

原発の老朽化を問う 第4回 高浜1、2号機&美浜3号機延長認可等取消訴訟

老朽原発の中性子照射脆化の過小な評価

原発老朽化問題研究会、東京大学名誉教授 井野 博満

原子炉压力容器は炉心から放出される中性子を浴びて徐々に脆くなる。脆いという言葉は、その材料にひび割れ(=クラック、き裂)が生じて拡大しやすいことを意味する。ひび割れのない状態の強さは引張強さや降伏強さで表される。材料のひび割れに対する強さは破壊靱性値 K_{Ic} (Kワンc)で表される。

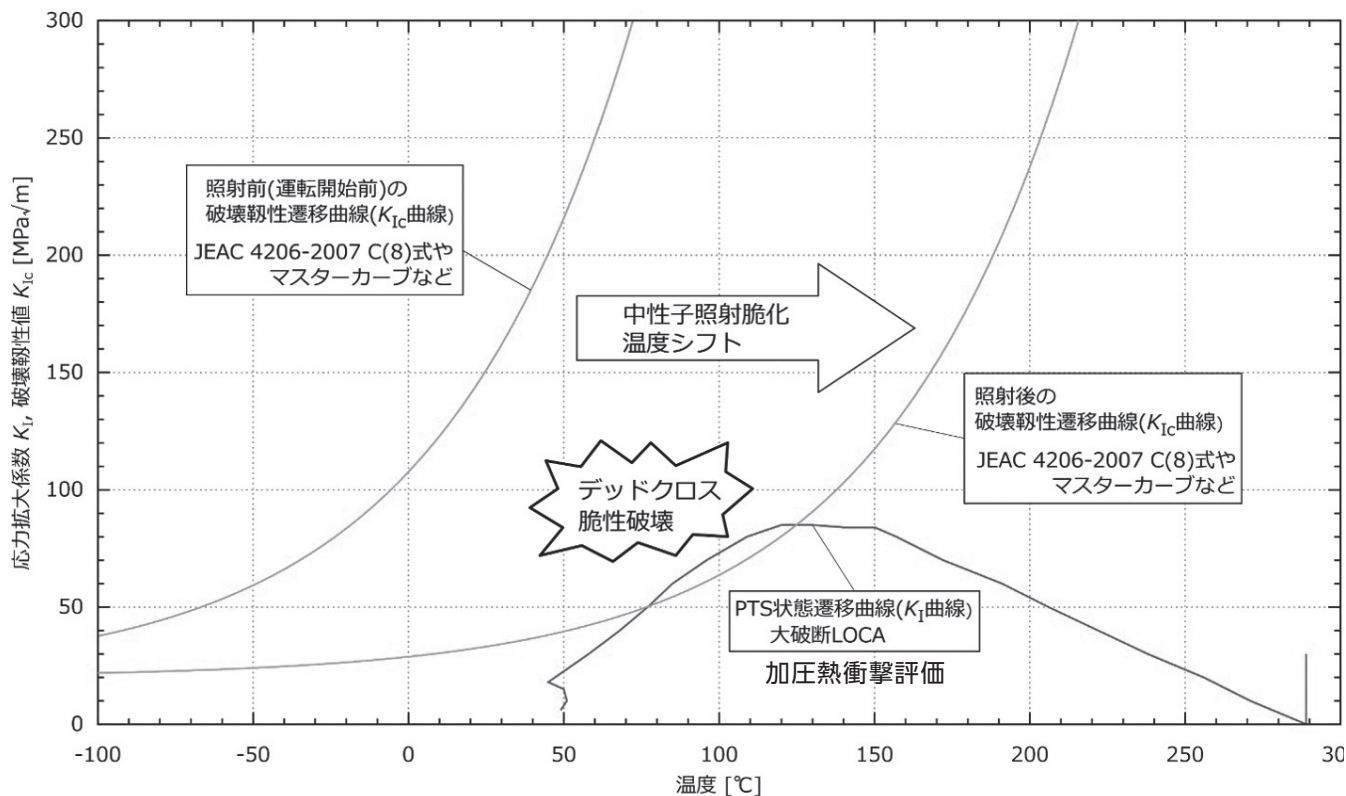
鉄鋼材料には低温になると破壊靱性が低下する性質がある。100年近く前、第2次大戦中の1943年1月のことだが、米国・オレゴン造船所に係留中のリバティー船スネクタディ号の船体が真二つに割れる事故が起こった。波の力は小さく、降伏強さの数分の一のみでこのような大きな構造物が一気に破壊する現象、脆性破壊が起こった。

