

PRA 用パラメータの推定手法に関する 検討報告書

平成 26 年 11 月

一般社団法人 原子力安全推進協会

PRA 用パラメータ専門家会議

本報告書は、一般社団法人 原子力安全推進協会に設置された「PRA 用パラメータ専門家会議」において、専門知識を持つ委員の審議を経て、取り纏めたものである。

免責事項

弊協会は本報告記載内容に関する説明責任を有するが、記載内容の利用に起因する問題・損害等に対しては責任を有さない。また、本報告に関連して主張される特許権及び著作権の有効性を判断する責任も、それらの利用によって生じた特許権や著作権の侵害に係わる損害賠償請求に応ずる責任も有さない。そうした責任は、すべて本報告記載内容の利用者にある。

著作権

本報告書の著作権は、すべて弊協会に帰属する。

目 次

1	はじめに.....	1
2	専門家会議の概要.....	2
2.1	委員構成.....	2
2.2	開催実績.....	3
3	推定手法の問題点.....	4
3.1	機器故障率.....	4
3.2	起因事象発生頻度.....	7
3.3	共通原因故障パラメータ.....	7
4	推定手法の検討結果.....	9
4.1	機器故障率.....	9
4.1.1	ベイズ計算ソフト Stan の利用.....	9
4.1.2	超事前分布の変更.....	11
4.1.3	事前情報の取り扱いについて.....	15
4.1.4	故障率推定の収束の検証.....	16
4.1.5	超事前分布の適切さに関する比較検討.....	18
4.1.6	火災発生頻度の階層ベイズ手法（EPRI 手法）による一般故障率推定.....	27
4.1.7	推定手法の適用条件の考察.....	31
4.1.8	機器故障率推定方法のまとめ.....	35
4.2	起因事象発生頻度.....	42
4.2.1	起因事象発生頻度の推定における課題.....	42
4.2.2	起因事象発生頻度の推定方法の適用確認.....	44
4.3	共通原因故障パラメータ.....	52
4.3.1	米国値を事前分布としたベイズ更新.....	52
4.3.2	今後の課題解決に向けて.....	54
5	まとめ.....	56
6	参考文献.....	57
	添付資料 機器故障率推定の試計算と PRA モデルへの適用例.....	59
	参考資料 階層ベイズモデル.....	78

1 はじめに

現在、国内の PRA 用パラメータのうち、機器故障率については、国内データのみを用いて推定している一般パラメータには、平成 21 年 5 月に日本原子力技術協会から報告・公開された「故障件数の不確実さを考慮した国内一般機器故障率の推定（1982 年度～2002 年度 21 ヶ年 49 基データ）」（以下、21 ヶ年データ報告書）^[1]と平成 25 年 6 月（平成 26 年 1 月改訂）に原子力安全推進協会（以下、弊協会）から報告・公開している「故障件数の不確実さを考慮した国内一般機器故障率の推定（1982 年度～2007 年度 26 ヶ年 55 基データ）」（以下、26 ヶ年データ報告書）^[2]がある。

弊協会では、PRA 用パラメータ（対象パラメータ：機器故障率、起因事象発生頻度、共通原因故障パラメータ、アンアベイラビリティ、復旧失敗確率、内部溢水発生頻度、内部火災発生頻度）の推定に必要な国内プラントの運転情報を収集するための仕組みを構築することを目的に、産業界関係者（電力各社、プラントメーカー、エンジニアリング会社）をメンバーとした PRA 用パラメータ整備 WG（以下、WG）を平成 24 年 4 月に設置した。この WG を通じた電力各社との連携の下、一般パラメータの算出・公開を実施するとともに、電力各社において個別プラントデータの算出が可能となる PRA 用信頼性データシステムの構築に取り組んでおり、2016 年度末までに国内一般パラメータの公開及び個別プラントデータの推定が可能となるよう PRA 用信頼性データシステムの構築を目指している。

しかし、弊協会にて算出している機器故障率、起因事象発生頻度及び共通原因故障パラメータの推定手法の運用経験を通じて幾つかの課題が明らかになったことから、今後整備を行う予定の 1982 年度～2010 年度 29 ヶ年 56 基データを用いた機器故障率の推定（以下、29 ヶ年データ推定）に向けて、これまで明らかになった問題点の解決方法を検討することを目的に、PRA を含む安全工学を専門とする学識経験者、学術研究機関有識者等による「PRA 用パラメータ専門家会議」（以下、専門家会議）を平成 26 年 3 月に設置した。

本報告書は、上述の専門家会議の検討結果を取り纏め報告するものである。

2 専門家会議の概要

2.1 委員構成

本専門家会議の委員は、以下のとおり、PRA を含む安全工学を専門とする学識経験者、学術研究機関有識者、PRA 実施経験者により構成している。

主査	秋田県立大学 名誉教授	笠井 雅夫
副主査	大阪大学大学院 准教授	高田 孝
委員	東京都市大学 講師	牟田 仁
	(独)日本原子力研究開発機構 研究主幹(主任研究員)	栗坂 健一
	東京電力(株)	松中 修平
	関西電力(株) マネージャー	成宮 祥介
	中部電力(株) 課長	岩谷 泰広
	四国電力(株) グループリーダー	友澤 孝司
	(一財)電力中央研究所 上席研究員	吉田 智朗
	(一財)電力中央研究所 上席研究員	桐本 順広
	(株)東芝 主務	藤井 正彦
	日立 GE ニュークリア・エネルギー(株) 主管技師	曽根田 秀夫
	三菱重工業(株) 主席技師	黒岩 克也
	(株)テプコシステムズ マネージャー	佐藤 親宏
	(株)原子力エンジニアリング 次長	倉本 孝弘
常時参加者	(独)日本原子力研究開発機構	西野 裕之
	(一財)電力中央研究所 研究員	曾我 昇太
	(株)NESI	鳴戸 健一
	(株)原子力エンジニアリング	門田 勇作
	原電情報システム(株) マネージャー	根岸 孝行
	日本原燃(株)	玉内 義一
	(株)東芝	山岡 哲朗
事務局	(一社)原子力安全推進協会 部長	橋本 和典
	(一社)原子力安全推進協会 主任	錦見 篤志
	(一社)原子力安全推進協会 部長	河井 忠比古
	(一社)原子力安全推進協会 部長	鎌田 信也
退任	東京電力(株) 副長	松尾 俊弘
	(一社)原子力安全推進協会 主任	佐竹 祥宏

2.2 開催実績

本専門家会議は、以下の9回開催及び議題を経て、本報告書を取りまとめた。

回	日時	主な議題
第1回	平成26年3月11日(火) 13:30~16:30	・推定手法の問題点整理 ・解決策の検討状況
第2回	平成26年4月23日(水) 10:00~12:00	・機器故障率の推定手法の検討
第3回	平成26年5月28日(水) 10:00~11:30	・機器故障率の推定手法の検討 ・共通原因故障の推定手法の検討
第4回	平成26年6月25日(水) 13:30~15:50	・機器故障率の推定手法の検討 ・29ヵ年データ推定への反映、推定手法の検討
第5回	平成26年7月31日(木) 13:30~15:10	・機器故障率の推定手法の検討 ・共通原因故障の推定手法の検討 ・29ヵ年データ推定への反映、推定手法の検討と中間まとめ
第6回	平成26年8月27日(水) 13:30~15:20	・29ヵ年データ推定に向けた機器故障率の推定手法の整理・まとめ ・起因事象発生頻度推定手法の検討
第7回	平成26年9月25日(木) 13:30~15:55	・29ヵ年データ推定に向けた機器故障率の試算 ・起因事象発生頻度推定手法の検討
第8回	平成26年10月30日(木) 13:30~16:00	・29ヵ年データ推定に向けた機器故障率の試算 ・起因事象発生頻度推定手法の検討 ・最終報告書のまとめ
第9回	平成26年11月27日(木) 13:30~16:00	・機器故障率の試算結果のPRAモデルへの応用事例の確認 ・最終報告書のまとめ

3 推定手法の問題点

3.1 機器故障率

26 カ年データ報告書の一般機器故障率推定には、21 カ年データ報告書を踏襲し、階層ベイズ手法を用いている。日本原子力技術協会主催の有識者会議で、21 カ年データ報告書の推定結果は、個別プラント故障率推定の事前分布との位置づけであると同時に、国内プラント PRA の入力用としても位置付けられていたことから、26 カ年データも国内のプラント PRA に適用しようという試みがあった。しかしながらその試みの中で、26 カ年データ報告書の推定結果の一部に、故障実績に比して過大な平均故障率となっているものがあることが指摘された。これについて両報告書の推定結果の比較検討を実施した結果、以下のような問題点が明確になった。これらの問題点は、26 カ年のデータと解析条件において顕在化したものであるが、21 カ年データ報告書の推定においても潜在していたと考えられるため、根本的な解決が必要である。従来から用いられてきた階層ベイズ手法の概要を参考資料に示す^[1,2]。

(1) 平均値の収束性

本階層ベイズ手法では、国内一般機器故障率の分布（母集団変動分布）を故障率の対数平均値 μ と故障率の対数標準偏差 σ を母数とする対数正規分布 $LN(\mu, \sigma)$ でモデル化している。このとき、 (μ, σ) は階層ベイズ手法では超母数（ハイパーパラメータ）となり、故障データから (μ, σ) の事後分布を求めた後、その (μ, σ) に対応する対数正規分布から故障率の値をサンプルすることにより一般機器故障率を求めている。21 カ年データ報告書の解析条件^[1]では対数標準偏差 σ の超事前分布を 0～3 までの一様分布としていたが、この方法では σ の事後分布が強制的に 3 未満に裾切りされて故障率事後分布が過小評価となる場合があったため、これを 26 カ年データ報告書^[2]では 0～4 までに拡大して裾切りがないよう対処した。しかしながら、このことにより、機器故障モードによっては大きな故障率がサンプルされ易くなり、収束が悪くなって故障率の平均値が大きく影響を受けるという別の問題が生じた。図 3.1 は、時折 $10^2/h \sim 10^3/h$ という故障率の大きい外れ値が発生している例である。

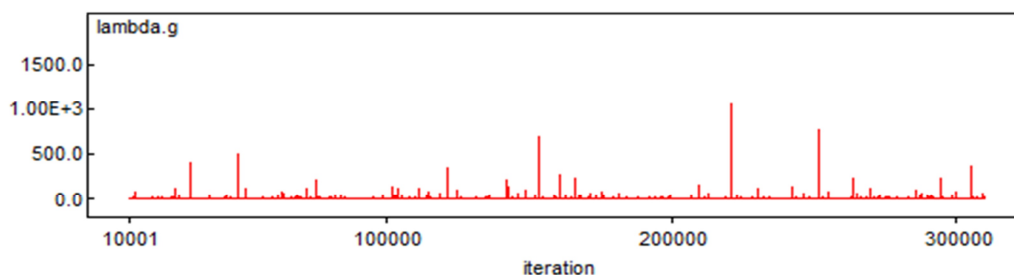


図 3.1 ディーゼル駆動ポンプ - 起動失敗 平均値 (lambda.g) の時系列例

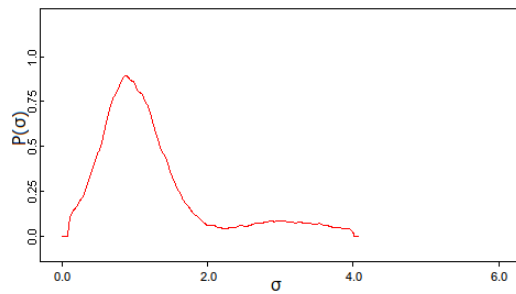
このように、モンテカルロ計算が十分に収束していないため、外れ値により一般故障率の平均値が大きく左右される。すなわち、対数標準偏差 の超事前分布が広い場合に計算が十分に収束していないと、一般故障率が非現実的に大きくなる場合があることが明らかになった。

また、機器によってはプラントの故障件数が 0 件となるものがあるが、0 件のプラントについては 0.5 件/供用時間として、国内故障率の事前分布(対数平均の分布)の範囲を設定しており、これが故障率推定値の分布の幅(特に下限)を事実上決定している。そのため、供用時間の短い機器では、工学的に判断して信頼性が高いと考えられかつ故障件数 0 であっても、それらから推察される相場よりも過大な故障率の値となる。

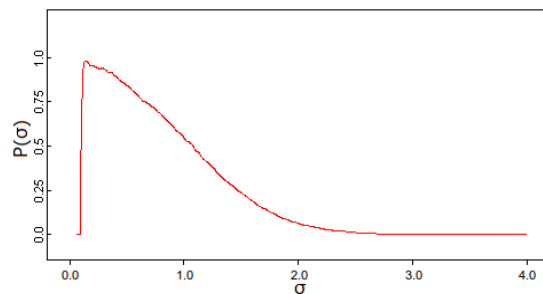
さらに、多くのプラントで使用されている機器の故障モードでは、故障件数が 0 件でも、従来計算の経験上、 の事後分布は右下がりになり、 の平均値は 1 程度となる場合が多い。一方、故障件数も 0 件または 1 件でプラント数が 4 と少ない ABWR 特有機器においては、必然的に 、すなわち故障率のばらつきに関するデータからの情報が少なく、 の範囲があまり限定されない(減少度合いが少ない)ため、 の超事前分布のうち ~ 2 の影響が強く残る。その結果、モンテカルロ 計算において大きな一般機器故障率をサンプルしやすくなりかつ収束しにくくなるので、その平均値が異常に大きくなると考えられる。表 3.1 は機器の総故障件数が少なく、かつそれが使用されているプラント数が少ない場合に、プラント固有の故障率推定値と一般機器故障率推定値の間に大きな隔たりが生ずる場合のあることを示している。また、図 3.2 に の事後分布を示す。結果として、超事前分布を 0~4 までの一様分布としても一部の機器では裾切りは回避できておらず、このことも課題の一つである。

表 3.1 故障件数・プラント数・推定値の関係性

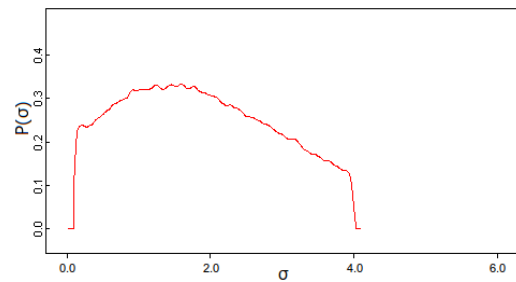
機種 - 故障 モード	電動ポンプ(常 用運転、純水) - 継続運転失敗	熱交換器 - 外部リーク	カード(半導体ロ ジック回路) - 不動作	演算装置(ディ ジtal制御機器) - 不動作
故障件数	29	0	0	0
プラント数	55	55	15	4
0.5/供用時間の範囲	-	7.3E8 ~ 5.3E6	1.8E8 ~ 3.8E8	1.2E7 ~ 3.5E6
一般 / 固有(max)の比	0.44	1.3	6.6	6000



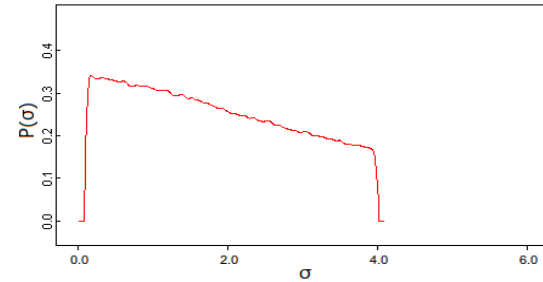
a. 電動ポンプ(常用運転、純水) - 継続運転失敗



b. 熱交換器 - 外部リーク



c. カード(半導体ロジック回路) - 不動作



d. 演算装置(デジタル制御機器) - 不動作

図 3.2 の事後分布

その他、一般機器故障率が個別プラント故障率の数倍以上となったものには、真空逃がし弁(PWR) - 作動失敗、インバータ(PLR) - 機能喪失、カード(半導体ロジック回路) - 不動作及び誤動作等がある。これらの故障モードの事後分布の平均は1.3～1.8程度であり、1より幾分ではあるが大きくなっており、プラント数は11～20とやはり少なめとなっていた。

なお、原子力学会パラメータ標準^[3]において、点推定値には平均値の使用が要求されており、平均値の収束性はPRA評価結果の信頼性の観点から重要となる。

(2) 分布形状

先述のように、本手法では、 (μ, σ) の事後分布に対応する対数正規分布から故障率の値をサンプルすることにより一般機器故障率を求めているため、その分布は一般的には対数正規分布にはならない。すなわち、モンテカルロ法で計算した故障率分布はパラメトリックな形(対数正規分布など)にならない。この場合、PRAソフトへの入力の際に、報告書記載の分位点を対数正規分布と捉えて使用するのは適切ではない。なぜなら、点推定値を平均値にするか中央値にするか、あるいは、エラーファクタ(以下、EF)を5%点と95%点で計算するか50%点と95%点で計算するかによって入力する対数正規分布の形が異なるからである。

3.2 起因事象発生頻度

起因事象発生頻度についても、2008 年度迄のデータを対象に、機器故障率と基本的に同様の階層ベイズ手法によって、一般パラメータの試評価を実施した。機器故障率同様の手法を用いていることから、特に発生件数が 0 件や極端に少ない起因事象において、機器故障率と同様の問題点が生ずると考えられる。

(1) 平均値の収束性

3.1 と同様に、発生件数が少なく(数件以下)、平均値の収束が遅い場合には、反復計算条件によっては妥当な平均値が得られない場合がある。

(2) 事前分布

現状では、一般故障率の計算と同様に、0 件事象の事前分布のための超母数の範囲を、発生件数を 0.5 件と仮定した最尤推定値をもとに設定して、階層ベイズの評価を行っている。このため、故障率の問題と同様、新しいプラントほど起因事象発生頻度が高い、平均値の収束が悪い、などの原理的な問題が生ずる可能性がある。このように 0 件事象の取扱いの説明性を高める必要があり、場合によっては事前情報として米国データ等の利用を検討することも必要である。

3.3 共通原因故障パラメータ

(1) 国内評価値の妥当性

電力中央研究所では、NUCIA^[4]のトラブル情報から国内主要機器の共通原因故障割合(CCF パラメータ)を国際的な標準手法(米国 NRC 開発の手法、NUREG/CR-5485)^[5]にしたがって評価した^[6,7]が、その評価値が、従来使用値(米国 NRC SPAR モデルの評価値)に比べて 1 桁以上も大きくなる場合があり、国内ではその評価値の使用を躊躇する向きがある。不確かさ解析も含めた結果の妥当性確認を行い、国内評価値を PRA 実施者が信用して使えるようにするためにはどうすればよいかを考える必要がある。これについては、単に評価手法だけではなく、NUCIA トラブル情報登録や共通原因故障判定の妥当性も考慮すべき問題である。

(2) CCF パラメータの不確かさの反映

標準手法(NUREG/CR-5485)^[5]の CCF モデルによれば、インパクトベクトルから計算される CCF パラメータは不確かさを持つ。例えば、ファクタについては、その不確かさをディリクレ分布で表わすことができる。ここで、ファクタはすべての和が 1 であるという条件があるため、個々のファクタは独立


に分布を持つわけではない。MGL パラメータも同様に、ファクタと数学的に換算できる関係があるため、MGL パラメータごとに不確かさ分布を持つが互いに独立な分布にはならない。厳密には、CCF パラメータの不確かさ分布を PRA の不確かさ評価に反映させることが望ましいが、互いに相関を持つ CCF パラメータ分布の PRA 計算での扱いは容易では無いと考えられる。現行の PRA での CCF パラメータには点推定値が用いられていることが多いため緊急の問題はないが、将来的には本件のような特徴を持つ不確かさ分布を用いて具体的なシステム信頼性評価を行い、影響の大小を確認する必要がある。

4 推定手法の検討結果

4.1 機器故障率

機器故障率に関して 3 章で示した問題点を解決するために、本専門家会議で提示した方法を整理すると表 4.1 のとおりとなる。

表 4.1 機器故障率推定に係る問題点の解決案

問題点 解決策	1. 平均値が高いものがある	2. 故障 0 件機器の故障率が高い	3. パラメトリック分布にならない
収束性のよい MCMC 計算ソフトを使用する	Gibbs Sampler “BUGS” から Hybrid Sampler “Stan” へ		
超事前分布を共役分布などに変更	一様分布 共役分布など収束しやすくなる	 “故障率小” 事前情報要 データ源：米国，他産業体系的専門家判断手法（Mosleh 教授助言）	
事前情報に米国データ/他産業データ/専門家判断を活用する	副次的に解決		
一般故障率を個別プラント結果の和で求める	火災発生頻度 EPRI 手法		
結果の平均値 and/or パーセンタイルを用いて対数正規分布近似			「代表値」と「ばらつき」で分布型が決まる。 代表値：平均 or 中間値 ばらつき：5%-95% , 50%-95% , 25%-75% , etc.

4.1.1 ベイズ計算ソフト Stan の利用

従来のベイズ統計の手法として用いられていたギブス法では、サンプル間の自己相関が高い場合や、採択確率が低い場合、或いは定常分布に収束するまでのサンプルを棄却する必要がある、などの問題点を抱えている。

ベイズ統計ソフトの一つである Stan^[8]では、ハミルトニアンモンテカルロ法 (HMC 法、またはハイブリッドモンテカルロ法)^[9]と呼ばれる手法を用いてこれらの問題に対処している。HMC 法は、解析力学におけるエネルギーを一般化座標と一般化運動量であらわすハミルトニアンを、確率分布と補助の任意の運動エネルギーを導入することで構築しており、このハミルトニアンの特性を利用して、高い採択確率や低い自己相関を持つサンプルを生成することを可能としている。

ここで表 4.1 及び図 4.1 はある機器のプラント個別故障率を Stan と OpenBUGS で計算した例であるが、Stan は BUGS^[10] に比べて少ない MC エラー (約 1/3 程度) を持ち、Stan は BUGS に比べて小さい自己相関を持つ。また、Stan では thinning=2 でも十分に自己相関を減らすことができるが、BUGS では thinning=100 でも十分に自己相関を減らすことができないことから、結果的に Stan の方が少ないサンプル数で済む。

表 4.1 Stan と BUGS の 26 カ年データ報告書の手法を用いた推定結果の比較
 < OpenBUGS(サンプル数 10 万) >

個別故障率	平均値	標準偏差	MCエラー	5%点	中央値	95%点
発電所#1	1.18E-08	3.07E-08	2.32E-10	9.88E-11	3.74E-09	4.54E-08
発電所#2	1.08E-08	2.77E-08	2.42E-10	9.43E-11	3.73E-09	4.08E-08
発電所#3	1.04E-08	2.66E-08	2.45E-10	9.41E-11	3.68E-09	3.88E-08
発電所#4	1.03E-08	2.30E-08	1.91E-10	9.35E-11	3.74E-09	4.00E-08
発電所#5	1.02E-08	2.44E-08	2.15E-10	9.34E-11	3.63E-09	3.82E-08
発電所#6	9.99E-09	2.08E-08	1.61E-10	9.24E-11	3.69E-09	3.87E-08
発電所#7	9.67E-09	2.02E-08	1.83E-10	9.94E-11	3.69E-09	3.71E-08
発電所#8	9.43E-09	1.91E-08	1.50E-10	9.59E-11	3.61E-09	3.63E-08
発電所#9	9.95E-09	2.25E-08	1.85E-10	9.88E-11	3.62E-09	3.75E-08
発電所#10	9.98E-09	2.10E-08	1.69E-10	9.90E-11	3.67E-09	3.86E-08
発電所#11	1.01E-08	2.17E-08	1.88E-10	1.05E-10	3.62E-09	3.90E-08
発電所#12	1.12E-08	2.57E-08	1.89E-10	1.02E-10	3.85E-09	4.32E-08
発電所#13	1.14E-08	2.80E-08	2.28E-10	9.94E-11	3.85E-09	4.42E-08
発電所#14	1.19E-08	3.11E-08	2.88E-10	1.00E-10	3.85E-09	4.61E-08
発電所#15	1.11E-08	2.63E-08	2.08E-10	9.77E-11	3.82E-09	4.25E-08
発電所#16	1.20E-08	3.11E-08	2.38E-10	1.02E-10	3.93E-09	4.52E-08
発電所#17	2.24E-07	2.91E-07	3.42E-09	9.34E-09	1.23E-07	7.83E-07
発電所#18	1.24E-08	3.31E-08	2.47E-10	1.04E-10	4.00E-09	4.71E-08
発電所#19	1.03E-08	2.31E-08	1.97E-10	9.60E-11	3.64E-09	3.96E-08
発電所#20	1.00E-08	2.22E-08	1.89E-10	9.62E-11	3.61E-09	3.83E-08
発電所#21	1.12E-08	2.75E-08	2.23E-10	9.86E-11	3.83E-09	4.22E-08
発電所#22	1.56E-08	5.69E-08	4.06E-10	1.07E-10	4.24E-09	5.64E-08
発電所#23	1.18E-08	3.07E-08	2.49E-10	1.05E-10	3.85E-09	4.44E-08
発電所#24	2.01E-08	1.25E-07	7.03E-10	1.03E-10	4.20E-09	6.28E-08

< Stan(サンプル数 10 万) >

個別故障率	平均値	標準偏差	MCエラー	5%点	中央値	95%点
発電所#1	1.20E-08	3.26E-08	1.03E-10	8.54E-11	3.76E-09	4.61E-08
発電所#2	1.08E-08	2.68E-08	8.49E-11	7.70E-11	3.62E-09	4.15E-08
発電所#3	1.09E-08	2.75E-08	8.68E-11	7.90E-11	3.63E-09	4.14E-08
発電所#4	1.03E-08	2.42E-08	7.66E-11	8.06E-11	3.52E-09	3.98E-08
発電所#5	1.02E-08	2.33E-08	7.37E-11	7.96E-11	3.56E-09	3.92E-08
発電所#6	9.95E-09	2.26E-08	7.15E-11	7.74E-11	3.49E-09	3.85E-08
発電所#7	9.44E-09	2.08E-08	6.59E-11	7.82E-11	3.45E-09	3.62E-08
発電所#8	9.62E-09	2.14E-08	6.76E-11	8.09E-11	3.46E-09	3.71E-08
発電所#9	9.91E-09	2.24E-08	7.08E-11	8.01E-11	3.48E-09	3.80E-08
発電所#10	1.00E-08	2.30E-08	7.28E-11	8.23E-11	3.55E-09	3.85E-08
発電所#11	9.95E-09	2.22E-08	7.03E-11	7.94E-11	3.49E-09	3.86E-08
発電所#12	1.12E-08	2.94E-08	9.28E-11	8.21E-11	3.64E-09	4.33E-08
発電所#13	1.17E-08	3.07E-08	9.72E-11	8.55E-11	3.71E-09	4.47E-08
発電所#14	1.22E-08	3.47E-08	1.10E-10	8.29E-11	3.74E-09	4.65E-08
発電所#15	1.11E-08	2.77E-08	8.76E-11	8.12E-11	3.70E-09	4.25E-08
発電所#16	1.21E-08	3.22E-08	1.02E-10	8.03E-11	3.73E-09	4.73E-08
発電所#17	2.34E-07	3.08E-07	1.09E-09	9.58E-09	1.28E-07	8.07E-07
発電所#18	1.20E-08	3.28E-08	1.04E-10	8.52E-11	3.75E-09	4.60E-08
発電所#19	1.04E-08	2.43E-08	7.69E-11	7.86E-11	3.59E-09	4.01E-08
発電所#20	1.01E-08	2.25E-08	7.12E-11	7.67E-11	3.54E-09	3.89E-08
発電所#21	1.10E-08	2.70E-08	8.53E-11	8.19E-11	3.67E-09	4.20E-08
発電所#22	1.69E-08	7.24E-08	2.50E-10	8.79E-11	4.01E-09	5.90E-08
発電所#23	1.21E-08	3.28E-08	1.04E-10	8.64E-11	3.76E-09	4.65E-08
発電所#24	2.35E-08	1.92E-07	6.89E-10	9.07E-11	4.10E-09	6.65E-08

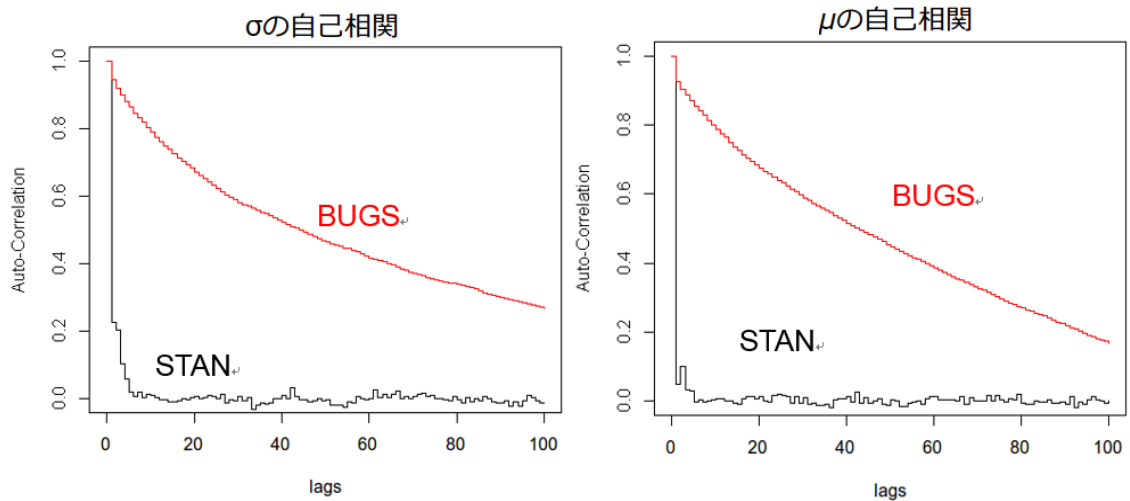


図 4.1 26 カ年データ報告書の手法を用いた Stan - BUGS の自己相関性の比較

4.1.2 超事前分布の変更

適切な超事前分布(μ , σ)への変更を検討するため、いくつかの分布の比較を行う。比較する超事前分布として以下 \sim の分布を考慮する。

一様分布 (26 カ年データ報告書の手法)

26 カ年データ報告書^[2]ではこの事前分布が用いられており、超事前分布を一様分布と仮定し、その上限と下限を国内エビデンスデータから決定している。このとき、個別発電所の観測故障件数が 0 件の場合には 0.5 件と仮定して推定している。図 4.2 は、ある機器に対して超事前分布に一様分布を用い、分布の上限と下限を 26 カ年データ報告書と同様として事後分布を算出したものであり、比較的高い μ の値 (2 ~ 3) に分布が集中している例である。

