

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、深さ方向に最大で 12cm 程度である。 この範囲は、炉心中心部の内部コンクリート（1次遮蔽壁）の断面積全体（約 <input type="text"/> m^2）に対して約 <input type="text"/> %（約 <input type="text"/> m^2）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、サポートリブ及びベースプレートを、接線方向荷重は、上記に加えて外周プレート及び埋込補強材（スタッド）を経て内部コンクリート（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及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内部コンクリート（1次遮蔽壁）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 style="text-align: center;">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="450 1335 1337 1500"> <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"/>*1</td> <td><input type="text"/></td> <td>2.86</td> </tr> <tr> <td>欠損有</td> <td><input type="text"/>*1</td> <td><input type="text"/></td> <td>2.82</td> </tr> </tbody> </table> <p>※1：川内原子力発電所第1号機 工事計画認可申請書 添付資料 16 原子炉本体の基礎に関する説明書 (II27.3.18 認可)</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、内部コンクリート（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、内部コンクリート（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）</p>	欠損想定	荷重 (kN)	耐力 (kN)	耐震裕度	欠損無	<input type="text"/> *1	<input type="text"/>	2.86	欠損有	<input type="text"/> *1	<input type="text"/>	2.82
欠損想定	荷重 (kN)	耐力 (kN)	耐震裕度										
欠損無	<input type="text"/> *1	<input type="text"/>	2.86										
欠損有	<input type="text"/> *1	<input type="text"/>	2.82										

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。

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

欠損想定	荷重 (kN)	耐力 (kN)	耐震裕度
欠損無	□ ^{*1}	□	3.02
欠損有	□ ^{*1}	□	2.96

3. 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 S_s に対する最大せん断ひずみと中性子照射量が $1 \times 10^{19} \text{n/cm}^2$ を超える範囲を考慮した最大せん断ひずみは、以下に示すとおり基準値を下回っていることを確認した。(添付5)

欠損想定	内部コンクリート (1次遮蔽壁) における基準地震動 S_s に対する最大せん断ひずみ	基準値 ^{*2}
欠損無	約 0.146×10^{-3} ^{*3}	2.0×10^{-3}
欠損有	約 0.148×10^{-3}	

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

※3：川内原子力発電所第1号機 工事計画認可申請書 添付資料 3-16-1 原子炉格納施設の地震応答解析 (H27.3.18 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) から中性子照射量が $1 \times 10^{19} \text{n/cm}^2$ を超える範囲を除いても、構造体の耐力が地震時の鉛直荷重等の設計荷重を上回ること、地震時のせん断ひずみが基準値を下回ることから、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 H27.3.18 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 中性子線照射量が $1 \times 10^{19} \text{n/cm}^2$ を超える範囲とコーン状破壊面の有効投影面積との比較

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

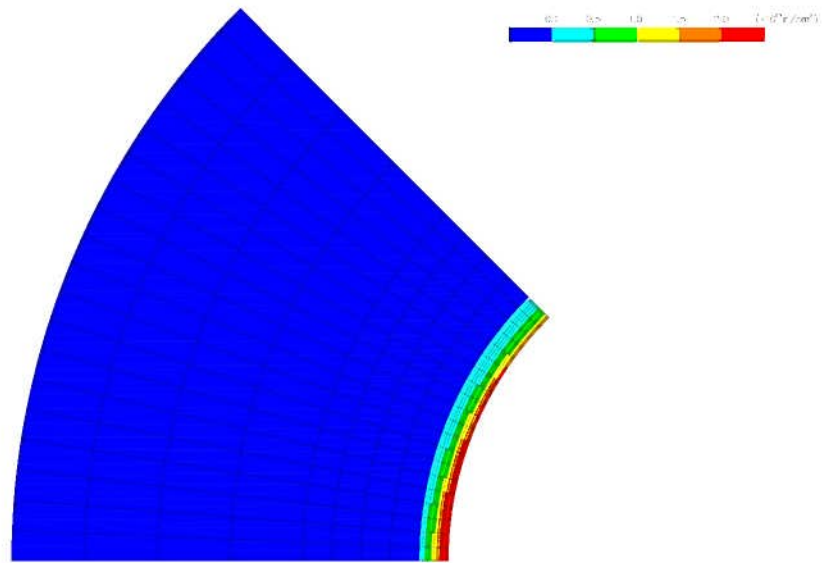


図 1-1 中性子線照射線量当量分布解析結果 (炉心高さ)

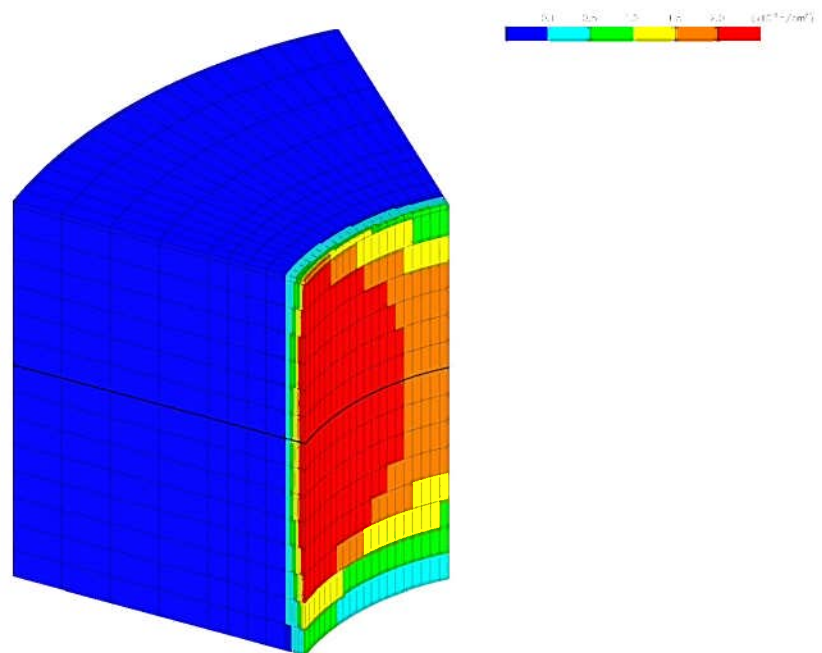


図 1-2 中性子線照射線量当量分布解析結果 (解析モデル全体)

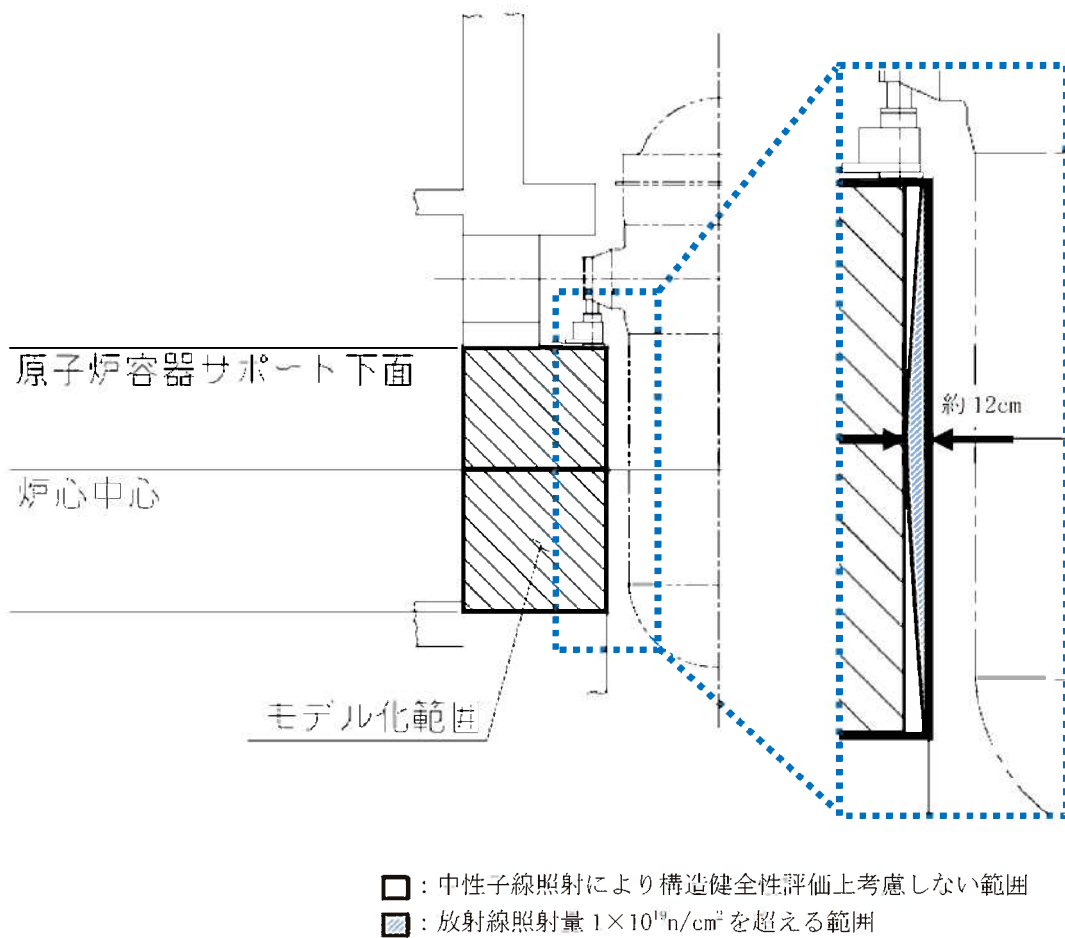
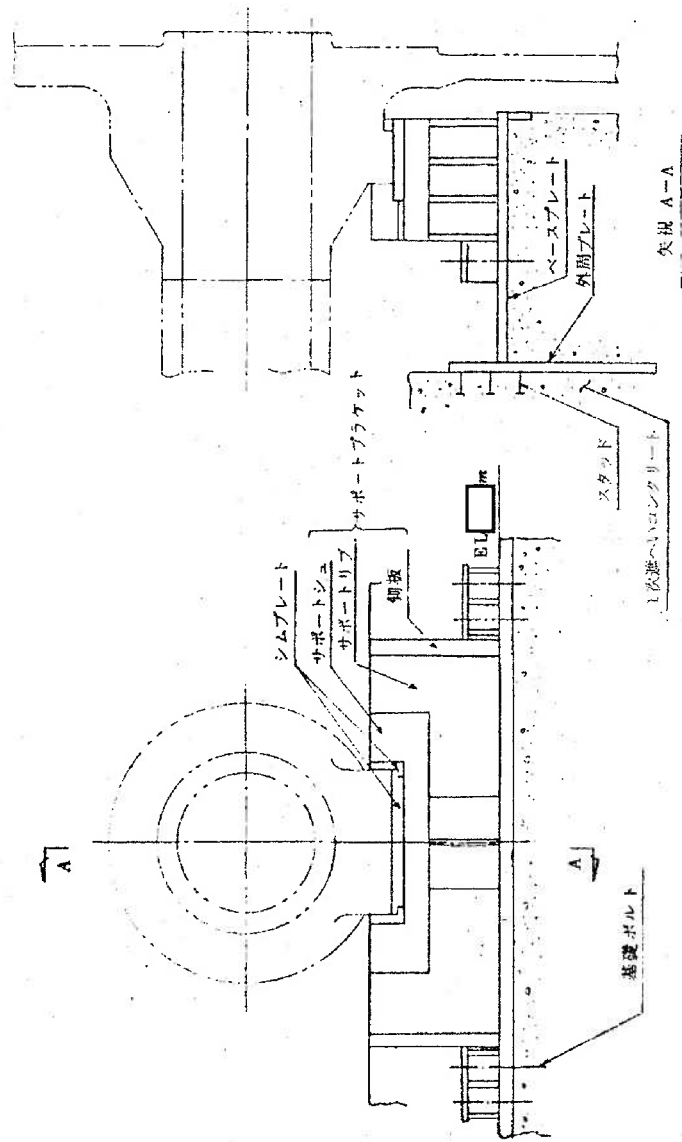


図 1-3 中性子線照射量が $1 \times 10^{19} \text{n/cm}^2$ を超える範囲のイメージ図 (断面)

原子炉本体の基礎に関する説明書

工事計画認可申請添付資料 16

川内原子力発電所第1号機



第1-1図 原子炉容器支持構造物概略図

(3) まとめ

第2-2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2-2表 コンクリートの耐力

(単位：kN)

		Sd 地震時		Ss 地震時	
		荷重	耐力	荷重	耐力
圧縮		□	□	□	□
圧縮荷重の内訳	白重		-		-
	熱膨張荷重		-		-
	地震荷重		-		-
引張		□	□	□	□

(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数処理しているため、必ずしも合計は一致しない。

(注3) 添付資料3-17-3-21「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。

2.4 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、添付資料3-16-1「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。

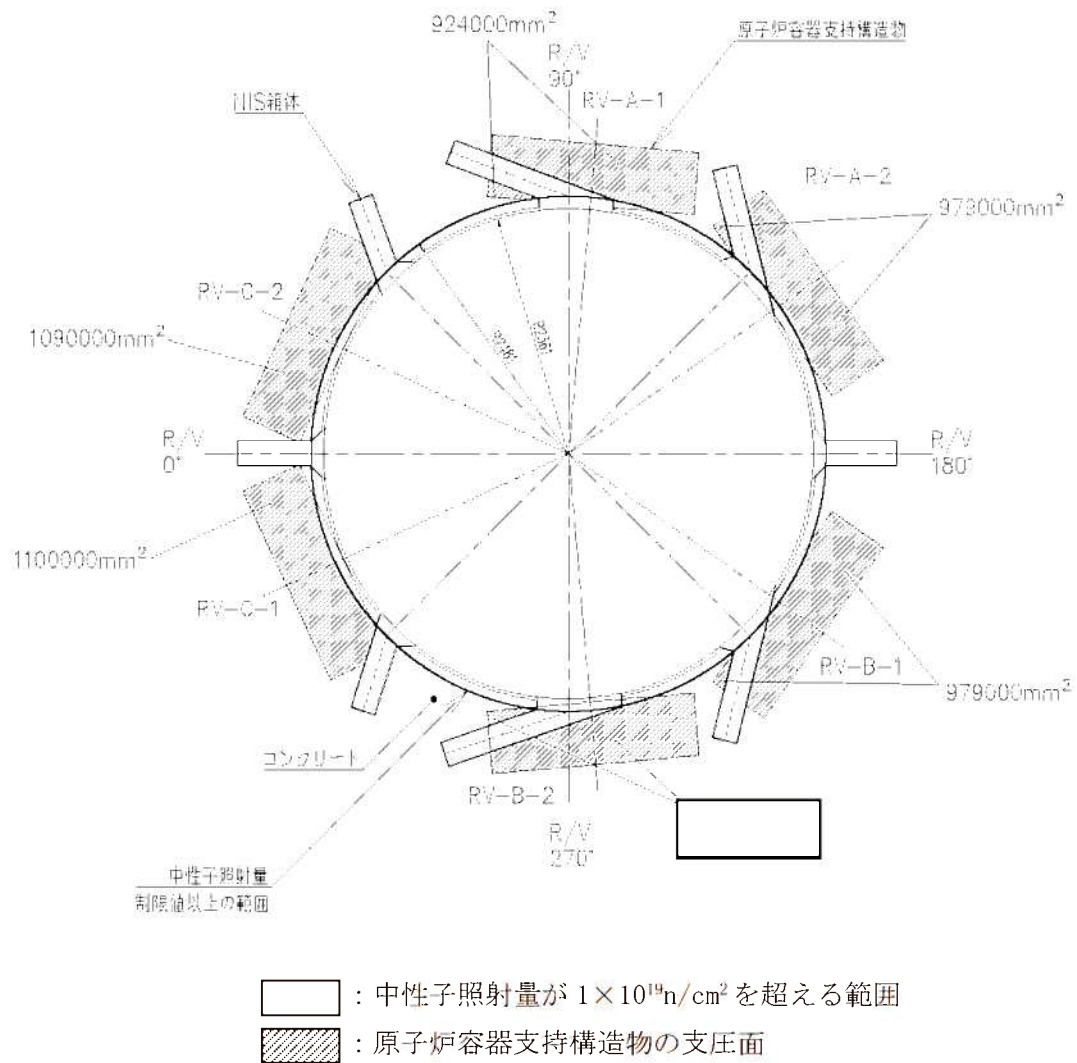


図 3-1 中性子線照射量が $1 \times 10^{14} \text{n/cm}^2$ を超える範囲と原子炉容器支持構造物の支圧面との比較

中性子照射量が $1 \times 10^{14} \text{n/cm}^2$ を超える範囲を考慮すると、支圧面積最小部位においては、欠損無の支圧面積 mm² が mm² となる。

