

電力中央研究所報告

国内原子力発電所の
PRA用一般機器信頼性パラメータの推定

研究報告：NR21002

2021年9月

 電力中央研究所

IR

CRIEPI

**Central Research Institute of
Electric Power Industry**

国内原子力発電所の PRA 用一般機器信頼性パラメータの推定

吉田 智朗^{*1} 曾我 昇太^{*2} 清野 弘章^{*3}

キーワード：確率論的リスク評価
機器信頼性パラメータ
時間故障率
デマンド故障確率
ベイズ統計

Key Words : Probabilistic Risk Assessment
Component Reliability Parameters
Failure Rate
Demand Failure Probability
Bayesian Statistics

Estimation of the generic component reliability parameters for probabilistic risk assessment of the Japanese nuclear power plants

Tomoaki Yoshida, Shota Soga and Hiroaki Seino

Abstract

This report provides improved estimates of the generic component reliability parameters for probabilistic risk assessment of the Japanese nuclear power plants based on the data collected through an explanatory procedure with explicitly defined criteria. The credibility of the previous generic reliability parameters was questioned because the failure data sources were the NUCIA industry database, which is not originally designed for PRA and might not cover the component populations modeled in PRA. To resolve this issue, we use the component failure information directly collected by the Japanese utilities according to the sound definitions of component populations and failure criteria consistent with the utilities PRA models. The technical problems in the previous parameters have been resolved in the new parameters, which are believed to contribute to the enhanced quality of PRA in Japan.

^{*1}原子力リスク研究センター 参事

^{*2}原子力リスク研究センター リスク評価研究チーム 主任研究員

^{*3}原子力リスク研究センター リスク情報活用推進チーム 主任研究員

背景

従来、日本の確率論的リスク評価（PRA: probabilistic risk assessment）で示されていた炉心損傷頻度（CDF: core damage frequency）などのリスク指標は欧米プラントのそれよりも数桁程度小さい傾向があり、その要因の大きな部分が機器故障率など機器信頼性パラメータの低い値にあると考えられることから、日本では PRA として考慮すべき機器故障事象のデータが適切に収集されていないのではないか、との疑念の声が国内外専門家から聞かれることがあった。国内機器故障情報は（一社）原子力安全推進協会（JANSI）の運営する原子力施設情報公開ライブラリー（NUCIA）の原子力機器トラブル情報を用いたものであったが、NUCIA が PRA での使用を目的に設計されたデータベースではないことから、PRA に必要な機器故障情報が国内プラントからもれなく収集されていること、および、推定した数字が日本の原子力機器の信頼性水準を的確に表していることを明確な証拠で示すのは困難であった。

目的

国内で PRA 用として適切に収集した機器故障情報を用いて、説明性のある国内一般機器信頼性パラメータ、特に本報告では時間故障率およびデマンド故障確率を推定する。また、日本のパラメータの数値が米国のもものと比べて 2 桁以上も低くなるのかどうか確認する。

主な成果

1. 国内一般機器信頼性パラメータの推定

電力各社のプラント PRA でモデル化している機種・故障モードについて、各社の品質保証体制の下、プラント不具合情報から信頼性の高い機器故障情報を収集し、その情報を用いて国内一般機器信頼性パラメータを推定した。故障情報の対象は、現在再稼働済みまたは再稼働予定の 27 プラントにおいて 2004 年度から 2010 年度に発生した機器故障事象である。収集手順を図 1 に示す。推定方法は、米国の一般機器信頼性パラメータの推定に用いられているベイズ統計手法を用いた（図 2）。

2. 米国の一般機器信頼性パラメータとの比較

国内一般機器信頼性パラメータを米国の一般パラメータと比較したところ、国内パラメータの水準は、米国と同等もしくは若干低い傾向を示し、米国の数値より 2 桁も低いような事例はほとんどなかった（表 1）。

今後の展開

機器故障情報の収集と一般機器信頼性パラメータの推定は今後も継続的に行い、信頼性の高い PRA 用パラメータの整備と充実を進めていく。また、その他、共通原因故障など PRA に必要なパラメータ全般の整備を進めていく。

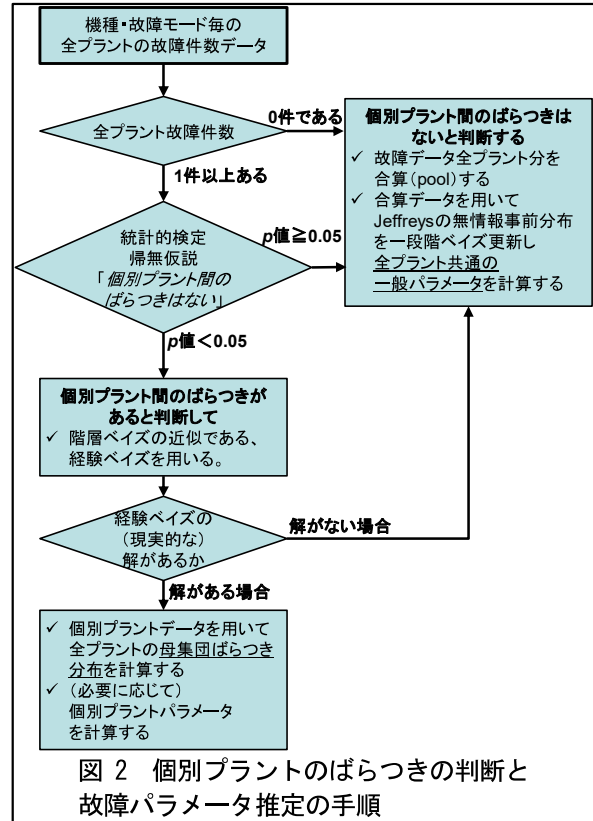
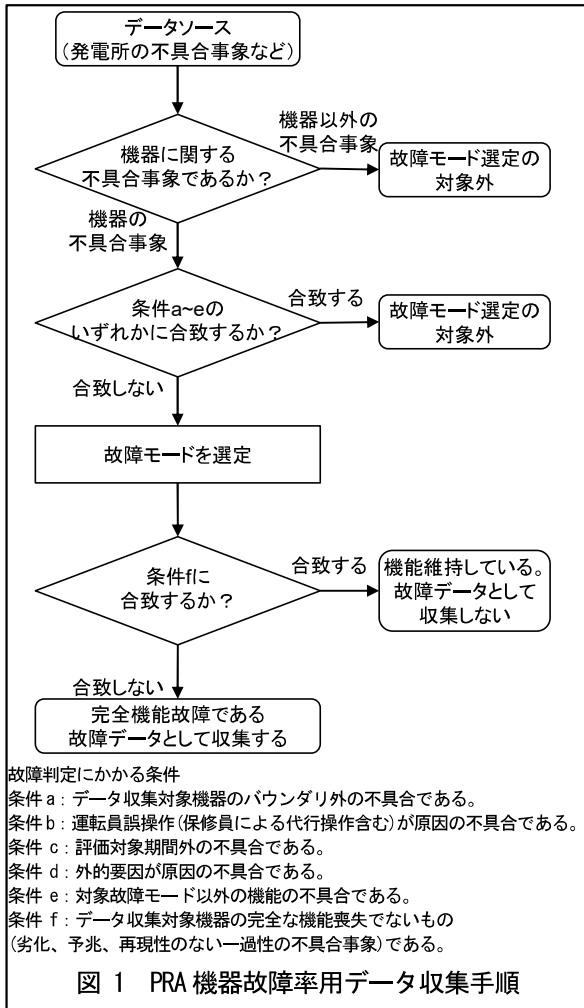


表 1 一般機器故障率の日米比較の例

「比」の欄：日本のほうが米国より数値が小さいものを太字で、さらに米国の 5%以下のものを下線で示した。

ID	機種	故障モード	故障件数	国内データ			国内新故障率		米国故障率		比
				運転時間(h)	プラント数	Mean/(h)	EF	Mean/(h)	EF		
T2	非常用ディーゼル発電機	継続運転失敗	7	6,907	27	1.1E-03	1.7	3.7E-03	2.2	0.29	
T4	電動ポンプ (通常運転、純水)	継続運転失敗	1	10,431,547	27	1.4E-07	3.3	3.8E-06	2.2	0.04	
T6	電動ポンプ (通常運転、海水)	継続運転失敗	0	4,697,834	27	1.1E-07	8.4	3.8E-06	2.2	0.03	
T8	電動ポンプ (通常待機、純水)	継続運転失敗	0	13,331	27	3.8E-05	8.4	1.2E-04	4.9	0.31	
T10	電動ポンプ (通常待機、海水)	継続運転失敗	0	4,057	5	1.2E-04	8.4	1.2E-04	4.9	1.01	
T12	タービン駆動ポンプ	継続運転失敗	0	831	27	6.0E-04	8.4	3.7E-03	4.8	0.16	
T14	ディーゼル駆動ポンプ	継続運転失敗	0	76	2	6.6E-03	8.4	9.8E-04	1.6	6.71	
T18	電動弁 (純水)	調剤又は誤開	0	148,036,418	27	3.4E-09	8.4	3.2E-08	6.9	0.10	
T19	電動弁 (純水)	外部リーク	0	99,577,958	21	5.0E-09	8.4	2.7E-08	8.7	0.19	
T20	電動弁 (純水)	内部リーク	4	60,486,595	26	7.4E-08	2.0	7.6E-08	5.5	0.98	
T25	電動弁 (海水)	調剤又は誤開	0	18,219,232	27	2.7E-08	8.4	3.2E-08	6.9	0.85	
T26	電動弁 (海水)	外部リーク	0	6,707,431	8	7.5E-08	8.4	2.7E-08	8.7	2.75	
T27	電動弁 (海水)	内部リーク	3	9,118,729	14	3.8E-07	2.2	7.6E-08	5.5	5.06	
T32	空気作動弁	調剤又は誤開	1	77,465,541	27	1.9E-08	3.3	1.1E-07	3.9	0.18	
T33	空気作動弁	外部リーク	1	60,978,708	21	2.5E-08	3.3	4.5E-08	1.2	0.55	
T34	空気作動弁	内部リーク	4	39,865,996	25	1.1E-07	2.0	7.8E-08	1.2	1.45	
T39	油圧作動弁	調剤又は誤開	0	6,037,453	17	8.3E-08	8.4	1.9E-07	1.5	0.44	
T40	油圧作動弁	外部リーク	0	1,652,120	4	3.0E-07	8.4	1.3E-07	1.5	2.26	
T41	油圧作動弁	内部リーク	0	4,743,976	11	1.1E-07	8.4	4.8E-08	2.0	2.18	
T46	逆止弁	外部リーク	0	98,164,738	21	5.1E-09	8.4	7.7E-09	1.7	0.66	
T47	逆止弁	内部リーク	1	28,061,015	26	5.3E-08	3.3	2.1E-07	7.8	0.26	
T51	手動弁	外部リーク	0	378,640,021	21	1.3E-09	8.4	1.1E-07	1.5	0.01	
T52	手動弁	内部リーク	5	90,899,545	26	4.9E-08	17.7	6.9E-08	6.1	0.71	
T57	安全弁	誤開	0	38,985,411	27	1.3E-08	8.4	5.4E-08	1.6	0.24	
T58	安全弁	外部リーク	0	28,480,458	21	1.8E-08	8.4	1.2E-08	2.5	1.49	
T59	安全弁	内部リーク	1	21,194,997	26	7.1E-08	3.3	6.9E-08	1.5	1.03	

目 次

1. はじめに	1
2. PRA 用機器信頼性パラメータ評価手法	2
2.1 確率過程モデル、パラメータおよびデータの関係	2
2.2 パラメータ推定手法	3
2.2.1 基本的考え方：ベイズ統計手法	3
2.2.1.1 一段階ベイズ手法	3
2.2.1.2 階層ベイズ手法	3
2.2.1.3 個別プラント間のばらつきの判断	5
2.2.2 デマンド故障確率推定の定式化	6
2.2.2.1 個別プラント間のばらつきがある場合のデマンド故障確率推定	6
2.2.2.2 個別プラント間のばらつきがない場合のデマンド故障確率推定	7
2.2.3 時間故障率推定の定式化	7
2.2.3.1 個別プラント間のばらつきがある場合の時間故障率推定	7
2.2.3.2 個別プラント間のばらつきがない場合の時間故障率推定	9
3. 国内一般機器信頼性パラメータの推定	9
3.1 国内一般機器故障データ	9
3.2 国内一般機器信頼性パラメータ	10
3.3 米国一般機器信頼性パラメータとの比較	16
3.4 過去の一般機器信頼性パラメータとの比較	16
3.5 機器信頼性パラメータ比較のまとめ	16
4. 謝辞	25
参考文献	25
附録 A 収集データ	A-1-1

1. はじめに

本報は、国内プラントで収集した機器故障情報から、日本の原子力プラントの確率論的リスク評価（PRA: probabilistic risk assessment）に用いるための国内一般の機器（時間）故障率、および機器（デマンド）故障確率（一般的には、いく種類もある機器信頼性パラメータ¹のうちの一部）を推定²した結果について述べたものである。

従来、日本の PRA で用いられていた国内機器故障率/故障確率は、（一社）原子力安全推進協会（JANSI）の運営する原子力施設情報公開ライブラリー（NUCIA）¹¹の原子力機器トラブル情報を用いて推定されたものであった¹²⁻⁷。これらの値を用いて推定された日本のプラントの炉心損傷頻度（CDF）などのリスク指標が欧米プラントのそれよりも数桁程度小さい傾向があり、その要因の大きな部分が機器故障率/故障確率の低い値にあると考えられることから、日本では PRA として考慮すべき機器故障事象のデータが適切に収集されていないのではないか、との疑念の声が国内外専門家から聞かれることもあった。しかしながら、次のような NUCIA データベースの性格から、PRA に必要な故障情報が国内プラントからもれなく収集されていること、および、推定した数字が日本の原子力機器の信頼性水準を的確に表していることを明確な証拠で示すのは困難であった。

- NUCIA のトラブル情報入力基準は、PRA に必要な対象機器や故障基準などを考慮して設定されているわけではないため、PRA に必要な故障情報が収集されているとは限らないこと

- 機器故障情報以外に機器故障率/故障確率の推定に必要な情報、すなわち、機器母集団数、機器供用時間、起動デマンド数などは NUCIA には登録されないために、別途当該プラントの P&ID や運転情報から概算せざるをえないことから、推定された機器故障率/故障確率に把握しづらい不確かさが含まれること

日本の電気事業者が東京電力福島第一原子力発電所事故の反省を踏まえて NRRC を設立し本格的に PRA の技術開発に取り組む中で、PRA の基本となる機器故障等の信頼性情報をプラント個別で収集し、説明性の高い機器故障率/故障確率を推定しようという動きが始まった。NRRC では、欧米の文献・先行事例を参考にして、個別プラントの PRA モデルとの整合性、および、故障情報内容の説明性が確保されるようなデータ収集プロセスを策定し³、これに基づいて各プラントから収集された機器故障情報を用いて、日本での PRA 用一般機器故障率/故障確率を推定した。

本報告では、PRA 用パラメータの推定のために収集するデータ仕様とそのデータから PRA 用パラメータを推定する手法、および、推定の結果について述べる。さらに、得られた国内の機器故障率/故障確率が米国の原子力産業界と比較してどの程度の水準にあるかを確認する。

¹ パラメータ：日本原子力学会標準 AESJ-SC-RK003 :2018「原子力施設のリスク評価標準で共通に使用される用語の定義：2018」によれば、“2.41 パラメータ (Parameter) 確率分布を特徴付ける数。

注記 確率論及び統計学における母数のこと。

例 起因事象発生頻度、機器故障率又は機器故障確率、アンアベイラビリティ、平均復旧時間”との定義がある。

² 故障率や故障確率についての真値は不可知であり、その値について知るには故障データから統計的に推測する以外方法がないため、「推定」という表現を使う。

³ データ収集のガイドは別途公刊予定。

2. PRA 用機器信頼性パラメータ評価手法

2.1 確率過程モデル、パラメータおよびデータの関係

PRA への入力となる機器信頼性パラメータの種類と、それぞれに関連する確率過程モデル、およびパラメータ推定のために収集するデータの概要を表 2-1 にまとめた（米国 NRC の PRA 用パラメータハンドブック NUREG/CR-6823^[8]を参考に作成）。このうち、本報告では、「機器故障」の「起動失敗または状態変更失敗」と「継続運転失敗または状態維持失敗」を対象としている。

ここでいう「起動失敗または状態変更失敗」は、

対象機器に起動（または状態変更）デマンドをかけたときにある割合で失敗する、という確率事象であり、これを、 N 回のデマンド数に対して失敗回数 X （＝故障件数）が、確率（デマンド故障確率） $p \in [0,1]$ を持つ二項過程で発生する、という確率過程モデルで表す。式で書けば下記のように表される。

$$X \sim \text{Binomial}(N, p) \quad (2-1)$$

または、

$$P(X = x|p) = \binom{N}{x} p^x (1-p)^{N-x} \quad (2-2)$$

ここで、 N は正の整数、 x は $N \geq x$ である非負の整数、 $P(\cdot | \star)$ は、条件“ \star ”のとき命題“ \cdot ”が真となる確率を表す。機器故障確率 p を推定するため

表 2-1 PRA 用機器信頼性パラメータの種類とその推定に必要なデータ

事象	パラメータ	パラメータ解説	代表的な確率過程モデルと必要データ
機器故障	起動失敗 または 状態変更失敗	デマンド故障確率	ある状態にある機器が状態変更要求（デマンド）を受けた時に故障する確率
		待機時間故障率	機器が待機中に故障し、状態変更要求時に機能しない率
	継続運転失敗 または 状態維持失敗	機能維持失敗率	ある状態にある機器がその状態を維持できなくなる率
	共通原因故障 パラメータ	Multiple Greek Letter モデル β, γ, δ α ファクタモデル $\alpha 1, \alpha 2, \alpha 3 \dots$	全機器故障率の中で複数同時故障率が占める割合
供用不能状態	アンアベイラビリティ	試験および保修によりシステムが供用不能状態となっている時間の割合	交代再生過程モデル ・ 供用不能/待機除外時間 ・ 機器機能に期待する時間 (原子炉運転時間、歴時間)
復旧事象	復旧時間	システムまたは機器が、故障により待機除外となった後、復旧して供用可能となるまでの時間	ワイブル過程モデル ・ 復旧するまでの時間
起回事象	起回事象発生頻度	事故シーケンスの発端となる事象が発生する頻度	ポアソン過程モデル ・ 事象発生件数 ・ 事象の起こり得る露出時間 (原子炉運転時間、歴時間)

に収集するデータはデマンド数 N と故障件数 x である。

「継続運転失敗または状態維持失敗」は、運転中（または供用中）の機器が、ある観測時間の間に、ある頻度で故障して運転停止（または供用状態維持失敗）する、という確率事象である。これを、運転（または供用）時間 T （exposure time, 曝露時間⁴または露出時間）の間に故障数 X が発生頻度（時間故障率） $\lambda \in [0, \infty]$ [単位時間]を持つポアソン過程で発生する、という確率モデルで表す。

$$X \sim \text{Poisson}(\lambda T) \quad (2-3)$$

または、

$$P(X = x | \lambda T) = \frac{(\lambda T)^x e^{-\lambda T}}{x!} \quad (2-4)$$

ここで、 T は正の実数、 x は非負の整数である。機器故障率 λ を推定するために収集するデータは露出時間 T と故障件数 x である。なお、デマンド故障事象を、待機時間中の故障としてポアソン過程モデルで表現するという考え方もあり、欧州、日本のBWRグループで採用されている。

2.2 パラメータ推定手法

2.2.1 基本的考え方：ベイズ統計手法

パラメータ推定の基本的考え方はベイズ統計手法による。ここでは詳細については割愛し、要点のみ述べる（詳細はNUREG/CR-6823^[8]、Gelman^[9]等を参照）。

2.2.1.1 一段階ベイズ手法

故障データ D が、機器信頼性パラメータ θ^5 を持つ（＝特徴づけられる）確率過程 $\pi(D|\theta)$ ⁶により生成されるとすると、条件付き確率の関係(2-5)からベイズの定理(2-6)が成り立つ。

$$\begin{aligned} P(D, \theta) &= P(D)P(\theta|D) \\ &= P(\theta)P(D|\theta) \end{aligned} \quad (2-5)$$

$$\begin{aligned} \therefore P(\theta|D) &= \frac{1}{P(D)} \pi(D|\theta)P(\theta) \\ &\propto \pi(D|\theta)P(\theta) \end{aligned} \quad (2-6)$$

ここで、 $P(D, \theta)$ は D と θ の同時確率分布、 $P(D|\theta)$ は確率過程 $\pi(D|\theta)$ のことであり、また、 $P(D) = \int_{\theta} \pi(D|\theta)P(\theta)d\theta$ は、式(2-6)が θ の確率分布となるための規格化定数である（すなわち、 θ の全領域について積分すると1になる）。

式(2-6)は、パラメータ θ の事前情報 $P(\theta)$ とデータ D から、 θ の情報（確率分布） $P(\theta|D)$ を得るパラメータ推定方法を表している。この手法を、一段階ベイズ手法と呼ぶ。なお、 $\pi(D|\theta)$ は、本来、データ D を確率変数とする確率分布であるが、ここでは D が既知であるためパラメータ θ についての関数となっており、これを尤度関数という⁷。

2.2.1.2 階層ベイズ手法

前項は、プラント単体での議論であるが、次にこれを拡張して国内 M 基のプラント（ $M \geq 2$ 、 M は整数）個別のパラメータ θ_j をデータ D_j （ $j = 1, 2, \dots, M$ ）から推定する場合について考える。

$$\begin{cases} \vec{\theta} = (\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_M) \\ \vec{D} = (D_1, D_2, \dots, D_M) \end{cases} \quad (2-7)$$

