

タイトル	土木・建築関係設備に係わる保全管理の文書体系について
説明	<p>土木・建築関係設備に係わる保全管理の文書体系は以下のとおりである。</p> <pre>graph TD; A[玄海原子力発電所 原子炉施設保安規定 (要則)] --> B[原子力発電所品質マニュアル (要則)]; B --> C[玄海原子力発電所 品質マニュアル (基準)]; C --> D[玄海原子力発電所 土木建築基準]; C --> E[玄海原子力発電所 教育訓練基準]; D --> F[玄海原子力発電所 土木建築業務要領]; E --> G[玄海原子力発電所 土木建築課教育訓練要領];</pre>

<p>タイトル</p>	<p>温度分布解析の方法等について</p>
<p>説明</p>	<p>内部コンクリート（1次遮蔽壁）の炉心領域部及び原子炉容器サポート直下部における温度分布解析の方法等について、以下に示す。</p> <p>1. 炉心領域部の温度分布解析</p> <p>1.1 温度分布解析の方法</p> <p>炉心領域部の1次遮蔽壁内におけるガンマ発熱による温度分布は、2次元輸送計算コード DORT (Ver. 3.2) を用いて算出したガンマ線束分布に、エネルギー吸収係数を乗じて1次遮蔽壁内のガンマ発熱量分布を算出した後、熱伝導方程式を解いて温度分布を求めている。</p> <p>(1) 解析モデル</p> <p>炉心、炉内構造物、原子炉容器及び炉心領域部の1次遮蔽コンクリートを2次元形状（水平断面）でモデル化している。具体的な解析モデルは添付1に示す。</p> <p>(2) 入力条件</p> <p>DORT コードは、米国のオークリッジ国立研究所で開発された中性子輸送方程式を数値的に解くコードであり、入力パラメータは、以下のとおりである。</p> <div data-bbox="411 1099 1350 1451" data-label="Diagram"> <pre> graph LR A[①物性値(密度、組成)] --> DORT[DORT コード] B[②原子炉、1次遮蔽形状] --> DORT C[③原子炉熱出力分布*1] --> DORT D[④核分裂により発生する中性子スペクトル*2] --> DORT DORT --> E[ガンマ線束] E --> F[ガンマ発熱量 (kcal/(cm³・h))] G[エネルギー吸収係数*3] --> F </pre> </div> <p>* 1 : これまでの運転サイクルにおける原子炉出力分布の平均値を用いて原子炉熱出力に相当する分のエネルギー（中性子発生個数）を入力 * 2 : 燃料（ウラン235）の核分裂により発生する中性子発生個数とエネルギー（物性値）を入力 * 3 : 出典「REACTOR PHYSICS CONSTANTS, ANL-5800 (1963)」</p> <p>1.2 解析結果</p> <p>炉心領域部のガンマ発熱量分布の計算結果を添付1に示す。添付1を基に、熱伝導方程式を解いて温度分布を算出した結果、炉心領域部での最高温度は、内部コンクリート（1次遮蔽壁）内面から約57cmの位置に現れ、約52℃であり、強度上の熱に対するコンクリートの温度制限値（貫通部90℃、その他の部分65℃）を下回る結果であった。1次遮蔽コンクリート内の温度分布を添付2に示す。</p>

2. 原子炉容器サポート直下部の温度分布解析

2.1 温度分布解析の方法

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

(1) 解析モデル

解析モデルの対象範囲は、温度条件の厳しい原子炉容器出口ノズル部回りとし、以下の要素から構成している。具体的な対象範囲と解析モデルは添付4に示す。

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

(2) 入力条件

入力条件は定格出力運転時を前提として下記のとおりとしている。

- ・1次冷却材温度（原子炉容器内面） T_G : 289°C
- ・1次冷却材温度（原子炉容器出口管台及び1次冷却材管内面） T_H : 325°C
- ・原子炉容器冷却ファン出口冷却空気流量 : 1,100m³/min
- ・原子炉容器冷却ファン出口冷却空気温度 : 46°C
- ・ガンマ発熱 : 添付1図2のガンマ発熱量分布
- ・材料物性値（熱伝導率） : 文献、使用材料に基づき設定（添付5）

2.2 解析結果

原子炉容器サポート直下は伝達熱により温度が上昇する。しかし、温度分布解析の結果は、約52°Cであり強度上の熱に対するコンクリートの温度制限値（貫通部90°C、その他の部分65°C）を下回る結果であった（添付6）。また、原子炉容器サポートの外側コンクリートにおいて、シム及びサポートシューの輻射並びに冷却空気の澱みによる影響から約54°Cを示す箇所があるが、原子炉容器サポートからの荷重を直接支持する部位ではない。

なお、コンクリート内部における原子炉容器サポート直下部近傍の実測温度は約28~44°Cであり、実測温度の測定箇所における解析結果（約52°C）よりも十分に低い値であることから、保守的な評価が行われていると判断している（添付3）。

- 添付1 炉心領域部の1次遮蔽コンクリートにおけるガンマ発熱量分布の計算モデル及び計算結果
- 添付2 炉心領域部の1次遮蔽コンクリート内の温度分布（炉心高さ）
- 添付3 原子炉容器サポート直下部近傍の解析値と実測温度の比較
- 添付4 原子炉容器サポート直下部の解析対象範囲及び解析モデル
- 添付5 材料物性値（熱伝導率）
- 添付6 原子炉容器サポート直下部の1次遮蔽コンクリートの温度分布

炉心領域部の 1 次遮蔽コンクリートにおけるガンマ発熱量分布の計算モデル及び計算結果

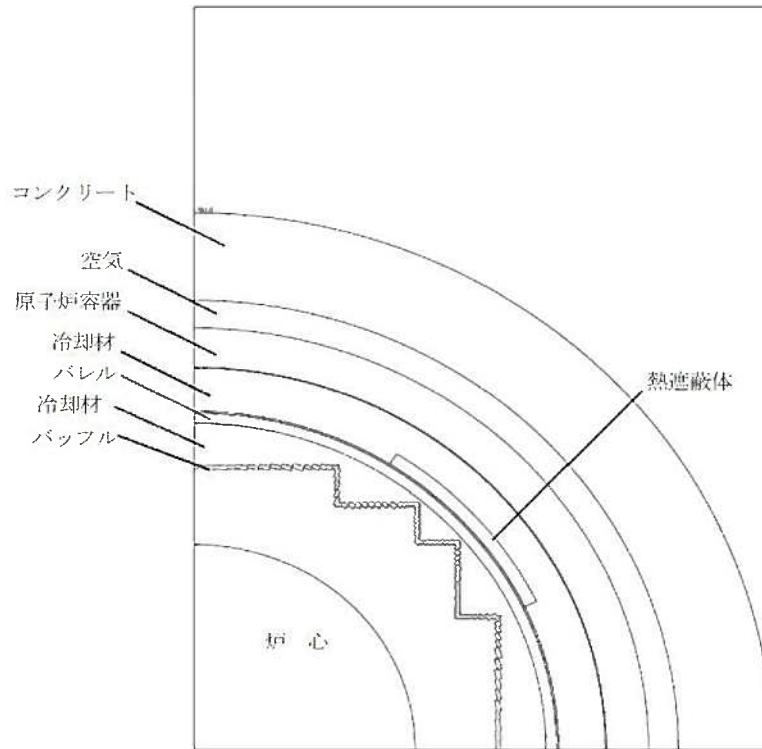


図 1 計算モデル

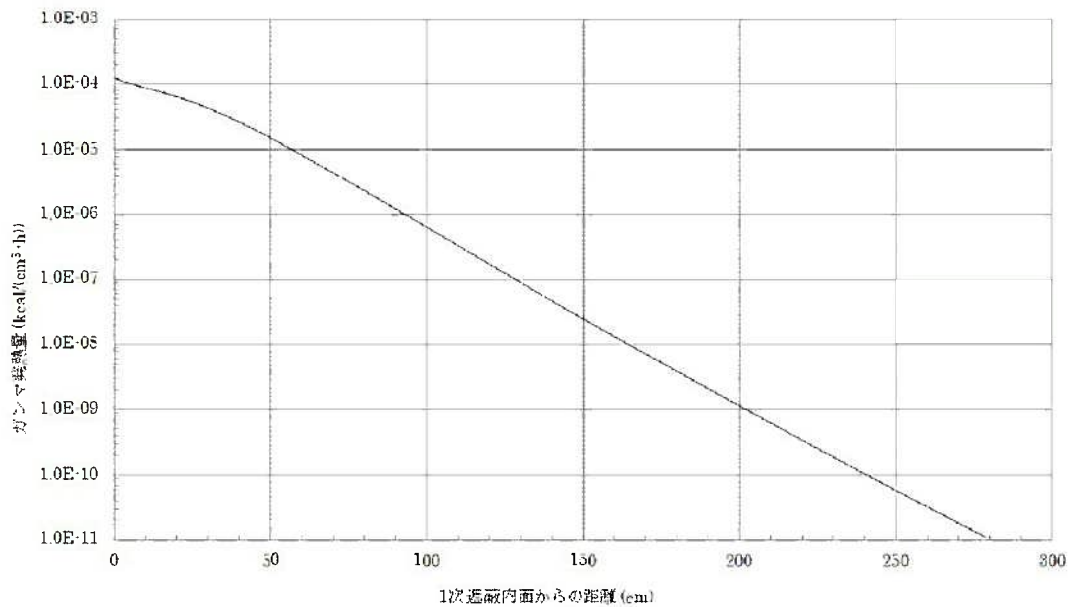


図 2 1 次遮蔽コンクリート内のガンマ発熱量分布 (炉心高さ)

炉心領域部の1次遮蔽コンクリート内の温度分布（炉心高さ）

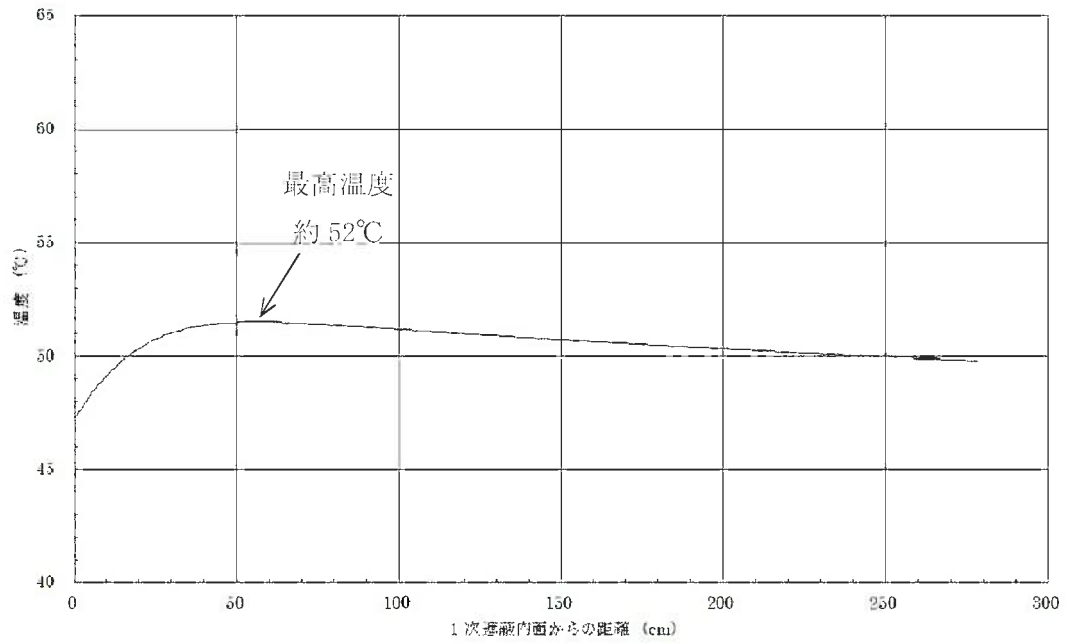


図3 1次遮蔽コンクリート内の温度分布（炉心高さ）

原子炉容器サポート直下部近傍の解析値と実測温度の比較

表 1 解析値と実測温度の比較

部 位	解析値* 1	実測値	備 考
原子炉容器 サポート直下部近傍	約 52℃	約 28～44℃	実測値の測定は、2020 年 1 月 ～2022 年 12 月（3 年間）の最 低温度と最高温度

* 1 解析値は、実測温度の測定箇所における値

実測温度の計測位置

原子炉容器サポート直下部における実測温度の計測位置（4 点）は以下のとおり。

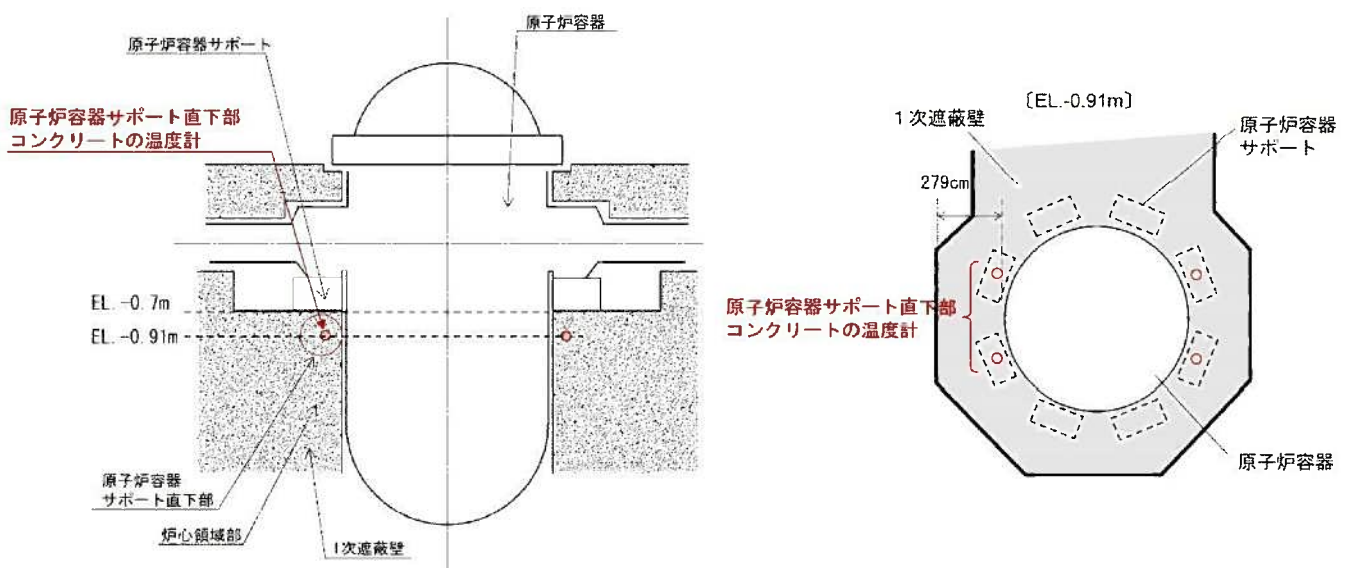


図 4 実測温度の計測位置

原子炉容器サポート直下部の解析対象範囲及び解析モデル

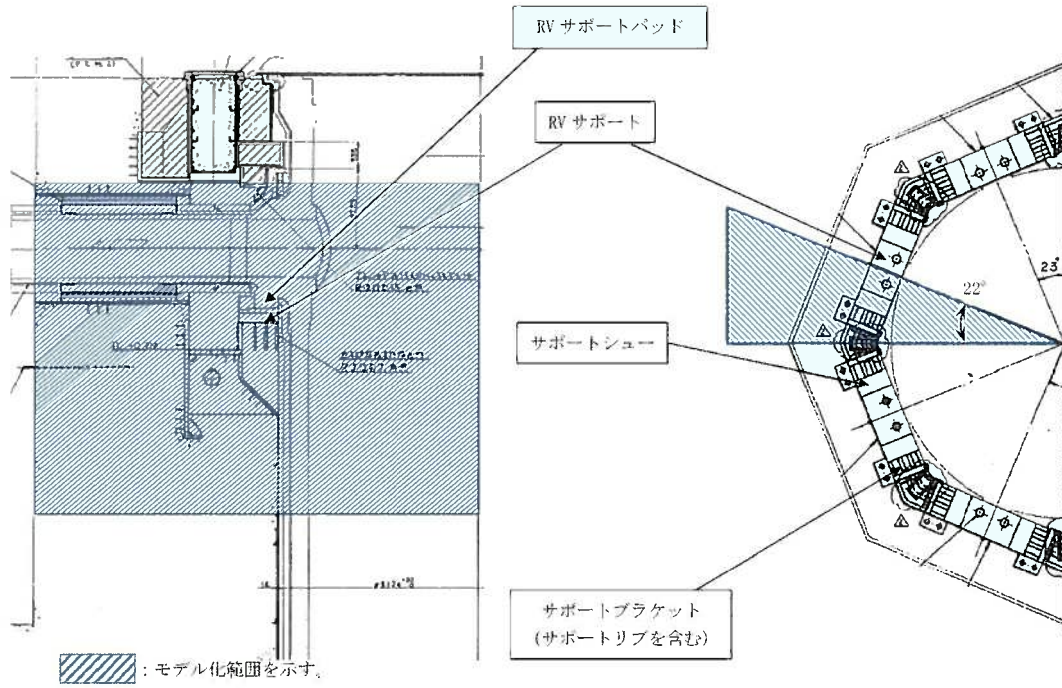


図5 解析対象範囲

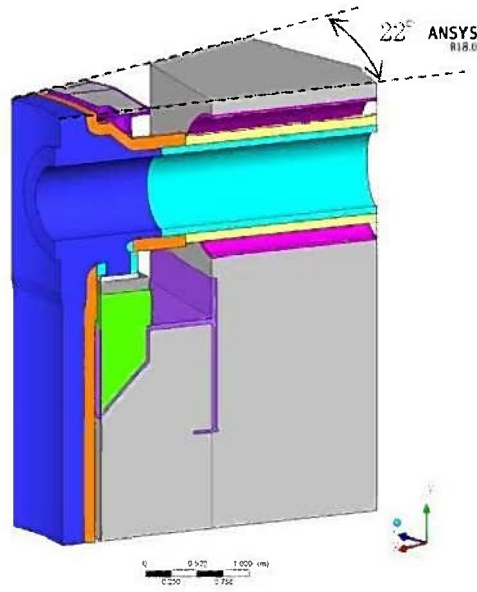


図 6 解析モデル (全体)

