

浜岡原子力発電所 4 号炉 審査資料	
資料番号	H4-PLM30(冷温)-07 改 2
提出年月日	令和 4 年 12 月 16 日

浜岡原子力発電所 4 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

本資料のうち、枠囲みの内容は営業  
秘密に属しますので公開できません

令和 4 年 12 月 16 日

中部電力株式会社

### 3.2 高経年化対策上着目すべき経年劣化事象の抽出

機能に影響を及ぼすことが否定できない経年劣化事象として、コンクリートの強度低下、遮へい能力低下及び鉄骨の強度低下が考えられ、これらを想定される経年劣化事象として選定する。

また、想定される経年劣化事象を引き起こす可能性がある劣化要因については、経年劣化メカニズムまとめ表[1]に記載のある劣化要因の中から、対象構造物の構造、材料、環境及び現在までの運転経験を考慮し想定の可否を整理する。想定される経年劣化事象及び劣化要因の整理結果を表5に示す。

表5 経年劣化事象及び劣化要因の整理結果(1/2)

コンクリート構造物

経年劣化事象	劣化要因及び整理結果		想定要否
強度低下	熱	コンクリートは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り、 <b>想定が必要と整理する。</b>	要
	放射線照射	コンクリートは中性子照射やガンマ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、乾燥に伴うひび割れ等により強度が低下する可能性があり、 <b>想定が必要と整理する。</b>	要
	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すると鉄筋周囲に生成されていた不動態被膜が失われ、コンクリート中の水分、酸素の作用により鉄筋は腐食し始める。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り、 <b>想定が必要と整理する。</b>	要
	塩分浸透	コンクリート中に塩化物イオンが浸透して鉄筋位置まで達すると鉄筋表面の不動態被膜が失われ、コンクリート中の水分、酸素の作用により鉄筋は腐食し始める。腐食が進行すると酸化生成物による体積膨張からコンクリートにひび割れや剥離が生じ、コンクリート構造物としての健全性が損なわれる可能性があり、 <b>想定が必要と整理する。</b>	要
	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り、 <b>想定が必要と整理する。</b>	要
	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り、 <b>想定が必要と整理する。</b>	要
	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り、 <b>想定が必要と整理する。</b>	要
	化学的侵食	地下水等に化学物質が含まれる場合、コンクリートが侵食を受け劣化する可能性がある。ただし、地下水による劣化評価（別紙10）より、化学的侵食が発生し、進展する可能性が低いと見られるため、 <b>想定不要と整理する。</b>	否
	酸性雨	酸性雨がコンクリート中に侵入するとセメントの主成分が分解され、強度が低下する可能性がある。ただし、対象構造物は基本的に防水層や塗膜等が施され、雨掛かりがないことや、雨水の滞留により雨水が長時間接触することはないため、 <b>想定不要と整理する。</b>	否
	乾燥収縮	コンクリート中の自由水の逸散に伴う乾燥により収縮が生じ、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。ただし、乾燥収縮によるひび割れは一般建築物における壁等の薄い部材において問題になる要因であることや、その影響が軽微であることから、 <b>想定不要と整理する。</b>	否
	日射	コンクリート表面の温度変動により、膨張及び収縮現象が生じることで強度が低下する可能性がある。ただし、日射による温度上昇は特に屋上において顕著であるが、対象構造物の屋上には基本的に防水層とその保護材が施されており、コンクリート躯体の温度上昇は抑制されるためその影響は軽微であり、 <b>想定不要と整理する。</b>	否
	風化	コンクリート中のセメント水和物が周囲の水（軟水）に溶解して組織が疎となることで、強度が低下する可能性がある。ただし、風化は軟水等の成分濃度の低い水が河川のように常に新しく供給されるような環境において進行する現象であり、対象構造物はこのような環境下にないため、 <b>想定不要と整理する。</b>	否
	たわみ	過荷重等により部材に変形やひび割れが発生し、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。ただし、設計時に想定した荷重を上回る重量機器等を設置する場合には都度、構造体や部材の健全性を確認するため、 <b>想定不要と整理する。</b>	否
遮へい能力低下	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、放射線に対する遮へい能力が低下する可能性があり、 <b>想定が必要と整理する。</b>	要

表5 経年劣化事象及び劣化要因の整理結果(2/2)

鉄骨構造物

経年劣化事象	劣化要因及び整理結果		想定要否
強度低下	腐食	一般的に、鋼材の腐食は大気中の酸素、水分と化学反応を起こして発生する。腐食は海塩粒子等により促進され、進行すると鉄骨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り、 <b>想定が必要と整理する。</b>	要
	金属疲労	鋼材は繰返し応力を受けると金属疲労を起こし疲労破壊に至る <b>ため</b> 鉄骨の強度低下につながる可能性があり、 <b>想定が必要と整理する。</b>	要
	摩耗	オイル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る <b>ため</b> オイルダンパの強度低下につながる可能性があり、 <b>想定が必要と整理する。</b>	要
	化学的腐食	薬品等の浸入により鉄部が発錆することで強度低下につながる可能性がある。ただし、対象構造物には塗装が施されており薬品等が侵入する可能性が低いことから、 <b>想定は不要と整理する。</b>	否
	酸性雨	酸性雨が直接鉄部に掛かると発錆が促進され、強度低下につながる可能性がある。ただし、対象構造物には塗装が施されており、雨掛かりがないことから、 <b>想定は不要と整理する。</b>	否

下記①、②に該当しない事象を高経年化対策上着目すべき経年劣化事象と判断する。抽出された高経年化対策上着目すべき経年劣化事象及び劣化要因を表6に示す。

表6 高経年化対策上着目すべき経年劣化事象及び劣化要因

構造物	経年劣化事象	劣化要因
コンクリート	強度低下	熱
		放射線照射
		中性化
		塩分浸透
		機械振動
	遮へい能力低下	熱

① 高経年化対策上着目すべき経年劣化事象ではない事象（日常劣化管理事象）

表7に示す経年劣化事象については、想定した劣化傾向等に基づき適切な保全活動を行っていることから、高経年化対策上着目すべき経年劣化事象ではない事象と判断する。なお、コンクリート及び鉄骨構造物の保全活動は、「点検計画（建築編）（運転）」及び「点検計画（土木編）（運転）」（以下、「点検計画」という。）に定めた点検方法により実施している。点検計画における点検項目及び管理基準を別紙1に示す。

