

島根原子力発電所2号炉 審査資料	
資料番号	PLM-03-2
提出年月日	平成30年8月1日

島根原子力発電所2号炉 審査会合における指摘事項の回答 (コンクリートおよび鉄骨構造物)

平成30年8月1日
中国電力株式会社

本資料のうち、枠囲みの内容は機密
に係る事項のため公開できません。

Energia

島根原子力発電所2号炉 審査会合における指摘事項の回答一覧表

No.	指摘事項	回答
<p>13-5 コンクリート (平成30年7月4日 第13回審査会合)</p>	<p>凍結融解について、経年劣化要因の整理にあたっての考え方を実施手順を踏まえて説明すること。また、凍結融解を想定不要と判断した根拠についても示すこと。</p>	<p>P2～P9</p>
<p>13-6 コンクリート (平成30年7月4日 第13回審査会合)</p>	<p>(排気筒の)疲労評価について、詳細を説明すること。</p>	<p>8月下旬 別途回答</p>
<p>13-7 コンクリート (平成30年7月4日 第13回審査会合)</p>	<p>熱による遮へい能力低下の評価に用いた温度分布解析の内容について詳細を説明すること。</p>	<p>資料 PLM-03 改03 (補足説明資料 別紙11)</p>
<p>13-8 コンクリート (平成30年7月4日 第13回審査会合)</p>	<p>塩分浸透における鉄筋の腐食減量の算出過程について詳細を説明すること。</p>	<p>P10～P14</p>

13-5 凍結融解によるコンクリートの強度低下の評価(1/8)

1. 想定される経年劣化事象の抽出

島根2号炉 高経年化技術評価のうち、コンクリートおよび鉄骨構造物において、凍結融解によるコンクリートの強度低下については、日本建築学会「建築工事標準仕様書・同解説 JASS5 鉄筋コンクリート工事(2015)」(以下、「JASS5」という)により、凍結融解の危険性がない地域であることから想定不要としていたが、「高経年化対策実施基準 2008年版」附属書C(規定)「C.8.2.5 経年劣化要因の抽出」に基づき、想定される経年劣化事象として改めて抽出した。

表 C.8.2-評価すべき経年劣化要因

経年劣化事象	評価すべき経年劣化要因
コンクリートの強度低下	① 熱
	② 放射線照射
	③ 中性化
	④ 塩分浸透
	⑤ アルカリ骨材反応
	⑥ 機械振動
	⑦ 凍結融解
コンクリートの遮へい能力低下	① 熱
鉄骨の強度低下	① 腐食
	② 風などによる疲労

13-5 凍結融解によるコンクリートの強度低下の評価(2/8)

コンクリートおよび鉄骨構造物の経年劣化事象, 劣化要因に, 凍結融解によるコンクリートの強度低下を, 下表のとおり追加する。

コンクリートおよび鉄骨構造物の経年劣化事象および劣化要因(1/3)

構造物	経年劣化事象	劣化要因	
コンクリート	強度低下	熱	コンクリートが熱を受けると, 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ると, 照射量によっては, コンクリートの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, 表面から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, 鉄筋を保護する能力が失われると, 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, 腐食に伴う体積膨張によりコンクリートにひび割れやはく離が生じ, 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。

13-5 凍結融解によるコンクリートの強度低下の評価(3/8)

コンクリートおよび鉄骨構造物の経年劣化事象および劣化要因(2/3)

構造物	経年劣化事象	劣化要因	
コンクリート	強度低下	塩分浸透	<p>コンクリート中に塩化物イオンが浸透し、鉄筋位置まで達すると、鉄筋の腐食が徐々に進行し、鉄筋の膨張によりコンクリートにひび割れやはく離が生じ、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。</p>
		アルカリ骨材反応	<p>アルカリ骨材反応は、コンクリート中に存在するアルカリ溶液と、骨材中に含まれる反応性のシリカ鉱物の化学反応である。このとき生成されたアルカリ・シリカゲルが周囲の水を吸収し膨張すると、コンクリート表面にひび割れが生じ、コンクリート構造物としての健全性が損なわれる可能性がある。</p>
		機械振動	<p>コンクリート構造物は、長期間にわたって機械振動による繰返し荷重を受けるとひび割れが発生し、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。</p>
		凍結融解	<p>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。</p>
	遮へい能力低下	熱	<p>コンクリートは、周辺環境からの伝達熱および放射線照射に起因するコンクリート内部の温度上昇により、コンクリート中の水分が逸散し、放射線に対する遮へい能力が低下する可能性がある。</p>

