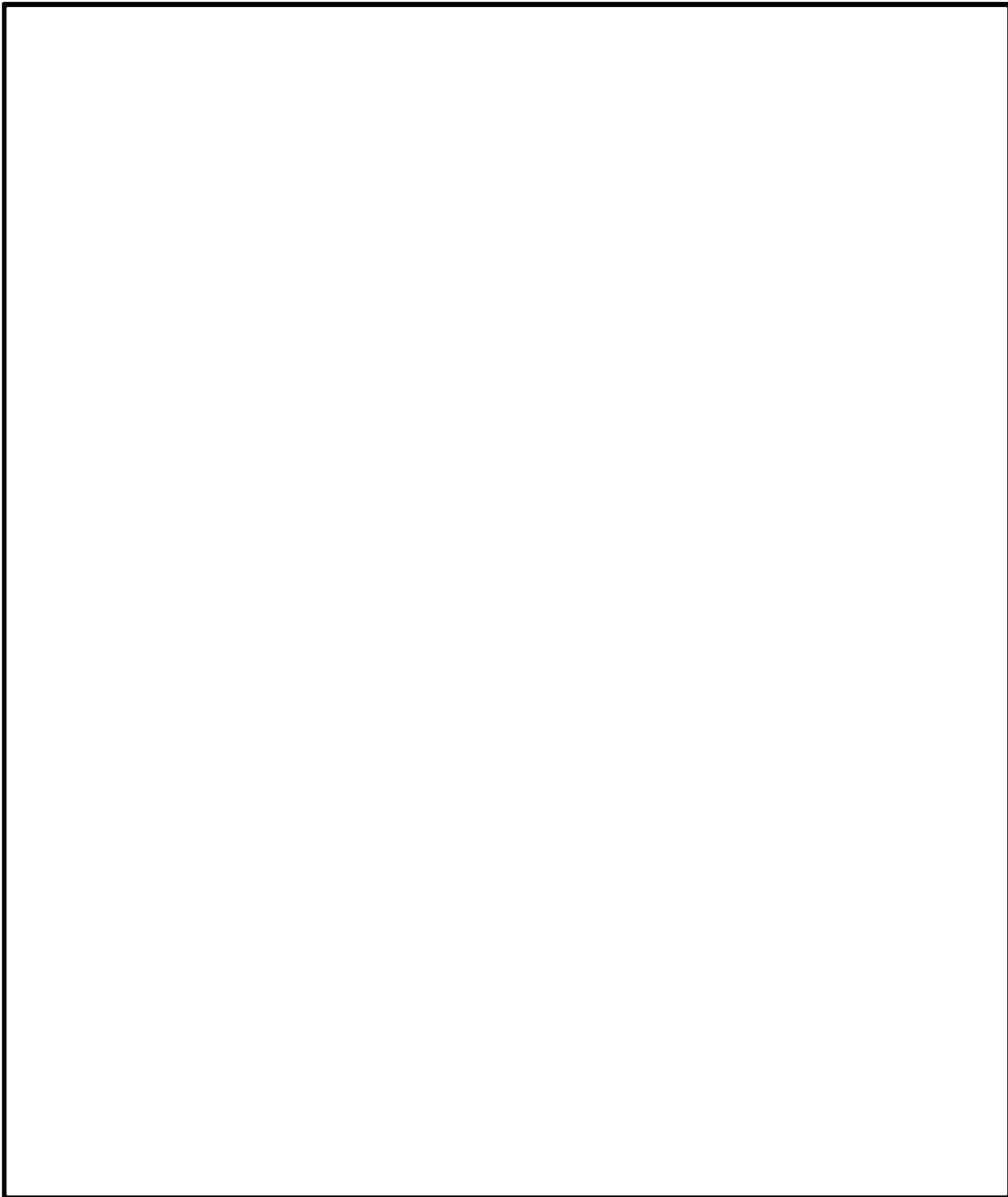


タイトル	機械振動の評価対象の選定過程について																																																	
説明	<p>「日本原子力学会標準 原子力発電所の高経年化対策実施基準:2021 付属書C 添付資料-4 経年劣化メカニズムまとめ表-PWR」を踏まえ、タービン架台及び非常用ディーゼル発電設備基礎を選定した。 表 1 に主要な機器の定格出力及び重量を示す。</p> <p style="text-align: center;">表 1 主要な機器の定格出力及び重量</p> <table border="1" data-bbox="408 636 1347 1393"> <thead> <tr> <th>機器名称</th> <th>運転状態</th> <th>定格出力(kW)</th> <th>重量(kg)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>高圧タービン</td> <td>連続</td> <td>1,180,000</td> <td>約 272,000</td> </tr> <tr> <td>低圧タービン</td> <td>連続</td> <td>1,180,000</td> <td>約 1,443,500</td> </tr> <tr> <td>海水ポンプ用電動機</td> <td>連続</td> <td>560</td> <td>約 19,900</td> </tr> <tr> <td>格納容器スプレイポンプ用電動機</td> <td>一時</td> <td>940</td> <td>約 11,700</td> </tr> <tr> <td rowspan="2">余熱除去ポンプ用電動機</td> <td>連続 (余熱除去時)</td> <td rowspan="2">400</td> <td rowspan="2">約 8,700</td> </tr> <tr> <td>一時 (低圧注入時)</td> </tr> <tr> <td>ディーゼル発電機</td> <td>一時</td> <td>7,100</td> <td>約 163,000</td> </tr> <tr> <td>電動補助給水ポンプ用電動機</td> <td>一時</td> <td>650</td> <td>約 5,600</td> </tr> <tr> <td>充てんポンプ用電動機</td> <td>連続</td> <td>550</td> <td>約 10,000</td> </tr> <tr> <td>高圧注入ポンプ用電動機</td> <td>一時</td> <td>1,400</td> <td>約 18,800</td> </tr> <tr> <td>タービン動主給水ポンプタービン</td> <td>連続</td> <td>7,600</td> <td>約 68,700</td> </tr> <tr> <td>タービン動補助給水ポンプタービン</td> <td>一時</td> <td>1000</td> <td>約 2,000</td> </tr> </tbody> </table> <p>このうちディーゼル発電機については、動作確認等における一時的な運転のみでありタービン発電機と比較してその振動の大きさ、頻度の影響が小さいと言えるものの、運転状態の違いを考慮して念のため評価対象部位とした。 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部とした。</p> <p>添付 1 評価対象部位平面図</p>	機器名称	運転状態	定格出力(kW)	重量(kg)	高圧タービン	連続	1,180,000	約 272,000	低圧タービン	連続	1,180,000	約 1,443,500	海水ポンプ用電動機	連続	560	約 19,900	格納容器スプレイポンプ用電動機	一時	940	約 11,700	余熱除去ポンプ用電動機	連続 (余熱除去時)	400	約 8,700	一時 (低圧注入時)	ディーゼル発電機	一時	7,100	約 163,000	電動補助給水ポンプ用電動機	一時	650	約 5,600	充てんポンプ用電動機	連続	550	約 10,000	高圧注入ポンプ用電動機	一時	1,400	約 18,800	タービン動主給水ポンプタービン	連続	7,600	約 68,700	タービン動補助給水ポンプタービン	一時	1000	約 2,000
機器名称	運転状態	定格出力(kW)	重量(kg)																																															
高圧タービン	連続	1,180,000	約 272,000																																															
低圧タービン	連続	1,180,000	約 1,443,500																																															
海水ポンプ用電動機	連続	560	約 19,900																																															
格納容器スプレイポンプ用電動機	一時	940	約 11,700																																															
余熱除去ポンプ用電動機	連続 (余熱除去時)	400	約 8,700																																															
	一時 (低圧注入時)																																																	
ディーゼル発電機	一時	7,100	約 163,000																																															
電動補助給水ポンプ用電動機	一時	650	約 5,600																																															
充てんポンプ用電動機	連続	550	約 10,000																																															
高圧注入ポンプ用電動機	一時	1,400	約 18,800																																															
タービン動主給水ポンプタービン	連続	7,600	約 68,700																																															
タービン動補助給水ポンプタービン	一時	1000	約 2,000																																															



評価対象部位平面図  
(タービン建屋)



評価対象部位平面図  
(原子炉周辺建屋)

タイトル	モルタルバー法等の試験結果について																										
説明	<p>1. 建設時の使用骨材に対する反応性試験結果  建設時（1987～1991）に実施したモルタルバー法の試験方法、試験条件（使用骨材等）及び試験結果等を以下に示す。</p> <table border="1" data-bbox="395 539 1401 1122"> <thead> <tr> <th data-bbox="395 539 525 779">区分</th> <th data-bbox="525 539 847 779">骨材産地</th> <th data-bbox="847 539 943 779">試験方法</th> <th data-bbox="943 539 1054 779">実施年</th> <th data-bbox="1054 539 1182 779">試験結果 材令6ヶ月 の 膨張率 (%)</th> <th data-bbox="1182 539 1342 779">判定基準 有害な反応を起 こす可能性のあ る材令6ヶ月の 膨張率 (%)</th> <th data-bbox="1342 539 1401 779">判定</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td data-bbox="395 779 525 880">粗骨材</td> <td data-bbox="525 779 847 880">碎石 (佐賀県東松浦郡*1 鎮西町産)</td> <td data-bbox="847 779 943 880"></td> <td data-bbox="943 779 1054 880"></td> <td data-bbox="1054 779 1182 880">0.003</td> <td data-bbox="1182 779 1342 880"></td> <td data-bbox="1342 779 1401 880"></td> </tr> <tr> <td data-bbox="395 880 525 1122">細骨材 (混合砂) (海砂：山 砂 =8：2)</td> <td data-bbox="525 880 847 1122">海砂 (佐賀県東松浦郡*1 呼子町産) 山砂 (福岡県糸島郡*2 志摩町産)</td> <td data-bbox="847 880 943 1122">JASS5N T-201*3</td> <td data-bbox="943 880 1054 1122">1987年 ～ 1991年</td> <td data-bbox="1054 880 1182 1122">0.004</td> <td data-bbox="1182 880 1342 1122">0.10以上</td> <td data-bbox="1342 880 1401 1122">無害</td> </tr> </tbody> </table> <p>*1：現 唐津市  *2：現 糸島市  *3：日本建築学会「建築工事標準仕様書・同解説 JASS 5N 原子力発電所施設における鉄筋コンクリート工事 T-201 骨材の反応性試験方法（案）」（1985）</p>						区分	骨材産地	試験方法	実施年	試験結果 材令6ヶ月 の 膨張率 (%)	判定基準 有害な反応を起 こす可能性のあ る材令6ヶ月の 膨張率 (%)	判定	粗骨材	碎石 (佐賀県東松浦郡*1 鎮西町産)			0.003			細骨材 (混合砂) (海砂：山 砂 =8：2)	海砂 (佐賀県東松浦郡*1 呼子町産) 山砂 (福岡県糸島郡*2 志摩町産)	JASS5N T-201*3	1987年 ～ 1991年	0.004	0.10以上	無害
区分	骨材産地	試験方法	実施年	試験結果 材令6ヶ月 の 膨張率 (%)	判定基準 有害な反応を起 こす可能性のあ る材令6ヶ月の 膨張率 (%)	判定																					
粗骨材	碎石 (佐賀県東松浦郡*1 鎮西町産)			0.003																							
細骨材 (混合砂) (海砂：山 砂 =8：2)	海砂 (佐賀県東松浦郡*1 呼子町産) 山砂 (福岡県糸島郡*2 志摩町産)	JASS5N T-201*3	1987年 ～ 1991年	0.004	0.10以上	無害																					

2. 新規制基準以降に設置した対象構造物の使用骨材に対する反応性試験結果  
 2012年～2013年、2016年に実施したモルタルバー法や化学法の試験方法、試験条件（使用骨材等）及び試験結果等を以下に示す。

対象構造物	区分	骨材産地	試験方法 (準拠規格)	実施年	試験結果	判定
代替緊急時対策所	粗骨材	砕石 (佐賀県伊万里市波多津町産)	モルタルバー法 <sup>*1</sup> (JIS A 1146)	2012年 ～ 2013年	0.029%	無害
		砕石 (佐賀県唐津市浦産)	化学法 <sup>*2</sup> (JIS A 1145)		Re: 70mmol/L Sc: 31mmol/L a)	
	細骨材	砕砂 (佐賀県唐津市蔵木町産)			Re: 88mmol/L Sc: 17mmol/L a)	
		海砂 (佐賀県唐津市呼子町産)	Re: 44mmol/L Sc: 10mmol/L a)			
大容量空冷式 発電機基礎 (燃料タンク 基礎含む)	粗骨材	砕石 (佐賀県伊万里市波多津町産)	モルタルバー法 <sup>*1</sup> (JIS A 1146)	2012年 ～ 2013年	0.029%	無害
		砕石 (佐賀県唐津市浦産)	化学法 <sup>*2</sup> (JIS A 1145)		Re: 78mmol/L Sc: 33mmol/L a)	
	細骨材	砕砂 (佐賀県唐津市蔵木町産)			Re: 87mmol/L Sc: 20mmol/L a)	
		海砂 (佐賀県唐津市呼子町産)	Re: 48mmol/L Sc: 21mmol/L a)			
取水ピット搬入口蓋	粗骨材	砕石 (福岡県宮若市宮田町産)	化学法 <sup>*2</sup> (JIS A 1145)	2016年	Re: 70mmol/L Sc: 41mmol/L a)	無害
	細骨材	石灰砕砂 (福岡県田川市弓削田産)			Re: 18mmol/L Sc: 1mmol/L b)	
		海砂 (福岡県北九州市小倉北区白鳥産)			Re: 45mmol/L Sc: 26mmol/L a)	

