必要に応じ現状の施設管理に追加すべき保全策（以下「追加保全策」という。）を抽出すること。</p> <p>ロ 実用炉規則第82条第2項又は第3項の規定に基づく高経年化技術評価プラントの運転を開始した日から40年間に同条第2項又は第3項に規定する延長する期間を加えた期間</p>	<p>「4.5 高経年化への対応」に示すとおり、現状保全項目に、高経年化対策の観点から追加する新たな保全策はなかった。</p>
<p>実用発電用原子炉施設における高経年化対策実施ガイド</p>	<p>3.2 長期施設管理方針の策定及び変更 長期施設管理方針の策定及び変更に当たっては、以下の要求事項を満たすこと。</p> <p>①高経年化技術評価の結果抽出された全ての追加保全策（発電用原子炉の運転を断続的に行うことを前提として抽出されたもの及び冷温停止状態が維持されることを前提として抽出されたものの全て。）について、発電用原子炉ごとに、施設管理の項目及び当該項目ごとの実施時期を規定した長期施設管理方針を策定すること。</p> <p>なお、高経年化技術評価の結果抽出された追加保全策について、発電用原子炉の運転を断続的に行うことを前提とした評価から抽出されたものと冷温停止状態が維持されることを前提とした評価から抽出されたもの間で、その対象の経年劣化事象及び機器・構造物の部位が重複するものについては、双方の追加保全策を踏まえた保守的な長期施設管理方針を策定すること。</p>	<p>「4.5 高経年化への対応」に示すとおり、現状保全項目に、高経年化対策の観点から追加すべきものはなく、施設管理に関する方針として策定する事項はなかった。</p>

6.2 施設管理に関する方針として策定する事項

コンクリート構造物および鉄骨構造物に関する評価について、施設管理に関する方針として策定する事項は抽出されなかった。

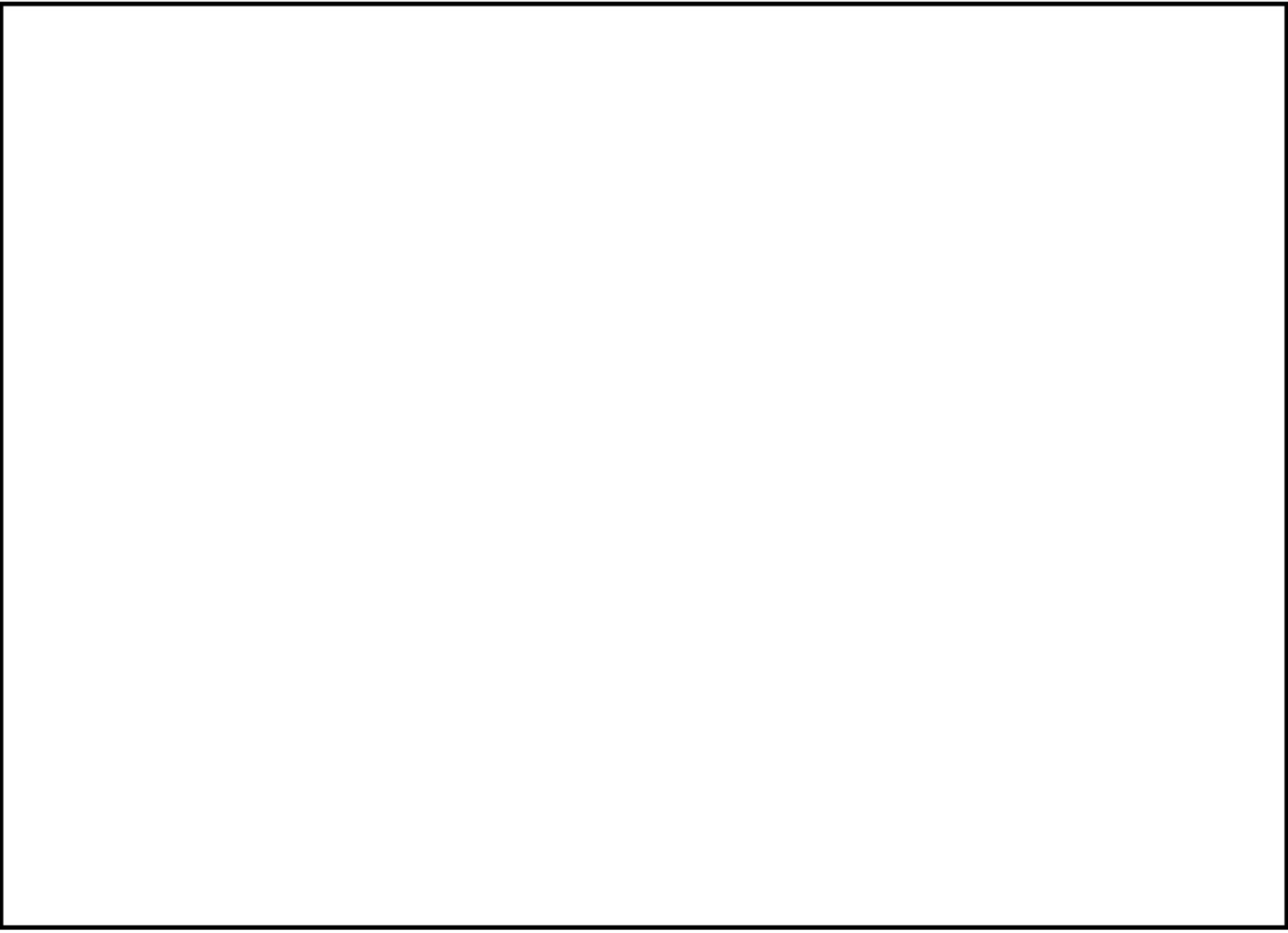
【参考文献】

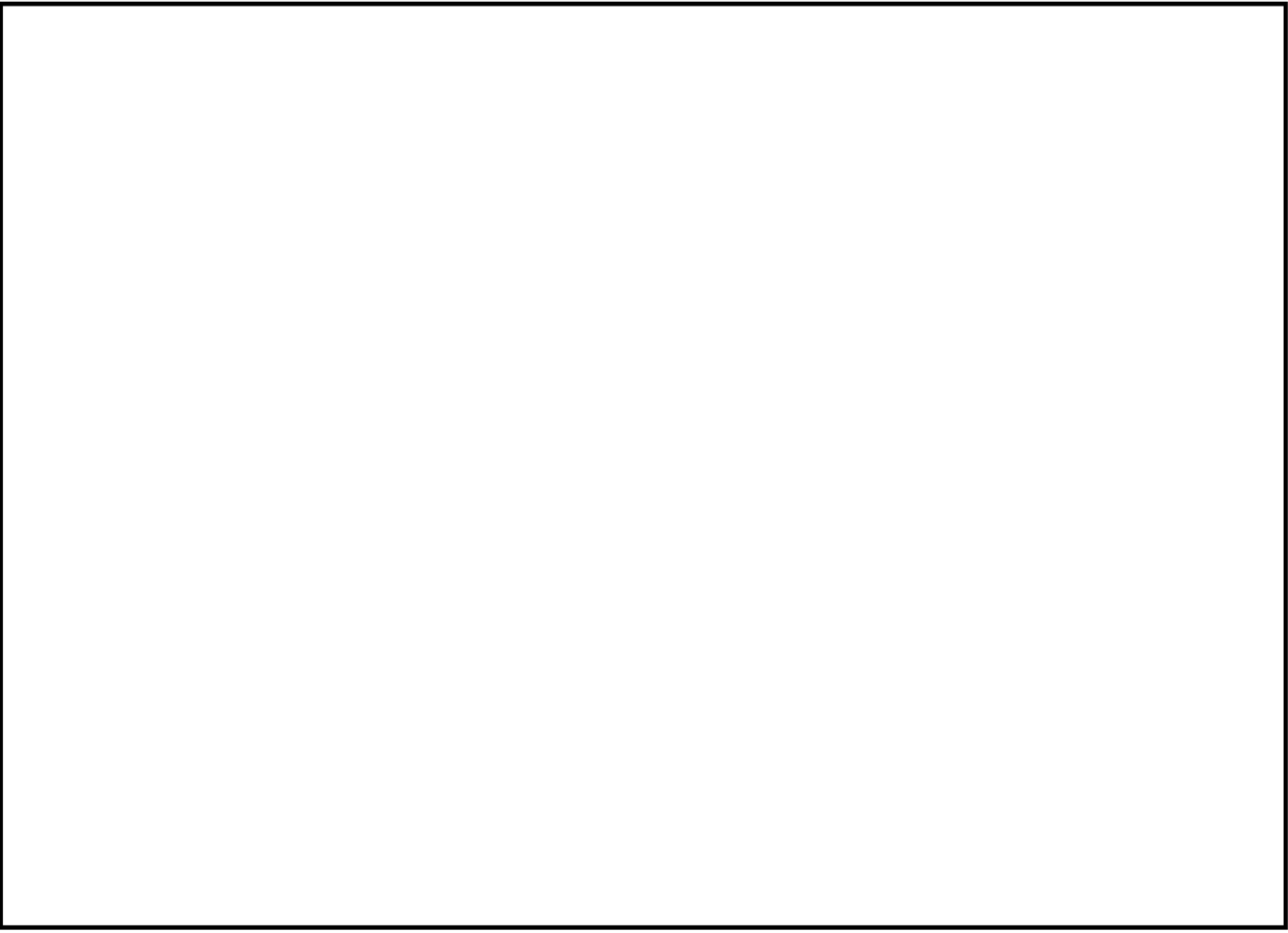
- 1) 日本建築学会「原子炉建屋構造設計指針・同解説（1988）」
- 2) Hilsdorf、Kropp、and Koch、「The Effects of Nuclear Radiation on the Mechanical Properties of Concrete」、American Concrete Institute Publication、SP 55-10. 1978
- 3) 小嶋他、NTEC-2019-1001「中性子照射がコンクリートの強度に及ぼす影響(2019)」
- 4) 日本建築学会「高耐久性鉄筋コンクリート造設計施工指針（案）・同解説（1991）」
- 5) 森永繁「鉄筋の腐食速度に基づいた鉄筋コンクリート建築物の寿命予測に関する研究—東京大学学位論文（1986）」
- 6) 土木学会「コンクリート標準示方書 維持管理編（2013）」
- 7) 「コンクリート遮蔽体設計規準」(R. G. Jaeger et al. 「Engineering Compendium on Radiation Shielding (ECRS) VOL. 2」)

タイトル	高浜 3 号炉の劣化状況評価との相違点について
説明	<p>高浜 3 号炉と高浜 4 号炉の劣化状況評価（コンクリート）において、差異を以下に記す。</p> <p>1. 評価対象設備の差</p> <p>① 対象構造物の差 高浜 4 号炉の評価対象設備の構成は、高浜 3 号炉と相違ない。 3・4 号共用設備（1・2・3・4 号共用設備を含む。）は、3 号炉、4 号炉ともに対象構造物としている。 高浜 3 号炉および 4 号炉の建屋の評価範囲の区分については、添付－2 に示す。</p> <p>② 設備仕様の差 なし</p> <p>2. 評価手法の差 なし</p> <p>3. 評価条件の差 評価条件の差として挙げられるのは、以下のものがある。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・中性化による強度低下： 中性化深さの測定値、環境条件および測定年 ・塩分浸透による強度低下： 鉄筋位置での塩化物イオン濃度（塩化物量）および測定年 <p>4. 評価結果の差 設備仕様の差、評価条件の差によって、総合評価、高経年化への対応に差の生じるものはない。</p> <p style="text-align: right;">以 上</p> <p>添付－1 高浜 3 号炉の劣化状況評価との相違点 添付－2 建屋の評価範囲の区分</p>

表 高浜3号炉の劣化状況評価との相違点（評価条件の差）

相違点		3号炉	4号炉	備考
評価条件の差	中性化による強度低下	原子炉補助建屋（基礎マット） 中性化深さ測定値：2.4cm 測定年：運転開始後37年経過時点 温度：21.6℃ 相対湿度：59.0% CO ₂ 濃度：0.042% 原子炉補助建屋（内壁及び床） 中性化深さ測定値：0.3cm 測定年：運転開始後36年経過時点 温度：36.1℃ 相対湿度：20.9% CO ₂ 濃度：0.045% 取水構造物（気中帯） 中性化深さ測定値：0.5cm 測定年：運転開始後37年経過時点 温度：16.0℃ 相対湿度：75.9% CO ₂ 濃度：0.041%	タービン建屋（タービン架台） 中性化深さ測定値：3.9cm 測定年：運転開始後36年経過時点 温度：28.8℃ 相対湿度：41.2% CO ₂ 濃度：0.041% 内部コンクリート（ループ室） 中性化深さ測定値：0.2cm 測定年：運転開始後37年経過時点 温度：32.7℃ 相対湿度：16.7% CO ₂ 濃度：0.042% 取水構造物（気中帯） 中性化深さ測定値：0.5cm 測定年：運転開始後36年経過時点 温度：16.0℃ 相対湿度：75.9% CO ₂ 濃度：0.041%	原子炉補助建屋（1・2号炉）（基礎マット）および取水構造物（1・2号炉）は相違なし
	塩分浸透による強度低下	取水構造物（気中帯） 塩化物イオン濃度（塩化物量）測定値： 0.02%（0.47kg/m ³ ） 測定年：運転開始後37年経過時点 取水構造物（干満帯） 塩化物イオン濃度（塩化物量）測定値： 0.02%（0.47kg/m ³ ） 測定年：運転開始後37年経過時点 取水構造物（海中帯） 塩化物イオン濃度（塩化物量）測定値： 0.01%（0.20kg/m ³ ） 測定年：運転開始後37年経過時点	取水構造物（気中帯） 塩化物イオン濃度（塩化物量）測定値： 0.01%（0.19kg/m ³ ） 測定年：運転開始後36年経過時点 取水構造物（干満帯） 塩化物イオン濃度（塩化物量）測定値： 0.01%（0.27kg/m ³ ） 測定年：運転開始後37年経過時点 取水構造物（海中帯） 塩化物イオン濃度（塩化物量）測定値： 0.04%（1.04kg/m ³ ） 測定年：運転開始後37年経過時点	取水構造物（1・2号炉）は相違なし





タイトル	社内標準における目視点検の項目、方法および判定基準について
説明	<p>「原子力発電所 土木設備点検要綱指針」および「原子力発電所 建築設備点検要綱指針」に基づき定期的を実施する目視点検の項目、方法および判定基準を以下に示す。</p> <p>添付 1 定期点検標準（土木設備）（抜粋）</p> <p>添付 2 建築設備の定期点検内容一覧表（建築設備）（コンクリート構造物および鉄骨構造物（抜粋））</p> <p>添付 3 建物設備（部位）と確認内容（建築設備）（コンクリート構造物および鉄骨構造物（抜粋））</p> <p>添付 4 目視点検によるコンクリート構造物の劣化の評価基準（土木設備・建築設備共通）</p>

定期点検標準 (土木設備) (抜粋)

(設備箇所については、他施設にも準用出来る。)

設備箇所		点検事項	点検頻度	点検方法	備考
1. 取水設備	陸上部				
	海上部				
	水中部				
	水路部 (内部)				
4. タンク基礎					
10. 防波堤	陸上部				
	海上部				

設備箇所		・点検事項	点検頻度	・点検方法	備考
10. 防波堤	水中部				
16. 津波防護施設	陸上部				
	土中部				
	水中部				

建築設備の定期点検内容一覧表（建築設備）（コンクリート構造物および鉄骨構造物（抜粋））

点検設備（部位）		点検 頻度	点検方法
建物構造 部分	コンクリート躯体		
	鉄骨造構造体		

建物設備（部位）と確認内容（建築設備）（コンクリート構造物および鉄骨構造物（抜粋））

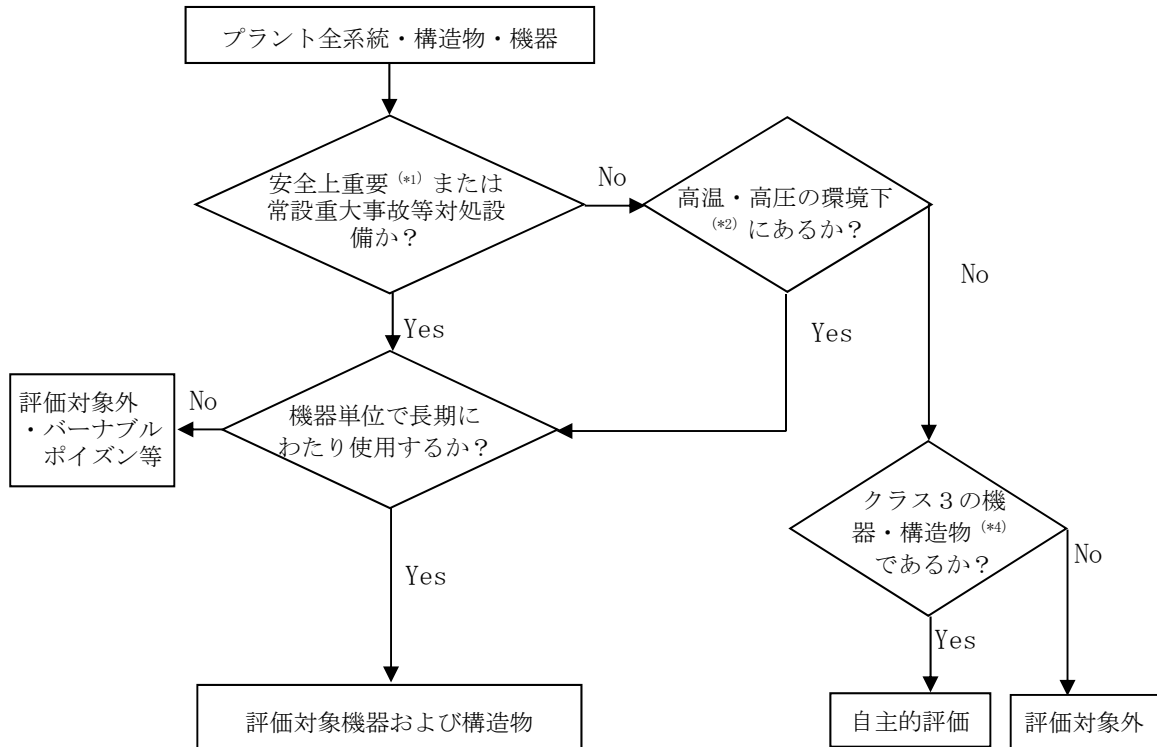
点検設備(部位)	確認内容 (損傷等がある場合はその程度を確認する)	備 考
コンクリート躯体 1) (基礎、壁、柱、床、梁、堰等)		
鉄骨造構造体 (柱、梁、鉄骨架台等)		

目視点検によるコンクリート構造物の劣化の評価基準 (土木設備・建築設備共通)

	内容
評価基準	
参照文献	

タイトル	対象構造物および代表構造物の選定過程について
説明	<p>高浜 4 号炉におけるコンクリート構造物および鉄骨構造物の技術評価について、対象構造物および代表構造物の選定過程を以下に示す。</p> <p>1. 対象構造物の選定</p> <p>対象構造物は、安全重要度分類審査指針*およびこれを踏まえ具体的な分類を示した日本電気協会「安全機能を有する電気・機械装置の重要度分類指針」(JEAG4612-2010)に基づき識別した色塗系統図および原子力保全総合システム(M35)等により抽出される機器・構造物を対象とし、該当する構造物、または該当する機器を支持する構造物を選定した。</p> <p>評価対象となる機器および構造物の抽出フローを添付 1 に示す。</p> <p>※：発電用軽水型原子炉施設の安全機能の重要度分類に関する審査指針(平成2年8月30日原子力安全委員会決定)</p> <p>2. 代表構造物の選定</p> <p>対象構造物の使用条件(高温部の有無、放射線の有無など)の影響の大きさに基づき、代表構造物を選定した。</p> <p style="text-align: right;">以上</p> <p>添付 1 評価対象となる機器および構造物の抽出フロー</p>

評価対象となる機器および構造物の抽出フロー



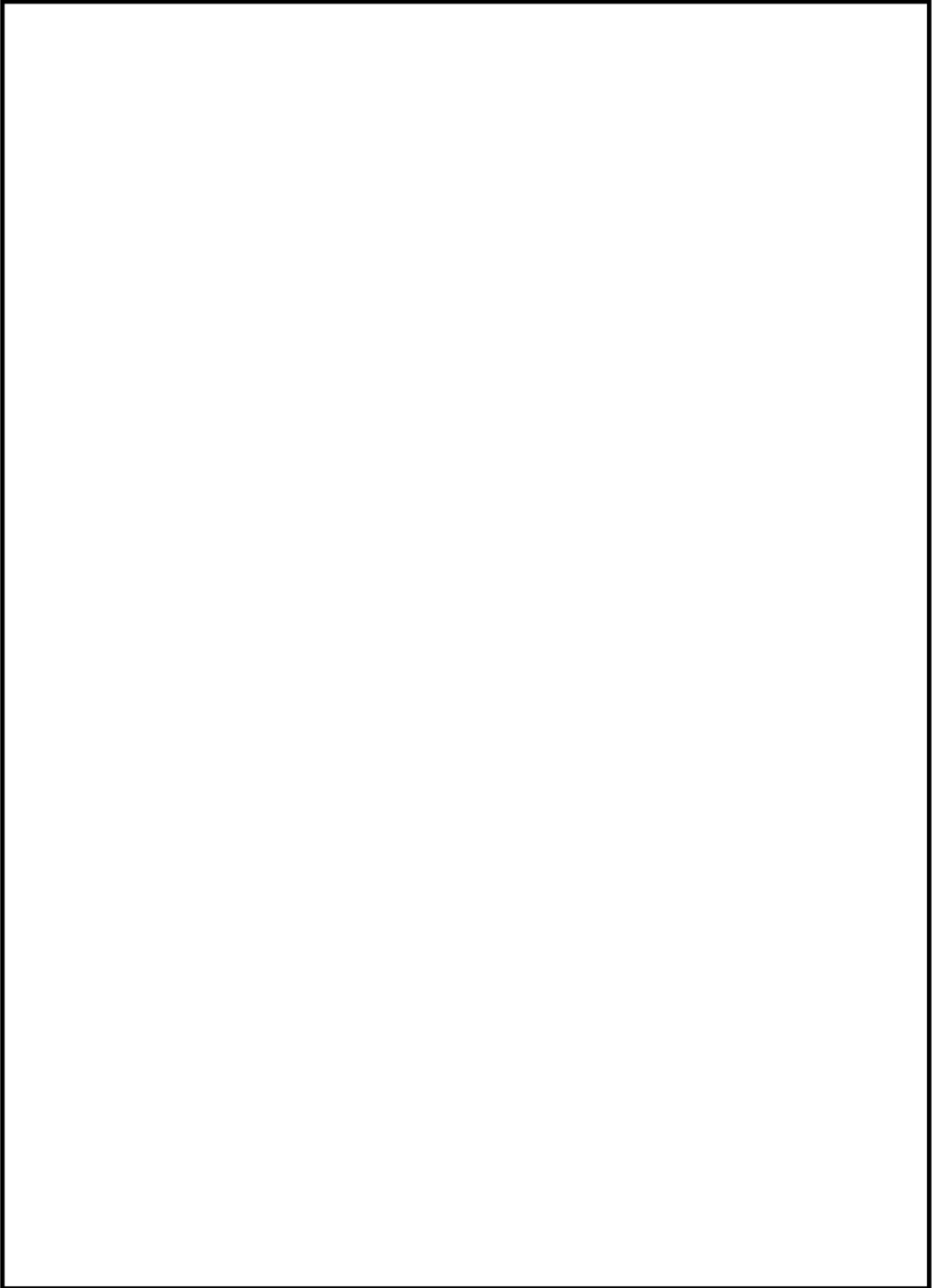
1 重要度分類クラス1および2^()（耐津波安全性評価が必要な浸水防護施設に属する機器および構造物を含む。）

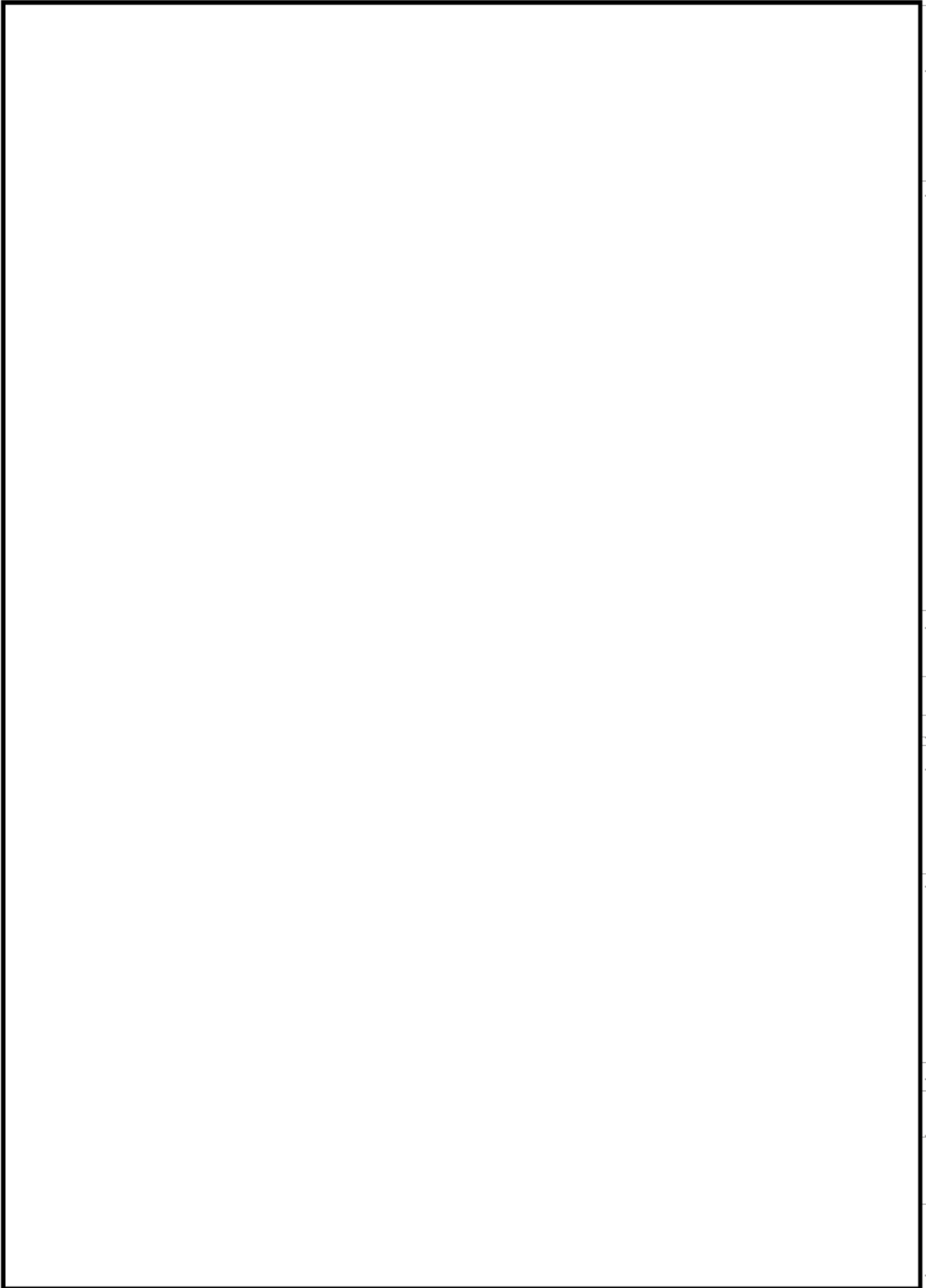
*2 重要度分類クラス3のうち、最高使用温度が95℃を超え、または最高使用圧力が1900kPaを超える環境下にある機器（原子炉格納容器外にあるものに限る）

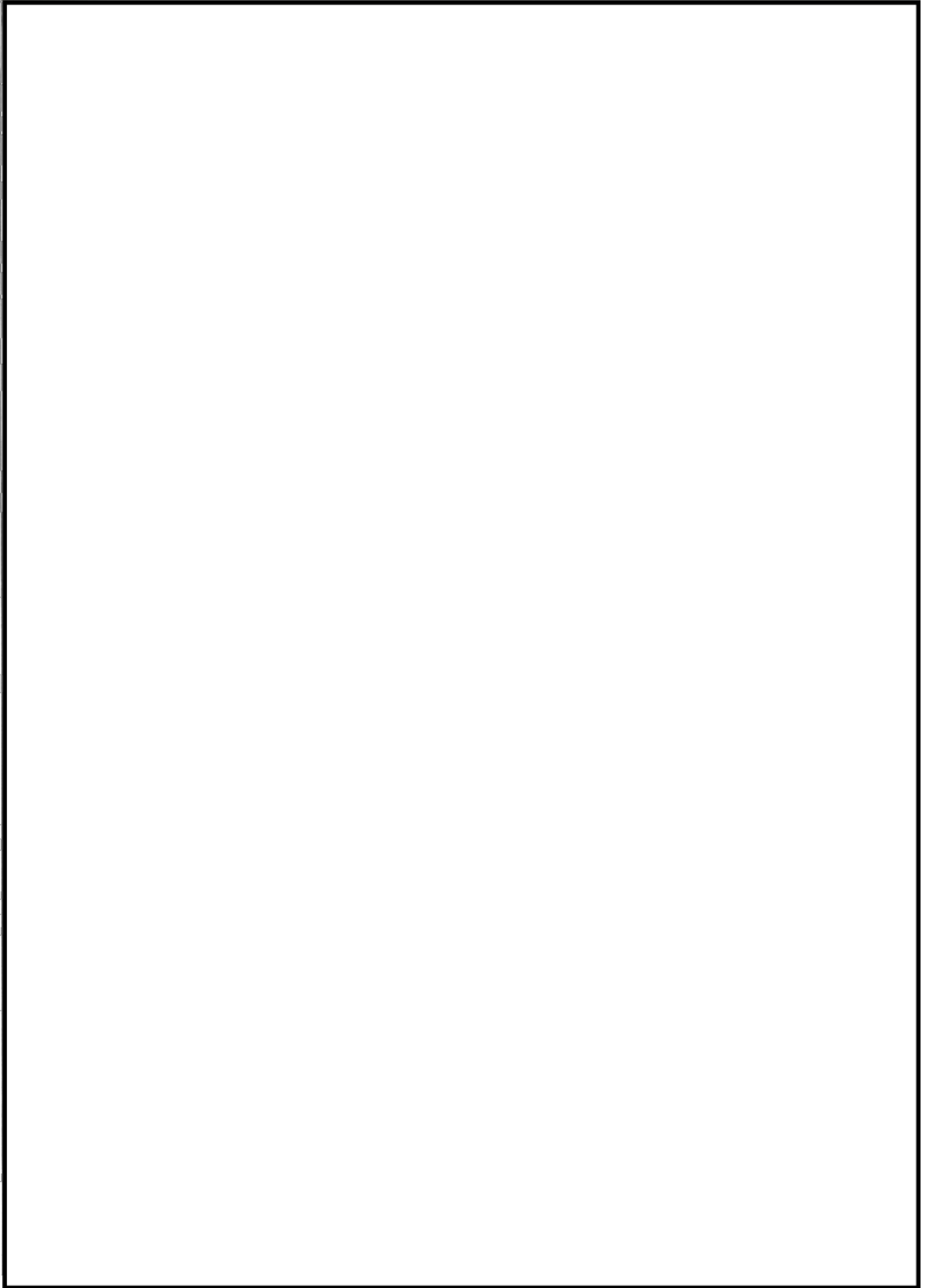
*3 「発電用軽水型原子炉施設の安全機能の重要度分類に関する審査指針」（平成2年8月30日原子力安全委員会決定の重要度分類）

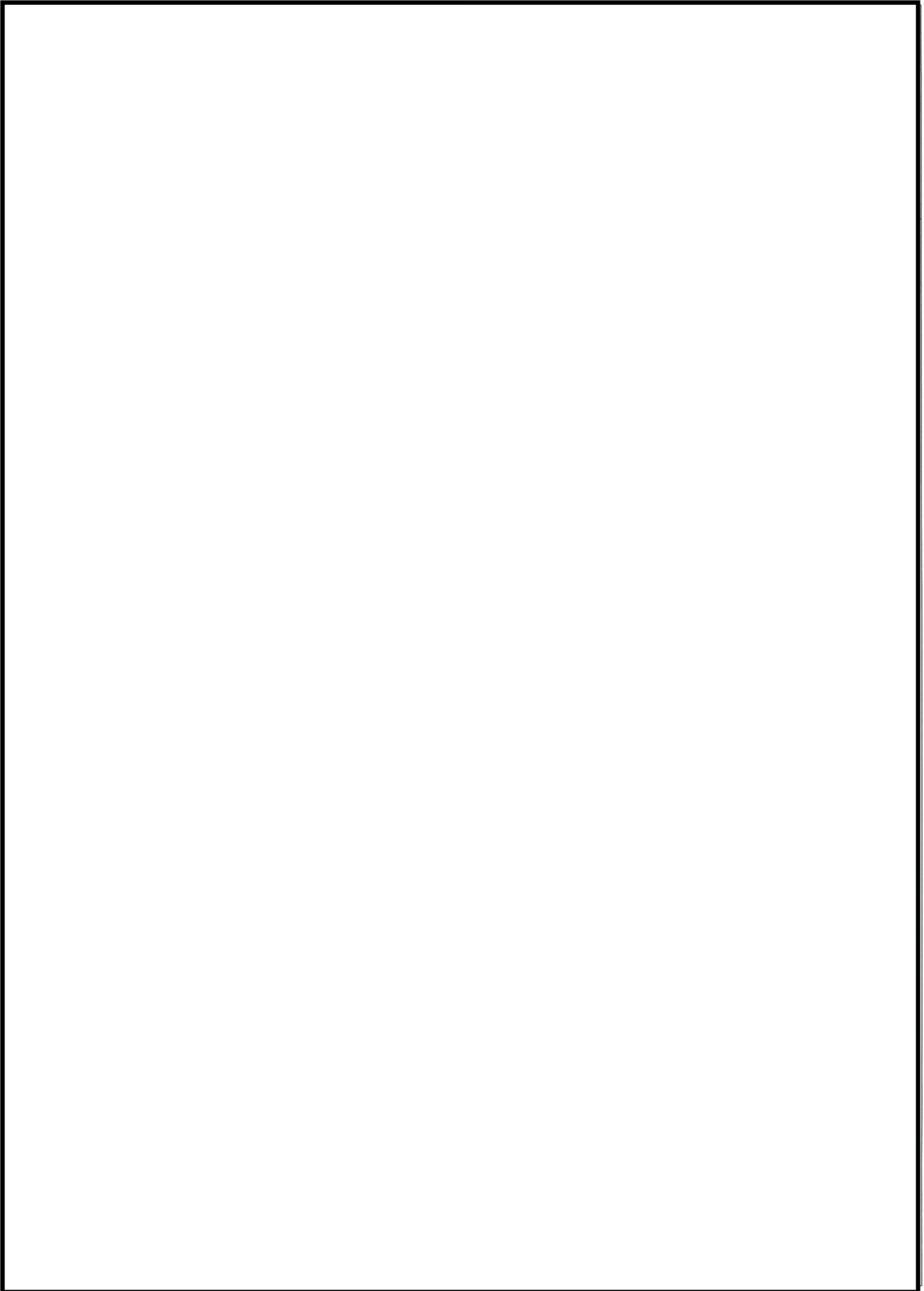
*4 浸水防護施設に属する機器および構造物を含む。

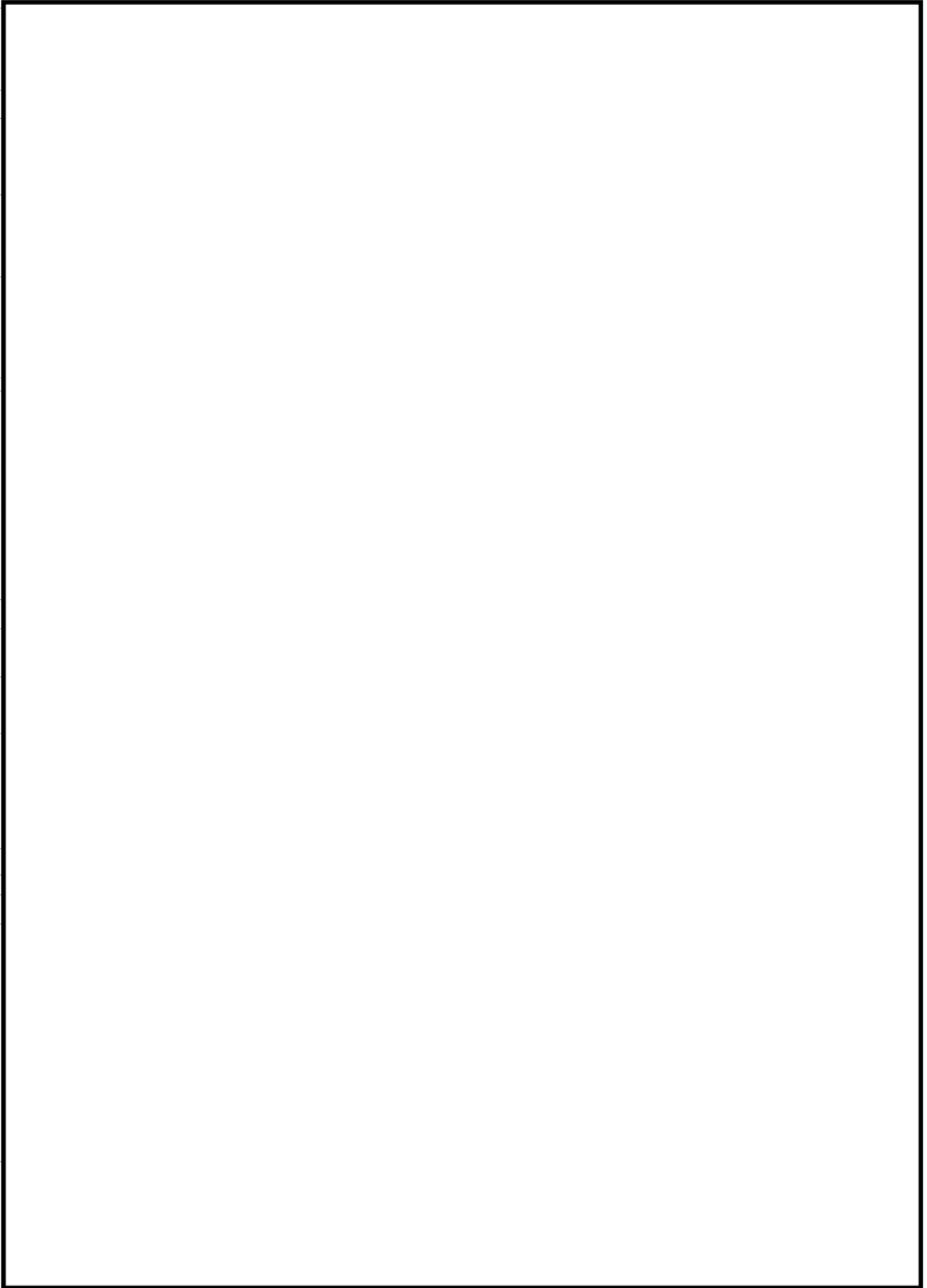
タイトル	耐火能力の考え方および耐火能力が要求されている壁の位置について
説明	<p>コンクリート構造物の耐火能力は、コンクリートの断面厚により確保する設計としている。耐火能力が要求されている壁の位置については、「高浜発電所4号機工事計画認可申請書（関原発第153号平成27年10月9日認可）」、「高浜発電所3号機工事計画認可申請書（関原発第152号平成27年8月4日認可）」、「高浜発電所1号機工事計画認可申請書（関原発第73号平成28年6月10日認可）」および「高浜発電所2号機工事計画認可申請書（関原発第74号平成28年6月10日認可）」に示すとおりである（添付1参照）。</p> <p>添付1 火災区域などの位置図</p>

