

# 運転期間延長認可制度と コンクリート構造物の特別点検

平成30年 8月23日

関西電力株式会社

北川 高史



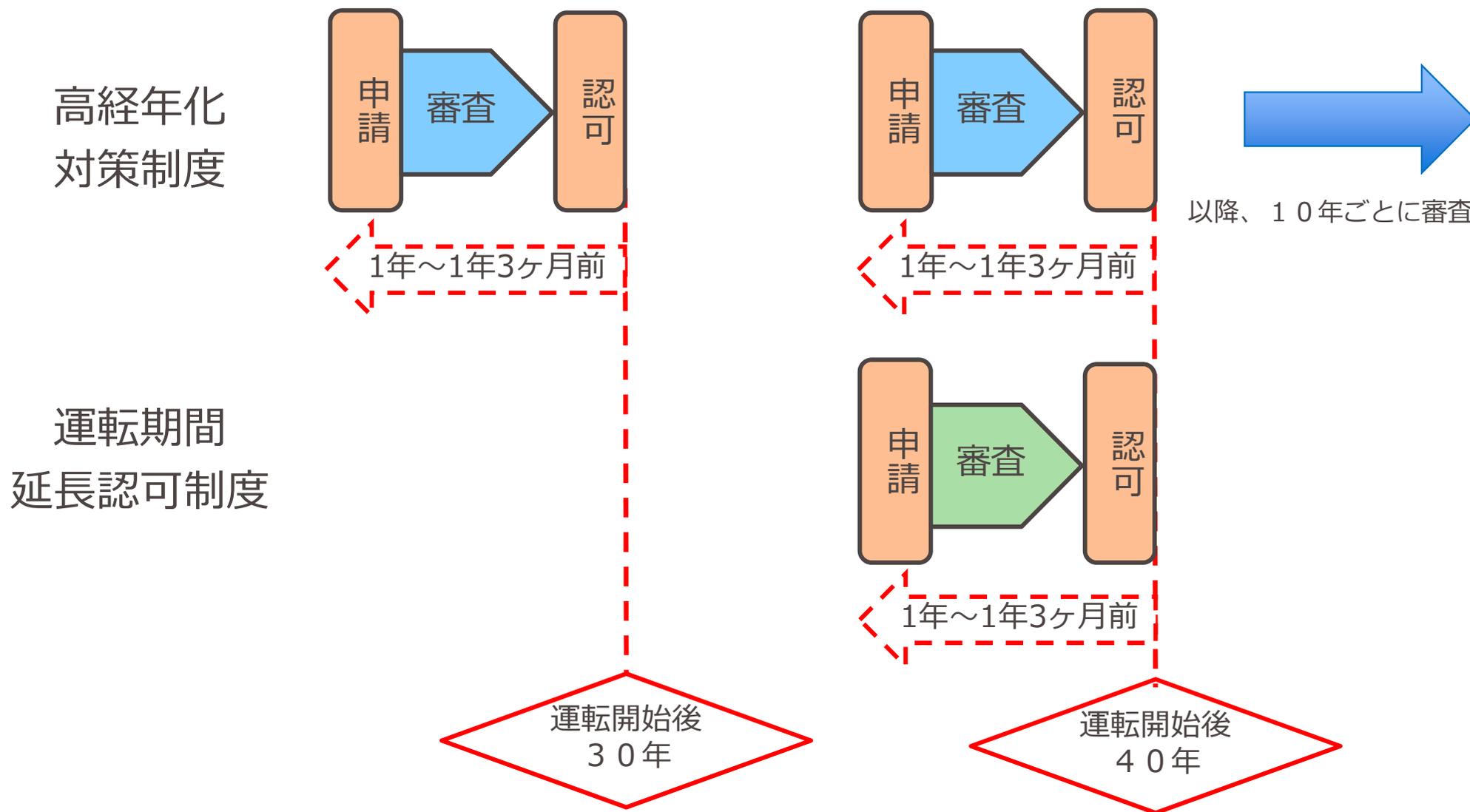
## ■ 高経年化対策制度

- ・ 運転開始後 30 年を経過する原子力発電所について、10 年ごとに機器・構造物の劣化評価および保守管理方針の策定を実施

## ■ 運転期間延長認可制度

- ・ 2013 年に改正された原子炉等規制法により制定
- ・ 原子力発電所を運転できる期間を原則 40 年とし、その満了までに認可を受けた場合には、1 回に限り運転期間の延長が認められる
- ・ 運転期間延長の上限は 20 年
- ・ 運転期間延長認可の申請に当たっては、以下の 3 つが必要
  - ①劣化事象に係る特別点検の実施
  - ②延長期間における劣化に関する技術的評価
  - ③延長期間における保守管理方針の策定