- \*1: 判定基準 無害 …… 供試体3本の平均膨張率が26週後に0.100%未満の場合  
 無害でない …… 供試体3本の平均膨張率が26週後に0.100%以上の場合
- \*2: 判定基準 a) …… 溶解シリカ量 (Sc) が10mmol/L以上で、アルカリ濃度減少量 (Re) が  
 70mmol/L未満の範囲では、ScがRe未満となる場合は“無害”と判定し、  
 ScがRe以上となる場合は“無害でない”と判定する。  
 b) …… 溶解シリカ量 (Sc) が10mmol/L未満で、アルカリ濃度減少量 (Re) が  
 70mmol/L未満の場合は“無害”と判定する。  
 c) …… アルカリ濃度減少量 (Re) が70mmol/L以上の場合は判定しない。

タイトル	PCCVの供用期間中検査における検査対象テンドンの選定過程並びに検査の計画、要領及び結果について
説明	<p>供用期間中検査における、緊張力検査の対象テンドンの選定過程並びに検査の計画、要領及び結果を以下に示す。</p> <p>1. 緊張力検査の対象テンドンの選定過程</p> <p>1.1 テンドンのグルーピング グループは、フープテンドン 165 本、逆Uテンドン 90 本。</p> <p>1.2 検査テンドンの本数 各グループについて、グループ総本数の 2%。ただし、最小 3 本。</p> <p>1.3 検査テンドンの抽出 上記に従い、25 年目供用期間中検査（第 14 回定期検査）では、 フープテンドン H19、H48、H86<sup>*1</sup>、H110、H153<sup>*1</sup> 逆Uテンドン V18、V68<sup>*1</sup>、V75 を選定した。</p> <p>* 1 各供用期間中検査にて検査を行うテンドン（履歴テンドン）</p> <p>2. 供用期間中検査の計画、要領及び結果</p> <p>2.1 供用期間中検査の計画 PCCVの供用期間中検査は、「玄海原子力発電所 保安規定に基づく土木建築業務要領」に基づき 1 回 / 5 年で実施している。</p> <p>2.2 供用期間中検査の要領 25 年目供用期間中検査（第 14 定期検査）の要領を以下に示す。</p> <p>①非破壊検査</p> <p>(1) 目視確認</p> <p>(a) コンクリート部 コンクリート表面のひび割れ、欠落等の有無を目視により確認する。</p> <p>(b) 緊張材（テンドン）定着部 緊張材定着部の腐食、変形、割れ等の有無及び周辺コンクリート表面のひび割れ、欠落等の有無を目視により確認する。</p> <p>(2) 緊張力確認検査 測定板採取法により、テンドンの緊張力を測定する。</p> <p>(3) 防せい材検査 グリースキャップ中に封入されている防せい材より検査用サンプルを採取し、水溶性不純物（塩化物、硝酸塩、硫化物）、含水量、全アルカリ価について、第三者機関における検査結果を記録により確認する。</p>

表 各検査の判定基準

非破壊検査	目視検査	(a) コンクリート部 コンクリート表面に有意なひび割れ、欠落等がないこと。
		(b) 緊張材定着部 緊張材定着部に有意な腐食、変形、割れ等がないこと。 周辺コンクリート表面に有意なひび割れ、欠落等がないこと。
	緊張力確認検査	テンダンの緊張力が、下記の数値以上であること。 フープテンダン：5.18 MN/本 逆Uテンダン：5.01 MN/本
	防せい材検査	各水溶性不純物が、下記の数値以下であること。 塩化物イオン：10ppm 硝酸塩イオン：10ppm 硫化物イオン：10ppm 含水量が、重量比で10%以下であること 全アルカリ価が、初期設置時の値の50%以上であること。

2.3 外観検査・緊張力検査・防せい材検査の結果

25年目供用期間中検査（第14回定期検査）の各検査において、判定基準を満たしていることを確認している。

なお、運転開始以降のPCCVの供用期間中検査（第1回、第3回、第5回、第8回、第12回及び第13回定期検査）についても同様に外観検査、緊張力確認検査及び防せい材検査を行い、判定基準を満たしていることを確認している。

運転開始以降のPCCVの供用期間中検査における履歴テンダンの緊張力確認検査の結果を添付1に示す。

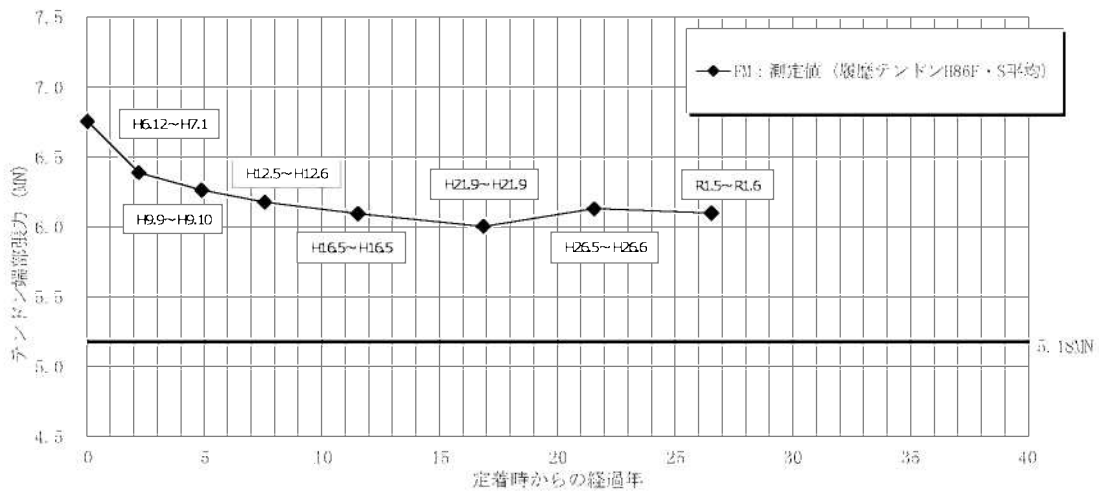
以上

添付1 運転開始以降のPCCV履歴テンダンの緊張力確認検査結果

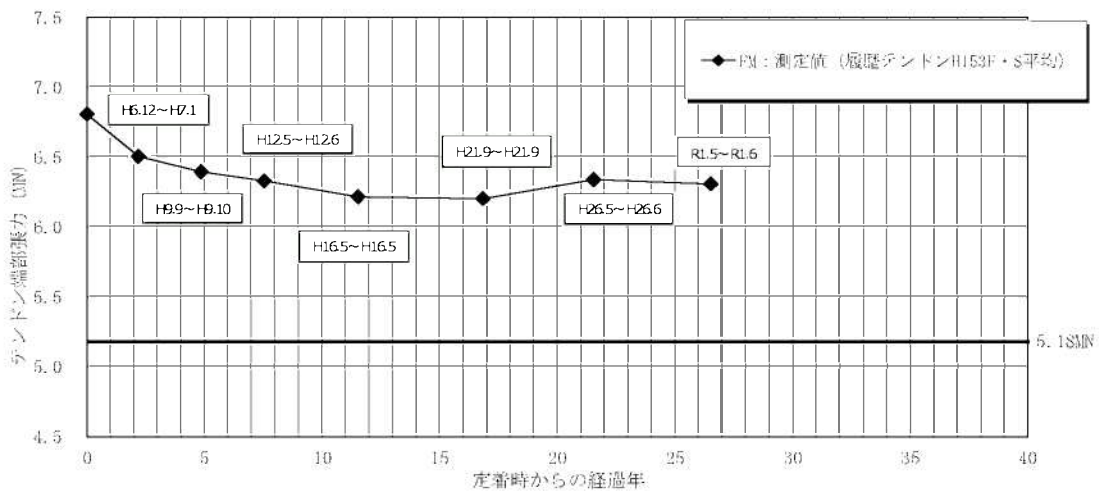
運転開始以降のPCCV履歴テンドンの緊張力確認検査結果

運転開始以降のPCCV履歴テンドンの緊張力の測定結果を図1に示す。予測と同様に緊張力の低下は、初期に大きく表れ時間の経過とともに緩やかになっている。また、設計要求値に対して余裕を持って推移していることが確認できる。

なお、緊張力が初期に大きく低下することに配慮し、「玄海原子力発電所3、4号機用プレストレストコンクリート格納容器に関する技術指針」(別紙)では、運転開始後1年目、3年目及び5年目に検査を実施することが定められている。玄海3号機においては、同指針に基づき、第1回、第3回及び第5回定期検査で供用期間中検査を実施している。



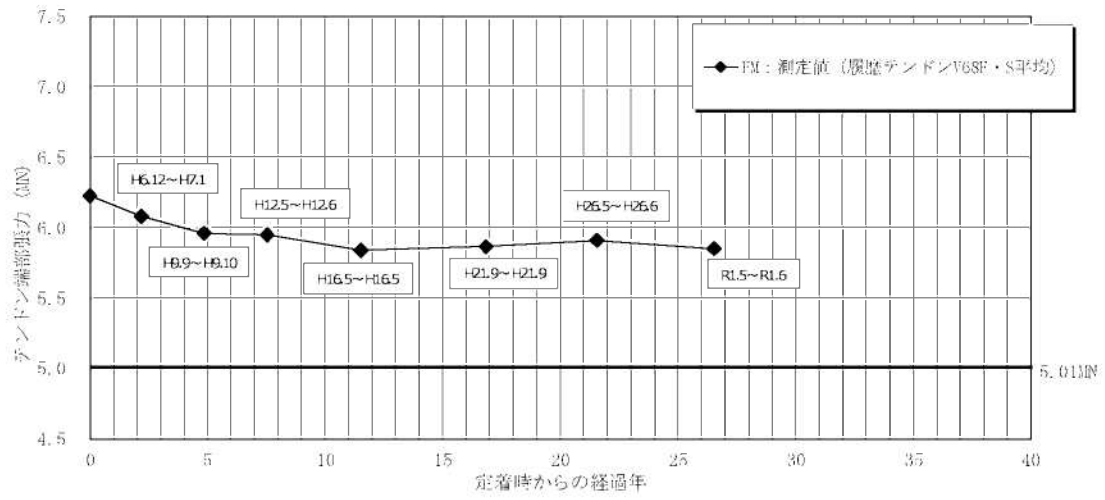
(a) フープテンドン(シリンダー部)



(b) フープテンドン(ドーム部)

図1 運転開始以降のPCCV履歴テンドンの緊張力の測定結果 (1/2)





(c) 逆Uテンドン

図 1 運転開始以降のPCCV履歴テンダンの緊張力の測定結果 (2/2)

玄海原子力発電所3、4号機用  
プレストレストコンクリート格納容器に関する  
技 術 指 針

昭 和 59年 10月

通商産業省資源エネルギー庁

公益事業部 火 力 課

公益事業部 原子力発電安全審査課

公益事業部 原子力発電安全管理課

### 6.3 供用期間中の点検及び試験

供用期間中に格納容器の構造上の健全性又は気密性のいずれかに影響を与える恐れのある構造上の変化の有無を目視により点検する。

付着を生じさせないプレストコンクリート格納容器については、供用期間中にP・C鋼材並びに緊張材及び付属材料を対象として試験及び検査が行えるようにする。

また、全体漏えい率試験を定期的実施できるものとする。

#### 6.3.1 目視点検

コンクリート、ライナプレート等の予め選定された箇所について目視により異常の有無を定期的に点検する。

#### 6.3.2 全体漏えい率試験

全体漏えい率試験を行う場合は、JEAC-4203(1974)に準拠して実施する。

#### 6.3.3 付着を生じさせないプレストコンクリート格納容器の試験及び検査

##### i) 試験項目

イ) 緊張力の確認試験


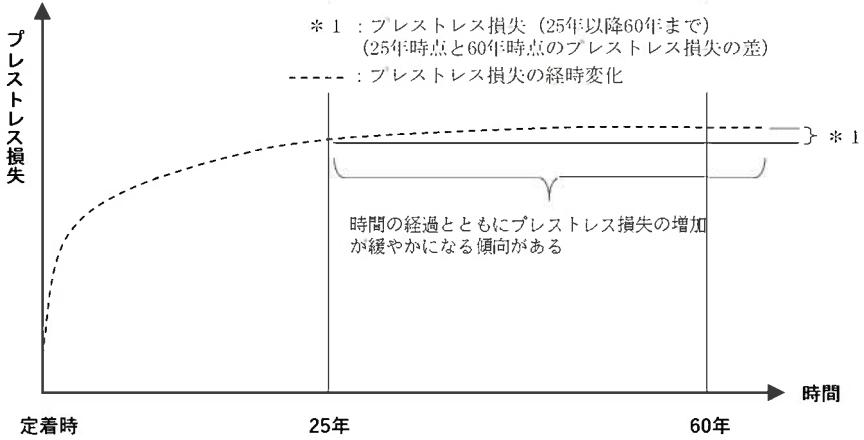
ロ) 緊張材付属材料の材料特性確認試験並びに緊張材定着具の腐食、局部的損傷及び防せい材漏えいの有無。

