

これまでの委員からの質問への回答 (第1、6、7回分科会時の質問)

2022年12月23日



No.	資料	質問事項	質問者	頁
1-4	【資料3-2】 川内原子力発電所 1, 2号機の特別点 検の実施について	監視試験片の評価結果について説明すること。	渡邊委員	資料2 P4にて説明
6-1	【資料1】 コンクリート構 造物の特別点検 (個別確認・評 価)について	コンクリート構造物のアルカリ骨材反応について、岩石学的試験（偏光顕微鏡試験）の結果を示すこと。	橋高委員	第7回分科会 にて説明済
6-2		各試験データは3本の平均値を示しているが、ばらつきの確認のため各データを示すこと。	後藤委員	第7回分科会 にて説明済
6-3		P. 21点検結果総評に、各点検項目に対して劣化なしと評価した見解を記載すること。	後藤委員	第7回分科会 にて説明済
6-4		コンクリートの劣化要因には化学的要因、機械的要因があると思うが、機械的要因についても評価すること。（例：米国のCAV評価）	佐藤委員	第7回分科会 にて説明済
6-5		塗膜の劣化に対する補修の方法について説明すること。	後藤委員	第7回分科会 にて説明済
6-6	【資料2】 原子炉格納容器 の特別点検（個 別確認・評価に ついて）	軽微な塗膜の劣化が確認された箇所については、%表記ではなく、「箇所数」を記載すること。	後藤委員	第7回分科会 にて説明済
6-7		建設時の格納容器溶接部の非破壊検査の手法、精度は、現在の手法と比べて適正か説明すること。	渡邊委員	5～8
6-8	【資料3】 原子炉容器の特 別点検（個別確 認・評価につい て）	クラッドの有、無の条件で応力拡大係数の値を示すこと。	後藤委員	資料3-3 No. 追6-13 にて説明
6-9		クラッドの溶接方法、材料について説明すること。	渡邊委員	第7回分科 会にて説明 済

No.	資料	質問事項	質問者	頁
6-10	【資料3】 原子炉容器の 特別点検（個 別確認・評価 について）	非破壊検査の適用性の検証に使用した試験体の形状、材料、溶接方法について実機との違いを整理すること。	渡邊委員	10~14
6-11	【資料4 No. 4-13】 第4回分科会 時の質問	中性子分布について、評価対象部位（バッフルフォーマーボルト、原子炉容器サポート等）の照射量、位置を示すこと。	渡邊委員	15~22
6-12	【資料4 No. 4-17】 第4回分科会 時の質問	製造中止品についてもどのような取り組みをしているか。	守田委員	23~25
6-13	【資料4 No. 5-3】 第5回分科会 時の質問	熱時効と中性子照射脆化等の重畳について、影響が考えられる溶接方法、材料について示すこと。	渡邊委員	資料3-1 No. 7-3 にて説明
6-14	【資料4 No. 5-6】 第5回分科会 時の質問	破壊靱性値の実測値について、母材部、溶接部を明記すること。	後藤委員	資料3-3 No. 追6-12 にて説明
6-15	【資料4 No. 5-7】 第5回分科会 時の質問	バッフル板のスウェリング量はどの程度か。また、評価に使用した式などを示すこと。	渡邊委員	第7回分 科会にて 説明済
6-16	【資料4 No. 5-8】 第5回分科会 時の質問	監視試験片の試験結果について、断面図等を示すこと。	渡邊委員	資料2にて 説明 (参考資料)

No.	資料	質問事項	質問者	頁
7-1	【資料1】 劣化状況評価結果について (コンクリートの強度低下及び遮蔽能力の低下)	コンクリートの各劣化要因について、よくある事象なのか、起こりにくい事象なのか、国内外の事例と合わせて説明すること。 また、伊方発電所において過去にアルカリ骨材反応が問題となったが、コンクリートの材料について川内との相違を説明すること。	守田委員 渡邊委員	29~35
7-2		放射線照射による強度低下について、中性子照射によるコンクリートの劣化メカニズムを説明すること。また、そのメカニズムを健全性評価にどう考慮しているかを説明すること。	渡邊委員	36~40
7-3	【資料2】 劣化状況評価結果について (照射誘起型応力腐食割れ)	炉心槽の不安定破壊の評価について、応力拡大係数が1、2号炉で異なる理由を説明すること。	渡邊委員	41~43
7-4		IASCCで評価している炉内構造物の材料の強度は、照射を受けてどのように変化するのか。	渡邊委員	44
7-5		定荷重応力試験割れ試験結果のまとめの図について、2点の結果で破断の閾値を引いているがデータの信頼性をどのように考えているのか。	後藤委員	45~46
7-6	【資料3-3 No. 6-9】 第5回分科会時の質問	クラッドの溶接の説明には入熱管理、溶接後熱処理の情報も記載すること。	渡邊委員	47~48

1. 質問事項

監視試験片の評価結果について説明すること。

2. 回 答

○ 「資料2 P4」にて監視試験片の評価結果を記載。

1. 質問事項

建設時の格納容器溶接部の非破壊検査の手法、精度は、現在の手法と比べて適正か説明すること。

2. 回 答

- 建設時の格納容器溶接部においては、溶接後に非破壊検査として放射線透過試験（以下「RT」という。）を実施している。
- 建設時と現在におけるRTの手法、精度について比較した結果を次頁以降に示す。
- 比較した結果、建設時と現在において手法等に多少の違いは見られるものの、技術的に大きな影響はないと考える。また、判定基準においても大きな差はないことから、建設時の格納容器溶接部の非破壊検査の手法は適正であると考えられる。

表1 建設時と現在の手法等の比較

項目	建設時	現在	評価
規格要求	表2のとおり	表2のとおり	表2に示すとおり、建設時から要求が追加されたのは、透過写真の具備すべき条件として、「 <u>2. 溶接部の位置を示す記号が、明らかに撮影されていること。</u> 」であり、技術的な内容ではないため、規格要求の変更による影響は低いと考える。
X線発生装置	検査記録に型番等の記載は無	同左	建設時に使用したX線発生装置について、型番等の記載が当時の検査記録にはないため、現在とスペック差を比較することは困難である。 ただし、像質（画像の良否）を良く撮影するためには、線源を小さくするか、管電圧を下げ、長時間照射することで、像質良く撮影できることから、装置自体の技術的性能差による影響は低いと考える。
フィルム	KODAK	富士フィルム	現在はKODAK社のフィルムが製造されていないため、富士フィルム製のフィルムを使用しているが、同性能であるため、技術的な進歩によるフィルム像質の影響は低い。
増感紙	金属蛍光増感紙	金属増感紙 金属蛍光増感紙	金属蛍光増感紙は、金属増感紙に比べて若干像質が悪くなるものの、現在の規格においては、どちらの増感紙も原子炉格納容器での使用が認められているため、増感紙の影響は低いと考える。 建設時は照射時間が短い金属蛍光増感紙を使用したと考えられる。
現像処理	タンク現像	同左	同様の方法で実施しており、技術的な進歩は少ない。
品質管理	—	—	建設時と現在の検査要領を比較したところ、若干の運用の変更はあるが品質に影響するような管理方法の差異は無い。

表2 建設時と現在の規格・法令要求対比 (1/2)

		建設時	現在																
法令・規格要求		電気工作物の溶接に関する技術基準を定める省令 (昭和39年法律第170号 昭和54年3月改正)	・ 実用発電用原子炉及びその附属施設の技術基準 ・ 発電用原子力設備規格 溶接規格JSME S NB1-2007																
放射線透過試験に要求される判定基準 (※1)	透過写真の具備すべき条件	放射線透過試験をする装置は、次のイからロまでに適合する有孔形透過度計の最も端に近い穴又はスリットが識別できるものであること。	溶接規格第1部表-7 放射線透過試験 次の1. から3. までに適合すること。 1. 透過度計の記号および基準穴が明らかに撮影されていること。																
		—	2. 溶接部の位置を示す記号が、明らかに撮影されていること。																
		3 次の計算式により計算した試験部の欠陥以外の部分の透過写真の濃度が、JIS Z3104(1968)の「2.8 透過写真の具備すべき条件」の表5に示す範囲に適合するように撮影されていること。ただし、有孔形透過度計を使用する場合にあっては、更に、透過度計が置かれた部分の濃度より15%以上低いか又は30%以上高い濃度の部分がないように撮影されていること。	3. 次の計算式により計算した試験部のきず以外の部分の透過写真の濃度が次の表に示す範囲を満足すること。さらに透過度計が置かれた部分の15%以上低いか、または30%以上高い濃度の部分がないように撮影されていること。																
		表 5	表 5																
		$D = \log_{10} F_0 / F$ <table border="1" style="margin-left: auto; margin-right: auto;"> <thead> <tr> <th>材厚 mm</th> <th>写真濃度範囲</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>50以下</td> <td>1.0以上3.5以下</td> </tr> <tr> <td>50を超え100以下</td> <td>1.5以上3.5以下</td> </tr> <tr> <td>100を超えるもの</td> <td>2.0以上3.5以下</td> </tr> </tbody> </table>	材厚 mm	写真濃度範囲	50以下	1.0以上3.5以下	50を超え100以下	1.5以上3.5以下	100を超えるもの	2.0以上3.5以下	$D = \log_{10} F_0 / F$ <table border="1" style="margin-left: auto; margin-right: auto;"> <thead> <tr> <th>材厚 mm</th> <th>写真濃度範囲</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>50以下</td> <td>1.0以上3.5以下</td> </tr> <tr> <td>50を超え100以下</td> <td>1.5以上3.5以下</td> </tr> <tr> <td>100を超えるもの</td> <td>2.0以上3.5以下</td> </tr> </tbody> </table>	材厚 mm	写真濃度範囲	50以下	1.0以上3.5以下	50を超え100以下	1.5以上3.5以下	100を超えるもの	2.0以上3.5以下
材厚 mm	写真濃度範囲																		
50以下	1.0以上3.5以下																		
50を超え100以下	1.5以上3.5以下																		
100を超えるもの	2.0以上3.5以下																		
材厚 mm	写真濃度範囲																		
50以下	1.0以上3.5以下																		
50を超え100以下	1.5以上3.5以下																		
100を超えるもの	2.0以上3.5以下																		
		Dは、透過写真の濃度 F ₀ は、透過写真の濃度を測定する装置から透過写真を取り外した場合の透過光束 Fは、透過写真の濃度を測定する装置に透過写真を取り付けた場合の透過光束	Dは、透過写真の濃度 F ₀ は、透過写真の濃度を測定する装置から透過写真を取り外した場合の透過光束 Fは、透過写真の濃度を測定する装置に透過写真を取り付けた場合の透過光束																

※1：第2種容器／クラスMC容器に関する判定基準のみ記載し、その他の判定基準は省略する。

表2 建設時と現在の規格・法令要求対比 (2/2)

