

**女川原子力発電所2号炉
鉄筋コンクリート躯体の乾燥収縮及び地震影響を踏まえた
要求機能に対する各条文の機能維持の方針の整理**

**平成31年 2月14日
東北電力株式会社**

審査会合における指摘事項

No	審査会合日	項目
83	平成30年8月30日	鉄筋コンクリート躯体の要求性能について、乾燥収縮及び地震による影響を踏まえ、設置許可基準規則の各条文との関係性を整理し提示すること。また、機能維持の方針についても対象構造物等の役割及び要求機能並びに維持管理指針を踏まえた妥当性を各条文との関係性の整理とともに提示すること。

各要求機能に対する乾燥収縮ひび割れ等の影響の考慮(1)

【建屋耐震設計において考慮する乾燥収縮等による初期剛性低下の影響以外の機能に対する評価】

- 3.11地震等による建屋の初期剛性低下の影響を耐震設計に反映することに加え、各条文ごとに乾燥収縮等の影響を考慮するものを網羅的に整理した。(別紙1参照)
- その結果、下記の各条文に対する要求機能と該当部に対して、乾燥収縮による影響を検討の上、機能維持評価の方針を整理した。
- なお、下記以外の条文による要求機能については、コンクリートの乾燥収縮等に対して直接的な影響のないものとして整理される。

条文	項目	要求機能	該当部(例)	影響検討、機能維持評価の方針
3条	地盤	耐震性	原子炉建屋 他基礎地盤	<ul style="list-style-type: none"> ➤ 初期剛性低下を考慮した建屋地震応答解析モデルに基づき地盤安定解析用FEMモデルを作成し、地盤の安定性を確認する。
4条 39条	耐震設計 耐震設計	耐震性	各設備	<ul style="list-style-type: none"> ➤ 建屋は、初期剛性低下を考慮した地震応答解析モデルによる地震応答解析結果を用いて、各設備の耐震設計・評価を実施する。 ➤ 屋外重要土木構造物は、地中構造物のため応答は周囲の地盤の振動が支配的となるため、初期剛性の影響は小さいと考えられる。 ➤ 建屋及び屋外重要土木構造物に設置される設備の支持機能(アンカー部)は、JEAG4601及び各種合成構造設計指針・同解説に基づき、低減係数を考慮した設計を実施する。 ➤ 土木構造物は、地中構造物のため応答は周囲の地盤の振動が支配的となるため、初期剛性の影響は小さい。また、土木構造物に作用する主たる荷重である土圧は、剛性が小さいほど小さく評価されることから、作用外力としては乾燥収縮と地震の重畳による剛性低下を見込まないほうが安全側の評価となる。
5条 40条	耐津波設計 耐津波設計	止水性	海水ポンプ 室等	<ul style="list-style-type: none"> ➤ 通常時は、乾燥収縮ひび割れ等を考慮した保守管理をすることから、津波来襲前に止水性に影響するひび割れはない。 ➤ 津波時の止水性のうち、面内変形については、耐震実験より乾燥収縮が地震時のひび割れ発生に大きな影響を与えないことから、地震応答解析結果の変形に基づき評価する。 ➤ 津波時の止水性のうち、面外変形については、地震応答解析の結果に対し、顕著なひび割れが発生していないことを解析等により確認するか、許容値に対し裕度を持たせることにより、止水性に問題ないことを確認する。

(次ページへ続く)

各要求機能に対する乾燥収縮ひび割れ等の影響の考慮(2)

条文	項目	要求機能	該当部(例)	影響検討, 機能維持評価の方針
6条	外部からの衝撃による損傷の防止	建屋の構造健全性	原子炉建屋等	<p>➤ 風(台風), 竜巻, 凍結, 降水, 積雪, 落雷, 火山の影響, 生物学的事象, 外部火災, 有毒ガスの発生に対して, 建屋の構造健全性(外殻としての機能, 耐火性, 止水性, 気密性等)が維持されることを確認する。</p> <p>➤ 機能維持にあたっては, 乾燥収縮ひび割れについて, 実験結果から, 乾燥収縮ひび割れの多寡による地震によるひび割れの進展への影響は, ほとんどないことを確認していることを踏まえ, 以下のとおり対応する。</p> <p>[外殻としての機能]</p> <p>➤ 竜巻飛来物に対する躯体の衝突評価及び裏面剥離評価としては, コンクリートの設計基準強度を用いて, 貫通限界厚さ及び裏面剥離限界厚さを評価するが, 実機からのコア抜きによりコンクリートの圧縮強度が設計基準強度を上回っていることを確認しており, 外殻としての機能の評価への影響はない。</p> <p>➤ 竜巻による各荷重に対する建屋全体の変形評価においては, 初期剛性低下を考慮した建屋地震応答解析モデルの荷重 - 変形関係を用いることから, 乾燥収縮等の影響を考慮した評価としている。</p> <p>[耐火性]</p> <p>➤ 外部火災の耐火性の評価としては, 最大の輻射熱の発生が考えられる原子炉建屋の表面温度をコンクリートの圧縮強度が維持される保守的な温度である200℃以下(加熱温度と圧縮強度の関係を実験で確認した文献より設定)とすることで, 外部事象防護対象施設の安全性を損なわない設計としている。</p> <p>➤ 乾燥収縮は, 建屋全体の剛性として力学的性質に影響を与えるが, 乾燥収縮はコンクリート材料の一般的な性質であり, 実機からのコア抜きによりコンクリートの圧縮強度が設計基準強度を上回っていること, また, 耐震実験により乾燥収縮が終局耐力に影響を与えないことを確認しており構造体として問題はないことから, 外部火災上の耐火性に問題はない。</p>

各要求機能に対する乾燥収縮ひび割れ等の影響の考慮 (3)

条文	項目	要求機能	該当部(例)	影響検討, 機能維持評価の方針
6条	外部からの衝撃による損傷の防止	建屋の構造健全性	原子炉建屋等	<p>(前ページからの続き)</p> <p>[止水性]</p> <ul style="list-style-type: none"> ▶ 降水等に対する止水性については, アスファルト防水などにより機能を確保している。アスファルト防水等は乾燥収縮や地震によるひび割れに追従する構造であるため, 問題はない <p>[気密性]</p> <ul style="list-style-type: none"> ▶ 通常時の気密性については, 乾燥収縮ひび割れ等を考慮した保守管理をすることから問題はない。 ▶ 地震時の気密性について, 面内変形に対しては, 耐震壁のせん断ひずみがおおむね弾性状態にとどまることを基本とする。おおむね弾性状態を超える場合は, 地震応答解析による耐震壁のせん断ひずみから算定した空気漏えい量が設置する換気設備の性能を下回ること必要な気密性を維持する設計とする。その場合, 基準地震動Ssによる気密性を要求される鉄筋コンクリート造の施設に対し, 許容限界を最大せん断ひずみ2.0×10^{-3}とし, その適用性を確認する。 ▶ また, 面外変形に対しては, 地震時に生じる応力に対して鉄筋が降伏しないことを確認(鉄筋が降伏する場合は別途詳細検討)することで, 気密性を維持する設計とする。 ▶ 地震応答解析においては, 初期剛性低下を考慮した建屋地震応答解析モデルを用いることから, 乾燥収縮等の影響を考慮した評価としている。 ▶ 空気漏洩量の算定においては, 「原子炉建屋の弾塑性試験に関する報告書((財)原子力発電技術機構)※」にて提案されている評価式について, 乾燥収縮ひび割れのある建屋における気密性能検査から十分な保守性を確認した上で適用する。 <p>※ 財団法人 原子力発電技術機構「耐震安全解析コード改良試験 原子炉建屋の弾塑性試験 試験結果の評価に関する報告書 平成5年度」</p>

(次ページへ続く)

各要求機能に対する乾燥収縮ひび割れ等の影響の考慮(4)