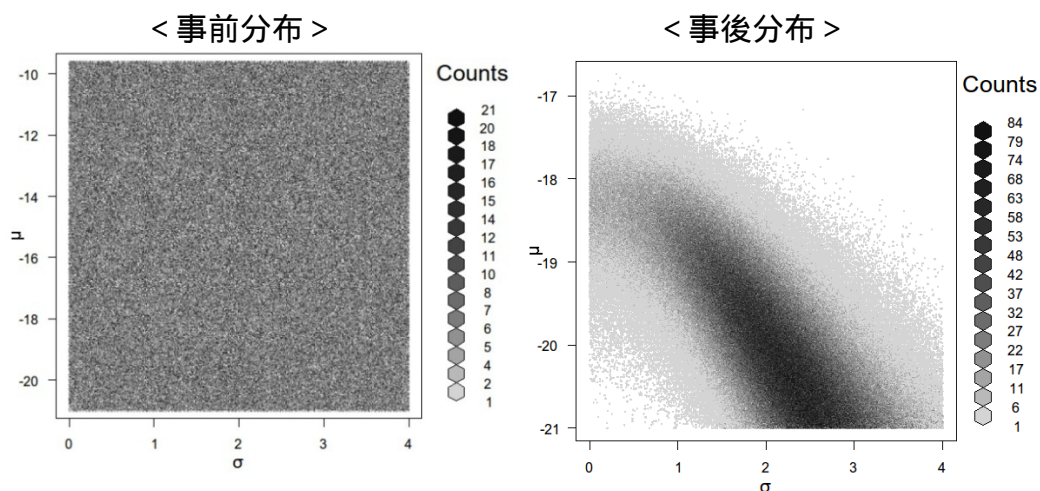


図 4.2 一様分布の例

Jeffreys 無情報事前分布

事前分布に情報を与えない超事前分布として Jeffrey 無情報事前分布を考える。対数正規分布に対する Jeffrey 無情報事前分布は以下の式に示されるように非正則（積分すると無限大となり 1 に規格化できないこと。このため厳密には確率分布とは言えない。）となる。図 4.3 はある機器の計算例であるが、事後分布をみると の値が比較的小さい（ $< \sim 0.5$ ）ことがわかる。これは、超事前分布が $\sigma=0$ 付近（ $\sigma>0$ ）に集中しており、支配的に事後分布を決定しているためと考えられる。

$$p(\mu, \sigma) \sim \frac{1}{\sigma}$$

< 事後分布 >

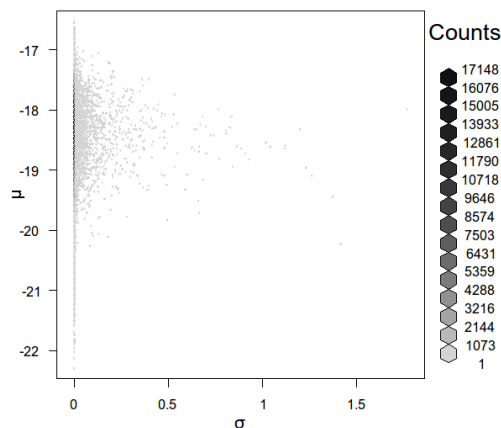


図 4.3 超母数(μ, σ)に Jeffreys 無情報事前分布を使った場合の事後分布の例

共役事前分布

共役事前分布を用いると、事後分布が事前分布と同じ種類の分布となり計算が容易となる。対数正規分布の共役事前分布には、精度パラメータ（ $=1/\sigma^2$ ）に対して共役となる Normal-Gamma 分布と、分散（ σ^2 ）に対して共役となる Normal-Inverse-Gamma (NIG) 分布の二種類がある^[12]。今回の手法では、以下の式に示すように分散に対して共役となる NIG 分布を用いて事後分布の算出を行った。

$$p(\mu, \sigma | \alpha, \beta, \lambda, \gamma) \sim \frac{1}{\sigma} \left(\frac{1}{\sigma^2} \right)^{\alpha+1} e^{-\frac{2\beta + \lambda(\mu - \gamma)^2}{2\sigma^2}}$$

また、共役事前分布のパラメータは以下の式によって与えられる。

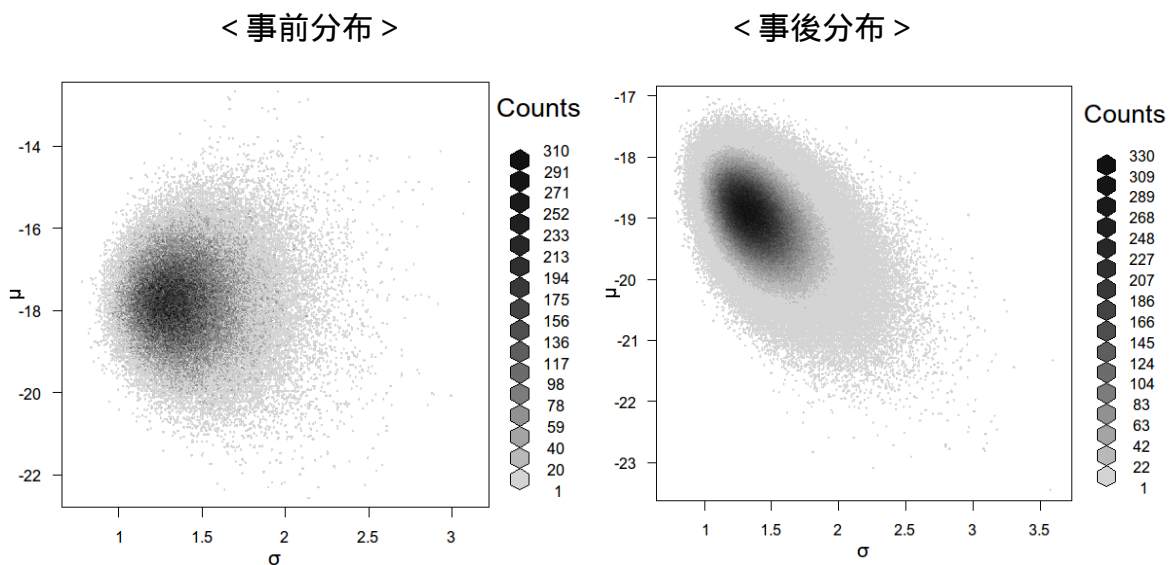
$$\alpha = \frac{(E(\sigma^2))^2}{Var(\sigma^2)} + 2$$

$$\beta = E(\sigma^2) \left(\frac{(E(\sigma^2))^2}{Var(\sigma^2)} + 1 \right)$$

$$\gamma = E(\mu)$$

$$\lambda = \frac{\beta}{(\alpha - 1)Var(\mu)}$$

共役事前分布はピークを持つ分布であるためパラメータの上限・下限を設定する必要がなく 26 カ年データ報告書の手法でみられるような裾切りの問題は発生しない。共役事前分布を用いた計算例を図 4.4 に示す。この例では、対数平均値 μ の事後分布は事前分布から更新されており不確かさが軽減されているが、対数標準偏差 σ についてはあまり更新されていない。



分散に対する共役事前分布として Normal-Inverse-Gamma を用いた

図 4.4 共役事前分布の例

なお、図 4.5 にも示すとおりベイズ更新をしても対数標準偏差 σ の事後分布（青）は事前分布（白抜き）とあまり変わらない（ベイズ更新があまりされない）問題点もあるため、超事前分布に共役事前分布を用いる場合には、分布のパラメータを可能な限り広くとる必要がある。

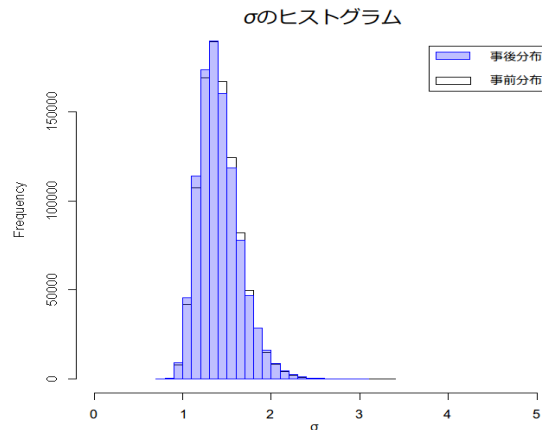


図 4.5 共役事前分布を用いたときの事前分布と事後分布

Half-Cauchy 分布と正規分布の組合せ

推定結果の“自然さ”への考慮として、対数標準偏差 の事前分布に裾切りの必要がないパラメトリックな分布である Half-Cauchy 分布を使う^[13]。また、対数平均 μ についても、裾切りがないように正規分布を仮定する。この計算例を図 4.6 に示す。超母数 の分布を表す Half-Cauchy 分布は、尺度パラメータ A を用いて下記の式で表される。

$$p(\sigma|A) = \frac{A}{2\pi[A^2 + \sigma^2]}$$

$$= \left[\frac{\pi A}{2} \left(1 + \left(\frac{\sigma}{A} \right)^2 \right) \right]^{-1} \quad (\sigma > 0)$$

また、超母数 μ の分布を表す正規分布は、平均値 μ_μ と標準偏差 σ_μ を用いて下記の式で表される。

$$p(\mu|\mu_\mu, \sigma_\mu) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_\mu^2}} \exp\left(-\frac{(\mu - \mu_\mu)^2}{2\sigma_\mu^2}\right)$$

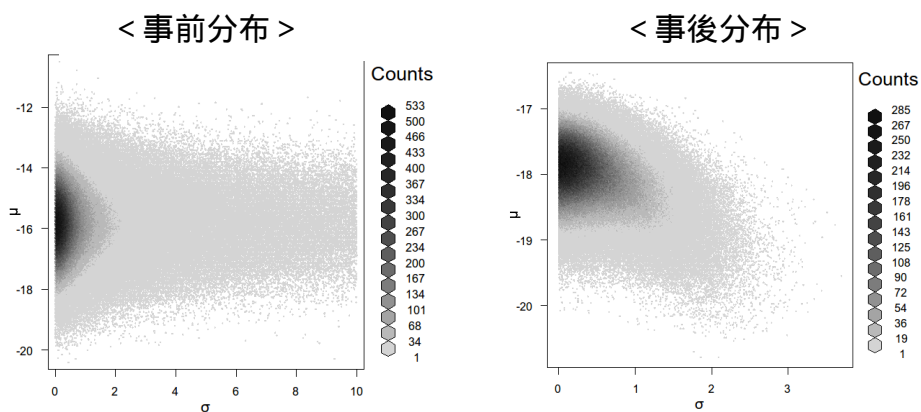


図 4.6 ~ Half-Cauchy 分布 + $\mu \sim$ 正規分布の例

4.1.3 事前情報の取り扱いについて

故障件数が 0 件の場合には、「故障率がどれだけ小さいか」に関する情報がデータから得られないため、データの情報だけでは故障率の下限の推定が難しい。ベイズ統計手法では、事前分布に“故障率範囲の相場”を考慮して故障率を推定する。“故障率範囲の相場”には、データ以外の様々な関連情報を反映させる。ただし、事前分布が著しく“実態”と異なれば、推定結果も“実態”を表していないことになる。従来の事前情報の扱いでは、故障件数が 0 件の場合には一律に 0.5 件を仮定していたため、供用時間の長短が推定結果に比較的大きな影響を与えることがあった。

そこで、他所で整備されている機器故障関連情報を事前情報とすることを考え、米国 NRC の PRA モデル SPAR 用のパラメータとして整備されているデータを利用する方法について検討した。SPAR 用のパラメータ推定値には NUREG/CR-6928^[14]と Component Reliability Data Sheet Update 2010^[15]がある。前者は 1998 年から 2002 年の米国実績を用いて推定したもので、後者は 1998 年から 2010 年の米国実績を用いたものである。NUERG/CR-6928 の手法では、推定値の EF (=95%分位点/50%分位点)が大きくなりすぎて、SPAR モデルに入力すると炉心損傷頻度(以下、CDF)の不確かさも大きくなるため、Component Reliability Data Sheet Update 2010 の手法では、プラント間のばらつきはないとした上で事前分布を Jeffreys 無情報事前分布としている。なお、一般には EF==95%分位点/50%分位点 とすることが多いが、対数正規分布の場合のみ下記の式が成り立つ。

$$EF = \frac{95\%分位点}{50\%分位点} = \frac{50\%分位点}{5\%分位点} = \sqrt{\frac{95\%分位点}{5\%分位点}}$$

(対数正規分布の場合)

以上のことから、NUREG/CR-6928 と Component Reliability Data Sheet Update 2010 の推定値には不確かさに大きな違いがあり、どちらの事前情報を用いるかによって、我が国の推定結果が大きく異なることになる。NUREG/CR-6928 と Component Reliability Data Sheet Update 2010 の違いを表 4.2 に示す。

表 4.2 NUREG/CR-6928 と Component Reliability Data Sheet 2010 の比較
(一部抜粋)

名称	故障率	EF	故障率	EF
	NUREG/CR-6928		Component Reliability Data Sheet 2010	
空気弁-リーク(小)	1.29E-08	8.4	5.51E-08	1.2
逆止弁-閉失敗	1.04E-04	8.4	2.38E-04	3.2
タービン駆動ポンプ-継続運転失敗	5.77E-06	2.2	9.34E-06	2.5
空気調和器	2.73E-03	18.7	3.86E-03	3.9

NUREG/CR-6928 の値を事前情報として超事前分布を作成した場合には、その不確かさが大きいことため事後分布の EF も大きくなり、その結果、PRA において炉心損傷頻度の不確かさも大きな値となってしまうことが予想される。一方で、Component Reliability Data Sheet Update 2010 においてプラント間のばらつきはないと評価された故障率の値を事前情報として超事前分布を作成した場合には、事後分布でプラント間の十分なばらつきが表されず、CDF の不確かさも小さく見積もられてしまう可能性がある。従って、米国データの中でばらつきが少ないとされている分布をそのまま利用することは、適切ではないと考えられる。

機器故障率推定値の不確かさをほぼデータの情報のみで決めるためには、事前分布の不確かさはある程度大きくしておかなければならない。そこで、超母数 (μ, σ) の事前分布から対数正規分布を使ってサンプルした故障率分布（いわゆる故障率の事前分布を意味する）の EF 値が十分に広くなるように、超事前分布を設定することを考える。EF=20 を持つ対数正規分布は広い裾を持っており、国内での機器故障率の不確かさを十分に内包できると考えられることから、ここでは EF=20 程度に設定することにした。

以上により、故障率分布の平均値を米国データの平均値と一致させ、EF が 20 前後となるように超事前分布のパラメータ (μ, σ) を設定する。

4.1.4 故障率推定の収束の検証

26 ヶ年データ報告書の手法では収束性の確認を十分にとっておらず、推定値が十分に収束していないものがあつた。このため、本手法では推定値の収束性を確認する必要がある。故障件数が数件程度観測されている機器であれば、経験上、時間故障率でもデマンド故障確率でも比較的収束性がよく、サンプル数も 10 万程度で収まる。一方、故障が観測されていない故障 0 件の場合には、一般的に収束し難く、図 4.7 の例に示すように、特に運転時間の短い機器ではサンプル数 100 万でも収束しないケースがあつた。故障と露出データとも情報が少ない場合は、特に収束性に影響があるものと考えられる。

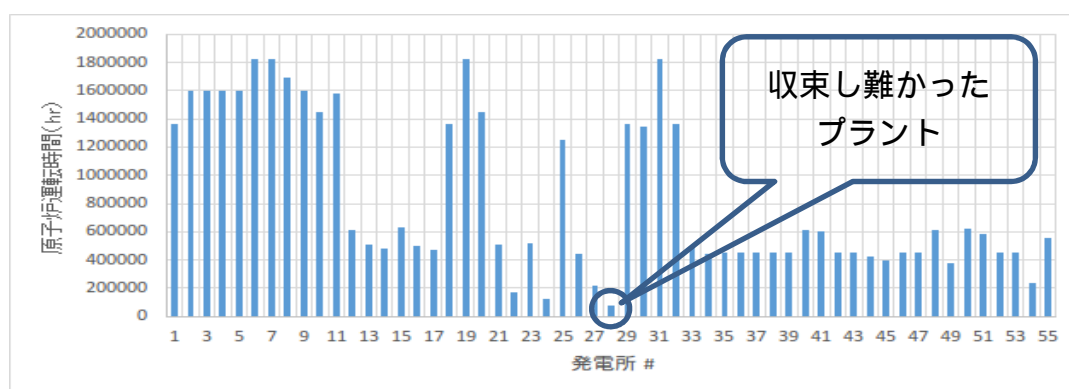


図 4.7 各プラントの運転時間

個別プラントの機器故障率の推定における収束性をさらに向上させるには、次の方策が考えられる。

サンプルの Chain 数を増やし、複数 Chain 間で収束性を確認する

26 カ年データ報告書の手法では 1 Chain のみしか算出しておらず収束性はモンテカルロ標準誤差 (MCSE) のみを考慮していた。しかしながら MCSE だけでは Markov Chain Monte Carlo (MCMC) 計算が定常分布に収束しているかは判断できないため、ここでは複数の Chain を利用して収束性の確認を行う。Chain 数が少ないと、極端な外れ値をサンプルした場合に収束性の悪化に繋がりが易いと予想されるため、Chain 数を 10 程度に増やすことを考える。これにより、各 Chain で算出した分散の平均値をとることで事後分布の分散を安定的に算出することができ、Gelman plot^[16]での収束性の確認を適切に行うことができる。この検討例を図 4.8 に示す。Chain 数を増やすことで収束性の確認が比較的容易になると考えられる。

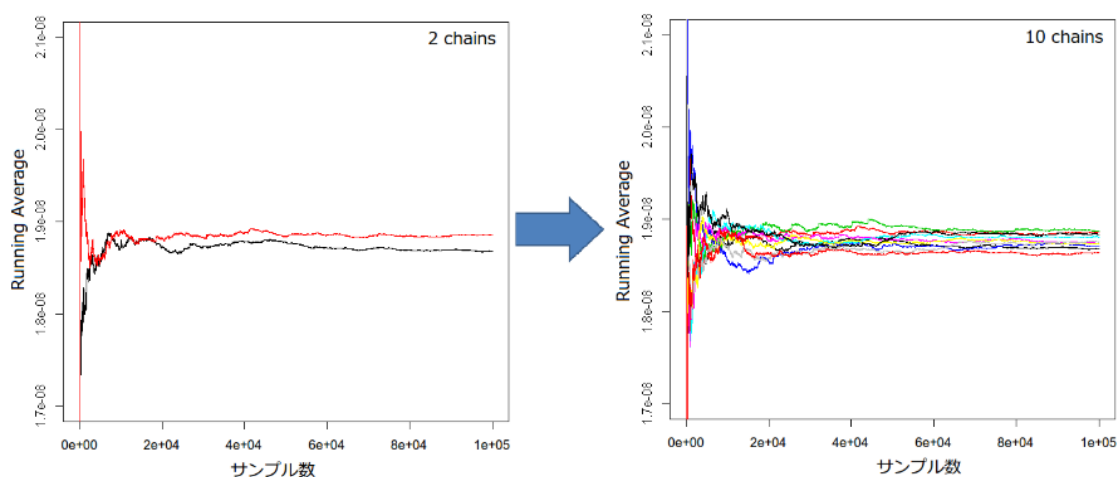


図 4.8 サンプル Chain を増加させた場合の Running Average 検討

極端な外れ値をサンプリングから除外する

収束性が悪い場合では、超母数 σ^2 と μ の特定の組み合わせにおいて極端な外れ値がサンプリングされている。このため、 σ^2 と μ の組み合わせに対する対数正規分布の分散 $e^{(2\mu+\sigma^2)}(e^{\sigma^2} - 1)$ が著しく大きいと考えられる場合には、この組み合わせとなるサンプリングを除外することが考えられる。このような σ^2 と μ の組合せを除外した場合と除外しない場合の個別プラント故障率の推定値の比較を表 4.3 に示す。本計算では分散の値が 1 を超えるような σ^2 と μ の特定の組み合わせを除外して計算を行っている。極端な外れ値を除外しても推定結果に実質的な影響は見られず、適切な扱いを行えば、実用に供するものと考えられる。

表 4.3 サンプルングの外れ値除外有無における結果比較

	除外無	除外有		除外無	除外有		除外無	除外有
発電所#1	1.22E-08	1.23E-08	発電所#25	5.11E-08	5.00E-08	発電所#49	1.18E-08	1.18E-08
発電所#2	1.15E-08	1.16E-08	発電所#26	1.23E-08	1.27E-08	発電所#50	1.01E-08	1.02E-08
発電所#3	1.13E-08	1.15E-08	発電所#27	1.41E-08	1.41E-08	発電所#51	1.03E-08	1.04E-08
発電所#4	1.12E-08	1.12E-08	発電所#28	1.55E-08	1.54E-08	発電所#52	1.07E-08	1.06E-08
発電所#5	1.11E-08	1.12E-08	発電所#29	1.15E-08	1.17E-08	発電所#53	1.04E-08	1.06E-08
発電所#6	1.08E-08	1.09E-08	発電所#30	1.12E-08	1.16E-08	発電所#54	1.13E-08	1.14E-08
発電所#7	1.06E-08	1.06E-08	発電所#31	4.07E-08	3.99E-08	発電所#55	1.03E-08	1.05E-08
発電所#8	1.07E-08	1.07E-08	発電所#32	1.21E-08	1.21E-08			
発電所#9	1.10E-08	1.11E-08	発電所#33	1.10E-08	1.10E-08			
発電所#10	1.11E-08	1.10E-08	発電所#34	1.13E-08	1.13E-08			
発電所#11	1.10E-08	1.11E-08	発電所#35	1.13E-08	1.14E-08			
発電所#12	1.17E-08	1.19E-08	発電所#36	1.13E-08	1.15E-08			
発電所#13	1.22E-08	1.20E-08	発電所#37	1.05E-08	1.04E-08			
発電所#14	1.22E-08	1.25E-08	発電所#38	1.02E-08	1.02E-08			
発電所#15	1.15E-08	1.18E-08	発電所#39	1.03E-08	1.04E-08			
発電所#16	1.24E-08	1.24E-08	発電所#40	1.01E-08	1.02E-08			
発電所#17	1.65E-07	1.62E-07	発電所#41	1.01E-08	1.02E-08			
発電所#18	1.24E-08	1.26E-08	発電所#42	1.05E-08	1.05E-08			
発電所#19	1.11E-08	1.13E-08	発電所#43	1.05E-08	1.05E-08			
発電所#20	1.11E-08	1.12E-08	発電所#44	1.09E-08	1.11E-08			
発電所#21	1.18E-08	1.19E-08	発電所#45	1.10E-08	1.11E-08			
発電所#22	1.55E-08	1.50E-08	発電所#46	1.09E-08	1.09E-08			
発電所#23	1.23E-08	1.25E-08	発電所#47	1.05E-08	1.06E-08			
発電所#24	1.84E-08	1.90E-08	発電所#48	1.11E-08	1.13E-08			

階層ベイズを用いた個別プラント故障率の推定では、数件の故障がある場合、Stan コードを用いると、経験的にサンプル数 10 万程度で収束している。収束の判定では、サンプル Chain 数を 10 などに設定し、サンプルングの極端な外れ値の影響を低減していくことが考えられる。故障件数が少ない場合や 0 件の場合、運転経験が浅く露出データも少ないプラントでは、収束し難いケースが発生する可能性があるが、サンプル数を 50 万・100 万などに増加する、或いは極端な外れ値を除外するなどに対処が可能である。

4.1.5 超事前分布の適切さに関する比較検討

4.1.2 に述べた ~ の超事前分布について、収束性や指標・シミュレーションを用いて適切さを比較検討する。

(1) 平均値の収束性について

一般故障率の平均値の収束性に関して、図 4.9 は逆止弁内部リーク(故障 4 件、延供用時間 $8 \times 10^8 \text{h}$) について、~ の超事前分布に対する一般故障率の累積平均を示したものである。本図に示すとおり 26 ヶ年データ報告書の手法では収束しておらず、他の事前分布を用いれば収束していることがわかる。図 4.10 は各々の超事前分布に対する一般機器故障率の事後分布を比較している。26 ヶ年データ報告書の手法による事後分布は、他の分布と比べて大きな不確かさを持っていることがわかる。共役事前分布に対する事後分布は、26 ヶ年データ報告書の

手法の次に大きな不確かさを持っている。一方、Half-Cauchy 分布と正規分布の組み合わせに対する事後分布は、上記の二つの分布に比べると不確かさは小さくなっている。また、Jeffreys 無情報事前分布の場合には、他の事後分布に比べて分散が小さく不確かさが小さいという評価になっている。

各超事前分布に対する一般機器故障率の推定結果を表 4.4 に示す。また、表 4.5 に示すとおり Jeffreys 無情報事前分布の個別故障率にはほとんど差が生じておらず、これは の値がほぼ 0 となっているためである。4.1.3 項で述べたように、Jeffreys 無情報事前分布は、発電所間の故障率にほとんど差異がない場合に使用するものであると考えられる。

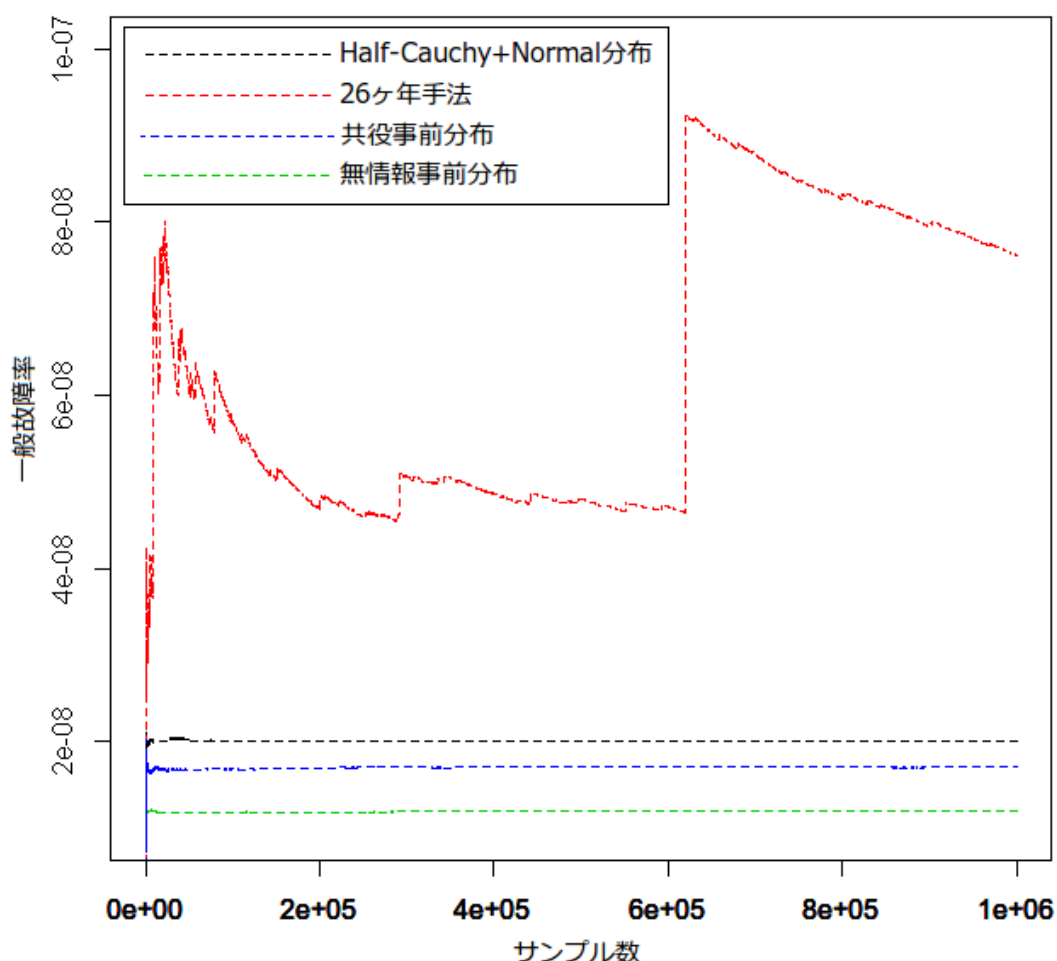


図 4.9 事前分布の違いによる収束性の比較

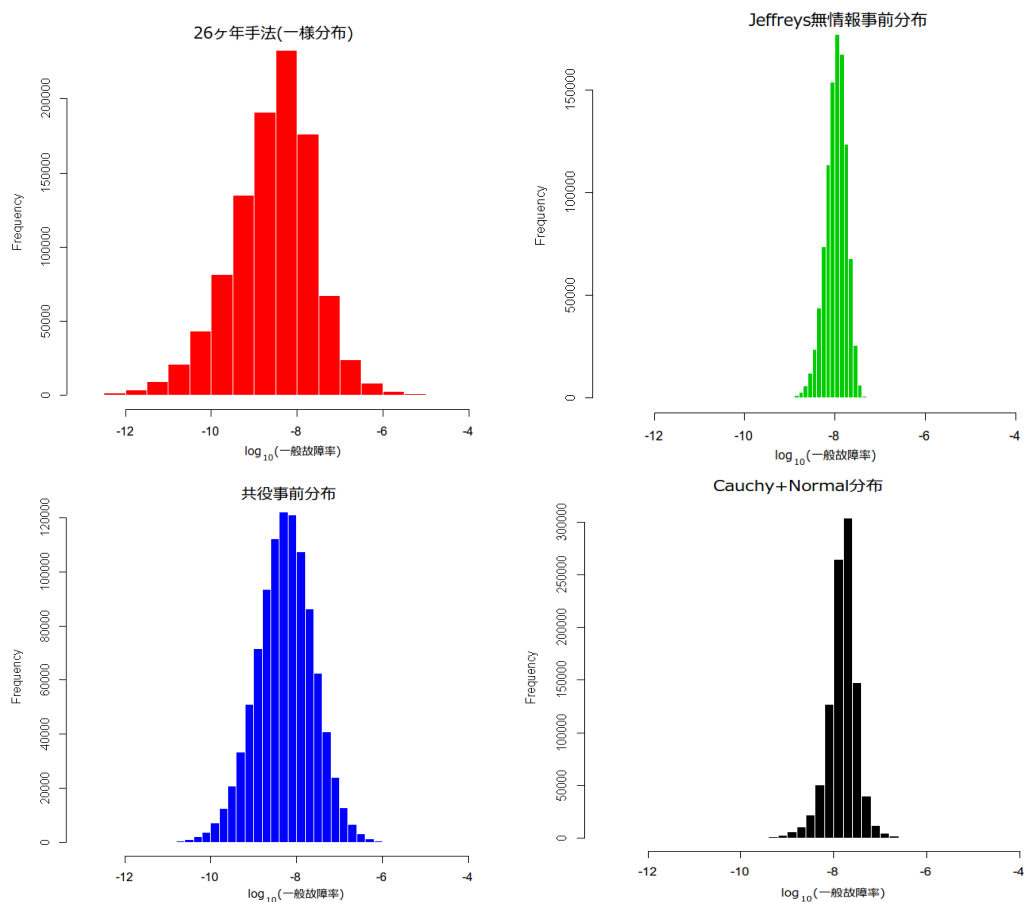


図 4.10 一般機器故障ヒストグラム（逆止弁 - 内部リーク）の比較

表 4.4 各超事前分布による 26 カ年データ報告書の手法による一般機器故障率（逆止弁 - 内部リーク）

超事前分布	平均値	MCエラー	5%点値	中央値	95%点値
一様分布	7.62E-08	2.85E-08	5.02E-11	3.39E-09	7.08E-08
共役事前分布	1.70E-08	7.36E-11	4.05E-10	5.58E-09	6.23E-08
無情報事前分布	1.20E-08	1.04E-11	4.07E-09	1.10E-08	2.32E-08
Half-Cauchy+normal分布	2.01E-08	5.30E-11	4.23E-09	1.61E-08	4.28E-08

表 4.5 Jeffreys 無情報事前分布と 26 カ年データ報告書の手法による個別故障率

	平均値	MCエラー	5%点値	中央値	95%点値
発電所#1	1.20E-08	1.12E-11	4.07E-09	1.10E-08	2.32E-08
発電所#2	1.20E-08	1.14E-11	4.07E-09	1.10E-08	2.32E-08
発電所#3	1.20E-08	1.10E-11	4.07E-09	1.10E-08	2.32E-08
発電所#4	1.20E-08	1.04E-11	4.07E-09	1.10E-08	2.32E-08
発電所#5	1.20E-08	1.00E-11	4.07E-09	1.10E-08	2.32E-08

無情報事前分布の個別故障率

	平均値	MCエラー	5%点値	中央値	95%点値
発電所#1	1.15E-08	5.09E-11	4.68E-11	3.02E-09	4.52E-08
発電所#2	1.02E-08	4.08E-11	4.62E-11	2.91E-09	4.01E-08
発電所#3	1.02E-08	4.10E-11	4.49E-11	2.90E-09	4.00E-08
発電所#4	9.65E-09	3.64E-11	4.48E-11	2.85E-09	3.83E-08
発電所#5	9.47E-09	3.45E-11	4.40E-11	2.81E-09	3.76E-08

26ヶ年手法の個別故障率

(2) シミュレーションによる比較検討

適切な超事前分布を選択するために、以下 3 つの方法を用いてシミュレーションを実施し比較検討を行った。

a. 対数正規分布の対数標準偏差 σ と対数平均値 μ のパラメータサーベイによる比較

逆止弁 - 内部リークを例に、合計観測故障件数：4 件、標準偏差：0.32515 の観測値になるような σ と μ の概算値を個別の運転時間を用いて算出する。故障観測確率は、21 ヶ年データと同じベータ分布Beta(4,6)としている。

