

高浜発電所4号炉審査資料	
資料番号	KTN4-PLM40-特別点検（コンクリート）
提出年月日	令和5年4月25日

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

令和5年4月25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. はじめに	1
2. 要求事項	1
3. 点検方法	1
4. 点検箇所	14
5. 点検結果	32
6. まとめ	38

別紙 1～6

別紙 1. 点検箇所選定のための非破壊試験位置	1-1
別紙 2. 空気環境測定位置	2-1
別紙 3. 塩分量測定位置	3-1
別紙 4. 特別点検実施位置	4-1
別紙 5. 点検箇所の選定に使用する温度・湿度の算出方法	5-1
別紙 6. 塩分量測定の考え方	6-1

1. はじめに

本資料は、高浜4号炉で実施したコンクリート構造物の特別点検について、実施した内容を取りまとめたものである。

2. 要求事項

対象の機器・構造物、その対象の部位、着目する劣化事象および点検方法は、「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」¹⁾（以下「運用ガイド」という。）に定められている。要求事項の概要を表2-1に示す。

表2-1 要求事項の概要¹⁾

対象の構造物	対象の部位	着目する劣化事象	点検方法/点検項目
安全機能を有するコンクリート構造物並びに安全機能を有する系統及び機器を支持するコンクリート構造物	コンクリート	強度低下及び遮蔽能力低下	採取したコアサンプル等による強度、遮蔽能力、中性化、塩分浸透及びアルカリ骨材反応の確認
常設重大事故等対処設備に属するコンクリート構造物及び常設重大事故等対処設備に属する機器を支持するコンクリート構造物			

3. 点検方法

3. 1 点検方法の概要

3. 1. 1 点検の概要

コンクリート構造物は、強度低下および遮蔽能力低下の観点で、これまでに高経年化技術評価において様々な劣化要因に対する技術評価を行い、その健全性を確認してきた。高経年化技術評価においては、劣化要因毎に最も厳しい使用条件などにあるコンクリート構造物を代表構造物として選定し、その中でも最も条件が厳しい箇所を評価点として技術評価を行い、健全性を確認した上で、その他のコンクリート構造物にも、使用条件などが代表構造物の使用条件に含まれていることを踏まえて評価結果を展開している。なお、この技術評価においては、評価の入力値となる中性化や塩分浸透、強度を確認するためのコアサンプルによる点検を実施している。

今回の特別点検では、これまで高経年化技術評価においてコアサンプルによる確認がなされていない範囲についても、点検を実施した。

3. 1. 2 点検項目の詳細

特別点検の点検項目の詳細を表3. 1. 2-1に示す。

運用ガイドでは、表3. 1. 2-1において「○」と記載されている対象の部位および点検項目の組合せごとに、点検項目に照らして使用材料および使用環境条件が最も厳しくなる場所から採取したコアサンプルによって確認を行うものとされていることを踏まえ、適切な点検方法および点検箇所（コアサンプル採取箇所）を選定することとした。

表3. 1. 2-1 加圧型軽水炉の点検項目の詳細¹⁾

対象のコンクリート構造物	対象の部位	点検項目				
		強度	遮蔽能力*1	中性化深さ*2	塩分浸透*2,3	アルカリ骨材反応
原子炉格納施設等	外部遮蔽壁	○	○	○	○	○
	内部コンクリート	○	○	○	—	○
	基礎マット	○	—	○	—	○
原子炉補助建屋	外壁	○	○	○	○	○
	内壁及び床	○	○	○	—	○
	使用済み燃料プール	○	—	○	—	○
	基礎マット	○	—	○	—	○
タービン建屋	外壁	○	—	○	○	○
	内壁及び床	○	—	○	—	○
	基礎マット	○	—	○	—	○
取水槽	海中帯	○	—	○	○	○
	干満帯	○	—	○	○	○
	気中帯	○	—	○	○	○
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	—	○	—	○	—
	原子炉補助建屋内	—	○	—	○	—
	タービン建屋内（タービン架台を含む。）	—	○	—	○	—
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。）	—	○	○	○	○	○

*1: 設計及び工事の計画の認可申請書(以下「設工認申請書」という。)において、遮蔽能力(乾燥単位容積質量)が記載されている範囲について確認する。

*2: コアサンプルによる確認と同等の方法(ドリル法等)によることもできる。また、中性化深さを確認する場所は、塗装等のコンクリート表面被覆のない場所を選定する。

*3: 海塩粒子の付着等によって塩分浸透の可能性のある場所(海風の直接当たる外壁等)及び取水構造物について確認する。

3. 2 点検方法の選定

3. 2. 1 点検方法選定の考え方

運用ガイドにおいては、点検項目は明示されているが、その具体的な方法については記載がないことから、点検項目毎に、以下の順序で点検方法を選定した。

- ①点検項目に適した JIS 規格または各種学会規格を用いる。
- ②JIS 規格または各種学会規格の一部が点検項目に適さない場合、その一部を変更して用いる。
- ③点検項目に適した規格が存在しない場合、既往知見を踏まえた最適な方法を用いる。

3. 2. 2 選定した点検方法

選定した点検方法を表 3. 2. 2-1 に示す。

表 3. 2. 2-1 選定した点検方法

点検項目	点検方法	適用	備考
強度	JIS A 1108 コンクリートの圧縮強度試験方法	①	
遮蔽能力	JASS5N T-601 コンクリートの乾燥単位容積質量試験方法に準じた方法	②	適用範囲（コアサンプル、試験体の大きさ）を変更
中性化深さ	JIS A 1152 コンクリートの中性化深さの測定方法	①	
塩分浸透	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	①	
アルカリ骨材反応	「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)」に基づく方法	③	

このうち、適用が②である遮蔽能力および③であるアルカリ骨材反応の点検方法について、その妥当性を説明する。

3. 2. 3 遮蔽能力の点検方法の妥当性

遮蔽能力の試験方法として、日本建築学会 建築工事標準仕様書・同解説 JASS 5N 原子力発電所施設における鉄筋コンクリート工事建築工事標準仕様書（以下「JASS5N」という。）にコンクリートの乾燥単位容積質量試験方法（以下「JASS5N T-601」という。）が定められている。しかしながら、この試験方法はテストピースを対象としており、また、テストピースの最小直径が 10cm までとされている。

この JASS5N T-601 を特別点検に採用するに際して、コアサンプルに適用できるのか、また実構造物の鉄筋間隔が密であり、直径が 10cm のコアサンプルを鉄筋を切断せずに採取することは困難であることから、コアサンプルの寸法を小さくしても適用できるか、という 2 点を確認するため、実証実験により検証を行った。

実証実験においては、当社の各原子力発電所に適用できるように、乾燥単位容積質量に大きく影響する骨材について、その最大径を実機と同様の 25mm とし、セメント種別においても、普通セメント、中庸熱セメント、これらにフライアッシュを混入したものをそれぞれ選定した。また、コンクリートの調合についても、実機と大きく相違がなく、本試験結果を実機に適用できる試験条件となっている。実証実験と実機のコンクリート調合の比較を表 3. 2. 3-1 に示す。

表 3. 2. 3-1 実証実験と実機のコンクリート調合の比較

	記号	セメント種別	水結合材比 (%)	単位量 (kg/m ³)					備考
				水	セメント	フライアッシュ	細骨材	粗骨材	
実証 実験	N40	N	40	172	430	—	697	1016	
	N50		50	168	336	—	784	1016	
	N65		65	166	255	—	855	1016	
	M40	M	40	172	430	—	702	1016	
	M50		50	168	336	—	788	1016	
	M65		65	166	255	—	858	1016	
	NF40	N+F	40	166	332	83	700	1016	
	NF50		50	162	259	65	790	1016	
	NF65		65	160	197	49	863	1016	
	MF40	M+F	40	166	332	83	704	1016	
	MF50		50	162	259	65	793	1016	
	MF65		65	160	197	49	866	1016	
実機	高浜 3, 4 号炉	M+F						外部遮蔽壁	
								原子炉補助建屋	

その結果を図3. 2. 3-1~3. 2. 3-3に示す。当該規格のコアサンプルへの適用については、規格の適用範囲であるテストピースとコアサンプルで同様の乾燥単位容積質量が得られることを確認できた。また、コアサンプルの寸法の変更については、直径10cm、7.5cm、5.0cmのコアサンプルの乾燥単位容積質量に違いは見られないが、直径5.0cmのコアサンプルでは標準偏差（ばらつき）が大きく、直径7.5cm、10cmのコアサンプルでは標準偏差が同等であることから、直径7.5cmまでは小さくできると判断した。

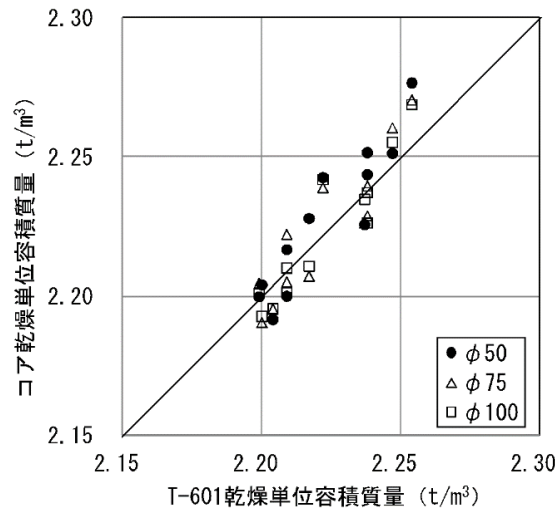


図3. 2. 3-1 コアサンプルとテストピースの乾燥単位容積質量の関係²⁾

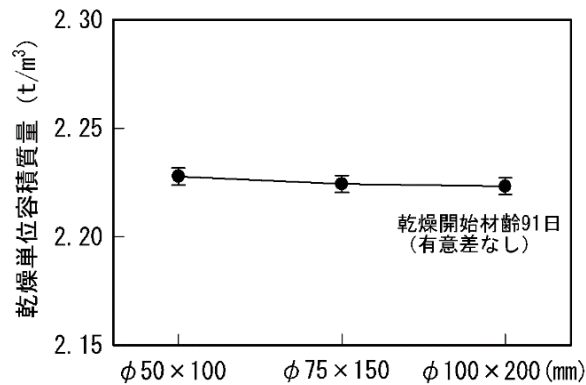


図3. 2. 3-2 コア寸法と乾燥単位容積質量の関係³⁾

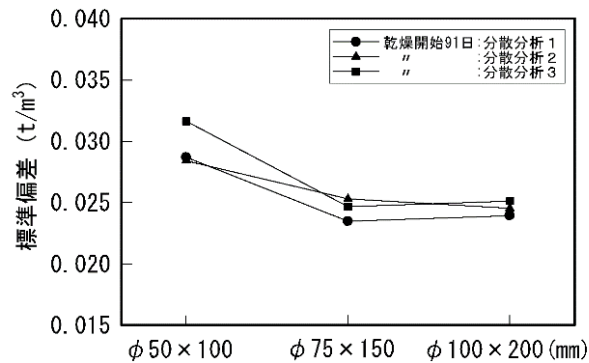


図3. 2. 3-3 コア寸法と乾燥単位容積質量の標準偏差の関係³⁾

なお、コアサンプルの寸法の見直しに伴い、JASS5N T-601 で定義される試験終了を判定する質量変化量を、コアサンプルの寸法に応じた値に見直す必要がある。そこで、コアサンプルの容積比に応じて、質量変化の測定数値を変更する。

JASS5N T-601 において、『乾燥状態の定義は、「供試体の質量変化が 2 日で 1g となったとき」とする。供試体（直径 15cm、高さ 30cm）の単位容積質量 0.001t/ m³ に相当する質量が約 5g であるため、十分な精度で乾燥単位容積質量を得ることができる』と記載がある。これにより、乾燥状態と判断できる質量変化は、単位容積質量に換算して 0.001t/m³ 程度に相当すると考えられる。

今回、直径 7.5cm、高さ 15cm の供試体（コアサンプル）を最低限必要な大きさとしているが、乾燥状態と判断できる単位容積質量から求めた質量変化量 (①) と、コアサンプルの容積比から求めた質量変化量 (②) を比較した結果、容積比から求めた質量変化量がより保守的な値となった。

①乾燥状態と判断できる単位容積質量から求めた質量変化量

(容積) (単位容積質量) (質量変化量)

$$662\text{cm}^3 \times 0.001\text{t/m}^3 (\text{g/cm}^3) = 0.662\text{g}$$

②コアサンプルの容積比から求めた質量変化量

JASS5NT-601 : 直径 10cm、高さ 20cm → 容積 1570cm³

特別点検 : 直径 7.5cm、高さ 15cm → 容積 662cm³

容積比による質量変化量 : $662\text{cm}^3 / 1570\text{cm}^3 \times 1\text{g} = 0.42\text{g}$

以上を踏まえ、今回の特別点検における測定数値は、コアサンプルの容積比から求めた質量変化量を基に 2 日で 0.4g と設定した。

3. 2. 4 アルカリ骨材反応の点検方法の妥当性

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かった。そのため、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)」⁴⁾ 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)」⁵⁾ (以下「JNES 報告書」という。) を参照し、点検方法を検討することとした。

JNES 報告書において複数紹介されているコンクリートの岩石学的診断法を表 3. 2. 4-1 に示す。その中から、高浜発電所 4 号炉は運転開始から約 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、また広範囲において複数の箇所点検が必要なことを踏まえ、「実体顕微鏡観察」を点検方法として選定した。

また、実体顕微鏡観察による点検に際し、アルカリ骨材反応の発生状況を適切に評価できる点検帳票およびデグリー表を作成し、それに基づき点検を行うこととした。アルカリ骨材反応の点検記録帳票を表 3. 2. 4-2 に、アルカリ骨材反応評価用デグリー表を表 3. 2. 4-3 に示す。

表 3. 2. 4-1 岩石学的診断法 (国内) ⁵⁾

		試験方法		長所	課題
骨材	総プロ法 (旧建設省)	目視観察	コンクリートより取り出した骨材・コアのスライス片	簡便	岩種判定が目的・切断により、ゲルが見えにくくなる
		偏光顕微鏡観察	薄片 (主にコンクリートより取り出した粗骨材)	やや簡便	粗骨材中の有害鉱物の含有状況の判定が目的。細骨材は対象外。セメントペーストのひび割れの進展状況を観察せず
		X線回折分析	コンクリートから取り出した粗骨材	簡便	オパール・ガラスは検出できない
	JCI-DD3	偏光顕微鏡観察	薄片 (未使用骨材)	やや簡便	コンクリート中の骨材の反応状況は観察の対象外
		X線回折分析	未使用骨材	簡便	反応性鉱物をリストアップしているが、内容が不正確
コンクリート	総プロ法 (旧建設省)	湿式化学分析	ゲルの確認 (掻き取った試料)	簡便	試料採取位置が記録されず
			水溶性アルカリの測定	やや簡便	水溶性アルカリをすべてセメント由来とみなす。そのため、セメントのアルカリ量を過大に評価する
	NEXCO 西日本 (九州) 福永ら (2007) Katayama et al (2008)	実体顕微鏡観察	ゲルの検出 (コア外周・破断面)	簡便	岩種の詳細は分からない
		岩種構成定量	粗骨材 (展開写真)	やや簡便	展開カメラは市販されていない
			細骨材 (薄片)	正確	測定に熟練・時間を要する
		偏光顕微鏡観察	反応・ひびの進展状況確認 (薄片)	正確	薄片作製・観察に熟練を要する
		SEM*観察	ゲルの検出 (鏡面研磨薄片)	正確	観察に熟練を要する
		EPMA 分析・EDS 分析**	ゲルの組成分析 (鏡面研磨薄片)	正確	観察・分析に熟練・時間を要する
未水和セメントのアルカリ分析 (鏡面研磨薄片)	正確		観察・分析に熟練・時間を要する		

* SEM : 走査電子顕微鏡

** EPMA : 電子線プローブ・マイクロアナライザー

*** EDS : エネルギー分散型スペクトル分析装置

※記載の一部誤記は修正

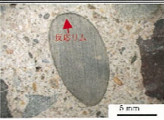

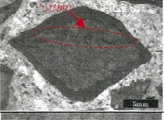
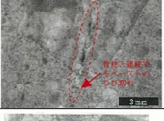

表3. 2. 4-2 アルカリ骨材反応の点検記録帳票

様式-1

コアサンプル実体顕微鏡観察 記録用紙

発電所名		コア番号				
構造物名称		確認実施日				
部位		試験員				
試験員		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			

表3. 2. 4-3 アルカリ骨材反応評価用デグリー表

項目	◎. 顕著	○. ある	△. 軽微	-. なし
I 骨材の反応リム	(項目現象が「はっきり明確に」生じていること)		(項目現象が「かすかにわずかに」生じていること)	(項目現象の「ない」こと)
II セメントペーストへのゲルの滲み	(項目現象が「はっきり明確に」生じていること)		(項目現象が「かすかにわずかに」生じていること)	(項目現象の「ない」こと)
III 骨材のひび割れ、ゲル充填	(項目現象が「はっきり明確に」生じていること)		(項目現象が「かすかにわずかに」生じていること)	(項目現象の「ない」こと)
IV セメントペーストのひび割れ、ゲル充填	(項目現象が「はっきり明確に」生じていること)		(項目現象が「かすかにわずかに」生じていること)	(項目現象の「ない」こと)
V セメントペースト気泡へのゲル充填	(項目現象が「はっきり明確に」生じていること)		(項目現象が「かすかにわずかに」生じていること)	(項目現象の「ない」こと)

アルカリ骨材反応の点検結果は点検記録帳票のとおり、確認されたアルカリ骨材反応の状況を踏まえ、「反応性なし」「反応性あり」のどちらかに分類する。

アルカリ骨材反応は、まず、セメントに含まれるアルカリ分に由来するアルカリ溶液が、骨材が有する反応性シリカ分と反応し、水和アルカリシリケート（水ガラス）層と呼ばれる層を作る。その水ガラス層は、コンクリート中のカルシウムイオンと反応し、硬いカルシウムシリケート層となる。これを反応リムと呼び、骨材の外周部に生じる。

アルカリ溶液は、骨材外周部の反応リムを通過して骨材内部に浸透し、骨材が有する反応性シリカ分と継続して反応していくが、その反応によって生じた水ガラスは、反応リムがせき止める形となり、骨材の外側へ出て行くことが難しくなるため、反応が進めば進むほど体積が膨張し、膨張圧が骨材内部に生じ、一部の反応生成物（ゲル）がセメントペースト部ににじむ程度に出て行く。この膨張圧が限界を超えると、骨材にひび割れが生じる。

この状態が進展すると、ひび割れが骨材だけに収まらず、セメントペースト部分まで拡大し、ひび割れ部にゲルが充填され始める（図3. 2. 4-1参照）。更に反応が進展していくと、セメントペースト部に元々存在する気泡部にまでゲルが充填され、その状況が顕著に見られるようになると、構造物の目視点検においても、ひび割れが確認できるようになる（図3. 2. 4-2参照）。ひび割れの発生は、膨張に対する拘束状態により異なり、拘束の小さな無筋コンクリート構造物などでは亀甲状のひび割れが生じ、鉄筋コンクリート構造物では主筋方向に、部材両端が強く拘束されている構造物では拘束されている面に直角にひび割れが生じる。また、アルカリ骨材反応によるひび割れは部材内部まで達していないことが多い。

アルカリ骨材反応は極めて軽微なものを含めると、ほとんどのコンクリートで発生しうるものであるため、点検においては、上述するアルカリ骨材反応の進行状況や発生を的確に観察、分類し、実構造物の状況やコアサンプル全体の目視観察などを踏まえ、コンクリートの健全性に影響を与える劣化であるかどうか、という観点で「反応性なし」「反応性あり」の判定を行う。

実体顕微鏡観察にて観察した結果、「反応性あり」と判定された場合は、図3. 2. 4-3に示すとおり、既往知見を踏まえてより精緻な方法を用いてアルカリ骨材反応の進展状況を確認する。具体的には、反応が生じている骨材の鉱物同定及び反応の進展状況（反応リム・ゲル、ひび割れ）をより精緻に確認できる「偏光顕微鏡観察」や、反応が生じている特定の鉱物及びゲル生成物の同定ならびにひび割れなどの進展状況をより精緻に確認できる「走査電子顕微鏡観察」などを用いる。なお、コアサンプルを採取する場合は、「反応性あり」と判断されたコアサンプルと同様、アルカリ骨材反応に対して使用環境の厳しい箇所を選定する。

また、劣化状況評価を踏まえた上で、点検方法の選定プロセスおよび点検結果の妥当性の確認のため、代表箇所について偏光顕微鏡観察を行い、妥当であることを確認している。

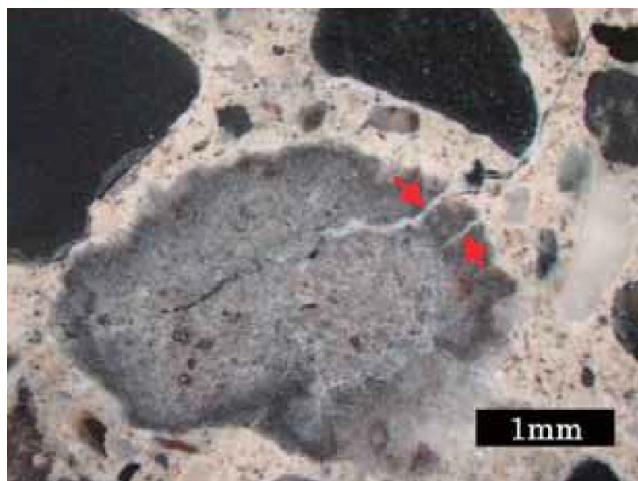


図3. 2. 4-1 実体顕微鏡観察での膨張ひび割れの確認事例⁶⁾



図3. 2. 4-2 実構造物における膨張ひび割れ（亀甲状）の事例⁷⁾

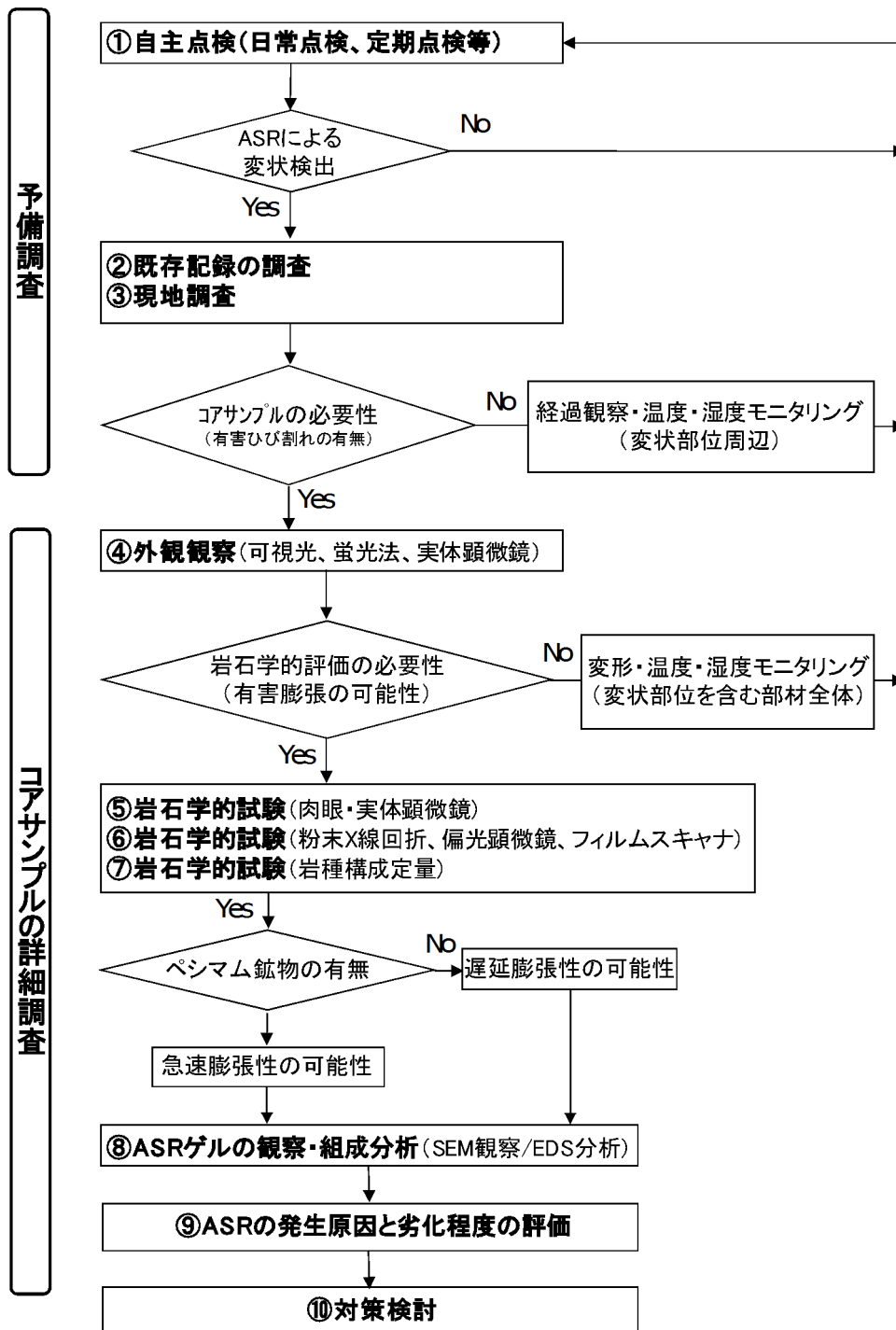


図 3.8 コンクリート構造物の ASR 診断フロー (例)

