

タイトル	中性化の評価対象及び評価点の選定過程について
説明	<p>中性化の評価対象及び評価点の選定過程を以下に示す。</p> <p>1. 環境測定          中性化の進展度合いは、空気環境条件（二酸化炭素濃度、温度、相対湿度）の影響を受けることから、2019年から2020年に空気環境測定を実施した。</p> <p>1-1. 測定方法          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、相対湿度の測定は、2019年11月1日から2020年11月8日の期間で実施し、1時間間隔で連続測定を行った。二酸化炭素濃度の測定は、2019年11月から2020年11月の期間で毎月ごとに3日間を対象として測定を行った。</p> <p>1-2. 測定位置          二酸化炭素濃度、温度、相対湿度とも、建屋内外で1号炉、2号炉合わせて計378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          中性化の評価対象は、空気環境の影響を遮断する仕上げの状況、上記の環境測定の結果等に基づく中性化に及ぼす影響度の大きさを踏まえ、以下のとおり選定した。</p> <p>2-1. 仕上げ状況          代表構造物のうち、仕上げが無い箇所がある構造物を選定し、設置環境が屋内の構造物と屋外の構造物に分類する。屋外の構造物については、対象となる構造物が取水構造物のみであることから、取水構造物を評価対象として選定し、屋内については次項の中性化に及ぼす影響度の大きさを踏まえて選定した。</p> <p>2-2. 中性化に及ぼす影響度の大きさ          仕上げが無い箇所がある対象構造物のうち、設置環境が屋内の構造物から、環境測定の測定結果等に基づく中性化に及ぼす影響度が最も大きくなった原子炉補助建屋を選定した。なお、中性化に及ぼす影響度については、各環境条件（二酸化炭素濃度、温度、相対湿度）が入力値となる森永式を引用し、環境条件による係数によって算出した。影響度の算出結果を添付3「環境条件による影響度」に示す。なお、特別点検による中性化深さの点検箇所については、この影響度に応じて選定している。特別点検の結果を添付4「中性化深さの測定結果」に示す。</p>

### 3. 評価点の選定過程

中性化の評価点については、上記の選定過程による評価対象構造物（原子炉補助建屋、取水構造物）のうち、特別点検の結果などを踏まえて、以下のとおりに選定した。

#### 3-1. 原子炉補助建屋

原子炉補助建屋の各対象部位のうち、特別点検における中性化深さの測定結果の値が最も大きい外壁を対象とした。

#### 3-2. 取水構造物

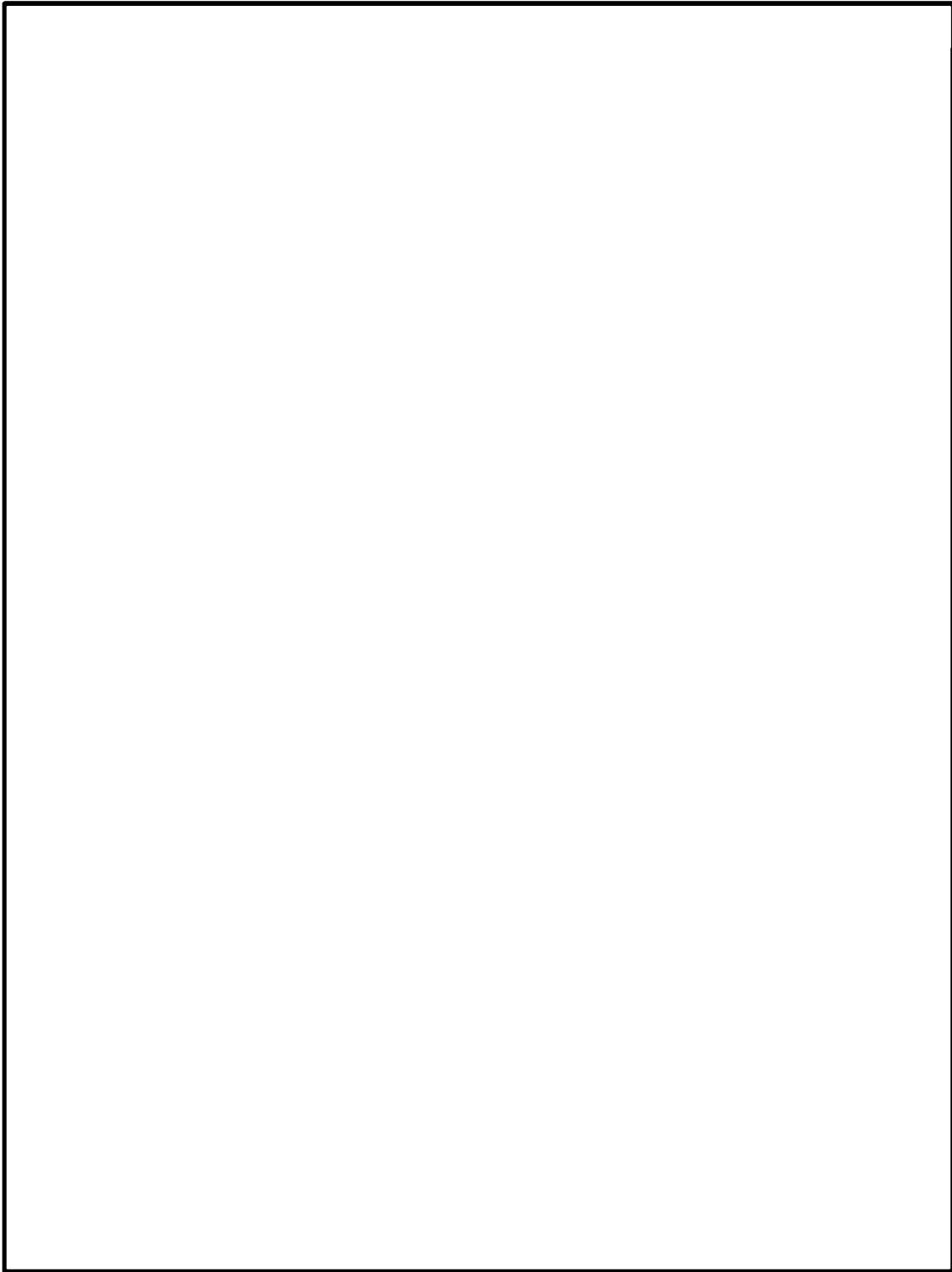
取水構造物の各対象部位のうち、海水によりコンクリート表面が湿潤とならず、最も空気環境の影響を受ける気中帯を対象とした。