ここで、図 4.11 に示すとおり、 σ と μ の値に対する故障率とそれから予測される故障件数を虱潰しに計算し、観測故障件数と整合する適切な σ と μ の範囲を探した。図 4.12 に合計故障件数、標準偏差、95% 値の平均値の等高線を示す。図中の赤線は、それぞれ、観測データの合計観測件数（4 件）と一致する σ と μ の組み合わせ、観測データの標準偏差と一致する σ と μ の組み合わせ、95% 値の平均故障件数が 20 となる σ と μ の組合せを示している。観測故障件数 4 件に対して、平均故障件数が 20 を超えることは、ほぼあり得ないだろうと考えられる。

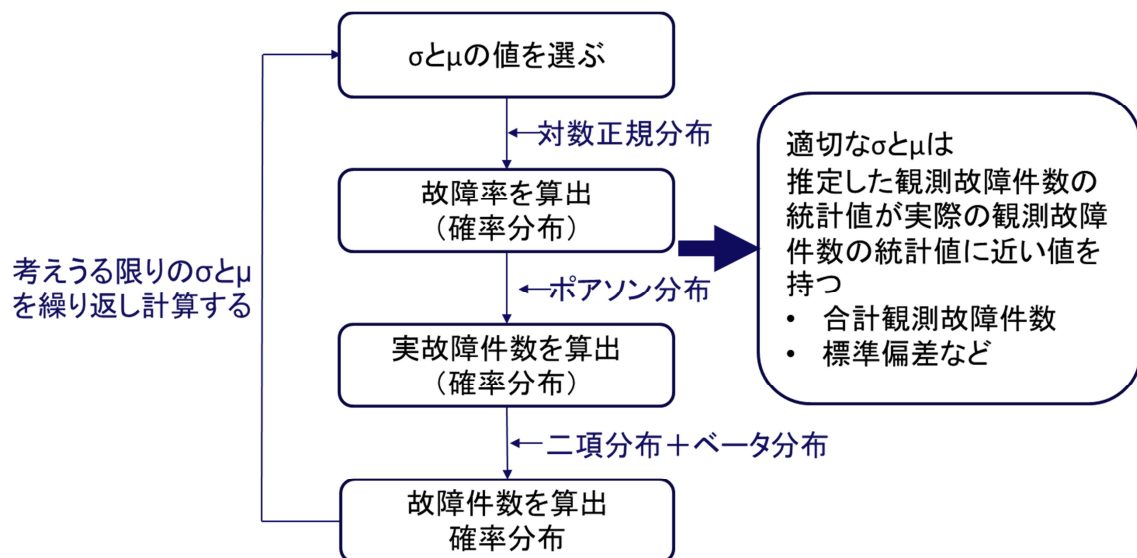
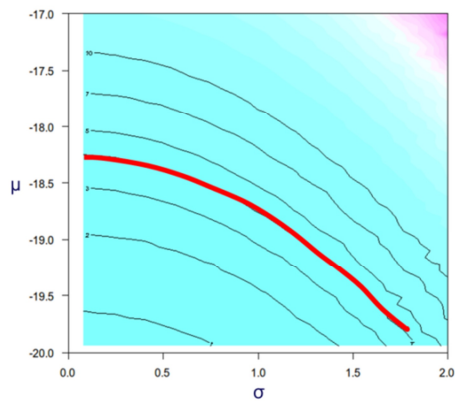
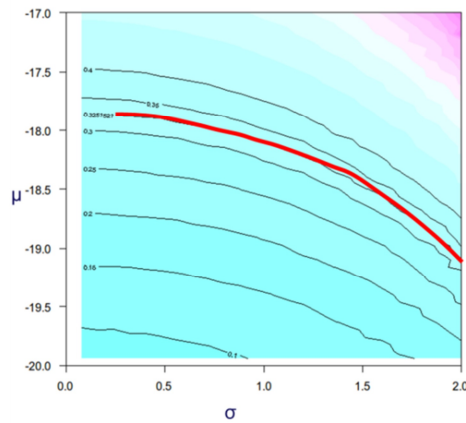


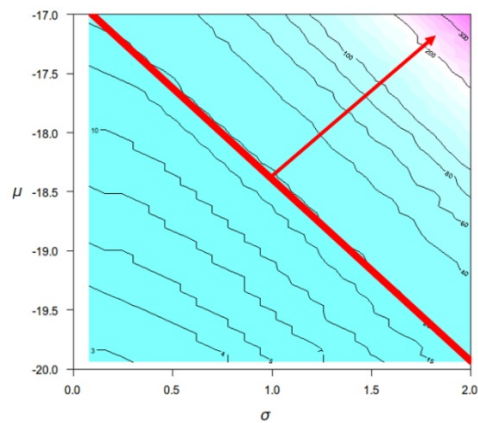
図 4.11 シミュレーションフローによる σ と μ の推定



a) 合計故障件数の平均値（等高線）
赤線は平均合計故障件数が 4 件となる組み合わせ



b) 標準偏差の平均値（等高線）
赤線は故障件数が標準偏差：0.32515 となる組み合わせ



c) 95% 値の平均値（等高線）
赤線より上側は平均合計故障件数の 95% 点値が 20 を超える組み合わせ

図 4.12 合計故障件数、標準偏差、95% 値の平均値の等高線

95% 値の等高線に合計故障件数と標準偏差の赤線に該当する等高線を重ねて表示すると図 4.13 のようになり、斜線部分あたりが観測データを再現しうると μ の組み合わせとなる。すなわち、 σ と μ の分布が斜線部分あたりに存在するとき、観測データと整合し適切と判断できる。各 \sim の超事前分布形から得た平均値を用いて比較した結果、図 4.14 のとおり比較的 Half-Cauchy 分布+正規分布の組み合わせが観測データとよく整合する結果となった。

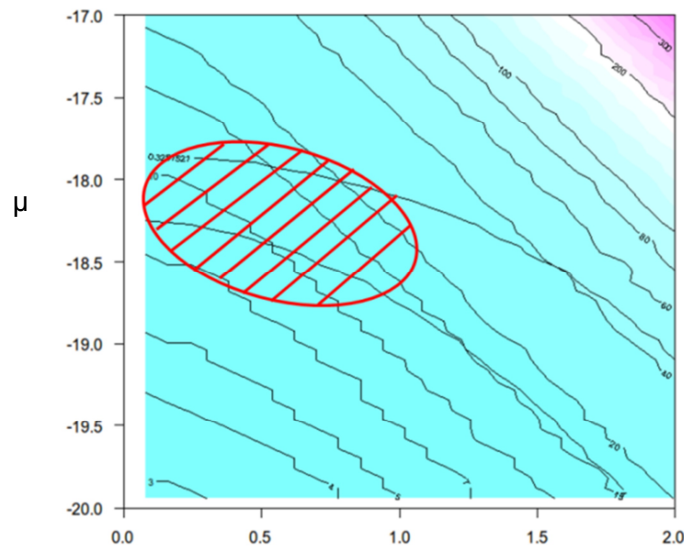


図 4.13 合計故障件数、標準偏差、95%値の平均値の等高線の重ね合わせ

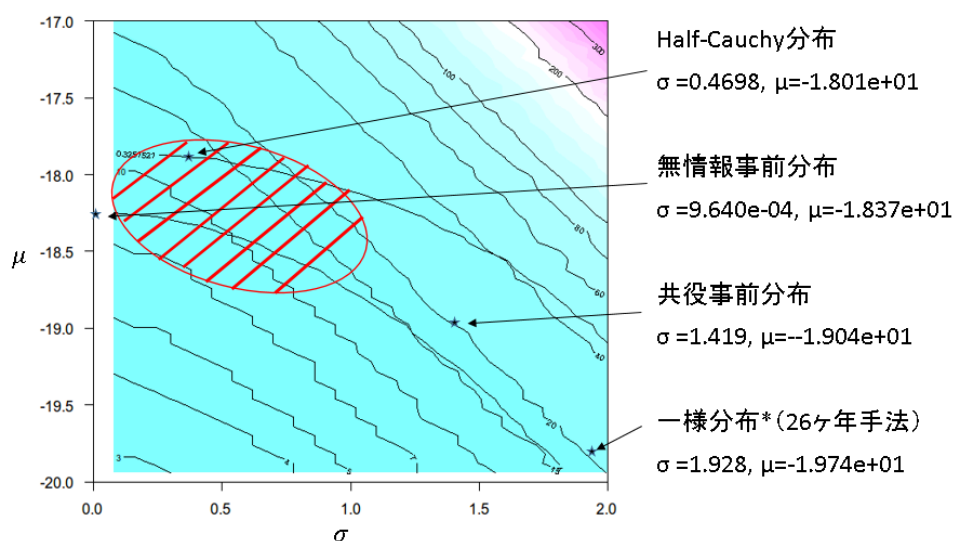


図 4.14 各 \sim の超事前分布形に対する (μ, σ) の存在位置

b. 階層ベイズの結果を基にシミュレーションを行い、観測結果との一致を確認

図 4.15 に示すフローに従って、階層ベイズから得た σ と μ を基に推定された故障件数と観測故障件数を算出する。故障件数の推定値が観測値（合計観測故障件数：4 件、標準偏差：0.32515）を再現できていれば妥当な推定と言える。結果は表 4.6 のとおりであり、個別故障率を用いた場合では Jeffreys 無情報事前分布がほぼ再現できている。共役事前分布と 26 ヶ年データ報告書の手法は、Jeffreys 無情報事前分布よりも少し大きめに評価していることがわかる。また、Half-Cauchy 分布と正規分布の組み合わせは、やや大きめの結果をもたらすが、それほど過大ではない。一般故障率を用いた場合でも無情報事前分布と Half-Cauchy 分布と正規分布の組み合わせは、個別故障率とほぼ同じ結果を再現している。一方で共役事前分布は少し大きめな結果となったが、Half-Cauchy 分布と正規分布の組み合わせよりは近い値となっている。

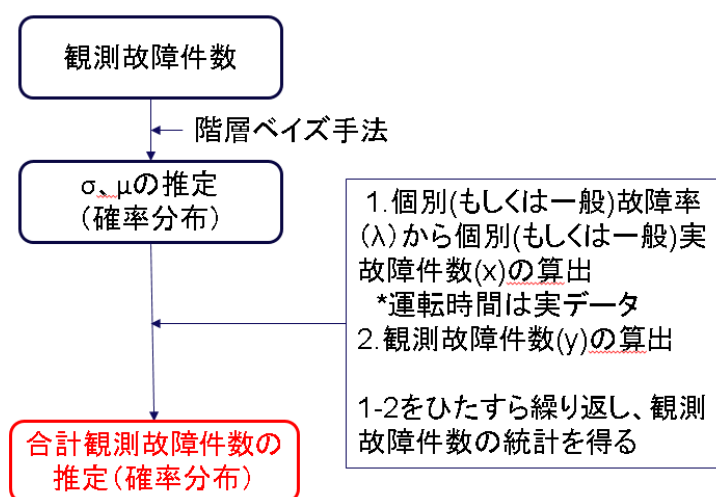


図 4.15 観測故障件数から個別故障率を用いて実故障件数の推定

表 4.6 バイズ統計結果を用いたシミュレーションによる結果

事前分布	個別故障率		一般故障率	
	平均合計故障件数	平均標準偏差	平均合計故障件数	平均標準偏差
26ヶ年手法	4.62	3.40E-01	18.11	3.35E-01
共役事前分布	4.56	3.08E-01	5.78	2.33E-01
無情報事前分布	4.03	2.51E-01	4.03	2.51E-01
Half-Cauchy+正規分布	6.32	3.39E-01	6.79	3.23E-01

c. WAIC を用いた交差検定

WAIC(Widely Applicable Information Criterion もしくは Watanabe-Akaike Information Criterion)とは、階層モデルにも用いることができる広く使える情報基準量の一つである^[17]。WAIC は一個抜き交差検証と漸次等価(データが多ければ等しくなる)であり、予測とデータの整合性を検証できる。また類似の方法である LOOCV (leave-one-out cross validation) と異なり計算量が少ないため、容易に算出できることから利便性が高い。図 4.16 のとおり一個抜き交差検証とは、観測データの集合から一つだけデータを抜き出し、残りのデータから確率分布を推定し、抜き出したデータと一致するかを確かめる手法である。このように、WAIC は確率モデルの平均的な性能を検証できる^[18]。

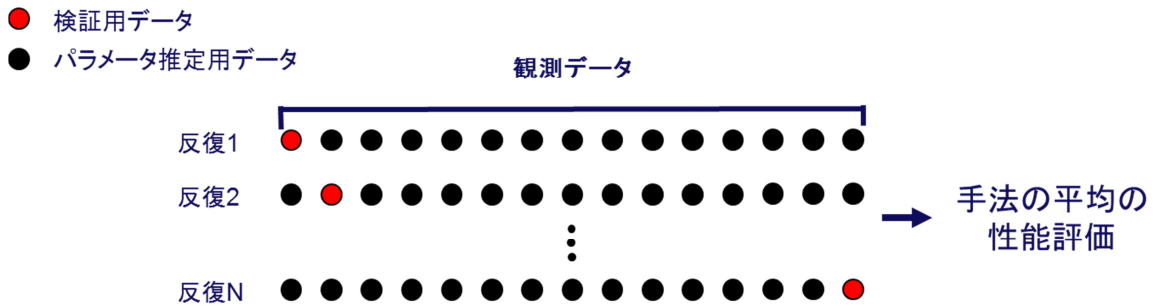


図 4.16 一個抜き交差検証

WAIC を算出するには求めている真の確率分布が必要であるため、WAIC の理論値を算出することはできない。よって、Gelman による以下の近似式を用いて算出を行っている^[18]。

$$\text{WAIC} \approx -2(\widehat{lpd} - \hat{p}_{waic})$$

ここで \widehat{lpd} は対数個別予測分布(log pointwise predictive density)であり、 \hat{p}_{waic} は実効パラメータ数(effective number of parameters)である。 \widehat{lpd} は次式で定義される。

$$\widehat{lpd} = \sum_{i=1}^n \log \left(\frac{1}{S} \sum_{s=1}^S p(X_i | w_s) \right)$$

実効パラメータ数には平均に基づく近似と分散に基づく近似の二通りがある。

$$\hat{p}_{waic,1} \approx 2 \sum_{i=1}^n \left(\log \left(E_{post} p(X_i | w) \right) - E_{post} (\log p(X_i | w)) \right)$$

$$\hat{p}_{waic,2} \approx \sum_{i=1}^n var_{post}(\log p(X_i|w))$$

Gelman らに依れば、分散に基づく近似の方が安定して値を求めることができる。以下、表 4.7 に WAIC の計算結果を示す。Jeffreys 無情報事前分布は の値がほぼ 0 であるため、倍浮動小数点ではオーバーフローにより WAIC を算出することができない。共役事前分布は、実効パラメータ数の算出方法に関わらずもっとも大きな値となった。26 カ年データ報告書の手法は、実効パラメータ数の計算手法に関わらず WAIC の値が安定している。一方で、実効パラメータ数の計算方法によって、Half-Cauchy 分布と正規分布の組み合わせは WAIC の値に差が出るのがわかる。また、共役事前分布も実効パラメータ数の計算方法によって WAIC に大きな差が出るのがわかる。

表 4.7 WAIC を用いた交差検定結果
(値が小さければ小さいほど良い)

	cauchy+正規分布	共役事前分布	無情報事前分布	26ヶ年手法
WAIC(pwaic1)	-1776.6288	-1418.0216	NA	-1797.2264
WAIC(pwaic2)	-1931.1634	-152.9174	NA	-1728.829
lpd	1098.6966	981.9234	NA	1101.7645
pwaic1	210.3822	272.9126	NA	203.1513
pwaic2	133.1149	905.4647	NA	237.35

(3) 比較検討のまとめ

以上の比較検討を整理すると、表 4.8 となる。

表 4.8 比較結果

事前分布	シミュレーション	個別故障率	一般故障率	WAIC1	WAIC2
26ヶ年手法	×	○	×	◎	○
共役事前分布	×	○	○	×	×
無情報事前分布	○	◎	◎	NA	NA
Half-Cauchy+正規分布	◎	△	△	○	◎

まず Jeffreys 無情報事前分布は全体的に良好な結果となったが個別故障率を細かく見ていくとすべての発電所が同じ故障率になっている(参照 表 4.5)。これは Jeffreys 無情報事前分布では、 の値がほぼ 0 であるために発電所間の差異がないという前提で計算しているためである。このため、Half-Cauchy 分布と正規分布の組み合わせに比べて、共役事前分布は事後分布に強い影響を与えるため、事前情報が観測データと整合しているかどうか重要なポイントとなる。故に 0 件故障など米国の実績と国内データの傾向が異なる機器に対して共役事前分布を用いることは、あまり適切とは言えない。また、共役事前分布は、個別故障

率と一般故障率から推定した故障件数は比較の実データと整合している一方で、シミュレーション結果（参照 図 4.14）や WAIC の比較を見ると良好ではない。Half-Cauchy 分布と正規分布の組み合わせは、個別故障率と一般故障率から推定した故障件数はやや保守的な評価となったが、全体的に良好な結果となった。

以上より、Half-Cauchy 分布と正規分布の組み合わせを超事前分布の第一候補とする。

4.1.6 火災発生頻度の階層ベイズ手法（EPRI 手法）による一般故障率推定

EPRI の火災発生頻度評価手法^[19]では（以下、EPRI 手法）階層ベイズ手法において一般故障率を個別発電所推定結果の重ね合わせで求めており、これによって、平均値、分散、平均故障件数が個別発電所のデータと整合するような一般故障率となっている。EPRI 手法では、 (μ, σ) の事後分布から一般故障率をサンプルするわけではないので、個別故障率の計算が収束している限り外れ値が出ず、平均値の計算も安定する。

EPRI 手法は、すべての発電所を等価に扱って故障率をサンプルするが、ここでは発電所ごとの運転時間の長短を考慮して、故障率をサンプルする方法も考える。

< 各発電所を等価に扱う場合 >

$$P(\lambda_g) = \begin{cases} P(\lambda_1) & \text{if } x \in \left(0, \frac{1}{n}\right) \\ \vdots \\ P(\lambda_i) & \text{if } x \in \left(\frac{i-1}{n}, \frac{i}{n}\right) \\ \vdots \\ P(\lambda_n) & \text{if } x \in \left(\frac{n-1}{n}, 1\right) \end{cases} \quad \text{given } x \sim (0,1)$$

（注）各発電所の個別故障率分布から、等しく故障率をサンプルして一般故障率を算出する。

< 発電時間の重みをかけて扱う場合 >

$$P(\lambda_g) = \begin{cases} P(\lambda_1) & \text{if } x \in \left(0, \frac{t_1}{\sum_{j=0}^n t_j}\right) \\ \vdots \\ P(\lambda_i) & \text{if } x \in \left(\frac{\sum_{j=0}^{i-1} t_j}{\sum_{j=0}^n t_j}, \frac{\sum_{j=0}^i t_j}{\sum_{j=0}^n t_j}\right) \\ \vdots \\ P(\lambda_n) & \text{if } x \in \left(\frac{\sum_{j=0}^{n-1} t_j}{\sum_{j=0}^n t_j}, 1\right) \end{cases} \quad \text{given } x \sim (0,1)$$

（注）運転時間が長ければその発電所の個別故障率はほかの発電所より信頼できるとみなし、各発電所の故障率分布から、その運転時間割合に比例した数の故障率をサンプルして、一般故障率を算出する。

図 4.17 は、ある機器について、超母数(μ, σ)の事前分布を $\mu \sim$ 正規分布、 $\sigma \sim$ Half-Cauchy 分布として EPRI 手法で計算した一般故障率分布と、超事前分布を一様分布とした 26 ヶ年手法で計算した一般故障率分布を比較したものである。26 ヶ年手法で一般故障率の外れ値（ここには示していないが）が生じているものの、分布の主要部分（例えば 5%-95%の範囲の分布）は比較的安定しており、EPRI 手法でもこの 26 ヶ年手法の分布をほぼ再現できている。

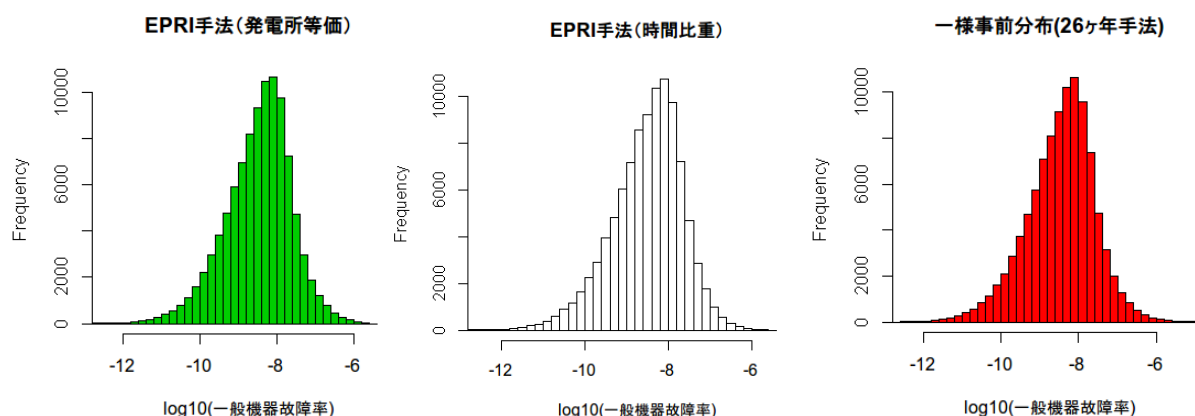


図 4.17 一般機器故障確率分布の結果比較

また、図 4.18 は両手法による一般故障率の累積平均をプロットしたもので、EPRI 手法は(個別故障率が収束しているの)一般故障率の平均値は収束する。このとき、その平均値は共役事前分布や Jeffreys 無情報事前分布と同じ程度の値となった。

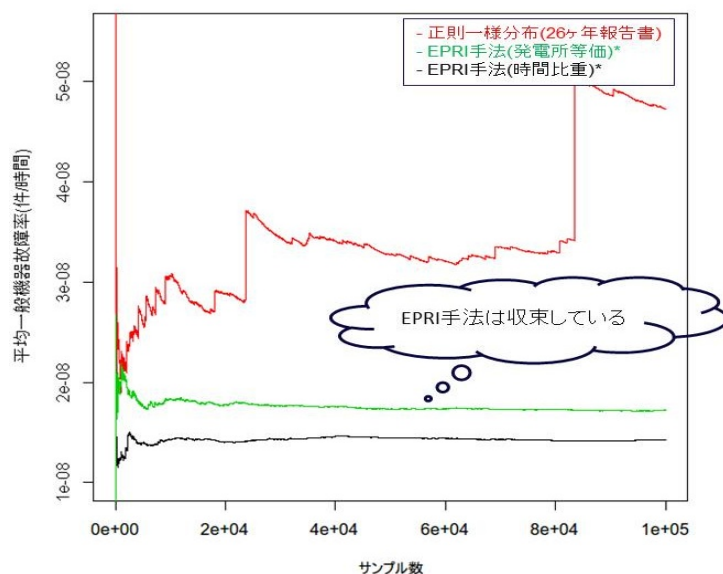


図 4.18 EPRI 手法の収束性の確認

なお、WAIC を用いて EPRI 手法の適切さを比較することはできないことから、別途事前分布の適切さを判断する必要がある。Half-Cauchy 分布と正規分布の組合せを事前分布として、平均値の収束性（Running Average）及び事後分布の収束性の指標である Gelman Plot の例を図 4.19 と図 4.20 に示す。図 4.19 は、蓄電池機能喪失（故障 0 件、延供用時間 $4.6 \times 10^7 \text{h}$ ）の時間故障率の例、図 4.20 は、ファン・ブローア起動失敗（故障 1 件、延デマンド数 $6.6 \times 10^4 \text{d}$ ）のデマンド故障確率の例である

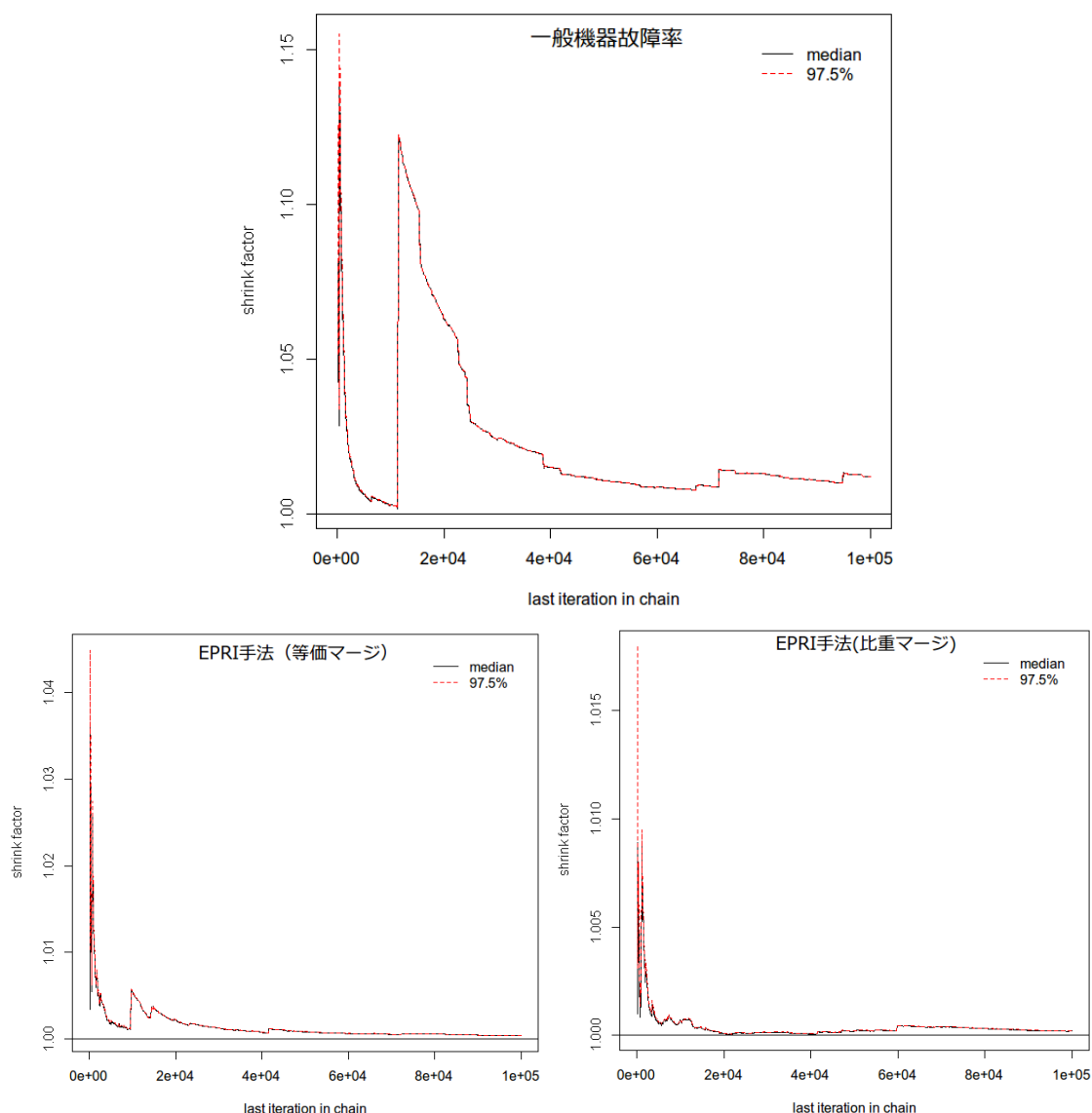


図 4.19 蓄電池機能喪失の一般時間故障率の収束性

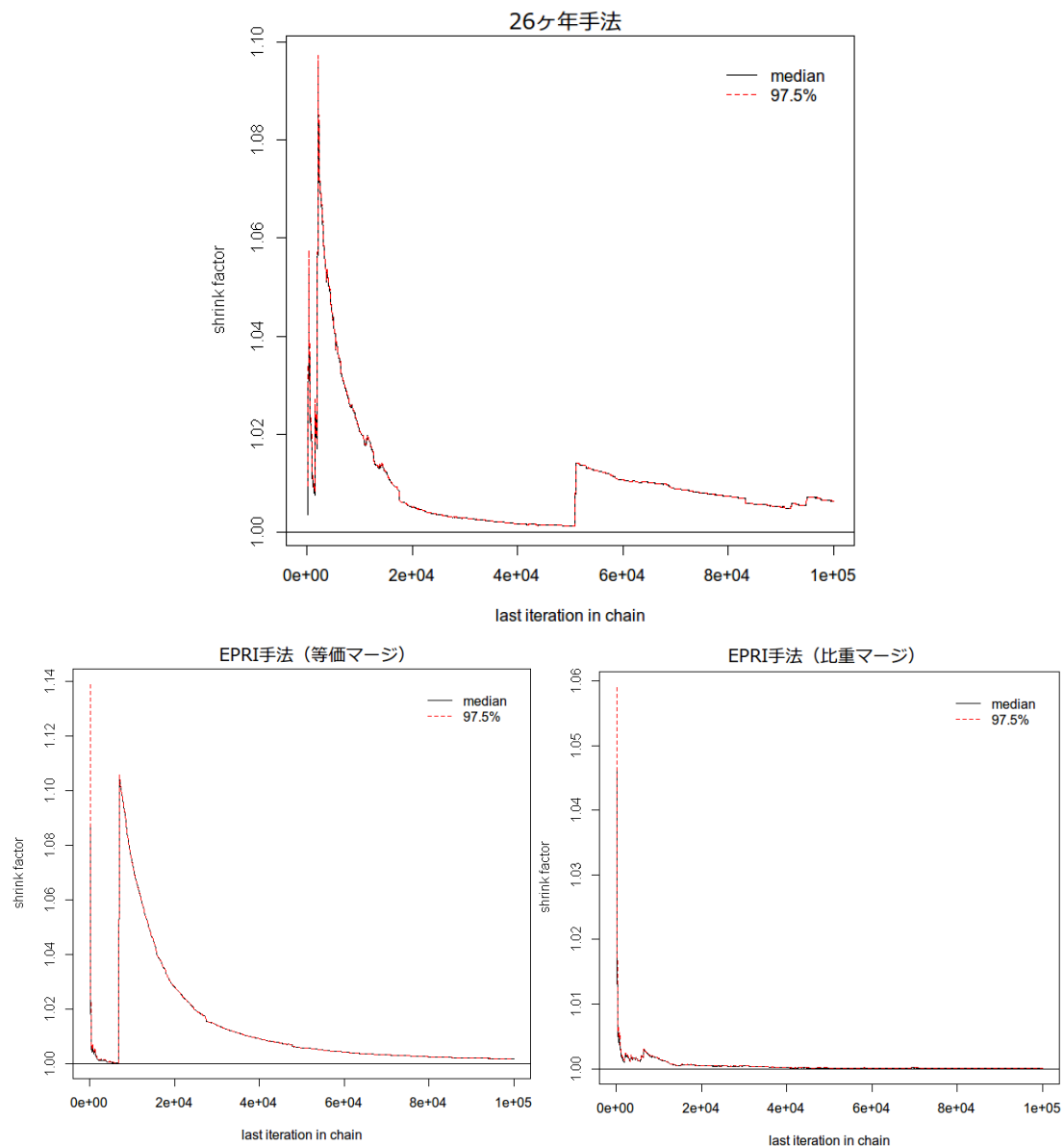


図 4.20 ファン・ブローアー起動失敗の一般デマンド故障確率の収束性

Gelman Plot は、複数チェーンによるモンテカルロ計算において、チェーン間の分散と各チェーン内の分散との比に相当する量（shrink factor という）をサンプル数に対してプロットしたもので、計算が収束していればこの量が 1 となり、慣習上 1.1 以下となれば収束とみなすことが多い。図 4.19、図 4.20 の何れも十分に収束していることが確認できる。

以上により、Half-Cauchy 分布と正規分布の組合せを超事前分布に採用した場合でも、一般故障率をよく推定できると考えられる。

4.1.7 推定手法の適用条件の考察

工学的に妥当な機器故障率を推定するには推定手法の適応条件を明確に把握しておく必要がある。ゆえにプラント数や事前情報がどのように推定値に影響を与えるか感度解析を行い、超事前分布の Half-Cauchy 分布と正規分布の組合せにおいて必要な条件設定の検討を行う。

