

リスクを活用した合理的な圧力容器保全のための研究

Risk-based Optimization of Reactor Pressure Vessel Maintenance

京都大学
京都大学
京都大学

中筋 俊樹
阮 小勇
森下 和功

Toshiki NAKASUJI Student Member
Xiaoyong RUAN Student Member
Kazunori MORISHITA Member

Abstract

Reactor pressure vessel (RPV) steels are subjected to neutron irradiation that can lead to loss of fracture toughness. One of the critical issues for RPV structural integrity is related to the pressurized thermal shock (PTS) event. Risk assessment is important for safety evaluation and maintenance planning of a nuclear power plant. In this study, a new method was developed to assess a failure risk of RPV at PTS event for the risk-based maintenance. The failure risk was caused by fluctuations of stress intensity factor (K_I) and fracture toughness (K_{IC}) of cracks at the inner surface of the RPV. The optimization of conventional time-based maintenance of RPV was discussed.

Keywords: Irradiation Embrittlement, Reactor Pressure Vessel, Risk Assessment, Bayesian statistics

1. はじめに

福島原子力発電所事故の発生を受けて、原子力エネルギーシステムは想定外の事象が生じても耐えて回復する能力、レジリエンス性を持つことが求められている。このためには、

①起こりうる事象を正しく想定し対応すること

②想定外の事象が生じた時に適切な修正が可能なが重要であり、これらを満たすような対策・対応を行うことが必要である。本研究では、軽水炉圧力容器鋼の照射脆化に関する健全性評価に着目する。

照射脆化に関する①については、材料照射挙動分野と熱流体・構造解析分野の分野融合が必要である。なぜなら、照射実験やマルチスケールモデリングにより材料照射脆化を予測するだけでなく、冷却状況や熱応力の発生等の使用されている環境も把握することが健全性評価には重要であるからである。もちろん、マルチスケールモデリングにより精度良く照射脆化予測を行うことも重要である。

②は、照射脆化について、予測と実測の違いを事後処理する方法を構築することが挙げられる。そのために、ベイズ統計学やデータマイニング工学、スパースモデリングなどのすでに取得したデータを利用して推論を行う

データサイエンス分野の研究を活用する。予測の不確実性に対応するために、脆化を精度良く予測するマルチスケールモデリングとスモールデータを扱うデータサイエンスの融合が不可欠となる。

レジリエンス性向上のためには、照射脆化した圧力容器鋼の破壊リスクを定量評価し、経年化などによるリスク変動に合わせた対応を行うことも重要である。そのために本研究では、まず圧力容器鋼の破壊リスクを定量評価する。そして、データサイエンスを活用した今までにない新たな予測法について議論する。これらを通して、想定内の事象だけでなく、想定外の事象に対するシステムのレジリエンス性向上に大きく貢献することを目的とする。

2. 圧力容器鋼の破損リスク評価

軽水炉圧力容器鋼は、中性子の照射を受けて脆化・硬化といった材料の機械特性が変化する。脆化した圧力容器鋼は、事故時における緊急冷却時に生じる加圧熱衝撃(PTS)に耐えられず破損してしまう可能性がある。そのため、圧力容器の保全活動を行い、事故の未然防止を図ることは重要である。

PTS 事象に対する圧力容器の健全性評価は、照射脆化による破壊靱性値変化の評価と加圧熱衝撃時に圧力容器内面のき裂に負荷される応力拡大係数の評価を行い、圧力容器内面のき裂が進展するかどうかを確認することで

連絡先:中筋 俊樹、〒611-0011 京都府宇治市五ヶ庄、
京都大学 エネルギー理工学研究所、
E-mail: t-nakasuji@iae.kyoto-u.ac.jp

ある。しかしながら、これらの評価にはあいまいさが必ず存在する。例えば、照射脆化評価では脆化予測の精度および炉内に入れられた脆化監視試験片と実際の圧力容器鋼の脆化度合いの違いなどが挙げられる。したがって、き裂進展による圧力容器破壊は確率論的なプロセスである。本研究では、圧力容器破壊確率をリスクとして用い、圧力容器の保全の最適化をリスクベースで行うための検討を行った。

JEAC4201-2013 (JEAC4201-2007 2013 年追補版)^[1-3]の脆化予測法に記述されているばらつき (延性脆性遷移温度の計算値と実測値の残差の標準偏差 $\sigma = 11^\circ\text{C}$) を用いて圧力容器鋼破壊リスクを得た。図 1 は、圧力容器鋼破壊リスクと延性脆性遷移温度 (DBTT) の時間変化を示す。時間の経過とともに脆化の変化率は鈍化するが、リスクは急激に増大していることがわかる。また、JEAC4201-2007^[4]の規定で定められている脆化量監視は、破壊リスクが小さく、脆化の変化率が大きいところで行われていることが分かる。これは、脆化量の把握に重点をおいた監視計画とは言えるものの、リスクに基づく保全計画にはなっていない。これまで 40 年分の脆化データが十分に蓄積されてきたことを考えると、今後は、運転後期 (30 年目以降) に頻りに監視するなどの保全計画が安全性向上には重要と考えられる。

