

玄海原子力発電所3号炉 高経年化技術評価に係るヒアリング
コメント反映整理表<コンクリート構造物>

2023年8月15日 九州電力㈱

No	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	2023年6月19日	補足説明資料 (コンクリート構造物)	1-2	別紙1の定期点検一覧表について、設備箇所、点検事項、点検頻度、点検方法等の詳細を記載すること。	玄海原子力発電所 土木建築業務要領に基づき、別紙1の定期点検一覧表の記載を充実した。 [補足説明資料 別紙1]	7月25日	7月25日
2	2023年6月19日	補足説明資料 (コンクリート構造物)	12-7 12-8 12-9 12-11	図1について中性化深さ+1cm以外の領域においてデータを棄却している試料について、棄却判断の理由を記載すること。	土木学会規準(案)※1に従い、中性化深さ+1cm以内の棄却のほか、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)、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じ値となり適正な回帰分析が難しいデータ(SP-ci-3u-5、SP-ci-3u-7)についても棄却している。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(SP-ci-3u-3)についても棄却している。 以上の内容を補足説明資料の別紙12に追記した。 ※1 コンクリート委員会・基準関連小委員会 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-G573-2003)」 [コンクリート構造物及び鉄骨構造物 補足説明資料 別紙12]	8月15日	8月15日

玄海原子力発電所3号炉
高経年化技術評価
(コンクリート構造物及び鉄骨構造物)

補足説明資料

2023年8月 日

九州電力株式会社

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_{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)	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: 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	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)	16.4	19.4	19.4*1	気中帯: 気象庁 (平均) の観測値 (1991年~2021年の28か年平均) 干満帯・海中帯: 発電所構内の海水温度の観測値 (2012年~2021年の10か年平均)	
RH: 相対湿度 (%)	85	100	100*2	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*3	気中帯: 理科年表 干満帯: 別紙 11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: 純り混ぜ水の塩分濃度 (%)	0.10~0.57	0.09~1.17	0.07~0.74	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 ⁻⁴ g/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 ⁻⁴ g/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 ⁻⁴ g/cm ²)	86.4	90.1	87.0		

- (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) 森永式により、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
- * 1 : 森永式の計算結果 (腐食速度) が負になる場合は、標準条件下 (温度 15°C、湿度 69%、酸素濃度 20%) の数値を用いる

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

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

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

$$q_2 = 2.59 - 0.05T - 6.89H - 22.87O - 0.99N + 0.14TH + 0.511O + 0.01TN + 60.811O + 3.36HN + 7.32ON$$

$$q_2' = 0.56528 + 1.4304N$$

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

- 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: 純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
- 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）（JSCE-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

