

川内原子力発電所1, 2号炉 運転期間延長認可申請に係るヒアリング
コメント反映整理表<コンクリート構造物>

2023年2月28日 九州電力㈱

No	対象号機	日付	資料名	該当ページ	コメント内容	コメント対応	回答日	完了日
1	1/2号機	2月2日	コンクリート構造物及び鉄骨構造物 劣化状況評価 補足説明資料	2	「高経年化対策実施基準(日本原子力学会)」の劣化メカニズムに記載の劣化要因を網羅するよう、記載の充実を図ること。	補足説明資料P2、3に「高経年化対策実施基準(日本原子力学会)」に記載されている劣化要因を追記した。		
2	1/2号機	2月2日	コンクリート構造物及び鉄骨構造物 劣化状況評価 補足説明資料 (別紙1)	1-4	「ASR」は略語であるため、※書き等で正式名称を記載すること。	補足説明資料P1-4に※書きで正式名称を記載した。		
3	1/2号機	2月2日	コンクリート構造物及び鉄骨構造物 劣化状況評価 補足説明資料 (別紙5)	5-5	温度の実測箇所についての説明を加えること。	補足説明資料P5-5に温度の実測箇所を追加した。		
4	1/2号機	2月2日	コンクリート構造物及び鉄骨構造物 劣化状況評価 補足説明資料 (別紙8)	8-14	中性化の平均値の元となる数値を追記すること。	補足説明資料P8-14に中性化の平均値の元となる数値を追記した。		
5	1/2号機	2月2日	コンクリート構造物及び鉄骨構造物 劣化状況評価 補足説明資料 (別紙12)	12-5 ~13	拡散方程式の回帰分析結果[C_0 (コンクリート表面の塩化物イオン量)、D(拡散係数)]もあわせて示すこと。	補足説明資料P12-5~13のグラフ内に C_0 (コンクリート表面の塩化物イオン量)、D(拡散係数)の値を追記した。		
6	1/2号機	2月2日	コンクリート構造物及び鉄骨構造物 劣化状況評価 補足説明資料 (別紙12)	12-14,16, 18,20	鉄筋の腐食減量について、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のそれぞれ前後5年間の値を数値で提示すること。	補足説明資料P12-16、17、19、20、22、23に調査時点、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のそれぞれ前後5年間の値を数値で記載した。		
7	1/2号機	2月2日	コンクリート構造物及び鉄骨構造物 劣化状況評価 補足説明資料 (別紙15)	—	「アルカリ溶液浸漬法」まで含めた潜在膨張性に関する評価について、追記すること。 (まずは「審査会合における指摘事項の回答」としてアルカリ溶液浸漬試験結果を追記した資料にて確認頂き、その結果を踏まえ、補足説明資料に記載する)	「審査会合の指摘事項」P11,12にアルカリ溶液浸漬法の結果を追記した(補足説明資料への反映は、「審査会合における指摘事項の回答」における議論の結果を踏まえ行う)		

川内原子力発電所 1 号炉審査資料	
資料番号	QSN1-PLM40-コンクリート
提出年月日	2023 年 2 月 28 日

川内原子力発電所 1 号炉 劣化状況評価
(コンクリート構造物及び鉄骨構造物)

補足説明資料

2023年2月28日

九州電力株式会社

目 次

1. 概要	1
2. 基本方針	4
3. 代表構造物の選定	6
4. 代表構造物の技術評価	16
5. 代表構造物以外の評価	24
6. まとめ	25

別紙

別紙 1. 川内原子力発電所 土木建築業務要領における目視点検の項目、方法及び判定基準について	1-1
別紙 2. 対象構造物及び代表構造物の選定過程について	2-1
別紙 3. 耐火能力の考え方及び耐火能力が要求されている壁の位置について	3-1
別紙 4. 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	4-1
別紙 5. 温度分布解析の方法等について	5-1
別紙 6. 放射線照射量の算出方法等について	6-1
別紙 7. 中性子照射量に対する耐力評価について	7-1
別紙 8. 中性化の評価対象及び評価点の選定過程について	8-1
別紙 9. 中性化深さの推定値の算定過程及び結果について	9-1
別紙 10. 塩分浸透の評価対象及び評価点の選定過程について	10-1
別紙 11. 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	11-1
別紙 12. 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	12-1
別紙 13. 機械振動の評価対象の選定過程について	13-1
別紙 14. モルタルバー法の試験結果について	14-1
別紙 15. 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	15-1
別紙 16. 川内 1 号炉周辺の地下水による劣化影響について	16-1

表1 コンクリート構造物及び鉄骨構造物の経年劣化事象及び劣化要因(1/2)

構造物	経年劣化事象	劣化要因	
コンクリート構造物	強度低下	熱	コンクリートは、周辺環境からの伝達熱及び放射線照射に起因する内部発熱により、温度条件によってはコンクリート中の水分の逸散に伴う乾燥に起因する微細なひび割れ、あるいは水分の移動に起因する空隙の拡大等により強度が低下する可能性がある。
		放射線照射	コンクリートが中性子照射やガンマ線照射を受けた場合、自由水の逸散等により強度が低下する可能性がある。
		中性化	コンクリートは空気中の二酸化炭素の作用を受けると、徐々にそのアルカリ性を失い中性化する。中性化がコンクリートの内部に進行しアルカリ性が失われると鉄筋周囲に生成されていた不動態被膜も失われ、鉄筋はコンクリート中の水分、酸素の作用により腐食し始める。さらに、鉄筋の腐食が進行すると酸化生成物による体積膨張からコンクリートにひび割れや剥離が生じ、コンクリート構造物としての健全性が損なわれる可能性がある。
		塩分浸透	コンクリート中に塩化物イオンが浸透して鉄筋位置まで達すると、鉄筋表面の不動態被膜が失われ、鉄筋は、コンクリート中の水分、酸素の作用により腐食し始める。さらに、腐食が進行すると酸化生成物による体積膨張からコンクリートにひび割れや剥離が生じ、コンクリート構造物としての健全性が損なわれる可能性がある。
		機械振動	機械振動により、コンクリート構造物が長期間にわたって繰返し荷重を受けると、ひび割れの発生、ひいては損傷に至る可能性がある。
		アルカリ骨材反応	コンクリート中の反応性シリカを含む骨材と、セメント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。
		凍結融解	コンクリート中の水分が凍結し、それが気温の上昇や日射を受けること等により融解する凍結融解を繰り返すことでコンクリートにひび割れが生じ、コンクリート構造物としての健全性が損なわれる可能性がある。
		化学的侵食 [※]	コンクリートが、水分などに含有された化学物質に直接接することによって生じる可能性がある。
		(乾燥)収縮 [※]	硬化中のコンクリートから、水分が乾燥に伴い逸散し、収縮する。
		風化 [※]	地下部に存在する水にセメント水和物が溶解し、組織が疎となり強度低下の可能性がある。
	日射 [※]	コンクリート表面の温度変動によって膨張・収縮現象が生じ、コンクリートの強度低下が生じる。	
遮蔽能力低下	熱	コンクリートは、周辺環境からの伝達熱及び放射線照射に起因する内部発熱により、コンクリート中の水分が逸散し、放射線に対する遮蔽能力が低下する可能性がある。	

表1 コンクリート構造物及び鉄骨構造物の経年劣化事象及び劣化要因(2/2)

構造物	経年劣化事象	劣化要因	
コンクリート構造物	耐火能力低下	火災時の熱	コンクリート構造物は、断面厚により耐火能力を確保する設計であるが、火災時の熱により剥落が生じ、部分的な断面厚の減少に伴う耐火能力の低下によりコンクリート構造物の健全性が損なわれる可能性がある。
鉄骨構造物	強度低下	腐食	鉄は一般に大気中の酸素、水分と化学反応を起こして腐食する。また、海塩粒子等により腐食が促進される。腐食が進行すると鉄骨の断面欠損に至り、鉄骨の強度低下につながる可能性がある。
		風等による疲労	繰返し荷重が継続的に鉄骨構造物にかかることにより、疲労による損傷が蓄積され、鉄骨の強度低下につながる可能性がある。
		化学的腐食※	薬品等の浸入によって鉄部が発錆し、鉄骨の強度低下が生じる。

(注) 本表は、日本原子力学会「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」に示されている経年劣化事象一覧表（コンクリート・鉄骨編）に基づき作成しているが、※の劣化要因については、経年劣化事象の特定において第2段階スクリーニングにより想定不要な経年劣化事象として整理されている。

項目	内容	判断基準	補足
コンクリート構造物	ASRを示唆するひび割れ、白蒸、漏水跡等が見られないか。	<ul style="list-style-type: none"> 左記事象が見られないこと。 ○(健全) 左記事象が微かにも確認されるもの。 ×(要検討) 	<p>判断基準により、下記方針に基づき措置をとる。</p> <ul style="list-style-type: none"> 原因究明のための詳細調査を実施し、劣化因子遮断のための工法、時期を計画し補修する。 <p>(判断基準の根拠) 「コンクリート診断技術」 (公益社団法人 日本コンクリート工学会)</p>
	塗装に損傷、剥離、剥落はないか。 (面放射線塗装を除く)	<ul style="list-style-type: none"> 塗装面の状態について左記事象が見られないか、又は、塵小なものであり、建物機能上、全く支障がないもの ○(健全) 塗装面について、左記事象が見られ、広範囲範囲に及ぶもの ×(要検討) 	<p>判断基準により、下記方針に基づき措置をとる。</p> <ul style="list-style-type: none"> 塗装面の損傷、剥離等の事象がみられるものについては、補修の要否を検討し、工法、時期を計画して補修する。機能上、支障がないと判断できるものについては、傾向監視していくことによる保全も有効とする。
	遮へい能力に支障をきたす可能性のある有意な劣化はないか。 (遮へい扉も含む)	<ul style="list-style-type: none"> 外観上に著しい損傷、変形などがなくこと。 ○(健全) 外観上に著しい損傷、変形などが確認されるもの ×(要検討) 	<p>判断基準により、下記方針に基づき措置をとる。</p> <ul style="list-style-type: none"> 補修工法、時期を計画し、補修する。 <p>(判断基準の根拠) 「原子力施設における建築物の維持管理指針・解説編(2015)」 (社)日本建築学会</p>
鉄骨(鋼)構造物	部材に腐食による著しい断面欠損はないか。	<ul style="list-style-type: none"> 腐食がないこと、又は腐食が見られるが、板厚の変化はないか、あるいは殆ど減少していないもの ○(健全) 鉄骨本体にまで腐食が及んでおり、板厚が著しく、減少しているもの ×(要検討) 	<p>判断基準により、下記方針に基づき措置をとる。</p> <ul style="list-style-type: none"> 補修工法、時期を計画し、補修する。 <p>(判断基準の根拠) 「水門鉄骨技術基準」 (社)水門鉄骨協会(平成19年) 「原子力施設における建築物の維持管理指針・解説編(2015)」 (社)日本建築学会</p>
	塗装面に浮き、剥がれ、割れ、鋼材の錆はないか。	<ul style="list-style-type: none"> 鉄骨部の錆、塗装面の浮き、剥がれ、割れがないか、あるいはごく軽度な状態のもの ○(健全) 塗膜や皮膜の劣化が認められるとともに、小さな点錆が全面にわたって点在しているか、大きな点錆が少しあるもの ○(経過観察) 構造物としての機能維持に支障を来すもの、又はその可能性があるもの ×(要検討) 	<p>判断基準により、下記方針に基づき措置をとる。</p> <ul style="list-style-type: none"> 補修工法を選定のうえ、補修する。 <p>(判断基準の根拠) 「水門鉄骨技術基準」 (社)水門鉄骨協会(平成19年) 「原子力施設における建築物の維持管理指針・解説編(2015)」 (社)日本建築学会</p>

※ ASR：アルカリ骨材反応

タイトル	温度分布解析の方法等について
説明	<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 1347 1451" style="border: 1px solid black; padding: 10px; margin: 10px 0;"> <pre> graph LR A[①物性値(密度、組成)] --> D[DORT コード] B[②原子炉、1次遮蔽形状] --> D C[③原子炉熱出力分布※1] --> D E[④核分裂により発生する 中性子スペクトル※2] --> D D --> F[ガンマ線束] G[エネルギー吸収係数※3] --> F F --> H[ガンマ発熱量 (kcal/(cm³・h))] </pre> </div> <p>※1：これまでの運転サイクルにおける原子炉出力分布の平均値を用いて原子炉熱出力に相当する分のエネルギー（中性子発生個数）を入力 ※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46cmの位置に現れ、約56℃であり、強度上の熱に対するコンクリートの温度制限値（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> <p>なお、コンクリート内部における炉心領域部近傍の実測温度は約25～42℃であり、実測温度の測定箇所における解析結果（約56℃）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）。</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_C : 321°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 : 321°C
- ・原子炉容器冷却ファン出口冷却空気流量 : 860m³/min
- ・原子炉容器冷却ファン出口冷却空気温度 : 48°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5.5°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）。

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2.7～4.6°Cであり、実測温度の測定箇所における解析結果（約5.5°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 炉心領域部及び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、実測温度の計測位置
- 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

炉心領域部及び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*	実測値	備 考
炉心領域部近傍	約 5.6℃	約 2.5～4.2℃	実測値の測定は、2021年1月～12月（1年間）の最低温度と最高温度
原子炉容器サポート直下部近傍	約 5.5℃	約 2.7～4.6℃	実測値の測定は、2021年1月～12月（1年間）の最低温度と最高温度

