河川ポンプ設備の信頼性と経済性を考慮したマネジメント手法に関する研究

藤野　健一[1)]　田中　義光[2)]　山元　弘[3)]　林　輝[4)]　河北　憲治[5)]

Research of Management Methods of River Pumping Systems That Consider the Reliability and Economic Properties

Kenichi FUJINO, Yoshimitsu TANAKA, Hiroshi YAMAMOTO, Akira HAYASHI, Kenji KAWAKITA

要旨

1960 年代以降、社会資本として急速に整備が進められた様々な機械設備は、現在老朽化が進行しつつある。一方、河川事業費に占める維持管理費の割合は、平成 18 年度現在で約 1/4 に及ぶが、近年の経済情勢を踏まえ予算を増やせないのが実情である。河川ポンプ設備は、国民の生命・財産を守るために非常に重要な設備であることから、信頼性の確保と増大する維持管理費の縮減が大きな課題になっている。本研究は、河川ポンプ設備を対象として、これまでの点検や修理に関するデータを基に、維持管理費と設備の信頼性を解析し、維持管理の方法と設備の信頼性の関係を明かにし、信頼性と経済性を考慮した効果的な維持管理手法を提案するものである。また、設備の長期的な管理に必要となるデータベースシステムのデータ項目と機能を提案する。

キーワード：ポンプ設備、FMEA、FTA、信頼性、維持管理、データベース

Synopsis

Various machine plants that have been set up as an infrastructure since the 1960's are aging, causing higher risk of system failure and cost of operation and maintenance a social issue. On the other hand, the proportion of the administrative and maintenance expense in the river business expense is about 1/4 in fiscal year 2006. However, it is not possible to increase a budget from the economic climate in recent years. This research proposes an effective maintenance technique for improving the reliability of the river pumping systems within limited budget. Based on data on the current inspection and repair, administrative and maintenance expense and reliability of facilities is analyzed and the relation between the method of maintenance and the reliability of facilities is clarified. It also proposes items in the database necessary for long term management of pumping systems as well as application of it.

Key Words: Pumping Systems, FMEA, FTA, Reliability, Maintenance-Management, Database

1) 独立行政法人土木研究所 技術推進本部 先端技術チーム 主席研究員
2) 独立行政法人土木研究所 技術推進本部 先端技術チーム 主任研究員
3) 前 独立行政法人土木研究所技術推進本部 先端技術チーム 主席研究員 (現 国土交通省 近畿地方整備局)
4) 前 独立行政法人土木研究所 技術推進本部 先端技術チーム 総括主任研究員 (現 国土交通省 関東地方整備局)
5) 前 独立行政法人土木研究所 技術推進本部 先端技術チーム 主任研究員 (現 株式会社 酉島製作所)

河川ポンプ設備の信頼性と経済性を考慮したマネジメント手法に関する研究

目　　次

１．序論 …… 1
　１．１　研究の背景と目的…… 1
　１．２　河川ポンプ設備…… 3
　１．３　河川ポンプ設備の設置実態…… 3
　１．４　達成目標…… 5

２．研究の基本方針…… 5
　２．１　基本方針の概要…… 5
　２．２　維持管理情報の整理手法検討…… 5
　２．３　FMEA 及び FTA の実施手法検討 …… 5
　２．４　信頼性と経済性の評価手法の検討…… 6
　２．５　維持管理費縮減手法の提案…… 6

３．FMEA 及び FTA …… 6
　３．１　FMEA の概要…… 6
　３．２　FTA の概要 …… 7

４．維持管理情報の整理手法…… 13
　４．１　河川ポンプ設備の維持管理の概要…… 13
　４．２　維持管理情報の種類…… 13
　４．３　維持管理情報の収集…… 14
　４．４　信頼性に関する情報の整理結果…… 17
　４．５　経済性に関する情報の整理結果…… 23

５．FMEA の実施…… 27
　５．１　実施手順…… 27
　５．２　対象機器の抽出…… 28
　５．３　実施事例…… 28

６．FTA の実施 …… 32
　６．１　実施手順…… 32
　６．２　実施事例…… 34

７．信頼性と経済性の評価手法…… 39
　７．１　アンアベイラビリティによる点検効果の評価…… 39
　７．２　信頼性と経済性の評価…… 39

８．維持管理費縮減手法の提案…… 40
　８．１　状態監視保全技術の検討…… 40
　８．２　主軸振動解析…… 41
　８．３　潤滑油分析による状態監視…… 44

９．維持管理への提言…… 47
　９．１　データ収集事例から…… 47
　９．２　信頼性確保とコスト縮減…… 49

１０．結論…… 51

1．序論

1.1　研究の背景と目的

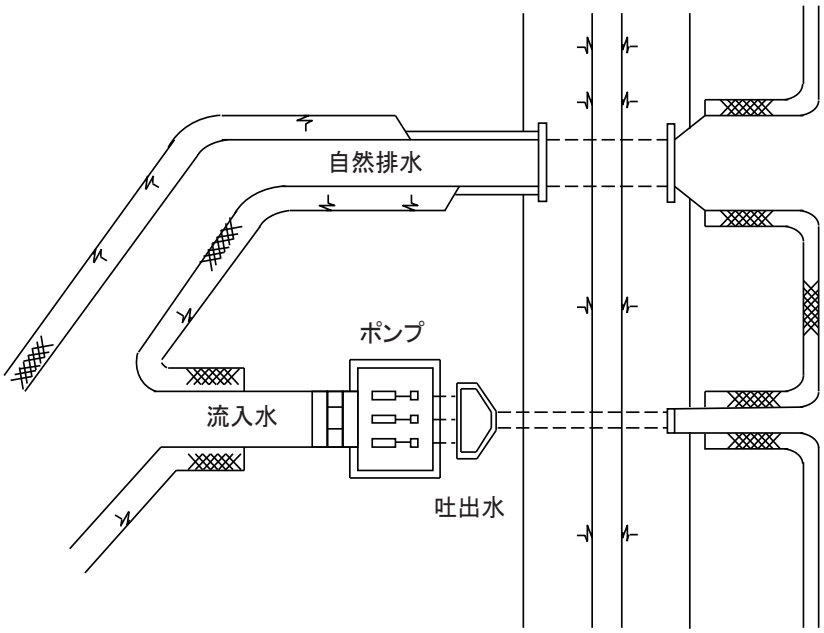
近年、我が国においては、地球温暖化に伴う激しい集中豪雨や巨大な台風の襲来が懸念されており、大規模な出水が発生した場合でも水害を最小限に抑えるために河川堤防、ダム等河川管理施設の整備が進められている。排水機場は、内水を河川へ排水するための重要な河川管理施設であり、排水機場に設置される河川ポンプ設備は、確実に稼働することで内水排除を行う非常用設備である。低地に人口や資産が集中している日本においては、河川堤防が整備された地域においても、内水被害を低減するポンプ設備の役割は特に大きい。

国民が安全で安心できる暮らしを実現し、それを維持していくためには、社会環境の変化に見合った河川管理施設の整備と、全ての河川管理施設が充分に本来の役割を果たし続けることが不可欠である。

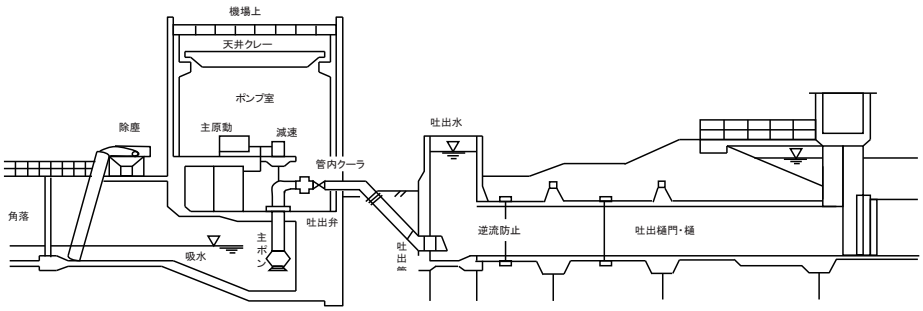
水害を防止する観点では、前述のとおり河川ポンプ設備の役割は非常に重要である。また、頻繁に運転していなくても必要とされるときに必ず稼働しなければならないという点で、民間企業が効率を求めた管理を行う工場等のポンプ設備とは性格を異にしている。

しかしながら、1960 年代以降排水ポンプやゲート等の機械設備が急速に整備されてきたため、近年では老朽化した設備も多くなっており、今後更新費や維持管理費が増大していくものと予想される。従って、既存設備の維持管理においては、①要求される信頼性を充分に確保し、②効果的かつ効率的な点検・整備・更新を実施し、経済性を追求しなければならない、という２つの課題を抱えている。

国土交通省では、有識者を交えた「河川ポンプ設備の効率的な維持管理・更新手法の検討会」を設置し、その



平面図



断面図

図 1-1　排水機場の構造図

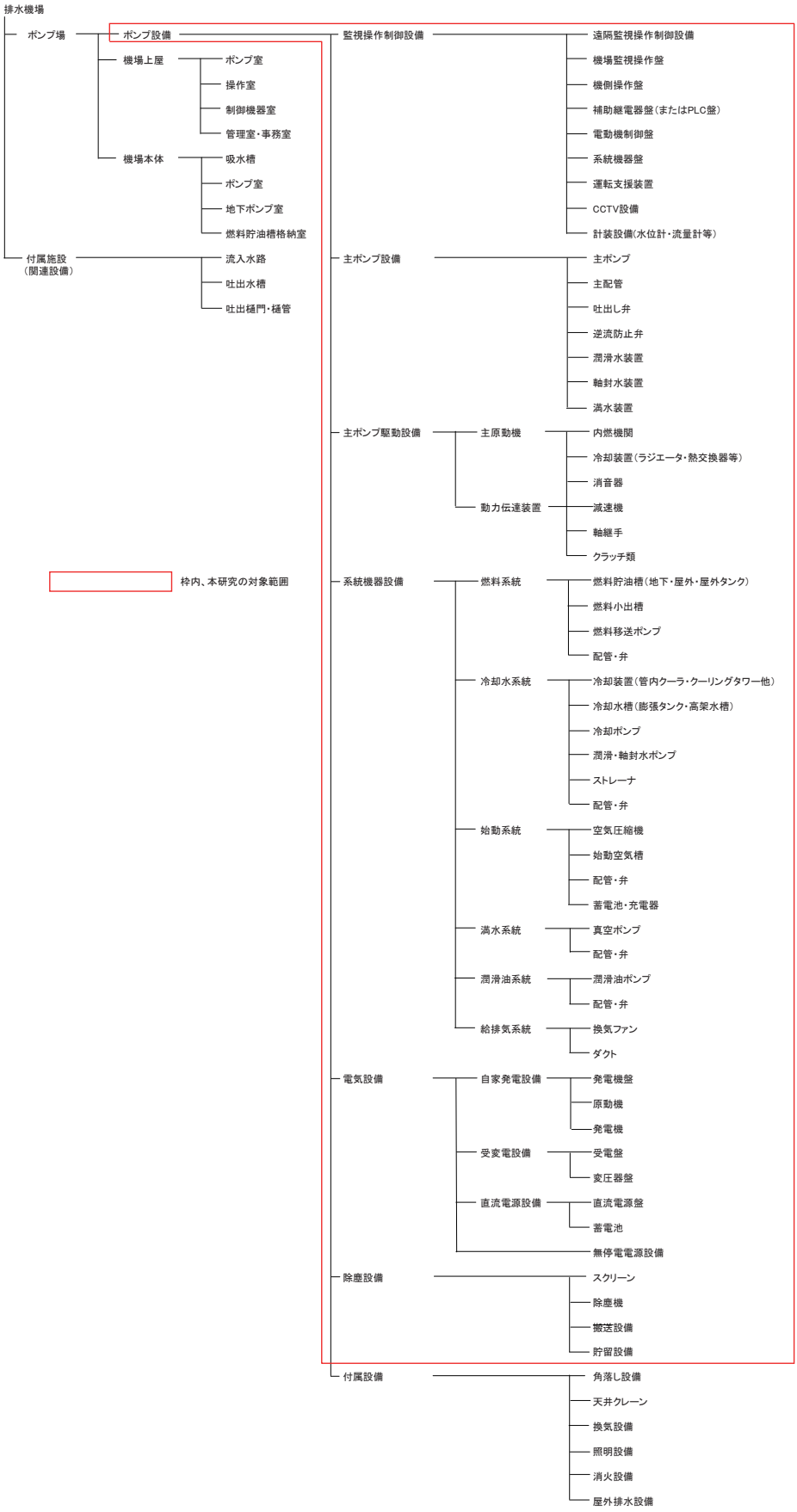

排水機場
ポンプ場
ポンプ設備
機場上屋
ポンプ室
操作室
制御機器室
管理室・事務室
機場本体
吸水槽
ポンプ室
地下ポンプ室
燃料貯油槽格納室
付属施設
（関連設備）
流入水路
吐出水槽
吐出樋門・樋管
枠内、本研究の対象範囲
監視操作制御設備
遠隔監視操作制御設備
機場監視操作盤
機側操作盤
補助継電器盤（またはPLC盤）
電動機制御盤
系統機器盤
運転支援装置
CCTV設備
計装設備（水位計・流量計等）
主ポンプ設備
主ポンプ
主配管
吐出し弁
逆流防止弁
潤滑水装置
軸封水装置
満水装置
主ポンプ駆動設備
主原動機
内燃機関
冷却装置（ラジエータ・熱交換器等）
消音器
動力伝達装置
減速機
軸継手
クラッチ類
系統機器設備
燃料系統
燃料貯油槽（地下・屋外・屋外タンク）
燃料小出槽
燃料移送ポンプ
配管・弁
冷却水系統
冷却装置（管内クーラ・クーリングタワー他）
冷却水槽（膨張タンク・高架水槽）
冷却ポンプ
潤滑・軸封水ポンプ
ストレーナ
配管・弁
始動系統
空気圧縮機
始動空気槽
配管・弁
蓄電池・充電器
満水系統
真空ポンプ
配管・弁
潤滑油系統
潤滑油ポンプ
配管・弁
給排気系統
換気ファン
ダクト
電気設備
自家発電設備
発電機盤
原動機
発電機
受変電設備
受電盤
変圧器盤
直流電源設備
直流電源盤
蓄電池
無停電電源設備
除塵設備
スクリーン
除塵機
搬送設備
貯留設備
付属設備
角落し設備
天井クレーン
換気設備
照明設備
消火設備
屋外排水設備

図 1-2　設備構成

成果を平成19年3月に「河川ポンプ設備点検・整備・更新検討マニュアル(案)」(以後、「検討マニュアル」という)としてとりまとめ、平成20年4月より施行している。当該マニュアルでは、ポンプ設備毎に、設備の有する社会的な影響度、使用及び経年で変化する健全度、仕様と社会的要求の適合性などを総合的に評価し、点検、整備、更新を適切に実施する方策を示した。これによって、一部で画一的な水準で行われていた維持管理を脱却し、設備の機能、目的、状態に合わせた効率的な維持管理をめざすものである。

信頼性の確保と経済性の追求は、一般的には相反事項であるため、これまでの実績から信頼性と経済性の関係を把握し、それを判断指標として活用しながら具体的な点検内容、整備・更新時期を決定するマネジメント手法が必要である。

このような状況に鑑み、本研究は「情報管理」、「信頼性評価」、「経済性管理」の視点で区分した河川ポンプ設備のマネジメント手法を提案・確立することを目的として実施した。

1.2　河川ポンプ設備

排水機場は、河川や水路の流水を本川の堤防を横断して排水するための施設であり、揚排水ポンプ設備技術基準(案)同解説において、図1-1のように設置事例が示されている。

図1-1の例は、主ポンプの回転軸が垂直に設置される「立型」ポンプで、主原動機の出力軸から直交減速機を介して主ポンプに動力が伝えられる。図1-1は吐出管が鋳鉄管(一部鋼管を用いる場合もある。)で造られる一般的な構造であり、ポンプの羽根車は吸水槽において運転水位以下にある。吐出管口径が2000㎜を超える大型ポンプでは、ケーシングをコンクリート構造にする場合が多い。一方、主原動機の出力軸から遊星歯車減速機等を介してそのまま主ポンプに連結する横軸ポンプもある。横軸形式は、主ポンプ設備と主ポンプ駆動設備（原動機及び減速機）を同一床盤に設置でき、土木構造も簡素化されるが、羽根車が吸水位より上にあるため、真空ポンプなどの満水系統を備え、運転開始時にケーシング内を充水する必要がある。

ポンプ本体の形式は、軸流、斜流、渦巻などが河川ポンプ設備には使用されており、一般的には揚程と吐出量を勘案して決定されている。

河川ポンプ設備は、揚排水機場及び浄化施設に設置されるポンプ設備の総称であるが、本研究では主に排水機場に設置されるポンプ設備を対象とするものとする。河川ポンプ設備の構成は、「河川ポンプ設備技術基準(案)同解説」において、図1-2に示すとおり明記されている。排水運転に直接関与しない付属設備を除く、監視操作制御設備、主ポンプ設備、主ポンプ駆動設備、系統機器設備、電源設備、除塵設備が対象設備となる。

1.3　河川ポンプ設備の設置実態

本項では、本研究の目的を裏付ける根拠として河川ポンプ設備の設置実態を示し、懸念される設備の老朽化と、今後予想される維持管理費の増大についてまとめる。

図1-3は、国土交通省が2008年度末現在でまとめた直轄管理の排水機場設置実態である。

排水機場は、1960年代後半から急速に設置数が増え、1980年に年間20機場を超えピークを迎えた。1980年代後半から、多様な出水に対応するため可搬式水中ポンプを用いる救急排水ポンプ設備が導入されるようになり、1990年代は通常の排水機場設置数は減少傾向にあった。しかし、近年の出水被害に鑑み、2000年代前半に排水機場の設置数は再びピークを迎えている。

また、1960年代から整備されてきた排水機場の設備は、1990年代頃から老朽化が指摘されるようになっており、今後維持管理費の増大が予測される。

図1-4は、直轄管理の河川維持管理費実績の推移と、今後増大する設置後30年以上になる老朽化施設数の予測を表したものである。現状において、老朽化施設は既に4000施設弱に及び、年間1000億円近い維持管理費を要しているが、今後20年間でさらに老朽化施設は確実に増大する。

国土交通省では、河川ポンプ設備と河川ゲート設備を対象として、平成21年から施行している検討マニュアルの運用を推進することで維持管理費を圧縮したい考えである。具体的には、設備の社会的影響度を勘案した維持管理内容・優先順位の設定と、適切な健全度評価を各設備毎に行う状態監視保全の導入によって、信頼性を低下させずに寿命の延長も図っていかなければならない。本研究では、検討マニュアルの運用に資することができる具体的なマネジメント手法を提案する。

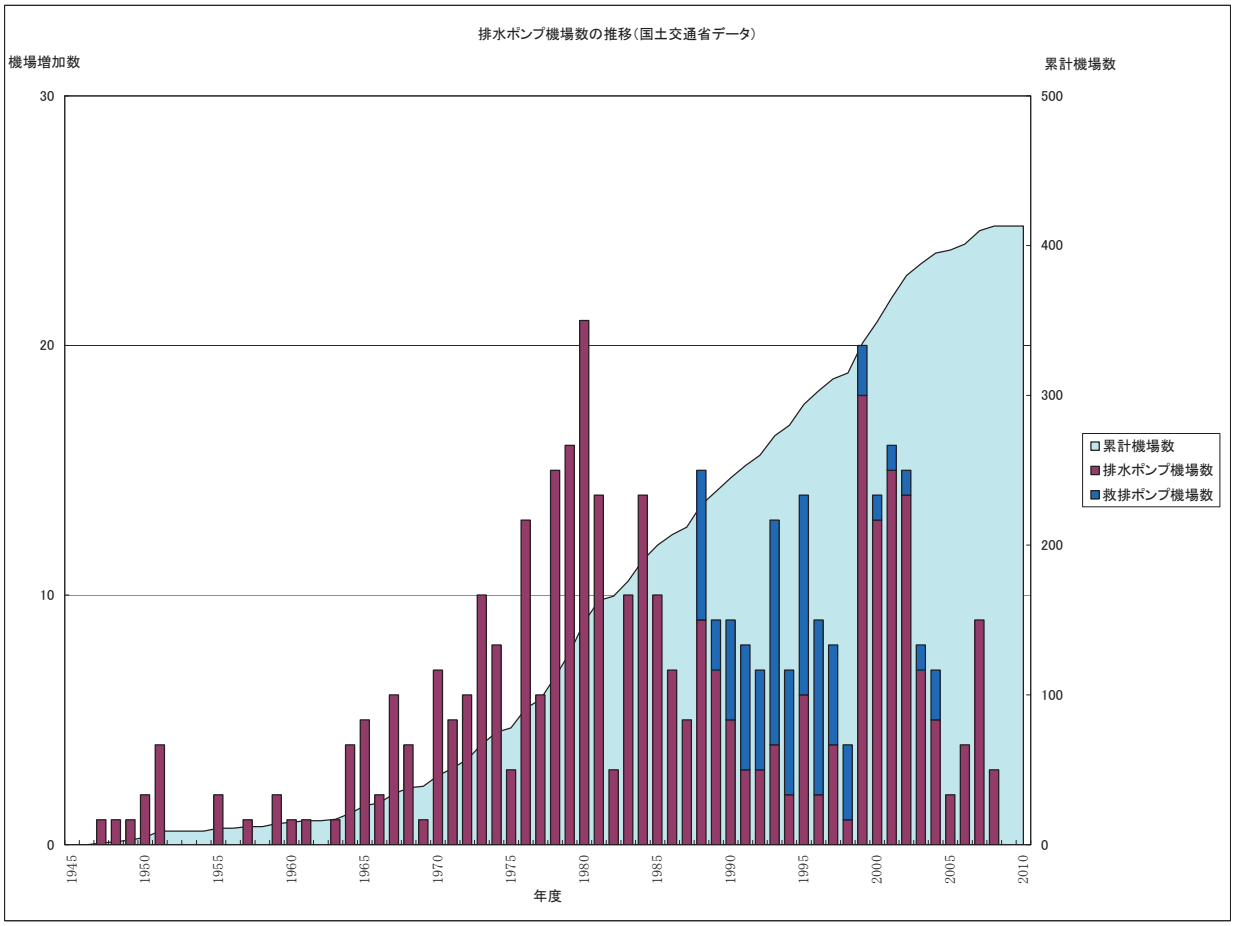


図 1-3　排水機場の設置実態（2008 年　国土交通省調べ）

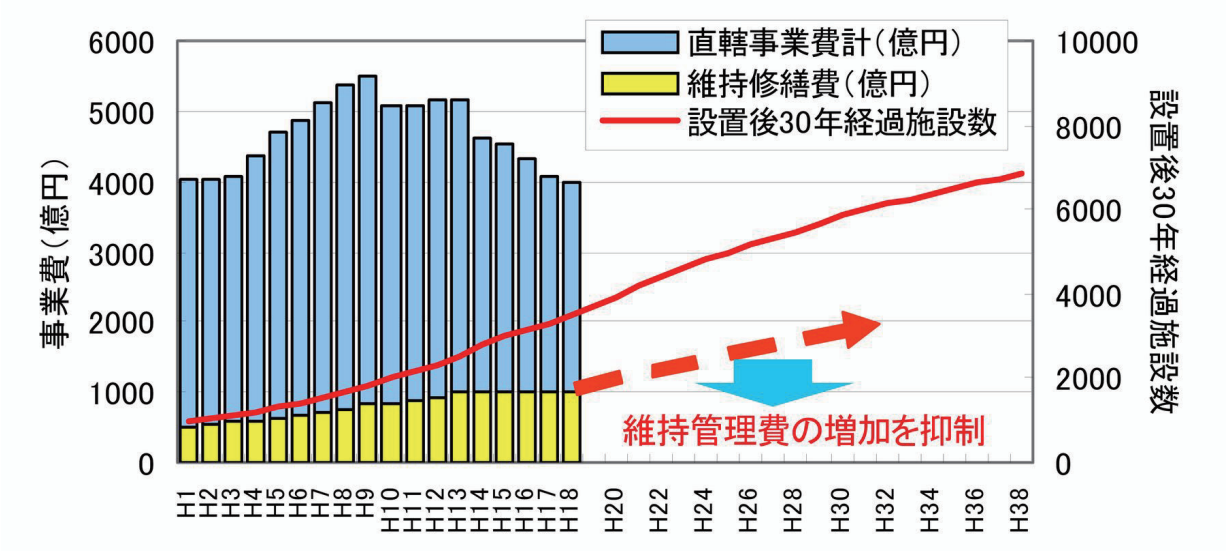


図 1-4　維持管理費と老朽化施設数(2007 年：国土交通省)

1.4　達成目標

本研究では、目的を達成するための具体的な目標を下記のとおり設定した。

1)　維持管理情報整理手法の提案

設置工事、点検整備、運転、更新に関する各情報に関し、信頼性評価、経済性評価に資することのできる情報の整理手法を提案する。

2)　FMEA 及び FTA 実施法の確立

設備の仕様と点検整備等から得られる情報を基に、設備の信頼性を評価する手法として FMEA 及び FTA を採用し、非常用施設である河川ポンプ設備を対象とした実施方法を確立する。信頼性の指標としてアンアベイラビリティ（不信頼度。本報告では、「設備が動くべき時に機能が低下する確率」を表す。3.2(4)参照。）の適用を考慮する。

3)　信頼性と経済性評価手法の確立

河川ポンプ設備においては、これまで信頼性と維持管理費の関係が明確に把握されていない。本研究では、実際に稼働している排水機場を規模別に数機場抽出し、維持管理レベル(普段の点検内容や定期整備の実施内容)と維持管理費の推移を明らかにする。また、維持管理の結果得られている信頼性指標と維持管理費の関係を把握する。

4)　維持管理費縮減手法の提案

信頼性と経済性の解析結果を基に、維持管理上重要な実施事項を明らかにし、合理的な維持管理費縮減手法の提案を行う。

2．研究の基本方針

2.1　基本方針の概要

本研究は、平成 17 年度から平成 20 年度にかけて実施した。昭和 59 年度から昭和 62 年度にかけて土木研究所材料施工部機械研究室（現：土木研究所先端技術チーム）

が実施した研究テーマ「機械設備の信頼性評価に関する調査研究」の成果と、当該成果を受けて建設省（現国土交通省）管理の揚排水機場から収集された信頼性フィールドデータ記録（平成元年～平成 9 年度）を活用し、新たに信頼性と経済性を総合的に考慮する管理手法を検討したものである。本研究の実施にあたっては、実在する河川ポンプ設備の維持管理情報を用いた信頼性と経済性