材料物性値（熱伝導率）

表 2 各部位の材質と熱伝導率

部 位		材 質	熱伝導率 (W/(m・K)) *1
空 気		—	0.02572 (20°C) 0.03145 (100°C) 0.03803 (200°C) 0.04708 (350°C)
原子炉容器	上部胴 冷却材出口管台	SFVQ1A	51.2 (300K) 46.1 (500K) 36.9 (800K)
	下部胴	SFVQ1A	
1次冷却材管	ホットレグ	SCS14A 相当	24.3 (300K)
原子炉容器 サポート	シムプレート	AISI A-10 (工具鋼相当)	45.1 (300K) 39.2 (600K) 29.9 (1000K)
	サポートシュ	SFVQ1A	51.2 (300K) 46.1 (500K) 36.9 (800K)
	サポートブラケット、 ベースプレート、 外周プレート	SM50B (SM490B)	51.6 (300K) 47.8 (500K) 38.2 (800K)
シールドウォール、リングフレーム支柱 プレッシャデフレクタ		SM50B (SM490B)	51.6 (300K) 47.8 (500K) 38.2 (800K)
バブルプレート		SS41 (SS400)	51.6 (300K) 47.8 (500K) 38.2 (800K)
コンクリート		普通コンクリート (珪岩質骨材コンクリ ート)	1.5 (293K) 1.1 (600K)
保温材	原子炉容器保温材	金属保温材	0.0605 (300K) 0.0605 (600K)
	原子炉容器保温材	ステンレスクロス製 保温マット	0.063 (300K) 0.063 (600K)
	1次冷却材管保温材	—	0.063 (300K) 0.063 (600K)

* 1 (出典) 日本機械学会「伝熱工学資料 改訂第5版」(2009) (保温材は保温材スペック)
熱伝導率は記載の値 (記載の値は一例) を定義し、その間の温度では解析コード内で線形補完した値を設定している

原子炉容器サポート直下部の1次遮蔽コンクリートの温度分布



図7 解析モデル全体の温度分布

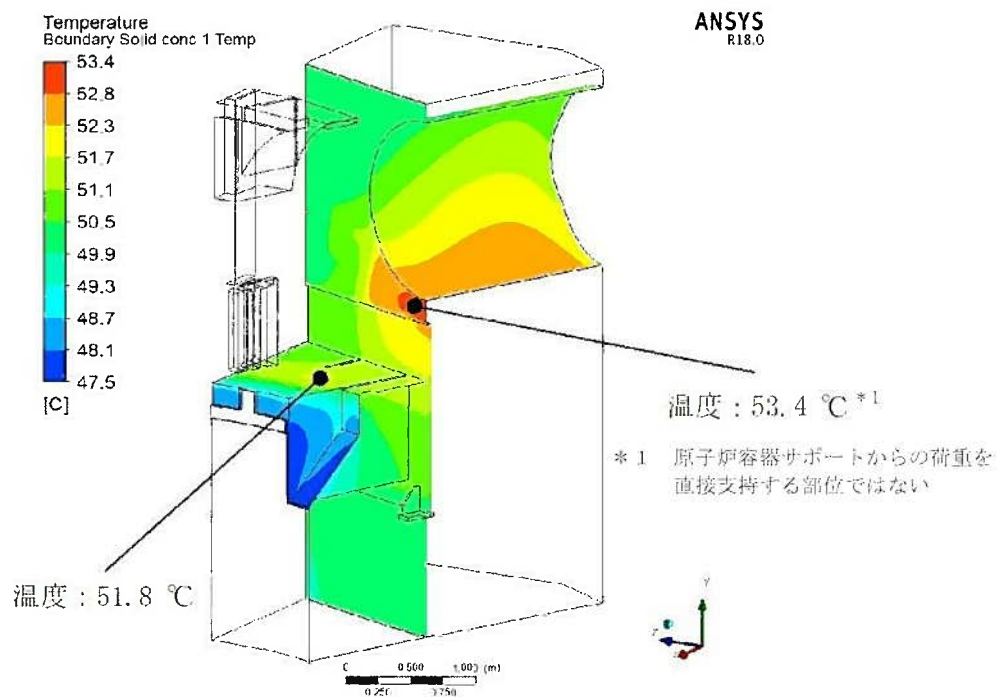


図8 原子炉容器サポート回りのコンクリートの温度分布

タイトル	放射線照射量の算出方法等について
説明	<p>1次遮蔽の放射線照射量は、1次遮蔽における中性子束 ($E > 0.098\text{MeV}$) 及びガンマ線量率を2次元輸送計算コード DORT により算出し、運転時間を掛けることで中性子、ガンマ線照射量を求めている。</p> <p>DORT コードは、米国のオークリッジ国立研究所で開発された中性子輸送方程式を数値的に解くコードであり、入力パラメータは以下のとおりである。</p> <div data-bbox="427 616 1327 974" style="border: 1px solid black; padding: 10px; margin: 10px 0;"> <pre> graph LR A[①物性値 (密度, 組成)] --> DORT[DORT コード] B[②原子炉, 1次遮蔽形状] --> DORT C[③原子炉出力分布] --> DORT D[④核分裂により発生する中性子スペクトル] --> DORT DORT --> E[中性子束 (n/cm²/s) ガンマ線量率 (rad/h)] </pre> </div> <p>1次遮蔽内の中性子束及びガンマ線量率は、炉心の水平断面形状 (R, θ 計算) を用いて、1次遮蔽の照射量が最大となる高さ位置の中性子束及びガンマ線量率を各々算出する。</p> <p>また、中性子束及びガンマ線量率の軸方向分布 ($\phi(z)$) は、水平断面形状 (R, θ 計算) で算出した中性子束及びガンマ線量率の最大値 (ϕ_{\max}) を垂直断面形状 (R, Z 計算) より算出した軸方向の補正係数 (f_z) を用いて補正することで算出する。</p> $\phi(z) = \phi_{\max} \times f_z$ <p>$\phi(z)$: 中性子束及びガンマ線量率の軸方向分布 ϕ_{\max} : 中性子束及びガンマ線量率の最大値 f_z : 軸方向の補正係数</p> <p>1次遮蔽内の水平断面形状 (R, θ 計算) の評価では、図1に示すような形状を入力して、1次遮蔽の最大高さ位置の中性子束及びガンマ線量率を算出している。</p>

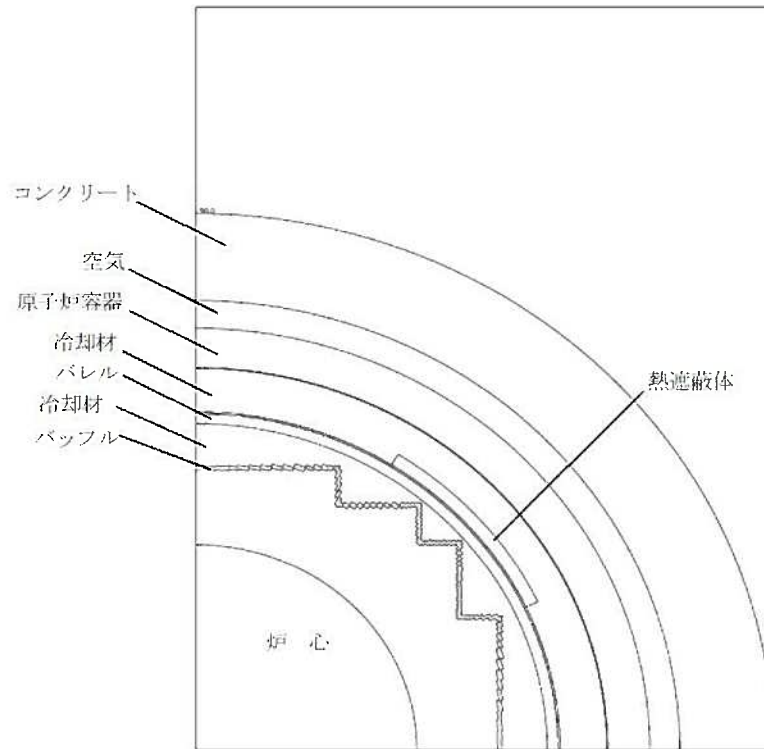


図1 計算モデル図[(R, θ)形状]

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

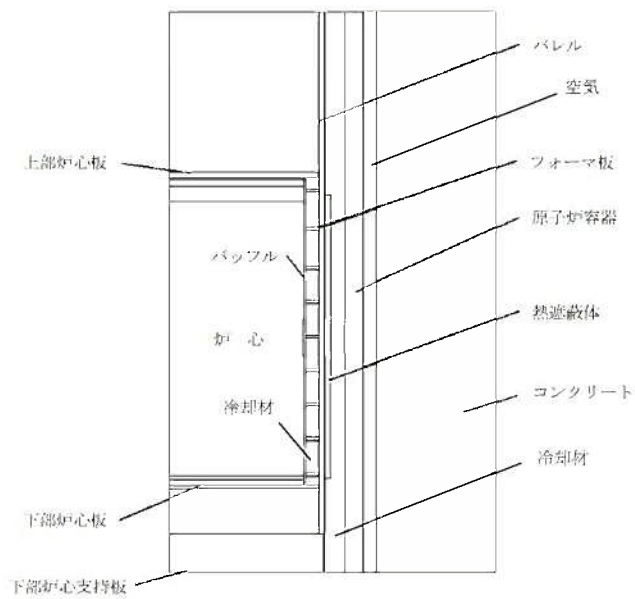


図2 計算モデル図[(R, Z)形状]

以上により算出した1次遮蔽内の中性子束及びガンマ線量率に対し、運転開始後60年時点における定格負荷運転年数(50.5EFPY*¹)を乗じ、1次遮蔽コンクリート炉心側が受ける照射量を算出した結果を表1に示す。

表1 1次遮蔽コンクリート炉心側が受ける照射量の最大値

項目	解析結果	備考
中性子照射量	約 2.4×10^{13} (n/cm ²)	E>0.098MeV
ガンマ線照射量	約 9.5×10^9 (Rad)	

運転開始後60年時点における定格負荷運転年数については、2020年3月末までは運転実績(16.6EFPY)を用い、2020年4月以降は設備利用率を100%と仮定して計算している。将来の運転年数は、過去の設備利用率を踏まえて保守的に設定しており、実際の照射量は解析で算出した照射量よりも小さくなると判断している。また、2009年11月9日(13.6EFPY)からMOX燃料を装荷しており、MOX燃料装荷以降の照射量は保守的に1.2倍して算出している。

なお、解析に用いた中性子スペクトルのエネルギー範囲の設定は0.098MeVを超える範囲で代表しており、中性子照射がコンクリート強度へ及ぼす知見を示したNRA技術報告(小嶋他「中性子照射がコンクリートの強度に及ぼす影響」(NTEC-2019-1001))の、0.1MeVを超える範囲の中性子照射量に基づく評価と、エネルギー範囲は同等である。

*1 運転開始後60年時点における定格負荷運転年数の予測値

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、深さ方向に最大で約 6 cm 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 1339 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>1.93</td> </tr> <tr> <td>欠損有</td> <td><input type="text"/> *1</td> <td><input type="text"/></td> <td>1.90</td> </tr> </tbody> </table> <p>* 1 : 玄海原子力発電所第 3 号機 設計及び工事計画認可申請書 添付資料 7 原子炉本体の基礎に関する説明書 (R3. 6. 1 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"/>	1.93	欠損有	<input type="text"/> *1	<input type="text"/>	1.90
欠損想定	荷重 (kN)	耐力 (kN)	耐震裕度										
欠損無	<input type="text"/> *1	<input type="text"/>	1.93										
欠損有	<input type="text"/> *1	<input type="text"/>	1.90										

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}	□	2.74
欠損有	□ ^{*1}	□	2.72

* 1 : 玄海原子力発電所第3号機 設計及び工事計画認可申請書 添付資料7 原子炉本体の基礎に関する説明書 (R3.6.1 認可)

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。

基準地震動 S_s に対する現状の最大せん断ひずみ (欠損無) 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 (欠損有) 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 0.129×10^{-3} ^{*3}	2.0×10^{-3}
欠損有	□	

* 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 : 玄海原子力発電所第3号機 工事計画認可申請書 添付資料6-3 原子炉格納容器及び原子炉周辺建屋の地震応答解析 (R2.3.30 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 (設計及び工事計画認可申請 R3.6.1 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

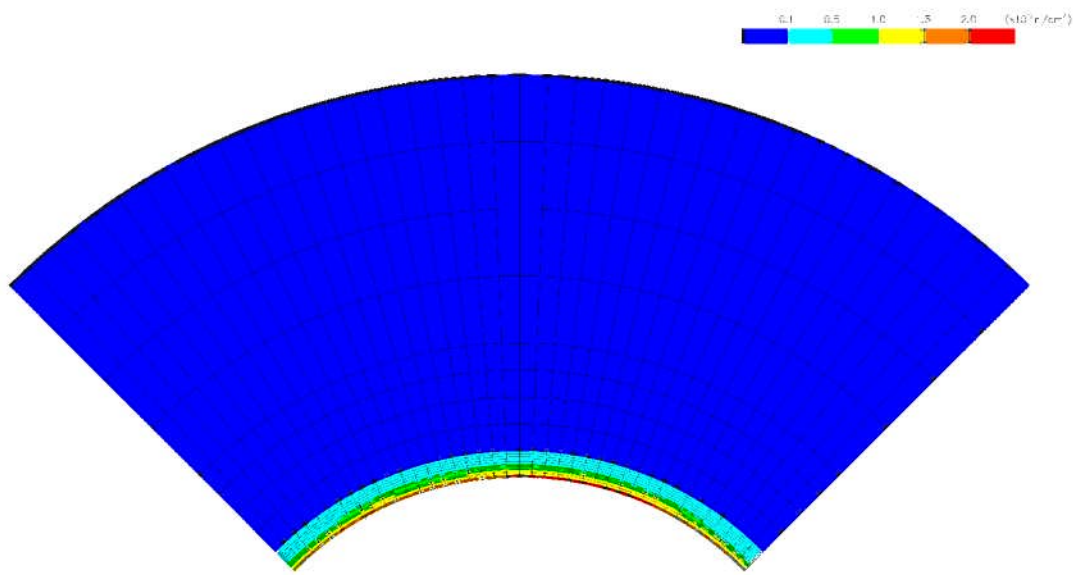


図 1-1 中性子線照射線量当量分布解析結果 (炉心高さ)

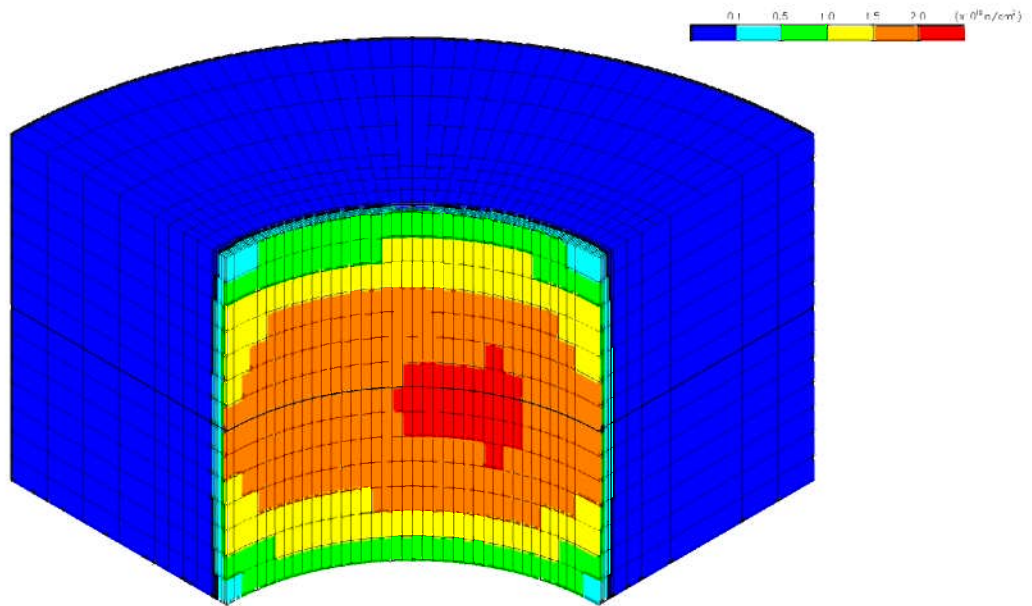


図 1-2 中性子線照射線量当量分布解析結果 (解析モデル全体)

