

原子力材料挙動のモデリングと保全学への展開

中筋 俊樹

経済性や環境適合性の観点から重要なエネルギーインフラの1つに原子力発電がある。福島事故後、さらなる安全性が求められている。本研究では、原子力発電所で使われている压力容器に着目する。原子炉压力容器は、冷却材圧力バウンダリの機能を有する安全上重要な機器である。压力容器の取替えは想定されていないため、劣化による压力容器の破損を未然に防ぐことは安全を保つために重要である。压力容器は核反応によって生じる中性子等の放射線を受けて脆化する（中性子照射脆化）。压力容器の破損モードの1つとして、加圧熱衝撃時の脆性破壊が挙げられる。これは、炉心緊急冷却時に压力容器内面と外面の温度差により容器内面に生じる引張応力によって脆性破壊に至ることである。特に、压力容器鋼は中性子照射脆化するため、運転期間の増加とともに脆性破壊の可能性は高くなる。

どのようなインフラ設備においても、機器の故障等のトラブルによる重大事故の発生を防ぐために、「機器の保守管理活動（保全活動）」が行われている。保全活動は、予防（初期不良率低減、劣化予測）・検知（状態監視）・修復（溶接等による是正）の3つのフェーズに分類できる。本研究で取り扱う压力容器は、冷却材圧力バウンダリであることや交換の想定がないことから、“劣化予測”が重要となる。

完璧な予測は現実的に不可能であり、予測と実測にはばらつき（誤差）がみられる。この誤差は、「系統誤差」と「偶然誤差」の2つに大別できる。「系統誤差」は、予測式に考慮されていない効果や未知の効果が原因となって現れる誤差であり、「偶然誤差」とは、衝撃試験等で現れる偶発的な誤差である。「系統誤差」は予測式を改良していくことで小さくできる。予測式改良には、予測式に物理現象をしっかりと取り入れることがあげられる。他には、実測データを取り入れた予測の修正（データ同化）もある。

さらに、予測にはばらつき（誤差）が付き回るとすると、誤差に起因する破壊確率（リスク）が存在する。このリスクを用いて構造健全性を示すことは、決定論的安全評価では見えにくい、破損するまでの余裕を定量評価できる。压力容器のような破損を防止する必要がある機器には、リスクを示すことで、定量的な安全性の提示や合理的な管理が可能となる。

照射脆化の管理は、照射脆化予測式による予測と炉内に装荷された監視試験片による監視が行われている。压力容器の照射脆化を把握するうえで重要な課題は2つある。1つ目は、照射脆化の監視試験片が压力容器の中に装荷されているが、装荷できるスペースが限られており、運転期間内で監視試験4～5回程程度の試験片しか装荷できず、データの数が少ないというので照射脆化を把握しなければならないということである。2つ目は、脆化の測定データ数を補うためにイオン加速器などを利用して加速試験を行った場合、実際の压力容器と

の照射条件の違いが大きく影響し、実際の圧力容器の脆化とは違ったデータが得られるということである。なお、日本の規制で用いられている脆化予測式では、それぞれのプラントごとに予測式を構築するのではなく、データ数の少なさを補うために日本国内の全原子力プラントで得られたデータを利用して構築されている。

また、圧力容器の破損モードの1つとして、加圧熱衝撃時の脆性破壊が挙げられる。熱衝撃とは、事故時における炉心の緊急冷却の際に、圧力容器内面と外面に生じる温度差によって、圧力容器内面に引張応力が生じることである。このとき、容器内面にあるき裂が成長し、脆性破壊を生じる可能性がある。特に、圧力容器鋼は中性子照射脆化するため、運転期間の増加とともに脆性破壊の可能性は高くなる。加圧熱衝撃時の脆性破壊については、実際のところ、照射脆化の進行度合いを示す延性脆性遷移温度を指標として管理されている。しかしながら、延性脆性遷移温度の変化は機械的特性の変化であり、圧力容器の健全性を評価するのであれば、負荷される応力拡大係数や脆化の予測値や評価値の曖昧さなども考慮するべきと考えられる。

これらの課題を解決するために、以下の項目を検討した。

- 照射脆化予測について、加速試験等による照射条件の脆化への影響を詳細に明らかにするため、マルチスケールモデリングにより空間的および時間的にマイクロなスケールから照射脆化をシミュレーションし、予測精度の向上を検討する（2章）。
- 脆化予測に使える実測データが少ないことについて、データサイエンス分野の特にベイズ統計を用いて、機械特性の実測データを活用し、マクロな視点からの脆化予測の高度化を検討する（3章）。
- 圧力容器の照射脆化について、延性脆性遷移温度の変化ではなく、リスクを活用した合理的な保安全管理について議論する（4章）。

これらの検討を踏まえた総括を5章とする。

各章の要約を以下に述べる。

圧力容器鋼照射脆化のマルチスケールモデリング（2章）

軽水炉圧力容器鋼の照射脆化について、照射による材料内マイクロ構造変化のマルチスケールモデリングを行った。照射脆化は、中性子線等の放射線の入射によって格子位置にある原子をはじき出すことに起因し、空孔クラスターや格子間原子クラスター、銅などの溶質原子クラスターの形成によるマイクロ構造変化により生じる。本研究では圧力容器鋼内の欠陥集合体の核生成過程をモンテカルロ法および反応速度論によりシミュレーションした。欠陥集合体は、銅-空孔集合体および転位ループを考慮した。まず、銅-空孔集合体の形成エネルギーの定式化を行い、核生成エネルギーを導出した。また、モンテカルロ法や反応速度論法により、欠陥集合体の核生成過程と成長過程を表現した。その結果、同じ照射量でも損傷