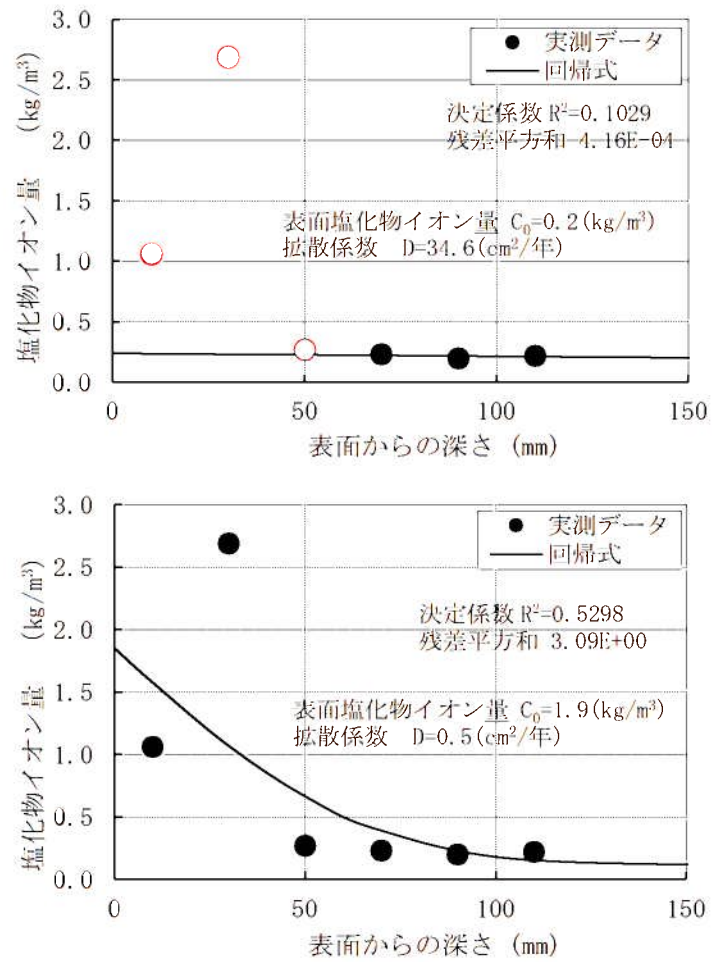


図 1 (1/9) 取水構造物気中帯 (SP-ci-3u-1) の回帰分析結果
 (上: 中性化考慮あり、下: 中性化考慮なし) [○データを棄却]

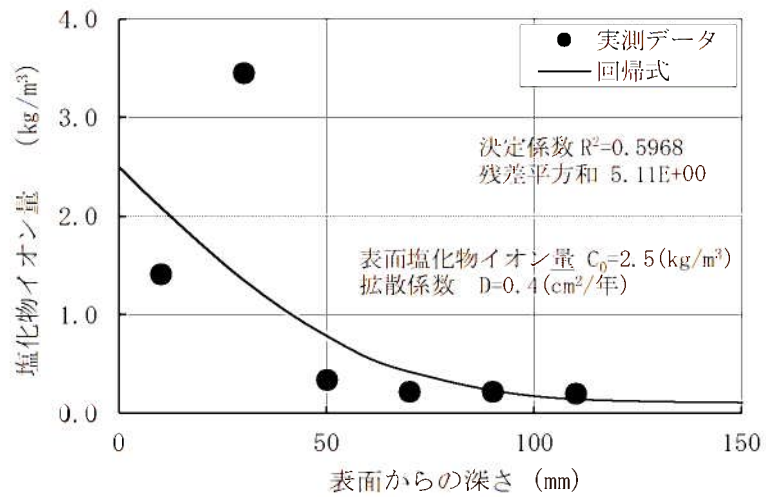
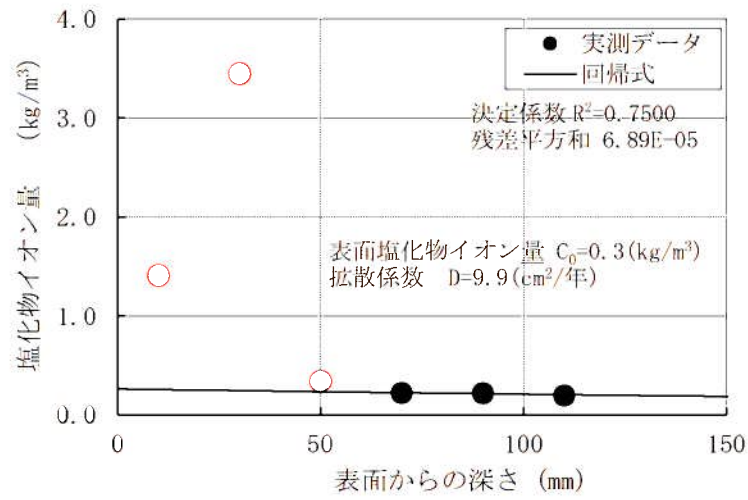


図 1 (2/9) 取水構造物気中帯 (SP-ci-3u-2) の回帰分析結果
(上：中性化考慮あり、下：中性化考慮なし) [○データを棄却]

