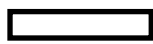


泊発電所 2 号炉 審査資料	
資料番号	HTN2-PLM30(冷停)-コン 改 4
提出年月日	令和 2 年 12 月 1 日

泊発電所 2 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

令和 2 年 12 月 1 日  
北海道電力株式会社



：枠囲みの内容は機密情報に属しますので公開できません。

## 目次

1. 概要	1
2. 基本方針	3
3. 評価対象と評価手法	5
3.1 代表構造物の選定	5
3.2 高経年化対策上着目すべき経年劣化事象の抽出	9
3.3 劣化要因ごとの評価対象部位の選定結果	12
3.4 評価手法	12
4. 代表構造物の技術評価	14
4.1 コンクリート構造物の強度低下	14
4.2 コンクリート構造物の遮へい能力低下	23
4.3 現状保全	24
4.4 総合評価	24
4.5 高経年化への対応	24
5. 代表構造物以外の技術評価	24
6. まとめ	25
6.1 審査ガイド適合性	25
6.2 保守管理に関する方針として策定する事項	26
別紙1 保守管理要則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 泊2号炉周辺地域の凍害危険度及びコンクリートの空気量について	2-1
別紙3 温度分布解析の方法，条件及び結果について	3-1
別紙4 放射線照射の影響に対する構造健全性評価結果について	4-1
別紙5 空気環境の測定方法及び位置について	5-1
別紙6 中性化深さの推定値の算出過程について	6-1
別紙7 塩分浸透における評価点の妥当性について	7-1
別紙8 塩分浸透における鉄筋の腐食減量の算出過程について	8-1
別紙9 機械振動の評価対象部位及び評価点の選定過程について	9-1
別紙10 泊2号炉周辺の地下水による経年劣化影響について	10-1

## 1. 概要

本資料は、「実用発電用原子炉の設置、運転等に関する規則」第 82 条第 1 項の規定に基づき実施した冷温停止状態が維持されることを前提とした高経年化技術評価のうち、コンクリート構造物及び鉄骨構造物の経年劣化事象に対する評価結果について補足説明するものである。

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を表 1 に示す。



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

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	コンクリートは、中性子照射やガンマ線照射に起因する内部発熱によるコンクリート中の水分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。更に、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破壊されるため、鉄筋はコンクリート中の水分及び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	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ため、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。
		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。
	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。	
	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。

## 2. 基本方針

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に対する評価の基本方針は、対象構造物について、表1の経年劣化事象の発生の可能性について評価し、その可能性が将来にわたって発生することが否定できない場合は、その発生及び進展に係る健全性評価を行い、運転開始後60年時点までの期間において「実用発電用原子炉施設における高経年化対策審査ガイド」及び「実用発電用原子炉施設における高経年化対策実施ガイド」の要求事項を満たすことを確認することである。

コンクリート構造物及び鉄骨構造物評価についての要求事項を表2に整理する。

なお、コンクリート構造物の経年劣化事象のうち、熱及び放射線による強度低下並びに熱による遮へい能力低下については、原子炉の冷温停止状態が維持されることを前提とした場合、劣化の進展が考えられない経年劣化事象である。したがって、高経年化対策上着目すべき経年劣化事象ではないものの、現在までの劣化の進展を考慮した耐震安全性評価を行うため、高経年化対策上着目すべき経年劣化事象と同様に健全性評価を行った。

評価に当たっては、実施ガイド3.1⑧ただし書きの規定に該当する場合\*1ではなくなった際には、プラントの運転を開始した日から60年間について健全性評価を行うことを踏まえ、今回の評価においても、60年間の劣化の進展を仮定した評価を行うことで、40年間における健全性を評価している。

\*1 運転開始以後30年を経過する日において技術基準\*2に適合しないものがある場合

\*2 実用発電用原子炉及びその附属施設の技術基準に関する規制に定められる基準

表2 コンクリート構造物及び鉄骨構造物評価についての要求事項

ガイド	要求事項
<p>実用発電用原子炉施設における高経年化対策審査ガイド</p>	<p>3. 高経年化技術評価等の審査の視点・着眼点            (1) 高経年化技術評価の審査            ⑫健全性の評価            実施ガイド3. 1⑤に規定する期間の満了日までの期間について、高経年化対策上着目すべき経年劣化事象の発生又は進展に係る健全性を評価していることを審査する。            ⑬現状保全の評価            健全性評価結果から現状の保全策の妥当性が評価されていることを審査する。            ⑭追加保全策の抽出            現状保全の評価結果から、現状保全に追加する必要のある新たな保全策が抽出されていることを審査する。            (2) 長期保守管理方針の審査            ①長期保守管理方針の策定            すべての追加保全策について長期保守管理方針として策定されているかを審査する。</p>
<p>実用発電用原子炉施設における高経年化対策実施ガイド</p>	<p>3. 1 高経年化技術評価の実施及び見直し            高経年化技術評価の実施及び見直しに当たっては、以下の要求事項を満たすこと。            ⑤抽出された高経年化対策上着目すべき経年劣化事象について、以下に規定する期間の満了日までの期間について機器・構造物の健全性評価を行うとともに、必要に応じ現状の保守管理に追加すべき保全策（以下、「追加保全策」という。）を抽出すること。            イ 実用炉規則第82条第1項の規定に基づく高経年化技術評価プラントの運転を開始した日から60年間（ただし、⑧ただし書の規定に該当する場合にはプラントの運転を開始した日から40年間とする。）            3. 2 長期保守管理方針の策定及び変更            長期保守管理方針の策定及び変更にあたっては、以下の要求事項を満たすこと。            ①高経年化技術評価の結果抽出された全ての追加保全策（発電用原子炉の運転を断続的に行うことを前提として抽出されたもの及び冷温停止状態が維持されることを前提として抽出されたものの全て。）について、発電用原子炉ごとに、保守管理の項目及び当該項目ごとの実施時期を規定した長期保守管理方針を策定すること。            なお、高経年化技術評価の結果抽出された追加保全策について、発電用原子炉の運転を断続的に行うことを前提とした評価から抽出されたものと冷温停止状態が維持されることを前提とした評価から抽出されたもの間で、その対象の経年劣化事象及び機器・構造物の部位が重複するものについては、双方の追加保全策を踏まえた保守的な長期保守管理方針を策定すること。            ただし、冷温停止が維持されることを前提とした高経年化技術評価のみを行う場合はその限りでない。</p>

### 3. 評価対象と評価手法

#### 3.1 代表構造物の選定

コンクリートの強度低下，コンクリートの遮へい能力低下及び鉄骨の強度低下が想定される構造物は多数存在するため，高経年化技術評価では，評価対象構造物の中から代表構造物を選定して評価を行う。対象構造物及び代表構造物は以下の手順にて選定する。

##### 3.1.1 対象構造物の選定とグループ化

泊2号炉のコンクリート構造物及び鉄骨構造物のうち，重要度分類指針におけるクラス1，2に該当する構造物又はクラス1，2及び高温・高圧の環境下にあるクラス3の機器であって，冷温停止状態維持に必要な機器を支持する構造物に該当する構造物を選定し，コンクリート構造物と鉄骨構造物にグループ化を実施した。その結果を表3に示す。

##### 3.1.2 代表構造物の選定

グループ化した対象構造物について，使用条件等を考慮して代表構造物を選定した。コンクリート構造物における代表構造物の選定結果を表4に，鉄骨構造物における代表構造物の選定結果を表5に示す。

表3 対象構造物の選定とグループ化

対象構造物	重要度分類	コンクリート構造物	鉄骨構造物
外部しゃへい建屋	クラス1 設備支持	○	
内部コンクリート	クラス1 設備支持	○	○ (鉄骨部)
原子炉格納施設の基礎	クラス1 設備支持	○	
周辺補機棟及び燃料取扱棟	クラス1 設備支持	○	○ (鉄骨部)
原子炉補助建屋	クラス1 設備支持	○	○ (鉄骨部)
取水構造物	クラス1 設備支持	○	
燃料油貯油槽タンク室	クラス1 設備支持	○	
燃料取替用水タンク建屋	クラス1 設備支持	○	○ (鉄骨部)

表4 コンクリート構造物における代表構造物の選定結果

対象構造物 (コンクリート構造物)	重要度 分類	使用条件等							選定	選定理由
		運転開始 後経過 過年数	高温部の 有無	放射線の 有無	振動の有無	設置環境		供給 塩化物量		
						屋内	屋外			
① 外部しゃへい建屋	クラス1 設備支持	28	◇	◇	—	一部 仕上げなし	仕上げ 有り	◇	◎	屋内で仕上げなし
② 内部コンクリート	クラス1 設備支持	28	○ (1次し ゃへい壁)	○ (1次し ゃへい壁)	—	一部 仕上げなし	/	/	◎	高温部、放射線の影響、屋 内で仕上げなし
③ 原子炉格納施設の基礎	クラス1 設備支持	28	—	◇	—	仕上げ有り	埋設*2	◇	◎	代表構造物を支持する構造 物
④ 周辺補機棟及び 燃料取扱棟	クラス1 設備支持	28	—	◇	○ (ディーゼル 発電機基礎)	一部 仕上げなし	仕上げ 有り	◇	◎	振動の影響、屋内で仕上げ なし
⑤ 原子炉補助建屋	クラス1 設備支持	28	—	◇	—	一部 仕上げなし	仕上げ 有り	◇	◎	屋内で仕上げなし
⑥ 取水構造物	クラス1 設備支持	28	—	—	—	一部 仕上げなし	仕上げ なし	○ (海水と接触)	◎	屋外で仕上げなし、供給塩 化物量の影響
⑦ 燃料油貯油槽タンク室	クラス1 設備支持	28	—	—	—	/	埋設*2	◇		
⑧ 燃料取替用水タンク建屋	クラス1 設備支持	28	—	◇	—	一部 仕上げなし*1	仕上げ 有り	◇		

\*1：ほかの屋内で仕上げがない構造物で代表させる。

\*2：環境条件の区分として、土中は一般の環境として区分されることから、ほかの屋外で仕上げがない構造物で代表させる。

■：グループ内代表構造物とする使用条件等

【凡例】

○：影響大

◇：影響小

—：影響極小、又はなし

表5 鉄骨構造物における代表構造物の選定結果

	対象構造物 (鉄骨構造物)	重要度分類	使用条件等		選定	選定理由	
			運転開始後経過年数	設置環境			
				屋内			屋外
①	内部コンクリート（鉄骨部）	クラス1 設備支持	28	仕上げ有り		◎	設置環境
②	周辺補機棟及び燃料取扱棟（鉄骨部）	クラス1 設備支持	28	仕上げ有り		◎	設置環境
③	原子炉補助建屋（鉄骨部）	クラス1 設備支持	28	仕上げ有り		◎	設置環境
④	燃料取替用水タンク建屋（鉄骨部）	クラス1 設備支持	28	仕上げ有り		◎	設置環境

: グループ内代表構造物とする使用条件等

### 3.2 高経年化対策上着目すべき経年劣化事象の抽出

#### 3.2.1 高経年化対策上着目すべき経年劣化事象

高経年化対策上着目すべき経年劣化事象を表6に示す。表1に示した経年劣化事象のうち、以下①と②以外について、高経年化対策上着目すべき経年劣化事象として抽出した。

表6 高経年化対策上着目すべき経年劣化事象

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した。なお、コンクリート構造物及び鉄骨構造物の保全活動は、「泊発電所土木建築設備保守管理要則（R-30-211-31）」（以下、「保守管理要則」という。）に基づき実施している。

具体的な点検及び補修の実績を表8に示す。また、保守管理要則における目視点検の項目、方法及び判定基準を別紙1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	<p>使用している骨材については、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。</p> <p>なお、定期的（1回/年）に保守管理要則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等は認められていない。</p>
		凍結融解	<p>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）に示される凍害危険度の分布図によると泊2号炉の周辺地域の凍害の予想程度は「軽微」である。</p> <p>また、使用しているコンクリートについては、凍結融解作用に対する抵抗性を確保するために有効な空気量を満足している。</p> <p>なお、定期的（1回/年）に保守管理要則に基づく目視点検を行っており、凍結融解に起因すると判断されるひび割れ等は認められていない。</p> <p>凍害危険度及びコンクリートの空気量について別紙2に示す。</p>
鉄骨	強度低下	腐食	<p>定期的（1回/年）に保守管理要則に基づく目視確認を実施しており、強度に支障をきたす可能性のあるような鋼材の腐食は認められていない。また、鉄骨の強度に支障をきたす可能性があるような鋼材の腐食に影響する塗装の劣化等が認められた場合には、その部分の塗装の塗替え等を行うこととしている。</p>

表8 アルカリ骨材反応，凍結融解及び腐食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	外部しゃへい建屋 内部コンクリート 原子炉格納施設の基礎 周辺補機棟及び燃料取扱棟 原子炉補助建屋	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認められていない	補修実績なし
	凍結融解	取水構造物 燃料油貯油槽タンク室 燃料取替用水タンク建屋	目視点検	1回/年	凍結融解に起因すると判断されるひび割れは認められていない	補修実績なし
鉄骨の強度低下	腐食	内部コンクリート 周辺補機棟及び燃料取扱棟 原子炉補助建屋 燃料取替用水タンク建屋	目視点検	1回/年	有害な腐食は認められていない	補修実績なし

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)	骨材	測定値 (6か月)	判定基準	結果
外部しゃへい建屋ほか 主要構造物※	モルタルバー法 (昭和59年)	幌延産 細骨材	0.013%	膨張率が6か月 で0.1%以下が 無害	無害
		岩内産 細骨材	0.033%		無害
		京極産 粗骨材	-0.005%		無害

※外部しゃへい建屋，内部コンクリート，原子炉格納施設の基礎，周辺補機棟及び燃料取扱棟，原子炉補助建屋，取水構造物，燃料油貯油槽タンク室並びに燃料取替用水タンク建屋

② 高経年化対策上着目すべき経年劣化事象ではない事象（日常劣化管理事象以外）

表10に示す経年劣化事象については，今後も経年劣化事象の進展が考えられない，又は進展傾向が極めて小さいと考えられることから，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した。

表10 日常劣化管理事象以外

構造物	経年劣化事象	劣化要因	理由
鉄骨	強度低下	風等による疲労	泊2号炉の鉄骨構造物では疲労破壊が生じるような風等による繰返し荷重を継続的に受ける構造部材はない。

### 3.3 劣化要因ごとの評価対象部位の選定結果

経年劣化事象に対する劣化要因ごとの評価対象部位について、選定した結果を表 11 に示す。

### 3.4 評価手法

高経年化対策上着目すべき経年劣化事象に対して、代表構造物の使用環境、使用条件、重要度等から、その進展の程度が大きいと考えられる評価点について、要求される機能に影響する経年劣化事象に対する健全性を確認する。

健全性を確認する方法としては、学会基準等による既往の健全性評価又は国内外の研究成果による健全性評価とした。

表 11 コンクリート構造物及び鉄骨構造物に想定される経年劣化事象と評価対象部位

構造種別		コンクリート構造物							鉄骨構造物		
経年劣化事象		強度低下						遮へい能力低下	強度低下		
要因		熱	放射線照射	中性化	塩分浸透	機械振動	アルカリ骨材反応	凍結融解	熱	腐食	風等による疲労
代表構造物	外部しゃへい建屋			○			△	△			
	内部コンクリート	1次しゃへい壁* ○◆	1次しゃへい壁* ○◆				△	△	1次しゃへい壁* ○◆	鉄骨部 △	鉄骨部 ▲
	原子炉格納施設の基礎						△	△			
	周辺補機棟及び燃料取扱棟					ディーゼル発電機基礎* ○	△	△		鉄骨部 △	鉄骨部 ▲
	原子炉補助建屋						△	△		鉄骨部 △	鉄骨部 ▲
	取水構造物			○	○		△	△			
	燃料取替用水タンク建屋(鉄骨部)									鉄骨部 △	鉄骨部 ▲

○：高経年化対策上着目すべき経年劣化事象（表中の○に対応する代表構造物：評価対象とする構造物）

△：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）

▲：高経年化対策上着目すべき経年劣化事象ではない事象（日常劣化管理事象以外）

◆：冷温停止状態が維持されることを前提とした場合には発生・進展が想定されないが、耐震安全性評価のために評価する

\*：評価対象部位

#### 4. 代表構造物の技術評価

##### 4.1 コンクリート構造物の強度低下

###### 4.1.1 熱による強度低下

###### (1) 評価の概要

評価対象部位は、代表構造物のうち、運転時に最も高温状態となる内部コンクリート（1次しゃへい壁）とした。

評価点は、ガンマ発熱の影響の最も大きい炉心領域部及び原子炉容器支持構造物（以下、「RV サポート」という。）からの伝熱の影響の最も大きいRV サポート直下部とした。内部コンクリート（1次しゃへい壁）の概要を図1に示す。

評価については、コンクリートの温度制限値と温度分布解析の結果を比較した。温度分布解析の方法、条件及び結果を別紙3に示す。

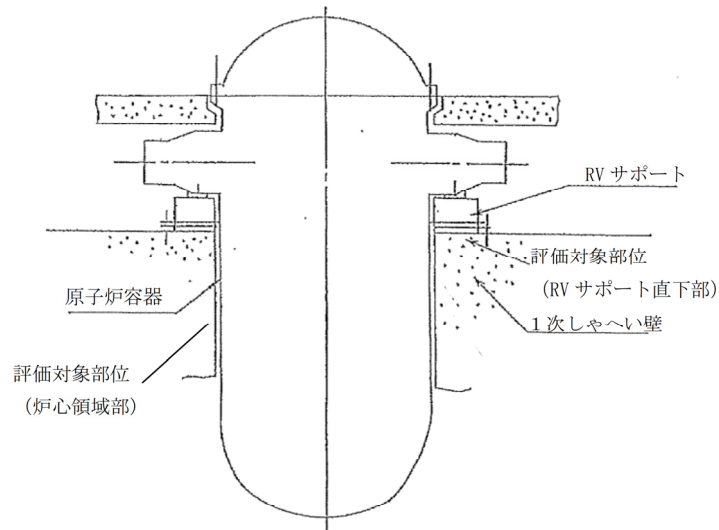


図1 内部コンクリート（1次しゃへい壁）の概要

###### (2) 評価結果

コンクリートの温度制限値は設計基準強度確保の観点から、局部では90℃、一般部では65℃と定められている<sup>1)</sup>。

これに対して、温度分布解析の結果、コンクリート内の最高温度は炉心領域部で約62℃、断続的運転を前提とした場合におけるRVサポート直下部で約53℃であり、いずれの部位においても、コンクリートの最高温度は温度制限値を下回っている。

以上から、熱による強度低下に対しては、長期健全性評価上問題とならない。

1) (社)日本建築学会「原子炉建屋構造設計指針・同解説」（1988）

#### 4.1.2 放射線による強度低下

##### (1) 評価の概要

評価対象部位は、代表構造物のうち、中性子照射量及びガンマ線照射量の最も大きい内部コンクリート（1次しゃへい壁）とした。

評価点は、中性子照射量及びガンマ線照射量が最大となる1次しゃへい壁炉心側コンクリートとした。

評価については、評価点における運転開始後60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した。

##### (2) 評価結果

中性子照射と強度の関係に関しては、従来 Hilsdorf ほかの文献<sup>2)</sup>における「中性子照射したコンクリートの圧縮強度 (fcu) と照射しないコンクリートの圧縮強度 (fcuo) の変化」を参照していた。一方、小嶋ほかの試験結果<sup>3)</sup>を踏まえた最新知見によると、コンクリートの圧縮強度は、およそ  $1 \times 10^{19} \text{n/cm}^2$  の中性子照射量 ( $E > 0.1 \text{MeV}$ ) から低下する可能性が確認されている。

断続的運転を前提とした場合における運転開始後60年時点で予想される中性子照射量 ( $E > 0.11 \text{MeV}$ ) は、放射線照射量解析の結果、評価点において最大約  $3.6 \times 10^{19} \text{n/cm}^2$  となるが、照射量が  $1 \times 10^{19} \text{n/cm}^2$  を超えるコンクリートの範囲は、1次しゃへい壁の厚さ（最小壁厚279cm）に比べて小さく、深さ方向に最大でも9cm程度である。当該範囲のコンクリートを除いた構造体の耐力が、地震時の鉛直荷重等を上回ることを、日本電気協会「原子力発電所耐震設計技術指針（JEAG 4601-1987）」に基づく、内部コンクリート（1次しゃへい壁含む）のせん断ひずみ評価に影響を及ぼすものではないことを確認していることから、構造強度上問題とはならない。

ガンマ線照射量と強度の関係については Hilsdorf ほかによる文献や、（社）日本建築学会「原子力施設における建築物の維持管理指針・同解説」（2015）によると、少なくとも  $2 \times 10^8 \text{Gy}$  ( $2 \times 10^{10} \text{rad}$ ) 程度のガンマ線照射量では有意な強度低下は見られない（図2参照）。

断続的運転を前提とした場合における運転開始後60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、評価点において、最大約  $2.4 \times 10^8 \text{Gy}$  (約  $2.4 \times 10^{10} \text{rad}$ ) となるが、照射量が  $2 \times 10^{10} \text{rad}$  を超えるコンクリートの範囲は、

- 2) Hilsdorf, Kropp, and Koch, 「The Effects of Nuclear Radiation on the Mechanical Properties of Concrete」, American Concrete Institute Publication, SP 55-10 (1978)
- 3) 小嶋 正義, 中野 眞木郎, 田口 清貴, 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)

1次しゃへい壁の厚さ（最小壁厚 279cm）に比べて小さく，深さ方向に最大でも 8cm 程度である。当該範囲のコンクリートを除いた構造体の耐力が，地震時の鉛直荷重等を上回ることを，日本電気協会「原子力発電所耐震設計技術指針（JEAG 4601-1987）」に基づく，内部コンクリート（1次しゃへい壁含む）のせん断ひずみ評価に影響を及ぼすものではないことを確認していることから，構造強度上問題とはならない。

放射線照射の影響に対する構造健全性評価結果を別紙 4 に示す。

以上から，放射線照射による強度低下に対しては，長期健全性評価上問題とならない。

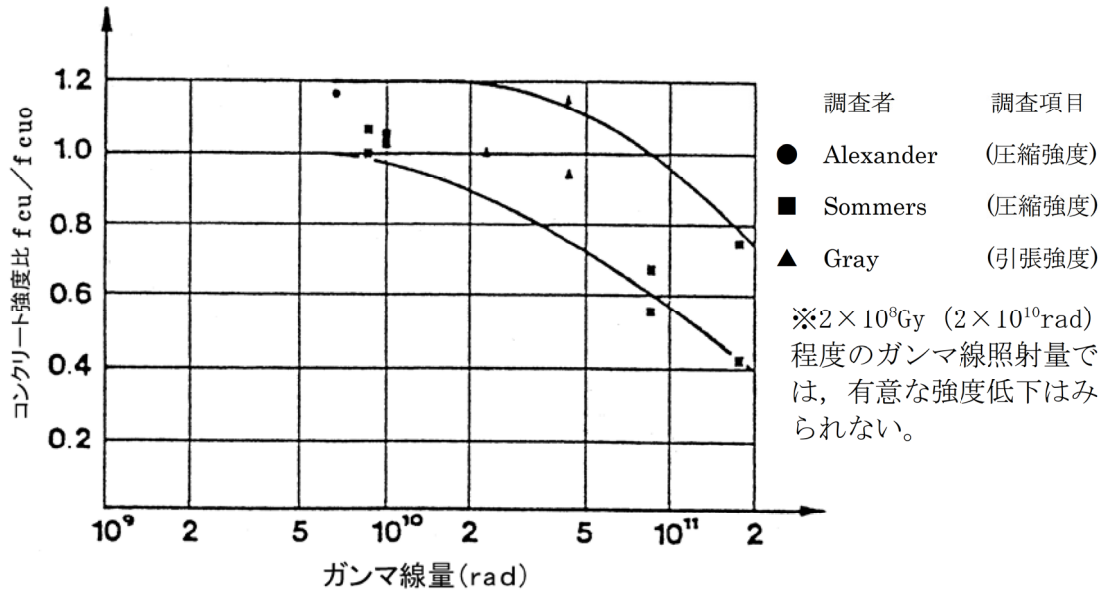


図2 ガンマ線照射したコンクリートの圧縮強度 ( $f_{cu}$ ) と照射しないコンクリートの圧縮強度 ( $f_{cuo}$ ) の変化<sup>2)</sup>

#### 4.1.3 中性化による強度低下

##### (1) 評価の概要

中性化の進展度合いは、環境条件（二酸化炭素濃度、温度及び相対湿度）の影響を受けるため、空気環境測定を実施した。空気環境の測定方法及び位置を別紙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、鉄筋のかぶり厚さから2cm奥まで達したときとされている（（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））ことから、評価対象部位は、屋外、屋内について各々選定することとし、塗装等のコンクリート表面仕上げ、環境条件（二酸化炭素濃度、温度及び相対湿度）を考慮して選定した。

対象構造物のうち、仕上げがない箇所がある構造物を選定し、設置環境が屋外の構造物と屋内の構造物に分類する。屋外については、対象となる構造物が取水構造物のみであることから、取水構造物を評価対象として選定した。屋内については、対象構造物のうち環境条件の中性化に及ぼす影響が比較的大きい外部しゃへい建屋を選定した。なお、中性化に及ぼす影響については、森永式<sup>4)</sup>における環境条件（二酸化炭素濃度、温度及び相対湿度）による影響度を算出した。算出結果を表12に示す。

評価点は、屋外については取水構造物のうち海水によりコンクリート表面が湿潤とならず、空気環境の影響を受ける取水構造物の壁面（気中帯）とした。屋内については外部しゃへい建屋のうち環境条件の中性化に及ぼす影響が大きいEL. 26.9mを選定した。