##### ii) 試験数量

イ) の試験の対象とする緊張材の数量は、各配置方向について全体を代表するよう適切に選択するものとし、運転開始後5年目までは、全体の4%とする。

##### iii) 試験及び検査の回数

検査及び試験の回数は、原則として運転開始後1年目、3年目及び5年目に各1回実施することとする。これ以降は、それまでの結果を検討して必要ある場合は、別途その実施を定めることとする。

<p>タイトル</p>	<p>テンドンの緊張力予測値の算定過程及び結果について</p>
<p>説明</p>	<p>1. 緊張力予測値の算定          運転開始後 60 年経過時点のテンドンの緊張力予測値は、25 年目供用期間中検査（第 14 回定期検査）における緊張力測定値より 25 年以降 60 年目までのプレストレス損失を減じて算定している。（図 1）このため 25 年目供用期間中検査までの緊張力低下の傾向が反映されている。          緊張力予測値は、各テンドンの定着荷重が異なることや緊張力低下の傾向にばらつきがあることから、25 年目供用期間中検査におけるテンドンの緊張力測定値を起点とし算定した値の平均値とした。</p> <div style="text-align: center;">  </div> <p style="text-align: center;">図 1 緊張力予測値の算定イメージ</p> <p>* 1 プレストレス損失（25 年以降 60 年まで）  <math display="block">= \text{プレストレス損失（運転開始後 60 年経過時点）} - \text{プレストレス損失（運転開始後 25 年経過時点）}</math></p> <p>テンドンの緊張力低下の長期的な傾向は、プレストレス損失の増加が時間の経過とともに緩やかになる（図 2）ため、緊張力低下が緩やかになり、最終的にはほぼ一定となる（図 3）。運転開始後 60 年経過時点のテンドンの緊張力予測値は、プレストレス損失の各要因の入力値を安全側にすることで保守的に算定している。          プレストレス損失の長期的な傾向を添付 1 「プレストレス損失の算定過程及び結果 1. プレストレス損失の長期的な傾向」に示す。</p> <div style="text-align: center;">  </div> <p style="text-align: center;">図 2 プレストレス損失の傾向とプレストレス損失の算定イメージ</p>

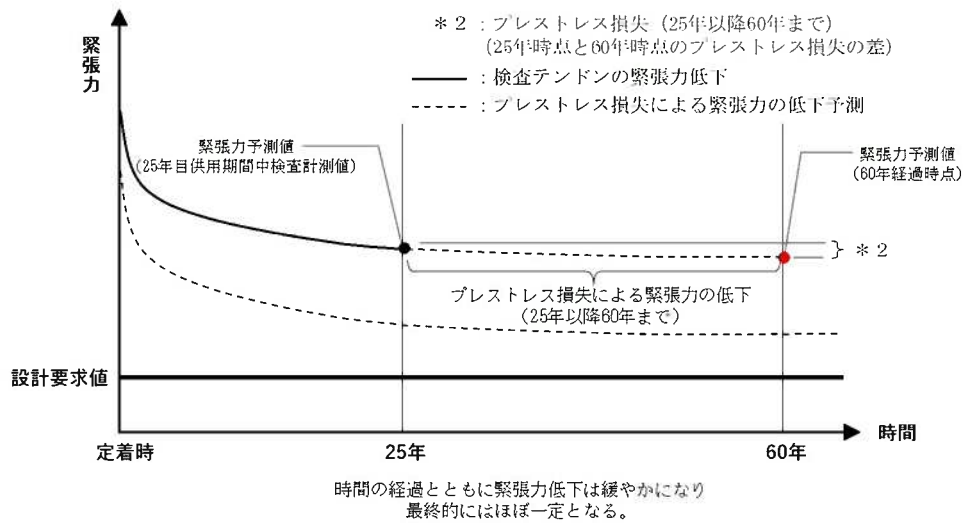


図3 テンダンの緊張力低下の傾向と緊張力予測のイメージ

## 2. プレストレス損失の算定

### (1) プレストレス損失の算定方法

プレストレス損失は、第1回工事計画認可申請資料（総文第313号 昭和60年3月8日認可）（以下、「工事計画認可申請資料」という）の添付資料5-2に倣い算定している。

工事計画認可申請資料に、テンダンの有効張力に対するロスとして、コンクリートの弾性変形によるロス( $\Delta f_1$ )、PC鋼線のリラクセーションによるロス( $\Delta f_2$ )、コンクリートのクリープによるロス( $\Delta f_3$ )及びコンクリートの乾燥収縮によるロス( $\Delta f_4$ )がある。緊張力予測値の算定にあたり、コンクリートの弾性変形によるロス( $\Delta f_1$ )は、各テンダンの緊張順序により生じる建設時のロスであるため、25年以降60年までのプレストレス損失の要因とならず、プレストレス損失は、PC鋼線のリラクセーション、コンクリートのクリープによるロス及びコンクリートの乾燥収縮によるロスにより算定される。

よって、プレストレス損失( $\Delta f$ )の算定は、以下の式となる。

$$\Delta f = \Delta f_2 + \Delta f_3 + \Delta f_4$$

なお、プレストレス損失( $\Delta f$ )の要因であるPC鋼線のリラクセーションによるロス( $\Delta f_2$ )、コンクリートのクリープによるロス( $\Delta f_3$ )及びコンクリートの乾燥収縮によるロス( $\Delta f_4$ )は、土木学会「プレストレストコンクリート標準示方書」(1978)（以下、「PC示方書」という）に準拠し、工事計画認可申請資料に記載している次式を用いて算出している。

- ・ PC鋼線のリラクセーションによるロス( $\Delta f_2$ )

$$\Delta f_2 = \gamma(\text{tr}) \cdot f_i \cdot \left( 1 - 2 \cdot \frac{\Delta f_3 + \Delta f_4}{f_i} \right)$$

・コンクリートのクリープによるロス(△f<sub>3</sub>)

$$\Delta f_3 = \frac{n \cdot \phi(t, t_0) \cdot \sigma_c}{1 + n \cdot \frac{\sigma_c}{f_i} \cdot \left[1 + \frac{1}{2} \phi(t, t_0)\right]}$$

・コンクリートの乾燥収縮によるロス(△f<sub>4</sub>)

$$\Delta f_4 = \frac{E_p \cdot \varepsilon_s(t, t_0)}{1 + n \cdot \frac{\sigma_c}{f_i} \cdot \left[1 + \frac{1}{2} \phi(t, t_0)\right]}$$

- σ<sub>c</sub> : 初期平均コンクリート応力度
- f<sub>i</sub> : テンドンの初期平均張力
- E<sub>p</sub> : テンドンのヤング係数
- E<sub>c</sub> : コンクリートのヤング係数
- n : ヤング係数比 (E<sub>p</sub>/E<sub>c</sub>)
- γ (tr) : PC鋼線のリラクゼーション係数
- φ (t, t<sub>0</sub>) : コンクリートのクリープ係数
- ε<sub>s</sub> (t, t<sub>0</sub>) : コンクリートの乾燥収縮ひずみ

プレストレス損失の算定時の入力値を添付1「プレストレス損失の算定過程及び結果 2. プレストレス損失の算定時の入力値」に示す。

#### (2) プレストレス損失の算定結果

運転開始後25年経過時点のプレストレス損失、運転開始後60年経過時点のプレストレス損失及び25年以降60年までのプレストレス損失の算定結果を添付1「プレストレス損失の算定過程及び結果 3. プレストレス損失の算定結果」に示す。

#### 3. 緊張力予測値の算定結果

運転開始後60年経過時点の緊張力予測値を、添付2「緊張力予測値の算定結果」に示す。

テンドンの緊張力を予測した結果、運転開始後60年経過時点のテンドンの緊張力予測値はフープテンドン6.11MN、逆Uテンドン5.87MNとなり、設計要求値(フープテンドン5.18MN、逆Uテンドン5.01MN)を上回る結果が得られた。

なお、25年目供用期間中検査における緊張力測定値は、すべての検査テンドンにおいて設計要求値を上回ることを確認している。

また、緊張力検査及び定着部(定着具、周辺コンクリート部)の目視点検の結果、緊張力は設計要求値を十分に上回ることを確認しており、極端に設計要求値に近い値はないこと、定着具の有害な変形や破損及び周辺コンクリート部の有害なひび割れ等の損傷や劣化はないことから、今後テンドンの緊張力低下が急激に進展することはない。

添付1 プレストレス損失の算定過程及び結果

添付2 緊張力予測値の算定結果

## プレストレス損失の算定過程及び結果

## 1. プレストレス損失の長期的な傾向

日本建築学会「プレレストコンクリート設計施工規準・同解説」(1998)に「コンクリートのクリープ及び乾燥収縮、PC鋼線のリラクセーションは、ある年数の経過後にはある一定値に達し、その後はクリープまたはリラクセーションの増大はなくなるから、プレストレス力の時間的減少もまたある一定値に達し、定常状態となる」とある。

プレストレス損失の算定に用いた、工事計画認可申請資料のPC鋼線のリラクセーションによるロス( $\Delta f_2$ )、コンクリートのクリープによるロス( $\Delta f_3$ )、及び、コンクリートの乾燥収縮によるロス( $\Delta f_4$ )の式は、ロスの増加が時間の経過とともに小さくなり、ロスは長期的にほぼ一定となる考えが含まれている。よって、プレストレス損失の長期的な傾向として、プレストレス損失の増加が時間の経過とともに小さくなっていく。

その結果、テンドンの緊張力低下が小さくなり長期的にほぼ一定となる。

(1) PC鋼線のリラクセーションによるロス( $\Delta f_2$ )

PC鋼線のリラクセーションによるロス( $\Delta f_2$ )は、工事計画認可申請資料に記載されている以下の式により算定する。

$$\Delta f_2 = \gamma(t_r) \cdot f_i \cdot \left( 1 - 2 \cdot \frac{\Delta f_3 + \Delta f_4}{f_i} \right)$$

- $f_i$  : テンドンの初期平均張力
- $\gamma(t_r)$  : PC鋼線のリラクセーション係数
- $\Delta f_3$  : コンクリートのクリープによるロス
- $\Delta f_4$  : コンクリートの乾燥収縮によるロス

PC鋼線のリラクセーションによるロス( $\Delta f_2$ )の傾向は、リラクセーション係数が同じであれば、コンクリートのクリープによるロス( $\Delta f_3$ )及び乾燥収縮によるロス( $\Delta f_4$ )から定まる。そのため、コンクリートのクリープによるロス( $\Delta f_3$ )及びコンクリートの乾燥収縮によるロス( $\Delta f_4$ )が、長期的にほぼ一定となれば、PC鋼線のリラクセーションによるロス( $\Delta f_2$ )も、長期的にほぼ一定となる。

(2) コンクリートのクリープによるロス( $\Delta f_3$ )

コンクリートのクリープによるロス( $\Delta f_3$ )は、工事計画認可申請資料に記載されている次式により算定する

$$\Delta f_3 = \frac{n \cdot \phi(t, t_0) \cdot \sigma_c}{1 + n \cdot \frac{\sigma_c}{f_i} \cdot \left[ 1 + \frac{1}{2} \phi(t, t_0) \right]}$$

- $\sigma_c$  : 初期平均コンクリート応力
- $f_i$  : テンドンの初期平均張力
- $n$  : ヤング係数比 ( $E_p/E_c$ )
- $\phi(t, t_0)$  : コンクリートのクリープ係数

コンクリートのクリープによるロス( $\Delta f_3$ )の入力値のうち、時間の要因を含むものは、コンクリートのクリープ係数である。コンクリートのクリープ係数の算定方法は「2.