		建設時	現在												
放射線透過試験に要求される判定基準 (※1)	第2種容器／クラスMC容器	<p>次の1から3までに適合すること。</p> <p>1 日本工業規格JIS Z 3104 (1968) 「鋼溶接部の放射線透過試験方法および透過写真の等級分類方法」の「3 透過写真の等級分類方法」の1級であること。この場合において、ブローホールについては、試験視野を3倍に拡大して欠陥点数を求め、その3分の1の値を欠陥点数とすることができる。</p>	<p>次の1. から3. までに適合すること。</p> <p>1. JIS Z3104 (1995) 「鋼溶接継手の放射線透過試験方法」の附属書4「透過写真によるきずの像の分類方法」の1類であること。ただし、クラスMC容器、クラス2容器、クラス3容器(およびクラス3相当容器)、クラス2配管、クラス3配管(およびクラス3相当管) およびクラス4配管の場合にあっては、第1種及び第4種※2のきずについては、試験視野を3倍に拡大してきず点数を求め、その3分の1の値をきず点数とすることができる。</p> <table border="1" style="margin-left: auto; margin-right: auto;"> <thead> <tr> <th colspan="2">附属書4表1 きずの種類</th> </tr> <tr> <th>きずの種類</th> <th>きずの種類</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>第1種</td> <td>丸いブローホール及びこれに類するきず</td> </tr> <tr> <td>第2種</td> <td>細長いスラグ巻込み、パイプ、溶込み不良、融合不良及びこれに類するきず</td> </tr> <tr> <td>第3種</td> <td>割れ及びこれに類するきず</td> </tr> <tr> <td>第4種</td> <td>タングステン巻込み</td> </tr> </tbody> </table>	附属書4表1 きずの種類		きずの種類	きずの種類	第1種	丸いブローホール及びこれに類するきず	第2種	細長いスラグ巻込み、パイプ、溶込み不良、融合不良及びこれに類するきず	第3種	割れ及びこれに類するきず	第4種	タングステン巻込み
		附属書4表1 きずの種類													
		きずの種類	きずの種類												
第1種	丸いブローホール及びこれに類するきず														
第2種	細長いスラグ巻込み、パイプ、溶込み不良、融合不良及びこれに類するきず														
第3種	割れ及びこれに類するきず														
第4種	タングステン巻込み														
<p>2 ブローホールがある場合には、その径は、隣接する他のブローホールとの間の距離が25 mm未満の場合にあつては、板厚の0.2倍 (3.2 mmを超える場合は、3.2 mm) , 隣接する他のブローホールとの間の距離が25 mm以上の場合にあつては板厚の0.3倍 (6.4 mmを超える場合は、6.4 mm) を超えないこと。</p>	<p>2. 第1種及び第4種※2のきずがある場合には、それぞれのきずの隣接するほかの第1種及び第4種※2のきずとの間の距離が25mm未満の場合にあては、それぞれのきずの最大径が母材の厚さの0.2倍(3.2mmを超える場合は、3.2mm)、隣接する他の第1種のきずとの間の距離が25mm以上の場合にあつては、それぞれのきずの最大径が母材の厚さの0.3倍(6.4mmを超える場合は、6.4mm)の値を超えないこと。この場合において、1.においてきず点数として算定しないきずについては、きずとみなさない。</p>														
<p>3 板厚の12倍の長さの範囲内で、隣接するスラグ巻込みの間の距離が長い方のスラグ巻込みの長さの6倍未満であり、かつ、これらが連続して直線上に並んでいるときにおけるこれらの長さの合計が板厚を超えないこと。</p>	<p>3. 母材の厚さの12倍の長さの範囲で、隣接する第2種のきずの間の距離が長い方の第2種のきずの長さの6倍未満であり、かつ、これらが連続して直線上に並んでいるときにおけるこれらの長さの合計が母材の厚さを超えないこと</p>														

※1：第2種容器／クラスMC容器に関する判定基準のみ記載し、その他の判定基準は省略する。

※2：胴の溶接はサブマージ溶接／アーク溶接で施工され対象無。

1. 質問事項

クラッドの有、無の条件で応力拡大係数の値を示すこと。

2. 回 答

○ 「資料3－3 No. 追6－13」にて回答。

1. 質問事項

非破壊検査の適用性の検証に使用した試験体の形状、材料、溶接方法について実機との違いを整理すること。

2. 回 答

○非破壊検査の適用性の検証に使用した試験体の形状、材料、溶接方法の実機との違いについて、次頁以降に整理結果を示す。

○形状、材料、溶接方法について、一部異なる点はあるものの、検出性能に影響を与えない形状、材料、溶接方法であることから、適用性について問題ないと考えている。

①炉心領域 (UT)

		実機	検証試験 【UTS※1】	対比試験片	評価
母材	材料	ASME SA-533. Gr. B CLASS-1	SFVQ1A		検証試験体：実機と同等。 (母材区分は同じ) 対比試験片：実機と同等。 (母材区分は同じ)
	板厚		220mm		検証試験体：実機と同等。 対比試験片：実機と同等。
	熱影響部深さ	約5mm程度	約5mm程度		検証試験体：実機と同じ。 対比試験片： style="border: 2px solid red;">
クラッド部	材料	SUS309	SUS309L相当		検証試験体：実機と同等。(材料区分は オーステナイト系ステンレス 鋼であり同等) 対比試験片： style="border: 2px solid red;">
	厚さ	約5.5mm	約5.5mm		検証試験体：実機と同等。 対比試験片： style="border: 2px solid red;">
	溶接方法	サブマージアーク溶接	エレクトロスラグ溶接		検証試験体：実機と異なるが、両者とも 帯状電極肉盛溶接法であり、 検出性に影響を与えないと 考えられる。 対比試験片： style="border: 2px solid red;">
	自動 or 手動	自動	自動		検証試験体：実機と同じ。 対比試験片： style="border: 2px solid red;">
	層数	1	1	検証試験体：実機と同じ。 対比試験片： style="border: 2px solid red;">	

※1 : Ultrasonic Test & Evaluation for Maintenance Standards
(超音波探傷試験における欠陥検出性及びサイジング精度の確認)

 内は商業機密に係る事項であるため公開できません。

②一次冷却材ノズルコーナー部（クラッド部）（ECT）

a) 出口管台ノズルコーナー角部用

		実機	検証試験 【検討委託※2】	対比試験片	評価
母材	材料	ASME SA-508 CLASS-3		—	検証試験体： 対比試験片：ECT対象はクラッド表面であるため問題ない。
クラッド部	材料	SUS309 +SUS304 (2層以降)		検証試験体： 対比試験片：材料は であるが、クラッド部の と導電率、比透磁率が同等の材料である。 なお、JEAG4217-2010解説2330-2に、対比試験片には電磁的特性が均一な材料を使用することが明記されている。	
	厚さ	約5~10mm 程度		検証試験体： 対比試験片：JEAG4217-2010 解説2330-4記載を踏まえ、試験片端部が校正に影響を及ぼさない板厚として、最も深い での渦電流の表皮深さ（約 ）の3倍以上の板厚としている。	
	溶接方法	被覆アーク溶接 (SMAW)		—	
	自動 or 手動	手動		—	検証試験体：
	層数	7		—	

※2：原子炉容器非破壊検査高度化検討委託

内は商業機密に係る事項であるため公開できません。

②一次冷却材ノズルコーナー部（クラッド部）（ECT）

b) 入口管台ノズルコーナー角部用及び出口管台平坦部用（管台内面）

		実機	検証試験 【検討委託※2】	対比試験片	評価
母材	材料	ASME SA-508 CLASS-3		—	検証試験体： （母材区分は同じ） 対比試験片： ECT対象はクラッド表面であるため問題ない。
クラッド部	材料	SUS309		検証試験体： 対比試験片： 材料は であるが、クラッド部の と導電率、比透磁率が同等の材料である。 なお、JEAG4217-2010解説2330-2に、対比試験片には電磁的特性が均一な材料を使用することが明記されている。	
	厚さ	約5~9mm		検証試験体： 対比試験片： JEAG4217-2010 解説2330-4記載を踏まえ、試験片端部が校正に影響を及ぼさない板厚として、最も深い での渦電流の表皮深さ（約 mm）の3倍以上の板厚としている。	
	溶接方法	サブマージ アーク溶接		—	検証試験体：
	自動 or 手動	自動		—	
層数	1	—			

※2：原子炉容器非破壊検査高度化検討委託

内は商業機密に係る事項であるため公開できません。

③炉内計装筒内面（ECT）

		実機	検証試験 【確性試験 ^{※3} ／国プロ NPV ^{※4} 】	対比試験片	評価
母材	材料	ASME SB-166	(確性試験) <input type="text"/> (NPV) NCF600	<input type="text"/>	検証試験体：確性試験では <input type="text"/> の平板SCCで確認。その後の国プロ NPVでは実機同等材のSCCでも確性試験と同様の結果が得られている。 (深さ0.5mmのSCC検出可) 対比試験片： <input type="text"/>
	板厚 (又は外径)	(外径) Φ38.1mm	(確性試験) <input type="text"/> (NPV) Φ38.1		検証試験体：確性試験では <input type="text"/> のSCCで確認。その後の国プロNPVでは実機同等材のSCCでも確性試験と同様の結果が得られている。 (深さ0.5mmのSCC検出可) 対比試験片： <input type="text"/>
	内径	Φ15.2mm	(確性試験) <input type="text"/> (NPV*) Φ15.2, Φ9.5		検証試験体：国プロ NPVは実機と同じ。 対比試験片： <input type="text"/>

※3：平成12年度 小口径管内面へのウォータージェットピーニング法適用に関する確性試験
 ※4：平成19年度 容器貫通部狭隘部の非破壊検査技術実証に関する事業報告書(国プロ NPV)

内は商業機密に係る事項であるため公開できません。

1. 質問事項

中性子分布について、評価対象部位（バッフルフォーマーボルト、原子炉容器サポート等）の照射量、位置を示すこと。

2. 回 答

○評価対象部位の中性子照射量、位置を次ページ以降に示す。

(1) 評価対象位置

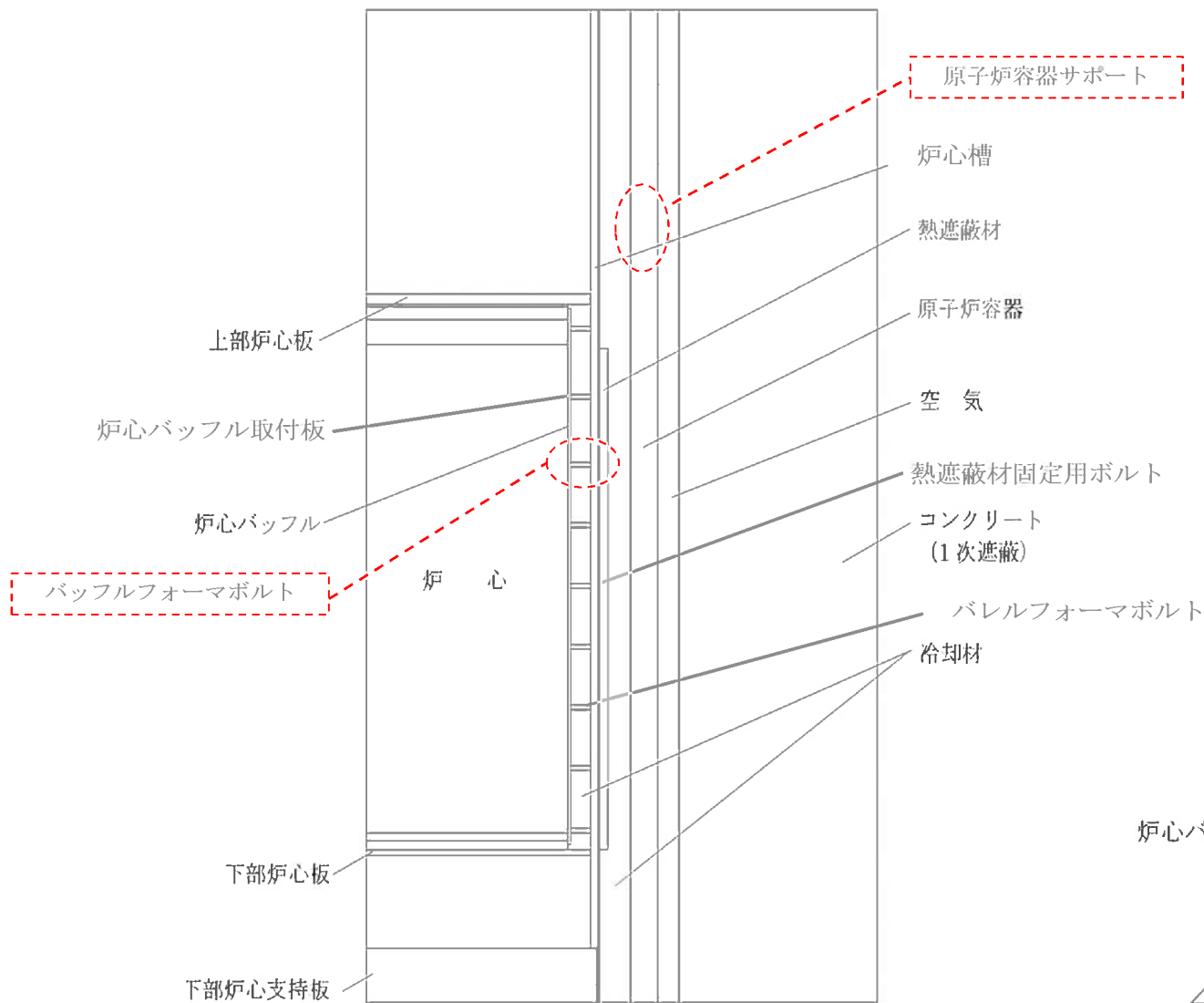


図1 評価対象部位 (垂直断面図)

