

川内原子力発電所 1, 2号炉  
運転期間延長認可申請  
(審査会合における指摘事項の回答)

2023年 5月16日

九州電力株式会社



No.	日時	指摘事項の内容	回答
1	2022年 11月15日	コンクリート構造物における、遅延膨張性のアルカリ骨材反応に対する潜在性について今後説明すること。	2023年1月24日 回答済
2	2022年 11月15日	評価対象機器・構造物はいつ設工認を受けたのか、いつ運開したのか、具体的な日付を今後説明すること。	2023年1月24日 回答済
3	2022年 11月15日	経年劣化傾向の評価について、30年目と40年目の評価の差異を個別事象の説明時に説明すること。	個別事項説明時に 別途説明予定
4	2022年 11月15日	30年目の長期施設管理方針の有効性評価について、評価内容を個別事象ごとに今後説明すること。	個別事項説明時に 別途説明予定
5	2022年 11月15日	国外の運転経験の抽出元について、評価書本文にはPWR情報検討会等についての記載がないため、記載を適正化すること。	2023年1月24日 回答済
6	2022年 11月15日	大飯発電所3号機加圧器スプレイライン配管溶接部における事象を踏まえた評価が評価書に記載されていないため、新知見として評価書または施設管理方針に適切に反映すること。	2023年1月24日 回答済
7	2023年 1月24日	ノズルコーナー一部のECTについて、JEAG4217では、原則基準感度の20%以上の指示を抽出するとされているが、今回、これと異なる基準を用いたことについて、その妥当性を説明すること。	次回以降 説明予定
8	2023年 1月24日	塗膜の劣化に関する通常点検のうち、リングガード部について、今後実施する具体的な点検について今後説明すること。	次回以降 説明予定
9	2023年 1月24日	【No. 1 関連】コンクリート構造物のアルカリ骨材反応の評価について、細骨材の一部に遅延膨張性の反応性鉱物が認められていることから、促進膨張試験（アルカリ溶液浸漬法）を実施しているのであれば、その結果を提示すること。	2023年3月14日 回答済

No.	日時	指摘事項の内容	回答
10	2023年 3月14日	<p>平均圧縮強度について、取水構造物は1号炉・2号炉ともに干満帯の値が、海中帯、気中帯に比べて相対的に低い。また、原子炉補助建屋は2号炉の内壁及び床の値が、その他の部位に比べて相対的に低い。これらの理由について、過去の破壊試験及び非破壊試験の結果も整理して、説明すること。</p> <p>(強度以外でも過去の試験結果との比較が説明できるものがあれば説明すること)</p>	P3～14

## 1. 考察概要(1/2)

- ・2023年3月14日の審査会合「資料1-3-1」P34で示した、コンクリート構造物の平均圧縮強度について、以下の赤枠で示す部位で相対的な強度差が確認された。今回、相対的な強度差が確認された要因について、過去の試験結果とも比較しながら考察を行う。

対象コンクリート構造物	対象の部位	1号炉 平均圧縮強度 ※1 (N/mm <sup>2</sup> )	2号炉 平均圧縮強度 ※1 (N/mm <sup>2</sup> )	備考※2
原子炉格納施設等	外部遮蔽壁	44.7	47.0	22.1
	内部コンクリート	43.0	46.8	22.1
	基礎マット	36.3	51.0	22.1
原子炉補助建屋	外壁	50.4	49.3	22.1
	内壁及び床	43.4	29.9	22.1
	基礎マット	51.0	40.8	22.1
	平均※3	48.3	40.0	22.1
タービン建屋	内壁及び床	39.7	36.7	22.1
	基礎マット	44.7	43.0	17.7
取水構造物	海中帯	38.5	38.7	23.5
	干満帯	29.9	32.0	23.5
	気中帯	45.4	43.7	23.5
	平均※3	37.9	38.1	23.5