同様の脆性破壊が原子炉压力容器で起これば、炉心を構成する物質が原子炉外に放出され広範な放射能汚染を引き起こす大惨事になる。

原子炉压力容器鋼の中性子照射脆化が進んだ際の加圧熱衝撃(PTS)評価は、日本電気協会が作成した規程JEAC 4206-2007に基いて行われている。中性子照射脆化と加圧熱衝撃評価について図1を用いて説明する。

図1には破壊靱性遷移曲線、および大破断LOCA(loss of coolant accident、冷却水喪失事故)の場合の加圧熱衝撃評価を描いている。破壊靱性遷移曲線は各温度における压力容器鋼材の破壊靱性値 K_{Ic} を表す。破壊靱性値は、この値まで力が掛かって

図1 PTS評価(破壊靱性遷移曲線とPTS状態遷移曲線)



もひび割れが耐えられることを意味する。

この K_{Ic} 曲線は、JEAC 4206-2007 に附属書C(8)式として示されている。

$$K_{Ic}=20.16+129.9\exp[0.016(T-T_p)] \quad C(8)式$$

C(8)式は、破壊靱性遷移曲線は中性子照射を受けて高温側にシフトしていくことを示す。

もう一つの山型の曲線：PTS状態遷移曲線は、圧力容器内面に、ある大きさのひび割れ(検査で発見できる大きさ以上に設定される)があったとき、冷却水喪失事故時にそのひび割れに生じる力の大きさ(応力拡大係数 K_I)の時間的变化を表す。

応力拡大係数 K_I が材料の破壊靱性値 K_{Ic} を超えると、すなわち、この二つの曲線が交差するとき、脆性破壊が発生すると評価される。つまり、大破断LOCAが起きても破壊靱性遷移曲線(K_{Ic} 曲線)がPTS状態遷移曲線(K_I 曲線)に接しないことが安全運転の条件である。なお、 K_{Ic} は K_I の臨界値(critical value)という意味である。

温度シフトの不足——危険側予測

原子炉圧力容器内には、内面よりも炉心に近い場所に、圧力容器と同じ鋼材の試験片を詰めたカプセルが設置されている。このカプセルから試験片を取り出して監視試験を行う。試験片は内面よりも多くの中性を浴びているため、脆化の状態を先回りして知ることが出来るというわけだ。

図1の曲線には、(図には記していないが)観測データが付随していて、それらの観測データがすべて包み込まれるように、つまり、下限包絡されるように曲線の位置を決める。

この図に描かれる破壊靱性値は、JEAC4206-2007が定める運転延長期間において、圧力容器が被る中性子照射量を推測し、その時点まで温度シフトをおこなった値である。

この図から、試験片が各温度に置かれた際の破壊靱性値を求めることができる。この破壊靱性値は中性子照射を受けた際のダメージ(靱性低下)の最大

値を意味する。

一方、運転開始から60年後の破壊靱性遷移曲線は、全ての各監視試験データを中性子照射量に応じて得られる脆性遷移温度(厳密には関連温度)の移行量分(ΔRT_{NDT})を温度シフトして、予測することになっている。破壊靱性値の温度シフト $\Delta T_{K_{Ic}}$ は、JEAC4206-2007において附属書C(12)式を用いて計算することが規定されている。この式を次に示す。

$$\Delta T_{K_{Ic}}=\Delta RT_{NDT} \text{ 計算値(評価時期)}-\Delta RT_{NDT} \text{ 計算値(各監視試験時)}+\sigma\Delta \quad C(12)式$$

ここで、 $\sigma\Delta$ は誤差の標準偏差である。

この式が実は大問題なのである。JEAC4206-2007の規程全体がこの式を前提として組み立てられている。ということは、JEAC4206-2007の規程が正しいならば、

$$\begin{aligned} & \text{破壊靱性温度移行量}\Delta T_{K_{Ic}} \\ & = \text{脆性遷移温度の温度シフト}\Delta RT_{NDT} \end{aligned}$$

とならねばならない。

明らかになった新知見

2023年7月27日に行われた原子力規制委員会第60回技術情報検討会において、実プラントのデータによる破壊靱性の検討と題した報告が行われた¹⁾。この報告では $\Delta T_{K_{Ic}}=\Delta RT_{NDT}$ を明確に否定する新しい事実が示された(次ページの図2)。