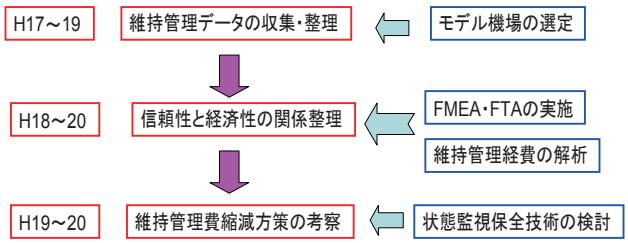


図 2-1　研究の流れ

の定量的な評価事例によって、これまでの維持管理レベルで得ることのできた信頼性と経済性の関係を明らかにするとともに、当該結果に基づく維持管理費縮減に関する提案を行うこととした。

本研究の流れを図 2-1 に示す。平成 62 年度まで実施された「機械設備の信頼性に関する調査研究」では、河川ポンプ設備の信頼性を、「故障モード影響解析（Failure Mode and Effects Analysis）」（以後「FMEA」という）と「故障木解析（Fault Tree Analysis）」（以後「FTA」という）によって評価する方法を提案しており、FMEA の基本的な考え方、代表的な FT 図の作成及び定量的なアンアベイラビリティの試算を行っている。また、アンアベイラビリティと個々の施設が生み出す便益から効率的な点検整備手法を導く手法を提案した。

しかし、個々の施設の便益を個別に評価していくことは困難であることから、本研究では実際のポンプ設備の信頼性と経済性の関係をモデル機場の維持管理情報から明らかにし、その結果から最適な維持管理手法を提案していく。

2.2　維持管理情報の整理手法検討

信頼性評価及び経済性管理を行うためには情報管理が重要になる。本研究では、これまで実施してきた FMEA 及び FTA の課題を整理し、必要となる情報をモデル機場における実際の維持管理データからどのように抽出し、以後の解析に活用していくべきか実例を基に検討を行った。モデル機場については、国土交通省が管理する排水機場のうち、建設時から 20 年以上経過しており、なおかつ比較的維持管理データの保存状態が良好な河川ポンプ設備を選定し、必要な情報を収集・整理した。

2.3　FMEA 及び FTA の実施手法検討

本研究では、過去の当チームが提案した FMEA・FTA をさらに発展させ、実際のマネジメントに活用できるまで具体化することを検討した。具体的には、以下の手順で研究を進めた。

1) 河川ポンプ設備に活用されている主要構成機器を漏れなく選定し、FMEA シートを作成した。シート作成時に、信頼性フィールドデータ記録を活用するとともに、特にシステムにとって重要な機器を明確化し、当該機器に関する事象を、FTA 作成時に漏れなく採用するようにした。
2) 河川ポンプ設備の機器構成は、設置環境などの個別条件や設計思想によって許容される範囲で自由度がある。本研究では、実在するモデル機場の設備構成に合わせて、具体的な FTA を行う方法を検討した。

2.4 信頼性と経済性の評価手法検討

本研究以前に、排水機場のポンプ設備に関する維持管理費について、建設時から長期にわたって集計し公表された事例はない。本研究では、規模別のモデル機場において、実態としてどの程度の維持管理費を要し、その結果得られた信頼性との関係を定量的に示す方法を明らかにするものとした。

信頼性の指標は、従来どおりアンアベイラビリティを用いるものし、モデル機場の維持管理内容（定期点検・定期整備等の実施内容）とアンアベイラビリティを比較することで、維持管理の効果を評価するとともに、その信頼性を得るためにどの程度のコストを要しているか、維持管理費は計画時に比較してどのようなレベルにあるか、などを評価していく。

2.5 維持管理費縮減手法の提案

河川ポンプ設備の信頼性を確保するために必要となる維持管理レベルを確保し、なおかつライフサイクルコストを縮減するマネジメント手法を、実際の信頼性解析結果と維持管理費の掛かり方から明らかにするものとした。

信頼性評価の最終的な目的は、システム及び構成機器の致命的な故障を予防できることにあることから、維持管理情報を活用する信頼性工学を用いた手法に合わせて、実態の設備コンディションを的確に把握するための状態監視保全技術を選定・評価し、維持管理費縮減による信頼性低下を防止する方策を検討した。

また、本研究の成果から今後の維持管理における提言をまとめるものとした。

3．FMEA 及び FTA

3.1 FMEA の概要

3.1.1 FMEA の概要

FMEA は、システムの設計や製造工程におけるトラブルの解析手法であり、アメリカ航空宇宙局（NASA）で開発されたものである。現在では、具体的な FMEA の研究が進み、各種の適用事例が紹介され、広く民間プラントの信頼性評価に活用されるようになった。

FMEA は、システムを構成する機器に故障が発生したときに、その故障が全体に与える影響を解析し、システムにとって致命度の高い機器を明確化する手法である。民間においては、システムや製品の故障の予防、安全性の改善を図るツールとして活用されている。FMEA において、構成機器を漏れなく評価すれば、重要な機器の見逃しがなくなる反面作業量は大きくなる。よって、民間プラントにおいては、何らかの不具合や危険性を抱えて稼働しているシステムについてのみ採用するケースが多い。

具体的な作業としては、まず解析したいシステムを構成機器に区分し、各々の機器に発生する故障を列挙するとともに、当該故障を引き起こす故障モード、その故障モードの要因（どうしてその故障モードが発生したか）を抽出する。次に、その故障について、発生した場合の「システムへの影響度」、「発生頻度」、「発見の容易性」を評価し、その大小をもってシステムに対する３つの要素を総合的に勘案した致命度を求める方法である。

「システムへの影響度」は、機器に故障が発生した場合に全体システムへ与える影響の大きさを評価するものである。「発生頻度」は、当該故障モードが発生する頻度である。「発見の容易性」とは、その機器に発生する故障モードが、点検作業において発見しやすいかどうかという指標である。非常用施設の場合、点検と点検の合間に発生する故障を点検作業で発見し、未然に防ぐ必要があ

表 3-1 一般的な FMEA の事例

品名	機能	故障	故障モード	故障モードの原因	発生頻度	影響度	検出容易性	RPN	是正措置など
電動機	○○を駆動する	回転しない	巻き線断線	高温下使用	4	10	8	320	巻き線交換
				ケース変形					
				不適切な結線					

表 3-2　河川ポンプ設備に関する FMEA 事例(昭和 62 年　土研)

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		
熱交換機	腐食	腐食･電食	影響なし	影響なし	Ⅳ	一次冷却水
	亀裂	疲労･加工亀裂	機能不全	緊急停止	Ⅰ	
	漏洩	組み立て不良･腐食	機能不全	緊急停止	Ⅰ	

ることから、発見の容易性を評価することは維持管理レベルを決定する上で非常に重要となる。この致命度は、一般的に３つの指標した上で各々の積で表し、RPN（Risk Priority Number：危険優先指数）、あるいは RI（Risk Index：危険指数）と定義される場合が多い。ただし、各指標の数値基準や評価方法は、一定の規格が存在する訳ではなく、実施する技術者の判断によるところが大きい。

FMEA は、シートを用いて実施される。シート様式は技術者によって適宜作成されるので、千差万別であるが、一般的事例を表 3-1 に示す。本シートの作成者は、電動機の３つの指標を 10 段階評価しており、発生頻度は 10 段階の「４」、同様にシステム全体への影響度は「10」、発見の容易性は「8」と評価している。その結果、RPN は 3 つの指標の積で 320 という結果を得る。

同様にシステムを構成する全ての機器について実施し、RPN が高い順に致命度の高い機器を抽出し、重点的な維持管理の実施や致命度を低下させる技術改善を図るなどの方策を検討する。

3.1.2　FMEA の課題

「機械設備の信頼性評価に関する調査研究(昭和 59～62 年)」においては、FMEA を FTA に用いる重要な事象を評価するツールとして活用した。本研究においては、FMEA を具体的な構成機器について完全に実施し、FTA に反映させるとともに、維持管理担当者に対する故障情報の指標としてとりまとめるものとした。すなわち、河川ポンプ設備を対象とした構成機器を洗い出し、致命度の高い機器を明確化するとともに、発生しうる故障、故障モード、原因を網羅することで、実際の点検作業から記録･保存して FMEA や FTA に活用すべき維持管理データの内容を明らかにすることとした。

しかしながら、当初の FMEA 実施から 20 年以上経過し、他分野における実施方法は研究者、あるいは事業者によって様々な新しい方法が提案されている。よって、河川ポンプ設備における FMEA についても、本来の機能を尊重しながら、河川ポンプ設備に最適な方法に進化させる必要がある。表 3-2 に昭和 62 年度までの研究で示した FMEA シートの抜粋を示す。

本研究では、本手法と既存の他分野手法を比較し、河川ポンプ設備適用を考慮した課題を次のとおり整理した。

①FMEA の根本的な課題として、要となる「故障モード」の定義が曖昧である。複数の管理者が、同じようなシステムを評価するにあたって、その視点を合わせるために故障モードの定義を明確化しておく意義は非常に高い。

②河川ポンプ設備の完全な１つのシステムを対象として、構成機器を網羅した解析まで到達していない。

③「機械設備の信頼性評価に関する調査研究」を実施した昭和 62 年の段階で把握していた構成機器の故障頻度は、他分野の故障データベースから故障率を引用するなど精度が充分でなかった。

①については、FMEA の具体的手法を研究するに当たって最重要事項である。当チームで実施してきた FMEA においても、表 3-2 に示すとおり機器自体の故障内容、故障モードと故障原因の仕分けなど曖昧なケースがある。②については、システム構成が 20 年前と変化した部分もあり、現代のシステムで再構築する必要がある。③が評価に与える影響は大きく、昭和 62 年の段階では一般的に FMEA に用いる発生頻度(発生確率)を評価することができず、故障等級を FMEA の総括で４段階評価している。

これらの課題について、FMEA を解説する手順書や他の論文報告のみで手法を見いだすことは困難であり、河川ポンプ設備の特質を勘案した独自の FMEA を完成させる必要がある。まず、①に対応するため FMEA を行う上で最も重要な故障モードについて考察し、②に対応する河川ポンプ設備を対象とした FMEA において、現在の標準的な機器構成に合わせた FMEA シートを作成するものとした。また、③については、土木研究所で平成 13 年にとりまとめられた構成機器の故障率（機械設備の信頼性評価に関する調査研究(第二報)、土木研究所資料、第 3784 号、2001）を用いた FMEA を実施することで対応するものとした。

3.2 FTA の概要

3.2.1 FTA（Fault Tree Analysis）の概要

FTA は、故障の木解析と呼ばれるシステムの信頼性評価手法である。まず、解析しようとするトップ事象を定義し、トップダウンでその原因を掘り下げていく。ツールとして FT 図を使用する。FT 図では、トップ事象に関連する事象を論理記号で連結し、因果関係を明らかにしていく。FT 図の末端に位置する各事象の発生確率を、実績、データブック、実験等により得ることができれば、トップ事象の発生する確率をブール代数で求めることができる。ブール代数の主たる論理記号（演算）は、AND 回路と OR 回路である。AND 回路とは、２つあるいはそれ以上の事象が同時に発生したときにその上位の事象が発生するという意味で、各事象の生起確率が１より非常に小さい場合、各事象の積に近似される。Q は各事象の生起確率を示し、本報告における単位は(1/hr)である。((２)事象の生起確率参照)

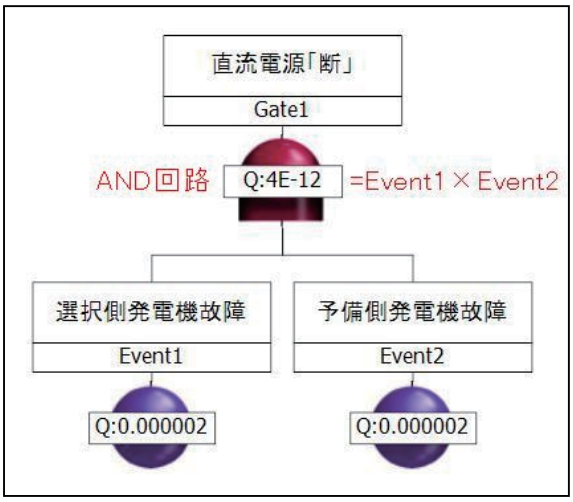


図 3-1 AND 回路

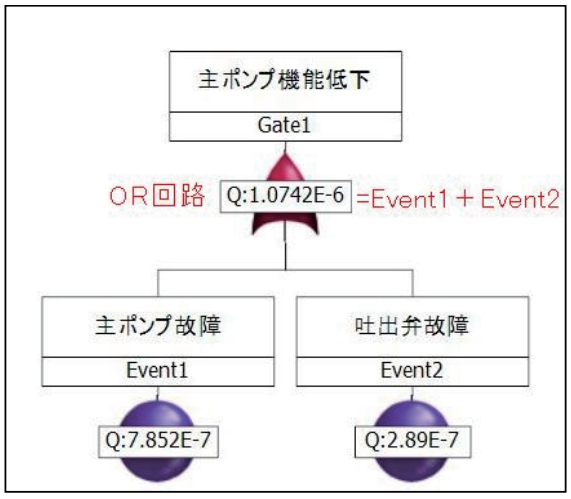


図 3-2 OR 回路

図 3-1 に AND 回路の事例を示す。ポンプ設備においては、冷却水系統や燃料系統など重要な系統機器設備や非常用発電装置は二重化などの冗長化が図られる事例が多く、二重化した双方の機器が同時に停止しない限り、求められる機能は喪失しない。このような設計によって、機能が喪失するリスクを著しく低下させることができる。

OR 回路は、２つあるいはそれ以上の事象のいずれかが発生するとその上位の事象が発生することを意味し、その確率は、各事象の生起確率が１より非常に小さい場合、各事象の和に近似できる。図 3-2 に OR 回路の事例を示す。ポンプ設備の場合、非常に多くの回路が OR 回路になる。

FTA は、定量的な解析手法であり、視覚的に事象の流れも把握できるため、トップ事象生起確率についての許容性や、各事象がトップ事象に及ぼす影響度等を検討することができるが、故障木の作成や各事象の発生確率を求める作業が必要であり、大きなシステムの FTA は膨大な作業量となる。従って、一般的にはトップ事象にあまり影響のない故障木を省略し、事象を細分化せずに発生確率を求めるなどの方策がとられるが、精度あるトップ事象の生起確率を求めるためには、システムを熟知した技術者の判断が必要になる。

3.2.2 事象の生起確率

非常用設備は、供用時間に対して運転時間が非常に短いことが特徴である。(供用時間は、建設時から現場に供した時間。本研究では、非出水期も供用時間として考慮しているので、建設時からの経過時間に等しい。)

一般的な常用系機械設備においては、供用時間とともに運転時間が信頼性評価の重要な要素になる。運転時間が長ければ、繰り返し荷重などの力学的作用、摩耗、加熱、通電など物理的あるいは化学的な要因による各部の劣化が進み、故障の発生リスクは高まる。しかし、運転時間の短い非常用設備においては、運転時間との直接的な因果を把握しにくい。従って、河川ポンプ設備の信頼性評価においては、FTA における各事象の発生確率、構成機器・部品の故障確率は、事象の発生回数を当該機器・部品の供用時間で除した値を採用することとする。

3.2.3 FTA の課題

一般的に FTA では、個々のシステムを対象として、トップ事象の生起確率を評価する。しかし、国土交通省の管理する河川ポンプ設備全てのシステムを個別に分析

し、信頼性を評価するアプローチは現実的ではない。本研究の成果を広く国土交通省の管理する河川ポンプ設備に適用するために、次の課題を解決する必要がある。

①システムが多様である河川ポンプ設備における故障木の具体化

②各事象の発生確率の設定

③FTA 解析結果の維持管理における活用法の確立

一般的な FTA では、河川ポンプ設備を対象としたトップ事象は本来「排水不能」となる。しかし、「排水不能」という事象については、複数あるポンプが全台故障で動けない場合、及び電源設備あるいは系統機器が故障して完全に停止場合が含まれる。このうち、複数あるポンプ系統が原因で排水不能になる確率は非常に小さく、電源設備と系統機器についてはシステムが二重化されており、これらが完全にシステムダウンする可能性も非常に小さい。また、実績としても、設備の故障を原因として完全な「排水不能」となった事例の記録が土木研究所にない。

しかし、予備機がない排水ポンプ設備においては、排水時に 1 台でも稼働できない状態が発生すれば浸水被害を発生させる可能性があり、非常用設備としての役割を考慮すると維持管理のあり方としてその状態は許容できない。

よって、本研究では、排水時に 1 台でも排水能力が低下しうる状況をトップ事象とした信頼性評価を行う。

今後、老朽化した設備が増大することを勘案すると、「排水能力の低下」が発生するリスクは高まり、そのような状態が発生する確率を評価することは非常に有意義である。トップ事象を「排水能力の低下」とすることによって、解析上において以下に示す具体的なメリットがある。

1)事象生起確率の算定に、既存データを活用できる。

2)幅広い河川ポンプ設備システムの評価ができる。

当チームでは、昭和 62 年までの研究テーマ「機械設備の信頼性評価に関する調査研究」の成果に基づき、平成元年から平成 9 年までの 9 年間に発生した河川ポンプ設備の故障を対象として調査を実施し、フィールドデータを平成 13 年に集計した。表 3-3 に集計結果を示す。

本調査の対象機場は 252 機場で、故障発生年月、故障内容、故障モード、故障発生時の状況、発生した故障の影響度など FMEA・FTA に資することができる情報を対象とした。標準としては、構成機器単位で故障を集計しているが、重要な機器は部品まで掘り下げている。表 3-3 は、発生した故障の影響が排水機能の喪失につながる致命的なものと、一定時間以上の連続運転ができない重大な故障を対象として集計している。つまり、軽微な故障は含まれておらず、排水運転に影響のある故障を対象とした故障率算定結果である。各構成機器・部品毎に横断的に集計した故障件数を延べ供用時間（各種構成機器の供用時間の総和）で除したものを故障率として示している。

本研究では、排水機場に設置された全てのポンプ設備をシステムとして考え、トップ事象を設定し全体の信頼性を評価できる汎用的な手法を検討する。つまり、過去の故障データを活用するとともに、幅広い形式のポンプ設備の信頼性評価を可能とする FTA を構築する。

河川ポンプ設備においては、ポンプ設備台数が増加すればその分構成機器数が増え、システムのどこかに発生する故障リスクは高まる。しかし、主ポンプ台数が増えることによって、ある程度までの出水に対する適応能力は台数が少ない機場より高くなる。本研究の成果により、このような設置台数の違いによるアンアベイラビリティの差異も検討できるようになる。

3.2.4　アンアベイラビリティ

FTA におけるトップ事象の生起確率は、取り扱うシステムの設計及びトップ事象の設定によって異なる。非常用設備である河川ポンプ設備のトップ事象生起確率は、「アンアベイラビリティ」になる。

アンアベイラビリティは、「ポンプ設備が動くべき時に何らかの要因で機能が低下した確率」である。河川ポンプ設備における FTA において、FT 図を構成する各基本

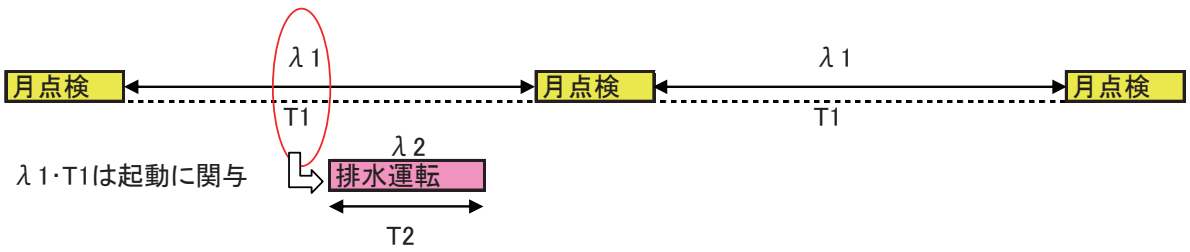


図 3-3　点検間隔・排水運転と各故障率の関係

事象の生起確率を、母集団の施設から横断的に集計した確率をもって採用すれば、アンアベイラビリティの大小は機場のシステム構成にのみ依存する。従って、本手法によって算出したアンアベイラビリティを比較することで、システムの違いに起因する潜在的な機場の信頼性を比較することができる。非常用設備のアンアベイラビリティは、理論的に式(3-1)で求めることができる。[1)]

$$A = \frac{1}{T1}\int_0^{T1}(1 - e^{-\lambda 2*t})dt + (1 - e^{-\lambda 2*T2})$$

$$\fallingdotseq \frac{1}{2}(T1*\lambda 1) + T2*\lambda 2 \qquad \text{式(3-1)}$$

ここに、A : アンアベイラビリティ、T1 : 点検間隔、λ1 : 点検間隔における故障率(λ1 ≪ 1)、T2 : 運転時間、λ2 : 運転中における故障率(λ2 ≪ 1)

式(3-1)第 1 項は、点検間隔中に発生するシステムの故障を対象としており、故障率λ1 が付与条件である場合の近似式である。(理論式をテイラー展開し、第 2 項以降を省略したものである。) 当該故障は、点検で全て見つけられ、なおかつ次回の点検までに修復できるものであるという仮定が必要になる。結果的に第 1 項は、点検期間の半分の時間に、その間の一定故障率を乗じた数値に近似できる。この第 1 項は、非常用設備がいざ運転するときに、起動失敗する確率を意味する。第 2 項は、連続運転に入ってから役目を終えて停止する間に発生する故障であり、連続運転時間が長くなればリスクも高まる。

ある一定期間中における維持管理データを用い、適正な FTA を実施した結果得られるトップ事象の生起確率と当該条件数値を(3-1)式に代入することで得られる確率は等価になる。

