

土木研究所資料

機械設備の信頼性評価に関する調査研究

平成2年3月

建設省土木研究所
機械施工部機械研究室

Copyright ©(1990) by P. W. R. I.

All rights reserved. No part of this book may be reproduced by any means, nor transmitted, nor translated into a machine language without the written permission of the Director General of P. W. R. I.

この報告書は、土木研究所長の承認を得て刊行したものである。したがって、本報告書の全部又は一部の転載、複製は、土木研究所長の文書による承認を得ずしてこれを行ってはならない。

機械設備の信頼性評価に関する調査研究

機械研究室	室長	長	健次
	室長	樋下	敏雄 ¹⁾
	主任研究員	村松	敏光
	研究員	多田	和弘 ²⁾
	研究員	大沢	昭弘
		斉藤	英晴 ³⁾

要旨：河川管理施設や道路管理施設の中で重要な役割を担っている機械設備のより確実な機能確保を目的として、信頼性工学を導入してこれら機械設備の信頼性を定量的に評価する手法の開発を行ったものである。定量的評価に基づく、計画、設計、維持、管理の合理的な実施方法や、新技術の導入の信頼性向上効果の評価を行った。

キーワード：機械設備，FMEA，FTA，信頼性工学，設計，維持，管理，新技術

注 1) 現 本州四国連絡橋公団工務部設備課長

2) 現 近畿地方建設局道路部機械課長

3) 現 関東地方建設局霞ヶ浦工事事務所波崎出張所電気通信係長

ま え が き

建設事業の推進により年々整備が進む河川管理施設や道路施設の中で、機械設備は重要な役割を担って設置されている。例えば、排水ポンプ設備やゲート設備は、河川構造物そのものの一部となり内水排除や洪水の安全な流下等の機能を発揮している。また、トンネル換気設備や散水融雪設備は、道路空間や路面の状態を良好に保持し、安全かつ円滑な道路交通の確保に寄与している。

これら機械設備の大きな特徴は、作動して始めて要求される機能を発揮する点であり、このため、故障が発生する可能性も潜在している。操作盤のパイロットランプから設備機械本体に至るまで、その本来の機能が喪失または低下することはすべて“故障”と考えられるが、万一設備本体の故障が発生した場合、周囲の地域社会へ与える影響は甚大である。

建設省では、これら機械設備の機能の確保を図るため、各設備の設計、維持管理についての技術基準や要領等の整備を進めている。また、治水事業、道路整備事業等の進歩に伴い、排水ポンプ設備やゲート設備、トンネル換気設備等が増加し、効率的かつ効果的な実施による維持管理の充実が重要な課題となってきた。

機械設備の信頼性を向上するための設計や維持管理の方法の検討に当たっては、関係技術者のノウハウや経験の積み重ねに基づいた定性的な評価に頼っているのが現状である。

一方、他分野においては定量的な評価が試みられており、原子力発電所や航空機などのように故障の発生が致命的な影響を与える設備などをはじめとして、「信頼性工学」を応用した定量的な信頼性管理が一般化している。

本調査研究では、このような情勢をふまえ建設省が所管する機械設備の信頼性確保方策を検討するために、信頼性工学の導入を試みるもので、実態調査等を中心として地方建設局のご協力の下に実施したものである。

昭和59年度は予備調査として、機械設備の維持管理の実態を事例研究としてとりまとめ今後の課題を把握するとともに、信頼性工学の基礎理論調査を行い、本調査研究の実施方針を検討した。

昭和60年度は、調査の実施要領及び中間的なとりまとめを行い、さらに、本調査で実施する信頼性工学に基づく解析手法や成果の活用方向などについてまとめた。

昭和61年度は、信頼性工学を導入した機械設備の信頼性評価手法および点検手法等のとりまとめを行った。

和昭62年度は、ガスタービン等の従来用いられていない技術を適用した場合の効果を定量的に評価するとともに、パソコンで信頼性を計算するソフトの開発を行った。

この成果が、機械設備の合理的な設計・維持・管理手法の検討に役立てば幸いである。

目 次

まえがき

1. 概 要	1
1.1 調査研究の目的	1
1.2 調査研究の体系	1
1.3 調査研究の体制と計画	1
2. 研究の基本方針と位置づけ	3
2.1 機械設備維持管理の実態と課題	3
2.2 システムの信頼性の評価	3
2.3 調査研究の内容	5
2.3.1 事例研究	5
2.3.2 理論体系調査	5
2.3.3 信頼性データの収集	5
2.3.4 信頼性評価手法の検討	6
2.4 信頼性と設計・維持管理	6
3. 信頼性解析の基礎理論	11
3.1 信頼性の定量化	11
3.2 信頼性データの収集	18
3.3 信頼性評価尺度の検討	19
3.3.1 非常用設備のアベイラビリティ	19
3.3.2 常用設備のアベイラビリティ	20
4. 信頼性の評価法	23
4.1 FMEAの実施	23
4.1.1 排水ポンプ設備のFMEA	23
4.1.2 トンネル換気設備のFMEA	33
4.2 FT図の作成	41
4.2.1 排水ポンプ設備のFT図	41
4.2.2 トンネル換気設備のFT図	50
5. 信頼性データ	54
5.1 フィールドデータの収集	54
5.1.1 排水ポンプ設備のフィールドデータ	54
5.1.2 トンネル換気設備のフィールドデータ	58
5.2 信頼性データブックによる信頼性データ	61
5.2.1 信頼性データブック	61

5.2.2	調査対象機械設備における使用環境調査	62
5.2.3	環境データによる補正	64
5.3	機器要素の故障率	67
5.3.1	排水ポンプ設備の機器故障率	67
5.3.2	トンネル換気設備の機器故障率	68
6.	信頼性の定量化	69
6.1	排水ポンプ設備の信頼性	69
6.2	トンネル換気設備の信頼性	72
7.	信頼性と設備の設計・維持管理	75
7.1	信頼性と設計	75
7.1.1	排水ポンプ設備のシステム設計	75
7.1.2	トンネル換気設備のシステム設計	79
7.2	信頼性と維持管理	80
7.2.1	排水ポンプ設備の維持管理	80
7.2.2	トンネル換気設備の維持管理	85
7.2.3	設置環境改善による信頼性向上	89
7.3	新技術の導入と信頼性	92
7.3.1	機器故障率の決定	92
7.3.2	新技術を導入したFT図の作成	96
7.3.3	信頼性計算	99
7.3.4	新技術導入効果の評価	100
8.	ま と め	102
	あ と が き	104
	参 考 文 献	105

付録

ブール代数によるFTAの定量化手法

第38～40回建設省技術研究会共通部門指定課題「機械設備の信頼性評価に関する調査研究」
とりまとめ担当者名簿

1. 概 要

1.1. 調査研究の目的

現在、建設省が直轄で管理している河川、ダム、道路などに設置されている機械設備の総数は約10,000台あり、総資産は約4,200億円にも達している。これらの機械設備は河川、ダム、道路などの本来の機能を発揮するために設置されているものであり、その性能は永久的に維持されなければならない。

このため機械設備は設計段階で十分に信頼性を考慮して設置され、また設置後も信頼性を維持させるための点検整備などの維持管理も適切に行わなければならないことは言うまでもない。

しかし、これらの機械設備が本格的に設置され始めてからの歴史が比較的浅いこともあり、機械設備の信頼性を定量的に評価しながら管理する技術は未だ確立されていない。これまでは、主として機械設備に熟知した建設省職員の経験的技術によって維持管理することで大事に至る事故や故障を防いできたが、今後の設備数が増加し続けるのに対し、これら熟練の職員は急激に減少しつつあり、機械設備の合理的な設計・管理手法を確立させることが急務となっている。

本調査研究では、機械設備の維持管理実態や故障実態の調査、機械設備構成要素の信頼性調査および信頼性の定量的評価手法の研究などを行い、機械設備に関する信頼性管理手法を検討し、高い信頼性を持たせて機械設備を維持管理するための合理的な設計、点検、整備に係る基準・要領などの作成に資するものである。

1.2 調査研究の体系

信頼性の検討に係る作業の一般的な工程は、図-1.2.1に示すような体系になる。この中で、信頼性データを蓄積すべき要素分割レベルを規定するシステム分析と、要素毎に正確な信頼性データを蓄積することが最も重要である。

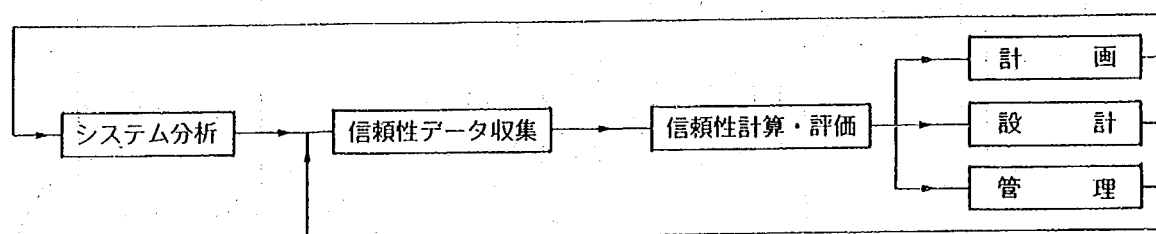


図-1.2.1 信頼性検討のフロー

特に、信頼性データの蓄積には長期間を要するのが一般的である。これは、ある部品の故障率（信頼性）を統計的に把握するには少なくとも10回以上の故障データを必要としているためで、通常5年から10年を要する。しかし、多くの部品は一般的に他の分野でも使用されていることから、他分野での信頼性データを活用することが可能なため、図-1.2.2に示す体系によって調査研究を進めることとした。

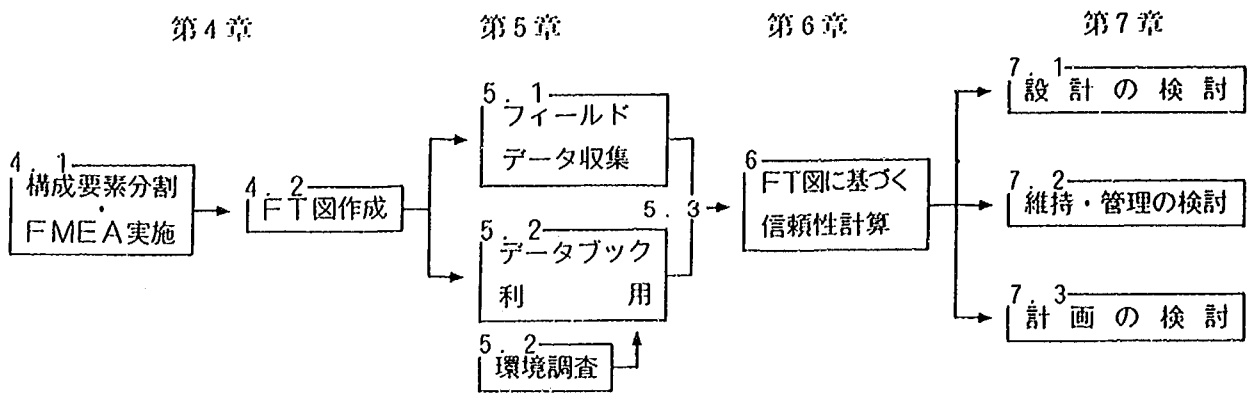


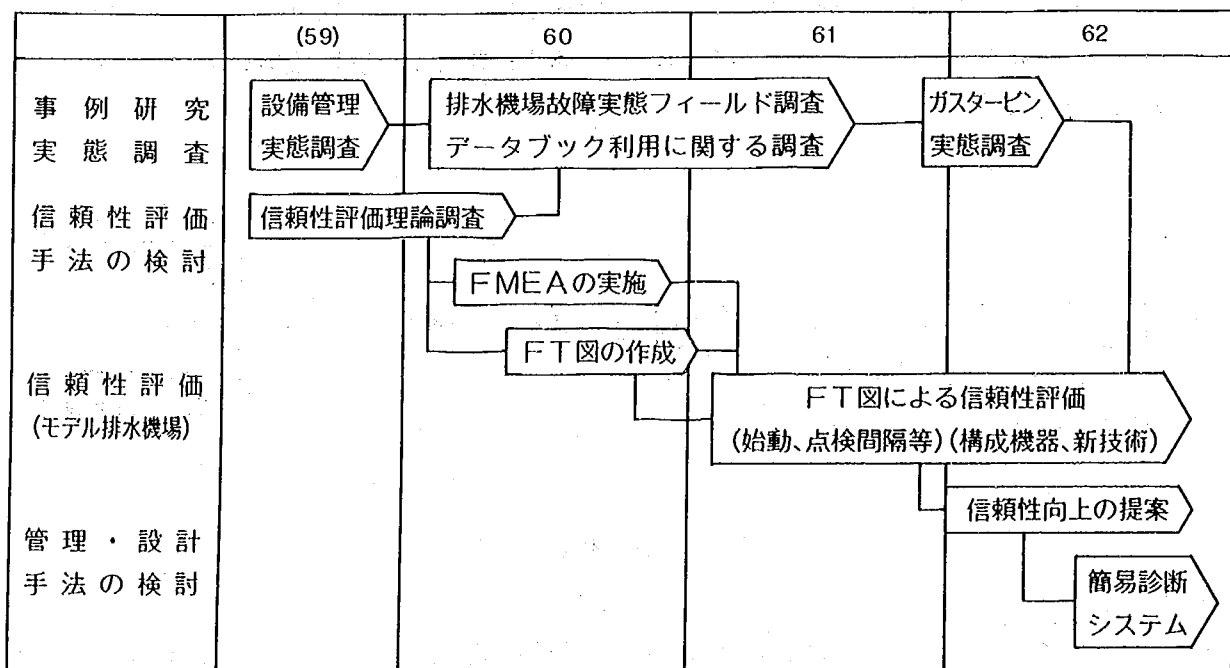
図- 1.2.2 調査研究の体系（数字は章，節）

1.3 調査研究の体制と計画

本調査研究は，昭和59年度から61年度の建設省技術研究会共通部門指定課題として実施したもので，建設経済局建設機械課を主務として，土木研究所が中心となって，大臣官房技術調査室，河川局，道路局等の関係部局の意見を踏まえつつ，各地方建設局と共同して行った。研究方針の策定，調査項目の決定および総括とりまとめは土木研究所が行い，個別調査および事項目のとりまとめは地方建設局が行った。

なお，本調査研究の年次計画は表- 1.3.1 に示すフローの通りである。

表 1.3.1 本調査試験の研究フローチャート



2. 研究の基本方針

2.1 機械設備維持管理の実態と課題

建設省が管理している排水ポンプ設備、河川用ゲート設備、ダム用ゲート設備、トンネル換気設備、トンネル非常用設備、散水融雪設備、道路排水設備、共同溝付帯設備、ダム施工設備などの機械設備の設計、管理の実態と課題を調査した。

現在、建設省で管理している設備数は表－2.1.1に示すとおりである。

これらの機械設備は、従来直営に近い形で管理されてきたが、設備の増加と業務の合理化などのために、運転・管理業務の委託化が進められている。そのため、合理的な設計、製作、維持の体系の確立が求められている。

表－2.1.1 直轄管理されている機械設備の数

設備の種類	施設数	主たる設備の 設置台数、総延長など	備 考
排水ポンプ設備	162箇所	主ポンプ台数 370台	ダム事業分を含む。 排水機場併設分、ダム事業分を含む。 現在稼働中の設備
河川用ゲート設備	5,453 "	門 数 7,570門	
ダム用ゲート設備	51 "	門 数 382門	
トンネル換気・非常用設備	51 "	換気ファン台数 366台	
散水融雪設備	313 "	設置区間総延長 150km	
道路排水設備	635 "		
共同溝付帯設備	50 "	共同溝総延長 67km	
ダム施工設備	10 "		

(昭和58年末現在：昭和59年度調査)

これらの設備の故障内容には、排水ポンプ設備におけるストレーナの目詰まり、ゲート設備における水密ゴムの劣化、散水融雪設備におけるノズルの目詰まりなど、それぞれのシステム固有の機器の故障と、センサ、リレー類のような共通部品の故障とが含まれている。また、同じ部品であってもシステムの中の位置づけによって、システムへの影響程度（運転続行への影響）が異なってくることから、個々の故障がシステムに及ぼす影響の程度を判定して、効果的な設計の改善や点検の実施を行うことの必要性が指摘された。

これら機械設備は今後も増加の傾向にあり、その機能に対する要求も高まってきていることから、故障が少なく、信頼性の高い状態に維持するうえで効果的かつ効率的な維持管理の必要性が指摘されている。

2.2 システムの信頼性の評価

完結したシステム（ここでは広義に解する。すなわち、部品や要素であっても、その範囲で機能を発揮するシステムとみなすことができる。）の信頼性（JISによれば、「システムが与えられた条件で規定の期間中、要求された機能を果たすることができる性質」）を表現するには、故障しやすさ（故障しにくさ）に加えて、修理のしやすさがあげられる。複雑なシステムでは、構成する部品の信頼性を基に、解析的、分析的にシステム全体の信頼性を予測することが行われている。

表－2.2.1 システムの主な信頼性評価尺度⁽¹⁾

	尺 度	尺 度 の 概 要
確 率	信 頼 度	系、機器等が規定の条件下で、意図する期間中、規定の機能を発揮する確率
	保 全 度	修理可能なものが、規定の条件での保全によって、規定期間内に復旧する確率
	アベイラビリティ	系、機器等が、特定の期間に機能を維持している確率
時 間	M T B F	平均故障間隔（Mean Time Between Failure）
	M T T F	故障までの平均時間（Mean Time To Failure）
	M T T R	平均修復時間（Mean Time To Repaire）
	M D T	平均動作不能時間（Mean Down Time）
比 率	不 良 率	全体の中の不良品の比率
	成 功 率	全体の中の成功の比率
	故障率，事故率	時間当りの不良，不成功等の比率
そ の 他	特性値の経時変化	上記の各種特性値の使用時間等による変化
	各種コスト有効性	ライフサイクルコスト，MTBF/コストのような信頼性と投入費用の関係

複雑なシステムの信頼性を定量的に説明する尺度としては、表－2.2.1に示すようなものがあるが、これらの値を解析的に求める手法としては、個々の構成要素を出発点としてその故障がシステム全体への様に影響していくかを解析するFMEA（Failure Mode and Effect Analysis：故障モード解析）と言われる手法と、システムとしての機能を損なう故障状態から出発し、分析的にこれへの影響因子を求めていくFTA（Fault Tree Analysis：故障の木解析）と言われる手法が一般的である。

このような解析的な手法をシステムに適用して設計・管理を行っている代表的なものに発電所がある。ここでは、常時稼動状態にある常用系と、常時待機状態にある非常用系とに設備を分類し、それぞれ別の評価尺度、設計、維持管理思想を適用している。これは、常時稼動状態にある機械では故障の発生と復帰が信頼性を左右するのに対し、常時待機状態にある機械では起動の失敗と連続運転可能な時間が信頼性を左右することによっている。

建設省が管理している機械設備をこのような観点から分類すると、表－2.2.2のようになる。この非常用設備の中には、トンネル非常用設備や道路排水設備に使用されるセンサ系統のように常用系に分類されるべきものが含まれており、常用設備の中に分類されている散水融雪設備のように要求される運転時間の長さやとらえ方によって非常用系的性格を併せ持っているものがある。

排水ポンプ設備は、比較的長期（出水の状態でない期間）にわたって待機状態にあるが、ひとたび出水が発生した場合には確実に起動でき、所要の時間にわたって排水機能を連続して維持しなければならない。トンネル換気設備は通常の運転条件^{*}の下では換気を目的とした運転を行っており、換気条件に基づき無人で自動運転制御が行われている。本調査研究では、排水ポンプ設備を非常用系の代表とし、トンネル換気設備を常用系の代表として事例研究を実施することとした。

表－2.2.2 常用系機械設備と非常用系機械設備

常 用 系	非 常 用 系
トンネル換気設備	排水ポンプ設備
散水融雪設備（冬季）	河川用ゲート設備
共同溝付帯設備	ダム用ゲート設備
ダム施工設備	トンネル非常用設備
	道路排水設備

2.3 調査研究の内容

2.3.1 事例研究

事例研究として、まず、建設省で管理している機械設備の設置実態、運転・管理状態、故障実態を調査するとともに信頼性評価に関する既存資料の収集等を実施した。

2.3.2 理論体系調査

信頼性管理に関する基礎理論、具体的には、種々の信頼性評価手法とそれぞれの手法の特質、信頼性データ収集の基本原則、信頼性管理に関する基本原理、信頼性工学分野における統計理論、故障物理理論などについて調査研究を行い、個々の機械設備の信頼性管理の適用法について調査研究を実施することとした。

まず、主として信頼性評価に関連する基礎理論を調査した。次に、信頼性管理に関する基礎理論を調査した。

さらに、原子力発電の分野で採用されている信頼性評価手法を調査し、本調査研究で行おうとする機械設備の信頼性管理への導入の可否、導入上の問題点を探った。

2.3.3 信頼性データの収集

(1) フィールドデータの収集

機械設備のうち主要なものについて、機械の管理体制、予防保全、事後保全等に関する実態を調査票により統一的な視点の下に全国規模で調査した。同時に、調査票には、信頼性に関するフィールドデータ収集機能も持たせ、これを基に信頼性評価の基礎となる故障率、修復率などを算出するものとした。

(2) データブック等の利用

信頼性工学分野のJIS、ISOなどの規格の整備状況や、市販の信頼性に関するデータブック等の調査を行った。これらデータブックに記載されている数値のうちで本調査研究で引用可能なものの範囲を明

^{*} トンネル換気設備にはこの他に、火災発生時の避難等を目的とした逆転運転の使用形態がある。

らかにし、フィールドデータを補完することとした。

また、データブックからのデータ引用に際して、使用環境による補正係数を求めるために、当該設備の設置環境に関する実態調査も併せて実施した。

2.3.4 信頼性評価手法の検討

上記の事例研究結果、理論体系調査結果に基づき、各々の設備の設置目的に合致した信頼性評価手法を研究した。さらに、この信頼性手法により、信頼性データの収集により得られたデータを用いて各設備の信頼性を算出した。

2.3.5 新技術の摘要性評価

既存のシステムについて実施したFMEA及びFTAに基づく信頼性の評価手法を、新たな技術導入によってシステムを組替えた場合に適用する方法について検討することによって、今後の技術革新やシステムの変更による信頼性の向上に生かすものである。

本研究では、ガスタービン、吐出管クーラの導入についてケーススタディを行った。

2.4 信頼性と設計・管理・維持

2.4.1 品質と信頼性

科学・技術とそれを利用した製品の発達にともなって、19世紀から20世紀初期にかけて、製造工業は非常な変貌を遂げた。この結果それまで考えられなかった仕事の専門家と大量生産および設計、製作、検査などの分化が起こった。これに関連して、正確法則から統計法則への考え方の転換、標準化の導入、さらに統計的手法を用いた統計的品質管理（SQC）への基盤が逐次築かれていった。

製品は設計意図どおり使用することによって有効性を発揮するものであり、技術的本質は規定の条件下で使用するとき、「性能・機能などを示す性質」と「使用中故障が少なく安定して使える性質」との2つを考えなければならない。

前者は通常「品質」と呼ばれ、工業生産では単なる検査から品質管理の実施によって確認されるようになった。後者は現在「信頼性」と呼ばれるが、初期には漠然とした耐久性など抽象的な表現が用いられ、工業生産では当初あまり関心が持たれなかったといわれる。これは当初の製品は比較的簡単であり、安全率の使用や経験によって、耐久性をある程度保持し得たからである。この品質と信頼性は相互に関連があって、今や製品の有効性発揮のためには欠くことができない概念である。

この漠然として信頼性の概念に明確な定義が与えられるようになったのは第二次大戦頃の軍用機器の開発に伴ってである。当時アメリカではそれまで考えられなかったすぐれた電子兵器が開発・生産され、それらの製品には品質管理が適用され厳重な検査に合格したものであった。ところがこれらの新兵器は、実使用の段階で予想もしなかった故障多発の問題が発生した。

このような電子機器、電子部品などの故障問題を解決するため、米国防省は、これを「信頼性問題」として正式に取り上げ、1952年「電子機器信頼性顧問団（略称AGREE）」を設置した。顧問団は9つの

問題ごとに専門委員会を設けて調査・研究を進め、1957年「AGREE報告」が提出され、これが以後の信頼性評価技術を発展させる基礎となった。

2.4.2 信頼性解析の意義

最近、建設省で設計管理する機械設備についても一般の産業分野における製品と同様に性能の高度化、重要な任務の付与、コスト/スケジュールの制約などが要望されるので、この目標を達成するために、実用経験の少ない新しい工学技術の適用、新規材料の使用などが必要となってきた。また、これら新しい部材の故障による任務達成の中断、故障多発による機能停止及び修理費用増大による損害、故障に起因する事故・災害に対する管理責任問題などの防止により一層の注意を払う必要が生じてきた。

このように機械設備に適切な信頼性を付与する必要性は極めて大きくなった。すなわち機械設備の評価基準が、従来の単なる「性能－コスト」の最適化から、「性能－信頼性－コスト」の最適化に移ったものと考えられる。したがって、これからの機械設備の設計・管理計画には設計当初から、検討項目に信頼性を加えなければならない。設計を開始した新しいシステムについて、基本設計あるいは詳細設計の完了した段階で、それぞれの設計に織り込まれた信頼性を検討し、設計目標の信頼性と比較して評価することができれば、設計段階から相当数の潜在故障を減らすことになり、その後の維持管理まで含めた信頼性についての検討を経済的に進めることができる。この種の評価法は信頼性解析といわれ、電子系のみならず定量的評価方法が適用しにくいとされている機械系についても、この要望が強くなってきたと言える。

この定量的な方法は、固有技術の知識および故障の経験を活用するのが主な手法であり、FTA（故障の本解析）による方法が最も一般に用いられている。

FTAの考え方は、1961年にアメリカの大陸間弾道ミニットマンの開発で、打ち上げ管制システムの安全性評価のため、ベル通信研究所ではじめて開発し使用した方法と言われている。1965年にアメリカで行われた安全性シンポジウムにはFTAに関する数編の論文が発表され、これを契機にアメリカでは原子力発電関係で信頼性・安全性解析にFTAが有効であるとして関心が高まった。その後コンピュータ化によるFTAの自動解析法などが展開されて信頼性データの評価に使用されている。

このように、FTAの技法が利用される範囲が広まるとともに、技法自体もなお進展中である。

2.4.3 信頼性評価と設計・維持・管理

信頼性に定量的評価結果を設備の設計、維持、管理に反映する場合の一般的な考え方を以下に示す。これらは、画一的なものではなく、具体的な適用についてはシステムの性質や目的に応じて個別に検討されるべきものである。

排水ポンプ設備、トンネル換気設備に関する具体的な検討結果については第7章で説明する。

(1) 信頼性の設計目標値

システムの信頼性は100%とするのが理想であるが現実には不可能である。そこで何等かの方法によって目標値を設定する必要がある。

その方法の1つとして、現在の技術水準から考えてコストなどの制限のもとで達成可能な値を設定するという考え方がある。機器の信頼性を高めるには、品質の高い部品や加工、組立が必要であり、さらにそれを保証するには多くのデータが必要で、そのため開発費など生産コストは上昇する。一方、信頼度が高くなれば点検や故障に対する修理の手間が省けるため整備コストは減少する。図-2.4.1は電子装備品の信頼度とコストの関係を概念的に示したものである。信頼度を上げていくと生産コストは実線のように上昇し、85%を超えると急激に増加する。他方、整備コストは点線のように減少する。両者の和を全費用として太線で表すと、その値は90%付近で最小値をとることがわかる。図では信頼度最適の範囲を斜線区間としてある。

信頼度設定のもう一方の考え方は、システムの故障が社会に与える影響を考えて決める方法で、単にコストだけでは決めにくい場合、たとえば原子炉など故障が人命の危険に結びつくシステムの信頼性

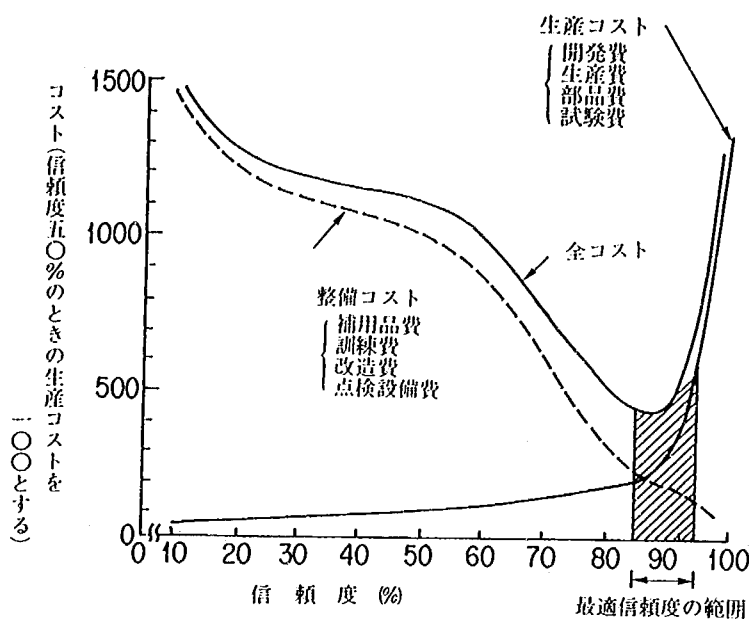


図-2.4.1 信頼度とコストの一般的関係 (13)

(安全性)を決定する際に用いられる。しかし、どの程度のリスクであれば社会に容認されるかを判断することは極めて難しいようである。図-2.4.2は天災についてのリスクを示すもので、原子力発電所の事故のため死亡する確率はいん石に当たって死ぬ確率よりも低いと言うのはこのようなデータによって示されている。

(2) 設備のサブシステム間の信頼性のバランス

信頼性の目標値が設定できれば、この目標値を達成できるように各サブシステムの目標値も定める必要がある。これを信頼度の配分という。信頼度配分をどのような方針で行うかの着眼点はいくつかあるが、最終的には最も少ない努力(コ

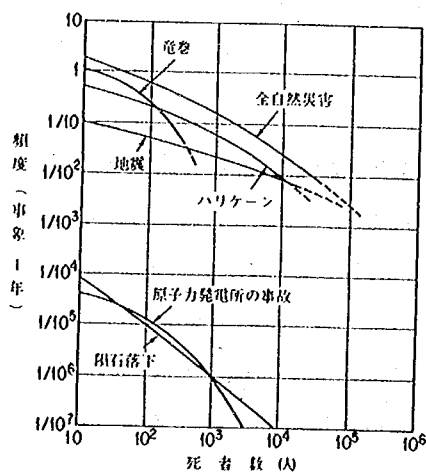


図-2.4.2 いろいろな規模の天災が1年間に発生する頻度 (13)

スト・開発期間・研究)でシステムの目標値が得られるようにすることである。

この基本的な考え方は次に示す通りである。いま仮に、各サブシステムの故障予測値を λ_i 、システム信頼度予測値 $\lambda_s = \sum \lambda_i$ とすると、 $\lambda_s < \lambda_s'$ ならば信頼度目標は達成できるものとする。ただし、 λ_s' は目標故障率である。しかし、 $\lambda_s > \lambda_s'$ ならば、相対故障率 $W_i = \lambda_i / \lambda_s$ を計算し、次式によって目標配分値 λ_i' を求めなければならない。

$$\lambda_i' \leq \frac{W_i \lambda_s' T}{E_i t_i} \quad (2.4.1)$$

ここに、 T ：システムの要求動作時間（ミッション時間）

t_i ：サブシステム i の T 時間内の動作時間

E_i ：サブシステム i の重要度（寄与度）。サブシステム i 以外のサブシステムが正常であるとき、サブシステム i が故障してシステムが故障となる確率

ただし、すべての i に対し、 $t_i = T$ 、 $E_i = 1$ ならば、

$$\lambda_i' \leq W_i \lambda_s'$$

となる。

信頼度目標値および予測値がそれぞれ信頼度 R_s' 、 R_s で表わされるときは、 $R_s' \leq R_s$ ならば予測値は要求を満足している。もし、 $R_s' > R_s$ ならば、サブシステムの配分信頼度 R_i' は、

$$R_i'(t_i) \geq 1 - \left(\frac{1 - R_s'(T)}{E_i} \right)^{W_i} \quad (2.4.2)$$

となる。ただし、信頼度と故障率の関係は

$$R_s = e^{-\lambda_s T}, R_i = e^{-\lambda_i t_i}$$

として仮定してある。

上記の作業を簡単に言い換えると、排水ポンプ設備を例にとれば主ポンプ系、主原動機系、補機系などの系統毎の信頼性が定量化されるため、ウィークポイントを見出して改良を加えるべき個所を合理的に指摘できるようになるということである。

さらに、上記の具体的な改良策として管内クーラー、セラミックス軸受等の導入により機器の簡素化を図った場合については、F T図の当該個所を修正し、信頼性計算を行うことにより信頼性の改善効果を定量的に論ずることができるようになる。

(3) 適正な維持管理

まず排水機場のような非常用系を考えた場合、F T図における基本事象の発生確率であるアンアベイラビリティは、経過時間 t 、保全時間 τ の関数 $A(t, \tau)$ として与えられるが、定期的な維持管理の対象となるが基本事象、例えば部品等のアンアベイラビリティは経過時間 t に対し、維持管理の間隔 T

毎に0%まで復帰する周期関数となる。したがって、これらの集合体であるシステム全体のアンアベイラビリティも周期T毎にある水準まで回復することとなる。この手法を用いることにより、定期的な維持管理がシステムの信頼性へ与える効果が定量的に評価できることとなり、逆にある一定の信頼性を維持するために必要な維持管理項目、頻度などを理論的に提案できることとなる。また、万一不具合が生じた際の対応についても保全時間 τ がシステムの信頼性に与える影響、即ち修理体制を改善した際の影響を定量化することが可能であるため、保全体制のあるべき姿の検討に資することも可能である。

次にトンネル換気設備のような常用系のシステムを考える場合、アンアベイラビリティは不稼働率として与えられる。このようなシステムでは、不稼働率最小、言い換えればアベイラビリティ最大となる維持管理体制を提案することが望まれる。なぜなら、維持管理が適切でない場合は不慮の重大故障により修理のための不稼働時間が増大し、また維持管理回数が極度に多い場合は、維持管理を実施するための停止に伴う不稼働時間が増大し、共にアベイラビリティが下がる。

ここで信頼性からコスト面に観点を变えて管理コスト最小となるような維持管理の検討、例えば設備を更新するべきか否かの判定に際しても、FTAの一環として収集した各部品の故障データは、今後の修理費用の予測の重要な資料となりコスト比較には欠かせないものである。

3. 信頼性解析の基礎理論

本調査研究の実施に先立ち、信頼性工学の基礎的考え方を調査した。

信頼性と設計・管理・維持については参考文献(1)～(4)及び(3)に詳述されている。ここでは、これらを基に排水機場を念頭において、基本的な考え方をまとめる。

3.1 信頼性の定量化

3.1.1 システムの信頼性

いま、ある固有の機能を持つ機械システムを考えることとする。このシステムの信頼性とは、JISによる定義に従えば、“システムが与えられた条件で規定の期間中、要求された機能を果たすることができる性質”ということになる。わかりやすくいえば、信頼できるかどうかというのは、システムがある使用状態におかれたとき、あるコストの制限内で使用者が要求し期待する時間、満足しうる状態にあるかどうかということである。この信頼性は、修理を前提とする自動車や計算機と、故障すれば修理をしないで捨ててしまう電球のような消耗品とでは少し考え方が違ってくる(図-3.1.1参照)。信頼性を正常と故障という状態間の推移としてとらえると“信頼度”と“保全度”の2つの概念が考えられ、時間をパラメータとする確率過程として定量化される。電球のような消耗品では、“信頼度”をはじめから高めておく必要があり、“保全度”は考えない。しかし、修理を前提とするシステム(修復係)では“信頼度”のほかに“保全度”が重要となる。

ここで、信頼度が対象とする事象は、システムに外部から加わるストレスを低減化すること、システム自体の強度を向上させ故障源となる欠陥を取り除くこと、さらに一部がこわれたり誤動作を起こしても全体に影響しない配置や構造にすること、あるいは故障が起こる前に予防保全を行うことである。これに対して保全を対象とする事象は、故障が生じた後でスペアに切り替えたり、故障を早く見つけて満足な状態に修復すること、すなわち事後保全となる。

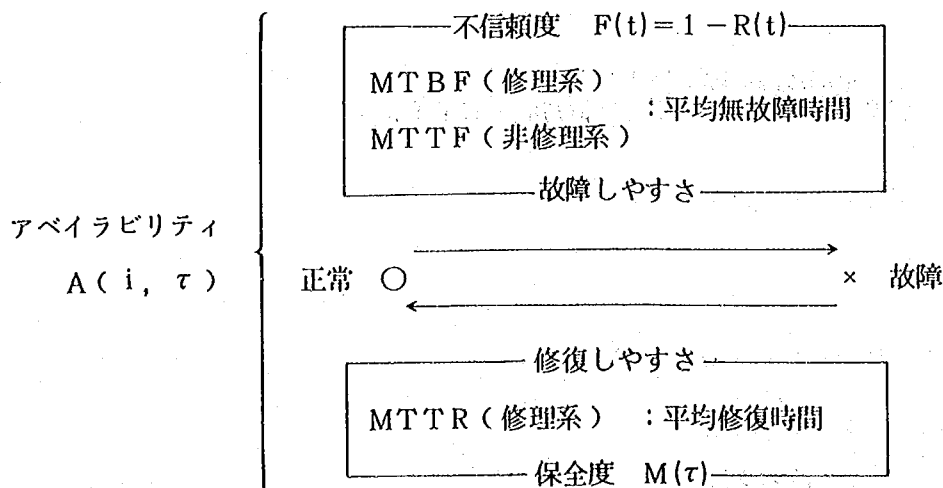


図-3.1.1 信頼度 $R(t)$ 、保全度 $M(\tau)$ 、アベイラビリティ $A(t, \tau)$
〔MTBF, MTTFは正常から故障への平均移行時間, MTTRはその逆で、修理回復までの平均故障時間を示す。〕

広義の信頼性は、以上の“信頼度”と“保全度”の2つの概念を含む“アベイラビリティ”という概念で、一般に確率として定量的に評価される。

人が操作し保全を行いながら使用するシステム、たとえば計算機、車両などでは故障しないことももちろん大切であるが、“保全度”が対象とする修理やサービスの機能を始めから“信頼度”と結びついた形でシステムに織り込むことが大切である。しかし、無人の人工衛星や修理できない構造の製品や部品では事後保全に頼る訳にはいかないから、はじめから“信頼度”を高めておくことになる。

表- 3.1.1 信頼度と保全度の比較

	信 頼 度	保 全 度
累 積 分 布 関 数	信頼度関数: $R(t)$	$1 - M(\tau)$
	不信頼度関数: $F(t) = 1 - R(t)$	保全度関数: $M(\tau)$
	故障状態にある確率, 故障しやすさ	保全で正常状態に戻る率, 修理しやすさ
密 度 関 数	$f(t) = \frac{dF(t)}{dt}$	$m(\tau) = \frac{dM(\tau)}{d\tau}$
率 (時間当り)	故障率 $\lambda(t) = f(t)/R(t)$	修復率: $\mu(t) = m(t)/(1 - M(\tau))$
指数分布の場合の 累積分布と平均時間	$F(t) = 1 - e^{-\lambda t}$ $MTBF (MTTF) = 1/\lambda$	$M(\tau) = 1 - e^{-\mu \tau}$ $MTTR = 1/\mu$

この信頼度 $R(t)$ は、一般に指数分布、正規分布の積分型、ワイブル分布となり、保全度 $M(\tau)$ は、対数正規分布で表記される。他に関係の深い尺度として“故障率 $\lambda(t)$ ”、“修復率 $\mu(\tau)$ ”などがあり、これらの関連は表- 3.1.1 に示す通りである。つぎに、アベイラビリティ $A(t, \tau)$ については、対象とするシステムの使命に応じて最適な尺度を検討しなければならないが、一般によく用いられる形式として、例えば、

$$A = \frac{\text{平均故障間隔 (MTBF)}}{\text{平均故障間隔 (MTBF)} + \text{平均修復時間 (MTTR)}} \\ = \frac{\mu}{\lambda + \mu} \quad (\text{指数分布の場合}) \quad (3.1.1)$$

あるいは、

$$A(t, \tau) = R(t) + (1 - R(t)) \cdot M(\tau) \quad (3.1.2)$$

ここに t : 使命時間

τ : 許容修復時間

などの形で表わされるものが提案されている。なお

$$\bar{A} = 1 - A \quad (3.1.3)$$

をアンアベイラビリティと称し信頼性の評価尺度としてよく用いられる。

3.1.2 信頼性の定量化手法⁽³⁾

システム全体の信頼性の評価に際しては、FMEAならびにFTAという手法が採用されることが多い。FMEAは定性的な評価方法であり、定量的評価方法であるFTAに先立つ準備作業として実施される。