条文	項目	要求機能	該当部(例)	影響検討, 機能維持評価の方針
8条 41条	火災による損傷の防止	耐火性 (内部火災)	原子炉建屋等	<ul style="list-style-type: none"> 内部火災の耐火性の評価としては, 150mm以上のコンクリート壁が3時間耐火性能をもつことを文献で確認している。 この3時間耐火性能は遮熱性の観点での評価であり, 壁厚やコンクリートの種類に応じた遮熱特性係数により耐火性能時間を算定しているものである。乾燥収縮はコンクリート材料の一般的な性質であり, 躯体厚さや遮熱特性係数へ影響を及ぼすものではないことから, 内部火災の耐火性に影響を与えるものではない。
9条	内部溢水	止水性	原子炉建屋等	<ul style="list-style-type: none"> 通常時は, 乾燥収縮ひび割れ等を考慮した保守管理をすることから, 溢水により安全施設の機能へ影響するひび割れはない。 地震時の止水性については, 実験より乾燥収縮が地震時のひび割れ発生に大きな影響を与えないことを確認していることから, 基準地震動Ssに対して応答ひずみが大きく評価される不確かさケース(基本ケースよりも更に初期剛性低下を考慮したモデル)によるせん断ひずみ度から残留ひび割れ幅を算定し, 0.2mm未満であることを確認することにより止水性を維持する。 <p>【添付資料1参照】</p>
16条	燃料体等の取扱施設及び貯蔵施設	想定外の重量物落下が生じないこと	原子炉建屋 屋根, 壁	<ul style="list-style-type: none"> 屋根スラブは, 鋼板(デッキプレート)の上に鉄筋コンクリート造の屋根を設けた構造であり, 地震により剥落しない設計であることから影響はない。 3階床面より上部を構成する壁については, 鉄筋コンクリート造の耐震壁であり, 3階床面より下部の耐震壁とあわせて地震により落下しないことを確認する。 地震応答解析においては, 初期剛性低下を考慮した建屋地震応答解析モデルを用いることから, 乾燥収縮等の影響を考慮した評価としている。

各要求機能に対する乾燥収縮ひび割れ等の影響の考慮(5)

条文	項目	要求機能	該当部(例)	影響検討, 機能維持評価の方針
26条 59条	原子炉制御室 原子炉制御室	気密性, 遮蔽性	原子炉制御室, 緊急時対策所, 原子炉建屋等	<ul style="list-style-type: none"> ▶ 乾燥収縮ひび割れについては, 実験結果から, 乾燥収縮ひび割れの多寡による地震によるひび割れの進展への影響は, ほとんどないことを確認していることを踏まえ, 居住性が確保されていることについて, 気密性・遮蔽性の観点から以下のとおり対応する。 ▶ また, 新設建屋の地震応答解析においては, 設計剛性(設計基準強度)を用いた地震応答解析モデルを基本とするが, 念のため, 耐震壁の厚さが厚い原子炉建屋のオペフロ下部の3.11地震に対する剛性低下量(0.8倍程度)を不確かさケースとして考慮する。 <p>[気密性](6条[気密性]と同じ)</p> <p>[遮蔽性]</p> <ul style="list-style-type: none"> ▶ 設計基準対象施設の耐震重要度分類及び重大事故等対処施設の施設区分に応じた地震動に対して構造強度を確保し, 遮蔽体の形状及び厚さを確保することで, 地震後における残留ひずみを小さくし, ひび割れがほぼ閉鎖し, 貫通するひび割れが直線的に残留しないこととすることで, 遮蔽性を維持する設計とする。 ▶ 地震応答解析においては, 初期剛性低下を考慮した建屋地震応答解析モデルを用いることから, 乾燥収縮等の影響を考慮した評価としている。 <p>[止水性](9条と同じ)</p>
34条 61条	緊急時対策所 緊急時対策所	気密性, 遮蔽性		
29条	直接ガンマ線等からの防護	遮蔽性		
30条	放射線からの放射線業務従事者の防護	遮蔽性, 気密性, 止水性		
32条	原子炉格納施設	気密性		

乾燥収縮ひび割れ等によるRC躯体の止水性の機能維持

女川原子力発電所の特殊性

- ・女川2号炉原子炉建屋は、3.11地震等では、幅1.0mm以上のひび割れが発生するような構造的損傷を受けた状態では無いが、微細なひび割れが発生している。
- ・また、初期剛性低下の要因として乾燥収縮による影響の重畳が考えられ、乾燥収縮ひび割れも東通原子力発電所と比較した場合、有意に多い。

女川原子力発電所の特殊性が鉄筋コンクリート躯体の機能に与える影響

・これらの特殊性が、鉄筋コンクリート躯体として要求される止水性に対して影響を与える可能性について確認する。

地震によるひび割れ

- ・地震によるひび割れが発生した場合については、微細なものであっても、それが躯体を貫通していることを前提に全て補修する対策をとる。
- ・事前損傷を与えた耐震壁の耐震実験^{※1}では、事前損傷が耐震壁のその後の挙動に与える影響はないことを確認している。
- ・乾燥収縮ひび割れの多寡による地震によるひび割れの進展への影響は、ほとんどないことを確認している。（【添付資料2】参照）

過去の地震の経験や乾燥収縮によるひび割れが耐震壁の地震時ひび割れの進展に与える影響はほとんどない。

乾燥収縮によるひび割れ

- ・乾燥収縮によるひび割れは、女川、東通の乾燥ひび割れの「ひび割れ密度」を調査しており、その際に合わせて計測したひび割れ幅が参考となる。ひび割れ密度の測定結果、ひび割れ幅の測定結果は【添付資料3】のとおり。
- ・女川は、東通に比較して乾燥ひび割れが多い傾向であるが、平均ひび割れ幅はほぼ同様であり、幅0.1mm未満となっている。また、ひび割れ幅0.2mmを超えるものは極まれである。

乾燥収縮ひび割れの多寡により、止水性に及ぼす影響は小さい。

【鉄筋コンクリート躯体の止水性について】

- 鉄筋コンクリート躯体からの漏水が生じる原因は、コンクリート表面から裏面まで貫通するような微細なひび割れが生じることによって水の通り道ができるためと考えられる。
- 【添付資料4】に示すとおり、3.11地震時に原子炉建屋地下3階は海水流入により浸水したが、境界となる耐震壁（壁厚180cm）から反対側へ漏水していないことを確認しており、乾燥収縮ひび割れからの漏水は無かった。
- 一方、文献[1]によれば、幅0.2mm以上（壁厚26cm以下）の場合に漏水が生じるとされているが、実機の躯体は十分に厚く（壁厚30～180cm）、また、【添付資料3】のとおり、実機の乾燥収縮による平均ひび割れ幅は0.1mm未満で0.2mmを超えるものは極まれであり、3.11地震時に漏水が無かったことと整合している。
- また、一般的に、コンクリートの乾燥収縮ひび割れが躯体表面に多いことを、乾燥収縮ひび割れ発生メカニズムにより確認している。（【添付資料5】参照）
- 以上のことから、止水性を確保するためには、ひび割れ幅0.2mm以上のひび割れを塞ぐ、又は覆うことが有効である。

乾燥収縮ひび割れ等によるRC躯体の止水性の機能維持

RC躯体の止水性の機能維持については、地震時のひび割れ及び乾燥収縮によるひび割れともに、ひび割れ幅0.2mmを閾値とすることで、地震を経験していないプラントと同様に機能維持が可能であり、乾燥収縮ひび割れを踏まえた止水性を確保するための保守管理については、幅0.2mm以上のひび割れを補修することが止水性の確保に有効である。（【添付資料6】）

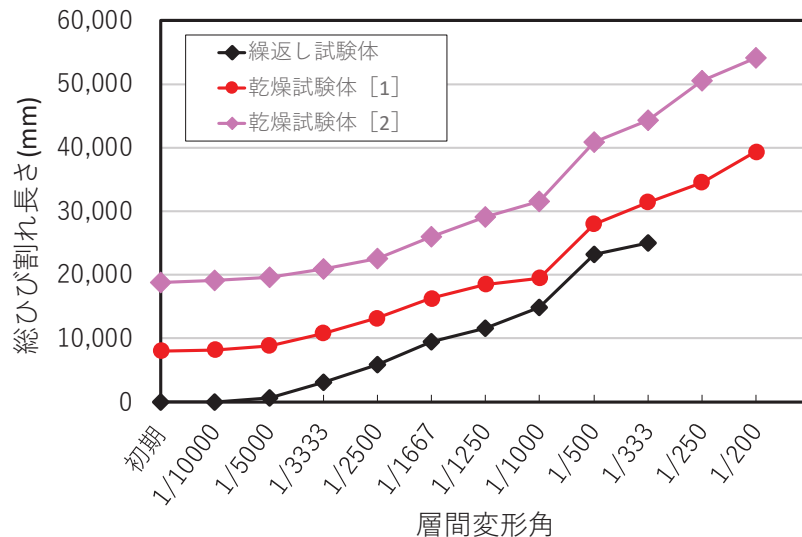
文献[1] コンクリートのひび割れ調査、補修・補強指針—2013—：社団法人 日本コンクリート工学協会