Fig. 3.8 Example of ASR diagnosis flow for concrete structures

図 3. 2. 4-3 コンクリート構造物の ASR 診断フロー (案) 4)

3. 3 試験員の力量

特別点検を実施する試験員については、建築士、技術士、施工管理技士、コンクリート主任技士、コンクリート技士およびコンクリート診断士や、試験業務に関する十分な経験を有するなど、コンクリートに関する技術を有する者が従事している。

4. 点検箇所

4. 1 選定プロセス

4. 1. 1 基本的な考え方

運用ガイドにおいて“この確認においては、この組合せごとに、対象の部位の中で点検項目に照らして使用材料及び使用環境条件が最も厳しくなる場所から採取したコアサンプルによる確認をもって、当該組合せに係る確認を行ったものとするることができる。また、内部鉄筋の切断やペデスタル外部鋼板を破壊する等、強度・機能に影響を及ぼすこととなる場合は、当該対象の部位に準じた使用材料及び使用環境条件を有する場所から採取したコアサンプルによる確認をもってその確認を代替させることができる。”と記載されていることを踏まえ、対象の部位と点検項目の組合せごとに、点検項目に対する劣化メカニズムや影響要素などを踏まえ、コアサンプルが採取可能な部位で使用材料および使用環境条件が最も厳しくなる場所を点検箇所（コアサンプル採取箇所）に選定した。

4. 1. 2 遮蔽能力の点検箇所選定プロセス

運用ガイドに基づき、対象の部位の中で、遮蔽能力の点検という観点で使用材料および使用環境条件が最も厳しくなる場所を選定した。

(1) 内部コンクリート

内部コンクリートについては、炉心に最も近く、放射線の影響が非常に大きい1次遮蔽壁の炉心高さ部分を、使用材料によらず点検箇所として選定した。

(2) 内部コンクリート以外

遮蔽能力はコンクリートの密度（単位容積質量）に影響を受け、コンクリートの密度は、使用材料の密度や、コンクリート中の水分を逸散させるような熱などの使用環境の影響を受ける。今回の特別点検では、より保守的な点検方法としてコンクリートの乾燥単位容積質量を確認する方法を選定したことから、熱などの、コンクリート中の水分を逸散させるような使用環境の影響がほぼなくなる。そこで、高浜4号炉については建設時に乾燥単位容積質量試験を実施しているため、内部コンクリート以外の部位についてはその結果が最も小さかった箇所を点検箇所として選定した。（表4. 1. 2-1、表4. 1. 2-2参照）。

上記において、より水和が進展している箇所、すなわち強度が増進している箇所は、コンクリート中の自由水がより多く結合水に変化していると想定される。乾燥単位容積質量の試験は、コンクリート中の自由水を強制的に蒸発させる方法であるため、水和が進展している箇所は、乾燥単位容積質量が相対的に大きいことが想定される。そのため、点検の候補となる箇所が広範囲となる場合は、上記に加え、さらに具体的なコアサンプル採取位置を選定するために、リバウンドハンマーによる非破壊試験によりコンクリート強度を推定するための反発度を確認し、最も反発度が低い箇所、すなわち水和が進展しておらず、乾燥単位容積質量が相対的に小さいと想定される箇所を点検箇所（コアサンプル採取箇所）に選定した（表4. 1. 2-3参照）。

表 4. 1. 2 - 1 建設時の乾燥単位容積質量試験結果 (外部遮蔽壁)

打設日	平均乾燥単位容積質量 (t/m ³)	コアサンプル採取箇所	打設日	平均乾燥単位容積質量 (t/m ³)	コアサンプル採取箇所
1982/11/18	2.226		1983/8/30	2.270	
1982/12/13	2.220	○	1983/9/13	2.289	
1982/12/24	2.225		1983/9/23	2.284	
1983/1/24	2.227		1983/10/4	2.287	
1983/2/5	2.229		1983/10/13	2.288	
1983/2/18	2.222		1983/10/21	2.292	
1983/3/3	2.240		1983/10/27	2.281	
1983/3/16	2.230		1983/11/3	2.254	
1983/3/29	2.226		1983/11/10	2.283	
1983/4/14	2.238		1983/11/15	2.283	
1983/4/29	2.257		1983/11/19	2.321	
1983/6/13	2.247		1984/2/8	2.307	
1983/7/22	2.267		1984/2/17	2.280	
1983/7/28	2.258		1984/2/24	2.301	
1983/8/2	2.266		1984/3/2	2.294	
1983/8/10	2.274				

表4. 1. 2-2 建設時の乾燥単位容積質量試験結果 (原子炉補助建屋)

打設日	平均乾燥単位容積質量 (t/m ³)	コアサンプル採取箇所	打設日	平均乾燥単位容積質量 (t/m ³)	コアサンプル採取箇所	打設日	平均乾燥単位容積質量 (t/m ³)	コアサンプル採取箇所
1981/11/21	2.287		1982/5/6	2.242		1982/11/8	2.251	
1981/11/27	2.266		1982/5/8	2.240		1982/11/9	2.247	
1981/11/28	2.297		1982/5/13	2.246		1982/11/9	2.243	
1981/12/2	2.238		1982/5/14	2.240		1982/11/12	2.229	
1981/12/2	2.265		1982/5/17	2.231		1982/11/16	2.229	
1981/12/3	2.274		1982/5/18	2.259		1982/11/24	2.237	
1981/12/9	2.256		1982/5/19	2.238		1982/11/25	2.232	
1981/12/9	2.263		1982/5/20	2.212		1982/11/25	2.228	
1981/12/12	2.271		1982/5/22	2.214	○ (外壁)	1982/12/3	2.246	
1981/12/16	2.267		1982/5/26	2.240		1982/12/9	2.222	
1981/12/17	2.303		1982/6/4	2.283		1982/12/9	2.218	
1981/12/17	2.303		1982/6/9	2.249		1982/12/14	2.224	
1981/12/21	2.254		1982/6/10	2.302		1982/12/15	2.230	
1981/12/23	2.263		1982/6/14	2.278		1982/12/16	2.226	
1981/12/23	2.249		1982/6/17	2.266		1982/12/23	2.214	
1981/12/23	2.262		1982/6/18	2.271		1982/12/25	2.217	
1981/12/25	2.260		1982/6/21	2.268		1983/1/15	2.231	
1982/1/7	2.276		1982/6/24	2.257		1983/1/15	2.231	
1982/1/8	2.288		1982/6/24	2.257		1983/1/18	2.227	
1982/1/9	2.246		1982/6/26	2.237		1983/1/19	2.220	
1982/1/14	2.247		1982/7/3	2.233		1983/1/20	2.217	
1982/1/15	2.305		1982/7/5	2.228		1983/1/24	2.227	
1982/1/16	2.290		1982/7/10	2.224		1983/1/26	2.223	
1982/1/18	2.241		1982/7/12	2.255		1983/1/27	2.226	
1982/1/19	2.263		1982/7/16	2.258		1983/1/31	2.219	
1982/1/22	2.312		1982/7/21	2.276		1983/2/3	2.234	
1982/1/23	2.306		1982/7/22	2.212	○ (内壁及び床)	1983/2/5	2.237	
1982/1/26	2.285		1982/7/26	2.293		1983/2/9	2.238	
1982/1/28	2.259		1982/7/28	2.258		1983/2/15	2.224	
1982/2/5	2.270		1982/7/28	2.261		1983/2/17	2.222	
1982/2/10	2.303		1982/7/31	2.265		1983/2/21	2.232	
1982/2/10	2.321		1982/8/3	2.258		1983/2/23	2.229	
1982/2/10	2.297		1982/8/4	2.251		1983/2/24	2.220	
1982/2/10	2.307		1982/8/4	2.248		1983/2/26	2.224	
1982/2/15	2.321		1982/8/7	2.222		1983/2/28	2.240	
1982/3/1	2.282		1982/8/9	2.230		1983/3/4	2.240	
1982/3/3	2.271		1982/8/9	2.232		1983/3/5	2.240	
1982/3/6	2.286		1982/8/10	2.250		1983/3/18	2.230	
1982/3/8	2.310		1982/8/11	2.242		1983/3/22	2.227	
1982/3/8	2.298		1982/8/21	2.222		1983/3/22	2.227	
1982/3/8	2.310		1982/8/28	2.255		1983/4/11	2.238	
1982/3/12	2.321		1982/8/30	2.234		1983/4/27	2.225	
1982/3/12	2.331		1982/8/31	2.242		1983/4/29	2.257	
1982/3/16	2.300		1982/9/2	2.236		1983/5/19	2.256	
1982/3/16	2.262		1982/9/9	2.224		1983/6/17	2.259	
1982/3/18	2.262		1982/9/13	2.238		1983/7/28	2.258	
1982/3/19	2.306		1982/9/14	2.241		1983/8/1	2.263	
1982/3/19	2.295		1982/9/22	2.226		1983/8/5	2.278	
1982/3/23	2.297		1982/9/24	2.228		1983/8/11	2.279	
1982/3/23	2.274		1982/9/27	2.252		1983/8/23	2.271	
1982/3/31	2.260		1982/9/27	2.251		1983/10/8	2.270	
1982/4/7	2.244		1982/10/8	2.230		1983/11/17	2.287	
1982/4/8	2.238		1982/10/9	2.223		1983/12/14	2.326	
1982/4/16	2.275		1982/10/12	2.245		1983/12/26	2.306	
1982/4/21	2.249		1982/10/13	2.239		1984/6/8	2.291	
1982/4/23	2.246		1982/10/14	2.223		1984/6/15	2.262	
1982/4/27	2.265		1982/10/18	2.237		1984/6/22	2.287	
1982/4/28	2.264		1982/10/22	2.227				

表 4. 1. 2-3 高浜 4 号炉 非破壊試験による選定結果（遮蔽能力）

対象の コンクリート構造物	対象の部位	測定 No. ※	平均反発度	コアサンプル 採取箇所
原子炉格納施設等	外部遮蔽壁	1	53	
		2	51	○
		3	53	
	内部コンクリート	1	40	
		2	39	○
原子炉補助建屋	内壁及び床	1	55	
		2	53	
		3	52	○

※ 非破壊試験の実施位置は別紙 1 に示す。

4. 1. 3 中性化深さの点検箇所選定プロセス

運用ガイドに基づき、対象の部位の中で、中性化深さの点検という観点で使用材料および使用環境条件が最も厳しくなる場所を選定した。

中性化はコンクリートの強度、仕上げの状況、ならびに温度、湿度および二酸化炭素濃度といった使用環境条件の影響を受ける。対象の部位の範囲において、コンクリートの設計基準強度は同じである。一方で、仕上げの状況ならびに温度、湿度および二酸化炭素濃度といった使用環境条件については、対象の部位の範囲において大きく異なることから、仕上げがない箇所を優先的に選定し、かつ使用環境条件が最も厳しくなる箇所を選定することとした。

建屋内（建屋の屋外箇所を含む）においては、使用環境条件が最も厳しくなる箇所の選定にあたり、まず温度、湿度および二酸化炭素濃度を測定し、測定した値から使用環境条件による影響度を算出し、その影響度が大きい箇所を対象の部位ごとに選定した（表4. 1. 3-1参照）。ここで、影響度とは測定した値が入力値となる森永式⁸⁾の一部（表4. 1. 3-1欄外下線部）に相当する。

また、中性化はコンクリート強度の影響を受けることから、コアサンプル採取箇所の候補となる箇所が広範囲となる場合は、上記に加えさらに具体的な採取箇所を選定するために、リバウンドハンマーによる非破壊試験によりコンクリート強度を推定するための反発度を確認し、最も反発度が低い箇所、すなわち中性化深さが相対的に大きいと想定される箇所をコアサンプル採取箇所を選定した（表4. 1. 3-2参照）。

表4. 1. 3-1 高浜4号炉 対象の部位毎の使用環境条件による影響度の算出結果

構造物	対象の部位	点検箇所	測定結果に基づく環境条件 (平均値) の入力値			環境条件 による 影響度 ^{*1}	備考
			温度 (°C)	湿度 (%)	二酸化炭素 濃度(ppm)		
原子炉格納施設等	外部遮蔽壁	外部遮蔽壁 (アニュラス内)	34.2	28.0	430	0.346	補正実施 ^{*3}
	内部コンクリート	ループ室 ^{*2}	32.7	16.7	415	0.372	補正実施 ^{*3}
	基礎マット	ほう酸ポンプ室	29.8	33.8	422	0.302	補正実施 ^{*3}
原子炉補助建屋	外壁	ディーゼル発電機室給 気ファン室 外壁 ^{*2}	16.4	85.4	402	0.060	補正実施 ^{*3}
	内壁及び床	ベネトレーションエリア	33.1	24.9	441	0.356	補正実施 ^{*3}
	使用済み燃料プール	通路	28.1	35.8	476	0.305	
	基礎マット	海水管室	23.1	49.5	416	0.216	
タービン建屋	内壁及び床	タービン建屋 地下部	20.7	61.3	424	0.166	補正実施 ^{*3}
	基礎マット	タービン建屋 地下部	19.0	74.0	419	0.133	
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 2階部	28.8	41.2	413	0.269	補正実施 ^{*3}

測定期間：2020年10月1日～2021年9月30日

※1 森永式における環境条件による影響度（下記赤部）から算出した。

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

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

※2 対象範囲全面に仕上げがあるため、仕上げがある箇所の中から選定した。

※3 使用環境条件の補正方法は別紙5に示す。

表 4. 1. 3-2 高浜 4 号炉 非破壊試験による選定結果 (中性化)

対象のコンクリート構造物	対象の部位 (点検箇所)	測定 No. ※	平均反発度	コアサンプル 採取箇所
原子炉格納施設等	外部遮蔽壁 (アニュラス内)	1	44	○
		2	45	
		3	47	
	基礎マット (ほう酸ポンプ室)	1	48	○
		2	52	
原子炉補助建屋	外壁 (ディーゼル発電機室給気 ファン室 外壁)	1	46	
		2	45	
		3	42	○
	基礎マット (海水管室)	1	50	
		2	48	○
		3	51	
タービン建屋	内壁及び床 (タービン建屋 地下部)	1	56	
		2	51	○
		3	54	
	基礎マット (タービン建屋 地下部)	1	45	○
		2	45	
		3	53	
取水槽	海中帯	1	46	
		2	45	
		3	35	○
	干満帯	1	56	
		2	58	
		3	53	○
	気中帯	1	51	
		2	52	
		3	48	○
		4	48	
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	タービン建屋内 (タービン架台含む。)	1	49	○
		2	53	
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)	1	50	○
		2	50	
		3	53	
	復水タンク基礎	1	52	
		2	51	
		3	51	
		4	49	○

※ 非破壊試験の実施位置は別紙 1 に示す。

4. 1. 4 塩分浸透の点検箇所選定プロセス

運用ガイドに基づき、対象の部位の中で、塩分浸透の点検という観点から使用材料および使用環境条件が最も厳しくなる場所を選定した。

塩分浸透は、構造物へ飛来、付着する塩分の量、使用材料およびコンクリート調合の影響を受けるが、対象の部位の範囲においては、使用材料およびコンクリート調合に大きな違いがない。一方、構造物へ飛来、付着する塩分の量は、対象の部位の使用環境条件に大きく影響を受けることから、使用環境条件が最も厳しくなる箇所を選定することとした。

原子炉格納施設等および原子炉補助建屋については、飛来塩分を捕集する器具（土研式塩分捕集器、図4. 1. 4-1参照）を高さ方向に分散して設置し、捕集した塩分量が最も多い箇所をコアサンプル採取箇所を選定した（表4. 1. 4-1参照）。

その他部位については、構造物の規模や海中にあるなどの設置環境を踏まえ、X線によりコンクリート表面の塩分量を測定する器具（ポータブル型蛍光X線分析計、図4. 1. 4-2参照）を用いて構造物のコンクリート表面の塩分量を測定し、測定した塩分量が最も多い箇所をコアサンプル採取箇所を選定した（表4. 1. 4-2参照）。



図 4. 1. 4 - 1 飛来塩分捕集器
(土研式塩分捕集器)



図 4. 1. 4 - 2 表面塩分量測定器
(蛍光 X 線分析計)

表4. 1. 4-1 高浜4号炉 塩分量測定による選定結果（土研式塩分捕集器）

対象のコンクリート構造物	対象の部位	測定 No.	測定値 飛来塩分量 (mg/dm ²)	コアサンプル 採取箇所
原子炉格納施設等	外部遮蔽壁	1	226.20	○
		2	49.66	
		3	23.63	
原子炉補助建屋	外壁	1	184.24	○
		2	2.72	

測定期間：2020年10月1日～2021年10月1日

※ 塩分量測定位置は別紙3に示す。

表4. 1. 4-2 高浜4号炉 塩分量測定による選定結果（蛍光X線分析計）

対象のコンクリート構造物	対象の部位	測定 No.	測定値 表面塩分量 (ppm)	コアサンプル 採取箇所
取水槽	海中帯	1	5,962	○
		2	3,610	
		3	4,261	
	干満帯	1	8,173	○
		2	5,864	
		3	6,047	
	気中帯	1	7,019	○
		2	5,053	
		3	1,625	
		4	1,835	
		5	3,315	
	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）	1	997
2			993	
3			893	
復水タンク基礎		1	1,822	
		2	1,610	
		3	1,891	○
		4	1,443	

※ 塩分量測定位置は別紙3に示す。

4. 1. 5 アルカリ骨材反応の点検箇所選定プロセス

運用ガイドに基づき、対象の部位の中で、アルカリ骨材反応の点検という観点から使用材料および使用環境条件が最も厳しくなる場所を選定した。

アルカリ骨材反応は、反応性骨材、水およびアルカリ分により反応が生じる事象であり、これに加えて、放射線についても反応の活性化の観点でその影響が懸念される。骨材については、表4. 1. 5-1に示すとおり、1985年に実施したモルタルバー法試験により無害であることを確認している。また、アルカリ分の主な供給元であるセメントについて、対象の部位の範囲においては使用材料に大きな違いがない。一方で、水分や、塩分などの外部から供給されるアルカリ分については、その使用環境によって異なってくることから、使用環境条件が最も厳しくなる箇所を選定することとした。

まず、内部コンクリートについては、放射線の観点で、放射線照射量が最も多い1次遮蔽壁をコアサンプル採取箇所を選定した。次に、外部遮蔽壁、原子炉補助建屋（外壁）および取水槽については、外部からのアルカリ供給元として塩分が考えられるため、特別点検における塩分浸透と同一位置を、コアサンプル採取箇所を選定した。それ以外の部位については、発電所内各所の空気環境測定を実施した結果に基づき、水分の供給の観点で、対象の部位の範囲において湿度が最も大きな位置をコアサンプル採取箇所を選定した（表4. 1. 5-2参照）。

表4. 1. 5-1 高浜4号炉 モルタルバー法試験結果

区分	試験方法	骨材産地	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 (漆原産)	0.061	0.10以上	無害
細骨材		川砂 (百瀬川産)	0.078	0.10以上	無害

ASTM-C227: 「Standard Test Method for Potential Alkali Reactivity of Cement-Aggregate Combinations (Mortar-Bar Method)」

表4. 1. 5-2 高浜4号炉 対象部位毎の湿度測定の結果

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}
	海中帯	海水ポンプ室	外部からのアルカリ供給(塩分)	-	
取水槽	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
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。補正方法は別紙5に示す。

4. 1. 6 強度の点検箇所選定プロセス

運用ガイドに基づき、対象の部位の中で、強度の点検という観点で使用材料および使用環境条件が最も厳しくなる場所を検討した。

構造物としての強度低下につながる劣化要因は、熱、放射線照射、中性化深さ、塩分浸透など多岐にわたるため、対象の構造物毎に対象の部位における各劣化要因の影響有無を踏まえ、選定する必要がある。

なお、同じ対象の部位については、同じ材料が用いられているため、以下の通り使用環境条件によって点検箇所を選定することとした。

- ・材料としての強度低下につながる劣化要因は熱および放射線照射であり、これらの影響が大きい原子炉格納施設等のうち内部コンクリートについては、熱および放射線照射の評価箇所を強度の点検箇所を選定する。
- ・それ以外の部位については、中性化深さ、塩分浸透、アルカリ骨材反応、機械振動に関して厳しい箇所が、強度に関しても厳しいものとみなし、それらの点検項目の点検箇所の中から点検箇所を選定する。具体的には、対象の構造物毎に対象の部位における各劣化要因の影響有無を踏まえ、対象構造物の範囲において、複数ある劣化要因をなるべく網羅できるよう、対象の部位毎に異なる劣化要因の点検箇所などを、強度の点検箇所を選定する。


以上を踏まえた強度の点検箇所の選定結果を表4. 1. 6-1に示す。

表 4. 1. 6-1 強度の点検箇所を選定結果

対象 構造物	対象の部位	点検箇所	選定理由とした劣化要因						
			熱	放射線 照射	中性化	塩分浸透	アルカリ 骨材反応	機械振動	凍結融解
原子炉 格納施設等	外部遮蔽壁	外部遮蔽壁 (アニュラス内)	○	○	○	○	○	-	△
	内部 コンクリート	1次遮蔽壁 (炉心領域部)*	○	○	○	-	○	-	△
	基礎マット	通路	-	-	○	-	○	-	△
原子炉 補助建屋	外壁	ディーゼル 発電機室 外壁	-	-	○	○	○	-	△
	内壁及び床	非常用ディーゼル 発電機基礎*	○	○	○	-	○	○	△
	使用済み燃料 プール	通路	○	○	○	-	○	-	△
	基礎マット	海水管 トレンチエリア	○	○	○	-	○	-	△
タービン 建屋	内壁及び床	タービン建屋 地下部	-	-	○	-	○	-	△
	基礎マット	タービン建屋 地下部	-	-	○	-	○	-	△
取水槽	海中帯	海水ポンプ室 水路内床版	-	-	○	○	○	-	△
	干満帯	海水ポンプ室 水路内側壁	-	-	○	○	○	-	△
	気中帯	海水ポンプ室 基礎	-	-	○	○	○	-	△
タービン架台	タービン建屋 2階部	○	-	○	-	-	○	△	
非常用ディーゼル発電用 燃料油タンク基礎	基礎	-	-	○	○	○	-	△	
復水タンク基礎	タンク基礎	-	-	○	○	○	-	△	

※ 原子炉格納施設等のうち内部コンクリートおよび原子炉補助建屋のうち内壁及び床の点検箇所は代替箇所とした。

凡例 ○：影響有 △：高経年化対策上着目すべき経年劣化事象でない事象 -：影響無

 考慮した劣化要因

なお、原子炉格納施設等（内部コンクリート）および原子炉補助建屋（内壁及び床）については、次に示すとおり強度・機能に影響を及ぼすこととなると判断し、代替箇所で強度を確認している。

①原子炉格納施設等（内部コンクリート）

当該部位においては、1次遮蔽壁が熱の影響が最も大きい箇所となるが、その箇所は炉心領域部の内面から約47cmの位置である。1次遮蔽壁の内側はアクセスが困難な箇所であり、内面からコアサンプルを採取することはできないため、コアサンプルが採取可能で、かつ熱の影響が大きい箇所という観点で、炉心領域部の外面から採取することができた深さまでのコアサンプルで代替した。1次遮蔽壁の炉心領域部はすべて同じ使用材料であり、最高温度となる箇所の温度が約56℃であるのに対し、1次遮蔽壁外面の温度は約51℃であり、コアサンプルを採取できた深さでも最高温度となる箇所に準じた使用環境条件であることから、代替させることができると判断した。

