

確率論的リスク評価用原子力機器信頼性パラメータの整備

Development of Nuclear Component Reliability Parameters for Probabilistic Risk Assessment in Japan

電中研 NRRC	吉田 智朗	Tomoaki YOSHIDA	Non-member
電中研 NRRC	清野 弘章	Hiroaki SEINO	Non-member
電中研 NRRC	喜多 利亘	Toshinobu KITA	Non-member
電中研 NRRC	古田 泰	Tai FURUTA	Member

New reliability parameters of the nuclear components have been estimated for probabilistic risk assessment in Japan. The data for the estimation were collected in a manner consistent with their PRA modeling under the utilities quality assurance systems. The component reliability parameters were estimated with empirical Bayes method. These reliability parameters will contribute to the improvement of the PRA quality in Japan.

Keywords: Probabilistic risk assessment
Component reliability parameter
Component failure rate,
Component failure probability
Bayesian

1. はじめに

本報は、我が国の原子力発電プラントの確率論的リスク評価（PRA: probabilistic risk assessment、ここでは特にレベル1 内の事象 PRA のことをさす）に用いる国内一般機器故障率/故障確率（機器故障パラメータ）を、国内プラントで収集した機器故障データから推定した結果について述べたものである。

従来、我が国の PRA で用いられていた 機器故障率/故障確率の値は、（一社）原子力安全推進協会（JANSI）の原子力施設情報公開ライブラリー（NUCIA）に登録された機器トラブル情報を用いて算出されたものである[1]。これらの値を用いて評価された我が国の PRA の炉心損傷頻度（CDF）が総じて欧米プラントのそれよりも数桁程度小さい傾向にあったことから、国内外専門家より、日本の機器故障パラメータは低すぎるのではないかと、故障事象のデータが適切に収集されていないのではないかと、の疑念の声もあげられていた。しかしながら、NUCIA には、その事象登録基準に PRA の故障基準が考慮されていないため PRA に必要な情報が登録されているとは限らないこと、また、機器故障パラメータの計算に必要な機器母集団・運転時間等のデータは登録されないことから、NUCIA データから算出した機器故障パラメータ

の妥当性の説明ができなかった。

東京電力福島第一原子力発電所事故（1F 事故）の反省・教訓から、電気事業者は NRRC を設立して PRA の本格的技術開発に乗り出し、その一環として、各発電所で直接収集した説明性のあるデータを用いて機器信頼性パラメータを算出することとした。NRRC はこれを支援するため、PRA モデルと整合したデータ収集の技術要件をまとめ、それにしたがって電気事業が収集したデータを用いて、PRA 用の国内一般機器故障パラメータを推定した。

2. PRA 用信頼性パラメータ評価手法

2.1 PRA 用パラメータと推定のためのデータ

原子力発電プラントの PRA の基事象に用いられる機器故障事象は、大別して次の2 種類に分けられる。

(1) 継続運転失敗（あるいは状態維持失敗）

運転中（あるいは供用中）の機器が、運転（供用）時間中に何らかの原因で機能故障し、運転（供用）が停止する事象。一般にこの事象は、ある時間の間に一定の割合でランダムに事象が発生するポアソン過程としてモデル化される。総運転（供用）時間 T の間に故障が x 回起こるような確率は次式で表される。

$$P(x|\lambda, T) = \frac{(\lambda T)^x e^{-\lambda T}}{x!} \quad (1)$$

ここで、パラメータ λ は正の定数であり、時間故障率を表す。問題は、データ (T, x) を得て λ を推定することである。

(2) 起動失敗（あるいは状態変更失敗）

安全設備など供用待機中の機器に、異常発生により起動デマンドがかかったときに、機能故障で起動しない事象。一般にこの事象は、複数回の試行のうちある一定の割合でランダムに発生する二項過程としてモデル化される。総起動デマンド回数 D のうち x 回失敗する確率は次式で表される。

$$P(x|p) = {}_D C_x p^x (1-p)^{D-x} \quad (2)$$

ここで、パラメータ p は $[0,1]$ の定数であり、デマンド故障確率を表す。問題は、データ (D, x) を得て p を推定することである。

2.2 階層ベイズ手法

ある原子力機器の機種について、国内 M 基のプラントの機器故障エビデンスデータ E_j （前節では (T, x) 、 (D, x) ）を収集して、当該機器故障の信頼性パラメータ θ_j （前節では λ 、 p ）を推定することを考える（ $j=1, 2, \dots, M$ ）。前節(1)、(2)で述べたように、データ E_j は、パラメータ θ_j で特徴づけられる確率過程 $\pi(E_j|\theta)$ から生ずると想定する（ π は、前節ではポアソン過程、二項過程）。さらに、信頼性パラメータ θ_j は産業界における θ の母集団ばらつき分布 $g(\theta|\varphi)$ から生成される、というモデルを考える。 θ の分布形を特徴づけるパラメータ φ はハイパーパラメータと呼ばれる。ベイズの定理から、エビデンスデータ E_j を得てパラメータ θ_j 、 φ の同時確率分布を表す式が得られる。