(1) プラント数

これまで例示してきた機器は、国内 55 基の BWR/PWR プラントで使用されているものが多かったが、安全保護系のデジタル制御機器などは、現状 ABWR のみで使用されており、使われているプラント数や母集団数が少ない（データがあるのは実質 4 プラント分のみ）。このようなプラント数の大小がどのように事後分布に影響を与えるかを調べるため、プラント数による感度解析を行う。

感度解析対象として熱交換器を用いる。これは熱交換器が 0 件故障機種であり、故障が観測されている機器よりも不確かさが大きいと考えられるためである。図 4.21 は、全 55 プラントのデータから、順次 5 プラント分ずつ減らしたデータを用いて故障率推定を行い、それぞれの場合の (μ, σ) の事後分布を 2 次元平面にプロットしたものである。ただし、ここではおおまかな傾向をみるのが目的であるため、減らしている 5 プラント分の供用時間がそれぞれ同じになるように調整しているわけではなく、当該 5 プラントは任意に決めている。

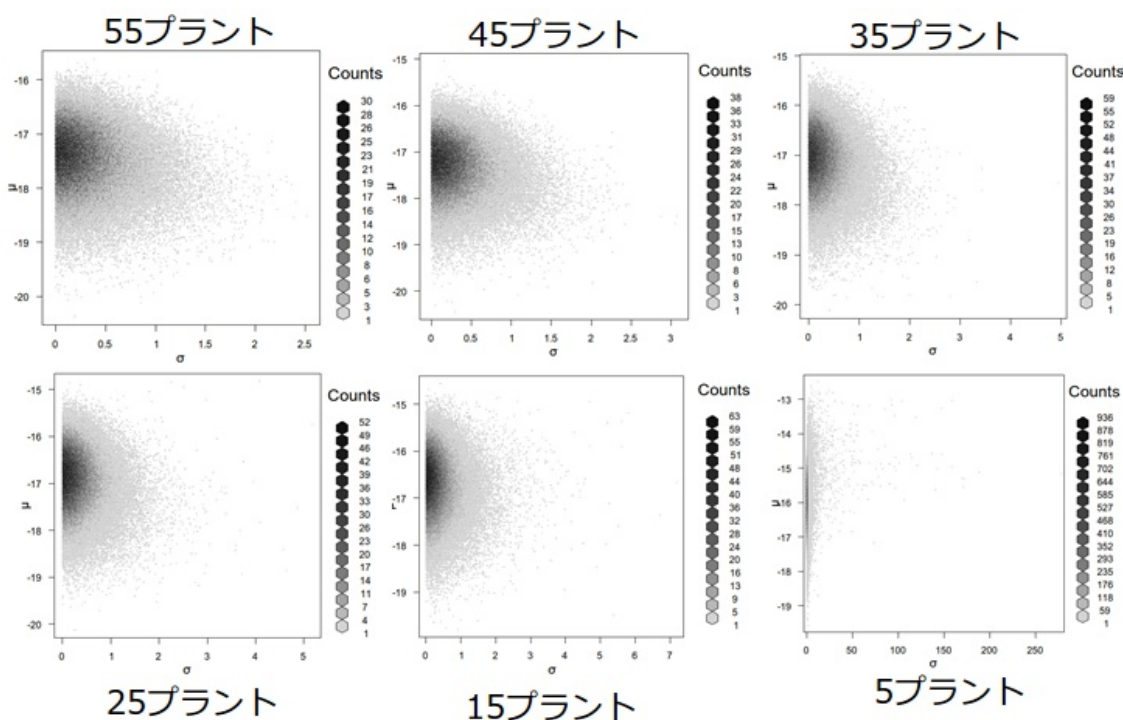


図 4.21 プラント数の事後分布への影響

図 4.21 において、プラント数が 5 基しかないとき、 σ の分布は 0 から約 250 まで広がっている。プラント数が増えていくにつれて σ の不確かさ幅が減少している。 σ は対数正規分布の対数標準偏差であり、経験的に σ の値が 2 を超えると外れ値の発生により収束性が悪くなるため、0 件故障など更新する情報量が少ない場合、収束性を考えるとプラント数は 25 基ほど必要になると考えられる。

(2) 事前情報

超母数である故障率の対数平均 μ を対象として、その事前情報を -8 から -18 まで変化させた場合の故障率の事後分布がどのように変化するかを確認する。(1) より、プラント数が少ない場合、対数標準偏差 σ と対数平均値 μ の不確かさが大きくなり事前情報が事後分布に強く影響を与えと考えられるので、プラント数 5 基での解析を行う。対象機器は(1)と同様に、熱交換器のデータを用いる。

事前情報に対して故障率の事後分布がどのように変化したかを表 4.9 に示す。故障率事後分布の EF は事前情報に対して感度が高く、故障率の事前情報が故障率の推定値から離れていると EF が非現実的な値を示すことがわかる。また、事後分布は収束していなかった。

表 4.9 事前情報の事後分布への影響(プラント数 5 基)

μ (事前情報)	故障率(事前情報)	平均値	5%点値	中央値	95%点値	EF
-8	0.000380129	2.37E-08	2.69E-108	7.49E-18	8.93E-08	1.82E+50
-10	5.14449E-05	3.64E-08	5.92E-87	1.62E-14	1.83E-07	5.56E+39
-12	6.9623E-06	1.76E-07	1.68E-42	2.00E-08	7.19E-07	6.55E+17
-14	9.42245E-07	1.98E-07	9.90E-09	1.51E-07	5.27E-07	7.295635
-16	1.27519E-07	8.47E-08	7.45E-09	5.57E-08	2.49E-07	5.785894
-18	1.72578E-08	2.46E-08	1.38E-09	1.25E-08	7.79E-08	7.511999

$EF = \sqrt{95\%点/5\%点}$ として計算している。本来の定義 $EF = 95\%点/50\%点$ ではもう少し小さい値となる。

上記をまとめると、プラント数が少ない場合、事前情報と推測される実際の故障率の乖離が大きいと、非現実的な推定値となってしまう。事前情報に米国データ等を用いる場合は、必ずしも我が国の故障率と同程度の値ではないため、プラント数が少ない機器などの故障率推定に使うときには注意が必要である。

(3) 評価対象となるプラント数が少ない場合への対処

上記で示したように評価対象となるプラント数が少ない場合、事前分布が推定しようとしている故障率と大きく乖離していると、推定した分布の不確かさが非現実的に大きくなる。従って、事前分布に米国データを用いようとするとき、国内データとの乖離が大きい場合には、表 4.9 で見たように、推定した故障率分布の結果が非現実的な EF を持つことになる。すなわち、プラント数が少な

い場合は、個別プラント故障率の違いを考慮しようとしてもエビデンスデータが少ないために不確かさが大きくなり、現実的な個別プラントの推定が困難になっていると考えられる。そこで、プラント数が少ない場合には、個別プラントの違いを考慮せずどのプラントも同じ故障率であるという仮定で計算することとした。このため、Stan コードの計算モデルにおいて個別故障率(λ_i)ではなく全プラント同じ故障率とするよう変更を加えた（データ収集確率は個別プラントで異なるとしているが、全プラント同じとしてもほとんど違いはない）。上記の変更点を図 4.22 にまとめた。

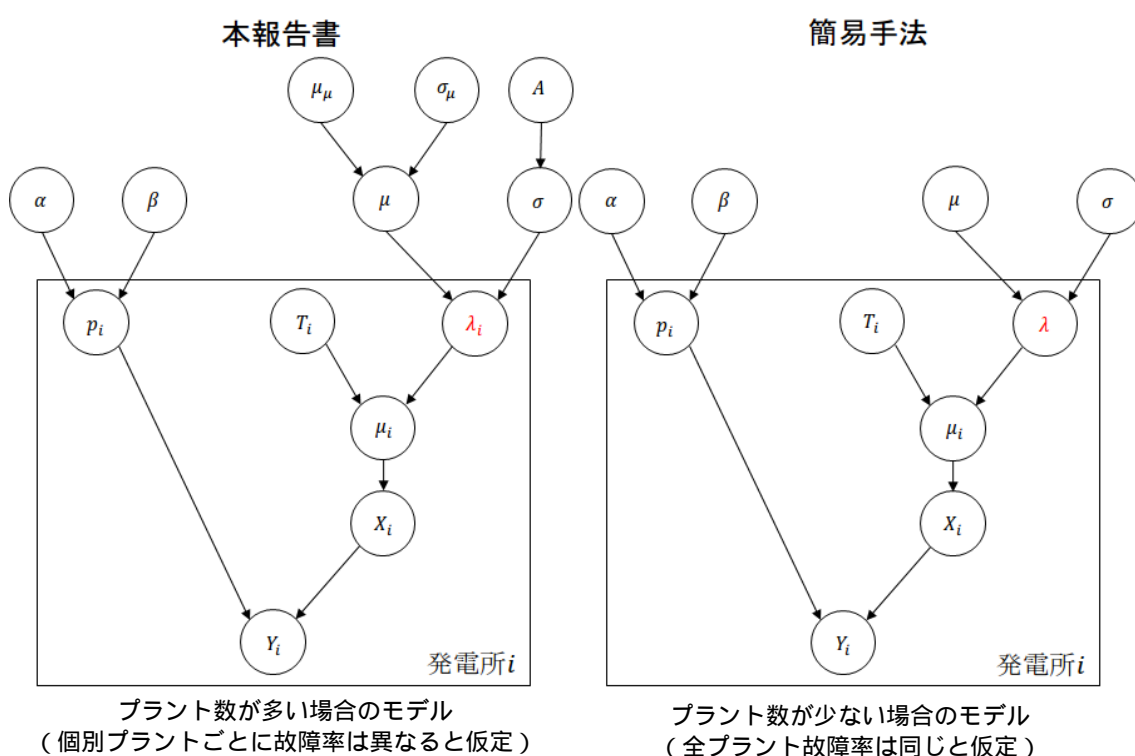


図 4.22 プラント数が多い場合と少ない場合のモデルの比較

上記の変更では、故障率の事前分布を表す対数正規分布のパラメータ σ と μ を決める必要がある。本報告書の手法に倣い、事前分布の EF が与えられていると仮定すると σ の値は、

$$\sigma = \ln \frac{(EF)}{1.645}$$

で与えられる。また、故障率の事前分布の平均値を米国故障率の平均値で決めると仮定すれば、 μ の値は下記の式で与えることができる。

$$\mu = \ln(\text{米国データ}) - \frac{\sigma^2}{2}$$

上記をもとに、デジタル制御機器のデータについて故障率を試算したものを表 4.10 にまとめた。事前分布の EF は広めにとって 20 と仮定して計算を行っている。

表 4.10 デジタル制御機器故障率の推定結果

機 種	故障モード	本報告書の手法					簡易評価手法				
		平均値	5 %点値	中央値	95% 点値	EF	平均値	5 %点値	中央値	95% 点値	EF
演算装置 (デジタル制御機器)	不動作	6.74E-07	1.94E-08	2.13E-07	1.68E-06	9.29E+00	1.30E-07	6.83E-09	7.18E-08	4.41E-07	8.035
	誤動作	6.74E-07	1.94E-08	2.13E-07	1.68E-06	9.29E+00	1.30E-07	6.83E-09	7.18E-08	4.41E-07	8.035
インターフェース (デジタル制御機器)	不動作	1.79E-07	1.39E-18	8.96E-08	5.38E-07	6.22E+05	5.05E-08	3.89E-09	3.11E-08	1.60E-07	6.403
	誤動作	1.79E-07	1.39E-18	8.96E-08	5.38E-07	6.22E+05	5.05E-08	3.89E-09	3.11E-08	1.60E-07	6.403
入出力装置 (デジタル制御機器)	不動作	2.49E-07	7.47E-14	1.41E-07	6.94E-07	3.05E+03	6.61E-08	4.64E-09	3.96E-08	2.13E-07	6.772
	誤動作	2.49E-07	7.47E-14	1.41E-07	6.94E-07	3.05E+03	6.61E-08	4.64E-09	3.96E-08	2.13E-07	6.772
ロジックカード (デジタル制御機器)	不動作	1.31E-06	8.44E-08	7.53E-07	3.64E-06	6.57E+00	9.84E-07	8.94E-08	6.54E-07	2.97E-06	5.766
ロードドライバ (デジタル制御機器)	不動作	3.38E-07	1.70E-10	2.05E-07	9.04E-07	7.30E+01	8.72E-08	5.59E-09	5.11E-08	2.88E-07	7.177
電源装置 (デジタル制御機器)	機能喪失	2.25E-07	9.95E-15	1.26E-07	6.45E-07	8.05E+03	6.13E-08	4.53E-09	3.71E-08	1.96E-07	6.586
光ケーブル (デジタル制御機器)	機能喪失	7.70E-08	7.78E-38	5.41E-09	2.73E-07	1.87E+15	2.91E-08	2.64E-09	1.85E-08	8.96E-08	5.830
光コネクタ (デジタル制御機器)	機能喪失	3.03E-08	6.96E-56	4.91E-11	1.17E-07	1.30E+24	1.81E-08	1.80E-09	1.16E-08	5.46E-08	5.507

表 4.10 に示すように、個別プラント故障率が異なるとした手法では、一部のデジタル制御機器に対して非現実的な故障率や EF の値となっている。一方、全プラント故障率が同じとして手法では、すべての機器に対して故障率値も EF も現実的な値が求められている。よって、プラント数が少ない場合でも、全プラントが同じ故障率であるとすれば、妥当な推定が可能であると考えられる。

4.1.8 機器故障率推定方法のまとめ

機器故障率の推定方法に関する検討結果から、今後整備を行う予定の 29 カ年データ推定以降においては、表 4.11 の方法を採用していくこととする。

表 4.11 29 カ年データ推定への反映、推定手法

	26 カ年データ報告書	29 カ年データ推定	効果
計算ソフト	WinBUGS	Stan	計算の高速化と収束性の向上。
超事前分布	一様分布	μ : 正規分布 : Half-Cauchy 分布	海外事前情報の導入とそれを可能とする事前分布形状の導入により、個別プラント故障件数の実態に合った故障率を計算することができる。
事前情報の導入	国内 26 カ年データ (故障が 0 件の場合は 0.5 件とする。)	NUREG/CR-6928 の 2010 年版による米国 SPAR 用推定値を事前情報とする。	
一般故障率算出	階層ベイズ手法により直接算出。	階層ベイズ手法の結果から収束性のよい個別プラント故障率のマージ(EPRI の火災発生頻度手法を利用)。プラント数が少ない場合は全プラント同じ故障率とする。	個別プラント故障件数と整合した一般故障率(未収束による非現実的値の回避)。
報告書掲載の分布形	WinBUGS モンテカルロの計算結果である平均値と分位点をそのまま掲載。	表 4.1 の方針により、モンテカルロ計算で得られた平均値または分位点を用いて対数正規分布に近似。	パラメトリック分布となり、PRA ソフトへの入力容易。

また、26 カ年データ報告書での故障率推定の問題点が、モンテカルロ計算の未収束、実故障件数から乖離した故障率推定値にあったことから、今後の故障率パラメータ推定の際には、以下の確認を行なうものとする。

- モンテカルロ計算では、収束確認を行う(少なくとも 2 Chains 以上(推奨 10Chains)で計算し Gelman Plot^[16]を用いる、running average により収束の傾向を目視する、など)。また、サンプルの自己相関が十分低いことも確認する。Gelman Plot の例は、4.1.6 項(図 4.19, 図 4.20)に、running average の例は、4.1.4 項に示している。

- 推定された個別プラントの故障率を用いたシミュレーションにより観測故障件数の予測分布を求め、それが観測されている故障件数と整合していることを確認する(予測分布の最頻値が個別プラントにおける観測故障件数に近い、など)。4.1.5 (2) b. 項に確認の方法と例を示している。

具体的な推定方法としては、次のようにまとめられる。また、これらの推定方法を適用した検討例を添付資料に示す。

◆ 利用ソフト

- サンプルの自己相関が小さいことが確認されている Stan コード。
- WinBUGS/OpenBUGS を使う場合は、thinning=50 などとして自己相関がないことを確認する。

◆ 超事前分布

- 対数平均値 μ ：正規分布
分布の中央値は、米国 SPAR 用推定値から導出した値 (μ_{US}) とする(後述)。
分布の分散 (σ_μ) は、表 4.12 のリストから機種の特性を考慮して選ぶ。
- 対数標準偏差 σ ：Half-Cauchy 分布
分布の A 値(中央値)は、表 4.12 のリストから機種の特性を考慮して選ぶ。

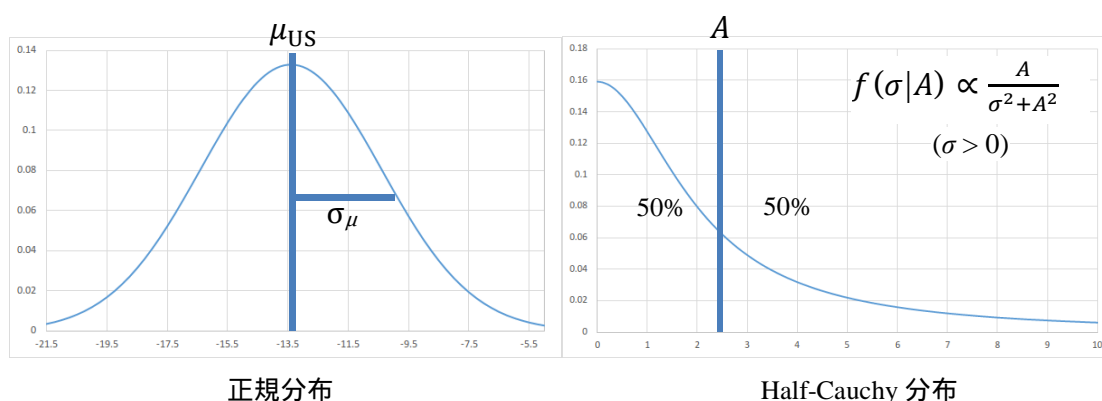


表 4.12 は、超母数 (μ, σ) の事前分布の形を決めるため、超母数の事前分布に対する故障率分布の EF を数値解析で求めたものである。事前分布を $p(\sigma, \mu|A, \sigma_\mu, \mu_{US})$ としたとき、この事前分布からサンプルした σ と μ を対数正規

分布に直接代入してサンプルした故障率 λ の分布から EF を算出している。機器故障率の事前分布が、事前分布としての十分な不確かさを持つように超母数の事前分布を決定する。ここでは、EF が約 20 となるように、表 4.12 から $A = 0.5$ 、 $\sigma_{\mu} = 1.0$ とした。添付資料にまとめた試評価ではこの値を用いている。

表 4.12 超母数の事前分布からサンプルした故障率分布(事前故障率分布)の EF

A	σ_{μ}	EF
0.25	1.0	8.7
0.5	1.0	18.7
0.75	1.0	50.5
0.75	1.5	78.5

◆ サンプルング

- Chain 数：2～10
- サンプル数:10 万以上
- 収束判定で収束しない場合にはサンプル数を増やし（50 万、100 万など） その場合でも収束しない場合には σ のサンプルング範囲を制限する。

◆ 収束判定

- Gelman Plot（Shrink Factor 値 1.1 以下を収束の基準とする）
- Running Average（目視確認）

◆ 一般故障率推定手法

- EPRI の火災発生頻度推定手法を利用。

◆ 評価確認

- 推定された故障率パラメータを用いてそのプラントにおける故障件数の予測分布を計算し、実際の故障件数と整合していること。

◆ 推定結果の分布形

- モンテカルロ計算結果で得られた平均値または分位点を用いて対数正規分布に近似する。

超事前分布のパラメータ算出式などを以下に示す。

(1) μ に関する正規分布の中央値 (μ_{US})

米国 SPAR 用推定値では、時間故障率を gamma 分布、デマンド故障確率を beta 分布で表しており、これらの分布の平均値を利用して μ の中央値 (μ_{US}) の値を求める。対数正規分布の平均値の式は以下の式で与えられる。

$$\text{米国平均値} = e^{\mu + \frac{\sigma^2}{2}}$$

σ の値が σ の分布の中央値であるとし、 μ の値は μ の分布の平均値 μ_{US} とすると、 μ_{US} は以下の式で与えることができる。

$$\mu_{US} = \ln(\text{米国平均値}) - \frac{\sigma^2}{2}$$

(2) のサンプリング範囲の制限

外れ値を効率的に除外する方法として、対数標準偏差 を用いる方法を考える。対数正規分布を考えたとき、外れ値が頻繁に出るような σ と μ の組み合わせとして確率変数 (故障率) の分散が大きい場合が考えられる。ゆえに外れ値が生じやすい σ と μ の組み合わせを分散の値を基準に決定する。対数正規分布に従う確率変数の分散の式より次のように整理される。

$$\begin{aligned} \text{分散} &= e^{2\mu + \sigma^2} (e^{\sigma^2} - 1) = e^{2\mu + 2\sigma^2} - e^{2\mu + \sigma^2} \\ &< e^{2\mu + 2\sigma^2} < a (= \text{分散の上限}) \leftrightarrow \sigma^2 < \frac{1}{2} \ln a - \mu \end{aligned}$$

これより のサンプリング制限を実施する場合には、

$$\sigma^2 > \frac{1}{2} \ln a - \mu$$

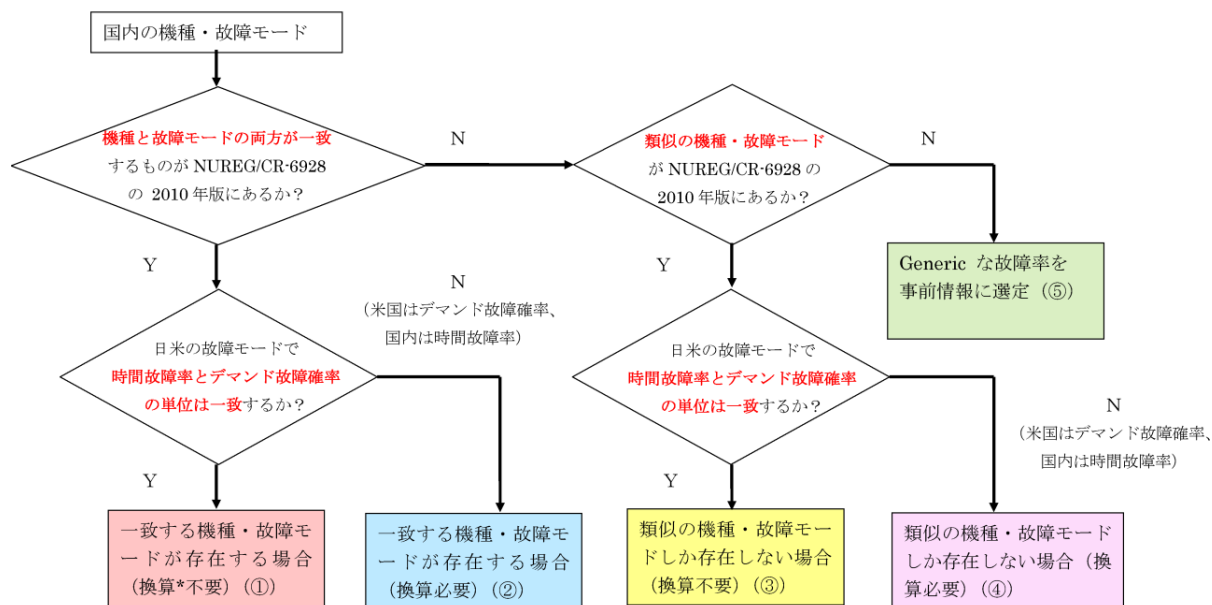
となる の値を除外して計算を行う。なお、米国データを参考にするると分散の値は $10^{-12} \sim 10^{-8}$ 程度であるため $a = 1$ は十分保守的でありほとんどの場合推定結果に影響は生じない。

(3) 事前情報の選定手法

国内故障率推定の事前情報として、米国 NRC の PRA SPAR モデル用に整備された米国推定値を用いる。NUREG/CR-6928 には、米国 INPO の EPIXなどをデータ源とした故障率データセットが記載されているが、その更新版である Component Reliability Data Sheets Update 2010 (以下 6928 updated 版) がある。NUCIA の PRA データベースと 6928 updated 版とでは、機器、故障モードについて、一致するものと一致しないものがあり、一致しないものについては事前情報の選定ルールを設定して、適切な事前情報を選定する必要がある。

また、国内では起動失敗などのデマンド故障率を、時間故障率とサーベランス間隔から算出して PRA に用いる場合があるため、米国データにおいてデマンド故障確率しかない場合には、時間故障率へ換算してデータを作る必要がある。

これらのことを考慮した事前情報の選定フローと設定方法を次に示す。



事前情報の選定フロー

一致する機種・故障モードが存在する場合（換算*不要）

一致する機種・故障モードがある場合には、それを事前情報に選定する。

（ * デマンド故障率の時間故障率への換算、以下同じ）

一致する機種・故障モードが存在する場合（換算必要）

機種・故障モードは一致するが、時間故障率・デマンド故障確率の単位が異なる場合。6928 updated 版のデマンド故障確率を q とし、サーベランス期間を $T_s(h)$ 、時間故障率を $(/h)$ とすると、 $=2*q/T_s$ で換算した $(/h)$ を国内の時間故障率の事前情報として使用する。なお、サーベランス期間は一般的に 1 カ月であるため、 $T_s = 720(h)$ として換算する。

類似の機種・故障モードしか存在しない場合（換算不要）

一致する機種・故障モードが存在しない場合でも、類似の機種・故障モードがあり、それをを用いることが妥当であると判断できる場合には、類似の機種・故障モードを事前情報に選定する。類似の機種・故障モードとは以下のものを指す。

a) 機種は一致するが機種の属性が完全には一致しない機種・故障モード

例：国内ではストレーナ/フィルターは“純水等”と“海水”にわけて定義しているが、これに対して 6928 updated 版では、機種として Self-Cleaning Strainer(FLTSC)が対応するものの、“純水等”と“海水”の属性の区別はない。このように機種の属性までは完全に一致しないが、類似の機種と判断できれば事前情報に適用する。

b) 機種は一致するが故障モードが完全には一致しない機種・故障モード

例：遮断器という機種は一致するが、国内の故障モードには誤開と誤閉が分けて定義されているのに対して、6928 updated 版では誤作動が定義されており完全に一致する故障モードがない。このように機種は一致するが故障モードまでは完全に一致しない場合であっても、類似の故障モードと判断できれば事前情報に適用する。

c) a)と b)の両方に該当する機種・故障モード。

類似の機種・故障モードしか存在しない場合（換算必要）

一致する機種・故障モードが存在しない場合でも、類似の機種・故障モードがあり、それを用いることが妥当であると判断できる場合には、類似の機種・故障モードの事前情報に選定する。ただし、時間故障率・デマンド故障確率の単位が異なるため、と同じ手法による換算を実施する。

Generic な故障率を事前情報に選定

妥当だと判断できる類似の機器・故障モードが何れもない場合、別途算出する Generic な故障率を用いる。妥当と判断できる類似の機種・故障モードがないものを以下に例示する。

例 1：米国では、ストレーナとオリフィス以外の機種の故障モードには、閉塞はない。ストレーナ、オリフィス以外の国内の機種の閉塞には、Generic な事前情報を適用する。

例 2：国内の放射線検出器、リミットスイッチ、コントローラ、演算器、カード、警報設定器、ヒューズ、制御ケーブルといった機種は、一致する機種が 6928 updated 版にはなく、これらの機種の事前情報には Generic な事前情報を適用する。

Generic な事前情報として 6928 updated 版での機種分類を参考として、以下の機種を用意する。

- ・ 弁
- ・ ストレーナ類
- ・ 原子炉保護系
- ・ その他
- ・ 逃し弁類
- ・ 加熱・換気系
- ・ 電気系

(4) 評価対象とするプラント数が少ない場合

デジタル制御機器のように ABWR 特有の機器では、データベースが整備されているプラント数が実質的に 4 基しかなく、そのような場合には、個別プラントの違いが生じず、階層ベイズを適用すると収束性に問題が生ずることがある。このようなケースにおいても、以下の簡略化した手法により一般故障率を推定することができる。

- 全てのプラントは同一の機器故障率を持つものとする。
(対数標準偏差 と対数平均 μ の不確かさは考慮しない)
- 各プラントにデータ収集確率を考慮する。
- 事前分布の EF は 20 とする ($= \ln(20)/1.645$)。
- 事前分布の平均値は米国データを用いる ($= \ln[\text{米国値}] - \sigma^2/2$)。

4.2 起因事象発生頻度

4.2.1 起因事象発生頻度の推定における課題

従来の起因事象発生頻度の試評価では、機器故障率と同様、個別プラントデータを用いた階層ベイズ手法により一般発生頻度を計算しているため、特に発生事象数がごく少数、あるいは 0 の事象については、機器故障率推定の場合と同様の問題点（収束性、超母数分布幅不足）を含む可能性がある。

従来の試評価でのモデルの概要を図 4.23 に示す。また、このモデルにより試評価を行った PWR での起因事象の例を図 4.24 に示す。主給水喪失や冷却材喪失は年発生頻度で評価されているが、オーバードレンについては、ドレン実施回数あたりとなるため、デマンド発生確率が適用されている。

主給水喪失の例からは、従来故障率と同様に超事前分布に一樣分布を用いており、その幅によっては事後分布の裾切など故障率推定と同様な課題が発生している。また、冷却材喪失の例では、発生経験がないところを 0.5 件と仮定しており、各種の推定方法によって推定値のばらつきが比較的大きくなっていることが分かる。このように、起因事象発生頻度の推定においても機器故障率と同様の課題が確認されることから、計算の収束性やサンプル間の自己相関の確認と合わせて今後適用すべき推定方法を検討する。

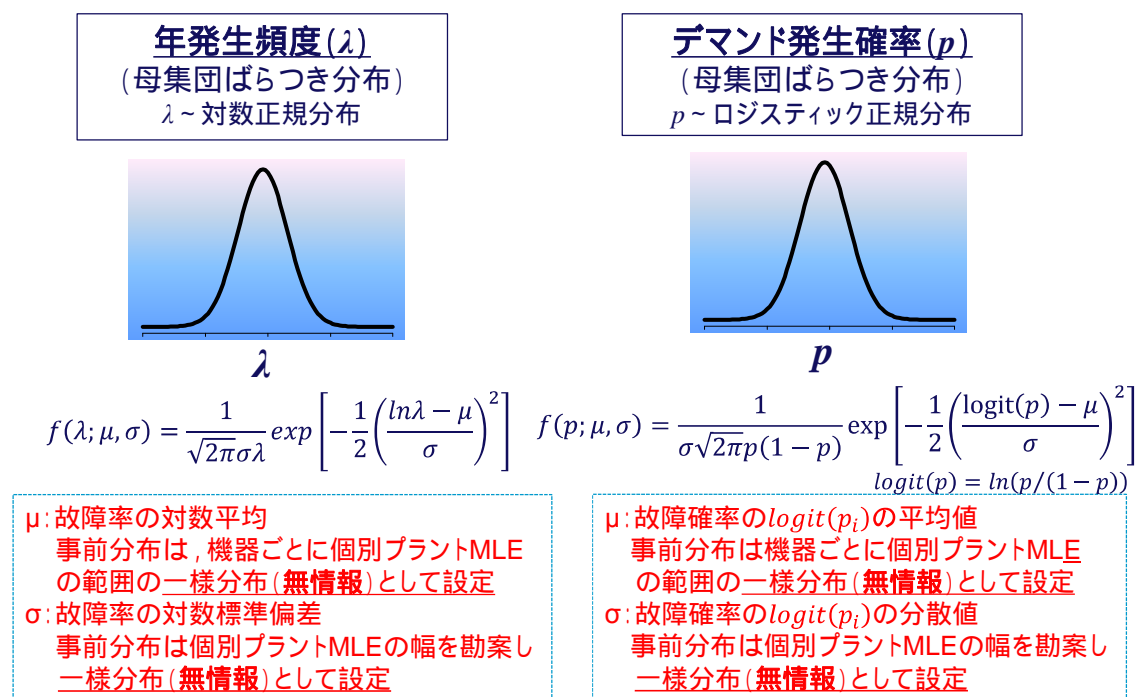


図 4.23 従来の起因事象発生頻度試評価のモデル

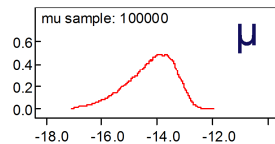
代表起因事象

起因事象	発生過程	発生件数	最尤推定値 [/年]又は[/回]	評価対象とした理由
主給水喪失	ポアソン過程	7件	1.6E-2 [/年]	発生実績あり
冷却材喪失	ポアソン過程	0件	1.1E-3 [/年]	発生実績なし
オーバードレン	二項過程	0件	5.6E-4 [/回]	-