- 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 中性化深さの測定結果

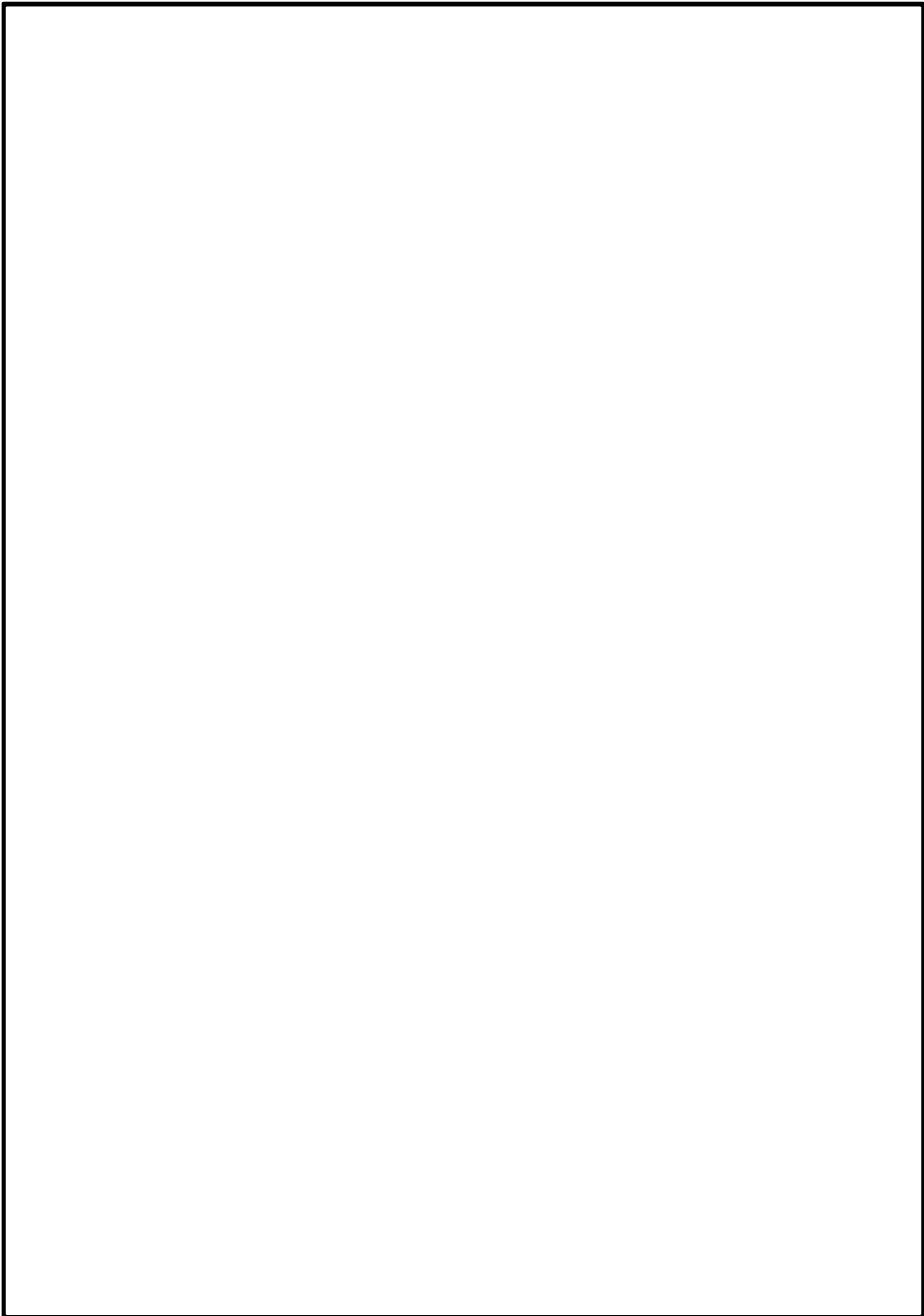
## 環境測定 使用機器

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

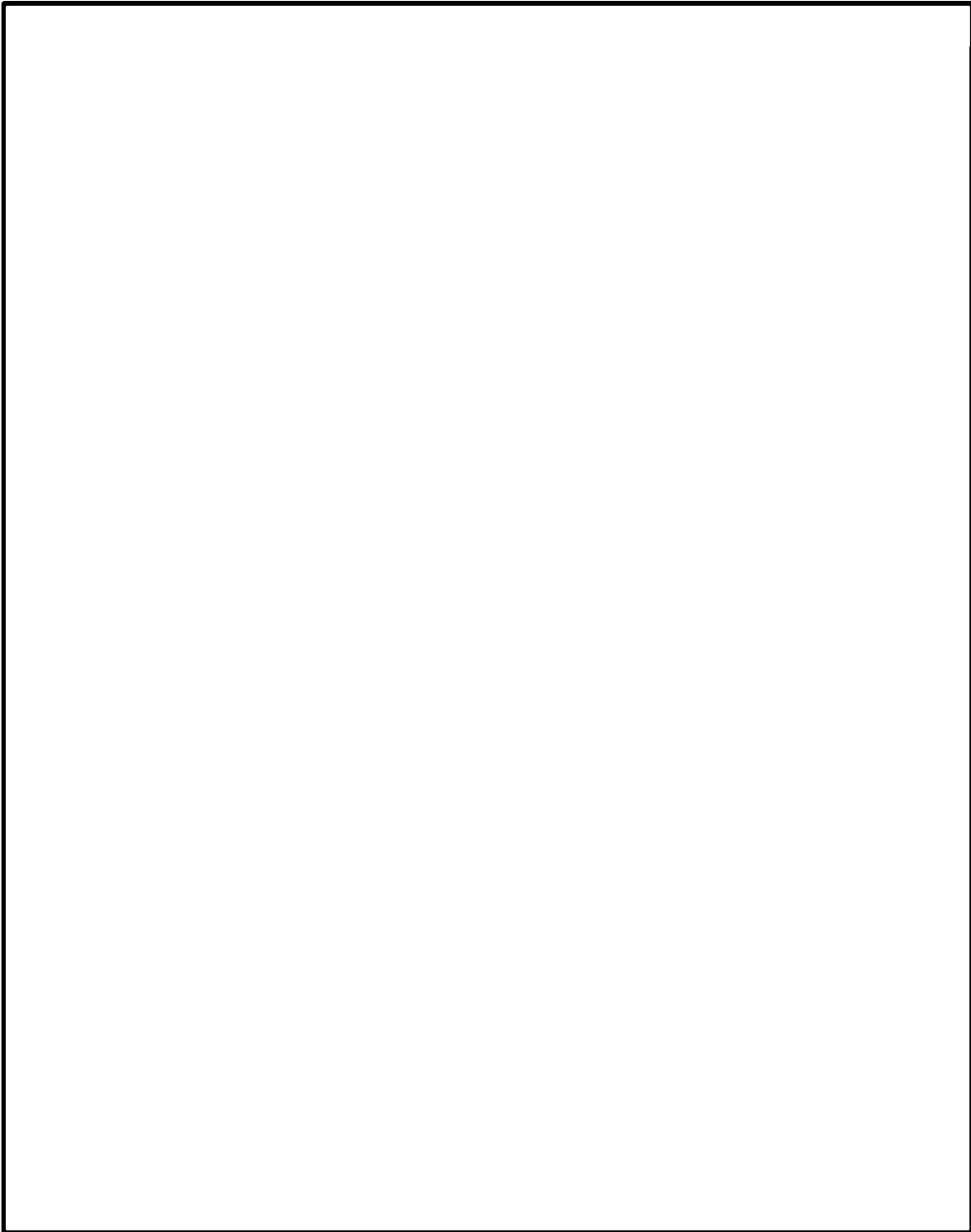
環境測定 測定位置図



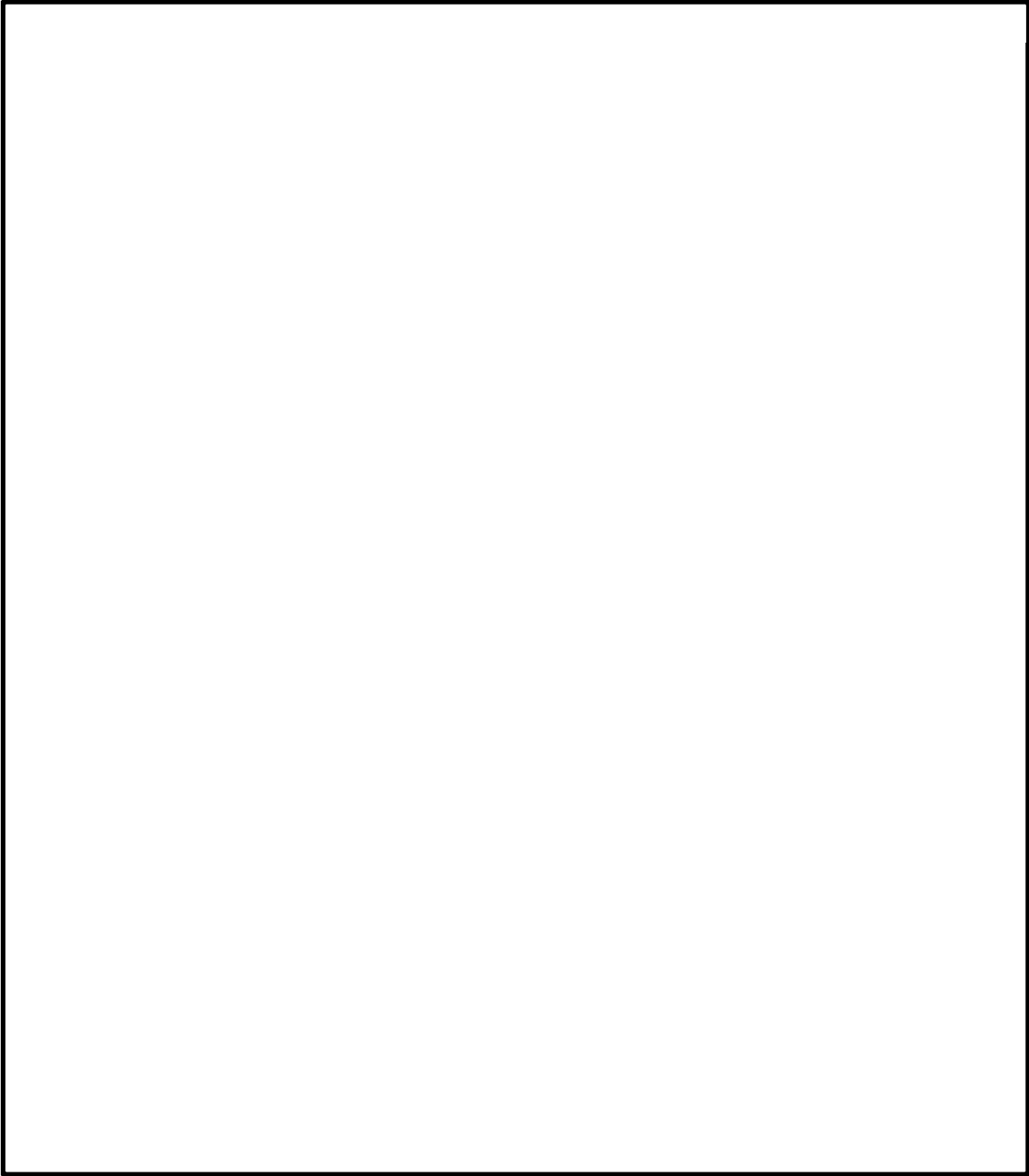
原子炉格納施設等、原子炉補助建屋



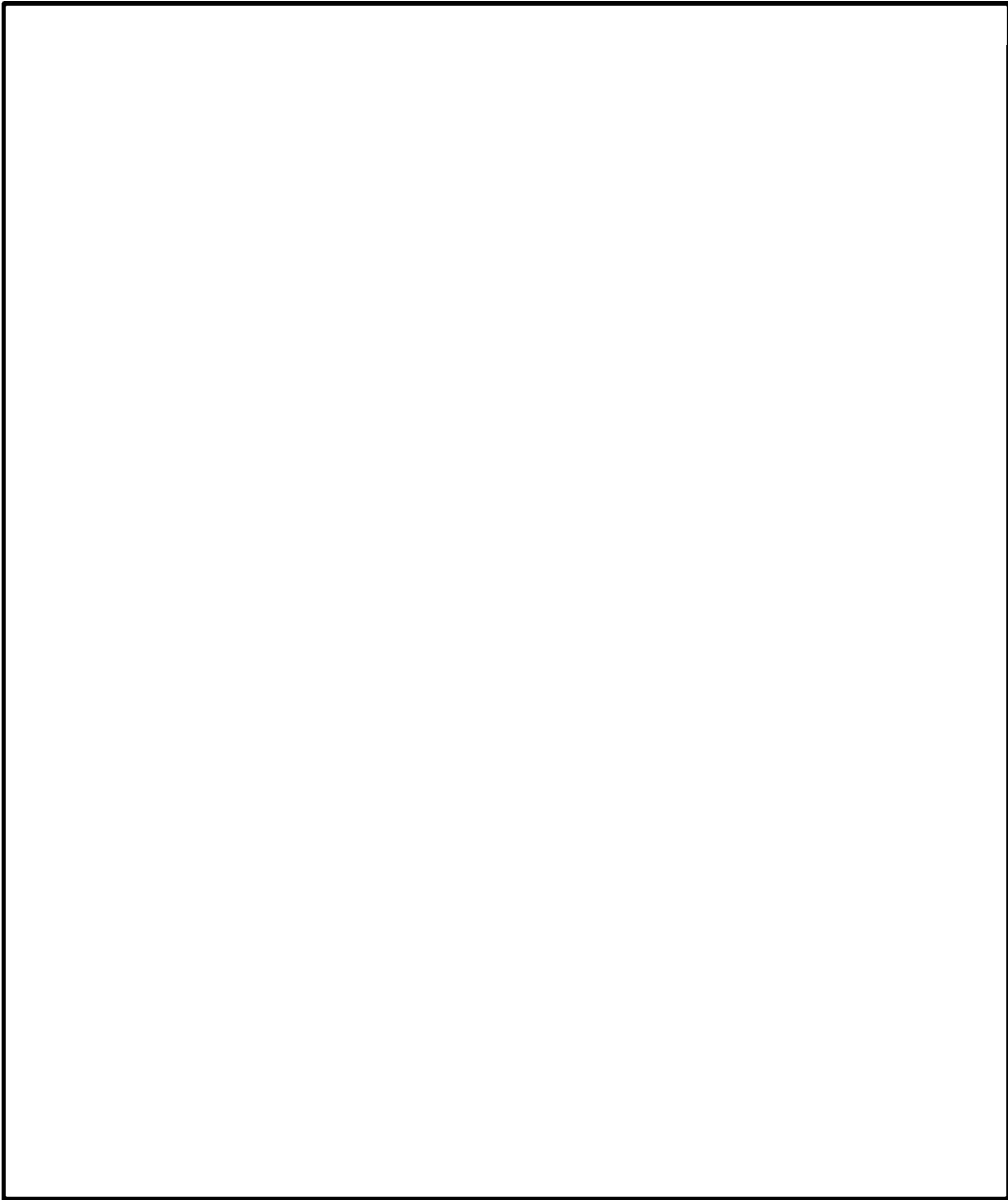
原子炉格納施設等、原子炉補助建屋



原子炉格納施設等、原子炉補助建屋、タービン建屋

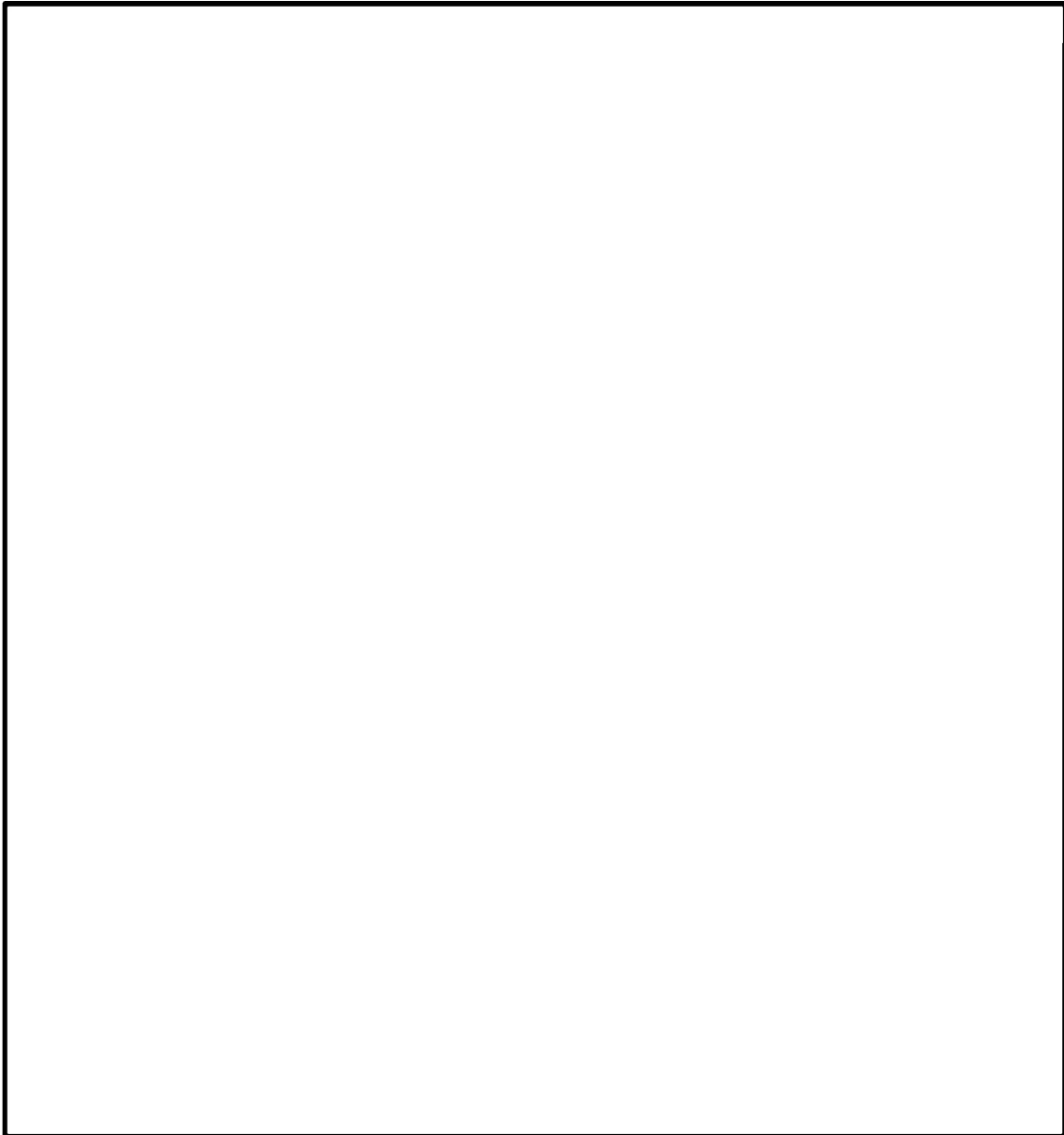


燃料取替用水タンク基礎 (配管トレンチ)

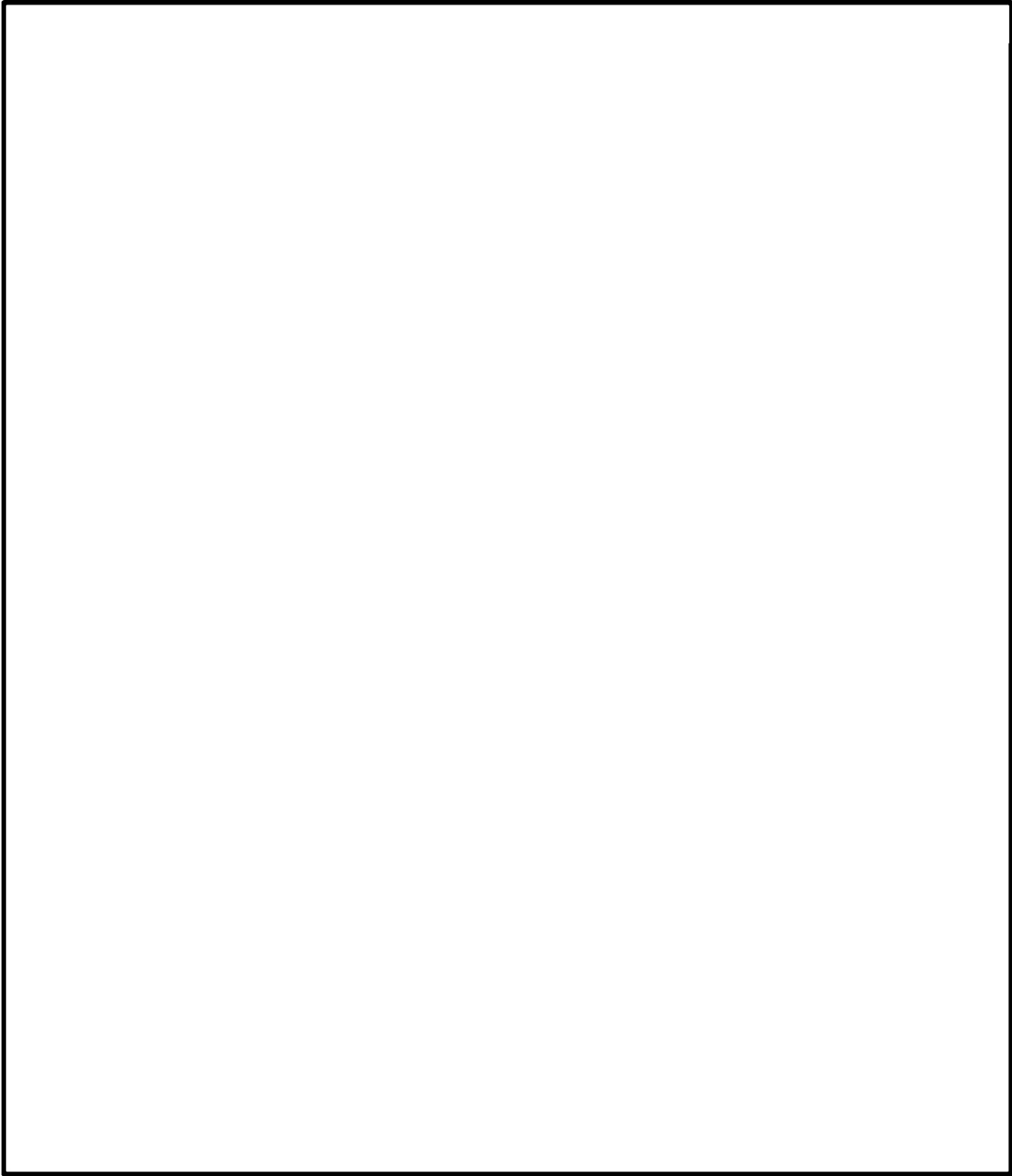


原子炉格納施設等、原子炉補助建屋、タービン建屋

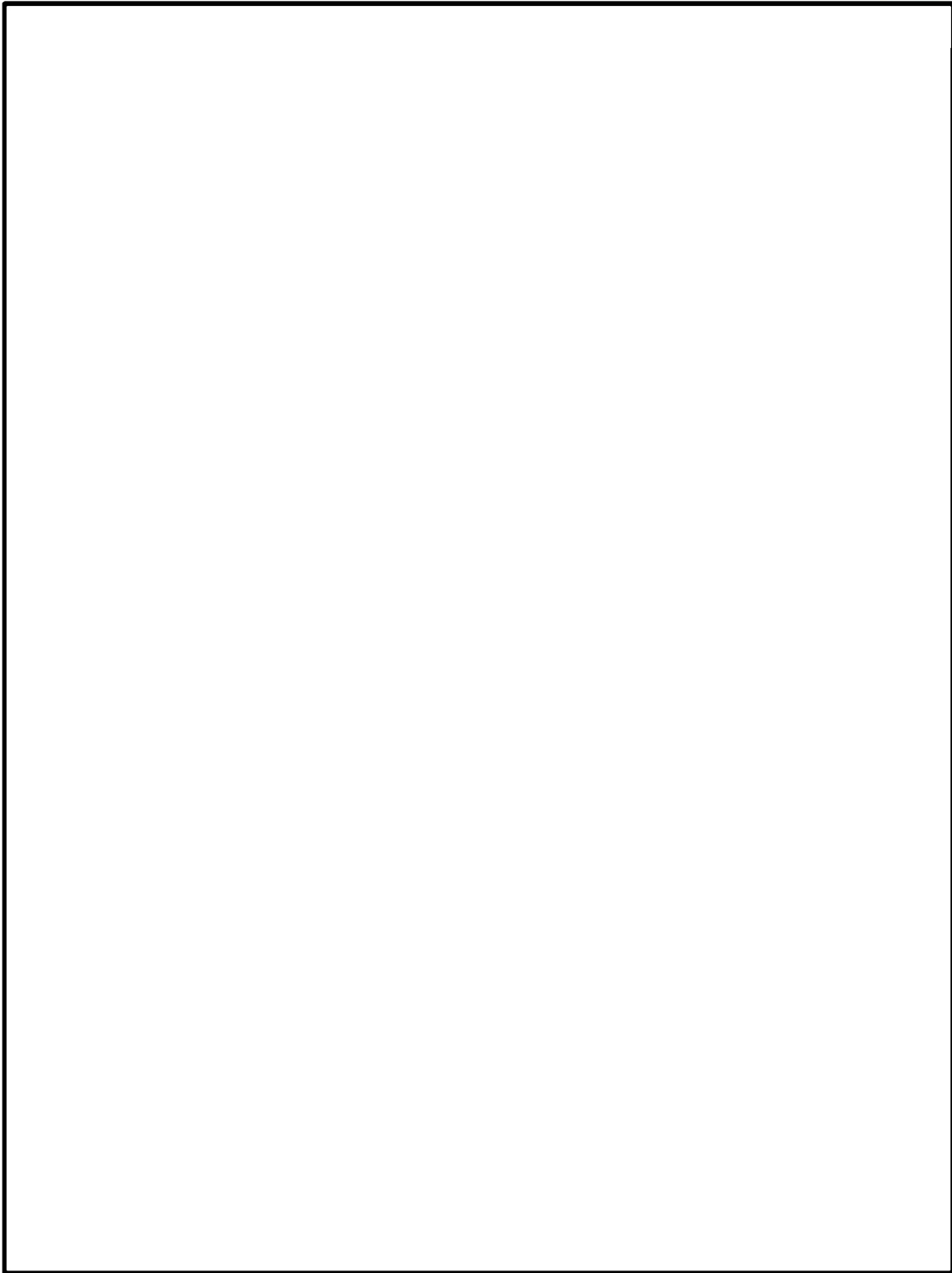




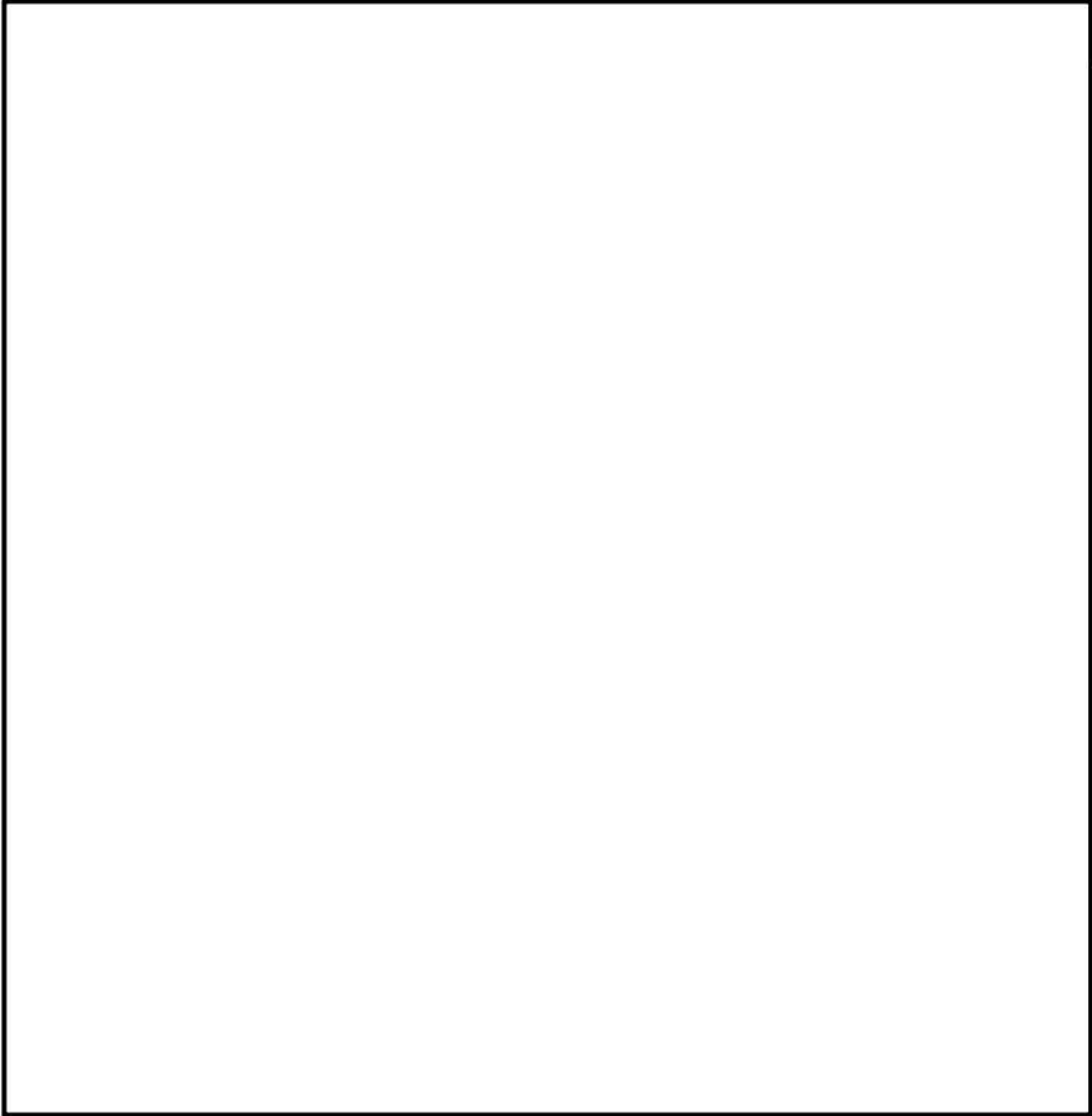
原子炉格納施設等、原子炉補助建屋、タービン建屋



原子炉補助建屋



タービン建屋



取水構造物

## 環境条件による影響度

対象のコンクリート構造物	対象の部位	環境条件による影響度 <sup>※1,2</sup>	備考
原子炉格納施設等	外部遮蔽壁	0.205	
	内部コンクリート	0.259	塗装あり
	基礎マット	0.206	
原子炉補助建屋	外壁	0.337	
	内壁及び床	0.387	
	使用済み燃料プール	0.337	
	基礎マット	0.309	
タービン建屋	内壁及び床	0.257	
	基礎マット	0.132	
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。）	燃料取替用水タンク 基礎	0.278	

