

運転保守データを活用した BWR プラントの保全

BWR Maintenance Based on Data of Operation and Maintenance

東電環境エンジニアリング (株)

野田 宏 Hiroshi NODA

Member

Based on NUCIA data, an analysis of failure on demand of RCIC (Reactor Core Isolation Cooling) system estimated by Bayes analysis and an optimization of overhaul inspection interval combined with event occurrence rate of a MOV (Motor Operated Valve) in BWR's safety systems estimated by Bayes analysis and the unavailability have been conducted.

Keywords: RCIC, Bayes statistics, MOV

1. はじめに

我が国では原子力プラントで発生した事故、故障等のデータは、原子力施設情報公開ライブラリー (NUCIA: NUClear Information Archives) [1]に蓄積されている。特に、原子力プラントの確率論的安全評価 (PSA: Probabilistic Safety Analysis) 用信頼性データは、1982年4月より収集が開始されているが、故障件数が極めて少ない、あるいはゼロであるため、従来の頻度論に基づく方法ではデマンド故障確率、故障率等の推定が困難な場合が多かった。昨今、個別原子力プラントの信頼性解析や PSA の結果に基づく保全プログラムが必須要件となりつつあり、発生頻度が少ない事象に対する的確な信頼性評価が必要である。米国等で採用されているベイズ統計による推定方法は、データ量が少ない場合でも専門家の経験、知識等を事前分布に取り入れ [2][3][4][5]、母集団の属性を推定する方法であり、上記の要件に応えることのできる有効な方法である。

本報では NUCIA のデータを基に、ベイズ統計を活用して BWR 原子炉隔離時冷却系 (RCIC 系: Reactor Core Isolation Cooling System) のデマンド故障の解析および BWR 安全系電動弁の不具合事象発生率の解析とアンアベラビリティの解析との組合せによる分解点検間隔の最適化について述べる。

2. BWR 原子炉隔離時冷却系のデマンド故障の解析

2.1 評価対象の選定

NUCIA に登録されている「原子力プラントにおける運転制限の逸脱事象」について系統別に整理し、最も多く事象が発生している BWR の RCIC 系を解析対象に選定した。RCIC 系は「プラント運転中に発生したトラブルにより実作動すること」、「原子炉運転中、30日に一回の頻度で起動させる定例試験が行われこと」、「定期検査終了時、起動試験が行われること」の3種類の起動デマンドがあり、運転データを Table 1 に示す。日本の RCIC 系を有する BWR30 基の個別プラントについてベイズ統計による評価を行うことを目的にカイ二乗検定結果に基づき、定期検査の試験時と定例試験時のデマンド故障とに区別して解析する。

2.2 デマンド故障の確率モデル

RCIC系は単一系統で、どれかひとつの機器が故障すれば、起動失敗となる。全 m 基の発電所のうち、発電所 i ($1 \leq i \leq m$) の待機中機器について起動失敗確率を p_i としたとき、 n_i 回の起動デマンドに対し、 x_i 回の起動失敗が起こる確率 $P_r(x_i | p_i, n_i)$ は、下記の二項分布に従うと仮定する。

$$P_r(x_i | p_i, n_i) = \binom{n_i}{x_i} p_i^{x_i} (1-p_i)^{n_i-x_i} \quad (1)$$

2.3 階層ベイズ法による解析

階層ベイズ法 [2][3] による分析では未知数である RCIC 系起動失敗確率 $\mathbf{p}=(p_1, p_2, \dots, p_m)$ の不確かさを確率分布で表し、その分布のハイパーパラメータを θ とする。RCIC 系起動デマンド数と起動失敗回数の m 組のデータ (\mathbf{n}, \mathbf{x}) 、 $\mathbf{n}=\{n_i\}$ 、 $\mathbf{x}=\{x_i\}$ 、 $i=1, 2, \dots, m$ が得られたとき、同時確率関数 $f(\mathbf{p}, \theta, \mathbf{x})$ は次式で表される。

$$f(\mathbf{p}, \theta, \mathbf{x}) = f(\mathbf{x} | \mathbf{p}) \cdot f(\mathbf{p} | \theta) \cdot f(\theta) \quad (2)$$

