



ナトリウム系空気作動弁の
開閉失敗確率に関する統計分析
(研究報告)

1999年11月



核燃料サイクル開発機構
大洗工学センター

本資料の全部または一部を複写・複製・転載する場合は、下記にお問い合わせください。

〒319-1184 茨城県那珂郡東海村大字村松4-49

核燃料サイクル開発機構

技術展開部 技術協力課

Inquiries about copyright and reproduction should be addressed to :

Technical Cooperation Section,

Technology Management Division,

Japan Nuclear Cycle Development Institute

4-49 Muramatsu, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki, 319-1184

Japan

©核燃料サイクル開発機構 (Japan Nuclear Cycle Development Institute)

1999

ナトリウム系空気作動弁の開閉失敗確率に関する統計分析
(研究報告)

栗坂健一*

要旨

本研究の目的は、予防保全およびサーベイランス試験の有効性を故障確率の観点から検討するための基礎データを整備することである。本研究においては、主要な待機機器としてナトリウム系の空気作動弁を分析対象に選び、ダイヤモンド数(n)、使用時間(t)、および直前の開閉動作からの待機時間(T)について、弁の開閉失敗確率に対する傾向を統計的に分析した。この分析は、高速炉機器信頼性データベース CORDS に蓄積された実機における弁の運転及び故障経験データに基づいている。分析に当たっては、開閉失敗確率(P)を、 $P=1-\exp\{-C-E n-F/n-\lambda T-a T(t-T/2)-AT^2/2\}$ と表し、関数パラメータである C、E、F、 λ 、a および A を最尤法を用いて推定した。その結果、開閉失敗確率は、開閉周期が約 100 日を超える場合にのみポアソン分布を想定した場合の故障率を用いて算出した故障確率で概ね表され、開閉周期が約 100 日より短い場合、本研究で提案したパラメータモデルで良く表されることがわかった。本研究成果を用いると、予め定めた開閉失敗確率の目標値に対して適切なサーベイランス試験頻度を導くことができる。

* 大洗工学センター システム技術開発部 リスク評価技術開発グループ

A statistical analysis on failure-to-open/close probability of pneumatic valve
in sodium cooling systems

Kenichi Kurisaka*

Abstract

The objective of this study is to develop fundamental data for examination on efficiency of preventive maintenance and surveillance test from the standpoint of failure probability.

In this study, as a major standby component, a pneumatic valve in sodium cooling systems was selected. A statistical analysis was made about a trend of valve failure-to-open/close (FTOC) probability depending on number of demands ("n"), time since installation ("t") and standby time since last open/close action ("T"). The analysis is based on the field data of operating- and failure- experiences stored in the Component Reliability Database and Statistical Analysis System for LMFBR's (CORDS). In the analysis, the FTOC probability ("P") was expressed as follows: $P = 1 - \exp\{-C - E n - F/n - \lambda T - a T(t - T/2) - AT^2/2\}$. The functional parameters, "C", "E", "F", " λ ", "a" and "A", were estimated with the maximum likelihood estimation method.

As a result, the FTOC probability is almost expressed with the failure probability being derived from the failure rate under assumption of the Poisson distribution only when valve cycle (i.e. open-close-open cycle) exceeds about 100 days. When the valve cycle is shorter than about 100 days, the FTOC probability can be adequately estimated with the parameter model proposed in this study. The results obtained from this study may make it possible to derive an adequate frequency of surveillance test for a given target of the FTOC probability.

* O-arai Engineering Center, System Engineering Technology Division,
Nuclear System Safety Research Group

目次

1. 緒言	1
2. 分析方法	2
2.1 故障確率のモデル化	2
2.2 最尤法によるパラメータ推定	4
3. 使用データと分析条件	7
3.1 機器運転経験データ	7
3.2 機器故障経験データ	8
3.3 パラメータ定量化を目的とした故障データの分類	10
4. 分析結果	23
4.1 開閉失敗確率パラメータの定量化	23
4.1.1 全母集団に対する相関性の分析	23
4.1.2 全母集団に対するパラメータの推定	24
4.1.3 所属施設別母集団に対する相関性の分析	25
4.1.4 所属施設別母集団に対するパラメータの推定	26
4.1.5 パラメータ推定結果に対する考察	27
4.2 推奨パラメータに基づく開閉失敗確率の試算	29
4.2.1 一定周期で開閉を行っている弁に対する開閉失敗確率	29
4.2.2 開閉周期を一時的に変更する場合の開閉失敗確率	29
4.2.3 20年当たりの開閉失敗確率	31
5. 結言	48
6. 参考文献	49

目次

図 2.1-1	弁の故障確率を決める 3 つの変数	6
図 2.1-2	弁の故障確率を決める 3 つの変数 (評価時刻が $t+T$)	6
図 2.1-3	弁の故障確率を決める 3 つの変数 (評価時刻が $t-T+\tau$)	6
図 3.1-1	ナトリウム系空気作動弁の運転経験データの開閉周期による内訳	18
図 3.1-2	ナトリウム系空気作動弁の運転経験データの使用時間による内訳	18
図 3.1-3	ナトリウム系空気作動弁の運転経験データの開閉動作回数による内訳	19
図 3.2-1	ナトリウム系空気作動弁の故障経験データの開閉周期による内訳	19
図 3.2-2	ナトリウム系空気作動弁の故障経験データの故障時間による内訳	20
図 3.2-3	ナトリウム系空気作動弁の故障経験データの開閉動作回数による内訳	20
図 3.2-4	ナトリウム系空気作動弁の開閉失敗の原因内訳	21
図 3.2-5	ナトリウム系空気作動弁の設計温度による内訳	21
図 3.2-6	ナトリウム系空気作動弁の使用温度による内訳	22
図 3.2-7	ナトリウム系空気作動弁の開閉失敗確率とダイヤモンド数との相関性 (小分類③ EBR-II のシール摩耗、ダイヤフラムの損傷のみ)	22
図 4.1-1	全機器&全故障を母集団とした開閉失敗故障率と使用時間との相関	32
図 4.1-2	全機器&全故障を母集団とした開閉失敗故障率と開閉周期との相関	32
図 4.1-3	全機器&全故障を母集団とした開閉失敗確率と開閉動作数との相関	33
図 4.1-4	全機器&小分類③④⑤⑥⑦を母集団とした 開閉失敗故障率と使用時間との相関	33
図 4.1-5	全機器&小分類⑦を母集団とした 開閉失敗故障率と開閉周期との相関	34
図 4.1-6	全機器&小分類①②④⑦を母集団とした 開閉失敗確率と開閉動作数との相関	34
図 4.1-7	原子炉に属する弁&小分類③④⑦を母集団とした 開閉失敗故障率と使用時間との相関	35
図 4.1-8	原子炉に属する弁&小分類⑦を母集団とした 開閉失敗故障率と開閉周期との相関	35
図 4.1-9	原子炉に属する弁&小分類①④⑦を母集団とした 開閉失敗確率と開閉動作数との相関	36
図 4.1-10	原子炉に属する弁&小分類①④⑦を母集団とした 開閉失敗故障率と開閉周期との相関	36
図 4.1-11	試験施設に属する弁&小分類④⑤⑥⑦を母集団とした 開閉失敗故障率と使用時間との相関	37
図 4.1-12	試験施設に属する弁&小分類①②④⑦を母集団とした 開閉失敗確率と開閉動作数との相関	37
図 4.1-13	試験施設に属する弁&小分類②を母集団とした 開閉失敗確率と開閉動作数との相関	38

図 4.1-14	試験施設に属する弁&小分類④⑤⑥⑦を母集団とした 開閉失敗故障率と使用時間との相関（一部の故障事象を除外）	38
図 4.1-15	開閉失敗確率の時間に依存しない成分の統計母集団間における比較	39
図 4.1-16	開閉失敗故障率の統計母集団間における比較（待機時間 1 ヶ月）	39
図 4.1-17	開閉失敗故障率の統計母集団間における比較（待機時間 5 年）	40
図 4.1-18	故障の全てが時間で整理できるとした場合の故障率の比較	40
図 4.2-1	一定の周期で開閉を行っているナトリウム系空気作動弁の開閉失敗確率 （最確値評価）	41
図 4.2-2	一定の周期で開閉を行っているナトリウム系空気作動弁の開閉失敗確率 （95%評価）	42
図 4.2-3	一定周期で開閉を行っており途中で開閉周期を変更する場合の ナトリウム系空気作動弁の開閉失敗確率（最確値評価）	43
図 4.2-4	一定周期で開閉を行っており途中で開閉周期を変更する場合の ナトリウム系空気作動弁の開閉失敗確率（95%値評価）	44
図 4.2-5	一定周期で開閉を行っており途中で開閉周期を変更する場合の ナトリウム系空気作動弁の偶発ダイヤモンドに対する開閉失敗確率 （最確値評価）	45
図 4.2-6	一定周期で開閉を行っており途中で開閉周期を変更する場合の ナトリウム系空気作動弁の偶発ダイヤモンドに対する開閉失敗確率 （95%値評価）	46
図 4.2-7	20 年間使用して 1 回以上開閉失敗を経験する確率	47

表目次

表 3.1-1	ナトリウム系空気作動弁の運転経験データ	12
表 3.2-1	ナトリウム系空気作動弁の故障経験データ	15
表 3.2-2	ナトリウム系空気作動弁の開閉失敗原因と保全内容	16
表 3.3-1	故障タイプの分類	17

1. 緒言

プラントの安全性と運転要領または保全要領との関係を定量的に把握して、プラントの運転および保全活動に役立てるためには、機器レベルにおいて故障確率と使用年数の関係あるいは定期的に行う動作確認試験（以下、サーベイランス試験という）の周期と故障確率の関係を定量的に把握することが重要である。

弁が開閉動作に失敗する確率のように、待機系機器の機能要求時の故障確率を評価するためには、一般にダイヤモンド（要求）当たりの一定の故障確率と待機中の単位時間当たりの故障率の両者を考慮しなければならない。また、初期故障や経年劣化効果が存在する場合には、故障率の中にこの効果を適切に考慮しなければならない。本研究の目的は、実機における弁の運転故障経験データに基づいて、これらの効果を表すパラメータを定量的に推定することである。

これまでの研究^[1]において、ナトリウム系の電動弁と空気作動弁およびガス系の空気作動弁を対象とした開閉失敗確率の待機時間依存性について分析を行った。この分析は、故障確率が待機時間の非線型関数として表されるものと仮定することにより関数のパラメータを統計的に推定するというものであった。ここで仮定した非線型関数は、待機時間がゼロの場合に定数項が残り、待機時間の増加とともに故障確率が単調増加するという特徴を有するものの、経年劣化効果を考慮していない点が課題であった。

この点を解決した研究^[2]においては、弁の使用時間および待機時間に関する経年劣化効果を考慮した定量化モデルを提案し、これをナトリウム系の電動弁を対象とした統計分析に適用した。本研究では、さらに経年劣化効果に加えて初期故障の効果を考慮した故障確率のモデル化を提案するとともに、これをナトリウム系空気作動弁に適用して開閉失敗確率の統計分析を行った。

2. 分析方法

2.1 故障確率のモデル化

待機機器の代表である弁の動作時刻歴を図 2.1-1 に模式的に描いた。この図において弁を時刻 0 において使用開始し、n 回目の動作における動作失敗確率（以下、故障確率という）を計算したい。このとき、使用開始から n 回目の動作までの経過時間を t と表し、直前の動作すなわち $n-1$ 回目の動作から n 回目の動作までの経過時間を T と表す。弁の故障確率を計算するに当たって、動作失敗原因の発生時点を特定できるとしたならば、発生時点によって故障確率の計算方法が異なるため、発生時点は待機時間中と動作時の 2 種類に大別できる。そして、この計算には上述の 3 つの変数 n 、 t 、 T が必要である。その理由を、原因が待機時間中に発生する場合と動作時に発生する場合に分けて以下に述べる。

【待機時間中に発生する場合】

- ①待機時間中に発生する原因のうち、無秩序に発生すると考えられるものはポアソン分布に従い、時間に無関係な一定の発生率をとる。
- ②待機時間中に発生する原因のうち、環境要因等によって弁の使用開始時から系統的に発生して蓄積されると考えられる原因による動作失敗の発生率は時間 t とともに増加する。寿命劣化とよばれる現象は、これに該当すると考えられる。
- ③待機時間中に発生する原因のうち、系統的に蓄積されてしかも開閉動作の度に取り除かれる原因による動作失敗の発生率は、直前の開閉動作からの経過時間 T とともに増加する。

【動作時に発生する場合】

- ④動作時に発生する原因のうち、無秩序に発生すると考えられるものは、動作回数に依らず、一定の故障確率で発生する。
- ⑤動作時に発生する原因のうち、系統的に発生し、動作を重ねるにつれて蓄積されるものは、動作回数 n とともに故障確率が増加する。

現実に発生する故障は、単独の原因のみで説明されるとは限らず、むしろ複数の原因が重なって発生する可能性がある。ここでは、モデルを単純にするために故障確率 P が故障の発生率（以下、故障率という）の時間積分の関数として表現される故障確率 P_t とそれ以外の故障確率 P_d に分離されると想定した。なお、 P_t は原因が待機時間中に発生する場合に対応し、 P_d は原因が動作時に発生する場合に対応する。このとき、故障確率 P は P_t と P_d を用いて次のように表される。

$$(1-P) = (1-P_t)(1-P_d)$$

- | | |
|-------|-------------------------|
| P | 待機系機器の機能要求時の故障確率 |
| P_t | 故障率の時間積分の関数として表現される故障確率 |
| P_d | それ以外の故障確率 |

【故障原因の除去】

修理や保全活動による動作失敗要因の除去は、故障の発見を契機として行われる。故障は動作時に発見されることから、除去の発生時点については便宜的に動作時と考えるのが適当であろう。このため、故障原因が除去されることによる故障発生確率の減少傾向は時間よりも動作回数の関数として表現するのが適当と判断し、上述のPdの中で考慮することとした。ただし、長期的な保全活動（故障を経験した弁への再発防止策の導入や、他の弁への水平展開）の結果として、故障率が弁の使用時間につれて徐々に減少する傾向を呈することも十分予想されるため、これを表現するための関数についてはPtの中でも考慮することとした。

(1) 故障率の時間積分の関数として表現される故障確率

この場合の故障確率Ptは累積ハザードHtを用いて $Pt=1-\exp(-Ht)$ と表される。そして、Htは故障率の時間積分である。経年劣化効果を考慮した故障率を考える。寿命が若返る因子として、(1) 機器交換またはオーバーホールのような保全活動と(2) サーベイランス試験で行われる動作確認の2種類を考える。この2種類は活動としては完全に異なる。前者は機器を初期の状態に戻す効果を有すると考えられる。後者は、基本的に試験時点において動作するかどうかを明らかにすることが目的であるが、例えば弁の全閉状態を長時間維持すると固着が生じる可能性があるとした場合、定期的な開動作を行う（環境を変化させる）ことに固着要因を取り除く効果が期待される。

線型経年劣化モデル (Linear Aging Model) ^[1] を用いてこの2種類の因子を故障率の中で表現する。故障率は機器の使用時間tに依らない項(λ)と比例する項に分けられ、この両者の線型結合で表現される。本研究においてはオリジナルの線型経年劣化モデルに改良を加えて、時間に比例する項を前述の2種類の因子に対応させた2つ項に分割してモデル化する^[2]。一方は直近の機器交換またはオーバーホールのような保全活動からの経過時間(t)に比例する項(比例係数a:これを寿命加速率と呼ぶ)であり、他方は直近の動作からの経過時間(T)に比例する項(比例係数A:これも寿命加速率と呼ぶ)である。このとき、二つの時間軸について、各々時刻tおよび時刻Tにおける故障率は $\lambda+a t+AT$ と表される。なお、故障率が弁の使用時間につれて徐々に減少する傾向についてはパラメータaに負の値を許すことにより表現することができる。

二つの時間について $t>T$ を仮定するとき、時刻t-Tから時刻tの間において生じる故障要因によって時刻tにおいて故障する確率Ptは次のように表される。

$$Pt=1-\exp\{-\lambda T-a(tT-T^2/2)-AT^2/2\}$$

(2) それ以外の故障確率

故障確率Pdのモデル化について述べる。(1-Pd)は故障が発生しない確率であり0~1の間の値をとる。そこで、これを変形して $Hc=-\ln(1-Pd)$ を定義する。Hcはゼロまた

は正の数である。前述の④⑤及び故障原因の除去について述べたことをモデルに反映させるため、パラメータ H_c を動作回数に依らない定数項 C 、 H_c が動作回数 n に比例して増減する項、 H_c が動作回数 n に反比例して減少する項の和としてモデル化した。故障原因の除去を表現する関数として反比例を選んだ理由は、動作回数とともに急激に H_c が減少する様子を表現できるから、そして単純な関数形であり統計処理が容易であったからである。

$$H_c = C + E n + F/n$$

n 動作回数

C 、 E 、 F 関数のパラメータ

(3) 故障確率

動作回数 n 、使用時間 t 、待機時間 T は互いに独立に選ばれる。図 2.1-1 に示すように時刻 $t-T$ において動作確認をすでに実施しており、故障していないことが確認されているときに、時刻 t において動作に失敗する確率は次式によって計算される。

$$P = 1 - \exp\{-C - E n - F/n - \lambda T - a (tT - T^2/2) - AT^2/2\}$$

さらに、図 2.1-2 に示すように時刻 t において故障していないことが確認されているときに、時刻 $t+T$ において開閉動作に失敗する確率は次式によって計算される。

$$P = 1 - \exp\{-C - E n - F/n - \lambda T - a (tT + T^2/2) - AT^2/2\}$$

特に、右辺の指数部が 1 よりも極めて小さい場合、次の近似が成立する。

$$P \approx C + E n + F/n + \lambda T + a (tT + T^2/2) + AT^2/2$$

以上は、計画的に発生する動作要求についての故障確率を与える式である。偶発的な動作要求を想定する場合は異なる。図 2.1-3 に示すように使用時間 t において動作確認のために $n-1$ 回目の開閉動作を行うものとする。そして τ 時間後に次の動作確認を行うとき、 $n-1$ 回目の動作確認から次の動作確認までの間に偶発的に発生する開閉動作要求（発生時刻は $t+T$ であり、 T は 0 から τ までの範囲をとり、未定である。）に対する故障確率は次式によって計算される。

$$P = 1 - \exp\{-(C + E n + F/n + \lambda \tau/2 + a t \tau/2 + a \tau^2/6 + A \tau^2/6)\}$$

2.2 最尤法によるパラメータ推定

パラメータ推定に当たっての統計分析方法として最尤法を採用する。

ダイヤモンドが一定の周期で発生すると想定すると、機器が設置されてから各ダイヤモンドが発生するまでの経過時間が推定される。このとき、一定の周期とは、上記カレンダー時間を累積ダイヤモンド数で除することによって得られる。故障を経験していない機器 k について、累積ダイヤモンド数を N_k と表し、カレンダー時間と N_k から導出される一定の周期を T_k と表す。機器設置後、周期 T_k 毎に発生する N_k 回のダイヤモンドに対していずれ

も故障しない確率は次式で表される。

$$\begin{aligned} & \prod_{i=1}^{N_k} \exp(-C - Ei - F/i - \lambda T_k - a T_k^2(i - \frac{1}{2}) - \frac{1}{2} A T_k^2) \\ &= \exp(-\sum_{i=1}^{N_k} (C + Ei + F/i + \lambda T_k + a T_k^2(i - \frac{1}{2}) + \frac{1}{2} A T_k^2)) \\ &= \exp(-N_k C - \frac{1}{2} E N_k(N_k + 1) - F \sum_{i=1}^{N_k} 1/i - N_k \lambda T_k - \frac{1}{2} a T_k^2 N_k^2 - \frac{1}{2} A T_k^2 N_k) \end{aligned}$$

故障を経験した機器および故障を経験していない機器の全てについて、すべてのダイヤモンドにおいて故障しない確率を Q_{total} と記すと、これは機器 k の総数を k_{max} と表したとき次式であらわされる。

$$\begin{aligned} Q_{total} = \exp & (-C \sum_{k=1}^{k_{max}} N_k - \frac{1}{2} E \sum_{k=1}^{k_{max}} N_k(N_k + 1) - F \sum_{k=1}^{k_{max}} \sum_{i=1}^{N_k} 1/i - \lambda \sum_{k=1}^{k_{max}} N_k T_k \\ & - \frac{1}{2} a \sum_{k=1}^{k_{max}} T_k^2 N_k^2 - \frac{1}{2} A \sum_{k=1}^{k_{max}} T_k^2 N_k) \end{aligned}$$

故障データについては故障 1 件毎に履歴データが存在する。機器が設置されてから故障が発生するまでのカレンダー時間および運転時間である。このカレンダー時間をこの機器のダイヤモンド周期 T_k で除することによって、機器が設置されてから故障するまでの間に発生したダイヤモンド回数 M_k が算定される。機器設置後、周期 T_k 毎に発生する M_k 回目のダイヤモンドにおいて故障する確率は次式で表される。

$$1 - \exp(-C - E M_k - F/M_k - \lambda T_k - a T_k^2(M_k - \frac{1}{2}) - \frac{1}{2} A T_k^2)$$

そして、これを M_k 回目のダイヤモンドにおいて故障しない確率で除したものは次式で表される。

$$\exp(C + E M_k + F/M_k + \lambda T_k + a T_k^2(M_k - \frac{1}{2}) + \frac{1}{2} A T_k^2) - 1$$

故障データ k に基づく周期 T_k と故障発生までのダイヤモンド回数 M_k が得られているときに上記確率が得られる。故障データ k の総数を n_{max} と表したとき、上記確率を全ての故障データについて乗じたものを P_{total} と記すと、これは次式で表される。

$$P_{total} = \prod_{k=1}^{n_{max}} (\exp(C + E M_k + F/M_k + \lambda T_k + a T_k^2(M_k - \frac{1}{2}) + \frac{1}{2} A T_k^2) - 1)$$

機器運転故障経験データ一式が与えられたとき、 Q_{total} と P_{total} の積が尤度となり、この尤度の値を最大にするような C 、 E 、 F 、 λ 、 a および A を決定することが、最尤法による機器信頼度パラメータの分析評価である。

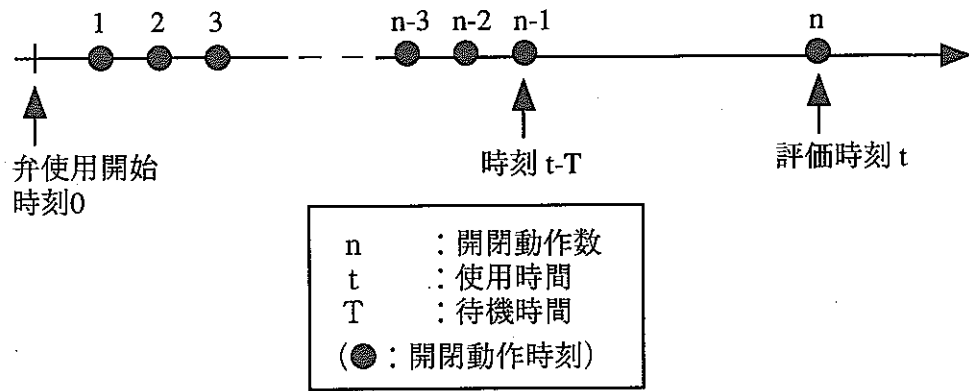


図2.1-1 弁の故障確率を決める3つの変数

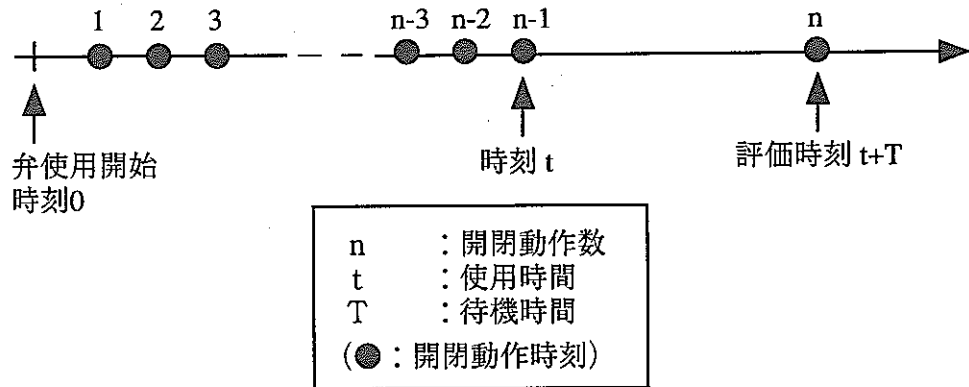


図2.1-2 弁の故障確率を決める3つの変数 (評価時刻が $t+T$)

