

# 高速炉プラントの系統・機器信頼度評価

1991年10月

動力炉・核燃料開発事業団  
大洗工学センター

複製又はこの資料の入手については、下記にお問い合わせ下さい。

〒311-13 茨城県東茨城郡大洗町成田町4002

動力炉・核燃料開発事業団

大洗工学センター 技術開発部・技術管理室

Inquiries about copyright and reproduction should be addressed to: Technology  
Management Section O-arai Engineering Center Power Reactor and Nuclear Fuel  
Development Corporation 4002 Narita-machi, O-arai-machi, Higashi-Ibaraki,  
Ibaraki-Ken, 311-13

動力炉・核燃料開発事業団 (Power Reactor and Nuclear Fuel Development  
Corporation) 1991

## 高速炉プラントの系統・機器信頼度評価

中井良大\*，日置一雅\*，  
佐久間孝志\*，可児吉男\*

### 要　　旨

高速炉プラントの運転実績から得られる知見を大型炉の安全設計検討へ有効に反映することを目的としてCREDOデータベースを利用して系統・機器の信頼性の分析を実施した。高速炉用機器の信頼性の特徴を把握するために代表的な機器について安全系・非安全系の違い、設計パラメータによる信頼性依存性の特性を整理した。機器の信頼度評価を通じて各種使用条件に於ける信頼度を把握し、適切な安全設計方針を策定する上で、決定論的な要求条件、例えば、単一故障基準や試験効果等について確率論的検討を加え、それらを検討するための定量的基盤を整理した。また、崩壊熱除去系を対象として系統信頼度を定量化し、系統構成、成功基準等の影響度を分析した。強制循環除熱時のサポートシステムの重要性や自然循環除熱の効果等の系統の信頼度を決定する主な因子を整理し、崩壊熱除去系の合理的な信頼度向上方策に関する知見を得た。

---

\* 大洗工学センター技術開発部システム解析室

## Reliability Assessment on systems and components of FBR

Ryodai Nakai\*, Kazumasa Hioki\*,  
Takashi Sakuma\*, Yoshio Kani\*

### Abstract

Reliabilities of systems and components for LMFBR have been analyzed using CREDO (Centralized Reliability Data Organization) database in order to study the safety design of a large scale FBR based on the operational experiences of LMFBRs. In order to understand the characteristics of FBR-specific components, the comparison of reliabilities between safety and non-safety class components, and the trend of reliabilities on design parameter are evaluated. Based on the component reliability under various operating conditions, the deterministic requirements such as single failure criteria and testing effects are examined using a probabilistic technique. A quantitative technical basis is constructed to study an appropriate safety design policy. Reliabilities of a decay heat removal system are analyzed for various system configurations and success criteria. The dominant contributors to system unreliability such as the importance of support system under a forced circulation and the effectiveness of natural circulation are identified to develop the rational measures for reliability improvement.

---

\* Systems Analysis Section, Technology Development Division, Oarai Engineering Center

## 目次

|                           |    |
|---------------------------|----|
| 1. 序                      | 1  |
| 2. 条件別信頼性データの分析           | 6  |
| 2. 1 検出器                  | 6  |
| 2. 2 弁                    | 7  |
| 2. 3 故障検出方法の比較            | 8  |
| 2. 4 設計温度の依存性             | 8  |
| 2. 5 設計サイズの依存性            | 9  |
| 2. 6 まとめ                  | 10 |
| 3. 機器信頼度評価                | 25 |
| 3. 1 機器使用条件の信頼度に対する影響     | 25 |
| 3. 2 機器修復性の検討             | 30 |
| 3. 3 機器信頼度評価のまとめ          | 32 |
| 4. 系統信頼度評価                | 42 |
| 4. 1 解析対象モデル              | 42 |
| 4. 2 崩壊熱除去系 1 ループあたりの故障確率 | 42 |
| 4. 3 崩壊熱除去系の機能喪失確率        | 43 |
| 4. 4 崩壊熱除去系の強化の影響         | 44 |
| 4. 5 サポートシステム系統数の影響       | 45 |
| 4. 6 まとめ                  | 46 |
| 5. 結言                     | 55 |
| 6. 参考文献                   | 57 |

## 1. 序

我が国の高速炉プラントの開発は、高速実験炉「常陽」が10年以上に亘る運転実績があり、高速増殖原型炉「もんじゅ」は建設が完了し試験段階を迎えており。また、大型炉に関する設計研究が進められている。大型炉プラントの開発に当たってはこれまでの運転経験等を踏まえて高い安全性を合理的に達成することが期待されている。一方、大型炉の安全性を判断する指針・基準類の策定に当たって高速炉プラントの運転経験に基づく知見を有効に活用していく必要がある。

安全設計の基本的な考え方は安全機能の重要度に応じてそれを果たす系統の信頼度レベルを確保することであり、そのためには安全設計方針で記載される決定論的な要求事項、即ち、多重性、独立性、多様性あるいは非常用電源への接続、試験可能性の要求等が課せられる。安全設計方針等の指針・基準類は決定論的評価の枠組みの中で適用されるものであるが、適切な安全設計方針の策定を目的として安全裕度の適正化と合理的安全基準の検討を行う上で確率論的手法を利用する必要がある。安全設計方針検討において確率論的手法の適用できる可能性がある範囲を図1.1に示す。各検討項目には検討課題を併せて示している。また、高速炉プラントの安全設計審査指針策定に当たって参考とされる発電用軽水型原子炉施設に関する安全設計審査指針の内、信頼性に関連する指針及び解説を表1.1及び表1.2に示す。指針9では高い信頼性を確保するために、多重性又は多様性及び独立性を備えた設計であること、单一故障の仮定に加え、非常用電源への接続を要求している。指針10では試験又は検査ができる求めている。このようなものを高速炉プラントについてどう設定していくか等の判断に際して、確率論的な検討により得られる材料を参考とし、定量的な基盤をもつことが重要である。またその解説によれば、重要度の高い安全機能を有する系統については「重要度分類指針」において定められていること、单一故障基準の適用に当たって動的／静的機器の種別、使命時間の長短、修復可能性について考慮することが言及されている。表1.3の重要度分類指針の抜粋には系統・機器は重要度に応じて3つに分類されることが示されている。各々分類されたクラスに対応して系統・機器がどのような信頼度をどういう手段で確保すべきかをこれまでの運転実績に基づく系統・機器の信頼度評価を通じて明らかにしていくことが重要である。

高速炉プラントの運転経験として大洗工学センターの高速実験炉「常陽」並びに米国の高速実験炉FFTF、EBR-IIの他、50MW蒸気発生器試験施設等の日米のナトリウム試験施設における運転保守データを収集整理し、高速炉用機器信頼性データベースCR

EDO (Centralized Reliability Data Organization)を開発・整備してきている。CREDOデータベースを活用することにより、日米の高速炉プラントの運転経験を反映した系統・機器の信頼性の評価が可能となる。

本研究はCREDOデータベースを利用してこれまでの高速炉プラントの運転実績の分析を行い、系統・機器の信頼性評価を通じて大型炉の適切な安全設計方針策定へ有効に反映していくための基礎データを提供することを目的とする。第2章では高速炉プラントの運転経験を分析して機器の信頼性実績の安全系・非安全系の比較、設計パラメータによる信頼度依存性の整理を行う。第3章では機器信頼度評価を通じて使用条件（試験間隔、使用寿命）の影響度、機器修復性の検討を実施し、機器信頼度に於ける重要な因子の影響度について分析する。また分析結果に基づき、単一故障基準や試験等の安全設計方針策定に関わる定量的な基礎データを整理する。第4章では崩壊熱除去系を対象として系統信頼度を定量化し、成功基準、系統構成等の影響度を分析し、合理的な信頼度向上方策としてまとめる。最後に第5章で研究成果のまとめを行う。

表1.1 発電用軽水型原子炉施設に関する安全設計審査指針の抜粋

指針9. 信頼性に関する設計上の考慮

1. 安全機能を有する構築物、系統及び機器は、その安全機能の重要度に応じて、十分に高い信頼性を確保し、かつ、維持し得る設計であること。
2. 重要度の特に高い安全機能を有する系統については、その構造、動作原理、果たすべき安全機能の性質等を考慮して、多重性又は多様性及び独立性を備えた設計であること。
3. 前項の系統は、その系統を構成する機器の单一故障の仮定に加え、外部電源が利用できない場合においても、その系統の安全機能が達成できる設計であること。

指針10. 試験可能性に関する設計上の考慮

安全機能を有する構築物、系統及び機器は、それらの健全性及び能力を確認するため、その安全機能の重要度に応じ、適切な方法により、原子炉の運転中又は停止中に試験又は検査ができる設計であること。

表1.3 重要度分類審査指針の抜粋

V. 安全機能を有する構築物、系統及び機器に対する設計上の考慮

1. 基本的目標

各クラスに属する構築物、系統及び機器の基本設計ないし基本的設計方針は、確立された設計、建設及び試験の技術並びに運転管理により、安全機能確保の観点から、次の各号に掲げる基本的目標を達成できるものでなければならない。

- (1) クラス1：合理的に達成し得る最高度の信頼性を確保し、かつ、維持すること。
- (2) クラス2：高度の信頼性を確保し、かつ、維持すること。
- (3) クラス3：一般の産業施設と同等以上の信頼性を確保し、かつ、維持すること。

表1.2 発電用軽水型原子炉施設に関する安全設計審査指針（解説）の抜粋

指針9. 信頼性に関する設計上の考慮

「安全機能の重要度に応じて、十分に高い信頼性」及び「重要度の特に高い安全機能を有する系統」については、別に「重要度分類指針」において定める。

「单一故障」は、動的機器の单一故障と静的機器の单一故障に分けられる。重要度の特に高い安全機能を有する系統は、短時間では動的機器の单一故障を仮定しても、長期間では動的機器の单一故障又は想定される静的機器の单一故障のいずれかを仮定しても、所定の安全機能を達成できるように設計されていることが必要である。

上記の動的機器の单一故障又は想定される静的機器の单一故障のいずれかを仮定すべき長期間の安全機能の評価に当たっては、その单一故障が安全上支障のない期間内に除去または修復できることが確実であれば、その单一故障を仮定しなくてよい。

指針10. 試験可能性に関する設計上の考慮

「適切な方法」とは、実系統を用いた試験又は検査が不適当な場合には、試験用のバイパス系を用いることなどを許容することを意味する。

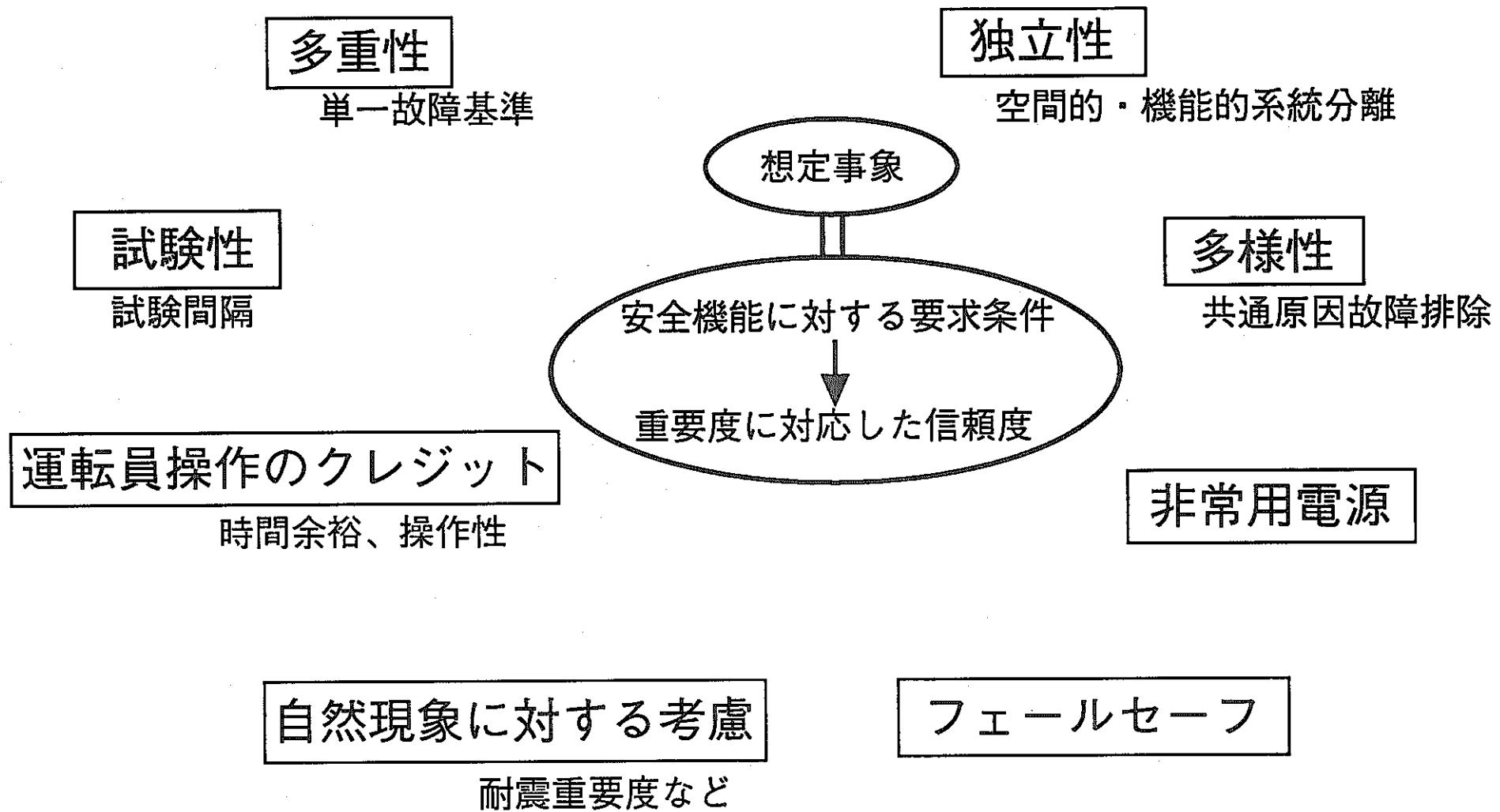


図1.1 安全設計方針検討への確率論的手法の適用

## 2. 条件別信頼性データの分析

信頼性データを特定の系統や機器に適用しようとする場合、系統や機器に対する依存性を考慮する必要がある。即ち、同種の機器であっても使用流体の違いや設計条件、運転条件の違いによって信頼性がどの程度変化するのかを把握しておくことは重要である。また、安全上重要な機器については材料選定や品質管理の違いによりどの程度の信頼性が確保されているのか、逆に所定の信頼度を確保するのにどの様な設計上・運転上の配慮をするべきかを検討していく必要がある。

まずCREDOデータを利用し安全上重要な機器に対する信頼性についてそれ以外の機器との比較を行うことにより信頼性評価上の特性を分析する。高速炉プラントにおいて一般的に安全系に分類されるものは原子炉停止機能、崩壊熱除去機能、格納機能を達成する系統・設備である。対象とした機器はデータ母集団の充足度や機器の機能等を考慮して検出器と弁を取り上げて特徴分析を行う。次に実験炉や試験施設での信頼性データを将来の大型炉プラントに適用していく上で考慮すべき点として機器サイズと設計温度に対する信頼性の傾向を分析する。

### 2.1 検出器

表2.1.1にCREDOデータベースに登録されている検出器の機器数、故障数、運転時間を施設別に示す。CREDOデータベースはプラント内の機器が必ずしも全て登録されている訳ではないことと安全系の数は元々多くないので、安全系として登録されている機器数／運転時間は比較的少ない。安全系は運転時間では検出器全体の数%に過ぎなく、統計的母集団としてやや不足している面がある。計測項目別のデータインベントリを表2.1.2に示す。約10種類の計測項目のデータが存在するが、計測項目としては流量、液位、圧力、温度が比較的多い。安全系に分類される検出器はいずれも1次、2次主冷却系、原子炉容器廻り、原子炉制御系の系統に属しており、検出器の計測項目としては流量、液位、圧力、温度のみである。

圧力、温度、液位、流量の検出器について故障率を比較して図2.1.1に示す。計測流体はいずれもナトリウムのものについて評価している。5%，95%信頼度幅は $\chi^2$ 推定より求めている。計測項目の種類によって信頼性に大差はなく、故障率の平均値は $10^{-6}/hr$ の前後となっている。いずれの検出器についても安全系の方が故障率が2～5倍高くなっている。しかしながら、非安全系の温度検出器を除けば故障件数が1～6件と少ないとめ

に故障率の不確定性幅は大きくなっている、不確定性を考慮すればそれほど顕著な差はないといえる。

常陽に於ける計装品の設計・製作時の品質管理（Q C）や運転・保守方法に関する原則的な考え方を安全系について非安全系との比較において示すと以下のようになる。

①Q C：耐震クラスが分類されている場合は構造的強度及びその振動試験が異なる。

その他は一般的に共通。

②試験保守：安全系はスクラム設定点確認が月に1回の頻度で行われる。その他の運転方法、計器校正の内容は共通。

安全系については機能低下に対して故障として厳しくカウントされているので相対的に表面的な故障率が高くなっているものと思われる。基本的に品質的な差はないので、本質的な故障率は同等となっていると考えられ、信頼性データの使い分けは必要ないと考えられる。安全系の検出器については各個体の信頼性を高く維持しているというよりも、そのシステム構成により冗長性（多重性）を持たせる等して信頼度を高めていると考えられる。即ち、検出器信号を原子炉トリップ等の安全保護系信号として利用する場合は2 out of 3ロジック等の信頼度を高める手段が用いられている。

## 2.2 弁

弁に関する安全上重要な機器としては格納容器隔離弁がある。アルゴンガス系・窒素系・空気系のラインの隔離弁とそれ以外のガスラインの常用弁との比較を行った。図2.2.1に原子炉施設別に隔離弁と隔離弁以外の故障率を比較して示す。米国のE B R - II, F F T Fではいずれも隔離弁以外の方が隔離弁より信頼度が高くなっている。一方、常陽の隔離弁はまだ一度も故障を経験しておらず、隔離弁以外よりも信頼度は一桁以上高いものとなっている。E B R - IIの隔離弁の故障17件の内8件は内部漏洩に分類されており、漏洩率試験において漏洩率が基準を満たさなかったものである。隔離弁については試験の要求基準のため機能低下を故障の発生として厳しくカウントされている可能性が考えられ、このことが隔離弁の故障率が高くなっていることに結びついているものと考えられる。

図2.2.2に常陽の弁について更に駆動源別に故障率を比較して示す。隔離弁については電動弁が14機器、空気作動弁が17機器であるが、運転時間はともに $1.41 \times 10^6$ 機器時間であり、50%信頼度 $\chi^2$ 推定で求めた故障率はいずれも $4.9 \times 10^{-7}/hr$ である。隔離弁以外の弁と比較すると不確かさが大きいものの平均値は一桁以上小さい故障率となっている。

但し、電動弁についてはガス系の隔離弁以外のデータがないため他の原子炉施設のデータを使用している。常陽の隔離弁以外の10件の故障の主な原因は圧力コントローラ／リミットスイッチの故障或いはナトリウムのベーパ付着である。一方、EBR-II, FFTFの隔離弁は全て空気作動弁となっており、このような駆動源別の比較はできない。

これらの分析結果から、常陽において格納容器隔離に関連する弁がその他の弁より小さい要因としては以下の点が考えられる。

- ①運転状態が常時全開であり、格納容器のアイソレーションを必要とするトラブルが少ないため作動機会が少ない。従って動作に伴う寿命劣化はほとんどないと考えられる。
- ②運転状態としては手動弁と同じだが、3件故障が発生している手動弁に比べて口径が大きく、かつナトリウムベーパ等の影響がほとんどないラインに設置されている。従ってナトリウムベーパ付着による故障が起こりにくい。
- ③表2.2.1に隔離弁と隔離弁以外の運転・試験・保守の比較を示すが、保守の内容は同等であるが、保守の頻度は隔離弁の方が多く、予防保全効果が信頼度の良さとなって現れてきているものと考えられる。

以上、常陽に於ける経験データに基づけば隔離弁（ガス系）の信頼性は隔離弁以外のガス系の弁に比較して高く、隔離機能に関する信頼性評価では隔離弁の信頼性データを使用して評価するのが妥当であると考えられる。

### 2.3 故障検出方法の比較

安全系と非安全系について故障の検出方法を比較したものを図2.3.1に示す。安全系、非安全系とも故障検出方法としては監視・巡回が第1位となっている。非安全系については監視・巡回による故障発見が半数近くを占めている。安全系については試験、保護動作、定期保守時における故障の発見割合が相対的に大きくなっている。安全系の試験・保守頻度が相対的に高いため試験・保守による発見割合が増加していると考えられる。従って待機系については安全系の方が故障検出性が高いと考えられ、故障率が同等であっても信頼度は高いものとなる。一方、常用系については監視・巡回に故障発見が有効と考えられるため、状態監視が可能な検出手段をもっておくことが信頼度を高める上で重要である。