(2) コンクリートのクリープ係数」を参照。

このうち、 $\beta_f(t)$ 、 $\beta_f(t_0)$ は図1に示す、「コンクリートの有効材令  $t$  及び部材の

仮想厚さ  $h_{th}$  に関する関数」により算定する。

図 1 に示す関数は材令に伴い収束し、最終値に収まる。よって、コンクリートのクリープ係数は時間の経過とともに収束し、長期的に一定となる。そのため、クリープによるロス ( $\Delta f_3$ ) は、ロスの増加が時間の経過とともに小さくなり、長期的にはほぼ一定となる。

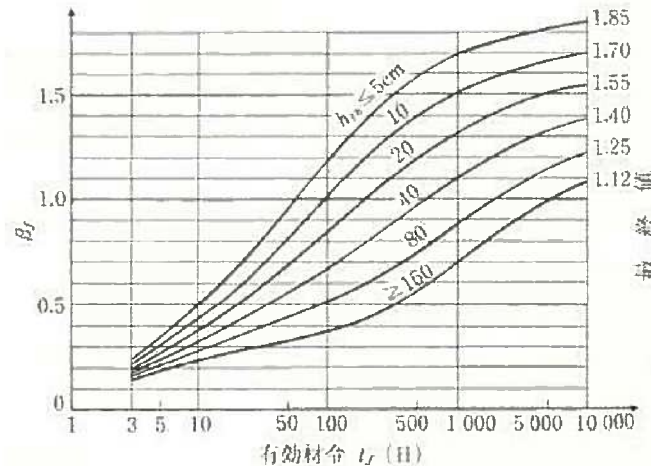


図 1 コンクリートの有効材令  $t_e$  及び部材の仮想厚さ  $h_{th}$  に関する関数  
[出典：土木学会「プレストレストコンクリート標準示方書」(1978) P20]

(3) コンクリートの乾燥収縮によるロス ( $\Delta f_4$ )

コンクリートの乾燥収縮によるロス ( $\Delta f_4$ ) は、工事計画認可申請資料に記載されている以下の式により算定する。

$$\Delta f_4 = \frac{E_p \cdot \varepsilon_s(t, t_0)}{1 + n \cdot \frac{\sigma_c}{f_i} \cdot \left[ 1 + \frac{1}{2} \phi(t, t_0) \right]}$$

$\sigma_c$  : 初期平均コンクリート応力

$f_i$  : テンドンの初期平均張力

$E_p$  : テンドンのヤング係数

$n$  : ヤング係数比 ( $E_p/E_c$ )

$\phi(t, t_0)$  : コンクリートのクリープ係数

$\varepsilon_s(t, t_0)$  : コンクリートの乾燥収縮ひずみ

コンクリートの乾燥収縮によるロス ( $\Delta f_4$ ) の入力値のうち、時間の要因を含むものは、コンクリートのクリープ係数及び乾燥収縮ひずみである。コンクリートのクリープ係数の算定方法は「2. (2) コンクリートのクリープ係数」を参照。コンクリートの乾燥収縮ひずみの算定方法は「2. (3) コンクリートの乾燥収縮ひずみ」を参照。

このうち、 $\beta_s(t)$ 、 $\beta_s(t_0)$  は図 2 に示す、「コンクリートの材令  $t$  及び部材の仮想厚さ  $h_{th}$  に関する関数」により算定する。

図 2 に示す関数は材令に伴い収束し、最終値に収まる。よって、コンクリートの乾燥収縮ひずみは時間の経過とともに収束し、長期的に一定となる。

コンクリートのクリープ係数及び乾燥収縮ひずみは、時間の経過とともに収束し、長期的に一定となる。そのため、乾燥収縮によるロス ( $\Delta f_4$ ) は、ロスの増加が時間の経過とともに小さくなり、長期的にはほぼ一定となる。



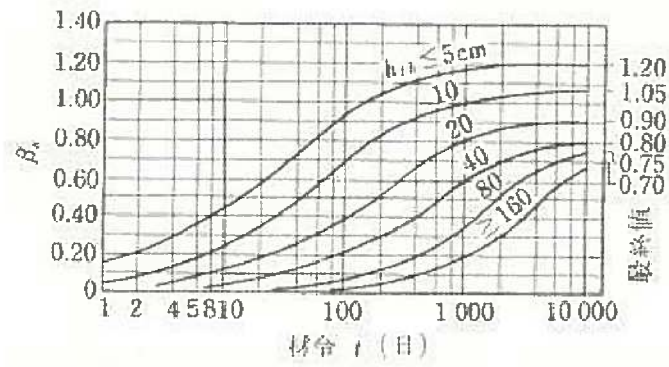


図2 コンクリートの材令  $t$  及び部材の仮想厚さ  $h_{th}$  に関する関数  
 [出典：土木学会「プレストレストコンクリート標準示方書」(1978) P18]

## 2. プレストレス損失の算定時の入力値

表 1 プレストレス損失の算定時の入力値

		経過時点		備考
		25年時点	60年時点	
テンドンの 初期平均張力 (kg/mm <sup>2</sup> )	フープテンドン	105.0		工事計画認可申請資料
	逆Uテンドン	99.9		
初期平均 コンクリート 応力度 (kg/mm <sup>2</sup> )	フープ テンドン	ドーム	0.62	テンドンの初期平均張力と コンクリート断面厚さより 算定
		シリンダー	1.13	
	逆U テンドン	ドーム	0.74	
		シリンダー	0.62	
ヤング係数 (kg/cm <sup>2</sup> )	テンドン	2.00×10 <sup>9</sup>		工事計画認可申請資料
	コンクリート	3.04×10 <sup>5</sup>		
テンドンのリラクセーション係数		4.0%	4.0%	(1)に記載
コンクリートの クリープ係数 φ (t, t <sub>0</sub> )	ドーム	1.61	1.70	(2)に記載
	シリンダー	1.29	1.39	
コンクリートの 乾燥収縮ひずみ ε <sub>s</sub> (t, t <sub>0</sub> ) (×10 <sup>-6</sup> )	ドーム	150.6	159.8	(3)に記載
	シリンダー	127.8	136.4	

## (1) PC鋼線のリラクゼーション係数

PC鋼線のリラクゼーション係数の25年時点及び60年時点の入力値は、工事計画認可申請資料の40年時点のリラクゼーション係数4%と同じ値としている。

土木学会「コンクリート標準示方書」(2012)において、「リラクゼーション試験により求めた1000時間試験値の3倍の値とする。」とある(1000時間試験値は0.9%)。リラクゼーション係数4%は、1000時間試験値の3倍の値である2.7%に比べ安全側の値である。

## (2) コンクリートのクリープ係数

コンクリートのクリープ係数は、PC示方書に倣い算定した。

$$\text{クリープ係数} : \phi(t, t_0) = \phi_{d0} \times \beta_d(t-t_0) + \phi_{r0} [\beta_r(t) - \beta_r(t_0)]$$

表2 クリープ係数算定時の入力値

		経過時点		備考
		25年時点	60年時点	
$\phi_{d0}$ : 遅れ弾性ひずみに対する基本クリープ係数	ドーム	0.4	0.4	一般に0.4
	シリンダー			
$\beta_d(t-t_0)$ : 載荷後の有効経過日数 ( $t-t_0$ )に関する関数による値	ドーム	1.0	1.0	$(t-t_0) \geq 3$ ヶ月のとき1.0
	シリンダー			
$\phi_{r0}$ : フローひずみに対する基本クリープ係数	ドーム	2.0	2.0	PC示方書に示される、環境条件に応じた基本クリープ係数(相対湿度70%)
	シリンダー			
$\beta_r(t_0)$ : 有効材令 $t_0$ におけるコンクリートの有効材令 $t$ 及び部材の仮想厚さ $h_{th}$ に関する関数*1による値	ドーム	0.52	0.52	有効材令 $t_0$ ドーム : 308日、胴 : 841日
	シリンダー	0.68	0.68	
$\beta_r(t)$ : 載荷後の有効材令 $t$ におけるコンクリートの有効材令 $t$ 及び部材の仮想厚さ $h_{th}$ に関する関数*1による値	ドーム	1.13	1.18	載荷後の有効材令 $t$ 25年時点 ドーム : 13,233日、胴 : 13,766日 60年時点 ドーム : 30,185日、胴 : 30,718日
	シリンダー			

\*1 : PC示方書のコンクリートの有効材令  $t$  及び部材の仮想厚さ  $h_{th}$  に関する関数を多項式に近似し、有効材令10,000日以上を外挿し、算出。

## (3) コンクリートの乾燥収縮ひずみ

コンクリートの乾燥収縮ひずみは、P C 示方書に倣い算定した。

$$\text{乾燥収縮ひずみ} : \varepsilon_s(t, t_0) = \varepsilon_{s0}[\beta_s(t) - \beta_s(t_0)]$$

表 3 乾燥収縮ひずみ算定時の入力値

		経過時点		備考
		25 年時点	60 年時点	
$\varepsilon_{s0}$ : 基本収縮ひずみ	ドーム	$250.0 \times 10^{-6}$	$250.0 \times 10^{-6}$	P C 示方書に示される、環境条件に応じた基本収縮ひずみ (相対湿度 70%)
	シリンダー			
$\beta_s(t_0)$ : 有効材令 $t_0$ におけるコンクリートの材令 $t$ 及び部材の仮想厚さ $h_{ch}$ に関する関数*1による値	ドーム	0.08	0.08	有効材令 $t_0$ ドーム : 308 日、胴 : 841 日
	シリンダー	0.17	0.17	
$\beta_s(t)$ : 載荷後の有効材令 $t$ におけるコンクリートの材令 $t$ 及び部材の仮想厚さ $h_{ch}$ に関する関数*1による値	ドーム	0.68	0.72	載荷後の有効材令 $t$ 25 年時点 ドーム : 13,233 日、胴 : 13,766 日 60 年時点 ドーム : 30,185 日、胴 : 30,718 日
	シリンダー			

\*1 P C 示方書のコンクリートの材令  $t$  及び部材の仮想厚さ  $h_{ch}$  に関する関数を多項式に近似し、有効材令 10,000 日以上を外挿し算出。

## 3. プレストレス損失の算定結果

運転開始後 60 年経過時点の緊張力予測値の算出におけるプレストレス損失としてフープテンドンについては、0.042MN を、逆Uテンドンには 0.032MN を用いる。

表 4 プレストレス損失の算定結果 (MN)

		プレストレス損失 〔運転開始後 25 年経過時点〕	プレストレス損失 〔運転開始後 60 年経過時点〕	プレストレス損失 〔25 年日以降 60 年まで〕
フープテンドン ( $\Delta f$ )	ドーム	0.766	0.795	0.030
	シリンダー	0.874	0.916	0.042
逆Uテンドン( $\Delta f$ )		0.747	0.779	0.032

表5 緊張力予測値の算定結果

(MN)

検査テンドン*1			緊張力測定値 〔建設時点〕		緊張力測定値 〔25年日供用 期間中検査結果〕		緊張力予測値*2 〔運転開始後 60年経過時点〕		設計 要求値*3
			測定値	平均値*4	測定値	平均値*4	予測値	平均値*4	
フープテンドン	ドーム	H153S	6.76	6.75	6.26	6.16	6.21	6.11	5.18
		H153F	6.86		6.36		6.31		
	シリンダー	H19S	6.78		6.09		6.04		
		H19F	6.75		6.12		6.07		
		H48S	6.72		6.04		5.99		
		H48F	6.77		6.18		6.13		
		H86S	6.77		6.10		6.05		
		H86F	6.74		6.10		6.05		
		H110S	6.71		6.17		6.12		
		H110F	6.73		6.19		6.14		
逆Uテンドン	V18S	6.21	6.22	5.88	5.90	5.84	5.87	5.01	
	V18F	6.34		6.01		5.97			
	V68S	6.17		5.83		5.79			
	V68F	6.28		5.87		5.83			
	V75S	6.14		5.89		5.85			
	V75F	6.19		5.95		5.91			

\*1 最新の測定結果である25年日供用期間中検査のテンドンを対象

\*2 各テンドンの「緊張力測定値(25年日供用期間中検査結果)」から「プレストレス損失(25年以降60年まで)」を差し引いたもの

\*3 工事計画認可申請資料に基づき設定されたテンドン定着部の緊張力(経年による緊張力の損失を考慮)

\*4 平均値は、小数点以下第3位を切り捨てして算出

表6 テンドン定着部緊張力の設計要求値

	①テンドン定着部の 定着完了後の緊張力(kg/mm <sup>2</sup> )	②経年による 緊張力の損失 (kg/mm <sup>2</sup> )	③テンドン1本あ たりの断面積 (mm <sup>2</sup> /本)	(①-②)×③ 設計要求値(MN)
フープテンドン	108.2	24	6272.24	5.18
逆Uテンドン	99.6	18	6272.24	5.01

<p>タイトル</p>	<p>テンダンの緊張力低下のうち高経年化対策上着目すべき劣化事象ではないとした要因における根拠の説明について</p>
<p>説明</p>	<p>テンダンの緊張力低下のうち高経年化対策上着目すべき劣化事象ではないとした要因における根拠を以下に示す。</p> <p>1. 熱（高温）による緊張力低下          熱（高温）による緊張力の低下については、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)（付録Ⅱ 原子力施設における建築物の維持管理指針 解説（プレストレストコンクリート製原子炉格納容器（PCCV）編））（以下「維持管理指針」という）に基づき、高経年化対策上着目すべき劣化事象ではないと判断した。</p> <p>維持管理指針抜粋（P204）          『PC鋼材の引張強度は、200℃程度までの温度であれば著しく低下することはなく、温度400℃でも短期間（3～5分）であれば、PC鋼材の機械的性質に有害な影響は生じない。なお、コンクリート製原子炉格納容器で一般に経験される温度レベルは200℃よりもはるかに低い65℃の範囲に収まっていると考えられるため、通常運転時の状態でPC鋼材に熱損傷が生じる可能性は極めて低く、着目する劣化要因とはしない。』</p> <p>2. 放射線照射による緊張力低下          放射線照射による緊張力低下については、維持管理指針に基づき、高経年化対策上着目すべき劣化事象ではないと判断した。</p> <p>運転開始後60年時点における、1次冷却材ループ室内機器表面付近及び1次遮蔽壁コンクリート外表面の中性子照射量のオーダーは、それぞれ、<math>10^{11}\text{n/cm}^2</math> (<math>E&gt;1.0\text{MeV}</math>)及び<math>10^8\text{n/cm}^2</math> (<math>E&gt;1.0\text{MeV}</math>)程度である。          テンダンを含む外部遮蔽壁は、炉心から見て上記の位置より離れていることから、PC鋼線の照射量は、下記の閾値<math>4\times 10^{16}\text{n/cm}^2</math> (<math>E&gt;1.0\text{MeV}</math>)より十分に小さい値であると考えられる。</p> <p>維持管理指針抜粋（P204）          『PC鋼材への放射線照射は、<math>4\times 10^{16}\text{n/cm}^2</math>までの中性子照射では影響がなく、コンクリート製格納容器の照射量はこの閾値よりも低く、プレストレストシステムの性能に影響を与える可能性は極めて低いと考えられることから、着目する劣化要因とはしない。』</p> <p>3. 腐食による緊張力低下          腐食による緊張力低下については、維持管理指針に基づき、高経年化対策上着目すべき劣化事象ではないと判断した。</p> <p>また、防せい材は第14回の定期検査において、水溶性不純物、含水量及び全アルカリ価の検査を実施しており、全ての検査項目について判定基準を満足していることを確認している。</p>