- 4) 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）



表 12 森永式における環境条件による影響度

代表構造物		二酸化炭素濃度 (ppm)	温度 (°C)	相対湿度 (%)	環境条件による影響度*
外部しゃへい建屋	EL. 18. 3m	470. 6	24. 2	32. 5	0. 1330
	EL. 26. 9m	484. 3	25. 9	29. 1	0. 1443
内部コンクリート	EL. 13. 4m	435. 3	26. 3	26. 5	0. 1417
	EL. 24. 8m	448. 9	26. 0	28. 4	0. 1403
原子炉格納施設の基礎		498. 1	24. 3	30. 3	0. 1408
周辺補機棟及び燃料取扱棟	EL. 10. 3m	457. 8	24. 0	29. 5	0. 1356
	EL. 18. 3m	519. 1	23. 6	32. 2	0. 1389
	EL. 24. 8m	459. 7	24. 1	32. 3	0. 1316
	EL. 31. 3m	485. 6	22. 8	30. 3	0. 1358
原子炉補助建屋	EL. 3. 3m	458. 5	20. 6	39. 2	0. 1128
	EL. 9. 8m	537. 4	23. 5	33. 8	0. 1382
	EL. 17. 3m	527. 9	23. 2	33. 5	0. 1369
	EL. 24. 8m	444. 4	21. 3	34. 6	0. 1199
	EL. 32. 3m	492. 1	20. 8	36. 8	0. 1213
燃料取替用水タンク建屋		480. 2	16. 6	47. 7	0. 0926

\*：森永式における環境条件による係数（下記赤線部）から算出

$$x = \sqrt{\frac{C}{5}} \cdot 2.44 \cdot R \cdot (1.391 - 0.017 \cdot RH + 0.022 \cdot T) \cdot (4.6 \cdot w/c / 100 - 1.76) \cdot \sqrt{t} \quad (w/c \leq 60)$$

$x$ ：中性化深さ (mm)

$C$ ：二酸化炭素濃度 (%)

$R$ ：中性化比率

$RH$ ：相対湿度 (%)  $T$ ：温度 (°C)

$w/c$ ：水セメント比 (%)

$t$ ：材齢 (日)

(2) 評価手順

評価については、以下の手順にて実施した。中性化深さの推定値の算出過程を別紙6に示す。

① 中性化深さの推定

中性化深さの推定式（岸谷式<sup>5)</sup>、森永式<sup>4)</sup>及び中性化深さの実測値に基づく $\sqrt{t}$ 式<sup>6)</sup>により、運転開始後60年時点の中性化深さの推定値を算出する。

② 最大中性化深さの推定値の抽出

中性化深さの推定式により得られる中性化深さのうち、最大値となる中性化深さを抽出する。

③ 鉄筋が腐食し始める時の中性化深さの算出

鉄筋が腐食し始める時の中性化深さとして、屋外はかぶり厚さの値、屋内はかぶり厚さに2cmを加えた値をそれぞれ算出する。

④ 運転開始後60年時点の中性化深さの評価

②が③よりも小さいことを確認する。

(3) 評価結果

運転開始後60年時点における中性化深さの推定値は表13に示すとおり、いずれの評価点においても鉄筋が腐食し始める時の中性化深さを下回っている。

また、定期的に見視点検を実施しているが、中性化による鉄筋腐食に起因する有害なひび割れ等は認められていない。

以上から、中性化による強度低下に対しては、長期健全性評価上問題とならない。

表13 コンクリートの中性化深さ

	中性化深さ (cm)			鉄筋が腐食し始める時の中性化深さ (cm)
	測定値 (調査時点の 運転開始後経 過年)	推定値*1		
		調査時点 (推定式)	運転開始後 60年時点 (推定式)	
外部しゃへい建屋	0.34 (27年)	3.79*2 (岸谷式)	5.65 (岸谷式)	9
取水構造物 (気中帯)	0.84 (26年)	1.33*3 (岸谷式)	2.02 (岸谷式)	8.4

\*1：岸谷式<sup>5)</sup>、森永式<sup>4)</sup>及び実測値に基づく $\sqrt{t}$ 式<sup>6)</sup>による評価結果のうち最大値を記載

\*2：運転開始後27年時点の推定値

\*3：運転開始後26年時点の推定値

5) (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)

6) (社)土木学会「コンクリート標準示方書 維持管理編」(2018)

#### 4.1.4 塩分浸透による強度低下

##### (1) 評価の概要

評価対象部位は、代表構造物のうち、飛来塩分及び海水とその飛沫の影響により最も厳しい塩分浸透環境下であり、塗装等の仕上げが施されていない部位がある取水構造物を選定した。取水構造物の塩分浸透の測定結果を表 14 に示す。

評価点は、対象構造物（取水構造物）のうち、「高経年化技術評価審査マニュアル（JNES-RE-2013-9012）」に基づき、塩分浸透環境を考慮し、図 3 に示すとおり、環境条件が異なる取水構造物の気中帯、干満帯及び海中帯をそれぞれ評価点として選定した。評価点の妥当性を別紙 7 に示す。

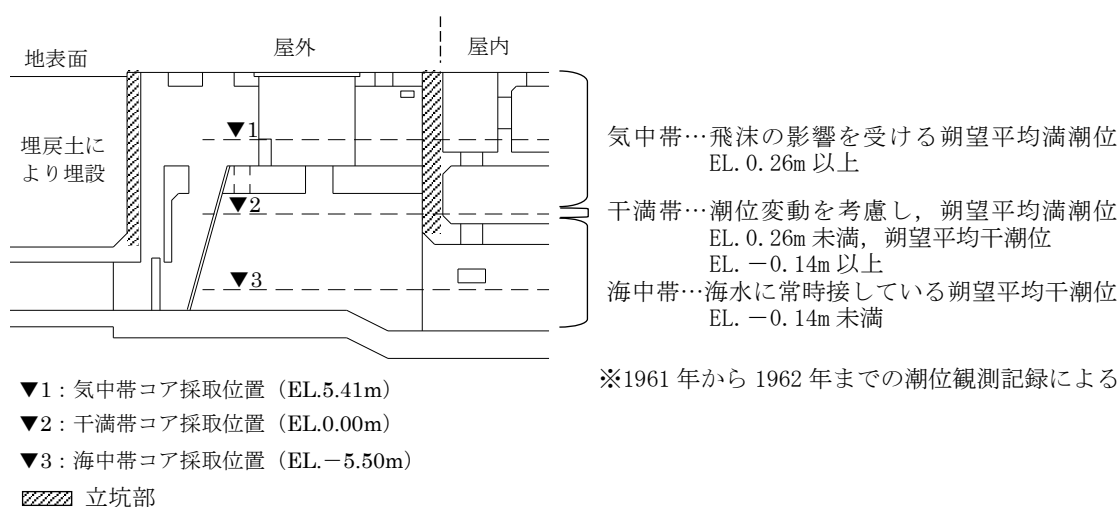


図 3 取水構造物の概要

表 14 塩分浸透の測定結果

対象の コンクリート 構造物	表面から の深さ (mm)	塩化物イオン量 (kg/m <sup>3</sup> )		
		気中帯	干満帯	海中帯
取水構造物	0～20	0.451	0.625	1.597
	20～40	0.364	0.482	0.569
	40～60	0.158	0.245	0.198
	60～80	0.134	0.198	0.143
	80～100	0.134	0.150	0.143
	100～120	0.134	0.143	0.127
コア採取日		2018年1月24日	2018年1月23,24日	2018年1月24日

(2) 評価手順

評価については、以下の手順にて実施した。鉄筋の腐食減量の算出過程を別紙 8 に示す。

① 運転開始後 60 年時点における鉄筋の腐食減量の算出

拡散方程式により塩化物イオン濃度の測定結果をもとに、運転開始後経過年ごとのコンクリート表面からの塩化物イオンの浸透を予測し、鉄筋位置における塩化物イオン量を算出する。

鉄筋位置における塩化物イオン量を用いて、森永式<sup>4)</sup>により運転開始後経過年数ごとの鉄筋の腐食減量を算出する。

② かぶりコンクリートにひび割れが発生する時点における鉄筋の腐食減量の算出

鉄筋径及びかぶり厚さを用いて、森永式<sup>4)</sup>により、かぶりコンクリートにひび割れが発生する時点における鉄筋の腐食減量を算出する。

③ 運転開始後 60 年時点における鉄筋の腐食減量の評価

①が②よりも小さいことを確認する。

(3) 評価結果

運転開始後 60 年時点における鉄筋の腐食減量の推定値は表 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、定期的に目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認められていない。

以上から、塩分浸透による強度低下に対しては、長期健全性評価上問題とならない。

表 15 鉄筋の腐食減量

	調査時期 (運転開始後 経過年数)	鉄筋位置での塩化物イオン濃度 (%) (塩化物イオン量 (kg/m <sup>3</sup> ))	鉄筋の腐食減量 (×10 <sup>-4</sup> g/cm <sup>2</sup> )		
			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)	2018 年 (26 年)	0.01 (0.14)	2.6	6.1	91.5
取水構造物 (干満帯)	2018 年 (26 年)	0.01 (0.15)	6.8	15.4	91.5
取水構造物 (海中帯)	2018 年 (26 年)	0.01 (0.15)	0.0	0.0	91.5

#### 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、振動の影響を受ける周辺補機棟及び燃料取扱棟（ディーゼル発電機基礎）とした。

評価点は、局部的に影響を受ける可能性がある基礎ボルト周辺のコンクリートとした。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

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、機械の異常振動や定着部周辺コンクリート表面に有害なひび割れが発生すると考えられる。

ディーゼル発電機基礎については、定期的（1回/年）に保守管理要則に基づき目視点検を行い、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。また、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、機器の異常振動が発生するものと考えられるが、定期試験等を行っており、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に対しては、長期健全性評価上問題とならない。

## 4.2 コンクリート構造物の遮へい能力低下

### 4.2.1 熱による遮へい能力低下

#### (1) 評価の概要

評価対象部位は、代表構造物のうち放射線に対する遮へい能力が要求される内部コンクリート（1次しゃへい壁）とした。

評価点は、運転時に最も高温となる炉心領域部とした。

評価については、コンクリートの温度制限値と温度分布解析の結果を比較した。

#### (2) 評価結果

放射線防護の観点から、コンクリート遮へい体の設計に適用されている「コンクリート遮蔽体設計規準」（R. G. Jaeger et al., 「Engineering Compendium on Radiation Shielding (ECRS) VOL. 2」）には、周辺及び内部最高温度の制限値が示されており、コンクリートに対しては中性子遮へいで88℃以下、ガンマ線遮へいで177℃以下となっている。

これに対し、温度分布解析の結果、断続的運転を前提とした場合における炉心領域部の最高温度は、約62℃であり、コンクリートの最高温度は、温度制限値を下回っている。

また、定期的な目視点検を実施しているが、遮へい能力に支障をきたす可能性のあるひび割れ等は認められていない。

仮にコンクリート構造物の遮へい能力低下が生じた場合、放射線量が上昇するものと考えられるが、放射線量は日常的に監視しており、異常の兆候は検知可能である。

以上から、熱によるコンクリート遮へい能力低下に対しては、長期健全性評価上問題とならない。

#### 4.3 現状保全

コンクリート構造物の強度低下については、保守管理要則に基づき、定期的（1回／年）にコンクリート表面の目視点検を実施し、強度低下につながるひび割れ等を確認している。目視点検の結果、ひび割れ等の補修が必要となる損傷が確認された場合、即時補修が必要な場合を除き、その経過を継続的に監視しつつ、点検実施後数年以内を目処に補修を計画、実施することとしている。

コンクリート構造物の遮へい能力低下については、保守管理要則に基づき、定期的（1回／年）にコンクリート表面の目視点検を実施し、遮へい能力低下につながるひび割れ等を確認している。また、放射線量を日常的に監視している。

#### 4.4 総合評価

コンクリート構造物の強度低下については、健全性評価の結果から判断して、現状において問題はなく、今後、強度低下が急激に発生する可能性は小さい。

また、保守管理要則に基づく定期的な目視点検により、補修対象となったひび割れ等の補修を計画、実施することとしており、現状の保全方法は、コンクリート構造物の健全性を維持する上で適切である。

コンクリート構造物の遮へい能力低下については、健全性評価の結果から判断して、現状において問題はなく、今後、遮へい能力低下が急激に発生する可能性は小さい。

また、仮に熱によるコンクリート構造物の遮へい能力低下が生じた場合、放射線量が上昇するものと考えられるが、放射線量は日常的に監視しており、異常の兆候は検知可能である。

#### 4.5 高経年化への対応

コンクリート構造物の強度低下及び遮へい能力低下に対しては、高経年化対策の観点から現状の保全内容に対して追加すべき項目はなく、今後も現状保全を継続していく。

### 5. 代表構造物以外の技術評価

コンクリート構造物及び鉄骨構造物の技術評価については、代表構造物について各経年劣化事象に影響を及ぼす要因ごとに使用条件を考慮して実施しており、代表構造物以外の使用条件は代表構造物に包含されているため、技術評価結果も代表構造物に包含された結果となる。

6. まとめ

6.1 審査ガイド適合性

「2. 基本方針」で示した要求事項について技術評価を行った結果、全ての要求事項を満足していることを確認した。コンクリート構造物及び鉄骨構造物についての要求事項との対比を表 16 に示す。

表 16 コンクリート構造物及び鉄骨構造物についての要求事項との対比

ガイド	要求事項	技術評価結果
実用発電用原子炉施設における高経年化対策審査ガイド	3. 高経年化技術評価等の審査の視点・着眼点 (1) 高経年化技術評価の審査 ⑫健全性の評価 実施ガイド3. 1⑤に規定する期間の満了日までの期間について、高経年化対策上着目すべき経年劣化事象の発生又は進展に係る健全性を評価していることを審査する。	「4. 代表構造物の技術評価」に示すとおり、代表構造物について運転開始後 60 年時点を想定した健全性評価を実施した。
	⑬現状保全の評価 健全性評価結果から現状の保全策の妥当性が評価されていることを審査する。	「4.3 現状保全」に示すとおり、健全性評価結果から、現状の保全策が妥当であることを確認した。
	⑭追加保全策の抽出 現状保全の評価結果から、現状保全に追加する必要がある新たな保全策が抽出されていることを審査する。	「4.5 高経年化への対応」に示すとおり、現状保全項目に、高経年化対策の観点から追加すべき新たな保全策はなかった。
	(2) 長期保守管理方針の審査 ①長期保守管理方針の策定 すべての追加保全策について長期保守管理方針として策定されているかを審査する。	「4.5 高経年化への対応」に示すとおり、現状保全項目に、高経年化対策の観点から追加すべきものはなく、保守管理に関する方針として策定する事項はなかった。
実用発電用原子炉施設における高経年化対策実施ガイド	3. 1 高経年化技術評価の実施及び見直し 高経年化技術評価の実施及び見直しに当たっては、以下の要求事項を満たすこと。 ⑮抽出された高経年化対策上着目すべき経年劣化事象について、以下に規定する期間の満了日までの期間について機器・構造物の健全性評価を行うとともに、必要に応じ現状の保守管理に追加すべき保全策（以下、「追加保全策」という。）を抽出すること。 イ 実用炉規則第 82 条第 1 項の規定に基づく高経年化技術評価プラントの運転を開始した日から 60 年間（ただし、⑯ただし書の規定に該当する場合にはプラントの運転を開始した日から 40 年間とする。）	「4.5 高経年化への対応」に示すとおり、現状保全項目に、高経年化対策の観点から追加する新たな保全策はなかった。
	3. 2 長期保守管理方針の策定及び変更 長期保守管理方針の策定及び変更にあたっては、以下の要求事項を満たすこと。 ⑰高経年化技術評価の結果抽出された全ての追加保全策（発電用原子炉の運転を断続的に行うことを前提として抽出されたもの及び冷温停止状態が維持されることを前提として抽出されたもの全て。）について、発電用原子炉ごとに、保守管理の項目及び当該項目ごとの実施時期を規定した長期保守管理方針を策定すること。 なお、高経年化技術評価の結果抽出された追加保全策について、発電用原子炉の運転を断続的に行うことを前提とした評価から抽出されたものと冷温停止状態が維持されることを前提とした評価から抽出されたものの中で、その対象の経年劣化事象及び機器・構造物の部位が重複するものについては、双方の追加保全策を踏まえた保守的な長期保守管理方針を策定すること。 ただし、冷温停止が維持されることを前提とした高経年化技術評価のみを行う場合はその限りでない。	「4.5 高経年化への対応」に示すとおり、現状保全項目に、高経年化対策の観点から追加すべきものはなく、保守管理に関する方針として策定する事項はなかった。



## 6.2 保守管理に関する方針として策定する事項

コンクリート構造物及び鉄骨構造物に関する評価について、保守管理に関する方針として策定する事項は抽出されなかった。

## 別紙

- 別紙 1 保守管理要則における目視点検の項目，方法及び判定基準について
- 別紙 2 泊 2 号炉周辺地域の凍害危険度及びコンクリートの空気量について
- 別紙 3 温度分布解析の方法，条件及び結果について
- 別紙 4 放射線照射の影響に対する構造健全性評価結果について
- 別紙 5 空気環境の測定方法及び位置について
- 別紙 6 中性化深さの推定値の算出過程について
- 別紙 7 塩分浸透における評価点の妥当性について
- 別紙 8 塩分浸透における鉄筋の腐食減量の算出過程について
- 別紙 9 機械振動の評価対象部位及び評価点の選定過程について
- 別紙10 泊 2 号炉周辺の地下水による経年劣化影響について

〈保守管理要則における目視点検の項目，方法及び判定基準について〉

保守管理要則に基づき定期的（1回／年）に実施する目視点検の項目，方法及び判定基準を以下に示す。

泊発電所 土木設備 点検の項目・方法及び判定基準

点検の種類	点検の項目		点検の方法	判定基準	
定期点検	コンクリート構造物	ひび割れ	特に厳しい 腐食性環境		
			腐食性環境		目視（簡易測定含む）
			一般部		
		浮き・剥離			
		鉄筋腐食			目視
		鉄筋露出			目視
		漏水			目視

泊発電所 建築設備 点検の項目・方法及び判定基準

点検の種類	点検の項目			点検の方法	判定基準		
定期点検	コンクリート構造物	ひび割れ	構造安全性		目視（簡易測定含む）		
			使用性	屋外			
				屋内			
			水密性	塗膜あり			
				塗膜なし			
			遮へい性	屋外			
				屋内			
			剥離・剥落	目視（打音調査含む）			
		鉄筋腐食	目視				
		漏水	目視				
	たわみ	目視					
	振動	目視					
	すりへり	目視					
	鉄骨構造物	強度低下		目視			
鋼材腐食		目視					
接合部の異常		目視					

## 〈泊 2 号炉周辺地域の凍害危険度及びコンクリートの空気量について〉

## 1. 泊 2 号炉周辺地域の凍害危険度について

## 1.1 はじめに

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。

(社)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) (以下、「JASS5」という。) 解説図 26.1 (凍害危険度の分布図) によると、泊 2 号炉の周辺地域の凍害危険度は「2」であり、凍害の予測程度は「軽微」である。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。図 2-1 に JASS5 凍害危険度の分布図を示す。

気象資料から泊 2 号炉周辺地域の凍害危険度をあらためて確認した結果を以下に示す。

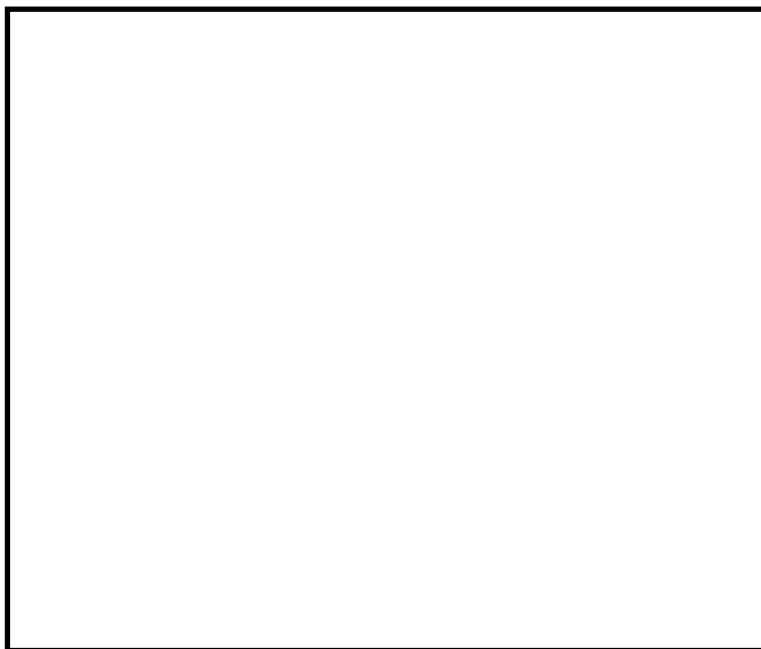


図 2-1 JASS5 凍害危険度の分布図

## 1.2 凍結融解作用を受けるコンクリート

JASS5「26節 凍結融解作用を受けるコンクリート」では、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について示されている。

26節の適用にあたっては解説表 26.1（本節適用の目安）が示されており、この解説表には最低気温（日最低気温の平滑平年値の年間極値（気象庁資料による））と凍害危険度の関係が示されている。図 2-2 に JASS5 26 節適用の目安を示す。

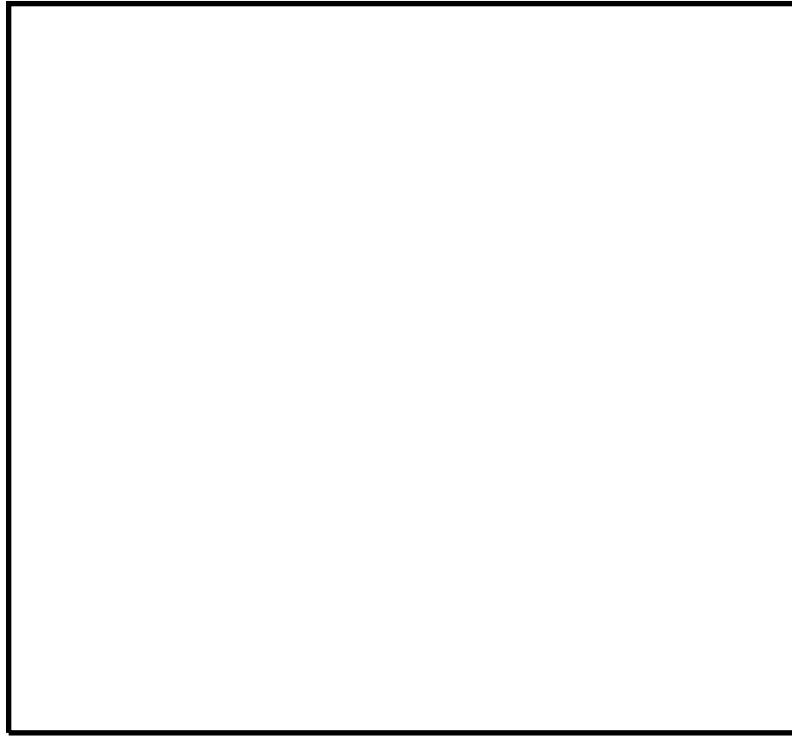


図 2-2 JASS5 26 節適用の目安

### 1.3 泊2号炉周辺地域の凍害危険度

泊2号炉の凍害危険度の確認においては、JASS5と同様に日最低気温の平滑平年値の年間極値（気象庁資料による）（以下、「最低気温（平年値）」という。）を用いる。なお、検討にあたっては、最新の気象庁資料（1981～2010年の観測値）を用いた。

泊2号炉の周辺地域である後志地方気象台の共和、神恵内及び寿都の3地点の最低気温（平年値）を確認すると、それぞれ $-7.6^{\circ}\text{C}$ 、 $-5.5^{\circ}\text{C}$ 及び $-5.4^{\circ}\text{C}$ であった。

図2-2によると、稚内及び函館の最低気温（平年値）は $-8.7^{\circ}\text{C}$ 及び $-7.7^{\circ}\text{C}$ に対して、凍害危険度は2、長野の最低気温（平年値）は $-5.5^{\circ}\text{C}$ に対して凍害危険度は1である。これに対し、泊2号炉の周辺地域である共和、神恵内及び寿都の最低気温（平年値）は $-7.6^{\circ}\text{C}$ 、 $-5.5^{\circ}\text{C}$ 及び $-5.4^{\circ}\text{C}$ であり、稚内及び函館よりも最低気温（平年値）が高いこと、神恵内及び寿都については、長野と同程度であることから、凍害危険度は1又は2と考えられ、凍害危険度を2とすることについて、妥当であると判断した。

なお、JASS5「26節」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』とあり、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。

また、本検討では最新の気象庁資料を用いているが、1981～2010年の最低気温（平年値）（10年ごとに更新）であることから、念のため、泊2号炉の周辺地域で最も最低気温（平年値）が低い共和において2011年以降の観測値を考慮しても最低気温（平年値）の傾向が変わらないことを確認する。

最低気温（平年値）に相当する値を、気象庁による気象観測統計指針に準じて、連続する30年間（1989年4月～2019年3月）の統計データを基に算出した結果、 $-7.4^{\circ}\text{C}$ となり、1981～2010年の最低気温（平年値）である $-7.6^{\circ}\text{C}$ と同等であることを確認した。

なお、共和における日最低気温は、1981～2010年では $-17.8^{\circ}\text{C}$ （1985年1月25日）であるのに対して、1989年4月～2019年3月では $-17.6^{\circ}\text{C}$ （1994年1月29日）となっている。

表2-1に共和における最低気温（平年値）及び日最低気温を示す。

表2-1 共和における最低気温（平年値）及び日最低気温

	1981～2010年 （気象庁資料）	1989年4月～2019年3月
最低気温（平年値）	$-7.6^{\circ}\text{C}$	$-7.4^{\circ}\text{C}$ （参考）
日最低気温	$-17.8^{\circ}\text{C}$ （1985年1月25日）	$-17.6^{\circ}\text{C}$ （1994年1月29日）



## 2. コンクリートの空気量について

### 2.1 凍結融解作用に対する抵抗性をもった空気量

JIS A 5308「レディーミクストコンクリート」（以下、「JIS」という。）では空気量及び許容差が規定されており、荷卸し時点での空気量は4.5%、この許容差は±1.5%とされている。また、この規定値はJASS5「5節」及び「11節」とも同一である。表2-2にJIS並びにJASS5「5節」及び「11節」に示される空気量及び許容差を示す。

JASS5「26節」では、『4節および5節で規定される材料・調合の制限、空気量(4.5%)の規定などは凍結融解作用に対する対策であり、本節を適用しないコンクリートでもある程度の凍結融解作用に対する抵抗性をもったものとなっている。』とされている。