※1 耐震実験[2] 耐震実験による事前損傷が終局耐力に与える影響検討（第628回審査会合 資料1-1-3 別紙11添付11）

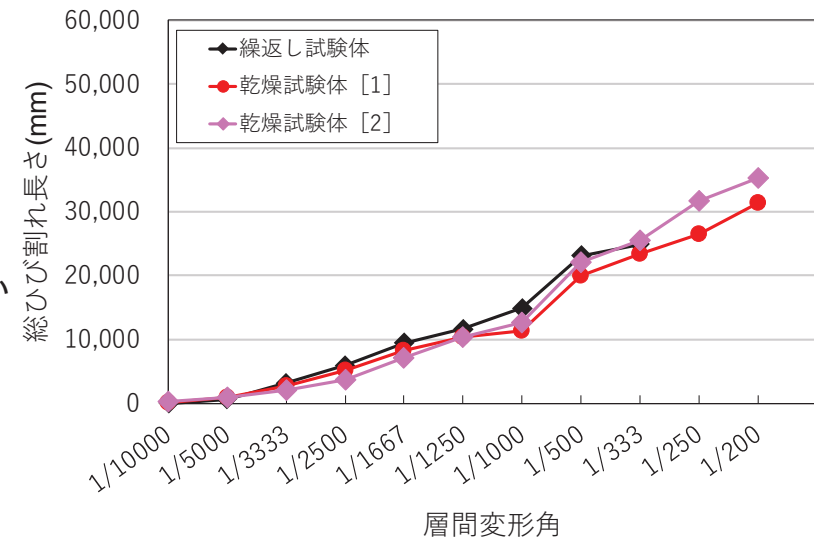
乾燥収縮が地震によるひび割れの進展に与える影響

- 当社で実施した耐震実験※1における総ひび割れ長さと層間変形角関係の図とひび割れ状況図から、乾燥試験体は加力前に乾燥収縮ひび割れが生じているが、加力後に生じるひび割れ(地震時ひび割れ)長さは、乾燥させない試験体と同等のひび割れ長さとなっている。したがって、加力前に生じている乾燥収縮ひび割れは、地震時のひび割れの発生の仕方には大きな影響を与えないことが確認できる。
- また、地震によるひび割れが進展した状態では、ひび割れの量は地震によるひび割れが多くなるため、乾燥収縮ひび割れの影響はその点からも小さいものとなる。

※1 耐震実験 [1] 耐震実験による中小地震レベルの繰返し加力による影響検討 (第628回審査会合 資料1-1-3 別紙11添付5)
 耐震実験 [3] 耐震実験による乾燥収縮が終局耐力に与える影響検討 (第628回審査会合 資料1-1-3 別紙11添付8)



加力前の乾燥収縮ひび割れを差し引いて、加力によるひび割れのみで比較



加力前の乾燥収縮ひび割れ有り
 (加力前の乾燥収縮ひび割れ+加力によるひび割れ)

加力前の乾燥収縮ひび割れ無し
 (加力によるひび割れのみ)

耐震実験における総ひび割れ長さ—層間変形角関係

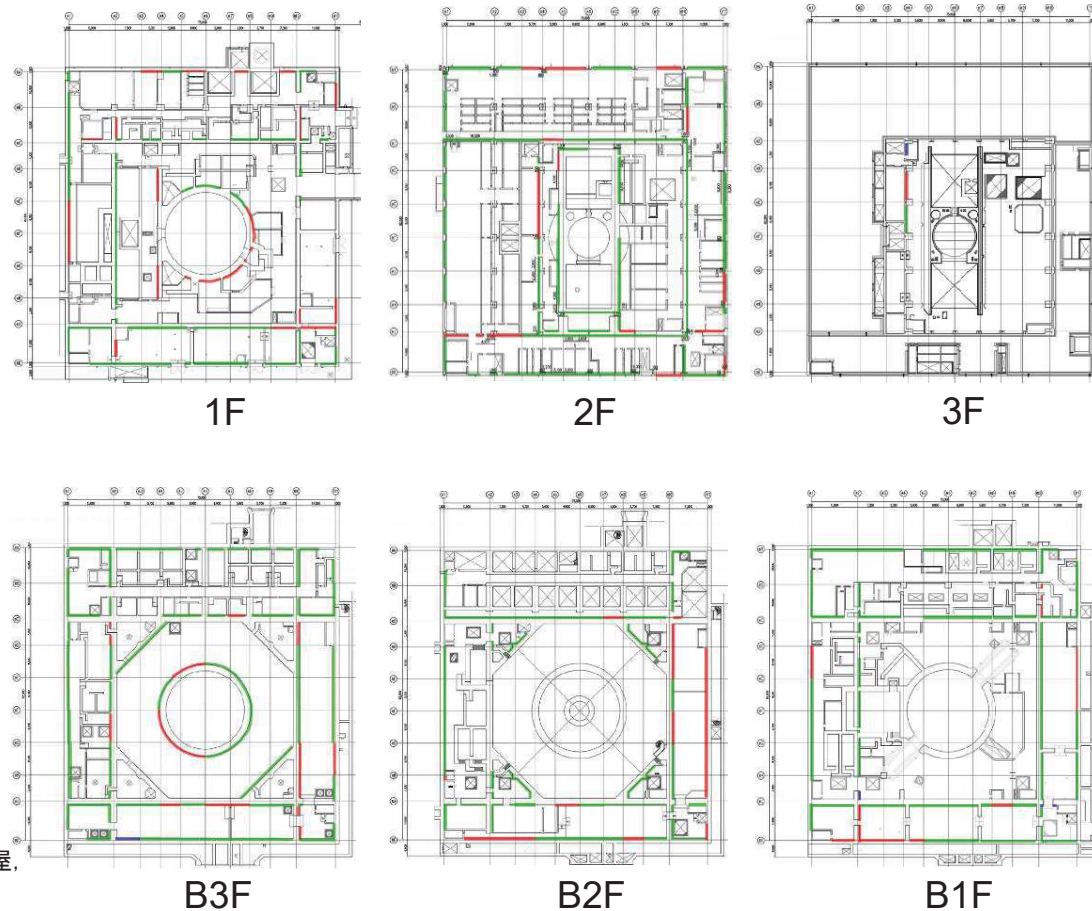
乾燥収縮ひび割れ調査結果(女川2号炉原子炉建屋)

■ひび割れ調査結果(女川2号炉原子炉建屋)

- ・ひび割れ密度は女川2号炉原子炉建屋において、4～5の間の数値を示しており、鉄筋間隔と同等である。
- ・平均ひび割れ幅はフロアによって大きな差はなく、0.05～0.07mmと計測された。
- ・全建屋のひび割れ密度の平均値より $+\sigma$ 以上の耐震壁を赤色で、 $-\sigma$ 以下の耐震壁を青色で、 $\pm\sigma$ に収まった耐震壁を緑色で示した図においては、赤色を示している部位が多く確認される。

フロアごとのひび割れ調査結果 (女川2号炉原子炉建屋)

	ひび割れ調査長さ(m)		ひび割れ密度 (平均ひび割れ幅)
	建屋	各階	
3F	約2036	約14	約4.8 (0.05)
M2F		約30	約4.5 (0.05)
2F		約417	約4.2 (0.06)
M1F		約77	約4.0 (0.06)
1F		約269	約4.5 (0.06)
B1F		約360	約4.0 (0.05)
MB2F		約31	約4.5 (0.07)
B2F		約312	約4.8 (0.05)
MB3F		約86	約4.5 (0.05)
B3F		約440	約4.0 (0.06)



ひび割れ密度※

- : 平均より $+\sigma$ 以上多い
- : $-\sigma \sim +\sigma$
- : 平均より $-\sigma$ 少ない

※女川2号炉原子炉建屋、
女川3号炉海水熱交換器建屋、
東通1号炉原子炉建屋、
東通1号炉海水熱交換器建屋
の調査結果より平均値、 σ を算出
(平均値:3, 標準偏差 σ :2.4)

調査スパンごとのひび割れの多寡状況図
(女川2号炉原子炉建屋)

乾燥収縮ひび割れ調査結果(東通1号炉原子炉建屋)

■ひび割れ調査結果

- ・ひび割れ密度は東通1号炉原子炉建屋において、1未満の数値を示している。
- ・平均ひび割れ幅はフロアによって大きな差はなく、女川2号炉原子炉建屋と同等な0.05～0.08mmと計測された。
- ・全建屋のひび割れ密度の平均値より $+\sigma$ 以上の耐震壁を赤色で、 $-\sigma$ 以下の耐震壁を青色で、 $\pm\sigma$ に収まった耐震壁を緑色で示した図においては、青色を示している部位が多く確認される。
- ・女川2号炉原子炉建屋と比較すると、**女川2号炉原子炉建屋の方がひび割れ密度が高い傾向**となっている。