尤度関数である $f(\mathbf{x} | \mathbf{p})$ は式(1)を用い、事前分布 $f(\mathbf{p} | \theta)$ としてロジスティック正規事前分布を、ハイパーパラメータの事前分布 $f(\theta)$ については、類似の評価事例 [2] を参照した。

2.4 評価結果

2.4.1 個別プラントのデマンド故障確率

定期検査の試験時のデマンド故障確率を階層ベイズによって解析した結果を Fig.1 に示す。この結果、これまで頻度論では評価できなかった個別プラントの評価が可能となり、個々の運転実績の特徴を示すことができた。

2.4.2 デマンド故障確率の比較

定期検査の試験時と定例試験時のデマンド故障確率について、日本全体一律平均と米国全体一律平均について解析を行い、その結果、以下のことがいえる。

(1) 日本のデマンド故障確率では、定期検査の試験時のデマンド故障確率は 0.0357 で、定例試験時のデマンド故障確率は 0.00158 で、定期検査の試験時のデマンド故障確率は定例試験時に対して約 23 倍も高い。

(2) 米国の燃料取替え後の定例試験時のデマンド故障確率は、0.0212 である。日本の定期検査の試験時のデマンド故障確率は、米国に対して約 1.7 倍高い。

(3) 定期検査の試験時の故障について原因別、機器別に整理した。この結果、施工不完全が大きな要因とな

っており、機器別に見るとタービンコントロール弁の不具合が、約 58%を占めている。

以上より、RCIC 系の機器の分解点検を行うとき、施工に注意すること、特に、タービンコントロール弁について入念な施工管理が必要なが分かり、これらを保全プログラムに反映する必要がある。

3. BWR 安全系電動弁の分解点検間隔の最適化

3.1 評価対象の選定

「原子力プラントにおける運転制限の逸脱事象」について機器別に整理し、最も多く事象が発生している BWR 安全系電動弁(MOV:Motor Operated Valve)を解析対象に選定した。各年度に発生した安全系電動弁の不具合事象発生件数をその年度の安全系電動弁の数とプラントの運転時間(弁・炉年)で割った不具合事象発生頻度を求め、その結果を Fig. 2 に示す。

3.2 不具合事象発生の確率モデル

Fig. 2 に示すように安全系電動弁の不具合事象発生頻度は、時間的に変化している。このため、不具合事象の発生は、発生率が時間とともに変化する非斉次ポアソン過程(NHPP: Nonhomogeneous Poisson Process)^[2]に従うと考える。時間依存性の有る不具合事象発生率を $\lambda(t)$ とし、暴露時間 s_i に対し、 x_i 回の不具合事象が起こる確率を $\Pr(x_i|\mu_i)$ とおくと、次式で表わされる。

$$\Pr(x_i | \mu_i) = \frac{e^{-\mu_i} \mu_i^{x_i}}{x_i!} \quad (3)$$

$$\mu_i = \lambda(t_i) s_i \quad (i = 1, 2, \dots, m)$$

不具合事象発生率 $\lambda(t_i)$ は対数線形で記述する。

$$\ln \lambda(t_i) = a + bt_i \quad (4)$$

3.3 ベイズ統計による不具合事象発生率の推定

ベイズ統計を用いて不具合事象発生率 $\lambda(t_i)$ の係数 a 、 b を推定する。式(3)の λ に式(4)を代入し、各年度 t_i に安全系電動弁が、 x_i 回不具合事象を発生する確率は、次式で与えられる。

$$f(x_i | a, b, s_i, t_i) = \frac{(s_i)^{x_i} \exp((a + bt_i)x_i - s_i \exp(a + bt_i))}{x_i!} \quad (5)$$