また、日常劣化管理事象に関する点検及び補修の実績を表8に示す。

表7 日常劣化管理事象

構造物	経年劣化事象	劣化要因	理由
コンクリート	強度低下	アルカリ骨材反応	定期的な点検計画に基づく目視点検を行っており、アルカリ骨材反応に起因すると判断されるひび割れは確認されていない。 また、試験によりコンクリート構造物の健全性に影響を与えるような反応性がないことを確認している。試験結果を表9に示す。 今後も使用環境が急激に変化することはないことから、アルカリ骨材反応の進展傾向は極めて小さいと考えられる。
鉄骨	強度低下	腐食	定期的な点検計画に基づく目視点検を行っており、健全性が損なわれる可能性のある腐食は確認されていない。なお、鋼材の腐食に影響する塗膜の劣化が認められた場合には補修塗装を施し健全性を確保する。
		金属疲労	排気筒は、耐震裕度を向上させるための鉄塔支持化(オイルダンパ付)を2007年5月に完了している。鉄塔支持化後では、鉄塔を含む架構全体の固有周期から共振風速を算出すると62.5m/sとなり、浜岡原子力発電所での至近10年間の観測最大風速37.1m/s(10分間平均)と比較して、共振現象が発生する可能性は極めて小さく、今後も外筒の共振現象による疲労が大きく変化する要因があるとは考え難い。 また、定期的な点検計画に基づく目視点検を行っており、共振による疲労割れは確認されていない。
オイルダンパ	強度低下	腐食	定期的な点検計画に基づく目視点検を行っており、健全性が損なわれる可能性のある腐食は確認されていない。なお、鋼材の腐食に影響する塗膜の劣化が認められた場合には補修塗装を施し健全性を確保する。

表8 日常劣化管理事象に関する点検及び補修の実績

経年劣化事象	劣化要因	対象構造物	点検方法	点検頻度	点検結果	補修実績
コンクリートの強度低下	アルカリ骨材反応	コンクリート構造物全般	目視点検	1回/年	アルカリ骨材反応に起因すると判断されるひび割れは確認されていない。	補修実績なし
鉄骨の強度低下	腐食	原子炉建屋 タービン建屋 排気筒(オイルダンパ含む)	目視点検	1回/年	健全性が損なわれる可能性のある腐食は確認されていない。	排気筒は塗替を定期的に施している
	金属疲労	排気筒	目視点検	1回/年	共振による疲労割れは確認されていない。	補修実績なし
オイルダンパの強度低下	腐食	排気筒のオイルダンパ	目視点検	1回/年	健全性が損なわれる可能性のある腐食は確認されていない。	塗替を適宜実施している

表9 アルカリ骨材反応に関する試験結果

対象構造物	試験方法 (試験実施年)	コア採取場所	測定値	判定基準	結果
原子炉建屋 ほか主要構造物	コンクリートコアによる 膨張率測定[2] (2021年3月~10月)	原子炉建屋 地下2階 北側通路壁	0.015%	全膨張率が 0.050%未満[3]	有害な膨張を生じる 可能性は低い
			0.015%		
		タービン建屋 2階 南側通路壁	0.016%		
			0.015%		
			0.016%		
			0.016%		

#### 4.1.1 熱による強度低下

##### (1) 評価の概要

評価対象部位は、対象構造物のうち、通常運転時に雰囲気温度が高く、高温の原子炉圧力容器近傍に位置する一次遮へい壁（図1参照）とし、評価点は一次遮へい壁内側とする。

評価については、コンクリートの温度制限値と通常運転時における温度分布解析の結果を比較する。温度分布解析を別紙3に示す。

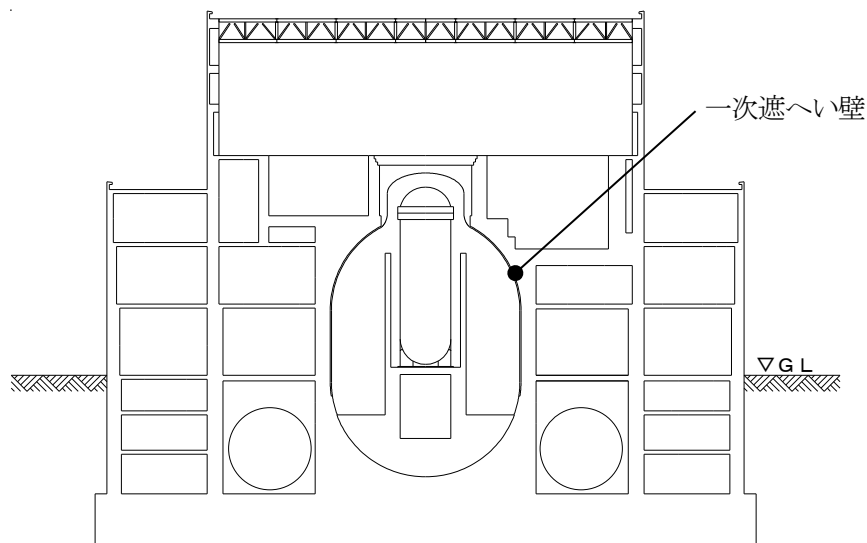


図1 評価対象部位

##### (2) 評価結果

温度分布解析の結果、コンクリートの最高温度は62.7℃であり、制限値[4]である65℃以下であるため、熱による強度低下は問題ない。

また、定期的に見視点検を行っており、熱に起因する有害なひび割れ等は確認されていない。

以上から、熱によるコンクリートの強度低下は、長期健全性評価上問題とならない。

#### 4.1.2 放射線照射による強度低下

##### (1) 評価の概要

評価対象部位は、対象構造物のうち、原子炉圧力容器近傍に位置し、運転時に中性子照射量及びガンマ線照射量の最も大きい一次遮へい壁とし、評価点を一次遮へい壁内側とする。

評価については、評価点における運転開始後40年時点で予想される中性子照射量及びガンマ線照射量を解析により算出する。放射線照射量解析を別紙4に示す。

## (2) 評価結果

中性子照射と強度の関係についてHilsdorf 他の文献[5]や小嶋他の試験結果を踏まえた最新知見[6]によると、 $1 \times 10^{19}$  n/cm<sup>2</sup>の中性子照射量 ( $E > 0.1$ MeV) から強度低下する可能性があることが示されている。

運転開始後 40 年時点で予想される解析による中性子照射量 ( $E > 0.1$ MeV) は、 $1.92 \times 10^{15}$  n/cm<sup>2</sup>であり  $1 \times 10^{19}$  n/cm<sup>2</sup>を超えておらず、中性子照射によるコンクリート強度への影響はない。

また、日本原子力研究所（現：日本原子力研究開発機構）動力試験炉の生体遮へいコンクリートから採取したコンクリートの試験結果[7]によると、中性子照射量 ( $E > 0.11$ MeV) は  $1 \times 10^{13} \sim 10^{17}$  n/cm<sup>2</sup>において圧縮強度の低下は見られない。中性子エネルギー範囲については、解析による中性子照射量 ( $E > 0.1$ MeV) との差異はあるが、わずかであることから強度低下がみられない中性子照射量の範囲に入るものと考えられる。