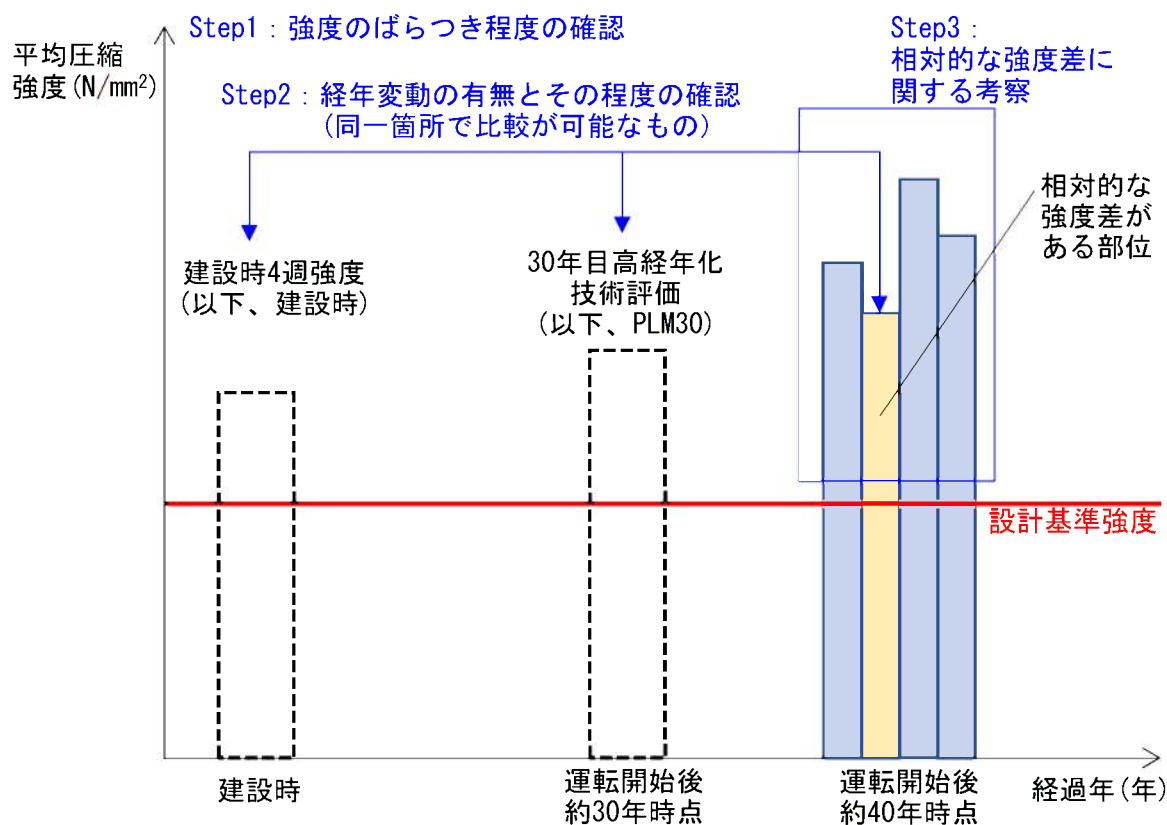
※1 コアサンプル3本の平均値

※2 設計基準強度(N/mm<sup>2</sup>)

※3 対象コンクリート構造物における各対象部位の平均圧縮強度の平均値

## 1. 考察概要 (2/2)

- ・ 一般にコンクリートは供用期間中に水和反応の進行により、強度増進が生じているものと推察されている※。
- ・ 今回、コンクリート構造物の劣化状況評価（以下、PLM40）において、約40年経過した時点で採取したコアサンプルによる強度試験の結果、全ての部位で設計基準強度を満足していることが確認できたものの、相対的な強度差が確認されたことから、以下のステップで考察を行った。



考察ステップのイメージ図

**Step1: 強度のばらつき程度の確認 (P3)**  
 一般に、コンクリート構造物（既設原子力発電所及び一般構造物）の強度がどの程度のばらつきを有しているか、川内原子力発電所におけるコンクリート強度のばらつきがどの程度かを確認する。



**Step2: 経年変動の有無とその程度の確認 (P4, 5)**  
 相対的な強度差がある部位について、過去の強度試験結果（建設時もしくはPLM30）と比較し、経年変動の有無とその程度について確認する。



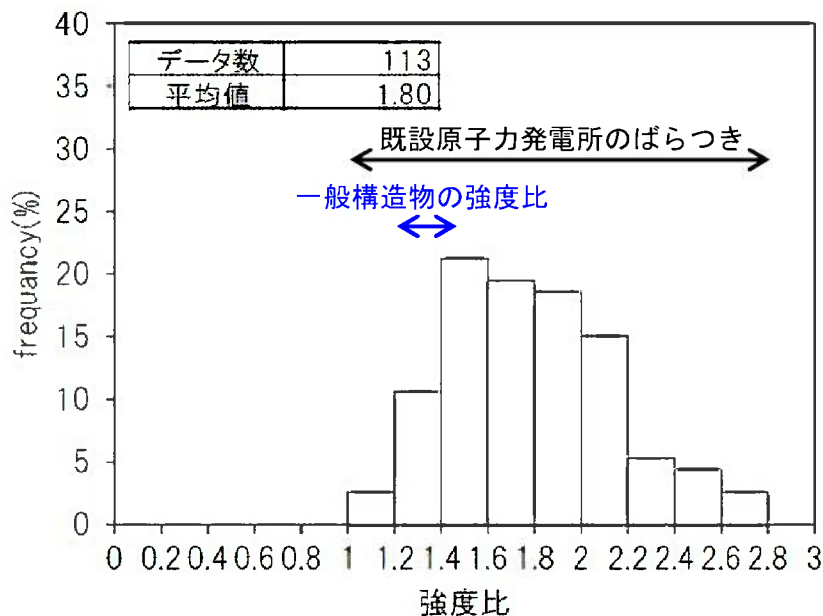
**Step3: 相対的な強度差に関する考察 (P6~9)**  
 強度に変動を及ぼす要因を整理し、相対的な強度差が確認された部位毎に、その要因を考察する。

参考  
 強度同様、PLM30と比較が可能な劣化要因を整理し、比較が可能な劣化要因については経年変動の有無とその程度を確認する。

※ 土木学会原子力土木委員会 地中構造物の耐震性能照査高度化小委員会「原子力発電所屋外重要土木構造物の耐震性能照査指針[2021年版] (技術資料XⅢ)」 (以下、「技術資料XⅢ」)