表 3-3　構成機器・部品の故障率統計(1)（H 元～H9）

	大区分	小区分	装置名	機器名	部品名	故障件数	機器数量	延べ供用時間	故障率(E-06)
1	主ポンプ設備	主ポンプ	主ポンプ	羽根車	羽根車	7	5,056	44,290,560	0.1580
2	主ポンプ設備	主ポンプ	主ポンプ	羽根車	羽根車ナット	1	5,056	44,290,560	0.0226
3	主ポンプ設備	主ポンプ	主ポンプ	羽根車	フェザーキー	1	5,056	44,290,560	0.0226
4	主ポンプ設備	主ポンプ	主ポンプ	主軸	主軸	1	5,056	44,290,560	0.0226
5	主ポンプ設備	主ポンプ	主ポンプ	主軸	軸スリーブ	1	5,056	44,290,560	0.0226
6	主ポンプ設備	主ポンプ	主ポンプ	中間軸	軸継ぎ手	1	5,056	44,290,560	0.0226
7	主ポンプ設備	主ポンプ	主ポンプ	水中軸受	軸受	4	5,056	44,290,560	0.0903
8	主ポンプ設備	主ポンプ	主ポンプ	水中軸受	封水ブッシュ	2	5,056	44,290,560	0.0452
9	主ポンプ設備	主ポンプ	主ポンプ	外側軸受	グランドパッキン	6	5,056	44,290,560	0.1355
10	主ポンプ設備	主ポンプ	主ポンプ	その他		18	－	－	－
11	主ポンプ設備	主配管	吐出弁	吐出弁本体		5	5,123	44,877,480	0.1114
12	主ポンプ設備	主配管	吐出弁	電動機		1	5,123	44,877,480	0.0223
13	主ポンプ設備	主配管	逆流防止弁	逆流防止弁本体		10	5,120	44,851,200	0.2230
14	主ポンプ設備	継手	継手	継手		8	4,599	40,287,240	0.1986
15	主ポンプ設備	減速機	本体	軸受	入力軸ラジアル軸受	1	4,896	42,888,960	0.0233
16	主ポンプ設備	減速機	本体	その他部品	軸受押さえ板	1	4,896	42,888,960	0.0233
17	主ポンプ設備	減速機	本体	その他部品	その他	7	－	－	－
18	主ポンプ設備	減速機	給油装置	油濾過器		2	4,896	42,888,960	0.0466
19	主ポンプ設備	減速機	給油装置	初期プライミングポンプ		2	4,896	42,888,960	0.0466
20	主ポンプ設備	減速機	給油装置	その他		7	－	－	－
21	主ポンプ設備	ディーゼルエンジン	本体部	本体	歯車箱	2	4,327	37,904,520	0.0528
22	主ポンプ設備	ディーゼルエンジン	本体部	本体	オイルパン	5	4,327	37,904,520	0.1319
23	主ポンプ設備	ディーゼルエンジン	本体部	本体	電導軸	3	4,327	37,904,520	0.0791
24	主ポンプ設備	ディーゼルエンジン	本体部	過給器		19	4,327	37,904,520	0.5013
25	主ポンプ設備	ディーゼルエンジン	クランク軸部	クランク軸	クランク軸本体	2	4,327	37,904,520	0.0528
26	主ポンプ設備	ディーゼルエンジン	クランク軸部	クランク軸	軸受	2	4,327	37,904,520	0.0528
27	主ポンプ設備	ディーゼルエンジン	クランク軸部	クランク軸	クランク歯車	2	4,327	37,904,520	0.0528
28	主ポンプ設備	ディーゼルエンジン	連接棒部	連接棒	連接棒部本体	2	4,327	37,904,520	0.0528
29	主ポンプ設備	ディーゼルエンジン	連接棒部	連接棒	クランクピンメタル	3	4,327	37,904,520	0.0791
30	主ポンプ設備	ディーゼルエンジン	ピストン部	ピストン	ピストンピン	4	4,327	37,904,520	0.1055
31	主ポンプ設備	ディーゼルエンジン	ピストン部	ピストン	ピストンリング	5	4,327	37,904,520	0.1319
32	主ポンプ設備	ディーゼルエンジン	ピストン部	ピストン	オイルリング	1	4,327	37,904,520	0.0264
33	主ポンプ設備	ディーゼルエンジン	ピストン部	ピストン	ピストン	5	4,327	37,904,520	0.1319
34	主ポンプ設備	ディーゼルエンジン	燃料噴射系	燃料噴射ポンプ		5	4,327	37,904,520	0.1319
35	主ポンプ設備	ディーゼルエンジン	燃料噴射系	調速機		10	4,327	37,904,520	0.2638
36	主ポンプ設備	ディーゼルエンジン	燃料噴射系	その他	燃料噴射弁	7	4,327	37,904,520	0.1847
37	主ポンプ設備	ディーゼルエンジン	燃料噴射系	その他	高圧配管	5	4,327	37,904,520	0.1319
38	主ポンプ設備	ディーゼルエンジン	ヘッド部	吸気弁・排気弁		5	4,327	37,904,520	0.1319
39	主ポンプ設備	ディーゼルエンジン	ヘッド部	ヘッド及びライナ	シリンダヘッド	3	4,327	37,904,520	0.0791
40	主ポンプ設備	ディーゼルエンジン	ヘッド部	ヘッド及びライナ	ライナ	3	4,327	37,904,520	0.0791
41	主ポンプ設備	ディーゼルエンジン	カム軸部	カム軸	カム軸駆動歯車	2	4,327	37,904,520	0.0528
42	主ポンプ設備	ディーゼルエンジン	動弁装置	動弁装置		3	4,327	37,904,520	0.0791
43	主ポンプ設備	ディーゼルエンジン	潤滑油系	初期プライミングポンプ		6	4,327	37,904,520	0.1583
44	主ポンプ設備	ディーゼルエンジン	潤滑油系	配管	圧力調整弁	3	4,327	37,904,520	0.0791
45	主ポンプ設備	ディーゼルエンジン	潤滑油系	配管	出口濾し器	2	4,327	37,904,520	0.0528
46	主ポンプ設備	ディーゼルエンジン	潤滑油系	配管	配管	1	4,327	37,904,520	0.0264
47	主ポンプ設備	ディーゼルエンジン	潤滑油系	油冷却器		7	4,327	37,904,520	0.1847
48	主ポンプ設備	ディーゼルエンジン	空気配管系	空気配管	始動空気分配弁	10	4,327	37,904,520	0.2638
49	主ポンプ設備	ディーゼルエンジン	空気配管系	空気配管	始動空気塞止弁	24	4,327	37,904,520	0.6332
50	主ポンプ設備	ディーゼルエンジン	空気配管系	空気配管	始動空気操縦弁	11	4,327	37,904,520	0.2902
51	主ポンプ設備	ディーゼルエンジン	空気配管系	空気配管	始動空気操縦弁	11	4,327	37,904,520	0.2902
52	主ポンプ設備	ディーゼルエンジン	空気配管系	空気配管	空気配管	4	4,327	37,904,520	0.1055
53	主ポンプ設備	ディーゼルエンジン	空気配管系	始動電磁弁		7	4,327	37,904,520	0.1847
54	主ポンプ設備	ディーゼルエンジン	空気配管系	停止電磁弁		8	4,327	37,904,520	0.2111
55	主ポンプ設備	ディーゼルエンジン	燃料供給系	燃料濾し器		3	4,327	37,904,520	0.0791
56	主ポンプ設備	ディーゼルエンジン	燃料供給系	燃料配管	燃料フィードポンプ	2	4,327	37,904,520	0.0528
57	主ポンプ設備	ディーゼルエンジン	燃料供給系	燃料配管	燃料配管	17	4,327	37,904,520	0.4485
58	主ポンプ設備	ディーゼルエンジン	排気管系	排気管	消音器	2	4,327	37,904,520	0.0528
59	主ポンプ設備	ディーゼルエンジン	排気管系	排気管	排気管	4	4,327	37,904,520	0.1055
60	主ポンプ設備	ディーゼルエンジン	冷却器系	ラジエータ		3	290	2,540,400	1.1809
61	主ポンプ設備	ディーゼルエンジン	冷却器系	熱交換器		3	1,339	11,729,640	0.2558
62	主ポンプ設備	ディーゼルエンジン	冷却器系	インタークーラー		3	322	2,820,720	1.0636
63	主ポンプ設備	ディーゼルエンジン	その他	その他		119	－	－	－
64	主ポンプ設備	ガスタービン	ガスタービン	エンジン本体（二軸式）		1	85	744,600	1.3430
65	主ポンプ設備	ガスタービン	ガスタービン	吸排気系		1	85	744,600	1.3430
66	主ポンプ設備	ガスタービン	ガスタービン	燃料系		1	85	744,600	1.3430
67	主ポンプ設備	エンジン始動装置	始動装置	空気槽		11	3,913	34,277,880	0.3209
68	主ポンプ設備	電動機	電動機	電動機		7	644	5,641,440	1.2408
69	主ポンプ設備	操作・制御設備	発電機用ディーゼルエンジン	発電機本体		3	2,940	25,754,400	0.1165
70	主ポンプ設備	操作・制御設備	発電機用ディーゼルエンジン	ピストン	ピストン	1	2,940	25,754,400	0.0388
71	主ポンプ設備	操作・制御設備	発電機用ディーゼルエンジン	調速機		1	2,940	25,754,400	0.0388
72	主ポンプ設備	操作・制御設備	発電機用ディーゼルエンジン	その他燃料噴射系	燃料噴射弁	4	2,940	25,754,400	0.1553
73	主ポンプ設備	操作・制御設備	発電機用ディーゼルエンジン	その他燃料噴射系	高圧配管	1	2,940	25,754,400	0.0388
74	主ポンプ設備	操作・制御設備	発電機用ディーゼルエンジン	シリンダヘッド及びライ	シリンダヘッド	1	2,940	25,754,400	0.0388
75	主ポンプ設備	操作・制御設備	発電機用ディーゼルエンジン	シリンダヘッド及びライ	ライナ	1	2,940	25,754,400	0.0388
76	主ポンプ設備	操作・制御設備	発電機用ディーゼルエンジン	初期プライミングポンプ		1	2,940	25,754,400	0.0388
77	主ポンプ設備	操作・制御設備	発電機用ディーゼルエンジン	配管	圧力調整弁	1	2,940	25,754,400	0.0388
78	主ポンプ設備	操作・制御設備	発電機用ディーゼルエンジン	配管	配管	5	2,940	25,754,400	0.1941
79	主ポンプ設備	操作・制御設備	発電機用ディーゼルエンジン	配管	油冷却器	1	2,940	25,754,400	0.0388
80	主ポンプ設備	操作・制御設備	発電機用ディーゼルエンジン	空気配管	始動空気分配弁	2	2,940	25,754,400	0.0777
81	主ポンプ設備	操作・制御設備	発電機用ディーゼルエンジン	空気配管	始動空気塞止弁	4	2,940	25,754,400	0.1553
82	主ポンプ設備	操作・制御設備	発電機用ディーゼルエンジン	空気配管	空気配管	2	2,940	25,754,400	0.0777
83	主ポンプ設備	操作・制御設備	発電機用ディーゼルエンジン	始動電磁弁		2	2,940	25,754,400	0.0777
84	主ポンプ設備	操作・制御設備	発電機用ディーゼルエンジン	停止電磁弁		1	2,940	25,754,400	0.0388
85	主ポンプ設備	操作・制御設備	発電機用ディーゼルエンジン	燃料配管	燃料配管	5	2,940	25,754,400	0.1941
86	主ポンプ設備	操作・制御設備	発電機用ディーゼルエンジン	排気管	排気管	1	2,940	25,754,400	0.0388
87	主ポンプ設備	操作・制御設備	発電機用ディーゼルエンジン	ラジエータ		4	1,121	25,754,400	0.4073
88	主ポンプ設備	操作・制御設備	発電機用ディーゼルエンジン	その他		21	－	－	－
89	主ポンプ設備	操作・制御設備	発電機用ガスタービン	エンジン本体(一軸式)		1	50	438,000	2.2831
90	主ポンプ設備	操作・制御設備	発電機用ガスタービン	燃料系		2	50	438,000	4.5662

表 3-3 構成機器・部品の故障率統計(2)（H 元～H9）

	大区分	小区分	装置名	機器名	部品名	故障件数	機器数量	延べ供用時間	故障率(E-06)
91	主ポンプ設備	操作・制御設備	始動装置	セルモータ		1	1,536	13,455,360	0.0743
92	主ポンプ設備	操作・制御設備	始動装置	空気槽		3	1,275	11,169,000	0.2686
93	主ポンプ設備	操作・制御設備	操作・制御設備	圧力スイッチ		5	19,153	167,780,280	0.0298
94	主ポンプ設備	操作・制御設備	操作・制御設備	スイング式フロースイッチ		7	8,466	74,162,160	0.0944
95	主ポンプ設備	操作・制御設備	操作・制御設備	温度リレー(センサー)		5	17,560	153,825,600	0.0325
96	主ポンプ設備	操作・制御設備	操作・制御設備	速度リレー(センサー)		4	6,627	58,052,520	0.0689
97	主ポンプ設備	操作・制御設備	操作・制御設備	電極式レベルスイッチ		4	7,599	66,567,240	0.0601
98	主ポンプ設備	操作・制御設備	操作・制御設備	リミットスイッチ		2	17,801	155,936,760	0.0128
99	主ポンプ設備	操作・制御設備	操作・制御設備	マイクロスイッチ		1	11,178	97,919,280	0.0102
100	主ポンプ設備	操作・制御設備	操作・制御設備	制御用ボタンスイッチ		2	95,020	832,375,200	0.0024
101	主ポンプ設備	操作・制御設備	操作・制御設備	交流電磁開閉器		2	28,155	246,637,800	0.0081
102	主ポンプ設備	操作・制御設備	操作・制御設備	交流電磁接触器		5	45,495	398,536,200	0.0125
103	主ポンプ設備	操作・制御設備	操作・制御設備	配線用遮断器		2	70,339	616,169,640	0.0032
104	主ポンプ設備	操作・制御設備	操作・制御設備	補助継電器		11	681,107	5,966,497,320	0.0018
105	主ポンプ設備	操作・制御設備	操作・制御設備	電動機用保護継電器		6	23,992	210,169,920	0.0285
106	主ポンプ設備	操作・制御設備	操作・制御設備	配線		2	207,469	1,817,428,440	0.0011
107	主ポンプ設備	操作・制御設備	操作・制御設備	蓄電池		5	2,167	18,982,920	0.2634
108	主ポンプ設備	操作・制御設備	操作・制御設備	励磁ユニット		1	1,493	13,078,680	0.0765
109	主ポンプ設備	操作・制御設備	操作・制御設備	低圧ヒューズ		1	75,766	663,710,160	0.0015
110	主ポンプ設備	操作・制御設備	操作・制御設備	抵抗器		7	22,476	196,889,760	0.0356
111	主ポンプ設備	操作・制御設備	操作・制御設備	近接スイッチ		2	350	3,066,000	0.6523
112	主ポンプ設備	操作・制御設備	操作・制御設備	その他		33	－	－	－
113	主ポンプ設備	補機設備	ポンプ類	真空ポンプ		12	1,961	17,178,360	0.6986
114	主ポンプ設備	補機設備	ポンプ類	冷却水ポンプ		53	3,441	30,143,160	1.7583
115	主ポンプ設備	補機設備	ポンプ類	取水(井戸) ポンプ		11	1,498	13,122,480	0.8383
116	主ポンプ設備	補機設備	ポンプ類	二次冷却水ポンプ		5	1,367	11,974,920	0.4175
117	主ポンプ設備	補機設備	ポンプ類	潤滑水(封水) ポンプ		4	1,065	9,329,400	0.4288
118	主ポンプ設備	補機設備	ポンプ類	所内排水ポンプ		6	1,936	16,959,360	0.3538
119	主ポンプ設備	補機設備	ポンプ類	燃料移送ポンプ		7	3,577	31,334,520	0.2234
120	主ポンプ設備	補機設備	ポンプ類	その他ポンプ		10	－	－	－
121	主ポンプ設備	補機設備	配管関係	オートストレーナ		14	1,247	10,923,720	1.2816
122	主ポンプ設備	補機設備	配管関係	吸込ストレーナ		1	3,050	26,718,000	0.0374
123	主ポンプ設備	補機設備	配管関係	清水冷却器		1	3,772	33,042,720	0.0303
124	主ポンプ設備	補機設備	配管関係	電磁弁		21	11,892	104,173,920	0.2016
125	主ポンプ設備	補機設備	配管関係	電動弁		4	789	6,911,640	0.5787
126	主ポンプ設備	補機設備	配管関係	電動ボール弁		6	7,505	65,743,800	0.0913
127	主ポンプ設備	補機設備	配管関係	手動弁		5	100,707	882,193,320	0.0057
128	主ポンプ設備	補機設備	配管関係	逆止弁		8	21,066	184,538,160	0.0434
129	主ポンプ設備	補機設備	圧縮機	空気圧縮機		16	3,387	29,670,120	0.5393
130	除塵設備	除塵機本体	レーキ駆動装置	伝導チェーン・スプロケット		3	3,613	31,649,880	0.0948
131	除塵設備	除塵機本体	レーキ駆動装置	電動機		1	3,613	31,649,880	0.0316
132	除塵設備	除塵機本体	レーキ駆動装置	その他		2	－	－	－
133	除塵設備	除塵機本体	レーキ昇降装置	その他		1	－	－	－
134	除塵設備	除塵機本体	レーキ機構	レーキ機構	レーキ	6	3,613	31,649,880	0.1896
135	除塵設備	除塵機本体	レーキ機構	レーキ機構	レーキチェーン	2	3,613	31,649,880	0.0632
136	除塵設備	除塵機本体	レーキ機構	レーキ機構	テークアップ装置	2	3,613	31,649,880	0.0632
137	除塵設備	除塵機本体	レーキ機構	レーキ機構	軸	1	3,613	31,649,880	0.0316
138	除塵設備	除塵機本体	レーキ機構	レーキ機構	その他	5	－	－	－
139	除塵設備	除塵機本体	走行装置	台車本体		1	3,613	31,649,880	0.0316
140	除塵設備	除塵機本体	走行装置	減速機		1	3,613	31,649,880	0.0316
141	除塵設備	その他	構造物	スクリーン	前衛スクリーン	2	4,971	43,545,960	0.0459
142	除塵設備	その他	構造物	スクリーン	主スクリーン	2	4,971	43,545,960	0.0459
143	除塵設備	コンベア	駆動装置	伝導チェーンスプロケット	チェーン	1	2,453	21,488,280	0.0465
144	除塵設備	コンベア	駆動装置	電動機		1	2,453	21,488,280	0.0465
145	除塵設備	コンベア	ベルト・ローラ部	ベルト・ローラ	テークアップ装置	4	2,453	21,488,280	0.1861
146	除塵設備	コンベア	ベルト・ローラ部	ベルト・ローラ	コンベアベルト	3	2,453	21,488,280	0.1396
147	除塵設備	コンベア	プーリ部	プーリ（モータプーリ）	ヘットプーリ	1	2,453	21,488,280	0.0465
148	除塵設備	コンベア	その他	ホッパー		4	2,453	21,488,280	0.1861
149	除塵設備	コンベア	その他	スカート		2	2,453	21,488,280	0.0931
150	除塵設備	コンベア	その他	その他		7	－	－	－
151	除塵設備	操作・制御設備	操作・制御設備	圧力スイッチ		1	168	1,471,680	0.6795
152	除塵設備	操作・制御設備	操作・制御設備	リミットスイッチ		6	11,229	98,366,040	0.0610
153	除塵設備	操作・制御設備	操作・制御設備	制御用ボタンスイッチ		1	18,930	165,826,800	0.0060
154	除塵設備	操作・制御設備	操作・制御設備	交流電磁開閉器		6	9,742	85,339,920	0.0703
155	除塵設備	操作・制御設備	操作・制御設備	漏電遮断器		2	2,029	17,774,040	0.1125
156	除塵設備	操作・制御設備	操作・制御設備	限時継電器		2	7,370	64,561,200	0.0310
157	除塵設備	操作・制御設備	操作・制御設備	補助継電器		3	49,166	430,694,160	0.0070
158	除塵設備	操作・制御設備	操作・制御設備	近接スイッチ		2	1,333	11,677,080	0.1713
159	除塵設備	操作・制御設備	操作・制御設備	低圧変電器		1	459	4,020,840	0.2487
160	除塵設備	操作・制御設備	操作・制御設備	その他		58	－	－	－

※：本表にない機器の故障は実績が無いことを示す。FMEA・FTA において、本表以外の機器・部品の故障率が必要となった場合は、機械設備の信頼性評価に関する調査研究、土木研究所資料、第 2870 号に準拠し、当該機器・部品が属する小区分の「延べ供用時間」の３倍にあたる供用時間に１回の割合で故障が発生するものとみなした数値を用いるものとする。

4．維持管理情報の整理手法

4.1　河川ポンプ設備の維持管理の概要

河川ポンプ設備は、河川の出水時に確実に内水を排除することを使命としており、必要なときに確実に稼働でき、要求される間故障無く連続運転を行える信頼性が求められる。その信頼性を確保するために実施される維持管理の柱は、定期的に実施する点検作業と比較的大規模な分解を伴う保守整備である。

河川ポンプ設備は「揚排水機場設備点検・整備指針(昭和 64 年国土交通省:平成 13 年、平成 20 年改訂)」（以下「点検・整備指針」という）に則って点検・整備が行われてきた。

基本的な点検内容の構成は昭和 64 年の施行以来約 20 年間変わらなかったが、平成 20 年に施行された検討マニュアルにおいて画一的な点検項目が見直され、個別の設計や設備構成に見合った点検項目を設定することが示された。また、月点検の目的は、停止状態にある各機器の異状を発見して未然に排除することによって、次回の運転時に故障を発生させないことであるが、図 4-1 に示すとおり、基本的に管理運転を行って全体システムに異状がないか確認する管理運転点検が基本となった。年点検については、従来どおり機器の健全度の把握、システム全体の機能確認、劣化・損傷等の発見を目とした詳細な確認と管理運転を行うこととされている。

本研究では、実際に現場ではどのような点検作業がこれまで行われてきたか、また、信頼性評価手法として FMEA、FTA の実施に資することが出来る情報について調査することとした。

4.2　維持管理情報の種類

(1)一般的な維持管理情報

一般的に、工事、点検整備等から得られる情報を列記すると、以下のとおりである。

・設備台帳情報（設備の基本仕様・設備構成・各機器の仕様等）

・点検整備情報（時系列情報、作業分類（年点検・月点検等）、各種点検表(異状有無・各状態パラメータ)、特記事項等）

・運転情報（運転日時・時間情報、稼働対象機器、運転時各状態パラメータの主な計測情報）

・故障履歴（故障日時、故障内容、故障モード、故障発生の状況（点検時・運転時））

・修繕更新情報（増設・改良工事、修繕作業、修繕工事、更新工事情報、施工記録）

・経済性情報（建設費（増設・改良費を含む）、維持管理費（更新費を含む））

以下、FMEA・FTA を用いた信頼性評価の面から必要となる維持管理データについて述べる。

(2)FMEA に要する維持管理情報

(1)に示す維持管理情報と FMEA に要する情報を勘案し、FMEA については、表 4-1 のとおり維持管理情報を収集し、本研究に活用することとした。

表 4-1　FMEA に必要な情報項目

情報項目	情報元	活用
システム構成 構成機器内訳	設備台帳 工事完成図書 点検整備報告書	FMEAにおける構成機器の選定 構成機器のシステム全体への影響度評価
故障内容	点検整備報告書 故障報告関係資料	故障パターンの把握 故障モードの抽出 故障モードの原因の特定 故障発見の難易度
機器故障率	点検整備報告書 故障報告関係資料	機器毎の故障頻度
故障の復旧内容	工事完成図書 点検整備報告書 故障報告関係資料	復旧時間の算定

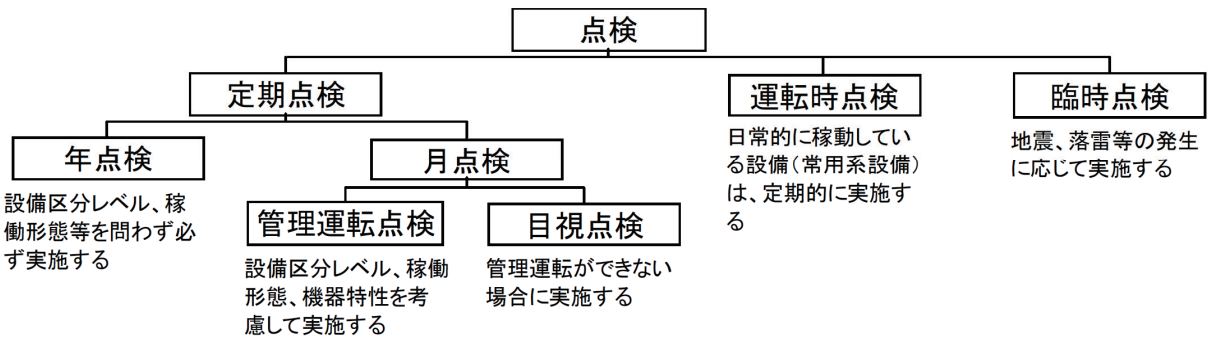


図 4-1　点検の構成（出典：河川ポンプ設備点検・整備・更新検討マニュアル(案)p3-1）

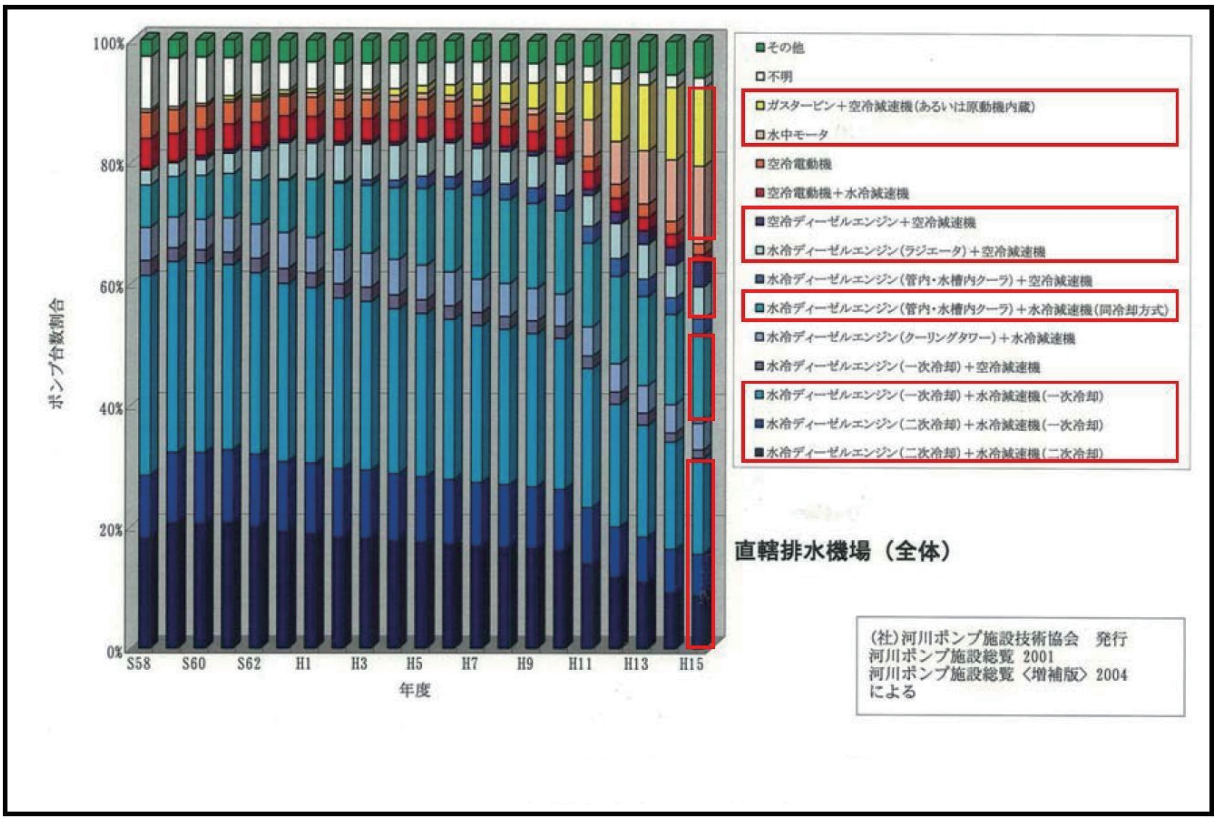


図 4-2 直轄排水機場形式別統計図

表 4-2 FTA に必要な情報項目

情報項目	情報元	活用
構成機器内訳 構成機器の設計仕様	設備台帳 工事完成図書	故障木の構成 事象分析
故障内容	点検整備報告書 故障報告関係資料	事象分析
機器故障率	点検整備報告書 故障報告関係資料	各事象の生起確率の解析

(3)FTA に要する維持管理情報

FTA に要する情報を勘案し、表 4-2 のとおり維持管理情報を収集し、本研究に活用することとした。

4.3 維持管理情報の収集

河川ポンプ設備の信頼性及び経済性を考慮したマネジメント手法の検討は、具体的な維持管理情報を用いて実施することとした。維持管理情報の収集は、次の手順で実施した。

1)全国の河川ポンプ設備の概要調査

2)ポンプ形式区分の整理

3)情報収集方針及び対象ポンプ設備の決定

4)情報収集

(1)全国の河川ポンプ設備概要調査

河川ポンプ設備の信頼性を評価できる汎用的なFMEA、FTA を検討するため、「河川ポンプ施設総覧 2001」及び「河川ポンプ施設総覧(増補版)2004」（双方とも社団法人河川ポンプ施設技術協会編）を用いて、全国の河川ポンプ設備の内容を調査した。確認した事項は、総排水量、主ポンプ台数、主ポンプ形式、原動機形式、減速機形式である。

調査対象施設は、双方の総覧に記載のある直轄管理の河川ポンプ設備 534 箇所（総覧 2001 掲載分 386 箇所、増補版 2004 掲載分 148 箇所）である。

「揚排水ポンプ設備技術基準(案)同解説」（社団法人河川ポンプ施設技術協会編）では、河川ポンプ設備は、主ポンプ設備と主ポンプ駆動設備、系統機器設備（燃料系統・冷却水系統・始動系統・潤滑油系統・給排気系統など）、監視操作制御設備、電源設備、除塵設備等に区分されており、設計上主ポンプ設備には予備を設けず、各々単独で主ポンプ駆動設備を有している。一方、系統機器設備の各系統は、複数の主ポンプ設備の兼用設備となっており、故障時の影響範囲が非常に大きいため、二重化あるいはそれ以上の冗長化を図っている場合が多い。また、系統機器設備のうち、最も多様な設計になるものが冷却水系統であり、主ポンプ設備及び主ポンプ駆動設備に装備される冷却を要する機器の配置、数量、さらに冷却水の調達環境によって設計が異なる。冷却を要する機器は、主ポンプ水中軸受（ゴム軸受の場合）、主原動機(一次・二次)、減速機等多様であり、また回転軸の水密を保つ封水機構にも水系統を要するので、他の系統機器よりシステム設計が複雑になる。よって、多くのシステムを仕分けする場合に、原動機及び減速機の冷却系統に着目