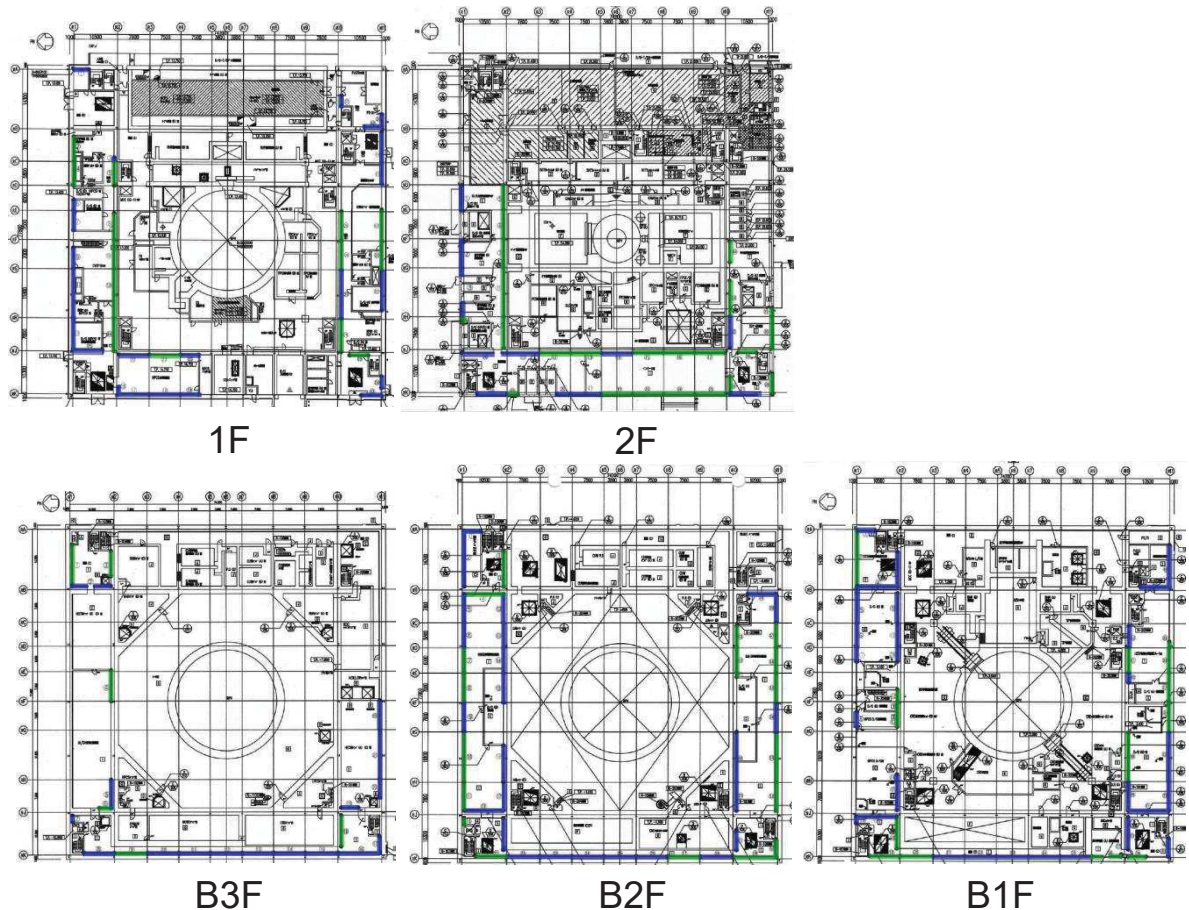
フロアごとのひび割れ調査結果 (東通1号炉原子炉建屋)

	ひび割れ調査長さ(m)		ひび割れ密度 (平均ひび割れ幅)
	建屋	各階	
3F	養生中のため調査不可		
2F		約213	約0.8 (0.05)
1F		約212	約0.6 (0.06)
B1F	約1129	約266	約0.5 (0.07)
B2F		約300	約0.6 (0.07)
B3F		約139	約0.6 (0.08)

ひび割れ密度※

- : 平均より $+\sigma$ 以上多い
- : $-\sigma \sim +\sigma$
- : 平均より $-\sigma$ 少ない

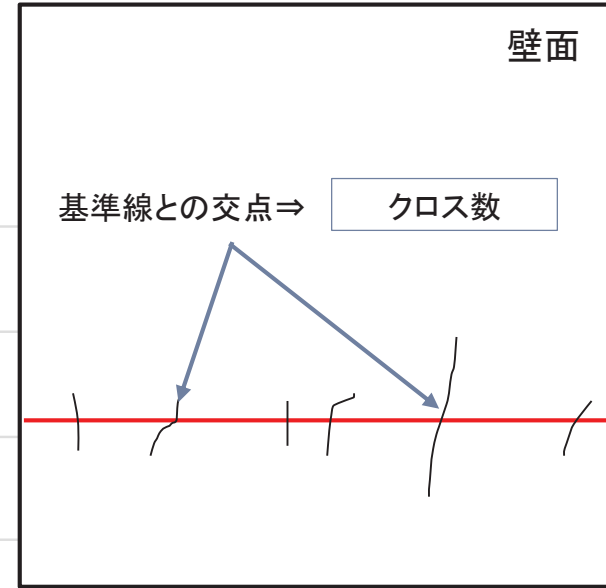
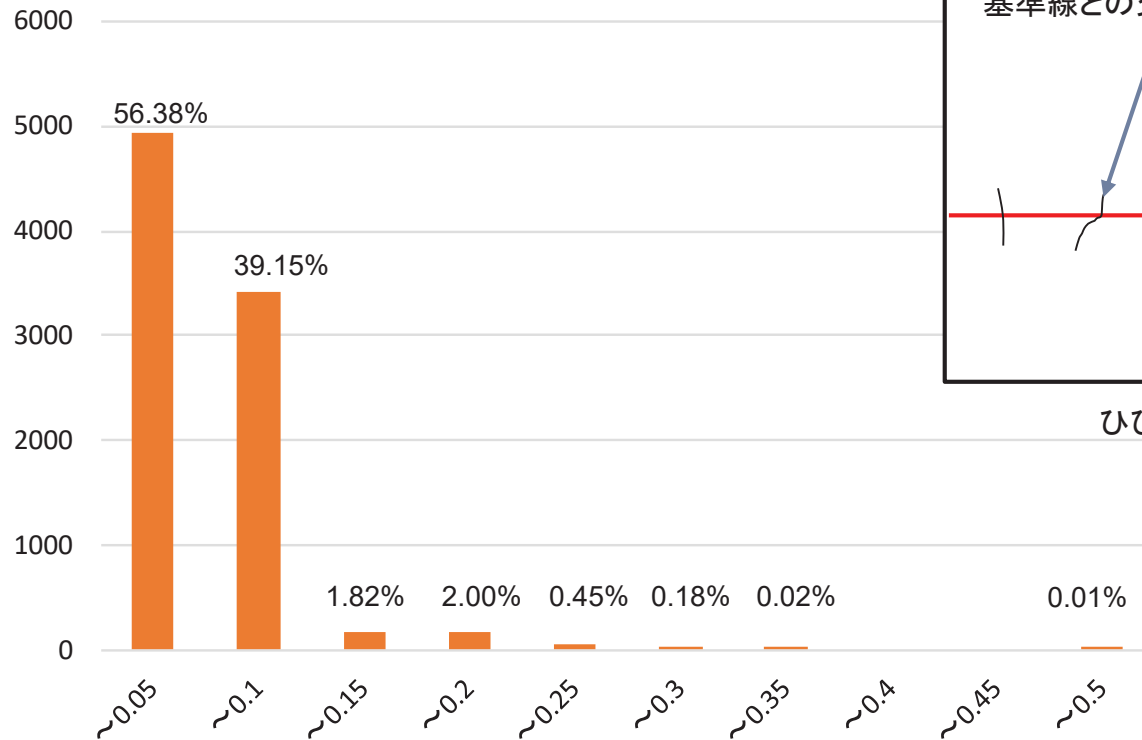
※女川2号炉原子炉建屋,
女川3号炉海水熱交換器建屋,
東通1号炉原子炉建屋,
東通1号炉海水熱交換器建屋
の調査結果より平均値, σ を算出
(平均値:3, 標準偏差 σ :2.4)



調査スパンごとのひび割れの多寡状況図
(東通1号炉原子炉建屋)

乾燥収縮ひび割れ調査結果(原子炉建屋のひび割れ幅の分布)

個所数(クロス数)



ひび割れ密度=(クロス数/m)

ひび割れ幅(mm)