(1) FMEA

FMEAは、システムを構成する各々の部品がどのような故障モードを有しており、さらにこれらの構成部品に故障が起きたとき、それが上位レベルの装置やシステムの使命、機能、信頼性あるいは安全性にどのような影響を与えるかを解析し設計上の問題点を事前に発見する、あるいは、ある設計上の改善策が採られた時にそれがシステムの信頼性改善にどの程度寄与するかを予測するためのものであり、故障モード影響解析とも呼ばれている。後述のFTAがシステムの呈する現象から順に下位レベルの要素へ下っていく方法を採用のに対し、FMEAでは、上位レベルのシステムへと逆上っていく方法を採用することとなる。

実際の作業は、図-3.1.2に示すワークシートを各構成部品について埋めてゆく作業となる。

FMEA記入用紙											
システム _____					Date _____						
サブシステム _____					作成者 _____						
					所 属 _____						
構成部品名 識別番号	機 能	故 障 モード	故障の 原 因	故 障 検知法	故障の影響		評 価 点				処 置 内 容 処置担当課
					サブ システム	システム	発生 度合	影響 度合	検出 度合	重要 度	

図-3.1.2 FMEAのワークシートの例

(2) FTA

FTAは、故障の木解析とも称され、システムの特定期故障の発生原因を下位レベルに樹木のよう展開していき、最下位レベルの要素故障の発生確率値から理論的に逆上ってシステムの特定期故障の発生確率を求める方法である。この解析の中心はFT図（故障の木）の作成にあるが、FT図とは、“解析しようとする事象（本調査研究では、「内水排除機能消失」等）が生ずるためには何が起これなければならないか？”という素朴な質問をして、その事象の原因となる事象をすべてあげ、それらの間の因果関係を論理記号を用いて結合する。さらにその原因となる事象は、というように論理記号を駆使して上から下へと逆トーナメント式に組み立てていき、すべての事象がもうこれ以

上分解できないところー基本事象ーまで続けていき、できあがった論理図である。

このようにFTAは結果と原因をAND、ORなどの論理記号で結び上位レベルから下位レベルの要素故障にいたるまで論理的に整合のとれた樹木図の形に展開していく方法をとるため、各構成要素のアンアベイラビリティ等がデータブック等により与えられればシステム全体の故障確率や故障発生経路をブール代数（巻末資料参照）を用いて数学的に求めることができる。表ー 3.1.3にFTAで使用する主な記号を紹介する。

ここで、ごく簡単な例として芝刈機のエンジンを対象として信頼性解析例によりFTAの実施手順を示す。⁽³⁾

① 解析対象エンジン

この芝刈機の動力は空冷2サイクル小型エンジンで、出力は約4馬力である。燃料としてはガソリンとオイルの混合した燃料を使用する。

また燃料タンクは上部にあり、重力給油方式により燃料を燃焼室に供給する。したがって燃料ポンプはない。

始動は、通常は電気式スタータを使用して行うが、もしスタータが使用できない場合はプル・コードを引張ることにより手動による始動もできるようになっている。スタータの電源はバッテリーである。また電流断続による高電圧発生機（バッテリー点火装置又はマグネット点火装置）があり、点火プラグに高圧電気を供給する。

② トップ事象の選定

トップ事象の候補として、1)エンジン始動せず。2)エンジン連続運転できない。があげられたが、このエンジンのスタート失敗の確率がどの程度なのか知るため、まず1)をトップ事象として取り上げ解析することにする。

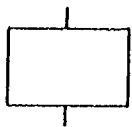
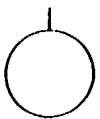
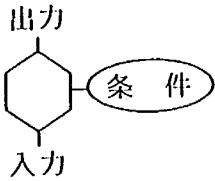
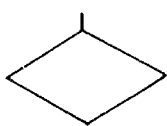
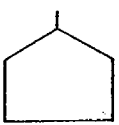
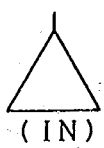
③ FT図の作成

「エンジンが始動しない」というトップ事象に対して、その原因となる事象を考えるには、まずエンジンが始動するためにはどのような機能が必要であるかを考える。そしてトップ事象の起こる原因はその裏返しの事象であると考えれば良い。このためには、システムの機能ブロック図や信頼性ブロック図を利用する。機能ブロック図から各機能別、サブシステムごとにエンジン始動に果す役割を考えていくと抜けや見落としが防止できる。この際細かい原因がいろいろ出てくるが、それらをまとめて、事象記号  に記すようにする。

エンジンが始動しない原因は、まず燃焼室に燃料が到達していないことがあげられる。また燃料がきていても、シリンダ内の圧縮圧力が不足しては始動できない。あるいは十分な規定圧力まで混合気が圧縮されていても、電気系統の故障で点火プラグのアーキが飛ばなかったり、アーキに圧縮混合ガスを点火するエネルギーが不足しているときもエンジンはスタートしない。エンジンは大別して、これらの事象のどれか一つ存在しても始動できない。したがって、トップ事象に対する第1次の原因事象としてこれらの3つを取り上げてORゲートで結合する。

次にこれらの3つの原因事象のそれぞれに対して、順次同様な方法でさらに解析を進め、ツリ

表- 3.1.3 FTAに用いる論理記号(基本的なもの)⁽³⁾

No.	記 号	名 称	説 明
1		事 象 EVENT	基本事象などの組み合わせにより起こる個々の事象
2		基 本 事 象 BASIC EVENT	これ以上は展開されない基本的な事象 または発生確率が単独に得られる最も低いレベルでの基本的な事象
3		AND ゲート "AND" GATE	すべての入力事象が共存するときのみ出力事象が発生する。論理積。
4		OR ゲート "OR" GATE	入力事象のうち、いずれか一つが存在するとき出力事象が発生する。論理和。
5		制 止 ゲ ート INHIBIT GATE	入力事象について、このゲートで示す条件が満足する場合のみ出力事象が発生する。条件付き確率。
6		否 展 開 事 象 UNDEVELOPPED EVENT	情報不足、解析技術の不十分により、これ以上展開できない事象をあらわす ただし作業の進行によりさらに解析が可能となったときは、再び展開を続行する。
7		家 型 HOUSE GATE	通常発生と思われる事象を示す。 たとえば火災について解析しているとすれば“空気存在”がこれにあたる。
8		移 行 記 号 CONNECTING SYMBOL	FT図上の関連する部分への移行または連結を示す。 三角形の頂上からの線は入る移行を示す。
8'		移 行 記 号 CONNECTING SYMBOL	8と同じ。 三角形の横からの線は出ていく移行を示す。

ーを発展させていく。このようにして描いたFT図を図-3.1.1に示す。

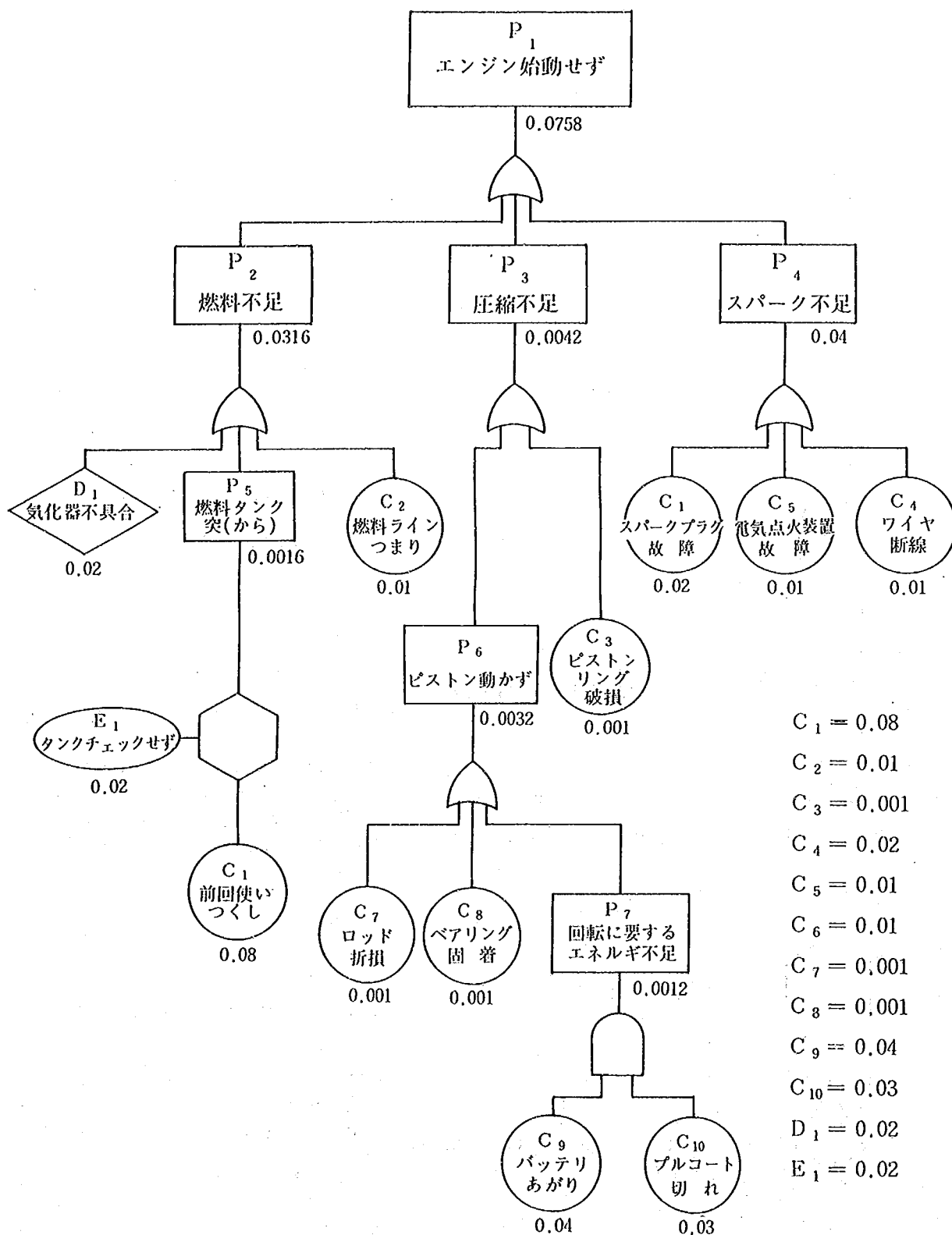


図- 3.1.1 動力芝刈機エンジンのFT図

④ 信頼性の計算

トップ事象の発生確率を計算するためには、基本事象の発生確率データまたは故障率データが必要である。これらのデータは、データブック、信頼性試験結果、フィールドデータの収集などによって得られるものであり、故障解析上の関数としては不信頼度あるいはアンアベイラビリティの形で与えられる。

図-3.1.1には多くの文字記号がある。P₁からP₇までは出力のそれぞれのレベルを示し、C₁～C₁₀は基本欠陥事象を、D₁は否展開事象を、またE₁は制止条件を示している。これらの文字の選択はまったく自由である。

次の故障発生確率が各文字に与えられた（簡単のため定数として与える）とする。

$$\begin{array}{llll} C_1 = 0.08 & C_4 = 0.02 & C_7 = 0.001 & C_{10} = 0.03 \\ C_2 = 0.01 & C_5 = 0.01 & C_8 = 0.001 & D_1 = 0.02 \\ C_3 = 0.001 & C_6 = 0.01 & C_9 = 0.04 & E_1 = 0.02 \end{array}$$

基本事象○、否展開事象◇と制止条件事象—○に数値が与えられ、出力事象□はそれらの値から計算により得られるものであり、数値の割当てではない。

AND、ORおよび制止ゲートは、ハードウェアでも機能品目でもなく、確率計算の“オペレータ”として、論理の鎖に方向を与えるものである。

上記の数字を使用して、ブール代数の法則に従って下から上に向かって計算を進める。

$$\begin{aligned} P_7 &= C_9 \cdot C_{10} = 0.04 \times 0.03 = 0.0012 \\ P_6 &= C_7 + C_8 + P_7 = 0.001 + 0.001 + 0.0012 = 0.0032 \\ P_3 &= P_6 + C_3 = 0.0032 + 0.001 = 0.0042 \\ P_4 &= C_4 + C_5 + C_6 = 0.02 + 0.01 + 0.01 = 0.04 \\ P_5 &= C_1 \cdot E_1 = 0.08 \times 0.02 = 0.0016 \\ P_2 &= D_1 + P_5 + C_2 = 0.02 + 0.0016 + 0.01 = 0.0316 \\ P_1 &= P_2 + P_3 + P_4 = 0.0316 + 0.0042 + 0.04 = 0.0758 \end{aligned}$$

したがって、この芝刈機エンジンの「始動しない」という事象発生の確率は7.58%または約13回に1回起こる。

⑤ 成果の活用

F T Aの最後のステップは結果を評価して、トップ事象の生起に最も寄与している欠陥事象または故障を識別して、効果的な改善対策を検討することである。

図-3.1.1をみるとP₄の“スパーク不足”が始動不良の53%を占めており、最も大きく、トップ事象の発生に影響を与えていることがわかった。

したがって始動の問題を改善するためには、まず点火プラグと電気点火装置に対して設計改善を行う切要がある。次はP₂であり、特に基本事象の“燃料ラインのつまり”について調査し対策を

講ずべきであるといえる。

なお、この例では、基本事象の発生確率としては簡単のため定数を与えたが、経過時間 t 、保全時間 τ の関数であるアンアベイラビリティ $A(t, \tau)$ の形で発生確率を与えれば、維持・管理の影響まで定量的に考慮することが可能となる。

3.2 信頼性データの収集

一般にあるシステムの故障特性を論ずるには、まずそのシステムを信頼性の観点からいくつかの構成要素に分割し、各構成要素の信頼性を3.1.1で述べたような関数で表現してやらなければならない。具体的な関数形を決定する方法としては、既存のデータブックより情報を得る方法、信頼性試験を実施しデータを得る方法、フィールドテストからデータを集積し解析する方法などがある。

3.2.1 データブックの利用

近年、アメリカの軍事機器の信頼性データブックに端を発し、特に故障率が一定である電気電子部品を中心に、信頼性データが充実しつつある。これらを利用するのが最も手軽な方法である。

一般的に、部品の信頼性はその使用環境により大きく左右されるため、データブックの基礎となった部品の作動環境と実際に信頼性を評価しようとしている部品の使用条件が異なる場合、データブックのデータはそのままでは使用できなくなる。そこで、作動環境による補正係数なるものが、各種提案されており、これらデータブックの利用に際しては、あらかじめ検討の対象となる機器類の設置環境を調査しておく必要がある。

3.2.2 信頼性試験

信頼性データを既存のデータブックに求められないときは、実験的に故障特性を明らかにする方法がとられる。このような、製品やシステムの故障とその効果に関して製品の信頼性を明らかにするために行われる試験を総称して「信頼性試験」という。試験は、実施場所、方法、加えるストレスの特性、信頼性計画上の位置づけなどの立場から次に例示するような方法が提案されているが、どの様な方法で試験するかは、目的によって使い分けられる。⁽¹⁾

実施場所：実験室等（開発・試作段階で、固有の信頼度を求める。）

実地、現場（製品の使用状態での動作信頼度を求める。）

ストレスの程度：正常動作試験、オーバーストレス試験、破壊までの試験、限界試験

加速寿命試験、強制劣化試験、促進試験

定ストレス試験、負荷スペクトラム印加試験

ステップストレス試験、ストレス増加試験

サイクリックストレス試験

間欠動作試験、無負荷放置試験

試験対象：全数試験、抜取り試験

材料, 部品, サブアセンブリ, ユニット, サブシステム, システム
製品信頼性確認: 型式認定試験
受け入れ試験

3.2.3 フィールドテスト

3.2.1のような信頼性試験を体系的に実施するには、一般に多大な費用、人員、時間を要するため、故障時の影響が非常に大きいものや広く使用されるもので行われるのが一般的である。そこで、日常の設備の保全活動を通じて、対象となるシステムや要素の信頼性データを蓄積しようとするものがフィールドテストである。これらのデータ収集は、信頼性活動を総合的に推進するための組織を作って、設備の維持・管理などと一体となって行われることが多い。収集されたデータは、その目的に応じて整理され、要素毎の信頼度あるいは故障率などとして蓄積される。

3.3 信頼性評価尺度の検討

信頼性を定量化するための尺度であるアベイラビリティの定義付けは検討対象設備の使命、機能を十分検討した上で行わなければならない。このとき、常用系と非常用系では信頼性の考え方が異なる(3.1.1参照)ため、それぞれについて(非常用系については排水ポンプ設備を、常用系についてはトンネル換気設備を念頭に置く。)アベイラビリティの定義付けを試みた。

3.3.1 非常用系設備のアベイラビリティ

非常用系設備は、常時は比較的長期間にわたって待機状態にあるが、ひとたび要求があった場合その運転機能に高い信頼性が要求される。また、電球のように故障すれば捨ててしまう非修理系と異なり、システムに故障が発生しても修理を施して(すなわち保全)使用を継続していくことを前提として設計された修理系である。

以上のことがらを考慮して、常時待機状態にある非常用設備の信頼性(アベイラビリティ)は次式で表わすこととした。

$$A_T = A_1 \cdot A_2 \quad (3.3.1)$$

ここに、 A_T : システムのトータルアベイラビリティ

A_1 : 起動に対するシステムのアベイラビリティ

A_2 : 連続運転に対するシステムのアベイラビリティ

システムの信頼性は A_T で表わしてもよいが、後述のFT図が故障という事象に着目しているのでシステムの評価も A_T と表裏一体の関係にある不信頼性を示すトータルアンアベイラビリティ $\bar{A}_T$ で表わす方がよい。

$$\bar{A}_T = 1 - A_T = 1 - A_1 \cdot A_2 \quad (3.3.2)$$

$$= \bar{A}_1 + \bar{A}_2 - \bar{A}_1 \cdot \bar{A}_2$$

通常、 $\bar{A}_1 \cdot \bar{A}_2$ は微少であるので省略する。したがって、

$$\bar{A}_T = \bar{A}_1 + \bar{A}_2 (\ll 1.0) \quad (3.3.3)$$

ここに、 $\bar{A}_T$: システムのトータルアンアベイラビリティ

$\bar{A}_1$: 起動に対するシステムのアンアベイラビリティ

$\bar{A}_2$: 連続運転に対するシステムのアンアベイラビリティ

となる。

ここで (3.3.3) 式の $\bar{A}_1$ は、必要とした時にシステムに対して起動指令を発したが、システムが正常に起動できない事態が生じる確率であり、次式で与えられる。

$$\begin{aligned} \bar{A}_1 &= \frac{1}{T} \int_0^T (1 - e^{-\lambda_1 t}) dt \\ &= \frac{1}{2} \lambda_1 \cdot T - \frac{1}{6} (\lambda_1 \cdot T)^2 + \dots \\ &\approx \frac{1}{2} \lambda_1 \cdot T (\ll 1.0) \end{aligned} \quad (3.3.4)$$

ここに、 λ_1 : 待機状態におけるシステムの故障率

T : 点検周期

$\bar{A}_2$ は、システムが正常に起動した後、稼働の必要がなくなるまでの一定の時間内でシステムが故障する確率であり、次式で示される。

$$\begin{aligned} \bar{A}_2 &= 1 - e^{-\lambda_2 \cdot t} \\ &= \lambda_2 \cdot t - \frac{1}{2} (\lambda_2 \cdot t)^2 + \dots \\ &\approx \lambda_2 \cdot t (\ll 1.0) \end{aligned} \quad (3.3.5)$$

ここに、 λ_2 : 運転状態におけるシステムの故障率

t : 連続運転時間

ここまではシステムを検討の対象として議論がなされてきたわけであるが、このシステムを構成する個々の要素（部品）の信頼性の定量化についても同様の議論が当てはまる。すなわち、ある要素 n についても、起動に対するアンアベイラビリティ $\bar{a}_{1n}$ と連続運転に対するアンアベイラビリティ $\bar{a}_{2n}$ を考える必要があり、 $\bar{a}_{1n}$ 、 $\bar{a}_{2n}$ はそれぞれ次式で示される。

$$\bar{a}_{1n} = \frac{1}{2} \lambda_{1n} \cdot T \quad (3.3.6)$$

$$\bar{a}_{2n} = \lambda_{2n} \cdot t$$

(3.3.7)

ここに、 $\bar{a}_{1n}$ ：起動に対する要素 n の アンアベイラビリティ

$\bar{a}_{2n}$ ：連続運転に対する要素 n のアンアベイラビリティ

λ_{1n} ：待機状態における要素 n の故障率

λ_{2n} ：運転状態における要素 n の故障率

T：点検周期

t：連続運転時間

F T図による信頼性計算においては、基本事象の発生確率を F T図の扱う事象（起動か連続運転か）に応じて $\bar{a}_{1n}$ あるいは $\bar{a}_{2n}$ で与えることとなる。

ここで、式(3.3.3 ~ 3.3.7)の意味を考えてみることにする。式(3.3.4)および(3.3.6)は、点検周期 T のとり方により、信頼性が左右されることを示しており、すなわち定期保全による保全性の概念が組み込まれているといえることができる。しかし、運転中の突発的な故障に対する事後保全による保全性の概念が入っていない。即ち、万一故障しても τ 時間以内に故障を修理できればシステムの機能は全うできたと考えると、その時のシステムのトータルアンベイラビリティ $\bar{A}_T$ は、式(3.1.2)と同様に、

$$\bar{A}_T = 1 - \{ A_T + (1 - A_T) M(\tau) \} \quad (3.3.8)$$

ここに、 $M(\tau)$ ：保全度

と表わすべきである。

具体的な例で説明すれば、排水機場を中央制御のみ、あるいは中央制御・機側制御併用で操作し、起動渋滞を許さない場合は、 $\tau = 0$ であり、従って $M(\tau) = 0$ となるため、式(3.3.8)は結果的には式(3.3.3 ~ 3.3.7)によるものと同じになるが、例えば 1 時間の起動渋滞を許すこととした場合の保全度 $M(\tau)$ を何らかの形で関数化し、 $\tau = 1 \text{ hr}$ に相当する $M(\tau)$ の値を求めなければならなくなる。しかし、保全度の関数化についてはデータブック等によるデータも得られずその一般的な手法が確立していないため、本調査研究では次のように考えることとした。

まず、F T図におけるすべての基本事象に対して、その故障を 1 時間以内に復帰することの可能なものと、不可能なものの 2 つのグループに分け、復帰可能なものに対しては $M(\tau) = 1$ （必ず復帰可能）、復帰不可能なものに対しては $M(\tau) = 0$ （必ず復帰不可能）を与えることとした。すなわち、決定論理的考え方に従うこととしたわけである。 $M(\tau) = 1$ を与えた場合、式(3.3.8)より $\bar{A}_T = 0$ （絶対故障しない）となるため、その事象を F T図の上から抹消することで対応をとればよい。また、 $M(\tau) = 0$ とした場合、式(3.3.8)より $\bar{A}_T = 1 - A_T = \bar{A}_T$ であるため、その事象に対しては式(3.3.3 ~ 3.3.7)を適用し信頼性を計算すればよいわけである。

以上の操作により式(3.3.3 ~ 3.3.7)に間接的に事後保全に対する保全性の概念が含まれたこととなる。

なお、本調査ではシステムの安定期を検討の対象としている。すなわち、我々が予測しようとしているシステムのアンアベイラビリティは、初期故障がデバッグで取り除かれ、また摩耗などによる故障は十分なメンテナンスで取り除かれているとして、いわゆる偶発故障を対象としている。

3.3.2 常用系設備のアベイラビリティ

常用系設備のように常時運転される機器（常用系）については、稼動している時間の割合の長いことが要求されている。このような設備のアベイラビリティの評価尺度としては、“故障あるいは予防保全による停止時間の全時間に対する比”が採用され、システムのトータルアベイラビリティ A_T は次式で示される。

$$A_T = \frac{\text{動作可能時間}}{\text{動作可能時間} + \text{動作不可能時間}}$$

ここで、非常用系設備の場合と同様の理由で、システムの不信頼性を示すトータルアンアベイラビリティ $\bar{A}_T$ を規定することとする。

$$\bar{A}_T = 1 - A_T$$

$$= \frac{\text{動作不可能時間}}{\text{動作可能時間} + \text{動作不可能時間}}$$

$$= \frac{t_r}{1 / \lambda + t_r}$$

$$= \frac{\lambda \cdot t_r}{1 + \lambda \cdot t_r}$$

$$\approx \lambda \cdot t_r (\ll 1.0)$$

(3.3.9)

ここに、 λ : システムの故障率

t_r : システムの平均修復時間

式 (3.3.9) は、システムのアンアベイラビリティとして導かれたが、FT図における基本事象（各構成要素等）の故障の発生確率（アンアベイラビリティ $\bar{a}_{rn}$ ）も同様の形で考えればよい。すなわち、

$$\bar{a}_{rn} = \lambda_n \cdot t_{rn} (\ll 1.0)$$

(3.3.9)

ここに、 λ_n : 要素 n の故障率

t_{rn} : 要素 n の平均修復時間

となる。

4. 信頼性の評価法

4.1 FMEAの実施

4.1.1 排水ポンプ設備のFMEA

(1) モデル排水ポンプ設備の設定

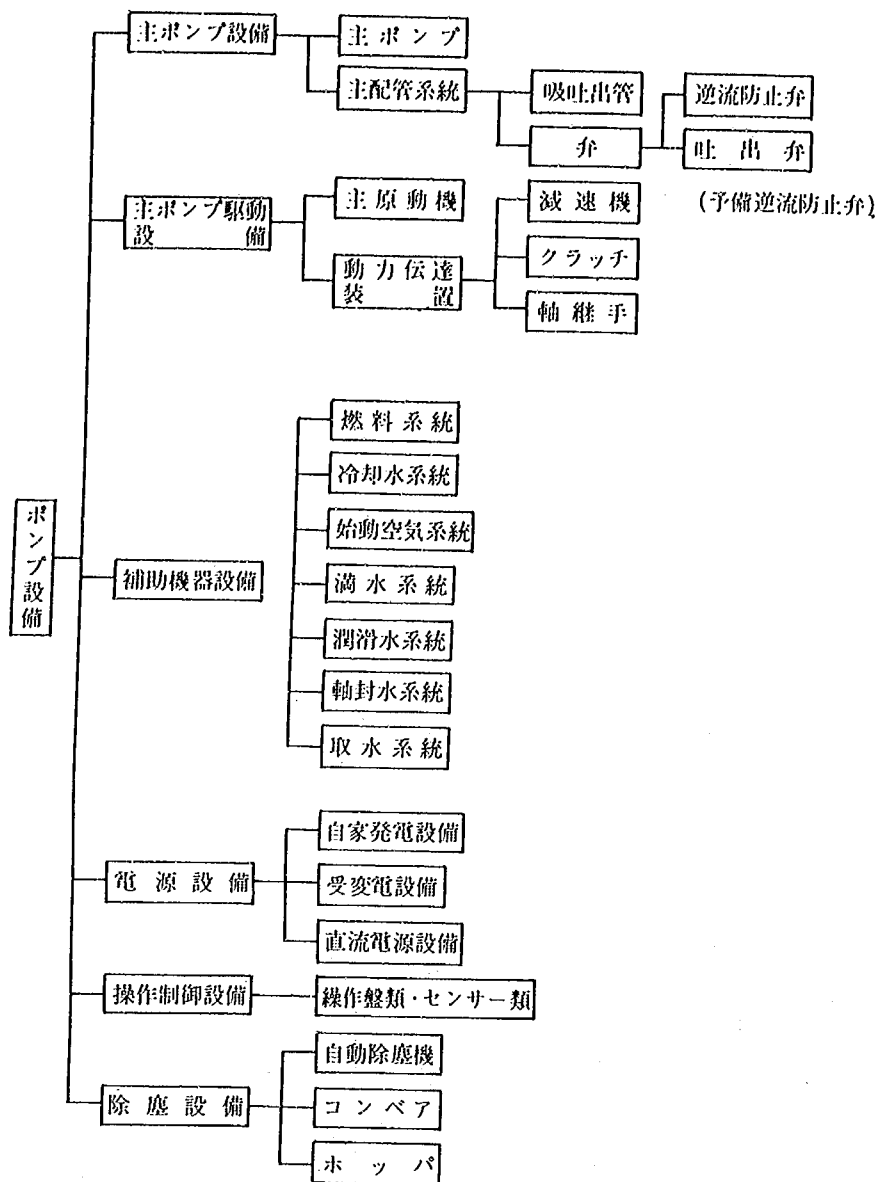
本調査研究におけるFMEA, さらに後述のFTAによる信頼性解析を実施するに際して, モデル排水ポンプ設備を設定し, 同モデルについて信頼性評価手法を用いて検討し, ポンプ形式や規模の異なるシステムについてもこれを応用することで信頼性評価を行うこととした。このため全国的に見て多い形式と容量の設備を選ぶこととした。

モデル設備は次のように設定した。ポンプ形式は立軸斜流(二床式), 口径は1,500mm, 吐出量は $5\text{ m}^3/\text{sec}$ とし, 通常においてはポンプ台数は2~3台が平均的であるが, 今回は信頼性評価を明らかにすることを目的としているので1台に設定した。ポンプ運転操作方式は, 中央連動, 機側単独の2操作方式に設定した。

表-4.1.1にモデルポンプ設備の諸元を, 図-4.1.1にモデルポンプ設備のブロック図を, 図-4.1.2にモデルポンプ設備図を示す。

表-4.1.1 モデルポンプ設備の諸元

主ポンプ	形式	立軸斜流 二床式	吸吐出管	台数	1台	2. 潤滑水 ポンプ	台数	1台			
	口径	1,500mm		規格	1,500φ		形式	立軸うず巻			
	実揚程	4.2m		本数	1本		規格	50φ3.7KW			
	吐出量	5m³/s	吐出弁	形式	電動蝶形	3. 二次冷却水 ポンプ	台数	2台			
	回転数	215rpm					規格	100φ5.5KW			
	効率	85%					台数	2台			
主原動機	台数	1台	逆流防止弁	形式	フラップ形	4. 所内排水 ポンプ	形式	立軸うず巻 汚水			
	形式	4サイクル ディーゼル 機関					規格	50φ1.5KW			
	容量, 規格 始動式 方冷却式 方台数	470ps 6気筒 圧縮空気 水冷 1台					台数	2台			
	歯車機 減速機	形式 容量, 規格	直交軸 マガリ歯 カサ歯車 470ps	補助機 器設備 1.井戸ポンプ	形式	水中深井戸	5. 燃料移送 ポンプ	形式	歯車形		
								規格	1,800φ	規格	25φ0.75KW
								台数	1台	台数	2台
				操作方式	中央 機側	連動 単独					



図ー 4.1.1 モデルポンプ設備のブロック図

(2) 影響評価の考え方

排水機場の信頼性解析では、機場のシステムが機械系や電気系と複雑に組合わされているため、解析手法としてはFTA手法を用いる。このFTAの実施にあたっては、まず事前にFMEAを実施し、その結果を反映させるのが有効である。

FMEAは、システム構成品の潜在故障モードの識別と推定および故障のシステム任務達成への影響の評価を行うもので、システム内のすべての構成品の故障モードと原因を検討し、さらに信頼性ブロック図によりシステム任務達成に与える影響を評価し、検討結果をFMEAワークリスト、致命品目リストなどにまとめるものである。これによって故障の因果関係が明らかになり、システムに潜在する信頼性の弱点を定性的に求めることができる。

ここでFMEAの実施手順を図ー 4.1.3 に示す。

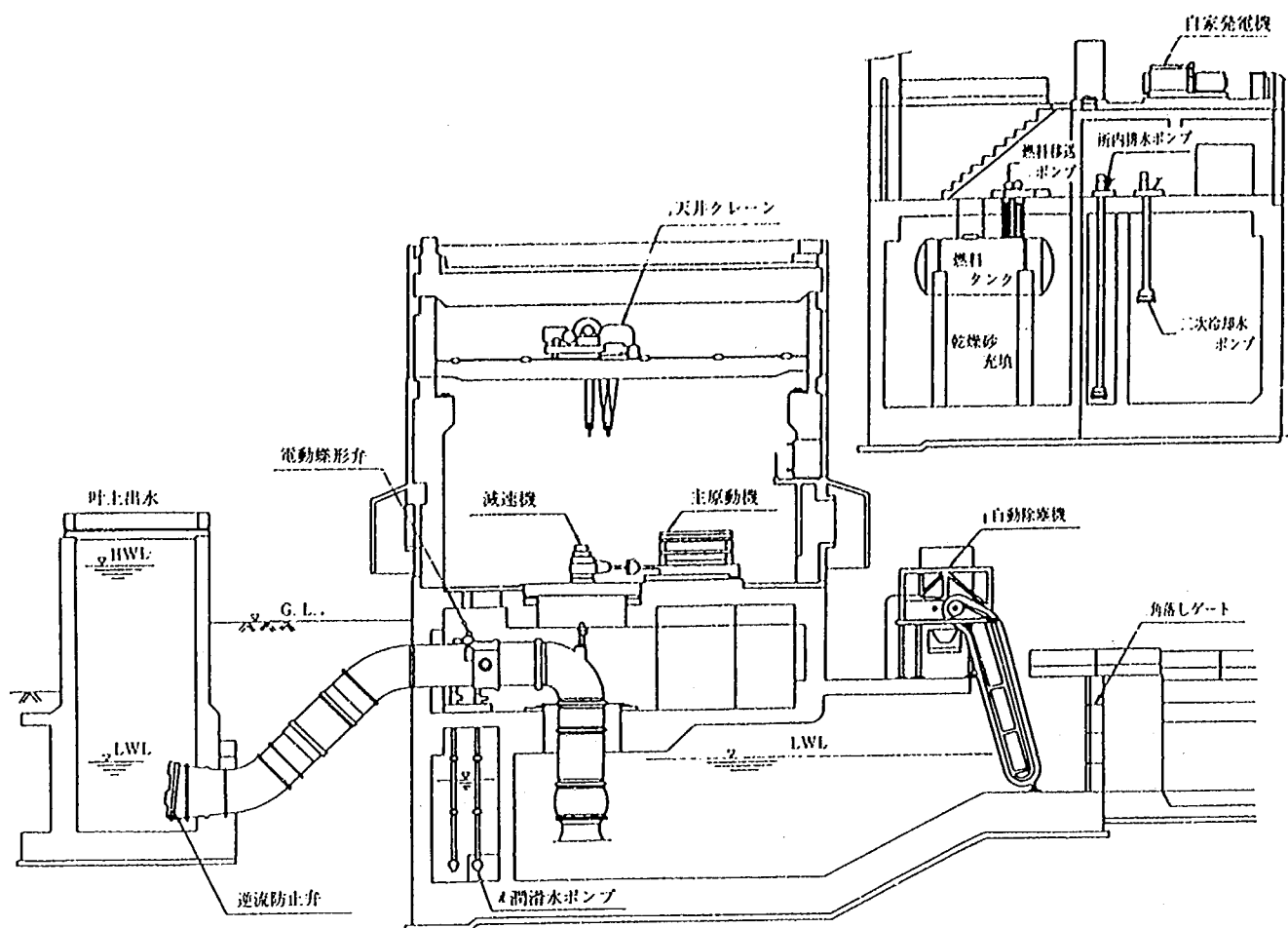


図- 4. 1. 2 モデルポンプ設備図

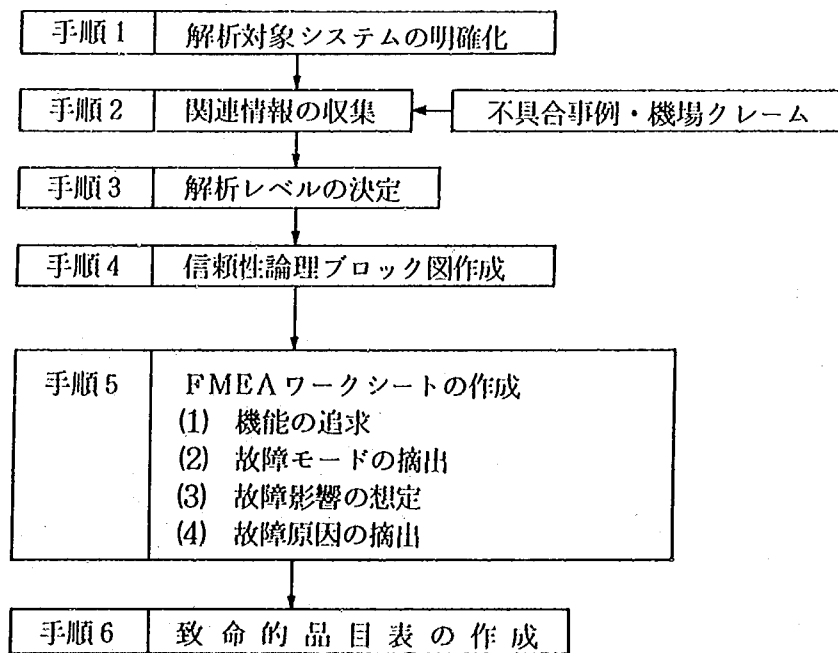


図- 4. 1. 3 FMEA実施手順

以下、上記手順に従って今回の作業結果について報告する。

① 解析対象システムの明確化

解析対象の排水ポンプ設備は前項(1)のモデル排水ポンプ設備（φ1500立軸二床式斜流ポンプ×1台）を解析対象とすることとした。

② 関連情報の収集

設計計算書、仕様書、機器構造図等を検討した。さらに並行して、ポンプ設備の信頼性に関するフィールド調査を実施することとした。

③ 解析レベルの決定

原則として構成品レベル（取替単位）に分解し、必要に応じて部品レベルに分解して解析することとした。

④ 信頼性論理ブロック図作成

FMEAを実施する場合は、設計図面等を参考として信頼性論理ブロック図と呼ばれる線図を作成する必要がある。これは、構成要素の故障がシステム全体の作動に及ぼす波及的関係を考慮するのに有効である。信頼性論理ブロック図はシステムとその構成要素（サブシステム、構成品、部品等）の機能の相互関係を示す論理図であって、装置の物理的接続関係を示すシステムブロック図ではないので、配線や配管の直列・並列と信頼性論理ブロック図の直列・並列は必ずしも一致しないことになる。図-4.1.4に今回作成した信頼性論理ブロック図の一部を示す。

⑤ FMEAワークシートの作成

信頼性論理ブロック図で分析された排水機場設備システムの最小要素（部品等）がどのような故障モードを持っているか、さらに排水機場設備に与える故障の影響を検討し故障等級を決め、表-4.1.2に示すFMEAワークシートに検討結果を記入した。なお、記入に際しては次に示す方針で行なうこととした。