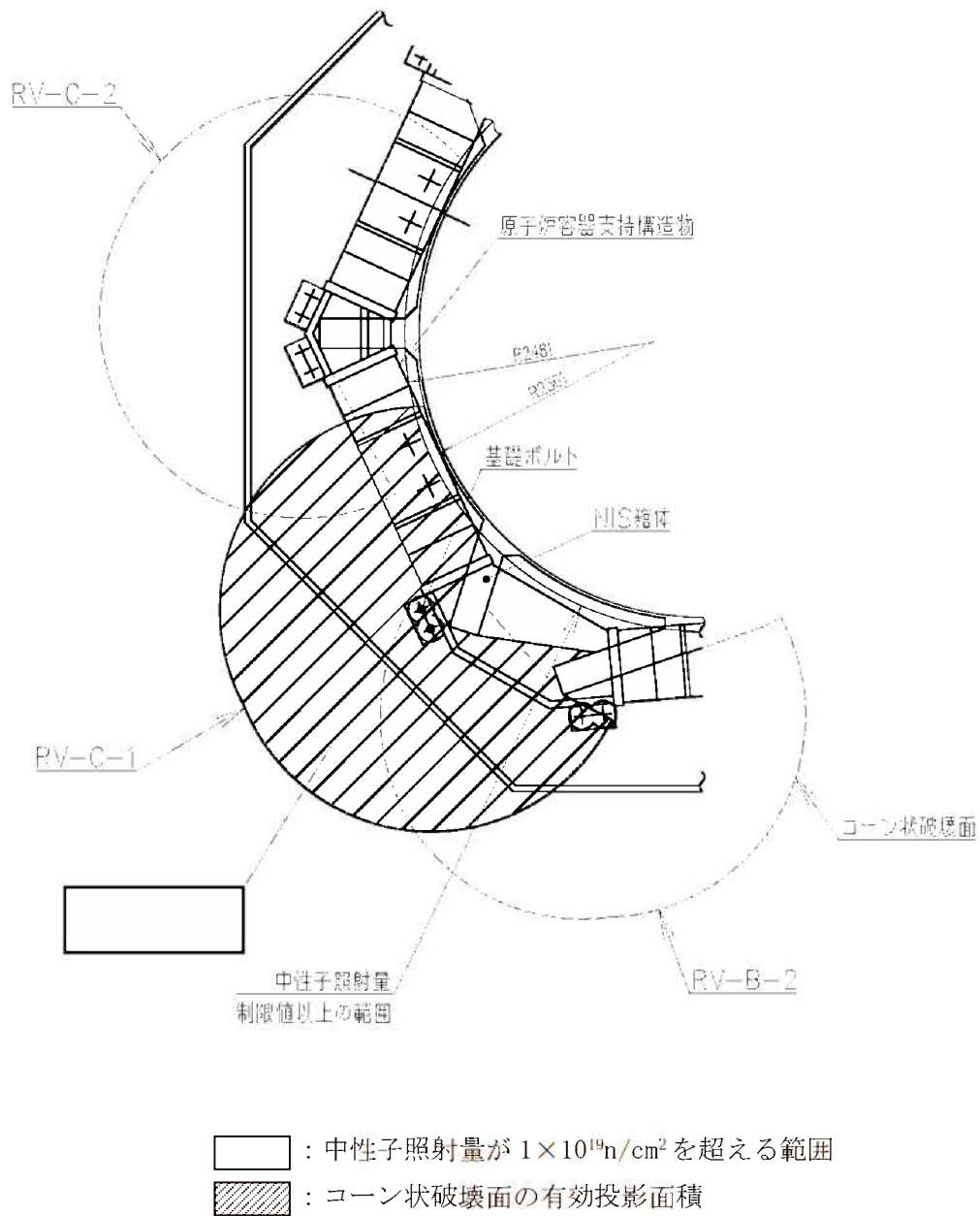


図 4-1 中性子線照射量が $1 \times 10^{19} \text{n/cm}^2$ を超える範囲とコーン状破壊面の有効投影面積との比較

一部の有効投影面積に中性子照射量が $1 \times 10^{19} \text{n/cm}^2$ を超える範囲を考慮すると、欠損無の有効投影面積 mm^2 が 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

川内原子力発電所 1 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

川内原子力発電所 1 号機の内部コンクリート（1 次遮蔽壁）における、基準地震動に対する最大せん断ひずみは、約 0.146×10^{-3} である。

(出典：川内原子力発電所 1 号機 工事計画認可申請書 添付資料 3-16-1 原子炉格納施設の地震応答解析 (H27. 3. 18 認可))

(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。

$$0.146 \times 10^{-3} \times \left(\frac{\quad}{\quad} \right) = \frac{\quad}{\quad}$$

⇒

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

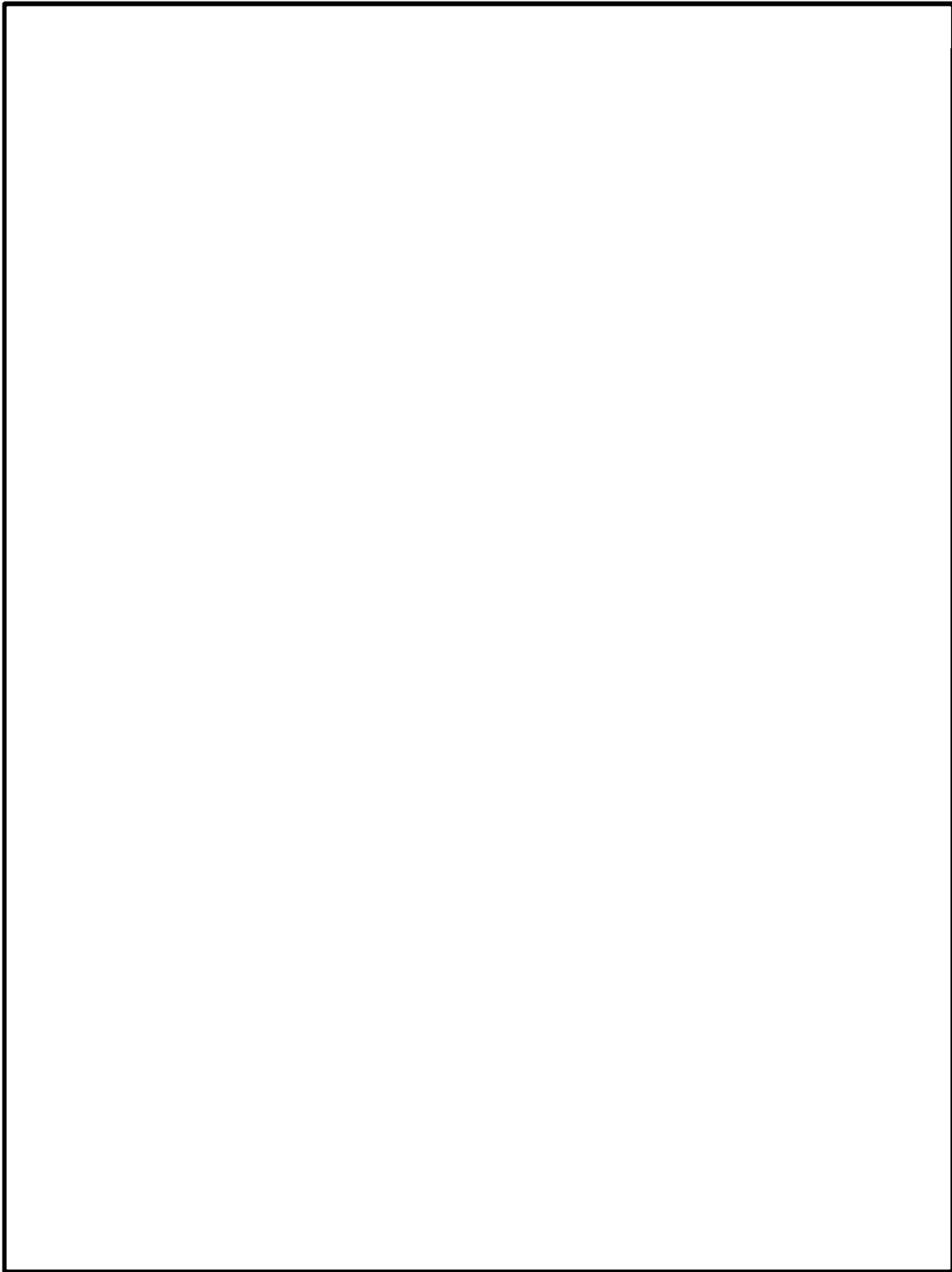
取水構造物の各対象部位のうち、海水によりコンクリート表面が湿潤とならず、最も空気環境の影響を受ける気中帯を対象とした。