### 2.4 設計温度の依存性

機器の設計条件への依存性評価として母集団の比較的大きいナトリウム弁について設計

温度に対する故障率の傾向分析を行った。図2.4.1に電動弁の、図2.4.2に空気作動弁の、図2.4.3に手動弁の設計温度に対する故障率の依存性を示す。各々設計温度に関して50℃きざみでデータを検索し、故障率を求めている。

電動弁の故障率は600℃以下ではほぼ一定であり、不確定性を考慮しても $10^{-5}/hr$ を超えることはない。600℃以上では平均値が $10^{-5}/hr$ より大きく、600℃以下の弁の故障率の約5倍となっている。また、その不確定性もデータ母集団が小さいため相対的に大きくなっている。電動弁は高温領域で故障率が大きくなっている傾向が見られる。

空気作動弁の故障率は概ね平均値で $10^{-5}/hr$ 前後であり、600～650℃の温度範囲で故障率が最も高くなっている。500～650℃の範囲は故障数も相対的に多く不確定性幅は小さくなっているが、500℃以下では故障数が少なく不確定性幅が大きい。

手動弁の故障率は平均値で $10^{-6}$ から $10^{-5}/hr$ に分布しており、高温領域の方が若干大きくなる傾向が見られる。600℃以下についてみれば、不確定性があるもののほぼ $10^{-6}/hr$ の故障率になっている。

設計温度への依存性について全般的に見るとわずかながら高温の設計温度の弁の方が故障率が高くなる傾向が見られるが、不確定性幅を考慮するとまだ顕著な傾向とはいえない。通常プラント設計で使用される範囲内（600℃以下）では故障率が一定と考えても良い。平均的な故障率に対して $\chi^2$ 推定で求めた不確定性幅は概ね2より小さく設計温度に対する依存性による故障率のバラツキの方が大きくなっている。平均的な故障率に不確定性としてエラーファクターとして5程度見込めばこれらのバラツキはカバーされていると考えられる。

## 2.5 設計サイズの依存性

大型炉においては機器の大型化が進むと考えられるので、信頼性データの機器サイズへの依存性をやはりナトリウム弁について傾向分析を行った。図2.5.1に電動弁の、図2.5.2に空気作動弁の、図2.5.3に手動弁の設計サイズに対する故障率の依存性を示す。各々設計サイズとして、2インチ以下、2～4インチ、4～8インチ、8インチより大きいもの4つの分類で検索し故障率を求めた。

電動弁の故障率は2インチ以下の弁の故障率が最も大きくなりるとともに若干故障率が小さくなる傾向にある。平均値に対して全てファクター3以内に収まっており、設計サイズに対して大きな依存性があるとは言えない。

空気作動弁の故障率は2インチ以上だけの傾向をみるとサイズが大きくなるにつれて故障率は高くなっている。2~4インチの弁に対して8インチ以上の弁は故障率で約一桁大きくなっている。2インチ以下の弁については故障数が多く、不確定性幅は小さくなっている。値としては8インチ以上の弁に近い。不確定性を考慮すれば明確な依存性があると判断できないので、平均的な値にエラーファクターとして5程度見込むのが適切と考えられる。

手動弁は2インチより大きい弁の母集団が小さく、故障もあまり発生していない。故障率でみると平均値はほぼ一定であるのに対し、不確定性幅はサイズの大きい領域で大きくなっている。

全般的にみると設計サイズに対する依存性はほとんどなく、信頼性評価において機器サイズの影響は考慮する必要はないと考えられる。但し、サイズごとにグループ化するとグループごとに故障率がばらつくことの影響を考慮してエラーファクターとして故障母集団から決定される $\chi^2$ 推定値による不確定性よりも大きな値として5を設定すべきである。

## 2.6 まとめ

代表的な高速炉用機器についてCREDOデータベースを利用し、高速炉プラント等の運転経験から信頼性データの機器の設計条件・運転条件に対する依存性について分析・整理した。

○安全上重要な機器として流量、温度、圧力、液位の検出器について非安全系のものと比較したところ、いずれも安全保護系検出器の故障率の方が高いという結果が得られた。不確定性を考慮すれば顕著な差はないこと、並びに、安全系と非安全系の検出器の間で故障率に差ができる品質あるいは保守上の本質的な違いはないので、信頼性データの使い分けは特に必要ないと考えられる。

○隔離弁についてその他のガス系の弁と比較した結果、常陽については隔離弁の故障率が一桁以上信頼性が高くなっている。隔離弁の使用環境の良さ・保守頻度の多さにより、信頼度が高くなっていると考えられ、隔離機能に関する信頼性評価では弁一般のデータではなく、隔離弁のデータそのものを使用するのが適切と考えられる。

○設計温度に対する依存性については高温領域において故障率が高くなる傾向が見られるものの通常使用する温度条件下ではほとんど依存性がないと判断され、信頼性データの

使い分けは必要ないと考えられる。

○設計サイズに対する依存性はほとんどなく、サイズに係わらず一定の故障率を用いても良いと考えられる。

○設計温度や設計サイズで分類せずに故障率を求めると  $\chi^2$  推定で得られる故障母集団 サイズに基づく不確定性幅は概ね 2 以下となる。一方、設計サイズや設計温度による故障率のバラツキの最大はファクターで 5 度となっているので、信頼度評価に当たっては  $\chi^2$  推定に基づく不確定性よりも大きな機器間の故障率のバラツキが考慮できる適切な不確定性幅を見込む必要がある。

表2.1.1 検出器データインベントリ

|            | EBR-II             | FPTF               | 米国試験施設             | 常陽                 | 日本試験施設             | 合計                 |
|------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| 機器数 (安全系)  | 11                 | 47                 | 13                 | 9                  | 0                  | 80                 |
| (非安全系)     | 4                  | 1277               | 92                 | 556                | 2019               | 3948               |
| (小計)       | 15                 | 1324               | 105                | 565                | 2019               | 4028               |
| 故障数 (安全系)  | 6                  | 4                  | 1                  | 2                  | 0                  | 13                 |
| (非安全系)     | 2                  | 58                 | 7                  | 70                 | 56                 | 193                |
| (小計)       | 8                  | 62                 | 8                  | 72                 | 56                 | 206                |
| 運転時間 (安全系) | $1.24 \times 10^6$ | $3.07 \times 10^6$ | $5.01 \times 10^5$ | $8.06 \times 10^5$ | 0                  | $5.62 \times 10^6$ |
| (非安全系)     | $1.80 \times 10^5$ | $8.42 \times 10^7$ | $3.28 \times 10^6$ | $5.13 \times 10^7$ | $1.88 \times 10^8$ | $3.27 \times 10^8$ |
| (小計)       | $1.42 \times 10^6$ | $8.73 \times 10^7$ | $3.78 \times 10^6$ | $5.21 \times 10^7$ | $1.88 \times 10^8$ | $3.33 \times 10^8$ |

(注) 運転時間の単位は機器時間

表2.1.2 原子炉施設の検出器データインベントリ

|     | E B R - I I        |     | F F T F            |     | 常 陽                |     | 合 計                                       |         |
|-----|--------------------|-----|--------------------|-----|--------------------|-----|---|---------|
|     | 機器数                | 故障数 | 機器数                | 故障数 | 機器数                | 故障数 | 機器数                                       | 故障数     |
|     | 運転時間               |     | 運転時間               |     | 運転時間               |     | 運転時間                                      |         |
| 温度  |                    |     | 8 4 4              | 2 6 |                    |     | 844 (27)                                  | 26 (3)  |
|     |                    |     | $5.75 \times 10^7$ |     |                    |     | $5.75 \times 10^7$ ( $1.79 \times 10^6$ ) |         |
| 漏洩  |                    |     | 1 0 5              | 6   | 4 8 6              | 6 3 | 591 (0)                                   | 69 (0)  |
|     |                    |     | $6.91 \times 10^6$ |     | $4.56 \times 10^7$ |     | $5.25 \times 10^7$ (0)                    |         |
| 火災  |                    |     | 1 6 8              | 0   |                    |     | 163 (0)                                   | 0 (0)   |
|     |                    |     | $1.03 \times 10^7$ |     |                    |     | $1.03 \times 10^7$ (0)                    |         |
| 流量  | 9                  | 5   | 8 1                | 8   | 1 3                | 0   | 103 (18)                                  | 13 (5)  |
|     | $9.49 \times 10^5$ |     | $5.10 \times 10^6$ |     | $1.31 \times 10^6$ |     | $7.36 \times 10^6$ ( $1.69 \times 10^6$ ) |         |
| 液位  | 2                  | 1   | 6 9                | 0   | 2 2                | 6   | 93 (8)                                    | 7 (2)   |
|     | $1.13 \times 10^5$ |     | $4.56 \times 10^6$ |     | $2.12 \times 10^6$ |     | $6.78 \times 10^6$ ( $5.93 \times 10^5$ ) |         |
| 圧力  | 4                  | 2   | 4 3                | 2   | 1 4                | 2   | 61 (14)                                   | 6 (2)   |
|     | $3.60 \times 10^5$ |     | $2.37 \times 10^6$ |     | $1.41 \times 10^6$ |     | $4.14 \times 10^6$ ( $1.05 \times 10^6$ ) |         |
| 変位  |                    |     |                    |     | 3 0                | 1   | 30 (0)                                    | 1 (0)   |
|     |                    |     |                    |     | $1.68 \times 10^6$ |     | $1.68 \times 10^6$ (0)                    |         |
| 加速度 |                    |     | 4                  | 0   |                    |     | 4 (0)                                     | 0 (0)   |
|     |                    |     | $2.53 \times 10^5$ |     |                    |     | $2.53 \times 10^5$ (0)                    |         |
| 分析  |                    |     | 1 1                | 1 9 |                    |     | 11 (0)                                    | 19 (0)  |
|     |                    |     | $2.49 \times 10^5$ |     |                    |     | $2.49 \times 10^5$ (0)                    |         |
| 地震  |                    |     | 1                  | 0   |                    |     | 1 (0)                                     | 0 (0)   |
|     |                    |     | $7.21 \times 10^4$ |     |                    |     | $7.21 \times 10^4$ (0)                    |         |
| その他 |                    |     | 3                  | 1   |                    |     | 3 (0)                                     | 1 (0)   |
|     |                    |     | $1.59 \times 10^5$ |     |                    |     | $1.59 \times 10^5$ (0)                    |         |
| 合計  | 1 5                | 8   | 1324               | 6 2 | 5 6 5              | 7 2 | 1904(67)                                  | 142(12) |
|     | $1.42 \times 10^6$ |     | $8.74 \times 10^7$ |     | $5.21 \times 10^7$ |     | $1.41 \times 10^8$ ( $5.12 \times 10^6$ ) |         |

( ) 内の数値は安全系の機器を示す。

表2.2.1 弁に関する運転・試験・保守の比較（隔離弁と隔離弁以外）

|           | 隔離弁  | 隔離弁以外   |
|-----------|--|---|
| 運転        | <ul style="list-style-type: none"> <li>○常時全開状態</li> <li>○アイルーション信号を受けて全閉へ</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>○制御弁：常時系内の圧力信号等を受けて開度制御状態</li> <li>○手動弁等：常時一定開度または全開・全閉状態</li> </ul> |
| 試験・保守     |  |   |
| ①外観目視チェック | 1回／月   | 1回／年  |
| ②オーバホール   | 1回／年   | 1回／3年又は5年   |
| ③校正・電気試験  | 1回／年   | 1回／1年又は3年   |
| ④作動試験     | 1回／年   | 1回／1年又は3年   |
| ⑤リーグ試験    | 1回／年   | オーバホール時   |