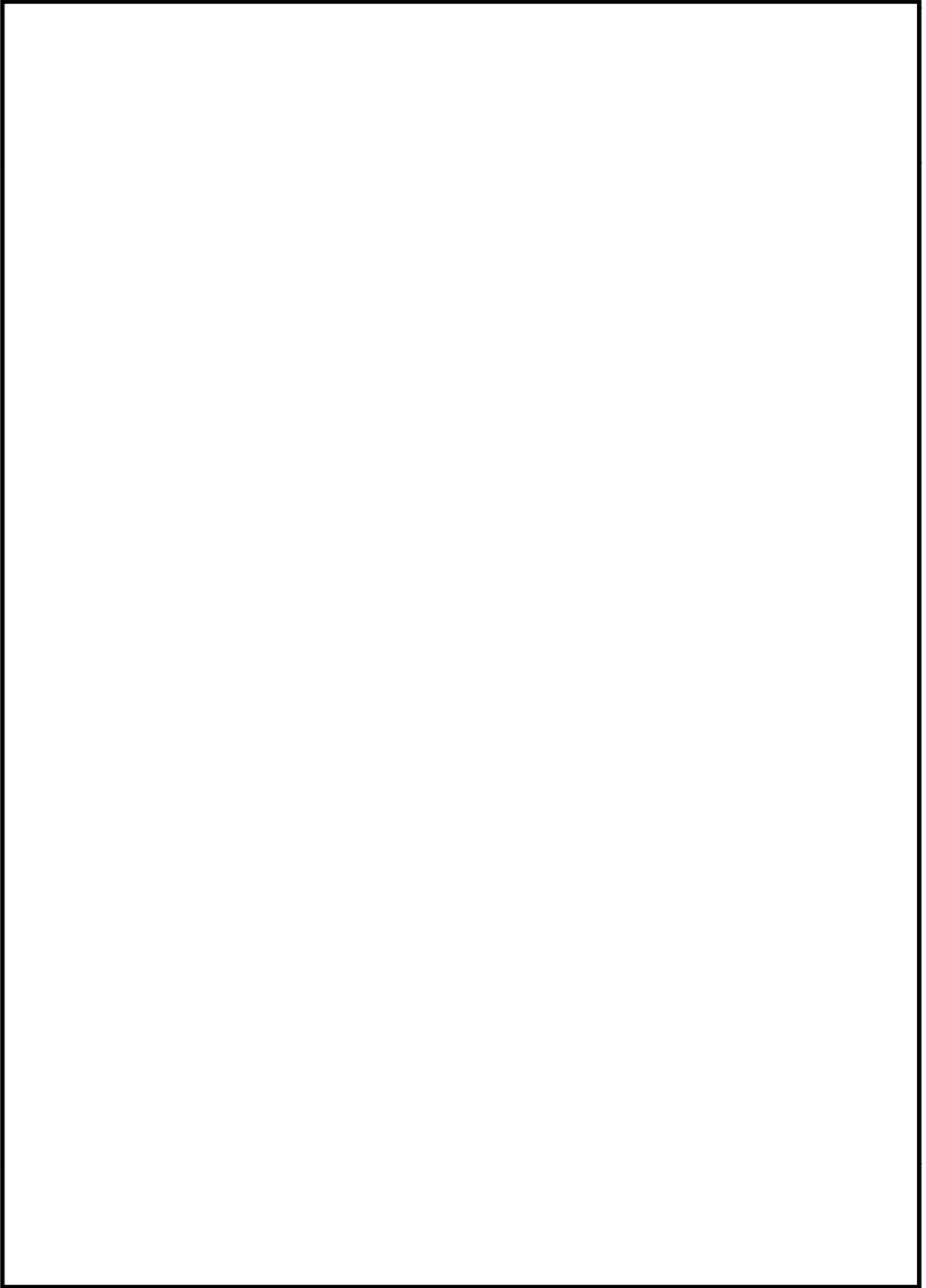


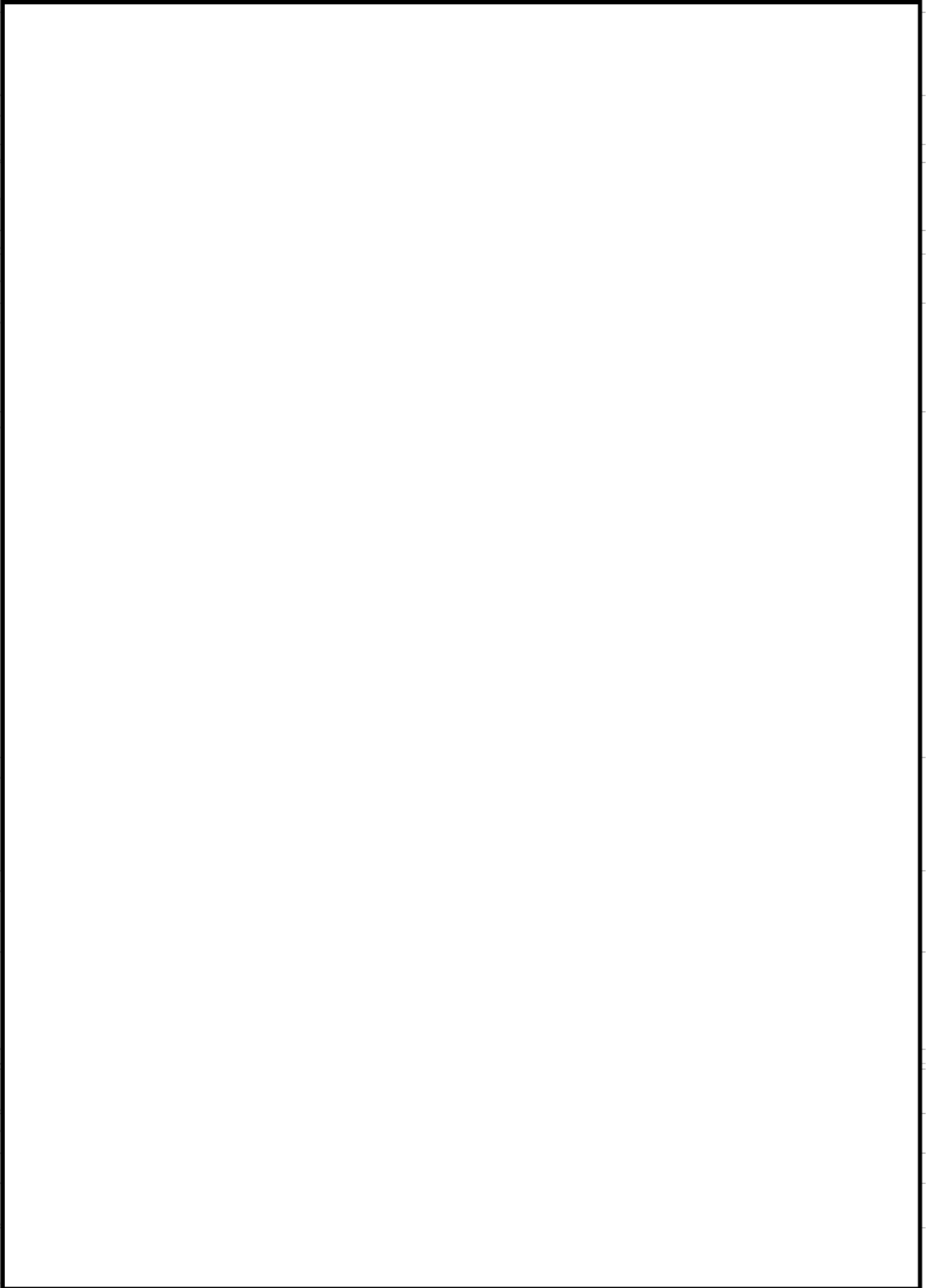


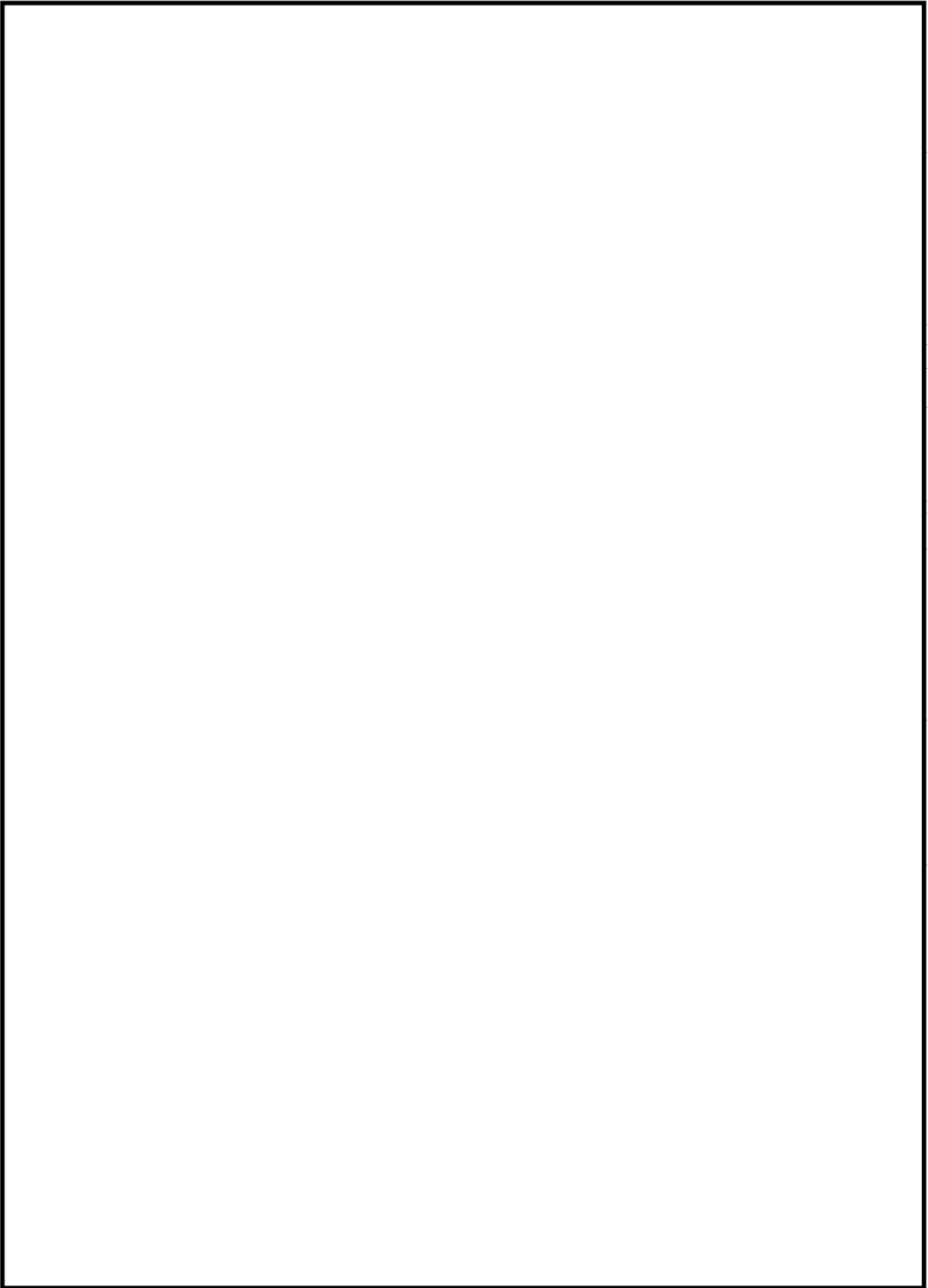


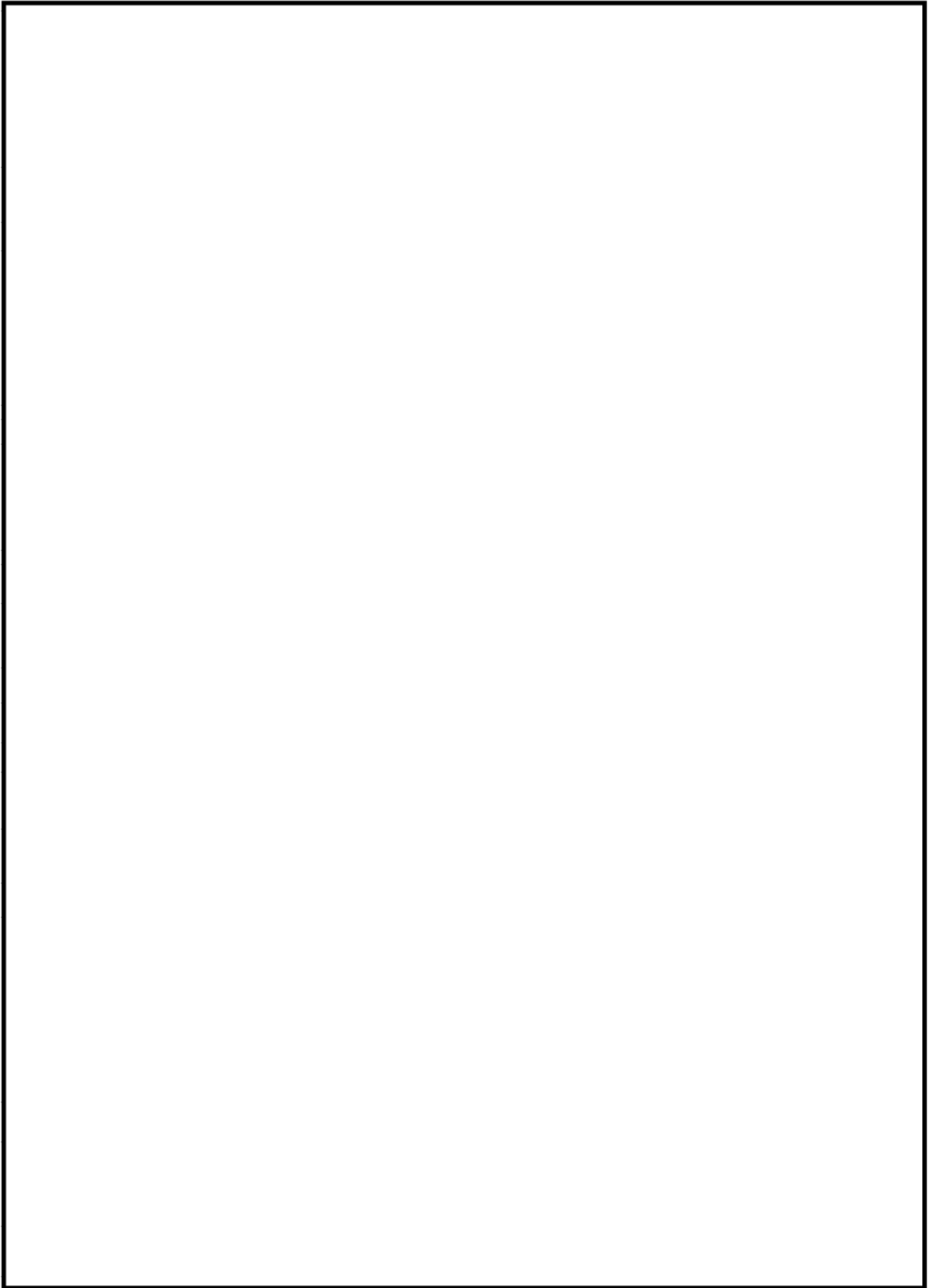


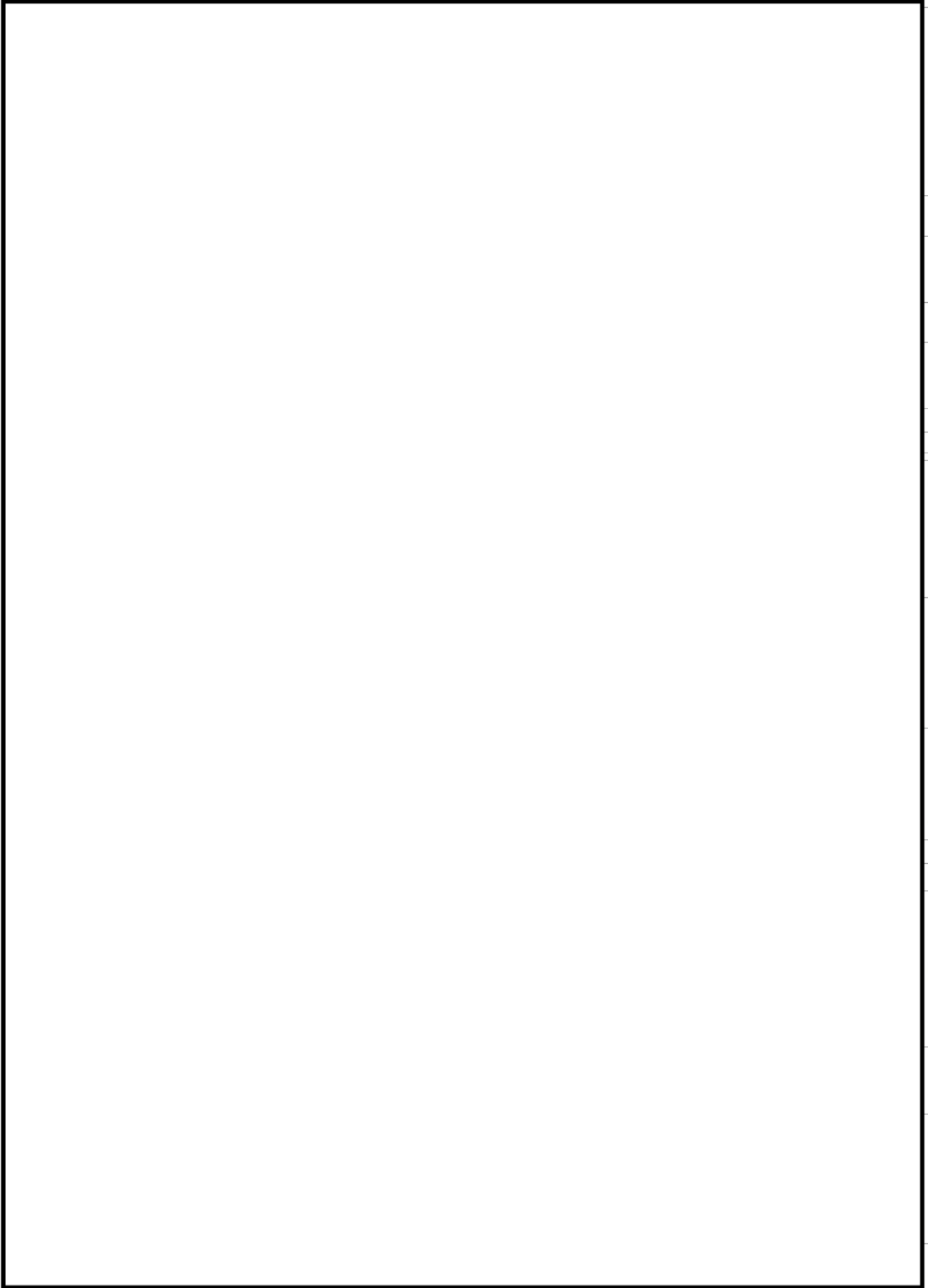


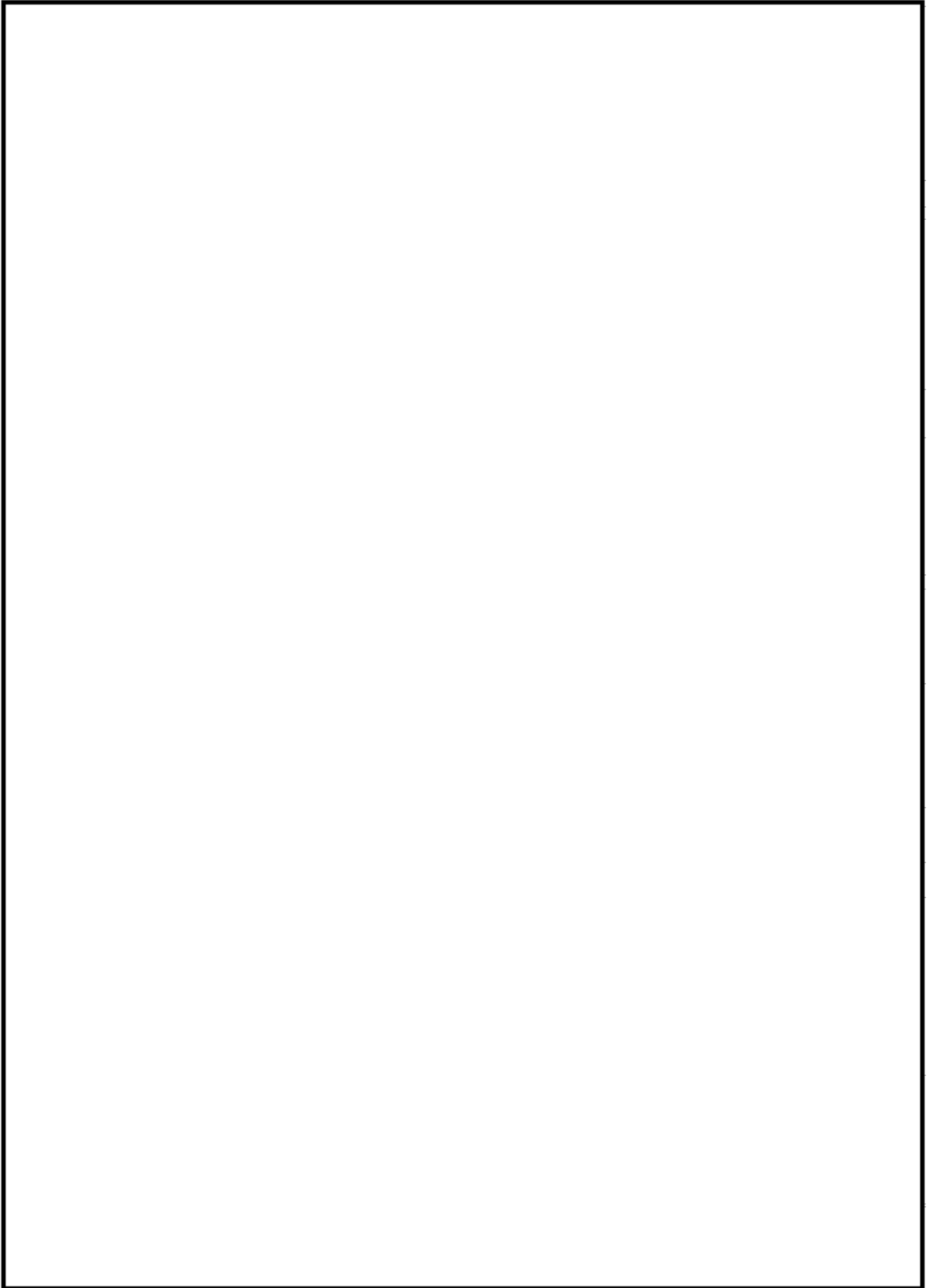


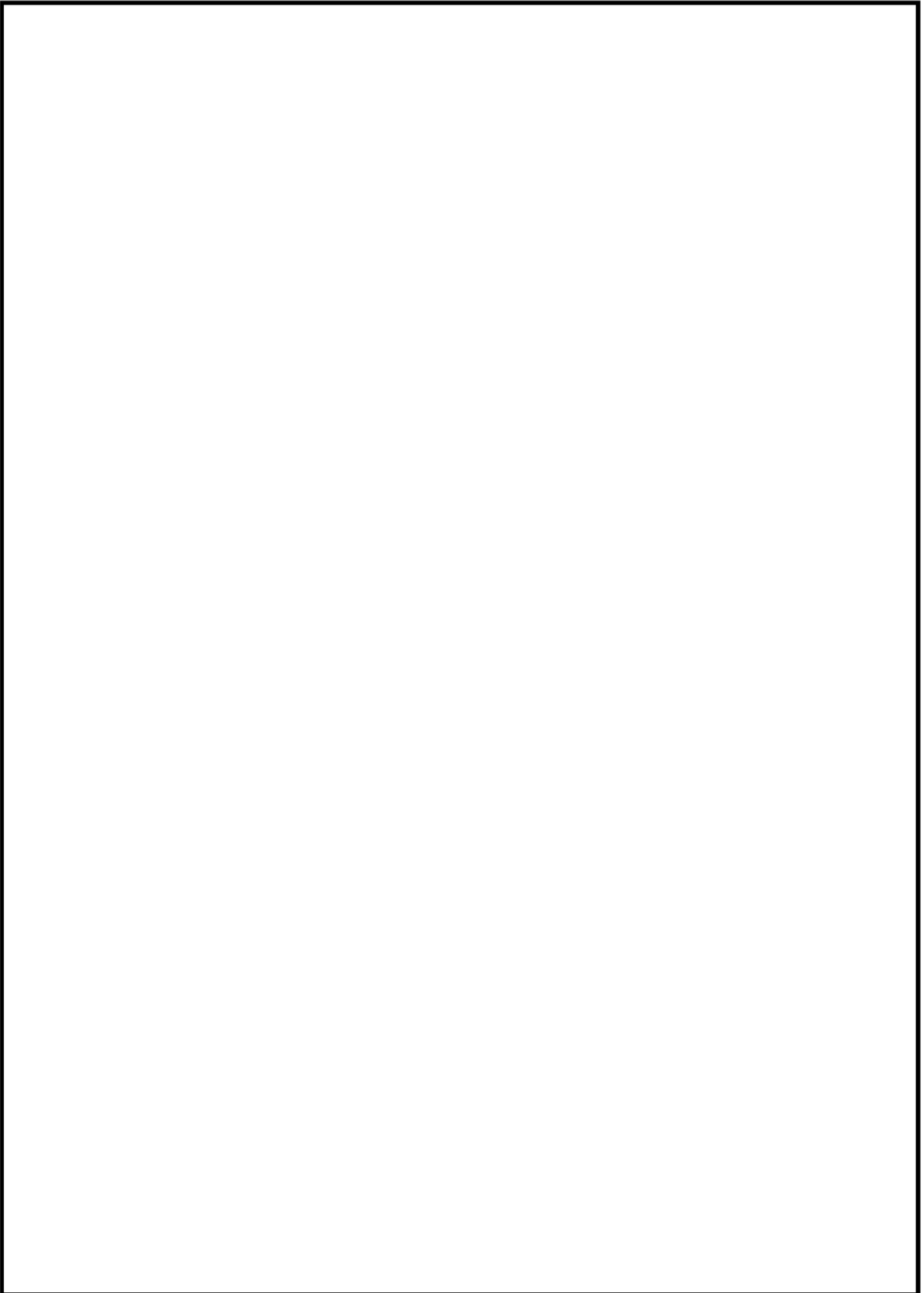


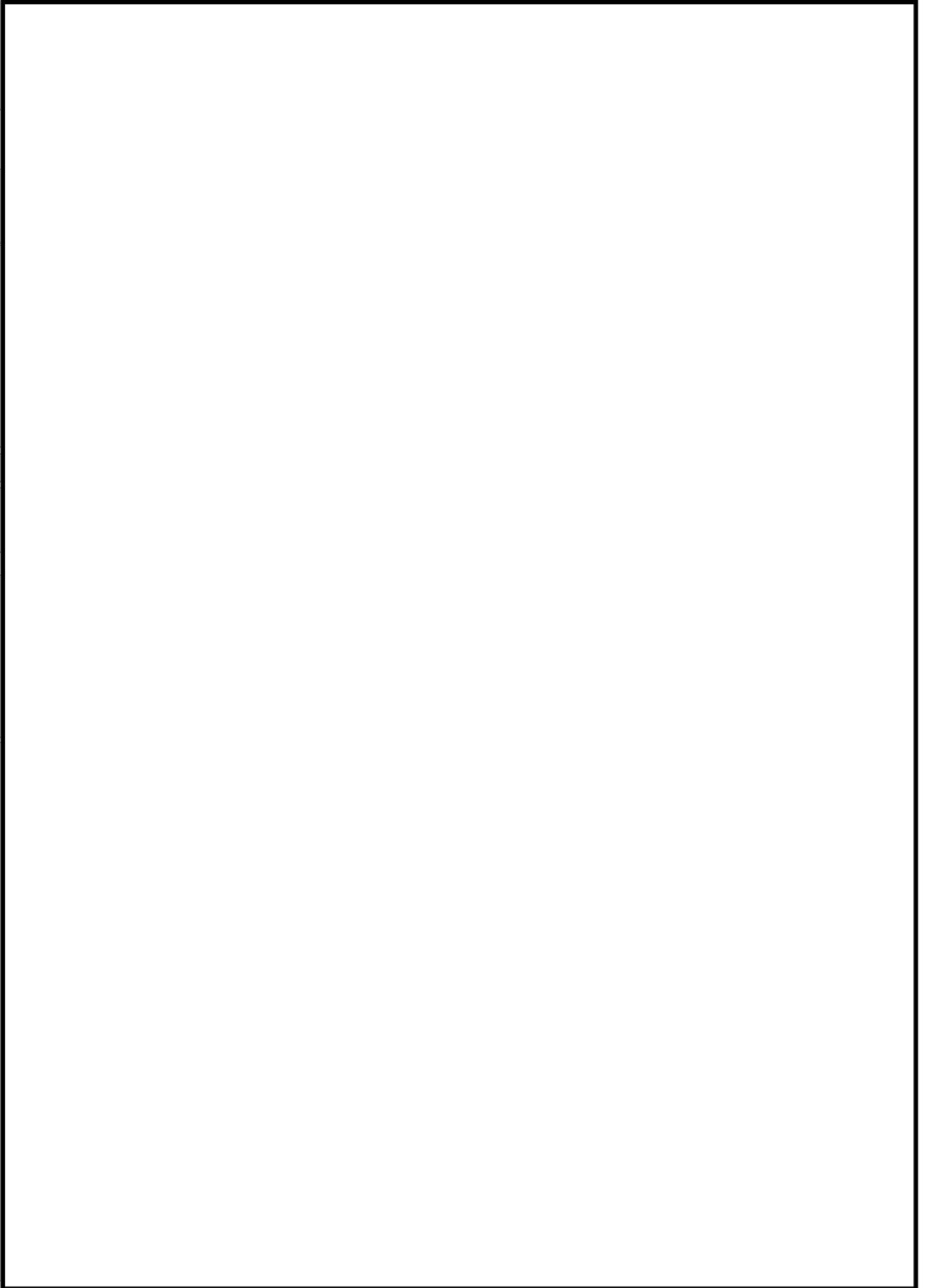


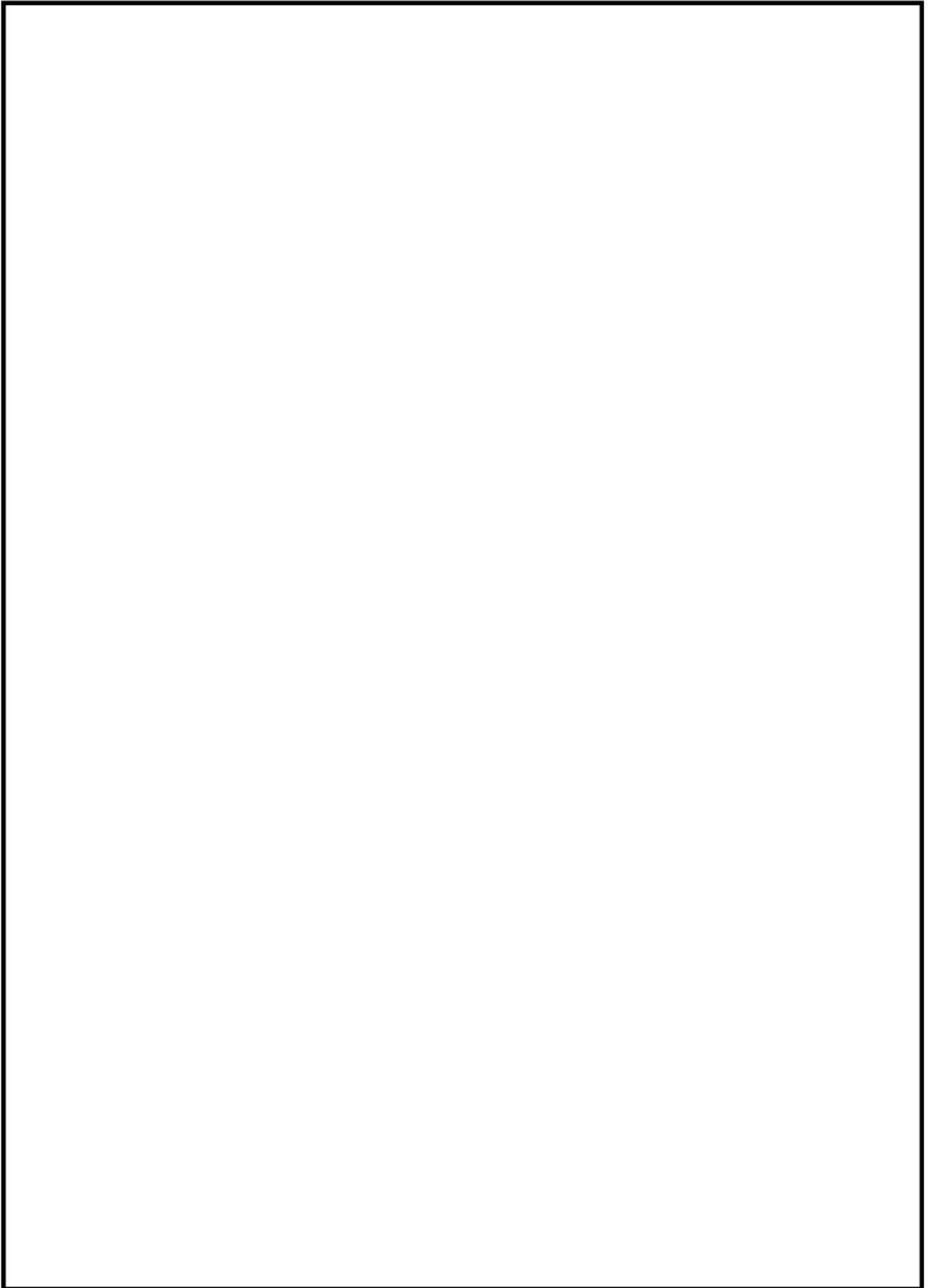


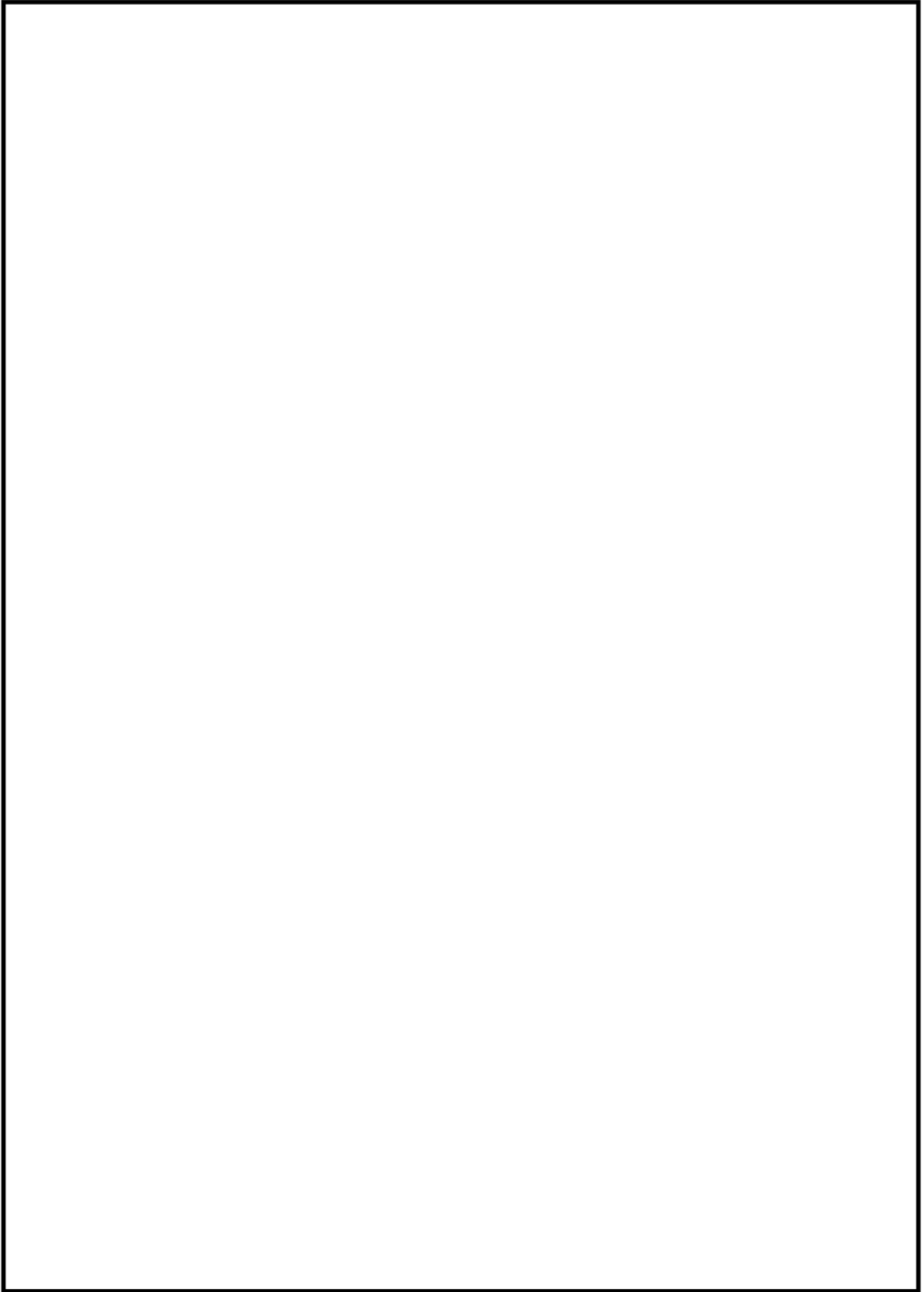


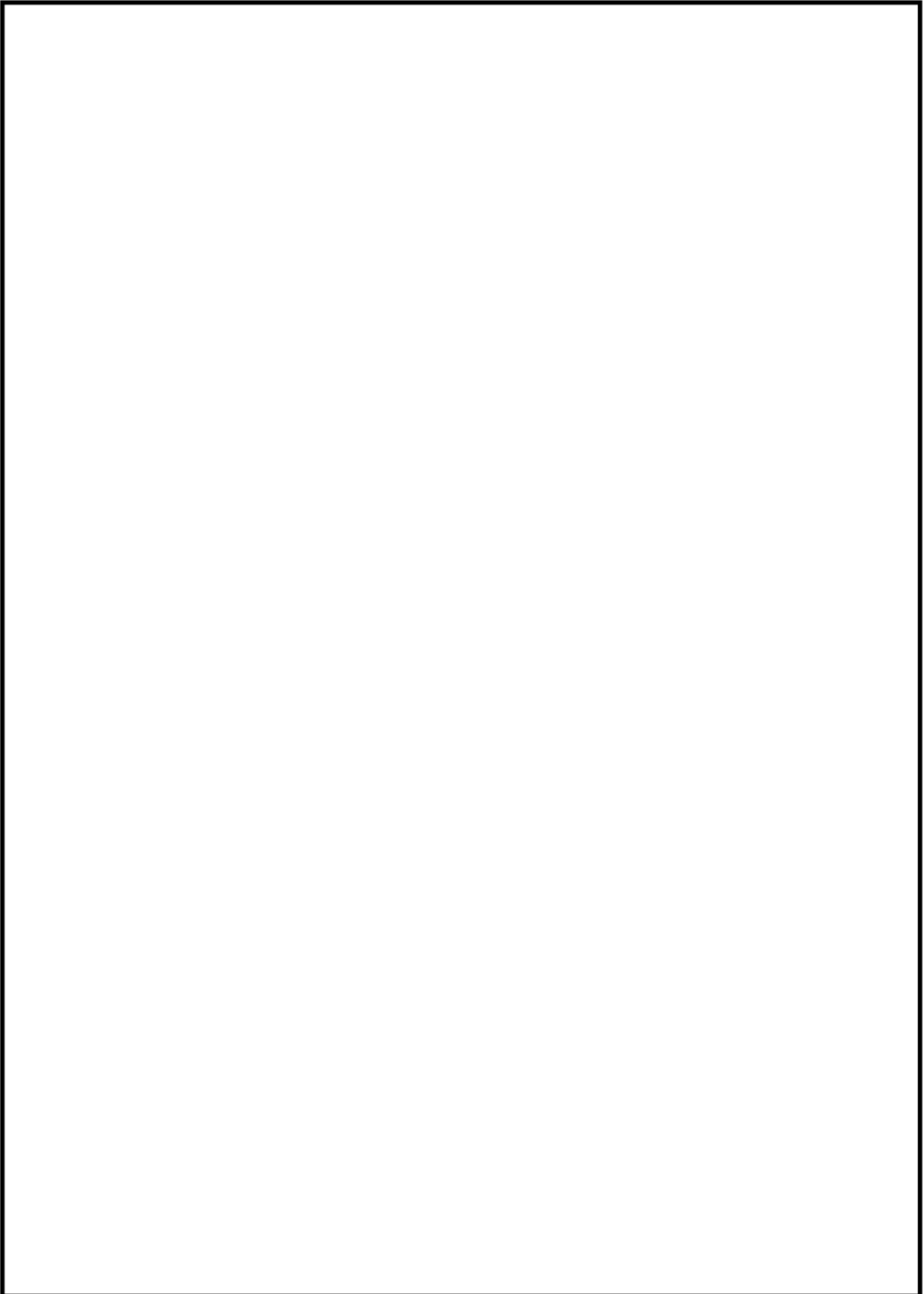


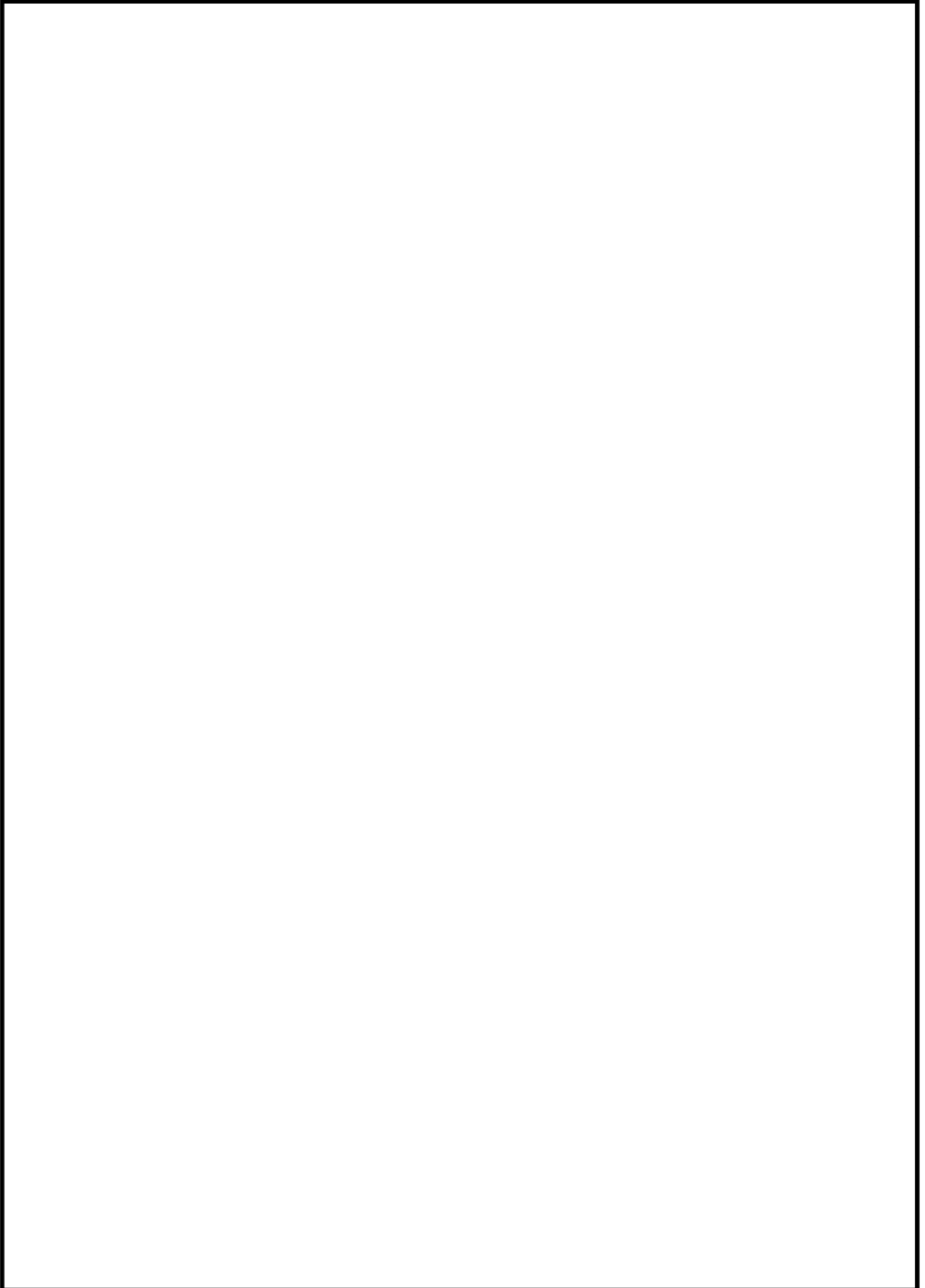




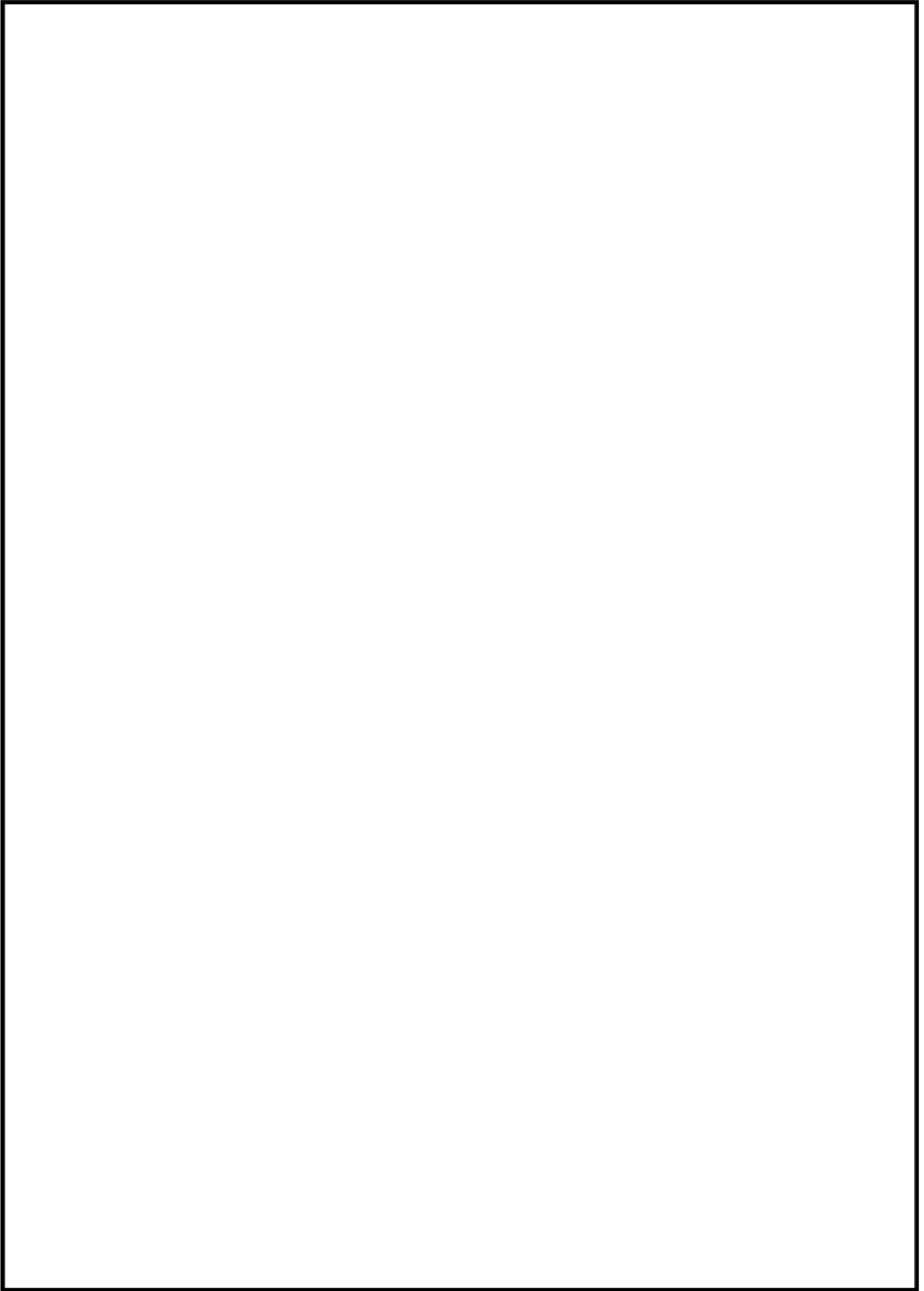


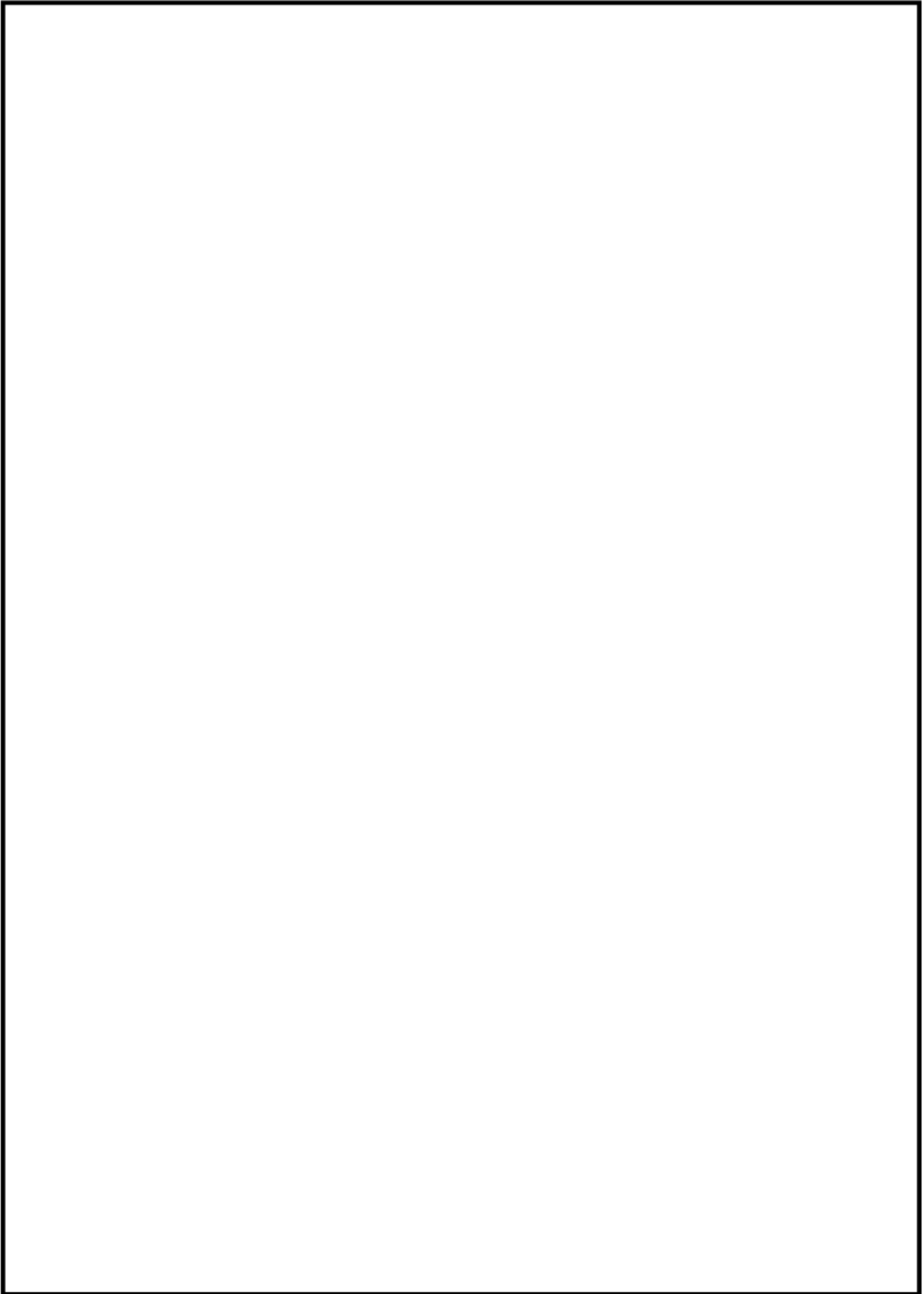


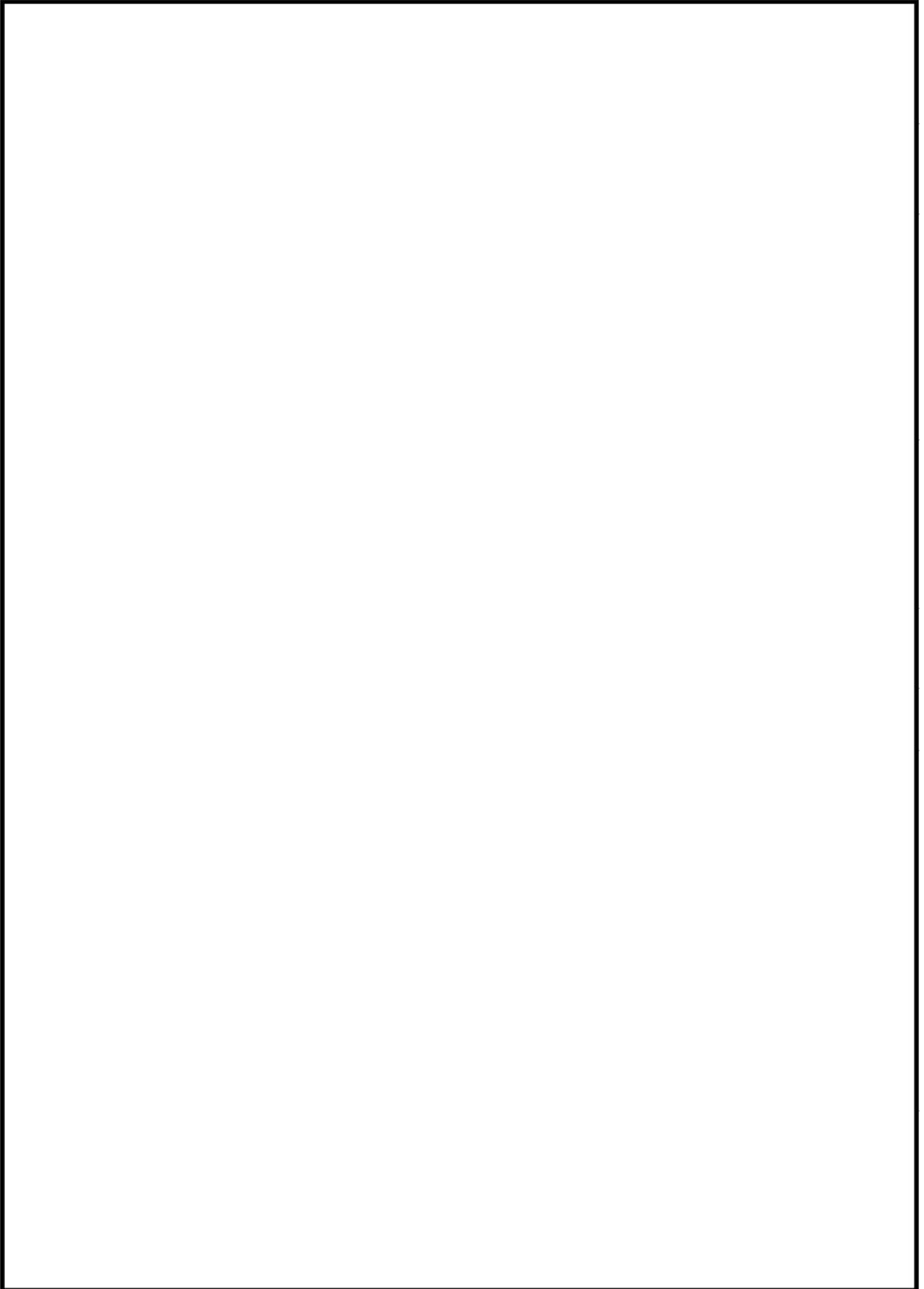


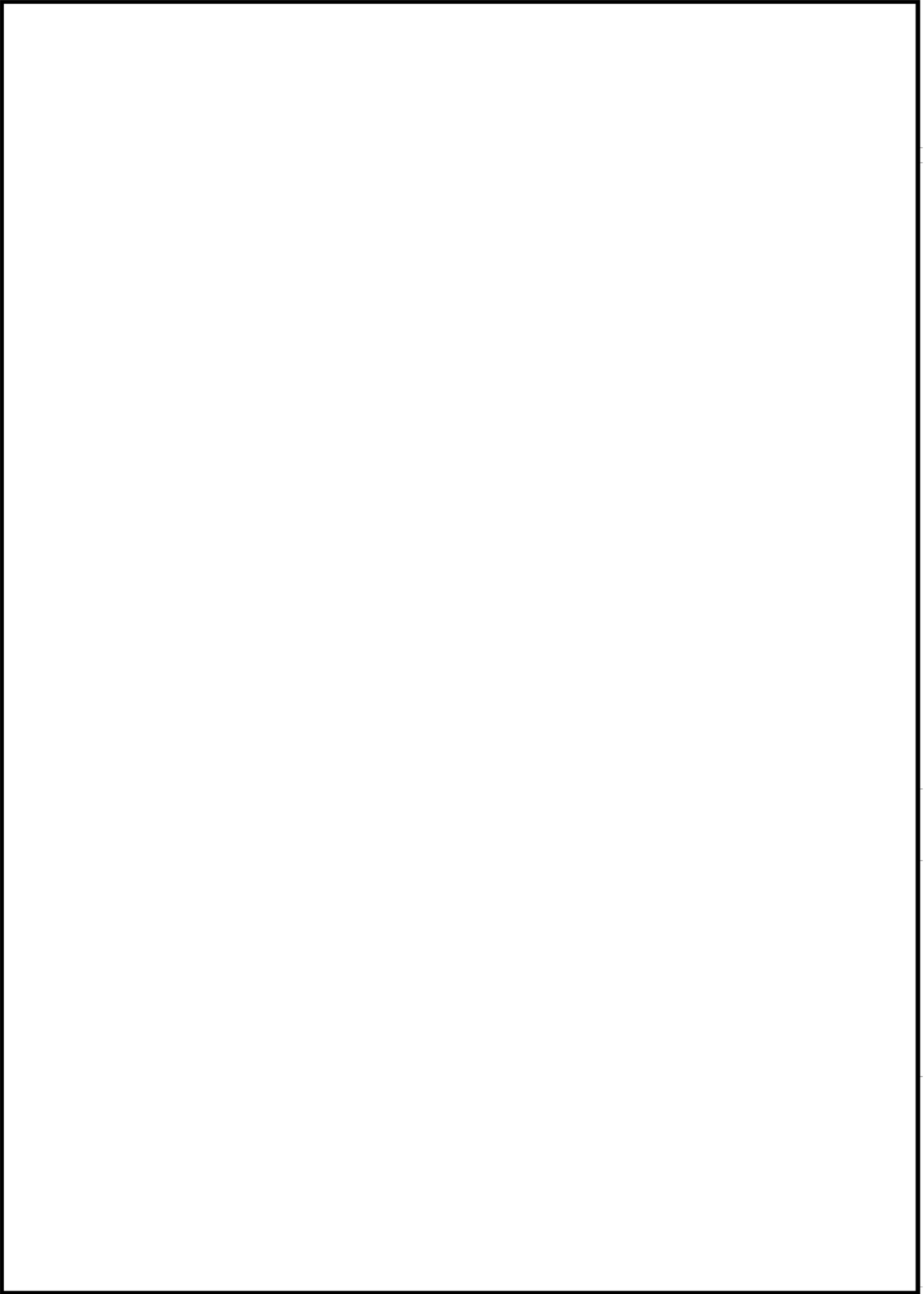


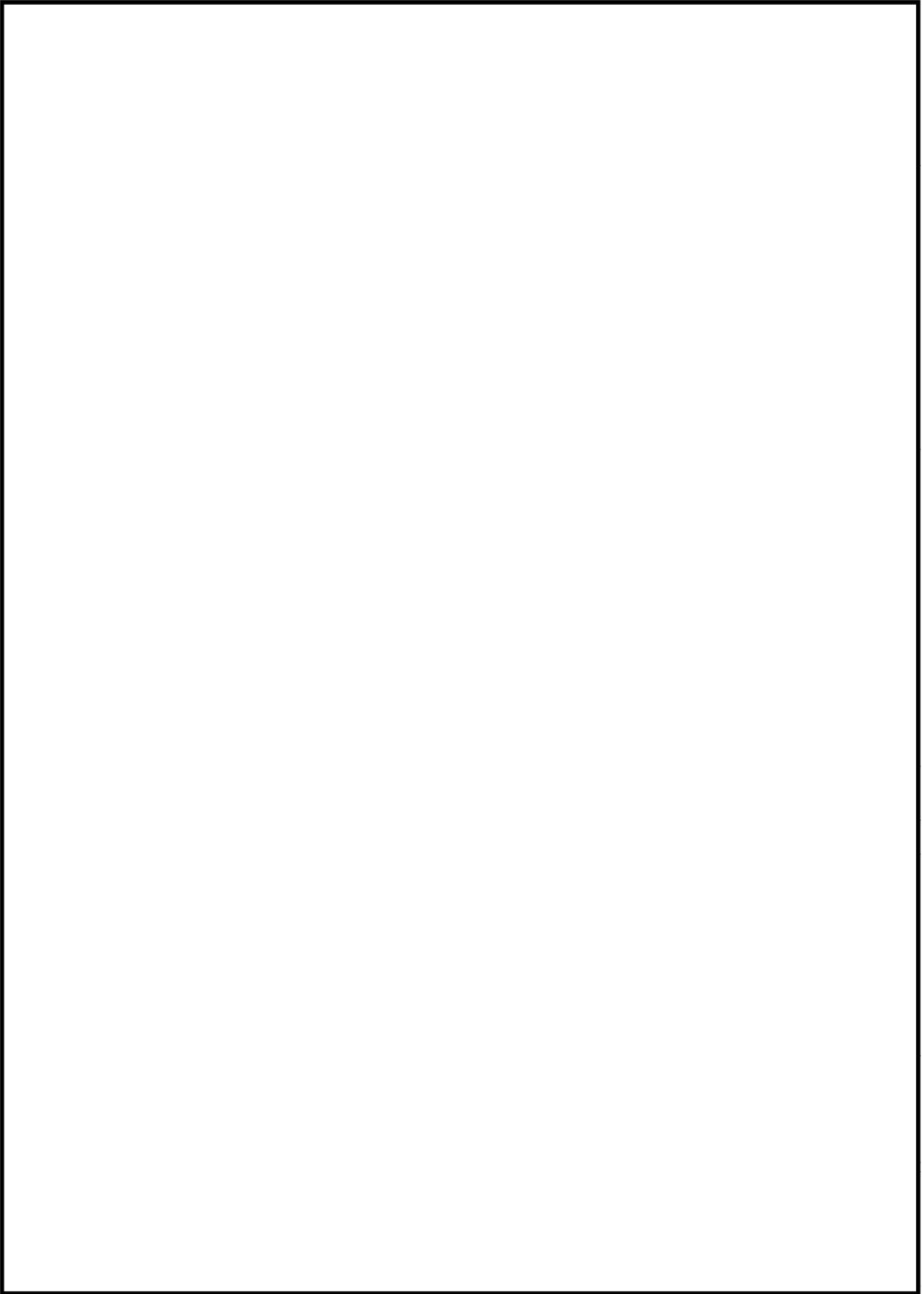


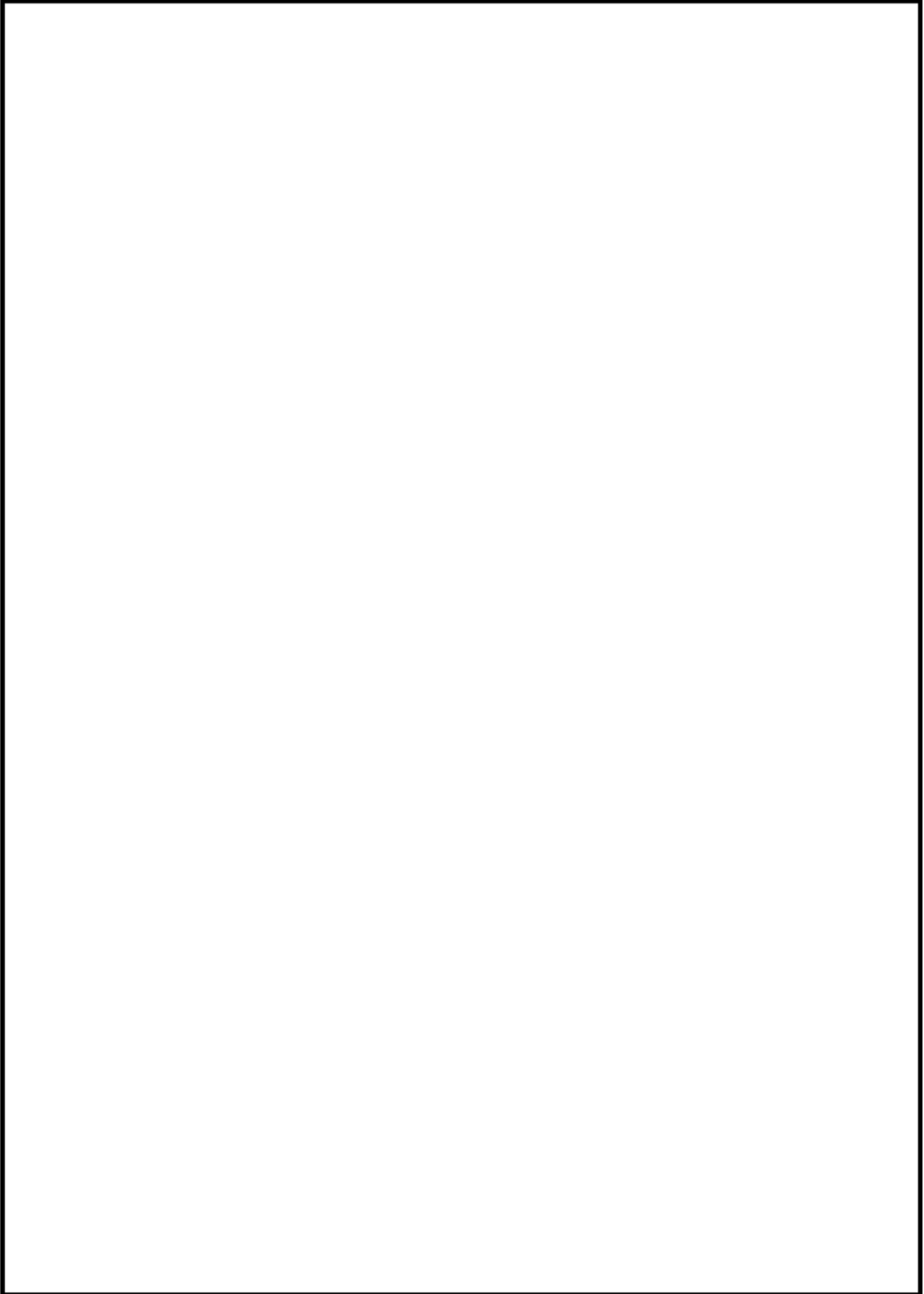


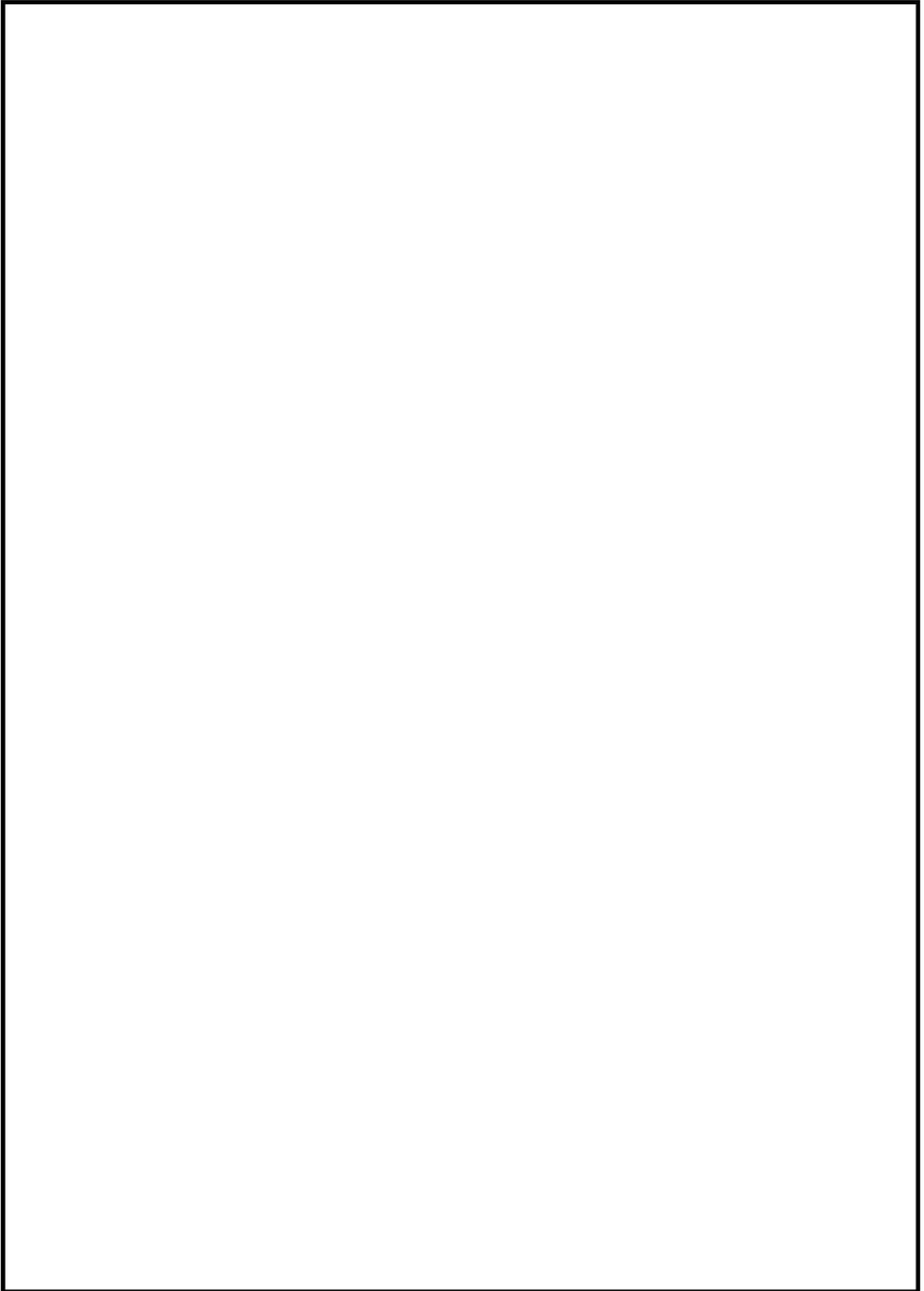


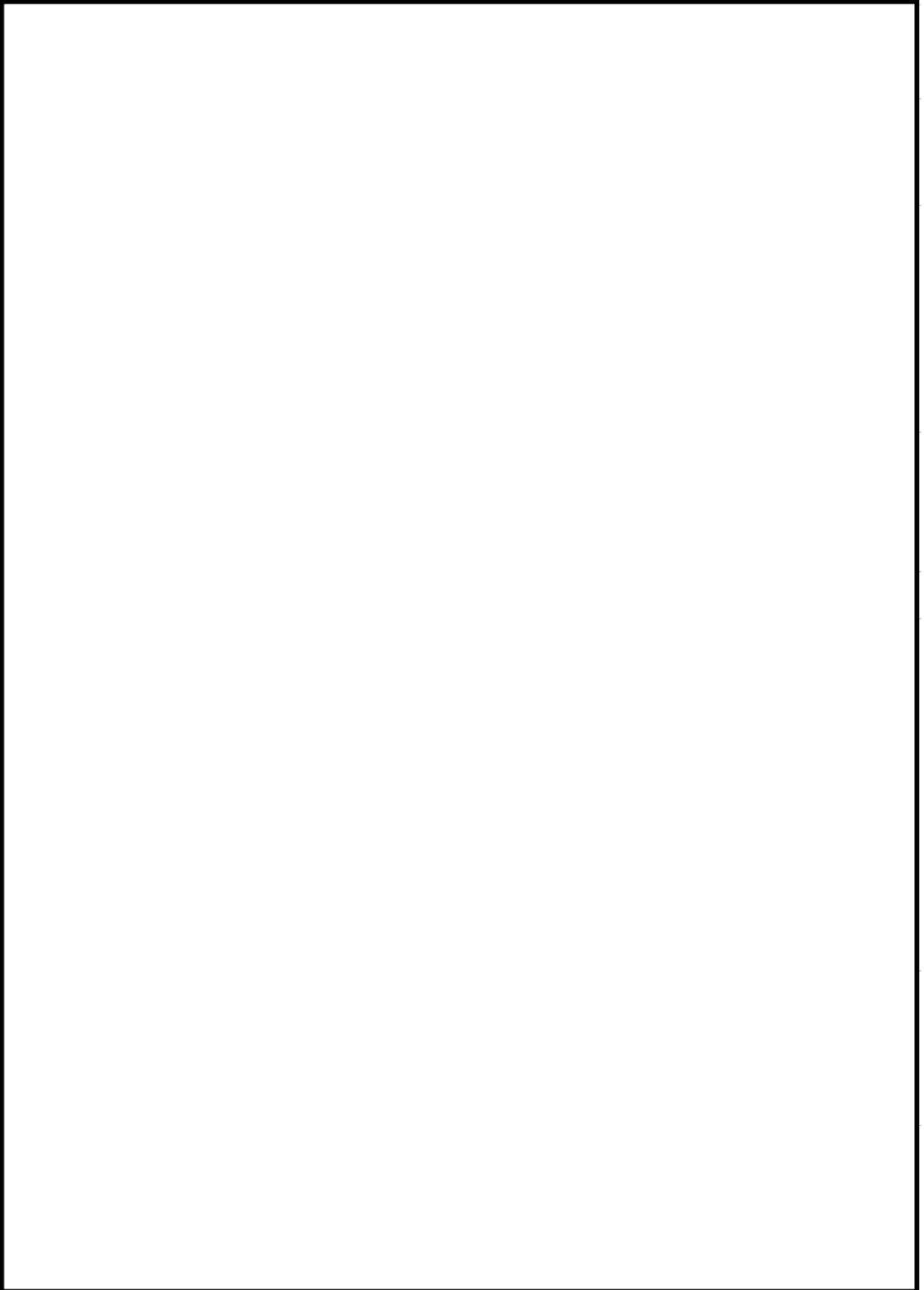


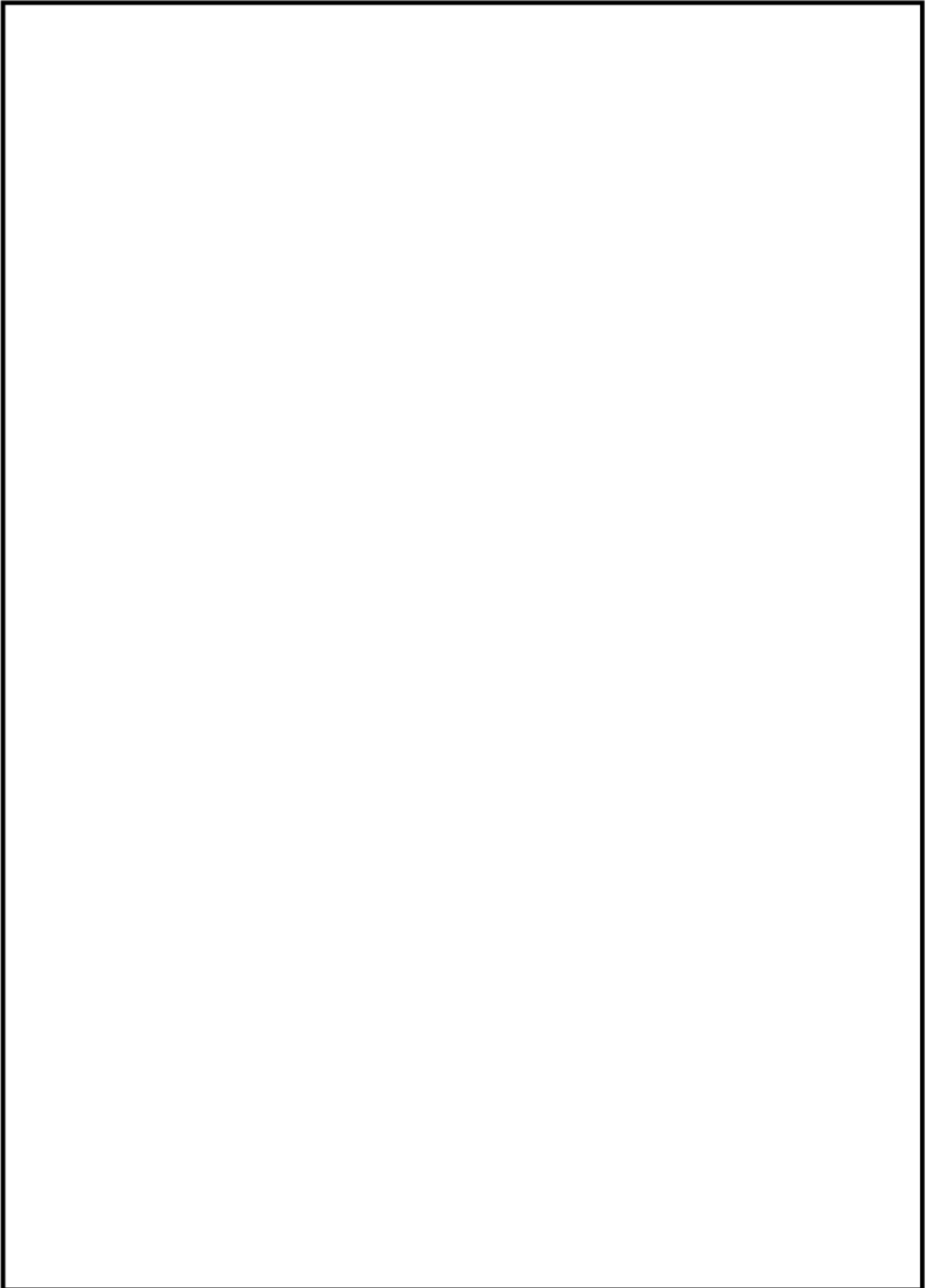


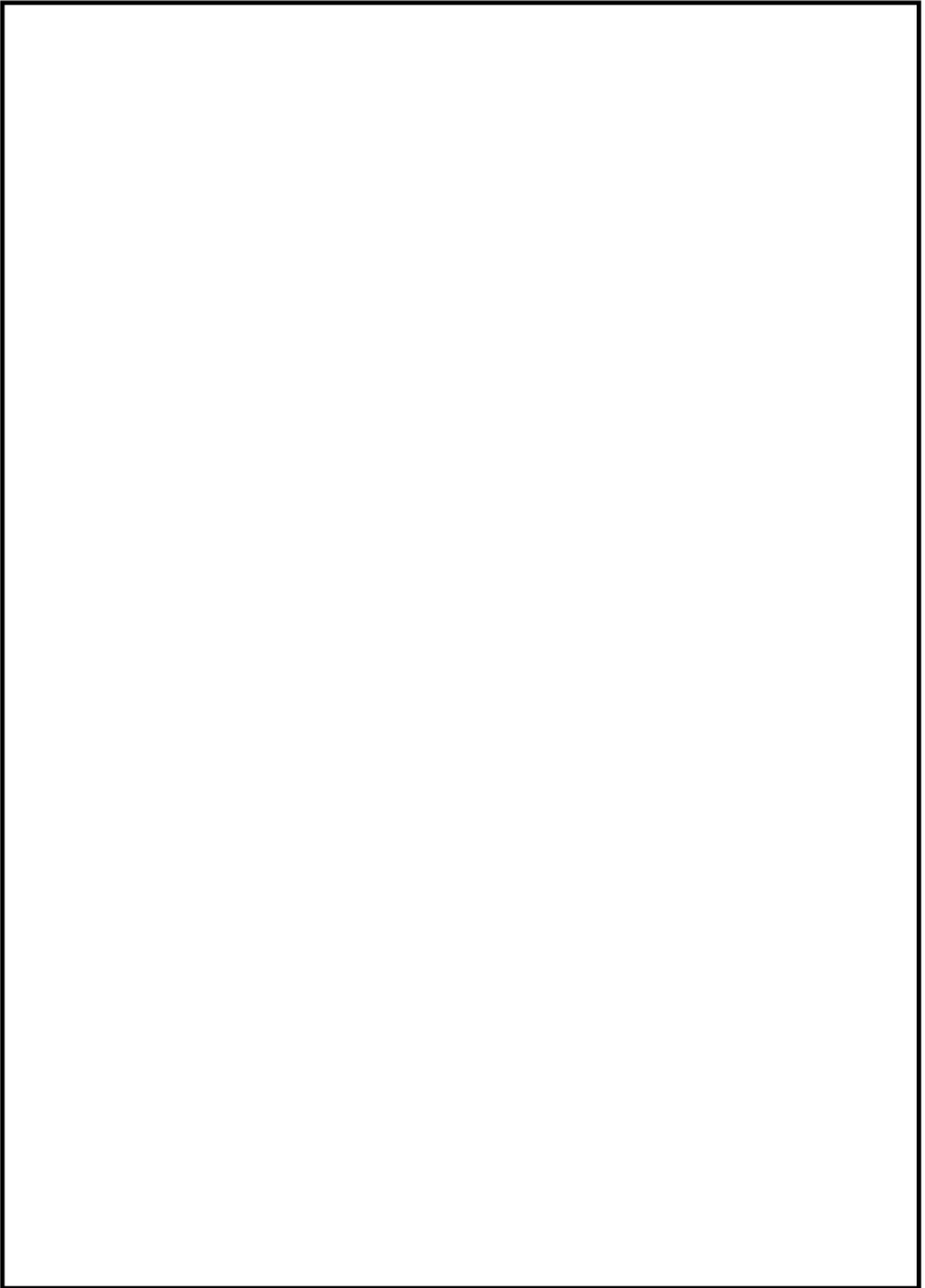


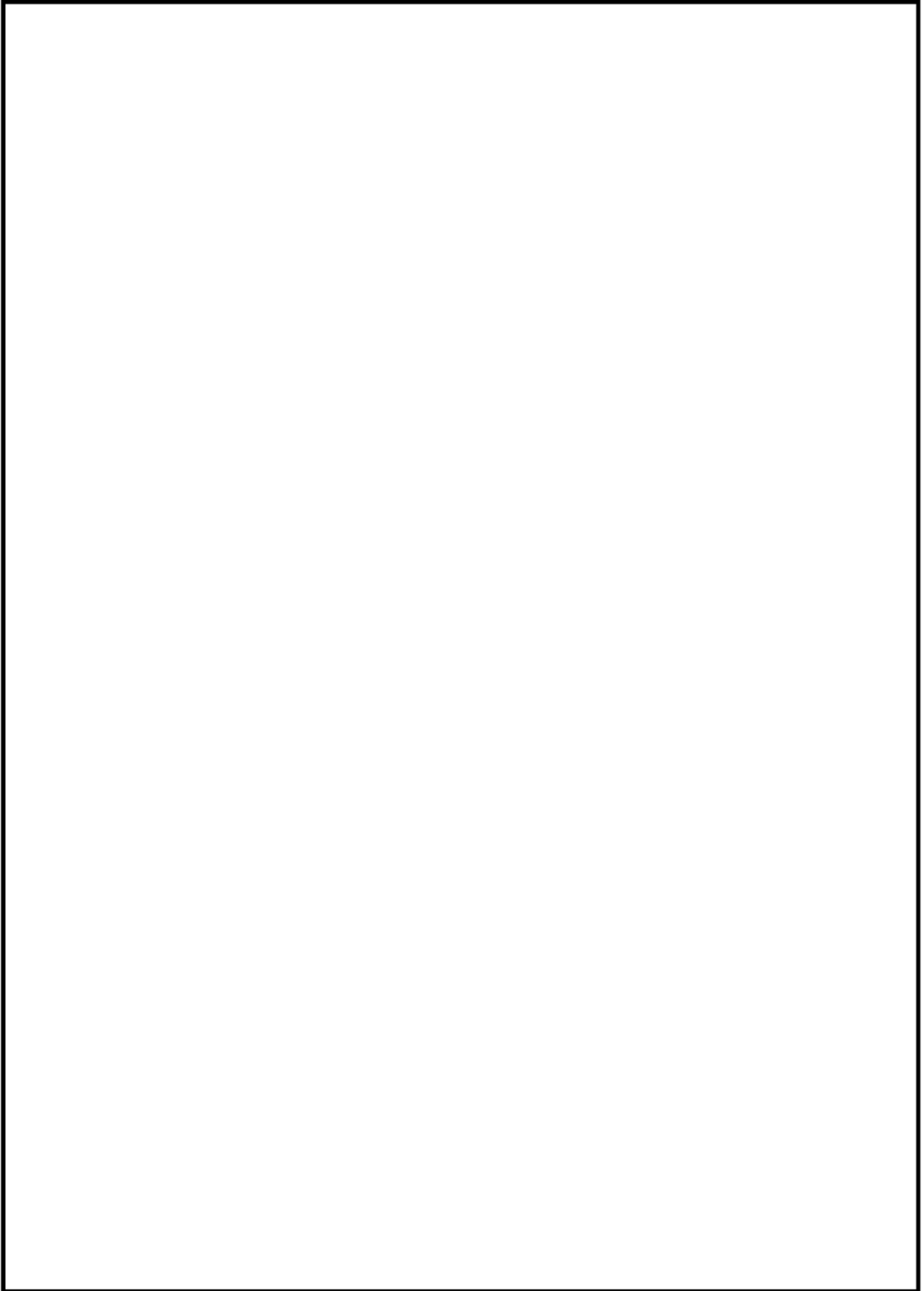


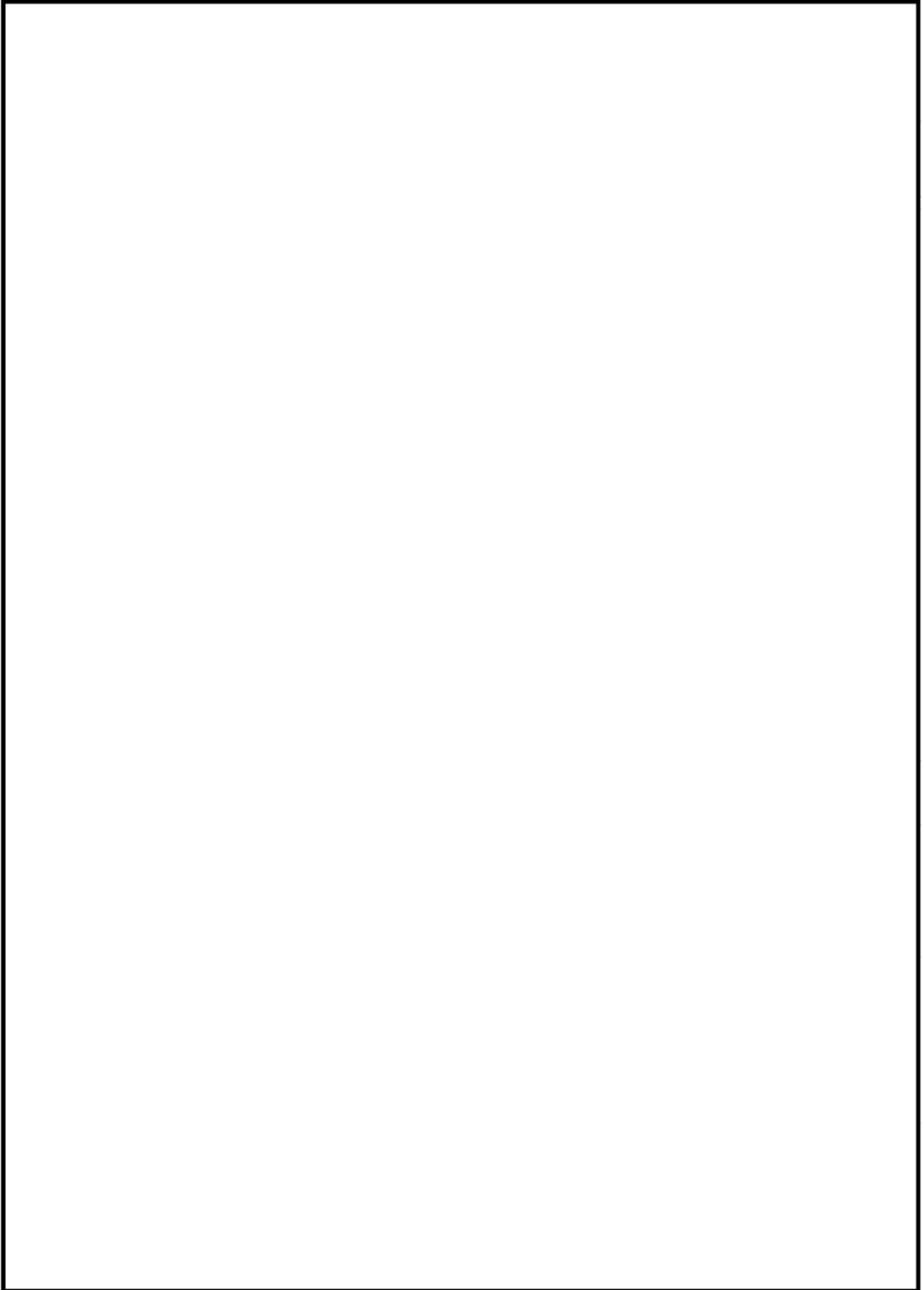


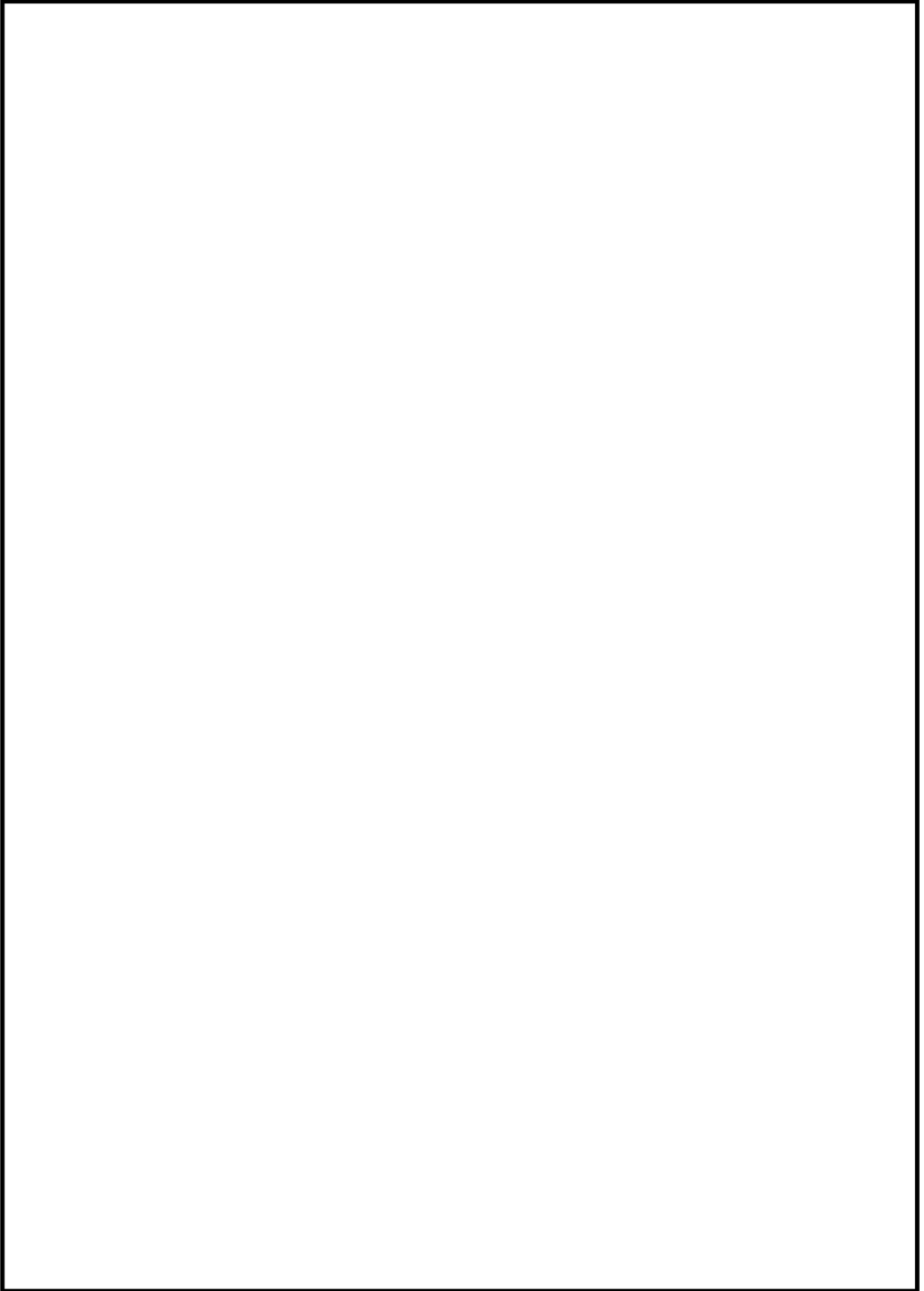


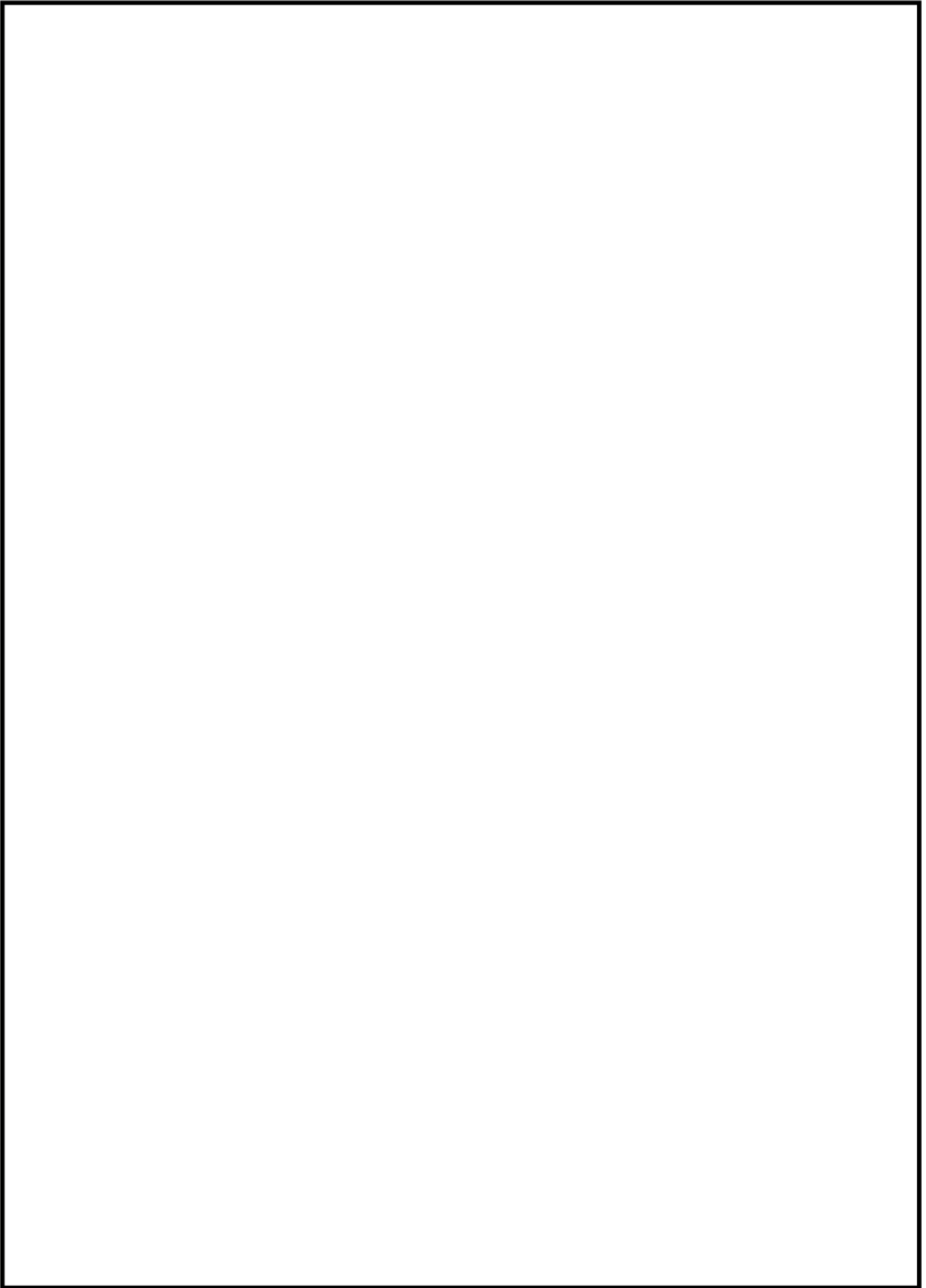


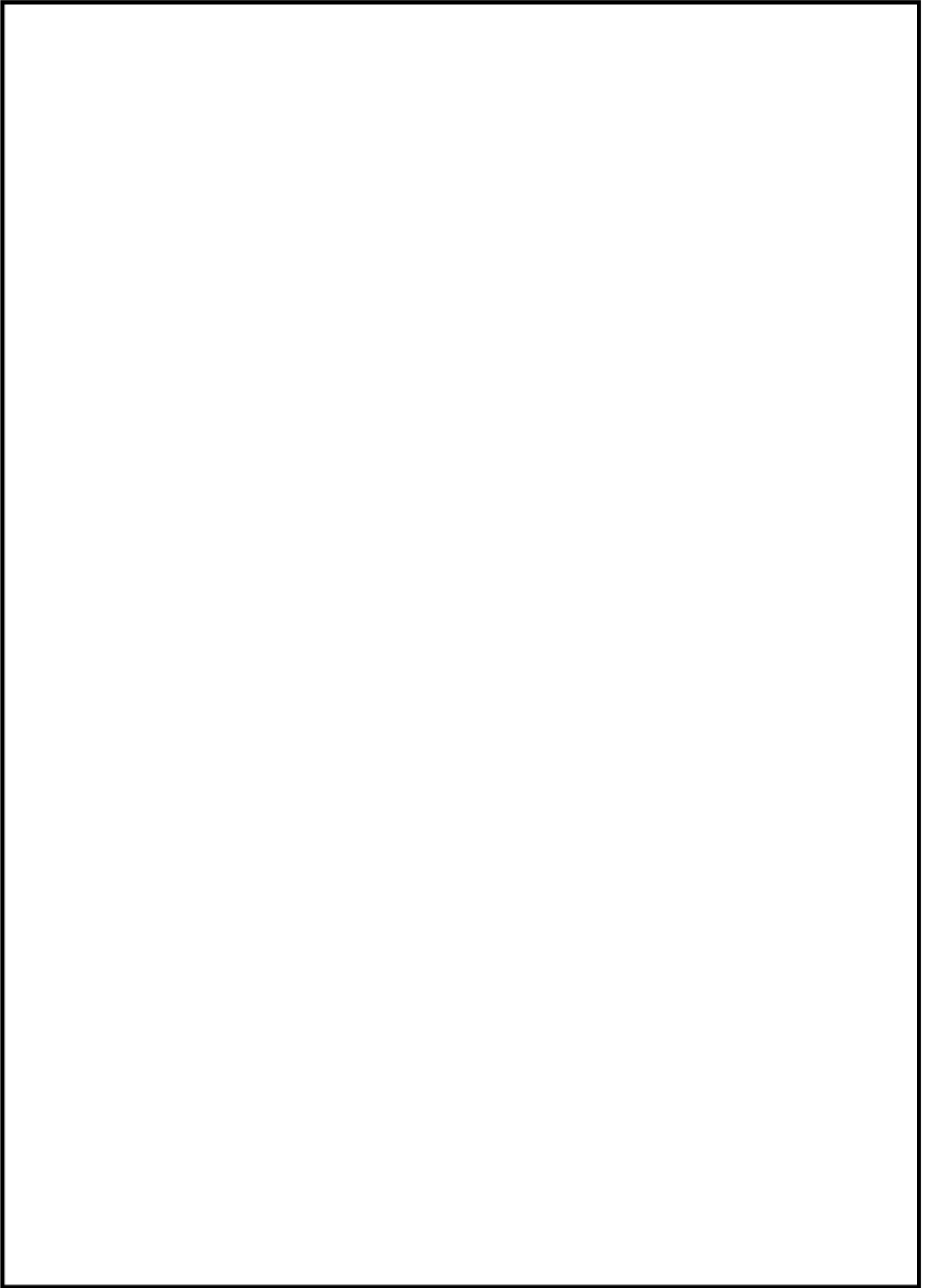


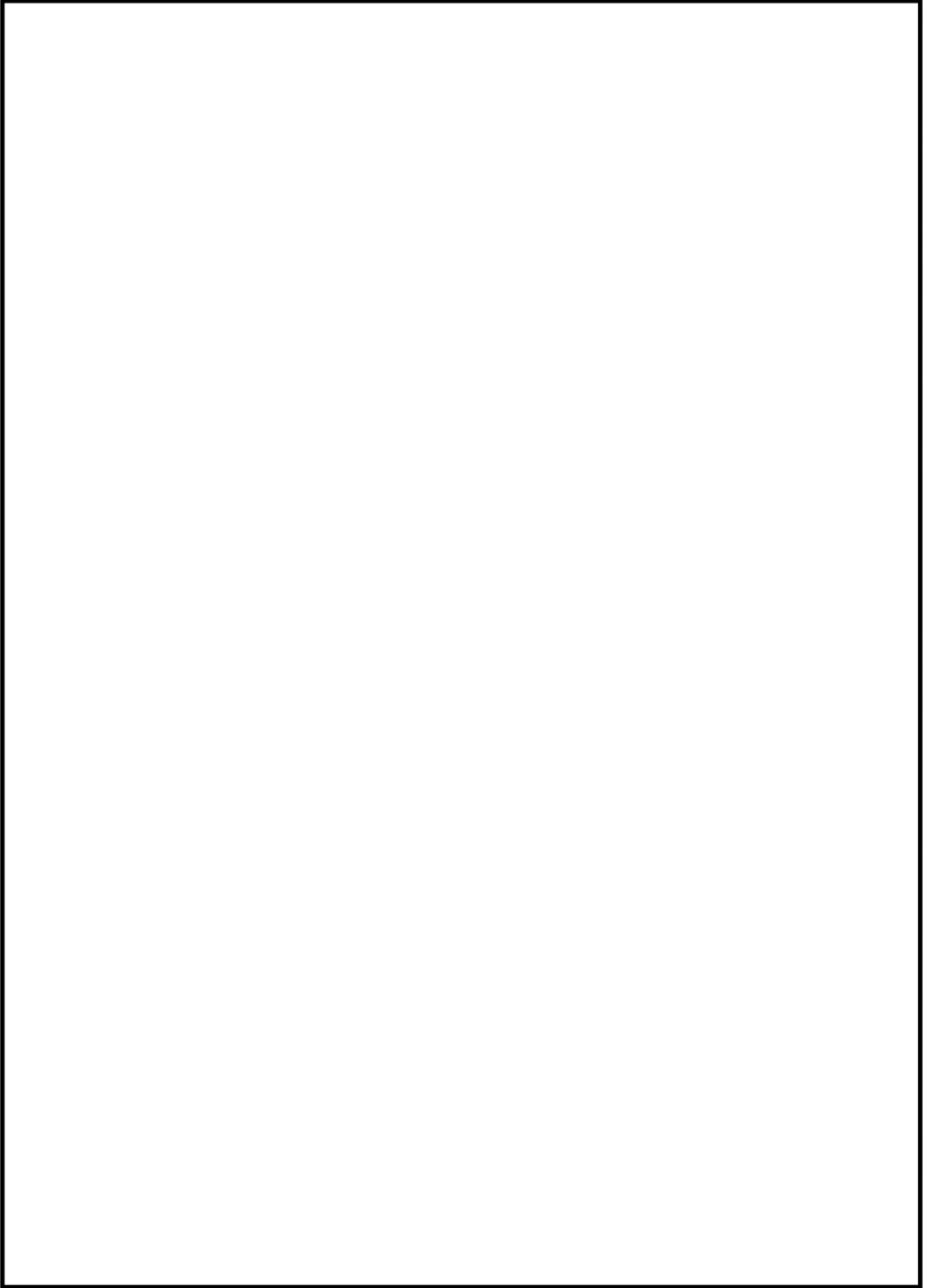


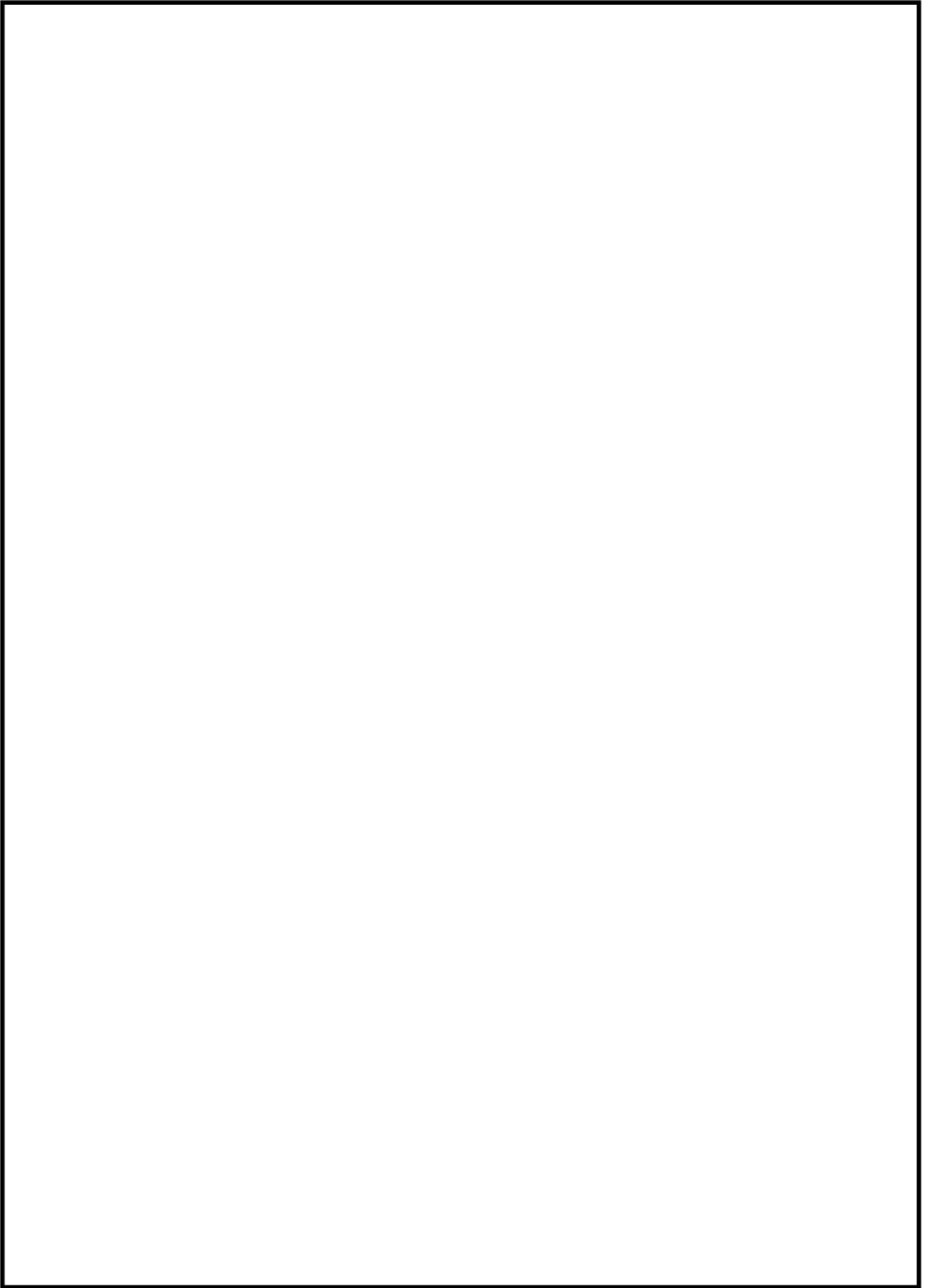


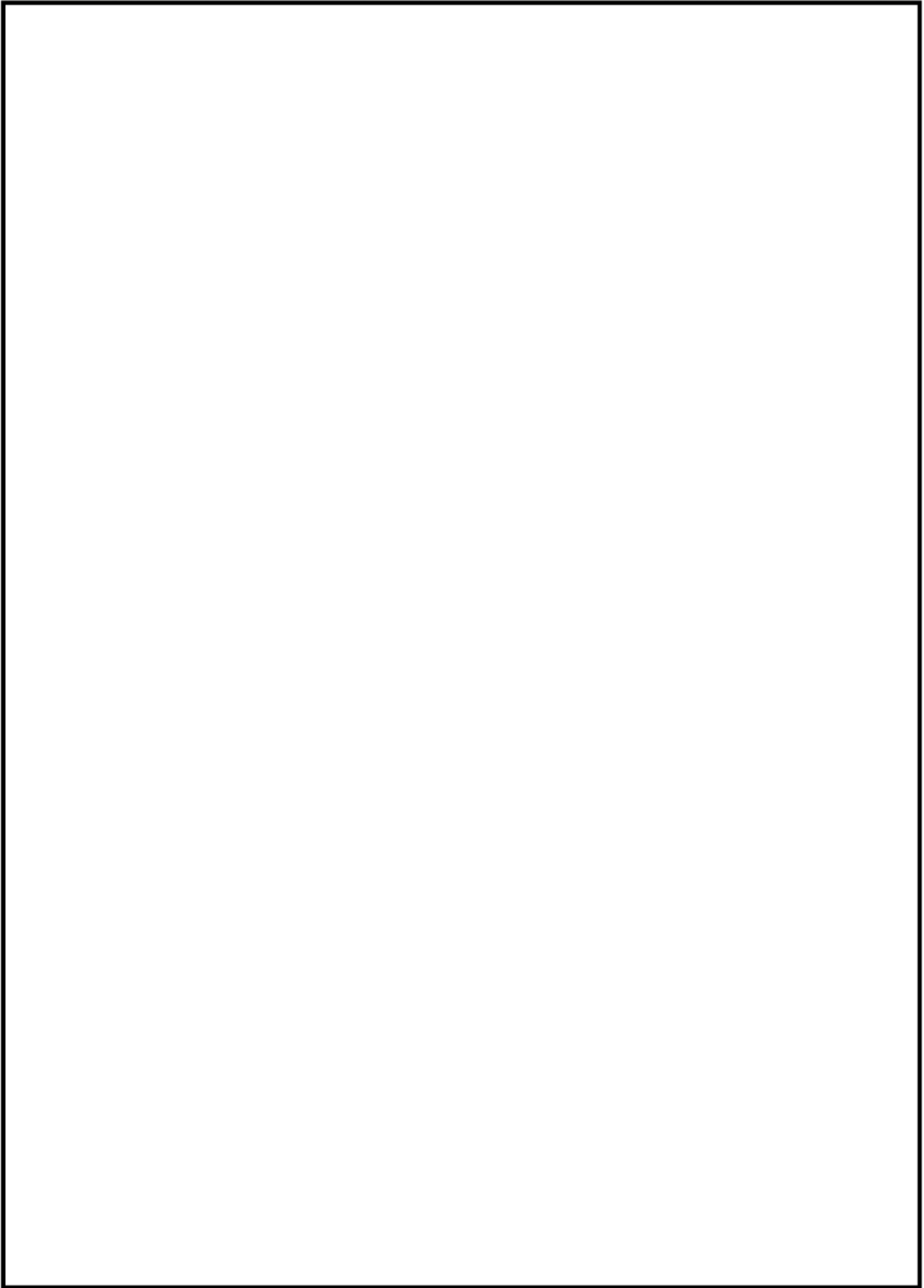


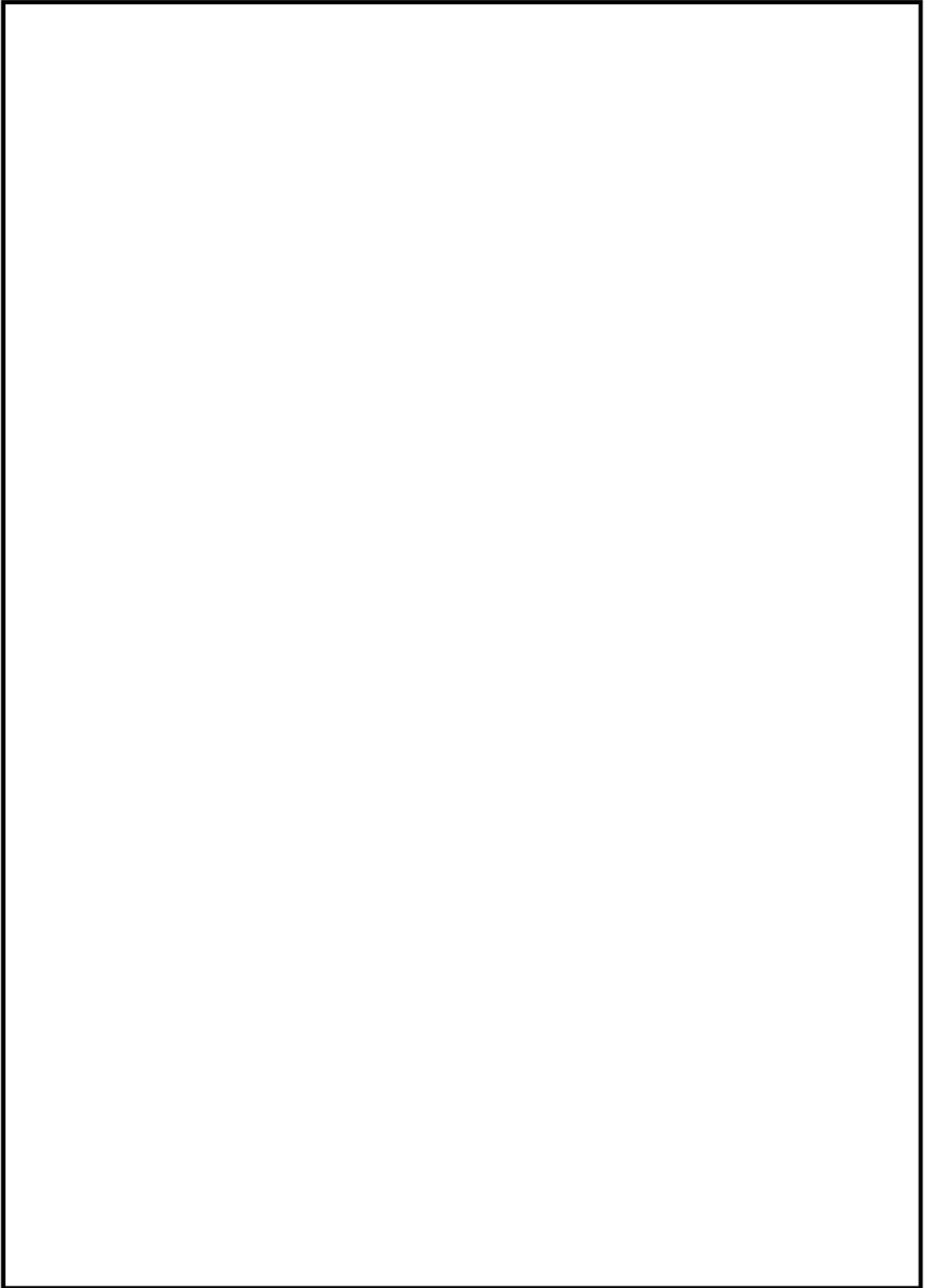


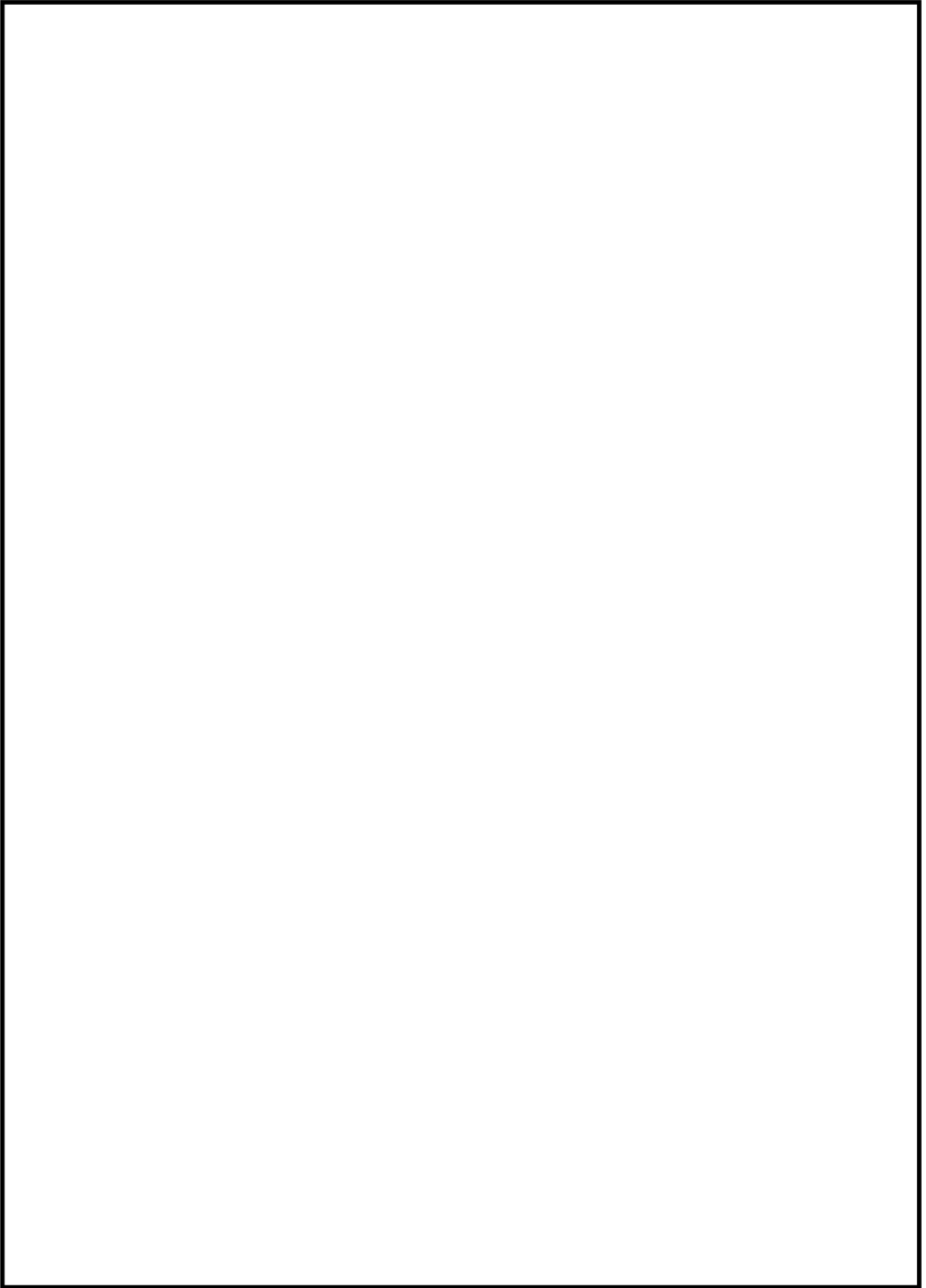


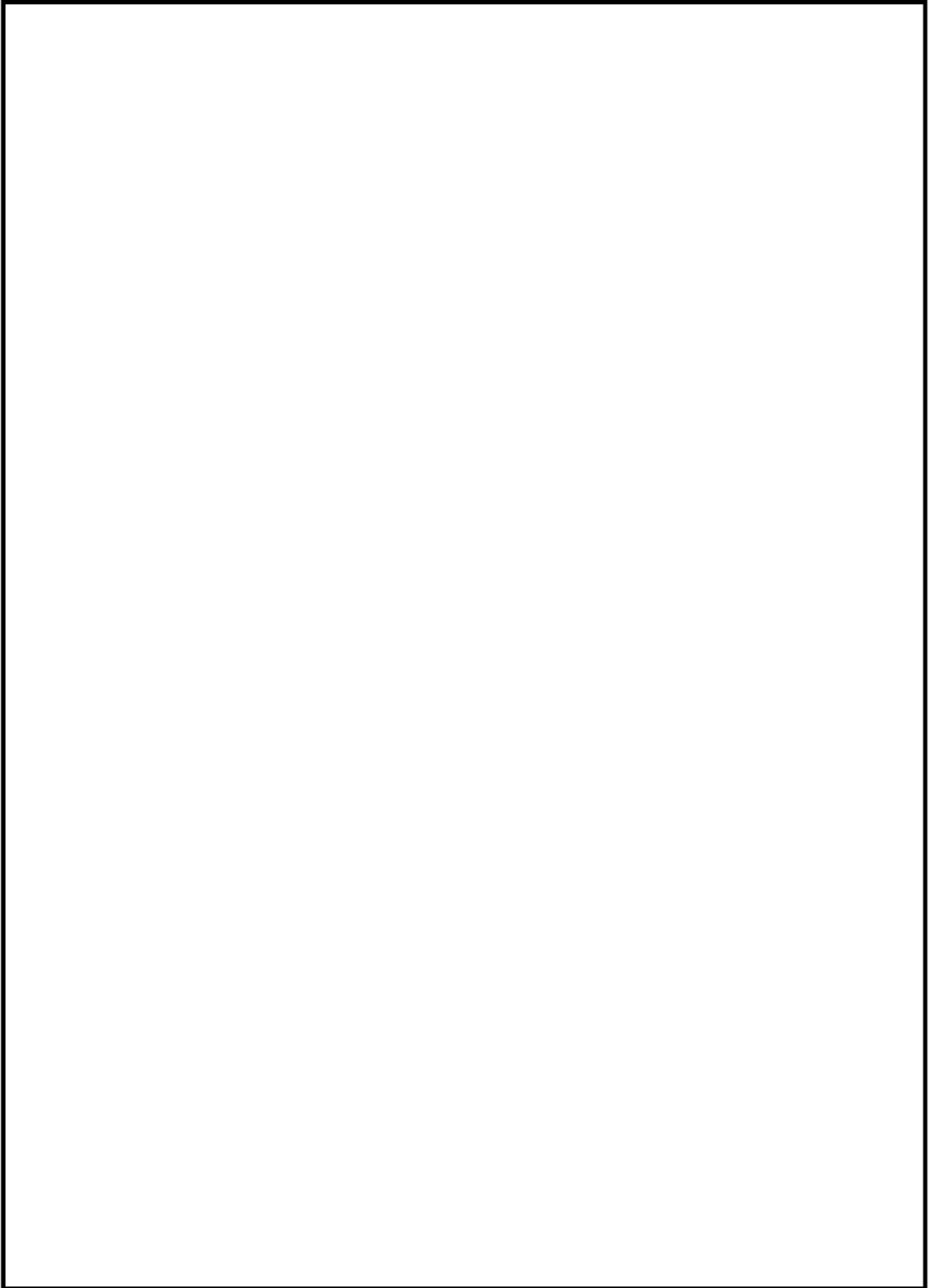


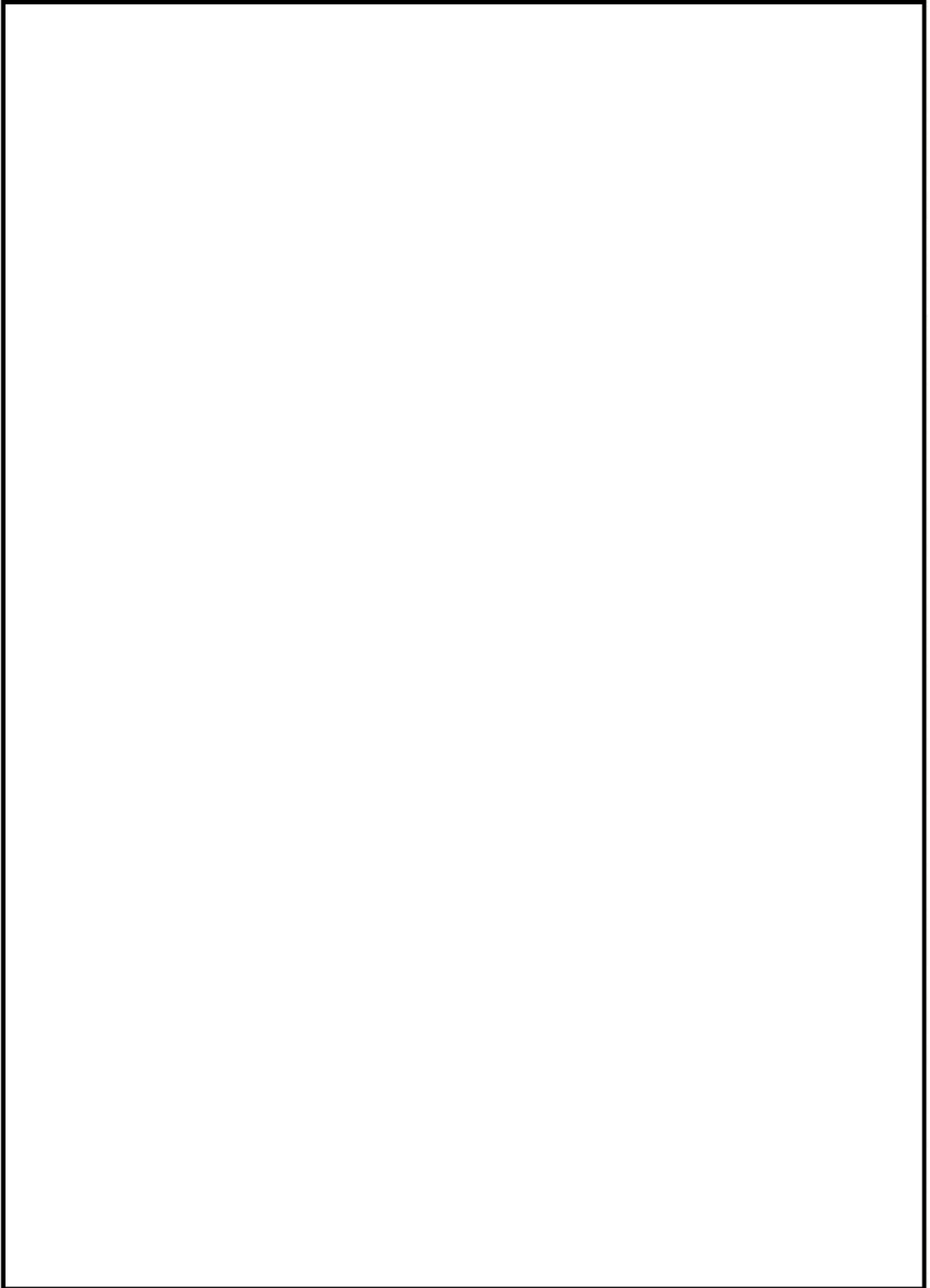


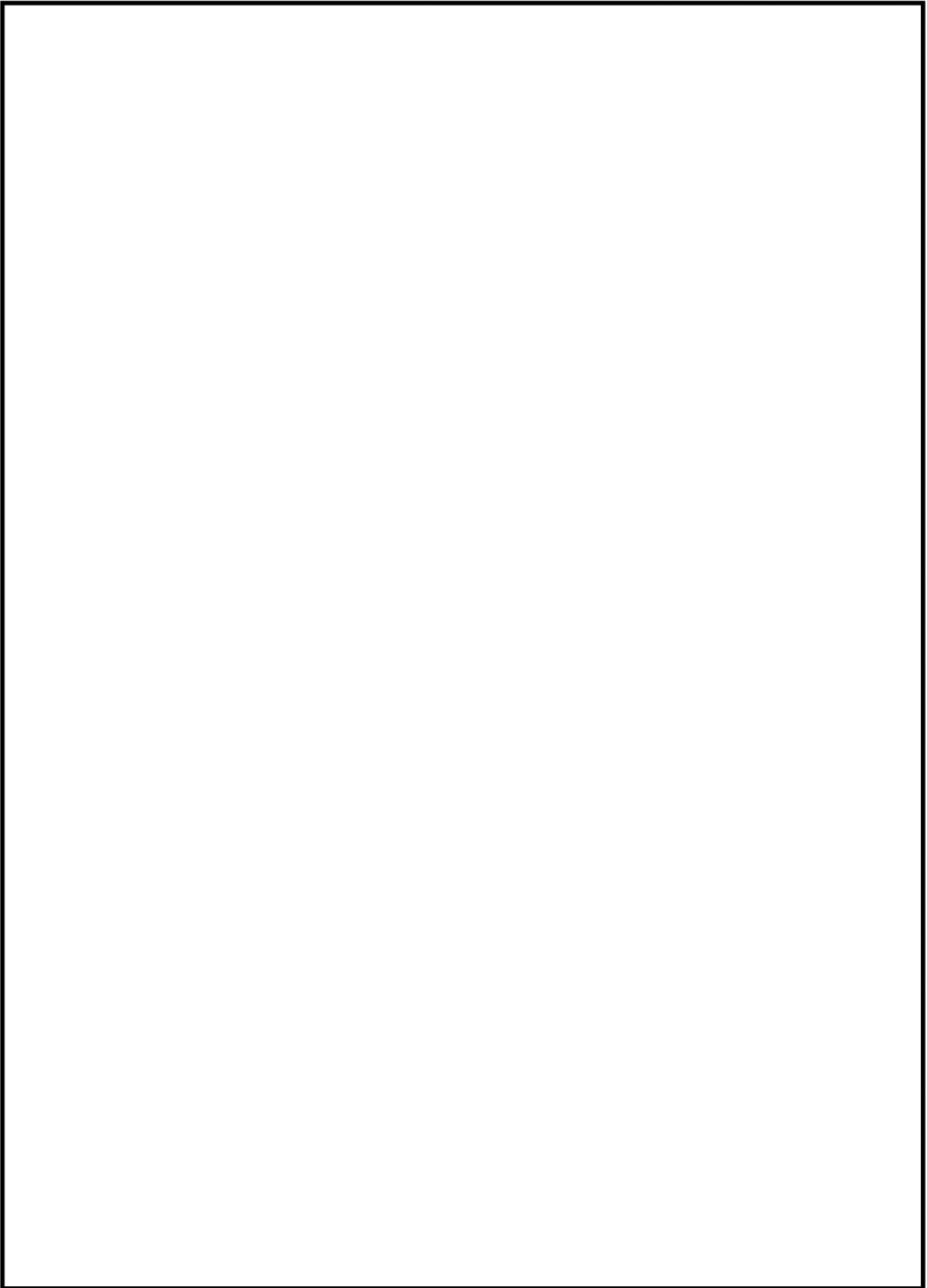


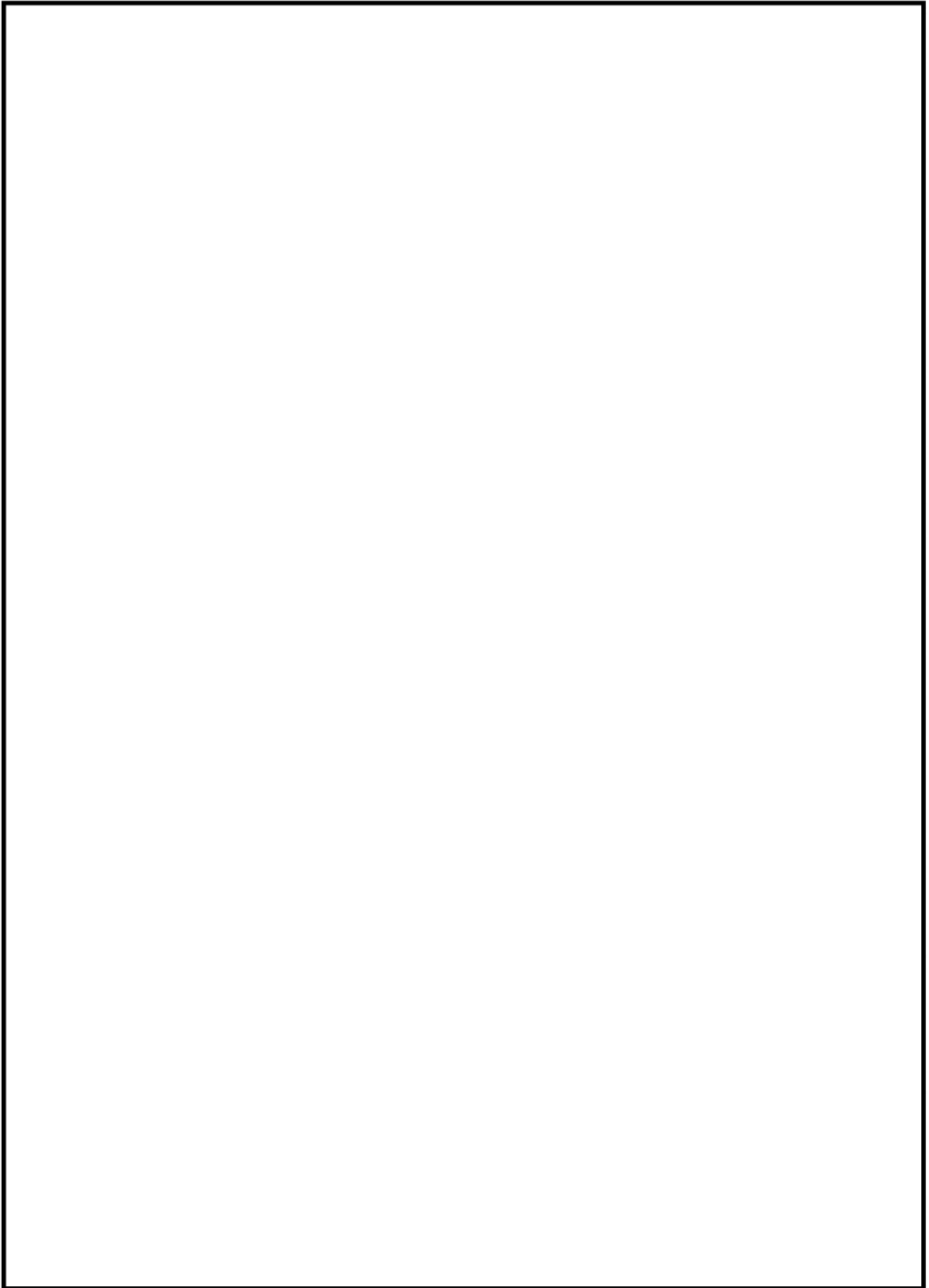


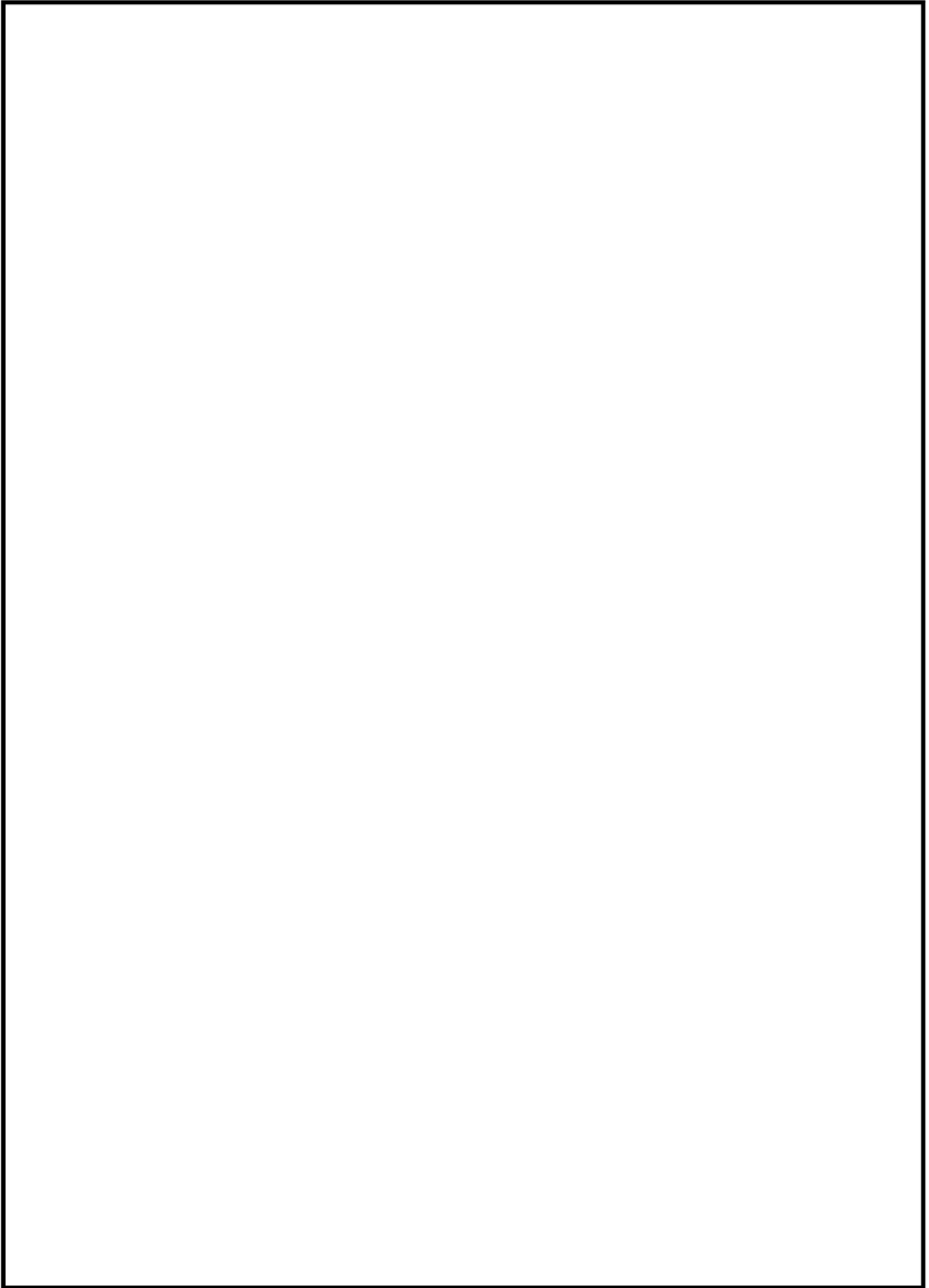


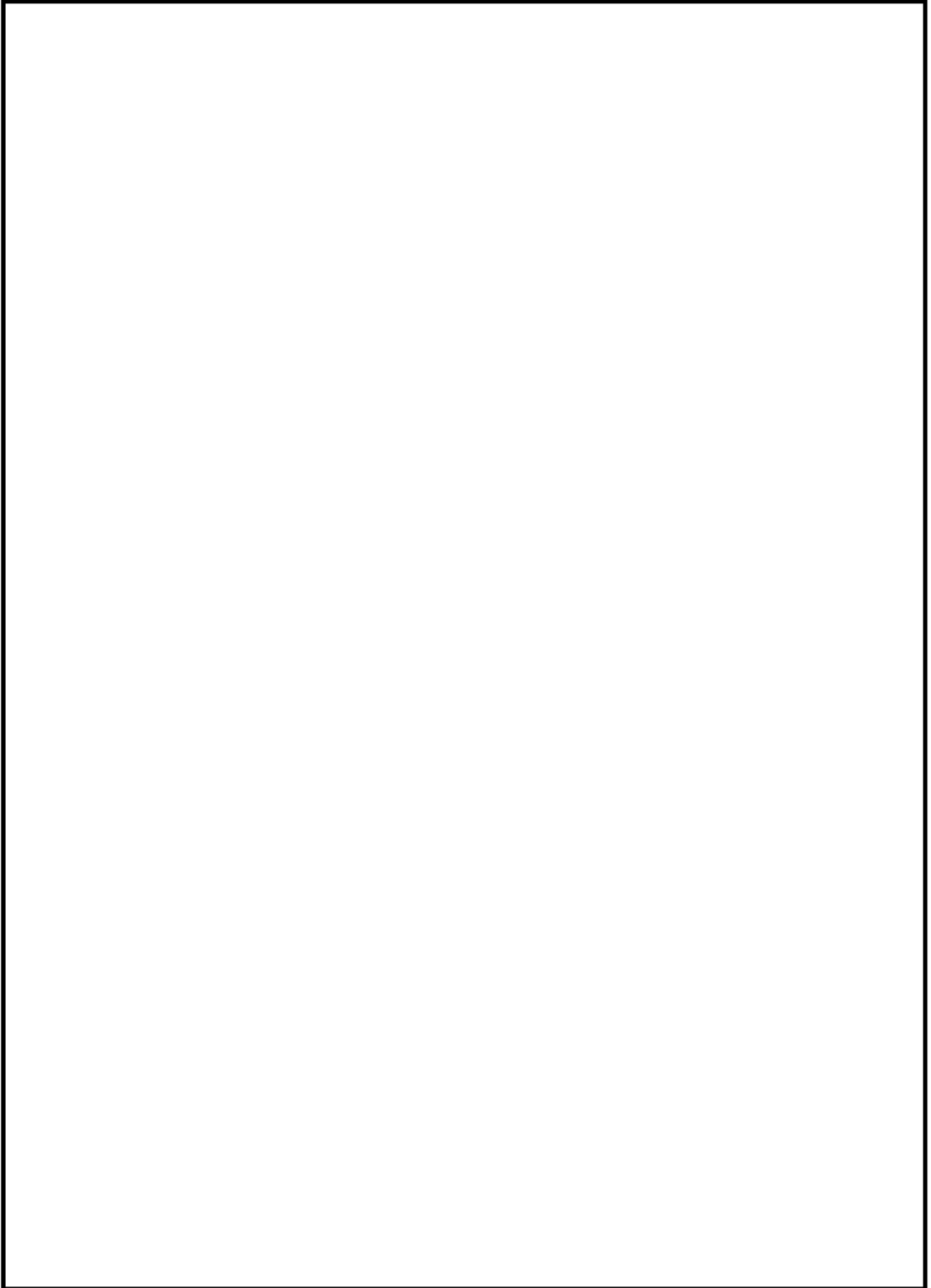


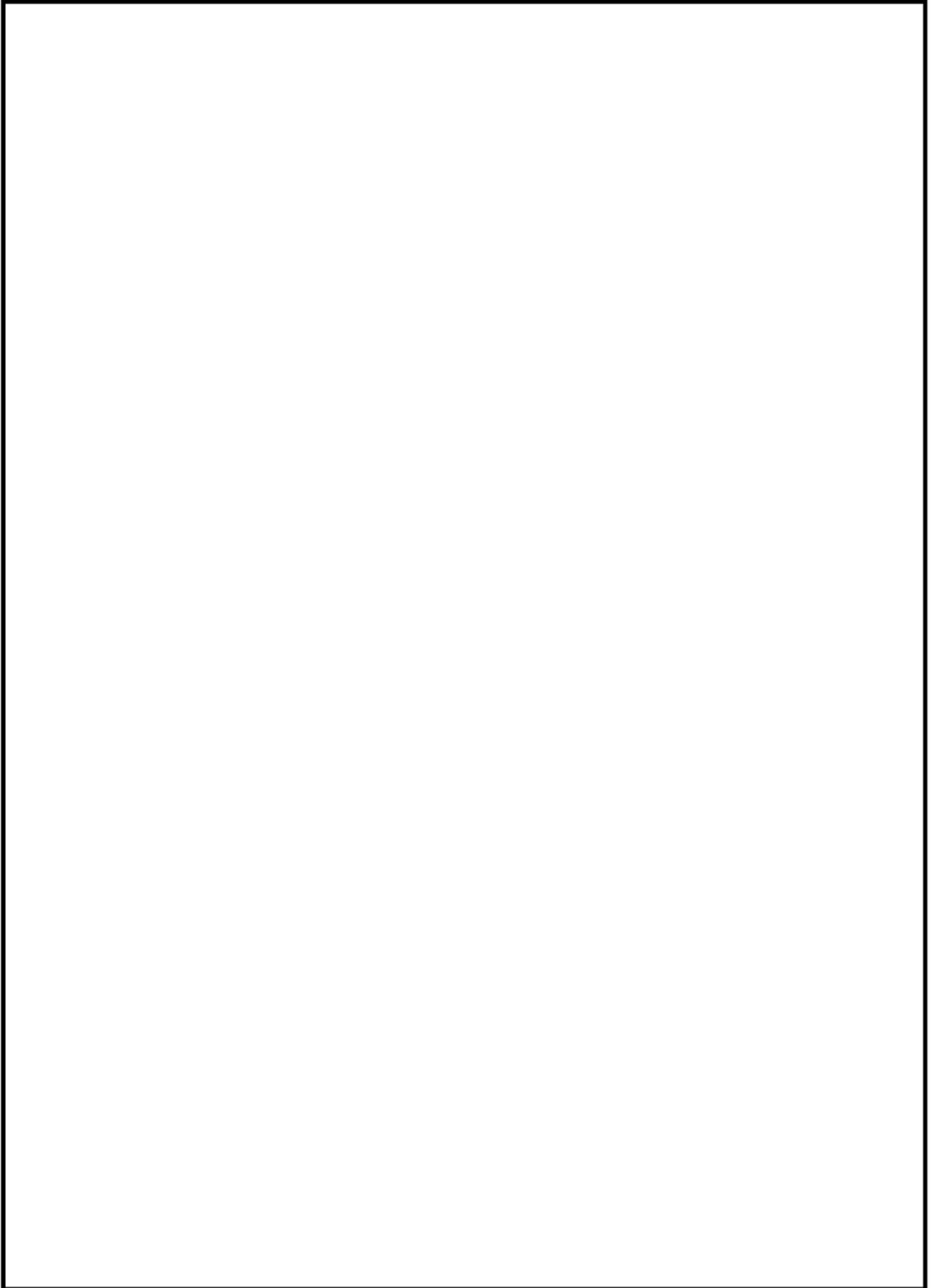


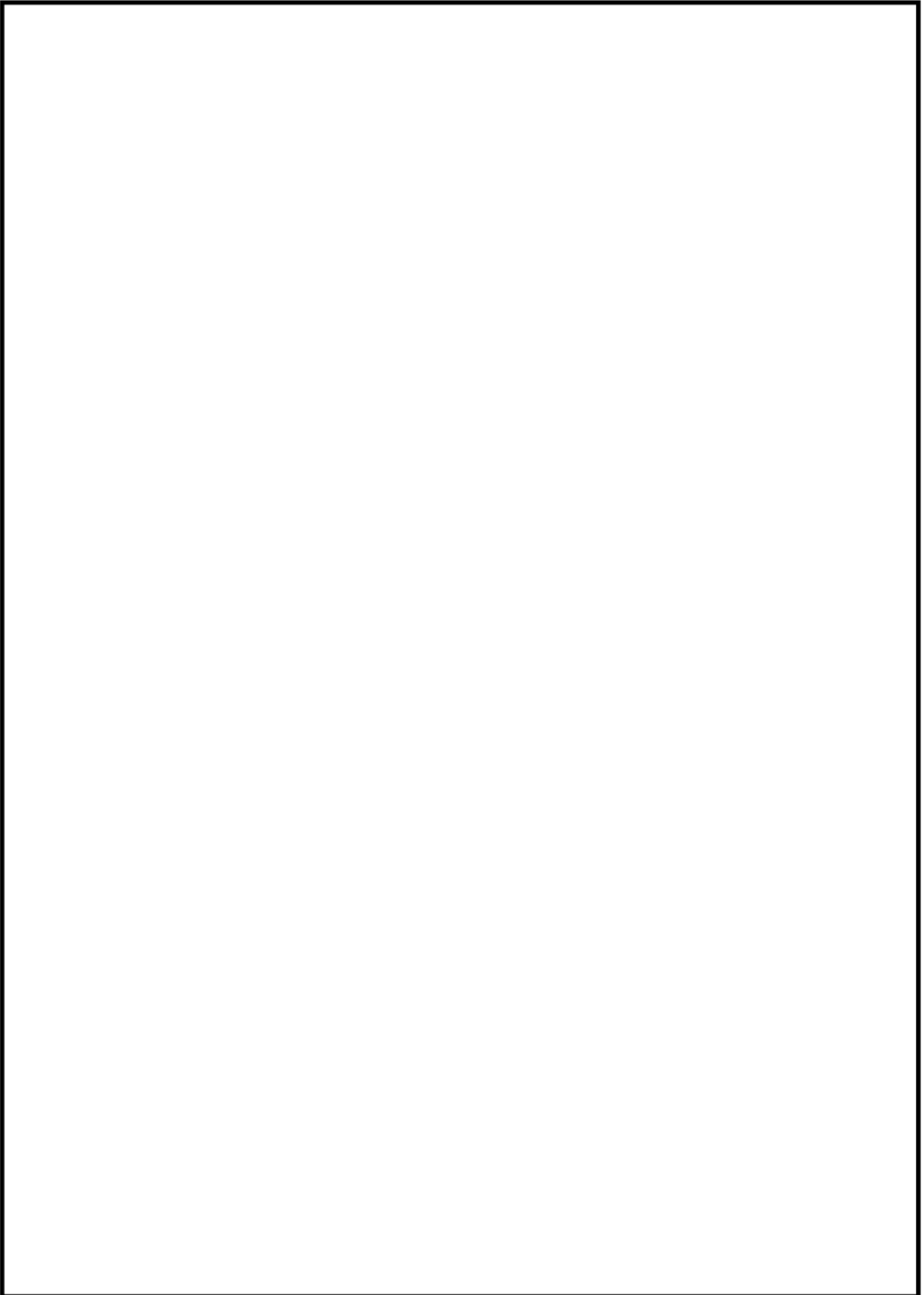


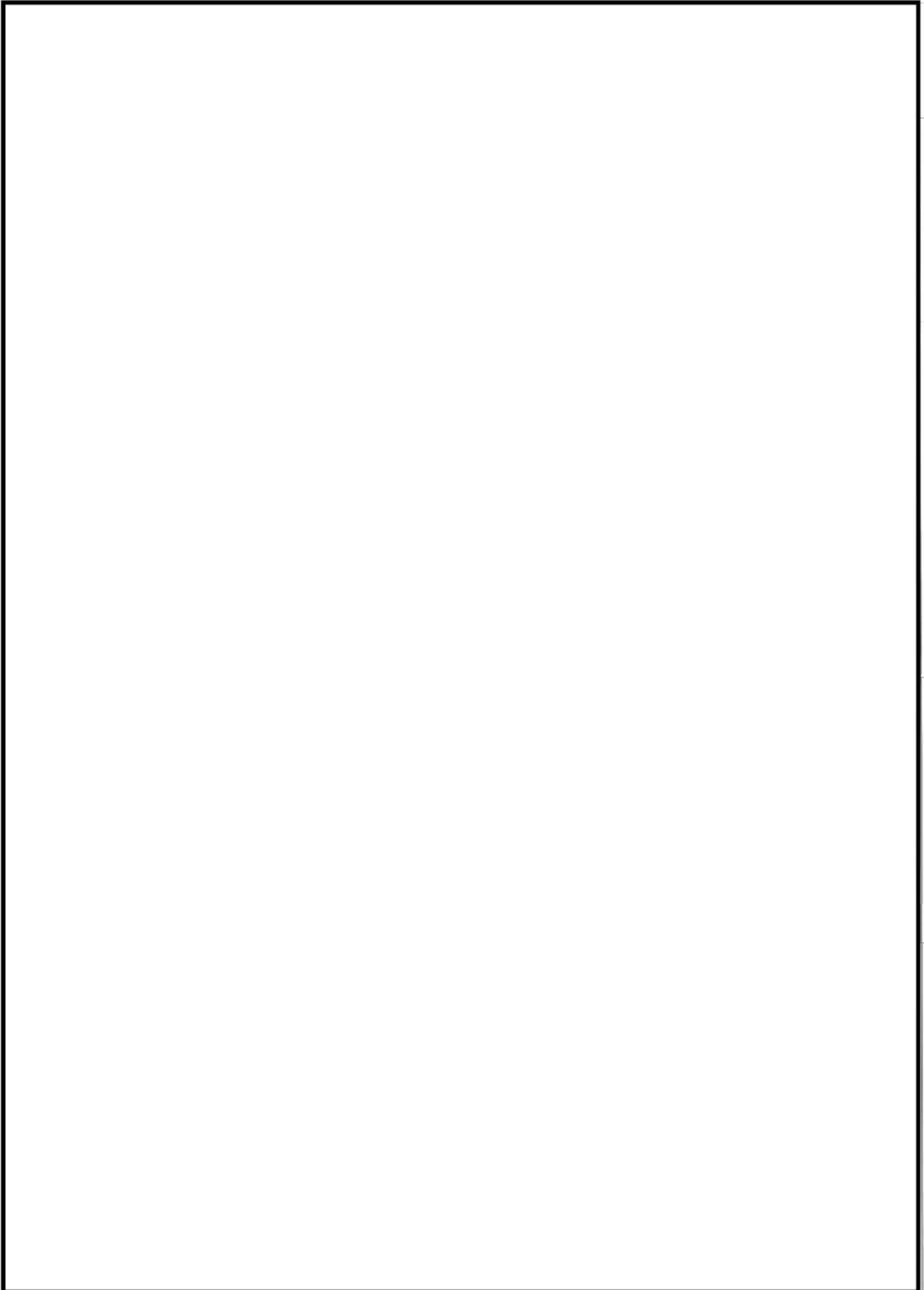