※ 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

炉心領域部及び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は以下のとおり。

①炉心領域部

- ・炉心位置に、炉心側表面から深さ方向に約 30 cm ピッチで温度計を 8 点設置

②原子炉容器サポート直下部

- ・原子炉容器サポート直下に温度計を 6 点設置

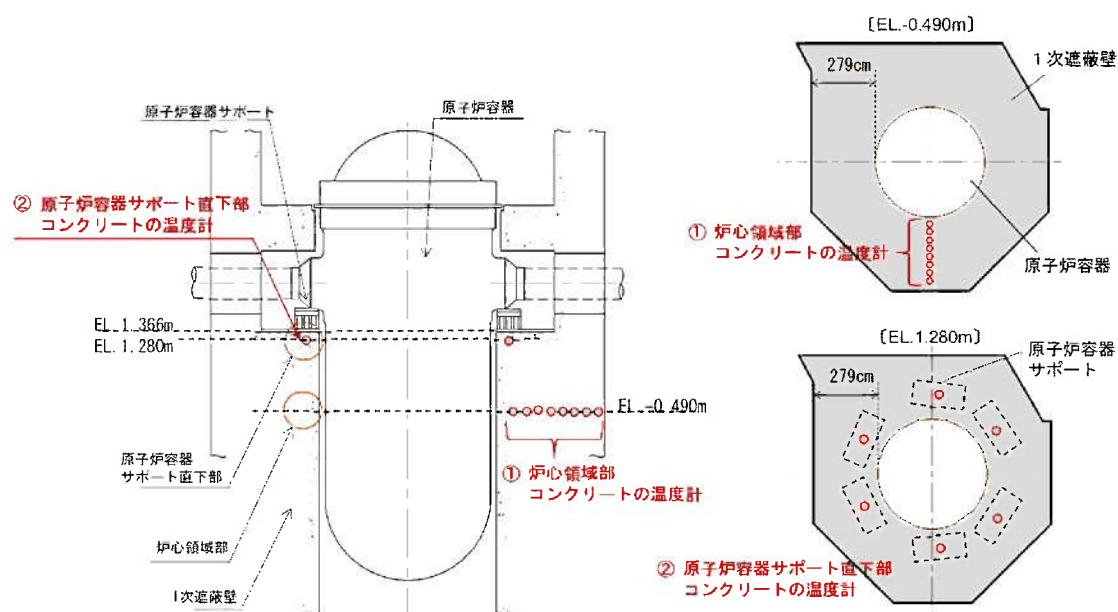


図 4 実測温度の計測位置

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

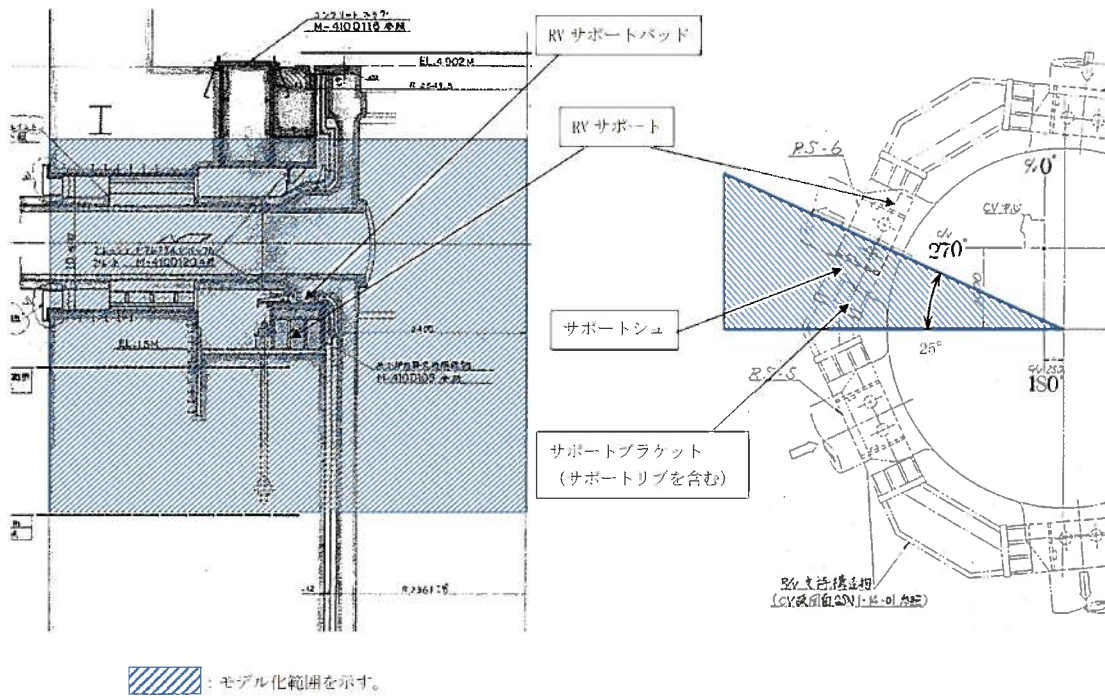


図5 解析対象範囲

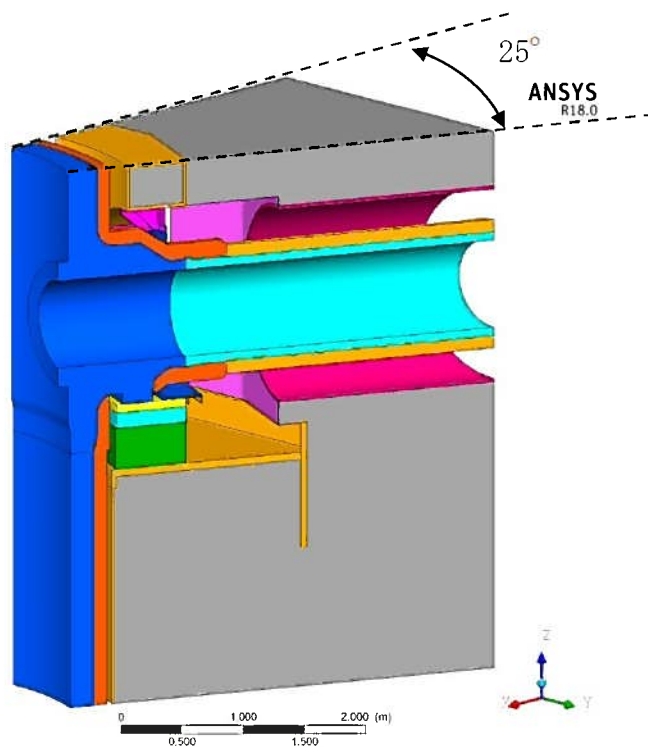


図6 解析モデル (全体)

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

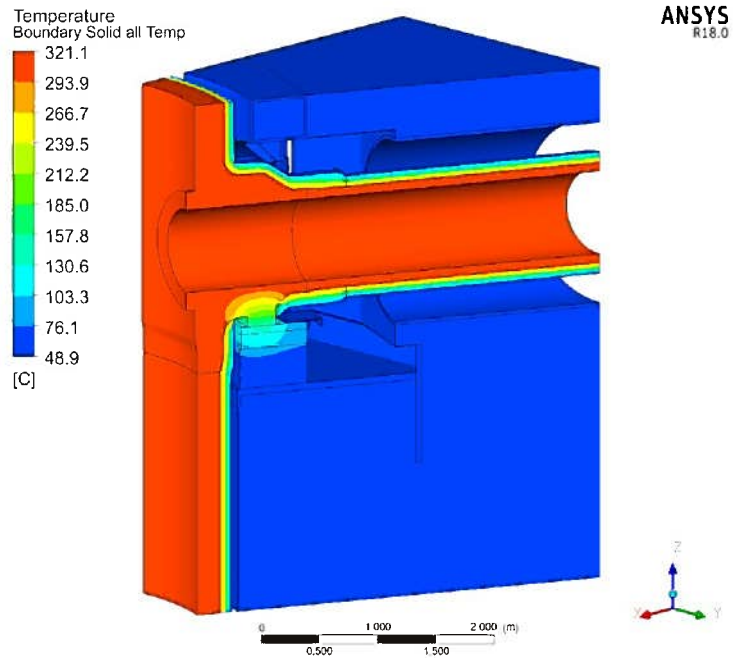


図7 解析モデル全体の温度分布

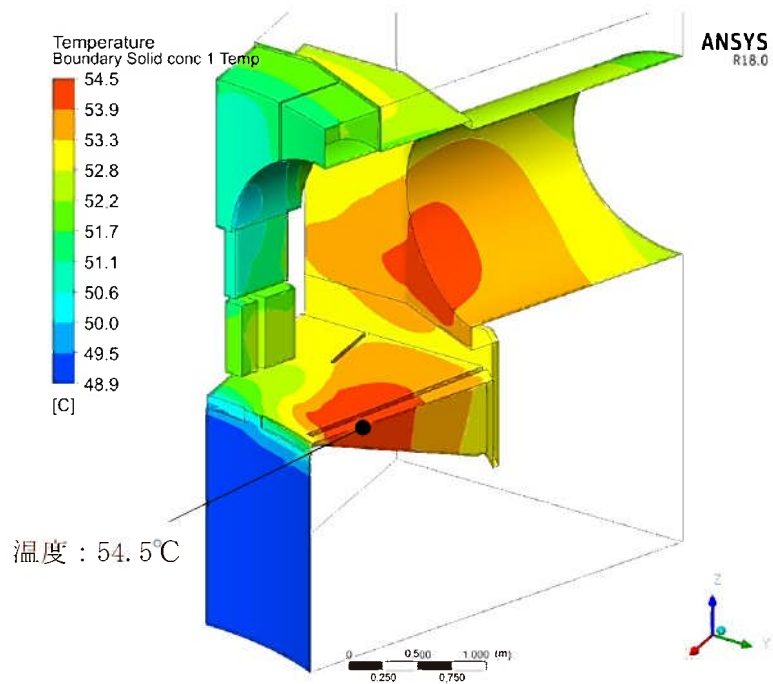


図8 原子炉容器サポート回りのコンクリートの温度分布

中性化深さの測定結果

対象のコンクリート構造物		対象の部位	コア No.	中性化深さ (mm)	平均中性化深さ ^{※1} (mm)	備考 ^{※2}		
原子炉格納施設等	外部遮蔽壁		1	7.0	8.8	60		
			2	11.0				
			3	8.4				
	内部コンクリート			1	1.6	1.7	60	
				2	1.3			
				3	2.1			
	基礎マット			1	19.4	26.0	100	
				2	31.4			
				3	27.1			
原子炉補助建屋	外壁			1	33.2	42.2	70	
				2	43.4			
				3	49.9			
	内壁及び床				1	23.8	31.9	70
					2	31.4		
					3	40.4		
	使用済み燃料プール				1	35.7	36.5	70
					2	35.8		
					3	37.9		
	基礎マット				1	32.8	36.5	70
					2	40.3		
					3	36.4		
タービン建屋	内壁及び床			1	22.4	27.5	95	
				2	32.7			
				3	27.4			
	基礎マット				1	8.8	10.5	80
					2	9.9		
					3	12.8		
取水槽	海中帯			1	0.7	2.7	85	
				2	3.5			
				3	3.8			
	干満帯				1	1.4	2.0	87
					2	2.8		
					3	1.8		
	気中帯				1	17.6	11.5	90
					2	5.5		
					3	11.3		
安全機能を有する系統及び機器又は常設重大事故等対処設備に属する機器を支持する構造物	原子炉格納施設内	上記「原子炉格納施設等」に含む						
	原子炉補助建屋内	上記「原子炉補助建屋」に含む						
	タービン建屋内 (タービン架台を含む。)	上記「タービン建屋」に含む						
上記以外の構造物 (安全機能を有する構造物又は常設重大事故等対処設備に属する構造物・安全機能を有する系統及び機器又は常設重大事故等対処設備に属する機器を支持する構造物に限る。)	非常用ディーゼル発電用燃料油貯油槽基礎			1	1.6	1.9	70	
				2	2.7			
				3	1.5			
	燃料取替用水タンク基礎				1	30.6	28.7	70
					2	28.8		
					3	26.8		

※ 1 : コアサンプル 3 本の平均値

※ 2 : 当該箇所のかぶり厚さ (mm)

タイトル	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 : 鉄筋位置における塩化物イオン量 (推定値)	kg/m ³	0.50~1.96	1.20~7.37	0.70~5.42	運転開始から 60 年経過時点までの各年の推定値
x: かぶり厚さ (mm)	90.5	87.5	85.5, 90.5		
d: 鉄筋径 (mm)	19	25	19, 29		
W: 単位水重 (kg/m ³)	133	133	133		
W/C: 水セメント比 (%)	44.3	44.3	44.3		
T: 温度 (°C)	17.4	22.0	22.0	気中帯: 気象庁 (阿久根) の観測値 (1984年~2019年の36年平均) 干満帯・海中帯: 発電所構内の海水温度の観測値 (1984年~2019年の36年平均)	
RH: 相対湿度 (%)	85	100	100	森永氏の鉄筋腐食に関する研究論文引用	
O: 酸素濃度 (%)	21	21	0.62	気中帯: 理科年表 干満帯: 別紙 1-1 のうち添付 2 の考察により、気中帯と同様のパラメータとした。 海中帯: 「原子力発電所屋外重要土木構造物の耐食性能調査マニュアル(2021)」参照	
N: 練り混ぜ水の塩分濃度 (%)	0.62~2.43	1.49~9.14	0.87~6.72	運転開始から 60 年経過時点までの各年の推定値	
n: 調査時点(36年経過)の鉄筋の腐食減量 (×10 ⁻⁴ g/cm ²)	2.6	7.7	0.9		
n: 運転開始後 60 年経過時点の鉄筋の腐食減量 (×10 ⁻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	80.4		

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

C: 鉄筋位置における塩化物イオン量 (kg/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

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

- x: かぶり厚さ (mm)
- D: コンクリートの材料、調査および含水状態などに応じて定まるコンクリート中の塩化物イオンの見かけの拡散係数 (mm²/年)
- t: 材齢 (年)

拡散方程式

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

森永式

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

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

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

$$q_2' = 0.56528 + 1.4304N$$

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

- 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': 寿命予想対象部位で、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
- T: 温度 (°C)
- H: 湿度に関する項 H = (RH - 45) / 100
- RH: 相対湿度 (%)
- O: 酸素濃度

拡散方程式の回帰分析と鉄筋腐食減量の算定について

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

(1) 拡散方程式の回帰分析

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

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

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

※：コンクリート委員会・規準関連小委員会 土木学会規準「実構造物におけるコンクリート中の全塩化物イオン分布の測定方法（案）（JSCE-G 573-2003）」（以下、土木学会規準（案）という。）

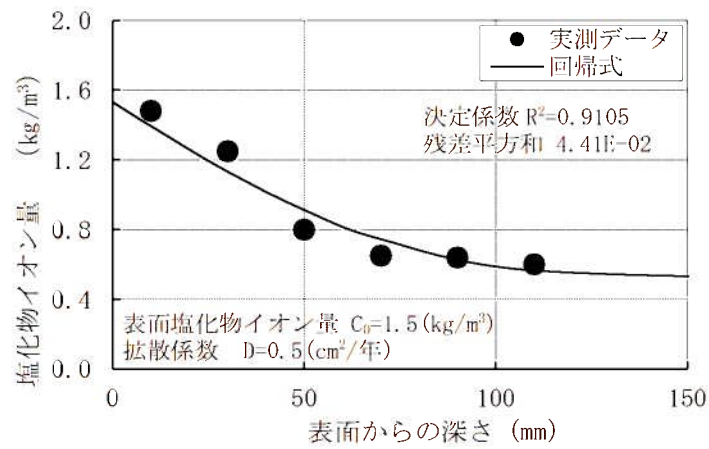
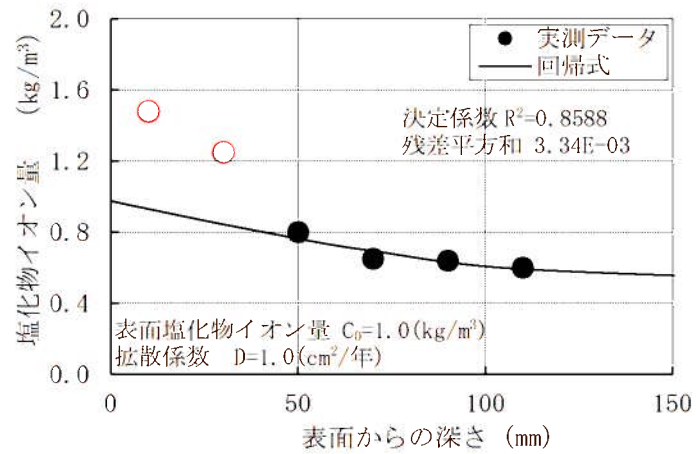