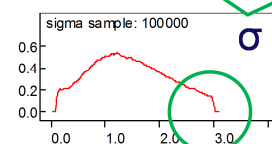
0.5件として計算

◆超母数の事後分布

主給水喪失



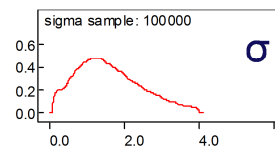
事前分布幅の不足
頻度に影響



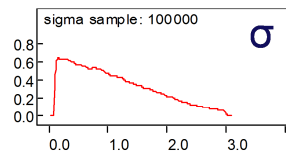
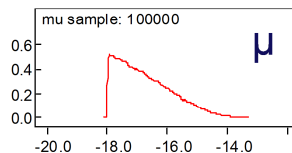
発生頻度

2.7E-2/y

4.6E-2/y



冷却材喪失



1.9E-3/y

発生頻度結果

起因事象	発生件数	最尤推定値 [/年]又は[/回]	階層ベイズ (本解析)	PSRでの 使用値	備考
主給水喪失	7件	1.6E-2 [/年]	2.7E-2*	1.2E-2**	
冷却材喪失	0件	1.1E-3 [/年]	1.9E-3*	9.9E-5**	PSRには 米国臨界時 間を含む
オーバードレン	0件	5.6E-4 [/回]	9.0E-4	2.5E-4	

*発電時間を使用 **暦時間を使用

PSRでは自由度1の χ^2 推定の50%値($\chi^2(1,0.5)/2T$)を使用(0.455/2T)

0件の事象では0.5件として事前分布を設定

図 4.24 従来の起因事象発生頻度試評価の例

4.2.2 起因事象発生頻度の推定方法の適用確認

起因事象発生頻度の推定における課題は、機器故障率の推定における課題と同様になっていることから、推定方法についても機器故障率と同様に更新していくことが考えられる。このため、従来試評価で用いていた一様分布の超事前分布を、機器故障率と同様に μ （正規分布）と（Half-Cauchy 分布）の組合せに変えて検討する。また、事前情報についても、該当する米国などの情報をモーメントマッチング法で適用することを検討する。PWR プラントからの例として冷却材喪失を、BWR プラントからの例として外部電源喪失を取り上げ、手法の適用性を確認する。また、計画外手動停止や計画停止に関する事象についても検討する。

(1) 冷却材喪失（PWR）での適用確認

事前情報として米国 NRC の評価値 IE2012^[20] から very small LOCA（米国では 1992 年以降 2 回の経験有）を利用し、モーメントマッチング法により、超事前分布の超母数 μ （正規分布）と（Half-Cauchy 分布）の分布を設定した。その結果を図 4.25 に示す。

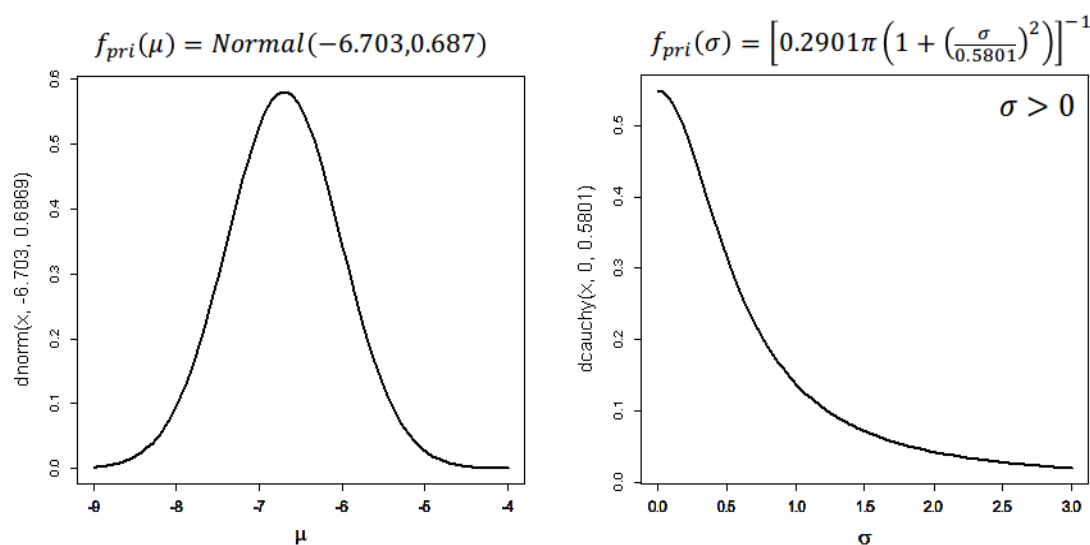
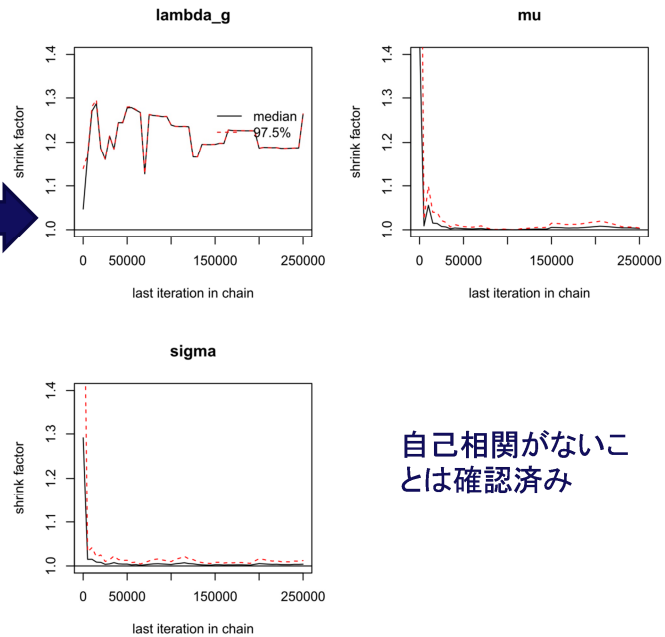


図 4.25 冷却材喪失における超母数の設定

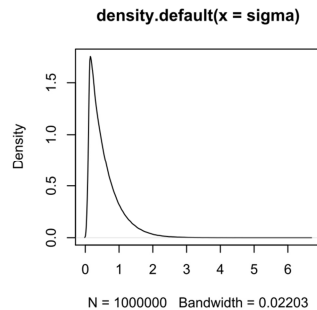
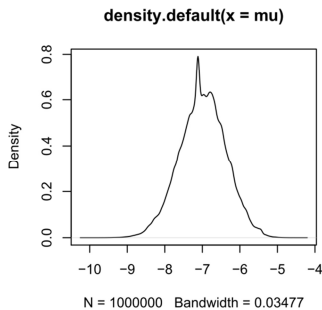
設定した超事前分布を用いて Stan により計算した結果を図 4.26 と図 4.27 に示す。Stan への変更と米国評価値の事前分布利用により、自己相関、超母数分布幅不足の問題は解決されており、収束性についても概ね改善がみられる。一般発生頻度の収束性の問題は依然として残るが、個別発生頻度は収束しているため、EPRI 手法に基づくマージにより一般発生頻度を求めることが可能である。

- ◆25万回 × 4chains
- ◆Gelmanプロット
- ◆一般発生率は収束していない。
- ◆ハイパーパラメータは収束している。
- ◆個別故障率は収束している(確認)



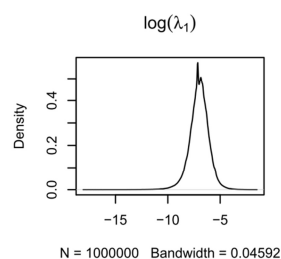
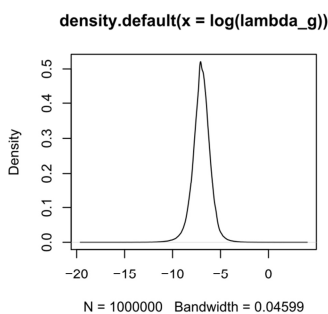
自己相関がないことは確認済み

収束性

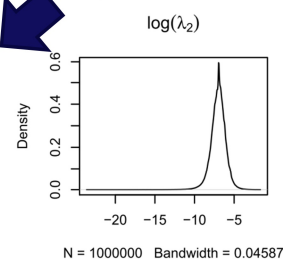


◆ μ が未収束

◆ σ 幅不足は解消している。

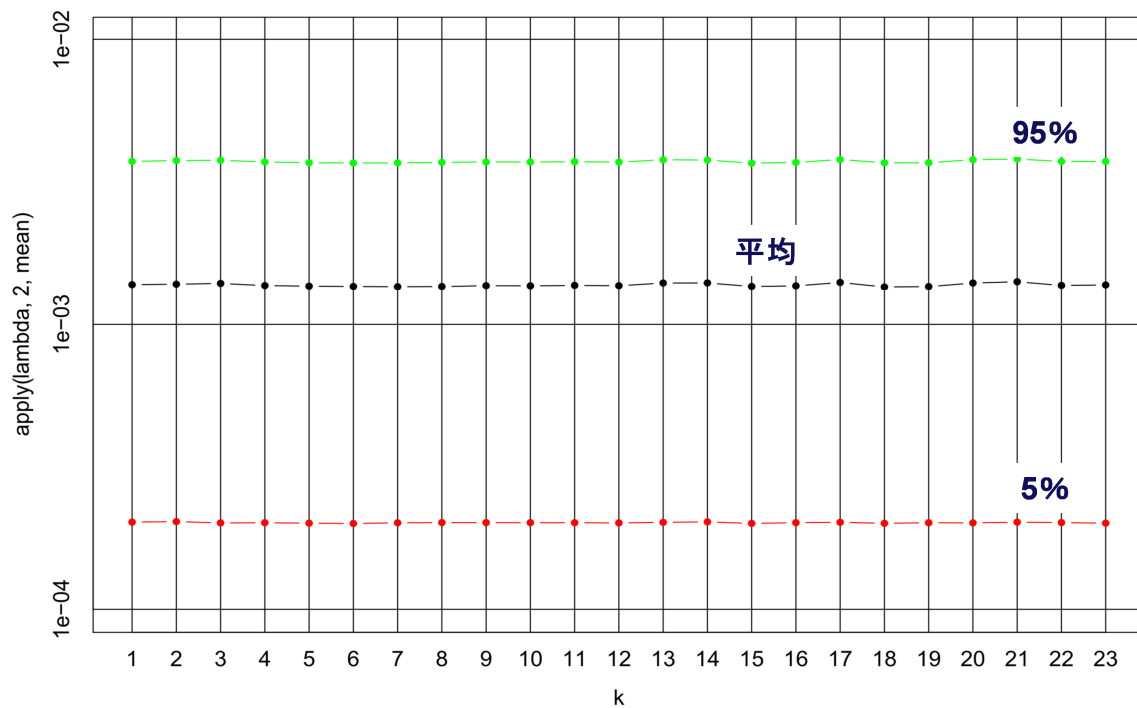


◆個別発生頻度も多少サンプル不足

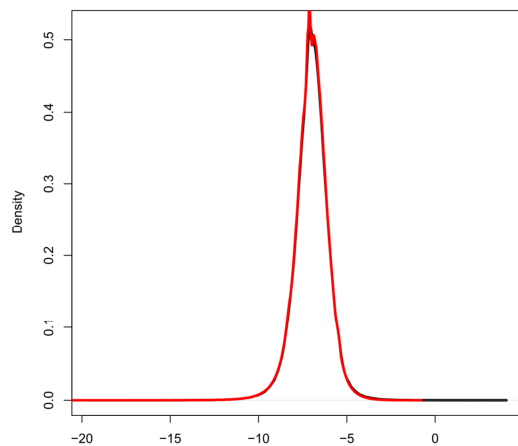


事後分布形

図 4.26 冷却材喪失における推定計算の状況



個別プラントの推定結果



	平均	5%	50%	95%
直接計算	1.9E-3	2.0E-4	9.3E-4	3.9E-3
マージ	1.4E-3	2.0E-4	9.2E-4	3.7E-3
JANSI 試算	1.7E-3	3.4E-5	4.2E-4	5.0E-3

黒: 階層ベイズ直接計算の結果

赤: 個別結果のマージ

本件の場合にはあまり相違がない。

一般発生率における直接計算とマージ

図 4.27 冷却材喪失における推定結果

以上のように、機器故障率と同様の手法は起因事象である冷却材喪失にも適用性を有すると考えられる。なお、個別プラント間の推定値にあまり違いがないのは、本事象は国内では発生経験のない0件の事例であり、個別プラント同士の発生頻度の差が少ないためではないかと考えられる。

(2) 外部電源喪失（BWR）での適用確認

事前情報として米国NRC2010^[21]の外部電源喪失頻度(37回/1421.4臨界年;0.026/臨界年)を利用し、モーメントマッチング法により、超事前分布の超母数 μ （正規分布）と（Half-Cauchy分布）の分布を設定した。その結果を図4.28に示す。

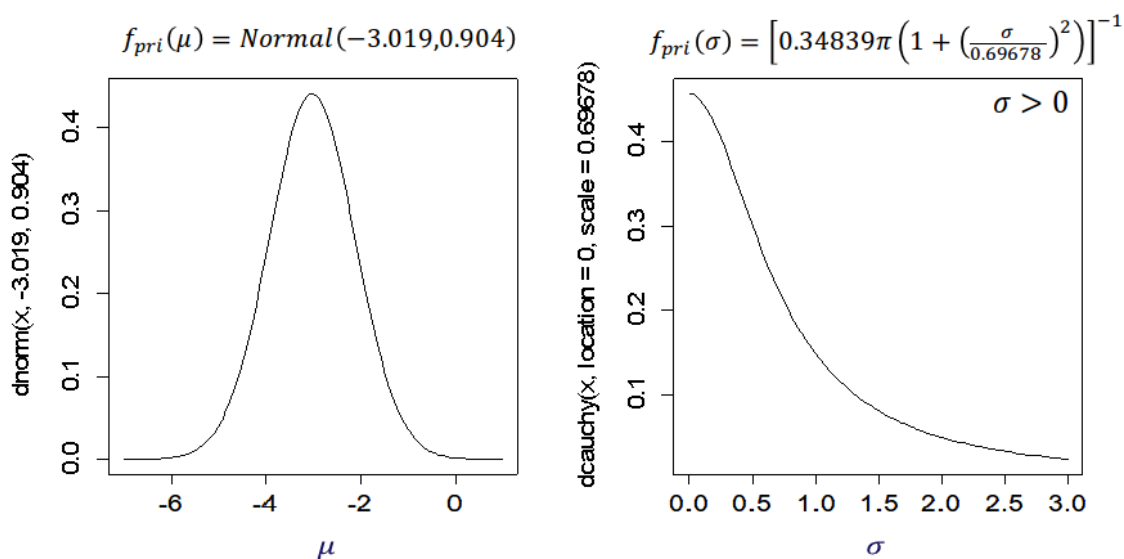
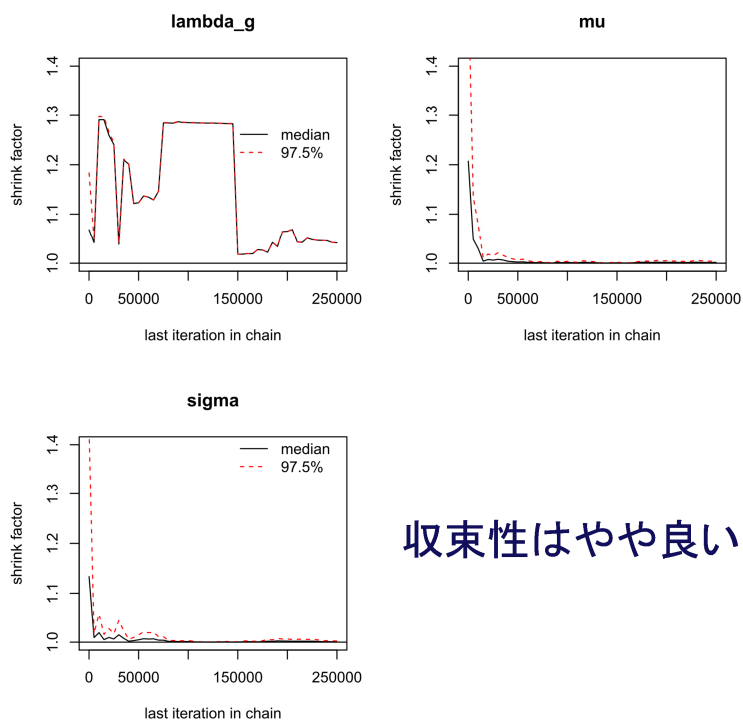


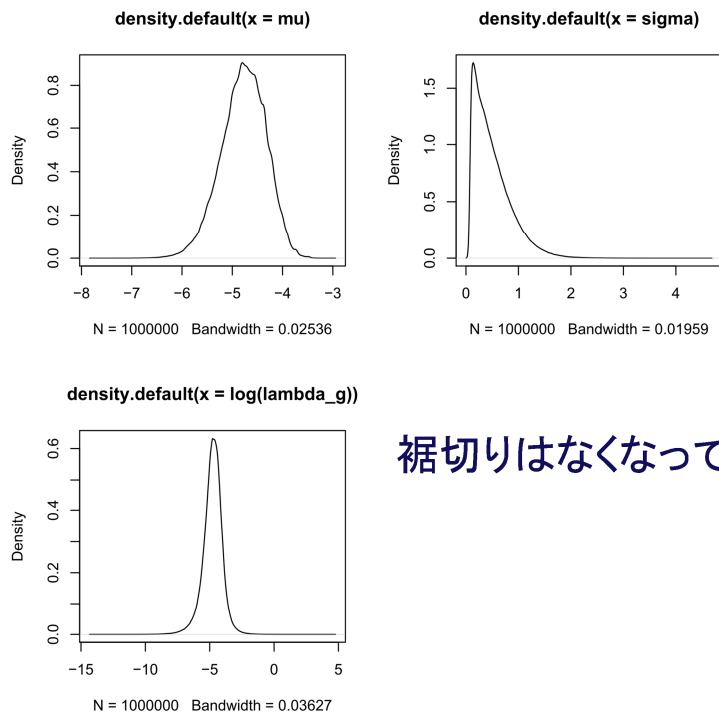
図 4.28 外部電源喪失における超母数の設定

設定した超事前分布を用いて Stan により計算した結果を図4.29と図4.30に示す。収束性や事後分布の裾切りは改善されているが、発生頻度は、0.5件を事前情報として仮定した一様分布を超事前分布とした従前推定に比較して大きくなっている。これは、今回の事前情報に米国評価値を用いていることによると考えられるが、国内データでの更新も推定には反映されており、推定結果は事前情報とした米国評価値よりは小さな値となっている。また、一般発生頻度の直接計算と EPRI 手法によるマージは同等の結果となっている。推定結果の解釈については、米国と国内での起因事象状況の解釈とも合わせて検討していくことが考えられる。



収束性はやや良い

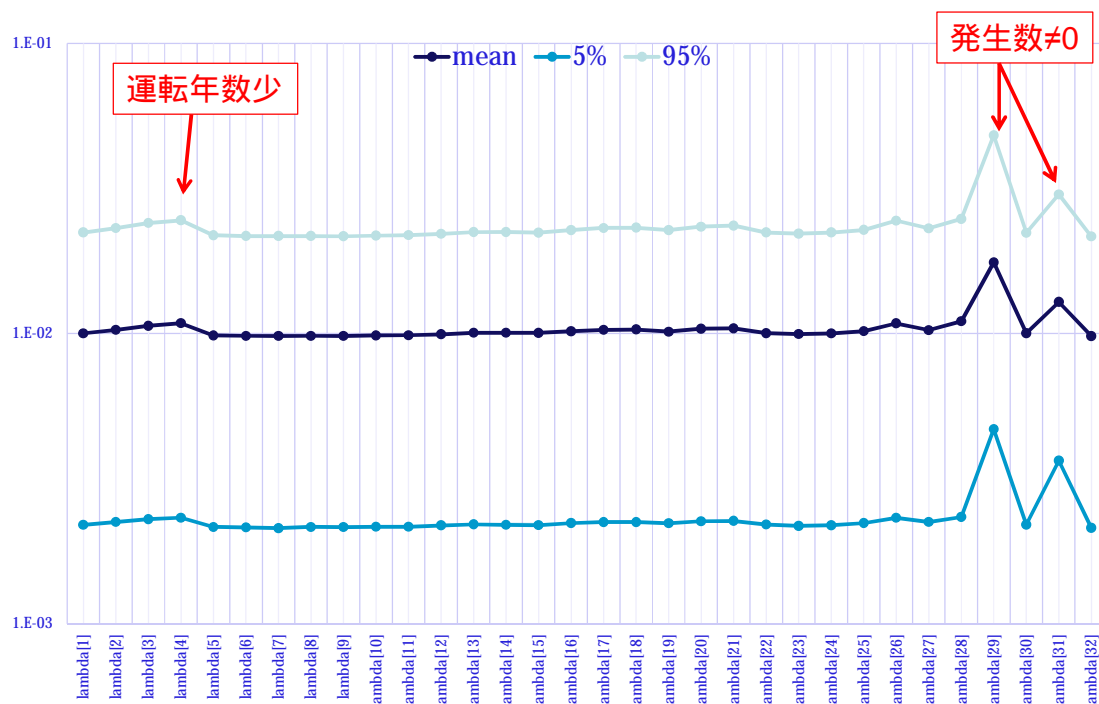
収束性



裾切りはなくなっている

事後分布形

図 4.29 外部電源喪失における推定計算の状況



個別プラントの推定結果

	平均	5%	50%	95%
直接計算	1.1E-2	2.3E-3	8.8E-3	2.5E-2
マージ	1.0E-2	2.3E-3	8.7E-3	2.4E-2
JANSI 試算	6.0E-3	3.4E-5	1.5E-3	1.8E-2

一般発生率における直接計算とマージ

図 4.30 外部電源喪失における推定結果

(3) 従属性を有する計画外手動停止事象への適用確認

起因事象と緩和系に従属性を有する事象がプラントの計画外手動停止事象として起因事象に選定される場合があり、何れも国内では発生経験のない事象となっている。このような起因事象に対する適用を確認した。検討対象とした起因事象と対応する米国 SPAR 用データ及び国内実績をまとめて表 4.13 に示す。

表 4.13 従属性を有する起因事象

起因事象名	米SPAR実績&推定					日本実績&事前分布		
	米実績 (回/延年)	推定 発生頻度	標準 偏差	Gamma(α, β)		日実績 (回/延年)	事前分布 μ	事前分布 σ
原子炉補機冷却系故障	0/2035.66	2.46E-4/y	1.05	0.5	2035.7	0/693.6	Lognormal(-8.86,2.1) (median=1.4E-4)	H-cauchy(1.05)
交流電源故障	11/1722.354	6.68E-3/y	0.29	11.5	1722.4	0/3366.2	Lognormal(-5.05,0.30) (median=6.4E-3)	H-cauchy(0.29)
直流電源故障	1/2035.66	7.37E-4/y	0.71	1.5	2035.7	0/1763.3	Lognormal(-7.47,0.94) (median=5.7E-4)	H-cauchy(0.71)

これらのデータに基づき、今回の μ （正規分布）と（Half-Cauchy 分布）の組合せで米国データを事前情報とした発生頻度の推定結果と、従来の一様分布（発生 0.5 件仮定）による推定結果の比較を表 4.14 に示す。今回の推定では、事後分布の裾切りもなく、階層ベイズでの個別プラントの発生率の収束性も確認されたが、従来の直接一般発生率を求める手法では未収束となったため、EPRI の手法によるマージで一般発生率を求めている。

表 4.14 従属性を有する起因事象の推定結果

起因事象名	米評価値から作成した事前分布による結果 [1/y]					0件⇒0.5件事前一様分布による結果 (JANSI試算) [1/y]				
	5%点	50%点	95%点	平均	EF	5%点	50%点	95%点	平均	EF
原子炉補機冷却系故障	1.38E-6	5.72E-5	1.21E-3	3.11E-4	19.4	3.7E-5	4.0E-4	4.0E-3	1.5E-3	10
交流電源故障	1.48E-3	2.68E-3	4.56E-3	2.84E-3	1.7	1.3E-5	1.1E-4	9.1E-4	3.2E-4	8.3
直流電源故障	5.02E-5	2.84E-4	1.27E-3	4.43E-4	4.46	2.2E-5	1.9E-4	1.5E-3	8.1E-4	7.9

事前情報(米国)を反映している
事前情報がないのでどれも同じ傾向

今回の推定では、事前情報に米国データを用いているため、推定結果にもこれが反映されており、原子炉補機冷却系故障や直流電源故障のように日米ともに発生経験が稀な事象では従来評価との差は比較的小さいが、交流電源故障のように日米の発生経験の差が比較的大きい場合には、従来評価との差も比較的大きくなっている。このため、推定結果の解釈については、米国と国内での起因事象状況の解釈とも合わせて検討していくことが考えられる。

また、国内ではタービンサポート系故障（油圧・機械式制御装置等の故障による計画外手動停止）やオーバードレン事象（PWR デマンド事象）など米国で設定されていない事象が選定される場合もあり、このような事象における事前情報の設定については、今後の詳細化で検討していくことが考えられる。

(4) ワイブル分布から推定している計画停止事象の検討確認

起因事象の中には、プラントの計画停止頻度のようにランダム発生とは異なるものも含まれる場合があり、このような起因事象では運転時間のワイブルフィッティングから平均運転時間の逆数を発生頻度とする評価が行われている。このような特徴的なケースについても、普通にランダム発生と仮定するのと相違があるかどうかを確認した。関係式は以下となる。

$$\begin{aligned} \cdot \text{運転時間 } t \text{ のワイブル分布 } (\lambda, \nu > 0) \quad & f(t) = \nu \lambda t^{\nu-1} \exp(-\lambda t^\nu) \\ \cdot \text{上記分布の平均値 (MTOP)} \quad & MTOP = \lambda^{-\frac{1}{\nu}} \Gamma(1 + 1/\nu) \end{aligned}$$

これまでの推定結果では、 $MTOP=394$ 日 ($\lambda=0.3253, \nu=8.546$) となっているが、指数分布のポアソン過程としたランダム発生で推定しても 400 日の結果となり、両者の結果はほとんど同じとなった。このことから、運転時間がワイブル分布に従うとするのであれば、本来起動からの時間によって停止する確率が変化するが、本評価の扱いでは平均値をとっているため、起動からの時間に係らないポアソン過程に従って発生するという想定になっていることが確認された。

(5) 起因事象の推定方法の検討まとめ

起因事象では発生経験のない 0 件発生の事象が多いため、機器故障率計算と同様に一般発生率の収束性や結果の現実性に問題がないかどうかを検討した。従来の超事前分布である一様分布による事後分布裾切りの問題は、今回の μ （正規分布）と（Half-Cauchy 分布）の組合せで米国データを用いた事前分布により、故障率パラメータと同様に解決可能であることが確認された。また、一般発生頻度の未収束に関しては、個別プラントの結果のマージによる EPRI 手法が適用可能であることが確認された。但し、推定値には米国データの情報が反映されるため、米国と国内での起因事象状況の解釈とも合わせて検討していくことが考えられる。また、米国で選定されていない事象における事前情報の設定については、今後の詳細化でさらに検討していくことが考えられる。

4.3 共通原因故障パラメータ

3.3 節に示した問題点と解決方法を整理すると表 4.15 のとおりとなる。なお、データ収集（CCF 判定）の Quality Assurance が最重要因子の一つと考えられるが、本報告書のスコープ外とする。

表 4.15 共通原因故障パラメータに係る問題点と解決方法

問題点	3. パラメトリック分布にならない
<p>(1) 国内評価値を信用して使えるようにするためにはどうすればよいのか？</p> <p>国内主要機器の CCF パラメータが米国 NRC の SPAR モデルで使用している値よりも大きくなったため、国内値の使用を躊躇する向きがある。</p>	<p><u>国内評価値が大きい理由：</u> 故障絶対数が米国に比べて少ないため、CCF の割合が相対的に大きくなっていると考えられる。</p> <p><u>対応案：a</u> 米国の値を事前分布として、国内のデータ（インパクトベクトル）でベイズ更新する。</p> <p><u>対応案：b</u> インパクトベクトルの精査により、複数機故障件数が小さくなれば CCF の割合も小さくなる。[電力レビューの結果による。今回は対象外]</p>
<p>(2) CCF パラメータの不確かさを PRA に如何に反映させるか？</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ ファクタ同士に相関がある。 ・ MGL パラメータ同士にも相関がある。 	<p>（CCF パラメータに点推定値を使うのであれば、特に考慮する必要はない）</p> <p>必要ならば、CCF パラメータに不確かさを考慮した場合の影響評価を実施する。[今回は対象外]</p>

4.3.1 米国値を事前分布としたベイズ更新

米国のインパクトベクトルを利用し、ファクタの事後分布(CCCG=3 の例)を推定しようとしたとき、インパクトベクトル $I=\{N_1, N_2, N_3\}$ の要素 N_1, N_2, N_3 (複数機故障の件数)は、それぞれ $_1, _2, _3$ の確率で生ずる。すなわち、 N_1, N_2, N_3 は($_1, _2, _3$)をパラメータとする多項分布に従う^[5]。

$$\Pr(N_1, N_2, N_3 | \alpha_1, \alpha_2, \alpha_3) = \frac{\Gamma(N_1 + N_2 + N_3)}{\Gamma(N_1)\Gamma(N_2)\Gamma(N_3)} \alpha_1^{N_1} \alpha_2^{N_2} \alpha_3^{N_3} \quad \alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3 = 1$$

((・) は、ガンマ関数)

ファクタの事後分布 $_{post} (_1, _2, _3 | I)$ は、ベイズ統計手法により、下式で表される。

$$\pi_{post}(\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3 | I) = \frac{\Gamma(A_1 + A_2 + A_3)}{\Gamma(A_1)\Gamma(A_2)\Gamma(A_3)} \alpha_1^{A_1-1} \alpha_2^{A_2-1} \alpha_3^{A_3-1} \quad A_k = 1 + N_k \quad (k=1,2,3)$$

$\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ の点推定値 $\alpha_{1,MLE}, \alpha_{2,MLE}, \alpha_{3,MLE}$ は、

$$\alpha_{1,MLE} = \frac{N_1}{N_1 + N_2 + N_3} \quad \alpha_{2,MLE} = \frac{N_2}{N_1 + N_2 + N_3} \quad \alpha_{3,MLE} = \frac{N_3}{N_1 + N_2 + N_3}$$

となる。実際に米国値を事前分布としてベイズ更新すると、下記ようになる。

1. 米国インパクトベクトル $I_U = \{N_{U1}, N_{U2}, N_{U3}\}$ により推定

$$\pi_U(\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3 | I_U) = \frac{\Gamma(A_{U1} + A_{U2} + A_{U3})}{\Gamma(A_{U1})\Gamma(A_{U2})\Gamma(A_{U3})} \alpha_1^{A_{U1}-1} \alpha_2^{A_{U2}-1} \alpha_3^{A_{U3}-1} \quad A_{Uk} = 1 + N_{Uk} \quad (k=1,2,3)$$

2. これを事前分布として我が国のインパクトベクトル $I_J = \{N_{J1}, N_{J2}, N_{J3}\}$ でベイズ更新する。

$$\pi_{JU}(\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3 | I_J, I_U) = \frac{\Gamma(A_{JU1} + A_{JU2} + A_{JU3})}{\Gamma(A_{JU1})\Gamma(A_{JU2})\Gamma(A_{JU3})} \alpha_1^{A_{JU1}-1} \alpha_2^{A_{JU2}-1} \alpha_3^{A_{JU3}-1}$$

$$A_{JUK} = 1 + N_{Uk} + N_{Jk} \quad (k=1,2,3)$$

3. 結局、インパクトベクトルを $N'_k = N_{Uk} + N_{Jk}$ とすればよい。

$$\hat{\alpha}_k = \frac{N'_k}{N'_1 + N'_2 + N'_3} \quad (k=1,2,3) \quad \hat{\beta} = \frac{N'_2 + N'_3}{N'_1 + N'_2 + N'_3}, \hat{\gamma} = \frac{N'_3}{N'_2 + N'_3}$$

