

実プラントのデータによる破壊靱性に関する検討

2023年7月27日
システム安全研究部門
技術基盤課

1. はじめに

中性子照射脆化に関する規制要求は、実用発電用原子炉及びその附属施設の技術基準に関する規則（以下「技術基準規則解釈」という。）第14条において、一般社団法人日本電気協会の電気技術規程「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「破壊靱性の確認試験方法」という。）及び「原子炉構造材の監視試験方法（JEAC4201-2007(2013)）」に「別記-1 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）」の適用に当たって」及び「別記-6 日本電気協会「原子炉構造材の監視試験方法（JEAC4201）」の適用に当たって」（以下「別記-6」という。）の要件を付したものであることとしている。

破壊靱性の確認試験方法に規定される加圧熱衝撃（以下「PTS」という。）の評価方法は、昭和58年度～平成3年度に実施された「原子炉圧力容器加圧熱衝撃試験実施委員会（財団法人発電設備技術検査協会）」（以下「国プロ」という。）で開発された手法¹がベースとなっている²。

破壊靱性の確認試験方法は、高経年化技術評価や運転期間延長認可申請における評価時期（例えば60年目）におけるPTS評価の予測を行う際に用いられており、これまで、事業者より提出されたPTS評価に関するデータが蓄積されつつあることから、蓄積されたデータを用いて技術的検討を開始した。

¹ 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

² 破壊靱性の確認試験方法「附属書C 供用状態C,Dにおける加圧水型原子炉圧力容器の炉心領域部に対する非延性破壊防止のための評価方法」「C-1000適用範囲」

2. 技術的検討

2.1 背景

破壊靱性の確認試験方法においては、PTS 評価における破壊靱性値の予測(図1右の青線)は、照射前の破壊靱性値の実測値(図1右の赤線)を、評価時期(例えば60年目)の関連温度³移行量 ΔRT_{NDT} (図1左)の分だけ平行移動させることにより算出するとされている。

これは、国プロにおいて、破壊靱性温度⁴移行量 ΔT_{KIC} の方が関連温度移行量 ΔRT_{NDT} よりも若干小さくなる傾向が認められるものの、ほぼ等価関係が認められるとしていることによる(図2参照)。

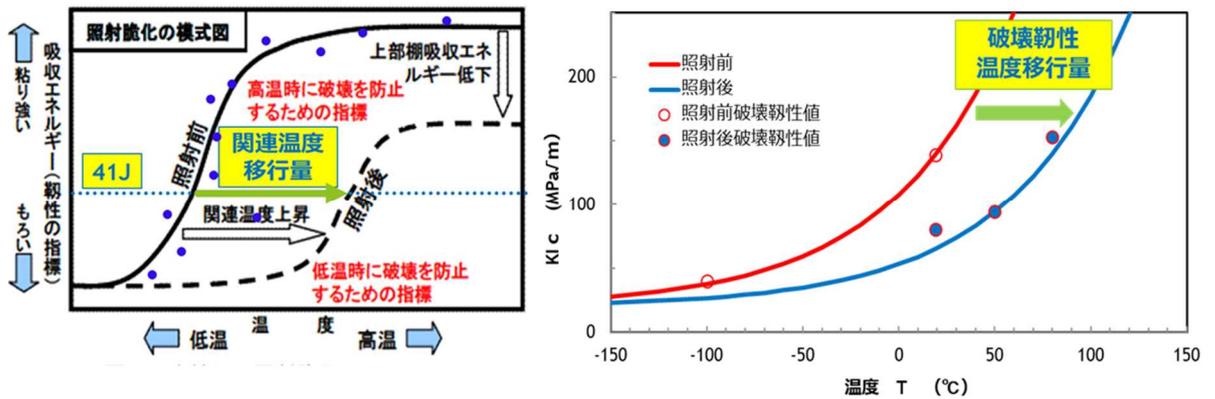


図1 照射による関連温度の変化と破壊靱性の変化

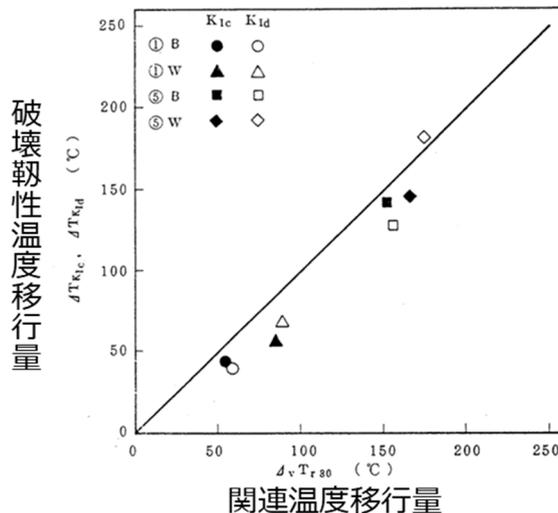


図2 破壊靱性温度移行量 ΔT_{KIC} と関連温度移行量 ΔRT_{NDT} の関係⁵

³ 落重試験及びシャルピー衝撃試験によって求められる温度

⁴ 破壊靱性試験(コンパクトテンション試験片やWOL試験片など)により取得した破壊靱性の温度依存性を基に求められる温度

⁵ 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 (一部追記)

2.2 技術的検討

高経年化技術評価や運転期間延長認可申請において提出されたデータがある程度蓄積されたことから、破壊靱性温度移行量 ΔT_{KIC} を試算し、関連温度移行量 ΔRT_{NDT} との関係について検討を開始した。