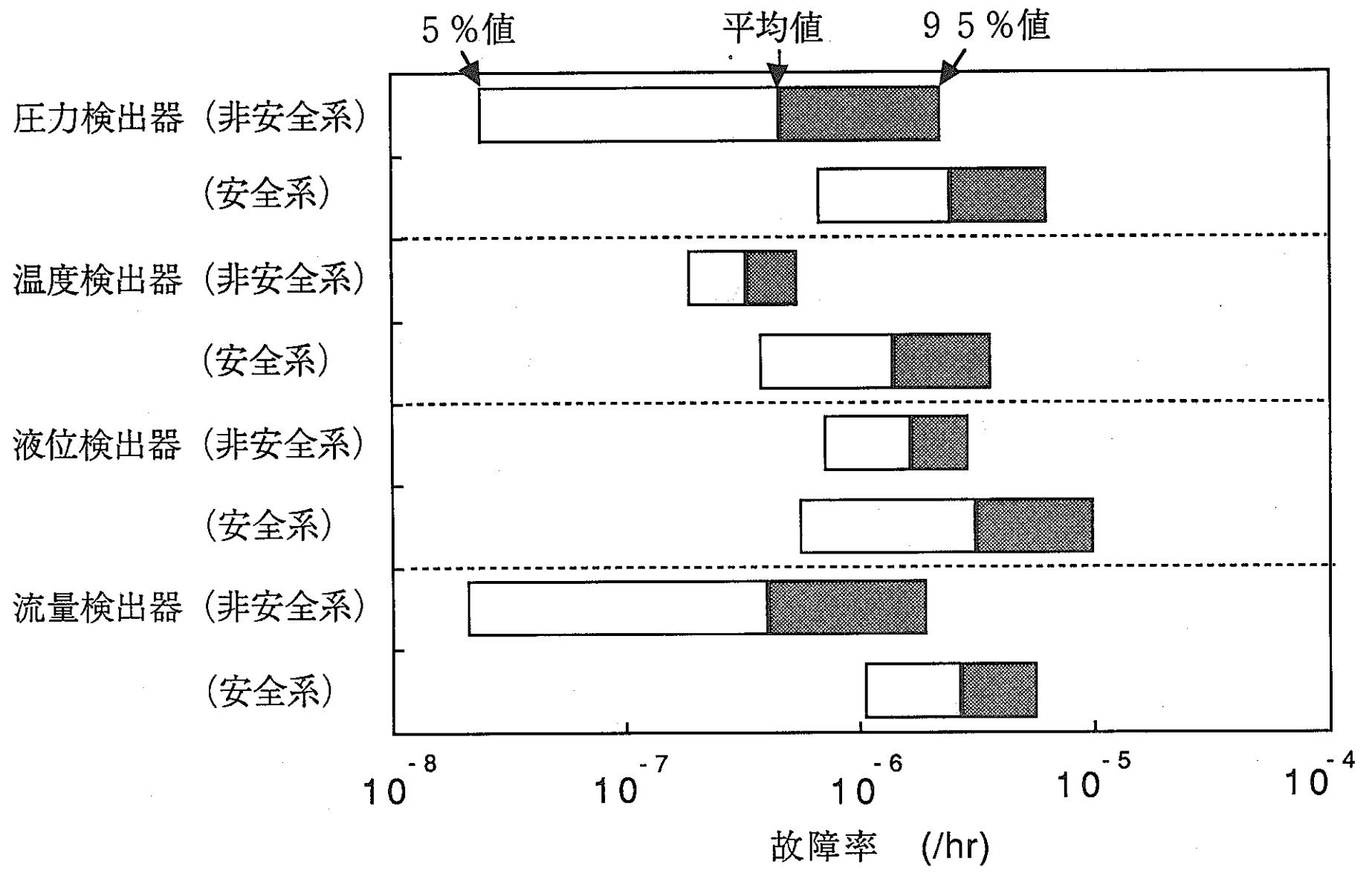


図2.1.1 検出器故障率の比較

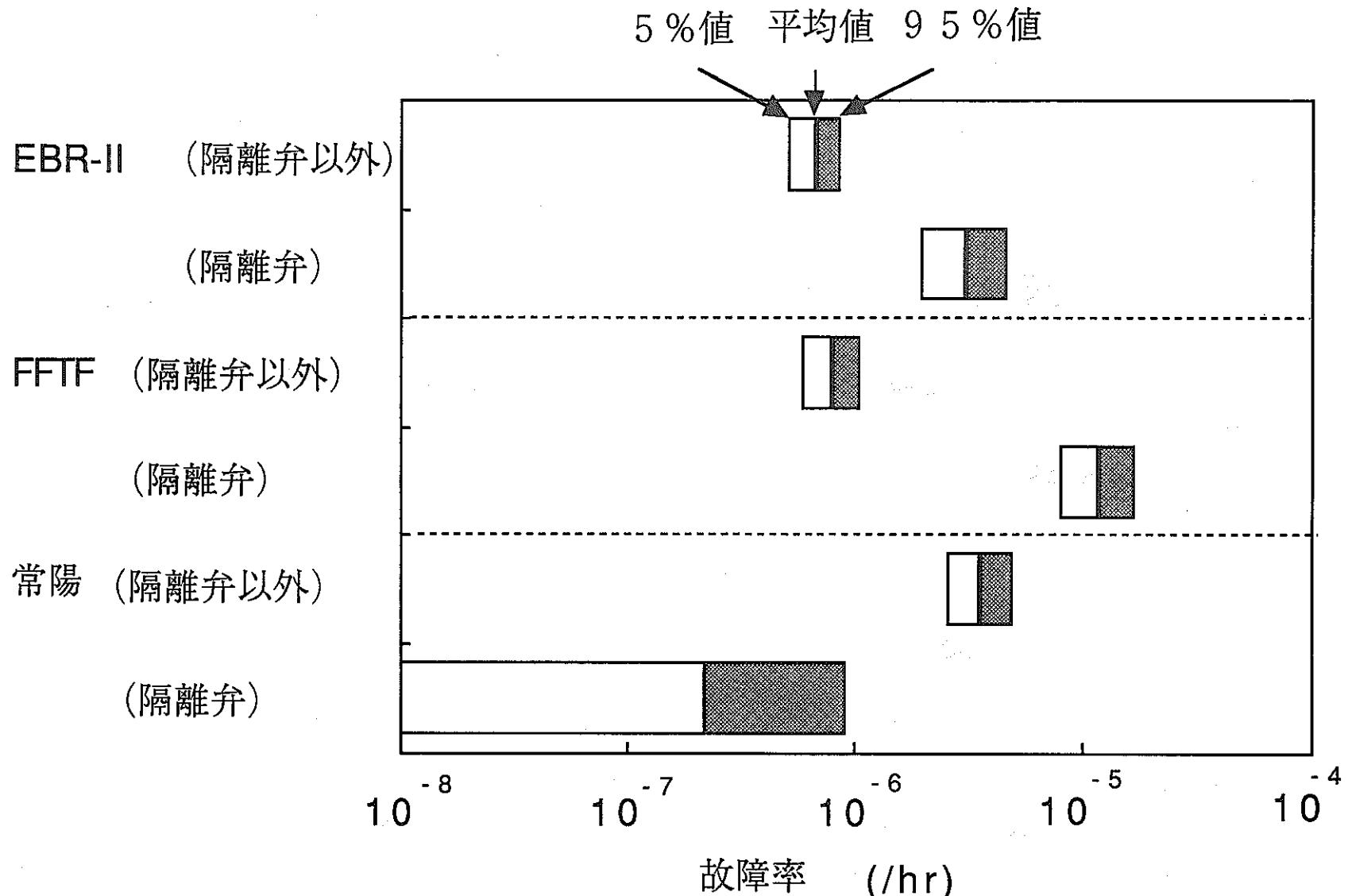


図2.2.1 隔離弁と非安全系弁の故障率の比較

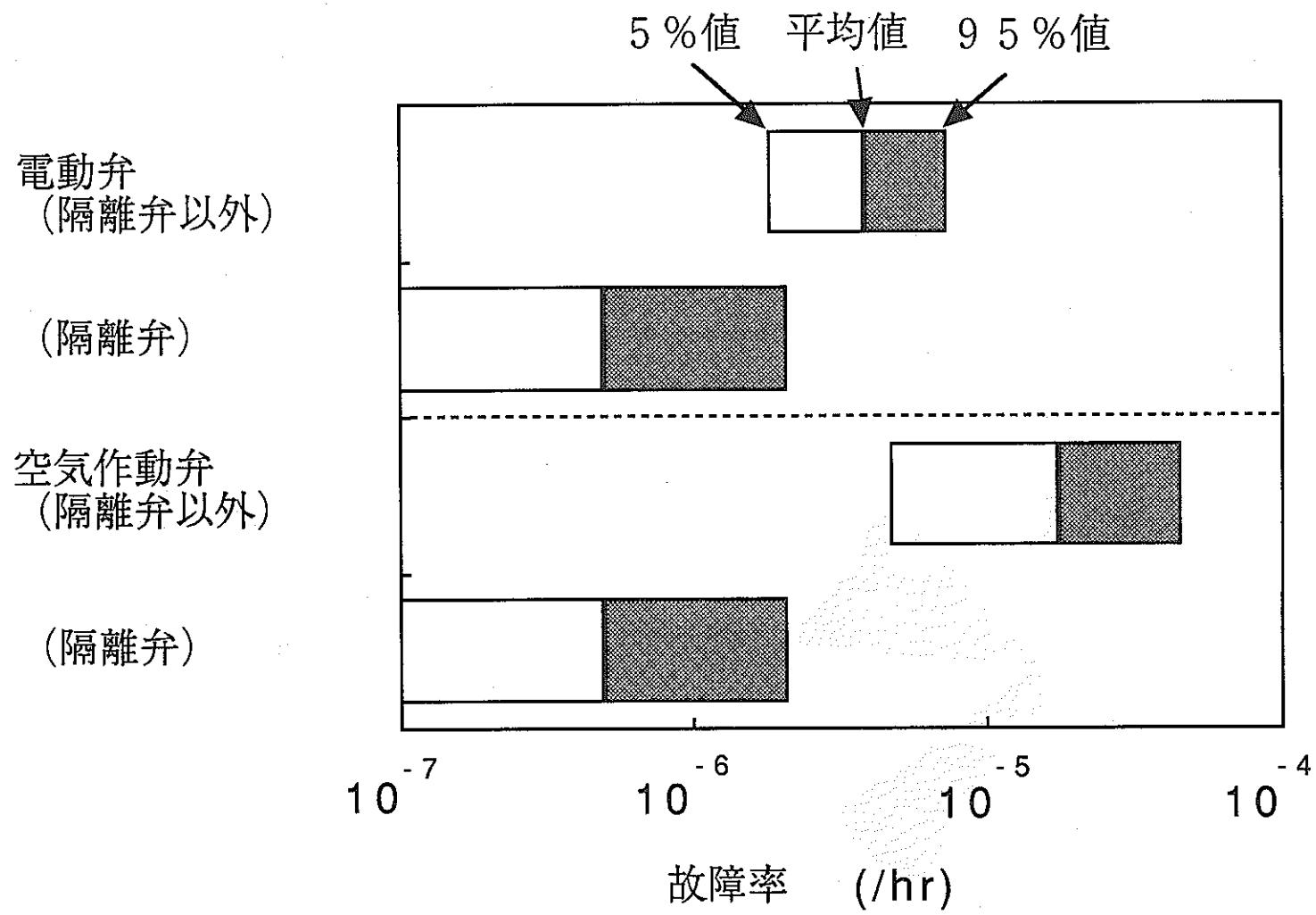


図2.2.2 常陽における駆動源別の隔離弁と非安全系弁の故障率の比較

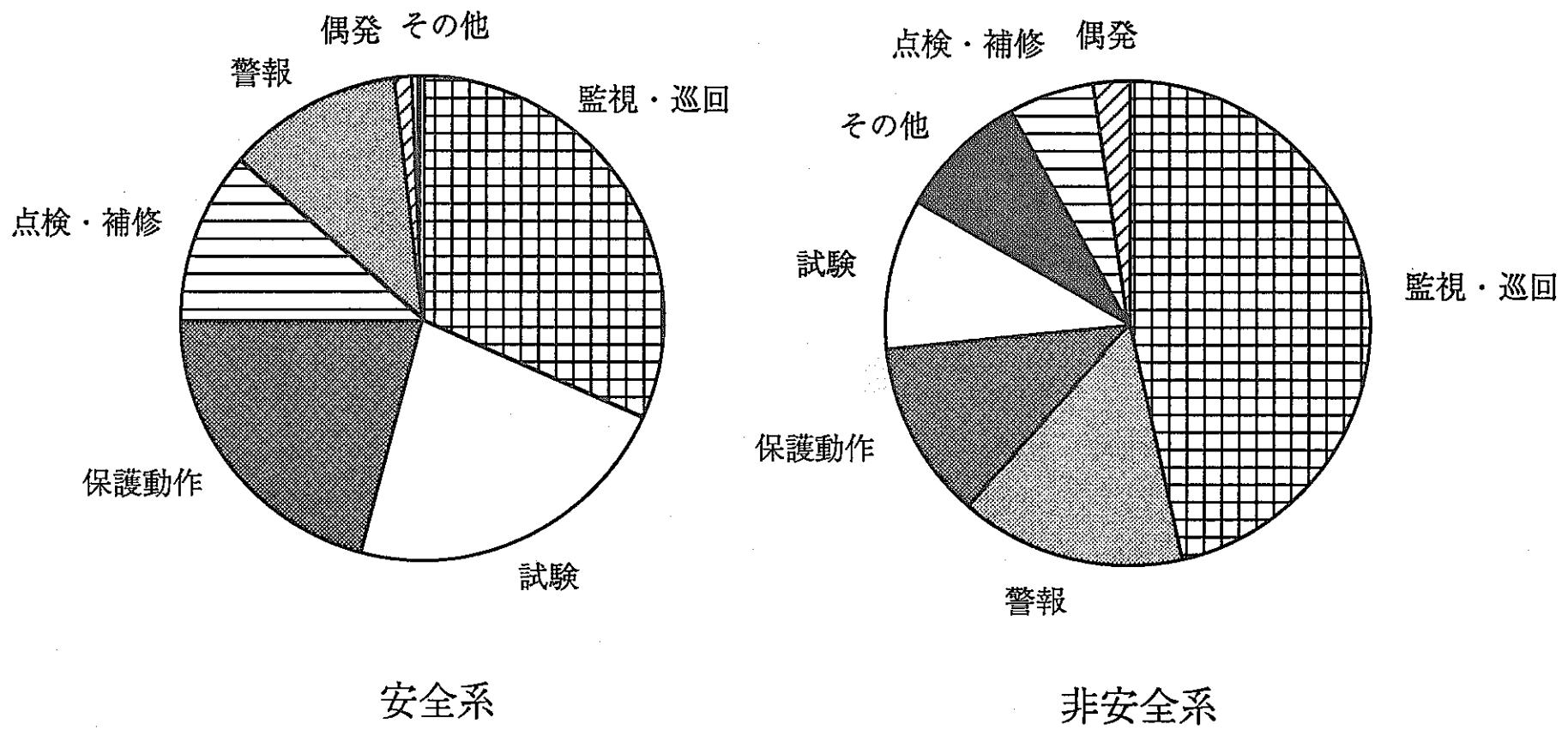


図2.3.1 故障の発見方法の比較

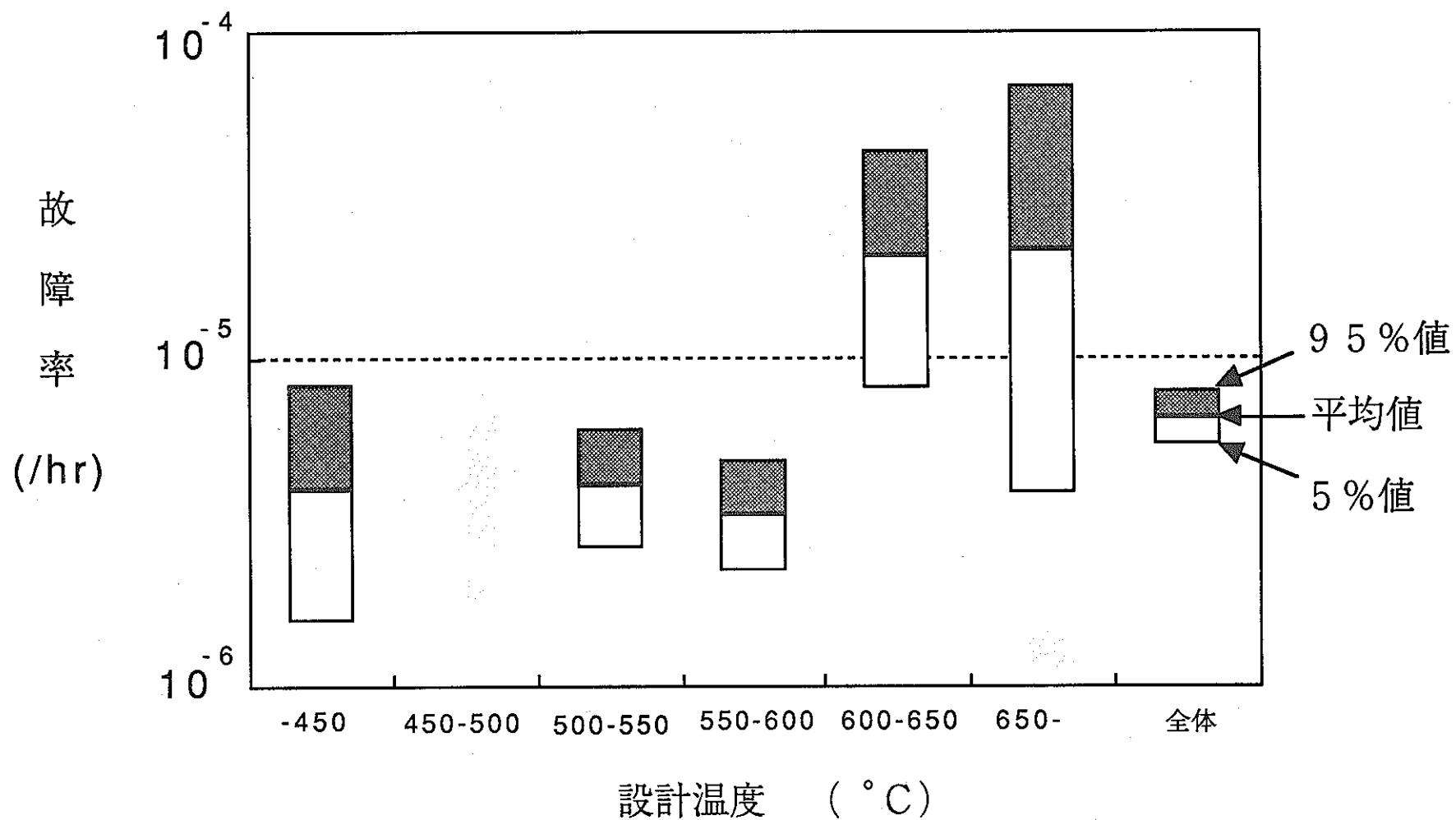


図2.4.1 電動弁の設計温度別故障率

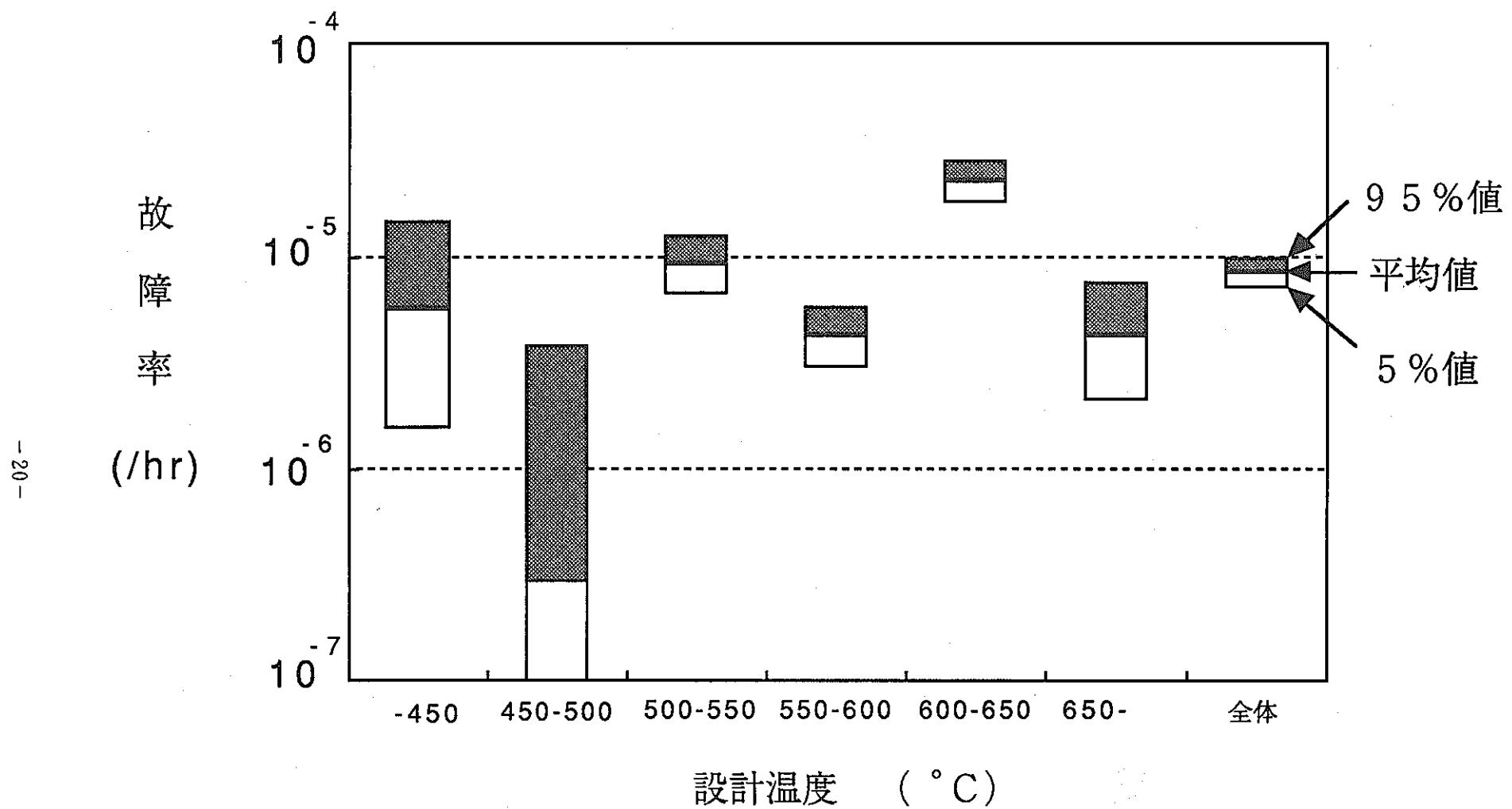


図2.4.2 空気作動弁の設計温度別故障率

-21-

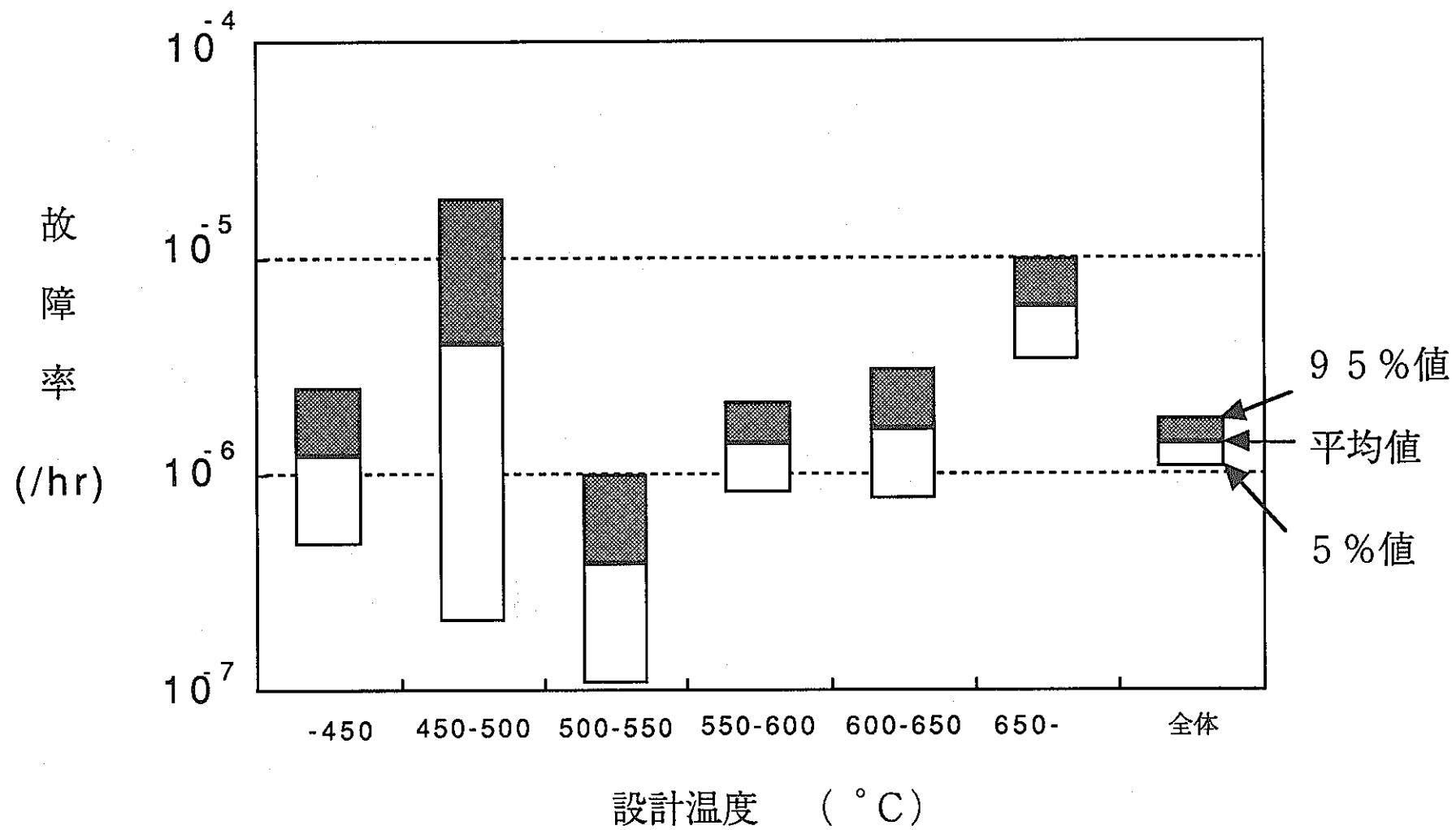


図2.4.3 手動弁の設計温度別故障率

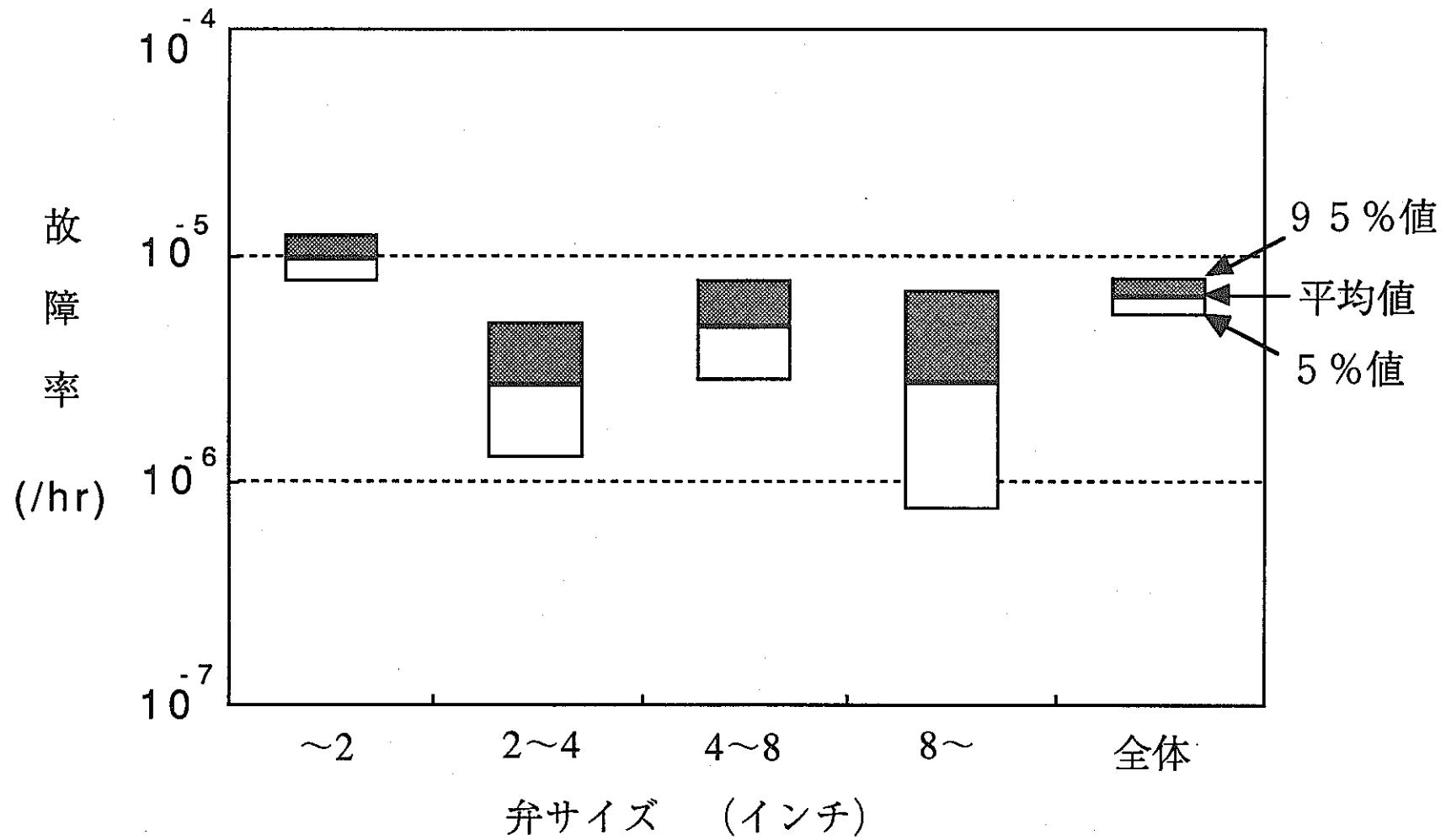


図2.5.1 電動弁の設計サイズ別故障率

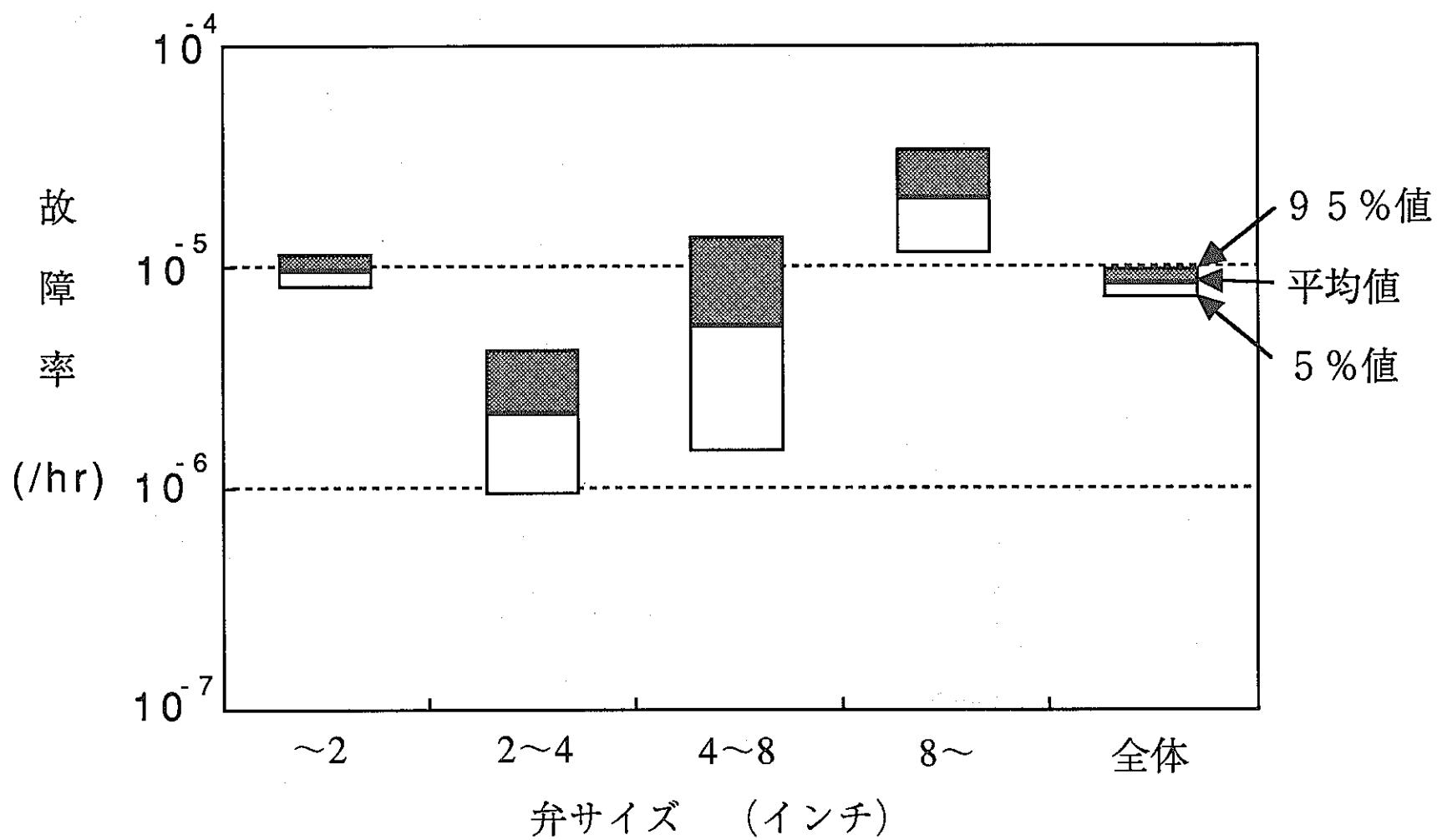


図2.5.2 空気作動弁の設計サイズ別故障率

- 24 -

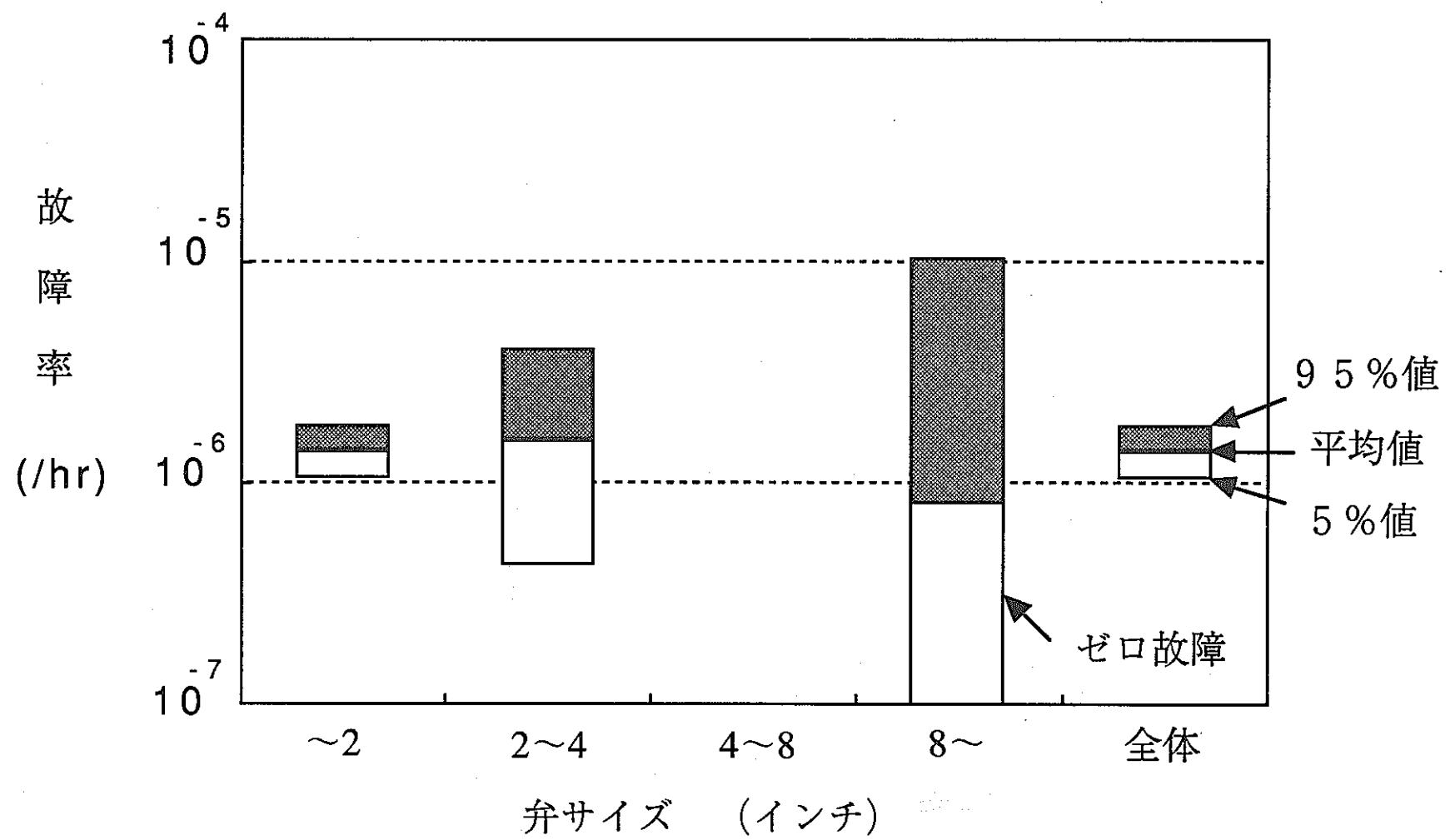


図2.5.3 手動弁の設計サイズ別故障率

### 3. 機器信頼度評価

本節では高速炉機器に関し、運転経験に基づいたCREDOデータベースから求められた信頼性データを利用し、想定される使用条件について信頼度評価を行い、安全設計上信頼度の観点から考慮すべき事項について整理する。特に多重性に対する要求条件として単一故障基準適用の考え方、待機系機器に対する試験要求とその効果について検討を加える。単一故障基準適用に当たっては動的機器、静的機器の種別、常用系と待機系の種別、使命時間の長さ、修復の容易性について考慮が払われているが、これらについて信頼度に関する定量的な検討を行う。

#### 3.1 機器使用条件の信頼度に対する影響

機器の信頼度は機器の故障率だけでなく、その使用条件（試験・保守）によっても大きく影響を受ける。機器の非信頼度はアンアベイラビリティ、アンリライアビリティ、試験によるアウテージ、保守によるアウテージ、人的エラーの和で定義される。式で表すと

$$U = U_a + U_r + U_t + U_m + U_h \quad (3.1)$$

となる。

ここで、

$U_a$  = アンアベイラビリティ、作動要求時に機器が故障している確率

$$= \frac{1}{2} \lambda T_t \quad (3.2)$$

( $\lambda$  = 故障率、 $T_t$  = 試験間隔あるいは故障検出時間)

$U_r$  = アンリライアビリティ、使命時間中に機器が故障する確率

$$= \lambda T_m \quad (3.3)$$

( $T_m$  = 使命時間)

$U_t$  = 試験アウテージ、試験により機器が供用外となっている確率

$$= \frac{\tau_t}{T_t} \quad (3.4)$$

( $\tau_t$  = 試験継続時間)

$U_m$  = 保守アウテージ, 保守により機器が供用外となっている確率

$$= \lambda_m \tau_r / (1 + \lambda_m \tau_r) \quad (3.5)$$

( $\lambda_m$  = 計画外保守頻度,  $\tau_r$  = 保守継続時間あるいは許容停止時間)

$$U_h = \text{人的過誤確率, 操作失敗あるいは保守失敗等} \quad (3.6)$$

このように機器の信頼度を決定するのは機器故障率だけでなく試験間隔や使命時間等の様々な因子が影響している。本節ではこれらの因子が信頼度に与える影響を検討する。

先ず、アンアベイラビリティとアンリライアビリティについて検討を加えることとし、それらの和を機器信頼度として評価した。対象機器は代表的な高速炉用機器（ナトリウム機器）とし、ポンプ、弁、配管、タンク、熱交換器について解析した。運転条件としては、機器に対して作動要求が発生する以前から作動状態にあるもの（常用系）と、作動要求が発生する時点で待機しているもの（待機系）に分類される。常用系については故障検出時間が、待機系については試験間隔がアンアベイラビリティに影響する。またアンリライアビリティは使命時間の長さに影響を受ける。使命時間の長さはその機器がどの安全機能を達成するかに依存する。原子炉停止の場合には、制御棒が挿入すれば、その後、特に使命が必要となる機器はない。一方、崩壊熱除去系の場合には、崩壊熱が十分低下するまである一定の期間機器が作動し続ける必要がある。まず、動的機器としてポンプ、弁について使命時間を1日として解析した結果を図3.1.1に示す。ポンプは電磁ポンプ、機械式ポンプについて、弁は手動弁、電動弁、空気作動弁について評価を行った。常用系の機器のアンアベイラビリティを計算する上で、故障検出時間（警報時間）として1時間を割り当てることとし、待機系機器の試験間隔として1ヵ月、1年について評価を行っている。また故障の修復は期待できないものとして評価している（修復効果については次節で別途検討）。試験間隔を1年とすると、手動弁の非信頼度は $10^{-3}/d$ 程度で、電磁ポンプ、機械式ポンプ、電動弁、空気作動弁は $10^{-2}/d$ 程度となっている。これらの故障確率はアンアベイラビリティが支配的である。試験間隔を1ヵ月とすると非信頼度は $10^{-3}/d$ まで小さくなる。常用系では機器ごとに非信頼度は異なっており、電動弁、空気作動弁は $10^{-5}/d$ 程度、電磁ポンプは $10^{-4}/d$ 程度、機械式ポンプは $10^{-3}/d$ 程度となっている。常用系の非信頼度はアンリライアビリティが支配的となっている。ここで、单一故障基準のめやす

として例えば $10^{-3}/d$ を適用すると動的機器であっても常用系の機器については信頼度が十分高く、単一故障基準を適用する必要がないということになる。一方、待機系でも弁については試験間隔を1ヵ月にすると非信頼度は $10^{-3}/d$ 以下となっており、単一故障基準適用から除外できる可能性がある。また、使命時間を1週間とした場合の評価結果を図3.1.2に示す。試験間隔が1年の機器は待機中の故障確率が支配的で、使命時間が1週間と長くなても信頼度はほとんど変化しない。使命時間を1週間とすると機械式ポンプについては常用系の機器の場合でも非信頼度は $10^{-3}/d$ を上回るので、長期の使命の場合には常用系であっても無条件に単一故障を除外できないことになる。電磁ポンプの常用系については平均値が $10^{-3}/d$ を下回っているものの95%値では $10^{-3}/d$ を上回っているので単一故障の除外には慎重であるべきと考えられる。電動弁、空気作動弁については常用系の場合、不確定性を考慮しても $10^{-3}/d$ を下回っているので単一故障基準を適用する必要がないということになる。