13-5 凍結融解によるコンクリートの強度低下の評価(4/8)

コンクリートおよび鉄骨構造物の経年劣化事象および劣化要因(3/3)

構造物	経年劣化事象	劣化要因	
鉄骨	強度低下	腐食	一般的に、鋼材は大気中の酸素および水分と化学反応を起こして腐食する。腐食は、海塩粒子等により促進され、進行すると鋼材の断面欠損に至り、鉄骨構造物としての健全性が損なわれる可能性がある。
		金属疲労	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。
	制震装置強度低下	腐食	一般的に、鋼材は大気中の酸素および水分と化学反応を起こして腐食する。腐食は、海塩粒子等により促進され、進行すると制震装置(粘性ダンパ)の断面欠損に至り、制震装置(粘性ダンパ)の強度低下につながる可能性がある。
		摩耗	制震装置(粘性ダンパ)の摺動部に長期間の使用により摩耗が発生すると、動作不良に至り、制震装置(粘性ダンパ)の強度低下につながる可能性がある。

2. 高経年化対策上着目すべき経年劣化事象の抽出

改めて抽出した凍結融解によるコンクリートの強度低下については、凍結融解の危険性がない地域であることから、高経年化対策上着目すべき経年劣化事象ではない事象(②日常劣化管理事象以外)と評価した。凍結融解の評価の詳細については次頁以降に示す。

②日常劣化管理事象以外: ▲

現在までの運転経験や使用条件から得られた材料試験データとの比較等により、今後も経年劣化の進展が考えられない、または進展傾向が極めて小さいと考えられる経年劣化事象

3. 凍結融解作用を受けるコンクリートの評価

(1) 評価の概要

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、凍害危険度が2以上の地域は、凍結融解を含む凍害を考慮する必要がある地域とある。

また、JASS5に示されている解説図26.1(凍害危険度の分布図)によると、島根2号炉の周辺地域は凍結融解の危険性がない地域に該当している。

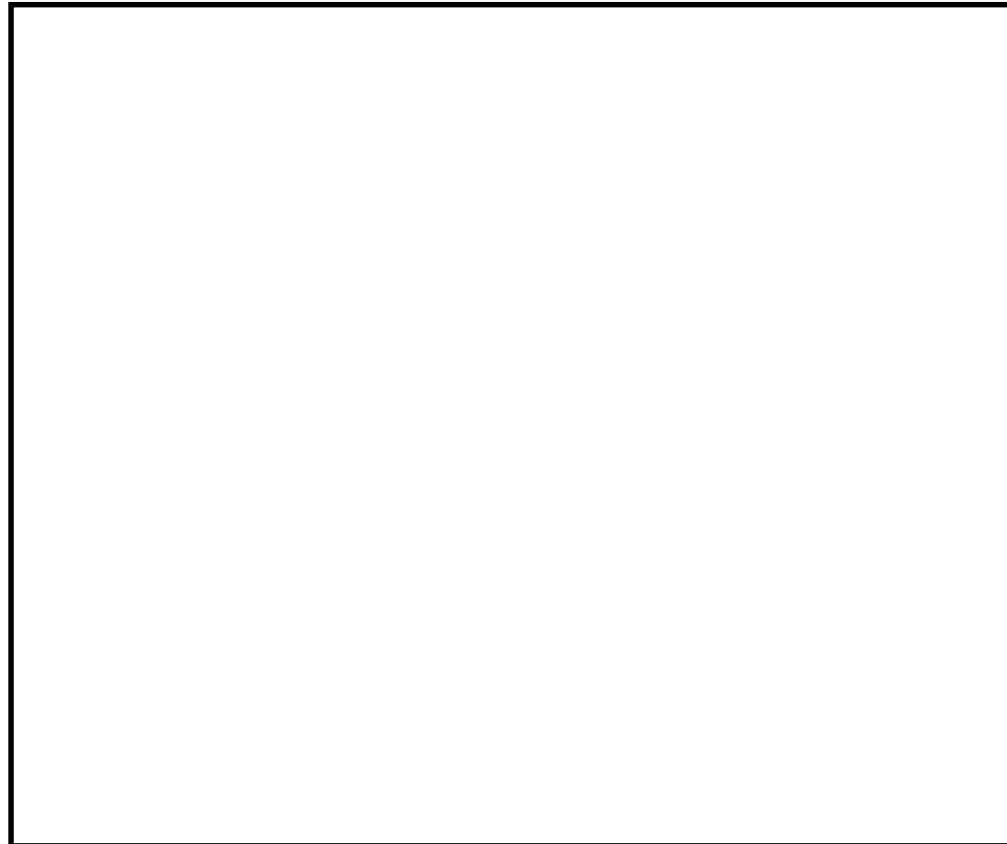


図 JASS5解説図26.1(凍害危険度の分布図)

