

泊発電所2号炉審査資料	
資料番号	HTN2-PLM30(冷停)-コン 改1
提出年月日	令和2年6月9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6月9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

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。

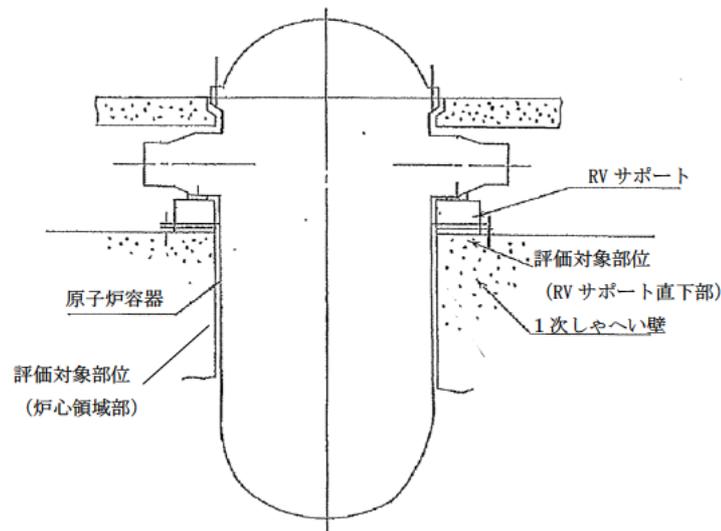


図1 内部コンクリート（1次しゃへい壁）の概要

(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¹⁾。

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²⁾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³⁾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深さ方向に最大でも9cm程度であり、1次しゃへい壁の厚さ（最小壁厚279cm）に比べて小さい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深さ方向に最大でも8cm程度であり、1次しゃへい壁の厚さ（最小壁厚279cm）に比べて小さいことから、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。

- 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)

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。

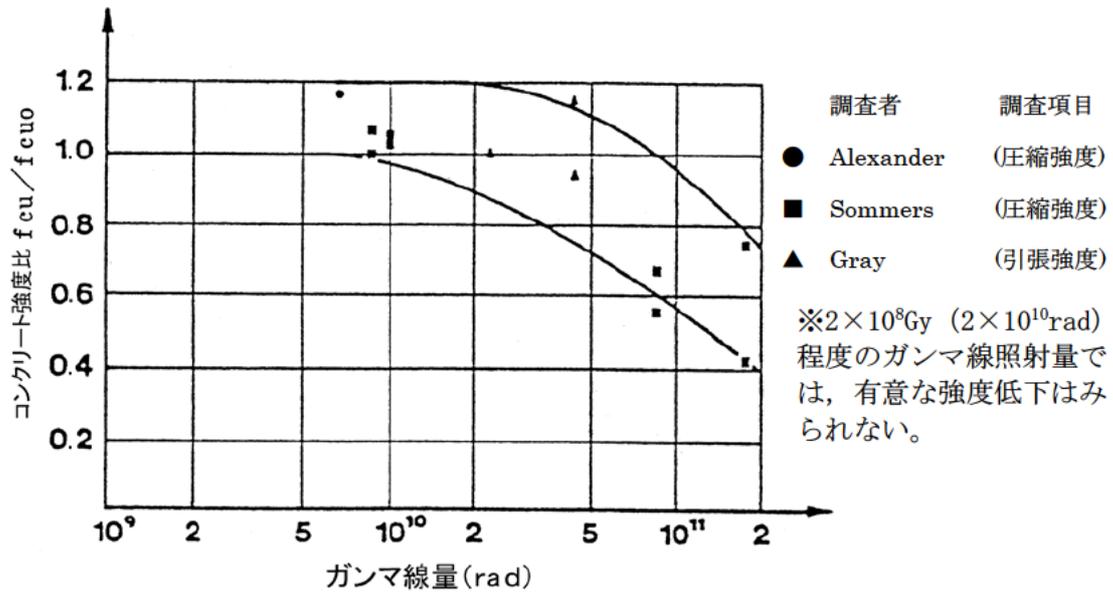


図2 ガンマ線照射したコンクリートの圧縮強度 (f_{cu}) と照射しないコンクリートの圧縮強度 (f_{cuo}) の変化²⁾

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⁴⁾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	24. 2	32. 5	470. 6	0. 1330
	EL. 26. 9m	25. 9	29. 1	484. 3	0. 1443
内部コンクリート	EL. 13. 4m	26. 3	26. 5	435. 3	0. 1417
	EL. 24. 8m	26. 0	28. 4	448. 9	0. 1403
原子炉格納施設の基礎		24. 3	30. 3	498. 1	0. 1408
周辺補機棟及び燃料取扱棟	EL. 10. 3m	24. 0	29. 5	457. 8	0. 1356
	EL. 18. 3m	23. 6	32. 2	519. 1	0. 1389
	EL. 24. 8m	24. 1	32. 3	459. 7	0. 1316
	EL. 31. 3m	22. 8	30. 3	485. 6	0. 1358
原子炉補助建屋	EL. 3. 3m	20. 6	39. 2	458. 5	0. 1128
	EL. 9. 8m	23. 5	33. 8	537. 4	0. 1382
	EL. 17. 3m	23. 2	33. 5	527. 9	0. 1369
	EL. 24. 8m	21. 3	34. 6	444. 4	0. 1199
	EL. 32. 3m	20. 8	36. 8	492. 1	0. 1213
燃料取替用水タンク建屋		16. 6	47. 7	480. 2	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⁵⁾、森永式⁴⁾及び中性化深さの実測値に基づく \sqrt{t} 式⁶⁾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⁵⁾、森永式⁴⁾及び実測値に基づく \sqrt{t} 式⁶⁾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。

