

# ベイズを用いた压力容器鋼の照射脆化予測の検討 —予測精度のより一層の向上に向けて—

## Application of Bayesian Estimation Method to Irradiation Embrittlement Correlation of RPV Steels

京都大学  
京都大学

森下 和功  
中筋 俊樹

Kazunori MORISHITA Member  
Toshiki NAKASUJI Student Member

### Abstract

An embrittlement correlation method is one of the most important techniques to ensure the integrity of pressure vessel steels in nuclear power plants. In Japan, this is being addressed in accordance with the Japan Electric Association Code (JEAC4201) that was constructed using actual measured data of irradiation embrittlement of pressure vessel steels. In the present study, as a key step towards developing more reliable methodologies, statistical arguments were made on the embrittlement data. Based on this, more appropriate interpretation of the conventional MC correction in JEAC4201 was made, and moreover, a new correction method was developed within the framework of Bayesian estimation. This new correction method will be useful to establish further advanced management methodologies using the probabilistic risk assessment approach.

**Keywords:** Neutron Irradiation Embrittlement, Reactor Pressure Vessel, JEAC4201 Embrittlement Correlation, Statistics, Bayesian Estimation, Reactor Integrity

## 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ことが重要であり、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、軽水炉压力容器鋼の照射脆化予測について、特に、②に着目する。

軽水炉压力容器鋼は、中性子照射脆化による高経年化に対応するため、照射脆化予測や監視などの保全活動を実施する必要がある。照射脆化についての②とは、予測と実測の違いを事後処理する方法論の構築である。現行規制の照射脆化予測法 (JEAC4201-2007<sup>[1][2]</sup>および JEAC4201-2007 (2013年追補版)<sup>[3][4]</sup>) においては、MC補正と呼ばれる脆化実測値を用いた予測値の補正が行われているが、これは、脆化の予測値と実測値の差の平均

だけ、予測値をシフトして補正を行うものである。しかしながら、その妥当性に関する議論が十分でないため、「後付けの予測法」と揶揄されることも多い。一方、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が近年盛んに行われており、めざましい進展がみられる。本研究ではデータサイエンス分野のベイズ統計を活用した今までにない予測の修正法について議論した。MC補正にかわる新たな予測の補正法を提案した。

## 2. ベイズによる脆化予測モデル

### 2.1 ベイズ統計学について

ベイズの定理は、以下の式である。

$$\pi(H|D) = \frac{f(D|H)\pi(H)}{\pi(D)}$$

ここで、 $\pi(H)$ はパラメータ $H$ の事前分布であり、データ $D$ を取得する前のパラメータ $H$ の確率分布である。 $\pi(D)$ はデータ $D$ が得られる確率分布である。 $f(D|H)$ は尤度であり、パラメータ $H$ のもとでデータ $D$ が得られる確率分布を表す。また、 $\pi(H|D)$ は事後分布であり、デ

ータDが得られた時のパラメータHの確率分布を意味する。このベイズの定理を用いて、データDが得られるたびに上記の式によりパラメータHの分布を更新する。このようにデータの取得毎にパラメータを更新することをベイズ更新という（図1）。

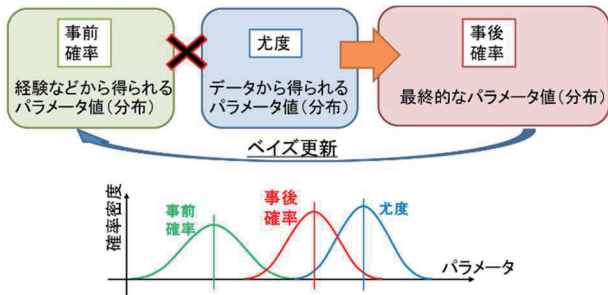


図1 ベイズ統計の概要

## 2.2 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 JEAC4201-2007 および JEAC4201-2007（2013 年追補版）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構築した。

$$\Delta DBTT_{pre} = \Delta DBTT_{cal} + \mu_X$$

ここで、 $\Delta DBTT_{cal}$  は現行規制の脆化予測法<sup>[2][4]</sup> で得られる計算値、 $\Delta DBTT_{pre}$  は補正後の予測値である。 $\mu_X$  は補正するためのパラメータであり、すでに得ている脆化データ  $\Delta DBTT_{mes}$  からベイズ推定により得る。新たなデータが得られる度に  $\mu_X$  を更新する。

ベイズによる脆化予測の補正を行った例を紹介する。ベイズ更新を行うにあたり、プラント K 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  $\mu_X$  の分布を更新した。プラント K の  $\Delta DBTT_{mes}$ 、 $\Delta DBTT_{cal}$  および  $\mu_X$  の分布の平均値の推移を表 1 に示す。 $\mu_X$  の平均値だけ  $\Delta DBTT_{cal}$  をシフトさせて脆化予測の補正を行った結果を図 2 に示す。4 回目の補正を行った後の  $\mu_X$  を用いると、実測データと予測値の残差の標準偏差は 14.0°C となり、ベイズ補正がない場合の 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 ( $\Delta DBTT_{MC}$ ) も示している。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、モデル式はベイズによる本研究のものと同様であるが、パラメータ  $\mu_X$  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、残差の標準偏差は 13.7°C となった。このことから、ベイズ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  $\mu_X$  の平均値の推移

Neutron fluence [n/cm <sup>2</sup> ]	$\Delta DBTT_{mes}$ [°C]	$\Delta DBTT_{cal}$ [°C]	$\mu_X$ [°C]
0 (initial)	-	-	0
$0.5 \times 10^{19}$	51	25.9	8.9
$2.1 \times 10^{19}$	53	56.8	5.6
$3.5 \times 10^{19}$	72	65.6	5.8
$6.5 \times 10^{19}$	114	80.4	10.6

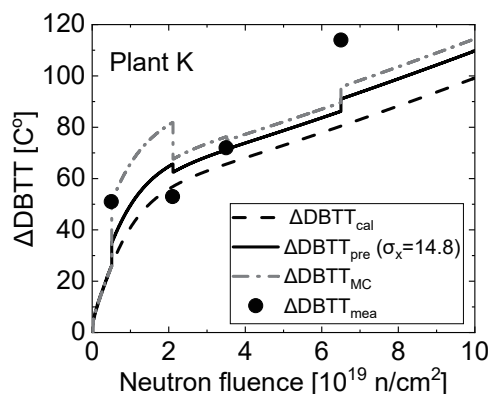


図2 ベイズによる照射脆化予測の補正

## 3. まとめ

照射脆化予測の精度向上の試みの 1 つとして、ベイズ統計を用い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。本研究で提案し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。

## 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, 2007
- [2] 曾根田直樹, 土肥謙次ら, 電力中央研究所報告書, 研究報告:Q06019, (2007).
- [3] (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.
- [4] 曾根田直樹, 中島健一ら, 電力中央研究所報告書, 研究報告:Q12007, (2013).