図1(1/9) 取水構造物気中帯 (SP-ci-1u-8-J-①) の回帰分析結果
(上：中性化考慮あり [○]データを棄却)、下：中性化考慮なし)

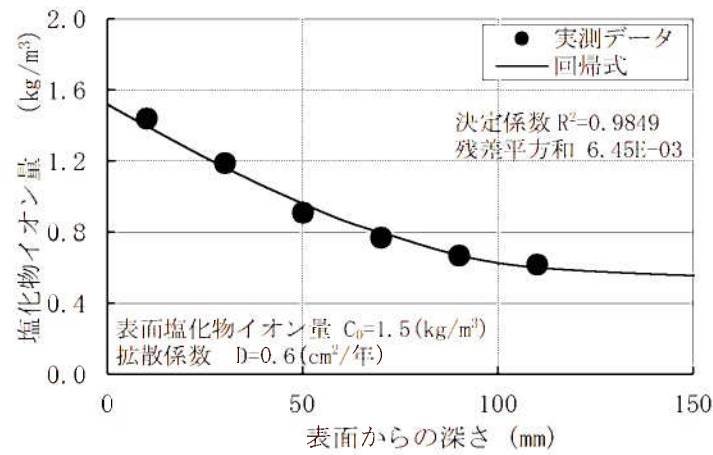
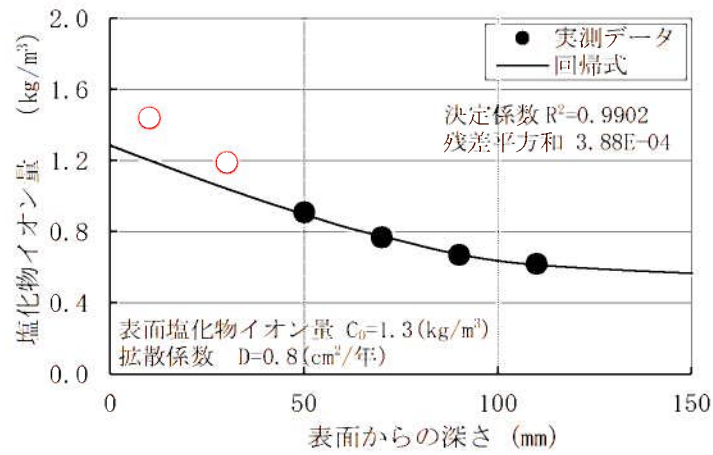


図1(2/9) 取水構造物気中帯 (SP-ci-1u-8-J-②) の回帰分析結果
(上: 中性化考慮あり [○データを棄却]、下: 中性化考慮なし)

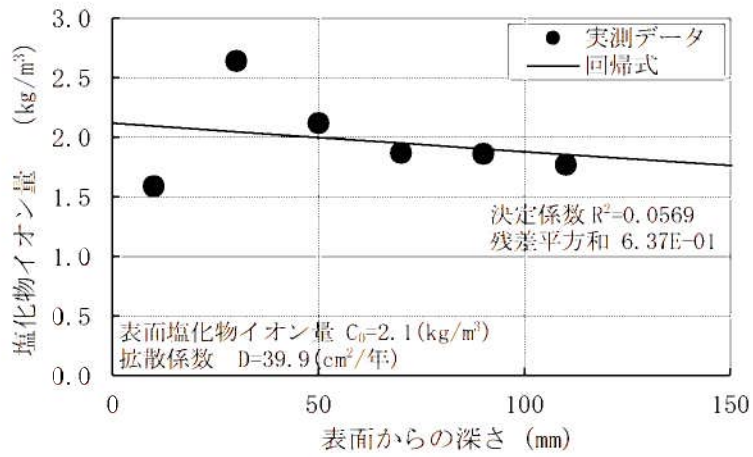
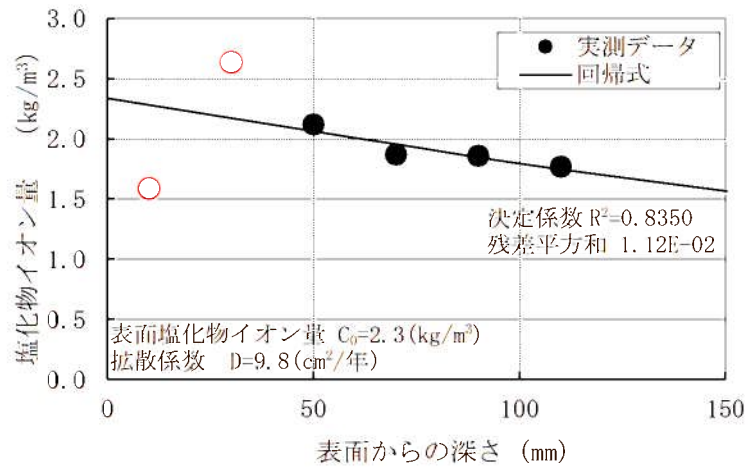


図1(3/9) 取水構造物気中帯 (SP-ci-1u-8) の回帰分析結果
 (上: 中性化考慮あり [○データを棄却]、下: 中性化考慮なし)

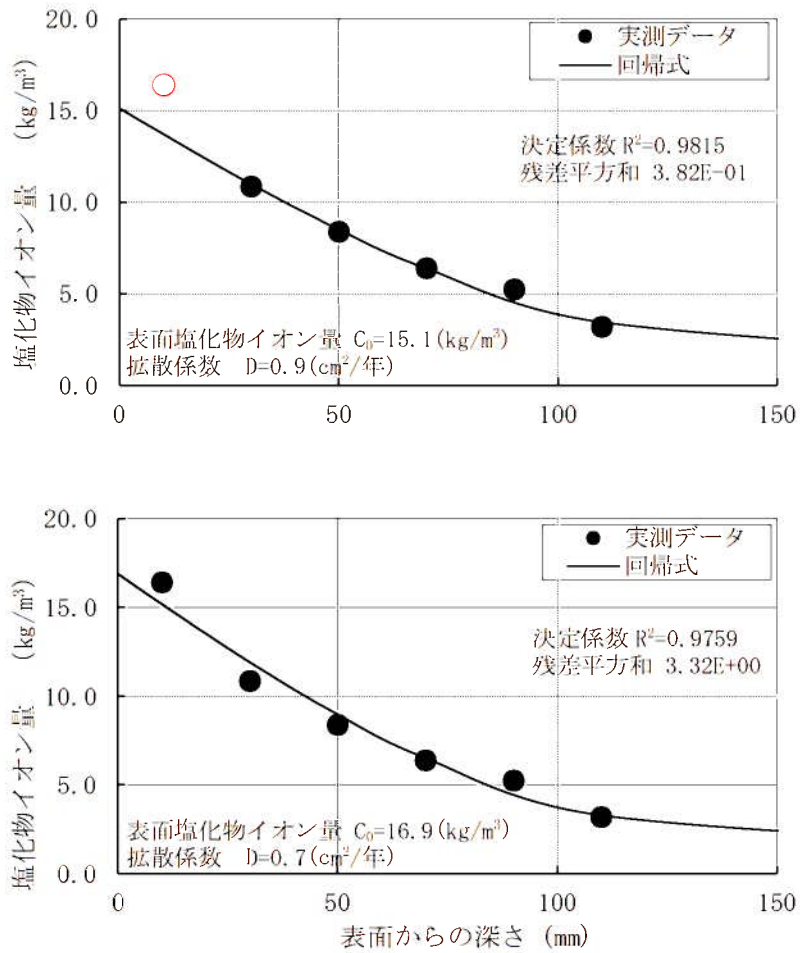


図1(4/9) 取水構造物干満帯 (SP-ci-1u-6-J-①) の回帰分析結果
 (上: 中性化考慮あり [○データを棄却]、下: 中性化考慮なし)

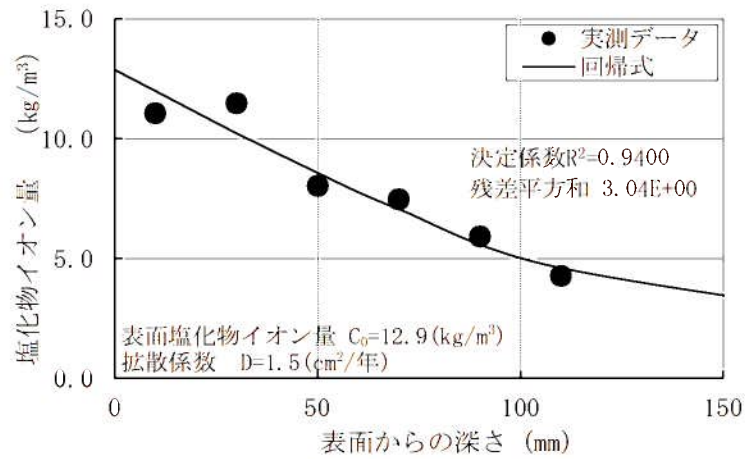
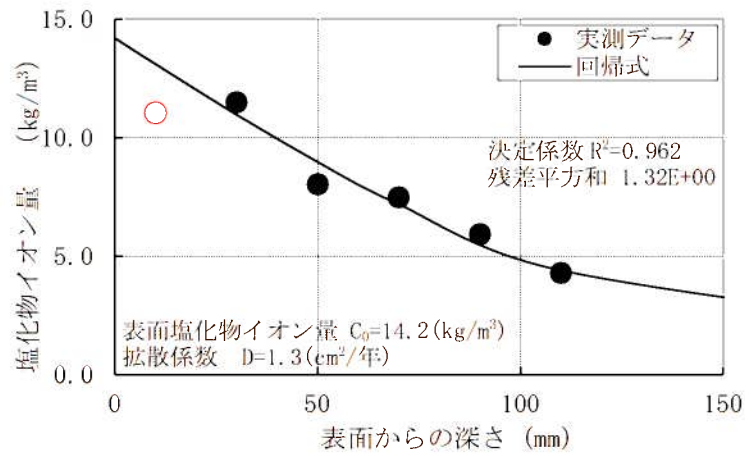


図1(5/9) 取水構造物干満帯 (SP-ci-1u-6-J-②) の回帰分析結果
(上: 中性化考慮あり [○]データを棄却)、下: 中性化考慮なし)

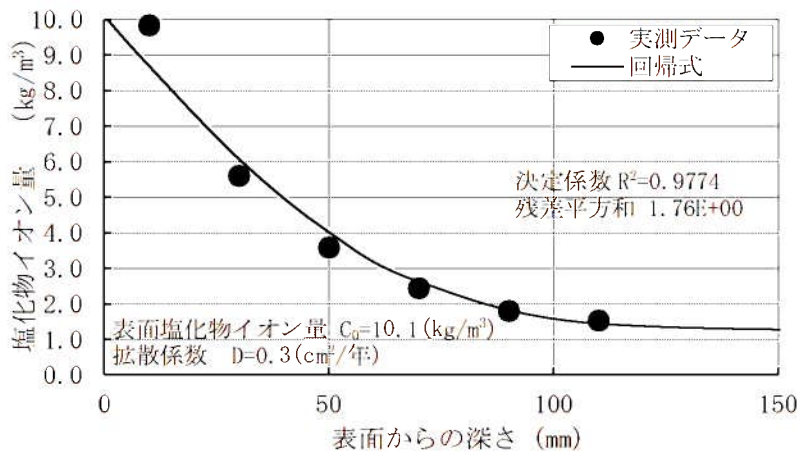
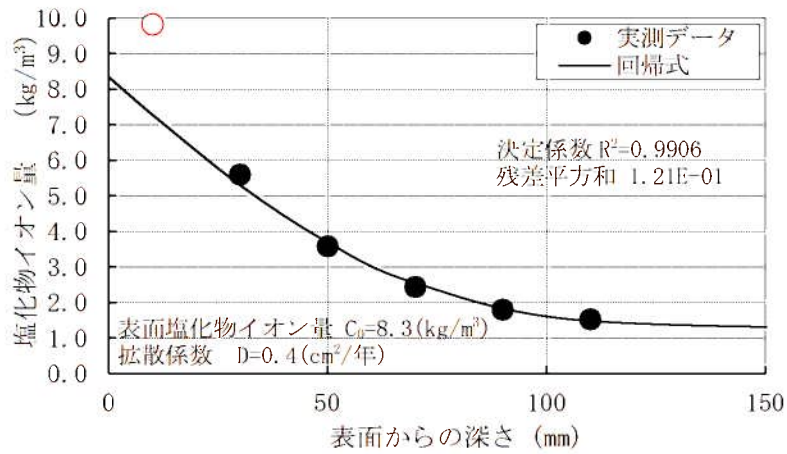


図1(6/9) 取水構造物干満帯 (SP-ci-1u-6) の回帰分析結果
(上: 中性化考慮あり [○データを棄却]、下: 中性化考慮なし)

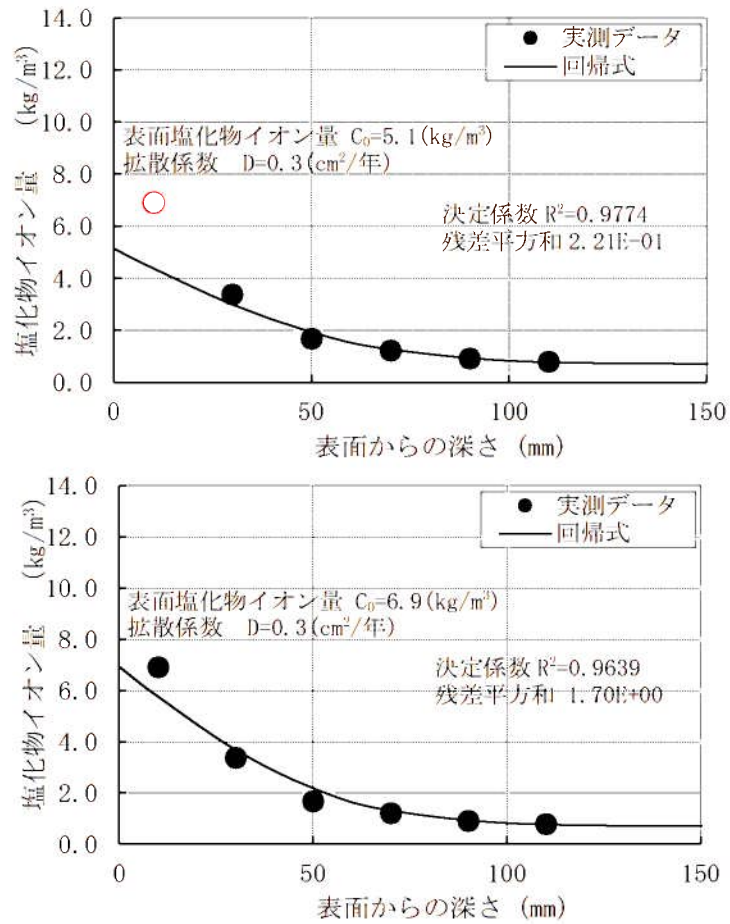


図1(7/9) 取水構造物海中帯 (SP-ci-1u-11) の回帰分析結果
 (上: 中性化考慮あり [○データを棄却]、下: 中性化考慮なし)