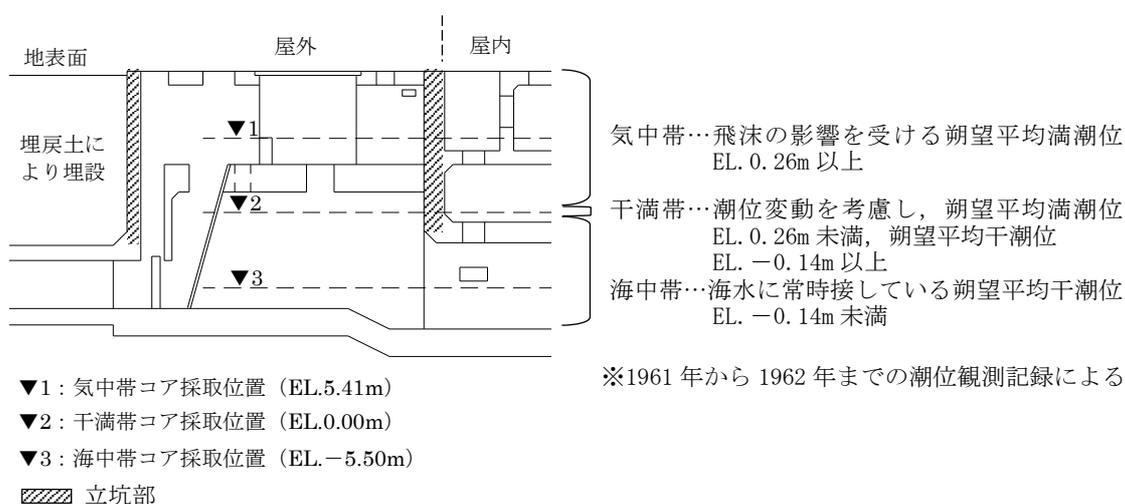


図 3 取水構造物の概要

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 ³)		
		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⁴⁾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⁴⁾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 ³))	鉄筋の腐食減量 (×10 ⁻⁴ g/cm ²)		
			調査 時点	運転開 始後 60 年時点	かぶりコンク リートにひび 割れが発生す る時点
取水構造物 (気中帯)	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)	0.0	0.0	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。