よって、泊2号炉の凍結融解作用に対する抵抗性は、JIS並びにJASS5「5節」及び「11節」に規定される空気量及び許容差にて確認する。

表 2-2 JIS 並びに JASS5 「5 節」 及び 「11 節」 に規定される空気量及び許容差

コンクリートの種類	空気量	空気量の許容差
普通コンクリート	4.5%	±1.5%

なお、JASS5「26節」では、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についての仕様（空気量の下限值等）が別途規定されており、同節で対象とする「激しい凍結融解作用」とは、『湿潤状態で凍結融解作用を受けるコンクリート』とされている。また、『寒冷地の建物では、金属笠木の使用、水分が滞留しないディテールの工夫など、凍害の弱点となる部分をなくすことが凍害対策の基本であり、このような対策が十分な場合、凍結融解作用の強い地域であっても本節を適用する必要はない。』とされている。

泊2号炉の代表構造物のうち外部しゃへい建屋、周辺補機棟及び燃料取扱棟並びに原子炉補助建屋については、外壁面には仕上げ（防水性のある塗装）を施していること、屋根面は防水層により保護することでこれらの部位に水分が滞留しない対策を実施しており、湿潤状態にはならないことから、JASS5「26節」で対象とする「激しい凍結融解作用」の恐れはないと判断した。

取水構造物については、大部分が埋設あるいは屋内に設置されており、これらの部分は屋外に接していないため、凍結融解の恐れはないと判断した。また、屋外と接する部位としては立坑部等があるが、当該部位は鉛直面で構成されているため、図2-2によると水がかりの少ない部位（外壁面一般など）に相当し、凍害危険度3以下はC（一般に適用しない）となっていることから、JASS5「26節」で対象とする「激しい凍結融解作用」の恐れはないと判断した。

一方、内部コンクリートについては屋内構造物であり、原子炉格納施設の基礎については埋設されていることから、それぞれ屋外に接していないため、凍結融解の恐れはないと判断した。

## 2.2 泊2号炉における空気量

建設時に荷卸し時点で実施した空気量試験では、最小値が3.6%、最大値が5.4%であり、表2-2の数値を満足していることを確認している。表2-3に泊2号炉に使用しているコンクリートの目標空気量と空気量試験の最小値及び最大値を示す。

なお、荷卸し時点で実施した空気量試験については建設時の使用前検査においても確認されている。

表2-3 泊2号炉に使用しているコンクリートの目標空気量と  
空気量試験の最小値及び最大値

目標空気量（許容範囲）	最小値	最大値
4.5%（3.0～6.0%）	3.6%	5.4%

以上から、泊2号炉に使用しているコンクリートは、凍結融解作用に対する抵抗性をもった空気量を確保していると判断している。

以上

## 〈温度分布解析の方法，条件及び結果について〉

炉心領域部及び原子炉容器支持構造物（以下，「RV サポート」という。）直下部の温度分布解析の方法，条件及び結果を以下に示す。

## 1. 炉心領域部の温度分布解析

## 1.1 算出方法

炉心領域部のガンマ発熱による温度分布は，1次しゃへい壁内のガンマ発熱量分布を1次元輸送計算コードANISNにより算出し，熱伝導方程式を解いて1次しゃへいコンクリート内の温度分布を算出している。

## 1.2 入力条件

ANISN 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，入力パラメータを図 3-1 に示す。

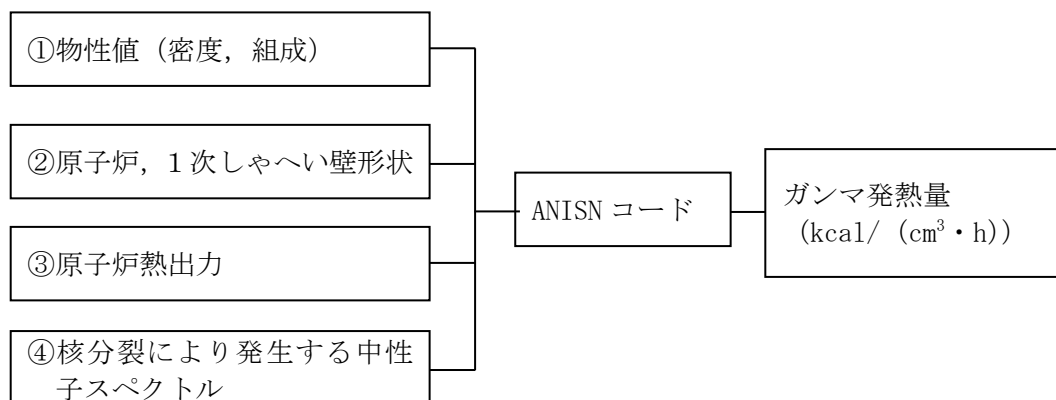


図 3-1 入力パラメータ

また，炉心，炉心構造物，原子炉容器及び1次しゃへいコンクリートを1次元円筒形状でモデル化した計算形状図を図 3-2 に示す。

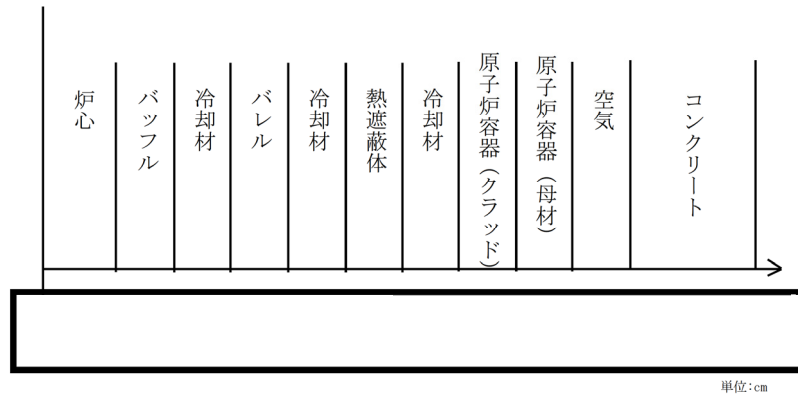


図 3-2 炉心，炉心構造物，原子炉容器及び 1 次しゃへいコンクリートの計算形状図

### 1.3 評価結果

1 次しゃへい壁内のガンマ発熱量分布を基に，円筒形状に対する熱伝導方程式を解いて温度分布を算出した結果，1 次しゃへいコンクリート内での最高温度は，1 次しゃへいコンクリート内面から約 47cm の位置に現れ，約 62℃である。

1 次しゃへいコンクリート内温度分布を図 3-3 に示す。

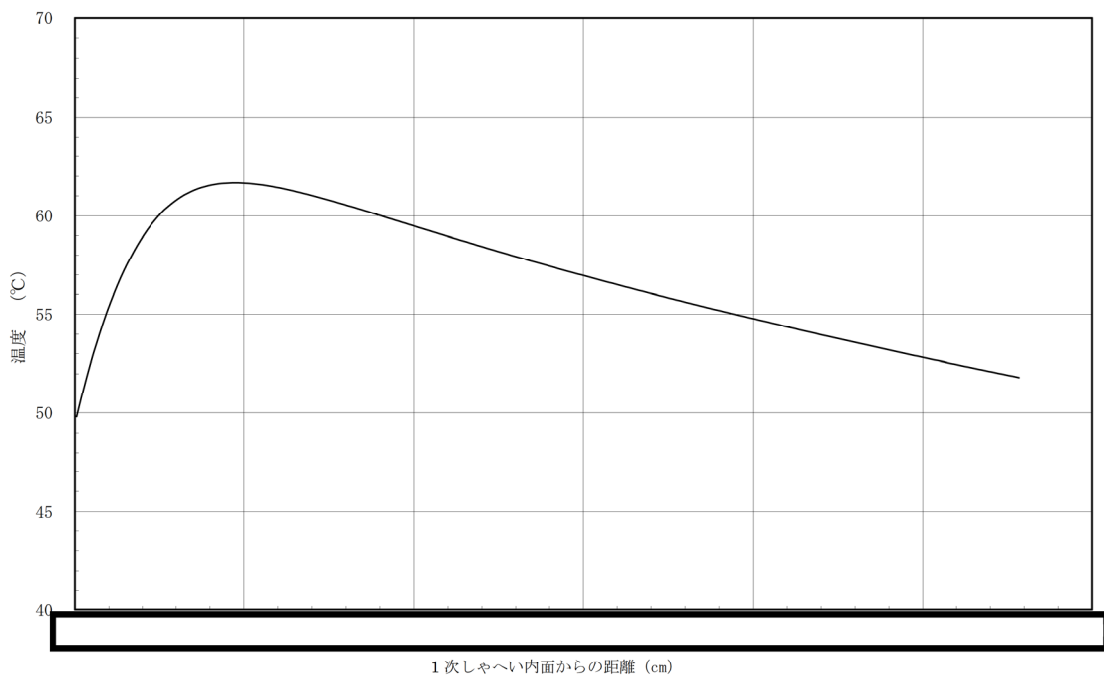


図 3-3 1 次しゃへいコンクリート内温度分布

## 2. RV サポート直下部の温度分布解析

### 2.1 算出方法

RV サポート直下部の温度分布は対象範囲を3次元ソリッド要素でモデル化し、熱流動解析より算出している。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 を使用している。

### 2.2 評価モデル

評価モデルの対象範囲は温度条件の厳しい RV 出口ノズル部周りとし、以下の要素から構成している。評価対象範囲と評価モデル（全体）を図 3-4 及び図 3-5 に示す。

- RV
- 1次冷却材管（ホットレグ）
- 保温材
- RV サポート
- 配管貫通部
- 1次しゃへいコンクリート（ライニング含む）

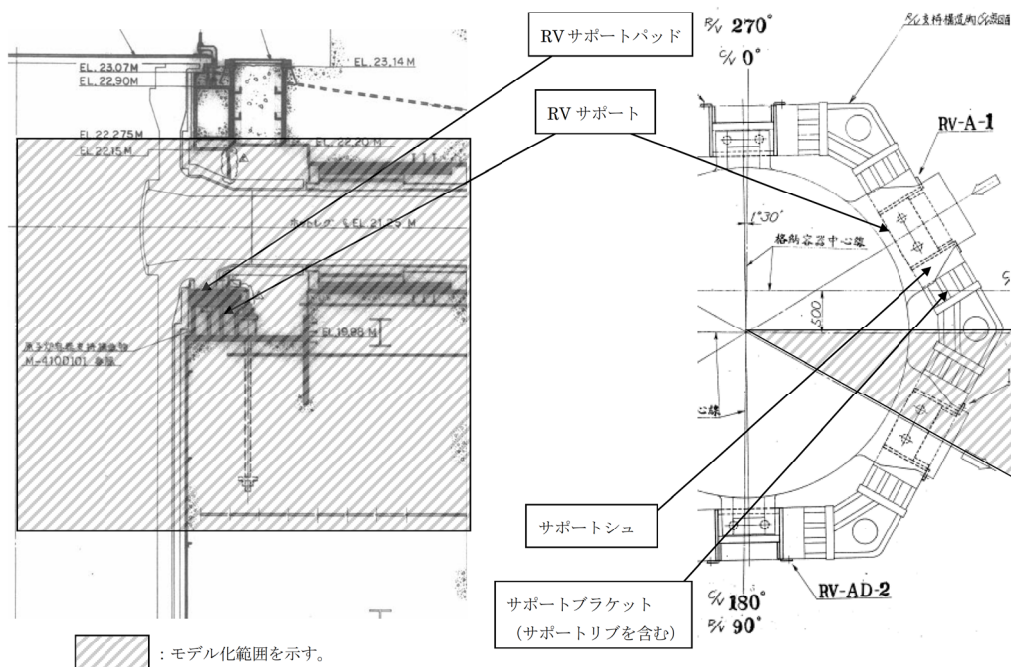


図 3-4 評価対象範囲

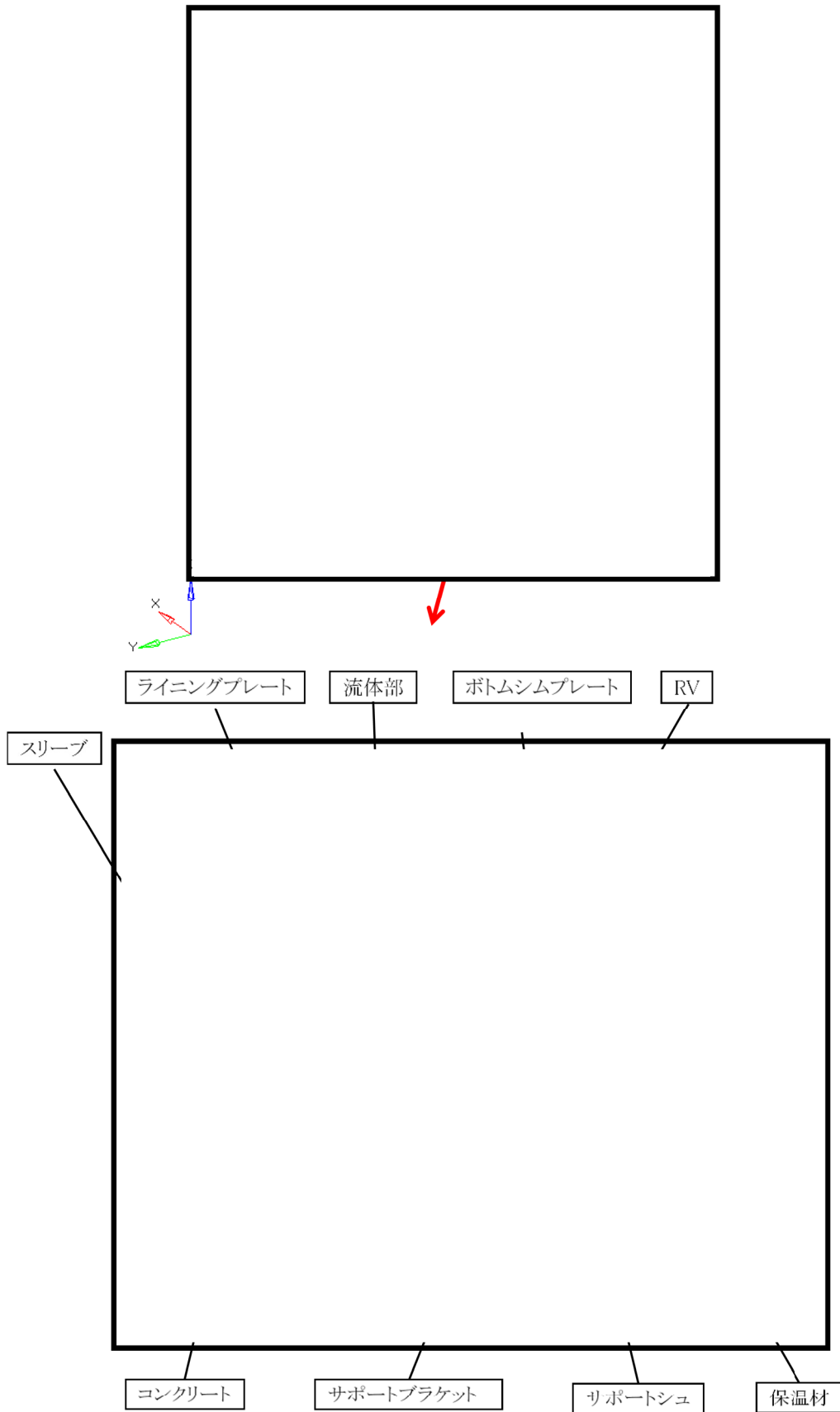


図 3-5 評価モデル (全体)

### 2.3 入力条件

- 1次冷却材温度 (RV 内部)  $T_C : 288.1^\circ\text{C}$
- 1次冷却材温度 (RV 出口管台及び1次冷却材管内面)  $T_H : 322.7^\circ\text{C}$
- RV 冷却ファン出口流量  $\square \text{ m}^3/\text{min}$ , 冷却空気温度  $\square \text{ }^\circ\text{C}$
- ガンマ発熱 : 図 3-6 を考慮
- 主な材料物性値 : 表 3-1 参照

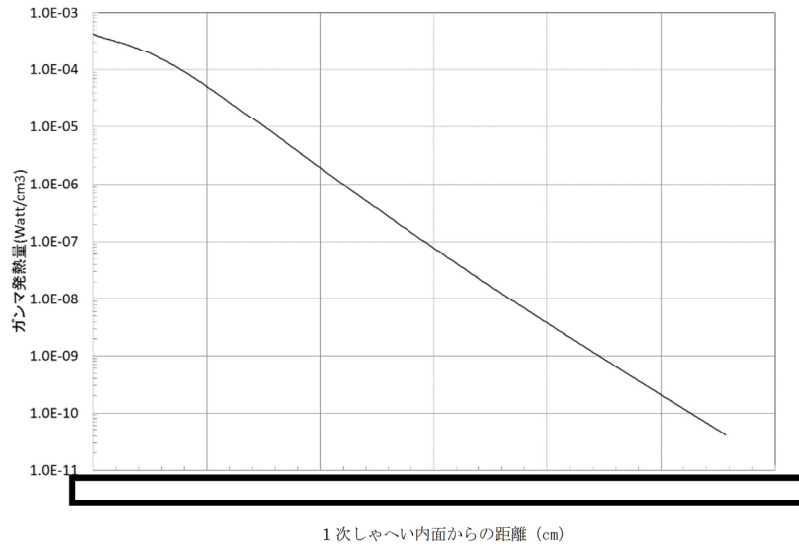


図 3-6 1次しゃへいコンクリート (炉心中心高さ) のガンマ発熱量分布

表 3-1 主な材料物性値

部位		材質	熱伝導率 (W/(m・K)) ※
空気		—	0.02572 (20℃) 0.03145 (100℃) 0.03803 (200℃) 0.04708 (350℃)
RV	上部胴, 冷却材出口管台	SFVQ 1A	51.2 (300K) 46.1 (500K) 36.9 (800K)
	下部胴	SFVQ 1A	
1次冷却材管	ホットレグ	SCS14A	24.3 (300K)
RV サポート	シムプレート	AISI A10 (工具鋼相当)	45.1 (300K) 39.2 (600K) 29.9 (1000K)
	サポートシュ	SFVQ 1A	51.2 (300K) 46.1 (500K) 36.9 (800K)
	ベースプレート, サポートブラケット	SM50B (SM490B)	51.6 (300K) 47.8 (500K) 38.2 (800K)
	止め金具	SNC631 (ニッケルクロム鋼相当)	17.4 (300K)
外周プレート, スリーブ, リングフレーム支柱		SM50B (SM490B)	51.6 (300K) 47.8 (500K) 38.2 (800K)
パッフルプレート, パッフルビーム, ライニング, リングフレーム		SS41 (SS400)	51.6 (300K) 47.8 (500K) 38.2 (800K)
コンクリート, グラウト		珪岩質骨材コンクリート相当	1.5 (300K) 1.1 (600K)
保温材	RV 保温材	—	
	1次冷却材管保温材	—	

※出典：(社)日本機械学会「伝熱工学資料 改訂第5版」(保温材は保温材スペック)  
熱伝導率は記載の値(記載の値は一例)を定義し、その間の温度では線形補間した値を設定している。



#### 2.4 評価結果

温度分布解析の結果、RV サポート直下部における最高温度は約 53℃である。  
RV サポート直下部の温度分布を図 3-7 に示す。

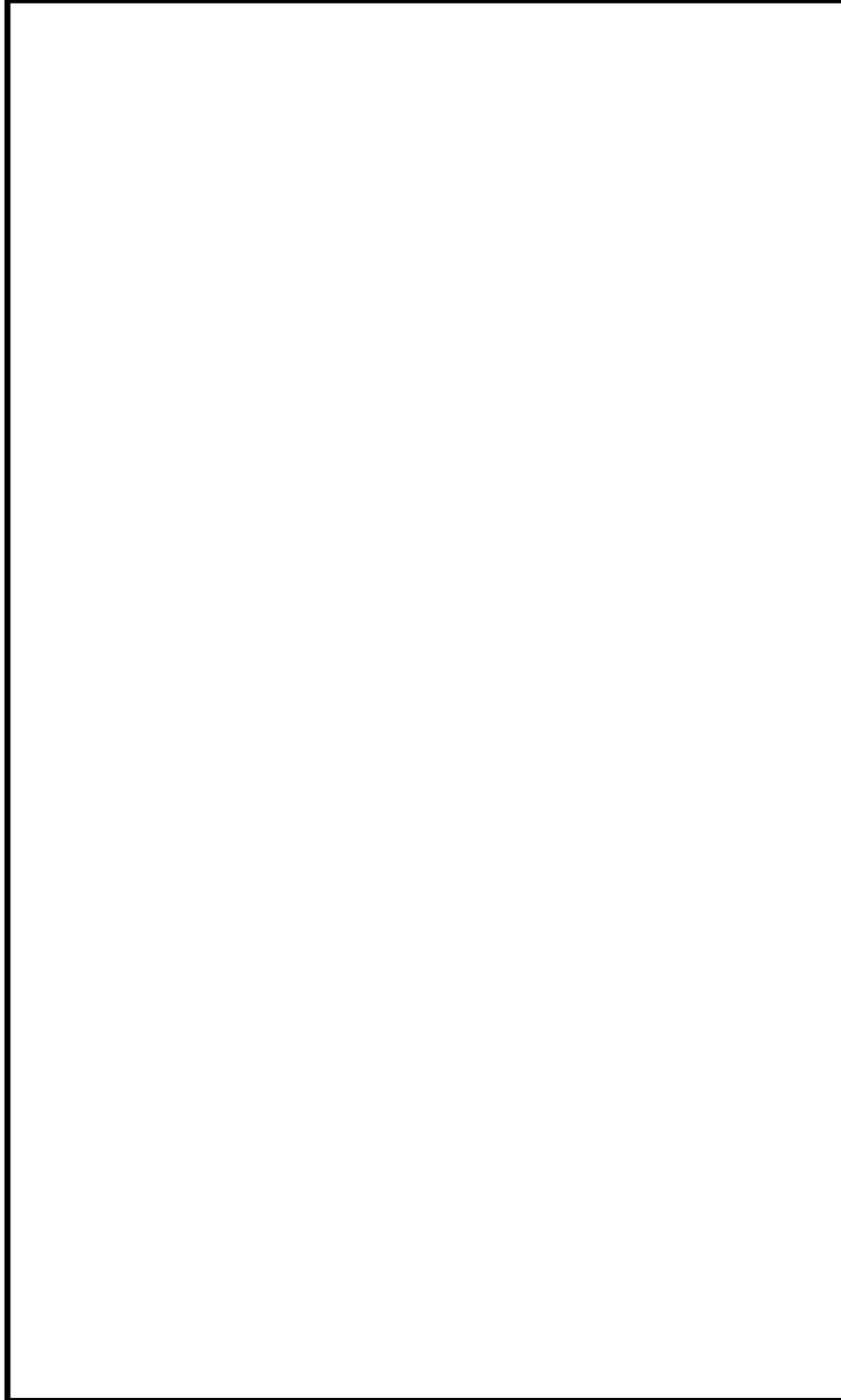


図 3-7 RV サポート直下部の温度分布

## ＜放射線照射の影響に対する構造健全性評価結果について＞

中性子照射及びガンマ線照射によるコンクリートの強度低下を踏まえた構造健全性評価結果を以下に示す。

中性子照射がコンクリート強度へ及ぼす影響に関する最新知見として用いている、原子力規制庁技術報告(小嶋ほか, 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))においては、中性子スペクトルのエネルギー範囲が 0.1MeV を超える中性子について、中性子照射量が  $1 \times 10^{19} \text{n/cm}^2$  よりコンクリート強度が低下する可能性を指摘している。

泊 2 号炉においても、中性子照射量が  $1 \times 10^{19} \text{n/cm}^2$  からコンクリート強度が低下するものとして評価を行っているが、中性子スペクトルのエネルギー範囲は解析の設定上 0.11MeV を超える範囲で代表しており、上記技術報告のエネルギー範囲と僅かに差異がある。このエネルギー範囲の差異は、コンクリートが受ける中性子照射量に影響するおそれがある。

しかし、泊 2 号炉における、エネルギー範囲の差異による中性子照射量に対する影響は、評価条件及び評価結果における裕度の範囲内であり軽微なものと考えている。

上記を踏まえ、以下の評価においては中性子スペクトルのエネルギー範囲が 0.11MeV を超える範囲の中性子を代表とした評価としている。

なお、評価条件における中性子スペクトルのエネルギー範囲の差異による影響に関する確認結果を添付-1 に示す。

## 1. はじめに

中性子照射量が  $1 \times 10^{19} \text{n/cm}^2$  を超える範囲は、炉心中心部で最も大きくなり、1 次しゃへい壁炉心側表面から深さ方向に 9cm 程度である。また、ガンマ線照射量が  $2 \times 10^{10} \text{rad}$  を超える範囲も、炉心中心部で最も大きくなり、深さ方向に 8cm 程度である。

中性子照射量が  $1 \times 10^{19} \text{n/cm}^2$  を超える範囲及びガンマ線照射量が  $2 \times 10^{10} \text{rad}$  を超える範囲について、3次元モデルを作成し要素毎に示した結果を図 4-1 及び図 4-2 に示す。