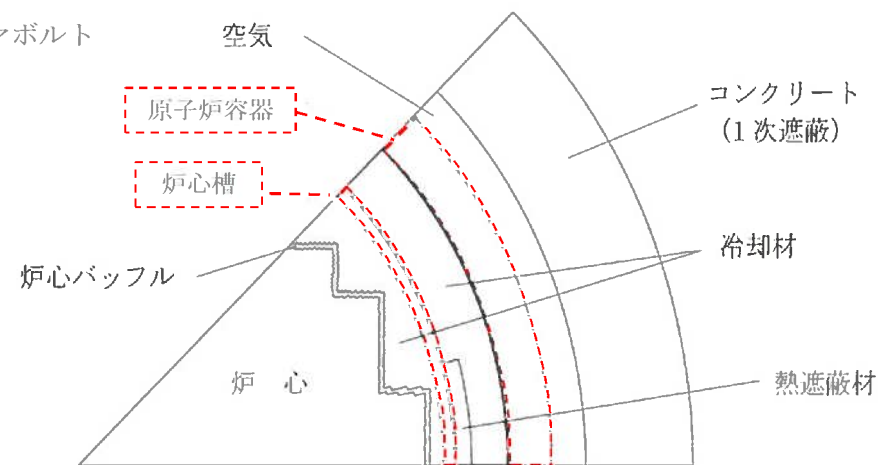


図2 評価対象部位 (水平断面図)

川内1号機



図3 垂直方向 中性子束分布図（ $E > 1.0 \text{ MeV}$ ）



図4 垂直方向 中性子束分布図（ $E > 0.1 \text{ MeV}$ ）

内は商業機密に係る事項であるため公開できません。

川内1号機



図5 垂直方向 中性子束分布図（全群）

内は商業機密に係る事項であるため公開できません。

川内1号機



図6 水平方向 中性子束分布図 ($E > 1.0 \text{ MeV}$)

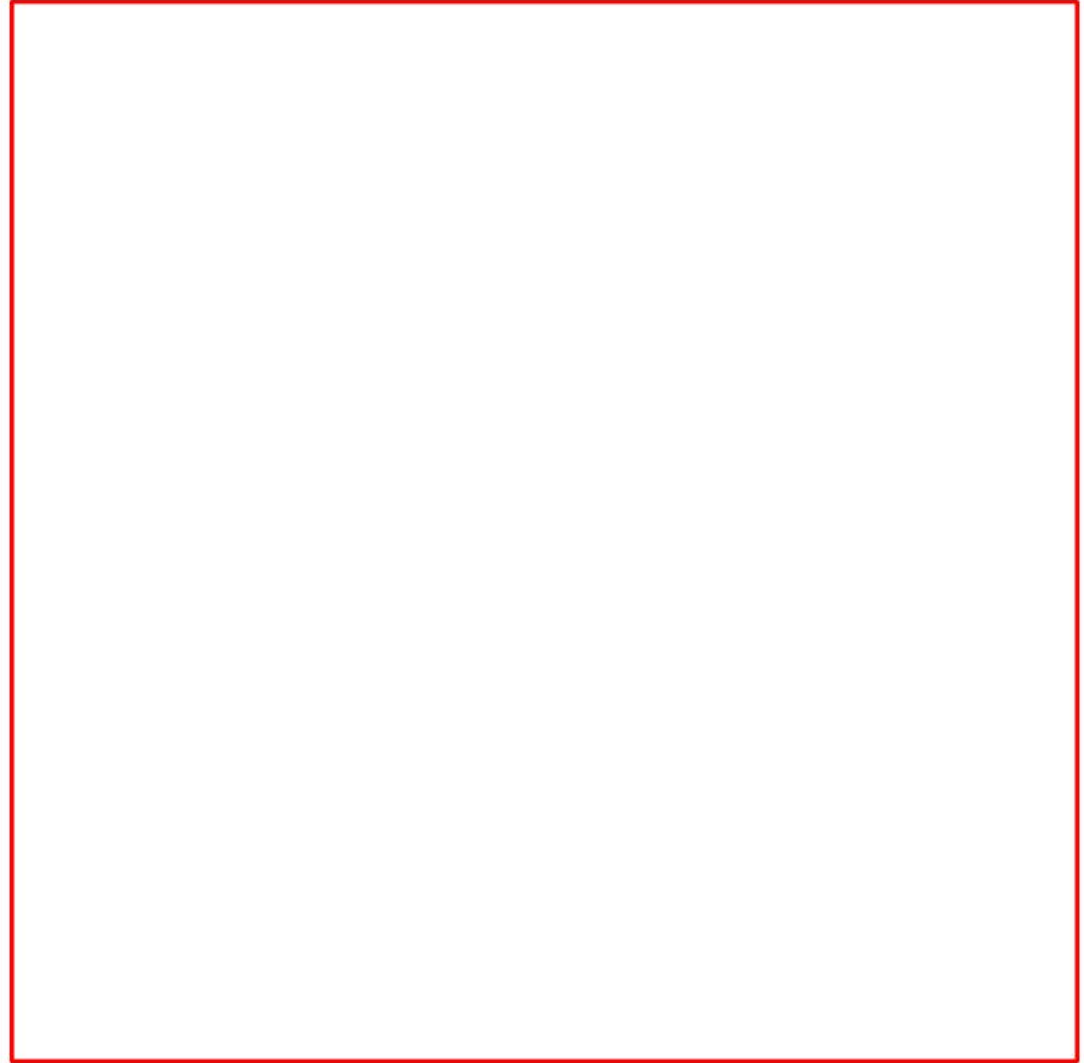



図7 水平方向 中性子束分布図 ($E > 0.1 \text{ MeV}$)

内は商業機密に係る事項であるため公開できません。

川内2号機



図8 垂直方向 中性子束分布図（ $E > 1.0 \text{ MeV}$ ）

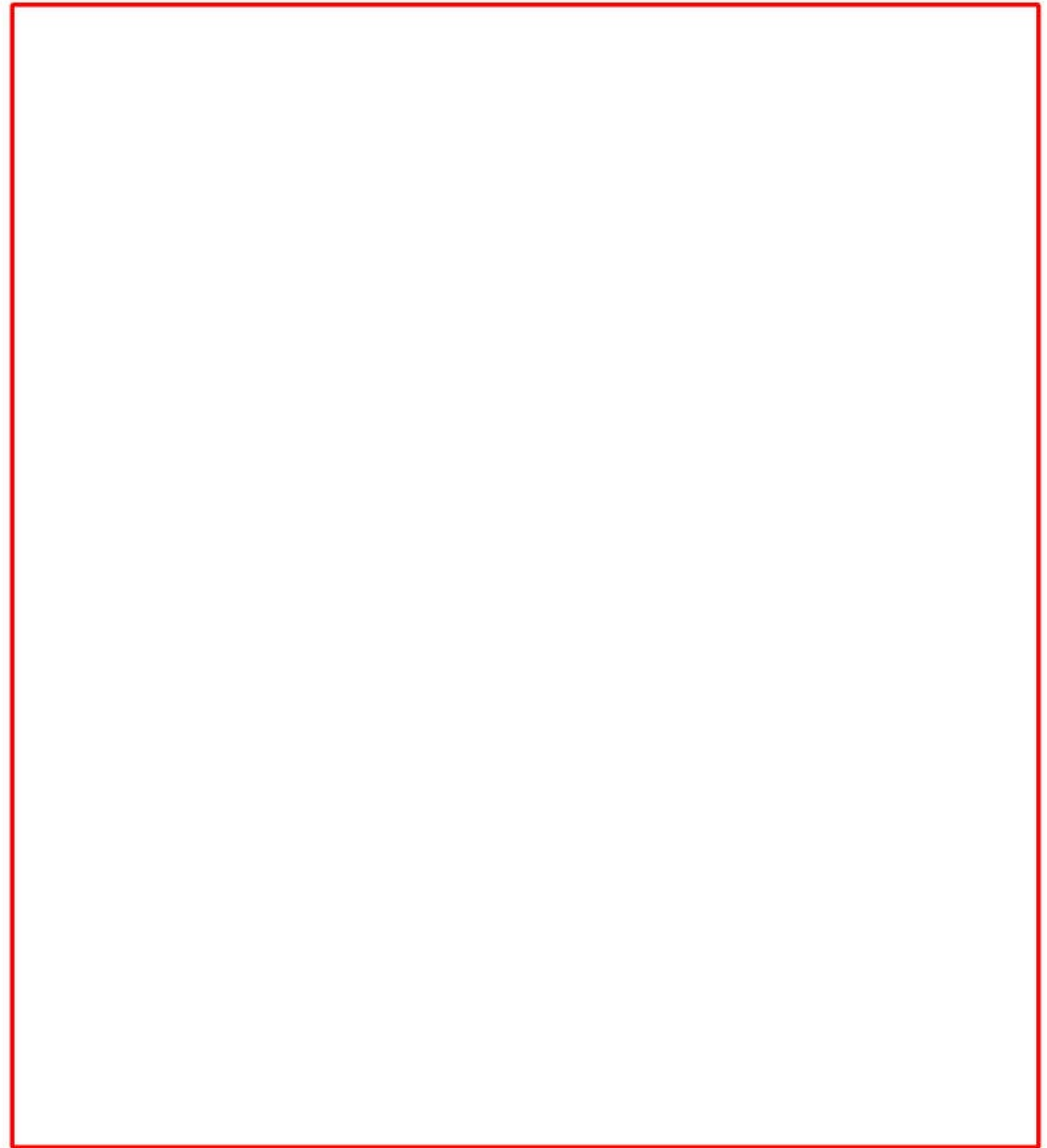


図9 垂直方向 中性子束分布図（ $E > 0.1 \text{ MeV}$ ）

内は商業機密に係る事項であるため公開できません。

川内2号機



図10 垂直方向 中性子束分布図（全群）

内は商業機密に係る事項であるため公開できません。

川内2号機



図1.1 水平方向 中性子束分布図 ($E > 1.0 \text{ MeV}$)