する必要がある。

図 4-2 に、冷却系統を考慮した原動機及び減速機形式により、直轄管理の河川ポンプ設備を時系列に仕分けした構成割合を示す。平成 15 年度の段階で、総数は 534 箇所である。

機場形式の傾向は概ね下記のとおりである。

①冷却水を使用する機場形式は、平成 7 年度から減少し始め、平成 15 年度現在で 7 割を下回る。

②揚排水ポンプ設備技術基準(案)同解説で適用が標準化されたガスタービンが平成 11 年度以降増加している。

③ガスタービン同様、冷却水を必要としない水中ポンプも近年増加している。

④二次冷却水系統を有する設備の減少が著しい。

以上を考慮して、信頼性評価を行うためにポンプ形式区分の整理を行った。

(2)ポンプ形式区分の整理

揚排水ポンプ設備技術基準(案)同解説における冷却水系統の区分について概説する。河川ポンプ設備に採用される代表的な冷却方式の事例を図 4-3～4 に示す。

図 4-3 に示す直接冷却方式は、一次冷却方式とも呼ばれる。一次冷却水とは、冷却対象となる機器を直接冷却する水で、一般的に循環系統の不具合を避けるために清水が用いられる。原動機や減速機を冷却する清水がふんだんに用意できる場合に採用されることがあったが、一般的に井戸水を用いることから新規建設では殆ど見られない。原動機に限ってみれば、トラック等に使用されるラジエータ方式も直接冷却方式の 1 つであり、河川用ポンプ設備で採用されることがある。技術基準においては、一次冷却水を管内クーラで冷却する方式も直接冷却方式と呼ぶため、本報告では図 4-3 の形式を一次冷却方式という。

図 4-4 に示す冷却方式は、二次冷却方式である。二次冷却水とは、冷却によって暖まった一次冷却水を冷やすための冷却水をいう。河川水の塵芥を排除して用いるのが一般的である。一次冷却水の消費を押さえ、なおかつ熱交換容量を大きくとれることから広く普及したが、河川水に混入する塵芥の除去が滞ると機場の機能が低下することやシステムが複雑になるため、近年では減少している。

図 4-5 は、管内クーラ方式といい、一次冷却水配管を主ポンプの吐出管内に設置する熱交換器へ通して、吐出水と熱交換を行うものである。

二次冷却水を使用せずに同様の効果を得ることができるので、近年広く普及している。コンクリートケーシング等の大型ポンプでは、一次冷却水を吐出水槽内へ配管して冷却する方法がとられる場合があり、水槽内クーラと呼ばれるが、原理は本方式と全く同様である。また、冷却水を使用しないシステムとしては、駆動設備では空冷ディーゼル機関、ガスタービン、水中ポンプ、減速機では空冷減速機がある。

図 4-2 の赤枠で示すとおり、採用例の少ない電動機と特異な組み合わせの冷却方式を除けばその他の方式で全体の約 8 割を占めることがわかった。よって、本研究では、信頼性評価の対象とするポンプ設備の冷却方式を次の 9 方式として検討を進めることとした。

①水冷ディーゼル機関（二次冷却）＋水冷減速機(二次冷却)

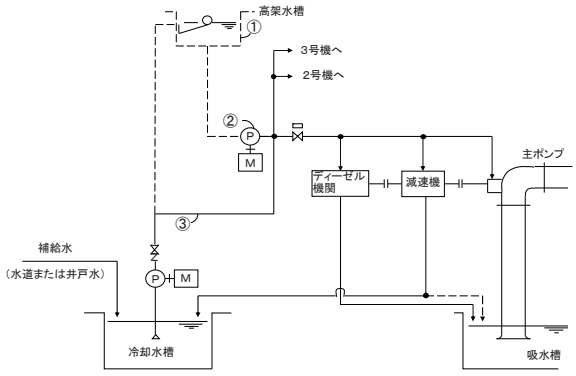


図 4-3　直接冷却方式

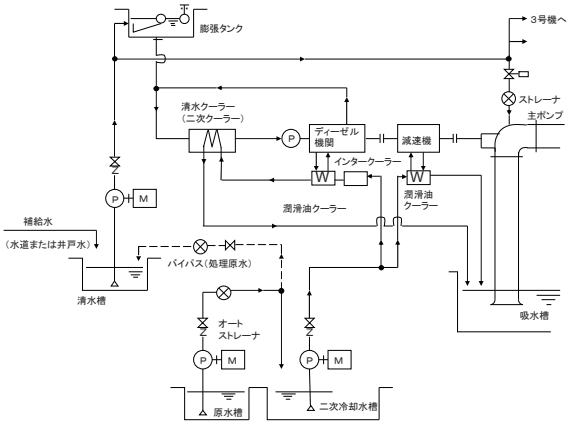


図 4-4　二次冷却方式

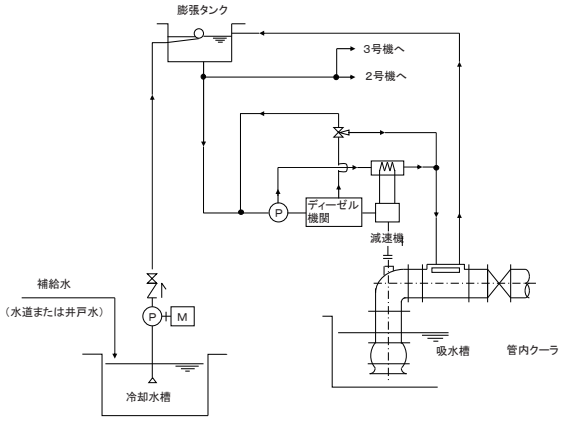


図 4-5　管内クーラ方式

表 4-3 モデル機場の概要

機場名	総排水量(m3/s)	供用年数(年)	ポンプ形式	総台数	機器構成
A 改修前	15	33	立軸斜流ポンプ	2	水冷ディーゼルエンジン(二次冷却方式)＋水冷減速機(二次冷却方式)
A 改修後	15	33	立軸斜流ポンプ	2	水冷ディーゼルエンジン(管内クーラ方式)＋水冷減速機(管内クーラ方式)
B	15	21	立軸軸流ポンプ	2	水冷ディーゼルエンジン(二次冷却方式)＋水冷減速機(二次冷却方式)
C	200	28	立軸渦巻斜流ポンプ	5	水冷ディーゼルエンジン(二次冷却方式)＋水冷減速機(二次冷却方式)
D	100	26	立軸渦巻斜流ポンプ	3	水冷ディーゼルエンジン(水槽内クーラ)＋水冷減速機(水槽内クーラ) ※1
E	50	17	立軸軸流ポンプ	2	水冷ディーゼルエンジン(二次冷却方式)＋水冷減速機(二次冷却方式) ※2

※1：1995 年に 1 台ポンプを増設し二次冷却方式から水槽内クーラに変更されているが、改修前の維持管理情報が十分揃っていないため、改修後のシステムで信頼性を評価する。
※2：E 機場については、増設された 1 台の主ポンプがガスタービンで駆動される形式であるが、系統機器がディーゼルエンジン駆動用として先行導入されているため、ディーゼルエンジン形式での解析を行い、ガスタービン駆動の主ポンプ及び主原動機については調査対象から外した。

②水冷ディーゼル機関（二次冷却）＋水冷減速機(一次冷却)
③水冷ディーゼル機関（一次冷却）＋水冷減速機(一次冷却)
④水冷ディーゼル機関(管内・水槽内ｸｰﾗ)＋水冷減速機(管内・水槽内ｸｰﾗ)
⑤水冷ディーゼル機関(ラジエータ)＋空冷減速機
⑥空冷ディーゼル機関＋空冷減速機
⑦水中モータ
⑧ガスタービン（横軸）
⑨ガスタービン（立軸）

(3)情報収集方針及び対象ポンプ設備の決定

前項に示す全ての形式について、実在するポンプ設備から維持管理データを収集し、解析・比較することが最善であるが、１機場あたり膨大な量の維持管理データが存在すること及び統計処理に要する事務量を考慮して、設置数の多い形式から数ケースを選定して解析することとした。

また、維持管理情報の収集については、事務作業量が膨大なことと、施設によって情報の内容に格差が生じるリスクを軽減するために、当チームが管理事務所と連携して直接必要情報の判断・抽出を行うものとした。

最終的に、対象設備は次の基準により決定した。

①建設時から現在に至るまで長期（概ね 20 年以上）にわたり維持管理情報が保存された設備であること。
②多様な冷却方式（原動機及び減速機）の情報が収集できること。
③設備規模が小さいものから大きいものまで幅広く対象となる情報が収集できること。

情報収集における地理的要因を勘案して、平成 19 年度に関東地方整備局を対象として、上記①に該当する設備の抽出に関するヒアリングを行った。

その結果、過去 10 年を超えた維持管理データを容易に収集できる河川ポンプ設備は少なく、特にその傾向は小規模な排水機場において顕著である。冷却水系統の形式としては、二次冷却方式及び管内クーラ方式は比較的多く存在するが、一次冷却方式の原動機は存在せず、水中ポンプ設備は規模が非常に小さい機場に限定されている。また、ガスタービンは、系統機器を合理化できる反面、圧縮機、燃焼器、タービン、原動機、減速機、起動設備（スタータ）、制御機器を専門的な方法で一体管理するもので、導入後歴史が浅く、河川ポンプ設備における信頼性を評価できるデータが充分に揃っていない。

その他情報収集に係る地理的条件と照合した結果、５機場が対象機場として適切であると判断した。

各機場の概要を表 4-3 に示す。A、B、D 機場は、現在に至るまでにシステム改造を行っており、これまでの供用期間の長さと維持管理情報の保存状態を勘案して最も解析精度が高くなる機器構成で区分している。A 機場は、2000 年までは二次冷却方式で運用されていたが、2001 年に管内クーラ方式に変更になった。A 機場については、回収前後の維持管理情報を用いて双方の信頼性評価を実施する。B 機場は、2002 年から冷却水系統のシステム改良と主ポンプ 3 号機の増設を行っているが、新しいシステムにおいては 3 年程度の維持管理データしか得られな

いため、信頼性評価は、２台の二次冷却システム（クーリングタワー併用）で実施する。

D 機場は、一般的な河川水による二次冷却方式を採用して建設された。E 機場は建設後最も供用時間が短い機場であり、大規模な整備工事は未実施である。

4.4　信頼性に関する情報の整理結果

(1)データ収集状況

表 4-4　維持管理データの収集状況

機場名	年度	S47	S48	S49	S50	S51	S52	S53	S54	S55	S56	S57	S58	S59	S60	S61	S62	S63	H1	H2	H3	H4	H5	H6	H7	H8	H9	H10	H11	H12	H13	H14	H15	H16	H17	H18
A機場	1号機運転データ	完成	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	△	△	×	×	×	△	×	×	○	○	○	○	×	○	○	○	○	×	○	○	○
	2号機運転データ							完成	×	×	×	×	×	×	×	△	△	×	×	×	△	×	×	○	○	○	○	×	○	○	○	○	×	○	○	○
	点検時の故障データ		×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	○	○	○	○	○	×	×	×	○	×	×	○	○	○	○	×	○	○	○	○	○	○	○	○
	修理・整備データ		×	×	×	×	×	○	○	×	○	×	○	○	○	○	○	×	○	×	○	×	×	○	○	○	○	×	○	○	○	○	×	○	○	○
	更新データ										○												○		○				○	○				○		
B機場	1号機運転データ														完成	×	×	×	×	○	○	○	△	△	○	△	×	×	△	○	○	○	○	○	○	○
	2号機運転データ														完成	×	×	×	×	○	○	○	△	△	○	△	×	×	△	○	○	○	○	○	○	○
	3号機運転データ																																完成	○	○
	点検時の故障データ															×	×	○	○	○	○	○	○	○	○	○	×	×	×	○	○	○	○	○	○	○
	修理・整備データ															×	×	○	○	○	○	○	○	○	○	○	×	×	×	○	○	○	○	○	○	○
	更新データ																									○	○	○				○				
C機場	1号機運転データ							完成	×	△	△	△	△	△	△	○	△	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
	2号機運転データ																						完成	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
	3号機運転データ																								完成	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
	4号機運転データ							完成	×	△	△	△	△	△	△	○	△	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
	5号機運転データ							完成	×	△	△	△	△	△	△	○	△	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
	点検時の故障データ									○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
	修理・整備データ									○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
	更新データ																				○			○		○		○	○	○						
D機場	1号機運転データ									完成	×	×	×	×	△	△	×	△	△	△	○	×	×	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
	2号機運転データ									完成	×	×	×	×	△	△	×	△	△	△	○	×	×	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
	3号機運転データ																								完成	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
	点検時の故障データ														○	○	×	○	○	○	○	×	×	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
	修理・整備データ														○	○	×	○	○	○	○	×	×	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
	更新データ																		○							○	○	○	○							
E機場	1号機運転データ																		完成	×	×	×	×	×	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
	2号機運転データ																						完成	×	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
	3号機運転データ																											完成	○	○	○	○	○	○	○	○
	点検時の故障データ																								○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
	修理・整備データ																								○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
	更新データ																																			

凡例　○　内容がわかるもの
×　欠落したデータ
△　管理運転の確認できるもの

各機場の維持管理情報について、収集した結果を表4-4に示す。情報収集が可能であった資料は○及び△を、×印の資料は収集時において直ちに調達できなかったものである。

維持管理情報の殆どは、定常的に実施されている点検整備業務の委託報告書であり、現状において電子納品されておらず、紙ベースのみで保存されている。機場によっては、年間の報告書枚数は一般的に数百頁に及び、規模が大きい機場では千頁を超える。従って、格納スペースに限界があることから、点検結果に基づき、円滑に維持管理が進行した場合は、所定の期間を持って廃棄されるケースが殆どである。

モデル機場における実績に鑑みても、直近約 10 年間の調達状況は良好であり、維持管理情報の電子化は喫緊の課題である。

(2)モデル機場の設備・システム構成

各モデル機場のポンプ設備について、工事完成図書及び設備台帳より構成機器とシステムフローを把握した。各機場の主要機器内訳を表 4-5～9 に示す。システムフローは、各機場とも冷却水系統、始動空気系統、燃料供給系統、潤滑油系統など各系統機器設備について作成し、主要機器の接続・連携の考え方が示されているものである。系統機器は、複数の主ポンプ間で共用する設備であり、システムフローから二重化などの冗長化について確認する必要がある。多岐・複雑な内容になるが、FTA の故障木構成には不可欠なものである。

表 4-5(1)　A 排水機場主要機器内訳（改修前）

A排水機場　ポンプ2台　自家発2台　改修前(二次冷却方式)

系統	機器名	設置台数	運用台数	備考
空気系統				
	空気圧縮機	2台	2台の内1台予備	
	始動用空気槽	2台×4基分	2台の内1台予備×4基分	発々2基含む
冷却水系統				
	井戸ポンプ	1台		
	潤滑水ポンプ	2台	2台の内1台予備	
	二次冷却水ポンプ	2台	2台の内1台予備	
	同上ストレーナ	2台	2台の内1台予備	
	膨張タンク	1槽×2基分		
	清水冷却器	1台×2基分		
	二次清水冷却器	1台×2基分		
燃料系統				
	燃料地下タンク	1槽		
	燃料小出槽	2槽	2槽合わせて必要容量	
	燃料移送ポンプ	2台	2台の内1台予備	
	潤滑油ポンプ	1台×2基分		
	潤滑油冷却器	1台×4基分		発々2基含む

表 4-5(2)　A 排水機場主要機器内訳（改修後）

A排水機場　ポンプ2台　自家発2台　改修後(管内クーラ方式)

系統	機器名	設置台数	運用台数	備考
空気系統				
	空気圧縮機	2台	2台の内1台予備	
	始動用空気槽	2台×4基分	2台の内1台予備×4基分	発々2基含む
冷却水系統				
	井戸ポンプ	1台		
	潤滑水ポンプ	2台	2台の内1台予備	
	膨張タンク	1槽×2基分		
	管内クーラ	1台×2基分		
	冷却水ポンプは原動機機付きのみ			
燃料系統				
	燃料地下タンク	1槽		
	燃料小出槽	2槽	2槽合わせて必要容量	
	燃料移送ポンプ	2台	2台の内1台予備	
	潤滑油ポンプ	1台×2基分		
	潤滑油冷却器	1台×4基分		発々2基含む

表 4-6 B 排水機場主要機器内訳

B排水機場 ポンプ2台（2004年に1台増設運用開始して3台となったが解析は2台で実施）、自家発2台

系統	機器名	設置台数	運用台数	備考
空気系統				
	空気圧縮機	2台	2台の内1台予備	
	始動用空気槽	2台×4基分	2台の内1台予備×5基分	発々2基含む
冷却水系統				
	潤滑水ポンプ	2台	2台の内1台予備	
	膨張タンク	1槽		
	原水取水ポンプ	2台	2台の内1台予備	
	二次冷却水ポンプ	2台	2台の内1台予備	
※	クーリングタワー	1台×3基分		
燃料系統				
	燃料地下タンク	1槽		
	燃料小出槽	2槽	2槽合わせて必要容量	
	燃料移送ポンプ	2台	2台の内1台予備	

※:河川水の塵芥が多いときに二次冷却水を循環使用できるようクーリングタワーが装備されている
2004年の主ポンプ増設完成時に管内クーラ化されたが、解析上は二次冷却方式で実施。

表 4-7 C 排水機場主要機器内訳

C排水機場 ポンプ5台 自家発2台

系統	機器名	設置台数	運用台数	備考
空気系統				
	機関用空気圧縮機	2台	2台の内1台予備	
	自家発用空気圧縮機	1台		
	翼角制御用空気圧縮機	1台		
	始動用空気槽	2台×7基	2台の内1台予備	自家発用2基含む
冷却水系統				
	原水取水ポンプ	3台	3台の内1台予備?	
	同上1次ストレーナ	3台	3台の内1台予備	
	冷却水（A）ポンプ	3台	3台の内1台予備	
	同上2次ストレーナ	3台	2台の内1台予備	
	冷却水（B）ポンプ	2台	2台の内1台予備	
	高架水槽揚水ポンプ	2台	2台の内1台予備	
	高架水槽	2槽		
	インラインポンプ	2台	2台の内1台予備	
	機関1次冷却水冷却器	1台×6基		自家発1基含む
燃料系統				
	燃料地下タンク	2槽	2槽合わせて必要容量	
	燃料小出槽	1槽		
	燃料移送ポンプ	2台×2槽	2台の内1台予備	
	燃料弁冷却油ポンプ	1台×4基		No,4ポンプ以外のポンプ
	燃料弁冷却油冷却器	1台×4基		No,4ポンプ以外のポンプ
	潤滑油タンク	1槽		
	潤滑油移送ポンプ	2台	2台の内1台予備	
	機関油冷却器	1台×6基		自家発1基含む
	減速機油冷却器	1台×5基		
	流体継手油冷却器	1台×5基		
	流体継手作動油冷却器	1台×4基		
	ストレーナ	2台×5基	2台の内1台予備	

本構成機器表と各機場のシステムフロー図が各機場の冗長性に関する設計思想を把握するための資料になる。C 機場の冷却水フロー図を図 4-6 に示す。水色で示された一次冷却水のフローは一般的であるが、青で示す二次冷却系統は、5 台の主ポンプに配水するのに 3 台+2 台の系統に分け、2 台の系統は浄化運転を行う 4 号系統に特化しているが、双方の不調時には融通することができるようにしている。

各機場のシステムフローは、FMEA における構成機器のシステムへの影響度評価や FTA における故障木展開に活用する。

(3)故障・整備・修理情報整理方法

信頼性評価において、最も重要な情報は故障情報と機器の交換(寿命)の記録である。基本故障情報は、「施設名」

表 4-8 D 排水機場主要機器内訳

D排水機場 ポンプ3台 自家発2台

系統	機器名	設置台数	運用台数	備考
空気系統				
	空気圧縮機	2台		
	ポンプ用始動用空気槽	2台×3基分	2台の内1台予備	
	自家発用始動空気槽	3台	1台×2基(常用) 1台予備(兼用)	
冷却水系統				
	清水ポンプ	2台	2台の内1台予備	
	膨張タンク揚水ポンプ	2台	2台の内1台予備	
	インラインポンプ	1台		
	ポンプ用膨張タンク	1槽×3基		
	自家発用膨張タンク	1槽	2基で1槽を兼用	
	ポンプ用水槽内クーラ	2台×2基	2台で1基分の能力	
	自家発用水槽内クーラ	2台	2台で1基分の能力	
	管内クーラ	2台×1基	2台で1基分の能力	
	グランド排水ポンプ	4台	50m3/s:2台 25m3/s各1台	
燃料系統				
	燃料地下タンク	1槽		
	燃料小出槽	1槽		
	燃料移送ポンプ	2台	2台の内1台予備	
	潤滑油タンク	1槽		
	潤滑油移送ポンプ	2台	2台の内1台予備	
	潤滑油冷却器	1台×5基		発発2基含む
	潤滑油ポンプ	1台×5基		発発2基含む
	廃油槽	1槽		
	廃油移送ポンプ	可搬式		

表 4-9 E 排水機場主要機器内訳

E排水機場 ポンプ2台 自家発2台 ガスタービン:1台

系統	機器名	設置台数	運用台数	備考
空気系統				
	空気圧縮機	2台	2台の内1台予備	
	始動用空気槽	2台×4基分	2台の内1台予備	自家発2基含む
冷却水系統				
	二次冷却水ポンプ	2台	2台の内1台予備	
	潤滑水ポンプ	2台	2台の内1台予備	
	二重管式冷却器	3台		自家発1台含む
	1次膨張タンク	1台		
燃料系統				
	燃料貯油槽	1槽		ディーゼルエンジン用
	燃料油槽	1槽		ガスタービン用※
	燃料小出槽	1槽		ディーゼルエンジン用
	燃料小出槽	1槽		ガスタービン用※
	燃料移送ポンプ	2台	2台の内1台予備	ディーゼルエンジン用
	燃料移送ポンプ	2台	2台の内1台予備	ガスタービン用※
	潤滑油槽	1槽		
	潤滑油移送ポンプ	1台		
	廃油槽	1槽		
	廃油移送ポンプ	1台		
	潤滑油冷却器	1台×2基		
	※:ガスタービン用機器はディーゼルエンジンシステム解析の対象から除外する。			

「発生年月」「対象機器・部品名」「故障発生時の状態」「故障内容」「故障モード」「整備形態(対処内容)」であり、これらを維持管理情報から抽出した。

対象機器・部品名においては、故障内容や点検担当者の判断でさまざまなレベルでの表記になることが予測されたため、集計においては元情報に記載のあるままの機器名を省略せずに記録し、「工事完成図書の電子納品要領(案)機械設備工事編 施設機器コード編」（国土交通省，2006.3）に基づき、当該機器・部品そのものあるいは当該機器・部品を包括する機器の施設機器コードを併記するものとした。これによって、類似部品レベルの仕分けミスを防止する。