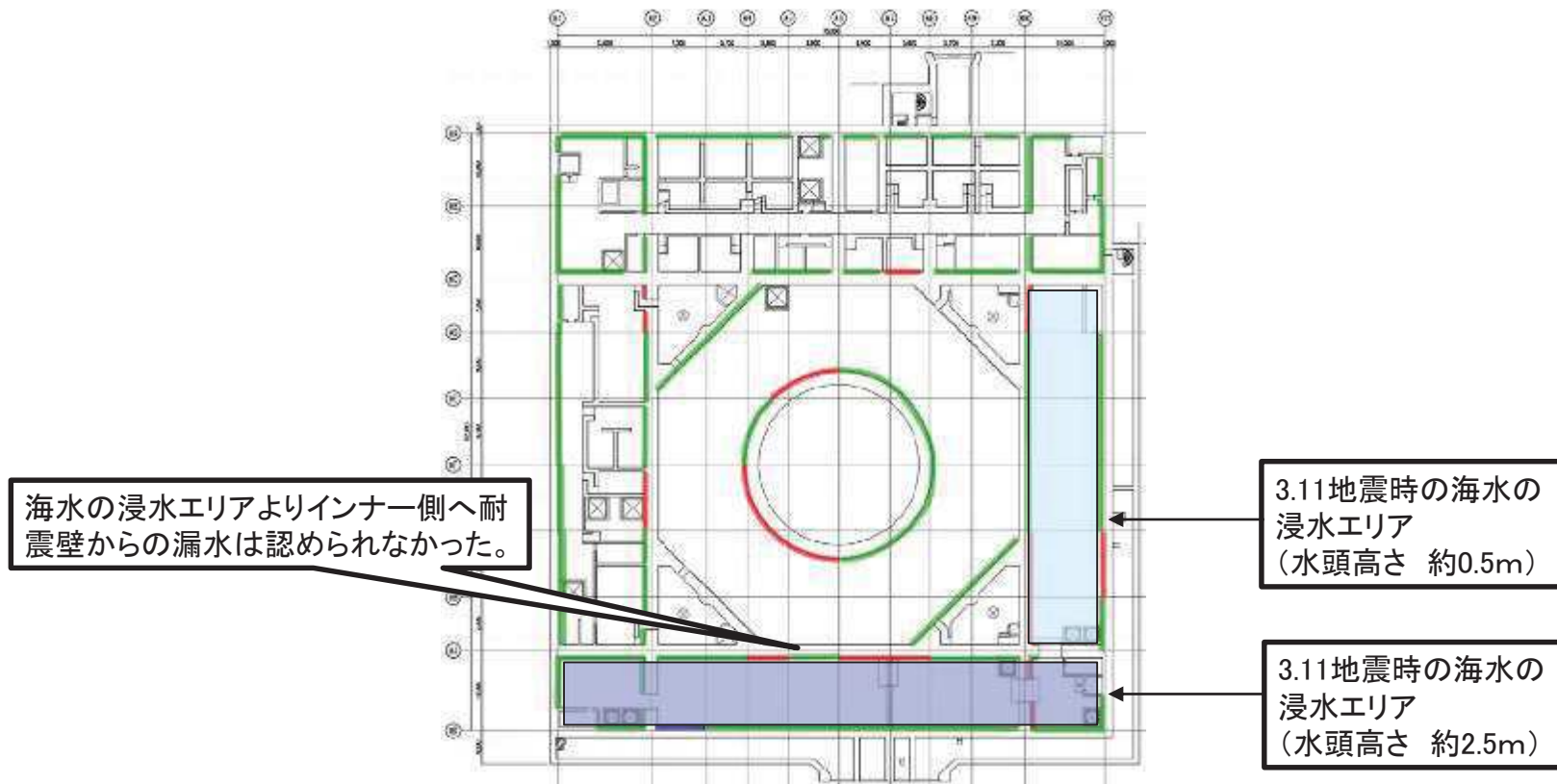
乾燥収縮ひび割れ調査結果(女川2号炉原子炉建屋)

3.11地震時の海水流入の際の乾燥収縮ひび割れ等の影響

東北地方太平洋沖地震時の海水流入の際の乾燥収縮ひび割れ等の影響について

- ・3.11地震時において、下図に示す原子炉建屋地下3階は海水流入により浸水したが、境界となる耐震壁から反対側へ漏水していないことを確認していることから乾燥収縮ひび割れからの漏水はないと言える。
- ・女川の乾燥収縮ひび割れは、【添付資料3】に示す通りほとんど幅0.1mm未満であり、ひび割れ幅0.2mmを超えるものは極まれである。文献[1]によれば、ひび割れ幅0.2mm未満であれば止水性が確保されることから、幅0.2mm以上の乾燥収縮によるひび割れを適切に補修することで漏水は生じない。

文献[1] コンクリートのひび割れ調査、補修・補強指針－2013－：社団法人 日本コンクリート工学協会



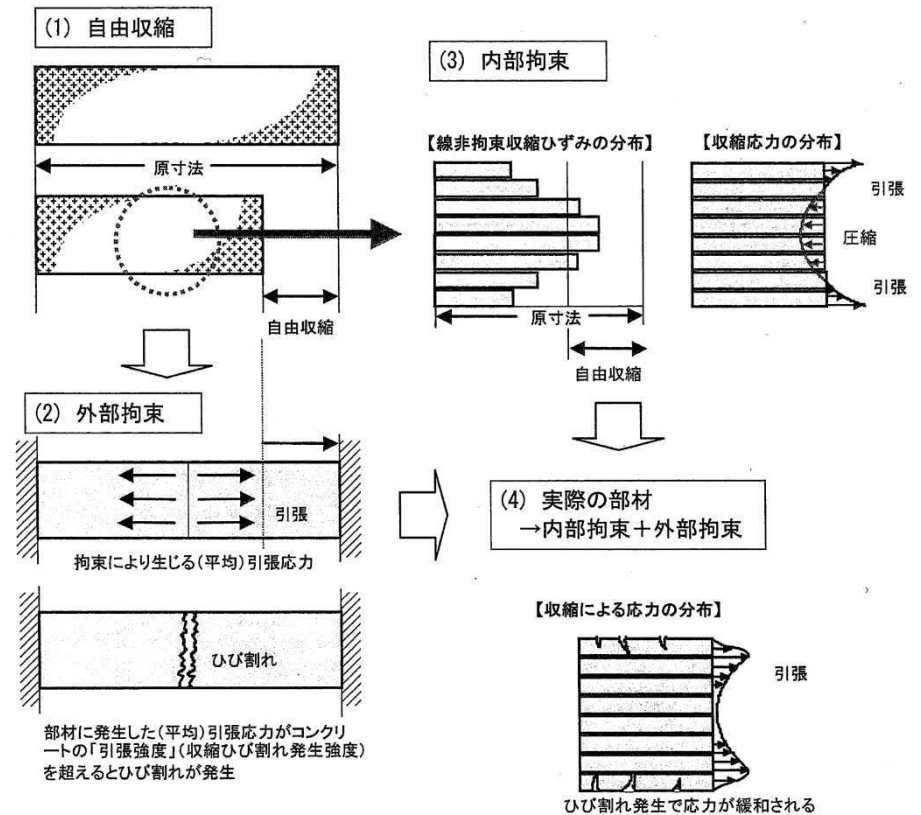
原子炉建屋 地下3階

※図中の赤線、緑線については添付資料3参照

乾燥収縮ひび割れの特徴に関する文献レビュー

- 「鉄筋コンクリート造建築物の収縮ひび割れ制御設計・施工指針(案)・同解説」(日本建築学会)によれば、コンクリートは乾燥に伴い収縮する性質を有しており、収縮ひび割れはコンクリート部材が自由に収縮しようとしたときに、それが何らかの形で拘束されることによって生じる。
- 拘束には外部から受けるもの(外部拘束)と内部から受けるもの(内部拘束)とがあり、拘束を受けることによってコンクリートに引張応力が生じ、コンクリートの引張強度を超えたときにひび割れが発生する。
- 外部拘束を引き起こす例としては、壁を取り囲む柱や梁、さらには内部の鉄筋等がある。
- 一方、内部拘束はコンクリート部材内部で生じる拘束である。表面部分と内部とでは、乾燥の程度に応じて収縮する量が異なるが、実際には部材は一体となって収縮するため、表面は引張力を、内部は圧縮力を受けた状態となる。(右図(3)の状態)
- 一般に、乾燥収縮試験において測定されているコンクリートの自由収縮といえ、右図(3)右側に示す状態での収縮を意味している。
- したがって、たとえ自由収縮の場合であっても表面にはひび割れが発生する可能性がある。
- ひび割れ発生により応力が緩和される。

■ 乾燥収縮ひび割れの発生メカニズム ※1



※1 日本建築学会：鉄筋コンクリート造建築物の収縮ひび割れ制御設計・施工指針(案)・同解説,2006.2 P.51-52記載抜粋

(参考)第618回審査会合(2018.8.30)での説明内容

鉄筋コンクリート躯体の要求機能に対するひび割れ影響

要求機能	該当部(例)	乾燥収縮によるひび割れ		地震時に生じるひび割れに対する機能維持の方針
		維持管理指針※1	機能維持の方針	
止水性	最終貯留区画	ひび割れ幅を評価項目とし、ひび割れ幅が0.05mm以下の場合をA1(健全)、0.2mm以上の場合をA3(要検討)、0.05mmを超え0.2mm未満の場合をA2(経過観察)とする。	<ul style="list-style-type: none"> ➢ A1(健全)を満足しない判定となる場合は、速やかに補修等の対応。 	<ul style="list-style-type: none"> ➢ 基準地震動Ssに対して応答ひずみが大きく評価される不確かさケース(3.11地震よりも更に初期剛性低下を考慮したモデル)によるせん断ひずみ度から残留ひび割れ幅を算定し、0.2mm未満であることを確認することにより止水性を維持する。 ➢ 床については、3.11地震等のシミュレーション解析では床ばねのせん断応力度は耐震壁よりも小さいことを確認しているが、保守的に耐震壁のせん断ひずみ度から残留ひび割れ幅を算定し、0.2mm未満であることを確認することにより止水性を維持する。なお、基準地震動Ssに対する壁と床のせん断応力度の関係を確認する。 ➢ さらに、内部溢水評価等の機能上重要な設備に対して残留ひび割れから漏水量を計算し機能に影響を及ぼさないことを確認する。
	堰(コンクリート製)		<ul style="list-style-type: none"> ➢ ひび割れ幅が0.1mmを超えた場合は、速やかに補修等の対応。 	