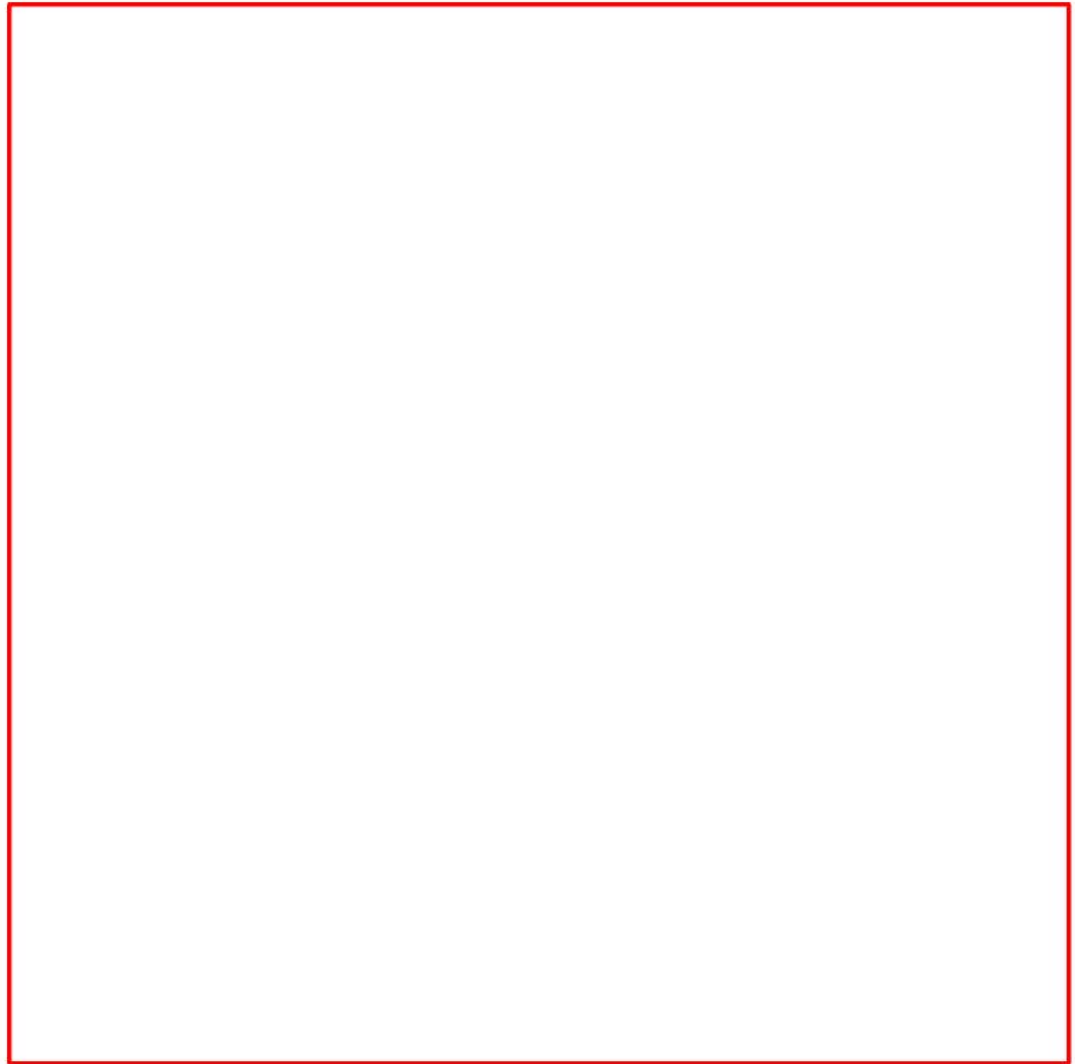


図1.2 水平方向 中性子束分布図 ($E > 0.1 \text{ MeV}$)

内は商業機密に係る事項であるため公開できません。

1. 質問事項

製造中止品についてもどのような取り組みをしているか。

2. 回 答

○メーカーやサプライヤーの一部は、設計技術及び保守技術の継承が困難な状況であり、実際に原子力産業からの撤退により、使用機器や部品等の製造中止等の事例が生じている。そのため、プラントの長期運転を実施していく上で、これら製造中止等によって原子力発電所の安全性へ影響が生じないように管理を強化していく必要がある。

○原子力エネルギー協会（ATENA）より、安全な長期運転に向けた経年劣化管理の取り組みの一環として「製造中止品管理ガイドライン（2020年9月）」が発行された。

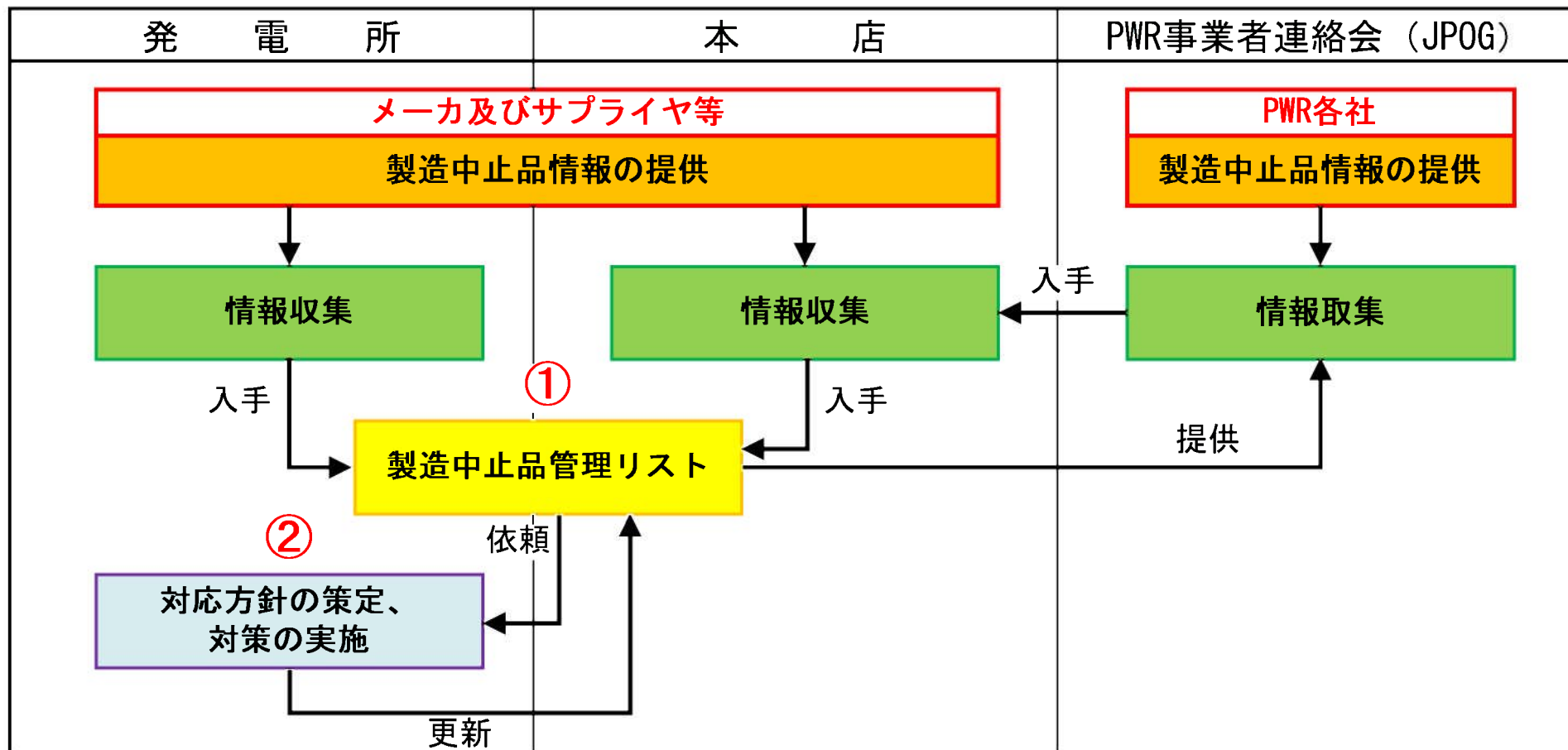
○同ガイドラインは、製造中止品への対応を確実にし、設備の機能を維持するために製造中止品情報を関係箇所から、体系的かつ継続的に入手・管理し、事業者及び関係箇所が連携して対応する仕組みの構築・運用について示されたものである。

○当社は同ガイドラインに基づき、製造中止品情報の収集・報告及び管理について社内規定に定めている。

○製造中止品の管理は、プラントメーカーとPWR電力各社（PWR事業者連絡会議）の会議体や発電所からの入手した製造中止品情報を電力各社と共有するとともに、当社発電所に展開し対応方針の策定及び対策を実施している。（詳細は次頁参照）

○製造中止品情報取り扱いフロー

- ① メーカー及びサプライヤ等やPWR事業者連絡会から製造中止品情報入手し、製造中止品管理リストに取りまとめる。なお、当社で入手した製造中止品情報はPWR事業者連絡会を通じて電力各社へ提供する。
- ② 入手した製造中止品情報は発電所へ展開し、製造中止品に対して、代替メーカー及び代替品について検討し、取替又は予備の確保などの対応方針を策定後、対策を実施し、製造中止品管理リストを更新する。



○製造中止品に対して代替品の選定し、代替品への取替工事を実施した例は以下の通り。

No.	情報入手日	情報提供元	機器名	製造中止品／サービス名称	メーカー等	供給期限等	対応策 (代替品の有無、納期等)	対応方針	対象プラント	
									川内1号	川内2号
1	2017年9月	A社	非常用ディーゼル発電機	機関付き磁気式回転計	B社	既に製造中止	代替品として信頼性と実績のあるC社製への換装	代替品として電気式回転計（アナログ式）に取替工事実施済	対策済	対策済
2	2020年3月	A社	脱気器水位伝送器	浮力式伝送器	D社	既に製造中止	代替品：有【代替仕様】ダイヤフラムシール付差圧伝送器（D社製）	代替品への取替工事完了	対策済	対策済
3	2020年3月	A社	タービン動補助給水ポンプ	油ポンプ用モータ（DC）	E社	既に製造中止	代替メーカー：E社	代替品への取替工事完了	対策済	対策済

1. 質問事項

熱時効と中性子照射脆化等の重畳について、影響が考えられる溶接方法、材料について示すこと。

2. 回 答

○「資料3－1 No. 7－3」にて回答。

1. 質問事項
破壊靱性値の実測値について、母材部、溶接部を明記すること。
2. 回 答
○「資料3－3 No. 追6－12」にて回答。

1. 質問事項
監視試験片の試験結果について、断面図等を示すこと。
2. 回 答
 - 「資料2 参考資料2～5」にて回答。

1. 質問事項

コンクリートの各劣化要因について、よくある事象なのか、起こりにくい事象なのか、国内外の事例と合わせて説明すること。

また、伊方発電所において過去にアルカリ骨材反応が問題となったが、コンクリートの材料について川内との相違を説明すること。

2. 回 答

○コンクリートの各劣化要因の国内外事例及び伊方原子力発電所と川内原子力発電所のコンクリート材料の相違点等を次ページ以降に示す。

○コンクリートの各劣化要因に係る国内外の事例

- ・原子力発電所では、ニューシア※1等によると、「アルカリ骨材反応」については国内外において劣化が生じた事例が認められているが、その他の劣化要因に関する事例の報告は見当たらなかった。
- ・コンクリートの劣化事例を、その他の発電所とあわせて下表に示す。

経年劣化事象	劣化要因	コンクリートの劣化事例 (—: 事例なし、/ : 該当なし)		
		原子力発電所 (国内外の商用炉)	その他の発電所 (国内の火力・水力発電所)	参考 (一般構造物※5)
強度低下	熱	—	/	/
	放射線照射	—	/	/
	中性化	—	・火力発電所の取水構造物において、かぶり厚さが不足している箇所で発生が確認されている※2	・仕上げが施されていない箇所や、雨水にさらされる環境で多く確認されている
	塩分浸透	—	・火力発電所における揚炭棧橋(海洋構造物)等で発生が確認されている※3	・海岸に近接した構造物等で多く確認されている
	機械振動	—	—	・高度経済成長期に架設された橋梁の鉄筋コンクリート床版が、交通振動に伴う疲労により劣化する事象が確認されているが、1972年の「道路橋示方書」改訂以降、類似事例は減少している
	アルカリ骨材反応	・国内では伊方1号において発生が確認されている(①参照) ・国外では米国シーブルック1号において発生が確認されている(②参照)	・富山県内の65箇所の水力発電所のうち、軽微なものも含めると27箇所で発生が確認されている※4	・1980年代後半より研究が盛んに進められ、その結果を踏まえたアルカリ総量規制等の基準化に伴い、新設構造物での発生事例は減少しているが、現在でも使用材料や使用環境によっては確認されている事例もある
	凍結融解	—	・富山県内の65箇所の水力発電所のうち、軽微なものも含めると41箇所で発生が確認されている※4	・一般に、建築構造物より土木構造物の方が影響を受けやすい条件下にあり、道路橋、擁壁、ダム等で多く確認されている(土木構造物は水と直接接する機会が多く、気象作用の厳しい箇所に設置されている)
遮蔽能力低下	熱	—	/	/