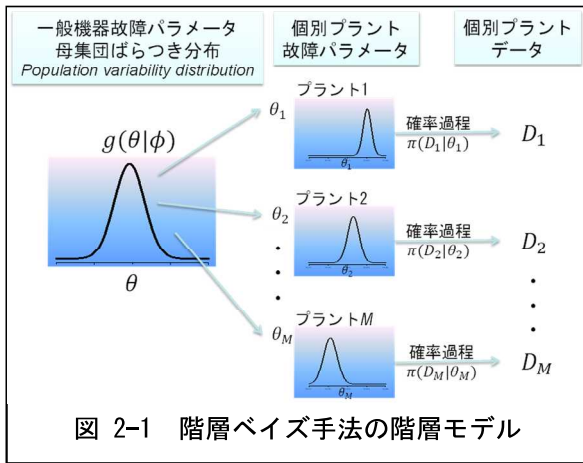
⁴ 機器が故障する可能性に曝されている（exposed）時間、という意味。ただし、国内の標準的慣行に従い、本報告では「露出時間」とする。

⁵ 例えば故障率、故障確率など。

⁶ 例えばポアソン過程、二項過程など。

⁷ データ D が発生する確率過程を表す $\pi(D|\theta)$ は D についての確率関数なので $\int_D \pi(D|\theta)dD = 1$ であるが、尤度関数としての $\pi(D|\theta)$ は θ についての関数となり確率関数にはならないことに注意。

ここで、パラメータ $\vec{\theta}$ は産業界を母集団とするばらつき分布 (population variability distribution) $g(\theta|\phi)$ から生成されたもの、というモデルを想定する。ここで、 ϕ は、 $\vec{\theta}$ の母集団の分布 $g(\theta|\phi)$ の形を決める (特徴づける) パラメータで、ハイパーパラメータといい、産業界で共通である。このように、故障データ D の生成する確率過程が機器信頼性パラメータ θ とその分布を表す ϕ の階層モデルで表されることから、本項で述べる手法は階層ベイズ手法と呼ばれる。階層ベイズ手法の階層ベイズモデルを図 2-1 に示す。図中の矢印は、確率分布 g 、 π からそれぞれパラメータ θ_j 、データ D_j がサンプルされる様子を表す。



階層ベイズ手法の定式化について簡単に述べる⁹⁾。まず、条件付確率の関係から式(2-8)が成り立つ。

$$\begin{aligned}
 P(\vec{\theta}, \phi) &= P(\phi)P(\vec{\theta}|\phi) \\
 &= P(\phi)g(\vec{\theta}|\phi) \\
 &= P(\phi) \prod_{j=1}^M g(\theta_j|\phi) \quad (2-8)
 \end{aligned}$$

式(2-8)右辺第2行目は、 $P(\vec{\theta}|\phi) \equiv g(\vec{\theta}|\phi)$ を用い、第3行目は図2-1から $g(\vec{\theta}|\phi) = \prod_{j=1}^M g(\theta_j|\phi)$ を用いた。

また、データ \vec{D} からベイズの定理でパラメータ $(\vec{\theta}, \phi)$ を求めることを考えると、式(2-6)と同様にして (つまり、式(2-6)の θ を $(\vec{\theta}, \phi)$ で置き換え)、次式が成り立つ。

$$\begin{aligned}
 P(\vec{\theta}, \phi|\vec{D}) &\propto \pi(\vec{D}|\vec{\theta}, \phi)P(\vec{\theta}, \phi) \\
 &= \pi(\vec{D}|\vec{\theta})P(\vec{\theta}|\phi)P(\phi) \\
 &= \prod_{j=1}^M \pi(D_j|\theta_j)P(\vec{\theta}|\phi)P(\phi) \quad (2-9)
 \end{aligned}$$

式(2-9)において、データ \vec{D} の分布 $\pi(\vec{D}|\vec{\theta}, \phi)$ は、 $\vec{\theta}$ のみに依存するため (図2-1)、 $\pi(\vec{D}|\vec{\theta})$ とした。また、個別プラントデータ D_j は個別プラントパラメータ θ_j のみに依存するため、 $\pi(\vec{D}|\vec{\theta}) = \prod_{j=1}^M \pi(D_j|\theta_j)$ とした。

結局、式(2-8)と式(2-9)から、式(2-10)を得る。

$$P(\vec{\theta}, \phi|\vec{D}) \propto \prod_{j=1}^M \pi(D_j|\theta_j) \prod_{j=1}^M g(\theta_j|\phi) P(\phi) \quad (2-10)$$

式(2-10)において、 π は、データ生成の確率過程を表す確率分布の形なので想定条件として評価者が与えるものである。また、仮定から $g(\theta|\phi)$ は母集団ばらつき分布として与えられる。したがって、あとはハイパーパラメータ ϕ の事前分布 $P(\phi)$ を適宜定めれば、式(2-10)はデータ \vec{D} が得られた時の $(\vec{\theta}, \phi)$ の同時確率分布を明示的に表したものとなる (規格化定数を除く)。なお、式(2-10)における尤度関数は

$\prod_{j=1}^M \pi(D_j|\theta_j) \prod_{j=1}^M g(\theta_j|\phi)$ の部分となる。

式(2-10)から $\vec{\theta}, \phi$ それぞれの分布を求めるには、現在ではマルコフ連鎖モンテカルロ (MCMC) 手法等により未知パラメータの事後分布をサンプルして求める手法が発達している。さらに、そのようにして得られたハイパーパラメータ ϕ の事後分布を用いて、 θ の母集団ばらつき分布 $g(\theta|\phi)$ (すなわち産業界の一般パラメータ分布) の予測分布をモンテカルロサンプリングによって求めることができる。

しかしながら、従来の NUCIA データを用いた機器故障率推定において階層ベイズ手法を用いた経験によると、機器故障件数データが希少な場合 (たとえば全プラントあわせても数件程度) は

θ, ϕ の MCMC 計算が収束しにくく、そのため $g(\theta|\phi)$ の収束解も得られにくくなる[5-7]。したがって、今回の推定では、米国の一般機器故障パラメータを推定している NUREG/CR-6928^[10]およびその更新版^[11-13]の方法にならい、MCMC を使わない簡便な近似計算方法を用いた。すなわち、

- 母集団ばらつき分布の事前分布（式(2-10)の $g(\theta_j|\phi)$ ）として、共役事前分布⁸を用いることにより、未知パラメータの事後分布（式(2-10)）を解析的に表す。
- 経験ベイズ手法⁹を用いる。すなわち、パラメータの事前情報（ここでは ϕ ）を、データの情報を用いて最尤法¹⁰で求める。これにより、MCMC が収束しない問題に悩まされることなく、実用に耐え得るパラメータ推定ができる。

2.2.1.3 個別プラント間のばらつきの判断

階層ベイズモデルは、産業界の個々のプラント間で機器信頼性パラメータ（故障率/故障確率）がばらついている（異なる）ことを前提としているが、実際の計算ではプラント間の相違が見分けられず個別プラントごとの結果が得られない場合もある。そこで、ベイズ手法の適用前に統計的検定¹¹を行ってプラント間のばらつきがあるかないかを判断した。

検定によりばらつきがないと判断した場合は、産業界全体（全プラント）で同じパラメータを持つものとして、全プラントのデータを合算（pool）し Jeffreys の無情報事前分布で一段階ベイズを行い^[8]、全プラント共通の一般パラメータを推定し

た。一方、プラント間のばらつきがあると判断した場合は、階層ベイズを近似した経験ベイズにより、全プラントを包絡する一般パラメータとして母集団ばらつき分布を求めた。なお、故障件数が 0 の場合は検定ができずばらつきを判断する情報がないため、ばらつきはないものと判断した。また、検定でばらつきがあると判断されても、データによっては経験ベイズの解がない場合もあるので、そのときもばらつきはないものと判断した。個別プラント間のばらつきの判断手順を図 2-2 に示す。

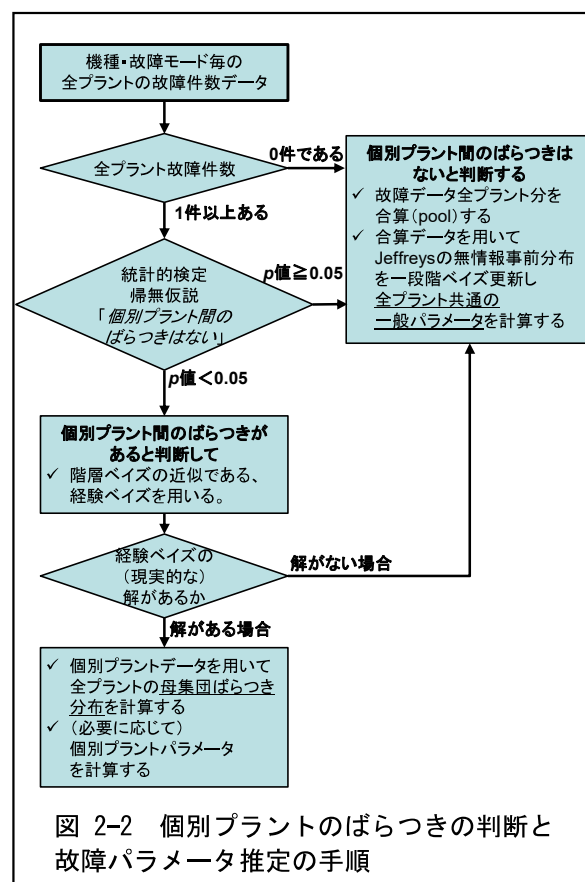


図 2-2 個別プラントのばらつきの判断と故障パラメータ推定の手順

⁸ 事前分布と事後分布が同じ関数形になるように定めた事前分布を共役事前分布という。共役事前分布の形は、尤度関数の形によって決まる。
⁹ 本来、「事前情報」とはデータの情報を得る前の事前知識をいうので、データの情報で事前情報を決めるこの方法は自己矛盾しているが、データと矛盾しない事前情報が定められるので実際には有効な方法としてよく使われている。
¹⁰ 最尤法：尤度関数を最大とするパラメータ（ここでは ϕ ）の値をそのパラメータの点推定値とする方法。
¹¹ 「個別プラント間のばらつきはない」という帰無仮説の下に、通常は χ^2 検定を行うが、今回用いた 7 年間の運転経験データでは故障件数が希少なことから χ^2 検定の精度が高くないため、件数希少の場合にも使用できるモンテカルロ検定^[14]を実施した。

2.2.2 デマンド故障確率推定の定式化

2.2.2.1 個別プラント間のばらつきがある場合のデマンド故障確率推定

待機機器の起動失敗の場合、式(2-10)において、データ生成の確率過程 π は二項分布であり、式(2-2)で与えられている。よって、デマンド故障（起動失敗）確率 θ_j は p_j 、故障データ D_j は (x_j, N_j) であり、 $\pi(x_j|p_j)$ は以下の形となる。

$$\pi(x_j|p_j) = \binom{N_j}{x_j} p_j^{x_j} (1-p_j)^{N_j-x_j} \quad (2-11)$$

また、計算を容易にするため、母集団ばらつき分布 $g(p_j|\phi)$ は二項分布に対する共役分布であるベータ分布とし、その母数（超母数） ϕ を (α, β) , $(\alpha > 0, \beta > 0)$ とすると次式で表される。

$$g(p_j|\alpha, \beta) = \frac{\Gamma(\alpha + \beta)}{\Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)} p_j^{\alpha-1} (1-p_j)^{\beta-1} \quad (2-12)$$

これらを式(2-10)に代入し、故障件数データ x_j から個別プラントのデマンド故障確率 p_j と母集団ばらつき分布の母数 (α, β) の事後分布を表す式が得られる。

$$\begin{aligned} P(\vec{p}, \alpha, \beta|\vec{x}) &\propto \prod_{j=1}^M p_j^{x_j} (1-p_j)^{N_j-x_j} \\ &\times \prod_{j=1}^M \frac{\Gamma(\alpha + \beta)}{\Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)} p_j^{\alpha-1} (1-p_j)^{\beta-1} \\ &\times P(\alpha, \beta) \end{aligned} \quad (2-13)$$

ここで、 $\vec{p} = (p_1, p_2, \dots, p_M)$ 、 $\vec{x} = (x_1, x_2, \dots, x_M)$ である。

通常、式(2-13)から \vec{p}, α, β を計算するには、超事前分布 $P(\alpha, \beta)$ を適宜定めて MCMC 法を用いるが、一般に日本のようにデータ件数 $(\sum_j x_j)$ が希少な場合はモンテカルロ計算が安定せず収束しない場合が多いので、ここでは最尤法により超母数 (α, β) の最尤推定値 $(\hat{\alpha}, \hat{\beta})$ を定める経験ベイズ手法を用いることにした。最尤推定値 $(\hat{\alpha}, \hat{\beta})$ は分布を

持たないが、これを式(2-12)に代入して近似値としての故障確率の母集団ばらつき分布が求められる。個別プラント故障確率については、 $(\hat{\alpha}, \hat{\beta})$ に不確かさ近似（The Kass-Steffey adjustment）を加えて求めることができる^[8]。

まず、式(2-13)において、 (α, β) が所与とすると、

$$P(\vec{p}|\alpha, \beta, \vec{x}) \propto \prod_{j=1}^M p_j^{\alpha+x_j-1} (1-p_j)^{\beta+N_j-x_j-1} \quad (2-14)$$

となり、これは $p_j^A (1-p_j)^B$ という形をしているので、次のようにベータ分布として書ける。

$$\begin{aligned} P(\vec{p}|\alpha, \beta, \vec{x}) &= \prod_{j=1}^M \frac{\Gamma(\alpha + \beta + N_j)}{\Gamma(\alpha + x_j)\Gamma(\beta + N_j - x_j)} \\ &\times p_j^{\alpha+x_j-1} (1-p_j)^{\beta+N_j-x_j-1} \end{aligned} \quad (2-15)$$

式(2-13)と式(2-15)に条件付確率の関係

$$P(\alpha, \beta|\vec{x}) = \frac{P(\vec{p}, \alpha, \beta|\vec{x})}{P(\vec{p}|\alpha, \beta, \vec{x})} \quad (2-16)$$

を用いて、 (α, β) の周辺分布の形が得られる。

$$\begin{aligned} P(\alpha, \beta|\vec{x}) &\propto P(\alpha, \beta) \\ &\times \prod_{j=1}^M \binom{N_j}{x_j} \frac{\Gamma(\alpha + \beta)}{\Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)} \frac{\Gamma(\alpha + x_j)\Gamma(\beta + N_j - x_j)}{\Gamma(\alpha + \beta + N_j)} \end{aligned} \quad (2-17)$$

式(2-17)を beta-binomial モデルという。尤度関数 $L(\alpha, \beta|\vec{x})$ は第2行の項で表される。

$$\begin{aligned} L(\alpha, \beta|\vec{x}) &= \prod_{j=1}^M \binom{N_j}{x_j} \frac{\Gamma(\alpha + \beta)}{\Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)} \frac{\Gamma(\alpha + x_j)\Gamma(\beta + N_j - x_j)}{\Gamma(\alpha + \beta + N_j)} \end{aligned} \quad (2-18)$$

最尤法では、尤度関数を最大とする (α, β) の値 $(\hat{\alpha}, \hat{\beta})$ をその推定値とする。この解き方は、NUREG/CR6823^[8]の8章（特に8.2）に記載されているので、ここでは簡単に手順概要を示す。

まず、超母数 (α, β) を以下のような (δ, μ) に変換する。

$$\begin{cases} \delta = \alpha + \beta \\ \mu = \alpha / \delta \end{cases} \quad (2-19)$$

(α, β)はベータ分布の母数なので、当該ベータ分布の平均と分散は(δ, μ)を用いて以下のように表される。

$$\text{平均: } \frac{\alpha}{\alpha + \beta} = \mu$$

$$\text{分散: } \frac{\alpha\beta}{(\alpha + \beta)^2(\alpha + \beta + 1)} = \frac{\mu(1 - \mu)}{\delta + 1}$$

この変換によって、母数(δ, μ)の意味を分布の平均と分散に関連付けて考えやすくなる。

尤度関数 $L(\alpha, \beta | \vec{x})$ を(δ, μ)の関数に変化し、関数を最大とする(δ, μ)を求めるために、以下の連立方程式を解く。

$$\begin{cases} \frac{\partial L}{\partial \delta} = 0 \\ \frac{\partial L}{\partial \mu} = 0 \end{cases} \quad (2-20)$$

連立方程式(2-20)の解が最尤推定値($\hat{\delta}, \hat{\mu}$)として得られれば、式(2-19)の逆変換(2-21)で($\hat{\alpha}, \hat{\beta}$)が得られる。

$$\begin{cases} \alpha = \mu\delta \\ \beta = (1 - \mu)\delta \end{cases} \quad (2-21)$$

なお、連立方程式(2-20)は常に解があるとは限らず、それはプラント間のデマンド故障確率にあまりばらつきがないことを意味する。特に $\delta > \sum_j n_j$ となったときは、全プラントのデータを統合(pool)したときよりも分散が小さくなる。一方、おおむね $\alpha < 0.3$ となった場合は5%値と平均値との開きが4桁以上にもなり、非現実的な結果になることもわかっている^[13]。したがって、上記のような場合は、全プラントが同じデマンド故障確率を持つものと判断し、階層ベイズモデルを使う意味がないため、全プラントを統合したデータ($\sum_j x_j, \sum_j N_j$)で全プラント共通のデマンド故障確率を一段階ベイズで推定する。

2.2.2.2 個別プラント間のばらつきがない場合のデマンド故障確率推定

全プラントデータを合算して以下のように表す。

$$\begin{cases} x_I = \sum_{j=1}^M x_j \\ N_I = \sum_{j=1}^M N_j \end{cases} \quad (2-22)$$

全プラント共通のデマンド故障確率 p_I を、二項分布に対するJeffreysの共役無情報事前分布Beta(1/2, 1/2)を用いて一段階ベイズで求めると、 p_I の事後分布もベータ分布となる。

$$p_I | x_I, N_I \sim \text{Beta}\left(x_I + \frac{1}{2}, N_I - x_I + \frac{1}{2}\right) \quad (2-23)$$

これを関数の形で書くと次式で与えられる。

$$P_{\text{post}}(p_I | x_I, N_I) = \frac{1}{B\left(x_I + \frac{1}{2}, N_I - x_I + \frac{1}{2}\right)} \times p_I^{x_I - 1/2} (1 - p_I)^{N_I - x_I - 1/2} \quad (2-24)$$

($B(*, *)$ はベータ関数)

2.2.3 時間故障率推定の定式化

2.2.3.1 個別プラント間のばらつきがある場合の時間故障率推定

運転中機器の継続運転失敗の場合、式(2-10)において、データ生成の確率過程 π はポアソン分布、式(2-4)なので、時間故障(継続運転失敗)率 θ_j は λ_j 、故障データ D_j は(x_j, T_j)であり、 $\pi(x_j | \lambda_j)$ は以下の形となる。

$$\pi(x_j | \lambda_j) = \frac{(\lambda_j T_j)^{x_j} e^{-\lambda_j T_j}}{x_j!} \quad (2-25)$$

また、計算を容易にするため、母集団ばらつき分布 $g(\lambda_j | \phi)$ はポアソン分布に対する共役分布であるガンマ分布とし、その母数(超母数) ϕ を(α, β), ($\alpha > 0, \beta > 0$)とすると¹²、次式のように表

¹² この(α, β)は、2.2.2のベータ分布の母数とは異なるものである。

される。

$$g(\lambda_j|\alpha, \beta) = \frac{\beta^\alpha}{\Gamma(\alpha)} \lambda_j^{\alpha-1} e^{-\lambda_j \beta} \quad (2-26)$$

これらを式(2-10)に代入し、故障件数データ x_j から個別プラントの時間故障率 λ_j と母集団ばらつき分布の母数 (α, β) の事後分布を表す式が得られる。

$$\begin{aligned} P(\vec{\lambda}, \alpha, \beta | \vec{x}) &\propto \prod_{j=1}^M \frac{(\lambda_j T_j)^{x_j} e^{-\lambda_j T_j}}{x_j!} \\ &\times \prod_{j=1}^M \frac{\beta^\alpha}{\Gamma(\alpha)} \lambda_j^{\alpha-1} e^{-\lambda_j \beta} \\ &\times P(\alpha, \beta) \end{aligned} \quad (2-27)$$

$\vec{\lambda} = (\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_M)$ 、 $\vec{x} = (x_1, x_2, \dots, x_M)$ である。

ここでも 2.2.2 と同じ理由で、式(2-27)から $\vec{\lambda}, \alpha, \beta$ を計算するために、最尤法により超母数 (α, β) の最尤推定値 $(\hat{\alpha}, \hat{\beta})$ を定める経験ベイズ手法を用いる。最尤推定値 $(\hat{\alpha}, \hat{\beta})$ を式(2-26)に代入して近似値としての故障確率の母集団ばらつき分布が求められる。個別プラント時間故障率については、 $(\hat{\alpha}, \hat{\beta})$ に不確かさ近似 (The Kass-Steffey adjustment) を加えて求めることができる^[8]。

まず、式(2-27)において、 (α, β) が所与とすると、

$$P(\vec{\lambda}|\alpha, \beta, \vec{x}) \propto \prod_{j=1}^M \lambda_j^{\alpha+x_j-1} e^{-\lambda_j(\beta+T_j)} \quad (2-28)$$

であり、これは $\lambda_j^A e^{-B}$ という形をしているので、次のようにガンマ分布として書ける。

$$\begin{aligned} P(\vec{\lambda}|\alpha, \beta, \vec{x}) \\ = \prod_{j=1}^M \frac{(\beta + T_j)^{\alpha+x_j}}{\Gamma(\alpha + x_j)} \lambda_j^{\alpha+x_j-1} e^{-\lambda_j(\beta+T_j)} \end{aligned} \quad (2-29)$$

式(2-27)と式(2-29)と条件付確率の関係

$$P(\alpha, \beta | \vec{x}) = \frac{P(\vec{\lambda}, \alpha, \beta | \vec{x})}{P(\vec{\lambda} | \alpha, \beta, \vec{x})} \quad (2-30)$$