- 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

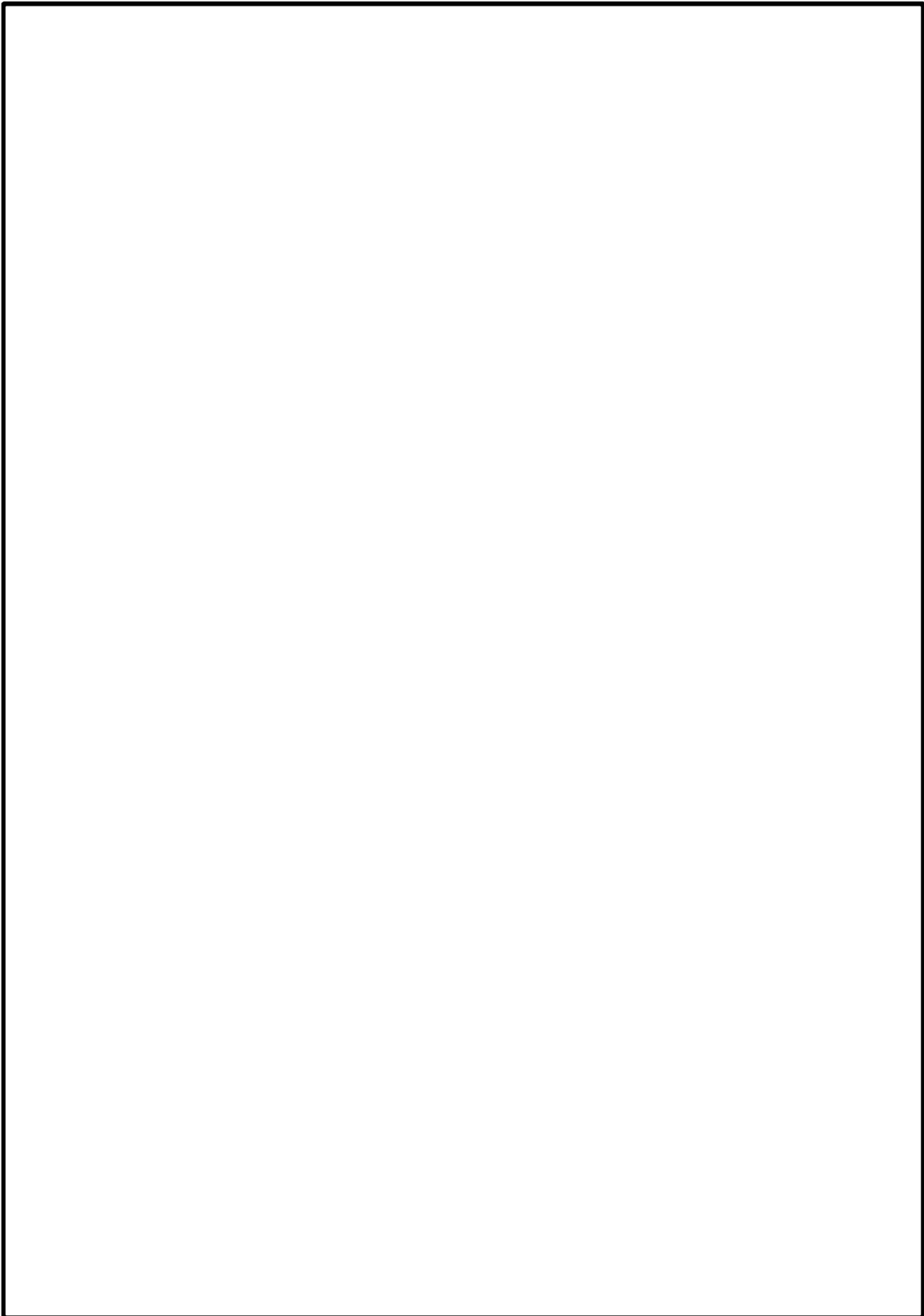
環境測定 使用機器

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

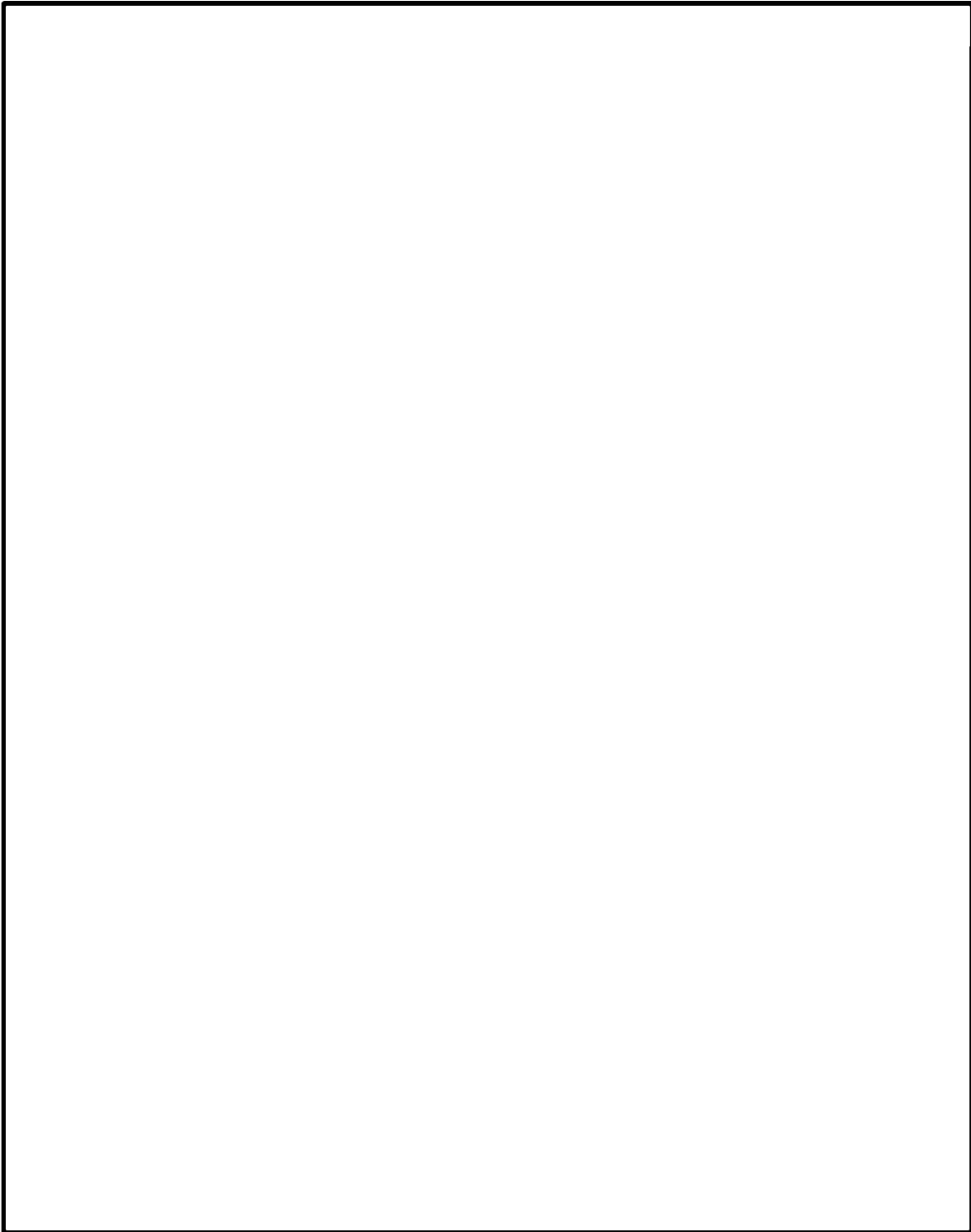
環境測定 測定位置図



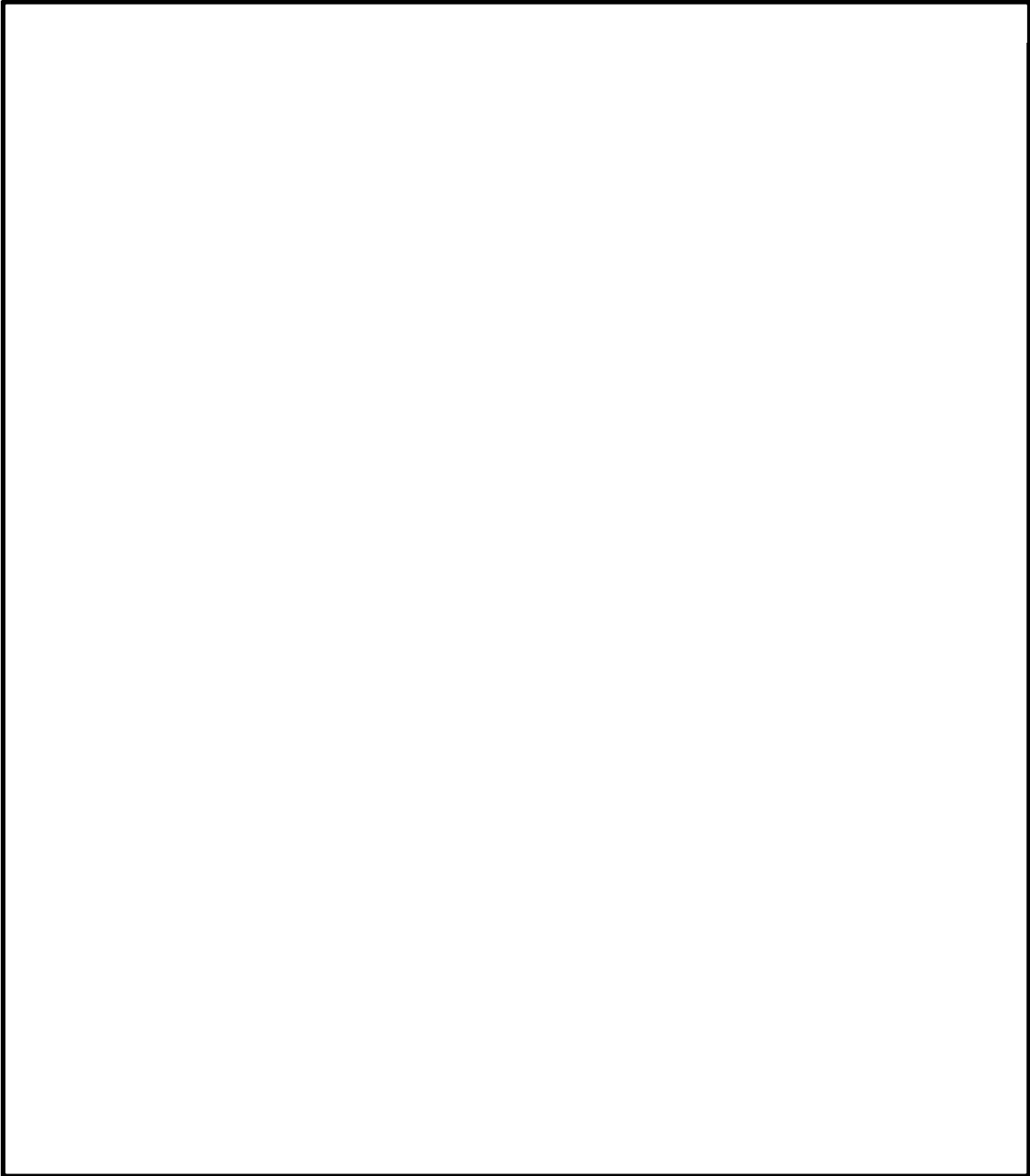
原子炉格納施設等、原子炉補助建屋



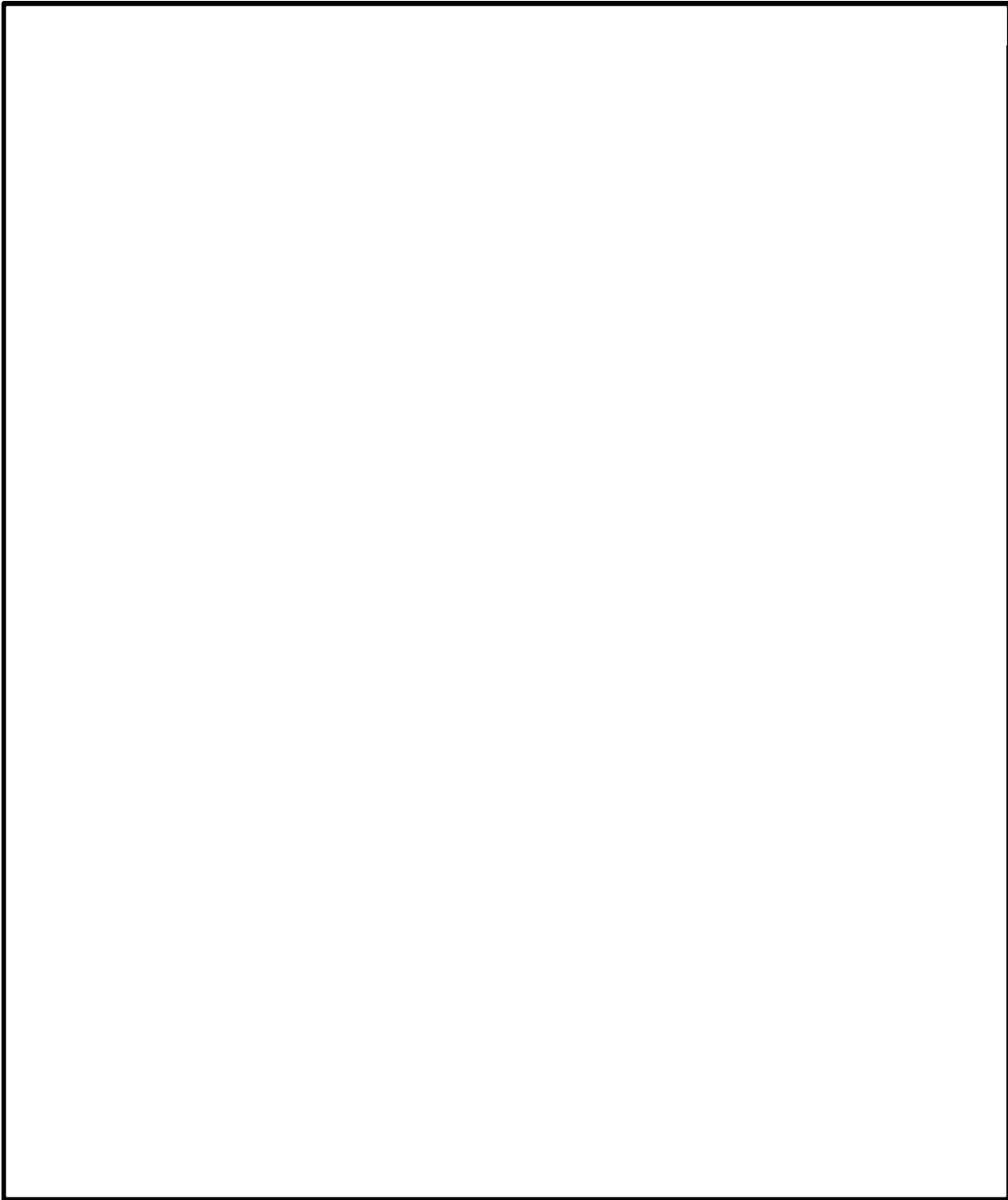
原子炉格納施設等、原子炉補助建屋



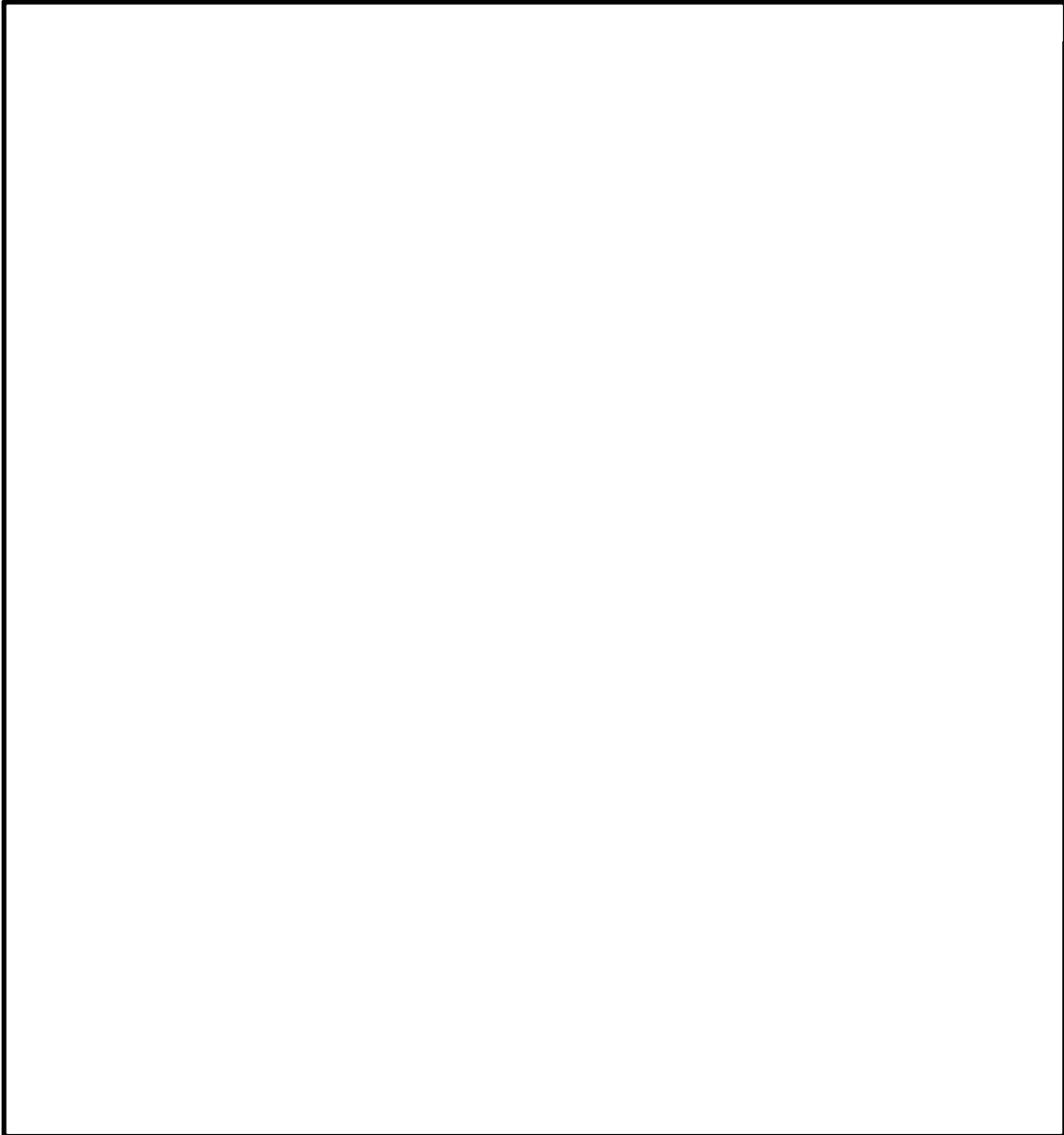
原子炉格納施設等、原子炉補助建屋、タービン建屋



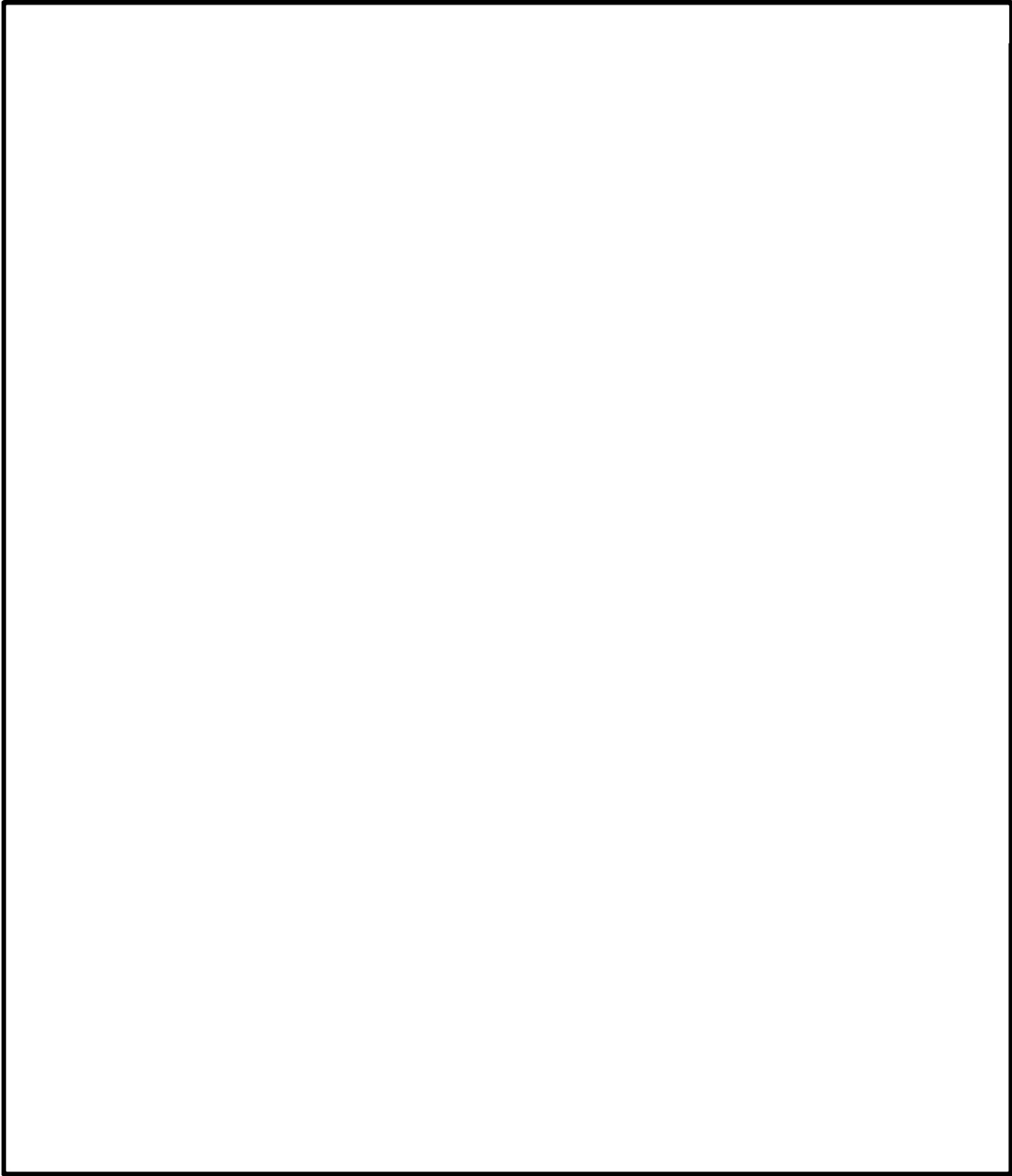
燃料取替用水タンク基礎 (配管トレンチ)



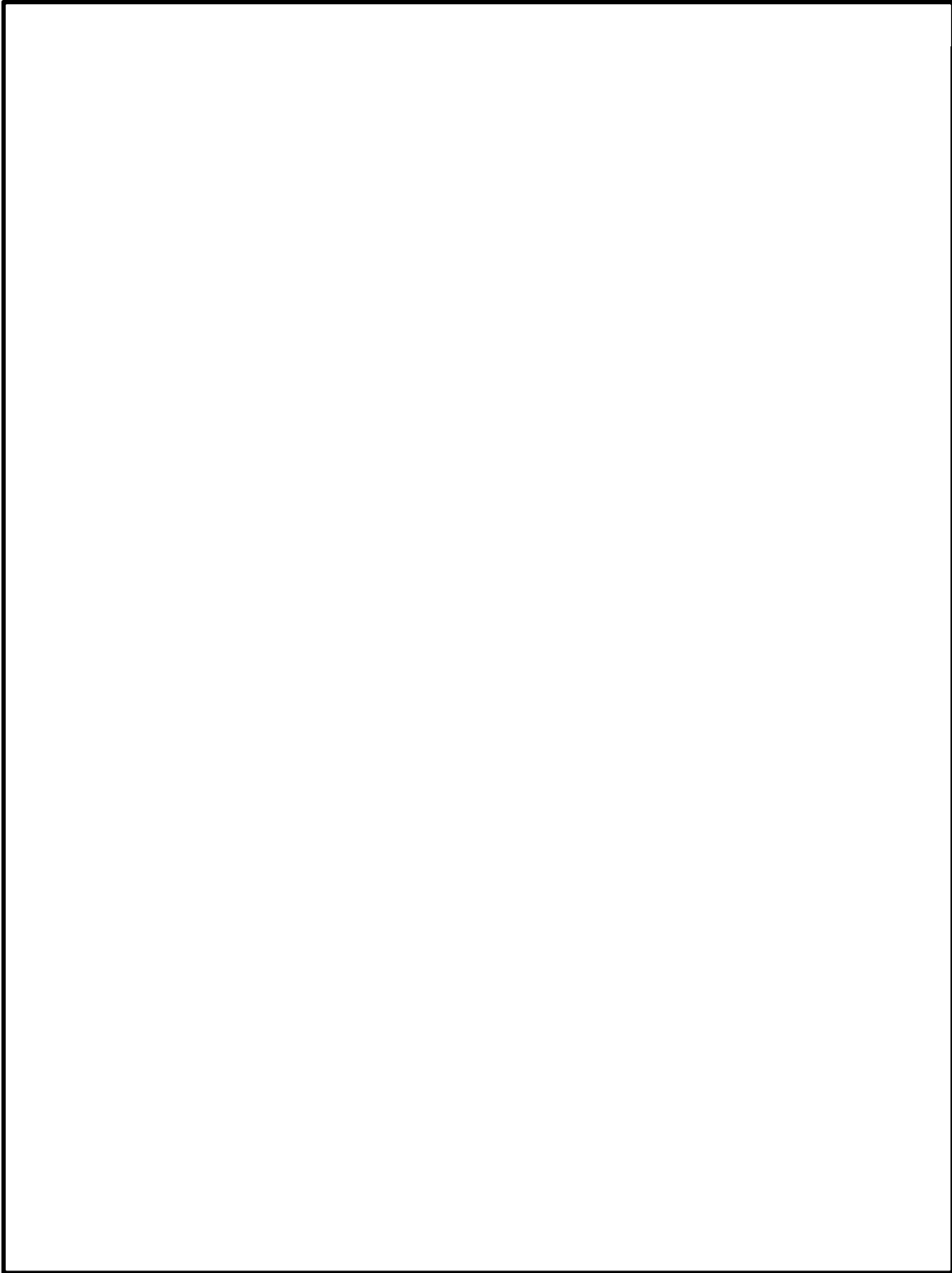
原子炉格納施設等、原子炉補助建屋、タービン建屋



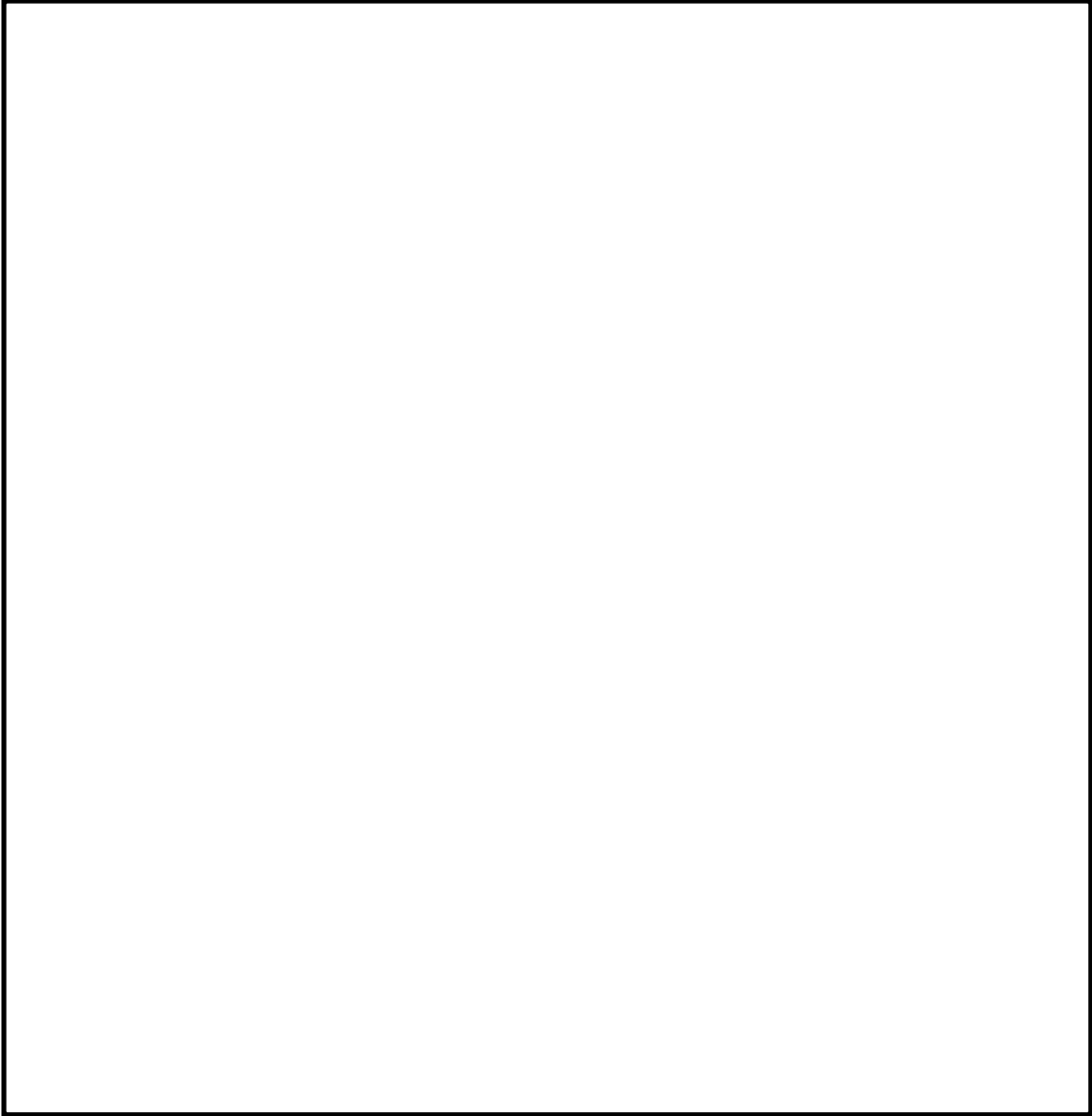
原子炉格納施設等、原子炉補助建屋、タービン建屋



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 ^{*1,2}	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	平均中性化深さ※ ¹ (mm)	備考※ ²
原子炉格納施設等		外部遮蔽壁	8.8	60
		内部コンクリート	1.7	60
		基礎マット	26.0	100
原子炉補助建屋		外壁	42.2	70
		内壁及び床	31.9	70
		使用済み燃料プール	36.5	70
		基礎マット	36.5	70
タービン建屋		内壁及び床	27.5	95
		基礎マット	10.5	80
取水槽		海中帯	2.7	85
		干満帯	2.0	87
		気中帯	11.5	90
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	1.9	70