維持管理指針抜粋 (P205)

『国内のPCCVでは、米国のような鉛直+ガンマテンドン(テンドンギヤラリとリングガードで定着するテンドン)形式ではなく、逆Uテンドン形式を採用し、緊張材(テンドン)の両端を底部内にあるテンドンギヤラリに定着しているため、雨水や地下水が浸入することはない。また、外部に露出した水平方向テンドンのグリースキャップまたはエンドキャップには、雨水対策を施しているため、水分が浸入することはない。さらに、シース、グリースキャップまたはエンドキャップ内には、防せい材が充填されているため、定着具およびPC鋼材が腐食する可能性は極めて低いことなどから、着目する劣化要因とはしない。』

添付1 国内外におけるテンドン等の腐食に関する不具合事例について



## 国内外における tendon 等の腐食に関する不具合事例について

## 1. 国内外における PCCV の不具合事例

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)において、国外の PCCV の不具合事例が整理されている(表 1)。なお、国内の PCCV においては同様の不具合は確認されていない。

## 2. tendon 等の腐食に関する不具合事例

表 1 に示した国外の不具合事例のうち tendon 等の腐食に関する事例としては、Joseph M. Farley-2(米国)におけるアンカーヘッドの破損並びに Ocone-2, 3(米国) Joseph M. Farley-2(米国)及び Calvert Cliffs-1, 2(米国)における tendon ワイヤの破断・腐食があり、その原因は水の浸入による腐食または水素応力割れとされている。

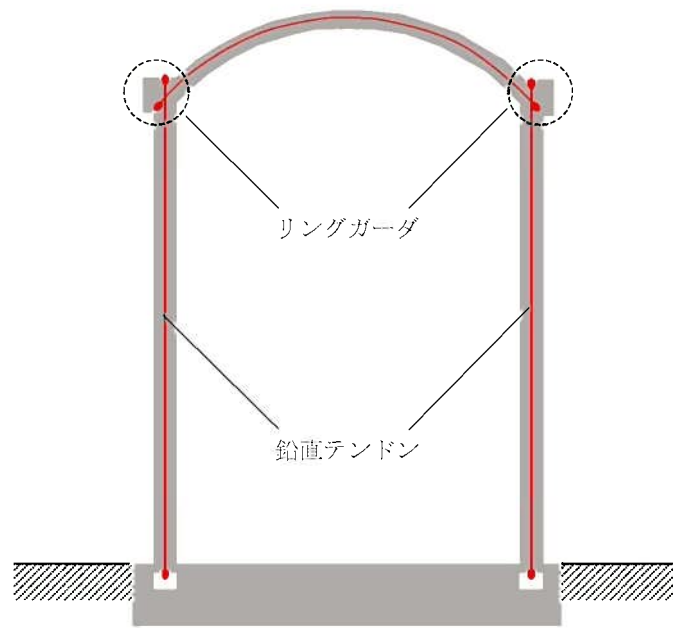
これらの発電所では、鉛直+ガンマ tendon 形式が採用されている。鉛直+ガンマ tendon 形式では、鉛直 tendon の上端定着部は屋外に露出しているため、雨水が入りやすい構造となっている(図 1 (a)、(b))。また、鉛直 tendon の下端定着部は基礎の底面に定着されている場合があり、地下水が入りやすい構造となっている(図 1 (b))。

これに対し、玄海 3 号炉の PCCV では、米国のような鉛直+ガンマ tendon 形式ではなく、逆 U tendon 形式を採用し、緊張材の両端を基礎内部にある tendon キャラリに定着しているため、雨水や地下水が浸水することはない。

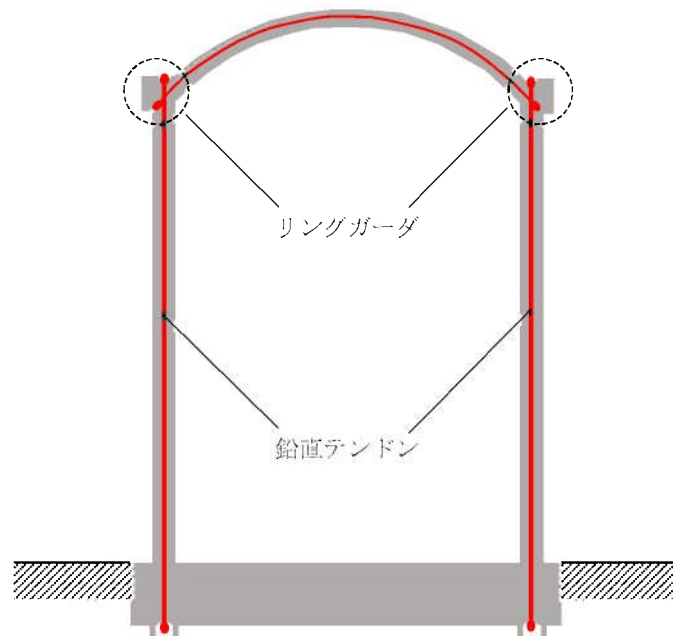
表 1 国外の PCCV の不具合事例

部位	プラント名	不具合の発見時期	不具合事例	原因・状況	
原子炉格納容器シェル部コンクリート	Three Mile Island-1 (米)	1974 建設時(運開 1974.9)	リングガード、支圧板付近にひび割れ	詳細は不明	
	Turkey Point-3 (米)	1975 検査時(運開 1972.12)	リングガードコンクリートの剥離		
	Point Beach-1 (米)	1991.10 検査時(運開 1970.12)	バットレス部にフープアンドン位置に沿った水平ひび割れ		
	Oconee-1,2,3 (米)	1998.4 検査時(運開#1-1973.7, #2-1974.9, #3-1974.12)	支圧板下のコンクリートの剥離		
	Calvert Cliffs-1 (米)	1999.4 検査時(運開 1975.5)	バットレス部にひび割れ		
	Calvert Cliffs-2 (米)	1999.4 検査時(運開 1977.4)	ドーム部から水酸化カルシウムの露出		
	San Onofre-2 (米)	1978 検査時(建設時)	シェル部からグリース滲れ		熱によるグリースの高酸化とオイルの分離
	Fort Calhoun-1 (米)	1990 検査時(運開 1973.9)			熱によるグリース材の膨張
	Trojan (米)	1991.6 検査時(運開 1976.5)	格納容器のデフラミネーション(腐食)		グリースの低融解点
	Point Beach-2 (米)	1991.10 検査時(運開 1972.10)			詳細は不明
Turkey Point-3 (米)	1970 検査時(運開 1972.12)	格納容器のデフラミネーション(腐食)	設計・施工上の不具合		
Crystal River-3 (米)	2009.9 蒸気発生器交換工事時(運開 1977.3)				
原子炉格納容器シェル部コンクリート	Callaway-1 (米)	1977 建設時(運開 1984.12)	ハンカム状ひび割れ	鉄筋が露出したエリアに低スランプのコンクリートが使用された	
	Trojan (米)	1991.6 検査時(運開 1976.5)	コンクリートの剥離、炭酸カルシウムの露出	詳細は不明	
	Trojan (米)	1991.6 検査時(運開 1976.5)	地下水の浸出	外部からアンドンギャラリへの水の浸入	
	Point Beach-2 (米)	1991.10 検査時(運開 1972.10)		アンドンギャラリ壁と天井のひび割れから浸出	
	Turkey Point-3 (米)	1992.1 検査時(運開#3-1972.12)		詳細は不明	
	Oconee-1,2,3 (米)	1978.4 検査時(運開#1-1973.7, #2-1974.9)			
	Virgil C. Summer (米)	2000 検査時(運開 1984.1)			
	Joseph M. Farley-1, 2 (米)	2004 検査時(運開#1-1977.12, #2-1981.7)		アンドンギャラリ壁と基礎接合部より浸出	
プレストレストレスシステム	Byron-1,2 (米)	1979.11 建設中発生(運開#1-1985.9, #2-1987.8)	アンカーヘッドの破損	使用された塩基性鉄鋼材料の後熱処理の不具合	
	Joseph M. Farley-2 (米)	1985.2 発見(運開 1981.7)		水素応力割れ(グリースキャップの歪縮と浸入した水との反応)	
	Oconee-2,3 (米)	1982 検査時(運開#2-1974.9, #3-1974.12)		テンドンワイヤの破断・腐食	鉛直テンドンシース内に溜まった水による腐食
	Joseph M. Farley-2 (米)	アンドン製鉄 8 年後(運開 1981.7)	水素応力割れ、水の浸入		
	Calvert Cliffs-1,2 (米)	1997.6 検査時(運開#1-1975.5, #2-1977.4)	水素応力割れ(施工時の不十分なグリース充填と水分の浸入による)		
	South Ukraine-3 (ウクライナ)	不明	テンドン潤滑剤の喪失によるワイヤの腐食、外側ワイヤに過度の荷重がかかる設計だった		
	Turkey Point-3 (米)	1992.1 検査時(運開#3-1972.12)	プレストレストレスシステムの水の蓄積	詳細は不明	
	Oconee-1 (米)	1991.8 検査時(運開 1973.7)	リフトオフ中のテンドンワイヤの(アンカーヘッド内)破断	監視作業中に降伏点を越える過緊張を行った(試験作業管理上の不具合)	
	Zion-2 (米)	1972 検査時(運開 1974.9)	テンドンワイヤの孔食	建設時のテンドンワイヤの風外保管における降雨と不十分な防食による	
	San Onofre-3 (米)	1983 建設時(運開 1984.4)	リフトオフ時の許容値を越えた	リラクセーション塔の過大降荷	
	Point Beach-1,2 (米)	1991.10 検査時(運開#1-1970.12, #2-1972.10)	支圧板とグリ スキャップの腐食	詳細は不明	
	Turkey Point-3 (米)	1974 検査時(運開#3-1972.12)	グリースキャップからの防せい材漏れ	詳細は不明	
	Trojan (米)	1991.6 検査時(運開 1976.5)		詳細は不明	
	Robert E. Genna (米)	1979, 1980 検査時(運開 1970.6)	テンドン張力の低下	既った平均気温材節により設計リラクセーション値を過小評価	
	Virgil C. Summer (米)	1990.2 検査時(運開 1984.1)		熱によるリラクセーションの増加	
	Turkey Point-3,4 (米)	1992.11 検査時(運開#3-1972.12, #4-1973.9)			
	Oconee-1,2,3 (米)	1995 検査時(運開#1-1973.7, #2-1974.9, #3-1974.12)		リフトオフ試験で同一のテンドンを使用し、度重なる緊張を行った	
	Forsman-2 (スウェーデン)	不明		熱によるリラクセーションの増加	

「原子力施設における建築物の維持管理指針・同解説(2015) 付録 II 補足資料-2」より引用



(a) 鉛直テンドンが基礎内部に定着されている形式



(b) 鉛直テンドンが基礎下端に定着されている形式

図1 鉛直+ガンマテンドン形式イメージ図

タイトル	プレストレスシステムの疲労試験について
説明	<p>プレストレスシステムの疲労試験（高サイクル疲労試験及び低サイクル疲労試験）の方法等について、以下に示す。</p> <p>1. 試験方法及び条件  プレストレスシステムの疲労試験は ASME Sec. III Div. 2 CC-2463 及び 2464 を準用し実施している。</p> <p>(1) 試験体  試験体は、実際に施工するテンドンの全断面積の 10%以上の断面積を有するテンドン及びそれに相当する定着具とする。</p> <p>(2) 試験方法  ○高サイクル疲労試験  テンドンの保証引張荷重の 60%から 66%の荷重範囲で 500,000 回の繰り返し载荷を行い、テンドンが破断しないことを確認する。</p> <p>○低サイクル疲労試験  テンドンの保証引張荷重の 40%から 80%の荷重範囲で 50 回の繰り返し载荷を行い、テンドンが破断しないことを確認する。</p> <p>2. 試験結果  平成 3 年 4 月、高サイクル疲労試験及び低サイクル疲労試験においてテンドン破断なし。(判定 合格)</p> <p>添付 1 玄海原子力発電所 3、4 号機用 プレストレスコンクリート格納容器に関する技術指針 (1984)</p>