測定期間：2019年11月1日～2020年11月8日

※1 対象構造物ごと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（下記赤部）から算出

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

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)

## 中性化深さの測定結果

対象のコンクリート構造物		対象の部位	コア No.	中性化深さ (mm)	平均中性化深さ <sup>※1</sup> (mm)	備考 <sup>※2</sup>
原子炉格納施設等	外部遮蔽壁		1	7.0	8.8	60
			2	11.0		
			3	8.4		
	内部コンクリート		1	1.6	1.7	
			2	1.3		
			3	2.1		
	基礎マット		1	19.4	26.0	
			2	31.4		
			3	27.1		
原子炉補助建屋	外壁		1	33.2	42.2	70
			2	43.4		
			3	49.9		
	内壁及びび床		1	23.8	31.9	
			2	31.4		
			3	40.4		
	使用済み燃料プール		1	35.7	36.5	
			2	35.8		
			3	37.9		
	基礎マット		1	32.8	36.5	
			2	40.3		
			3	36.4		
タービン建屋	内壁及びび床		1	22.4	27.5	95
			2	32.7		
			3	27.4		
	基礎マット		1	8.8	10.5	
			2	9.9		
			3	12.8		
取水槽	海中帯		1	0.7	2.7	85
			2	3.5		
			3	3.8		
	干満帯		1	1.4	2.0	
			2	2.8		
			3	1.8		
	気中帯		1	17.6	11.5	
			2	5.5		
			3	11.3		
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。)	上記「タービン建屋」に含む				
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。)	非常用ディーゼル発電用燃料油貯油槽基礎		1	1.6	1.9	70
			2	2.7		
			3	1.5		
	燃料取替用水タンク基礎		1	30.6	28.7	
			2	28.8		
			3	26.8		

※ 1 : コアサンプル 3 本の平均値

※ 2 : 当該箇所のかぶり厚さ (mm)

タイトル	中性化深さの推定値の算定過程及び結果について																									
説明	<p>調査時点及び運転開始後 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）及び結果を以下に示す。</p> <p>1. 推定式、条件、パラメータ  以下の中性化深さを推定する式を用いて評価を実施した。推定式の詳細、条件及びパラメータは、添付 1「中性化深さの推定値の算定過程及び結果」に示すとおり。</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・岸谷式</li> <li>・森永式</li> <li>・中性化深さの実測値に基づく<math>\sqrt{t}</math>式</li> </ul> <p>2. 結果  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。  中性化深さを評価した結果は、以下に示す。</p> <table border="1" data-bbox="408 954 1347 1227"> <thead> <tr> <th rowspan="2"></th> <th colspan="3">調査時点の中性化深さ</th> <th rowspan="2">運転開始後 60 年経過時点の中性化深さ<sup>*2</sup> (cm) (推定式)</th> <th rowspan="2">鉄筋が腐食し始める時の中性化深さ (cm)</th> </tr> <tr> <th>経過年数</th> <th>実測値 (cm)</th> <th>推定値<sup>*1</sup> (cm) (推定式)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>原子炉補助建屋 (外壁 屋内面)</td> <td>37 年</td> <td>4.2</td> <td>3.8 (森永式)</td> <td>5.4 (<math>\sqrt{t}</math>式)</td> <td>9</td> </tr> <tr> <td>取水構造物 (気中帯)</td> <td>36 年</td> <td>1.2</td> <td>0.6 (岸谷式)</td> <td>1.5 (<math>\sqrt{t}</math>式)</td> <td>9</td> </tr> </tbody> </table> <p>* 1 : 岸谷式、森永式による評価結果のうち最大値を記載  * 2 : 岸谷式、森永式及び特別点検における中性化深さの実測値に基づく<math>\sqrt{t}</math>式による評価結果のうち最大値を記載</p> <p>添付 1 中性化深さの推定値の算定過程及び結果</p>						調査時点の中性化深さ			運転開始後 60 年経過時点の中性化深さ <sup>*2</sup> (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 <sup>*1</sup> (cm) (推定式)	原子炉補助建屋 (外壁 屋内面)	37 年	4.2	3.8 (森永式)	5.4 ( $\sqrt{t}$ 式)	9	取水構造物 (気中帯)	36 年	1.2	0.6 (岸谷式)	1.5 ( $\sqrt{t}$ 式)	9
	調査時点の中性化深さ			運転開始後 60 年経過時点の中性化深さ <sup>*2</sup> (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 <sup>*1</sup> (cm) (推定式)																							
原子炉補助建屋 (外壁 屋内面)	37 年	4.2	3.8 (森永式)	5.4 ( $\sqrt{t}$ 式)	9																					
取水構造物 (気中帯)	36 年	1.2	0.6 (岸谷式)	1.5 ( $\sqrt{t}$ 式)	9																					

中性化深さの推定値の算定過程及び結果

□ : 中性化深さの推定に必要なパラメータ  
 □ : 推定結果

1. 岸谷式

	原子炉補助建屋	取水構造物	備考
	外壁 屋内面	気中帯	
W : 水セメント比(%)	57.5	44.3	
α : 劣化外力係数	1.1	1.0	原子炉補助建屋(外壁 屋内面) : 実測値に基づく補正値 取水構造物(気中帯) : 屋外
β : 仕上材による係数	1.0	1.0	仕上げなし
γ : セメントによる係数	1.4	1.0	原子炉補助建屋(外壁 屋内面) : フライアッシュセメントB種 取水構造物(気中帯) : 普通ポルトランドセメント
調査時点の推定値(cm)	3.1	0.6	
運転開始後60年経過時点の推定値(cm)	3.9	0.8	

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

t : 深さ x まで中性化する期間(年) x : 中性化深さ(cm) w : 水セメント比(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

2. 森永式

	原子炉補助建屋	取水構造物	備考
	外壁 屋内面	気中帯	
W/C : 水セメント比(%)	57.5	44.3	
R : 仕上材の中性化率	1.0	1.0	打ち放し仕上げ : 1.0
二酸化炭素濃度(%)	0.050	0.046	原子炉補助建屋(外壁 屋内面) : 実測値 取水構造物(気中帯) : 実測値
T : 温度(°C)	31.5	19.3	原子炉補助建屋(外壁 屋内面) : 実測値 取水構造物(気中帯) : 実測値
RH : 湿度(%)	33.8	75.5	原子炉補助建屋(外壁 屋内面) : 実測値 取水構造物(気中帯) : 実測値
調査時点の推定値(cm)	3.8	0.4	
運転開始後60年経過時点の推定値(cm)	4.8	0.5	

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

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)

3. 実測値に基づく√t式

	原子炉補助建屋	取水構造物	備考
	外壁 屋内面	気中帯	
中性化実測深さ (cm)	4.2	1.2	特別点検結果 (中性化深さの点検結果)
運転開始後60年経過時点の推定値 (cm)	5.4	1.5	

$$\sqrt{t}\text{式 } x = A \cdot \sqrt{t}$$

x : 中性化深さ (mm)  
 t : 中性化期間 (年)  
 A : 中性化速度係数 (中性化実測深さと中性化期間により算出)



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)」によると、中性化の進行は、二酸化炭素濃度の平方根に比例するとある。

ここで、岸谷式の原子炉補助建屋(外壁 屋内面)に用いる劣化外力係数の算出にあたっては、川内原子力発電所構内の屋外での二酸化炭素濃度の実測値を基準として、原子炉補助建屋(外壁 屋内面)での二酸化炭素濃度の実測値を除した値の平方根で算出した。

実測値による劣化外力係数の算出結果は、原子炉補助建屋(外壁 屋内面)で「1.04」であった。そこで、計算に用いる劣化外力係数には、保守的に「1.1」を採用することとした。

・原子炉補助建屋(外壁 屋内面)

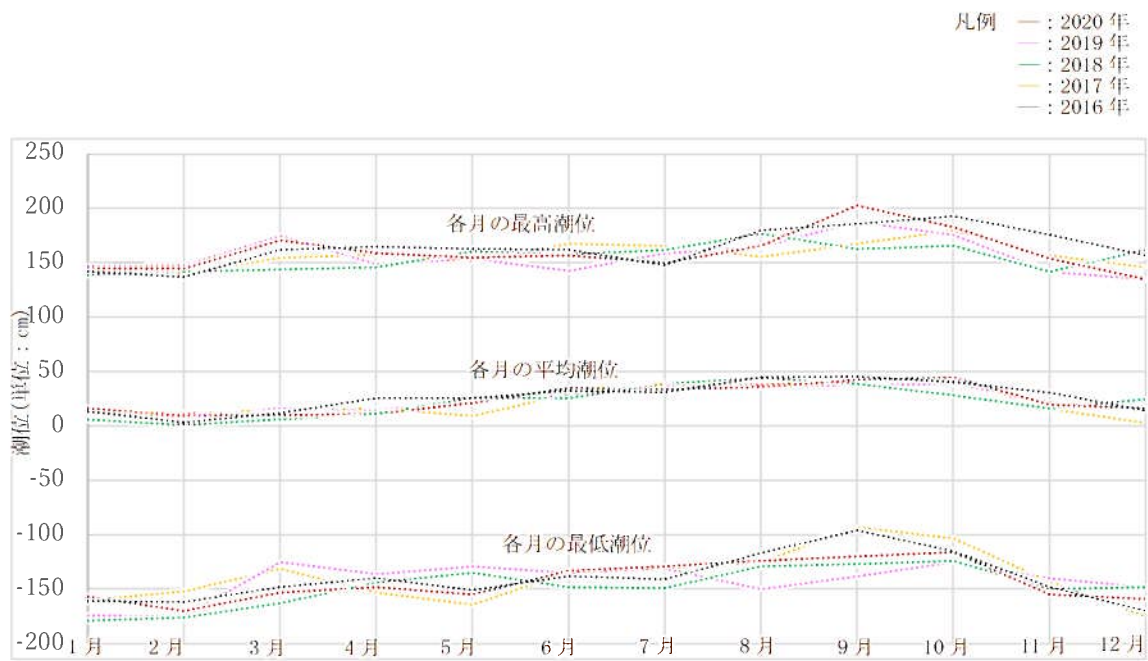
$$\text{実測値による劣化外力係数 } \alpha = \sqrt{\frac{C}{C_0}} = \sqrt{\frac{499}{462}} = 1.04 \rightarrow 1.1$$

C : 原子炉補助建屋(外壁 屋内面)の二酸化炭素濃度の実測値(499ppm)

C<sub>0</sub> : 屋外の二酸化炭素濃度の実測値(462ppm)

<p>タイトル</p>	<p>塩分浸透の評価対象及び評価点の選定過程について</p>
<p>説明</p>	<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、干満帯及び海中帯をそれぞれ評価点として選定した。</p> <p>なお、気中帯、干満帯及び海中帯については、「川内原子力発電所 発電用原子炉設置変更許可書」に基づき設定している。</p> <p>また、川内原子力発電所における 2016 年 1 月～2020 年 12 月の期間の潮位を確認しており、大幅な潮位変化がないことを確認している。</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、2016 年 1 月～2020 年 12 月の潮位変化を添付－ 1 に示す。</p> <p>気中帯：H. W. L. (T. P. +1. 38m) を超える位置  干満帯：T. P. +1. 38m 以下、T. P. -1. 72m 以上の位置  海中帯：L. W. L. (T. P. -1. 72m) 未満の位置</p> <p>添付 1      2016 年 1 月～2020 年 12 月までの潮位変化</p>

添付 1



2016年～2020年における各月の潮位変化(最高潮位・平均潮位・最低潮位)

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> <ol style="list-style-type: none"><li>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、海水の飛沫に関する整理を添付2「海水の飛沫環境による塩分浸透への影響」に示す。</li><li>2. 測定方法 JIS A 1154:2020「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。</li><li>3. 測定結果 添付3「塩化物イオン濃度及び量の測定結果」に示すとおり。</li></ol> <p>添付1 塩化物イオン濃度の測定位置図 添付2 海水の飛沫環境による塩分浸透への影響 添付3 塩化物イオン濃度及び量の測定結果</p>

塩化物イオン濃度の測定位置図

凡例 (壁部) (床部)  
▼ ● : 測定位置 (試験実施年)



※ 測定部分の中心位置

## 海水の飛沫環境による塩分浸透への影響

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、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した「気中帯・干満帯・海中帯」の環境の違いについて、別紙10に示す潮位変化データ（2016年1月～2020年12月）を踏まえ、表1において整理した。

表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
	T. P. +5.12m～+7.65m	T. P. +0.5m	T. P. -14.80m～-1.95m
潮位変化 (2016年1月～ 2020年12月)	・最高潮位 (平均) T. P. +1.59m	・最高潮位 (平均) T. P. +1.59m ・最低潮位 (平均) T. P. -1.42m ・平均潮位 (平均) T. P. +0.24m	・最低潮位 (平均) T. P. -1.42m
環境	外気環境	塩化物イオン濃度測定位置が平均潮位を上回っていることから、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	常時海水に浸かる環境



図1 干満帯の塩化物イオン濃度測定位置と潮位変化

表1及び図1に示すとおり、「気中帯」である壁は最高潮位(T.P. +1.59m)から十分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、平均潮位より高い位置にあることから、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、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。

以上から、「干満帯」については、一時的に海水の飛沫を受ける環境にあると考える。

## 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2に、「気中帯」及び「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、及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、日本コンクリート工学会「コンクリート診断技術'21」に示されている。

表2 「気中帯」及び「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。	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環境（一時的に海水の飛沫を受ける環境）。
塩化物イオンの浸透（塩分浸透）の状況	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。	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、海水の飛沫による乾湿の繰り返しによって、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、塩化物イオン量は多いが乾湿の繰り返しはされない環境である。 このことから、一時的に飛沫を受ける環境である干満帯は、気中帯及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易い環境である。

## 塩化物イオン濃度及び量の測定結果\*

## 取水槽気中帯の塩化物イオン濃度及び量の測定結果

コア 番号	単位	塩化物イオン濃度 (%) 及び量 (kg/m <sup>3</sup> )					
		0～20mm	20～40mm	40～60mm	60～80mm	80～100mm	100～120mm
SP-ci-lu	%	0.07	0.06	0.04	0.03	0.03	0.03
8-J-①	kg/m <sup>3</sup>	1.48	1.25	0.80	0.65	0.64	0.60
SP-ci-lu	%	0.07	0.05	0.04	0.04	0.03	0.03
8-J-②	kg/m <sup>3</sup>	1.44	1.19	0.91	0.77	0.67	0.62
SP-ci-lu	%	0.07	0.12	0.10	0.08	0.08	0.08
8	kg/m <sup>3</sup>	1.59	2.64	2.12	1.87	1.86	1.77
平均値	%	0.07	0.08	0.06	0.05	0.05	0.05
	kg/m <sup>3</sup>	1.50	1.69	1.28	1.10	1.06	1.00

## 取水槽干満帯の塩化物イオン濃度及び量の測定結果

コア 番号	単位	塩化物イオン濃度 (%) 及び量 (kg/m <sup>3</sup> )					
		0～20mm	20～40mm	40～60mm	60～80mm	80～100mm	100～120mm
SP-ci-lu	%	0.75	0.50	0.38	0.29	0.24	0.15
6-J-①	kg/m <sup>3</sup>	16.40	10.85	8.39	6.39	5.25	3.20
SP-ci-lu	%	0.51	0.53	0.37	0.34	0.27	0.20
6-J-②	kg/m <sup>3</sup>	11.06	11.49	8.04	7.48	5.93	4.29
SP-ci-lu	%	0.45	0.26	0.16	0.11	0.08	0.07
6	kg/m <sup>3</sup>	9.83	5.60	3.58	2.44	1.80	1.53
平均値	%	0.57	0.43	0.30	0.25	0.20	0.14
	kg/m <sup>3</sup>	12.43	9.31	6.67	5.44	4.33	3.01

## 取水槽海中帯の塩化物イオン濃度及び量の測定結果

コア 番号	単位	塩化物イオン濃度 (%) 及び量 (kg/m <sup>3</sup> )					
		0～20mm	20～40mm	40～60mm	60～80mm	80～100mm	100～120mm
SP-ci-lu	%	0.32	0.16	0.08	0.06	0.04	0.04
11	kg/m <sup>3</sup>	6.92	3.38	1.68	1.22	0.92	0.79
SP-ci-lu	%	0.34	0.41	0.34	0.25	0.20	0.17
12	kg/m <sup>3</sup>	7.01	8.36	7.04	5.11	4.07	3.47
SP-ci-lu	%	0.29	0.28	0.23	0.18	0.13	0.11
13	kg/m <sup>3</sup>	6.25	6.06	4.94	3.80	2.87	2.39
平均値	%	0.32	0.28	0.22	0.16	0.12	0.11
	kg/m <sup>3</sup>	6.73	5.93	4.55	3.38	2.62	2.22