を用いて、 (α, β) の周辺分布の形が得られる。

$$\begin{aligned} P(\alpha, \beta | \vec{x}) &\propto p(\alpha, \beta) \\ &\times \prod_{j=1}^M \frac{\Gamma(\alpha + x_j)}{x_j! \Gamma(\alpha)} \left(\frac{T_j}{\beta}\right)^{x_j} \left(1 + \frac{T_j}{\beta}\right)^{-(\alpha+x_j)} \end{aligned} \quad (2-31)$$

式(2-31)を gamma-Poisson モデルという。尤度関数 $L(\alpha, \beta | \vec{x})$ は式(2-31)の第2行の項で表される。

$$\begin{aligned} L(\alpha, \beta | \vec{x}) \\ = \prod_{j=1}^M \frac{\Gamma(\alpha + x_j)}{x_j! \Gamma(\alpha)} \left(\frac{T_j}{\beta}\right)^{x_j} \left(1 + \frac{T_j}{\beta}\right)^{-(\alpha+x_j)} \end{aligned} \quad (2-32)$$

最尤法では、尤度関数を最大とする (α, β) の値 $(\hat{\alpha}, \hat{\beta})$ をその推定値とする。この場合についても解き方は NUREG/CR6823^[8] PRA用パラメータ8.2 ハンドブックの8章 (特に8.2) に記載されているので、ここでは簡単に手順概要を示す。

尤度関数 $L(\alpha, \beta | \vec{x})$ を最大にする (α, β) を求めるのに、尤度関数の自然対数を最大にしても同じなので、以下の連立方程式を解く。

$$\begin{cases} \frac{\partial}{\partial \alpha} \ln L = 0 \\ \frac{\partial}{\partial \beta} \ln L = 0 \end{cases} \quad (2-33)$$

連立方程式(2-20)を解けば最尤推定値 $(\hat{\alpha}, \hat{\beta})$ が求まる。

デマンド故障確率の場合と同様、連立方程式(2-33)は常に解があるとは限らず、それはプラント間の時間故障率にあまりばらつきがないことを意味する。特に $\beta > \sum_j t_j$ となったときは、全プラントのデータを合算 (pool) したときよりも分散が小さくなる。一方、おおむね $\alpha < 0.3$ となった場合は 5%値と平均値との開きが 4 桁以上にもなり、非現実的な結果になることもわかっている^[13]。したがって、上記のような場合は、全プラントが同じ時間故障率を持つものと判断し、階層ベイズモデルを使う意味がないため、全プラントを合算したデータ $(\sum_j x_j, \sum_j T_j)$ で全プラント共通の時間故障率を推定する。

2.2.3.2 個別プラント間のばらつきがない場合の時間故障率推定

全プラントデータを統合して以下のように表す。

$$\begin{cases} x_I = \sum_{j=1}^M x_j \\ T_I = \sum_{j=1}^M T_j \end{cases} \quad (2-34)$$

全プラント共通の時間故障率 λ_I を、ポアソン分布に対するJeffreysの共役無情報事前分布 $P_{pri}(\lambda_I) \propto \lambda_I^{-1/2}$ (ガンマ分布の関数部分 $\lambda_I^{\alpha-1} e^{-\lambda_I \beta}$ で $\alpha = 1/2, \beta = 0$ と置いたもの)を用い一段階ベイズで求めると、 λ_I の事後分布はガンマ分布となる。

$$\Lambda_I | x_I, T_I \sim \text{Gamma}(x_I + 1/2, T_I) \quad (2-35)$$

これを関数の形で書くと次式で与えられる。

$$P_{post}(\lambda_I | x_I, T_I) = \frac{T_I^{x_I+1/2}}{\Gamma(x_I + 1/2)} \lambda_I^{x_I-1/2} e^{-\lambda_I T_I} \quad (2-36)$$

($\Gamma(*)$ はガンマ関数)

3. 国内一般機器信頼性パラメータの推定

3.1 国内一般機器故障データ

従来国内で推定してきた国内一般故障率^[2-7]は、「1章はじめに」で述べたとおり、NUCIAデータベースを情報源としていることから、PRAに必要な

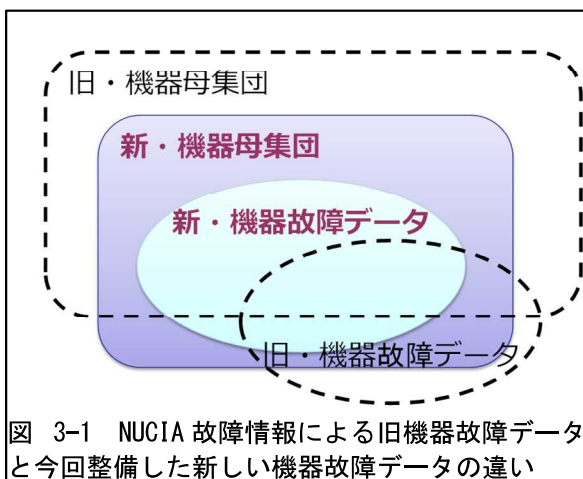


図 3-1 NUCIA 故障情報による旧機器故障データと今回整備した新しい機器故障データの違い

な故障情報がもれなく収集されているとはいえず、また、起動デマンド数や供用時間などの運転経験情報や機器母集団情報は NUCIA にはなく別途収集せざるを得なかった。そのため、旧機器故障データは PRA モデルに定められた機器母集団の中の故障とは言えないことから、これらのデータから推定した機器故障パラメータが日本の原子力機器の信頼性水準を的確に表していることを明確な証拠で示すことは困難であった。収集データに関するこのような過去の問題点を改善して説明性と信頼性の高い故障データを収集するために、各プラントの PRA モデルを構成する基事象から故障情報の収集対象とする実際の機種・故障モードを定義し、それらに対して故障情報と母集団・運転経験情報を収集することとした。また、データ収集の情報源は、各プラントでの品質保証体制に基づく不具合情報とし、その中から PRA に必要な属性をもつ故障情報のみを抽出する手順とした。図 3-1 に NUCIA を情報源とした旧機器故障データと、今回あらたに収集した新機器故障データとの違いについての概念を示す。旧データの収集方法は、設定した機器母集団の中から機器故障情報が収集されるということが保証されていなかったが、新データの収集方法は、設定した機器母集団の中から機器故障情報が収集されるように改善した。

各プラントで実施する機器故障率用データ収集手順を図 3-2 に示す。この手順は、プラントの不具合事象を情報源として、その中から条件 a-e で PRA 用機器故障に該当しないものを仕分けする手順となっている。残った事象は PRA モデルの基事象に該当する機種・故障モードの不具合であり、そのうち、条件 f で完全に機能喪失していると判断した事象を PRA 用機器故障パラメータ推定のためのデータとする。国内のデータ収集は、再稼働済みおよび再稼働予定の 27 基のプラントについて、品質保証体制が整備された 2004 年度から 2010 年度までの不具合事象の中から各社が上記

手順に従って実施した。国内集約した収集データを附録Aに収録した。収集データは、各機器・故障モードについて、国内対象プラントの機能故障件数、起動デマンド数、露出時間数、の合計をそれぞれ表にまとめた。プラント個別情報はプラント個別に管理しており、本報告の国内集約データには収録していない。表中、BWR プラント、PWR プラント別の内訳を示した。また、機種名の中の「(BWR)」「(PWR)」は、BWR のみ、あるいは PWR のみのモデルで対象となっている機種であることを示す。起動デマンド数や露出時間数が全プラントについて 0 となっている機種・故障モードは、将来の故障率推定の対象としているもので、今回はデータ収集をしておらず機器故障パラメータは推定していない。

3.2 国内一般機器信頼性パラメータ

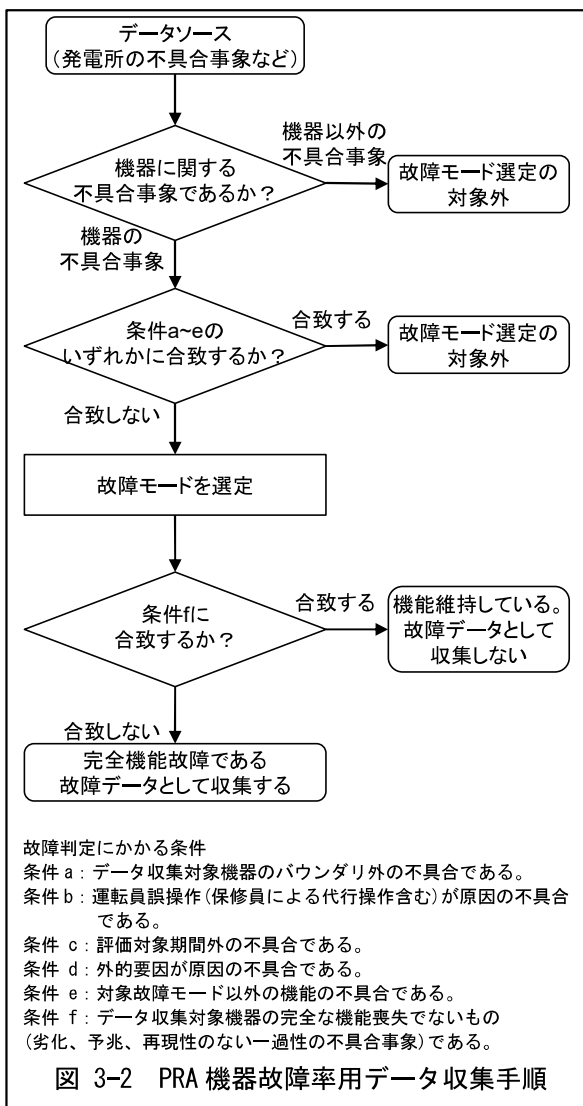
2章で述べた手法と 3.1 で述べたデータを用いて、国内原子力機器の機種・故障モード別の故障パラメータを推定した。

非常用ディーゼル発電機や待機安全系ポンプなど起動/作動デマンドで起動/作動するタイプの機器の起動失敗故障モードについては、起動デマンド数に対する起動失敗数の割合を意味する起動失敗確率でモデル化するのが一般的であるが、その一方で、これを供用待機期間中に発生する故障として捉えて時間故障率でモデル化する考え方もある。海外では、米国は起動失敗確率モデルを使っているが、欧州では時間故障率モデルを使う国が多いようである。日本では、従来、PWR グループが起動失敗確率モデル、BWR グループが時間故障率モデルを使っている。したがって、今回の国内故障パラメータの推定では、両グループの PRA モデルで使えるように、デマンド故障確率と時間故障率の両方を推定した。

計算結果を表 3-1、表 3-2 に示す。表 3-1 は時間故障率の結果である。起動失敗故障モードの時間故障率の値も同じ表に載せている。時間故障率はガンマ分布で表しており、平均値、エラーファクター (95%値/50%値)、およびガンマ分布の母数を記載した。表 3-2 はデマンド故障確率の結果である。故障確率はベータ分布で表しており、平均値、エラーファクター (同)、ベータ分布の母数を記載した。

両表の左列にある T+番号、D+番号、の番号は、附録 A-1 の機種・故障モードの番号を表しており、T は時間故障率、D はデマンド故障確率を表す。それぞれの機種・故障モードに対して、故障率計算のエビデンスとなる機能故障件数と運転時間 (表 3-1 の場合) またはデマンド数 (表 3-2 の場合)、および、データを収集したプラント基数を記載した。

「評価手法」の欄は以下の意味である。



- JNID/IL: Jeffreys Non-Informative Distribution / Industrial Level. ジェフリーズの無情報（事前）分布を用いた一段階ベイズ更新。産業界レベルの故障パラメータを求めたことになる。
- EB/PL/KS: Empirical Bayes / Plant Level / Kass-Steffey adjustment. 経験ベイズ（による階層ベイズ）。個別プラント間のばらつきを考慮。個別プラントの値を求める際は KS 近似を用いる（本報告では産業界一般の数値までしか示していない）。

前章 2.2.1.3 に示したように、各社から収集した個別プラントのデータは、機種・故障モードごとにモンテカルロ検定にかけ、故障パラメータ（故障率または故障確率）にプラントごとのばらつきが認められるかどうかを判断して評価手法を決めた。全プラント同じ故障パラメータであるという帰無仮説の下、 $p < 0.05$ のときは、原則、個別ばらつきありと判断して EB/PL/KS により産業界全体のばらつき分布を求めた。一方、 $p > 0.05$ のときは個別のばらつきは判断できないとして JNID/IL により全プラント共通としての故障パラメータを求めた。ただし、 $p < 0.05$ であっても、経験ベイズの解が得られない場合があるので、そのときは JNID/IL を用いた。表中、「JNID/IL※」と記載している機種・故障モードでは、そのような評価となっている。また、故障件数が 0 の場合は検定ができずばらつき判断ができないので JNID/IL を用いた。

表 3-1 国内一般機器時間故障率推定結果

“JNID/IL※”は、 p 値<0.05 (太字下線) から個別プラント間のばらつきがあると判断したが、最尤法の解がないためばらつきがないとして推定したもの。

No.	ID	機種	故障モード	国内データ			評価手法	p 値	国内新故障率 (ガンマ分布)			
				故障件数	運転時間(h)	プラント数			Mean(/h)	EF	α	β
1	T1	非常用ディーゼル発電機	起動失敗	11	3,309,689	27	JNID/IL	0.242	3.5E-06	1.6	11.5	3,309,689
2	T2	非常用ディーゼル発電機	継続運転失敗	7	6,907	27	JNID/IL	0.214	1.1E-03	1.7	7.5	6,907
3	T3	電動ポンプ (通常運転、純水)	起動失敗	2	20,934,842	27	JNID/IL	0.512	1.2E-07	2.5	2.5	20,934,842
4	T4	電動ポンプ (通常運転、純水)	継続運転失敗	1	10,431,547	27	JNID/IL	0.514	1.4E-07	3.3	1.5	10,431,547
5	T5	電動ポンプ (通常運転、海水)	起動失敗	3	7,889,157	27	JNID/IL※	0.048	4.4E-07	2.2	3.5	7,889,157
6	T6	電動ポンプ (通常運転、海水)	継続運転失敗	0	4,697,834	27	JNID/IL	—	1.1E-07	8.4	0.5	4,697,834
7	T7	電動ポンプ (通常待機、純水)	起動失敗	1	11,633,408	27	JNID/IL	0.465	1.3E-07	3.3	1.5	11,633,408
8	T8	電動ポンプ (通常待機、純水)	継続運転失敗	0	13,331	27	JNID/IL	—	3.8E-05	8.4	0.5	13,331
9	T9	電動ポンプ (通常待機、海水)	起動失敗	0	508,439	5	JNID/IL	—	9.8E-07	8.4	0.5	508,439
10	T10	電動ポンプ (通常待機、海水)	継続運転失敗	0	4,057	5	JNID/IL	—	1.2E-04	8.4	0.5	4,057
11	T11	タービン駆動ポンプ	起動失敗	1	1,212,040	27	JNID/IL	0.436	1.2E-06	3.3	1.5	1,212,040
12	T12	タービン駆動ポンプ	継続運転失敗	0	831	27	JNID/IL	—	6.0E-04	8.4	0.5	831
13	T13	ディーゼル駆動ポンプ	起動失敗	0	88,000	2	JNID/IL	—	5.7E-06	8.4	0.5	88,000
14	T14	ディーゼル駆動ポンプ	継続運転失敗	0	76	2	JNID/IL	—	6.6E-03	8.4	0.5	76
15	T17	電動弁 (純水)	作動失敗	9	148,453,308	27	JNID/IL	0.092	6.4E-08	1.6	9.5	148,453,308
16	T18	電動弁 (純水)	誤開又は誤閉	0	148,036,418	27	JNID/IL	—	3.4E-09	8.4	0.5	148,036,418
17	T19	電動弁 (純水)	外部リーク	0	99,577,958	21	JNID/IL	—	5.0E-09	8.4	0.5	99,577,958
18	T20	電動弁 (純水)	内部リーク	4	60,486,595	26	JNID/IL	0.805	7.4E-08	2.0	4.5	60,486,595
19	T21	電動弁 (純水)	閉塞	0	144,939,288	27	JNID/IL	—	3.4E-09	8.4	0.5	144,939,288
20	T24	電動弁 (海水)	作動失敗	5	18,274,928	27	JNID/IL	0.096	3.0E-07	1.9	5.5	18,274,928
21	T25	電動弁 (海水)	誤開又は誤閉	0	18,219,232	27	JNID/IL	—	2.7E-08	8.4	0.5	18,219,232
22	T26	電動弁 (海水)	外部リーク	0	6,707,431	8	JNID/IL	—	7.5E-08	8.4	0.5	6,707,431
23	T27	電動弁 (海水)	内部リーク	3	9,118,729	14	JNID/IL	0.167	3.8E-07	2.2	3.5	9,118,729
24	T28	電動弁 (海水)	閉塞	0	18,163,536	27	JNID/IL	—	2.8E-08	8.4	0.5	18,163,536
25	T31	空気作動弁	作動失敗	15	77,690,319	27	JNID/IL	0.081	2.0E-07	1.5	15.5	77,690,319
26	T32	空気作動弁	誤開又は誤閉	1	77,465,541	27	JNID/IL	0.459	1.9E-08	3.3	1.5	77,465,541
27	T33	空気作動弁	外部リーク	1	60,978,708	21	JNID/IL	0.739	2.5E-08	3.3	1.5	60,978,708
28	T34	空気作動弁	内部リーク	4	39,865,996	25	JNID/IL※	0.018	1.1E-07	2.0	4.5	39,865,996
29	T35	空気作動弁	閉塞	0	75,906,300	27	JNID/IL	—	6.6E-09	8.4	0.5	75,906,300
30	T38	油圧作動弁	作動失敗	1	6,037,453	17	JNID/IL	0.145	2.5E-07	3.3	1.5	6,037,453
31	T39	油圧作動弁	誤開又は誤閉	0	6,037,453	17	JNID/IL	—	8.3E-08	8.4	0.5	6,037,453
32	T40	油圧作動弁	外部リーク	0	1,652,120	4	JNID/IL	—	3.0E-07	8.4	0.5	1,652,120
33	T41	油圧作動弁	内部リーク	0	4,743,976	11	JNID/IL	—	1.1E-07	8.4	0.5	4,743,976
34	T42	油圧作動弁	閉塞	0	6,037,453	17	JNID/IL	—	8.3E-08	8.4	0.5	6,037,453
35	T45	逆止弁	作動失敗	5	142,730,961	27	JNID/IL※	1.E-04	3.9E-08	1.9	5.5	142,730,961
36	T46	逆止弁	外部リーク	0	98,164,738	21	JNID/IL	—	5.1E-09	8.4	0.5	98,164,738
37	T47	逆止弁	内部リーク	1	28,061,015	26	JNID/IL	0.761	5.3E-08	3.3	1.5	28,061,015
38	T50	手動弁	開閉失敗	4	441,207,321	27	JNID/IL	0.148	1.0E-08	2.0	4.5	441,207,321
39	T51	手動弁	外部リーク	0	378,640,021	21	JNID/IL	—	1.3E-09	8.4	0.5	378,640,021
40	T52	手動弁	内部リーク	5	90,899,545	26	EB/PL/KS	0.003	4.9E-08	17.7	0.3	6,335,105
41	T53	手動弁	閉塞	0	432,851,325	27	JNID/IL	—	1.2E-09	8.4	0.5	432,851,325
42	T56	安全弁	作動失敗	0	38,985,411	27	JNID/IL	—	1.3E-08	8.4	0.5	38,985,411
43	T57	安全弁	誤開	0	38,985,411	27	JNID/IL	—	1.3E-08	8.4	0.5	38,985,411
44	T58	安全弁	外部リーク	0	28,480,458	21	JNID/IL	—	1.8E-08	8.4	0.5	28,480,458
45	T59	安全弁	内部リーク	1	21,194,997	26	JNID/IL	0.511	7.1E-08	3.3	1.5	21,194,997
46	T62	逃し安全弁 (BWR)	作動失敗	0	4,499,872	10	JNID/IL	—	1.1E-07	8.4	0.5	4,499,872
47	T63	逃し安全弁 (BWR)	誤開	0	4,499,872	10	JNID/IL	—	1.1E-07	8.4	0.5	4,499,872
48	T64	逃し安全弁 (BWR)	外部リーク	0	2,063,229	4	JNID/IL	—	2.4E-07	8.4	0.5	2,063,229
49	T65	逃し安全弁 (BWR)	内部リーク	0	3,315,682	7	JNID/IL	—	1.5E-07	8.4	0.5	3,315,682
50	T71	電磁弁	作動失敗	0	4,672,821	9	JNID/IL	—	1.1E-07	8.4	0.5	4,672,821
51	T72	電磁弁	誤開又は誤閉	0	4,672,821	9	JNID/IL	—	1.1E-07	8.4	0.5	4,672,821
52	T73	電磁弁	外部リーク	0	1,686,295	3	JNID/IL	—	3.0E-07	8.4	0.5	1,686,295
53	T74	電磁弁	内部リーク	0	2,124,931	7	JNID/IL	—	2.4E-07	8.4	0.5	2,124,931
54	T75	電磁弁	閉塞	0	4,672,821	9	JNID/IL	—	1.1E-07	8.4	0.5	4,672,821
55	T76	ファン/ブロー	起動失敗	0	29,271,810	26	JNID/IL	—	1.7E-08	8.4	0.5	29,271,810
56	T77	ファン/ブロー	継続運転失敗	3	9,988,894	26	JNID/IL	0.086	3.5E-07	2.2	3.5	9,988,894
57	T80	ダンパ	作動失敗	19	89,771,018	26	EB/PL/KS	0.004	2.0E-07	16.7	0.3	1,559,001
58	T81	ダンパ	誤開又は誤閉	0	89,057,437	26	JNID/IL	—	5.6E-09	8.4	0.5	89,057,437
59	T82	ダンパ	外部リーク	1	57,916,097	21	JNID/IL	0.633	2.6E-08	3.3	1.5	57,916,097
60	T83	ダンパ	内部リーク	0	21,429,791	16	JNID/IL	—	2.3E-08	8.4	0.5	21,429,791
61	T84	ダンパ	閉塞	0	89,771,018	26	JNID/IL	—	5.6E-09	8.4	0.5	89,771,018
62	T85	熱交換器	伝熱管破損	3	43,723,715	27	JNID/IL※	5.E-05	8.0E-08	2.2	3.5	43,723,715
63	T86	熱交換器	外部リーク	0	29,221,743	21	JNID/IL	—	1.7E-08	8.4	0.5	29,221,743