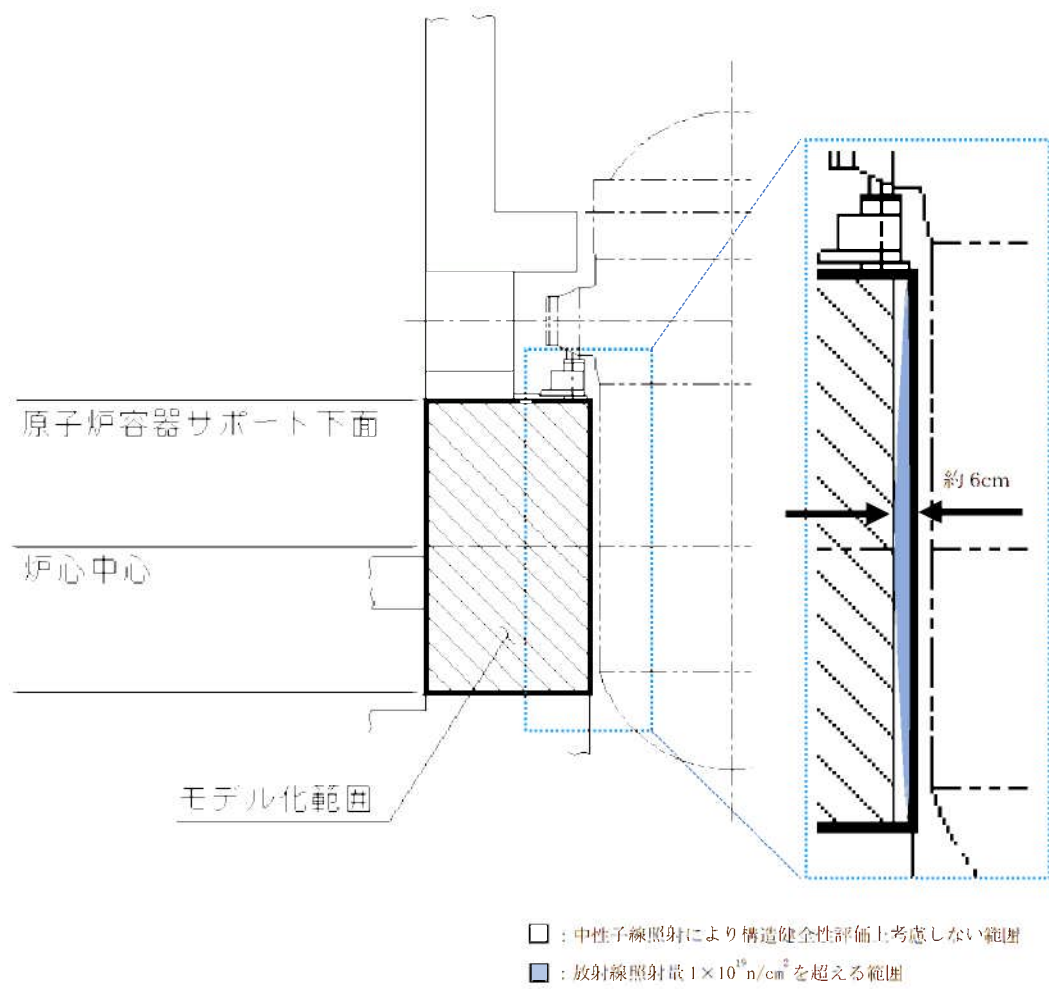
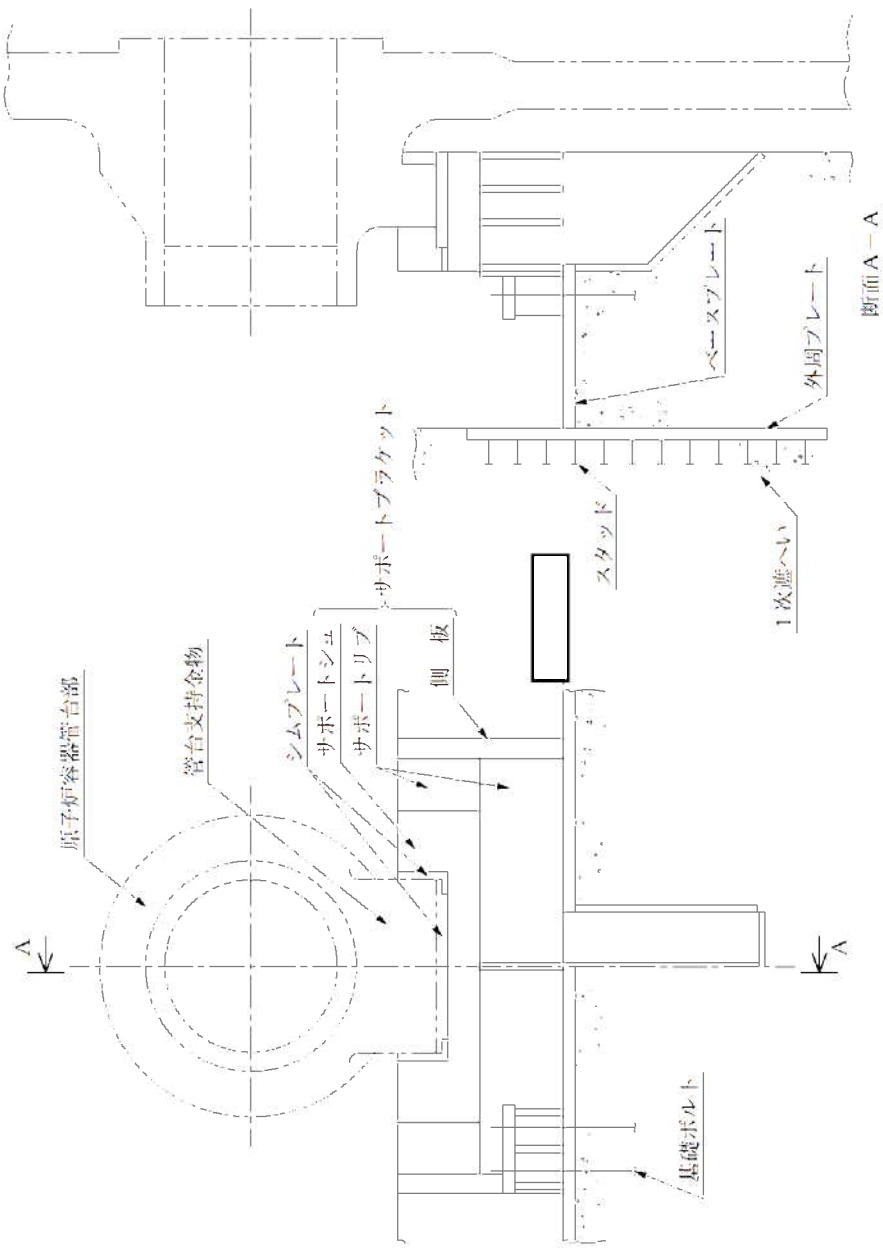


図1-3 中性子線照射量が $1 \times 10^{19} \text{ n/cm}^2$ を超える範囲のイメージ図 (断面)

原子炉本体の基礎に関する説明書

設計及び工事計画認可申請添付資料 7

玄海原子力発電所第 3 号機



第 1-1 図 原子炉容器支持構造物概略図

(3) まとめ

第 2-4 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 2-4 表 コンクリートの強度評価 (注 1.2.3)

(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	自重		-		-
	熱膨張荷重		-		-
	地震荷重		-		-
引 張		□	□	□	□

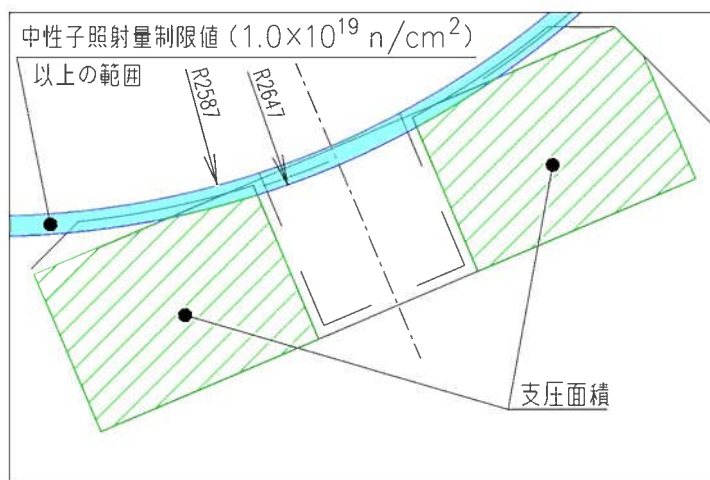
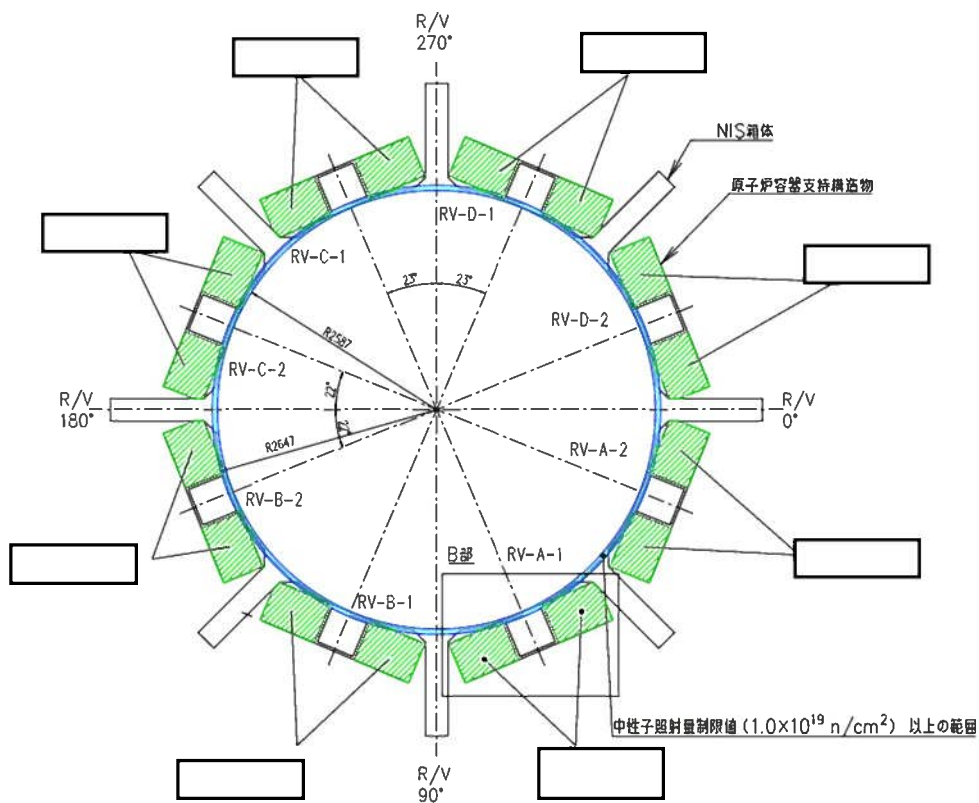
(注1) 荷重は、絶対値で表示する。

(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) 引張荷重は、水平方向荷重(Sd 地震時: 3,000kN、Ss 地震時: 4,100kN)により基礎ボルトに作用する荷重を示す。

2.4 1次遮へいコンクリート(間接支持構造物)の強度評価

1次遮へいコンクリートの強度評価については、令和元年 11 月 28 日付け原規規発第 1911282 号にて認可された工事計画の添付資料 8-13-4「内部コンクリートの耐震計算書」に示すとおり十分な強度を有している。



B部詳細

- : 中性子照射量制限値 ($1.0 \times 10^{19} \text{ n/cm}^2$) 以上の範囲
- : 原子炉容器支持構造物の支圧面積

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

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、支圧面積最小部位においては、欠損無の支圧面積 mm^2 が mm^2 となる。

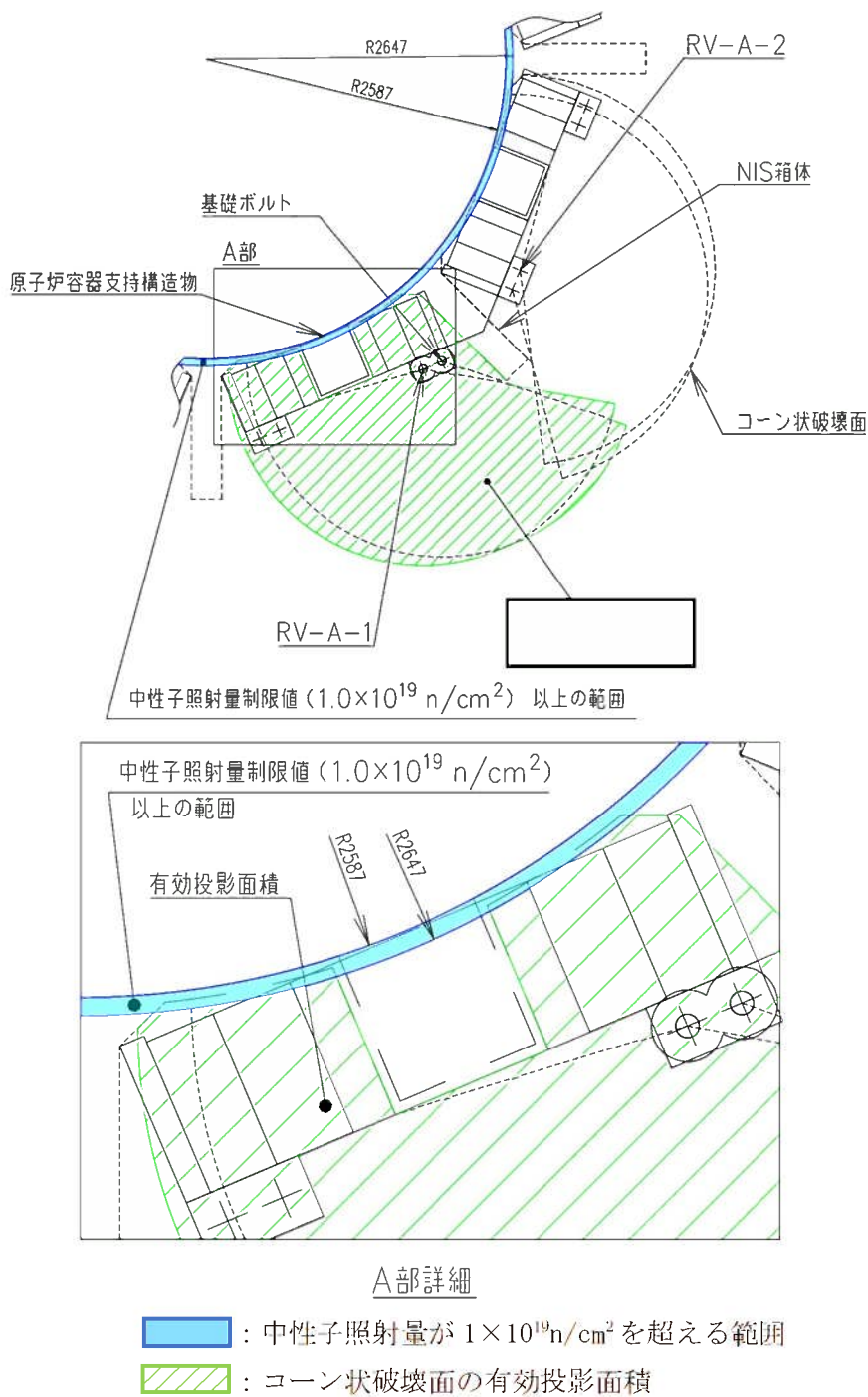


図 4-1 中性子線照射量が $1 \times 10^{19} \text{ n/cm}^2$ を超える範囲とコーン状破壊面の有効投影面積との比較

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

玄海原子力発電所 3 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

玄海原子力発電所 3 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 0.129×10^{-3} である。

(出典：玄海原子力発電所第 3 号機 工事計画認可申請書 添付資料 6-3 原子炉格納容器及び原子炉周辺建屋の地震応答解析 (R2. 3. 30 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。

$$0.129 \times 10^{-3} \times \left(\frac{\text{断面積比}}{\text{断面積比}} \right) = \frac{\text{断面積比}}{\text{断面積比}}$$

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^{*1}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6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1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、建屋内外で計97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 style="text-align: center;">*1 雑固体焼却炉建屋については、2007年4月から2008年3月に空気環境測定を実施</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に基づく中性化に及ぼす影響度の大きさ、運転開始後経過年数を踏まえ、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、一部仕上げ無しの構造物（取水構造物、脱気器基礎）のうち、仕上げを施していない割合が比較的大きい取水構造物を評価対象として選定し、屋内については中性化に及ぼす影響度の大きさと運転開始後経過年数の長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。</p> <p>2.3 運転開始後経過年数の長さ 屋内で仕上げが無い箇所がある対象構造物のうち、運転開始後経過年数が長く、中性化が進展している可能性のある構造物として雑固体焼却炉建屋の屋内面を選定した。</p>