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

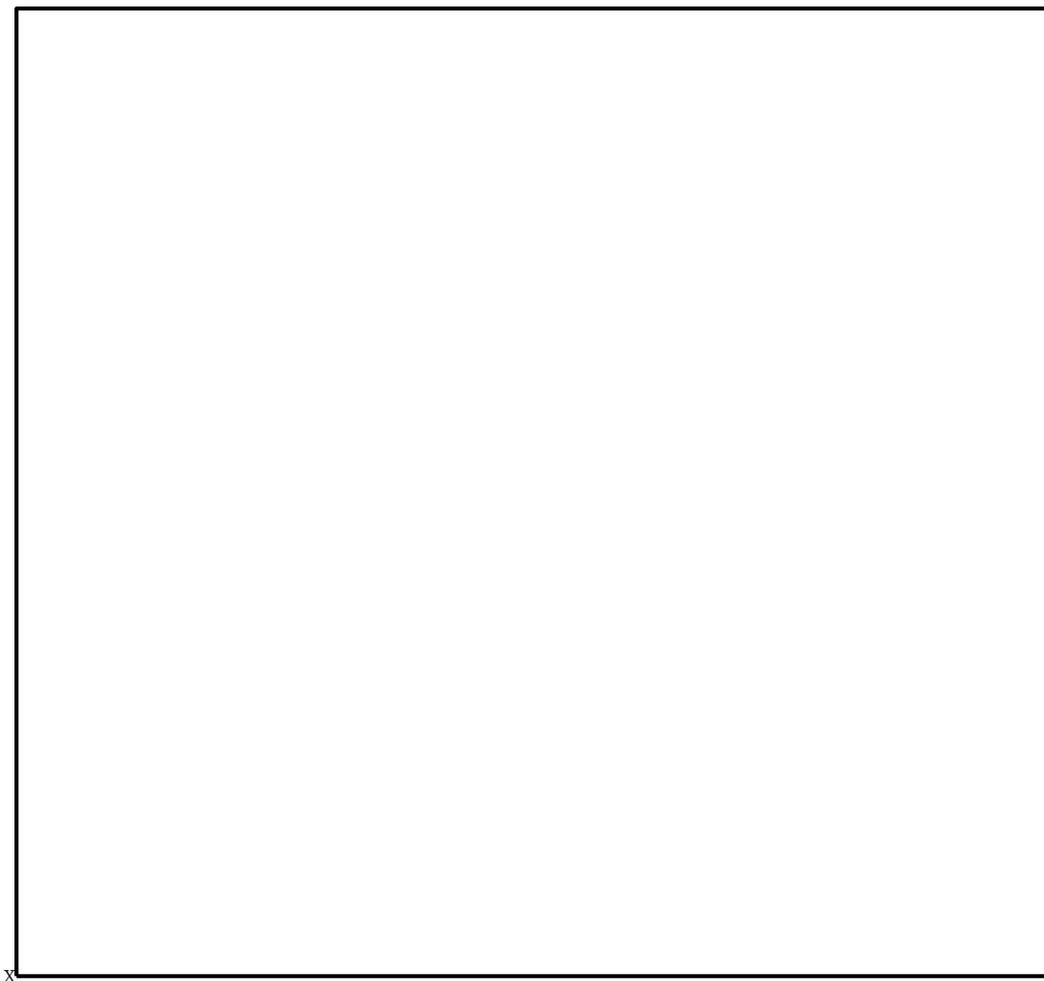
＜放射線照射の影響に対する構造健全性評価結果について＞

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。

1. はじめに

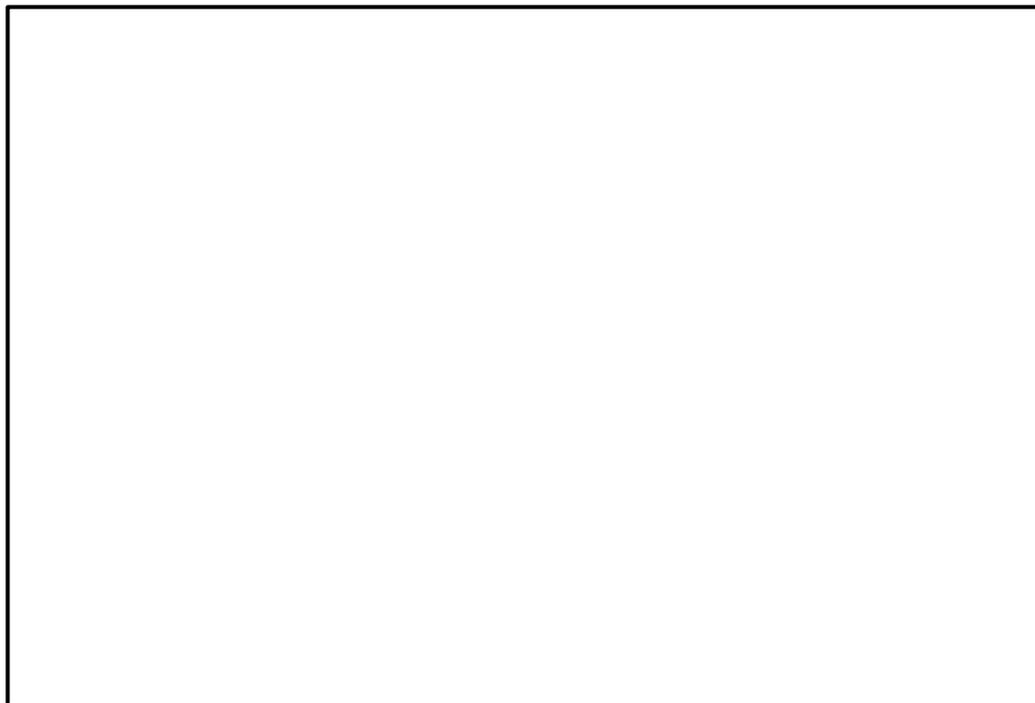
中性子照射量が $1 \times 10^{19} \text{n/cm}^2$ を超える範囲は、炉心中心部で最も大きくなり、1次しゃへい壁炉心側表面から深さ方向に9cm程度である。また、ガンマ線照射量が $2 \times 10^{10} \text{rad}$ を超える範囲も、炉心中心部で最も大きくなり、深さ方向に8cm程度である。