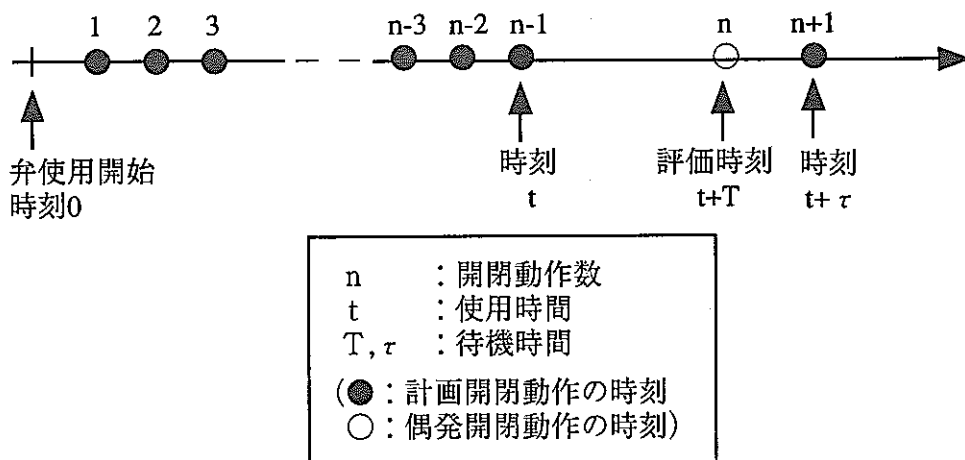


図2.1-3 弁の故障確率を決める3つの変数 (評価時刻が $t-T+\tau$)

3. 使用データと分析条件

分析にあたっては、高速炉機器信頼性データベース CORDS (Component Reliability Database and Statistical Analysis System for LMFBRs)^[4]を使用した。ナトリウム系電動弁に引き続き安全上重要な待機系の機器として、CORDS データベースの中からナトリウム系の空気作動弁を選び、分析対象とした。また、運転・故障経験データの分析に当たっては、分析の結果を確率論的安全評価 (PSA) に反映することから、分析対象とする故障モードを機能上の故障モードとして捉え、開失敗および閉失敗 (以下、両モードをまとめて開閉失敗と呼ぶ) に限定する。

3.1 機器運転経験データ

(1) 機器母集団の規模

分析に使用したナトリウム系空気作動弁の運転経験データの一覧を表 3.1-1 に示す。この表に挙げた弁は、データベースの記録上少なくとも 2 回以上弁の開閉動作を経験したもののみに限られる。その総数は 325 件である。弁の開閉失敗確率を計算する際に参照する弁の使用時間としてカレンダー時間を採用した。弁の運転経験データの統計母集団をこの時間で表すと、累積値は、 2.4×10^7 機器時間である。

弁の開動作と閉動作一組につき、開閉動作 1 回と数える。表 3.1-1 のダイヤモンド数は、各々の弁が設置されてから撤去されるまでまたは現在供用中の弁については現在までの期間中に発生した開閉動作をこのように数えた開閉動作の回数である。弁 1 個については最大でも約 1600 回であり、その合計は 4.5×10^4 回である。

(2) 使用時間をカレンダー時間とした理由

CORDS データベースを分析に活用する場合、弁の故障確率を計算する際に参照する弁の使用時間として、次の 2 種類の時間が参照可能である。一方は、弁が設置されてから撤去されるまでのカレンダー時間または現在供用中の弁については現在までのカレンダー時間である。他方は、弁が設置されてから撤去されるまでまたは現在供用中の弁については現在までの期間の中で弁が流体に接していた時間のみを累積した値である。開閉失敗モードに焦点を絞った場合、弁が流体に接しているいなくにかかわらず故障は発生し得る (内部流体の外部漏洩であれば、内部に流体が接していないときに発生し得ない)。弁の駆動装置の劣化等の故障要因は、弁が流体に接しているか否かにはかかわらず存在すると考えられる。分析評価した故障確率を PSA に適用する観点からは、経年劣化効果の評価のように長期間の運転履歴を追跡するような場合、内部の流体がドレンされている時間も評価対象期間に含まれることが十分に考えられる。これらのことから、前者の時間を分析に使うこととした。

(3) 開閉周期と機器母集団

本研究の目的の一つは、直前の開閉動作からの経過時間と故障確率の関係を明らかにすることであり、このためにデータ分析を行うので、弁の運転経験データの統計母集団の開閉周期による内訳を調べておかねばならない。

弁1個ずつに対して、上述の弁使用時間をダイヤモンド数で除することによって開閉周期を計算することができる。これが表3.1-1において開閉周期欄の値である。一つの弁であっても単調な周期で弁が使われるとは限らないため、これはあくまでも弁の開閉周期の指標とみなすべき量である。しかしながら、本研究においては、この開閉周期を定期的に行われる開閉動作に対する一定周期として取り扱うこととした。

図3.1-1にその結果を示す。開閉周期について見ると、2日～1200日の範囲において運転経験データが存在しており、この範囲においてデータは対数軸上で概ね一様に分布している。

(4) 使用時間と機器母集団

同様に図3.1-2に使用時間についての内訳を示す。最長が約28年であり、弁の半数は約8年を越えており、弁の3分の1が10年を超えている。

(5) 開閉動作回数と機器母集団

また図3.1-3に開閉動作回数についての内訳を示す。最大は上述の通り約1600回であるが、分布の中央値は約50回である。

3.2 機器故障経験データ

(1) 故障母集団の規模

これに対して開閉失敗モードの故障事象件数は表3.1-1に挙げた機器に対しては全部で36件存在することがわかった。その内訳を表3.2-1に示す。

(2) 開閉周期と故障母集団

分析のためには、直近の開閉動作から開閉失敗までの経過時間が必要である。ここでは、これに代わる利用可能な情報として開閉周期を参照した(表3.2-1の中の「待機時間」に相当)。ただし、設置直後の故障であったり、または直前に開閉失敗故障を経験しており、これらの事実より直近の開閉動作からの経過時間が明らかに開閉周期よりも短いと推定される場合には参照した開閉周期を補正して分析に用いた。

補正後の開閉周期についての故障母集団の累積度数分布を図3.2-1に示す。同図によると故障は概ね2日から1100日の範囲において観測されており、対数軸上で見ると分布に多少の偏りは見られるものの故障が観測された範囲を統計分析の対象とすることに

支障をきたすほどのものではないと考えられる。

(3) 故障時間と故障母集団

設置から開閉失敗に至るまでの時間（表 3.2-1 の中の「 t_{tfc1} 」に相当）についての累積度数分布を図 3.2-2 に示す。弁の開閉失敗は設置後 1 年未満から 17 年の期間において観測されており、発生時間に著しい偏りは見られない。

(4) 開閉動作回数と故障母集団

設置から開閉失敗に至るまでの開閉動作回数に（表 3.2-1 の中の「故障までのダイヤモンド数」に相当）についての累積度数分布を図 3.2-3 に示す。最大値は約 220 回であり、対数軸上でほぼ一様に分布している。

(5) 故障原因

図 3.2-4 に示すように故障原因の内訳を見ると、弁の駆動装置とその制御部に関わるものとして、シールの磨耗、ダイヤフラムの破損、圧縮空気の漏洩、制御回路の結線エラー、電磁弁の破損、リミットスイッチ破損が挙げられ、弁本体に関係すると考えられるものとして、弁軸周囲のナトリウム固化、弁体上の Oリング異常、高温環境、弁軸とパッキンナットの接触、埃とデブリの弁軸上への蓄積が挙げられる。

特に、弁軸とパッキンナットの接触による閉失敗は、高頻度の開閉動作と高温による熱膨張が許容範囲を超えていたためと報告されている。この推定原因の妥当性を補強するものとして以下の事実関係が存在する。開閉動作回数は約 220 回であり、図 3.1-3 および図 3.2-3 によるとこの数値は故障事例の中では上位約 5% に位置し、分析対象弁の 80% 強がこの回数を下回る開閉動作しか経験していない。一方、弁の使用温度は約 540℃であり、設計温度約 650℃である。図 3.2-5 および図 3.2-6 に示した分析対象弁の設計温度による内訳と使用温度による内訳によれば、設計温度がほぼ平均的な値である反面、この弁の使用温度は上位 20% 以内に含まれる。

(6) 故障と保全

故障原因別に事後保全と予防保全の内容を整理して表 3.2-2 にまとめた。事後保全については部品交換や改良等の故障原因の除去が適切に行われている。ただし、原因不明の事象については開閉動作以外に特別な保全措置を行わずに機能が回復している。

予防保全については、故障を発見する作動試験や性能検査、あるいは圧縮空気の漏洩の有無の点検等が行われているものの、実際に発生している故障事象を未然に防ぐような、いわば弁を若返らせるような措置は行われていないと判断できる。このため、統計処理に当たって弁使用時間の補正は不要と考えられる。

3.3 パラメータ定量化を目的とした故障データの分類

2章において述べた故障確率定量化モデルを弁の開閉失敗確率の定量化に適用するに当たり、事象の内容を図 3.2-4 の故障原因の観点から整理することによって定量化モデル中のパラメータをできる限り決定したい。このため、事象を

- パラメータ C、E および F のみで表現できる型、すなわち主として弁の開閉動作が引き金となって発生または蓄積されると考えられる故障原因と
- パラメータ λ 、a および A のみで表現できる型、すなわち弁の開閉動作を引き金とするのではなく弁の待機時にいつでも発生または蓄積が可能であると考えられる故障原因の2種類に分類するよう試みた。前者を「開閉動作依存型」、後者を「開閉動作無関係型」と呼ぶことができよう。しかしながら、どちらの可能性も考えられるものは「両者型」として分別した。そして「開閉動作無関係型」または「両者型」の場合には待機時間のみについての寿命加速要因が存在するか否か（パラメータ A が正の数かゼロか）を分類した。表 3.3-1 に分類した結果を示す。

(1) 開閉動作依存型

この型に分類したものは、弁体上の Oリング異常、弁軸とパッキンナットの接触である。故障部分が弁の開閉動作に伴って動く部品の破損であることに加えて、前者は初回の動作あるいは2回目の動作で故障していること、そして後者は高頻度で使用したことが一因と推定されていることから開閉動作のみに依存していると判断した。

(2) 開閉動作無関係型

この型の具体例は、エアーカップフィルタのクラックまたは配管接合部の変形による圧縮空気の漏洩、制御回路の結線エラー、弁軸周囲におけるナトリウムの凍結、ベローズシール内側へのナトリウムの漏洩・凍結、埃とデブリの弁軸上への蓄積である。

開閉動作無関係型は、開閉動作とは無関係に何時でも起こりうる可能性を有している原因事象であるが、その中の制御回路の結線エラーはメンテナンス時に発生し、その後の確認試験中に発見されたものである。このような事象を故障と数える場合にはヒューマンエラーとしてモデル化するべきという考え方がある。また、施設 SCTI の弁で起きたナトリウムの凍結については、加熱による是正措置がとられており、ありふれた単純な原因と備考欄に記されていたため、弁の運用方法あるいは予熱の問題として考慮すべき問題であろう。以上の故障事象については、感度解析的に分析対象から除外した場合の分析を行うこととした。

施設 50MWSG の弁で起きたナトリウムのベローズ内側への漏洩・凍結については、予熱上の問題であるか否かの情報が無いこと、是正措置としてベローズ、弁体、弁軸を交換していることから、ここでは弁自身の故障として取り扱うべきと判断した。

(3) 両者型

この型に分類したのは、リミットスイッチのピンの溶接部の損傷、ダイヤフラムの損傷、シールの磨耗、電磁弁の故障、そして原因不明の固着である。分類の理由は、故障部分が弁の開閉動作に伴って動く部品の破損であるものの、待機時間中に劣化が進行した可能性も否定できないからである。また、原因不明の事象は原因が特定できないためこの型に含めた。この他に、流体の温度が約 500℃では弁が作動しなかったが温度を約 300℃に下げたところ支障無く作動したという事例が存在した。これは高温環境が原因であるとされており、敢えて言うならば温度依存型であるがこの型に含めた。

(4) パラメータ A の要因

パラメータ A の要因とは、待機時間のみについての寿命加速要因は待機時間の経過とともに蓄積されていき、待機の終了とともに取り除かれ、弁の年齢が 0 に若返ると考えられるものである。つまり、弁を強制的に開けたり閉めたりすることによって蓄積された寿命加速要因が除去されるような故障を指す。これに該当する可能性があると考えられるのは原因不明とされている開閉失敗であり、故障発見後の是正措置として強制的に開閉動作を繰り返しただけで正常状態に復帰した事例である。

(5) 故障分類とパラメータの設定

故障データに基づき最尤法を用いてパラメータを決定する際に、上述の故障分類の観点からパラメータの取りうる範囲を前もって限定した（表 3.3-1 を参照）。

小分類の①と②は「開閉動作依存型」と考えられるため、パラメータ λ 、 a 、 A はゼロである。さらに①は初期故障ではないと考えられることからパラメータ F もゼロである。小分類の③、④及び⑥は「両者型」である。しかし、開閉失敗の原因は開閉動作によって除去されるものでないため、待機時間のみに対する寿命加速要因は認められず、したがって、パラメータ A はゼロである。小分類⑤は「開閉動作無関係型」と考えられるため、パラメータ C 、 E 、 F はゼロである。小分類⑦は原因不明であるため「両者型」と考えられる。そして、開閉動作によって故障が除去されるため、待機時間のみについての寿命加速要因の可能性が考えられる。

さらに、小分類③の開閉失敗は、表 3.1-1 と表 3.2-1 から弁の寿命中の開閉動作数が 10 回以下の特定の弁において集中的に発生した故障である（全 36 件の開閉失敗の中で 13 件がこれに該当する）ことがわかっている。このため、開閉失敗確率と開閉動作数との相関を観察すると、見かけ上小分類③が開閉動作 10 回以下の開閉失敗確率を増大させる要因となる（図 3.3-1 参照）。したがって、開閉動作数に伴い開閉失敗確率を変化させる成分であるパラメータ E と F を小分類③について強制的にゼロと設定することとした。

表3.1-1 ナトリウム系空気作動弁の運転経験データ(1)

施設名称	CREDO ID	ltimecl (h)	デマント数	開閉周期 (h)	故障件数
SCTI	VA00007A	14473	1230	12	
PLANDTL	VA00044A	39095	980	40	
PLANDTL	VA00030A	74520	1566	48	
PLANDTL	VA00010A	74520	1181	63	
GPL-1	VA00008A	13639	215	63	1
GPL-1A	VA00006A	21360	315	68	
GPL-1A	VA00003A	21360	311	69	
SCTI	VA00033A	63193	822	77	
SCTI	VA00043A	119535	1550	77	
SCTI	VA00058A	119535	1550	77	
SCTI	VA00048A	55286	682	81	
SCTI	VA00050A	55286	682	81	1
SCTI	VA00051A	55286	682	81	
PLANDTL	VA00017A	74520	880	85	
PLANDTL	VA00075A	35450	329	108	
GPL-1A	VA00008A	21360	157	136	
GPL-1A	VA00009A	21360	155	138	
GPL-1	VA00008B	112818	736	153	
GPL-1	VA00001A	128365	813	158	
PLANDTL	VA00031A	74520	466	160	
PLANDTL	VA00032A	74520	466	160	
PLANDTL	VA00033A	74520	466	160	
PLANDTL	VA00042A	74520	466	160	
PLANDTL	VA00091A	35450	221	160	
PLANDTL	VA00092A	35450	221	160	
GPL-2	VA00017A	86006	507	170	
SPTF	VA00041A	150498	886	170	
SPTF	VA00048A	150498	886	170	
GPL-2	VA00015A	86006	499	172	
GPL-2	VA00020B	24552	141	174	
GPL-2	VA00020A	19634	107	183	
GPL-1	VA00009A	126456	687	184	
GPL-1A	VA00001A	21360	105	204	
GPL-2	VA00018A	86006	409	210	
PLANDTL	VA00035A	74520	352	212	
PLANDTL	VA00076A	35450	167	212	
SCTI	VA00048B	63193	296	213	
SCTI	VA00050B	63193	296	213	
SCTI	VA00051B	63193	296	213	
GPL-1	VA00007A	121022	535	226	
GPL-1	VA00011A	98152	433	227	
PLANDTL	VA00046A	74520	315	237	1
PLANDTL	VA00047A	74520	315	237	1
GPL-1A	VA00011A	21360	85	253	
GPL-1A	VA00012A	21360	85	253	
GPL-1A	VA00013A	21360	85	253	
GPL-1	VA00012A	106412	421	253	
GPL-1	VA00010A	120830	474	255	
GPL-1A	VA00010A	21360	79	272	
GPL-2	VA00006A	86006	311	276	
PLANDTL	VA00090A	35450	124	285	
PLANDTL	VA00016A	39095	134	292	
SPTF	VA00043A	150498	507	297	
SCTI	VA00008A	63193	205	308	
SCTI	VA00027A	63193	205	308	
GPL-2	VA00011A	86006	279	308	
GPL-2	VA00013A	86006	268	321	
GPL-2	VA00014A	86006	268	321	
SPTF	VA00034A	150498	450	335	
SPTF	VA00035A	150498	450	335	
SPTF	VA00044A	150498	450	335	
SPTF	VA00045A	150498	450	335	
50MWSGTF	VA00038A	142032	413	344	1
GPL-2	VA00002A	86006	222	388	
PLANDTL	VA00029A	74520	190	392	
PLANDTL	VA00036A	74520	190	392	
PLANDTL	VA00037A	74520	190	392	
PLANDTL	VA00038A	74520	190	392	
GPL-2	VA00016A	86006	218	394	
GPL-2	VA00021A	44234	112	396	
SPTF	VA00049A	150498	369	408	
SASS-2	VA00001A	3288	8	408	
SASS-2	VA00100A	3288	8	408	
GPL-1A	VA00002A	21360	52	409	
SASS-2	VA00002A	3288	8	419	
SASS-2	VA00101A	3288	8	419	
GPL-2	VA00004A	86006	205	420	
PLANDTL	VA00078A	35450	79	450	
PLANDTL	VA00093A	35450	79	450	
PLANDTL	VA00094A	35450	79	450	
PLANDTL	VA00095A	35450	79	450	
PLANDTL	VA00096A	35450	79	450	
SASS-1	VA00003A	21408	44	486	
JOYO	VA00181A	111791	215	520	1
JOYO	VA00179A	111791	212	527	
PLANDTL	VA00001A	39095	72	542	1
PLANDTL	VA00002A	39095	72	542	
PLANDTL	VA00005A	39095	72	542	
PLANDTL	VA00006A	39095	72	542	1
SCTI	VA00028A	71521	128	559	
JOYO	VA00175A	124630	221	563	
GPL-2	VA00022A	44234	78	567	
SASS-1	VA00002A	21408	37	574	
SASS-1	VA00008A	21408	37	574	
SASS-1	VA00005A	21408	36	594	
SASS-1	VA00006A	21408	36	594	
SASS-1	VA00007A	21408	36	594	
SASS-1	VA00011A	21408	36	594	
SASS-1	VA00012A	21408	36	594	
PLANDTL	VA00018A	74520	124	599	1
PLANDTL	VA00025A	74520	124	599	
PLANDTL	VA00026A	74520	124	599	
PLANDTL	VA00027A	74520	124	599	
PLANDTL	VA00028A	74520	124	599	1
PLANDTL	VA00041A	74520	124	599	
PLANDTL	VA00045A	74520	124	599	
SASS-2	VA00003A	3288	5	638	
SASS-2	VA00102A	3288	5	638	
FFTF	VA00361A	110085	171	643	
FFTF	VA00363A	110085	171	643	
FFTF	VA00364A	110085	171	643	
FFTF	VA00365A	110085	171	643	
FFTF	VA00366A	110085	171	643	1
FFTF	VA00367A	110085	171	643	
FFTF	VA00370A	110085	171	643	1
FFTF	VA00371A	110085	171	643	
FFTF	VA00383A	110085	171	643	
FFTF	VA00384A	110085	171	643	
FFTF	VA00385A	110085	171	643	
GPL-1A	VA00004A	21360	32	662	
PLANDTL	VA00083A	35450	52	678	
PLANDTL	VA00086A	35450	52	678	
PLANDTL	VA00087A	35450	52	678	
PLANDTL	VA00088A	35450	52	678	

表3.1-1 ナトリウム系空気作動弁の運転経験データ(2)

施設名称	CREDO ID	ltimecl (h)	テ・イマント数	開閉周期 (h)	故障件数
GPL-2	VA00012A	86006	121	709	
GPL-1A	VA00005A	21360	27	781	
SCTI	VA00053A	63193	79	799	
SCTI	VA00055A	63193	79	799	
SCTI	VA00070A	63193	79	799	
JOYO	VA00181D	50064	61	826	
JOYO	VA00180A	111791	135	827	
SCTI	VA00002A	55286	66	840	
SCTI	VA00038A	55286	66	840	
SCTI	VA00039A	55286	66	840	
SCTI	VA00059A	55286	66	840	
SCTI	VA00060A	55286	66	840	
JOYO	VA00182A	111791	132	845	
GPL-1A	VA00007A	21360	25	859	
SCTI	VA00065A	85873	99	865	1
SASS-1	VA00001A	21408	25	866	
SASS-1	VA00004A	21408	25	866	
SASS-1	VA00013A	21408	25	866	
SASS-1	VA00014A	21408	25	866	
SASS-1	VA00015A	21408	25	866	
SASS-1	VA00016A	21408	25	866	
50MWSGTF	VA00001A	38280	44	879	
JOYO	VA00179B	93262	102	918	
50MWSGTF	VA00012A	142032	145	976	1
JOYO	VA00181B	33214	34	988	
50MWSGTF	VA00039A	142032	141	1011	
50MWSGTF	VA00010A	142032	139	1020	
PLANDTL	VA00003A	39095	38	1024	
PLANDTL	VA00004A	39095	38	1024	
PLANDTL	VA00007A	39095	38	1024	
PLANDTL	VA00008A	39095	38	1024	
SCTI	VA00032A	63193	62	1026	
50MWSGTF	VA00009A	142032	138	1028	
GPL-2	VA00019A	79669	77	1033	
SPTF	VA00042A	150498	145	1041	
SCTI	VA00063A	119535	114	1046	1
SCTI	VA00067A	119535	114	1046	
SCTI	VA00049A	117808	113	1046	
SCTI	VA00061A	117808	113	1046	1
SPTF	VA00050A	97722	93	1048	
SPTF	VA00051A	97722	93	1049	
SCTI	VA00057A	119535	114	1051	
SCTI	VA00034A	85873	81	1060	
SCTI	VA00062A	85873	81	1060	
SCTI	VA00068A	85873	81	1060	
SCTI	VA00069A	85873	81	1060	
JOYO	VA00175B	81215	76	1073	
JOYO	VA00182D	50064	46	1077	
GPL-1	VA00003A	31984	29	1095	
SCTI	VA00042A	55286	50	1099	
SCTI	VA00044A	55286	50	1099	
PLANDTL	VA00019A	74520	66	1132	
PLANDTL	VA00020A	74520	66	1132	
PLANDTL	VA00021A	74520	66	1132	
PLANDTL	VA00022A	74520	66	1132	
PLANDTL	VA00039A	74520	66	1132	
SASS-2	VA00006A	29016	26	1133	
SASS-2	VA00007A	29016	26	1133	
SASS-2	VA00008A	29016	26	1133	
SASS-2	VA00022A	29016	25	1146	
JOYO	VA00180B	93262	79	1180	
GPL-2	VA00008A	86006	73	1183	
SASS-2	VA00013A	29016	24	1208	
JOYO	VA00181C	9672	8	1226	
JOYO	VA00182C	9672	8	1226	
PLANDTL	VA00072A	35450	28	1280	
PLANDTL	VA00073A	35450	28	1280	
PLANDTL	VA00079A	35450	28	1280	
PLANDTL	VA00080A	35450	28	1280	
PLANDTL	VA00081A	35450	28	1280	1
PLANDTL	VA00082A	35450	28	1280	
PLANDTL	VA00084A	35450	28	1280	
PLANDTL	VA00085A	35450	28	1280	
50MWSGTF	VA00011A	142032	111	1284	
GPL-2	VA00009A	86006	65	1319	
GPL-2	VA00010A	86006	65	1319	
JOYO	VA00182B	33214	24	1411	1
SASS-2	VA00005A	29016	20	1429	
SASS-2	VA00014A	29016	20	1429	
SASS-2	VA00015A	29016	20	1429	
SASS-2	VA00016A	29016	20	1429	
SASS-2	VA00017A	29016	20	1429	
SASS-2	VA00018A	29016	20	1429	
SASS-2	VA00019A	29016	20	1429	
SCTI	VA00003A	49646	33	1523	
SCTI	VA00066A	49646	33	1523	
SCTI	VA00031A	63193	41	1538	
GPL-2	VA00023A	25727	17	1542	
GPL-2	VA00100A	25727	17	1542	
SASS-2	VA00009A	29016	18	1605	
SASS-2	VA00010A	29016	18	1605	
SASS-2	VA00011A	29016	18	1605	
SASS-2	VA00012A	29016	18	1605	
50MWSGTF	VA00004A	142032	84	1693	
50MWSGTF	VA00283A	76512	45	1713	
50MWSGTF	VA00280A	76512	44	1725	
50MWSGTF	VA00281A	76512	44	1725	
50MWSGTF	VA00014A	142032	81	1762	
50MWSGTF	VA00282A	76512	40	1902	
GPL-2	VA00001A	86006	40	2147	
GPL-2	VA00024A	25727	12	2184	
GPL-2	VA00101A	25727	12	2184	
FFTF	VA00022A	110085	50	2188	
FFTF	VA00023A	110085	50	2188	
FFTF	VA00024A	110085	50	2188	
FFTF	VA00101A	110085	50	2188	
GPL-2	VA00003A	86006	39	2188	
50MWSGTF	VA00040A	100104	43	2315	
GPL-2	VA00025A	25727	11	2356	
GPL-2	VA00026A	25727	11	2356	
GPL-2	VA00102A	25727	11	2356	
GPL-2	VA00103A	25727	11	2356	
50MWSGTF	VA00001B	103776	42	2473	
50MWSGTF	VA00047A	100104	40	2489	
SASS-1	VA00009A	21408	8	2676	
SASS-1	VA00010A	21408	8	2676	
SPTF	VA00036A	150498	56	2687	
SPTF	VA00037A	150498	56	2687	
SPTF	VA00038A	150498	56	2687	
SPTF	VA00039A	150498	56	2687	
SPTF	VA00040A	150498	56	2687	
SPTF	VA00046A	150498	56	2687	
SPTF	VA00047A	150498	56	2687	
50MWSGTF	VA00046A	100104	36	2752	