表-4.1.2 サブシステムFMEAワークシート

サブシステム名	機 器 名	冗長性(予備機器)	作 成 者			作成年月日	改 訂	来 歴	シートNo.
						昭和 年 月 日			

部 品 名	故 障 モ ード	故 障 原 因	故 障 の 影 響		故 障 等 級	備 考
			サブシステム	シ ス テ ム		

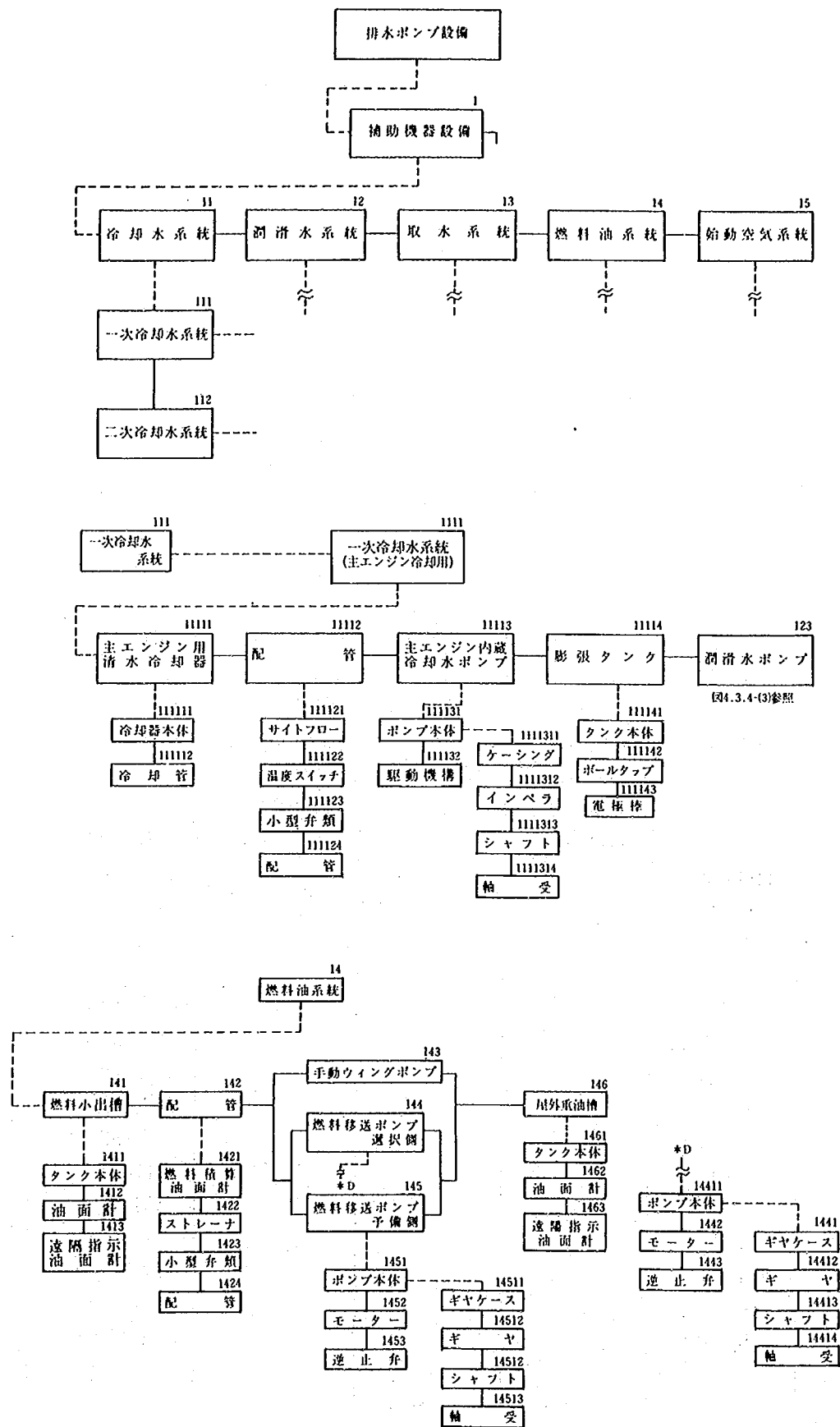


図4.3.4-(3)参照

図- 4.1.4 信頼性論理ブロック図(一例)

㊦ 部 品 名

原則として、システム図の全構成部品とした。

㊧ 故障モード

当該部品の故障、劣化モードを記入した。(適確を期するため、破壊または破断、き裂、損傷、変形、漏洩、腐食、摩耗等当該部品の予想される故障事象に対し、それぞれ故障モードを記入した。)
「故障の影響」以下の展開は、ここに掲げた故障モードごとに行った。

㊨ 故障原因

「FTA」検討の指標として「故障モード」発生原因と予想される複数の原因を掲載することとした。「故障モード」と「故障原因」の一例を表-4.1.3に示す。

表-4.1.3 故障モードおよび原因一覧表(一例)

1. 摩 耗	2. 腐 食	3. 変 形 (歪み・へたり)	4. 弛み・剥離 (脱落・移動)	5. 焼 損 (焼付き)	6. き 裂	
材料選定不良 (硬さ異常) 加工不良 (表面粗さ不良) 組立不良 (間隙不良) (片当り) (ミスアライメント) 過大荷重 過大振動 面圧不良 相対すべり 異物混入 異物付着 変 形 発 錆 潤滑不良	2A エロージョン 材料選定不良 (硬さ異常) 形状不良 流速異常 流速異常 キャビテーション 2B 全面腐食 材料選定不良 使用雰囲気 防錆不良 2C 選択腐食 材料選定不良 使用雰囲気 鋭敏化 デブリスケール 隙 間 2D 電 食 使用雰囲気 材料選定不良 (組合せ)	強度不足 材料不均一 加工不良 組立不良 過大応力 残留応力 当て傷 温度不均一 材料劣化	材質不良 強度不足 接着不良 組立不良 (締付不良) 過大振動 摩 耗 腐 食	材料選定不良 (硬さ異常) (組合せ) 組立不良 (間隙不良) 異物混入 潤滑不良 (潤滑切れ) (潤滑圧力不足) (潤滑剤の不適・劣化、異物混入) 過大荷重	6A 脆性き裂 初期欠陥 靱性不足 組立不良 過大応力 残留応力 6B 延性き裂 初期欠陥 強度不足 組立不良 過大応力 6C 疲労き裂 初期欠陥 強度不足 加工不良 (表面粗さ不良) 形状不良 (切欠) 組立不良 過大繰返し応力 残留応力 使用雰囲気 フレッチング	6D 応力腐食き裂 初期欠陥 高強度材 形状不良 (切欠) 高応力 残留応力 使用雰囲気 隙間腐食 鋭敏化 6E 加工き裂 材料欠陥 溶接欠陥 加工不良

㊦ 故障の影響（サブシステム）

「故障モード」と「故障原因」の推定から部品（組立品、構成品含む）および機器への影響、さらに機器の有する機能上への影響も考察し記入した。〔例：機能喪失（耐圧・強度・気密・作動・通電・制御等の機能喪失）、性能低下、影響無し（判断基準は次回定期検査までの継続可とした。）〕

㊧ 故障の影響（システム）

「機器故障」に至った時、プラントに及ぼす影響を考慮し、記入した。〔例：排水機能停止（現場切替運転不能）、排水機能低下（自動運転不能）、排水機能に影響なし〕

① 故障等級

故障が発生した場合、サブシステム、システム、運転する人などが受ける影響の大きさを分類し、数等級に支障の等級を分けて記入した。この影響評価の目安を表－4.1.4に示す。

表－4.1.4 故障によるシステムへの影響評価

故障等級	基 本	記 事
I 致命的	システムの排水機能喪失	(1) 冗長性のない機械系および動力系の故障または動力系を制御する制御系の故障により運転不能 (2) 機械的運転 [*] に関わらず運転不能 (3) 機械的運転のみ可能であるが、極めて短時間に主機（ポンプ・原動機等）に重大なダメージ（焼損・き裂等）を与える故障により運転不可 (4) 主機の運転不可能な振動の発生等
II 重大	短時間の運転可能 設定条件の変更による運転可能	(1) 冗長性のある機械系および動力系の故障または動力系を制御する制御系の故障（機側盤からの運転を含む） (2) 現場での応急的な運転操作条件の変更により運転可能（フリースイッチ・電極棒・電磁弁の故障等） (3) 補機に重大なダメージを与える故障または振動の発生等 (4) 運転を継続すると短時間に主機に重大なダメージを与える故障 (5) 機械的運転による運転可能（エンジン始動用電磁弁の故障等） (6) 一定時間内であれば、運転可能（燃料小出槽の容量分の運転等）
III 軽微	継続運転可能	(1) 継続運転可能であるが、運転終了後故障箇所の点検が必要（補機の振動・騒音等）
IV 微少	当面の運転に支障がない	(1) 少なくとも次回の定期点検までの正常運転可能 (2) ランプ等直接運転に影響を与えないもの

* 機械的運転：エンジンの操縦ハンドルによる手動操作

㊨ そ の 他

①の故障等級に致命的または重大としたもので、特例判断が入っているものは注記することとし、また、維持管理の体制により等級が変わるものも注記することとした。

⑥ 致命的品目表の作成

排水ポンプ設備に重大な影響を与える項目として、表－4.1.4に表される致命的故障、重大故障を

要アクション項目として抽出し、致命的品目表を作成した。表－4.1.5に作成した致命的品目表の様式を示す。

表－4.1.5 致命的品目表

番号	品 目	故 障 モ ード	影 響	故障等級	備 考

(3) FMEA実施結果

排水機場の全設備についてのFMEAを実施することにより、故障の因果関係を明らかにし、システムに潜在する信頼性の弱点を定性的に求めることができるようになった。この結果をFT図の作成および排水ポンプ設備のシステム設計、維持管理、点検要領等の検討に資することとした。

① FMEAワークシート

排水機場の全設備についてFMEAを実施した、ただし、機能グレードにより、

- ・部品のままのもの
- ・溶接構造又は締結により、一体構造となっており、合わせて一つの機能をはたし、影響が同一のものは部品単位の組立品

の2種類に分けて、ワークシートの部品欄にそれぞれ記入し、解析した。FMEAワークシートの一例として、図－4.1.4に示す信頼性論理ブロック図〔補助機器設備、一次冷却水系統〕のうち、冷却器本体のFMEAワークシートを表－4.1.6に、小型弁、配管のFMEAワークシートを表－4.1.7に、燃料系統のうち燃料小出槽（タンク）等のFMEAワークシートを表－4.1.8に示す。

表－4.1.6 サブシステムFMEAワークシート

サブシステム名	機 関 名	冗長性(予備機器)	作 成 者	作成年月日	改 訂	来 歴	シートNo.
補助機器設備 (一次冷却水 系統)	11121 発電機用エンジン 清水冷却器	無		昭和 61年3月5日			一冷3 1

部 品 名	故障モード	故 障 原 因	故 障 の 影 響		故障等級	備 考
			サブシステム	シ ス テ ム		
11121 冷却器本体	腐 食	全面腐食、電食	影響なし	影響なし	Ⅳ	
	き 裂	疲労き裂、加工き裂	機能不全 (一次冷却水量減少)	緊急停止 (温度継電器作動)	I	
	漏 洩	組立不良、溶接不良、 材料の劣化、腐食	同 上	同 上	I	

表- 4.1.7 サブシステムFMEAワークシート

サブシステム名	機 器 名	冗長性(予備機器)	作 成 者			作成年月日	改 訂	来 歴	シートNo.
補助機器設備 (一次冷却水 系統)	11112 主エンジン 配 管	無				昭和 61年3月5日			一冷6 2 配管

部 品 名	故障モード	故 障 原 因	故 障 の 影 響		故障等級	備 考
			サブシステム	シ ス テ ム		
111123 小型弁類	作動不良	開動作不良	機能不全	運転不能	I	
		閉動作不良	機能不全	影響なし	IV	
111124 配 管	腐 食	全面腐食	影響なし	影響なし	IV	
	き 裂	疲労き裂, 加工き裂	機能不全 (一次冷却水 減少)	緊急停止	I	
	漏 洩	組立不良, 材料の劣 化, 溶接不良	同 上	同 上	I	

表- 4.1.8 サブシステムFMEAワークシート

サブシステム名	機 器 名	冗長性(予備機器)	作 成 者			作成年月日	改 訂	来 歴	シートNo.
補助機器設備 (燃料系統)	燃 料 小 出 槽	無				昭和 61年3月5日			燃油 1

部 品 名	故障モード	故 障 原 因	故 障 の 原 因		故障 等級	備 考
			サブシステム	シ ス テ ム		
1411 タンク本体	腐 食	全面腐食	影響なし	影響なし	IV	
	き 裂	脆性き裂, 加工き裂	機能不全	運転時間の短縮 又は始動不能	I	
	漏 洩	腐食, き裂	同 上	同 上	I	
1412 油 面 計	作動不良	機械的不良	機能不全 (油面を検知 しない)	影響なし	IV	
1413 遠隔指示 油面計	作動不良	電氣的的不良 機械的不良	機能不全 (油面を検知 しない)	運転時間短縮	II	

② 致命的品目表

FMEAの結果、排水機場の機能喪失のような致命的故障や運転を連続して行えない重大故障の原因となる項目(表- 4.1.4 故障によるシステムへの影響評価を参照)としてFMEAワークシートの中で、故障等級Ⅰ、Ⅱに格付けされた機器を要アクション項目とし、FTAの基本要素とした。なお故障等級Ⅲ、Ⅳとした機器については、機械的に修理の必要があるもののシステムの使命達成には影響がないためFTAから除外した。致命的品目表の一例として、表- 4.1.9 に潤滑水系統を、表- 4.1.10に燃料系統を示す。

表- 4.1.9 致命的品目表(潤滑水系統)抜粋

表- 4.1.10 致命的品目表(燃料系統)抜粋

番号	品 名	故障モード	影 響	故障等級	備 考
	《配 管》				
1.	フローリレー (主ポンプ用)	作動不良 (不動作)	緊急停止	Ⅰ	
2.	フローリレー (減速機用)	同 上	同 上	Ⅰ	
3.	サイトフロー	詰り・付着	同 上	Ⅰ	
		作動不良 (開動作不良)	同 上	Ⅰ	
4.	小型弁類	作動不良 (開動作不良)	同 上	Ⅰ	
5.	配 管	き 裂	同 上	Ⅰ	
		漏 洩	同 上	Ⅰ	
		詰り・不着	同 上	Ⅰ	
	《減速機用 潤滑油 冷却器》				
6.	冷却器本体	き 裂	緊急停止	Ⅰ	
		漏 洩	同 上	Ⅰ	
7.	冷 却 管	き 裂	同 上	Ⅰ	
		詰り・付着	同 上	Ⅰ	
1.	《配 管》 電 磁 弁 (弁 本 体)	き 裂	緊急停止	Ⅱ	
		漏 洩	同 上	Ⅱ	

番号	品 名	故障モード	影 響	故障等級	備 考
	《燃料小出槽》				
1.	タンク本体	き 裂	始動不能または時間短縮	Ⅰ	
		漏 洩	同 上	Ⅰ	
	《配 管》				
2.	小型弁類 (燃料小出槽～各エンジン)	作動不良 (開動作不良)	始動不能	Ⅰ	燃料移送ポンプ選択予備共に故障の場合
3.	配 管 (燃料小出槽～各エンジン)	き 裂	運転不能	Ⅰ	同 上
		漏 洩	同 上	Ⅰ	同 上
		詰り・付着	同 上	Ⅰ	同 上
	《手動ウイング ポンプ》				
4.	手動ウイング ポンプ	き 裂	始動不能または運転不能	Ⅰ	
		漏 洩	同 上	Ⅰ	
		詰り・不着	同 上	Ⅰ	
		作動不良	同 上	Ⅰ	
	《燃料小出槽》				
1.	遠隔指示油面計	作動不良	運転時間短縮	Ⅱ	
	《屋外重油 タンク》				
2.	タンク本体	き 裂	運転時間短縮	Ⅱ	
		漏 洩	同 上	Ⅱ	

4.1.2 トンネル換気設備のFMEA

(1) モデルトンネル換気設備の設定

トンネル換気設備の合理的な設計および維持管理の手法を確立するため、標準的なモデル設備を設定し当該設備の定量的な信頼性評価を実施することとした。モデル設備としては建設省における設置件数が一番多い換気方式「縦流式ジェットファン」を選定した。その概要は、トンネル延長が1,270m，トンネル断面積 31.54 m^2 ，道路構造規格が第3種第3級の2車線対面交通8,000台/日で、煤煙濃度透過率40%以上、一酸化炭素濃度100ppm以下の許容濃度で設計されたもので、 $8 \text{ m}^3/\text{sec}$ のジェットファンが14台設置されているものとした。

モデル設備の諸元を表-4.1.11に、モデル設備の全体構成図を図-4.1.5に示す。

表-4.1.11 モデル設備の諸元

換気方式	縦流式，ジェットファン	
本体	型式	横型電動機直結可逆軸流
	口径	660mm
	風量	$80 \text{ m}^3/\text{sec}$
	噴流速度	$30 \text{ m}/\text{sce}$
	回転数	3,000 r.p.m
体	効率	90%
	寸法	外径 800mm × 内径 660mm × 長さ 4,400mm
	型式	全閉外扇カゴ型三相誘導
電動機	出力	11kW/400V
	極数	2p
	回転式	3,000 r.p.m
主制御	VI制御	
設置台数	14台	

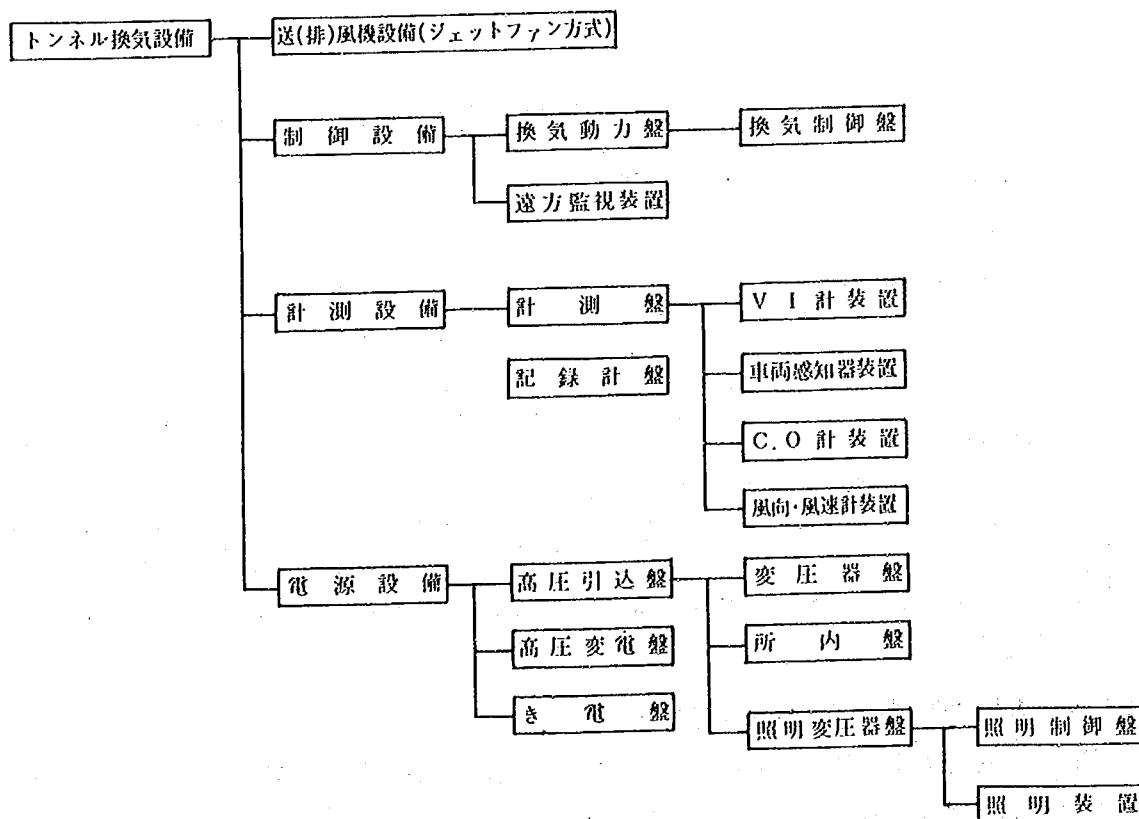


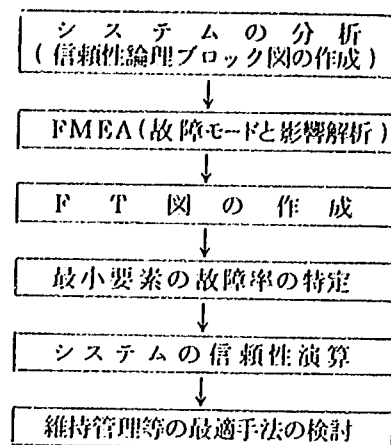
図-4.1.5 モデル設備の全体構成図

(2) 影響評価の考え方

信頼性の定量的評価は、図－4.1.6 に示す手順により実施されるが、本項では第2段階であるFMEA（故障モードと影響解析）の実施内容を報告する。

FMEAの目的、効用については排水ポンプに関する項で既に説明してある通りである。トンネル換気設備についてFMEAは次に示す手順で実施した。その主な内容は表－4.1.12に示す通りである。

- ① 解析対象システムの明確化
- ② 関連情報の収集
- ③ 解析レベルの決定
- ④ 信頼性論理のブロック図の作成
- ⑤ FMEAワークシートの作成
- ⑥ 致命的品目表の作成



図－4.1.6 信頼性評価手順

表－4.1.12 FMEAの実施手順及び実施内容

手順	項目	実施内容
①	解析対象システムの明確化	○トンネル換気設備（ジェットファン）を構成する1台のジェットファンを解析対象とした。
②	関連情報の収集	○設計計画書，仕様書，構造図，詳細図を検討した。 ○トンネル換気設備の信頼性に関するフィールド調査を実施中した。
③	解析レベルの決定	○トンネル換気各設備及びジェットファンを構成する全部品について展開することとした。
④	信頼性論理のブロック図の作成	○機能別ブロックからサブシステムの信頼性ブロック図を作成した。 ○トンネル換気各設備及びジェットファンについて展開した。 ○部品と部品とのインターフェースも考慮した。
⑤	FMEAワークシートの作成	○FMEA故障モード一覧表及び故障等級を検討決定した。 ○類似のシステムや機器の試験報告書，不具合報告書，機場の実態調査を参照しながら重要な推定原因を列挙した。 ○故障の等級 故障が発生した場合，サブシステム，システム，構成部品などが受ける影響の大きさを分類し，等級等に故障の等級を分けて記入した。
⑥	致命的品目表の作成	○現状にてある等級を越えるものを要アクション項目した。

表－4.1.12のうち④の「信頼性ブロック図」は，システムとその構成要素（サブシステム，構成部品等）の機能の相互関係を示す論理図であって，装置の物理的接続関係を示すシステムブロック図ではないので，配線や配管の直列・並列と信頼性論理ブロック図の直列・並列は必ずしも一致しないことになる。図－4.1.7に今回作成した信頼性論理ブロック図の一例として，ジェットファン本体の信頼性ブ

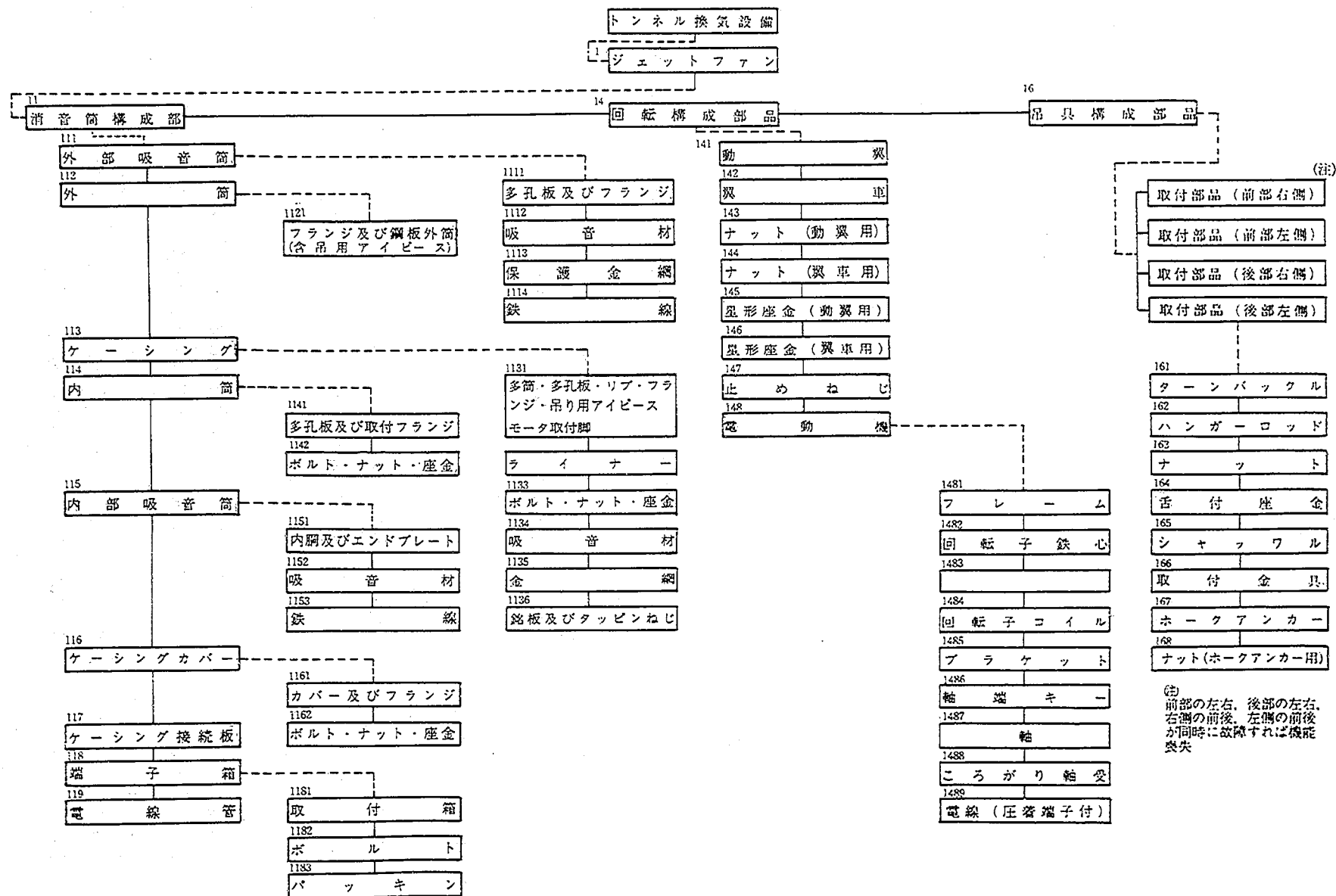


図-4.1.7 ジェットファンの信頼性論理ブロック図

ロック図を示す。

次に、⑤の「FMEA ワークシートの作成」については、以下に示す考え方に基き、表－ 4.1.13に示すフォーマットにより作成した。

表－ 4.1.13 サブシステムFMEAワークシート

サブシステム名	機 器 名	冗長性(予備機器)	作 成 者			作成年月日	改 訂	来 歴	シートNo
ジェットファン	ジェットファン (1 台)	有				昭和 年 月 日			

㉑ 部 品 名	㉒ 故障モード	㉓ 故 障 原 因	㉔ 故 障 の 影 響		㉕ 故障 等級	備 考
			サブシステム	システム		

㉑ 対象(部)品

全部品を対象として解析を行った。ただし、機能グレードにより

- ・部品のままのもの
- ・溶接構造または締結により一体構造となっており、合せて一つの機能を果たし、影響が同一のもの部品の組立品
- ・部品と部品とのインターフェイス

の3種類に分けて、ワークシートの部品欄にそれぞれ記入し解析した。これらの部品および組立品は信頼性論理ブロック図中に示したものである。

㉒ 故障モードと故障原因

トンネル換気設備に発生し得ると考えられる故障モードおよびその原因についてまとめ(表－ 4.1.14参照)，その中から解析対象部品に、潜在的に存すると考えられる故障モードおよび原因を抽出し、それぞれ故障モード欄および故障原因欄に記入した。解析は原則として故障モードをベースに行うこととした。

㉔ 故障の影響

機器への影響については、該当部品、組立品または構成部品への影響と合せて、サブシステムへの影響およびシステムへの影響について記入した。この場合想定される最悪を記入した。

㉕ 故障等級

故障が発生した場合、サブシステム、システムなどが受ける影響の大きさを分類し、4等級に故障の等級を分けた。表－ 4.1.15に故障によるシステムへの影響評価等級を示す。

表- 4.1.14 故障モード及び原因一覧表(一例)

10. 振動・騒音	11. 作動不良	13. 溶断・断線	14. 接点不良	15. 絶縁不良 (短絡・漏電・接地)	16. モータ始動・作動不良
10B 機械的原因 加工不良 (軸継手不良) 組立不良 (心出し不良) (バランス不良) (締付力不足) (歯当り不良) 構造・剛性不良 (配管反力・ モーメント) (サポート不良) 異物混入 潤滑不良 危険速度 自励振動 共振 変形 摩擦 基礎・支え台の 不良または劣化 トルク変動(欠 相時) 負荷側の不平衡 单相または電圧 の不平衡 断線(单相運転) ブラシの接触不 良 エアークリップの 不整 二次回路の不 平衡	11A 開動作不良 加工不良 コンタミネーション スティック 流体圧力異常 駆動装置不良 機構部破損 誤動作 11B 閉動作不良 加工不良 弁座に傷 コンタミネーション スティック 流体圧力異常 駆動装置不良 機構部破損 誤動作 11C 電気的不良 (含コントローラ) センサ取付不良 センサ校正不良 センサ部破損 リード線切断 誤動作 11D 機械的不良 加工不良 組立不良 駆動装置不良 機構部破損	13A 過熱 選定誤り 配線不良 締付不良 不完全投入 過負荷 異常電圧 短絡 変化 劣化 13B 絶縁破壊 異常電圧 機械的破損 汚損	14A 異常消耗 過負荷 開閉頻度高 チャタリング 腐食性ガス 汚損 14B 接触不良 組立不良 機構部破損 接点脱落 コイル断線 吸引不良 汚損(酸化) 発錆 異物混入 保全不良 14C 溶着 過熱 過負荷 突入電流大 炭化物 接触面荒れ 摩擦	15A 絶縁低下 汚損 吸湿 焼損 保全不良 15B 絶縁劣化 絶縁物の劣化 絶縁物のき裂 15C 振動	電源不良 (電圧, 周波数異常) 断線 接続不良 短絡または接地 回転子不良 固定子と回転子 の接触 過負荷 始動トルク不足 相回転逆 軸受焼損

表- 4.1.15 故障によるシステムへの影響評価

故障等級		基準	記事
I	致命的	所量風量の換気機能消失。 (1台以上のファンが運転不能)	1. ファン消失。 2. ジェットファンの羽根車が回転せず換気機能消失。 3. 電源消失。
II	重大	設定条件の変更による運転可能。	
III	軽微	各1台のファンの運転は行うが、部品単位で故障と見なせる。	1. 外観上運転可能であるが、部品点検し取替を要する。
IV	微少	定期点検まで運転に支障ない。	

(3) FMEA実施結果

ジェットファンを構成する機器の信頼性論理ブロック図により、システム、サブシステム、構成品、部品等の関係が明確になったため、これに基づき各構成部品の故障モードおよび故障原因を想定するとともに、個々の構成部品の故障が最終的にシステムへ与える影響について等級別評価し、検討結果をFMEAワークシートにとりまとめた。その結果の一部を表-4.1.16に示す。

さらにFMEAワークシートで、故障等級Ⅰ、Ⅱとした機器を要アクション項目とし、FTAの基本要素とすることとした。なお、故障等級Ⅲ、Ⅳとした機器については、FTAから除外した。ここで一例としてジェットファン本体について故障等級Ⅰに格付けされた致命品目を表-4.1.17にとりまとめた。

表-4.1.16 サブシステムFMEAワークシート(その1)

サブシステム名	機 器 名	冗長性(予備機器)	作 成 者	作成年月日	改 訂	来 歴	シートNo.
ジェットファン	ジェットファン (1台)	有		昭和 年 月 日			

部 品 名	故障モード	故 障 原 因	故 障 の 影 響		故障等級	備 考
			サブシステム	シ ス テ ム		
141 動 翼	破 壊	脆性破壊 疲労破壊	機能不全	←	Ⅰ	動翼脱落 バランス不良, 静止部と接触 ダスト付着 (アンバランス)
	振 動	機械的原因 流体的原因	機能不全	←	Ⅰ	
	変 形	強度不足 加工不良 過大応力 当て傷	機能不全	←	Ⅲ	
	き 裂	疲労き裂 応力腐食 延性き裂	部品の影響大	←	Ⅲ	
	腐 食	エロージョン 全面腐食	部品の影響大	←	Ⅲ	角度設定不良
	騒 音	機械的原因	影響なし	←	Ⅳ	
	作動不良	加工不良	機能不全	←	Ⅰ	
142 翼 車	破 壊	脆性破壊 疲労破壊	機能不全	←	Ⅰ	バランス不良
	振 動	機械的原因	機能不全	←	Ⅰ	
	き 裂	疲労き裂 応力腐食 延性き裂	部品の影響大	←	Ⅲ	
	腐 食	エロージョン 全面腐食		←	Ⅳ	
翼車のキー部	変 形	強度不足 加工不良 過大応力 当て傷	機能不全	←	Ⅰ	
ナット(動翼用))	破 壊	脆性破壊 疲労破壊	機能不全	←	Ⅰ	動翼がめけだす

表- 4.1.16 サブシステムFMEA ワークシート(その2)

サブシステム名	機 器 名	冗長性(予備機器)	作 成 者	作成年月日	改 訂	来 歴	シートNo.
ジェットファン	ジェットファン (1 台)	有		昭和 年 月 日			

部 品 名	故障モード	故 障 原 因	故 障 の 影 響		故障等級	備 考
			サブシステム	システム		
ナットのねじ部 144 ナット(翼車用)	弛 み	組立不良 過大振動 腐 食	機能不全	←	I	バランス不良
	振 動	機械的原因	機能不全	←	I	
	き 裂	疲労き裂 応力腐食 延性き裂	部品の影響大	←	III	
	腐 食	エロージョン 全面腐食	部品の影響大	←	IV	
	変 形	強度不足 加工不良 組立不良 過大応力	部品の影響大	←	III	
	破 壊	脆性破壊 疲労破壊	機能不全	←	I	
ナットのねじ部 1481 電動機フレーム	弛 み	組立不良 過大振動 腐 食	機能不全	←	I	同 上
	振 動	機械的原因	機能不全	←	I	バランス不良
	き 裂	疲労き裂 応力腐食 延性き裂	部品の影響大	←	III	
	腐 食	エロージョン 全面腐食	部品の影響大	←	IV	
	変 形	強度不足 加工不良 組立不良 過大応力	部品の影響大	←	III	
	破 損	脆性破壊 延性破壊 応力腐食	機能不全	←	III	
電 動 機 回 転 子 鉄 心	腐 食	エロージョン 全面腐食 選択腐食	影響ナシ	←	IV	
	変 形	加工不良 組立不良 当て傷	部品の影響大	←	IV	
	き 裂	脆性き裂 延性き裂 応力腐食	部品の影響大	←	IV	
	破 壊	延性破壊 疲労破壊 応力腐食	機能不全	←	I	
	絶縁不良	絶縁低下 絶縁劣化 振動	機能不全	←	I	
	腐 食	エロージョン 全面腐食 選択腐食	機能不全	←	III	
	変 形	加工不良 組立不良 当て傷 温度不均一	部品の影響大	←	IV	
	き 裂	延性き裂 疲労き裂 応力腐食	部品の影響大	←	IV	
	振 動	機械的原因	部品の影響大	←	IV	

表- 4.1.17 致命故障品目表(ジェットファン本体)抜粋

番号	品 目	部品番号	故障モード	故障等級	備 考
1	外筒の多孔板およびフランジ	1111	亀 裂	1	通風部をふさぐ
2	フランジおよび 鋼板外筒 (含吊り用アイピース) モーター取付脚	1131	破 壊 振 動 変 形	1 1 1	ケーシング脱落 モーター取付不良による接触 動翼接触の原因
3	消音器のボルト・ナット	1133	破 壊 脱 落	1 1	消音器脱落 "
4	内筒の多孔板およびフランジ	1141	亀 裂	1	通風部をふさぐ
5	内筒のボルト・ナット	1142	脱 落	1	"
6	動 翼	141	破 壊 振 動 作動不良	1 1 1	動翼脱落 バランス不良・静止部と接触 角度設定不良
7	翼 車	142	破 壊 振 動	1 1	バランス不良
8	翼 の キ ー 部	143	変 形	1	
9	動 翼 の ナ ッ ト	143	破 壊 緩 振 み 動	1 1 1	動翼のめけだし バランス不良
10	翼 車 の ナ ッ ト	144	破 壊 緩 振 み 動	1 1 1	翼車を固定できない " バランス不良
11	翼 車 の 止 め ね じ	147	脱 落	1	
12	電 動 機 回 転 子 コ ア	1482	破 壊 絶縁不良	1 1	
13	電 動 機 回 転 子 内 フ ァ ン	1483	破 壊	1	
14	電 動 機 の 回 転 子 コ イ ル	1484	溶 断	1	
15	電 動 機 の エ ン ド ブ ラ ケ ッ ト	1485	破 損	1	
16	電 動 機 の 軸	1487	破 損 振 動	1 1	振動の原因 バランス不良
17	電 動 機 の こ ろ が り 軸 受	1488	摩 耗 焼 損 破 壊	1 1 1	取替部品 グリースなし・製品不良・寿命
18	電 動 機 の リ ー ド 線	1489	溶 断 絶縁不良	1 1	過電流
19	電 動 機 の リ ー ド 線 圧 着 端 子	1489	接点不良	1	接触不良
20	タ ー ン バ ッ ク ル	161	脱 落 破 損	1 1	ジェットファン脱落
21	ハ ン ガ ー ロ ッ ド	162	脱 落 破 損	1 1	"
22	シ ャ ッ ク ル	165	脱 落 破 損	1 1	"
23	取 付 け 金 具	166	脱 落 破 損	1 1	"
24	ホ ー ク ア ン カ ー	167	脱 落 破 壊	1 1	"
25	ホ ー ク ア ン カ ー 用 ナ ッ ト	168	破 壊	1	"
26	アーチコンクリートの強度		劣 化	1	"

4.2 FT図の作成

4.2.1 排水ポンプ設備のFT図

(1) FT図作成の前提

排水ポンプ設備のFT図の作成に当たっては、次に示す点を前提とした。

① 排水ポンプ設備に要求される機能と操作方式

排水ポンプ設備に要求される機能は次のように規定することができる。「通常時待機状態にある排水ポンプ設備が、ひとたび出水が発生し、内水排除を要求される事態に陥った時に確実に始動することができ、かつ必要作動時間連続して運転を継続できること。」

また、今回の検討の対象としたモデルポンプ設備（図-4.1.1参照）の操作方式として、次の三つの方式を考えることとした。

④ 中央盤だけでシステムの運転を行う方式（中央操作）

⑤ 中央盤だけでシステムの運転を試みたが、運転不能のときに現場の機側盤で運転を行う方式（中央+機側操作）

⑥ ④の中央+機側操作でもシステムの運転が不能のとき、不具合箇所を修復して運転を行う方式（中央+機側修復操作）

ここでいう修復とは、現場での応急的措置を講ずることである。すなわち、機側盤ではコントロールすることはできないが、運転員が現場で手動で操作することによってバックアップが可能となるように、設備設計がなされている機構を生かすことを指している。したがって、バルブやリレーなどの部品を交換することや電気回路の配線の変更などは含まれていない。

今回のモデルポンプ設備の場合、サブシステム補助機器設備系では始動電磁弁、潤滑水電磁弁、空気槽および井戸ポンプにこのような機構が備えられている。

② 信頼性評価尺度

今回の調査では、FTA法というシステムにとって望ましくない事象に着目した解析手法を採用しているので、システム（排水ポンプ設備）の信頼性評価尺度としてアンアベイラビリティを用いることとした。具体的には前述の排水ポンプ設備に要求される機能を考慮し、次に示す二つの信頼性評価尺度を規定した。

④ 始動失敗に関するアンアベイラビリティ…………… $\bar{A}_1$

⑤ 連続運転失敗に関するアンアベイラビリティ…………… $\bar{A}_2$

排水ポンプ設備としてのトータルアンアベイラビリティ（ $\bar{A}_T$ ）は、これら $\bar{A}_1$ 、 $\bar{A}_2$ を含めて次式で評価することとした。

$$\bar{A}_T = \bar{A}_1 + \bar{A}_2 \quad (\ll 1.0)$$

③ FT図のトップ事象

FTA法におけるFT図は、システム（排水ポンプ設備）にとって望ましくない事象をトップ事象として取上げ、それを引起す因果関係を、システム→サブシステム→アセンブリ→コンポー

ネット（最小要素）まで順次掘下げ、その過程を論理記号を用いて表わしたものである。したがって、トップ事象が信頼性評価目的に合せて正しく設定されなかった場合には、出来上ったF T図は意図にそぐわないものとなり、それを用いて信頼性評価計算を行っても意味のないものになってしまう。

本調査では、排水ポンプ設備に要求される機能と信頼性評価目的から、トップ事象を「内水排除機能の喪失」と設定した。このことは、排水ポンプ設備は始動機能と連続運転機能の両者が同時に満足されなければ、システムの望ましくない事象、すなわち「内水排除機能の喪失」を出現させることを意味する。

④ F T図の種類

前述の信頼性評価尺度と操作方式から次に示すように始動失敗に関して3種類、連続運転失敗に関して3種類、合計6種類のF T図を作成した。ここで、中央+機側修復操作の場合のF T図を作成するにあたっては、前述したような意味での修復を行うために許容される時間を1時間以内と仮定した。また、この修復は始動時および必要作動時間内であれば、どの時点で行ってもよいものである。

