

— その3 健全性評価と運転管理 —

三菱重工業 阪本 浩之 廣田 貴俊 関西電力 坂口 昌平 九州電力 野崎 剛

本シリーズは、原子炉压力容器（以下、压力容器）の中性子照射脆化やその評価手法の概要を紹介した第1回、脆化メカニズムに関する最近の理解とそれに基づく脆化予測法を解説した第2回に続き、今回が最終の第3回目となる。本稿では、压力容器の健全性評価や運転管理の方法について、その背景とあわせて解説する。

健全性評価の概要

压力容器の炉心領域（図1）では、中性子の照射を受けることにより、延性脆性遷移温度の上昇と上部柵韌性の低下という経年劣化（中性子照射脆化）が進行する。これらを踏まえた压力容器の健全性評価や運転管理はプラントの安全性確保の観点から非常に重要であり、その方法および判定基準が日本電気協会技術規格「JEAC4206」^[1]に規定されている。

压力容器の延性脆性遷移温度は中性子照射により上昇することから、本連載の第1回で触れたとおり、加圧熱衝撃（Pressurized Thermal Shock：PTS）事象、起動・停止時および耐圧・漏えい試験への延性

脆性遷移温度上昇の考慮が必要となる。具体的には、压力容器が比較的低温となるこれらの状況下でも脆性破壊が生じないように、压力容器の健全性の評価、運転管理が実施されており、その詳細は後で解説する。

また、上部柵韌性の低下に関しては、上部柵吸収エネルギーが68J以上であることがJEAC4206において基準とされている。ただし、それを下回る場合においても、き裂を想定した破壊力学による詳細な解析を実施し健全性を評価することができる。このため、上部柵吸収エネルギーが仮に68Jを下回った場合においても、通常、詳細評価では十分な余裕がある結果が得られ、健全性に直ち

に問題が生じることはない。なお、基準値の68Jとは、もともとは米国で経験的に設定された基準値（50ft-lb）であるが、国内で実施された実証試験ではこの値を下回っても压力容器が延性破壊に至らない結果が得られており、保守的な設定と

なっていると考えられる。

これら一連の評価手法を規定するJEAC4206に対して、日本電気協会技術規格「JEAC4201」^[2]には、中性子照射による压力容器材料の延性脆性遷移温度および上部柵韌性などの機械的性質の変化を調査し評価するための監視試験方法が規定されている。監視試験では、压力容器と同一の鋼材から加工した調査用の試験片を収納した監視試験片カプセルを压力容器内に設置し、中性子による照射脆化の程度に応じて、カプセルを計画的に取り出して試験を行う。ここで、カプセルの照射速度は压力容器より高いことから、压力容器の将来に対応する実測データを先行して取得することができ、压力容器のカプセル取り出し時点での評価だけでなく、将来に対する健全性も確認することが可能である。JEAC4206は、これらの実際の压力容器の監視試験データを有効利用することで、より信頼性の高い健全性評価を可能としている。

事故時の健全性評価の背景

PTSとは、緊急炉心冷却系（ECCS）の作動に伴う安全注入水の炉内注入（図1）などにより、加圧下のPWR压力容器が内側からの急激な冷却を受ける事象である。このような事象下では、压力容器の内外