$f(x_i | a, b, s_i, t_i)$ が互いに独立でポアソン分布に従うとすれば、尤度関数は、次式で表せる。

$$f(x | a, b, s, t) = \prod_{i=1}^m \frac{(s_i)^{x_i} \exp((a + bt_i)x_i - s_i \exp(a + bt_i))}{x_i!} \quad (6)$$

a 、 b の事前分布として $a \sim N(b_0, B_0)$ 、 $b \sim N(c_0, C_0)$ の正規分布を仮定すれば、条件付事後確率密度関数は、

$$f(a | b, x, s, t) \propto \exp \left[-\frac{(a - b_0)^2}{2B_0} + \sum_{i=1}^m \{ax_i - s_i \exp(a + bt_i)\} \right]$$

$$f(b | a, x, s, t) \propto \exp \left[-\frac{(b - c_0)^2}{2C_0} + \sum_{i=1}^m \{bx_i t_i - s_i \exp(a + bt_i)\} \right] \quad (7)$$

となる。具体的な解析には公開されているコンピュータ・プログラム、Win BUGS^[9]を使用した。

3.4 安全系電動弁の分解点検間隔の評価方法

安全系電動弁の信頼性評価はアンアベラビリティを用いて行う。本研究では安全系電動弁の保全に対して、次のような不具合とその復帰を考慮した保全モデルを提案する。この保全モデルではある分解点検から次の分解点検の間には、①定例試験を行うとき、システムが使用できなくなることによるアンアベラビリティ U_t 、②定例試験までの待機中に不具合事象発生によるアンアベラビリティ U_f 、③定例試験により見つけた不具合を修理したときのアンアベラビリティ U_r を考える。安全系電動弁は定例試験中、プラントにトラブルが発生した場合、定例試験が自動的に中止され、試験状態から所定の機能を満たすように復帰させる設計となっている。このため、①の U_t を 0 と仮定した。②の U_f と③の U_r は、これまで米国で実施した PSA 解析例^{[7][8]}に示されているように、②の U_f に比べ③の U_r が小さいので、本研究でも、②のみ考慮した。

以上、アンアベラビリティ U は待機中の不具合事象発生によるアンアベラビリティ U_f と時間基準保全に基づき待機中に実施する分解点検によるアンアベラビリティ U_o との和として次式で表わされる^{[8][9][10]}。

$$U = U_f + U_o \quad (8)$$

$$U_f = \frac{1}{L - T} \int_0^{L-T} \left\{ \frac{1}{T} \int_0^T \left[1 - \exp \left[- \int_{t_0}^{t_0+u} \lambda(t') dt' \right] \right] du \right\} dt_0 \quad (9)$$

$$U_o = \frac{d}{L + d} \quad (10)$$

ここで、 T は定例試験間隔を、 L は分解点検間隔を、 d は分解点検時間を示す。 u は前回の定例試験 t_0 を行ったときからの経過時間を示す。

3.5 評価結果

3.5.1 不具合事象発生率の推定

3.1 節の不具合事象発生頻度をもとに、①1982 年度より 1984 年度までの期間、②1985 年度より 1996 年までの期間、③1997 年度より 2006 年度までの期間に区分して、カイ二乗検定を行い、3 つの期間の不具合事象発生率 $\lambda(t)$ が、統計的に同一でないことがわかった。次に、ベイズ統計により不具合事象発生率 $\lambda(t)$ の推定を行った。この結果を Fig. 3 に示す。今後の安全系電動弁の保全プログラムに役立つため、本研究では最近、10 年間の運転・保守管理状況に相当する

③の期間の不具合事象発生率を用い、次の安全系電動弁の分解点検間隔の最適化を試みることにする。

3.5.2 安全系電動弁の分解点検間隔の評価

安全系電動弁のアンアベラビリティ U は、3.4 節で示した U_f と U_o の和である。定例試験間隔 T および分解点検時間 d が与えられたとき、アンアベラビリティ U が最小になる分解点検間隔 L を求める。アンアベラビリティ U を最小とする T 、 L 、 d は、次の3式を同時に満足する必要がある。

$$\left(\frac{\partial U}{\partial T}\right)_{L,d} = 0, \quad \left(\frac{\partial U}{\partial L}\right)_{T,d} = 0, \quad \left(\frac{\partial U}{\partial d}\right)_{T,L} = 0 \quad (11)$$