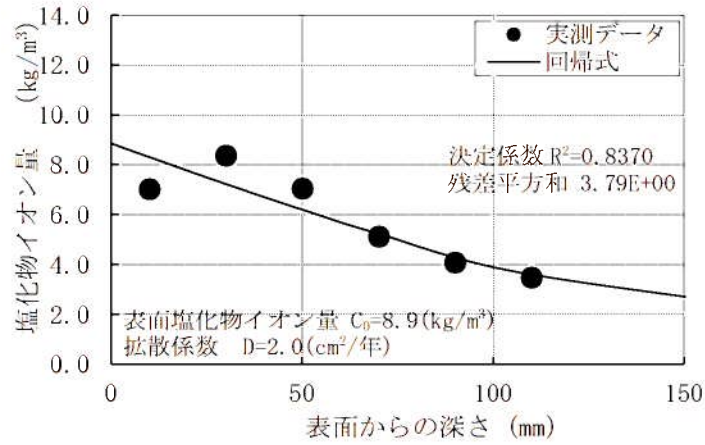
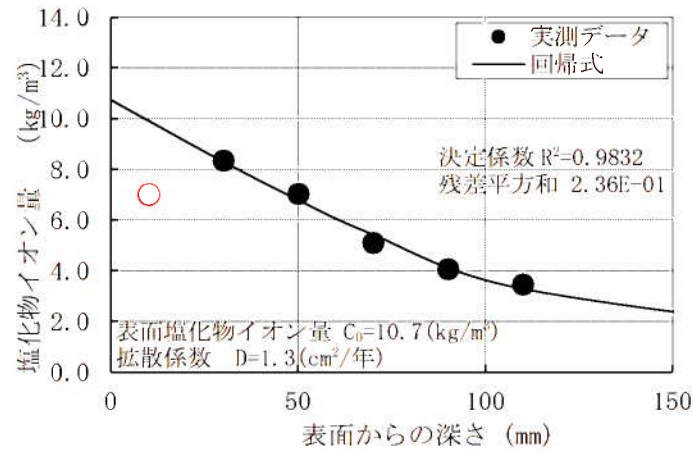


図1(8/9) 取水構造物海中帯 (SP-ci-1u-12) の回帰分析結果
(上: 中性化考慮あり [○データを棄却]、下: 中性化考慮なし)

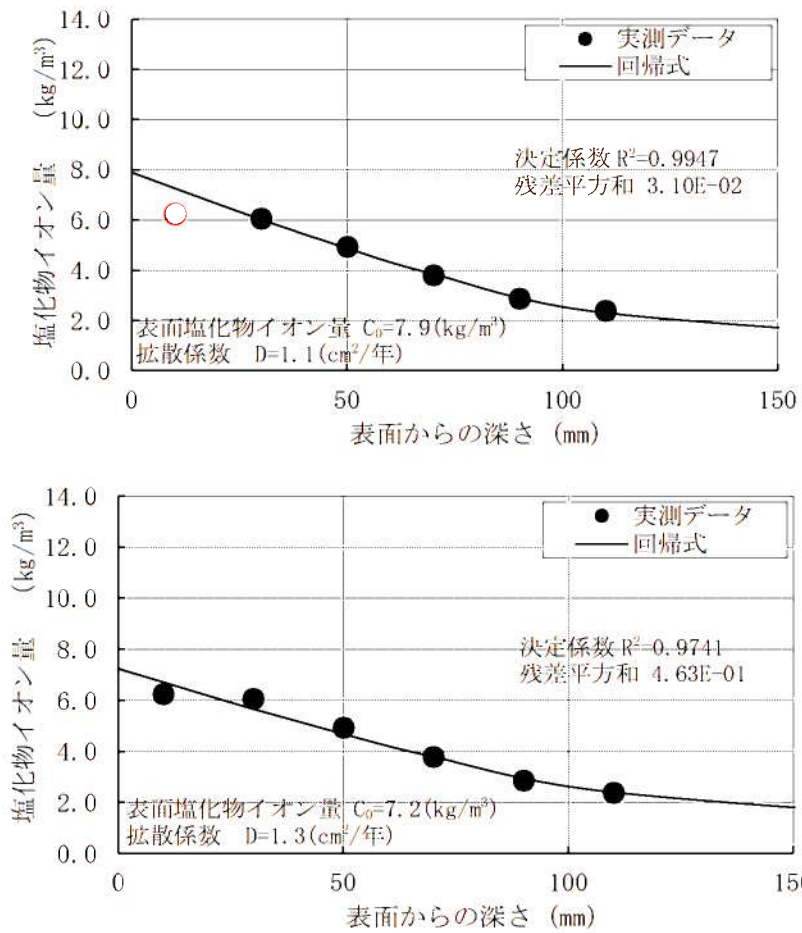


図1(9/9) 取水構造物海中帯 (SP-ci-1u-13) の回帰分析結果
 (上: 中性化考慮あり [○データを棄却]、下: 中性化考慮なし)

(2) 鉄筋の腐食減量

1) 評価結果

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

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

なお、上記結果(気中帯、干満帯、海中帯)は、3本のコア測定値の平均値を用いた場合である。それぞれ単独コアで見た場合でも、運転開始後60年経過時点の鉄筋の腐食減量が、かぶりコンクリートにひび割れが発生する時点の鉄筋腐食減量を下回っていることを確認しており、その結果については後述する。

表3 鉄筋の腐食減量の結果

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

2) 単独コアの確認結果

① 気中帯について

気中帯は、コンクリートが空気に曝される状況下であり、中性化の作用を受けている可能性があることから、土木学会規準（案）に示された「中性化した領域及びそこから1cm以内の深部で採取された試料から得られた結果は、回帰分析を行う際には用いないほうがよい。」を参考に、気中帯の中性化深さ測定結果（11.5mm）+1cmの領域を含む『0～40mmの塩化物イオン量のデータ』を用いる場合と用いない場合の影響を確認した。

■ コア（3箇所）の塩化物イオン濃度及び量測定結果

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

表4 コアの塩化物イオン濃度及び量測定値（気中帯：3箇所）

コア番号	単位	塩化物イオン濃度及び量					
		0～20mm	20～40mm	40～60mm	60～80mm	80～100mm	100～120mm
SP-ci-lu 8-J-①	%	0.07	0.06	0.04	0.03	0.03	0.03
	kg/m 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-1u-8-J-①		SP-ci-1u-8-J-②		SP-ci-1u-8		3本コア平均※1	
運転開始後 経過年数	鉄筋の 腐食減量 ($\times 10^4 \text{g/cm}^2$)	運転開始後 経過年数	鉄筋の 腐食減量 ($\times 10^4 \text{g/cm}^2$)	運転開始後 経過年数	鉄筋の 腐食減量 ($\times 10^4 \text{g/cm}^2$)	運転開始後 経過年数	鉄筋の 腐食減量 ($\times 10^4 \text{g/cm}^2$)
31	2.0	31	2.0	31	2.6	31	2.2
32	2.1	32	2.1	32	2.6	32	2.3
33	2.2	33	2.2	33	2.7	33	2.4
34	2.2	34	2.2	34	2.8	34	2.4
35	2.3	35	2.3	35	2.9	35	2.5
36	2.4	36	2.4	36	3.0	36	2.6
37	2.4	37	2.4	37	3.1	37	2.7
38	2.5	38	2.5	38	3.2	38	2.7
39	2.6	39	2.6	39	3.3	39	2.8
40	2.6	40	2.6	40	3.3	40	2.9
41	2.7	41	2.7	41	3.4	41	3.0

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

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

☐: 技術評価書に記載の値

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

※2: かぶりコンクリートにひび割れが発生する時点

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

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

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

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

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

※2：かぶりコンクリートにひび割れが発生する時点

②干満帯について

干満帯は、気中帯と同様に外気環境に曝される状態であると想定し、土木学会規準(案)に示された「中性化した領域及びそこから1cm以内の深部で採取された試料から得られた結果は、回帰分析を行う際には用いないほうがよい。」を参考に、干満帯の中性化深さ測定結果(2.0mm)+1cmの領域を含む『0~20mmの塩化物イオン量のデータ』を用いる場合と用いない場合の影響を確認した。

■コア(3箇所)の塩化物イオン濃度及び量測定結果

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

表7 コアの塩化物イオン濃度及び量測定値(干満帯:3箇所)

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

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

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

□: 技術評価書に記載の値

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

※2: かぶりコンクリートにひび割れが発生する時点

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

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

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

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

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

※2：かぶりコンクリートにひび割れが発生する時点

③海中帯について

海中帯は、常に海水に浸かっている状況下であるが、土木学会規準(案)を参考に、中性化の作用が考えられる領域の『0～20mmの塩化物イオン量のデータ』を用いる場合と用いない場合の影響を確認した。

■コア(3箇所)の塩化物イオン濃度及び量測定結果

塩化物イオンの測定結果を表10に測定結果を示す。なお測定結果(水色)が構造物表面から深さ1cmの領域を含むデータ(0～20mm)である。

表10 コアの塩化物イオン濃度及び量測定値(海中帯:3箇所)

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

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

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

□: 技術評価書に記載の値

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

※2: かぶりコンクリートにひび割れが発生する時点

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

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

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

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

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

※2：かぶりコンクリートにひび割れが発生する時点

川内原子力発電所 2 号炉 審査資料	
資料番号	QSN2-PLM40-コンクリート
提出年月日	2023 年 2 月 28 日

川内原子力発電所 2 号炉 劣化状況評価
(コンクリート構造物及び鉄骨構造物)

補足説明資料

2023 年 2 月 28 日

九州電力株式会社

目 次

1. 概要	1
2. 基本方針	4
3. 代表構造物の選定	6
4. 代表構造物の技術評価	16
5. 代表構造物以外の評価	24
6. まとめ	25

別紙

別紙1. 川内原子力発電所 土木建築業務要領における目視点検の項目、方法及び判定基準について	1-1
別紙2. 対象構造物及び代表構造物の選定過程について	2-1
別紙3. 耐火能力の考え方及び耐火能力が要求されている壁の位置について	3-1
別紙4. 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	4-1
別紙5. 温度分布解析の方法等について	5-1
別紙6. 放射線照射量の算出方法等について	6-1
別紙7. 中性子照射量に対する耐力評価について	7-1
別紙8. 中性化の評価対象及び評価点の選定過程について	8-1
別紙9. 中性化深さの推定値の算定過程及び結果について	9-1
別紙10. 塩分浸透の評価対象及び評価点の選定過程について	10-1
別紙11. 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	11-1
別紙12. 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	12-1
別紙13. 機械振動の評価対象の選定過程について	13-1
別紙14. モルタルバー法の試験結果について	14-1
別紙15. 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	15-1
別紙16. 川内2号炉周辺の地下水による劣化影響について	16-1

表1 コンクリート構造物及び鉄骨構造物の経年劣化事象及び劣化要因(1/2)

構造物	経年劣化事象	劣化要因	
コンクリート構造物	強度低下	熱	コンクリートは、周辺環境からの伝達熱及び放射線照射に起因する内部発熱により、温度条件によってはコンクリート中の水分の逸散に伴う乾燥に起因する微細なひび割れ、あるいは水分の移動に起因する空隙の拡大等により強度が低下する可能性がある。
		放射線照射	コンクリートが中性子照射やガンマ線照射を受けた場合、自由水の逸散等により強度が低下する可能性がある。
		中性化	コンクリートは空気中の二酸化炭素の作用を受けると、徐々にそのアルカリ性を失い中性化する。中性化がコンクリートの内部に進行しアルカリ性が失われると鉄筋周囲に生成されていた不動態被膜も失われ、鉄筋はコンクリート中の水分、酸素の作用により腐食し始める。さらに、鉄筋の腐食が進行すると酸化生成物による体積膨張からコンクリートにひび割れや剥離が生じ、コンクリート構造物としての健全性が損なわれる可能性がある。
		塩分浸透	コンクリート中に塩化物イオンが浸透して鉄筋位置まで達すると、鉄筋表面の不動態被膜が失われ、鉄筋は、コンクリート中の水分、酸素の作用により腐食し始める。さらに、腐食が進行すると酸化生成物による体積膨張からコンクリートにひび割れや剥離が生じ、コンクリート構造物としての健全性が損なわれる可能性がある。
		機械振動	機械振動により、コンクリート構造物が長期間にわたって繰返し荷重を受けると、ひび割れの発生、ひいては損傷に至る可能性がある。
		アルカリ骨材反応	コンクリート中の反応性シリカを含む骨材と、セメント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。
		凍結融解	コンクリート中の水分が凍結し、それが気温の上昇や日射を受けること等により融解する凍結融解を繰り返すことでコンクリートにひび割れが生じ、コンクリート構造物としての健全性が損なわれる可能性がある。
		化学的侵食 [※]	コンクリートが、水分などに含有された化学物質に直接接することによって生じる可能性がある。
		(乾燥)収縮 [※]	硬化中のコンクリートから、水分が乾燥に伴い逸散し、収縮する。
		風化 [※]	地下部に存在する水にセメント水和物が溶解し、組織が疎となり強度低下の可能性がある。
日射 [※]	コンクリート表面の温度変動によって膨張・収縮現象が生じ、コンクリートの強度低下が生じる。		
	遮蔽能力低下	熱	コンクリートは、周辺環境からの伝達熱及び放射線照射に起因する内部発熱により、コンクリート中の水分が逸散し、放射線に対する遮蔽能力が低下する可能性がある。

表1 コンクリート構造物及び鉄骨構造物の経年劣化事象及び劣化要因(2/2)

構造物	経年劣化事象	劣化要因	
コンクリート構造物	耐火能力低下	火災時の熱	コンクリート構造物は、断面厚により耐火能力を確保する設計であるが、火災時の熱により剥落が生じ、部分的な断面厚の減少に伴う耐火能力の低下によりコンクリート構造物の健全性が損なわれる可能性がある。
鉄骨構造物	強度低下	腐食	鉄は一般に大気中の酸素、水分と化学反応を起こして腐食する。また、海塩粒子等により腐食が促進される。腐食が進行すると鉄骨の断面欠損に至り、鉄骨の強度低下につながる可能性がある。
		風等による疲労	繰返し荷重が継続的に鉄骨構造物にかかることにより、疲労による損傷が蓄積され、鉄骨の強度低下につながる可能性がある。
		化学的腐食※	薬品等の浸入によって鉄部が発錆し、鉄骨の強度低下が生じる。