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。



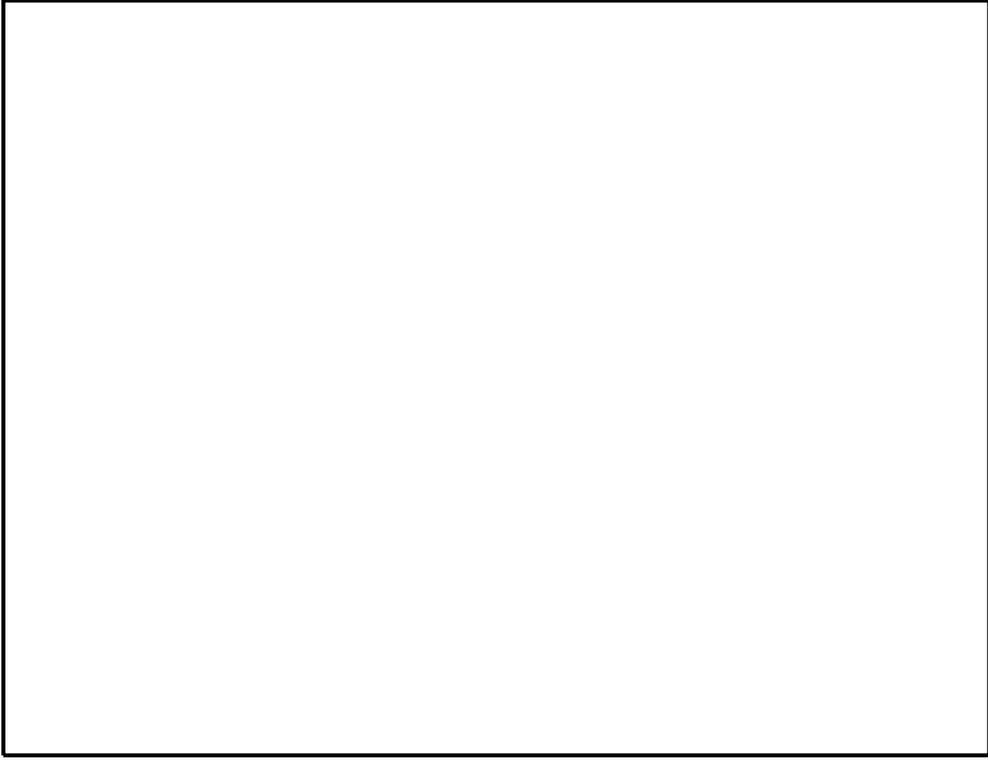
x

(a) モデル全体

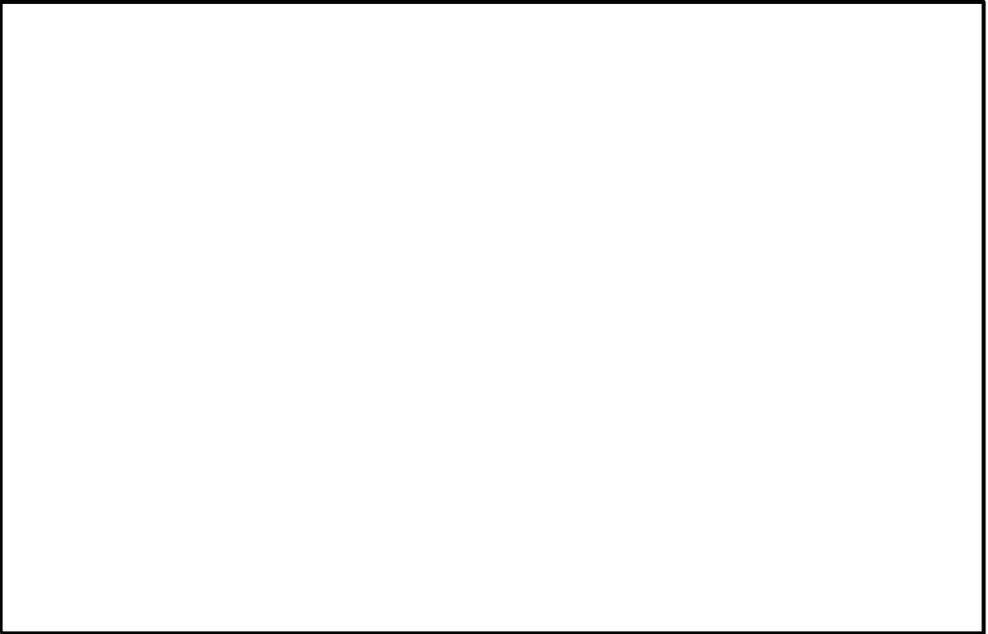


(b) 炉心中心位置

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。

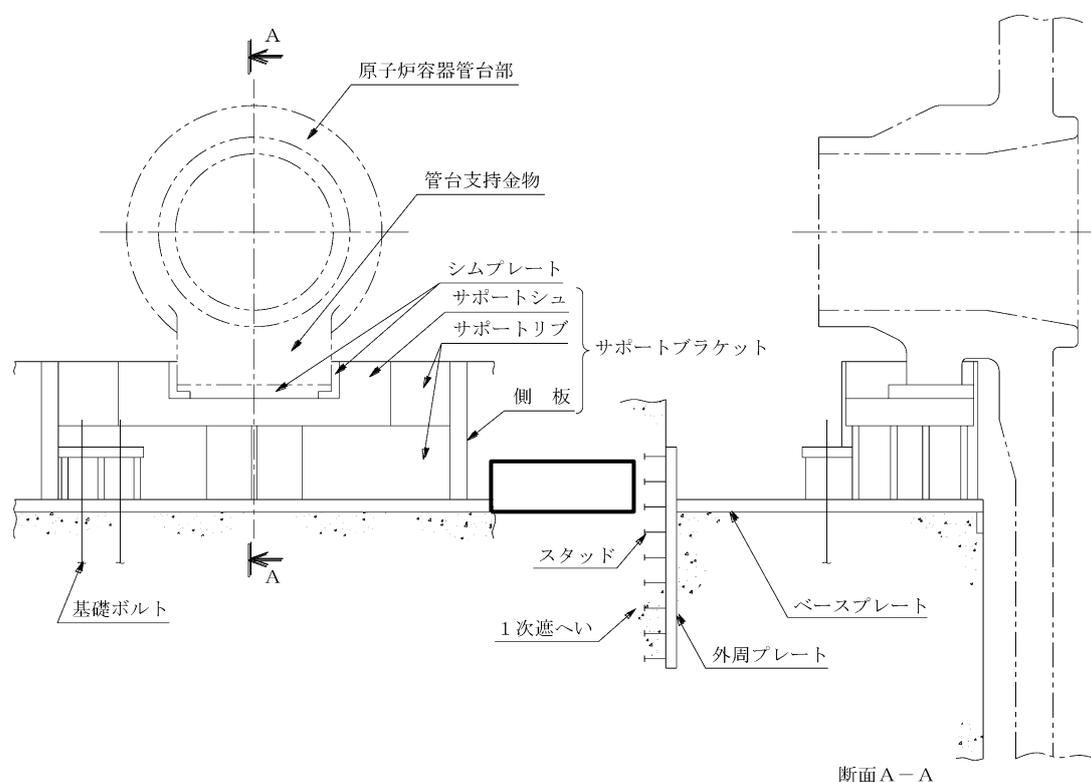


図 4-3 原子炉容器支持構造物概略図

【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。

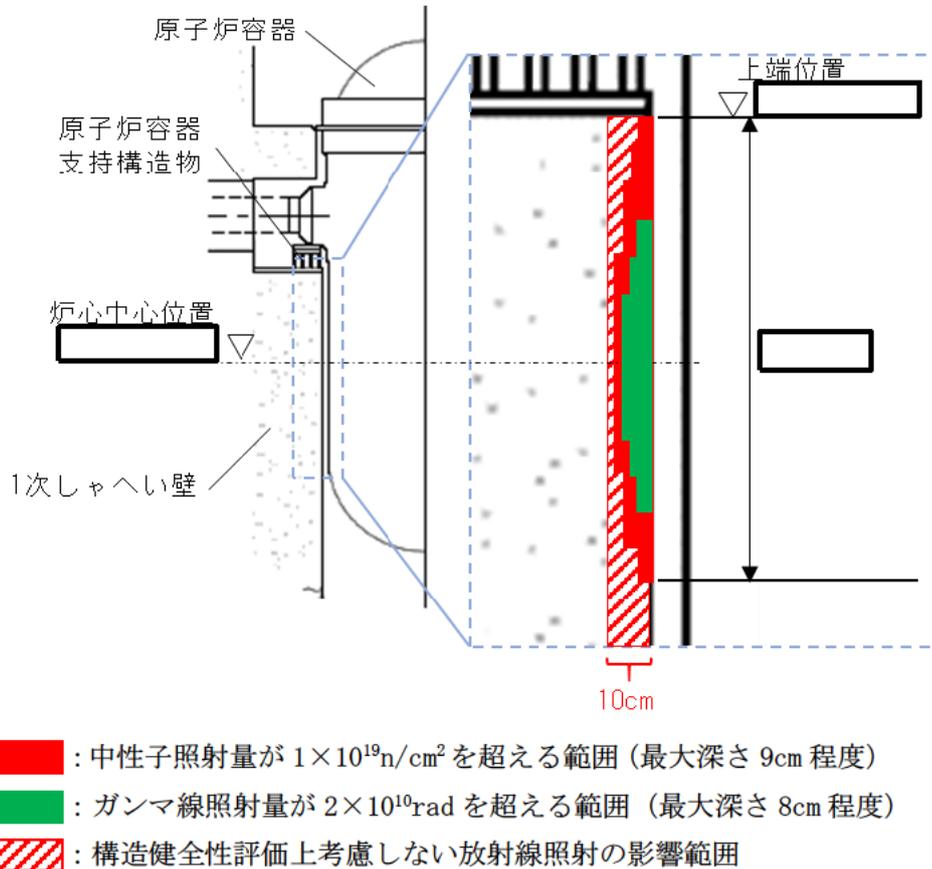


図4-4 構造健全性評価に用いる放射線照射の影響範囲の概念図

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