$$P(\vec{\theta}, \varphi | \vec{E}) \propto \prod_{j=1}^M \{ \pi(E_j | \theta_j) \cdot g(\theta_j | \varphi) \} \cdot P(\varphi) \quad (3)$$

ここで、 $\vec{\theta} = (\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_M)$ 、 $\vec{E} = (E_1, E_2, \dots, E_M)$ 。上記のように、パラメータとハイパーパラメータという階層構造をもつモデルのベイズ統計の取り扱いを、階層ベイズ手法という。階層ベイズ手法の構造概念を図1に示す。

式(3)から各パラメータの確率分布を求めるには、適切な φ の事前分布 $P(\varphi)$ を決めてマルコフ連鎖モンテカルロ (MCMC) 法を用いる方法があるが、データ数（今回の

場合は故障件数）が希少な場合はMCMCが収束しない事が多いため、ここでは米国NRCでの一般機器パラメータ評価手法にならって、経験ベイズ手法を用いた。すなわち、共役事前分布とエビデンスデータ \vec{E} を用い最尤法によってパラメータの点推定値 $\hat{\theta}_j$ 、 $\hat{\varphi}$ を求めた。機器故障パラメータ θ の一般分布は $g(\theta|\hat{\varphi})$ で求められる。さらに、プラント間でパラメータ θ_j の差がない場合は、通常、最尤法の解がないので、予めデータ \vec{E} に対して χ^2 検定を行い、差がないと判断した場合は、機器故障パラメータとデータは全プラント共通とみなし、一段階ベイズ手法

$$P(\theta | E_{total}) \propto \pi(E_{total} | \theta) \cdot P(\theta) \quad (4)$$

により産業界共通の機器故障パラメータ θ を求めた（事前分布 $P(\theta)$ には Jeffreys の無情報事前分布を用いた）。

2.3 一般機器故障パラメータの推定

電気事業者の品質保証体制が整った2004年度から1F事故直前の2010年度までの国内プラントのデータを用いて前項の手法により算出した機器故障パラメータの例を図2、図3に示す。図2は時間故障率の例、図3はデマンド起動失敗確率の例である。比較のため、米国の同機種、故障モードの一般故障確率の値もあわせて掲載した[2]。

結果の全般的な特徴としては、・故障件数0のものが多く、その場合はエラーファクターが大きめになっている、・米国のパラメータの値より小さいが、その違いは概ね1桁以内である。

電気事業は、今後もデータ収集を継続し、機器故障パラメータの信頼性を高めていくことが望ましい。

3. まとめ

電気事業者がPRAモデルと整合性のあるデータを適切な品質保証の下で収集し、そのデータ用いて評価した機器故障パラメータでPRAを実施することにより、PRA結果の信頼性が大きく向上すると考える。

参考文献

- [1] <https://nrc.denken.or.jp/kisnrr/>
- [2] <http://nrcoe.inl.gov/resultsdb/publicdocs/AvgPerfComponentReliabilityDataSheets2015.pdf>