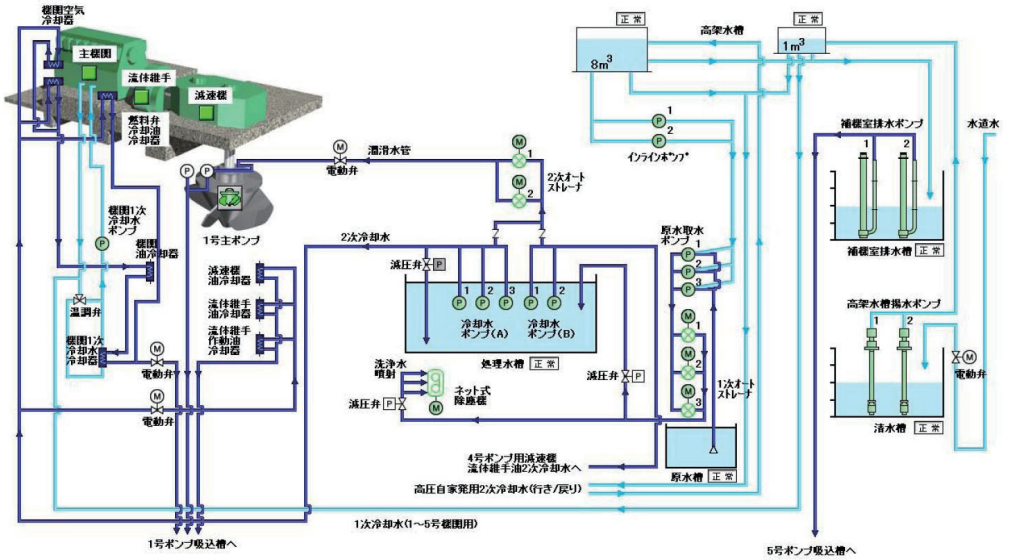


図 4-6　冷却水系統図（C 機場の例）

表 4-10　故障履歴（C 機場の例）

①地整名	②管理No.	③機場名	④設置年	⑤年度	⑥日付	⑦号機No.	⑧故障機器コード	⑨機器名称	⑪運転回数	⑫点検回数	⑭発生時の状態	⑮故障内容
83		C	1980	2003	2003/5/1	不明	-	電極点検用ステージ	1	1	管理運転+年点検	さびによる汚損
83		C	1980	1981			PC050010050100	冷却水ポンプ	1	1		軸受けから異音
83		C	1980	2002	2002/5/7	不明	PE050040000300	375kVA自家発電機盤周波数計	1	1	管理運転+年点検	指示値不良
83		C	1980	1997	1997/11/1	不明	PE050040029900	1500KVA自家発用回転計	1	1	管理運転+月点検	指示値確認不能
83		C	1980	1991	1991/5/27	不明	PH050070009900	冷暖房設備ボイラー用圧力計	1	1	管理運転+年点検	指示値不良
83		C	1980	1991	1991/5/27	不明	PK050080001300	油圧ゲート圧力計	1	1	管理運転+年点検	指示値不良
83		C	1980	1991	1991/5/27	5	PP050010009900	主ポンプ用速度指示ポテンションメーター	1	1	管理運転+年点検	指示値不良
83		C	1980	1996	1996/5/31	1	PK050080003300	減速機潤滑油ダイヤル温度計	1	1	管理運転+年点検	指示値不良
83		C	1980	1996	1996/7/18	4	PK050080003300	減速機潤滑油ダイヤル温度計	1	1	管理運転+月点検	指示値不良
83		C	1980	1996	1996/9/9	不明	PK050020000100	ミニグラフィックパネル用塩分濃度計変換器	1	1	管理運転+月点検	指示値不良
83		C	1980	1997	1998/1/1	5	PD050010009900	主原動機用燃料流量計	1	1	管理運転+月点検	指示値不良
83		C	1980	1997	1997/5/16	2	PK050080021300	主原動機始動空気槽圧力計	1	1	管理運転+年点検	指示値不良
83		C	1980	1997	1997/5/16	4	PK050080021300	主原動機始動空気槽圧力計	1	1	管理運転+年点検	指示値不良
83		C	1980	1997	1997/5/16	5	PK050080021300	主原動機始動空気槽圧力計	1	1	管理運転+年点検	指示値不良
83		C	1980	1997	1997/5/16	不明	PE050040020100	主原動機1500KVA自家発電機	1	1	管理運転+年点検	指示値不良
83		C	1980	1997	1997/5/16	不明	PE050040020100	主原動機375kVA自家発電機	1	1	管理運転+年点検	指示値不良
83		C	1980	1997	1997/9/10	不明	PD050010009900	1500KVA周波数計	1	1	管理運転+月点検	指示値不良
83		C	1980	1997	1998/3/4	5	PD050010009900	主原動機燃料流量計	1	1	管理運転+月点検	指示値不良
83		C	1980	1986			PK050080003300	歯車減速機潤滑油温度計	1	1		指示不良
83		C	1980	1983			PS050010000100	除塵槽ピット排水ポンプ	1	1		自動運転不可
83		C	1980	1980		3	PP050010000300	翼角制御装置	1	1	管理運転+年点検	自動運転不具合
83		C	1980	1998	1998/5/1	5	PD050010009900	主原動機インジェクターカップルプスピンドル	1	1	管理運転+年点検	締め付け困難
83		C	1980	1996	1996/11/6,7	2	PC050010059900	二次冷却水ポンプ軸受摺動部	1	1	管理運転+月点検	手動操作増加
83		C	1980	1982			PS050010030100	所内排水ポンプ	1	1	管理運転+年点検	振動値大、自動運転不能
83		C	1980	2000	2000/11/27	不明	PD050010009900	排ガス煙道	1	1	管理運転+月点検	隙間あり
83		C	1980	2002	2002/5/7	3	PP050010000500	主ポンプ軸受部潤滑油	1	1	管理運転+年点検	性能低下
83		C	1980	2002	2002/5/7	5	PD050010009900	主原動機過給機用エバライトフィルタ	1	1	管理運転+年点検	性能低下
83		C	1980	2002	2002/5/7	不明	PH050020009900	主ポンプ吐出ゲート作動油	1	1	管理運転+年点検	性能低下
83		C	1980	2002	2002/5/7	不明	PJ050020009900	除塵機設備サイクロ減速機出力軸用オイルシール	1	1	管理運転+年点検	性能低下
83		C	1980	1997	1997/5/8	不明	PL050099009900	燃料回収ポンプ用電動機	1	1	管理運転+年点検	絶縁抵抗低下
83		C	1980	1996	1996/6/1	不明	PJ050020009900	二次除塵機二次側ケーブル	1	1	管理運転+年点検	絶縁抵抗不良
83		C	1980	1996	1996/6/1	不明	PJ050099009900	伏越除塵機操作盤ケーブル	1	1	管理運転+年点検	絶縁不良
83		C	1980	1998	1998/5/1	1	10	減速機2号潤滑油ポンプ用モータ	1	1	管理運転+年点検	絶縁不良
83		C	1980	1998	1998/5/1	5	10	減速機2号潤滑油ポンプ用モータ	1	1	管理運転+年点検	絶縁不良
83		C	1980	1998	1998/5/1	不明	PL050099009900	燃料回収ポンプ用モータ	1	1	管理運転+年点検	絶縁不良
83		C	1980	2004	2004/5/1	不明	PJ050020009900	除塵機装置動力ケーブル	1	1	管理運転+年点検	絶縁不良
83		C	1980	1980			PL050030009900	潤滑油タンク油面検知	1	1		接続不良
83		C	1980	1980			PK050085059900	2次冷却水断水警報	1	1		接続不良
83		C	1980	2001	2001/5/7	不明	PJ050020009900	二次除塵機昇降用マグネットスイッチ	1	1	管理運転+年点検	接点不良
83		C	1980	1981			PK050020000100	監視操作盤	1	1		選択SW不良
83		C	1980	2004	2004/10/21	4	PH050020000100	吐出ゲート	1	1	管理運転+月点検	操作不能
83		C	1980	2004	2004/10/10	不明	PJ050020000100	一次除塵機	1	1	管理運転+月点検	操作不能
83		C	1980	2005	2005/6/1	不明	PK050010000500	中央処理装置磁気ディスク装置	1	1	管理運転+年点検	立上げ時間増加
83		C	1980	1991	1991/5/27	4	PP050010009900	主ポンプグランドパッキン	1	1	管理運転+年点検	調整不能
83		C	1980	1991	1991/5/27	5	PP050010009900	主ポンプグランドパッキン	1	1	管理運転+年点検	調整不能
83		C	1980	1986		不明	PE050040000100	375kVA自家発	1	1		抵抗器劣化
83		C	1980	2000	2000/11/27	1	PT050010029900	原水取水ポンプ	1	1	管理運転+月点検	手廻し確認時の回転が円滑でない
83		C	1980	2000	2000/11/27	2	PT050010029900	原水取水ポンプ	1	1	管理運転+月点検	手廻し確認時の回転が円滑でない
83		C	1980	2000	2000/11/27	3	PT050010029900	原水取水ポンプ	1	1	管理運転+月点検	手廻し確認時の回転が円滑でない
83		C	1980	1991	1991/5/27	不明	PJ050020009900	一次除塵機1号回転灯ランプ	1	1	管理運転+年点検	点灯不良
83		C	1980	1991	1991/5/27	不明	PH050050000100	地下1号ポンプ補機室蛍光灯	1	1	管理運転+年点検	点灯不良
83		C	1980	1996	1996/7/18	不明	PH050050000100	エンジン室水銀灯	1	1	管理運転+月点検	点灯不良
83		C	1980	1996	1997/1/16	不明	PH050050000100	エンジン室水銀灯	1	1	管理運転+月点検	点灯不良
83		C	1980	1980			PK050040009900	継電器盤リレー	1	1		動作不良

故障情報においては、式（3-1）におけるアンアベイラビリティの定義に基づき、どのような状態で発生・発見されたかを識別する必要がある。判断指標は、「故障発生時の状態」であり、具体的には、次のように識別する。

1)定期整備時・点検時（年点検又は月点検）
2)実排水運転時
3)その他（実排水運転時以外に偶発的に発見されるもの。）

アンアベイラビリティの定義は、「ポンプ設備が動くべき時に何らかの要因で機能が低下した確率」であるので、1)の定期整備時・点検時に発見された故障のうち、速やかに復旧でき実排水に影響を与えることがないものについては FTA におけるアンアベイラビリティ算定の対象事象とはしない。「速やか」とは点検期間中を目安として、それを超過する場合は算定対象とする。2)の実排水運転時に発見された故障で、全台停止、あるいは排水量を一部削減（運転出来ない号機の発生、排水量の低下など）せざるを得ない故障は、アンアベイラビリティ算出の対象事象となる故障である。3)のケースでは、他の維持管理関係者による発見、第三者による発見などが考えられるが、非常用施設であることから、希なケースになると考えられる。しかし、本ケースは、当該故障が起動に影響を与える可能性が高い場合、アンアベイラビリティ算定対象事象であると判断する。

また、各故障情報については、どのように対処したかを明らかにするため「整備形態」欄を設けた。当該欄では、「修理」「更新」が基本情報になる。更新情報については、当該機器・部品に関する直近前情報の年度と比較することで寿命算定情報を得ることができる。

表計算ソフト「エクセル」を用いて記録表を作成した。当該様式の概要と、C 機場における情報例を表 4-10 に示す。

(4) 各機場の故障傾向

各機場の点検整備情報（表 4-4 における「×」以外の情報）から得られた故障情報は、A 機場 167 件、B 機場 144 件、C 機場 290 件、D 機場 258 件、E 機場 132 件である。当該情報は、精査の結果、明らかな重複事項、ポンプ稼働の信頼性に影響のない付属施設の故障、故障モードとして認識できるが明らかに故障に至っていない事項が含まれていた。当該事項を除くと各機場の故障傾向は表 4-11 のとおりとなった。

また、記録の範囲で実排水運転時に発生した故障は、C 機場における 1 件のみで、その他の全故障は点検時に発見されたものであった。C 機場の 1 件は、5 台ある全主ポンプを並行運転した際に発生した冷却水系統の故障で、発生後直ちに復旧でき、排水不能となることはなかった。

表 4-11 モデル機場の故障傾向

設備区分	二重化	A機場	B機場	C機場	D機場	E機場	設備区分毎合計
主ポンプ	×	2	0	7	4	0	13
減速機	×	10	3	8	3	0	24
主原動機(ディーゼル)	×	13	6	36	29	10	94
吐出弁	×	1	0	9	7	3	20
逆流防止弁	×	0	0	0	0	2	2
電源設備・自家発電設備	○	19	11	11	13	14	68
系統機器設備	○	23	24	32	18	22	119
除塵設備	×	6	5	15	14	8	48
操作制御設備	×	4	1	6	9	5	25
機場毎合計		78	50	124	97	64	総合計 413

凡例：「○」二重化されている 「×」二重化されていない

点検時に発見された故障の傾向では、設備区分でみると系統機器の故障が最も多い。次に主原動機の故障が多くなっている。表 4-11 において、各設備区分において故障時に対応できる二重化が図られているものであるかを付記した。最も故障の多い系統機器については、設計上二重化されており、1 つのラインが故障しても直ちに排水性能に影響は与えない。しかし、2 番目に故障の多い主原動機は予備機がないため、実排水中のトラブルは即刻排水能力の低下につながる。各モデル機場におけるこれらの特徴から、現状においては月点検時に主原動機の作動状況を重点的に確認するなどの具体内容を検討する必要がある。

(5)構成機器の更新サイクル

維持管理では、故障の対応としてあるいは保全の対象として機器の更新がなされており、当該情報を整理することで、統計的な機器の寿命を評価することができる。寿命統計は、本来横断的に多くの設備を対象として整理されるものであり、現状では「河川ポンプ設備点検・整備・更新検討マニュアル(案)」にその概要がまとめられている。

マニュアルに示されている機器の寿命は、母集団の 10%が故障に至る供用時間(以後「B10」という)と平均寿命(母集団の 50%が故障する供用時間。以後「B50」という)で、マネジメントとしては、B10 を超えたら劣化に注意しながら更新の機会を検討し、B50 近辺では更新を行うという指標を示している。ただし、現状では B50 については指標が示されていない機器が多い。

モデル機場における機器の交換サイクルを表 4-12 に示す。本表は、表 4-10 に示す各機場の故障履歴において、整備形態の「更新」「交換」を選択しソートすることで得られる。モデル機場の更新情報は、統計的な寿命とは異なる。更新情報から、その交換が故障によるものか、状態が劣化して交換を行ったものか、時間計画保全なのか識別することが重要であり、各機場でこの識別を精査することで、横断的な統計精度が向上する。

モデル機場の例では、構成する多くの主要機器に対して更新情報が十分ではない。更新情報に抜けがある可能性も否定できないが、建設時から継続して使用している構成機器が非常に多いことを示している。しかしながら、記録が残されているものについては、マニュアルとの比較、複数回更新されている機器については個別機場毎の更新サイクルを知ることができ、以後の維持管理計画の参考資料となる。また、表 4-12 より、「河川ポンプ設備点検・整備・更新検討マニュアル(案)」に示される B10 よりは長いサイクルで更新されている機器が多いことが

表 4-12　モデル機場の構成機器更新サイクル

機器名称	機場名	号機	更新年数 累計	検討マニュアル(案)	
				10%故障率	平均
グランドパッキン	C	4	11		
グランドパッキン	C	5	11		
グランドパッキン	C	1	23		
グランドパッキン	C	5	12		
		平均	14.3	13	–
吐出弁	B		25	36	–
水平コンベア	A	2	27		
コンベア	B		25		
一次除塵機コンベア	D		13		
傾斜コンベア	D		13		
二次除塵機コンベア	D		13		
		平均	18.2		
除塵機	B		25		
潤滑油移送ポンプ	C		14	17	–
潤滑油タンク	C		20		
地下重油タンク	C	2	25		
天井クレーン	B		25		
燃料移送ポンプ	A	1	22		
燃料移送ポンプ	A	2	29		
燃料移送ポンプ	A	1	11		
燃料移送ポンプ	C		14		
		平均	19.0	15	35
井戸ポンプ	A		27		
冷却水ポンプ	A		22		
二次冷却水ポンプ	C		25		
		平均	23.5	12	–
潤滑水ポンプ	A	1	22		
潤滑水ポンプ	A	1	11		
潤滑水ポンプ	C		25		
		平均	19.3	12	–
清水冷却器	A		23		
冷却水配管	A		22		
二次冷却水配管	C		21		
		平均	21.5		
空気圧縮機	A		22		
空気圧縮機	A		27		
空気圧縮機	C		20		
空気圧縮機	D	1	11		
空気圧縮機	D	2	11		
		平均	18.2	9	23
空気槽	B		22		
空気槽	C		11		
		平均	16.5	10	
空気配管	C		11		
空気配管	C		17		
		平均	14.0		
除塵機機側操作盤	B		19		
燃料移送ポンプ機側盤	C		14		
除塵機機側操作盤	D		15		
		平均	16.0	22	37
中央操作制御設備	A		29		
中央操作制御設備	B		25		
中央監視操作設備	C		23		
		平均	25.7	27	–
電源設備	B		25	25	–
直流電源盤	D		15		
発電機盤	A		27		
配線	A		22		
除塵機電源ケーブル	C		24		

表4-13 定期整備（主ポンプ・主原動機・減速機の分解整備）実施間隔

設備区分	機場名	号機	実施間隔	検討マニュアル	備考
主ポンプ	B	1	12年		
		2	14年		
	C	4	14年		
	平均		13年	12年～	（水中軸受）
主原動機	A	1	29年		
		2	12年		
	B	1	11年		
		2	12年		
	C	1	12年		
		4	16年		
		5	15年		
	D	2	16年		
		1	18年		
	平均		16年	15年～	（ピストン）
減速機	A		28年		
	平均		28年	20年～	（軸受）

表4-14 モデル機場の運転時間（1995～2006 B機場は2001～2006）

機場名	号機	1号機		2号機		3号機		4号機			5号機		計
	集計区分	管理	排水	管理	排水	管理	排水	管理	排水	浄化	管理	排水	
A機場	運転別	51.5	85.7	50.7	77.0	－	－	－	－	－	－	－	264.8
	号機計	137.1		127.7		－		－			－		
B機場	運転別	9.4	94.9	8.2	85.4	6.2	55.6	－	－	－	－	－	259.5
	号機計	104.2		93.6		61.8		－			－		
C機場	運転別	56.7	74.6	17.5	102.8	21.3	348.7	78.0	268.9	1650.1	51.9	255.4	2925.7
	号機計	131.3		120.3		370.0		1996.9			307.3		
D機場	運転別	25.6	118.2	27.5	128.4	9.8	50.8	－	－	－	－	－	360.1
	号機計	143.8		155.8		60.5		－			－		
E機場	運転別	53.7	106.6	18.7	110.6	－	－	－	－	－	－	－	289.6
	号機計	160.3		129.3		－		－			－		

わかる。また、前述のとおり建設時以来使用され続けている機器・部品が非常に多いことを勘案すると、機械の状態を適正に把握する技術の重要性を認識することができる。

(6)定期整備時期の把握

主ポンプ・減速機・原動機など年点検で全ての状態を把握出来ない機器については、定期的な整備（時間計画保全）を行うことが念頭に置かれており、これまでの実績でも専門技術者による設備診断等を実施しながら、基本は時間計画保全で更新サイクルを決めてきた経緯がある。

「河川ポンプ設備点検・整備・更新検討マニュアル(案)」では、主要機器・部品に関する修繕・取替の標準年数が示されているが、定期整備に関係する機器・部品について各モデル機場の定期整備における実績と比較したものを、表4-13に示す。

検討マニュアル(案)では、設備区分を構成する機器毎にB10が記載されているので、分解整備を行わないと修繕あるいは取替できない機器の最短年数を表示した。

主ポンプにおいては、A機場では分解整備が行われていないが、他機場の例では概ね検討マニュアルに示される指標と同等の間隔で実施されている。検討マニュアルでは、水中軸受のゴム軸受は平均32年(B50)の取替周期であることから、A機場のように30年以上分解整備を行っていない機場も多数あると考えられる。管理担当事務所では、累積稼働時間を見ながら、実績としての分解整備間隔を重視する時間計画保全を行うため、モデル機場においても機場毎に、ほぼ同間隔で分解整備を行っていることがわかった。

(7)運転情報

現状において、運転時間は機器の故障率を評価できるパラメータとして取り扱っていないが、設備の稼働状況と故障傾向との因果関係を把握することや、将来的に設備の状態監視に資する重要な情報として活用できる可能性がある。本研究では、モデル機場の各ポンプ設備において稼働データを整理し、現場における稼働管理の実態を把握した。

管理運転は、機場の環境によってできない場合や水量によっては長時間運転ができないケースもあり、設置条件を勘案した上で、設計や運転手法においてさまざまな工夫がなされる。モデル機場は、基本的に管理運転が可能な機場であり、A機場を除き、総運転時間に占める管理運転の割合は2割前後である。A機場は2001年以前の排水運転が非常に少ないため、管理運転の割合が高いが、各機場とも、号機間の運転時間バランスをとるよう管理している様子が伺える。C機場の4号機は、電動機駆動で吸水路側の浄化運転ができるようになっており、運転時間が長くなっている。

4.5　経済性に関する情報の整理結果

(1)整理手順

経済性情報は、次の手順で整理するものとした。

①建設費の集計

・新規建設費、増設費

・改造費

②維持修理費の集計

・大規模な定期整備・修繕費の集計

・点検費の集計

・運転費用の集計

③解析

・デフレータによる補正

・建設費に対する維持管理費率の算出

(2)建設費の集計

建設費はポンプ設備に対するイニシャルコストを意味し、当初の建設及び増設、改造に要する費用をいう。対象設備は、揚排水ポンプ設備技術基準（案）に示される範囲とするが、維持修理費との仕分けに関するルールが必要となるので、本研究においては技術的視点に立ち、次のとおりとした。

①土木構造及び建築物は機械設備ではないため、解析の対象範囲外とする。

・上屋、下部工、吸水槽などの工事費は建設費には含めない。

・消防設備も対象外とする。

②下記のような仕様変更は建設費ではなく維持修理費に含む。

・主ポンプ整備時に行う軸受のセラミック化（軸受の変更）

・操作制御設備の更新時の PLC 化(補助継電器から PLC に変更したが基本的な機能は同じ)

③定期整備費用は建設費ではなく、維持修理費の対象とする。

④建設費に含まれるものは、下記のような事例とする。

・図 1-2 の赤枠で示される設備の当初の建設費

・後から行われた主ポンプ設備の増設費

・従前にない使用方法に伴う大規模な設備の追加費用(河川浄化設備追加など)

⑤改造費に含まれるものは下記のとおりとする。

・遠方監視操作制御設備の追加

・ニーズや社会の変化(陳腐化)によって行う系統機器や除塵設備などの大幅な仕様変更

表 4-15 に A 機場の建設費と維持経費を集計した事例を示す。改造費は、本来建設費に含まれるものであるが、表 4-15 では内訳がわかるように差別化して集計した。

表 4-15　A 機場の建設費・維持修理費

建設履歴	建設費			維持修理費			
	建設費	改造費	累計	点検費	修理費	小計	累計
1971 S.46	118,300		118,300			0	0
1972 S.47			118,300			0	0
1973 S.48			118,300			0	0
1974 S.49 維持管理開始			118,300	2,077		2,077	2,077
1975 S.50			118,300	2,077		2,077	4,154
1976 S.51 除塵機増設		41,750	160,050	2,077		2,077	6,231
1977 S.52			160,050	2,077		2,077	8,308
1978 S.53	250,500		410,550	2,077	900	2,977	11,285
1979 S.54			410,550	2,077		2,077	13,362
1980 S.55			410,550	2,000	3,890	5,890	19,252
1981 S.56			410,550	2,400	8,325	10,725	29,977
1982 S.57			410,550	1,630		1,630	31,607
1983 S.58			410,550	1,850	4,190	6,040	37,647
1984 S.59			410,550	2,330	2,200	4,530	42,177
1985 S.60			410,550	2,250	3,800	6,050	48,227
1986 S.61			410,550	2,077	10,850	12,927	61,154
1987 S.62			410,550	2,077		2,077	63,231
1988 S.63			410,550	2,077		2,077	65,308
1989 H.1			410,550	11,872	5,500	17,372	82,680
1990 H.2			410,550	11,872		11,872	94,551
1991 H.3			410,550	11,872		11,872	106,423
1992 H.4			410,550	11,872		11,872	118,294
1993 H.5			410,550	11,872	54,075	65,947	184,241
1994 H.6			410,550	11,872	39,140	51,012	235,252
1995 H.7			410,550	11,872	41,509	53,381	288,633
1996 H.8			410,550	11,872		11,872	300,505
1997 H.9			410,550	11,872	49,770	61,642	362,146
1998 H.10			410,550	11,872		11,872	374,018
1999 H.11			410,550	11,872	96,600	108,472	482,489
2000 H.12 遠隔監視		381,100	791,650	11,687	174,300	185,987	668,476
2001 H.13			791,650	12,238		12,238	680,714
2002 H.14			791,650	12,056	14,700	26,756	707,469
2003 H.15			791,650	11,444	9,450	20,894	728,363
2004 H.16			791,650	13,362	8,925	22,287	750,651
2005 H.17			791,650	10,860	18,795	29,655	780,305
2006 H.18			791,650	11,455		11,455	791,760

1980-1985の平均値とした。

2000-2006の平均値

当該機場は、7.5m³/s の排水量を有する立軸斜流ポンプ２台を擁する機場で、1971 年に建設着手し、1978 年に 2 号機増設、2000 年に遠方監視操作制御設備増設に関する工事を完了させている。

建設費の対象は、当初工事 1971 年の 118,300 千円（主ポンプ 1 台）、除塵機増設 1976 年の 41,750 千円、1978 年の 250,500 千円（主ポンプ 1 台増設）、遠方監視操作制御設備増設 2000 年の 381,100 千円である。

工事の発注方法によっては、建設費の区分と維持修理費の区分が混在しているケースが実績として認められるが、本研究においては積算内容を細分化した解析は実施せず、主たる工種で判断した。

建設費の累計は、増設や改造がなければ前年度と同じ金額である。この建設費と当該年度までに要した平均維

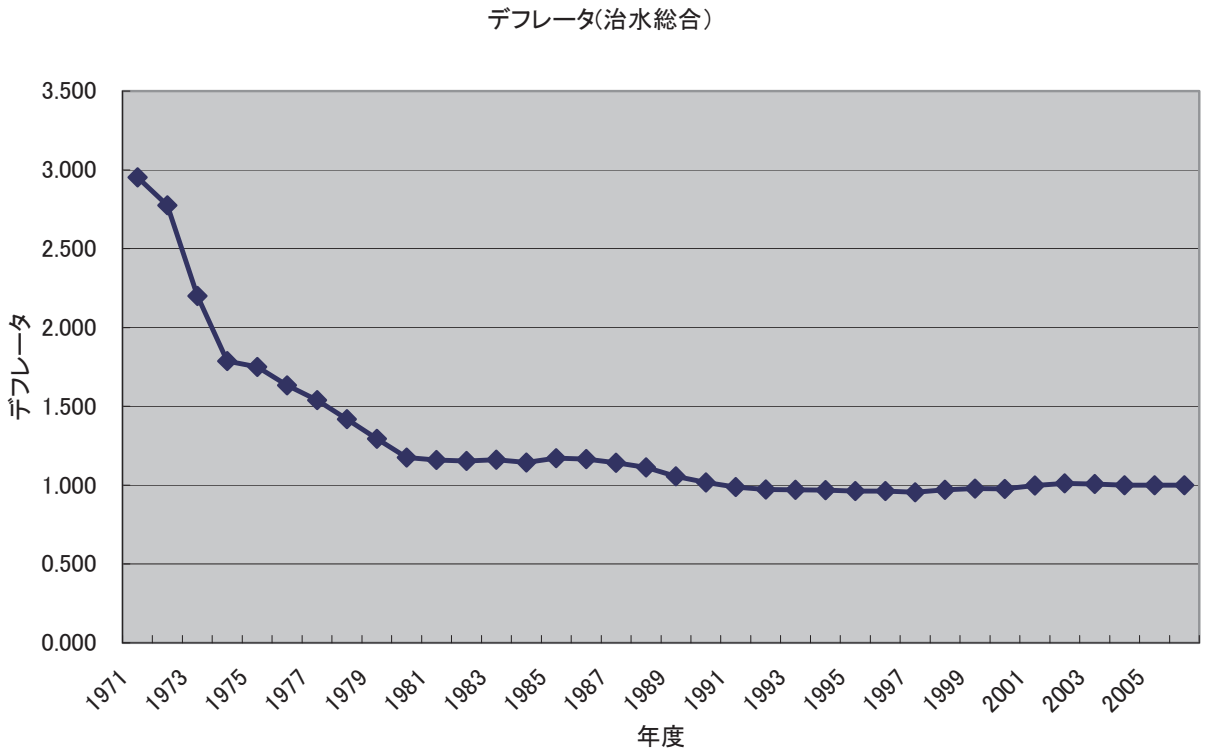


図 4-7 デフレータ(総合治水 2004 年＝1.0)

持修理費との比率が年率換算の維持修理費率(以後、「累計年間維持修理費率」という)となる。

(3)維持修理費の集計

維持修理費はポンプ設備に対するランニングコストで、点検費、運転費、定期整備費、修繕費等である。定期整備費は、主ポンプ、主原動機、自家発電装置など大きな作業だけでなく、系統機器等の OH も含まれる。

維持修理費に欠落があると経済性を過大評価する（実態より良好な経済性を示す）ため、基本的には各ポンプ設備の建設時から現在に至る全ての情報が必要になる。従って、維持修理費の集計に当たっては、点検整備報告書以外に、各ポンプ設備の履歴簿、修繕や定期整備報告書等現存する資料を全て参照し、必要なデータを抽出する必要がある。