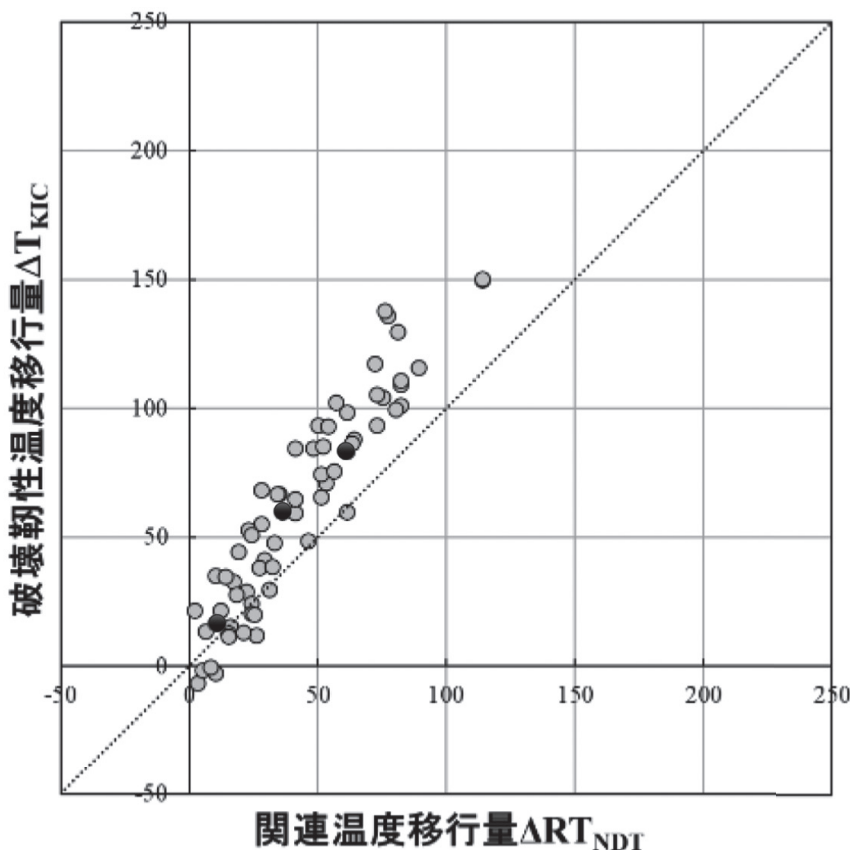
その検討会で示された規制庁の報告書では、破壊靱性温度の温度シフト $\Delta T_{K_{Ic}}$ および脆性遷移温度の温度シフト ΔRT_{NDT} は次のプロセスで算出されている。

(1)各プラントの監視試験回次毎に、材料種別、関連温度、破壊靱性値とその試験温度をデータとして準備する。

例えば、高浜1号炉の破壊靱性曲線(K_{Ic} 曲線)を求めるには、高浜1号の第1回から第5回監視試験で得られた破壊靱性値をプロットし、C(8)式の破壊靱性遷移曲線を描く。

- (2)各破壊靱性値に対して JEAC 4206-2007 附属書 C(8)式から T_p を計算する。
- (3)監視試験回次毎に T_p の平均値を算出する。
- (4)監視試験回次毎の T_p の平均値と照射前の T_p の差 ΔT_p を ΔT_{KIC} とする。
- (5)監視試験回次毎の RT_{NDT} と照射前の RT_{NDT} の差を ΔRT_{NDT} とする。

図2 国内実機PWRの破壊靱性温度移行量 ΔT_{KIC} と、脆性遷移温度の温度シフト ΔRT_{NDT} の関係（実測値）



規制庁の報告書に示された図6を、この解説では図2として示す。

考察

2023年7月に示された規制庁の「実プラントのデータによる破壊靱性に関する検討」¹⁾で提示された国内各原発（PWR）の照射による脆性遷移温度の上昇量 ΔRT_{NDT} と照射による破壊靱性値の上昇量 ΔT_{KIC}

が等しくないことが明らかになった。さらに、筆者らの統計学的データ解析によって、母材においては、 ΔT_{KIC} は ΔRT_{NDT} の1.32倍、溶接金属においては、1.44倍以上になると見積もられた。

脆性遷移温度も、破壊靱性値も、同じ脆性破壊現象を観測しているのに、どうしてこういう違いが生じるのか、読者の皆さんも疑問に思われるであろう。

その理由はまだ十分明らかになっていないが、Wallin et al.²⁾は注目すべき研究をおこなっている。その結果によれば、試料にかける変形速度の違いの影響だろうという。すなわち、変形速度が大きいシャルピー試験や動的破壊靱性試験では静的破壊靱性試験に比べて照射による移行量が小さくなるという結果が得られている。よって、シャルピー試験を静的破壊靱性試験の代わりに用いることは危険だと結論している。