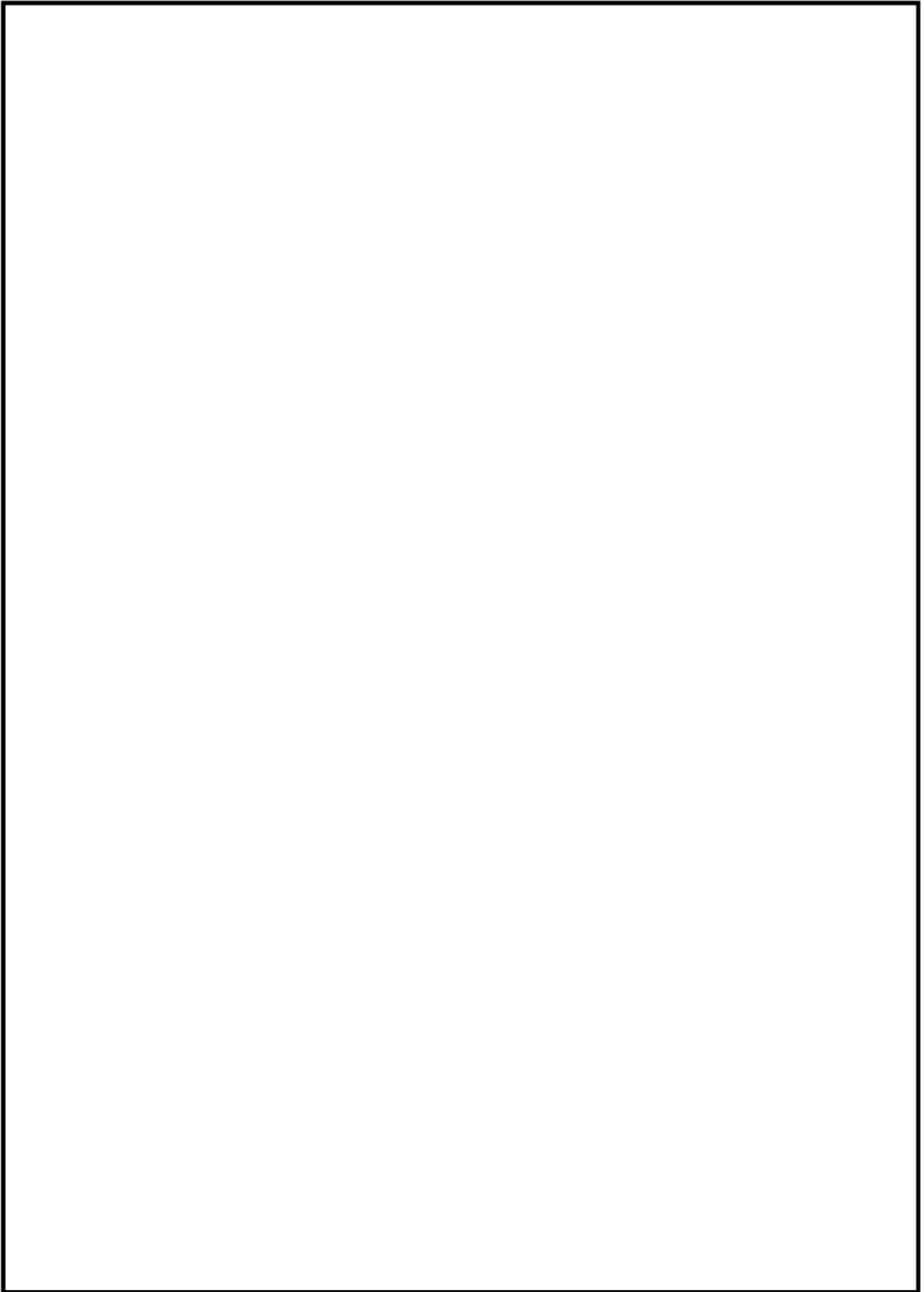












タイトル	土木建築設備に係る保全管理の文書体系について
説明	<p data-bbox="448 383 1246 416">土木建築設備に係る保全管理の文書体系は以下のとおりである。</p> <pre data-bbox="421 495 1362 1256">graph TD; A[施設管理通達] --> B[原子力発電所土木建築業務要綱]; B --> C[高浜発電所土木建築業務所則]; B --> D[原子力発電所建築設備点検要綱指針]; B --> E[原子力発電所土木設備点検要綱指針]; B --> F[原子力発電所コンクリート構造物高経年化に関する点検要綱指針]; C --> G[高浜発電所土木建築業務所則指針];</pre> <p data-bbox="1305 1335 1362 1368">以上</p>

タイトル	炉心領域部および原子炉容器サポート直下部の1次遮蔽壁における温度分布解析の方法などについて
説明	<p>炉心領域部および原子炉容器サポート（以下「RVサポート」という。）直下部の1次遮蔽壁（コンクリート）における温度分布解析の方法などについて、以下に示す。</p> <p>1. 炉心領域部の温度分布解析</p> <p>1. 1 温度分布解析の方法</p> <p>炉心領域部の1次遮蔽壁内におけるガンマ発熱による温度分布は、2次元輸送計算コード DORT (Ver. 3.2) を用いて、1次遮蔽中のガンマ線束分布を算出し、ガンマ発熱量換算係数を乗じることで温度分布を求めている。</p> <p>(1) 解析モデル</p> <p>炉心、炉内構造物、原子炉容器および1次遮蔽壁（コンクリート）を2次元形状（水平断面）でモデル化している。具体的な解析モデルは添付1に示す。</p> <p>(2) 入力条件</p> <p>DORT コードは、米国のオークリッジ国立研究所で開発された中性子輸送方程式を数値的に解くコードであり、入力パラメータは、以下のとおりである。</p> <div data-bbox="427 1193 1362 1547" data-label="Diagram"> <pre> graph LR A[①物性値(密度, 組成)] --> DORT[DORTコード] B[②原子炉, 1次遮蔽形状] --> DORT C[③原子炉出力分布※1] --> DORT D[④核分裂により発生する 中性子スペクトル※2] --> DORT DORT --> E[ガンマ線束] F[エネルギー吸収係数] --> E E --> G[ガンマ発熱量 (kcal/(cm³・h))] </pre> </div> <p>※1：これまでの運転サイクルにおける原子炉出力分布の平均値を用いて原子炉熱出力に相当する分のエネルギー（中性子発生個数）を入力している。</p> <p>※2：燃料の核分裂により発生する中性子発生個数とエネルギー（物性値）を入力している。</p> <p>1. 2 解析結果</p> <p>1次遮蔽壁内のガンマ発熱量分布の計算結果を添付1に示す。添付1を基に、円筒形状に対する熱伝導方程式を解いて温度分布を算出した結果、1次遮蔽壁内での最高温度は、1次遮蔽壁内面から約47cmの位置に現れ、約56℃であり、強度上の熱に対するコンクリートの温度制限値（一般部65℃、局部90℃）を下回る結果であった。1次遮蔽壁内の温度分布を添付2に示す。</p>

2. RVサポート直下部の温度分布解析

2. 1 温度分布解析の方法

RVサポート廻りコンクリート部の温度分布解析は、対象範囲を3次元ソリッド要素でモデル化し、熱流動解析を実施している。熱流動解析では、冷却空気の流れから、熱伝達面に沿った流速分布、冷却空気温度を解析で求めることにより各部材温度を算出している。解析コードはANSYS (Ver. 18.0) を使用している。

(1) 解析モデル

解析モデルの対象範囲は、温度条件の厳しいRV出口ノズル部廻りとし、以下の要素から構成している。具体的な対象範囲と解析モデルは添付3に示す。