(ファクタの最尤値)

(MGL パラメータの最尤値)

以上より、米国値を事前分布としてベイズ更新すると表 4.16 のとおり、インパクトベクトル、ファクタ、MGL とともに米国値と同じオーダーとなる。

表 4.16 非常用ディーゼル発電機の例

故障モード: 起動失敗			事前分布(SPAR)を国内データで更新			SPAR ^[2] : 1997/1/1 - 2010/12/31		
CCCGサイズ ^(注2)			CCCG=2	CCCG=3	CCCG=4	CCCG=2	CCCG=3	CCCG=4
BWR + PWR	インパクト ベクトル	N ₁	273.72	407.26	540.89	231.04+3.6	347.10+4.86	462.80+5.832
		N ₂	4.30	3.69	3.354	2.2	1.54	1.472
		N ₃	—	2.83	2.665	—	1.02	1.072
		N ₄	—	—	2.095	—	—	0.502
	α ファクタ	α ₁	0.984527	0.984254	0.985221	0.9907250	0.9927790	0.9935420
		α ₂	1.55E-02	8.92E-03	6.11E-03	9.27E-03	4.34E-03	3.12E-03
		α ₃	—	6.83E-03	4.85E-03	—	2.88E-03	2.27E-03
		α ₄	—	—	3.82E-03	—	—	1.06E-03
	MGL	1-β	0.984527	0.984254	0.985221	9.91E-01	9.93E-01	9.94E-01
		β	1.55E-02	1.57E-02	1.48E-02	9.27E-03	7.22E-03	6.46E-03
		γ	—	4.34E-01	5.87E-01	—	3.98E-01	5.17E-01
		δ	—	—	4.40E-01	—	—	3.19E-01

このように日米のインパクトベクトルを合算して利用することが可能であり、我が国のデータのみを用いた場合に CCF 割合が大きくなる影響は緩和され（SPAR 値より多少大きいが桁は同程度）、CCF 件数が少ない場合にも対応可能であることがわかった。

なお、NRC SPAR のデータには、全機種 of インパクトベクトルを合算して作った “Generic Distributions” があり、CCF データがない場合にはこれを使うこととしている。

4.3.2 今後の課題解決に向けて

共通原因故障パラメータの推定プロセスに関する現状の課題として、幾つかの要因が考えられる。これらを整理したものを表 4.17 に示す。

表 4.17 共通原因故障パラメータ推定プロセスにおける現状の課題

	作業ステップ	結果に確信をもてない要因
	対象（冗長）機器・系統の特定	故障データ登録時（NUCIA）母集団を十分に把握できていない。
	対象機器トラブル（ \Leftarrow NUCIA）の分析 劣化程度 p /原因共有性 c /同時性 q の数値化	<ul style="list-style-type: none"> ・トラブルが十分に把握できていない。 ・(p, c, q) の工学的判断は妥当か。 (p, c, q) に大きい数値がつくと CCF 数が大となる。
	(p, c, q) から “公式” によりインパクトベクトル (N_1, N_2, \dots) を算出	なし
	インパクトベクトルから “公式” により CCF パラメータ（ α ファクタ、MGL）を算出	なし 点推定値 一意に決まる。 ベイズ推定 ディリクレ分布（ α_i ） 米国評価値を事前分布にしたベイズ推定手法は適用可能。

推定プロセスにおいては、まず共通原因故障に関する故障データを収集する必要があるが、現場での故障検知、原因分析、データ登録の過程では、PRA の

対象範囲、共通原因故障分析の対象範囲が陽に定義されていない現状がある。このため、故障データ登録の際、共通原因故障分析に必要な冗長数、劣化程度、原因共有性や同時性の情報が欠落する可能性が高いと考えられる。また、現状では独立機器故障のための判定と共通原因故障の判定プロセスが各々独立しているため、判定の一貫性を保つことが難しい状況にもなっている。この結果として、故障データ登録の際、共通原因故障分析に必要な情報が欠落してしまう可能性が大きくなっていると考えられる。このような状況により、共通原因故障に関するインパクトベクトルなどの判断ガイドラインは作ったが、情報が少ない分、分析者（所外者）の裁量の幅が大きくなる可能性に注意する必要がある。例えば、米国 NRC においては、独立機器故障と共通原因故障のデータを一括して収集し、共通原因故障の割合や要因を分析することで、共通原因故障の低減に繋げる検討を行っている。このための故障データの分析例を表 4.18 に示す。

表 4.18 米国 NRC における共通原因故障の分析例^[*]

Component Type	PRA-Relevant Failure Modes	Systems Analyzed for the Component Type	Number of CCF Events ^a for System and Component Type	Number of Independent Failures for System & Component Type	Total Number of CCF Events ^a for Component Type	Total Number of Independent Failures for Component Type
Air-Operated Valves	Fail to Open	Auxiliary Feedwater (PWR)	42	197	191	505
	Fail to Close	High Pressure Injection (BWR)	2	28		
	Fail to Stay Closed	Isolation Condenser (BWR)	1	9		
		Main Steam Isolation (BWR/PWR)	146	271		
Batteries/Chargers	No Output, High Output	DC Power (BWR & PWR)	60	1,260	60	1,260
Check Valves	Fail to Open	Auxiliary Feedwater (PWR)	59	201	147	556
	Fail to Close	High Pressure Injection (BWR/PWR)	23/21	84/145		
	Fail to Stay Closed	Low Pressure Injection (BWR/PWR)	23/21	88/38		
Circuit Breakers	Fail to Open	DC Power (BWR/PWR)	8	112	116	989
	Fail to Close	AC Power (BWR/PWR)	82	746		
	Fail to Stay Closed	Reactor Trip Breakers (fail to open)	26	131		
Emergency Diesel Generators	Fail to Start, Run	Emergency Power (BWR/PWR)	131	1,346	131	1,346

NRC RIS 99-03 Resolution of GI-145 より一部抜粋

以上のことから、今後の課題解決に向けては、

機器故障と共通原因故障の対象範囲と収集情報を予め定義しておくこと

機器故障判定プロセスと合わせて共通原因故障判定を行っていくこと

など、必要な情報の収集過程をより信頼性の高いものとすることで、共通原因故障におけるより堅牢な判定を実現していくことが考えられる。

5 まとめ

弊協会では、今後の PRA の推進・活用に資するため、PRA 用パラメータとして、機器故障率、起因事象発生頻度、共通原因故障パラメータ、アンアベイラビリティ、復旧失敗確率、内部溢水発生頻度、内部火災発生頻度の整備を進めている。これまでのパラメータ推定の経験により見えてきた技術的課題を検討・整理する目的で、「PRA 用パラメータ専門家会議」を開催し、その検討成果として本報告書がとりまとめられた。対象とした検討項目は以下の通りである。

- ・ 機器故障率推定の階層ベイズ手法による超事前分布のあり方
- ・ 機器故障率推定の階層ベイズ手法による評価における収束性の向上
- ・ 機器故障率推定における一般故障率の導出方法
- ・ 起因事象発生頻度の推定方法の信頼性向上
- ・ 共通原因故障パラメータの推定方法の信頼性向上と今後の対応

本報告書の検討内容は、今後整備を予定している 1982 年度～2010 年度 29 カ年 56 基データを用いた機器故障率の推定などに反映していくとともに、必要な技術成果については、原子力学会の PRA 用パラメータ推定実施基準の改訂にも資することを想定している。

6 参考文献

- [1] “故障件数の不確実さを考慮した国内一般機器故障率の推定(1982 年度～2002 年度 21 ヶ年 49 基データ)”平成 21 年 5 月, (有)日本原子力技術協会
- [2] “故障件数の不確実さを考慮した国内一般機器故障率の推定(1982 年度～2007 年度 26 ヶ年 55 基データ)改定 1”平成 21 年 5 月, (有)日本原子力技術協会
- [3] “原子力発電所の確率論的安全評価用のパラメータ推定に関する実施基準：2010(AESJ-SC-RK001:2010)”平成 22 年 06 月, (一社)日本原子力学会
- [4] ニューシア原子力施設情報公開ライブラリー, <http://www.nucia.jp/>, (一社)原子力安全推進協会
- [5] A. Mosleh, et al, “Guidelines on Modeling Common-Cause Failures in Probabilistic Risk Assessment”, NUREG/CR-5485, Idaho National Engineering and Environmental Laboratory, Idaho Falls, ID., 1998.
- [6] 眞田高宥, 桐本順広, 吉田智朗, “PSA 入力用共通原因故障国内データ分析と信頼性パラメータの推定(機械品編)”, 平成 22 年 11 月, (一財)電力中央研究所
- [7] 吉田智朗, 眞田高宥, 桐本順広, “PRA 入力用共通原因故障国内データ分析と信頼性パラメータの推定(電気・計装品編)”平成 25 年 06 月, (一財)電力中央研究所
- [8] Stan Development Team, “Stan Modeling Language Users Guide and Reference Manual, Version 2.5.0,” <http://mc-stan.org>
- [9] Hoffman, Matthew D., and Andrew Gelman. "The no-U-turn sampler: Adaptively setting path lengths in Hamiltonian Monte Carlo." arXiv preprint arXiv:1111.4246 (2011).
- [10] Lunn, D., Spiegelhalter, D., Thomas, A. and Best, N. (2009) The BUGS project: Evolution, critique and future directions (with discussion), *Statistics in Medicine* 28: 3049-3082.
- [11] Crow, Edwin L., and Kunio Shimizu, eds. Lognormal distributions: Theory and applications. Vol. 88. New York: M. Dekker, 1988.
- [12] Fink, Daniel. "A compendium of conjugate priors." See <http://www.people.cornell.edu/pages/df36/CONJINTRnew%20TEX.pdf> (1997): 46.
- [13] Gelman, Andrew. "Prior distributions for variance parameters in hierarchical models (comment on article by Browne and Draper)." *Bayesian analysis* 1.3 (2006): 515-534.
- [14] S. A. Eide, et al, “Industrial-Average Performance for Components and

- Initiating Events at U.S. Commercial Nuclear Power Plants,” NUREG/CR-6928, USNRC, February 2007.
- [15] U.S. Regulatory Commission, “Component Reliability Data Sheet 2010,” USNRC, September 2012.
 - [16] A. Gelman, and D. B. Rubin. "Inference from iterative simulation using multiple sequences." *Statistical science* (1992): 457-472.
 - [17] S. Watanabe, "A widely applicable Bayesian information criterion." *The Journal of Machine Learning Research* 14.1 (2013): 867-897.
 - [18] Gelman, Andrew, et al. *Bayesian data analysis*. CRC press, 2013.
 - [19] EPRI, “An Improved Methodological Approach for Estimating Fire Ignition Frequencies”, Electric Power Research Institute, November 2011.
 - [20] “Rates of Initiating Events at U.S. Nuclear Power Plants 1988-2012”, USNRC, February 2013
 - [21] “Analysis of Loss of Offsite Power Events 2010 Update” , USNRC, September 2012

添付資料 機器故障率推定の試計算と PRA モデルへの適用例

添付 1. 機器故障率推定の試計算

「故障件数の不確実さを考慮した国内一般機器故障率の推定(1982年度～2007年度26ヵ年55基データ)」「(26ヵ年データ報告書)での手法(旧手法)を改良した機器故障率の推定手法(新手法)による試評価を行った(新手法の詳細については4.1.8節を参照のこと)。評価条件を下表に示す。評価データは旧手法と同じ26ヵ年データを使用した。

評価条件		新手法 (本報告書による手法)	旧手法 (26ヵ年データ報告書)
解析ツール		STAN	WinBUGS
サンプリング回数		100000	300000
Chain 数		10	1
Thinning 数		1	3
バーンイン回数	時間	10000	10000
	デマンド	10000	10000
超事前分布	μ	正規分布 (μ_{US} は米国推定値より設定し、 σ は 1.0 と設定。)	一様分布 (個別プラント最尤推定値より上下限を設定。)
		Half-Cauchy 分布 (A を 0.5 と設定。)	一様分布 ($0.1 < \mu < 4.0$ の範囲とする。)
一般機器故障率の導出		EPRI 手法(マージ)	母集団変動分布

新手法での計算結果を本文 4.1.8(3)項による事前情報の選定と合わせて添付表 1 - 1 (時間故障率)と添付表 1 - 2 (デマンド故障率)に示す。添付表 1 - 1 では、参考として ABWR の RPV インターナルポンプ関連機器の試評価の結果も合わせて示す。

新手法では、収束性を全て確認しており、裾切りのない超事前分布を使用したことから、ほとんど全ての故障モードが適切に計算されている。この結果、旧手法において発生していた一般故障率の平均値が個別プラント故障率の数倍となるような特異なケースなどは、新手法においては発生しなくなった。

新手法により旧手法での推定値が改善された例を次表に示す。平均値の低減に加えて旧手法では概して大きな EF であったところが、新手法では何れも改善されており、より安定的な機器故障率の推定が実施できている。

機種	故障モード	26ヶ年評価		新手法による評価		平均値の比 (新手法 / 26ヶ年)
		平均値 [1/h]	EF (近似)	平均値 [1/h]	EF (近似)	
電動ポンプ(常用待機, 海水)	起動失敗	7.8E-06	51.3	1.4E-06	4.0	0.17
電動弁(海水)	作動失敗	9.9E-07	22.4	1.1E-07	4.8	0.11
逆止弁	閉失敗	2.4E-07	90.0	5.3E-08	7.4	0.22
	内部リーク	9.0E-08	37.3	2.1E-08	2.9	0.23
逃がし安全弁 (BWR)	外部リーク	1.0E-07	10.7	2.4E-08	5.6	0.23
真空逃がし弁 (PWR)	作動失敗	8.1E-07	16.7	1.1E-07	4.3	0.14
ファン/ブロア	継続運転失敗	8.7E-07	30.2	2.3E-07	2.6	0.26
ダンパ	作動失敗	1.7E-07	23.6	5.1E-08	2.7	0.30
制御棒駆動装置(BWR)	挿入失敗	1.7E-07	69.3	3.0E-08	11.7	0.18
制御棒駆動装置(PWR)	挿入失敗	1.9E-07	32.5	3.7E-08	3.6	0.20
インバータ (PLR)	機能喪失	3.1E-05	23.6	3.7E-06	3.2	0.12
カード(半導体ロジック回路)	誤動作	5.4E-07	50.7	6.0E-08	2.7	0.11

機種	故障モード	26ヶ年評価		新手法による評価		平均値の比 (新手法 / 26ヶ年)
		平均値 [1/D]	EF (近似)	平均値 [1/D]	EF (近似)	
空気作動弁	閉失敗	6.0E-04	108.0	1.4E-04	4.6	0.24
安全弁	開失敗	1.7E-03	20.7	5.1E-04	6.1	0.31
	閉失敗	4.9E-03	46.6	9.8E-04	11.3	0.20

一方、今回の試評価では、次表のように旧手法に比して平均値が増加したケースも見られたが、推定結果のバランスなどから概して妥当な範囲と考えられる。また、何れの故障モードにおいても EF は安定的な値となった。

機種	故障モード	26ヶ年評価		新手法による評価		平均値の比 (新手法 / 26ヶ年)
		平均値 [1/h]	EF (近似)	平均値 [1/h]	EF (近似)	
ダンパ	作動失敗	1.7E-07	23.6	5.1E-08	2.7	0.30
	誤開又は誤閉	7.9E-09	5.4	1.8E-08	2.7	2.31
	閉塞	1.7E-08	7.6	3.4E-08	2.3	1.99
	外部リーク	7.9E-09	5.4	2.9E-08	2.4	3.69
	内部リーク	7.9E-09	5.4	1.3E-08	3.1	1.61
制御ケーブル	短絡	1.9E-10	6.1	1.0E-09	2.1	5.58
	地絡	6.9E-10	11.7	1.4E-09	2.0	2.03
	断線	7.3E-10	11.5	1.4E-09	2.0	1.90
遅延リレー	不動作	4.7E-09	6.8	1.4E-08	2.5	3.02
	誤動作	4.7E-09	6.8	1.4E-08	2.5	3.02
警報設定器	不動作	1.9E-09	7.8	8.1E-09	2.4	4.20
	誤動作	1.5E-08	21.8	1.2E-08	2.3	0.79
温度検出器	不動作	1.4E-09	6.1	5.1E-09	2.4	3.59
	高出力/低出力	1.2E-08	20.2	1.0E-08	2.2	0.86
リミットスイッチ	不動作	1.1E-08	9.9	1.1E-08	2.0	0.98
	誤動作	2.2E-09	8.1	6.7E-09	2.2	3.11
手動スイッチ	不動作	1.9E-09	7.3	3.8E-09	2.3	1.98
	誤動作	1.0E-09	5.3	4.1E-09	2.3	3.95
コントローラ	不動作	5.6E-09	8.1	2.0E-08	2.6	3.65
	高出力 / 低出力	3.2E-08	17.2	2.8E-08	2.4	0.89

これらのケースで平均値が増加した要因としては、新手法で米国データを事前情報に用いたことが考えられる。

なお、新手法では事前情報の設定等によって、結果に比較的大きな影響が生じる稀なケースが発生した。その代表例として、閉塞に関する故障率の試評価結果をまとめて次に示す。何れの機種においても閉塞が破損やリークより故障率は大きくなり、一般的な傾向からも異なる推定結果となった。

機種	故障モード	故障 件数 [件]	延べ 運転時間 [h]	新手法による評価						
				事前分布					平均値 [1/h]	EF (近似)
				選択ルール	米国対応機器	米国対応故障モード	故障率	μ		
タンク	破損	0	8.5E+07	ルール	Tank (TNK)	External Leak Small	3.3E-07	-15.06	5.7E-08	3.5
	閉塞	0	8.5E+07	ルール	(Others)	(Generic)	3.4E-04	-8.12	2.2E-07	2.2
配管 3インチ未満	リーク	0	4.7E+09	ルール	Piping Service Water System	External Leak Small	6.9E-10	-21.22	4.2E-10	4.7
	閉塞	1	4.7E+09	ルール	(Others)	(Generic)	3.4E-04	-8.12	6.5E-09	1.9
配管 3インチ以上	リーク	4	1.1E+10	ルール	Piping Service Water System	External Leak Large	1.4E-10	-22.83	6.9E-10	6.8
	閉塞	0	1.1E+10	ルール	(Others)	(Generic)	3.4E-04	-8.12	2.8E-09	1.9

このケースでは、故障モードとしての閉塞がそもそも米国 NRC の SPAR の機器非信頼度データにないことから、一般化した事前情報を設定している。一般化した事前情報を次表に、表中の各機種の内訳を添付表 1 - 3 に示す。一般化した事前情報の設定については、添付 2 に検討例を示す。

今後、具体的にパラメータを整備していく際には、このような事前情報の設定検討とは別に、推定値を適用する PRA モデルにおいて有用なパラメータであるかを考慮して進めていくことも考えられる。

一般化した事前情報	故障率
弁	8.60E-07
逃がし弁類	2.21E-07
原子炉保護系	1.58E-06
原子炉保護系(プロセスロジックのみ)	4.50.E-06
原子炉保護系(センサ/トランスミッタのみ)	9.89.E-07
加熱・換気系	8.27.E-06
電気系	3.39E-06
ストレーナ類	1.69E-06
その他	3.37E-04

また、事前情報に乏しく露出データも比較的少ない ABWR のデジタル制御関連機器においては、事前情報に用いた故障率が実績データとかけ離れている場合、事後分布の の推定値が大きくなり EF が非現実的な値となるケースが生じた。この原因として、評価対象とするプラント数が少ないことが考えられることから、4.1.8(4)項の対応策を適用した。この手法の適用により、次のような結果が得られ、一般故障率の推定としてデジタル制御機器についても適用できることを確認した。

機種 (デジタル制御機器)	故障モード	故障件数 [件]	延べ 運転時間 [h]	故障件数 推定値 [件]	事前情報			デジタル機器用手法			
					故障率	mu	sigma	5 % 点値	95 % 点値	平均値	EF
演算装置	不動作	0	8.9E+06	0.6	1.60.E-06	-15.00	1.821	7.31E-09	4.55E-07	1.34E-07	7.9
	誤動作	0	8.9E+06	0.6	1.60.E-06	-15.00	1.821	7.31E-09	4.55E-07	1.34E-07	7.9
インターフェース	不動作	0	3.8E+07	0.5	1.60.E-06	-15.00	1.821	4.14E-09	1.54E-07	5.03E-08	6.1
	誤動作	0	3.8E+07	0.5	1.60.E-06	-15.00	1.821	4.14E-09	1.54E-07	5.03E-08	6.1
入出力装置	不動作	0	2.6E+07	0.6	1.60.E-06	-15.00	1.821	4.90E-09	2.09E-07	6.66E-08	6.5
	誤動作	0	2.6E+07	0.6	1.60.E-06	-15.00	1.821	4.90E-09	2.09E-07	6.66E-08	6.5
ロジックカード	不動作	0	1.4E+06	0.6	1.60.E-06	-15.00	1.821	1.16E-08	1.50E-06	3.66E-07	11.4
ロードドライバ	不動作	0	1.6E+07	0.5	1.60.E-06	-15.00	1.821	5.85E-09	2.91E-07	8.98E-08	7.0
電源装置	機能喪失	0	2.9E+07	0.6	1.60.E-06	-15.00	1.821	4.66E-09	1.92E-07	6.15E-08	6.4
光ケーブル	機能喪失	0	8.4E+07	0.5	1.60.E-06	-15.00	1.821	2.80E-09	8.19E-08	2.81E-08	5.4
光コネクタ	機能喪失	0	1.7E+08	0.6	1.60.E-06	-15.00	1.821	1.91E-09	4.67E-08	1.66E-08	4.9

添付表 1 - 1 (1/3) 国内一般故障率 (26 ヶ年データ) の新手法による試評価結果 (時間故障率)

機種	故障モード	故障 件数 [件]	延べ 運転時間 [h]	26ヶ年評価			新手法による評価					EF ² (近似)		
				故障件数 推定値 ^{*1} [件]	平均値 [1/h]	EF ² (近似)	事前分布			平均値 [1/h]				
							選択ルール	米国対応機器	米国対応故障モード					
非常用ディーゼル発電機	起動失敗	46	1.6E+07	116.6	7.3E-06	2.5	ルール	Emergency Diesel Generator	Fail to Start	8.0E-06	-11.86	7.1E-06	1.9	
	継続運転失敗(24時間平均) ^{*3}	-	-	-	2.3E-04	1.7	非常用DG 継続運転失敗の故障率は、故障までの継続運転時間がワイブル分布に従うと仮定し、 ベイズ統計手法により推定したワイブルパラメータを用いて故障率を推定する。 従来手法においても収束性などに問題はなかったため、本計算では対象外とした。							未評価
	継続運転失敗(36時間平均) ^{*3}	-	-	-	1.9E-04	1.8								
	継続運転失敗(72時間平均) ^{*3}	-	-	-	1.4E-04	2.0								
電動ポンプ(非常用待機、純水)	起動失敗	4	8.0E+07	10.6	2.2E-07	10.2	ルール	Motor-Driven Pump	Fail to Start	3.8E-06	-12.61	2.2E-07	2.4	
	電動ポンプ(常用運転、純水)	29	9.8E+07	73.6	8.4E-07	6.5	ルール	Motor-Driven Pump	Fail to Run	3.5E-06	-12.68	7.8E-07	3.2	
	電動ポンプ(常用待機、純水)	2	4.7E+07	5.7	1.9E-07	10.7	ルール	Motor-Driven Pump	Fail to Start	2.6E-06	-12.97	2.4E-07	2.7	
	電動ポンプ(非常用待機、海水)	1	2.3E+07	3.6	3.5E-07	8.3	ルール	Motor-Driven Pump	Fail to Start	2.6E-06	-12.97	3.5E-07	3.0	
	継続運転失敗	2	1.4E+07	5.6	7.4E-07	11.9	ルール	Motor-Driven Pump	Fail to Run	3.5E-06	-12.68	6.6E-07	2.9	
	起動失敗	1	3.6E+06	2.9	7.8E-06	51.3	ルール	Motor-Driven Pump	Fail to Start	2.6E-06	-12.97	1.4E-06	4.0	
	起動失敗	22	8.7E+06	55.8	9.1E-06	8.6	ルール	Turbine-Driven Pump	Fail to Start	2.5E-05	-10.73	6.7E-06	3.3	
	継続運転失敗	10	1.0E+07	25.4	2.9E-06	4.5	ルール	Turbine-Driven Pump	Fail to Run	9.3E-06	-11.71	2.8E-06	2.2	
	起動失敗	3	1.7E+05	8.9	5.4E-05	3.4	ルール	Engine-Driven Pump	Fail to Start	1.4E-05	-11.29	3.7E-05	2.9	
	継続運転失敗 ^{*4}	-	-	-	2.1E-03	30.0	電動ポンプの起動失敗と継続運転失敗の故障率比を用いた工学的判断により推定するため、対象外とした。							
電動弁(純水)	作動失敗	25	1.2E+09	64.8	1.2E-07	27.6	ルール	Motor-Operated Valve	Loss of Function/ Fail to Control	6.6E-08	-16.66	5.5E-08	10.3	
	誤開又は誤閉	0	1.2E+09	1.8	3.1E-09	5.7	ルール	Motor-Operated Valve	Spurious Operation	3.4E-08	-17.32	4.8E-09	3.3	
電動弁(海水)	閉塞	2	1.2E+09	5.7	8.3E-09	8.9	ルール	(Valves)	(Generic)	8.6E-07	-14.09	1.3E-08	2.3	
	外部リーク	1	1.2E+09	3.6	7.4E-09	7.3	ルール	Motor-Operated Valve	External Leak Small	3.3E-08	-17.36	6.0E-09	3.1	
	内部リーク	2	1.2E+09	5.7	7.7E-09	9.2	ルール	Motor-Operated Valve	Internal Leak Small	1.0E-07	-16.23	9.5E-09	2.7	
	作動失敗	2	4.4E+07	5.5	9.9E-07	22.4	ルール	Motor-Operated Valve	Loss of Function	6.6E-08	-16.66	1.1E-07	4.8	
	誤開又は誤閉	0	4.4E+07	1.1	6.4E-08	10.1	ルール	Motor-Operated Valve	Spurious Operation	3.4E-08	-17.32	3.0E-08	5.3	
	閉塞	0	4.4E+07	1.1	6.4E-08	10.1	ルール	(Valves)	(Generic)	8.6E-07	-14.09	1.2E-07	3.3	
	外部リーク	0	4.4E+07	1.1	6.4E-08	10.1	ルール	Motor-Operated Valve	External Leak Small	3.3E-08	-17.36	3.0E-08	5.4	
	内部リーク	0	4.4E+07	1.1	6.4E-08	10.1	ルール	Motor-Operated Valve	Internal Leak Small	1.0E-07	-16.23	5.3E-08	4.5	
	作動失敗	21	6.3E+08	53.4	9.1E-08	4.0	ルール	Air-Operated Valve	Loss of Function	2.5E-07	-15.33	8.9E-08	2.2	
	誤開又は誤閉	3	6.3E+08	8.7	3.0E-08	15.2	ルール	Air-Operated Valve	Spurious Operation	1.3E-07	-15.97	2.0E-08	3.1	
	閉塞	1	6.3E+08	3.9	1.0E-08	6.4	ルール	(Valves)	(Generic)	8.6E-07	-14.09	1.9E-08	2.5	
	外部リーク	1	6.3E+08	3.9	1.0E-08	6.4	ルール	Air-Operated Valve	External Leak Small	5.5E-08	-16.84	1.1E-08	3.2	
空気作動弁	内部リーク	3	6.3E+08	9.1	4.0E-08	21.4	ルール	Air-Operated Valve	Internal Leak Small	9.7E-08	-16.27	2.0E-08	3.7	
	作動失敗	15	1.3E+08	38.4	4.7E-07	12.9	ルール	Hydraulic ic-Operated Valve	Loss of Function	4.9E-07	-14.66	3.1E-07	3.6	
	誤開又は誤閉	3	1.3E+08	8.0	1.2E-07	13.2	ルール	Hydraulic ic-Operated Valve	Spurious Operation	2.0E-07	-15.55	8.0E-08	3.1	
	閉塞	0	1.3E+08	1.6	2.9E-08	6.3	ルール	(Valves)	(Generic)	8.6E-07	-14.09	5.6E-08	3.0	
油圧作動弁	外部リーク	0	1.3E+08	1.6	2.9E-08	6.3	ルール	Hydraulic ic-Operated Valve	External Leak Small	2.2E-07	-15.44	3.8E-08	3.4	
	内部リーク	0	1.3E+08	1.6	2.9E-08	6.3	ルール	Hydraulic ic-Operated Valve	Internal Leak Small	2.9E-08	-17.49	1.7E-08	4.6	
	開失敗	3	8.4E+08	7.9	2.1E-08	11.9	ルール	Check Valve	Fail to Open	3.0E-08	-17.46	1.2E-08	3.0	
	閉失敗	13	8.4E+08	34.7	2.4E-07	90.0	ルール	Check Valve	Fail to Close	6.6E-07	-14.35	5.3E-08	7.4	
逆止弁	外部リーク	0	8.4E+08	1.5	5.0E-09	6.6	ルール	Check Valve	External Leak Small	1.1E-08	-18.50	3.8E-09	4.0	
	内部リーク	4	8.4E+08	11.1	9.0E-08	37.3	ルール	Check Valve	Internal Leak Small	3.1E-07	-15.12	2.1E-08	2.9	
	開閉失敗	4	1.9E+09	10.5	7.5E-09	8.1	ルール	Manual Valve	Fail to Open/Close	5.3E-07	-14.57	1.1E-08	2.2	
	閉塞	4	1.9E+09	10.8	8.0E-09	11.3	ルール	(Valves)	(Generic)	8.6E-07	-14.09	1.1E-08	2.3	
安全弁	外部リーク	0	1.9E+09	2.3	3.2E-09	4.7	ルール	Manual Valve	External Leak Small	2.6E-07	-15.28	5.3E-09	2.6	
	内部リーク	1	1.9E+09	4.0	3.2E-09	5.8	ルール	Manual Valve	Internal Leak Small	1.3E-07	-15.95	5.6E-09	2.6	
	閉失敗	0	2.2E+08	2.1	1.9E-08	5.1	ルール	Safety Valve	Fail to Open	1.2E-06	-13.78	4.0E-08	2.8	
	誤開	1	2.2E+08	3.9	2.9E-08	6.2	ルール	Safety Valve	Fail to Close	5.6E-07	-14.52	4.2E-08	2.8	
手動弁	閉失敗	0	2.2E+08	2.1	1.9E-08	5.1	ルール	Safety Valve	Spurious Operation	7.0E-08	-16.61	1.8E-08	3.7	
	外部リーク	0	2.2E+08	2.1	1.9E-08	5.1	ルール	Safety Valve	External Leak Small	2.8E-08	-17.52	1.2E-08	4.3	
	内部リーク	4	2.2E+08	10.8	1.2E-07	14.7	ルール	Safety Valve	Internal Leak Small	9.0E-08	-16.35	5.5E-08	3.3	

