

No	対象号機	日付	資料名	該当ページ	コメント内容	コメント対応	回答日	完了日
1	1/2号機	2月2日	中性子照射脆化 劣化状況評価 補足説明資料	別紙6 6-1	Trpの式について転記ミスがあったが、計算において代入した値も間違った値を入れていないか改めて確認すること。また、他に転記ミス等がないか確認すること。	Trpの計算過程及び算出結果(1号p6-1~3)並びに加熱冷却曲線の適用時間(2号p7-3,4)について、値の修正を行った。また、劣化状況評価書と値の桁数を合わせる等の記載の適正化を行った。 [補足説明資料 1号炉 劣化状況評価(中性子照射脆化)] [補足説明資料 2号炉 劣化状況評価(中性子照射脆化)]	2023.4.21	2023.5.19
2	1/2号機	5月19日	資料-2-1 中性子照射脆化	23	特別点検のUTの結果から加圧熱衝撃評価に用いた評価手法が妥当であることを、分かりやすく説明できるよう記載を見直すこと。	特別点検のUTの結果から加圧熱衝撃評価に用いた評価手法が妥当であることを分かりやすい説明となるよう記載を見直した。 [スライド p.23]  また、回答資料 川内1, 2号炉-中性子照射脆化-2のとおり、当該箇所は劣化状況評価書のうち「劣化状況評価で追加する評価に係る技術評価書」に同様の記載があるため、上記対応を踏まえた修正を実施した。 本内容については、別途評価書の補正時に反映する。 [川内1号炉劣化状況評価書 劣化状況評価で追加する評価に係る技術評価書 p.9] [川内2号炉劣化状況評価書 劣化状況評価で追加する評価に係る技術評価書 p.9]	2023.6.15	
3	1/2号機	5月19日	川内1, 2号炉 原子炉容器の技術評価書	25,33	評価書においてL方向及びT方向についての注記を追記すること。(注記の記載内容についてはコメント反映整理表にて調整)	回答資料 川内1, 2号炉-中性子照射脆化-3のとおり、母材における上部棚吸収エネルギーの予測値については、JEAC4206-2007に基づきT方向の試験片にて評価しているため、T方向の試験片にて評価したことがわかるような注記を記載した。 本内容については、別途評価書の補正時に反映する。 [川内1号炉劣化状況評価書 原子炉容器の技術評価書 p.25] [川内2号炉劣化状況評価書 原子炉容器の技術評価書 p.25]  なお、1号炉の原子炉容器の技術評価書 p.33(2号炉p.33)においては、川内1, 2号炉の30年評価時より、参考としてL方向も記載していたため、40年評価においてもそれを踏襲しL方向の値も記載している。	2023.6.15	
4	1/2号機	5月19日	補足説明資料(中性子照射脆化)	11	Tr30の値を求める際の近似曲線について、どのような近似式をいつから用いているのか確認すること。 また、近似を行う際のパラメータの条件についても確認すること。	回答資料 川内1, 2号炉-中性子照射脆化-4, 6のとおり。	2023.6.15	
5	1/2号機	5月19日	補足説明資料(中性子照射脆化)	11	Tr30の計算に使用した温度、吸収エネルギーの値は提出されている報告書の値と一致しているのか確認すること。	Tr30の計算にあたっては、シャルピー衝撃試験の試験温度及びその温度での吸収エネルギーの値を用いて導出する。 それらの値については、メーカ報告書の値を用いているため一致している。	2023.6.15	
6	1/2号機	5月19日	補足説明資料(中性子照射脆化)	11	Tr30の値について、小数点以下の処理をどのように行っているのか示すこと。	回答資料 川内1, 2号炉-中性子照射脆化-4, 6のとおり。	2023.6.15	
7	1/2号機	5月19日	資料-2-1 中性子照射脆化	23~ 26	「8. 経年劣化の傾向評価」及び「9. 長期施設管理方針の有効性評価」の内容が劣化状況評価書又は補足説明資料に記載された内容か確認し、記載がなければ、補足説明資料への反映を検討すること。	「8. 経年劣化の傾向評価」及び「9. 長期施設管理方針の有効性評価」の内容が劣化状況評価書のうち「劣化状況評価で追加する評価に係る技術評価書」に記載されているため、補足説明資料への反映は不要とした。	2023.6.15	
8	1/2号機	5月19日	補足説明資料(中性子照射脆化)	13	原子炉容器の厚さについては公開情報と認識しているが、マスキングが必要か確認すること。	川内1/2号炉の固有の原子炉容器の厚さについては、メーカの商業機密情報であるため非公開としている。 なお、メーカのHPIに原子炉容器の厚さが記載してあるが、これは代表的な数値を参考として記載しているものである。	2023.6.15	