ガンマ線照射量と強度との関係について Hilsdorf 他の文献[5]によると、ガンマ線照射量が  $2.0 \times 10^{10}$  rad 以下 ( $2.0 \times 10^8$  Gy) では有意な強度低下は見られない。

運転開始後 40 年時点で予想されるガンマ線照射量は、放射線照射量解析の結果、 $2.07 \times 10^6$  rad ( $2.07 \times 10^4$  Gy) であり、 $2.0 \times 10^{10}$  rad ( $2.0 \times 10^8$  Gy) を超えておらず、ガンマ線照射によるコンクリート強度への影響はない。

また、定期的に目視点検を行っており、放射線照射に起因する有害なひび割れ等は確認されていない。

以上から、放射線照射によるコンクリートの強度低下は、長期健全性評価上問題とならない。

### 4.1.3 中性化による強度低下

#### (1) 評価の概要

中性化の進展に影響を及ぼす要因として、環境要素（二酸化炭素濃度、温度、相対湿度）等が考えられることから、環境測定を実施した。環境測定に基づく中性化の評価対象部位の選定過程を別紙 5 に示す。

鉄筋が腐食し始めるときの中性化深さは、一般に屋外の雨掛かりの部分では鉄筋のかぶり厚さまで達したとき、屋内の部分では鉄筋かぶり厚さから 20mm 奥まで達したときとされている[8]ことから、評価対象部位は、屋内、屋外について各々選定することとし、塗装等の仕上げ材の有無、環境要素等を考慮して選定する。

屋内については、塗装仕上げが無い箇所がある構造物のうち鉄筋腐食開始年が最小となる、非常用ガス処理配管ダクトを評価対象構造物として選定し、評価対象部位を非常用ガス処理配管ダクト内面、評価点を非常用ガス処理配管ダクトの屋内壁とする。なお、鉄筋腐食開始年については、環境要素が入力値となる森永式[9]を用いて算出する。

屋外については、対象となる構造物が原子炉機器冷却海水ポンプ室のみであることから、原子炉機器冷却海水ポンプ室を選定し、評価対象部位を原子炉機器冷却海水ポンプ室の壁面及び床面、評価点を原子炉機器冷却海水ポンプ室の壁面（気中帯）とする。

(3) 評価結果

運転開始後 40 年時点における鉄筋の腐食減量は表 15 に示すとおり、いずれの評価点においても、かぶりコンクリートにひび割れが発生する時点の鉄筋の腐食減量を下回っている。

また、定期的に見視点検を実施しているが、塩分浸透による鉄筋腐食に起因する有害なひび割れ等は確認されていない。

以上から、塩分浸透によるコンクリートの強度低下は、長期健全性評価上問題とならない。

表 15 鉄筋の腐食減量

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 ( $\times 10^{-4} \text{g/cm}^2$ )		
				調査時点	運転開始後 40 年時点	かぶりコンク リートにひび 割れが発生す る時点
原子炉機器 冷却海水 ポンプ室	気中帯	2022 年 4 月 (28 年)	0.021 (0.49) <sup>*1</sup>	4.3	6.6	79.6
	干満帯	2021 年 2 月 (27 年)	0.045 (1.07) <sup>*1</sup>	11.6	17.9	79.6
	海中帯		0.147 (3.47) <sup>*1</sup>	2.6	5.5	79.6

\*1 : ( )内は塩化物イオン量(kg/m<sup>3</sup>)

4.1.5 機械振動による強度低下

(1) 評価の概要

評価対象部位は、主要な機器の原動機出力を機械振動の大きさとして選定し、タービン建屋のタービン発電機架台を選定する。

評価点は、機械振動荷重を直接受ける機器支持部付近（基礎ボルト周辺のコンクリート）とする。機械振動の評価対象部位及び評価点の選定過程を別紙 9 に示す。

(2) 評価結果

タービン発電機は、運転中は運転員が異常振動の有無を日常的パトロールで確認している。タービン発電機架台については定期的（1 回/年）に見視点検を行い、コンクリート表面において強度に支障をきたす可能性のある欠陥がないことを確認している。

仮に機械振動により機器のコンクリート基礎への定着部の支持力が失われるような場合があったとしても、機器の異常振動が発生すると考えられるが、タービン監視計器により軸振動の測定値を中央制御室で連続監視しており異常の兆候は検知可能である。

以上から、機械振動による強度低下は、長期健全性評価上問題とならない。



## 【引用文献】

- [1] (社) 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
- [2] (社) 日本コンクリート工学協会, アルカリ骨材反応を生じたコンクリート構造物のコア試料による膨張率の測定方法 (案) JCI-DD2.
- [3] (社) 土木学会, コンクリート標準示方書[維持管理編], 2018.
- [4] (社) 日本建築学会, 原子炉建屋構造設計指針・同解説, 1988.
- [5] Hilsdorf, Kropp and Koch, The Effects of Nuclear Radiation on the Mechanical Properties of Concrete, American Concrete institute Publication SP - 55, Paper 10, 1977.
- [6] 小嶋他, “NTEC-2019-1001 中性子照射がコンクリートの強度に及ぼす影響”, 2019.
- [7] 出井他, JPDR 生体遮蔽コンクリートの材料強度特性 日本原子力研究所 JAERI-M 90-205, 1996.
- [8] (社) 日本建築学会, 鉄筋コンクリート造建築物の耐久設計施工指針・同解説, 2016.
- [9] 森永, 鉄筋の腐食速度に基づいた鉄筋コンクリート建築物の寿命予測に関する研究-東京大学学位論文, 1986.
- [10] (社) 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.
- [11] 岸谷他, コンクリート構造物の耐久性シリーズ中性化, 1986.
- [12] R.G. Jaeger et al. , “Engineering Compendium on Radiation Shielding (ECRS) VOL. 2” .

## 別紙8. 塩分浸透における鉄筋の腐食減量の算定過程及び結果

## 1. 評価概要

- (1) 拡散方程式 (Fick の第2法則) を用いて、鉄筋位置における塩化物イオン濃度を評価する。
- (2) 鉄筋の腐食速度を森永式にしたがって算定し、調査時点及び運転開始後40年経過時点における鉄筋腐食減量を評価し、ひび割れ発生の限界腐食量と比較する。

## 2. 計算方法

## (1) 拡散方程式

鉄筋位置における塩化物イオン濃度の経年変化は、下式に示す拡散方程式 (Fick の第2法則) を用いて計算する。コンクリート表面の塩化物イオン量、見かけの拡散係数及び初期含有塩化物イオン量は、コンクリート表面からの深さと塩化物イオン量の実測値の関係から、最小二乗法を用いて同定する。

## ・初期含有塩化物イオン量を考慮しない場合の式

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 (2018)」

$$C = C_0 \left[ 1 - \operatorname{erf} \left( \frac{0.1c}{2\sqrt{D \cdot t}} \right) \right]$$

$C$  : 鉄筋位置における塩化物イオン量 (kg/m<sup>3</sup>)