なお、中性子照射量及びガンマ線照射量は、2次元輸送計算コード DORT により算出した中性子束及びガンマ線量率に評価時間を乗じて算出している。

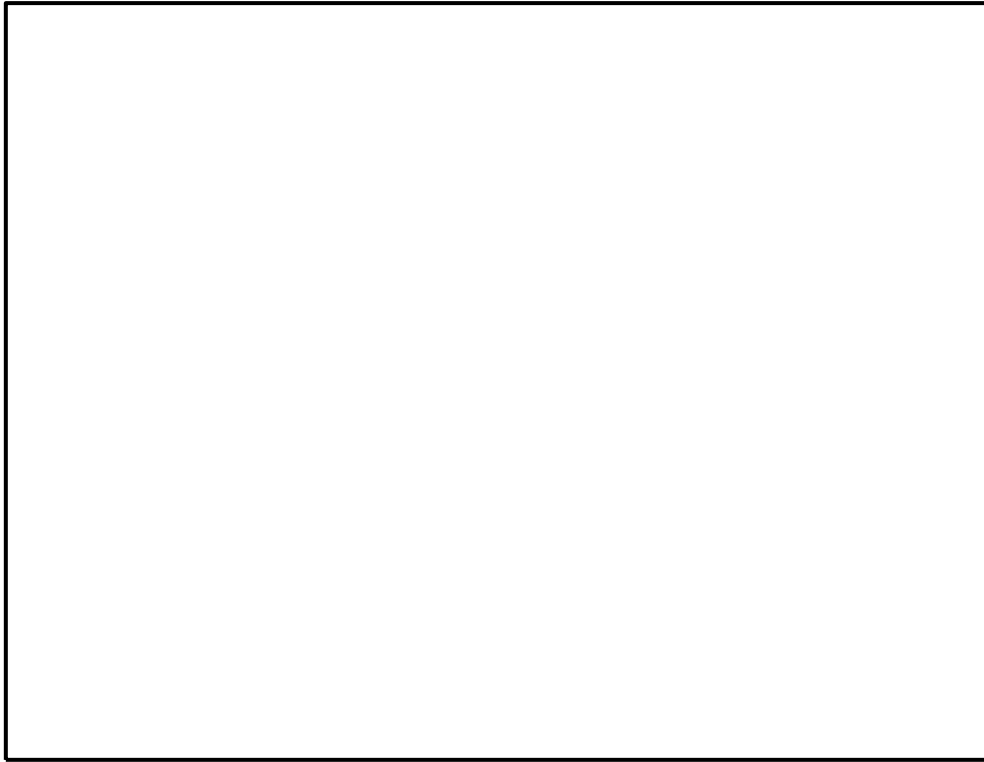


(a) モデル全体

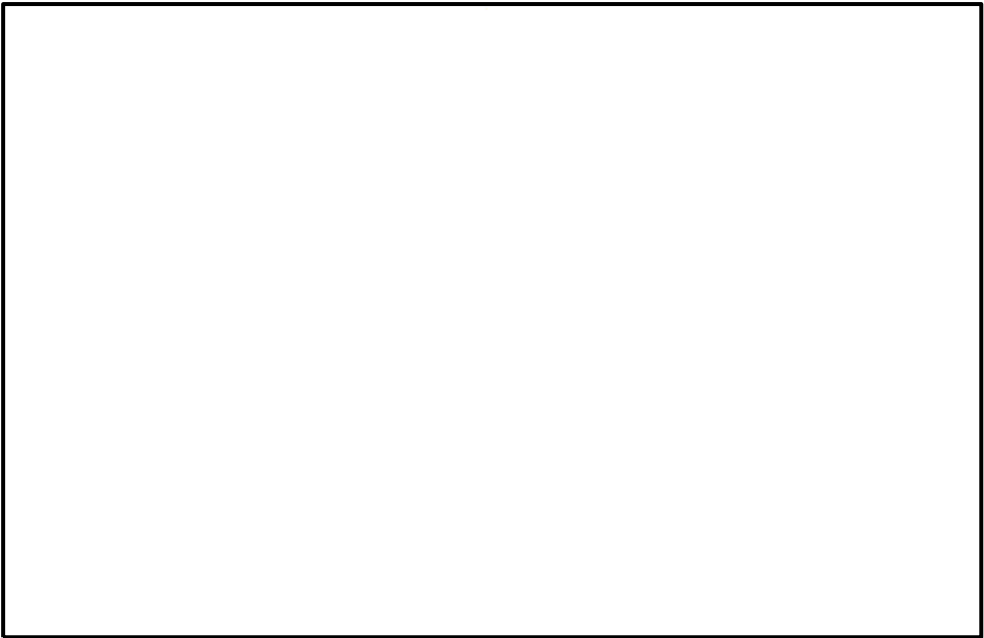


(b) 炉心中心位置

図 4-1 中性子照射線量当量分布



(a) モデル全体



(b) 炉心中心位置

図 4-2 ガンマ線照射線量当量分布

## 2. 放射線照射の影響に対する構造健全性評価

1次しゃへい壁における構造的な要求は以下のとおりである。

- ・原子炉容器の支持機能
- ・基準地震動に対する耐震性

### 2.1 原子炉容器の支持機能

#### (1) 鉛直方向荷重による圧縮評価

##### 【評価方針】

原子炉容器の鉛直方向荷重は、図4-3に示すとおり、シムプレート、サポートブラケット及びベースプレートを介してコンクリートに伝わる。原子炉容器支持部における圧縮荷重評価は建設工認時に行っている。今回、放射線照射の影響によりコンクリート強度が影響を受けると想定する範囲が原子炉容器支持部に重なるため、その面積を欠損させた状態を想定し改めて評価を行った。

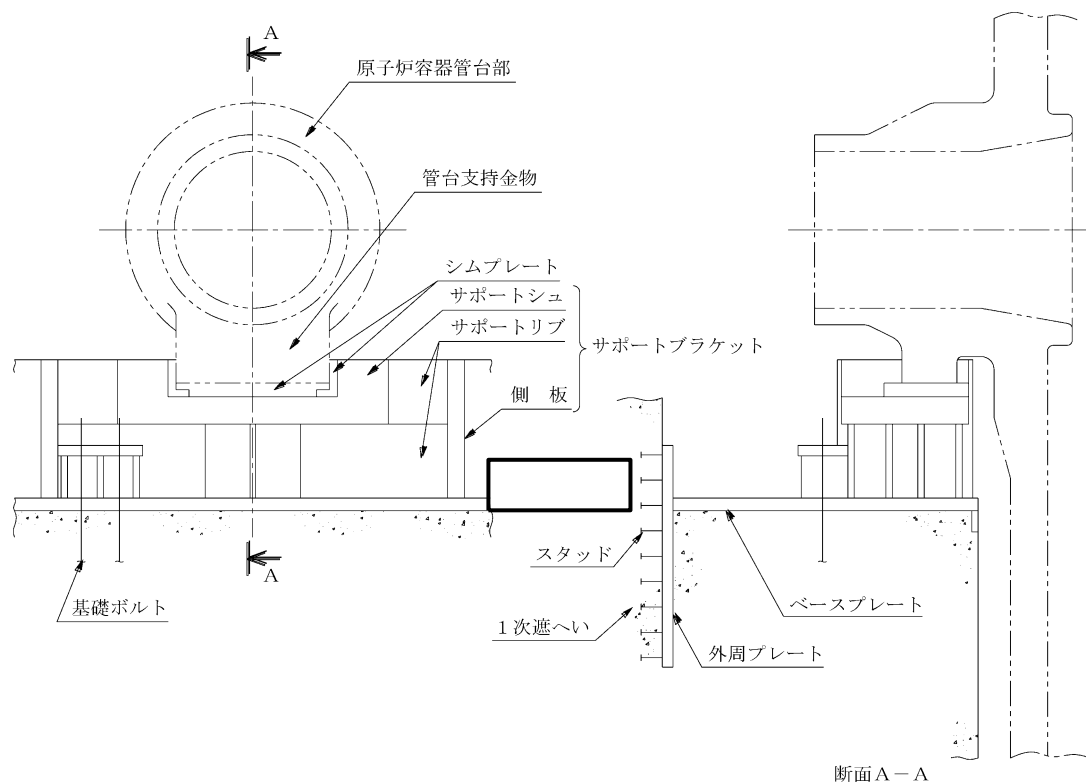


図 4-3 原子炉容器支持構造物概略図

【評価条件】

欠損範囲については、中性子照射量が $1 \times 10^{19} \text{n/cm}^2$ を超える範囲及びガンマ線照射量が $2 \times 10^{10} \text{rad}$ を超える範囲を包絡する範囲として、1次しゃへい壁の炉心側表面から一律10cmとし、1次しゃへい壁上端から下端までを欠損させた状態を保守的に想定する。構造健全性評価に用いる放射線照射の影響範囲の概念図を図4-4に示す。

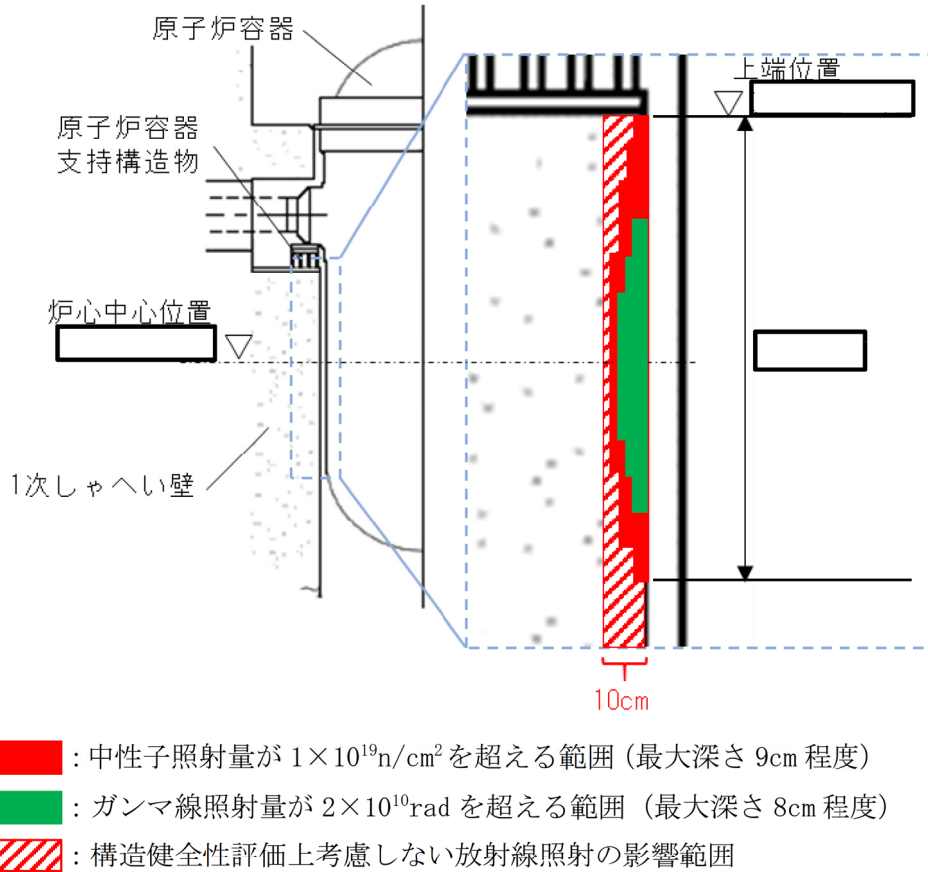


図4-4 構造健全性評価に用いる放射線照射の影響範囲の概念図

原子炉容器支持構造物から圧縮荷重を受けるコンクリートの支圧面と、コンクリートの欠損を想定する範囲の比較図を図4-5に示す。

評価面積は、各原子炉容器支持構造物の支圧面よりNIS箱体ライニングの設置面積を除外したものから、更に1次しゃへい壁炉心側表面から一律10cmを欠損させた面積の中で最小のものを使用する。評価に使用する最小面積を図4-5の赤枠で示す。

評価用荷重は基準地震動  $S_1$  と  $S_s^*$  を包絡したものを使用する。コンクリートに作用する荷重を表4-1に示す。

\*：発電用原子炉施設に関する耐震設計審査指針（平成18年9月19日）により策定した基準地震動  $S_s$

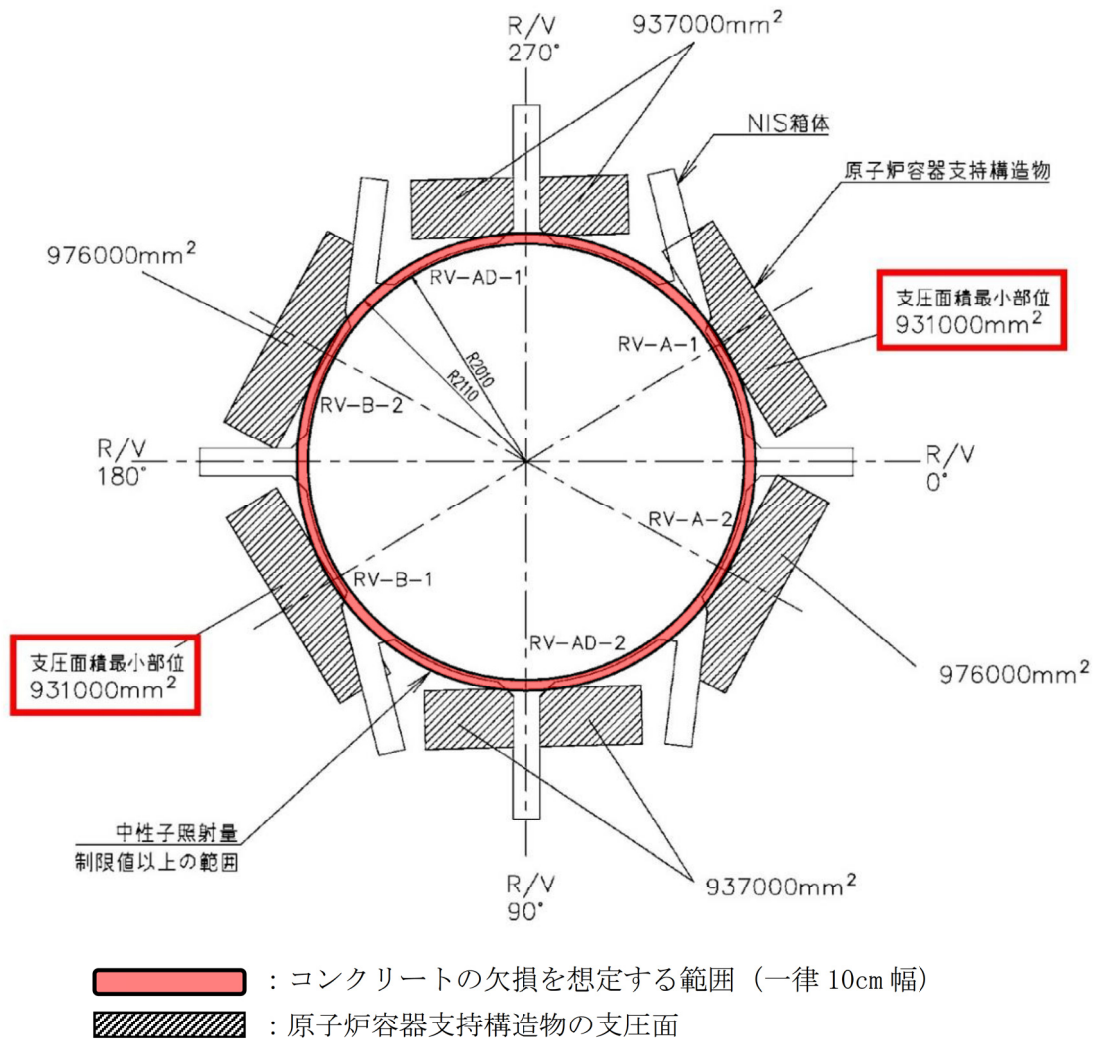


図 4-5 原子炉容器支持構造物の支圧面と鉛直方向荷重による圧縮評価において  
コンクリートの欠損を想定する範囲との比較

表 4-1 原子炉容器支持構造物コンクリートに作用する荷重 (鉛直方向)

(単位 : kN)

		S <sub>1</sub> 地震時	S <sub>s</sub> 地震時
		鉛直方向荷重による圧縮*1	
原子炉容器支持構造物より加わる荷重	自重*2		
	熱膨張荷重		
	地震荷重		
荷重			

\*1 : 荷重は、鉛直上向きを正とする。

\*2 : 自重は、スクラム荷重を含む。

**【評価結果】**

コンクリートの圧縮耐力（許容圧縮荷重）を次式により求める。

$$c_{pa} = (K_2' \times A_p \times F_c) / 1,000$$

ここで、

$c_{pa}$  : コンクリートの圧縮耐力（許容圧縮荷重）(kN)

$K_2'$  : コンクリート耐力の低減係数（ $S_1$ 地震時=2/3,  $S_s$ 地震時=0.75）

$A_p$  : コンクリートの支圧面積（=931,000mm<sup>2</sup>）

$F_c$  : コンクリートの設計基準強度（=23.5N/mm<sup>2</sup>）

コンクリートの圧縮耐力は地震時の荷重を十分上回っていることを確認した。評価結果を表4-2に示す。

表 4-2 原子炉容器支持構造物コンクリート 鉛直方向荷重による圧縮評価

応力状態	許容応力状態*	荷重 (kN)	耐力 (kN)	耐震裕度
圧縮 (1次+2次)	Ⅲ <sub>A</sub> S			2.43
	Ⅳ <sub>A</sub> S			2.73

\*: 本評価は、基準地震動 $S_1$ による発生値とⅢ<sub>A</sub>S及びⅣ<sub>A</sub>S許容値による評価である。

(2) 接線方向荷重による引張評価

**【評価方針】**

原子炉容器の接線方向荷重は、シムプレート、サポートブラケット等を介してコンクリートに伝わる。基礎ボルトは、接線方向荷重によるベースプレートの浮き上がりを防止するために設けており、基礎ボルトによるコンクリートのせん断評価は建設工認時に行っている。今回、放射線照射の影響によりコンクリート強度が影響を受けると想定する範囲が基礎ボルトによるコンクリートのコーン状破壊面の有効投影面積に重なるため、その面積を欠損させた状態を想定し改めて評価を行った。

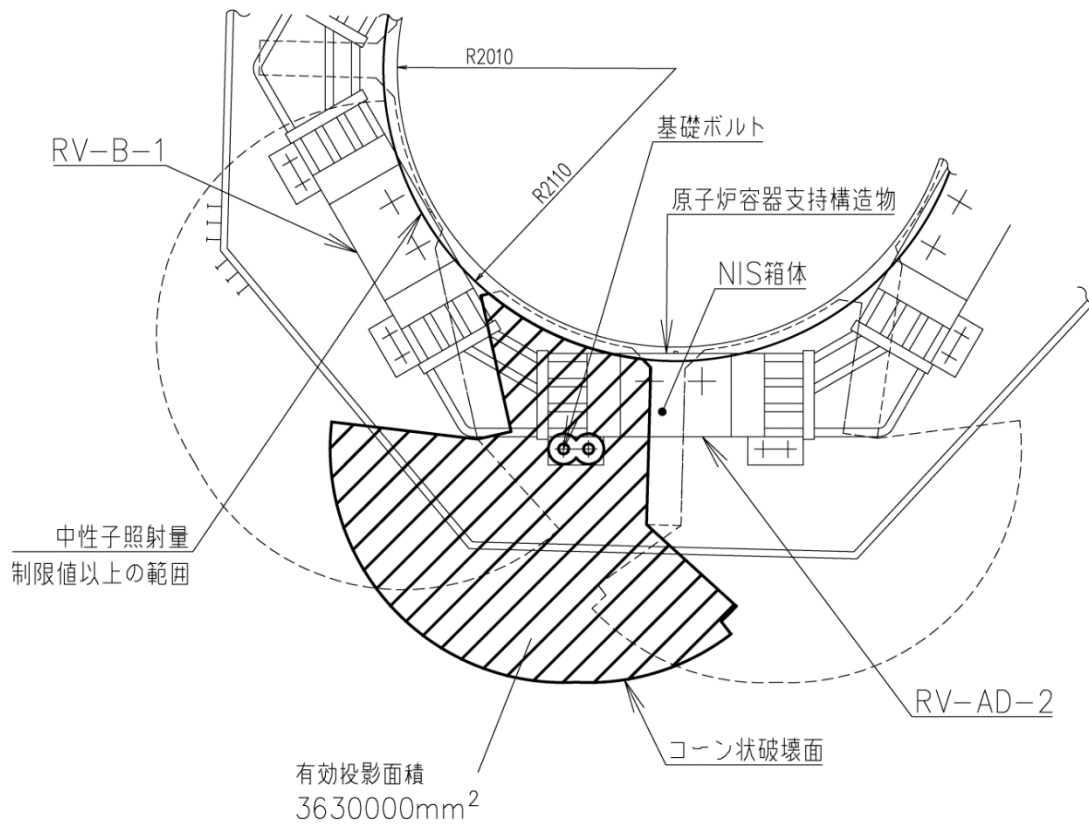
**【評価条件】**

欠損範囲については、前項(1)と同様に1次しゃへい壁の炉心側表面から一律10cmとし、1次しゃへい壁上端から下端までを欠損させた状態を保守的に想定（図4-4参照）する。基礎ボルトによるコンクリートのコーン状破壊面の有効投影面積と、コンクリートの欠損を想定する範囲の比較図を図4-6に示す。

評価面積は、各基礎ボルトのコーン状破壊面の有効投影面積よりNIS箱体ライニングの設置面積を除外したものから、更に1次しゃへい壁炉心側表面から一律10cmを欠損させた面積の中で最小のものを使用する。評価に使用する最小有効投影面積を図4-6に示す。

評価用荷重は基準地震動 $S_1$ と $S_s$ を包絡したものを使用する。コンクリートに作用する荷重を表4-3に示す。





(注) 有効投影面積が最小となるサポートはRV-AD-1及びRV-AD-2であるが、RV-AD-2を代表して図示した。

図 4-6 コーン状破壊面の有効投影面積と接線方向荷重による引張評価において  
コンクリートの欠損を想定する範囲との比較

表 4-3 原子炉容器支持構造物コンクリートに作用する荷重 (接線方向)

(単位 : kN)

		S <sub>1</sub> 地震時	S <sub>s</sub> 地震時
		接線方向荷重	
原子炉容器支持構造物より加わる荷重	自重	—	—
	熱膨張荷重	—	—
	地震荷重		
荷重			

【評価結果】

コンクリートの引張耐力（許容引張荷重）を次式により求める。

$$p_a = \text{最小値} (p_{a1}, p_{a2})$$

$$p_{a1} = 0.31 \times K_1 \times A_c \times \sqrt{F_c} / 1,000$$

$$p_{a2} = K_2 \times \alpha_c \times A_0 \times F_c / 1,000$$

ここで、

$p_a$  : コンクリートの引張耐力（許容引張荷重）(kN)

$p_{a1}$  : コンクリート躯体のコーン状破壊強度から決まる許容引張荷重 (kN)

$p_{a2}$  : 基礎ボルト頭部に接するコンクリート部の支圧強度から決まる許容引張荷重 (kN)

$K_1$  : コーン状破壊する場合の引張耐力の低減係数  
( $S_1$ 地震時=0.45,  $S_s$ 地震時=0.6)

$K_2$  : 支圧破壊する場合の引張耐力の低減係数  
( $S_1$ 地震時=2/3,  $S_s$ 地震時=0.75)

$F_c$  : コンクリートの設計基準強度 (=23.5N/mm<sup>2</sup>)

$A_c$  : コーン状破壊面の有効投影面積 (=3,630,000mm<sup>2</sup>)

$A_0$  : 基礎ボルト頂部の支圧面積 (=64,400mm<sup>2</sup>)

$\alpha_c$  : 支圧面積と有効投影面積から定まる係数 (=  $\sqrt{A_c/A_0}$  かつ 10以下=7.507)

コンクリートの引張耐力は地震時の荷重を十分上回っていることを確認した。評価結果を表4-4に示す。

表 4-4 原子炉容器支持構造物コンクリート 接線方向荷重による引張評価

応力状態	許容応力状態*	荷重 (kN)	耐力 (kN)	耐震裕度
引張 (1次)	Ⅲ <sub>A</sub> S			1.53
	Ⅳ <sub>A</sub> S			2.05

\*: 本評価は、基準地震動  $S_s$  による発生値とⅢ<sub>A</sub>S及びⅣ<sub>A</sub>S許容値による評価である。

## 2.2 基準地震動に対する耐震性

泊2号炉の1次しゃへい壁において、放射線照射の影響によりコンクリート強度が影響を受けると想定する範囲のコンクリートが欠損したと仮定し、せん断ひずみによる評価を行った。なお、欠損範囲については、中性子照射量が $1 \times 10^{19} \text{n/cm}^2$ を超える範囲及びガンマ線照射量が $2 \times 10^{10} \text{rad}$ を超える範囲を包絡する範囲として、1次しゃへい壁の炉心側表面から一律10cmとし、1次しゃへい壁上端から下端までを欠損させた状態を保守的に想定する。

### (1) 放射線照射を考慮しない場合のせん断ひずみ

泊2号炉の内部コンクリート（1次しゃへい壁含む）における建設工認時のせん断断面積及び基準地震動 $S_s$ に対するせん断ひずみを表4-5に示す。

基準地震動 $S_s$ に対するせん断ひずみは評価基準値に対して十分に余裕がある。

表4-5 内部コンクリート（炉心領域レベル）のせん断断面積及びせん断ひずみ

構造物	方向	せん断断面積 ( $\text{m}^2$ )	せん断ひずみ	評価基準値
内部コンクリート (炉心領域レベル)	EW	118.0	$0.146 \times 10^{-3}$	$2.0 \times 10^{-3}$
	NS	131.5	$0.117 \times 10^{-3}$	

### (2) 放射線照射を考慮した場合のせん断ひずみ

せん断ひずみ $\gamma$ は、以下の式で算出される。

$$\gamma = \tau / G$$

ここで、

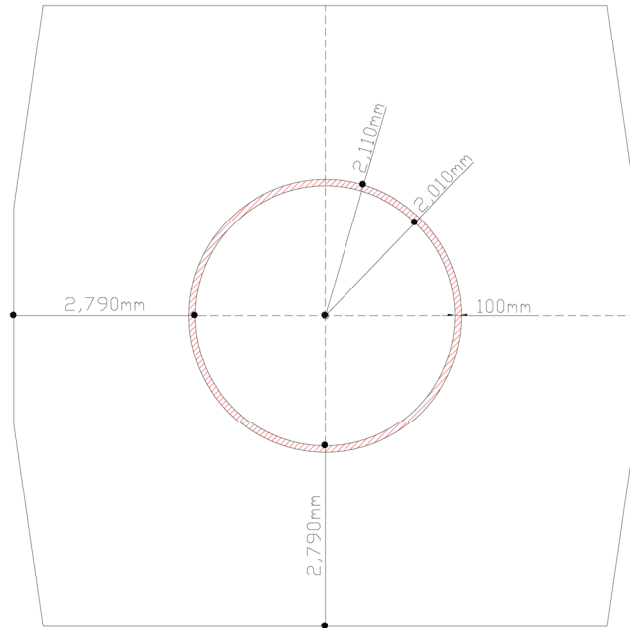
$\tau$  : せん断応力度（せん断力／せん断断面積）

$G$  : せん断弾性係数

せん断応力度については、放射線照射の影響によりコンクリート強度が影響を受けると想定する範囲のコンクリートが欠損したと仮定すると、せん断断面積に反比例して増加する。1次しゃへい壁のコンクリートの欠損を想定する範囲の概念図を図4-7に示す。

