

玄海原子力発電所3号炉
高経年化技術評価
(中性子照射脆化)

補足説明資料

2023年●月●日
九州電力株式会社

評価時期における原子炉容器内表面から板厚 t の $1/4t$ 深さ位置での中性子照射量 $f_{1/4}$ は、監視試験により得られた中性子照射量 f_0 及び定格負荷相当年数 EFPY₁ を用いて算出した中性子束に対し、原子炉容器内表面のリードファクタ LF 及び板厚方向の減衰係数を考慮し、評価時点での定格負荷相当年数 EFPY₂ を用いて算出する。

なお、玄海 3 号炉においては、2009 年 11 月 9 日 (13.6EFPY) に MOX 燃料を装荷し、使用を開始していることから、今回の評価では、13.6EFPY 以前の第 2 回監視試験より得られた中性子束を保守的に 1.2 倍として、2020 年 3 月末時点及び運転開始後 60 年時点の中性子照射量を算出した。なお、MOX 燃料を導入した場合において、中性子照射量に最も影響が出るのは新燃料が炉心の最外周かつ原子炉容器に最も近い位置に配置されていると仮定した場合であり、その場合、炉内構造物の中性子照射量については実績炉心と比べ約 1.19 倍となることから、安全側に 1.2 倍と設定している。

玄海 3 号炉の中性子照射量算出に用いる値を表 3 に示す。

$$f_{1/4} = f \times \underbrace{\exp(-0.24 \times t \div 4 \div 25.4)}_{\text{板厚方向の減衰係数}}$$

$$f = f_1 + f_2$$

$$f_1 = \underbrace{f_0 \div \text{EFPY}_1 \div \text{LF} \times \text{EFPY}_{\text{MOX}}}_{\text{MOX 燃料装荷時点における原子炉容器内表面での中性子照射量}}$$

$$f_2 = \underbrace{\underbrace{f_0 \div \text{EFPY}_1 \div \text{LF}}_{\text{カプセル位置での中性子束}} \times \underbrace{(\text{EFPY}_2 - \text{EFPY}_{\text{MOX}})}_{\text{内表面位置での中性子束}}}_{\text{MOX 燃料装荷時点から評価時期における原子炉容器内表面での中性子照射量 (MOX 燃料考慮)}} \times 1.2$$

＜PTS 事象の選定理由＞

国内 PWR に対しては、発電技検「溶接部等熱影響部信頼性実証試験」のうち、「原子炉圧力容器加圧熱衝撃試験」において、設計基準事象から主蒸気管破断事故、小破断冷却材喪失 (LOCA) 事故、大破断冷却材喪失 (LOCA) 事故が制限的な PTS 事象として選定されており、これらを評価対象として、現行の JEAC4206 に反映されている。PTS 評価は、これに従って評価を実施している。

(参考) 溶接部等熱影響部信頼性実証試験に関する調査報告書「原子炉圧力容器加圧熱衝撃試験」[総まとめ版] (平成 4 年 3 月、財団法人発電設備技術検査協会)

遷移曲線設定条件および PTS 評価における応力拡大係数の計算条件を表 5-1 および表 5-2 に示す。表 5-1 および表 5-2 は同型 4 ループプラントの代表である大飯 3 号炉での評価であり、PTS 事象の中で最も厳しくなる大破断 LOCA の条件について、主要条件を掲載している。

①ステップ状温度低下幅 (初期温度 約 291 °C → 約 0 °C)

玄海 3 号炉は代表プラントと同条件。

②再循環切替時間 (約 0 °C → 約 20 °C)

代表プラントでは約 4300 s であるのに対し、玄海 3 号炉は約 3100 s であり、再循環切替時間は代表プラント以下であることから安全側の評価となっている。

③圧力

玄海 3 号炉は代表プラントと同条件。

④冷却水温度 (0 °C)

玄海 3 号炉は代表プラントと同条件。

また、工事計画 (原規規発第 1708253 号 平成 29 年 8 月 25 日認可) の内容を反映した PTS 評価結果を添付 1 に示す。工事計画において、低温/高圧となり PTS 事象の観点から設計基準事故状態よりも厳しい状態となる可能性のある事象を複数の炉心損傷防止シーケンスから検討した結果、2 次冷却系からの除熱機能喪失を選定している。