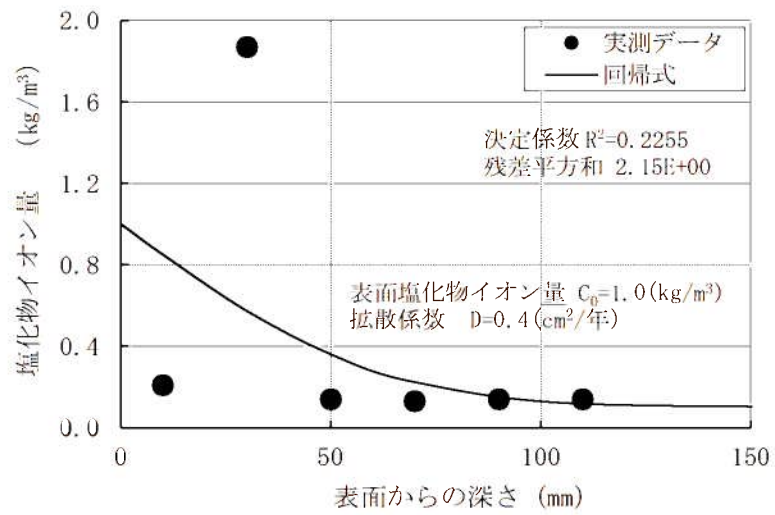
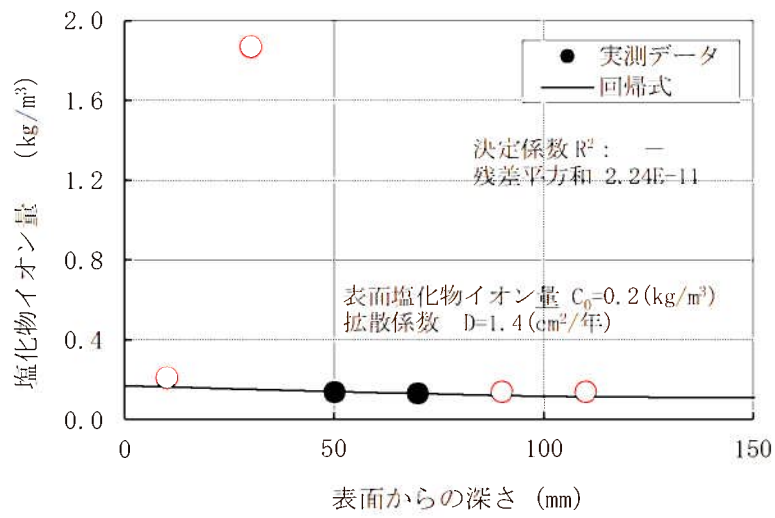


図 1 (3/9) 取水構造物気中帯 (SP-ci-3u-3) の回帰分析結果 (上: 中性化考慮あり、下: 中性化考慮なし) [○データを棄却]

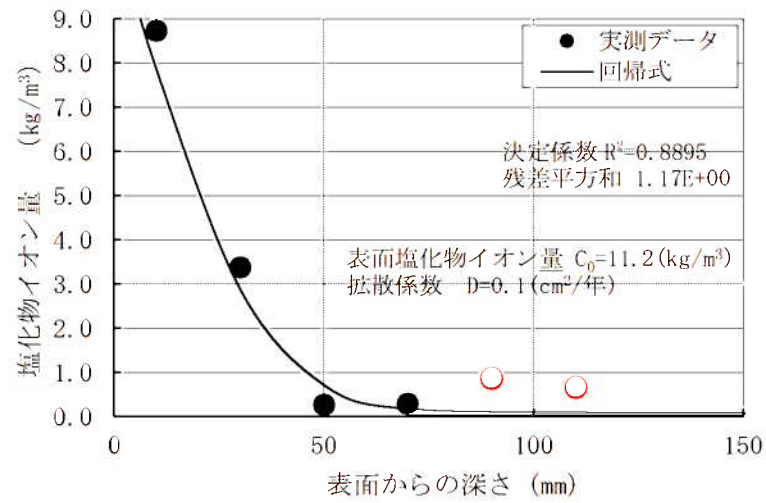
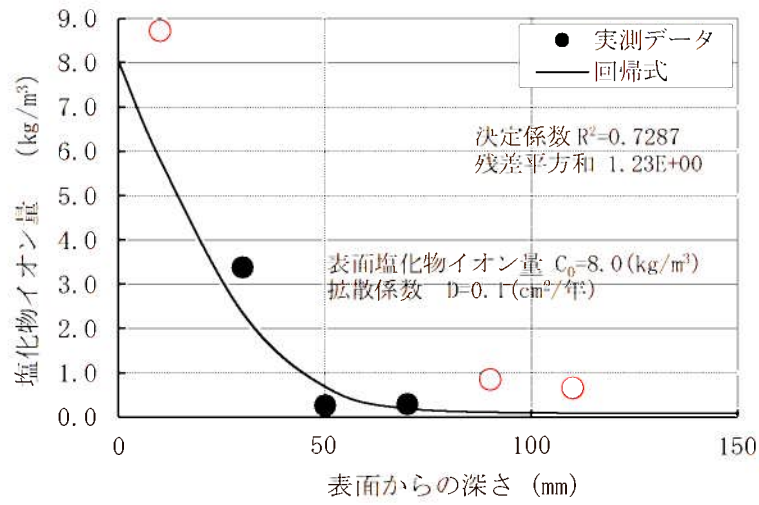