# 1. 原子力発電所の高経年化対策に関する制度



## ■最新の規制動向

- ・技術評価書（PLM、運転延長）は1本化（H29.8.7 施行）
- ・申請時期の始期の規定を削除（H29.7.26 原子力規制委員会）

## 2. 運転期間延長認可制度に関する審査基準・ガイド

### ■ 運転期間延長の審査基準

評価対象事象又は評価事項		要求事項
コンクリートの強度低下	熱	○評価対象部位のコンクリート温度が制限値（貫通部は90℃、その他の部位は65℃）を超えたことがある場合は、耐力評価を行い、その結果、当該部位を構成する部材又は構造体の耐力が設計荷
	放射線照射	○評価対象部位の累積放射線照射量が、コンクリート強度に影響を及ぼす可能性のある値を超えている又は超える可能性が認められる場合は、耐力評価を行い、その結果、当該部位を構成する部材又は構造体の耐力が設計荷重を上回ることを。
	中性化	○評価対象部位の中性化深さが、鉄筋が腐食し始める深さまで進行しているか又は進行する可能性が認められる場合は、耐力評価を行い、その結果、当該部位を構成する部材又は構造体の耐力が設
	塩分浸透	○評価対象部位に塩分浸透による鉄筋腐食により有意なひび割れが発生しているか又は発生する可能性が認められる場合は、耐力評価を行い、その結果、当該部位を構成する部材又は構造体の耐力が設計荷重を上回ることを。
	アルカリ骨材反応	○評価対象部位にアルカリ骨材反応による有意なひび割れが発生している場合は、耐力評価を行い、その結果、当該部位を構成する部材又は構造体の耐力が設計荷重を上回ることを。
	機械振動	○評価対象機器のコンクリート基礎への定着部周辺コンクリート表面に機械振動による有意なひび割れが発生している場合は、耐力評価を行い、その結果、当該部位を構成する部材又は構造体の耐力が設計荷重を上回ることを。
	凍結融解	○評価対象部位に凍結融解による有意なひび割れが発生している場合は、耐力評価を行い、その結果、当該部位を構成する部材又は構造体の耐力が設計荷重を上回ることを。
コンクリートの遮蔽能力低下	熱	○中性子遮蔽のコンクリートの温度が88℃又はガンマ線遮蔽のコンクリート温度が177℃を超えたことがある場合は、評価を行い、その結果、当該部位を構成する部材又は構造体の遮蔽能力が原子炉設置（変更）許可における遮蔽能力を下回らないこと。
鉄骨の強度低下	腐食	○評価対象部位に腐食による断面欠損が生じている場合は、耐力評価を行い、その結果、当該部位を構成する部材又は構造体の耐力が設計荷重を上回ることを。
	風などによる疲労	○評価対象部位に風などの繰り返し荷重による疲労破壊が発生している又は発生する可能性が認められる場合は、耐力評価を行い、その結果、当該部位を構成する部材又は構造体の耐力が設計荷重

### ■ 特別点検（点検項目）

“申請に至るまでの間の運転に伴い生じた原子炉その他の設備の劣化の状況の把握のための点検”

- ① 運転開始後 3 5 年を経過する日以降に実施するもの
- ② 対象の機器・構造物、その対象の部位、着目する劣化事象および点検方法が下表に該当するもの

対象の機器・構造物	対象の部位	着目する劣化事象	点検方法／点検項目
原子炉格納容器			
プレストレストコンクリート製原子炉格納容器	コンクリート	強度低下及び遮蔽能力低下	○採取したコアサンプル等による強度、遮蔽能力、中性化、塩分浸透及びアルカリ骨材反応の確認
○安全機能を有するコンクリート構造物並びに安全機能を有する系統及び機器を支持するコンクリート構造物 ○常設重大事故等対処設備に属するコンクリート構造物及び常設重大事故等対処設備に属する機器を支持するコンクリート構造物	コンクリート	強度低下及び遮蔽能力低下	○採取したコアサンプル等による強度、遮蔽能力、中性化、塩分浸透及びアルカリ骨材反応の確認 ○点検項目の詳細は別紙のとおり