		燃料取替用水タンク基礎	28.7	70

※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"> ・岸谷式 ・森永式 ・中性化深さの実測値に基づく\sqrt{t}式 <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 1348 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*2 (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*1 (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 (\sqrt{t}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 (\sqrt{t}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\sqrt{t}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*2 (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*1 (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*2 (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*1 (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值 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)

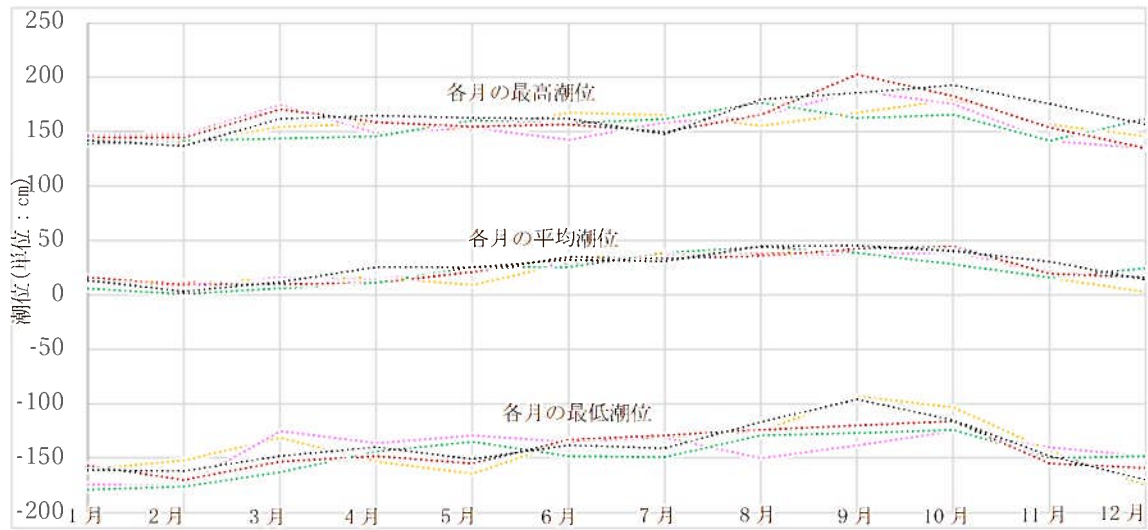
$$\text{実測値による劣化外力係数 } \alpha = \sqrt{\frac{C}{C_0}} = \sqrt{\frac{499}{462}} = 1.04 \rightarrow 1.1$$

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)