図 1 (4/9) 取水構造物干満帯 (SP-ci-3u-4) の回帰分析結果
(上: 中性化考慮あり、下: 中性化考慮なし) [○データを棄却]

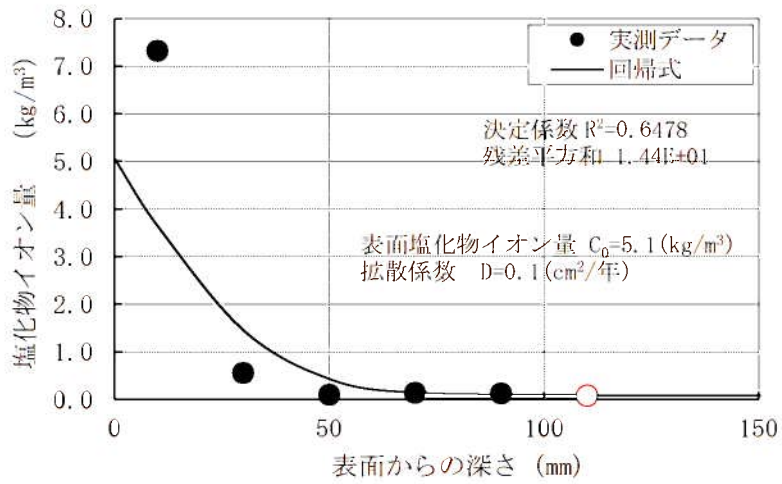
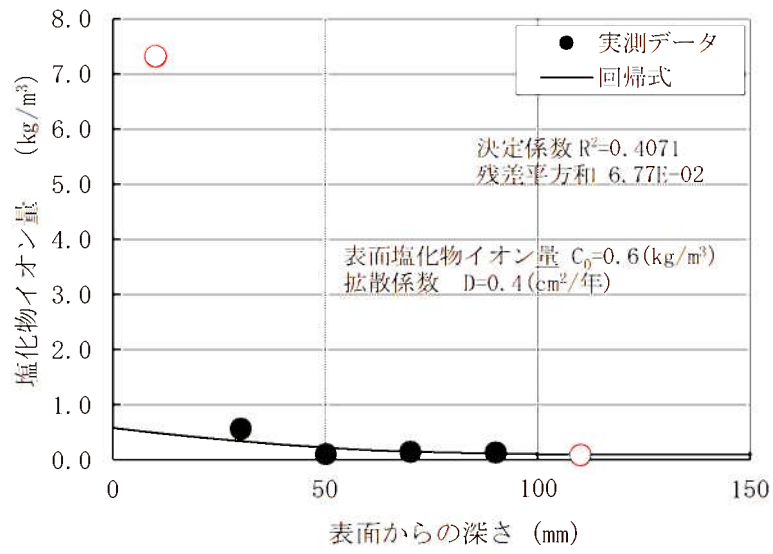


図 1 (5/9) 取水構造物干満帯 (SP-ci-3u-5) の回帰分析結果
(上: 中性化考慮あり、下: 中性化考慮なし) [○データを棄却]