“採取したコアサンプル等による強度、遮蔽能力、中性化、塩分浸透、アルカリ骨材反応の確認”（PCCVも同様）

“特別点検の結果を踏まえた劣化状況評価”

## ■ 特別点検（点検箇所）

“対象の部位の中で点検項目に照らして使用材料及び使用環境条件が最も厳しくなる場所から採取したコアサンプルによる確認”

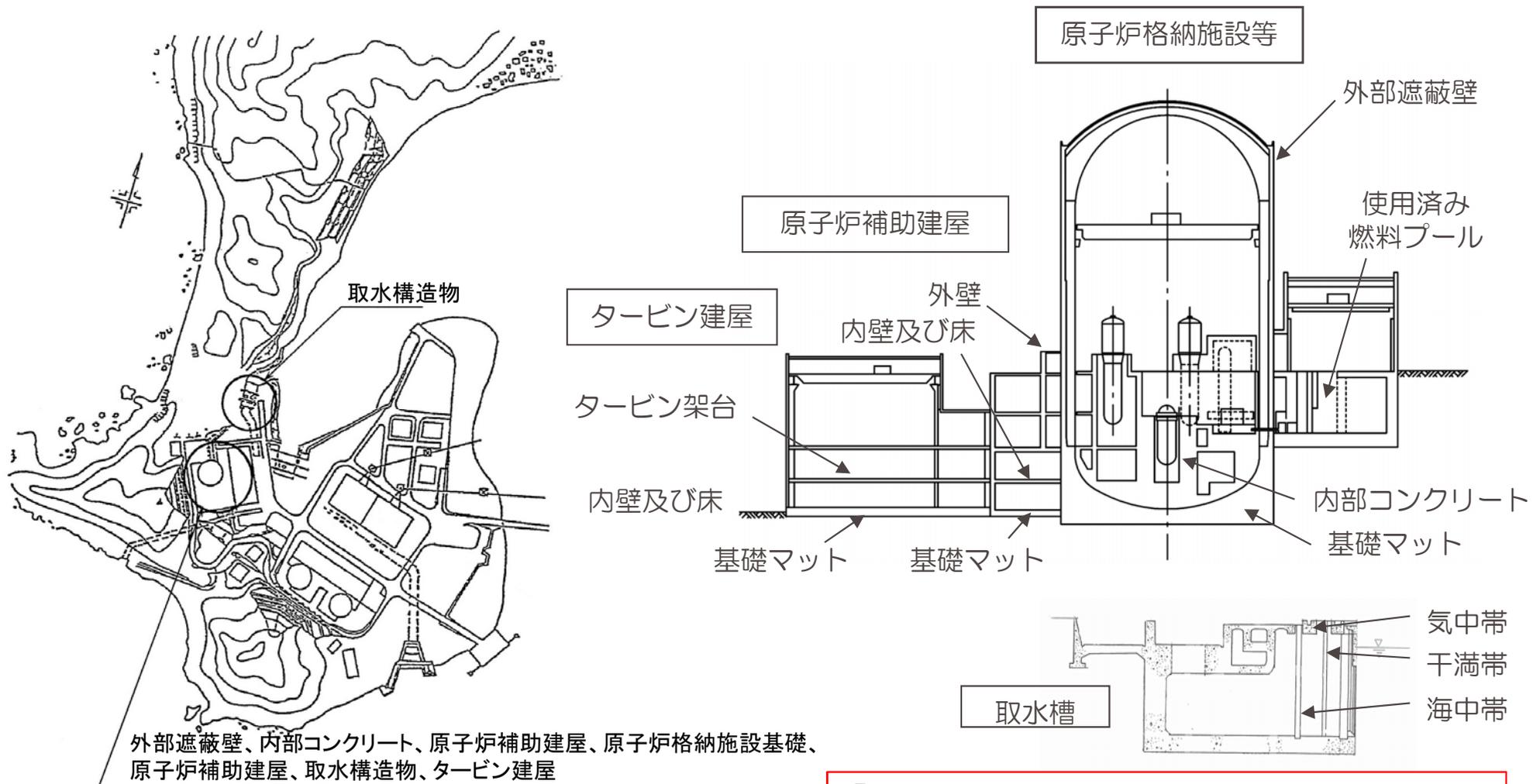
対象のコンクリート構造物	対象の部位	点検項目					
		強度	遮蔽能力*1	中性化深さ*2	塩分浸透*2,3	アルカリ骨材反応	
原子炉格納施設等	外部遮蔽壁	○	○	○	○	○	
	内部コンクリート	○	○	○	-	○	
	基礎マット	○	-	○	-	○	
原子炉補助建屋	外壁	○	○	○	○	○	
	内壁及び床	○	○	○	-	○	
	使用済み燃料プール	○	-	○	-	○	
	基礎マット	○	-	○	-	○	
タービン建屋	外壁	○	-	○	○	○	
	内壁及び床	○	-	○	-	○	
	基礎マット	○	-	○	-	○	
取水槽	海中帯	○	-	○	○	○	
	干満帯	○	-	○	○	○	
	気中帯	○	-	○	○	○	
安全機能を有する系統及び機器又は常設重大事故等対処設備に属する機器を支持する構造物	原子炉格納施設内	-	○	-	○	-	○
	原子炉補助建屋内	-	○	-	○	-	○
	タービン建屋内 (タービン架台を含む。)	-	○	-	○	-	○
上記以外の構造物(安全機能を有する構造物又は常設重大事故等対処設備に属する構造物・安全機能を有する系統及び機器又は常設重大事故等対処設備に属する機器を支持する構造物に限る。)	-	○	○	○	○	○	