※塩化物イオン量の測定結果のグラフ表示については、別紙 12 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及び結果について
説明	<p>鉄筋の腐食減量の算定過程（方法、条件、パラメータ）及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. 条件及びパラメータ</p> <p>評価対象（気中帯、干満帯、海中帯）の条件及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及び結果」及び添付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ではコンクリート表面は海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。</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11添付2「海水の飛沫環境による塩分浸透への影響」参照）</p>

### 3. 結果

運転開始後 60 年経過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 年経過時点及び、ひび割れが発生する時点の鉄筋の腐食減量」については、添付 2 に示す。

表 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	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 <sup>※1</sup>
取水構造物 (気中帯)	2.6	4.4	84.5
取水構造物 (干満帯) <sup>※2</sup>	7.7	15.1	88.1
取水構造物 (海中帯)	0.9	2.1	86.4

※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 11 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。

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及び結果

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及び結果

鉄筋の腐食減量の算定に用いる諸元とその結果を表 2 に示す。

表 2 算定に用いる諸元と評価結果

	取水構造物			備考	
	気中帯	干満帯	海中帯		
x: かぶり厚さ (mm)	90.5	87.5	85.5, 90.5		
c: 鉄筋位置における塩化物イオン濃度及び量	%	0.05	0.20	0.12	気中帯: 塩分浸透の点検結果 (平均) 干満帯: 塩分浸透の点検結果 (平均) 海中帯: 塩分浸透の点検結果 (平均)
	kg/m <sup>3</sup>	1.1	4.3	2.6	
C <sub>0</sub> : 鉄筋位置における塩化物イオン量 (推定値)	kg/m <sup>3</sup>	0.50~1.96	1.20~7.37	0.70~5.42	運転開始から 60 年経過時点までの各年の推定値
x: かぶり厚さ (mm)	90.5	87.5	85.5, 90.5		
d: 鉄筋径 (mm)	19	25	19, 29		
W: 単位水重 (kg/m <sup>3</sup> )	133	133	133		
W/C: 水セメント比 (%)	44.3	44.3	44.3		
T: 温度 (°C)	17.4	22.0	22.0	気中帯: 気象庁 (阿久根) の観測値 (1984年~2019年の36年平均) 干満帯・海中帯: 発電所構内の海水温度の観測値 (1984年~2019年の36年平均)	
RH: 相対湿度 (%)	85	100	100	森永氏の鉄筋腐食に関する研究論文引用	
O: 酸素濃度 (%)	21	21	0.62	気中帯: 理科年表 干満帯: 別紙 1-1 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: 「原子力発電所屋外重要土木構造物の耐食性能調査マニュアル(2021)」参照	
N: 練り混ぜ水の塩分濃度 (%)	0.62~2.43	1.49~9.14	0.87~6.72	運転開始から 60 年経過時点までの各年の推定値	
n: 調査時点(36 年経過)の鉄筋の腐食減量 (×10 <sup>-4</sup> g/cm <sup>2</sup> )	2.6	7.7	0.9		
n: 運転開始後 60 年経過時点の鉄筋の腐食減量 (×10 <sup>-4</sup> g/cm <sup>2</sup> )	4.4	15.1	2.1		
Q <sub>ex</sub> : 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 <sup>-4</sup> g/cm <sup>2</sup> )	84.5	88.1	80.4		

- : (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

C: 鉄筋位置における塩化物イオン量 (kg/m<sup>3</sup>)  
 C<sub>0</sub>: コンクリート表面の塩化物イオン量 (kg/m<sup>3</sup>)  
 C<sub>init</sub>: コンクリート中の初期塩化物イオン量 (kg/m<sup>3</sup>)

erf: 誤差関数

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

- x: かぶり厚さ (mm)
- D: コンクリートの材料、調査および含水状態などに応じて定まるコンクリート中の塩化物イオンの見かけの拡散係数 (mm<sup>2</sup>/年)
- t: 材齢 (年)

拡散方程式

$$C = (C_0 - C_{init}) \cdot \left[ 1 - \text{erf} \left( \frac{x}{\sqrt{Dt}} \right) \right] + C_{init}$$

森永式

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

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

$$q_2 = 2.59 - 0.05T - 6.89H - 22.87O - 0.99N + 0.14TH + 0.51TO + 0.01TN + 60.81HO + 3.36HN + 7.32ON$$

$$q_2' = 0.56528 + 1.4304N$$

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

- q: 鉄筋の腐食速度 (×10<sup>-4</sup>g/cm<sup>2</sup>/年)
- q<sub>1</sub>: 塩分環境下での腐食速度 (×10<sup>-4</sup>g/cm<sup>2</sup>/年)
- q<sub>2</sub>: 寿命予測対象部位で、塩分環境下での腐食速度 (×10<sup>-4</sup>g/cm<sup>2</sup>/年)
- q<sub>2</sub>': 寿命予測対象部位で、標準条件下 (温度 15°C、湿度 69%、酸素濃度 20%) での腐食速度 (×10<sup>-4</sup>g/cm<sup>2</sup>/年)
- Q<sub>ex</sub>: 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<sup>-4</sup>g/cm<sup>2</sup>)
- 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
- 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

## 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、塩化物イオン量（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（ $D$ ）及びコンクリート表面の塩化物イオン量（ $C_0$ ））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

塩化物イオン量は、気中帯、干満帯及び海中帯のそれぞれに対して、3箇所のコア採取により測定している。測定位置及び測定結果は、「別紙11添付1 塩化物イオン濃度の測定位置図」及び「別紙11添付3 塩化物イオン濃度及び量の測定結果」に示す。

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

なお、回帰分析に当たっては、土木学会規準（案）\*に準拠して中性化の影響の可能性を考慮することとし、コンクリート表面に近い領域の測定値について、「中性化の影響を考慮するケース」と「中性化の影響を考慮しないケース」の比較を行った。検討の結果、ほとんどのケースで「中性化の影響を考慮するケース」の方が、回帰分析における精度が高かったことから、今回、「中性化の影響を考慮するケース」を採用した。気中帯、干満帯及び海中帯の回帰分析結果を図1に示す。

※：コンクリート委員会・規準関連小委員会 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 573-2003）」（以下、土木学会規準（案）という。）

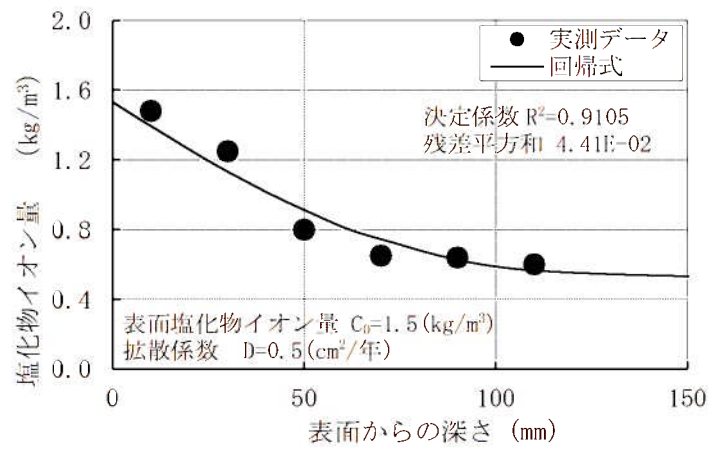
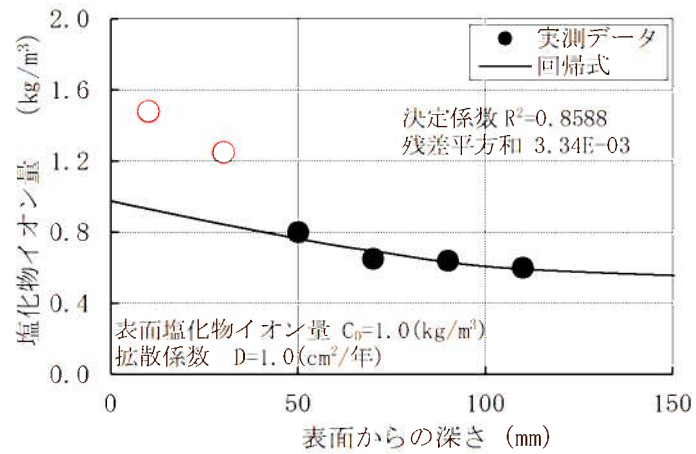


図1(1/9) 取水構造物気中帯 (SP-ci-1u-8-J-①) の回帰分析結果  
(上：中性化考慮あり [○データを棄却]、下：中性化考慮なし)

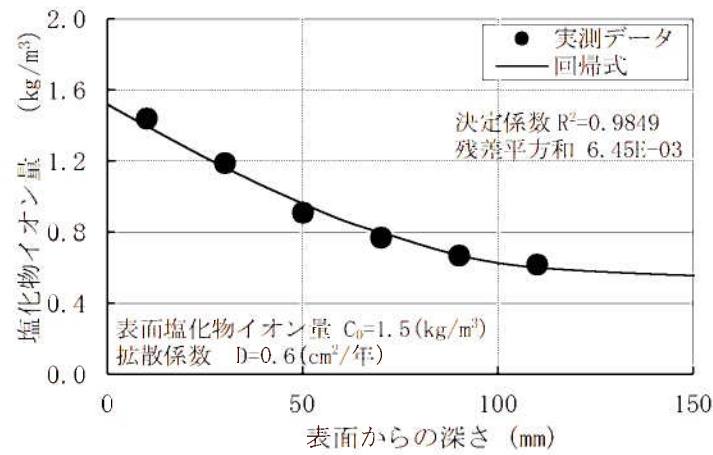
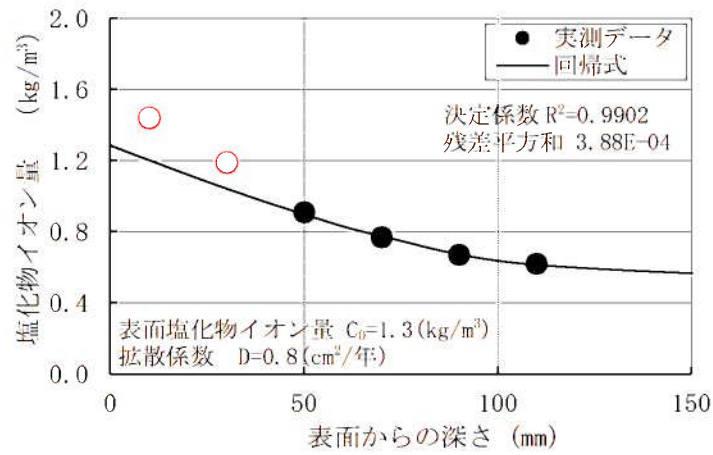


図1(2/9) 取水構造物気中帯 (SP-ci-1u-8-J-②) の回帰分析結果  
(上: 中性化考慮あり [○データを棄却]、下: 中性化考慮なし)

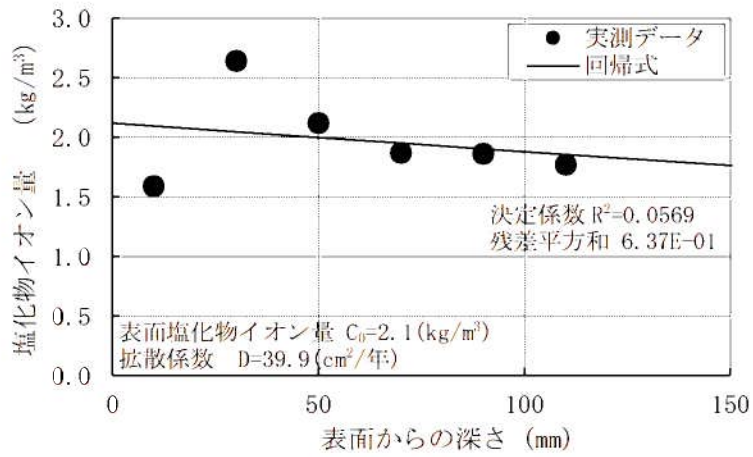
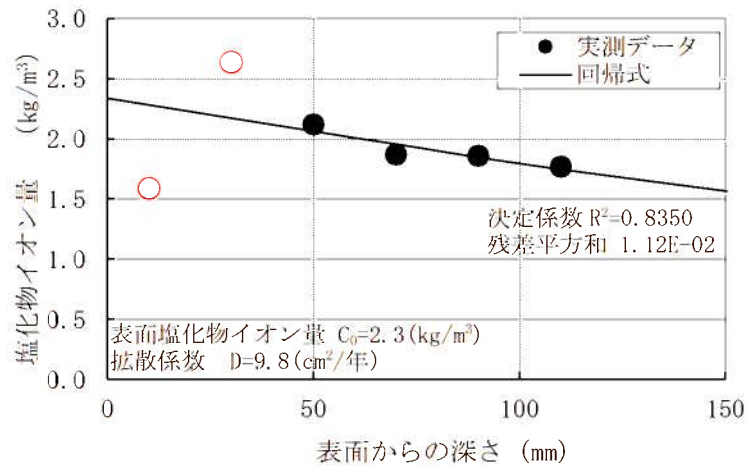


図1(3/9) 取水構造物気中帯 (SP-ci-1u-8) の回帰分析結果  
(上: 中性化考慮あり [○データを棄却]、下: 中性化考慮なし)

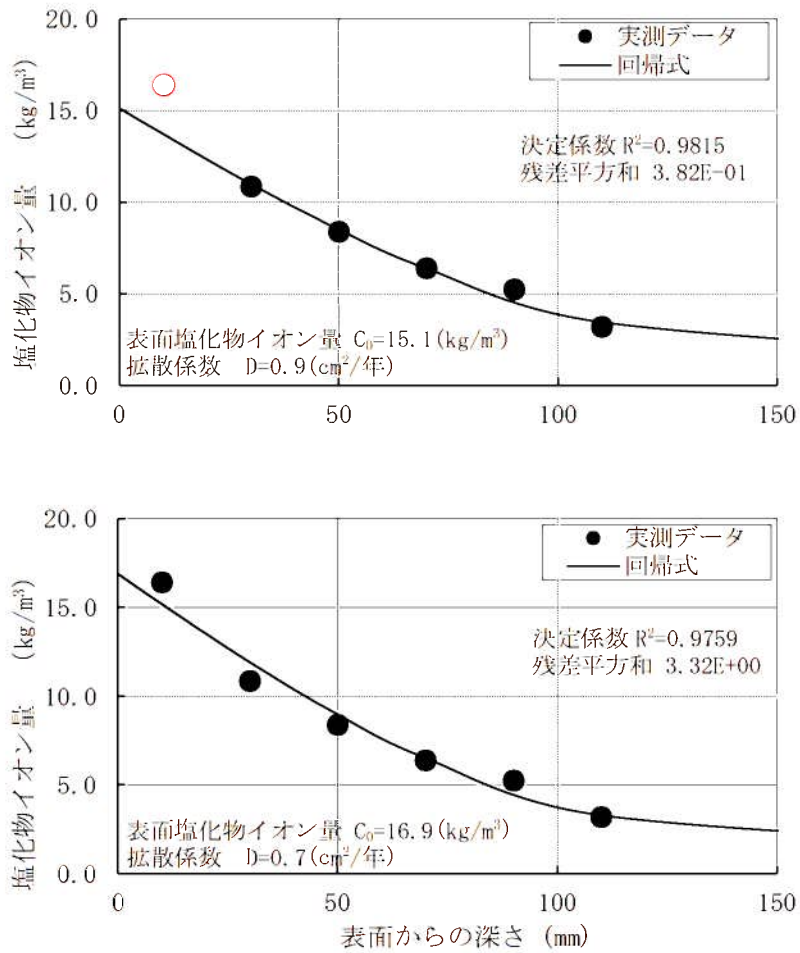


図1(4/9) 取水構造物干満帯 (SP-ci-1u-6-J-①) の回帰分析結果  
 (上: 中性化考慮あり [○データを棄却]、下: 中性化考慮なし)



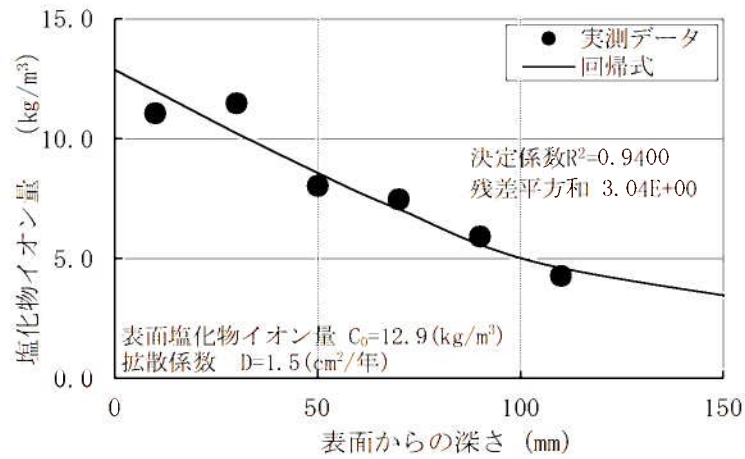
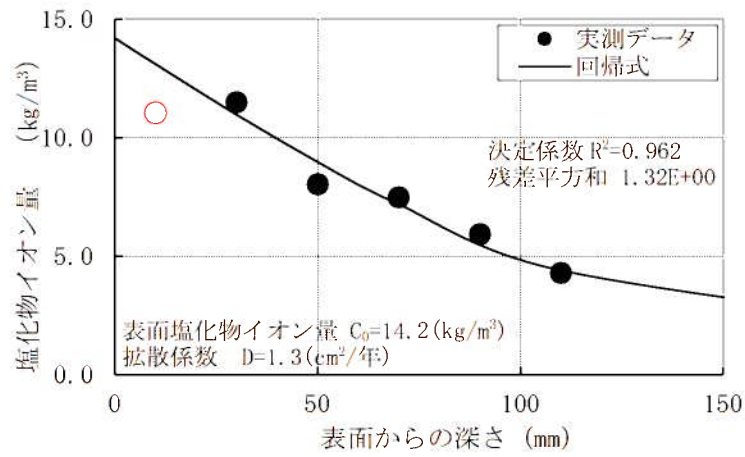


図1(5/9) 取水構造物干満帯 (SP-ci-1u-6-J-②) の回帰分析結果  
(上：中性化考慮あり [○データを棄却]、下：中性化考慮なし)