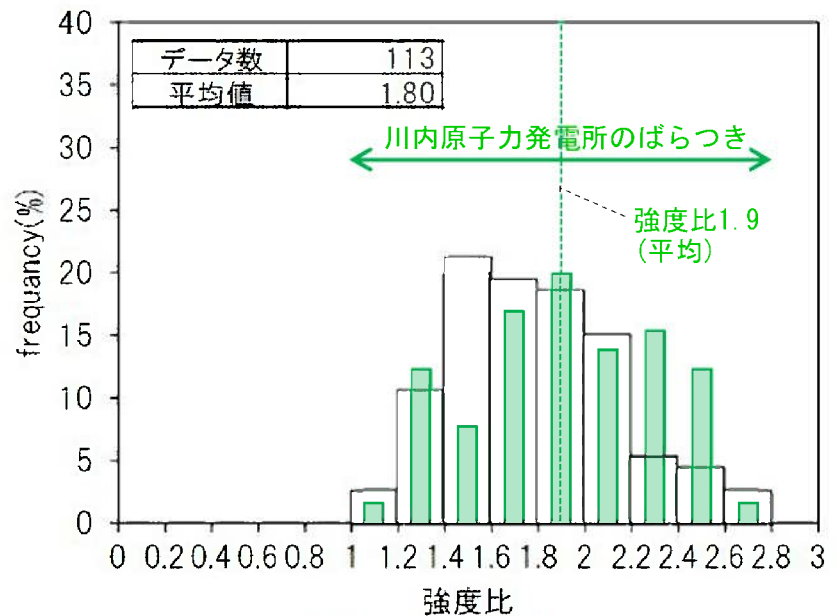
## 2. Step1 : 強度のばらつき程度の確認

- ・ 既設原子力発電所を対象にした調査結果に基づくと、強度比（設計基準強度に対する比）は1.0～2.8程度の範囲でばらつきがあり、その平均値は1.8と報告されている※。
- ・ 一方、一般構造物の強度比は平均で1.3程度とされており、既設原子力発電所は品質管理に十分な配慮がなされていることから、その強度比は一般構造物と比較して高い傾向にある※
- ・ 川内原子力発電所における強度比は1.0～2.8程度の範囲でばらつきがあり、その平均値は1.9で、既設原子力発電所と同様の傾向を示している。また、相対的な強度差が確認された部位における強度比は平均で1.3程度で、その値は一般構造物の平均と同等であり、設計基準強度に対して、十分な強度を有していることがわかる。



既設原子力発電所の強度比の分布※

川内原子力  
発電所の  
結果を追記



(■ : 川内原子力発電所の各部位の強度比)

川内原子力発電所の強度比の分布※

※「技術資料XⅢ」（図は一部追記）

### 3. Step2 : 経年変動の有無とその程度の確認 (1/2)

#### (1) 原子炉補助建屋 (内壁及び床) (2号炉)

- 相対的な強度差が確認された「原子炉補助建屋 (内壁及び床) (2号炉)」については、下図のとおり、1号炉とあわせて、建設時<sup>※1</sup>における強度試験結果との比較を行った。

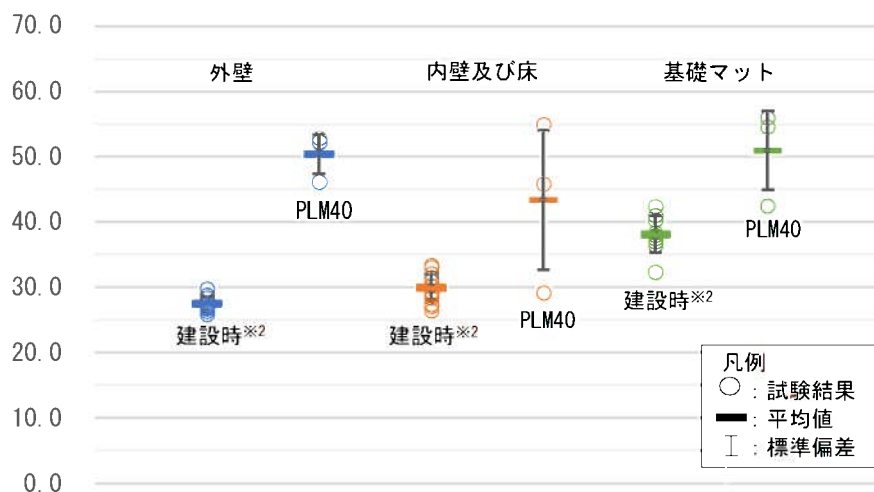
※1 原子炉補助建屋 (内壁及び床) については、PLM30とPLM40でコアサンプルを採取している部位が異なることから、建設時の品質管理記録を参考に、建設時との比較を実施

#### (確認結果)

- 内壁及び床 (2号炉) (下図、破線内) については、平均値の比較において若干の増進傾向が確認された。
- 上記以外の部位についても、平均値の比較において増進傾向が確認された。

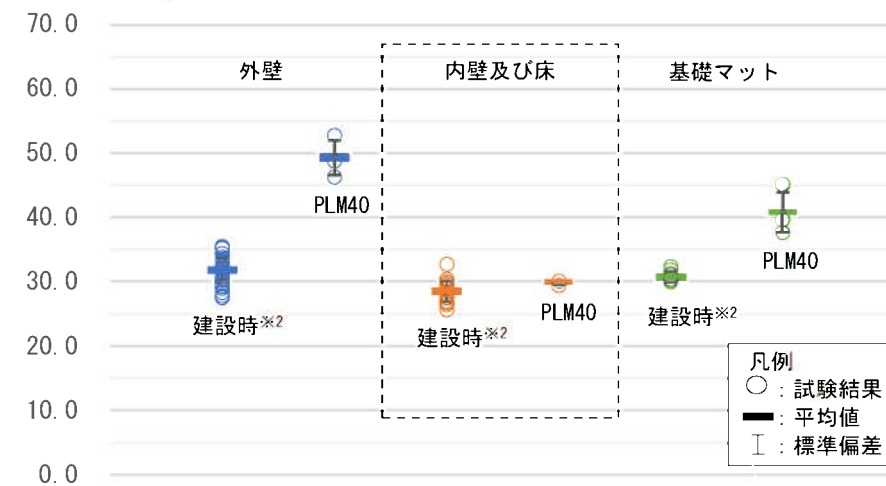
#### (1号炉)