本研究においては、維持管理費のうち、委託範囲に含まれていない国土交通省の職員人件費(機場管理分) 及び機場光熱費の統計処理ができなかった。よって、本報告では、職員人件費と機場光熱費を差し引いた費用を「維持修理費」（主に点検・整備・修理に要している費用であるため）と定義した。

表 4-15 に示す点検費用については、欠落した情報を比較的高い精度で補完するよう考慮した。1974 年～1979 年、1989 年～1999 年の点検費用は A 機場の個別情報として入手できなかった。点検費で、青字の箇所は年点検のみを実施しているが請負費が不明なもの、淡赤字は他の複数設備と合わせて点検が発注されておりその請負額は判っているが一部の点検内容と内訳（当該機場分）が不明なものである。

いずれの区分も、現存する点検表と当時の点検整備基準から作業内容を類推できる。前後の請負費が残っている年度と作業内容が同じ場合は、当該年度と同等の金額を想定している。また、淡赤字の箇所は、1989 年以降「揚排水機場設備点検・整備指針(案)」によって、月点検（8 回／年）が導入されたことが類推でき、現存する報告書からは裏付けがとれた。当該点検内容は、現状の作業内容と同等であるので、当該基準で実施されている各年度の平均値を採用している。いずれの補完も、不明箇所との境界となる年度の経費と比較し、大きな相違がないことを確認した。

なお、各年度の点検費に定常的な修理費と運転費用が含まれており、その内容は管理台帳から抜粋した。例えば、1993 年～1999 年にかけての大きな修理費は、主原動機の分解整備、老朽化した主要系統機器の更新、除塵設備の修繕等であり、2000 年には遠方監視操作制御設備増設の時期に合わせて、既存操作制御設備の更新を行っている。

表 4-16　A 機場の建設費・維持修理費（デフレータ考慮）

建設履歴	デフレータ	建設費（千円）			維持修理費(千円)				維持修理費率(%)	
	1/d	建設費	改造費	累計	点検費	補修費	小計	累計	各年別年間	累計年間
1971 S.46 1号ポンプ建設	2.952	349,222		349,222			0	0		
1972 S.47	2.776			349,222			0	0		
1973 S.48	2.200			349,222			0	0		
1974 S.49 維持管理開始	1.786			349,222	11,127	0	11,127	11,127	3.2%	3.2%
1975 S.50	1.751			349,222	10,909	0	10,909	22,036	3.1%	3.2%
1976 S.51 除塵機設置	1.634		68,220	417,441	10,180	0	10,180	32,215	2.4%	2.6%
1977 S.52	1.539			417,441	9,588	0	9,588	41,803	2.3%	2.5%
1978 S.53 2ポンプ建設	1.418	355,209		772,650	8,834	1,276	10,110	51,914	1.3%	1.3%
1979 S.54	1.294			772,650	8,062	0	8,062	59,975	1.0%	1.3%
1980 S.55	1.176			772,650	7,056	4,575	11,631	71,606	1.5%	1.3%
1981 S.56	1.160			772,650	8,352	9,657	18,009	89,615	2.3%	1.4%
1982 S.57	1.153			772,650	5,638	0	5,638	95,253	0.7%	1.4%
1983 S.58	1.162			772,650	6,449	4,869	11,318	106,571	1.5%	1.4%
1984 S.59	1.144			772,650	7,997	2,517	10,513	117,084	1.4%	1.4%
1985 S.60	1.171			772,650	7,904	4,450	12,354	129,438	1.6%	1.4%
1986 S.61	1.166			772,650	8,340	12,651	20,991	150,430	2.7%	1.5%
1987 S.62	1.141			772,650	8,621	0	8,621	159,051	1.1%	1.5%
1988 S.63	1.113			772,650	8,858	0	8,858	167,909	1.1%	1.4%
1989 H.1	1.056			772,650	8,830	5,808	14,638	182,548	1.9%	1.5%
1990 H.2	1.017			772,650	8,914	0	8,914	191,461	1.2%	1.5%
1991 H.3	0.989			772,650	9,067	0	9,067	200,528	1.2%	1.4%
1992 H.4	0.973			772,650	9,312	0	9,312	209,841	1.2%	1.4%
1993 H.5	0.970			772,650	9,675	52,453	62,127	271,968	8.0%	1.8%
1994 H.6	0.968			772,650	10,045	37,888	47,932	319,900	6.2%	2.0%
1995 H.7	0.964			772,650	10,392	40,015	50,406	370,307	6.5%	2.2%
1996 H.8	0.963			772,650	10,769	0	10,769	381,075	1.4%	2.1%
1997 H.9	0.954			772,650	11,053	47,481	58,533	439,609	7.6%	2.4%
1998 H.10	0.970			772,650	11,629	0	11,629	451,238	1.5%	2.3%
1999 H.11	0.979			772,650	12,131	94,571	106,703	557,940	13.8%	2.8%
2000 H.12 遠隔制御	0.977		381,100	1,153,750	11,418	170,291	181,709	739,649	15.7%	2.4%
2001 H.13	0.998			1,153,750	12,213	0	12,213	751,862	1.1%	2.3%
2002 H.14	1.011			1,153,750	12,189	14,862	27,050	778,913	2.3%	2.3%
2003 H.15	1.007			1,153,750	11,524	9,516	21,040	799,953	1.8%	2.3%
2004 H.16	1.000			1,153,750	13,362	8,925	22,287	822,240	1.9%	2.3%
2005 H.17	1.000			1,153,750	10,860	18,795	29,655	851,895	2.6%	2.3%
2006 H.18	1.000			1,153,750	11,455	0	11,455	863,350	1.0%	2.3%

故障記録から、1980 年代後半から 1990 年代にかけて主原動機及び系統機器の故障が点検で発見されているが、表 4-12～13 に示す更新実績を見ると、時間計画保全の要素が強いと考えられる。

(4)年間累計維持修理費率の算定

維持修理費の傾向を把握するために、維持修理費の集計結果から年間累計維持修理費率を求める。維持修理費の集計に当たっては、長年にわたる積み上げ値を計算に用いるため、単純合算ではなく物価変動を見込んだデフレータを年度毎に乗じる。建設費についても同様に取り扱う。デフレータは、建設事業に関する各指標のうち、「治水総合」を活用するものとする。[9)]

図 4-7 に治水総合の推移を示すとともに、デフレータを勘案した維持修理費の推移を表 4-16 及び図 4-8 に示す。

表 4-16 においては、建設費、維持修理費ともデフレータを考慮した計算値であることから、実際に要した費用とは乖離があり、予算執行上の統計値とは整合がとれなくなる。しかしながら河川ポンプ設備は、非常に長期にわたる維持管理を行うため、経済変動要素を考慮することは不可欠である。

維持修理費率を把握することは、計画的な維持管理の実施、予算管理に資することができるとともに、計画における便益評価時に対して維持管理費が計画どおり推移しているか評価することができるため非常に重要である。

表 4-16 における各年別年間維持管理費率は、当該年度の維持修理費を建設費に対する比率で示したものである。

各年別維持修理費率　＝　当該年度の維持修理費／当該年度までの建設費

累計年間維持修理費率　＝当該年度までの維持修理費合計／(当該年度までの建設費×維持管理年数)

累計年間維持修理費率において、5 年目、27 年目に一端下落しているのは、主ポンプ増設や遠方監視操作制御設備の追加により、建設費が増加したためである。また、

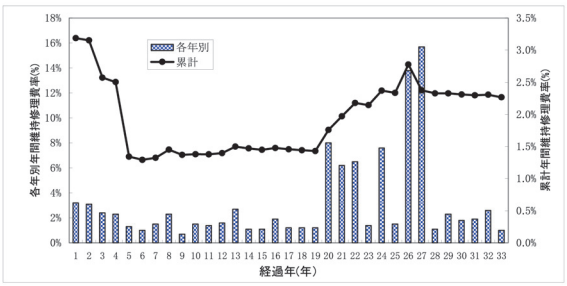


図 4-8 A 機場維持修理費率の推移

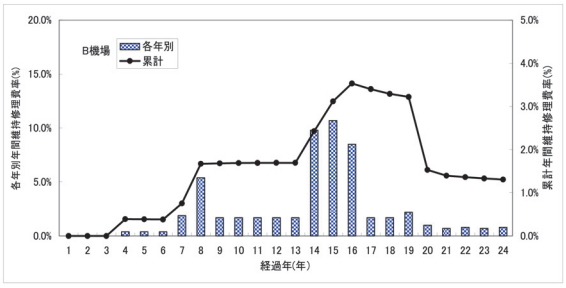


図 4-9 B 機場維持修理費率の推移

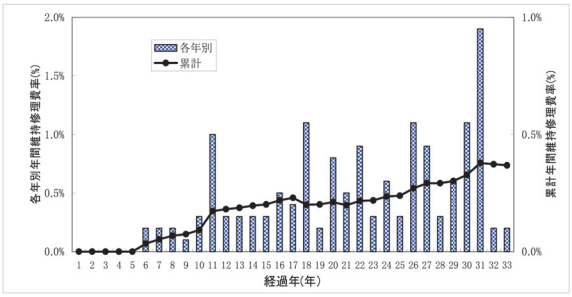


図 4-10 C 機場維持修理費率の推移

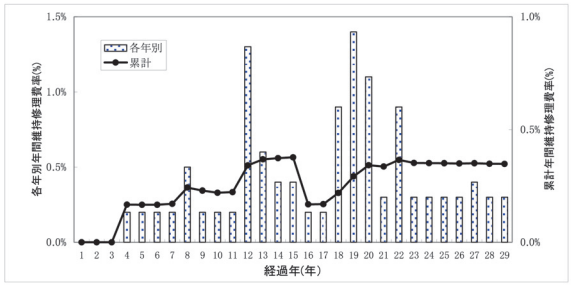


図 4-11 D 機場維持修理費率の推移

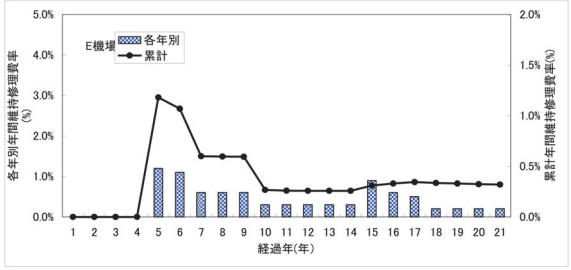


図 4-12 E 機場維持修理費率の推移

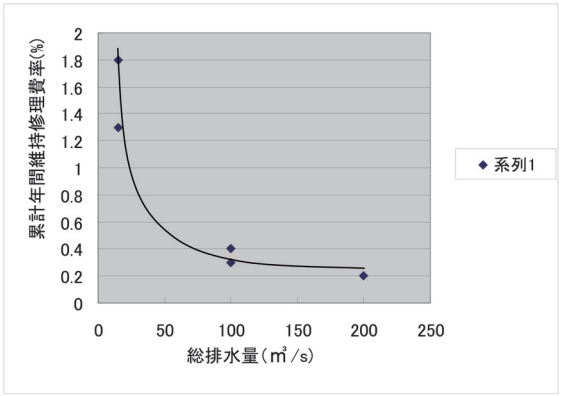


図 4-13 累計年間維持修理費率と機場総排水量(機場規模)の関係

当該機場は 33 年経過時点までの平均で、建設費の 2.3%に当たる維持修理費を要していることが判る。

同様に求めた、B 機場、C 機場、D 機場、E 機場の維持修理費率推移を図 4-9～12 に示す。2006 年度における各機場の累計年間維持修理費率は、B 機場は 1.3%、C 機場 0.4%、D 機場 0.3%、E 機場 0.3%である。

(5)累計年間維持修理費率と機場規模の関係

各モデル機場における累計年間維持修理費率を、比較可能である管理開始後 20 年のデータで比較したものを図 4-13 に示す。母集団が少ないので統計処理はできないが、機場規模が 50m^3/s を超えると 0.5%を下回り、20m^3/s より規模が小さいと 1%を超える傾向が見られる。

原因は、定常的な点検に要する費用にある。河川ポンプ設備の主要設備構成は表 4-6～9 に示したが、排水量や建設費の違いほど構成機器数は増加していない。排水量の大きさは主要機器の規模が大きいことを示しており、管理運転や目視点検に掛かる作業手間には規模に比例した違いがないことを示していると考えられる。

ただし、図 4-13 は供用開始後 20 年におけるモデル機場での解析結果である。図 4-8～12 に示す範囲では、バスタブカーブの摩耗故障期におけるような急峻な費用の増加は見られていないが、図 4-13 において累計年間維持修理費率が低い大規模機場では部品も高価であることから、経年による修理費の増加傾向など今後の情報解析が重要になる。

５．FMEA の実施

5.1　実施手順

本研究では、河川ポンプ設備の FMEA を実施する際の基本資料となるべく、一般的な機器構成を幅広く評価して一般的な評価シートを作成し、それを各機場のシステムに合わせて引用する活用法を想定した。

具体的には、次の実施手順で行った。

(1)FMEA 実施上の想定条件

FMEA の実施範囲は広い。故障モード、故障の因果関係を把握し、システムにとって影響度の大きい構成機器・部品を見極めるために実施するが、将来的には民間での活用方法と同様に、構成機器の技術改善・安全確保などメーカが行うべき作業の客観的指標を得ることも視野にいれる。

従って、継続的に実施され、なおかつ管理者の違いによる判定レベル、精度に大きな違いがなきよう手法に配慮が必要である。河川ポンプ設備では、FMEA を行うにあたって、次に示す想定条件を想定した。

1)各河川ポンプ設備は、所期の性能を発揮し稼働している状態から解析を行う。

根本的な設計ミスや構成機器の初期故障は、工事引渡前に検査や試運転によって排除するものであり、実際にも綿密な検査計画が立てられ、初期故障は排除されて運用に入る。これらの初期故障は、メーカ責任で修正され、維持管理上の故障として統計されていないことから、初期故障の発生確率を運用状態に入った設備における故障の発生確率と同等に扱うことは不適切である。よって、FMEA、FTA を実施する上でこれらを対象としない。

ただし、河川ポンプ設備においては、管理者が根本的な設計ミスを非常に見つけにくい要因がある。ポンプ設備の完成時に、計画点における連続運転ができる例は少なく、低揚程あるいは無負荷運転で実施されるケースがある。また、実運用上で計画点に達することが機場によっては非常に少ない場合もあることから、動力系統や構造体に設計上の負荷が初めて作用したときに故障が発生する場合も想定される。

初期故障の回避は、主たる課題は工事施工管理上にあると考えられるが、維持管理においては運用上における「初めての操作内容」がどのタイミングで発生するかを想定しながら、機場の状態を段階的に把握していくプロセスが重要になる。現場では、定格運転が初めて行われるまでは慎重な確認が続けられており、万一この段階で故障が発生する場合は、瑕疵の有無を含めた個別の検討が必要になる。また、現場の条件が変化していき、想定外の外力が構成機器に作用する可能性がある機器については、FMEA にその旨明らかにするよう努めるものとする。

2)人為的な故障事象は対象としない。

設計どおり完成したシステムにおいても、完全自動化を図らない限り、運用上人間が介在する。介在する人間側が設計上想定しない操作を行うとシステムは故障する場合がある。しかし、このような人為的なミスはシステムの信頼性に大きな影響を与えるが、非常に幅が広く、人為的なミスの視点から FMEA、FTA を展開しにくい。

ただし、FTA が完了すれば、人為的なミスが引き起こす事象を FT 図のなかに見いだすことで、その関連性、トップ事象への影響度を計るという活用方法は可能である。

(2)対象機器の抽出

河川ポンプ設備の故障実績から、評価すべき対象機器を選定する。

(3)故障モードの抽出

各構成機器･部品について、発生しうる故障モードを、各モデル機場における具体事例から引用するとともに、一般的に実施されている点検作業のチェック項目からも想定して妥当な故障モードを抽出・整理する。

(4)構成設備に対する故障内容の整理

一般的な FMEA では、構成機器に発生する故障モードがサブシステム、上位のシステム、システム全体に対してどのような影響があるか個別に評価していくが、河川ポンプ設備では図 1-2 に示すように基本構成の設備が定められており、一部の系統機器設備を除く主要機器はほぼ直列で機能することから、故障が発生すると直近の上位システムに直ちに影響を与えることがわかっている。

従って、FMEA では、構成機器・部品の故障モードによって、当該機器・部品に起こる故障と、その上位の設備（図における河川ポンプ設備の直下の設備群）における故障を合わせて抽出することとした。抽出にあたっては、モデル機場の実例と平成 13 年度集計の故障データ 2)をもとに行った。

(5)評価項目の設定

本 FMEA では、評価項目を「システムへの影響度（ａ）」、「発生頻度（ｂ）」、「発見の容易性（ｃ）」とし、各々４段階評価を行う。４段階評価の利点は、定性的な二者択一判断を２度繰り返すことで完了出来る点である。つまり、各項目とも４・３グループと２・１グループに属するか大きな判断を行い、次に各々を２分すればよい。

その他の評価方法について、例えば５段階評価では「３」

に判断が集中する傾向が想定される。また、定性的な判断で 10 段階に細分すると担当者によって大きく判断が分かれる可能性がある。

総合評価は、故障等級と定義し式(5-1)に示す

故障等級＝（a×b×c）1/3　式(5-1)

3 つの指標の三乗根とするのは、個別の４段階評価と感覚的に指標を合わせるためである。

①システムへの影響度

当該故障が発生した場合、システム全体にどのような影響を与えるか評価する。

４：システムの重故障レベル

３：システムの軽故障レベル

２：軽微な影響があるが連続運転が可能

１：殆ど影響がないか、現時点で二重化などの冗長化が図られている

河川ポンプ設備は、系統機器以外の殆どの重要機器はシステム上直列に影響し、構成機器に故障が発生すると当該機器を含む設備に重大な影響が発生する。なお、除塵設備のように構成機器に故障が発生した場合、自動運転に重大な影響はあるが、塵芥処理などの人為的作業で当面の継続運転が可能なものは軽故障扱いとした。

②故障モード発見の容易性

当該故障モードが発生したことを、維持管理上のどのような作業で発見できるかを評価指標とする。つまり、本評価項目では、より発見しにくい故障モードを重要視する。

４：一般的な維持管理作業では検出が困難

３：分解整備を実施する段階で発見出来るレベル

２：年点検時に発見できるレベル

１：月点検で発見できるレベル

以上より、「４」及び「３」は定常的に実施できる作業では発見できないことを意味する。

③故障発生頻度

本研究では表 3-3 に示す故障実績を用い、故障発生頻度の分布から全体を４区分して評価した。

４：0.1×10-6(1/hr)以上

３：0.066×10-6 以上 0.1×10-6(1/hr)未満

２：0.033×10-6 以上 0.066×10-6(1/hr)未満

１：0.033×10-6(1/hr)未満

5.2　対象機器の抽出

FMEA は、システムに活用されている機器の故障がシステム全体に与える影響度を定性的に解析する手法である。まず、河川ポンプ設備に使用されている構成機器のうち、解析の対象とする機器を選定する必要がある。対象機器の選定は、全国的な調査結果に基づく機器の故障率を算定した表 3-3 とモデル機場における故障内容の整理結果を用いて、次のとおり決定した。

表 5-1　FMEA 対象機器数

設備区分	機器数
主ポンプ設備	32
主ポンプ駆動設備	70
内訳（原動機）	(44)
（減速機）	(26)
電源操作制御設備	158
系統機器設備	32
除塵設備	29
合計	251

(1)運転に影響のある故障実績のある機器

表 3-3 は、実際に運転に影響のある故障が発生した事例から算定した故障率である。よって、表に記載のある機器・部品は、FMEA の対象とする。

(2)モデル機場で故障実績がある機器

モデル機場で故障実績がある機器をピックアプした結果、センサ類など種別が判別できなかった事例を除くと、概ね表 3-3 に掲載されている機器・部品に区分できた。

(3)一般的な点検項目から勘案して解析を要すると判断した機器

表に故障事例がない機器については、「揚排水機場点検・整備指針(案)同解説」（平成 1 3 年 2 月版）の点検項目として掲載がある機器と比較し、機能を失うと当該機器を含む設備区分（図 1-2 における「ポンプ設備」直下に類型される 6 区分）の機能に大きな影響を与える機器を抽出し FMEA の対象とした。結果として、FMEA の対象となる機器・部品数は、表 5-1 に示すとおりとなった。

5.3　実施事例

(1)主ポンプ設備

表 5-2 に、主ポンプ設備の実施事例(機器は抜粋)を示す。

故障内容は、機能の喪失に着目してまとめ、故障モードはその故障を引き起こす変化として編集した。故障モード及び故障モードの発生原因については、故障実績や揚排水機場設備点検・整備指針(案)によるほか、現場で実際に管理を行っている管理者へのヒアリング結果を反映させ最終的に完成させた。また「対策欄」は、今回はメーカヒアリングによって、故障内容を想定した上での復旧に要する時間（ほぼ修復時間 MTTR と同意）とその方法を記載した。

表 5-2　主ポンプの FMEA(抜粋)

機器区分	部品名	故障	故障モード	原因	検出方法	システム	故障モード発見の容易性	故障発生頻度	故障等級（致命度）	対策		備考
										復旧までの所要時間	内容	
本体	吸込口(ベルマウス)	吸込性能低下	土砂堆積	流入土砂量増大	目視	4	3	1	2.3	3ヶ月	取替	
			変形・欠損	吸込水槽形状	吐出圧測定					3ヶ月	取替	
			腐食	異物混入	流量測定					3ヶ月	取替	
			摩耗	経年劣化						3ヶ月	取替	
	ベンド(ケーシング)	漏水(横軸)	パッキン・弁の劣化(横軸ポンプ)	経年劣化	目視	4	1	1	1.6	3ヶ月	取替	鋼管の場合2ヶ月
		排水能力低下	腐食	水質	振動測定					3ヶ月	取替	
			摩耗	設計の誤り	吐出圧測定					3ヶ月	取替	
			振動	施工不良	流量測定					3ヶ月	取替	
	案内羽根	排水能力の低下	土砂堆積	流入土砂量増大	目視	3	3	1	2.1	5ヶ月	取替	性能試験含む
			変形	キャビテーション	吐出圧測定					5ヶ月	取替	
			腐食	異物衝突	流量測定					5ヶ月	取替	
			摩耗	経年劣化						5ヶ月	取替	
	据付部	支持力低下	躯体変形	キャビテーションの発生	目視	3	1	1	1.4	3ヶ月	取替	
		ポンプ位置のずれ	コンクリートクラック	不適切な管理						3ヶ月	取替	
			基礎ボルト破損	設計の誤り(強度不足)						3ヶ月	取替	
インペラ	羽根車	排水能力の低下	腐食	経年劣化	振動測定	4	3	4	3.6	5ヶ月	取替	
		停止	摩耗	異物混入	吐出圧測定					5ヶ月	取替	
		回転不良	欠損	水質	流量測定					5ヶ月	取替	
			振動	キャビテーションの発生	目視					5ヶ月	取替	
主軸及び軸受	主軸	回転不良	変形	想定外の外力	振動測定	4	3	1	2.3	3ヶ月	取替	
		停止	振動	芯ずれ	吐出圧測定					3ヶ月	取替	
			腐食	水質	流量測定					3ヶ月	取替	
				設計・施工の誤り	目視							
	軸継手	トルク伝達不良	ボルトはずれ	想定外の外力	目視	4	3	4	3.6	3ヶ月	取替	
			カップリングゴム摩耗	水質						3ヶ月	取替	
			変形　　腐食	異物混入						3ヶ月	取替	
			振動	ボルトの締め忘れ・トルク不足						3ヶ月	取替	
	外側軸受	回転不良	ベアリング損傷	経年劣化	目視	4	3	1	2.3	3ヶ月	取替	予備品があれば2週間
		回転停止	摺動メタル摩耗・損傷	想定外の外力	振動測定					3ヶ月	取替	
			振動・温度上昇	潤滑油不足　異物混入	温度測定					3ヶ月	取替	
			腐食	芯ずれ・設計・施工の誤り	聴覚					3ヶ月	取替	
	軸受(スラスト軸受)	回転不良	ベアリング損傷	経年劣化	目視	4	3	1	2.3	3ヶ月	取替	予備品があれば2週間
		回転停止	振動・温度上昇	想定外の外力	振動測定					3ヶ月	取替	
			腐食	潤滑油不足　異物混入	温度測定					3ヶ月	取替	
				芯ずれ・設計・施工の誤り	聴覚							
	水中軸受(カットレス)	回転不良	焼き付き	経年劣化	目視	4	3	3	3.3	3ヶ月	取替	予備品があれば2週間
		回転停止	ゴム損傷	給水停止	フローサイト確認					3ヶ月	取替	
			摩耗	異物混入	聴覚					3ヶ月	取替	
	軸保護管	冷却水漏洩	変形	想定外の外力	目視	3	3	1	2.1	3ヶ月	取替	
		主軸保護機能低下	腐食	ボルトの締め忘れ・トルク不足						3ヶ月	取替	
			はずれ	異物衝突						3ヶ月	取替	
			振動	水質						3ヶ月	取替	
	グランドパッキン	水漏れ	損傷	経年劣化	目視	3	2	4	2.9	1ヶ月	取替	
			焼き付き	不適切な締め付けトルク	(漏れ量の確認)					1ヶ月	取替	
			変形							1ヶ月	取替	
			硬化							1ヶ月	取替	

表 5-3　主原動機の FMEA(抜粋)