図1 ECCS作動時の安全注入水の流れ

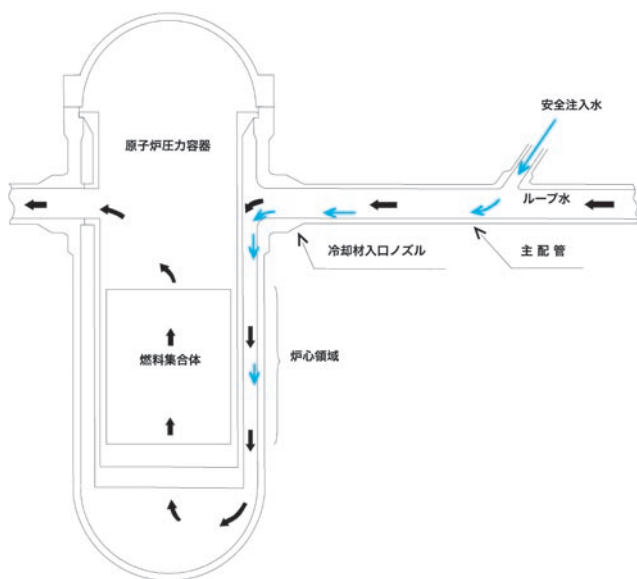


図2 PTSモデル試験設備^[3]

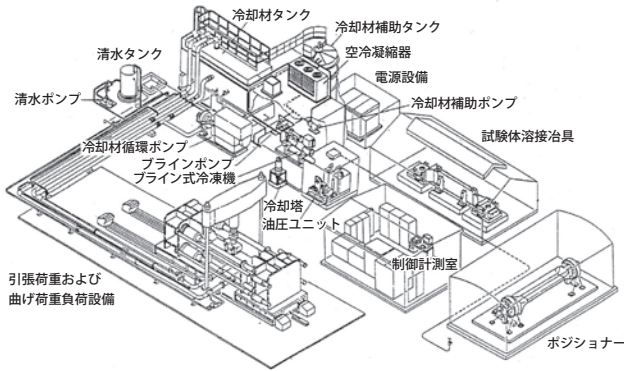
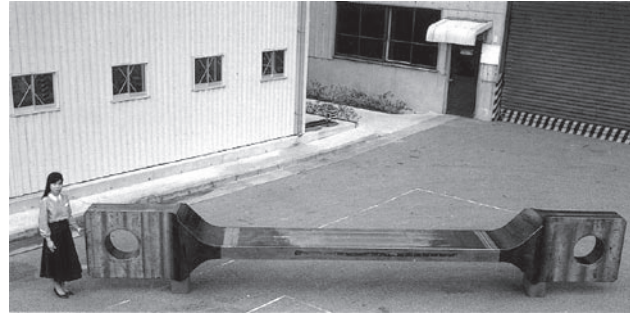


図3 PTSモデル試験の試験体^[4]



面間に温度差が生じ、それにより、内面に引張応力が生じ、この状態に内圧による応力が重畳した結果、内面に高い引張応力が発生する。压力容器の破壊靱性が中性子照射と冷却により低下し、き裂のような欠陥が内面に存在する場合には、き裂が進展して压力容器が損傷する恐れがあるといわれている。PTS事象としては、压力容器の損傷に至った事例は報告されていないが、古くは1978年に米ランチョ・セコ原子力発電所1号機において制御系の故障から蒸気発生器に過剰に冷水を供給した事象が知られている。わが国の軽水炉の压力容器は米国に比べ鋼材に含まれる不純物が少ないことから、中性子照射による延性脆性遷移温度の上昇は小さいと考えられ、PTS事象が実機の安全上の支障になると考えられていなかった。しかしながら、ランチョ・セコ1号機やその翌年起こったスリーマイル島原子力発電所2号機の事故を契機に、国のプロジェクトとして、国内の压力容器の健全性を実証することとなり、(財)発電設備技術検査協会のもと「原子炉压力容器加圧熱衝撃試験」(PTS委員会、委員長：三島良績東京大学名誉教授)が1983年から9カ年にわたり実施された^[3]。

同プロジェクトでは、PTS事象に対する評価への破壊力学適用に関する検討、調査が実施され、後述する現行のJEAC4206に規定されているPTS評価手法が策定されるとともに、国内PWRのいずれのループプラントにおいて、中性子照射による延性脆性遷移温度の上昇を考慮しても、PTS事象に対して压力容器の脆性破壊が発生しないことが確認された。