圧縮強度 (N/mm<sup>2</sup>)



#### (2号炉)

圧縮強度 (N/mm<sup>2</sup>)



強度試験の経年変動確認結果 (原子炉補助建屋)

※2 今回のコアサンプル採取箇所と同一箇所の可能性がある、建設時の試験結果を全て参考値として整理

### 3. Step2 : 経年変動の有無とその程度の確認 (2/2)

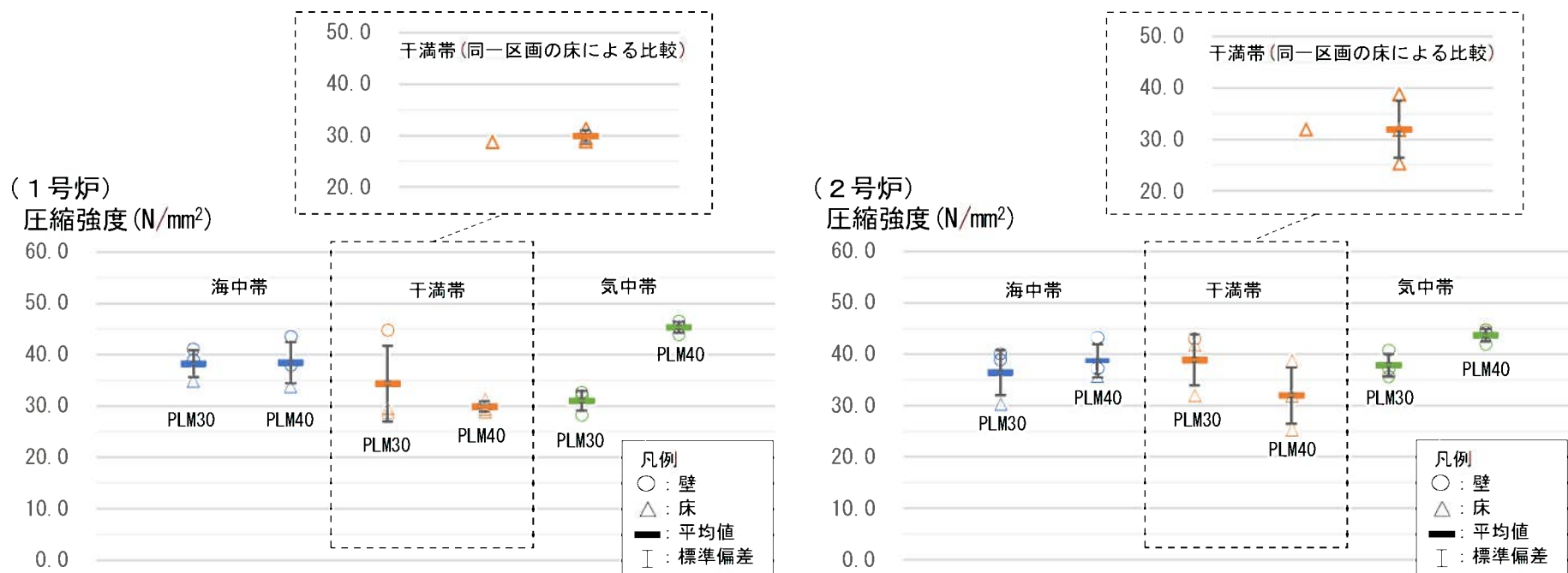
#### (2) 取水構造物(干満帯) (1, 2号炉)

- 相対的な強度差が確認された「取水構造物(干満帯)」について、下図のとおり、PLM30 ※における強度試験結果との比較を行った。

※取水構造物については、建設時の圧縮強度試験結果を示す記録が保存期間切れのため保管されていないことから、PLM30との比較を実施

#### (確認結果)

- 海中帯及び気中帯については、コアサンプル採取箇所は同一の部位であり、平均値及び標準偏差の比較において増進傾向が確認された。
- 干満帯(下図、破線内)については、異なる部位を含めた平均値の比較では低下傾向があるように見えるが、同一区画の床に着目して比較した結果、ばらつきはあるものの概ね同等の結果であることが確認された(1号炉は若干の増進傾向が確認)。



強度試験の経年変動確認結果 (取水構造物)



### 4. Step3 : 相対的な強度差に関する考察 (1/4)

#### (1) コンクリート強度の変動に影響を及ぼす主な要因

- ・コンクリート強度の変動に影響を及ぼす主な要因を下表※に示す。使用材料、製造、運搬、施工については大差はないことから、「強度発現特性」の違いにより、相対的な強度差が生じたものと推定される。