※1 NUCIA (NUClearn Information Archives) : 原子力施設情報公開ライブラリーといい、国内外の原子力発電所におけるトラブル情報等を公開しているサイト

※2 橋本他「苅田発電所新1号機再開発に伴う取水設備の健全度診断(1995年9月 電力土木技術協会誌)」

※3 藤本他「石川石炭火力発電所 揚炭棧橋上部工の補修工事と今後の維持管理(2019年11月 電力土木技術協会誌)」

※4 参納他「電力土木コンクリート構造物の劣化実態調査(2008年1月 電力土木技術協会誌)」

※5 日本コンクリート工学会「コンクリート診断技術'21」

①アルカリ骨材反応 (ASR) の国内事例 (伊方1号)

(1) 概要※1

- ・1977年に営業運転を開始した伊方1号(56.6万kW、PWR)では、1982年にタービン架台の梁側面のひび割れが認められたため、原因調査を行った結果、1987年にASRによるコンクリートの劣化と診断された。

(2) 原因※1

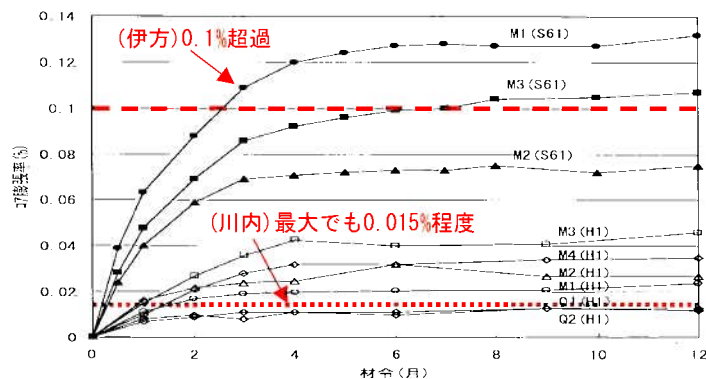
- ・使用骨材(砕石)が、ASRの反応性鉱物を有する「安山岩」であった。
- ・タービン架台周辺はASRが促進されやすい、高温・高湿度の環境であった。

		川内と伊方※2の材料比較	
		川内1, 2号 [1984年, 1985年]	伊方1号 [1977年]
骨材	粗骨材	砕石(薩摩川内市川永野産安山岩)	砕石(山口県柳井市産安山岩)
	細骨材	砕砂(薩摩川内市川永野産安山岩) 海砂(佐賀県唐津市呼子町小川島)	洗砂(海砂を脱塩したもの) (愛媛県今治市蒼社川沖)
セメント		フライアッシュセメント B種	中庸熱ポルトランドセメント
混和材料		AE減水剤	減水剤

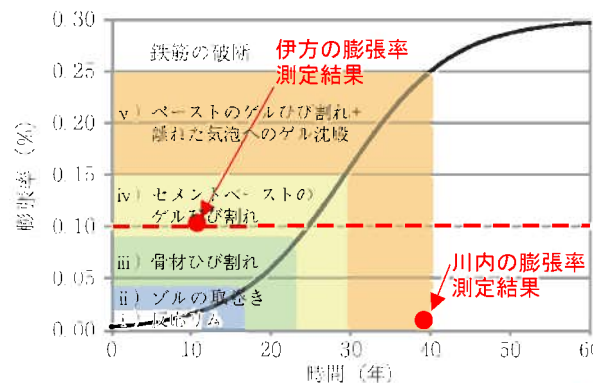
[] 内は営業運転開始年

(3) 川内1, 2号との違い

- ・伊方1号の運転開始は1977年で、1986年のASR抑制対策の原型(建設省暫定案※3)の発行前であった。川内1, 2号は1986, 87年にモルタルバー法により、使用骨材が有害でないことを確認している。
- ・膨張率測定結果より、伊方1号は運転開始約10年後に「試験期間(材令)3ヶ月で0.1%以上」の膨張を示すコンクリートコアが確認されているのに対して、川内1, 2号は運転開始約40年後の現在において「試験期間(材令)約4ヶ月で0.000~0.015%」程度であった。



伊方1号の膨張率測定結果※4



(参考) ASR進行段階とコンクリートの膨張曲線概念図※5

- ※1 伊方原子力発電所環境安全管理委員会技術専門部会(2002年11月26日開催)「資料1-2」
- ※2 日本建築学会大会学術講演梗概集「アルカリ骨材反応が生じたタービン発電機架台の裕度把握(その1)研究概要(2005)」
- ※3 建設省「アルカリ骨材反応暫定対策(土木構造物)及び「アルカリ骨材反応対策に関する暫定指針(建築物)(1986)」
- ※4 伊方原子力発電所環境安全管理委員会技術専門部会(2002年11月26日開催)「資料1-2」に一部追記
- ※5 片山哲哉「アルカリシリカ反応入門 ③アルカリシリカ反応の診断方法(2014年 日本コンクリート工学会誌)」に一部追記

②アルカリ骨材反応(ASR)の国外事例(米国シーブルック1号)

(1) 概要※1,2

- ・1990年に運転を開始したシーブルック1号(124万kW、PWR、ニューハンプシャー州)において、2010年頃、制御建屋地下コンクリートでASR特有のひび割れが確認された。

(2) 原因※1,2

- ・建設時の施工中における防水膜の損傷による地下水の浸入が原因と考えられている。
- ・建設時に実施された試験では、遅延膨張性の反応性鉱物を適切に把握できていなかった。

(3) 川内1,2号との違い

- ・川内1,2号は建屋の防水塗装等を適切な管理の下で施工しており、地下水が浸入する可能性は極めて低い。
- ・遅延膨張性の反応性鉱物について、川内1,2号では偏光顕微鏡観察の結果、下表の通り「細骨材」の一部に確認されたが、骨材にASRの現象としてのひび割れや膨張は生じていないことから、遅延膨張により急速に劣化が進行する可能性は低いと判断している。
- ・詳細は次ページ以降、③にて示す。



シーブルック1号におけるASRの発生状況※1

川内1,2号 遅延膨張性の反応性鉱物確認結果

骨材	確認結果
粗骨材	確認されなかった
細骨材	海砂の一部である流紋岩中に微量確認された →骨材にひび割れや膨張は生じておらず、急速に劣化が進行する可能性は低いと判断している

※1 Energiforsk「AGING MANAGEMENT OF NUCLEAR PRESTRESSED CONCRETE CONTAINMENTS(2015)」

※2 「ニューシア 原子力施設公開ライブラリー」より
(URL:<http://nucia.jp/nucia/kg/KgTroubleView.do?troubleId=206>)

③川内1, 2号における潜在膨張性の評価について (1/3)

(1) 粗骨材の観察結果

a. 評価対象、b. 骨材の岩種・鉱物の確認

- ・ 第7回分科会(資料-1)にて偏光顕微鏡による観察結果をご説明(1号: 原子炉格納施設等(外部遮蔽壁)、2号: 取水槽(海中帯))。

c. 潜在膨張性の評価

- ・ 偏光顕微鏡により反応性鉱物を同定した結果、粗骨材に急速膨張性の反応性鉱物(クリストバライト等)が認められた。
⇒ 促進膨張試験の結果※、急速膨張の可能性は低いと判断した。

※JCI-S-011-2017に基づき2020年に実施。判定基準(3ヶ月以上の促進養生後の膨張率が0.05%未満)に対し、膨張率は0.004%程度であった。

- ・ 粗骨材に遅延膨張性の反応性鉱物(隠微晶質石英、微晶質石英)は認められなかった。

(参考) 急速/遅延膨張性の概要

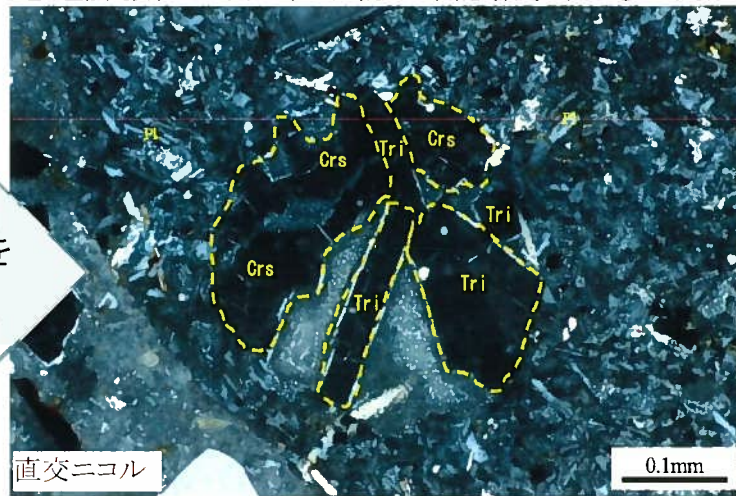
分類	解説
急速膨張性	反応性鉱物として、クリストバライト、トリディマイト、オパール、カルセドニー等があり、それらの鉱物が反応して膨張が生じる
遅延膨張性	反応性鉱物として、隠微晶質石英、微晶質石英があり、それらの鉱物が反応してコンクリート打設後10数年経過した後に膨張が生じる

第7回分科会説明資料(資料-1 P17抜粋)



石基を拡大

急速膨張性の反応性鉱物の確認結果(2号の例)



反応性鉱物としてクリストバライトとトリディマイトが確認された。クリストバライトは直交ニコルでは暗く観察され、トリディマイトは薄板状や楔形をしており直交ニコル下では双晶を示す。大きくまとまった部分を破線内に示す。

Crs: クリストバライト
Tri: トリディマイト

③川内1, 2号における潜在膨張性の評価について (2/3)

(2) 細骨材の観察結果

a. 評価対象

コンクリート構造物の健全性への影響は粗骨材の反応の方が顕著であると考えられるものの、細骨材の反応による関与も否定できないことから、細骨材についても偏光顕微鏡観察による確認を実施した。

細骨材については、実体顕微鏡観察より反応リムやゲルが生じている可能性のある箇所(7箇所)を対象に骨材岩種の特定及び反応性鉱物の有無の確認を実施した。

偏光顕微鏡により細骨材を観察した箇所

対象構造物	対象部位	細骨材観察箇所〔1号炉〕		細骨材観察箇所〔2号炉〕	
		該当	細骨材の岩種	該当	細骨材の岩種
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	内壁及び床	—		—	
	基礎マット	—		—	
取水槽	海中帯	○	海砂：軽石、流紋岩、安山岩、砂岩等	○	海砂：安山岩、流紋岩、頁岩、軽石等
	干満帯	○	海砂：砂岩、頁岩、軽石、安山岩等	○	海砂：頁岩、安山岩、流紋岩、軽石等
	気中帯	○	海砂：砂岩、頁岩、流紋岩、安山岩等	○	海砂：頁岩、安山岩、流紋岩、砂石等
非常用ディーゼル発電用燃料油貯油槽基礎	—		○	砕砂：安山岩 海砂：花崗岩質岩、頁岩、流紋岩、砂岩等	
燃料取替用水タンク基礎	—		—		

○：遅延膨張性の反応性鉱物が確認された箇所

③川内1, 2号における潜在膨張性の評価について (3/3)