㊤ 始動失敗に関するF T図

- i 中央操作方式で失敗する場合のF T図
- ii 中央+機側操作方式で失敗する場合のF T図
- iii 中央+機側修復操作方式で失敗する場合のF T図

㊤ 連続運転失敗に関するF T図

- i 中央操作方式で失敗する場合のF T図
- ii 中央+機側操作方式で失敗する場合のF T図
- iii 中央+機側修復操作方式で失敗する場合のF T図

(2) F T図の作成

前項で示したようにF T図は全部で6種類作成したが、それらの一つ一つは大変膨大なものであるためにこの報告書で1種類だけでも完全に載せることは難しい。そこで、ここでは始動失敗に関するF T図の中で、中央+機側操作方式で失敗する場合のF T図の1部を図-4.2.1(1)から図-4.2.1(6)に示す。

このうち、図-4.2.1(3)、(4)、(5)、(6)は最小要素まで展開したF T図であるが、量的にはこのケースでのF T図全体の約1/400程度である。このことからいかに一つのF T図が膨大なものであるか理解していただけるものと思う。

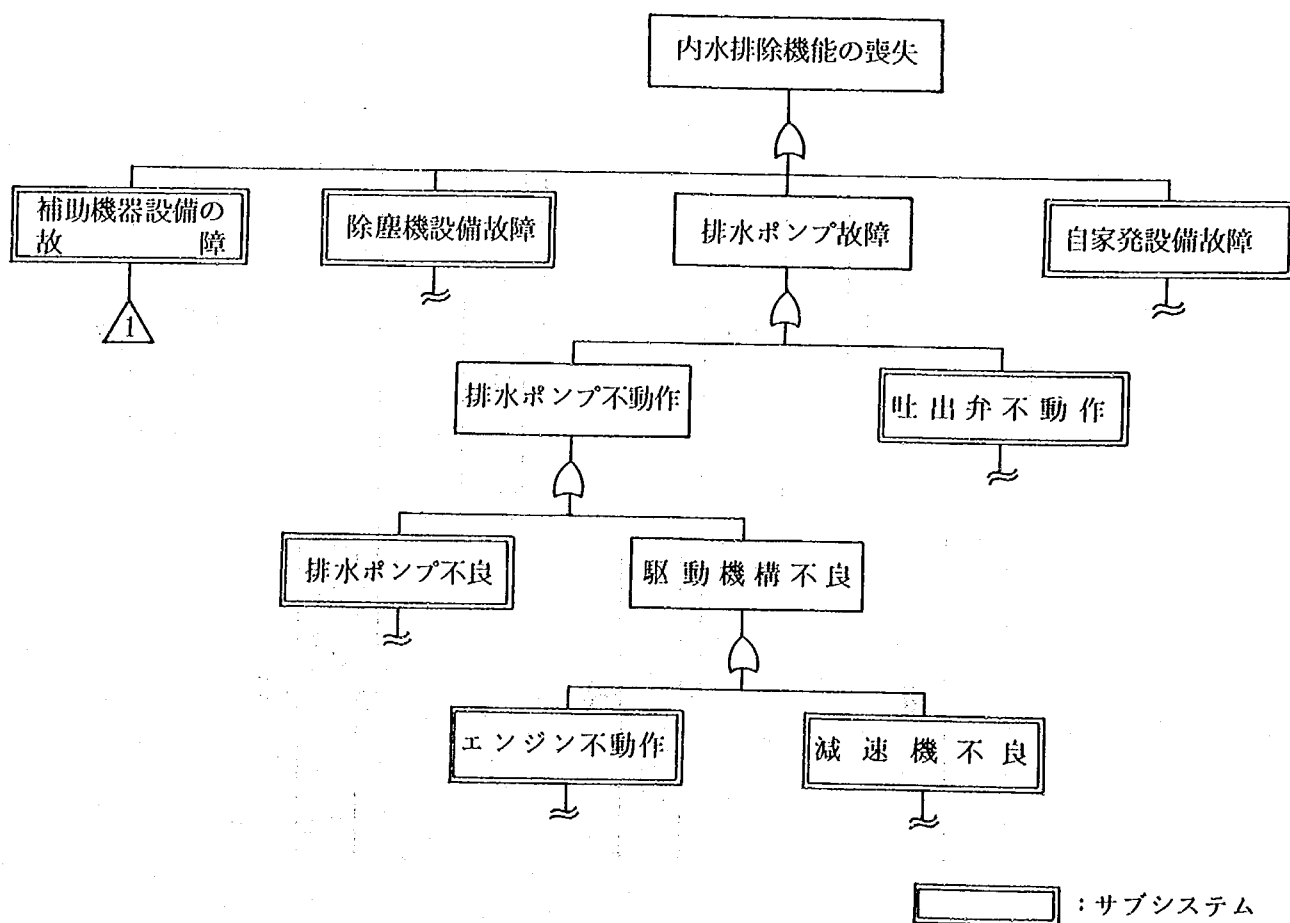
図-4.2.1(1)は、システムのトップ事象を引起す要因をサブシステムレベルまで展開したF T図の全体を表わすものである。この図から明らかなようにモデルポンプ設備は7つのサブシステムより構成されている。

図-4.2.1(2)は、これまでの諸調査で故障発生頻度の高かったサブシステムである補助機器設備系について展開したF T図である。

図－4.2.1 (3), (4), (5), (6)は、さらに主ポンプ始動失敗を引起す要因のうち、一次冷却水が断となる事象について最小要素まで展開し終えたF T図である。

図－4.2.1 (7)は、図－4.2.1 (6)と対比しながら見るものである。前者は後者と同じく始動失敗に関するF T図であるが、中央+機側修復操作方式で失敗する場合のF T図である。両者を比較して明らかなように、同じ「清水槽へ水が送られない」という事象に対して、それを引起す要因関係に差が見られる。これは前者が先に述べた修復可能な機能を有していることを示すとともに、その機構を働かせることによって、当該事象が出現する確率が低くなることを定性的に表わしている。いいかえると中央+機側操作方式と中央+機側修復操作方式のF T図の違いは、後者の方には、手動等による修復操作という冗長系が付加されている点にあるといえる。同様にして中央操作方式と中央+機側操作方式のF T図の違いは、後者の方に機側操作に係る冗長系が付加された点にあるといえる。

このようにF T図は、大変に複雑でかつ膨大なものであるが、事象を引起す因果関係が論理的に表現されているものである。また、後述するようにF T図を用いて、システムの信頼性を定量的に求めることが可能となる



図－4.2.1 (1) F T図 (始動失敗中央+機側操作)

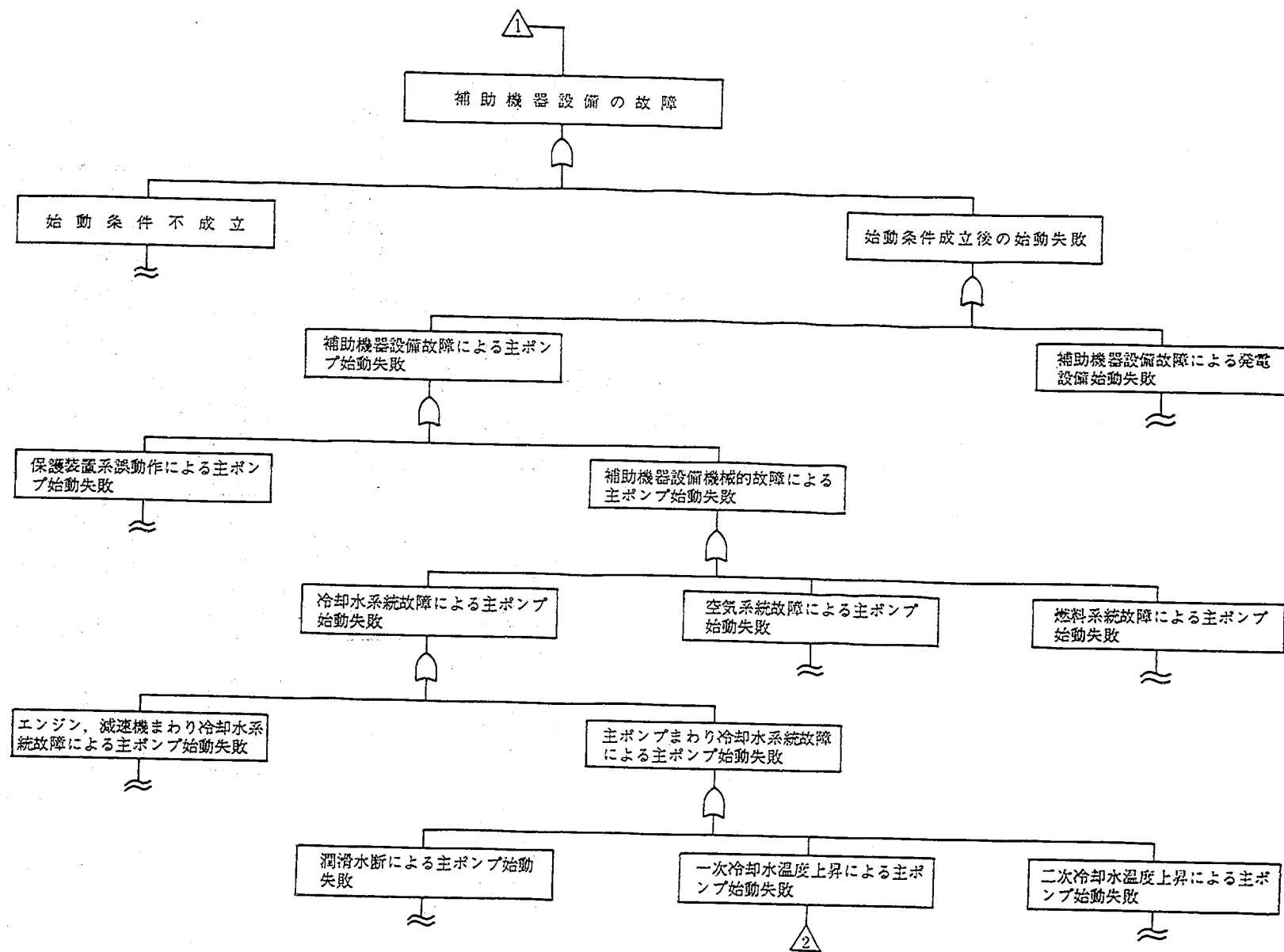


図-4.2.1(2) 補助機器設備FT図(始動失敗, 中央+機側操作)

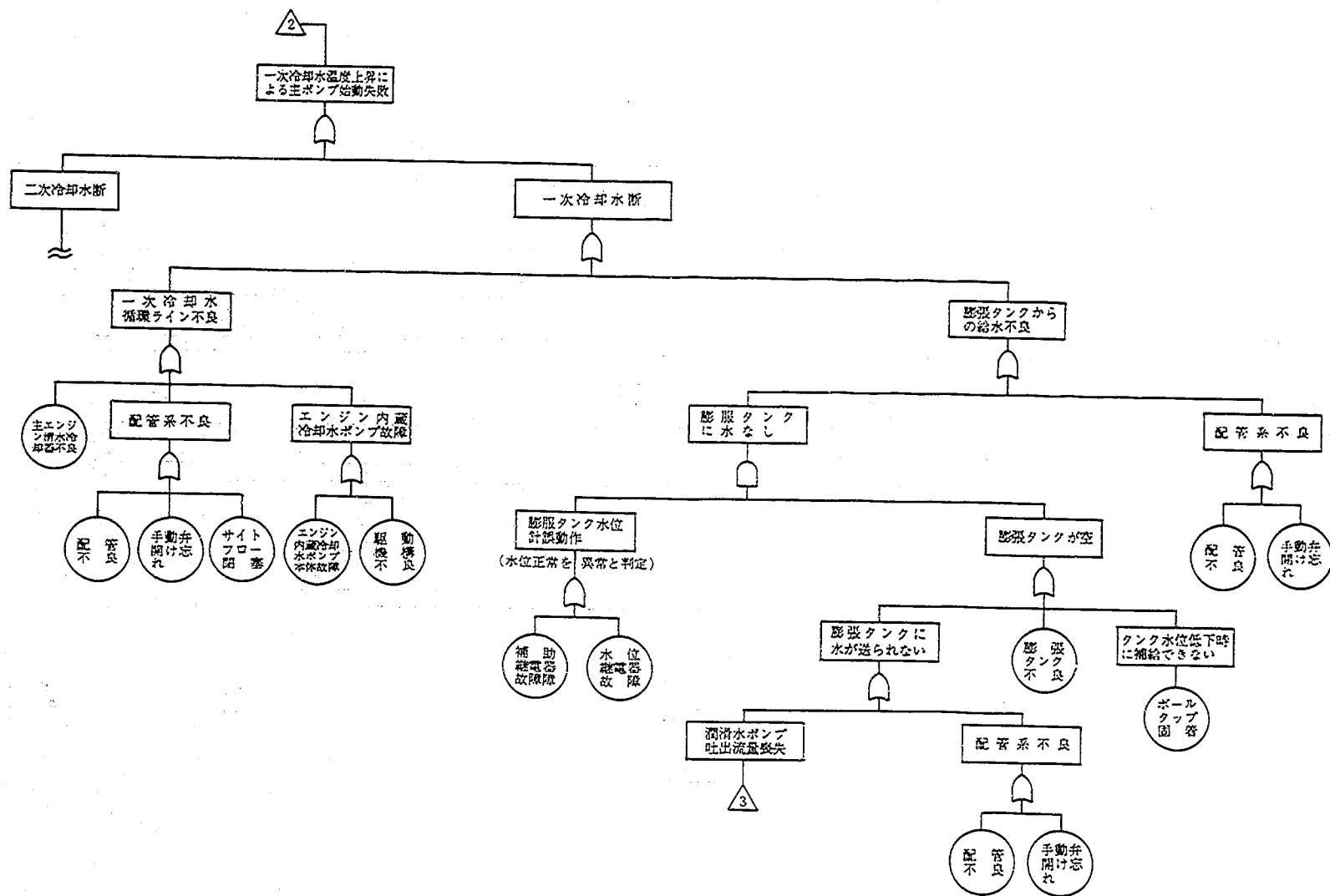


図-4.2.1(3) 一次冷却水系統F T図(始動失敗, 中央+機側操作)

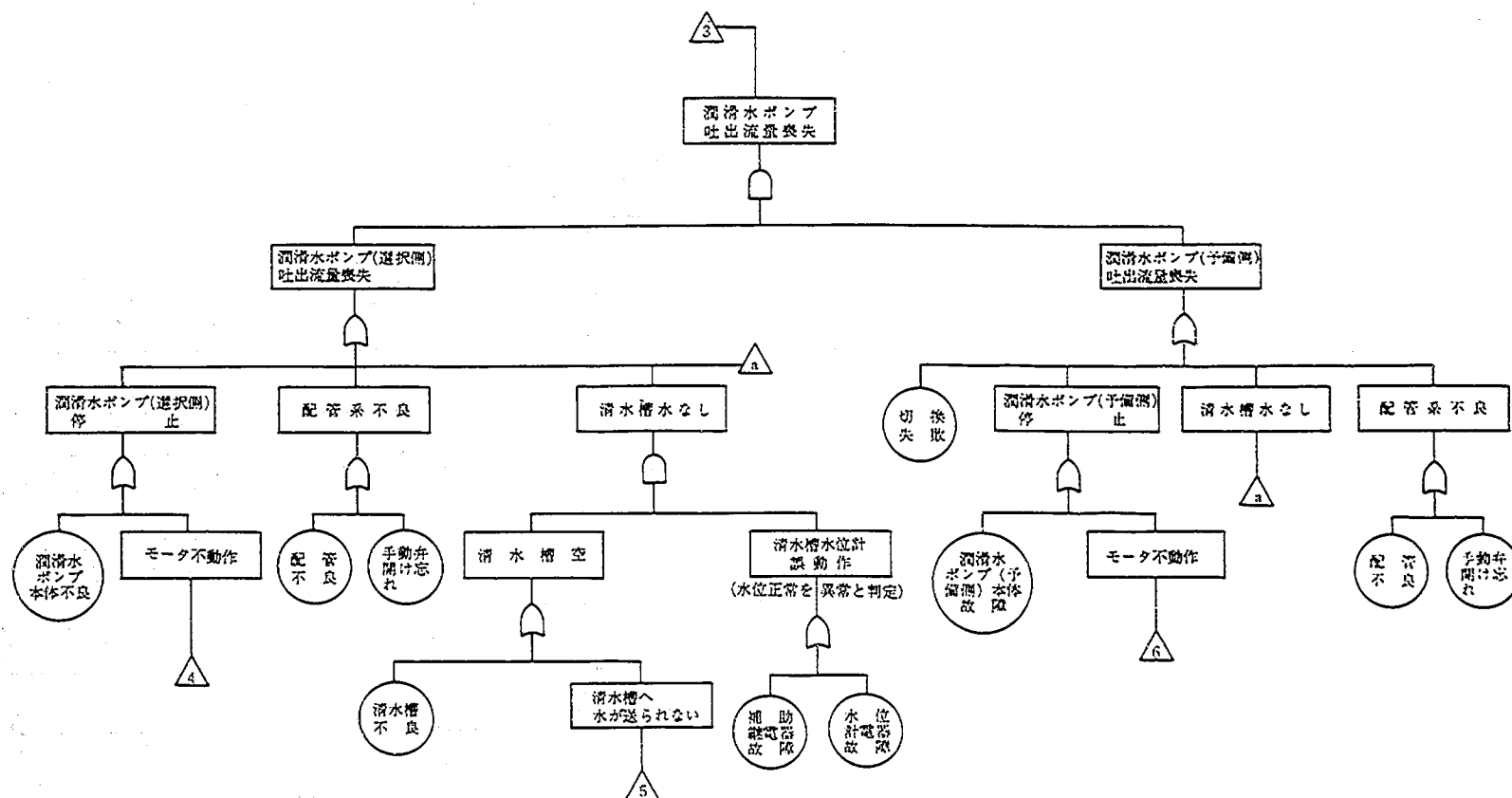


図- 4. 2. 1 (4) 一充冷却水系統 F T 図 (始動失敗, 中央+機側操作)

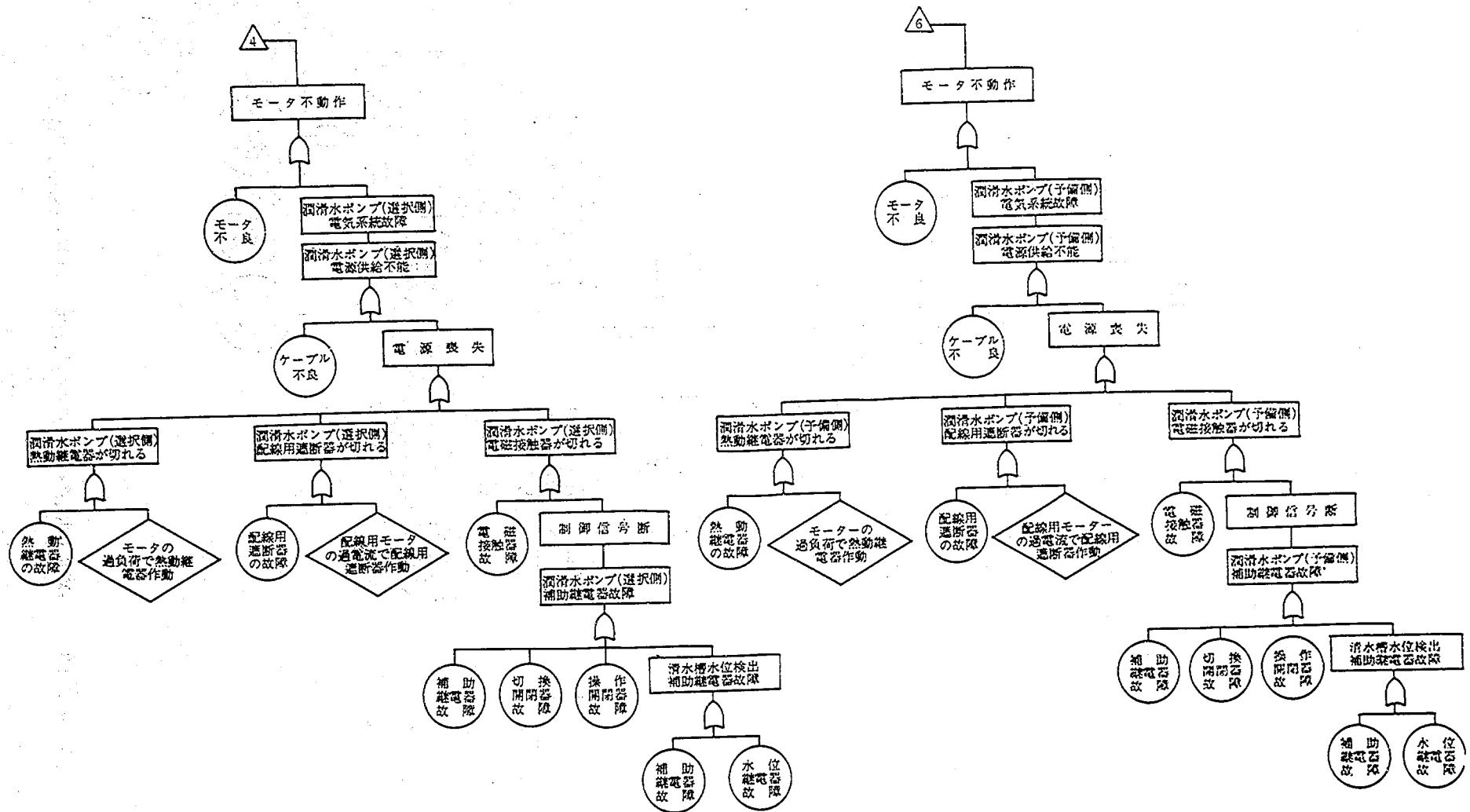


図-4.2.1(5) 一次冷却水系統F T図(始動失敗, 中央+機側操作)

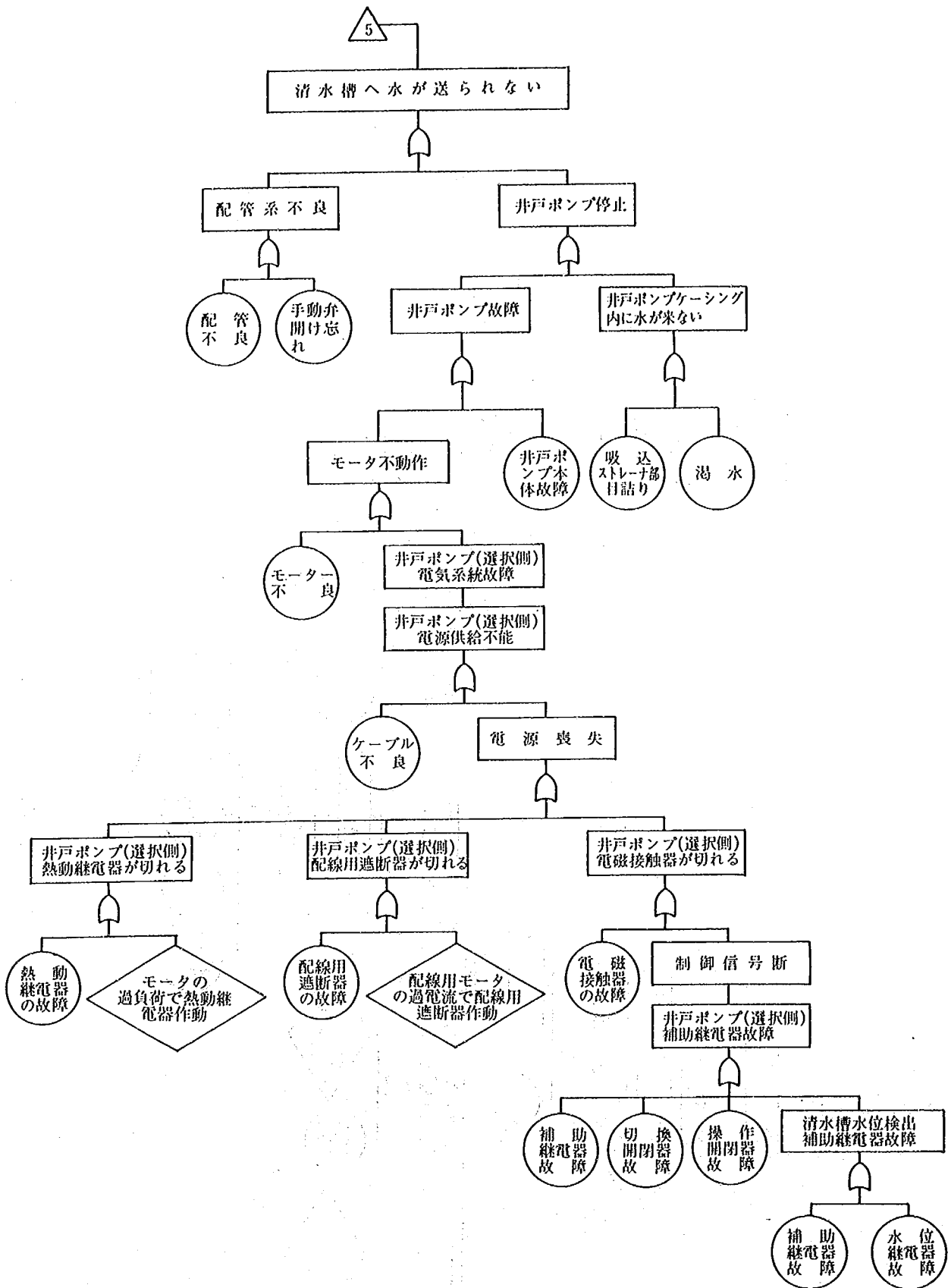


図- 4. 2. 1 (6) 一次冷却水系統 F T 図 (始動失敗, 中央+機側修復操作)

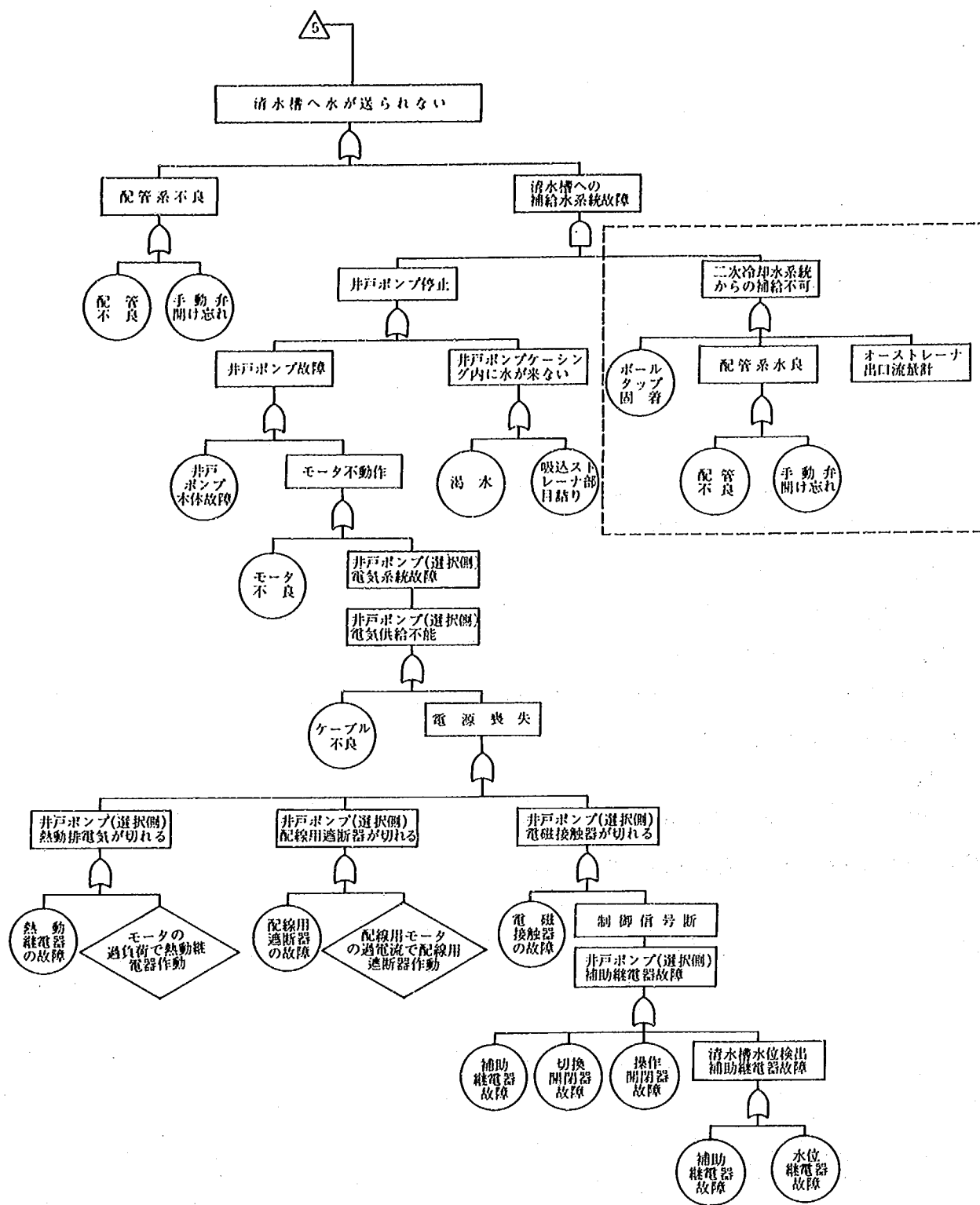


図- 4.2.1 (7) 一次冷却水系統 F T 図 (始動失敗, 中央+機側操作)

4.2.2 トンネル換気設備のFT図

(1) FT図作成の前提

トンネル換気設備のFT図は、次に示す点を念頭に置いて作成することとした。

- ① トンネル換気設備（ジェットファン方式）は、トンネル内の汚染された空気を機械的に排出し、安全な通行を確保することを使命に設置されており、長時間運転停止したり作動不能になった場合、トンネル内の安全かつ円滑な交通の確保に支障をきたすため、信頼度の高いものが要求される。本設備の特性は、稼働時間が長く、予防保全や故障修理による休止は最小限度にとどめ、全体として稼働率が高い事が要求される常用系システムであるという点にある。
- ② 信頼性の評価尺度は、故障あるいは予防保全による停止時間の全時間に対する比、すなわちアンアベイラビリティを採用することとした。
- ③ システムの分析（信頼性論理ブロック図）およびFMEA（故障モードと影響解析）の実施結果により、システムの運転上要求されるサブシステムと構成機器等の故障に係る因果関係が明確化され、システムに潜在する信頼性の弱点が定性的に求められた。これらをもとにモデルトンネル換気設備に望ましくない事象、FTAでいうトップ事象を「排風機能を消失させる故障」と定義することとした。
- ④ トップ事象の原因を逐次追求しつつ、トップ事象と基本事象の間を事象記号、論理記号を用い論理的に結合してFT図を完成させた。
- ⑤ このFT図は、トンネル換気設備の信頼性上の弱点の指摘と対策の提案とともに、システム、サブシステムの故障発生確率を定量的に求めるために使用することを目的とした。

(2) FT図

本報告では、維持管理の面から最もウェイトの大きいと考えられるジェットファン本体についてのFT図を紹介する。完成したFT図を図－4.2.2に示す。

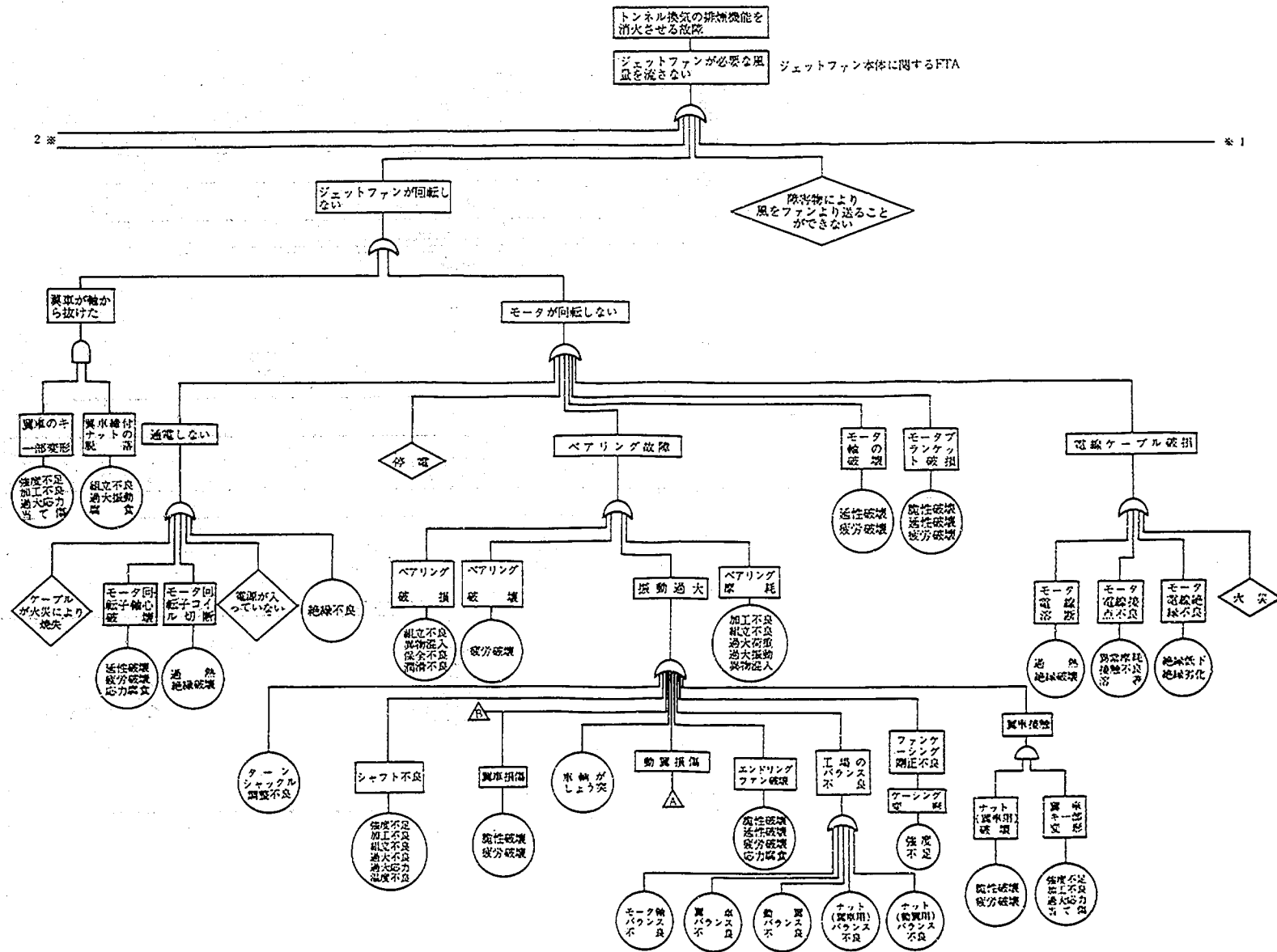


図-4.2.2(1) ジェットファンのFT図

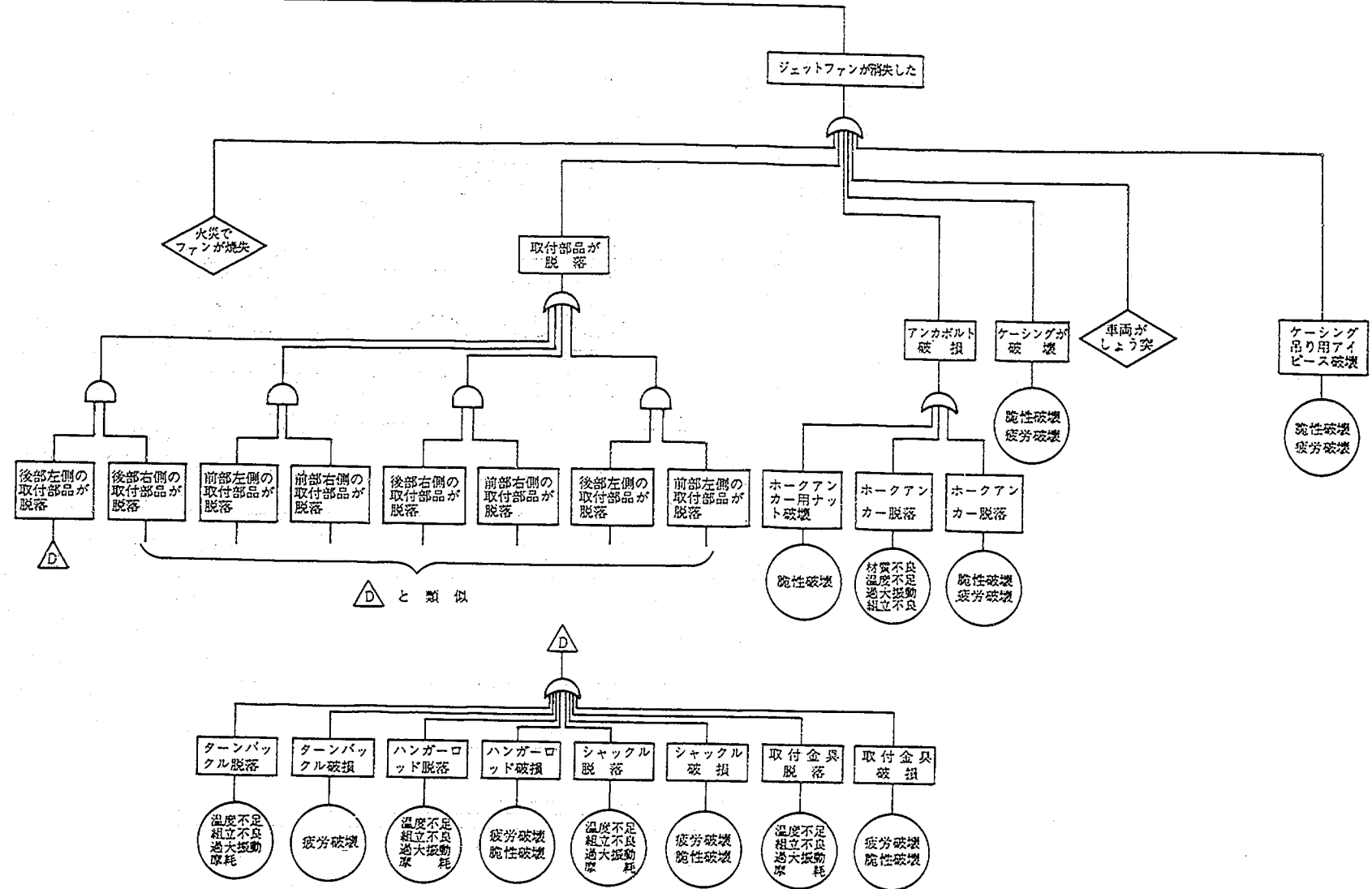


図-4.2.2(2) ジェットファンのFT図

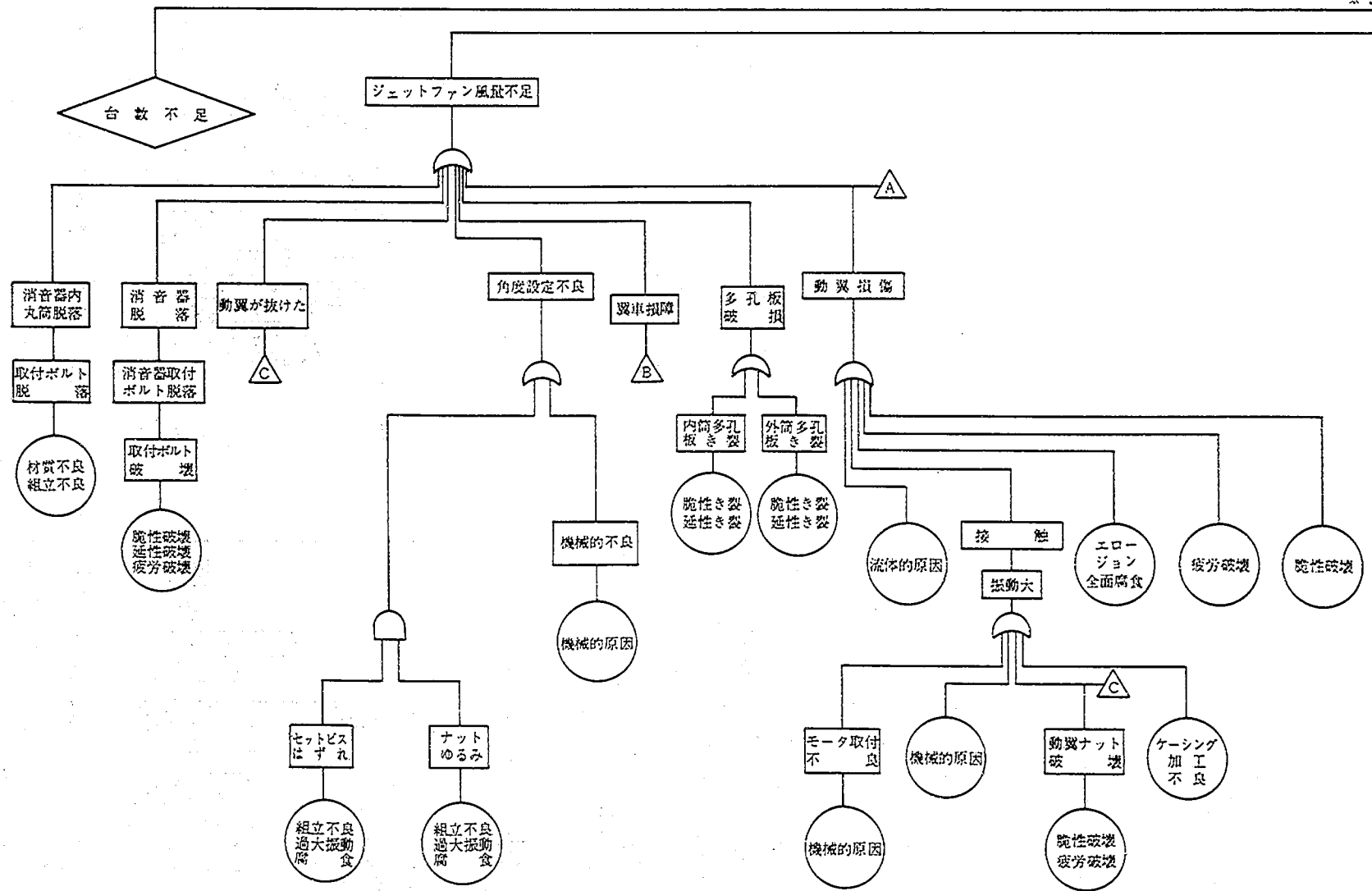


図-4.2.2(3) ジェットファンのFT図

5. 信頼性データ

5.1 フィールドデータの収集⁽¹⁵⁾

排水ポンプ設備とトンネル換気設備に関して、構成要素への分割とそのシステムでの位置づけを明確にするFMEAを実施した。これに基づいて、FMEAによる信頼性の定量化に必要な信頼性データを収集する作業を行なった。