表3.1-1 ナトリウム系空気作動弁の運転経験データ(3)

施設名称	CREDO ID	ltimecl (h)	ダイヤモンド数	開閉周期 (h)	故障件数
SETL	VA00012A	73874	27	2756	
50MWSGTF	VA00037A	142032	48	2948	
50MWSGTF	VA00278A	142032	47	3005	
50MWSGTF	VA00279A	142032	47	3005	
SCTI	VA00038B	63193	21	3071	
SCTI	VA00004A	63193	21	3077	
SCTI	VA00010A	63193	21	3077	
SCTI	VA00019A	117808	37	3199	
SCTI	VA00020A	117808	37	3199	
SCTI	VA00025A	117808	37	3199	
SCTI	VA00026A	50559	16	3235	
SCTI	VA00029A	71521	21	3355	
50MWSGTF	VA00044A	100104	28	3562	
50MWSGTF	VA00041A	100104	26	3782	
SCTI	VA00035A	68089	18	3789	
SCTI	VA00036A	68089	18	3789	
SASS-2	VA00023A	29016	7	3884	
SCTI	VA00005A	67969	17	4024	
50MWSGTF	VA00045A	100104	24	4130	
SCTI	VA00071A	49416	12	4160	
SCTI	VA00002B	63193	14	4382	
SCTI	VA00039B	63193	14	4382	
SCTI	VA00059B	63193	14	4382	
SCTI	VA00060B	63193	14	4382	
50MWSGTF	VA00007A	142032	31	4595	1
50MWSGTF	VA00042A	100104	21	4781	
SASS-2	VA00024A	29016	6	4812	
50MWSGTF	VA00043A	100104	20	4963	
SCTI	VA00011A	85873	17	5118	
SCTI	VA00012A	85873	17	5118	
SCTI	VA00021A	85873	17	5118	
SCTI	VA00022A	85873	17	5118	
SCTI	VA00016A	117808	23	5222	
SCTI	VA00018A	117808	23	5222	
SCTI	VA00014A	117808	22	5360	
50MWSGTF	VA00005A	142032	25	5581	
50MWSGTF	VA00006A	142032	25	5581	
PLANDTL	VA00040A	74520	12	5992	
SCTI	VA00042B	63193	10	6135	
SCTI	VA00044B	63193	10	6135	
SETL	VA00012B	19992	3	6347	
50MWSGTF	VA00008A	142032	20	6990	2
50MWSGTF	VA00048A	68712	10	7047	
50MWSGTF	VA00284A	76296	10	7630	
50MWSGTF	VA00285A	76296	10	7630	
FFTF	VA02557A	22955	3	8762	
FFTF	VA00084A	100607	11	8771	
FFTF	VA00081A	110085	13	8772	
FFTF	VA00083A	110085	13	8772	
FFTF	VA00085A	110085	13	8772	
FFTF	VA00091A	110085	13	8772	
FFTF	VA00097A	110085	13	8772	
SPTF	VA00054A	90276	9	9997	
SCTI	VA00009A	117808	11	10444	1
SCTI	VA00013A	117808	11	10444	
GPL-1	VA00004A	31984	3	11631	
GPL-1	VA00005A	31984	3	11631	
SPTF	VA00012A	150498	11	13144	
SPTF	VA00013A	150498	11	13144	
SCTI	VA00054A	37837	3	13276	
GPL-2	VA00005A	86006	6	13827	
SCTI	VA00054B	80834	5	14859	
EBR-II	VA00008A	35087	2	15389	
EBR-II	VA00006A	99599	6	17978	1
EBR-II	VA00005A	114287	6	19273	5
EBR-II	VA00007A	241080	10	23293	1
EBR-II	VA00009A	241080	10	23293	2
SPTF	VA00053A	112380	5	24168	
SCTI	VA00023A	85873	3	25558	
EBR-II	VA00116A	183673	7	27496	2
EBR-II	VA00117A	183673	7	27496	
EBR-II	VA00118A	183673	7	27496	2
EBR-II	VA00119A	183673	7	27496	1
EBR-II	VA00008B	122713	4	27826	
SCTI	VA00001A	117808	4	28456	
SCTI	VA00015A	117808	4	28456	
SCTI	VA00017A	117808	4	28456	
合計		325	2.4E+7	44643	36

施設名称：CORDSに登録されている施設の名称であり、今の場合、弁の設置されている施設を指す。

CREDO ID：CORDSにおいて施設毎に機器をユニークに特定するための8文字からなる識別記号である。

ltimecl：弁の設置から寿命を終えるまでのカレンダー時間または寿命をまだ終えていない弁については現在までのカレンダー時間

ダイヤモンド数：弁が経験した開動作の回数あるいは閉動作の回数（両者は等しい）

開閉周期：ここではltimeclの値をダイヤモンド数で除したものと定義している。

表3.2-1 ナトリウム系空気作動弁の故障経験データ

施設名称	CREDO ID	事象データ報告番号	故障モード	ltimecl	ダイヤモンド数	ttfcl(hr)	待機時間(h)	故障までのダイヤモンド数	小分類
EBR-II	VA00005A	ER700006	開閉失敗	114287	5.9	52895	19265	2.75	③
		ER700007	閉失敗	114287	5.9	54191	* 1296	** 3.75	
		ER720003	開失敗	114287	5.9	69623	* 15432	** 4.75	
		ER730002	開失敗	114287	5.9	80375	* 10752	** 5.75	
		ER740006	開失敗	114287	5.9	88199	* 7824	** 6.75	
	VA00006A	ER720002	開失敗	99599	5.5	69599	17991	3.87	
	VA00007A	ER750001	開失敗	241080	10.3	98087	23303	4.21	
	VA00009A	ER790003	開閉失敗	241080	10.3	134039	23303	5.75	
		ER810001	開失敗	241080	10.3	145463	* 11424	** 6.75	⑦
	VA00116A	ER760004	開失敗	183673	6.7	49609	27517	1.80	③
		ER770006	開失敗	183673	6.7	54529	* 4920	** 2.80	
	VA00118A	ER740014	開閉失敗	183673	6.7	34177	27517	1.24	
		ER800018	開失敗	183673	6.7	86929	27517	3.16	
VA00119A	ER800019	開失敗	183673	6.7	86929	27517	3.16		
FFTF	VA00370A	FF790019	閉失敗	110085	171.2	9502	643	14.77	④
	VA00366A	FF820043	制御失敗	110085	171.2	34064	643	52.97	⑦
GPL-1	VA00008A	GL690001	閉失敗	13639	215.4	13639	63	215.36	①
JOYO	VA00181A	JY790001	閉失敗	111791	215.0	31823	520	61.19	④
	VA00182B	JY920005	閉失敗	33214	23.5	31918	1411	22.61	
PLAN DTL	VA00028A	PL900001	閉失敗	74520	124.4	21191	599	35.37	⑥
	VA00006A	PL900002	閉失敗	39095	72.1	22823	542	42.09	⑤
	VA00001A	PL900003	閉失敗	39095	72.1	24911	542	45.94	④
	VA00046A	PL920002	開閉失敗	74520	314.6	38495	237	162.51	⑤
	VA00047A	PL920003	開閉失敗	74520	314.6	38495	237	162.51	
	VA00081A	PL930003	開失敗	35450	27.7	10681	1280	8.34	
	VA00018A	PL930004	開失敗	74520	124.4	50136	599	83.68	
SCTI	VA00050A	SC800004	閉失敗	55286	682.1	17947	81	221.42	⑦
	VA00009A	SC800006	閉失敗	117807	11.3	18810	10443	1.80	⑤
	VA00063A	SC890001	閉失敗	119535	114.3	91600	1046	87.61	
	VA00065A	SC890002	閉失敗	85873	99.3	57938	865	66.99	
	VA00061A	SC890003	閉失敗	117807	112.6	89872	1046	85.91	
50MW SGTF	VA00007A	SG740006	閉失敗	142032	30.9	1536	4596	*** 1.00	②
	VA00008A	SG740005	閉失敗	142032	20.3	1344	* 1344	1.00	
		SG740019	閉失敗	142032	20.3	5256	* 3912	1.34	
	VA00012A	SG740007	閉失敗	142032	145.5	1536	976	1.57	
	VA00038A	SG750010	閉失敗	142032	413.4	10368	344	30.18	⑤

施設名称：CORDSに登録されている施設の名称であり、今の場合、弁の設置されている施設を指す。

CREDO ID：CORDSにおいて施設毎に機器をユニークに特定するための8文字からなる識別記号である。

事象データ報告番号：CORDSにおいて機器故障事象をユニークに特定するための8文字からなる識別記号である。

ltimecl：弁の設置から寿命を終えるまでのカレンダー時間または寿命をまだ終えていない弁については現在までのカレンダー時間。

ダイヤモンド数：弁が経験した開動作の回数または閉動作の回数（両者は等しい）。

ttfcl：弁の設置から当該故障事象を経験するまでのカレンダー時間。

待機時間：基本的にltimeclをダイヤモンド数で除した開閉周期として求めた。

故障までのダイヤモンド数：基本的にttfclを開閉周期で除して求めた。

小分類：表3.3-1を参照。

*：直前の故障発見時からの経過時間が開閉周期より短いため、これを待機時間とした。

**：直前の故障回数に1を加えたものがttfclを開閉周期で除した値より大きい場合、これを故障までのダイヤモンド数とした。

***：故障までのダイヤモンド数は少なくとも1以上であるとした。

表3.2-2 ナトリウム系空気作動弁の開閉失敗原因と保全内容

故障原因	事後保全	予防保全
EBR-II：シール磨耗、ダイヤフラムの損傷による圧縮空気の漏洩	故障した部品の交換	パトロールにより圧縮空気の漏洩の有無を点検
常陽：ダイヤフラムの損傷による圧縮空気の漏洩	故障した部品の交換	月1回作動試験を実施
PLANDTL：エアーカップフィルタのクラック(2件)、配管接合部の変形(1件)による圧縮空気の漏洩	故障した部品の交換	年1回の性能検査、潤滑材供給
高温環境	故障した部品の交換	年1回の作動試験を実施
高温環境	300℃以下で正常に機能するようになったことから、故障後に修理活動は行われていない。	年1回の性能検査、電磁弁の検査
高頻度の開閉動作と高温による熱膨張が許容範囲を超えていたことによる弁軸とパッキンナットの接触	パッキンナットと軸の隙間を拡張した後予備品と交換。開閉動作の頻度の低減。	弁軸の潤滑性の維持のみ
制御回路の結線エラー（2台の弁の制御回路を交差して繋いだという事象。保全作業の中で生じた人的過誤。）	正しく結線した。	施設の運転記録および故障記録によると、故障発見直前にケーブルや計装関連の工事を含む施設の改造が実施されており、改造後の施設の運転に備えた確認を行う中で発見された故障であることから、この事象自身が予防保全であり、要求時に故障が発生することを十分に予防できたといえる。
電磁弁の故障	電磁弁の交換	なし
高温環境	Oリングを保持するための改良が施されたが、故障した3台の中の1台では数カ月後に再度同じ故障が生じており、その後、さらなる改良が行われ、それ以降の故障発生は報告されていない。	駆動装置のオーバーホールと点検。弁設置間もなく生じたため、この故障に対して予防保全の概念は当てはまらないと思われる。
弁軸周囲におけるナトリウムの凍結	ヒーターによる弁軸の加熱	なし
ベローズシール内側へのナトリウムの凍結	弁軸とベローズシールの交換	年1回ナトリウム漏洩検出器の機能チェック
埃とデブリの弁軸上への蓄積	埃とデブリの除去	なし
原因不明	開閉動作を繰り返す。弁を軽く叩く。	なし

表3.3-1 故障タイプの分類

故障原因	件数	故障タイプの分類の考え方	小分類	型	時間型故障のパラメータA
高頻度の開閉動作と高温による熱膨張が許容範囲を超えていたことによる弁軸とパッキンナットの接触	1	高温という環境要因を前提として、開閉動作自身がパッキンの接触剥離を促進する要因となったと考えられる。故障確率は待機時間でなく、開閉動作数につれて増加する関数になると考えられる。	①	A	該当せず
50MWSGTFのバタフライ弁：弁体上のOリング異常	4	原因は待機時間中に発生したのではなく、設置時に存在した。すなわち、開閉動作を要求すると高い確率で失敗する状況であったと考えられる。改良によって故障原因が除去されている。ただし、一部の弁は再発生しているため、改良の効果は100%でない。開閉動作によって初めて故障原因が発見され、改良によって少しずつ原因が除去されることから、故障確率は時間に関係なく、開閉動作数につれて減少する関数になると考えられる。	②		
EBR-II：シール磨耗、ダイヤフラムの損傷による圧縮空気の漏洩	13	故障の発見方法に着目すると、開閉動作のみならず、バトロールによる圧縮空気の漏洩の有無のチェックによっても発見可能であることが故障記録からわかっている。この事実から、開閉動作だけがシール磨耗とダイヤフラムの損傷の要因でなく、待機中の環境や時間の経過も寄与していると考えられる。	③	A&B	開閉失敗の原因は開閉動作によって除去されるものではない。従って、待機時間のみについての寿命加速要因でない(A=0)。
常備：ダイヤフラムの損傷による圧縮空気の漏洩	2	駆動装置の動的部品であることから、開閉動作自身がストレスになって故障した可能性が高いと考えられる。なお、時間に関する特別な環境要因が認められていないものの、待機時間中にダイヤフラムの損傷が進展した可能性も否定できない。	④		
リミットスイッチのピンの溶接部の損傷	1	リミットスイッチのピンは動的な部品であるため、開閉動作がストレスになって故障した可能性が高いと考えられる。しかし、リミットスイッチのピン溶接部の損傷が待機時間中に進展した可能性も否定できない。			
電磁弁の故障	1	動的部品であり、原因の詳細が不明なため様々な可能性が考えられる。			
PLANDTL：エアークラックフィルタのクラック(2件)、配管接合部の変形(1件)による圧縮空気の漏洩	3	駆動装置の一部を構成する部品であるが、静的な故障なので、故障原因は開閉動作に関係なく発生・進展すると考えられる。	⑤	B	
制御回路の結線エラー	2	保全活動中に発生した人的過誤であることが明白であるため、開閉動作を引き金としない故障である。なお、供用(待機)中の故障でないため分析対象から除外すべきとの考え方もある。保全におけるヒューマンエラーとしてモデル化する場合には、保全活動当たりの失敗確率として整理されるべきであろう。			
SCTI：弁軸周囲におけるナトリウムの凍結	3	待機時間中に時間をかけて凍結したものと考えられるので、開閉動作を引き金としない故障と考えられる。なお、弁の故障でなく、予熱失敗としてモデル化されるべきものであるとの考え方もある。			
ベローズシール内側へのナトリウムの漏洩・凍結	1	待機時間中に時間をかけて漏洩・凍結したものと考えられるので、開閉動作を引き金としない故障と考えられる。			
埃とデブリの弁軸上への蓄積	1	埃やデブリが多量に発生するという環境要因を前提として待機時間中に蓄積する現象であるため、開閉動作を引き金としない故障と考えられる。			
PLANDTL：高温環境	1	開閉動作自身は故障要因でないものの、開閉動作時に高温であったか否かが開閉失敗に至ったか否かに結びついており、待機時間の長短には関係しない。この観点では故障確率はパラメータCのみで表される。一方、設置時から存在していた高温に対する弱さが時間とともに顕在化した可能性が考えられ、この場合はパラメータλ、aが関係してくる。	⑥	A&B	
原因不明	3	原因不明	⑦	A&B	開閉動作によって故障が除去されるため、待機時間のみについての寿命加速要因(A>0)の可能性有り。

A：開閉動作依存型 (パラメータC, E, Fのみで表現できる。すなわち、λ=a=A=0)

B：開閉動作無関係型 (パラメータλ, a, Aのみで表現できる。すなわち、C=E=F=0)

A&B：両者型 (関係するパラメータを限定できない)