(2) 細骨材の観察結果

b. 骨材の岩種・鉱物の確認

細骨材である砕砂は安山岩、海砂には安山岩、流紋岩、頁岩、軽石等が含まれている。このうち流紋岩については、斜長石の斑晶ならびにその粒間を埋める微細な組織からなる石基から構成される。

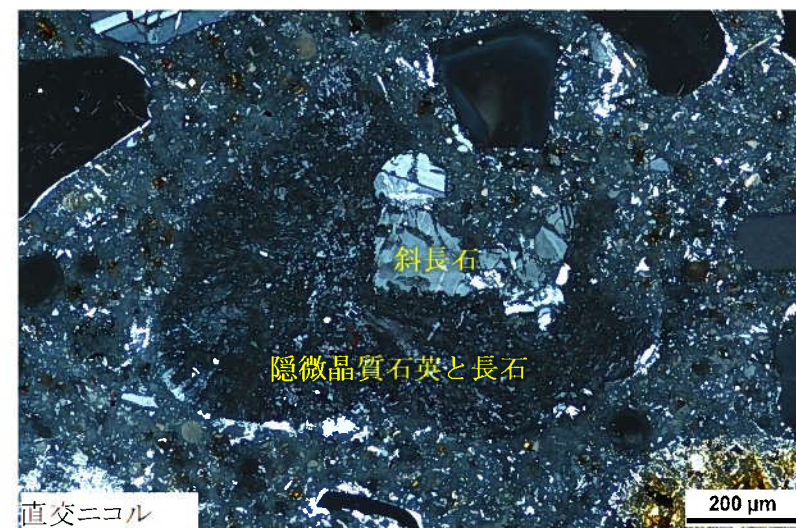
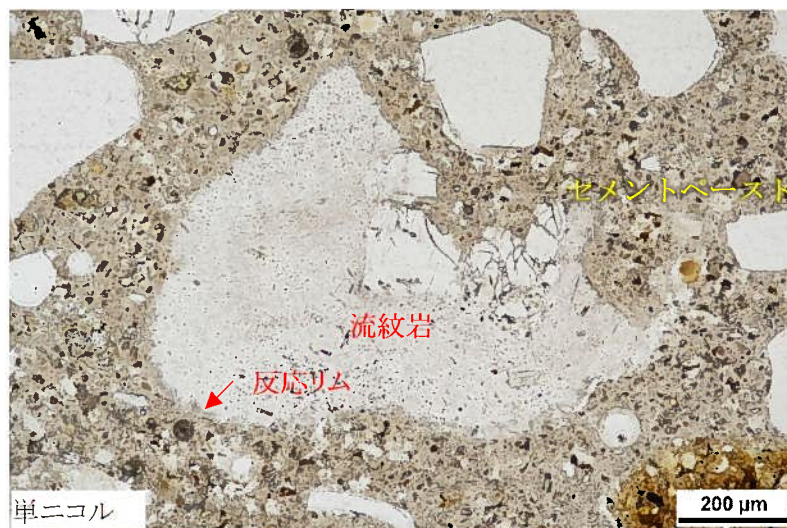
c. 潜在膨張性の評価

- ・ 細骨材に急速膨張性の反応性鉱物(クリストバライト等)が認められた。

⇒促進膨張試験の結果※、急速膨張の可能性は低いと判断した。

※JCI-S-011-2017に基づき2020年に実施。判定基準(3ヶ月以上の促進養生後の膨張率が0.05%未満)に対し、膨張率は0.006%程度であった。

- ・ 「取水槽」の一部の部位(1号：取水槽(気中帯)、2号：取水槽(干満帯))において、海砂の一部である流紋岩の中に遅延膨張性の反応性鉱物(隠微晶質石英、微晶質石英)が認められた。
⇒細骨材に膨張や劣化を生じるような進行したアルカリ骨材反応の現象としてのひび割れや膨張は確認されていないことから、遅延膨張の可能性は低いと判断した。なお、流紋岩以外については、遅延膨張性の反応性鉱物は認められなかった。



遅延膨張性の反応性鉱物(取水槽 気中帯(1号)の例)

1. 質問事項

放射線照射による強度低下について、中性子照射によるコンクリートの劣化メカニズムを説明すること。また、そのメカニズムを健全性評価にどう考慮しているかを説明すること。

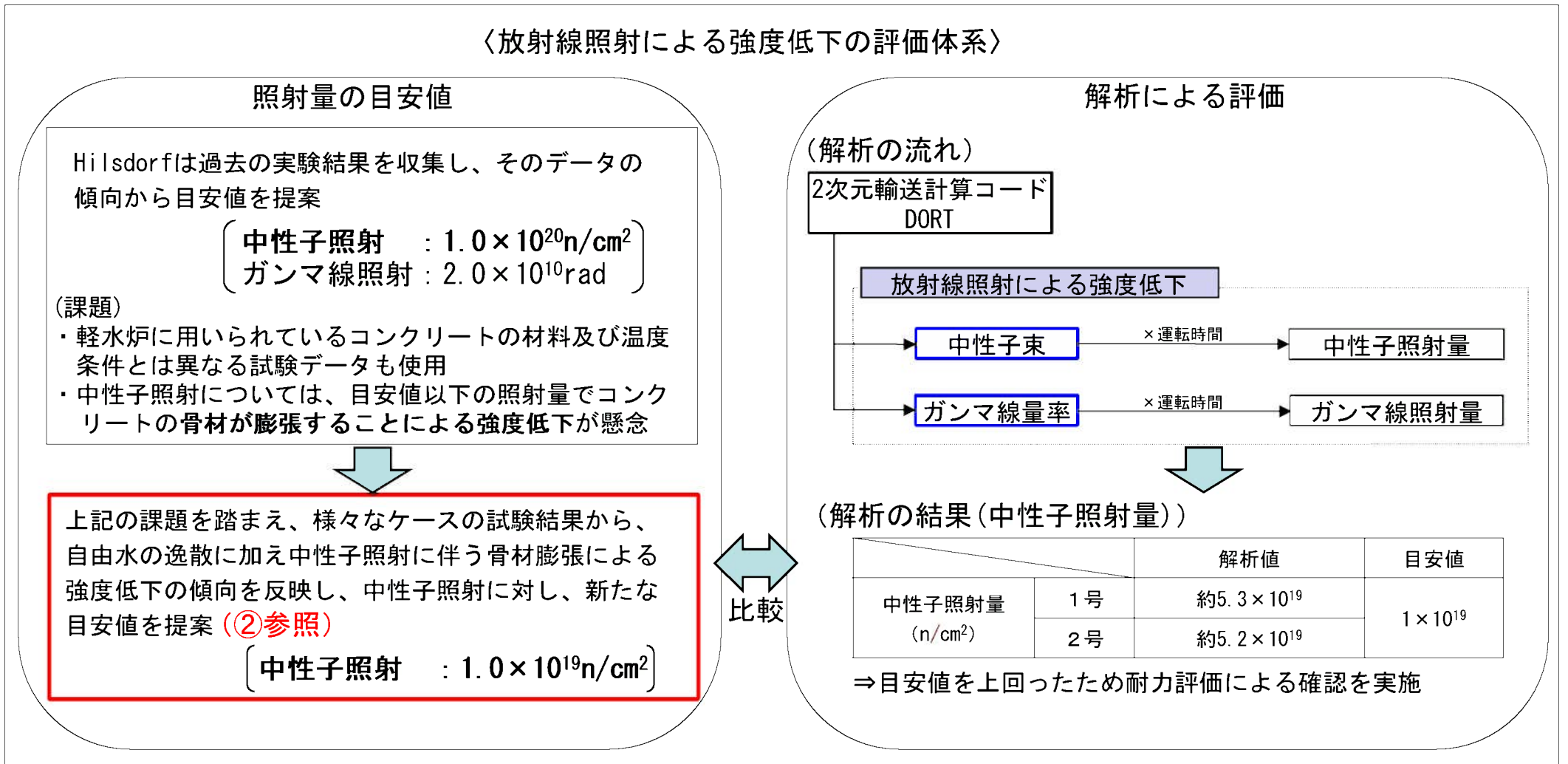
2. 回 答

○中性子照射によるコンクリートの劣化メカニズムと健全性評価への考慮について次ページ以降に示す。

○放射線照射によるコンクリートの劣化メカニズム及び評価上の位置付けについて

- ・放射線照射(中性子・ガンマ線)によるコンクリートの主な劣化メカニズムは、現在の知見によると、「自由水の逸散」及び「中性子照射による骨材の膨張」の2つの要因に起因している(①参照)。
- ・高経年化技術評価における評価体系は下図の通りであり、劣化メカニズムは目安値を設定する過程で考慮している(②参照)。

〈放射線照射による強度低下の評価体系〉

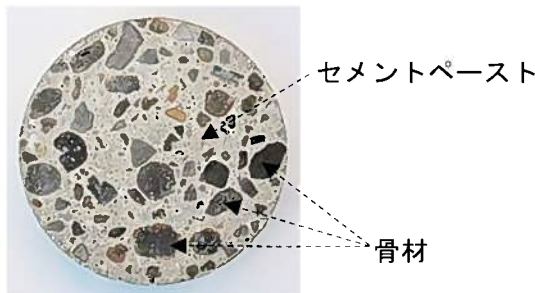


①放射線照射(中性子・ガンマ線)によるコンクリートの主な劣化メカニズム

- ・コンクリートの主な劣化メカニズムは「自由水の逸散」及び「中性子照射による骨材の膨張」の2つの要因に起因しており、その詳細を下表に示す。
- ・ガンマ線照射については「自由水の逸散」、中性子照射については「自由水の逸散」に加えて「骨材の膨張」の影響があることから、ガンマ線照射よりも中性子照射の方がコンクリートの強度・変形特性に及ぼす影響は大きい傾向にある。

放射線照射がコンクリートに及ぼす影響※1

構成材料	ガンマ線	中性子
セメントペースト	<ul style="list-style-type: none"> ・ガンマ発熱により水分が蒸発し乾燥・収縮 ・放射線分解により、水が水素・酸素に分解され、空隙内に圧力が蓄えられ、水分移動が加速し乾燥・収縮が促進 	<ul style="list-style-type: none"> ・ガンマ線と同じ（中性子照射環境では二次ガンマ線が生じる）
骨材	<ul style="list-style-type: none"> ・電離作用により結合角が変化するなど、メタミクト化※2が生じ、岩石鉱物の密度が低下（ただし、その影響は中性子よりも非常に小さい） 	<ul style="list-style-type: none"> ・原子の弾き出しによる結晶構造の歪みと二次ガンマ線の影響によるメタミクト化※2により、岩石鉱物の密度が低下し、骨材が膨張
コンクリート	<ul style="list-style-type: none"> ・セメントペーストの乾燥・収縮により骨材周囲にひび割れが発生しヤング率が低下 ・未反応セメントが反応し強度を増加させる作用も有り 	<ul style="list-style-type: none"> ・セメントペーストの乾燥・収縮と骨材の膨張により、骨材周囲に複数のひび割れに伴う損傷が発生し、ヤング率や強度が低下



コンクリートコアサンプル (断面)

※1 株式会社三菱総合研究所「平成28年度原子力施設等防災対策等委託費(高経年化技術評価高度化(放射線照射によるコンクリート建造物の長期健全性評価に関する研究))事業 成果報告書」