玄海原子力発電所 3、4 号機用  
プレストレストコンクリート格納容器に関する  
技 術 指 針

昭 和 59 年 10 月

通商産業省資源エネルギー庁

公益事業部 火 力 課

公益事業部 原紙力発電安全審査課

公益事業部 原子力発電安全管理課

## 技 術 指 針

## 3.13 材料の品質試験

格納容器に用いる材料は、規格品を用いるか、又は下表の試験によって適合することを確かめたものとする。

緊張材の試験は、定着具及び接続具の引張強度、定着又は接続された緊張材の引張強度及び繰り返し強度等について行う。

シー스는、局所的な外力及び一様な外力を受けた場合、曲げ加工をした場合等について、防錆材等の漏れがないことを予め試験等によって確かめる。

## 解 説

(4) テンドンシステムの試験は、ASME Sec. II Div. 2 の CC-2463 及び CC-2464 を準用して次の方法による。

i) 静的試験 試験体の数は 2 以上とし、次の結果が得られるような破壊試験を行う。

イ) 降伏強度 ロ) 終局引張強度 ハ) 伸び (最小標点間距離 2.5m 以上)

ニ) 破断した PC 鋼線又は PC 鋼より線の数

なお、静的試験においては、定着部が緊張材の破断の前に損傷しないことを確かめる。

ii) 疲労試験 緊張材の保証引張荷重の 40% から 80% の荷重範囲で 50 回のくり返し载荷を行い、テンドンシステムが破断しないことを確かめる。さらに、必要に応じて緊張材の保証引張荷重の 60% から 66% の範囲で 500,000 回の繰り返し载荷を行い、テンドンシステムが破断しないことを確かめる。

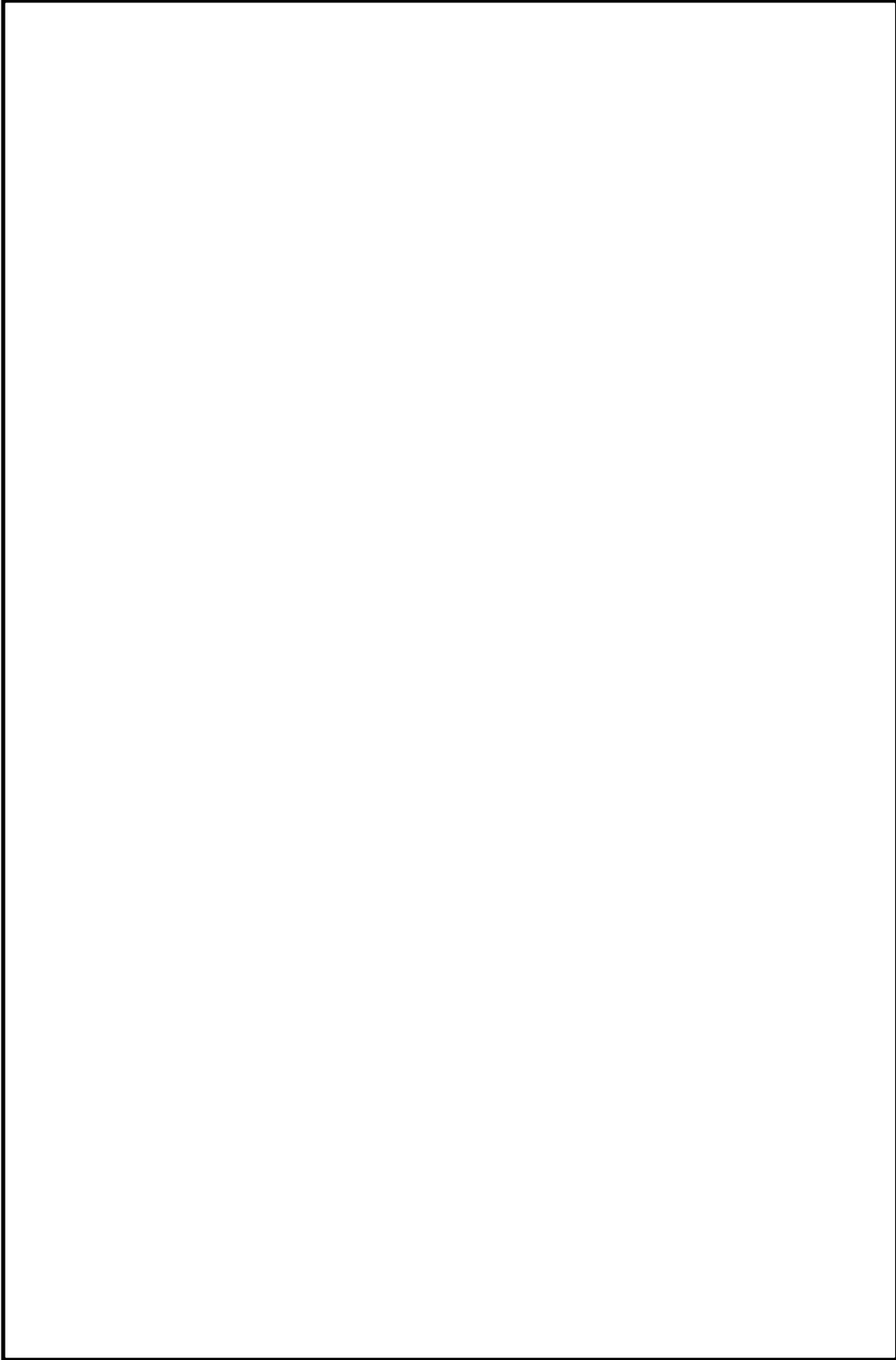
iii) 試験体の大きさ

イ) 静的試験 実際に施工する緊張材及び定着具と同じものとする。

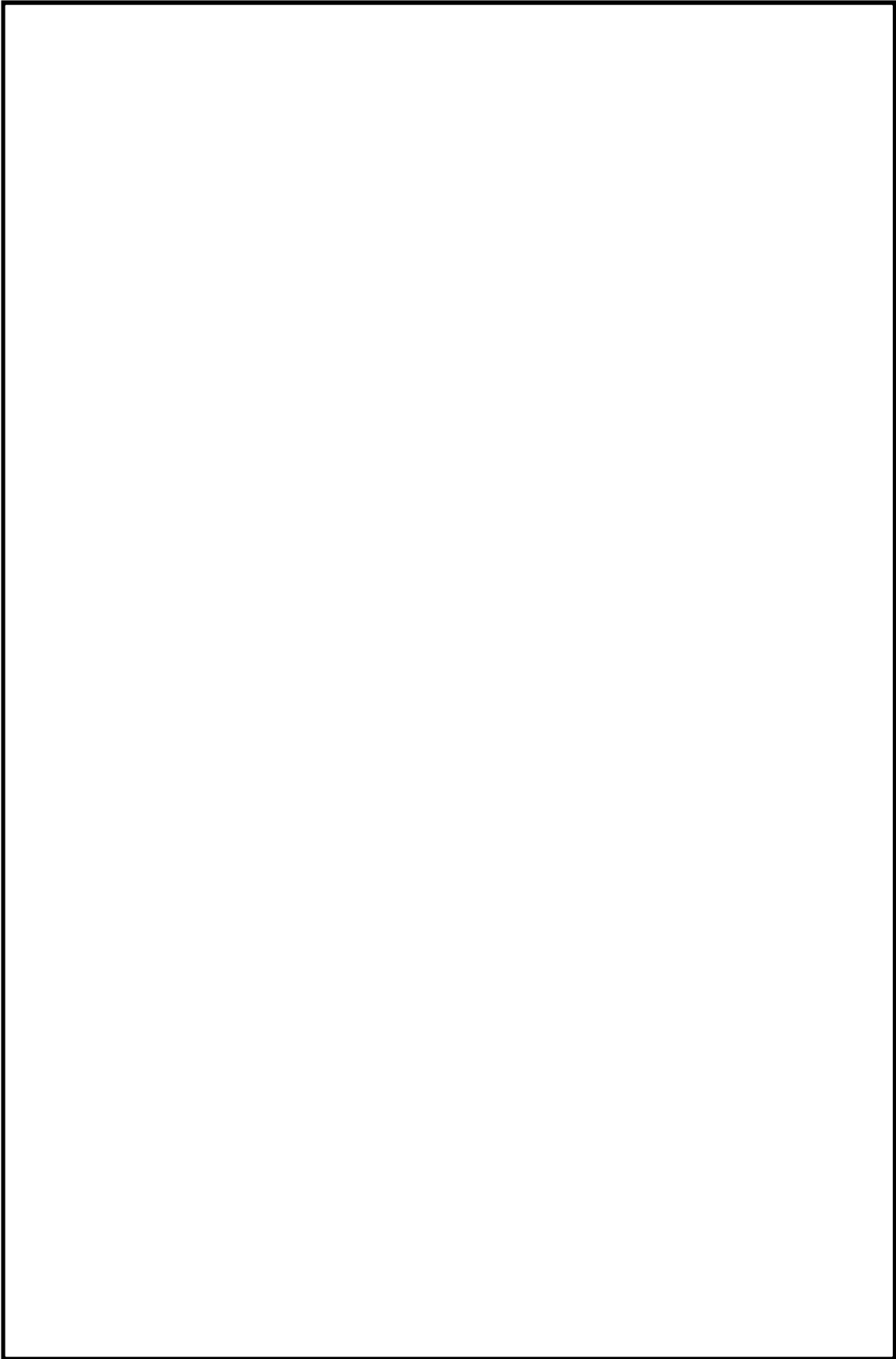
ロ) 疲労試験 実際に施工する緊張材の全断面積の 10% 以上の断面積を有する緊張材及びそれに相当する定着具とする。

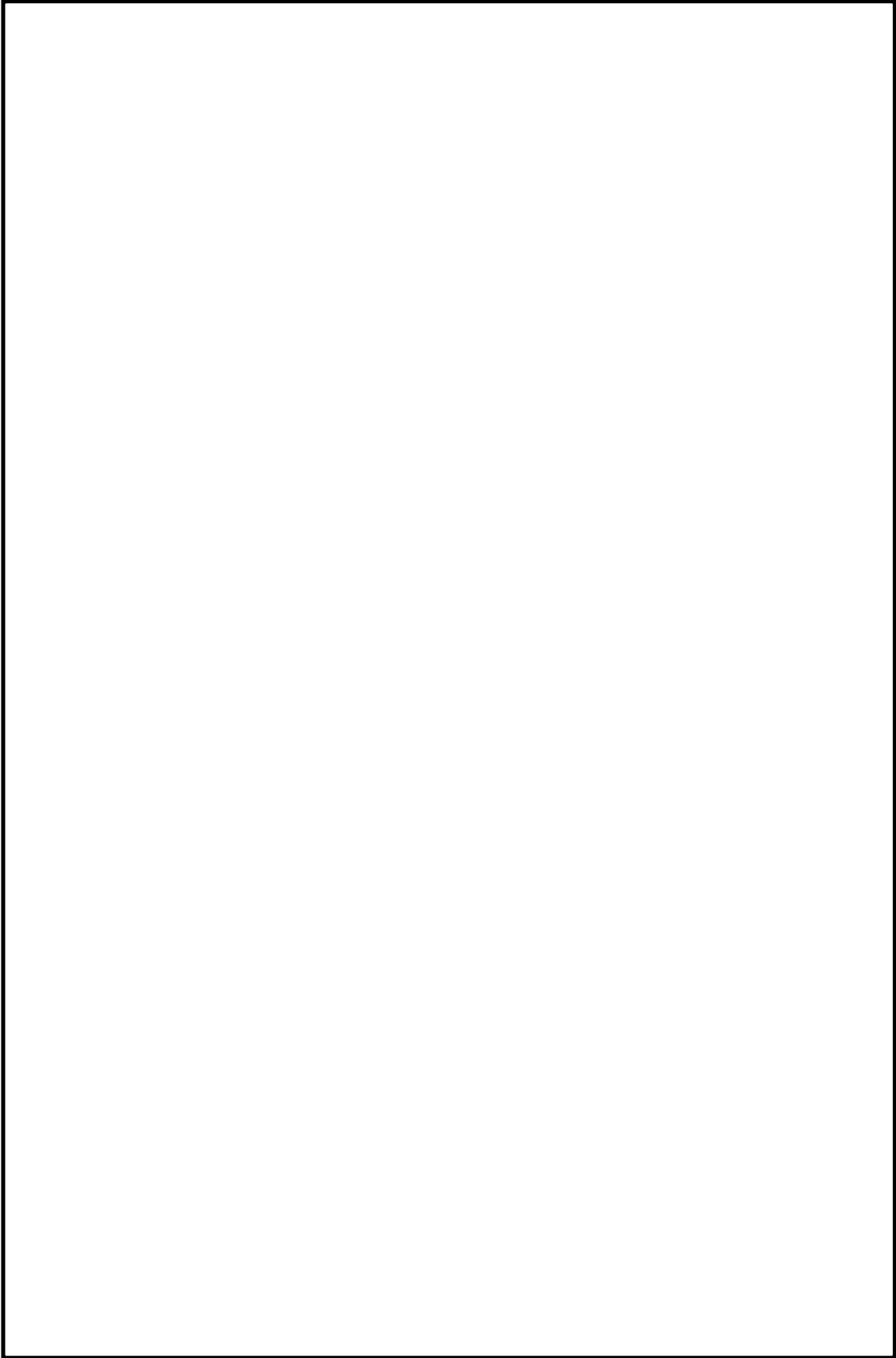
PC 鋼材の被覆材料の試験は JIS-K-0102 (1981) に対応する ASTM (American Society for Testing and Materials) D512. ASTM D992 及び APHA (American Public Health Association) No.428 によってもよい。