図 7 には、JEAC4201-2013 に示されている脆化予測結果のばらつき (予測値と実測値の残差の標準偏差 $\sigma = 11^\circ\text{C}$) を変化させたときの圧力容器破壊リスクを示す。予測結果の標準偏差を減少させることは、照射脆化シミュレーションの高度化による予測精度の向上を意味する。脆化予測の標準偏差を半分にする、すなわち脆化予測のあいまいさを減らすと、リスクは 3 桁も減少することが分かる。

したがって、脆化予測精度の向上は圧力容器の破壊リスク低減に重要である。脆化予測精度の向上には、照射脆化の物理現象をマルチスケールモデリングにより詳細に表現することが挙げられるが、次章ではすでに得られた脆化実測データを活用した予測精度の向上を、ベイズ統計を用いて議論する。

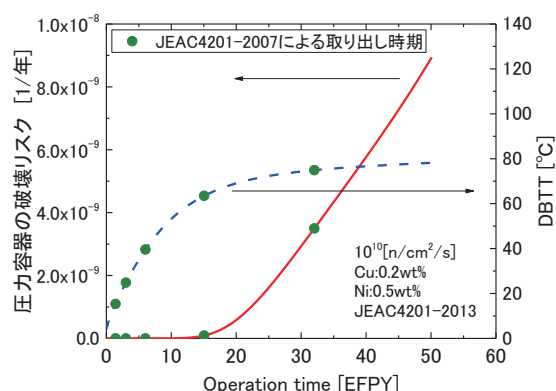


図 1 圧力容器破壊リスクと脆化量の経時変化

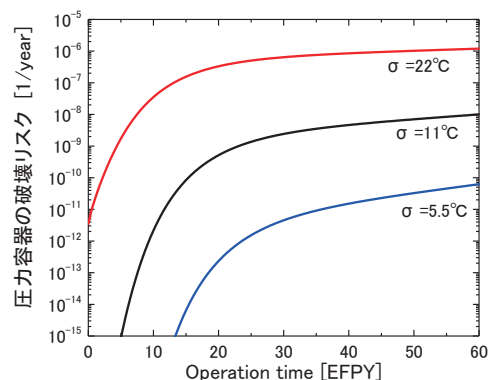


図 2 圧力容器破壊リスクの脆化予測精度依存性

3. ベイズによる脆化予測モデル

3.1 ベイズ統計学について

ベイズ統計学は、以下に示すベイズの定理に基づいて展開される。

$$P(A|D) = \frac{P(D|A)P(A)}{P(D)}$$

ここで、 $P(A)$ はパラメータ A の事前分布であり、データ D が得られる前のパラメータ A の確率分布である。 $P(D)$ は正規化項であり、すべてのパラメータにおいてデータ H が得られる確率分布である。 $P(D|A)$ は尤度でありパラメータ A の時にデータ D が得られる確率分布、 $P(A|D)$ は事後分布でありデータ D が得られた時のパラメータ A の確率分布を意味する。つまり、データ D が得られるたびに、上記の式を使ってパラメータ A を更新することにより、データ D の統計結果をパラメータ A の確率分布として表すことができる。

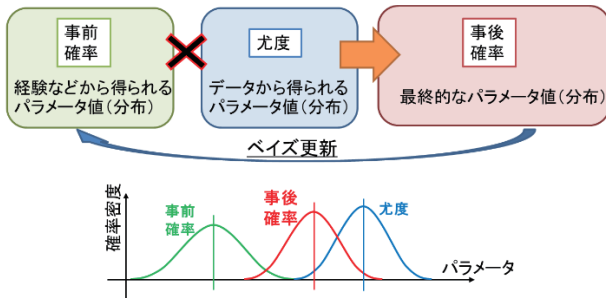


図3 ベイズ統計の概要

3.2 ベイズによる脆化予測の補正と結果

従来の照射脆化予測モデルである JEAC4201-2013 をもとに、ベイズ統計学を取り入れた簡易的な予測モデルを2つ構築した。

$$\Delta DBTT_{\text{最終予測値}} = \Delta DBTT_{\text{JEAC4201-2013 による予測値}} + a \quad (1)$$

$$\Delta DBTT_{\text{最終予測値}} = b \cdot \Delta DBTT_{\text{JEAC4201-2013 による予測値}} + c \quad (2)$$