表 3-1 国内一般機器時間故障率推定結果

“JNID/IL※”は、p 値<0.05 (太字下線) から個別プラント間のばらつきがあると判断したが、最尤法の解がないためばらつきがないとして推定したもの。

No.	ID	機種	故障モード	国内データ			評価手法	p 値	国内新故障率 (ガンマ分布)			
				故障件数	運転時間(h)	プラント数			Mean(/h)	EF	α	β
64	T87	熱交換器	伝熱管閉塞	0	43,039,331	27	JNID/IL	—	1.2E-08	8.4	0.5	43,039,331
65	T88	タンク	破損	0	12,630,873	24	JNID/IL	—	4.0E-08	8.4	0.5	12,630,873
66	T89	タンク	閉塞	0	12,187,429	24	JNID/IL	—	4.1E-08	8.4	0.5	12,187,429
67	T90	オリフィス	外部リーク	0	83,011,062	21	JNID/IL	—	6.0E-09	8.4	0.5	83,011,062
68	T91	オリフィス	内部破損	1	115,266,008	26	JNID/IL※	0.020	1.3E-08	3.3	1.5	115,266,008
69	T92	オリフィス	閉塞	2	114,609,897	26	JNID/IL※	1.E-04	2.2E-08	2.5	2.5	114,609,897
70	T93	ストレーナ/フィルタ (純水)	外部リーク	0	18,205,762	21	JNID/IL	—	2.7E-08	8.4	0.5	18,205,762
71	T94	ストレーナ/フィルタ (純水)	内部破損	0	28,546,155	27	JNID/IL	—	1.8E-08	8.4	0.5	28,546,155
72	T95	ストレーナ/フィルタ (海水)	閉塞	0	28,546,150	27	JNID/IL	—	1.8E-08	8.4	0.5	28,546,150
73	T96	ストレーナ/フィルタ (海水)	外部リーク	1	5,952,335	13	JNID/IL	0.325	2.5E-07	3.3	1.5	5,952,335
74	T97	ストレーナ/フィルタ (海水)	内部破損	0	13,386,504	27	JNID/IL	—	3.7E-08	8.4	0.5	13,386,504
75	T98	ストレーナ/フィルタ (海水)	閉塞	1	13,052,328	27	JNID/IL	0.359	1.1E-07	3.3	1.5	13,052,328
76	T99	制御棒駆動装置 (BWR)	挿入失敗	0	6,032,868	7	JNID/IL	—	8.3E-08	8.4	0.5	6,032,868
77	T103	RPS、CRDM MGセット	機能喪失	0	204,902	2	JNID/IL	—	2.4E-06	8.4	0.5	204,902
78	T104	インバータ	機能喪失	0	1,048,176	6	JNID/IL	—	4.8E-07	8.4	0.5	1,048,176
79	T108	遮断器	作動失敗	2	130,046,573	27	JNID/IL	0.913	1.9E-08	2.5	2.5	130,046,573
80	T109	遮断器	誤開又は誤閉	2	130,046,573	27	JNID/IL	0.133	1.9E-08	2.5	2.5	130,046,573
81	T110	変圧器	機能喪失	1	11,722,801	27	JNID/IL	0.139	1.3E-07	3.3	1.5	11,722,801
82	T111	蓄電池	機能喪失	0	5,048,458	27	JNID/IL	—	9.9E-08	8.4	0.5	5,048,458
83	T112	充電器	機能喪失	1	4,844,536	27	JNID/IL	0.343	3.1E-07	3.3	1.5	4,844,536
84	T113	母線	機能喪失	1	44,012,575	27	JNID/IL	0.099	3.4E-08	3.3	1.5	44,012,575
85	T117	配管 (3インチ未満)	リーク	0	302,590,198	16	JNID/IL	—	1.7E-09	8.4	0.5	302,590,198
86	T118	配管 (3インチ未満)	閉塞	0	278,094,635	14	JNID/IL	—	1.8E-09	8.4	0.5	278,094,635
87	T119	配管 (3インチ以上)	リーク	0	670,678,331	19	JNID/IL	—	7.5E-10	8.4	0.5	670,678,331
88	T120	配管 (3インチ以上)	閉塞	0	393,872,221	15	JNID/IL	—	1.3E-09	8.4	0.5	393,872,221
89	T121	リレー	不動作	1	378,212,352	27	JNID/IL	0.548	4.0E-09	3.3	1.5	378,212,352
90	T122	リレー	誤動作	1	378,208,175	27	JNID/IL	0.839	4.0E-09	3.3	1.5	378,208,175
91	T123	遅延リレー	不動作	1	47,579,852	19	JNID/IL	0.078	3.2E-08	3.3	1.5	47,579,852
92	T124	遅延リレー	誤動作	0	47,582,365	19	JNID/IL	—	1.1E-08	8.4	0.5	47,582,365
93	T125	演算器	不動作	0	12,388,533	9	JNID/IL	—	4.0E-08	8.4	0.5	12,388,533
94	T126	演算器	高出力/低出力	0	12,388,533	9	JNID/IL	—	4.0E-08	8.4	0.5	12,388,533
95	T127	カード (半導体ロジック回路)	不動作	0	35,745,155	15	JNID/IL	—	1.4E-08	8.4	0.5	35,745,155
96	T128	カード (半導体ロジック回路)	誤動作	0	35,752,512	15	JNID/IL	—	1.4E-08	8.4	0.5	35,752,512
97	T129	警報設定器	不動作	0	52,431,784	20	JNID/IL	—	9.5E-09	8.4	0.5	52,431,784
98	T130	警報設定器	誤動作	0	52,431,784	20	JNID/IL	—	9.5E-09	8.4	0.5	52,431,784
99	T131	ヒューズ	誤断線	0	9,721,873	8	JNID/IL	—	5.1E-08	8.4	0.5	9,721,873
100	T132	流量トランスミッタ	不動作	0	8,745,208	24	JNID/IL	—	5.7E-08	8.4	0.5	8,745,208
101	T133	流量トランスミッタ	高出力/低出力	1	8,745,208	24	JNID/IL※	0.015	1.7E-07	3.3	1.5	8,745,208
102	T134	圧カトランスミッタ	不動作	0	43,449,035	27	JNID/IL	—	1.2E-08	8.4	0.5	43,449,035
103	T135	圧カトランスミッタ	高出力/低出力	2	43,449,035	27	JNID/IL	0.591	5.8E-08	2.5	2.5	43,449,035
104	T136	水位トランスミッタ	不動作	3	30,809,449	27	JNID/IL	0.695	1.1E-07	2.2	3.5	30,809,449
105	T137	水位トランスミッタ	高出力/低出力	1	30,785,498	27	JNID/IL	1.000	4.9E-08	3.3	1.5	30,785,498
106	T138	温度検出器	不動作	0	29,740,837	24	JNID/IL	—	1.7E-08	8.4	0.5	29,740,837
107	T139	温度検出器	高出力/低出力	2	29,741,845	24	JNID/IL	0.065	8.4E-08	2.5	2.5	29,741,845
108	T140	放射線検出器	不動作	0	1,595,100	4	JNID/IL	—	3.1E-07	8.4	0.5	1,595,100
109	T141	放射線検出器	高出力/低出力	0	1,595,100	4	JNID/IL	—	3.1E-07	8.4	0.5	1,595,100
110	T142	流量スイッチ	不動作	1	1,957,004	8	JNID/IL	0.578	7.7E-07	3.3	1.5	1,957,004
111	T143	流量スイッチ	誤動作	0	1,957,004	8	JNID/IL	—	2.6E-07	8.4	0.5	1,957,004
112	T144	圧カスイッチ	不動作	1	14,081,319	18	JNID/IL	0.696	1.1E-07	3.3	1.5	14,081,319
113	T145	圧カスイッチ	誤動作	0	14,081,319	18	JNID/IL	—	3.6E-08	8.4	0.5	14,081,319
114	T146	水位スイッチ	不動作	2	8,637,686	11	JNID/IL	0.705	2.9E-07	2.5	2.5	8,637,686
115	T147	水位スイッチ	誤動作	0	8,637,686	11	JNID/IL	—	5.8E-08	8.4	0.5	8,637,686
116	T148	温度スイッチ	不動作	0	13,404,865	19	JNID/IL	—	3.7E-08	8.4	0.5	13,404,865
117	T149	温度スイッチ	誤動作	0	13,404,865	19	JNID/IL	—	3.7E-08	8.4	0.5	13,404,865
118	T150	リミットスイッチ	不動作	2	42,922,407	22	JNID/IL	1.000	5.8E-08	2.5	2.5	42,922,407
119	T151	リミットスイッチ	誤動作	1	42,922,407	22	JNID/IL	1.000	3.5E-08	3.3	1.5	42,922,407
120	T152	手動スイッチ	不動作	1	71,966,709	26	JNID/IL	1.000	2.1E-08	3.3	1.5	71,966,709
121	T153	手動スイッチ	誤動作	0	71,966,709	26	JNID/IL	—	6.9E-09	8.4	0.5	71,966,709
122	T154	コントローラ	不動作	0	1,088,885	4	JNID/IL	—	4.6E-07	8.4	0.5	1,088,885
123	T155	コントローラ	高出力/低出力	0	1,088,885	4	JNID/IL	—	4.6E-07	8.4	0.5	1,088,885
124	T156	配線/電線	短絡	0	19,452,045	22	JNID/IL	—	2.6E-08	8.4	0.5	19,452,045
125	T157	配線/電線	地絡	0	19,452,045	22	JNID/IL	—	2.6E-08	8.4	0.5	19,452,045
126	T158	配線/電線	断線	0	19,452,045	22	JNID/IL	—	2.6E-08	8.4	0.5	19,452,045

表 3-1 国内一般機器時間故障率推定結果

“JNID/IL※”は、 p 値 <0.05 (太字下線) から個別プラント間のばらつきがあると判断したが、最尤法の解がないためばらつきがないとして推定したものと。

No.	ID	機種	故障モード	国内データ			評価手法	p 値	国内新故障率 (ガンマ分布)			
				故障件数	運転時間(h)	プラント数			Mean(/h)	EF	α	β
127	T159	ヒーター	機能喪失	0	1,158,301	10	JNID/IL	—	4.3E-07	8.4	0.5	1,158,301
128	T160	アナンシエータ	機能喪失	0	350,180	5	JNID/IL	—	1.4E-06	8.4	0.5	350,180
129	T161	空気圧縮機	起動失敗	1	3,637,160	27	JNID/IL	1.000	4.1E-07	3.3	1.5	3,637,160
130	T162	空気圧縮機	継続運転失敗	7	1,707,068	27	EB/PL/KS	0.020	4.1E-06	8.2	0.5	125,091
131	T165	爆破弁 (BWR)	開失敗	0	182,534	2	JNID/IL	—	2.7E-06	8.4	0.5	182,534
132	T166	爆破弁 (BWR)	誤開	0	182,534	2	JNID/IL	—	2.7E-06	8.4	0.5	182,534
133	T167	爆破弁 (BWR)	外部リーク	0	87,590	1	JNID/IL	—	5.7E-06	8.4	0.5	87,590
134	T168	爆破弁 (BWR)	内部リーク	0	87,590	1	JNID/IL	—	5.7E-06	8.4	0.5	87,590
135	T169	爆破弁 (BWR)	閉塞	0	182,534	2	JNID/IL	—	2.7E-06	8.4	0.5	182,534
136	T170	主復水器 (BWR)	伝熱管破損	2	1,186,653	11	JNID/IL※	0.011	2.1E-06	2.5	2.5	1,186,653
137	T171	主復水器 (BWR)	外部リーク	0	565,526	5	JNID/IL	—	8.8E-07	8.4	0.5	565,526
138	T172	主復水器 (BWR)	伝熱管閉塞	0	1,186,653	11	JNID/IL	—	4.2E-07	8.4	0.5	1,186,653
139	T173	復水器 (BWR)	伝熱管破損	0	1,193,638	11	JNID/IL	—	4.2E-07	8.4	0.5	1,193,638
140	T174	復水器 (BWR)	外部リーク	0	487,139	5	JNID/IL	—	1.0E-06	8.4	0.5	487,139
141	T175	復水器 (BWR)	伝熱管閉塞	0	1,193,638	11	JNID/IL	—	4.2E-07	8.4	0.5	1,193,638
142	T176	ラプチャーディスク(BWR)	開失敗	0	317,897	8	JNID/IL	—	1.6E-06	8.4	0.5	317,897
143	T177	サンプスクリーン(PWR)	閉塞	0	1,269,586	15	JNID/IL	—	3.9E-07	8.4	0.5	1,269,586
144	T180	冷凍機	起動失敗	16	5,468,469	25	EB/PL/KS	0.000	3.2E-06	11.5	0.4	125,826
145	T181	冷凍機	継続運転失敗	20	2,940,278	25	EB/PL/KS	0.007	6.7E-06	4.6	0.9	137,632
146	T187	再結合器 (OG含む) (BWR)	機能喪失	2	594,379	10	JNID/IL※	0.002	4.2E-06	2.5	2.5	594,379
147	T188	補助ボイラー(BWR)	機能喪失	19	670,207	8	EB/PL/KS	0.000	3.6E-05	7.1	0.6	16,279
148	T209	窒素/空気ポンペ	外部リーク	0	337,531	1	JNID/IL	—	1.5E-06	8.4	0.5	337,531
149	T210	窒素/空気ポンペ	閉塞	0	845,375	4	JNID/IL	—	5.9E-07	8.4	0.5	845,375
150	T213	演算装置 (デジタル制御機器)	不動作	4	9,415,906	3	JNID/IL	0.273	4.8E-07	2.0	4.5	9,415,906
151	T214	演算装置 (デジタル制御機器)	誤動作	0	9,415,906	3	JNID/IL	—	5.3E-08	8.4	0.5	9,415,906
152	T215	インターフェイス (デジタル制御機器)	不動作	0	7,843,186	1	JNID/IL	—	6.4E-08	8.4	0.5	7,843,186
153	T216	インターフェイス (デジタル制御機器)	誤動作	0	7,843,186	1	JNID/IL	—	6.4E-08	8.4	0.5	7,843,186
154	T217	入出力装置 (デジタル制御機器)	不動作	4	25,984,628	3	JNID/IL	0.537	1.7E-07	2.0	4.5	25,984,628
155	T218	入出力装置 (デジタル制御機器)	誤動作	0	25,984,628	3	JNID/IL	—	1.9E-08	8.4	0.5	25,984,628
156	T219	ロジックカード (デジタル制御機器)	不動作	0	555,720	2	JNID/IL	—	9.0E-07	8.4	0.5	555,720
157	T220	ロジックカード (デジタル制御機器)	誤動作	0	555,720	2	JNID/IL	—	9.0E-07	8.4	0.5	555,720
158	T221	ロードドライバ (デジタル制御機器)	不動作	1	7,104,373	3	JNID/IL	1.000	2.1E-07	3.3	1.5	7,104,373
159	T222	ロードドライバ (デジタル制御機器)	誤動作	1	7,104,373	3	JNID/IL	1.000	2.1E-07	3.3	1.5	7,104,373
160	T223	光ケーブル (デジタル制御機器)	機能喪失	0	9,150,383	1	JNID/IL	—	5.5E-08	8.4	0.5	9,150,383
161	T227	計装用電源装置 (E/S) (デジタル制御機器)	機能喪失	0	28,830,300	2	JNID/IL	—	1.7E-08	8.4	0.5	28,830,300
162	T228	中性子束検出器 (BWR)	不動作	1	2,103,788	10	JNID/IL	0.863	7.1E-07	3.3	1.5	2,103,788
163	T229	中性子束検出器 (BWR)	高出力/低出力	0	2,103,788	10	JNID/IL	—	2.4E-07	8.4	0.5	2,103,788
164	T232	真空破壊弁 (BWR)	作動失敗	0	3,431,345	10	JNID/IL	—	1.5E-07	8.4	0.5	3,431,345
165	T233	真空破壊弁 (BWR)	外部リーク	0	935,107	4	JNID/IL	—	5.3E-07	8.4	0.5	935,107
166	T234	真空破壊弁 (BWR)	内部リーク	0	1,693,018	7	JNID/IL	—	3.0E-07	8.4	0.5	1,693,018
167	T235	空気貯槽 (BWR)	破損	0	9,750,615	10	JNID/IL	—	5.1E-08	8.4	0.5	9,750,615
168	T236	空気貯槽 (BWR)	閉塞	0	9,750,615	10	JNID/IL	—	5.1E-08	8.4	0.5	9,750,615
169	T237	格納容器	リーク	0	438,595	11	JNID/IL	—	1.1E-06	8.4	0.5	438,595
170	T238	容積式流量積算計	外部リーク	0	464,290	3	JNID/IL	—	1.1E-06	8.4	0.5	464,290
171	T239	容積式流量積算計	閉塞	3	1,654,888	8	JNID/IL※	0.015	2.1E-06	2.2	3.5	1,654,888
172	T240	脱塩塔 (BWR)	外部リーク	0	1,019,178	5	JNID/IL	—	4.9E-07	8.4	0.5	1,019,178
173	T241	脱塩塔 (BWR)	閉塞	0	2,739,568	10	JNID/IL	—	1.8E-07	8.4	0.5	2,739,568
174	T242	制御弁 (BWR)	制御不能	3	5,710,342	9	JNID/IL	0.572	6.1E-07	2.2	3.5	5,710,342
175	T243	制御弁 (BWR)	誤開又は誤閉	0	10,154,725	10	JNID/IL	—	4.9E-08	8.4	0.5	10,154,725
176	T244	エゼクタ (BWR)	外部リーク	0	116,570	3	JNID/IL	—	4.3E-06	8.4	0.5	116,570
177	T245	エゼクタ (BWR)	内部破損	0	739,259	8	JNID/IL	—	6.8E-07	8.4	0.5	739,259
178	T246	エゼクタ (BWR)	閉塞	0	739,259	8	JNID/IL	—	6.8E-07	8.4	0.5	739,259

表 3-2 国内一般機器デマンド故障確率の推定結果

“JNID/IL※”は、 p 値<0.05（太字下線）から個別プラント間のばらつきがあると判断したが、最尤法の解がないためばらつきがないとして推定したもの。

No.	ID	機種	故障モード	国内データ			評価手法	p 値	国内新故障確率（ベータ分布）			
				故障件数	デマンド数	プラント数			Mean	EF	α	β
1	D1	非常用ディーゼル発電機	起動失敗	11	6,878	27	JNID/IL	0.139	1.7.E-03	1.6	11.5	6,868
2	D3	電動ポンプ（通常運転、純水）	起動失敗	2	19,318	27	JNID/IL	0.147	1.3.E-04	2.5	2.5	19,317
3	D5	電動ポンプ（通常運転、海水）	起動失敗	3	9,075	27	JNID/IL※	0.003	3.9.E-04	2.2	3.5	9,073
4	D7	電動ポンプ（通常待機、純水）	起動失敗	1	20,895	27	JNID/IL	0.295	7.2.E-05	3.3	1.5	20,895
5	D9	電動ポンプ（通常待機、海水）	起動失敗	0	1,815	5	JNID/IL	—	2.8.E-04	8.4	0.5	1,816
6	D11	タービン駆動ポンプ	起動失敗	1	2,047	27	JNID/IL	0.489	7.3.E-04	3.3	1.5	2,047
7	D13	ディーゼル駆動ポンプ	起動失敗	0	150	2	JNID/IL	—	3.3.E-03	8.4	0.5	151
8	D15	電動弁（純水）	開失敗	5	118,838	27	JNID/IL	0.237	4.6.E-05	1.9	5.5	118,834
9	D16	電動弁（純水）	閉失敗	4	120,217	27	JNID/IL	0.113	3.7.E-05	2.0	4.5	120,214
10	D22	電動弁（海水）	開失敗	3	365,722	25	JNID/IL※	0.020	9.6.E-06	2.2	3.5	365,720
11	D23	電動弁（海水）	閉失敗	2	365,687	25	JNID/IL※	0.002	6.8.E-06	2.5	2.5	365,686
12	D29	空気作動弁	開失敗	11	78,042	26	JNID/IL※	0.005	1.5.E-04	1.6	11.5	78,032
13	D30	空気作動弁	閉失敗	4	77,927	26	JNID/IL	0.126	5.8.E-05	2.0	4.5	77,924
14	D36	油圧作動弁	開失敗	1	15,899	17	JNID/IL	0.668	9.4.E-05	3.3	1.5	15,899
15	D37	油圧作動弁	閉失敗	0	15,801	17	JNID/IL	—	3.2.E-05	8.4	0.5	15,802
16	D43	逆止弁	開失敗	0	141,286	27	JNID/IL	—	3.5.E-06	8.4	0.5	141,287
17	D44	逆止弁	閉失敗	5	141,372	27	JNID/IL※	3.E-04	3.9.E-05	1.9	5.5	141,368
18	D48	手動弁	開失敗	1	20,449	26	JNID/IL	0.212	7.3.E-05	3.3	1.5	20,449
19	D49	手動弁	閉失敗	3	20,448	26	JNID/IL	0.422	1.7.E-04	2.2	3.5	20,446
20	D54	安全弁	開失敗	0	1,612	18	JNID/IL	—	3.1.E-04	8.4	0.5	1,613
21	D55	安全弁	閉（吹止まり）失敗	0	1,612	18	JNID/IL	—	3.1.E-04	8.4	0.5	1,613
22	D60	逃し安全弁（BWR）	開失敗	0	1,535	8	JNID/IL	—	3.3.E-04	8.4	0.5	1,536
23	D61	逃し安全弁（BWR）	閉（吹止まり）失敗	0	1,535	8	JNID/IL	—	3.3.E-04	8.4	0.5	1,536
24	D69	電磁弁	開失敗	0	84,701	4	JNID/IL	—	5.9.E-06	8.4	0.5	84,702
25	D70	電磁弁	閉失敗	0	84,735	4	JNID/IL	—	5.9.E-06	8.4	0.5	84,736
26	D76	ファン/フロア	起動失敗	0	31,865	26	JNID/IL	—	1.6.E-05	8.4	0.5	31,866
27	D78	ダンバ	開失敗	4	48,153	26	JNID/IL	0.155	9.3.E-05	2.0	4.5	48,150
28	D79	ダンバ	閉失敗	15	48,070	26	JNID/IL※	0.004	3.2.E-04	1.5	15.5	48,056
29	D106	遮断器	開放失敗	1	52,694	26	JNID/IL	0.725	2.8.E-05	3.3	1.5	52,694
30	D107	遮断器	投入失敗	1	94,552	26	JNID/IL	0.434	1.6.E-05	3.3	1.5	94,552
31	D161	空気圧縮機	起動失敗	1	6,588	27	JNID/IL	1.000	2.3.E-04	3.3	1.5	6,588
32	D180	冷凍機	起動失敗	16	3,235	25	EB/PL/KS	2.E-05	6.0.E-03	1.5	16.5	3,220
33	D230	真空破壊弁（BWR）	開失敗	0	642	7	JNID/IL	—	7.8.E-04	8.4	0.5	643
34	D231	真空破壊弁（BWR）	閉失敗	0	642	7	JNID/IL	—	7.8.E-04	8.4	0.5	643