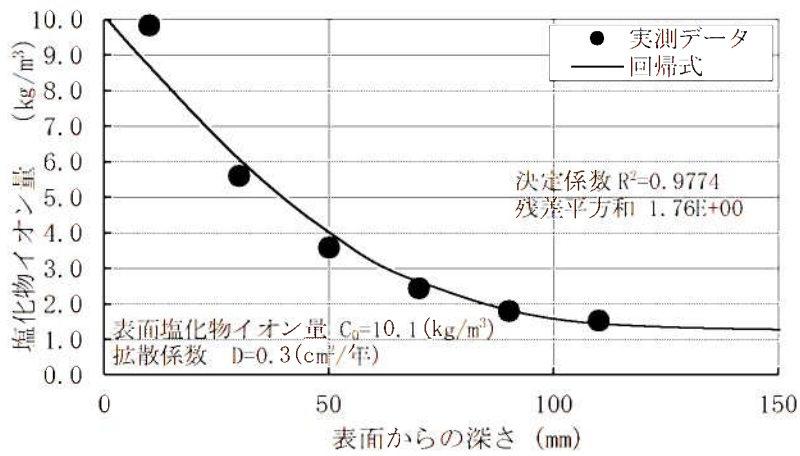
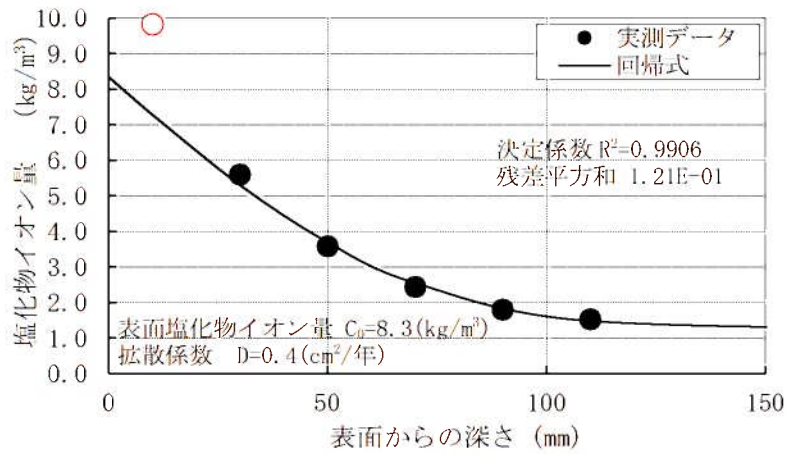


図1(6/9) 取水構造物干満帯 (SP-ci-1u-6) の回帰分析結果  
(上: 中性化考慮あり [○データを棄却]、下: 中性化考慮なし)

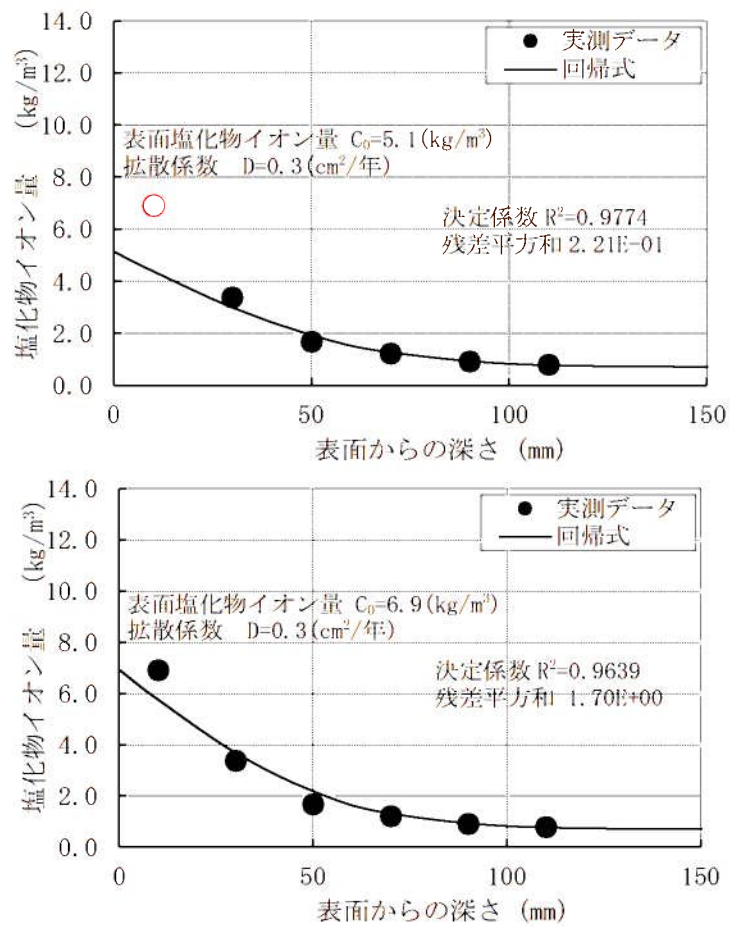


図1(7/9) 取水構造物海中帯 (SP-ci-1u-11) の回帰分析結果  
 (上: 中性化考慮あり [○データを棄却]、下: 中性化考慮なし)

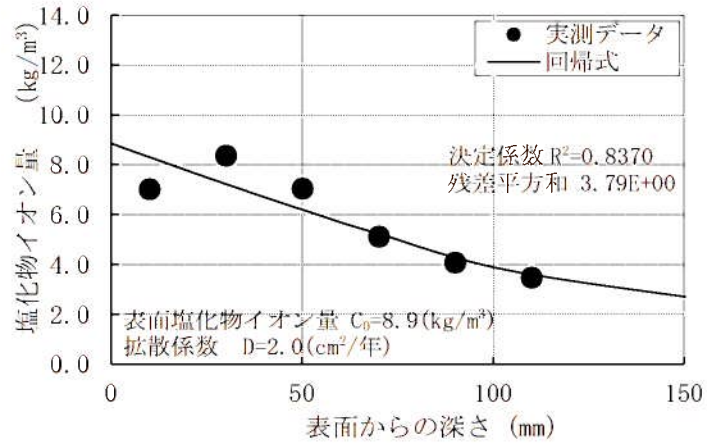
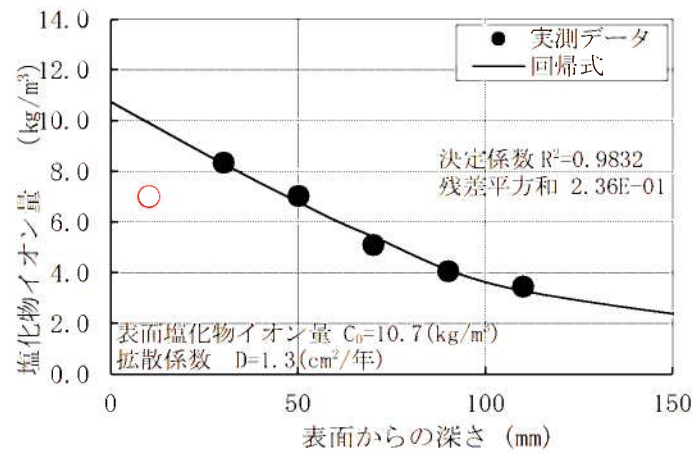


図1(8/9) 取水構造物海中帯 (SP-ci-1u-12) の回帰分析結果  
(上: 中性化考慮あり [○データを棄却]、下: 中性化考慮なし)

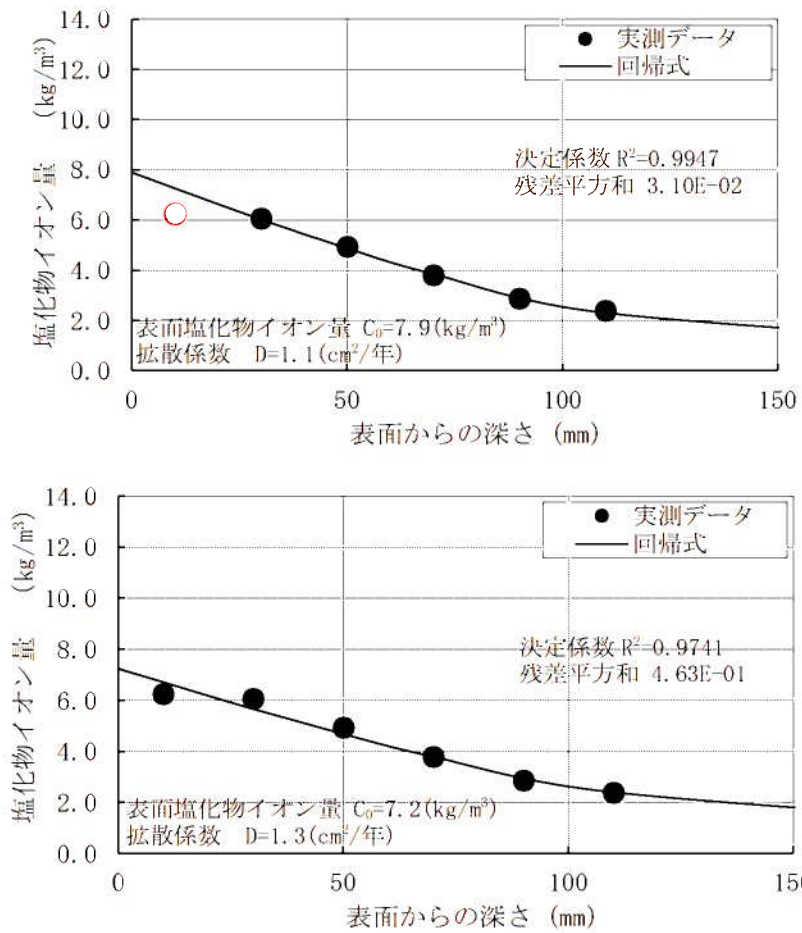


図1(9/9) 取水構造物海中帯 (SP-ci-1u-13) の回帰分析結果  
(上: 中性化考慮あり [○データを棄却]、下: 中性化考慮なし)

## (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)及びコンクリート表面の塩化物イオン量(Co)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」及び、「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選定した結果を表3に示す。

運転開始後60年経過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本のコア測定値の平均値を用いた場合である。それぞれ単独コアで見た場合でも、運転開始後60年経過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を下回っていることを確認しており、その結果については後述する。

表3 鉄筋の腐食減量の結果

気中帯(3本コア平均)		干満帯(3本コア平均)		海中帯(3本コア平均)	
運転開始後経過年数	鉄筋の腐食減量 ( $\times 10^{-1} \text{g/cm}^2$ )	運転開始後経過年数	鉄筋の腐食減量 ( $\times 10^{-1} \text{g/cm}^2$ )	運転開始後経過年数	鉄筋の腐食減量 ( $\times 10^{-1} \text{g/cm}^2$ )
調査時点 (36年)	2.6	調査時点 (36年)	7.7	調査時点 (36年)	0.9
運転開始後 60年経過時点	4.4	運転開始後 60年経過時点	15.1	運転開始後 60年経過時点	2.1
かぶりコンクリートにひび割れが発生する時点	84.5	かぶりコンクリートにひび割れが発生する時点	88.1	かぶりコンクリートにひび割れが発生する時点	86.4

## 2) 単独コアの確認結果

## ① 気中帯について

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「中性化した領域及びそこから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。」を参考に、気中帯の中性化深さ測定結果（11.5mm）+1cmの領域を含む『0～40mmの塩化物イオン量のデータ』を用いる場合と用いない場合の影響を確認した。

## ■ コア（3箇所）の塩化物イオン濃度及び量測定結果

塩化物イオンの測定結果を表4に示す。測定結果（水色部）が中性化の作用が考えられる領域のデータ（0～40mm）である。

表4 コアの塩化物イオン濃度及び量測定値（気中帯：3箇所）

コア 番号	単位	塩化物イオン濃度及び量					
		0～20mm	20～40mm	40～60mm	60～80mm	80～100mm	100～120mm
SP-ci-lu 8-J-①	%	0.07	0.06	0.04	0.03	0.03	0.03
	kg/m <sup>3</sup>	1.48	1.25	0.80	0.65	0.64	0.60
SP-ci-lu 8-J-②	%	0.07	0.05	0.04	0.04	0.03	0.03
	kg/m <sup>3</sup>	1.44	1.19	0.91	0.77	0.67	0.62
SP-ci-lu 8	%	0.07	0.12	0.10	0.08	0.08	0.08
	kg/m <sup>3</sup>	1.59	2.64	2.12	1.87	1.86	1.77
平均値	%	0.07	0.08	0.06	0.05	0.05	0.05
	kg/m <sup>3</sup>	1.50	1.69	1.28	1.10	1.06	1.00

## ■ 各ケース単独コアの確認

塩化物イオン量測定結果及び表面付近領域の中性化影響の考慮有無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」及び、「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5,6に示す。

いずれのパターンにおいても、運転開始後60年経過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を大きく下回っていることを確認した。

表5 鉄筋の腐食減量の算定結果(気中帯)  
【中性化の影響を考慮するケース】

SP-ci-1u-8-J-①		SP-ci-1u-8-J-②		SP-ci-1u-8		3本コア平均 <sup>※1</sup>	
運転開始後 経過年数	鉄筋の 腐食減量 ( $\times 10^4 \text{g/cm}^2$ )	運転開始後 経過年数	鉄筋の 腐食減量 ( $\times 10^4 \text{g/cm}^2$ )	運転開始後 経過年数	鉄筋の 腐食減量 ( $\times 10^4 \text{g/cm}^2$ )	運転開始後 経過年数	鉄筋の 腐食減量 ( $\times 10^4 \text{g/cm}^2$ )
31	2.0	31	2.0	31	2.6	31	2.2
32	2.1	32	2.1	32	2.6	32	2.3
33	2.2	33	2.2	33	2.7	33	2.4
34	2.2	34	2.2	34	2.8	34	2.4
35	2.3	35	2.3	35	2.9	35	2.5
36	2.4	36	2.4	36	3.0	36	2.6
37	2.4	37	2.4	37	3.1	37	2.7
38	2.5	38	2.5	38	3.2	38	2.7
39	2.6	39	2.6	39	3.3	39	2.8
40	2.6	40	2.6	40	3.3	40	2.9
41	2.7	41	2.7	41	3.4	41	3.0

55	3.6	55	3.6	55	4.7	55	4.0
56	3.7	56	3.7	56	4.8	56	4.1
57	3.8	57	3.8	57	4.9	57	4.1
58	3.8	58	3.8	58	5.0	58	4.2
59	3.9	59	3.9	59	5.1	59	4.3
60	4.0	60	4.0	60	5.2	60	4.4
61	4.0	61	4.1	61	5.2	61	4.4
62	4.1	62	4.1	62	5.3	62	4.5
63	4.2	63	4.2	63	5.4	63	4.6
64	4.2	64	4.3	64	5.5	64	4.7
65	4.3	65	4.3	65	5.6	65	4.7

1221	84.1	1159	84.1	882	84.0		
1222	84.2	1160	84.2	883	84.1		
1223	84.2	1161	84.3	884	84.2		
1224	84.3	1162	84.3	885	84.3		
1225	84.4	1163	84.4	886	84.4		
1226 <sup>※1</sup>	84.5	1164 <sup>※2</sup>	84.5	887 <sup>※2</sup>	84.5		
1227	84.5	1165	84.6	888	84.6		
1228	84.6	1166	84.6	889	84.7		
1229	84.7	1167	84.7	890	84.8		
1230	84.7	1168	84.8	891	84.9		
1231	84.8	1169	84.9	892	85.0		

□: 技術評価書に記載の値

※1: 四捨五入のため、単独コアの平均結果が3本コア平均の値と合わない場合がある

※2: かぶりコンクリートにひび割れが発生する時点



表6 鉄筋の腐食減量の算定結果(気中帯)  
【中性化の影響を考慮しないケース】

SP-ci-1u-8-J-①		SP-ci-1u-8-J-②		SP-ci-1u-8		3本コア平均※1	
運転開始後 経過年数	鉄筋の 腐食減量 ( $\times 10^3 \text{g}/\text{m}^2$ )	運転開始後 経過年数	鉄筋の 腐食減量 ( $\times 10^3 \text{g}/\text{m}^2$ )	運転開始後 経過年数	鉄筋の 腐食減量 ( $\times 10^3 \text{g}/\text{m}^2$ )	運転開始後 経過年数	鉄筋の 腐食減量 ( $\times 10^3 \text{g}/\text{m}^2$ )
31	2.0	31	2.0	31	2.7	31	2.3
32	2.1	32	2.1	32	2.8	32	2.3
33	2.2	33	2.2	33	2.9	33	2.4
34	2.2	34	2.2	34	3.0	34	2.5
35	2.3	35	2.3	35	3.0	35	2.6
36	2.4	36	2.4	36	3.1	36	2.6
37	2.4	37	2.4	37	3.2	37	2.7
38	2.5	38	2.5	38	3.3	38	2.8
39	2.6	39	2.6	39	3.4	39	2.8
40	2.6	40	2.6	40	3.5	40	2.9
41	2.7	41	2.7	41	3.6	41	3.0

55	3.6	55	3.6	55	4.8	55	4.0
56	3.7	56	3.7	56	4.9	56	4.1
57	3.8	57	3.8	57	5.0	57	4.2
58	3.8	58	3.8	58	5.1	58	4.3
59	3.9	59	3.9	59	5.2	59	4.3
60	4.0	60	4.0	60	5.3	60	4.4
61	4.0	61	4.1	61	5.4	61	4.5
62	4.1	62	4.1	62	5.5	62	4.6
63	4.2	63	4.2	63	5.6	63	4.6
64	4.2	64	4.3	64	5.7	64	4.7
65	4.3	65	4.3	65	5.8	65	4.8

1130	84.1	1122	84.1	906	84.0		
1131	84.2	1123	84.2	907	84.1		
1132	84.3	1124	84.3	908	84.2		
1133	84.4	1125	84.3	909	84.3		
1134	84.4	1126	84.4	910	84.4		
1135※2	84.5	1127※2	84.5	911※2	84.5		
1136	84.6	1128	84.6	912	84.6		
1137	84.7	1129	84.7	913	84.7		
1138	84.8	1130	84.7	914	84.8		
1139	84.8	1131	84.8	915	84.9		
1140	84.9	1132	84.9	916	85.0		