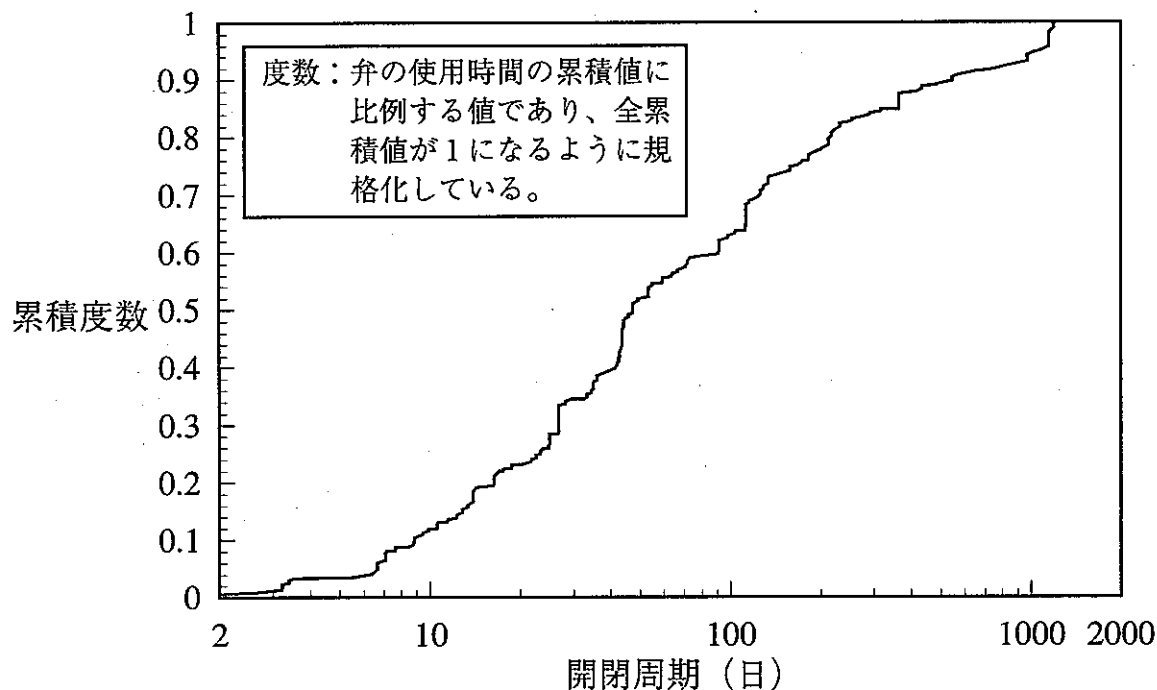


図3.1-1 ナトリウム系空気作動弁の
運転経験データの開閉周期による内訳

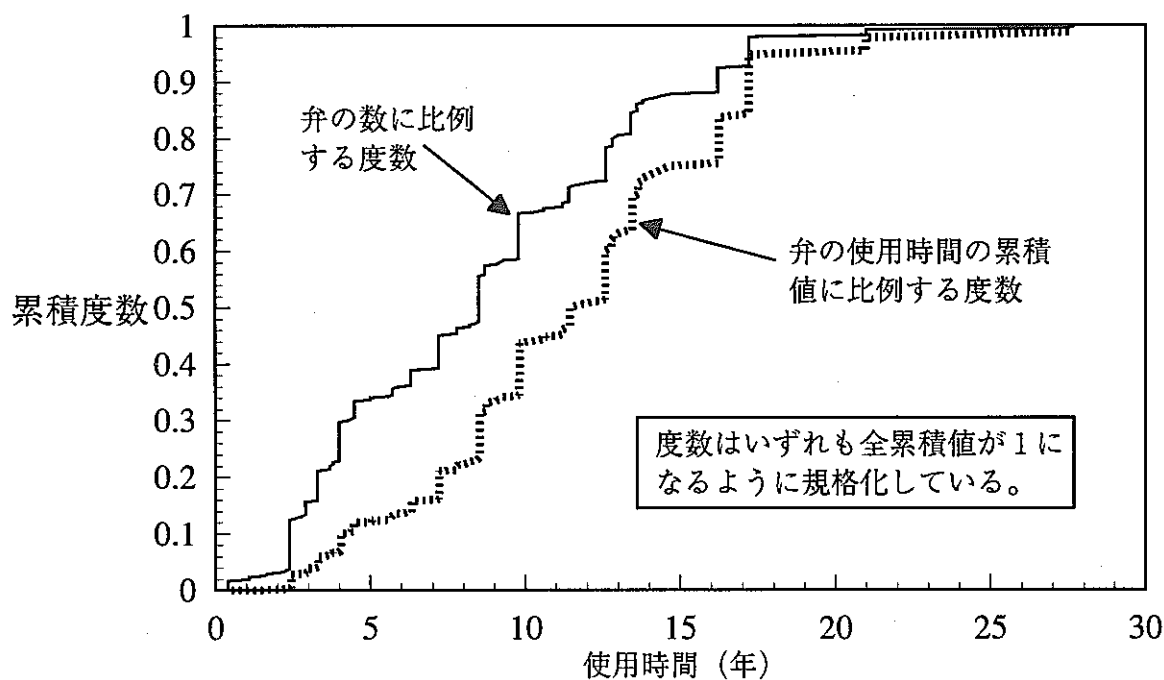


図3.1-2 ナトリウム系空気作動弁の
運転経験データの使用時間による内訳

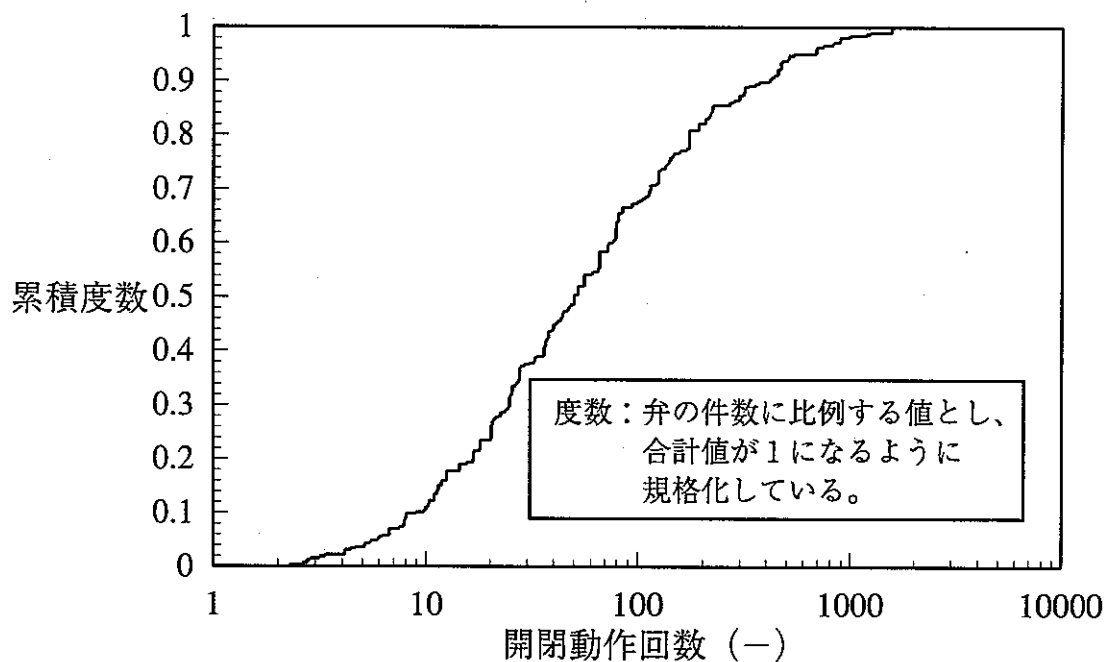


図3.1-3 ナトリウム系空気作動弁の運転経験データの開閉動作回数による内訳

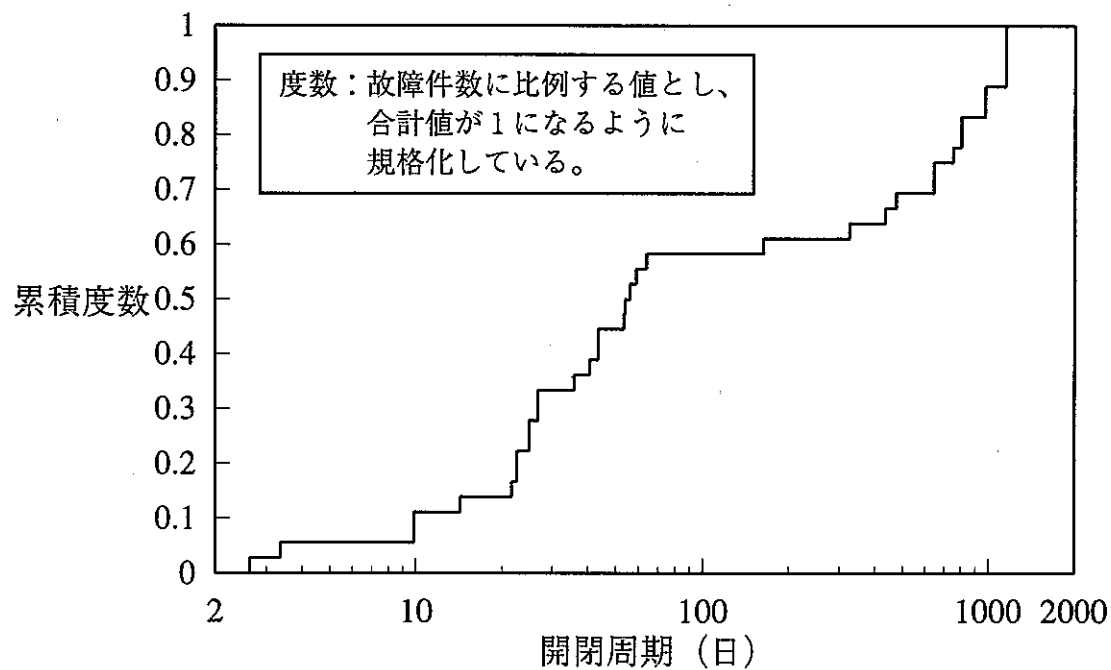


図3.2-1 ナトリウム系空気作動弁の故障経験データの開閉周期による内訳

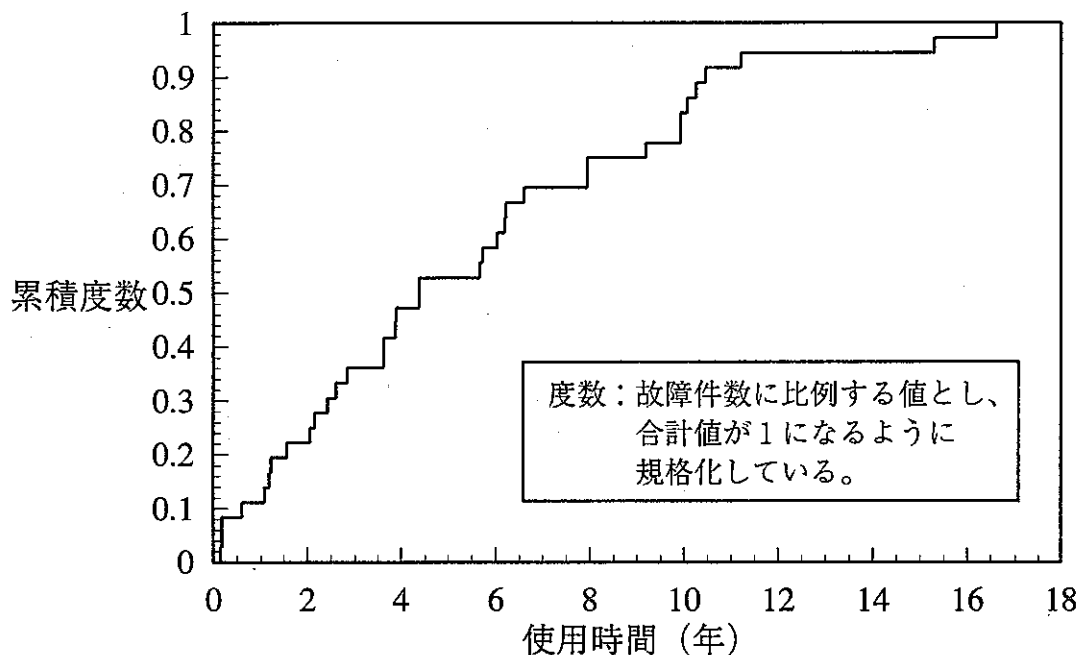


図3.2-2 ナトリウム系空気作動弁の故障経験データの故障時間による内訳

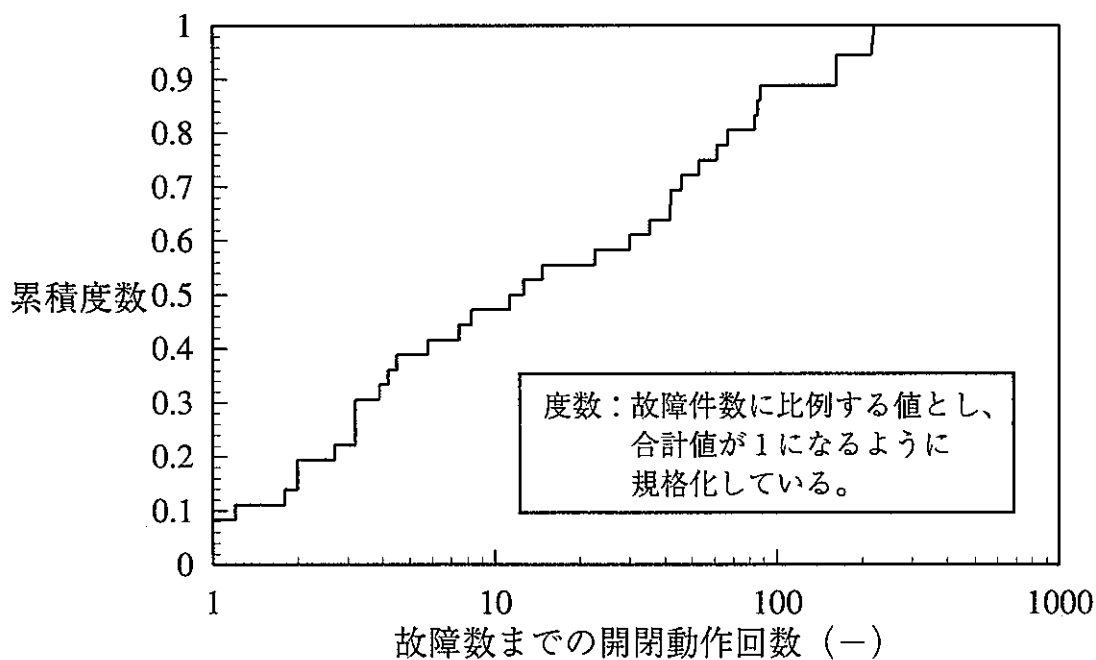


図3.2-3 ナトリウム系空気作動弁の故障経験データの開閉動作回数による内訳

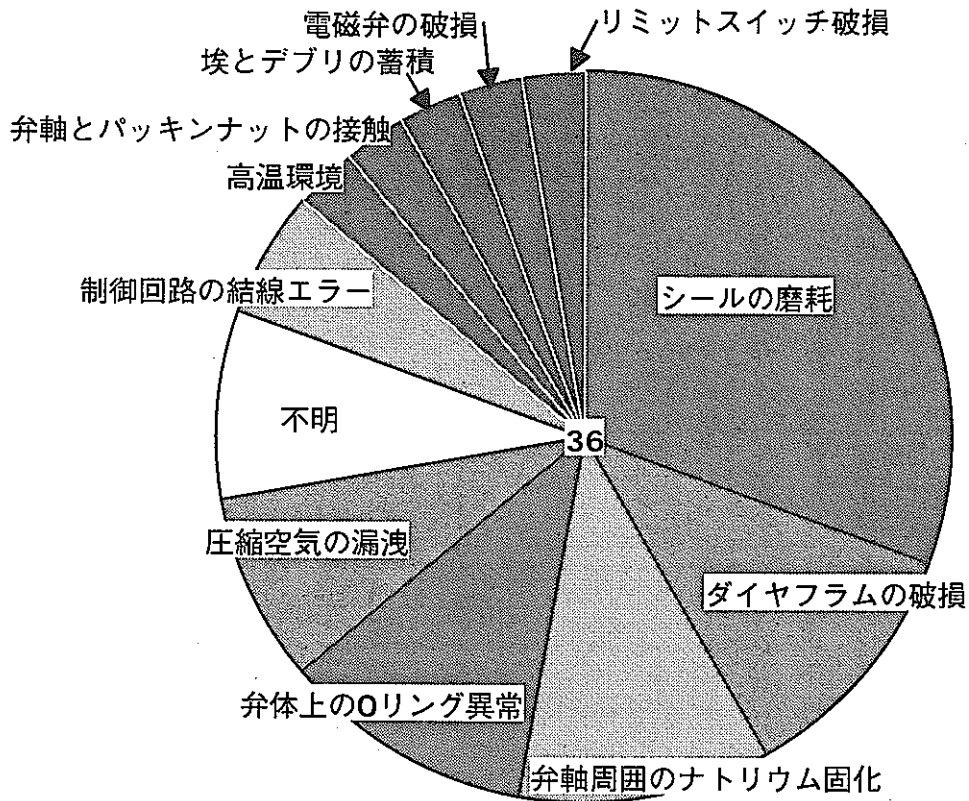


図3.2-4 ナトリウム系空気作動弁の開閉失敗の原因内訳

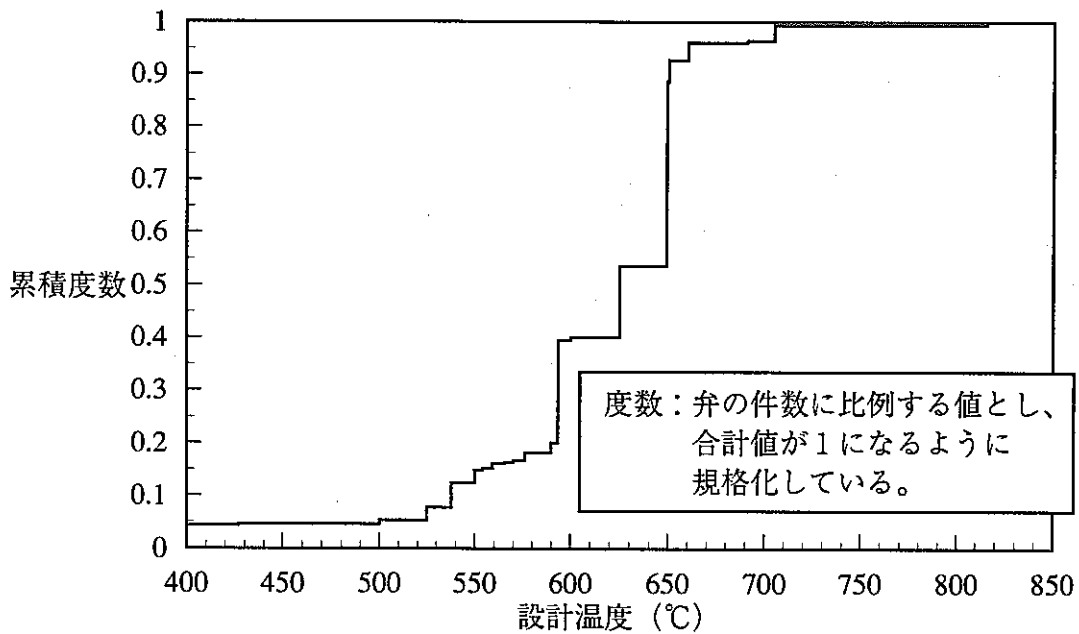


図3.2-5 ナトリウム系空気作動弁の設計温度による内訳

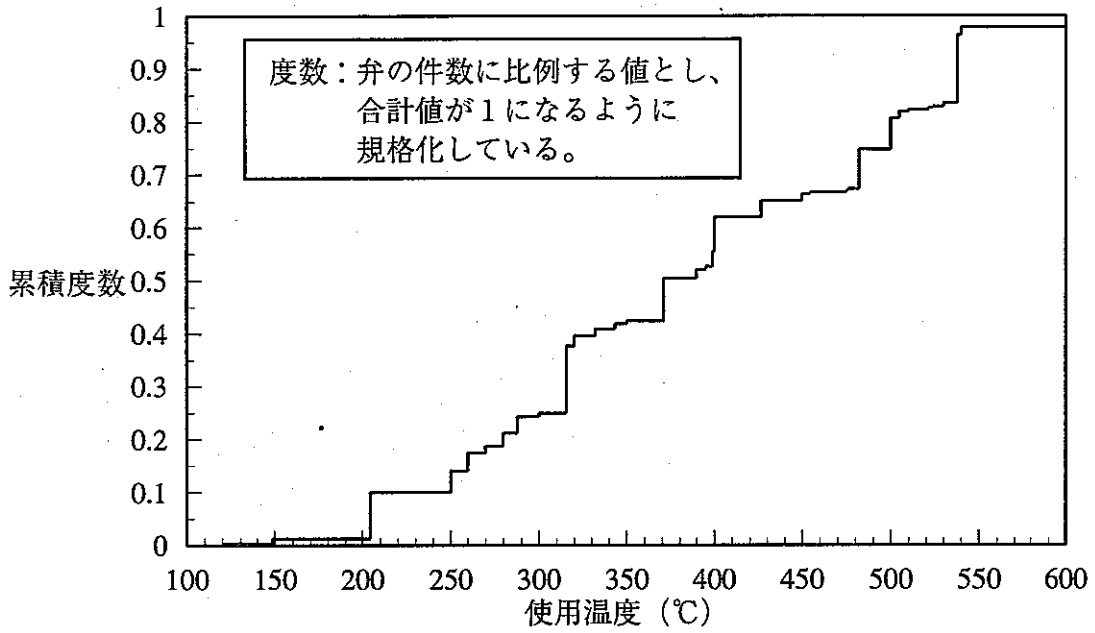


図3.2-6 ナトリウム系空気作動弁の使用温度による内訳

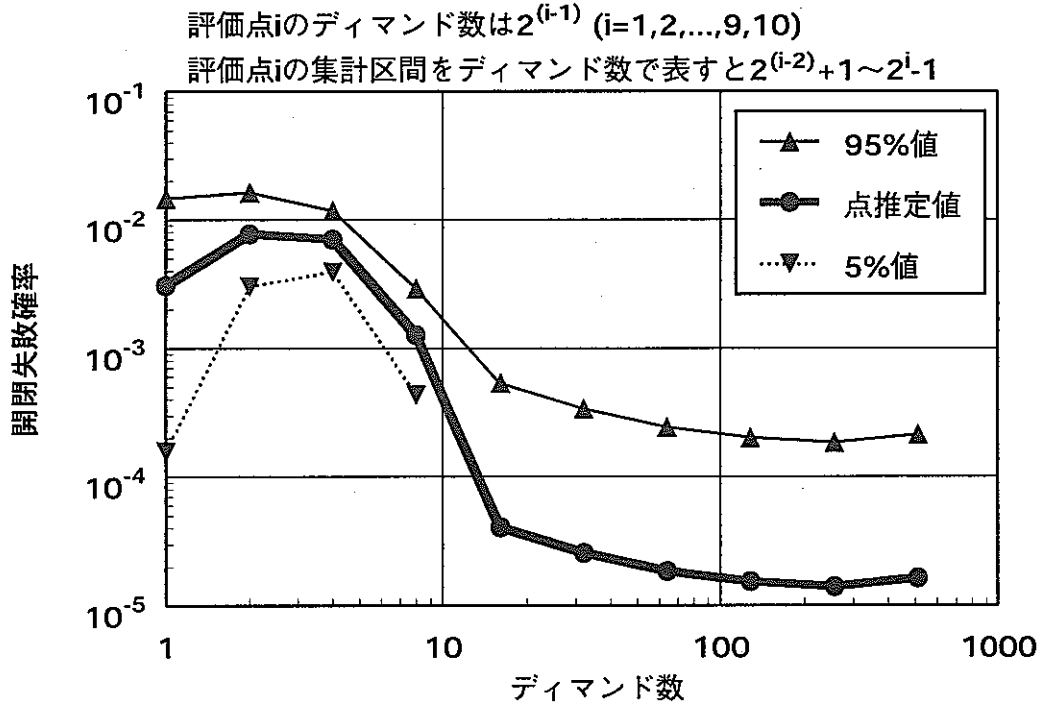


図3.3-1 ナトリウム系空気作動弁の開閉失敗確率とダイヤモンド数との相関性 (小分類③EBR-IIのシール磨耗、ダイヤフラムの損傷のみ)

4. 分析結果

4.1 開閉失敗確率パラメータの定量化

4.1.1 全母集団に対する相関性の分析

(1) 分析内容

ナトリウム系空気作動弁の開閉失敗確率について、使用時間 t 、待機時間 T 、開閉動作数 n との相関性を調べた。使用時間 t はパラメータ a を介して故障率と結びつけられるので、故障率を使用時間 t について整理した。待機時間 T はパラメータ A を介して故障率と結びつけられる。また、待機時間に相当するデータは弁の開閉周期であることから、待機時間 T と故障確率との相関性を調べるために、故障率を弁の開閉周期について整理した。開閉動作数 n はパラメータ E と F を介して故障確率と直接結びつけられるので、故障確率を開閉動作数 n について整理した。

(2) 全故障データの傾向分析

分析対象母集団を弁全体 325 件とし、分析対象開閉失敗事象を 36 件全てとした結果を図 4.1-1～図 4.1-3 に示す。故障率は使用時間について著しい増加も減少も認められない。そして、開閉周期に対しては、単調な増加や単調な減少は認められず、20～30 日における値と比較して 100 日前後で故障率は一旦小さくなり、数百日以上では 20～30 日における値よりも故障率は大きいという複雑な傾向を呈している。開閉動作数に対しては減少傾向を呈しているものの、減少の割合は 10～20 回以下はそれ以上よりも急激である。

(3) 故障分類に従った分析

以上は、故障について全母集団の傾向を調べたものである。次に、3.3 で説明した故障分類に従って分析対象である開閉失敗事象を使用時間、待機時間および開閉動作数の各々に関係するものだけに限定して相関性を調べた（図 4.1-4～図 4.1-6 を参照）。使用時間については、10 年以下では時間とともに少し増加傾向を呈しているが、10 年以上では不確かさが著しく増大し、減少の可能性も残している。全体として見れば、故障率は使用時間によらずほぼ一定であるといえる。開閉周期については、不確かさが大きく、増加あるいは減少の傾向は認められない。開閉動作数については、単調に減少している。そして、減少の仕方はほぼ開閉動作数に反比例している。

(4) まとめ

これらの結果から、パラメータ a は 0 近傍、 A は 0 または 0 近傍の正の数、 E は 0 または 0 近傍の負の数、 F は正の数を取るであろうと推定される。

4.1.2 全母集団に対するパラメータの推定

(1) 計算条件

前述の故障確率モデルのパラメータ C、E、F、 λ 、a および A を入力として 3 章において記した運転経験データと故障経験データに基づいて尤度を数値計算することにより、最大尤度を与えるようなパラメータ（最確値）をサーベイした。3.3 で述べたように、予め故障分類毎にパラメータに制限を加えてサーベイを実施した。弁の使用データと故障データの存在する範囲において故障確率も故障率も非負でなければならないことから、20 年以下の使用時間、2000 日以下の開閉周期、300 回以下の開閉動作数において、故障確率および故障率が非負の値を取ることを計算条件として課した。パラメータ C および λ は非負の値でなければならないが、これ以外のパラメータは負の値を取りうる。

また、各パラメータに対する確率密度が尤度に比例すると想定して、パラメータの不確かさ分布（確率密度分布あるいは累積確率分布）を尤度を用いて計算した。このとき、6 種類のパラメータは互いに独立ではないが、ここでは評価を簡便にするために独立とみなした。さらに、確率密度を計算すべきパラメータ以外のパラメータは最確値に固定した。

(2) 計算結果

最大尤度を与えるパラメータを計算すると、 $C=3.2e-3$ 、 $E=-1.1e-5$ 、 $F=-1.5e-3$ 、 $\lambda=1.1e-6$ 、 $a=-3.1e-12$ 、 $A=0.0$ という値が得られる（この時の尤度は $\exp(-236)$ である）。明らかに、4.1.1(4) において推定した結果と大きく異なるため、パラメータ E、F について非負の条件を課して計算し直した。その結果、 $C=3.4e-5$ 、 $F=3.0e-3$ 、 $\lambda=1.5e-6$ 、 $a=-6.0e-12$ 、 $E=A=0.0$ という値が得られた（この時の尤度は $\exp(-247)$ である）。そして、このときのパラメータの不確かさ分布の 95% 値は、 $C=1.5e-4$ 、 $E=3.5e-7$ 、 $F=6.9e-3$ 、 $\lambda=1.9e-6$ 、 $a=1.8e-12$ 、 $A=6.2e-11$ である。

(3) 感度計算結果

表 3.3-1 において「開閉動作無関係型」に分類された事象のうち、故障原因に「制御回路の結線エラー」、「弁軸周囲におけるナトリウムの凍結」と記された事象の合計 5 件の事象については、弁の故障から除外すべきという考え方もあるため、ここでは感度解析的にこれらを除外した上で同様の方法と計算条件に従ってパラメータを定量化した。

パラメータを計算し直したところ、 $C=3.8e-5$ 、 $F=3.2e-3$ 、 $\lambda=1.3e-6$ 、 $a=-6.7e-12$ 、 $E=A=0.0$ という値が得られた（この時の尤度は $\exp(-209)$ である）。また、不確かさ分布の 95% 値は、 $C=1.5e-4$ 、 $E=3.5e-7$ 、 $F=7.0e-3$ 、 $\lambda=1.6e-6$ 、 $a=8.0e-13$ 、 $A=2.2e-11$ である。

4.1.3 所属施設別母集団に対する相関性の分析

以上は、弁について母集団全体の傾向を調べたものである。その傾向によると初期故障が観察される。しかし、試験ループの初期故障は、試運転を十分に行う原子炉施設の初期故障とは異なる可能性がある。このため、弁の所属施設を原子炉に絞った場合と試験施設に絞った場合の2種類の場合について、開閉失敗確率と使用時間、待機時間および開閉動作数の相関性を調べた。

(1) 原子炉に属する弁の分析

使用時間について故障率の点推定値は不確かさ幅の範囲内で変動しているものの、全体として見れば、故障率は使用時間によらずほぼ一定であるといえる（図 4.1-7を参照）。開閉周期については、不確かさが大きく、増加あるいは減少の傾向は認められない（図 4.1-8を参照）。開閉動作数については、30回以下に限定するとほぼ一定であるといえるが、これを超えると減少傾向を呈している（図 4.1-9を参照）。減少の割合は緩やかである。

開閉動作数の多い弁は開閉周期が短いので、開閉周期の短い弁の故障率が長い弁の故障率より小さければ、様々な開閉周期の混在する弁の集合の故障確率は、その結果として開閉動作数の増加につれて減少することになる。図 4.1-9と同一の統計母集団を用いて故障率を開閉周期について整理し、図 4.1-10にまとめた。その結果、少なくとも開閉周期の短い弁の故障率は長い弁のそれより小さくないことが確かめられた。