3.3 米国一般機器信頼性パラメータとの比較

「1章はじめに」で述べたように、従来日本の故障率/故障確率は海外の値に比べて低すぎると言われてきたため、このたび電力会社各社の品質保証体制の下で PRA モデルと整合させて漏れないように収集したデータを用いて推定した機器信頼性パラメータが米国の一般パラメータとどの程度異なるのか、比較を行った。

比較対象とした米国のパラメータは、米国 NRC の個別プラント PRA モデル (SPAR モデル) を支援するために策定している "Component Reliability Data Sheets Update 2015,"²⁰¹⁷^[13] とした。比較の仕方は、おおそ機種・故障モードが対応していると考えられる機器について、信頼性パラメータの日/米の比をとって、大きな差があるかどうかを調べた。表 3-3、表 3-4 に、時間故障率とデマンド故障確率の平均値の日米比を示す。日本の数値が米国の数値の 5%未満になるものを下線で示したが、その数は特に多くはない。一般的に日本の数値のほうが小さな傾向にはあるが、中には米国より大きなものも存在し、日本の新しい機器信頼性パラメータは、過去指摘されていたような、海外の数値より 2 桁以上も小さいという例はほとんどみられなかった。

3.4 過去の一般機器信頼性パラメータとの比較

過去の一般機器信頼性パラメータである JANSI の 29 ヶ年データによるパラメータ^[7]との比較も行った。ほぼ対応のつく機種・故障モードについて、表 3-5、表 3-6 に時間故障率とデマンド故障確率の平均値の新旧比を示す。表中、新信頼性パラメータと旧 29 ヶ年パラメータの比が 0.1~10.0 となるものを下線で示したが、ほとんどの機種・故障モードがその範囲に入っている (数十倍にな

るものはいくつかある)。すなわち、新旧故障パラメータの違いは、どちらが大きいにせよほとんど 1 桁以内に収まっている。

3.5 機器信頼性パラメータ比較のまとめ

従来、日本の PRA 用機器信頼性パラメータは、その推定の基となるデータ収集のしくみの説明性が低かったため、推定された値の信憑性に疑義を持たれていたが、このたびデータ収集のルールとしくみを見直して収集データの質を高めたことにより、信憑性の高い機器信頼性水準を示すことができた。

具体的に得られた国内一般機器信頼性パラメータの数値は、米国の一般機器信頼性パラメータと同程度か若干低い程度であった。日本ではまだデータ収集期間が浅いため、今後もデータを蓄積してパラメータの信頼性を高めていくことが肝要である。

表 3-3 一般機器時間故障率の日米比較（日本の値が米国の値の5%未満のものに下線）

ID	機種	故障モード	国内データ			国内新故障率		米国故障率(SPAR2015)		比	米国故障率(SPAR2015)の記述
			故障件数	運転時間(h)	プラント数	Mean(h)	EF	Mean(h)	EF		
T2	非常用ディーゼル発電機	継続運転失敗	7	6,907	27	1.1E-03	1.7	3.7E-03	2.2	0.29	Diesel Generator Fails To Load And Run, Early
T4	電動ポンプ（通常運転、純水）	継続運転失敗	1	10,431,547	27	1.4E-07	3.3	3.8E-06	2.2	<u>0.04</u>	Motor-driven pump Fail to Run, Normally Running
T6	電動ポンプ（通常運転、海水）	継続運転失敗	0	4,697,834	27	1.1E-07	8.4	3.8E-06	2.2	<u>0.03</u>	Motor-driven pump Fail to Run, Normally Running
T8	電動ポンプ（通常待機、純水）	継続運転失敗	0	13,331	27	3.8E-05	8.4	1.2E-04	4.9	0.31	Motor Driven Pump Fails To Run, Early Term
T10	電動ポンプ（通常待機、海水）	継続運転失敗	0	4,057	5	1.2E-04	8.4	1.2E-04	4.9	1.01	Motor Driven Pump Fails To Run, Early Term
T12	タービン駆動ポンプ	継続運転失敗	0	831	27	6.0E-04	8.4	3.7E-03	4.8	0.16	Turbine Driven Pump Fails To Run (Pooled Systems), Early Term
T14	ディーゼル駆動ポンプ	継続運転失敗	0	76	2	6.6E-03	8.4	9.8E-04	1.6	6.71	Engine Driven Pump Fails To Run
T18	電動弁（純水）	誤開又は誤閉	0	148,036,418	27	3.4E-09	8.4	3.2E-08	6.9	0.10	Motor Operated Valve Fails To Remain Open
T19	電動弁（純水）	外部リーク	0	99,577,958	21	5.0E-09	8.4	2.7E-08	8.7	0.19	Motor Operated Valve External Leakage (Small)
T20	電動弁（純水）	内部リーク	4	60,486,595	26	7.4E-08	2.0	7.6E-08	5.5	0.98	Motor Operated Valve Internal Leakage (Small)
T25	電動弁（海水）	誤開又は誤閉	0	18,219,232	27	2.7E-08	8.4	3.2E-08	6.9	0.85	Motor Operated Valve Fails To Remain Open
T26	電動弁（海水）	外部リーク	0	6,707,431	8	7.5E-08	8.4	2.7E-08	8.7	2.75	Motor Operated Valve External Leakage (Small)
T27	電動弁（海水）	内部リーク	3	9,118,729	14	3.8E-07	2.2	7.6E-08	5.5	5.06	Motor Operated Valve Internal Leakage (Small)
T32	空気作動弁	誤開又は誤閉	1	77,465,541	27	1.9E-08	3.3	1.1E-07	3.9	0.18	Air Operated Valve Transfers Positions
T33	空気作動弁	外部リーク	1	60,978,708	21	2.5E-08	3.3	4.5E-08	1.2	0.55	Air-Operated Valve External Leakage (Small)
T34	空気作動弁	内部リーク	4	39,865,996	25	1.1E-07	2.0	7.8E-08	1.2	1.45	Air-Operated Valve Internal Leakage (Small)
T39	油圧作動弁	誤開又は誤閉	0	6,037,453	17	8.3E-08	8.4	1.9E-07	1.5	0.44	Hydraulic valve spurious operation
T40	油圧作動弁	外部リーク	0	1,652,120	4	3.0E-07	8.4	1.3E-07	1.5	2.26	Hydraulic Operated Valve External Leakage (Small)
T41	油圧作動弁	内部リーク	0	4,743,976	11	1.1E-07	8.4	4.8E-08	2.0	2.18	Hydraulic Operated Valve Internal Leakage (Small)
T46	逆止弁	外部リーク	0	98,164,738	21	5.1E-09	8.4	7.7E-09	1.7	0.66	Check Valve External Leakage (Small)
T47	逆止弁	内部リーク	1	28,061,015	26	5.3E-08	3.3	2.1E-07	7.8	0.26	Check Valve Internal Leakage (Small)
T51	手動弁	外部リーク	0	378,640,021	21	1.3E-09	8.4	1.1E-07	1.5	<u>0.01</u>	Manual Valve External Leakage (Small)
T52	手動弁	内部リーク	5	90,899,545	26	4.9E-08	17.7	6.9E-08	6.1	0.71	Manual Valve Internal Leakage (Small)
T57	安全弁	誤開	0	38,985,411	27	1.3E-08	8.4	5.4E-08	1.6	0.24	Code Safety Valve Spurious Operation
T58	安全弁	外部リーク	0	28,480,458	21	1.8E-08	8.4	1.2E-08	2.5	1.49	Code Safety Valve External Leakage (Small)
T59	安全弁	内部リーク	1	21,194,997	26	7.1E-08	3.3	6.9E-08	1.5	1.03	Code Safety Valve Internal Leakage (Small)
T63	迷し安全弁（BWR）	誤開	0	4,499,872	10	1.1E-07	8.4	1.4E-07	4.6	0.79	Safety Relief Valve (BWR Only) SPURIOUSLY OPENS
T64	迷し安全弁（BWR）	外部リーク	0	2,063,229	4	2.4E-07	8.4	6.9E-09	8.4	35.02	Safety Relief Valve (BWR Only) External Leakage (Small)
T65	迷し安全弁（BWR）	内部リーク	0	3,315,682	7	1.5E-07	8.4	4.1E-07	9.1	0.37	Safety Relief Valve (BWR Only) Internal Leakage (Small)
T72	電磁弁	誤開又は誤閉	0	4,672,821	9	1.1E-07	8.4	6.6E-08	1.6	1.62	Solenoid-Operated Valve Spuriously Open or Close
T73	電磁弁	外部リーク	0	1,686,295	3	3.0E-07	8.4	2.4E-08	2.2	12.15	Solenoid Operated Valve External Leakage (Small)
T74	電磁弁	内部リーク	0	2,124,931	7	2.4E-07	8.4	1.4E-07	1.4	1.65	Solenoid Operated Valve Internal Leakage (Small)
T77	ファン/ブローア	継続運転失敗	3	9,988,894	26	3.5E-07	2.2	4.4E-06	7.4	0.08	HVAC Fan Fails To Run, Normally Running
T81	ダンパ	誤開又は誤閉	0	89,057,437	26	5.6E-09	8.4	1.1E-07	2.2	0.05	Air-Operated Damper Spurious Operation

表 3-3 一般機器時間故障率の日米比較（日本の値が米国の値の5%未満のものに下線）

ID	機種	故障モード	国内データ			国内新故障率			米国故障率 (SPAR2015)			比	米国故障率 (SPAR2015) の記述 Component Failure Mode
			故障件数	運転時間 (h)	フラント数	Mean (h)	EF	Mean (h)	EF	Mean (h)	EF		
T83	ダンバ	内部リーク	0	21,429,791	16	2.3E-08	8.4	1.8E-07	1.9	0.13	Air-Operated Damper Internal Leakage (Small)		
T85	熱交換器	伝熱管破損	3	43,723,715	27	8.0E-08	2.2	4.2E-08	18.8	1.91	Heat Exchanger External Leakage (Rupture)		
T86	熱交換器	外部リーク	0	29,221,743	21	1.7E-08	8.4	2.8E-07	4.8	0.06	Heat Exchanger External Leakage (Small)		
T87	熱交換器	伝熱管閉塞	0	43,039,331	27	1.2E-08	8.4	3.9E-07	7.6	<u>0.03</u>	Heat Exchanger Plugging/Heat Transfer (Pooled)		
T88	タンク	破損	0	12,630,873	24	4.0E-08	8.4	2.6E-07	1.5	0.15	Tank Rupture		
T92	オリフィス	閉塞	2	114,609,897	26	2.2E-08	2.5	1.0E-06	18.8	<u>0.02</u>	Orifice Plugging		
T93	ストレーナ/フィルタ (純水)	外部リーク	0	18,205,762	21	2.7E-08	8.4	1.0E-07	2.2	0.26	Filter External Leakage (Small) All Systems		
T95	ストレーナ/フィルタ (純水)	閉塞	0	28,546,150	27	1.8E-08	8.4	2.5E-07	2.5	0.07	Filter Plugging, Clean Systems		
T98	ストレーナ/フィルタ (海水)	閉塞	1	13,052,328	27	1.1E-07	3.3	1.1E-06	1.6	0.10	Strainer Plugging (Dirty water systems)		
T104	インバータ	機能喪失	0	1,048,176	6	4.8E-07	8.4	5.0E-06	4.0	0.10	Inverter Fails to Operate		
T109	遮断器	誤開又は誤閉	2	130,046,573	27	1.9E-08	2.5	1.6E-07	6.4	0.12	Circuit Breaker (All Voltages) Transfers Open		
T110	変圧器	機能喪失	1	11,722,801	27	1.3E-07	3.3	2.9E-06	2.6	<u>0.04</u>	Transformer Fail to Operate		
T111	蓄電池	機能喪失	0	5,048,458	27	9.9E-08	8.4	3.7E-07	1.4	0.27	Battery Fails to Operate		
T112	充電器	機能喪失	1	4,844,536	27	3.1E-07	3.3	2.6E-06	3.5	0.12	Battery Charger Fails to Operate		
T113	母線	機能喪失	1	44,012,575	27	3.4E-08	3.3	9.6E-07	4.0	0.04	AC Bus Fails to Operate		
T117	配管 (3インチ未満)	リーク	0	302,590,198	16	1.7E-09	8.4	6.9E-10	8.4	2.40	Piping Service Water System External Leak Small		
T119	配管 (3インチ以上)	リーク	0	670,678,331	19	7.5E-10	8.4	6.9E-10	8.4	1.08	Piping Service Water System External Leak Small		
T131	ヒューズ	誤断線	0	9,721,873	8	5.1E-08	8.4	1.2E-08	2.5	4.18	Fuse Transfer to Open State		
T132	流量トランスミッタ	不動作	0	8,745,208	24	5.7E-08	8.4	1.0E-07	8.4	0.56	Sensor/Transmitter (Flow) Fail to Operate per Hour		
T134	圧力トランスミッタ	不動作	0	43,449,035	27	1.2E-08	8.4	8.2E-07	8.4	<u>0.01</u>	Sensor/Transmitter (Pressure) Fail to Operate per Hour		
T136	水位トランスミッタ	不動作	3	30,809,449	27	1.1E-07	2.2	1.0E-07	8.4	1.11	Sensor/Transmitter (Level) Fail to Operate per Hour		
T138	温度検出器	不動作	0	29,740,837	24	1.7E-08	8.4	8.4E-07	8.4	<u>0.02</u>	Sensor/Transmitter (Temperature) Fail to Operate per Hour		
T162	空気圧縮機	継続運転失敗	7	1,707,068	27	4.1E-06	8.2	6.5E-05	2.8	0.06	Motor Driven Compressor Fails To Run		
T181	冷凍機	継続運転失敗	20	2,940,278	25	6.7E-06	4.6	6.9E-05	4.1	0.10	Chiller Unit Fails To Run, Normally Running		
T234	真空破壊弁 (BWR)	内部リーク	0	1,693,018	7	3.0E-07	8.4	2.9E-07	1.5	1.00	Vacuum Breaker Valve Internal Leakage (Small)		
T242	制御弁 (BWR)	制御不能	3	5,710,342	9	6.1E-07	2.2	1.9E-07	1.5	3.30	Flow Control Valve Fails To Control		
T243	制御弁 (BWR)	誤開又は誤閉	0	10,154,725	10	4.9E-08	8.4	1.2E-07	1.6	0.42	Flow Control Valve Transfers Positions		

表 3-4 一般機器デマンド故障確率の日米比較（日本の値が米国の値の5%未満のものに下線）

ID	機種	故障モード	国内データ			国内新故障確率			米国故障確率 (SPAR2015)			比	米国データ (SPAR2015) の記述 Component Failure Mode
			故障件数	デマンド数	プラント数	Mean	EF	Mean6	EF	EF	日/米		
D1	非常用ディーゼル発電機	起動失敗	11	6878	27	1.7 E-03	1.6	2.9E-03	1.7	<u>0.58</u>	Diesel Generator Fails To Start, Normally Standby		
D3	電動ポンプ (通常運転、純水)	起動失敗	2	19318	27	1.3 E-04	2.5	1.1E-03	2.5	<u>0.12</u>	Motor-driven pump Fail to Start, Normally Running		
D5	電動ポンプ (通常運転、海水)	起動失敗	3	9075	27	3.9 E-04	2.2	1.1E-03	2.5	<u>0.36</u>	Motor-driven pump Fail to Start, Normally Running		
D7	電動ポンプ (通常待機、純水)	起動失敗	1	20895	27	7.2 E-05	3.3	7.9E-04	2.7	<u>0.09</u>	Motor Driven Pump Fails To Start, Normally Standby		
D9	電動ポンプ (通常待機、海水)	起動失敗	0	1815	5	2.8 E-04	8.4	7.9E-04	2.7	<u>0.35</u>	Motor Driven Pump Fails To Start, Normally Standby		
D11	タービン駆動ポンプ	起動失敗	1	2047	27	7.3 E-04	3.3	6.0E-03	3.8	<u>0.12</u>	Turbine Driven Pump Fails To Start (Pooled Systems), Normally Standby		
D13	ディーゼル駆動ポンプ	起動失敗	0	150	2	3.3 E-03	8.4	2.2E-03	6.5	1.53	Engine Driven Pump Fails To Start, Normally Standby		
D29	空気作動弁	開失敗	11	78042	26	1.5 E-04	1.6	3.9E-04	5.2	<u>0.38</u>	Air Operated Valve Fails To Open		
D30	空気作動弁	開失敗	4	77927	26	5.8 E-05	2.0	3.6E-04	7.6	<u>0.16</u>	Air Operated Valve Fails To Close		
D43	逆止弁	開失敗	0	141286	27	3.5 E-06	8.4	9.2E-06	8.4	<u>0.38</u>	Check Valve Fails To Open		
D44	逆止弁	開失敗	5	141372	27	3.9 E-05	1.9	1.6E-04	1.7	<u>0.25</u>	Check Valve Fails To Close		
D60	逃し安全弁 (BWR)	開失敗	0	1535	8	3.3 E-04	8.4	2.4E-03	1.4	<u>0.13</u>	Safety relief valve fails to open		
D61	逃し安全弁 (BWR)	閉 (吹止まり)失敗	0	1535	8	3.3 E-04	8.4	8.9E-04	3.4	<u>0.37</u>	BWR ADS/SRV Fails To Reclose		
D76	ファン/ブローア	起動失敗	0	31865	26	1.6 E-05	8.4	5.4E-04	1.3	<u>0.03</u>	HVAC Fan Fails To Start, Normally Running		
D161	空気圧縮機	起動失敗	1	6588	27	2.3 E-04	3.3	3.4E-02	7.3	<u>0.01</u>	Motor Driven Compressor Fail To Start, Normally Running		
D180	冷凍機	起動失敗	16	3235	25	6.0 E-03	1.5	9.2E-03	6.0	<u>0.65</u>	Chiller Unit Fails To Start, Normally Running		
D230	真空破壊弁 (BWR)	開失敗	0	642	7	7.8 E-04	8.4	9.0E-05	2.5	8.66	Vacuum Breaker Valve Fail to Open		
D231	真空破壊弁 (BWR)	閉失敗	0	642	7	7.8 E-04	8.4	2.2E-04	5.7	3.62	Vacuum Breaker Valve fails to close		