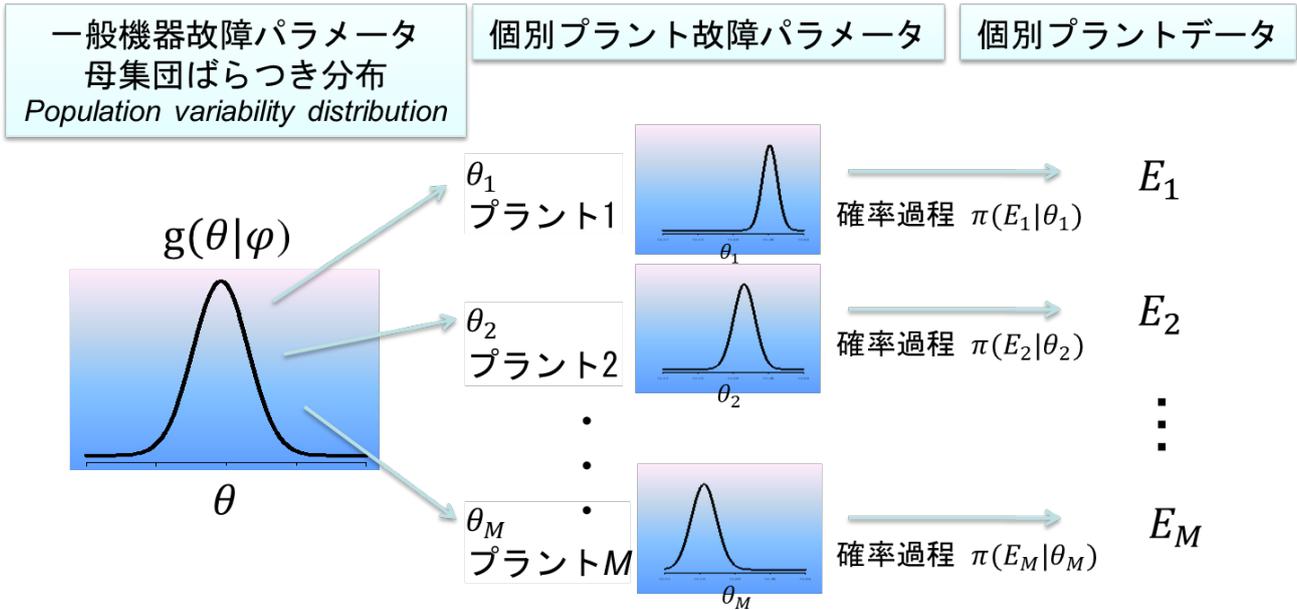


図 1 階層ベイズ手法の階層概念

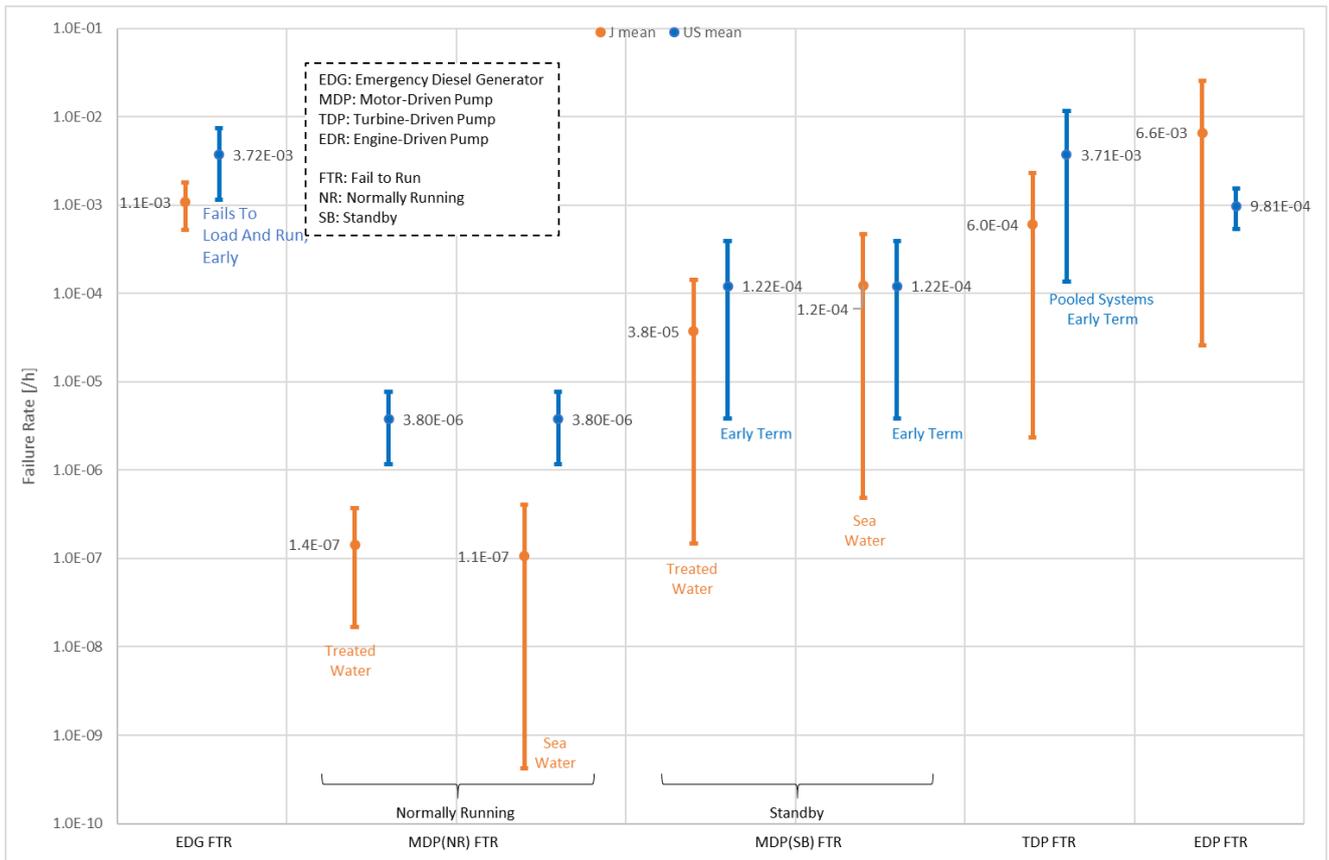