以上の分析より、パラメータ a は 0 近傍、 A は 0 または 0 近傍の正の数、 E は 0 または負の数、 F は 0 近傍であろうと推定できる。

(2) 試験施設に属する弁の分析

使用時間について故障率の点推定値は不確かさ幅の範囲内で変動しているものの、全体として見れば、故障率は使用時間によらずほぼ一定であるといえる（図 4.1-11を参照）。開閉周期については、関係する事象が 1 件しか無いので相関性の分析はできない。故障確率と開閉動作数との相関性については、開閉動作数に対して減少傾向にある（図 4.1-12を参照）といえ、特に 10 回以下における減少割合が著しい。この領域における故障確率の減少傾向は小分類②の初期故障の除去過程の傾向を反映したものである（図 4.1-13を参照）。また、4.1.2(3)で述べたように、一部の故障事象を感度解析的に分析対象から除外した場合の故障率と使用時間の相関性を図 4.1-14にまとめた。故障事象が減少したことに伴って故障率の不確かさが増大し、点推定値の使用時間に対する減少傾向が増した。

以上の分析より、パラメータ a は負の数、 A は 0 または 0 近傍の正の数、 E は 0 近傍、 F は正の数であろうと推定できる。

4.1.4 所属施設別母集団に対するパラメータの推定

4.1.2 で述べた方法と計算条件に従って所属施設を原子炉と試験施設に分けて弁の開閉失敗確率を表すパラメータの推定を行った。

(1) 原子炉に属する弁の分析

4.1.3 における推定内容に適合させるために、パラメータ a 、 F について非負の条件を課して、この制限内において最大尤度を与えるパラメータを計算した。その結果、 $\lambda = 3.7e-6$ 、 $C=E=F=a=A=0.0$ という値が得られた（この時の尤度は $\exp(-83)$ である）。そして、このときのパラメータの不確かさ分布の 95% 値は、 $C=1.4e-3$ 、 $E=1.3e-5$ 、 $F=1.8e-2$ 、 $\lambda=5.5e-6$ 、 $a=2.3e-11$ 、 $A=1.3e-10$ である。

(2) 試験施設に属する弁の分析

4.1.3 における推定内容に適合させるために、パラメータ E 、 F について非負の条件を課して、この制限内において最大尤度を与えるパラメータを計算した。その結果、 $C=3.8e-5$ 、 $F=3.3e-3$ 、 $\lambda=8.4e-7$ 、 $a=4.7e-12$ 、 $E=A=0.0$ という値が得られた（この時の尤度は $\exp(-153)$ である）。そして、このときのパラメータの不確かさ分布の 95% 値は、 $C=1.5e-4$ 、 $E=3.6e-7$ 、 $F=7.4e-3$ 、 $\lambda=1.11e-6$ 、 $a=3.0e-12$ 、 $A=1.04e-10$ である。

表 3.3-1 において「開閉動作無関係型」に分類された事象のうち、故障原因に「制御回路の結線エラー」、「弁軸周囲におけるナトリウムの凍結」と記された事象の合計 5 件の事象については、弁の故障から除外すべきという考え方もあるため、ここでは感度解析的にこれらを除外した上で同様の方法と計算条件に従ってパラメータを定量化した。

その結果、 $C=4.5e-5$ 、 $F=3.3e-3$ 、 $\lambda=4.5e-7$ 、 $a=2.5e-12$ 、 $E=A=0.0$ という値が得られた（この時の尤度は $\exp(-111)$ である）。また、不確かさ分布の 95% 値は、 $C=1.6e-4$ 、 $E=3.7e-7$ 、 $F=7.6e-3$ 、 $\lambda=7.0e-7$ 、 $a=2.3e-12$ 、 $A=1.04e-10$ である。

4.1.5 パラメータ推定結果に対する考察

定量化したパラメータは2章で述べたように時間に関係するものとそれ以外に分けられる。時間に関係するパラメータ λ 、 a 、 A については故障率($\lambda + at + A T : t$ は使用時間、 T は待機時間)として表し、それ以外のパラメータ C 、 E 、 F については故障確率 P_d ($P_d = 1 - \exp(-C - En - F/n) : n$ は開閉動作数)として表した。これら2つの指標を用いて、定量化したパラメータの妥当性と原子炉施設で使われる弁の信頼性評価への適用性を検討した。

(1) 故障確率 P_d

まず、後者の故障確率 P_d について、全母集団から決定したパラメータに基づく場合、原子炉の弁から決定した場合、試験施設から決定した場合の比較を最確値と上限値について行った結果を図4.1-15に示す。ここで、上限値とは3種類のパラメータについて独立に一つずつ95%値を適用(残りの二つのパラメータには最確値を適用)して求めた3種類の P_d の中の最大値を言う。この図より次のことが言える。

- ①全母集団に基づく P_d と試験施設に基づく P_d は、最確値、上限値ともに(すなわち、不確かさ幅を考慮しても)開閉動作数とともに単調に減少しているといえる。
- ②原子炉に基づく P_d の最確値は0であり、上限値は全母集団や試験施設に基づく P_d の上限値より大きい。つまり、試験施設に基づく P_d や全母集団に基づく P_d は不確かさを考慮しても原子炉に基づく P_d の不確かさ幅の範囲内に存在する。
- ③原子炉の弁の信頼性評価に全母集団から求めた P_d を適用しても差し支えない。

(2) 故障率

故障率について、全母集団から決定したパラメータに基づく場合、原子炉の弁から決定した場合、試験施設から決定した場合の比較を最確値と上限値について行った結果を図4.1-16及び図4.1-17に示す。これらの図より次のことが言える。なお、上限値の意味は図4.1-15の場合と同じである。

- ①待機時間1ヶ月(原子炉における安全上重要な機器のサーベイランス試験周期に相当)の場合、試験施設に基づく故障率は、最確値が使用時間とともに減少していくのに対して上限値は逆に増加している。待機時間5年(本分析データの適用限界:最長待機時間に相当)の場合、上限値は使用時間によらずほぼ一定である。このように不確かさを考慮すると、故障率は使用時間に対して減少するとともに増加するとともに断言できない。
 - ②原子炉の弁に基づく故障率は、最確値が使用時間によらず一定値をとり、上限値もほとんど一定とみなしてよい。
 - ③全母集団に基づく故障率は、使用時間とともに最確値も上限値も減少している。しかし、故障率の施設間(原子炉と試験施設の間)におけるばらつき幅を考慮すると全母集団の故障率の使用時間に対する減少は有意でないと判断できる。
- ①～③をまとめると、故障率については、使用時間及び待機時間(開閉周期)に対して一定値をとると考えて良い。

つぎに、施設間における故障率値のばらつきを分析する。もともと、原子炉と試験施設を区別して定量化したパラメータを比較した理由は、一般的に試験施設の設備に対する品質要求よりも原子炉の方が厳しいため、故障確率を定量化するとその傾向が現れるはずであるとの考えがあったからである。図 4.1-16 及び図 4.1-17 を観察するかぎり、原子炉の弁と試験施設の弁では故障率の傾向に違いが認められたものの、前者の方が後者より故障確率が高い。そして、全母集団から求められた故障率は試験施設の故障率に類似しており、それを原子炉で使われる弁の信頼性評価に適用することは、故障率の過小評価に至る恐れがあると考えられる。

原子炉施設の弁が試験施設の弁よりも故障率が高いかどうかを確かめるために、図 4.1-18 に故障率データを整理した。図 4.1-18 は故障の全てが時間で整理できるとした場合の故障率を計算した結果である。原子炉には常陽、EBR-II、FFTF の 3 種類存在する。しかし、不確かさ幅を考慮して故障率が試験施設より大きいと言えるのは EBR-II だけであり、常陽と FFTF の弁は、試験施設における弁より故障率が大きいとは断言できない。ゆえに、全母集団から求められた故障確率を原子炉で使われる弁の信頼性評価に適用しても良いと結論づけられる。

(3) まとめ

原子炉における弁の信頼性評価を行うための故障確率パラメータとしては、CORDS に登録された原子炉と試験施設の両者における弁の使用経験を基に決定するのがよい。分析の結果、故障率については、使用時間 t 及び待機時間 T に関するパラメータ a 及び A をゼロとするのが良い。故障事例の中で分析対象から除外した方が良いかもしれないものについては、含めた場合と除外した場合の故障確率の差異は他の要因に起因する不確かさ幅と比較して無視できるほど小さいため、ここでは含めて取り扱うこととする。故障率の施設間におけるばらつきを十分考慮してパラメータ λ の不確かさ幅を決定すべきである。

このような条件の下で推奨すべきパラメータを求めると、最確値は $C=3.6e-5$ 、 $F=3.1e-3$ 、 $\lambda=1.2e-6$ (/h)、 $E=a=A=0$ である。そして、不確かさ幅の上限値としての 95% 値は、パラメータ E 、 a 及び A をゼロとする。残りのパラメータ C 、 F 及び λ については、不確かさ分布として対数正規分布を仮定し、分析で明らかになった統計上の不確かさ幅や施設間におけるばらつき幅を考慮してエラーファクター（95% 値の 5% 値に対する比の平方根）を一律 15 に設定する^{**}。

※：エラーファクターを 15 とした理由は次のとおりである。対数正規分布の特性上、95% 値の期待値に対する比を最大（約 3.8）にするエラーファクターが約 15 である。運転・故障経験から得られた故障率の最確値を対数正規分布の期待値として取り扱うのが通例である。統計分析で得られた 95% 値の最確値に対する比は 3.8 程度は存在する。施設間のばらつきについても故障率の最大を与える施設の値と全母集団から得られる値の比は 3.8 を超える。このため、95% 値の期待値に対する比を最大にするエラーファクターとして約 15 を設定した。

4.2 推奨パラメータに基づく開閉失敗確率の試算

4.2.1 一定周期で開閉を行っている弁に対する開閉失敗確率

推奨パラメータを用いて、定期的にか開閉が行われる弁に対する開閉失敗確率を評価した。最確値をプロットした図 4.2-1 及び 95%値をプロットした図 4.2-2 を見ると、概ね 1 年以上使用した弁の開閉失敗確率が故障率一定モデルから得られる曲線で良く表されている様子がわかる。逆に使用時間 1 年未満の領域において、使用時間とともに開閉失敗確率が減少するのは、初期故障が除去されていくからである。使用時間ではなく、開閉周期に着目すると、図の (b) より開閉周期が半年より長ければ、使用時間に依らず初期故障の傾向は認められない。これは、図の (a) における横軸の開閉周期が約 180 日のプロットに相当する。最確値は使用時間によって変化していても、不確かさの上限値である 95%値が使用時間によらず一定となる領域は、開閉周期が 60 日～100 日のあたりである。したがって、不確かさを考慮した上で故障率一定モデルで良く表されると言えるのは、丸め値として開閉周期にして概ね 100 日を超える領域である。それ以外の領域では本研究から得られる推奨パラメータに基づいて評価するのが良い。

なお、図 4.2-1 及び図 4.2-2 のプロット曲線が左右で切れているのは次の理由による。図の (a) において、2 週間後、2 ヶ月後、1 年後の曲線の右端が切れているのは、開閉周期の最大値が使用時間を超えられないためである。図の (b) において、全ての曲線の左端が切れているのも同じ理由による。また、図の (a) において、10 年後と 20 年後の曲線の左端が切れているのは、ダイヤモンド数の上限を運転データと故障データが存在する範囲内すなわち 300 回に制限したために、これより開閉周期を短くするとこの制限値を超えるからである。

4.2.2 開閉周期を一時的に変更する場合の開閉失敗確率

一定の周期で開閉動作を行う弁であっても、弁設置後のある時点でプラント全体のリスク管理等の目的から、開閉周期を一時的に変更する場合がある。このとき、信頼度上の目標値と照らして十分低く抑えられているかを確認するためには、周期を変更変更したことによって、開閉失敗確率が幾らになるかを把握したい。あるいは、周期の変更による開閉失敗確率の相対的な変化量を把握したいかもしれない。これらをできる限り簡便に評価する方法を検討することを目的として、開閉周期を一時的に変更する場合の開閉失敗確率を計算した。

通常周期としては 1 ヶ月と 1 年の 2 種類を想定した。1 ヶ月という数値は原子炉の安全系で一般的に採用されている値である。1 年という数値は原子力発電所の一般的な定期検査の周期として想定した。

(1) 計画的開閉動作における確率

一時的に開閉周期を変更した後で、予定した開閉時刻において開閉に失敗する確率を計算した。最確値による計算結果を図 4.2-3 に 95% 値による計算結果を図 4.2-4 に示す。

最確値、95% 値ともに、事前の開閉周期の長さに依らず、変更後の開閉周期が 1 ヶ月より短い領域では、初期故障の寄与が無視できないため、使用時間にも依っては開閉周期を短縮することによる開閉失敗確率の減少は故障率一定モデルで表現したよりも緩やかである。変更後の開閉周期が 1 ヶ月～約 100 日においては、最確値は若干故障率一定モデルとの差異を示すものの 95% 値については故障率一定モデルとの良い一致が見られる。変更後の開閉周期が 100 日を超えると最確値、95% 値ともに故障率一定モデルとの良い一致を示している。

(2) 偶発的作動要求に対する失敗確率

一時的に開閉周期を変更した直後から予定した次の開閉時刻までの間において偶発的に発生する開閉要求に対して作動失敗する確率を計算した。最確値による計算結果を図 4.2-5 に 95% 値による計算結果を図 4.2-6 に示す。

定性的な傾向は上述の計画的な開閉動作に対する失敗確率と同じである。事前の開閉周期の長さに依らず、変更後の開閉周期が概ね 100 日より短い領域では、使用時間にも依るが、初期故障の寄与が無視できないため、開閉周期を短縮することによる開閉失敗確率の減少は故障率一定モデルで表現したよりも緩やかである。逆に開閉周期を概ね 100 日より延伸する側においては、使用時間によらず、故障率一定モデルで良く表される。

(3) まとめ

開閉動作要求が計画的であるか偶発的であるかによらず、開閉周期を一時的に短縮あるいは延伸することによる開閉失敗確率の変化を定量的に評価するためには、変更前の周期に依らず変更後の開閉周期が概ね 100 日を超える場合には故障率一定モデルを用いても良いといえる。一方、変更後の開閉周期が約 100 日以下では、故障率一定モデルでは初期故障を適切な評価が行えないことから、本研究で推奨したパラメータ値による評価を行う必要がある。

4.2.3 20年当たりの開閉失敗確率

弁が安全系に属しており、偶発的に発生する開閉動作要求時の作動信頼性を向上させるには、サーベイランス試験の実施により故障の検出を高めるのが良い。しかし、このように偶発的要求に対する信頼性が目標を満足しているならば、その範囲においては事後保全に掛かるコストを低減する観点から、弁を長期間使用した場合にトータルで故障に遭遇する回数を低減することは重要である。

本研究では使用期間は最大20年が適用範囲であるので、20年間使用した場合に弁1台が1回以上開閉失敗を経験する確率を、推奨パラメータを基に計算して図4.2-7に最確値評価と95%値評価を示した。

図を見る限り、最確値も95%値もともに開閉周期によらずほぼ一定値である。その理由は、「開閉動作依存型」故障は初期故障として発生確率の中に現れているものの、長期間の弁使用において、故障確率に占める「開閉動作依存型」故障の発生割合が無視できるほど小さい、すなわち20年当たりの故障頻度は開閉周期に依らず一定であることを意味している。したがって、開閉周期をうまく選ぶことによって弁を長期間使用した場合のトータルの故障遭遇回数を低減することはできないといえる。