表 3-5 国内一般機器時間故障率の新旧比較（新旧の違いが一桁以内のものに下線）

ID	機種	故障モード	国内データ			国内新故障率		29 年故障率		比	備考
			故障件数	運転時間(h)	プラント数	Mean(h)	EF	Mean(h)	EF		
T1	非常用ディーゼル発電機	起動失敗	11	3,309,689	27	3.5E-06	1.6	7.6E-06	2.0	<u>0.5</u>	
T2	非常用ディーゼル発電機	継続運転失敗	7	6,907	27	1.1E-03	1.7	3.3E-04	1.7	<u>3.3</u>	
T3	電動ポンプ（通常運転、純水）	起動失敗	2	20,934,842	27	1.2E-07	2.5	2.4E-07	2.3	<u>0.5</u>	29ヶ年データでは、電動ポンプ(常用待機、純水)起動失敗
T4	電動ポンプ（通常運転、純水）	継続運転失敗	1	10,431,547	27	1.4E-07	3.3	8.1E-07	2.5	<u>0.2</u>	
T5	電動ポンプ（通常運転、海水）	起動失敗	3	7,889,157	27	4.4E-07	2.2	1.1E-06	3.4	<u>0.4</u>	29ヶ年データでは、電動ポンプ(常用待機、海水)起動失敗
T6	電動ポンプ（通常運転、海水）	継続運転失敗	0	4,697,834	27	1.1E-07	8.4	6.0E-07	2.5	<u>0.2</u>	
T7	電動ポンプ（通常待機、純水）	起動失敗	1	11,633,408	27	1.3E-07	3.3	2.0E-07	2.2	<u>0.7</u>	29ヶ年データでは、電動ポンプ(非常用待機、純水)起動失敗
T8	電動ポンプ（通常待機、純水）	継続運転失敗	0	13,331	27	3.8E-05	8.4	8.1E-07	2.5	46.3	29ヶ年データでは当該故障モードがないため、参考に電動ポンプ(常用運転、純水)継続運転失敗と比較
T9	電動ポンプ（通常待機、海水）	起動失敗	0	508,439	5	9.8E-07	8.4	3.7E-07	2.6	<u>2.7</u>	29ヶ年データでは、電動ポンプ(非常用待機、海水)起動失敗
T10	電動ポンプ（通常待機、海水）	継続運転失敗	0	4,057	5	1.2E-04	8.4	6.0E-07	2.5	205.1	29ヶ年データでは当該故障モードがないため、参考に電動ポンプ(常用運転、海水)継続運転失敗と比較
T11	タービン駆動ポンプ	起動失敗	1	1,212,040	27	1.2E-06	3.3	7.5E-06	2.3	<u>0.2</u>	
T12	タービン駆動ポンプ	継続運転失敗	0	831	27	6.0E-04	8.4	4.0E-06	1.9	149.5	
T13	ディーゼル駆動ポンプ	起動失敗	0	88,000	2	5.7E-06	8.4	4.2E-05	2.8	<u>0.1</u>	
T14	ディーゼル駆動ポンプ	継続運転失敗	0	76	2	6.6E-03	8.4	1.2E-03	30.0	<u>5.6</u>	
T17	電動弁（純水）	作動失敗	9	148,453,308	27	6.4E-08	1.6	6.6E-08	5.9	<u>1.0</u>	
T18	電動弁（純水）	誤開又は誤閉	0	148,036,418	27	3.4E-09	8.4	4.2E-09	2.9	<u>0.8</u>	
T19	電動弁（純水）	外部リーク	0	99,577,958	21	5.0E-09	8.4	5.5E-09	2.7	<u>0.9</u>	
T20	電動弁（純水）	内部リーク	4	60,486,595	26	7.4E-08	2.0	8.7E-09	2.4	<u>8.6</u>	
T21	電動弁（純水）	閉塞	0	144,939,288	27	3.4E-09	8.4	1.3E-08	2.1	<u>0.3</u>	
T24	電動弁（海水）	作動失敗	5	18,274,928	27	3.0E-07	1.9	2.5E-07	2.4	<u>1.2</u>	
T25	電動弁（海水）	誤開又は誤閉	0	18,219,232	27	2.7E-08	8.4	2.8E-08	4.6	<u>1.0</u>	
T26	電動弁（海水）	外部リーク	0	6,707,431	8	7.5E-08	8.4	2.7E-08	4.7	<u>2.8</u>	
T27	電動弁（海水）	内部リーク	3	9,118,729	14	3.8E-07	2.2	4.9E-08	3.8	<u>7.8</u>	
T28	電動弁（海水）	閉塞	0	18,163,536	27	2.8E-08	8.4	1.4E-07	2.7	<u>0.2</u>	
T31	空気作動弁	作動失敗	15	77,690,319	27	2.0E-07	1.5	8.6E-08	1.9	<u>2.3</u>	
T32	空気作動弁	誤開又は誤閉	1	77,465,541	27	1.9E-08	3.3	1.8E-08	2.6	<u>1.1</u>	
T33	空気作動弁	外部リーク	1	60,978,708	21	2.5E-08	3.3	1.0E-08	2.8	<u>2.5</u>	
T34	空気作動弁	内部リーク	4	39,865,996	25	1.1E-07	2.0	1.7E-08	2.9	<u>6.5</u>	
T35	空気作動弁	閉塞	0	75,906,300	27	6.6E-09	8.4	2.0E-08	2.2	<u>0.3</u>	
T38	油圧作動弁	作動失敗	1	6,037,453	17	2.5E-07	3.3	3.2E-07	2.8	<u>0.8</u>	
T39	油圧作動弁	誤開又は誤閉	0	6,037,453	17	8.3E-08	8.4	8.6E-08	2.5	<u>1.0</u>	
T40	油圧作動弁	外部リーク	0	1,652,120	4	3.0E-07	8.4	4.7E-08	2.8	<u>6.4</u>	
T41	油圧作動弁	内部リーク	0	4,743,976	11	1.1E-07	8.4	1.5E-08	3.9	<u>6.9</u>	
T42	油圧作動弁	閉塞	0	6,037,453	17	8.3E-08	8.4	6.2E-08	2.5	<u>1.3</u>	
T45	逆止弁	作動失敗	5	142,730,961	27	3.9E-08	1.9	9.4E-09	2.7	<u>4.1</u>	

表 3-5 国内一般機器時間故障率の新旧比較（新旧の違いが一桁以内のものに下線）

ID	機種	故障モード	国内データ			国内新故障率		29年故障率		比	備考
			故障件数	運転時間(h)	プラント数	Mean(h)	EF	Mean(h)	EF		
T46	逆止弁	外部リーク	0	98,164,738	21	5.1E-09	8.4	3.4E-09	3.5	<u>1.5</u>	
T47	逆止弁	内部リーク	1	28,061,015	26	5.3E-08	3.3	2.1E-08	2.3	<u>2.6</u>	
T50	手動弁	開閉失敗	4	441,207,321	27	1.0E-08	2.0	1.1E-08	2.0	<u>0.9</u>	
T51	手動弁	外部リーク	0	378,640,021	21	1.3E-09	8.4	4.8E-09	2.4	<u>0.3</u>	
T52	手動弁	内部リーク	5	90,899,545	26	4.9E-08	17.7	5.1E-09	2.4	<u>9.5</u>	
T53	手動弁	閉塞	0	432,851,325	27	1.2E-09	8.4	1.1E-08	2.0	<u>0.1</u>	
T56	安全弁	作動失敗	0	38,985,411	27	1.3E-08	8.4	3.1E-08	2.6	<u>0.4</u>	
T57	安全弁	誤開	0	38,985,411	27	1.3E-08	8.4	1.6E-08	3.2	<u>0.8</u>	
T58	安全弁	外部リーク	0	28,480,458	21	1.8E-08	8.4	1.1E-08	3.7	<u>1.6</u>	
T59	安全弁	内部リーク	1	21,194,997	26	7.1E-08	3.3	5.7E-08	2.6	<u>1.2</u>	
T62	逃し安全弁 (BWR)	作動失敗	0	4,499,872	10	1.1E-07	8.4	1.6E-07	2.6	<u>0.7</u>	
T63	逃し安全弁 (BWR)	誤開	0	4,499,872	10	1.1E-07	8.4	6.8E-08	3.4	<u>1.6</u>	
T64	逃し安全弁 (BWR)	外部リーク	0	2,063,229	4	2.4E-07	8.4	2.2E-08	4.9	11.2	
T65	逃し安全弁 (BWR)	内部リーク	0	3,315,682	7	1.5E-07	8.4	8.3E-08	3.1	<u>1.8</u>	
T71	電磁弁	作動失敗	0	4,672,821	9	1.1E-07	8.4	1.6E-08	2.0	<u>6.6</u>	
T72	電磁弁	誤開又は誤閉	0	4,672,821	9	1.1E-07	8.4	4.4E-09	2.7	24.4	
T73	電磁弁	外部リーク	0	1,686,295	3	3.0E-07	8.4	4.4E-09	2.6	67.9	
T74	電磁弁	内部リーク	0	2,124,931	7	2.4E-07	8.4	6.2E-09	2.3	38.3	
T75	電磁弁	閉塞	0	4,672,821	9	1.1E-07	8.4	5.1E-09	2.5	20.9	
T76	ファン/プロア	起動失敗	0	29,271,810	26	1.7E-08	8.4	1.5E-07	2.7	<u>0.1</u>	
T77	ファン/プロア	継続運転失敗	3	9,988,894	26	3.5E-07	2.2	3.2E-07	2.2	<u>1.1</u>	
T80	ダンバ	作動失敗	19	89,771,018	26	2.0E-07	16.7	4.6E-08	2.3	<u>4.5</u>	
T81	ダンバ	誤開又は誤閉	0	89,057,437	26	5.6E-09	8.4	1.7E-08	2.5	<u>0.3</u>	
T82	ダンバ	外部リーク	1	57,916,097	21	2.6E-08	3.3	1.4E-08	2.6	<u>1.9</u>	
T83	ダンバ	内部リーク	0	21,429,791	16	2.3E-08	8.4	1.2E-08	2.8	<u>2.0</u>	
T84	ダンバ	閉塞	0	89,771,018	26	5.6E-09	8.4	2.4E-08	2.2	<u>0.2</u>	
T85	熱交換器	伝熱管破損	3	43,723,715	27	8.0E-08	2.2	3.7E-08	2.6	<u>2.2</u>	
T86	熱交換器	外部リーク	0	29,221,743	21	1.7E-08	8.4	2.8E-08	2.7	<u>0.6</u>	
T87	熱交換器	伝熱管閉塞	0	43,039,331	27	1.2E-08	8.4	6.9E-08	2.3	<u>0.2</u>	
T88	タンク	破損	0	12,630,873	24	4.0E-08	8.4	5.2E-08	3.0	<u>0.8</u>	
T89	タンク	閉塞	0	12,187,429	24	4.1E-08	8.4	8.4E-08	2.6	<u>0.5</u>	
T90	オリフィス	外部リーク	0	83,011,062	21	6.0E-09	8.4	1.3E-08	2.4	<u>0.5</u>	
T91	オリフィス	内部破損	1	115,266,008	26	1.3E-08	3.3	1.3E-08	2.4	<u>1.0</u>	
T92	オリフィス	閉塞	2	114,609,897	26	2.2E-08	2.5	2.0E-08	2.5	<u>1.1</u>	
T93	ストレナー/フィルタ (純水)	外部リーク	0	18,205,762	21	2.7E-08	8.4	3.8E-08	2.4	<u>0.7</u>	

表 3-5 国内一般機器時間故障率の新旧比較（新旧の違いが一桁以内のものに下線）

ID	機種	故障モード	国内データ			国内新故障率		29年故障率		比	備考
			故障件数	運転時間(h)	フラント数	Mean(h)	EF	Mean(h)	EF		
T94	ストレナー/フィルタ (純水)	内部破損	0	28,546,155	27	1.8E-08	8.4	2.4E-08	2.7	0.7	
T95	ストレナー/フィルタ (純水)	閉塞	0	28,546,150	27	1.8E-08	8.4	2.2E-08	2.8	0.8	
T96	ストレナー/フィルタ (海水)	外部リーク	1	5,952,335	13	2.5E-07	3.3	1.9E-07	2.8	1.4	
T97	ストレナー/フィルタ (海水)	内部破損	0	13,386,504	27	3.7E-08	8.4	1.3E-07	3.2	0.3	
T98	ストレナー/フィルタ (海水)	閉塞	1	13,052,328	27	1.1E-07	3.3	2.9E-07	2.5	0.4	
T99	制御駆動装置 (BWR)	挿入失敗	0	6,032,868	7	8.3E-08	8.4	3.0E-08	4.8	2.8	
T103	RPS、CRDM MGセット	機能喪失	0	204,902	2	2.4E-06	8.4	2.8E-07	2.9	8.7	
T104	インバータ	機能喪失	0	1,048,176	6	4.8E-07	8.4	4.6E-06	2.8	0.1	
T108	遮断器	作動失敗	2	130,046,573	27	1.9E-08	2.5	4.3E-08	2.1	0.5	
T109	遮断器	誤開又は誤閉	2	130,046,573	27	1.9E-08	2.5	3.8E-08	2.0	0.5	
T110	変圧器	機能喪失	1	11,722,801	27	1.3E-07	3.3	2.1E-07	2.2	0.6	
T111	蓄電池	機能喪失	0	5,048,458	27	9.9E-08	8.4	9.5E-08	3.0	1.0	
T112	充電器	機能喪失	1	4,844,536	27	3.1E-07	3.3	2.6E-07	2.3	1.2	
T113	母線	機能喪失	1	44,012,575	27	3.4E-08	3.3	4.1E-08	2.0	0.8	
T117	配管 (3インチ未満)	リーク	0	302,590,198	16	1.7E-09	8.4	3.9E-10	4.0	4.2	
T118	配管 (3インチ未満)	閉塞	0	278,094,635	14	1.8E-09	8.4	2.5E-09	2.2	0.7	
T119	配管 (3インチ以上)	リーク	0	670,678,331	19	7.5E-10	8.4	8.1E-10	2.8	0.9	
T120	配管 (3インチ以上)	閉塞	0	393,872,221	15	1.3E-09	8.4	7.0E-10	2.5	1.8	
T121	リレー	不動作	1	378,212,352	27	4.0E-09	3.3	2.2E-09	3.1	1.8	
T122	リレー	誤動作	1	378,208,175	27	4.0E-09	3.3	3.0E-09	1.9	1.3	
T123	遅延リレー	不動作	1	47,579,852	19	3.2E-08	3.3	6.8E-09	2.8	4.6	
T124	遅延リレー	誤動作	0	47,582,365	19	1.1E-08	8.4	6.8E-09	2.8	1.5	
T125	演算器	不動作	0	12,388,533	9	4.0E-08	8.4	1.6E-08	2.4	2.5	
T126	演算器	高出力/低出力	0	12,388,533	9	4.0E-08	8.4	4.6E-08	2.6	0.9	
T127	カード (半導体ロジック回路)	不動作	0	35,745,155	15	1.4E-08	8.4	2.5E-08	2.6	0.6	
T128	カード (半導体ロジック回路)	誤動作	0	35,752,512	15	1.4E-08	8.4	5.0E-08	2.4	0.3	
T129	警報設定器	不動作	0	52,431,784	20	9.5E-09	8.4	4.2E-09	2.6	2.3	
T130	警報設定器	誤動作	0	52,431,784	20	9.5E-09	8.4	1.0E-08	2.1	0.9	
T131	ヒューズ	誤断線	0	9,721,873	8	5.1E-08	8.4	6.5E-09	2.0	7.9	
T132	流量トランスミッタ	不動作	0	8,745,208	24	5.7E-08	8.4	3.1E-08	2.2	1.8	
T133	流量トランスミッタ	高出力/低出力	1	8,745,208	24	1.7E-07	3.3	7.2E-08	5.5	2.4	
T134	圧カトランスミッタ	不動作	0	43,449,035	27	1.2E-08	8.4	1.3E-08	2.2	0.9	
T135	圧カトランスミッタ	高出力/低出力	2	43,449,035	27	5.8E-08	2.5	4.2E-08	1.9	1.4	
T136	水位トランスミッタ	不動作	3	30,809,449	27	1.1E-07	2.2	2.7E-08	2.3	4.1	
T137	水位トランスミッタ	高出力/低出力	1	30,785,498	27	4.9E-08	3.3	3.0E-08	2.2	1.6	

表 3-5 国内一般機器時間故障率の新旧比較（新旧の違いが一桁以内のものに下線）

ID	機種	故障モード	国内データ			国内新故障率		29年故障率		比	備考
			故障件数	運転時間(h)	プラント数	Mean(h)	EF	Mean(h)	EF		
T138	温度検出器	不動作	0	29,740,837	24	1.7E-08	8.4	4.1E-09	2.3	<u>4.1</u>	
T139	温度検出器	高出力/低出力	2	29,741,845	24	8.4E-08	2.5	8.5E-09	2.0	<u>9.9</u>	
T140	放射線検出器	不動作	0	1,595,100	4	3.1E-07	8.4	7.6E-08	2.8	<u>4.1</u>	
T141	放射線検出器	高出力/低出力	0	1,595,100	4	3.1E-07	8.4	1.7E-07	2.6	<u>1.8</u>	
T142	流量スイッチ	不動作	1	1,957,004	8	7.7E-07	3.3	1.9E-08	2.4	40.5	
T143	流量スイッチ	誤動作	0	1,957,004	8	2.6E-07	8.4	2.7E-08	2.3	<u>9.6</u>	
T144	圧カススイッチ	不動作	1	14,081,319	18	1.1E-07	3.3	7.9E-09	2.4	13.6	
T145	圧カススイッチ	誤動作	0	14,081,319	18	3.6E-08	8.4	1.9E-08	2.5	<u>1.9</u>	
T146	水位スイッチ	不動作	2	8,637,686	11	2.9E-07	2.5	2.7E-08	2.5	10.7	
T147	水位スイッチ	誤動作	0	8,637,686	11	5.8E-08	8.4	1.5E-08	2.3	<u>3.8</u>	
T148	温度スイッチ	不動作	0	13,404,865	19	3.7E-08	8.4	1.9E-08	2.5	<u>1.9</u>	
T149	温度スイッチ	誤動作	0	13,404,865	19	3.7E-08	8.4	2.8E-08	2.4	<u>1.3</u>	
T150	リミットスイッチ	不動作	2	42,922,407	22	5.8E-08	2.5	9.2E-09	2.0	<u>6.3</u>	
T151	リミットスイッチ	誤動作	1	42,922,407	22	3.5E-08	3.3	5.6E-09	2.1	<u>6.2</u>	
T152	手動スイッチ	不動作	1	71,966,709	26	2.1E-08	3.3	3.1E-09	2.2	<u>6.8</u>	
T153	手動スイッチ	誤動作	0	71,966,709	26	6.9E-09	8.4	2.4E-09	2.4	<u>2.9</u>	
T154	コントローラ	不動作	0	1,088,885	4	4.6E-07	8.4	2.0E-08	2.3	23.3	
T155	コントローラ	高出力/低出力	0	1,088,885	4	4.6E-07	8.4	3.1E-08	2.3	15.0	
T156	配線/電線	短絡	0	19,452,045	22	2.6E-08	8.4	3.3E-09	30.0	<u>7.9</u>	
T157	配線/電線	地絡	0	19,452,045	22	2.6E-08	8.4	7.4E-09	30.0	<u>3.5</u>	
T158	配線/電線	断線	0	19,452,045	22	2.6E-08	8.4	7.4E-09	30.0	<u>3.5</u>	
T159	ヒーター	機能喪失	0	1,158,301	10	4.3E-07	8.4	5.0E-08	30.0	<u>8.6</u>	
T160	アナンシエータ	機能喪失	0	350,180	5	1.4E-06	8.4	3.0E-08	30.0	47.9	
T213	演算装置 (デジタル制御機器)	不動作	4	9,415,906	3	4.8E-07	2.0	8.9E-08	6.2	<u>5.4</u>	
T214	演算装置 (デジタル制御機器)	誤動作	0	9,415,906	3	5.3E-08	8.4	8.9E-08	6.2	<u>0.6</u>	
T215	インターフェイス (デジタル制御機器)	不動作	0	7,843,186	1	6.4E-08	8.4	3.3E-08	4.8	<u>1.9</u>	
T216	インターフェイス (デジタル制御機器)	誤動作	0	7,843,186	1	6.4E-08	8.4	3.3E-08	4.8	<u>1.9</u>	
T217	入出力装置 (デジタル制御機器)	不動作	4	25,984,628	3	1.7E-07	2.0	4.4E-08	5.1	<u>3.9</u>	
T218	入出力装置 (デジタル制御機器)	動作	0	25,984,628	3	1.9E-08	8.4	9.5E-08	3.4	<u>0.2</u>	
T219	ロジックカード (デジタル制御機器)	不動作	0	555,720	2	9.0E-07	8.4	2.4E-07	9.3	<u>3.8</u>	
T221	ロードドライバ (デジタル制御機器)	不動作	1	7,104,373	3	2.1E-07	3.3	6.1E-08	5.6	<u>3.4</u>	
T223	光ケーブル (デジタル制御機器)	機能喪失	0	9,150,383	1	5.5E-08	8.4	4.1E-08	5.0	<u>1.3</u>	

表 3-6 国内一般機器デマンド故障確率の新旧比較 (新旧の違いが一行以内のものに下線)

ID	機種	故障モード	国内データ			国内新故障確率			29ヶ年故障確率			備考
			故障件数	デマンド数	プラント数	Mean	EF	Ratio	Mean	EF	Ratio	
D1	非常用ディーゼル発電機	起動失敗	11	6878	27	1.7E-03	1.6	4.1	2.9E-03	4.1	<u>0.6</u>	
D3	電動ポンプ (通常運転、純水)	起動失敗	2	19318	27	1.3E-04	2.5	2.1	1.2E-04	2.1	<u>1.1</u>	29ヶ年データでは機種が細分化されていないため、電動ポンプ起動失敗と比較
D5	電動ポンプ (通常運転、海水)	起動失敗	3	9075	27	3.9E-04	2.2	2.1	1.2E-04	2.1	<u>3.2</u>	29ヶ年データでは機種が細分化されていないため、電動ポンプ起動失敗と比較
D7	電動ポンプ (通常待機、純水)	起動失敗	1	20895	27	7.2E-05	3.3	2.1	1.2E-04	2.1	<u>0.6</u>	29ヶ年データでは機種が細分化されていないため、電動ポンプ起動失敗と比較
D9	電動ポンプ (通常待機、海水)	起動失敗	0	1815	5	2.8E-04	8.4	2.1	1.2E-04	2.1	<u>2.3</u>	29ヶ年データでは機種が細分化されていないため、電動ポンプ起動失敗と比較
D11	タービン駆動ポンプ	起動失敗	1	2047	27	7.3E-04	3.3	2.5	4.1E-03	2.5	<u>0.2</u>	
D13	ディーゼル駆動ポンプ	起動失敗	0	150	2	3.3E-03	8.4	2.7	2.1E-02	2.7	<u>0.2</u>	
D15	電動弁 (純水)	開失敗	5	118838	27	4.6E-05	1.9	2.3	6.8E-05	2.3	<u>0.7</u>	29ヶ年データでは機種が細分化されていないため、電動弁の開失敗、閉失敗とそれぞれ比較
D16	電動弁 (純水)	閉失敗	4	120217	27	3.7E-05	2.0	3.7	4.6E-05	3.7	<u>0.8</u>	29ヶ年データでは機種が細分化されていないため、電動弁の開失敗、閉失敗とそれぞれ比較
D22	電動弁 (海水)	開失敗	3	365722	25	9.6E-06	2.2	2.3	6.8E-05	2.3	<u>0.1</u>	29ヶ年データでは機種が細分化されていないため、電動弁の開失敗、閉失敗とそれぞれ比較
D23	電動弁 (海水)	閉失敗	2	365687	25	6.8E-06	2.5	3.7	4.6E-05	3.7	<u>0.2</u>	29ヶ年データでは機種が細分化されていないため、電動弁の開失敗、閉失敗とそれぞれ比較
D29	空気作動弁	開失敗	11	78042	26	1.5E-04	1.6	2.5	4.8E-05	2.5	<u>3.1</u>	
D30	空気作動弁	閉失敗	4	77927	26	5.8E-05	2.0	3.1	1.2E-04	3.1	<u>0.5</u>	
D36	油圧作動弁	開失敗	1	15899	17	9.4E-05	3.3	2.1	1.1E-04	2.1	<u>0.8</u>	
D37	油圧作動弁	閉失敗	0	15801	17	3.2E-05	8.4	2.5	5.6E-05	2.5	<u>0.6</u>	
D43	逆止弁	開失敗	0	141286	27	3.5E-06	8.4	3.6	9.2E-06	3.6	<u>0.4</u>	
D44	逆止弁	閉失敗	5	141372	27	3.9E-05	1.9	4.2	5.9E-05	4.2	<u>0.7</u>	
D48	手動弁	開失敗	1	20449	26	7.3E-05	3.3	3.0	1.1E-04	3.0	<u>0.7</u>	
D49	手動弁	閉失敗	3	20448	26	1.7E-04	2.2	3.2	8.3E-05	3.2	<u>2.1</u>	
D54	安全弁	開失敗	0	1612	18	3.1E-04	8.4	5.4	4.6E-04	5.4	<u>0.7</u>	
D55	安全弁	閉 (吹止まり)失敗	0	1612	18	3.1E-04	8.4	7.6	6.9E-04	7.6	<u>0.5</u>	
D60	逃し安全弁 (BWR)	開失敗	0	1535	8	3.3E-04	8.4	3.0	4.2E-04	3.0	<u>0.8</u>	
D61	逃し安全弁 (BWR)	閉 (吹止まり)失敗	0	1535	8	3.3E-04	8.4	3.5	2.8E-04	3.5	<u>1.2</u>	
D69	電磁弁	開失敗	0	84701	4	5.9E-06	8.4	2.1	4.3E-05	2.1	<u>0.1</u>	29ヶ年データでは機種が細分化されていないため、電磁弁の開閉失敗と比較
D70	電磁弁	閉失敗	0	84735	4	5.9E-06	8.4	2.1	4.3E-05	2.1	<u>0.1</u>	29ヶ年データでは機種が細分化されていないため、電磁弁の開閉失敗と比較
D76	ファン/ブローア	起動失敗	0	31865	26	1.6E-05	8.4	2.7	1.0E-04	2.7	<u>0.2</u>	
D78	ダンパ	開失敗	4	48153	26	9.3E-05	2.0	2.3	6.1E-05	2.3	<u>1.5</u>	
D79	ダンパ	閉失敗	15	48070	26	3.2E-04	1.5	2.5	5.2E-05	2.5	<u>6.2</u>	
D106	遮断器	開放失敗	1	52694	26	2.8E-05	3.3	2.1	5.2E-05	2.1	<u>0.6</u>	
D107	遮断器	投入失敗	1	94552	26	1.6E-05	3.3	2.1	7.2E-05	2.1	<u>0.2</u>	