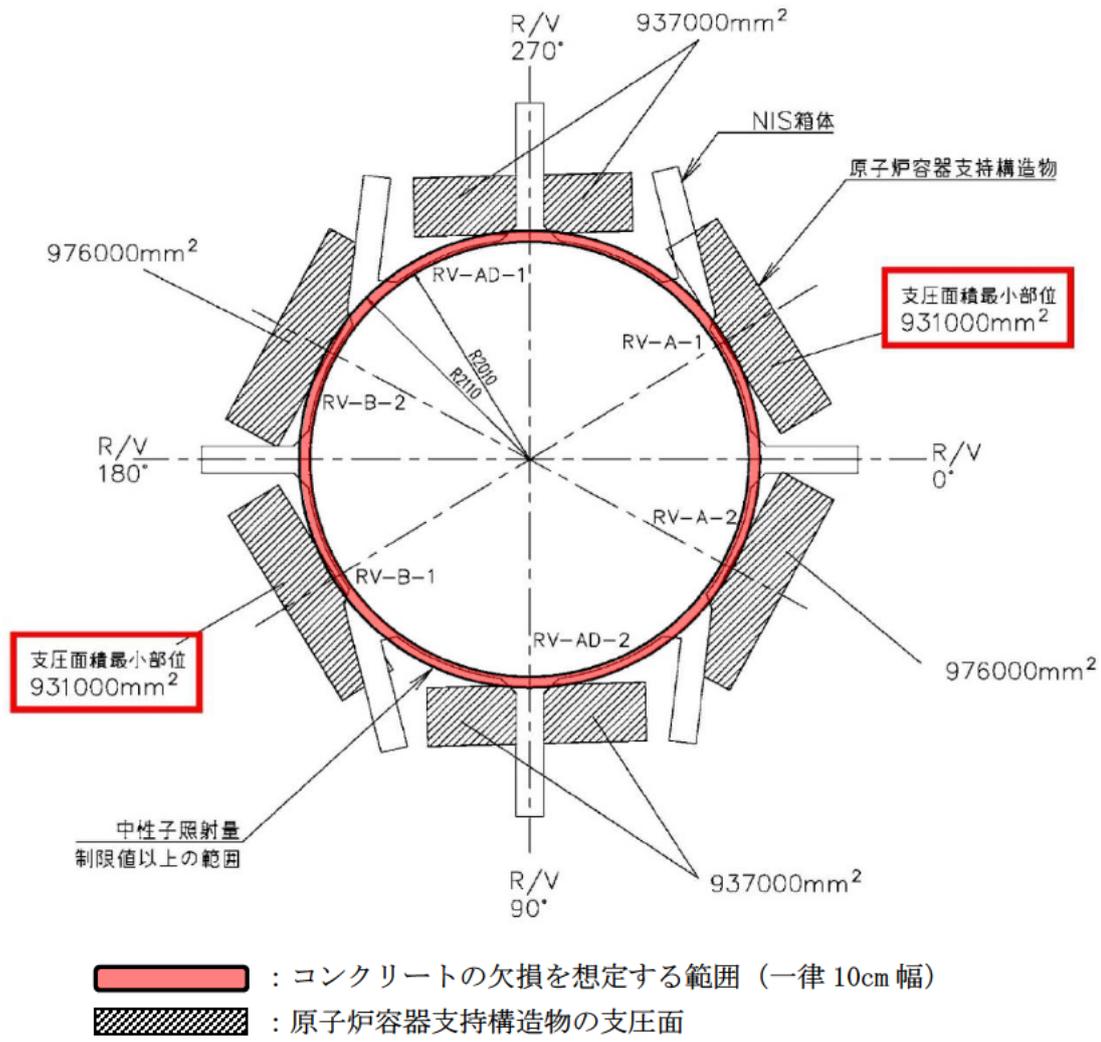


図 4-5 原子炉容器支持構造物の支圧面と鉛直方向荷重による圧縮評価において
コンクリートの欠損を想定する範囲との比較

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 ₁ 地震時	S _s 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（=931,000mm²）

F_c : コンクリートの設計基準強度（=23.5N/mm²）

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 _A S			2.43
	Ⅳ _A S			2.73

*: 本評価は、基準地震動 S_1 による発生値とⅢ_AS及びⅣ_AS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】