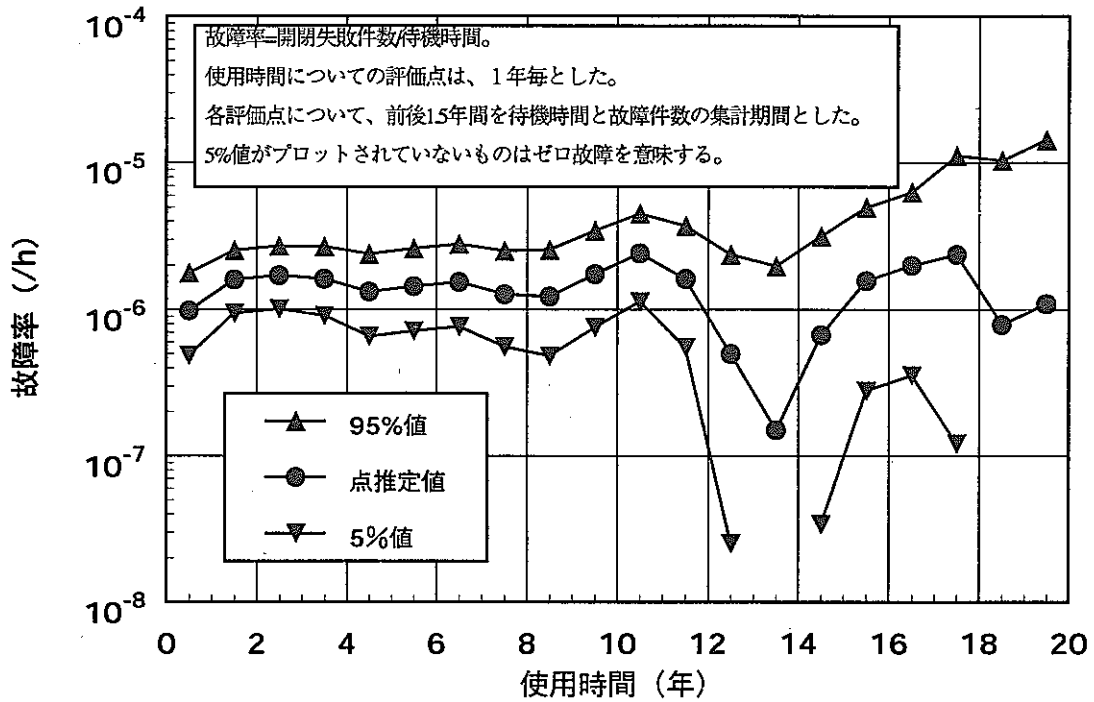


図4.1-1 全機器&全故障を母集団とした
開閉失敗故障率と使用時間との相関

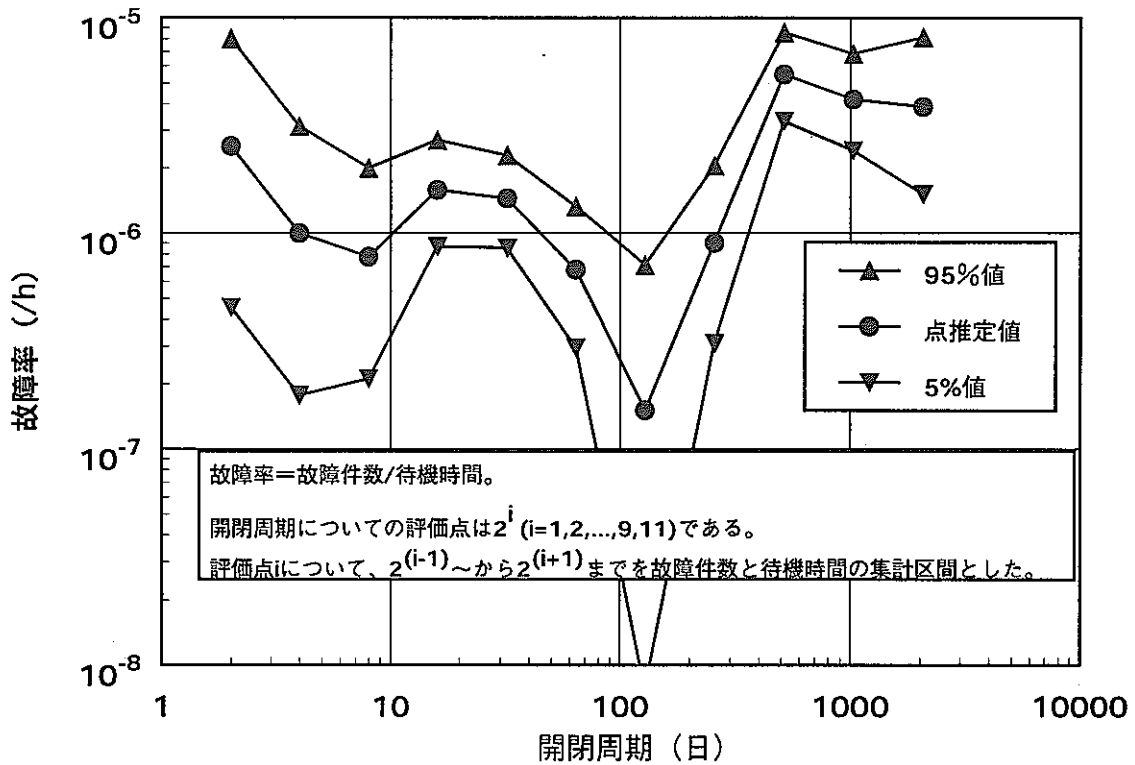


図4.1-2 全機器&全故障を母集団とした
開閉失敗故障率と開閉周期との相関

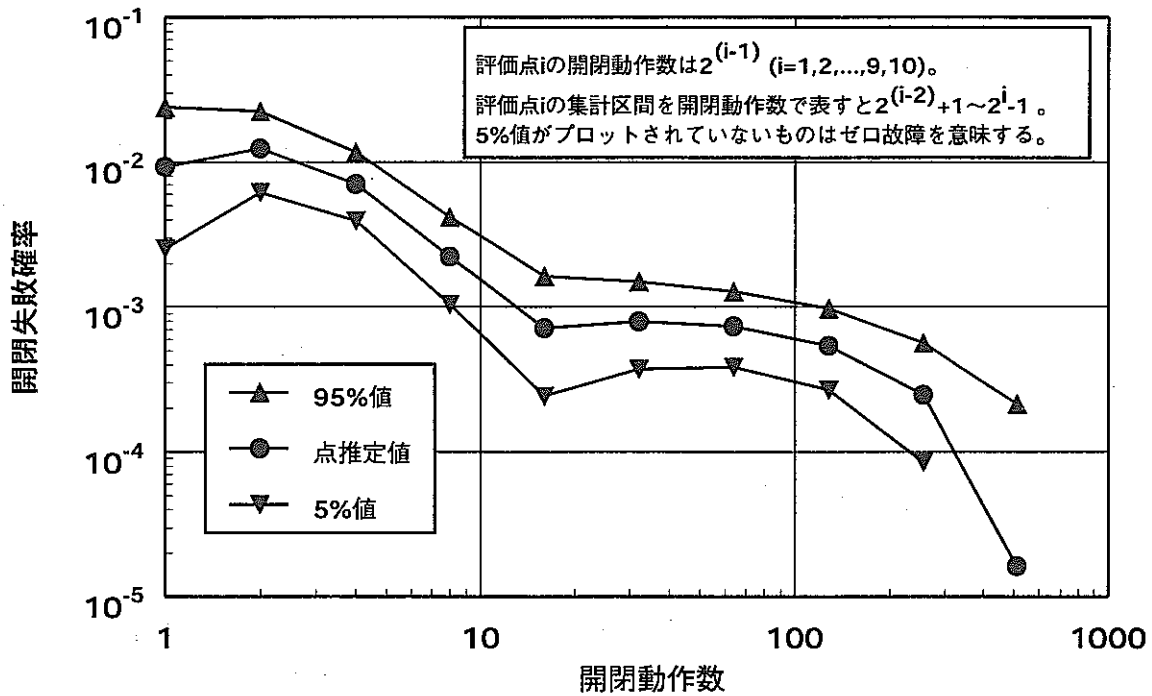


図4.1-3 全機器&全故障を母集団とした
開閉失敗確率と開閉動作数との相関

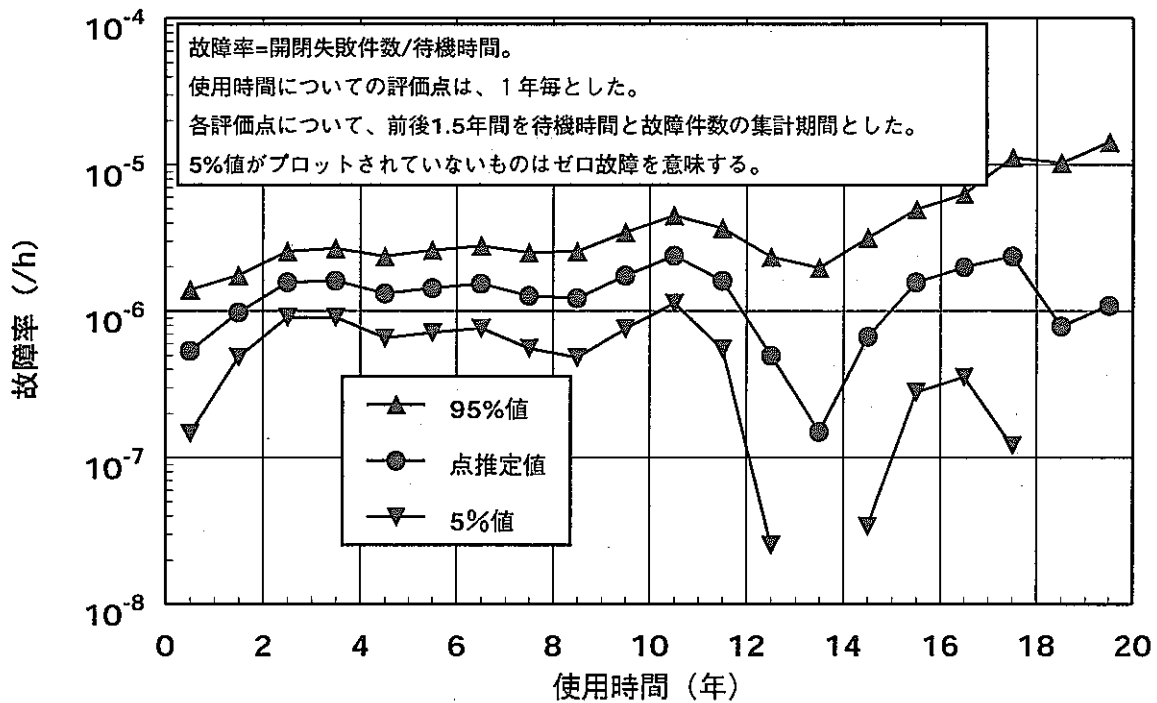


図4.1-4 全機器&小分類③④⑤⑥⑦を母集団とした
開閉失敗故障率と使用時間との相関

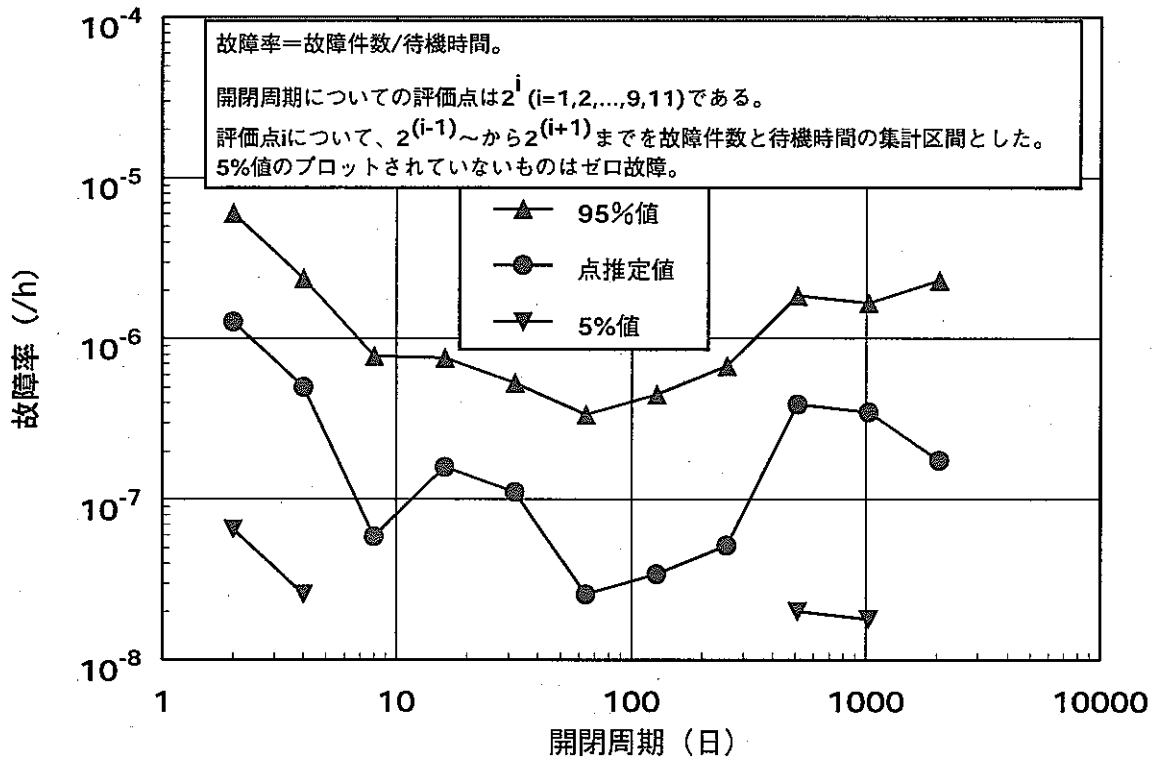


図4.1-5 全機器&小分類⑦を母集団とした開閉失敗故障率と開閉周期との相関

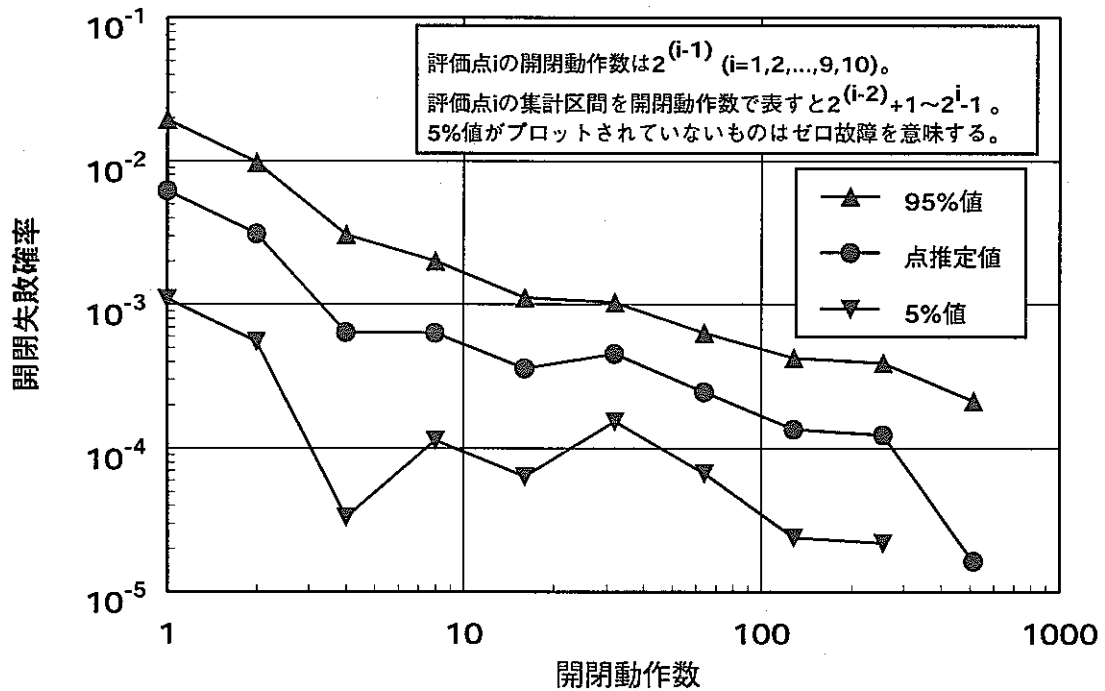


図4.1-6 全機器&小分類①②④⑦を母集団とした開閉失敗確率と開閉動作数との相関

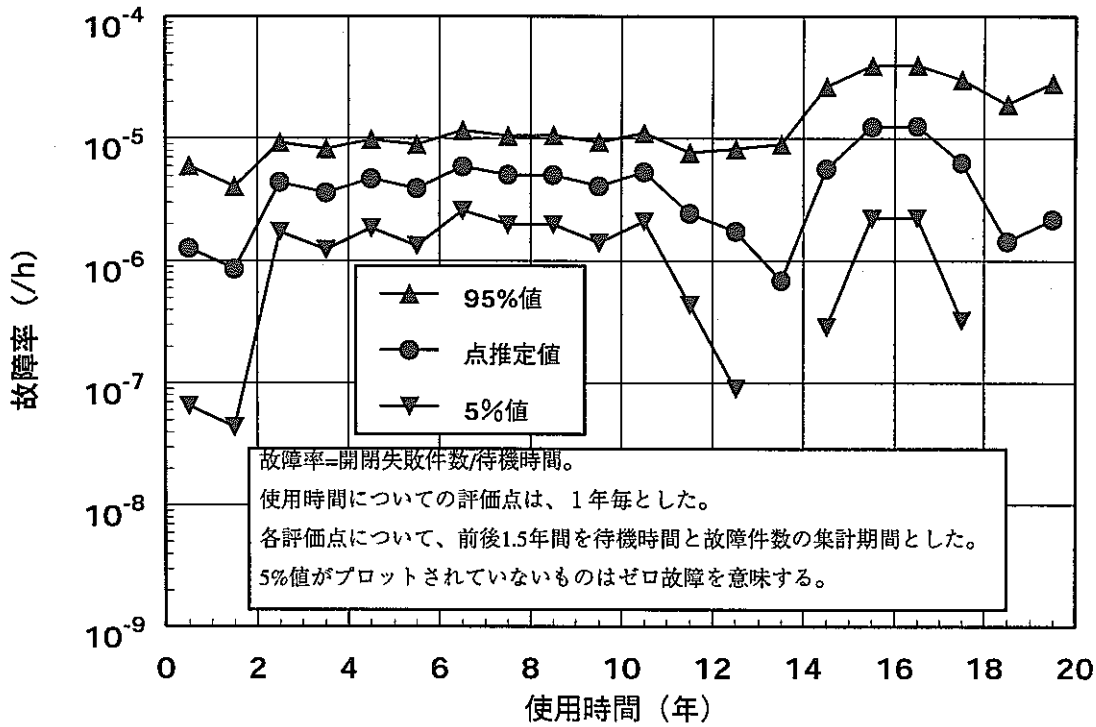


図4.1-7 原子炉に属する弁&小分類③④⑦を母集団とした開閉失敗故障率と使用時間との相関

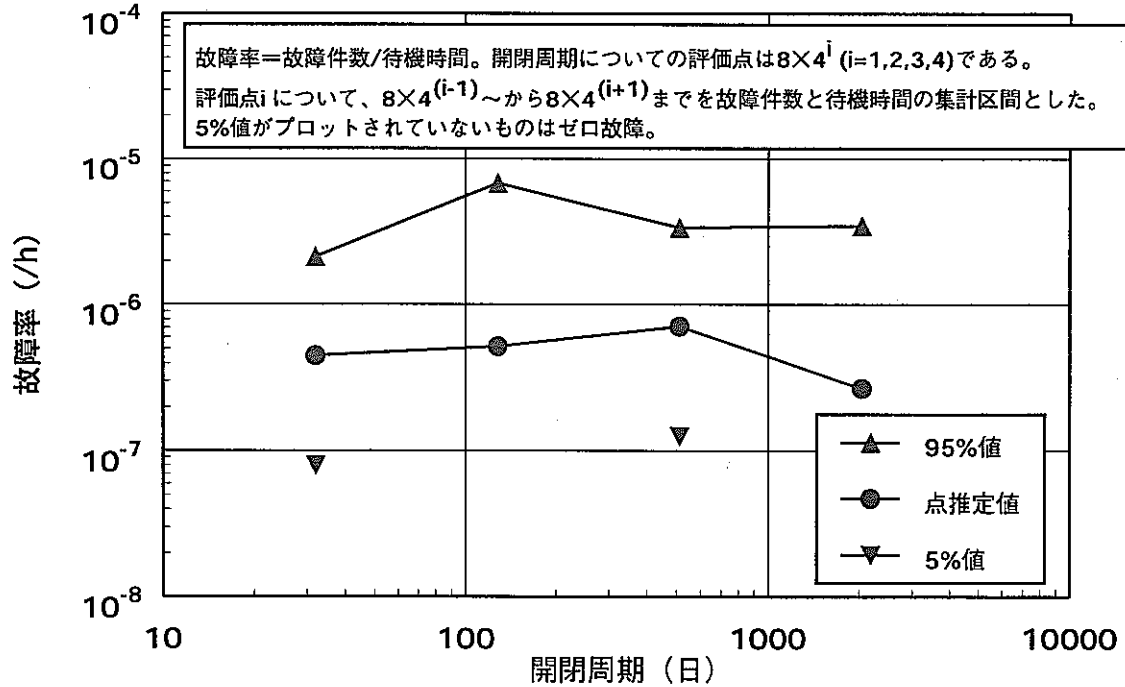


図4.1-8 原子炉に属する弁&小分類⑦を母集団とした開閉失敗故障率と開閉周期との相関

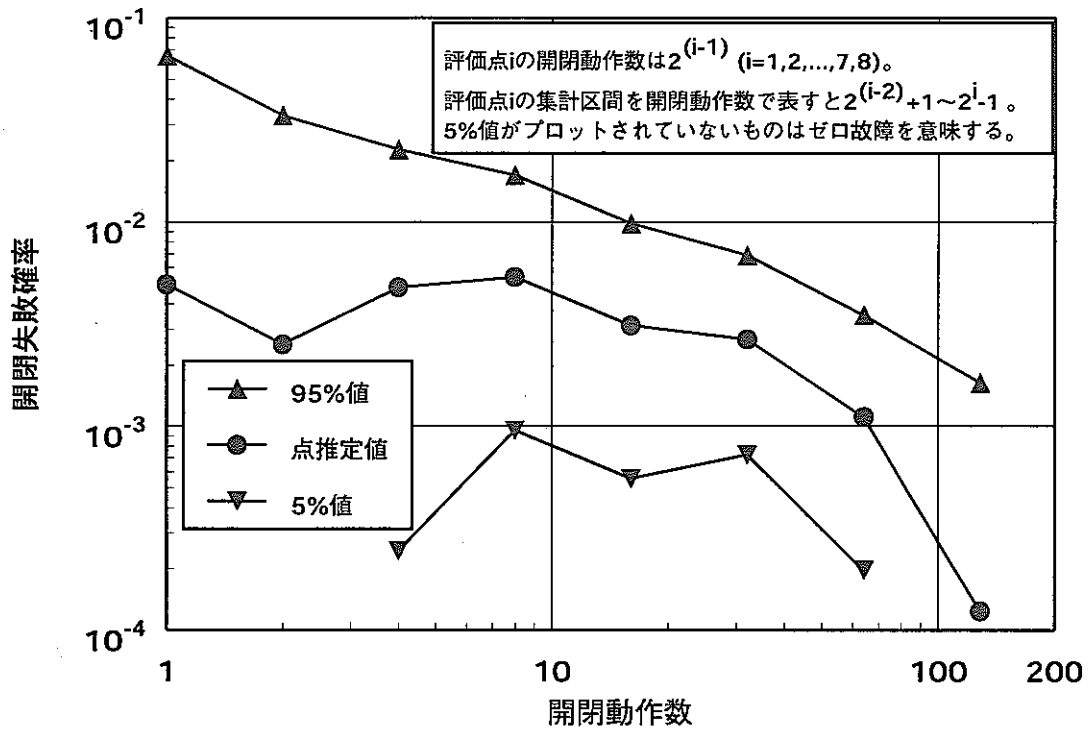


図4.1-9 原子炉に属する弁&小分類①④⑦を母集団とした開閉失敗確率と開閉動作数との相関

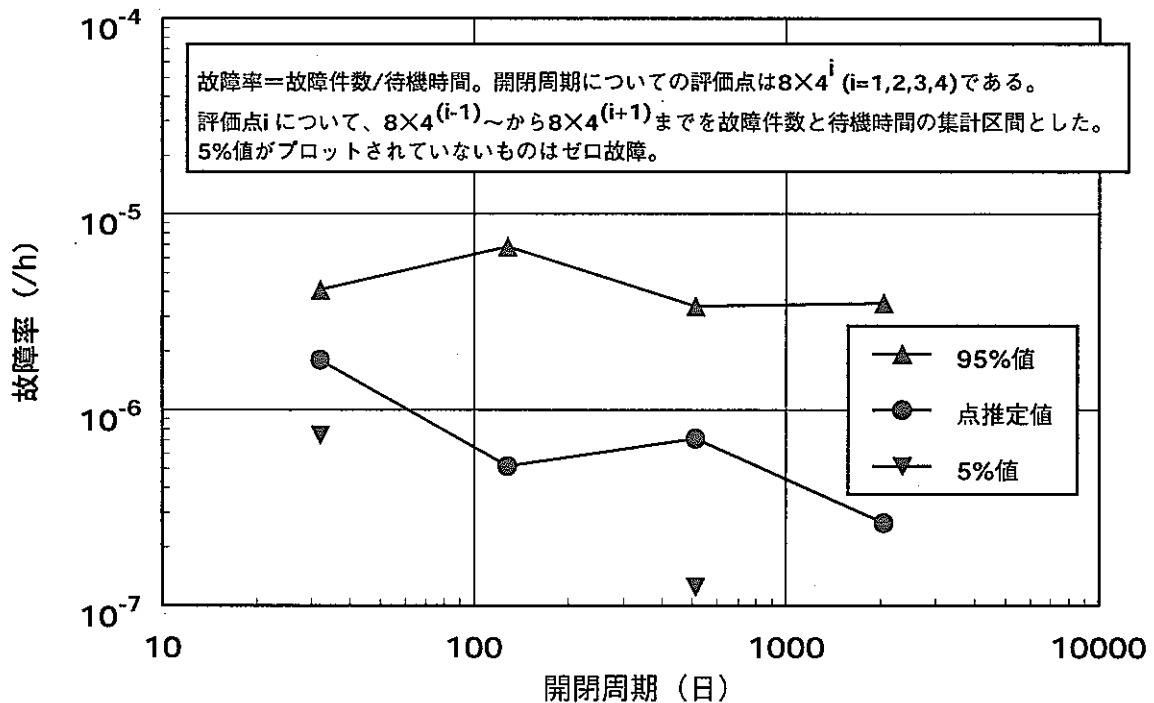


図4.1-10 原子炉に属する弁&小分類①④⑦を母集団とした開閉失敗故障率と開閉周期との相関

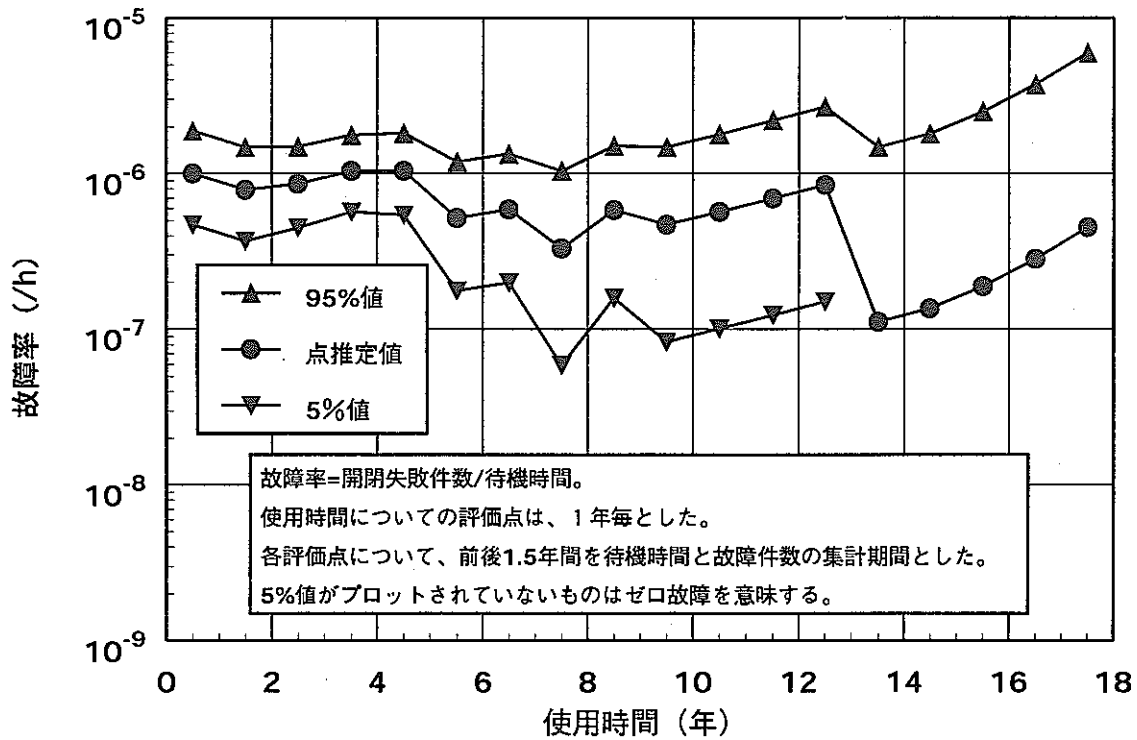


図4.1-11 試験施設に属する弁&小分類④⑤⑥⑦を母集団とした開閉失敗故障率と使用時間との相関