速度が低いほど銅-空孔集合体の数密度は増加することが分かった。さらに、高い損傷速度では銅-空孔集合体は空孔しか含まれていないボイドとして核生成し、低い損傷速度の条件では銅-空孔集合体は銅原子しか含まれていない銅析出物となることが分かった。

損傷速度の影響を明らかにすることは、材料試験炉やイオン照射等を用いた加速試験を行う上で重要である。特に 40 年や 60 年といった長期間の脆化を実機で評価をするには、加速試験を行うしかなく、損傷速度の効果を理解していないと危険側への評価になることもある。本研究で得た結果は従来の実験結果と一致することからも、本研究により照射脆化の損傷速度の影響について機構論を基にした数値シミュレーションで明らかにした。これは、照射脆化において加速試験を行う上で非常に重要な知見を得た。

また、現在日本で使用されている照射脆化予測式 (JEAC4201-2007) には、ボイドの形成の効果は考慮されていない。材料試験炉よりもさらに損傷速度の高い電子線照射やイオン照射を活用するのであれば、ボイドの形成も考慮する必要があると考えられる。

ベイズ統計学を用いた照射脆化予測の高度化 (3章)

3章では、物理現象の詳細を取り扱う2章とは異なり、実測されるマクロスケールのデータを使った予測の高度化を検討した。これまで商業軽水炉や材料試験炉等で得られている脆化データを、“データ同化”や“ベイズ統計学”に則ってデータサイエンスを応用して照射脆化予測への反映について検討を行った。精度よく照射脆化を予測するため、統計学の観点から照射脆化データを分析し、新たな補正方法について提案した。なお、ここでは、日本の原子力規制で使われている照射脆化予測式(JEAC4201)を用いて検討した。

最新の JEAC4201 は、照射による材料内マイクロ構造変化を表現するモデル式に 19 個のフィッティングパラメータを含ませ、日本の商業軽水炉や材料試験炉等で得られた脆化データ (400 点程度) を用いて 19 個のパラメータを決定して、作られた照射脆化予測計算モデルである。入力パラメータは、中性子照射量、中性子束、照射温度、Cu 濃度、Ni 濃度であり、延性脆性遷移温度 (DBTT) の変化量が出力値である。また、各プラントにおいて、DBTT 変化量の実測値が得られている場合は、実測値と JEAC4201 による計算値の差の平均値だけ脆化計算値をシフトさせる Mc 補正と呼ばれる補正が行われる。

まず、国内にあるすべての照射脆化データについて、残差 (実測値と JEAC4201 による計算値の差) が母集団と見なされる場合、個々のプラントの残差は母集団から抽出された標本と見なすことができる。特定のプラントの Δ DBTT 値を十分な精度で予測するには、統計平均に関する標本誤差を考慮する必要があることがわかった。

標本誤差により生じる予測と実測のずれを解消するには、JEAC 4201 の計算値に対して適切な補正を行うことがあげられる。特定のプラントの照射脆化が予測される場合、母標準偏差をマージンとして使用するのとは正しくないが、従来の MC 補正は統計的な観点からも有効であることが確認された。

MC 補正の代替方法として、ベイズ論を使用して新しい補正方法を提案した。この方法は、MC 補正と同程度の補正量でしかないが、圧力容器の管理のために確率的リスク評価を活用するのであれば、リスク評価を行うにあたって潜在的な利点がある。

リスク情報を活用した圧力容器保全の最適化（4章）

原子炉圧力容器は、放射性物質の閉じ込める機能を維持し続ける必要があるが、腐食や疲労などの要因による破損する可能性が存在する。圧力容器の破損は、冷却機能喪失や閉じ込め機能喪失につながるため、予防保全による破損の未然防止をしっかりと図る必要があり、リスク評価により破損するまでの余裕を示すことは安全性の提示や合理的な保全に有効である。

本研究では、PTS 事象により圧力容器が破損するリスクの評価手法を提案した。そのリスク評価手法を用いて、圧力容器の保全活動（監視試験片の衝撃試験の時期）の見直しを図った。

運転時間の経過とともに圧力容器の破損リスクは立ち上がることが分かった。従来の圧力容器鋼照射脆化の監視は、破壊リスクの小さいところで行われている。リスクの増加に合わせた脆化監視計画を立てることにより、より合理的な保全活動が行える。脆化予測のあいまいさによってリスクが生じている。予測のあいまいさを減少させることで、リスクは大きく低減する。

3章のベイズ補正モデルを用いてリスク評価を行った。3つのモデルプラントは、それぞれの脆化量のばらつきが異なる。ばらつきを考慮すると、脆化量が高いプラントでも破損に至るリスクは小さいことが分かった。このようにリスク値を比較することで、圧力容器の保全最適化が可能となる。