- ・RV
- ・1次冷却材管（ホットレグ）
- ・保温材
- ・RVサポート
- ・1次冷却材管貫通部
- ・1次遮蔽壁（コンクリート）

(2) 入力条件

入力条件は定格出力運転時を前提として下記のとおりとしている。

- ・1次冷却材温度（RV内面） T_H °C
- ・1次冷却材温度（RV出口管台及び1次冷却材管内面） T_H : °C
- ・RV冷却ファン出口冷却空気流量： m³/min
- ・RV冷却ファン出口冷却空気温度： °C
- ・ガンマ発熱：添付1 図2のガンマ発熱量分布
- ・材料物性値（熱伝導率）：文献、使用材料に基づき設定（添付4）

2. 2 解析結果

RVサポート直下は伝熱により温度が上昇する。しかし、温度分布解析の結果は、約53.2°Cであり強度上の熱に対するコンクリートの温度制限値（一般部65°C、局部90°C）を下回る結果であった（添付5）。また、RVサポートの外側コンクリート回廊部において、シム及びサポートシュの輻射による影響から53.4°Cを示す箇所があるが、RVサポートからの荷重を直接支持する部位ではない。

なお、コンクリート内部におけるRVサポート直下部近傍の実測温度は約37~44°Cであり、実測温度の測定箇所における解析結果（約53.2°C）よりも十分に低い値であることから、保守的な評価が行われていると判断している（添付6）。

以上

	<p>添付1 炉心領域部の1次遮蔽壁（コンクリート）におけるガンマ発熱量分布の計算モデルおよび計算結果</p> <p>添付2 炉心領域部の1次遮蔽壁（コンクリート）内の温度分布</p> <p>添付3 R Vサポート直下部の解析対象範囲および解析モデル</p> <p>添付4 材料物性値（熱伝導率）</p> <p>添付5 R Vサポート直下部の1次遮蔽壁（コンクリート）の温度分布</p> <p>添付6 R Vサポート直下部近傍の解析値と実測温度の比較</p>
--	---

炉心領域部の1次遮蔽壁（コンクリート）における
ガンマ発熱量分布の計算モデルおよび計算結果

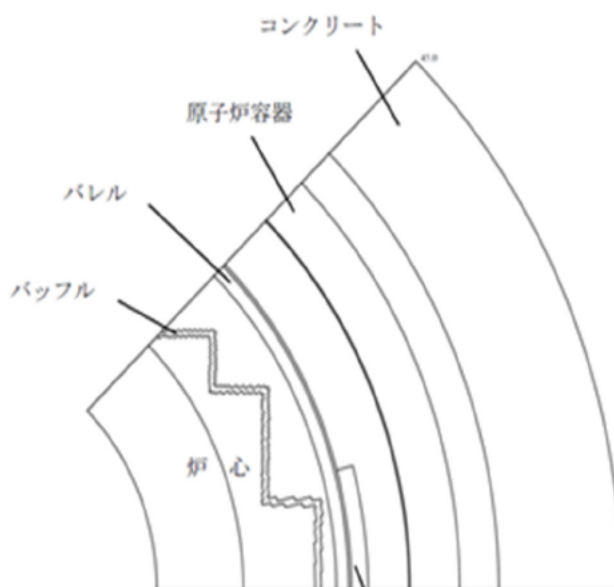


図1 計算モデル

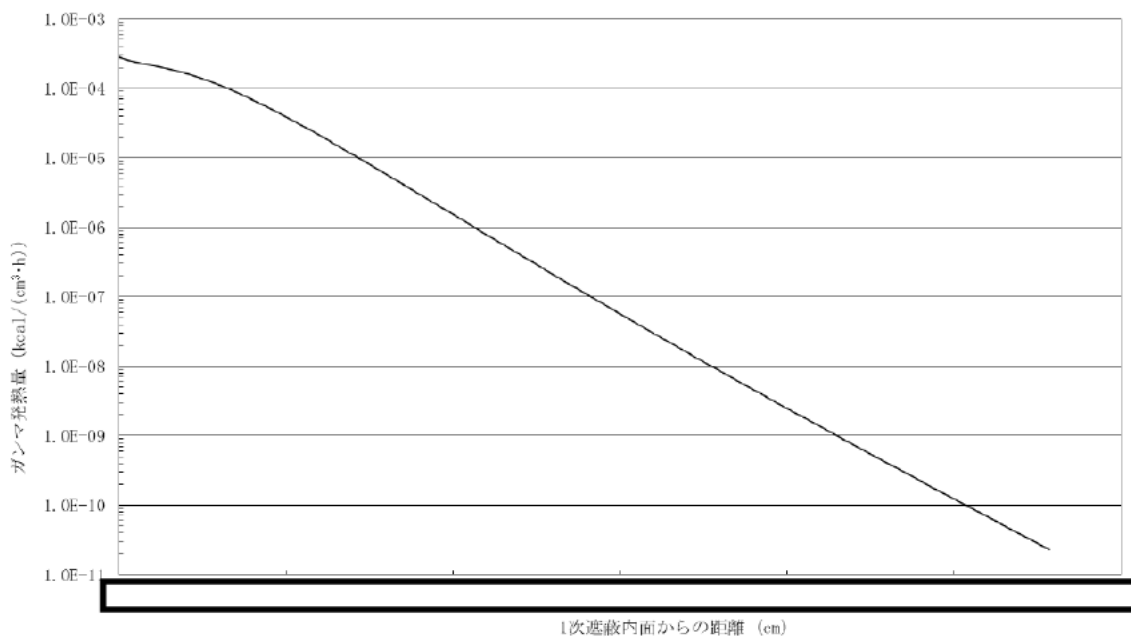


図2 1次遮蔽壁（コンクリート）内のガンマ発熱量分布

炉心領域部の1次遮蔽壁（コンクリート）内の温度分布

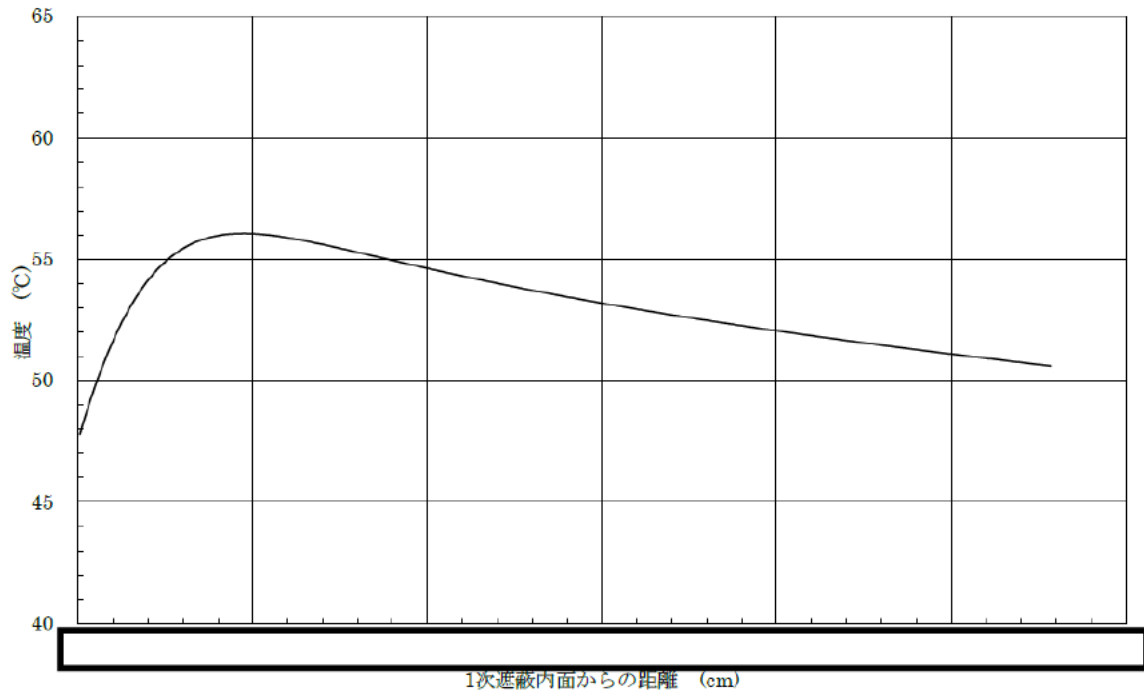


図3 1次遮蔽壁（コンクリート）内の温度分布

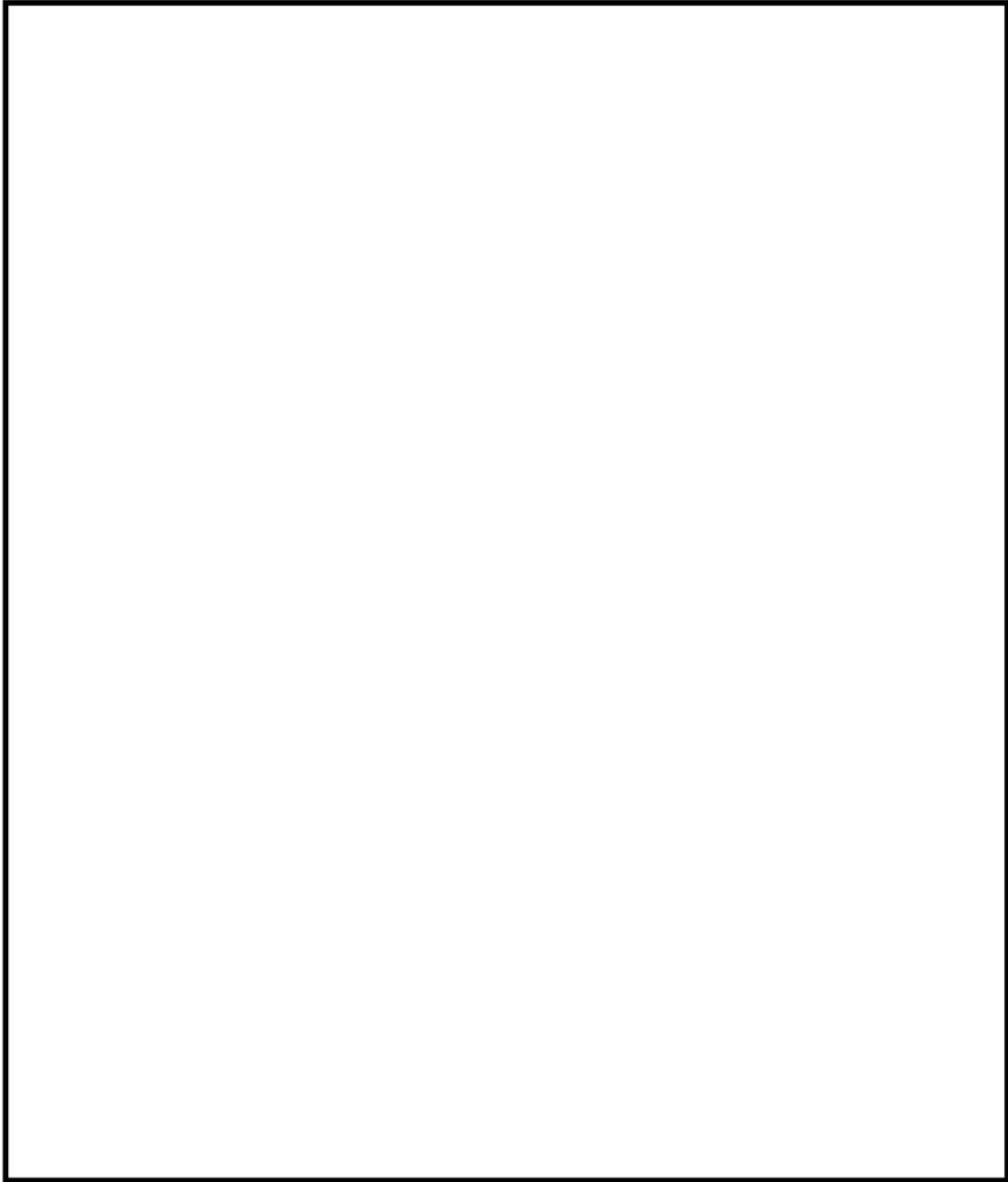


図5 解析モデル（全体）

材料物性値（熱伝導率）

表 1 各部位の材質と熱伝導率

部位		材質	熱伝導率 (W/(m・K)) ※
空気		—	0.02572 (20°C) 0.03145 (100°C) 0.03803 (200°C) 0.04708 (350°C)
R V	上部胴、冷却材出口管台	SFVQ1A	51.2 (300K) 46.1 (500K) 36.9 (800K)
	下部胴	SFVQ2A	
	セーフエンド	SUSF316	16.0 (300K) 19.0 (600K) 25.7 (1000K)
1次冷却材管	ホットレグ	SCS14A	24.3 (300K)
R Vサポート	シムプレート	AISI A10相当 (工具鋼相当)	45.1 (300K) 39.2 (600K) 29.9 (1000K)
	サポートシュ	SFVQ1A	51.2 (300K) 46.1 (500K) 36.9 (800K)
	サポートブラケット、 ベースプレート、外周プレート	SM50B (SM490B)	51.6 (300K) 47.8 (500K) 38.2 (800K)
リングフレーム、プレッシャデフレクタ、 バッフルプレート		SS41 (SS400)	
コンクリート		普通コンクリート (珪岩質骨材コン クリート)	1.5 (293K) 1.1 (600K)
保温材	R V保温材	—	
	1次冷却材管保温材	—	