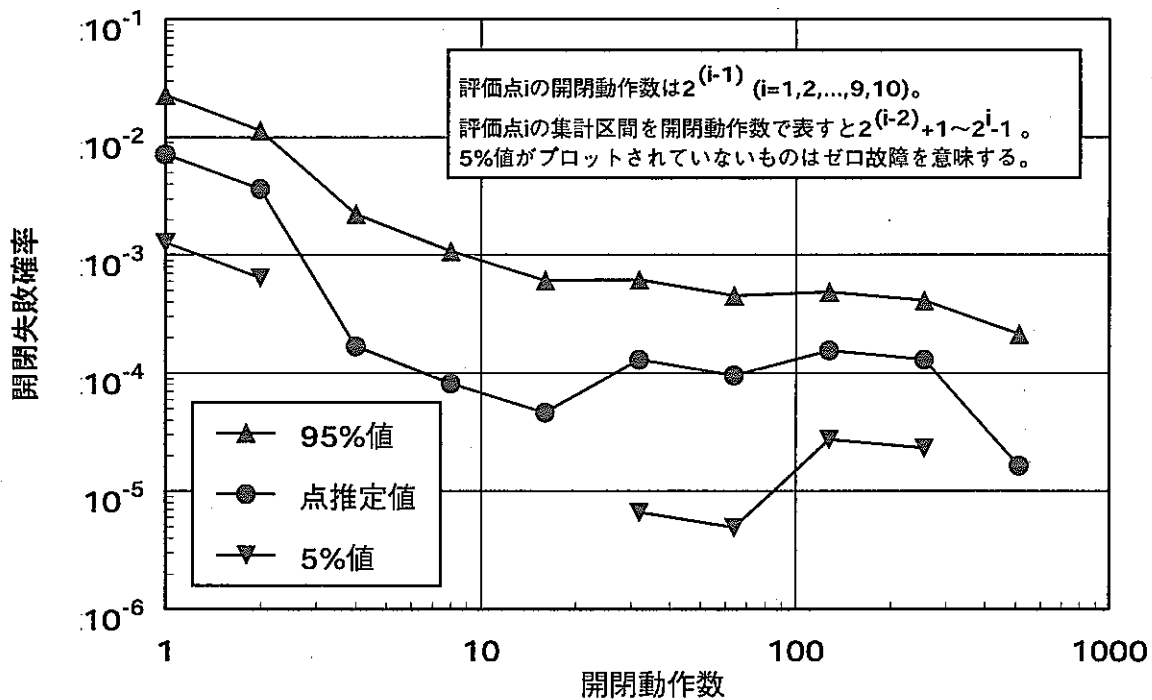


図4.1-12 試験施設に属する弁&小分類①②④⑦を母集団とした開閉失敗確率と開閉動作数との相関

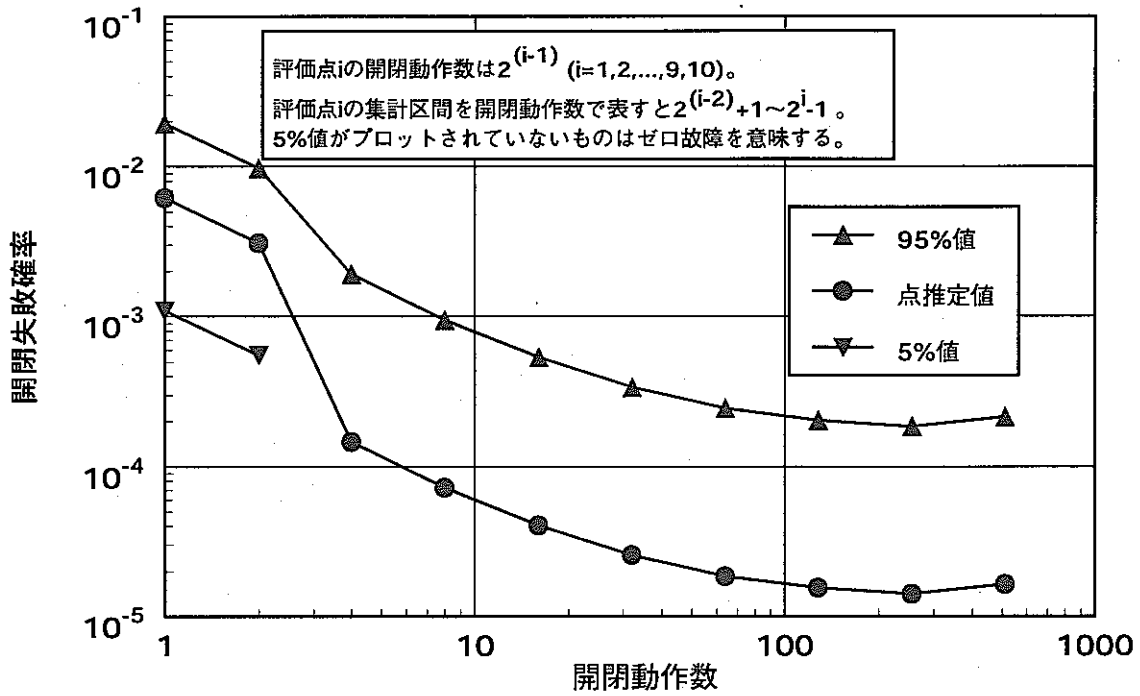


図4.1-13 試験施設に属する弁&小分類②を母集団とした開閉失敗確率と開閉動作数との相関

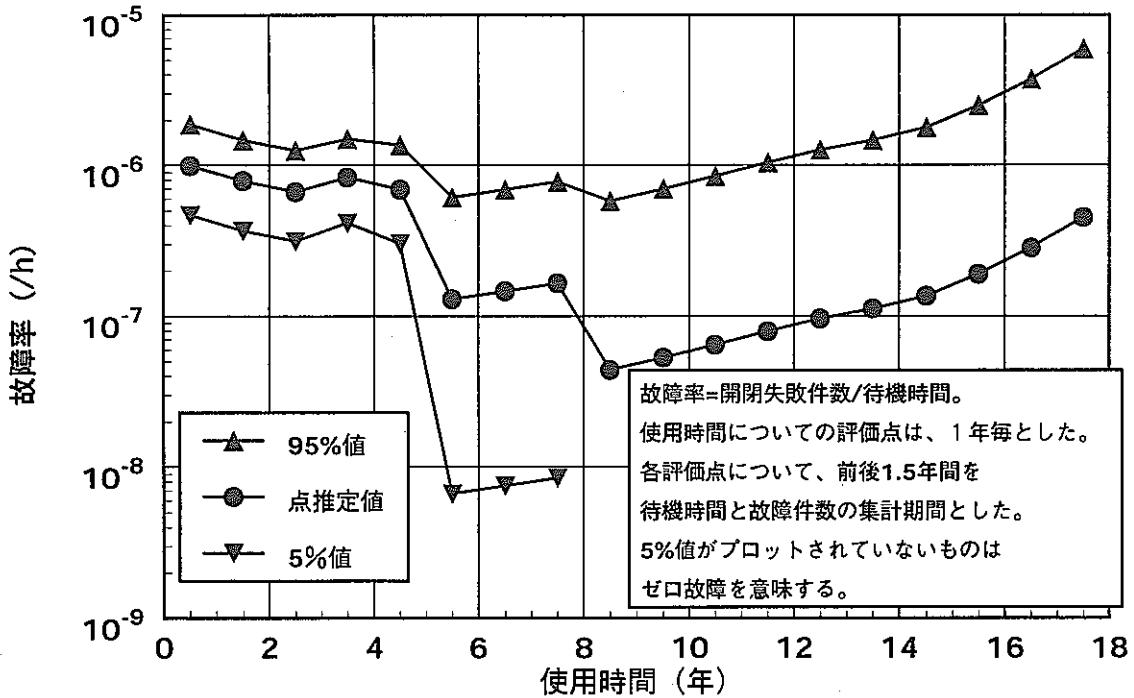


図4.1-14 試験施設に属する弁&小分類④⑤⑥⑦を母集団とした開閉失敗故障率と使用時間との相関 (一部の故障事象を除外)

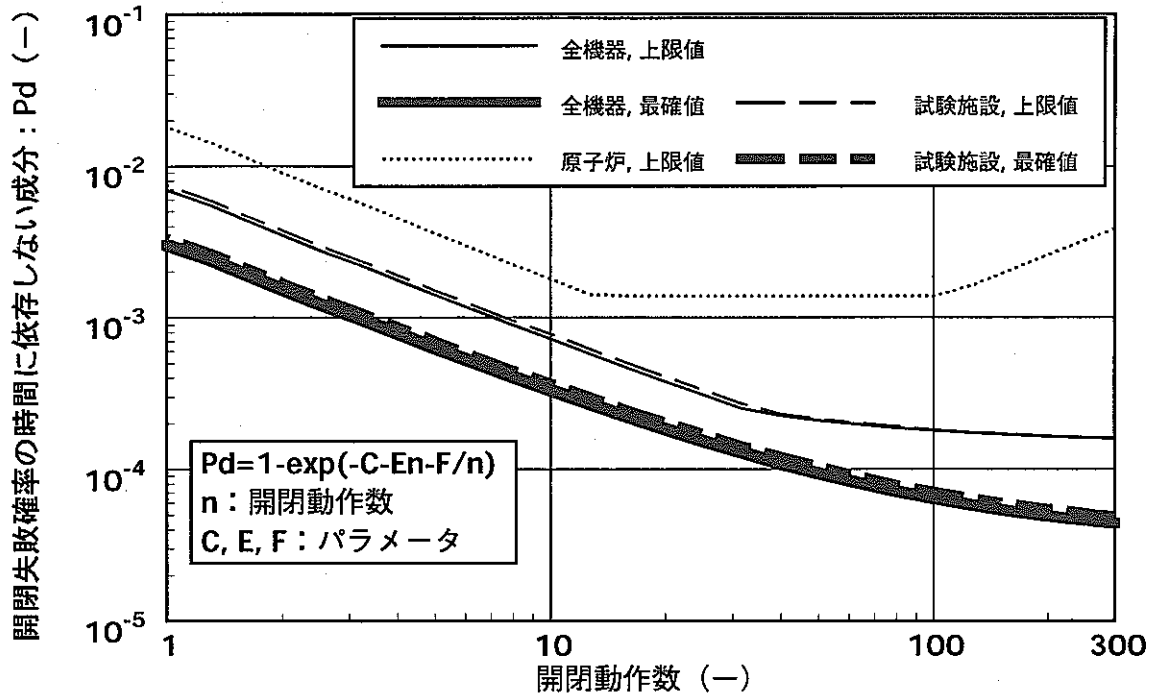


図4.1-15 開閉失敗確率の時間に依存しない成分の統計母集団間における比較

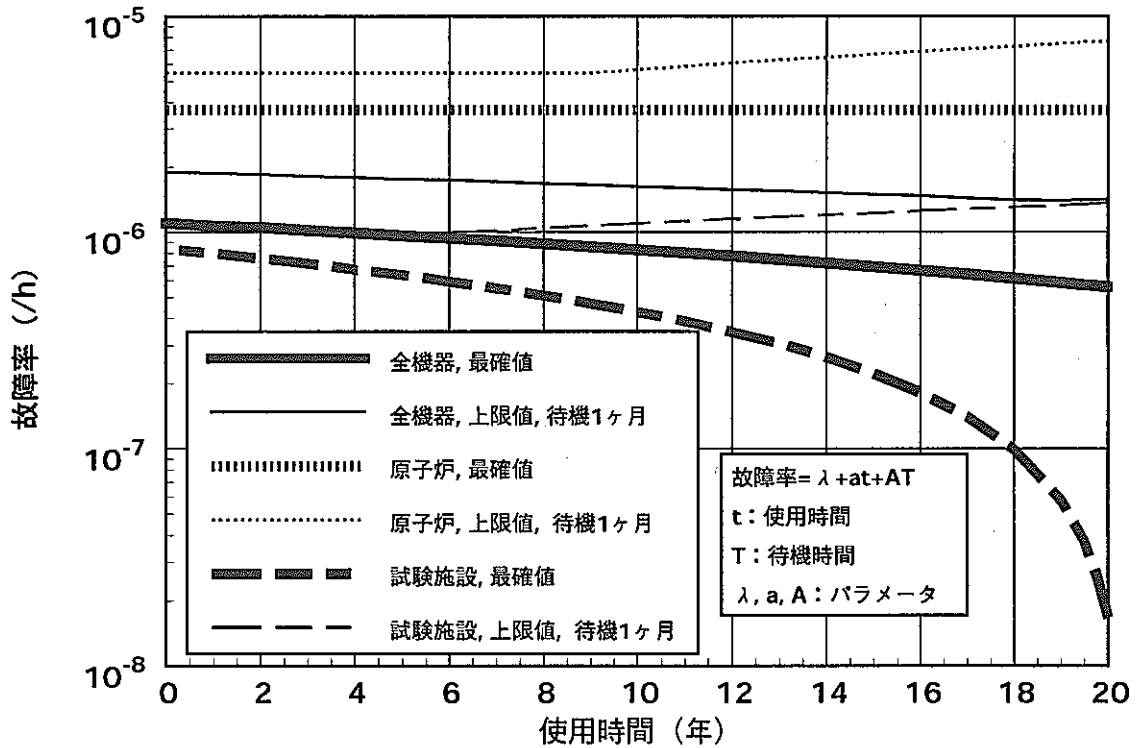


図4.1-16 開閉失敗故障率の統計母集団間における比較 (待機時間1ヶ月)

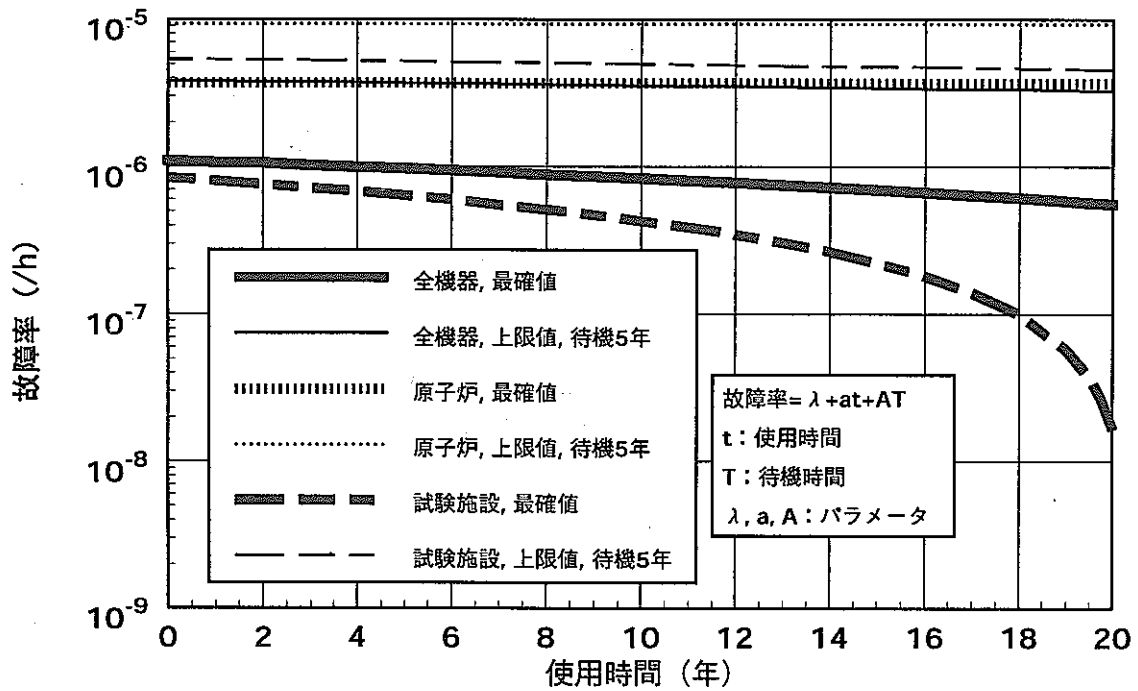


図4.1-17 開閉失敗故障率の統計母集団間における比較 (待機時間5年)

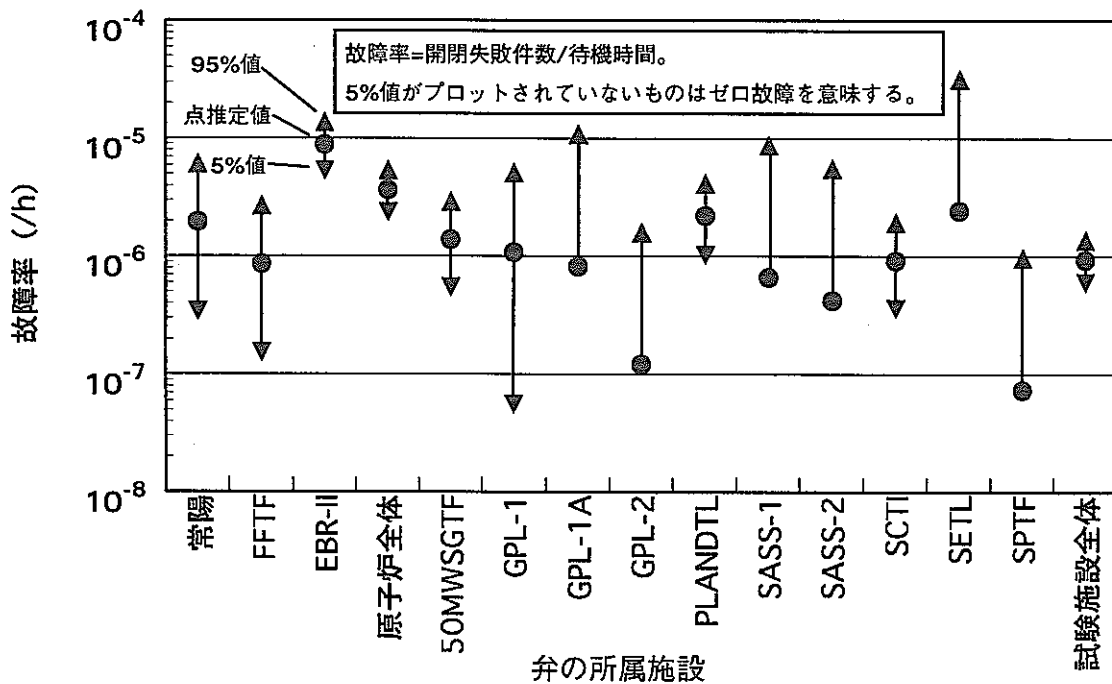
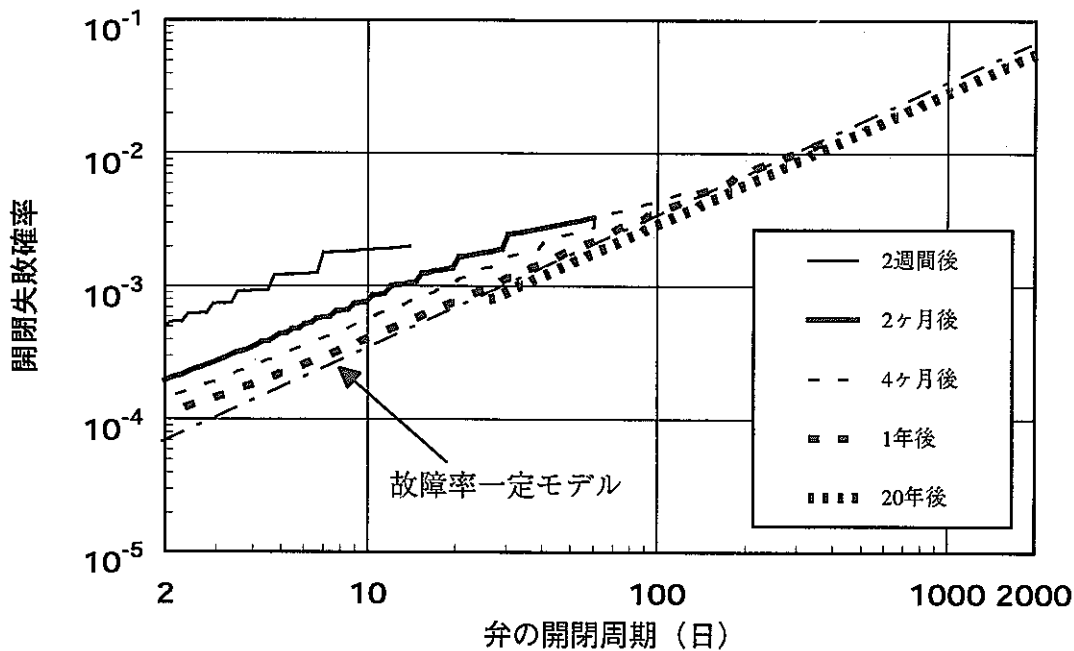
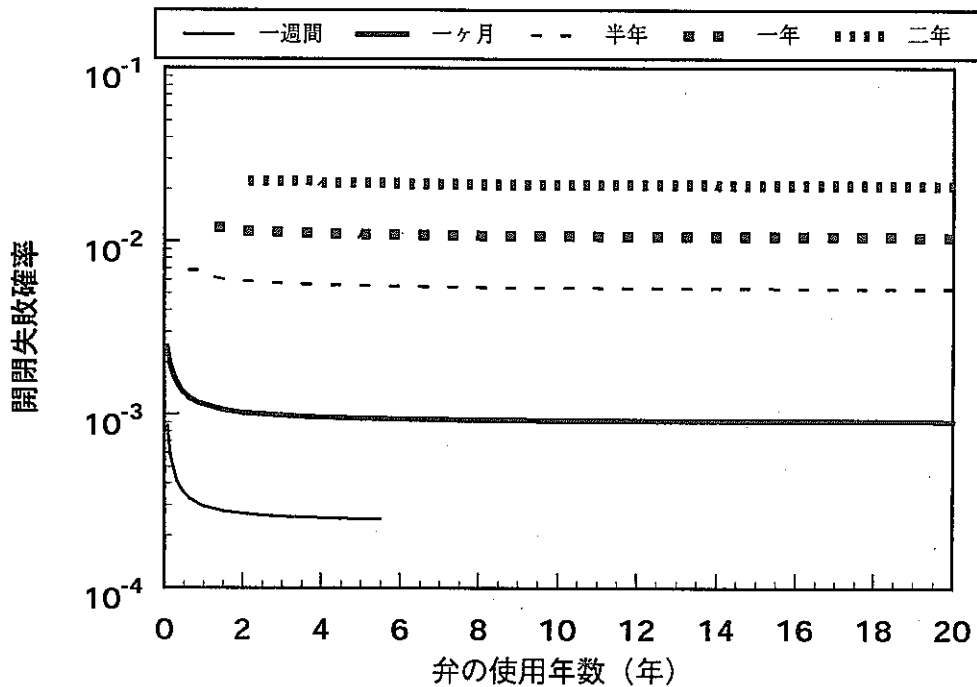


図4.1-18 故障の全てが時間で整理できるとした場合の故障率の比較



(a)使用時間別開閉周期依存性



(b)開閉周期別経年変化

図4.2-1 一定の周期で開閉を行っているナトリウム系空気作動弁の開閉失敗確率 (最確値評価)

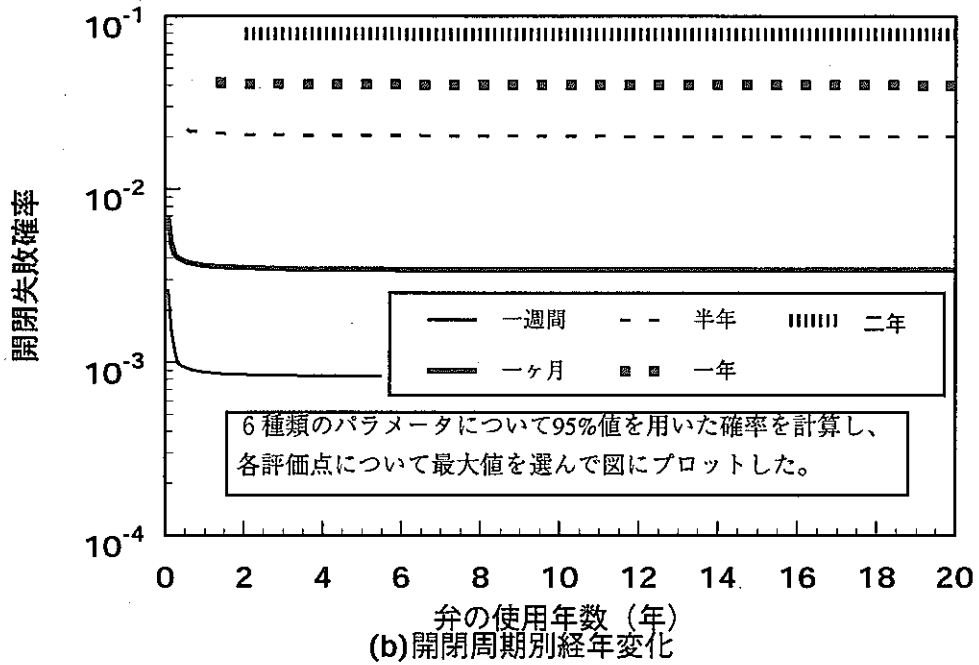
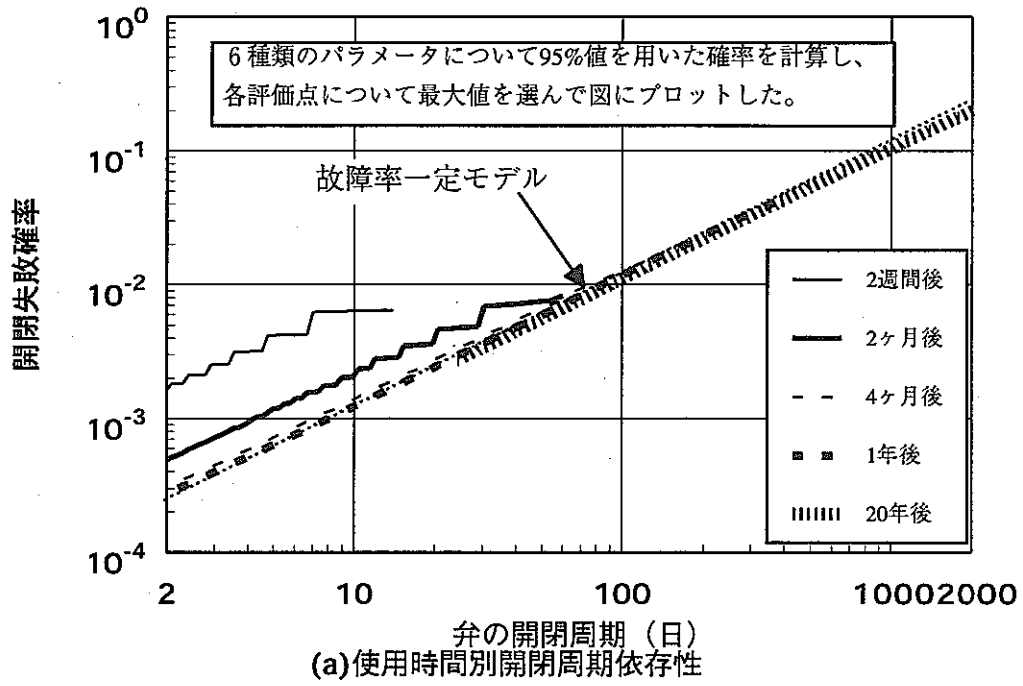
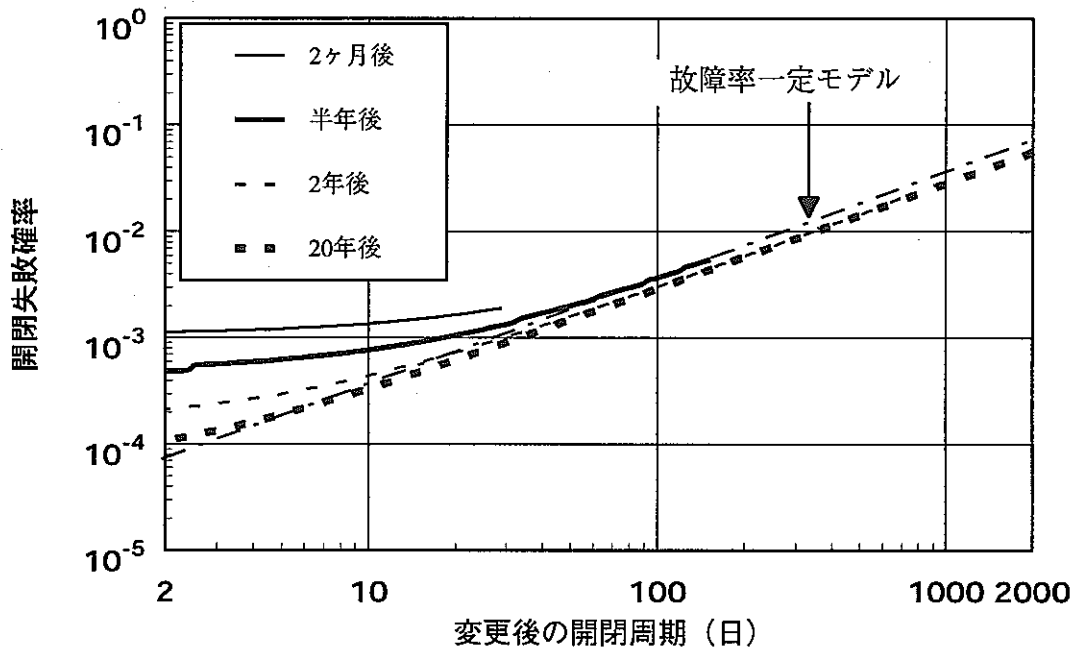
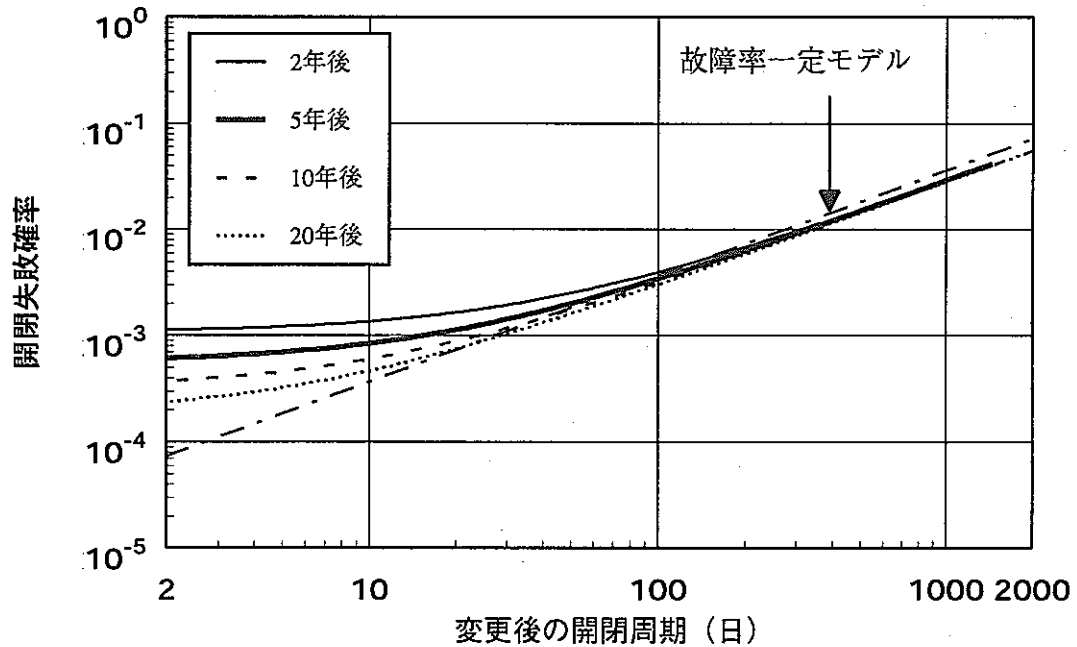