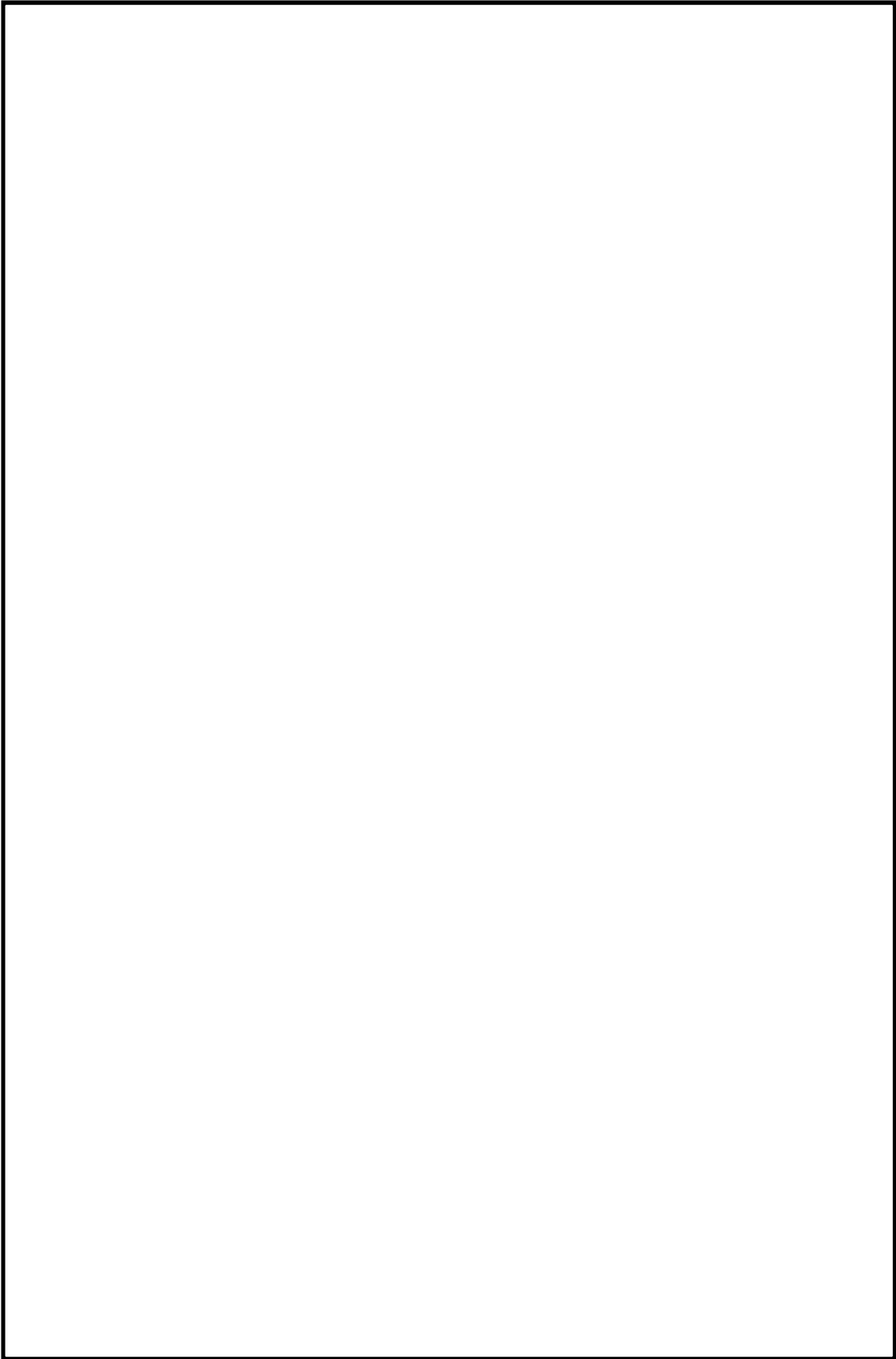
<p>タイトル</p>	<p>外部遮蔽壁における非破壊試験結果及び圧縮強度の推定方法について</p>
<p>説 明</p>	<p>供用期間中はテンドン緊張力によるプレストレスが作用しているためにコア採取することができない外部遮蔽壁において実施した、コンクリートの非破壊試験の試験方法、位置並びに試験結果及び圧縮強度の推定方法については以下のとおり。</p> <p>1. 試験方法          JIS A 1155:2012「コンクリートの反発度の測定方法」による。</p> <p>2. 試験位置          添付1「コンクリートの非破壊試験位置図」に示すとおり。</p> <p>3. 試験結果及び推定方法          添付2「コンクリートの非破壊試験結果」に示すとおり。          なお、推定圧縮強度 (N/mm<sup>2</sup>) は、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) (付録II 原子力施設における建築物の維持管理指針 解説 (プレストレスコンクリート製原子炉格納容器 (PCCV) 編)) に準拠し、次式にて算出。</p> $F = 16.4 \times \exp((2.91 \times 10^{-2} \times R))$ <p>ここに、F：推定圧縮強度 (N/mm<sup>2</sup>)          R：リバウンドハンマーによる反発度</p> <p>添付1 コンクリートの非破壊試験位置図          添付2 コンクリートの非破壊試験結果</p>

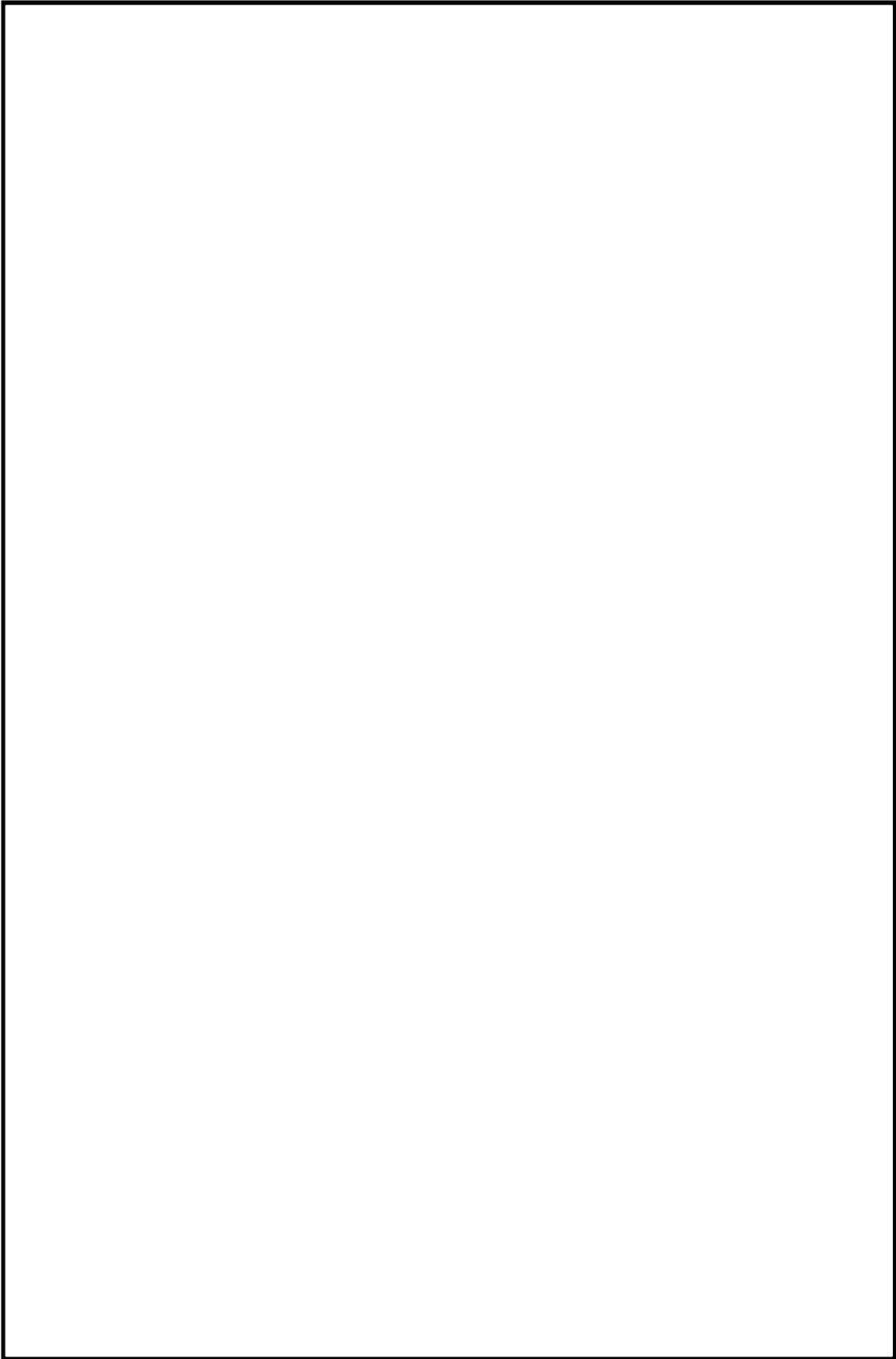












## コンクリートの非破壊試験結果

測定点	実施時期	反発度 測定結果	推定圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )	設計基準強度 (N/mm <sup>2</sup> )
①	2023年	48	66.3	41.2
②	2023年	50	70.3	41.2
③	2023年	49	68.3	41.2
④	2023年	51	72.3	41.2
⑤	2023年	50	70.3	41.2
⑥	2023年	48	66.3	41.2
⑦	2023年	57	86.1	41.2
⑧	2023年	51	72.3	41.2
⑨	2023年	54	78.9	41.2
⑩	2023年	43	57.3	41.2
⑪	2023年	44	59.0	41.2
⑫	2023年	44	59.0	41.2
⑬	2023年	42	55.7	41.2
⑭	2023年	59	81.3	41.2
⑮	2023年	58	78.9	41.2
⑯	2023年	62	88.7	41.2
平均			70.7	41.2

タイトル	玄海3号炉周辺の地下水による劣化影響について								
説明	<p>1. はじめに</p> <p>玄海3号炉のコンクリート構造物うち、外部遮蔽壁、原子格納施設基礎、原子炉補助建屋、原子炉周辺建屋、タービン建屋、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。</p> <p>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、それらが玄海3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。</p> <p>2. 経年劣化影響評価</p> <p>2.1 地下水に起因する経年劣化要因の抽出</p> <p>地下水に起因するコンクリートの経年劣化要因とその概要を表1に示す。</p> <p>表1 地下水の存在下で引き起こされる経年劣化要因</p> <table border="1" data-bbox="408 898 1350 1503"> <thead> <tr> <th data-bbox="408 898 564 976">経年劣化要因</th> <th data-bbox="564 898 1350 976">概要</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td data-bbox="408 976 564 1184">塩分浸透</td> <td data-bbox="564 976 1350 1184">コンクリート中に塩化物イオンが浸透して鉄筋位置まで達すると、鉄筋表面の不動態被膜が失われ、鉄筋は、コンクリート中の水分、酸素の作用により腐食し始める。腐食が進行すると酸化生成物による体積膨張からコンクリートにひび割れや剥離が生じ、コンクリート構造物としての健全性が損なわれる可能性がある。</td> </tr> <tr> <td data-bbox="408 1184 564 1357">アルカリ骨材反応</td> <td data-bbox="564 1184 1350 1357">コンクリート中の反応性シリカを含む骨材と、セメント等に含まれるアルカリ（ナトリウムイオンやカリウムイオン）が、水の存在下で反応してアルカリ珪酸塩を生成し、この膨張作用によりコンクリートにひび割れが生じ、コンクリート構造物としての健全性が損なわれる可能性がある。</td> </tr> <tr> <td data-bbox="408 1357 564 1503">化学的侵食</td> <td data-bbox="564 1357 1350 1503">水分中の酸や硫酸塩等の塩類とセメント水和物の化学反応により、セメントペーストの溶解（酸）や、コンクリート表層の剥離・剥落（塩類）が生じ、コンクリート構造物としての健全性が損なわれる可能性がある。</td> </tr> </tbody> </table> <p>2.2 地下水に起因するコンクリートの経年劣化評価</p> <p>コンクリートの経年劣化要因のうち、塩分浸透、アルカリ骨材反応、化学的侵食が玄海3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、玄海3号炉の環境条件に基づき評価を行った。</p> <p>2.2.1 塩分浸透</p> <p>玄海3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。</p> <p>その結果、各評価部位における鉄筋腐食減量は、運転開始後60年経過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の鉄筋腐食減量を十分に下回っている。</p>	経年劣化要因	概要	塩分浸透	コンクリート中に塩化物イオンが浸透して鉄筋位置まで達すると、鉄筋表面の不動態被膜が失われ、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。腐食が進行すると酸化生成物による体積膨張からコンクリートにひび割れや剥離が生じ、コンクリート構造物としての健全性が損なわれる可能性がある。	アルカリ骨材反応	コンクリート中の反応性シリカを含む骨材と、セメント等に含まれるアルカリ（ナトリウムイオンやカリウムイオン）が、水の存在下で反応してアルカリ珪酸塩を生成し、この膨張作用によりコンクリートにひび割れが生じ、コンクリート構造物としての健全性が損なわれる可能性がある。	化学的侵食	水分中の酸や硫酸塩等の塩類とセメント水和物の化学反応により、セメントペーストの溶解（酸）や、コンクリート表層の剥離・剥落（塩類）が生じ、コンクリート構造物としての健全性が損なわれる可能性がある。
経年劣化要因	概要								
塩分浸透	コンクリート中に塩化物イオンが浸透して鉄筋位置まで達すると、鉄筋表面の不動態被膜が失われ、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。腐食が進行すると酸化生成物による体積膨張からコンクリートにひび割れや剥離が生じ、コンクリート構造物としての健全性が損なわれる可能性がある。								
アルカリ骨材反応	コンクリート中の反応性シリカを含む骨材と、セメント等に含まれるアルカリ（ナトリウムイオンやカリウムイオン）が、水の存在下で反応してアルカリ珪酸塩を生成し、この膨張作用によりコンクリートにひび割れが生じ、コンクリート構造物としての健全性が損なわれる可能性がある。								
化学的侵食	水分中の酸や硫酸塩等の塩類とセメント水和物の化学反応により、セメントペーストの溶解（酸）や、コンクリート表層の剥離・剥落（塩類）が生じ、コンクリート構造物としての健全性が損なわれる可能性がある。								