②原子炉補助建屋（内壁及び床）

当該部位においては、非常用ディーゼル発電機基礎の機械振動の影響を踏まえて対象の部位として選定している。劣化技術評価においては、非常用ディーゼル発電機基礎ボルト周辺部が評価点となるが、基礎ボルト周辺部はボルトなどが干渉するため、強度・機能に影響を及ぼすこととなり、コアサンプルが採取できない。そのため、コアサンプルが採取可能な非常用ディーゼル発電機基礎の一般部で代替した。一般部は、同じ使用材料で、基礎ボルト周辺部に準じた使用環境条件（機械振動）の箇所であることから、代替させることができると判断した。

4. 2 選定結果

点検項目毎に選定した点検箇所を表4. 2-1～4. 2-5に示す。

表4. 2-1 強度の点検箇所

対象のコンクリート構造物	対象の部位	点検箇所
原子炉格納施設等	外部遮蔽壁	屋内部（アニュラス内）
	内部コンクリート	一次遮蔽壁
	基礎マット	通路
原子炉補助建屋	外壁	ディーゼル発電機室 外壁
	内壁及び床	A 非常用ディーゼル発電機室 地下
	使用済み燃料プール	通路
	基礎マット	海水管トレンチエリア
タービン建屋	内壁及び床	タービン建屋 地下部
	基礎マット	タービン建屋 地下部
取水槽	海中帯	海水ポンプ室 水路内床版
	干満帯	海水ポンプ室 水路内側壁
	気中帯	海水ポンプ室 基礎
タービン架台		タービン建屋 2階部
非常用ディーゼル発電用燃料油タンク基礎		基礎
復水タンク基礎		タンク基礎

表4. 2-2 遮蔽能力の点検箇所

対象のコンクリート構造物	対象の部位	点検箇所
原子炉格納施設等	外部遮蔽壁	屋外部（シリンダー部）
	内部コンクリート	一次遮蔽壁
原子炉補助建屋	外壁	使用済燃料ピットポンプエリア外壁
	内壁及び床	中間建屋 B 安全補機開閉器室

表 4. 2 - 3 中性化の点検箇所

対象のコンクリート構造物	対象の部位	点検箇所
原子炉格納施設等	外部遮蔽壁	外部遮蔽壁 (アニュラス内)
	内部コンクリート	ループ室
	基礎マット	ほう酸ポンプ室
原子炉補助建屋	外壁	ディーゼル発電機室給気ファン室 外壁
	内壁及び床	ペネトレーションエリア
	使用済み燃料プール	通路
	基礎マット	海水管室
タービン建屋	内壁及び床	タービン建屋 地下部
	基礎マット	タービン建屋 地下部
取水槽	海中帯	海水ポンプ室 水路内床版
	干満帯	海水ポンプ室 水路内側壁
	気中帯	海水ポンプ室 基礎
タービン架台		タービン建屋 2 階部
非常用ディーゼル発電用燃料油タンク基礎		基礎
復水タンク基礎		タンク基礎

表 4. 2 - 4 塩分浸透の点検箇所

対象のコンクリート構造物	対象の部位	点検箇所
原子炉格納施設等	外部遮蔽壁	屋外部
原子炉補助建屋	外壁	ディーゼル発電機室外壁
取水槽	海中帯	海水ポンプ室 水路内床版
	干満帯	海水ポンプ室 水路内側壁
	気中帯	海水ポンプ室 基礎
非常用ディーゼル発電用燃料油タンク基礎		基礎
復水タンク基礎		タンク基礎

表 4. 2-5 アルカリ骨材反応の点検箇所

対象のコンクリート構造物	対象の部位	点検箇所
原子炉格納施設等	外部遮蔽壁	外部遮蔽壁（外部）
	内部コンクリート	1次遮蔽壁
	基礎マット	通路
原子炉補助建屋	外壁	ディーゼル発電機室 外壁
	内壁及び床	燃料ピット室
	使用済み燃料プール	プロセスモニタ線源校正エリア
	基礎マット	海水管トレンチエリア
タービン建屋	内壁及び床	タービン建屋 地下部
	基礎マット	タービン建屋 地下部
取水槽	海中帯	海水ポンプ室 水路内床版
	干満帯	海水ポンプ室 水路内側壁
	気中帯	海水ポンプ室 基礎
タービン架台		タービン建屋 1階部
非常用ディーゼル発電用燃料油タンク基礎		基礎
復水タンク基礎		タンク基礎

5. 点検結果

点検結果を表5-1～表5-5に示す。

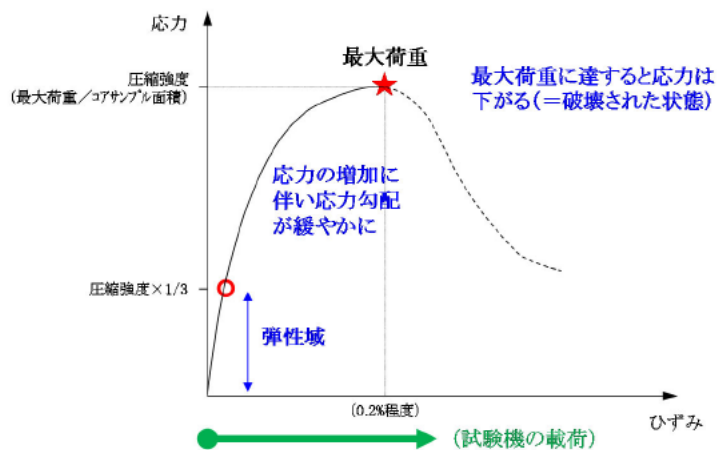
表5-1 高浜4号炉 強度の点検結果

対象のコンクリート構造物		対象の部位	平均圧縮強度※ (N/mm ²)	点検実施日
原子炉格納施設等		外部遮蔽壁	41.1	2022年7月19日
		内部コンクリート	37.7	2022年7月19日
		基礎マット	58.0	2022年10月14日
原子炉補助建屋		外壁	62.2	2022年3月15日
		内壁及び床	48.2	2022年3月7日
		使用済み燃料プール	43.9	2022年1月28日
		基礎マット	35.5	2022年3月7日
タービン建屋		内壁及び床	56.1	2022年2月10日
		基礎マット	68.6	2022年1月28日
取水槽		海中帯	41.5	2022年7月26日
		干満帯	50.1	2022年7月26日
		気中帯	57.2	2022年1月21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	タービン建屋内 (タービン架台を含む。)	タービン架台	26.7	2022年3月7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)	56.7	2022年2月7日
		復水タンク基礎	42.7	2021年12月23日

※コアサンプル3本の平均値

(参考)

コンクリート構造物の特別点検における『強度』については、コンクリートの圧縮時の応力-ひずみ関係図に基づき、試験機が最大荷重を示す時の応力 (=圧縮強度) を点検結果としている。



コンクリートの圧縮時の応力-ひずみ関係図



強度の点検状況 (例)



大きく破壊されたコアサンプル(左端) (例)

表5-2 高浜4号炉 遮蔽能力の点検結果

対象のコンクリート構造物	対象の部位	平均乾燥単位 容積質量* (g/cm ³)	点検 実施日
原子炉格納施設等	外部遮蔽壁	2.186	2022年1月18日～ 2022年3月12日
	内部コンクリート	2.260	2022年6月30日～ 2022年9月5日
原子炉補助建屋	外壁	2.213	2021年12月21日～ 2022年1月31日
	内壁及び床	2.229	2022年1月18日～ 2022年3月6日

※コアサンプル3本の平均値

表 5-3 高浜 4 号炉 中性化の点検結果

対象のコンクリート構造物		対象の部位	平均中性化深さ※ (mm)	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
取水槽		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	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

※ 採取孔 3 箇所 の平均値

表5-4 高浜4号炉 塩分浸透の点検結果

対象の コンクリート構造物	対象の部位	点検結果						点検実施日
		平均塩化物イオン濃度(%) [*]						
	表面からの 深さ(mm)	0~20	20~40	40~60	60~80	80~100	100~120	
原子炉格納施設等	外部遮蔽壁	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	2022年6月4日～ 2022年6月22日
原子炉補助建屋	外壁	0.02	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01	2022年3月11日～ 2022年3月20日
取水槽	海中帯	0.40	0.29	0.21	0.11	0.04	0.02	2022年7月19日～ 2022年8月5日
	干満帯	0.13	0.09	0.05	0.02	0.01	0.01	2022年7月19日～ 2022年7月26日
	気中帯	0.04	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	2022年1月14日～ 2022年1月25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（配管トレントリ含む）	0.02	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	2022年2月2日～ 2022年2月15日
	復水タンク基礎	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	2021年12月17日～ 2021年12月27日

※コアサンプル3本の平均値

表 5-5 高浜 4 号炉 アルカリ骨材反応の点検結果

対象のコンクリート構造物		対象の部位	点検結果	
			実体顕微鏡観察結果	点検実施日
原子炉格納施設等		外部遮蔽壁	反応性なし	2022 年 6 月 15 日
		内部コンクリート	反応性なし	2022 年 6 月 29 日
		基礎マット	反応性なし	2022 年 10 月 15 日
原子炉補助建屋		外壁	反応性なし	2022 年 4 月 21 日
		内壁及び床	反応性なし	2022 年 2 月 10 日
		使用済み燃料プール	反応性なし	2022 年 2 月 10 日
		基礎マット	反応性なし	2022 年 4 月 21 日
タービン建屋		内壁及び床	反応性なし	2022 年 2 月 10 日
		基礎マット	反応性なし	2022 年 2 月 10 日
取水槽		海中帯	反応性なし	2022 年 8 月 5 日
		干満帯	反応性なし	2022 年 8 月 5 日
		気中帯	反応性なし	2022 年 2 月 10 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	タービン建屋内 (タービン架台を含む)	タービン架台	反応性なし	2022 年 2 月 10 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)	反応性なし	2022 年 2 月 10 日
		復水タンク基礎	反応性なし	2022 年 2 月 10 日

6. まとめ

コンクリート構造物の特別点検においては、これまでの高経年化技術評価では確認していなかった範囲を含め、使用材料および使用環境条件が最も厳しい箇所から採取したコアサンプルにより、強度、遮蔽能力、中性化、塩分浸透およびアルカリ骨材反応の5つの点検項目について点検を実施した。また、得られた結果を用いて、20年間の運転期間延長に伴う劣化状況評価を行っている。

点検箇所選定のために実施した環境測定や非破壊試験により、様々なデータを得ることが出来た。これらのデータを、今後の保全活動に有効に活用していくものとする。

【参考文献】

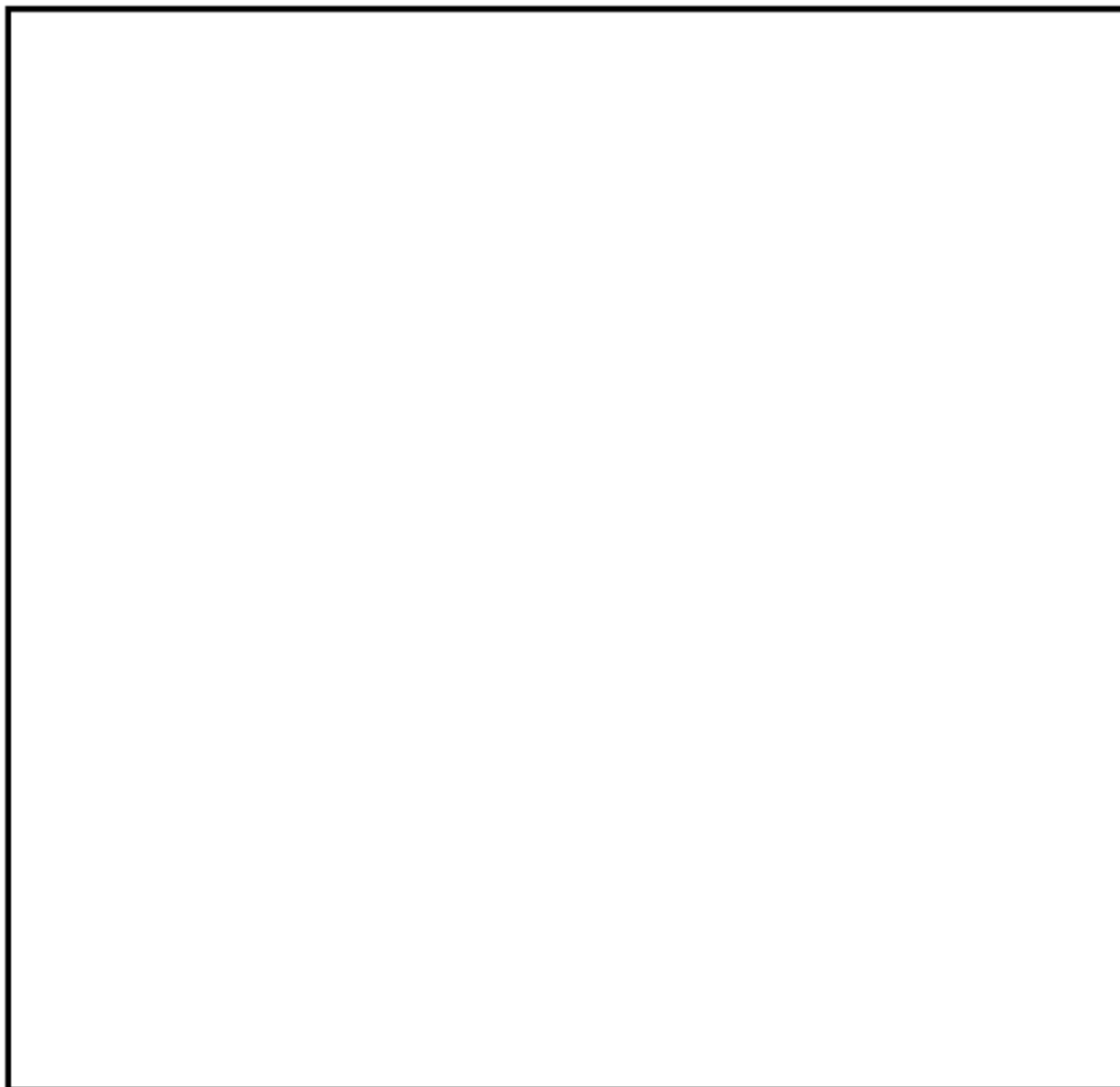
- 1) 実用発電用原子炉の運転期間延長認可申請に係る運用ガイド(原管P発第1306197号 改正令和2年3月31日 原規発第20033110号 原子力規制委員会決定)
- 2) 米澤敏男ほか、日本建築学会大会学術講演梗概集(関東)2015年9月「既存構造物における遮蔽コンクリートの乾燥単位容積質量試験方法の検討(その4 コア供試体による乾燥単位容積質量試験方法の検討)」
- 3) 徳永将司ほか、日本建築学会大会学術講演梗概集(関東)2015年9月「既存構造物における遮蔽コンクリートの乾燥単位容積質量試験方法の検討(その3 コア供試体による乾燥単位容積質量の実験)」
- 4) 安全研究成果報告 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、原子力規制庁 長官官房技術基盤グループ)
- 5) 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、独立行政法人原子力安全基盤機構)
- 6) 株式会社太平洋コンサルタント HP
(<https://www.taiheiyo-c.co.jp/cement/asr/>)
- 7) アルカリ骨材反応による劣化を受けた道路橋の橋脚・橋台躯体に関する補修・補強ガイドライン(案)(平成20年3月 ASRに関する対策検討委員会)
- 8) 森永繁、鉄筋の腐食速度に基づいた鉄筋コンクリート構造物の寿命予測に関する研究(東京大学学位論文、1986)


別紙1 点検箇所選定のための非破壊試験位置

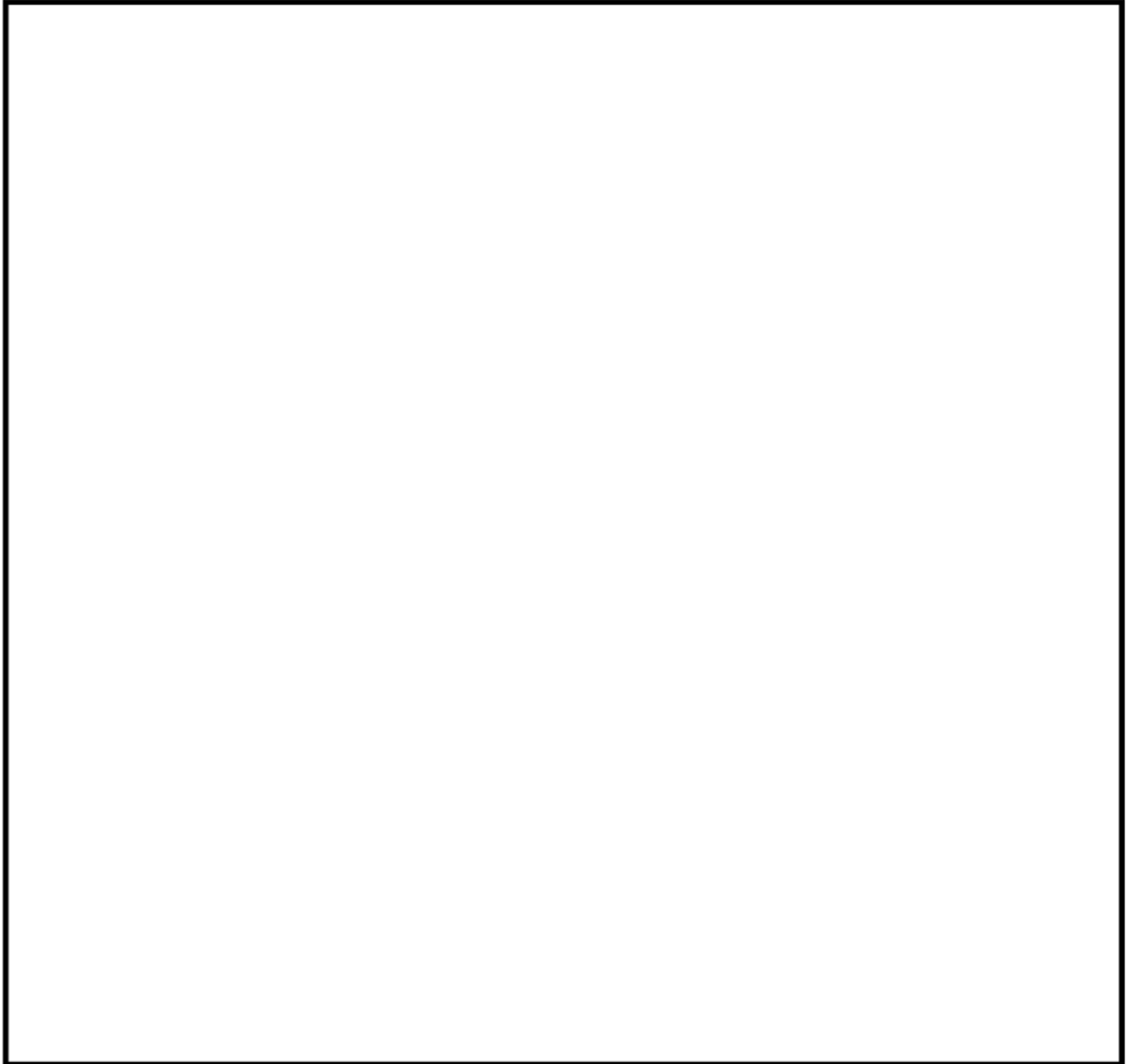
遮蔽能力および中性化の点検については、点検箇所選定のためにリバウンドハンマーによる非破壊検査を実施している。本資料はその位置を示すものである。


1. 遮蔽能力

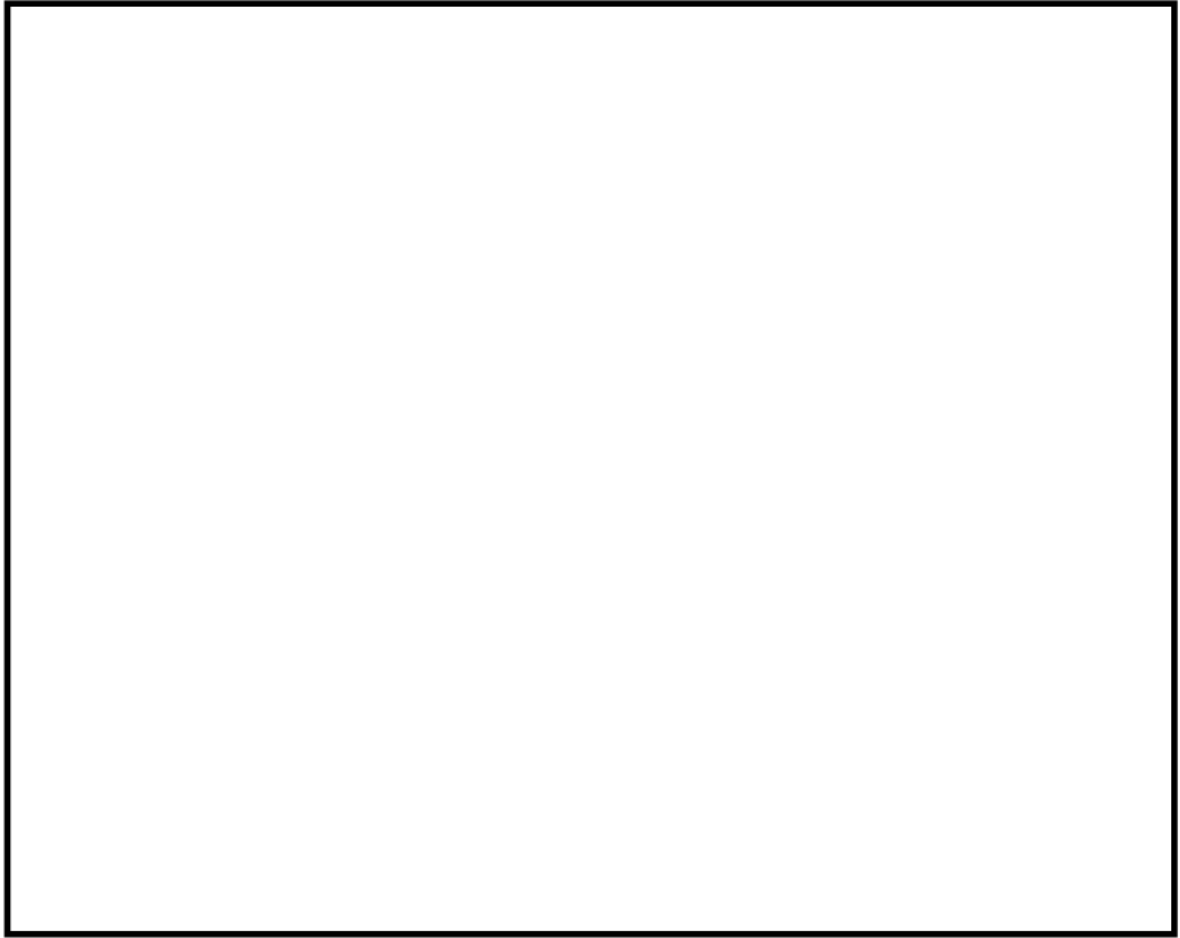
遮蔽能力の点検箇所選定のために実施したリバウンドハンマーによる非破壊試験位置を図一別紙1-1～図一別紙1-3に示す。




図一別紙1-1 高浜4号炉 非破壊試験実施位置（遮蔽能力）
（原子炉補助建屋 ）



図一別紙 1 - 2 高浜 4 号炉 非破壊試験実施位置 (遮蔽能力)
(原子炉格納施設等 )