- \* 1：工事計画認可申請書において、遮蔽能力(乾燥単位容積質量)が記載されている範囲について確認する。
- \* 2：コアサンプルによる確認と同等の方法(ドリル法等)によることもできる。また、中性化深さを確認する場所は、塗装等のコンクリート表面被覆のない場所を選定する。
- \* 3：海塩粒子の付着等によって塩分浸透の可能性がある場所(海風の直接当たる外壁等)及び取水構造物について

# 3. 特別点検計画

以降は高浜 1, 2号機、美浜 3号機の実績について述べる

## ■ 点検対象構造物の概要



代表構造物 配置図

### 【コアサンプルの採取】

- ・ 高浜 1, 2号機 : 約 300 本弱
- ・ 美浜 3号機 : 約 150 本弱

#### ■ 点検計画

「特別点検方法」・「点検箇所」は、事業者にて選定が必要となる。

#### ■ 特別点検方法の選定

特別点検方法を選定するにあたり、以下の①～③を踏まえ検討をした。

① 点検項目に適したJIS規格および各種学会規格

② JIS規格および各種学会規格を一部変更する場合、変更箇所の妥当性を適切に評価

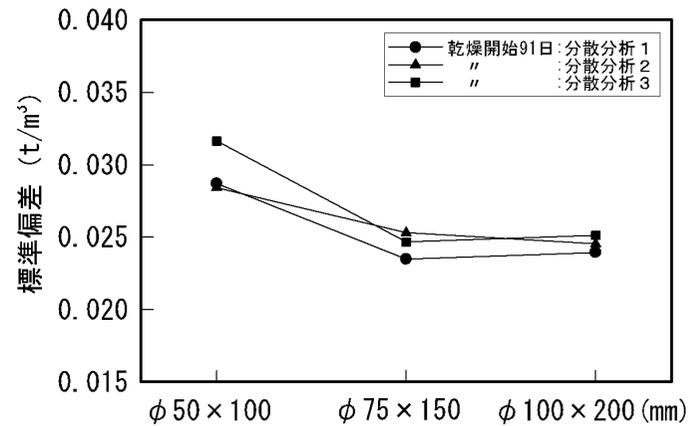
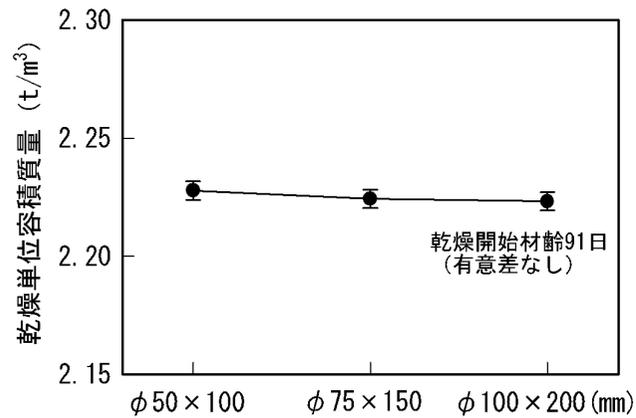
③ 点検項目に適した規格が存在しない場合、最新の知見を踏まえた最適な方法を検討