※1：四捨五入のため、単独コアの平均結果が3本コア平均の値と合わない場合がある

※2：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

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「中性化した領域及びそこから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。」を参考に、干満帯の中性化深さ測定結果(2.0mm)+1cmの領域を含む『0~20mmの塩化物イオン量のデータ』を用いる場合と用いない場合の影響を確認した。

## ■コア(3箇所)の塩化物イオン濃度及び量測定結果

塩化物イオンの測定結果を表7に示す。なお、測定結果(水色部)が中性化の作用が考えられる領域のデータ(0~20mm)である。

表7 コアの塩化物イオン濃度及び量測定値(干満帯:3箇所)

コア番号	単位	塩化物イオン濃度及び量					
		0~20mm	20~40mm	40~60mm	60~80mm	80~100mm	100~120mm
SP-ci-lu 6-J-①	%	0.75	0.50	0.38	0.29	0.24	0.15
	kg/m <sup>3</sup>	16.40	10.85	8.39	6.39	5.25	3.20
SP-ci-lu 6-J-②	%	0.51	0.53	0.37	0.34	0.27	0.20
	kg/m <sup>3</sup>	11.06	11.49	8.04	7.48	5.93	4.29
SP-ci-lu 6	%	0.45	0.26	0.16	0.11	0.08	0.07
	kg/m <sup>3</sup>	9.83	5.60	3.58	2.44	1.80	1.53
平均値	%	0.57	0.43	0.30	0.25	0.20	0.14
	kg/m <sup>3</sup>	12.43	9.31	6.67	5.44	4.33	3.01

## ■各ケース単独コアの確認

塩化物イオン量測定結果及び表面付近領域の中性化影響の考慮有無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」及び、「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8,9に示す。

いずれのパターンにおいても、運転開始後60年経過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を大きく下回っていることを確認した。

表8 鉄筋の腐食減量の算定結果(干満帯)  
【中性化の影響を考慮するケース】

SP-ci-lu-6-J-①		SP-ci-lu-6-J-②		SP-ci-lu-6		3本コア平均 <sup>※1</sup>	
運転開始後 経過年数	鉄筋の 腐食減量 ( $\times 10^3 \text{g/cm}^2$ )	運転開始後 経過年数	鉄筋の 腐食減量 ( $\times 10^3 \text{g/cm}^2$ )	運転開始後 経過年数	鉄筋の 腐食減量 ( $\times 10^3 \text{g/cm}^2$ )	運転開始後 経過年数	鉄筋の 腐食減量 ( $\times 10^3 \text{g/cm}^2$ )
31	6.6	31	7.4	31	5.2	31	6.4
32	6.8	32	7.7	32	5.4	32	6.6
33	7.1	33	8.0	33	5.6	33	6.9
34	7.4	34	8.3	34	5.8	34	7.2
35	7.7	35	8.7	35	5.9	35	7.5
36	8.0	36	9.0	36	6.1	36	7.7
37	8.3	37	9.4	37	6.3	37	8.0
38	8.6	38	9.7	38	6.5	38	8.3
39	8.9	39	10.1	39	6.7	39	8.6
40	9.3	40	10.4	40	6.9	40	8.9
41	9.6	41	10.8	41	7.1	41	9.1

55	14.4	55	16.1	55	9.9	55	13.4
56	14.7	56	16.4	56	10.1	56	13.8
57	15.1	57	16.8	57	10.3	57	14.1
58	15.5	58	17.2	58	10.5	58	14.4
59	15.8	59	17.6	59	10.7	59	14.7
60	16.2	60	18.1	60	10.9	60	15.1
61	16.6	61	18.5	61	11.1	61	15.4
62	17.0	62	18.9	62	11.3	62	15.7
63	17.3	63	19.3	63	11.5	63	16.1
64	17.7	64	19.7	64	11.8	64	16.4
65	18.1	65	20.1	65	12.0	65	16.7

209	85.9	200	85.5	326	86.6		
210	86.4	201	86.0	327	86.9		
211	87.0	202	86.6	328	87.2		
212	87.5	203	87.1	329	87.5		
213	88.0	204	87.6	330	87.9		
214 <sup>※2</sup>	88.5	205 <sup>※3</sup>	88.1	331 <sup>※2</sup>	88.2		
215	89.1	206	88.7	332	88.5		
216	89.6	207	89.2	333	88.8		
217	90.1	208	89.7	334	89.2		
218	90.6	209	90.3	335	89.5		
219	91.2	210	90.8	336	89.8		

□: 技術評価書に記載の値

※1: 四捨五入のため、単独コアの平均結果が3本コア平均の値と合わない場合がある

※2: かぶりコンクリートにひび割れが発生する時点

表9 鉄筋の腐食減量の算定結果(干満帯)  
【中性化の影響を考慮しないケース】

SP-ci-lu-6-J-①		SP-ci-lu-6-J-②		SP-ci-lu-6		3本コア平均 <sup>※1</sup>	
運転開始後 経過年数	鉄筋の 腐食減量 ( $\times 10^3 \text{g}/\text{m}^2$ )	運転開始後 経過年数	鉄筋の 腐食減量 ( $\times 10^3 \text{g}/\text{m}^2$ )	運転開始後 経過年数	鉄筋の 腐食減量 ( $\times 10^3 \text{g}/\text{m}^2$ )	運転開始後 経過年数	鉄筋の 腐食減量 ( $\times 10^3 \text{g}/\text{m}^2$ )
31	6.4	31	7.6	31	5.2	31	6.4
32	6.7	32	7.9	32	5.4	32	6.7
33	7.0	33	8.2	33	5.6	33	6.9
34	7.3	34	8.6	34	5.7	34	7.2
35	7.6	35	8.9	35	5.9	35	7.5
36	7.9	36	9.3	36	6.1	36	7.8
37	8.2	37	9.6	37	6.3	37	8.0
38	8.5	38	10.0	38	6.5	38	8.3
39	8.8	39	10.3	39	6.7	39	8.6
40	9.1	40	10.7	40	6.9	40	8.9
41	9.4	41	11.0	41	7.0	41	9.2

55	14.3	55	16.3	55	9.9	55	13.5
56	14.6	56	16.7	56	10.1	56	13.8
57	15.0	57	17.0	57	10.3	57	14.1
58	15.4	58	17.4	58	10.5	58	14.4
59	15.8	59	17.8	59	10.7	59	14.8
60	16.2	60	18.2	60	10.9	60	15.1
61	16.5	61	18.6	61	11.1	61	15.4
62	16.9	62	19.0	62	11.4	62	15.8
63	17.3	63	19.4	63	11.6	63	16.1
64	17.7	64	19.8	64	11.8	64	16.5
65	18.1	65	20.3	65	12.0	65	16.8

202	85.4	205	85.6	309	86.5		
203	85.9	206	86.1	310	86.8		
204	86.5	207	86.6	311	87.2		
205	87.0	208	87.1	312	87.5		
206	87.6	209	87.6	313	87.9		
207 <sup>※2</sup>	88.1	210 <sup>※2</sup>	88.1	314 <sup>※2</sup>	88.2		
208	88.7	211	88.7	315	88.6		
209	89.3	212	89.2	316	89.0		
210	89.8	213	89.7	317	89.3		
211	90.4	214	90.2	318	89.7		
212	90.9	215	90.7	319	90.0		

※1：四捨五入のため、単独コアの平均結果が3本コア平均の値と合わない場合がある

※2：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

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)を参考に、中性化の作用が考えられる領域の『0～20mmの塩化物イオン量のデータ』を用いる場合と用いない場合の影響を確認した。

## ■コア(3箇所)の塩化物イオン濃度及び量測定結果

塩化物イオンの測定結果を表10に測定結果を示す。なお測定結果(水色)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。

表10 コアの塩化物イオン濃度及び量測定値(海中帯:3箇所)

コア番号	単位	塩化物イオン濃度及び量					
		0～20mm	20～40mm	40～60mm	60～80mm	80～100mm	100～120mm
SP-ci-1u-11	%	0.32	0.16	0.08	0.06	0.04	0.04
	kg/m <sup>3</sup>	6.92	3.38	1.68	1.22	0.92	0.79
SP-ci-1u-12	%	0.34	0.41	0.34	0.25	0.20	0.17
	kg/m <sup>3</sup>	7.01	8.36	7.04	5.11	4.07	3.47
SP-ci-1u-13	%	0.29	0.28	0.23	0.18	0.13	0.11
	kg/m <sup>3</sup>	6.25	6.06	4.94	3.80	2.87	2.39
平均値	%	0.32	0.28	0.22	0.16	0.12	0.11
	kg/m <sup>3</sup>	6.73	5.93	4.55	3.38	2.62	2.22

## ■各ケース単独コアの確認

塩化物イオン量測定結果及び表面付近領域の中性化影響の考慮有無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」及び、「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11、12に示す。

いずれのパターンにおいても、運転開始後60年経過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を大きく下回っていることを確認した。

表 11 鉄筋の腐食減量の算定結果 (海中帯)  
【中性化の影響を考慮するケース】

SP-ci-1u-11		SP-ci-1u-12		SP-ci-1u-13		3本コア平均 <sup>※1</sup>	
運転開始後 経過年数	鉄筋の 腐食減量 ( $\times 10^3 \text{g}/\text{m}^2$ )	運転開始後 経過年数	鉄筋の 腐食減量 ( $\times 10^3 \text{g}/\text{m}^2$ )	運転開始後 経過年数	鉄筋の 腐食減量 ( $\times 10^3 \text{g}/\text{m}^2$ )	運転開始後 経過年数	鉄筋の 腐食減量 ( $\times 10^3 \text{g}/\text{m}^2$ )
31	0.5	31	1.0	31	0.7	31	0.7
32	0.5	32	1.0	32	0.8	32	0.8
33	0.6	33	1.1	33	0.8	33	0.8
34	0.6	34	1.2	34	0.8	34	0.9
35	0.6	35	1.2	35	0.9	35	0.9
36	0.6	36	1.3	36	0.9	36	0.9
37	0.7	37	1.3	37	1.0	37	1.0
38	0.7	38	1.4	38	1.0	38	1.0
39	0.7	39	1.5	39	1.1	39	1.1
40	0.7	40	1.5	40	1.1	40	1.1
41	0.8	41	1.6	41	1.2	41	1.2

55	1.2	55	2.5	55	1.8	55	1.9
56	1.2	56	2.6	56	1.9	56	1.9
57	1.2	57	2.7	57	2.0	57	2.0
58	1.3	58	2.8	58	2.0	58	2.0
59	1.3	59	2.8	59	2.1	59	2.1
60	1.3	60	2.9	60	2.1	60	2.1
61	1.4	61	3.0	61	2.2	61	2.2
62	1.4	62	3.1	62	2.2	62	2.2
63	1.4	63	3.1	63	2.3	63	2.3
64	1.5	64	3.2	64	2.3	64	2.4
65	1.5	65	3.3	65	2.4	65	2.4

1126	89.6	776	83.9	1013	84.0		
1127	89.7	777	84.0	1014	84.1		
1128	89.8	778	84.1	1015	84.2		
1129	89.9	779	84.2	1016	84.3		
1130	90.0	780	84.4	1017	84.4		
1131 <sup>※2</sup>	90.1	781 <sup>※2</sup>	84.5	1018 <sup>※2</sup>	84.5		
1132	90.2	782	84.6	1019	84.6		
1133	90.3	783	84.7	1020	84.6		
1134	90.3	784	84.9	1021	84.7		
1135	90.4	785	85.0	1022	84.8		
1136	90.5	786	85.1	1023	84.9		

□: 技術評価書に記載の値

※1: 四捨五入のため、単独コアの平均結果が3本コア平均の値と合わない場合がある

※2: かぶりコンクリートにひび割れが発生する時点

表12 鉄筋の腐食減量の算定結果 (海中帯)  
【中性化の影響を考慮しないケース】

SP-ci-lu-11		SP-ci-lu-12		SP-ci-lu-13		3本コア平均 <sup>※1</sup>	
運転開始後 経過年数	鉄筋の 腐食減量 ( $\times 10^{-2}g/cm^2$ )	運転開始後 経過年数	鉄筋の 腐食減量 ( $\times 10^{-2}g/cm^2$ )	運転開始後 経過年数	鉄筋の 腐食減量 ( $\times 10^{-2}g/cm^2$ )	運転開始後 経過年数	鉄筋の 腐食減量 ( $\times 10^{-2}g/cm^2$ )
31	0.5	31	1.1	31	0.8	31	0.8
32	0.5	32	1.2	32	0.8	32	0.8
33	0.6	33	1.2	33	0.8	33	0.9
34	0.6	34	1.3	34	0.9	34	0.9
35	0.6	35	1.4	35	0.9	35	1.0
36	0.6	36	1.4	36	1.0	36	1.0
37	0.6	37	1.5	37	1.0	37	1.0
38	0.7	38	1.5	38	1.1	38	1.1
39	0.7	39	1.6	39	1.1	39	1.1
40	0.7	40	1.7	40	1.1	40	1.2
41	0.7	41	1.7	41	1.2	41	1.2

55	1.2	55	2.7	55	1.9	55	1.9
56	1.2	56	2.8	56	1.9	56	2.0
57	1.2	57	2.8	57	2.0	57	2.0
58	1.3	58	2.9	58	2.0	58	2.1
59	1.3	59	3.0	59	2.1	59	2.1
60	1.3	60	3.0	60	2.2	60	2.2
61	1.4	61	3.1	61	2.2	61	2.2
62	1.4	62	3.2	62	2.3	62	2.3
63	1.4	63	3.3	63	2.3	63	2.3
64	1.5	64	3.3	64	2.4	64	2.4
65	1.5	65	3.4	65	2.4	65	2.5

951	89.5	869	84.0	1070	84.0		
952	89.6	870	84.1	1071	84.1		
953	89.7	871	84.2	1072	84.2		
954	89.8	872	84.3	1073	84.3		
955	89.9	873	84.4	1074	84.4		
956 <sup>※2</sup>	90.1	874 <sup>※2</sup>	84.5	1075 <sup>※2</sup>	84.5		
957	90.2	875	84.6	1076	84.5		
958	90.3	876	84.7	1077	84.6		
959	90.4	877	84.8	1078	84.7		
960	90.6	878	84.9	1079	84.8		
961	90.7	879	85.0	1080	84.9		