※：（出典）日本機械学会「伝熱工学資料 改訂第5版」（保温材は保温材スペック）
熱伝導率は記載の値（記載の値は一例）を定義し、その間の温度では解析コード内で
線形補完した値を設定している

RVサポート直下部の1次遮蔽壁（コンクリート）の温度分布

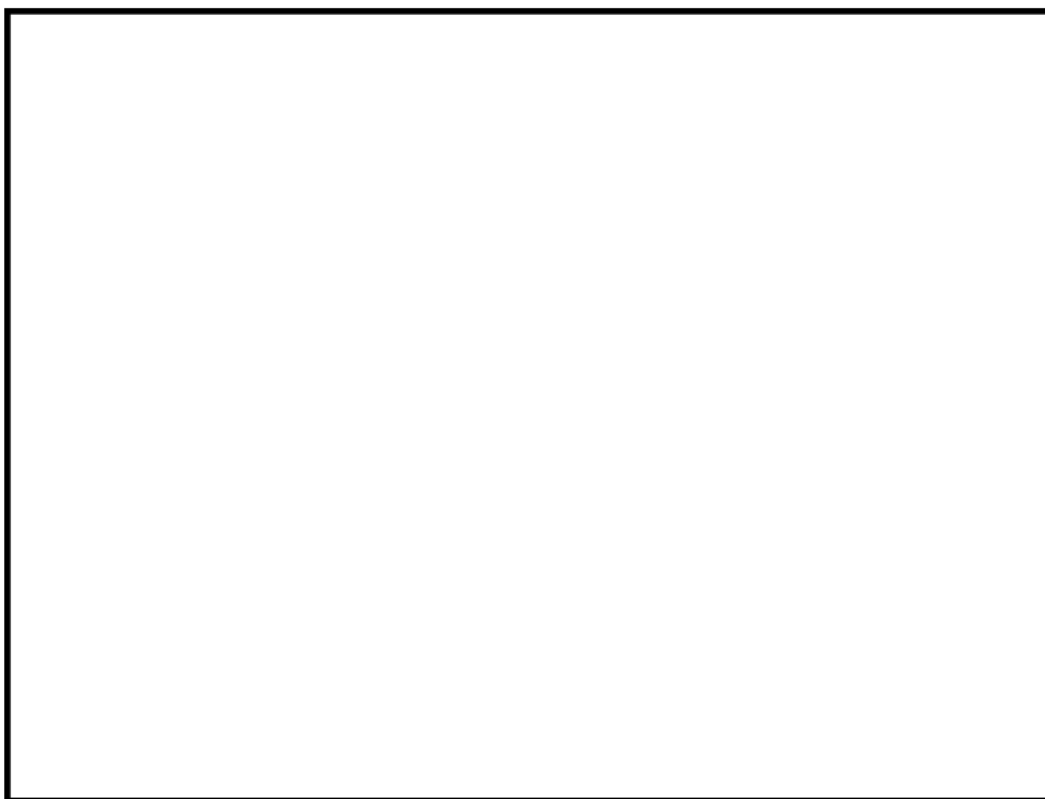


図6 解析モデル全体の温度分布

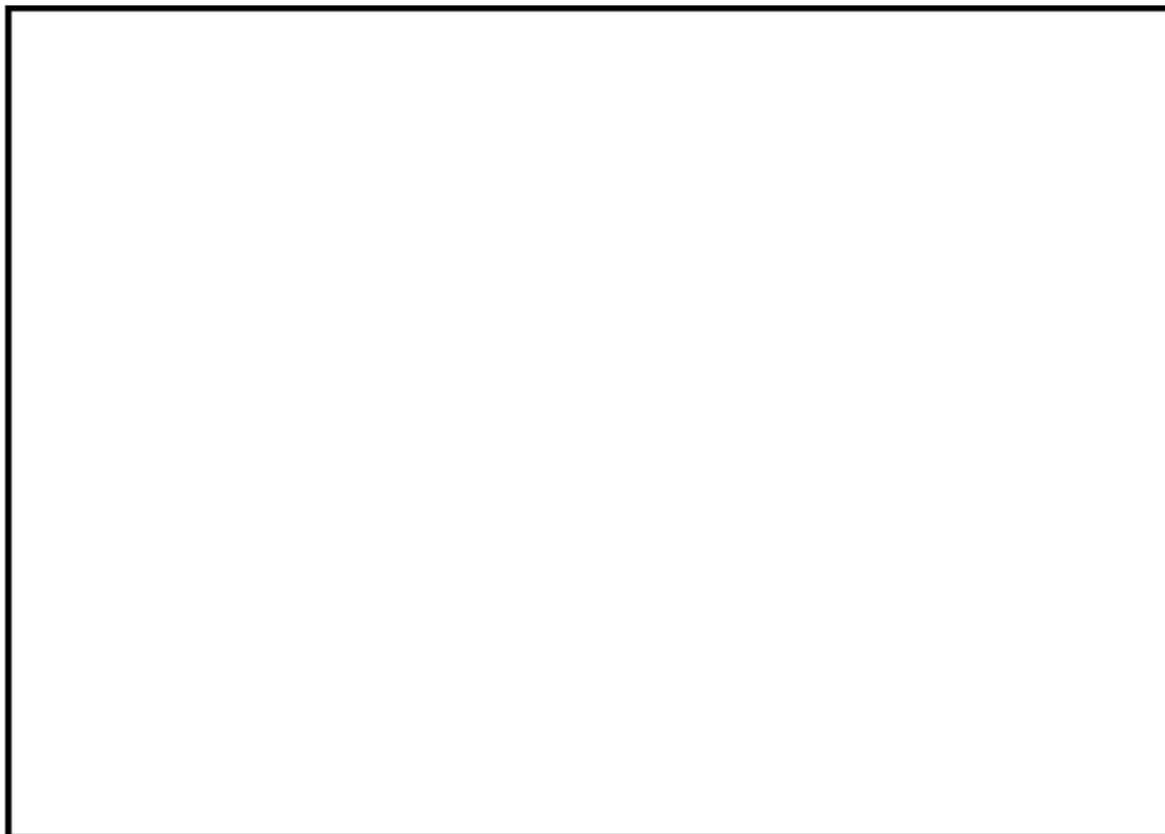


図7 RVサポート廻りのコンクリートの温度分布

RVサポート直下部近傍の解析値と実測温度の比較

表2 解析値と実測温度の比較

解析値※	実測値	備考
約53.2℃	約37～44℃	実測日は、2021年8月7日

※：解析値は、実測温度の測定箇所における値

タイトル	放射線照射量の算出方法などについて
説明	<p>1次遮蔽の放射線照射量は、1次遮蔽における中性子束 ($E > 0.098\text{MeV}$) およびガンマ線量率を2次元輸送計算コードDORTにより算出し、運転時間を掛けることで中性子、ガンマ線照射量を求めている。</p> <p>DORTコードは、米国のオークリッジ国立研究所で開発された中性子輸送方程式を数値的に解くコードであり、入力パラメータは以下のとおりである。</p> <div data-bbox="443 645 1361 1010" style="border: 1px solid black; padding: 10px; margin: 10px 0;"> <pre> graph LR A[①物性値 (密度, 組成)] --> DORT[DORTコード] B[②原子炉, 1次遮蔽形状] --> DORT C[③原子炉出力分布※1] --> DORT D[④核分裂により発生する 中性子スペクトル※2] --> DORT DORT --> E[中性子束 (n/(cm²·s)) ガンマ線量率 (rad/h)] </pre> </div> <p>※1：これまでの運転サイクルにおける原子炉出力分布の平均値を用いて原子炉熱出力に相当する分のエネルギー（中性子発生個数）を入力している。</p> <p>※2：燃料の核分裂により発生する中性子発生個数とエネルギー（物性値）を入力している。</p> <p>1次遮蔽内の中性子束およびガンマ線量率は、炉心の水平断面形状 (R, θ 計算) を用いて、1次遮蔽の照射量が最大となる高さ位置の中性子束およびガンマ線量率を各々算出する。</p> <p>また、中性子束およびガンマ線量率の軸方向分布 ($\phi(z)$) は、水平断面形状 (R, θ 計算) で算出した中性子束およびガンマ線量率の最大値 (ϕ_{\max}) を垂直断面形状 (R, Z 計算) より算出した軸方向の補正係数 (f_z) を用いて補正することで算出する。</p> $\phi(z) = \phi_{\max} \times f_z$ <p>$\phi(z)$：中性子束およびガンマ線量率の軸方向分布 ϕ_{\max}：中性子束およびガンマ線量率の最大値 f_z：軸方向の補正係数</p> <p>1次遮蔽内の水平断面形状 (R, θ 計算) の評価では、図1に示すような形状を入力して、1次遮蔽の最大高さ位置の中性子束およびガンマ線量率を算出している。</p>

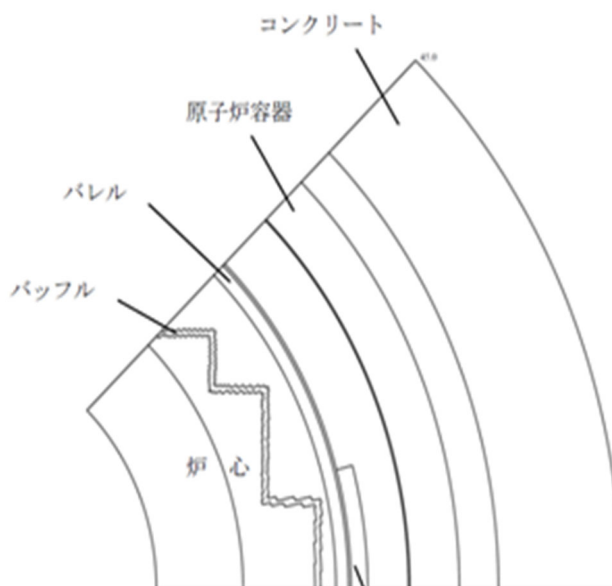


図1 計算モデル図[(R, θ)形状]

また、1次遮蔽内の垂直断面形状 (R, Z計算) の評価では、図2に示すような形状を入力して、軸方向の補正係数 (fz) を算出している。

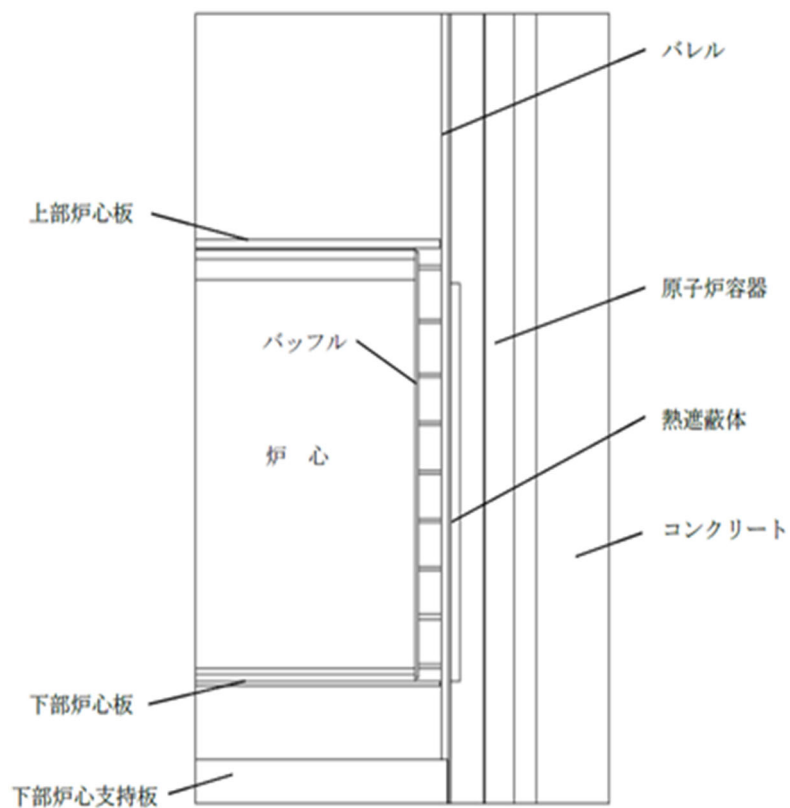


図2 計算モデル図[(R, Z)形状]

以上により算出した1次遮蔽内の中性子束およびガンマ線量率に対し、運転開始後60年時点における定格負荷運転年数（47.0 EFPY*）を乗じ、1次遮蔽壁コンクリートがうける照射量を算出した結果を表1に示す。

*運転開始後60年時点における定格負荷運転年数の予測値

表1 1次遮蔽壁コンクリート内面がうける照射量の最大値

項目	解析結果	備考
中性子照射量	5.62×10^{19} (n/cm ²)	E>0.098MeV
ガンマ線照射量	1.75×10^{10} (Rad)	

運転開始後60年時点における定格負荷運転年数については、2021年3月末までは運転実績（25.5 EFPY、設備利用率69.7%）を用い、2022年4月以降は設備利用率を90%と仮定して計算している。将来の運転年数は、過去の設備利用率を踏まえて保守的に設定しており、実際の照射量は解析で算出した照射量よりも小さくなると判断している。

以上

タイトル	中性子照射量に対する耐力評価について																								
説明	<p>以下のとおり、中性子照射量に対する耐力評価を行った。</p> <p>1. 中性子照射量が $1 \times 10^{19} \text{ n/cm}^2$ を超える範囲を添付-1 に示す。 中性子照射量が、$1 \times 10^{19} \text{ n/cm}^2$ を超える範囲は炉心中心部で最も大きくなり、深さ方向に最大約 12cm である。</p> <p>2. 原子炉容器の鉛直方向荷重は、シムプレート、サポートシュおよびサポートリブを、接線方向荷重は、上記に加えてベースプレート、外周プレートおよび埋込補強材（スタッド）を経て1次遮蔽壁に伝わるが、添付-2 に示すとおり、荷重の耐力は既工認の評価にて実施している。 中性子線照射の影響を考慮した鉛直方向荷重および接線方向荷重に対する耐力評価を説明する。</p> <p>(1) 鉛直方向荷重に対する評価 中性子照射量が $1 \times 10^{19} \text{ n/cm}^2$ を超える範囲は炉心中心部で最も大きくなり、炉心中心部の $1 \times 10^{19} \text{ n/cm}^2$ を超える範囲を荷重負担部の1次遮蔽コンクリート上端から下部まで欠損させた状態を保守的に想定する。（添付-3） 評価用荷重として基準地震動 S_s を用いた耐力評価を行った結果、以下のとおり圧縮耐力は地震時の荷重を十分上回っていることを確認した。</p> <p>原子炉容器支持構造物コンクリート 鉛直方向荷重による圧縮評価</p> <table border="1" data-bbox="507 1227 1326 1350"> <thead> <tr> <th>欠損想定</th> <th>荷重 (kN)</th> <th>耐力 (kN)</th> <th>耐震裕度</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>欠損無</td> <td><input type="text"/></td> <td><input type="text"/></td> <td>2.20</td> </tr> <tr> <td>欠損有</td> <td><input type="text"/></td> <td><input type="text"/>*</td> <td>2.20</td> </tr> </tbody> </table> <p>※:欠損面積が僅かであるため、端数処理により欠損無の耐力と同値となる。</p> <p>(2) 接線方向荷重に対する評価 接線方向荷重によるベースプレートの浮き上がり防止のために基礎ボルトが設置されており、基礎ボルトによるコンクリートのコーン状破壊面の有効投影面積から中性子照射量が $1 \times 10^{19} \text{ n/cm}^2$ を超える範囲を欠損させた状態を想定して耐力評価を行った。欠損範囲については1次遮蔽壁の炉心側表面から $1 \times 10^{19} \text{ n/cm}^2$ を超える範囲とし、1次遮蔽壁上端から下端までを欠損させた状態を保守的に想定する。（添付-4） 評価用荷重として基準地震動 S_s を用いた耐力評価を行った結果、以下のとおり引張耐力は地震時の荷重を十分上回っていることを確認した。</p> <p>原子炉容器支持構造物コンクリート 接線方向荷重による引張評価</p> <table border="1" data-bbox="507 1892 1326 2016"> <thead> <tr> <th>欠損想定</th> <th>荷重 (kN)</th> <th>耐力 (kN)</th> <th>耐震裕度</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>欠損無</td> <td><input type="text"/></td> <td><input type="text"/></td> <td>2.04</td> </tr> <tr> <td>欠損有</td> <td><input type="text"/></td> <td><input type="text"/></td> <td>2.00</td> </tr> </tbody> </table>	欠損想定	荷重 (kN)	耐力 (kN)	耐震裕度	欠損無	<input type="text"/>	<input type="text"/>	2.20	欠損有	<input type="text"/>	<input type="text"/> *	2.20	欠損想定	荷重 (kN)	耐力 (kN)	耐震裕度	欠損無	<input type="text"/>	<input type="text"/>	2.04	欠損有	<input type="text"/>	<input type="text"/>	2.00
欠損想定	荷重 (kN)	耐力 (kN)	耐震裕度																						
欠損無	<input type="text"/>	<input type="text"/>	2.20																						
欠損有	<input type="text"/>	<input type="text"/> *	2.20																						
欠損想定	荷重 (kN)	耐力 (kN)	耐震裕度																						
欠損無	<input type="text"/>	<input type="text"/>	2.04																						
欠損有	<input type="text"/>	<input type="text"/>	2.00																						

3. 中性子線照射量が $1 \times 10^{19} \text{ n/cm}^2$ を超える範囲は、炉心中心部の1次遮蔽壁コンクリート断面において約 m^2 であり、1次遮蔽壁コンクリート断面積全体(約 m^2) の約 %である。
4. 地震時の構造体の耐力と設計荷重との関係を示す指標の一つとして、基準地震動による地震力を負担する断面に対するせん断ひずみによる評価がある。現状の基準地震動に対する最大せん断ひずみと基準値は以下に示す通りであり、基準値に対して余裕があることが確認できる。3. で示す中性子照射量が $1 \times 10^{19} \text{ n/cm}^2$ を超える範囲を考慮しても健全性に影響を及ぼすものではないと判断できる(添付-5)。

内部コンクリート(1次遮蔽壁含む)における 基準地震動に対する最大せん断ひずみ	基準値 ^{※1}
約 0.565×10^{-3} ^{※2}	2.0×10^{-3}

※1：(社)日本電気協会 原子力発電所耐震設計技術指針 (JEAG 4601-1987)

※2：高浜発電所第4号機 工事計画認可申請書 資料13-16-4
内部コンクリートの耐震計算書 (H28.1.21認可)

以上を踏まえ、保守的に内部コンクリート(1次遮蔽壁)からこの範囲を除いても、構造体の耐力が地震時の鉛直荷重などの設計荷重を上回ることを、地震時のせん断ひずみへの影響が極めて軽微であることを確認していることから、内部コンクリート(1次遮蔽壁)の強度への影響はないと考えられる。

- 添付-1 中性子線照射量が $1 \times 10^{19} \text{ n/cm}^2$ を超える範囲
- 添付-2 原子炉本体の基礎に関する説明書(工事計画認可申請書 H28.1.21認可)
- 添付-3 中性子照射量が $1 \times 10^{19} \text{ n/cm}^2$ を超える範囲と原子炉容器支持構造物の支圧面との比較
- 添付-4 コーン状破壊面の有効投影面積と接線方向荷重による引張評価においてコンクリートの欠損を想定する範囲との比較
- 添付-5 中性子照射量が $1 \times 10^{19} \text{ n/cm}^2$ を超える範囲を考慮した基準地震動に対する最大せん断ひずみの確認

中性子線照射量が $1 \times 10^{19} \text{ n/cm}^2$ を超える範囲



図1-1 炉心中心位置での中性子線照射線量当量分布

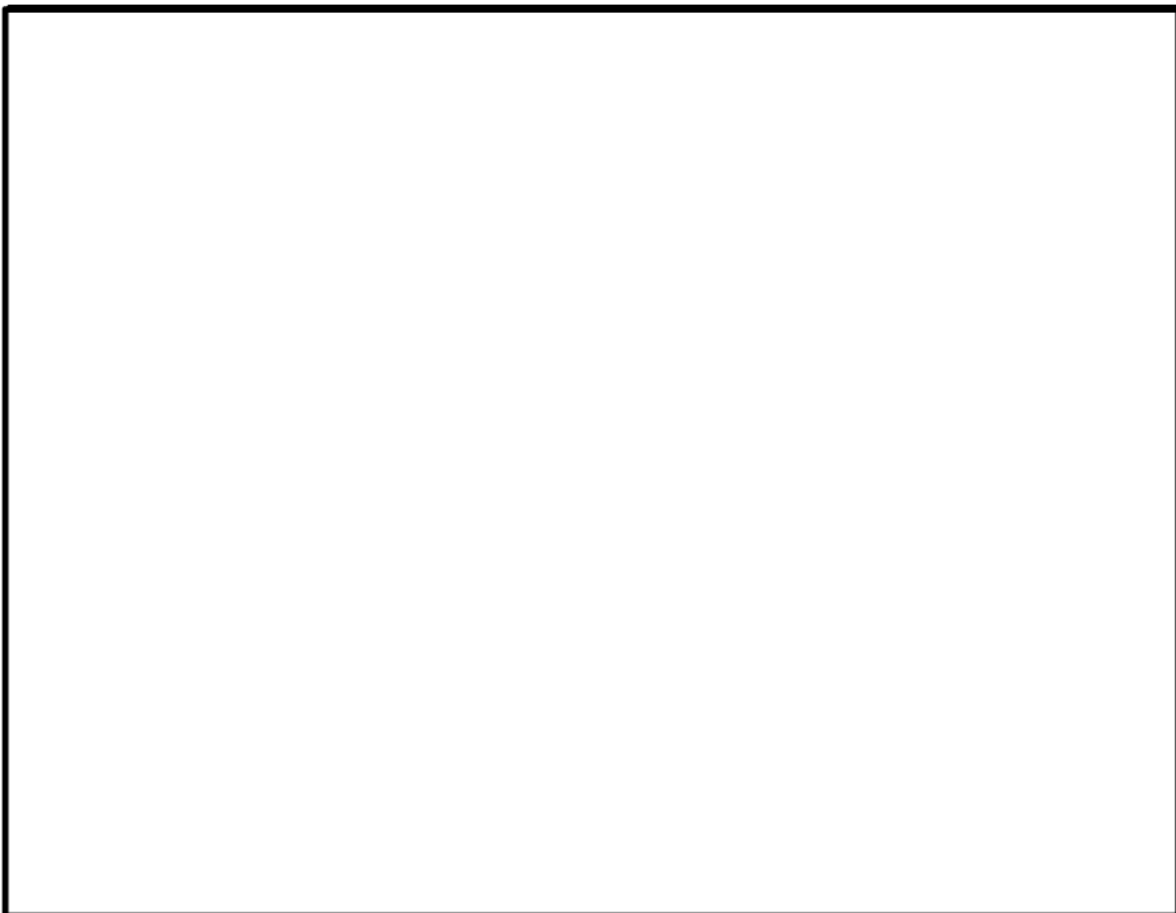


図1-2 中性子線照射線量当量分布解析結果 (解析モデル全体)

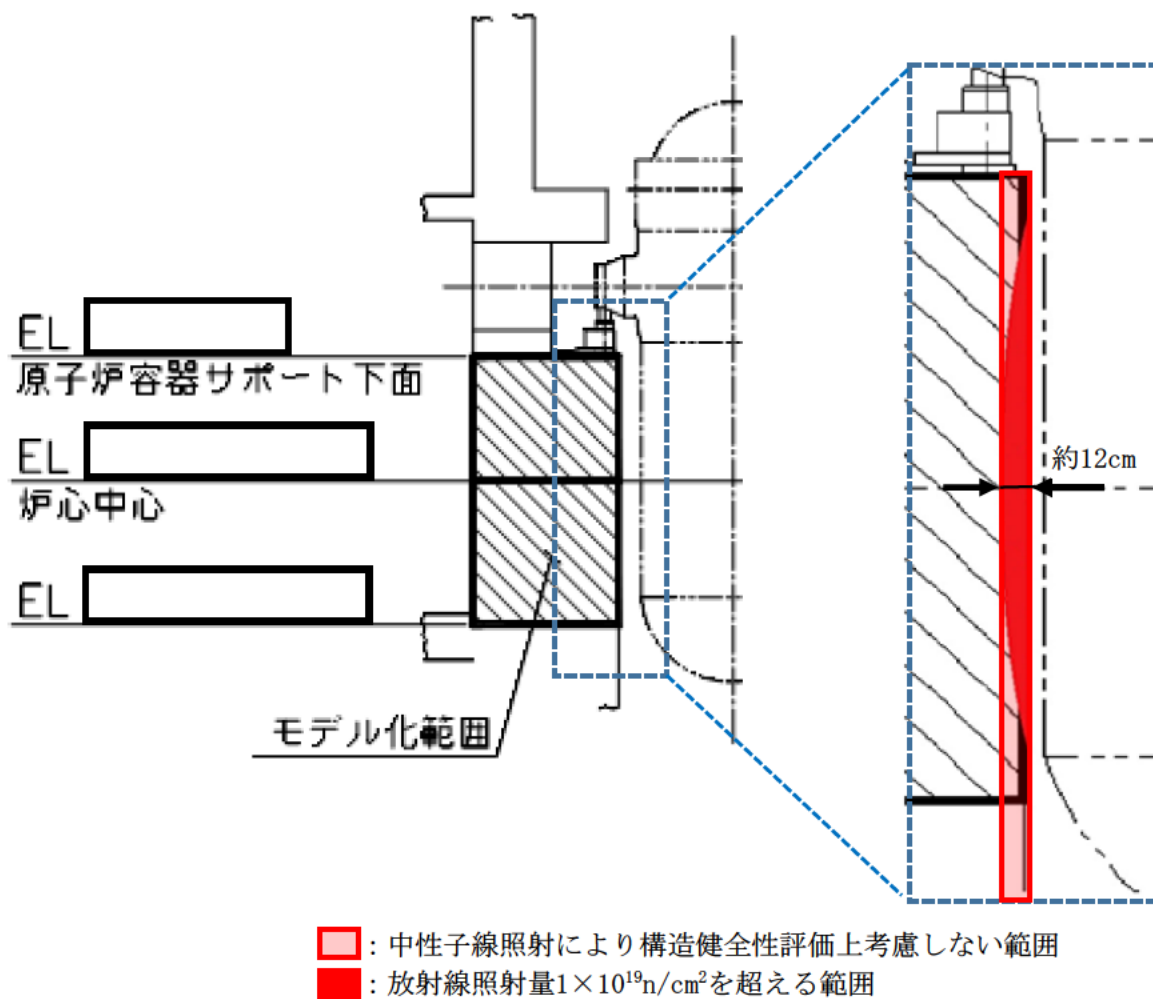
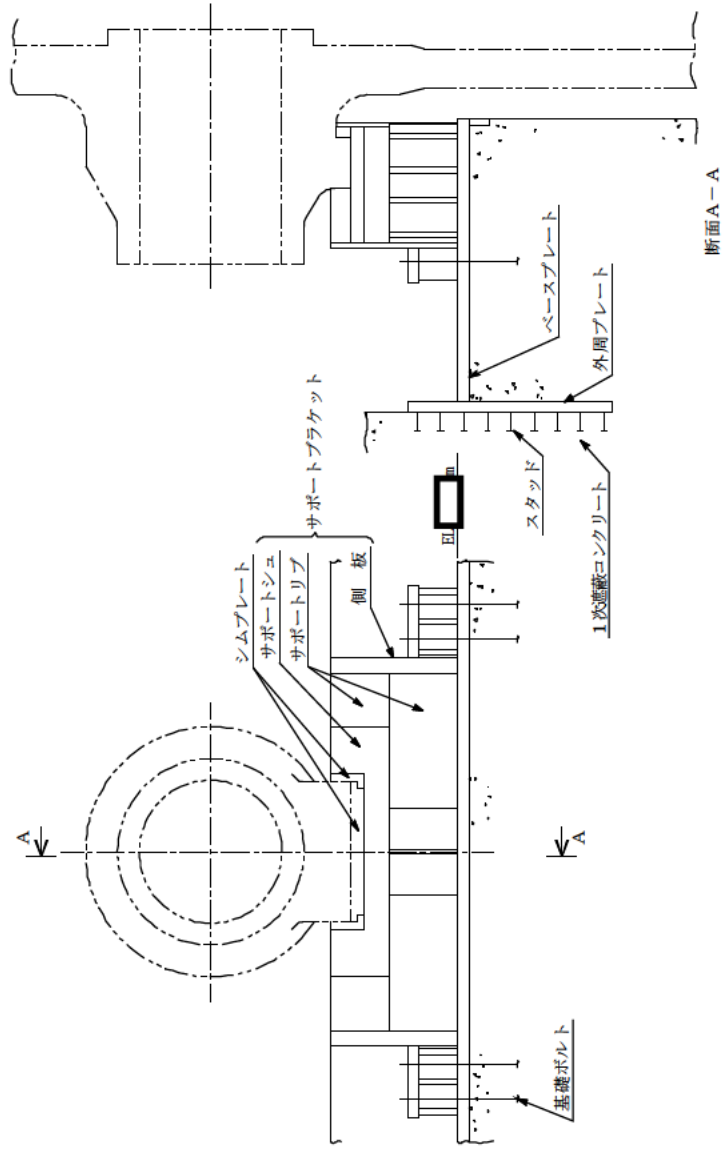


図1-3 中性子線照射量が $1 \times 10^{19} \text{n/cm}^2$ を超える範囲のイメージ図 (断面)

原子炉本体の基礎に関する説明書

資料 15 原子炉本体の基礎に関する説明書



第2-1図 原子炉容器支持構造概略図

(3) コンクリートに作用する荷重

コンクリートに作用する荷重を第3-1表に示す。

第3-1表 コンクリートに作用する荷重

(単位：kN)

		Sd 地震時		Ss 地震時	
		圧縮	引張	圧縮	引張
原子炉容器支持構	自重 ^(注4)	[]	-	[]	-
造物理込金物より	熱膨張荷重		-		-
加わる荷重 ^(注1、3)	地震荷重		-		-
荷重 ^(注1、2、3)		[]	[]	[]	[]

(注1) 荷重は、鉛直上向きを正とする。

(注2) 保守的になるように十の位を端末処理しているため、必ずしも合計は一致しない。

(注3) 資料13-17-3-23「1次冷却材管の耐震計算書」に示すループ荷重の値を使用する。

(注4) 自重は、スクラム荷重を含む。

(4) まとめ

第3-2表に示すとおり、コンクリートの圧縮耐力及び引張耐力は、いずれも地震時の荷重を上回っている。

第3-2表 コンクリートの評価結果

(単位：kN)

	Sd 地震時		Ss 地震時	
	荷重 ^(注)	耐力	荷重 ^(注)	耐力
圧縮	[]	[]	[]	[]
引張	[]	[]	[]	[]

(注) 荷重は、絶対値で表示する。

3.1.4 1次遮蔽コンクリート（間接支持構造物）の強度評価

1次遮蔽コンクリートの強度評価については、資料13-17-7-2「原子炉格納施設の地震応答解析」に示すとおり十分な強度を有している。

中性子照射量が $1 \times 10^{19} \text{ n/cm}^2$ を超える範囲と原子炉容器支持構造物の支圧面との比較

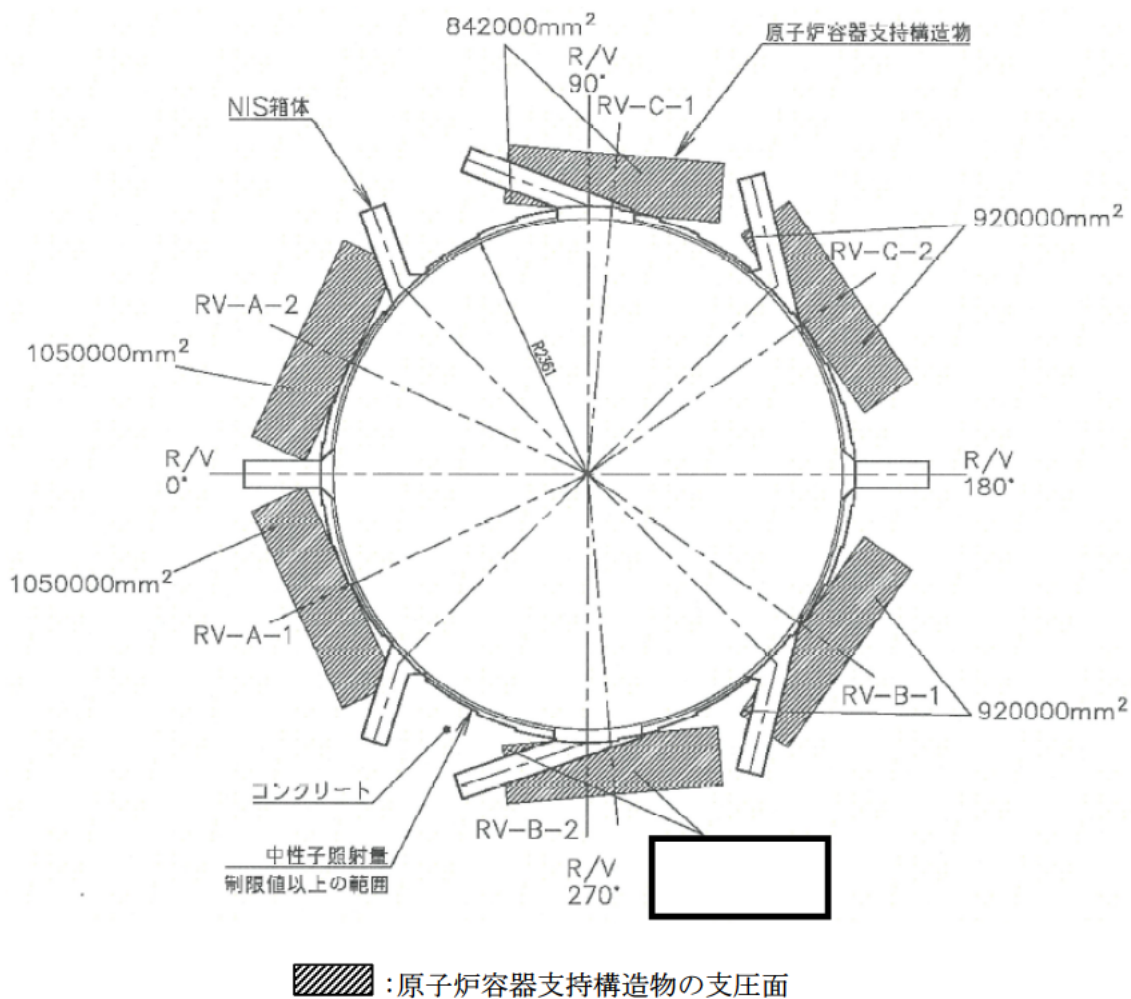


図3-1 中性子線照射量が $1 \times 10^{19} \text{ n/cm}^2$ を超える範囲と原子炉容器支持構造物の支圧面との比較

一部の支圧面に $1 \times 10^{19} \text{ n/cm}^2$ を超える範囲が僅かに存在するため、支圧面積を欠損させ、[] mm²とする。

コーン状破壊面の有効投影面積と接線方向荷重による引張評価において
コンクリートの欠損を想定する範囲との比較

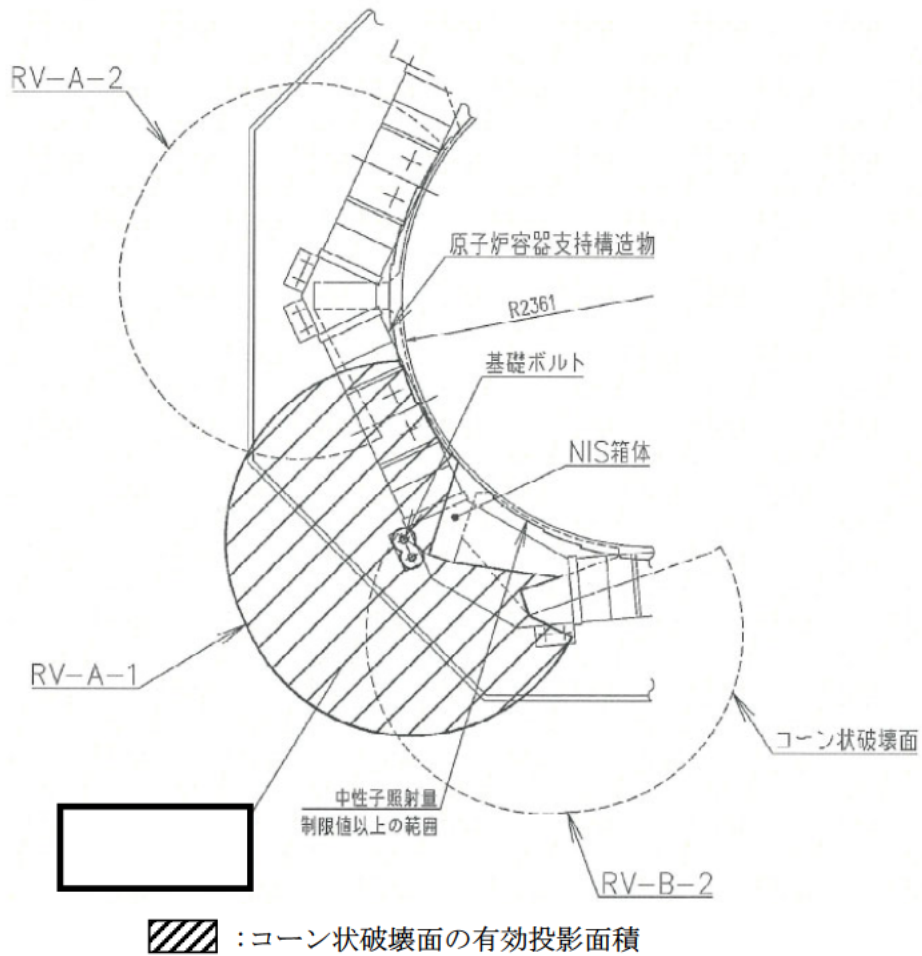


図4-1 コーン状破壊面の有効投影面積と接線方向荷重による引張評価においてコンクリートの欠損を想定する範囲との比較

一部の有効投影面積に $1 \times 10^{19} \text{ n/cm}^2$ を超える範囲が僅かに存在するが、端数処理により欠損無の有効投影面積と同値の mm^2 となる。

中性子照射量が $1 \times 10^{19} \text{ n/cm}^2$ を超える範囲を考慮した
基準地震動に対する最大せん断ひずみの確認

高浜発電所 4 号機の 1 次遮蔽壁において、中性子照射量が $1 \times 10^{19} \text{ n/cm}^2$ を超える範囲のコンクリートが欠損したと仮定し、その範囲のコンクリート強度を期待しない場合の、最大せん断ひずみ量についての検討を実施した。

(1) 中性子照射を考慮しない場合の最大せん断ひずみ

高浜発電所 4 号機の内部コンクリート（1次遮蔽壁含む）における、基準地震動に対する最大せん断ひずみは、 0.565×10^{-3} である。

(出典：高浜発電所第 4 号機 工事計画認可申請書 資料 13-16-4 内部コンクリートの耐震計算書)

(2) 中性子照射を考慮した場合の最大せん断ひずみ

せん断ひずみ γ は、以下の式で算出される。

$$\gamma = \tau / G$$

τ : せん断応力

G : せん断弾性係数

ここで、 τ : せん断応力については、中性子照射量が $1 \times 10^{19} \text{ n/cm}^2$ を超える範囲のコンクリートが欠損したと仮定すると、断面積の比に反比例して増加する。

一方、 G : せん断弾性係数は、コンクリートの物性値であることから、中性子照射の影響がない範囲の値は照射後においても変化がないといえる。

仮に中性子照射を考慮した場合の最大せん断ひずみについて、安全側に一次遮蔽壁のみの断面積比例で検討した場合、以下のとおりとなる。断面積の比率でも約 % 程度の影響であり、最大せん断ひずみ評価に影響を及ぼすものではないことが確認できる。

$$0.565 \times 10^{-3} \times \left(\text{} \right) = \text{}$$

$$\Rightarrow \text{}$$

タイトル	中性化の評価対象および評価点の選定過程について
説明	<p>中性化の評価対象および評価点の選定過程を以下に示す。</p> <p>1. 環境測定</p> <p>中性化の進展度合いは、使用環境条件（温度、湿度および二酸化炭素濃度）の影響を受けることから、2020年から2021年に空気環境測定を実施した。</p> <p>1-1. 測定方法</p> <p>環境測定に使用した機器を添付1「環境測定 使用機器」に示す。温度および湿度は、2020年10月1日から2021年9月30日の期間で、1時間間隔で連続測定を行った。二酸化炭素濃度は、2020年10月から2021年9月の期間で各月ごとに3日間を対象とし、各日当たり1回測定を行った。</p> <p>1-2. 測定位置</p> <p>温度、湿度および二酸化炭素濃度は、建屋内外で計83箇所にて測定を実施した。測定位置図を添付2「環境測定 測定位置図」に示す。</p> <p>2. 評価対象の選定過程</p> <p>中性化の評価対象は、仕上げの状況および上記の環境測定結果などの空気環境を考慮し、以下のとおり選定した。</p> <p>2-1. 仕上げ状況</p> <p>代表構造物のうち、仕上げが無い箇所がある構造物を候補とする。</p> <p>2-2. 空気環境</p> <p>屋外で仕上げが無い構造物は取水構造物のみである。そのうち、海水によりコンクリート表面が湿潤とならず、空気環境の影響を受ける箇所を評価対象として選定する。</p> <p>屋内の構造物については、「1. 環境測定」のとおりに測定した温度、湿度および二酸化炭素濃度等に基づいて算出した中性化に及ぼす影響度が、最も大きくなる箇所を評価対象として選定する。なお、中性化に及ぼす影響度については、各使用環境条件が入力値となる森永式の一部に相当する。影響度の算出結果のうち代表構造物毎の影響度の最大値を添付3「環境条件による影響度」に示す。</p> <p>2-3. 特別点検の結果</p> <p>上記に加えて、対象構造物における特別点検結果の値が最も大きい箇所を評価対象として選定した。特別点検の結果を添付4「特別点検結果（中性化深さ）」に示す。</p>

3. 評価点の選定結果

上記に基づく評価点の選定結果を以下に示す。

- ・ 屋外の構造物のうち、仕上げが無い構造物として取水構造物を選定した。そのうち、海水によりコンクリート表面が湿潤とならず、空気環境の影響が大きい「取水構造物（気中帯）」を評価点として選定した。
- ・ 屋内の構造物で仕上げが無い箇所のうち、中性化に及ぼす影響度が最も大きい「内部コンクリート」を評価点として選定した。
- ・ 対象構造物における特別点検結果の値が最も大きい「タービン建屋（タービン架台）」を評価点として選定した。

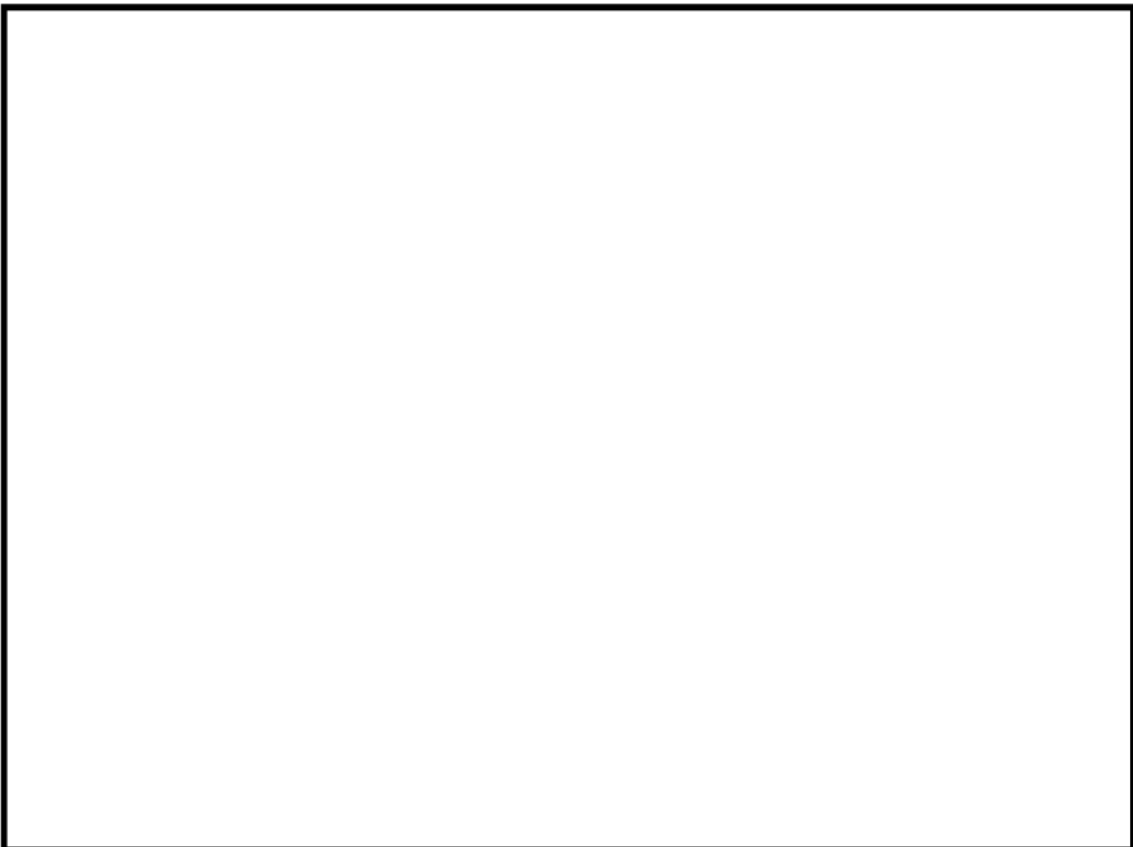
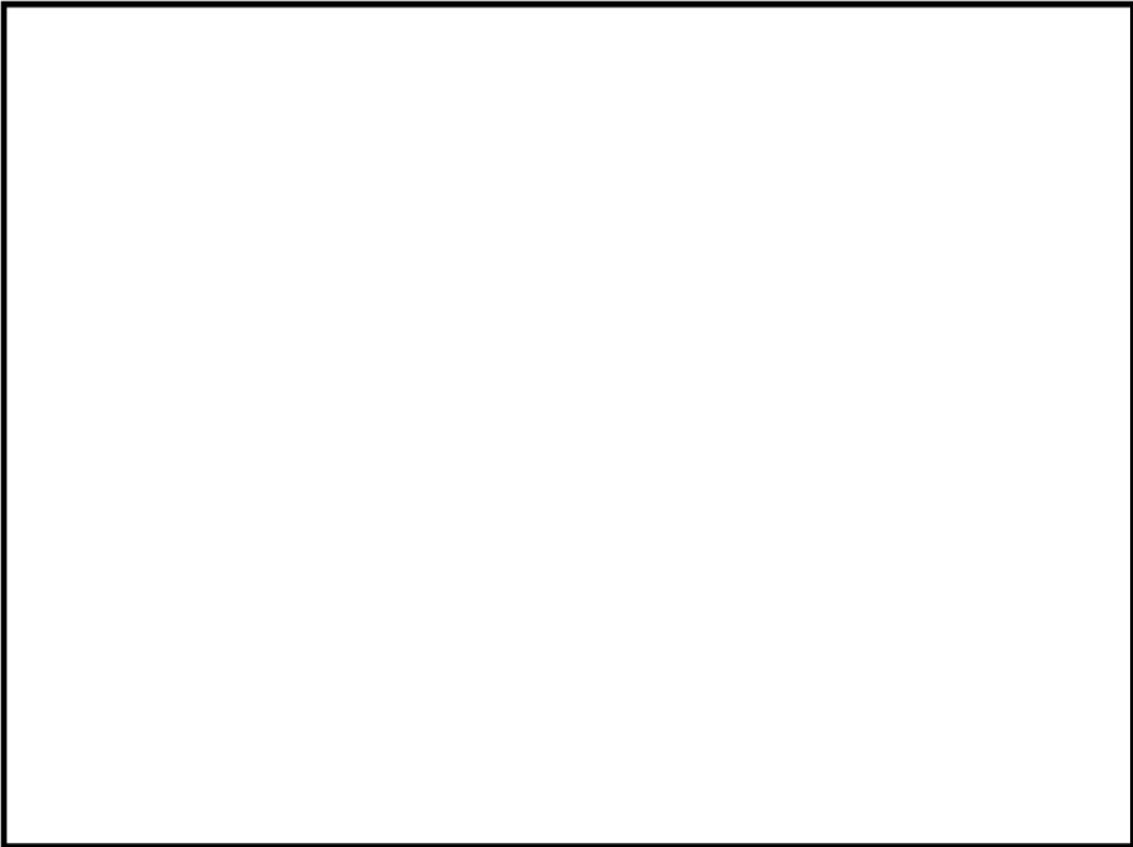
- 添付1 環境測定 使用機器
添付2 環境測定 測定位置図
添付3 環境条件による影響度
添付4 特別点検結果（中性化深さ）

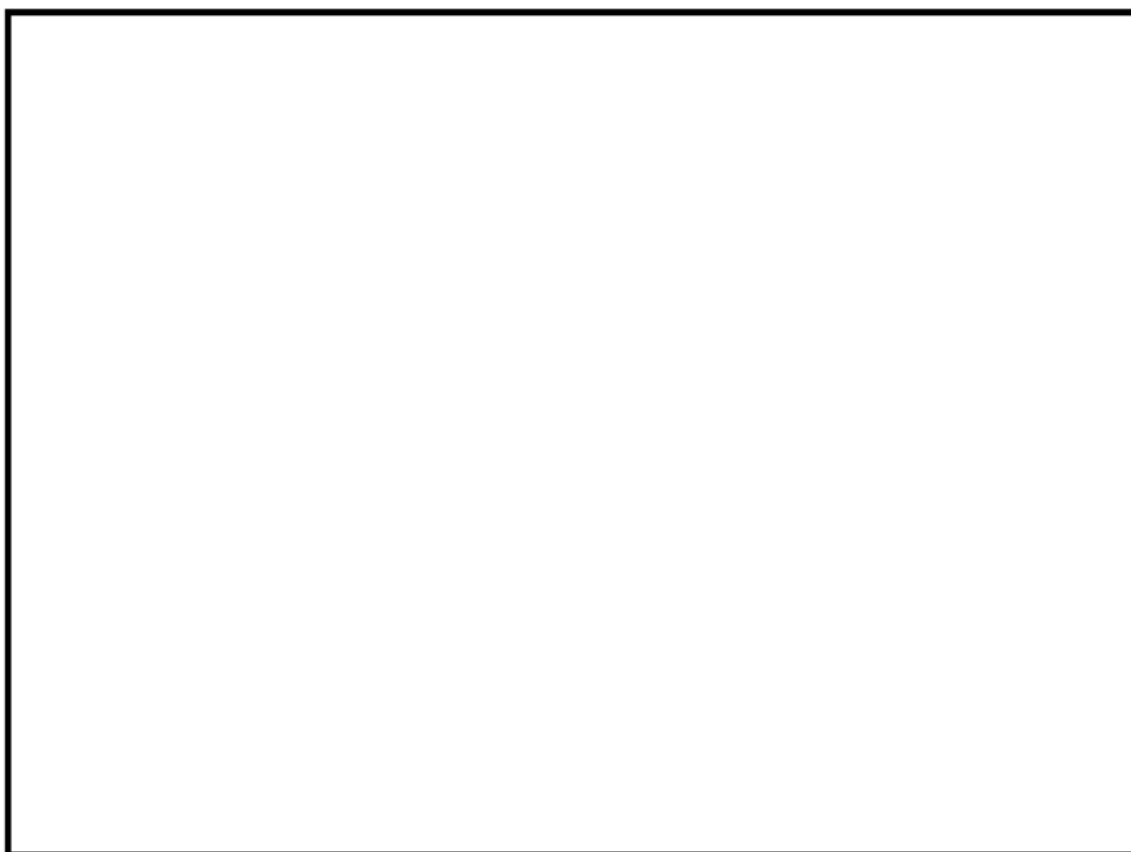
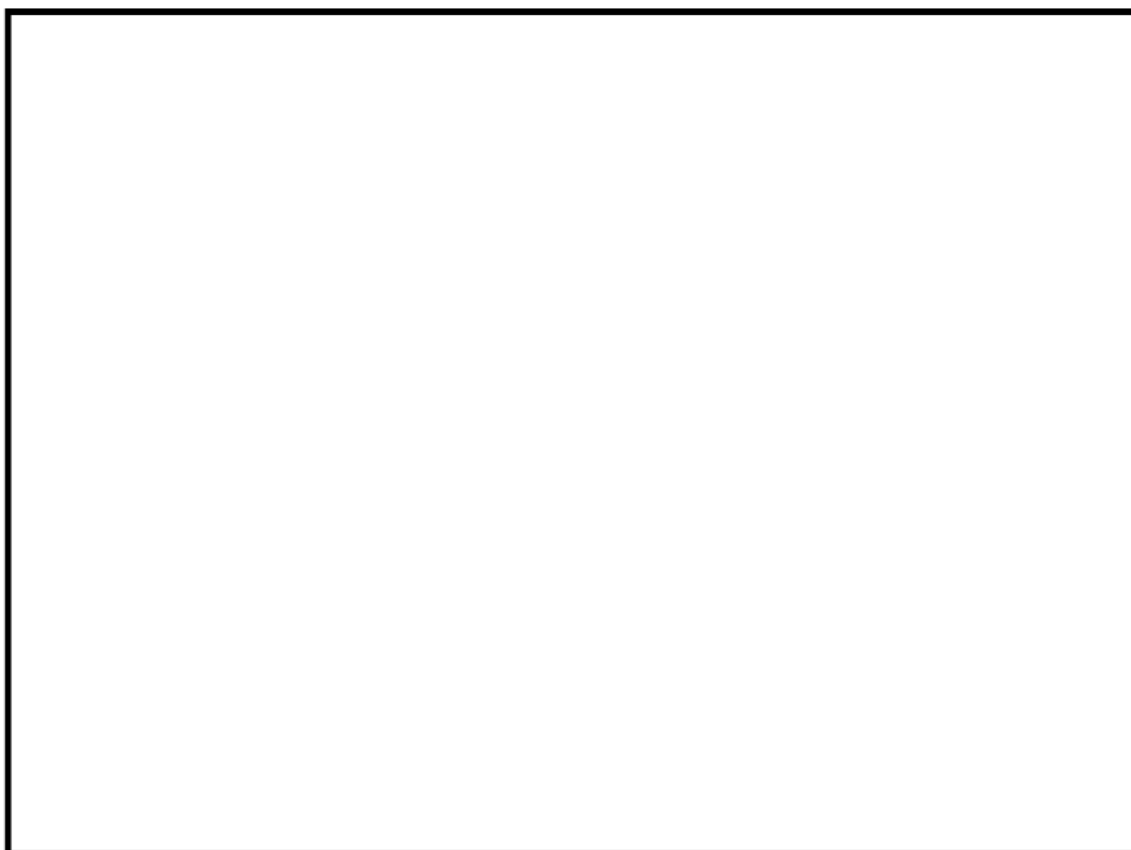
環境測定 使用機器