ここで、 a, b, c はパラメータであり、すでに得ている脆化データからベイズ統計学により得る。新たなデータが得られる度にパラメータを更新する。式(1)は DBTT 予測値をパラメータ a だけシフトさせて補正する。式(2)は b と c の2つパラメータを用いて、1次式により補正するものである。このような補正モデル以外に、JEAC4201-2013 や米国の規制で用いられている EONY^⑤等の脆化予測法で使われているパラメータをベイズにより直接更新することも挙げられる。

ここでは式(1)の DBTT 予測値をパラメータ a だけシフトさせるモデル式についてベイズ更新を行った例を紹介する。ベイズ更新を行うにあたり、玄海1号の照射脆化データ（運転時間の異なる4回の測定分）を実測値として用いる。測定データが1つ得られるごとにパラメータ a の分布を更新した。パラメータ a の統計分布の推移を表1に示す。4回目の実測データを用いて更新したパラメータ a により、脆化予測を行った結果を図2に示す。このときの実測データと予測値の標準偏差は 14.0°C となり、ベイズによる補正がない場合の 21.2°C から大きく低減することができた。

図2には、照射脆化予測の現行規制である JEAC4201-2007(2013年追補版)に記載されている Mc 補正を行った結果についても同時に示している。Mc 補正は、プラントごとの DBTT 初期値のばらつきを DBTT 予測値をシフトさせることにより補正する。したがって、モデル式は(1)式と同様であるが、パラメータ a の取得方法は異なる。4回目の実測データが得られたのちの Mc 補正量は 16.2°C 、

予測と実測の標準偏差は 13.7°C となった。このことから、ベイズによる補正においても十分に予測値の補正が行えることが分かった。

表1 ベイズ更新によるパラメータ a の推移

	中性子照射量 [n/cm ²]	a の平均値 [$^{\circ}\text{C}$]	a の標準偏差 σ [$^{\circ}\text{C}$]
0回目 (初期値)	0	0	11
1回目	0.5×10^{19}	13.85	5.50
2回目	2.1×10^{19}	13.99	4.92
3回目	3.5×10^{19}	12.94	4.49
4回目	6.5×10^{19}	13.74	4.16

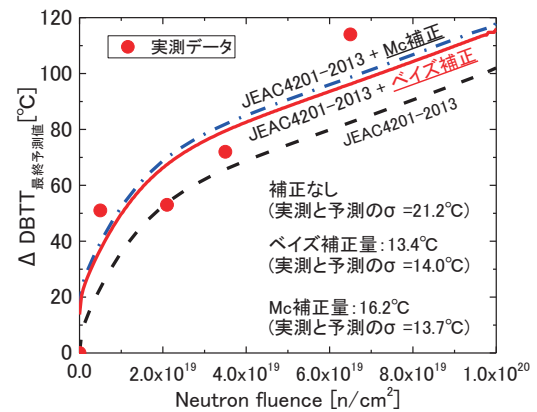


図4 4回目の実測データ取得後の照射脆化予測値

4. まとめ

原子力発電所のレジリエンス性向上のため、照射脆化に着目し、リスクを活用した合理的な压力容器保全について検討した。まず、PTS 事象による压力容器の破壊リスクを算出した。そして、ベイズによる照射脆化予測の補正を検討した。得られた知見を以下に示す。

1. 運転時間の経過とともに压力容器の破壊リスクは立ち上がる。従来の压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。
2. 脆化予測のあいまいさによってリスクが生じている。予測のあいまいさの低減、すなわち予測精度の向上は、リスク低減に大きく貢献する。
3. 照射脆化予測の精度向上の試みの1つとして、ベイズ統計によってすでに得られている脆化データを活

用した照射予測の補正を行った。ベイズによる照射脆化予測の補正が有効であることを確認したとともに、従来の Mc 補正の有効性についても確認した。

参考文献

- [1] (社) 日本電気協会, “原子炉構造材の監視試験方法”, JEAC 4201-2007 [2013 年追補版], 2013.
- [2] 曾根田直樹, 土肥謙次ら, “軽水炉圧力容器鋼材の照射脆化予測法の式化に関する研究 -照射脆化予測法の開発-”, 電力中央研究所 報告書, 研究報告:Q06019, (2007).
- [3] 曾根田直樹, 中島健一ら, “原子炉圧力容器鋼の照射脆化予測法の改良-高照射試験データの予測の改善-”, 電力中央研究所 報告書, 研究報告:Q12007, (2013).
- [4] (社) 日本電気協会, “原子炉構造材の監視試験方法”, JEAC 4201-200, 2007.
- [5] U.S. NRC, 10CFR 50.61a, ”Alternate fracture toughness requirements for protection against pressurized thermal shock events”, (2010).