## 2. 中性子照射脆化

## (1) 関連温度

川内1号炉の30年目の評価実施後、2019年に第5回目の照射試験片の取り出しを実施し、照射脆化の監視試験を実施した。なお、60年時点の関連温度の予測値について、脆化予測法をJEAC4201-2007/2010追補版から変更し、「日本電気協会 原子炉構造材の監視試験方法 JEAC4201-2007/2013追補版」(以下、(JEAC4201)という。)の国内脆化予測法に基づく評価結果を記載している。その結果を表2-1に示す。

評価結果は脆化予測式による予測を逸脱しておらず、特異な脆化は認められない。

また、川内1号炉の30年目及び40年目の評価では深さ10mmの想定欠陥を用いた加圧熱衝撃評価を実施し、原子炉容器の60年時点の健全性を確認しており、運転期間延長認可申請に際して実施した特別点検において、表面近傍の深さ5mm程度の欠陥が検出可能なUTにより原子炉容器胴部炉心領域の母材部・溶接部全面の探傷を実施した結果、脆性破壊の起点となるような有意な欠陥がないことを確認している。

よって、30年目及び40年目の評価で実施した加圧熱衝撃評価は十分保守的な評価手法であり、評価結果の妥当性が確認できたと考える。

## (2) 上部柵吸収エネルギー

60年時点の上部柵吸収エネルギーの予測値について、30年目と40年目の評価を比較した結果を表2-1に示す。

なお、第5回の監視試験片の照射量は国内USE予測式の適用範囲外であるが、第5回の監視試験の上部柵吸収エネルギー実測値は「日本電気協会 原子力発電所用機器に対する破壊靱性の確認試験方法 (JEAC4206-2007)」(以下、「JEAC4206」という。)で要求している68Jを上回っている。

60年時点の上部柵吸収エネルギーの予測値は、30年目の評価と同様に、68Jを上回っており、十分な上部柵吸収エネルギーがあることを確認している。

また、定期的に超音波探傷検査を実施し、有意な欠陥のないことを確認できている。

以上のことから、原子炉容器の照射脆化については、30年目の評価及びそれ以降の保全は有効であったと評価できる。

## 2. 中性子照射脆化

### (1) 関連温度

川内2号炉の30年目の評価実施後、2020年に第4回目の照射試験片の取り出しを実施し、照射脆化の監視試験を実施した。なお、60年時点の関連温度の予測値について、「日本電気協会 原子炉構造材の監視試験方法 JEAC4201-2007/2013追補版」（以下、(JEAC4201)という。)の国内脆化予測法に基づく評価結果を記載している。その結果を表2-1に示す。

評価結果は脆化予測式による予測を逸脱しておらず、特異な脆化は認められない。

また、川内2号炉の30年目及び40年目の評価では深さ10mmの想定欠陥を用いた加圧熱衝撃評価を実施し、原子炉容器の60年時点の健全性を確認しており、運転期間延長認可申請に際して実施した特別点検において、表面近傍の深さ5mm程度の欠陥が検出可能なUTにより原子炉容器胴部炉心領域の母材部・溶接部全面の探傷を実施した結果、脆性破壊の起点となるような有意な欠陥がないことを確認している。

よって、30年目及び40年目の評価で実施した加圧熱衝撃評価は十分保守的な評価手法であり、評価結果の妥当性が確認できたと考える。

### (2) 上部柵吸収エネルギー

60年時点の上部柵吸収エネルギーの予測値について、30年目と40年目の評価を比較した結果を表2-1に示す。

なお、第4回の監視試験片の照射量は国内USE予測式の適用範囲外であるが、第5回の監視試験の上部柵吸収エネルギー実測値は「日本電気協会 原子力発電所用機器に対する破壊靱性の確認試験方法 (JEAC4206-2007)」（以下、「JEAC4206」という。）で要求している68Jを上回っている。