5.1.1 排水ポンプ設備のフィールドデータ

(1) 調査の概要

第4章のFMEA図を構成する要素を対象として、各地方建設局及び北海道開発局が管理する排水ポンプ設備のうち、年間を通じて管理運転（単体運転も含む。）が可能で、主ポンプ口径が600mmから3,400mmまでのもの97箇所を選定した。

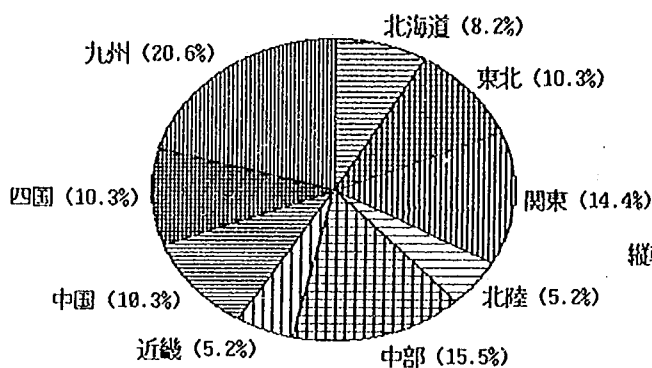


図-5.1.1 地建別調査対象機場

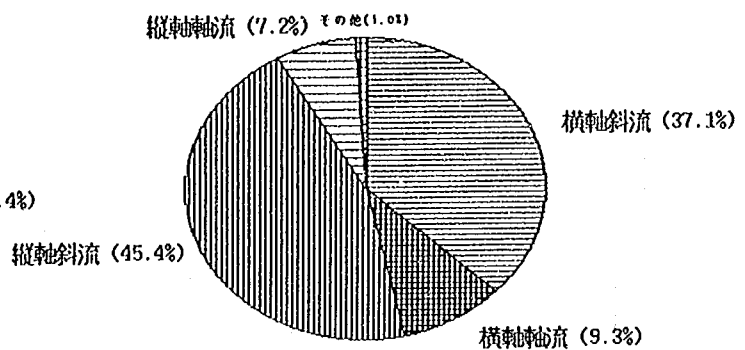


図-5.1.2 ポンプ形式別調査対象機場

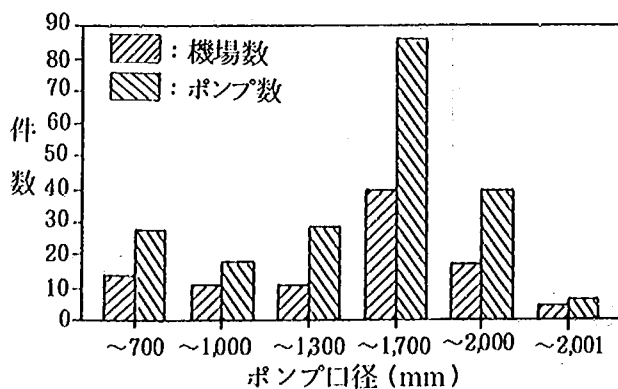


図-5.1.3 ポンプ口径別調査対象機場

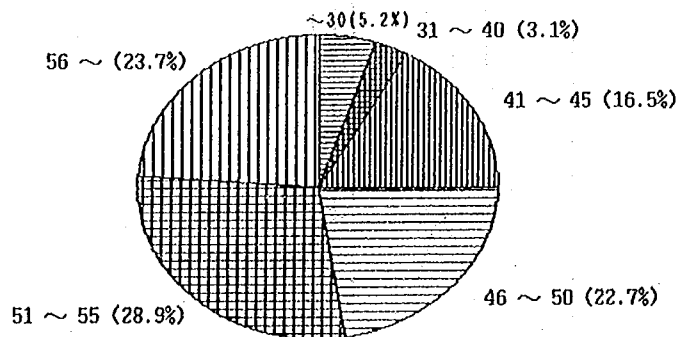


図-5.1.4 設置年度別調査対象機場

本調査における「故障」とは、「各機器が本来の機能を失うこと、あるいは低下したこと」をいう。ただし、機能の損失や低下には、潤滑油・グリスの交換及び補給、フィルタの目詰まりや清掃、錆の発生や汚れ、ボルトの緩みや脱落、水抜きその他通常の点検、管理に係るものがある。このような管理項

目あるいは故障とは判断しがたい項目は除くこととするが、これら管理項目を怠ったことによってシステムの機能に障害が発生したような場合は「故障」と考えることとした。

また、工場における組立てミスや初期のなじみの不具合等の初期故障や、交換の遅れに伴う老朽化による故障など、寿命の初期や末期に特有のものは一定の故障率とならない。そこで、通常一定率を示す偶発的故障を対象として調査を行った。

調査内容は、排水機場の規模や形式などの一般事項に関する調査と排水運転で発見された機器の故障情報（機器名、故障原因、故障時の運転状態、システム全体に対する影響、故障の状態、故障に対する処置及び回復までの時間）に関する調査を行った。

本調査期間は、昭和60年4月15日から昭和61年11月30日までとし、このあいだに発生した故障について統計をとることとした。

(2) 機器の故障の概要

本調査は、定期点検及び排水運転で発見した故障について、収集された「データ」を解析し、とりまとめたものである。したがって、報告された故障の72%は、月点検、年点検等の点検時に発見されたものであり、運転に支障のない故障が多いことと合わせ、ここで紹介する故障が実際の排水運転トラブルを表わすものではないことを断っておく。

① 故障した設備と機器

排水ポンプ設備を構成する設備別の故障発生状況を図-5.1.5に示す。

故障発生件数の多いものは、主原動機（約37%）と補機類（約18%）である。また、センサー盤類及び電磁弁など操作制御設備の故障件数が全体の30%を占めている。

次に故障件数の多い、主原動機、補機類、センサー、及び除塵機について故障機器の内訳を調べた。

(a) 主原動機の内訳

図-5.1.6に示すように、ディーゼルエンジン本体の故障が約60%、燃料噴射ポンプの故障が約23%を占めている。

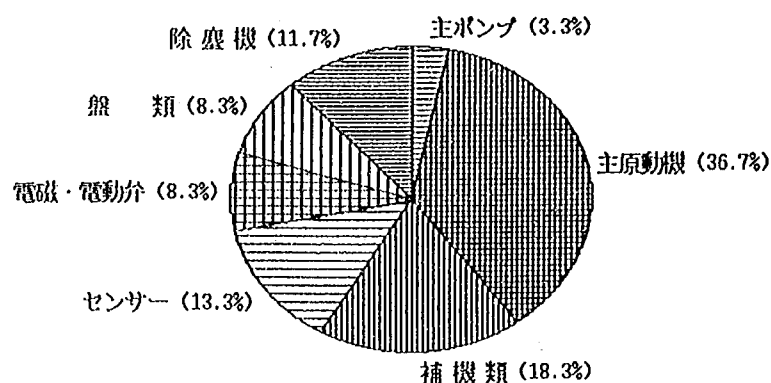


図-5.1.5 故障の装置別内訳

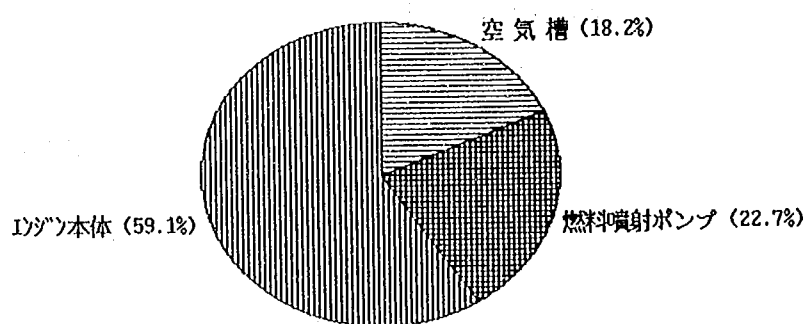


図-5.1.6 主原動機故障内訳

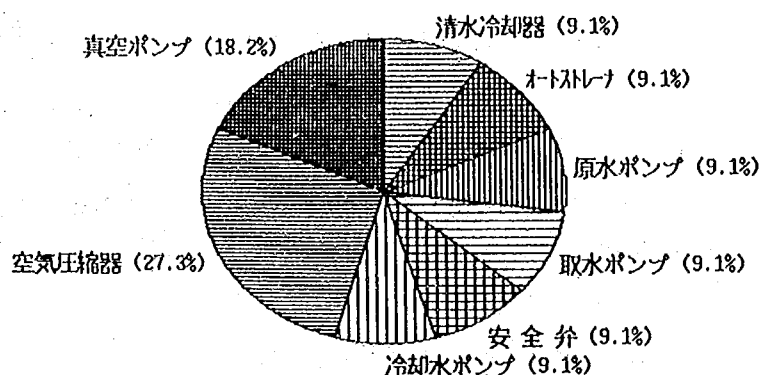


図-5.1.7 補機類故障内訳

(b) 補機類の内訳

図-5.1.7に示すように、空気圧縮機の故障が約27%、真空ポンプの故障が約18%を占めている。

(c) センサーの内訳

図-5.1.8に示すように、フロート式満水検知機の故障が約25%、水位計などの各機器が約13%を占めている。

(d) 除塵機の内訳

図-5.1.9に示すように、リミットスイッチの故障が約60%、レーキ開閉機構が約30%を占め、残りが配線用遮断器の故障であった。

② ポンプ設備に対する影響

ここでは、各機器の故障が排水機場というシステム全体へ及ぼした影響について述べる。点検中に発見された故障についても、実際の排水運転を想定した時に当該故障がシステム全体へ及ぼす影響を想定して整理することとした。なお、本項で使用する重故障、軽故障、部分故障の分類法は、建設省で現在使用している分類法であり、信頼性評価でのFMEAの作業において設定した故障等級(表-4.1.4)とは異なっている。

機器の故障がポンプ設備の排水機能に及ぼす影響は、図-5.1.10に示すように、部分故障と軽故障が90%を占めていた。重故障については運転中の歯車の破損事故、エンジン故障などが主なものであり、多くは短時間の修復作業で運転可能となるものであった。

③ 故障発生時の対応

故障発生時のポンプの運転の継続については、図-5.1.11に示すように、約90

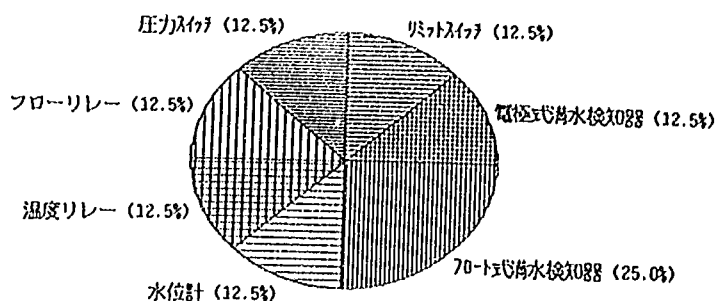


図-5.1.8 センサー類故障内訳

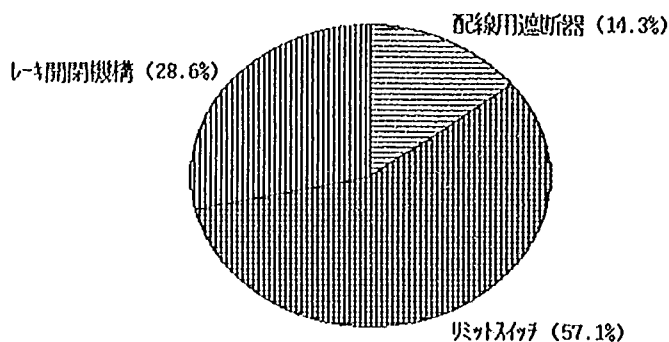


図-5.1.9 除塵機故障内訳

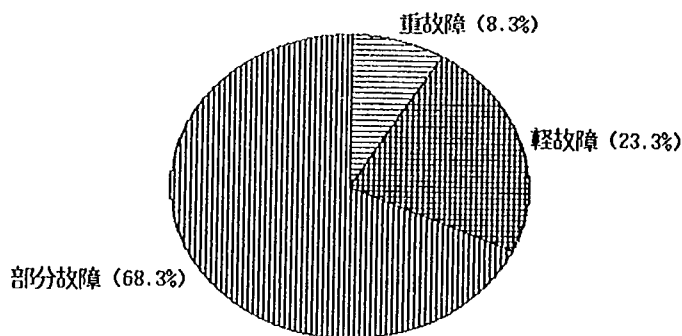


図-5.1.10 故障の程度

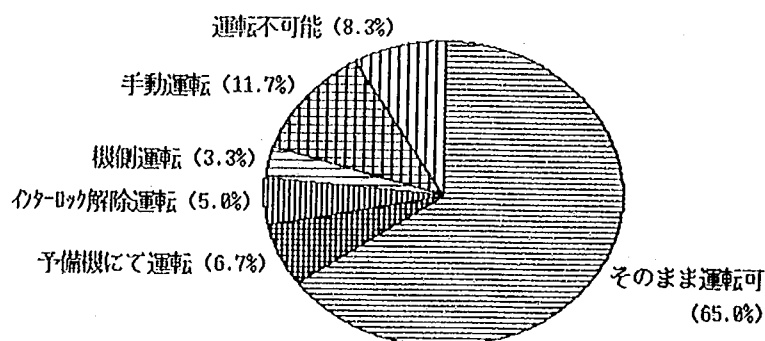


図-5.1.11 故障の運転への影響

がそのまま、あるいは、手動、予備機などに切り換えて運転を継続でき、排水ポンプ設備としての機能に支障がなかった。継続運転が不可能であったものは（a）で説明した重故障である。

図-5.1.11から、インターロック解除、手動運転、予備機への切り換えなどオペレータの技量が重要な役割を果たす場面が多いといえる。

(a) 機器別の影響

故障が発生した各機器がどの程度の影響を与えているかを図-5.1.12に示す。

全体としては、どの機器の故障も排水機能にはほとんど影響を与えないものであるが、予備系を持たない主ポンプ、主原動機の故障に、排水機能に支障をきたす危険のあるものが見られる。

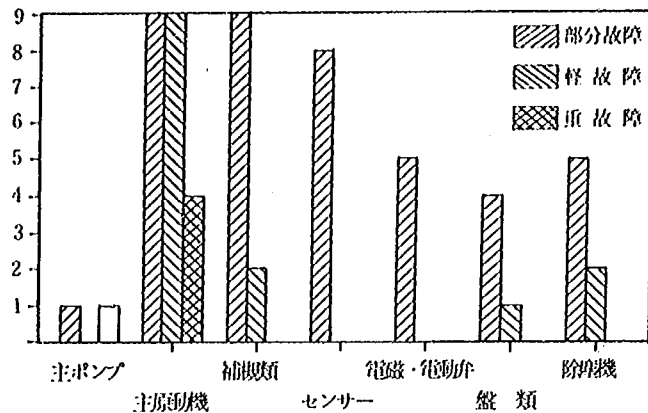


図-5.1.12 装置別故障の程度

(3) 機器故障率の算出

排水ポンプ設備の各構成機器の故障率

λ_{10} の算出については、基本的には供用時間当りの故障回数を求めるわけであり、次のようにして求めることとした。

まず、各構成機器毎に調査期間中に1件以上の故障の報告されたものについては、

$$\lambda_{10} = \frac{\text{調査期間中の当該構成機器の延故障回数 (台・回)}}{\text{調査期間中の当該構成機器の延供用時間 (台・hr)}}$$

$$= \frac{\text{全機場における調査期間中の当該構成機器の故障件数 (台・回)}}{\sum \{ (\text{機器 } k \text{ の当該構成機器の数量}) \times (\text{機器 } k \text{ の調査日数}) \times 24 \} \text{ (台・hr)}}$$

で示される λ_{10} を当該構成機器の故障率と定義して、各構成機器毎に算出した。

例えば、補助継電器を例に取れば、調査期間中の故障件数は3件、延供用時間は 2.91402×10^8 時間であったので、

$$\lambda_{10} = \frac{3 \text{ (台・回)}}{2.91402 \times 10^8 \text{ (台・hr)}}$$

$$= 0.010 \times 10^{-6} \text{ (1/hr)}$$

と計算された。このことは、本調査期間の大部分は待機状態であるから、補助継電器1個当たり、100万時間の待機時間に対して0.039回の割合で故障が発生することを示しているといえる。

また、調査期間中1件も故障が報告されなかった構成機器については、上式に従えば $\lambda_{10} = 0$ と算出されるが、故障物理上、故障率0ということとはあり得ない。このような統計学上故障率が0と計算される場合は、真の故障率の60%信頼率による推定区間の上端値に相当する値を採用する方式が提案されて

⁽¹⁶⁾ いるため、本調査研究でもこの方式によることとした。これによれば λ_{1k} は、

$$\begin{aligned}\lambda_{1k} &= \frac{1}{3} \times \frac{1}{\text{調査期間中の当該構成機器の延供用時間}} \\ &= \frac{1}{3} \times \frac{1}{\sum (\text{機器 } k \text{ の当該構成機器の数量}) \times (\text{機場 } k \text{ の調査日数}) \times 24}\end{aligned}$$

として与えられる。

例えば、防塵機電動機の場合、故障件数は0件、延供用時間は、 3.62534×10^6 時間であったので、

$$\begin{aligned}\lambda_{1k} &= \frac{1}{3} \times \frac{1}{3.62534 \times 10^6} \\ &= 0.092 \times 10^{-6}\end{aligned}$$

と計算される。

なお、上述の計算に際して、例えば冷却水ポンプ、取水ポンプ、二次冷却水ポンプ、封水ポンプ、所内排水ポンプなど、あるいは電動弁、電動ボール弁、伝導ボールバタフライ弁のような類似の機器については、これをそれぞれの機器とみなし、延供用時間、延故障回数を一括して λ_{1k} を求め同一の故障率を与える とした。

また、使用条件の著しく異なる環境でのフィールドデータを用いる場合は、後述のデータブックのデータを利用する場合と同様に環境補正を行うこととした。

5.1.2 トンネル換気設備のフィールドデータ

(1) 調査概要

フィールド調査は、各地方建設局の管理するトンネル換気設備の内から46設備を対象として実施した。

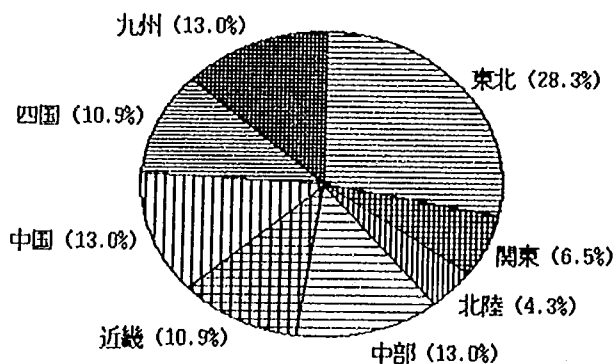


図-5.1.13 地建別調査対象設備

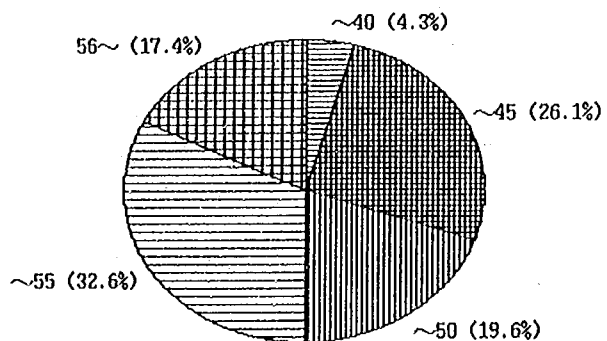


図-5.1.14 設置年度別調査対象設備

調査の対象となるトンネル換気設備は、常時稼動しているものを対象としており、予備発電機や非常用設備系統については非常用系であることから調査の対象とはしていない。

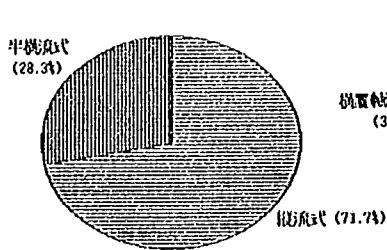


図-5.1.15 換気方式

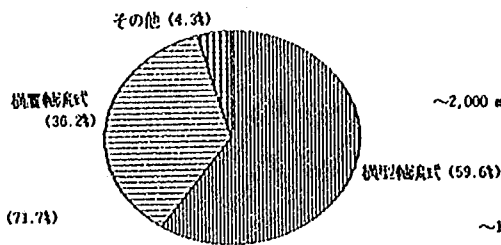


図-5.1.16 換気装置型式

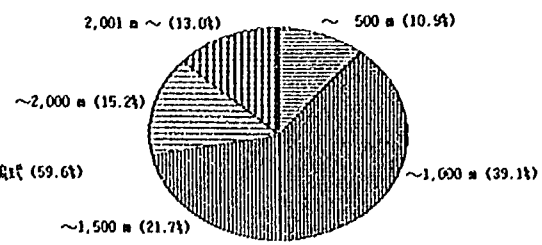


図-5.1.17 設置トンネル延長

トンネル換気設備の巡回点検や定期点検および分解整備で発見された故障機器を様々な面から調査して、設備を構成する機器の信頼性を定量的に評価するための資料を得ることを目的として実施したもので、故障に対する基本的考え方は排水機場の場合と同様である。

調査項目の内、設備の概要および故障の内容など基本的には排水ポンプ設備と同様であるが、トンネル換気設備が常用系であることから、定期的な交換を想定した故障前の部品交換に関する調査を加えて実施した。

本調査期間は、昭和60年4月15日から昭和61年11月30日までとし、このあいだに発生した故障について統計を取ることとした。

(2) 機器故障の概要

トンネル換気設備の故障について調査表によって収集されたデータを解析し、故障例についてとりまとめた。

① 故障した設備と機器

図-5.1.18に故障した設備と機器について示す。内円は、トンネル換気設備の故障した機器の区分で、センサーの故障が43%、ジェットファン本体の故障が32%、送排風機設備の故障が16%、盤類の故障が8%であった。

外円は、故障した設備の機器を示しており、センサーの故障のうち約6割がV I計の故障で約4割がC O計の故障であった。ジェットファン本体では、電動機の故障が約4分の1、残りが羽根車と軸受けの故障であった。送排風機設備では、軸受けの故障が5割、主減速機本体の故障が3分の1、残りがケーシングの故障であった。

盤類では、記録計、計器用変成器、交流電磁接触器がそれぞれ同数であった。

② 故障発見の方法

図-5.1.19に故障発見の方法について示した。巡回点検による発見が約7割と大多数を占めていた。このように巡回点検により発見する割合が大きく、巡回点検の重要性を

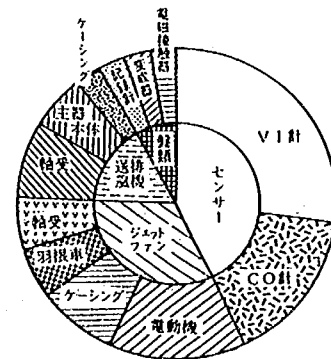


図-5.1.18 故障の装置、機器別内訳

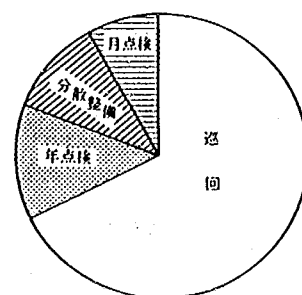


図-5.1.19 故障発見の方法

示している。

③ 換気設備に対する影響

図- 5.1.20に換気設備に対する影響について示す。影響なしとは、障害はあるが機能に多大な影響をおよぼさない故障の程度であり、代用可能とは、他の運転方式で代用が可能な故障を示す。手動可能とは、手動操作により運転可能な故障であり、機能停止とは、設備としての機能を完全に失う故障である。

換気設備においては、故障によって機能を完全に失うような重大事態になることは少ないようであるが、常用系であるため他の方式で代用できない場合は、重大事態になることを念頭に置く必要がある。

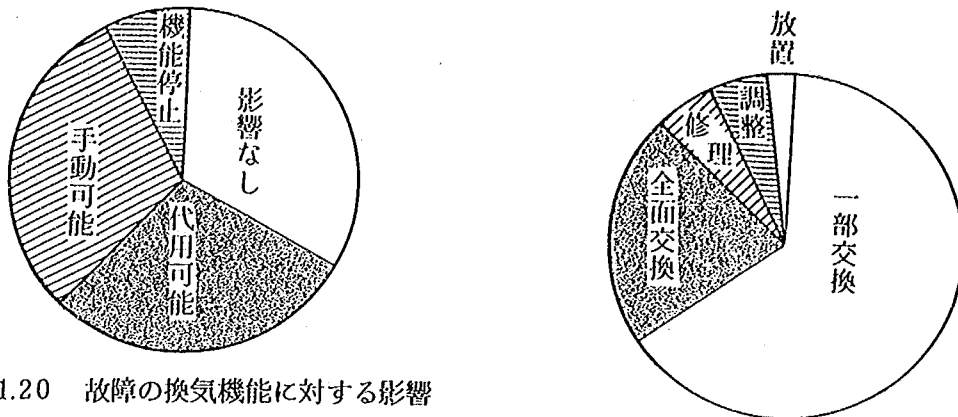


図- 5.1.20 故障の換気機能に対する影響

④ 故障への対応

図- 5.1.21に故障への対応について示す。交換を伴う修理（一部交換および全面交換）の割合が87%と比較的高い。

(3) 機器故障率の算出

トンネル換気設備の各構成機器の故障率 λ_n の算出についても、排水ポンプ設備の場合と同様の方式を採用した。すなわち、各構成機器毎に調査期間中 1 件以上の故障が報告されたものについては、

$$\lambda_n = \frac{\text{調査期間中の当該構成機器の延故障回数 (台・回)}}{\text{調査期間中の当該構成機器の延供用時間 (台・hr)}}$$

で示される λ_n を当該構成機器の故障率と定義して、各構成機器毎に算出した。

例えばジェットファン本体の電動機については、故障件数 9 件、延供用時間 3.401×10^6 時間であったので、

$$\begin{aligned} \lambda_n &= \frac{9 \text{ (台・回)}}{3.401 \times 10^6 \text{ (台・hr)}} \\ &= 2.646 \times 10^{-6} \end{aligned}$$

と計算された。このことは、ジェットファン本体の電動機は 100 万時間に 2.6 回の割合で故障が発生することを意味する。

また、調査期間中、1 件も故障の発生がなかった構成機器の故障率 λ_n については、故障率 0 ということ

とは故障物理上あり得ないことであるため、

$$\lambda_s = \frac{1}{3} \times \frac{1 \text{ (台・回)}}{\text{調査期間中の当該構成機器の延供用時間 (台・hr)}}$$

で示される λ_s を故障率として採用した。この値は、統計学上、故障率が0と計算される場合の真の故障率の60%信頼率による推定値の上端値に相当するものと考えられる。

例えば、ジェットファン本体の吊り金具の場合、故障件数0件、延供用時間 5.38×10^6 時間であったため、

$$\begin{aligned}\lambda_s &= \frac{1}{3} \times \frac{1}{5.38 \times 10^6} \\ &= 0.062 \times 10^{-6} \text{ (1/hr)}\end{aligned}$$

と計算された。

さらに、トンネル換気設備については常用系であるため修復時間 t_{rn} を求めなければならない。この値については、管理の体勢、メーカーのサービス体制などに大きく左右されるため、フィールドデータを基に、個別に検討を加えて決定することとした。

5.2 信頼性データブックによる信頼性データ

5.2.1 信頼性データブック

市販されているデータブックの主なものは、

- ① MIL-HDBK-2170
- ② IEEE-Std.-500
- ③ RADC 信頼性ノートブック, NPRDS, WASH-1400, など
- ④ Earlesの規準故障率

などを挙げるができる。このうち、

- ①は軍用電子機器を対象とした製品規格に基づくものに適用されるもので、本調査の対象となる設備の制御系統においてあまり使用されていないので適用に限界がある。
- ②は広く強電と弱電の機器を対象としており、本調査対象に当てはめるのに都合がよい。
- ③は原子力発電所の非常に限定された範囲を対象にしており適用に限界がある。
- ④はデータとして古く数が少ないため、適用に限界がある。

したがって、本調査研究では、主にIEEE-Std.-500の収録機器の中から必要とされる基本的な信頼性データ（故障率）を得ることとした。

IEEE-Std.-500では、表-5.2.1に例示するように、故障モード等によって故障の発現率が異なることが示されているので、この中のどの値を採用するか問題になる。本調査では、環境の変動による補正を別に行うこととしているため、標準(REC)に相当する故障率を基準故障率として採用す

ることとした。また、故障モード別にデータが示されているものについては、本調査が設備としての機能を損なわないことを主たる対象に考えていることから、致命（CATASTROPHIC）に相当するものを採用し、特に区分がなされていないものについては、オールモード（ALL MODE）を採用した。

例えば、多相誘導電動機と単相同期電動機について表－5.2.1に示す様なデータシートが作成され収められている。この表から、交流300～499Vの多相誘導電動機については、 $3.32/10^6$ hrの故障率となり、単相同期電動機の基準故障率は $1.25/10^6$ hrと求められる。

表－5.2.1 IEEE-Std.-500の故障率掲載例

CHAPTER: 4 Motors, Generators & UPS		SECTION: 4.1 Motors		SUBSECTION: 4.1.1 AC									
ITEM OR EQUIPMENT DESCRIPTION													
4.1.1.1 Induction, 4.1.1.1.2 300-499 VAC Polyphase													
FAILURE MODE	FAILURE RATE								(1) OUT OF SERVICE (II) REPAIR TIME OR (S) RESTORE (HOURS)				
	FAILURES/10 ⁶ HOURS				FAILURES/10 ⁶ CYCLES								
	LOW	REC	HIGH	REF	LOW	REC	HIGH	REF	LOW	REC	HIGH	REF	
ALL MODES	1.67	3.32	6.64	15					0	475.0	7.15E3	15	

CHAPTER: 4 Motors, Generators & UPS		SECTION: 4.1 Motors		SUBSECTION: 4.1.1 AC									
ITEM OR EQUIPMENT DESCRIPTION													
4.1.1.2 Synchronous Single Phase													
FAILURE MODE	FAILURE RATE								(1) OUT OF SERVICE (II) REPAIR TIME OR (S) RESTORE (HOURS)				
	FAILURES/10 ⁶ HOURS				FAILURES/10 ⁶ CYCLES								
	LOW	REC	HIGH	REF	LOW	REC	HIGH	REF	LOW	REC	HIGH	REF	
ALL MODES	1.20	1.51	1.81	1									
CATASTROPHIC	1.0	1.25	1.5										
Fails to Run Once Started	0.56	0.70	0.84										
Fails to Start	0.44	0.55	0.66										
DEGRADED	0.08	0.10	0.12										
INCIPIENT	0.12	0.16	0.19										

5.2.2 調査対象機械設備における使用環境調査⁽¹⁵⁾

一般的に部品の信頼性はその使用環境に大きく左右されるため、データブックの基礎となった部品の作動環境と実際に信頼性を評価しようとしている部品の使用条件が異なる場合、データブックのデータはそのままでは使用できなくなる。排水機場は常時人がいないため、温度、湿度等の環境条件があまり良くないことが知られている。このような場合には、環境条件の違いに応じて信頼性の値を変更して用いなければならないことになる。この信頼性の変化（低下）の程度を表すものとして環境補正係数があ

とした。

調査時期は梅雨期，盛夏，秋霖期，大寒期のそれぞれのシーズンとし，表－5.2.2に示す調査表によって1時間毎の温度および湿度を7日間連続で測定した。

まず，測定された温・湿度の概要を測定位置別に整理し，平均値，標準偏差，最高・低値，5・10%上・下端値として表－5.2.4に示す。本調査研究においてデータブックから故障率を引用する場合は，このデータに基づき，各機器の環境補正係数を定めることとした。

表－5.2.4 排水機場の環境条件の全国平均値

区分	名 称	平均値	標準偏差	最高値	5% 下端値	5% 上端値	最低値	備 考
温 度	操 作 室	23	9	39	4	35	－6	
	電 気 室	23	9	39	6	37	－5	
	送 風 機 室	21	9	44	4	34	－7	
	ト ン ネ ル 内	19	9	42	2	31	－3	
湿 度	操 作 室	60	12	100	40	83	31	
	電 気 室	56	11	100	38	78	28	
	送 風 機 室	69	13	100	47	90	17	
	ト ン ネ ル 内	72	15	100	44	96	24	

5.2.3 環境データによる補正

(1) 環境補正係数

本調査研究において故障率の出典とすることとしたIEEStd.500には，例えば表－5.2.5に，示すように，個々の機器毎に温度，放射線，湿度，振動による補正係数が提案されている。しかし，補正を必要とする場合の具体的な条件が示されておらず，さらに機器毎に個々に補正係数を求めることは非常に煩雑になる。

また，Barlesの基準故障率には，適用時の環境補正方法として，表－5.2.6に例示するような表が示されている。FTAの解析レベル等との整合を考慮すれば，簡便法としてBarlesの環境補正係数を採用すれば十分と考える。

本表によれば，機器を“機械”“電気機械”“電気・電子”“固体電子”などの6つの大きなカテゴリーに分類し環境補正係数を求めればよいこととなる。

(2) 環境補正係数の決定

環境補正係数の決定については，環境因子毎の補正係数を求めてその総和によって求める環境での補正係数を算出することになる。

表- 5.2.5 IEE-Std. 500における環境補正係数

Part Name	High Temperature	High Radiation	High Humidity
リレー	1.34	1.19	1.98
サーキットブレーカー	2.19	1.17	2.74
誘導モータ	8.0	1.0	6.0
同期モータ	3.0	1.0	2.5

表- 5.2.6 Ealesの補正係数（関係部分のみ）

環境条件		装置の型	機	電	電	電	固	推	環境条件		装置の型	機	電	電	電	固	推
			械	気	気	池	体	業				械	気	気	池	体	業
温度 (℃)	10~25		1	1	1	*	1	**	振動 (g. rms)	0~5		0	0	0	0	0	0
	-10~50		2	4	2	*	1	**		5~15	稼働 非稼働	2 1	3 1	1 1	1 1	1 1	1
	-30~75		6	8	4	*	2	**		15~30	稼働 非稼働	8 4	10 6	4 4	4 4	4 4	2
	-60~100		9	16△	8	*	6	**		30~40	稼働 非稼働	32△ 16△	75△ 30	10△ 10△	10△ 10△	12△ 12△	10△
	<-60>100		12	*	25△	*	20△	**		>40	稼働 非稼働	* *	* 100	* *	* *	* *	*
圧力 (mmHg)	585~795		0	0	0	0	0	0	加速度 (g)	<10		0	0	0	0	0	0
	10~585	シール有 シール無	1	0.5 *	0.5	0	0	0		10~50	稼働 非稼働	3 0	6 2	2 2	2 2	0 0	1
	<10	シール有 シール無	4	1 10	1	0.5	0.5	0.5		~50	稼働 非稼働	10 2	10 3	4 4	5 5	5 5	5
湿度 (%)	20~60 (常温)		0	0	0	0	0	0	衝撃 (g)	<50		0	0	0	0	0	0
	5~100	シール有 シール無	3	1 4	1	0.5	0.5	0.5		50~500	稼働 非稼働	15△ 4	10△ 3	4△ 4△	5△ 5△	0 0	0
	<5	シール有 シール無	0	0 1	0	0	0	0		>500	稼働 非稼働	* 6△	* *	* *	* *	4△ 5△	5△
放射線 (Rads)	<10 ⁴		0	0	0	0	0	0	騒音 (ad)	<120		0	0	0	0	0	0
	10 ⁴ ~10 ⁵		0	1	0	0	1	0		120~150	稼働 非稼働	5 2	5 1	4 4	3 3	2 2	2
	10 ⁵ ~10 ⁶		1	2	1	1	2	1		150~160	稼働 非稼働	10△ 4	16△ 4	10△ 10△	6△ 6△	8△ 8△	8△
	10 ⁶ ~10 ⁷		2	6	2	2	8	5		>160		* *	* *	* *	* *	* *	*
	>10 ⁷		3	50	3	8	75	65									

(注) △の個数に従ってつぎの倍数を総和に掛ける。
2個-1.5, 3個-2.0, 4個-3.0

*使用しない
※, **は別の温度区分を用いる

① 湿度による環境補正係数

湿度による補正については、表- 5.2.3 および表- 5.2.4 にまとめられた変動幅から考えて、表- 5.2.6 の中の湿度 5~100% に相当する補正係数を採用することとした。このとき、電気機械類については使用環境を考慮してシール類が設けられているので「シール有」の値を採用することとした。

② 温度による環境補正係数

排水機場の温度については、屋外盤内へ設置された機器については、表- 5.2.6 の中の温度-10~50℃に対応する補正係数をそのまま採用した。屋内へ設置された機器については、変動幅が標準温度10℃~25℃を大きくはずれることがないことと、IEE-Std. 500において一部の機器について40℃までを標準としているものもあるなどの理由から、温度-10~50℃に対応する補正係数の値を採用することとした。以上の手順により排水ポンプ設備の各構成機器の環境補正係数は、表- 5.2.7

表－5.2.7 排水ポンプ設備における環境補正係数の例

屋内・外の別	設 置 場 所	機器のタイプ	温度による 補 正 係 数	湿度による 補 正 係 数	環境補正係数
屋 内	操 作 室 エンジンフロア ポ ン プ 室	機 械	1.5	3.0	4.5
		電 気 機 械	2.5	1.0	3.5
		電 気 ・ 電 子	1.5	1.0	2.5
屋 外	屋 外 盤 内	機 械	2.0	3.0	5.0
		電 気 機 械	4.0	1.0	5.0
		電 気 ・ 電 子	2.0	1.0	3.0

に示す通りに計算された。

トンネル換気設備の温度による補正については、排水ポンプ設備における屋内へ設置された機器の場合と同じ理由から表－5.2.6の中の温度－10～50℃に対応する補正係数の半分の値を採用することとした。この手順によりトンネル換気設備の各構成機器の環境補正係数は、表5.2.8に示す通りに計算された。

表－5.2.8 トンネル換気設備の環境補正係数

機 器 名	機器のタイプ	温度による 補 正 係 数	湿度による 補 正 係 数	環境補正係数
操 作 室 ， 電 気 室 送風機室，トンネル内	機 械	1.5	3.0	4.5
	電 気 機 械	2.5	1.0	3.5
	電 気 ・ 電 子	1.5	1.0	2.5

(3) 故障率の推定

データブックに記載されている基準故障率と(2)で求めた環境補正係数を用いて各機器の実際に置かれている環境下での故障率を算出した。

例えば単相同期電動機の場合、表－5.2.1より、基準故障率は $1.25 \times 10^{-6} \text{ 1/hr}$ と求められる。

この機器は、タイプとしては電気機械であるから環境補正係数は表－5.2.8より屋内使用では3.5、屋外使用では5.0と求められる。したがって使用時の故障率は、

$$\text{屋内使用時：} (1.25 \times 10^{-6}) \times 3.5 = 4.38 \times 10^{-6} \text{ (1/hr)}$$

$$\text{屋外使用時：} (1.25 \times 10^{-6}) \times 5 = 6.25 \times 10^{-6} \text{ (1/hr)}$$