BWR 安全系電動弁の定例試験間隔 T は、30 日に1回の頻度で実施していること、分解点検時間 d は、弁の大きさ（口径）で決まるので、口径 10 インチの安全系電動弁を具体例として、分解点検時間 d を 2 日としてアンアベラビリティ U が最小となる分解点検間隔 L を求めことにする。

3.5.3 アンアベラビリティの評価結果

安全系電動弁の不具合事象発生率 $\lambda(t)$ の平均値、平均値 + 標準偏差、90% 確信区間の推定値 (95th Percentile) に対するアンアベラビリティ U を解析し、Fig. 4 に示す。この結果、不具合事象発生率 $\lambda(t)$ の平均値、平均値 + 標準偏差、90% 確信区間の推定値 (95th Percentile) に対するアンアベラビリティ U が最小値となるのは、 U_o と U_f とが交差する近傍で、最適な安全系電動弁の分解点検間隔 L が求まる。

以上により、これまで、安全系電動弁は経験的に 5 ~ 10 年の間隔で分解点検が行われてきたが、不具合事象発生率 $\lambda(t)$ の 90% 確信区間の推定値である 95th Percentile で評価すれば、アンアベラビリティ U が最小値となる最適な安全系電動弁の分解点検間隔 L は、8 炉年となる。このように、本研究では運転・保守データを用いてベイズ統計により不具合事象発生率 $\lambda(t)$ の時間依存性を推定することで、アンアベラビリティ U の最小値を与える最適な分解点検間隔を決めることができる。

4. まとめ

今回、NUCIA のデータを基に、ベイズ統計を活用して RCIC 系のデマンド故障の解析および安全系電動弁の不具合事象発生率の解析とアンアベラビリティの解析との組合せによる分解点検間隔の最適化を行った。この結果、以下のことがいえる。

RCIC 系のデマンド故障の解析より

(1) デマンド故障の発生頻度の少ないまたはゼロの個別プラントに対して頻度論では信頼性の推定が困難であったが、階層ベイズ法はその運転実績に対応して個別プラントを評価するのに適する。

(2) 定期検査の試験時、定例試験時でデマンド故障確率が大きく異なっている。

(a) 日本の定期検査の試験時のデマンド故障確率は、米国の故障確率に比べやや高い値を示している。調査したところ、ほぼ半数の故障は機器の分解点検後の故障であり、施工不完全に起因するものである。

(b) 日本の定例試験のデマンド故障確率は、定期検査の試験時に対して、約 1/23 に減少している。これは施工不完全を定期検査時の試験により是正され、なじみ運転後の状態で定例試験が行われるため、故障確率が低くなるものと推定される。

安全系電動弁の解析より

(1) 安全系電動弁のアンアベラビリティ U を小さくするには、定例試験が不可欠である。

(2) 現在、安全系電動弁の分解点検間隔は経験に基づき決められているが、定例試験間隔のもとで、これまでの運転・保守データを用いた不具合事象発生率 $\lambda(t)$ の評価に基づき、最適な分解点検間隔を決めることができ、保全プログラムに反映できる。

本研究の評価法は、BWR および PWR の他の機器や設備に対しても適用可能であり、今後、各機器、設備の評価を実施して行きたい。評価には NUCIA の運転・保守データが、基本となるため、今後とも、機器の信頼性を評価するために必要なデータの蓄積と更新が大切であり、NUCIA の一層の充実が望まれる。なお、原子力発電所には個別プラントの運転・保守データが蓄積されているので、本評価方法を適用することにより、個別プラントについての最適保全プログラムの策定も可能となる。

Table 1 Comparison of failure on demand of RCIC system between Japan and the USA

		Unplanned Demand	Periodical Inspection Test*	Surveillance Test
Japan Research Period: From April 1, 1982 to March 31, 2006	Number of Failures	0	12	7
	Demands	2	337	4431
USA Research Period: From Jan. 1, 1987 to Dec. 31, 1993	Number of Failures	7	3	
	Demands	132	142	

* It corresponds to Cyclic Surveillance Test in USA.