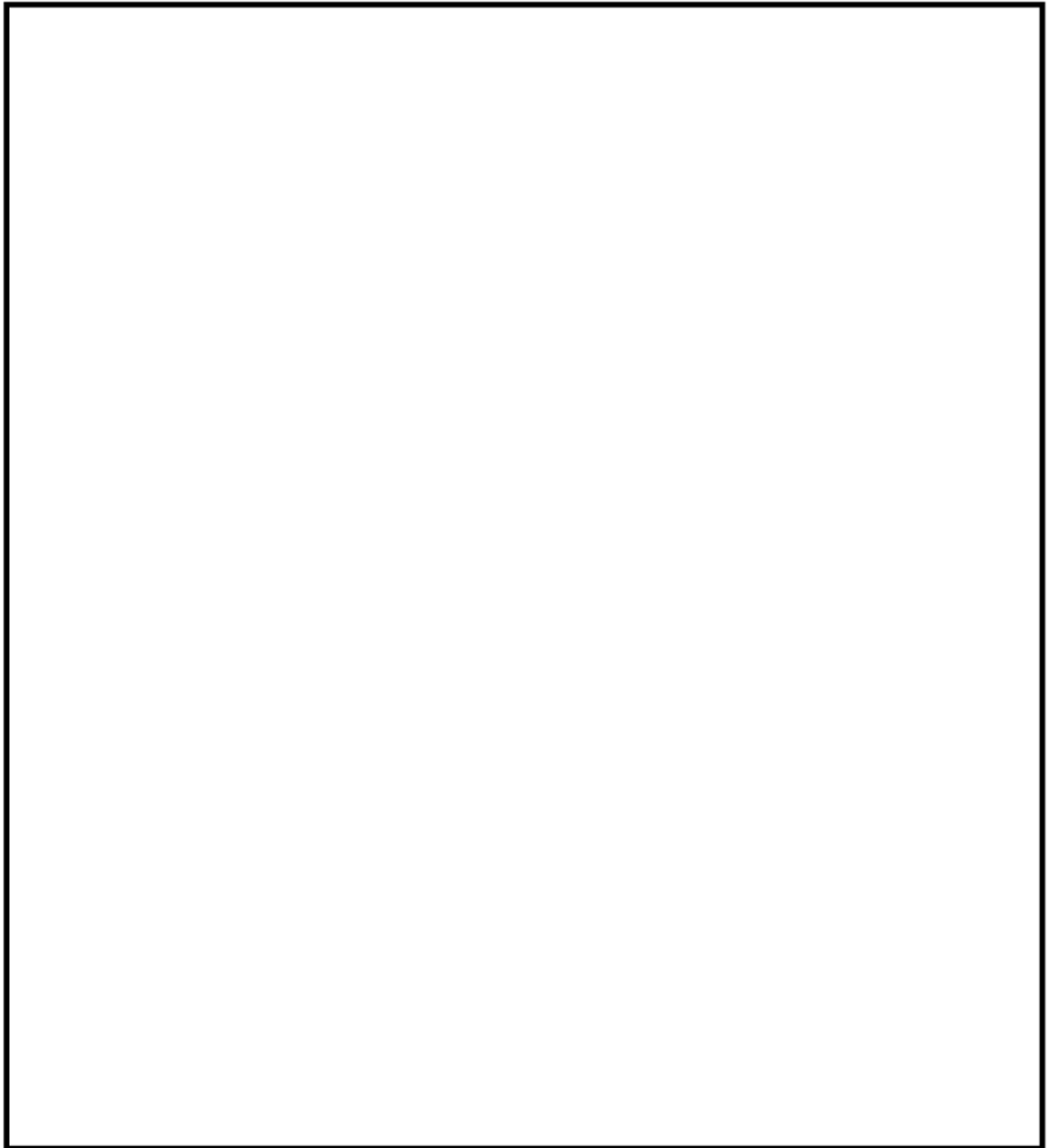
図－別紙 1－3 高浜 4 号炉 非破壊試験実施位置（遮蔽能力）
（原子炉格納施設等 ）


2. 中性化

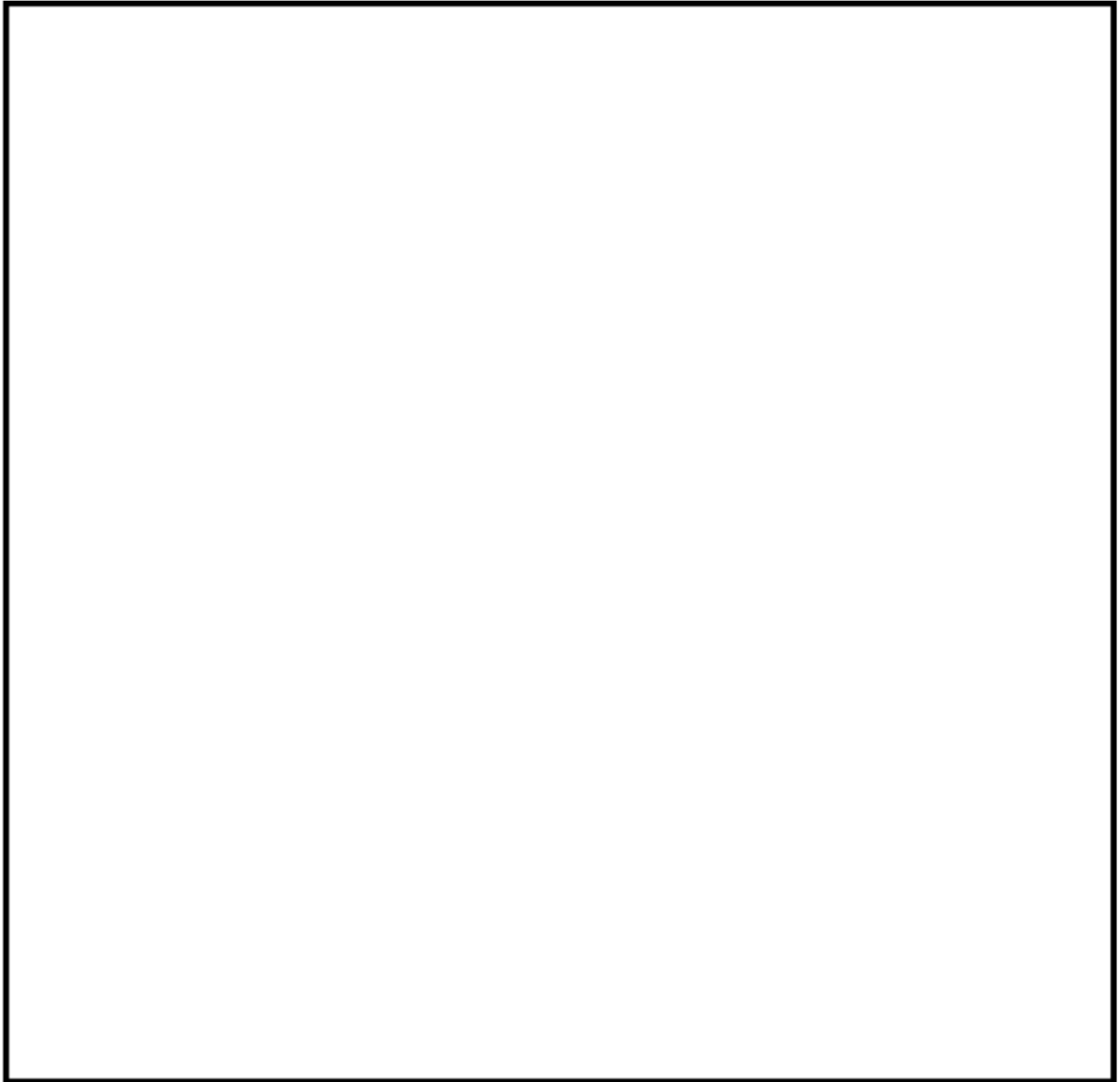
中性化の点検箇所選定のために実施したリバウンドハンマーによる非破壊試験位置を図一別紙 1-4～図一別紙 1-12 に示す。




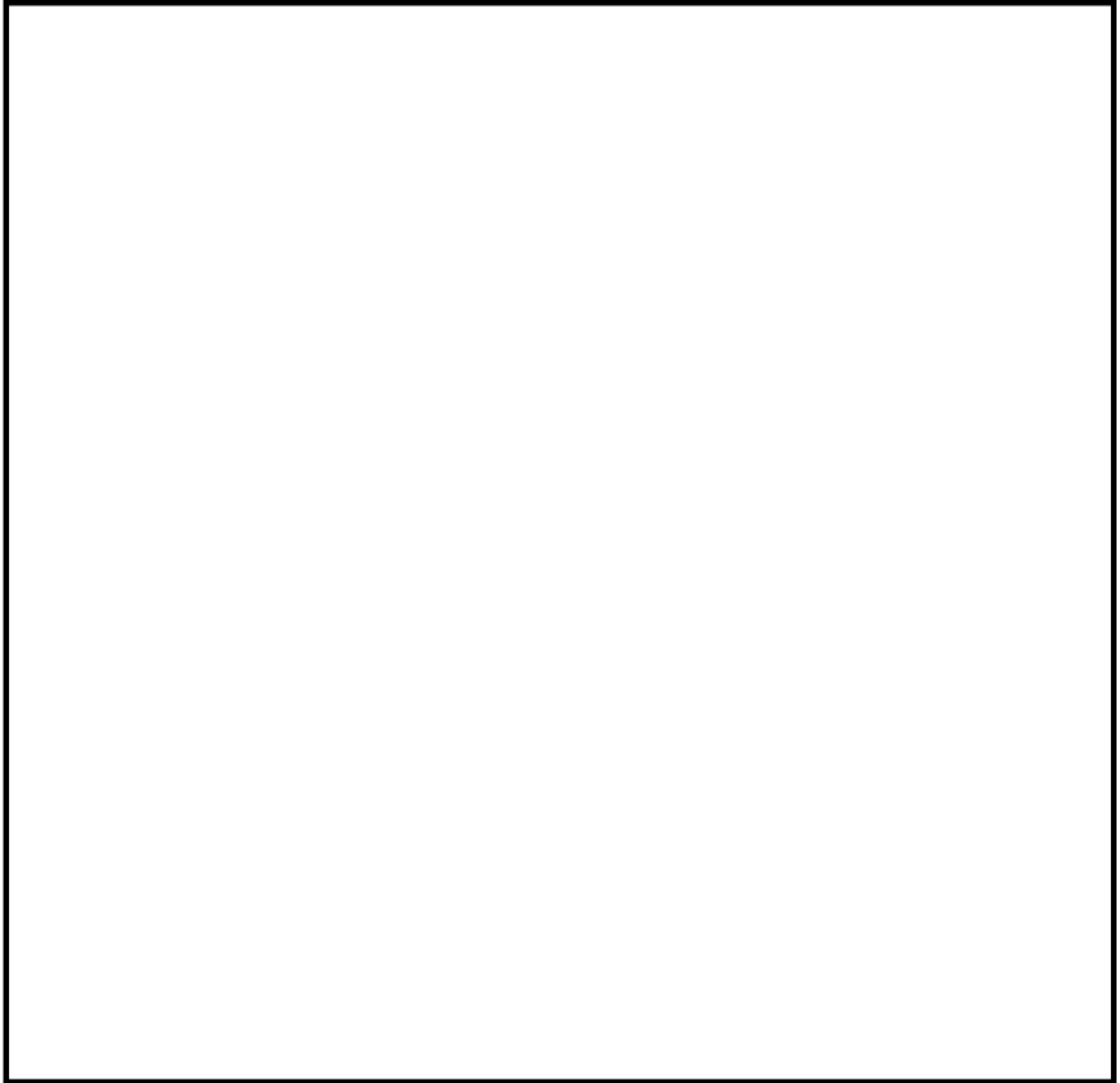
図一別紙 1-4 高浜 4 号炉 非破壊試験実施位置 (中性化)
(タービン建屋 )




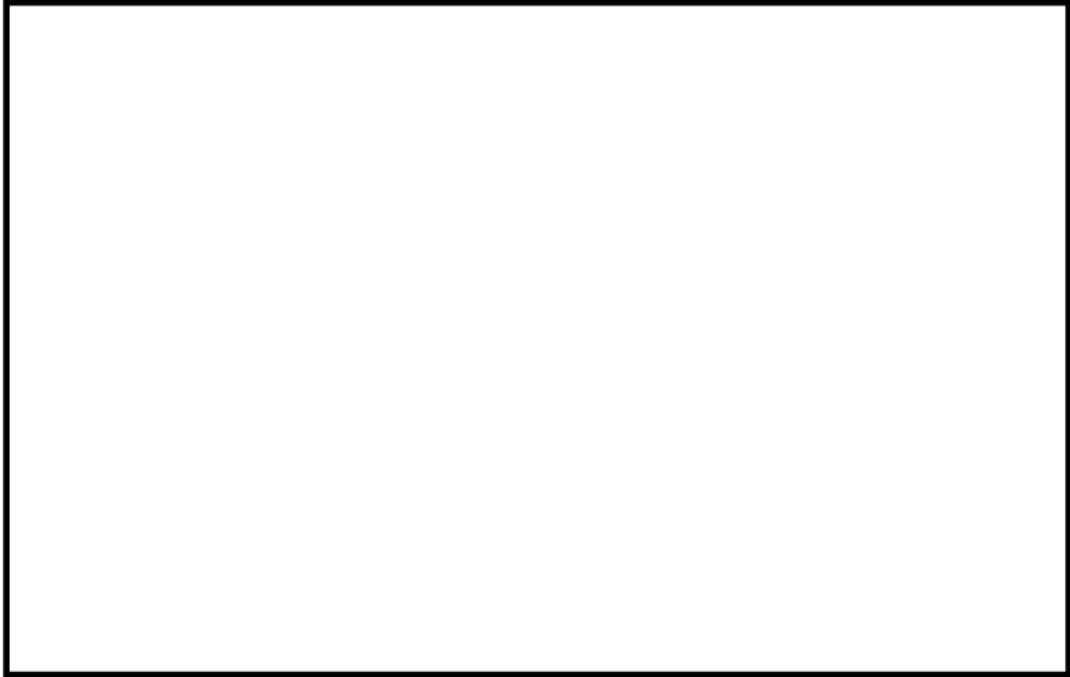
図一別紙 1 - 5 高浜 4 号炉 非破壊試験実施位置 (中性化)
(原子炉補助建屋、タービン建屋 )




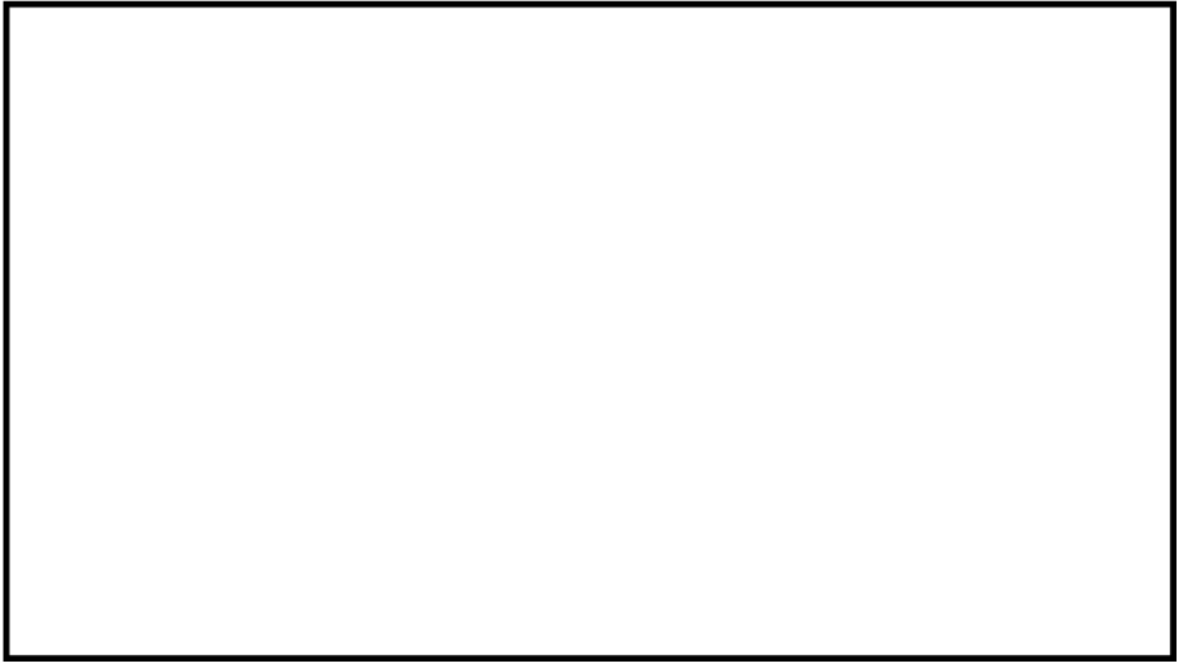
図一別紙 1 - 6 高浜 4 号炉 非破壊試験実施位置 (中性化)
(原子炉格納施設等、タービン架台 )



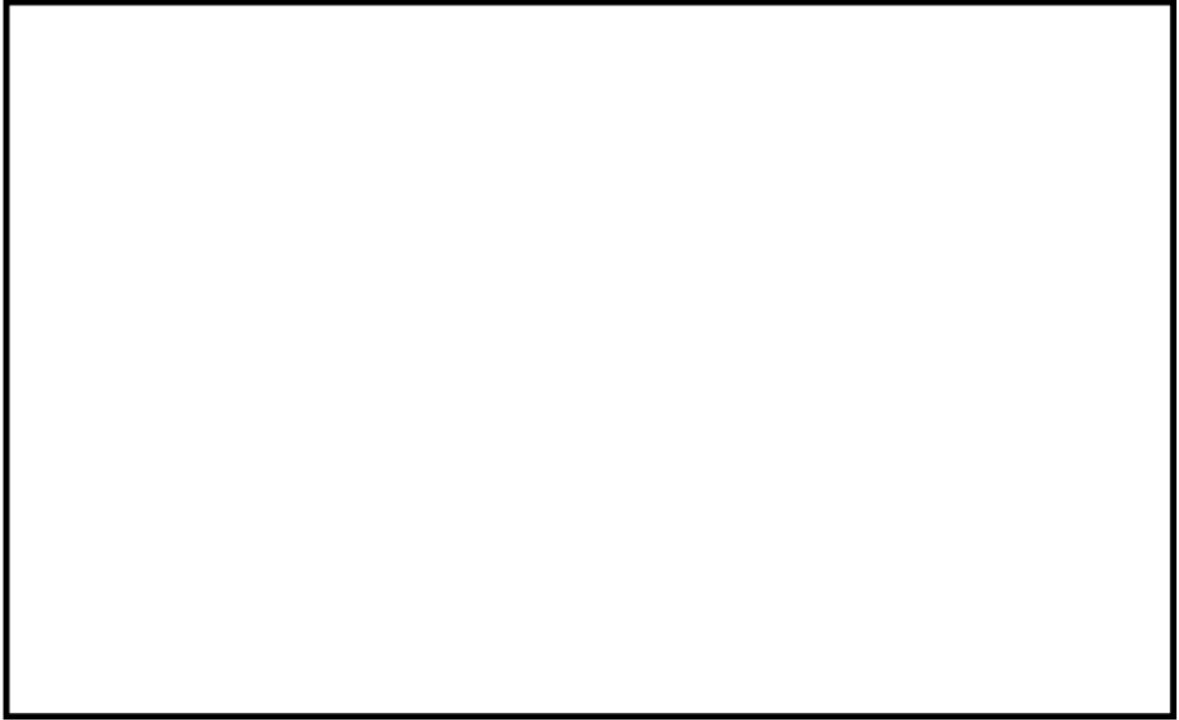
図一別紙 1 - 7 高浜 4 号炉 非破壊試験実施位置 (中性化)
(原子炉補助建屋 )



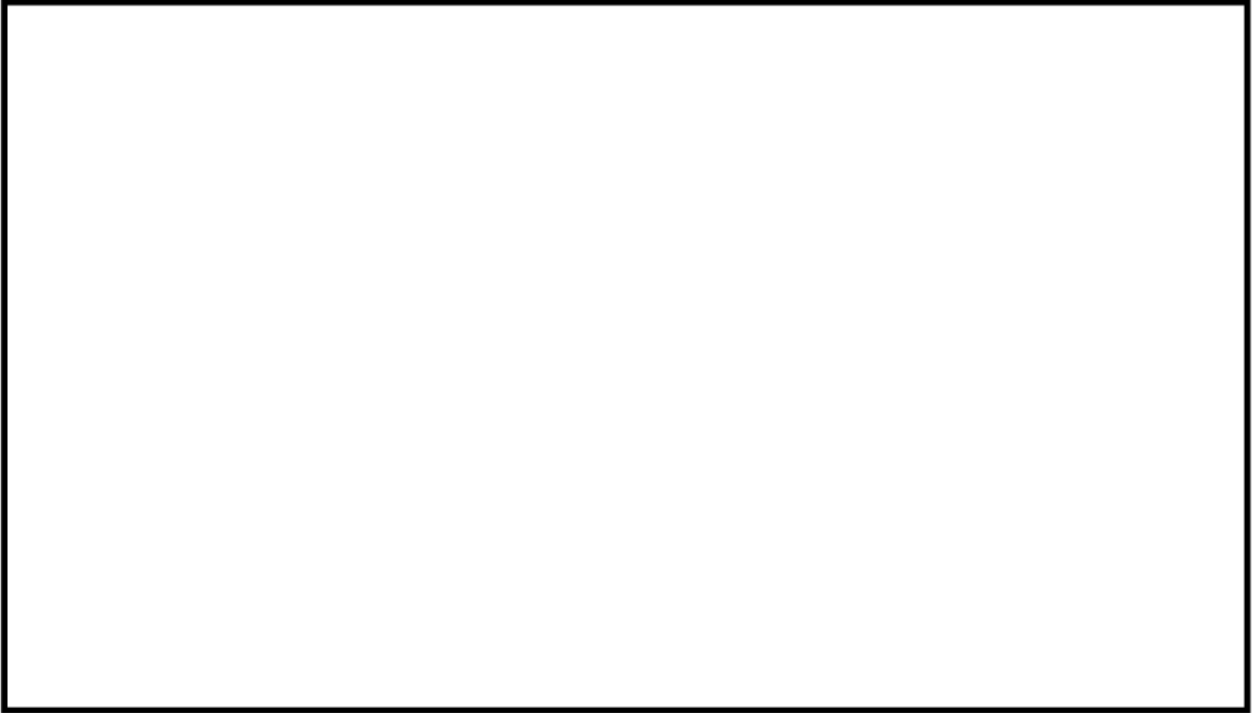
図一別紙 1 - 8 高浜 4 号炉 非破壊試験実施位置 (中性化)
(原子炉格納施設等 )



図一別紙 1 - 9 高浜 4 号炉 非破壊試験実施位置 (中性化)
(取水構造物 気中帯)



図一別紙 1 - 1 0 高浜 4 号炉 非破壊試験実施位置 (中性化)
(取水構造物 干満帯)

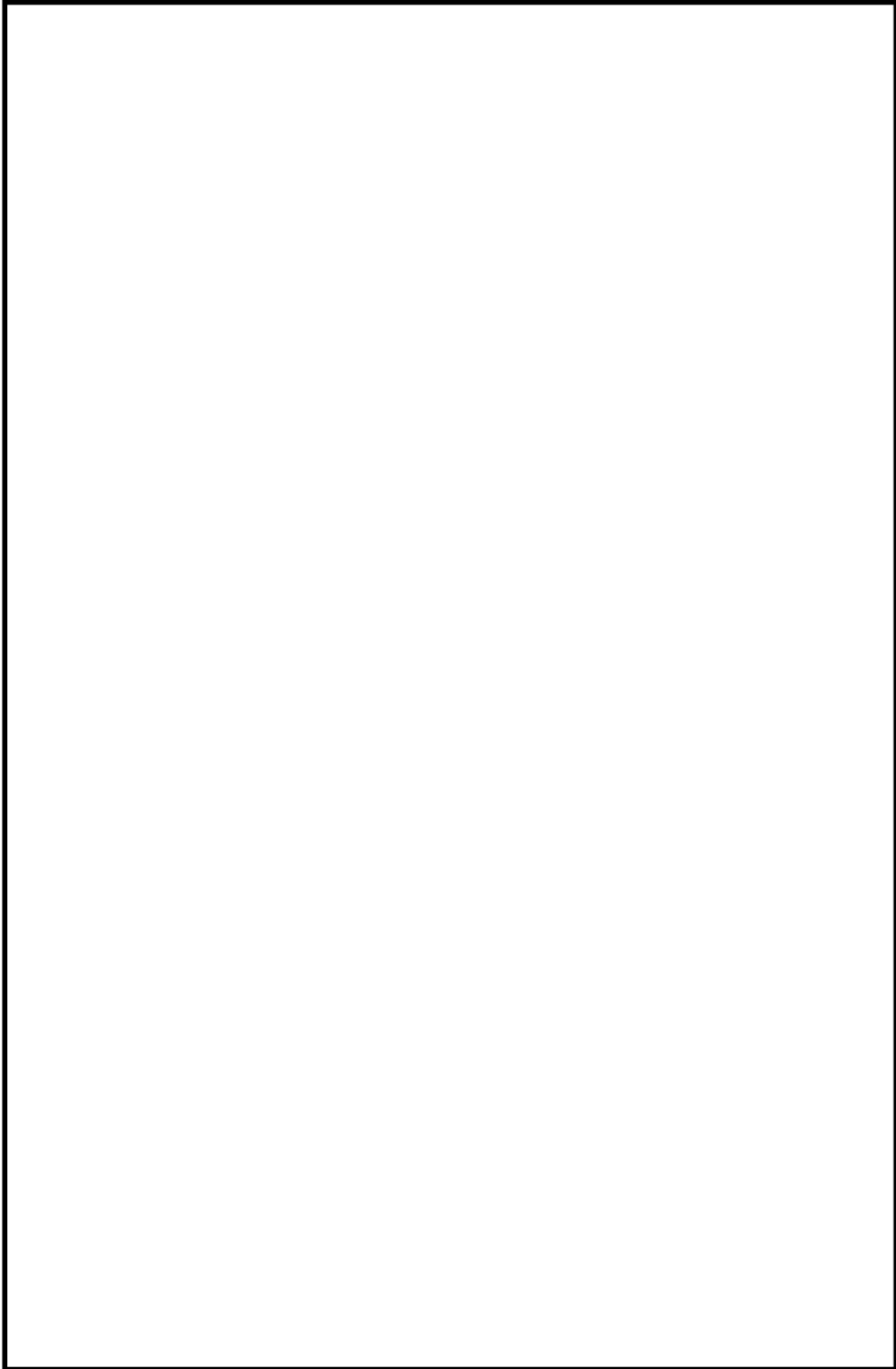


図一別紙 1 - 1 1 高浜 4 号炉 非破壊試験実施位置 (中性化)
(取水構造物 海中帯)