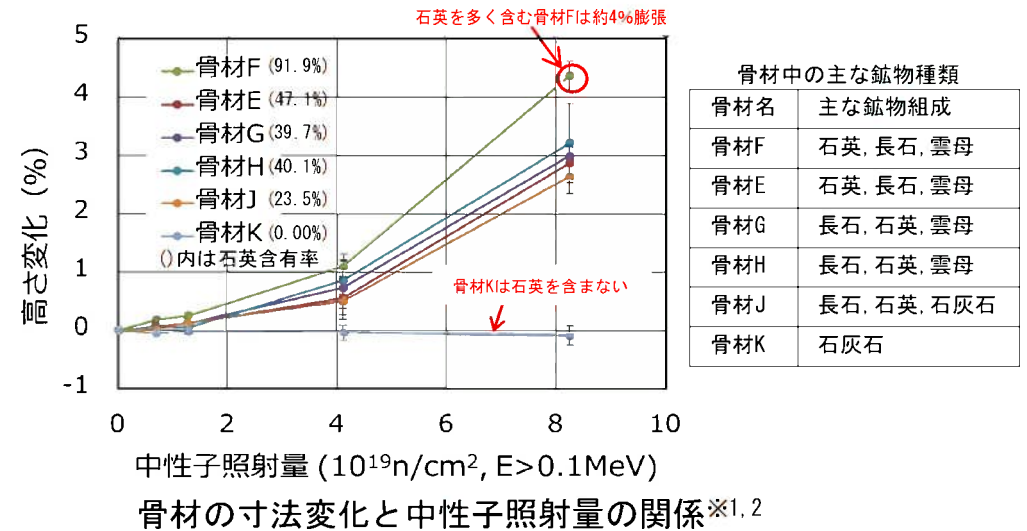
※2 放射線によって結晶格子が破壊され、ガラスのような非晶質(アモルファス)※3とみなされる状態

※3 結晶とは異なり原子や分子が正しく配置されておらず、乱れた配列をしている状態

②中性子照射量の目安値 ($1.0 \times 10^{19}n/cm^2$) の設定について (小嶋他^{※1})

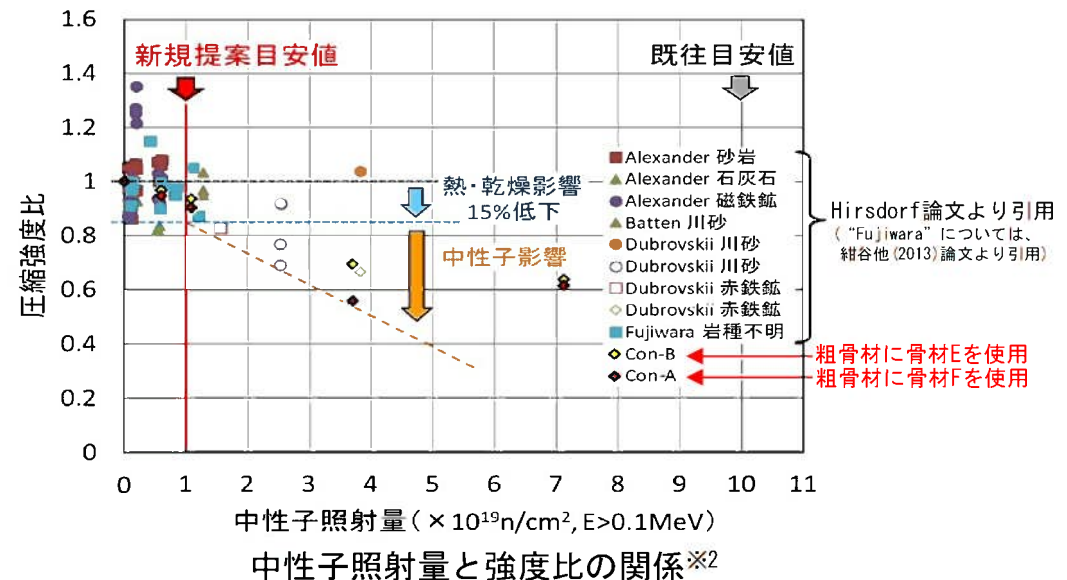
(1) 骨材膨張と中性子照射量の関係

- ・ 中性子照射量が $1.0 \times 10^{19}n/cm^2$ 程度を超えると、骨材の膨張(高さ変化)が発生。その程度は骨材に含まれる鉱物の種類と含有率により異なる。
- ・ 鉱物の中でも「石英」が最も中性子照射の影響を受けやすく、「石英」の含有率が高い骨材Fでは $8.0 \times 10^{19}n/cm^2$ 程度の中性子照射量で約4%膨張する
- ・ なお、川内1, 2号で使用されている安山岩は一般的に「石英」含有率が低いとされており、中性子照射による骨材膨張は比較的小さいと考える。



(2) 中性子照射と強度低下の関係

- ・ 中性子照射による強度低下の影響は、熱・乾燥による影響を除くと、 $1.0 \times 10^{19}n/cm^2$ より大きい範囲で確認できる^{※3}。



※1 小嶋他「中性子照射がコンクリートの強度に及ぼす影響 (NTEC-2019-1001)」

※2 紺谷修「放射線照射がコンクリート特性に及ぼす影響 (JASMiRT第2回国内ワークショップ, 2018)」に一部追記

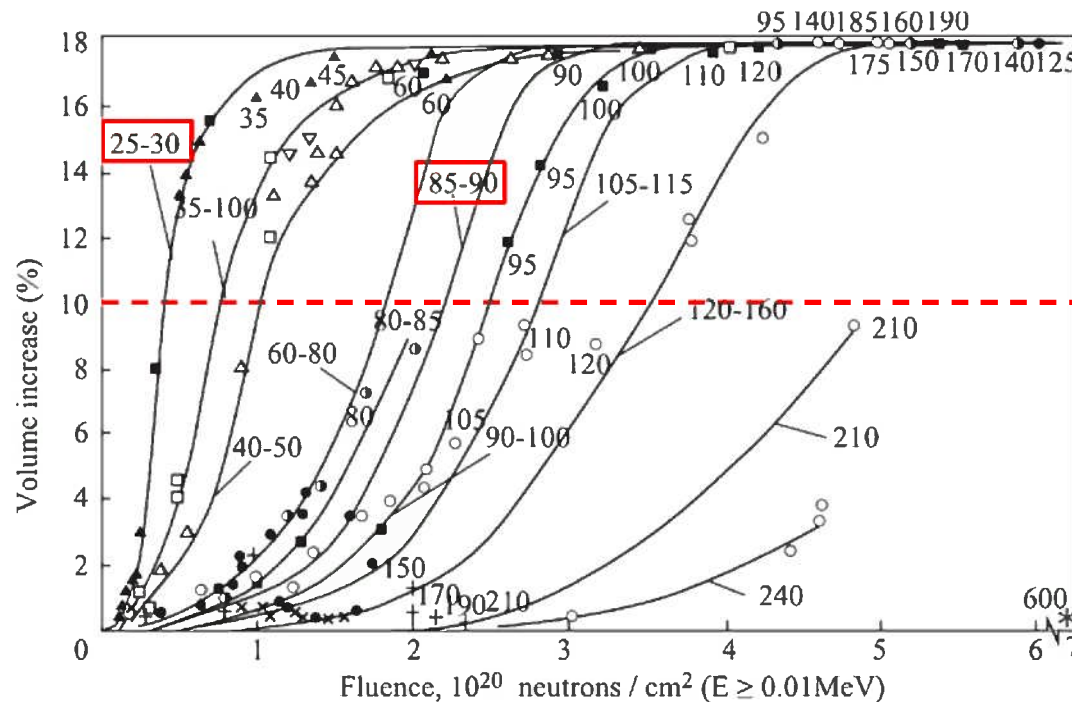
※3 石英のメタミクト化については温度依存性を有することから(詳細を(3)にて示す)、実験時の照射環境温度(約70℃)における中性子照射量を、実機の環境に近い温度条件(55℃)に対応した中性子照射量に補正

Hirsdorf論文より引用
(“Fujiwara”については、紺谷他(2013)論文より引用)

②中性子照射量の目安値 ($1.0 \times 10^{19} \text{n/cm}^2$) の設定について

(3) 石英の膨張に関する温度依存性※

- ・石英のメタミクト化は照射温度の影響を大きく受けることが明らかとなっており、照射温度が高温であるほど、熱的な治癒効果が大きくなると考えられる。
- ・下図はメタミクト化に伴う石英の体積膨張率と中性子照射量の関係を示しており、照射温度が高温なほど治癒効果により、同じ照射量でも体積膨張率が低くなっている。
- ・例えば、25-30℃環境と85-90℃環境で比較すると、10%の体積膨張に必要な照射量は5倍程度も異なる。



メタミクト化に伴う石英の体積膨張率と中性子照射量の関係※

※ 株式会社三菱総合研究所「平成28年度原子力施設等防災対策等委託費(高経年化技術評価高度化(放射線照射によるコンクリート構造物の長期健全性評価に関する研究))事業 成果報告書」

1. 質問事項

炉心槽の不安定破壊の評価について、応力拡大係数が1、2号炉で異なる理由を説明すること。

2. 回 答

○炉心槽の亀裂安定性評価対象の溶接線は川内1号機：サブマージアーク溶接、川内2号機：自動TIG溶接によって施工している。

○次ページ以降に、サブマージアーク溶接と自動TIG溶接における、開先面と残留応力分布（軸方向）を示す。

○サブマージアーク溶接、自動TIG溶接ともに外面側、内面側で引張応力、板厚内部で圧縮応力であるが、サブマージアーク溶接と自動TIG溶接を比較すると、自動TIG溶接（2号）が比較的狭開先であるため、表面から深い位置で圧縮応力となり、結果として応力拡大係数が大きくなる。

○材料は1、2号炉とも母材がSUS304、溶接材料がSUS308Lである。



図1 開先面及び残留応力分布（1号：サブマージアーク溶接）


 内は商業機密に係る事項であるため公開できません。

図2 開先面及び残留応力分布（2号：自動TIG溶接）

内は商業機密に係る事項であるため公開できません。

1. 質問事項

IASCCで評価している炉内構造物の材料の強度は、照射を受けてどのように変化するのか。

2. 回 答

○炉内構造物の材料（SUS304系、SUS316系）は、中性子照射により元素のはじき出しによって生じた格子欠陥が転位の動きを妨げることとなり、強度が増加する。

○図1及び図2に示す通り、引張強さは照射量の増加に伴い上昇し、10~20 dpa で飽和している。

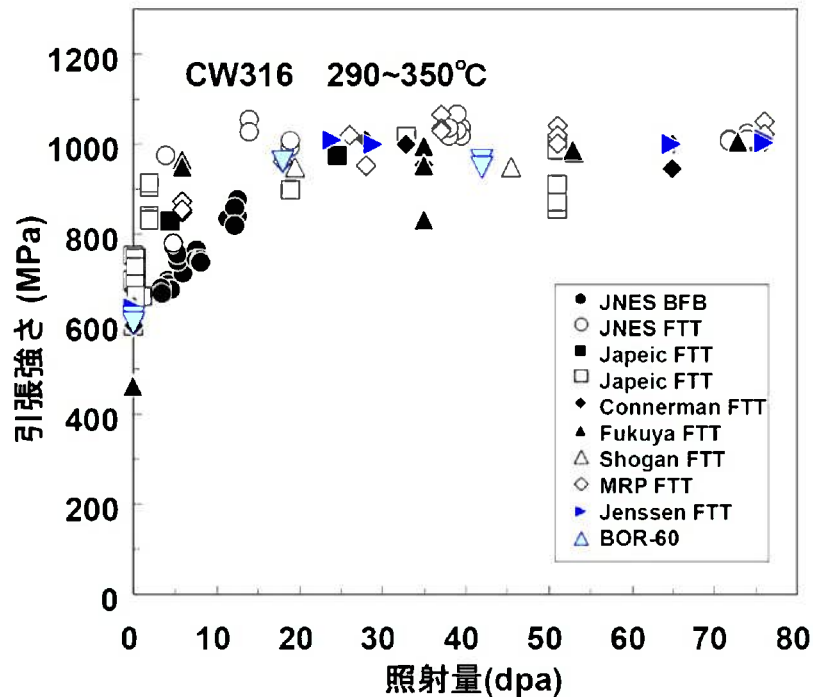


図1 SUS316CW の引張特性データの照射量依存性(試験温度: 290~350°C)