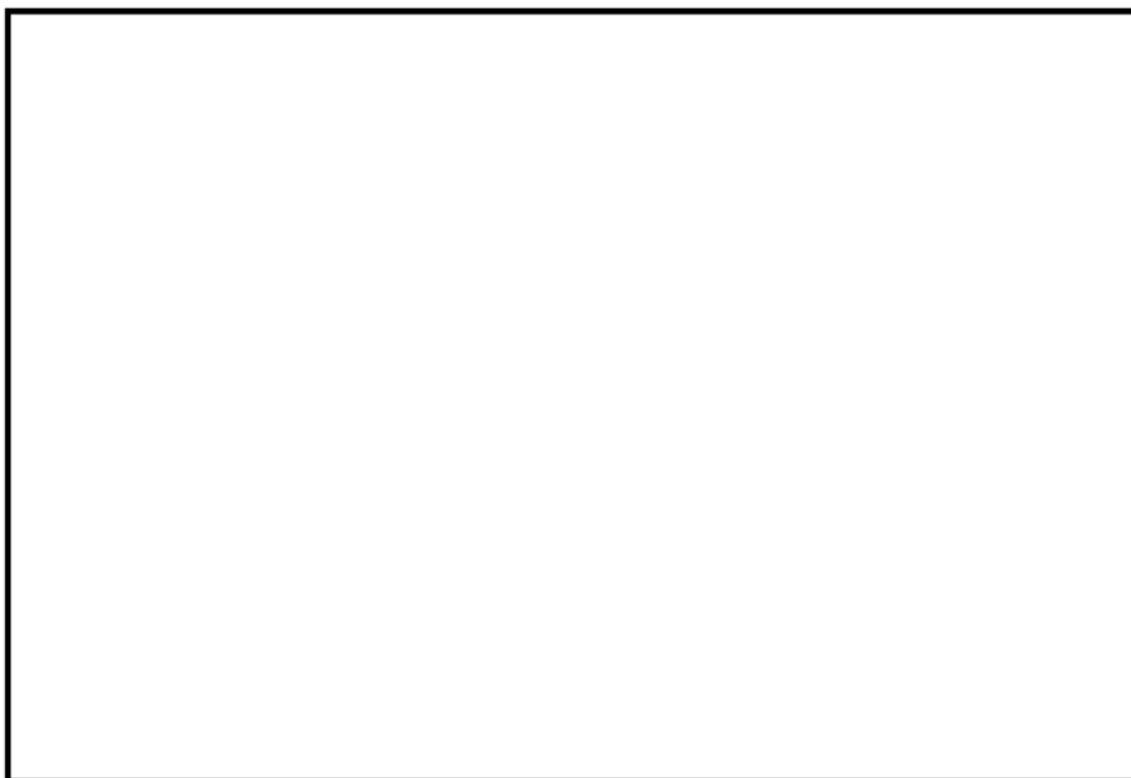
測定場所	測定項目	使用機器
構内各所	温度	温湿度計
	湿度	
	二酸化炭素濃度	二酸化炭素検知管

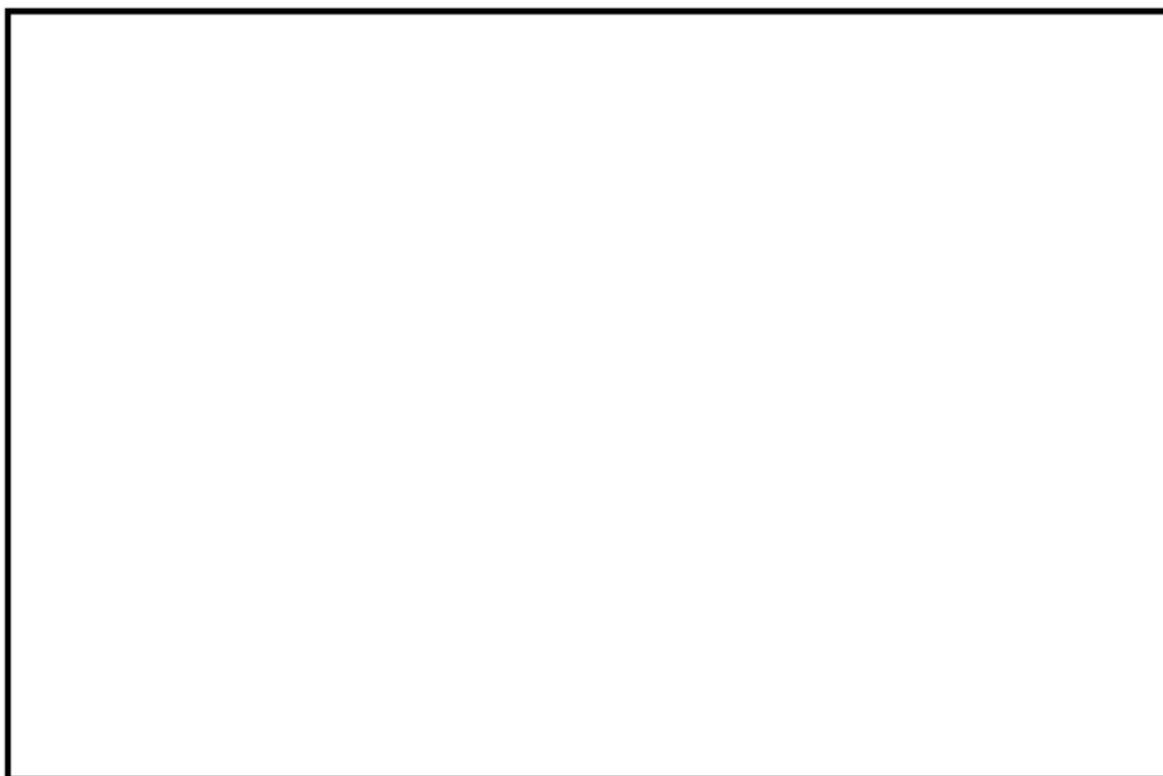
環境測定 測定位置図

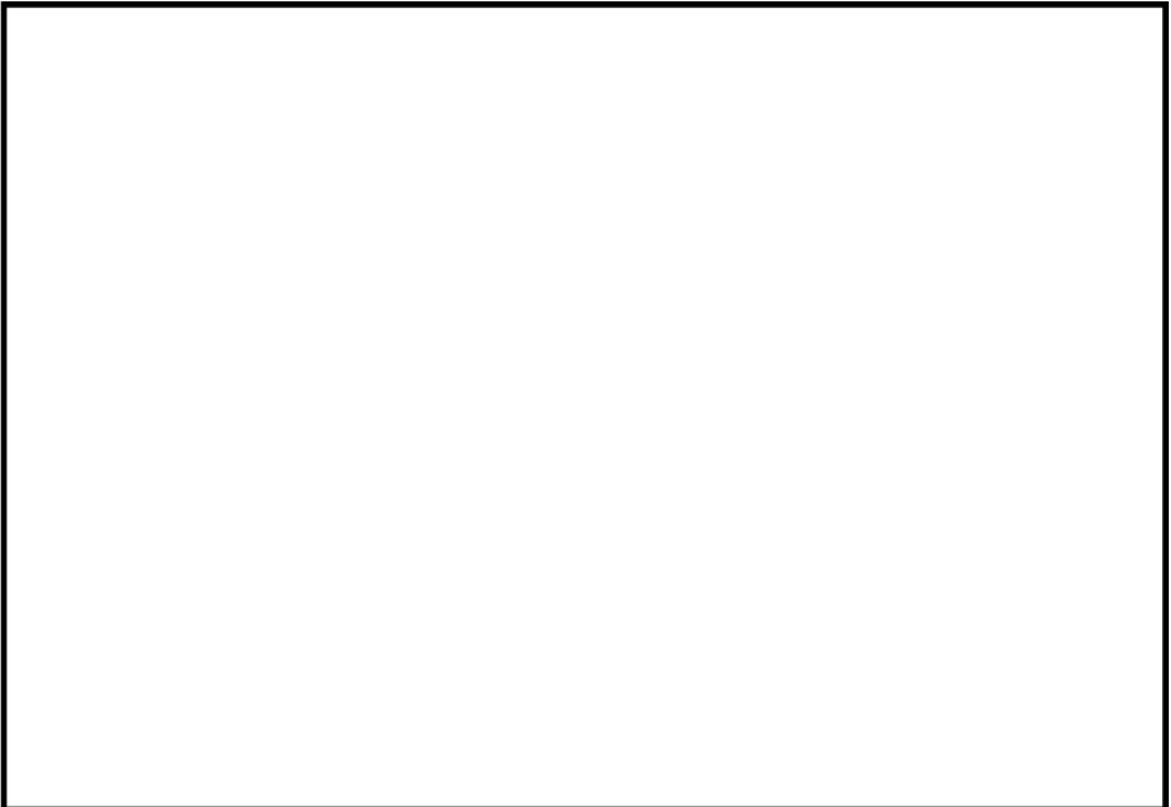
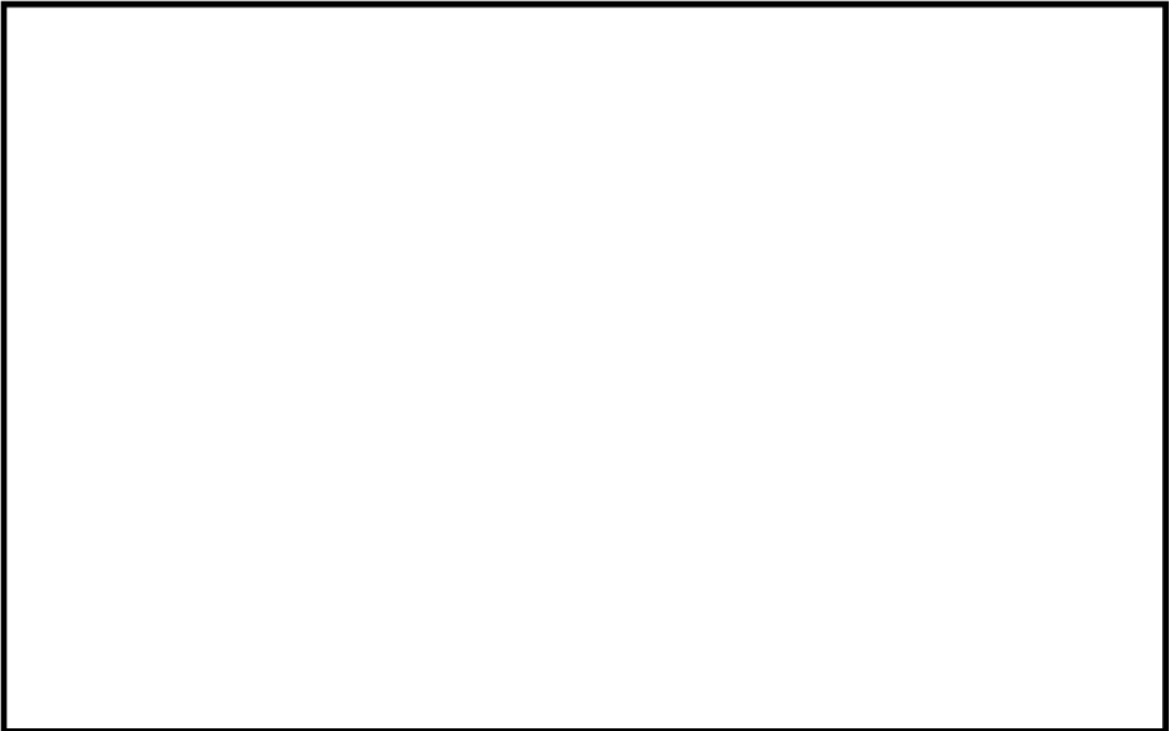












環境条件による影響度

構造物	対象の部位	環境条件による影響度 ^{※1, 2}	備考
原子炉格納施設等	外部遮蔽壁	0.346	補正実施 ^{※3}
	内部コンクリート	0.372	補正実施 ^{※3}
	基礎マット	0.370	補正実施 ^{※3}
原子炉補助建屋	外壁	0.064	
	内壁及び床	0.356	補正実施 ^{※3}
	使用済み燃料プール	0.305	
	基礎マット	0.216	
タービン建屋	内壁及び床	0.166	補正実施 ^{※3}
	基礎マット	0.113	
安全機能を有する系統及び機器又は常設重大事故等対処施設設備に属する機器を支持する構造物	タービン架台	0.269	補正実施 ^{※3}

測定期間：2020年10月～2021年9月

- ※1 対象構造物毎に影響度が最も大きくなったものを示す。
- ※2 森永式における環境条件による係数（下記赤下線部）から算出
- ※3 環境条件による影響度の算出に用いている環境データは、運転時の温度上昇などを踏まえた補正を実施

「高浜発電所4号炉 特別点検（コンクリート構造物）補足説明資料 別紙5」を参照

$$x = \sqrt{C} \cdot (1.391 - 0.017 \cdot RH + 0.022T) \cdot \frac{1}{\sqrt{5}} \cdot 2.44 \cdot R \cdot (4.6 \cdot w/c/100 - 1.76) \cdot \sqrt{t}$$

- x : 中性化深さ (mm)
- T : 温度 (°C)
- t : 材齢 (日)
- C : 炭酸ガス濃度 (%)
(1%=10,000ppm)
- RH : 湿度 (%)
- w/c : 水セメント比 (%)
- R : 中性化比率

特別点検結果（中性化深さ）

対象のコンクリート構造物		対象の部位	点検結果		備考
			平均中性化深さ(mm) ※1	点検実施日	
原子炉格納施設等		外部遮蔽壁	1.1	2022年4月18日	
		内部コンクリート	1.3	2022年6月22日	
		基礎マット	1.8	2022年10月4日	
原子炉補助建屋		外壁	1.0	2022年3月7日	
		内壁及び床	1.3	2021年12月9日	
		使用済み燃料プール	4.8	2021年11月16日	
		基礎マット	2.6	2022年2月17日	
タービン建屋		内壁及び床	9.3	2022年1月12日	
		基礎マット	5.4	2022年1月12日	
取水構造物		海中帯	2.7	2022年7月13日	
		干満帯	4.2	2022年7月12日	
		気中帯	5.0	2022年1月13日	
安全機能を有する系統及び機器又は常設重大事故等対処設備に属する機器を支持する構造物	原子炉格納施設内	上記「原子炉格納施設等」に含む			
	原子炉補助建屋内	上記「原子炉補助建屋」に含む			
	タービン建屋内 (タービン架台を含む)	タービン架台	38.4	2022年2月21日	
上記以外の構造物(安全機能を有する構造物又は常設重大事故等対処設備に属する構造物・安全機能を有する系統及び機器又は常設重大事故等対処設備に属する機器を支持する構造物に限る。)		非常用ディーゼル発電用 燃料油タンク基礎 (配管トレンチ含む)	2.5	2022年2月1日	
		復水タンク基礎	3.0	2021年12月14日	

※1：採取孔3箇所での平均値

タイトル	中性化深さの推定値の算定過程および結果について
説明	<p>調査時点および運転開始後60年経過時点の中性化深さの推定値の算定過程（推定式、条件、パラメータ）および結果を以下に示す。</p> <p>1. 推定式、条件、パラメータ 次の中性化深さを推定する速度式を用いて評価を実施した。推定式の詳細、条件およびパラメータは、添付1「中性化深さの推定値の算定過程および結果」に示すとおり。 （中性化深さを推定する速度式）</p> <ul style="list-style-type: none"> ・岸谷式 ・森永式 ・中性化深さの実測値に基づく\sqrt{t}式 <p>なお、原子炉補助建屋（1・2号炉）（基礎マット）および取水構造物（1・2号炉）（気中帯）を除き、高浜4号炉ではコンクリートの材料（混和材）としてフライアッシュを使用していることから、適用性を考慮し、環境条件の影響を適切に考慮できる森永式および実測値に基づく\sqrt{t}式を用いている。</p> <p>2. 実測値 特別点検における中性化深さの実測値を添付2に示す。</p> <p>3. 結果 中性化深さの推定値の算定結果を、以下に示す。 運転開始後60年経過時点の中性化深さの推定値が、鉄筋が腐食し始めるときの中性化深さを下回っていることを確認した。</p>

	調査時点の中性化深さ			4号炉運転開始後60年経過時点の中性化深さの推定値 (cm) (推定式)	鉄筋が腐食し始める時の中性化深さ (cm)
	経過年数	実測値 (cm)	推定値 (cm) (推定式)		
タービン建屋 (タービン架台)	36年	3.9	2.4 (森永式)	5.0 ^{*4} (\sqrt{t} 式)	8.5
内部コンクリート (ループ室)	37年	0.2	2.4 (森永式)	3.0 ^{*4} (森永式)	8.8
取水構造物 (気中帯)	36年	0.5	0.6 (森永式)	0.7 ^{*4} (\sqrt{t} 式)	8.5
原子炉補助建屋 (1・2号炉) (基礎マット)	29年 ^{*1}	3.5	4.4 ^{*3} (岸谷式)	5.8 ^{*4*6} (岸谷式)	10.0
取水構造物 (1・2号炉) (気中帯)	29年 ^{*2}	0.4	2.3 ^{*3} (岸谷式)	3.0 ^{*5*7} (岸谷式)	8.5

*1：4号炉運転開始後の経過年数を示す。1号炉運転開始後の経過年数は40年。

*2：4号炉運転開始後の経過年数を示す。1号炉運転開始後の経過年数は39年。

*3：岸谷式および森永式による評価結果のうち最大値を記載

*4：森永式および実測値に基づく \sqrt{t} 式による評価結果のうち最大値を記載

*5：岸谷式、森永式および実測値に基づく \sqrt{t} 式による評価結果のうち最大値を記載

*6：1号炉運転開始後の経過年数は71年。

*7：2号炉運転開始後の経過年数は70年。

添付1 中性化深さの推定値の算定過程および結果

添付2 中性化深さの実測値

中性化深さの推定値の算定過程および結果

: 中性化深さの推定に必要なパラメータ
 : 推定結果

1. 森永式

	タービン建屋 (タービン架台)	内部コンクリート	取水構造物 (気中帯)	原子炉補助建屋 (1・2号炉) (基礎マット)	取水構造物 (1・2号炉) (気中帯)	備考
	屋内仕上無	屋内仕上無	屋外仕上無	屋内仕上無	屋外仕上無	
W/C: 水セメント比 (%)	53.3	48.9	48.0	59.0	53.0	
R: 仕上材の中性化率	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	打ち放し仕上げ: 1.0
二酸化炭素濃度 (%)	0.041	0.042	0.041	0.057	0.040	原子炉補助建屋(基礎マット): 実測値 原子炉補助建屋(内壁及び床): 実測値 取水構造物(気中帯): 気象庁(線量)の観測(2019年の年平均) 原子炉補助建屋(1・2号炉)(基礎マット): 実測値 取水構造物(1・2号炉)(気中帯): 気象庁(線量)の観測(2013年の年平均)
T: 温度 (°C)	28.8	32.7	16.0	29.8	14.5	原子炉補助建屋(基礎マット): 実測値 原子炉補助建屋(内壁及び床): 実測値 取水構造物(気中帯): 発電所構内の湿度の観測値(2005年1月~2021年12月の17ヵ年平均) 原子炉補助建屋(1・2号炉)(基礎マット): 実測値 取水構造物(1・2号炉)(気中帯): 気象庁(舞鶴)の観測値(共用期間平均)
RH: 湿度 (%)	41.2	16.7	75.9	57.9	77.0	原子炉補助建屋(基礎マット): 実測値 原子炉補助建屋(内壁及び床): 実測値 取水構造物(気中帯): 発電所構内の湿度の観測値(2005年1月~2021年12月の17ヵ年平均) 原子炉補助建屋(1・2号炉)(基礎マット): 実測値 取水構造物(1・2号炉)(気中帯): 気象庁(舞鶴)の観測値(共用期間平均)
運転開始後37年 [※] 経過 時点の推定値 (cm)	2.4	2.4	0.6	3.2	0.8	※ 原子炉補助建屋(1・2号炉)(基礎マット)及び取水構造物(1・2号炉)(気中帯)につ いては、運転開始後29年経過時点の推定値。
運転開始後60年経過 時点の推定値 (cm)	3.1	3.0	0.7	4.3	1.0	

森永式
$$x = \sqrt{\frac{C}{5}} \cdot 2.44 \cdot R \cdot (1.391 - 0.017 \cdot RH + 0.022 \cdot T) \cdot (4.6 \cdot w/c/100 - 1.76) \cdot \sqrt{t}$$

x : 中性化深さ (mm) c : 二酸化炭素濃度 (%)
R : 中性化比率 RH : 相対湿度 (%)
w/c : 水セメント比 (%) T : 温度 (°C)
t : 材齢 (日)

2. 中性化深さの実測値に基づく√t式

	原子炉補助建屋 (基礎マット)	内部コンクリート	取水構造物 (気中帯)	原子炉補助建屋 (1・2号炉) (基礎マット)	取水構造物 (1・2号炉) (気中帯)	備考
	屋内仕上無	屋内仕上無	屋外仕上無	屋内仕上無	屋外仕上無	
中性化深さの実測値 (cm)	3.9	0.2	0.5	3.4	0.4	
運転開始後60年経過時点 の中性化深さ推定値 (cm)	5.0	0.2	0.7	4.6	0.5	

√t式
$$x = A \cdot \sqrt{t}$$

x : 中性化深さ (mm)
t : 中性化期間 (年)
A : 中性化速度係数 (中性化深さの実測値と中性化期間により算出)

3. 岸谷式

	原子炉補助建屋 (1・2号炉) (基礎マット)	取水構造物 (1・2号炉) (気中帯)	備考
	屋内仕上無	屋外仕上無	
W/C: 水セメント比 (%)	59.0	53.0	
α: 劣化外力係数	1.37	1.00	原子炉補助建屋(1・2号炉)(基礎マット): 実測値に基づく補正值 取水構造物(1・2号炉)(気中帯): 1.00
β: 仕上げ材による係数	1.0	1.0	仕上げなし: 1.0
γ: セメントによる係数	1.4	1.4	フライアッシュセメント: 1.4
運転開始後29年経過 時点の推定値 (cm)	4.4	2.3	
運転開始後60年経過 時点の推定値 (cm)	5.8	3.0	

岸谷式
$$t = \frac{7.2}{R^2 \cdot (4.6 \cdot w - 1.76)^2} \cdot x^2$$

t : 深さ x まで中性化する期間(年)
x : 中性化深さ(mm)
w : 水セメント比 (%)
R : 中性化比率 (R = α × β × γ)
α : 劣化外力の区分による係数
β : 仕上げ材による係数
γ : セメントによる係数

岸谷式の原子炉補助建屋（1・2号炉）（基礎マット）に用いた劣化外力係数の算出にあたっては、岸谷式の根拠となっている屋外二酸化炭素濃度データは「高耐久性鉄筋コンクリート造設計施工指針（案）・同解説（日本建築学会）」を参照し、最低値である300ppmを基準として、当該部位での二酸化炭素濃度の実測値を300ppmで除した値の平方根で算出した。

- ・原子炉補助建屋（1・2号炉）（基礎マット）
劣化外力係数 $\alpha = \sqrt{C/C_0} = 1.37$

C_0 : 屋外二酸化炭素濃度データの最低値 (300ppm)

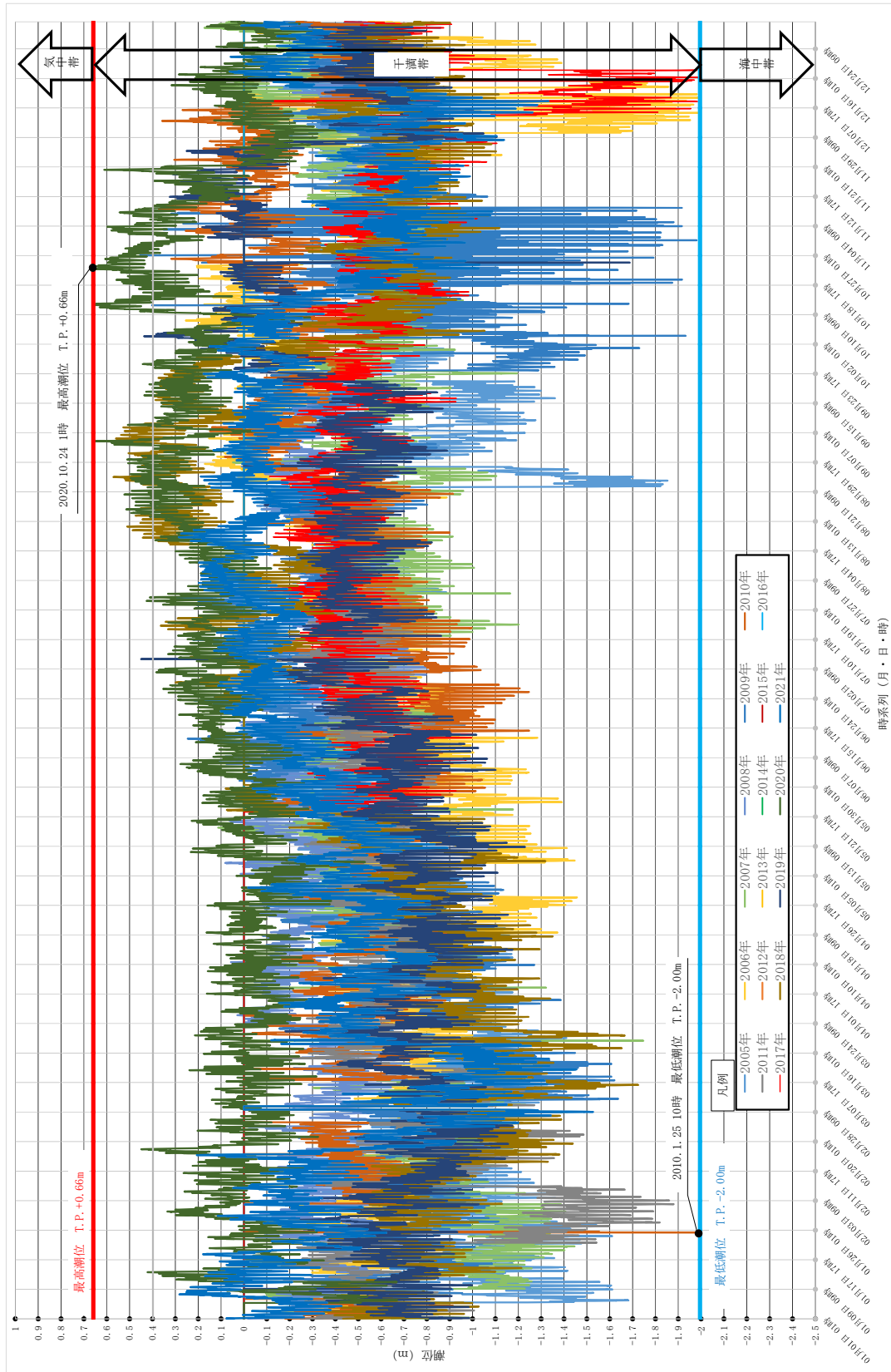
C : 原子炉補助建屋（1・2号炉）（基礎マット）における二酸化炭素濃度の
実測値 (567ppm)

中性化深さの実測値

中性化深さの実測値は測定点近傍の 3 箇所の測定値を平均して算出している。

	測定値 1 (cm)	測定値 2 (cm)	測定値 3 (cm)	実測値 (平均値) (cm)
内部コンクリート (ループ室)	0. 1	0. 1	0. 2	0. 2
タービン建屋 (タービン架台)	4. 0	4. 1	3. 6	3. 9
取水構造物 (気中帯)	0. 4	0. 7	0. 6	0. 5
原子炉補助建屋 (1・2号炉) (基礎マット)	3. 6	3. 5	3. 3	3. 5
取水構造物 (1・2号炉) (気中帯)	0. 5	0. 4	0. 3	0. 4

タイトル	塩分浸透の評価対象および評価点の選定過程について
説明	<p>塩分浸透の代表構造物の取水構造物について、高経年化技術評価審査マニュアル（JNES-RE-2013-9012）に基づき、環境条件が異なる気中帯、干満帯および海中帯をそれぞれ評価点として選定した。</p> <p>なお、最高潮位および最低潮位は、高浜発電所内において、2005年1月から2021年12月の17年間で観測を実施したデータにより設定している。観測を実施したデータについては、高浜発電所のOPMS（運転状態管理システム）において記録している値である。</p> <p>それぞれの評価点については、以下に示すとおりであり、2005年1月～2021年12月の期間の潮位変化を添付1に示す。</p> <p>気中帯：最高潮位 T.P. +0.66mを超える位置 干満帯：最高潮位 T.P. +0.66m以下、最低潮位 T.P. -2.00m以上の位置 海中帯：最低潮位 T.P. -2.00m未満の位置</p> <p>添付1 2005年1月～2021年12月までの潮位変化</p> <p style="text-align: right;">以上</p>



2005年1月 ～ 2021年12月までの潮位変化

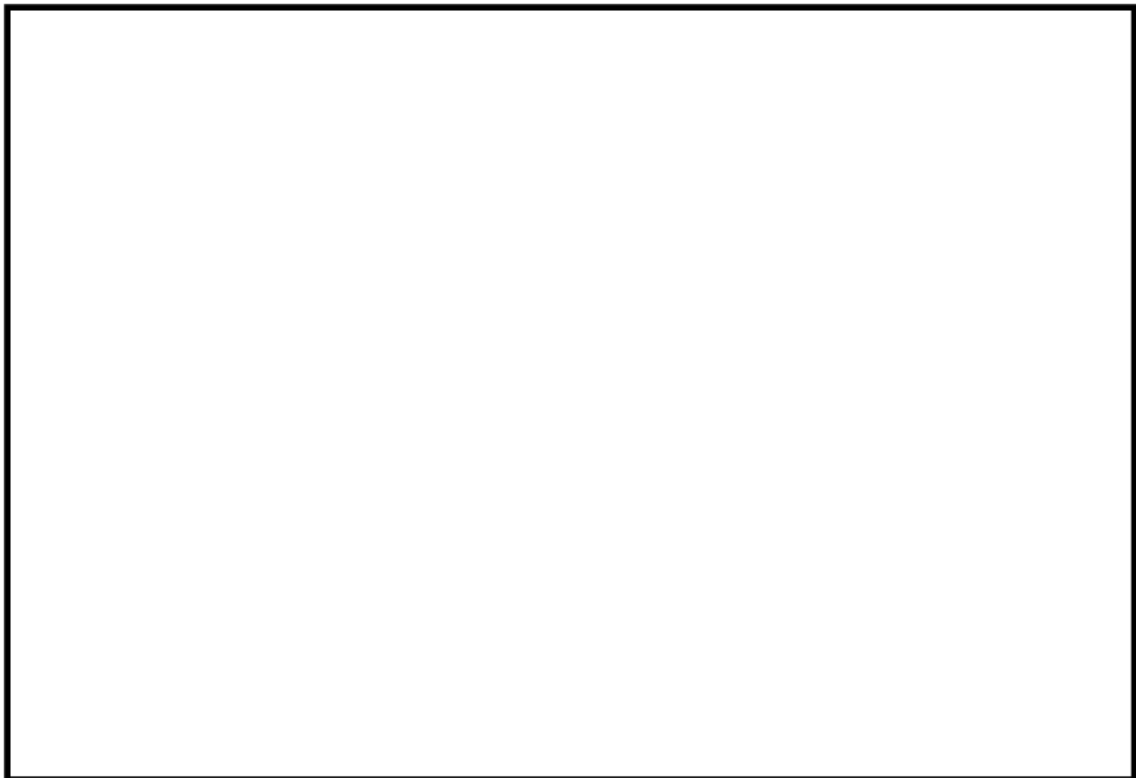
タイトル	塩化物イオン濃度の測定位置、測定方法、測定結果について
説明	<p>塩化物イオン濃度の測定位置、測定方法、測定結果を以下に示す。</p> <p>1. 測定位置 添付1「塩化物イオン濃度の測定位置図」に示すとおり。 なお、干満帯は、潮が干満を繰り返す領域ではあるが、潮位の傾向が低い時期（季節）では干満帯に位置するコンクリート表面は海水面より上に長時間現れていることが多い状況であることから、海水の飛沫を受けてコンクリート表面が乾湿を繰り返している環境である。 （詳細は、添付2「海水の飛沫環境を対象とした場合の塩化物イオンの浸透（塩分浸透）の整理」参照）</p> <p>2. 測定方法 JIS A 1154「硬化コンクリート中に含まれる塩化物イオンの試験方法」による。</p> <p>3. 測定結果 添付3「塩化物イオン濃度および量の測定結果」に示すとおり。</p> <p>添付1 塩化物イオン濃度の測定位置図 添付2 海水の飛沫環境を対象とした場合の塩化物イオンの浸透（塩分浸透）の整理 添付3 塩化物イオン濃度および量の測定結果</p>

塩化物イオン濃度の測定位置図

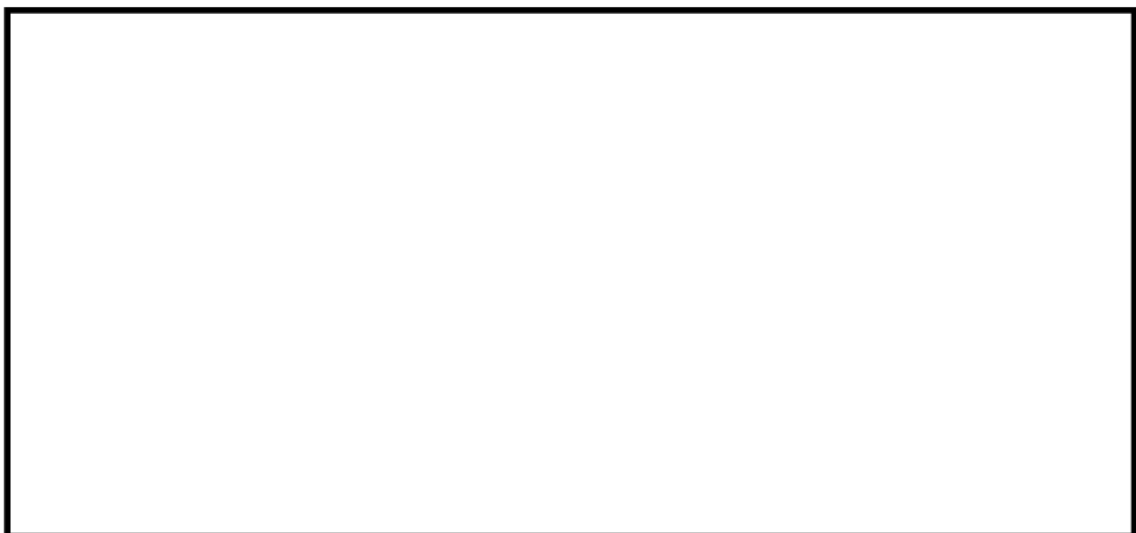
凡例

▼：塩化物イオン濃度試験位置（試験実施年）

高浜 4 号炉 取水構造物
平面図



断面図



海水の飛沫環境を対象とした場合の塩化物イオンの浸透（塩分浸透）の整理

代表構造物のうち、取水構造物は海水に接触するため供給塩分量が多い構造物であり、飛来塩分および海水とその飛沫の影響を多く受ける環境下にある。

以下において、海水の飛沫環境を対象とした場合の塩化物イオンの浸透（塩分浸透）について示す。

①「気中帯・干満帯・海中帯」の海水の飛沫環境について

塩化物イオン濃度を測定位置（気中帯、干満帯および海中帯）の環境の違いについて、表12-1において整理した。

なお、干満帯は潮が干満を繰り返す領域であるが、別紙11のうち添付1「2005年1月～2021年12月までの潮位変化」に示すとおり、時期（季節）によって潮位変化の傾向が異なるため、潮位変化の傾向別に分割して整理を行った。

表12-1 塩化物イオン濃度を測定した「気中帯・干満帯・海中帯」の環境の違い

塩化物イオン濃度測定位置	気中帯	干満帯		海中帯
	No. 1:T.P.+2.56m No. 2:T.P.+2.57m No. 3:T.P.+2.56m	No. 1:T.P.-0.16m No. 2:T.P.-0.32m No. 3:T.P.-0.59m		
潮位変化 (2005年1月～2021年12月)	最高潮位 T.P.+0.66m	【時期：各年1月～6月】 ・平均潮位T.P.-0.57m ・最高潮位T.P.+0.45m ・最低潮位T.P.-2.00m	【時期：各年7月～12月】 ・平均潮位T.P.-0.37m(+0.20m) [※] ・最高潮位T.P.+0.66m(+0.21m) [※] ・最低潮位T.P.-1.99m(+0.01m) [※] ※()は、左記潮位との差	最低潮位 T.P.-2.00m
環境	外気環境にある	1月～6月は潮位が低い傾向にあることから、コンクリート表面が海面より上に長期間現れていることが多い。	左記の期間に比べて潮位が高い傾向であり、1月～6月の期間より干満の影響を繰り返し受けている。	常時海水に浸かる環境にある。

図12-1 干満帯の塩化物イオン濃度測定位置と潮位変化

表 1 2 - 1 および図 1 2 - 1 に示すとおり、「気中帯」である頂版は最高潮位 (T.P.+0.66m) から 0.89m 高い位置ではあるが、外気環境であるため潮風による飛沫塩分を受けてコンクリート表面が乾湿を繰り返している環境である。

また、「干満帯」については、1月～6月の潮位傾向が7月～12月の潮位傾向よりも各年で同様に低い傾向であることから、干満帯に位置するコンクリート表面は海水面より上に長時間現れていることが多い状況であり、海水の飛沫を受けてコンクリート表面が乾湿を繰り返している環境である。なお、海面は取水構造物内の天井 (T.P.+0.05m) を超えることもあり、波浪の跳ね返りによって海水の飛沫を多く受けている環境であると考えられる。

一方、7月～12月の潮位傾向は、1月～6月の潮位傾向よりも各年で同様に比較的高く、干満帯に位置するコンクリート表面は干満の影響を繰り返し受けることによりほぼ飽和状態にあると考えられる。

以上から、「干満帯」は、時期 (季節) によっては海水の飛沫を受けてコンクリート表面が乾湿を繰り返している環境である。

②海水の飛沫環境を対象とした場合の塩化物イオンの浸透 (塩分浸透) について

表 1 2 - 2 に、「気中帯」および「干満帯」の海水の飛沫環境における塩化物イオンの浸透 (塩分浸透) の状況を示す。

なお、塩化物イオンの浸透は、コンクリートの乾湿の繰り返しによる水の移動 (移流) が関係すること、および特に海洋環境では、乾湿の繰り返しの影響が大きい飛沫帯のように、常に海水に接してはいないが乾湿が繰り返し起きるとコンクリート表層部分に塩化物イオンが浸透しやすいと、コンクリート診断技術 (公益社団法人 日本コンクリート工学会) に示されている。

表 1 2 - 2 「気中帯」および「干満帯」の塩化物イオンの浸透 (塩分浸透) の状況

	海水の飛沫を受けるエリア	
	気中帯	干満帯
海水の飛沫環境	潮風のみによる飛沫塩分を受ける環境。	時期 (季節) によっては、コンクリート表面が海面より上に長時間現れていることが多い状況であり、また波浪が取水構造物内で跳ね返ることにより、海水の飛沫を多く受ける環境。
塩化物イオンの浸透 (塩分浸透) の状況	供給される塩化物イオン量は、海水の飛沫の影響に左右されるが、飛沫した海水の他に雨水によるコンクリート表面の乾湿繰り返しによって、コンクリートの水分が移動 (移流) して塩化物イオンが浸透する。	供給される塩化物イオン量は、気中帯と同様に海水の飛沫の影響により左右されるが、左記の気中帯と比べて海水の飛沫量は多い環境である。 また、海水の飛沫によるコンクリート表面の乾湿繰り返しによって、コンクリートの水分が移動 (移流) して塩化物イオンが浸透する。 一方、海中帯は常時海水に浸かっている環境でありコンクリート表面の乾湿繰り返しはされない環境である。 このことから、海水の飛沫を受ける環境である干満帯は、気中帯および海中帯より多く塩化物イオンがコンクリート表層に浸透しやすい環境である。

以上の環境を考慮し、別紙 1 3 で示す「塩分浸透における鉄筋の腐食減量の算定」において鉄筋の腐食減量の推定値を算定する。

塩化物イオン濃度および量の測定結果※

構造物	部位	実施時期 (年)	試料 番号	単位	塩化物イオン濃度 (%) および量 (kg/m ³)					
					0~20mm	20~40mm	40~60mm	60~80mm	80~100mm	100~120mm
海水ポンプ室 気中帯	側壁	2022	No. 1	%	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
				kg/m ³	0.47	0.28	0.25	0.15	0.13	0.19
			No. 2	%	0.06	0.02	0.01	0.02	0.01	0.01
				kg/m ³	1.43	0.54	0.28	0.36	0.25	0.29
			No. 3	%	0.04	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
			平均値	kg/m ³	0.85	0.25	0.23	0.22	0.18	0.24
				%	0.04	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
				kg/m ³	0.92	0.36	0.25	0.24	0.19	0.24
海水ポンプ室 干満帯	側壁	2022	No. 1	%	0.12	0.05	0.02	0.01	0.01	0.01
				kg/m ³	2.90	1.13	0.52	0.22	0.20	0.21
			No. 2	%	0.14	0.12	0.06	0.03	0.01	0.01
				kg/m ³	3.40	2.82	1.38	0.60	0.34	0.30
			No. 3	%	0.12	0.11	0.06	0.03	0.01	0.01
			平均値	kg/m ³	2.88	2.49	1.33	0.66	0.27	0.27
				%	0.13	0.09	0.05	0.02	0.01	0.01
				kg/m ³	3.06	2.15	1.08	0.49	0.27	0.26
海水ポンプ室 海中帯	底部	2022	No. 1	%	0.32	0.28	0.26	0.15	0.05	0.02
				kg/m ³	7.48	6.50	6.17	3.47	1.23	0.54
			No. 2	%	0.43	0.23	0.13	0.05	0.03	0.03
				kg/m ³	10.15	5.40	3.02	1.16	0.79	0.61
			No. 3	%	0.46	0.36	0.25	0.12	0.05	0.02
			平均値	kg/m ³	10.93	8.41	5.83	2.89	1.11	0.40
				%	0.40	0.29	0.21	0.11	0.04	0.02
				kg/m ³	9.52	6.77	5.01	2.51	1.04	0.52

■ : 鉄筋位置付近の塩化物イオン濃度および量

※塩化物イオン濃度の測定結果のグラフ表示については、別紙13のうち添付2「拡散方程式の回帰分析と鉄筋腐食減量の算定について」に示す。

タイトル	塩分浸透における鉄筋の腐食減量の算定過程および結果について
説明	<p>鉄筋の腐食減量の算定過程（方法、条件、パラメータ）および結果を以下に示す。</p> <p>1. 方法</p> <p>（1）拡散方程式により、コンクリート表面からの塩化物イオンの浸透を予測</p> <p>（2）上記塩化物イオンの浸透予測をもとに、森永式から、鉄筋腐食減量の経年値とコンクリートひび割れ時点の鉄筋腐食減量を算定し、両者を比較</p> <p>2. 条件およびパラメータ</p> <p>評価対象（気中帯、干満帯、海中帯）の条件およびパラメータをそれぞれ、添付1「塩分浸透による鉄筋の腐食減量の推定値算定の過程および結果」および添付2「拡散方程式の回帰分析と鉄筋腐食減量の算定について」に示す。</p> <p>なお、干満帯は、潮が干満を繰り返す領域ではあるが、潮位の傾向が低い時期（季節）では干満帯に位置するコンクリート表面は海水面より上に長時間現れていることが多い状況であることから、海水の飛沫を受けてコンクリート表面が乾湿を繰り返している環境である。</p> <p>このことから、添付1における干満帯の推定値算出に必要なパラメータのうち酸素濃度については、コンクリート表面の乾湿の繰り返しの程度を考慮して気中帯と同様の外気環境に曝される状態であると想定して設定をした。</p> <p>（詳細は、別紙12添付2「海水の飛沫環境を対象とした場合の塩化物イオンの浸透（塩分浸透）の整理」参照）</p>

3. 結果

運転開始60年時点の鉄筋腐食減量が、かぶりコンクリートにひび割れが発生する時点の鉄筋腐食減量を下回っていることを確認した。

鉄筋の腐食減量の算定結果は、以下に示す。

なお、「調査時点、運転開始後60年経過時点およびひび割れが発生する時点の前後5年の鉄筋の腐食減量」については、添付2に示す。

表13-1 評価結果

対象の部位	鉄筋の腐食減量 ($\times 10^{-4} \text{g/cm}^2$)		
	調査時点	4号炉運転開始後60年経過時点	かぶりコンクリートにひび割れが発生する時点 ^{*1}
取水構造物 (気中帯)	3.0	5.1	90.1
取水構造物 (干満帯) ^{*2}	7.4	11.8	88.1
取水構造物 (海中帯)	0.6	1.9	88.1
取水構造物 (1・2号炉) (気中帯)	10.7	26.6 ^{*4}	90.1
取水構造物 (1・2号炉) ^{*2} (干満帯)	11.4	21.6 ^{*3}	90.1
取水構造物 (1・2号炉) (海中帯)	7.2	19.3 ^{*3}	90.1

^{*1}かぶりコンクリートにひび割れが発生する時点の鉄筋腐食減量推定値 (Q_{CR})

^{*2}別紙12のうち添付2の考察により、気中帯と同様の酸素濃度とし推定値を算定。

^{*3}1号炉運転開始後の経過年数は71年。

^{*4}2号炉運転開始後の経過年数は70年。

添付1 塩分浸透による鉄筋の腐食減量の推定値算定の過程および結果
添付2 拡散方程式の回帰分析と鉄筋腐食減量の算定について

塩分浸透による鉄筋の腐食減量の推定値算定の過程および結果

鉄筋の腐食減量の算定に用いる諸元とその結果を表 1 3-2 に示す。

表 1 3-2 算定に用いる諸元と評価結果 (1/2)

	取水構造物			備考	
	気中帯	干満帯	海中帯		
x: 暴露面から塩化物イオン濃度を測定した箇所までの距離 (mm)	0~120	0~120	0~120		
t: 共用年数 (年)	36	37	37	塩分浸透の点検実施時点	
C(x,t): 距離x (mm)、共用期間t (年)において測定された塩化物イオン濃度および量	%	0.01~0.06	0.01~0.12	0.02~0.32	気中帯: 塩分浸透の点検結果 干満帯: 塩分浸透の点検結果 海中帯: 塩分浸透の点検結果
	kg/m ³	0.25~1.43	0.20~2.90	0.54~7.48	
Co: コンクリート表面の塩化物イオン濃度および量	%	0.027	0.157	0.394	拡散方程式の回帰分析により算出 塩化物イオン量 (kg/m ³) = 単位容積質量 (kg/m ³) × 塩化物イオン濃度 (%) / 100
	kg/m ³	0.64	3.70	9.29	
D: コンクリート中の塩化物イオンの見かけ上の拡散係数 (mm ² /年)		262.1	13.9	75.1	拡散方程式の回帰分析により算出
Cl: 鉄筋位置における塩化物イオン濃度および量 (推定値)	%	0.00~0.02	0.00~0.01	0.00~0.14	運転開始から60年経過時点までの各年の推定値
	kg/m ³	0.00~0.41	0.00~0.12	0.00~3.31	
c: かぶり厚さ (mm)		85.5	87.5	87.5	
d: 鉄筋径 (mm)		29	25	25	
W: 単位水量 (kg/m ³)		169	169	169	
W/C: 水セメント比 (比)		48	48	48	
T: 温度 (°C)		16.0	18.7	18.7	気中帯: 発電所構内の温度の観測値 (2005年1月~2021年12月の17ヵ年平均) 干満帯・海中帯: 発電所構内の海水温度の観測値 (2005年1月~2021年12月の17ヵ年平均)
RH: 相対湿度 (%)		75.9	100	100	気中帯: 発電所構内の湿度の観測値 (2005年1月~2021年12月の17ヵ年平均) 干満帯・海中帯: 海水の接触により100%とする
O: 酸素濃度 (比)		21	21	0.6	気中帯: 理科年表 干満帯: 別紙12のうち添付2の考察により、気中帯と同様のパラメータとした。 海中帯: 森永氏の鉄筋腐食に関する研究論文引用
N: 練り混ぜ水の塩分濃度 (%)		0.00~0.40	0.00~0.12	0.00~3.23	運転開始から60年経過時点までの各年の推定値
Q _{36.37} : 調査時点 (36.37年経過) の鉄筋の腐食減量 (×10 ⁻⁴ g/cm ²)		3.0	7.4	0.6	
Q ₆₀ : 運転開始後60年経過時点の鉄筋の腐食減量 (×10 ⁻⁴ g/cm ²)		5.1	11.8	1.9	
Q _{CR} : かぶりコンクリートにひび割れが発生する時点の鉄筋の腐食減量 推定値 (×10 ⁻⁴ g/cm ²)		90.1	88.1	88.1	

- : (1) 拡散方程式により、コンクリート表面からの塩化物イオンの浸透を予測するに必要なパラメータ
- : (1) の予測結果
- : (2) 森永式により、鉄筋の腐食減量の評価を実施するのに必要なパラメータ
- : (2) の推定結果

拡散方程式

$$C(x, t) = C_0 \left\{ 1 - \operatorname{erf} \left(\frac{x}{2\sqrt{D \cdot t}} \right) \right\}$$

C(x, t): 距離x (mm)、共用期間t (年)において測定された塩化物イオン濃度および量 (%)
C₀: コンクリート表面の塩化物イオン濃度 (%)
erf: 誤差関数

$$\operatorname{erf}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x e^{-t^2} dt$$

x: 暴露面から塩化物イオン濃度を測定した箇所までの距離 (mm)
D: コンクリート中の塩化物イオンの見かけの拡散係数 (mm²/年)
t: 材齢 (年)

森永式

$$q = q_1 \cdot \frac{q_2}{q_2}$$

$$q_1 = \frac{d}{c^2} \left[-0.51 - 7.60N + 44.97(W/C)^2 + 67.95N(W/C)^2 \right]$$

$$q_2 = 2.59 - 0.05T - 6.89H - 22.87O - 0.99N + 0.14TH + 0.51TO$$

$$+ 0.01IN + 60.8IHO + 3.36HN + 7.32ON$$

$$q_2' = 0.56528 + 1.4304 N$$

$$Q_{CR} = 0.602(1 + 2c/d)^{0.85} \times d$$

q: 鉄筋の腐食速度 (×10⁻⁴g/cm²/年)
q1: 塩分環境下での腐食速度 (×10⁻⁴g/cm²/年)
q2: 寿命予測対象部位で、塩分環境下での腐食速度 (×10⁻⁴g/cm²/年)
q2': 寿命予測対象部位で、標準環境下 (温度15°C、湿度69%、酸素濃度20%) での腐食速度 (×10⁻⁴g/cm²/年)
Q_{CR}: かぶりコンクリートにひび割れが発生する時点の腐食減量 (×10⁻⁴g/cm²)
d: 鉄筋径 (mm)
c: かぶり厚さ (mm)
N: 練り混ぜ水に対する塩分濃度 (%)
W/C: 水セメント比 (比)
T: 温度 (°C)
H: 湿度に関する項 H=(RH-45)/100
RH: 相対湿度 (%)
O: 酸素濃度 (比)

表 1 3-2 算定に用いる諸元と評価結果 (2/2)