強度に影響を及ぼす要因		説明	強度差に影響を及ぼした可能性		
	使用材料の影響 (セメント, 骨材, 混和材等)	使用する材料が異なる場合は、強度に影響を及ぼす	—	使用材料に大きな違いはない	
	製造の影響	骨材表面水の誤差の影響等で水量が変動し、強度に影響を及ぼす	—	どの部位においても、建設時に慎重かつ入念な品質管理を実施していることから、製造～施工時の影響によって、相対的な強度差が生じる可能性は低い	
	運搬の影響	比較的外気温が高い状態で長時間の運搬を行うと、荷下ろし後のワーカビリティが低下し、強度に影響を及ぼす			
	施工時の影響	打込みの影響			打込みの速さが大きくなると、型枠に過大な側圧や偏心的な荷重が作用しやすくなり、それらが強度に影響を及ぼす
		締め固めの影響			型枠中に打ち込んでから入念に締め固めると、強度は高くなる
		養生方法の影響	初期材齢における湿潤養生の程度が強度に影響を及ぼす		
		降雨の影響	締め固めにより、雨水とコンクリートが混合するため、降雨量の増大に伴い、強度に影響を及ぼす		
		温度の影響 (打設時期)	コンクリート強度発現に影響を及ぼす要因のうち、温度環境の及ぼす影響は最も大きいとされており、夏期などの高温時には長期的な強度発現が停滞する傾向にある	○	打設時期は各々の部位によって異なることから、影響を及ぼした可能性がある
	強度発現特性	水分の影響	水中では外部から絶えず水分が供給されるため、強度増進に寄与するセメントの水和反応が継続的に進行し、その結果、強度増進に影響を及ぼす可能性がある	○	取水構造物(海中帯)については、絶えず水分が供給される環境下であるため、影響を及ぼした可能性がある
		部材種類・部位 ・部材寸法	コンクリートの強度は部材やその部位によって異なり、下部よりは上部の方が強度が小さくなる。柱と梁、壁とスラブでも異なり、壁では位置によって2～3割の強度差が生じることが明らかになっている	○	コアサンプル採取箇所の高さは部位によって異なることから、影響を及ぼした可能性がある

※日本建築学会「構造体コンクリートの品質に関する研究の動向と問題点 2008」

【凡例】 ○ : 影響あり  
— : 影響小

### 4. Step3：相対的な強度差に関する考察(2/4)

#### (2) 相対的な強度差が確認された部位について

- ・相対的な強度差が確認された部位については下表(上)に示すとおり、i～iiiの部位ごとに比較を行った。
- ・強度差が生じた要因は、主に「温度」、「水分」、「部位」の影響が考えられる。
- ・なお「温度」の影響については、養生温度が高温の場合、長期強度が増進しなくなる傾向がある※とされており、i～iiiに共通して考えられる要因の一つであるが、「温度」に関する明確な記録が保存されていないことから、下表(下)の赤枠内に示す要因について、詳細に考察を行う。

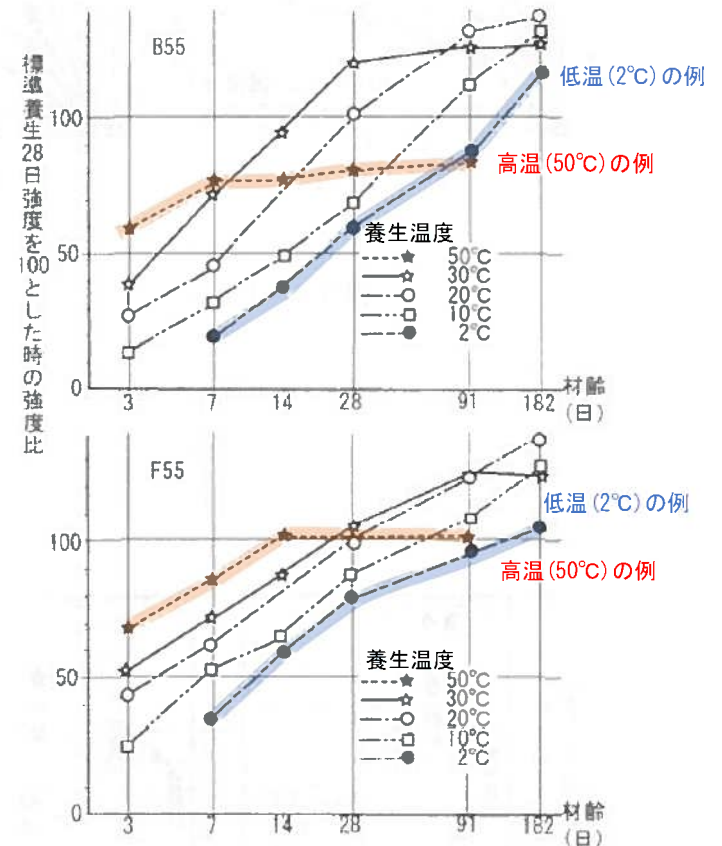
相対的な強度差が確認された部位及びその要因

対象 構造物	対象部位	平均圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )	
		1号炉	2号炉
原子炉補助建屋	内壁及び床	43.4	29.9
取水構造物	海中帯	38.5	38.7
	干満帯	29.9	32.0
	気中帯	45.4	43.7

□：相対的な強度差がある部位

部位の比較	強度差が生じた要因		
	温度	水分	部位
i 「内壁及び床(1号炉)」と「内壁及び床(2号炉)」に強度差が生じた要因	○	—	○
ii 「海中帯」と「干満帯」に強度差が生じた要因	○	○	—
iii 「気中帯」と「干満帯」に強度差が生じた要因	○	—	○