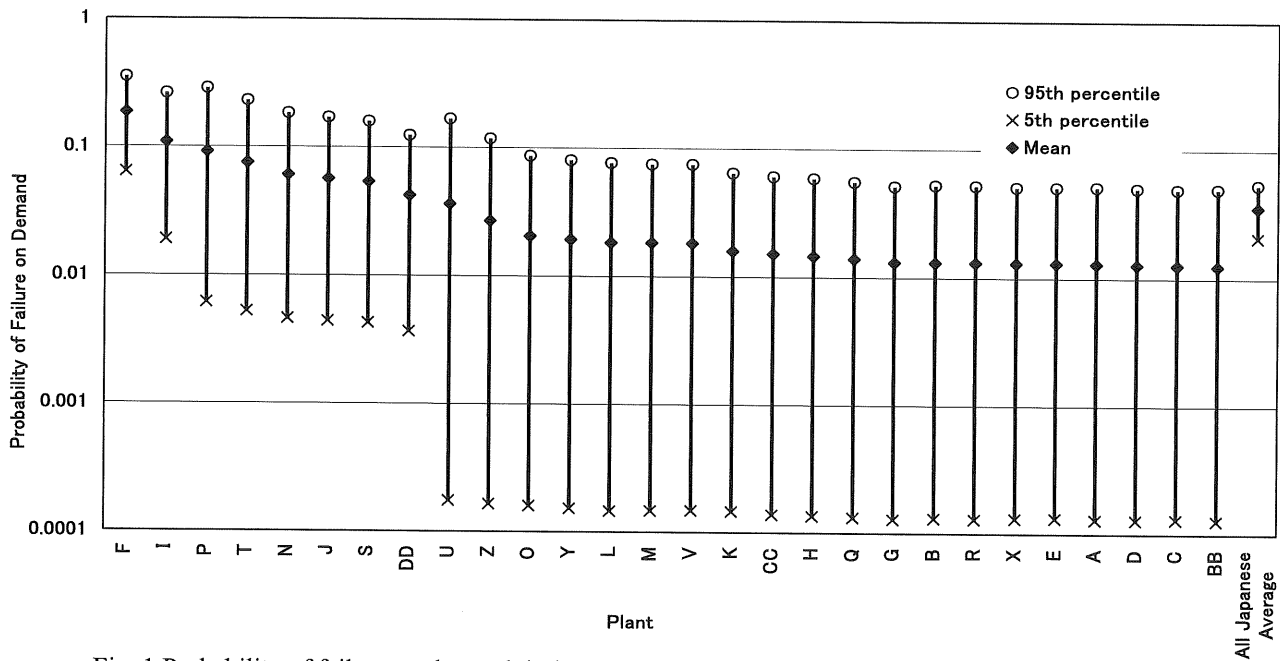


Fig. 1 Probability of failure on demand during periodical inspection test using hierarchical Bayes analysis for different nuclear power plants in Japan