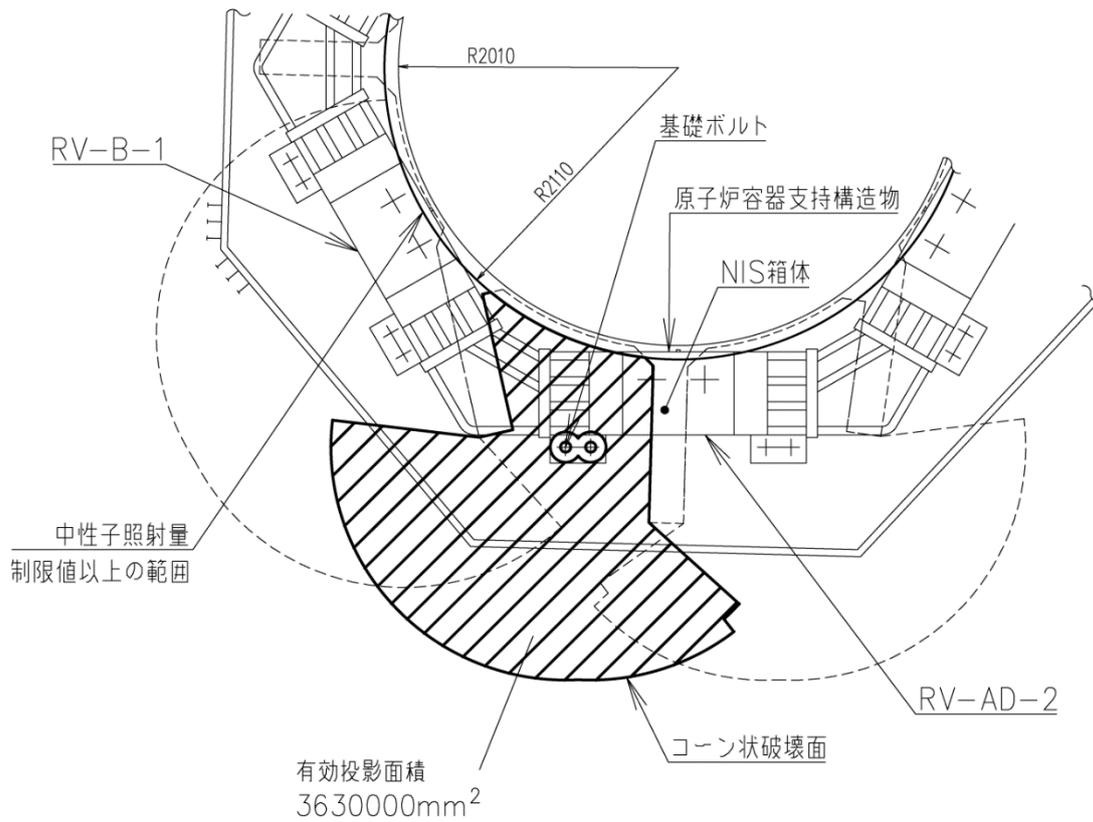
原子炉容器の接線方向荷重は、シムプレート、サポートブラケット等を介してコンクリートに伝わる。基礎ボルトは、接線方向荷重によるベースプレートの浮き上がりを防止するために設けており、基礎ボルトによるコンクリートのせん断評価は建設工認時に行っている。今回、放射線照射の影響によりコンクリート強度が影響を受けると想定する範囲が基礎ボルトによるコンクリートのコーン状破壊面の有効投影面積に重なるため、その面積を欠損させた状態を想定し改めて評価を行った。

【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 ₁ 地震時	S _s 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/mm²)

A_c : コーン状破壊面の有効投影面積 (=3,630,000mm²)

A_0 : 基礎ボルト頂部の支圧面積 (=64,400mm²)

α_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 _A S			1.53
	Ⅳ _A S			2.05

*: 本評価は、基準地震動 S_s による発生値とⅢ_AS及びⅣ_AS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 (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	0.146×10^{-3}	2.0×10^{-3}
	NS	131.5	0.117×10^{-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 γ は、以下の式で算出される。

$$\gamma = \tau / G$$

ここで、

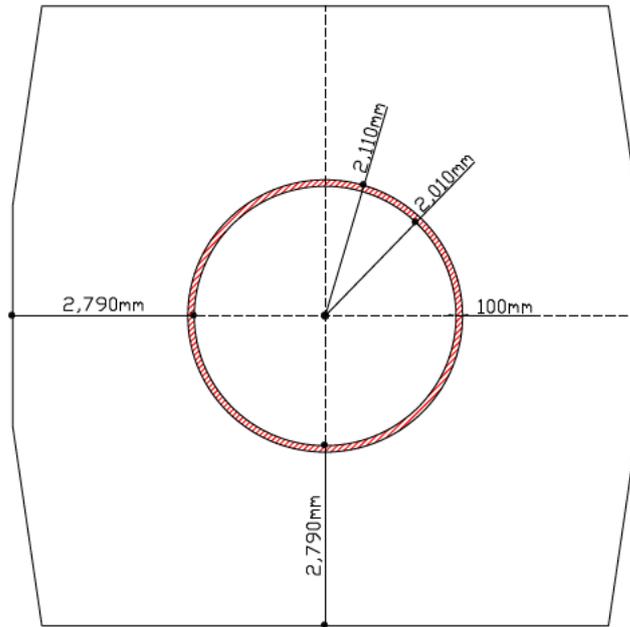
τ : せん断応力度（せん断力／せん断断面積）

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 (1.3m²)

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

〈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 ³)	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 ³)	2.038	1.183	2.498	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
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 ² /年)	9	58	13	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
C_i : 鉄筋位置における塩化物イオン量 (kg/m ³) (推定値)	0.15	0.38	0.18	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 ³)				
W/C : 水セメント比 (比)				
N : 練り混ぜ水に対する NaCl としての塩分濃度 (%)	0.14	0.36	0.17	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 日の期間に取水ビュー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
RH : 相対湿度 (%)	80.1	100	100	相対湿度は海水との接触により 100% (森永論文引用 ^{*)})
O : 酸素濃度 (比)	0.21	0.006	0.006	気中帯: 2016 年 5 月 18 日から 2017 年 4 月 28 日の期間に取水ビュースクリーン室において測定した結果の平均値 干満帯, 海中帯: 森永論文引用 [*]
Q_{26} : 調査時点の鉄筋の腐食減量 (×10 ⁻⁴ g/cm ²)	2.6	0.0	0.0	
Q_{60} : 運転開始 60 年経過時点の鉄筋の腐食減量 (×10 ⁻⁴ g/cm ²)	6.1	0.0	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 (×10 ⁻⁴ g/cm ²)	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」—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