3. 評価点の選定過程

屋内の構造物の評価点は、原子炉補助建屋及び雑固体焼却炉建屋のうち、塗装等のコンクリート表面仕上げがない屋内面の壁を選定した。

屋外の構造物の評価点は、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選定した。

添付1 環境測定 使用機器

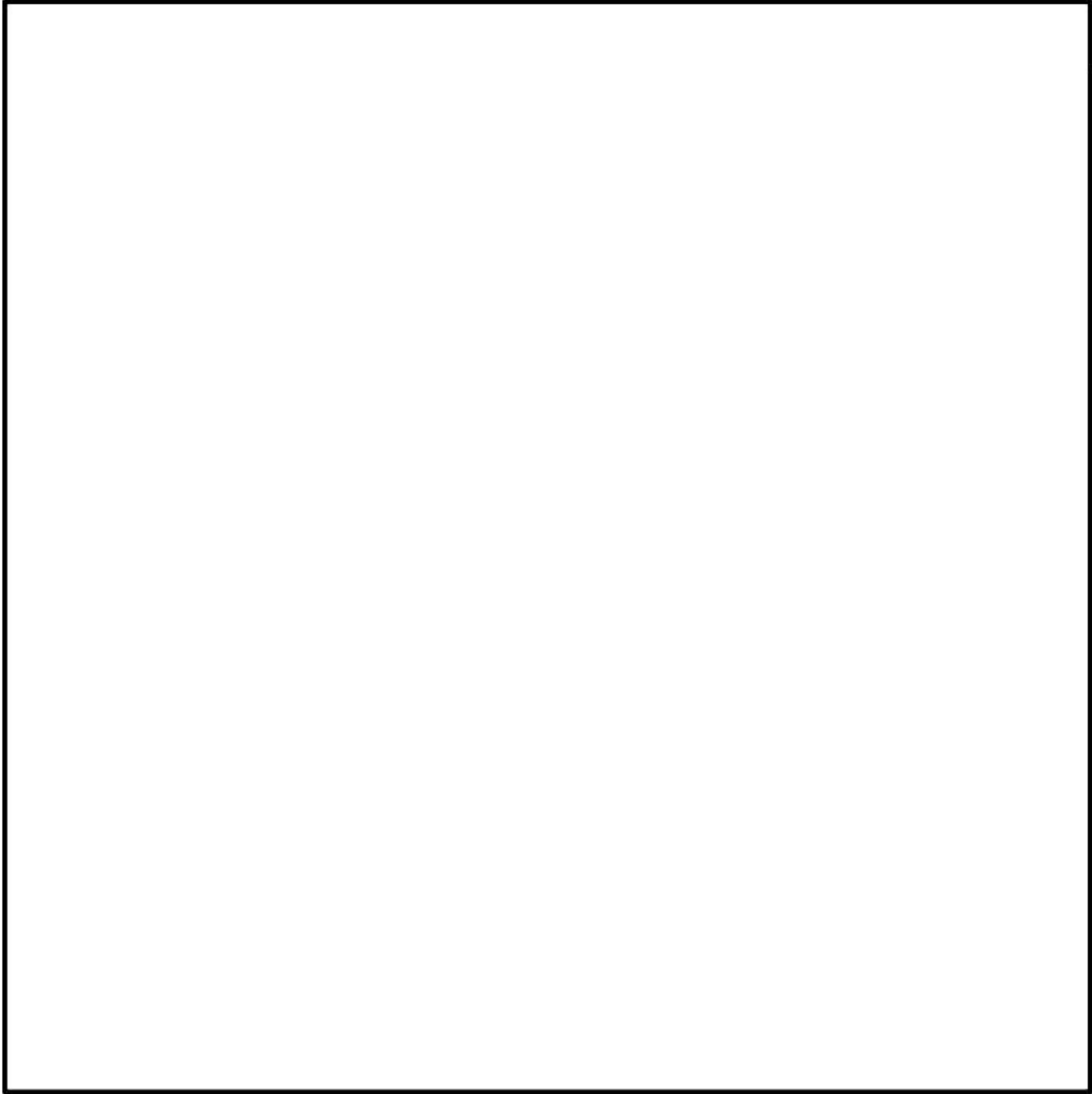
添付2 環境測定 測定位置図

添付3 環境条件による影響度

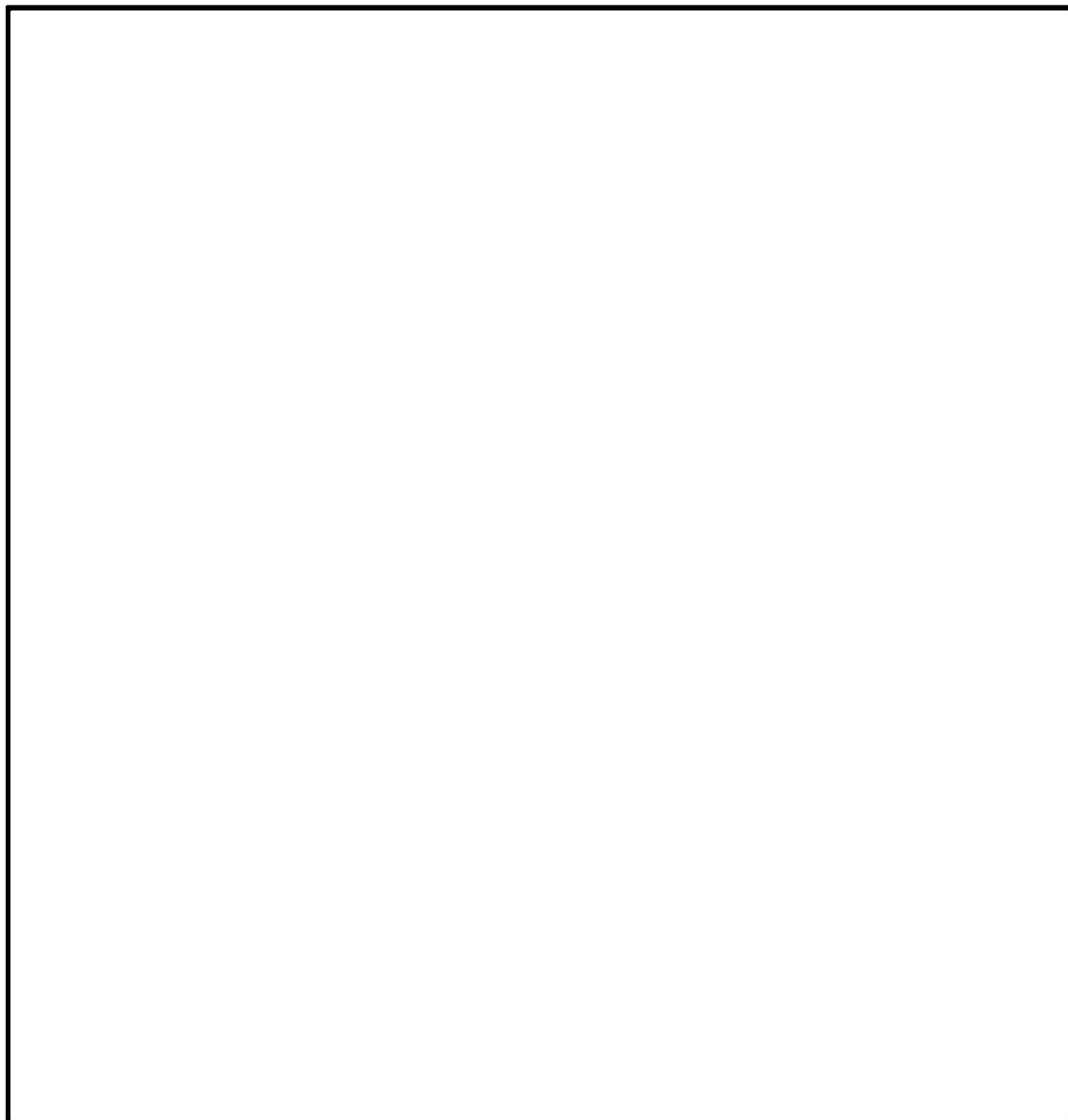
環境測定 使用機器

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

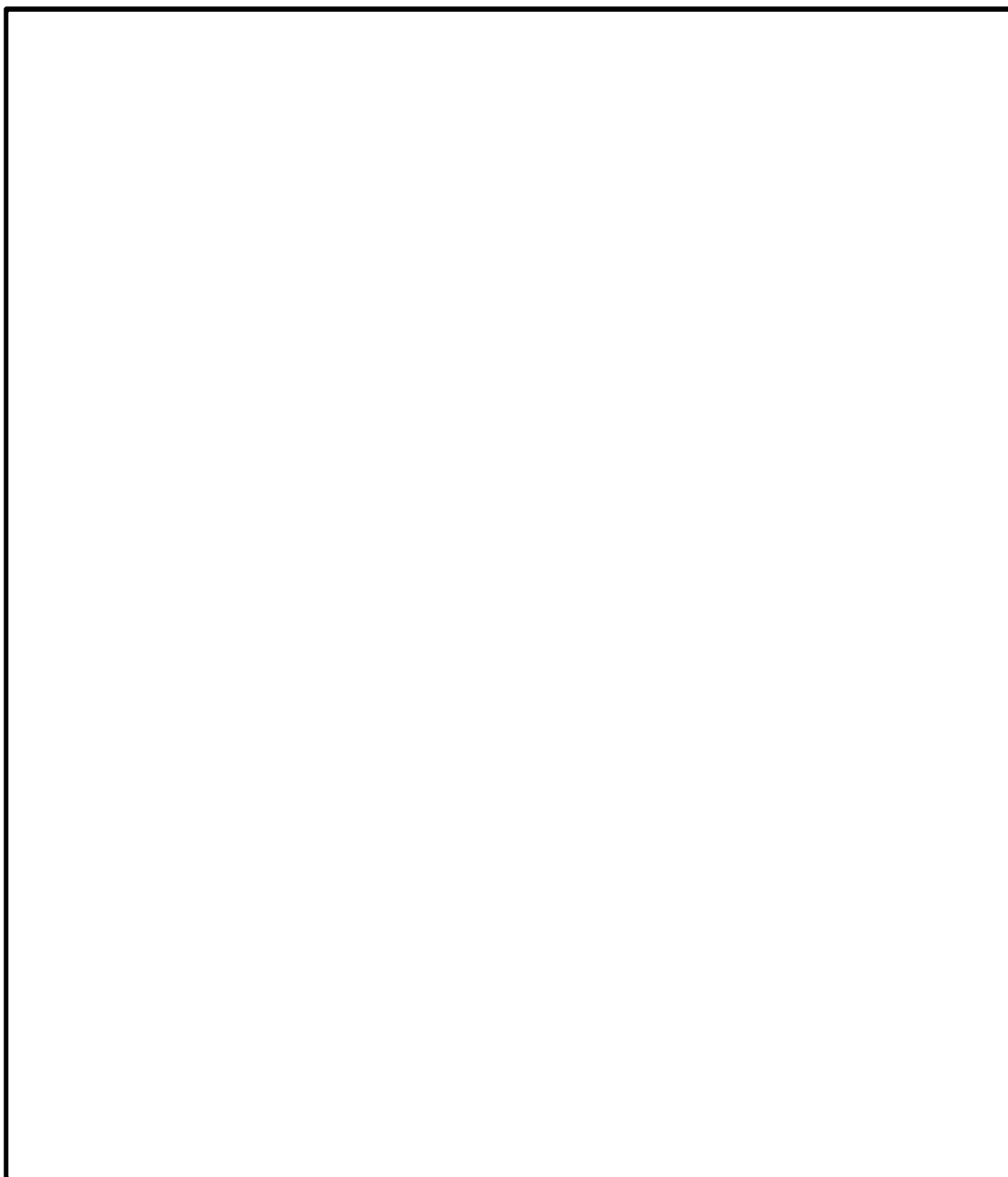
環境測定 測定位置図



原子炉補助建屋



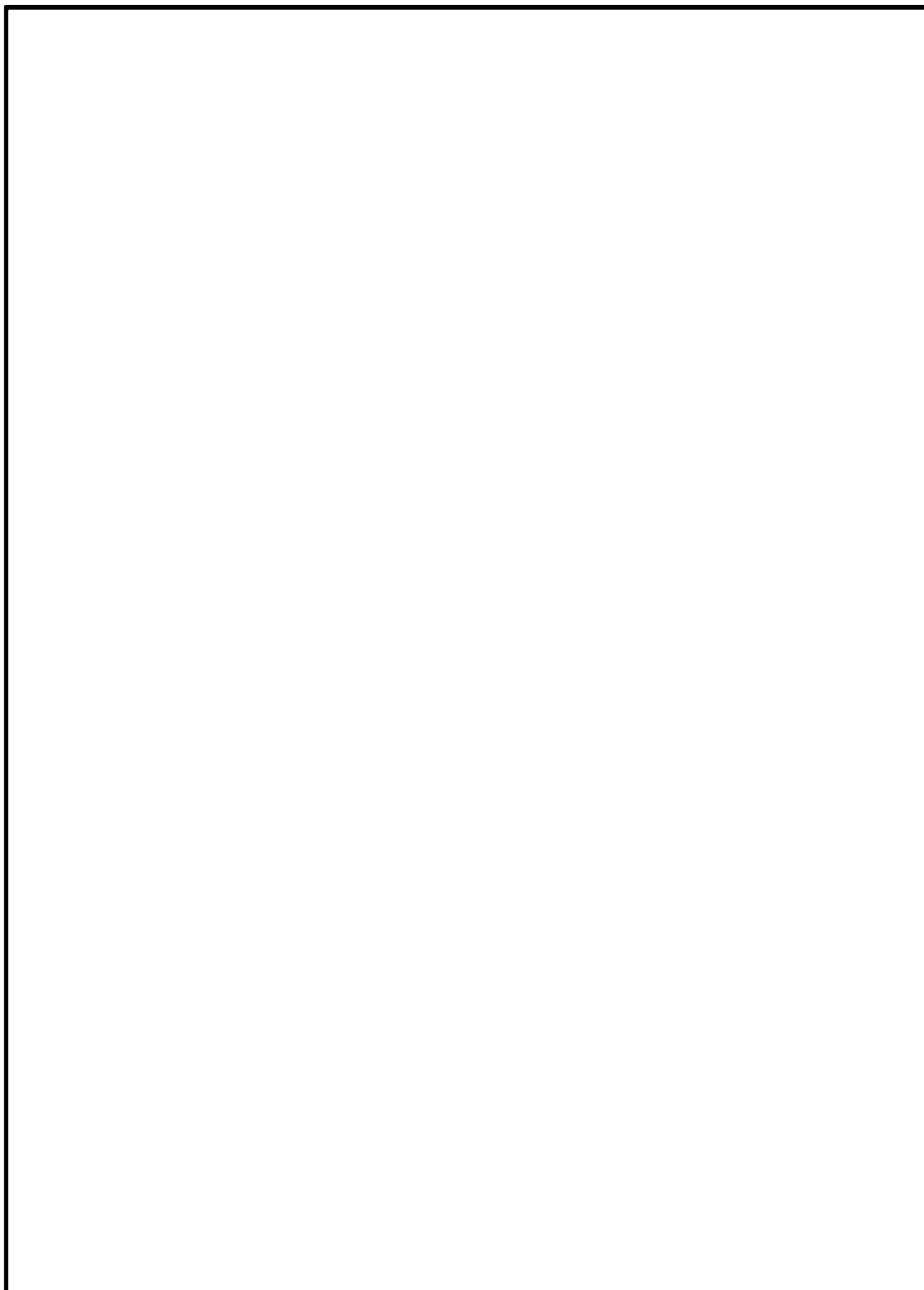
原子炉格納施設等、原子炉周辺建屋、原子炉補助建屋



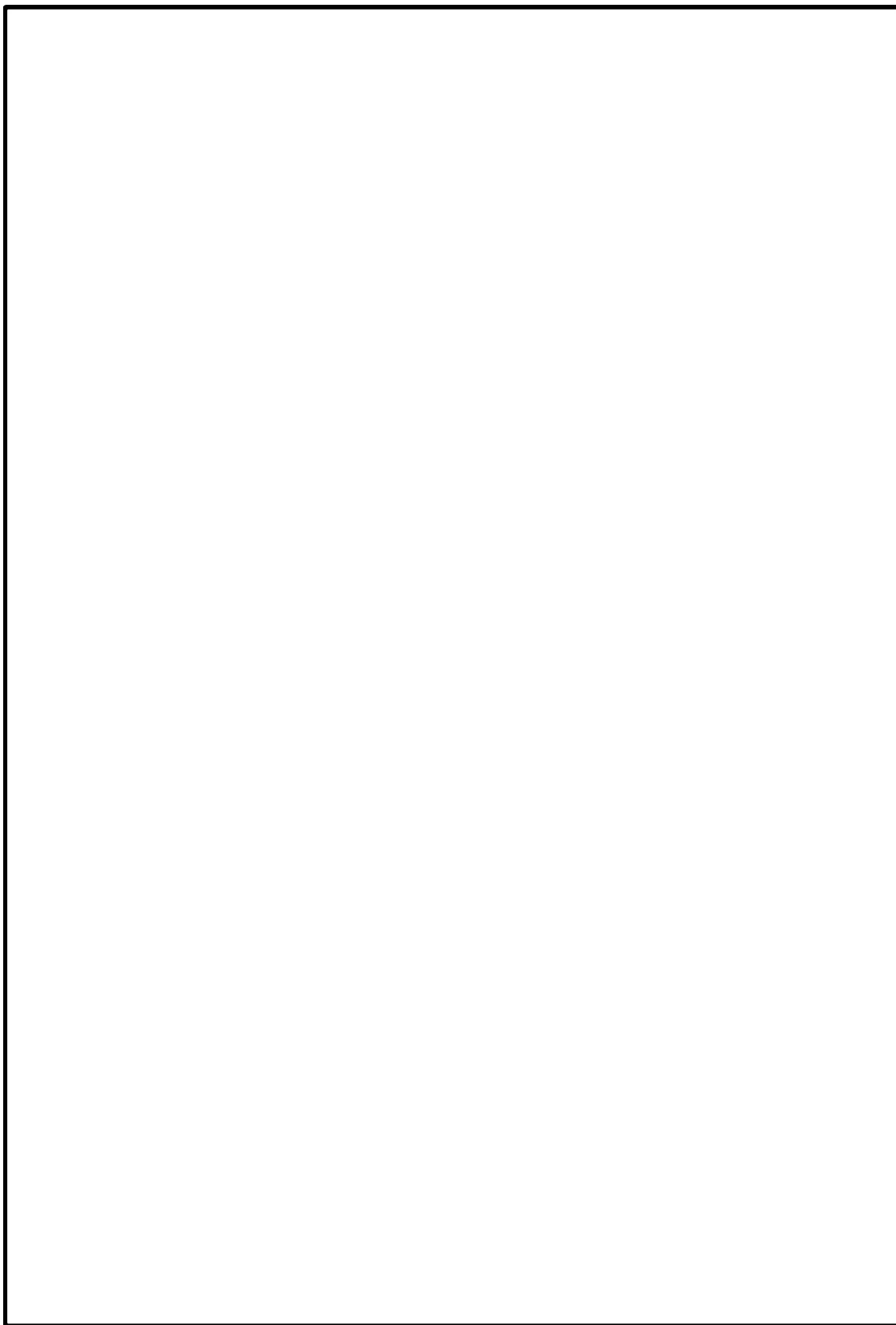
原子炉格納施設等、原子炉周辺建屋、原子炉補助建屋



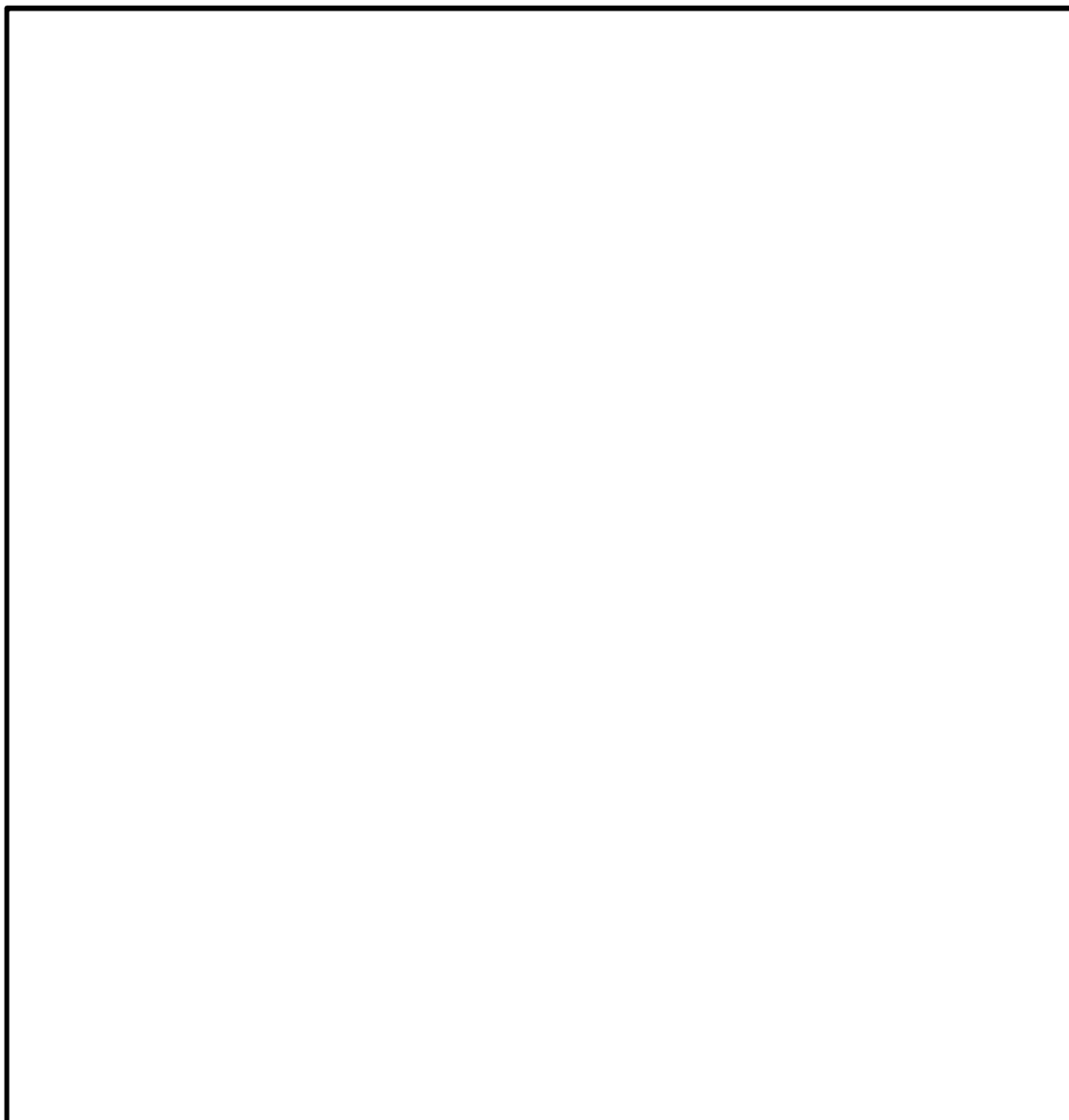
タービン建屋



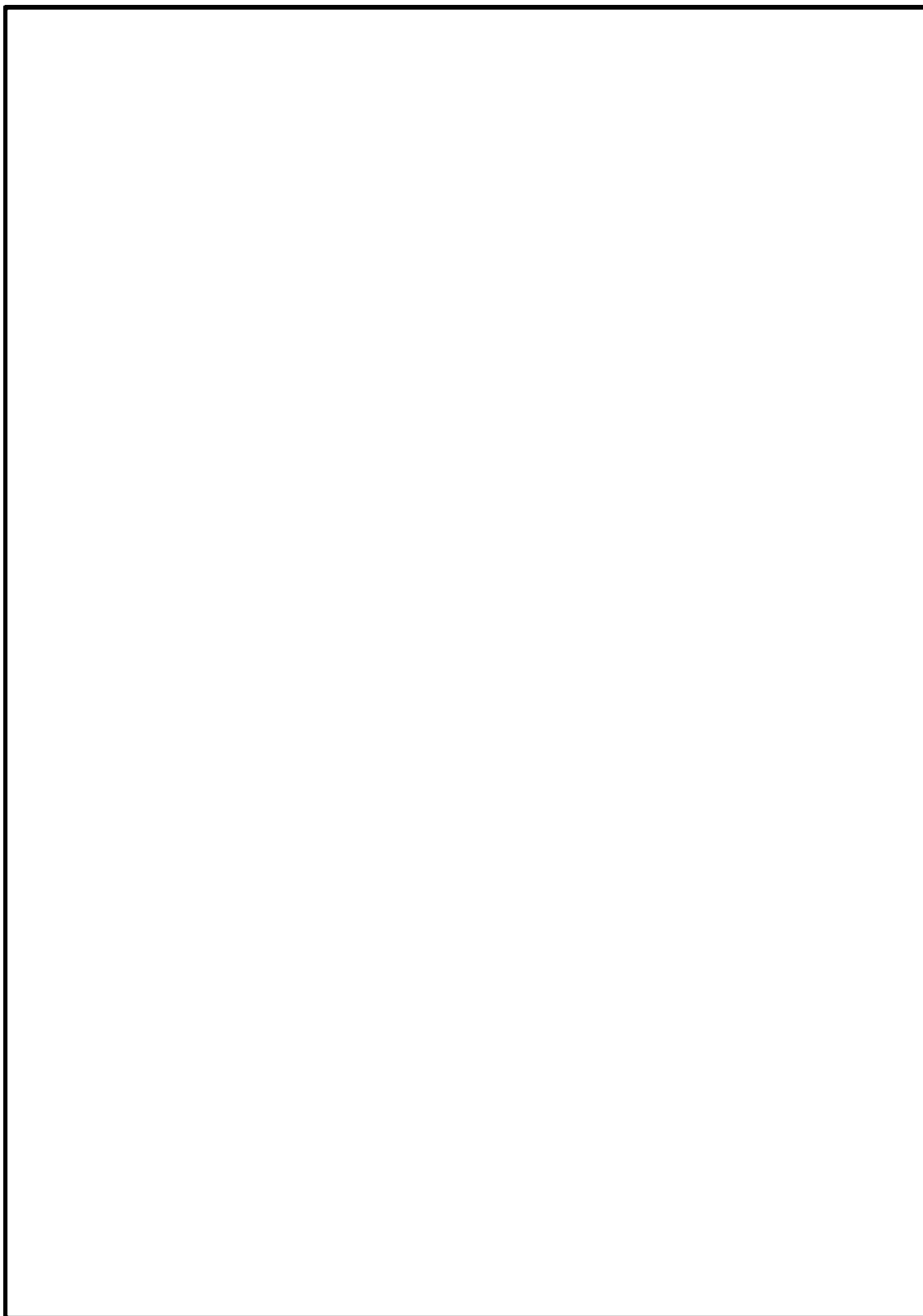
原子炉格納施設等、原子炉周辺建屋、原子炉補助建屋、タービン建屋



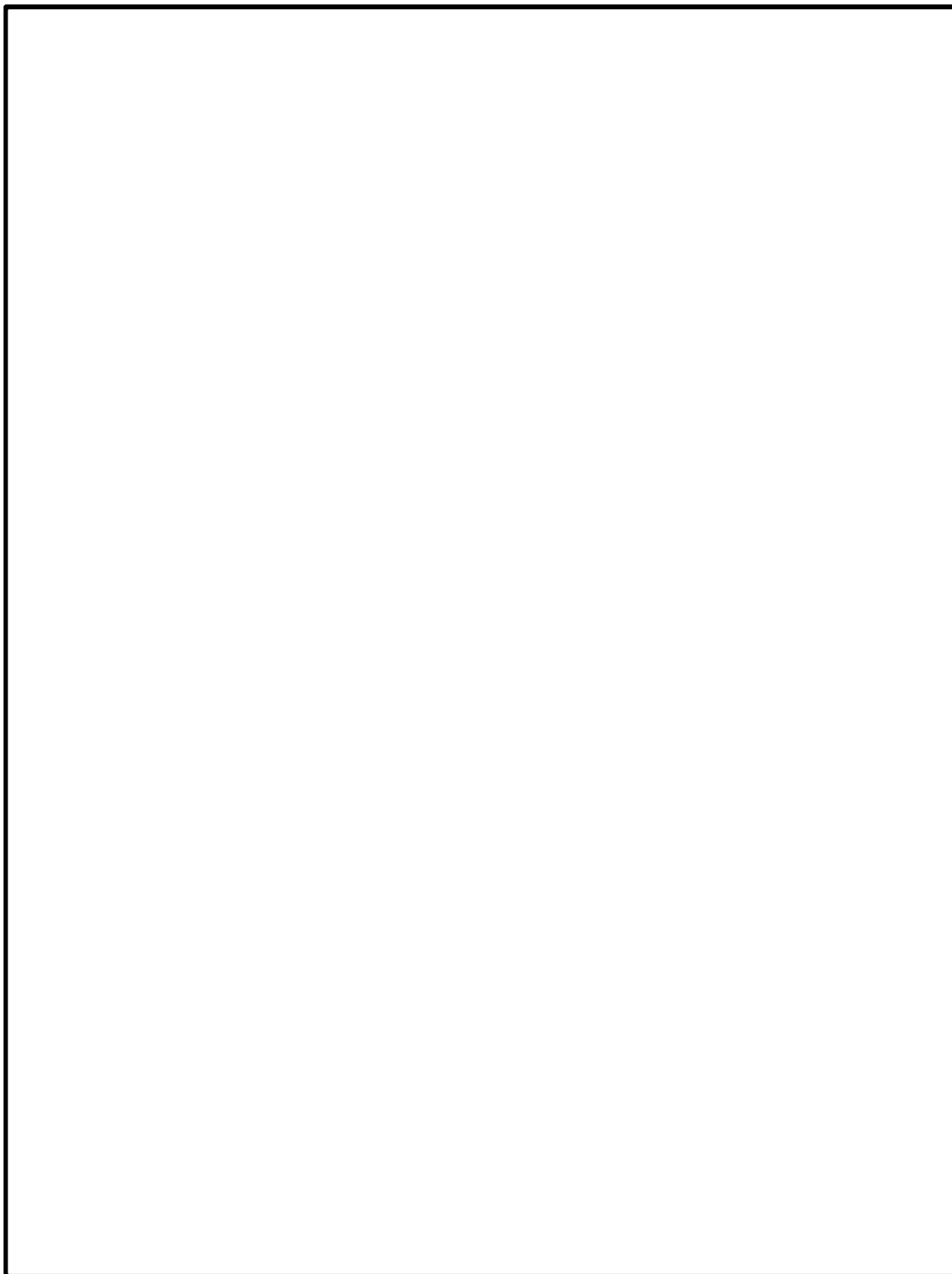
原子炉格納施設等、原子炉周辺建屋、原子炉補助建屋、タービン建屋



原子炉格納施設等、原子炉補助建屋



原子炉格納施設等、原子炉補助建屋、タービン建屋



雑固体焼却炉建屋

環境条件による影響度

代表構造物	温度 [°C]	相対湿度 [%]	CO ₂ 濃度 [ppm]	環境条件による 影響度*1, 2 [-]
外部遮蔽壁	37.4	37.5	540	0.366
内部コンクリート	31.1	55.5	531	0.261
原子炉格納施設基礎	29.0	37.1	567	0.333
原子炉補助建屋	33.1	28.1	521	0.375
原子炉周辺建屋	31.3	31.5	533	0.357
タービン建屋 (タービン架台)	29.8	35.2	503	0.325
雑固体焼却炉建屋	21.3	51.0	377	0.193

測定期間：2019年11月1日～2020年11月6日（雑固体焼却炉建屋以外）

：2007年4月1日～2008年3月18日（雑固体焼却炉建屋）

（表中の温度、相対湿度、CO₂濃度の各値は環境測定期間中の平均値）

* 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)

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</p> <p>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。中性化深さの実測値に基づく\sqrt{t}式で用いた実測値は、添付 1 「中性化深さの測定値の元となる実測値データ」に示す。また、推定式の詳細、条件及びパラメータは、添付 2 「中性化深さの推定値の算定過程及び結果」に示す。</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>ただし、取水構造物ではコンクリート材料として、高炉セメント B 種に混和材としてフライアッシュを使用しているため、適用性を考慮し、岸谷式は用いていない。</p> <p>2. 結果</p> <p>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 1144 1350 1518"> <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 (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 (cm) (推定式)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>原子炉補助建屋 (屋内面)</td> <td>26 年</td> <td>2.9</td> <td>2.2 (森永式) *1</td> <td>4.4 (\sqrt{t}式) *2</td> <td>7.0</td> </tr> <tr> <td>雑固体焼却炉建屋 (屋内面)</td> <td>42 年</td> <td>3.4</td> <td>2.6 (岸谷式) *1</td> <td>4.5 (\sqrt{t}式) *2</td> <td>6.0</td> </tr> <tr> <td>取水構造物 (気中帯)</td> <td>28 年</td> <td>3.3</td> <td>1.2 (森永式)</td> <td>4.9 (\sqrt{t}式) *3</td> <td>8.9</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 (雑固体焼却炉建屋は運転開始後の経過年数 73 年での値を記載) * 3 : 森永式及び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 中性化深さの測定値の元となる実測値データ 添付 2 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 (cm) (推定式)	鉄筋が腐食 し始める時の 中性化深さ (cm)	経過 年数	実測値 (cm)	推定値 (cm) (推定式)	原子炉補助建屋 (屋内面)	26 年	2.9	2.2 (森永式) *1	4.4 (\sqrt{t} 式) *2	7.0	雑固体焼却炉建屋 (屋内面)	42 年	3.4	2.6 (岸谷式) *1	4.5 (\sqrt{t} 式) *2	6.0	取水構造物 (気中帯)	28 年	3.3	1.2 (森永式)	4.9 (\sqrt{t} 式) *3	8.9
	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 (cm) (推定式)	鉄筋が腐食 し始める時の 中性化深さ (cm)																							