一方、せん断弾性係数は、コンクリートの物性値であることから、放射線照射の影響が無い範囲の値は照射後においても変化がないといえる。

よって、放射線照射の影響を考慮した場合のせん断ひずみについて、内部コンクリートのせん断断面積の比率で算出した。




 : コンクリートの欠損を想定する範囲 (1.3m<sup>2</sup>)

図 4-7 1次しゃへい壁のコンクリートの欠損を想定する範囲の概念図

評価の結果、以下のとおり放射線照射の影響を考慮した場合、断面積の比率でも1%程度の影響であり、せん断ひずみ評価に影響を及ぼすものではないことが確認できる。

(EW 方向)

$$118.0\text{m}^2 / (118.0\text{m}^2 - 0.65\text{m}^2) \times 0.146 \times 10^{-3} = 0.147 \times 10^{-3}$$

(NS 方向)

$$131.5\text{m}^2 / (131.5\text{m}^2 - 0.65\text{m}^2) \times 0.117 \times 10^{-3} = 0.118 \times 10^{-3}$$

### 3. まとめ

保守的に内部コンクリート（1次しゃへい壁）から、放射線照射の影響を受ける範囲を除いても、原子炉容器の支持機能を満足していること、耐震性に影響を及ぼすものではないことから、内部コンクリート（1次しゃへい壁）の構造健全性への影響は無いと考えられる。

以 上

## 中性子スペクトルのエネルギー範囲の差による影響について

コンクリート構造物の構造健全性評価における中性子スペクトルのエネルギー範囲の差による影響について確認する。中性子照射量は以下の式で算出している。

$$\text{中性子照射量 (n/cm}^2\text{)} = \text{中性子束 (n/cm}^2\text{/sec)} \times \text{評価時間 (EFPY (定格負荷相当年数))}$$

上記の式より、中性子照射量は中性子束と評価時間の積で表されるため、中性子スペクトルのエネルギー範囲の差異による中性子束に対する影響と、評価に当たり設定した評価時間の裕度を比較し、中性子スペクトルのエネルギー範囲の差異がコンクリート構造物の構造健全性評価結果に与える影響について確認した。

## 1. 影響評価の考え方

中性子スペクトルのエネルギー範囲の差異による影響については、1次しゃへい壁への中性子照射量に対する影響について確認を行った。中性子照射量は、中性子束と評価時間の積で算出されることから、泊2号炉の評価において、中性子照射量が $1 \times 10^{19} \text{ n/cm}^2$ を超える範囲を求める際に用いた $E > 0.11 \text{ MeV}$ と、最新知見である原子力規制庁技術報告で用いられた $E > 0.1 \text{ MeV}$ を用いた場合における中性子束に対する影響について検討を行った。

評価時間の裕度については、運転開始後60年時点での運転時間余裕（評価に用いたEFPYと現実的なEFPYの差）について検討を行った。

これらの検討の結果から、中性子束に対する影響が、評価時間の裕度の範囲内であることを確認することで、中性子スペクトルのエネルギー範囲の差異による1次しゃへい壁への中性子照射量に対する影響については軽微であると判断した。

## 2. 1次しゃへい壁における中性子束について

1次しゃへい壁における中性子束は、2次元輸送計算コードであるDORTコードにて解析を行っている。DORTコードにおいては、中性子のエネルギーを21群に分けて取扱っており、エネルギーの大きい方から数えて12群目の下限エネルギーが約0.11MeVであることから、泊2号炉の評価では第1～第12群の合計の中性子束で代表している。

泊2号炉の評価で用いた $E > 0.11\text{MeV}$ と最新知見である原子力規制庁技術報告で用いられた $E > 0.1\text{MeV}$ におけるエネルギー範囲の差異は、泊2号炉の評価における中性子エネルギーの第13群（約0.041～0.11MeV）の範囲となるため、各群の中性子束のスペクトルが平坦に分布すると仮定し、保守的に単位エネルギーバンド当たりの中性子束が高い第13群の中性子束の値を用いて、評価した。算出方法のイメージを図4-1-1に示す。評価の結果、 $E > 0.1\text{MeV}$ として評価した場合の中性子束は、 $E > 0.11\text{MeV}$ として評価した場合と比較して約3.6%の増加であることを確認した。

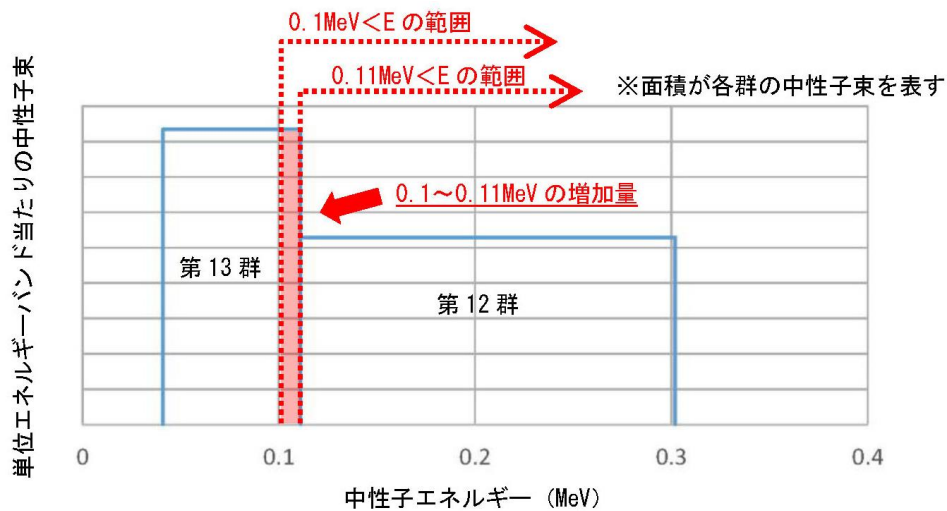


図4-1-1 単位エネルギーバンド当たりの中性子束とエネルギーの関係

$$\text{中性子束増加量の割合} : \frac{(0.11109 - 0.1)}{(0.11109 - 0.040868)} \times \frac{5.858 \times 10^9}{2.597 \times 10^{10}} = 0.0352 \approx 3.6\% \text{ (切上げ)}$$

[計算に使用する値]

12群目の下限エネルギー値 : 0.11109 (MeV)

13群目の上限エネルギー値 : 0.11109 (MeV)

13群目の下限エネルギー値 : 0.040868 (MeV)

13群目の中性子束 :  $5.858 \times 10^9$  (n/cm<sup>2</sup>/s)

1～12群の中性子束の合計 :  $2.597 \times 10^{10}$  (n/cm<sup>2</sup>/s)

### 3. 評価時間の裕度について

泊2号炉高経年化技術評価上の再稼働後（運転開始後30年経過以降60年経過時点まで）の稼働率は、長期停止前の断続運転時の稼働実績である84%を保守的に切り上げて90%に設定しており、運転開始後60年時点のEFPYが持つ裕度は約4.2%となる。

$$\text{EFPYが持つ裕度} = \frac{44.37}{(17.37 + 30 \text{ (年)} \times 0.84)} - 1 = 0.0423 \approx 4.2\% \text{ (切捨て)}$$

[計算に使用する値]

運転開始後60年時点のEFPY : 44.37

現時点のEFPY : 17.37

### 4. まとめ

中性子スペクトルのエネルギー範囲の差異による影響について確認した結果、泊2号炉の評価で用いた $E > 0.11\text{MeV}$ と最新知見である原子力規制庁技術報告で用いられた $E > 0.1\text{MeV}$ におけるエネルギー範囲の差異による中性子束の増加割合は、EFPYの裕度の範囲内であることから、コンクリートの強度低下の影響範囲の算出に用いる中性子照射量にエネルギー範囲の差異が与える影響は僅かである。

また、構造健全性評価では、1次しゃへい壁において、放射線照射によりコンクリート強度が低下する範囲を中性子及びガンマ線の影響深さを考慮して、炉心側表面から一律10cmの円筒状とするとともに、当該部位を欠損させた状態を仮定しており、その結果、最も裕度の小さい原子炉容器の支持性能（接線方向荷重による引張評価）においても、荷重に対して約1.5倍以上の支持耐力を有していることを確認している。

## 〈空気環境の測定方法及び位置について〉

空気環境測定方法および位置を以下に示す。

## 1. 空気環境測定

中性化の進展度合いは、空気環境条件（二酸化炭素濃度、温度及び相対湿度）の影響を受けるため、空気環境測定を実施した。

## (1) 測定方法

空気環境測定に使用した機器を表 5-1 に示す。二酸化炭素濃度は、2016 年 5 月から 2017 年 4 月の期間で各月ごとに 2～3 回測定を行った。温度及び相対湿度は、2016 年 5 月 1 日から 2017 年 4 月 30 日の期間で実施し、1 時間間隔で連続測定を行った。

表 5-1 空気環境測定 使用機器

測定場所	測定項目	使用機器
構内各所	二酸化炭素濃度	二酸化炭素濃度計
	温度	温湿度計
	湿度	

## (2) 測定位置

二酸化炭素濃度、温度及び相対湿度について、建屋内外の計 40 箇所にて測定を実施した。測定位置図を図 5-1～図 5-13 に示す。



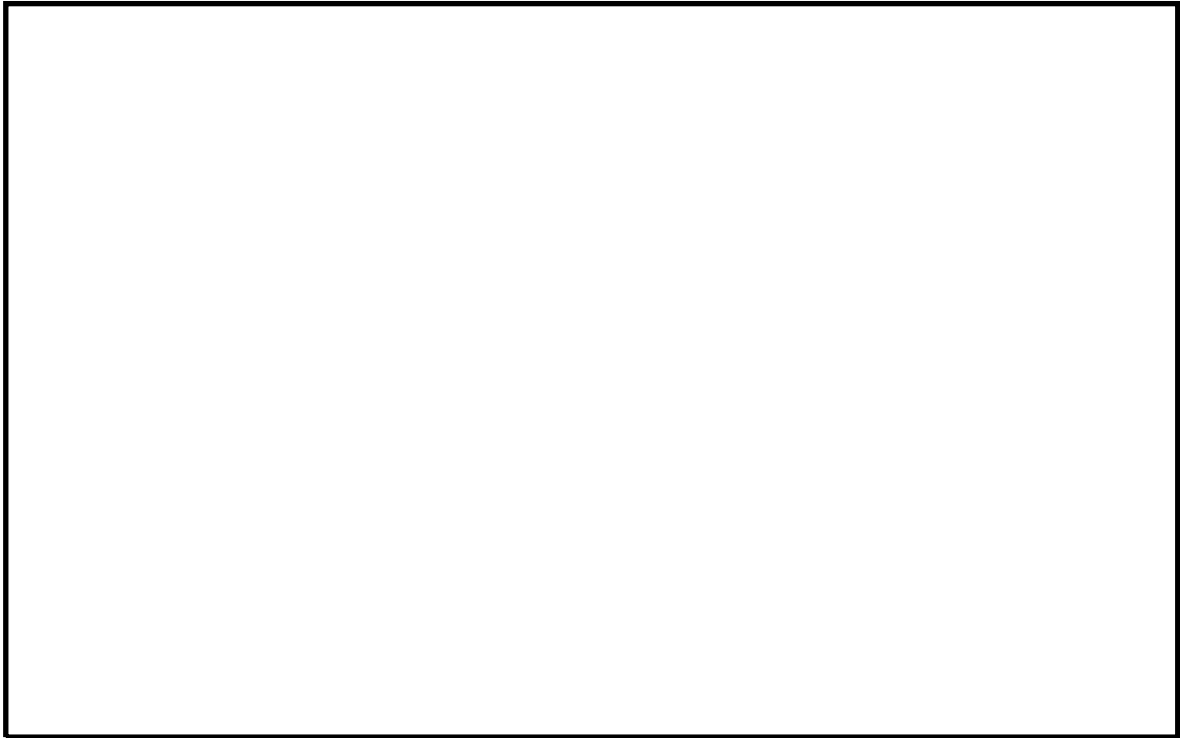


図 5-1 外部しゃへい建屋，周辺補機棟及び燃料取扱棟 (EL. 10.3m)

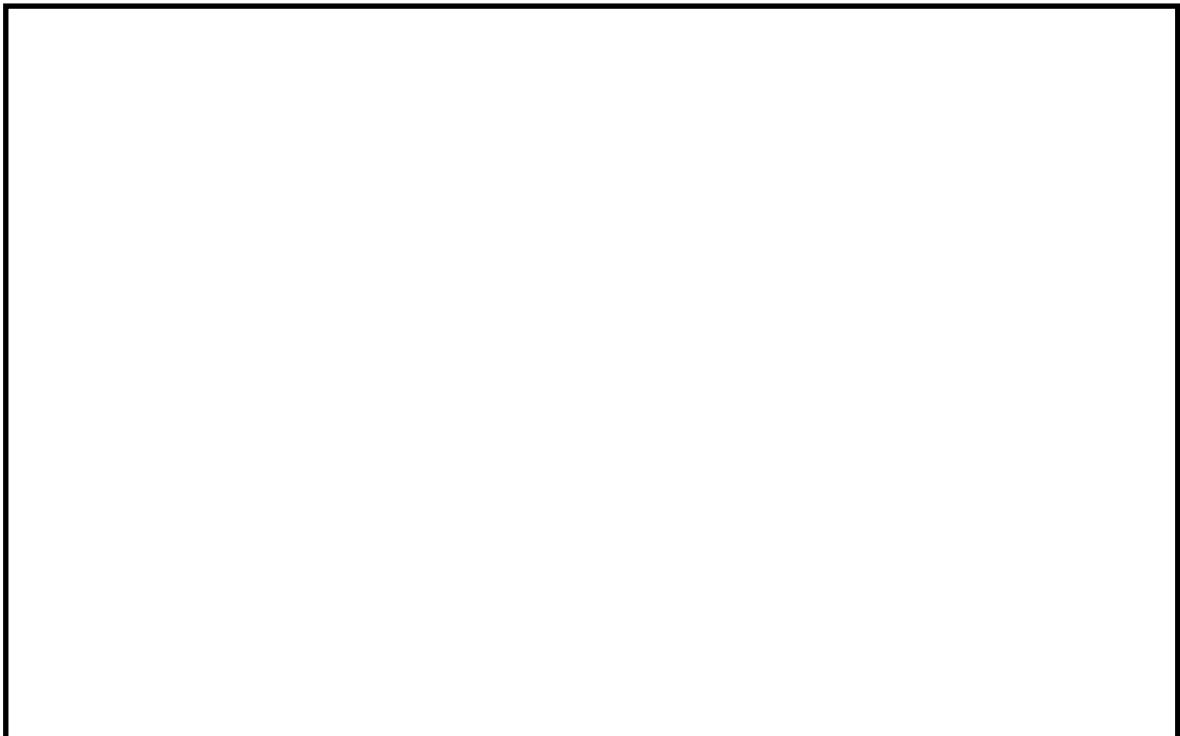


図 5-2 外部しゃへい建屋，周辺補機棟及び燃料取扱棟 (EL. 18.3m)

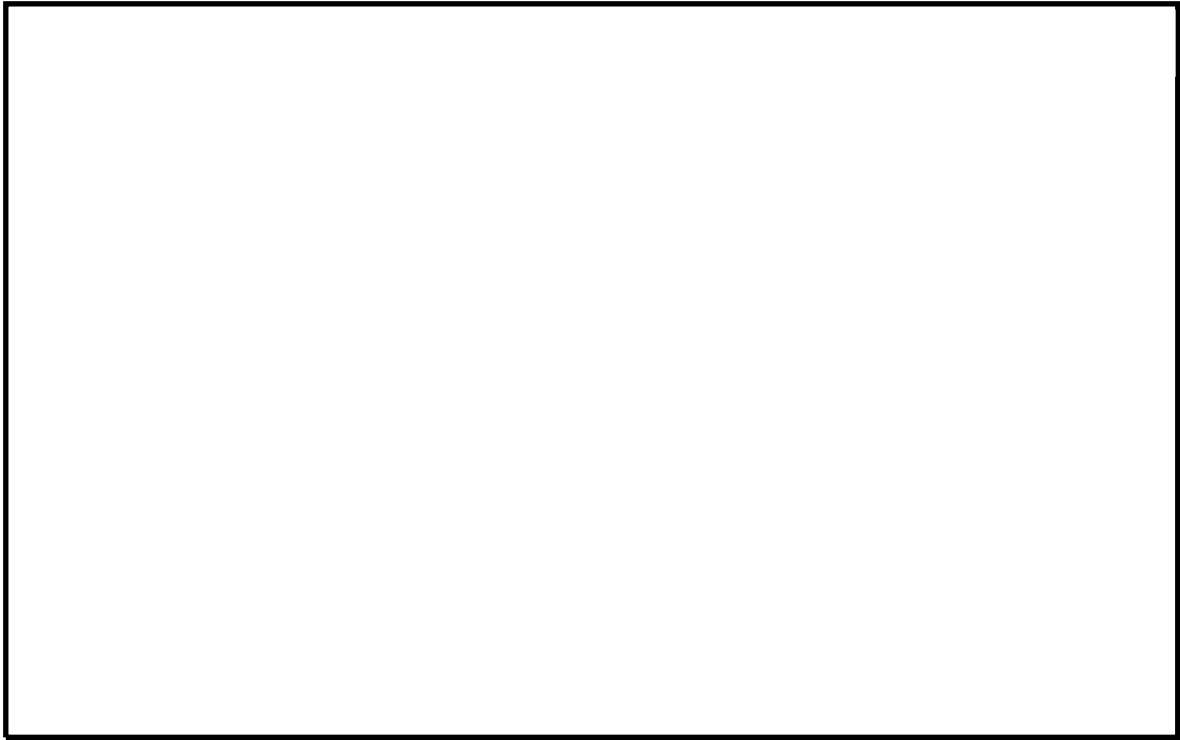


図 5-3 外部しゃへい建屋，周辺補機棟及び燃料取扱棟 (EL. 24. 8m)

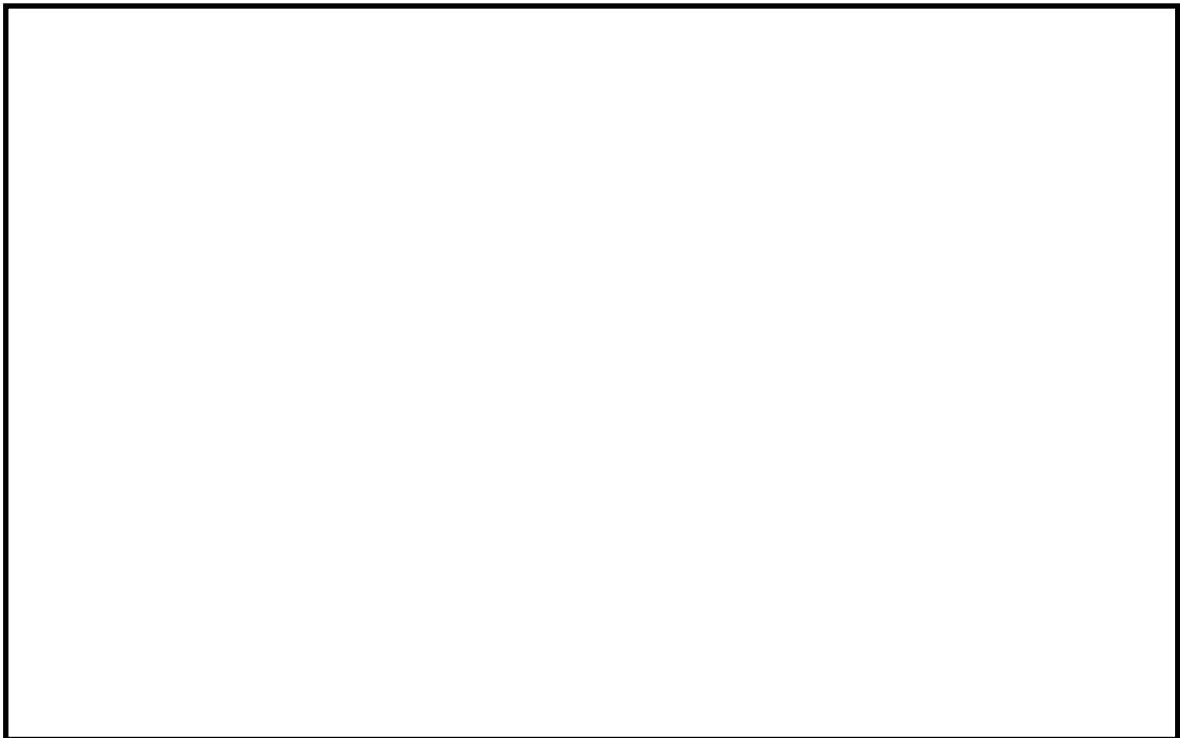


図 5-4 外部しゃへい建屋，周辺補機棟及び燃料取扱棟 (EL. 31. 3m)

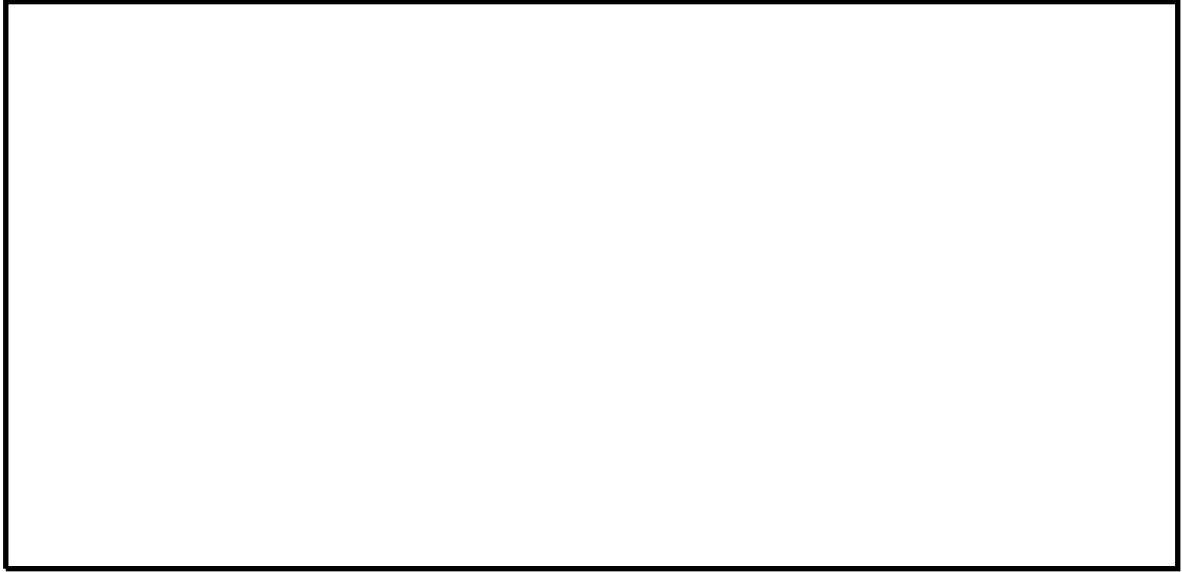


図 5-5 内部コンクリート (EL. 13. 8m)



図 5-6 内部コンクリート (EL. 24. 8m)

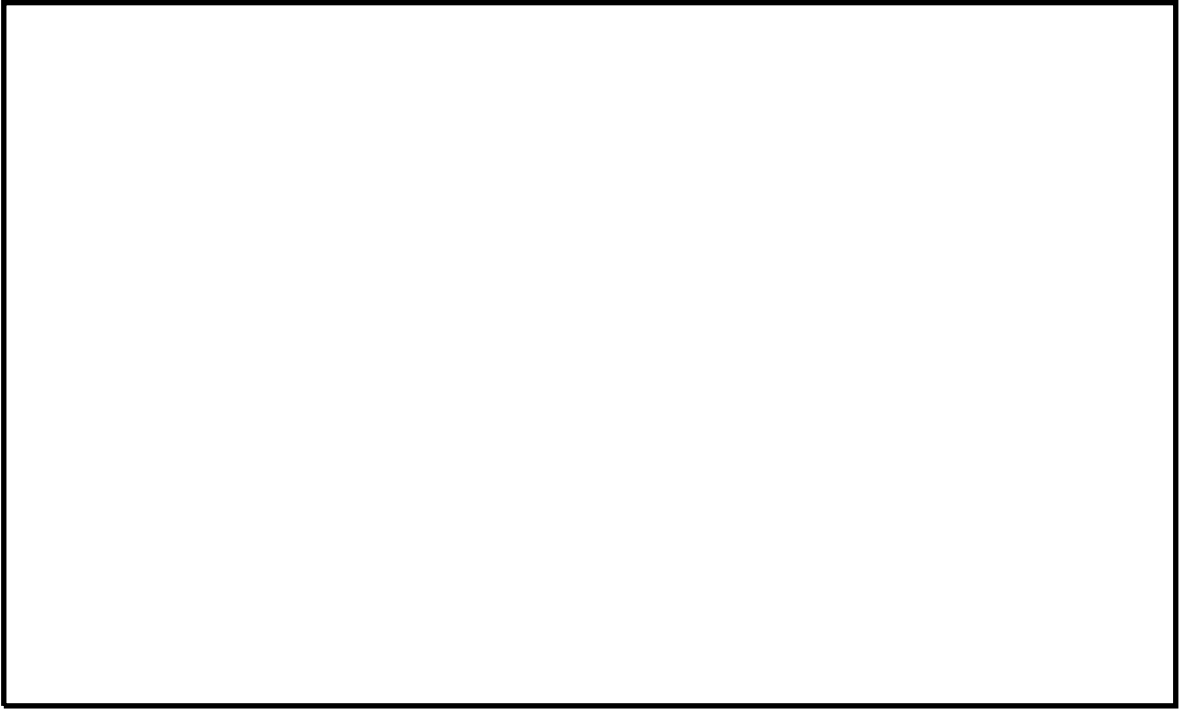


图 5-7 原子炉補助建屋 (EL. 3.3m)