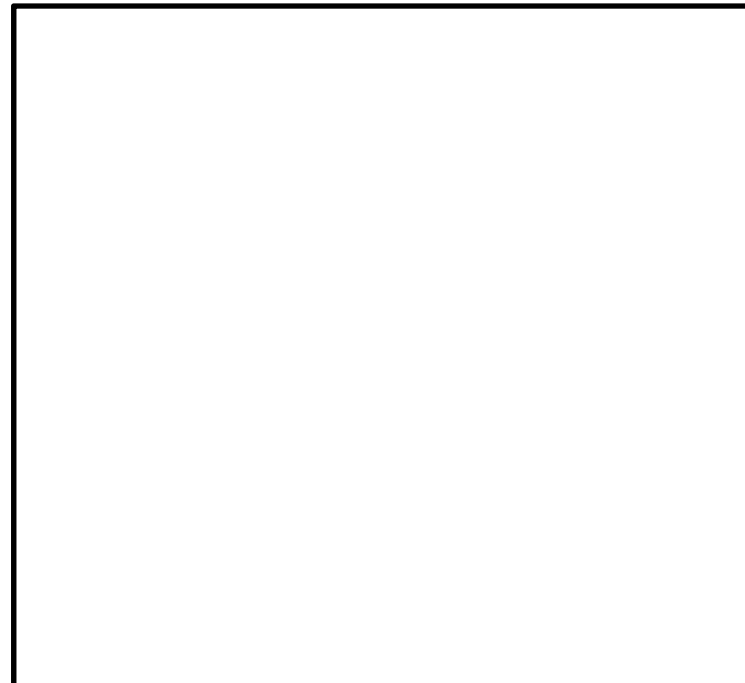
なお、凍害危険度の分布図にある凍害危険度は、気象資料を用いて外気温上の凍結融解作用の強さに日射等の影響と含水程度を考慮して算出したものであることから、気象資料から島根2号炉周辺地域の凍害危険度を確認した。

(2) 島根2号炉周辺地域の凍害危険度

JASS5「26節 凍結融解作用を受けるコンクリート」に、寒冷地に建設する建築物の激しい凍結融解作用を受ける部分に使用するコンクリートの仕様が示されている。

26節の適用にあたっては、解説に「凍結融解作用が激しくない場合、本節を適用する必要はない」とされ、同節の適用にあたっての目安が下表により示されている。

表 JASS5 26節適用の目安



13-5 凍結融解によるコンクリートの強度低下の評価(8/8)

最新の平滑平年値(1981~2010年の観測値)により, 島根2号炉の周辺地域である, 松江地方気象台の鹿島および松江の2地点の最低気温を確認すると, それぞれ0.4℃および0.5℃であった。

前表 JASS5 26節適用の目安によると, 新潟の最低気温 -0.7°C に対して, 凍害危険度は0である。これに対し, 島根2号炉の周辺地域である鹿島および松江の最低気温は0.4℃および0.5℃であり, 新潟よりも最低気温が高いことから, 凍害危険度は0となり, 凍結融解作用を受ける危険性はない地域と判断した。

なお, JASS5解説に「わが国の多くの地域で最低気温と凍結融解回数が対応している」ことから, 「凍結融解作用の温度条件の厳しさを最低気温によって表している」とされており, 最低気温から凍害危険度を確認することは妥当と考える。

13-8 塩分浸透における鉄筋の腐食減量の算出過程(1/5)

1. 健全性評価結果

島根2号炉 高経年化技術評価のうち、コンクリートおよび鉄骨構造物において、塩分浸透によるコンクリートの強度低下について、拡散方程式の同定にあたり一般的な最小二乗法により回帰分析を実施していたが、先行プラントの審査状況を踏まえて Levenberg-marquardt法(以下、LM法とする)により改めて回帰分析を実施した。