C₀ : 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>

凡例
 — : 2020年
 - - : 2019年
 ··· : 2018年
 -·- : 2017年
 - - - : 2016年

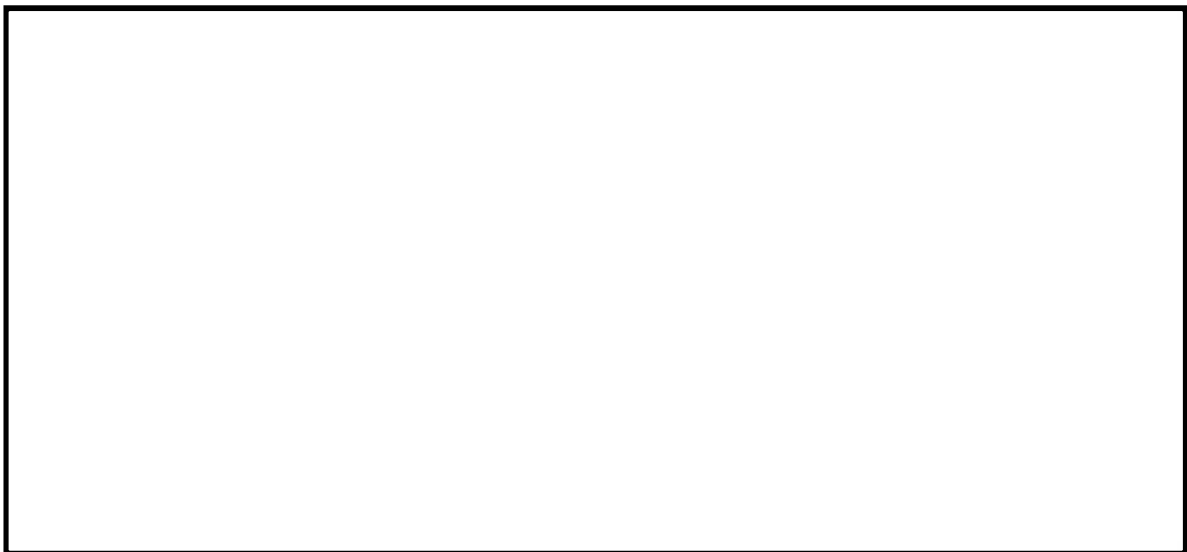
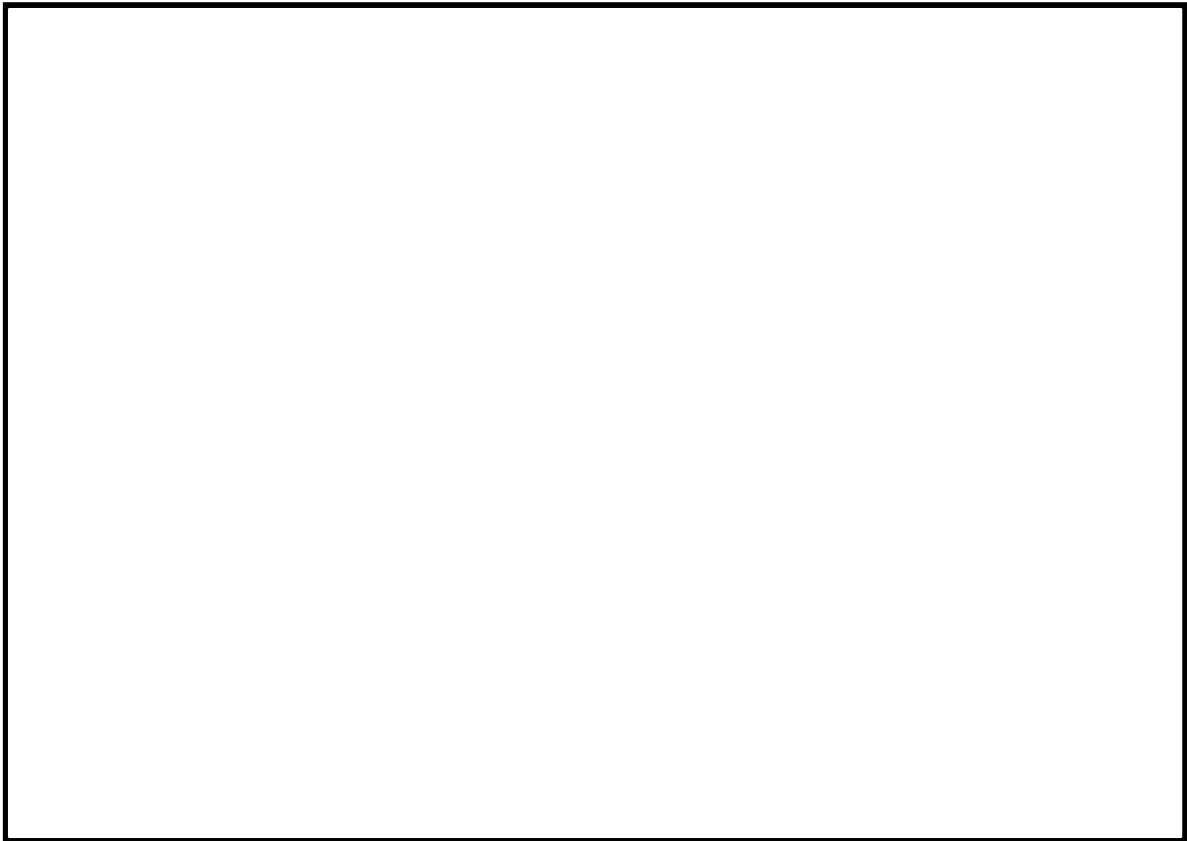


2016年～2020年における各月の潮位変化（最高潮位・平均潮位・最低潮位）

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">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。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。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。 <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。

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 ³)					
		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 ³	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 ³	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 ³	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 ³	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

試料 番号	単位	塩化物イオン濃度 (%) 及び量 (kg/m ³)					
		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 ³	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 ³	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 ³	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 ³	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

試料 番号	単位	塩化物イオン濃度 (%) 及び量 (kg/m ³)					
		0~20mm	20~40mm	40~60mm	60~80mm	80~100mm	100~120mm
SP-ci-lu- 11	%	0.32	0.16	0.08	0.06	0.04	0.04
	kg/m ³	6.92	3.38	1.68	1.22	0.92	0.79
SP-ci-lu- 12	%	0.34	0.41	0.34	0.25	0.20	0.17
	kg/m ³	7.01	8.36	7.04	5.11	4.07	3.47
SP-ci-lu- 13	%	0.29	0.28	0.23	0.18	0.13	0.11
	kg/m ³	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 ³	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 ^{*1}
取水構造物 (気中帯)	2.6	4.4	84.5
取水構造物 (干満帯) ^{*2}	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 ³	1.1	4.3	2.6	
C ₀ : コンクリート表面の塩化物イオン量	kg/m ²	0.47~1.84	7.14~13.94	0.44~10.03	拡散方程式の回帰分析により算出
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 (cm ² /年)		0.79~9.82	0.40~1.25	0.30~1.31	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量 (推定値)	kg/m ²	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 : 単位水量 (kg/m ³)	133	133	133		
W/C : 水セメント比 (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 (比)	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	
q : 調査時点 (36 年経過) の鉄筋の腐食減量 (×10 ⁻⁴ g/cm ²)	2.6	7.7	0.9		
q ₁ : 運転開始後 60 年経過時点の鉄筋の腐食減量 (×10 ⁻⁴ g/cm ²)	4.4	15.1	2.1		
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)	84.5	88.1	86.4		

: (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ため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ために必要なパラメータ
 : (2) の推定結果

拡散方程式

$$C = (C_0 - C_{init}) \cdot \left[1 - \operatorname{erf} \left(\frac{x}{2\sqrt{Dt}} \right) \right] + C_{init}$$

C : 鉄筋位置における塩化物イオン量 (kg/m³)
 C₀ : コンクリート表面の塩化物イオン量 (kg/m³)
 C_{init} : コンクリート中の初期塩化物イオン量 (kg/m³)

erf : 誤差関数

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

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 (mm²/年)
 t : 材齢 (年)

森永式

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

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

$$q_2 = 2.59 - 0.05T - 6.89H - 22.870 - 0.99N + 0.14RH + 0.51T0 + 0.01TN + 60.81H0 + 3.36HN + 7.320N$$

$$q_2' = 0.56528 + 1.4304N$$

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

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、標準条件下 (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。）

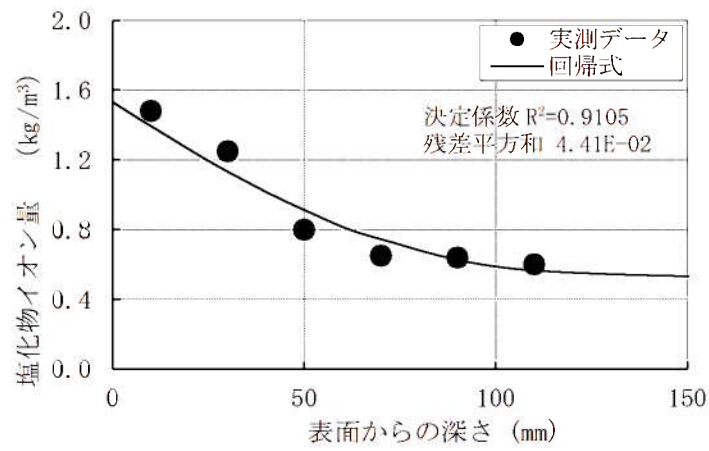
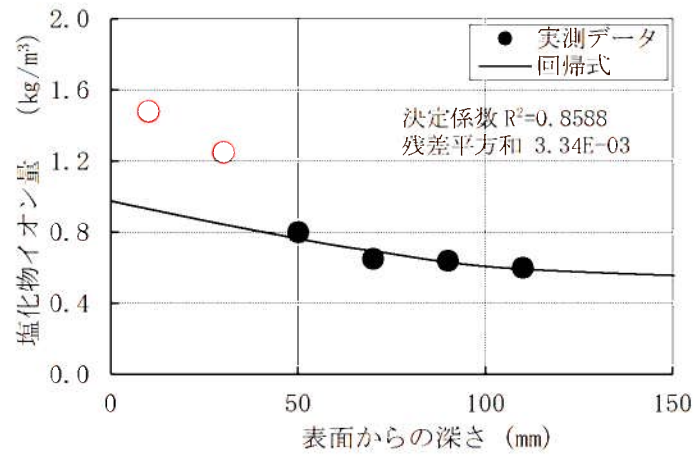


図1(1/9) 取水構造物気中帯 (SP-ci-1u-8-J-①) の回帰分析結果
(上：中性化考慮あり [○]データを棄却)、下：中性化考慮なし)

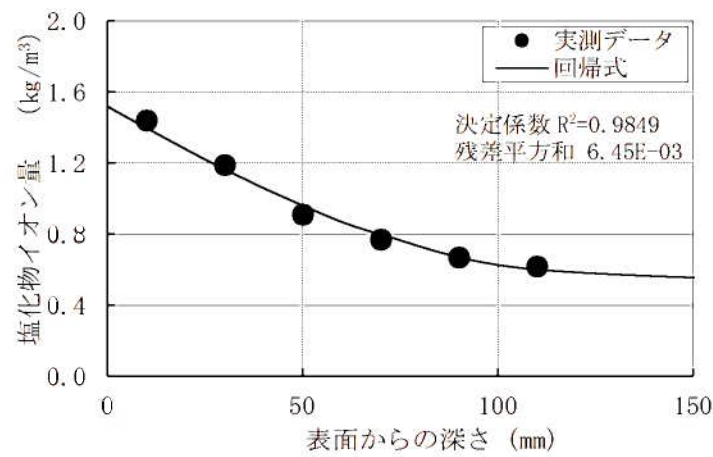
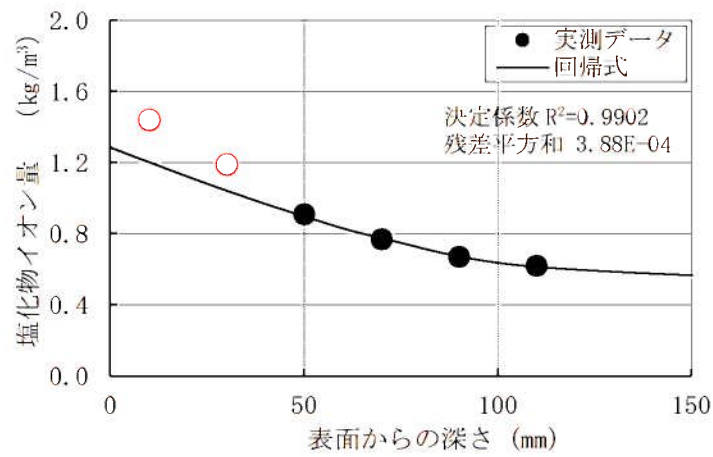


図1(2/9) 取水構造物気中帯 (SP-ci-1u-8-J-②) の回帰分析結果
(上：中性化考慮あり [○データを棄却]、下：中性化考慮なし)

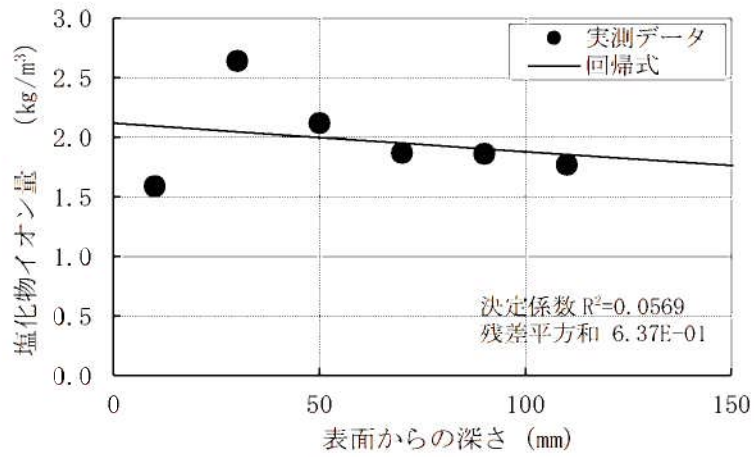
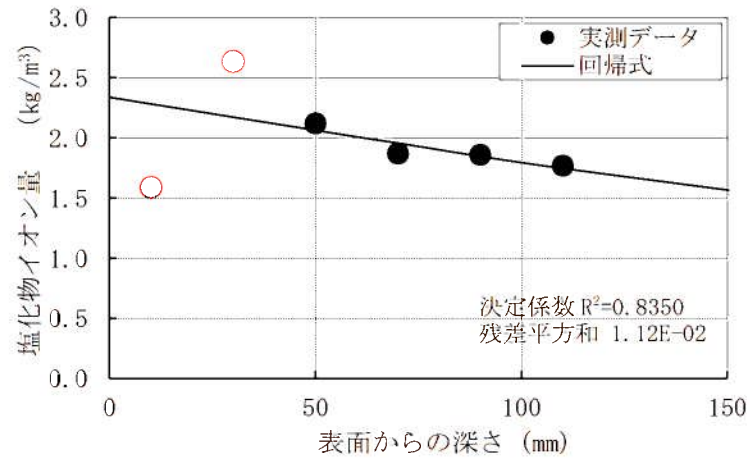