【凡例】○：影響あり —：影響小



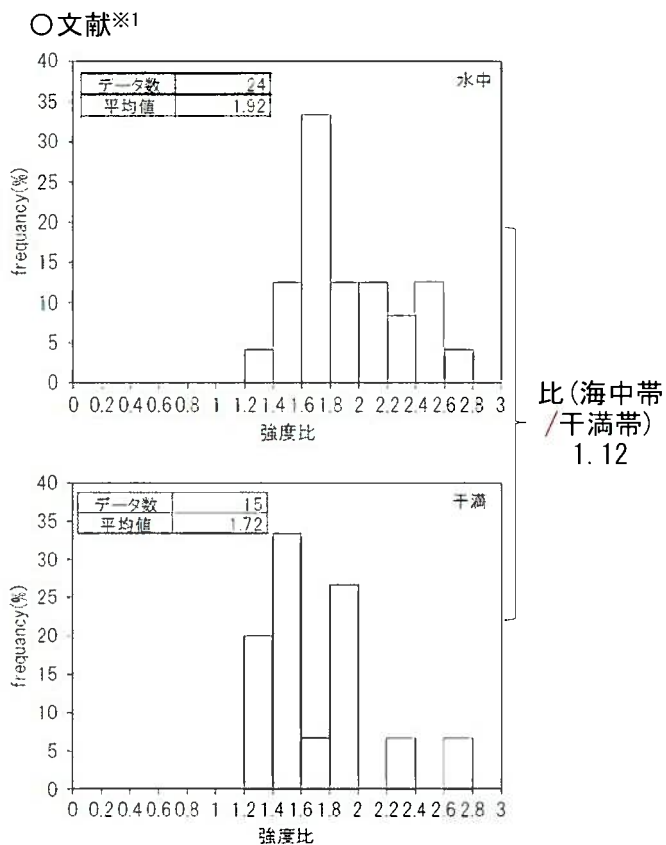
養生温度と圧縮強度の関係(混合セメントの例)※

※ 日本建築学会「構造体コンクリートの品質に関する研究の動向と問題点 2008」(図は一部追記)

### 4. Step2 : 相対的な強度差に関する考察 (3/4)

#### (3) 水分の影響について (対象部位 ii)

- ・文献に基づく、海中帯においては外部から水分が絶えず供給される環境下にあるため、強度増進に寄与するセメントの水和反応が継続的に進行し、相対的な強度差が生じる傾向にある(海中帯の強度比は平均値1.92、干満帯の強度比は平均値1.72で、その比(海中帯/干満帯)は約1.12) ※<sup>1</sup>。
- ・川内原子力発電所における比(海中帯/干満帯)は、約1.21~1.29であり、文献と類似の傾向があることから、川内においても「水分」の影響により、相対的な強度差が生じたものと考えられる。

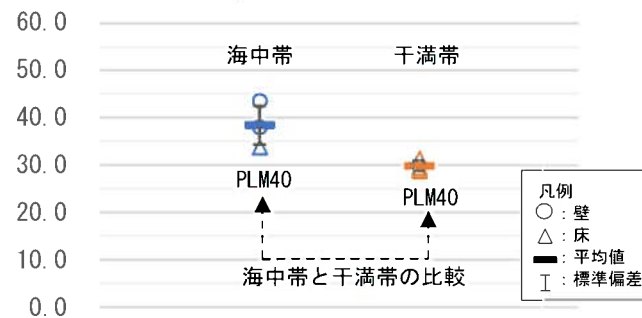


海中・干満における強度比分布

※<sup>1</sup> 技術資料XIII

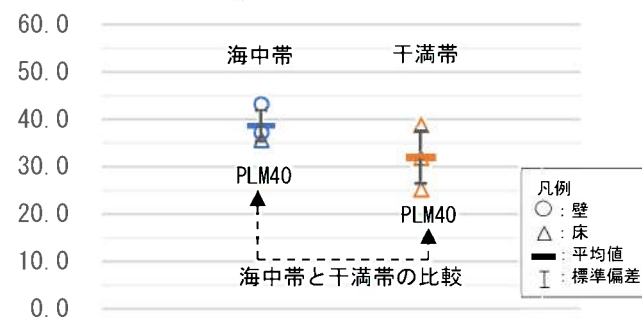
#### ○川内原子力発電所

##### (1号炉) 圧縮強度 (N/mm<sup>2</sup>)



部位	平均圧縮強度※ <sup>2</sup> (N/mm <sup>2</sup> )	比 (a/b)
海中帯	38.5 (a)	1.29
干満帯	29.9 (b)	

##### (2号炉) 圧縮強度 (N/mm<sup>2</sup>)



部位	平均圧縮強度※ <sup>2</sup> (N/mm <sup>2</sup> )	比 (a/b)
海中帯	38.7 (a)	1.21
干満帯	32.0 (b)	