LM法により同定した拡散方程式から得られた塩分浸透における鉄筋の腐食減量を下表のとおり記載する。

運転開始後60年経過時点と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の比較

評価点		調査時期 (経過年数)	鉄筋位置での 塩化物イオン濃度 (%)	鉄筋の腐食減量 ($\times 10^{-4}$ g/cm ²)		
				調査時点	運転開始後60 年時点	かぶりコンクリート にひび割れが 発生する時点
取水 構造 物	気中帯	2016年 (27年)	0.015 (0.36)*	12.4	28.0	59.9
	干満帯	2016年 (27年)	0.020 (0.45)*	0.0	0.0	59.9
	海中帯	2016年 (27年)	0.015 (0.35)*	0.0	0.0	85.0

*: ()内は塩化物イオン量(kg/m³)

13-8 塩分浸透における鉄筋の腐食減量の算定過程(2/5)

2. 塩分浸透における鉄筋の腐食減量の算定過程

(1) 鉄筋の腐食減量の算定過程

LM法により回帰分析を実施した際の鉄筋の腐食減量(方法, 条件, パラメータ)を以下に示す。

	取水構造物			備考
	気中帯	干満帯	海中帯	
x : かぶり厚さ (mm)	40	40	70	
C : 鉄筋位置における塩化物体積量 (kg/m ³)	0.36 0.32	0.45 0.50	0.35 0.33	上段: 塩分浸透の測定結果 (調査時点の推定値) 下段: 鉄筋位置近傍における塩化物体積量試験結果
G_0 : コンクリート表面の塩化物体積量 (kg/m ³)	0.41	0.49	0.37	拡散方程式の G_0 と D を未知数として, 測定値の回帰分析を行った。Levenberg-marquardt 法により, $K/2$ 乗が最小となる G_0 を求めた。
D : コンクリート中の塩化物イオンの見かけ上の拡散係数 (cm ² /年)	10.89	41.96	197.23	拡散方程式の G_0 と D を未知数として, 測定値の回帰分析を行った。Levenberg-marquardt 法により, $K/2$ 乗が最小となる D を求めた。
C_l : 鉄筋位置における塩化物体積量 (推定値)	0.00~0.37	0.00~0.46	0.00~0.36	運転開始時から 60 年経過時点までの各年の推定値
x : かぶり厚さ (mm)	40	40	70	
d : 鉄筋径 (mm)	38	38	38	
W : 単位水量 (kg/m ³)	171	171	171	
W/C : 水セメント比 (比)	0.53	0.53	0.53	
N : 練り混ぜ水の塩分濃度 (%)	0.00~0.36	0.00~0.45	0.00~0.34	運転開始時から 60 年経過時点までの各年の推定値
T : 温度 (°C)	17.0	18.9	18.9	気中帯: 2016 年 7 月 30 日から 2017 年 7 月 29 日の期間で, 1 時間間隔で連続測定した結果の平均値 干満帯, 海中帯: 沿岸定点の海水温の調査結果
RH : 相対湿度 (%)	69.4	100	100	気中帯: 2016 年 7 月 30 日から 2017 年 7 月 29 日の期間で, 1 時間間隔で連続測定した結果の平均値 干満帯, 海中帯: 海水との接触により 100% (森永論文 ²⁾)
O : 酸素濃度 (比)	0.21	0.0062	0.0062	気中帯: 一般大気中の酸素濃度 (理科年表) 干満帯, 海中帯: 土木学会「原子力発電所屋外重要土木構造物の耐震性能調査指針・マニュアル (2005)」引用
q_t : 調査時点の鉄筋の腐食減量 ($\times 10^{-3}$ g/cm ²)	12.4	0.0	0.0	
q_t : 運転開始 60 年経過時点の鉄筋の腐食減量 ($\times 10^{-3}$ g/cm ²)	28.0	0.0	0.0	
Q_{α} : 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 ($\times 10^{-3}$ g/cm ²)	59.9	59.9	85.0	