	経過 年数	実測値 (cm)	推定値 (cm) (推定式)																									
原子炉補助建屋 (屋内面)	26 年	2.9	2.2 (森永式) *1	4.4 (\sqrt{t} 式) *2	7.0																							
雑固体焼却炉建屋 (屋内面)	42 年	3.4	2.6 (岸谷式) *1	4.5 (\sqrt{t} 式) *2	6.0																							
取水構造物 (気中帯)	28 年	3.3	1.2 (森永式)	4.9 (\sqrt{t} 式) *3	8.9																							

中性化深さの測定値の元となる実測値データ

中性化深さの実測値は、下記3箇所の測定値を平均して算出している。

	測定値 1 (cm)	測定値 2 (cm)	測定値 3 (cm)	実測値 (平均値) (cm)
原子炉補助建屋 (屋内面)	2.5	3.4	2.9	2.9
雑固体焼却炉建屋 (屋内面)	4.2	3.0	2.9	3.4
取水構造物 (気中帯)	3.8	3.8	2.4	3.3

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	雑固体焼却炉建屋	備考
	屋内面	屋内面	
W : 水セメント比(%)	50.0	55.0	
α : 劣化外力係数	1.1	1.0	実測値に基づく補正值
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	1.4	フライアッシュセメントB種
調査時点の推定値(cm)	1.6	2.6	
運転開始後60年経過時点の推定値(cm)	2.4	3.4	雑固体焼却炉建屋は運転開始後の経過年数73年での値を記載

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

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($R = \alpha \times \beta \times \gamma$)
 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	雑固体焼却炉建屋	取水構造物	備考
	屋内面	屋内面	気中帯	
W/C : 水セメント比(%)	50.0	55.0	55.0	
R : 仕上材の中性化率	1.0	1.0	1.0	打ち放し仕上げ : 1.0
二酸化炭素濃度(%)	0.052	0.038	0.049	実測値
T : 温度(°C)	33.1	21.3	19.6	実測値
RH : 湿度(%)	28.1	51.0	68.3	実測値
調査時点の推定値(cm)	2.2	2.0	1.2	
運転開始後60年経過時点の推定値(cm)	3.3	2.6	1.8	雑固体焼却炉建屋は運転開始後の経過年数73年での値を記載

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

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	雑固体焼却炉建屋	取水構造物	備考
	屋内面	屋内面	気中帯	
中性化実測深さ(cm)	2.9	3.4	3.3	
運転開始後60年経過時点の推定値(cm)	4.4	4.5	4.9	雑固体焼却炉建屋は運転開始後の経過年数73年での値を記載

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

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（屋内面）に用いる劣化外力係数の算出にあたっては、玄海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（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（屋内面）で「1.03」、雑固体焼却炉建屋で「0.98」であった。そこで、計算に用いる劣化外力係数には、保守的にそれぞれ「1.1」、「1.0」を採用することとした。

- ・原子炉補助建屋（屋内面）

$$\text{実測値による劣化外力係数 } \alpha = \sqrt{\frac{C}{C_0}} = \sqrt{\frac{521}{491}} = 1.03 \rightarrow 1.1$$

C : 原子炉補助建屋（屋内面）の二酸化炭素濃度の実測値（521ppm）

C_0 : 屋外の二酸化炭素濃度の実測値（491ppm）

- ・雑固体焼却炉建屋（屋内面）

$$\text{実測値による劣化外力係数 } \alpha = \sqrt{\frac{C}{C_0}} = \sqrt{\frac{377}{392}} = 0.98 \rightarrow 1.0$$

C : 雑固体焼却炉建屋（屋内面）の二酸化炭素濃度の実測値（377ppm）

C_0 : 屋外の二酸化炭素濃度の実測値（392ppm）

タイトル	塩分浸透の評価対象及び評価点の選定過程について
説明	<p>塩分浸透の代表構造物の取水構造物について、高経年化技術評価審査マニュアル（JNES-RE-2013-9012）に基づき、環境条件が異なる気中帯、干満帯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、「玄海原子力発電所 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、玄海原子力発電所における 2017 年 1 月～2021 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、2017 年 1 月～2021 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. +1.31m) を超える位置 干満帯：T. P. +1.31m 以下、T. P. -0.98m 以上の位置 海中帯：L. W. L. (T. P. -0.98m) 未満の位置</p> <p>添付 1 2017 年 1 月～2021 年 12 月までの潮位変化</p>