図1(3/9) 取水構造物気中帯 (SP-ci-1u-8) の回帰分析結果
(上：中性化考慮あり[○データを棄却]、下：中性化考慮なし)

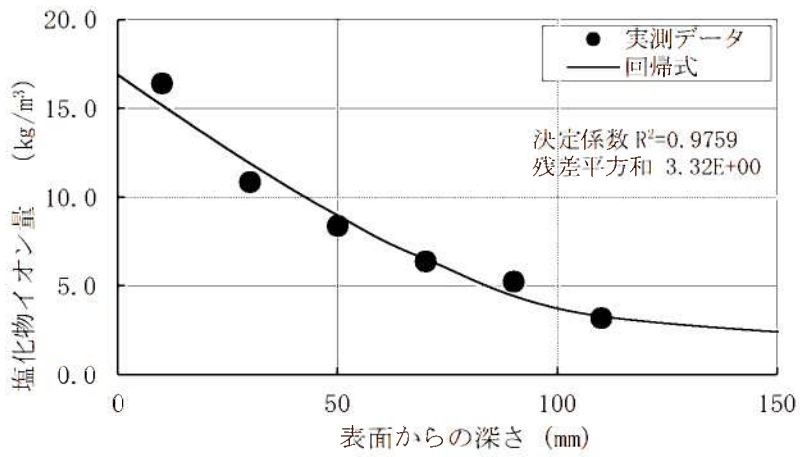
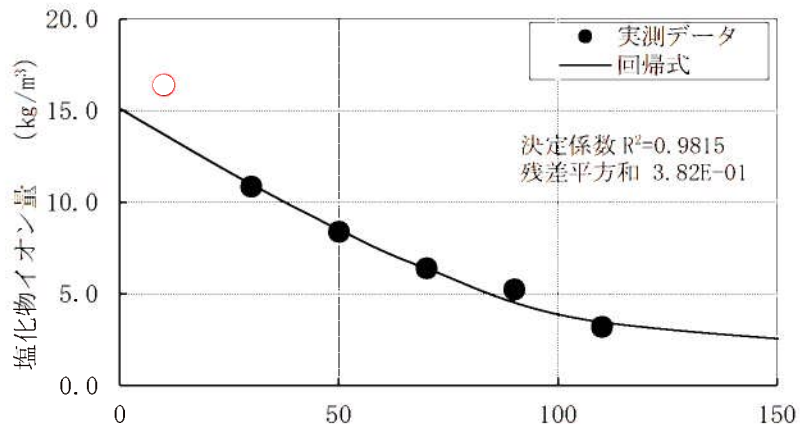


図1(4/9) 取水構造物干満帯 (SP-ci-1u-6-J-①) の回帰分析結果
(上: 中性化考慮あり [○データを棄却]、下: 中性化考慮なし)

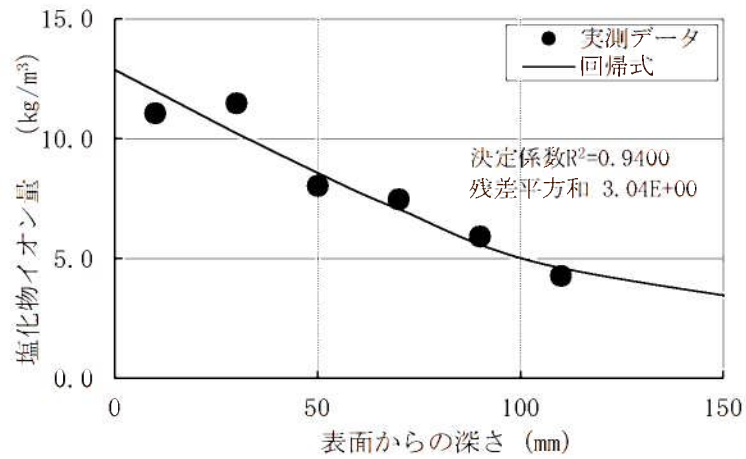
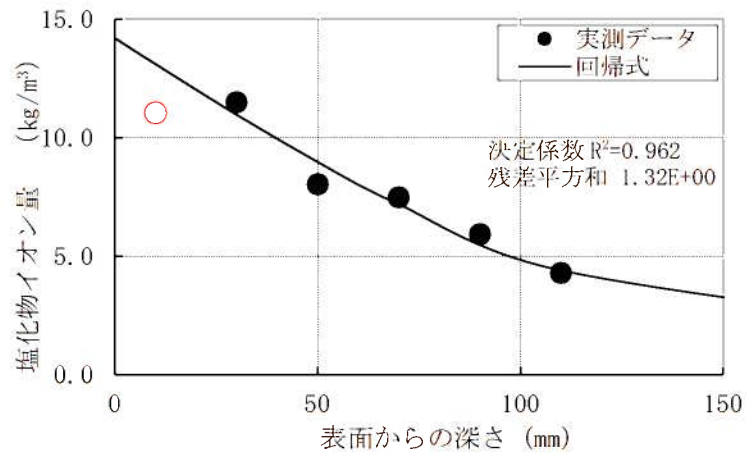


図1(5/9) 取水構造物干満帯 (SP-ci-1u-6-J-②) の回帰分析結果
(上：中性化考慮あり [○データを棄却]、下：中性化考慮なし)

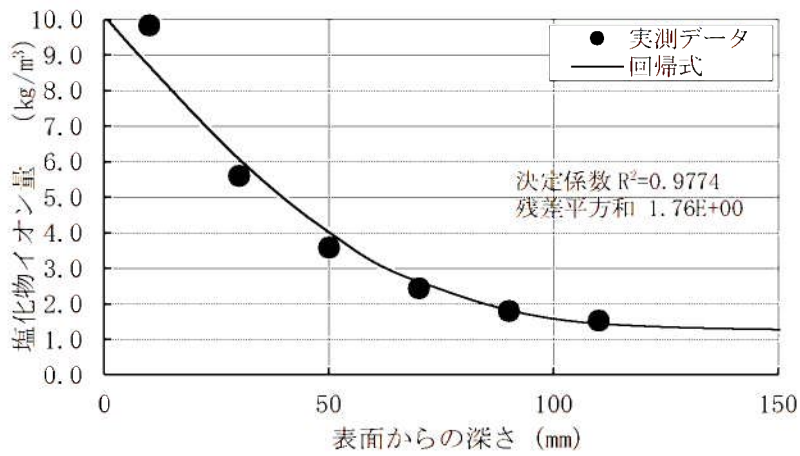
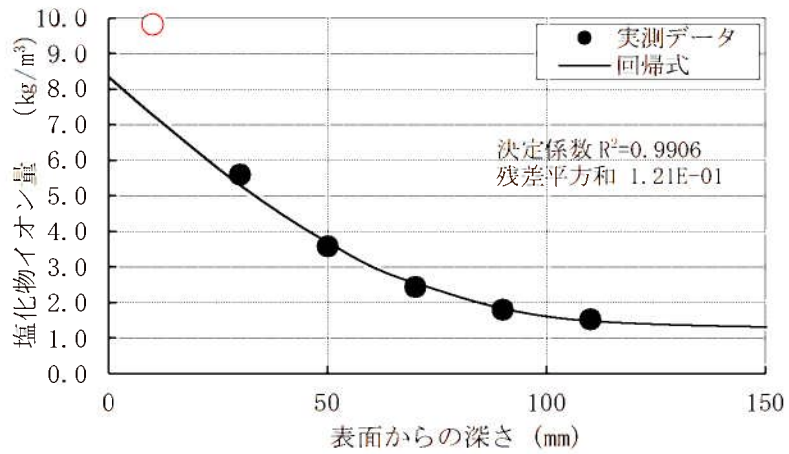


図1(6/9) 取水構造物干満帯 (SP-ci-1u-6) の回帰分析結果
(上：中性化考慮あり [○]データを棄却)、下：中性化考慮なし)

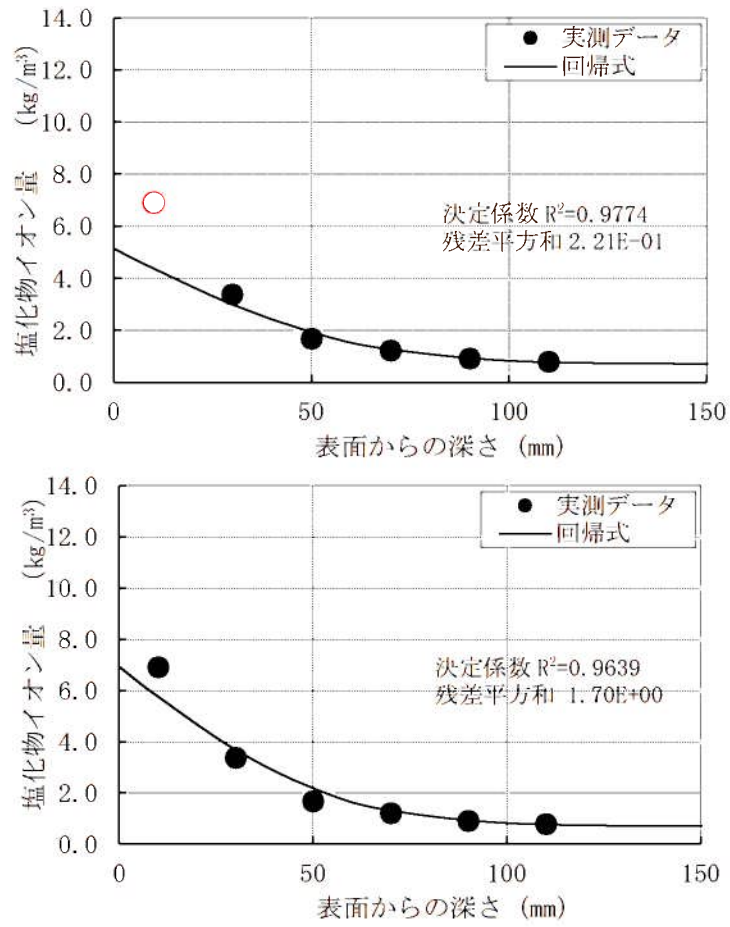


図1(7/9) 取水構造物海中帯 (SP-ci-1u-11) の回帰分析結果
 (上: 中性化考慮あり [○データを棄却]、下: 中性化考慮なし)

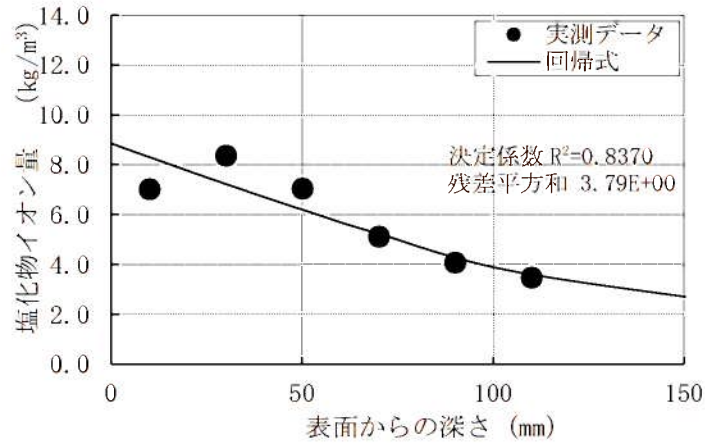
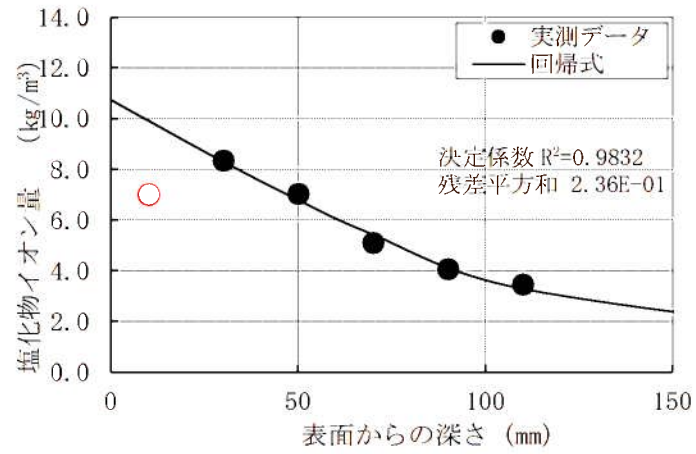


図1(8/9) 取水構造物海中帯 (SP-ci-1u-12) の回帰分析結果
(上：中性化考慮あり [○データを棄却]、下：中性化考慮なし)

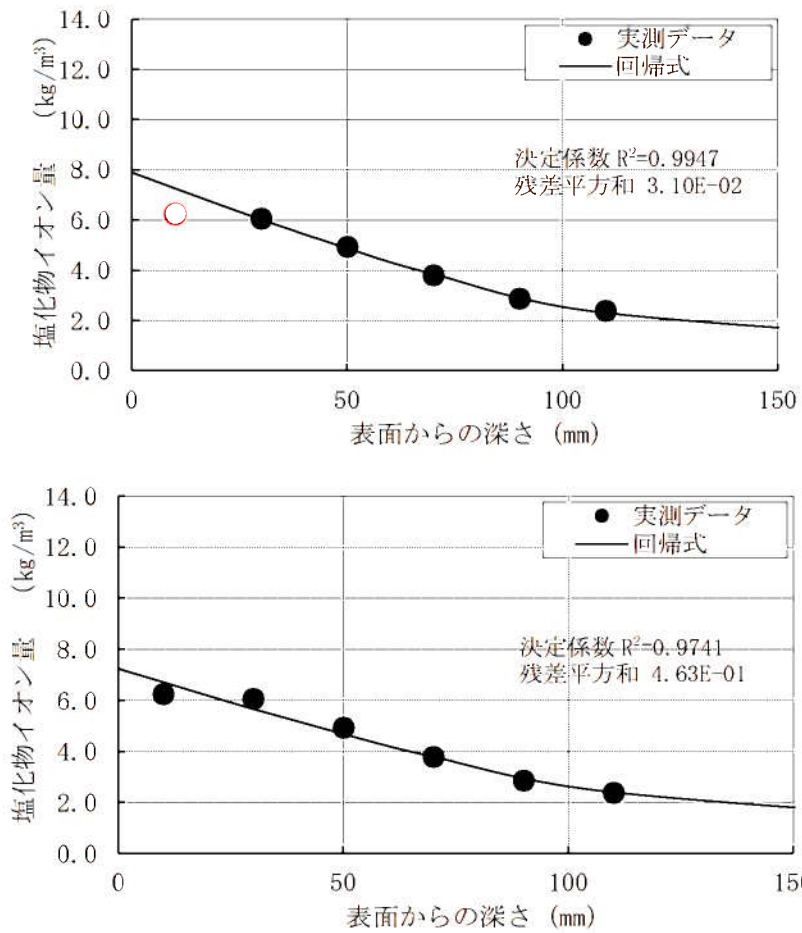


図1(9/9) 取水構造物海中帯 (SP-ci-1u-13) の回帰分析結果
 (上: 中性化考慮あり [○データを棄却]、下: 中性化考慮なし)