選定

点検項目	点検方法
強度	JIS A 1108 コンクリートの圧縮強度試験方法
遮蔽能力	JASS5N T-601 コンクリートの乾燥単位容積質量試験方法に準じた方法
中性化深さ	JIS A 1152 コンクリートの中性化深さの測定方法
塩分浸透	JIS A 1154 硬化コンクリート中に含まれる塩化物イオンの試験方法
アルカリ骨材反応	「原子力用コンクリートの反応性骨材の評価方法の提案 (JNES-RE-2013-2050) 」に基づく方法

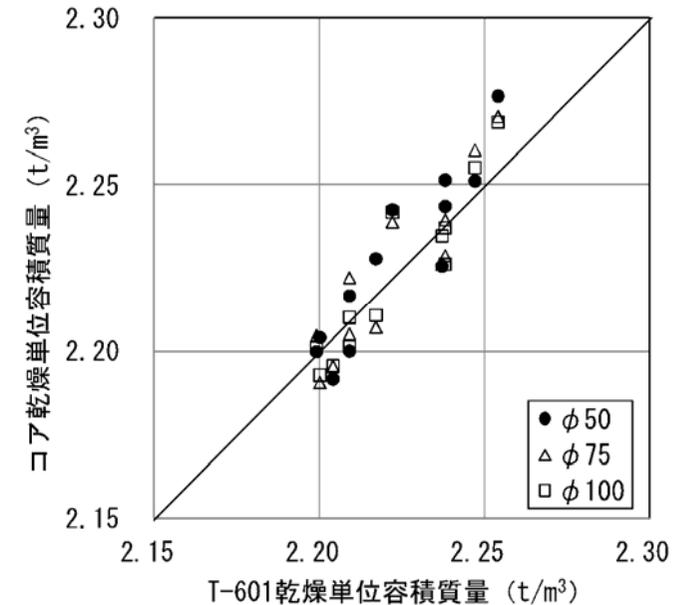
## ■ 遮蔽能力の点検方法

- JASS5N T-601はRC工事品質管理におけるテストピース(φ150,100)での試験規格
- 実構造物模擬の壁試験体から採取したコアサンプルに適用可能かを実験により検証
- 経φ100,75,50の3水準（実構造物の鉄筋間隔が密でφ100は鉄筋切断リスク有り）



コア寸法と乾燥単位容積質量の関係

コア寸法と標準偏差の関係



JASS5NT-601規格に基づいた試験体による乾燥単位容積質量とコアサンプルによる乾燥単位容積質量の関係

### <検証結果>

#### ① 当該規格のコアサンプルへの適用

- テストピースとコアサンプルで同様の乾燥単位容積質量が得られることを確認

#### ② 試験体の大きさの変更

- φ100, φ75, φ50のコアサンプルの乾燥単位容積質量に違いは見られない
- ただし、φ50のコアサンプルは標準偏差（ばらつき）が大きいため、φ75の大きさまでは変更可能と判断