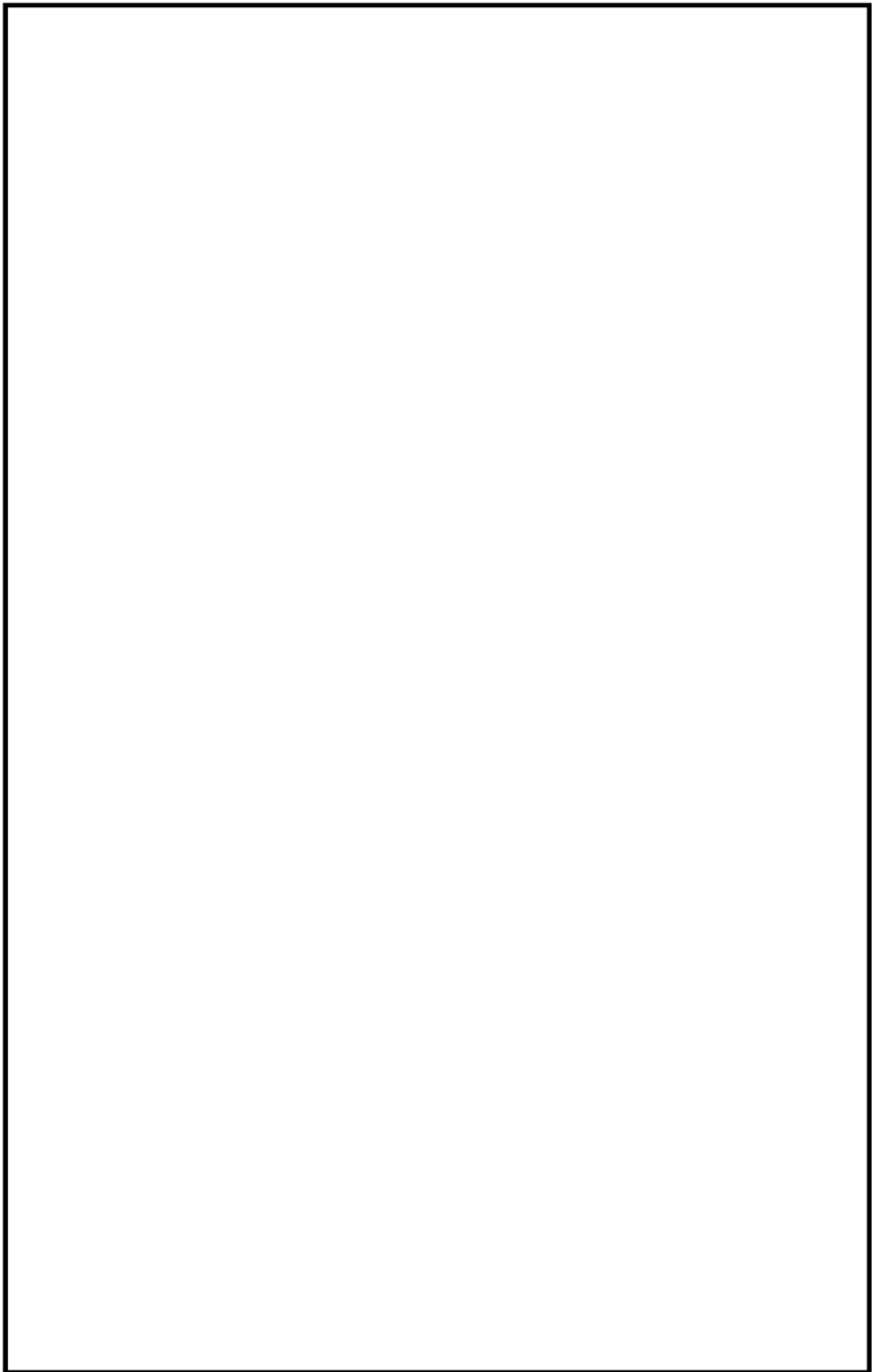


図一別紙 1 - 1 2 高浜 4 号炉 非破壊試験実施位置 (中性化)
(非常用ディーゼル発電機燃料油タンク基礎、復水タンク基礎)

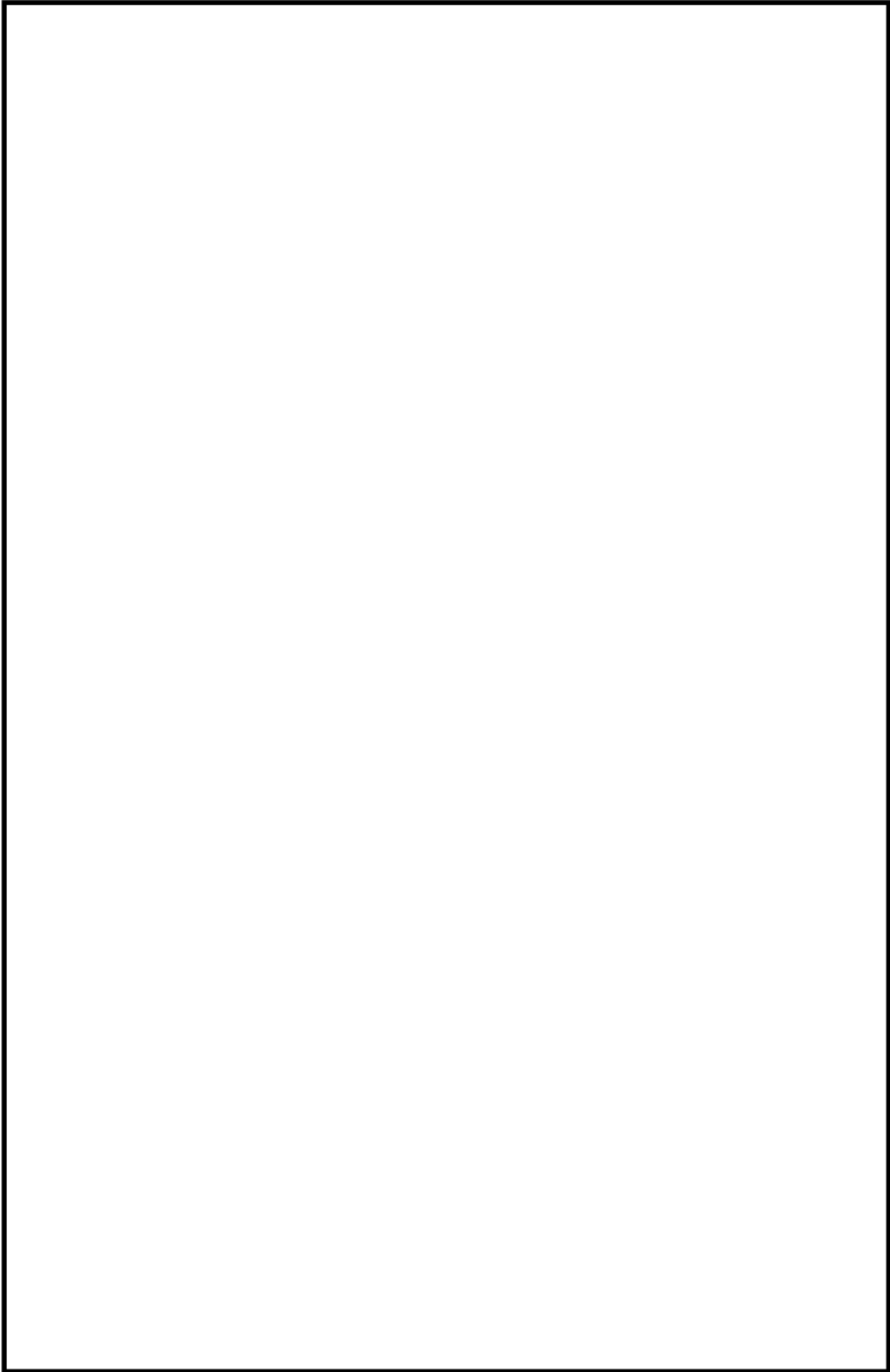
別紙2 空気環境測定位置



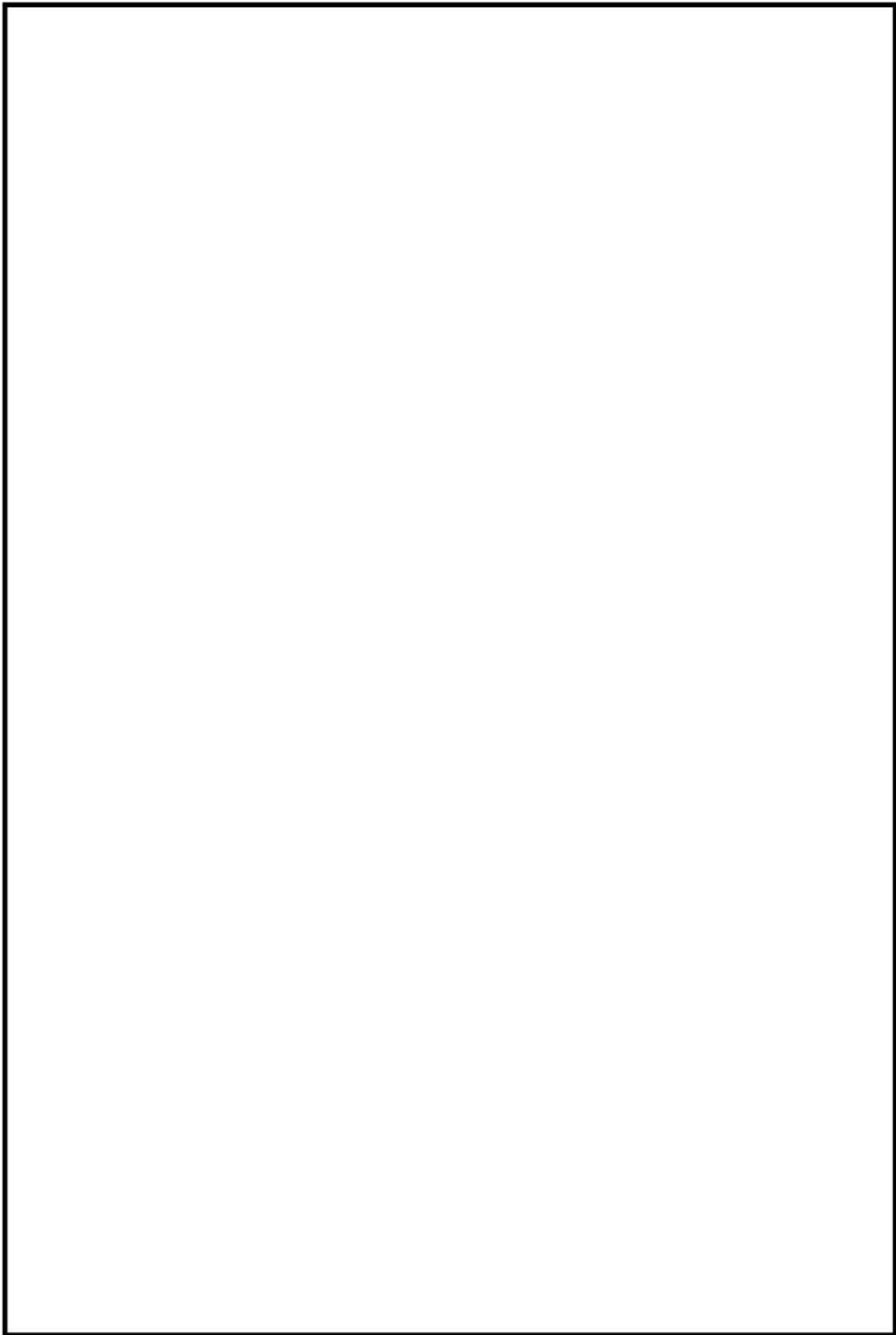
図一別紙2 空気環境測定箇所 (1 / 6)



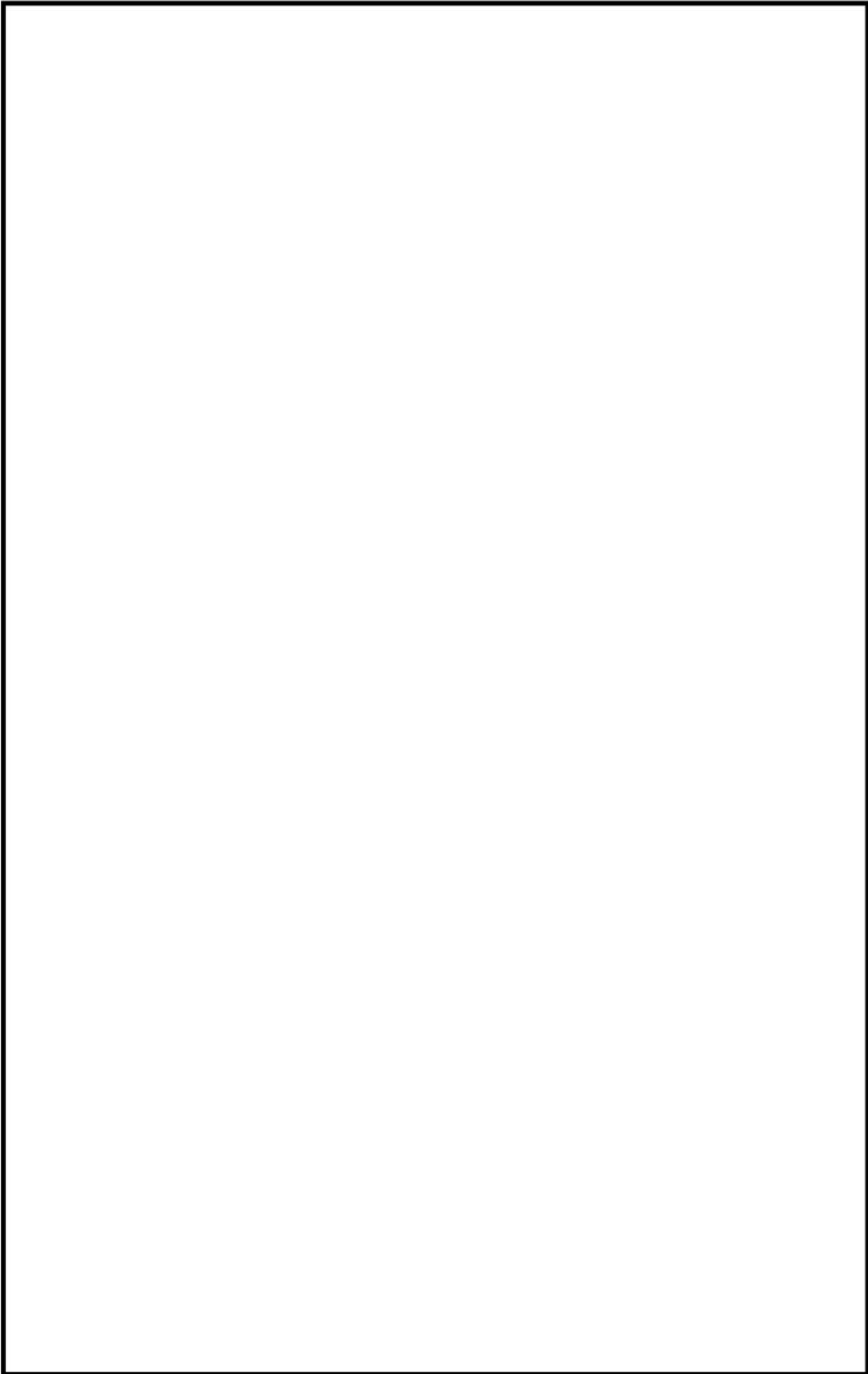
図一別紙2 空気環境測定箇所（2／6）



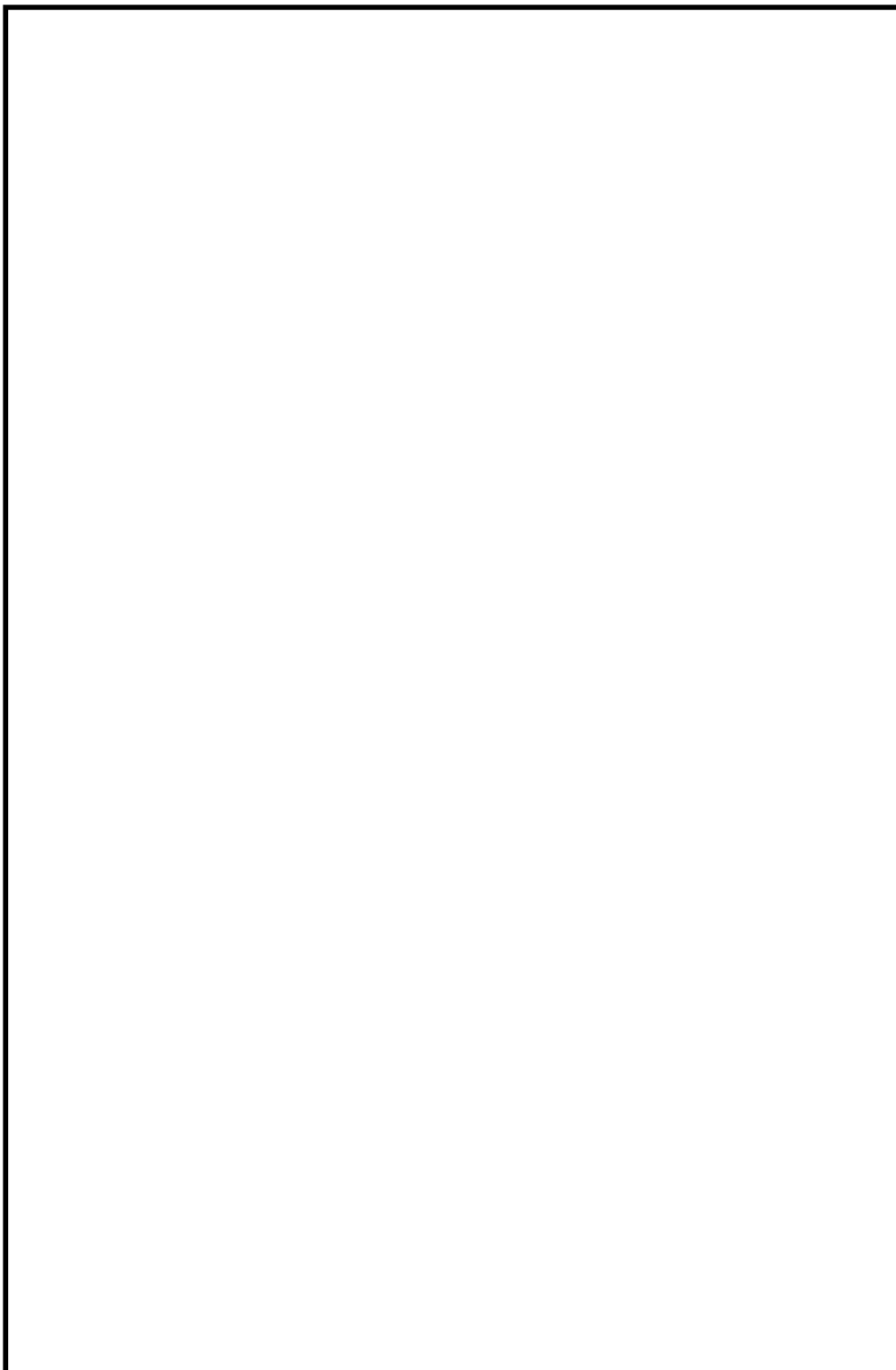
図一別紙2 空気環境測定箇所 (3 / 6)