取水構造物 (海中帯・干満帯) の強度試験比較結果

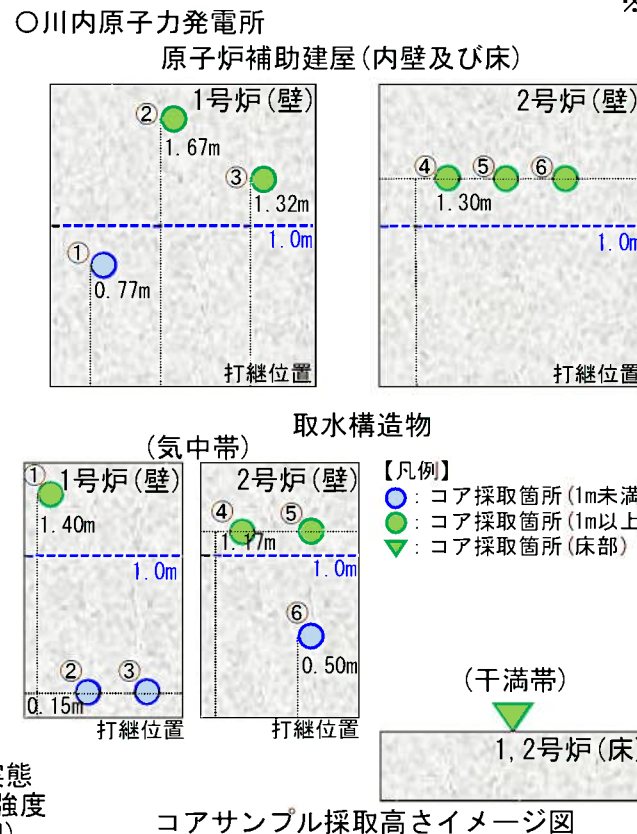
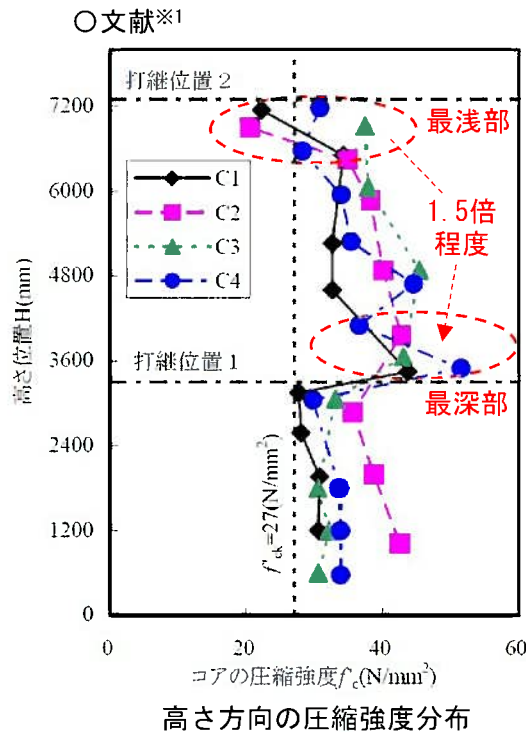
※<sup>2</sup> コアサンプル3本の平均値

### 4. Step2 : 相対的な強度差に関する考察 (4/4)

(4) 部位による影響について (対象部位 i、iii)

- ・文献に基づくと、強度発現特性の「部材種類・部位・部材寸法」のうち、「部位」については自重による圧密効果の影響があるとされており、コンクリート打継位置の最浅部と最深部において、相対的な強度差が生じる傾向にある (最深部と最浅部の比は1.5倍程度) ※1。
- ・原子炉補助建屋 (内壁及び床) については、打継位置に近い※2 「1号炉のコア①」と、打継位置から離れている「1号炉のコア②, ③」及び「2号炉のコア④~⑥」の平均値の比は1.67であった。
- ・取水構造物については、気中帯 (壁) の打継位置に近い「1号炉のコア②, ③」及び「2号炉のコア⑥」の平均値と、圧密効果のない干満帯 (床) の平均値の比は1.45であった。
- ・以上のことから、川内において「部位」の影響により、相対的な強度差が生じたものと考えられる。

※2 打継位置から高さ方向に約1m未満 (文献※1から読み取り)



原子炉補助建屋 (内壁及び床) における強度比

分類	コア番号	高さ	圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )	平均強度 (N/mm <sup>2</sup> )	比 (b/a)
1m以上	②	1.67m	29.2	33.0 (a)	1.67
	③	1.32m	45.9		
	④	1.30m	30.1		
	⑤	1.30m	30.1		
	⑥	1.30m	29.5		
1m未満	①	0.77m	55.0	55.0 (b)	

取水構造物 (気中帯・干満帯) における強度比

分類	コア番号	高さ	圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )	平均強度 (N/mm <sup>2</sup> )	比 (b/a)
気中帯 (1m以上)	①	1.40m	45.5	43.9	1.45
	④	1.17m	42.0		
	⑤	1.17m	44.3		
気中帯 (1m未満)	②	0.15m	46.6	45.1 (b)	
	③	0.15m	44.0		
	⑥	0.50m	44.8		
干満帯	—	—	25.3~38.8	31.0 (a)	

※1 コンクリート工学会年次論文集「報告 実態調査に基づく既設構造物のコンクリート強度分布に関する考察 (2006)」 (図は一部追記)

## 5. まとめ

- 川内原子力発電所における強度比（設計基準強度に対する比）のばらつきと平均値は、他の既設原子力発電所と同様の傾向を示すことが確認された。  
相対的な強度差が確認された部位における強度比の平均(1.3)は、一般構造物の強度比の平均(1.3)と同程度であり、設計基準強度に対して、十分な強度を有していることが確認された。
  
- 相対的な強度差が確認された「原子炉補助建屋(内壁及び床)(2号炉)」及び「取水構造物(干満帯)(1, 2号炉)」については、今回のPLM40の強度試験結果と過去の強度試験結果を比較した結果、概ね同等もしくは若干の強度増進の傾向が確認された。  
その他の部位については、すべて強度増進の傾向が確認された。
  
- 相対的な強度差がある部位については、強度の変動に影響を及ぼす要因のうち、主に「温度」、「水分」、「部位(自重による圧密効果)」の影響があると推定される。  
このうち、「水分」と「部位(自重による圧密効果)」に関して強度試験結果を基に分析した結果、これらの要因に伴い、相対的な強度差が生じたものと考えられる。



## ○強度以外の劣化要因に関する経年変動について(1/2)

- ・過去の試験結果(PLM30)と比較可能な劣化要因は、下表に示すとおり、実測値に基づき評価した中性化及び塩分浸透であり、PLM30からPLM40にかけ、やや増加傾向が確認されたものの、現時点において強度低下に影響を及ぼす劣化は認められないことを確認している※<sup>1</sup>。