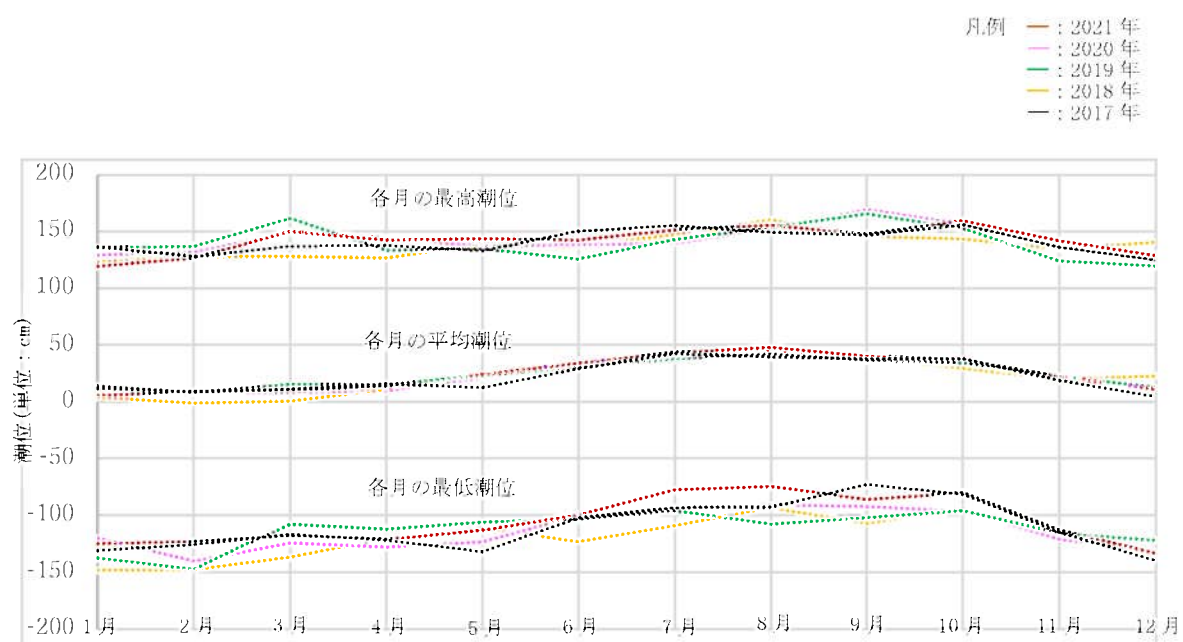
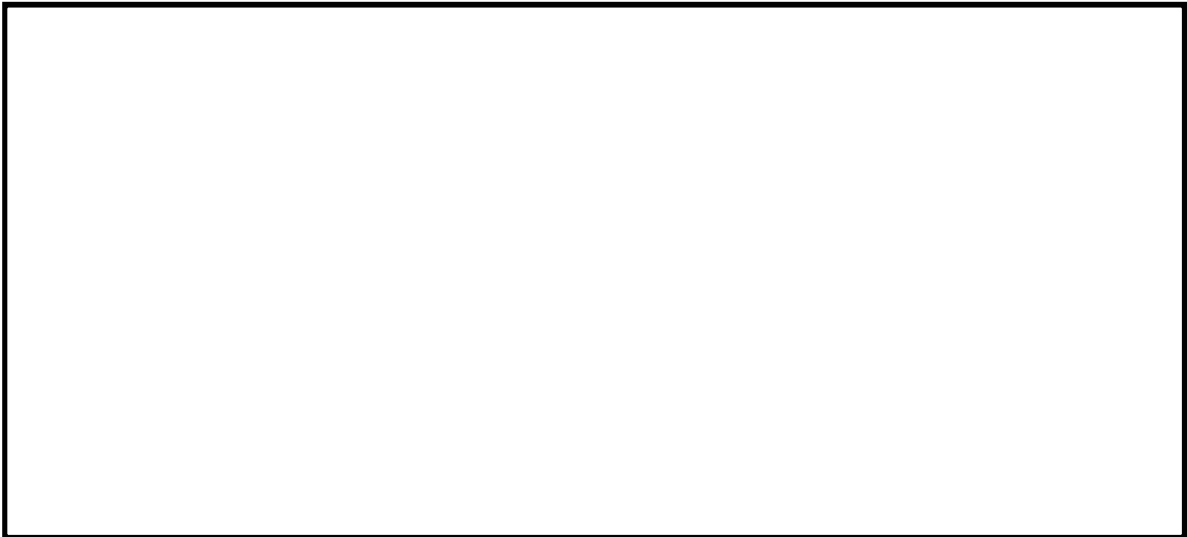
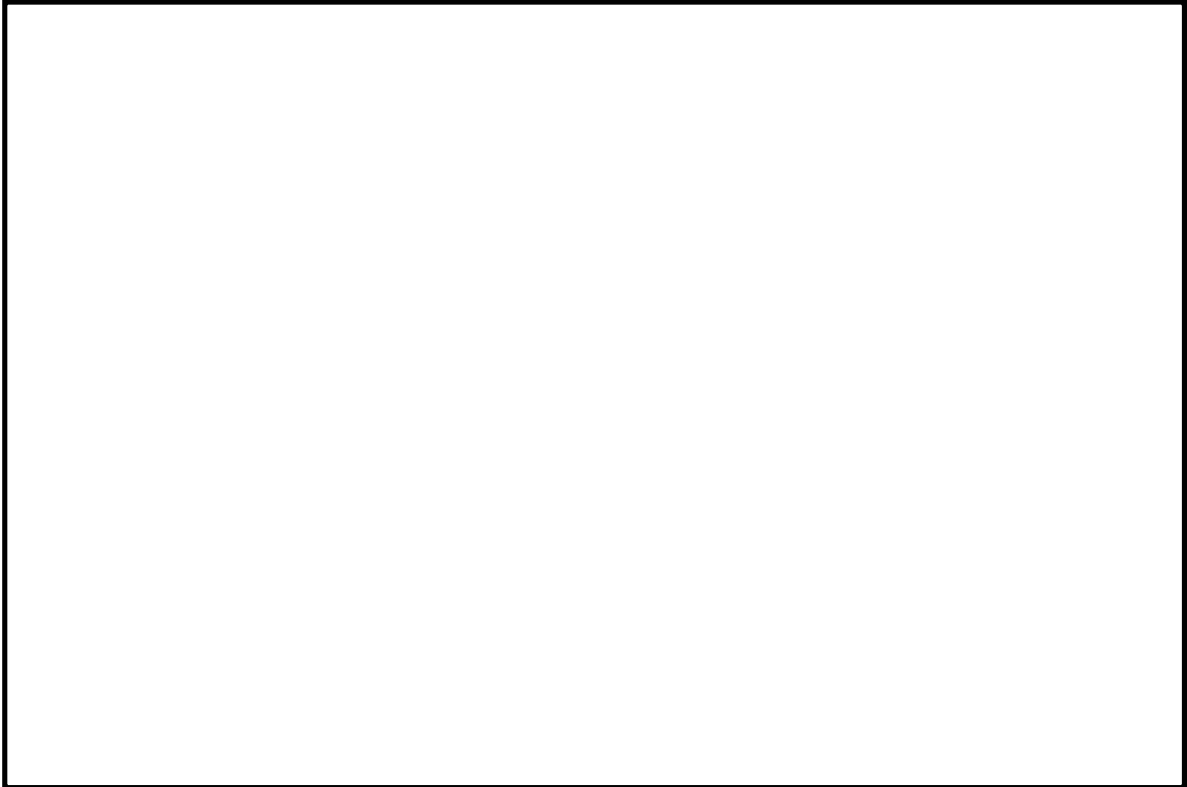


図1 2017年～2021年における各月の潮位変化（最高潮位・平均潮位・最低潮位）

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>

凡例 (壁部) (床部)
▼ ● : 測定位置 (試験実施年)



* 1 測定部分の中心位置

図 1 塩化物イオン濃度の測定位置図

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（2017 年 1 月～2021 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. +6. 87m～+7. 37m	T. P. +1. 0m	T. P. -13. 36m～-1. 55m
潮位変化 (2017年1月～ 2021年12月)	・最高潮位 (平均) T. P. +1. 41m	・最高潮位 (平均) T. P. +1. 41m ・最低潮位 (平均) T. P. -1. 12m ・平均潮位 (平均) T. P. +0. 24m	・最低潮位 (平均) T. P. -1. 12m
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

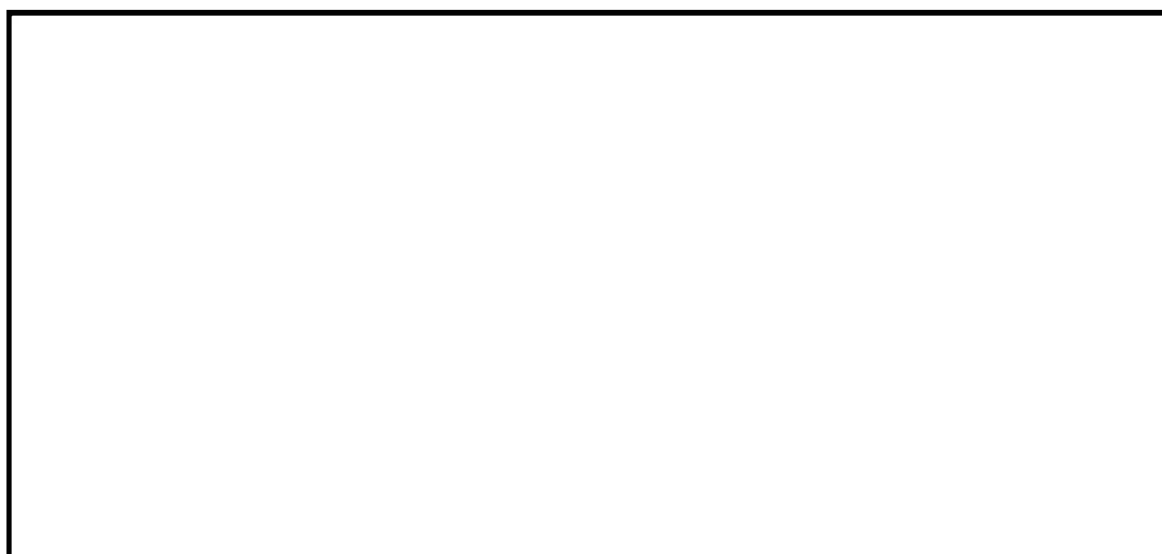


図 2 干満帯の塩化物イオン濃度測定位置と潮位変化

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. 41m) 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。

表 3 塩化物イオン濃度及び量の測定結果*1

取水構造物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-3u-1	%	0.05	0.12	0.01	0.01	0.01	0.01
	kg/m ³	1.06	2.69	0.27	0.23	0.20	0.22
SP-ci-3u-2	%	0.06	0.16	0.02	0.01	0.01	0.01
	kg/m ³	1.41	3.45	0.34	0.22	0.22	0.20
SP-ci-3u-3	%	0.01	0.08	0.01	0.01	0.01	0.01
	kg/m ³	0.21	1.87	0.14	0.13	0.14	0.14
平均値	%	0.04	0.12	0.01	0.01	0.01	0.01
	kg/m ³	0.89	2.67	0.25	0.19	0.19	0.19

取水構造物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 ³)					
		0~20mm	20~40mm	40~60mm	60~80mm	80~100mm	100~120mm
SP-ci-3u-4	%	0.40	0.15	0.01	0.01	0.04	0.03
	kg/m ³	8.73	3.38	0.27	0.29	0.86	0.66
SP-ci-3u-5	%	0.32	0.03	0.01	0.01	0.01	0.00
	kg/m ³	7.33	0.57	0.11	0.14	0.14	0.09
SP-ci-3u-6	%	0.44	0.20	0.01	0.01	0.01	0.01
	kg/m ³	9.86	4.50	0.32	0.25	0.32	0.24
平均値	%	0.39	0.13	0.01	0.01	0.02	0.01
	kg/m ³	8.64	2.82	0.23	0.23	0.44	0.33

取水構造物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 ³)					
		0~20mm	20~40mm	40~60mm	60~80mm	80~100mm	100~120mm
SP-ci-3u-7	%	0.21	0.18	0.01	0.00	0.00	0.00
	kg/m ³	4.80	3.96	0.29	0.09	0.07	0.08
SP-ci-3u-8	%	0.23	0.11	0.01	0.01	0.01	0.01
	kg/m ³	5.27	2.53	0.16	0.13	0.12	0.13
SP-ci-3u-9	%	0.29	0.13	0.01	0.01	0.01	0.01
	kg/m ³	6.31	2.81	0.22	0.23	0.22	0.18
平均値	%	0.24	0.14	0.01	0.01	0.01	0.01
	kg/m ³	5.46	3.10	0.22	0.15	0.14	0.13

* 1 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、表 1 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)	3.5	7.5	86.4
取水構造物 (干満帯) ^{*2}	8.9	18.7	90.1
取水構造物 (海中帯)	1.2	2.5	87.0

* 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_{crit})

* 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	上満帯	海中帯		
x: かぶり厚さ (mm)	89.0	85.5	87.5, 89.0		
C: 鉄筋位置における塩化物イオン濃度及び量	%	0.01	0.02	0.01	気中帯: 取分経過の点検結果 (平均) 上満帯: 取分経過の点検結果 (平均) 海中帯: 取分経過の点検結果 (平均)
	kg/m ³	0.19	0.44	0.14	
C1: 鉄筋位置における塩化物イオン量 (推定値)	kg/m ³	0.10~0.56	0.09~1.15	0.07~0.73	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)	89.0	85.5	87.5, 89.0		
d: 鉄筋径 (mm)	22	29	22, 25		
W: 単位水量 (kg/m ³)	162	162	162		
W/C: 水セメント比 (%)	55	55	55		
T: 温度 (°C)	15.4	19.4	19.4*	気中帯: 築港庁 (平野) の観測値 (1994年~2021年の28年平均値) 上満帯・海中帯: 発電所構内の海水温度の観測値 (2012年~2021年の10年平均値)	
RH: 相対湿度 (%)	85	100	100*	鉄筋の腐食腐食に関する研究論文引用	
O: 酸素濃度 (%)	21	21	0.62*	気中帯: 埋科年表 上満帯: 別紙11のうち給排水の考察により、気中帯と同様のパラメータとした。 海中帯: 「原子力発電所屋外施設に水漬露乾の耐腐蝕性能評価マニュアル(2021)」参照	
N: 練り混ぜ水の塩分濃度 (%)	0.10~0.57	0.09~1.17	0.07~0.73	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(28年経過)の鉄筋の腐食減量 (×10 ⁻³ kg/cm ²)	3.5	8.9	1.2		
q: 運転開始後60年経過時点の鉄筋の腐食減量 (×10 ⁻³ kg/cm ²)	7.5	18.7	2.5		
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 ⁻³ kg/cm ²)	55.4	90.1	57.9		

■: (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) 拡散方程式により、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

*1: 拡散方程式の計算結果(腐食速度)が負になる場合は、標準条件下(温度15°C、湿度65%、酸素濃度20%)の数値を用いる

拡散方程式

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

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

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

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

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

$$q_2' = 0.56528 + 1.4304N$$

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

q: 鉄筋の腐食速度 (×10⁻³g/cm²/年)

q1: 塩分環境下での腐食速度 (×10⁻³g/cm²/年)

q2: 寿命予測対象部位で、塩分環境下での腐食速度 (×10⁻³g/cm²/年)

q2': 寿命予測対象部位で、標準条件下(温度15°C、湿度65%、酸素濃度20%)での腐食速度 (×10⁻³g/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 (×10⁻³g/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 (%)

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、中性化の影響の可能性*1を考慮し、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」の比較を行った結果、回帰分析における精度が高い傾向にある「中性化の影響を考慮しないケース」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。

* 1: 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）（JSCF-G 573-2003）」（以下、土木学会規準（案）という。）によると、「中性化した領域およびそこから 1cm 以内の深部で採取された試料から得られた結果は、回帰分析を行なう際には用いないほうがよい」とされている【①】。

また、上記のほかに「隣接する前後の深さ位置での測定結果と著しく異なる結果についても、回帰分析用のデータから除外するほうがよい」とされている【②】。さらに、「測定された試料中の全塩化物イオン濃度から初期含有全塩化物イオン濃度を差し引いた値を用いて回帰分析が行なわれる」とされており、全塩化物イオン濃度と初期含有全塩化物イオン濃度が同等の場合は適正な回帰分析が難しい場合がある【③】。

なお、塩化物イオンが深さ方向に浸透しておらず適正な回帰分析が難しい場合もある【④】。

上記の①～④の理由に伴い棄却したコアの番号は以下のとおりである。

- ① 全てのコア
- ② SP-ci-3u-4
- ③ SP-ci-3u-5、SP-ci-3u-7
- ④ SP-ci-3u-3

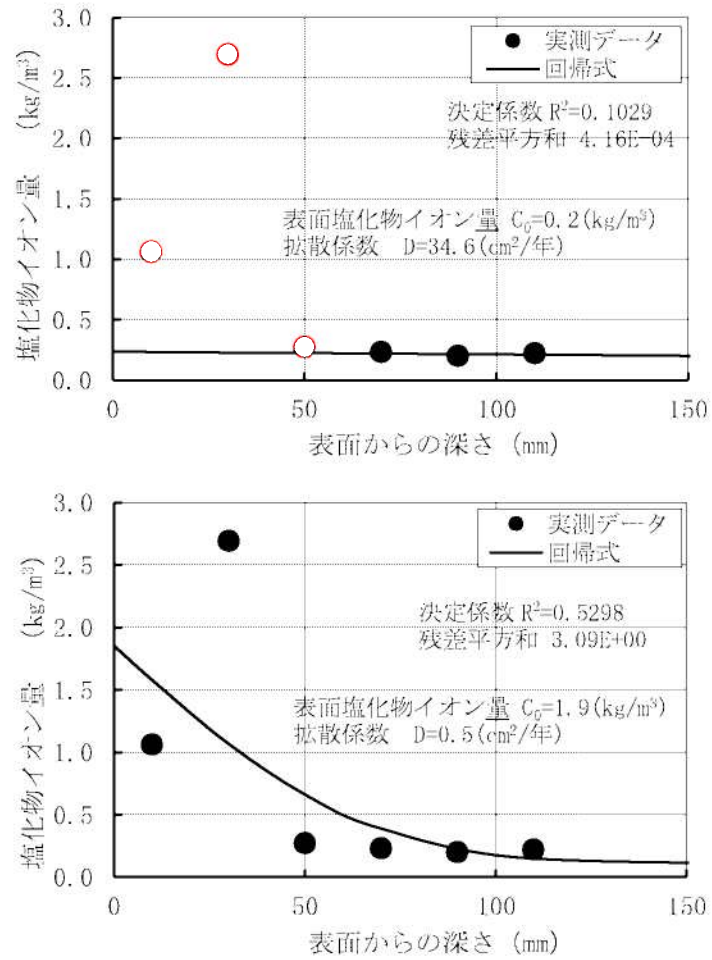


図 1 (1/9) 取水構造物気中帯 (SP-ci-3u-1) の回帰分析結果 (上: 中性化考慮あり、下: 中性化考慮なし) [○データを棄却]

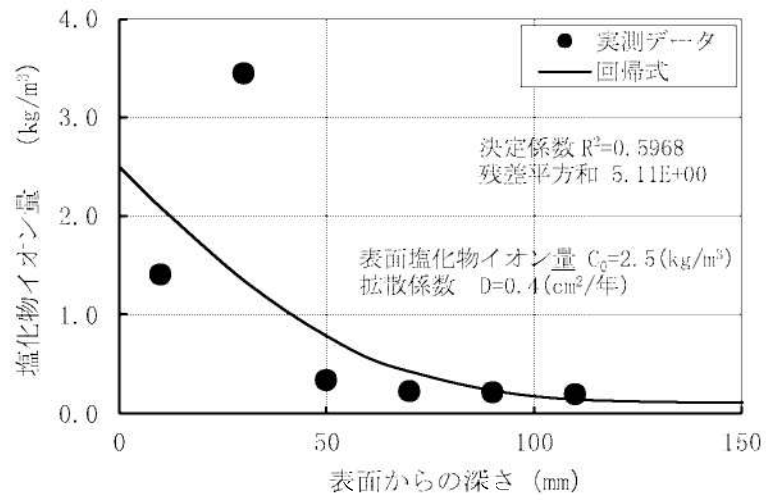
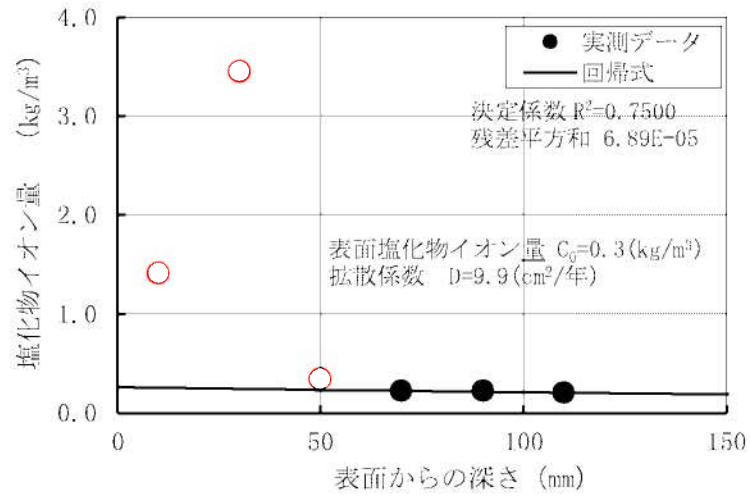