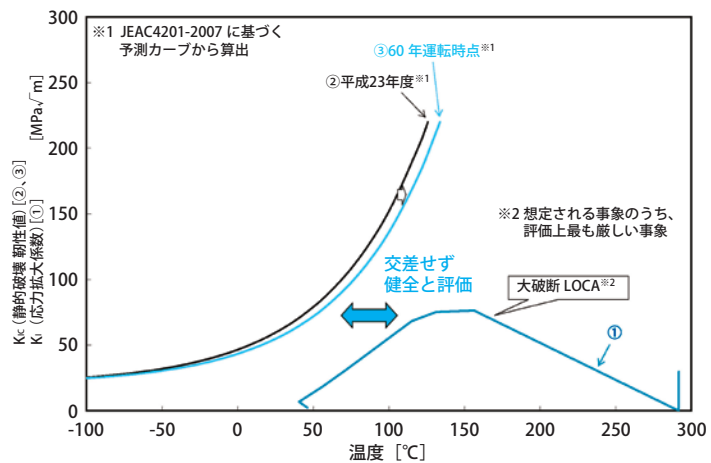
また、この中で実施されたPTSモデル試験では、PTS事象発生時の压力容器の内圧、急冷を再現できる設備(図2)を用いて、中性子照射による破壊靱性の低下を模擬した実機と同等の板厚の試験体(図3)が、PTS事象下で破壊するか否かが試験

された。この試験により、PTS評価手法の妥当性が確認されている。

PTS評価手法

PTS事象に対する構造健全性評価では、本連載の第1回で紹介した破壊力学に基づき、「想定」したき裂を拡大させる進展力(応力拡大係数)と鋼材の破壊に対する抵抗力(破壊靱性値)を比較し、応力拡大係数が破壊靱性値を上回らないことを確認する。確認した例として、九州電力の玄海1号機に対する大破断冷却材喪失事故(大破断LOCA)時の評価事例を図4に示すが、PTS事象での応力拡大係数の軌跡(PTS状態遷移曲線、図中の①のライン)と破壊靱

図4 玄海1号機のPTS評価結果^[5]



(注) PTS状態遷移曲線は大破断LOCAのもの

性値の変化（破壊靱性遷移曲線、図中の②および③のライン）が交差していないことから压力容器の健全性が確認されている。

国内PWRプラントのPTS評価は、制限的となる代表的PTS事象として、1次冷却材の温度低下が大きい大破断LOCAだけではなく、小破断冷却材喪失事故（小破断LOCA）、主蒸気管破断事故（SLB）が選定されている。これらのそれぞれの事象に対して、压力容器に発生する応力を計算し、PTS状態遷移曲線を算出する。この際、安全を考慮して、製作時や定期検査で検出可能なき裂寸法に比べ、十分に大きなき裂（深さ10mm、長さ60mmの半だ円形状）をより影響を受けやすい内表面に仮想的に想定している（内部のき裂に対して、表面のき裂は応力拡大係数が大きい）。

次に、破壊靱性遷移曲線の設定には、監視試験などで破壊靱性試験片から実測された破壊靱性値が利用される。压力容器の鋼材に対して、供用前のデータを採取するとともに監視試験でもデータが採取され、採取時の中性子照射のレベルに対応するデータが存在する。これらの中性子照射レベルが異なるデータを、圧力

容器の健全性を確認したい評価時期での中性子照射に対応するデータに換算する。（図5でのプロットのシフト量に相当）。これらの換算した破壊靱性値を下限包絡する曲線を、保守的に破壊靱性遷移曲線としている。

PTS評価手法の保守性

PTS事象に対する健全性評価結果を理解する上で、評価に含まれる保守性を把握することは重要である。上述のとおり、大きな内表面き裂を想定していること、実測データから設定された下限の破壊靱性を使用していることに保守性があると考えられるが、ここでは、その他の保守性について補足する。