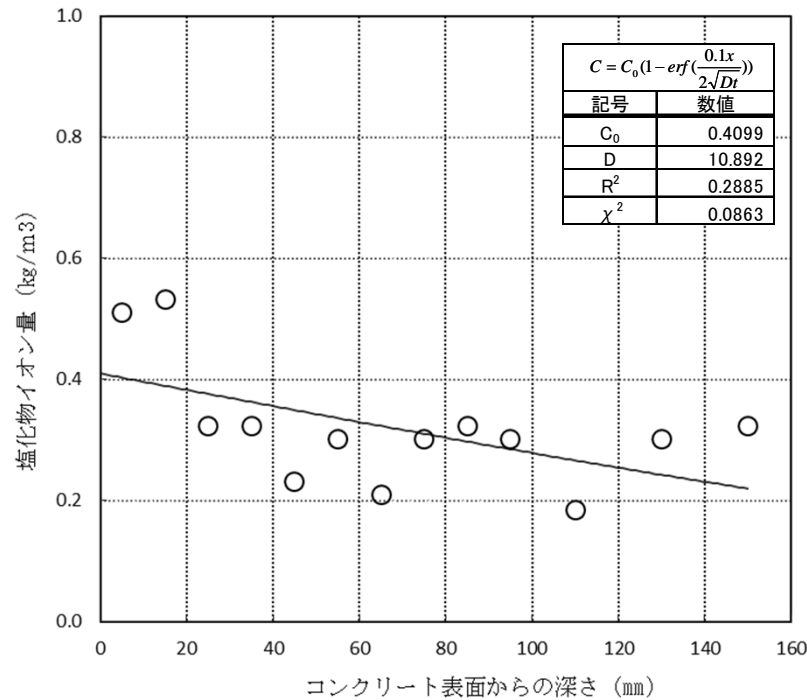
※森永他「腐食による鉄筋コンクリート構造物の寿命予測」-コンクリート工学論文集 (1990)

- : 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
- : 予測結果
- : 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
- : 推定結果

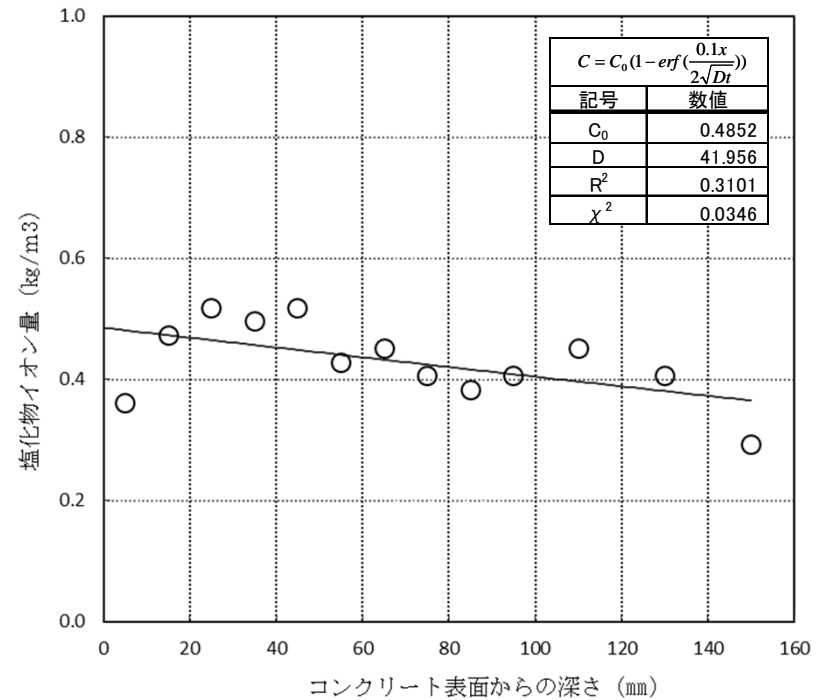
13-8 塩分浸透における鉄筋の腐食減量の算定過程(3/5)

2. 塩分浸透における鉄筋の腐食減量の算定過程 (2) 拡散方程式の回帰分析結果

(気中帯)



(干満帯)