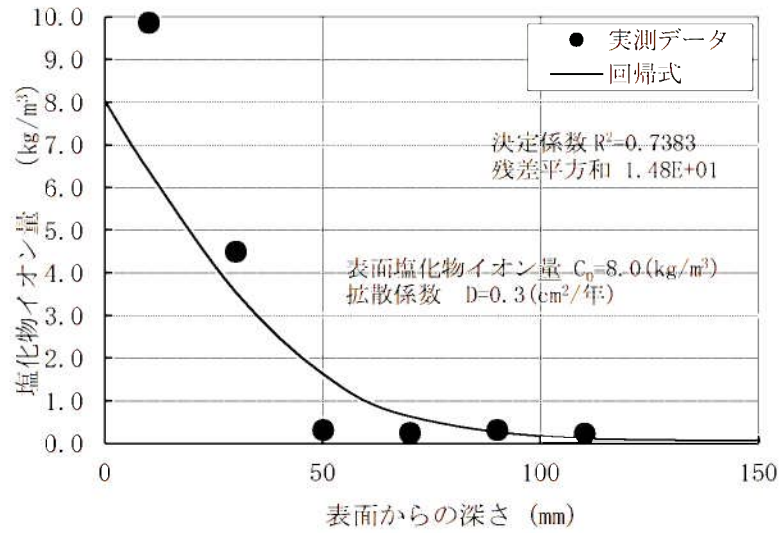
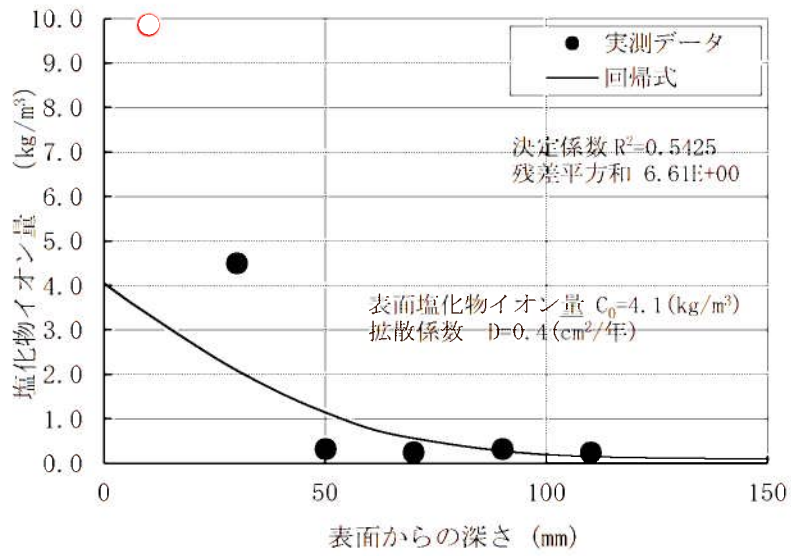


図 1 (6/9) 取水構造物干満帯 (SP-ci-3u-6) の回帰分析結果
(上：中性化考慮あり、下：中性化考慮なし) [○データを棄却]

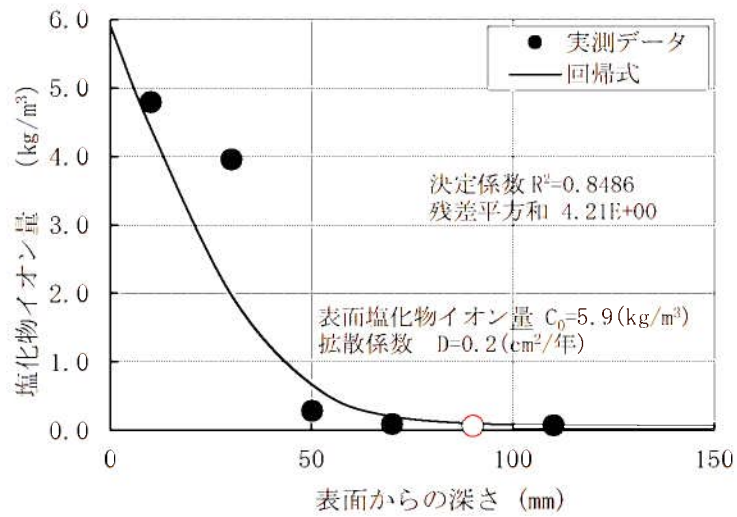
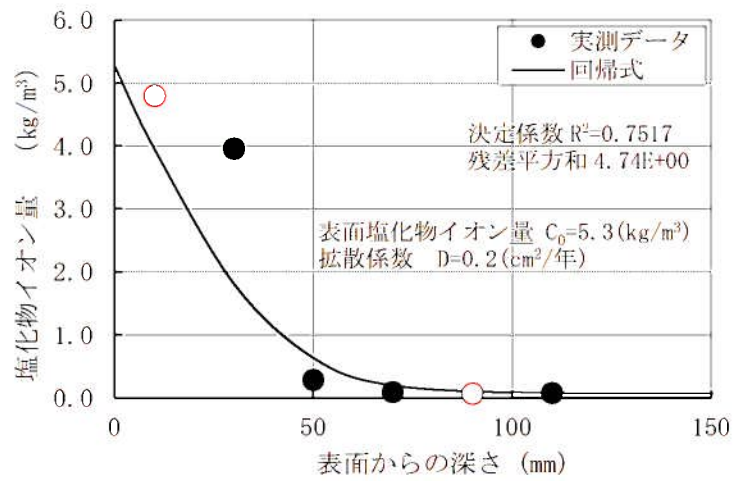