日本電気協会が作成し、規制当局が是認（エンドース）した規程、JEAC4201やJEAC4206には移行量の等価性の問題以外にも、予測式の元になる反応速度式の次元の不一致（拡散係数の1乗の項と2乗の項が足し算されている）など間違いや不備

が多くある³⁾。その改訂が規制委員会から要請されて10年以上経つが、日本電気協会はまだ実行していない。誤りを正すのに、困難な事情があるのだろうか。

民間規格というのは、事業者が作るものである。それゆえに市民の厳しい監視が必要である。日本電気協会の対応が極めて後ろ向きであるばかりでなく、規制当局の対応も手ぬるい。

結び

- (1) 国内プラントのデータを用いて、破壊靱性の温度シフト ΔT_{KIC} と脆性遷移温度の温度シフト ΔRT_{NDT} の間に信頼性の高い新たな関係が導かれた。両者の関係は、 $\Delta T_{KIC} = a\Delta RT_{NDT}$ で表され、母材では $a = 1.32$ 、溶接金属では $a = 1.44$ と得られた。
- (2) その関係を用いて高浜1号のPTS評価をおこなった結果、60年超えの運転は極めて危険であることがわかった。
- (3) 日本電気協会が作成した圧力容器安全評価のための規程JEAC4201-2007およびJEAC4206-2007は、正しい温度シフトに基づくよう改訂が必要である。そして、全国の高経年化原発の安全審査をやり直さなければならない。
- (4) なお、JEAC4201-2007およびJEAC4207-2007には、本稿で中心テーマとして論じた温度シフトの問題以外に、反応速度式の次元が合わない(拡散係数の1乗を含む項と2乗を含む項が足し算されている)などの間違いや不備がある。

なお、この論稿は、青野雄太・井野博満の共著論文「老朽原発の危険性—中性子照射脆化の過小評価」⁴⁾を参照して執筆した。

文献

- 1) 原子力規制庁、原子力規制委員会第60回技術情報検討会、実プラントのデータによる破壊靱性に関する検討(2023)
- 2) Wallin, K. et al, Descriptive characteristics of different types of test for irradiation embrittlement, Nuclear Engineering and Design, vol.159 pp.69-80 (1995)
- 3) 高浜原子力発電所1号機及び2号機運転期間延長認可処分等取消請求事件(老朽化原発40年廃炉名古屋訴

訟)、原告準備書面(97)(中性子照射脆化：専門家意見書に基づく反論・主張の補充)(2023)

- 4) 青野雄太、井野博満：「老朽原発の危険性」、『金属』、94巻9号、(2024)

注記

井野は玄海1号、美浜1号、美浜2号の実プラントデータを用いて解析を行い、 $\Delta T_{KIC} = \Delta RT_{NDT}$ の仮定が成り立っていないことを2012年の保安院・高経年化意見聴取会で再三強調してきた。

井野はこのとき、破壊力学の泰斗である岡村弘之の協力を得て、破壊靱性観測値による解析をおこない、玄海1号炉の破壊靱性曲線を求めた。その結果は、JEAC4206-2007の規程から求めた破壊靱性曲線より高温側になった。

岡村がおこなった解析そのものは、岡村から井野に当たった私信(2012年3月2日)に記されていたが、当時、本人の意向で公表されなかった。それが公表されたのは、名古屋地裁での「老朽原発40年廃炉訴訟」においてである。そのなかで岡村は、上記解析を示すとともに、この間の事業者や規制当局の姿勢について、「 ΔRT_{NDT} と ΔT_{KIC} の相関について、実機データを含めた検討なくしては、照射脆化の予測は困難でしょう。どうして ΔRT_{NDT} の検討のみにとどまっていたのでしょうか、理解に苦しみます。」と述べている。岡村の先見の明を示したものである。

4回の連載を通じての感想

第3回の高島武雄の考察は、図1の山型の曲線に関わるものである。本稿と併せて考察していただきたい。裁判上の論点や名古屋高裁での控訴審の展望については、第2回の小島寛司弁護士の論稿をご覧ください。第1回の柴山恭子(廃炉訴訟市民の会)の論稿は、名古屋地裁の運転延長取消訴訟全般について論じたものである。ここまでの正確な理解をされる市民活動家が居られることは驚きである。裁判の過程でも、調査やいくつもの有益な提言をされた。