(注) 本表は、日本原子力学会「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」に示されている経年劣化事象一覧表（コンクリート・鉄骨編）に基づき作成しているが、※の劣化要因については、経年劣化事象の特定において第2段階スクリーニングにより想定不要な経年劣化事象として整理されている。

項目	内容	判断基準	補足
コンクリート 構造物	ASR [※] を示唆するひび割れ、白蒸、 漏水跡等が見られないか。	<ul style="list-style-type: none"> 左記事象が見られないこと。 ○(健全) 左記事象が微かにも確認されるもの。 ×(要検討) 	<p>判断基準により、下記方針に基づく措置をとる。</p> <ul style="list-style-type: none"> 原因究明のための詳細調査を実施し、劣化因子遮断のための工法、時期を計画し補修する。 <p>(判断基準の根拠) 「コンクリート診断技術」 (公益社団法人 日本コンクリート工学会)</p>
	塗装に損傷、剥離、剥落はないか。 (面放射性塗装を除く)	<ul style="list-style-type: none"> 塗装面の劣化について左記事象が見られないか、又は、種小なものであり、建物機能上、全く支障がないもの。 ○(健全) 塗装面について、左記事象が見られ、広範な範囲に及ぶもの。 ×(要検討) 	<p>判断基準により、下記方針に基づく措置をとる。</p> <ul style="list-style-type: none"> 塗装面の損傷、剥離等の事象がみられるものについては、補修の要否を検討し、工法、時期を計画して補修する。機能上、支障がないと判断できるものについては、傾向監視していくことによる保全も有効とする。
	遮へい能力に支障をきたす可能性のある有意な劣化はないか。 (遮へい扉も含む)	<ul style="list-style-type: none"> 外観上に著しい損傷、変形などがないこと。 ○(健全) 外観上に著しい損傷、変形などが確認されるもの。 ×(要検討) 	<p>判断基準により、下記方針に基づく措置をとる。</p> <ul style="list-style-type: none"> 補修工法、時期を計画し、補修する。 <p>(判断基準の根拠) 「原子力施設における建築物の維持管理指針・同解説(2015)」 (社)日本建築学会</p>
鉄骨(鋼)構造物	部材に腐食による著しい断面欠損はないか。	<ul style="list-style-type: none"> 腐食がないこと、又は腐食が見られるが、板厚の変化はないか、あるいは殆ど減少していないもの。 ○(健全) 鉄骨本体にまで腐食が及んでおり、板厚が著しく、減少しているもの。 ×(要検討) 	<p>判断基準により、下記方針に基づく措置をとる。</p> <ul style="list-style-type: none"> 補修工法、時期を計画し、補修する。 <p>(判断基準の根拠) 「水門鉄骨技術基準」 (社)水門鉄骨協会(平成19年) 「原子力施設における建築物の維持管理指針・同解説(2015)」 (社)日本建築学会</p>
	塗装面に浮き、剥がれ、割れ、 鋼材の錆はないか。	<ul style="list-style-type: none"> 鉄部面の錆、塗装面の浮き、剥がれ、割れがないか、あるいはごく軽度な状態のもの。 ○(健全) 塗膜や皮膜の劣化が認められるとともに、小さな点錆が全面にわたって点在しているか、大きな点錆が少しあるもの。 ○(経過観察) 構造物としての機能維持に支障を来たすもの、又はその可能性があるもの。 ×(要検討) 	<p>判断基準により、下記方針に基づく措置をとる。</p> <ul style="list-style-type: none"> 補修工法を選定のうえ、補修する。 <p>(判断基準の根拠) 「水門鉄骨技術基準」 (社)水門鉄骨協会(平成19年) 「原子力施設における建築物の維持管理指針・同解説(2015)」 (社)日本建築学会</p>

※ ASR : アルカリ骨材反応

タイトル	温度分布解析の方法等について
説明	<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 1070 1348 1422" 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] F[エネルギー吸収係数※3] --> G[ガンマ発熱量 (kcal/(cm³・h))] E --> G </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</p> <p>※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</p> <p>※3：出典「REACTOR PHYSICS CONSTANTS, ANI-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48cmの位置に現れ、約55℃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> <p>なお、コンクリート内部における炉心領域部近傍の実測温度は約27～40℃であり、実測温度の測定箇所における解析結果（約55℃）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）。</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） $T_C : 321^{\circ}\text{C}$
- ・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） $T_H : 321^{\circ}\text{C}$
- ・原子炉容器冷却ファン出口冷却空気流量：900m³/min
- ・原子炉容器冷却ファン出口冷却空気温度：47℃
- ・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5.4℃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（添付6）。

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3.1～4.2℃であり、実測温度の測定箇所における解析結果（約5.4℃）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 炉心領域部及び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、実測温度の計測位置
- 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

炉心領域部及び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*	実測値	備 考
炉心領域部近傍	約 5.5℃	約 2.7～4.0℃	実測値の測定は、2021年1月～12月（1年間）の最低温度と最高温度
原子炉容器サポート直下部近傍	約 5.4℃	約 3.1～4.2℃	実測値の測定は、2021年1月～12月（1年間）の最低温度と最高温度

※ 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

炉心領域部及び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は以下のとおり。

①炉心領域部

- ・炉心位置に、炉心側表面から深さ方向に約 30 cm ピッチで温度計を 8 点設置

②原子炉容器サポート直下部

- ・原子炉容器サポート直下に温度計を 6 点設置

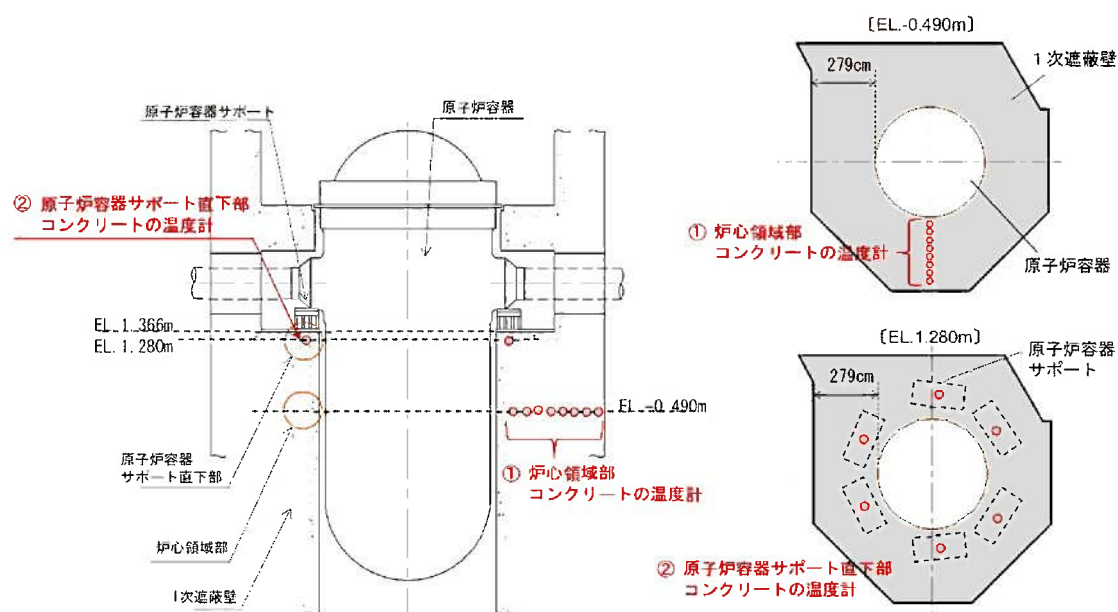


図 4 実測温度の計測位置

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

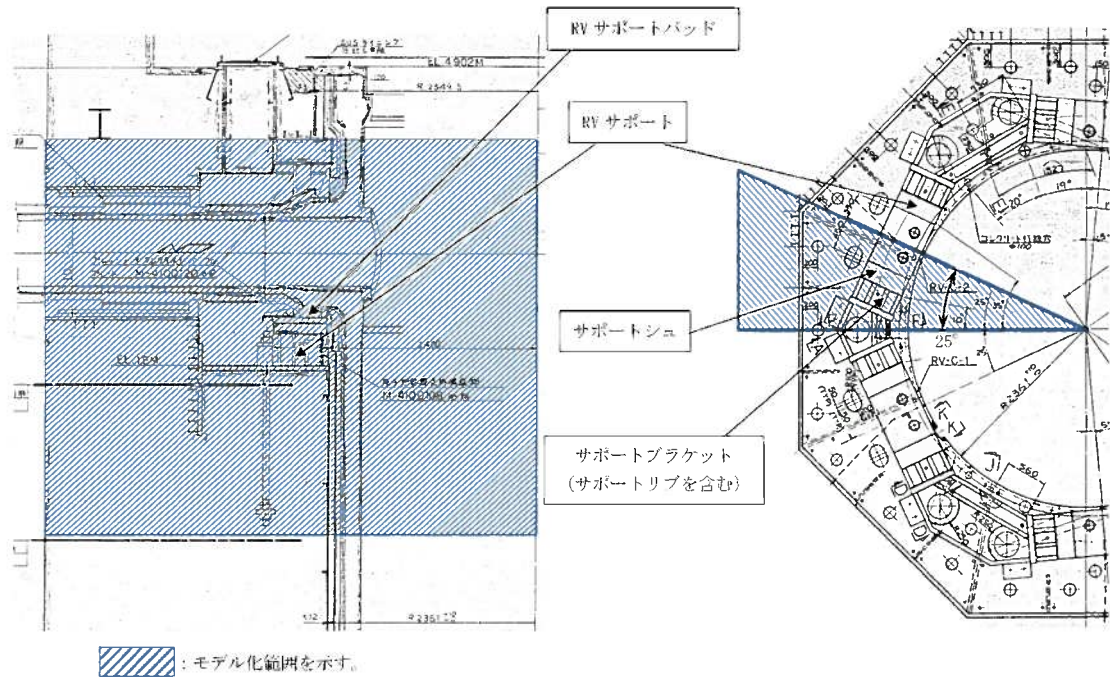


図5 解析対象範囲

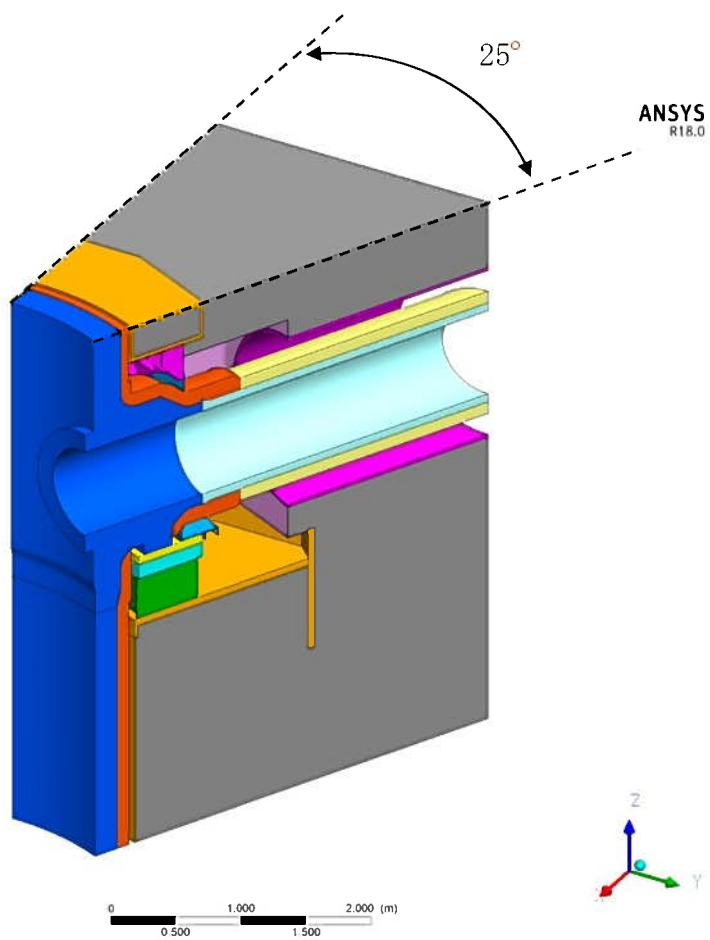


図6 解析モデル (全体)

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

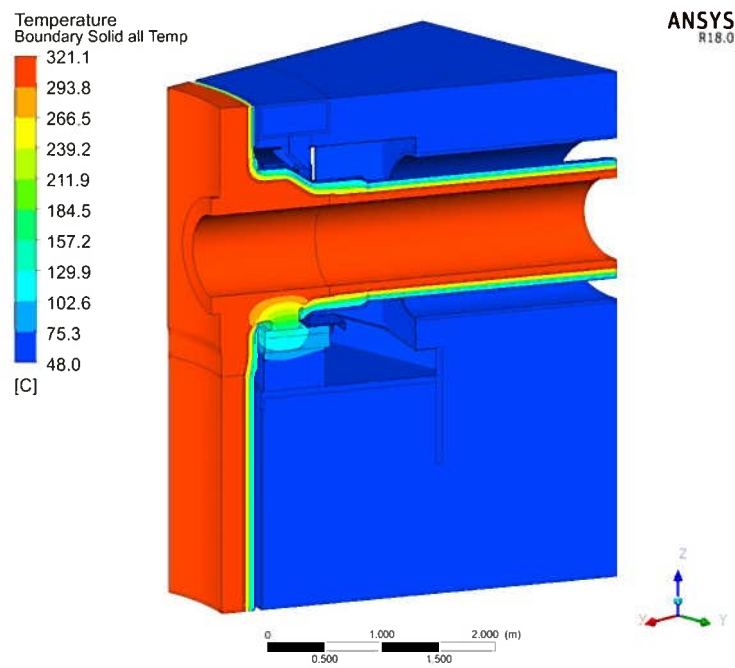


図 7 解析モデル全体の温度分布

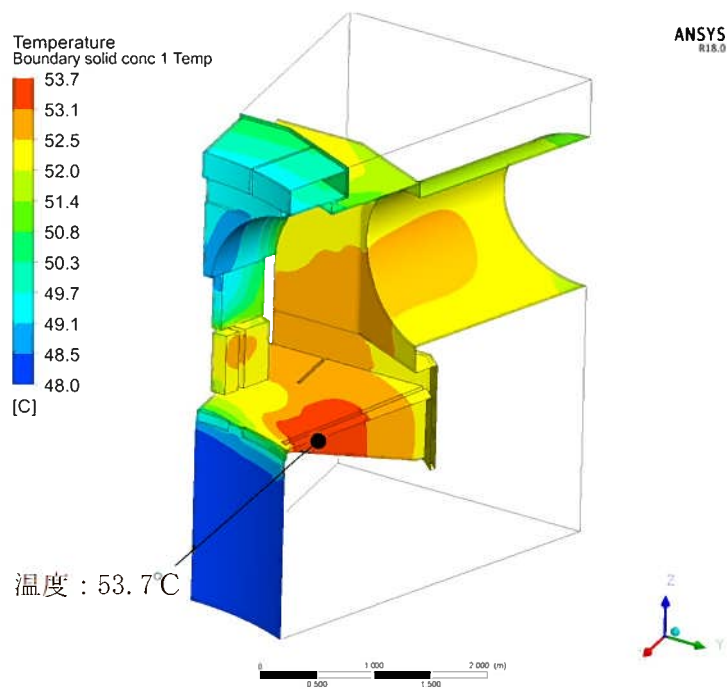


図 8 原子炉容器サポート回りのコンクリートの温度分布

中性化深さの測定結果

対象のコンクリート構造物		対象の部位	コア No.	中性化深さ (mm)	平均中性化深さ ^{※1} (mm)	備考 ^{※2}
原子炉格納施設等	外部遮蔽壁		1	16.6	19.2	60
			2	20.4		
			3	20.7		
	内部コンクリート		1	1.3	1.3	60
			2	2.0		
			3	0.6		
	基礎マット		1	36.7	33.4	100
			2	32.1		
			3	31.3		
原子炉補助建屋	外壁		1	45.1	43.3	70
			2	42.7		
			3	42.0		
	内壁及びび床		1	5.1	5.3	70
			2	5.8		
			3	4.9		
	使用済み燃料プール		1	22.9	14.8	70
			2	11.5		
			3	9.9		
	基礎マット		1	32.0	30.6	70
			2	27.9		
			3	31.9		
タービン建屋	内壁及びび床		1	38.8	20.4	95
			2	14.4		
			3	8.1		
	基礎マット		1	5.9	4.0	80
			2	2.8		
			3	3.2		
取水槽	海中帯		1	0.0	0.5	85
			2	0.0		
			3	1.5		
	干満帯		1	0.0	0.0	87
			2	0.0		
			3	0.0		
	気中帯		1	5.2	11.8	90
			2	22.3		
			3	7.9		
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	3.4	4.0	70
			2	4.0		
			3	4.5		
	燃料取替用水タンク基礎		1	3.0	3.4	70
			2	4.4		
			3	2.8		