図 1 (7/9) 取水構造物海中帯 (SP-ci-3u-7) の回帰分析結果
(上: 中性化考慮あり、下: 中性化考慮なし) [○データを棄却]

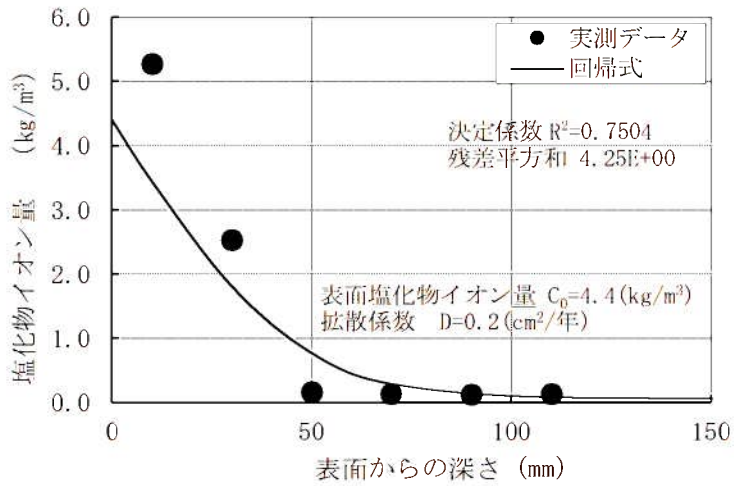
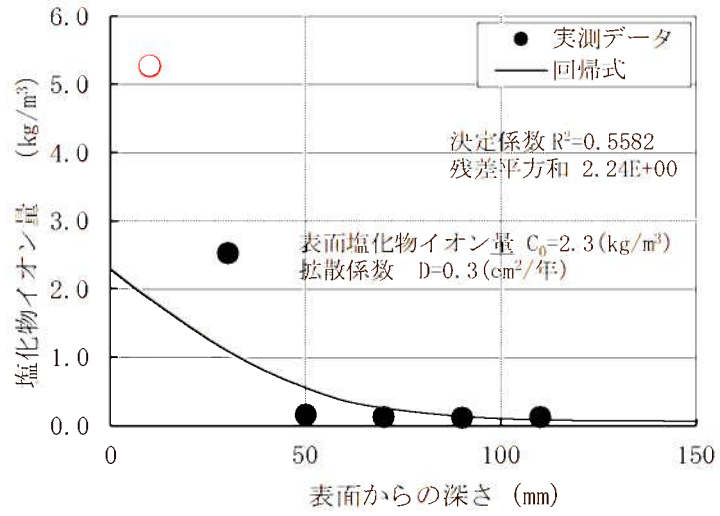


図 1 (8/9) 取水構造物海中帯 (SP-ci-3u-8) の回帰分析結果
(上: 中性化考慮あり、下: 中性化考慮なし) [○データを棄却]