図 2 時間故障率の算出例

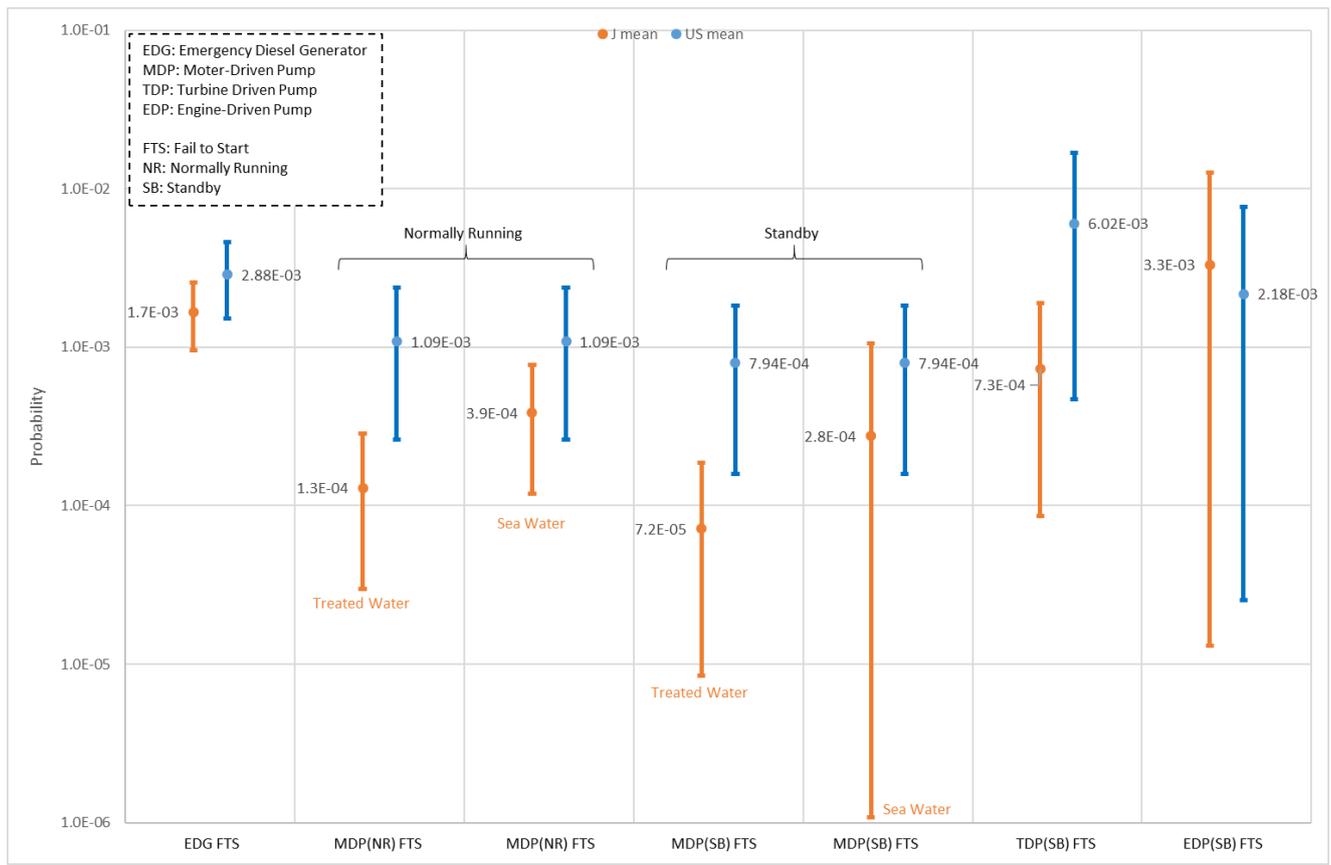


図 3 デマンド故障確率の算出例