機器区分	部品名	故障	故障モード	原因	検出方法	システム	故障モード発見の容易性	故障発生頻度	故障等級（致命度）	対策		備考
										復旧までの所要時間	内容	
本体	吸込口(ベルマウス)	吸込性能低下	土砂堆積	流入土砂量増大	目視	4	3	1	2.3	3ヶ月	取替	
			変形・欠損	吸込水槽形状	吐出圧測定					3ヶ月	取替	
			腐食	異物混入	流量測定					3ヶ月	取替	
			摩耗	経年劣化						3ヶ月	取替	
	ベンド(ケーシング)	漏水(横軸)	パッキン・弁の劣化(横軸ポンプ)	経年劣化	目視	4	1	1	1.6	3ヶ月	取替	鋼管の場合2ヶ月
		排水能力低下	腐食	水質	振動測定					3ヶ月	取替	
			摩耗	設計の誤り	吐出圧測定					3ヶ月	取替	
			振動	施工不良	流量測定					3ヶ月	取替	
	案内羽根	排水能力の低下	土砂堆積	流入土砂量増大	目視	3	3	1	2.1	5ヶ月	取替	性能試験含む
			変形	キャビテーション	吐出圧測定					5ヶ月	取替	
			腐食	異物衝突	流量測定					5ヶ月	取替	
			摩耗	経年劣化						5ヶ月	取替	
	据付部	支持力低下	躯体変形	キャビテーションの発生	目視	3	1	1	1.4	3ヶ月	取替	
		ポンプ位置のずれ	コンクリートクラック	不適切な管理						3ヶ月	取替	
			基礎ボルト破損	設計の誤り(強度不足)						3ヶ月	取替	
インペラ	羽根車	排水能力の低下	腐食	経年劣化	振動測定	4	3	4	3.6	5ヶ月	取替	
		停止	摩耗	異物混入	吐出圧測定					5ヶ月	取替	
		回転不良	欠損	水質	流量測定					5ヶ月	取替	
			振動	キャビテーションの発生	目視					5ヶ月	取替	
主軸及び軸受	主軸	回転不良	変形	想定外の外力	振動測定	4	3	1	2.3	3ヶ月	取替	
		停止	振動	芯ずれ	吐出圧測定					3ヶ月	取替	
			腐食	水質	流量測定					3ヶ月	取替	
				設計・施工の誤り	目視							
	軸継手	トルク伝達不良	ボルトはずれ	想定外の外力	目視	4	3	4	3.6	3ヶ月	取替	
			カップリングゴム摩耗	水質						3ヶ月	取替	
			変形　　腐食	異物混入						3ヶ月	取替	
			振動	ボルトの締め忘れ・トルク不足						3ヶ月	取替	
	外側軸受	回転不良	ベアリング損傷	経年劣化	目視	4	3	1	2.3	3ヶ月	取替	予備品があれば2週間
		回転停止	摺動メタル摩耗・損傷	想定外の外力	振動測定					3ヶ月	取替	
			振動・温度上昇	潤滑油不足　異物混入	温度測定					3ヶ月	取替	
			腐食	芯ずれ・設計・施工の誤り	聴覚					3ヶ月	取替	
	軸受(スラスト軸受)	回転不良	ベアリング損傷	経年劣化	目視	4	3	1	2.3	3ヶ月	取替	予備品があれば2週間
		回転停止	振動・温度上昇	想定外の外力	振動測定					3ヶ月	取替	
			腐食	潤滑油不足　異物混入	温度測定					3ヶ月	取替	
				芯ずれ・設計・施工の誤り	聴覚							
	水中軸受(カットレス)	回転不良	焼き付き	経年劣化	目視	4	3	3	3.3	3ヶ月	取替	予備品があれば2週間
		回転停止	ゴム損傷	給水停止	フローサイト確認					3ヶ月	取替	
			摩耗	異物混入	聴覚					3ヶ月	取替	
	軸保護管	冷却水漏洩	変形	想定外の外力	目視	3	3	1	2.1	3ヶ月	取替	
		主軸保護機能低下	腐食	ボルトの締め忘れ・トルク不足						3ヶ月	取替	
			はずれ	異物衝突						3ヶ月	取替	
			振動	水質						3ヶ月	取替	
	グランドパッキン	水漏れ	損傷	経年劣化	目視	3	2	4	2.9	1ヶ月	取替	
			焼き付き	不適切な締め付けトルク	(漏れ量の確認)					1ヶ月	取替	
			変形							1ヶ月	取替	
			硬化							1ヶ月	取替	

主ポンプ設備の構成部品は、故障が排水能力を直接低下させるので、殆ど発見容易性と発生頻度で故障等級が決まる。なかでも、羽根車、軸継ぎ手、水中軸受の故障等級は高い。

(2)主原動機

表 5-3 に主原動機の FMEA 実施例を示す。主原動機も、故障が排水能力に与える影響は非常に大きい。また、構成部品も多く、個別の機関内に冗長性は殆ど無いので、

表 5-4 冷却水系統の FMEA 事例(抜粋)

機器区分	部品名	故障	故障モード	原因	検出方法	システム	故障モード発見の容易性	故障発生頻度	故障等級（致命度）	対策		備考
										復旧までの所要時間	内容	
冷却水系統	管内クーラ	冷却機能低下	腐食	経年劣化	目視	4	3	2	2.9	2ヶ月	取替え	
			変形	想定外の外力						2ヶ月	取替え	
			損傷 漏れ	異物衝突						2ヶ月	取替え	
			詰まり	水質の悪化						2ヶ月	取替え	
	クーリングタワー	冷却機能低下	熱交換機腐食	経年劣化	目視	2	1	4	2.0	1ヶ月	取替え	
			熱交換機チューブ詰まり	蒸発後のスケール付着	作動確認					1ヶ月	取替え	
			損傷 漏れ	水質の悪化						1ヶ月	取替え	
	膨張タンク・高架水槽	冷却水漏れ	腐食	経年劣化	目視	2	1	1	1.3	1ヶ月	取替え	
			変形	塗膜の劣化						1ヶ月	取替え	
			損傷	想定外の外力						1ヶ月	取替え	
	冷却水ポンプ	揚水不能	羽根車変形	異物噛み込み 過負荷	目視	1	2	4	2.0	2ヶ月	取替え	
		揚水量低下	軸・軸受損傷	想定外の外力	電流値測定					2ヶ月	取替え	
		グランド部水漏れ	電動機断線・短絡	高湿度	絶縁抵抗測定					2ヶ月	取替え	
			グランドパッキン変形	経年劣化						2ヶ月	取替え	
	二次冷却水ポンプ	揚水不能	羽根車変形	異物噛み込み 過負荷	目視	1	2	4	2.0	2ヶ月	取替え	
		揚水量低下	軸・軸受損傷	想定外の外力	電流値測定					2ヶ月	取替え	
		グランド部水漏れ	電動機断線・短絡	高湿度	絶縁抵抗測定					2ヶ月	取替え	
			グランドパッキン変形	経年劣化						2ヶ月	取替え	
	潤滑水ポンプ	揚水不能	羽根車変形	異物噛み込み 過負荷	目視	1	2	4	2.0	2ヶ月	取替え	
		揚水量低下	軸・軸受損傷	想定外の外力	電流値測定					2ヶ月	取替え	
		グランド部水漏れ	電動機断線・短絡	高湿度	絶縁抵抗測定					2ヶ月	取替え	
			グランドパッキン変形	経年劣化						2ヶ月	取替え	
	取水ポンプ	揚水不能	羽根車変形	異物噛み込み 過負荷	目視	1	2	4	2.0	2ヶ月	取替え	
		揚水量低下	軸・軸受損傷	想定外の外力	電流値測定					2ヶ月	取替え	
		グランド部水漏れ	電動機断線・短絡	高湿度	絶縁抵抗測定					2ヶ月	取替え	
			グランドパッキン変形	経年劣化						2ヶ月	取替え	
	井戸（給水）ポンプ	揚水不能	羽根車変形	異物噛み込み 過負荷	目視	2	2	4	2.5	2ヶ月	取替え	
		揚水量低下	軸・軸受損傷	想定外の外力	電流値測定					2ヶ月	取替え	
		グランド部水漏れ	電動機断線・短絡	高湿度	絶縁抵抗測定					2ヶ月	取替え	
			グランドパッキン変形	経年劣化						2ヶ月	取替え	
	原水ポンプ	揚水不能	羽根車変形	異物噛み込み 過負荷	目視	1	2	2	1.6	2ヶ月	取替え	
		揚水量低下	軸・軸受損傷	想定外の外力	電流値測定					2ヶ月	取替え	
		グランド部水漏れ	電動機断線・短絡	高湿度	絶縁抵抗測定					2ヶ月	取替え	
			グランドパッキン変形	経年劣化						2ヶ月	取替え	
	オートストレーナ	冷却水取水不能	エレメント詰まり	塵芥量の増大	目視	3	2	4	2.9	14日	取替え	
		冷却水取水量減少	破損・腐食	経年劣化	電流値測定					14日	取替え	
			電動機断線・短絡	高湿度	絶縁抵抗測定					14日	取替え	
				過負荷								
	電磁弁	止水不能	電磁石断線	経年劣化	目視	3	2	4	2.9	14日	取替え	
		作動不良	弁体破損	高湿度	作動確認					14日	取替え	
			腐食	過負荷						14日	取替え	
	電動弁	止水不能	電動機断線・短絡	経年劣化	目視	3	2	4	2.9	14日	取替え	
		作動不良	弁体破損	高湿度	作動確認					14日	取替え	
			腐食	過負荷						14日	取替え	
			スピンドル損傷	そうてい								
	電動ボール弁	止水不能	電動機断線・短絡	経年劣化	目視	3	2	3	2.6	14日	取替え	
		作動不良	弁体破損	高湿度	作動確認					14日	取替え	
			腐食	過負荷						14日	取替え	
			スピンドル損傷	想定外の外力								
	手動弁	止水不能	スピンドル損傷	経年劣化	目視	2	2	1	1.6	14日	取替え	
		作動不良	弁体破損	高湿度	作動確認					14日	取替え	
			腐食	過負荷						14日	取替え	
				想定外の外力								
	逆止弁	逆流防止機能喪失	弁体破損	ウォーターハンマ	目視	3	1	2	1.8	14日	取替え	
		逆流方法への水漏れ	腐食	異物混入・噛み込み	聴覚					14日	取替え	
		水漏れ		経年劣化						14日	取替え	

FMEA の結果でも故障等級の高い機器・部品が多くなった。表 3-3 に示す故障率が高い部品も多い。個別には、燃料噴射弁、吸・排気弁、過給器、ピストン関連の各部品、調速機の故障等級が高い。ピストンなど日常点検で故障モードを発見することは難しい部品も多い。

なお、機場の設計思想で若干の差異はあるが、非常用発電設備の原動機もほぼ同じ形式で設置される。予備機があるため、システムの影響度が低くなり、表 3-3 に示す各部品の故障率も主原動機より低い傾向がある。故障モード発見の容易性は殆ど主原動機と同様である。

(3)系統機器設備

主要な系統機器は設計上予備系統を有しており、機器・部品単独で故障が発生しても直ちに大きな影響を与えることはないが、主ポンプ、主原動機の駆動に必要不可欠であるがために冗長化が図られていることから、全て FMEA の対象とした。表 5-4 に冷却水系統の実施例を示す。故障実績の多いポンプ機器は一般的に冗長化することで、故障等級を低下させている。配管の弁類も故障が多いが、主要ルートの電動弁・電磁弁では、自動開閉が行われなくなった場合、手動弁で代替できる措置がとれるため、運転に影響が出る場合でも、即時復旧できる場合が多い。

(4)故障等級の大きい機器

FMEA を実施した結果、故障等級が大きい機器を集計して表 5-5 に示す。FMEA の 3 つの指標においては、各々「2」以下であれば維持管理上安全側の評価範囲にある。よって、故障等級においても「2」以下であれば維持管理上の問題が少ない構成機器であると判断する。本 FMEA では、故障等級の大きさを評価する 1 つの指標として、2 つの指標が「2」であっても、1 つ「4」がある場合の故障等級「2.5」に着目した。表 5-5 においては、2.5 を越える機器をまとめて示している。

表 5-5　故障等級の大きい機器・部品一覧

設備区分	機器区分	部品名	故障	故障モード	原因	検出方法	システム	故障モード発見の容易性	故障発生頻度	故障等級（致命度）	対策		備考
											復旧までの所要時間	内容	
主ポンプ	インペラ	羽根車	排水能力の低下	腐食	経年劣化	振動測定	4	3	4	3.6	5ヶ月	取替	
			停止	摩耗	異物混入	吐出圧測定					5ヶ月	取替	
			回転不良	欠損	水質	流量測定					5ヶ月	取替	
				振動	キャビテーションの発生	目視					5ヶ月	取替	
	主軸及び軸受	水中軸受(カットレス)	回転不良	焼き付き	経年劣化	目視	4	3	3	3.3	3ヶ月	取替	予備品があれば2週間
			回転停止	ゴム損傷	給水停止	フローサイト確認					3ヶ月	取替	
				摩耗	異物混入	聴覚					3ヶ月	取替	
	吐出弁	弁体	止水不全	変形	想定外の外力	目視	3	3	4	3.3	3ヶ月	取替	
			開閉不全	腐食	経年劣化	振動測定					3ヶ月	取替	
				固着	異物噛突・挟み込み	聴覚							
					キャビテーションの発生								
	逆流防止弁	弁体	止水不全	腐食	経年劣化	目視	3	2	4	2.9	3ヶ月	取替	
			閉鎖不全	変形	想定外の外力						3ヶ月	取替	
				摩耗	異物噛突・挟み込み						3ヶ月	取替	
				固着							3ヶ月	取替	
		弁箱(配管に設けられる場合)	水漏れ	腐食・摩耗	経年劣化	目視	3	2	4	2.9	3ヶ月	取替	
				変形・ひび・割れ	想定外の外力						3ヶ月	取替	
				破損	異物付着						3ヶ月	取替	
		弁軸	回転不能	腐食	経年劣化	目視	3	2	4	2.9	1ヶ月	取替	
			開閉動作角度の減少	変形	異物衝突						1ヶ月	取替	
				摩耗	異物付着						1ヶ月	取替	
				固着							1ヶ月	取替	
主原動機（ディーゼル）	本体	シリンダヘッド	圧縮ガス漏れ	変形	経年劣化	目視	3	2	3	2.6	2日	交換	
			冷却水漏れ	ひび	タペット隙間調整不良						2日	交換	
			潤滑油漏れ	欠損							2日	交換	
			タペット作動異常										
		燃料噴射弁(燃料弁)	燃料噴射せず	ノズル破損	経年劣化	目視	4	2	4	3.2	2日	交換	
			噴射量調整不能	スプリング破損	燃料への異物(水等)混入	回転数測定					2日	交換	
			出力安定せず	固定又は取付ナット破損	開弁圧力調整を実施していない	単体作動確認					2日	交換	
				開弁圧力誤設定							2日	交換	
		ライナ	圧縮ガス漏れ	やぶれ	経年劣化	目視	3	2	3	2.6	2日	交換	
			潤滑油漏れ	欠損	設計・施工の誤り						2日	交換	
			冷却水漏れ	変形							2日	交換	
				ひび							2日	交換	
		吸・排気弁	作動不良	破損	経年劣化	目視	4	3	4	3.6	2日	交換	
			作動しない	変形	バルブスプリング調整不良	聴覚					2日	交換	
				カーボン付着	長期低負荷運転後の定格負荷運転						2日	交換	
		過給器	出力低下	タービン欠損	経年劣化	目視	4	2	4	3.2	2日	交換	
			原動機停止	シャフト折損	異物混入	聴覚					2日	交換	
				腐食	熱疲労						2日	交換	
				振動	フィルタ閉塞						2日	交換	
		ピストン	原動機停止	カーボン付着	長期低負荷運転後の定格負荷運転	目視	4	3	4	3.6	2日	交換	
				損傷	連接棒破損	ターニング					2日	交換	
					冷却水混入						2日	交換	
					潤滑油不足						2日	交換	
		ピストンリング	圧縮漏れ	摩耗	経年劣化	目視	3	3	4	3.3	2日	交換	
			原動機停止	変形	オーバーヒート	ターニング					2日	交換	
				損傷	長期低負荷運転後の定格負荷運転						2日	交換	
				カーボン付着	潤滑油不足						2日	交換	
主原動機（ディーゼル）	本体	ピストンピン	原動機停止	損傷	想定外の外力	目視	4	3	4	3.6	2日	交換	
				破断	オーバーヒート	ターニング					2日	交換	
					連接棒破損								
					潤滑油不足								
		連接棒	原動機停止	折損	想定外の外力	目視	4	3	2	2.9	2日	交換	
					オーバーヒート	ターニング							
					冷却水混入								
					潤滑油不足								
		クランクピンメタル	出力低下	破損	想定外の外力	目視	3	3	3	3.0	2日	交換	
			回転数低下	ひび	経年劣化	聴覚					2日	交換	
					潤滑油不足	ターニング							
		調速機	原動機回転数不安定	ガバナ軸折損	想定外の外力	目視	4	2	4	3.2	2日	交換	
			原動機停止	ガバナウェイト損傷	経年劣化						2日	交換	
				シフタ機構損傷	調整不良						2日	交換	
	潤滑油系統	潤滑油冷却器	油温制御不能	配管腐食	経年劣化	目視	4	2	4	3.2	30日	交換	
			原動機焼付き	冷却水漏れ	冷却水質の悪化・量不足						30日	交換	
				ケーシング腐食	潤滑油劣化						30日	交換	
					清掃不良								
		圧力調整弁	潤滑油圧力低下	調圧機構破損	調整機器破壊による圧力調整不能	目視	3	2	3	2.6	2日	交換	
				ブルドン管式圧力計破損	原動機摺動部の摩耗進展	アラーム(小型原動機の場合)					2日	交換	
						圧力測定							
	燃料系統	燃料フィードポンプ	燃料供給できない	ロータ又はベーン又は歯車破損	想定外の外力	目視	4	2	3	2.9	2日	交換	
				油漏れ	経年劣化	作動確認							
					不純物の混入								
		燃料噴射ポンプ	燃料噴射せず	コントロール部破損	想定外の外力	目視	4	2	4	3.2	2日	交換	
				油漏れ	経年劣化	作動確認							
					不純物の混入								
	動弁系統	タイミングギア	カム軸が駆動しない	歯折損	経年劣化	目視	4	2	3	2.9	2日	交換	
			バルブタイミングがずう	歯面摩耗	想定外の外力	作動確認					2日	交換	
					潤滑不足								
	始動空気系統	分配弁・塞止弁・操縦弁	シリンダへ送気不能	空気漏れ	経年劣化	目視	4	1	4	2.5	2日	交換	
				腐食	想定外の外力	作動確認					2日	交換	
				固着	多湿						2日	交換	
		始動電磁弁・停止電磁弁	操作不能	電磁ソレノイド損傷	経年劣化	目視	4	1	4	2.5	2日	交換	
				腐食		作動確認					2日	交換	
				固着							2日	交換	
	始動電気系統	セルモータ	作動せず	フィールドコイル短絡	経年劣化	目視	4	1	4	2.5		修理又は	
				ブラシ摩耗	想定外の外力	作動確認						交換	
				オーバーランニングクラッチ破損	高温・高湿度								
				マグネットスイッチ破損　配線断線									
	冷却水系統	内部冷却水ポンプ	冷却水循環不能	ケーシング・インペラの腐食・破損	経年劣化	目視	4	1	4	2.5	2日	交換	
			冷却水減少	アーリ破断	冷却水質の悪化						2日	交換	
				冷却水漏れ	想定外の外力						2日	交換	
				配管破損							2日	交換	
	冷却装置	ラジエータ	冷却水温度上昇	腐食	不適切な管理	目視	4	1	4	2.5	2ヶ月	取替え	
			オーバーヒート	漏れ	経年劣化						2ヶ月	取替え	
			原動機焼付き		水質の悪化						2ヶ月	取替え	
		熱交換器(清水冷却器)	冷却水温度上昇	腐食	経年劣化	目視	4	2	4	3.2	2ヶ月	取替え	
			オーバーヒート	漏れ	水質の悪化・量の不足						2ヶ月	取替え	
			原動機焼付き	詰まり	清掃不良						2ヶ月	取替え	
		インタークーラ	吸気冷却能力低下	フィン腐食	経年劣化	目視	4	3	4	3.6	2ヶ月	取替え	
			吸気への水混入	冷却水漏れ	水質の悪化						2ヶ月	取替え	
				内部結露	高湿度						2ヶ月	取替え	
減速機	冷却水系統	潤滑油冷却器	油温制御不能	配管腐食	経年劣化	目視	4	2	2	2.5	1ヶ月	取替	
			原動機焼付き	冷却水漏れ	冷却水質の悪化						1ヶ月	取替	
				ケーシング腐食	潤滑油劣化						1ヶ月	取替	
		センサ類	作動しない	断線	経年劣化	目視	4	2	3	2.9	7日	取替え	
				短絡		作動確認					7日	取替え	
											7日	取替え	
系統機器設備	冷却水系統	井戸(給水)ポンプ	揚水不能	羽根車変形	異物噛み込み　過負荷	目視	2	2	4	2.5	2ヶ月	取替え	
			揚水量低下	軸・軸受損傷	想定外の外力	電流値測定					2ヶ月	取替え	
			グランド部水漏れ	電動機断線・短絡	高湿度	絶縁抵抗測定					2ヶ月	取替え	
				グランドパッキン変形	経年劣化						2ヶ月	取替え	
		電磁弁	止水不能	電磁石断線	経年劣化	目視	3	2	4	2.9	14日	取替え	
			作動不良	弁体破損	高湿度	作動確認					14日	取替え	
				腐食	過負荷						14日	取替え	
		電動弁	止水不能	電動機断線・短絡	経年劣化	目視	3	2	4	2.9	14日	取替え	
			作動不良	弁体破損	高湿度	作動確認					14日	取替え	
				腐食	過負荷						14日	取替え	
				スピンドル損傷	そうじい								
		電動ボール弁	止水不能	電動機断線・短絡	経年劣化	目視	3	2	3	2.6	14日	取替え	
			作動不良	弁体破損	高湿度	作動確認					14日	取替え	
				腐食	過負荷						14日	取替え	
				スピンドル損傷	想定外の外力								
	始動空気系統	配管	圧縮空気漏れ	腐食　変形	経年劣化	目視	4	1	4	2.5	14日	取替え	
				継ぎ手部損傷	想定外の外力						14日	取替え	
				パッキン損傷							14日	取替え	
				振動									
電源設備	直流電源盤	蓄電池	電極不良	断線	経年劣化	目視	4	2	4	3.2	1ヶ月	取替え	
			給電不能	腐食	過負荷						1ヶ月	取替え	
				短絡							1ヶ月	取替え	
				損傷									
	無停電電源装置	保護回路	作動しない	短絡	経年劣化	作動確認	3	2	4	2.9	1ヶ月	取替え	
				過電流	需害						1ヶ月	取替え	
			接点不良	焼損	過負荷						1ヶ月	取替え	
		蓄電池	電極不良	断線	経年劣化	目視	4	2	4	3.2	1ヶ月	取替え	
			給電不能	腐食	過負荷						1ヶ月	取替え	
				短絡							1ヶ月	取替え	
				損傷									
除塵設備	除塵機	チェーン	作動不良	伸び	経年劣化	日視検査	3	2	3	2.6	1日	データアップ調整	調整可能な場合
			作動しない	切断	金属疲労	日視検査					2~3日	取替え	調整不能な場合
				腐食	過負荷	日視検査					2~3日	取替え	部分的であれば在庫可能
				摩耗		日視検査							
		スプロケット	回転不良	歯先摩耗　軸受損傷	経年変化, 金属疲労	聴開検査	3	2	3	2.6	3ヶ月	取替え	使用不能の場合
	コンベア	スプロケット	回転不良	歯先摩耗　軸受損傷	経年変化, 金属疲労	聴開検査	3	2	3	2.6	3ヶ月	取替え	使用不能の場合
		テークアップ装置	調整不能	ネジの噛み込み　変形	経年劣化	作動確認	3	2	4	2.9	1ヶ月	部品取替え	
				腐食　損傷	想定外の外力	目視検査					1ヶ月	部品取替え	

システムにおける信頼性を左右する影響が大きいことを示している。よって、定量的にシステム全体の信頼性を評価する FTA においては、当該機器を盛り込んで FT 図を作成する。

傾向としては、主原動機に致命的機器が多いので、原動機部分の FT 図は比較的綿密に作成する。システムによって内容が異なる冷却水系統については、システムの違いが信頼性に与える定量的な影響を評価する。

(5)現場での FMEA の活用方法

本 FMEA は、システムにとって影響度の高い構成機器・部品を見極めるために実施しており、主要機器・部品についてはほぼ全種を採用しているので、個々のポンプ設備を対象とした場合に、システムに合わせて機器・部品の取捨選択を行い、FMEA シートを作成する。

本評価結果は FTA に活用するほか、故障等級が大きい機器・部品については、維持管理上特に注意を払うべきものとして取り扱うという用途がある。

具体的には、当該機器のうち発見の容易である機器は、月点検が管理運転点検で行われる現状にあっても、当該機器の目視点検を月点検時に実施するなどの方策が考えられる。現場単位の故障発生頻度を用いて FTA を実施するのは、データが不足している現状では非常に困難であるため、本 FMEA の実施は維持管理上のポイントを得るために有効であり、今後故障発生頻度などの情報が個々の施設毎に蓄積されれば、都度 FMEA を見直して精度を向上させることが可能になると考える。

6．FTA の実施

6.1 実施手順

(1)対象システム

本研究では、個々の機場の FTA を行う際の指標となるべく、下記の 9 方式の FT 図を作成した。FT 図の規模は、事象を考察するために細分化する機器・部品のレベルで決まるが、FMEA において故障等級が高い部品を含む原動機については部品区分まで細分化し、それ以外の機器については機器区分までの分析として FT 図をシンプル化するものとした。

①水冷ディーゼル機関（二次冷却）＋水冷減速機(二次冷却)
②水冷ディーゼル機関（二次冷却）＋水冷減速機(一次冷却)
③水冷ディーゼル機関（一次冷却）＋水冷減速機(一次冷却)
④水冷ディーゼル機関(管内・水槽内ｸｰﾗ)＋水冷減速機（管内・水槽内ｸｰﾗ）
⑤水冷ディーゼル機関(ラジエータ)＋空冷減速機
⑥空冷ディーゼル機関＋空冷減速機
⑦水中モータ
⑧ガスタービン（横軸）
⑨ガスタービン（立軸）

(2)標準 FT 図

9 方式の FT 図は、いずれも集約すると図 6-1 に示す形態となる。

「主ポンプ設備」「電源設備」「系統機器設備」「除塵設備」という 4 つの系統から構成される。「主ポンプ設備」は、台数分だけ独立した系統を有するので、台数が多いほど定格総排水量に対して一部の排水能力が低下するリスクは高まる。しかし、1 系統が停止しても一部の排水能力を確保できるので、逆に完全に排水能力を喪失するリスクは低下する。「主ポンプ設備」「主ポンプ駆動設備」「電源設備」「除塵設備」は、構成機器が機場によって異なるので、代表的な 1 ユニットを構成して、各方式に共用とした。系統機器設備における空気系統、燃料系統、潤滑油系統は、重要機器が二重化されたほぼ同様の設備が採用されるので、代表的なユニットを構成して組み合わせるものとした。冷却水系統は、一次冷却系統と二次冷却系統を各々構成すると、その組み合わせで①～③まで構成することができる。また、管内クーラは、二次冷却系統の代替ラインとなるので、一次冷却系統に管内クーラ装置を組み込むだけで差別化できる。また、⑤は、冷却水系統を必要としない。⑦～⑧は独自の FT 図を別途構築するものとした。