以上の評価結果より動的機器は機器の種類・使用条件によって信頼度は変化し、概ね想定される条件では $10^{-2} \sim 10^{-4}/d$ の非信頼度となっている。高度の信頼度を確保するには待機系の機器については試験間隔を、常用系の機器については故障検出時間（警報時間）を適切に設定することが必要である。待機系について試験間隔が1年のものと1ヵ月のものと比較すると1ヵ月のものは信頼度が一桁近く向上しており、月1回以上の試験を行うことは信頼度上有効であることがわかる。従って、安全上重要な機器については、出力運転中に試験可能な設計が必要となる。また、常用系の機器についても状態監視により早期に故障を検出し、機器喪失状態の時間を短くし信頼性の確保を計ることが肝要である。

静的な故障モードとしては、静的機器の故障と動的機器の静的故障モード（漏洩・閉塞等）が含まれる。静的機器についてはタンク、配管（100mとして換算）、熱交換器、空気冷却器、動的機器については空気作動弁、電動弁、手動弁、機械式ポンプ、電磁ポンプの故障モード別信頼度評価を行った。図3.1.3に静的機器の故障と動的機器の静的故障モードの非信頼度を示す。使命時間は1週間としている。図中の黒印はまだ故障を経験していない故障モードである。非信頼度は機器と故障モードに依存するが、その値は $10^{-4} \sim 10^{-7}/d$ に分布しており、動的機器の動的故障モードの故障確率に比較して2～3桁信頼度が良い。機械式ポンプ、熱交換器の漏洩や閉塞については故障を経験していないので、その信頼度の上限値は運転経験の長さに支配されている。いずれの機器についても非信頼度の上限値は $10^{-4}/d$ より小さくなっている。これら静的機器については、1週間という比

較的長い使命時間に対しても信頼度は十分高く、单一故障基準の適用が除外できる可能性が示されている。

待機系機器の試験において、テストオーバライド機能がないと非信頼度として試験によるアウテージを考慮する必要がある。試験によるアウテージは(3.4)式に示される通り、試験の継続時間に比例し、試験間隔に反比例する。電磁ポンプ、電動弁について試験間隔をパラメータとして非信頼度を解析した。試験継続時間を1時間、使命時間を1週間とした場合の結果を図3.1.4に示す。テストオーバライド機能がある場合、電動弁については試験間隔を短くするにつれて単調に非信頼度は減少していき、信頼度向上の効果は大きい。電磁ポンプについては試験間隔を1ヶ月より短くしたとしても使命時間中での故障確率が支配的となるので信頼性向上はそれほど大きくない。テストオーバライド機能がない場合、試験間隔をある程度以上に短縮すると試験によるアウテージが支配的となり、非信頼度は増大する。本解析ケースでみれば信頼度を最も小さくする試験間隔は約1ヶ月になっている。次に電動弁について試験継続時間をパラメータとして求めた非信頼度を図3.1.5に示す。試験継続時間を30分、1時間、2時間と変化した場合でも試験間隔が3ヶ月より長い場合にはほとんど差がない。試験間隔が1ヶ月より短い場合には試験によりアウテージが支配的で試験継続時間の長さの比例して非信頼度が増大している。最適な試験間隔は試験によるアウテージ、アンアベイラビリティのバランスによって1ヶ月から3ヶ月の値となる。試験間隔が1ヶ月と1年で比較した場合、試験間隔を1年から1ヶ月に短縮することにより信頼度は2～5倍程度向上する。テストオーバライド機能がある場合には信頼度は一桁向上する。以上、代表的な高速炉用機器について試験間隔に対するパラメータサーベイを行った結果、試験間隔を1ヶ月程度に設定することは信頼度向上に効果的である。安全上重要な機器について概ね月1回の試験を行うことは機器信頼度を最適化する上では妥当であると考えられる。また、テストオーバライド機能がない場合はそれ以上試験間隔を短縮することは信頼度をかえって低下させることになる。待機系の機器の非信頼度はアンアベイラビリティが支配的で想定した範囲内では使命時間の影響はほとんどないが、常用系の非信頼度は使命時間の影響を大きく受ける。

ヒューマンエラーの影響をみるために試験後の運転状態への復旧エラーについて検討を加える。このタイプのヒューマンエラーについてはT H E R P (Technique for Human Error Rate Prediction)モデルにより定量化が行われる。原型炉PSAでの評価結果によればこの確率は

$$U_h = 6.0 \times 10^{-3} / d$$

と求められている。試験後、常にこのエラー確率が存在するという静的なモデルでは試験頻度にかかわらず非信頼度にこの確率が加えられなければならない。実際には試験後の巡回・点検により復旧エラーが検出され、正常状態に復帰できる可能性が期待される。指数分布に基づく修復モデルを以下のように定義する。

$$U_h(t) = U_{min} + (U_0 - U_{min}) e^{-\frac{t}{\tau_{hr}}} \quad (3.7)$$

ここで、

$U_0$  = 試験後の復旧エラーの確率

$U_{min}$  = 残留故障確率、

ヒューマンエラーの内、修復できない（検出できない）故障の確率

$\tau_{hr}$  = ヒューマンエラーに対する平均修復時間

(3.7) 式から平均的な故障確率を求めると(3.8) 式のように求められる。

$$\begin{aligned} U_h &= \frac{1}{T_t} \int_0^{T_t} U_h(t) dt \\ &= U_{min} + \frac{\tau_{hr}}{T_t} (U_0 - U_{min}) \left(1 - e^{-\frac{T_t}{\tau_{hr}}}\right) \end{aligned} \quad (3.8)$$

(3.8) 式に基づき  $U_{min}$ ,  $\tau_{hr}$  をパラメータとして試験後のヒューマンエラー確率を求め図3.1.6 に示す。ヒューマンエラーに対する平均修復時間は巡回・点検が直毎に行われることを考慮し、24時間を基準として12時間及び48時間の場合についても検討を加えた。残留故障確率 ( $U_{min}$ ) としては、 $U_0$  の 10% を基準として 5%, 20%, 50% についても検討した。図の横軸は試験間隔を表している。試験間隔を 3ヶ月とすると概ね残留故障確率に近づいてくる。試験後、数日はヒューマンエラー確率が修復により減少している過渡期にあり、この時点で新たに試験を実施するとヒューマンエラーは  $U_0$  にもどるので平均的なヒューマンエラーの確率が大きくなる。

図3.1.7 にヒューマンエラー、試験によるアウトエージも考慮して求めた電動弁の機器信頼度を示す。ヒューマンエラーに関するパラメータとしては  $U_{min}$  を  $U_0$  の 10%,  $\tau_{hr}$

を24時間として計算している。テストオーバライド機能がある場合でもヒューマンエラーの影響により2週間より試験間隔を短縮すると非信頼度は増大する。テストオーバライド機能がない場合は試験によるアウテージが支配的であるので非信頼度はほとんど変化しない。以上、テストオーバライド機能がある場合でも試験頻度を減少させるとアンアベイラビリティの寄与が増加し、試験頻度を増加させると試験に関わるヒューマンエラーの寄与が増大するのである最適な試験頻度が存在する。

但し、ヒューマンエラーに関する定量的な検討で使用したパラメータについては実機条件で経験的に得られたものではなく、暫定的に設定したものであるのでこれらの定量的評価が今後の検討課題として残っている。