図一別紙2 空気環境測定箇所（4／6）

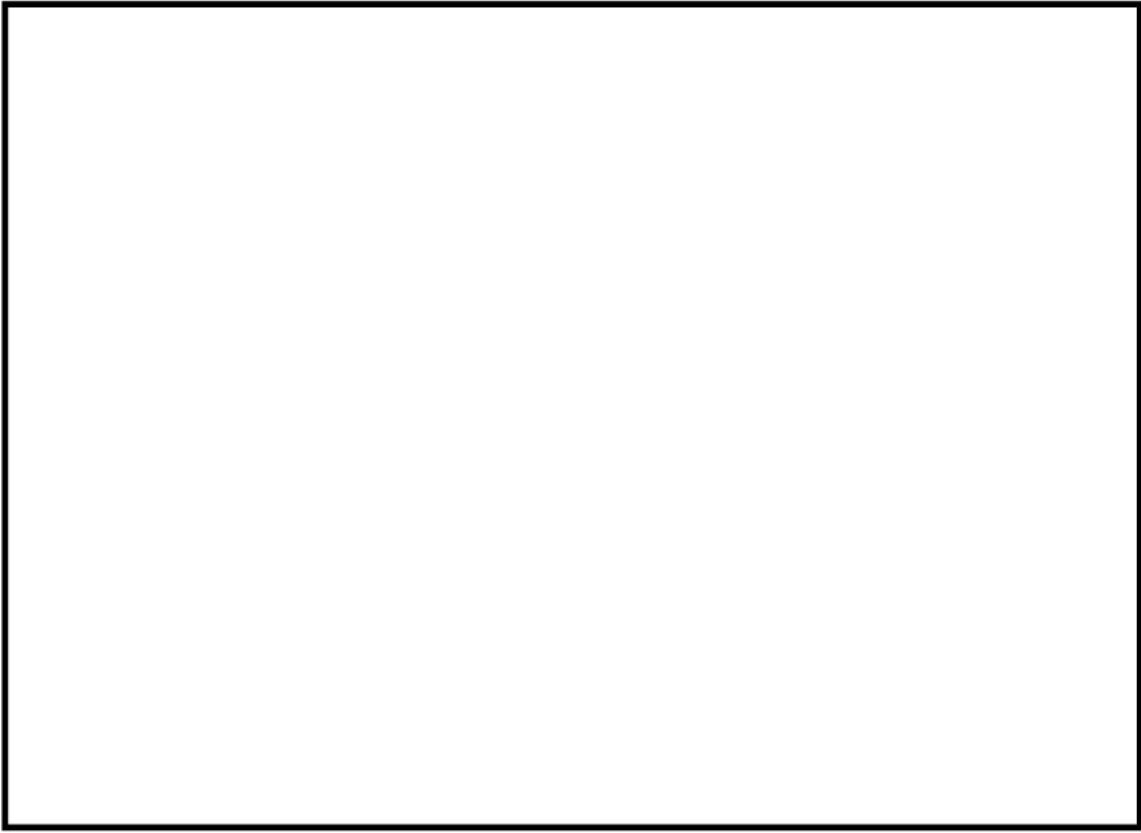



図一別紙2 空気環境測定箇所（5 / 6）

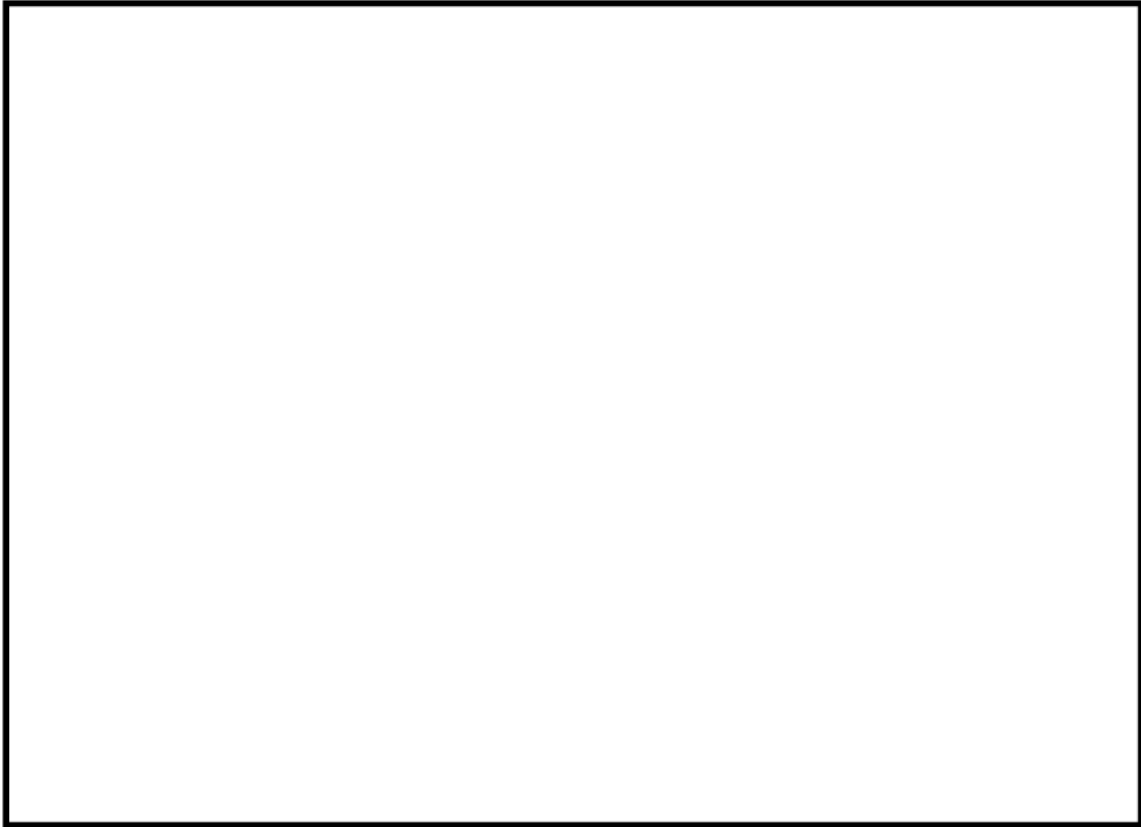


図一別紙2 空気環境測定箇所（6 / 6）

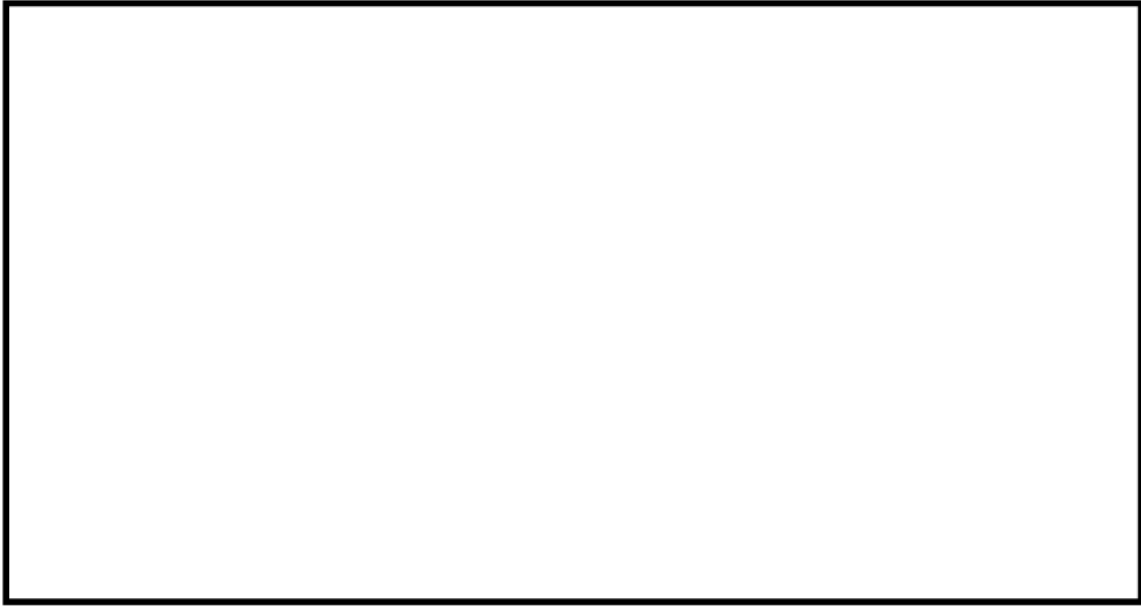
別紙3 塩分量測定位置



図一別紙3-1 高浜4号炉 塩分量測定位置
(原子炉補助建屋 )



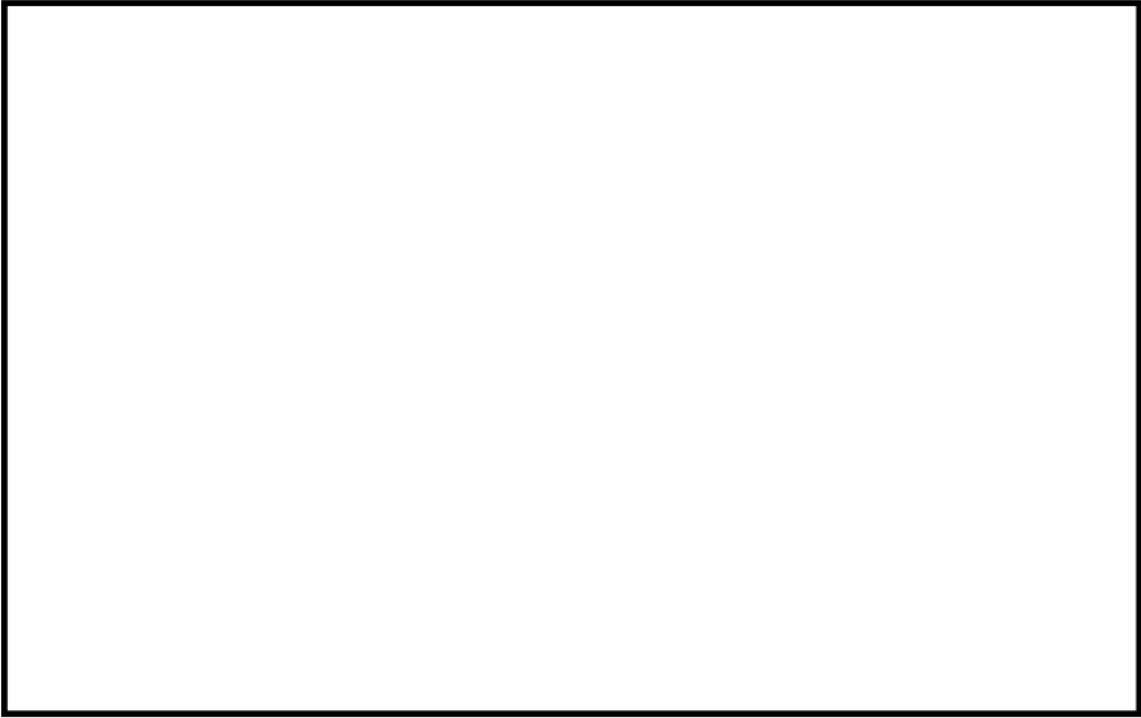
図一別紙 3 - 2 高浜 4 号炉 塩分量測定位置
(原子炉補助建屋)



図一別紙 3 - 3 高浜 4 号炉 塩分量測定位置
(原子炉格納施設等)



図一別紙3-4 高浜4号炉 塩分量測定位置
(取水構造物 気中帯)



図一別紙 3 - 5 高浜 4 号炉 塩分量測定位置
(取水構造物 干満帯)

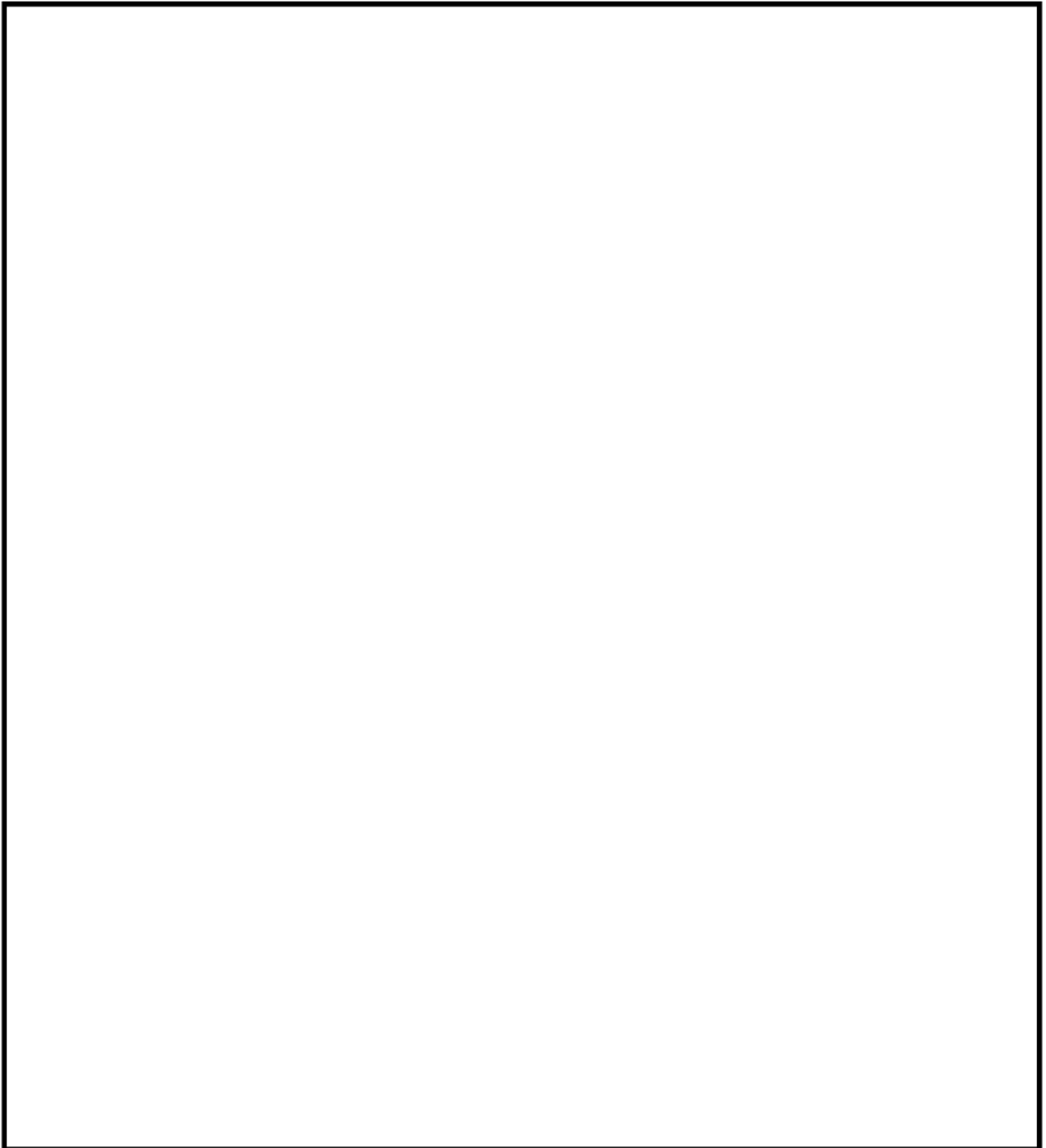



図一別紙 3 - 6 高浜 4 号炉 塩分量測定位置
(取水構造物 海中帯)

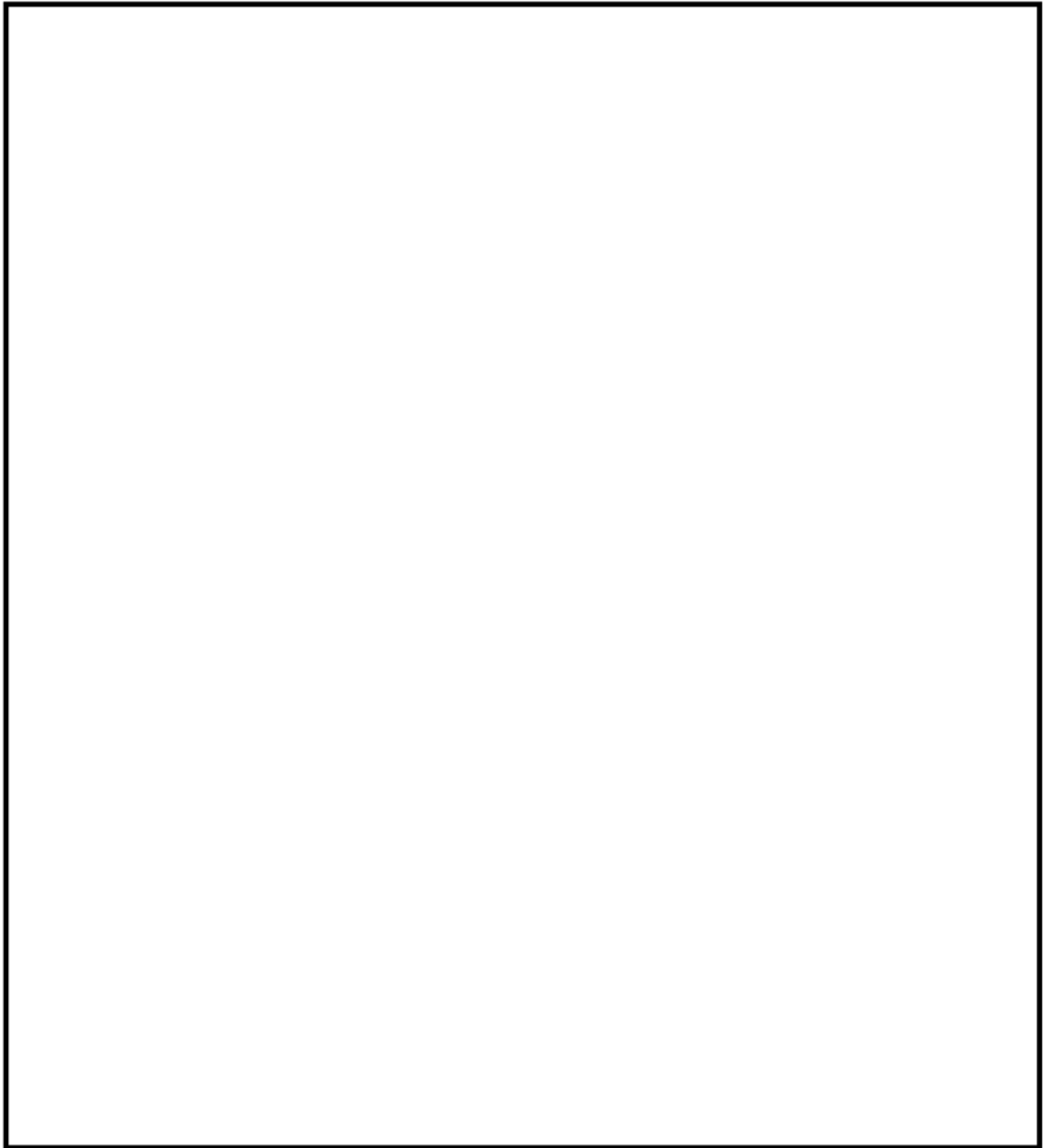


図－別紙 3－7 高浜 4 号炉 塩分量測定位置
(非常用ディーゼル発電機燃料油タンク基礎、復水タンク基礎)

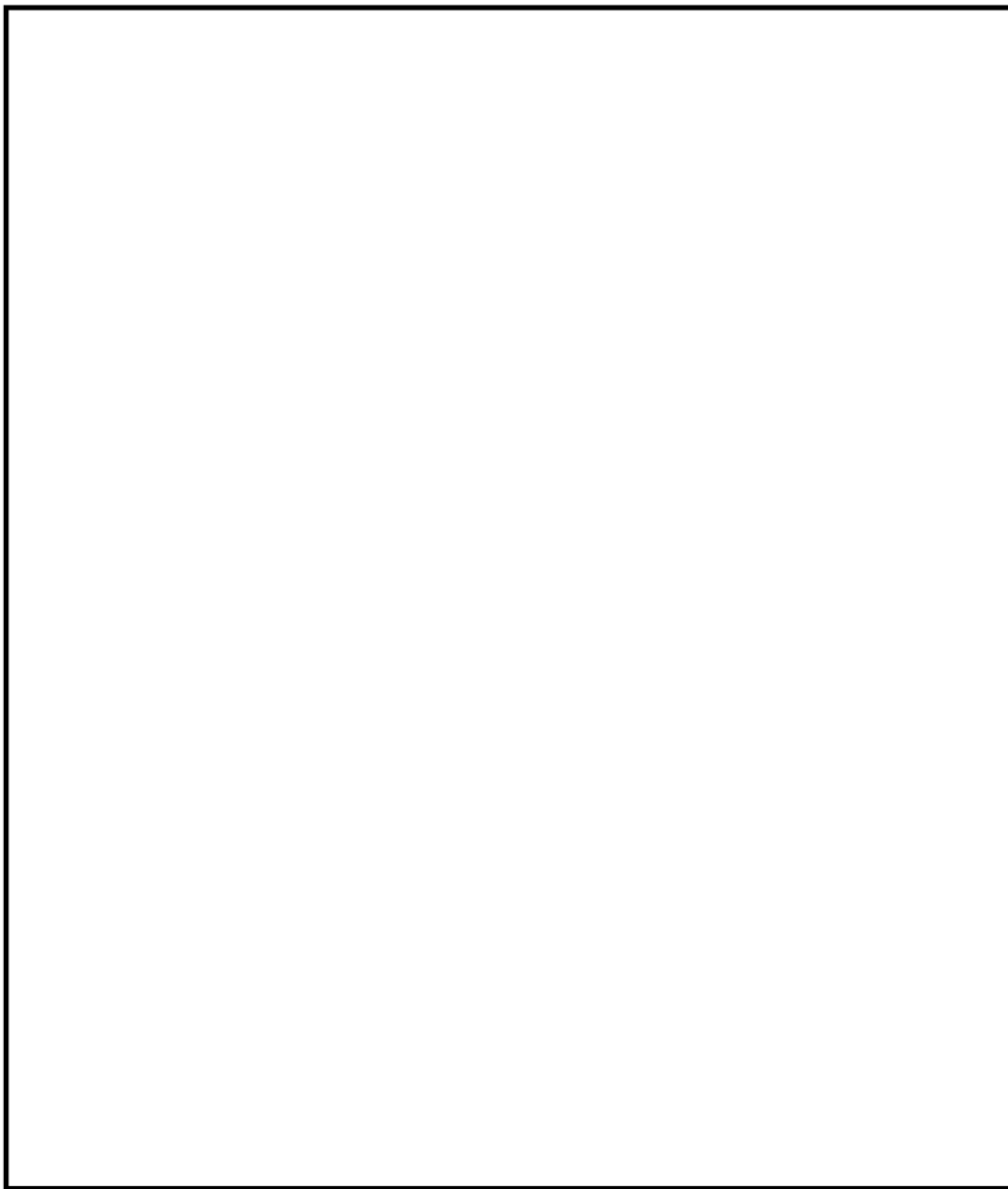
別紙4 特別点検実施位置



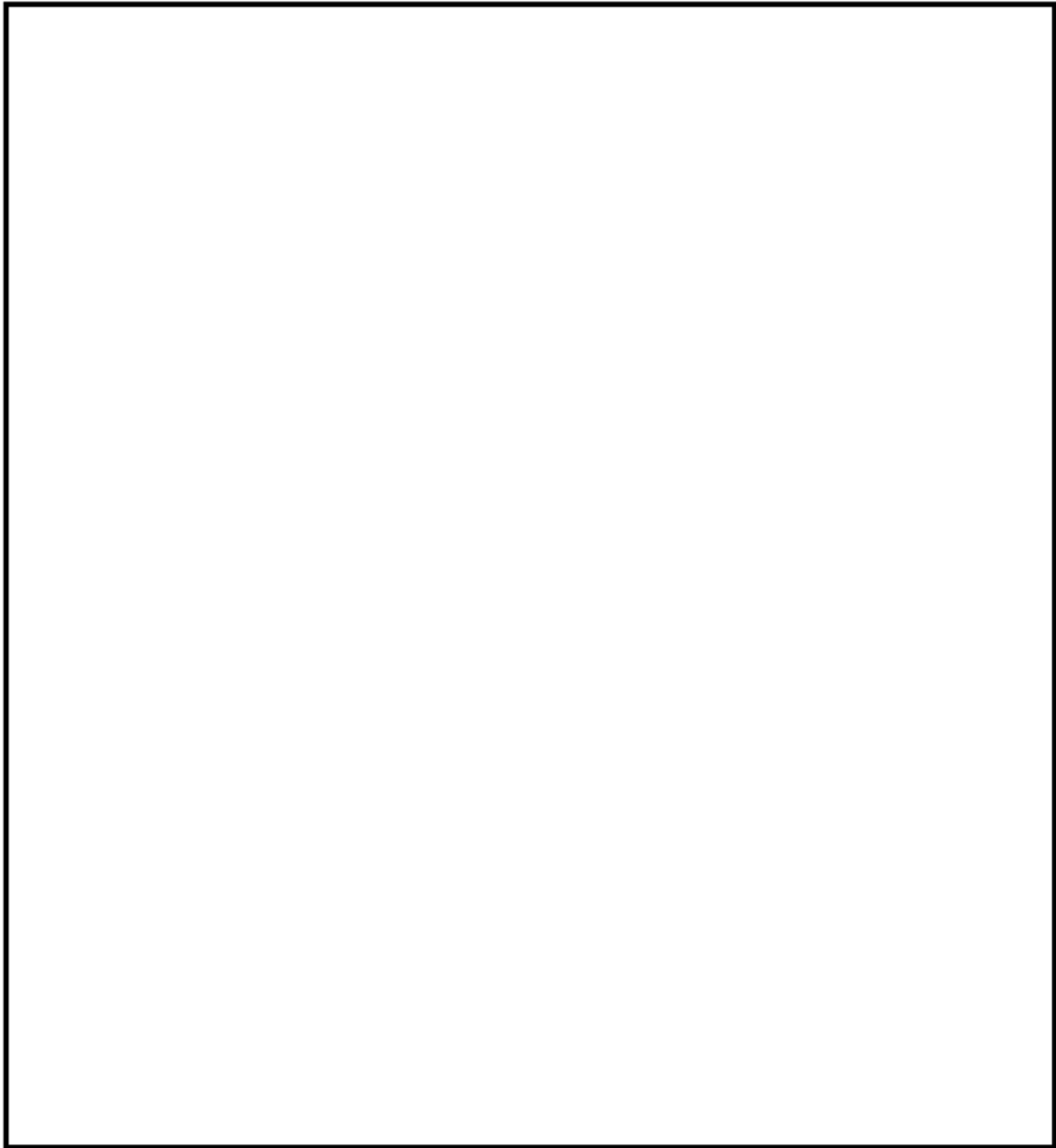
図－別紙4－1 高浜4号炉 特別点検実施位置
(原子炉補助建屋、タービン建屋 )