※1 原子力施設における建築物の維持管理指針・同解説 (社)日本建築学会, 2015

コンクリートの乾燥収縮による経年的変化

■ 乾燥収縮の進行度合い評価方法

・コンクリートの乾燥収縮は、コンクリート打設後に急激に進行し、長期的には安定状態に入ることが知られている。日本建築学会の「鉄筋コンクリート造建築物の収縮ひび割れ制御設計・施工指針(案)・同解説」では経年的変化に関する評価式が提案されており、これに基づき女川2号炉原子炉建屋の耐震壁(オペフロ上部[壁厚400mmを例とした]、オペフロ下部[壁厚800mmを例とした])を対象として、乾燥収縮の進行度合いを評価した。

■ 乾燥収縮の進行度合い評価結果

・耐震壁の壁厚相当での乾燥収縮は4000日経過程度まではゆっくりと進行し、その後収束する傾向にあり、現時点(コンクリート打設から**25年程度[9000日程度]**)では**おおむね収束した状態**となっている。

$$\varepsilon_{sh}(t, t_0) = k \cdot t_0^{-0.08} \cdot \left\{ 1 - \left(\frac{h}{100} \right)^3 \right\} \cdot \left(\frac{t - t_0}{0.16 \cdot (V/S)^{1.5} + (t - t_0)} \right)^{1.4 \cdot (V/S)^{-0.18}}$$

$$k = (11 \cdot W - 1.0 \cdot C - 0.82 \cdot G + 404) \cdot \gamma_1 \cdot \gamma_2 \cdot \gamma_3$$

ここに、 $\varepsilon_{sh}(t, t_0)$: 乾燥開始材齢 t_0 日における材齢 t 日の収縮ひずみ ($\times 10^{-6}$)

W : 単位水量 (kg/m^3)

C : 単位セメント量 (kg/m^3)

G : 単位粗骨材量 (kg/m^3)

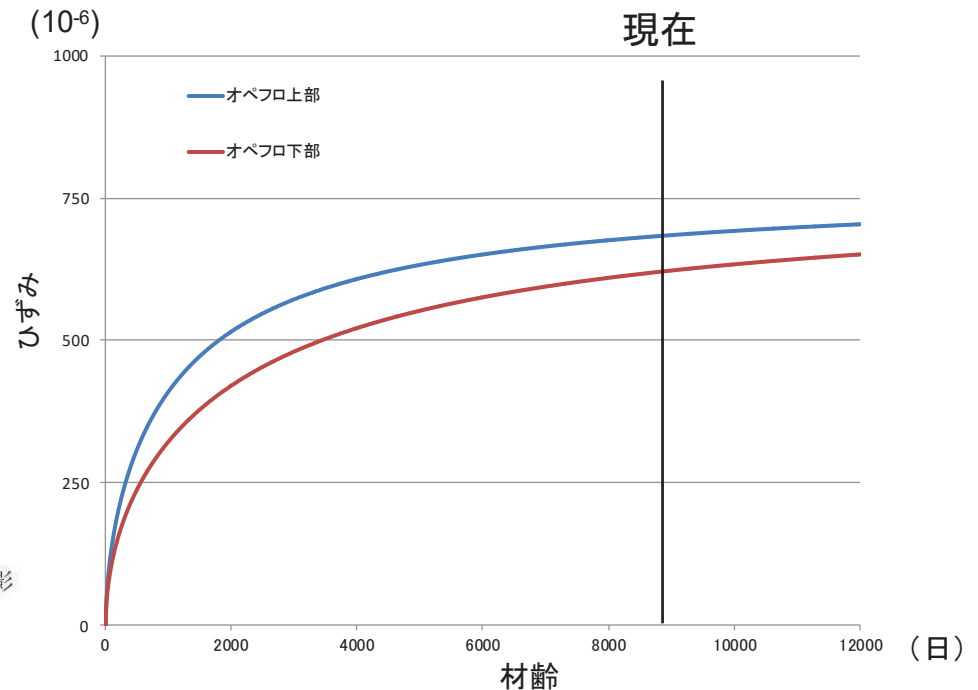
h : 相対湿度 (%) ($40\% \leq h \leq 100\%$)

V : 体積 (mm^3)

S : 外気に接する表面積 (mm^2)

V/S : 体積表面積比 (mm) ($V/S \leq 300\text{mm}$)

$\gamma_1, \gamma_2, \gamma_3$: それぞれ、骨材の種類の影響、セメントの種類の影響、混和材の種類の影響を表す修正係数



収縮ひずみの算定例(女川2号炉原子炉建屋)

「鉄筋コンクリート造建築物の収縮ひび割れ制御設計・施工指針(案)・同解説」
(日本建築学会)から抜粋

鉄筋コンクリート躯体の乾燥収縮及び地震影響を踏まえた要求機能に対する各条文の機能維持の方針の整理

No.	条文	項目	要求機能	該当部 (例)	影響検討, 機能維持評価の方針
1	1条	適用範囲	—	—	—
2	2条	定義	—	—	—
3	3条	設計基準対象施設の地盤	設計基準対象施設の地盤の支持性能 (耐震性)	原子炉建屋他基礎地盤	・初期剛性低下を考慮した建屋地震応答解析モデルに基づき地盤安定解析用 FEM モデルを作成し, 地盤の安定性を確認する。
4	4条	地震による損傷の防止	各設備の機能維持 (耐震性)	各設備	・建屋は, 初期剛性低下を考慮した地震応答解析モデルによる地震応答解析結果を用いて, 各設備の耐震設計・評価を実施する。 ・屋外重要土木構造物は, 地中構造物のため応答は周囲の地盤の振動が支配的となるため, 初期剛性の影響は小さいと考えられる。
5	4条	地震による損傷の防止	支持性能 (アンカ部の耐震性)	各設備のアンカ部	・建屋及び屋外重要土木構造物に設置される設備の支持機能 (アンカー部) は, JEAG4601 及び各種合成構造設計指針・同解説に基づき, 低減係数を考慮した設計を実施する。
6	4条	地震による損傷の防止	設計基準対象施設の耐震性 (土木構造物)	土木構造物	・土木構造物は, 地中構造物のため応答は周囲の地盤の振動が支配的となるため, 初期剛性の影響は小さい。また, 土木構造物に作用する主たる荷重である土圧は, 剛性が小さいほど小さく評価されることから, 作用外力としては乾燥収縮と地震の重畳による剛性低下を見込まないほうが安全側の評価となっている。
7	5条	津波による損傷の防止	設計基準対象施設の浸水防護 (土木構造物) (止水性)	海水ポンプ室	・通常時は, 乾燥収縮ひび割れ等を考慮した保守管理をすることから, 津波来襲前に止水性に影響するひび割れはない。 ・津波時の止水性は, 面内変形については, 耐震実験より乾燥収縮が地震時のひび割れ発生に大きな影響を与えないことから, 地震応答解析結果の変形により評価する。面外変形については, 地震応答解析の結果に対し, 顕著なひび割れが発生していないことを解析等により確認するか, 許容値に対し裕度を持たせることにより, 止水性に問題ないことを確認する。