### 3.2 機器修復性の検討

軽水炉の安全審査指針では单一故障基準の適用に当たっては故障の修復性をも考慮して行うこととなっている。そこで代表的な高速炉用機器について修復可能性の検討を行う。故障の修復可能性は故障修復時間と猶予時間によって特性付けられる。猶予時間は安全機能が喪失してから重大な影響が出始めるまでの時間であり、事象の種類に依存する。高速炉プラントでは冷却材のナトリウムは沸点までかなりの温度的余裕が存在し、崩壊熱除去系が故障しても直ちに炉心が損傷することではなく、炉容器内のナトリウム、1次主冷却系及び2次主冷却系内のナトリウムの温度上昇を経て、原子炉冷却材バウンダリ等の健全性が損なわれるまでにはかなりの時間が存在する。また、ある程度の時間崩壊熱除去系が機能すれば、崩壊熱レベルが下がっていることにより、さらに、猶予時間は長くなる。猶予時間について以下の関係式を導入する。

$$\text{炉停止直後の猶予時間の効果} \quad T_g = A \quad (3.9)$$

$$\text{崩壊熱レベルの低下に伴う猶予時間の増大の効果} \quad T_g = B T_s \quad (3.10)$$

ここで、A、Bは定数、 $T_s$ は機能成功時間である。猶予時間はプラントの熱容量や放散熱等に依存しており、プラント依存と考えられる。因みに原型炉クラスでは、Aが5~10時間程度、Bが0.5程度である。これらの猶予時間に対して修復効果を期待できるものとして非信頼度を評価する式は以下の通りである。

$$\text{アンアベイラビリティ} = \frac{1}{2} \lambda T_t e^{-\frac{\lambda T_t}{\tau_r}} - \frac{A}{\tau_r} \quad (3.11)$$

$$\text{アンリライアビリティ} = \int_0^{T_m} \lambda e^{-\lambda t} e^{-\frac{\lambda t}{\tau_r}} d t - \frac{A + B t}{\tau_r} \quad (3.12)$$

ここで、

$T_g$  = 猶予時間

$T_t$  = 試験間隔

$T_m$  = 使命時間

$\tau_r$  = 平均修復時間

$\lambda$  = 故障率

この効果をパラメータとして評価した結果を以下にまとめる。炉停止後の猶予時間として 5 時間, 10 時間, 20 時間の場合について, 崩壊熱レベルの低下に伴う猶予時間の増大の効果を  $0.5 T_s$ ,  $T_s$ ,  $2 T_s$  ( $T_s$  は使命成功時間) の場合について検討した。その結果を図3.2.1 に示す。崩壊熱除去系で使用される可能性のある機器について, 各機器の修復時間と猶予時間の関係から (3.11), (3.12) 式を適用して修復を考慮した非信頼度と修復を考慮しない非信頼度の比として非修復率を計算している。各機器の平均修復時間は C R E D O データベースより原子炉施設の該当機器の故障実績から導出したものを使用している。図中の白印はアンアベイラビリティ (作動要求時故障確率) の非修復率もしくは猶予時間が使命時間中一定の場合のアンリライアビリティ (使命時間中の故障確率) の非修復率, 黒印は猶予時間が機能成功時間に比例して長くなる場合のアンリライアビリティの非修復率を表している。アンアベイラビリティについては弁, ベーン, ダンパー等が猶予時間が 10 ~ 20 時間と非常に長い場合には信頼度の向上が 1 術程度期待できるが, 他の機器や猶予時間が 5 時間以下の場合は修復の期待はほとんどできない。弁, ベーン, ダンパーのアンリライアビリティについては約一桁の修復効果が得られる。黒印はアンリライアビリティ評価において炉停止直後の猶予時間を期待しない場合であるが, 期待できるとする場合については図中の黒印の非修復率を掛け合わせたものになるので更に修復率が向上する。その結果を図3.2.2 に示す。弁, ベーン, ダンパーについては一桁以上の信頼度の向上が期待できる。ブロワー, 電磁ポンプ, 機械式ポンプについてはあまり修復は期待できない。機械式ポンプの中でも 1 次系についてはより修復が困難と考えられる。自然

循環除熱に必要な動的機器は弁、ベーン、ダンパーのみであるので、これらの機器については修復という観点からも信頼性を高める上で有利である。従って、自然循環能力を備えておくことは、事故管理の観点からも重要である。

以上高速炉用機器の内、弁、ベーン、ダンパ等の機器については猶予時間が長い場合には修復が十分に期待できる。また、崩壊熱の低下に伴う猶予時間の増大により使命時間中の非信頼度の低減には効果的である。

### 3.3 機器信頼度評価のまとめ

代表的な高速炉用機器について想定される試験、待機条件、使命時間などの使用条件での信頼度評価を行った。その結果、安全設計に関連して以下の知見が得られた。

- 動的機器の信頼度は概ね  $10^{-2} \sim 10^{-4} / d$  の非信頼度である。常用系（機器に対して作動要求が発生する以前から作動状態にあるもの）については信頼度が高く、单一故障基準適用のめやすを  $10^{-3} / d$  とした場合、概ね適用が除外できると考えられる。
- 静的機器あるいは動的機器の静的故障モードの非信頼度は  $10^{-4} / d$  より小さくなっている、非常に長い時間の使命を除けば单一故障を想定する必要はない可能性が示された。
- 待機系の動的機器の信頼度確保に当たっては月1回程度（種々の条件によって2週間～3ヶ月の間で変化する）の機能試験の実施が効果的である。但し、それ以上に試験間隔の短縮を図ると試験によるアウトエージや試験後ヒューマンエラーの影響が無視しえない。
- 高速炉機器の一部の機器は崩壊熱除去機能に於ける猶予時間の長さと相まって修復可能性が高く修復率が一定程度期待できることがわかった。特に、自然循環流路を確保する際に必要とされる動的機器であるベーン、ダンパ、弁に対する修復効果が大きく、事故管理の観点からも自然循環特性を活用することが期待できる。

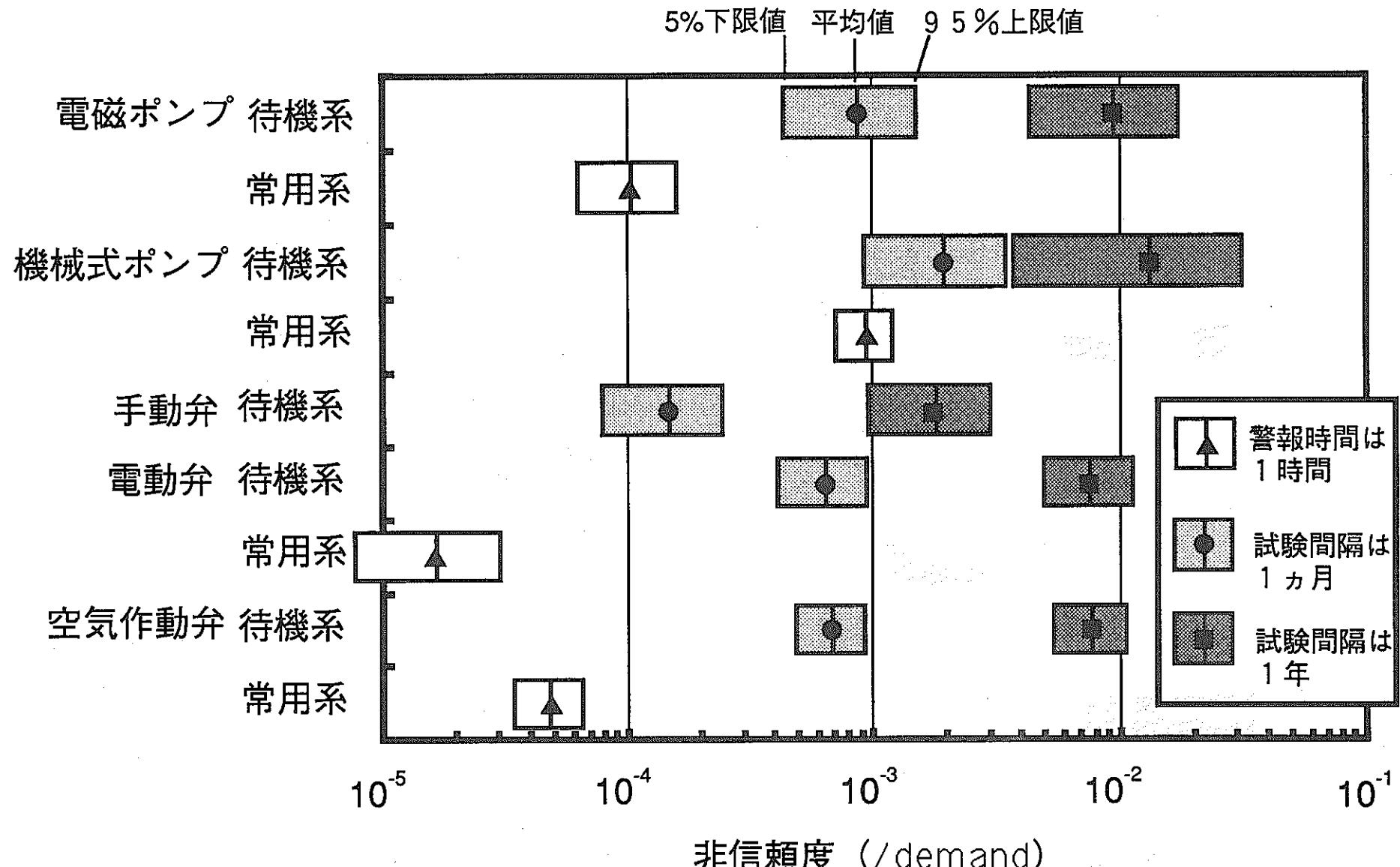


図3.1.1 動的故障の非信頼度 (使命時間は1日)