(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 ($\times 10^{-1}$ g/cm ²)	運転開始後 経過年数	鉄筋の 腐食減量 ($\times 10^{-1}$ g/cm ²)	運転開始後 経過年数	鉄筋の 腐食減量 ($\times 10^{-1}$ 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 ³	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 ³	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 ³	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 ³	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-lu-8-J-①		SP-ci-lu-8-J-②		SP-ci-lu-8	
運転開始後 経過年数	鉄筋の 腐食減量 ($\times 10^{-4}$ g/cm ²)	運転開始後 経過年数	鉄筋の 腐食減量 ($\times 10^{-4}$ g/cm ²)	運転開始後 経過年数	鉄筋の 腐食減量 ($\times 10^{-4}$ g/cm ²)
調査時点 (36年)	2.4	調査時点 (36年)	2.4	調査時点 (36年)	3.0
運転開始後 60年経過 時点	4.0	運転開始後 60年経過 時点	4.0	運転開始後 60年経過 時点	5.2
かぶりコン クリートに ひび割れが 発生する 時点 (1227年)	84.5	かぶりコン クリートに ひび割れが 発生する 時点 (1165年)	84.5	かぶりコン クリートに ひび割れが 発生する 時点 (888年)	84.5

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-lu-8-J-①		SP-ci-lu-8-J-②		SP-ci-lu-8	
運転開始後 経過年数	鉄筋の 腐食減量 ($\times 10^{-4}$ g/cm ²)	運転開始後 経過年数	鉄筋の 腐食減量 ($\times 10^{-4}$ g/cm ²)	運転開始後 経過年数	鉄筋の 腐食減量 ($\times 10^{-4}$ g/cm ²)
調査時点 (36年)	2.4	調査時点 (36年)	2.4	調査時点 (36年)	3.1
運転開始後 60年経過 時点	4.0	運転開始後 60年経過 時点	4.0	運転開始後 60年経過 時点	5.3
かぶりコン クリートに ひび割れが 発生する 時点 (1135年)	84.5	かぶりコン クリートに ひび割れが 発生する 時点 (1128年)	84.5	かぶりコン クリートに ひび割れが 発生する 時点 (912年)	84.5

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に測定結果を示す。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)

試料番号	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 ³	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 ³	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 ³	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 ³	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	
運転開始後 経過年数	鉄筋の 腐食減量 ($\times 10^{-4}$ g/cm ²)	運転開始後 経過年数	鉄筋の 腐食減量 ($\times 10^{-4}$ g/cm ²)	運転開始後 経過年数	鉄筋の 腐食減量 ($\times 10^{-4}$ g/cm ²)
調査時点 (36年)	8.0	調査時点 (36年)	9.0	調査時点 (36年)	6.1
運転開始後 60年経過 時点	16.2	運転開始後 60年経過 時点	18.1	運転開始後 60年経過 時点	10.9
かぶりコン クリートに ひび割れが 発生する 時点 (213年)	88.1	かぶりコン クリートに ひび割れが 発生する 時点 (204年)	88.1	かぶりコン クリートに ひび割れが 発生する 時点 (330年)	88.1

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	
運転開始後 経過年数	鉄筋の 腐食減量 ($\times 10^{-4}$ g/cm ²)	運転開始後 経過年数	鉄筋の 腐食減量 ($\times 10^{-4}$ g/cm ²)	運転開始後 経過年数	鉄筋の 腐食減量 ($\times 10^{-4}$ g/cm ²)
調査時点 (36年)	7.9	調査時点 (36年)	9.3	調査時点 (36年)	6.1
運転開始後 60年経過 時点	16.2	運転開始後 60年経過 時点	18.2	運転開始後 60年経過 時点	10.9
かぶりコン クリートに ひび割れが 発生する 時点 (206年)	88.1	かぶりコン クリートに ひび割れが 発生する 時点 (209年)	88.1	かぶりコン クリートに ひび割れが 発生する 時点 (313年)	88.1

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)

試料番号	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-11	%	0.32	0.16	0.08	0.06	0.04	0.04
	kg/m ³	6.92	3.38	1.68	1.22	0.92	0.79
SP-ci-lu-12	%	0.34	0.41	0.34	0.25	0.20	0.17
	kg/m ³	7.01	8.36	7.04	5.11	4.07	3.47
SP-ci-lu-13	%	0.29	0.28	0.23	0.18	0.13	0.11
	kg/m ³	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 ³	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-lu-11		SP-ci-lu-12		SP-ci-lu-13	
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 ($\times 10^{-4} \text{g/cm}^2$)
調査時点 (36年)	0.6	調査時点 (36年)	1.3	調査時点 (36年)	0.9
運転開始後 60年経過 時点	1.3	運転開始後 60年経過 時点	2.9	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 (1131年)	90.1	かぶりコン クリートに ひび割れが 発生する 時点 (781年)	84.6	かぶりコン クリートに ひび割れが 発生する 時点 (1019年)	84.6

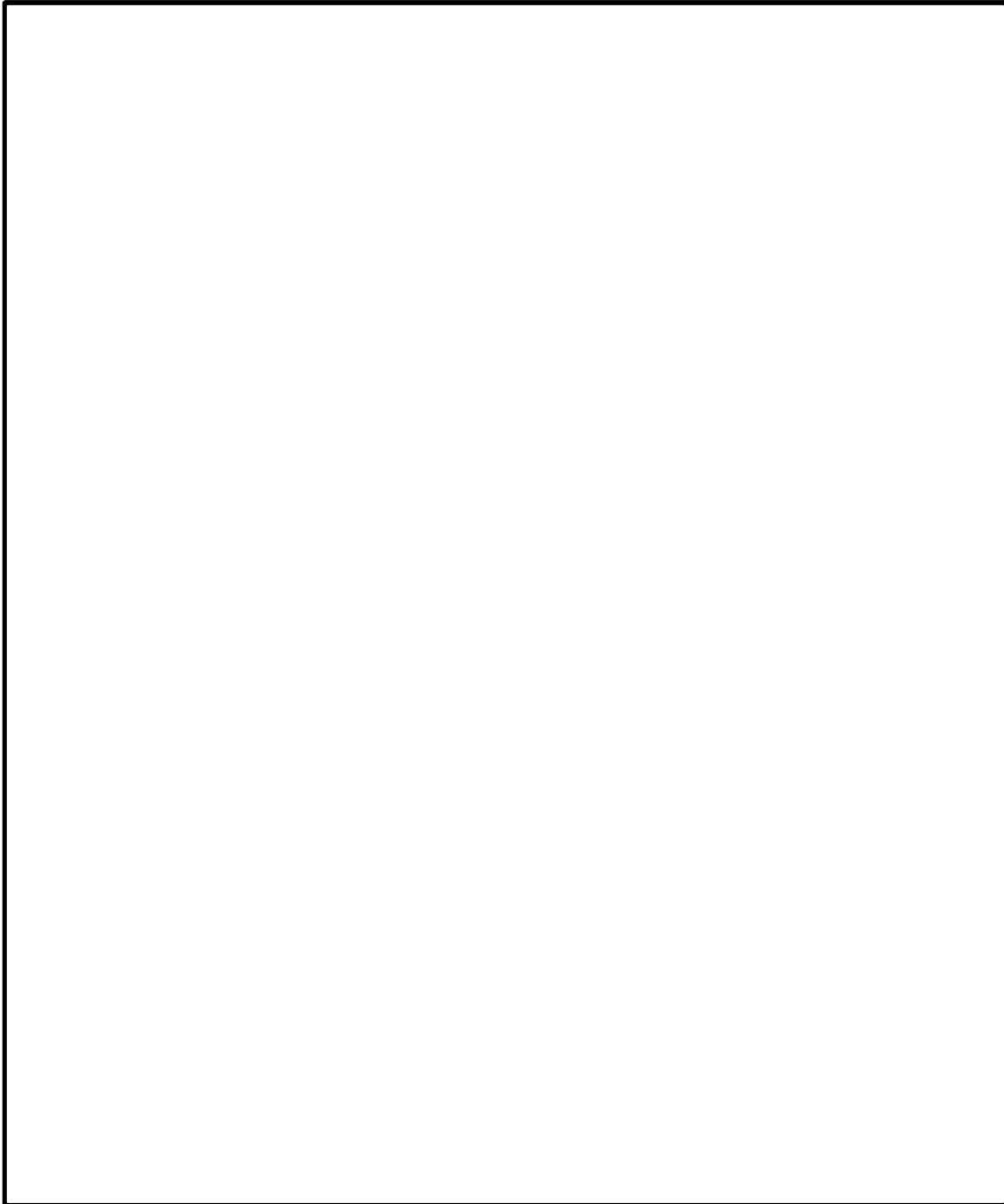
表12 鉄筋の腐食減量の算定結果（海中帯）
【中性化の影響を考慮しないケース】

SP-ci-lu-11		SP-ci-lu-12		SP-ci-lu-13	
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 ($\times 10^{-4} \text{g/cm}^2$)
調査時点 (36年)	0.6	調査時点 (36年)	1.4	調査時点 (36年)	1.0
運転開始後 60年経過 時点	1.3	運転開始後 60年経過 時点	3.0	運転開始後 60年経過 時点	2.2
かぶりコン クリートに ひび割れが 発生する 時点 (956年)	90.1	かぶりコン クリートに ひび割れが 発生する 時点 (874年)	84.6	かぶりコン クリートに ひび割れが 発生する 時点 (1076年)	84.6

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 1353 1415"> <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

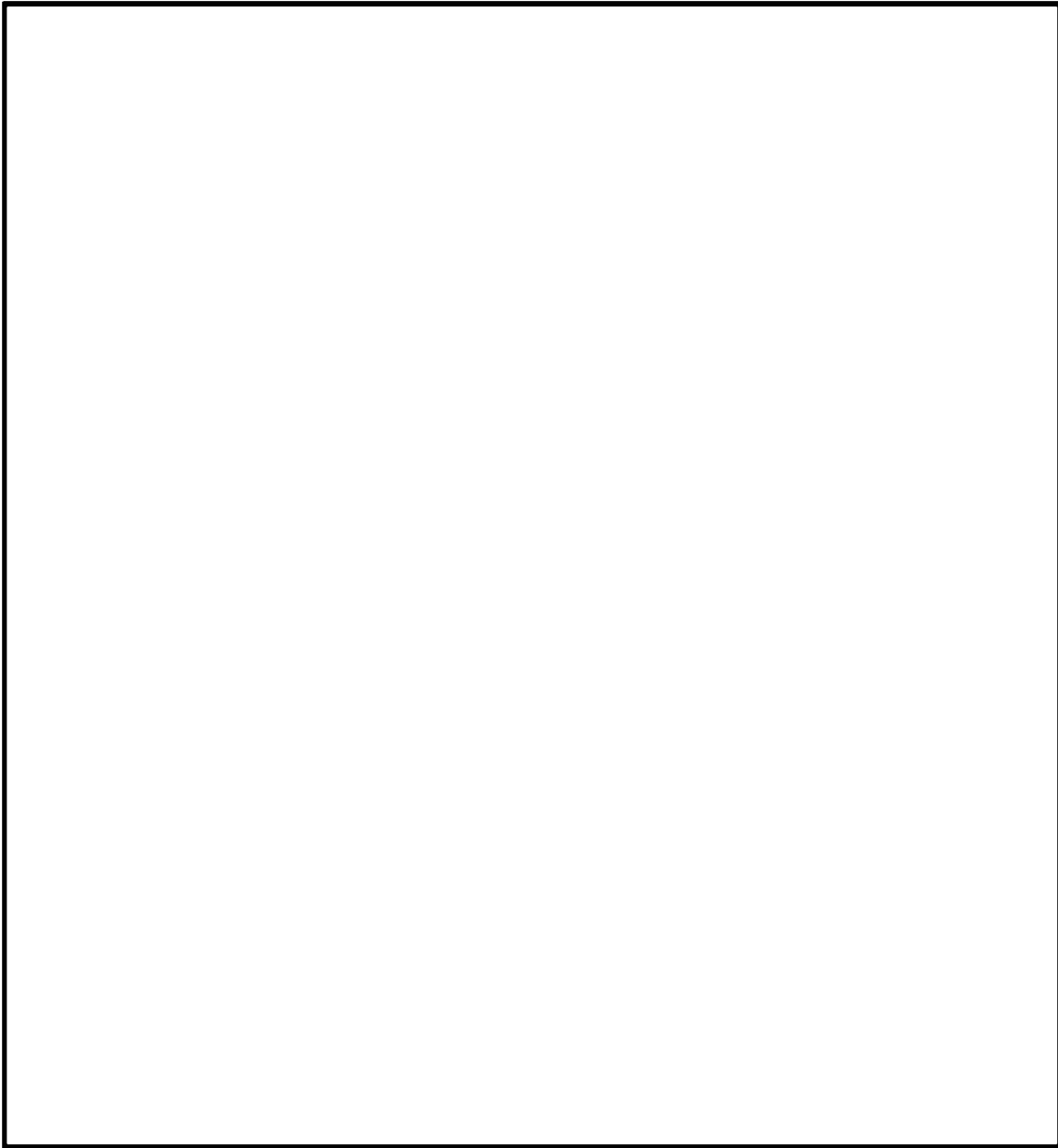
▼ : コアサンプル採取箇所



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	モルタルバー法の試験結果について				
説明	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。				
区分	骨材産地	試験方法	試験結果 材令6ヶ月の膨張率 (%)	判定基準 有害な反応を起す可能性のある材令6ヶ月の膨張率 (%)	判定
粗骨材	砕石 (鹿児島県川内市*1 川永野産)	JASS5N	0.008	0.10 以上	無害
細骨材	砕砂 (鹿児島県川内市*1 川永野産)	T-201*3	0.004		
	海砂 (佐賀県東松浦郡*2 呼子町小川島産)	ASTM-C227*4	-0.031*5		
<p>*1 : 現 薩摩川内市</p> <p>*2 : 現 唐津市</p> <p>*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)</p> <p>*4 : 「Standard Test Method for Potential Alkali Reactivity of Cement-Aggregate Combinations (Mortar-Bar Method)」(1981)</p> <p>*5 : 「-」記号は収縮側にあることを示す</p>					

<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^{※1}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^{※2}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、コンクリート構造物の 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^{※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


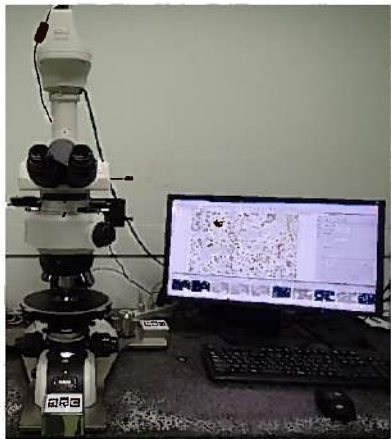
- ・川内 1 号炉は、定期的な目視点検を実施し、運転開始から約 40 年間に於いて、アルカリ骨材反応に起因すると判断されるひび割れ等は認められていない。
- ・使用している骨材(粗骨材、細骨材)は、モルタルバー法による反応性試験を実施し、有害でないことを確認している。
- ・採取したコアサンプルについて、特別点検による実体顕微鏡を用いた観察により、コンクリート構造物の健全性に影響を与えるような反応性がないことを確認した^{※2}。