添付表 1 - 1 (2/3) 国内一般故障率（26 ヶ年データ）の新しい手法による評価結果（時間故障率）

機種	故障モード	故障 件数 [件]	延べ 運転時間 [h]	26ヶ年評価			新手法による評価					
				故障件数 推定値 ^{*1} [件]	平均値 [1/h]	EF ² (近似)	事前分布			平均値 [1/h]	EF ² (近似)	
							選択ルール	米国対応機器	米国対応故障モード			故障率 μ
逃がし安全弁（BVR）	開失敗	0	4.8E+07	1.1	1.0E-07	10.7	ルール	Safety Relief Valve	Fail to Open	-11.90	2.0E-07	2.8
	閉失敗	0	4.8E+07	1.1	1.0E-07	10.7	ルール	Safety Relief Valve	Fail to Close	-13.07	1.5E-07	3.0
	誤開	0	4.8E+07	1.1	1.0E-07	10.7	ルール	Safety Relief Valve	Spurious Operation	-15.36	7.4E-08	3.9
	外部リーク	0	4.8E+07	1.1	1.0E-07	10.7	ルール	Safety Relief Valve	External Leak Small	-17.67	2.4E-08	5.6
	内部リーク	0	4.8E+07	1.1	1.0E-07	10.7	ルール	(Relief Valves)	(Generic)	-15.45	7.2E-08	4.0
真空逃がし弁（PIR） 電磁弁	作動失敗	0	2.8E+07	0.9	8.1E-07	16.7	ルール	Power-Operated Relief Valve	Loss of Function	-15.25	1.1E-07	4.3
	作動失敗	6	1.6E+09	15.6	1.6E-08	13.1	ルール	Solenoid-Operated Valve	Loss of Function	-12.84	1.8E-08	2.1
	誤開又は誤閉	1	1.6E+09	3.9	4.1E-09	6.9	ルール	Solenoid-Operated Valve	Spurious Operation	-17.31	4.8E-09	3.0
	閉塞	0	1.6E+09	2.1	2.7E-09	5.0	ルール	(Valves)	(Generic)	-14.09	7.5E-09	2.5
	外部リーク	1	1.6E+09	3.8	3.6E-09	6.1	ルール	Solenoid-Operated Valve	External Leak Small	-17.31	4.8E-09	3.0
ファン/ブロー	内部リーク	1	1.6E+09	3.8	3.6E-09	6.1	ルール	Solenoid-Operated Valve	Internal Leak Small	-18.6E	6.8E-09	2.6
	起動失敗	1	4.5E+07	3.5	1.3E-07	8.7	ルール	Fan (FAN)	Fail to Start	-13.09	2.0E-07	2.8
	継続運転失敗	8	1.3E+08	21.0	8.7E-07	30.2	ルール	Fan (FAN)	Fail to Run	-12.17	2.3E-07	2.6
	継続運転失敗 ^{*4} （異常時）	-	-	-	5.2E-05	30.2	ルール	通常時と異常時の故障率が米国データと同等とした工学的判断により推定するため、対象外とした。				
	作動失敗	6	5.0E+08	17.1	1.7E-07	23.6	ルール	Hydraulic-Operated Damper (HOD)	Fail to Open/Close	-13.46	5.1E-08	2.7
ダンパ	誤開又は誤閉	0	5.0E+08	1.9	7.9E-09	5.4	ルール	Hydraulic-Operated Damper (HOD)	Spurious Operation	-17.02	1.8E-08	2.7
	閉塞	1	5.0E+08	3.7	1.7E-08	7.6	ルール	(Heating & Ventilation)	(Generic)	-11.83	3.4E-08	2.3
	外部リーク	0	5.0E+08	1.9	7.9E-09	5.4	ルール	(Heating & Ventilation)	(Generic)	-11.83	2.9E-08	2.4
	内部リーク	0	5.0E+08	1.9	7.9E-09	5.4	ルール	Motor-Operated Damper (DMP)	Internal Leak Small	-15.91	1.3E-08	3.1
	伝熱管破損	1	2.1E+08	3.8	2.8E-08	6.5	ルール	Heat Exchanger (HTX)	Internal Leak Small	-14.91	4.0E-08	2.9
熱交換器 ⁵	外部リーク	0	2.1E+08	2.1	2.4E-08	5.2	ルール	Heat Exchanger (HTX)	External Leak Small	-15.04	3.1E-08	3.1
	伝熱管閉塞	2	2.1E+08	6.5	6.5E-08	15.1	ルール	Heat Exchanger (HTX)	Loss of Heat Transfer	-14.72	5.3E-08	3.2
	破損	0	8.5E+07	2.1	5.1E-08	4.9	ルール	Tank (TK)	External Leak Small	-15.06	5.7E-08	3.5
	閉塞	0	8.5E+07	2.1	5.1E-08	4.9	ルール	(Others)	(Generic)	-8.12	2.2E-07	2.2
	外部リーク	1	7.0E+08	4.0	8.8E-09	6.0	ルール	(Strainers)	(Generic)	-13.41	2.0E-08	2.4
オフィス	内部破損	0	7.0E+08	2.3	6.4E-09	4.7	ルール	(Strainers)	(Generic)	-13.41	1.7E-08	2.5
	閉塞	0	7.0E+08	2.3	6.4E-09	4.7	ルール	Orifice	Plug	1.0E-06	1.5E-08	2.6
	外部リーク	1	2.5E+08	3.9	2.5E-08	6.0	ルール	Self-Cleaning Strainer (FLTSC)	External Leak Small	-14.09	4.2E-08	2.7
	内部破損	0	2.5E+08	2.2	1.8E-08	4.8	ルール	(Strainers)	(Generic)	-13.41	3.9E-08	2.7
	閉塞	0	2.5E+08	2.2	1.8E-08	4.8	ルール	Self-Cleaning Strainer (FLTSC)	Plugged	-13.10	4.2E-08	2.6
ストレーナ/フィルタ （海水等）	外部リーク	0	3.2E+07	1.4	1.2E-07	7.5	ルール	Self-Cleaning Strainer (FLTSC)	External Leak Small	-14.09	1.5E-07	3.4
	内部破損	1	3.2E+07	3.3	1.7E-07	10.2	ルール	(Strainers)	(Generic)	-13.41	2.4E-07	3.0
	閉塞	2	3.2E+07	5.5	3.6E-07	13.1	ルール	Self-Cleaning Strainer (FLTSC)	Plugged	-13.10	3.2E-07	2.8
	挿入失敗	6	5.8E+08	16.2	1.7E-07	69.3	ルール	Hydraulic Control Unit (HCU)	Fail to Operate	-17.36	3.0E-08	11.7
	挿入失敗	1	1.5E+08	3.0	1.9E-07	32.5	ルール	Control Rod Drive	Fail to Operate	-16.25	3.7E-08	3.6
制御棒駆動装置 ^{*6} (BVR) 制御棒駆動装置（PIR） PLR MG セット(BVR ^{*1}) RPS、CROM MGセット インバータ（PLB） インバータ（バイタル） 遮断器	機能喪失	14	6.0E+06	35.5	7.7E-06	4.6	ルール	Motor Control Center (MCC)	Fail to Operate	-15.28	4.5E-06	4.1
	機能喪失	0	1.7E+07	1.1	2.2E-07	10.0	ルール	Motor Control Center (MCC)	Fail to Operate	-15.28	1.4E-07	4.5
	機能喪失	3	2.6E+06	8.1	3.1E-05	23.6	ルール	Inverter (INV)	Fail to Operate	-12.22	3.7E-06	3.2
	機能喪失	1	2.6E+07	3.3	3.2E-07	14.2	ルール	Inverter (INV)	Fail to Operate	-12.22	3.7E-07	2.8
	作動失敗	13	9.2E+08	33.8	8.6E-08	20.3	ルール	Circuit Breaker (CRB)	Fail to Open/Close	-12.05	4.9E-08	2.3
変圧器 蓄電池 充電器 母線 ⁸ 制御ケーブル ⁹	誤開	14	9.2E+08	35.5	4.5E-08	6.1	ルール	Circuit Breaker (CRB)	Spurious Operation	-15.07	4.3E-08	2.3
	機能喪失	2	9.2E+08	5.7	1.0E-08	11.4	ルール	Circuit Breaker (CRB)	Spurious Operation	-15.50	1.3E-08	2.6
	機能喪失	6	8.2E+07	15.3	3.0E-07	10.7	ルール	Transformer (TFM)	Fail to Operate	-14.00	2.3E-07	2.5
	機能喪失	0	4.6E+07	1.1	6.4E-08	10.0	ルール	Battery (BAT)	Fail to Operate	-14.47	1.0E-07	3.5
	機能喪失	2	4.6E+07	5.5	3.3E-07	23.2	ルール	Battery Charger (BCH)	Fail to Operate	-12.94	2.5E-07	2.7
母線 ⁸	機能喪失	4	4.7E+08	10.5	3.8E-08	11.1	ルール	Bus (BUS)	Fail to Operate	-13.61	4.1E-08	2.3
	短絡	0	2.0E+10	1.6	1.9E-10	6.1	ルール	(Electrical Equipment)	(Generic)	-12.72	1.0E-09	2.1
	地絡	3	2.0E+10	8.0	6.9E-10	11.7	ルール	(Electrical Equipment)	(Generic)	-12.72	1.4E-09	2.0
制御ケーブル ⁹	断線	3	2.0E+10	8.0	7.3E-10	11.5	ルール	(Electrical Equipment)	(Generic)	-12.72	1.4E-09	2.0

添付表 1 - 1 (3/3) 国内一般故障率 (26 ヶ年データ) の新手法による試評価結果 (時間故障率)

機種	故障モード	故障 件数 【件】	延べ 運転時間 【h】	26ヶ年評価		新手法による評価			
				故障件数 推定値 ^{*1} 【件】	平均値 【1/h】	EF ² (近似)	事前分布		
							選択ルール	米国対応機器	米国対応故障モード
配管 3 インチ未満 ^{*10}	リーク	0	4.7E+09	2.2	8.8E-10	4.8	J-ルール	Piping Service Water System	External Leak Small
	閉塞	1	4.7E+09	3.9	1.6E-09	6.4	J-ルール	(Others)	(Generic)
配管 3 インチ以上 ^{*10}	リーク	4	1.1E+10	10.5	1.6E-09	10.3	J-ルール	Piping Service Water System	External Leak Large
	閉塞	0	1.1E+10	2.0	3.7E-10	5.1	J-ルール	(Others)	(Generic)
リレー	不動作	8	1.1E+10	20.9	7.0E-09	50.9	J-ルール	Relay	Fail to Operate
	誤動作	6	1.1E+10	15.6	5.8E-09	28.8	J-ルール	(Reactor Protection System)	(Generic)
遅延リレー	不動作	0	8.8E+08	1.6	4.7E-09	6.8	J-ルール	(Reactor Protection System)	(Generic)
	誤動作	0	8.8E+08	1.6	4.7E-09	6.8	J-ルール	(Reactor Protection System)	(Generic)
演算器	不動作	0	5.8E+08	2.0	7.5E-09	5.2	J-ルール	(Reactor Protection System)	(Generic)
	高出力/低出力	5	5.8E+08	12.9	3.5E-08	8.6	J-ルール	(Reactor Protection System)	2.2
カード (半導体ロジック回路)	不動作	0	3.2E+08	0.8	3.0E-08	21.5	J-ルール	(Reactor Protection System)	1.6E-06
	誤動作	4	3.2E+08	10.7	5.4E-07	50.7	J-ルール	(Reactor Protection System)	1.6E-06
警報設定器	不動作	0	1.7E+09	1.4	1.9E-09	7.8	J-ルール	(Reactor Protection System)	(Generic)
	誤動作	3	1.7E+09	8.1	1.5E-08	21.8	J-ルール	(Reactor Protection System)	(Generic)
ヒューズ	誤断線	3	3.1E+09	8.1	4.6E-09	11.8	J-ルール	(Reactor Protection System)	1.6E-06
	不動作	7	7.7E+08	18.3	6.1E-08	33.0	J-ルール	Sensor/Transmitter (Flow)	1.0E-07
流量トランスミッタ	高出力/低出力	19	7.7E+08	49.6	2.0E-07	42.4	J-ルール	(Sensor/Transmitter)	9.9E-07
	不動作	1	9.6E+08	3.6	1.5E-08	10.4	J-ルール	Sensor/Transmitter (Pressure)	Fail to Operate
圧力トランスミッタ	高出力/低出力	15	9.6E+08	38.0	4.9E-08	6.3	J-ルール	(Sensor/Transmitter)	(Generic)
	高出力/低出力	2	4.0E+08	1.7	9.4E-09	5.9	J-ルール	Sensor/Transmitter (Level)	Fail to Operate
水位トランスミッタ	高出力/低出力	2	4.0E+08	5.6	2.2E-08	9.4	J-ルール	(Sensor/Transmitter)	(Generic)
	不動作	0	2.6E+09	1.6	1.4E-09	6.1	J-ルール	Sensor/Transmitter (Temperature)	Fail to Operate
温度検出器	高出力/低出力	5	2.6E+09	13.1	1.2E-08	20.2	J-ルール	(Reactor Protection System)	(Generic)
	不動作	0	7.3E+07	2.0	5.6E-08	5.2	J-ルール	(Reactor Protection System)	1.6E-06
放射線検出器	高出力/低出力	2	7.3E+07	5.9	2.2E-07	8.7	J-ルール	(Reactor Protection System)	1.6E-06
	不動作	0	4.7E+08	1.8	9.1E-09	5.6	J-ルール	Process Logic (Flow)	Fail to Operate
流量スイッチ	誤動作	1	4.7E+08	3.7	1.4E-08	7.9	J-ルール	(Process Logic)	(Generic)
	不動作	1	1.3E+09	3.6	4.8E-09	7.2	J-ルール	Process Logic (Pressure)	Fail to Operate
圧力スイッチ	誤動作	7	1.3E+09	18.4	3.1E-08	29.7	J-ルール	(Process Logic)	(Generic)
	不動作	6	9.0E+08	16.1	5.0E-08	43.0	J-ルール	Process Logic (Level)	Fail to Operate
水位スイッチ	誤動作	2	9.0E+08	6.1	1.7E-08	17.1	J-ルール	(Process Logic)	(Generic)
	不動作	0	4.4E+08	1.8	1.4E-08	5.9	J-ルール	Process Logic (Delta Temperature)	Fail to Operate
温度スイッチ	誤動作	2	4.4E+08	6.0	2.5E-08	13.4	J-ルール	(Process Logic)	(Generic)
	不動作	6	2.8E+09	15.4	1.1E-08	9.9	J-ルール	(Process Logic)	4.5E-06
リミットスイッチ	誤動作	1	2.8E+09	3.6	2.2E-09	8.1	J-ルール	(Process Logic)	4.5E-06
	不動作	2	4.5E+09	5.9	1.9E-09	7.3	J-ルール	Manual Switch	Fail to Operate or Close
手動スイッチ	誤動作	0	4.5E+09	2.1	1.0E-09	5.3	J-ルール	(Process Logic)	(Generic)
	不動作	0	5.5E+08	1.3	5.6E-09	8.1	J-ルール	(Reactor Protection System)	1.6E-06
コントローラ	高出力 / 低出力	2	5.5E+08	5.6	3.2E-08	17.2	J-ルール	(Reactor Protection System)	(Generic)
	短絡 ^{*4}	-	-	-	6.3E-10	30.0	J-ルール	制御ケーブルと同等とした工学的判断により推定するため、対象外とした。	未評価
配線 / 電線	地絡 ^{*4}	-	-	-	1.8E-09	30.0		制御ケーブルと同等とした工学的判断により推定するため、対象外とした。	未評価
	断線 ^{*4}	-	-	-	1.8E-09	30.0		制御ケーブルと同等とした工学的判断により推定するため、対象外とした。	未評価
ヒーター	機能喪失 ^{*4}	-	-	-	1.2E-08	30.0		ヒューズの断線線と同等とした工学的判断により推定するため、対象外とした。	未評価
	機能喪失 ^{*4}	-	-	-	5.3E-09	30.0		警報設定留の不動作と同等とした工学的判断により推定するため、対象外とした。	未評価
アナナシエータ	機能喪失	0	3.4E+05	0.6	3.0E-03	61.1	J-ルール	Motor Control Center (MCC)	Fail to Operate
	継続運転失敗	1	1.7E+06	2.9	2.8E-04	77.9	J-ルール	Motor-Driven Pump (MDP)	Fail to Run

注釈 *1. NUC1Aデータ (観測件数) に不確実さを考慮した故障件数の推定値 (平均値)

*2. EF² (近似) =95%点 / 5%点

*3. 特殊な故障率としてワイブル分布のベイズ評価により算出

*4. 特殊な故障率として算出

*5. 熱交換器の場合は、機器 1 台当たりの故障率

*6. ABIRの改良型制御機駆動装置を含む

*7. ABIRを除いた従来型のBIR

*8. 母線の場合は、機器間の 1 セクション (3 相) 当たりの故障率

*9. 制御ケーブルは、機器間を 1 機器として算出した故障率

*10. 配管の場合は、機器、材質変更箇所や分岐によって区分される 1 セクション間当たりの故障率

添付表 1 - 2 国内一般故障率（26ヶ年データ）の新手法による試評価結果（デマンド故障率）

機種	故障モード	故障 件数	推定 総デマンド 回数 [D]	26ヶ年評価			新手法による評価						
				故障件数 推定値 ^{*1} [件]	平均値 [1/D]	EF ² (近似)	事前分布						
							選択ルール	米国対応機器	米国対応故障モード	故障率	μ		
非常用DG	起動失敗	46	5.5E+04	120.8	2.7E-03	4.4	ルール	Emergency Diesel Generator (EDG)	Fail to Start	2.9E-03	-5.97	2.5E-03	3.1
電動ポンプ	起動失敗	5	1.8E+05	13.0	1.1E-04	11.2	ルール	Motor-Driven Pump (MDP)	Fail to Start	1.4E-03	-6.72	1.1E-04	2.4
	タービン駆動ポンプ	21	1.5E+04	53.3	4.0E-03	9.8	ルール	Turbine-Driven Pump (TDP)	Fail to Start	8.9E-03	-4.84	3.6E-03	3.7
ディーゼル駆動ポンプ	起動失敗	3	3.5E+02	9.1	2.6E-02	3.4	ルール	Engine-Driven Pump (EDP)	Fail to Start	5.1E-03	-5.40	1.6E-02	3.0
ファン / ブローア	起動失敗	1	6.6E+04	3.7	9.1E-05	6.7	ルール	Fan (FAN)	Fail to Start	7.1E-04	-7.38	1.1E-04	3.1
電動弁	開失敗	16	6.5E+05	40.3	7.4E-05	10.7	ルール	Motor-Operated Valve (MOV)	Fail to Open/Close	9.6E-04	-7.07	6.9E-05	2.5
	閉失敗	7	6.5E+05	18.2	6.6E-05	33.1	ルール	Motor-Operated Valve (MOV)	Fail to Open/Close	9.6E-04	-7.07	4.0E-05	2.8
空気作動弁	開失敗 ^{*3}	1	1.9E+05	3.2	3.6E-05	11.3	ルール	Air-Operated Valve (AOV)	Fail to Open/Close	9.5E-04	-7.08	5.2E-05	2.7
	閉失敗	7	2.0E+05	19.1	6.0E-04	108.0	ルール	Air-Operated Valve (AOV)	Fail to Open/Close	9.5E-04	-7.08	1.4E-04	4.6
油圧作動弁	閉失敗	5	1.7E+05	13.0	1.3E-04	13.1	ルール	Hydraulic-Operated Valve (HOV)	Fail to Open/Close	1.2E-03	-6.85	1.1E-04	2.4
	開失敗	0	1.7E+05	1.3	2.0E-05	8.6	ルール	Hydraulic-Operated Valve (HOV)	Fail to Open/Close	1.2E-03	-6.85	4.9E-05	2.9
逆止弁	開失敗	1	3.3E+05	3.5	1.7E-05	8.4	ルール	Check Valve (CKV)	Fail to Open	1.1E-05	-11.57	1.0E-05	4.4
	閉失敗	3	3.2E+05	7.9	4.0E-05	11.2	ルール	Check Valve (CKV)	Fail to Close	2.4E-04	-8.47	3.8E-05	2.7
手動弁	閉失敗	2	5.4E+04	5.5	2.2E-04	19.2	ルール	Manual Valve (XVM)	Fail to Open/Close	1.9E-04	-8.68	1.2E-04	3.6
	開失敗	1	5.3E+04	3.6	1.1E-04	8.0	ルール	Manual Valve (XVM)	Fail to Open/Close	1.9E-04	-8.68	9.2E-05	3.7
安全弁	閉失敗	0	1.6E+03	0.7	1.7E-03	20.7	ルール	Safety Valve (SVV)	Fail to Open	4.2E-04	-7.89	5.1E-04	6.1
	開失敗	1	1.5E+03	2.9	4.9E-03	46.6	ルール	Safety Valve (SVV)	Fail to Close	2.0E-04	-8.63	9.8E-04	11.3
逃がし安全弁	閉失敗	0	1.1E+04	1.0	3.4E-04	13.0	ルール	Safety Relief Valve (SRV)	Fail to Open	2.8E-03	-6.01	4.6E-04	3.5
	開失敗	0	1.1E+04	1.0	3.3E-04	13.4	ルール	Safety Relief Valve (SRV)	Fail to Close	8.6E-04	-7.19	3.0E-04	4.1
電磁弁	閉開失敗	3	3.9E+05	7.9	3.0E-05	9.2	ルール	Solenoid-Operated Valve (SOV)	Fail to Open/Close	1.2E-03	-6.86	4.2E-05	2.4
遮断器	閉失敗	3	3.0E+05	7.9	4.2E-05	12.1	ルール	Circuit Breaker (CRB)	Fail to Open/Close	2.4E-03	-6.16	5.7E-05	2.3
	開失敗	6	3.0E+05	15.9	1.1E-04	14.7	ルール	Circuit Breaker (CRB)	Fail to Open/Close	2.4E-03	-6.16	8.0E-05	2.3
ダンパ	閉失敗	4	2.4E+05	10.9	1.1E-04	13.9	ルール	Hydraulic-Operated Damper (HOD)	Fail to Open/Close	5.8E-04	-7.58	6.8E-05	2.6
	閉失敗	2	2.4E+05	6.6	5.2E-05	12.3	ルール	Hydraulic-Operated Damper (HOD)	Fail to Open/Close	5.8E-04	-7.58	5.0E-05	3.1

注釈 *1. NUCIAデータ（観測件数）に不確実さを考慮した故障件数の推定値（平均値）
 *2. EF²(近似) = 95 % 点 / 5 % 点
 *3. 未収束であったため1chain当たりのサンプリング回数を50万に増やして計算した

添付表 1 - 3 (1/5) 一般化した事前情報の内訳

一般化した事前情報 (弁)

故障モード	d/h	デマンド故障確率 d、 あるいは、 時間故障率 t(/h)	時間故障率 t(/h) (デマンド故障確率は、 以下の式で換算。 $t = 2 \times d / 720$)
Air-Operated Valve (AOV) External Leak Small	h	5.51E-08	5.51E-08
Air-Operated Valve External Leak Large	h	3.86E-09	3.86E-09
Air-Operated Valve (AOV) Loss of Function / Fail to Control	h	2.49E-07	2.49E-07
Air-Operated Valve (AOV) Fail to Open/Close	d	9.51E-04	2.64E-06
Air-Operated Valve (AOV) Internal Leak Small	h	9.69E-08	9.69E-08
Air-Operated Valve Internal Leak Large	h	1.94E-09	1.94E-09
Air-Operated Valve (AOV) Spurious Operation	h	1.31E-07	1.31E-07
Check Valve (CKV) External Leak Small	h	1.05E-08	1.05E-08
Check Valve External Leak Large	h	7.35E-10	7.35E-10
Check Valve (CKV) Fail to Close	d	2.38E-04	6.62E-07
Check Valve (CKV) Fail to Open	d	1.07E-05	2.97E-08
Check Valve (CKV) Internal Leak Small	h	3.08E-07	3.08E-07
Check Valve Internal Leak Large	h	6.15E-09	6.15E-09
Check Valve (CKV) Spurious Closing	h	5.47E-09	5.47E-09
Check Valve (CKV) Spurious Opening	h	3.48E-09	3.48E-09
Explosive-Operated Valve (EOV) Fail to Open/Close	d	2.57E-03	7.14E-06
Hydraulic-Operated Valve (HOV) External Leak Small	h	2.23E-07	2.23E-07
Hydraulic-Operated Valve External Leak Large	h	1.56E-08	1.56E-08
Hydraulic-Operated Valve (HOV) Loss of Function / Fail to Control	h	4.86E-07	4.86E-07
Hydraulic-Operated Valve (HOV) Fail to Open/Close	d	1.20E-03	3.33E-06
Hydraulic-Operated Valve (HOV) Internal Leak Small	h	2.86E-08	2.86E-08
Hydraulic-Operated Valve Internal Leak Large	h	5.72E-10	5.72E-10
Hydraulic-Operated Valve (HOV) Spurious Operation	h	2.00E-07	2.00E-07
Motor-Operated Valve (MOV) External Leak Small	h	3.28E-08	3.28E-08
Motor-Operated Valve External Leak Large	h	2.29E-09	2.29E-09
Motor-Operated Valve (MOV) Loss of Function / Fail to Control	h	6.62E-08	6.62E-08
Motor-Operated Valve (MOV) Fail to Open/Close	d	9.63E-04	2.68E-06
Motor-Operated Valve (MOV) Internal Leak Small	h	1.01E-07	1.01E-07
Motor-Operated Valve Internal Leak Large	h	2.02E-09	2.02E-09
Motor-Operated Valve (MOV) Spurious Operation	h	3.39E-08	3.39E-08
Main Steam Isolation Valve (MSV) External Leak Small	h	1.34E-07	1.34E-07
Main Steam Isolation Valve (MSV) Fail to Open/Close	d	7.79E-04	2.16E-06
Main Steam Isolation Valve (MSV) Internal Leak Small	h	1.51E-06	1.51E-06
Main Steam Isolation Valve (MSV) Spurious Operation	h	3.85E-07	3.85E-07
Solenoid-Operated Valve (SOV) External Leak Small	h	3.43E-08	3.43E-08
Solenoid-Operated Valve External Leak Large	h	2.40E-09	2.40E-09
Solenoid-Operated Valve (SOV) Loss of Function / Fail to Control	h	3.00E-06	3.00E-06
Solenoid-Operated Valve (SOV) Fail to Open/Close	d	1.19E-03	3.31E-06
Solenoid-Operated Valve (SOV) Internal Leak Small	h	1.79E-07	1.79E-07
Solenoid-Operated Valve Internal Leak Large	h	3.58E-09	3.58E-09
Solenoid-Operated Valve (SOV) Spurious Operation	h	3.43E-08	3.43E-08
Turbine Bypass Valve (TBV) Loss of Function / Fail to Control	h	1.05E-06	1.05E-06
Turbine Bypass Valve (TBV) Fail to Close	d	2.47E-04	6.86E-07
Turbine Bypass Valve (TBV) Fail to Open	d	4.20E-03	1.17E-05
Vacuum Breaker Valve (VBV) Fail to Close	d	2.97E-04	8.25E-07
Vacuum Breaker Valve (VBV) Fail to Open	d	2.24E-04	6.22E-07
Vacuum Breaker Valve (VBV) Internal Leak Small	h	4.16E-07	4.16E-07
Manual Valve (XVM) External Leak Small	h	2.62E-07	2.62E-07
Manual Valve External Leak Large	h	1.83E-08	1.83E-08
Manual Valve (XVM) Fail to Open/Close	d	1.92E-04	5.33E-07
Manual Valve (XVM) Internal Leak Small	h	1.34E-07	1.34E-07
Manual Valve Internal Leak Large	h	2.68E-09	2.68E-09
Manual Valve (XVM) Spurious Operation	h	8.42E-08	8.42E-08
		平均	8.60E-07

添付表 1 - 3 (2/5) 一般化した事前情報の内訳

一般化した事前情報 (逃がし弁類)

故障モード	時間故障率 $t(/h)$
Power-Operated Relief Valve (PORV) Internal Leak Small	5.08E-07
Low-Capacity Relief Valve (RVL) Internal Leak Small	6.65E-08
Safety Valve (SVV) Internal Leak Small	8.99E-08
平均	2.21E-07

一般化した事前情報 (原子炉保護系)

故障モード	d/h	デマンド故障確率 d あるいは、 時間故障率 $t(/h)$	時間故障率 $t(/h)$ (デマンド故障確率は、 以下の式で換算。 $t = 2 * d / 720$)
Bistable Fail to Operate	d	5.44E-04	1.51E-06
Manual Switch Fail to Open or Close	d	1.26E-04	3.51E-07
Process Logic (Delta Temperature) Fail to Operate	d	5.07E-03	1.41E-05
Process Logic (Flow) Fail to Operate	d	6.26E-04	1.74E-06
Process Logic (Level) Fail to Operate	d	6.26E-04	1.74E-06
Process Logic (Pressure) Fail to Operate	d	1.60E-04	4.45E-07
Relay Fail to Operate	d	2.48E-05	6.90E-08
RPS Breaker (Mechanical) Fail to Open or Close	d	1.54E-05	4.28E-08
RPS Breaker (Shunt Trip) Fail to Operate	d	3.29E-04	9.13E-07
RPS Breaker (Undervoltage Trip) Fail to Operate	d	4.13E-04	1.15E-06
RPS Breaker (Combined) Fail to Open or Close	d	1.55E-05	4.32E-08
Sensor/Transmitter (Flow) Fail to Operate	d	8.15E-04	2.26E-06
Sensor/Transmitter (Flow) Fail to Operate	h	1.02E-07	1.02E-07
Sensor/Transmitter (Level) Fail to Operate	d	8.15E-04	2.26E-06
Sensor/Transmitter (Level) Fail to Operate	h	1.02E-07	1.02E-07
Sensor/Transmitter (Pressure) Fail to Operate	d	1.17E-04	3.25E-07
Sensor/Transmitter (Pressure) Fail to Operate	h	8.22E-07	8.22E-07
Sensor/Transmitter (Temperature) Fail to Operate	d	4.32E-04	1.20E-06
Sensor/Transmitter (Temperature) Fail to Operate	h	8.40E-07	8.40E-07
平均			1.58E-06

添付表 1 - 3 (3/5) 一般化した事前情報の内訳

一般化した事前情報 (原子炉保護系(プロセスロジックのみ))

故障モード	d/h	デマンド故障確率 d、 あるいは、 時間故障率 t(/h)	時間故障率 t(/h) (デマンド故障確率は、 以下の式で換算。 $t = 2 * d / 720$)
Process Logic (Delta Temperature) Fail to Operate	d	5.07E-03	1.41E-05
Process Logic (Flow) Fail to Operate	d	6.26E-04	1.74E-06
Process Logic (Level) Fail to Operate	d	6.26E-04	1.74E-06
Process Logic (Pressure) Fail to Operate	d	1.60E-04	4.45E-07
		平均	4.50.E-06

一般化した事前情報 (原子炉保護系(センサ/トランスミッタのみ))

故障モード	d/h	デマンド故障確率 d、 あるいは、 時間故障率 t(/h)	時間故障率 t(/h) (デマンド故障確率は、 以下の式で換算。 $t = 2 * d / 720$)
Sensor/Transmitter (Flow) Fail to Operate	d	8.15E-04	2.26E-06
Sensor/Transmitter (Flow) Fail to Operate	h	1.02E-07	1.02E-07
Sensor/Transmitter (Level) Fail to Operate	d	8.15E-04	2.26E-06
Sensor/Transmitter (Level) Fail to Operate	h	1.02E-07	1.02E-07
Sensor/Transmitter (Pressure) Fail to Operate	d	1.17E-04	3.25E-07
Sensor/Transmitter (Pressure) Fail to Operate	h	8.22E-07	8.22E-07
Sensor/Transmitter (Temperature) Fail to Operate	d	4.32E-04	1.20E-06
Sensor/Transmitter (Temperature) Fail to Operate	h	8.40E-07	8.40E-07
		平均	9.89.E-07

添付表 1 - 3 (4/5) 一般化した事前情報の内訳

一般化した事前情報 (加熱・換気系)

故障モード	d/h	デマンド故障確率 d、 あるいは、 時間故障率 t(/h)	時間故障率 t(/h) (デマンド故障確率は、 以下の式で換算。 $t = 2^* d / 720$)
Air Handling Unit (AHU) Fail to Run	h	5.61E-06	5.61E-06
Air Handling Unit (AHU) Fail to Start	d	3.86E-03	1.07E-05
Air Handling Unit (Standby) Fail to Run After First Hour of Operation	h	3.80E-06	3.80E-06
Air Handling Unit (Standby) Fail to Start	d	8.29E-04	2.30E-06
Air Damper (DMP) Fail to Open/Close	d	3.66E-04	1.02E-06
Air Damper (DMP) Spurious Operation	h	7.27E-08	7.27E-08
Chiller (CHL) Fail to Run	h	3.05E-05	3.05E-05
Chiller (CHL) Fail to Start	d	1.30E-02	3.61E-05
Fan (FAN) Fail to Run	h	5.88E-06	5.88E-06
Fan (FAN) Fail to Start	d	7.09E-04	1.97E-06
Fan (FAN) Standby Fail to Run greater than 1 hour	h	4.54E-05	4.54E-05
Fan (FAN) Fail to Start	d	8.42E-04	2.34E-06
Air Damper (DMP) Fail to Open/Close	d	5.80E-04	1.61E-06
Air Damper (DMP) Internal Leak Small	h	3.60E-08	3.60E-08
Air Damper (DMP) Spurious Operation	h	6.11E-07	6.11E-07
Air Damper (DMP) Fail to Open/Close	d	2.33E-04	6.47E-07
Air Damper (DMP) Internal Leak Small	h	1.39E-07	1.39E-07
Air Damper (DMP) Spurious Operation	h	4.62E-08	4.62E-08
平均			8.27E-06