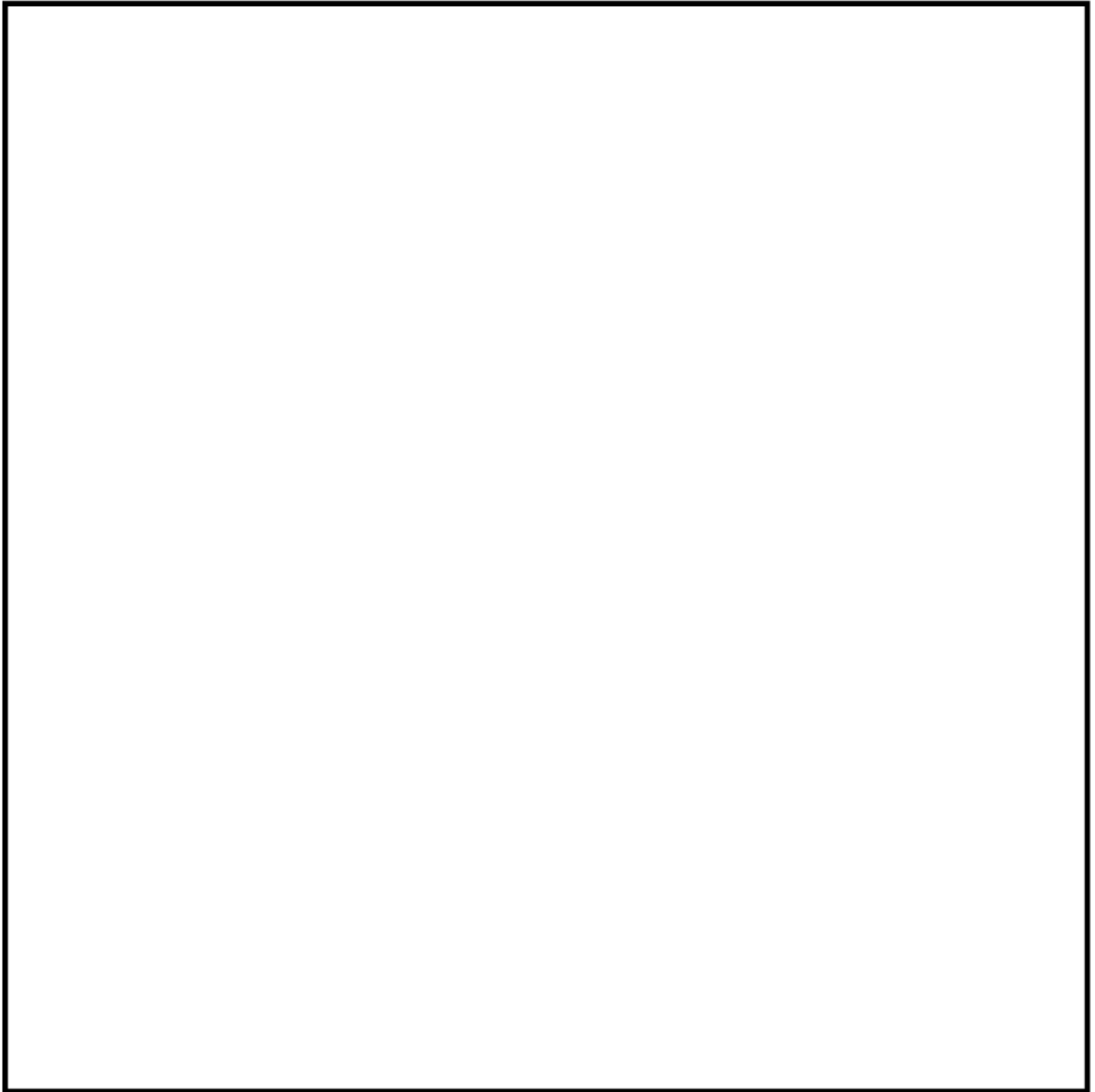
図一別紙4-2 高浜4号炉 特別点検実施位置
(原子炉補助建屋、タービン建屋)




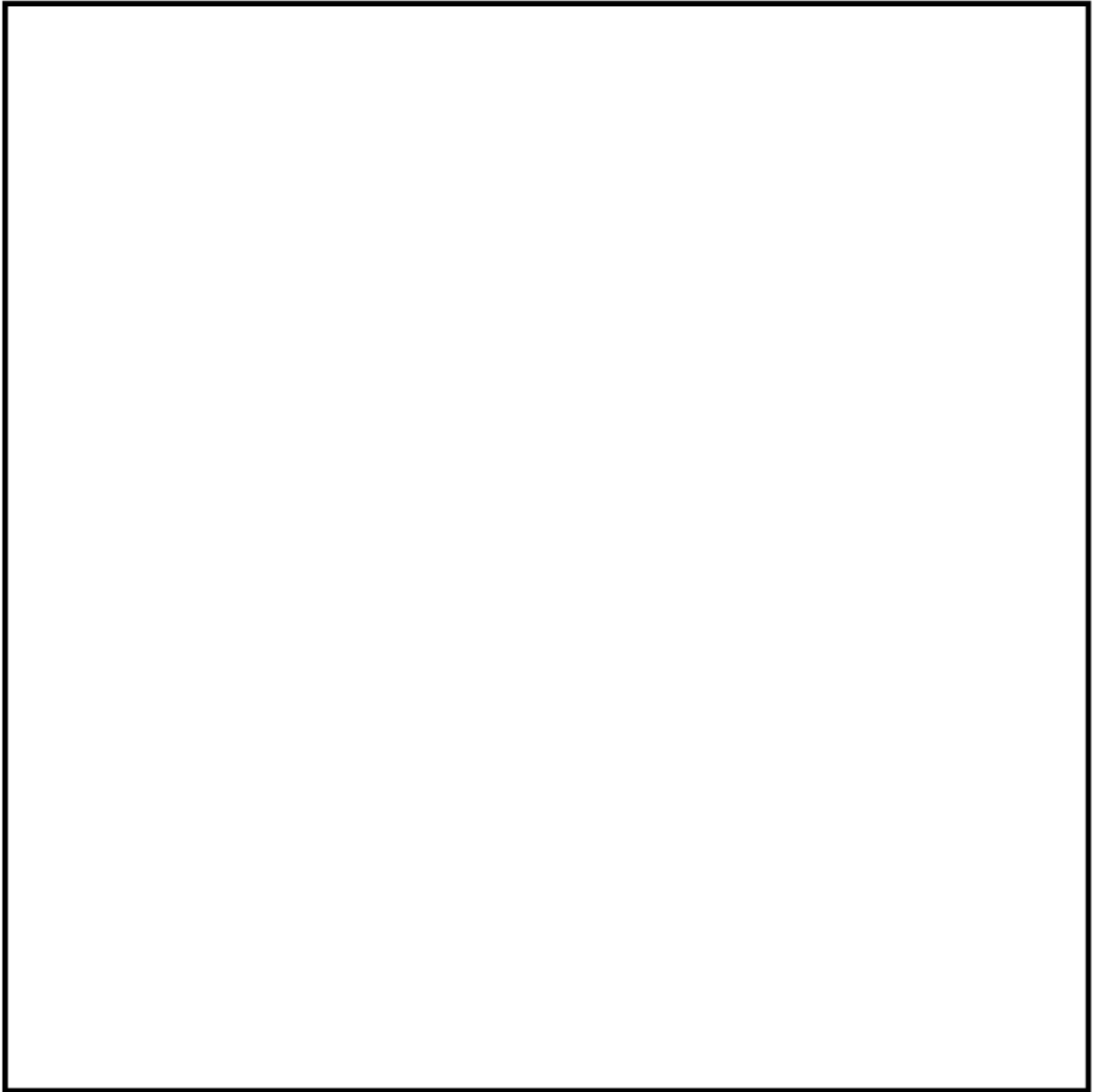
図一別紙4-3 高浜4号炉 特別点検実施位置
(原子炉補助建屋、タービン建屋)




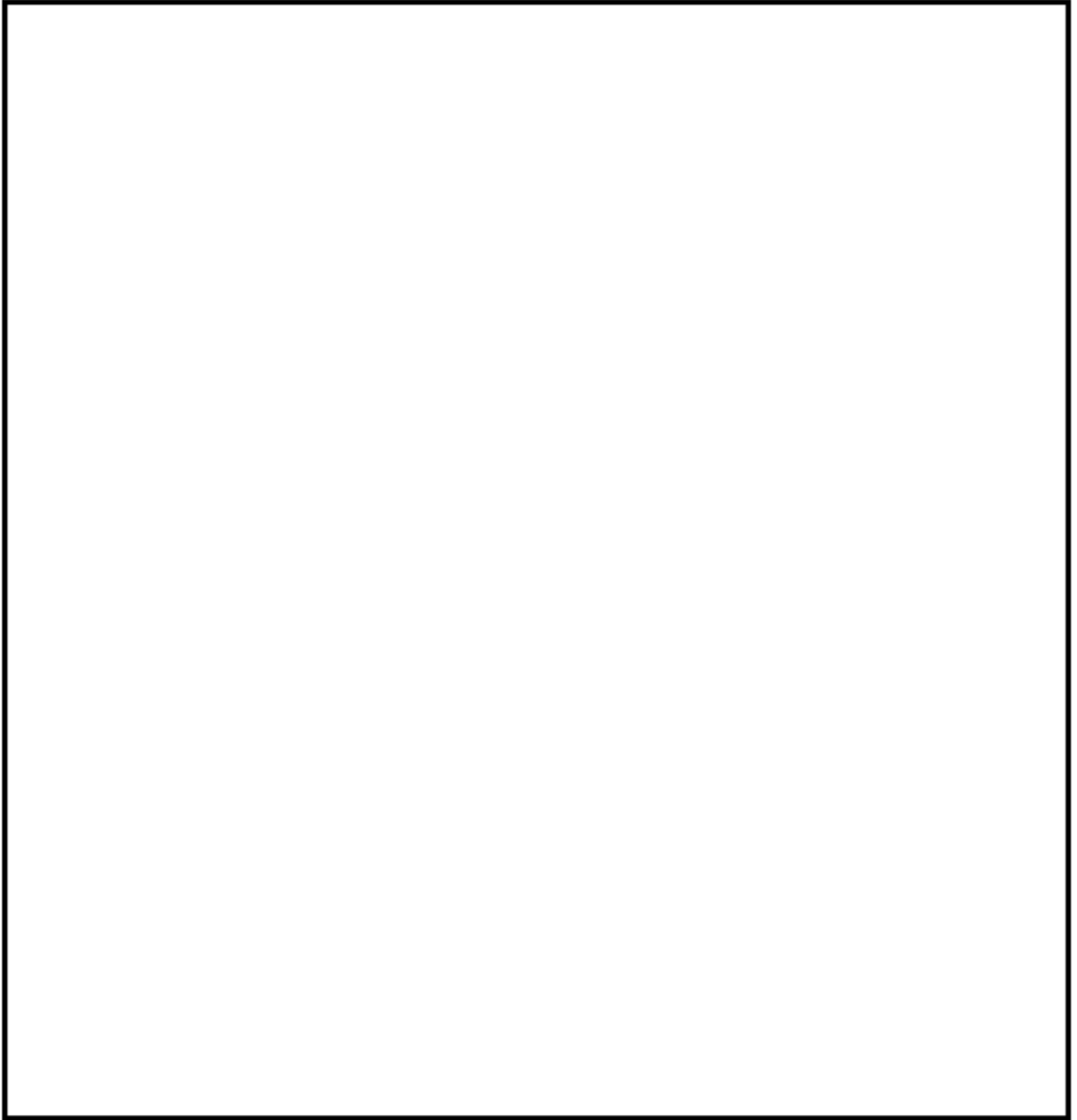
図一別紙4-4 高浜4号炉 特別点検実施位置
(タービン架台 )



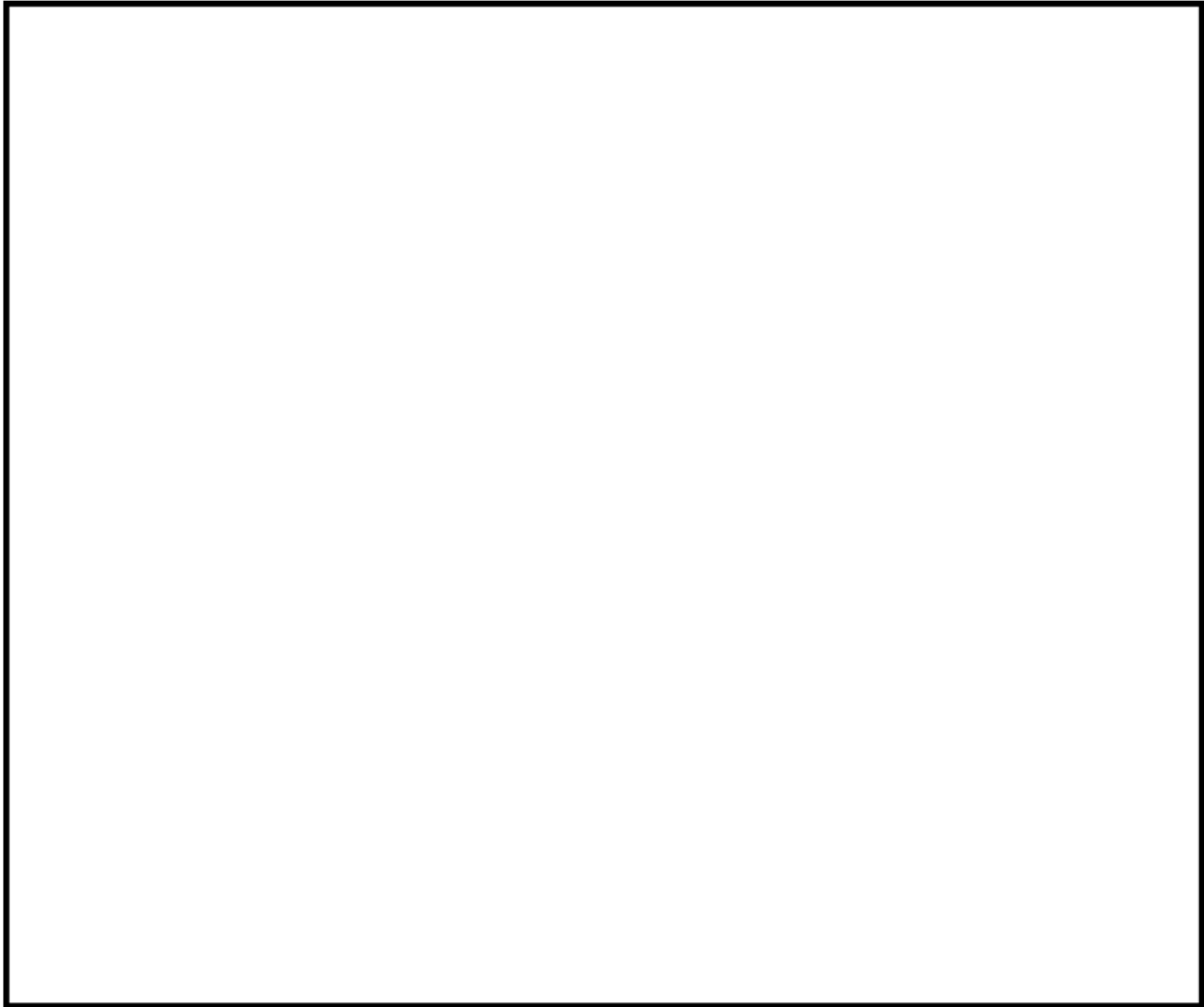
図－別紙４－５ 高浜４号炉 特別点検実施位置
(原子炉格納施設等、原子炉補助建屋、タービン架台 )




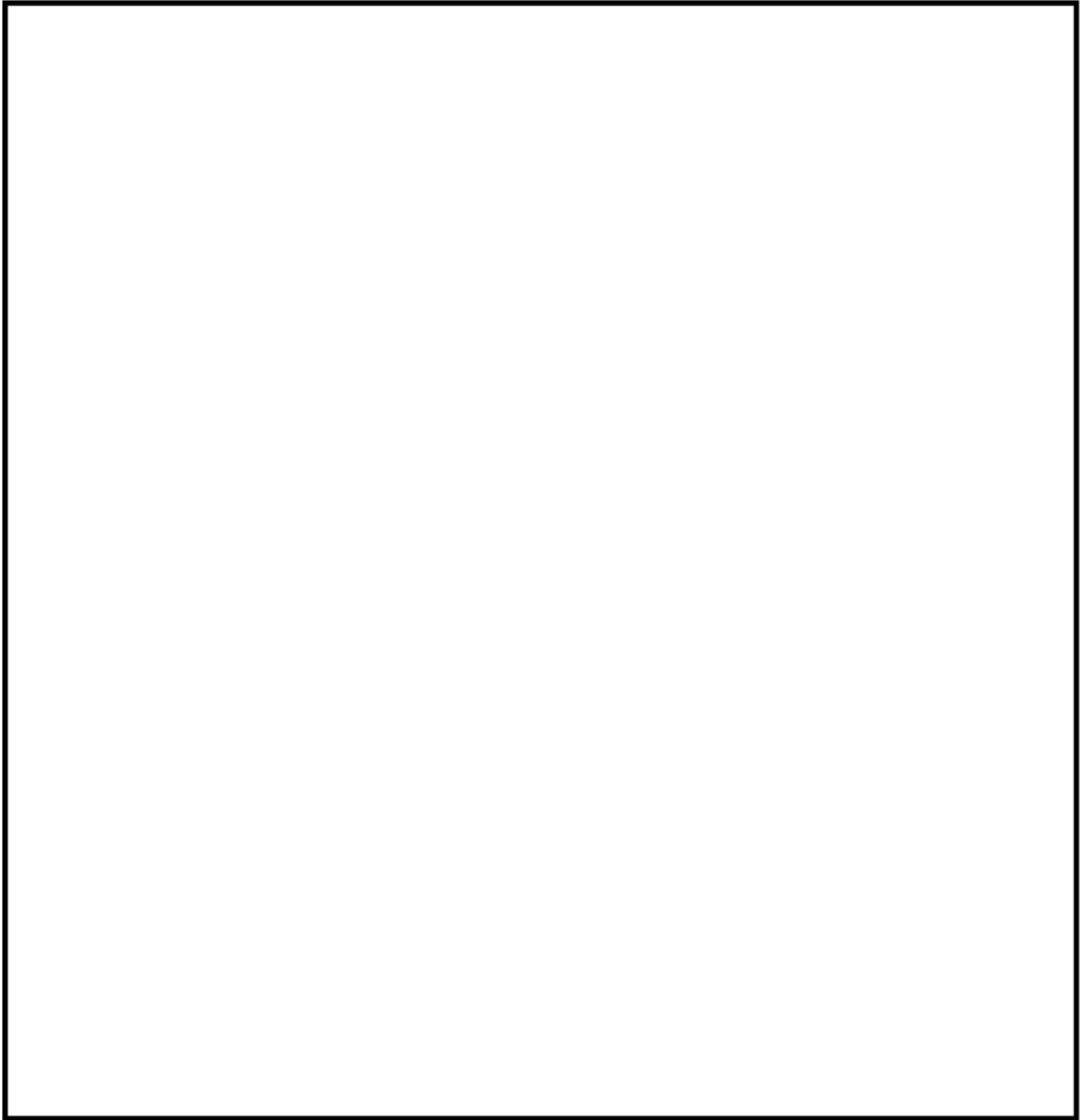
図一別紙4-6 高浜4号炉 特別点検実施位置
(原子炉補助建屋 )




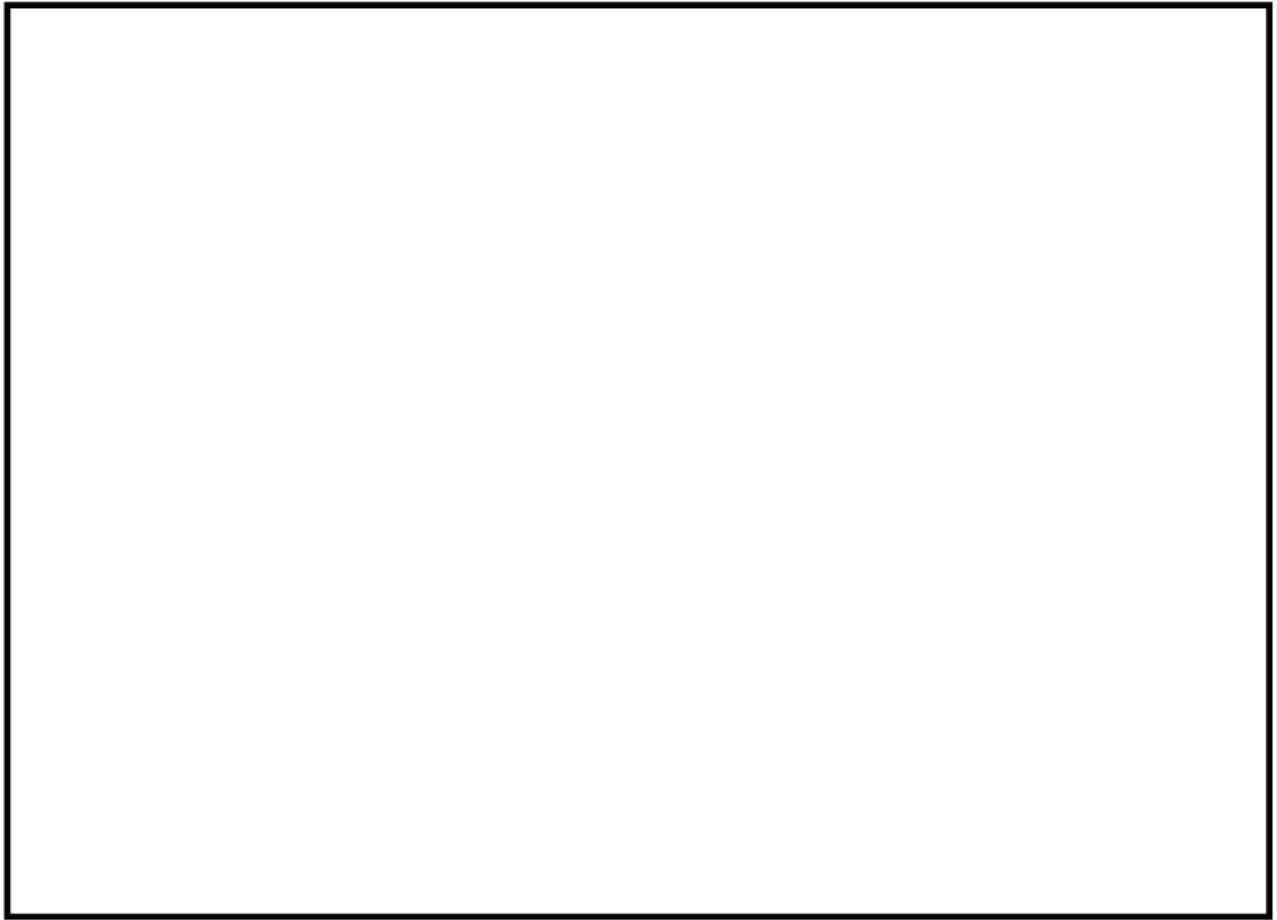
図一別紙4-7 高浜4号炉 特別点検実施位置
(原子炉格納施設等、原子炉補助建屋)