図 1 (2/9) 取水構造物気中帯 (SP-ci-3u-2) の回帰分析結果
(上: 中性化考慮あり、下: 中性化考慮なし) [○データを棄却]

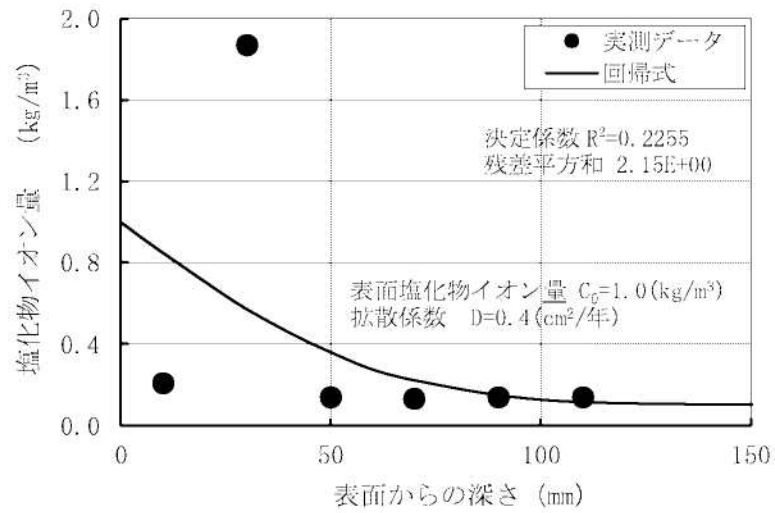
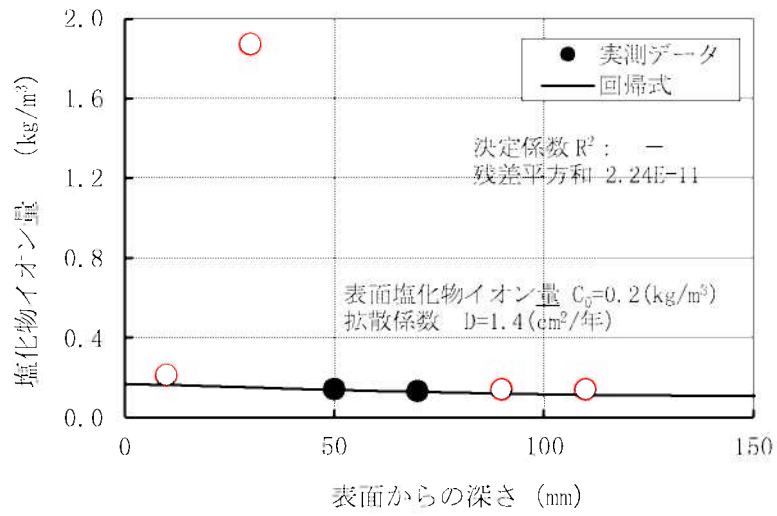


図 1 (3/9) 取水構造物気中帯 (SP-ci-3u-3) の回帰分析結果 (上: 中性化考慮あり、下: 中性化考慮なし) [○データを棄却]

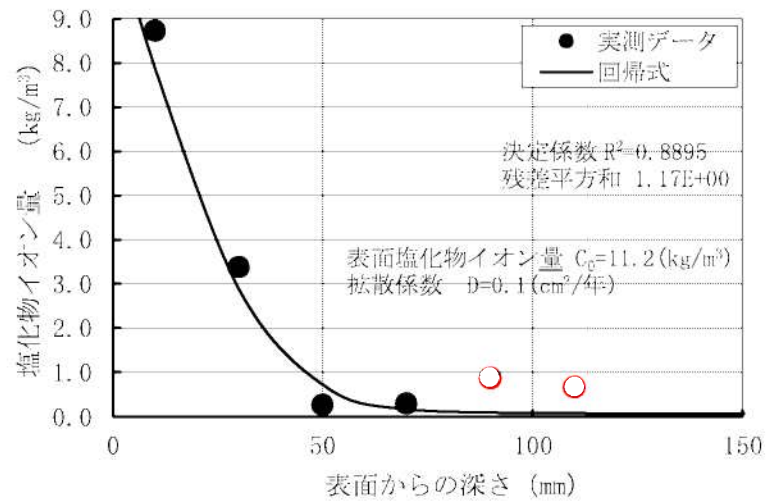
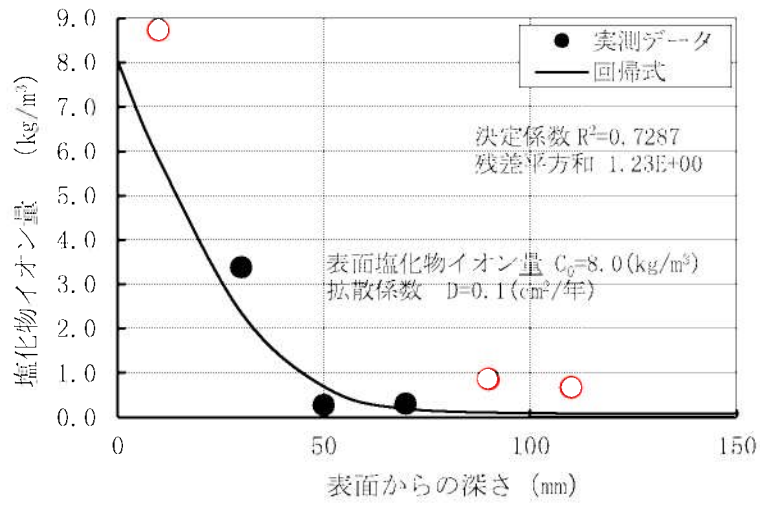


図 1 (4/9) 取水構造物干満帯 (SP-ci-3u-4) の回帰分析結果
(上: 中性化考慮あり、下: 中性化考慮なし) [○データを棄却]

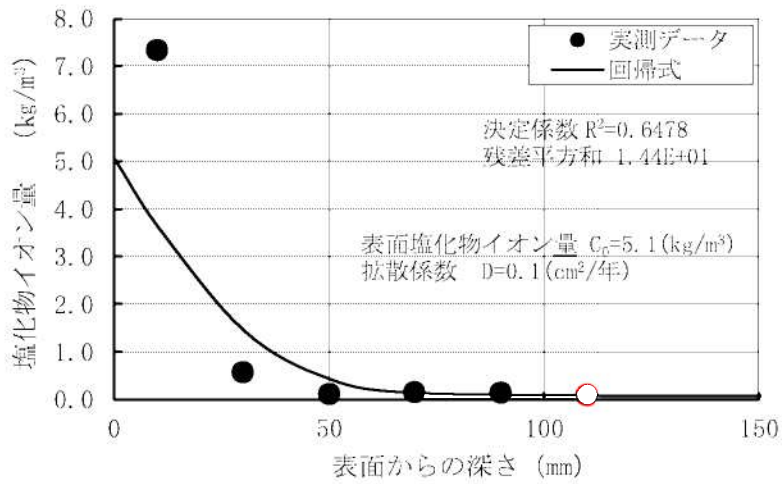
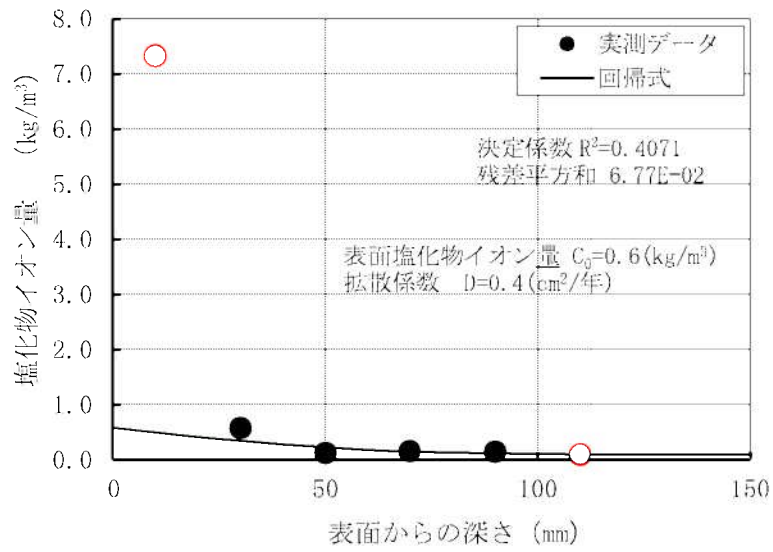


図 1 (5/9) 取水構造物干満帯 (SP-ci-3u-5) の回帰分析結果
(上: 中性化考慮あり、下: 中性化考慮なし) [○データを棄却]

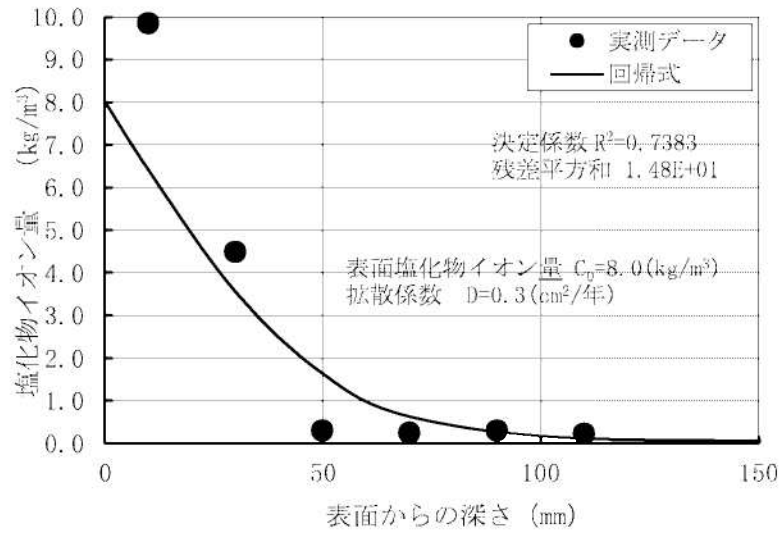
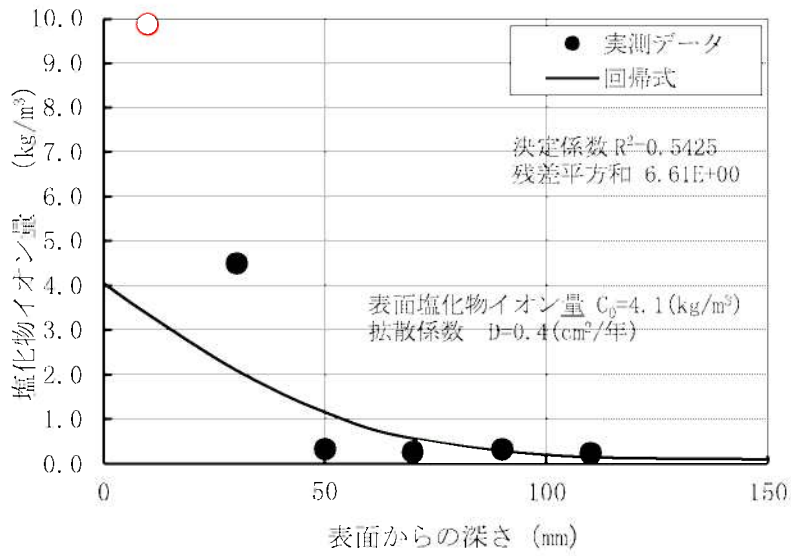


図 1 (6/9) 取水構造物干満帯 (SP-ci-3u-6) の回帰分析結果 (上: 中性化考慮あり、下: 中性化考慮なし) [○データを棄却]

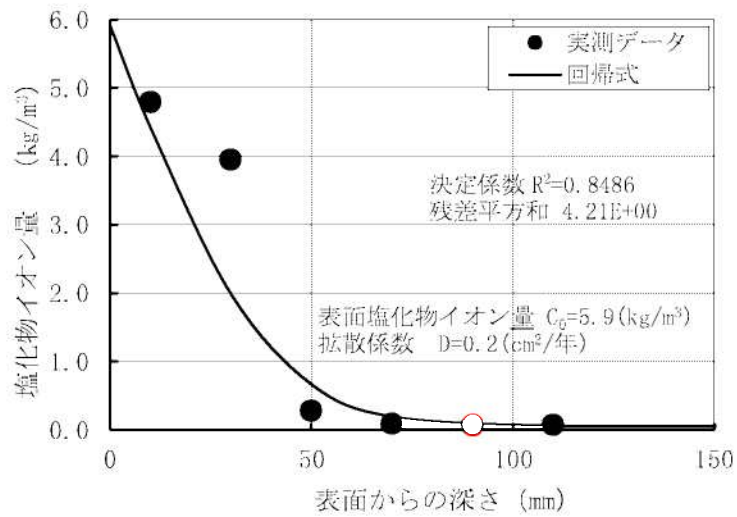
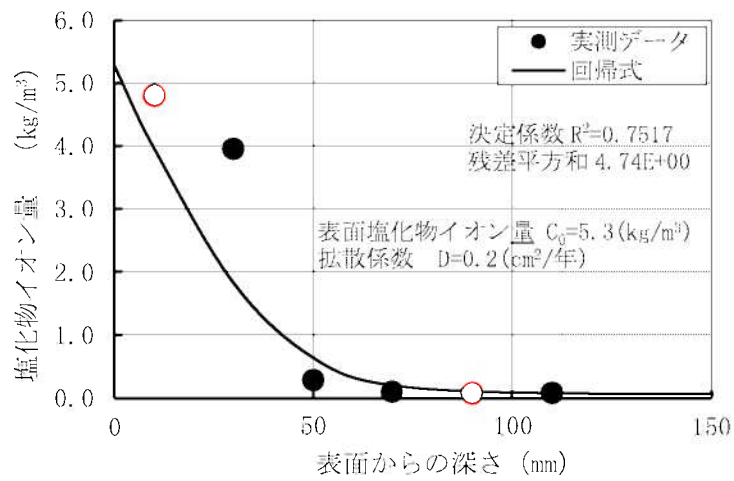


図 1 (7/9) 取水構造物海中帯 (SP-ci-3u-7) の回帰分析結果
(上: 中性化考慮あり、下: 中性化考慮なし) [○データを棄却]

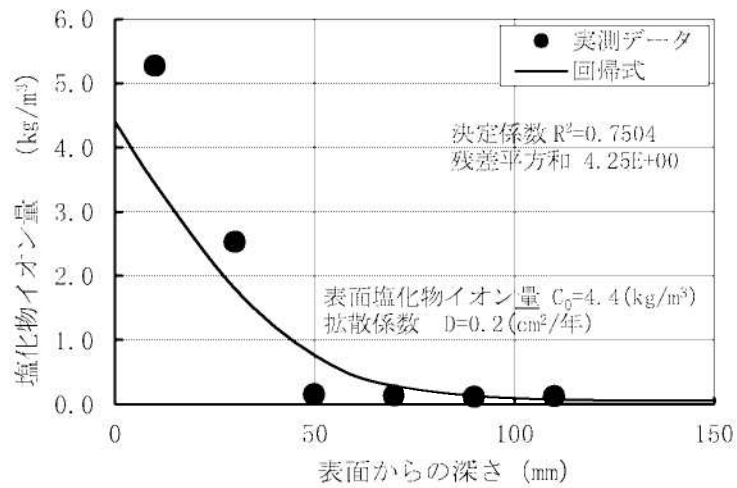
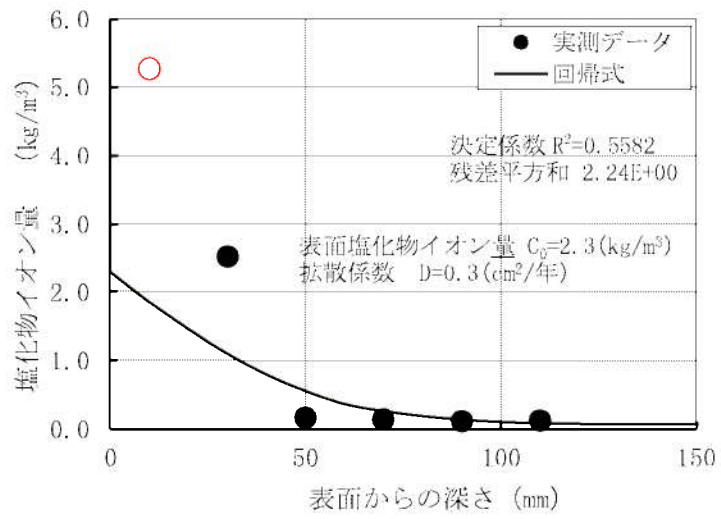


図 1 (8/9) 取水構造物海中帯 (SP-ci-3u-8) の回帰分析結果
(上: 中性化考慮あり、下: 中性化考慮なし) [○データを棄却]