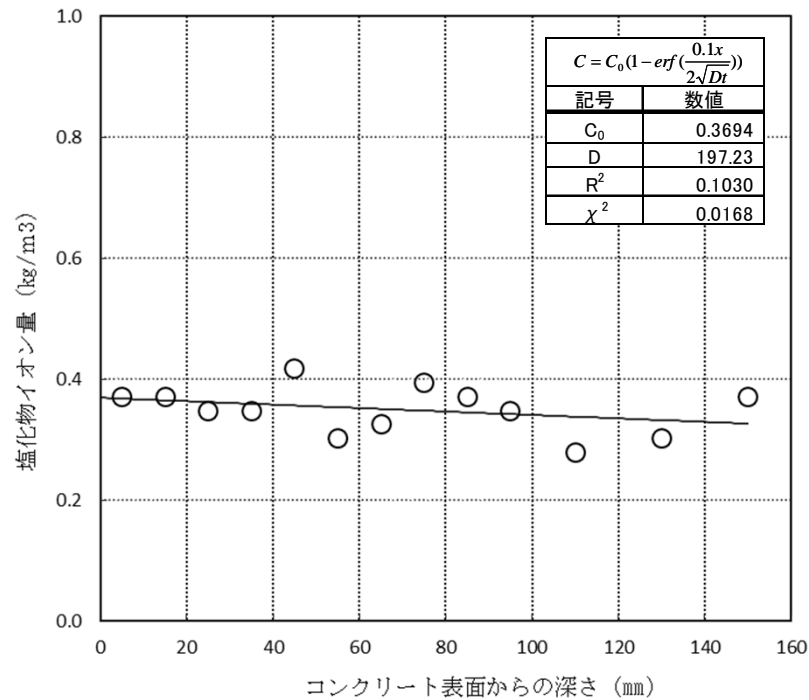


表の注記)
 C_0 : コンクリート表面の塩化物イオン量(kg/m³)
 D : コンクリート中の塩化物イオンの見かけの 拡散係数 (cm²/年)
 R^2 : 決定係数
 χ^2 : カイニ乗

13-8 塩分浸透における鉄筋の腐食減量の算定過程(4/5)

2. 塩分浸透における鉄筋の腐食減量の算定過程 (2) 拡散方程式の回帰分析結果

(海中帯)



表の注記)
 C_0 : コンクリート表面の塩化物イオン量 (kg/m³)
 D : コンクリート中の塩化物イオンの見かけの 拡散係数 (cm²/年)
 R^2 : 決定係数
 χ^2 : カイ二乗

13-8 塩分浸透における鉄筋の腐食減量の算定過程(5/5)

2. 塩分浸透における鉄筋の腐食減量の算定過程

(3) 調査時点, 運転開始後60年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前後5年の鉄筋の腐食減量

気中帯		干満帯		海中帯	
経過年数 (年)	Σq ($\times 10^{-4} \text{g/cm}^2$)	経過年数 (年)	Σq ($\times 10^{-4} \text{g/cm}^2$)	経過年数 (年)	Σq ($\times 10^{-4} \text{g/cm}^2$)
22	10.1	22	0.0	22	0.0
23	10.6	23	0.0	23	0.0
24	11.0	24	0.0	24	0.0
25	11.5	25	0.0	25	0.0
26	12.0	26	0.0	26	0.0
27	12.4	27	0.0	27	0.0
28	12.9	28	0.0	28	0.0
29	13.4	29	0.0	29	0.0
30	13.9	30	0.0	30	0.0
31	14.3	31	0.0	31	0.0
32	14.8	32	0.0	32	0.0
55	25.7	55	0.0	55	0.0
56	26.1	56	0.0	56	0.0
57	26.6	57	0.0	57	0.0
58	27.1	58	0.0	58	0.0
59	27.6	59	0.0	59	0.0
60	28.0	60	0.0	60	0.0
61	28.5	61	0.0	61	0.0
62	29.0	62	0.0	62	0.0
63	29.5	63	0.0	63	0.0
64	29.9	64	0.0	64	0.0
65	30.4	65	0.0	65	0.0
122	57.5	9995	0.0	9995	0.0
123	58.0	9996	0.0	9996	0.0
124	58.5	9997	0.0	9997	0.0
125	59.0	9998	0.0	9998	0.0
126	59.5	9999	0.0	9999	0.0
127	59.9	10000 ※	0.0	10000 ※	0.0
128	60.4	10001	0.0	10001	0.0
129	60.9	10002	0.0	10002	0.0
130	61.4	10003	0.0	10003	0.0
131	61.8	10004	0.0	10004	0.0
132	62.3	10005	0.0	10005	0.0

※上記の算定結果を踏まえると、干満帯および海中帯については、塩分浸透における鉄筋の腐食減量は10,000年経過時点においても0g/cm²であり、コンクリートにひび割れは発生しないものと考えられる。