$C_0$  : コンクリート表面における塩化物イオン量 (kg/m<sup>3</sup>)

$\operatorname{erf}$  : 誤差関数

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

$c$  : かぶり厚さ (mm)

$D$  : コンクリート中の塩化物イオンの見かけの拡散係数 (cm<sup>2</sup>/年)

$t$  : 供用開始からの経過年数 (年)

## ・初期含有塩化物イオン量を考慮する場合の式

土木学会「2018年制定 コンクリート標準示方書 [維持管理編]」

$$C = C_0 \left[ 1 - \operatorname{erf} \left( \frac{0.1c}{2\sqrt{D \cdot t}} \right) \right] + C_i$$

$C$  : 鉄筋位置における塩化物イオン量 (kg/m<sup>3</sup>)

$C_0$  : コンクリート表面における塩化物イオン量 (kg/m<sup>3</sup>)

$\operatorname{erf}$  : 誤差関数

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

$c$  : かぶり厚さ (mm)

$D$  : コンクリート中の塩化物イオンの見かけの拡散係数 (cm<sup>2</sup>/年)

$t$  : 供用開始からの経過年数 (年)

$C_i$  : 初期含有塩化物イオン量 (kg/m<sup>3</sup>)

表面塩化物イオン量，見かけの拡散係数の算定時にあたっては中性化の影響の可能性<sup>1)</sup>を考慮し，中性化の影響範囲（中性化深さ+10mmの範囲）にあるデータを除外する場合と含む場合の2ケースの回帰分析を実施する。

1) 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 573-2018）」

上記を踏まえ，評価は表1に示す4ケースで実施し，運転開始後40年経過時点の鉄筋の腐食減量が大きいケースを評価値とする。

表1 評価ケース

		中性化の影響範囲にあるデータ	
		除外する場合	含む場合
初期含有塩化物 イオン量	考慮しない場合	ケース①	ケース②
	考慮する場合	ケース③	ケース④

(3) 条件及びパラメータ

条件及びパラメータを表2に示す。なお、推定値算定に必要なパラメータのうち、酸素濃度については、参考資料1に示す文献を引用した。

表2 条件及びパラメータ

	原子炉機器冷却海水ポンプ室			備考
	気中帯	干満帯	海中帯	
$t$ : 供用開始からの経過年数(年)	28	27	27	
$C$ : 鉄筋位置における塩化物イオン量(kg/m <sup>3</sup> )	0.49	1.07	3.47	塩分浸透の点検結果
$C_0$ : コンクリート表面の塩化物イオン量(kg/m <sup>3</sup> )	12.284	6.764	8.728	拡散方程式の回帰分析により算出
$D$ : コンクリート中の塩化物イオンの見かけ上の拡散係数(cm <sup>2</sup> /年)	0.201	0.442	1.229	拡散方程式の回帰分析により算出
$G_i$ : 初期含有塩化物イオン量(kg/m <sup>3</sup> )	—	—	—	拡散方程式の回帰分析により算出
$Cl_m$ : 鉄筋位置における塩化物イオン量(kg/m <sup>3</sup> ) (推定値)	0.00~1.05	0.00~1.66	0.00~4.22	運転開始から40年経過時点までの各年の推定値
$c$ : かぶり厚さ(mm)	69	69	69	
$d$ : 鉄筋径(mm)				
$W/C$ : 水セメント比(%/100)				
$T$ : 温度(°C)	16.7	16.7	19.8	気中帯, 干満帯: 気象庁御前崎気象観測所で測定した1991年から2020年の期間における平均値 海中帯: 1991年から2020年の期間における発電所前面毎或の海水温の調査結果
$RH$ : 相対湿度(%)	73	100	100	気中帯: 気象庁御前崎気象観測所で測定した1991年から2020年の期間における平均値 干満帯, 海中帯: 海水との接触により100%
$O$ : 酸素濃度(比)	0.20	0.20	0.0062	土木学会「原子力発電所屋外重要土木構造物の耐震性能照査指針・マニュアル・照査例2021」引用 海中帯は温度20°Cの場合を参照
$q$ : 調査時点の鉄筋の腐食減量( $\times 10^{-4}$ g/cm <sup>2</sup> )	4.3	11.6	2.6	
$q$ : 運転開始後40年経過時点の鉄筋の腐食減量( $\times 10^{-4}$ g/cm <sup>2</sup> )	6.6	17.9	5.5	
$Q_{cr}$ : 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量推定値( $\times 10^{-4}$ g/cm <sup>2</sup> )	79.6	79.6	79.6	

- : 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

### 3. 拡散方程式の回帰分析結果

各評価点の拡散方程式の回帰分析結果を図1～12に示す。

#### (1) 原子炉機器冷却海水ポンプ室 気中帯

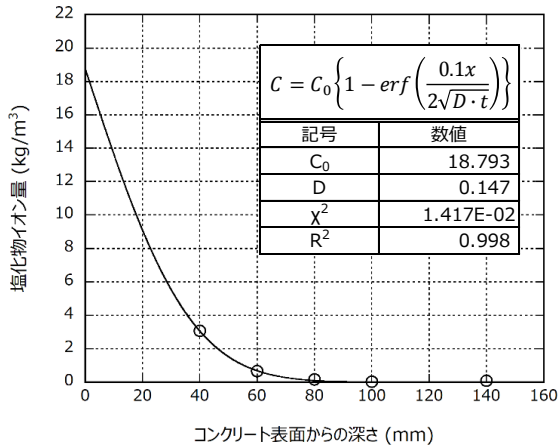


図1 ケース①の回帰分析結果

(中性化影響範囲除外,  $C_i$ を考慮しない)

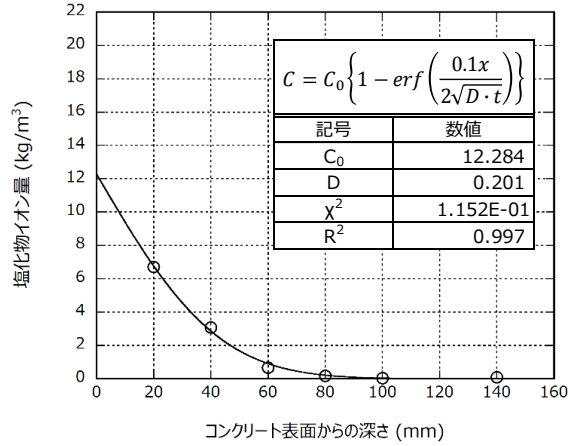


図2 ケース②の回帰分析結果

(中性化影響範囲含む,  $C_i$ を考慮しない)