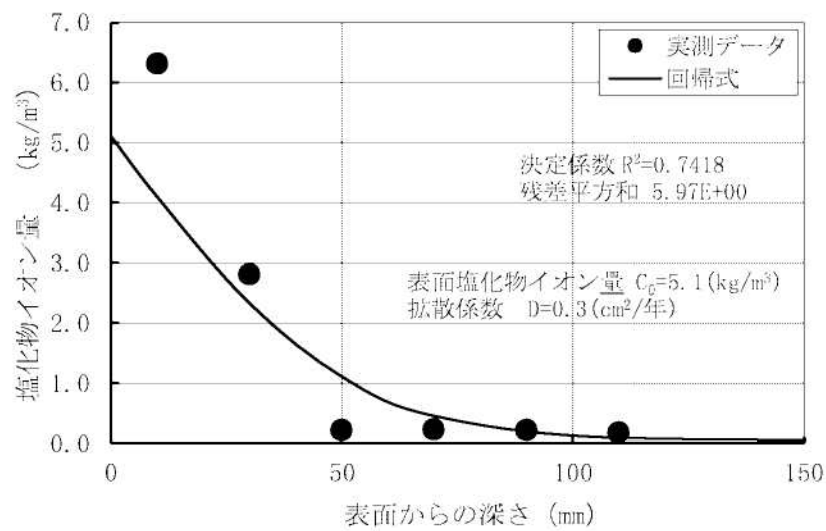
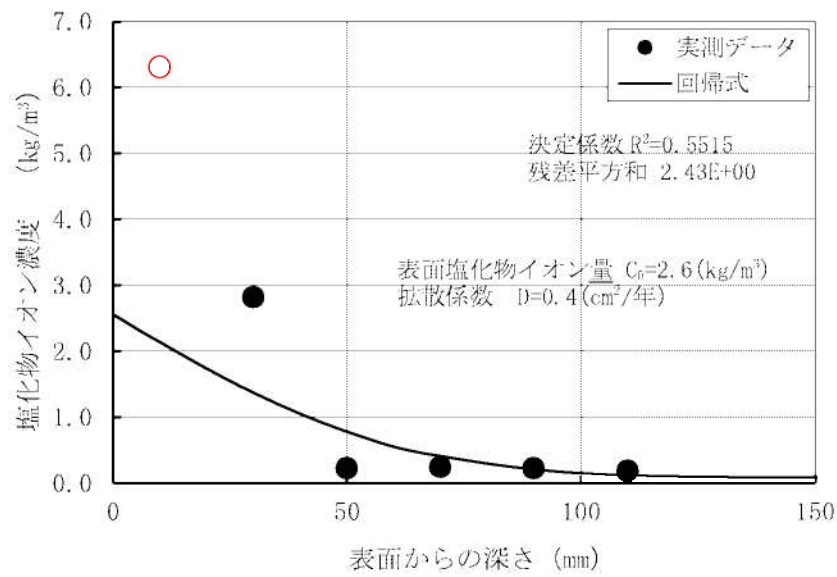


図 1 (9/9) 取水構造物海中帯 (SP-ci-3u-9) の回帰分析結果
(上: 中性化考慮あり、下: 中性化考慮なし) [○データを棄却]

(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 (28年)	3.5	調査時点 (28年)	8.9	調査時点 (28年)	1.2
運転開始後 60年経過時点	7.5	運転開始後 60年経過時点	18.7	運転開始後 60年経過時点	2.5
かぶりコンクリートにひび割れが発生する時点	86.4	かぶりコンクリートにひび割れが発生する時点	90.1	かぶりコンクリートにひび割れが発生する時点	87.0

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において、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 1 cm 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 + 1 cm の領域を含む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。また、塩化物イオンが深さ方向に浸透しておらず適正な回帰分析が難しいデータについても棄却した（SP-ci-3u-3）。

■ 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-3u-1	%	0.05	0.12	0.01	0.01	0.01	0.01
	kg/m ³	1.06	2.69	0.27	0.23	0.20	0.22
SP-ci-3u-2	%	0.06	0.16	0.02	0.01	0.01	0.01
	kg/m ³	1.41	3.45	0.34	0.22	0.22	0.20
SP-ci-3u-3	%	0.01	0.08	0.01	0.01	0.01	0.01
	kg/m ³	0.21	1.87	0.14	0.13	0.14	0.14
平均値	%	0.04	0.12	0.01	0.01	0.01	0.01
	kg/m ³	0.89	2.67	0.25	0.19	0.19	0.19

■ 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-3u-1		SP-ci-3u-2		SP-ci-3u-3		3本コア平均*1	
運転開始後 経過年数	鉄筋の 腐食減量 ($\times 10^{-4}$ 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)	運転開始後 経過年数	鉄筋の 腐食減量 ($\times 10^{-4}$ g/cm ²)
23	2.9	23	2.9	23	2.9	23	2.9
24	3.0	24	3.0	24	3.0	24	3.0
25	3.1	25	3.1	25	3.2	25	3.2
26	3.3	26	3.3	26	3.3	26	3.3
27	3.4	27	3.4	27	3.4	27	3.4
28	3.5	28	3.5	28	3.5	28	3.5
29	3.6	29	3.6	29	3.7	29	3.6
30	3.8	30	3.8	30	3.8	30	3.8
31	3.9	31	3.9	31	3.9	31	3.9
32	4.0	32	4.0	32	4.0	32	4.0
33	4.1	33	4.1	33	4.1	33	4.1

55	6.8	55	6.8	55	6.9	55	6.9
56	7.0	56	7.0	56	7.0	56	7.0
57	7.1	57	7.1	57	7.1	57	7.1
58	7.2	58	7.2	58	7.2	58	7.2
59	7.3	59	7.3	59	7.4	59	7.3
60	7.4	60	7.5	60	7.5	60	7.5
61	7.6	61	7.6	61	7.6	61	7.6
62	7.7	62	7.7	62	7.7	62	7.7
63	7.8	63	7.8	63	7.9	63	7.8
64	7.9	64	7.9	64	8.0	64	8.0
65	8.1	65	8.1	65	8.1	65	8.1

696	85.8	696	85.9	695	85.7		
697	85.9	697	86.0	696	85.9		
698	86.0	698	86.1	697	86.0		
699	86.2	699	86.2	698	86.1		
700	86.3	700	86.3	699	86.2		
701*2	86.4	701*2	86.5	700*2	86.4		
702	86.5	702	86.6	701	86.5		
703	86.7	703	86.7	702	86.6		
704	86.8	704	86.8	703	86.7		
705	86.9	705	87.0	704	86.9		
706	87.0	706	87.1	705	87.0		

* 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

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-3u-1		SP-ci-3u-2		SP-ci-3u-3		3本コア平均*1	
運転開始後 経過年数	鉄筋の 腐食減量 ($\times 10^{-4}$ 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)	運転開始後 経過年数	鉄筋の 腐食減量 ($\times 10^{-4}$ g/cm ²)
23	2.9	23	2.9	23	2.9	23	2.9
24	3.0	24	3.0	24	3.0	24	3.0
25	3.2	25	3.2	25	3.2	25	3.2
26	3.3	26	3.3	26	3.3	26	3.3
27	3.4	27	3.4	27	3.4	27	3.4
28	3.5	28	3.5	28	3.5	28	3.5
29	3.6	29	3.6	29	3.7	29	3.7
30	3.8	30	3.8	30	3.8	30	3.8
31	3.9	31	3.9	31	3.9	31	3.9
32	4.0	32	4.0	32	4.0	32	4.0
33	4.1	33	4.1	33	4.1	33	4.1

55	6.9	55	6.9	55	6.9	55	6.9
56	7.0	56	7.0	56	7.0	56	7.0
57	7.2	57	7.2	57	7.1	57	7.2
58	7.3	58	7.3	58	7.2	58	7.3
59	7.4	59	7.4	59	7.3	59	7.4
60	7.5	60	7.6	60	7.5	60	7.5
61	7.7	61	7.7	61	7.6	61	7.7
62	7.8	62	7.8	62	7.7	62	7.8
63	7.9	63	8.0	63	7.8	63	7.9
64	8.1	64	8.1	64	8.0	64	8.0
65	8.2	65	8.2	65	8.1	65	8.2

574	85.6	535	85.5	652	85.7		
575	85.7	536	85.7	653	85.8		
576	85.9	537	85.8	654	86.0		
577	86.1	538	86.0	655	86.1		
578	86.2	539	86.2	656	86.2		
579*2	86.4	540*2	86.4	657*2	86.4		
580	86.6	541	86.6	658	86.5		
581	86.7	542	86.7	659	86.6		
582	86.9	543	86.9	660	86.8		
583	87.0	544	87.1	661	86.9		
584	87.2	545	87.3	662	87.1		

□ : 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

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 1 cm 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 + 1 cm の領域を含む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。また、隣接する前後の深さ位置での測定結果と著しく異なるデータ（SP-ci-3u-4）や、測定されたコアの全塩化物イオン濃度と初期塩化物イオン濃度が同等となり適正な回帰分析が難しいデータについても棄却した（SP-ci-3u-5）。

■ 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-3u-4	%	0.40	0.15	0.01	0.01	0.04	0.03
	kg/m ³	8.73	3.38	0.27	0.29	0.86	0.66
SP-ci-3u-5	%	0.32	0.03	0.01	0.01	0.01	0.00
	kg/m ³	7.33	0.57	0.11	0.14	0.14	0.09
SP-ci-3u-6	%	0.44	0.20	0.01	0.01	0.01	0.01
	kg/m ³	9.86	4.50	0.32	0.25	0.32	0.24
平均値	%	0.39	0.13	0.01	0.01	0.02	0.01
	kg/m ³	8.64	2.82	0.23	0.23	0.44	0.33

■ 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-3u-4		SP-ci-3u-5		SP-ci-3u-6		3本コア平均*1	
運転開始後 経過年数	鉄筋の 腐食減量 ($\times 10^{-4}$ 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)	運転開始後 経過年数	鉄筋の 腐食減量 ($\times 10^{-4}$ g/cm ²)
23	7.4	23	7.4	23	7.3	23	7.4
24	7.7	24	7.7	24	7.6	24	7.7
25	8.0	25	8.0	25	7.9	25	8.0
26	8.3	26	8.3	26	8.2	26	8.3
27	8.6	27	8.6	27	8.5	27	8.6
28	8.9	28	8.9	28	8.8	28	8.9
29	9.3	29	9.2	29	9.1	29	9.2
30	9.6	30	9.5	30	9.4	30	9.5
31	9.9	31	9.9	31	9.7	31	9.8
32	10.2	32	10.2	32	10.0	32	10.1
33	10.5	33	10.5	33	10.3	33	10.4

55	17.1	55	17.2	55	16.9	55	17.1
56	17.4	56	17.5	56	17.2	56	17.4
57	17.7	57	17.8	57	17.5	57	17.7
58	18.0	58	18.1	58	17.8	58	18.0
59	18.3	59	18.4	59	18.2	59	18.3
60	18.6	60	18.7	60	18.5	60	18.6
61	18.9	61	19.0	61	18.8	61	18.9
62	19.2	62	19.3	62	19.1	62	19.2
63	19.5	63	19.6	63	19.4	63	19.5
64	19.8	64	19.9	64	19.7	64	19.8
65	20.1	65	20.2	65	20.1	65	20.1

249	88.3	295	88.8	247	88.3		
250	88.7	296	89.1	248	88.8		
251	89.2	297	89.4	249	89.2		
252	89.6	298	89.7	250	89.6		
253	90.0	299	90.0	251	90.0		
254*2	90.5	300*2	90.3	252*2	90.4		
255	90.9	301	90.6	253	90.8		
256	91.4	302	90.9	254	91.2		
257	91.8	303	91.2	255	91.7		
258	92.3	304	91.5	256	92.1		
259	92.7	305	91.8	257	92.5		

*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-3u-4		SP-ci-3u-5		SP-ci-3u-6		3本コア平均*1	
運転開始後 経過年数	鉄筋の 腐食減量 ($\times 10^{-4} \text{g/cm}^2$)	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 ($\times 10^{-4} \text{g/cm}^2$)
23	7.4	23	7.4	23	7.3	23	7.4
24	7.7	24	7.7	24	7.6	24	7.7
25	8.0	25	8.0	25	7.9	25	8.0
26	8.3	26	8.3	26	8.2	26	8.3
27	8.6	27	8.6	27	8.5	27	8.6
28	8.9	28	8.9	28	8.8	28	8.9
29	9.3	29	9.3	29	9.1	29	9.2
30	9.6	30	9.6	30	9.4	30	9.5
31	9.9	31	9.9	31	9.7	31	9.8
32	10.2	32	10.2	32	10.0	32	10.1
33	10.5	33	10.5	33	10.3	33	10.4

55	17.2	55	17.2	55	17.1	55	17.2
56	17.5	56	17.5	56	17.4	56	17.5
57	17.8	57	17.8	57	17.7	57	17.8
58	18.1	58	18.1	58	18.0	58	18.1
59	18.4	59	18.4	59	18.4	59	18.4
60	18.7	60	18.7	60	18.7	60	18.7
61	19.0	61	19.0	61	19.0	61	19.0
62	19.3	62	19.3	62	19.4	62	19.3
63	19.6	63	19.6	63	19.7	63	19.6
64	19.9	64	19.9	64	20.1	64	19.9
65	20.2	65	20.2	65	20.4	65	20.3

240	87.8	270	88.5	214	87.6		
241	88.3	271	88.9	215	88.1		
242	88.8	272	89.2	216	88.6		
243	89.3	273	89.6	217	89.2		
244	89.8	274	90.0	218	89.7		
245*2	90.3	275*2	90.4	219*2	90.2		
246	90.7	276	90.7	220	90.8		
247	91.2	277	91.1	221	91.3		
248	91.7	278	91.5	222	91.8		
249	92.2	279	91.9	223	92.4		
250	92.7	280	92.3	224	92.9		

□ : 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

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。また、測定されたコアの全塩化物イオン濃度と初期塩化物イオン濃度が同等となり適正な回帰分析が難しいデータについても棄却した (SP-ci-3u-7)。

■ 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 (水色部) が構造物表面から深さ約 1 cm の領域を含むデータである。

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-3u-7	%	0.21	0.18	0.01	0.00	0.00	0.00
	kg/m ³	4.80	3.96	0.29	0.09	0.07	0.08
SP-ci-3u-8	%	0.23	0.11	0.01	0.01	0.01	0.01
	kg/m ³	5.27	2.53	0.16	0.13	0.12	0.13
SP-ci-3u-9	%	0.29	0.13	0.01	0.01	0.01	0.01
	kg/m ³	6.31	2.81	0.22	0.23	0.22	0.18
平均値	%	0.24	0.14	0.01	0.01	0.01	0.01
	kg/m ³	5.46	3.10	0.22	0.15	0.14	0.13

■ 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-3u-7		SP-ci-3u-8		SP-ci-3u-9		3本コア平均*1	
運転開始後 経過年数	鉄筋の 腐食減量 ($\times 10^{-4}$ 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)	運転開始後 経過年数	鉄筋の 腐食減量 ($\times 10^{-4}$ g/cm ²)
23	0.9	23	0.9	23	1.1	23	1.0
24	1.0	24	1.0	24	1.2	24	1.0
25	1.0	25	1.0	25	1.2	25	1.1
26	1.0	26	1.0	26	1.3	26	1.1
27	1.1	27	1.1	27	1.3	27	1.2
28	1.1	28	1.1	28	1.4	28	1.2
29	1.2	29	1.2	29	1.4	29	1.2
30	1.2	30	1.2	30	1.5	30	1.3
31	1.2	31	1.2	31	1.5	31	1.3
32	1.3	32	1.3	32	1.6	32	1.4
33	1.3	33	1.3	33	1.6	33	1.4

55	2.3	55	2.3	55	2.8	55	2.5
56	2.3	56	2.4	56	2.8	56	2.5
57	2.4	57	2.4	57	2.8	57	2.5
58	2.4	58	2.5	58	2.8	58	2.6
59	2.5	59	2.5	59	2.8	59	2.6
60	2.5	60	2.6	60	2.8	60	2.6
61	2.5	61	2.6	61	2.8	61	2.7
62	2.6	62	2.7	62	2.8	62	2.7
63	2.6	63	2.7	63	2.8	63	2.7
64	2.7	64	2.8	64	2.8	64	2.8
65	2.7	65	2.8	65	2.8	65	2.8

1209	85.9	2154	86.1	1626	87.7		
1210	86.0	2155	86.2	1627	87.8		
1211	86.1	2156	86.2	1628	87.9		
1212	86.2	2157	86.3	1629	87.9		
1213	86.3	2158	86.3	1630	88.0		
1214*2	86.4	2159*2	86.4	1631*2	88.1		
1215	86.5	2160	86.4	1632	88.1		
1216	86.5	2161	86.5	1633	88.2		
1217	86.6	2162	86.5	1634	88.3		
1218	86.7	2163	86.6	1635	88.3		
1219	86.8	2164	86.6	1636	88.4		

* 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-3u-7		SP-ci-3u-8		SP-ci-3u-9		3本コア平均*1	
運転開始後 経過年数	鉄筋の 腐食減量 ($\times 10^{-4}g/cm^2$)	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 ($\times 10^{-4}g/cm^2$)	運転開始後 経過年数	鉄筋の 腐食減量 ($\times 10^{-4}g/cm^2$)
23	0.9	23	0.9	23	1.1	23	1.0
24	1.0	24	1.0	24	1.1	24	1.0
25	1.0	25	1.0	25	1.2	25	1.1
26	1.0	26	1.0	26	1.2	26	1.1
27	1.1	27	1.1	27	1.3	27	1.2
28	1.1	28	1.1	28	1.3	28	1.2
29	1.2	29	1.2	29	1.4	29	1.2
30	1.2	30	1.2	30	1.4	30	1.3
31	1.2	31	1.2	31	1.5	31	1.3
32	1.3	32	1.3	32	1.6	32	1.4
33	1.3	33	1.3	33	1.6	33	1.4

55	2.3	55	2.4	55	2.4	55	2.3
56	2.3	56	2.4	56	2.4	56	2.4
57	2.4	57	2.5	57	2.4	57	2.4
58	2.4	58	2.5	58	2.4	58	2.5
59	2.5	59	2.6	59	2.4	59	2.5
60	2.5	60	2.6	60	2.4	60	2.5
61	2.6	61	2.7	61	2.5	61	2.6
62	2.6	62	2.7	62	2.5	62	2.6
63	2.7	63	2.8	63	2.5	63	2.6
64	2.7	64	2.8	64	2.5	64	2.7
65	2.8	65	2.8	65	2.5	65	2.7

1112	85.9	1285	86.0	971	87.5		
1113	86.0	1286	86.1	972	87.6		
1114	86.1	1287	86.2	973	87.8		
1115	86.2	1288	86.3	974	87.9		
1116	86.3	1289	86.3	975	88.0		
1117*2	86.4	1290*2	86.4	976*2	88.1		
1118	86.5	1291	86.5	977	88.2		
1119	86.6	1292	86.6	978	88.4		
1120	86.7	1293	86.7	979	88.5		
1121	86.8	1294	86.8	980	88.6		
1122	86.9	1295	86.9	981	88.7		

1117*2 : 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