	取水構造物(1・2号炉)			備考	
	気中帯	干満帯	海中帯		
x: 暴露面から塩化物イオン濃度を測定した箇所までの距離 (mm)	0~120	0~120	0~120		
t: 共用年数 (年)	29 ^{※2}	29 ^{※1}	29 ^{※1}	塩分浸透の点検実施時点 ※1: 4号炉運転開始後の経過年数を示す。1号炉運転開始後の経過年数は40年。 ※2: 4号炉運転開始後の経過年数を示す。2号炉運転開始後の経過年数は39年。	
C(x,t): 距離x (mm)、共用期間t (年)において測定された塩化物イオン濃度および量	%	0.15~0.38	0.03~0.12	0.27~0.81	気中帯: 塩分浸透の点検結果 干満帯: 塩分浸透の点検結果 海中帯: 塩分浸透の点検結果
	kg/m ³	3.60~9.12	0.72~2.88	6.53~19.54	
Co: コンクリート表面の塩化物イオン濃度および量	%	0.599	0.132	0.831	拡散方程式の回帰分析により算出 塩化物イオン量(kg/m ³)=単位容積質量(kg/m ³)×塩化物イオン濃度(%) / 100
	kg/m ³	14.38	3.17	19.94	
D: コンクリート中の塩化物イオンの見かけ上の拡散係数 (mm ² /年)		120.2	115.4	133.9	拡散方程式の回帰分析により算出
Cl: 鉄筋位置における塩化物イオン濃度および量 (推定値)	%	0.00~0.31	0.00~0.07	0.00~0.45	1号炉または2号炉運転開始から4号炉運転開始後60年経過時点までの各年の推定値
	kg/m ³	0.00~7.33	0.00~1.60	0.00~10.67	
c: かぶり厚さ (mm)		85.5	85.5	85.5	
d: 鉄筋径 (mm)		29	29	29	
W: 単位水量 (kg/m ³)		142	142	142	
W/C: 水セメント比 (比)		53	53	53	
T: 温度 (°C)		14.5	18.7	18.7	気中帯: 気象庁(舞鶴)の観測値(1975~2014年の39年平均) 干満帯: 海中帯: 発電所構内の海水温度の測定記録(2005~2014年の10年平均) 非常用海水路: 発電所構内の海水温度の測定記録(2005~2014年の10年平均)
RH: 相対湿度 (%)		78	100	100	気中帯: 気象庁(舞鶴)の観測値(2014年) 干満帯: 海中帯: 海水の接触により100%とする
O: 酸素濃度 (比)		21	21	0.6	気中帯: 理科年表 干満帯: 別紙12のうち添付2の考察により、気中帯と同様のパラメータとした。 海中帯: 森永氏の鉄筋腐食に関する研究論文引用
N: 練り混ぜ水の塩分濃度 (%)		0.00~8.52	0.00~1.86	0.00~12.40	1号炉または2号炉運転開始から4号炉運転開始後60年経過時点までの各年の推定値
Q ₂₉ : 調査時点(29年経過)の鉄筋の腐食減量 (×10 ⁻⁴ g/cm ²)		10.7	11.4	7.2	
Q ₆₀ : 4号炉運転開始後60年経過時点の鉄筋の腐食減量 (×10 ⁻⁴ g/cm ²)		26.6	21.6	19.3	
Q _{CR} : かぶりコンクリートにひび割れが発生する時点の鉄筋の腐食減量 推定値 (×10 ⁻⁴ g/cm ²)		90.1	90.1	90.1	

- : (1) 拡散方程式により、コンクリート表面からの塩化物イオンの浸透を予測するのに必要なパラメータ
- : (1) の予測結果
- : (2) 森永氏により、鉄筋の腐食減量の評価を実施するのに必要なパラメータ
- : (2) の推定結果

拡散方程式

$$C(x, t) = C_0 \left\{ 1 - \operatorname{erf} \left(\frac{x}{2\sqrt{D \cdot t}} \right) \right\}$$

C(x, t): 距離x (mm)、共用期間t (年)において測定された塩化物イオン濃度および量 (%)
C₀: コンクリート表面の塩化物イオン濃度 (%)
erf: 誤差関数

$$\operatorname{erf}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x e^{-t^2} dt$$

x: 暴露面から塩化物イオン濃度を測定した箇所までの距離 (mm)
D: コンクリート中の塩化物イオンの見かけの拡散係数 (mm²/年)
t: 材齢 (年)

森永式

$$q = q_1 \cdot \frac{q_2}{q_2'}$$

$$q_1 = \frac{d}{c^2} \left[-0.51 - 7.60N + 44.97 \left(\frac{W}{C} \right)^2 + 67.95N \left(\frac{W}{C} \right)^2 \right]$$

$$q_2 = 2.59 - 0.05T - 6.89H - 22.87O - 0.99N + 0.14TH + 0.51TO + 0.017N + 608HO + 3.36HN + 7.32ON$$

$$q_2' = 0.56528 + 1.4304 N$$

$$Q_{CR} = 0.602(1+2c/d)^{0.85} \times d$$

q: 鉄筋の腐食速度 (×10⁻⁴g/cm²/年)
q₁: 塩分環境下での腐食速度 (×10⁻⁴g/cm²/年)
q₂: 寿命予測対象部位で、塩分環境下での腐食速度 (×10⁻⁴g/cm²/年)
q₂': 寿命予測対象部位で、標準環境下 (温度15°C、湿度69%、酸素濃度20%) での腐食速度 (×10⁻⁴g/cm²/年)
Q_{CR}: かぶりコンクリートにひび割れが発生する時点の腐食減量 (×10⁻⁴g/cm²)
d: 鉄筋径 (mm)
c: かぶり厚さ (mm)
N: 練り混ぜ水に対する塩分濃度 (%)
W/C: 水セメント比 (比)
T: 温度 (°C)
H: 湿度に関する項 H=(RH-45)/100
RH: 相対湿度 (%)
O: 酸素濃度 (比)

拡散方程式の回帰分析と鉄筋腐食減量の算定について

鉄筋の腐食減量を評価するには、まず、塩化物イオン濃度（コア測定）の回帰分析から拡散方程式（コンクリート中の塩化物イオンの見かけの拡散係数（ D ）およびコンクリート表面の塩化物イオン濃度（ C_0 ））を求め、それを森永式に展開することから評価される。ここでは、拡散方程式の回帰分析（最小二乗法）と、それを踏まえた鉄筋の腐食減量について示す。

(1) 拡散方程式の回帰分析

塩化物イオン濃度は、気中帯、干満帯および海中帯のそれぞれに対して、3箇所（No. 1、No. 2、No. 3）のコア採取により測定している。測定位置および測定結果は、「別紙 1 2 添付 1 塩化物イオン濃度の測定位置図」および「別紙 1 2 添付 3 塩化物イオン濃度および量の測定結果」に示す。

拡散方程式（ D 、 C_0 ）は、気中帯、干満帯および海中帯のそれぞれに対して、測定された塩化物イオン濃度を回帰分析することで評価する。

評価はコア（No. 1、No. 2、No. 3）の平均値を用いる場合と、コア（No. 1、No. 2、No. 3）の単独値を用いる場合の双方について実施した。

回帰分析に当たっては、土木学会規準（案）※に示された「隣接する前後の深さ位置での測定結果と著しく異なる結果についても、回帰分析用のデータから除外するほうがよい。」との記載を参考に、除外する測定結果を選定している。全測定結果および「回帰分析に用いない測定結果（フィッティングさせるため）」を図 1 3-1 に示す。

また、土木学会規準（案）に示された中性化の影響の可能性を考慮し、コンクリート表面に近い領域（0～20mm）の測定値を用いる場合と用いない場合の検討を実施した。

以上の通り検討し、最も影響の大きい回帰分析結果を図 1 3-2 に示す。

※：土木学会規準「実構造物におけるコンクリート中の全塩化物イオン分布の測定方法（案）（JSCE-G 573-2018）」（以下、土木学会規準（案）と言う。）

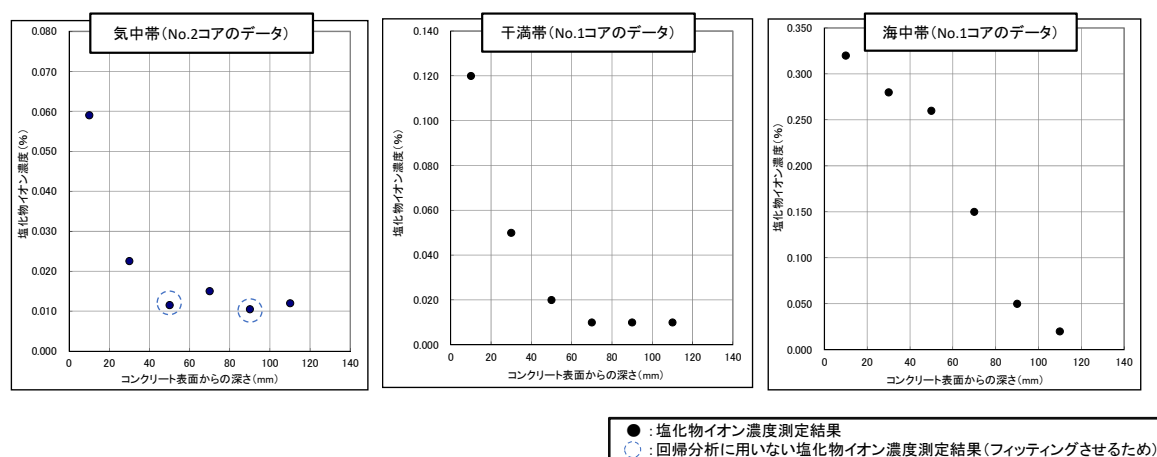


図 1 3-1 全測定結果および回帰分析に用いない測定結果（フィッティングさせるため）

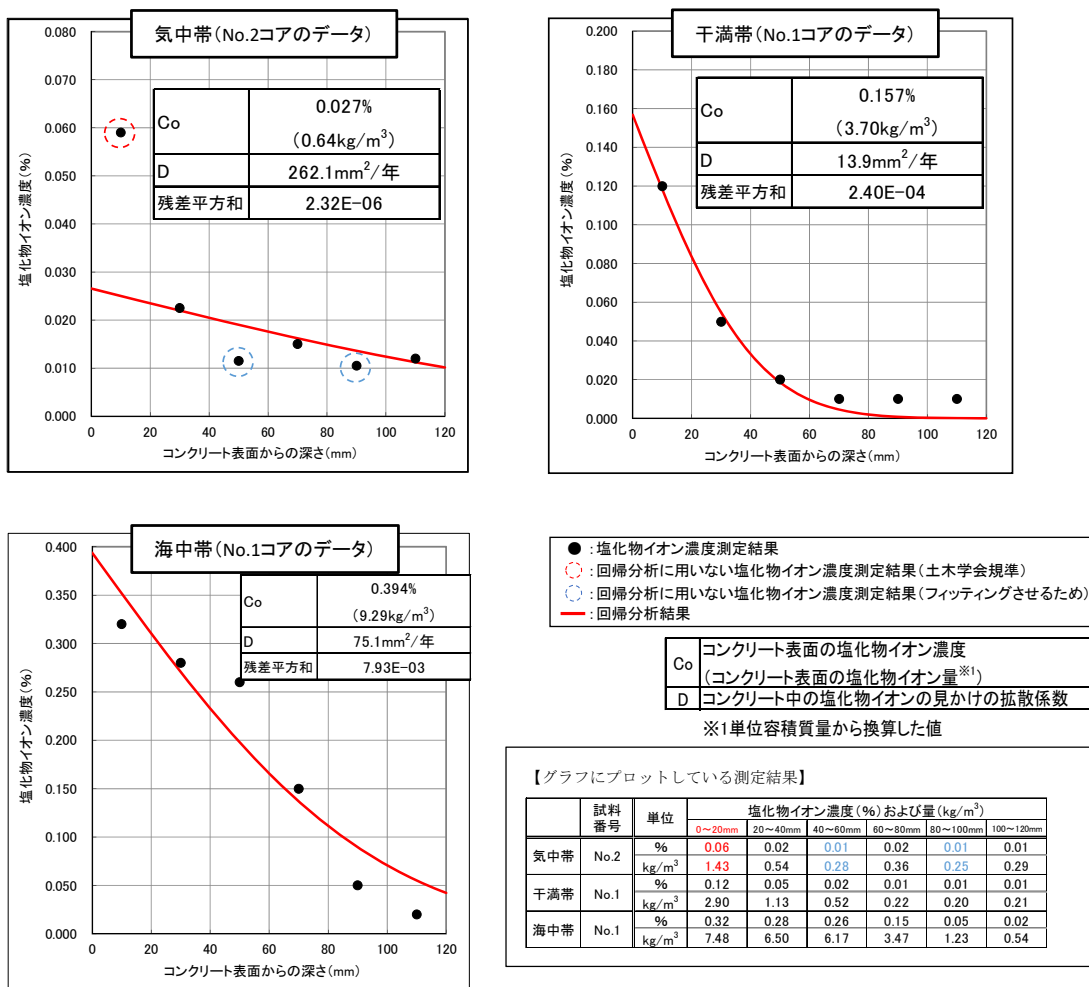


図 1 3-2 拡散方程式の回帰分析結

なお、回帰分析において初期含有全塩化物イオン濃度 (C_i) は、土木学会規準 (案) で「初期含有全塩化物イオン濃度が不明な場合には、十分に深く構造物表面からの塩分浸透の影響を受けていないと考えられる位置から採取された試料の全塩化物イオン濃度で代用する。」とされており、深い位置での塩化物イオン濃度測定結果が概ね 0 であることから、C_i=0 としている。

(2) 鉄筋の腐食減量

1) 評価結果

上記、拡散方程式の回帰分析で求めたコンクリート中の塩化物イオンの見かけの拡散係数 (D) およびコンクリート表面の塩化物イオン濃度 (C_o) を森永式に展開し、鉄筋の腐食減量 (気中帯、干満帯、海中帯) を算定した。「調査時点」、「運転開始後 60 年経過時点」および「かぶりコンクリートにひび割れが発生する時点」のそれぞれの算定結果を比較して採用した結果を表 1 3-3 に示す。

運転開始 60 年時点の鉄筋の腐食減量が、かぶりコンクリートにひび割れが発生する時点の鉄筋腐食減量 (気中帯: $90.1 \times 10^{-4} \text{g/cm}^2$ 、干満帯・海中帯: $88.1 \times 10^{-4} \text{g/cm}^2$) を下回っていることを確認した。

なお、上記結果 (気中帯、干満帯、海中帯) は、3 本のコア単独の測定値を用いた場合、およびその平均値を用いた場合のそれぞれにおいて中性化の影響有無を考慮した結果、最も影響の大きいケースである。その選定過程については後述する。

表 1 3-3 鉄筋の腐食減量の結果

気中帯 ^{※1}		干満帯 ^{※2}		海中帯 ^{※3}	
データ: No.2コアの測定結果		データ: No.1コアの測定結果		データ: No.1コアの測定結果	
運転開始後経過年数 (年)	鉄筋の腐食減量 ($\times 10^{-4} \text{g/cm}^2$)	運転開始後経過年数 (年)	鉄筋の腐食減量 ($\times 10^{-4} \text{g/cm}^2$)	運転開始後経過年数 (年)	鉄筋の腐食減量 ($\times 10^{-4} \text{g/cm}^2$)
31	2.6	32	6.4	32	0.4
32	2.7	33	6.6	33	0.4
33	2.8	34	6.8	34	0.5
34	2.9	35	7.0	35	0.5
35	2.9	36	7.2	36	0.5
調査時点 36	3.0	調査時点 37	7.4	調査時点 37	0.6
37	3.1	38	7.6	38	0.6
38	3.2	39	7.8	39	0.7
39	3.3	40	8.0	40	0.7
40	3.4	41	8.2	41	0.8
41	3.5	42	8.4	42	0.8
55	4.7	55	10.9	55	1.6
56	4.7	56	11.0	56	1.6
57	4.8	57	11.2	57	1.7
58	4.9	58	11.4	58	1.8
59	5.0	59	11.6	59	1.8
運転開始後 60年経過時点	5.1	運転開始後 60年経過時点	11.8	運転開始後 60年経過時点	1.9
61	5.2	61	12.0	61	2.0
62	5.3	62	12.1	62	2.0
63	5.4	63	12.3	63	2.1
64	5.4	64	12.5	64	2.2
65	5.5	65	12.7	65	2.2
994	89.6	470	86.9	728	87.3
995	89.7	471	87.1	729	87.5
996	89.8	472	87.3	730	87.6
997	89.9	473	87.5	731	87.8
998	90.0	474	87.7	732	87.9
999 ^{※4}	90.1	475 ^{※4}	87.9	733 ^{※4}	88.1
1000	90.1	476	88.1	734	88.2
1001	90.2	477	88.3	735	88.4
1002	90.3	478	88.5	736	88.5
1003	90.4	479	88.7	737	88.7
1004	90.5	480	88.9	738	88.8

※1 0~20mmの塩化物イオン濃度のデータを用いない場合での鉄筋の腐食減量 (ケース: ①-2)

※2 0~20mmの塩化物イオン濃度のデータを用いる場合での鉄筋の腐食減量 (ケース: ②-1)

※3 0~20mmの塩化物イオン濃度のデータを用いる場合での鉄筋の腐食減量 (ケース: ②-1)

※4 かぶりコンクリートにひび割れが発生する時点

2) 影響の大きいケースの選定

①気中帯について

回帰分析は、前述したようにコア (No. 1、No. 2、No. 3) の平均値を用いる場合と、コア (No. 1、No. 2、No. 3) の単独値を用いる場合の双方について実施している。

気中帯は、コンクリートが空気に曝される状況下であり、中性化の作用を受けている可能性があることから、土木学会規準 (案) に示された「中性化した領域およびそこから1cm以内の深部で採取された試料から得られた結果は、回帰分析を行う際には用いないほうがよい。(中略) 同様に、隣接する前後の深さ位置での測定結果と著しく異なる結果についても、回帰分析用のデータから除外するほうがよい。」を参考に、気中帯の中性化深さ測定結果 (0.5cm) +1cmの領域を含む『0~20mmの塩化物イオン濃度のデータ』を用いないで回帰分析を実施した。

なお、『0~20mmの塩化物イオン濃度のデータ』を用いる場合での検討も実施し、用いない場合と用いる場合の影響を検討して影響の大きな方を採用した。

■コア (3箇所) の塩化物イオン濃度測定結果

塩化物イオンの測定結果を表1 3-4に示す。赤字の測定結果が、中性化の影響の可能性が考えられる領域のデータ (0~20mm) である。また、青字の測定結果については、回帰曲線を塩化物イオン濃度測定値にフィッティングさせるため回帰分析には用いていないデータである。

なお、回帰分析結果については割愛する。

表1 3-4 コアの塩化物イオン濃度測定値 (気中帯: 3箇所)

試料番号	単位	塩化物イオン濃度(%)および量(kg/m ³)					
		0~20mm	20~40mm	40~60mm	60~80mm	80~100mm	100~120mm
No.1	%	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
	kg/m ³	0.47	0.28	0.25	0.15	0.13	0.19
No.2	%	0.06	0.02	0.01	0.02	0.01	0.01
	kg/m ³	1.43	0.54	0.28	0.36	0.25	0.29
No.3	%	0.04	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
	kg/m ³	0.85	0.25	0.23	0.22	0.18	0.24
平均値	%	0.04	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
	kg/m ³	0.92	0.36	0.25	0.24	0.19	0.24

■影響の大きいケースの選定

塩化物イオン濃度測定結果が鉄筋の腐食減量結果に及ぼす影響について、「調査時点」、「運転開始後60年経過時点」および「かぶりコンクリートにひび割れが発生する時点」を比較して表1 3-5~1 3-6に示す。

運転開始後経過60年時点の鉄筋の腐食減量が最も大きい値は、①-2 (0~20mmのデータを用いない場合、No.2コアの測定結果) であったため、このケースを採用した。

表 1 3-5 鉄筋の腐食減量の算定結果（気中帯）
【0～20mmのデータを用いない場合】

①-1		①-2		①-3		①-4	
データ:No.1コアの測定結果		データ:No.2コアの測定結果		データ:No.3コアの測定結果		データ:平均値	
運転開始後 経過年数 (年)	鉄筋の腐食減量 ($\times 10^{-4}$ g/cm ²)	運転開始後 経過年数 (年)	鉄筋の腐食減量 ($\times 10^{-4}$ g/cm ²)	運転開始後 経過年数 (年)	鉄筋の腐食減量 ($\times 10^{-4}$ g/cm ²)	運転開始後 経過年数 (年)	鉄筋の腐食減量 ($\times 10^{-4}$ g/cm ²)
31	2.6	31	2.6	31	2.6	31	2.6
32	2.7	32	2.7	32	2.7	32	2.7
33	2.7	33	2.8	33	2.7	33	2.8
34	2.8	34	2.9	34	2.8	34	2.8
35	2.9	35	2.9	35	2.9	35	2.9
調査時点 36	3.0	調査時点 36	3.0	調査時点 36	3.0	調査時点 36	3.0
37	3.1	37	3.1	37	3.1	37	3.1
38	3.2	38	3.2	38	3.2	38	3.2
39	3.2	39	3.3	39	3.2	39	3.3
40	3.3	40	3.4	40	3.3	40	3.3
41	3.4	41	3.5	41	3.4	41	3.4
55	4.6	55	4.7	55	4.6	55	4.6
56	4.6	56	4.7	56	4.6	56	4.7
57	4.7	57	4.8	57	4.7	57	4.8
58	4.8	58	4.9	58	4.8	58	4.9
59	4.9	59	5.0	59	4.9	59	5.0
運転開始後 60年経過時点	5.0	運転開始後 60年経過時点	5.1	運転開始後 60年経過時点	5.0	運転開始後 60年経過時点	5.0
61	5.1	61	5.2	61	5.1	61	5.1
62	5.1	62	5.3	62	5.1	62	5.2
63	5.2	63	5.4	63	5.2	63	5.3
64	5.3	64	5.4	64	5.3	64	5.4
65	5.4	65	5.5	65	5.4	65	5.5
1062	89.7	994	89.6	1067	89.6	1031	89.6
1063	89.8	995	89.7	1068	89.7	1032	89.7
1064	89.9	996	89.8	1069	89.8	1033	89.8
1065	89.9	997	89.9	1070	89.9	1034	89.9
1066	90.0	998	90.0	1071	90.0	1035	90.0
1067 ^{※1}	90.1	999 ^{※1}	90.1	1072 ^{※1}	90.0	1036 ^{※1}	90.1
1068	90.2	1000	90.1	1073	90.1	1037	90.2
1069	90.3	1001	90.2	1074	90.2	1038	90.2
1070	90.4	1002	90.3	1075	90.3	1039	90.3
1071	90.4	1003	90.4	1076	90.4	1040	90.4
1072	90.5	1004	90.5	1077	90.5	1041	90.5

: 採用ケース

※1 かぶりコンクリートにひび割れが発生する時点

表 1 3-6 鉄筋の腐食減量の算定結果（気中帯）
【0～20mmのデータを用いる場合】

②-1 データ: No.1コアの測定結果		②-2 データ: No.2コアの測定結果		②-3 データ: No.3コアの測定結果		②-4 データ: 平均値	
運転開始後 経過年数 (年)	鉄筋の腐食減量 ($\times 10^{-4}$ g/cm ²)	運転開始後 経過年数 (年)	鉄筋の腐食減量 ($\times 10^{-4}$ g/cm ²)	運転開始後 経過年数 (年)	鉄筋の腐食減量 ($\times 10^{-4}$ g/cm ²)	運転開始後 経過年数 (年)	鉄筋の腐食減量 ($\times 10^{-4}$ g/cm ²)
31	2.6	31	2.6	31	2.6	31	2.6
32	2.7	32	2.7	32	2.7	32	2.7
33	2.7	33	2.7	33	2.8	33	2.7
34	2.8	34	2.8	34	2.8	34	2.8
35	2.9	35	2.9	35	2.9	35	2.9
調査時点 36	3.0	調査時点 36	3.0	調査時点 36	3.0	調査時点 36	3.0
37	3.1	37	3.1	37	3.1	37	3.1
38	3.2	38	3.2	38	3.2	38	3.2
39	3.2	39	3.2	39	3.3	39	3.3
40	3.3	40	3.3	40	3.3	40	3.3
41	3.4	41	3.4	41	3.4	41	3.4
55	4.6	55	4.6	55	4.6	55	4.6
56	4.6	56	4.7	56	4.7	56	4.7
57	4.7	57	4.7	57	4.7	57	4.8
58	4.8	58	4.8	58	4.8	58	4.9
59	4.9	59	4.9	59	4.9	59	5.0
運転開始後 60年経過時点	5.0	運転開始後 60年経過時点	5.0	運転開始後 60年経過時点	5.0	運転開始後 60年経過時点	5.1
61	5.1	61	5.1	61	5.1	61	5.1
62	5.1	62	5.2	62	5.2	62	5.2
63	5.2	63	5.2	63	5.2	63	5.3
64	5.3	64	5.3	64	5.3	64	5.4
65	5.4	65	5.4	65	5.4	65	5.5
1046	89.6	895	89.5	1001	89.6	929	89.6
1047	89.7	896	89.6	1002	89.7	930	89.7
1048	89.8	897	89.7	1003	89.8	931	89.8
1049	89.9	898	89.8	1004	89.9	932	89.9
1050	90.0	899	90.0	1005	90.0	933	90.0
1051 ^{※1}	90.1	900 ^{※1}	90.1	1006 ^{※1}	90.1	934 ^{※1}	90.1
1052	90.1	901	90.2	1007	90.2	935	90.2
1053	90.2	902	90.3	1008	90.3	936	90.3
1054	90.3	903	90.4	1009	90.4	937	90.4
1055	90.4	904	90.5	1010	90.4	938	90.5
1056	90.5	905	90.6	1011	90.5	939	90.6

※1 かぶりコンクリートにひび割れが発生する時点

②干満帯について

回帰分析は、前述したようにコア (No. 1、No. 2、No. 3) の平均値を用いる場合と、コア (No. 1、No. 2、No. 3) の単独値を用いる場合の双方について実施している。

干満帯は、気中帯と同様に外気環境に曝される状態であると想定し、土木学会規準 (案) に示された「中性化した領域およびそこから1cm以内の深部で採取された試料から得られた結果は、回帰分析を行う際には用いないほうがよい。(中略) 同様に、隣接する前後の深さ位置での測定結果と著しく異なる結果についても、回帰分析用のデータから除外するほうがよい。」を参考に、気中帯の中性化深さ測定結果 (0.5cm) +1cmの領域を含む『0~20mmの塩化物イオン濃度のデータ』を用いないで回帰分析を実施した。

なお、『0~20mmの塩化物イオン濃度のデータ』を用いる場合での検討も実施し、用いない場合と用いる場合の影響を検討して影響の大きな方を採用した。

■コア (3箇所) の塩化物イオン濃度測定結果

塩化物イオンの測定結果を表 1 3-7 に測定結果を示す。なお、赤字の測定結果が、中性化の影響の可能性が考えられる領域のデータ (0~20mm) である。

なお、回帰分析結果については割愛する。

表 1 3-7 コアの塩化物イオン濃度測定値 (干満帯 : 3箇所)

試料番号	単位	塩化物イオン濃度 (%) および量 (kg/m ³)					
		0~20mm	20~40mm	40~60mm	60~80mm	80~100mm	100~120mm
No.1	%	0.12	0.05	0.02	0.01	0.01	0.01
	kg/m ³	2.90	1.13	0.52	0.22	0.20	0.21
No.2	%	0.14	0.12	0.06	0.03	0.01	0.01
	kg/m ³	3.40	2.82	1.38	0.60	0.34	0.30
No.3	%	0.12	0.11	0.06	0.03	0.01	0.01
	kg/m ³	2.88	2.49	1.33	0.66	0.27	0.27
平均値	%	0.13	0.09	0.05	0.02	0.01	0.01
	kg/m ³	3.06	2.15	1.08	0.49	0.27	0.26

■影響の大きいケースの選定

塩化物イオン濃度測定結果が鉄筋の腐食減量結果に及ぼす影響について、「調査時点」、「運転開始後60年経過時点」および「かぶりコンクリートにひび割れが発生する時点」を比較して表 1 3-8 ~ 1 3-9 に示す。

運転開始後経過60年時点の鉄筋の腐食減量が最も大きい値は、②-1 (0~20mmのデータを用いる場合、No. 1コアの測定結果) であったため、このケースを採用した。

表 13-8 鉄筋の腐食減量 (干満帯)
【0~20mmのデータを用いない場合】

①-1 データ: No.1コアの測定結果		①-2 データ: No.2コアの測定結果		①-3 データ: No.3コアの測定結果		①-4 データ: 平均値	
運転開始後 経過年数 (年)	鉄筋の腐食減量 ($\times 10^{-4}$ g/cm ²)	運転開始後 経過年数 (年)	鉄筋の腐食減量 ($\times 10^{-4}$ g/cm ²)	運転開始後 経過年数 (年)	鉄筋の腐食減量 ($\times 10^{-4}$ g/cm ²)	運転開始後 経過年数 (年)	鉄筋の腐食減量 ($\times 10^{-4}$ g/cm ²)
32	6.3	32	6.2	32	6.2	32	6.2
33	6.5	33	6.4	33	6.3	33	6.4
34	6.7	34	6.5	34	6.5	34	6.6
35	6.9	35	6.7	35	6.7	35	6.7
36	7.1	36	6.9	36	6.9	36	6.9
調査時点 37	7.2	調査時点 37	7.1	調査時点 37	7.0	調査時点 37	7.1
38	7.4	38	7.2	38	7.2	38	7.3
39	7.6	39	7.4	39	7.4	39	7.4
40	7.8	40	7.6	40	7.5	40	7.6
41	8.0	41	7.8	41	7.7	41	7.8
42	8.1	42	7.9	42	7.9	42	8.0
55	10.5	55	10.2	55	10.1	55	10.2
56	10.6	56	10.3	56	10.3	56	10.4
57	10.8	57	10.5	57	10.4	57	10.5
58	11.0	58	10.7	58	10.6	58	10.7
59	11.2	59	10.8	59	10.8	59	10.9
運転開始後 60年経過時点	11.3	運転開始後 60年経過時点	11.0	運転開始後 60年経過時点	11.0	運転開始後 60年経過時点	11.0
61	11.5	61	11.2	61	11.1	61	11.2
62	11.7	62	11.4	62	11.3	62	11.4
63	11.9	63	11.5	63	11.5	63	11.6
64	12.0	64	11.7	64	11.7	64	11.7
65	12.2	65	11.9	65	11.8	65	11.9
483	87.1	397	86.7	406	86.8	427	87.0
484	87.3	398	87.0	407	87.1	428	87.2
485	87.5	399	87.2	408	87.3	429	87.4
486	87.7	400	87.5	409	87.5	430	87.6
487	87.9	401	87.7	410	87.8	431	87.9
488 ^{※1}	88.1	402 ^{※1}	88.0	411 ^{※1}	88.0	432 ^{※1}	88.1
489	88.3	403	88.2	412	88.3	433	88.3
490	88.5	404	88.5	413	88.5	434	88.6
491	88.6	405	88.8	414	88.8	435	88.8
492	88.8	406	89.0	415	89.0	436	89.0
493	89.0	407	89.3	416	89.3	437	89.3

※1 かぶりコンクリートにひび割れが発生する時点

表 13-9 鉄筋の腐食減量 (干満帯)
【0~20mmのデータを用いる場合】

②-1		②-2		②-3		②-4	
データ: No.1コアの測定結果		データ: No.2コアの測定結果		データ: No.3コアの測定結果		データ: 平均値	
運転開始後 経過年数 (年)	鉄筋の腐食減量 ($\times 10^{-4}$ g/cm ²)	運転開始後 経過年数 (年)	鉄筋の腐食減量 ($\times 10^{-4}$ g/cm ²)	運転開始後 経過年数 (年)	鉄筋の腐食減量 ($\times 10^{-4}$ g/cm ²)	運転開始後 経過年数 (年)	鉄筋の腐食減量 ($\times 10^{-4}$ g/cm ²)
32	6.4	32	6.0	32	6.0	32	6.1
33	6.6	33	6.2	33	6.2	33	6.3
34	6.8	34	6.4	34	6.3	34	6.5
35	7.0	35	6.6	35	6.5	35	6.7
36	7.2	36	6.7	36	6.7	36	6.8
調査時点 37	7.4	調査時点 37	6.9	調査時点 37	6.9	調査時点 37	7.0
38	7.6	38	7.1	38	7.0	38	7.2
39	7.8	39	7.2	39	7.2	39	7.4
40	8.0	40	7.4	40	7.4	40	7.5
41	8.2	41	7.6	41	7.5	41	7.7
42	8.4	42	7.8	42	7.7	42	7.9
55	10.9	55	10.0	55	9.9	55	10.1
56	11.0	56	10.2	56	10.1	56	10.3
57	11.2	57	10.3	57	10.3	57	10.4
58	11.4	58	10.5	58	10.5	58	10.6
59	11.6	59	10.7	59	10.6	59	10.8
運転開始後 60年経過時点	11.8	運転開始後 60年経過時点	10.9	運転開始後 60年経過時点	10.8	運転開始後 60年経過時点	10.9
61	12.0	61	11.0	61	11.0	61	11.1
62	12.1	62	11.2	62	11.2	62	11.3
63	12.3	63	11.4	63	11.3	63	11.5
64	12.5	64	11.6	64	11.5	64	11.6
65	12.7	65	11.7	65	11.7	65	11.8
470	86.9	412	86.7	424	86.9	434	87.0
471	87.1	413	87.0	425	87.2	435	87.2
472	87.3	414	87.2	426	87.4	436	87.5
473	87.5	415	87.4	427	87.6	437	87.7
474	87.7	416	87.7	428	87.9	438	87.9
475 ^{※1}	87.9	417 ^{※1}	87.9	429 ^{※1}	88.1	439 ^{※1}	88.1
476	88.1	418	88.2	430	88.3	440	88.4
477	88.3	419	88.4	431	88.5	441	88.6
478	88.5	420	88.6	432	88.8	442	88.8
479	88.7	421	88.9	433	89.0	443	89.0
480	88.9	422	89.1	434	89.2	444	89.2

: 採用ケース

※1 かぶりコンクリートにひび割れが発生する時点

③海中帯について

回帰分析は、前述したようにコア（No. 1、No. 2、No. 3）の平均値を用いる場合と、コア（No. 1、No. 2、No. 3）の単独値を用いる場合の双方について実施している。

海中帯は、常に海水に浸かっている状況下であるが、土木学会規準（案）に示された「全く中性化が生じていない場合においても、構造物表面から深さ1cm以内で採取された試料から得られた結果は、回帰分析を行う際には用いないほうがよい。同様に、隣接する前後の深さ位置での測定結果と著しく異なる結果についても、回帰分析用のデータから除外するほうがよい。」を参考に、『深さ1cmの領域を含む0～20mmの塩化物イオン濃度のデータ』を用いないで回帰分析を実施した。

なお、『0～20mmの塩化物イオン濃度のデータ』を用いる場合での検討も実施し、用いない場合と用いる場合の影響を検討して影響の大きな方を採用した。

■コア（3箇所）の塩化物イオン濃度測定結果

塩化物イオンの測定結果を表1 3-1 0に測定結果を示す。なお、赤字の測定結果が構造物表面から深さ1cmの領域を含むデータ（0～20mm）である。

なお、回帰分析結果については割愛する。

表1 3-1 0 コアの塩化物イオン濃度測定値（海中帯：3箇所）

試料番号	単位	塩化物イオン濃度(%)および量(kg/m ³)					
		0～20mm	20～40mm	40～60mm	60～80mm	80～100mm	100～120mm
No.1	%	0.32	0.28	0.26	0.15	0.05	0.02
	kg/m ³	7.48	6.50	6.17	3.47	1.23	0.54
No.2	%	0.43	0.23	0.13	0.05	0.03	0.03
	kg/m ³	10.15	5.40	3.02	1.16	0.79	0.61
No.3	%	0.46	0.36	0.25	0.12	0.05	0.02
	kg/m ³	10.93	8.41	5.83	2.89	1.11	0.40
平均値	%	0.40	0.29	0.21	0.11	0.04	0.02
	kg/m ³	9.52	6.77	5.01	2.51	1.04	0.52

■影響の大きいケースの選定

塩化物イオン濃度測定結果が鉄筋の腐食減量結果に及ぼす影響について、「調査時点」、「運転開始後60年経過時点」および「かぶりコンクリートにひび割れが発生する時点」を比較して表1 3-1 1～1 3-1 2に示す。

運転開始後経過60年時点の鉄筋の腐食減量が最も大きい値は、②-1（0～20mmのデータを用いる場合、No. 1コアの測定結果）であったため、このケースを採用した。

表 1 3-1 1 鉄筋の腐食減量（海中帯）
【0～20mmのデータを用いない場合】

①-1 データ: No.1コアの測定結果		①-2 データ: No.2コアの測定結果		①-3 データ: No.3コアの測定結果		①-4 データ: 平均値	
運転開始後 経過年数 (年)	鉄筋の腐食減量 ($\times 10^{-4}$ g/cm ²)	運転開始後 経過年数 (年)	鉄筋の腐食減量 ($\times 10^{-4}$ g/cm ²)	運転開始後 経過年数 (年)	鉄筋の腐食減量 ($\times 10^{-4}$ g/cm ²)	運転開始後 経過年数 (年)	鉄筋の腐食減量 ($\times 10^{-4}$ g/cm ²)
32	0.3	32	0.0	32	0.1	32	0.1
33	0.3	33	0.0	33	0.1	33	0.1
34	0.3	34	0.0	34	0.2	34	0.1
35	0.4	35	0.0	35	0.2	35	0.2
36	0.4	36	0.0	36	0.2	36	0.2
調査時点 37	0.4	調査時点 37	0.0	調査時点 37	0.2	調査時点 37	0.2
38	0.5	38	0.0	38	0.3	38	0.3
39	0.5	39	0.0	39	0.3	39	0.3
40	0.6	40	0.0	40	0.3	40	0.3
41	0.6	41	0.0	41	0.4	41	0.3
42	0.7	42	0.1	42	0.4	42	0.4
55	1.4	55	0.3	55	1.0	55	0.9
56	1.4	56	0.3	56	1.1	56	1.0
57	1.5	57	0.3	57	1.1	57	1.0
58	1.6	58	0.4	58	1.2	58	1.1
59	1.6	59	0.4	59	1.3	59	1.1
運転開始後 60年経過時点	1.7	運転開始後 60年経過時点	0.4	運転開始後 60年経過時点	1.3	運転開始後 60年経過時点	1.2
61	1.7	61	0.5	61	1.4	61	1.2
62	1.8	62	0.5	62	1.5	62	1.3
63	1.9	63	0.5	63	1.5	63	1.3
64	2.0	64	0.6	64	1.6	64	1.4
65	2.0	65	0.6	65	1.7	65	1.5
658	87.2	828	87.4	580	87.0	676	87.3
659	87.4	829	87.6	581	87.2	677	87.4
660	87.5	830	87.7	582	87.4	678	87.6
661	87.7	831	87.8	583	87.6	679	87.8
662	87.9	832	88.0	584	87.8	680	88.0
663 ^{※1}	88.0	833 ^{※1}	88.1	585 ^{※1}	88.0	681 ^{※1}	88.1
664	88.2	834	88.3	586	88.2	682	88.3
665	88.4	835	88.4	587	88.4	683	88.5
666	88.6	836	88.6	588	88.6	684	88.6
667	88.7	837	88.7	589	88.8	685	88.8
668	88.9	838	88.8	590	89.1	686	89.0

※1 かぶりコンクリートにひび割れが発生する時点

表 1 3-1 2 鉄筋の腐食減量（海中帯）
【0～20mmのデータを用いる場合】

②-1		②-2		②-3		②-4	
データ: No.1コアの測定結果		データ: No.2コアの測定結果		データ: No.3コアの測定結果		データ: 平均値	
運転開始後 経過年数 (年)	鉄筋の腐食減量 ($\times 10^{-4}$ g/cm ²)	運転開始後 経過年数 (年)	鉄筋の腐食減量 ($\times 10^{-4}$ g/cm ²)	運転開始後 経過年数 (年)	鉄筋の腐食減量 ($\times 10^{-4}$ g/cm ²)	運転開始後 経過年数 (年)	鉄筋の腐食減量 ($\times 10^{-4}$ g/cm ²)
32	0.4	32	0.0	32	0.2	32	0.1
33	0.4	33	0.0	33	0.2	33	0.2
34	0.5	34	0.0	34	0.3	34	0.2
35	0.5	35	0.0	35	0.3	35	0.2
36	0.5	36	0.0	36	0.3	36	0.2
調査時点 37	0.6	調査時点 37	0.0	調査時点 37	0.4	調査時点 37	0.3
38	0.6	38	0.0	38	0.4	38	0.3
39	0.7	39	0.0	39	0.4	39	0.3
40	0.7	40	0.0	40	0.5	40	0.4
41	0.8	41	0.0	41	0.5	41	0.4
42	0.8	42	0.0	42	0.5	42	0.4
55	1.6	55	0.2	55	1.2	55	1.0
56	1.6	56	0.2	56	1.3	56	1.0
57	1.7	57	0.2	57	1.3	57	1.1
58	1.8	58	0.2	58	1.4	58	1.1
59	1.8	59	0.2	59	1.5	59	1.2
運転開始後 60年経過時点	1.9	運転開始後 60年経過時点	0.3	運転開始後 60年経過時点	1.5	運転開始後 60年経過時点	1.2
61	2.0	61	0.3	61	1.6	61	1.3
62	2.0	62	0.3	62	1.7	62	1.4
63	2.1	63	0.3	63	1.7	63	1.4
64	2.2	64	0.4	64	1.8	64	1.5
65	2.2	65	0.4	65	1.9	65	1.5
728	87.3	775	87.3	615	87.2	693	87.2
729	87.5	776	87.5	616	87.4	694	87.3
730	87.6	777	87.6	617	87.6	695	87.5
731	87.8	778	87.8	618	87.7	696	87.6
732	87.9	779	88.0	619	87.9	697	87.8
733 ^{※1}	88.1	780 ^{※1}	88.1	620 ^{※1}	88.1	698 ^{※1}	88.0
734	88.2	781	88.3	621	88.3	699	88.1
735	88.4	782	88.4	622	88.5	700	88.3
736	88.5	783	88.6	623	88.7	701	88.5
737	88.7	784	88.8	624	88.9	702	88.6
738	88.8	785	88.9	625	89.1	703	88.8

: 採用ケース

※1 かぶりコンクリートにひび割れが発生する時点

タイトル	機械振動の評価対象の選定過程について																																														
説明	<p>機械振動による強度低下における評価対象については、『日本原子力学会 原子力発電所の高経年化対策実施基準：2021 付属書C 経年劣化メカニズムまとめ表』の記載ならびに機器の定格出力および重量より、タービン架台および非常用ディーゼル発電機基礎を選定した。主要な機器の定格出力および重量は表－1の通り。</p> <p style="text-align: center;">表－1 主要な機器の定格出力および重量</p> <table border="1" style="margin-left: auto; margin-right: auto;"> <thead> <tr> <th>機器名称</th> <th>運転状態</th> <th>定格出力(kW)</th> <th>重量(kg)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>高压タービン</td> <td>連続</td> <td>870,000</td> <td>145,500</td> </tr> <tr> <td>低压タービン</td> <td>連続</td> <td>870,000</td> <td>1,599,200</td> </tr> <tr> <td>海水ポンプモータ</td> <td>連続</td> <td>420</td> <td>28,400</td> </tr> <tr> <td>格納容器 スプレイポンプモータ</td> <td>一時</td> <td>700</td> <td>14,900</td> </tr> <tr> <td rowspan="2">余熱除去ポンプモータ</td> <td>連続 (余熱除去時)</td> <td rowspan="2">250</td> <td rowspan="2">10,000</td> </tr> <tr> <td>一時 (低压注入時)</td> </tr> <tr> <td>非常用ディーゼル発電機</td> <td>一時</td> <td>6,750</td> <td>131,000</td> </tr> <tr> <td>電動 補助給水ポンプモータ</td> <td>一時</td> <td>400</td> <td>4,000</td> </tr> <tr> <td rowspan="2">充てん/高压注入 ポンプモータ</td> <td>連続 (充てん時)</td> <td rowspan="2">780</td> <td rowspan="2">16,150</td> </tr> <tr> <td>一時 (高压注入時)</td> </tr> <tr> <td>タービン動 主給水ポンプタービン</td> <td>連続</td> <td>7,400</td> <td>61,700</td> </tr> <tr> <td>タービン動 補助給水ポンプタービン</td> <td>一時</td> <td>810</td> <td>3,500</td> </tr> </tbody> </table> <p>添付1 評価対象部位平面図 添付2 日本原子力学会 原子力発電所の高経年化対策実施基準：2021 付属書C 経年劣化メカニズムまとめ表</p>	機器名称	運転状態	定格出力(kW)	重量(kg)	高压タービン	連続	870,000	145,500	低压タービン	連続	870,000	1,599,200	海水ポンプモータ	連続	420	28,400	格納容器 スプレイポンプモータ	一時	700	14,900	余熱除去ポンプモータ	連続 (余熱除去時)	250	10,000	一時 (低压注入時)	非常用ディーゼル発電機	一時	6,750	131,000	電動 補助給水ポンプモータ	一時	400	4,000	充てん/高压注入 ポンプモータ	連続 (充てん時)	780	16,150	一時 (高压注入時)	タービン動 主給水ポンプタービン	連続	7,400	61,700	タービン動 補助給水ポンプタービン	一時	810	3,500
機器名称	運転状態	定格出力(kW)	重量(kg)																																												
高压タービン	連続	870,000	145,500																																												
低压タービン	連続	870,000	1,599,200																																												
海水ポンプモータ	連続	420	28,400																																												
格納容器 スプレイポンプモータ	一時	700	14,900																																												
余熱除去ポンプモータ	連続 (余熱除去時)	250	10,000																																												
	一時 (低压注入時)																																														
非常用ディーゼル発電機	一時	6,750	131,000																																												
電動 補助給水ポンプモータ	一時	400	4,000																																												
充てん/高压注入 ポンプモータ	連続 (充てん時)	780	16,150																																												
	一時 (高压注入時)																																														
タービン動 主給水ポンプタービン	連続	7,400	61,700																																												
タービン動 補助給水ポンプタービン	一時	810	3,500																																												

評価対象部位平面図

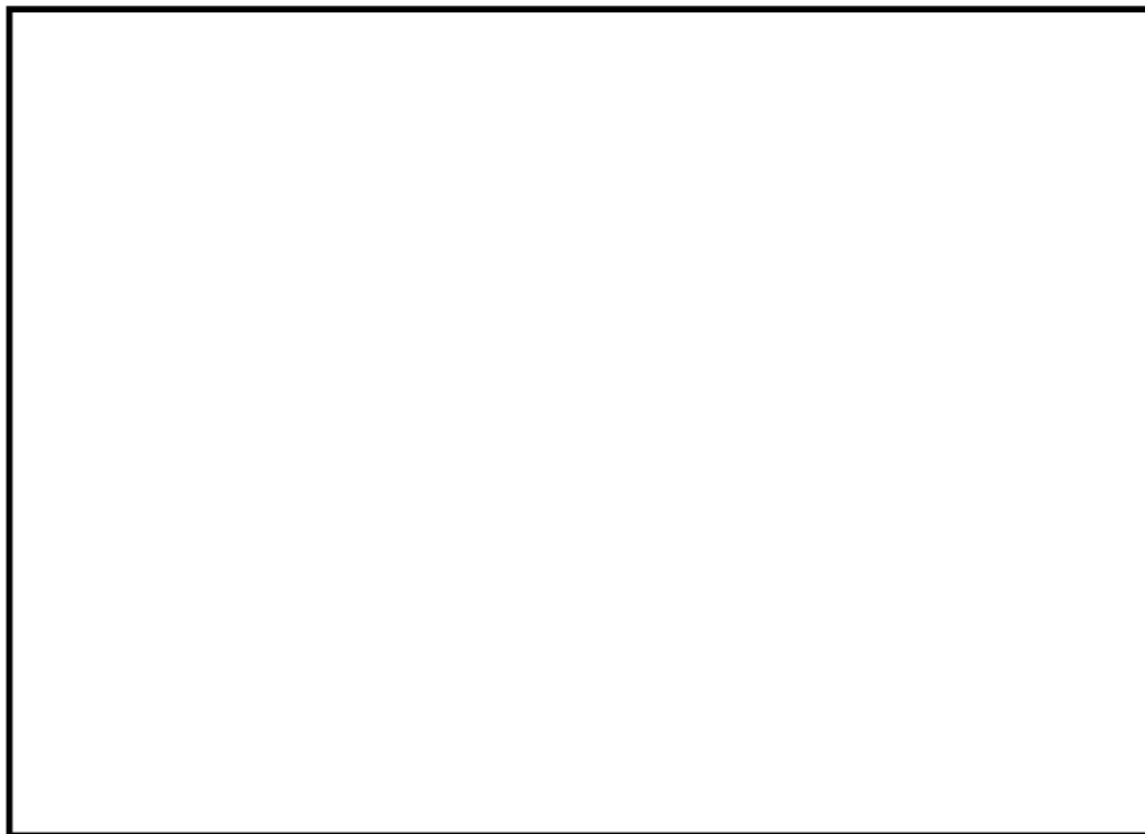


図 1 評価対象部位平面図 (タービン架台)

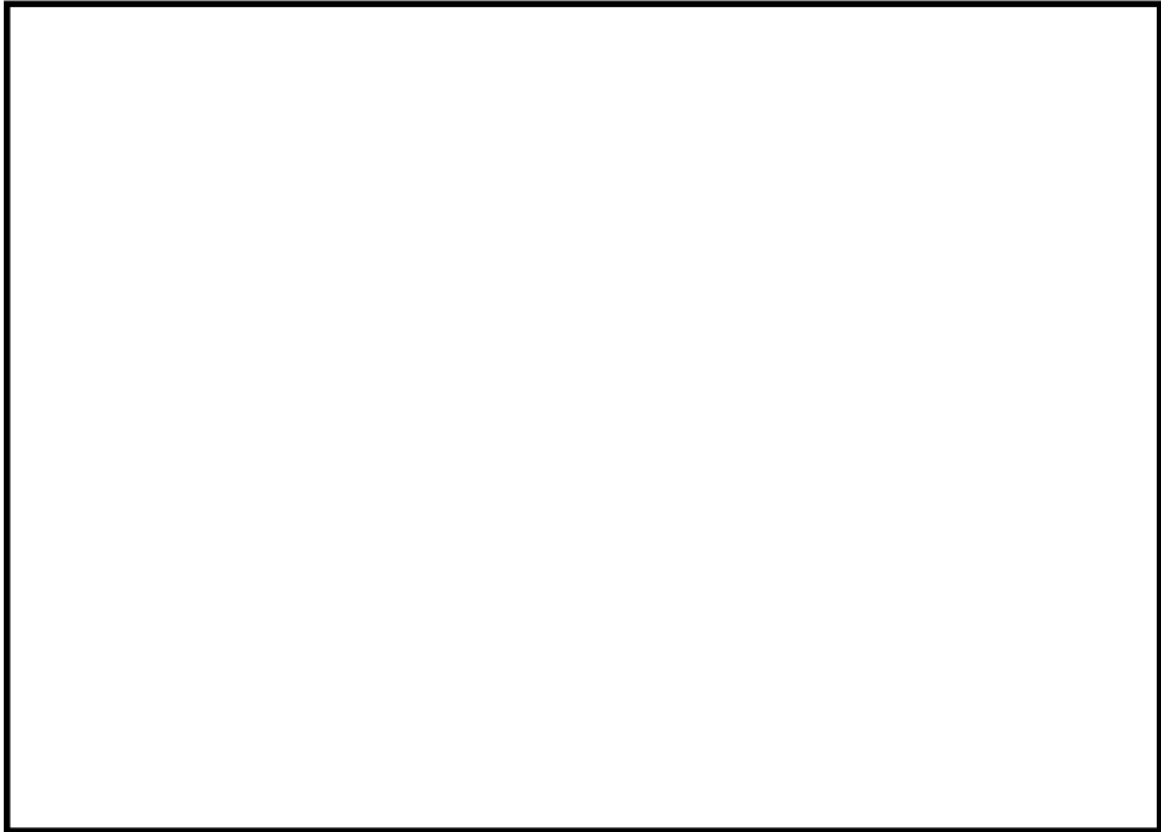


図2 評価対象部位平面図（非常用ディーゼル発電機基礎）

日本原子力学会 原子力発電所の高経年化対策実施基準：2021

付属書C 経年劣化メカニズムまとめ表

P005:2021

経年劣化メカニズムまとめ表-PWR

(1/2)