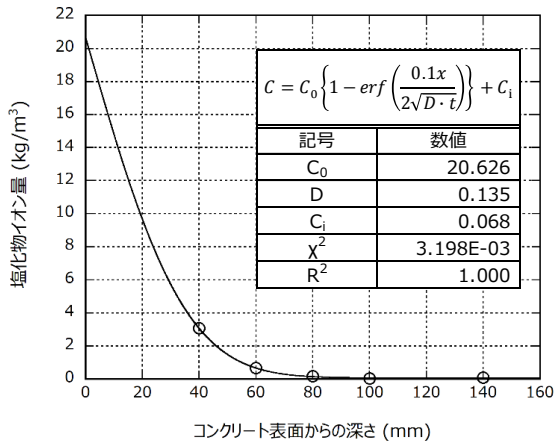


図3 ケース③の回帰分析結果

(中性化影響範囲除外,  $C_i$ を考慮する)

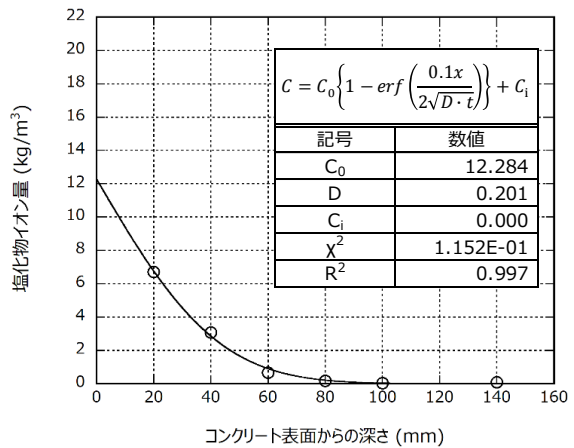


図4 ケース④の回帰分析結果

(中性化影響範囲含む,  $C_i$ を考慮する)

(2) 原子炉機器冷却海水ポンプ室 干満帯

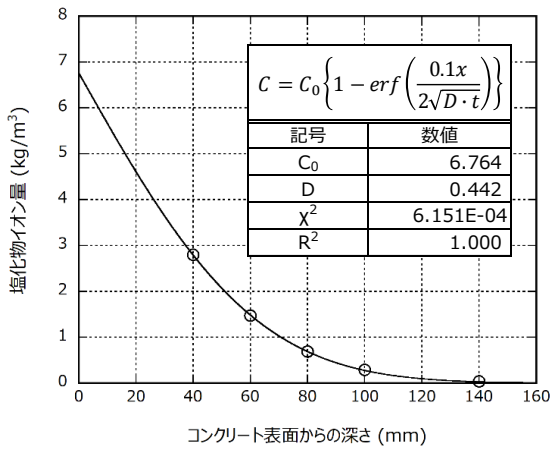


図5 ケース①の回帰分析結果  
(中性化影響範囲除外,  $C_i$ を考慮しない)

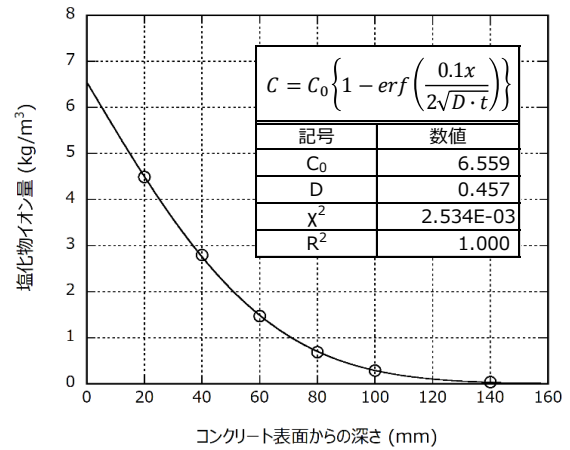


図6 ケース②の回帰分析結果  
(中性化影響範囲含む,  $C_i$ を考慮しない)

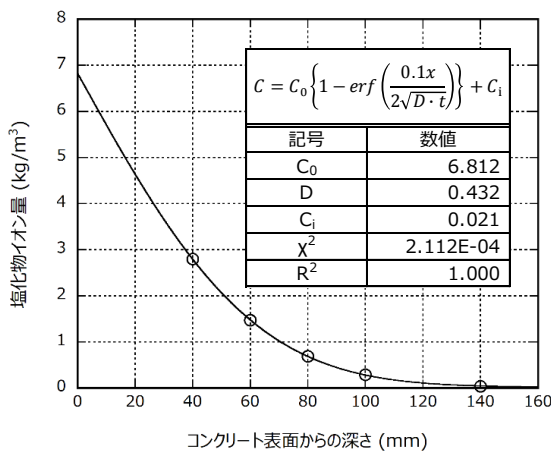


図7 ケース③の回帰分析結果  
(中性化影響範囲除外,  $C_i$ を考慮する)

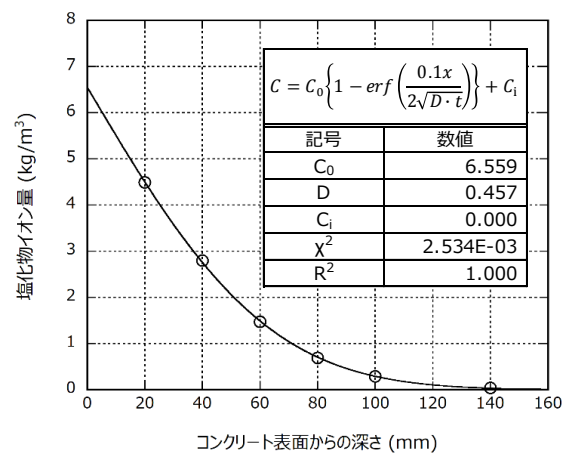


図8 ケース④の回帰分析結果  
(中性化影響範囲含む,  $C_i$ を考慮する)

(3) 原子炉機器冷却海水ポンプ室 海中帯

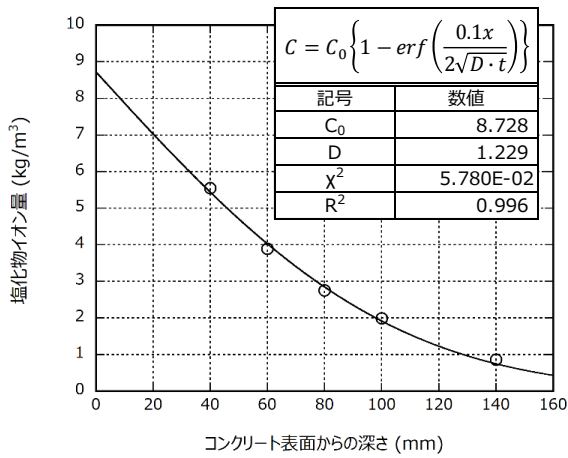


図9 ケース①の回帰分析結果

(中性化影響範囲除外,  $C_i$ を考慮しない)