(1) 破壊靱性温度移行量 ΔT_{KIC} と関連温度移行量 ΔRT_{NDT} の算出

①破壊靱性温度移行量 ΔT_{KIC} の算出方法はいくつか考えられるが、今回は国プロの方法を参考に、次の1)～3)により算出した。

1) 破壊靱性の確認試験方法の破壊靱性遷移曲線の設定の式を用い、破壊靱性試験データ毎に破壊靱性遷移曲線を求める。

$$K_{Ic} = 20.16 + 129.9 \exp [0.016 (T - T_p)]$$

2) 監視試験回次毎に、破壊靱性遷移曲線の T_p ⁶の平均値を算出する⁷。

3) 監視試験回次毎の T_p の平均値から得られた破壊靱性遷移曲線と、照射前の T_p の平均値から得られた破壊靱性遷移曲線との差分から、破壊靱性温度移行量 ΔT_{KIC} を算出する。

②関連温度移行量 ΔRT_{NDT} は高経年化技術評価や運転期間延長認可申請において提出されたデータをそのまま使用している。

(2) 破壊靱性温度移行量 ΔT_{KIC} と関連温度移行量 ΔRT_{NDT} の関係

これまでに得られたデータにより算出した破壊靱性温度移行量 ΔT_{KIC} と関連温度移行量 ΔRT_{NDT} との関係を図3に示す。

国プロにおいては、破壊靱性温度移行量 ΔT_{KIC} と関連温度移行量 ΔRT_{NDT} とはほぼ等価ではあるものの、前者が後者より若干小さくなる傾向が認められるとされていた。今回の検討結果においても、両者がほぼ等価であるとの大きな方向性は共有するものの、前者が後者より若干小さくなるという傾向とはやや異なる傾向を示す。

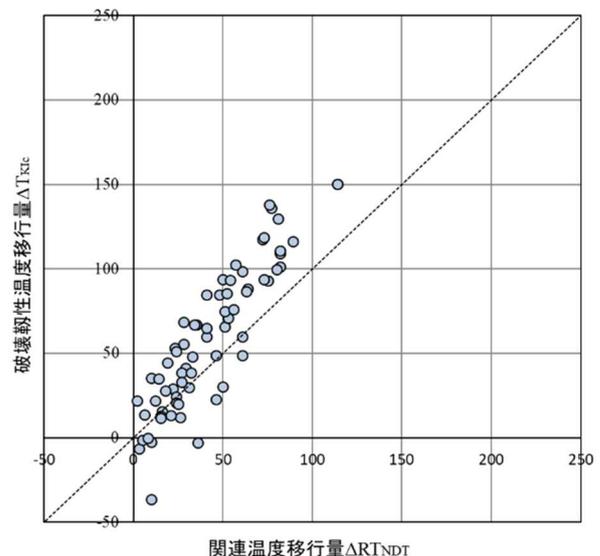


図3 ΔRT_{NDT} と ΔT_{KIC} の関係

⁶ 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(°C)

⁷ 国プロの実施された30年以上前は、破壊靱性の確認試験方法に規定された破壊靱性遷移曲線の設定の式はなかったため、破壊靱性値のプロットのほぼ中央をとる破壊靱性遷移曲線を求めていた。

3. 今後の進め方

(1) 規制との関係

技術基準規則解釈第14条は、安全設備のうち供用期間中において中性子照射脆化の影響を受ける原子炉圧力容器にあっては、破壊靱性の確認試験方法等に掲げる、破壊靱性の要求を満足することを求めている。また、技術基準規則解釈の別記-6において、原子炉圧力容器内面が受ける中性子照射量 ($E > 1\text{MeV}$) が $2.4 \times 10^{19}\text{n/cm}^2$ を上回る場合は、原子炉圧力容器内面が受ける中性子照射量 ($E > 1\text{MeV}$) が、これまでに取り出された監視試験片の中性子照射量を超えない時期に、新たな監視試験片を取り出して関連温度移行量を予測することなどを求めている。

運転期間延長認可申請等においては、①「照射脆化の将来予測を伴わない実測データに基づく評価」及び②「照射脆化の将来予測を保守的に行うことができる方法による評価」を行うこととされている⁸。

①については、監視試験によりデータが得られている範囲で、最後に取り出された破壊靱性の実測データだけでなく、過去に取得した破壊靱性の実測データに関連温度移行量 ΔRT_{NDT} 実測値を加えたものを用いて、それらの下限を包絡した破壊靱性曲線を用いた PTS 評価が行われている。

また、②については、国内脆化予測法(関連温度移行量 ΔRT_{NDT} を用いて評価時期(例えば60年目)の破壊靱性温度移行量 ΔT_{KIC} を予測する方法)を用いて、破壊靱性の実測データ及び過去に取得した破壊靱性の実測データに国内脆化予測法で求めた値を加え、その下限を包絡した破壊靱性曲線を用いた PTS 評価が行われている。

(2) 今後の対応

今般、実プラントのデータを用いて試算を実施したところ、破壊靱性温度移行量 ΔT_{KIC} と関連温度移行量 ΔRT_{NDT} がほぼ等価であるというという国プロの結果と大きな方向性は共有するものの、前者が後者より若干小さくなるという傾向とはやや異なる傾向となった。

実プラントのデータによる検討については、用いるデータの網羅性、破壊靱性温度移行量 ΔT_{KIC} の算出方法、破壊靱性温度移行量 ΔT_{KIC} と関連温度移行量 ΔRT_{NDT} との関係が PTS 評価に与える影響等について詳細な検討が必要であることから、原子力規制庁において、引き続き検討を進めることとする。

また、規格策定者である日本電気協会や事業者による検討も必要であることから、実プラントのデータを踏まえた破壊靱性温度移行量 ΔT_{KIC} と関連温度移行量 ΔRT_{NDT} の関係について、意見を聴取することとしたい。

⁸ 実用発電用原子炉の運転期間延長認可申請に係る運用ガイド等