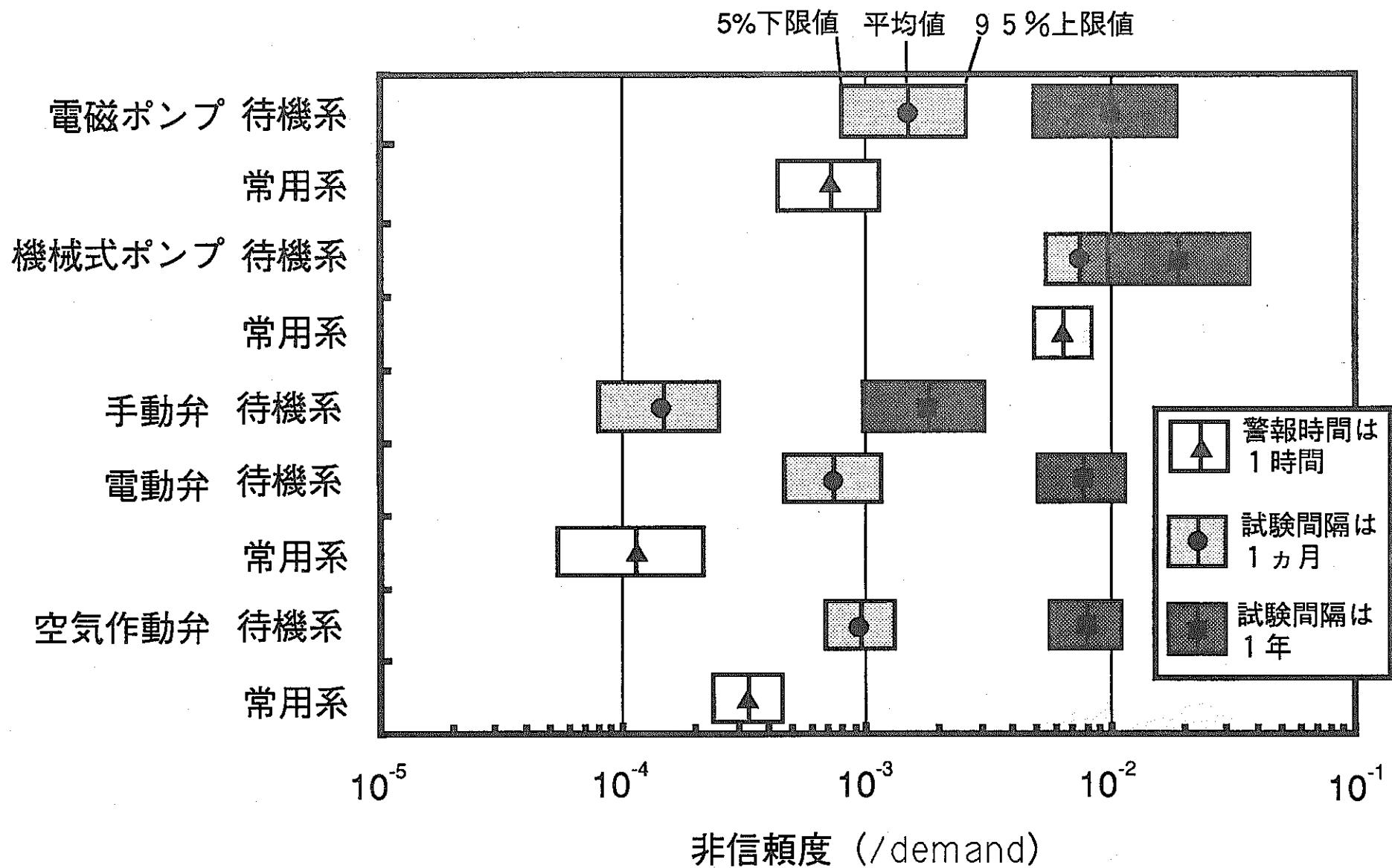


図3.1.2 動的故障の非信頼度（使命時間は1週間）

空気作動弁  
電動弁  
手動弁  
タンク  
機械式ポンプ  
電磁ポンプ  
配管 (100m)  
熱交換器  
空気冷却器

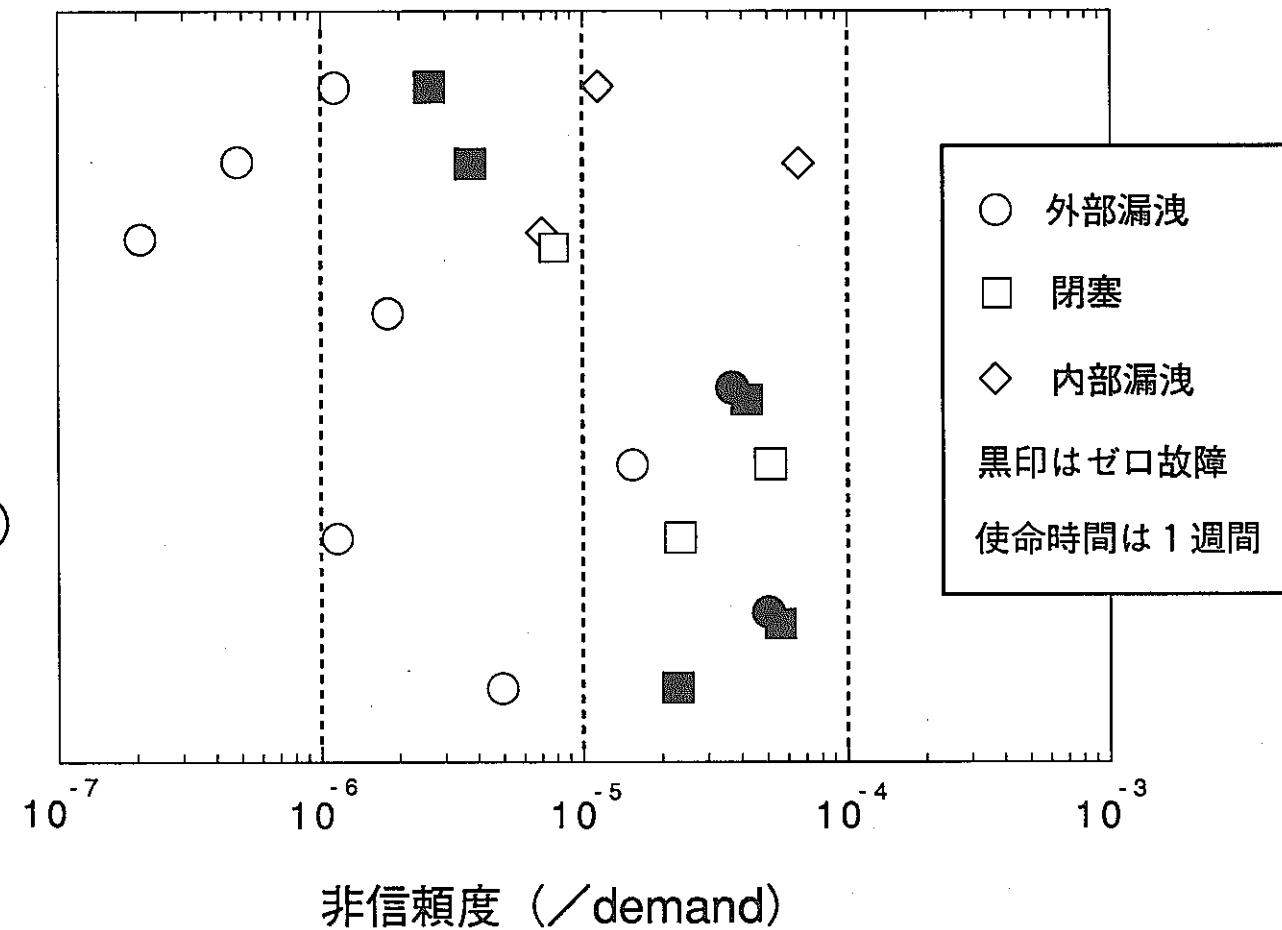


図3.1.3 静的故障モードの非信頼度

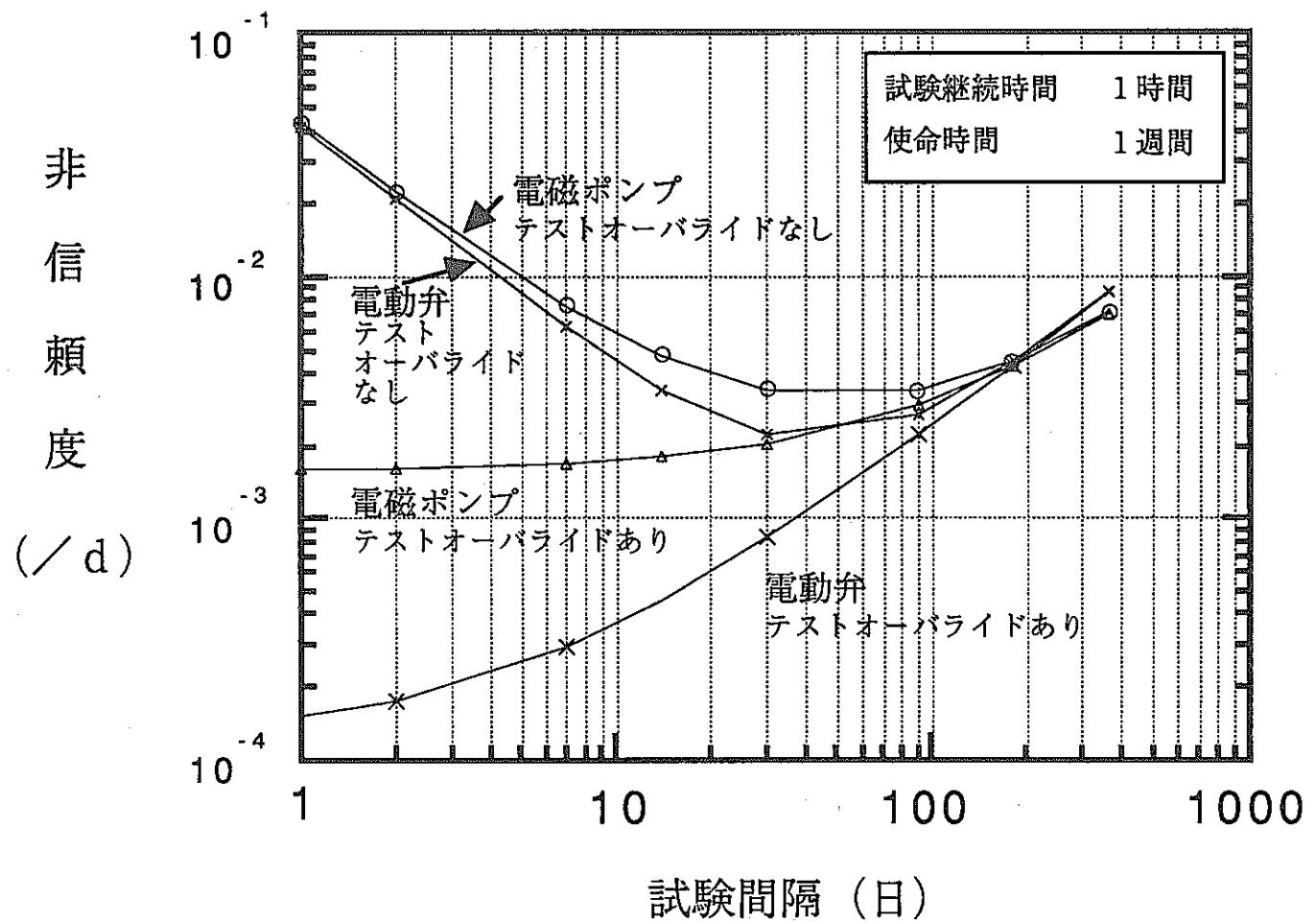


図3.1.4 試験によるアウテージを考慮した機器信頼度

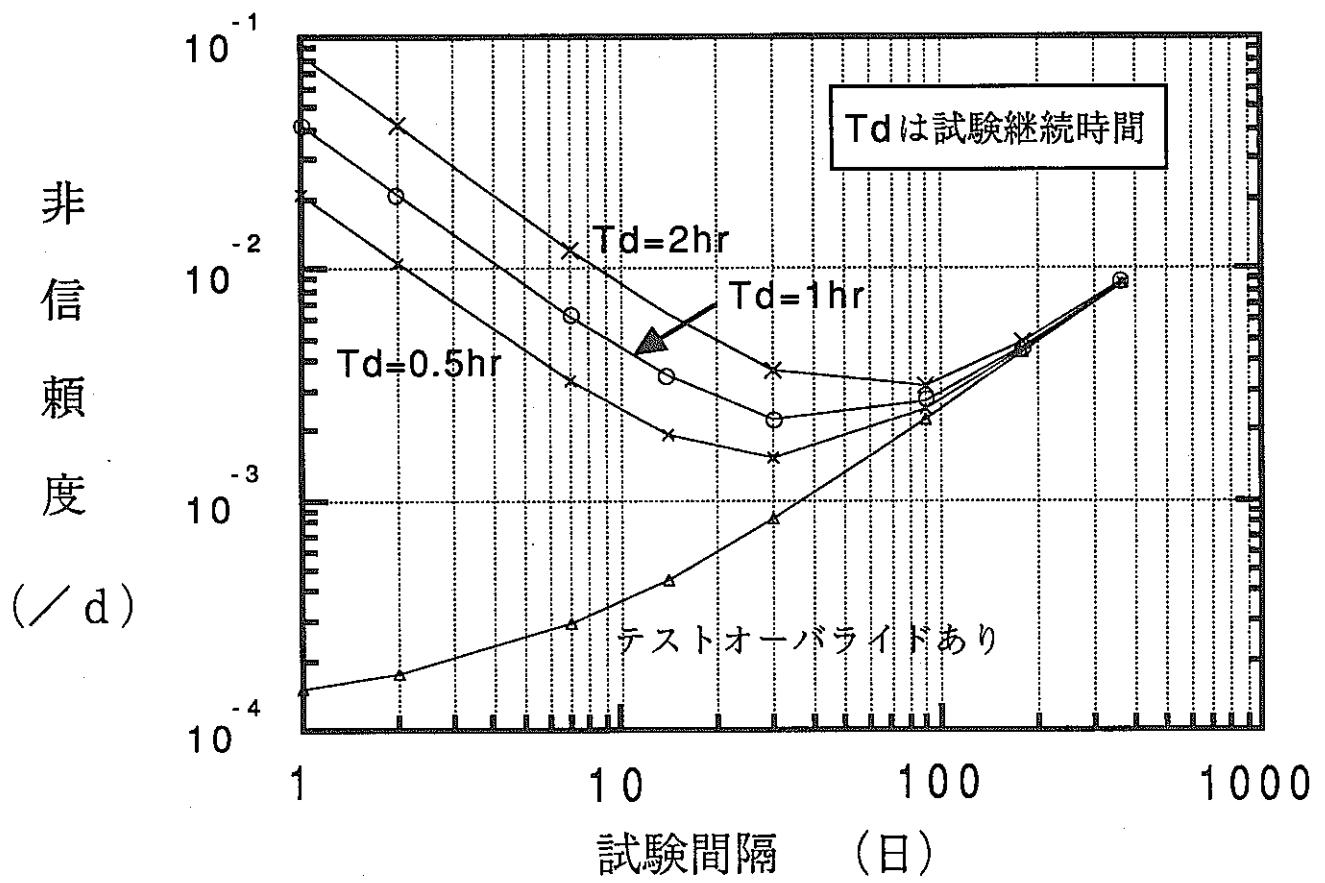


図3.1.5 試験によるアウテージを考慮した電動弁の機器信頼度

## ヒューマンエラー確率

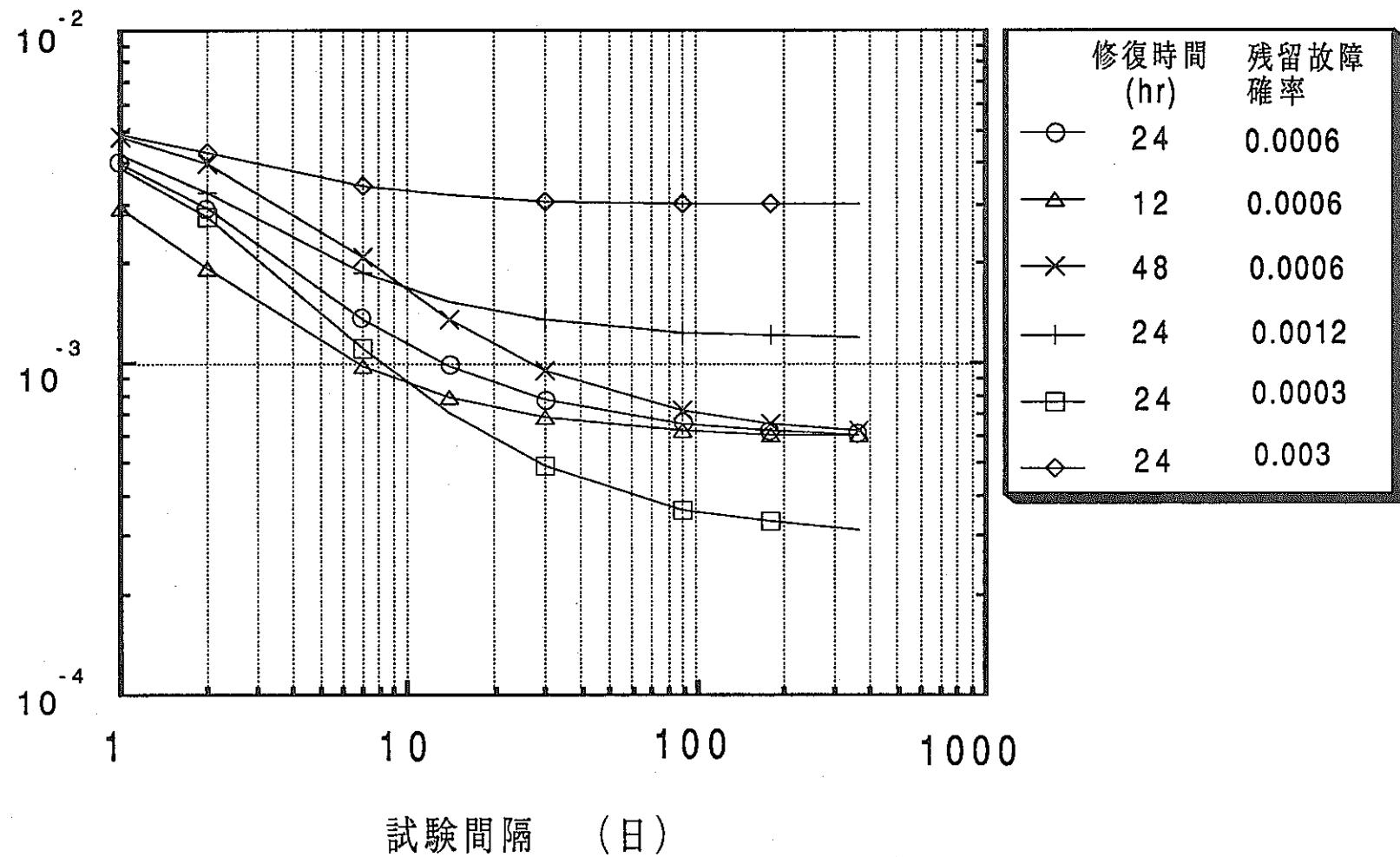


図3.1.6 試験後復旧エラーに関するヒューマンエラーの確率

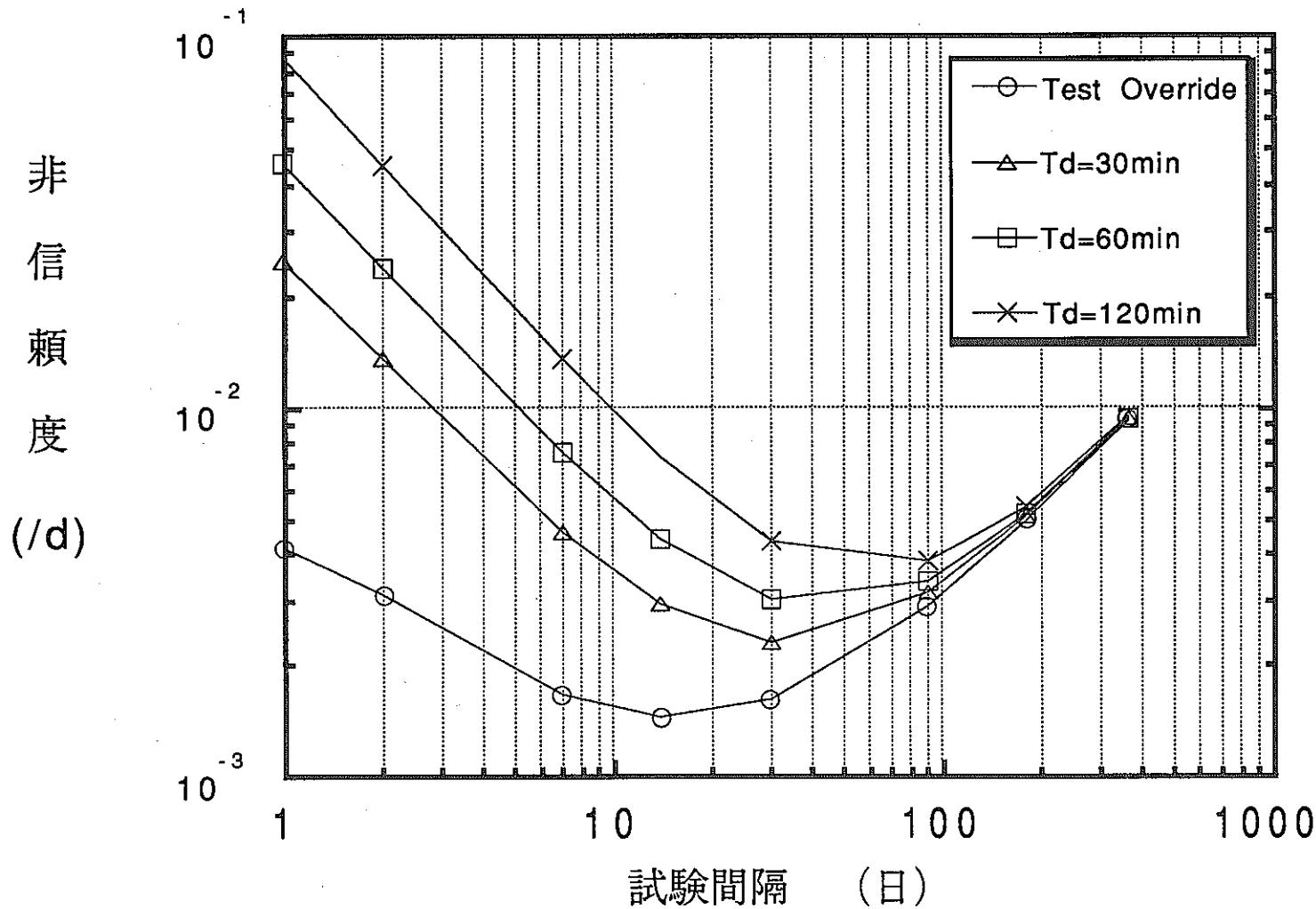


図3.1.7 試験オーバーレイ、ヒューマンエラーを考慮した電動弁の信頼度

空気作動弁  
手動弁  
電動弁  
ダンパー  
ベーン  
ブロワー  
電磁ポンプ  
2次系機械式ポンプ  
1次系機械式ポンプ

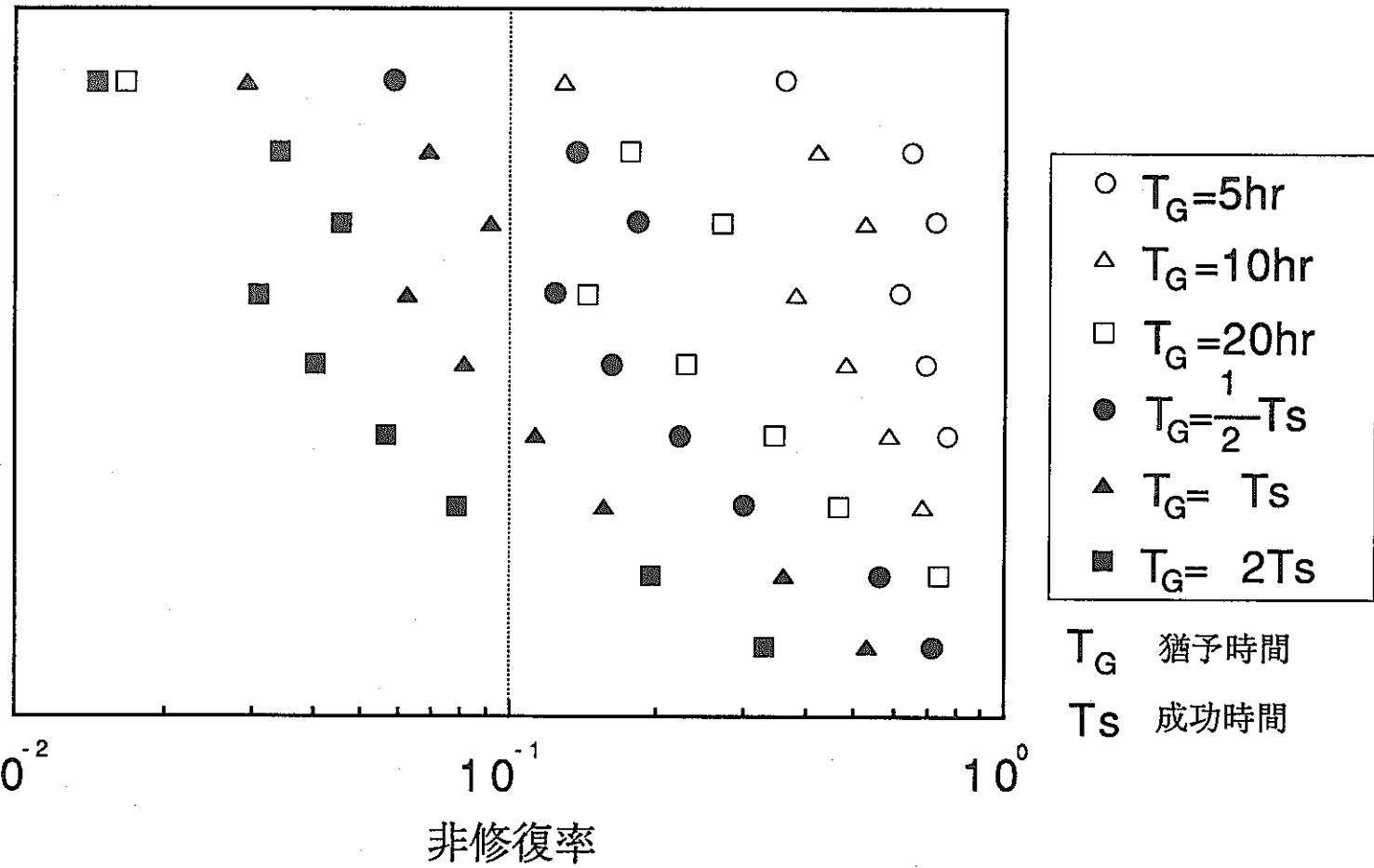


図3.2.1 高速炉用機器の機器別修復率

空気作動弁

手動弁

電動弁

ダンパー

ベーン

プロワー

電磁ポンプ

2次系機械式ポンプ

1次系機械式ポンプ

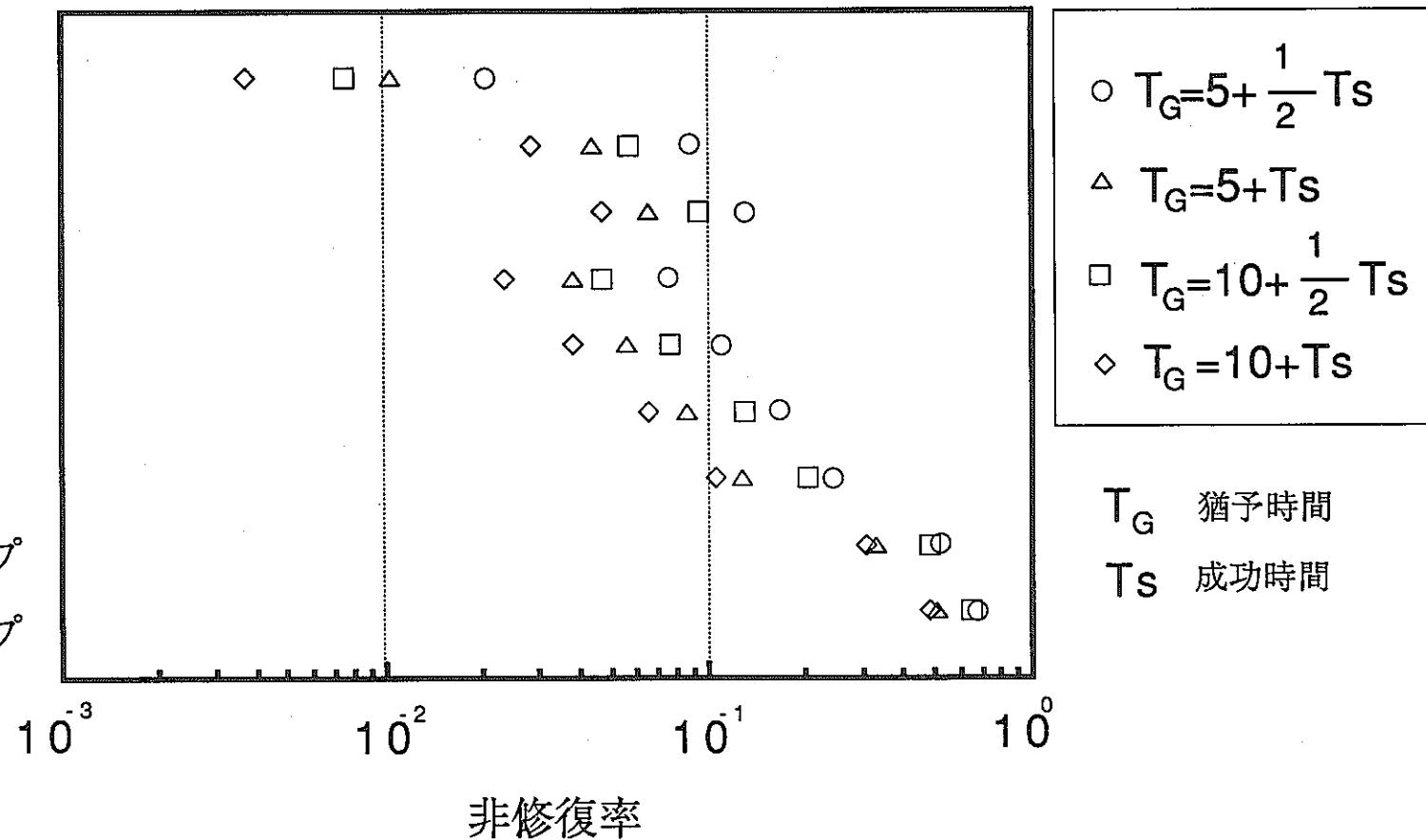


図3.2.2 高速炉用機器の機器別修復率

#### 4. 系統信頼度評価

崩壊熱除去系の信頼度は成功基準、構成機器、サポートシステム、使命時間等の影響を大きく受けると考えられるので、これらの項目に関して検討を行うために、系統信頼度評価を行った。

##### 4. 1 解析対象モデル

解析対象プラントの崩壊熱除去系は、図4.1.1 の右側に示すように 2 次主冷却系から分岐した I R A C S ( Intermediate Reactor Auxiliary Cooling System : 中間補助炉心冷却系) タイプとした。崩壊熱は 1 次主冷却系から 1 次主冷却系中間熱交換器を経て、2 次主冷却系に伝えられ、崩壊熱除去系の空気冷却器を介して大気に放散される。通常出力運転時のヒートシンクである水・蒸気系は崩壊熱除去には用いないものとして評価した。各ループのフロントラインシステムは、表4.1.1 に示す機器より構成されているものとした。表4.1.1 に示した機器のうち、1 次主冷却系循環ポンプモーター、2 次主冷却系循環ポンプモーター、空気冷却器送風機、蒸気発生器出入り口止め弁は崩壊熱除去系の強制循環除熱時にのみ必要であり、その他の機器は自然循環時にも必要である。蒸気発生器出入り口止め弁は、強制循環除熱時に水・蒸気系を崩壊熱除去系から隔離するために必要である。表4.1.2 に示すように、各機器が機能を果たすために必要なサポートシステムとしては、無停電電源、動力電源、機器冷却系を考慮する。自然循環時には、弁、ダンパー、ベーンの駆動・制御のための電源である無停電電源が必要で、強制循環時にはこれに加えて、動的機器の駆動電源、ポンプの機器冷却系が必要となる。サポートシステム間には、表4.1.3 、図4.1.2 に示すような従属関係がある。機器冷却系は補機冷却水設備によってサポートされており、補機冷却水設備はさらに補機冷却海水設備によってサポートされている。