一般化した事前情報 (電気系)

故障モード	d/h	デマンド故障確率 d、 あるいは、 時間故障率 t(/h)	時間故障率 t(/h) (デマンド故障確率は、 以下の式で換算。 $t = 2^* d / 720$)
Automatic Bus Transfer Switch (ABT) Loss of Function / Fail to Control	d	1.60E-03	4.44E-06
Automatic Bus Transfer Switch (ABT) Spurious Operation	h	1.37E-07	1.37E-07
Battery (BAT) Fail to Operate	h	5.86E-07	5.86E-07
Battery Charger (BCH) Fail to Operate	h	2.71E-06	2.71E-06
Bus (BUS) Fail to Operate	h	1.39E-06	1.39E-06
Bus (BUS) Fail to Operate	h	2.35E-07	2.35E-07
Circuit Breaker (CRB) Fail to Open/Close	d	2.39E-03	6.64E-06
Circuit Breaker (CRB) Spurious Operation	h	2.11E-07	2.11E-07
Circuit Breaker (CRB) Fail to Open/Close	d	5.73E-04	1.59E-06
Circuit Breaker (CRB) Spurious Operation	h	4.94E-08	4.94E-08
Circuit Breaker (CRB) Fail to Open/Close	d	6.66E-03	1.85E-05
Circuit Breaker (CRB) Spurious Operation	h	8.08E-07	8.08E-07
Circuit Breaker (CRB) Fail to Open/Close	d	2.70E-03	7.51E-06
Circuit Breaker (CRB) Spurious Operation	h	1.04E-07	1.04E-07
Inverter (INV) Fail to Operate	h	5.60E-06	5.60E-06
Motor Control Center (MCC) Fail to Operate	h	2.61E-07	2.61E-07
Sequencer Fail to Operate	d	3.33E-03	9.26E-06
Transformer (TFM) Fail to Operate	h	9.44E-07	9.44E-07
平均			3.39E-06

添付表 1 - 3 (5/5) 一般化した事前情報の内訳

一般化した事前情報 (ストレーナ類)

故障モード	時間故障率 t(/h)
Filter (FLT) External Leak Small	1.40E-07
Filter (FLT) Plugged	3.10E-07
Self-Cleaning Strainer (FLTSC) Bypass	7.84E-08
Self-Cleaning Strainer (FLTSC) External Leak Small	8.62E-07
Self-Cleaning Strainer (FLTSC) Fail to Operate	4.00E-06
Self-Cleaning Strainer (FLTSC) Plugged	2.32E-06
Sump Strainer (SMP) Plugged	5.08E-07
Trash Rack (TRK) Plugged	3.95E-06
Traveling Screen Assembly (TSA) Plugged	3.07E-06
平均	1.69E-06

一般化した事前情報 (その他)

故障モード	d/h	デマンド故障確率 d, あるいは、 時間故障率 t(/h)	時間故障率 t(/h) (デマンド故障確率は、 以下の式で換算。 $t = 2 * d / 720$)
Accumulator (ACC) External Leak Small	h	1.11E-07	1.11E-07
Air Accumulator External Leak Large	h	7.77E-09	7.77E-09
Air Dryer Unit Fail to Operate	h	5.00E-06	5.00E-06
Cooling Tower Fan (CTF) Fail to Run	h	2.30E-06	2.30E-06
Cooling Tower Fan (CTF) Fail to Start	d	7.73E-04	2.15E-06
Cooling Tower Fan (CTF) Standby Fail to Run greater than 1 hour	h	2.84E-05	2.84E-05
Cooling Tower Fan (CTF) Standby Fail to Run less than or equal to 1 ho	h	2.84E-05	2.84E-05
Cooling Tower Fan (CTF) Fail to Start	d	3.54E-03	9.84E-06
Engine-driven Air Compressor (EDC) Fail to Run	h	3.78E-03	3.78E-03
Engine-driven Air Compressor (EDC) Fail to Start	d	2.45E-03	6.81E-06
Heat Exchanger (HTX) Loss of Heat Transfer	h	5.23E-07	5.23E-07
Heat Exchanger (HTX) External Leak Small	h	3.34E-07	3.34E-07
Heat Exchanger Shell External Leak Large	h	2.34E-08	2.34E-08
Heat Exchanger (HTX) Loss of Heat Transfer	h	4.57E-07	4.57E-07
Heat Exchanger (HTX) Internal Leak Small	h	3.79E-07	3.79E-07
Air Compressor (CMP) Fail to Run	h	8.50E-05	8.50E-05
Air Compressor (CMP) Fail to Start	d	1.71E-02	4.75E-05
	h	2.62E-03	2.62E-03
	h	3.14E-03	3.14E-03
	d	7.13E-03	1.98E-05
Orifice Plug	h	1.00E-06	1.00E-06
Piping Non-Service Water System External Leak Small	h	2.53E-10	2.53E-10
Piping Non-Service Water System External Leak Large	h-ft	2.53E-11	2.53E-11
Piping Service Water System External Leak Small	h	6.89E-10	6.89E-10
Piping Service Water System External Leak Large	h-ft	1.38E-10	1.38E-10
Tank (TNK) External Leak Small	h	3.26E-07	3.26E-07
Tank Unpressurized External Leak Large	h	2.28E-08	2.28E-08
Tank (TNK) External Leak Small	h	2.60E-07	2.60E-07
Tank Unpressurized External Leak Large	h	1.82E-08	1.82E-08
平均			3.37E-04

添付 2. 機器故障率試計算結果の PRA モデルへの適用例

ここでは、新旧手法の事後分布（機器故障率）を PRA モデルにそれぞれ取り込み、PWR プラントを例として CDF を評価し、新手法の機器故障率（新故障率）と旧手法の機器故障率（旧故障率）の CDF に対する感度を確認した。

1. 評価対象とした故障モード

以下の ～ に該当する故障モードを選定し、選定された故障モードのうち PRA モデルでモデル化しているものを対象として評価することで、CDF に対する感度を確認した。故障モードの選定と、モデル化への取り込みについて、添付表 2 - 1 及び添付表 2 - 2 にまとめた。

- 選定 PRA モデルの基事象の FV 重要度が 0.005 以上の基事象の故障モード
- 選定 新旧手法の故障率を比較して、3 倍以上変化した故障モード
- 選定 21 ヶ年の故障率に対して、旧手法の 26 ヶ年の故障率が大きく増加（時間故障率は 10 倍、デマンド故障確率は 5 倍）した故障モード

2. 新旧故障率の CDF に対する感度

新故障率に基づく CDF は、下表に示すとおり旧故障率の CDF に対して、約 5% 増加した。新故障率の CDF が約 5% 増加したのは、タンク閉塞の故障率が増加した（旧：5.1E-8/h 新：2.2E-7/h）ことが主要因となった。

	旧手法による故障率	新手法による故障率
炉心損傷頻度(CDF) (/ 炉年)	5.0E-07	5.2E-07
EF ((95% 値 / 5% 値) ^{1/2})	3.8	3.6
比較(26 ヶ年ベース)	1.00	1.05

タンク閉塞の新故障率は、国内の発生実績が 0 件の故障モードであり、事前情報に「一般化した事前情報（その他）」を用いている。「一般化した事前情報（その他）」の故障率（3.4E-4/h）は、添付 1（添付表 1 - 3）に示すように、ポンプ、弁、安全弁、電気設備、ストレーナ、原子炉保護系統、換気空調系統を除く機種のような故障モードの平均値であり、タンク閉塞の事前情報としては値が大きいと考えられる。

なお、今回感度解析を実施した PWR の PRA モデルでは、主にデマンド故障確率を用いているため、例えば新旧での差が比較的大きい時間故障率の電動ポンプ（常用待機、海水）の起動失敗などは、モデルへ取り込まれていない。

一方、BWR の PRA モデルでは、主に時間故障率をモデル化しているため、新旧故障率の CDF に対する感度が PWR とは違った結果が得られることが予想されることから、今後は BWR においても確認していく必要があると考えられる。加えて、炉心損傷シーケンスが異なれば新旧故障率の CDF に対する感度も異なるため、個別プラントについても順次確認していく必要があると考えられる。

3. 一般化した事前情報の検討

タンク閉塞について、事前情報の「一般化した事前情報（その他）」の故障率が事後分布に与える感度を確認した。その結果を添付表 2 - 3 に示す。これより、事前情報に小さい故障率を与えることで、事後の故障率是对数比例的に小さくなることがわかる。発生実績が 0 件の故障モードでは、事前情報の故障率は、事後分布の故障率と大きく離れていないことが望ましいと考えられる。

このことから今後の実運用では、他の発生実績が 0 件の故障モード、あるいは発生実績の少ない故障モードに対しても同様の傾向が得られるかを確認し、必要に応じて事前情報の選定の見直しを行うことが考えられる。見直しとしては次のような例が考えられ、事後分布の状況と合わせて検討すべきである。

- 一般化に採用されている機種を推定対象機器とできるだけ整合させる。例えば、対象機器が動的機器か静的機器かにより一般化に採用する機種もそれに合わせる。
- 一般化に採用されている故障モードを推定対象の故障モードとできるだけ整合させる。例えば、故障モードが閉塞であれば同じ閉塞の故障モードを持つストレナなどを事前情報として考慮する。
- 一般化する故障率計算において、状況により点推定値の平均だけでなく、確率分布を考慮した評価とする。

4. まとめ

- ✓ 評価に使用した PWR の PRA モデルでは、新故障率に基づく CDF は、旧故障率の CDF に対して、約 5% 増加した。また、PWR の例以外に BWR の例についても故障率変更の CDF への影響の確認が必要であり、順次個別プラントについても確認していく必要があると考えられる。
- ✓ 今回の PWR の例において新故障率の CDF が増加したのは、タンク閉塞の故障率の増加（旧： $5.1\text{E-}8/\text{h}$ 新： $2.2\text{E-}7/\text{h}$ ）が主要因となった。タンクの閉塞は発生実績が 0 件の故障モードであり、事前情報の故障率の影響を事後分布の故障率が強く受けることがわかった。
- ✓ 今後の実運用では、事前情報の故障率と発生実績、事後分布の故障率の関係を整理し、必要に応じて事前情報を変更していくことが考えられる。

添付表 2 - 1 CDF の感度を確認した故障モード（時間故障率）

機種	故障モード	故障 件数 【件】	延べ 運転時間 【h】	旧手法		新手法				選定理由	新手法平均値 /旧手法平均値	PRAモデル への取り込み (: 考慮 x : 考慮せず)		
				平均値 【1/h】	EF (近似)	事前分布		平均値 【1/h】	EF (近似)					
						米国対応機器							米国対応故障モード	
非常用ディーゼル発電機	継続運転失敗 (24時間平均)	-	-	2.3E-04	1.7	非常用DG 継続運転失敗の故障率は、故障までの継続運転時間がワイブル分布に従うと仮定し、ベイズ統計手法により推定したワイブルパラメータを用いて故障率を推定する（従来と変更なし）。						1.00		
電動ポンプ(常用運転、純水)	継続運転失敗	29	9.8E+07	8.4E-07	6.5	Motor-Driven Pump		Fail to Run		7.8E-07	3.2	0.93		
電動ポンプ(常用待機、海水)	起動失敗	1	3.6E+06	7.8E-06	51.3	Motor-Driven Pump		Fail to Start		1.4E-06	4.0	0.17	x	
電動弁(純水)	閉塞	2	1.2E+09	8.3E-09	8.9	(Valves)		(Generic)		8.6E-07	1.3E-08	2.3	1.61	
	作動失敗	2	4.4E+07	9.9E-07	22.4	Motor Operated Valve		Loss of Function		6.8E-08	1.1E-07	4.8	0.11	x
	閉鎖失敗	13	8.4E+08	2.4E-07	90.0	Check Valve		Fail to Close		6.6E-07	5.3E-08	7.4	0.22	x
	逆止弁	4	8.4E+08	9.0E-08	37.3	Check Valve		Internal Leak Swall		3.1E-07	2.1E-08	2.9	0.23	
逃がし安全弁 (BIR)	外部リーク	0	4.8E+07	1.0E-07	10.7	Safety Relief Valve		External Leak Swall		2.4E-08	2.4E-08	5.6	0.23	x
	作動失敗	0	2.8E+07	8.1E-07	16.7	Power-Operated Relief Valve		Loss of Function		2.7E-07	1.1E-07	4.3	0.14	x
ファン/ブローア	継続運転失敗	8	1.3E+08	8.7E-07	30.2	Fan (FAN)		Fail to Run		5.9E-06	2.3E-07	2.6	0.26	
	作動失敗	6	5.0E+08	1.7E-07	23.6	Hydraulic-Operated Damper (HOD)		Fail to Open/Close		1.8E-06	5.1E-08	2.7	0.30	x
ダンパ	外部リーク	0	5.0E+08	7.9E-09	5.4	(Heating & Ventilation)		(Generic)		8.3E-06	2.9E-08	2.4	3.69	x
	閉塞	0	8.5E+07	5.1E-08	4.9	(Others)		(Generic)		3.4E-04	2.2E-07	2.2	4.37	
制御棒駆動装置(BIR)	挿入失敗	6	5.8E+08	1.7E-07	69.3	Hydraulic Control Unit (HCU)		Fail to Operate		3.3E-08	3.0E-08	11.7	0.18	x
制御棒駆動装置(PIR)	挿入失敗	1	1.5E+08	1.9E-07	32.5	Control Rod Drive		Fail to Operate		9.9E-08	3.7E-08	3.6	0.20	
インバータ (PIR)	機能喪失	3	2.8E+06	3.1E-05	23.6	Inverter (INV)		Fail to Operate		5.8E-06	3.7E-06	3.2	0.12	x
	機能喪失	2	4.6E+07	3.3E-07	23.2	Battery Charger (BCH)		Fail to Operate		2.7E-06	2.5E-07	2.7	0.75	
充電器	機能喪失	4	4.7E+08	3.8E-08	11.1	Bus (BUS)		Fail to Operate		1.4E-06	4.1E-08	2.3	1.08	
	母線					(Electrical Equipment)		(Generic)		3.4E-06	1.0E-09	2.1	5.58	
制御ケーブル	短絡	0	2.0E+10	1.9E-10	6.1	(Others)		(Generic)		3.4E-04	6.5E-09	1.9	4.11	x
配管 3インチ未満	閉塞	1	4.7E+09	1.6E-09	6.4	(Others)		(Generic)		3.4E-04	2.8E-09	1.9	7.56	x
	配管 3インチ以上					(Others)		(Generic)		3.4E-04	2.8E-09	1.9	7.56	
遅延リレー	不動作	0	8.8E+08	4.7E-09	6.8	(Reactor Protection System)		(Generic)		1.8E-06	1.4E-08	2.5	3.02	
	誤動作	0	8.8E+08	4.7E-09	6.8	(Reactor Protection System)		(Generic)		1.8E-06	1.4E-08	2.5	3.02	
(半導体ロジック回路)	誤動作	4	3.2E+08	5.4E-07	50.7	(Reactor Protection System)		(Generic)		1.8E-06	6.0E-08	2.7	0.11	x
	不動作	0	1.7E+09	1.9E-09	7.8	(Reactor Protection System)		(Generic)		1.8E-06	8.1E-09	2.4	4.20	
警報設定器	高出力/低出力	19	7.7E+08	2.0E-07	42.4	(Sensor/Transmitter Item)		(Generic)		9.9E-07	7.7E-08	7.1	0.38	
流量トランスミッタ	不動作	0	2.6E+09	1.4E-09	6.1	Sensor/Transmitter (Temperature)		Fail to Operate		8.4E-07	5.1E-09	2.4	3.59	x
温度検出器	誤動作	1	2.8E+09	2.2E-09	8.1	(Process Logic)		(Generic)		4.5E-06	6.7E-09	2.2	3.11	
リミットスイッチ	誤動作	0	4.5E+09	1.0E-09	5.3	(Process Logic)		(Generic)		4.5E-06	4.1E-09	2.2	3.98	x
手動スイッチ	不動作	0	5.5E+08	5.6E-09	8.1	(Reactor Protection System)		(Generic)		1.8E-06	2.0E-08	2.6	3.65	x
コントローラ	不動作	0												

添付表 2 - 2 CDF の感度を確認した故障モード（デマンド故障率）

機種	故障モード	故障 件数	推定 総デマンド 回数 [D]	旧手法		新手法					新手法平均値 /旧手法平均値	選定理由	PRAモデル への取り込み (: 考慮 ×: 考慮せず)
				平均値 [1/D]	EF (近似)	事前分布			平均値 [1/D]	EF (近似)			
						米国対応機器	米国対応故障モード	故障率					
非常用DG 電動弁 空気作動弁 安全弁	起動失敗	46	5.5E+04	2.7E-03	4.4	Emergency Diesel Generator (EDG)	Fail to Start	2.9E-03	2.5E-03	3.1	0.91		
	閉失敗	7	6.5E+05	6.6E-05	33.1	Motor-Operated Valve (MOV)	Fail to Open/Close	9.6E-04	4.0E-05	2.8	0.61		
	閉失敗	7	2.0E+05	6.0E-04	108.0	Air-Operated Valve (AOV)	Fail to Open/Close	9.5E-04	1.4E-04	4.6	0.24		
	閉失敗	0	1.6E+03	1.7E-03	20.7	Safety Valve (SVV)	Fail to Open	4.2E-04	5.1E-04	6.1	0.31		
	閉失敗	1	1.5E+03	4.9E-03	46.6	Safety Valve (SVV)	Fail to Close	2.0E-04	9.8E-04	11.3	0.20		

添付表 2 - 3 タンク閉塞における一般化事前情報の故障率が事後分布に与える感度

機種	故障 モード	故障 件数 【件】	延べ 運転時間 【h】	旧手法		新手法						新手法 平均値 /旧手法 平均値
				平均値 【1/h】	EF (近似)	事前分布			平均値 【1/h】	EF (近似)		
						米国対応 機器	米国対応 故障 モード	故障率				
タンク	閉塞	0	8.5E+07	5.1E-08	4.9	(Others)	(Generic)		3.4E-04	2.2E-07	2.2	4.37
						感度解析ケース 1		/100	3.4E-06	1.1E-07	2.8	2.08
						感度解析ケース 2		/10000	3.4E-08	2.2E-08	4.8	0.44

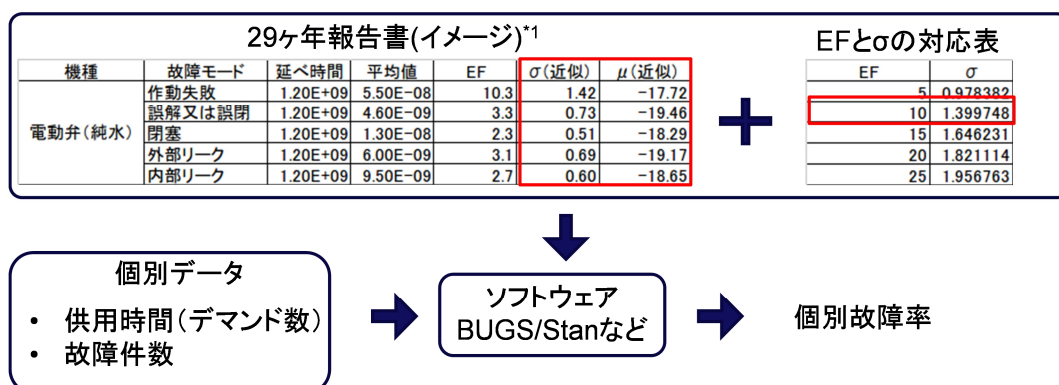
添付 3. 一般故障率を事前分布とした個別プラントの故障率推定への適用例

将来、一般故障率を事前分布として個別プラントの故障率推定に利用する場合も考えられることから、その適用例を示す。推定の手順は以下になる。

1. 機種に応じて下式により対数標準偏差 σ を変更する。式中の EF は、本報告書での推定手法により一般故障率を対数正規分布に近似して整備される。

$$\sigma = \ln [EF/1.645]$$

2. ベイズ更新する。個別故障率用モデルでは次の作業となる。



3. 事前分布の EF に対して感度解析を行ない、推定値の特徴を把握しておく。

例 1 : 供用時間 35526354 時間 故障件数 2 件

個別故障率					
EF	平均値	5%点値	中央値	95%点値	EF
5	4.12E-08	1.10E-08	3.51E-08	9.21E-08	2.889629
10	4.73E-08	1.06E-08	3.99E-08	1.09E-07	3.21117
15	4.97E-08	1.05E-08	4.17E-08	1.16E-07	3.319203
20	5.06E-08	1.02E-08	4.23E-08	1.19E-07	3.423805
25	5.13E-08	1.03E-08	4.31E-08	1.20E-07	3.405253

例 2 : 供用時間 11491200 時間 故障件数 0 件

個別故障率					
EF	平均値	5%点値	中央値	95%点値	EF
5	2.26E-08	3.50E-09	1.60E-08	6.41E-08	4.279741
10	2.23E-08	1.60E-09	1.29E-08	7.48E-08	6.839535
15	2.17E-08	1.02E-09	1.12E-08	7.81E-08	8.739545
20	2.12E-08	7.16E-10	1.02E-08	7.95E-08	10.53386
25	2.09E-08	5.39E-10	9.28E-09	8.10E-08	12.25691

ここで、故障がある場合はあまり事前分布の EF に影響を受けないが、0 件故障の場合では比較的影響を受けやすいことから、0 件故障機種について、供用時間と EF に対する感度解析を行なった。その例を以下に示す。

事後分布の EF

供用時間\事前分布のEF	5	10	15	20
1.00E+03	4.970921	10.04434	15.04527	19.94317
1.00E+04	4.917397	9.94709	14.45889	18.31747
1.00E+05	4.865638	8.753726	12.3169	15.30879
1.00E+06	4.094533	6.527024	8.293621	10.04943
1.00E+07	3.056939	4.450789	5.497645	6.424368
1.00E+08	2.390169	3.243476	3.970406	4.507587
1.00E+09	2.046066	2.703717	3.11243	3.528652

事後分布の平均値

供用時間\事前分布のEF	5	10	15	20
1.00E+03	4.95E-07	8.13E-07	1.18E-06	1.60E-06
1.00E+04	4.88E-07	7.94E-07	1.06E-06	1.27E-06
1.00E+05	4.60E-07	6.17E-07	7.20E-07	7.73E-07
1.00E+06	3.21E-07	3.06E-07	2.86E-07	1.37E-07
1.00E+07	1.01E-07	8.45E-08	7.09E-08	6.33E-08
1.00E+08	2.69E-08	1.62E-08	1.27E-08	1.11E-08
1.00E+09	4.49E-09	2.53E-09	1.94E-09	1.64E-09

事後分布の中央値

供用時間\事前分布のEF	5	10	15	20
1.00E+03	3.07E-07	3.04E-07	3.06E-07	3.04E-07
1.00E+04	3.06E-07	3.03E-07	2.98E-07	2.96E-07
1.00E+05	2.96E-07	2.77E-07	2.64E-07	2.49E-07
1.00E+06	2.32E-07	1.82E-07	1.54E-07	2.77E-07
1.00E+07	1.20E-07	6.32E-08	4.95E-08	4.17E-08
1.00E+08	2.44E-08	1.36E-08	1.01E-08	8.52E-09
1.00E+09	4.22E-09	2.24E-09	1.66E-09	1.37E-09

0 件故障で供用時間が 1E+5 までの場合、中央値があまり更新されないことから、一般故障率を個別故障率に更新するメリットはあまりないと考えられる。個別故障率を推定する場合には、このような特徴も参考とすることができる。

参考資料 階層ベイズモデル

26 カ年データ報告書までの階層ベイズモデルでは、報告されている故障件数の不確実さを考慮したモデルを採用しており、モデルで用いる計算式を以下に示す。本報告書においてもこれらのモデルを踏襲しているが、用いる超事前分布等に関して新たな検討を加えている。また、これらのモデルの概念について参考図 - 1 と参考図 - 2 に示す。

時間故障率に関する確率過程モデル設定

時間故障率 λ_i の母集団変動分布は対数正規分布と仮定している。パラメータ μ 及び σ はそれぞれ $\ln \lambda_i$ の平均と標準偏差を表す。対数正規分布は以下の式で与えられる。

$$P(\lambda_i|\sigma, \mu) = \frac{1}{\sigma \lambda_i \sqrt{2\pi}} \exp \left[-\frac{1}{2\sigma^2} (\ln \lambda_i - \mu)^2 \right]$$

発電所 i の露出時間を T_i としたとき、故障件数 x_i は個別発電所故障率 λ_i に支配されるポアソン過程で発生すると仮定し、以下の式で表された確率分布に従う。

$$P(x_i|\lambda, T_i) = \exp(-\lambda_i T_i) \frac{(\lambda_i T_i)^{x_i}}{x_i!}$$

さらに発電所 i で発生した PRA 機能故障が NUCIA に登録される確率 p_i はベルヌーイ過程に従うと仮定すると、当該発電所での PRA 故障件数を x_i とするとき、観測件数 y_i は下記のように二項分布 $Bin(p_i, x_i)$ で表すことができる。

$$P(y_i|x_i, p_i) = {}_{x_i}C_{y_i} p_i^{y_i} (1 - p_i)^{x_i - y_i}$$

データ収集確率の導入により NUCIA PRA 用データベースの故障件数は不確実さを持つが、データ収集確率 p_i 自身もまた不確実さを持っている。その不確実さの事前確率分布は、過去データの分析から推定することとした。

デマンド故障確率に関する確率過程モデル設定

デマンド故障確率 pd_i の母集団変動分布には、NUREG/CR-6823 で推奨されているロジスティック正規分布を用いた。母集団変動分布のパラメータ μ 及び σ は、 $\text{logit}(pd_i)$ の平均及び標準偏差を表す。ロジスティック正規分布は以下の式で

表すことができる。

$$P(pd_i|\sigma, \mu) = \frac{1}{\sigma pd_i(1 - pd_i)\sqrt{2\pi}} \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{\text{logit}(pd_i) - \mu}{\sigma} \right)^2 \right]$$

発電所 i の機器の起動要求回数を D_i とし、発電所 i の故障件数 x_i は個別発電所故障確率 pd_i に支配される二項過程と仮定すると以下の式で表された確率分布に従う。

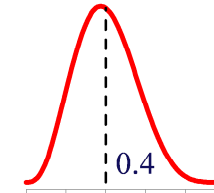
$$P(x_i|pd_i, D) = {}_{D_i}C_{x_i} p_i^{x_i} (1 - p_i)^{D_i - x_i}$$

時間故障率同様に発電所 i で発生した PRA 機能故障が NUCIA に登録される確率 p_i はベルヌーイ過程に従うと仮定すると、当該発電所での PRA 故障件数を x_i とするとき、観測件数 y_i は下記のように二項分布 $Bin(p_i, x_i)$ で表すことができる。

$$P(y_i|x_i, p_i) = {}_{x_i}C_{y_i} p_i^{y_i} (1 - p_i)^{x_i - y_i}$$

なお、ロジスティック正規分布は、故障率が小さい場合には参考図 - 3 に示すとおり対数正規分布で近似できる。

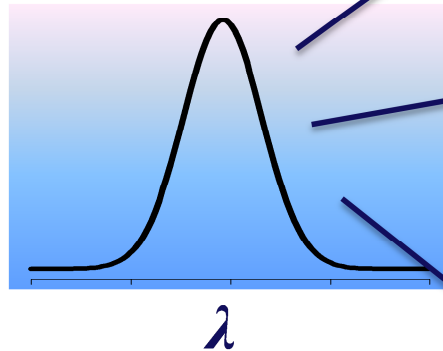
時間故障率階層ベイズモデル



(データ収集確率 p_d の導入)

国内故障率分布(λ)
(母集団ばらつき分布)
 $\lambda \sim$ 対数正規分布

超母数(μ, σ)
(ハイパーパラメータ)

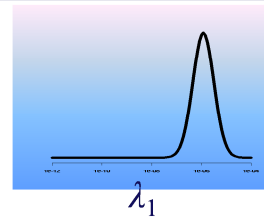


$$f(\lambda; \mu, \sigma) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma\lambda} \exp\left[-\frac{(\ln\lambda - \mu)^2}{2\sigma^2}\right]$$

μ : 故障率の対数平均
 σ : 故障率の対数標準偏差

個別プラント故障率
(不確実さ分布)

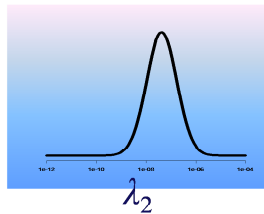
λ_1
プラント1



(n_1, T_1)
ポアソン過程

p_{d1}
二項過程
 (n'_1, T_1)

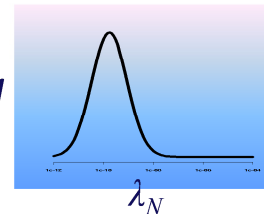
λ_2
プラント2



(n_2, T_2)
ポアソン過程

p_{d2}
二項過程
 (n'_2, T_2)

λ_N
プラントN



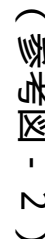
(n_N, T_N)
ポアソン過程

p_{dN}
二項過程
 (n'_N, T_N)

母数 λ

実際の流れ
計算は逆方向に推定される

— 8 —



デマンド故障の事前分布

◆ ロジット正規分布(デマンド故障の確率分布)

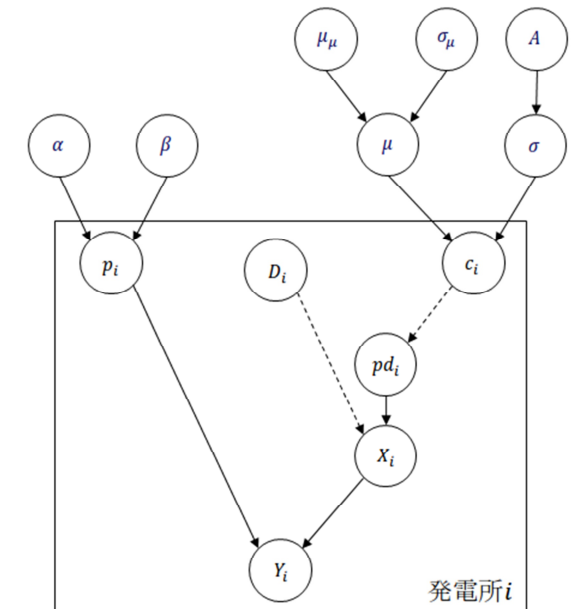
$$p(pd|\mu, \sigma) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}pd(1-pd)} \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{\text{logit}(pd) - \mu}{\sigma} \right)^2 \right]$$

$$\text{logit}(pd) = \ln \left[\frac{pd}{1-pd} \right]$$

◆ 故障率が小さいとき($pd \approx 0$)、ロジットは対数に近似することができる

$$\text{logit}(pd) = \ln \left[\frac{pd}{1-pd} \right] \approx \ln[pd]$$

◆ $pd \approx 0$ のときロジット正規分布は対数正規分布で近似できるため、事前分布も同じものを用いる



← は確率的依存性, ←---- は論理的依存性を表す。

デマンド故障モデル

PRA 用パラメータの推定手法に関する検討報告書

平成 26 年 11 月

編集：PRA 用パラメータ専門家会議

一般社団法人 原子力安全推進協会

連絡先：一般社団法人 原子力安全推進協会

〒108-0014 東京都港区芝 5-36-7 三田ベルジュビル 13～15 階

電話 03 (5418) 9314 (代) FAX 03 (5440) 3607