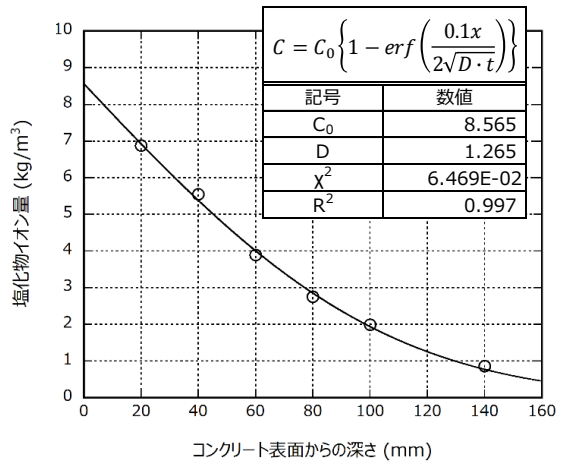


図10 ケース②の回帰分析結果

(中性化影響範囲含む,  $C_i$ を考慮しない)

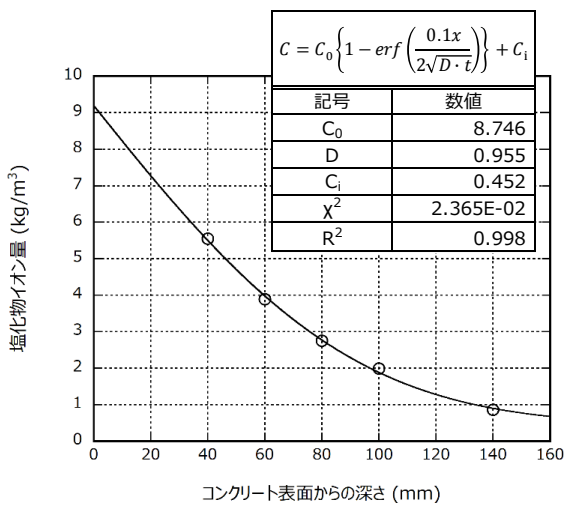


図11 ケース③の回帰分析結果

(中性化影響範囲除外,  $C_i$ を考慮する)

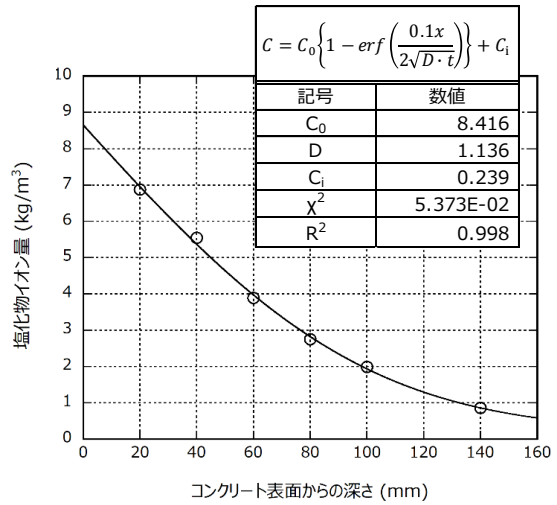


図12 ケース④の回帰分析結果

(中性化影響範囲含む,  $C_i$ を考慮する)

#### 4. 評価結果

調査時点, 運転開始後 40 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前後 5 年の鉄筋の腐食減量を表 3~5 に示す。



表3 調査時点、運転開始後40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前後5年の鉄筋の腐食減量：原子炉機器冷却海水ポンプ室 気中帯

ケース①		ケース②		ケース③		ケース④	
中性化影響範囲を除外		中性化影響範囲を含む		中性化影響範囲を除外		中性化影響範囲を含む	
初期塩化物イオン量を考慮しない				初期塩化物イオン量を考慮する			
$C_0$	18.793	$C_0$	12.284	$C_0$	20.626	$C_0$	12.284
D	0.147	D	0.201	D	0.135	D	0.201
$C_i$	—	$C_i$	—	$C_i$	0.068	$C_i$	0.000
経過年数 (年)	$\Sigma V_{1tn}$ ( $\times 10^{-4}g/cm^2$ )	経過年数 (年)	$\Sigma V_{1tn}$ ( $\times 10^{-4}g/cm^2$ )	経過年数 (年)	$\Sigma V_{1tn}$ ( $\times 10^{-4}g/cm^2$ )	経過年数 (年)	$\Sigma V_{1tn}$ ( $\times 10^{-4}g/cm^2$ )
23	3.5	23	3.5	23	3.5	23	3.5
24	3.6	24	3.7	24	3.7	24	3.7
25	3.8	25	3.8	25	3.8	25	3.8
26	3.9	26	4.0	26	4.0	26	4.0
27	4.1	27	4.1	27	4.1	27	4.1
28	4.3	28	4.3	28	4.3	28	4.3
29	4.4	29	4.5	29	4.4	29	4.5
30	4.6	30	4.7	30	4.6	30	4.7
31	4.7	31	4.8	31	4.8	31	4.8
32	4.9	32	5.0	32	4.9	32	5.0
33	5.1	33	5.2	33	5.1	33	5.2
35	5.4	35	5.6	35	5.5	35	5.6
36	5.6	36	5.8	36	5.6	36	5.8
37	5.8	37	6.0	37	5.8	37	6.0
38	6.0	38	6.2	38	6.0	38	6.2
39	6.2	39	6.4	39	6.2	39	6.4
40	6.3	40	6.6	40	6.4	40	6.6
41	6.5	41	6.8	41	6.6	41	6.8
42	6.7	42	7.0	42	6.8	42	7.0
43	6.9	43	7.2	43	7.0	43	7.2
44	7.1	44	7.4	44	7.2	44	7.4
45	7.3	45	7.6	45	7.4	45	7.6
193	75.6	208	76.8	191	75.6	208	76.8
194	76.3	209	77.3	192	76.3	209	77.3
195	76.9	210	77.9	193	76.9	210	77.9
196	77.6	211	78.4	194	77.6	211	78.4
197	78.3	212	79.0	195	78.3	212	79.0
198	78.9	213	79.5	196	79.0	213	79.5
199	79.6	214	80.1	197	79.6	214	80.1
200	80.2	215	80.7	198	80.3	215	80.7
201	80.9	216	81.2	199	81.0	216	81.2
202	81.6	217	81.8	200	81.7	217	81.8
203	82.2	218	82.4	201	82.4	218	82.4

(評価に使用するケースの選定：気中帯)

ケース②・④において運転開始後40年経過時点の鉄筋の腐食減量が最大のケースとなったが、ケース④において初期含有塩化物イオン量が0.000であることから、初期含有塩化物イオン量を考慮しない場合として扱うこととし、ケース②を評価で使用する。

表4 調査時点、運転開始後40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前後5年の鉄筋の腐食減量：原子炉機器冷却海水ポンプ室 干満帯