※ 1 : コアサンプル 3 本の平均値

※ 2 : 当該箇所のかぶり厚さ (mm)

タイトル	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)	2.9	4.7	84.5
取水構造物 (干満帯) ^{※2}	7.0	12.5	88.1
取水構造物 (海中帯)	0.7	1.6	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	%	0.06	0.14	0.09	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	1.3	3.0	2.0	
C ₀ : 鉄筋位置における塩化物イオン量 (推定値)	kg/m ³	1.20~1.53	1.20~4.00	0.60~3.95	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, 20		
W: 単位水量 (kg/m ³)	151.7	151.7	151.7		
W/C: 水セメント比 (%)	45.0	45.0	45.0		
T: 温度 (°C)	17.4	22.1	22.1	気中帯: 気象庁 (阿久根) の観測値 (1985年~2021年の37か年平均) 干満帯・海中帯: 発電所構内の海水温度の観測値 (1985年~2021年の37か年平均)	
RH: 相対湿度 (%)	85	100	100	森永氏の鉄筋腐食に関する研究論文引用	
O: 酸素濃度 (%)	21	21	0.62	気中帯: 理科年表 干満帯: 別紙 1-1 のうち添付 2 の考察により、気中帯と同様のパラメータとした。 海中帯: 「原子力発電所屋外重要土木構造物の耐食性能調査マニュアル(2021)」参照	
N: 練り混ぜ水の塩分濃度 (%)	1.28~1.63	1.28~4.91	0.61~4.21	運転開始から 60 年経過時点までの各年の推定値	
n: 調査時点(37 年経過)の鉄筋の腐食減量 (×10 ⁻⁴ g/cm ²)	2.9	7.0	0.7		
n: 運転開始後 60 年経過時点の鉄筋の腐食減量 (×10 ⁻⁴ g/cm ²)	4.7	12.5	1.6		
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)	81.5	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のに必要なパラメータ
 : (1) の予測結果
 : (2) 森永氏により、鉄筋の腐食減量の評価を実施するのに必要なパラメータ
 : (2) の推定結果

C: 鉄筋位置における塩化物イオン量 (kg/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

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

x: かぶり厚さ (mm)
 D: コンクリートの材料、調査および含水状態などに応じて定まるコンクリート中の塩化物イオンの見かけの拡散係数 (mm²/年)
 t: 材齢 (年)

拡散方程式

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

森永式

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

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

$$q_2 = 2.59 - 0.05T - 6.89H - 22.870 - 0.99N + 0.14TH + 0.5110 + 0.01TN + 60.8110 + 3.361N + 7.320N$$

$$q_2' = 0.56528 + 1.4304N$$

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

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
 T: 温度 (°C)
 H: 湿度に関する項 H = (RH - 45) / 100
 RH: 相対湿度 (%)
 O: 酸素濃度

拡散方程式の回帰分析と鉄筋腐食減量の算定について

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

(1) 拡散方程式の回帰分析

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

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

なお、回帰分析に当たっては、土木学会規準（案）*に準拠して中性化の影響の可能性を考慮することとし、コンクリート表面に近い領域の測定値について、「中性化の影響を考慮するケース」と「中性化の影響を考慮しないケース」の比較を行った。検討の結果、「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」は、回帰分析における精度はほぼ同等であったことから、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。）

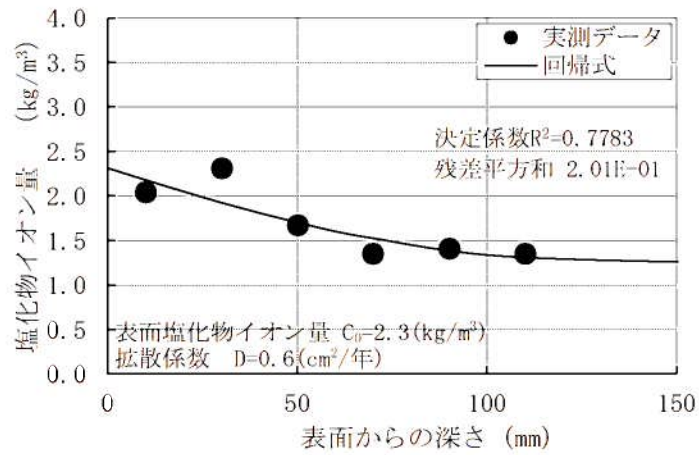
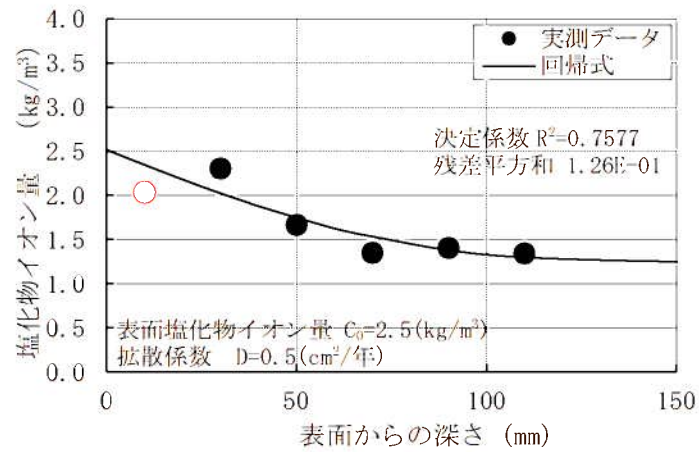


図1(1/9) 取水構造物気中帯 (SP-ci-2u-8-J-①) の回帰分析結果
(上：中性化考慮あり [○データを棄却]、下：中性化考慮なし)

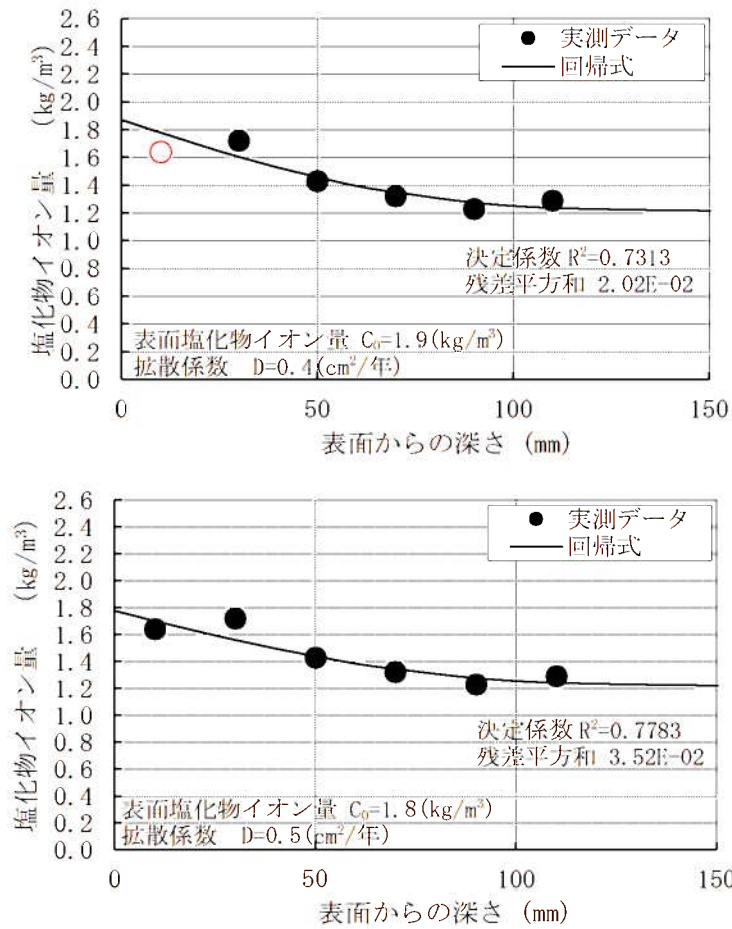


図1(2/9) 取水構造物気中帯 (SP-ci-2u-8-J-②) の回帰分析結果
 (上：中性化考慮あり [○データを棄却]、下：中性化考慮なし)

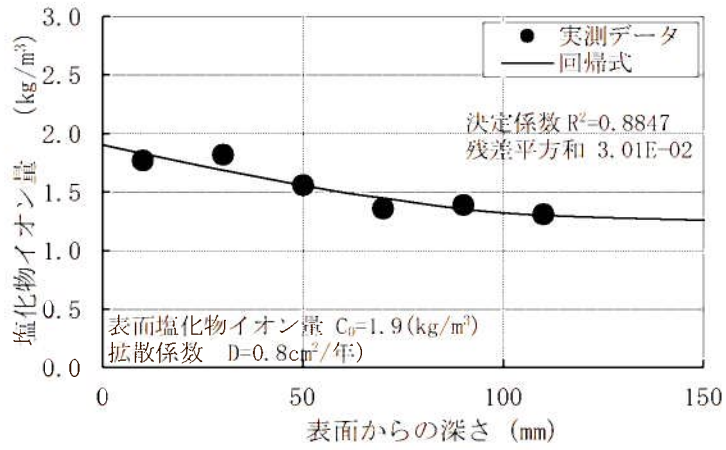
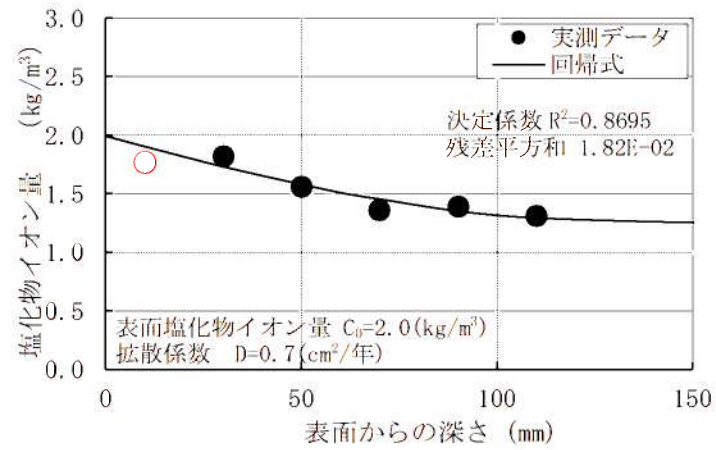


図1(3/9) 取水構造物気中帯 (SP-ci-2u-8) の回帰分析結果
(上: 中性化考慮あり [○データを棄却]、下: 中性化考慮なし)

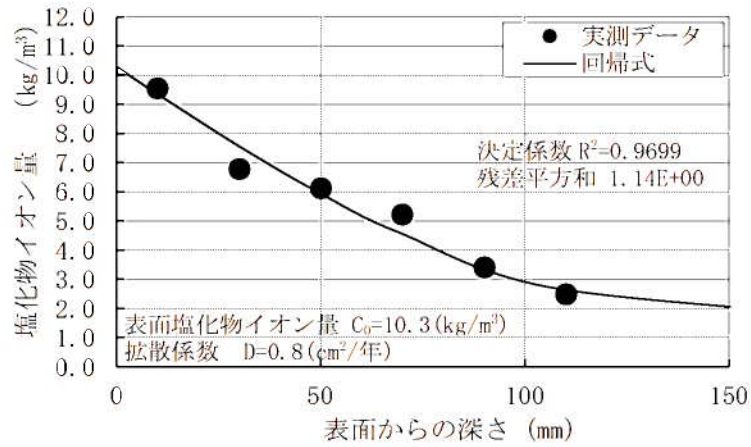
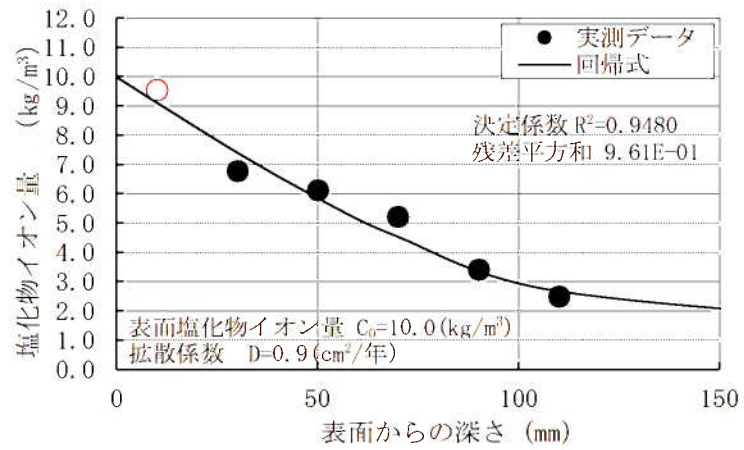


図1(4/9) 取水構造物干満帯 (SP-ci-2u-4-J-①) の回帰分析結果
(上：中性化考慮あり [○データを棄却]、下：中性化考慮なし)