No.	条文	項目	要求機能	該当部（例）	影響検討，機能維持評価の方針
8	5条	津波による損傷の防止	津波防護施設（止水性）	防潮堤，防潮壁	<ul style="list-style-type: none"> ・通常時は，乾燥収縮ひび割れ等を考慮した保守管理をすることから，津波来襲前に止水性に影響するひび割れはない。 ・津波時の止水性は，面内変形については，耐震実験より乾燥収縮が地震時のひび割れ発生に大きな影響を与えないことから，地震応答解析結果の変形により評価する。面外変形については，耐力に対する初期剛性の影響はないことから，許容値（耐力）以下とすることで，津波防護機能に影響を及ぼすような顕著なひび割れが発生しない設計とする。
9	6条	外部からの衝撃による損傷の防止	建屋の構造健全性	原子炉建屋等	<ul style="list-style-type: none"> ・風（台風），竜巻，凍結，降水，積雪，落雷，火山の影響，生物学的事象，外部火災，有毒ガスの発生に対して，建屋の構造健全性（外殻としての機能，耐火性，止水性，気密性等）が維持されることを確認する。 ・機能維持にあたっては，乾燥収縮ひび割れについて，実験結果から，乾燥収縮ひび割れの多寡による地震によるひび割れの進展への影響は，ほとんどないことを確認していることを踏まえ，以下のとおり対応する。 <p>➤ 外殻としての機能</p> <ul style="list-style-type: none"> ・乾燥収縮は，建屋全体の剛性として力学的性質に影響を与えるが，乾燥収縮はコンクリート材料の一般的な性質であり，実機からのコア抜きによりコンクリートの圧縮強度が設計基準強度を上回っていること，また，耐震実験により乾燥収縮が終局耐力に影響を与えないことを確認しており構造体として問題はない。 ・竜巻飛来物に対する躯体の衝突評価及び裏面剥離評価としては，コンクリートの設計基準強度を用いて，貫通限界厚さ及び裏面剥離限界厚さを評価するが，上記のことから外殻としての機能の評価への影響はない。 ・竜巻による各荷重に対する建屋全体の変形評価においては，初期剛性低下を考慮した建屋地震応答解析モデルの荷重-変形関係を用いることから，乾燥収縮等の影響を考慮した評価としている。 <p>➤ 耐火性</p> <ul style="list-style-type: none"> ・外部火災の耐火性の評価としては，最大の輻射熱の発生が考えられる原子炉建屋の表面温度をコンクリートの圧縮強度が維持される保守的な温度である 200℃以下（加熱温度と圧縮強度の関係を実験で確認した文献より設定）とすることで，外部事象防護対象施設の安全性を損なわない設計としている。 ・乾燥収縮は，建屋全体の剛性として力学的性質に影響を与えるが，乾燥収縮はコンクリート材料の一般的な性質であり，実機からのコア抜きによりコンクリートの圧縮強度が

No.	条文	項目	要求機能	該当部 (例)	影響検討, 機能維持評価の方針
					<p>設計基準強度を上回っていること, また, 耐震実験により乾燥収縮が終局耐力に影響を与えないことを確認しており構造体として問題はないことから, 外部火災上の耐火性に問題はない。</p> <p>➤ 止水性</p> <ul style="list-style-type: none"> ・降水等に対する止水性については, アスファルト防水等により機能を確保している。アスファルト防水等は乾燥収縮や地震によるひび割れに追従する構造であるため問題はない。 <p>➤ 気密性</p> <ul style="list-style-type: none"> ・通常時の気密性については, 乾燥収縮ひび割れ等を考慮した保守管理をすることから問題はない。 ・地震時の気密性について, 面内変形に対しては, 耐震壁のせん断ひずみがおおむね弾性状態にとどまることを基本とする。おおむね弾性状態を超える場合は, 地震応答解析による耐震壁のせん断ひずみから算定した空気漏えい量が設置する換気設備の性能を下回ること必要な気密性を維持する設計とする。その場合, 基準地震動 S_s による気密性を要求される鉄筋コンクリート造の施設に対し, 許容限界を最大せん断ひずみ 2.0×10^{-3} とし, その適用性を確認する。地震応答解析においては, 初期剛性低下を考慮した建屋地震応答解析モデルを用いることから, 乾燥収縮等の影響を考慮した評価としている。 ・また, 面外変形に対しては, 地震時に生じる応力に対して鉄筋が降伏しないことを確認(鉄筋が降伏する場合は別途詳細検討)することで, 気密性を維持する設計とする。地震応答解析においては, 初期剛性低下を考慮した建屋地震応答解析モデルを用いることから, 乾燥収縮等の影響を考慮した評価としている。 ・空気漏洩量の算定においては, 「原子炉建屋の弾塑性試験に関する報告書 ((財) 原子力発電技術機構) ※」にて提案されている評価式について, 乾燥収縮ひび割れのある建屋における気密性能検査から十分な保守性を確認した上で適用する。 <p>※財団法人 原子力発電技術機構「耐震安全解析コード改良試験 原子炉建屋の弾塑性試験 試験結果の評価に関する報告書 平成 5 年度」</p>

No.	条文	項目	要求機能	該当部 (例)	影響検討, 機能維持評価の方針
10	7条	発電用原子炉施設への人の不法な侵入等の防止	・直接的な要求なし (発電用原子炉施設への人の不法な侵入の防止, 不正な持ち込み防止, 不正アクセスの防止をするための設備)	—	—
11	8条	火災による損傷の防止	耐火性 (内部火災) (150mm以上の壁厚を有するコンクリート壁が3時間耐火性能をもつこと)	原子炉建屋等	<ul style="list-style-type: none"> 内部火災の耐火性の評価としては, 150mm以上のコンクリート壁が3時間耐火性能をもつことを文献で確認している。 この3時間耐火性能は遮熱性の観点での評価であり, 壁厚やコンクリートの種類に応じた遮熱特性係数により耐火性能時間を算定しているものである。乾燥収縮はコンクリート材料の一般的な性質であり, 躯体厚さや遮熱特性係数へ影響を及ぼすものではないことから, 内部火災の耐火性に影響を与えるものではない。
12	9条	溢水による損傷の防止等	止水性 (循環水管等が破損し, 溢水した海水が安全施設の機能へ影響しないこと) (土木構造物)	海水ポンプ室	<ul style="list-style-type: none"> 通常時は, 乾燥収縮ひび割れ等を考慮した保守管理をすることから, 溢水により安全施設の機能へ影響するひび割れはない。 溢水時は, 部材に水圧が作用し面外変形が生じることから, 顕著なひび割れが発生していないことを解析等により確認するか, 許容値に対し裕度を持たせることにより, 止水性に問題ないことを確認し, 安全施設の機能へ影響がないことを確認する。
13	9条	溢水による損傷の防止等	止水性 (放射性物質を含む液体があふれ出た場合において, 当該液体が管理区域外へ漏えいしないこと)	原子炉建屋等	<ul style="list-style-type: none"> 通常時は, 乾燥収縮ひび割れ等を考慮した保守管理をすることから, 溢水により安全施設の機能へ影響するひび割れはない。 地震時の止水性については, 実験より乾燥収縮が地震時のひび割れ発生に大きな影響を与えないことを確認していることから, 基準地震動 Ss に対して応答ひずみが大きく評価される不確かさケース (基本ケースよりも更に初期剛性低下を考慮したモデル) によるせん断ひずみ度から残留ひび割れ幅を算定し, 0.2 mm未満であることを確認することにより止水性を維持する。 <p>【乾燥収縮ひび割れを踏まえた止水性を確保するための保守管理について】</p> <ul style="list-style-type: none"> 乾燥収縮によるひび割れの補修に際しては, ひび割れ幅 0.2mm 以上のものを補修することで止水性を十分に確保できると考えられるため, 内部溢水評価における最終貯留区画については, 現在, 乾燥収縮は収束しており, 乾燥収縮ひび割れが毎年増大していく状態ではないことから, 点検・補修を定期的 to 実施していくこととし, 以下の通り保守管理する方針とする。

No.	条文	項目	要求機能	該当部 (例)	影響検討, 機能維持評価の方針
					<p>(1)ひび割れ幅 0.05mm を超えるもの~0.2mm 未満のひび割れについては, ひび割れ調査を実施し, 乾燥ひび割れの進展状況を観察することとし, ひび割れ幅 0.2mm 以上のひび割れについては, 対象となるひび割れすべての調査図を作成し管理する</p> <p>(2)ひび割れ幅 0.2mm 以上となったひび割れは, すべて補修を実施する</p> <p>・補修方法については, 0.3mm 未満のひび割れ幅ではエポキシ樹脂等の注入は困難であるため, 被覆材により表面を覆う工法 (被覆工法) とする。</p> <p>・なお, 最終貯留区画に集水するまでの経路上の止水性については, 階段室, 床ドレン, 開口部などを通じて下階へ溢水伝播され長時間貯留されることはなく, 内部溢水評価への影響はないことから, ひび割れ点検および補修等の維持管理については社内マニュアルに基づき適切に実施する。</p>
14	9条	溢水による損傷の防止等	止水性 (想定している溢水経路以外の区画に漏れ出すことがないこと)	各溢水経路最終貯留区画	[No.13 (9条) 止水性と同一]
15	10条	誤操作の防止	・直接的な要求なし (誤操作を防止するための措置・操作の容易性)	—	—
16	11条	安全避難通路等	・直接的な要求なし (避難通路・作業用照明の設置)	—	—
17	12条	安全施設	・直接的な要求なし	—	—
18	13条	運転時の異常な過渡変化及び設計基準事故の拡大の防止	・直接的な要求なし	—	—
19	14条	全交流動力電源喪失対策設備	・直接的な要求なし (SBO時の電源確保)	—	—
20	15条	炉心等	・直接的な要求なし	—	—