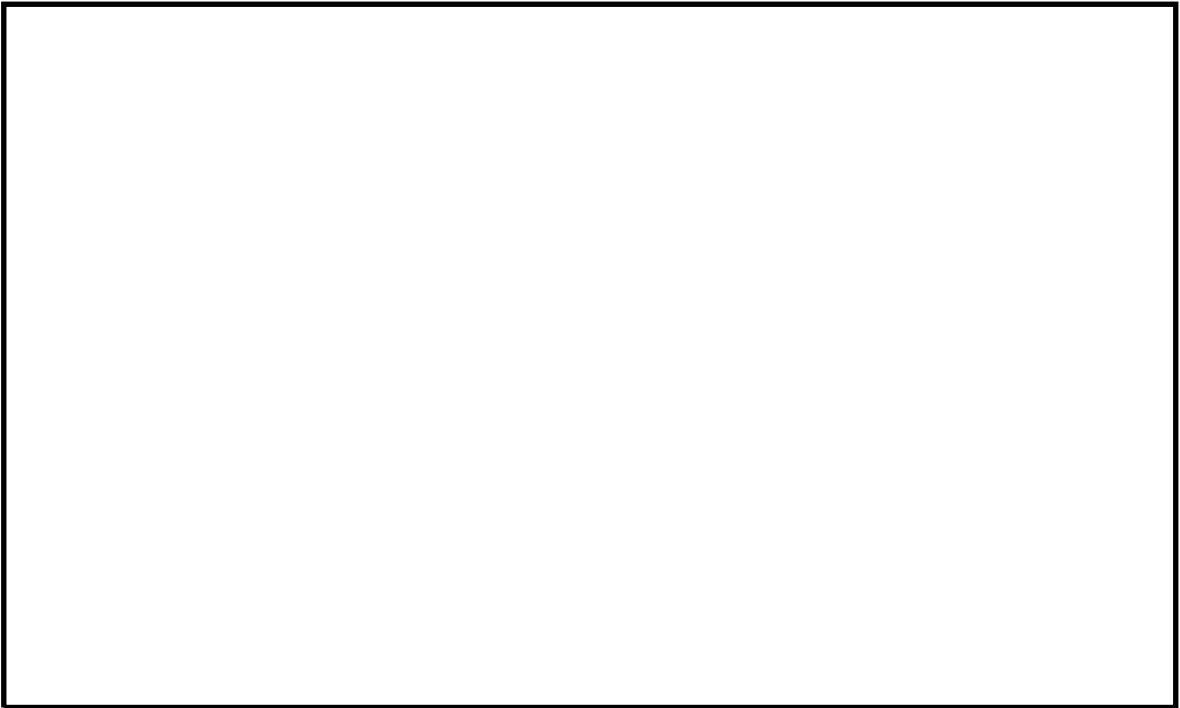


图 5-8 原子炉補助建屋 (EL. 9.8m)

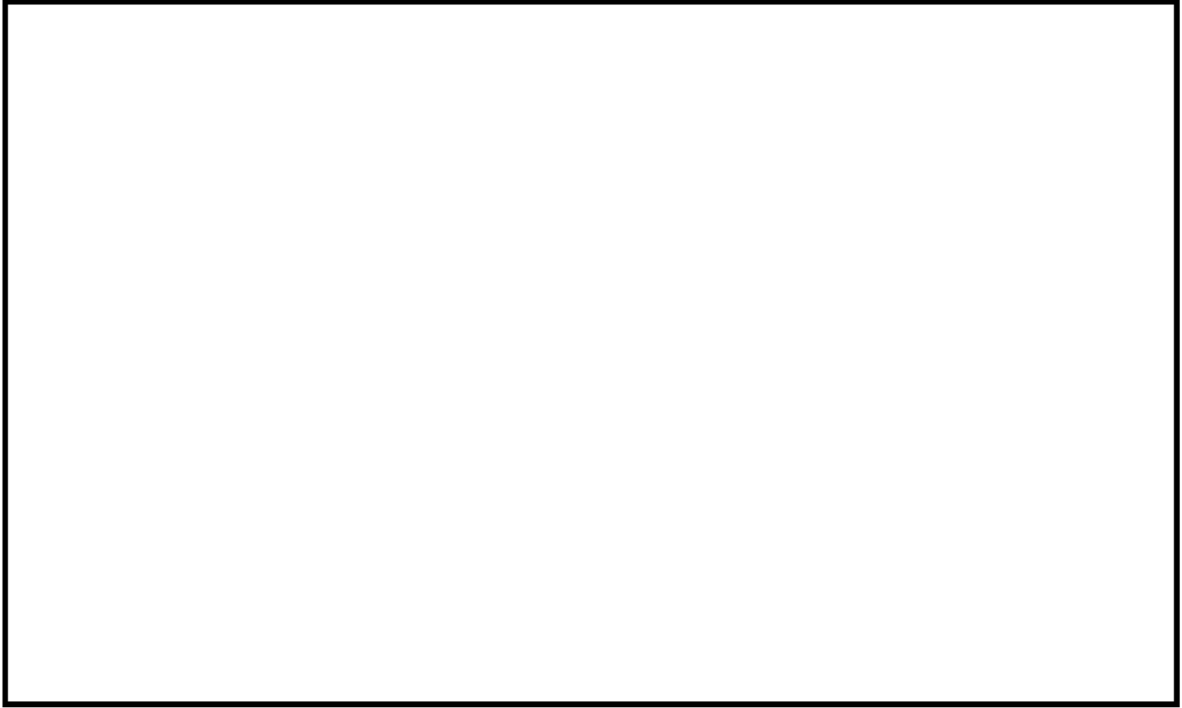


图 5-9 原子炉補助建屋 (EL. 17. 3m)

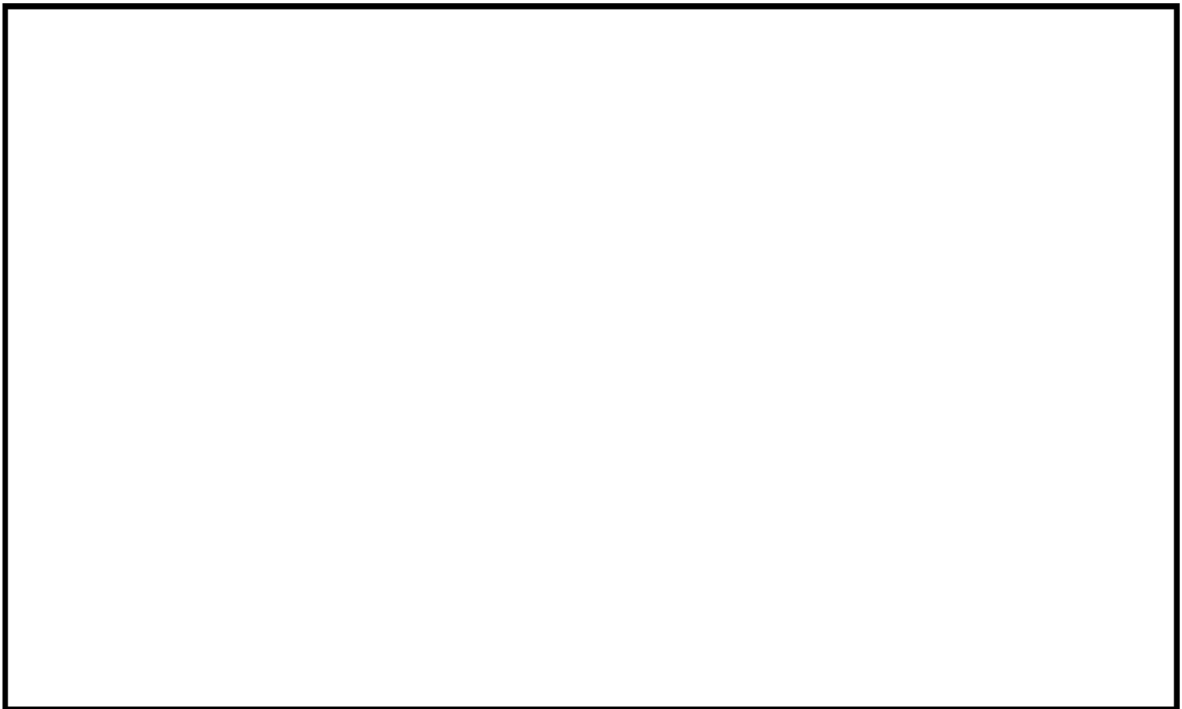


图 5-10 原子炉補助建屋 (EL. 24. 8m)

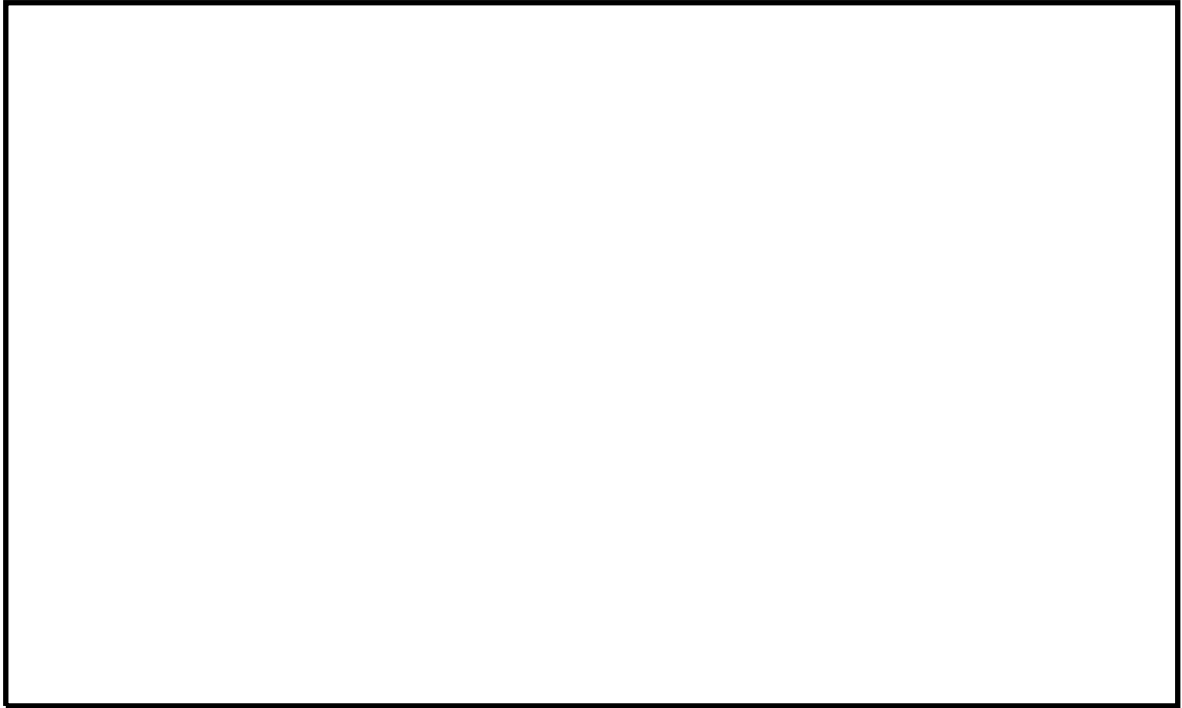


図 5-11 原子炉補助建屋 (EL. 32. 3m)

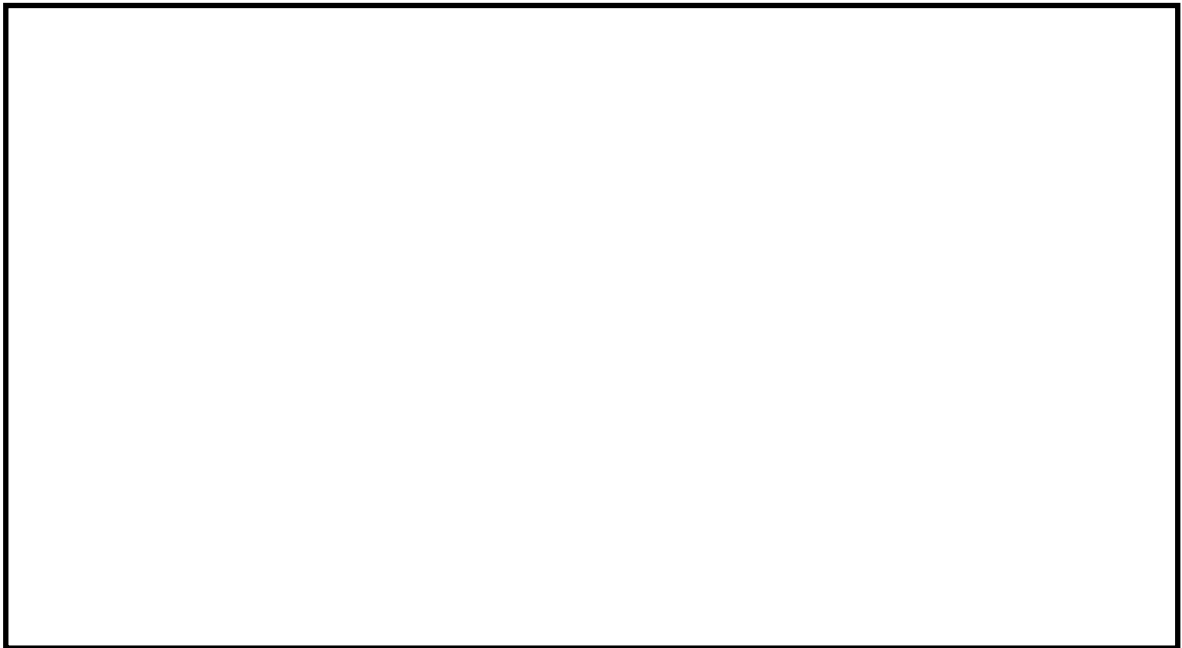


図 5-12 燃料取替用水タンク建屋 (EL. 24. 8m)

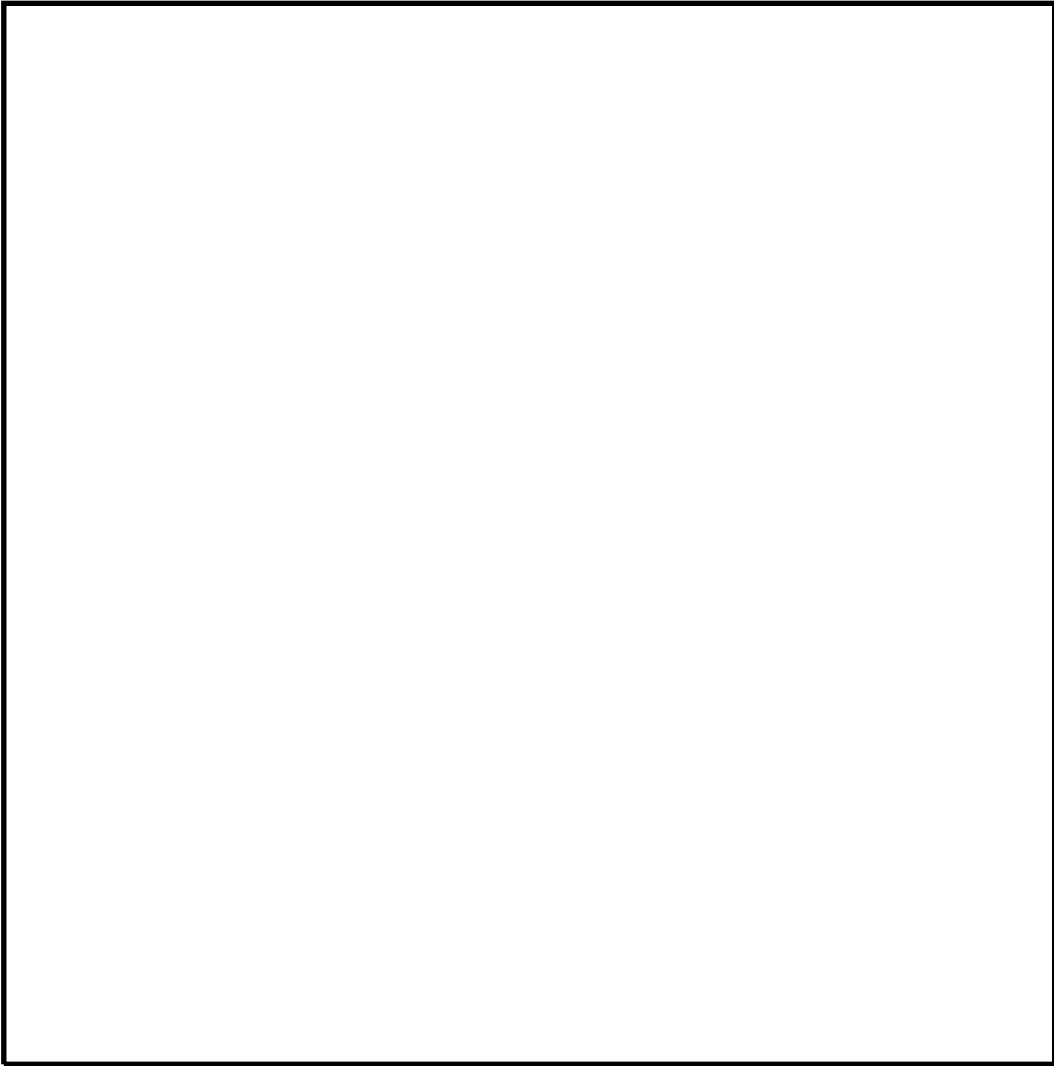


图 5-13 取水构筑物

〈中性化深さの推定値の算出過程について〉

調査時点及び運転開始後 60 年経過時点の中性化深さの推定値の算出過程（推定式、条件及びパラメータ）を以下に示す。

: 中性化深さの推定に必要なパラメータ  
 : 推定結果

1. 岸谷式

	外部しゃへい 建屋	取水構造物	備考
		気中帯	
$w$ : 水セメント比 (%)			
$\alpha$ : 劣化外力係数	1.7	1.0	外部しゃへい建屋 : 屋内 取水構造物 : 屋外
$\beta$ : 仕上げ材による係数	1.0	1.0	外部しゃへい建屋 : 仕上げなし 取水構造物 : 仕上げなし
$\gamma$ : セメントによる係数	1.2	1.0	外部しゃへい建屋 : 中庸熟ポルトランドセメント 取水構造物 : 普通ポルトランドセメント
調査時点の推定値 (cm)	3.79* <sup>1</sup>	1.33* <sup>2</sup>	*1 運転開始後 27 年経過時点 *2 運転開始後 26 年経過時点
運転開始後 60 年経過時点 の推定値 (cm)	5.65	2.02	

岸谷式

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

$t$  : 深さ  $x$  までの中性化する期間 (年)  
 $x$  : 中性化深さ (cm)  
 $w$  : 水セメント比 (比)  
 $R$  : 中性化比率 ( $R = \alpha \times \beta \times \gamma$ )

$\alpha$  : 劣化外力の区分による係数  
 $\beta$  : 仕上げ材による係数  
 $\gamma$  : セメントによる係数



□ : 中性化深さの推定に必要なパラメータ  
 □ : 推定結果

## 2. 森永式

	外部しゃへい 建屋	取水構造物	備考
		気中帯	
$w/c$ : 水セメント比			
$R$ : 仕上げ材の中性化率	1.0	1.0	外部しゃへい建屋 : 打ち放し 取水構造物 : 打ち放し
$C$ : 二酸化炭素濃度 (%)	0.04843	0.04497	2016年5月から2017年4月の期間で各月ごとに2~3回測定した結果の平均値
$T$ : 温度 (°C)	25.9	10.6	2016年5月から2017年4月の期間で1時間間隔で連続測定した結果の平均値
$RH$ : 湿度 (%)	29.1	80.1	2016年5月から2017年4月の期間で1時間間隔で連続測定した結果の平均値
調査時点の推定値 (cm)	3.35* <sup>1</sup>	0.41* <sup>2</sup>	*1 運転開始後 27年経過時点 *2 運転開始後 26年経過時点
運転開始後 60年経過時点の推定値 (cm)	4.99	0.63	

### 森永式

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

$x$  : 中性化深さ (mm)       $C$  : 二酸化炭素濃度 (%)  
 $R$  : 中性化比率       $RH$  : 相対湿度 (%)  
 $w/c$  : 水セメント比 (%)       $T$  : 温度 (°C)  
 $t$  : 材齢 (日)

□ : 中性化深さの推定に必要なパラメータ  
 □ : 推定結果

## 3. $\sqrt{t}$ 式

	外部しゃへい 建屋	取水構造物	備考
		気中帯	
中性化実測深さ (cm)	0.50	1.09	中性化深さの測定結果
運転開始後 60年経過時点の推定値 (cm)	0.75	1.66	

### $\sqrt{t}$ 式

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

$x$  : 中性化深さ (mm)  
 $t$  : 中性化期間 (年)  
 $A$  : 中性化速度係数 (中性化実測深さと中性化期間により算出)

〈塩分浸透における評価点の妥当性について〉

気中帯、干満帯及び海中帯は 1961 年から 1962 年までの岩内港における潮位観測記録により設定している。

気中帯、干満帯及び海中帯の範囲と評価点（以下、「コア採取位置」という。）を表 7-1 に示す。

表 7-1 評価点の範囲とコア採取位置\*1

	評価点の範囲	コア採取位置
気中帯	EL. 0.26m 以上 (C. D. L. 0.342m 以上)*2	EL. 5.41m (C. D. L. 5.492m)
干満帯	EL. 0.26m 未満, EL. -0.14m 以上 (C. D. L. 0.342m 未満, C. D. L. -0.058m 以上)	EL. 0.00m (C. D. L. 0.082m)
海中帯	EL. -0.14m 未満 (C. D. L. -0.058m 未満)	EL. -5.50m (C. D. L. -5.418m)

\*1 コア径：80mm

\*2 ( )内は EL. から C. D. L. 標記とした値：C. D. L. =EL. +0.082m

表 7-1 に示すとおり、気中帯、干満帯及び海中帯のコア採取位置は、潮位の影響を受けない箇所を選定しているが、潮位は 1961 年から 1962 年までの記録を用いているため、運転開始から至近までの潮位データを確認した上で、コア採取位置の妥当性を確認する。なお、潮位データは潮位表基準面（C. D. L.）で記録されているため、コア採取位置の EL. 標記を C. D. L. に変換している。

岩内港における運転開始（1991 年）から至近（2018 年）までの潮位変化グラフを図 7-1 に、運転開始年（1991 年）と至近（2018 年）における潮位を表 7-2 に示す。潮位変化グラフには朔望平均満潮位と朔望平均干潮位を示し、加えてコア採取位置を明示した。

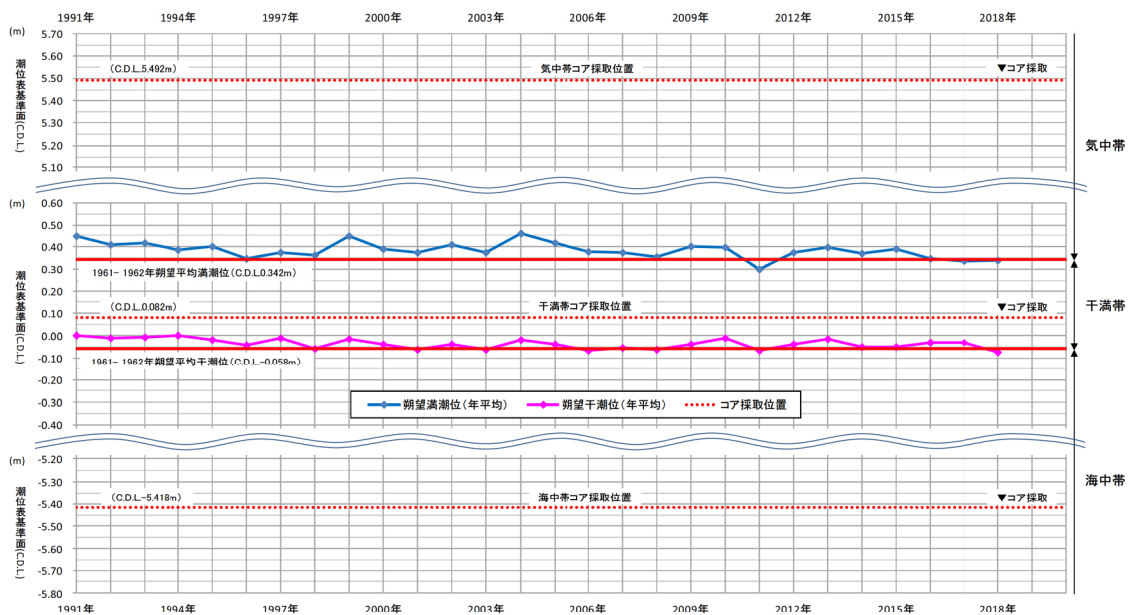


図 7-1 運転開始から至近までの潮位変化 (1991~2018 年)

表 7-2 運転開始年と至近の潮位

(C. D. L. 標記)

		1961-1962 年	運転開始年 (1991 年)	至近 (2018 年)
朔望平均満潮位		0.342m	0.449m	0.336m
朔望平均干潮位		-0.058m	0.003m	-0.072m
コア採取位置は適切な位置か	気中帯 (5.492m)	適切 (朔望平均満潮位以上)		
	干満帯 (0.082m)	適切 (朔望平均満潮位未満, 朔望平均干潮位以上)		
	海中帯 (-5.418m)	適切 (朔望平均干潮位未満)		

潮位の変化を確認した結果、運転開始から至近までの期間において、気中帯のコアは朔望平均満潮位以上、海中帯のコアは朔望平均干潮位未満、干満帯のコアは朔望平均満潮位未満、朔望平均干潮位以上の範囲内にある。よって、コアは適切な位置から採取しており、評価点は妥当であると判断した。