破壊挙動において、高温時にあらかじめ荷重を受け、温度と応力拡大係数が減少する過程では、応力拡大係数が破壊靱性を上回っても脆性破壊が起こらないことが多くの研究により明らかにされている。この現象は、高温予荷重（Warm Prestressing：WPS）効果と呼ばれ、前述のPTS実証試験でも確認されている（図6）。図4に示したように、破壊靱性遷移曲線とPTS状態遷移曲線が接近する低温側では、応力拡大係数が減少する過程となっており、WPS効果が

期待できる。このことは、仮に両者が交わっても、その交点がPTS状態遷移曲線のうち応力拡大係数が減少する領域であれば、破壊に至ることはないと判断できるものである。

また、内表面き裂からの脆性破壊の発生（両曲線の交差）の有無を評価の判定基準としているが、き裂が伝播する外面側では金属温度が高く、板厚内部で中性子の照射が減衰し照射脆化の進行も遅いことから、破壊靱性が高い。さらに、熱応力は外面側では圧縮であり、き裂の伝播とともに応力拡大係数が低下することもあるため、実際には、き裂は板厚を貫通せず停止する可能性がある。この現象は、き裂伝播停止と呼ばれており、仮に脆性破壊によりき裂が伝播しても、容器破損による放射性物質の拡散は起こらないと考えられる。

国内のPTS評価を導入する際に参考とした米国では、WPS効果やき裂伝播停止を考慮したより現実的なPTS解析に基づいた評価が実施されている。一方、現行のJEAC4206には、これらは取り込まれておらず、現行のPTS評価手法が持つ保守性と考えることができる。

加えて、実測の破壊靱性値を評価

図5 破壊靱性遷移曲線の設定^[6]（玄海1号機の例）

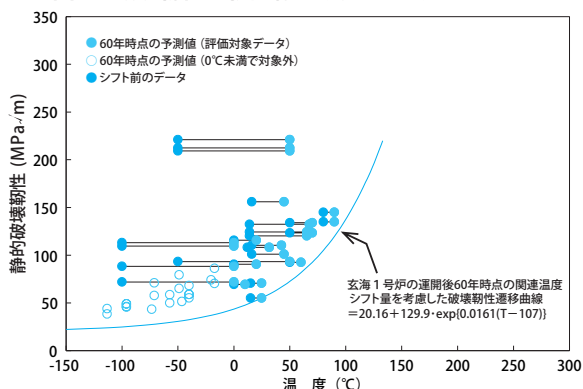
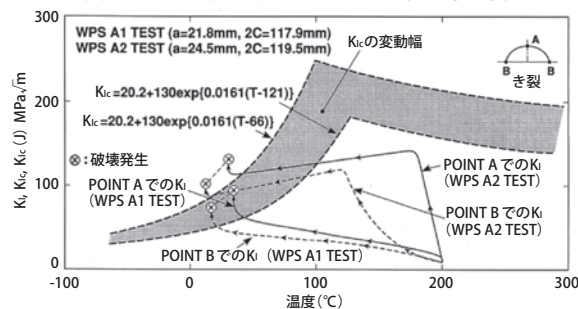


図6 PTS実証実験でのWPS効果の確認例^[7]



（注）WPS A2 TESTでは、応力拡大係数 K_I が減少する過程で破壊靱性 K_{IC} を上回ったが、破壊に至っていない

に利用していることによる保守性も挙げられる。破壊靱性の測定に使用される試験片は、形状・寸法上の特性から、圧力容器の想定き裂よりも破壊が起こりやすく、保守的な試験であることが知られている。また、一般的に鋼材の機械的性質は内部に比べ表面位置の方が優れている。破壊靱性データを測定する試験片は、き裂を想定する表面位置より破壊靱性が低い板厚の4分の1の深さ位置から採取され、その試験片による破壊靱性値を圧力容器の健全性評価に使用していることも保守性があるといえる。