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等は確認されていない。さらに、コンクリート躯体が直接海水に接触する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等は確認されていない。

したがって、塩分浸透の評価結果、目視点検の結果及び最も厳しい環境条件にある取水構造物の現状を踏まえると、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、玄海3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て膨張するため、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。

玄海3号炉は、運転開始後30年近く経過しており、定期的な建屋内部からの目視点検を実施しているが、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確認されていない。

また、使用している骨材（粗骨材・細骨材）については、別紙14に示すとおり、1987年から1991年にモルタルバー法（JASS5N T-201:1985）による反応性試験を実施しており、その結果、膨張率は「材令6ヶ月で0.1%以下」の判定基準、に対し無害と判定されている。

以上から、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等が生じる。

##### 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、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、玄海3号炉における地下水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) 玄海3号炉地下水水質試験における地下水採取位置及び試験結果

玄海3号炉周辺敷地内（図1）において採取した地下水について実施した地下水水質試験結果を表2に示す。

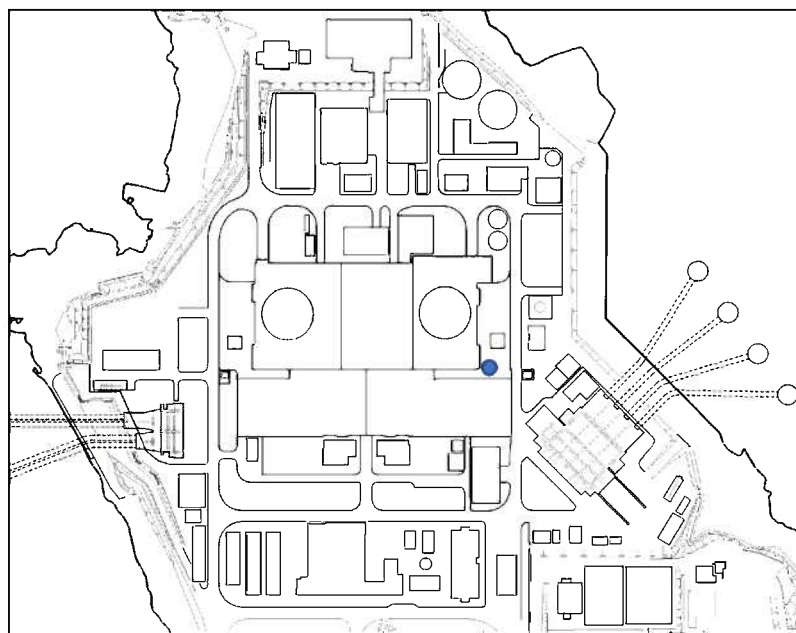


図1 玄海3号炉 地下水の採取位置

表2 玄海3号炉における地下水の水質試験結果

	pH	アンモニウムイオン (mg/l)	マグネシウムイオン (mg/l)	硫酸イオン (mg/l)	遊離炭酸 (mg/l)
採取位置	7.4	0.03 未満	45	110	9



(2) 地下水の水質試験結果の分析

玄海3号炉における地下水の水質試験結果（pH、アンモニウムイオン、マグネシウムイオン、硫酸イオン、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は表3に示すとおりであり、全ての項目において、EN206のいずれの環境区分にも該当しないことを確認した。

表3 玄海3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	環境区分との対比結果
	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
アンモニウムイオン [mg/ℓ]	$15 \leq X \leq 30$	$30 < X \leq 60$	$60 < X \leq 100$	該当区分なし
マグネシウムイオン [mg/ℓ]	$300 \leq X \leq 1000$	$1000 < X \leq 3000$	$3000 < X$	該当区分なし
硫酸イオン [mg/ℓ]	$200 \leq X \leq 600$	$600 < X \leq 3000$	$3000 < X \leq 6000$	該当区分なし
遊離炭酸 [mg/ℓ]	$15 \leq X \leq 40$	$40 < X \leq 100$	$100 < X$	該当区分なし

1) BS1, BS EN 206:2013+A2:2021: Concrete - Specification, performance, production and conformity

(3) 化学的侵食に関する経年劣化評価

玄海3号炉の地下水の水質試験結果に基づき、地下水成分の分析を行った結果、酸や硫酸塩に起因するコンクリートの経年劣化が進展する可能性は低いと考えられる。

また、対象構造物のうち海洋環境の影響を直接受ける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、地下水水質の分析や海水由来の侵食性物質に対して最も厳しい環境下にある取水構造物の現状を踏まえると、その他の地下埋設部コンクリートにおいても化学的侵食によるコンクリートの経年劣化が生じる可能性は低いと考えられる。

2.3 地下水に起因するコンクリート経年劣化評価に関するまとめ

地下水に起因するコンクリートの経年劣化要因が玄海3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玄海3号炉の環境条件に基づき評価を行った。

表4に示すとおり、各経年劣化要因が玄海3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低いことを確認した。

表4 地下水に起因するコンクリートの経年劣化要因に係る発生及び進展の可能性

経年劣化要因	経年劣化要因のスクリーニング結果		
	発生の可能性	進展の可能性	環境条件・根拠等
塩分浸透	○	×	地下水から塩化物イオンが供給されるため、発生の可能性はあるものの、塩分浸透による鉄筋腐食に起因する膨張性のひび割れ等は、建屋内部からの定期的な目視点検において確認されていない。 また、海水の影響を受ける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	×	×	建屋内部からの定期的な目視点検において、アルカリ骨材反応に起因する膨張性のひび割れ等は確認されていない。 また、コンクリート使用骨材については、モルタルバー法による反応性試験を実施し、有害でないことを確認している。
化学的侵食	×	×	玄海3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。

<p>タイトル</p>	<p>強度試験結果の詳細について</p>																																																										
<p>説明</p>	<p>強度試験結果の詳細を下表に示す。</p> <p style="text-align: right;">単位 (N/mm<sup>2</sup>)</p> <table border="1" data-bbox="440 434 1366 1966"> <thead> <tr> <th data-bbox="440 434 719 495"></th> <th data-bbox="719 434 948 495">圧縮強度</th> <th data-bbox="948 434 1158 495">平均圧縮強度</th> <th data-bbox="1158 434 1366 495">設計基準強度</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td data-bbox="440 495 719 707" rowspan="6">内部 コンクリート</td> <td data-bbox="719 495 948 533">75.6</td> <td data-bbox="948 495 1158 707" rowspan="6">64.4</td> <td data-bbox="1158 495 1366 707" rowspan="6">23.5</td> </tr> <tr> <td data-bbox="719 533 948 571">66.2</td> </tr> <tr> <td data-bbox="719 571 948 609">67.3</td> </tr> <tr> <td data-bbox="719 609 948 647">72.8</td> </tr> <tr> <td data-bbox="719 647 948 685">47.1</td> </tr> <tr> <td data-bbox="719 685 948 707">57.5</td> </tr> <tr> <td data-bbox="440 707 719 815" rowspan="3">原子炉格納 施設基礎</td> <td data-bbox="719 707 948 745">44.4</td> <td data-bbox="948 707 1158 815" rowspan="3">42.7</td> <td data-bbox="1158 707 1366 815" rowspan="3">23.5</td> </tr> <tr> <td data-bbox="719 745 948 784">43.2</td> </tr> <tr> <td data-bbox="719 784 948 815">40.6</td> </tr> <tr> <td data-bbox="440 815 719 1352" rowspan="14">原子炉補助 建屋</td> <td data-bbox="719 815 948 853">56.8</td> <td data-bbox="948 815 1158 1352" rowspan="14">43.0</td> <td data-bbox="1158 815 1366 1352" rowspan="14">29.4</td> </tr> <tr> <td data-bbox="719 853 948 891">30.0</td> </tr> <tr> <td data-bbox="719 891 948 929">41.2</td> </tr> <tr> <td data-bbox="719 929 948 967">32.8</td> </tr> <tr> <td data-bbox="719 967 948 1005">41.1</td> </tr> <tr> <td data-bbox="719 1005 948 1043">40.7</td> </tr> <tr> <td data-bbox="719 1043 948 1081">56.0</td> </tr> <tr> <td data-bbox="719 1081 948 1120">44.3</td> </tr> <tr> <td data-bbox="719 1120 948 1158">51.2</td> </tr> <tr> <td data-bbox="719 1158 948 1196">38.6</td> </tr> <tr> <td data-bbox="719 1196 948 1234">38.0</td> </tr> <tr> <td data-bbox="719 1234 948 1272">46.6</td> </tr> <tr> <td data-bbox="719 1272 948 1310">36.9</td> </tr> <tr> <td data-bbox="719 1310 948 1352">37.9</td> </tr> <tr> <td data-bbox="440 1352 719 1966" rowspan="14">原子炉周辺 建屋</td> <td data-bbox="719 1352 948 1391">45.8</td> <td data-bbox="948 1352 1158 1966" rowspan="14">49.0</td> <td data-bbox="1158 1352 1366 1966" rowspan="14">23.5</td> </tr> <tr> <td data-bbox="719 1391 948 1429">65.3</td> </tr> <tr> <td data-bbox="719 1429 948 1467">64.3</td> </tr> <tr> <td data-bbox="719 1467 948 1505">52.9</td> </tr> <tr> <td data-bbox="719 1505 948 1543">45.6</td> </tr> <tr> <td data-bbox="719 1543 948 1581">29.3</td> </tr> <tr> <td data-bbox="719 1581 948 1619">38.0</td> </tr> <tr> <td data-bbox="719 1619 948 1657">44.4</td> </tr> <tr> <td data-bbox="719 1657 948 1695">56.4</td> </tr> <tr> <td data-bbox="719 1695 948 1733">46.1</td> </tr> <tr> <td data-bbox="719 1733 948 1771">49.8</td> </tr> <tr> <td data-bbox="719 1771 948 1809">45.4</td> </tr> <tr> <td data-bbox="719 1809 948 1848">40.3</td> </tr> <tr> <td data-bbox="719 1848 948 1886">66.2</td> </tr> <tr> <td data-bbox="719 1886 948 1924">53.2</td> </tr> <tr> <td data-bbox="719 1924 948 1966">54.8</td> </tr> <tr> <td data-bbox="719 1966 948 2004">34.9</td> </tr> </tbody> </table>				圧縮強度	平均圧縮強度	設計基準強度	内部 コンクリート	75.6	64.4	23.5	66.2	67.3	72.8	47.1	57.5	原子炉格納 施設基礎	44.4	42.7	23.5	43.2	40.6	原子炉補助 建屋	56.8	43.0	29.4	30.0	41.2	32.8	41.1	40.7	56.0	44.3	51.2	38.6	38.0	46.6	36.9	37.9	原子炉周辺 建屋	45.8	49.0	23.5	65.3	64.3	52.9	45.6	29.3	38.0	44.4	56.4	46.1	49.8	45.4	40.3	66.2	53.2	54.8	34.9
	圧縮強度	平均圧縮強度	設計基準強度																																																								
内部 コンクリート	75.6	64.4	23.5																																																								
	66.2																																																										
	67.3																																																										
	72.8																																																										
	47.1																																																										
	57.5																																																										
原子炉格納 施設基礎	44.4	42.7	23.5																																																								
	43.2																																																										
	40.6																																																										
原子炉補助 建屋	56.8	43.0	29.4																																																								
	30.0																																																										
	41.2																																																										
	32.8																																																										
	41.1																																																										
	40.7																																																										
	56.0																																																										
	44.3																																																										
	51.2																																																										
	38.6																																																										
	38.0																																																										
	46.6																																																										
	36.9																																																										
	37.9																																																										
原子炉周辺 建屋	45.8	49.0	23.5																																																								
	65.3																																																										
	64.3																																																										
	52.9																																																										
	45.6																																																										
	29.3																																																										
	38.0																																																										
	44.4																																																										
	56.4																																																										
	46.1																																																										
	49.8																																																										
	45.4																																																										
	40.3																																																										
	66.2																																																										
53.2																																																											
54.8																																																											
34.9																																																											

単位 (N/mm <sup>2</sup> )			
タービン建屋 (タービン 架台)	53.1	47.2	23.5
	46.8		
	41.6		
	54.7	46.3	20.6
	43.5		
	40.6		
取水構造物	39.5	46.8	23.5
	41.7		
	41.5		
	54.1		
	62.7		
	56.8		
	43.6		
	55.3		
26.3			