＜塩分浸透における鉄筋の腐食減量の算出過程について＞

1. 鉄筋の腐食減量の算出過程（方法、条件及びパラメータ）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)	84	84	84	
$C$ : 鉄筋位置における塩化物イオン量 (kg/m <sup>3</sup> )	0.14	0.15	0.15	塩分浸透の測定結果
$C_0$ : コンクリート表面の塩化物イオン量 (kg/m <sup>3</sup> )	2.038	0.397	4.058	拡散方程式の回帰分析を最小二乗法により行い、誤差の二乗の和が最小となる $C_0$ を求めた
$C_{init}$ : コンクリート中の初期塩化物イオン量 (kg/m <sup>3</sup> )	0.133	-	0.118	拡散方程式の回帰分析を最小二乗法により行い、誤差の二乗の和が最小となる $C_{init}$ を求めた (式②を用いる場合に算出)
$D$ : コンクリート中の塩化物イオンの見かけ上の拡散係数 (mm <sup>2</sup> /年)	9	75	9	拡散方程式の回帰分析を最小二乗法により行い、誤差の二乗の和が最小となる $D$ を求めた
$Cl$ : 鉄筋位置における塩化物イオン量 (kg/m <sup>3</sup> ) (推定値)	0.15	0.15	0.16	運転開始から 60 年経過時点の推定値
$x$ : かぶり厚さ (mm)	84	84	84	
$d$ : 鉄筋径 (mm)	32	32	32	
$W$ : 単位水量 (kg/m <sup>3</sup> )	(空白)			
$W/C$ : 水セメント比 (比)	(空白)			
$N$ : 練り混ぜ水に対する NaCl としての塩分濃度 (%)	0.14	0.14	0.15	運転開始から 60 年経過時点の推定値
$T$ : 温度 (°C)	10.6	12.3	12.3	気中帯: 2016 年 5 月 1 日から 2017 年 4 月 30 日の期間に取水ピットスクリーン室において 1 時間間隔で連続測定した結果の平均値 干満帯, 海中帯: 温度は 2016 年 5 月 1 日から 2017 年 4 月 30 日の期間に取水口において 1 時間間隔で連続測定した海水温度の平均値 相対湿度は海水との接触により 100%(森永論文引用*)
$RH$ : 相対湿度 (%)	80.1	100	100	
$O$ : 酸素濃度 (比)	0.21	0.21	0.006	気中帯: 2016 年 5 月 18 日から 2017 年 4 月 28 日の期間に取水ピットスクリーン室において測定した結果の平均値 干満帯: 保守的に気中帯と同値に設定 海中帯: 森永論文引用*
$Q_{20}$ : 調査時点の鉄筋の腐食減量 ( $\times 10^{-4}$ g/cm <sup>2</sup> )	2.6	6.8	0.0	
$Q_{60}$ : 運転開始 60 年経過時点の鉄筋の腐食減量 ( $\times 10^{-4}$ g/cm <sup>2</sup> )	6.1	15.4	0.0	
$Q_{cr}$ : 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 ( $\times 10^{-4}$ g/cm <sup>2</sup> )	91.5	91.5	91.5	

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

- : (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

**拡散方程式**

( $C_{init}$  を考慮しない場合の式)

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

(建築工事標準仕様書・同解説 JASS5 鉄筋コンクリート工事 (2018 年))

( $C_{init}$  を考慮する場合の式)

$$C = (C_0 - C_{init}) \left[ 1 - \operatorname{erf} \left( \frac{x}{2\sqrt{D \cdot t}} \right) \right] + C_{init} \quad \text{--- ②}$$

(原子力施設における建築物の維持管理指針・同解説 (2015 年))

- $C$ : 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>)
- $C_{init}$ : コンクリート中の初期塩化物イオン量(kg/m<sup>3</sup>)
- $\operatorname{erf}$ : 誤差関数
- $\operatorname{erf}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x e^{-t^2} dt$
- $x$ : 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(mm<sup>2</sup>/年)
- $t$ : 材齢(年)

## 森永式

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

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

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

$$q_2' = 0.56528 + 1.4304N$$

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

q : 鉄筋の腐食速度( $\times 10^{-4}$  g/cm<sup>2</sup>/年)

q<sub>1</sub> : 塩分環境下での腐食速度( $\times 10^{-4}$  g/cm<sup>2</sup>/年)

q<sub>2</sub> : 寿命予測対象部位で、塩分環境下での腐食速度( $\times 10^{-4}$  g/cm<sup>2</sup>/年)

q<sub>2</sub>' : 寿命予測対象部位で、標準環境下(温度 15°C, 湿度 69%,

酸素濃度 20%)での腐食速度( $\times 10^{-4}$  g/cm<sup>2</sup>/年)

d : 鉄筋径(mm)

c : かぶり厚さ(mm)

N : 練り混ぜ水に対する NaCl としての塩分濃度(%)

W/C : 水セメント比(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(比)

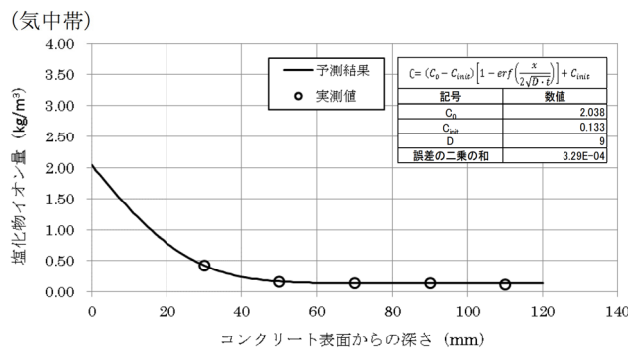
Q<sub>cr</sub> : 鉄筋腐食でかぶりコンクリートにひび割れが生じる時点での腐食減量( $\times 10^{-4}$  g/cm<sup>2</sup>)

c : かぶり厚さ(mm)

d : 鉄筋径(mm)

## 2. 拡散方程式の回帰分析結果

塩化物イオン量を測定するコアは、気中帯、干満帯及び海中帯のそれぞれにおいて、3箇所のコアを採取しているが、回帰分析の結果は、それぞれにおける3箇所のコアの測定結果を比較し、運転開始後60年時点の鉄筋の腐食減量が最も大きくなるデータの選定を基本としている。なお、気中帯及び干満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、「4.回帰分析について」に記載のとおり、より保守的な「塩分浸透による強度低下」評価となるように、中性化の作用が考えられる領域のデータ(0~20mm)を用いる場合と用いない場合の影響を確認したうえでデータを選定している。また、干満帯及び海中帯は、海水に接しており、溶脱の作用により塩化物イオン量の浸透に影響を与えている可能性があることから、コンクリート表面に近い領域のデータ(0~20mm)を用いる場合と用いない場合の影響を確認している。上記に合わせて、より保守的な「塩分浸透による強度低下」評価となるように、コンクリート中の初期塩化物イオン量( $C_{init}$ )を考慮しない場合と考慮する場合の影響を確認したうえで、データを選定している。



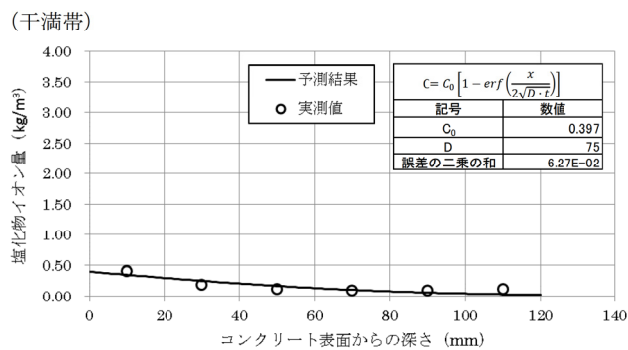
表の注記

$C_0$ : コンクリート表面の塩化物イオン量 ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )

$C_{init}$ : コンクリート中の初期塩化物イオン量 ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )

D: コンクリート中の塩化物イオンの見かけの

拡散係数 ( $\text{mm}^2/\text{年}$ )

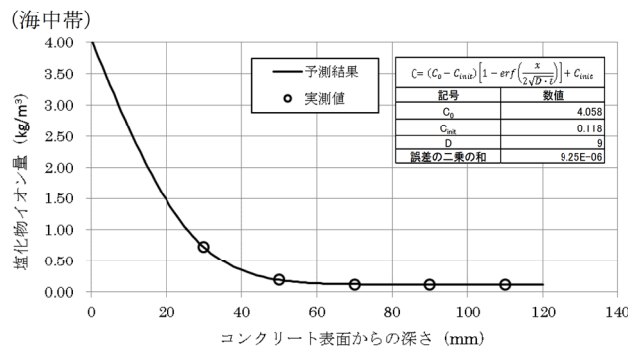


表の注記

$C_0$ : コンクリート表面の塩化物イオン量 ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )

D: コンクリート中の塩化物イオンの見かけの

拡散係数 ( $\text{mm}^2/\text{年}$ )



表の注記

$C_0$ : コンクリート表面の塩化物イオン量 ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )

$C_{init}$ : コンクリート中の初期塩化物イオン量 ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )

D: コンクリート中の塩化物イオンの見かけの

拡散係数 ( $\text{mm}^2/\text{年}$ )

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)	$\Sigma q$ ( $\times 10^{-4} \text{g/cm}^2$ )	経過年数 (年)	$\Sigma q$ ( $\times 10^{-4} \text{g/cm}^2$ )	経過年数 (年)	$\Sigma q$ ( $\times 10^{-4} \text{g/cm}^2$ )
21	2.1	21	5.5	21	0
22	2.2	22	5.8	22	0
23	2.3	23	6.0	23	0
24	2.4	24	6.3	24	0
25	2.5	25	6.5	25	0
26	2.6	26	6.8	26	0
27	2.7	27	7.0	27	0
28	2.9	28	7.3	28	0
29	3.0	29	7.6	29	0
30	3.1	30	7.8	30	0
31	3.2	31	8.1	31	0
55	5.6	55	14.1	55	0
56	5.7	56	14.4	56	0
57	5.8	57	14.6	57	0
58	5.9	58	14.9	58	0
59	6.0	59	15.1	59	0
60	6.1	60	15.4	60	0
61	6.2	61	15.6	61	0
62	6.3	62	15.9	62	0
63	6.4	63	16.1	63	0
64	6.5	64	16.4	64	0
65	6.6	65	16.6	65	0
705	90.8	361	90.3	1772	91.1
706	91.0	362	90.5	1773	91.1
707	91.1	363	90.8	1774	91.2
708	91.3	364	91.0	1775	91.3
709	91.4	365	91.3	1776	91.4
710	91.6	366	91.5	1777	91.5
711	91.7	367	91.8	1778	91.5
712	91.9	368	92.0	1779	91.6
713	92.0	369	92.3	1780	91.7
714	92.2	370	92.5	1781	91.8
715	92.3	371	92.8	1782	91.9

#### 4. 回帰分析について

気中帯及び干満帯については、「2. 拡散方程式の回帰分析結果」に示すとおり、より保守的な「塩分浸透による強度低下」評価となるように、以下の内容について影響を確認している。

- ・中性化の作用が考えられる領域のデータ（0～20mm）考慮有無による影響
- ・コンクリート中の初期塩化物イオン量（ $C_{init}$ ）の考慮有無による影響

また、干満帯及び海中帯については、「2. 拡散方程式の回帰分析結果」に示すとおり、より保守的な「塩分浸透による強度低下」評価となるように、以下の内容について影響を確認している。

- ・溶脱の作用が考えられる領域のデータ（0～20mm）考慮有無による影響
- ・コンクリート中の初期塩化物イオン量（ $C_{init}$ ）の考慮有無による影響



#### 4.1 気中帯の回帰分析について

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、中性化の作用が考えられる領域のデータ（0～20mm）を用いる場合と用いない場合の影響を確認している。また、合わせて、初期塩化物イオン量( $C_{init}$ )考慮有無による影響を確認している。

##### (1) 中性化の作用が考えられる領域のデータを用いる場合

表 8-1 に気中帯における 3 箇所（気中帯①，②，③）のコアの塩化物イオン量測定結果を示す。

表 8-1 塩化物イオン量の測定結果一覧（気中帯）

表面からの深さ (mm)	塩化物イオン量 (kg/m <sup>3</sup> )			
	気中帯①	気中帯②	気中帯③	平均値 <sup>*</sup>
0～20	0.332	0.522	0.498	0.451
20～40	0.237	0.427	0.427	0.364
40～60	0.142	0.166	0.166	0.158
60～80	0.142	0.119	0.142	0.134
80～100	0.142	0.119	0.142	0.134
100～120	0.142	0.142	0.119	0.134

※補足説明資料 P20「表 14 塩分浸透の測定結果」には平均値を記載。

上記データに対する「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」のうち、初期塩化物イオン量( $C_{init}$ )を考慮しない場合（拡散方程式①）を表 8-2 に、初期塩化物イオン量 ( $C_{init}$ ) を考慮する場合（拡散方程式②）を表 8-3 に示す。

表 8-2 鉄筋の腐食減量一覧表

(中性化領域データあり, 初期塩化物イオン量 ( $C_{init}$ ) を考慮しない場合)

気中帯①		気中帯②		気中帯③	
経過年数 (年)	$\Sigma q$ ( $\times 10^{-4}g/cm^2$ )	経過年数 (年)	$\Sigma q$ ( $\times 10^{-4}g/cm^2$ )	経過年数 (年)	$\Sigma q$ ( $\times 10^{-4}g/cm^2$ )
21	2.1	21	2.1	21	2.1
22	2.2	22	2.2	22	2.2
23	2.3	23	2.3	23	2.3
24	2.4	24	2.4	24	2.4
25	2.5	25	2.5	25	2.5
26	2.6	26	2.6	26	2.6
27	2.7	27	2.7	27	2.7
28	2.8	28	2.8	28	2.8
29	2.9	29	2.9	29	2.9
30	3.0	30	3.0	30	3.0
31	3.1	31	3.1	31	3.1
55	5.6	55	5.6	55	5.6
56	5.7	56	5.7	56	5.7
57	5.8	57	5.8	57	5.8
58	5.9	58	5.9	58	5.9
59	6.0	59	6.0	59	6.0
60	6.1	60	6.1	60	6.1
61	6.2	61	6.2	61	6.2
62	6.3	62	6.3	62	6.3
63	6.4	63	6.4	63	6.4
64	6.5	64	6.5	64	6.5
65	6.6	65	6.6	65	6.6
847	91.0	789	90.9	792	90.9
848	91.1	790	91.1	793	91.0
849	91.2	791	91.2	794	91.1
850	91.3	792	91.3	795	91.2
851	91.4	793	91.4	796	91.4
852	91.6	794	91.5	797	91.5
853	91.7	795	91.7	798	91.6
854	91.8	796	91.8	799	91.7
855	91.9	797	91.9	800	91.8
856	92.0	798	92.0	801	91.9
857	92.1	799	92.1	802	92.1

表 8-3 鉄筋の腐食減量一覧表

(中性化領域データあり, 初期塩化物イオン量 ( $C_{init}$ ) を考慮する場合)

気中帯①'		気中帯②'		気中帯③'	
経過年数 (年)	$\Sigma q$ ( $\times 10^{-4} \text{g/cm}^2$ )	経過年数 (年)	$\Sigma q$ ( $\times 10^{-4} \text{g/cm}^2$ )	経過年数 (年)	$\Sigma q$ ( $\times 10^{-4} \text{g/cm}^2$ )
21	2.1	21	2.1	21	2.1
22	2.2	22	2.2	22	2.2
23	2.3	23	2.3	23	2.3
24	2.4	24	2.4	24	2.4
25	2.5	25	2.5	25	2.5
26	2.7	26	2.6	26	2.6
27	2.8	27	2.7	27	2.7
28	2.9	28	2.8	28	2.8
29	3.0	29	2.9	29	2.9
30	3.1	30	3.0	30	3.0
31	3.2	31	3.1	31	3.1
55	5.6	55	5.6	55	5.6
56	5.7	56	5.7	56	5.7
57	5.8	57	5.8	57	5.8
58	5.9	58	5.9	58	5.9
59	6.0	59	6.0	59	6.0
60	6.1	60	6.1	60	6.1
61	6.2	61	6.2	61	6.2
62	6.3	62	6.3	62	6.4
63	6.4	63	6.4	63	6.5
64	6.5	64	6.5	64	6.6
65	6.6	65	6.7	65	6.7
847	91.0	791	91.0	794	91.0
848	91.1	792	91.1	795	91.1
849	91.2	793	91.2	796	91.2
850	91.3	794	91.3	797	91.3
851	91.4	795	91.4	798	91.4
852	91.6	796	91.6	799	91.6
853	91.7	797	91.7	800	91.7
854	91.8	798	91.8	801	91.8
855	91.9	799	91.9	802	91.9
856	92.0	800	92.0	803	92.0
857	92.1	801	92.2	804	92.1

(2) 中性化の作用が考えられる領域のデータを用いない場合

表 8-4 に中性化の作用が考えられる領域のデータを用いない場合における 3 箇所(気中帯④, ⑤, ⑥) のコアの塩化物イオン量測定結果を示す。

表 8-4 塩化物イオン量の測定結果一覧 (気中帯, 中性化領域除外)

表面からの深さ (mm)	塩化物イオン量 (kg/m <sup>3</sup> )			
	気中帯④	気中帯⑤	気中帯⑥	平均値
0~20	—	—	—	—
20~40	0.237	0.427	0.427	0.364
40~60	0.142	0.166	0.166	0.158
60~80	0.142	0.119	0.142	0.134
80~100	0.142	0.119	0.142	0.134
100~120	0.142	0.142	0.119	0.134

上記データに対する「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」のうち, 初期塩化物イオン量( $C_{init}$ )を考慮しない場合 (拡散方程式①) を表 8-5 に, 初期塩化物イオン量 ( $C_{init}$ ) を考慮する場合 (拡散方程式②) を表 8-6 に示す。

表 8-5 鉄筋の腐食減量一覧表

(中性化領域データなし, 初期塩化物イオン量 ( $C_{init}$ ) を考慮しない場合)

気中帯④		気中帯⑤		気中帯⑥	
経過年数 (年)	$\Sigma q$ ( $\times 10^{-4}g/cm^2$ )	経過年数 (年)	$\Sigma q$ ( $\times 10^{-4}g/cm^2$ )	経過年数 (年)	$\Sigma q$ ( $\times 10^{-4}g/cm^2$ )
21	2.1	21	2.1	21	2.1
22	2.2	22	2.2	22	2.2
23	2.3	23	2.3	23	2.3
24	2.4	24	2.4	24	2.4
25	2.5	25	2.5	25	2.5
26	2.6	26	2.6	26	2.6
27	2.7	27	2.7	27	2.7
28	2.8	28	2.8	28	2.8
29	2.9	29	2.9	29	2.9
30	3.0	30	3.0	30	3.0
31	3.1	31	3.1	31	3.1
55	5.6	55	5.6	55	5.6
56	5.7	56	5.7	56	5.7
57	5.8	57	5.8	57	5.8
58	5.9	58	5.9	58	5.9
59	6.0	59	6.0	59	6.0
60	6.1	60	6.1	60	6.1
61	6.2	61	6.2	61	6.2
62	6.3	62	6.3	62	6.3
63	6.4	63	6.4	63	6.4
64	6.5	64	6.5	64	6.5
65	6.6	65	6.6	65	6.6
866	91.0	792	90.9	793	90.9
867	91.1	793	91.1	794	91.0
868	91.2	794	91.2	795	91.1
869	91.3	795	91.3	796	91.2
870	91.4	796	91.4	797	91.4
871	91.6	797	91.5	798	91.5
872	91.7	798	91.6	799	91.6
873	91.8	799	91.8	800	91.7
874	91.9	800	91.9	801	91.8
875	92.0	801	92.0	802	92.0
876	92.1	802	92.1	803	92.1

表 8-6 鉄筋の腐食減量一覧表

(中性化領域データなし, 初期塩化物イオン量 ( $C_{init}$ ) を考慮する場合)

気中帯④'		気中帯⑤'		気中帯⑥'	
経過年数 (年)	$\Sigma q$ ( $\times 10^{-4}g/cm^2$ )	経過年数 (年)	$\Sigma q$ ( $\times 10^{-4}g/cm^2$ )	経過年数 (年)	$\Sigma q$ ( $\times 10^{-4}g/cm^2$ )
21	2.1	21	2.1	21	2.1
22	2.2	22	2.2	22	2.2
23	2.3	23	2.3	23	2.3
24	2.5	24	2.4	24	2.4
25	2.6	25	2.5	25	2.5
26	2.7	26	2.6	26	2.6
27	2.8	27	2.7	27	2.7
28	2.9	28	2.8	28	2.9
29	3.0	29	2.9	29	3.0
30	3.1	30	3.0	30	3.1
31	3.2	31	3.1	31	3.2
55	5.6	55	5.6	55	5.6
56	5.7	56	5.7	56	5.7
57	5.8	57	5.8	57	5.8
58	5.9	58	5.9	58	5.9
59	6.0	59	6.0	59	6.0
60	6.1	60	6.1	60	6.1
61	6.2	61	6.2	61	6.2
62	6.3	62	6.3	62	6.3
63	6.4	63	6.4	63	6.4
64	6.5	64	6.5	64	6.5
65	6.6	65	6.6	65	6.6
780	90.9	714	90.8	705	90.8
781	91.0	715	90.9	706	91.0
782	91.2	716	91.0	707	91.1
783	91.3	717	91.2	708	91.3
784	91.4	718	91.3	709	91.4
785	91.6	719	91.5	710	91.6
786	91.7	720	91.6	711	91.7
787	91.8	721	91.8	712	91.9
788	92.0	722	91.9	713	92.0
789	92.1	723	92.1	714	92.2
790	92.2	724	92.2	715	92.3

上記より, 運転開始後 60 年時点の鉄筋の腐食減量は, すべてのデータで同値 ( $6.1 \times 10^{-4}g/cm^2$ ) となったことから, 最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腐食減量に早く達する気中帯⑥' (中性化の作用が考えられる領域のデータを用いない場合, 初期塩化物イオン量 ( $C_{init}$ ) を考慮する場合) のデータを選定した。

#### 4.2 干満帯の回帰分析について

干満帯は、気中帯と同様に、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に加え、海水に接しており、溶脱の作用により塩化物イオン量の浸透に影響を与えている可能性があることから、コンクリート表面に近い領域のデータ(0～20mm)を用いる場合と用いない場合の影響を確認している。また、合わせて、初期塩化物イオン量 ( $C_{init}$ ) 考慮有無による影響を確認している。

##### (1) 中性化等の作用が考えられる領域のデータを用いる場合

表 8-7 に干満帯における3箇所(干満帯①, ②, ③)のコアの塩化物イオン量測定結果を示す。

表 8-7 塩化物イオン量の測定結果一覧(干満帯)

表面からの深さ (mm)	塩化物イオン量 (kg/m <sup>3</sup> )			
	干満帯①	干満帯②	干満帯③	平均値*
0～20	0.403	0.546	0.925	0.625
20～40	0.190	0.356	0.901	0.482
40～60	0.119	0.261	0.356	0.245
60～80	0.095	0.308	0.190	0.198
80～100	0.095	0.237	0.119	0.150
100～120	0.119	0.190	0.119	0.143

※補足説明資料 P20「表 14 塩分浸透の測定結果」には平均値を記載。

上記データに対する「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」のうち、初期塩化物イオン量( $C_{init}$ )を考慮しない場合(拡散方程式①)を表 8-8 に、初期塩化物イオン量 ( $C_{init}$ ) を考慮する場合(拡散方程式②)を表 8-9 に示す。

表 8-8 鉄筋の腐食減量一覧表

(中性化等領域データあり，初期塩化物イオン量 ( $C_{init}$ ) を考慮しない場合)

干満帯①		干満帯②		干満帯③	
経過年数 (年)	$\Sigma q$ ( $\times 10^{-4}g/cm^2$ )	経過年数 (年)	$\Sigma q$ ( $\times 10^{-4}g/cm^2$ )	経過年数 (年)	$\Sigma q$ ( $\times 10^{-4}g/cm^2$ )
21	5.5	21	5.3	21	5.5
22	5.8	22	5.6	22	5.7
23	6.0	23	5.8	23	6.0
24	6.3	24	6.1	24	6.2
25	6.5	25	6.3	25	6.5
26	6.8	26	6.6	26	6.7
27	7.0	27	6.8	27	7.0
28	7.3	28	7.1	28	7.2
29	7.6	29	7.3	29	7.5
30	7.8	30	7.6	30	7.7
31	8.1	31	7.8	31	8.0
55	14.1	55	13.8	55	13.9
56	14.4	56	14.0	56	14.2
57	14.6	57	14.3	57	14.4
58	14.9	58	14.5	58	14.7
59	15.1	59	14.8	59	14.9
60	15.4	60	15.0	60	15.2
61	15.6	61	15.3	61	15.4
62	15.9	62	15.5	62	15.7
63	16.1	63	15.8	63	15.9
64	16.4	64	16.0	64	16.2
65	16.6	65	16.3	65	16.4
361	90.3	361	90.4	347	90.2
362	90.5	362	90.6	348	90.5
363	90.8	363	90.9	349	90.8
364	91.0	364	91.1	350	91.1
365	91.3	365	91.4	351	91.3
366	91.5	366	91.6	352	91.6
367	91.8	367	91.9	353	91.9
368	92.0	368	92.1	354	92.1
369	92.3	369	92.4	355	92.4
370	92.5	370	92.6	356	92.7
371	92.8	371	92.9	357	92.9



表 8-9 鉄筋の腐食減量一覧表

(中性化等領域データあり，初期塩化物イオン量 ( $C_{init}$ ) を考慮する場合)

干満帯①'		干満帯②'		干満帯③'	
経過年数 (年)	$\Sigma q$ ( $\times 10^{-4}g/cm^2$ )	経過年数 (年)	$\Sigma q$ ( $\times 10^{-4}g/cm^2$ )	経過年数 (年)	$\Sigma q$ ( $\times 10^{-4}g/cm^2$ )
21	5.3	21	5.2	21	5.4
22	5.6	22	5.5	22	5.7
23	5.8	23	5.7	23	5.9
24	6.1	24	6.0	24	6.2
25	6.3	25	6.2	25	6.4
26	6.6	26	6.5	26	6.7
27	6.9	27	6.7	27	6.9
28	7.1	28	7.0	28	7.2
29	7.4	29	7.2	29	7.4
30	7.6	30	7.5	30	7.7
31	7.9	31	7.7	31	7.9
55	14.0	55	13.7	55	13.9
56	14.2	56	13.9	56	14.2
57	14.5	57	14.2	57	14.4
58	14.7	58	14.4	58	14.7
59	15.0	59	14.7	59	14.9
60	15.2	60	14.9	60	15.2
61	15.5	61	15.2	61	15.4
62	15.7	62	15.4	62	15.7
63	16.0	63	15.7	63	15.9
64	16.2	64	15.9	64	16.2
65	16.5	65	16.2	65	16.4
360	90.2	362	90.2	347	90.2
361	90.5	363	90.5	348	90.5
362	90.7	364	90.7	349	90.7
363	91.0	365	91.0	350	91.0
364	91.2	366	91.2	351	91.3
365	91.5	367	91.5	352	91.6
366	91.7	368	91.7	353	91.8
367	92.0	369	92.0	354	92.1
368	92.2	370	92.2	355	92.4
369	92.5	371	92.5	356	92.6
370	92.7	372	92.8	357	92.9

(2) 中性化等の作用が考えられる領域のデータを用いない場合

表 8-10 に中性化等の作用が考えられる領域のデータを用いない場合における 3 箇所 (干満帯④, ⑤, ⑥) のコアの塩化物イオン量測定結果を示す。

表 8-10 塩化物イオン量の測定結果一覧 (干満帯, 中性化等領域除外)