劣化要因※ <sup>2</sup>		1号炉の評価結果		2号炉の評価結果		備考
		PLM30	PLM40	PLM30	PLM40	
強度低下	熱	—	—	—	—	評価結果が実測によるものではなく、解析によるものであるため、対象外
	中性子照射量	—	—	—	—	同上
	ガンマ線照射量	—	—	—	—	同上
	中性化	【原子炉補助建屋】 2.2 (cm)	【原子炉補助建屋】 4.2 (cm)	【原子炉補助建屋】 3.0 (cm)	【原子炉補助建屋】 4.3 (cm)	1, 2号炉ともに増加傾向が確認
		【気中帯】 0.8 (cm)	【気中帯】 1.2 (cm)	【気中帯】 1.0 (cm)	【気中帯】 1.2 (cm)	
	塩分浸透	【気中帯】 0.5 (kg/m <sup>3</sup> )	【気中帯】 1.1 (kg/m <sup>3</sup> )	【気中帯】 1.1 (kg/m <sup>3</sup> )	【気中帯】 1.3 (kg/m <sup>3</sup> )	1, 2号炉ともに増加傾向が確認
【干満帯】 2.0 (kg/m <sup>3</sup> )		【干満帯】 4.3 (kg/m <sup>3</sup> )	【干満帯】 2.8 (kg/m <sup>3</sup> )	【干満帯】 3.0 (kg/m <sup>3</sup> )		
【海中帯】 2.0 (kg/m <sup>3</sup> )		【海中帯】 2.6 (kg/m <sup>3</sup> )	【海中帯】 1.6 (kg/m <sup>3</sup> )	【海中帯】 2.0 (kg/m <sup>3</sup> )		
遮蔽能力低下	熱	—	—	—	—	評価結果が実測によるものではなく、解析によるものであるため、対象外

※<sup>1</sup> 中性化は、鉄筋が腐食し始めるときの中性化深さに達していないこと、塩分浸透は、塩化物イオン量をもとに算出した鉄筋腐食減量が、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下回っていることを確認

※<sup>2</sup> 高経年化対策上着目すべき経年劣化事象の中から抽出

○強度以外の劣化要因に関する経年変動について(2/2)

- ・ PLM30からPLM40にかけて、実測値にやや増加傾向が確認されたものの、中性化、塩分浸透それぞれに下記の推定式を用いることで、その増加傾向は適切に推定されていることを確認している。

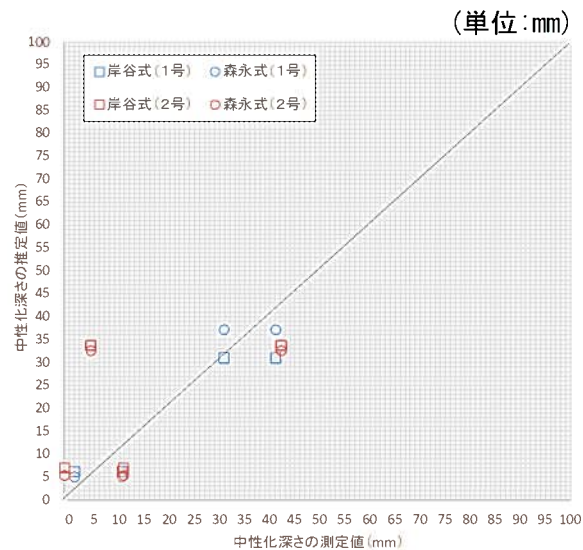
(1) 中性化

- ・ 中性化深さの推定は、「岸谷式<sup>※1</sup>、森永式」を用いて評価を行っている。
- ・ PLM30時の環境測定結果に基づく約40年時点での中性化深さの推定値は、ばらつきはあるものの、PLM40の測定値と概ね一致していることを確認した。

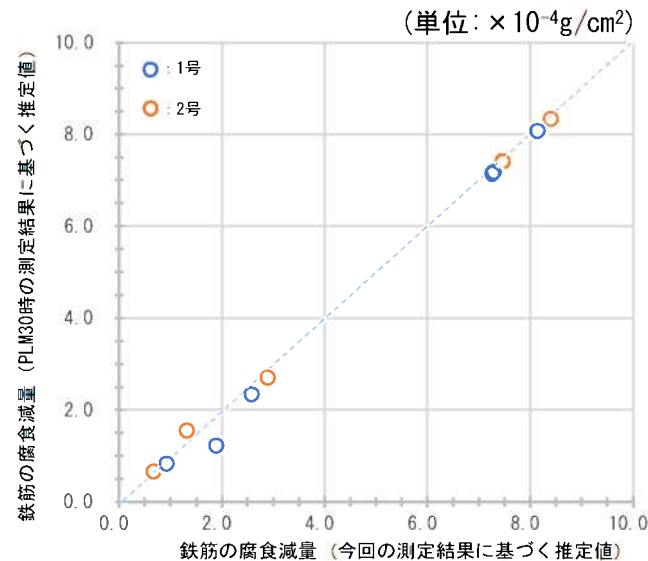
※1 岸谷式については、二酸化炭素濃度による補正を行うことで、測定値に近づくことを確認

(2) 塩分浸透

- ・ 鉄筋の腐食減量の推定は、「森永式」を用いて評価を行っている。
- ・ PLM30時の塩化物イオン量測定結果に基づく約40年時点での推定値は、ばらつきはあるものの、PLM40の測定結果に基づく推定値と概ね一致していることを確認した<sup>※2</sup>。



中性化深さの推定について



塩分浸透の推定について

※2 PLM30時は干満帯の酸素濃度比を「0.62%」として推定しているため、本比較においては干満帯の酸素濃度比を「0.62%」として計算した結果を使用