## ■ 点検箇所を選定（コアサンプル採取箇所）

**使用材料：**建設時試験記録等により材料種・物性値等を確認→部位内で大きな違いはない

**使用環境条件：**事前に環境測定（温度・湿度・二酸化炭素濃度・飛来塩分量）を実施

・点検（採取）箇所は、点検項目に対する劣化メカニズムや影響要素などを踏まえて選定。

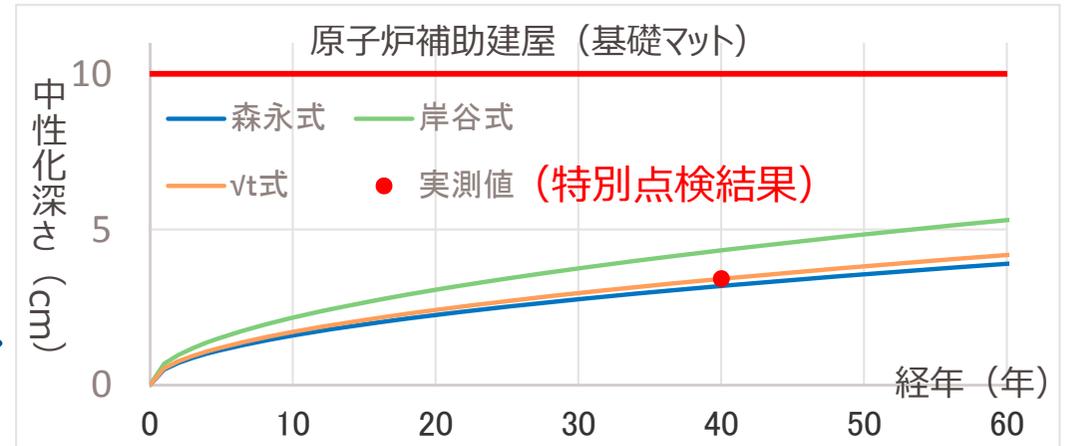
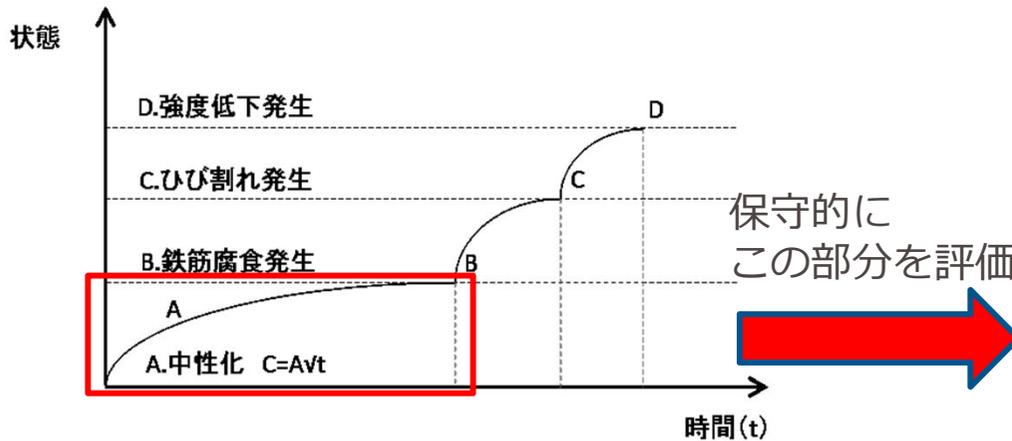
点検項目	点検箇所を選定方法
①強度	熱、放射線照射、中性化、塩分浸透等、強度低下要因は多岐に渡るため、対象構造物の範囲で対象の部位ごとに異なる劣化要因による強度低下が考えられる場所。
②遮蔽能力	工事計画認可申請書において、乾燥単位容積質量が記載されている範囲で、骨材材料試験記録に基づきコンクリート密度が最も小さいと考えられる箇所を選定。 (乾燥単位容積質量試験選定により、熱による水分逸散などの環境条件の影響はなし)
③中性化深さ	<u>温度、湿度および二酸化炭素濃度</u> の環境影響が最も大きい範囲で塗装等表面被覆が無い箇所。 (ただし対象部位の範囲で全て塗装を施している場合を除く) 環境影響の比較にあたっては、環境条件をパラメータとする評価式（森永式）を引用。 $x = \sqrt{C} \cdot (1.391 - 0.017 \cdot RH + 0.022T) \cdot \frac{1}{\sqrt{5}} \cdot 2.44 \cdot R \cdot (4.6 \cdot w/c/100 - 1.76) \cdot \sqrt{t}$ <div style="display: flex; align-items: center; justify-content: center;"> <div style="margin-right: 10px;"> <math>\left[ \begin{array}{l} X: \text{中性化深さ(sm)} \\ RH: \text{湿度(\%)} \end{array} \right.</math> </div> <div style="margin-right: 10px;"> <math>\left. \begin{array}{l} C: \text{CO}_2(\%) \\ T: \text{温度(}^\circ\text{C)} \end{array} \right]</math> </div> </div>
④塩分浸透	測定した <u>飛来塩分量</u> およびコンクリート表面塩分量から、最も塩分浸透が考えられる箇所
⑤アルカリ骨材反応	外部からのアルカリ供給源である塩分量および水分供給源である <u>湿度</u> 等を考慮し、最もアルカリ骨材反応の進展が考えられる場所