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 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 ¹⁾			
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 ¹⁾		・岩種の詳細は分からない	・薄片作成・観察に熟練を要する

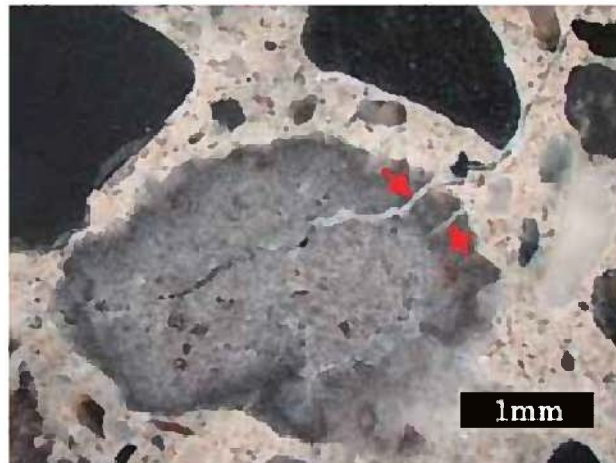
(参考文献)

- 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¹⁾



実構造物における膨張ひび割れ（亀甲状）の事例²⁾

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	骨材	セメント	
	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

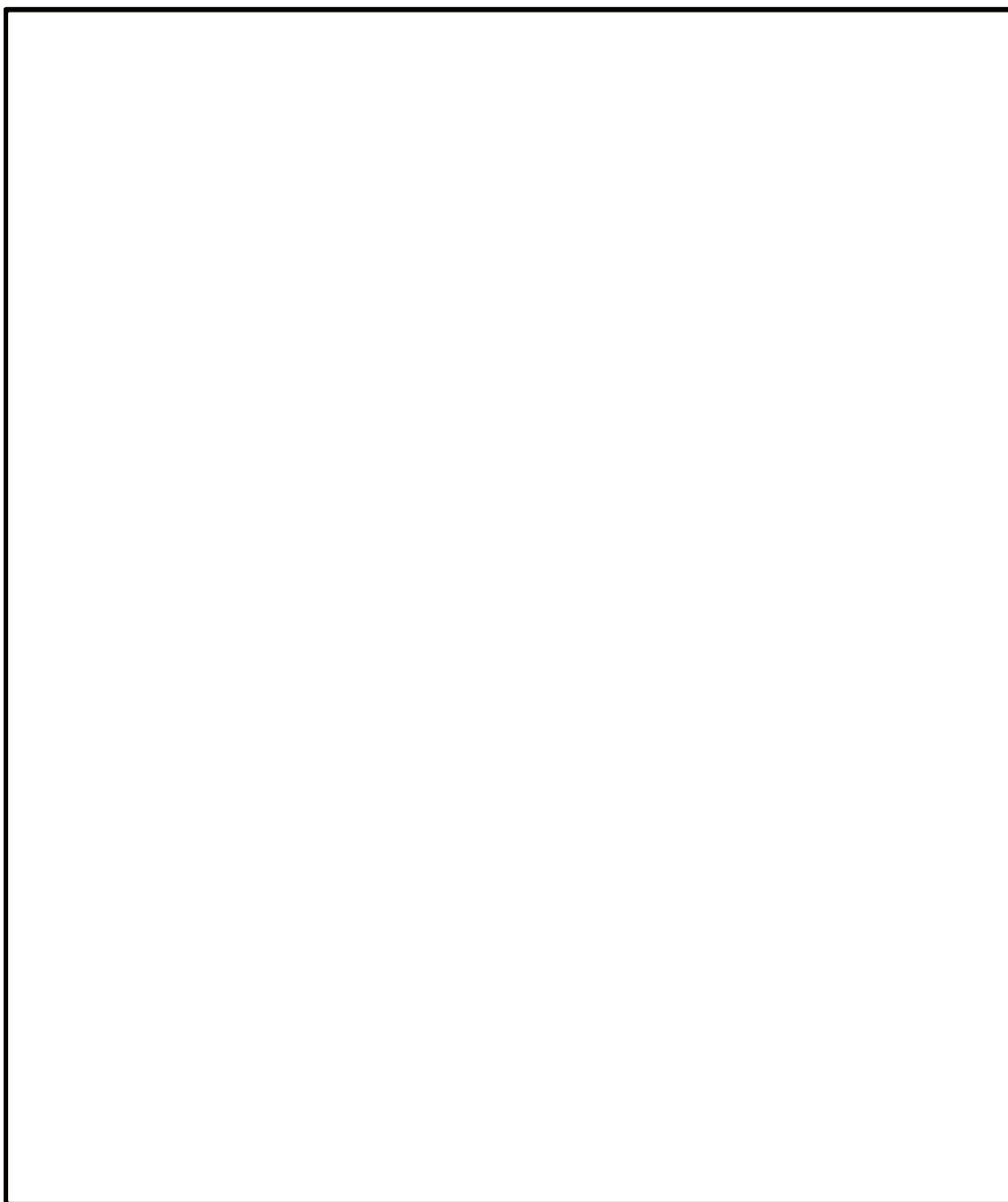
対象構造物	対象部位	実体顕微鏡観察結果	
		進行段階	反応性
原子炉格納施設等	外部遮蔽壁	ii	反応性なし
	内部コンクリート	i	
	基礎マット	i	
原子炉補助建屋	外壁	i	
	内壁及び床	ii	
	使用済み燃料プール	ii	
	基礎マット	—	
タービン建屋	内壁及び床	ii	
	基礎マット	—	
取水槽	海中帯	ii	
	干満帯	ii	
	気中帯	ii	
非常用ディーゼル発電用燃料油貯油槽基礎		ii	
燃料取替用水タンク基礎		ii	

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。

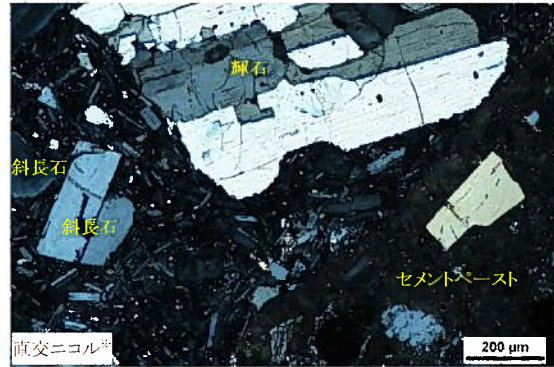
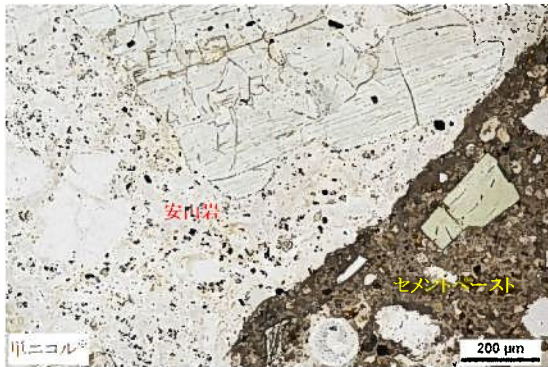
偏光顕微鏡観察結果

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

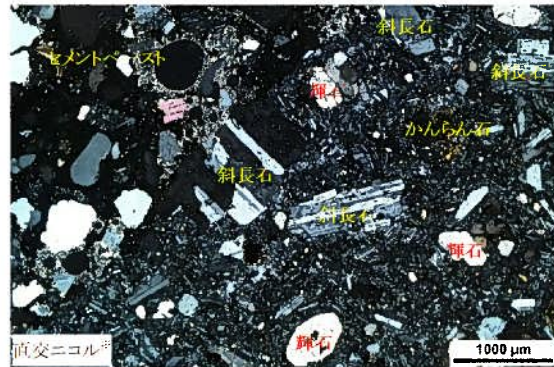
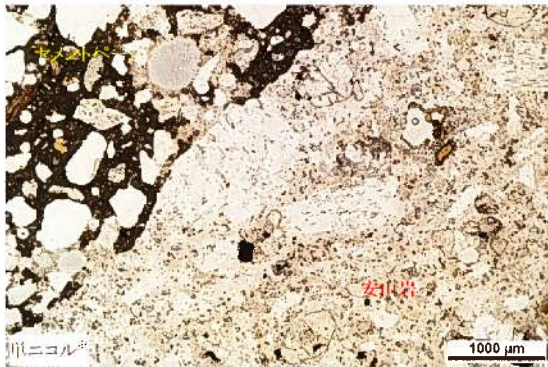
◎ 顕著、○ あり、+ 痕跡程度、— なし

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視察（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視察（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。

タイトル	川内1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 川内1号炉のコンクリート構造物うち、外部遮蔽壁、原子格納施設基礎、原子炉補助建屋、タービン建屋、取水構造物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、それらが川内1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 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>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="408 898 1350 1503"> <thead> <tr> <th data-bbox="408 898 564 976">経年劣化要因</th> <th data-bbox="564 898 1350 976">概要</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td data-bbox="408 976 564 1182">塩分浸透</td> <td data-bbox="564 976 1350 1182">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。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="408 1182 564 1361">アルカリ骨材反応</td> <td data-bbox="564 1182 1350 1361">コンクリート中の反応性シリカを含む骨材と、セメント等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="408 1361 564 1503">化学的侵食</td> <td data-bbox="564 1361 1350 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> <p>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、化学的侵食が川内1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、川内1号炉の環境条件に基づき評価を行った。</p> <p>2.2.1 塩分浸透 川内1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。</p> <p>その結果、各評価部位における鉄筋腐食減量は、運転開始後60年経過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の鉄筋腐食減量を十分に下回っている。</p>	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。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、セメント等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。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、セメント等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。								

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等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等は確認されていない。

したがって、塩分浸透の評価結果、目視点検の結果及び最も厳しい環境条件にある取水構造物の現状を踏まえると、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、川内1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。

川内1号炉は、運転開始後40年近く経過しており、定期的な建屋内部からの目視点検を実施しているが、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確認されていない。

また、使用している骨材（粗骨材・細骨材）については、別紙14に示すとおり、1986年にモルタルバー法（ASTM C227:1981）及び1987年にモルタルバー法（JASS5N T-201:1985）による反応性試験を実施しており、その結果、膨張率は「材令6ヶ月で0.1%以下」の判定基準に対し無害と判定されている。

これに加え、特別点検による実体顕微鏡を用いた観察において、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、アルカリ骨材反応によるコンクリートの経年劣化が生じる可能性は低いと考えられる。

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の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等が生じる。

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、川内1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) 川内1号炉地下水水質試験における地下水採取位置及び試験結果

川内1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。

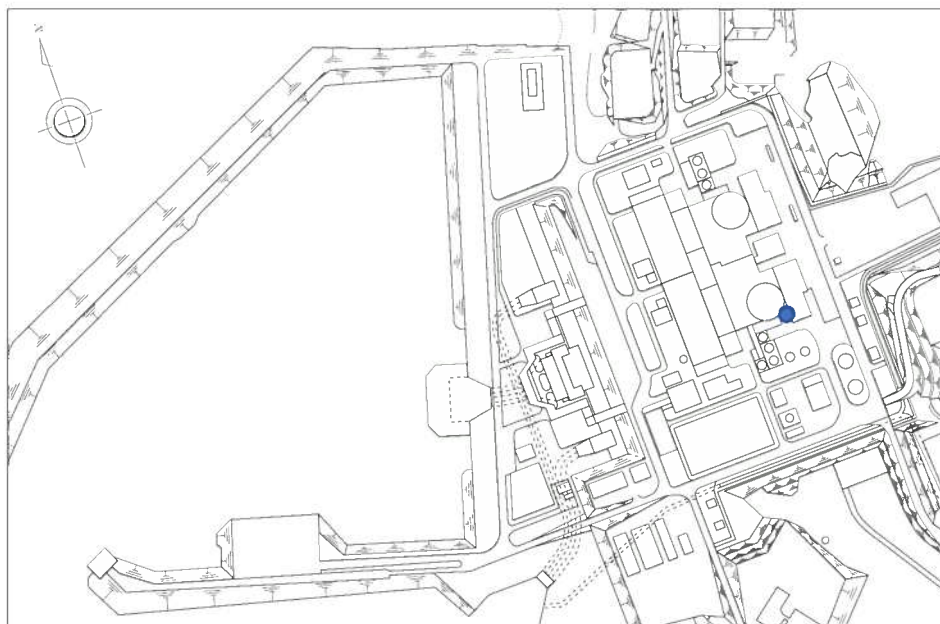


図1 川内1号炉 地下水の採取位置

表2 川内1号炉における地下水の水質試験結果

	pH	アンモニウムイオン (mg/l)	マグネシウムイオン (mg/l)	硫酸イオン (mg/l)	遊離炭酸 (mg/l)
採取位置	8.7	0.03 未満	2.6	24	1 未満

(2) 地下水の水質試験結果の分析

川内1号炉における地下水の水質試験結果（pH、アンモニウムイオン、マグネシウムイオン、硫酸イオン、遊離炭酸）をEN206¹⁾の地下水の環境区分と対比した結果は表3に示すとおりであり、全ての項目において、EN206のいずれの環境区分にも該当しないことを確認した。

表3 川内1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	環境区分との対比結果
	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
アンモニウムイオン [mg/l]	$15 \leq X \leq 30$	$30 < X \leq 60$	$60 < X \leq 100$	該当区分なし
マグネシウムイオン [mg/l]	$300 \leq X \leq 1000$	$1000 < X \leq 3000$	$3000 < X$	該当区分なし
硫酸イオン [mg/l]	$200 \leq X \leq 600$	$600 < X \leq 3000$	$3000 < X \leq 6000$	該当区分なし
遊離炭酸 [mg/l]	$15 \leq X \leq 40$	$40 < X \leq 100$	$100 < X$	該当区分なし

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

川内1号炉の地下水の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を踏まえると、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川内1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川内1号炉の環境条件に基づき評価を行った。

表4に示すとおり、各経年劣化要因が川内1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低いことを確認した。

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及び進展の可能性

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ものの、塩分浸透による鉄筋腐食に起因する膨張性のひび割れ等は、建屋内部からの定期的な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	×	×	建屋内部からの定期的な目視点検において、アルカリ骨材反応に起因する膨張性のひび割れ等は確認されていない。 また、コンクリート使用骨材については、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。 これに加え、特別点検による実体顕微鏡を用いた観察において、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ている。
化学的侵食	×	×	川内1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。