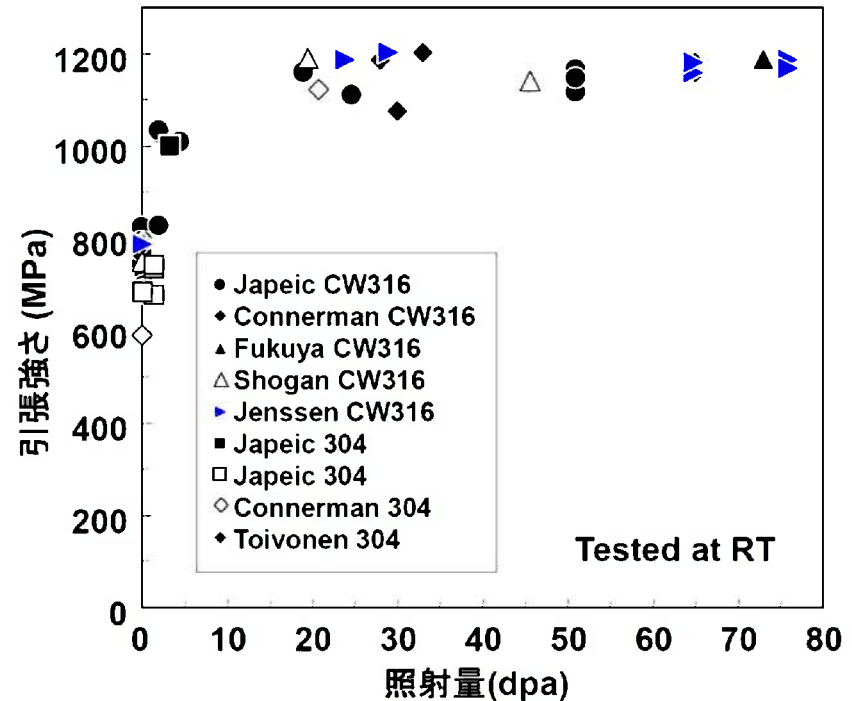


図2 SUS316CW 及び SUS304 の引張特性データの照射量依存性(試験温度: 室温)

【図 引用元】

加圧水型軽水炉炉内構造物用オーステナイト系ステンレス鋼の照射データに関する文献調査とデータ集の作成(受託研究): 日本原子力研究開発機構

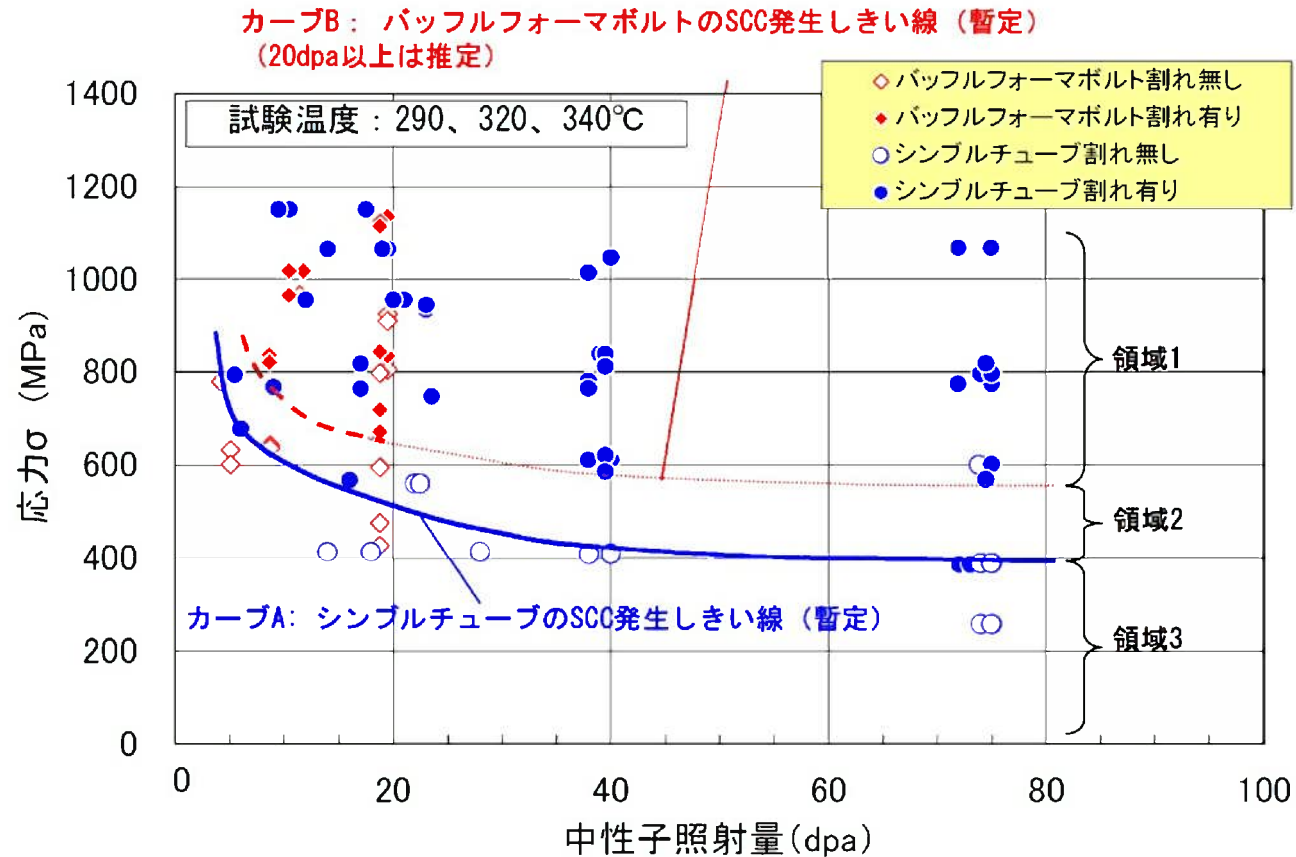
1. 質問事項

定荷重応力試験割れ試験結果のまとめの図について、2点の結果で破断の閾値を引いているがデータの信頼性をどのように考えているのか。

2. 回 答

○「第6回分科会 資料4-1 P13 図3」及び「第7回分科会 資料2 P15 図3」にて提示している図は、応力と破断時間を示すデータを例として示したものであり、実際の評価には使用していない。

○バッフルフォーマボルトの照射誘起型応力腐食割れに関する評価については、「IASCC評価技術に関する報告書（独）原子力安全基盤機構（平成21年9月）」及び「炉内構造物点検評価ガイドライン」に基づき、81点の試験結果から割れ発生応力線図を設定し、評価している。



- ① 領域1に含まれる場合
評価対象物は、評価対象時点で割れが発生する**可能性が高い**ものとみなす。
- ② 領域2に含まれる場合
評価対象物は、評価対象時点で割れが発生する**可能性が有る**ものとみなす。
- ③ 領域3に含まれる場合
評価対象物は、評価対象時点で割れが発生する**可能性が無い**ものとみなす。

図1 IASCCによる割れ発生しきい応力線図

【図引用元】

PWR炉内構造物点検評価ガイドライン：一般社団法人 原子力安全推進協会

1. 質問事項

クラッドの溶接の説明には入熱管理、溶接後熱処理の情報も記載すること。

2. 回 答

【入熱管理の方法】

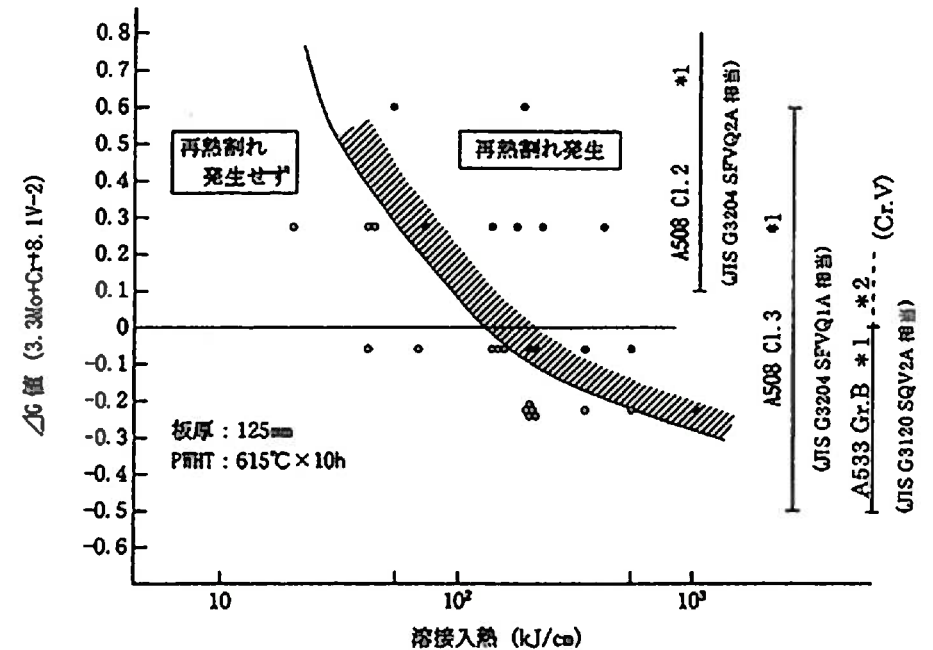
上部ふた、上部胴等には低合金鋼を用いており、ステンレス鋼の内張りを施している。一部の低合金鋼では大入熱溶接を用いた肉盛で溶接後熱処理が行われると局部的にき裂が発生することが米国PVRC (Pressure Vessel Research Council) の研究により確認されている。

川内1号炉においては、図1に示すように材料の化学成分 (ΔG 値) を踏まえ溶接入熱を管理し溶接を実施しており、き裂の発生する可能性は小さい。

なお、基本的には溶接電流、溶接電圧及び溶接速度を管理することで入熱管理を行っている。

表1 クラッドの溶接方法、材料等について
(第7回分科会 資料3-3 P13 再掲)

項目	内容
溶接方法	サブマージアーク溶接
溶接材料	SUS309系溶接材料にて溶接し、溶接後の組成がSUS304相当となる。
施工管理	予熱温度管理および電流・電圧・速度を計測し、指定の条件範囲内での施工していることを確認。 また、施工後検査としてPT・UTを実施。
フェライト量	溶着金属のサンプリング(成分分析)を行い、フェライト量確認を実施。
層数	1層
溶接幅	約50mm
肉厚管理	超音波厚さ計による計測・検査を行い、肉厚管理を実施。



*1: 規格成分による計算値
*2: 規格成分外のCr, Vを加えた計算値

図1 再熱割れ発生に及ぼす ΔG 値及び溶接入熱の影響
[引用元: 三菱重工技報 Vol.14 No.1 (1977-1)]

【溶接後熱処理】

溶接による残留応力の軽減、溶接熱影響部および溶接金属の軟化、靱性の回復等を目的として、クラッド溶接後に溶接後熱処理を実施している。

溶接後熱処理とは、溶接構造物を昇温して溶接部にクリープ変形を生じさせることにより、溶接による残留応力の軽減、溶接熱影響部および溶接金属の軟化、靱性の回復等を実施するものである。

RVの母材に適用している方法は、JIS Z 3700（炉内加熱による後熱処理方法）により実施し、被溶接後熱処理部の全部を加熱炉の中において、JSME溶接規格に規定された所定温度で所定時間熱処理している。



図2 大型熱処理炉外観



図3 熱処理炉台車へのRV設置の様子（4ループの例）

熱処理炉仕様	加熱方法	高速噴流型ガスバーナー
	温度計測	実体温度及び炉内温度
	有効範囲	幅13.0m×高さ11.7m×長さ26.0m
	最大積載荷重	650ton
	最高加熱温度	950℃