##### 4. 2 崩壊熱除去系 1 ループあたりの故障確率

崩壊熱除去系の信頼度評価にあたっては、アンアベイラビリティ（作動要求時機能喪失確率）、アンリライアビリティ（使命時間中運転失敗確率）を機器故障率データベースから算出して使用した。表4.2.1 に計算結果を示す。表4.2.1 の計算結果には、ケーブルやブレーカーなどの機器に付属する部品のアンアベイラビリティ、アンリライアビリティも含まれている。アンアベイラビリティには、保守によるメンテナンスアウテージ（供用停

止) の影響も含んでいる。2次系のポンプのアンアベイラビリティが1次系のポンプのアンアベイラビリティより大きいのは、1次系ポンプは格納容器内にあり、保守を行わないためである。一方、運転員による修復操作の効果は含まれていない。これらは、共に保守的な仮定である。試験は月に1回行われるものと仮定し、試験によるアウテージは test override機能があるものとして含めていない。サポートシステムについては、今回の評価ではフォールトツリーを作成せず、高速増殖炉原型炉もんじゅのシステム解析で作成したフォールトツリーを定量化し、これをもとにアンアベイラビリティ、アンリライアビリティを求めた。サポートシステムの定量結果を表4.2.2.に示す。機器冷却系の定量結果には、機器冷却系のサポートシステムである補機冷却水系、補機冷却海水系の機能喪失確率も含んだ値を示している。

崩壊熱除去系が機能を果たすべき時間である使命時間を原子炉停止後168時間(1週間)とした場合の崩壊熱除去系1ループあたりの機能喪失確率を、表4.2.1、表4.2.2に示したフロントラインシステム及びサポートシステムの故障率より求め、強制循環、自然循環の各々について、表4.2.3に示す。1ループあたりで見ると、自然循環失敗の確率は強制循環失敗確率の約6分の1である。構成機器及び系統の重要度評価結果を図4.2.1に示す。強制循環除熱で重要度の大きいのは機器冷却系、ポンプのアンリライアビリティで、それぞれ約40%、約20%であり、動的機器及びそのサポートシステムの重要度が大きい。自然循環の場合は、ポンプ、送風機等の動的機器及びそのサポートシステムが不要なため、機能喪失確率の絶対値は強制循環の場合より小さいが、ダンパ開失敗(約40%)に代表されるように、フロントラインシステム機器のアンアベイラビリティの重要度が相対的に大きい。信頼度を向上させるためには、これらの重要度の大きな動的機器の試験を強化し、アンアベイラビリティを低く保つことが必要である。試験を行っている間、機器が供用不能(テストアウテージ)となることを防止するため、test override function等を付して、試験中でも作動要求があれば、作動可能な設計とすると効果的である。

崩壊熱除去系のタイプによって構成機器は多少異なるが、ポンプやダンパ等の重要度の大きな機器や、機器冷却系等の重要なサポートシステムは、いずれのタイプの場合にも必要なで、崩壊熱除去系の信頼度に対する崩壊熱除去系タイプの影響は、以下に述べる成功基準や、系統数の影響と比較すると相対的に小さいと考えられる。

#### 4. 3 崩壊熱除去系の機能喪失確率

崩壊熱除去系の信頼度は、崩壊熱を除去するために強制循環が必要か、自然循環のみでよいか、また各モードで最低何ループ必要か、何時間運転する必要があるかといった成功基準によって変化する。解析対象プラントには、2次主冷却系が3ループあり、各ループに崩壊熱除去系が備えられており、その各々が独立なサポートシステムを持っている場合を想定する。成功基準として、炉停止後1時間は最低1ループの強制循環、1～168時間は最低1ループの自然循環が必要であるとした場合の崩壊熱除去系機能喪失確率を図4.3.1に点線①で示す。炉停止後1時間から168時間の間の機能喪失確率の増分は、時刻0の時点でのアンアベイラビリティに比べると小さい。すなわち原子炉停止直後の成功基準の影響が最も大きい。そこで成功基準を可能な限り緩和して、炉停止直後から168時間まで、崩壊熱除去系1ループの自然循環のみでよいと変更すると、崩壊熱除去系の機能喪失確率は図4.3.1の点線②のようになり、時刻0で①の場合の約16分の1、時刻168時間で約4分の1に低減できる。炉停止直後から、3ループ自然循環または、2ループ自然循環で崩壊熱が除去できる場合の時刻0における機能喪失確率は⑤点、⑥点のようになり、それぞれ1ループ強制循環が成功基準の場合の約80%、約30%となる。信頼性確保の観点からは、炉停止直後の成功基準として崩壊熱除去系の強制循環を必要とする設計とすることが望ましい。

#### 4. 4 崩壊熱除去系の強化の影響

崩壊熱除去系が3ループの場合は、1ループのみで崩壊熱を除去できる(300%容量)としても、時間経過に伴って、アンリライアビリティが増大していくことを4.3節で示した。起因事象が主冷却材の漏洩に係わる場合は、当該ループからの放散熱に期待できず、崩壊熱除去系の使命時間が延びることも考えられる。使命時間を1ヶ月とすると、図4.3.1に点線①、②で示すように、アンリライアビリティの寄与がさらに大きくなる。そこで、本節では、除熱能力の小さい崩壊熱除去系をもう1系統備えた場合について検討する。除熱能力が小さい崩壊熱除去系とは、原子炉停止直後には単独で崩壊熱を除去しきれないが、時間が経過し、崩壊熱が低下した後には、単独で崩壊熱除去ができる系統である。例えば、図4.1.1の左側に示すようなD R A C S(Direct Reactor Auxiliary Cooling System:直接補助炉心冷却系)を考える。なお、このD R A C Sにも他の崩壊熱除去系の各ループとは独立なサポートシステム(機器冷却系や電源等)が備えられているものとする。炉停止後24時間経過以降は、D R A C Sのみでも崩壊熱が除去できるとし

た場合の崩壊熱除去系機能喪失確率を図4.3.1に実線③、④で示す。③は炉停止後1時間はIRACS1ループの強制循環が必要な場合、④は炉停止直後からIRACS1ループの自然循環のみでよい場合である。除熱容量の小さな崩壊熱除去系を1系統加えることによって、24~720時間のアンリライアビリティは約4分の1になり、アンリライアビリティの増加が効果的に抑制されることがわかる。

#### 4. 5 サポートシステム系統数の影響

4. 4節では、崩壊熱除去系の系統数を増やして、機能を増強した場合の検討を行った。その際、機器冷却系や電源などのサポートシステムはフロントラインシステムの系統毎に独立に備えられているものと仮定した。ここでは、サポートシステム系統数の影響を検討する。成功基準は使命時間の168時間中変化せず、1ループの強制循環または1ループの自然循環として、計算した結果を表4.5.1、図4.5.1に示す。

成功基準が1ループ強制循環の場合は、サポートシステムの寄与が支配的であり、サポートシステムの系統数を変えずに、フロントラインシステムの系統数だけを増やしても崩壊熱除去系の機能喪失確率は大きく減少しない。例えば、フロントラインシステム3、サポートシステム2のプラントのフロントラインシステムだけを1系統増やして、フロントラインシステム4、サポートシステム2としても、崩壊熱除去系の機能喪失確率は殆ど変化しない。サポートシステムを1系統増やしてフロントラインシステム3、サポートシステム3とした場合は、機能喪失確率は約5分の1になる。サポートシステムの数が、フロントラインシステムの数よりも少ないと、崩壊熱除去系の機能喪失確率はサポートシステムの機能喪失確率によって支配されてしまうので、フロントラインシステムのみを強化するのは信頼度上効果は小さい。

成功基準が1ループ自然循環の場合は、強制循環の場合と比較して、フロントラインシステムのアンアベイラビリティの寄与が大きいので、フロントラインシステムを強化する効果も大きい。例えば、フロントラインシステム3、サポートシステム2のプラントのフロントラインシステムだけを1系統増やして、フロントラインシステム4、サポートシステム2とした場合も、サポートシステムだけを1系統増やして、フロントラインシステム3、サポートシステム3とした場合も、共に崩壊熱除去系の機能喪失確率は約40%減少する。

#### 4. 6 まとめ

高速炉プラントの崩壊熱除去系に関する信頼度評価を行い、以下の知見が得られた。

- ・ I R A C S タイプの崩壊熱除去系において、使命時間が168 時間の場合、1 ループあたりの自然循環除熱の機能喪失確率は強制循環の約 6 分の 1 である。
- ・ 使命時間を 168 時間とすると、1 ループあたり、強制循環モードでは機器冷却系及びポンプのアンリライアビリティの重要度がそれぞれ約 40%、約 20% と大きい。自然循環モードでは、空気冷却器出入口ダンバのアンアベイラビリティの重要度が約 40% で最も大きい。
- ・ 崩壊熱除去系の機能喪失確率に対する崩壊熱除去系のタイプの影響は、成功基準やサポートシステム構成に比較して相対的に小さい。
- ・ 原子炉停止直後の成功基準が崩壊熱除去系機能喪失確率に与える影響が大きい。使命時間を 168 時間とすると最初の 1 時間に 1 ループの強制循環が必要な場合の機能喪失確率は 1 ループの自然循環のみでよい場合の約 4 倍である。
- ・ 除熱容量の小さな崩壊熱除去系を 1 系統加えることによって、使命時間が 720 時間の場合には、アンリライアビリティは約 4 分の 1 になり、使命時間が長い場合のアンリライアビリティの増加を効果的に抑制できる。
- ・ 強制循環モードではサポートシステムの寄与が大きいので、フロントラインシステムだけを増強しても信頼度上効果は小さい。
- ・ 成功基準が 1 ループ自然循環の場合は、強制循環の場合と比較して、フロントラインシステムのアンアベイラビリティの寄与が大きいので、フロントラインシステムを強化する効果も大きい。

高速炉プラントにおける系統・機器の信頼度を決定する主な因子について把握するとともに、適切な信頼性を確保するための設計方針にかかわる定量的な検討を行う基盤が整備された。

表 4. 1. 1 崩壊熱除去系の構成機器

| 機器名           | 強制循環にのみ必要な機器 |
|---------------|--------------|
| 1次系ポンプ・ボニーモータ | ○            |
| 1次系逆止弁        |              |
| 1次系配管         |              |
| 中間熱交換器        |              |
| 2次系ポンプ・ボニーモータ | ○            |
| 2次系配管         |              |
| 空気冷却器出口止め弁    |              |
| 蒸気発生器入口止め弁    | ○            |
| 蒸気発生器出口止め弁    | ○            |
| 空気冷却器         |              |
| 空気冷却器送風機      | ○            |
| 空気冷却器入口ベーン    |              |
| 空気冷却器入口ダンパ    |              |
| 空気冷却器出口ダンパ    |              |

表 4. 1. 2 フロントラインシステム機器とサポートシステムの依存関係

|                      | サポートされる機器 |     |   |     |     |
|----------------------|-----------|-----|---|-----|-----|
|                      | ポンプ       | 送風機 | 弁 | ダンパ | ベーン |
| する<br>ポシ<br>トテ<br>すム | 動力電源      | ○   | ○ |     |     |
|                      | 機器冷却系     | ○   |   |     |     |
|                      | 無停電電源     |     |   | ○   | ○   |

表 4. 1. 3 サポートシステム間の依存関係

|                     | サポートされるシステム |       |        |         |
|---------------------|-------------|-------|--------|---------|
|                     | 動力電源        | 機器冷却系 | 補機冷却水系 | 補機冷却海水系 |
| する<br>ポス<br>トテ<br>ム | 動力電源        | ○     | ○      | ○       |
|                     | 機器冷却系       |       |        |         |
|                     | 補機冷却水系      | ○     |        |         |
|                     | 補機冷却海水系     | ○     | ○      |         |

表 4. 2. 1 崩壊熱除去系フロントラインシステムの故障率

| 機器             | 故障モード   | アンアベ伊拉ビリティ (/demand) | アンリライアビリティ (/hour)   |
|----------------|---------|----------------------|----------------------|
| 冷却材を内包する全機器    | 漏洩・閉塞   | $1.8 \times 10^{-6}$ | $8.1 \times 10^{-6}$ |
| 1次系ポンプ・ポンニーモータ | 起動・運転失敗 | $1.0 \times 10^{-3}$ | $4.7 \times 10^{-5}$ |
| 2次系ポンプ・ポンニーモータ | 起動・運転失敗 | $1.1 \times 10^{-3}$ | $4.7 \times 10^{-5}$ |
| 空気冷却器出口止め弁     | 閉失敗     | $8.6 \times 10^{-4}$ | $8.0 \times 10^{-7}$ |
| 蒸気発生器入口止め弁     | 閉失敗     | $8.6 \times 10^{-4}$ | $1.2 \times 10^{-6}$ |
| 蒸気発生器出口止め弁     | 閉失敗     | $8.6 \times 10^{-4}$ | $1.2 \times 10^{-6}$ |
| 空気冷却器胴部        | 漏洩      | $4.3 \times 10^{-6}$ | $1.2 \times 10^{-8}$ |
| 空気冷却器送風機       | 起動・運転失敗 | $1.8 \times 10^{-3}$ | $1.2 \times 10^{-5}$ |
| 空気冷却器入口ベーン     | 開、制御失敗  | $8.5 \times 10^{-4}$ | $7.2 \times 10^{-6}$ |
| 空気冷却器入口ダンパ     | 閉失敗     | $2.7 \times 10^{-3}$ | $1.5 \times 10^{-6}$ |
| 空気冷却器出口ダンパ     | 開、制御失敗  | $2.7 \times 10^{-3}$ | $8.6 \times 10^{-6}$ |

表 4. 2. 2 崩壊熱除去系のサポートシステムの故障率

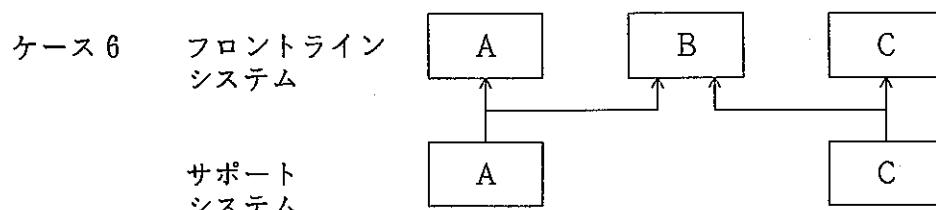
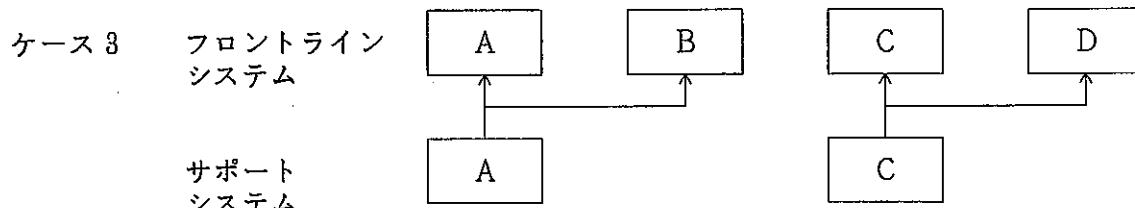
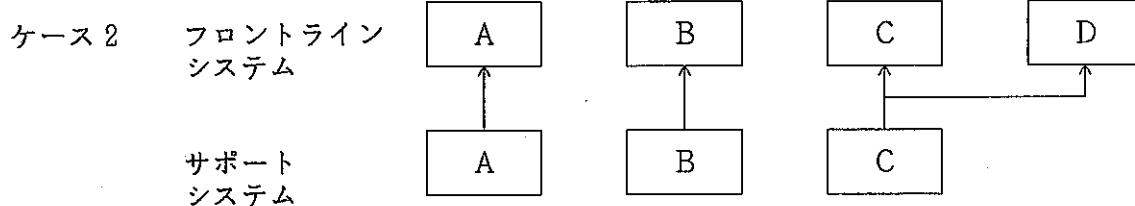
| サポートシステム | 必要とする機器   | アンアベイラビリティ (/demand) | アンリライアビリティ (/hour)   |
|----------|-----------|----------------------|----------------------|
| 動力電源     | ポンプ、送風機   | $1.3 \times 10^{-4}$ | $4.3 \times 10^{-5}$ |
| 無停電電源    | 弁、ダンパ、ベーン | $4.2 \times 10^{-5}$ | $8.0 \times 10^{-6}$ |
| 機器冷却系    | ポンプ       | $5.5 \times 10^{-3}$ | $1.9 \times 10^{-4}$ |

表 4. 2. 3 崩壊熱除去系 1 ループあたりの機能喪失確率

|        | アンアベイラビリティ (/demand) | アンリライアビリティ (/168hour) | 合 計 (/168hour)       |
|--------|----------------------|-----------------------|----------------------|
| 強制循環失敗 | $1.8 \times 10^{-2}$ | $6.3 \times 10^{-2}$  | $8.1 \times 10^{-2}$ |
| 自然循環失敗 | $7.1 \times 10^{-3}$ | $5.7 \times 10^{-3}$  | $1.3 \times 10^{-2}$ |

表 4. 5. 1 崩壊熱除去系系統数別機能喪失確率

| ケ<br>ー<br>ス<br>番<br>号 | フロント<br>ライ<br>ン<br>シス<br>テム<br>系<br>統<br>数 | サポー<br>ト<br>シス<br>テム<br>系<br>統<br>数 | 成 功 基 準              |                   |                      |                   |
|-----------------------|--|-------------------------------------|----------------------|-------------------|----------------------|-------------------|
|                       |  |                                     | 1 ループ強制循環            |                   | 1 ループ自然循環            |                   |
|                       |  |                                     | 絶対値                  | 相対値               | 絶対値                  | 相対値               |
| 1                     | 4  | 4                                   | $4.1 \times 10^{-5}$ | $1.0 \times 10^0$ | $2.7 \times 10^{-8}$ | $1.0 \times 10^0$ |
| 2                     | 4  | 8                                   | $3.0 \times 10^{-4}$ | $7.4 \times 10^0$ | $2.5 \times 10^{-7}$ | $9.2 \times 10^0$ |
| 3                     | 4  | 2                                   | $2.2 \times 10^{-3}$ | $5.5 \times 10^1$ | $2.3 \times 10^{-6}$ | $8.4 \times 10^1$ |
| 4                     | 4  | 1                                   | $4.6 \times 10^{-2}$ | $1.1 \times 10^3$ | $1.4 \times 10^{-3}$ | $5.1 \times 10^4$ |
| 5                     | 3  | 3                                   | $5.1 \times 10^{-4}$ | $1.3 \times 10^1$ | $2.1 \times 10^{-6}$ | $7.8 \times 10^1$ |
| 6                     | 3  | 2                                   | $2.3 \times 10^{-3}$ | $5.6 \times 10^1$ | $3.8 \times 10^{-6}$ | $1.4 \times 10^2$ |
| 7                     | 3  | 1                                   | $4.6 \times 10^{-2}$ | $1.1 \times 10^3$ | $1.4 \times 10^{-3}$ | $5.1 \times 10^4$ |
| 8                     | 2  | 2                                   | $6.4 \times 10^{-3}$ | $1.6 \times 10^2$ | $1.7 \times 10^{-4}$ | $6.1 \times 10^3$ |
| 9                     | 2  | 1                                   | $4.7 \times 10^{-2}$ | $1.2 \times 10^3$ | $1.5 \times 10^{-3}$ | $5.6 \times 10^4$ |
| 10                    | 1  | 1                                   | $8.0 \times 10^{-2}$ | $2.0 \times 10^3$ | $1.3 \times 10^{-2}$ | $4.7 \times 10^5$ |