No.	条文	項目	要求機能	該当部（例）	影響検討，機能維持評価の方針
21	16条	燃料体等の取扱施設及び貯蔵施設	・想定外の重量物落下が生じないこと	原子炉建屋屋根，壁	<ul style="list-style-type: none"> ・屋根スラブは，鋼板（デッキプレート）の上に鉄筋コンクリート造の屋根を設けた構造であり，地震により剥落しない設計であることから影響はない。 ・3階床面より上部を構成する壁については，鉄筋コンクリート造の耐震壁であり，3階床面より下部の耐震壁とあわせて地震により落下しないことを確認する。 ・地震応答解析においては，初期剛性低下を考慮した建屋地震応答解析モデルを用いることから，乾燥収縮等の影響を考慮した評価としている。
22	17条	原子炉冷却材圧力バウンダリ	・直接的な要求なし	—	—
23	18条	蒸気タービン	・直接的な要求なし	—	—
24	19条	非常用炉心冷却設備	・直接的な要求なし	—	—
25	20条	一次冷却材の減少分を補給する設備	・直接的な要求なし	—	—
26	21条	残留熱を除去することができる設備	・直接的な要求なし	—	—
27	22条	最終ヒートシンクへ熱を輸送することができる設備	・直接的な要求なし	—	—
28	23条	計測制御系統施設	・直接的な要求なし (設計基準事故時の計測・記録)	—	—
29	24条	安全保護回路	・直接的な要求なし (安全保護回路の設置・不正アクセス対策)	—	—
30	25条	反応度制御系統及び原子炉制御系統	・直接的な要求なし	—	—

No.	条文	項目	要求機能	該当部 (例)	影響検討, 機能維持評価の方針
31	26 条	原子炉制御室等	居住性確保 ・気密性 (漏えい率 (インリーク量) が規定値を満足すること) ・遮蔽性	原子炉制御室	・乾燥収縮ひび割れについては, 実験結果から, 乾燥収縮ひび割れの多寡による地震によるひび割れの進展への影響は, ほとんどないことを確認していることを踏まえ, 居住性が確保されていることについて, 気密性・遮蔽性の観点から以下のとおり対応する。 ▶ 気密性 [No.9 (6 条) 気密性と同じ] ※空気漏えい量の算定方法は 6 条と同じ ▶ 遮蔽性 ・設計基準対象施設の耐震重要度分類及び重大事故等対処施設の施設区分に応じた地震動に対して構造強度を確保し, 遮蔽体の形状及び厚さを確保することで, 地震後における残留ひずみを小さくし, ひび割れがほぼ閉鎖し, 貫通するひび割れが直線的に残留しないこととすることで, 遮蔽性を維持する設計とする。 ・地震応答解析においては, 初期剛性低下を考慮した建屋地震応答解析モデルを用いることから, 乾燥収縮等の影響を考慮した評価としている。
32	27 条	放射性廃棄物の処理施設	・直接的な要求なし	—	—
33	28 条	放射性廃棄物の貯蔵施設	・直接的な要求なし	—	—
34	29 条	工場等周辺における直接ガンマ線等からの防護	・遮蔽性	原子炉建屋等	[No.31 (26 条) 遮蔽性と同じ]
35	30 条	放射線からの放射線業務従事者の防護	・遮蔽性 ・気密性 ・止水性	原子炉建屋等	[No.31 (26 条) 遮蔽性と同じ] [No.9 (6 条) 気密性と同じ] [No.13 (9 条) 止水性と同じ]
36	31 条	監視設備	・直接的な要求なし (MP の非常用電源への接続, 伝送の多様性)	—	—
37	32 条	原子炉格納施設	・気密性	原子炉建屋 原子炉棟	[No.9 (6 条) 気密性と同じ] ※空気漏えい量の算定方法は 6 条と同じ
38	33 条	保安電源設備	・直接的な要求なし (DG・蓄電池多重性・独立性, 外部電源設備設置)	—	—

No.	条文	項目	要求機能	該当部 (例)	影響検討, 機能維持評価の方針
39	34 条	緊急時対策所	居住性確保 ・気密性 (漏えい率 (インリーク量) が規定値を満足すること) ・遮蔽性	緊急時対策所	[No.31 (26 条) と同じ] ※空気漏えい量の算定方法は 26 条と同じ ・新設建屋の地震応答解析においては, 設計剛性 (設計基準強度) を用いた地震応答解析モデルを基本とするが, 念のため, 耐震壁の厚さが厚い原子炉建屋のオベフロ下部の 3.11 地震に対する剛性低下量 (0.8 倍程度) を不確かさケースとして考慮する。 ・なお, 免震構造から耐震構造に変更しており, 基準地震動 Ss に対して短期許容応力度相当の設計としている。
40	35 条	通信連絡設備	・直接的な要求なし	—	—
41	36 条	補助ボイラー	・直接的な要求なし	—	—
42	37 条	重大事故等の拡大防止	・直接的な要求なし	—	—
43	38 条	重大事故等対処施設の地盤	重大事故等対処施設の地盤の支持性能 (耐震性)	緊急時対策建屋	・緊急時対策建屋の質点系 SR モデルにより剛性低下を考慮した場合, 建屋底面のせん断力に大きな差がなく, 地盤に作用する力に影響がないことから, 地盤の安定性には影響がないことを確認する。
44	39 条	SA 設備の耐震設計	各設備の機能維持 (耐震性)	各設備	[No.4 (4 条) と同じ]
45	39 条	SA 設備の耐震設計	支持性能 (アンカ部の耐震性)	各設備のアンカ部	[No.5 (4 条) と同じ]
46	39 条	地震による損傷の防止	重大事故等対処対象施設の耐震性 (土木構造物) (止水性)	土木構造物	[No.6 (4 条) と同じ]
47	40 条	津波による損傷の防止	重大事故等対処施設の浸水防護 (土木構造物) (止水性)	海水ポンプ室	[No.7 (5 条) と同じ]
48	41 条	内部火災	耐火性 (内部火災) (150mm 以上の壁厚を有するコンクリート壁が 3 時間耐火性能をもつこと)	原子炉建屋等	[No.11 (8 条) 耐火性と同じ]
49	42 条	特定重大事故等対処施設	原子炉建屋と同様の各要求機能 (耐震性, 止水性等) に対する機能維持	各設備	・原子炉建屋と同様に各機能に対して各設備の評価を実施する。

No.	条文	項目	要求機能	該当部 (例)	影響検討, 機能維持評価の方針
50	43条	重大事故等対処設備	・直接的な要求なし	—	—
51	44条	緊急停止失敗時に発電用原子炉を未臨界にするための設備	・直接的な要求なし	—	—
52	45条	原子炉冷却材圧力バウンダリ高圧時に発電用原子炉を冷却するための設備	・直接的な要求なし	—	—
53	46条	原子炉冷却材圧力バウンダリを減圧するための設備	・直接的な要求なし	—	—
54	47条	原子炉冷却材圧力バウンダリ低圧時に発電用原子炉を冷却するための設備	・直接的な要求なし	—	—
55	48条	最終ヒートシンクへ熱を輸送するための設備	・直接的な要求なし	—	—
56	49条	原子炉格納容器内の冷却等のための設備	・直接的な要求なし	—	—
57	50条	原子炉格納容器の過圧破損を防止するための設備	・直接的な要求なし	—	—
58	51条	原子炉格納容器下部の熔融炉心を冷却するための設備	・直接的な要求なし	—	—
59	52条	水素爆発による原子炉格納容器の破損を防止するための設備	・直接的な要求なし	—	—
60	53条	水素爆発による原子炉建屋等の損傷を防止するための設備	・直接的な要求なし	—	—
61	54条	使用済燃料貯蔵槽の冷却等のための設備	・直接的な要求なし	—	—
62	55条	工場等外への放射性物質の拡散を抑制するための設備	・直接的な要求なし	—	—

No.	条文	項目	要求機能	該当部（例）	影響検討，機能維持評価の方針
63	56条	重大事故等の収束に必要なとなる水の供給設備	・直接的な要求なし	—	—
64	57条	電源設備	・直接的な要求なし	—	—
65	58条	計装設備	・直接的な要求なし	—	—
66	59条	原子炉制御室	居住性確保 ・気密性（漏えい率（インリーク量）が規定値を満足すること） ・遮蔽性	原子炉制御室	[No.31（26条）と同じ]
67	60条	監視測定設備	・直接的な要求なし	—	—
68	61条	緊急時対策所	居住性確保 ・気密性（漏えい率（インリーク量）が規定値を満足すること） ・遮蔽性	緊急時対策所	[No.39（34条）と同じ]
69	62条	通信連絡を行うために必要な設備	・直接的な要求なし	—	—