と計算される。表－5.2.9にさらに数例の算出例を紹介しておく。

表- 5.2.9 IEC-Std. 500およびEarlesの環境補正係数による故障率の算出例

(10⁻⁶/hr)

機 器 名	規 格	機器のタイプ	基準故障率	使用時の故障率	
				屋 内	屋 外
電 動 機	多相誘導, 300~499VAC	電 気 機 械	3.32	11.62	16.60
電 動 機	単相同期	電 気 機 械	1.25	4.38	6.25
リ レ ー	小型, 100~199VAC	電 気・電 子	0.16	0.40	0.48
サーキットブレーカ	屋内用, AC	電 気・電 子	0.14	0.35	0.42

5.3 今回のF T Aに用いた故障率の例

5.3.1 排水ポンプ設備の機器故障率

信頼性の定量化に必要なデータは、設備を構成する各機器の故障率であるが、排水ポンプ設備の場合、第3章第3節に示される通り、待機状態における故障率と運転状態における故障率の2種類の故障率が必要とされる。

そこで、フィールドデータから得られた故障率はその調査期間の大部分が待機状態であるため、待機状態における故障率 λ_{1n} に相当し、また、データブックより得られた故障率はこれらデータブックが一般常用機器に基づいて編集されているため、運転状態における故障率 λ_{2n} に相当するものと考え信頼性計算に供することとした。このように、排水ポンプ設備の信頼性の定量化のために用いる故障率の具体的な数値は、フィールドデータ、データブックによるデータの両者を使用することとした。

待機状態における故障率 λ_{1n} の設定については、上述のように原則として実態調査から得られたフィールドデータを用いることとした。しかし、調査スケジュールの関係でF T Aが十分進行していない段階で実態調査に入ったため、調査する機器の分割レベルが途中変更になった。このため、フィールドデータの無い機器がいくつか発生した。このため、故障率 λ_{1n} の決定に当たっては、次の方法によって故障率を設定した。

- ① フィールドデータのあるものは、これを採用する。
- ② 故障データの必要ないいくつかの機器の結合されたユニットの形でフィールドデータのあるものについては、過去の経験に基づくエンジニアリングジャッジを行い、ユニットの中での各機器の故障発生頻度（寄与率）を想定して、ユニットの故障率を機器の故障率にブレイクダウンした。
- ③ フィールドデータの無いものについては、データブックの故障率に環境補正を施したものを採用した。

連続運転の信頼性の計算には運転状態での故障率 λ_{2n} の設定については、基本的にはデータブックの値を環境補正して用いることとした。また、データブックに記載されていない機器の故障率 λ_{2n} については、フィールド調査による故障率 λ_{1n} を準用することとした。

5.3.2 トンネル換気設備の機器故障率

トンネル換気設備の信頼性の定量化に際して使用する機器故障率は、原則としてフィールドデータを採用することとし、データブックによるデータはその補完的目的で使用する事とした。

本調査においては、排水ポンプ設備のようなI-T図の変更がなかったことから、フィールドで得られたデータで必要な全ての機器の故障率と修復時間を設定することができたので、信頼性計算ではデータブックのデータは用いなかった。

修復時間 t_{rn} については、この値が管理の体制等により大きく異なる性格のものであることから、フィールド調査による実績値に基づいて、メーカーのサービス体制などを考慮に入れつつ個々に検討を行って設定した。

6. 信頼性の定量化

6.1 排水ポンプ設備の信頼性

6.1.1 信頼性評価の前提条計

排水ポンプ設備の定量的信頼性評価計算は、F T Aの手法を用いて以下に示す条件の下で計算した。

- ① 故障は機器のみに発生するものとする。すなわち運転員により操作ミスはないものとする。
- ② 機器の故障率は一定とする。すなわち機器は偶発故障のパターンに従うものとする。
(寿命の初期や末期特有のものを含めると故障率が時間の関数になるなど、一般的でなくなる。)
- ③ 機器は待機中にも故障する。
- ④ 機器の故障は、点検によって完全に検出することができ、故障していた機器は修理によって正常に復帰しているものとする。
- ⑤ 起動に対する最小要素機器のアンアベイラビリティは、点検間隔での平均値として次式で与える。

$$\bar{a}_{1n} = \frac{1}{2} \lambda_{1n} \cdot T$$

ここで、 $\bar{a}_{1n}$: 起動に対する機器のアンアベイラビリティ

λ_{1n} : 待機状態における機器の故障率

T : 点検間隔

始動失敗に関する機器の故障率 λ_{1n} は、本調査研究の一環として行った故障実態調査結果にもとづいて算定した値を用いた。⁽¹⁵⁾

点検間隔については、14日、30日、90日、180日の4種類の値を代入した。

- ⑥ 連続運転に対する最小要素機器のアンアベイラビリティは、必要運転継続時間の間で故障する確率として次式で与える。

$$\bar{a}_{2n} = \lambda_{2n} \cdot t$$

ここで、 $\bar{a}_{2n}$: 連続運転に対する機器のアンアベイラビリティ

λ_{2n} : 運転状態における機器の故障率

t : 必要運転継続時間

連続運転失敗に関する機器の故障率 λ_{2n} は、排水ポンプ設備が非常用系設備であるために、先の故障実態調査結果から算定することが困難である。そこで今回は、IEEE-Std 500より引用した故障率を用いた。⁽¹⁵⁾

必要運転継続時間 t については、10hr、20hr、30hr、40hr、50hrの5種類の値を代入した。

6.1.2 排水ポンプ設備のアンアベイラビリティ

排水ポンプ設備の定量的な信頼性は、F T 図と F T 図に表われた最小要素の機器故障率を用いて計算

を行ったが、その方法は、本報告書の巻末資料に詳しく記述してあるのでここでは省略する。概略次に示す手順で計算を実施した。

- ① FT図に表われた最小要素の機器の故障率を決定する。($\lambda_{1n}, \lambda_{2n}$)
- ② 最小要素の機器のアンアベイラビリティを算出する。($\bar{a}_{1n}, \bar{a}_{2n}$)
- ③ FT図別に機器のアンアベイラビリティを代入し、ブール代数による論理演算を行ってシステムのアンアベイラビリティを算出する。($\bar{A}_1, \bar{A}_2$)
- ④ 排水ポンプ設備のトータルアンアベイラビリティを算出する。($\bar{A}_T$)

したがって、排水ポンプ設備のトータルアンアベイラビリティは、4.2.1で述べた操作方式別に、始動失敗に関するシステムのアンアベイラビリティ($\bar{A}_1$)と連続運転失敗に関するシステムのアンアベイラビリティ($\bar{A}_2$)の和として求められる。

また、実際の排水ポンプ設備の運転を考慮すると、中央操作で故障が発生した場合には、中央+機側操作又は中央+機側修復操作が行われる、したがって後者の2操作方式による場合の信頼性が確保されているならば、十分排水ポンプ設備の機能を果たすことになるので、ここでは中央操作の場合の定量的信頼性計算は省略した。

前述した前提条件の下で行った排水ポンプ設備の信頼性評価計算結果を表-6.1.1および表-6.1.2に示す。表-6.1.1は操作方式毎に点検間隔T別の起動に対するシステムのアンアベイラビリティと必要運転継続時間t毎の連続運転に対するシステムのアンアベイラビリティを示したものである。表-6.1.2は起動に対するシステムのアンアベイラビリティ $\bar{A}_1$ と連続運転に対するシステムのアンアベイラビリティ $\bar{A}_2$ を合せて、排水ポンプ設備のトータルアンアベイラビリティ $\bar{A}_T$ として示した

表-6.1.1 排水ポンプ設備のアンアベイラビリティ(1)

計算ケース	操作方式	故障モード	点検間隔 必要運転継続時間	アンアベイラビリティ	故障発生頻度
1-1-1	中央 + 機側操作	始動失敗	14日	0.495×10^{-2}	203回に1回
1-1-2			30日	1.06×10^{-2}	95回 //
1-1-3			90日	3.18×10^{-2}	32回 //
1-1-4			180日	6.36×10^{-2}	16回 //
1-2-1		連続運転失敗	10時間	0.090×10^{-2}	1,100回 //
1-2-2			20時間	0.18×10^{-2}	560回 //
1-2-3			30時間	0.27×10^{-2}	370回 //
1-2-4			40時間	0.36×10^{-2}	280回 //
1-2-5			50時間	0.46×10^{-2}	220回 //
2-1-1	中央 + 機側 修復操作	始動失敗	14日	0.341×10^{-2}	294回 //
2-1-2			30日	0.730×10^{-2}	137回 //
2-1-3			90日	2.19×10^{-2}	46回 //
2-1-4			180日	4.38×10^{-2}	23回 //
2-2-1		連続運転失敗	10時間	0.08×10^{-2}	1,300回 //
2-2-2			20時間	0.16×10^{-2}	630回 //
2-2-3			30時間	0.24×10^{-2}	420回 //
2-2-4			40時間	0.32×10^{-2}	320回 //
2-2-5			50時間	0.40×10^{-2}	250回 //

表- 6.1.2 排水ポンプ設備のアンアベイラビリティ(2)

ジェットファン本体の アンアベイラビリティ	本体各構成機器のアンアベイラビリティへの寄与率		
	機 器 名 称	機器のアンアベイラビリティ	寄 与 率 (%)
10.15×10^{-4}	羽 根 車	4.05×10^{-4}	39.9
	ケーシング	1.45×10^{-4}	14.3
	電 動 機	4.10×10^{-4}	40.4
	吊 金 具	0.01×10^{-4}	0.1
	軸 受	0.54×10^{-4}	5.3

ものである。ただし、この場合の連続運転に対するシステムのアンアベイラビリティ $\bar{A}_2$ は、必要運転継続時間10hrと50hrの時のもので算出している。

図- 6.1.1 は、表- 6.1.2 の必要連続運転時間50hrのデータを用いて、排水ポンプ設備の点検間隔と故障出現間隔の関係をグラフに表わしたものである。必要連続運転時間については、決定的なことは言えないが、ある種の調査では平均10時間程度であると報告されている。ここで、今回の信頼性評価計算に用いた機器故障率 λ_{1n} 、 λ_{2n} は、全てが確定されたものではないために、各アンアベイラビリティ値は最終的に若干数値が変わる可能性のあることを断っておく。

今回の調査は、特定のモデルポンプ設備で信頼性計算を行ったが、昭和50年代以降に設置されている排水ポンプ設備は同一の設計基準に基づいて、統一的の視点で設計されているので、一般の排水ポンプ設備についても以下の議論が当てはまるものと考えられる。

- ① 排水ポンプ設備の故障発生は、連続運転失敗による故障よりも始動失敗による故障にほとんど支配される。
- ② 始動失敗によるアンアベイラビリティは、点検間隔に比例して増大する。言い換えれば点検間隔を短かくすればするほどシステムのアンアベイラビリティは減少し、信頼性は向上する。

これは、点検によって故障機器を検出し修理が行われるために、点検間隔を短かくするほど機器のアンアベイラビリティが小さくなるからである。

- ③ 中央+機側修復操作の場合と中央+機側操作の場合の始動失敗のアンアベイラビリティに着目すると、前者は後者の約75%に減少している。これは運転員が故障箇所を見つけ出すことができ、かつ修復する技術を持ち合せていれば、システムの故障(内水排除機能の喪失)の約3割近く防止できることを意味している。また、このような運転員がよりシステムを熟知していれば、言い換えれば4.2.1項で仮定した修復内容よりも少し高度な修復を行うことのできる運転員であれば、さらに大きくシステムのアンアベイラビリティを改善できることを示している。

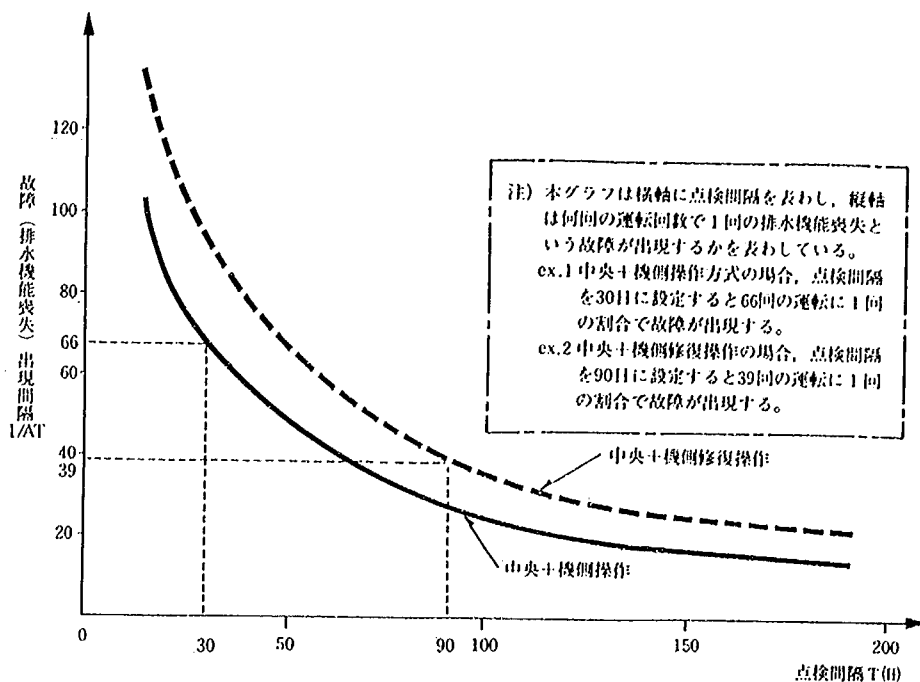


図- 6.1.1 排水ポンプ設備の故障出現間隔と点検間隔 (必要運転継続時間を50hrとした場合)

6.2 トンネル換気設備の信頼性

6.2.1 信頼性計算の前提条件

トンネル換気設備は、常用系として取扱うからその信頼性の定量的評価に用いる基本要素のアベイラビリティ評価尺度は、故障あるいは予防保全による停止時間の全運転時間に対する比、すなわち、アンアベイラビリティ $\bar{a}_{rn}$ で評価することとした。

基本要素のアンアベイラビリティ $\bar{a}_{rn}$ は、3.4.2 項で既に説明したように、

$$\bar{a}_{rn} = \frac{\lambda_n \cdot t_{rn}}{1 + \lambda_n \cdot t_{rn}}$$

$$\approx \lambda_n \cdot t_{rn} \quad (\ll 1.0)$$

ここに λ_n : 基本要素の故障率

t_{rn} : 基本要素の平均修復時間

で与えられる。

上式のうち、故障率 λ_n は、故障実績およびデータブック等から推定し、また、修復時間 t_{rn} は、修理実績または従来経験から設定するものとした。

6.2.2 トンネル換気設備のアンアベイラビリティ

トンネル換気設備のアンアベイラビリティの算出は次の手順で実施した。

- ① 最小要素の機器故障率 λ_n , 修復時間 t_{rn} を設定する。
- ② 最小要素の機器のアンアベイラビリティ $\bar{a}_{rn}$ を算出する。
- ③ FT図に各機器のアンアベイラビリティを代入し, ブール代数による論理演算を行ってシステムのアンアベイラビリティ $\bar{A}_T$ を算出する。なお, ブール代数による論理演算については, 巻末資料を参照されたい。

上記手順に従って, まずトンネル換気設備のサブシステムの一つであるジェットファン本体のアンアベイラビリティを算出した。その計算結果を表- 6.2.1 に示す。

表- 6.2.1 ジェットファン本体のアンアベイラビリティ

ジェットファン本体の アンアベイラビリティ	本体各構成機器のアンアベイラビリティへの寄与率		
	機 器 名 称	機器のアンアベイラビリティ	寄 与 率 (%)
10.15×10^{-4}	羽 根 車	4.05×10^{-4}	39.9
	ケ - シ ン グ	1.45×10^{-4}	14.3
	電 動 機	4.10×10^{-4}	40.4
	吊 金 具	0.01×10^{-4}	0.1
	軸 受	0.54×10^{-4}	5.3

表- 6.2.1 に示す計算結果によれば, ジェットファン本体のアンアベイラビリティは 10.15×10^{-4} であるが, これは10,000時間の稼働に対して, 10.2時間のジェットファン本体に起因する故障停止があること, いいかえれば985時間に1時間の割合で停止することを意味している。さらに具体的な例で説明すれば, いま仮にあるトンネルに14台のジェットファンが設置されている場合, 14台のジェットファン本体のアンアベイラビリティは

$$10.15 \times 10^{-4} \times 14 \div 0.014$$

となり, 年間8,760時間のうち, 故障状態にある期間が平均して,

$$8,760 \times 0.014 \div 123$$

より, 123時間であることが予測される。ただしこの値はジェットファン本体に起因する故障に関してのみの予測値であり, 制御系などを考慮に入れたシステム全体について計算すれば, 当然のことながらシステムのトータルアンアベイラビリティはさらに大きくなり, 従って故障状態にある期間の予測値も大きくなる。

また, ジェットファン本体を構成する機器のアンアベイラビリティへの寄与率に着目した場合, 最も影響の大きいものは電動機である。電動機1台当りの故障率を λ としたとき, n 台のジェットファンを設置したトンネル換気設備で少くとも1台の電動機が故障する率は $n \cdot \lambda$ となる。したがって, トンネル換気設備全体の電動機に関する平均故障間隔MTBFは $1 / (n \cdot \lambda)$ となる。ここで, 14台のジェットファンから成るトンネル換気設備を考えると $\lambda = 1.219 \times 10^{-6}$ であるから,

$$MTBF = 1 / (14 \times 1.219 \times 10^{-6}) \div 58,596 \text{ (Hr)}$$

と計算される。このことは、例にあげたトンネルでは平均して $58,596 \div 24 \div 365 \div 6.7$ 年に一度の割合で電動機の故障が発生すると予測されることを示している。

7. 信頼性と設備の設計・維持管理

7.1 信頼性と設計

7.1.1 排水ポンプ設備のシステム設計

(1) 排水ポンプ設備のシステム設計の概要

排水ポンプのシステム設計として、ここではF T Aの結果から排水ポンプのアンアベイラビリティに大きな影響を及ぼすサブシステムまたは機器について、

- ① 使用材料等のグレードアップ
- ② システム等の簡素化
- ③ システムや要素の予備系

等を検討し、排水ポンプ設備全体の信頼度を高める方策を検討するものである。ここでサブシステム（または要素）のシステム全体の故障に対する影響度を表わす尺度としては、次式で定義するアンアベイラビリティ寄与率を用いることとした。

$$\text{アンアベイラビリティ寄与率} = \frac{\text{当該サブシステムのアンアベイラビリティ}}{\text{システム全体のアンアベイラビリティ}} \times 100 \quad (\%)$$

(2) サブシステムの寄与率

F T Aの結果から排水ポンプ設備の各サブシステムのアンアベイラビリティ寄与率を求めると表7.1.1のとおりである。

表-7.1.1 排水ポンプ設備各サブシステムのアンアベイラビリティ寄与率

ケース \ 装置名		主ポンプ	減速機	主エンジン	吐出弁	除塵機	自家発電装置	補助機器設備
中央+機側操作	始動失敗	2.5	7.1	33.0	5.0	18.4	10.9	23.1
	連続運転失敗	7.9	15.4	26.4	0.0	6.7	9.8	33.8
中央+機側修復操作	始動失敗	3.6	10.2	31.7	7.3	26.8	15.7	4.7
	連続運転失敗	8.9	17.5	29.8	0.0	7.6	11.1	25.1

(注-1) 吐出弁は運転中は全開となっているので故障率を0とする。

(注-2) 制御系は各設備と分離して検討することが困難であったため含めて考慮した。

表-7.1.1に示すように、中央+機側操作で始動失敗の場合（補助機器の操作制御設備を含む）には主エンジン、補助機器設備、除塵機で寄与率の70%以上を占めており、これら設備の信頼性向上が、全体システムの信頼性向上に大きく寄与することが理解できる。

なお、対象モデルは前の項で設定した1500mm立軸二床式斜流ポンプ設備である。

(3) 補助機器設備システム設計

ここでは、補助機器設備を構成する機器のうちアンアベイラビリティ寄与率の高いものから順に検討

を進めるものとする。

中央+機側操作始動失敗の場合について補助機器設備を構成する各機器の補助機器全体に対する寄与率を求めると表-7.1.2のとおりであり、予備系を持たない機器が、アンアベイラビリティの寄与率が高いことを示している。

表-7.1.2 補助機器設備構成機器のアンアベイラビリティ寄与率

機 器 名	寄与率(%)	機 器 名	寄与率(%)
井 戸 ポ ンプ	41.1	清 水 冷 却 器	1.8
潤滑水電磁弁	24.0	〃	1.8
吸込ストレーナ	4.9	切 換 開 閉 器	1.2
空 気 槽	3.9	〃	1.2
〃	3.9	〃	1.2
清 水 冷 却 器	1.8	〃	1.2
〃	1.8	熱 動 継 電 器	1.1

以上のことから、アンアベイラビリティ寄与率の高い機器についてその簡素化および予備装置設置に対する可能性を検討した結果を示すと表-7.1.3の通りとなる。

表-7.1.3に示すように、補助機器設備の簡素化によって故障率の低減を図る可能性としては、次の方策が考えられる。

① セラミックス軸受+ラジエータ冷却の採用

潤滑水、電磁弁、清水冷却器等の簡素化が可能となり、仮にセラミックス軸受やラジエータの信頼性が100%であるとすれば、補助機器設備の故障率は現状システムと比較して30%程度の改善が計られる。

② セラミックス軸受の採用

潤滑水、電磁弁等の省略が可能となり、故障率は現状システムと比較して1/4程度の改善が計られる。

予備機器の設置はそれに伴うセンサ類の増加を考慮に入れると、さほど効果はみられず、過剰設備となる可能性がある。従って、システム設計としては予備機を設けるより、設備の簡素化を計る検討が有効であるといえる。

また、表-7.1.1の中央+機側操作始動失敗および中央+機側修復操作始動失敗の関係に見られるように、1時間以内の修復時間を許容した場合、補助機器設備の寄与率は23.1%から4.7%に減少する。すなわち、システム設計とは別に故障が発生した場合、臨機応変の処置による機能復帰を目的とした操作員の育成などソフトなシステムも信頼性を左右する大きな要因であるといえる。

また、排水ポンプ設備の故障診断システムを導入することは、

④ 事前の重要機器故障の予防

⑥ 故障時の迅速な原因究明，復旧

等による操作員の負担軽減と判断のサポートが可能となり，排水ポンプ設備の信頼性向上を計るうえで有効な手法の1つであると考えられる。

表－7.1.3の構成機器を見ると，冷却水系統の構成機器が多いことから，冷却水を必要としないシステム，すなわち基本的に空冷方式であるガスタービン等の採用も考えられる。

表－7.1.3 各構成機器の改善法検討結果

機 器 名	省略の可能性	備 考	予備系の設置	備 考
主エンジン始動用電磁弁	△	セルモータ起動の採用 但し，セルモータの信頼性 及び負荷側の予備必要	△	予備機の設置可能 但し，操作員が機側で手 動始動弁の操作が可能
発電機エンジン始動用電磁弁	△		△	
潤滑水，電磁弁	○	主ポンプセラミックス軸受 の採用	×	操作員が機側で手動弁操 作が可能
主エンジン始動用空気槽	△	セルモータ起動採用 但し，セルモータの信頼性 及び負荷側の検討必要	○	既に予備機を設置 操作員が操作にて予備機 に切換
発電機エンジン始動用空気槽	△		○	
主ポンプ用フローリレー	○	主ポンプセラミックス軸受 の採用	△	2 個直列に設置可能であ るが制御が複雑となる
主エンジン用フローリレー	×	〃	△	
発電機用フローリレー	×	〃	△	
減速機用フローリレー	×	〃	△	
主エンジン清水冷却器	○	二次冷却方式をラジエータ 方式とする	△	予備器設置可能であるが， 設置スペースに問題があ る
発電機用エンジン冷却器	○	〃	△	
主エンジン用温度スイッチ	×		△	2 個直列に設置可能であ るが，制御が複雑となる
主エンジン用油冷却器	×		△	予備器設置可能であるが， 設置スペースに問題があ る
発電機エンジン用油冷却器	×		△	
減速機用油冷却器	△	減速機の空冷化 但し，出力によって制限がある	△	
配線用遮断器	×		△	予備器設置可能であるが， 過剰設備となる
主エンジン付ポンプ	×		△	予備機設置可能であるが， 制御等複雑となる
発電機用エンジン付ポンプ	×		△	
油汚過器	×		△	操作員の現場操作でバイ パス弁開とする

凡例： ○：推奨 △：可能であるが推奨できない ×：不可能

(4) 排水ポンプ設備の信頼性の水準

ここでは，現在の排水ポンプ設備の信頼性の水準が他の一般装置類に比較してどのようなレベルにあ

るかということについて考察することとする。一般にシステムそれ自体の信頼性は、維持管理を行なわない状態（メンテナンスフリー）における当該システムの平均故障間隔MTBFにより比較される。MTBFはシステムの故障率の逆数として与えられるが、今回対象とした排水ポンプ設備の場合、中央・機側修復操作ではシステムの故障率は、式（3.3.4）、（3.3.5）および表-6.1.1に示す値を用いて、

$$\text{待機状態における故障率 } \lambda_1 = 2.0 \times 10^{-5} \text{ (回/hr)}$$

$$\text{運転状態における故障率 } \lambda_2 = 8.0 \times 10^{-5} \text{ (回/hr)}$$

と計算される。従って平均故障間隔MTBFは、 λ_1 に対して、

$$\text{MTBF} = 50,000 \text{ (hr)} \quad (\text{約}5.7\text{年})$$

λ_2 に対して、

$$\text{MTBF} = 12,000 \text{ (hr)} \quad (\text{約}1.4\text{年})$$

と計算される。排水ポンプ設備は常時待機状態にあるため、 λ_1 による平均故障間隔50,000時間がシステムの特徴を代表している値であると考えられる。

ここで他の一般装置類の信頼性の水準の例を図-7.1.1に示す。本図は各種装置の平均故障間隔MTBFを、その装置の構成部品数との関連において示したものである。このうち排水ポンプ設備は図中の  部分に相当すると考えられ、他の同規模の装置に比較しても決して劣るシステムではないことがわかる。また前段で述べた信頼性改善策としての①システム簡素化、②機器のグレードアップ、③予備系の設置は、それぞれ図中①～③の矢印で示される方向での信頼性改善策であると考えられる。逆に遠隔制御化に伴う制御系の直列多重化や機側操作の廃止は図中④～⑥の矢印で示される方向に相当し、共に信頼性を低下させる（平均故障間隔が短くなる）ことがわかる。

なお、実際の排水ポンプ設備では6章までで説明してきたように、維持管理を行うことにより実用上の信頼性（アベイラビリティ）は、本図のものよりはるかに高いことを断わっておく。

7.1.2 トンネル換気設備のシステム設計

トンネル換気設備のうち、とりわけジェットファンはトンネル内上部に吊下げられており、設備設置後は自動車等が通行しているため、保守点検および修理には困難をきたし、一般交通への影響も多大である。このため、トンネル換気設備のシステム設計にあたっては信頼性が特に重視されなければならない。

表-6.2.1の信頼性評価計算結果からジェットファン本体に関する各構成機器のアンアベイラビリティ寄与率は、電動機が40.4%、羽根車が39.9%、ケーシング軸受および吊金具が合わせて19.7%であることが判明した。したがって、ジェットファン本体の設計においては、トンネル内の環境にも問題があるが、ジェットファンという特殊用途に適した電動機開発も必要であると考えられる。

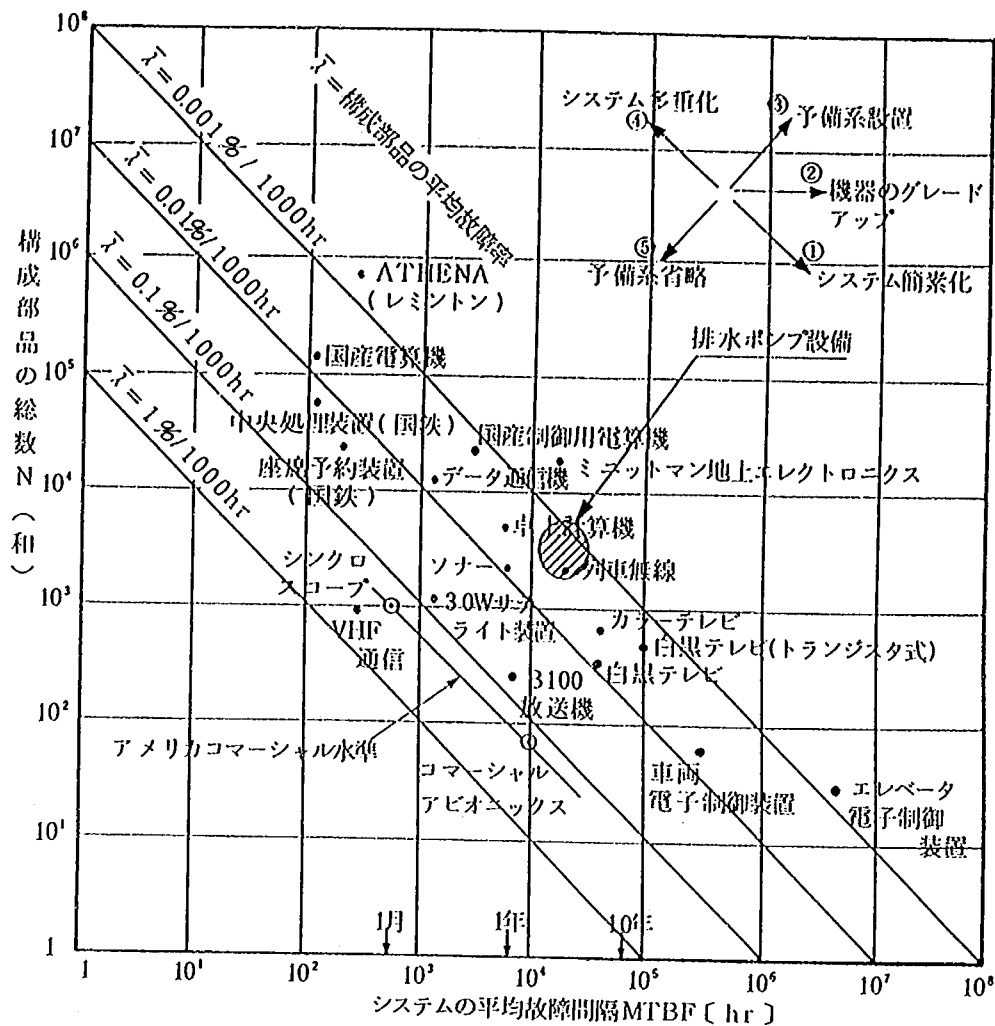


図-7.1.1 各種装置の信頼度水準例(日立ほか)

また、ジェットファン本体についての考え方としては、設置場所が一般車両等の通行するトンネル内という特殊性を考慮し、各機能部品の信頼性レベルを同一に設計しコスト面も考慮して一定期間メンテナンスフリーの方向に進むことも一方策と考えられる。

7.2 信頼性と維持管理

本節では、排水ポンプ設備とトンネル換気設備の信頼性から見た維持管理のあり方について考察を加えることとする。

7.2.1 排水ポンプ設備の維持管理

(1) 最適な定期点検の間隔

現在、排水ポンプ設備の定期点検の基本的考え方としては、専門家によるエンジンなどの整備を中心とした“年点検”を1年に1回、設備の作動確認のための管理運転・目視点検を中心とした“月点検”

を1ヶ月に1回程度実施することとしている。

このような管理運転を伴う月点検を確実に実施している機場では、充分に実施していない機場に比較して、実際の排水運転時の故障は大幅に少ないことが報告^(a)されているが、点検費用等との関係から最適な点検頻度の設定については統一的な考え方が未だ確立していないというのが実情である。そこで信頼性と経済性を考慮しつつ合理的な点検間隔（管理運転を伴う月点検レベル）の設定について考察を加えることとする。なお、検討の前提条件として次の4点を挙げておく。

- ① 予防保全としての性格を持つ年点検を確実に実施していること。
- ② 管理運転とは、ポンプおよびすべての予備機の運転まで含むいわゆるシステム運転であること。
- ③ 点検の際に発見された故障は、すみやかに修復されていること。
- ④ 経済性最優先の原則に従うものとする。

前述の如く、排水ポンプ設備のアンアベイラビリティ $\bar{A}_T$ は、

$$\bar{A}_T = \bar{A}_1 + \bar{A}_2 \quad (7.2.1)$$

$$\begin{aligned} \text{ここに、} \bar{A}_1 &= \frac{1}{2} \lambda_1 T : \text{起動に対するシステムのアンアベイラビリティ} \\ \bar{A}_2 &= \lambda_2 t : \text{連続運転に対するシステムのアンアベイラビリティ} \\ \lambda_1 &: \text{待機状態におけるシステムの故障率} \quad T : \text{点検間隔} \\ \lambda_2 &: \text{運転状態におけるシステムの故障率} \quad t : \text{連続運転時間} \end{aligned}$$

で与えられる。このうち $\bar{A}_1$ は点検間隔 T の関数、 $\bar{A}_2$ は連続運転時間 t の関数であり、これらの関数形は、設計および各構成部品の信頼性に支配される。従って、定期点検の頻度を検討するということは、 T の大きさを変えることとなるが、 $\bar{A}_1 \gg \bar{A}_2$ である（第6章参照）ためその影響は支配的であるといえる。なお、 $\bar{A}_1$ 、 $\bar{A}_2$ の関数形を変更するということは、システム設計を変更する（インラインクーラの採用など）、あるいは高信頼度の部品に変更するという改良策に対応する。

いま、排水機場を点検間隔 T （日）で管理運転による定期点検を実施しており、そのアンアベイラビリティが式（7.2.1）で与えられ、1回の点検費用が A （円）、年点検の費用と年間修理費の平均の合計が B （円）、排水機場の運転を伴う洪水の生起確率を λ_3 （回/日）、1回の洪水に伴うポンプが作動しない場合の想定被害額が C （円）であるとすると、年間の総維持管理費用 D （円）は、

$$D = \frac{365}{T} \cdot A + B \quad (\text{円}) \quad (7.2.2)$$

洪水時のポンプ故障による年間の損失額の推定値（確率論でいう期待値） E （円）は、

$$\begin{aligned} E &= 365 \cdot \lambda_3 \cdot C \cdot \bar{A}_T \\ &= 365 \cdot \lambda_3 \cdot C \cdot \left(\frac{\lambda_1 \cdot T}{2} + \lambda_2 \cdot t \right) \quad (\text{円}) \quad (7.2.3) \end{aligned}$$

である。ここで、維持管理による支出Dと、ポンプ故障による損失額Eの和X（円）を最小とするのが最も合理的（経済的）な管理方法であるから（図-7.2.1 参照），

$$X = D + E$$

$$= \frac{365}{T} \cdot A + B + 365 \cdot \lambda_3 \cdot C \left(\frac{\lambda_1 \cdot T}{2} + \lambda_2 \cdot t \right) \quad (\text{円}) \quad (7.2.4)$$

を最小とするTが、最適な定期点検間隔であると言える。ここで、

$$\frac{dX}{dT} = 0 \quad (7.2.5)$$

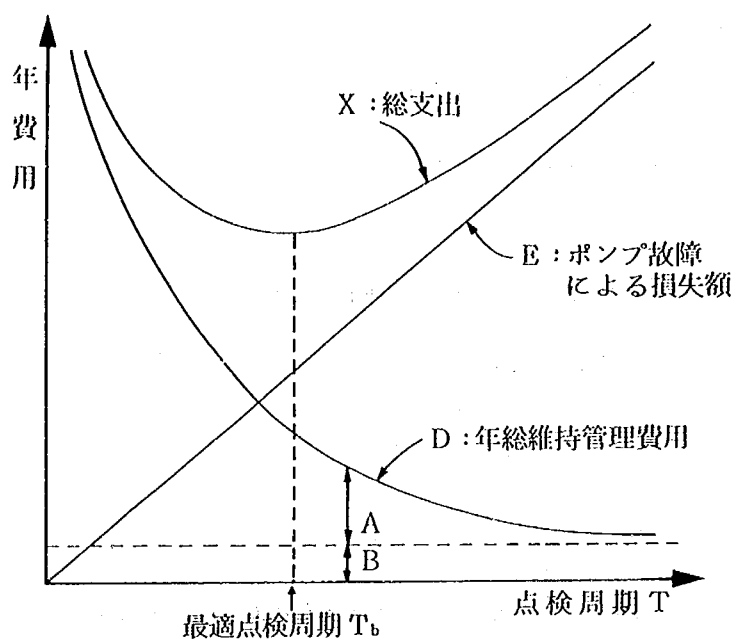


図-7.2.1 点検周期と年費用の関係

とおくと、

$$-\frac{A}{T^2} + \frac{C}{2} \cdot \lambda_1 \cdot \lambda_3 = 0 \quad (7.2.6)$$

従って、

$$T = \sqrt{\frac{2A}{\lambda_1 \cdot \lambda_3 \cdot C}} \quad (\text{日}) \quad (7.2.7)$$

上記のTが、最適点検周期 T_b （日）である。なお、上式のうち、 $\lambda_3 \cdot C$ は次式に相当するから、

$$\lambda_3 \cdot C = \frac{\text{ポンプ計画における想定年平均被害軽減額}}{365} \quad (\text{円}) \quad (7.2.8)$$

ポンプ計画におふる想定年平均被害軽減額をF(円)とおくと、式(7.2.7)は次のように表わされる。

$$T_b = \sqrt{\frac{730 \cdot A}{\lambda_1 \cdot F}} \quad (\text{日}) \quad (7.2.9)$$

なお、このときのXは式(7.2.4)より次式で示される。

$$X = \sqrt{730 \cdot \lambda_1 \cdot A \cdot F + B + \lambda_2 \cdot t \cdot F} \quad (\text{円}) \quad (7.2.10)$$

(2) 最適点検間隔の計算例

いま、仮に6 m³/secのポンプが1台設置されている機場を考えてみる。このとき、

1回の点検費用：A=200,000円

年点検と年間修理費用：B=1,800,000円

想定年平均被害軽減額：F=150,000,000円

であると仮定すると、表-6.1.1に示す計算結果と式(7.2.1)を用いて、中央+機側修復操作の場合では、 λ_1 、 λ_2 はそれぞれ、

$$\lambda_1 = 2 \cdot \bar{A}_1 / T = 2 \times 0.730 \times 10^{-2} / 30 = 0.00049 \quad (\text{回/日})$$

$$\lambda_2 = \bar{A}_2 / t = 0.160 \times 10^{-2} / 20 = 8.0 \times 10^{-5} \quad (\text{回/時間})$$

と計算されるから、最適点検間隔 T_b は、式(7.2.9)より

$$T_b = 45 \text{ 日}$$

となる。このときの排水ポンプ設備のアンアベイラビリティ $\bar{A}_T$ は、式(7.2.1)より、

$$\bar{A}_T = 0.011 + 8.0 \times 10^{-5} \cdot t$$

ここに、t=必要とされる連続運転時間(hr)

であり、年間の総維持管理費用Dは、式(7.2.2)より

$$D = 3,420,000 \text{ 円}$$

となる。ここでポンプ建設費を排水量t/sec当り70,000,000円とし、ポンプ耐用年数を20年とした場合、ポンプの修理率rは、

$$r = \frac{3,420,000 \times 20}{70,000,000 \times 6} \times 100$$

$$= 16.3\%$$

と計算される。

上述の検討で具体的に数値化された条件のうち、 A , B , λ_1 , λ_2 は、機場が異なっても大きく変わることはないと考えられるが、 C については、機場の設置されている場所により大きく異なることが予想される。ここで C のみを変化させて、 T_b がどのような値をとるか計算した結果を表-7.2.1に示す。

同一規模の機場であっても、その設置される条件によって最適な点検間隔は大きく異なることがわかる。

表-7.2.1 想定年平均被害軽減額と修理費率

ポンプ容量	想定年平均被害軽減額 C (円)	最適点検間隔 T_b (円)	修理費率 r (%)
6 m ³ /sec	3 0,0 0 0,0 0 0	1 0 1	1 2
	7 5,0 0 0,0 0 0	6 4	1 4
	1 5 0,0 0 0,0 0 0	4 5	1 6
	3 0 0,0 0 0,0 0 0	3 2	1 9