※1：四捨五入のため、単独コアの平均結果が3本コア平均の値と合わない場合がある

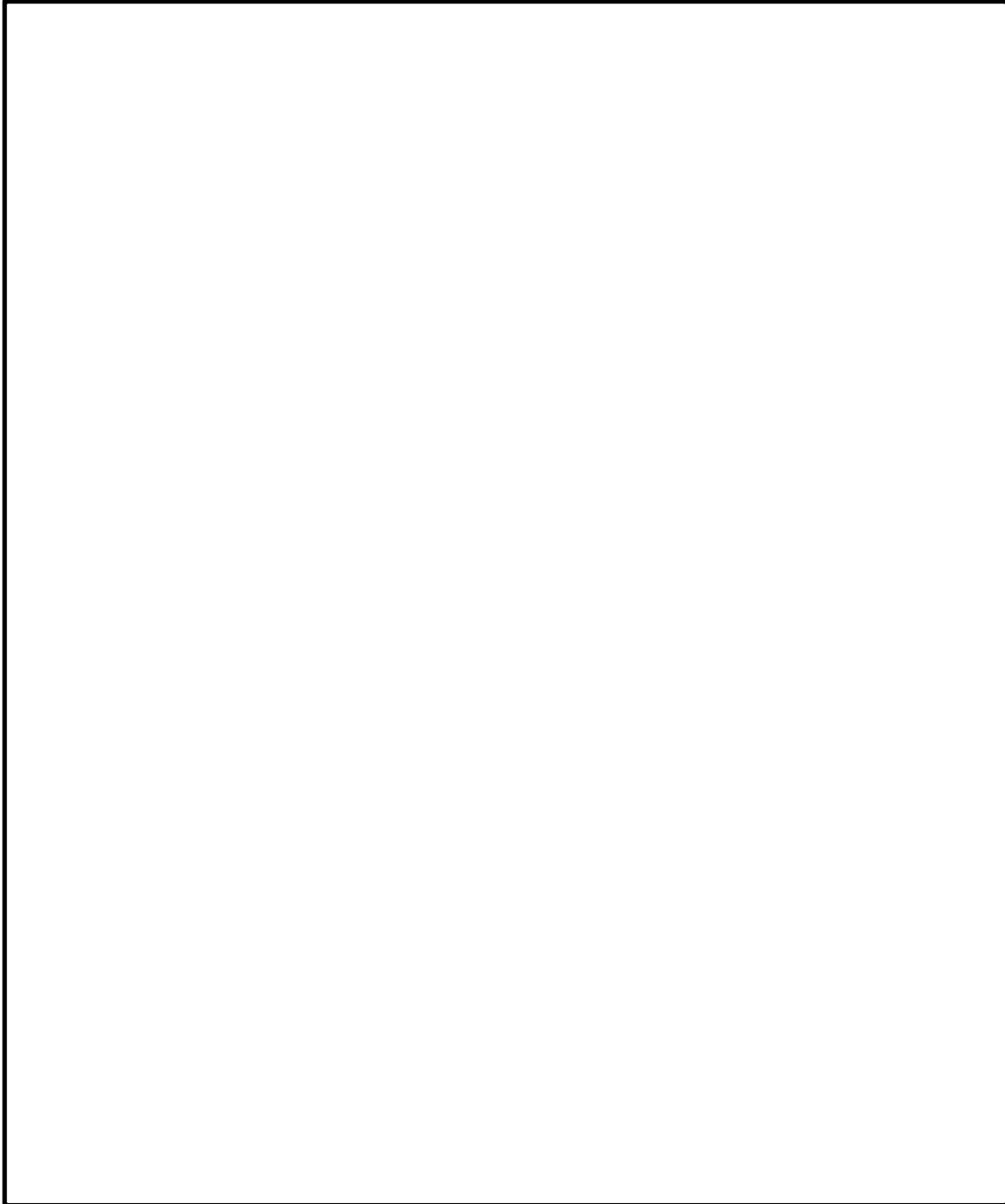
※2：かぶりコンクリートにひび割れが発生する時点

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>「日本原子力学会標準 原子力発電所の高経年化対策実施基準：2021 付属書C 添付資料-4 経年劣化メカニズムまとめ表-PWR」を踏まえ、タービン架台及び非常用ディーゼル発電設備基礎を選定した。 表 1 に主要な機器の定格出力及び重量を示す。</p> <p style="text-align: center;">表 1 主要な機器の定格出力及び重量</p> <table border="1" data-bbox="408 636 1347 1413"> <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>高圧タービン</td> <td>連続</td> <td>890,000</td> <td>約 228,000</td> </tr> <tr> <td>低圧タービン</td> <td>連続</td> <td>890,000</td> <td>約 1,245,000</td> </tr> <tr> <td>海水ポンプ用電動機</td> <td>連続</td> <td>380</td> <td>約 17,200</td> </tr> <tr> <td>格納容器スプレッドポンプ用電動機</td> <td>一時</td> <td>700</td> <td>約 14,100</td> </tr> <tr> <td rowspan="2">余熱除去ポンプ用電動機</td> <td>連続 (余熱除去時)</td> <td rowspan="2">250</td> <td rowspan="2">約 9,200</td> </tr> <tr> <td>一時 (低圧注入時)</td> </tr> <tr> <td>ディーゼル発電機</td> <td>一時</td> <td>5,700</td> <td>約 141,800</td> </tr> <tr> <td>電動補助給水ポンプ用電動機</td> <td>一時</td> <td>400</td> <td>約 3,900</td> </tr> <tr> <td rowspan="2">充てん/高圧注入ポンプ用電動機</td> <td>連続 (充てん時)</td> <td rowspan="2">780</td> <td rowspan="2">約 16,200</td> </tr> <tr> <td>一時 (高圧注入時)</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>5,300</td> <td>約 34,200</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>約 3,000</td> </tr> </tbody> </table> <p>このうちディーゼル発電機については、動作確認等における一時的な運転のみでありタービン発電機と比較してその振動の大きさ、頻度の影響が小さいと言えるものの、運転状態の違いを考慮して念のため評価対象部位とした。 評価点は、局部的に影響を受ける可能性がある基礎ボルト周辺部とした。</p> <p>添付 1 評価対象部位平面図</p>	機器名称	運転状態	定格出力(kW)	重量(kg)	高圧タービン	連続	890,000	約 228,000	低圧タービン	連続	890,000	約 1,245,000	海水ポンプ用電動機	連続	380	約 17,200	格納容器スプレッドポンプ用電動機	一時	700	約 14,100	余熱除去ポンプ用電動機	連続 (余熱除去時)	250	約 9,200	一時 (低圧注入時)	ディーゼル発電機	一時	5,700	約 141,800	電動補助給水ポンプ用電動機	一時	400	約 3,900	充てん/高圧注入ポンプ用電動機	連続 (充てん時)	780	約 16,200	一時 (高圧注入時)	タービン動主給水ポンプタービン	連続	5,300	約 34,200	タービン動補助給水ポンプタービン	一時	810	約 3,000
機器名称	運転状態	定格出力(kW)	重量(kg)																																												
高圧タービン	連続	890,000	約 228,000																																												
低圧タービン	連続	890,000	約 1,245,000																																												
海水ポンプ用電動機	連続	380	約 17,200																																												
格納容器スプレッドポンプ用電動機	一時	700	約 14,100																																												
余熱除去ポンプ用電動機	連続 (余熱除去時)	250	約 9,200																																												
	一時 (低圧注入時)																																														
ディーゼル発電機	一時	5,700	約 141,800																																												
電動補助給水ポンプ用電動機	一時	400	約 3,900																																												
充てん/高圧注入ポンプ用電動機	連続 (充てん時)	780	約 16,200																																												
	一時 (高圧注入時)																																														
タービン動主給水ポンプタービン	連続	5,300	約 34,200																																												
タービン動補助給水ポンプタービン	一時	810	約 3,000																																												



凡例

▼ : コアサンプル採取箇所

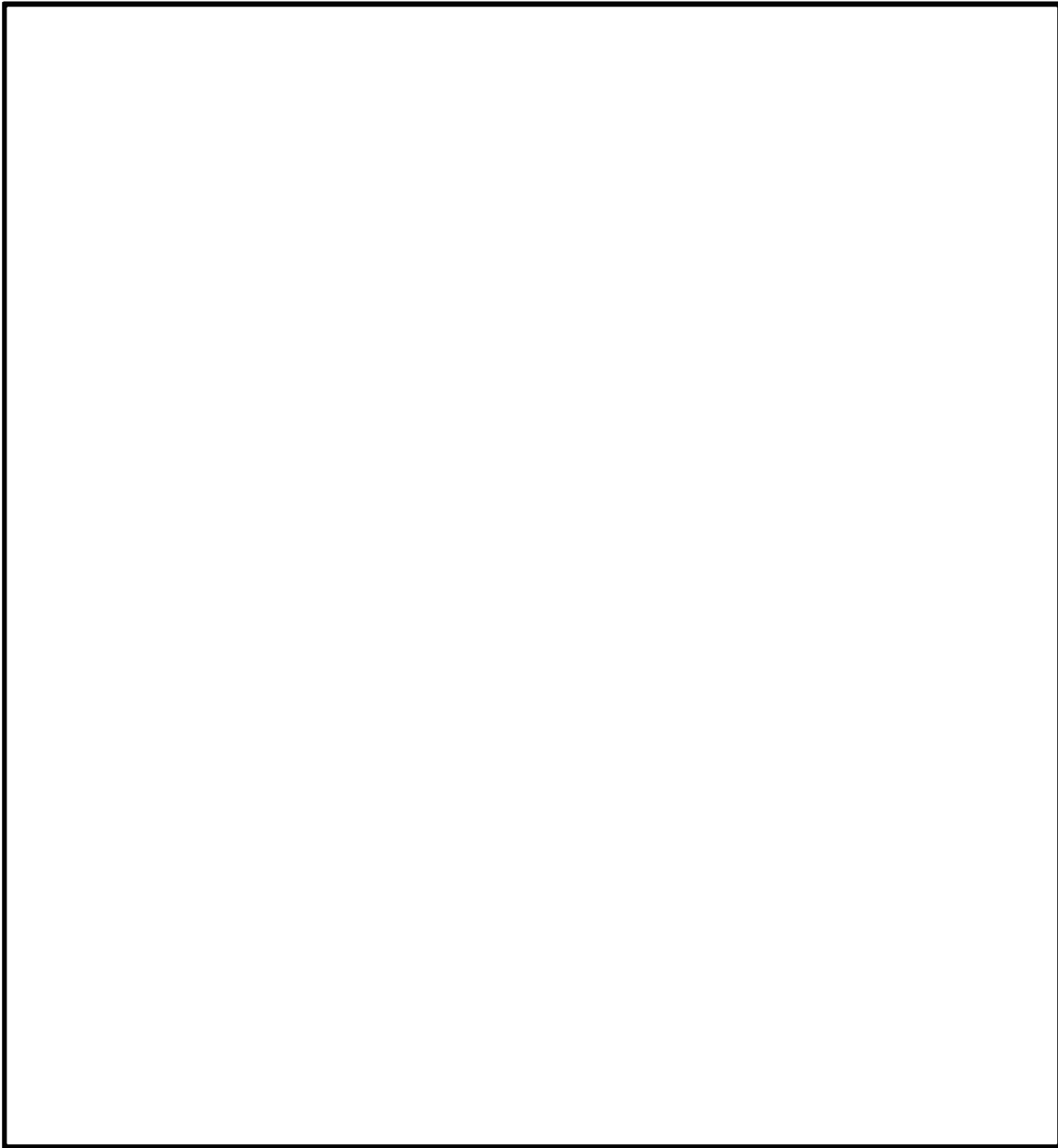


評価対象部位平面図  
(タービン建屋)

凡例



: コアサンプル採取箇所



評価対象部位平面図  
(原子炉補助建屋)

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</p> <p>1986年及び1987年に実施したモルタルバー法の試験方法、試験条件(使用骨材等)及び試験結果等を以下に示す。</p> <table border="1" data-bbox="392 555 1407 949"> <thead> <tr> <th rowspan="2">区分</th> <th rowspan="2">骨材産地</th> <th rowspan="2">試験方法</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>粗骨材</td> <td>砕石 (鹿児島県川内市<sup>*1</sup>川永野産)</td> <td rowspan="2">JASS5N T-201<sup>*3</sup></td> <td rowspan="2">1987年</td> <td>0.008</td> <td rowspan="3">0.10以上</td> <td rowspan="3">無害</td> </tr> <tr> <td rowspan="2">細骨材</td> <td>砕砂 (鹿児島県川内市<sup>*1</sup>川永野産)</td> <td>0.004</td> </tr> <tr> <td></td> <td>海砂 (佐賀県東松浦郡<sup>*2</sup>呼子町小川島産)</td> <td>ASTM-C227<sup>*4</sup></td> <td>1986年</td> <td>-0.031<sup>*5</sup></td> </tr> </tbody> </table> <p>*1：現 薩摩川内市  *2：現 唐津市  *3：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 T-201 骨材の反応性試験方法(案)」(1985)  *4：「Standard Test Method for Potential Alkali Reactivity of Cement-Aggregate Combinations(Mortar-Bar Method)」(1981)  *5：「-」記号は収縮側にあることを示す</p>						区分	骨材産地	試験方法	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	砕石 (鹿児島県川内市 <sup>*1</sup> 川永野産)	JASS5N T-201 <sup>*3</sup>	1987年	0.008	0.10以上	無害	細骨材	砕砂 (鹿児島県川内市 <sup>*1</sup> 川永野産)	0.004		海砂 (佐賀県東松浦郡 <sup>*2</sup> 呼子町小川島産)	ASTM-C227 <sup>*4</sup>	1986年	-0.031 <sup>*5</sup>
区分	骨材産地	試験方法	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	砕石 (鹿児島県川内市 <sup>*1</sup> 川永野産)	JASS5N T-201 <sup>*3</sup>	1987年	0.008	0.10以上	無害																								
細骨材	砕砂 (鹿児島県川内市 <sup>*1</sup> 川永野産)			0.004																										
		海砂 (佐賀県東松浦郡 <sup>*2</sup> 呼子町小川島産)	ASTM-C227 <sup>*4</sup>	1986年			-0.031 <sup>*5</sup>																							

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  
 2013年～2015年、2019年～2021年に実施したモルタルバー法  
 又は化学法の試験方法、試験条件（使用骨材等）及び試験結果等を以下に示す。

対象構造物	区分	骨材産地	試験方法 (準拠規格)	実施年	試験結果	判定
緊急時対策所	粗骨材	砕石 (鹿児島県薩摩川内市城上町産)	モルタルバー法 <sup>*1</sup> (JIS A 1146)	2019年 ～ 2021年	0.023%	無害
	細骨材	砕砂 (鹿児島県薩摩川内市城上町産)			0.017%	
		海砂 (鹿児島県屋久島神谷産)			0.020%	
海水ポンプエリア 防護壁	粗骨材	砕石 (鹿児島県薩摩川内市城上町産)	化学法 <sup>*2</sup> (JIS A 1145)	2013年 ～ 2014年	Re : 72mmol/L. Sc : 9mmol/L. b)	無害
	細骨材	海砂 (鹿児島県日置市吹上浜神谷産)			Re : 61mmol/L. Sc : 20mmol/L. a)	
		山砂 (鹿児島県薩摩川内市港町吉山産)			Re : 118mmol/L. Sc : 57mmol/L. a)	
貯留堰	粗骨材	砕石 (鹿児島県薩摩川内市城上町産)	化学法 <sup>*2</sup> (JIS A 1145)	2013年 ～ 2014年	Re : 72mmol/L. Sc : 9mmol/L. b)	無害
	細骨材	海砂 (鹿児島県日置市吹上浜神谷産)			Re : 61mmol/L. Sc : 20mmol/L. a)	
		山砂 (鹿児島県薩摩川内市港町吉山産)			Re : 123mmol/L. Sc : 36mmol/L. a)	
大容量空冷式 発電機基礎 (燃料タンク基礎含 む)	粗骨材	砕石 (鹿児島県薩摩川内市城上町産)	化学法 <sup>*2</sup> (JIS A 1145)	2014年 ～ 2015年	Re : 71mmol/L. Sc : 10mmol/L. a)	無害
	細骨材	海砂 (鹿児島県日置市吹上浜神谷産)			Re : 72mmol/L. Sc : 23mmol/L. a)	
		山砂 (鹿児島県薩摩川内市港町吉山産)			Re : 121mmol/L. Sc : 49mmol/L. a)	

- \* 1 : 判定基準 無害 …… 供試体3本の平均膨張率が26週後に0.100%未満の場合  
 無害でない …… 供試体3本の平均膨張率が26週後に0.100%以上の場合
- \* 2 : 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。

<p>タイトル</p>	<p>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及び評価結果の妥当性確認について</p>
<p>説明</p>	<p>アルカリ骨材反応の特別点検では、各種規格類や最新知見の動向及び実構造物の状況等を踏まえた上で、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、ひび割れ等の確認により、コンクリートのアルカリ骨材反応の発生の有無・状況が確認できる方法である。</p> <p>川内1号炉のコンクリート構造物は、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等は認められていない等、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は発生していない。一方で、運用ガイド<sup>※1</sup>において採取したコアサンプルによる確認が要求されていること、また、発電所内の広範囲において点検が必要であることを踏まえて、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の有無・程度の確認を主眼とした実体顕微鏡観察を選定したものである。</p> <p>なお、特別点検の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た場合、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>特別点検では、上述するアルカリ骨材反応の発生の有無・程度を的確に観察、分類し、実構造物の状況やコアサンプル全体の目視観察等を踏まえ、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。</p> <p>特別点検の結果、極めて軽微な反応状況<sup>※2</sup>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>なお、参考の位置付けとして、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及び評価結果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、反応の進行段階の確認、ひび割れの確認等により、アルカリ骨材反応が生じているコンクリートの反応の進行段階がより精緻に確認できる方法である。</p> <p>具体的には、川内1号炉で使用するコンクリート材料（セメント、骨材等）が同一であることを踏まえ、特別点検の結果において、アルカリ骨材反応が極めて軽微であるものの、反応リム・ゲルの有無・程度が相対的に顕著な「原子炉格納施設等（外部遮蔽壁）」を選定し、観察を行った。</p> <p>偏光顕微鏡観察の結果においても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及び評価結果は妥当であると改めて判断した。</p> <p>※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（令和2年3月）          ※2：極めて軽微な反応は、健全なコンクリートの多くに認められる現象である</p> <p>添付1 アルカリ骨材反応の健全性評価について          添付2 実体顕微鏡観察と偏光顕微鏡観察の特徴          添付3 実体顕微鏡観察の結果について          添付4 偏光顕微鏡観察の代表箇所          添付5 偏光顕微鏡観察結果について</p>

## 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 J I S 及び学会規格が存在しないことが分かったため、最新知見のひとつである原子力規制庁「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)を参照し、点検方法の検討を行った。
- ・本研究では、コンクリート建造物の ASR 診断フロー(例)が提示されている。
- ・川内 1 号炉は、定期的な目視点検を実施し、運転開始から約 40 年間に於いて、アルカリ骨材反応に起因すると判断されるひび割れ等は認められていない等、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。
- ・運用ガイドにおいて採取したコアサンプルによる確認が要求されている。
- ・発電所内の広範囲において点検が必要である。



以上より、最新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<sup>※1</sup>

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

## 2. 劣化状況評価


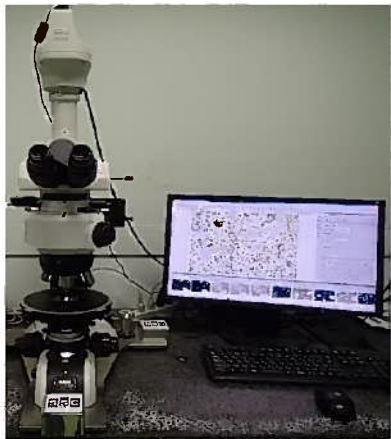
- ・川内 1 号炉は、定期的な目視点検を実施し、運転開始から約 40 年間に於いて、アルカリ骨材反応に起因すると判断されるひび割れ等は認められていない。
- ・使用している骨材(粗骨材、細骨材)は、モルタルバー法による反応性試験を実施し、有害でないことを確認している。
- ・採取したコアサンプルについて、特別点検による実体顕微鏡を用いた観察により、コンクリート建造物の健全性に影響を与えるような反応性がないことを確認した<sup>※2</sup>。



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 参考の位置付けとして、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及び評価結果の妥当性の確認のため、特別点検の代表箇所において、偏光顕微鏡を用いた観察を行った。

## 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
写真 <sup>1)</sup>			
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、反応リム ・ゲルの有無・程度、ひび割れ状況等を観察	・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等から、反応が生じている骨材の鉱物・岩種同定、進行段階、ひび割れ等を観察
	まとめ	・アルカリ骨材反応の発生有無・程度が確認できる	・アルカリ骨材反応が生じているコンクリート（骨材）の進行段階がより精緻に確認できる
課題 <sup>1)</sup>		・岩種の詳細は分からない	・薄片作成・観察に熟練を要する

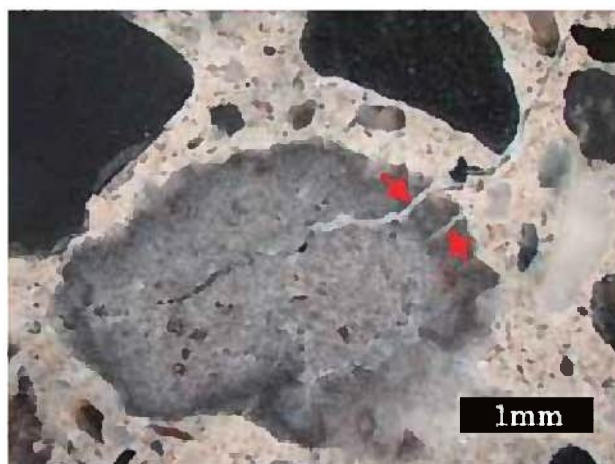
(参考文献)

- 1) 原子力規制庁「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)

実体顕微鏡観察の結果について

(1) 特別点検における評価について

コアサンプルの実体顕微鏡観察結果と、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の有無を確認している。