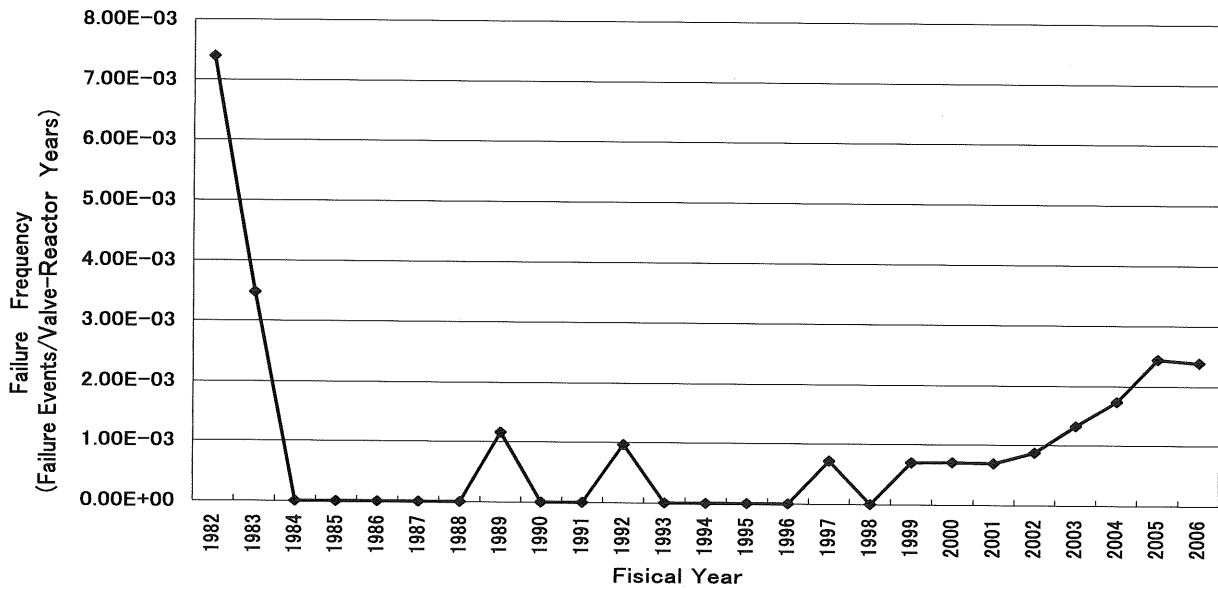


Fig.2 Event occurrence frequency of a MOV in safety systems in BWRs

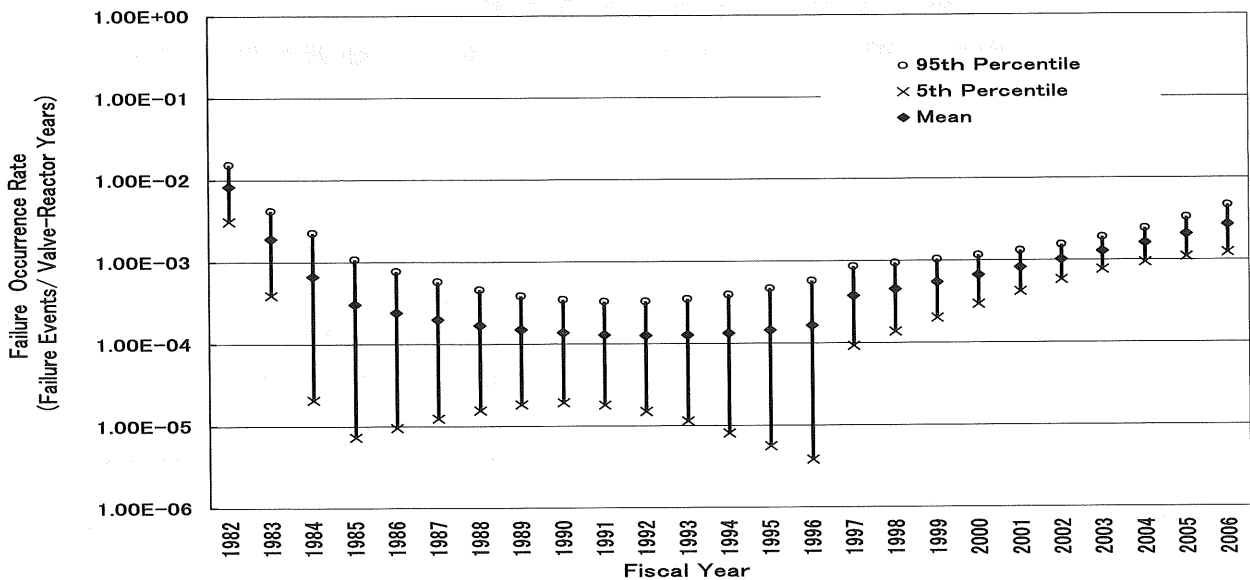


Fig. 3 Event occurrence rate of a MOV in safety systems in BWRs estimated by Bayes analysis