ケース①		ケース②		ケース③		ケース④	
中性化影響範囲を除外		中性化影響範囲を含む		中性化影響範囲を除外		中性化影響範囲を含む	
初期塩化物イオン量を考慮しない				初期塩化物イオン量を考慮する			
$C_0$	6.764	$C_0$	6.559	$C_0$	6.812	$C_0$	6.559
D	0.442	D	0.457	D	0.432	D	0.457
$C_i$	—	$C_i$	—	$C_i$	0.021	$C_i$	0.000
経過年数 (年)	$\Sigma V_{1tn}$ ( $\times 10^{-4}g/cm^2$ )	経過年数 (年)	$\Sigma V_{1tn}$ ( $\times 10^{-4}g/cm^2$ )	経過年数 (年)	$\Sigma V_{1tn}$ ( $\times 10^{-4}g/cm^2$ )	経過年数 (年)	$\Sigma V_{1tn}$ ( $\times 10^{-4}g/cm^2$ )
22	9.5	22	9.5	22	9.4	22	9.5
23	9.9	23	9.9	23	9.8	23	9.9
24	10.3	24	10.3	24	10.3	24	10.3
25	10.8	25	10.8	25	10.7	25	10.8
26	11.2	26	11.2	26	11.1	26	11.2
27	11.6	27	11.7	27	11.6	27	11.7
28	12.1	28	12.1	28	12.0	28	12.1
29	12.6	29	12.6	29	12.5	29	12.6
30	13.0	30	13.0	30	13.0	30	13.0
31	13.5	31	13.5	31	13.4	31	13.5
32	13.9	32	14.0	32	13.9	32	14.0
35	15.4	35	15.4	35	15.3	35	15.4
36	15.9	36	15.9	36	15.8	36	15.9
37	16.4	37	16.4	37	16.3	37	16.4
38	16.9	38	16.9	38	16.8	38	16.9
39	17.4	39	17.4	39	17.3	39	17.4
40	17.9	40	17.9	40	17.8	40	17.9
41	18.4	41	18.4	41	18.3	41	18.4
42	18.9	42	18.9	42	18.8	42	18.9
43	19.4	43	19.4	43	19.3	43	19.4
44	19.9	44	19.9	44	19.8	44	19.9
45	20.4	45	20.4	45	20.4	45	20.4
131	75.5	132	75.9	131	75.5	132	75.9
132	76.3	133	76.6	132	76.2	133	76.6
133	77.0	134	77.3	133	77.0	134	77.3
134	77.7	135	78.0	134	77.7	135	78.0
135	78.4	136	78.7	135	78.4	136	78.7
136	79.1	137	79.4	136	79.1	137	79.4
137	79.9	138	80.2	137	79.9	138	80.2
138	80.6	139	80.9	138	80.6	139	80.9
139	81.3	140	81.6	139	81.3	140	81.6
140	82.1	141	82.3	140	82.0	141	82.3
141	82.8	142	83.0	141	82.8	142	83.0

(評価に使用するケースの選定：干満帯)

ケース①において運転開始後40年経過時点の鉄筋の腐食減量が最大のケース（同値の場合はひび割れが発生する経過年数が最短のケースが最短のケース）となったため、ケース①を評価で使用します。

表5 調査時点、運転開始後40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前後5年の鉄筋の腐食減量：原子炉機器冷却海水ポンプ室 海中帯

ケース①		ケース②		ケース③		ケース④	
中性化影響範囲を除外		中性化影響範囲を含む		中性化影響範囲を除外		中性化影響範囲を含む	
初期塩化物イオン量を考慮しない				初期塩化物イオン量を考慮する			
$C_0$	8.728	$C_0$	8.565	$C_0$	8.746	$C_0$	8.416
D	1.229	D	1.265	D	0.955	D	1.136
$C_i$	—	$C_i$	—	$C_i$	0.452	$C_i$	0.239
経過年数 (年)	$\Sigma V_{1tn}$ ( $\times 10^{-4} \text{g/cm}^2$ )	経過年数 (年)	$\Sigma V_{1tn}$ ( $\times 10^{-4} \text{g/cm}^2$ )	経過年数 (年)	$\Sigma V_{1tn}$ ( $\times 10^{-4} \text{g/cm}^2$ )	経過年数 (年)	$\Sigma V_{1tn}$ ( $\times 10^{-4} \text{g/cm}^2$ )
22	1.7	22	1.7	22	1.7	22	1.8
23	1.9	23	1.9	23	1.9	23	1.9
24	2.1	24	2.1	24	2.1	24	2.1
25	2.3	25	2.3	25	2.3	25	2.3
26	2.4	26	2.5	26	2.4	26	2.5
27	2.6	27	2.6	27	2.6	27	2.7
28	2.8	28	2.8	28	2.8	28	2.8
29	3.0	29	3.0	29	3.0	29	3.0
30	3.2	30	3.2	30	3.2	30	3.2
31	3.4	31	3.5	31	3.4	31	3.4
32	3.6	32	3.7	32	3.6	32	3.7
35	4.3	35	4.3	35	4.3	35	4.3
36	4.5	36	4.5	36	4.5	36	4.5
37	4.8	37	4.8	37	4.7	37	4.8
38	5.0	38	5.0	38	4.9	38	5.0
39	5.2	39	5.2	39	5.2	39	5.2
40	5.5	40	5.5	40	5.4	40	5.4
41	5.7	41	5.7	41	5.7	41	5.7
42	5.9	42	5.9	42	5.9	42	5.9
43	6.2	43	6.2	43	6.1	43	6.2
44	6.4	44	6.4	44	6.4	44	6.4
45	6.7	45	6.7	45	6.6	45	6.7
251	77.3	254	77.6	247	77.3	254	77.6
252	77.7	255	77.9	248	77.7	255	78.0
253	78.1	256	78.3	249	78.1	256	78.3
254	78.5	257	78.7	250	78.5	257	78.7
255	78.9	258	79.1	251	78.8	258	79.1
256	79.3	259	79.5	252	79.2	259	79.5
257	79.6	260	79.8	253	79.6	260	79.9
258	80.0	261	80.2	254	80.0	261	80.2
259	80.4	262	80.6	255	80.4	262	80.6
260	80.8	263	81.0	256	80.8	263	81.0
261	81.2	264	81.4	257	81.2	264	81.4

(評価に使用するケースの選定：海中帯)

ケース①において運転開始後40年経過時点の鉄筋の腐食減量が最大のケース（同値の場合はひび割れが発生する経過年数が最短のケースが最短のケース）となったため、ケース①を評価で使用する。

## 別紙10. 地下水による劣化評価

## 1. はじめに

浜岡4号機のコンクリート構造物の一部は地下に埋設されているため、これらの構造物に対する地下水による経年劣化影響について検討する。

コンクリートの強度低下に影響を及ぼすと想定される地下水に起因する経年劣化要因を抽出するとともに、それらが浜岡4号機の地下埋設部コンクリートにおいて発生し、進展する可能性について評価を行う。