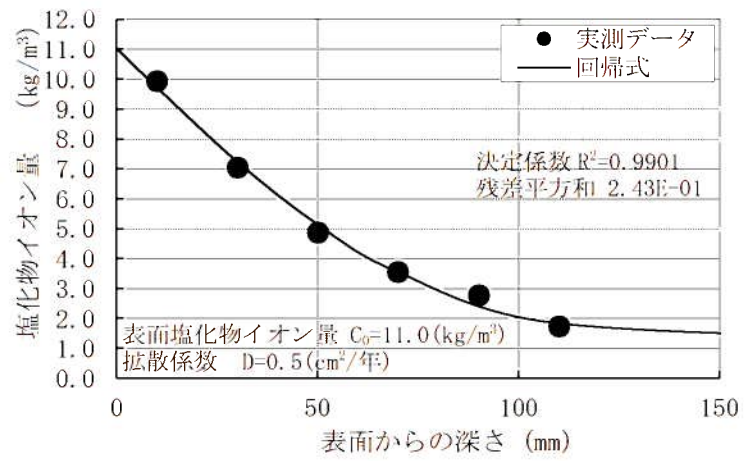
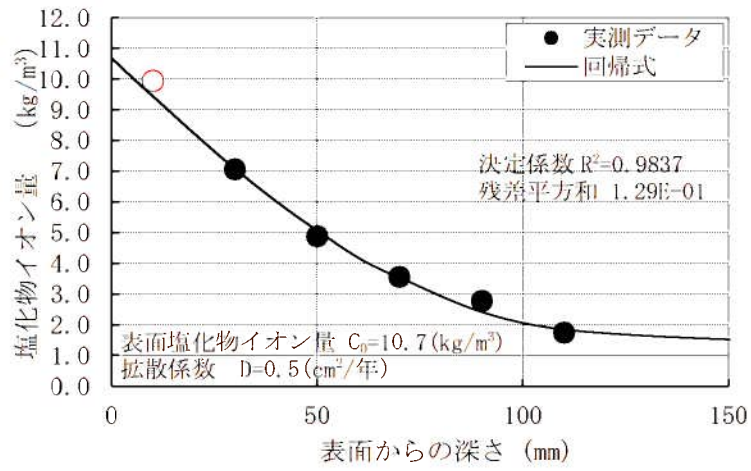


図1(5/9) 取水構造物干満帯 (SP-ci-2u-4-J-②) の回帰分析結果
(上: 中性化考慮あり [○データを棄却]、下: 中性化考慮なし)

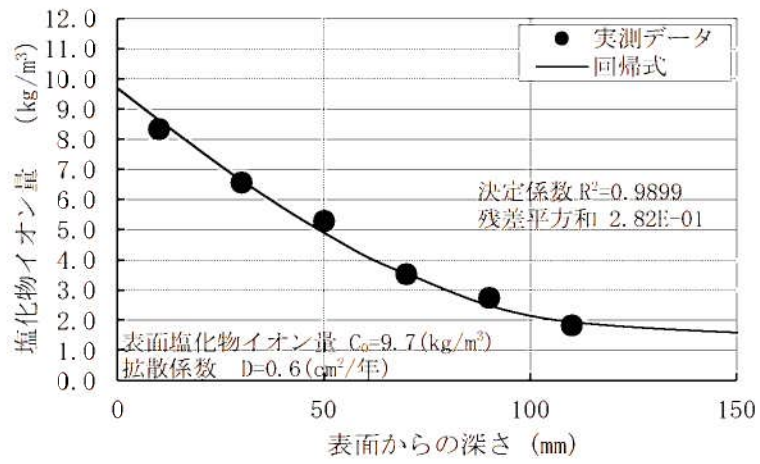
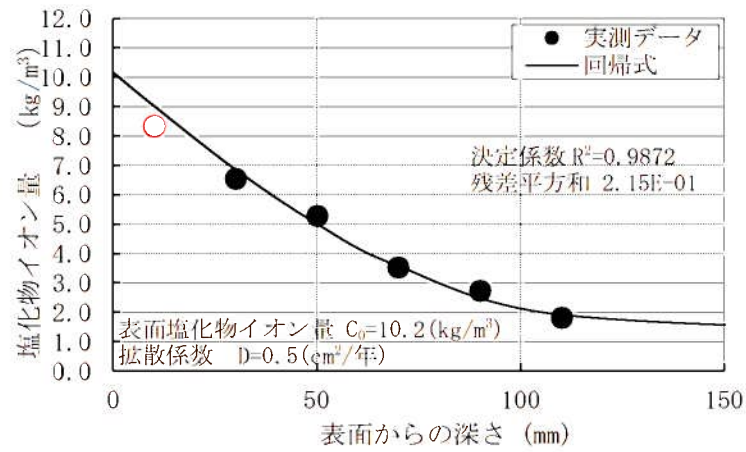


図1(6/9) 取水構造物干満帯 (SP-ci-2u-4) の回帰分析結果
(上：中性化考慮あり [○]データを棄却)、下：中性化考慮なし)

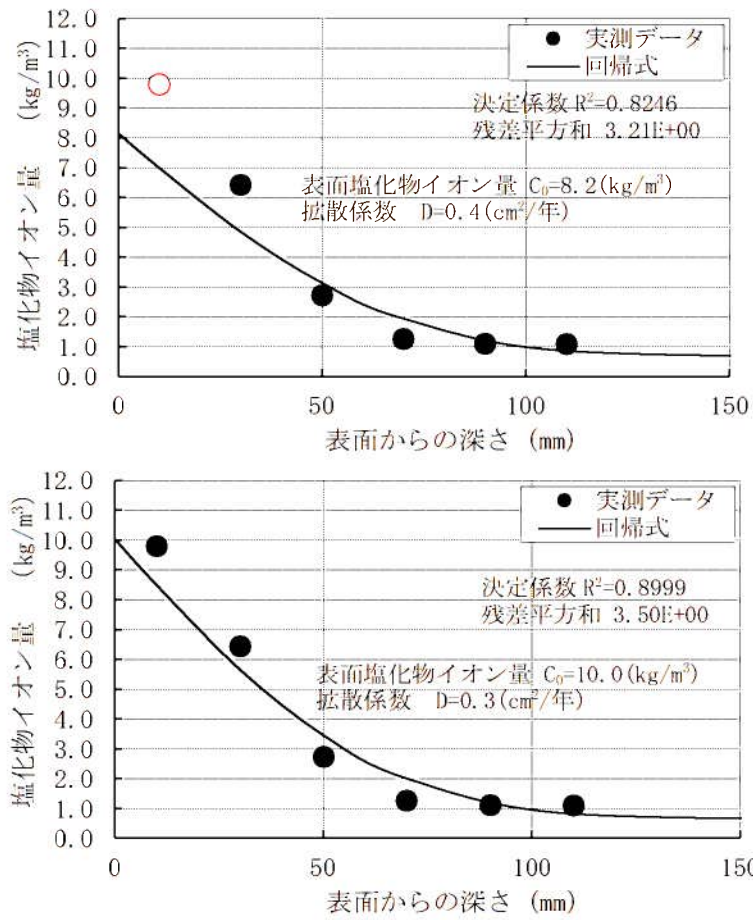


図1(7/9) 取水構造物海中帯 (SP-ci-2u-1) の回帰分析結果
(上：中性化考慮あり[○データを棄却]、下：中性化考慮なし)

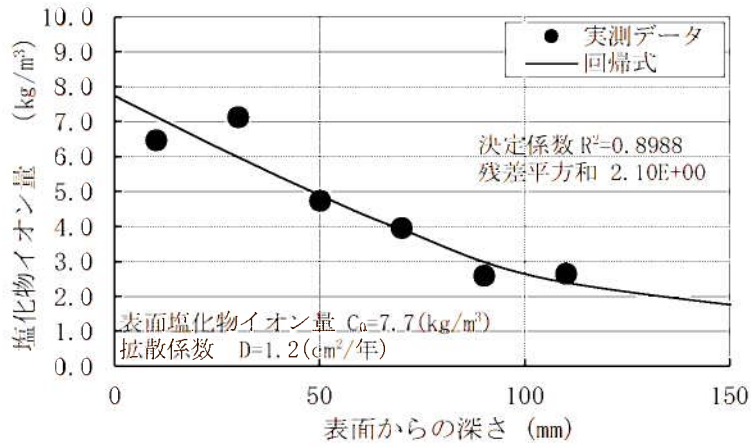
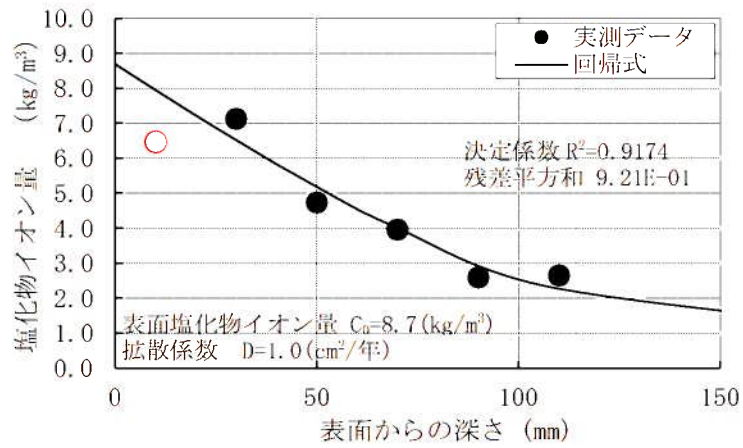


図1(8/9) 取水構造物海中帯 (SP-ci-2u-2) の回帰分析結果
(上：中性化考慮あり[○データを棄却]、下：中性化考慮なし)

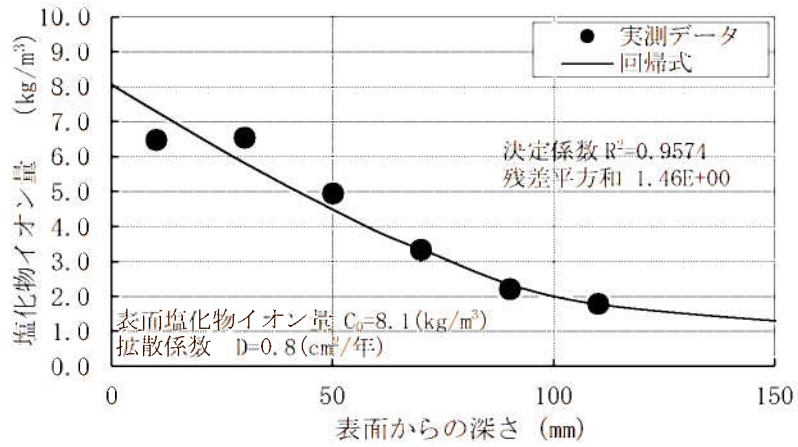
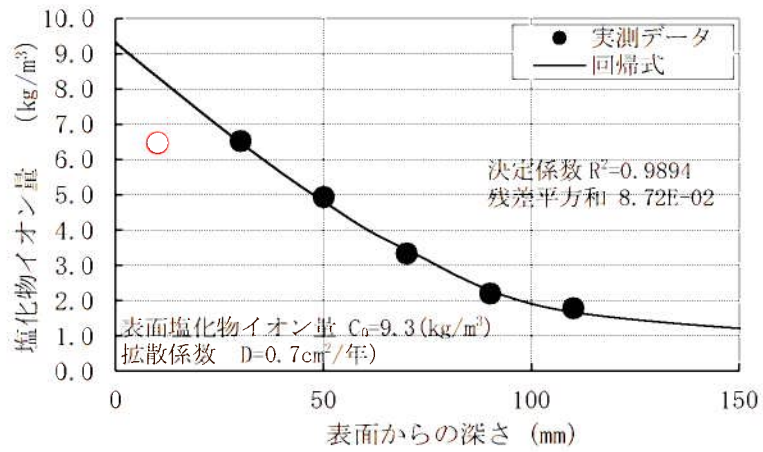


図1(9/9) 取水構造物海中帯 (SP-ci-2u-3) の回帰分析結果
(上: 中性化考慮あり [○データを棄却]、下: 中性化考慮なし)

(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 ($\times 10^{-4}$ 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 (37年)	2.9	調査時点 (37年)	7.0	調査時点 (37年)	0.7
運転開始後 60年経過時点	4.7	運転開始後 60年経過時点	12.5	運転開始後 60年経過時点	1.6
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（7.2mm）+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（0～20mm）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-2u	%	0.09	0.11	0.08	0.06	0.06	0.06
8-J-①	kg/m ³	2.04	2.31	1.67	1.35	1.41	1.35
SP-ci-2u	%	0.07	0.08	0.06	0.06	0.06	0.06
8-J-②	kg/m ³	1.64	1.72	1.43	1.32	1.23	1.29
SP-ci-2u	%	0.08	0.08	0.07	0.06	0.06	0.06
8	kg/m ³	1.77	1.82	1.56	1.36	1.39	1.31
平均値	%	0.08	0.09	0.07	0.06	0.06	0.06
	kg/m ³	1.82	1.95	1.55	1.34	1.34	1.32

■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-2u-8-J-①		SP-ci-2u-8-J-②		SP-ci-2u-8		3本コア平均※1	
運転開始後 経過年数	鉄筋の 腐食減量 ($\times 10^3 \text{g/cm}^2$)	運転開始後 経過年数	鉄筋の 腐食減量 ($\times 10^3 \text{g/cm}^2$)	運転開始後 経過年数	鉄筋の 腐食減量 ($\times 10^3 \text{g/cm}^2$)	運転開始後 経過年数	鉄筋の 腐食減量 ($\times 10^3 \text{g/cm}^2$)
32	2.5	32	2.5	32	2.5	32	2.5
33	2.6	33	2.6	33	2.6	33	2.6
34	2.6	34	2.6	34	2.6	34	2.6
35	2.7	35	2.7	35	2.7	35	2.7
36	2.8	36	2.8	36	2.8	36	2.8
37	2.9	37	2.9	37	2.9	37	2.9
38	3.0	38	2.9	38	3.0	38	3.0
39	3.0	39	3.0	39	3.0	39	3.0
40	3.1	40	3.1	40	3.1	40	3.1
41	3.2	41	3.2	41	3.2	41	3.2
42	3.3	42	3.2	42	3.3	42	3.3

55	4.3	55	4.3	55	4.3	55	4.3
56	4.4	56	4.3	56	4.4	56	4.4
57	4.5	57	4.4	57	4.5	57	4.5
58	4.6	58	4.5	58	4.5	58	4.5
59	4.7	59	4.6	59	4.6	59	4.6
60	4.7	60	4.6	60	4.7	60	4.7
61	4.8	61	4.7	61	4.8	61	4.8
62	4.9	62	4.8	62	4.9	62	4.9
63	5.0	63	4.9	63	5.0	63	4.9
64	5.1	64	5.0	64	5.0	64	5.0
65	5.1	65	5.0	65	5.1	65	5.1

923	84.0	1011	84.1	984	84.1		
924	84.1	1012	84.2	985	84.1		
925	84.2	1013	84.3	986	84.2		
926	84.3	1014	84.4	987	84.3		
927	84.4	1015	84.4	988	84.4		
928※2	84.5	1016※2	84.5	989※2	84.5		
929	84.6	1017	84.6	990	84.6		
930	84.7	1018	84.7	991	84.7		
931	84.8	1019	84.8	992	84.8		
932	84.8	1020	84.9	993	84.8		
933	84.9	1021	85.0	994	84.9		