なお、電気事業者は、PTS事象時に現実的には考えにくいような、圧力容器内面の全面が事故発生と同時に安全注入水で急冷される状況を想定することで、さらに保守的なPTS評価を行っている。

現行評価は「決定論的評価」を用いており、保守的な内表面き裂を想定した応力拡大係数に、保守的な下限の破壊靱性など、仮に保守的な条件であっても組み合わせて評価している。これに対して、米国では事象の発生頻度と入力変数の変動を考慮し、破壊に至る確率を評価し、結果的にそれが許容できる基準以下であ

るかどうかで健全性を判定する「確率論的評価」が採用されている。現実には、同時に厳しい条件が重なることは非常に稀で、決定論に基づく国内の現行手法の保守性が過剰である可能性があり、合理性を確保しつつ、より現実に則した手法に精緻化する余地があるものと思われる。

運転管理

事故時以外でも、圧力容器が加压されたまま低温となりうる起動・停止、定期検査ごとの耐圧・漏えい試験に対しては、脆性破壊を防止するために、圧力温度制限曲線(P-Tカーブ)を設定し、これに基づいた運転管理を行う必要があり、適切に実施してきている。

P-Tカーブとは、縦軸と横軸をそれぞれ、1次冷却材の圧力、温度とする座標系で、脆性破壊の観点から破壊が生じる圧力を、安全率を考慮した上でプロットしたものであり、カーブの下側が運転可能な領域となる。P-Tカーブを上回らない範囲で、起動・停止の運転操作が行われ(図7)、耐圧・漏えい試験の実施条件が決定されている。

通常の運転状態を対象とするP-Tカーブの設定には、圧力容器胴部の内外面に板厚の4分の1(50mm前後)にまで達する非常に大きな表面き裂を想定し、さらに許容圧力には先に述べた安全率(運転時2倍、試験時1.5倍)が付加されている。このことから、脆性破壊に対するプラントの運

転管理は、P-Tカーブにより非常に裕度を持って行われており、高い安全性が確保されているといえる。



本連載の締めくくりとして、本稿ではJEAC4206が規定する複雑な中性子照射脆化に関する健全性評価手法を解説し、保守的な想定のもと、実証試験に基づく信頼性の高い評価が行われていることを述べた。

原子力発電所の安全を考える上で、中性子照射脆化への対応は世界共通の課題であり、脆化メカニズムや予測法、健全性評価手法に関する研究が各国で盛んに行われている。圧力容器の健全性を現行手法で確認し、運転管理で着実に維持するとともに、国内外の最新知見や監視試験から得られるデータを踏まえ、脆化予測精度の向上や健全性評価手法の精緻化、高度化に向けた取り組みを継続することが重要である。

参考文献

- [1] JEAC 4206-2007「原子力発電所用機器に対する破壊靱性の確認試験方法」、(社)日本電気協会。
- [2] JEAC 4201-2007「原子炉構造材の監視試験方法」、(社)日本電気協会。
- [3] 「溶接部等熱影響部信頼性実証試験〔原子炉圧力容器加压熱衝撃試験〕〔総まとめ版〕」、(財)発電設備技術検査協会、1992年3月。
- [4] 「PWR型原子炉容器の安全性について」、(財)原子力発電技術機構 安全情報研究センター、1993年9月。
- [5] 原子力安全・保安院、「第5回高経年化技術評価に関する意見聴取会」、配付資料3、2012年1月23日。
- [6] 原子力安全・保安院、「第9回高経年化技術評価に関する意見聴取会」、配付資料2-2、2012年3月6日。
- [7] Okamura et al., Verification of Warm Prestressing Effect Under a Pressurized Thermal Shock (PTS) Event, Trans. of ASME, J. of Pressure Vessel Technology, Vol.116,1994.

図7 P-Tカーブとプラント起動履歴^[5]
(玄海1号機第27回定検の例)