・細部の選定にあたっては非破壊試験（反発度）結果を活用

# 4. 特別点検結果を踏まえた劣化状況評価

## ■ 中性化

- ・ 環境測定結果、塗装有無、特別点検結果より評価点を選定
- ・ 複数の進展予測式(実測値に基づく√t式含む) による中性化進行予測評価で長期健全性を確認



運転開始後60年後時点と鉄筋が腐食し始める時点の中性化深さの比較 (高浜 1号炉)

	中性化深さ(cm)			鉄筋が腐食し始める時の中性化深さ※2 (cm)	判定	備考 (強度試験結果)	
	測定値 (調査時点の運転開始後経過年)	推定値※1				平均圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )	設計基準強度 (N/mm <sup>2</sup> )
		調査時点※2 (中性化速度式)	運転開始後60年経過時点 (中性化速度式)				
外部遮蔽壁 (屋内面)	0.2 (40年)	3.8 (森永式)	<b>4.7 (森永式)</b>	<b>7.0</b>	<b>OK</b>	—	—
原子炉補助建屋 (基礎マット)	3.4 (40年)	4.3 (岸谷式)	<b>5.3 (岸谷式)</b>	<b>10.0</b>	<b>OK</b>	22.6	≥ 17.7
取水構造物 (気中帯)	0.1 (40年)	2.2 (岸谷式)	<b>2.7 (岸谷式)</b>	<b>8.75</b>	<b>OK</b>	28.7	≥ 23.5

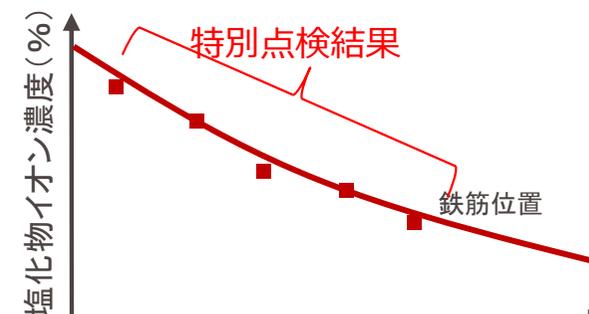
※1：岸谷式、森永式および実測値に基づく√t式による評価結果のうち最大値を記載

※2：屋内（外部遮蔽壁、原子炉補助建屋）はかぶり厚さに2cmを加えた値、屋外（取水構造物）はかぶり厚さの値

# 4. 特別点検結果を踏まえた劣化状況評価

## ■ 塩分浸透

- ・ 塩分供給環境の観点より評価点を選定
- ・ 特別点検結果により塩分浸透の拡散係数等を推定し、鉄筋位置の塩化物イオン量を予測
- ・ 森永式により経年毎の鉄筋腐食速度を算出し、鉄筋腐食減量予測評価で長期健全性を確認