## 2. 経年劣化影響評価

## (1) 地下水に起因する経年劣化要因の抽出

地下水に起因するコンクリートの経年劣化要因とその概要を表1に示す。

表1 地下水に起因するコンクリートの経年劣化要因とその概要

経年劣化要因	概要
塩分浸透	コンクリート中に塩化物イオンが浸透して鉄筋位置まで達すると、鉄筋表面の不動態被膜が破壊されるため、鉄筋はコンクリート中の水分、酸素の作用により腐食し始める。腐食が進行すると酸化生成物による体積膨張からコンクリートにひび割れや剥離が生じ、コンクリート構造物としての健全性が損なわれる可能性がある。
アルカリ骨材反応	コンクリート中の反応性シリカを含む骨材と、セメント等に含まれるアルカリ（ナトリウムイオンやカリウムイオン）が、水の存在下で反応してアルカリ珪酸塩を生成し、この膨張作用によりコンクリートにひび割れが生じ、コンクリート構造物としての健全性が損なわれる可能性がある。
化学的侵食	水分中の酸や硫酸塩等の塩類とセメント水和物の化学反応により、セメントペーストの溶解（酸）や、コンクリート表層の剥離・剥落（塩類）が生じ、コンクリート構造物としての健全性が損なわれる可能性がある。

## (2) 地下水に起因するコンクリートの経年劣化評価

コンクリートの経年劣化要因のうち、塩分浸透、アルカリ骨材反応、化学的侵食が浜岡4号機の地下埋設部コンクリートにおいて発生し、進展する可能性について、浜岡4号機の環境条件に基づき評価を行う。

### ① 塩分浸透

浜岡4号機の対象構造物においては塩分浸透を生じる可能性があるため、経年劣化に対する評価を実施している。その結果、各評価部位における鉄筋の腐食減量は、運転開始後40年時点の想定においてもかぶりコンクリートにひび割れが発生する時点での鉄筋の腐食量を十分に下回っている。

また、定期的な建屋内部からの目視点検の結果、塩分浸透による鉄筋腐食に起因する膨張性のひび割れは確認されていない。さらにコンクリート躯体が直接海水に接触する原子炉機器冷却海水ポンプ室においても、塩分浸透による鉄筋腐食に起因する膨張性のひび割れは確認されていない。

したがって、塩分浸透の評価結果、目視点検の結果及び最も厳しい環境条件にある原子炉機器冷却海水ポンプ室の現状に鑑み、その他の地下埋設部コンクリートにおいても、塩分浸透によるコンクリートの経年劣化が進展し、浜岡4号機の供用期間中にコンクリート構造物としての健全性が損なわれる可能性は極めて低いと考える。

### ② アルカリ骨材反応

浜岡4号機で使用している骨材については、2021年3月から2021年10月に実施した膨張率試験（JCI-DD2）により、その結果得られた全膨張率は判定基準値「0.050%」を下回っており、**有害な膨張を生じる可能性は低い**と判定されている。

また、定期的な建屋内部からの目視点検の結果、アルカリ骨材反応に起因する膨張性のひび割れは確認されていない。なお、絶えず海水が供給される環境下にある原子炉機器冷却海水ポンプ室においても、アルカリ骨材反応に起因する膨張性のひび割れは確認されていない。

したがって、コア供試体による膨張率試験、目視点検の結果及び最も厳しい環境条件にある原子炉機器冷却海水ポンプ室の現状に鑑み、その他の地下埋設部コンクリートにおいても、アルカリ骨材反応によるコンクリートの経年劣化が生じる可能性は極めて低いと考える。

### ③ 化学的侵食

化学的侵食はその劣化機構によって、以下のセメント水和物との化学反応による溶解、セメント水和物との化学反応による膨張に大別される。

- ・セメント水和物との化学反応による溶解

コンクリート中のセメント水和物との化学反応により、本来、水に溶解しにくいセメント水和物を可溶性物質に変質させ、コンクリートが多孔質化する、あるいは分解することで骨材の露出や脱落等が生じる。

- ・セメント水和物との化学反応による膨張

コンクリート中のセメント水和物との化学反応により、新たな化合物が生成され、膨張する際の膨張圧がコンクリートにひび割れや剥離を生じさせる。

(5) 化学的侵食に関する経年劣化評価

浜岡 4 号機の地下水水質試験結果に基づき地下水成分の分析を行った結果、酸や硫酸塩に起因するコンクリートの経年劣化が進展する可能性は低いと考えられる。

また、対象構造物のうち海洋環境の影響を直接受ける原子炉機器冷却海水ポンプ室においては、化学的侵食に特有の劣化兆候は見られない。したがって、地下水水質の分析や海水由来の侵食性物質に対して最も厳しい環境下にある取水構造物の現状に鑑み、その他の地下埋設部コンクリートにおいても化学的侵食によるコンクリートの経年劣化が生じる可能性は極めて低いと考える。

3. 地下水に起因するコンクリート経年劣化評価に関するまとめ

地下水に起因するコンクリートの経年劣化要因が浜岡 4 号機の地下埋設部コンクリートにおいて発生し、進展する可能性について浜岡 4 号機地下水水質試験に基づき評価した結果を表 4 に示す。

これより、各経年劣化要因が浜岡 4 号機の地下埋設部コンクリートにおいて進展する可能性は極めて低いことを確認した。

表 4 地下水に起因するコンクリートの経年劣化要因に係る発生及び進展の可能性

経年劣化 要因	経年劣化要因のスクリーニング結果		
	発生の 可能性	進展の 可能性	環境条件・根拠等
塩分浸透	○	×	地下水から塩化物イオンが供給されるため発生の可能性はあるが、塩分浸透による鉄筋腐食に起因する膨張性のひび割れは建屋内部からの目視点検において確認されていない。 また海水の影響を受ける原子炉機器冷却海水ポンプ室から採取したコアサンプルによって塩分浸透に対して健全性を有していることを確認している。
アルカリ 骨材反応	×	×	現状の躯体コンクリートから採取したコア供試体に対し、JCI-DD2 に基づく膨張率の測定試験を実施した結果、 <b>有害な膨張を生じる可能性は低い</b> と判定する。 また、仮にアルカリ骨材反応が起きた場合に発生する膨張性のひび割れは、建屋内部からの目視点検において確認されていない。 なお、絶えず海水が供給される環境下にある原子炉機器冷却海水ポンプ室においても、アルカリ骨材反応に起因する膨張性のひび割れは確認されていない。
化学的 侵食	×	×	浜岡 4 号機は土壌や地下水に侵食性物質が多く含まれる温泉地帯や酸性河川流域等の付近には建設されていない。 また、地下水成分の分析の結果、酸や硫酸塩に起因するコンクリート劣化の可能性は低いことを確認している。