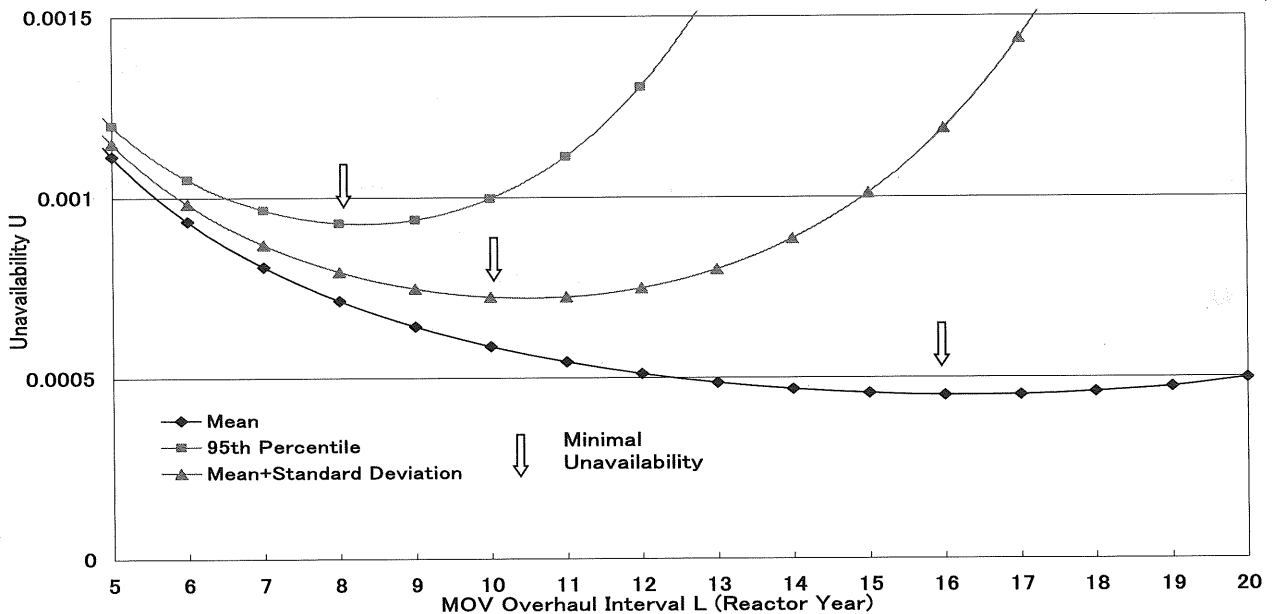


Fig.4 Unavailability of U of a MOV in safety systems in BWRs

参考文献

[1] Nuclear Information Archives, <<http://www.nucia.jp/>>
 [2] C.L. Atwood, J. L. LaChance, H. F. Martz *et al.*, *Handbook of Parameter Estimation for Probabilistic Risk Assessment*, NUREG/CR-6823(2003).
 [3] 伊庭幸人, 種村正美, 大森裕浩他, 計算統計Ⅱ, マルコフ連鎖モンテカルロ法とその周辺, 岩波書店.
 [4] 中妻照雄, 入門ベイズ統計学, 朝倉書店.
 [5] 豊田秀樹, マルコフ連鎖モンテカルロ法, 朝倉書店.
 [6] WinBUGS, <<http://www.mrc.-bsc.cam.ac.uk/bugs/>>
 [7] W. E. Vesely, F. F. Goldberg, N. H. Roberts *et al.*, *Fault Tree Handbook*, NUREG-0492(1981).
 [8] W. E. Vesely, A. B. Poole, *Component Unavailability Versus Inservice Test(IST) Interval: Evaluations of Component Aging Effects with Applications to Check Valves*, NUREG/CR-6508(1997).
 [9] W. E. Vesely, *Risk Evaluations of Aging Phenomena: the Linear Aging Reliability Model and Its Extensions*, NUREG/CR-4769(1987).
 [10] W. E. Vesely, R. E. Kurth, S. M. Scalzo, *Evaluations of Core Melt Frequency Effects Due to Component Aging and Maintenance*, NUREG/CR-5510(1990).