P11-01 コンクリート構造物及び鉄骨構造物（コンクリート構造物及び鉄骨構造物）

No.	機能達成に必要な項目	部位	材料	経年劣化事象	高経年化技術評価 不要の条件	耐震安全上の 機能別評価項目		耐震上の 影響
						静的 機能	動的 機能	
1	コンクリート強度の 維持	外部遮へい壁、内部コンクリート、原子炉格納施設基礎、原子炉補助建屋、取水構造物、タービン建屋（タービン架台）、復水タンク基礎（配管基礎含む）、燃料取替用水タンク基礎（配管基礎含む）、緊急時対策所、タービン建屋、アスファルト固化建屋	コンクリート	中性化による強度低下		★	/	▼
2		外部遮へい壁、取水構造物、非常用海水路	コンクリート	塩分浸透による強度低下		★	/	▼
3		外部遮へい壁、内部コンクリート、原子炉格納施設基礎、原子炉補助建屋、取水構造物、タービン建屋、タービン建屋（タービン架台）、特高開閉所、脱気器基礎、非常用ディーゼル発電用燃料タンク基礎（配管基礎含む）、復水タンク基礎（配管基礎含む）、燃料取替用水タンク基礎（配管基礎含む）、燃料取扱建屋、非常用海水路、海水ポンプエリア（防護壁）、緊急時対策所、原子炉建屋、アスファルト固化建屋	コンクリート	アルカリ骨材反応による強度低下		★	/	▼
4		外部遮へい壁、内部コンクリート、原子炉格納施設基礎、原子炉補助建屋、取水構造物、タービン建屋、タービン建屋（タービン架台）、非常用ディーゼル発電用燃料タンク基礎（配管基礎含む）、復水タンク基礎（配管基礎含む）、燃料取替用水タンク基礎（配管基礎含む）、燃料取扱建屋、非常用海水路、海水ポンプエリア（防護壁）、緊急時対策所、原子炉建屋、アスファルト固化建屋	コンクリート	凍結融解による強度低下		★	/	▼
5		外部遮へい壁、内部コンクリート、原子炉格納施設基礎、原子炉補助建屋、取水構造物、タービン建屋、タービン建屋（タービン架台）、燃料取扱建屋、海水ポンプエリア（防護壁）	コンクリート	化学的侵食による強度低下	①	★	/	▼
6		内部コンクリート（1次遮へい壁）	コンクリート	熱による強度低下		★	/	▼
7		内部コンクリート（1次遮へい壁）	コンクリート	放射線照射による強度低下		★	/	▼
8		原子炉補助建屋（非常用ディーゼル発電機基礎）、タービン建屋（タービン架台）	コンクリート	機械振動による強度低下		★	/	▼
9		コンクリート遮へい能力の維持	内部コンクリート（1次遮へい壁）	コンクリート	熱による遮へい能力低下		★	/

タイトル	モルタルバー法等の試験結果について																																																																											
説明	<p>1. 建設時の使用骨材に対する反応性試験結果 1985年に実施したモルタルバー法の試験結果は以下のとおりである。</p> <table border="1" data-bbox="421 490 1353 987"> <thead> <tr> <th rowspan="2">区分</th> <th rowspan="2">試験方法</th> <th rowspan="2">骨材産地</th> <th rowspan="2">実施年</th> <th>試験結果</th> <th>判定基準</th> <th rowspan="2">判定</th> </tr> <tr> <th>材令6ヶ月の膨張率(%)</th> <th>有害な反応を起こす可能性のある材令6ヶ月の膨張率(%)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td rowspan="3">粗骨材</td> <td rowspan="7">ASTM-C227 に準拠</td> <td>碎石(堅海産)</td> <td>1985年</td> <td>0.045</td> <td>0.10以上</td> <td>無害</td> </tr> <tr> <td>碎石(漆原産)</td> <td>1985年</td> <td>0.061</td> <td>0.10以上</td> <td>無害</td> </tr> <tr> <td>碎石(余部産)</td> <td>1985年</td> <td>0.030</td> <td>0.10以上</td> <td>無害</td> </tr> <tr> <td>山砂(三国町産)</td> <td>1985年</td> <td>0.039</td> <td>0.10以上</td> <td>無害</td> </tr> <tr> <td>川砂(百瀬川産)</td> <td>1985年</td> <td>0.078</td> <td>0.10以上</td> <td>無害</td> </tr> <tr> <td>砕砂(堅海産)</td> <td>1985年</td> <td>0.039</td> <td>0.10以上</td> <td>無害</td> </tr> <tr> <td>砕砂(漆原産)</td> <td>1985年</td> <td>0.027</td> <td>0.10以上</td> <td>無害</td> </tr> <tr> <td>山砂(網野町産)</td> <td>1985年</td> <td>0.034</td> <td>0.10以上</td> <td>無害</td> </tr> </tbody> </table> <p>ASTM-C227: 「Standard Test Method for Potential Alkali Reactivity of Cement-Aggregate Combinations(Mortar-Bar Method)」</p> <p>2. 新規制基準以降に設置した対象構造物の使用骨材に対する反応性試験結果 2017年～2018年に実施したコンクリートバー法(JASS 5N T-603)および2013年～2015年に実施した化学法(JIS A 1145)の試験方法、試験条件(使用骨材等)及び試験結果等を以下に示す。</p> <p>(a) コンクリートバー法</p> <table border="1" data-bbox="440 1415 1339 1695"> <thead> <tr> <th rowspan="2">対象構造物</th> <th rowspan="2">区分</th> <th rowspan="2">骨材産地</th> <th rowspan="2">実施年</th> <th colspan="2">試験結果</th> <th rowspan="2">判定※3</th> </tr> <tr> <th>材令6か月における膨張率(%)※1</th> <th>膨張率が0.1%となるときのアルカリ添加量の推定値(kg/m³)※2</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td rowspan="3">緊急時対策所</td> <td>粗骨材</td> <td>碎石(舞鶴市余部上産)</td> <td rowspan="3">2017年 ～ 2018年</td> <td rowspan="3">a) -0.010 b) -0.009 c) -0.009</td> <td rowspan="3">一側) 無限大とみなす +側) 無限大とみなす</td> <td rowspan="3">反応性なし</td> </tr> <tr> <td rowspan="2">細骨材</td> <td>砕砂(舞鶴市余部上産)</td> </tr> <tr> <td>山砂(坂井市三国町産)</td> </tr> </tbody> </table> <p>※1 a, b, c…アルカリ添加量が、それぞれ1.2kg/m³、1.8kg/m³、2.4kg/m³の場合 ※2 一側) …マイナス側交点より求めた値 +側) …プラス側交点より求めた値 ※3 判定基準 以下のふたつの条件が同時に満たされる場合に、対象としたコンクリートは、反応性なしと判定し、そうでない場合は反応性ありと判定する。 (1) 材令6か月における膨張率が、いずれのアルカリ添加量においても0.1%未満であること。 (2) 材令6か月において、膨張率が0.1%になるときのアルカリ添加量を推定する。この推定値がマイナス1.2kg/m³以下、またはプラス3.0kg/m³以上であること。</p>						区分	試験方法	骨材産地	実施年	試験結果	判定基準	判定	材令6ヶ月の膨張率(%)	有害な反応を起こす可能性のある材令6ヶ月の膨張率(%)	粗骨材	ASTM-C227 に準拠	碎石(堅海産)	1985年	0.045	0.10以上	無害	碎石(漆原産)	1985年	0.061	0.10以上	無害	碎石(余部産)	1985年	0.030	0.10以上	無害	山砂(三国町産)	1985年	0.039	0.10以上	無害	川砂(百瀬川産)	1985年	0.078	0.10以上	無害	砕砂(堅海産)	1985年	0.039	0.10以上	無害	砕砂(漆原産)	1985年	0.027	0.10以上	無害	山砂(網野町産)	1985年	0.034	0.10以上	無害	対象構造物	区分	骨材産地	実施年	試験結果		判定※3	材令6か月における膨張率(%)※1	膨張率が0.1%となるときのアルカリ添加量の推定値(kg/m ³)※2	緊急時対策所	粗骨材	碎石(舞鶴市余部上産)	2017年 ～ 2018年	a) -0.010 b) -0.009 c) -0.009	一側) 無限大とみなす +側) 無限大とみなす	反応性なし	細骨材	砕砂(舞鶴市余部上産)	山砂(坂井市三国町産)
区分	試験方法	骨材産地	実施年	試験結果	判定基準	判定																																																																						
				材令6ヶ月の膨張率(%)	有害な反応を起こす可能性のある材令6ヶ月の膨張率(%)																																																																							
粗骨材	ASTM-C227 に準拠	碎石(堅海産)	1985年	0.045	0.10以上	無害																																																																						
		碎石(漆原産)	1985年	0.061	0.10以上	無害																																																																						
		碎石(余部産)	1985年	0.030	0.10以上	無害																																																																						
山砂(三国町産)		1985年	0.039	0.10以上	無害																																																																							
川砂(百瀬川産)		1985年	0.078	0.10以上	無害																																																																							
砕砂(堅海産)		1985年	0.039	0.10以上	無害																																																																							
砕砂(漆原産)		1985年	0.027	0.10以上	無害																																																																							
山砂(網野町産)	1985年	0.034	0.10以上	無害																																																																								
対象構造物	区分	骨材産地	実施年	試験結果		判定※3																																																																						
				材令6か月における膨張率(%)※1	膨張率が0.1%となるときのアルカリ添加量の推定値(kg/m ³)※2																																																																							
緊急時対策所	粗骨材	碎石(舞鶴市余部上産)	2017年 ～ 2018年	a) -0.010 b) -0.009 c) -0.009	一側) 無限大とみなす +側) 無限大とみなす	反応性なし																																																																						
	細骨材	砕砂(舞鶴市余部上産)																																																																										
		山砂(坂井市三国町産)																																																																										

(b) 化学法

対象 構造物	区分	骨材産地	実施年	試験結果	判定*1
防潮 ゲート	粗骨材	砕石 (舞鶴市余部上産)	2013年 ～ 2014年	Rc : 106 mmol/L Sc : 15 mmol/L a)	無害
	細骨材	砕砂 (舞鶴市余部上産)		Rc : 147 mmol/L Sc : 31 mmol/L a)	
		山砂 (坂井市三国町産)		Rc : 101 mmol/L Sc : 71 mmol/L a)	
取水口側 防潮堤	粗骨材	砕石 (舞鶴市余部上産)	2014年 ～ 2015年	Rc : 87 mmol/L Sc : 9 mmol/L b)	無害
	細骨材	砕砂 (舞鶴市余部上産)		Rc : 147 mmol/L Sc : 31 mmol/L a)	
		山砂 (坂井市三国町産)		Rc : 109 mmol/L Sc : 66 mmol/L a)	

※1 判定基準

- a) 溶解シリカ量 (Sc) が10mmol/L 以上で、アルカリ濃度減少量 (Rc) が700mmol/L 未満の範囲では、Sc がRc 未満となる場合は“無害”と判定し、Sc がRc 以上となる場合は“無害でない”と判定する。
- b) 溶解シリカ量 (Sc) が10mmol/L 未満で、アルカリ濃度減少量 (Rc) が700mmol/L 未満の場合は“無害”と判定する。
- c) アルカリ濃度減少量 (Rc) が700mmol/L 以上の場合は判定しない。

タイトル	アルカリ骨材反応に関する特別点検手法の選定プロセスおよび評価結果の妥当性確認について
説明	<p>本資料では、アルカリ骨材反応における骨材反応の点検方法の選定プロセスおよび得られた評価結果の妥当性を示すこととする。アルカリ骨材反応の健全性評価のプロセスを添付1に示す。</p> <p>特別点検では、各種規格類や最新知見の動向および実構造物の状況などを踏まえた上で、コンクリートのアルカリ骨材反応の発生状況が確認可能な方法として実体顕微鏡観察を選定した。</p> <p>実体顕微鏡観察は、コンクリート切断面（採取コアサンプル表面）の観察による反応リム・ゲルの有無・程度、ひび割れなどの確認により、コンクリートのアルカリ骨材反応の発生有無・状況が確認できる方法である。</p> <p>高浜4号炉のコンクリート構造物は、定期的に目視確認を実施し、運転開始から約40年間において、アルカリ骨材反応に起因すると判断されるひび割れなどは認められていないなど、コンクリートの健全性に影響を与えるようなアルカリ骨材反応がこれまで発生していないことから、発電所内の広範囲において点検が必要であることも踏まえて、当該構造物に適用する特別点検の点検方法として、アルカリ骨材反応の発生有無・程度の確認を主眼とした実体顕微鏡観察を選定した。</p> <p>なお、特別点検結果を踏まえた評価において、コンクリート構造物の健全性に影響が認められる場合、より精緻な手法を踏まえた評価を行うこととしている。</p> <p>特別点検の結果、極めて軽微な反応状況であり、コンクリート構造物の健全性に影響を与えるような反応性がないことを確認した。</p> <p>劣化状況評価を踏まえた上で、上記事項の妥当性の確認のため、代表箇所による偏光顕微鏡観察を行った。</p> <p>偏光顕微鏡観察は、アルカリ骨材反応が生じているコンクリートの反応骨材についての精緻な観察を主眼として行うもので、コアサンプルから作製した薄片を用いて、反応骨材の鉱物・岩種の同定・反応の進展状況の確認、ひび割れの確認などにより、アルカリ骨材反応が生じているコンクリートの反応進展状況がより精緻に確認できる方法である。実体顕微鏡観察および偏光顕微鏡観察の特徴を添付2に示す。</p> <p>高浜4号炉で使用するコンクリート材料（セメント、骨材など）が同一であることを踏まえ、アルカリ骨材反応に対して使用環境が厳しい特別点検箇所の代表箇所として「タービン建屋基礎マット」を選定し、その近傍箇所から採取したコアサンプルを用いて行った。偏光顕微鏡観察実施箇所の選定プロセスを添付3に、偏光顕微鏡観察実施箇所を添付4に示す。</p> <p>同定した岩種ごとに精緻に観察した結果、極めて軽微な反応状況であり、実体顕微鏡観察の結果と同様に、コンクリートの健全性に影響を与えるような反応性がないことを確認した。偏光顕微鏡観察結果を添付5に示す。</p> <p>偏光顕微鏡観察コアサンプルでの実体顕微鏡観察結果および特別点検の実体顕微鏡観察結果について、偏光顕微鏡観察結果との照らし合わせを行っ</p>

た。照らし合わせ結果について添付6に示す。いずれの観察結果においても、偏光顕微鏡観察結果と同様に反応状況は極めて軽微であり、コンクリートの健全性に影響を与えるような反応性がないと判断できることから、実体顕微鏡観察による特別点検手法の選定プロセスおよび評価結果は妥当であると改めて判断した。

添付1 アルカリ骨材反応の健全性評価について

添付2 アルカリ骨材反応に関する実体顕微鏡観察と偏光顕微鏡観察の特徴

添付3 偏光顕微鏡観察実施箇所の選定プロセス

添付4 偏光顕微鏡観察実施箇所

添付5 偏光顕微鏡観察結果について

添付6 実体顕微鏡観察結果について

アルカリ骨材反応の健全性評価について

1. 特別点検手法の選定プロセス

- ・アルカリ骨材反応の状況を確認するための各種規格類を調査した結果、適したJISおよび学会規格が存在しないことが分ったため、既往知見である「安全研究成果報告 運転期間延長認可制度及び高経年化対策制度に係る技術的知見の整備に関する研究（RREP-2018-1004、平成30年11月）」および「原子力用コンクリートの反応性骨材の評価方法の提案（JNES-RE-2013-2050、平成26年2月）」を参照し、点検方法の検討を行った。
- ・既往知見においては、コンクリートの岩石学的診断法が複数紹介されている。
- ・高浜4号炉は、定期的に見視点検を実施し、運転開始から約40年間において、アルカリ骨材反応に起因すると判断されるひび割れなどは認められていないなど、コンクリートの健全性に影響を与えるようなアルカリ骨材反応がこれまで発生していない。
- ・発電所内の広範囲において点検が必要。



以上より、既往知見にあるアルカリ骨材反応の発生状況が確認可能な「実体顕微鏡観察」を選定^{※1}

- ※1 特別点検結果を踏まえた評価により、コンクリート構造物の健全性に影響が認められる場合、偏光顕微鏡観察など、より精緻な手法を踏まえた評価を行う。

2. 劣化状況評価

- ・高浜4号炉は、定期的に見視点検を実施し、運転開始から約40年間において、アルカリ骨材反応に起因すると判断されるひび割れなどは認められていない。
- ・使用している骨材は、モルタルバー法による反応性試験を実施し、反応性骨材ではないことを確認している。
- ・採取したコアサンプルについて、特別点検による実体顕微鏡を用いた観察により、コンクリート構造物の健全性に影響を与えるような反応性がないことを確認した^{※2}。



高経年化対策上着目すべき経年劣化事象ではないと判断

- ※2 劣化状況評価を踏まえた上で、特別点検手法の選定プロセスおよび評価結果の妥当性の確認のため、偏光顕微鏡を用いた観察を行った。

表 2-1 アルカリ骨材反応に関する実体顕微鏡観察と偏光顕微鏡観察の特徴

		実体顕微鏡観察	偏光顕微鏡観察
概要	観察対象	・コンクリート切断面（コアサンプル表面）を観察	・コアサンプルより作製した薄片を観察
	特徴	・概ね 2～30 倍で観察 ・コアの全体的な状況、 <u>反応リム・ゲルの有無・程度、ひび割れ状況</u> などを観察	・概ね 25～200 倍で観察 ・岩石や鉱物の観察に汎用される ・薄片に偏光を照射・透過させて鉱物の偏光特性などから、 <u>反応が生じている骨材の鉱物・岩種同定、反応進展状況、ひび割れ</u> などを観察
	まとめ	・アルカリ骨材反応の <u>発生有無・程度</u> が確認できる	・アルカリ骨材反応が生じているコンクリート（骨材）の <u>反応進展状況</u> がより精緻に確認できる
課題		・岩種の詳細は分からない	・薄片作成・観察に熟練を要する

偏光顕微鏡観察実施箇所の選定プロセス

偏光顕微鏡観察実施にあたり、アルカリ骨材反応に対して使用環境が最も厳しい箇所として、湿度が最も大きい部位を代表として選定した。対象部位ごとの湿度測定の結果を表 3-1 に示す。

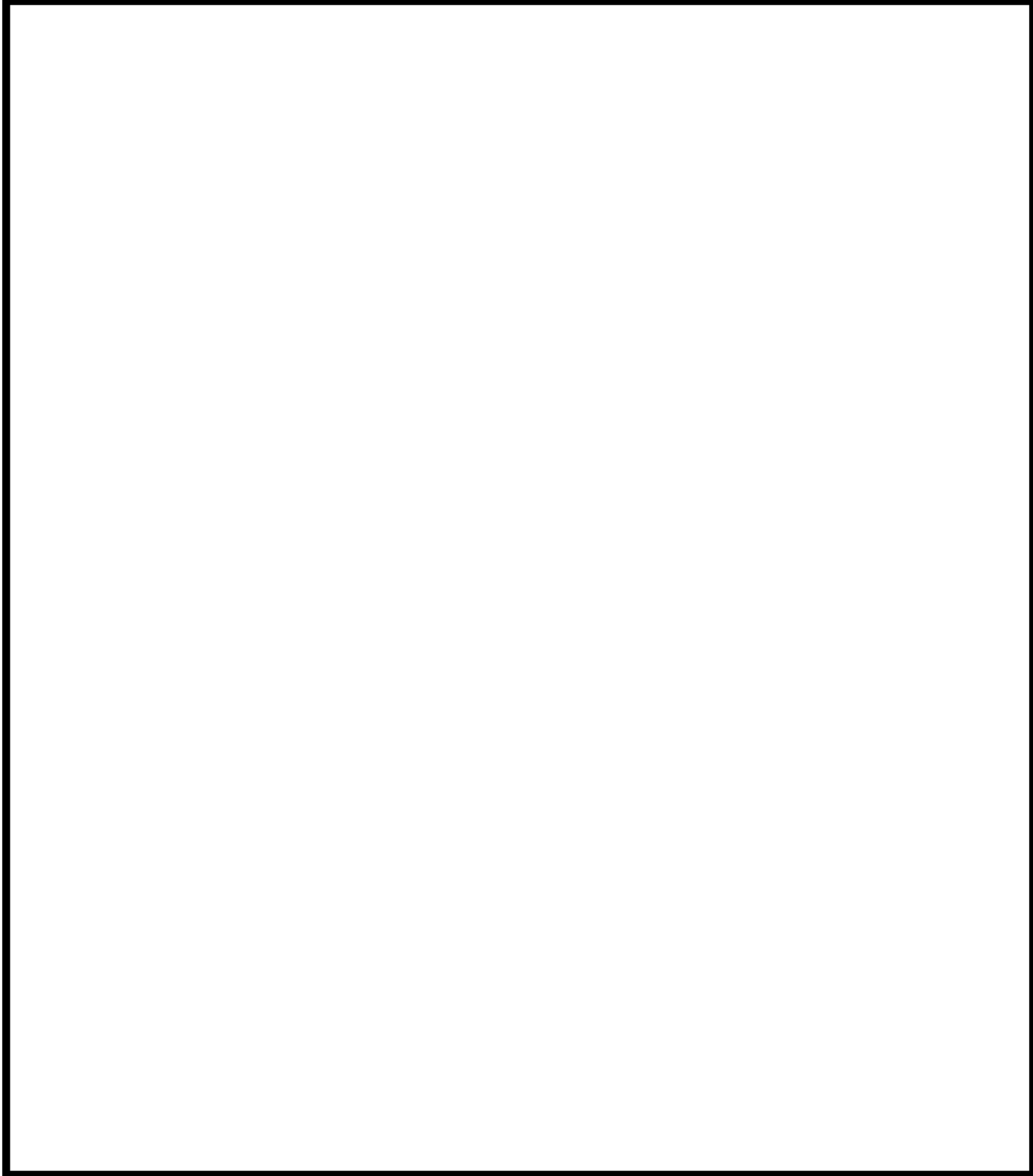
表 3-1 対象部位ごとの湿度測定の結果

構造物	対象の部位	点検箇所	選定理由	測定期間の平均湿度(%)	備考
原子炉格納施設等	外部遮蔽壁	外部遮蔽壁 (外部)	外部からのアルカリ供給 (塩分)	-	
	内部コンクリート	1 次遮蔽壁	放射線照射	-	
	基礎マット	通路	水分 (湿度)	45.4	
原子炉補助建屋	外壁	ディーゼル発電機室 外壁	外部からのアルカリ供給 (塩分)	-	
	内壁及び床	燃料ピット室	水分 (湿度)	56.1	補正実施 ^{※1}
	使用済み燃料プール	通路	水分 (湿度)	41.5	
	基礎マット	海水管トレンチエリア	水分 (湿度)	60.6	
タービン建屋	内壁及び床	タービン建屋 地下部	水分 (湿度)	67.8	
	基礎マット	タービン建屋 地下部	水分 (湿度)	84.9	補正実施 ^{※1}
取水槽	海中帯	海水ポンプ室	外部からのアルカリ供給 (塩分)	-	
	干満帯	海水ポンプ室	外部からのアルカリ供給 (塩分)	-	
	気中帯	海水ポンプ室	外部からのアルカリ供給 (塩分)	-	
安全機能を有する系統及び機器又は常設重大事故等対処施設設備に属する機器を支持する構造物	タービン架台	タービン建屋 1階部	水分 (湿度)	67.9	補正実施 ^{※1}
上記以外の構造物 (安全機能を有する構造物又は常設重大事故等対処設備に属する構造物・安全機能を有する系統及び機器又は常設重大事故等対処設備に属する機器を支持する構造物に限る。)	非常用ディーゼル発電用燃料油タンク基礎 (配管トレンチ含む)	基礎	外部からのアルカリ供給 (塩分)	-	
	復水タンク基礎	タンク基礎	外部からのアルカリ供給 (塩分)	-	

平均湿度の測定期間：2020年10月1日～2021年9月30日

※1 平均湿度の補正を実施している。補正方法は特別点検補足説明資料別紙 5 に示す。

偏光顕微鏡観察実施箇所

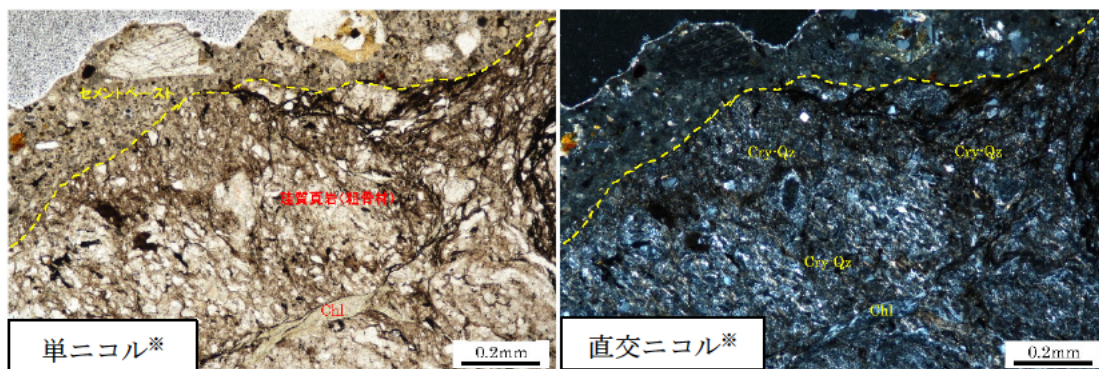


偏光顕微鏡観察結果について

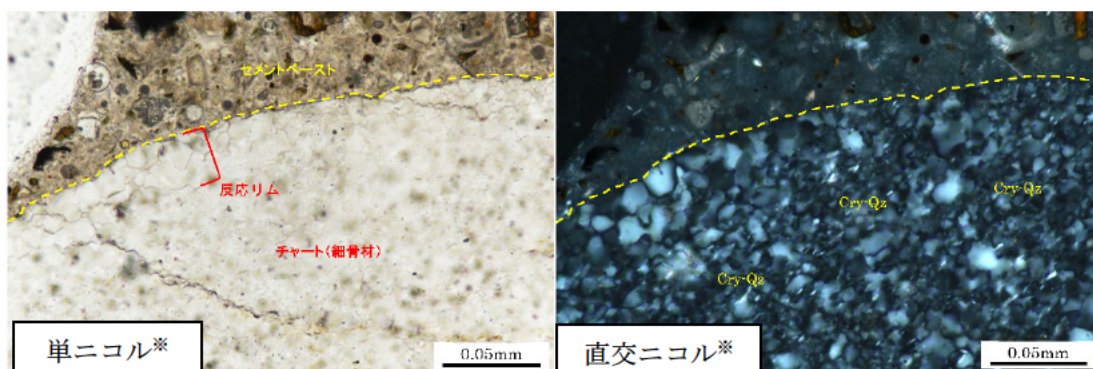
特別点検手法の選定プロセスおよび評価結果の妥当性の確認のため、偏光顕微鏡を用いた観察を行った。

粗骨材については、コンクリートコア試料中の粗骨材は碎石で、砂岩と頁岩、珪質頁岩などの堆積岩から主に構成されており、それぞれの粒子には、ASR の現象は認められなかった。細骨材については、一部粒子に反応リムの形成が認められたが、軽微もしくはそれ以下（健全）であった。観察結果を図 5-1 に、観察結果をもとに判断した進行状況を表 5-1 に示す。

以上より、コンクリートの健全性に影響を与えるような反応性がないと判断できる。



(a) 粗骨材の珪質頁岩



(b) 細骨材のチャート

図5-1 偏光顕微鏡観察結果

※単ニコル：一方向の光を遮断した状態で試験片の屈折光を観察した結果。構成鉱物の形、割れ、輪郭、色など、鉱物の特徴を確認。

直交ニコル：二方向の光を遮断した状態で試験片の屈折光を観察した結果。構成鉱物の色の变化、配列、組織など、鉱物の特性を確認。

表5-1 コンクリート薄片の偏光顕微鏡観察 アルカリ骨材反応の進行状況

試料名	骨材	岩種	ASR					劣化度 評価	
			進行段階 →						
			i	ii	iii	iv	v	顕微鏡	野外 目視
			骨材	セメントペースト	骨材	セメントペースト			
反応 りム	滲み・ 取り巻き	ひび割れ ゲル充填	ひび割れ ゲル充填	気泡 ゲル充填					
4-3	細骨材	頁岩	+					<1	
		珪質頁岩	+					<1	
		チャート	+					<1	
		流紋岩	+					<1	
	総合評価							<1	

アルカリシリカ反応の程度： ◎ 顕著； ○ あり； + 痕跡程度

劣化度の評価：偏光顕微鏡観察：1 軽微；2 中程度；3 顕著

偏光顕微鏡観察でASRの兆候が認められた骨材のみを記載した

実体顕微鏡観察結果について

(1) 偏光顕微鏡観察コアサンプルでの実体顕微鏡観察結果

偏光顕微鏡観察コアサンプルでの実体顕微鏡観察結果を図6-1に示す。

細骨材に含まれる珪質頁岩や頁岩などのごく一部の粒子に反応リムが見られるが、軽微な反応状況であり、コアサンプルの全体的な状況および実構造物の状況も踏まえ、コンクリートの健全性に影響を与えるような反応性はないと判断できる。

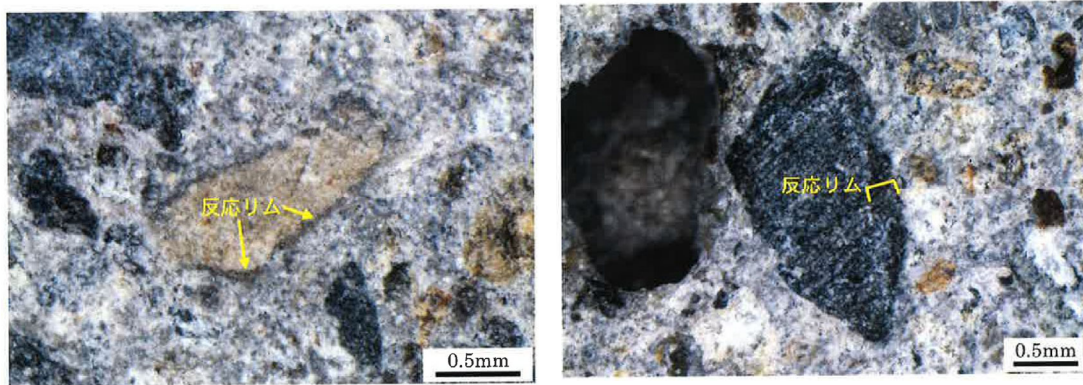


図6-1 実体顕微鏡観察写真

(2) 特別点検における実体顕微鏡観察結果

特別点検における実体顕微鏡観察では、複数の点検箇所では「骨材の反応リム」または「骨材のひび割れ」を確認されたものの、反応状況が極めて軽微であることから、反応性なしと判断している。「骨材の反応リム」および「骨材のひび割れ」が確認された原子炉格納施設等の内部コンクリートの観察結果を図6-2に示す。

コアサンプル実体顕微鏡観察 記録用紙

発電所名	高浜発電所4号機	コア番号	T4-1C			
構造物名称	原子炉格納施設等	確認実施日	2022年6月29日			
部位	内部コンクリート	試験員	(株)KANSOテクノス 鎌田 光司			
試験員	(株)KANSOテクノス 鎌田 光司	備考				
確認箇所写真						
構成岩種	砂岩、シルト岩、チャート					
特記事項	反応リムがみられた骨材が2個（いずれも砂岩）である。 ひび割れがみられた骨材は1個（チャート）である。（ゲルの充填はみられない。）（写真は別紙の通り）					
	反応状況					<凡例> ◎：顕著 ○：あり △：軽微 -：なし
	I	II	III	IV	V	
	骨材の反応リム	セメントペーストへのゲルの滲み	骨材のひび割れ、ゲル充填	セメントペーストのひび割れ、ゲル充填	セメントペースト気泡へのゲル充填	
アルカリ骨材反応の発生状況	△	-	△	-	-	
判定	1	コメント	各反応状況は添付写真のとおり			
			<凡例> 1. 反応性なし 2. 反応性あり			

図6-2 特別点検結果の例（原子炉格納施設等 内部コンクリート）（1/2）

コアサンプル実体顕微鏡観察 記録用紙

(別紙)

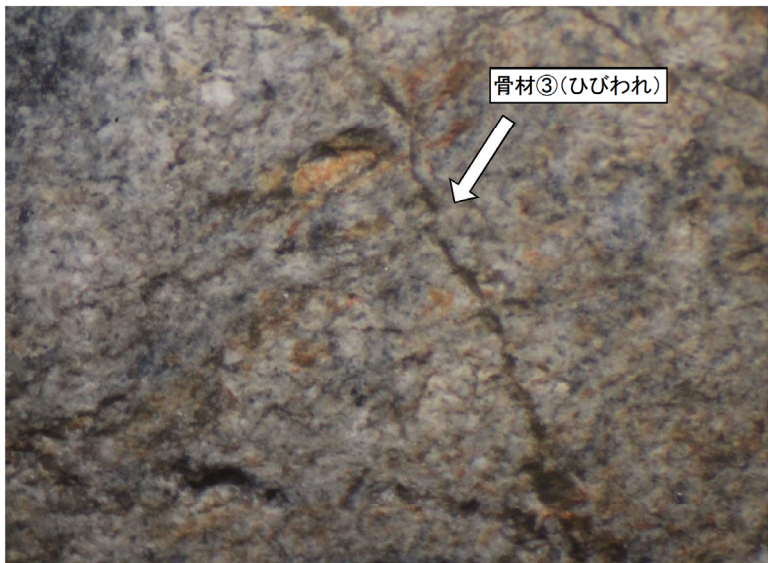
発電所名	高浜発電所4号機	コア番号	T4-1C			
構造物名称	原子炉格納施設等					
部位	内部コンクリート	確認実施日	2022年6月29日			
試験員	(株)KANSOテクノス 鎌田 光司	備考				
確認箇所写真						
構成岩種						
特記事項						
	反応状況					<凡例> ◎：顕著 ○：あり △：軽微 -：なし
	I	II	III	IV	V	
骨材の反応リム	セメントペーストへのゲルの滲み	骨材のひび割れ、ゲル充填	セメントペーストのひび割れ、ゲル充填	セメントペースト気泡へのゲル充填		
アルカリ骨材反応の発生状況						
判定	コメント					
		<凡例> 1. 反応性なし 2. 反応性あり				

図6-2 特別点検結果の例 (原子炉格納施設等 内部コンクリート) (2/2)

粗骨材にひび割れが見られたが、ひび割れ内部にゲルの充填が見られないことから、アルカリ骨材反応によるものではないと判断した。ひび割れの原因としては、採取時に既に生じていたことや、コンクリートの製造時に生じたことなどが考えられる。

(3) 偏光顕微鏡結果との照らし合わせ

いずれの観察結果においても、偏光顕微鏡観察結果と同様に反応状況は極めて軽微であり、コンクリートの健全性に影響を与えるような反応性がないと判断できることから、実顕微鏡観察による特別点検手法の選定プロセスおよび評価結果は妥当であると改めて判断した。

タイトル	高浜 4 号炉周辺の地下水による劣化影響について								
説明	<p>1. はじめに</p> <p>高浜 4 号炉の対象構造物の基礎の一部は地下に埋設されているため、これらの構造物に対する地下水による経年劣化影響について検討を行った。</p> <p>コンクリートの強度低下に影響を及ぼすと想定される地下水に起因する経年劣化要因を抽出するとともに、それらが高浜 4 号炉の地下埋設部コンクリートにおいて発生し、進展する可能性について評価を行った。</p> <p>2. 経年劣化影響評価</p> <p>2. 1 地下水に起因する経年劣化要因の抽出</p> <p>地下水に起因するコンクリートの経年劣化要因とその概要を表 1 に示す。</p> <p style="text-align: center;">表 1 地下水の存在下で引き起こされる経年劣化要因</p> <table border="1" data-bbox="421 898 1358 1503"> <thead> <tr> <th data-bbox="421 898 571 976">経年劣化 要因</th> <th data-bbox="571 898 1358 976">概要</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td data-bbox="421 976 571 1167">塩分浸透</td> <td data-bbox="571 976 1358 1167">コンクリート中に塩化物イオンが浸透して鉄筋位置まで達すると、鉄筋表面の不動態被膜が破壊されるため、鉄筋はコンクリート中の水分、酸素の作用により腐食し始める。腐食が進行すると酸化生成物による体積膨張からコンクリートにひび割れや剥離が生じ、コンクリート構造物としての健全性が損なわれる可能性がある。</td> </tr> <tr> <td data-bbox="421 1167 571 1357">アルカリ 骨材反応</td> <td data-bbox="571 1167 1358 1357">コンクリート中の反応性シリカを含む骨材と、セメントなどに含まれるアルカリ（ナトリウムイオンやカリウムイオン）が、水の存在下で反応してアルカリ珪酸塩を生成し、この膨張作用によりコンクリートにひび割れが生じ、コンクリート構造物としての健全性が損なわれる可能性がある。</td> </tr> <tr> <td data-bbox="421 1357 571 1503">化学的 侵食</td> <td data-bbox="571 1357 1358 1503">水分中の酸や硫酸塩等の塩類とセメント水和物の化学反応により、セメントペーストの溶解（酸）や、コンクリート表層の剥離・剥落（塩類）が生じ、コンクリート構造物としての健全性が損なわれる可能性がある。</td> </tr> </tbody> </table>	経年劣化 要因	概要	塩分浸透	コンクリート中に塩化物イオンが浸透して鉄筋位置まで達すると、鉄筋表面の不動態被膜が破壊されるため、鉄筋はコンクリート中の水分、酸素の作用により腐食し始める。腐食が進行すると酸化生成物による体積膨張からコンクリートにひび割れや剥離が生じ、コンクリート構造物としての健全性が損なわれる可能性がある。	アルカリ 骨材反応	コンクリート中の反応性シリカを含む骨材と、セメントなどに含まれるアルカリ（ナトリウムイオンやカリウムイオン）が、水の存在下で反応してアルカリ珪酸塩を生成し、この膨張作用によりコンクリートにひび割れが生じ、コンクリート構造物としての健全性が損なわれる可能性がある。	化学的 侵食	水分中の酸や硫酸塩等の塩類とセメント水和物の化学反応により、セメントペーストの溶解（酸）や、コンクリート表層の剥離・剥落（塩類）が生じ、コンクリート構造物としての健全性が損なわれる可能性がある。
経年劣化 要因	概要								
塩分浸透	コンクリート中に塩化物イオンが浸透して鉄筋位置まで達すると、鉄筋表面の不動態被膜が破壊されるため、鉄筋はコンクリート中の水分、酸素の作用により腐食し始める。腐食が進行すると酸化生成物による体積膨張からコンクリートにひび割れや剥離が生じ、コンクリート構造物としての健全性が損なわれる可能性がある。								
アルカリ 骨材反応	コンクリート中の反応性シリカを含む骨材と、セメントなどに含まれるアルカリ（ナトリウムイオンやカリウムイオン）が、水の存在下で反応してアルカリ珪酸塩を生成し、この膨張作用によりコンクリートにひび割れが生じ、コンクリート構造物としての健全性が損なわれる可能性がある。								
化学的 侵食	水分中の酸や硫酸塩等の塩類とセメント水和物の化学反応により、セメントペーストの溶解（酸）や、コンクリート表層の剥離・剥落（塩類）が生じ、コンクリート構造物としての健全性が損なわれる可能性がある。								

2. 2 地下水に起因するコンクリートの経年劣化評価

コンクリートの経年劣化要因のうち、塩分浸透、アルカリ骨材反応、化学的侵食が高浜4号炉の地下埋設部コンクリートにおいて発生し、進展する可能性について、高浜4号炉の環境条件に基づき評価を行った。

2. 2. 1 塩分浸透

コンクリート中に塩化物イオンが浸透して鉄筋位置まで達すると、鉄筋表面の不動態被膜が破壊されるため、鉄筋はコンクリート中の水分および酸素の作用により腐食し始める。腐食が進行すると酸化生成物による体積膨張からコンクリートにひび割れや剥離が生じ、コンクリート構造物としての健全性が損なわれる可能性がある。

高浜4号炉の対象構造物においては塩分浸透を生じる可能性があるため、経年劣化に対する評価を実施している。

その結果、各評価部位における鉄筋の腐食減量は、運転開始後60年時点の想定においてもかぶりコンクリートにひび割れが発生する時点での鉄筋の腐食減量を十分に下回っている。

また、定期的な建屋内部からの目視点検の結果、塩分浸透による鉄筋腐食に起因する膨張性のひび割れは確認されていない。さらにコンクリート躯体が直接海水に接触する取水構造物においても、塩分浸透による鉄筋腐食に起因する膨張性のひび割れは確認されていない。

したがって、塩分浸透の評価結果、目視点検の結果および最も厳しい環境条件にある取水構造物の現状に鑑み、その他の地下埋設部コンクリートにおいても、塩分浸透によるコンクリートの経年劣化が進展し、高浜4号炉の供用期間中にコンクリート構造物としての健全性が損なわれる可能性は極めて低いと考えられる。

2. 2. 2 アルカリ骨材反応

アルカリ骨材反応は、コンクリート中に存在するアルカリ溶液と骨材中に含まれる反応性シリカ鉱物の化学反応である。このとき生成されたアルカリ・シリカゲルが周囲の水を吸収して膨張するため、コンクリート表面にひび割れが生じ、コンクリート構造物としての健全性が損なわれる可能性がある。

ただし、高浜4号炉で使用している骨材については、別紙15に示すとおり、1985年にモルタルバー法（ASTM-C227）による反応性試験を実施しており、その結果得られた膨張率は「材齢6ヶ月で0.10%以上」の判定基準に対し無害と判定されている。

また、定期的な建屋内部からの目視点検の結果、アルカリ骨材反応に起因する膨張性のひび割れは確認されていない。さらに直接海水に接触する取水構造物においても、アルカリ骨材反応に起因する膨張性のひび割れは確認されていない。

したがって、使用骨材の反応性試験結果、目視点検の結果および最も厳しい環境条件にある取水構造物の現状に鑑み、その他の地下埋設部コンクリートにおいても、アルカリ骨材反応によるコンクリートの経年劣化が進展し、高浜4号炉の供用期間中にコンクリート構造物としての健全性が損なわれる可能性は極めて低いと考えられ

る。

2. 2. 3 化学的侵食

コンクリートの化学的侵食は、コンクリートが外部からの化学作用によってセメント硬化体を構成する水和生成物が、変質や分解により結合能力を失っていく事象である。化学的侵食はその劣化機構によって、1) セメント水和物との化学反応による溶解、2) セメント水和物との化学反応による膨張に大別される。

1) セメント水和物との化学反応による溶解

コンクリート中のセメント水和物との化学反応により、本来、水に溶解しにくいセメント水和物を可溶性物質に変質させ、コンクリートが多孔質化する、あるいは分解することで骨材の露出や脱落などが生じる。

2) セメント水和物との化学反応による膨張

コンクリート中のセメント水和物との化学反応により、新たな化合物が生成され、膨張する際の膨張圧がコンクリートにひび割れや剥離を生じさせる。

一般的な環境においては、化学的侵食が発生することはほとんどなく、温泉地帯、酸性河川流域、酸性・硫酸塩土壌等に建造された構造物等が化学的侵食の影響を受けるとされている。

そこで、高浜4号炉における地下水水質の試験結果に基づき、化学的侵食が発生し、進展する可能性について評価を行った。

(1) 高浜4号炉地下水水質試験における地下水採取位置および試験結果

高浜4号炉周辺敷地内(図1)において採取した地下水について実施した地下水水質試験結果を表2に示す。



図1 高浜4号炉地下水採取位置

表2 高浜4号炉における地下水水質試験結果

pH	硫酸塩 (mg/l)	マグネ シウム (mg/l)	アンモ ニウム (mg/l)	侵食性 遊離炭酸 (mg/l)
6.9	190	12	0.1未満	9.7

(2) 地下水水質試験結果の分析

高浜4号炉における地下水水質試験結果（pH、硫酸塩、マグネシウム、アンモニウム、侵食性遊離炭酸）をEN206¹⁾の地下水の環境区分と対比した結果を表3に示す。

表3 高浜4号炉における試験結果とEN206の環境区分(地下水)の対比

環境区分	XA1	XA2	XA3	高浜4号炉
	弱い 化学的侵食	標準的な 化学的侵食	強い 化学的侵食	
pH [-]	$6.5 \geq X \geq 5.5$	$5.5 > X \geq 4.5$	$4.5 > X \geq 4.0$	該当区分なし
硫酸塩 [mg/l]	$200 \leq X \leq 600$	$600 < X \leq 3000$	$3000 < X \leq 6000$	該当区分なし
マグネシウム [mg/l]	$300 \leq X \leq 1000$	$1000 < X \leq 3000$	$3000 < X$	該当区分なし
アンモニウム [mg/l]	$15 \leq X \leq 30$	$30 < X \leq 60$	$60 < X \leq 100$	該当区分なし
侵食性遊離炭酸塩 [mg/l] (aggressive)	$15 \leq X \leq 40$	$40 < X \leq 100$	$100 < X$	該当区分なし

(a) pH

EN206のいずれの環境区分にも該当しないことを確認した。

(b) 硫酸塩

EN206のいずれの環境区分にも該当しないことを確認した。

(c) マグネシウム

EN206のいずれの環境区分にも該当しないことを確認した。

(d) アンモニウム

EN206のいずれの環境区分にも該当しないことを確認した。

(e) 侵食性遊離炭酸塩

EN206のいずれの環境区分にも該当しないことを確認した。

1) BSI, BS EN 206 : Concrete - Specification, performance, production and conformity (2013)

(3) 化学的侵食に関する経年劣化評価

高浜4号炉の地下水水質試験結果に基づき地下水成分の分析を行った結果、酸や硫酸塩に起因するコンクリートの経年劣化が進展する可能性は低いと考えられる。

また、対象構造物のうち海洋環境の影響を直接受ける取水構造物においては、化学的侵食に特有の劣化兆候は見られない。

したがって、地下水水質の分析や海水由来の侵食性物質に対して最も厳しい環境下にある取水構造物の現状に鑑み、その他の地下埋設部コンクリートにおいても化学的侵食によるコンクリートの経年劣化が生じる可能性は極めて低いと考えられる。

2. 3 地下水に起因するコンクリート経年劣化評価に関するまとめ

地下水に起因するコンクリートの経年劣化要因が高浜4号炉の地下埋設部コンクリートにおいて発生し、進展する可能性について高浜4号炉の環境条件に基づき評価を行った。結果を表4に示す。

これより、塩分浸透に関しては発生の可能性は否定できないものの、表4に挙げた各経年劣化要因が高浜4号炉の地下埋設部コンクリートにおいて進展する可能性は極めて小さいことを確認した。

表4 地下水に起因するコンクリートの経年劣化要因に係る発生および進展の可能性

経年劣化要因	経年劣化要因のスクリーニング結果		
	発生の可能性	進展の可能性	環境条件・根拠等
塩分浸透	○	×	地下水から塩化物イオンが供給されるため発生の可能性はあるが、塩分浸透による鉄筋腐食に起因する膨張性のひび割れは建屋内部からの目視点検において確認されていない。 また海水の影響を受ける取水構造物から採取したコアサンプルによって塩分浸透に対して健全性を有していることを確認している。
アルカリ骨材反応	×	×	コンクリート使用骨材についてモルタルバー法による反応性試験を実施した結果、無害と判定された。 また、仮にアルカリ骨材反応が起きた場合に発生する膨張性のひび割れは、建屋内部からの目視点検において確認されていない。 さらに、直接海水に接触する取水構造物においても、アルカリ骨材反応に起因する膨張性のひび割れは確認されていない。
化学的侵食	×	×	高浜4号炉は土壌や地下水に侵食性物質が多く含まれる温泉地帯や酸性河川流域等の付近には建設されていない。 また、地下水成分の分析の結果、酸や硫酸塩に起因するコンクリート劣化の可能性は低いことを確認している。

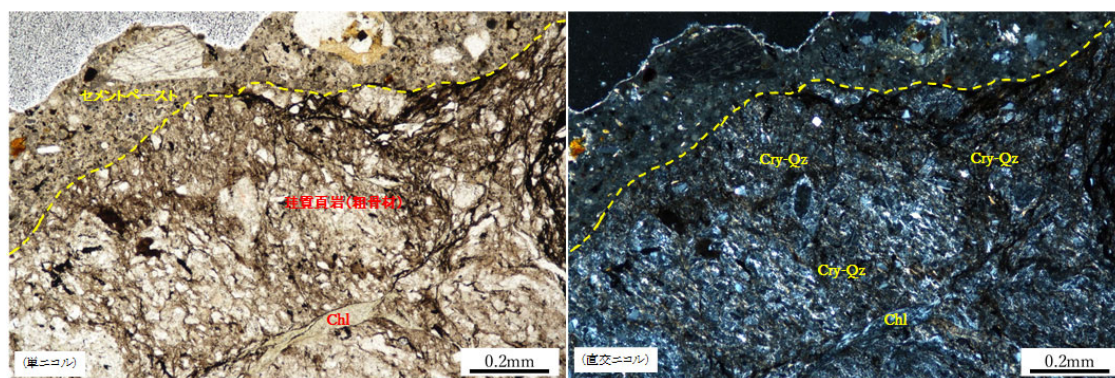
以上

タイトル	アルカリ骨材反応に関する潜在膨張性の評価について
説明	<p>アルカリ骨材反応については、特別点検（実体顕微鏡観察）により反応性がないことを確認しており、点検方法の選定プロセスと点検結果の妥当性を確認するため、代表箇所において偏光顕微鏡観察による確認を実施している。</p> <p>アルカリ骨材反応の潜在膨張性は、急速膨張性と遅延膨張性の2つがあることが知られている。急速膨張性のアルカリ骨材反応は、比較的早期に進行するため、すでに反応は収束していると考えられる。遅延膨張性に関する評価については、以下のとおりである。</p> <p>1. 評価内容</p> <p>特別点検手法の選定プロセス及び評価結果の妥当性確認のため、別紙15のとおりタービン建屋基礎マットにおいて偏光顕微鏡観察を実施した。ここでは、潜在膨張性の確認を行うため、反応性鉱物の確認を行うとともに、促進膨張試験（アルカリ溶液浸漬法^{※1}）を実施した。</p> <p>2. 評価結果</p> <p>（偏光顕微鏡観察結果）</p> <p>粗骨材については、遅延膨張性の反応性鉱物（微晶質～隠微晶質石英）が確認されたが、急速膨張性の反応性鉱物（クリストラバイト等）は確認されなかった。</p> <p>細骨材については、遅延膨張性の反応性鉱物（微晶質～隠微晶質石英）が確認されたが、急速膨張性の反応性鉱物（クリストラバイト等）は確認されなかった。</p> <p>偏光顕微鏡観察による反応性鉱物の確認結果は添付1に示す。</p> <p>（促進膨張試験結果）</p> <p>判定基準^{※2}（21日で膨張率が0.1%未満）に対し、28日浸漬させても0.023%であった。コアサンプル採取箇所、試験実施年、測定値は添付2に示す。</p> <p>以上より、遅延膨張性の潜在性は小さく、今後劣化が進行する可能性は低いと判断している。</p> <p>※1：日本コンクリート工学会「ASR診断の現状とあるべき姿研究委員会 報告書（2014）」に基づき実施</p> <p>※2：判定基準は、Katayama et al.「Alkali-aggregate reaction under the influence of deicing salts in the Hokuriku district, Japan（2004）」を参照した。</p> <p>添付1 偏光顕微鏡による反応性鉱物の確認結果 添付2 促進膨張試験（アルカリ溶液浸漬法）に関する試験結果</p>

偏光顕微鏡による反応性鉱物の確認結果

1. 粗骨材

粗骨材の偏光顕微鏡観察写真を図 1 に示す。砂岩・頁岩・珪質頁岩などの堆積岩から主に構成されており、微晶質～隠微晶質石英（遅延膨張性）や緑泥石などが確認された。急速膨張性を有する反応性鉱物は確認されなかった。なお、アルカリ骨材反応の現象は認められなかった。



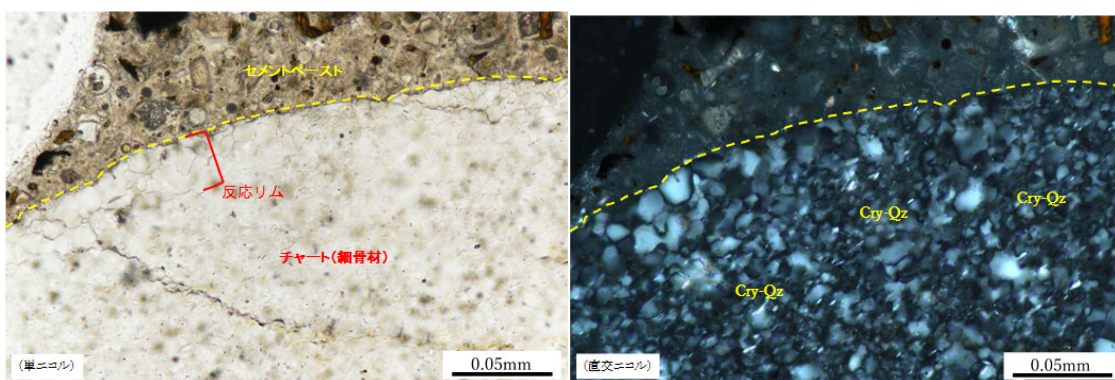
(a) 単ニコル

(b) 直交ニコル

図 1 粗骨材の偏光顕微鏡観察写真

2. 細骨材

細骨材の偏光顕微鏡観察写真を図 2 に示す。砂岩・頁岩・珪質頁岩の岩片や流紋岩・石英片岩、鉱物片（石英・斜長石・輝石など）から構成される砂であり、生物遺骸（貝殻片など）は認められなかった。珪質頁岩・頁岩・チャート・流紋岩の一部に、反応性鉱物として微晶質～隠微晶質石英（遅延膨張性）が認められた。なお、アルカリ骨材反応は、珪質頁岩・頁岩・チャート・流紋岩の一部粒子に反応リムの形成が認められる程度であり、軽微もしくはそれ以下（健全）であった。



(a) 単ニコル

(b) 直交ニコル

図 2 細骨材（チャート）の偏光顕微鏡観察写真

※単ニコル：一方方向の光を遮断した状態で試験片の屈折光を観察した結果。構成鉱物の形、割れ、輪郭、色など、鉱物の特徴を確認。

直交ニコル：二方向の光を遮断した状態で試験片の屈折光を観察した結果。構成鉱物の色の変化、配列、組織など、鉱物の特性を確認。

促進膨張試験（アルカリ溶液浸漬法）に関する試験結果

表 1 促進膨張試験（アルカリ溶液浸漬法）の結果

対象構造物	対象の部位	試験実施年	膨張率（%）※
タービン建屋	基礎マット	2021年	0.023

※ 試験期間 28 日での膨張率