表 5-1 同型 4 ループプラントの状態遷移曲線 (大破断 LOCA)

パラメータ	同型 4 ループプラントの状態遷移曲線
き裂形状 ① 深さ ② 軸方向長さ	【JEAC4206 に基づく設定】 ①10mm ②60mm
温度条件	約 291°C → 約 0°C にステップ状に変化 【PTS 評価上最も厳しい大破断 LOCA で評価】
圧力条件	約 15.6MPaG → 0MPaG にステップ状に変化 【PTS 評価上最も厳しい大破断 LOCA で評価】

＜PTS 評価における T_p の計算過程＞

深さ 10mm 位置の破壊靱性値の評価を行う上で用いた T_p の値、 T_p の設定に用いた全ての監視試験データ（破壊靱性）、中性子照射量、2020 年 3 月末時点および運転開始後 60 年時点の温度移行量とその計算過程について示す。

監視試験データは JEAC4206-2007 附属書 C に規定されている一般評価により計算し、 T_p を設定している。破壊靱性試験の実施については、脆性破壊が生じる温度では ASTM E399 に準じて実施しており、脆性破壊が生じるが ASTM E399 の有効条件を満たさない場合又は脆性破壊が生じない場合には ASTM E1820 に準じて実施している。CT 試験片については、ASTM E399 の ANNEX に定められる、板厚 B が 0.5 インチの CT 試験片を用いている。脆化予測には、JEAC4201-2007/2013 追補版の附属書 B に規定されている国内脆化予測法および技術基準規則解釈別記-1 を適用している。

玄海 3 号炉の T_p の評価に用いた詳細データを添付 1 に示す。

また、2020 年 3 月末時点および運転開始後 60 年時点において下限包絡線で厳しくなる第 2 回監視試験および照射前試験での母材の試験結果（2020 年 3 月末時点では、試験温度 0°C において $K_{IC}=213\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$ 、運転開始後 60 年時点では、試験温度 -20°C において $K_{IC}=155\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$ ）に対する T_p を算出した結果を以下に示す。

2020 年 3 月末時点

$$\begin{aligned}\Delta TK_{IC} &= \Delta RT_{NDT}(\text{評価時期}) - \Delta RT_{NDT}(\text{監視試験時点}) + \sigma_{\Delta} \\ &= 13.1 - 21.6 + 18 = 9.5^{\circ}\text{C}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}T(\text{シフト後温度}) &= T(\text{試験温度}) + \Delta TK_{IC} \\ &= 0 + 9.5 = 9.5^{\circ}\text{C}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}T_p &= T(\text{シフト後温度}) - \frac{1}{0.0161} \ln\left(\frac{K_{IC}^{-20.16}}{129.9}\right) \\ &= 9.5 - \frac{1}{0.0161} \ln\left(\frac{213^{-20.16}}{129.9}\right) \doteq -15\end{aligned}$$

運転開始後 60 年時点

$$\begin{aligned}\Delta TK_{IC} &= \Delta RT_{NDT}(\text{評価時期}) - \Delta RT_{NDT}(\text{監視試験時点}) + \sigma_{\Delta} \\ &= 31.5 - 21.6 + 18 = 27.9^{\circ}\text{C}\end{aligned}$$

$$T(\text{シフト後温度}) = (-20) + 27.9 = 7.9^{\circ}\text{C}$$

$$T_p = 7.9 - \frac{1}{0.0161} \ln\left(\frac{155^{-20.16}}{129.9}\right) \doteq 6$$

【記号の説明】

T_p : 当該プラントにおけるプラント評価時期の破壊靱性遷移曲線を設定する際に定まるプラント個別の定数 ($^{\circ}\text{C}$)

ΔTK_{IC} : 破壊靱性 (K_{IC}) の温度移行量 ($^{\circ}\text{C}$)

ΔRT_{NDT} : 関連温度移行量の計算値 ($^{\circ}\text{C}$)