実体顕微鏡観察での膨張ひび割れの確認事例<sup>1)</sup>



実構造物における膨張ひび割れ（亀甲状）の事例<sup>2)</sup>

参考写真：アルカリ骨材反応が進展している事例

- 1) 株式会社太平洋コンサルタントHP  
(<https://www.taiheiyo-c.co.jp/cement/asr/>)
- 2) A S Rに関する対策検討委員会「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）



(2) 実体顕微鏡観察の結果

川内1号炉においては、セメント・骨材について同一材料を用いており、ほとんどの点検箇所では反応リムの形成やゲルの滲みが確認できたものの、反応状況が極めて軽微であることから、実構造物の状況も踏まえ、川内1号炉全体として反応状況は極めて軽微であり、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はないと判断できる。

構造物名称	原子炉格納施設等		試験員	株太平洋コンサルタント	
部 位	外部遮蔽壁		備 考	番号：OS-asr-1u-4-J-① / 採取日：2020.10.5	
確認箇所 写真					
構成岩種	粗骨材	最大寸法10mm程度の砕石	細骨材	砂	
特記事項	なし				
	進行段階				
	i	ii	iii	iv	v
	骨材	セメントペースト	骨材	セメントペースト	
	反応リムの形成	ゲルの滲み・取り巻き	ひび割れゲル充填	ひび割れゲル充填	気泡へのゲル充填
アルカリ骨材反応の発生状況	◎	◎	-	-	-
判 定	反応性 あり ・ なし				

実体顕微鏡観察結果の例 (原子炉格納施設等 外部遮蔽壁)

劣化度の評価

- 進行段階 i ~ iii : 1 軽微 (潜伏期) ⇒ 反応性なし
- 進行段階 iv : 2 中程度 (進展期・加速期) ⇒ 反応性あり
- 進行段階 v : 3 顕著 (加速期・劣化期) ⇒ 反応性あり

## 特別点検結果の一覧

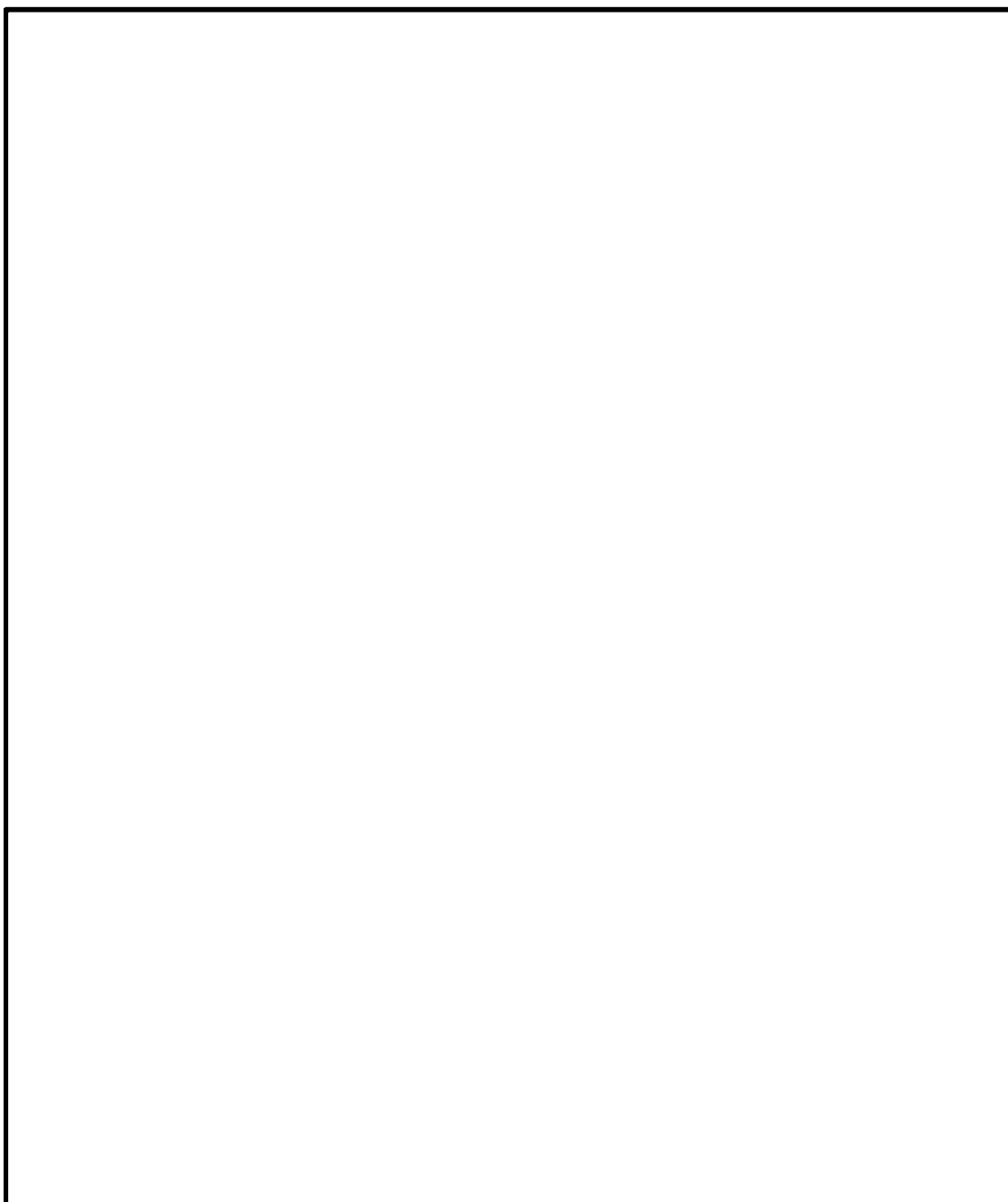
対象構造物	対象部位	実体顕微鏡観察結果	
		進行段階	反応性
原子炉格納施設等	外部遮蔽壁	ii	反応性なし
	内部コンクリート	i	
	基礎マット	i	
原子炉補助建屋	外壁	i	
	内壁及び床	ii	
	使用済み燃料プール	ii	
	基礎マット	—	
タービン建屋	内壁及び床	ii	
	基礎マット	—	
取水槽	海中帯	ii	
	干満帯	ii	
	気中帯	ii	
非常用ディーゼル発電用燃料油貯油槽基礎		ii	
燃料取替用水タンク基礎		ii	

偏光顕微鏡観察の代表箇所

凡 例

▼：特別点検コアサンプル採取位置（実体顕微鏡観察）

▼：偏光顕微鏡観察コアサンプル採取位置



原子炉格納施設等 外部遮蔽壁

## 偏光顕微鏡観察の結果について

## (1) 偏光顕微鏡観察の結果

偏光顕微鏡観察結果においては、骨材に反応リムの形成・ゲルの滲みが生じてはいるが、極めて軽微な反応状況であることが確認された。よって、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ものと判断できる。

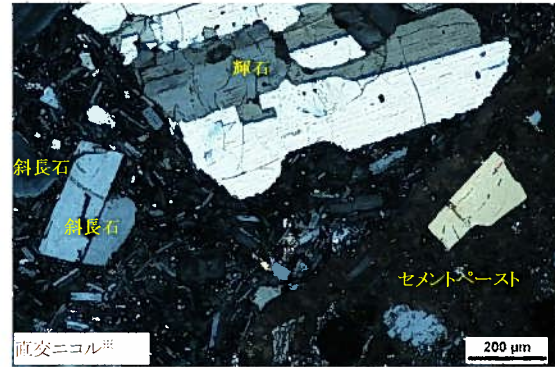
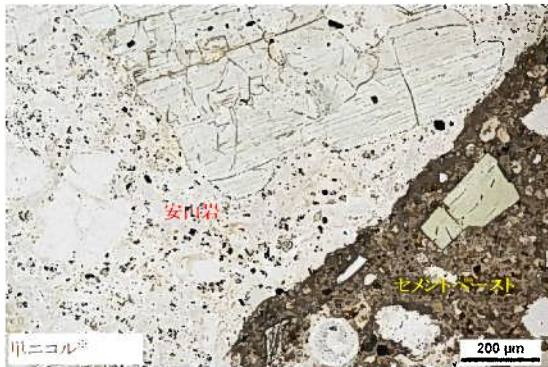
偏光顕微鏡観察結果

構造物	粗骨材 の 岩種	進行段階					劣化度 評価
		i	ii	iii	iv	v	
		骨材 反応リム の形成	セメントペースト ゲルの滲み ・取り巻き	骨材 ひび割れ ゲル充填	セメントペースト ひび割れ ゲル充填 気泡への ゲル充填		
原子炉格納施設等 (外部遮蔽壁)	安山岩	◎	◎	—	—	—	1

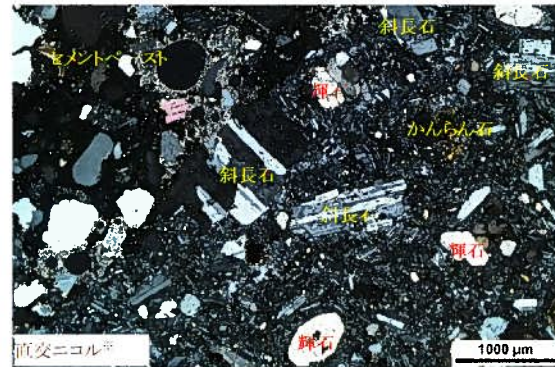
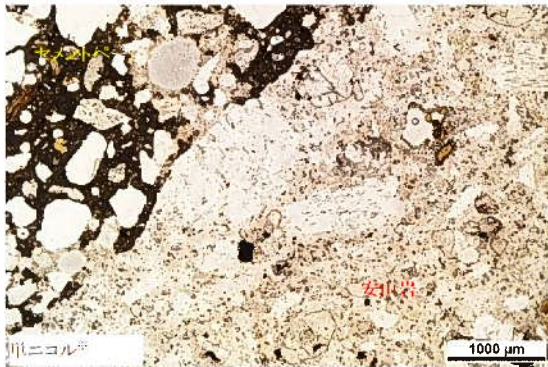
◎ 顕著、○ あり、+ 痕跡程度、— なし

## 劣化度の評価

進行段階 i ~ iii : 1 軽微 (潜伏期) ⇒ 反応性なし  
 進行段階 iv : 2 中程度 (進展期・加速期) ⇒ 反応性あり  
 進行段階 v : 3 顕著 (加速期・劣化期) ⇒ 反応性あり



安山岩は、斜長石や輝石等の斑晶と、その粒間を埋める微細な組織からなる石基から構成される。安山岩において、膨張や劣化を生じるような進行したアルカリ骨材反応の現象としての膨張ひび割れは認められなかった。



安山岩は、斜長石、輝石、かんらん石等の斑晶と、その粒間を埋める微細な組織からなる石基から構成される。安山岩において、膨張や劣化を生じるような進行したアルカリ骨材反応の現象としての膨張ひび割れは認められなかった。

### 偏光顕微鏡観察写真

※単ニコル：直線偏光による透過光で薄片試料を観察（構成鉱物の形、割れ、輪郭、色等を確認）

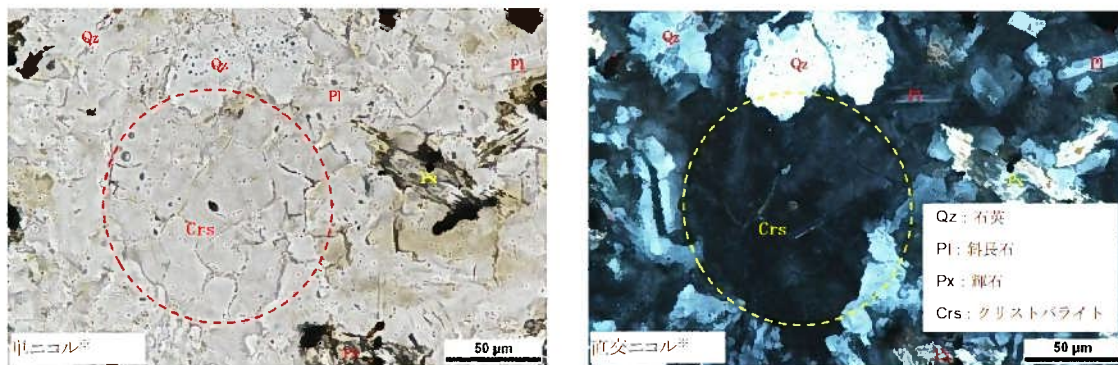
直交ニコル：単ニコルの状態に薄片試料と観察者の間に偏光板を設置して観察（構成鉱物の配列、組織等を確認）

### (2) 実体顕微鏡結果との照らし合わせ

偏光顕微鏡観察結果においても、添付3に示す実体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もの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及び評価結果は妥当であると改めて判断できる。

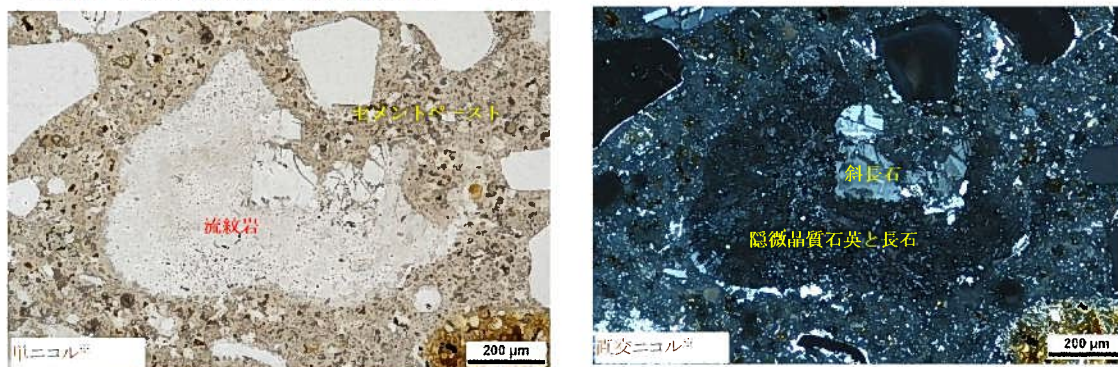
<p>タイトル</p>	<p>アルカリ骨材反応に関する潜在膨張性の評価について</p>
<p>説明</p>	<p>アルカリ骨材反応については、特別点検（実体顕微鏡観察）により反応性がないことを確認しており、点検方法の選定プロセスと点検結果の妥当性を確認するため、代表箇所において偏光顕微鏡観察による確認を実施している。潜在膨張性（急速膨張性及び遅延膨張性）に関する評価については、以下のとおりである。</p> <p>1. 評価内容          特別点検手法の選定プロセス及び評価結果の妥当性確認のため実施した偏光顕微鏡観察<sup>※1</sup>により反応性鉱物の確認を行った。          加えて、将来の潜在膨張性を確認するため、促進膨張試験<sup>※2</sup>（JCI-S-011-2017 及びアルカリ溶液浸漬法）を実施した。</p> <p>2. 評価結果          （偏光顕微鏡観察結果）          粗骨材については、急速膨張性の反応性鉱物（クリストバライト等）が確認されたが、遅延膨張性の反応性鉱物（隠微晶質石英、微晶質石英）は確認されなかった。          細骨材については、急速膨張性の反応性鉱物（クリストバライト等）が確認された。また、一部の部位において、海砂の一部である流紋岩の中に遅延膨張性の反応性鉱物（隠微晶質石英、微晶質石英）が認められた。なお、今回確認した範囲では、流紋岩以外については、遅延膨張性の反応性鉱物は認められなかった。          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）          (1) JCI-S-011-2017          判定基準<sup>※3</sup>（3 ヶ月以上の促進養生後の膨張率が 0.05%未満）に対し、最大でも 0.006%程度であった。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。          (2) アルカリ溶液浸漬法          判定基準<sup>※4</sup>（21 日で膨張率が 0.1%未満）に対し、28 日浸漬させても 0.045%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>※1：実体顕微鏡観察において、反応リムやゲルの有無・程度が相対的に顕著な構造物・部位を対象に実施した          ※2：JCI-S-011-2017については、急速膨張性の反応性鉱物（クリストバライト等）が確認された箇所を対象に実施し、アルカリ溶液浸漬法については、遅延膨張性の反応性鉱物（隠微晶質石英、微晶質石英）が確認された箇所を対象に実施した          ※3：判定基準は、土木研究センター「建設省総合技術開発プロジェクト コンクリートの耐久性向上技術の開発(1989)」を参考にした          ※4：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（JCI-S-011-2017 及びアルカリ溶液浸漬法）に関する試験結果</p>

(粗骨材：急速膨張性の反応性鉱物の確認結果)



安山岩の石基部分を拡大して示す。反応性鉱物としてクリストバライトが確認された。クリストバライトは単ニコルで屋根瓦のような模様を示し、直交ニコルでは暗く観察される。大きくまとまった部分を破線内に示す。

(細骨材：遅延膨張性の反応性鉱物の確認結果)



写真は流紋岩からなる砂粒であり、斜長石の斑晶ならびに、隠微晶質石英と長石の石基からなる。

偏光顕微鏡観察写真

※単ニコル：直線偏光による透過光で薄片試料を観察（構成鉱物の形、割れ、輪郭、色等を確認）

直交ニコル：単ニコルの状態に薄片試料と観察者の間に偏光板を設置して観察（構成鉱物の配列、組織等を確認）

## 促進膨張試験（JCI-S-011-2017 及び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（JCI-S-011-2017）結果

分類	対象構造物	対象の部位	試験実施年	測定値 (%)
粗骨材の 確認箇所	原子炉格納施設等	外部遮蔽壁※1	2020年10月～2021年2月	0.002
細骨材の 確認箇所	取水槽	海中帯※1	2020年9月～2021年1月	0.003
		干満帯※1	2020年9月～2021年1月	0.001
		気中帯※1	2020年9月～2021年1月	0.006

※1：急速膨張性の反応性鋳物（クリストパライト等）が確認された箇所

表2 促進膨張試験（アルカリ溶液浸漬法）結果

分類	対象構造物	対象の部位	試験実施年	測定値 (%)
細骨材の 確認箇所	取水槽	気中帯※1	2022年12月～2023年1月	0.045

※1：遅延膨張性の反応性鋳物（隠微晶質石英、微晶質石英）が確認された箇所