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

- C : 鉄筋位置における塩化物イオン量 (kg/m³)
- C_0 : コンクリート表面における塩化物イオン量 (kg/m³)
- 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 (cm²/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/cm²/年)

q₁ : 塩分環境下での腐食速度($\times 10^{-4}$ g/cm²/年)

q₂ : 寿命予測対象部位で、塩分環境下での腐食速度($\times 10^{-4}$ g/cm²/年)

q'₂ : 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/cm²/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)

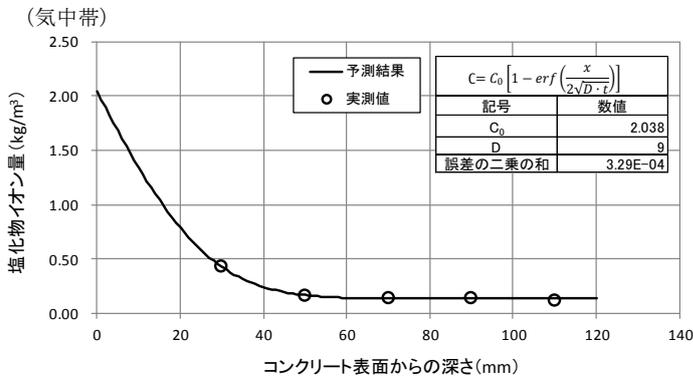
Q_{cr} : 鉄筋腐食でかぶりコンクリートにひび割れが生じる時点での腐食減量
($\times 10^{-4}$ g/cm²)

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

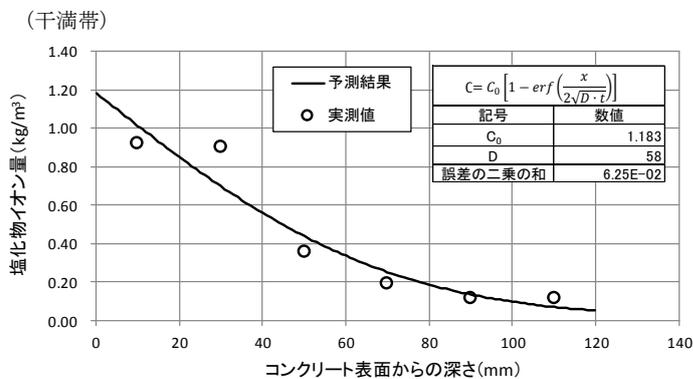
塩化物イオン量を測定するコアは、気中帯、干満帯及び海中帯のそれぞれにおいて、3箇所のコアを採取しているが、回帰分析の結果は、それぞれにおける3箇所のコアの測定結果を比較し、運転開始後60年時点の鉄筋の腐食減量が最も大きくなるデータの選定を基本としている。なお、運転開始後60年時点の鉄筋の腐食減量が干満帯や海中帯の値 ($0 \times 10^{-4} \text{g/cm}^2$) と比較し大きい値 ($6.1 \times 10^{-4} \text{g/cm}^2$) となる気中帯については、「4. 気中帯の回帰分析について」に記載のとおり、より保守的な「塩分浸透による強度低下」評価となるように、中性化の作用が考えられる領域 (0~20mm) のデータを用いる場合と用いない場合の影響を確認したうえでデータを選定している。選定したデータの拡散方程式の回帰分析結果を以下に示す。



表の注記

C₀: コンクリート表面の塩化物イオン量 (kg/m³)

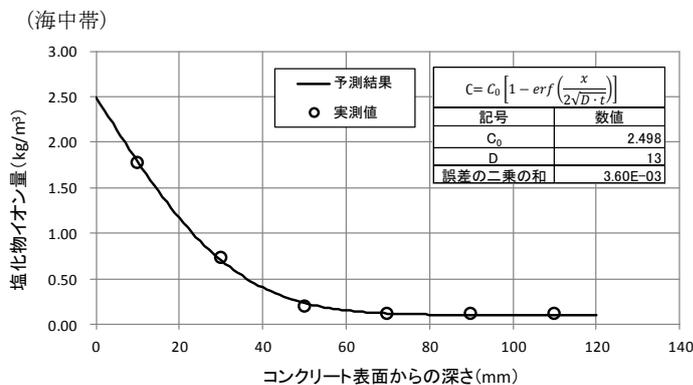
D: コンクリート中の塩化物イオンの見かけの
拡散係数 (mm²/年)



表の注記

C₀: コンクリート表面の塩化物イオン量 (kg/m³)

D: コンクリート中の塩化物イオンの見かけの
拡散係数 (mm²/年)



表の注記

C₀: コンクリート表面の塩化物イオン量 (kg/m³)

D: コンクリート中の塩化物イオンの見かけの
拡散係数 (mm²/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)	Σq ($\times 10^{-4} \text{g/cm}^2$)	経過年数 (年)	Σq ($\times 10^{-4} \text{g/cm}^2$)	経過年数 (年)	Σq ($\times 10^{-4} \text{g/cm}^2$)
21	2.1	21	0	21	0
22	2.2	22	0	22	0
23	2.3	23	0	23	0
24	2.4	24	0	24	0
25	2.5	25	0	25	0
26	2.6	26	0	26	0
27	2.7	27	0	27	0
28	2.9	28	0	28	0
29	3.0	29	0	29	0
30	3.1	30	0	30	0
31	3.2	31	0	31	0
55	5.6	55	0	55	0
56	5.7	56	0	56	0
57	5.8	57	0	57	0
58	5.9	58	0	58	0
59	6.0	59	0	59	0
60	6.1	60	0	60	0
61	6.2	61	0	61	0
62	6.3	62	0	62	0
63	6.4	63	0	63	0
64	6.5	64	0	64	0
65	6.6	65	0	65	0
705	90.8	7223	91.4	2587	91.2
706	91.0	7224	91.4	2588	91.3
707	91.1	7225	91.4	2589	91.3
708	91.3	7226	91.4	2590	91.4
709	91.4	7227	91.4	2591	91.4
710	91.6	7228	91.5	2592	91.5
711	91.7	7229	91.5	2593	91.5
712	91.9	7230	91.5	2594	91.6
713	92.0	7231	91.5	2595	91.6
714	92.2	7232	91.5	2596	91.7
715	92.3	7233	91.5	2597	91.7