60年時点の上部柵吸収エネルギーの予測値は、30年目の評価と同様に、68Jを上回っており、十分な上部柵吸収エネルギーがあることを確認している。

また、定期的に超音波探傷検査を実施し、有意な欠陥のないことを確認できている。

以上のことから、原子炉容器の照射脆化については、30年目の評価及びそれ以降の保全は有効であったと評価できる。

「(社)日本電気協会 原子炉構造材の監視試験方法 (JEAC4201-2007 [2013年追補版])」(以下 JEAC4201) の国内脆化予測法による現時点 (2020年3月末時点) と運転開始後 60年時点での関連温度予測値及び国内 U S E 予測式による上部柵吸収エネルギー予測値並びに国内脆化予測法による予測と監視試験結果の関係を表2.3-5及び表2.3-6並びに図2.3-3に示す。

評価の結果、関連温度実測値は予測の範囲内であった。

表2.3-5 川内 1号炉 原子炉容器本体胴部 (炉心領域部) の中性子照射脆化に対する関連温度の予測値

評価時期	中性子照射量*1 ( $\times 10^{19}\text{n/cm}^2$ ) [E>1MeV]	関連温度*2 (°C)		
		母材	溶接金属	熱影響部
現時点 (2020年3月末時点)	2.92	23	-23	12
運転開始後60年時点*3	5.56	40	-7	29

\*1 : 内表面から板厚の1/4深さでの中性子照射量、内表面の中性子照射量に JEAC4201 附属書B「中性子照射による関連温度移行量及び上部柵吸収エネルギー減少率の予測」に示される式で求めた減衰率を乗じて算出

\*2 : 内表面から板厚の1/4深さでの予測値

\*3 : 2020年4月以降の設備利用率100%で運転すると仮定して算出

表2.3-6 川内 1号炉 原子炉容器本体胴部 (炉心領域部) の中性子照射脆化に対する上部柵吸収エネルギーの予測値

評価時期	中性子照射量*1 ( $\times 10^{19}\text{n/cm}^2$ ) [E>1MeV]	上部柵吸収エネルギー*2 (J)		
		母材*4	溶接金属	熱影響部
現時点 (2020年3月末時点)	2.92	168	189	180
運転開始後60年時点*3	5.56	164	183	175

\*1 : 内表面から板厚の1/4深さでの中性子照射量、内表面の中性子照射量に JEAC4201 附属書B「中性子照射による関連温度移行量及び上部柵吸収エネルギー減少率の予測」に示される式で求めた減衰率を乗じて算出

\*2 : 内表面から板厚の1/4深さでの予測値

\*3 : 2020年4月以降の設備利用率100%で運転すると仮定して算出

\*4 : T方向 (試験片の長手方向が圧延方向に直角)

「(社)日本電気協会 原子炉構造材の監視試験方法 (JEAC4201-2007 [2013年追補版])」(以下 JEAC4201) の国内脆化予測法による現時点 (2020年3月末時点) と運転開始後60年時点での関連温度予測値及び国内USE予測式による上部柵吸収エネルギー予測値並びに国内脆化予測法による予測と監視試験結果の関係を表2.3-5及び表2.3-6並びに図2.3-3に示す。

評価の結果、関連温度実測値は予測の範囲内であった。

表2.3-5 川内2号炉 原子炉容器本体胴部 (炉心領域部) の中性子照射脆化に対する関連温度の予測値

評価時期	中性子照射量*1 ( $\times 10^{19}\text{n/cm}^2$ ) [E>1MeV]	関連温度*2 (°C)		
		母材	溶接金属	熱影響部
現時点 (2020年3月末時点)	2.81	7	-15	-10
運転開始後60年時点*3	5.59	24	2	7

- \*1: 内表面から板厚の1/4深さでの中性子照射量、内表面の中性子照射量に JEAC4201 附属書B「中性子照射による関連温度移行量及び上部柵吸収エネルギー減少率の予測」に示される式で求めた減衰率を乗じて算出
- \*2: 内表面から板厚の1/4深さでの予測値
- \*3: 2020年4月以降の設備利用率100%で運転すると仮定して算出