表面からの深さ(mm)  
特別点検結果から拡散係数等を推定

運転開始後60年経過時点と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の比較（1号炉）

	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 濃度および量  上段(%) 下段(kg/m <sup>3</sup> )	鉄筋の腐食減量(×10 <sup>-4</sup> g/cm <sup>2</sup> )			判定	参考:強度試験結果	
			調査時点	運転開始後 60年経過時点	かぶりコンク リートにひび 割れが発生 する時点		平均 圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )	設計基準 強度 (N/mm <sup>2</sup> )
取水構造物 (気中帯)	2015年 (40年)	0.05 (1.24)	3.5	<b>5.8</b>	<b>88.1</b>	<b>OK</b>	—	—
取水構造物 (干満帯)	2015年 (40年)	0.05 (1.23)	0.5	<b>1.2</b>	<b>88.1</b>	<b>OK</b>	31.0	≥ 23.5
取水構造物 (海中帯)	2015年 (40年)	0.33 (7.83)	7.2	<b>14.6</b>	<b>90.1</b>	<b>OK</b>	45.5	≥ 23.5
非常用海水路	2015年 (40年)	0.10 (2.36)	2.6	<b>4.6</b>	<b>90.1</b>	<b>OK</b>	37.5	≥ 23.5

※ 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)  
により、かぶり厚さおよび鉄筋径を用いて、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腐食減量を算出

### ■ 遮蔽能力

- 特別点検の乾燥単位容積質量の試験結果は、 $2.15\sim 2.21\text{kg/cm}^3$  (T1例)で遮蔽計算に用いる値を満足している。
- 乾燥状態での保守的な値であり、原子力発電所の長期健全性を確認できるものである。

### ■ アルカリ骨材反応

- 実機構造物は、運転開始以降、アルカリ骨材反応に起因するひび割れは認められていない。
- 特別点検のコアサンプルによる実体顕微鏡観察により、コンクリート構造物の健全性に影響を与えるような反応は確認できなかった。
- アルカリ骨材反応に対して、健全性が確認できる。



実体顕微鏡観察事例

# 4. 特別点検結果を踏まえた劣化状況評価

## ■ 強度

代表高浜1号機

対象のコンクリート構造物	対象の部位	平均圧縮強度 [N/mm <sup>2</sup> ]	判定	設計基準強度 [N/mm <sup>2</sup> ]
原子炉格納施設等	外部遮蔽壁	37.9	≧	20.6
	内部コンクリート	25.5	≧	20.6
	基礎マット	35.4	≧	20.6
原子炉補助建屋	外壁	28.5	≧	17.7
	内壁及び床	20.7	≧	17.7
	使用済み燃料プール	31.2	≧	17.7
	基礎マット	28.5 22.6	≧ ≧	17.7 17.7
タービン建屋	内壁及び床	29.0	≧	17.7
	基礎マット	42.7	≧	17.7
	タービン架台	23.7	≧	17.7
取水槽	海中帯	45.5	≧	23.5
	干満帯	31.0	≧	23.5
	気中帯	28.7	≧	23.5
上記以外の構造物	非常用ディーゼル発電用 燃料油タンク基礎 (配管トレンチ含む)	30.4	≧	23.5
	復水タンク基礎 (配管トレンチ含む)	32.1	≧	23.5
	非常用海水路	37.5	≧	23.5

- ・ 熱、放射線照射は内部コンクリート（1次遮蔽壁）を対象に解析（温度分布、累積照射量）による劣化状況評価を実施しているが、現状把握として、特別点検で1次遮蔽壁のコア強度を確認
- ・ 上記も含め、全ての点検箇所において、設計基準強度を上回っていることを確認

## ■結果

- 運転期間延長認可制度に基づき、国内で初めて運転開始後40年を経過する原子力発電所のコンクリート建造物の特別点検を実施した。
- 特別点検の計画にあたっては、各点検項目（「強度」「中性化深さ」「塩分浸透」「遮蔽能力」「アルカリ骨材反応」）ごとに合理的な点検方法、条件の厳しい点検箇所を検討のうえ、コアサンプルを採取し、点検を実施した。
- 特別点検結果により、現状が健全であることを把握するとともに、点検結果を踏まえた劣化状況評価により、長期健全性を確認した。
- 特別点検による詳細な点検で経年プラントの健全性を確認できたことにより、通常の維持管理が有効であったと考えられる。

## ■今後の課題と展望

- 特別点検等実建造物データの積み重ねにより、原子力プラントのコンクリート建造物が有する性能水準を示していきたい。
- 原子力プラント特有条件での健全性評価等において、電力共通研究、廃炉材研究、諸事業による研究成果等、新たな知見を活用する。
- 上記により、点検や評価において、更なる説明性の向上や合理性の確保に努めていきたい。

END