4. 気中帯の回帰分析について

運転開始後 60 年時点の鉄筋の腐食減量が干満帯や海中帯の値 ($0 \times 10^{-4} \text{g/cm}^2$) と比較し大きい値 ($6.1 \times 10^{-4} \text{g/cm}^2$) となる気中帯については、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 (0~20mm) のデータを用いる場合と用いない場合の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

表面からの深さ (mm)	塩化物イオン量 (kg/m ³)			
	気中帯①	気中帯②	気中帯③	平均値※
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」を表 8-2 に示す。

表 8-2 鉄筋の腐食減量一覧表

気中帯①		気中帯②		気中帯③	
経過年数 (年)	Σq ($\times 10^{-4} \text{g/cm}^2$)	経過年数 (年)	Σq ($\times 10^{-4} \text{g/cm}^2$)	経過年数 (年)	Σq ($\times 10^{-4} \text{g/cm}^2$)
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	92.161	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 8-3 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①' , ②' , ③') のコアの塩化物イオン量測定結果を示す。

表 8-3 塩化物イオン量の測定結果一覧 (中性化領域除外)

表面からの深さ (mm)	塩化物イオン量 (kg/m ³)			
	気中帯①'	気中帯②'	気中帯③'	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」を表 8-4 に示す。

表 8-4 鉄筋の腐食減量一覧表 (中性化領域除外)

気中帯①'		気中帯②'		気中帯③'	
経過年数 (年)	Σq ($\times 10^{-4}$ g/cm ²)	経過年数 (年)	Σq ($\times 10^{-4}$ g/cm ²)	経過年数 (年)	Σq ($\times 10^{-4}$ 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	2.9	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 ($6.1 \times 10^{-4} \text{g/cm}^2$) 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③' (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) のデータを選定した。

＜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。

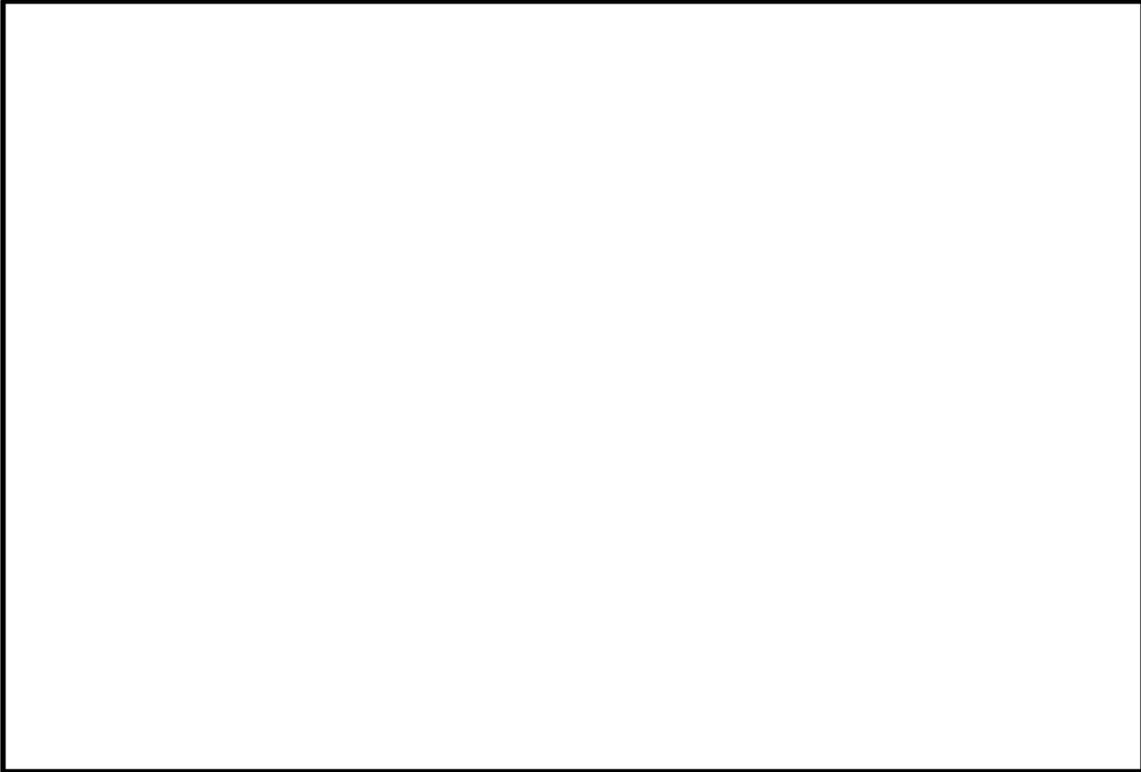


図 10-1 泊 2 号炉地下水採取位置（原子炉建屋・原子炉補助建屋）

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 EN206¹⁾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
SO_4^{2-} [mg/l]	$200 \leq X \leq 600$	$600 < X \leq 3000$	$3000 < X \leq 6000$	該当区分なし
Mg^{2+} [mg/l]	$300 \leq X \leq 1000$	$1000 < X \leq 3000$	$3000 < X$	該当区分なし
NH_4^+ [mg/l]	$15 \leq X \leq 30$	$30 < X \leq 60$	$60 < X \leq 100$	該当区分なし
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