図4.2-2 一定の周期で開閉を行っているナトリウム系空気作動弁の開閉失敗確率 (95%値評価)



(a)変更前の開閉周期=1ヶ月



(b)変更前の開閉周期=1年

図4.2-3 一定周期で開閉を行っており
途中で開閉周期を変更する場合のナトリウム系
空気作動弁の開閉失敗確率（最確値評価）

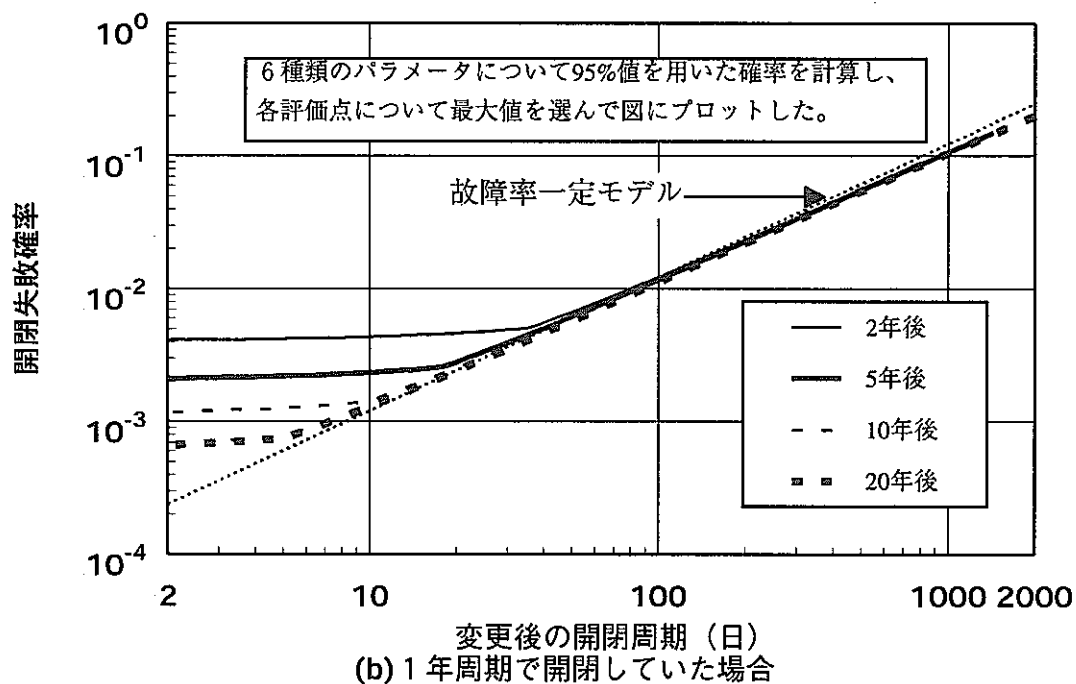
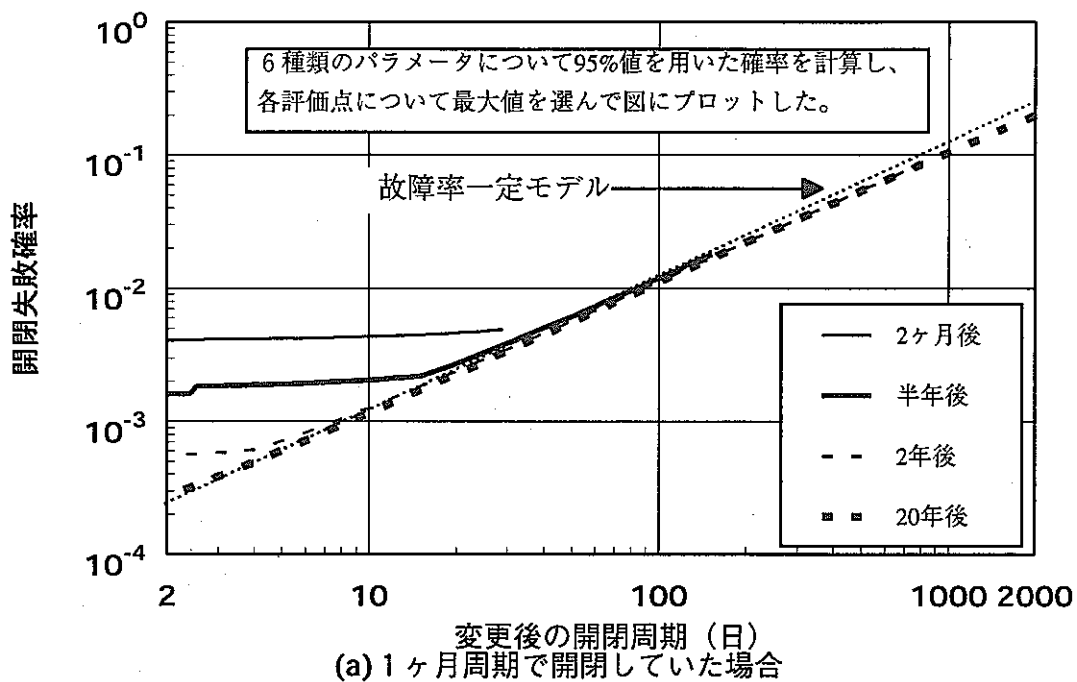
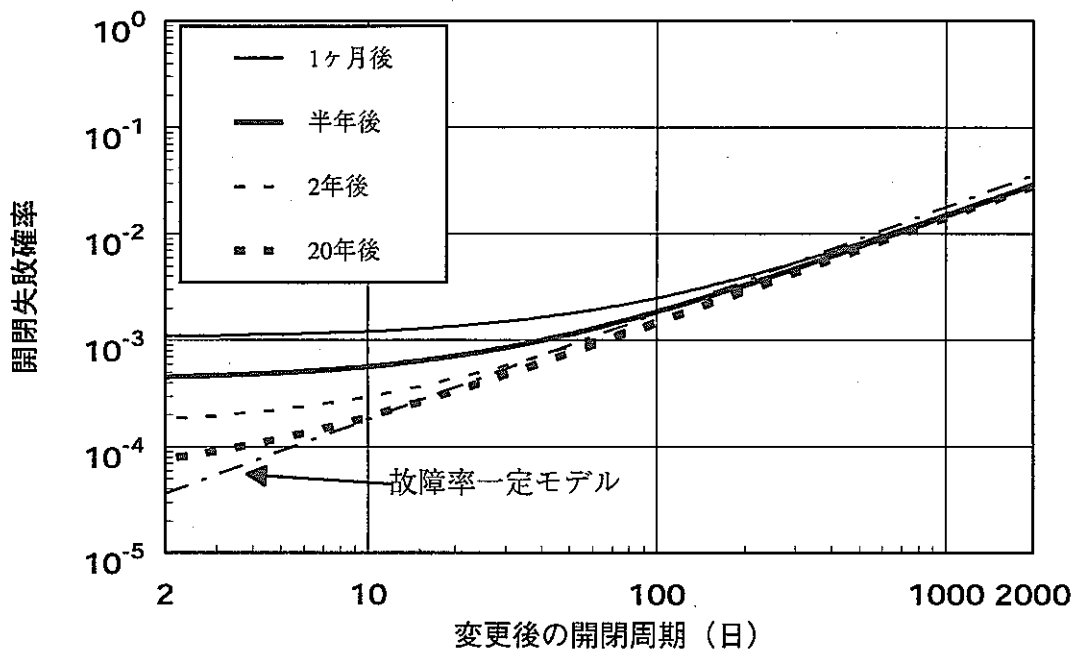
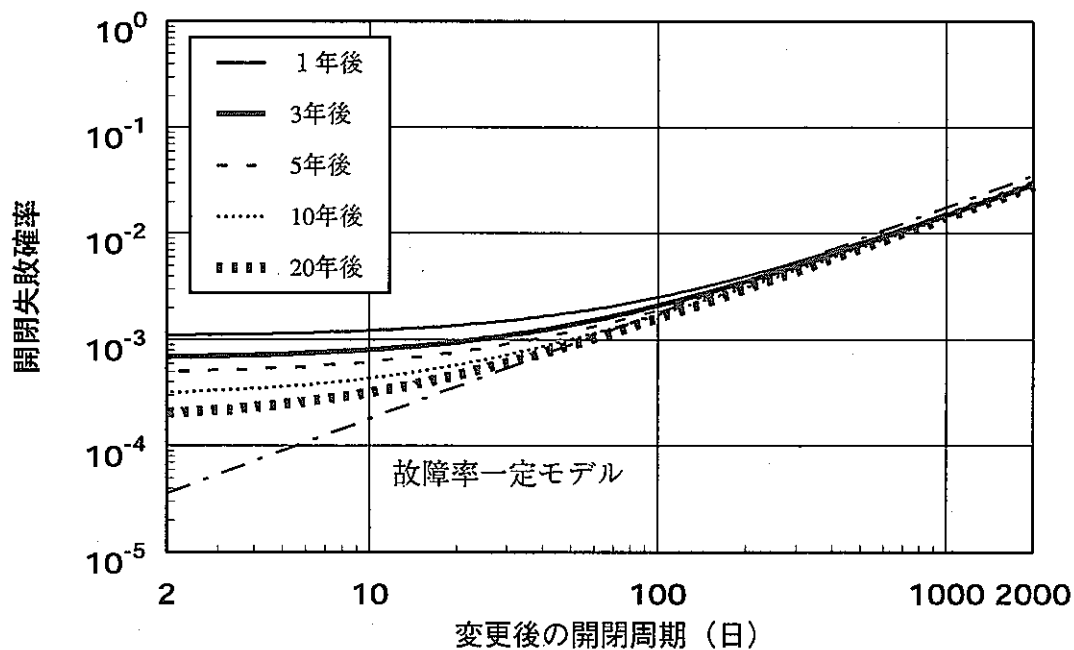


図4.2-4 一定周期で開閉を行っており
途中で開閉周期を変更する場合のナトリウム系
空気作動弁の開閉失敗確率 (95%値評価)



(a)変更前の開閉周期=1ヶ月



(b)変更前の開閉周期=1年

図4.2-5 一定周期で開閉を行っており途中で開閉周期を変更する場合のナトリウム系空気作動弁の偶発ディマンドに対する開閉失敗確率 (最確値評価)

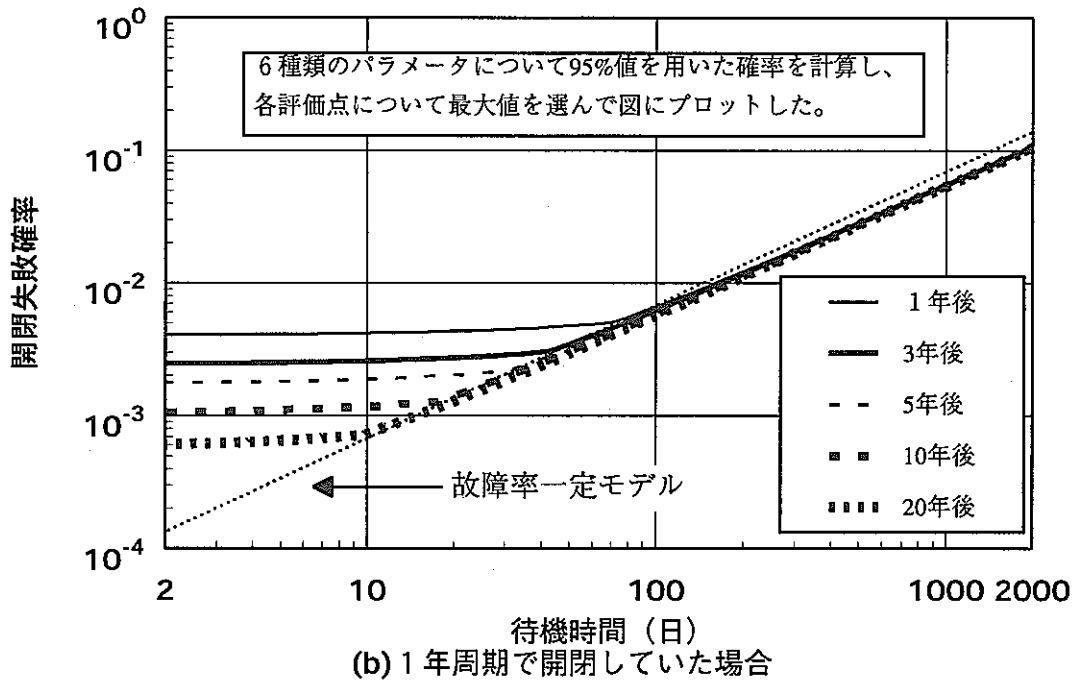
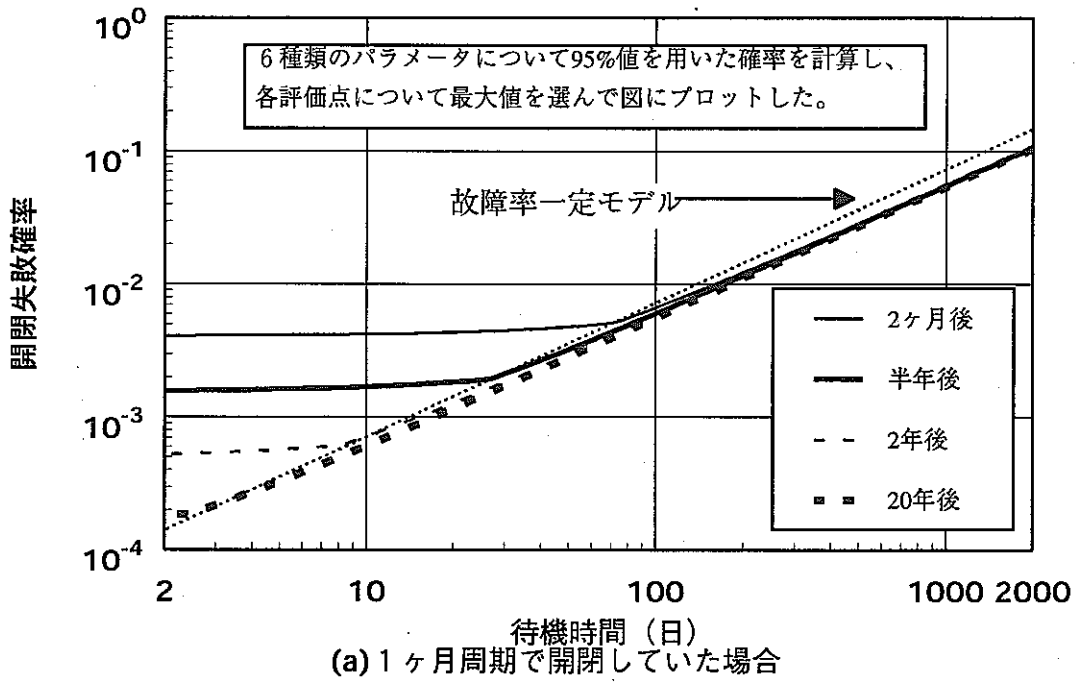


図4.2-6 一定周期で開閉を行っており
途中で開閉周期を変更する場合のナトリウム系
空気作動弁の開閉失敗確率 (95%値評価)

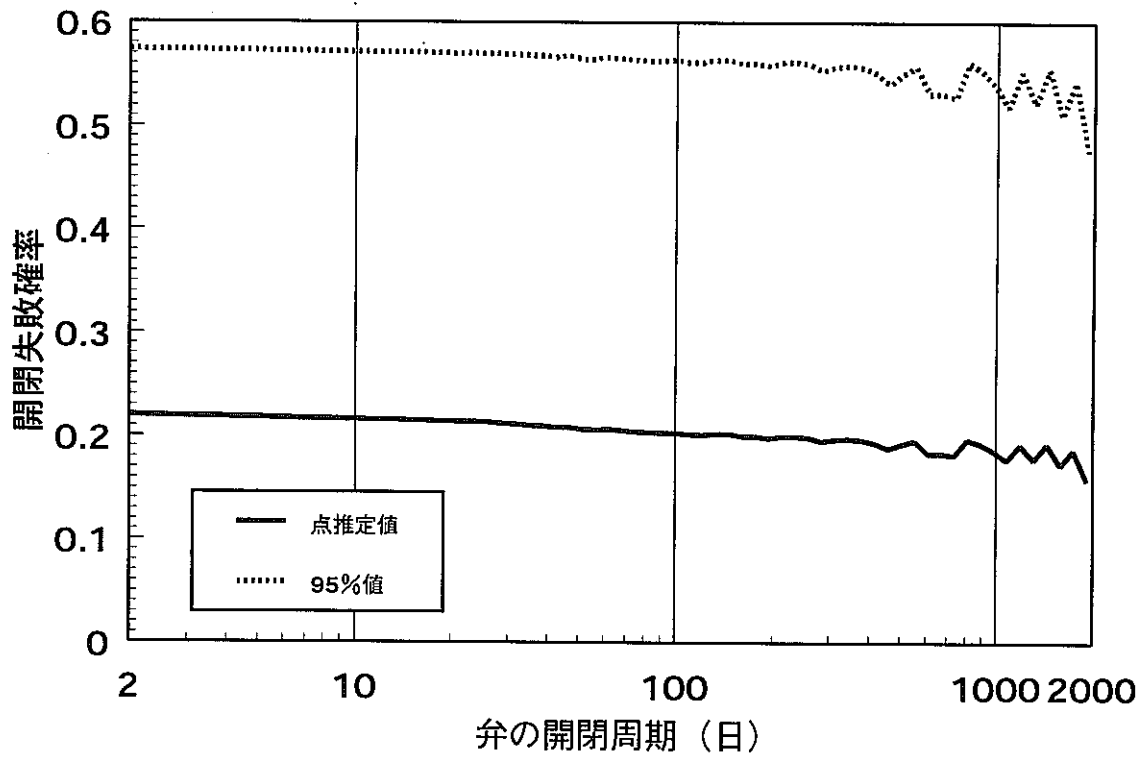


図4.2-7 20年間使用して1回以上開閉失敗を経験する確率

5. 結言

ナトリウム系空気作動弁を対象として、ダイヤモンド数 n 、使用時間 t 、そして直前の開閉動作からの待機時間 T についての開閉失敗確率の傾向を、実機における同弁の運転および故障経験データに基づいて統計的に分析した。以下が主要な成果である。

- (1) 開閉失敗確率 P を $P=1-\exp(-C-E n-F/n-\lambda T-aT(t-T/2)-AT^2/2)$ とモデル化した。パラメータ C 、 E 、 F 、 λ 、 a および A は定数であり、 n の関数を加えた点が電動弁の分析に適用したモデル^[2]からの改良である。
- (2) CORDS データベースに基づきナトリウム空気作動弁の運転・故障経験を調査した結果、予防保全としてサーベイランス試験が行われていることがわかった。これは開閉失敗を検知するとともに事後保全と相まって故障原因を除去するために役立っている。開閉失敗確率が使用時間や開閉動作数とともに増加する経年劣化の兆候は認められず、むしろ初期故障の影響により初期の開閉失敗確率が高く、使用とともに減少する傾向が存在することが確かめられた。
- (3) ナトリウム系空気作動弁の開閉失敗事象の原因が各パラメータに関係するかどうかを分析することによって故障をいくつかのタイプに分類し、例えば待機時間に関する寿命加速要因が認められないタイプについては A をゼロとするなど、故障の内容から予めパラメータ値がゼロであると考えられるものを明らかにした。その上で最尤法の適用により、6種類のパラメータ C 、 E 、 F 、 λ 、 a および A を推定した。

最終的に、統計上の不確かさと施設間のばらつきを考慮して開閉動作数に伴う寿命劣化効果をゼロ ($E=0$)、使用時間に伴う寿命劣化効果をゼロ ($a=0$)、待機時間に伴う寿命劣化をゼロ ($A=0$) と評価した。開閉失敗確率は、残りの3つのパラメータで表現される。その最確値を $C=3.6 \times 10^5$ 、 $F=3.1 \times 10^3$ 、 $\lambda=1.2 \times 10^6/\text{h}$ と評価した。不確かさ分布については3パラメータともに対数正規分布を仮定し、エラーファクターとして約 15 を設定することを推奨する。なお、パラメータの適用範囲は n が 300 以下であり、 t が 20 年以下、 T が 2000 日以下である。

- (4) ナトリウム空気作動弁の開閉失敗確率の定量化に当たっては上述の3パラメータモデルが基本的に必要である。ただし、開閉周期が約 100 日を超えるような弁については、計画的な開閉動作要求か偶発的な要求かを問わず開閉失敗確率は故障率一定モデルで近似的に表現できる。

以上の成果を活用すると、ナトリウム系空気作動弁について予め定めた開閉失敗確率の目標値に対して適切なサーベイランス試験頻度を導くことができる。

6. 参考文献

- [1] Kenichi Kurisaka, "Study on Risk-Based Operation and Maintenance Using the Living PSA System," IAEA/TCM on "Advances in Safety Related Maintenance," Vienna, 15-19 September 1997.
- [2] 栗坂健一、「ナトリウム系電動弁の開閉失敗確率に関する統計的分析」、PNC TN9410 98-078、(1998)
- [3] William E. Vesely, "Risk Evaluations of Aging Phenomena: The Linear Aging Reliability Model and Its Extension," NUREG/CR-4769, EG&G Idaho, 1987.
- [4] 栗坂健一、「高速炉機器信頼性データベースの開発」、動燃技報、No.98 (1996)