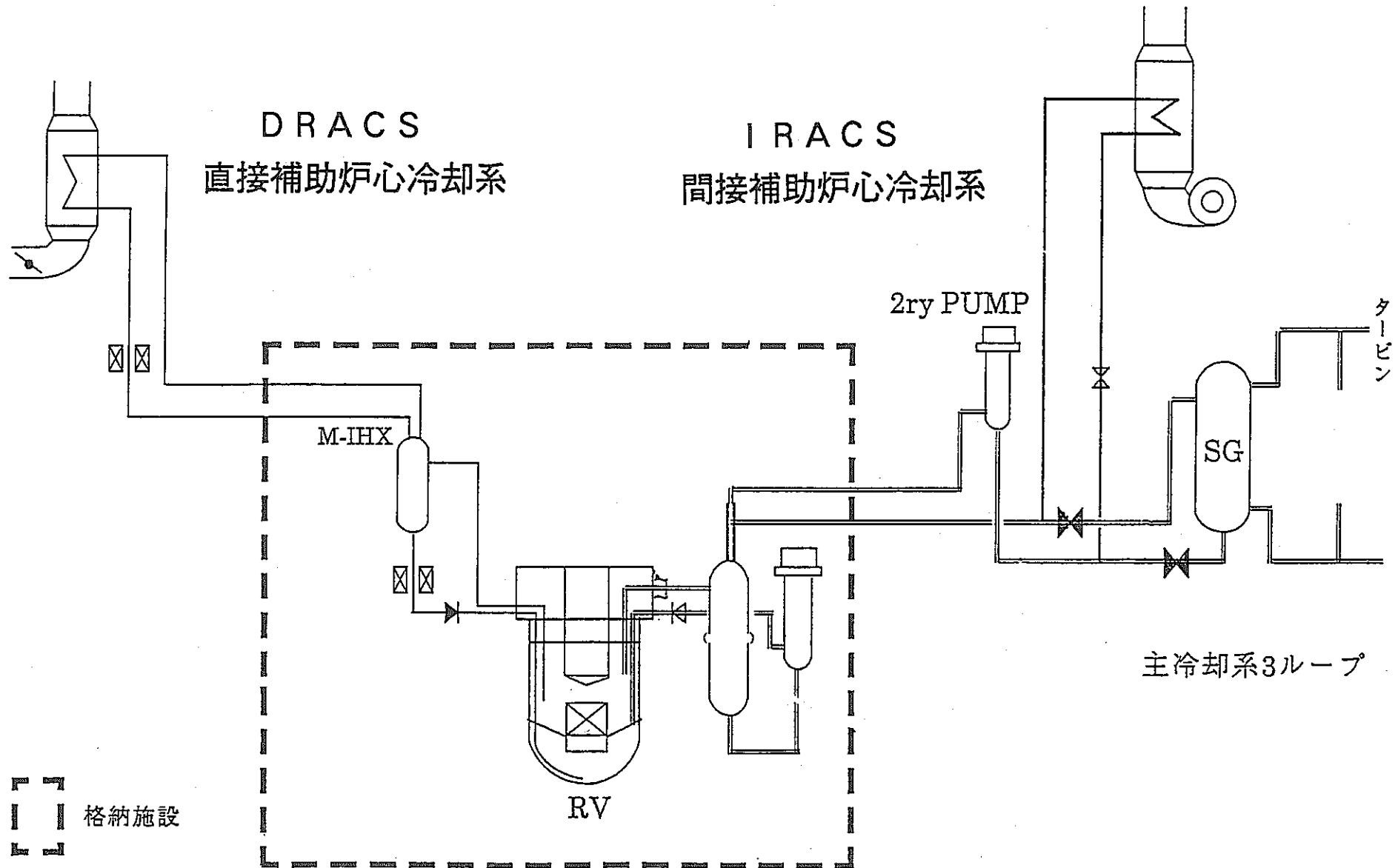


図 4.1.1 崩壊熱除去系系統概念図

フロント  
ライン  
システム

サポート  
システム

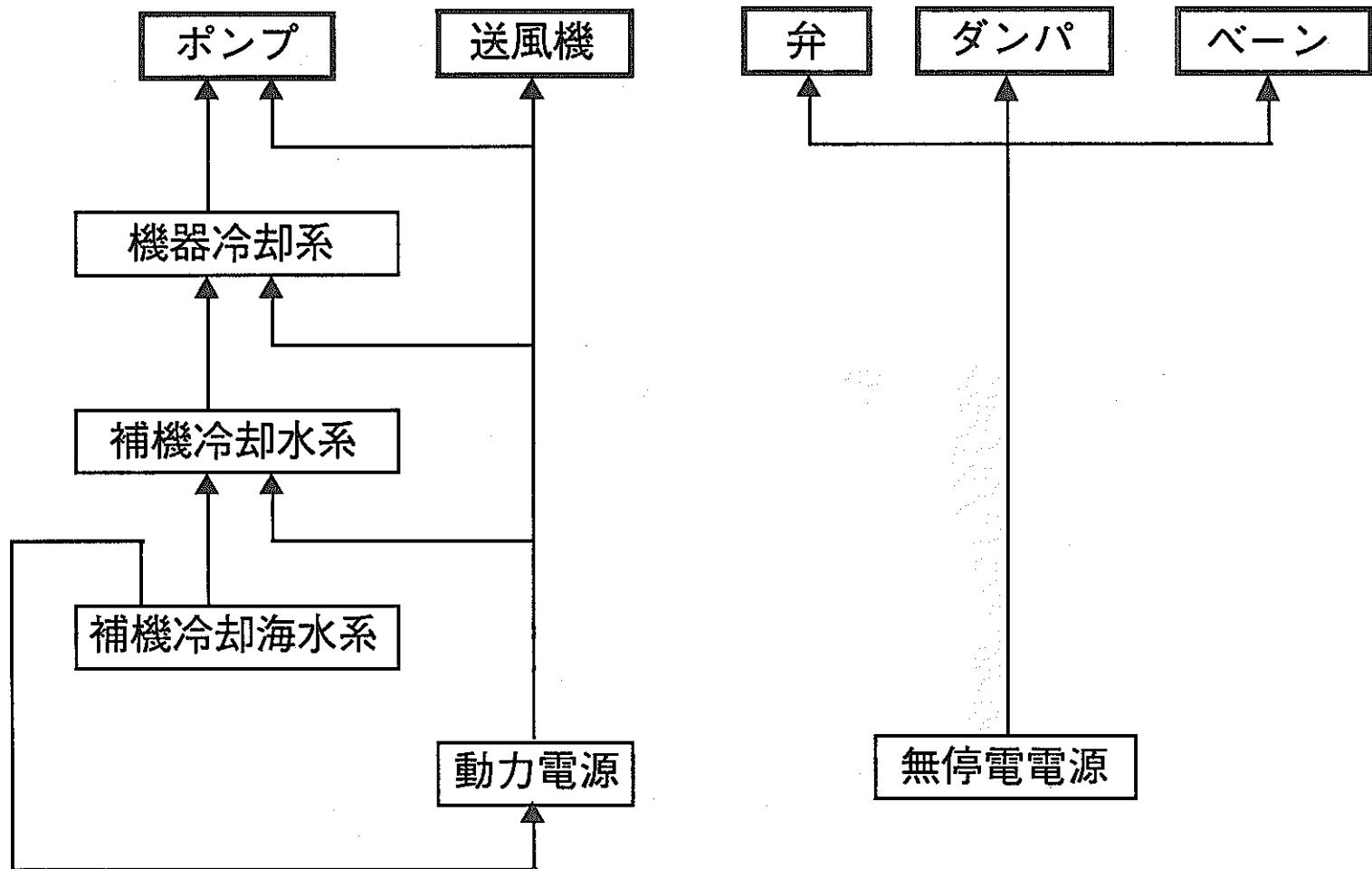


図 4.1.2 サポートシステム間の従属関係

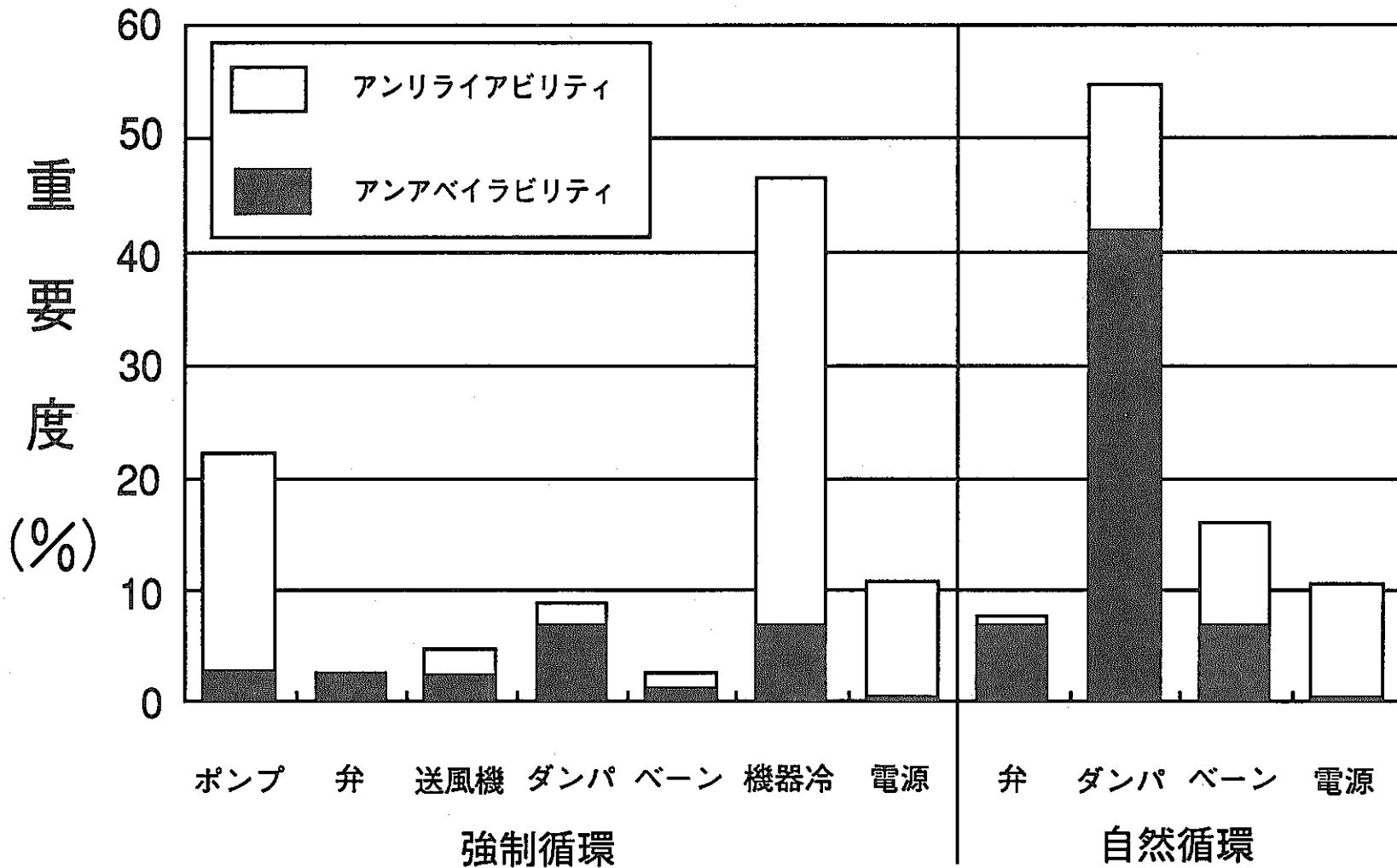


図 4.2.1 構成機器及びサポートシステムの重要度  
(崩壊熱除去系1ループについて)

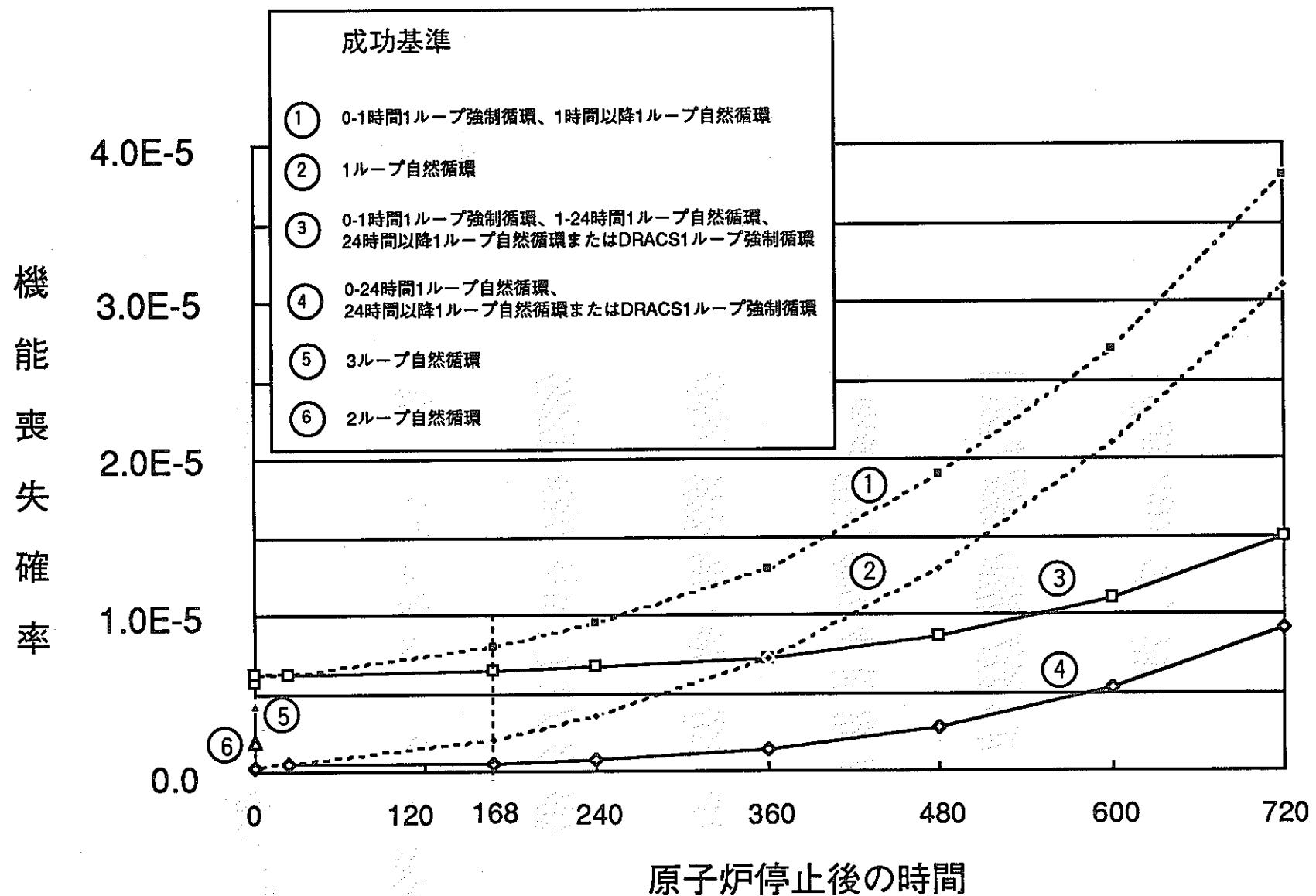


図 4.3.1 崩壊熱除去系機能喪失確率の時間変化

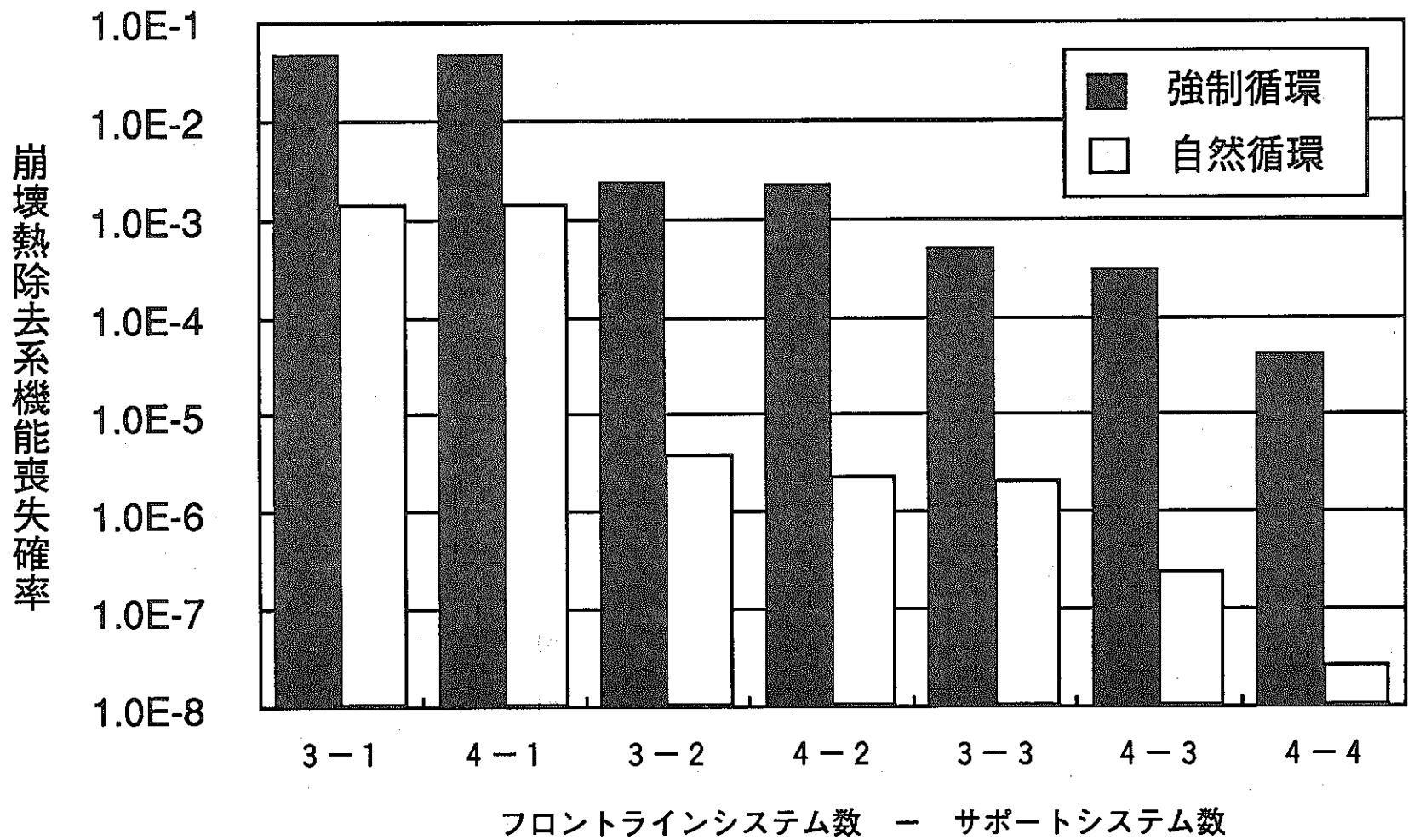


図 4.5.1 崩壊熱除去系機能喪失確率に対する系統数の影響  
(使命時間=168時間)

## 5. 結言

信頼度評価に当たって信頼性データはプラント固有のものを利用することが望ましいとされるが、大型炉の安全設計の検討に当たってはプラント固有のデータがないのでこれまでの高速炉プラントの運転経験データを適切に活用することが必要である。C R E D O データベースを利用し、高速炉プラントの運転経験に基づいて高速炉用機器信頼性データの特徴を整理し、高速炉プラントへの信頼性データの適用に当たって注意すべき点について傾向分析によりまとめた。信頼性データの利用に当たっては機器タイプごとに内部流体と駆動方式により分類することがまず第一に必要となる。また、条件別の信頼性データ分析結果によれば、弁については設計温度、設計サイズにより信頼性データを使い分ける必要がないこと、格納容器隔離弁と一般弁については信頼性データの使い分けの必要があること、検出器について安全系・非安全系の使い分けの必要がないことなどの知見が得られた。故障率の不確定性としては  $\chi^2$  推定で求められた不確定性幅より大きい機器間のバラツキを考慮した不確定性を用いるべきである。

高い信頼度で安全機能を達成する手段としての単一故障基準や試験の効果について確率論的な検討を加えた。単一故障基準の適用に当たっては機器の信頼性を考慮して適切に行う必要がある。機器信頼度評価によれば常用系（作動要求以前から作動状態にあるもの）あるいは静的機器の信頼度は高く、非常に長い使命を除けば単一故障を想定する必要はない可能性が示された。待機系機器の信頼度を確保する上で機能確認試験の実施が効果的であり、月1回程度の試験頻度は試験によるアウトエージや試験後ヒューマンエラーを考慮すればほぼ適切であると考えられる。

高速炉プラントの崩壊熱除去系を対象として系統信頼性評価を実施し、信頼度評価上重要な因子の影響を把握した。I R A C S タイプの崩壊熱除去系において、1ループあたりの自然循環除熱の機能喪失確率は強制循環除熱の機能喪失確率の数分の1程度である。強制循環モードでは動的機器及びサポートシステムの重要度が大きく、自然循環モードではフロントラインシステム機器のアンアベイラビリティの重要度が大きい。強制循環モードではサポートシステムの寄与が大きいので、フロントラインシステムだけを増強しても信頼度上効果は小さい。機能喪失確率に対する崩壊熱除去系のタイプの影響は、成功基準やサポートシステム構成に比較して相対的に小さい。原子炉停止直後の成功基準が崩壊熱除去系機能喪失確率に与える影響が大きいが、使命時間が長い場合には使命時間中の故障確率が有意に増加する。その場合に除熱容量の小さな崩壊熱除去系を1系統加えることによ

って、アンリライアビリティの増加を効果的に抑制できる。

以上、合理的な大型炉の安全設計や安全基準・指針の整備に当たって必要となる確率論的評価による定量的な技術的基盤が整備された。

## 6. 参考文献

- (1) 中井, 日本原子力学会誌, Vol. 31, No. 5, 「高速炉用機器信頼性データベースの開発」
- (2) 「発電用軽水型原子炉施設に関する安全設計審査指針」原子力安全委員会
- (3) 「発電用軽水型原子炉施設の安全機能の重要度分類に関する審査指針」原子力安全委員会

会