4. 謝辞

リスク情報活用推進チーム旧メンバの錦見篤志氏（現 東北インフォメーション・システムズ(株)）、高橋宏行氏（現 東北電力(株)）、友澤孝司氏（前（一財）電力中央研究所、四国電力(株)）には、日本で信頼性の高いデータ収集を行うためにデータ収集の技術要件の策定とデータ収集手順の作成に尽力されました。また、PRA用パラメータ整備 WG メンバのみなさまには、データ分析理論の適用しにくい現実的問題についてご指摘・ご議論いただき、実用的なデータ分析方法の確立に多大なご貢献をされました。最後に、(株)原子力エンジニアリングの大家慶氏、柘井誠氏には、データ収集の現場の問題から計算理論に至るまで幅広い分野で解決策をご検討いただきました。以上、関係者のみなさまに心より感謝申し上げます。

参考文献

- [1] ニューシア原子力施設情報公開ライブラリー, (一社) 原子力安全推進協会, <http://www.nucia.jp/>, (参照 2021-09-30)
- [2] “PSA 用故障率データに関する調査,” (財) 原子力安全研究協会報告書, 平成 9 年 3 月.
- [3] 桐本順広, 松崎章弘, 佐々木亨, “原子力発電所に関する確率論的安全評価用の機器故障率の算出 (1982 年度～1997 年度 16 カ年 49 基データ改訂版),” 電中研報告 P00001, (財) 電力中央研究所, 平成 13 年 2 月.
- [4] 桐本順広, 三上康文, 大山嘉博, “改良型 BWR(ABWR)プラントの PRA(PSA)用機器故障率データの整備 (その 1),” 電中研報告 P03001, (財) 電力中央研究所, 平成 16 年 3 月.
- [5] “故障件数の不確か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 カ年 49 基データ),” (有) 日本原子力技術協会, 2009 年 3 月.
- [6] “故障件数の不確か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 カ年 55 基データ) 改訂 1,” (一社) 原子力安全推進協会, 2014 年 1 月.
- [7] “故障件数の不確かさを考慮した国内一般機器故障率の推定 (1982～2010 年度 29 カ年 56 基データ),” (一社) 原子力安全推進協会, 2016 年 6 月.
- [8] C.L. Atwood et al., “Handbook of Parameter Estimation for Probabilistic Risk Assessment,” U.S. Nuclear Regulatory Commission, NUREG/CR-6823 (SAND2003-3348P), September 2003.
- [9] A. Gelman, et.al., “Bayesian Data Analysis Third edition,” CRC Press, 2013.
- [10] S. A. Eide, T. E. Wierman, C. D. Gentillon, D. M. Rasmuson and C. L. Atwood, "Industry-Average Performance for Components and Initiating Events at U.S. Commercial Nuclear Power Plants," NUREG/CR-6928, U.S. Nuclear Regulatory Commission, February 2007.
- [11] United States Nuclear Regulatory Commission, "Component Reliability Data Sheets," March 2008. [Online].Available: <http://nrcoe.inl.gov/resultsdb/publicdocs/AvgPerf/ComponentReliabilityDataSheets.pdf>, (参照 2021-09-30)
- [12] United States Nuclear Regulatory Commission, "Component Reliability Data Sheets Update 2010," September 2012. [Online].Available: <http://nrcoe.inl.gov/resultsdb/publicdocs/AvgPerf/ComponentReliabilityDataSheets2010.pdf>, (参照 2021-09-30)
- [13] United States Nuclear Regulatory Commission, "Component Reliability Data Sheets Update 2015," February 2017. [Online].Available:

[http://nrcoe.inl.gov/resultsdb/publicdocs/AvgPerf/
ComponentReliabilityDataSheets2015.pdf](http://nrcoe.inl.gov/resultsdb/publicdocs/AvgPerf/ComponentReliabilityDataSheets2015.pdf),

(参照 2021-09-30)

- [14] Adery C. A. Hope, “A Simplified Monte Carlo Significance Test Procedure,” *Journal of the Royal Statistical Society. Series B(Methodological)*, Vol. 30, No. 3(1968), pp. 582-598,

附録 A 収集データ

A-1 機種・故障モードに対する炉型別機能故障件数

表 A-1 機種・故障モードに対する炉型別機能故障件数（黒塗り部分は収集対象ではないことを示す）

No.	対象機種名	故障モード	BWR	PWR	計
1	非常用ディーゼル発電機	起動失敗	6	5	11
2	非常用ディーゼル発電機	継続運転失敗	2	5	7
3	電動ポンプ（通常運転、純水）	起動失敗	1	1	2
4	電動ポンプ（通常運転、純水）	継続運転失敗	1	0	1
5	電動ポンプ（通常運転、海水）	起動失敗	3	0	3
6	電動ポンプ（通常運転、海水）	継続運転失敗	0	0	0
7	電動ポンプ（通常待機、純水）	起動失敗	0	1	1
8	電動ポンプ（通常待機、純水）	継続運転失敗	0	0	0
9	電動ポンプ（通常待機、海水）	起動失敗	0	0	0
10	電動ポンプ（通常待機、海水）	継続運転失敗	0	0	0
11	タービン駆動ポンプ	起動失敗	0	1	1
12	タービン駆動ポンプ	継続運転失敗	0	0	0
13	ディーゼル駆動ポンプ	起動失敗	0	0	0
14	ディーゼル駆動ポンプ	継続運転失敗	0	0	0
15	電動弁（純水）	開失敗	3	2	5
16	電動弁（純水）	閉失敗	1	3	4
17	電動弁（純水）	作動失敗	4	5	9
18	電動弁（純水）	誤開又は誤閉	0	0	0
19	電動弁（純水）	外部リーク	0	0	0
20	電動弁（純水）	内部リーク	4	0	4
21	電動弁（純水）	閉塞	0	0	0
22	電動弁（海水）	開失敗	3	0	3
23	電動弁（海水）	閉失敗	1	1	2
24	電動弁（海水）	作動失敗	4	1	5
25	電動弁（海水）	誤開又は誤閉	0	0	0
26	電動弁（海水）	外部リーク	0	0	0
27	電動弁（海水）	内部リーク	3	0	3
28	電動弁（海水）	閉塞	0	0	0
29	空気作動弁	開失敗	0	11	11
30	空気作動弁	閉失敗	2	2	4
31	空気作動弁	作動失敗	2	13	15
32	空気作動弁	誤開又は誤閉	0	1	1
33	空気作動弁	外部リーク	0	1	1
34	空気作動弁	内部リーク	2	2	4
35	空気作動弁	閉塞	0	0	0
36	油圧作動弁	開失敗	1	0	1
37	油圧作動弁	閉失敗	0	0	0
38	油圧作動弁	作動失敗	1	0	1

表 A-1 機種・故障モードに対する炉型別機能故障件数（黒塗り部分は収集対象ではないことを示す）

No.	対象機種名	故障モード	BWR	PWR	計
39	油圧作動弁	誤開又は誤閉	0	0	0
40	油圧作動弁	外部リーク	0	0	0
41	油圧作動弁	内部リーク	0	0	0
42	油圧作動弁	閉塞	0	0	0
43	逆止弁	開失敗	0	0	0
44	逆止弁	閉失敗	5	0	5
45	逆止弁	作動失敗	5	0	5
46	逆止弁	外部リーク	0	0	0
47	逆止弁	内部リーク	1	0	1
48	手動弁	開失敗	1	0	1
49	手動弁	閉失敗	3	0	3
50	手動弁	開閉失敗	4	0	4
51	手動弁	外部リーク	0	0	0
52	手動弁	内部リーク	5	0	5
53	手動弁	閉塞	0	0	0
54	安全弁	開失敗	0	0	0
55	安全弁	閉（吹止まり）失敗	0	0	0
56	安全弁	作動失敗	0	0	0
57	安全弁	誤開	0	0	0
58	安全弁	外部リーク	0	0	0
59	安全弁	内部リーク	0	1	1
60	逃し安全弁（BWR）	開失敗	0		0
61	逃し安全弁（BWR）	閉（吹止まり）失敗	0		0
62	逃し安全弁（BWR）	作動失敗	0		0
63	逃し安全弁（BWR）	誤開	0		0
64	逃し安全弁（BWR）	外部リーク	0		0
65	逃し安全弁（BWR）	内部リーク	0		0
66	真空逃し弁（PWR）	開失敗		0	0
67	真空逃し弁（PWR）	閉失敗		0	0
68	真空逃し弁（PWR）	作動失敗		0	0
69	電磁弁	開失敗	0	0	0
70	電磁弁	閉失敗	0	0	0
71	電磁弁	作動失敗	0	0	0
72	電磁弁	誤開又は誤閉	0	0	0
73	電磁弁	外部リーク	0	0	0
74	電磁弁	内部リーク	0	0	0
75	電磁弁	閉塞	0	0	0
76	ファン/ブロア	起動失敗	0	0	0
77	ファン/ブロア	継続運転失敗	3	0	3
78	ダンパ	開失敗	0	4	4
79	ダンパ	閉失敗	9	6	15

表 A-1 機種・故障モードに対する炉型別機能故障件数（黒塗り部分は収集対象ではないことを示す）

No.	対象機種名	故障モード	BWR	PWR	計
80	ダンパ	作動失敗	9	10	19
81	ダンパ	誤開又は誤閉	0	0	0
82	ダンパ	外部リーク	1	0	1
83	ダンパ	内部リーク	0	0	0
84	ダンパ	閉塞	0	0	0
85	熱交換器	伝熱管破損	3	0	3
86	熱交換器	外部リーク	0	0	0
87	熱交換器	伝熱管閉塞	0	0	0
88	タンク	破損	0	0	0
89	タンク	閉塞	0	0	0
90	オリフィス	外部リーク	0	0	0
91	オリフィス	内部破損	1	0	1
92	オリフィス	閉塞	0	2	2
93	ストレーナ/フィルタ（純水）	外部リーク	0	0	0
94	ストレーナ/フィルタ（純水）	内部破損	0	0	0
95	ストレーナ/フィルタ（純水）	閉塞	0	0	0
96	ストレーナ/フィルタ（海水）	外部リーク	1	0	1
97	ストレーナ/フィルタ（海水）	内部破損	0	0	0
98	ストレーナ/フィルタ（海水）	閉塞	1	0	1
99	制御棒駆動装置（BWR）	挿入失敗	0		0
100	制御棒駆動装置（PWR）	挿入失敗		0	0
101	再循環ポンプ MG セット（ABWR）	機能喪失	0		0
102	PLR MG セット（BWR）	機能喪失	0		0
103	RPS、CRDM MG セット	機能喪失	0	0	0
104	インバータ	機能喪失	0	0	0
106	遮断器	開放失敗	1	0	1
107	遮断器	投入失敗	1	0	1
108	遮断器	作動失敗	2	0	2
109	遮断器	誤開又は誤閉	2	0	2
110	変圧器	機能喪失	0	1	1
111	蓄電池	機能喪失	0	0	0
112	充電器	機能喪失	0	1	1
113	母線	機能喪失	0	1	1
114	制御ケーブル	短絡	0	0	0
115	制御ケーブル	地絡	0	0	0
116	制御ケーブル	断線	0	0	0
117	配管（3インチ未満）	リーク	0	0	0
118	配管（3インチ未満）	閉塞	0	0	0
119	配管（3インチ以上）	リーク	0	0	0
120	配管（3インチ以上）	閉塞	0	0	0
121	リレー	不動作	1	0	1

表 A-1 機種・故障モードに対する炉型別機能故障件数（黒塗り部分は収集対象ではないことを示す）

No.	対象機種名	故障モード	BWR	PWR	計
122	リレー	誤動作	1	0	1
123	遅延リレー	不動作	0	1	1
124	遅延リレー	誤動作	0	0	0
125	演算器	不動作	0	0	0
126	演算器	高出力/低出力	0	0	0
127	カード（半導体ロジック回路）	不動作	0	0	0
128	カード（半導体ロジック回路）	誤動作	0	0	0
129	警報設定器	不動作	0	0	0
130	警報設定器	誤動作	0	0	0
131	ヒューズ	誤断線	0	0	0
132	流量トランスミッタ	不動作	0	0	0
133	流量トランスミッタ	高出力/低出力	0	1	1
134	圧カトランスミッタ	不動作	0	0	0
135	圧カトランスミッタ	高出力/低出力	1	1	2
136	水位トランスミッタ	不動作	1	2	3
137	水位トランスミッタ	高出力/低出力	1	0	1
138	温度検出器	不動作	0	0	0
139	温度検出器	高出力/低出力	0	2	2
140	放射線検出器	不動作	0	0	0
141	放射線検出器	高出力/低出力	0	0	0
142	流量スイッチ	不動作	0	1	1
143	流量スイッチ	誤動作	0	0	0
144	圧カスイッチ	不動作	1	0	1
145	圧カスイッチ	誤動作	0	0	0
146	水位スイッチ	不動作	2	0	2
147	水位スイッチ	誤動作	0	0	0
148	温度スイッチ	不動作	0	0	0
149	温度スイッチ	誤動作	0	0	0
150	リミットスイッチ	不動作	2	0	2
151	リミットスイッチ	誤動作	1	0	1
152	手動スイッチ	不動作	1	0	1
153	手動スイッチ	誤動作	0	0	0
154	コントローラ	不動作	0	0	0
155	コントローラ	高出力/低出力	0	0	0
156	配線/電線	短絡	0	0	0
157	配線/電線	地絡	0	0	0
158	配線/電線	断線	0	0	0
159	ヒーター	機能喪失	0	0	0
160	アナンシエータ	機能喪失	0	0	0
161	空気圧縮機	起動失敗	1	0	1
162	空気圧縮機	継続運転失敗	5	2	7

表 A-1 機種・故障モードに対する炉型別機能故障件数（黒塗り部分は収集対象ではないことを示す）

No.	対象機種名	故障モード	BWR	PWR	計
163	原子炉冷却材再循環ポンプ（ABWR）	起動失敗	0		0
164	原子炉冷却材再循環ポンプ（ABWR）	継続運転失敗	0		0
165	爆破弁（BWR）	開失敗	0		0
166	爆破弁（BWR）	誤開	0		0
167	爆破弁（BWR）	外部リーク	0		0
168	爆破弁（BWR）	内部リーク	0		0
169	爆破弁（BWR）	閉塞	0		0
170	主復水器（BWR）	伝熱管破損	2		2
171	主復水器（BWR）	外部リーク	0		0
172	主復水器（BWR）	伝熱管閉塞	0		0
173	復水器（BWR）	伝熱管破損	0		0
174	復水器（BWR）	外部リーク	0		0
175	復水器（BWR）	伝熱管閉塞	0		0
176	ラプチャーディスク（BWR）	開失敗	0		0
177	サンブスクリーン（PWR）	閉塞		0	0
178	サンブ（ファンネル）	破損	0	0	0
179	サンブ（ファンネル）	閉塞	0	0	0
180	冷凍機	起動失敗	13	3	16
181	冷凍機	継続運転失敗	16	4	20
182	ヒートトレース	断線	0	0	0
183	ダクト	リーク	0	0	0
184	ダクト	閉塞	0	0	0
185	ガスタービン駆動ポンプ（PWR）	起動失敗		0	0
186	ガスタービン駆動ポンプ（PWR）	継続運転失敗		0	0
187	再結合器（OG含む）（BWR）	機能喪失	2		2
188	補助ボイラー（BWR）	機能喪失	19		19
189	運搬車両	移動失敗	0	0	0
190	ガスタービン発電機（車載）	起動失敗	0	0	0
191	ガスタービン発電機（車載）	継続運転失敗	0	0	0
192	ディーゼル発電機（車載）	起動失敗	0	0	0
193	ディーゼル発電機（車載）	継続運転失敗	0	0	0
194	可搬式ケーブル	短絡	0	0	0
195	可搬式ケーブル	地絡	0	0	0
196	可搬式ケーブル	断線	0	0	0
197	キュービクル	機能喪失	0	0	0
198	可搬式消防ポンプ	起動失敗	0	0	0
199	可搬式消防ポンプ	継続運転失敗	0	0	0
200	水中ポンプ	起動失敗	0	0	0
201	水中ポンプ	継続運転失敗	0	0	0
202	内燃式エンジンポンプ	起動失敗	0	0	0
203	内燃式エンジンポンプ	継続運転失敗	0	0	0

表 A-1 機種・故障モードに対する炉型別機能故障件数（黒塗り部分は収集対象ではないことを示す）

No.	対象機種名	故障モード	BWR	PWR	計
204	ホース	リーク	0	0	0
205	乾式フィルタベント (PWR)	外部リーク		0	0
206	乾式フィルタベント (PWR)	閉塞		0	0
207	湿式フィルタベント	外部リーク	0	0	0
208	湿式フィルタベント	閉塞	0	0	0
209	窒素/空気ポンペ	外部リーク	0	0	0
210	窒素/空気ポンペ	閉塞	0	0	0
211	ドラム缶	破損	0	0	0
213	演算装置 (デジタル制御機器)	不動作	4	0	4
214	演算装置 (デジタル制御機器)	誤動作	0	0	0
215	インターフェイス (デジタル制御機器)	不動作	0	0	0
216	インターフェイス (デジタル制御機器)	誤動作	0	0	0
217	入出力装置 (デジタル制御機器)	不動作	4	0	4
218	入出力装置 (デジタル制御機器)	誤動作	0	0	0
219	ロジックカード (デジタル制御機器)	不動作	0	0	0
220	ロジックカード (デジタル制御機器)	誤動作	0	0	0
221	ロードドライバ (デジタル制御機器)	不動作	1	0	1
222	ロードドライバ (デジタル制御機器)	誤動作	1	0	1
223	光ケーブル (デジタル制御機器)	機能喪失	0	0	0
224	光コネクタ (デジタル制御機器)	機能喪失	0	0	0
225	タッチパネル (デジタル制御機器)	入力機能喪失	0	0	0
226	タッチパネル (デジタル制御機器)	出力機能喪失	0	0	0
227	計装用電源装置 (E/S) (デジタル制御機器)	機能喪失	0	0	0
228	中性子束検出器 (BWR)	不動作	1		1
229	中性子束検出器 (BWR)	高出力/低出力	0		0
230	真空破壊弁 (BWR)	開失敗	0		0
231	真空破壊弁 (BWR)	閉失敗	0		0
232	真空破壊弁 (BWR)	作動失敗	0		0
233	真空破壊弁 (BWR)	外部リーク	0		0
234	真空破壊弁 (BWR)	内部リーク	0		0
235	空気貯槽 (BWR)	破損	0		0
236	空気貯槽 (BWR)	閉塞	0		0
237	格納容器	リーク	0	0	0
238	容積式流量積算計	外部リーク	0	0	0
239	容積式流量積算計	閉塞	3	0	3
240	脱塩塔 (BWR)	外部リーク	0		0
241	脱塩塔 (BWR)	閉塞	0		0
242	制御弁 (BWR)	制御不能	3		3
243	制御弁 (BWR)	誤開又は誤閉	0		0
244	エゼクタ (BWR)	外部リーク	0		0
245	エゼクタ (BWR)	内部破損	0		0

表 A-1 機種・故障モードに対する炉型別機能故障件数（黒塗り部分は収集対象ではないことを示す）

No.	対象機種名	故障モード	BWR	PWR	計
246	エゼクタ (BWR)	閉塞	0		0
247	イグナイタ (PWR)	機能喪失		0	0

A-2 起動失敗故障モードの機種に対する炉型別起動デマンド数

(注) 起動デマンド数が全プラントについて 0 となっている機種・故障モードは、将来の故障率推定の対象としているもので、今回はデータ収集をしておらず機器信頼性パラメータは推定していない。