□: 技術評価書に記載の値

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

※2: かぶりコンクリートにひび割れが発生する時点

表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-2u-8-J-①		SP-ci-2u-8-J-②		SP-ci-2u-8		3本コア平均※1	
運転開始後 経過年数	鉄筋の 腐食減量 ($\times 10^3 \mu\text{g}/\text{m}^2$)	運転開始後 経過年数	鉄筋の 腐食減量 ($\times 10^3 \mu\text{g}/\text{m}^2$)	運転開始後 経過年数	鉄筋の 腐食減量 ($\times 10^3 \mu\text{g}/\text{m}^2$)	運転開始後 経過年数	鉄筋の 腐食減量 ($\times 10^3 \mu\text{g}/\text{m}^2$)
32	2.5	32	2.5	32	2.5	32	2.5
33	2.6	33	2.6	33	2.6	33	2.6
34	2.7	34	2.6	34	2.7	34	2.6
35	2.7	35	2.7	35	2.7	35	2.7
36	2.8	36	2.8	36	2.8	36	2.8
37	2.9	37	2.9	37	2.9	37	2.9
38	3.0	38	2.9	38	3.0	38	3.0
39	3.0	39	3.0	39	3.0	39	3.0
40	3.1	40	3.1	40	3.1	40	3.1
41	3.2	41	3.2	41	3.2	41	3.2
42	3.3	42	3.2	42	3.3	42	3.3

55	4.3	55	4.3	55	4.3	55	4.3
56	4.4	56	4.3	56	4.4	56	4.4
57	4.5	57	4.4	57	4.5	57	4.5
58	4.6	58	4.5	58	4.6	58	4.5
59	4.7	59	4.6	59	4.6	59	4.6
60	4.7	60	4.7	60	4.7	60	4.7
61	4.8	61	4.7	61	4.8	61	4.8
62	4.9	62	4.8	62	4.9	62	4.9
63	5.0	63	4.9	63	5.0	63	4.9
64	5.1	64	5.0	64	5.0	64	5.0
65	5.1	65	5.0	65	5.1	65	5.1

943	84.0	1020	84.0	994	84.1		
944	84.1	1021	84.1	995	84.1		
945	84.2	1022	84.2	996	84.2		
946	84.3	1023	84.3	997	84.3		
947	84.4	1024	84.4	998	84.4		
948※2	84.5	1025※2	84.5	999※2	84.5		
949	84.5	1026	84.5	1000	84.6		
950	84.6	1027	84.6	1001	84.7		
951	84.7	1028	84.7	1002	84.7		
952	84.8	1029	84.8	1003	84.8		
953	84.9	1030	84.9	1004	84.9		

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

※2：かぶりコンクリートにひび割れが発生する時点

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、気中帯の中性化深さ測定結果(0.0mm)+1cmの領域を含む『0~20mmの塩化物イオン量のデータ』を用いる場合と用いない場合の影響を確認した。

■コア(3箇所)の塩化物イオン濃度及び量測定結果

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

表7 コアの塩化物イオン濃度及び量測定値(干満帯:3箇所)

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-2u 4-J-①	%	0.44	0.31	0.28	0.24	0.16	0.12
	kg/m ³	9.55	6.78	6.12	5.21	3.41	2.49
SP-ci-2u 4-J-②	%	0.46	0.33	0.23	0.16	0.13	0.08
	kg/m ³	9.94	7.06	4.88	3.55	2.78	1.75
SP-ci-2u 4	%	0.38	0.30	0.24	0.16	0.13	0.08
	kg/m ³	8.34	6.56	5.29	3.52	2.74	1.83
平均値	%	0.43	0.31	0.25	0.19	0.14	0.09
	kg/m ³	9.28	6.80	5.43	4.09	2.98	2.02

■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-2u-4-J-①		SP-ci-2u-4-J-②		SP-ci-2u-4		3本コア平均※1	
運転開始後 経過年数	鉄筋の 腐食減量 ($\times 10^3 \text{g/cm}^2$)	運転開始後 経過年数	鉄筋の 腐食減量 ($\times 10^3 \text{g/cm}^2$)	運転開始後 経過年数	鉄筋の 腐食減量 ($\times 10^3 \text{g/cm}^2$)	運転開始後 経過年数	鉄筋の 腐食減量 ($\times 10^3 \text{g/cm}^2$)
32	6.2	32	5.7	32	5.7	32	5.9
33	6.4	33	5.9	33	5.9	33	6.1
34	6.7	34	6.1	34	6.1	34	6.3
35	6.9	35	6.3	35	6.3	35	6.5
36	7.1	36	6.5	36	6.5	36	6.7
37	7.4	37	6.7	37	6.8	37	7.0
38	7.6	38	6.9	38	7.0	38	7.2
39	7.9	39	7.1	39	7.2	39	7.4
40	8.1	40	7.3	40	7.4	40	7.6
41	8.4	41	7.5	41	7.6	41	7.8
42	8.6	42	7.8	42	7.8	42	8.1

55	12.1	55	10.7	55	10.8	55	11.2
56	12.3	56	11.0	56	11.0	56	11.4
57	12.6	57	11.2	57	11.3	57	11.7
58	12.9	58	11.4	58	11.5	58	12.0
59	13.2	59	11.7	59	11.8	59	12.2
60	13.4	60	11.9	60	12.0	60	12.5
61	13.7	61	12.2	61	12.3	61	12.7
62	14.0	62	12.4	62	12.5	62	13.0
63	14.3	63	12.7	63	12.7	63	13.2
64	14.6	64	12.9	64	13.0	64	13.5
65	14.9	65	13.2	65	13.3	65	13.8

270	86.2	289	86.5	291	86.3		
271	86.6	290	86.8	292	86.7		
272	87.0	291	87.2	293	87.1		
273	87.3	292	87.6	294	87.4		
274	87.7	293	87.9	295	87.8		
275※2	88.1	294※3	88.3	296※2	88.2		
276	88.5	295	88.7	297	88.5		
277	88.9	296	89.0	298	88.9		
278	89.2	297	89.4	299	89.2		
279	89.6	298	89.8	300	89.6		
280	90.0	299	90.2	301	90.0		

□: 技術評価書に記載の値

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

※2: かぶりコンクリートにひび割れが発生する時点

表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-2u-4-J-①		SP-ci-2u-4-J-②		SP-ci-2u-4		3本コア平均※1	
運転開始後 経過年数	鉄筋の 腐食減量 (×10 ³ g/m ²)	運転開始後 経過年数	鉄筋の 腐食減量 (×10 ³ g/m ²)	運転開始後 経過年数	鉄筋の 腐食減量 (×10 ³ g/m ²)	運転開始後 経過年数	鉄筋の 腐食減量 (×10 ³ g/m ²)
32	6.2	32	5.7	32	5.7	32	5.9
33	6.4	33	5.9	33	5.9	33	6.1
34	6.7	34	6.1	34	6.2	34	6.3
35	6.9	35	6.3	35	6.4	35	6.5
36	7.1	36	6.5	36	6.6	36	6.7
37	7.4	37	6.7	37	6.8	37	7.0
38	7.6	38	6.9	38	7.0	38	7.2
39	7.9	39	7.1	39	7.2	39	7.4
40	8.1	40	7.3	40	7.4	40	7.6
41	8.4	41	7.5	41	7.6	41	7.9
42	8.6	42	7.8	42	7.9	42	8.1

55	12.1	55	10.7	55	10.8	55	11.2
56	12.3	56	11.0	56	11.1	56	11.5
57	12.6	57	11.2	57	11.3	57	11.7
58	12.9	58	11.4	58	11.6	58	12.0
59	13.2	59	11.7	59	11.8	59	12.2
60	13.5	60	11.9	60	12.0	60	12.5
61	13.7	61	12.2	61	12.3	61	12.7
62	14.0	62	12.4	62	12.5	62	13.0
63	14.3	63	12.7	63	12.8	63	13.3
64	14.6	64	12.9	64	13.0	64	13.5
65	14.9	65	13.2	65	13.3	65	13.8

268	86.3	286	86.4	295	86.6		
269	86.7	287	86.8	296	86.9		
270	87.1	288	87.1	297	87.3		
271	87.5	289	87.5	298	87.6		
272	87.8	290	87.9	299	88.0		
273※2	88.2	291※2	88.3	300※2	88.4		
274	88.6	292	88.7	301	88.7		
275	89.0	293	89.0	302	89.1		
276	89.4	294	89.4	303	89.4		
277	89.8	295	89.8	304	89.8		
278	90.2	296	90.2	305	90.1		

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

※2：かぶりコンクリートにひび割れが発生する時点

③海中帯について

海中帯は、常に海水に浸かっている状況下であるが、土木学会規準(案)を参考に、中性化の作用が考えられる領域の『0～20mmの塩化物イオン量のデータ』を用いる場合と用いない場合の影響を確認した。

■コア（3箇所）の塩化物イオン濃度及び量測定結果

塩化物イオンの測定結果を表10に測定結果を示す。なお測定結果（水色）が構造物表面から深さ1cmの領域を含むデータ（0～20mm）である。

表10 コアの塩化物イオン濃度及び量測定値（海中帯：3箇所）

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-2u- 1	%	0.46	0.30	0.13	0.06	0.05	0.05
	kg/m ³	9.80	6.44	2.73	1.26	1.11	1.10
SP-ci-2u- 2	%	0.29	0.32	0.21	0.18	0.12	0.12
	kg/m ³	6.47	7.13	4.74	3.95	2.59	2.65
SP-ci-2u- 3	%	0.29	0.30	0.22	0.15	0.10	0.08
	kg/m ³	6.48	6.54	4.95	3.33	2.21	1.79
平均値	%	0.35	0.31	0.19	0.13	0.09	0.08
	kg/m ³	7.58	6.70	4.14	2.85	1.97	1.85

■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-2u-1		SP-ci-2u-2		SP-ci-2u-3		3本コア平均 ^{※1}	
運転開始後 経過年数	鉄筋の 腐食減量 ($\times 10^3 \text{g/cm}^2$)	運転開始後 経過年数	鉄筋の 腐食減量 ($\times 10^3 \text{g/cm}^2$)	運転開始後 経過年数	鉄筋の 腐食減量 ($\times 10^3 \text{g/cm}^2$)	運転開始後 経過年数	鉄筋の 腐食減量 ($\times 10^3 \text{g/cm}^2$)
32	0.5	32	0.6	32	0.5	32	0.5
33	0.5	33	0.7	33	0.5	33	0.6
34	0.5	34	0.7	34	0.5	34	0.6
35	0.5	35	0.7	35	0.6	35	0.6
36	0.6	36	0.8	36	0.6	36	0.6
37	0.6	37	0.8	37	0.6	37	0.7
38	0.6	38	0.9	38	0.6	38	0.7
39	0.7	39	0.9	39	0.7	39	0.8
40	0.7	40	0.9	40	0.7	40	0.8
41	0.7	41	1.0	41	0.7	41	0.8
42	0.8	42	1.0	42	0.8	42	0.9

55	1.3	55	1.6	55	1.3	55	1.4
56	1.3	56	1.7	56	1.3	56	1.5
57	1.4	57	1.7	57	1.4	57	1.5
58	1.4	58	1.8	58	1.4	58	1.6
59	1.5	59	1.8	59	1.5	59	1.6
60	1.5	60	1.9	60	1.5	60	1.6
61	1.6	61	1.9	61	1.6	61	1.7
62	1.6	62	2.0	62	1.6	62	1.7
63	1.7	63	2.1	63	1.6	63	1.8
64	1.7	64	2.1	64	1.7	64	1.8
65	1.8	65	2.2	65	1.7	65	1.9

838	89.4	1021	84.1	1021	84.0		
839	89.6	1022	84.2	1022	84.1		
840	89.7	1023	84.2	1023	84.2		
841	89.8	1024	84.3	1024	84.3		
842	90.0	1025	84.4	1025	84.4		
843 ^{※2}	90.1	1026 ^{※2}	84.5	1026 ^{※2}	84.5		
844	90.2	1027	84.6	1027	84.6		
845	90.4	1028	84.7	1028	84.7		
846	90.5	1029	84.8	1029	84.8		
847	90.6	1030	84.9	1030	84.9		
848	90.8	1031	85.0	1031	85.0		

□: 技術評価書に記載の値

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

※2: かぶりコンクリートにひび割れが発生する時点

表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-2u-1		SP-ci-2u-2		SP-ci-2u-3		3本コア平均 ^{※1}	
運転開始後 経過年数	鉄筋の 腐食減量 ($\times 10^3 \mu\text{g}/\text{cm}^2$)	運転開始後 経過年数	鉄筋の 腐食減量 ($\times 10^3 \mu\text{g}/\text{cm}^2$)	運転開始後 経過年数	鉄筋の 腐食減量 ($\times 10^3 \mu\text{g}/\text{cm}^2$)	運転開始後 経過年数	鉄筋の 腐食減量 ($\times 10^3 \mu\text{g}/\text{cm}^2$)
32	0.4	32	0.7	32	0.5	32	0.5
33	0.5	33	0.7	33	0.5	33	0.6
34	0.5	34	0.8	34	0.6	34	0.6
35	0.5	35	0.8	35	0.6	35	0.6
36	0.5	36	0.8	36	0.6	36	0.7
37	0.6	37	0.9	37	0.7	37	0.7
38	0.6	38	0.9	38	0.7	38	0.7
39	0.6	39	1.0	39	0.7	39	0.8
40	0.7	40	1.0	40	0.8	40	0.8
41	0.7	41	1.0	41	0.8	41	0.8
42	0.7	42	1.1	42	0.8	42	0.9

55	1.3	55	1.7	55	1.3	55	1.4
56	1.3	56	1.7	56	1.4	56	1.5
57	1.4	57	1.8	57	1.4	57	1.5
58	1.4	58	1.8	58	1.5	58	1.6
59	1.5	59	1.9	59	1.5	59	1.6
60	1.5	60	1.9	60	1.5	60	1.7
61	1.6	61	2.0	61	1.6	61	1.7
62	1.6	62	2.0	62	1.6	62	1.8
63	1.7	63	2.1	63	1.7	63	1.8
64	1.7	64	2.1	64	1.7	64	1.9
65	1.8	65	2.2	65	1.8	65	1.9

747	89.3	1097	84.1	1117	84.0		
748	89.4	1098	84.1	1118	84.1		
749	89.6	1099	84.2	1119	84.2		
750	89.8	1100	84.3	1120	84.3		
751	89.9	1101	84.4	1121	84.4		
752 ^{※2}	90.1	1102 ^{※2}	84.5	1122 ^{※2}	84.5		
753	90.2	1103	84.6	1123	84.6		
754	90.4	1104	84.7	1124	84.6		
755	90.5	1105	84.7	1125	84.7		
756	90.7	1106	84.8	1126	84.8		
757	90.8	1107	84.9	1127	84.9		

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

※2：かぶりコンクリートにひび割れが発生する時点