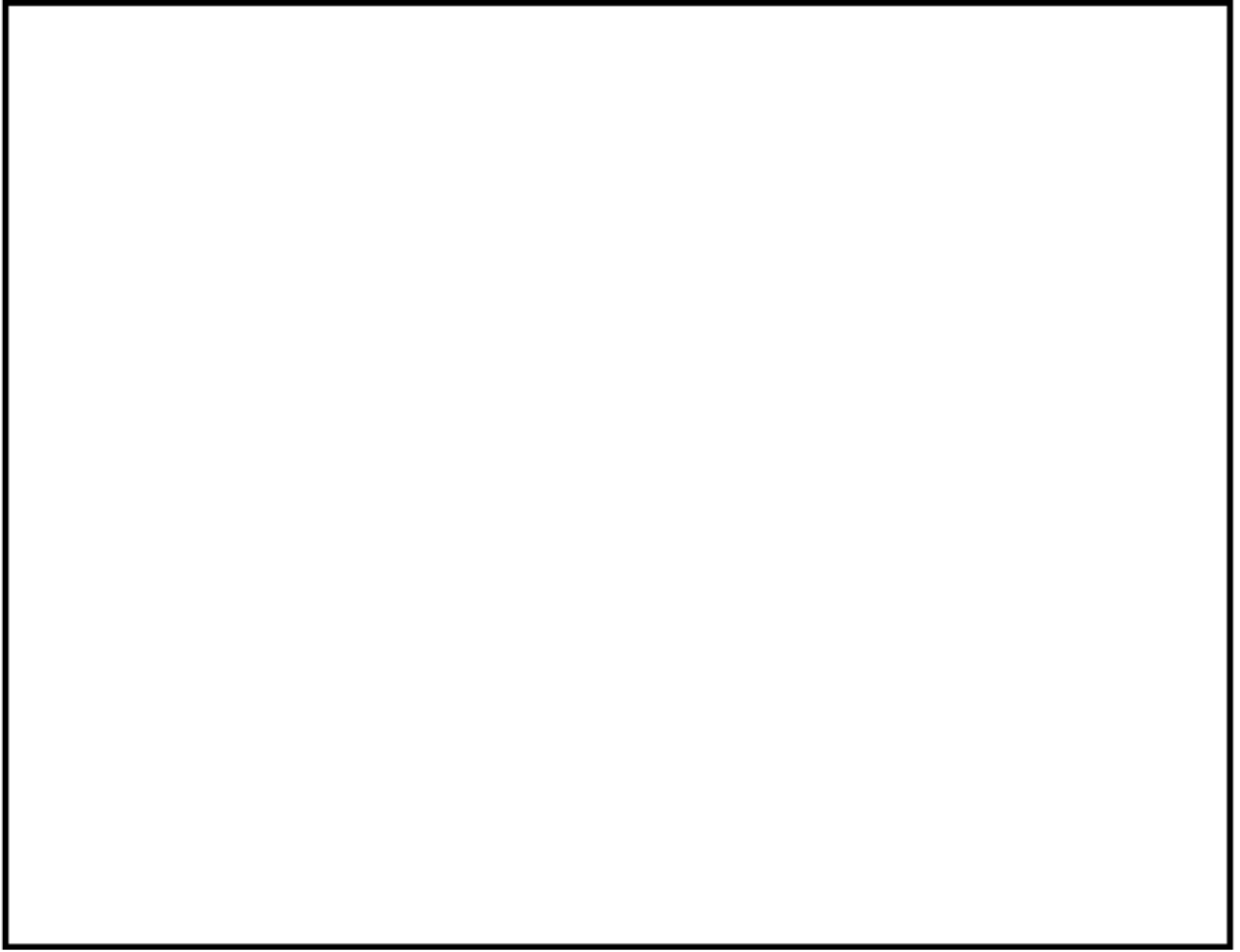
図一別紙4-8 高浜4号炉 特別点検実施位置
(原子炉補助建屋 )




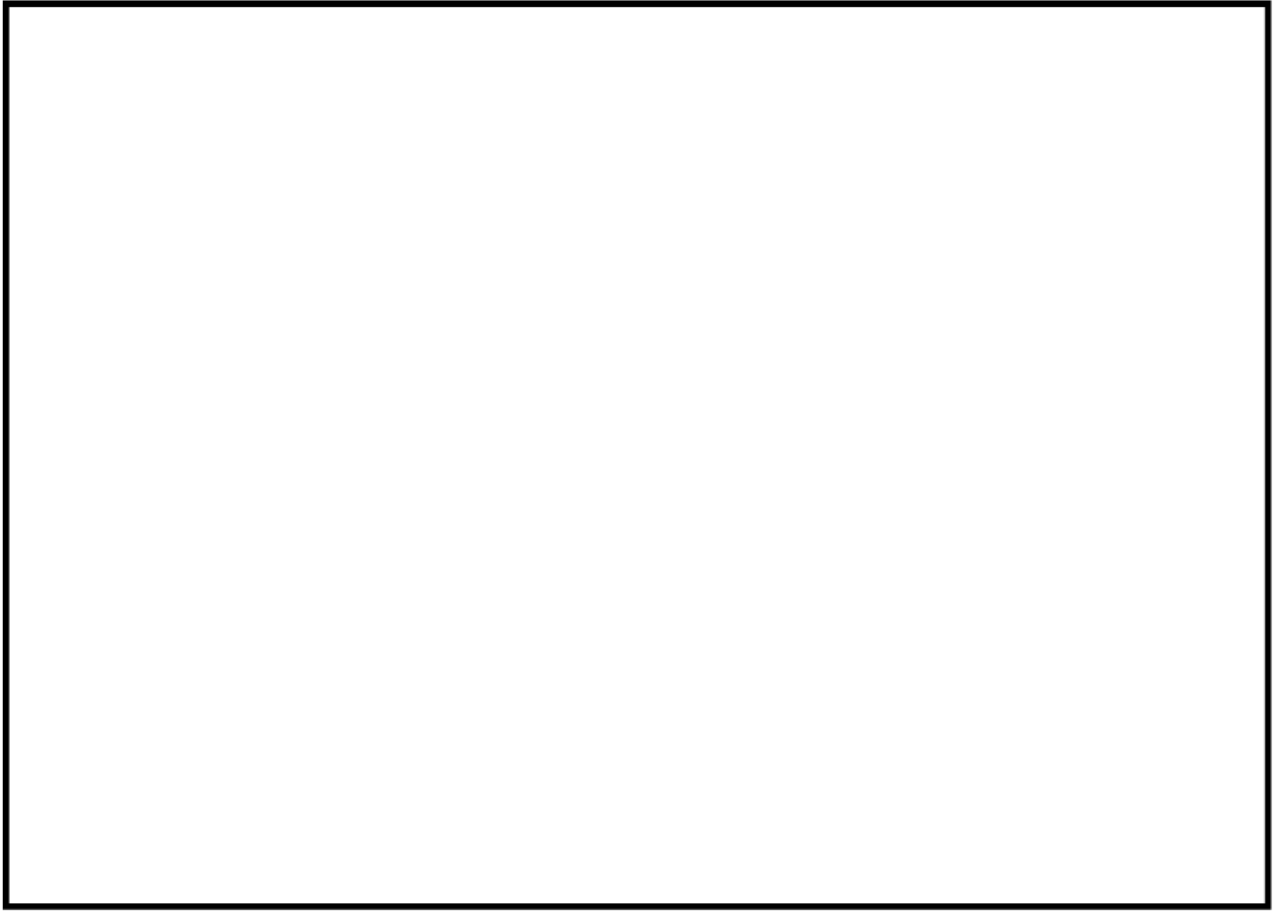
図一別紙4-9 高浜4号炉 特別点検実施位置
(原子炉補助建屋 )



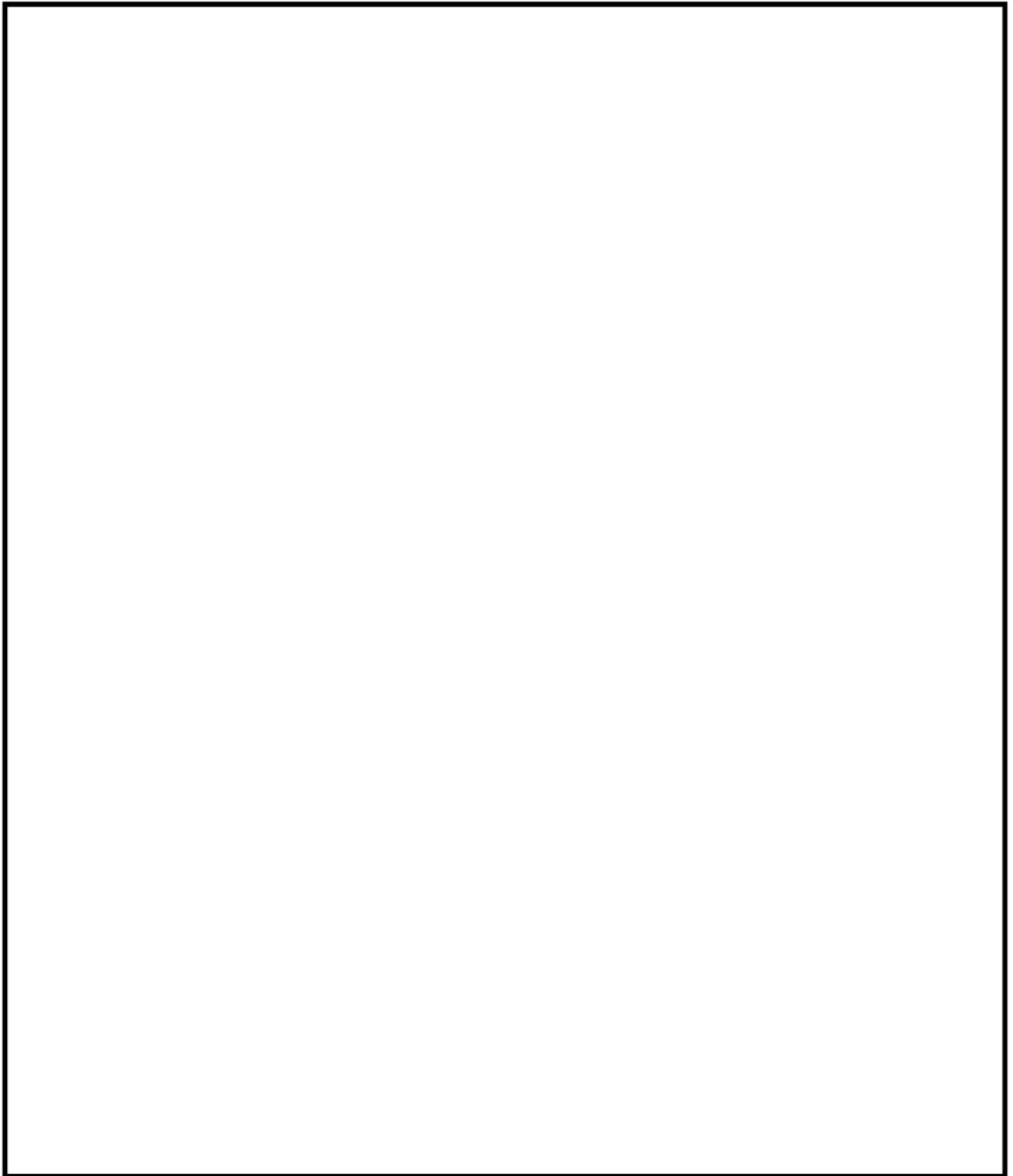
図－別紙４－１０ 高浜４号炉 特別点検実施位置
(原子炉格納施設等 )



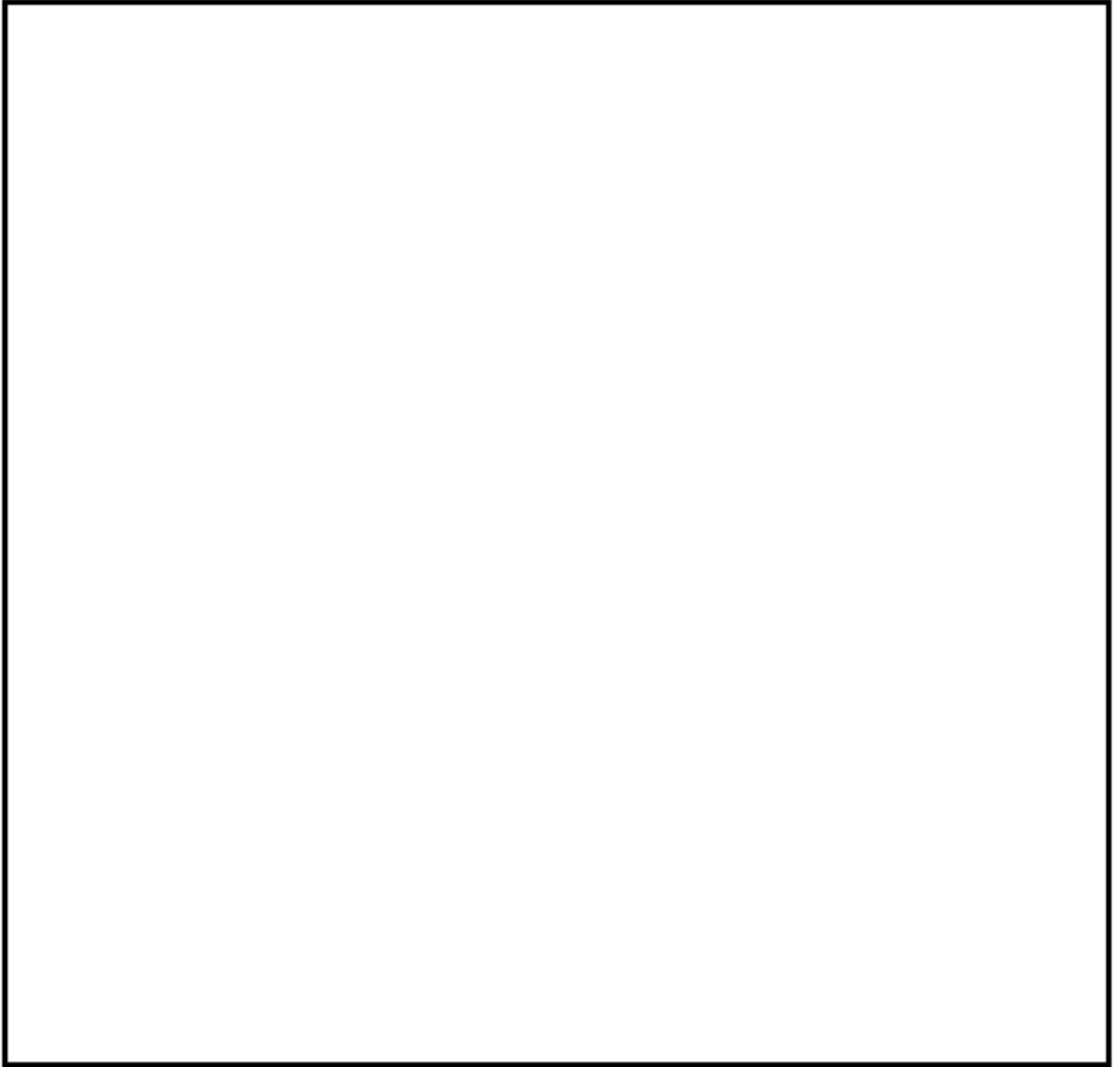
図－別紙 4－1 1 高浜 4 号炉 特別点検実施位置
(原子炉格納施設等、原子炉補助建屋 )



図－別紙４－１２ 高浜４号炉 特別点検実施位置
(原子炉格納施設等)



図一別紙4-13 高浜4号炉 特別点検実施位置
(取水構造物)



図－別紙４－１４ 高浜４号炉 特別点検実施位置
(非常用ディーゼル燃料油タンク基礎、復水タンク基礎)

別紙5 点検箇所の選定に使用する温度・湿度の算出方法

中性化深さおよびアルカリ骨材反応の点検箇所の選定に使用する温度・湿度の算出方法を示す。

原子炉格納施設等のうち内部コンクリートにおける温度・湿度の算出方法を「1. 原子炉格納施設等 内部コンクリート」に示す。

また、内部コンクリート以外の箇所における温度・湿度は同じ方法で算出している。具体的な算出方法は、タービン架台における数値を例として、「2. タービン架台」に示す。

1. 原子炉格納施設等 内部コンクリート

1. 1 温度

点検箇所の選定に使用する温度は、測定による稼動時および停止時の平均温度ならびに想定稼動率を用いて加重平均により補正して算出した。

測定値		想定稼動率 (%)	補正值 補正温度 (°C)
停止時平均温度 (°C) ※1	稼動時平均温度 (°C) ※2		
23.8	34.3	85	32.7

※1 停止時1年間に測定した温度の平均値 (2016.4.1～2017.3.31測定)

※2 稼動時1年間に測定した温度の平均値 (2018.9.4～2019.9.3測定)

1. 2 湿度

点検箇所を選定に使用する湿度は、測定による平均温度および平均湿度から水蒸気圧を算出し、温度によって飽和水蒸気圧が変動するとして補正した。

具体的な手順は以下の通り。

i) 測定による平均温度から飽和水蒸気圧を求める。

平均温度 (°C) ※1	飽和水蒸気圧 (Pa) ※2
23.9	2971.9

※1 湿度測定期間中に測定した温度の平均値 (2020. 10. 21～2021. 2. 18 測定)

※2 「JIS Z 8806 付表 1.1 水の飽和蒸気圧」から算出

ii) i) の飽和水蒸気圧および測定による平均湿度から水蒸気圧を求める。

飽和水蒸気圧 (Pa)	平均湿度 (%) ※3	水蒸気圧 (Pa)
2971.9	27.8	827.3

※3 湿度測定期間中に測定した湿度の平均値 (2020. 10. 21～2021. 2. 18 測定)

iii) 「1. 1 温度」による補正温度から飽和水蒸気圧を求める。

補正温度 (°C)	飽和水蒸気圧 (Pa) ※4
32.7	4957.5

※4 「JIS Z 8806 付表 1.1 水の飽和蒸気圧」から算出

iv) iii) の飽和水蒸気圧に対する ii) の水蒸気圧の比から補正湿度を求める。

飽和水蒸気圧 (Pa)	水蒸気圧 (Pa)	補正湿度 (%)
4957.5	827.3	16.7

2. タービン架台

2. 1 温度

点検箇所を選定に使用する温度は、中間期における稼働時および停止時の平均温度の差を算出し、通年でも同様の温度差が生じるとして、測定期間における稼働率および想定稼働率を用いて補正して算出した。

具体的な手順は以下の通り。

- i) 中間期である4～5月および10～11月の外気平均温度が概ね同等であることを踏まえ、運転による温度差として、プラント停止時である2020年10月～2020年11月における平均温度と、プラント稼働時である2021年4月～2021年5月における平均温度の差 (ΔT) を算出する。なお、プラント稼働時の平均温度がプラント停止時の平均温度を下回った場合は保守的に温度差は0とする。

	2020年10月～ 2020年11月 (プラント停止時)	2021年4月～ 2021年5月 (プラント稼働時)	平均温度の差 ΔT
外気平均温度 (°C) ※1	16.1	16.3	—
測定点における 平均温度 (°C)	20.5	30.4	9.9

※1 高浜3・4号機付近の計11点における外気温測定値の平均値

- ii) 測定全期間の平均温度 (T_{all}) に、想定稼働率 (α)、測定期間の運転月数と測定月数の比 (β) および ΔT を考慮し、以下の式を用いて補正温度 (T) を求める。

$$T = T_{all} + (\alpha - \beta) \cdot \Delta T$$

全期間平均温度 T_{all} (°C) ※2	想定稼働率 α (%)	測定期間の運転月数 ／測定月数 β	補正温度 T (°C)
25.3	85	6 / 12	28.8

※2 特別点検用に測定した1年間の温度平均値 (2020.10.1～2021.9.30測定)

2. 2 湿度

点検箇所を選定に使用する湿度は、測定による平均温度および平均湿度から水蒸気圧を算出し、温度によって飽和水蒸気圧が変動するとして算出した。

具体的な手順は以下の通り。

i) 測定全期間の平均温度から飽和水蒸気圧を求める。

全期間平均温度 T_{all} (°C) ※1	飽和水蒸気圧 (Pa) ※2
25.3	3228.8

※1 特別点検用に測定した1年間の温度平均値(2020.10.1~2021.9.30測定)

※2 「JIS Z 8806 付表 1.1 水の飽和蒸気圧」から算出

ii) i) の飽和水蒸気圧および測定による平均湿度から水蒸気圧を求める。

飽和水蒸気圧 (Pa)	平均湿度 (%) ※3	水蒸気圧 (Pa)
3228.8	50.5	1630.9

※3 特別点検用に測定した1年間の湿度平均値(2020.10.1~2021.9.30測定)

iii) 「2. 1 温度」による補正温度から飽和水蒸気圧を求める。

補正温度 (°C)	飽和水蒸気圧 (Pa) ※3
28.8	3957.8

※3 「JIS Z 8806 付表 1.1 水の飽和蒸気圧」から算出


iv) iii) の飽和水蒸気圧に対する ii) の水蒸気圧の比から補正湿度を求める。

飽和水蒸気圧 (Pa)	水蒸気圧 (Pa)	補正湿度 (%)
3957.8	1630.9	41.2

別紙6 塩分量測定のおえ方

(1) 土研式塩分捕集器

①測定箇所

測定箇所について、海岸線から最も近い面でかつアクセス性を有する箇所として、のタラップなどでアクセスできる箇所を選定した。高浜4号炉の海岸線からの位置関係を図-別紙6-1に示す。

②測定箇所数

原子炉補助建屋については、鉄筋コンクリート構造部分の最上部と最下部の2箇所（高低差約30m）で測定を行うこととした。外部遮蔽壁については、高さが約80mであることを踏まえ、最上部、最下部およびそれらの中間高さの計3箇所で測定を行うこととした。

③測定期間

測定期間は、季節変動を踏まえて2020年10月から2021年10月までの約1年間とした。

(2) ポータブル型蛍光X線分析計

①測定箇所

対象構造物は、目視点検において劣化が確認されていない設備であり、全体の環境条件に差がないと考えられることから、構造物全体から測定箇所を選定した。

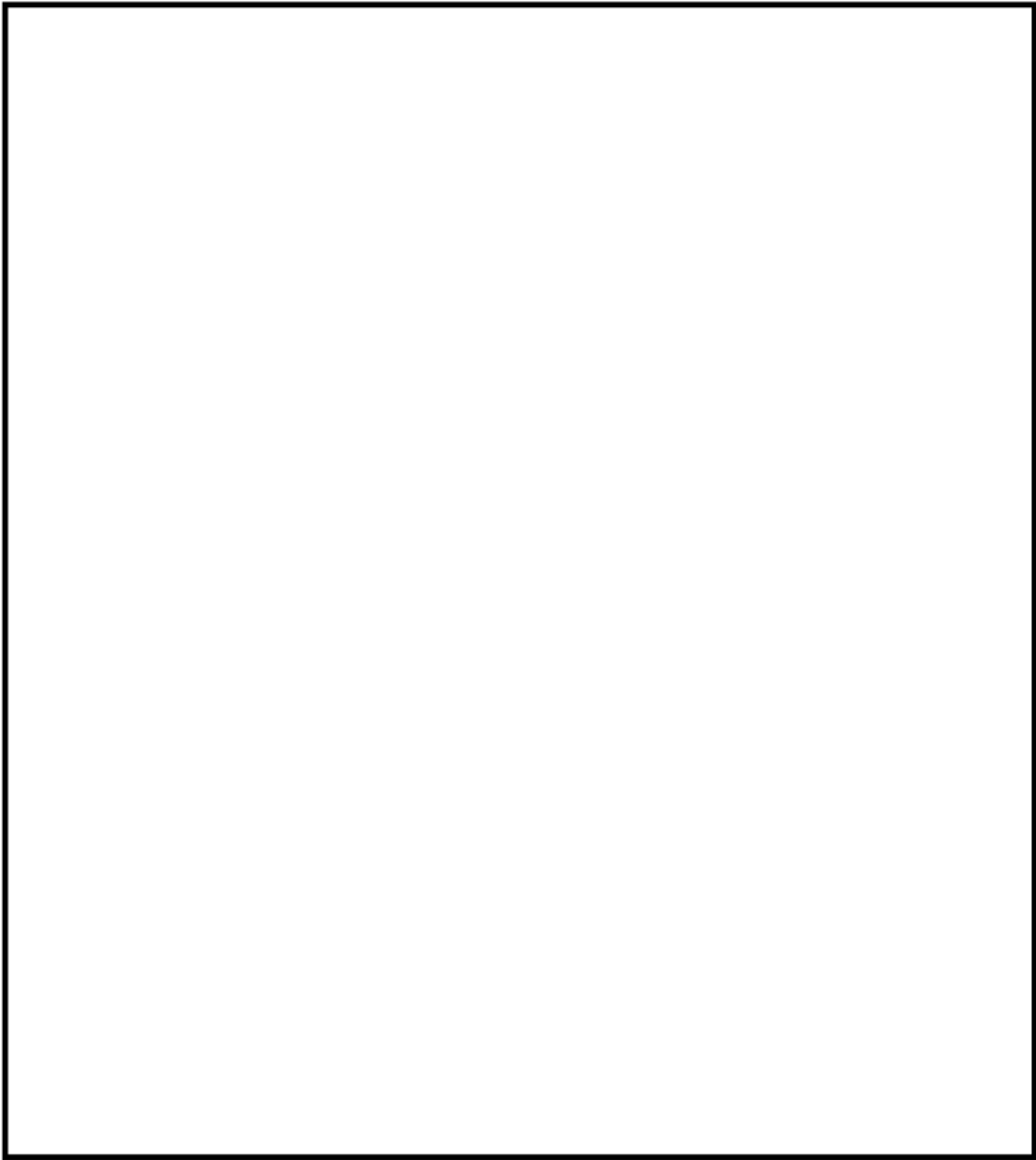
②測定箇所数

構造物全体から3箇所程度について、測定を行うこととした。

また、1箇所あたりの測定範囲はコアサンプル採取を前提とし、コアサンプル採取本数に合わせて範囲を設定しており、その範囲内で測定している。

③測定期間

測定は2021年12月から2022年7月の間で都度実施した。



図一別紙6-1 高浜4号炉 海岸線からの位置関係