表面からの深さ (mm)	塩化物イオン量 (kg/m <sup>3</sup> )			
	干満帯④	干満帯⑤	干満帯⑥	平均値
0~20	—	—	—	—
20~40	0.190	0.356	0.901	0.482
40~60	0.119	0.261	0.356	0.245
60~80	0.095	0.308	0.190	0.198
80~100	0.095	0.237	0.119	0.150
100~120	0.119	0.190	0.119	0.143

上記データに対する「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」のうち, 初期塩化物イオン量( $C_{init}$ )を考慮しない場合 (拡散方程式①) を表 8-11 に, 初期塩化物イオン量 ( $C_{init}$ ) を考慮する場合 (拡散方程式②) を表 8-12 に示す。

表 8-11 鉄筋の腐食減量一覧表

(中性化等領域データなし，初期塩化物イオン量 ( $C_{init}$ ) を考慮しない場合)

干満帯④		干満帯⑤		干満帯⑥	
経過年数 (年)	$\Sigma q$ ( $\times 10^{-4} \text{g/cm}^2$ )	経過年数 (年)	$\Sigma q$ ( $\times 10^{-4} \text{g/cm}^2$ )	経過年数 (年)	$\Sigma q$ ( $\times 10^{-4} \text{g/cm}^2$ )
21	5.4	21	5.3	21	5.5
22	5.7	22	5.5	22	5.8
23	5.9	23	5.8	23	6.0
24	6.2	24	6.0	24	6.3
25	6.4	25	6.3	25	6.6
26	6.7	26	6.5	26	6.8
27	6.9	27	6.8	27	7.1
28	7.2	28	7.0	28	7.3
29	7.4	29	7.3	29	7.6
30	7.7	30	7.5	30	7.8
31	7.9	31	7.8	31	8.1
55	14.0	55	13.7	55	14.1
56	14.2	56	14.0	56	14.3
57	14.5	57	14.2	57	14.6
58	14.7	58	14.5	58	14.8
59	15.0	59	14.7	59	15.1
60	15.2	60	15.0	60	15.3
61	15.5	61	15.2	61	15.6
62	15.8	62	15.5	62	15.8
63	16.0	63	15.7	63	16.1
64	16.3	64	16.0	64	16.3
65	16.5	65	16.2	65	16.6
359	90.2	363	90.4	337	90.3
360	90.5	364	90.7	338	90.6
361	90.7	365	90.9	339	90.9
362	91.0	366	91.2	340	91.1
363	91.2	367	91.4	341	91.4
364	91.5	368	91.7	342	91.7
365	91.7	369	91.9	343	92.0
366	92.0	370	92.2	344	92.3
367	92.2	371	92.4	345	92.6
368	92.5	372	92.7	346	92.9
369	92.7	373	92.9	347	93.1

表 8-12 鉄筋の腐食減量一覧表

(中性化等領域データなし, 初期塩化物イオン量 ( $C_{init}$ ) を考慮する場合)

干満帯④'		干満帯⑤'		干満帯⑥'	
経過年数 (年)	$\Sigma q$ ( $\times 10^{-4} \text{g/cm}^2$ )	経過年数 (年)	$\Sigma q$ ( $\times 10^{-4} \text{g/cm}^2$ )	経過年数 (年)	$\Sigma q$ ( $\times 10^{-4} \text{g/cm}^2$ )
21	5.3	21	5.2	21	5.3
22	5.6	22	5.5	22	5.6
23	5.8	23	5.7	23	5.8
24	6.1	24	6.0	24	6.1
25	6.3	25	6.2	25	6.3
26	6.6	26	6.5	26	6.6
27	6.8	27	6.7	27	6.8
28	7.1	28	7.0	28	7.1
29	7.3	29	7.2	29	7.3
30	7.6	30	7.5	30	7.6
31	7.8	31	7.7	31	7.8
55	13.9	55	13.7	55	13.8
56	14.1	56	13.9	56	14.1
57	14.4	57	14.2	57	14.3
58	14.6	58	14.4	58	14.6
59	14.9	59	14.7	59	14.8
60	15.2	60	14.9	60	15.1
61	15.4	61	15.2	61	15.3
62	15.7	62	15.4	62	15.6
63	15.9	63	15.7	63	15.8
64	16.2	64	15.9	64	16.0
65	16.4	65	16.2	65	16.3
360	90.3	363	90.4	336	90.2
361	90.5	364	90.6	337	90.5
362	90.8	365	90.9	338	90.7
363	91.0	366	91.1	339	91.0
364	91.3	367	91.4	340	91.3
365	91.5	368	91.6	341	91.6
366	91.8	369	91.9	342	91.9
367	92.0	370	92.1	343	92.2
368	92.3	371	92.4	344	92.5
369	92.5	372	92.6	345	92.8
370	92.8	373	92.9	346	93.1

上記より, 運転開始後 60 年時点の鉄筋の腐食減量が最も大きい値となった干満帯①(中性化等の作用が考えられる領域のデータを用いる場合, 初期塩化物イオン量 ( $C_{init}$ ) を考慮しない場合) のデータを選定した。

#### 4.3 海中帯の回帰分析について

海中帯は、干満帯と同様に、溶脱の作用により塩化物イオン量の浸透に影響を与えている可能性があることから、コンクリート表面に近い領域のデータ（0～20mm）を用いる場合と用いない場合の影響を確認している。また、合わせて、初期塩化物イオン量 ( $C_{init}$ ) 考慮有無による影響を確認している。

##### (1) 溶脱の作用が考えられる領域のデータを用いる場合

表 8-13 に海中帯における 3 箇所（海中帯①，②，③）のコアの塩化物イオン量測定結果を示す。

表 8-13 塩化物イオン量の測定結果一覧（海中帯）

表面からの深さ (mm)	塩化物イオン量 (kg/m <sup>3</sup> )			
	海中帯①	海中帯②	海中帯③	平均値※
0～20	0.617	1.779	2.396	1.597
20～40	0.190	0.735	0.783	0.569
40～60	0.119	0.190	0.285	0.198
60～80	0.119	0.119	0.190	0.143
80～100	0.119	0.119	0.190	0.143
100～120	0.119	0.119	0.142	0.127

※補足説明資料 P20 「表 14 塩分浸透の測定結果」には平均値を記載。

上記データに対する「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」のうち、初期塩化物イオン量 ( $C_{init}$ ) を考慮しない場合（拡散方程式①）を表 8-14 に、初期塩化物イオン量 ( $C_{init}$ ) を考慮する場合（拡散方程式②）を表 8-15 に示す。

表 8-14 鉄筋の腐食減量一覧表

(溶脱作用領域データあり, 初期塩化物イオン量 ( $C_{init}$ ) を考慮しない場合)

海中帯①		海中帯②		海中帯③	
経過年数 (年)	$\Sigma q$ ( $\times 10^{-4} \text{g/cm}^2$ )	経過年数 (年)	$\Sigma q$ ( $\times 10^{-4} \text{g/cm}^2$ )	経過年数 (年)	$\Sigma q$ ( $\times 10^{-4} \text{g/cm}^2$ )
21	0	21	0	21	0
22	0	22	0	22	0
23	0	23	0	23	0
24	0	24	0	24	0
25	0	25	0	25	0
26	0	26	0	26	0
27	0	27	0	27	0
28	0	28	0	28	0
29	0	29	0	29	0
30	0	30	0	30	0
31	0	31	0	31	0
55	0	55	0	55	0
56	0	56	0	56	0
57	0	57	0	57	0
58	0	58	0	58	0
59	0	59	0	59	0
60	0	60	0	60	0
61	0	61	0	61	0
62	0	62	0	62	0
63	0	63	0	63	0
64	0	64	0	64	0
65	0	65	0	65	0
2990	0	2555	91.2	1868	91.2
2991	0	2556	91.3	1869	91.2
2992	0	2557	91.3	1870	91.3
2993	0	2558	91.4	1871	91.4
2994	0	2559	91.4	1872	91.4
2995	0	2560	91.5	1873	91.5
2996	0	2561	91.5	1874	91.6
2997	0	2562	91.6	1875	91.7
2998	0	2563	91.6	1876	91.7
2999	0	2564	91.7	1877	91.8
3000	0	2565	91.7	1878	91.9

表 8-15 鉄筋の腐食減量一覧表

(溶脱作用領域データあり, 初期塩化物イオン量 ( $C_{init}$ ) を考慮する場合)

海中帯①'		海中帯②'		海中帯③'	
経過年数 (年)	$\Sigma q$ ( $\times 10^{-4}g/cm^2$ )	経過年数 (年)	$\Sigma q$ ( $\times 10^{-4}g/cm^2$ )	経過年数 (年)	$\Sigma q$ ( $\times 10^{-4}g/cm^2$ )
21	0	21	0	21	0
22	0	22	0	22	0
23	0	23	0	23	0
24	0	24	0	24	0
25	0	25	0	25	0
26	0	26	0	26	0
27	0	27	0	27	0
28	0	28	0	28	0
29	0	29	0	29	0
30	0	30	0	30	0
31	0	31	0	31	0
55	0	55	0	55	0
56	0	56	0	56	0
57	0	57	0	57	0
58	0	58	0	58	0
59	0	59	0	59	0
60	0	60	0	60	0
61	0	61	0	61	0
62	0	62	0	62	0
63	0	63	0	63	0
64	0	64	0	64	0
65	0	65	0	65	0
2990	0	2587	91.2	1901	91.1
2991	0	2588	91.3	1902	91.2
2992	0	2589	91.3	1903	91.3
2993	0	2590	91.4	1904	91.4
2994	0	2591	91.4	1905	91.4
2995	0	2592	91.5	1906	91.5
2996	0	2593	91.5	1907	91.6
2997	0	2594	91.6	1908	91.7
2998	0	2595	91.6	1909	91.7
2999	0	2596	91.7	1910	91.8
3000	0	2597	91.7	1911	91.9

(2) 溶脱の作用が考えられる領域のデータを用いない場合

表 8-16 に溶脱の作用が考えられる領域のデータを用いない場合における 3 箇所（海中帯④，⑤，⑥）のコアの塩化物イオン量測定結果を示す。

表 8-16 塩化物イオン量の測定結果一覧（海中帯）

表面からの深さ (mm)	塩化物イオン量 (kg/m <sup>3</sup> )			
	干満帯④	干満帯⑤	干満帯⑥	平均値
0~20	—	—	—	—
20~40	0.190	0.356	0.901	0.482
40~60	0.119	0.261	0.356	0.245
60~80	0.095	0.308	0.190	0.198
80~100	0.095	0.237	0.119	0.150
100~120	0.119	0.190	0.119	0.143

上記データに対する「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」のうち，初期塩化物イオン量 ( $C_{init}$ ) を考慮しない場合（拡散方程式①）を表 8-17 に，初期塩化物イオン量 ( $C_{init}$ ) を考慮する場合（拡散方程式②）を表 8-18 に示す。



表 8-17 鉄筋の腐食減量一覧表

(溶脱作用領域データなし，初期塩化物イオン量 ( $C_{init}$ ) を考慮しない場合)

海中帯④		海中帯⑤		海中帯⑥	
経過年数 (年)	$\Sigma q$ ( $\times 10^{-4} \text{g/cm}^2$ )	経過年数 (年)	$\Sigma q$ ( $\times 10^{-4} \text{g/cm}^2$ )	経過年数 (年)	$\Sigma q$ ( $\times 10^{-4} \text{g/cm}^2$ )
21	0	21	0	21	0
22	0	22	0	22	0
23	0	23	0	23	0
24	0	24	0	24	0
25	0	25	0	25	0
26	0	26	0	26	0
27	0	27	0	27	0
28	0	28	0	28	0
29	0	29	0	29	0
30	0	30	0	30	0
31	0	31	0	31	0
55	0	55	0	55	0
56	0	56	0	56	0
57	0	57	0	57	0
58	0	58	0	58	0
59	0	59	0	59	0
60	0	60	0	60	0
61	0	61	0	61	0
62	0	62	0	62	0
63	0	63	0	63	0
64	0	64	0	64	0
65	0	65	0	65	0
2990	0	2990	88.5	2990	41.7
2991	0	2991	88.6	2991	41.7
2992	0	2992	88.6	2992	41.7
2993	0	2993	88.7	2993	41.7
2994	0	2994	88.7	2994	41.7
2995	0	2995	88.8	2995	41.8
2996	0	2996	88.8	2996	41.8
2997	0	2997	88.8	2997	41.8
2998	0	2998	88.9	2998	41.8
2999	0	2999	88.9	2999	41.8
3000	0	3000	89.0	3000	41.9

表 8-18 鉄筋の腐食減量一覧表

(溶脱作用領域データなし，初期塩化物イオン量 ( $C_{init}$ ) を考慮する場合)

海中帯④'		海中帯⑤'		海中帯⑥'	
経過年数 (年)	$\Sigma q$ ( $\times 10^{-4}g/cm^2$ )	経過年数 (年)	$\Sigma q$ ( $\times 10^{-4}g/cm^2$ )	経過年数 (年)	$\Sigma q$ ( $\times 10^{-4}g/cm^2$ )
21	0	21	0	21	0
22	0	22	0	22	0
23	0	23	0	23	0
24	0	24	0	24	0
25	0	25	0	25	0
26	0	26	0	26	0
27	0	27	0	27	0
28	0	28	0	28	0
29	0	29	0	29	0
30	0	30	0	30	0
31	0	31	0	31	0
55	0	55	0	55	0
56	0	56	0	56	0
57	0	57	0	57	0
58	0	58	0	58	0
59	0	59	0	59	0
60	0	60	0	60	0
61	0	61	0	61	0
62	0	62	0	62	0
63	0	63	0	63	0
64	0	64	0	64	0
65	0	65	0	65	0
2990	0	1772	91.1	2221	91.1
2991	0	1773	91.1	2222	91.2
2992	0	1774	91.2	2223	91.3
2993	0	1775	91.3	2224	91.3
2994	0	1776	91.4	2225	91.4
2995	0	1777	91.5	2226	91.5
2996	0	1778	91.5	2227	91.5
2997	0	1779	91.6	2228	91.6
2998	0	1780	91.7	2229	91.6
2999	0	1781	91.8	2230	91.7
3000	0	1782	91.9	2231	91.8

上記より，運転開始後 60 年時点の鉄筋の腐食減量は，すべてのデータで同値 ( $0.0 \times 10^{-4}g/cm^2$ ) となったことから，最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腐食減量に早く達する海中帯⑤' (溶脱の作用が考えられる領域のデータを用いない場合，初期塩化物イオン量 ( $C_{init}$ ) を考慮する場合) のデータを選定した。

なお、「2. 拡散方程式の回帰分析結果」に示す、回帰分析結果のグラフにおける塩化物イオン量の実測値データは表 8-19 のとおりである。

表 8-19 塩化物イオン量の実測値データ (選定データ)

表面からの深さ (mm)	塩化物イオン量 (kg/m <sup>3</sup> )		
	気中帯	干満帯	海中帯
0~20	—	0.403	—
20~40	0.427	0.190	0.735
40~60	0.166	0.119	0.190
60~80	0.142	0.095	0.119
80~100	0.142	0.095	0.119
100~120	0.119	0.119	0.119

〈機械振動の評価対象部位及び評価点の選定過程について〉

泊2号炉の冷温停止状態が維持されることを前提とした場合の主要な機器の原動機出力を機械振動の大きさとして抽出し、機器の出力が相対的に大きいディーゼル発電機（ディーゼル発電機内燃機関）を選定した。主要な機器の原動機出力を下表に示す。

機器名称	種類	原動機出力 (kW/個)	備考
ディーゼル発電機内燃機関	ディーゼル機関	4,928	機関出力を記載
1次冷却材ポンプ	斜流形	4,570	
充てんポンプ	往復型	132	
原子炉補機冷却海水ポンプ	斜流形	340	
余熱除去ポンプ	うず巻形	250	
原子炉補機冷却水ポンプ	うず巻形	250	

機械振動による強度低下における評価対象部位については、支持する機器の機械振動が大きく、建屋コンクリート躯体から独立しているディーゼル発電機基礎を選定し、局部的に影響を受ける可能性がある基礎ボルト周辺のコンクリートを評価点としている。

ディーゼル発電機基礎部の概略図を図9-1に示す。

なお、経年劣化メカニズムまとめ表（（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：2018（追補3）」）においてもディーゼル発電機基礎が対象となっている。経年劣化メカニズムまとめ表を図9-2に示す。



図 9-1 泊 2 号炉 ディーゼル発電機基礎断面図

経年劣化メカニズムまとめ表-PWR

(1/2)

P11-01 コンクリート構造物及び鉄骨構造物（コンクリート構造物及び鉄骨構造物）

No.	機能達成に必要な項目	部位	材料	経年劣化事象	高経年化技術評価不要の条件	耐震安全上の機能別評価項目		耐震上の影響
						静的機能	動的機能	
1	コンクリート強度の維持	外部遮へい壁、内部コンクリート、原子炉格納施設基礎、原子炉補助建屋、取水構造物、タービン建屋（タービン架台）、復水タンク基礎（配管基礎含む）、燃料取替用水タンク基礎（配管基礎含む）、緊急時対策所、タービン建屋、アスファルト固化建屋	コンクリート	中性化による強度低下		★	/	▼
2		外部遮へい壁、取水構造物、非常用海水路	コンクリート	塩分浸透による強度低下		★	/	▼
3		外部遮へい壁、内部コンクリート、原子炉格納施設基礎、原子炉補助建屋、取水構造物、タービン建屋、タービン建屋（タービン架台）、特高開閉所、脱気器基礎、非常用ディーゼル発電用燃料タンク基礎（配管基礎含む）、復水タンク基礎（配管基礎含む）、燃料取替用水タンク基礎（配管基礎含む）、燃料取扱建屋、非常用海水路、海水ポンプエリア（防護壁）、緊急時対策所、原子炉建屋、アスファルト固化建屋	コンクリート	アルカリ骨材反応による強度低下		★	/	▼
4		外部遮へい壁、内部コンクリート、原子炉格納施設基礎、原子炉補助建屋、取水構造物、タービン建屋、タービン建屋（タービン架台）、非常用ディーゼル発電用燃料タンク基礎（配管基礎含む）、復水タンク基礎（配管基礎含む）、燃料取替用水タンク基礎（配管基礎含む）、燃料取扱建屋、非常用海水路、海水ポンプエリア（防護壁）、緊急時対策所、原子炉建屋、アスファルト固化建屋	コンクリート	凍結融解による強度低下		★	/	▼
5		外部遮へい壁、内部コンクリート、原子炉格納施設基礎、原子炉補助建屋、取水構造物、タービン建屋、タービン建屋（タービン架台）、燃料取扱建屋、海水ポンプエリア（防護壁）	コンクリート	化学的侵食による強度低下	①	★	/	/
6		内部コンクリート（1次遮へい壁）	コンクリート	熱による強度低下		★	/	▼
7		内部コンクリート（1次遮へい壁）	コンクリート	放射線照射による強度低下		★	/	▼
8		原子炉補助建屋（非常用ディーゼル発電機基礎）、タービン建屋（タービン架台）	コンクリート	機械振動による強度低下		★	/	▼
12		コンクリート耐火能力の維持	外部遮へい壁、内部コンクリート、原子炉補助建屋、燃料取扱建屋、取水構造物、取水構造物（海水管ダクト含む）、緊急時対策所	コンクリート	熱による耐火能力低下		★	/
9	コンクリート遮へい能力の維持	内部コンクリート（1次遮へい壁）	コンクリート	熱による遮へい能力低下		★	/	▼

図 9-2 経年劣化メカニズムまとめ表

＜泊 2 号炉周辺の地下水による経年劣化影響について＞

1. はじめに

泊 2 号炉のコンクリート構造物のうち、原子炉格納施設の基礎、燃料油貯油槽タンク室及び取水構造物の一部は、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を行った。

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、泊 2 号炉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った。

2. 経年劣化影響評価

2.1 地下水に起因するコンクリート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 10-1 に示す。

表 10-1 地下水の存在下で引き起こされるコンクリートの経年劣化要因

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、鉄筋表面の不動態皮膜が破壊されるため、鉄筋はコンクリート中の水分及び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る。
アルカリ 骨材反応	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により生成されるアルカリ・シリカゲルが周囲の水を吸収し膨張するため、コンクリート表面にひび割れが生じる。
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る。

## 2.2 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、化学的侵食及び凍結融解が泊2号炉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泊2号炉の環境条件に基づき評価を行った。

### 2.2.1 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、鉄筋表面の不動態皮膜が破壊されるため、鉄筋はコンクリート中の水分及び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。

泊2号炉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60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腐食減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。更にコンクリート躯体が直接海水に接触する取水構造物においても、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塩分浸透によるコンクリートの経年劣化が進展し、泊2号炉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低いと考えられる。

### 2.2.2 アルカリ骨材反応

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ため、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。

ただし、泊2号炉で使用している骨材については、1984年～1990年にモルタルバー法（JASS 5N T201, JIS A 5308 附属書8）による反応性試験を実施しており、その結果得られた膨張率は「材齢6ヶ月で0.100%以下」の判定基準に対し、無害と判定されている。

また、定期的な建屋内部からの目視点検の結果、アルカリ骨材反応が発生した



場合に発生する膨張性のひび割れは確認されていない。更に絶えず海水が供給される環境下にある取水構造物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、使用骨材の反応性試験結果、目視点検の結果及び外部からの水分供給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低いと考えられる。

### 2.2.3 化学的侵食

コンクリートの化学的侵食は、コンクリートが外部からの化学作用によって、セメント硬化体を構成する水和生成物に変質や分解により、結合能力を失っていく事象である。化学的侵食は、その劣化機構によって、1)セメント水和物との化学反応による溶解、2)セメント水和物との化学反応による膨張に大別される。

#### 1) 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などが生じる。

#### 2) 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。

一般的な環境においては、化学的侵食が発生することはほとんどなく、温泉地帯、酸性河川流域及び酸性・硫酸塩土壌等に建造された構造物等が化学的侵食の影響を受けるとされている。

そこで、泊2号炉における地下水質の試験結果に基づき、化学的侵食が発生し、進展する可能性について評価を行った。

#### (1) 泊2号炉地下水質試験における地下水採取位置及び試験結果

泊2号炉原子炉建屋及び原子炉補助建屋湧水ピット(図10-1)において採取した地下水について、2016年7月に実施した地下水質試験結果を表10-2に示す。



図 10-1 泊 2 号炉地下水採取位置（原子炉建屋・原子炉補助建屋）

表 10-2 泊 2 号炉における地下水質の試験結果

	pH	硫酸塩 (mg/l)	マグネ シウム (mg/l)	アンモ ニウム (mg/l)	侵食性 遊離炭酸 (mg/l)
原子炉建屋, 原子炉補助建屋 湧水ピット (平均値)					

(2) 地下水質試験結果の分析

泊2号炉における地下水質試験結果（pH、硫酸塩、マグネシウム、アンモニウム及び侵食性遊離炭酸）を EN206<sup>1)</sup>の地下水の環境区分と対比した結果を表 10-3 に示す。

表 10-3 泊2号炉における試験結果と EN206 の環境区分（地下水）の対比

環境区分	XA1	XA2	XA3	泊2号炉
	弱い 化学的侵食	標準的な 化学的侵食	強い 化学的侵食	
pH	$6.5 \geq X \geq 5.5$	$5.5 > X \geq 4.5$	$4.5 > X \geq 4.0$	該当区分なし
$\text{SO}_4^{2-}$ [mg/l]	$200 \leq X \leq 600$	$600 < X \leq 3000$	$3000 < X \leq 6000$	該当区分なし
$\text{Mg}^{2+}$ [mg/l]	$300 \leq X \leq 1000$	$1000 < X \leq 3000$	$3000 < X$	該当区分なし
$\text{NH}_4^+$ [mg/l]	$15 \leq X \leq 30$	$30 < X \leq 60$	$60 < X \leq 100$	該当区分なし
$\text{CO}_2$ [mg/l] (aggressive)	$15 \leq X \leq 40$	$40 < X \leq 100$	$100 < X$	該当区分なし

(a) pH

EN206 のいずれの環境区分にも該当しないことを確認した。

(b) 硫酸塩

EN206 のいずれの環境区分にも該当しないことを確認した。

(c) マグネシウム

EN206 のいずれの環境区分にも該当しないことを確認した。

(d) アンモニウム

定量下限値未満であり、EN206 のいずれの環境区分にも該当しないことを確認した。

1) BSI, BS EN 206: Concrete - Specification, performance, production and conformity (2013)

(e) 侵食性遊離炭酸

EN206 のいずれの環境区分にも該当しないことを確認した。

(3) 化学的侵食に関する経年劣化評価

泊2号炉の地下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の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取水構造物においては、化学的侵食に特有の劣化兆候は見られない。

したがって、地下水質の分析結果や、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、そのほか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低いと考えられる。

#### 2.2.4 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。

ただし、泊2号炉で使用しているコンクリートについては、凍結融解作用に対する抵抗性を確保するために有効な空気量を満足していることを確認している。なお、地下埋設部コンクリートにおいては、直接、外気に接していないため、凍結融解の恐れはないと考えられる。

したがって、凍結融解によるコンクリートの経年劣化が生じる可能性は低いと考えられる。

### 2.3 地下水に起因するコンクリート経年劣化評価についてのまとめ

地下水に起因するコンクリートの経年劣化要因が、泊2号炉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、泊2号炉の環境条件に基づき評価を行った。結果を表10-4に示す。

これより、塩分浸透は発生の可能性は否定できないものの、表10-1に挙げた各経年劣化要因が泊2号炉の地下埋設部コンクリートにおいて進展する可能性は小さいことを確認した。

表10-4 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	泊2号炉の環境条件・根拠等
塩分浸透	○	×	地下水から塩化物イオンは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、海水の影響を直接受ける取水構造物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	×	×	建設時にコンクリート使用骨材についてモルタルバ一法による反応性試験を実施した結果、無害と判定された。 また、仮にアルカリ骨材反応が発生し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。 更に絶えず海水が供給される環境下にある取水構造物においても、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	×	×	泊2号炉は、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。
凍結融解	×	×	使用しているコンクリートについては、凍結融解作用に対する抵抗性を確保するために有効な空気量を満足していることを確認している。なお、地下埋設部コンクリートにおいては、直接、外気に接していないため、凍結融解の恐れはないと考えられる。

凡例) ○：可能性あり， ×：可能性なし