表2.3-6 川内2号炉 原子炉容器本体胴部 (炉心領域部) の中性子照射脆化に対する上部柵吸収エネルギーの予測値

評価時期	中性子照射量*1 ( $\times 10^{19}\text{n/cm}^2$ ) [E>1MeV]	上部柵吸収エネルギー*2 (J)		
		母材*4	溶接金属	熱影響部
現時点 (2020年3月末時点)	2.81	205	197	197
運転開始後60年時点*3	5.59	202	191	193

- \*1: 内表面から板厚の1/4深さでの中性子照射量、内表面の中性子照射量に JEAC4201 附属書B「中性子照射による関連温度移行量及び上部柵吸収エネルギー減少率の予測」に示される式で求めた減衰率を乗じて算出
- \*2: 内表面から板厚の1/4深さでの予測値
- \*3: 2020年4月以降の設備利用率100%で運転すると仮定して算出
- \*4: T方向 (試験片の長手方向が圧延方向に直角)

川内 1, 2 号炉—中性子照射脆化— 4, 6

<p>タイトル</p>	<p>Tr30 の値を求める際の近似曲線について、どのような近似式をいつから用いているのか確認すること。                  また、近似を行う際のパラメータの条件についても確認すること。</p> <p>Tr30 の値について、小数点以下の処理をどのように行っているのか示すこと。</p>
<p>説明</p>	<p>Tr30 の値を求める際の近似曲線は、JEAC4201 に記載の式 <math>R = A + B \cdot \tanh\{(T - T_0) / C\}</math> を用いている。</p> <p>Tr30 の値を求めるにあたり当該式を使用し始めた時期は以下のとおり。                  川内 1 号：第 1 回取出し以降                  川内 2 号：第 1 回取出し以降</p> <p><b>【適用式 (JEAC4201-2007 (解説-SA-3120-2))】</b>  <math>R = A + B \cdot \tanh\{(T - T_0) / C\}</math></p> <p><b>【パラメータの説明】</b>                  R：吸収エネルギー (J)                  T：試験温度 (°C)                  A, B, T<sub>0</sub>, C：回帰係数 (*)</p> <p>*：非線形最小二乗法の繰り返し計算により求められる。</p> <div data-bbox="571 1205 1129 1590" style="text-align: center;"> </div> <p>双曲線関数の模式図 (解説図-SA-3120-1)</p>

川内1号炉第5回監視試験の母材C方向について、JEAC4201-2007（解説-SA-3120-2）に記載の式を用いたシャルピー衝撃試験の平均の遷移曲線の設定を以下に例示する。

【平均の遷移曲線の計算例】

- ・上部棚吸収エネルギー（シャルピー衝撃試験における延性破面率が100%となる試験温度の吸収エネルギーの平均値（添付参照））

$$A + B = 150.3 \text{ (J)}$$

- ・国内PWRプラントの過去の中性子照射前時点のシャルピー衝撃試験データ（母材、溶接金属、熱影響部）において、延性破面率が0%となった試験片の吸収エネルギーの最小値（固定値）

$$A - B = 4.9 \text{ (J)}$$

- ・ $A + B = 150.3 \text{ (J)}$  と  $A - B = 4.9 \text{ (J)}$  の連立方程式の解

$$A = 77.6$$

$$B = 72.7$$

- ・非線形最小二乗法の繰り返し計算にて算出

$$C = 54.35$$

$$T_0 = 69.13$$

【Tr30の計算例】

$R = A + B \cdot \tanh\{(T - T_0) / C\}$  に各パラメータの値を代入する。

Tr30は吸収エネルギーが41(J)の値である。

$$41 = 77.6 + 72.7 \cdot \tanh\{(Tr30 - 69.13) / 54.35\}$$

$$Tr30 = 39.0254$$

小数点以下を四捨五入し、 $Tr30 = 39^\circ\text{C}$

以上

A + B : 上部柵吸収エネルギー (J) の求め方

川内1号炉 第5回監視試験 母材のシャルピー衝撃試験結果

試験温度 (°C)	吸収エネルギー (J)	延性破面率 (%)
170	158	100
	148	100
	145	100
110	138	88
	136	80
	122	67
80	82	44
	81	44
	74	40
50	69	31
	61	31
	58	27
27	37	21
	30	17
24	17	10
0	18	11
	16	11
	9	5

延性破面率が 100%となる試験温度 (170°C) の吸収エネルギーの平均値

$$A + B = (158 + 148 + 145) / 3$$

$$= 150.333...$$