(3) ポンプを2台設置した場合

(2)の計算例において、6 m³/secのポンプ1台ではなく、3 m³/secポンプ2台を設置した場合を考える。

所要排水量を2台のポンプで分担することとした場合、洪水時のポンプ故障による年間の損失額の推定値 E' (円)が次式で示される点が、(1)における検討と異なる点となる。

$$E' = (F_1 - F_2) \cdot (2 \cdot \bar{A}_T) + F_2 \cdot (\bar{A}_T)^2 \quad (7.2.11)$$

ここに、 F_1 : 6 m³/secポンプ設計時の想定年平均被害軽減額 (円)

F_2 : 3 m³/secポンプ設計時の想定年平均被害軽減額 (円)

式(7.2.11)のうち第1項はポンプが2台共動く必要のある洪水に対するポンプ故障による年間の損失額の期待値であり、第2項はポンプが1台のみ作動すれば排水可能な洪水に対するポンプ故障による年間の損失額の期待値である。このうち、

$$F_1 - F_2 \simeq F_2$$

$$2 \bar{A}_T \gg (\bar{A}_T)^2$$

であるため、

$$E' \simeq (F_1 - F_2) \cdot (2 \bar{A}_T) \quad (7.2.12)$$

とおける。従って一般的に最適点検間隔 T_b' は、式(7.2.9)と同様にして、

$$T_b' = \sqrt{\frac{365 \cdot A}{\lambda_1 \cdot (F_1 - F_2)}} \quad (7.2.13)$$

ここに、 F_1 : ポンプ2台設置時の想定年平均被害軽減額(円)

F_2 : ポンプ1台設置時の想定年平均被害軽減額(円)

A : 1回の定期点検費用(円)

λ_1 : 待機状態におけるシステムの故障率(回/日)

と表わすことができる。

(2)の計算例においては、 $F_1 = 150,000,000$ 円、 $A = 200,000$ 円、 $\lambda_1 = 0.00049$ 回/日であったが、いま $F_2 = 70,000,000$ 円であると仮定すると、最適点検間隔は式(7.2.13)より、

$$T_b' = 43 \text{ 日}$$

と計算される。

(4) 管理面から見た信頼性の目標値

排水ポンプ設備の信頼性は、点検頻度を増すこと以外に、設計を変更し最初から高い信頼性を付与することによっても実現される。いま、最適点検間隔を T_R (日)とするために、機場の持つべき起動に関するシステムの故障率 λ_R (回/日)を求めることとする。式(7.2.9)により λ_R は、

$$\lambda_R = \frac{730A}{F \cdot T_R^2} \quad (\text{回/日}) \quad (7.2.14)$$

ここに、 A : 1回の点検費用(円)

F : 想定年平均被害軽減額

T_R : 理想とする点検間隔

となる。すなわち式(7.2.1)中の λ_1 が λ_R となるよう排水ポンプ設備のシステム設計の変更、あるいは、高信頼度部品の採用を図ることが望まれる。

ここで(2)の計算例で想定したポンプ設備で具体的に計算することとする。(2)では $T_b = 45$ 日と計算されたが、 $T_R = 60$ 日で済むようにするためには、式(7.2.14)より

$$\lambda_R = 0.00027 \quad (\text{回/日})$$

となるようにしなければならない。この時の年総支出 X の軽減額 ΔX は、

$$\Delta X = \sqrt{730 \cdot A \cdot F} \times (\sqrt{\lambda_1} - \sqrt{\lambda_R}) \quad (\text{円}) \quad (7.2.15)$$

$$= 844,000 \quad (\text{円})$$

と計算される。従ってポンプ耐用年数を20年と考えた場合、上記の設計の改善に

$$4 \times 20$$

$$= 17,000,000 \text{ (円)}$$

以上の費用がかかる場合、その改善は経済的でないと言うことができる。なお、この改善を実施した時のアンアベイラビリティは、式(7.2.1)より

$$\bar{A}_T = 0.0081 + 8.4 \times 10^{-5} \cdot t$$

ここに、 t ：必要とされる連続運転時間

である。

7.2.2 トンネル換気設備の維持管理

(1) 最適な定期点検の間隔

現在、トンネル換気設備の維持管理としては、目視点検、清掃・給油等が中心の月または半年点検、機能確認を中心とする年点検を実施しているが、これらは“故障をしたら交換する”という事後保全であり、送風機のベアリング交換を除いては、予防保全的な管理は行われていないのが実情である。ここでは、上記体勢のあり方について検討する。

3.3.2項に示す通り、トンネル換気設備のアベイラビリティ A_T は、

$$A_T = \frac{\text{動作可能時間}}{\text{動作可能時間} + \text{動作不可能時間}} \quad (7.2.16)$$

で表わされる。ここで、トンネル換気設備について、定期保全を稼動時間 T_3 毎に行っているとすると、式(7.2.16)のうち、

$$\begin{aligned} \text{動作不可能時間} = & (\text{定期保全の所要時間 } T_1) + \\ & (\text{故障に対する修利時間 } T_2) \times (\text{ } T_3 \text{ 間の故障回数}) \end{aligned} \quad (7.2.17)$$

$$\text{動作可能時間} = \text{稼動時間 } T_3 \quad (7.2.18)$$

と表わせる。したがって式(7.2.16)は、

$$A_T = \frac{T_3}{T_3 + T_1 + T_2 \times \int_0^{T_3} \lambda(t) dt} \quad (7.2.19)$$

ここに、 $\lambda(t)$ ：システムの故障率

となる。ところで、トンネル換気設備の故障モードをワイブル分布

$$F(t) = 1 - e^{-\frac{t^m}{t_0^m}} \quad (7.2.20)$$

ここに、 t_0 ：尺度パラメータ（定数）

m ：形状パラメータ（定数）

で代表することとすると、

$$\lambda(t) = \frac{m}{t_0} t^{m-1} \quad (7.2.21)$$

であるから、式(6.2.19)は、

$$A_T = \frac{T_3}{T_1 + T_2 \cdot (T_3^m / t_0^m) + T_3} \quad (7.2.22)$$

となる。

トンネル換気設備では、 A_T が大きいことが望まれるから、上記 A_T を最大とする定期保全の周期 T_3 を最適保全周期と考える。ここで、

$$\frac{dA_T}{dT_3} = 0$$

とおくと、

$$T_3 = \left(\frac{T_1}{T_2} \cdot \frac{t_0^m}{m-1} \right)^{1/m} \quad (7.2.23)$$

であり、上記 T_3 が最適な（ A_T を最大とする）保全周期である。

今回の調査研究では、調査期間等の条件から安定故障期のみを検討の対象としているが、安定期は

$$m = 1$$

である（故障率一定）。従って式(7.2.23)より

$$T_3 = \infty$$

であり、定期保全は無意味となる。つまり、通常は、清掃、給油等の必要最少限の管理のみに留め、故障が発生する度に迅速な修理を行うことが最適な管理方法であると言える。

しかし、図-7.2.2.に示すように、安定期に続く摩耗期に入ると $m > 1$ となるため定期保全が必要となる。従って今後も日常の設備管理業務により故障データのデータバンク化を図り、長期のデータを基

に、安定期から摩耗期に入る時期の把握および摩耗期におけるワイブルパラメータ m の推定を行い、定期保全計画を立てる必要がある。

さらに、多くの部品が摩耗期に入ると m はかなり大きな値となり、最適保全周期 T_3 が極度に短くなるため、経済的な面も検討のうえ、設備そのものの更新も考える必要が出てくる。

これら検討のためにも、故障データのデータバンク化が望まれるところである。

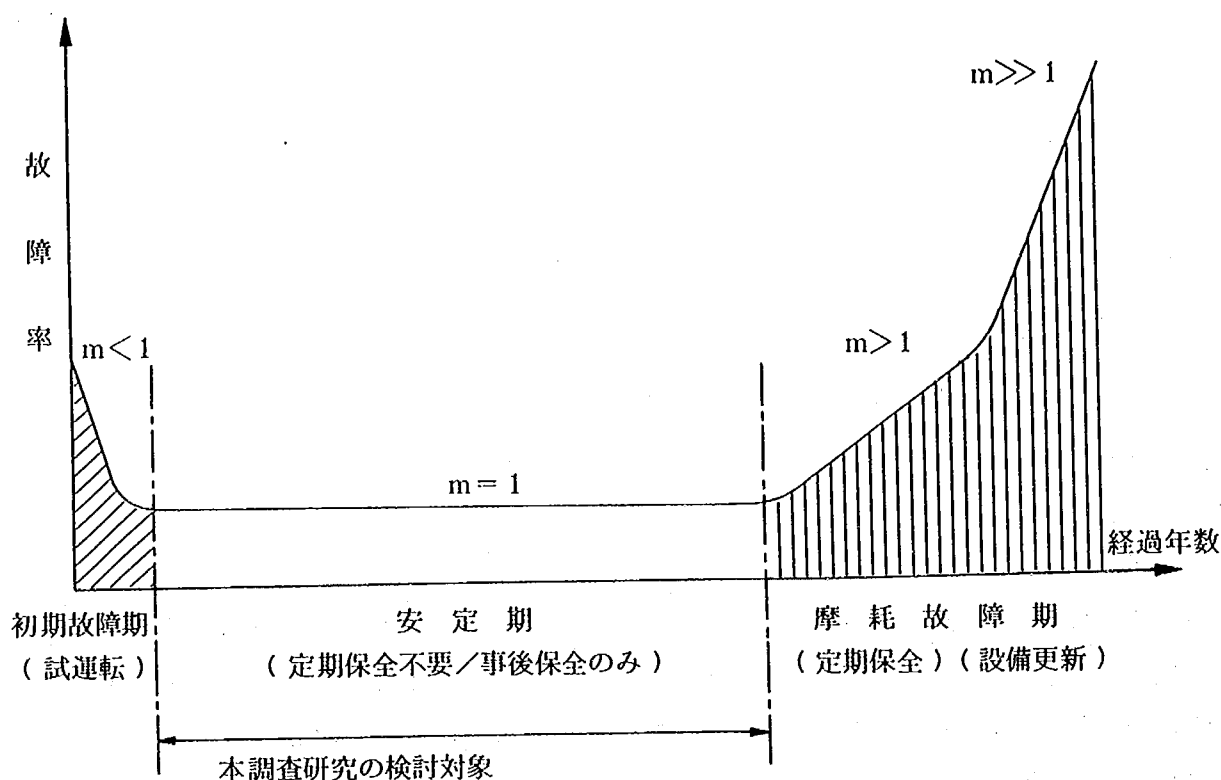


図-7.2.2. トンネル換気設備の故障率

(2) 設備の更新について

前段で、摩耗故障期での経済的側面からの設備の更新の必要性について触れたが、ここではその時期の決定法について考察する。

今、トンネル換気設備の設備費（あるいは更新費用）を C 、毎年の維持管理費を O とし、第1年目を O_1 、2年目を O_2 、……第 n 年目を O_n とする。このトンネル換気設備を n 年毎に更新するとした場合、全未来費用の合計額 M_n は、利率を i として現価に換算すると、

$$\begin{aligned}
 M_n = & [C + O_1(1+i)^{-1} + O_2(1+i)^{-2} + \dots + O_n(1+i)^{-n}] \\
 & + [C(1+i)^{-n} + O_1(1+i)^{-(n+1)} + O_2(1+i)^{-(n+2)} + \dots + O_n(1+i)^{-2n}] \\
 & + \dots \\
 & + \dots
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
&= [C + O_1(1+i)^{-1} + O_2(1+i)^{-2} + \dots + O_n(1+i)^{-n}] \\
&\quad + (1+i)^{-n} [\quad \quad \quad // \quad \quad \quad] \\
&\quad + (1+i)^{-2n} [\quad \quad \quad // \quad \quad \quad] \\
&\quad + \dots\dots\dots \\
&= \frac{C + O_1(1+i)^{-1} + O_2(1+i)^{-2} + \dots + O_n(1+i)^{-n}}{1 - (1+i)^{-n}} \\
&= \frac{1}{i} \left\{ \frac{C + O_1(1+i)^{-1} + O_2(1+i)^{-2} + \dots + O_n(1+i)^{-n}}{(1+i)^{-1} + (1+i)^{-2} + \dots + (1+i)^{-n}} \right\} \quad (7.2.24)
\end{aligned}$$

と表わせる。従って上記 M_n を最小とする n が最も経済的な設備の更新間隔(年)であるといふことができる。式(7.2.24)中の $O_1, O_2 \dots O_n$ は、トンネル換気設備が設置後 N 年で安定期から摩耗故障期へ遷移するとすると、一般に O_n は次の様に近似して数値化される。

$$\left. \begin{aligned} n \leq N \text{ のとき, } O_n &= a \text{ (一定)} \\ n \geq N \text{ のとき, } O_n &= a + k(n - N) \end{aligned} \right\} \quad (7.2.25)$$

式(7.2.25)の a, k は、故障率の変化とその修理費により決まる定数である。式(7.2.24), (7.2.25)より M_n を最小とする n を見出すことは、計算機等によれば容易にできるが、これらの式の持つ意味を考えてみる。

式(7.2.24)の{ }内の数式に注目すると、 C に関する項は n 年で更新する場合の1年間当りの設備設置費(年費用)に相当し、 $O_1 \sim O_n$ に関する項の和は n 年で更新する場合の1年間当りの平均維持管理費に相当する。 M_n の最小値は、即ち両者の和の最小値であり、この最小値と更新周期 n (年)との関連を概念的に示すと、図-7.2.3の通りとなる。

前述のように、今回の調査研究は安定期のみを対象としているため、式(7.2.24), (7.2.25)による具体的な数値を用いた設備更新期の算出は行えないが、今後の維持管理を通じてのデータの積重ねが望まれるところである。

7.2.3 設置環境改善による信頼性向上

排水ポンプ設備の環境は、表-5.2.3に示す通りである。屋内の温度については、各測定位置とも最高33~36℃ではば一定している。また、屋外盤(除塵機盤)については、屋内に比べ46℃とやや高い値を示している。最低温度は、除塵機盤で-0.9℃を記録しているが、屋内の操作盤、エンジンフロア等は2~4℃程度で一定している。湿度については、最高で93~98%を記録しているが、5%上端値でも86~95%と高い値を記録している。

トンネル換気設備は一般に坑口付近に設けられており、高温、高湿の影響を受けやすい。設備の環境条件は、温度については、室内、室外とも最高39~44℃ではば一定している。最低温度は、地域差にもよるが送風機室、トンネル内で0℃以下(最低-6.5℃)を記録しているが、室内では8℃以下(最

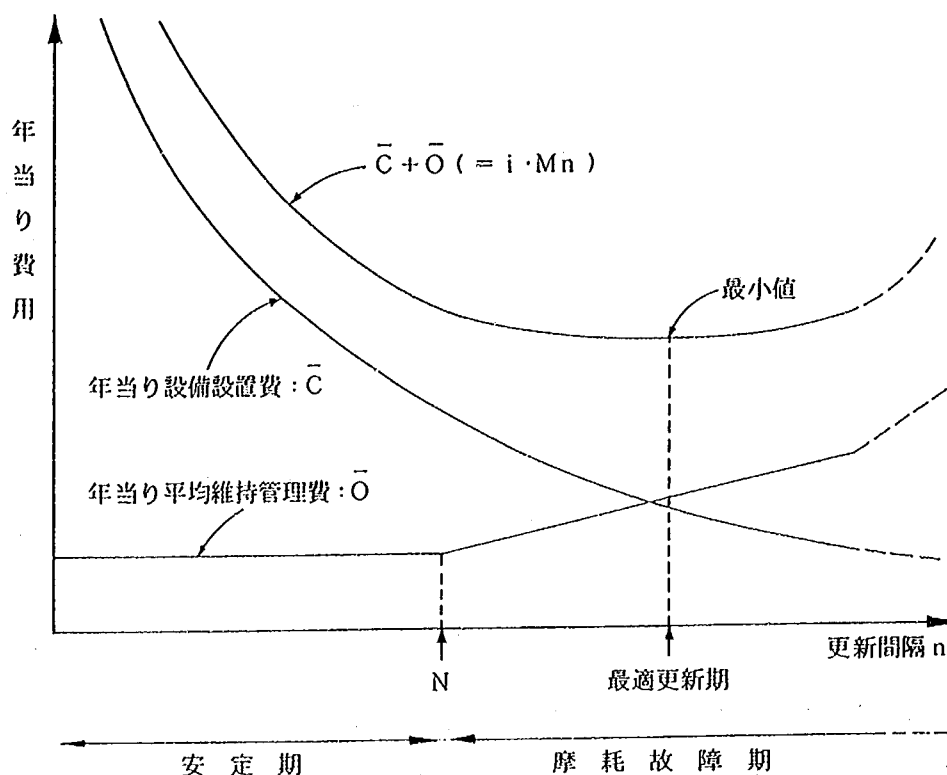


図- 7.2.3 トンネル換気設備の更新期

低-6℃)を記録している。湿度については、室内・室外で最高100%を記録している設備もある。また5%の上端値でも96%と高い値となっている。

環境補正係数の値は、小さいほどその機器にとって良好な環境といえ、機器の信頼性も向上することになる。その意味で、環境補正係数を小さくする努力は、システムの信頼性を向上する上で重要な要素となる。

表- 7.2.2 は、各種の機器の温度、湿度に関する使用範囲の一例を示したものである。設備の温度条件については、規準範囲内に収まっているが、湿度については大幅に規準範囲を越えている設備もある。このような環境条件を規準範囲内に納めるための方策として、一般に盤関係に採用されているスペースヒータ、空調器等による除湿対策がある。

(1) スペースヒータの有効性

機器側で対環境性を向上させる手段として一般に用いられるものとしては、スペースヒータ等による除湿が上げられ、ほとんどの設備に取り付けられている。

盤内の吸湿現象は、運転中に盤内の温度が上昇し、周囲との相対湿度のアンバランスによって吸湿現象がおき、停止後に同様に冷却することによって盤内の相対湿度が非常に大きくなり、結露現象が発生する。この現象は、温度変化が激しいほど、運転停止が頻繁でかつ停止期間が長いほど吸湿が進み、厳しい条件を生み出す。このような現象は、熱容量が大きい機器で特に厳しく、運転がなくても、周囲温度変化に追従することができず、夜中に冷却した機器は午前3時前後の最多湿の時刻を経過後明け方を

表- 7.2.2 機器等の使用温度、湿度範囲

機 器 名 称	建 設 省 要 領		J I S		メーカ保証の例		備 考
	温度(℃)	湿度(%)	温度(℃)	湿度(%)	温度(℃)	湿度(%)	
交流電磁開閉器・接触器	-10~50	30~90	-5~40	45~85	-5~40	85以下	JISC8325 JEM 1038
漏 電 遮 断 機	//	//	//	//	//	//	JISC8370
補 助 継 電 器	//	//	-10~40	//	-10~40	//	JISC8371
限 時 継 電 器	//	//	-	-	-10~55	//	
交流電圧計・電流計	//	//	-5~40	45~85	-10~50	//	JISC4551
操作・切替え開閉器	//	//	-	-	-5~50	30~70	JISC1102
低圧進相コンデンサ	//	//	-5~40	45~85	-10~55	85以下	JISC4520
低 圧 ヒ ュ ー ズ	//	//	-25~45	85以下	-25~45	//	JISC4901
配 線 用 遮 断 機	-	-	-5~40	45~85	-5~40	//	JISC8352

迎えると気温は上昇し、機械は冷たいという状態になり、露を結ぶ条件ができる。

この様な状況で電圧が印加されると、絶縁は最悪の状態となっているため、漏電による加熱等の危険状態に陥りやすい。このため、スペースヒータや連続通電によって、電気機器の温度を室温以下に下げないことによって結露現象の発生を抑制する方法がある。

トンネル換気設備の操作室盤内で、スペースヒータを連続ONにした盤とOFFにした盤で同時に測定した温度および湿度の調査記録を図- 7.2.4 に示す。この調査を実施したときの室内温度は31℃、湿度は66%で室内温度は外気よりやや高めであった。調査結果において、スペースヒータを投入した盤内温度が、投入していない盤より10%の除湿効果があることが判明した。

スペースヒータの使用方法としては、多湿の梅雨季や凍結防止のために冬季に投入するか、年間を通して連続投入しておくか、または、常に通電による発熱があり、節電のために入れていない、設置されていない等、管理事務所によってそれぞれ異なっている。なお、夏期には室内温度を自動換気扇で30℃前後に調整しているが、夕立時には湿度が高くなることがあり、機器の保護面からもスペースヒータを投入する必要がある。また、年間連続投入は不経済で省エネルギーの面から問題がある。

以上のことから、梅雨季の多湿時、夏季の夕立時、秋季の長雨季の結露による絶縁抵抗および冬季における機器への凍結防止などに対して、機器の保全効果が上がるよう、合理的な自動制御を行うことが望まれる。

(2) 空気調和設備

電算機室においては、一般に空気調和設備が完備され、温度 20～25℃、湿度 50～70%程度 の環境条件を確保されている。

排水ポンプ設備のコンクリート構造物の場合、特に夏期の高温多湿時、地下ポンプ室等では高湿度が連続的に続く、この傾向はコンクリート打設後の余剰水が乾燥するまでかなり長期間助長される傾向もあり、また、地下管路が多いポンプ場では特に問題となることが多い。

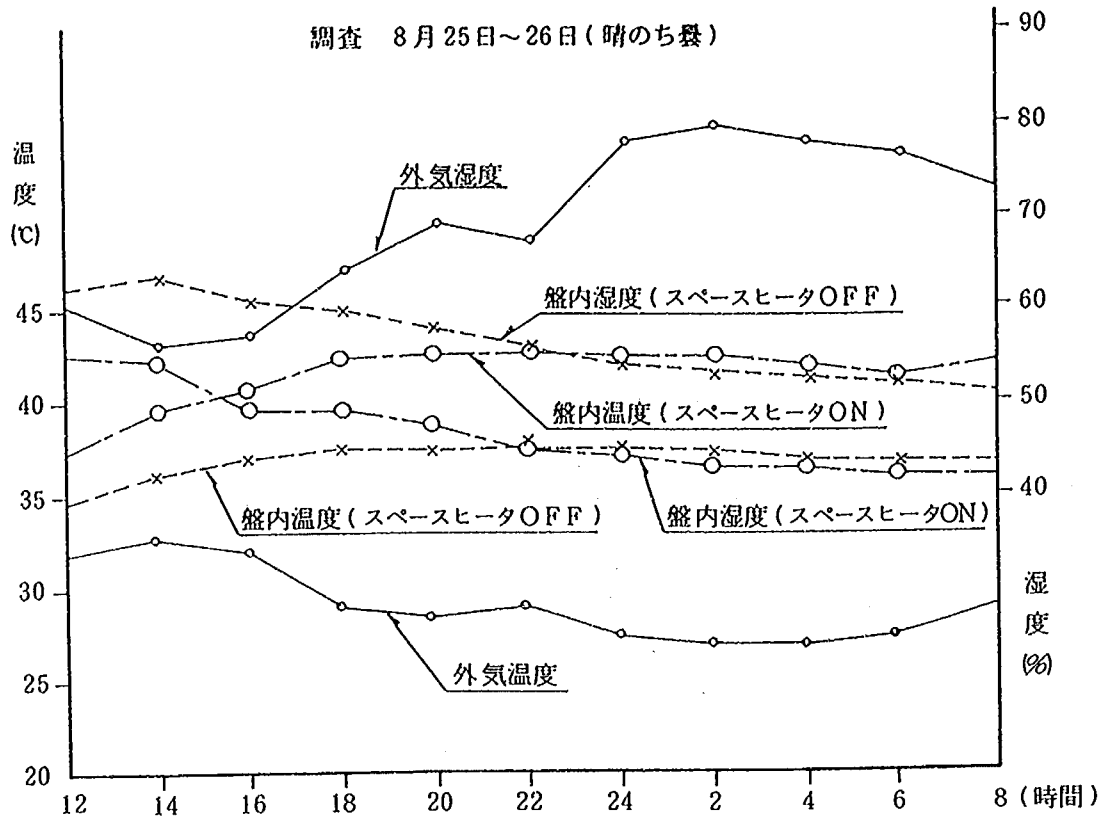


図-7.2.4 盤内スペースヒータの効果の計測結果

トンネル換気設備用建屋はコンクリート構造物が多く、外気温度に影響されやすい。制御盤内には、電子回路を内蔵しており故障防止対策の面から多少維持管理費は高くなるが塵埃等で室内を密閉する必要がある過酷な環境条件によっては、空調設備を設置することも考えられる。

今回の環境調査結果でも記録されているように、操作室などかなりの高温多湿(36℃, 93%)となる結果が出ており、設備内容によっては空調設備の検討が必要な場合もあると考えられる。

(3) 換気扇について

夏期の室内温度は外気より高いため、一般に室内自動換気扇は付けてある。しかし、盤内温度は室内より高いため、温度上昇を盤内部換気扇で換気する方法もあるが、比較的良好な場所に向いており、条件を充分検討して設置する必要がある。

7.3 信頼性と新技術の導入

第5章において、主原動機、補機類にかかる故障は致命的ではないものの、件数が多く報告されていることが指摘された。また、7.1.1における信頼性設計の観点からの検討において、エンジンの冷却水系統にかかるシステムの合理化、潤滑水系統のシステムの合理化等が指摘された。このようなシステムにおいて、従来の技術の範囲で合理的な構成の設計を行うには限界がある。そこで、新しい技術や機構を導入することによって、簡潔な機器構成を実現する試みの効果について、検討を試みた。

検討の対象は、以下の5種類とした。

- ① ケース1：ディーゼルエンジンにより排水ポンプを直接駆動し、各機器の冷却には2次冷却方式を用いた機器構成である。この方式は、大形の排水ポンプ設備で多く採用されてきた方式で、最も複雑な機器構成になる。
- ② ケース2：駆動系統はディーゼルエンジンを用いており、ケース1と同様である。冷却水系統を合理化する目的で、吐出管の中に冷却水の熱交換器を組み込むとともに、セラミックスを用いた無給水軸受けを採用した機器構成である。
- ③ ケース3：排水ポンプの駆動原動機に、冷却水の不要なガスタービンを排水ポンプと直結する形で用いるとともに、冷却水系統を直接冷却方式にして合理化したものである。なお、軸受けにはセラミックス軸受けを用いている。
- ④ ケース4：排水ポンプの駆動に電動機を用いて、その電源としてガスタービン発電機を使用したものである。その他の機器構成はケース3に準じている。
- ⑤ ケース5：ケース4と基本的構成は同一であるが、低速回転の電動機を用いて、電動機と排水ポンプの間の減速機を合理化したものである。

ケース1とケース2の比較から、冷却水系統の合理化の効果、ケース2とケース3の比較からガスタービンの導入による効果、ケース3とケース4及び5の比較から電動機を用いたときの信頼性の変化が定量的に評価されることを目指したものである。

7.3.1 機器故障率の設定

(1) ガスタービン

① ガスタービンの実態と排水ポンプの駆動原動機としての適応性

ガスタービンは、その出力機構から2軸式と1軸式に分けられる。1軸式は出力軸と圧縮機の軸が共通になった構造で、2軸式ではこれらが独立している。このため、1軸式では無負荷状態でないと起動できないのに対し、2軸式では部品点数が増加することになるものの、出力タービンがトルクコンバータのような働きをして、出力機構を直結したままでの起動が可能になる。

排水機場では、ポンプを接続したままでの起動が可能であること、ポンプの負荷が急激に変動しても機関停止などの障害が発生しにくい事などから、2軸式のガスタービンによる直接駆動によることが有利な場合が多いと考えられる。

現在、数千kW以上の出力の2軸式ガスタービンについては、合衆国等でパイプライン用のポンプの動力源として稼働しているとの報告もあるが、国内ではまだ実績が無い。

国内では、1000kW以下の中小型のガスタービンは、非常用を主とした発電に使用されているのみで、その総数はまだ2000台に達していない。また、中小型のガスタービンについては十分なラインアップとはなっていないため、選択範囲に限界がある。

したがって、排水機場用の動力としてガスタービンを使用するには、発電機用動力として使用する場合と、これによって直接ポンプを駆動する場合の2種類が考えられる。

② 信頼性調査の基本的考え方

日本におけるガスタービンエンジンの実態から、目的とする2軸式のガスタービンや、ポンプ駆動用のガスタービンの故障実態を調査することはできないので、1軸式のガスタービンについての調査を行い、2軸式の故障率を類推することとする。

この場合、ガスタービンの故障率については、その使用実績のほとんどが非常用発電機であることから、その故障実績を基に類推する方法をとった。

1軸式と2軸式のガスタービンの機構上の違いは、表-7.3.1に示すとおりで、出力用のタービン軸が増えているほかは基本的にはほとんど同じと言える。

表-7.3.1 機構上の比較

	1 軸 式	2 軸 式	比 較
エンジン 構造	圧縮機1段 軸流タービン2段 減速機 転がり軸受け	圧縮機1段 軸流タービン2段 減速機 転がり軸受け 出力タービン	① 出力タービンに相当するアンアベイラビリティの分だけ信頼性が低下 ② エンジン内部の故障は少ない ③ 滑り軸受けの方が耐用時間は長い、プライミング必要
燃料系	FOポンプ 調量弁+遮断弁 噴射弁	FOポンプ 調量弁+遮断弁 噴射弁	両方式ともほとんど同じ
点火系	蓄電池電源 エキサイター 点火栓	蓄電池電源 エキサイター 点火栓	両方式ともほとんど同じ
制御系	回転数、燃料等を電気制御 (保護系付き)	回転数、燃料等を電気制御 (保護系付き)	① 2軸から回転数をとるほかは両方式ともほとんど同じ ② 排水ポンプ駆動用では、低速度保護必要か?
始動系	電気始動	電気始動 (小容量)	① 両方式ともほとんど同じ ② 2軸式はディーゼルエンジン並

軸受けについては、大型の1軸式で滑り軸受けが使用されている場合もあるが、滑り軸受けでは耐用時間が転がり軸受けの10倍程度になるものの、プライミングが必要であること、転がり軸受けでも3,000~4,000時間の耐用時間があり非常用設備としては十分であること等から、転がり軸受けを基本とする。

エンジン本体については、1軸式のデータから、出力軸及びタービンの故障率を類推(エンジニアリングジャッジによる)し、2軸式に付いては相当分の故障率を上乗せすることで類推できる。

保護系については、2軸式でも基本コンポーネントが同じことから、1軸式と同様に、オーバースピード、アンダースピード、排気管(高温又は低下)、潤滑油圧、潤滑油温度とすることで、1軸式のデータが利用できる。

始動系については、2軸式では1軸式に比べて容量が少なく、ディーゼルエンジンとはほぼ同等の容量

になるものの、基本構成部品等はディーゼルエンジンや1軸式と同じなのでこれらのデータが利用できる。

使用環境については、排水機場の湿度が大きく変動しているのに対して、一般的には地下室等に設置されている非常用発電機は、かなり良い環境と言える。この環境の違いについては、Earlesの環境補正係数が一般に使われていることから、これによって補正すれば排水機場の環境への補正が可能であると推測できる。

以上のことから、非常用発電機等に利用されているガスタービンについての故障実態を調査すれば、目的とする2軸式ガスタービンの故障率が類推できると判断した。

③ 故障実態調査

ガスタービン発電機は、設置台数がまだ多くないこと、使用目的によっては定期的な分解検査が義務づけられていること、部品供給や分解検査がメーカーで直接行われる例が多いことなどから、メーカーにおいてそのほとんどが掌握されている。

そこで、100kVA以下の機種を生産している川崎重工業、ヤンマーディーゼル、新潟鉄工、ダイハツディーゼルに対しアンケート方式で調査することとした。

調査に当たっては、1軸式のガスタービンを想定し、図-7.3.1に示すような構成に分割した。

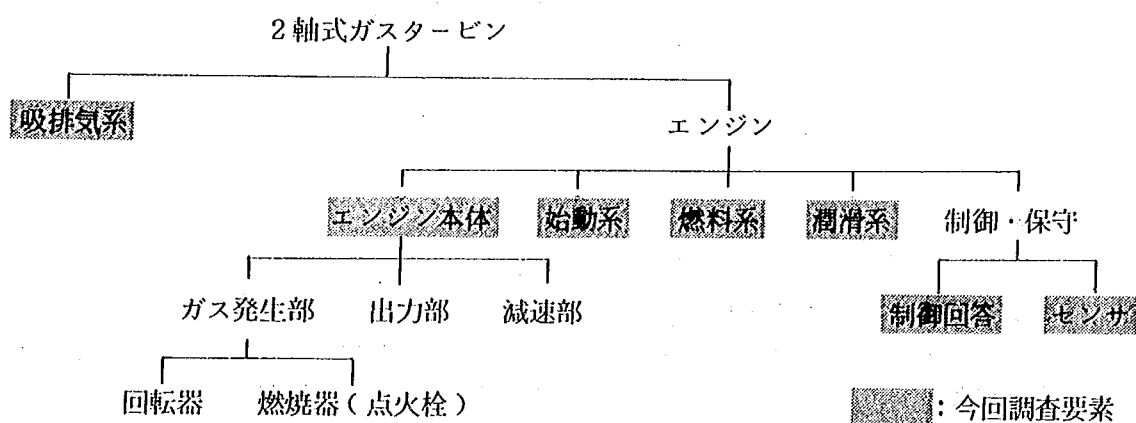


図-7.3.1 ガスタービンの故障調査要素

調査要素については、あまり細部にわたると、各企業の技術レベルなど秘密事項にふれる恐れがあるため、2軸式へのエンジニアリングジャッジが可能なレベルのデータが得られる限界とした。また、できる限り関連情報を収集するため、可能な限り故障の具体的内要を記載することとして、調査表を作成した。

なお、ガスタービン機関が実用化されてまだ期間の短いことや設置後あまり時間の経っていないものが多いことなどから、初期故障的なものが多いと想定される。このため、ここでの「故障」の定義は、機能の喪失又はこれに直結するものとし、組み立てミス等を原因とするものは除外した。

調査期間は、昭和62年1月1日からの1年間とし、この間に発生した故障についての統計をとることにする。

④ 調査結果

各メーカーからの故障実態報告から得られた故障率を基に、使用環境による補正を行った。環境補正に当たっては、Erlosの環境補正係数を基に、次のように考慮した。

- (a) 湿度について、ガスタービン設置場所を20～60%とし、排水機場を5～100%とした。
- (b) 温度については、非常用発電機の多くが地下室に設置されていることから、排水機場内部よりも温度変化の少ない環境におかれていると推定できる。しかし、Erlosの環境補正係数の温度区分ほどの差はないと推測できるので、温度による環境補正は行わない。
- (c) その他の環境因子については、日本国内であることから、同一環境にあるといえるので、環境補正は行わない。

2軸式エンジン本体における故障率の推定に付いては、図-7.3.1に示すようなFT図において、各機器の故障発生頻度をエンジニアリングジャッジにより推定した。すなわち、図-7.3.1において、1軸式と2軸式の相違点は、動力発生部の有無であるから、これを除いた1軸式の故障率の中から同程度の故障発生頻度に相当する故障率が上積みされるものとした。これにより、2軸式では、1軸式の故障率の約23%増の故障率になる。

このような補正を行った結果、ガスタービン本体の故障率としては、1軸式で 2.802×10^{-6} 、2軸式で 2.818×10^{-6} となり、ディーゼルエンジン本体の故障率 2.897×10^{-6} とほとんど差のない値を示し、ガスタービン採用によるメリットが少ないように見える。しかし、補機類の中には冷却水関係を代表とするディーゼルエンジンに付随する機器があるため、正確な評価のためには、機場全体の信頼性への効果はFT図に基づく解析を行わなければならない。

(2) 吐出管クーラ

吐出管クーラの基本的な構造は、図-7.3.2のようになっている。構造的に排水中の塵埃が絡みつきにくくなっているものの、その可能性は否定できないが致命的な故障につながることは考えにくい。したがって、想定される故障は、各種の液

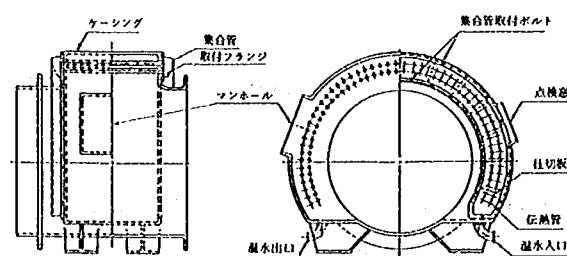


図-7.3.2 吐出管クーラ

冷式の熱交換器と同様のものになると推定されることから、フィールドデータのある油冷却器と同じ故障率に設定した。

(3) セラミックス軸受け

セラミックス軸受けは、新たに開発された機器であり、類似の機器もない。そのため、現時点では、在来の中軸受けと同じ故障率を与えることとした。実際には、従来の水中軸受けよりも高い信頼性が得られるものと推定されることから、故障率を高めめに設定したことになるが、軸受け本体の寄与率は低いのでシステムの信頼性解析には直接的には影響しないと考える。

7.3.2 新技術を導入したFT図の作成

(1) ガスタービンのFT図

ガスタービンを排水機場に適用する場合、排水ポンプを直接駆動する場合と、発電機を駆動してモータでポンプを駆動する場合とに分けられる。

ガスタービンを採用したときのFT図(図-4.2.1(1)に対応)は、トップ事象を排水機能の喪失として図-7.3.3のようになる。このレベルでの解析では、ディーゼルエンジンと比べて原動機の部分で異なるのみである。さらに、この中の補助機器系統故障による始動失敗を見てみると、ディーゼルエンジンのFT図(図-4.2.1(2))にあるエンジンの冷却水、空気系統故障(モデル排水ポンプ設備程度の大きさであれば、セルモータによる起動が可能になる。)などがガスタービンではなくなるため、設備全体での信頼性の向上につながる事が予測できる。

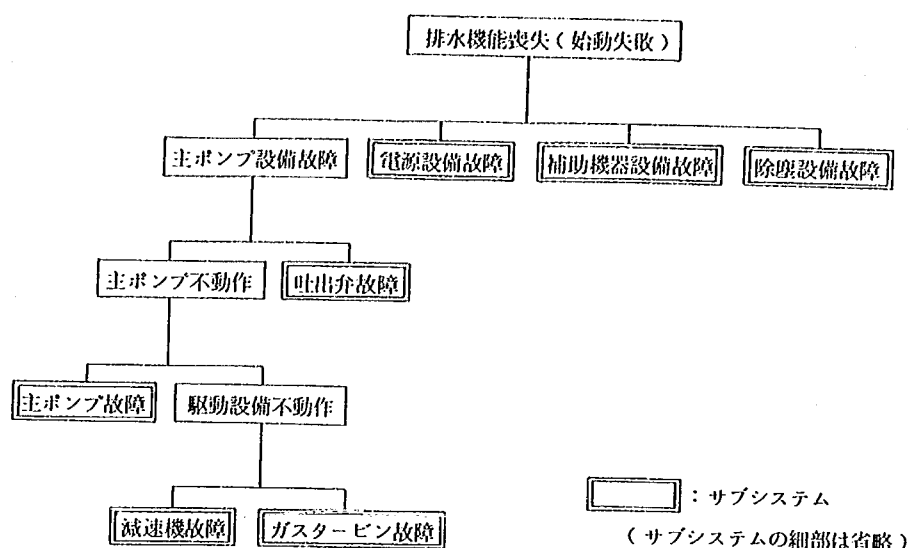


図-7.3.3 ガスタービンを用いた場合のFT図

直接駆動する場合(国内での実施例は把握していないが)には、合衆国等での大型ポンプの実施例を見ると、クラッチが省略できること等から2軸式のものが一般に用いられてきている。発電機等に用いられる1軸式のガスタービン及び2軸式のガスタービンの基本的な構造の違いは表-7.