表 A-2 起動失敗故障モードの機種に対する炉型別起動デマンド数（黒塗り部分は収集対象ではないことを示す）

No.	対象機種名	故障モード	BWR	PWR	計
1	非常用ディーゼル発電機	起動失敗	2,657	4,221	6,878
3	電動ポンプ（通常運転、純水）	起動失敗	12,263	7,055	19,318
5	電動ポンプ（通常運転、海水）	起動失敗	6,281	2,794	9,075
7	電動ポンプ（通常待機、純水）	起動失敗	12,754	8,141	20,895
9	電動ポンプ（通常待機、海水）	起動失敗	1,815	0	1,815
11	タービン駆動ポンプ	起動失敗	821	1,226	2,047
13	ディーゼル駆動ポンプ	起動失敗	150	0	150
15	電動弁（純水）	開失敗	78,611	40,227	118,838
16	電動弁（純水）	閉失敗	80,036	40,181	120,217
22	電動弁（海水）	開失敗	363,575	2,147	365,722
23	電動弁（海水）	閉失敗	363,584	2,103	365,687
29	空気作動弁	開失敗	49,165	28,877	78,042
30	空気作動弁	閉失敗	49,157	28,770	77,927
36	油圧作動弁	開失敗	8,984	6,915	15,899
37	油圧作動弁	閉失敗	8,938	6,863	15,801
43	逆止弁	開失敗	101,292	39,994	141,286
44	逆止弁	閉失敗	101,646	39,726	141,372
48	手動弁	開失敗	10,302	10,147	20,449
49	手動弁	閉失敗	10,310	10,138	20,448
54	安全弁	開失敗	93	1,519	1,612
55	安全弁	閉（吹止まり）失敗	93	1,519	1,612
60	逃し安全弁（BWR）	開失敗	1,535		1,535
61	逃し安全弁（BWR）	閉（吹止まり）失敗	1,535		1,535
66	真空逃し弁（PWR）	開失敗		0	0
67	真空逃し弁（PWR）	閉失敗		0	0
69	電磁弁	開失敗	84,701	0	84,701
70	電磁弁	閉失敗	84,735	0	84,735
76	ファン／ブロア	起動失敗	18,966	12,899	31,865
78	ダンパ	開失敗	14,152	34,001	48,153
79	ダンパ	閉失敗	14,124	33,946	48,070
106	遮断器	開放失敗	26,176	26,518	52,694

表 A-2 起動失敗故障モードの機種に対する炉型別起動デマンド数（黒塗り部分は収集対象ではないことを示す）

No.	対象機種名	故障モード	BWR	PWR	計
107	遮断器	投入失敗	68,013	26,539	94,552
161	空気圧縮機	起動失敗	4,008	2,580	6,588
163	原子炉冷却材再循環ポンプ（ABWR）	起動失敗	0		0
165	爆破弁（BWR）	開失敗	0		0
180	冷凍機	起動失敗	1,970	1,265	3,235
185	ガスタービン駆動ポンプ（PWR）	起動失敗		0	0
190	ガスタービン発電機（車載）	起動失敗	0	0	0
192	ディーゼル発電機（車載）	起動失敗	0	0	0
198	可搬式消防ポンプ	起動失敗	0	0	0
200	水中ポンプ	起動失敗	0	0	0
202	内燃式エンジンポンプ	起動失敗	0	0	0
230	真空破壊弁（BWR）	開失敗	642		642
231	真空破壊弁（BWR）	閉失敗	642		642

A-3 各機種の炉型別露出時間数

(注) 露出時間数が全プラントについて 0 となっている機種・故障モードは、将来の故障率推定の対象としているもので、今回はデータ収集をしておらず機器信頼性パラメータは推定していない。

表 A-3 各機種の炉型別露出時間数 (黒塗り部分は収集対象ではないことを示す)

No.	対象機種名	故障モード	BWR	PWR	計
1	非常用ディーゼル発電機	起動失敗	1,621,702	1,687,987	3,309,689
3	電動ポンプ (通常運転、純水)	起動失敗	12,650,088	8,284,754	20,934,842
5	電動ポンプ (通常運転、海水)	起動失敗	4,874,732	3,014,425	7,889,157
7	電動ポンプ (通常待機、純水)	起動失敗	5,968,303	5,665,105	11,633,408
9	電動ポンプ (通常待機、海水)	起動失敗	508,439	0	508,439
11	タービン駆動ポンプ	起動失敗	468,747	743,293	1,212,040
13	ディーゼル駆動ポンプ	起動失敗	88,000	0	88,000
17	電動弁 (純水)	作動失敗	67,014,977	81,438,331	148,453,308
18	電動弁 (純水)	誤開又は誤閉	67,014,977	81,021,441	148,036,418
19	電動弁 (純水)	外部リーク	32,611,380	66,966,578	99,577,958
20	電動弁 (純水)	内部リーク	34,310,750	26,175,845	60,486,595
21	電動弁 (純水)	閉塞	67,014,977	77,924,311	144,939,288
24	電動弁 (海水)	作動失敗	14,537,973	3,736,955	18,274,928
25	電動弁 (海水)	誤開又は誤閉	14,537,973	3,681,259	18,219,232
26	電動弁 (海水)	外部リーク	6,275,821	431,610	6,707,431
27	電動弁 (海水)	内部リーク	8,744,444	374,285	9,118,729
28	電動弁 (海水)	閉塞	14,537,973	3,625,563	18,163,536
31	空気作動弁	作動失敗	15,408,403	62,281,916	77,690,319
32	空気作動弁	誤開又は誤閉	15,408,403	62,057,138	77,465,541
33	空気作動弁	外部リーク	9,941,613	51,037,095	60,978,708
34	空気作動弁	内部リーク	9,297,139	30,568,857	39,865,996
35	空気作動弁	閉塞	15,408,403	60,497,897	75,906,300
38	油圧作動弁	作動失敗	2,876,450	3,161,003	6,037,453
39	油圧作動弁	誤開又は誤閉	2,876,450	3,161,003	6,037,453
40	油圧作動弁	外部リーク	1,652,120	0	1,652,120
41	油圧作動弁	内部リーク	1,582,973	3,161,003	4,743,976
42	油圧作動弁	閉塞	2,876,450	3,161,003	6,037,453
45	逆止弁	作動失敗	44,798,908	97,932,053	142,730,961
46	逆止弁	外部リーク	23,854,137	74,310,601	98,164,738
47	逆止弁	内部リーク	21,180,115	6,880,900	28,061,015
50	手動弁	開閉失敗	130,450,812	310,756,509	441,207,321

表 A-3 各機種の炉型別露出時間数（黒塗り部分は収集対象ではないことを示す）

No.	対象機種名	故障モード	BWR	PWR	計
51	手動弁	外部リーク	87,425,440	291,214,581	378,640,021
52	手動弁	内部リーク	70,168,356	20,731,189	90,899,545
53	手動弁	閉塞	130,450,812	302,400,513	432,851,325
56	安全弁	作動失敗	3,192,469	35,792,942	38,985,411
57	安全弁	誤開	3,192,469	35,792,942	38,985,411
58	安全弁	外部リーク	2,197,236	26,283,222	28,480,458
59	安全弁	内部リーク	2,937,558	18,257,439	21,194,997
62	逃し安全弁（BWR）	作動失敗	4,499,872		4,499,872
63	逃し安全弁（BWR）	誤開	4,499,872		4,499,872
64	逃し安全弁（BWR）	外部リーク	2,063,229		2,063,229
65	逃し安全弁（BWR）	内部リーク	3,315,682		3,315,682
68	真空逃し弁（PWR）	作動失敗		0	0
71	電磁弁	作動失敗	4,672,821	0	4,672,821
72	電磁弁	誤開又は誤閉	4,672,821	0	4,672,821
73	電磁弁	外部リーク	1,686,295	0	1,686,295
74	電磁弁	内部リーク	2,124,931	0	2,124,931
75	電磁弁	閉塞	4,672,821	0	4,672,821
76	ファン/ブローア	起動失敗	15,362,257	13,909,553	29,271,810
80	ダンパ	作動失敗	22,205,169	67,565,849	89,771,018
81	ダンパ	誤開又は誤閉	22,205,169	66,852,268	89,057,437
82	ダンパ	外部リーク	17,697,974	40,218,123	57,916,097
83	ダンパ	内部リーク	16,658,071	4,771,720	21,429,791
84	ダンパ	閉塞	22,205,169	67,565,849	89,771,018
85	熱交換器	伝熱管破損	13,925,582	29,798,133	43,723,715
86	熱交換器	外部リーク	10,052,941	19,168,802	29,221,743
87	熱交換器	伝熱管閉塞	13,925,582	29,113,749	43,039,331
88	タンク	破損	3,847,394	8,783,479	12,630,873
89	タンク	閉塞	3,847,394	8,340,035	12,187,429
90	オリフィス	外部リーク	17,267,494	65,743,568	83,011,062
91	オリフィス	内部破損	30,257,016	85,008,992	115,266,008
92	オリフィス	閉塞	30,257,016	84,352,881	114,609,897
93	ストレーナ/フィルタ（純水）	外部リーク	7,140,254	11,065,508	18,205,762
94	ストレーナ/フィルタ（純水）	内部破損	10,975,972	17,570,183	28,546,155
95	ストレーナ/フィルタ（純水）	閉塞	10,975,972	17,570,178	28,546,150

表 A-3 各機種の炉型別露出時間数（黒塗り部分は収集対象ではないことを示す）

No.	対象機種名	故障モード	BWR	PWR	計
96	ストレーナ/フィルタ（海水）	外部リーク	1,627,151	4,325,184	5,952,335
97	ストレーナ/フィルタ（海水）	内部破損	3,844,793	9,541,711	13,386,504
98	ストレーナ/フィルタ（海水）	閉塞	3,844,793	9,207,535	13,052,328
99	制御棒駆動装置（BWR）	挿入失敗	6,032,868		6,032,868
100	制御棒駆動装置（PWR）	挿入失敗		0	0
101	再循環ポンプ MG セット（ABWR）	機能喪失	0		0
102	PLR MG セット（BWR）	機能喪失	0		0
103	RPS、CRDM MG セット	機能喪失	204,902	0	204,902
104	インバータ	機能喪失	686,290	361,886	1,048,176
108	遮断器	作動失敗	79,268,301	50,778,272	130,046,573
109	遮断器	誤開又は誤閉	79,268,301	50,778,272	130,046,573
110	変圧器	機能喪失	7,178,867	4,543,934	11,722,801
111	蓄電池	機能喪失	2,261,418	2,787,040	5,048,458
112	充電器	機能喪失	2,394,071	2,450,465	4,844,536
113	母線	機能喪失	32,167,574	11,845,001	44,012,575
114	制御ケーブル	短絡	0	0	0
115	制御ケーブル	地絡	0	0	0
116	制御ケーブル	断線	0	0	0
117	配管（3インチ未満）	リーク	704,108	301,886,090	302,590,198
118	配管（3インチ未満）	閉塞	704,108	277,390,527	278,094,635
119	配管（3インチ以上）	リーク	1,194,222	669,484,109	670,678,331
120	配管（3インチ以上）	閉塞	1,194,222	392,677,999	393,872,221
121	リレー	不動作	274,299,072	103,913,280	378,212,352
122	リレー	誤動作	274,299,975	103,908,200	378,208,175
123	遅延リレー	不動作	43,311,288	4,268,564	47,579,852
124	遅延リレー	誤動作	43,313,801	4,268,564	47,582,365
125	演算器	不動作	635,240	11,753,293	12,388,533
126	演算器	高出力/低出力	635,240	11,753,293	12,388,533
127	カード（半導体ロジック回路）	不動作	717,253	35,027,902	35,745,155
128	カード（半導体ロジック回路）	誤動作	717,253	35,035,259	35,752,512
129	警報設定器	不動作	40,670,713	11,761,071	52,431,784
130	警報設定器	誤動作	40,670,713	11,761,071	52,431,784
131	ヒューズ	誤断線	7,192,855	2,529,018	9,721,873
132	流量トランスミッタ	不動作	4,550,259	4,194,949	8,745,208

表 A-3 各機種の炉型別露出時間数（黒塗り部分は収集対象ではないことを示す）

No.	対象機種名	故障モード	BWR	PWR	計
133	流量トランスミッタ	高出力/低出力	4,550,259	4,194,949	8,745,208
134	圧力トランスミッタ	不動作	24,113,076	19,335,959	43,449,035
135	圧力トランスミッタ	高出力/低出力	24,113,076	19,335,959	43,449,035
136	水位トランスミッタ	不動作	13,919,402	16,890,047	30,809,449
137	水位トランスミッタ	高出力/低出力	13,895,451	16,890,047	30,785,498
138	温度検出器	不動作	16,625,174	13,115,663	29,740,837
139	温度検出器	高出力/低出力	16,626,182	13,115,663	29,741,845
140	放射線検出器	不動作	1,595,100	0	1,595,100
141	放射線検出器	高出力/低出力	1,595,100	0	1,595,100
142	流量スイッチ	不動作	867,435	1,089,569	1,957,004
143	流量スイッチ	誤動作	867,435	1,089,569	1,957,004
144	圧力スイッチ	不動作	12,993,492	1,087,827	14,081,319
145	圧力スイッチ	誤動作	12,993,492	1,087,827	14,081,319
146	水位スイッチ	不動作	8,637,686	0	8,637,686
147	水位スイッチ	誤動作	8,637,686	0	8,637,686
148	温度スイッチ	不動作	3,187,564	10,217,301	13,404,865
149	温度スイッチ	誤動作	3,187,564	10,217,301	13,404,865
150	リミットスイッチ	不動作	41,920,397	1,002,010	42,922,407
151	リミットスイッチ	誤動作	41,920,397	1,002,010	42,922,407
152	手動スイッチ	不動作	58,277,661	13,689,048	71,966,709
153	手動スイッチ	誤動作	58,277,661	13,689,048	71,966,709
154	コントローラ	不動作	1,032,659	56,226	1,088,885
155	コントローラ	高出力/低出力	1,032,659	56,226	1,088,885
156	配線/電線	短絡	11,597,305	7,854,740	19,452,045
157	配線/電線	地絡	11,597,305	7,854,740	19,452,045
158	配線/電線	断線	11,597,305	7,854,740	19,452,045
159	ヒーター	機能喪失	1,158,301	0	1,158,301
160	アナライザ	機能喪失	350,180	0	350,180
161	空気圧縮機	起動失敗	2,035,119	1,602,041	3,637,160
163	原子炉冷却材再循環ポンプ（ABWR）	起動失敗	0		0
165	爆破弁（BWR）	開失敗	182,534		182,534
166	爆破弁（BWR）	誤開	182,534		182,534
167	爆破弁（BWR）	外部リーク	87,590		87,590
168	爆破弁（BWR）	内部リーク	87,590		87,590

表 A-3 各機種の炉型別露出時間数（黒塗り部分は収集対象ではないことを示す）

No.	対象機種名	故障モード	BWR	PWR	計
169	爆破弁（BWR）	閉塞	182,534		182,534
170	主復水器（BWR）	伝熱管破損	1,186,653		1,186,653
171	主復水器（BWR）	外部リーク	565,526		565,526
172	主復水器（BWR）	伝熱管閉塞	1,186,653		1,186,653
173	復水器（BWR）	伝熱管破損	1,193,638		1,193,638
174	復水器（BWR）	外部リーク	487,139		487,139
175	復水器（BWR）	伝熱管閉塞	1,193,638		1,193,638
176	ラブチャーディスク（BWR）	開失敗	317,897		317,897
177	サンブスクリーン（PWR）	閉塞		1,269,586	1,269,586
178	サンブ（ファンネル）	破損	0	0	0
179	サンブ（ファンネル）	閉塞	0	0	0
180	冷凍機	起動失敗	3,118,036	2,350,433	5,468,469
182	ヒートトレース	断線	0	0	0
183	ダクト	リーク	0	0	0
184	ダクト	閉塞	0	0	0
185	ガスタービン駆動ポンプ（PWR）	起動失敗		0	0
187	再結合物（OG含む）（BWR）	機能喪失	594,379		594,379
188	補助ボイラー（BWR）	機能喪失	670,207		670,207
189	運搬車両	移動失敗	0	0	0
190	ガスタービン発電機（車載）	起動失敗	0	0	0
192	ディーゼル発電機（車載）	起動失敗	0	0	0
194	可搬式ケーブル	短絡	0	0	0
195	可搬式ケーブル	地絡	0	0	0
196	可搬式ケーブル	断線	0	0	0
197	キュービクル	機能喪失	0	0	0
198	可搬式消防ポンプ	起動失敗	0	0	0
200	水中ポンプ	起動失敗	0	0	0
202	内燃式エンジンポンプ	起動失敗	0	0	0
204	ホース	リーク	0	0	0
205	乾式フィルタベント（PWR）	外部リーク		0	0
206	乾式フィルタベント（PWR）	閉塞		0	0
207	湿式フィルタベント	外部リーク	0	0	0
208	湿式フィルタベント	閉塞	0	0	0
209	窒素/空気ポンプ	外部リーク	337,531	0	337,531

表 A-3 各機種の炉型別露出時間数（黒塗り部分は収集対象ではないことを示す）

No.	対象機種名	故障モード	BWR	PWR	計
210	窒素/空気ポンプ	閉塞	845,375	0	845,375
211	ドラム缶	破損	0	0	0
213	演算装置（デジタル制御機器）	不動作	9,415,906	0	9,415,906
214	演算装置（デジタル制御機器）	誤動作	9,415,906	0	9,415,906
215	インターフェイス（デジタル制御機器）	不動作	7,843,186	0	7,843,186
216	インターフェイス（デジタル制御機器）	誤動作	7,843,186	0	7,843,186
217	入出力装置（デジタル制御機器）	不動作	25,984,628	0	25,984,628
218	入出力装置（デジタル制御機器）	誤動作	25,984,628	0	25,984,628
219	ロジックカード（デジタル制御機器）	不動作	555,720	0	555,720
220	ロジックカード（デジタル制御機器）	誤動作	555,720	0	555,720
221	ロードドライバ（デジタル制御機器）	不動作	7,104,373	0	7,104,373
222	ロードドライバ（デジタル制御機器）	誤動作	7,104,373	0	7,104,373
223	光ケーブル（デジタル制御機器）	機能喪失	9,150,383	0	9,150,383
224	光コネクタ（デジタル制御機器）	機能喪失	0	0	0
225	タッチパネル（デジタル制御機器）	入力機能喪失	0	0	0
226	タッチパネル（デジタル制御機器）	出力機能喪失	0	0	0
227	計装用電源装置（E/S）（デジタル制御機器）	機能喪失	28,830,300	0	28,830,300
228	中性子束検出器（BWR）	不動作	2,103,788		2,103,788
229	中性子束検出器（BWR）	高出力/低出力	2,103,788		2,103,788
232	真空破壊弁（BWR）	作動失敗	3,431,345		3,431,345
233	真空破壊弁（BWR）	外部リーク	935,107		935,107
234	真空破壊弁（BWR）	内部リーク	1,693,018		1,693,018
235	空気貯槽（BWR）	破損	9,750,615		9,750,615
236	空気貯槽（BWR）	閉塞	9,750,615		9,750,615
237	格納容器	リーク	382,899	55,696	438,595
238	容積式流量積算計	外部リーク	464,290	0	464,290
239	容積式流量積算計	閉塞	1,654,888	0	1,654,888
240	脱塩塔（BWR）	外部リーク	1,019,178		1,019,178
241	脱塩塔（BWR）	閉塞	2,739,568		2,739,568
243	制御弁（BWR）	誤開又は誤閉	10,154,725		10,154,725
244	エゼクタ（BWR）	外部リーク	116,570		116,570
245	エゼクタ（BWR）	内部破損	739,259		739,259
246	エゼクタ（BWR）	閉塞	739,259		739,259
247	イグナイタ（PWR）	機能喪失		0	0

A-4 起動してから故障するまでの継続運転時間

(注) 運転時間数が全プラントについて 0 となっている機種・故障モードは、将来の故障率推定の対象としているもので、今回はデータ収集をしておらず機器信頼性パラメータは推定していない。

表 A-4 起動してから故障するまでの継続運転時間（黒塗り部分は収集対象ではないことを示す）

No.	対象機種名	故障モード	BWR	PWR	計
2	非常用ディーゼル発電機	継続運転失敗	3,495	3,412	6,907
4	電動ポンプ（通常運転、純水）	継続運転失敗	6,367,261	4,064,286	10,431,547
6	電動ポンプ（通常運転、海水）	継続運転失敗	3,230,828	1,467,006	4,697,834
8	電動ポンプ（通常待機、純水）	継続運転失敗	11,357	1,974	13,331
10	電動ポンプ（通常待機、海水）	継続運転失敗	4,057	0	4,057
12	タービン駆動ポンプ	継続運転失敗	466	365	831
14	ディーゼル駆動ポンプ	継続運転失敗	76	0	76
77	ファン/ブローア	継続運転失敗	4,432,722	5,556,172	9,988,894
162	空気圧縮機	継続運転失敗	911,679	795,389	1,707,068
164	原子炉冷却材再循環ポンプ（ABWR）	継続運転失敗	0		0
181	冷凍機	継続運転失敗	1,608,720	1,331,558	2,940,278
186	ガスタービン駆動ポンプ（PWR）	継続運転失敗		0	0
191	ガスタービン発電機（車載）	継続運転失敗	0	0	0
193	ディーゼル発電機（車載）	継続運転失敗	0	0	0
199	可搬式消防ポンプ	継続運転失敗	0	0	0
201	水中ポンプ	継続運転失敗	0	0	0
203	内燃式エンジンポンプ	継続運転失敗	0	0	0
242	制御弁（BWR）	制御不能	5,710,342		5,710,342

電力中央研究所報告

〔不許複製〕

発行

一般財団法人 電力中央研究所
原子力リスク研究センター
東京都千代田区大手町1-6-1

e-mail hokokusho@cripi.denken.or.jp

著作

一般財団法人 電力中央研究所
東京都千代田区大手町1-6-1

ISBN978-4-7983-1938-4