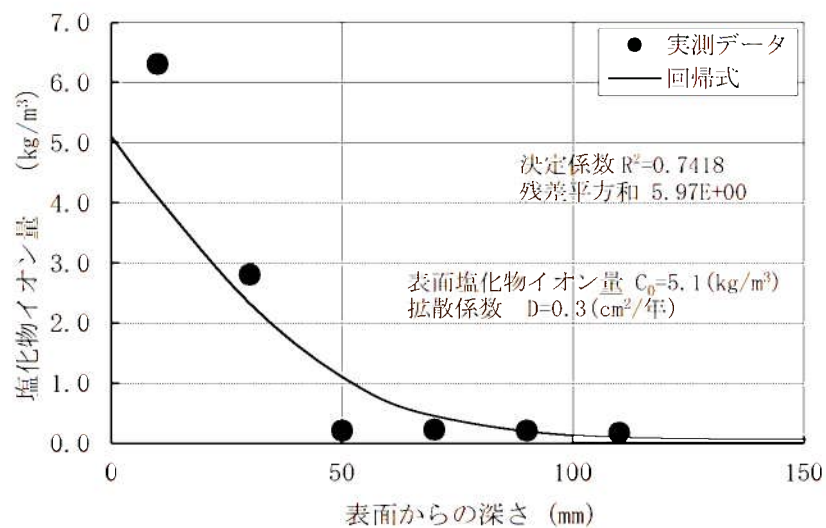
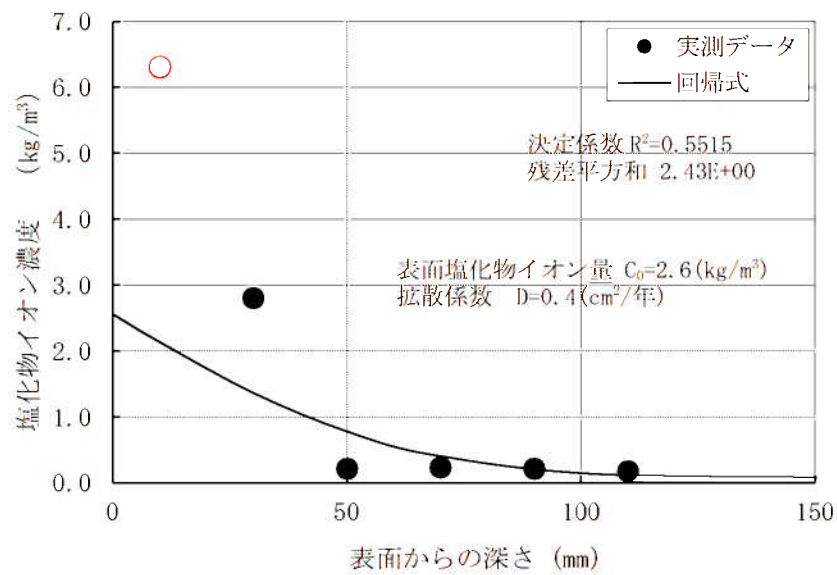


図 1 (9/9) 取水構造物海中帯 (SP-ci-3u-9) の回帰分析結果
(上: 中性化考慮あり、下: 中性化考慮なし) [○データを棄却]

(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 ($\times 10^{-4}$ 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 (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 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 ($\times 10^{-2}g/cm^2$)	運転開始後 経過年数	鉄筋の 腐食減量 ($\times 10^{-2}g/cm^2$)	運転開始後 経過年数	鉄筋の 腐食減量 ($\times 10^{-2}g/cm^2$)	運転開始後 経過年数	鉄筋の 腐食減量 ($\times 10^{-2}g/cm^2$)
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 ($\times 10^{-2}g/cm^2$)	運転開始後 経過年数	鉄筋の 腐食減量 ($\times 10^{-2}g/cm^2$)	運転開始後 経過年数	鉄筋の 腐食減量 ($\times 10^{-2}g/cm^2$)	運転開始後 経過年数	鉄筋の 腐食減量 ($\times 10^{-2}g/cm^2$)
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 ($\times 10^{-2}g/cm^2$)	運転開始後 経過年数	鉄筋の 腐食減量 ($\times 10^{-2}g/cm^2$)	運転開始後 経過年数	鉄筋の 腐食減量 ($\times 10^{-2}g/cm^2$)	運転開始後 経過年数	鉄筋の 腐食減量 ($\times 10^{-2}g/cm^2$)
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		

□ : 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