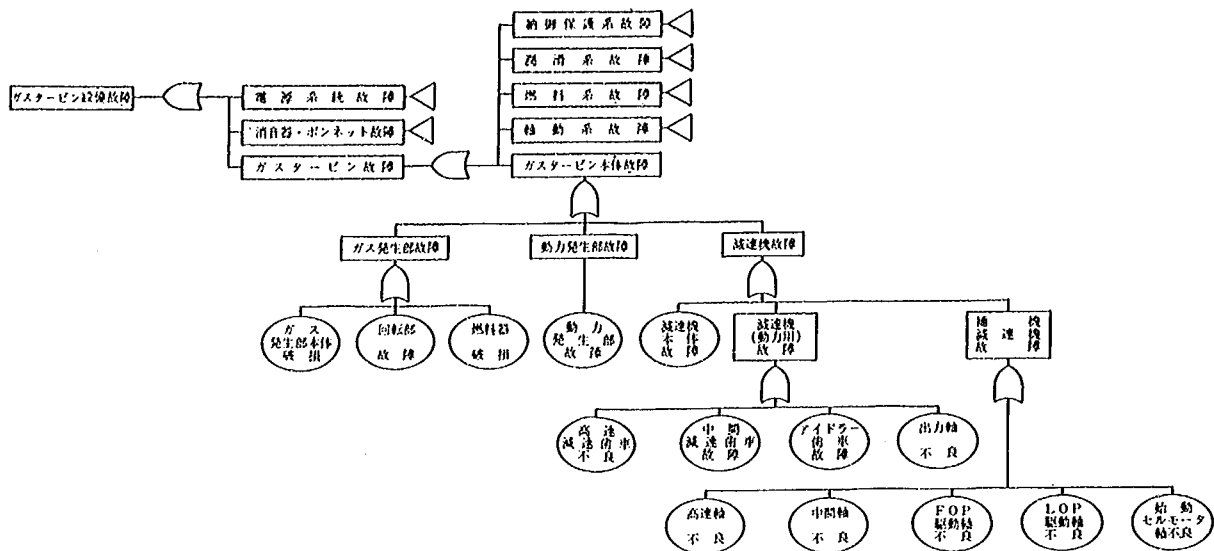
表-7.3.2 ガスタービンの構造

	一軸式ガスタービン	二軸式ガスタービン
エンジン本体	圧縮機1段+軸流タービン2段+減速機	[一軸式]+出力タービン(転り軸受)
燃料系	FOポンプ+調量弁+遮断弁+噴射弁	同左
点火系	蓄電池電源+エキサイター+点火栓	同左
制御系	回転数、燃料制御温度、回転保護系	同左(回転数は2軸から検出)
始動系	電気始動(DC24V)	同左(一軸よりは小容量)

故障データについては、新しい分野のため小部品レベルでの調査が困難なこと等から表-7.3.2の項目にしたがって調査した。調査回答が非常用発電機のみであったため排水機場と環境(特に湿度)が大きく異なるためこの補正を行なうほか、二軸式になることを考慮した補正を行って故障率を算定した。

ガスタービンのFT図は、表－ 7.3.2 の構成にしたがって図－ 7.3.4 に示すような組合せになる。故障率は(a)の図のレベルで扱うことになる。

また、ガスタービンを採用した場合のFT図については、単に原動機の部分の差替えにとどまらず、補機関係の修正などFT図全体の見直しが必要になる。このため、ガスタービンを採用したモデル排水機場について新たにFT図を作成した。



図－ 7.3.4 ガスタービンのFT図

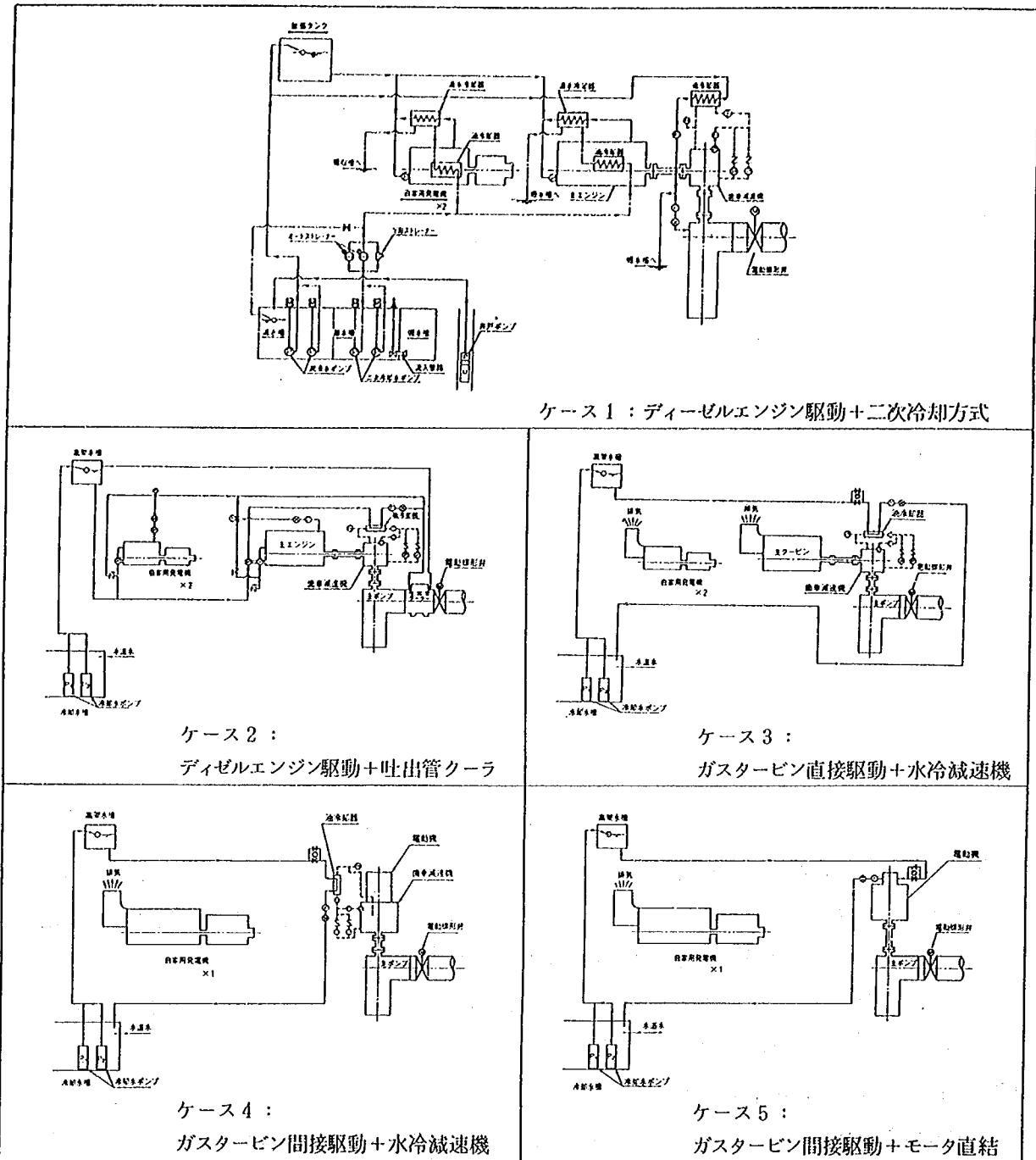
(2) 吐出管クーラ及びセラミックス軸受を使用した場合のFT図

現在、主ポンプの軸受に多く使われているカットレスベアリングは、注水の確認ができないとポンプが起動できず、潤滑用の水もきれいなものが要求される。そこで、小口径の軸受で実用化され始めているセラミックス軸受を採用して潤滑系統を簡素化することが提案されている。

これら冷却系統の組み替えについては、FT図の全体的な見直しが必要のため、省略可能な機器を抽出して、新たにFT図を作成した。

(3) 新技術を導入した排水ポンプ設備の構成

上記の組合せから、図－ 7.4.5 に示す5方式についてのFT図が作成された。



図ー 7.3.5 信頼性検討対象排水機場構成例

7.3.3 信頼性計算

各種の組合せにおける信頼性を効率よく計算したり、今後想定される新規排水機場の設計における信頼性検討などに対応するため、パソコンレベルで実用に耐える精度での計算可能なソフトウェアを開発した。⁶⁾FT図は故障の因果関係を表現するものであり、できる限り具体的かつ詳細な表現が望ましいが、パソコンレベルでの処理のため、本調査研究で対象としたFT図を対象に実用上必要となる3桁以上の精度を目標に開発した。

大型計算機による詳細な計算結果とパソコンによる簡略計算の結果については、ケース1の在来設計によるモデル排水機場について比較した。計算結果は表-7.3.3に示してあるとおり、3桁半以上の精度で詳細計算結果と整合していることから、実用上は十分な精

表-7.3.3 計算精度の比較例

計 算 対 象		簡略計算	詳細計算
始 動 失 敗		1.4046×10^{-5}	1.4046×10^{-5}
連続 運転 失敗	20時間	22.8088×10^{-5}	2.8092×10^{-5}
	50時間	7.0205×10^{-5}	7.0230×10^{-5}

度が確保されることが判明したことから、以降はこのパソコンによる計算ソフトによって信頼性の評価を行うこととする。

(1) サブシステムの寄与率

図-7.3.5に示した各機器構成について、サブシステムの寄与率を試算した結果を表-7.3.4に示す。吐出管クーラ等による冷却システムの簡素化が補助機器設備の寄与率低下に貢献し、ガスタービンの導入による機器の合理化が原動機の寄与率低下に貢献していることがわかる。

間接駆動による電気設備の寄与率の増加や、機器の合理化が機場全体の信頼性に及ぼす影響については、次に述べるアンアベイラビリティの計算結果を見る必要がある。

表-7.3.4 サブシステムの寄与率

ケース サブシステム	中 央					中央+機側操作					中央+機側修復操作				
	ケース1	ケース2	ケース3	ケース4	ケース5	ケース1	ケース2	ケース3	ケース4	ケース5	ケース1	ケース2	ケース3	ケース4	ケース5
主 ポ ン プ	1.3	1.2	1.6	1.9	2.0	2.5	2.2	2.9	2.3	2.5	3.6	2.6	3.0	2.4	2.6
減 速 機	3.8	4.6	6.5	9.8	3.3	7.1	8.8	11.5	11.8	4.1	10.2	10.4	12.2	9.8	4.3
ディーゼルエンジン	17.7	20.7	—	—	—	33.0	39.2	—	—	—	31.7	27.9	—	—	—
ガスタービン	—	—	8.9	—	—	—	—	11.4	—	—	—	—	12.1	—	—
吐 出 弁	2.7	3.2	4.4	5.1	5.5	5.0	6.0	7.9	6.2	6.7	7.3	7.1	8.3	6.7	7.1
電 気 設 備	30.4	37.9	45.4	44.7	48.0	10.9	13.9	29.3	50.7	55.0	15.7	16.5	31.2	54.6	57.9
補 助 機 器	34.2	20.2	16.2	18.8	20.1	23.1	6.8	6.1	5.3	5.7	4.7	8.1	0.9	0.7	0.8
除 塵 設 備	9.9	12.2	17.7	19.7	21.1	18.4	23.1	30.3	23.9	26.0	26.8	27.4	32.3	25.8	27.3

注) ケース4での電気設備には原動機用発電機、減速機には電動機をそれぞれ含む。

(2) アンアベイラビリティ

各運転モードにおける管理運転間隔、連続運転時間とアンアベイラビリティの計算結果は、表-7.3.5に示すとおりとなった。

また、冷却方式の合理化による効果及びガスタービンの採用による効果の試算結果でみる限りにおいては、冷却方式の合理化等による機器の簡素化が信頼性の向上に大きく貢献できることが指摘できる。

表7.3.5 排水ポンプのアンアベイラビリティ（始動失敗）

操作方式	管理運 転間隔	ディーゼルエンジン 二 次 冷 却	ディーゼルエンジン 吐出管クーラ	ガスタービン 直 接 駆 動	ガスタービン間接 水冷減速機	ガスタービン間接 モータ直結
中 央	14日	0.924×10^{-2}	0.742×10^{-2}	0.532×10^{-2}	0.459×10^{-2}	0.429×10^{-2}
	30	1.98	1.59	1.14	0.984	0.919
	90	5.94	4.77	3.42	2.95	2.56
	180	11.88	7.54	6.84	5.90	5.52
中央+機側	14日	0.495×10^{-2}	0.392×10^{-2}	0.298×10^{-2}	0.380×10^{-2}	0.349×10^{-2}
	30	1.06	0.84	0.637	0.814	0.748
	90	3.18	2.52	1.92	2.44	2.24
	180	6.36	5.03	3.83	4.89	4.49
中 央 + 機側修復	14日	0.341×10^{-2}	0.330×10^{-2}	0.281×10^{-2}	0.352×10^{-2}	0.332×10^{-2}
	30	0.73	0.71	0.602	0.754	0.711
	90	2.19	2.12	1.81	2.26	2.23
	180	4.38	4.25	3.61	4.53	4.27

表7.3.5 排水ポンプのアンアベイラビリティ（連続運転失敗）

操作 方式	連続運 転時間	ディーゼルエンジン 二 次 冷 却	ディーゼルエンジン 吐出管クーラ
中央	10 時間	0.14×10^{-2}	0.12×10^{-2}
	20	0.28	0.25
	30	0.43	0.37
	40	0.57	0.50
	50	0.71	0.62
中央 + 機側	10 時間	0.09×10^{-2}	0.08×10^{-2}
	20	0.18	0.17
	30	0.27	0.25
	40	0.36	0.33
	50	0.46	0.41
中央 + 機側 修復	10 時間	0.08×10^{-2}	0.08×10^{-2}
	20	0.16	0.17
	30	0.24	0.25
	40	0.32	0.33
	50	0.40	0.41

7.3.4 新技術導入効果の評価

ガスタービンについては部品点数が少ないことから、予測されたとおり、ディーゼルエンジンに比べて信頼性が高い結果となった。

また、いくつかの排水機場で半導体機器の誤動作が報告されているように、排水機場の環境の機器に及ぼす影響の程度は予測できない部分も多く、ビルに設置されている非常用発電機から予測した故障率の妥当性について今後追跡していくことによって、定量的な判定が可能になるものと思われる。

排水機場においてガスタービンを適用することについては、運転間隔が長いこと、常時は無人であることが多いことなどにより、排水機場のような劣悪な環境における信頼性を確認しながら、新しい選択として実績を積んでいく必要があると思われる。

構成機器の見直しについては、ケース1における「中央」と「中央+機側操作」についてのアンアベイラビリティが大きく違っていることから、主原動機の運転に対するインターロックの係っている機器を中心として整理、合理化することが設備全体の信頼成功上に貢献することが予測されていたが、実際、冷却系統を中心とした組み替えによって大きな効果を期待できることが指摘された。

ガスタービンについては、部品点数が少ない

ことから、ディーゼルエンジンに比べて信頼性の高いことが予測されたとおりであった。しかしながら高い信頼性の要求される原子力発電所における実績が日本では希有なことから、十分な整備に基づく限界的な信頼性ではディーゼルエンジンが優れているものと思われる。排水機場においては、運転間隔が長いこと、常時は無人であることが多いことなど限界に近い信頼性を維持することが現実的でないことから、本報告に示された実用レベルでの信頼性の範囲で選択することが現実的であろう。

(a) 中央操作始動失敗

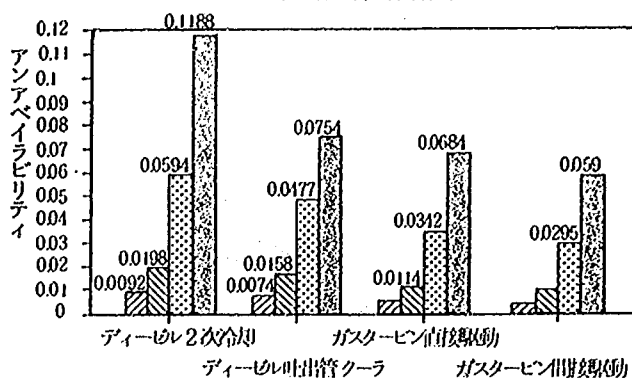
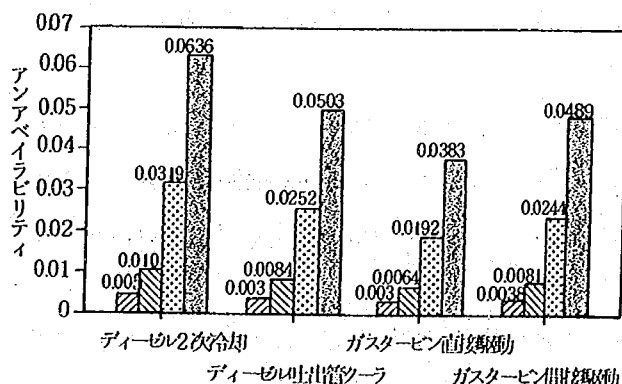


図-7.3.6 (1) 新技術の導入のアンアベイラビリティ

(b) 中央+機側操作始動失敗



(c) 中央+機側修復操作始動失敗

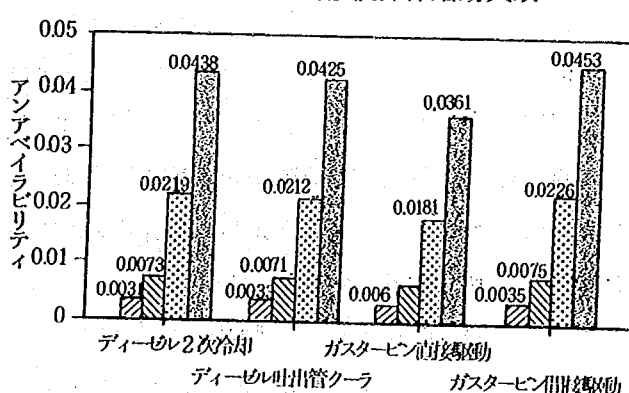


図-7.3.6(2) 新技術の導入のアンアベイラビリティ

また、図-7.3.6に示したとおり、中央操作による始動失敗ではガスタービン間接駆動が最も高いアンアベイラビリティを発揮している。しかし、機側での操作による故障の回避を行うようにすると、次第にこの差が縮まり、機側での修復操作が入ると更に縮まってくる。これをオペレータの側からみれば、その技量を生かせる部分の多さの差が現われたもので、何も判らないオペレータでは中央操作のような差になり、技量の高いオペレータでは機側修復の程度の差になることが定性的には言える。また、究極的な信頼性のレベルではなおディーゼルエンジンが優れているものの、今後の遠隔操作方式の導入、熟練オペレータの確保の難しさなどを考慮した場合に対応するには、究極の信頼性よりも修復操作無しでの信頼性を確保することが優先するケースもでてくるものと思われる。

8. ま と め

建設省が管理する機械設備を、その使用形態によって、排水ポンプ設備に代表される非常用系と、トンネル換気設備に代表される常用系とに分類し、それぞれの信頼性を定量的に評価する際に必要なアベイラビリティ尺度の構成方法、FTAの適用手法、信頼性データの収集およびこれらに基づく定量的な評価方法について研究結果を報告した。

これらの機械設備は様々な機器によってシステムが構成されているが、故障機器の種類、システムの中の位置づけあるいは故障モードによってシステムの目的に対する影響の度合が異なってくる。また、システムの目的や修復の仕方によっても、影響の度合が異なってくる。これらの現象をシステムティックに解析する手法としてFMEAによる手法を用いることとし、定量化についてはトップ事象をシステムの機能の喪失としたFT図を作成して数値解析を行った。

FTAにおいては、システムを構成する要素機器の故障がトップ事象とどの様に関わってくるのかを分析し、各機器の故障の発生頻度とこの関係の程度によって定量的にトップ事象の発生頻度を算出することとした。トップ事象（システムの目的が損なわれたことを表現する事象）については、システムの本来的な機能の喪失に設定することとし、排水ポンプ設備に関しては「内水排除機能の消失」とし、トンネル換気設備については「送（排）風機能の消失」とした。

ついで、各機器の故障とトップ事象との関係については、システムを構成する要素の故障から出発して、どの様な経路でその故障が上部要素に影響していくかを定性的に解析する手法であるFMEAを用いた。これを基に、トップ事象への各機器の故障の影響経路を総合的に表現するFT図を作成した。この解析に当たっては、現状に基づいてモデル設備を想定した。

故障率については、建設省が管理する排水ポンプ設備とトンネル換気設備を対象としてムフィールド調査を行い、各機器の故障率を求めた。なお、機器の設置環境の違いによって故障率が異なることが知られており、その程度が定量的に示されていることから、一般的な使用環境で収集されたデータを補正して利用することを行った。

これらの解析に基づいて、排水ポンプ設備とトンネル換気設備の信頼性（アベイラビリティ）を算出することができ、信頼性を効率的に確保する上でネックとなる機器故障の抽出と、それへの対応としての機器そのものの改善、あるいは機器構成の改善（簡素化）の提案とその効果の定量的な把握を行った。このように、信頼性の定量的な算定が可能になったことから、高信頼性設計、維持管理改善効果等が定量的に評価でき、この結果とコストとの比較検討が可能になった。また、信頼性への寄与率の高い機器について重点的に改善を加えるなど、効率的な改善方策の立案が期待できる。特に、いくつかの構成機器の故障がシステムの信頼性寄与率の多くを占めていることから、今後の改善のターゲットを絞ることができた。

しかしながら、本研究の分析では機器の故障をすべて偶発故障として扱っているのに対し、実際には、初期故障、偶発故障、摩耗故障の複合によって起きるのが一般的である。連続的に運転される機器で特に重要となる摩耗故障などのように故障率が時間に依存するものについても、寿命期間に起きる故障回

数を寿命期間で除する等の方法によって偶発故障と同列に扱うことも手続き的には可能なので、今後長期間にわたって故障データの蓄積を行ない、十分な件数のデータに基づいた見直しを行なう必要がある。

また、建設省が管理する排水機場の古いものには、設置されてから20年以上を経過しているものも少なくない。この期間における技術革新はめざましいものがあり、古い形のままで信頼性を維持しようとすると維持コストがかかり、機器を更新した方が有利な場合も想定される。このような場合の設備更新時期の見極めの根拠となる定量的な評価が望まれる。さらに、排水機場の設計におけるポンプの分割台数については、出水パターンに対応してスムーズな排水ができるようにしなければならない。このような場合に、分割によるメンテナンスコスト、イニシャルコストの増大と分散による信頼性向上を定量的に評価することによって、最適分割台数を算出できる可能性がある。

システムが十分に機能を発揮することを目的とした設計、維持・管理については、本研究で行ったような故障解析が従来行われており、建設省が管理する機械設備に対して適用することによって効果的な設計と維持を実現できることが示された。しかし、排水ポンプ設備のように、建設省が管理する機械設備には、たとえその設備の一部が破壊されても限界までその機能を発揮することが要求されることがある。そこで、従来の故障か停止かの2状態に分ける表現に代わって、システムの一部が故障しても部分的に機能を継続していくような場合も評価することが必要になってくる。そこで、実行された仕事がどの程度正しく行われているかを明らかにするための品質を示すものとしてDEPENDABILITY（機能に関する信頼性）がRELIABILITY（作動に関する信頼性）の代わりに使われつつあるようである。従来の信頼性が故障を避けることを目的としているのに対し、このような考え方の中では、故障をある程度容認しその影響を最小限にすることに努力することになる。特に、今後想定されるプログラマブルコントローラや遠隔操作における電子化においてその信頼性を確保するには、その使用環境が非常に過酷であることを考慮すると、このようなフォールトトレランスの手法を取り入れていくことが必要と考える。また、機械設備においても、運転に対する要求の程度（出水の状況）に応じて、回復可能な範囲で故障をおして運転できるシステム設計といった形で、フォールトトレランスの考え方を取り入れることによってより合理的かつ頼れる（DEPENDABLE）設備とすることが可能になろう。

あ　と　が　き

近年、スペースシャトルや原子力発電所の事故等があり、大規模機械設備などの信頼性に対する関心は増々高まっている。これらの信頼性（安全性）は、徹底したフィールドデータの収集など、長期にわたる地道な作業と信頼性工学の導入などにより確保されているものであり、本調査研究を進める上でも参考とする必要がある。

本調査研究は、建設省技術研究会指定課題「機械設備の信頼性評価に関する調査研究」として、北海道開発局・各地方建設局の機械課、設備を管理している工事事務所および技術事務所と共同して行ったものをもとに実施した。調査方法などに一部不徹底がみられたものの、所期の成果は十分得られたものとする。ここで、本調査研究のとりまとめに携わった担当者の方々にお礼申し上げる。

言うまでもなく、排水ポンプ、河川用ゲート、ダム用ゲートやジェットファンなどの機械設備は河川、ダム、道路を管理する上で非常に重要な役割を果たしているものであり、その信頼性を確保するための調査、研究であることを再認識し、今後も地道に、データ収集を継続し、より合理的な機械設備の設計、維持管理手法の確立を旨とす考えである。

最後に本調査研究を進める上でご協力ご指導いただいた方々に厚く感謝の意を表わします。

参 考 文 献

- (1) 高木, 塩見, 市田他 / 信頼性工学講座 1 ~ 5 / 東京電気大学出版局
- (2) 塩見 / 信頼性工学入門 / 丸善
- (3) 機械系信頼性部会 / FMEA・FTAの解説 / 日科技連
- (4) 菅野 / 保全と信頼性 / 日本機械学会誌 Vol. 74, No. 633.
- (5) 米納, 中村他 / 原子力発電所の予防保全活動 / 日立評論 Vol. 64, No. 8.
- (6) 小川原, 高見他 / システムの信頼性設計手法の開発 / 三菱重工技報 Vol. 18, No. 2.
- (7) IEEE-Std-500 / 米国電気・電子学会
- (8) 沢田, 太田, 前田 / 揚排水ポンプ設備保全実態調査報告書 (第1報) / 土研資料1842号
- (9) 伊藤, 太田, 前田 / 揚排水ポンプ設備保全実態調査報告書 (第2報) / 土研資料2031号
- (10) 建設省 / 機械設備の信頼性評価に関する調査研究 / 第38回建設省技術研究会論文集
- (11) 建設省 / 機械設備の信頼性評価に関する調査研究 / 第39回建設省技術研究会論文集
- (12) 建設省 / 機械設備の信頼性評価に関する調査研究 / 第40回建設省技術研究会論文集
- (13) 近藤 / 安全を設計する / 講談社
- (14) 向殿 / フォールト・トレラント・コンピューティング (Maruzen Advanced Technology <電子・情報・通信編>) / 丸善
- (15) 長, 樋下, 村松, 多田, 大沢, 斉藤 / 機械設備の信頼性評価に関する調査資料集 / 土木研究所部内資料第56号
- (16) Everett L. Welker, et al. / Estimating the Exponential Failure Rate from Data with No Failure Events

(1) 定量化の基本則(論理演算)

F T Aは定性的解析手法として大いに有用であるが、さらに基本事象の発生確率が既知または推定できるときは、論理ゲートの示す確率計算法則を用いてトップ事象の発生する確率を求めることができる。

F T Aは次の2つの仮定が前提となっている。

- ① 各事象は正常と異常の2つの状態しか取り得ない。すなわち互いに排反である。
- ② 基本事象は相互に独立である。

しかし実際には同じF T図の中に、

- ① 外部からの強制ストレスによって複数個の基本事象が同時に発生する場合
- ② ひとつの故障が環境ストレスを変動させて他の故障を発生し易くする場合

などのように基本事象が相関を持つ場合もあり、独立性を仮定して得られる量と実際と相違がでてくる原因ともなる。

F T図に描かれたロジック・ダイアグラムを定量化するにはまずブール代数(Boolean Algebra)による論理演算を行う。ブール代数は、以前はリレー回路、最近では特に電子計算機回路の発達とともに、その設計に有用な手法として発達してきたが、その基本は集合論に発している。したがって集合の結び(和集合)と交わり(積集合)とについては、ちょうど代数における四則演算のような基本法則が、ブール代数にも存在する、この基本法則を次に示す。

要素 x , y , z が属する集合がブール代数であれば、ブール変数について次の式が成立する。

- Ⓐ 交換律 $x + y = y + x$, $xy = yx$
- Ⓑ 結合律 $x + (y + z) = (x + y) + z$, $x(yz) = (xy)z$
- Ⓒ 吸収律 $x(x + y) = x$, $x + xy = x$
- Ⓓ 分配律 $x(y + z) = xy + xz$
- Ⓔ べき等律 $x + x = x$, $xx = x$
- ① 相補性 $x + \bar{x} = 1$, $x\bar{x} = 0$
- Ⓖ ドゥ・モルガンの定理

$$x + y = \overline{\overline{x}\overline{y}}, \quad xy = \overline{\overline{x} + \overline{y}}$$

(2) 計算方法(確率演算)

基本事象が独立であって、その故障モードのデータが発生確率で与えられると、ANDゲート、ORゲートの出力はそれぞれ、

ANDゲートの出力

Prob{A発生およびB発生}

$$\Pr(A \cap B) = \Pr(A/B) \cdot \Pr(B) \quad (\text{参-1})$$

$$= \Pr(B/A) \cdot \Pr(A) \quad (\text{参-2})$$

ORゲートの出力

Prob{A発生またはB発生}

$$\Pr(A \cup B) = \Pr(A) + \Pr(B) - \Pr(A \cap B) \quad (\text{参-3})$$

の形で与えられる。ところで入力事象AとBは互いに独立であるから、
(参-1), (参-2)式の条件付確率は、

$$\Pr(A/B) = \Pr(A), \Pr(B/A) = \Pr(B)$$

となるので、

$$\Pr(A \cap B) = \Pr(A) \cdot \Pr(B) \quad (\text{参-4})$$

また(参-3)式は、

$$\Pr(A \cup B) = \Pr(A) + \Pr(B) - \Pr(A) \cdot \Pr(B) \quad (\text{参-5})$$

もし、 $\Pr(A)$, $\Pr(B)$ が0.1以下であるならば、(参-5)式は近似的に

$$\Pr(A \cup B) = \Pr(A) + \Pr(B) \quad (\text{参-6})$$

これらの関係は入力が n 個になっても成立する。

したがって、一般に

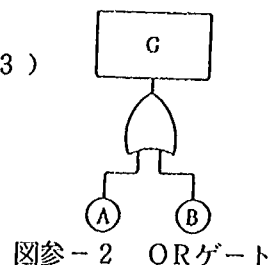
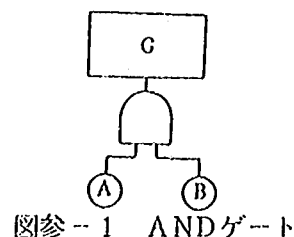
ANDゲート	⇨	入力事象の発生確率の積
ORゲート	⇨	入力事象の発生確率の和 (ただし各確率の値は0.1以下)
制止ゲート	⇨	入力事象と条件事象の発生確率の積

として計算することが多い。

なお、基本事象の発生確率として、確率過程で示される故障の発生確率である不信頼度やアンアベイラビリティ(またはアベイラビリティ)尺度の決定には、解析の対象としたシステムの使命を念頭に置いた充分な検討が必要となる。

(3) 計算例

F T図の枝に同一の事象が複数回またがって現れることがなければ、(1)の論理演算は形式的には不要となり、(2)の確率演算のみ行えば十分であるが、一般には同一事象が複数の枝にまたがって出現することが多い。この時は、F T図の簡素化、計算の効率化に、ブール代数による論理演算が不可欠となる。



このような場合の例として図参-3に示す簡単なFT図を考えることとする。出力事象の発生確率 a を求めるには、まずブール代数による論理演算を行なう。始めに、

$$\begin{array}{l} b = w + x \\ c = w + y \end{array} \quad \left. \vphantom{\begin{array}{l} b = w + x \\ c = w + y \end{array}} \right\} \text{ORゲート}$$

次に、

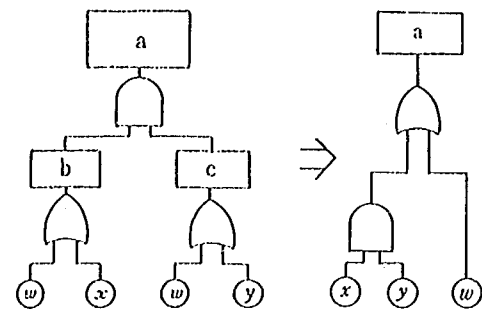
$$\begin{aligned} a &= b \cdot c && \text{ANDゲート} \\ &= (w + x)(w + y) \\ &= w \cdot w + w \cdot x + w \cdot y + x \cdot y && (\text{参-7}) \end{aligned}$$

この式をブール代数の基本則(1)①~⑧参照)で変換すると、

まず、 $w \cdot w = w$ (べき等律) $\therefore w + w x + w y + x y$

また、 $w + w x = w$ (吸収率) $\therefore w + w y + x y$

さらに、 $w + w y = w$ (吸収率) $\therefore w + x y$ (参-8)



図参-3 FT図の例

したがって(参-7)式は、論理演算により

$$a = w + x y \quad (\text{参-9})$$

という形に帰着する。

つぎに、式(参-9)に基き確率演算を行う。いま基本事象の発生の確率を、簡単のために $Pw = Px = Py = 0.01$ として図参-1のトップ事象 a の発生確率を計算してみると、

$$Pa = Pw + Px \cdot Py = 0.0101 \quad (\text{参-10})$$

として、トップ事象の発生確率が求められる。

第38～40回建設省技術研究会共通部門指定課題

「機械設備の信頼性評価に関する調査研究」とりまとめ担当者名簿

所 属	官 職	氏 名	担 当 期 間
東北地方建設局道路部機械課	課 長 補 佐	斎 恒 夫	59. 4～60. 7
	〃	石 澤 利 雄	60. 8～61. 6
	〃	丹 野 光 正	61. 6～62. 3
	業務第一係長	山 崎 晃	59. 4～61. 3
	〃	深 堀 哲 男	61. 4～62. 3
	技 官	高 堰 政 美	59. 4～60. 3
	〃	吾 妻 武	60. 4～62. 3
	課 長	岩 本 忠 和	60. 4～61. 2
	〃	板 橋 新 一	61. 3～62. 3
	設 計 係 長	高 橋 則 夫	60. 4～61. 3
東北地方建設局東北技術事務所工作課	〃	遠 藤 糾	61. 4～62. 3
	技 官	井 上 秀 秋	60. 3～61. 3
	〃	佐 藤 孝 志	61. 4～62. 3
	課 長 補 佐	大 塚 正 二	59. 4～61. 9
	〃	小 佐 部 憲 憲	61.10～62. 3
	整 備 係 長	橋 本 正 一	59. 4～61. 3
	〃	金 丸 孝 行	61. 4～62. 3
	技 官	星 野 剛	59. 4～60. 5
	〃	須 田 幸 彦	59. 4～62. 3
	〃	林 輝	61. 5～62. 3
関東地方建設局道路部機械課	〃	小 檀 基 住	61. 5～62. 3
	課 長	鈴 木 康 三	59. 4～61. 3
	〃	村 松 貞 雄	61. 4～62. 3
	管 理 係 長	中 村 優	59. 4～60. 3
	〃	小 笠 原 保	60. 4～62. 3
	技 官	小 林 晃 市	60. 4～61. 3
	〃	保 坂 賢 二	61. 4～62. 3
	課 長 補 佐	布 目 健 三	59. 4～61. 3
	〃	竹 島 隆 夫	61. 4～62. 3
	整 備 係 長	中 森 良 次	59. 4～62. 3
北陸地方建設局道路部機械課	課 長	村 松 敏 光	59. 6～62. 3
北陸地方建設局北陸技術事務所機械課	課 長		

所	属	官 職	氏 名	担 当 期 間
北陸地方建設局北陸技術事務所機械課		設 計 係 長	高 木 茂	60. 4 ~ 62. 3
中部地方建設局道路部機械課		課 長 補 佐	山 口 義 一	59. 4 ~ 62. 3
		業務第一係長	丸 山 崇 明	59. 4 ~ 60. 3
		"	安 江 規 尉	60. 4 ~ 62. 3
		技 官	桜 田 明 彦	59. 4 ~ 62. 3
中部地方建設局中部技術事務所		建 設 専 門 官	駒 田 尚 一	60. 4 ~ 61. 3
中部地方建設局中部技術事務所機械課		課 長	宮 島 義 敏	61. 4 ~ 62. 3
		機械調査係長	余 語 学	60. 4 ~ 61. 3
		"	中 原 公 行	61. 4 ~ 62. 3
		技 官	相 羽 学	60. 4 ~ 62. 3
近畿地方建設局道路部機械課		課 長 補 佐	村 田 良 太 郎	59. 4 ~ 60. 11
		"	瀬 野 尾 勝	60. 12 ~ 62. 3
		整 備 係 長	高 津 敏 夫	59. 4 ~ 60. 11
		"	工 藤 良 範	60. 12 ~ 61. 11
		"	八 尾 正 勝	61. 12 ~ 62. 3
近畿地方建設局近畿技術事務所機械課		課 長	池 田 敏 男	59. 4 ~ 62. 3
		整 備 係 長	岡 田 輝 男	59. 4 ~ 60. 3
		機械設計係長	横 江 重 行	60. 4 ~ 62. 3
		技 官	加 藤 義 紀	59. 4 ~ 60. 3
		"	脇 本 吉 庸	60. 4 ~ 61. 3
		"	赤 坂 雅 章	61. 4 ~ 62. 3
中国地方建設局道路部機械課		課 長 補 佐	須 田 哲 郎	59. 4 ~ 61. 3
		"	沖 田 正 臣	61. 4 ~ 62. 3
		業 務 係 長	中 井 登	59. 4 ~ 60. 3
		"	片 岡 孝 次	60. 4 ~ 62. 3
		技 官	大 久 保 勝 也	59. 4 ~ 60. 3
		"	玉 田 一 雄	60. 4 ~ 61. 3
		"	宮 武 英 信	61. 4 ~ 62. 3
中国地方建設局中国技術事務所機械課		課 長	橋 本 勝 美	60. 4 ~ 62. 3
		機械設計係長	田 口 尚 武	60. 4 ~ 62. 3
四国地方建設局道路部機械課		課 長 補 佐	深 川 寿 夫	59. 4 ~ 61. 6
		"	喜 多 良 男	61. 7 ~ 62. 3
		整 備 係 長	須 田 道 夫	59. 4 ~ 61. 6

所 属	官 職	氏 名	担 当 期 間
四国地方建設局道路部機械課	整 備 係 長	尾 崎 宏 一	61. 7 ~ 62. 3
	技 官	宮 本 正 司	59. 4 ~ 60. 3
	"	鎌 田 勝 美	60. 4 ~ 62. 3
	四国地方建設局四国技術事務所機械課	山 崎 正 人	59. 4 ~ 60. 10
		喜 多 良 男	60. 11 ~ 61. 6
		須 田 道 夫	61. 7 ~ 62. 3
		宇 和 川 仁	59. 4 ~ 60. 10
	機 械 設 計 係 長	岩 沢 委 式	60. 10 ~ 62. 3
	"	二 川 義 人	59. 4 ~ 61. 3
	技 官	市 原 道 弘	61. 4 ~ 62. 3
九州地方建設局道路部機械課	課 長 補 佐	中 島 甲 子 郎	59. 4 ~ 61. 3
	"	鹿 野 浩 利	61. 4 ~ 62. 3
	整 備 係 長	村 上 晃	59. 4 ~ 60. 3
	"	酒 見 金 剛	60. 4 ~ 61. 3
	"	坂 井 芳 晴	61. 4 ~ 62. 3
	技 官	田 上 幸 雄	59. 4 ~ 60. 3
	"	牧 野 千 代 春	59. 4 ~ 61. 10
	"	永 溝 茂	61. 4 ~ 61. 10
	"	榎 田 昭 二	59. 4 ~ 61. 3
	"	福 留 泰 男	61. 4 ~ 62. 3
九州地方建設局九州技術事務所機械課	課 長	平 嶋 正 明	59. 4 ~ 61. 3
	"	青 木 昭 生	61. 4 ~ 62. 3
	整 備 係 長	石 井 開	59. 6 ~ 62. 3
	開 発 専 門 官	吉 田 隆 郎	60. 4 ~ 61. 3
北海道開発局長官房機械課	"	村 上 昭 治	61. 4 ~ 62. 3
	設 計 係 長	本 谷 浩	60. 4 ~ 62. 3
	課 長 補 佐	大 平 善 男	59. 4 ~ 60. 8
	"	北 川 原 徹	60. 9 ~ 62. 3
	計 画 係 長	村 松 敏 光	59. 4 ~ 59. 6
	"	吉 田 正	59. 7 ~ 62. 2
	補 助 係 長	染 谷 晃	59. 4 ~ 61. 3
	"	橋 本 正 一	61. 4 ~ 62. 3
建設経済局建設機械課			

機械設備の信頼性評価に関する
調査研究

ISSN 0386-5878
土木研究所資料 第2870号
平成2年3月(1990)

長 健 次, 樋 下 敏 雄, 村 松 敏 光
多 田 和 弘, 大 沢 昭 弘, 齊 藤 英 晴

要旨：河川管理施設や道路管理施設の中で重要な役割を担っている機械設備のより確
実な機能確保を目的として、信頼性工学を導入してこれら機械設備の信頼性を定量的
に評価する手法の開発を行ったものである。定量的評価に基づく、計画、設計、維持、
管理の合理的な実施方法や、新技術の導入の信頼性向上効果の評価を行った。

キーワード：機械設備, FMEA, FTA, 信頼性工学, 設計, 維持・管理, 新技術

郵便はがき

305.□□

41円切手
をはって
下さい。

建設省土木研究所

機械施工部機械研究室 御中

茨城県つくば市大字旭一番地

No. 8

○

土木研究所資料第 2870号 部

上記のとおり受領しました。

所 属 (住所)

氏 名

印