河川ポンプ設備の FT 図は、全てを展開すると回路と事象合わせて 1000 以上の規模になるため、図 6-2 及び 6-3 に、一次冷却系統、二次冷却系統を抜粋した FT 図を示す。構成機器は、一般的な二重化ラインを考慮している。

同様に図 6-4 に主原動機 FT 図の一部を抜粋する。FMEA の結果に基づき、原動機についてはピストンブッシュ、クランクピンメタルなどの部品レベルまで FT 図を細分化している。

(3)共通事象の取扱

例えば、一次冷却系統に故障があると、当該冷却水が熱交換する各機器全てに影響が及ぶ。この冷却水系統の不具合のような事象を共通故障事象という。系統機器設

備のように、主ポンプ設備や主原動機の駆動に共通して関与する設備ラインは、FT 図の上流部で整理し、統括して示すことができるが、原動機の内部の潤滑機構などのように、複数の部品潤滑に関与する事象を、必要な箇所の故障木に全て組み込み、最終的に定量的な計算を行うと、あたかも当該故障が複数あるがごとく過大な事象発生確率を算出してしまう。このような重複計算を回避するために、ブール代数によって等価回路に置き換え簡素

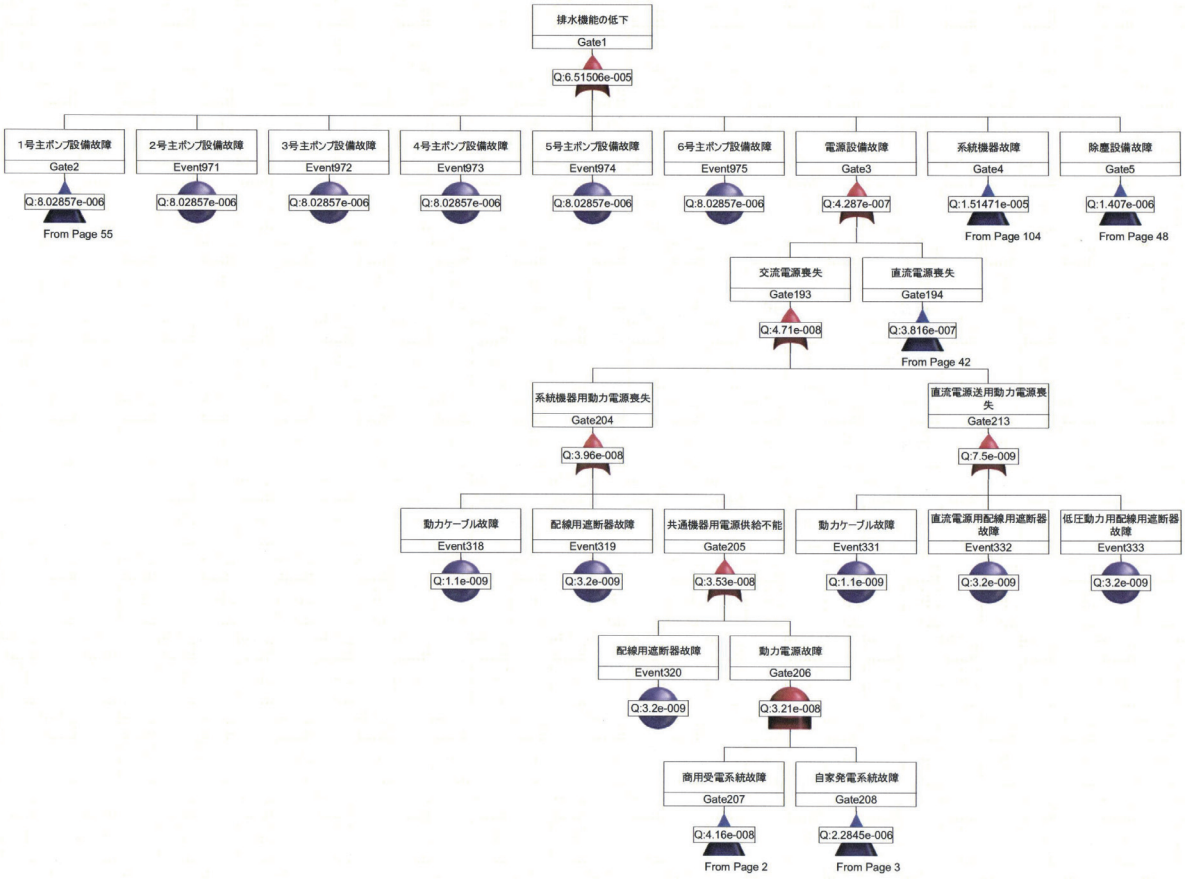


図 6-1　ポンプ設備 FT 図（主ポンプ 6 台想定　集約部）

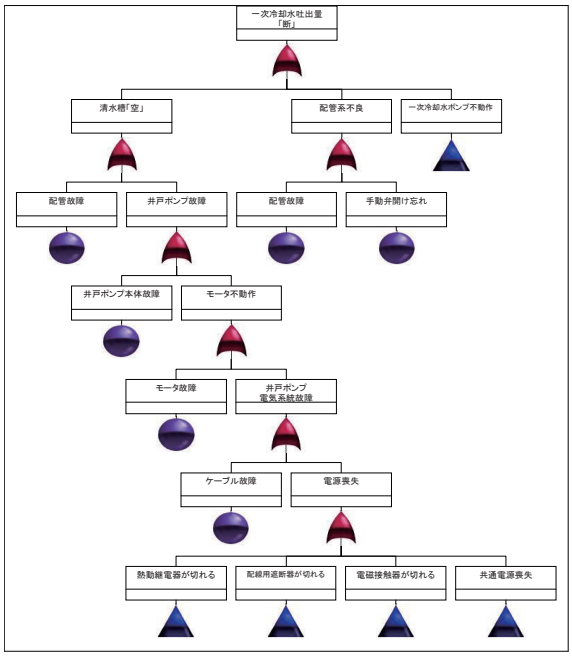


図 6-2　一次冷却系統 FT 図（抜粋）

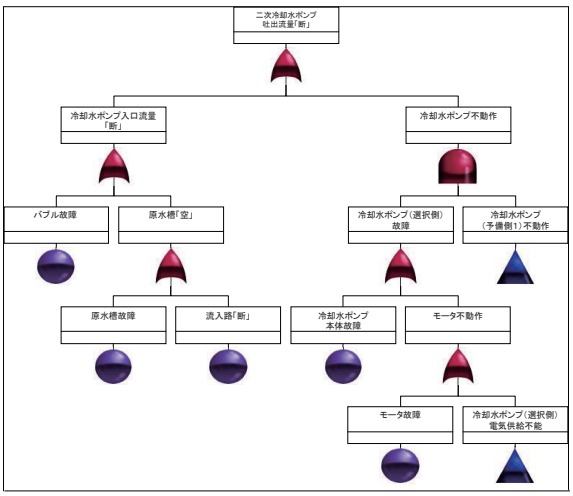


図 6-3　二次冷却水系統 FT 図（抜粋）

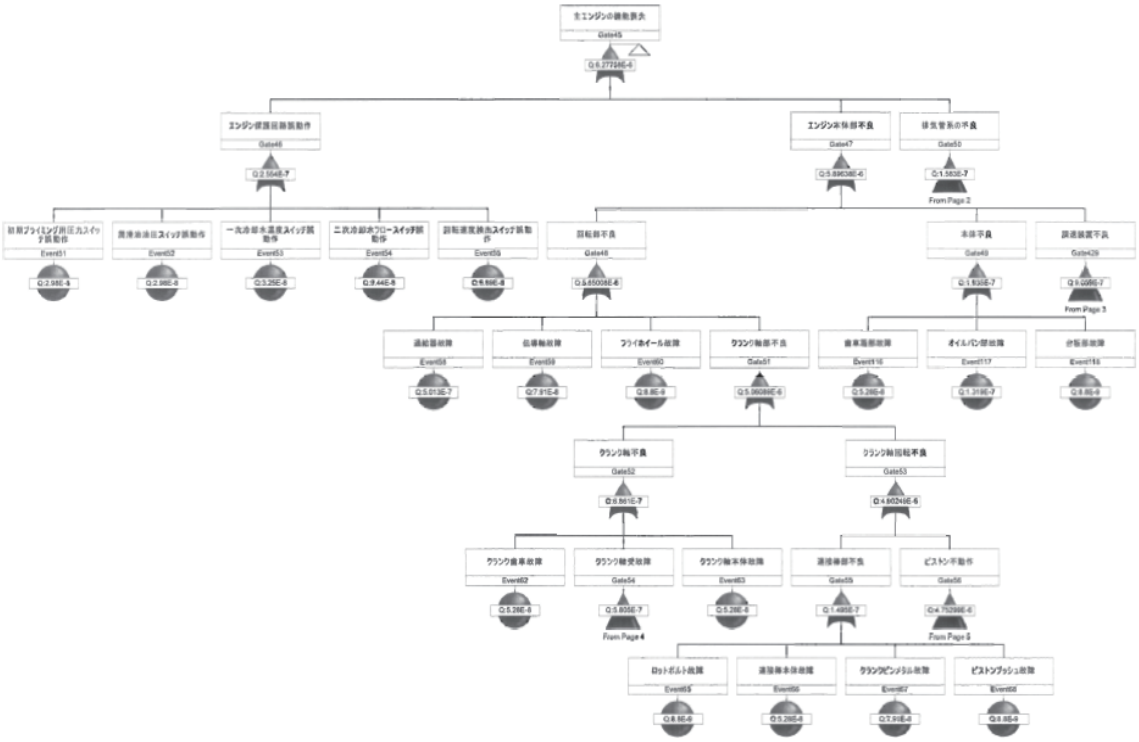


図 6-4 原動機の FT 図（抜粋）

化することが行われるが、1000 以上の事象を等価回路化していく作業は非常に困難な作業になる。また、全ての回路を簡素化してしまうと、細部の各事象の関連性が追えなくなる可能性がある。

表 6-1 に、A 機場（改修前）FTA における共通事象をまとめた。A 機場（改修前）のシステムでは、1135 の事象と回路で故障木が構成されるが、共通事象が 53 ある。本研究においては、等価回路で簡素化しなくてもトップ事象の生起確率を計算することができる専用ソフト「Relex」を採用した。本ソフトウェアは、事象入力時に共通故障事象であることを設定し、各々の発生確率を設定しておけば、自動的に計算することができる。

6.2 実施事例

(1)モデル機場のアンアベイラビリティ

各モデル機場のシステム構成と表 3-3 に示す構成機器の故障率を用いて、モデル 5 機場の FTA を実施した。個々の設備の FT 図への反映は、表 3-3 に統計のある故障事象までとし、定量化不能な細分化は行っていない。表 6-2 に各モデル機場のアンアベイラビリティと主たる設備の構成比を、図 6-5～10 に各 FT 図を示す。共通故障があるため、各設備の単純合算がアンアベイラビリティにはならないが、目安として、主ポンプ設備が約 7～8 割を占めていることがわかる。表 6-2 においては、主ポンプ設備に駆動設備分が含まれており主ポンプ設備のうち主原動機の影響が約 8 割を占める。

A(改修後)と D 機場には、管内クーラ及び水槽内クーラが導入され二次冷却系統が削減されている。現状において、管内クーラ、水槽内クーラの故障率は実績として求められていないため、本 FTA では冷却水の熱交換器の故障率を準用している。しかしながら、二次冷却水系統を削減した影響はあり、A 機場の改修後は改修前に比べ若干アンアベイラビリティが低下した。しかし、全体としては原動機の占める割合が非常に大きく、大きな低下とはなっていない。また、C 機場においては、二次冷却水系統が２系統あることや、主原動機の潤滑油系統が複雑で、表 4-7 に示すとおり構成機器数が非常に多くなっている。この要因で、系統機器設備の影響度が高くなっていると考えられる。

表 3-3 に示すデータから、冷却水系統に使用されるポンプ類の故障率は比較的高い。しかしながら、二重化が実排水運転時の故障に与える影響を飛躍的に低下させていると考えられる。モデル機場においても、表 4-11 に示すとおり系統機器には多くの故障が点検時に発見されているが、未然に対応することで、実排水への影響が殆ど発生していない。冷却水系統は、機器の故障率は高いが、システム設計と定常的な点検によって、現状のアンアベイラビリティを得ているといえる。また、排水機場は予

表 6-1　共通事象（A 機場(改修前)）

Type	Comment1	CCFGroup	InputValue
Basic Event	サイトフロー故障	サイトフロー故障	4.5E-09
Basic Event	ボールタップ故障	ボールタップ故障	4.5E-09
Basic Event	ケーブル故障	空気圧縮機選択側ケーブル故障	2E-10
Basic Event	オイルクーラ故障	減速機オイルクーラ故障	4.66E-08
Basic Event	ポンプ本体故障	減速機初期プライミングポンプ本体故障	4.66E-08
Basic Event	モーター本体故障	減速機初期プライミングポンプ本体故障	4.66E-08
Basic Event	フロースイッチ接点故障	減速機保護系誤動作によるフロースイッチ接点故障	9.44E-08
Basic Event	一次冷却水温度スイッチ誤動作	主エンジン用一次冷却水温度スイッチ誤動作	3.25E-08
Basic Event	配管故障	主ポンプ空気系統配管故障	8.8E-09
Basic Event	主ポンプ補機用配線遮断器が切れる	主ポンプ補機用配線遮断器が切れる	5E-10
Basic Event	動力ケーブル故障	主ポンプ用直流制御電源動力ケーブル故障	1.1E-09
Basic Event	断路器故障	主ポンプ用直流電源盤断路器故障	5E-10
Basic Event	オイルパン故障	主原動機オイルパン故障	1.319E-07
Basic Event	潤滑油系統不良	主原動機潤滑油系統不良	5.277E-07
Basic Event	駆動歯車故障	主原動機調速機駆動歯車故障	5.28E-08
Basic Event	カム軸故障	主原動機動弁装置部カム軸故障	8.8E-09
Basic Event	カム軸受部故障	主原動機動弁装置部カム軸受部故障	8.8E-09
Basic Event	配管故障	主原動機内部潤滑油配管故障	2.64E-08
Basic Event	空気配管故障	主原動機用空気配管故障	1.055E-07
Basic Event	歯車故障	主原動機用調速機歯車故障	5.28E-08
OR Gate	着火不良	主原動機用調速機本体故障	
OR Gate	着火装置部故障	主原動機用調速機本体故障	
Basic Event	調速機本体故障	主原動機用調速機本体故障	2.638E-07
Basic Event	燃料ラック故障	主原動機用燃料ラック故障	8.8E-09
Basic Event	配管故障	潤滑水系配管故障	8.8E-09
Basic Event	清水槽水位継電器故障	清水槽水位継電器故障	5E-11
Basic Event	水位継電器故障	清水槽水位継電器故障	5E-11
Basic Event	空気圧縮機本体故障	選択側空気圧縮機本体故障	5.393E-07
Basic Event	動力ケーブル故障	電源切換用直流電源装置動力ケーブル故障	1.1E-09
Basic Event	配管故障（小出槽～エンジン）	燃料系統配管故障	8.8E-09
Basic Event	配管故障	燃料系統配管故障	8.8E-09
Basic Event	燃料小出槽故障	燃料小出槽故障	8.8E-09
Basic Event	燃料小出槽油量計故障	燃料小出槽油量計故障	1.9E-09
Basic Event	配管故障	発電機空気系統配管故障	8.8E-09
Basic Event	一次冷却水温度スイッチ誤動作	発電機用一次冷却水温度スイッチ誤動作	3.25E-08
Basic Event	空気配管故障	発電機用空気配管故障	7.77E-08
Basic Event	オイルパン故障	発電機用原動機オイルパン故障	1.29E-08
Basic Event	潤滑油系統不良	発電機用原動機潤滑油系統不良	3.539E-07
Basic Event	駆動歯車故障	発電機用原動機調速機駆動歯車故障	1.29E-08
Basic Event	カム軸故障	発電機用原動機動弁装置部カム軸故障	1.29E-08
Basic Event	カム軸受部故障	発電機用原動機動弁装置部カム軸受部故障	1.29E-08
Basic Event	歯車故障	発電機用調速機歯車故障	1.29E-08
OR Gate	着火不良	発電機用調速機本体故障	
OR Gate	着火装置部故障	発電機用調速機本体故障	
Basic Event	調速機本体故障	発電機用調速機本体故障	0.000000038
Basic Event	動力ケーブル故障	発電機用直流制御電源動力ケーブル故障	1.1E-09
Basic Event	断路器故障	発電機用直流電源盤断路器故障	5E-10
Basic Event	燃料ラック故障	発電機用燃料ラック故障	8.8E-09
Basic Event	動力ケーブル故障	発電装置選択側動力ケーブル故障	1.1E-09
Basic Event	膨張タンク水位継電器故障	膨張タンク水位継電器故障	5E-11
Basic Event	水位継電器故障	膨張タンク水位継電器故障	5E-11
Basic Event	配管故障	膨張タンク配管故障	8.8E-09
Basic Event	空気圧縮機本体故障	予備側1空気圧縮機本体故障	5.393E-07

表 6-2　モデル機場のアンアベイラビリティ

機場名	アンアベイラビリティ	内訳　×10-5(1/hr)				
		主ポンプ設備		電源設備	系統機器設備	除塵設備
	×10-5(1/hr)	1台当たり	全体			
A(改修前)	2.34575	0.813027	1.626054	0.27316	0.2239	0.23709
	構成比(%)	34.45	68.89	11.57	9.49	10.05
A(改修後)	2.28747	0.813027	1.626054	0.23397	0.204855	0.23709
	構成比(%)	35.32	70.64	10.16	8.90	10.30
B	2.42348	0.78758	1.57516	0.27099	0.35294	0.23709
	構成比(%)	32.33	64.66	11.12	14.49	9.73
C	5.09275	0.781887	3.909435	0.5232	1.07091	0.0601803
	構成比(%)	14.05	70.27	9.40	19.25	1.08
D	2.97684	0.802957	2.408871	0.27228	0.241775	0.06018
	構成比(%)	26.92	80.75	9.13	8.10	2.02
E	2.12992	0.824097	1.648194	0.27228	0.2215	0.06018
	構成比(%)	37.42	74.84	12.36	10.06	2.73

備機を設けないため、アンアベイラビリティにおける主ポンプ設備の寄与度は非常に大きく、台数が増えるほど計算上アンアベイラビリティは増大する。しかし、表 6-2 に示すとおり、5 台を有する C 機場の 1 台当たりの寄与度は 14%台であるのに対し、2 台の A、B 及び E 機場は 30～35%程度と高くなり、1 台に不具合が発生した場合

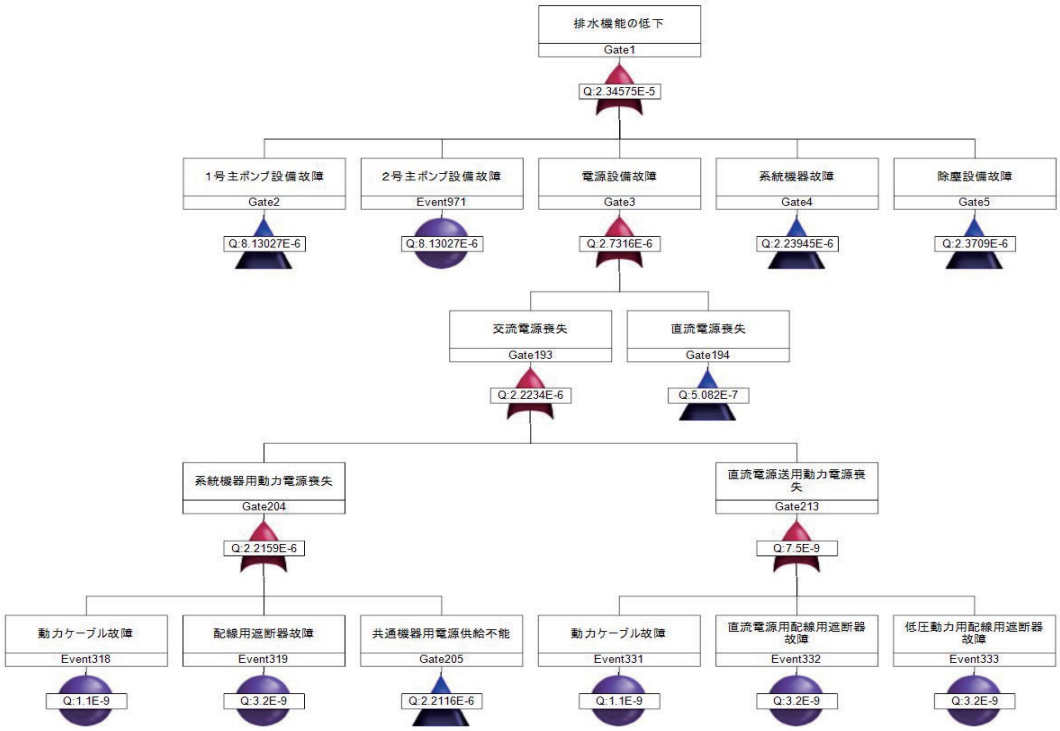


図 6-5　A 機場(改修前)FT 図（集計部）

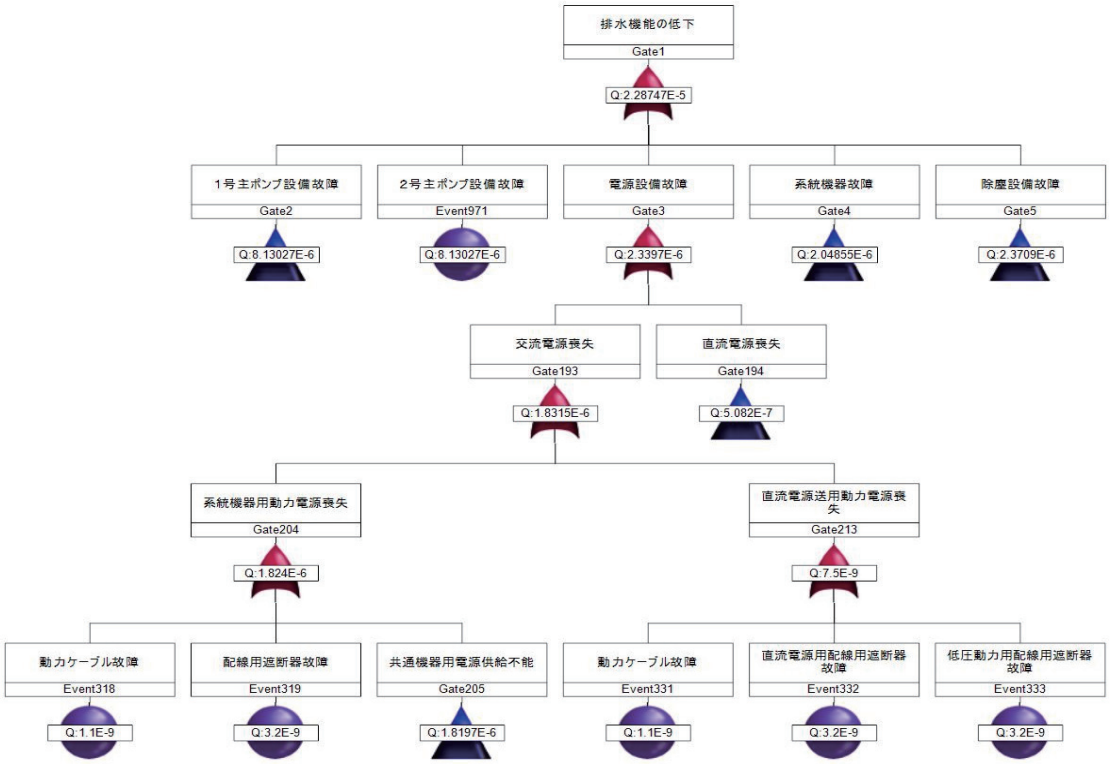


図 6-6　A 機場(改修後)FT 図（集計部）

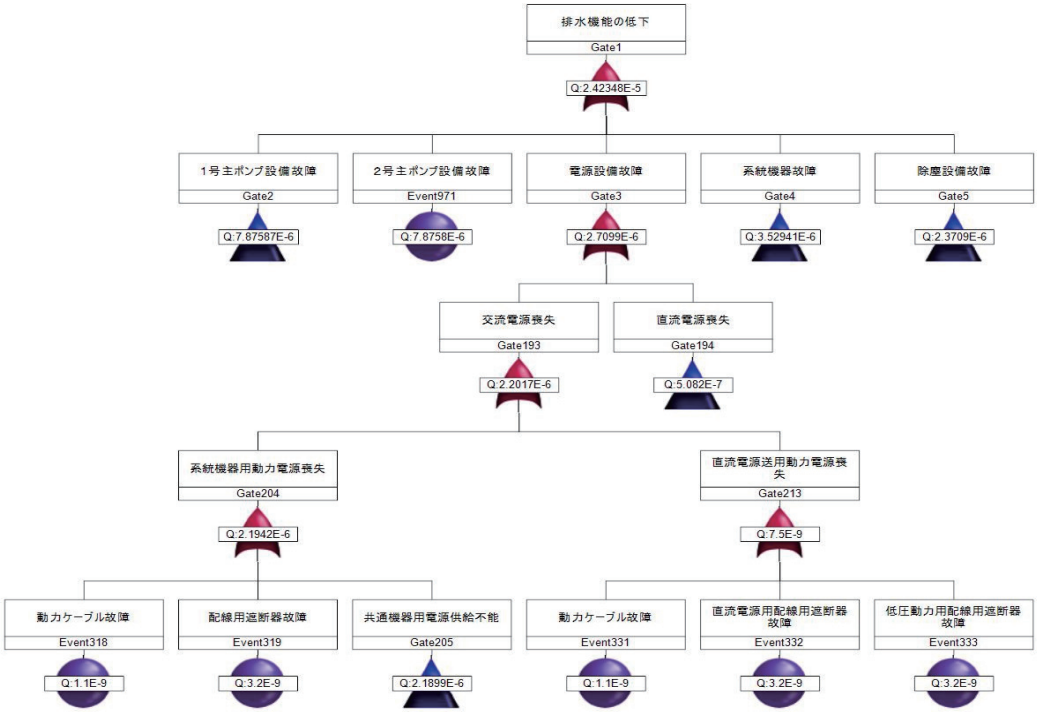


図 6-7　B 機場 FT 図（集計部）

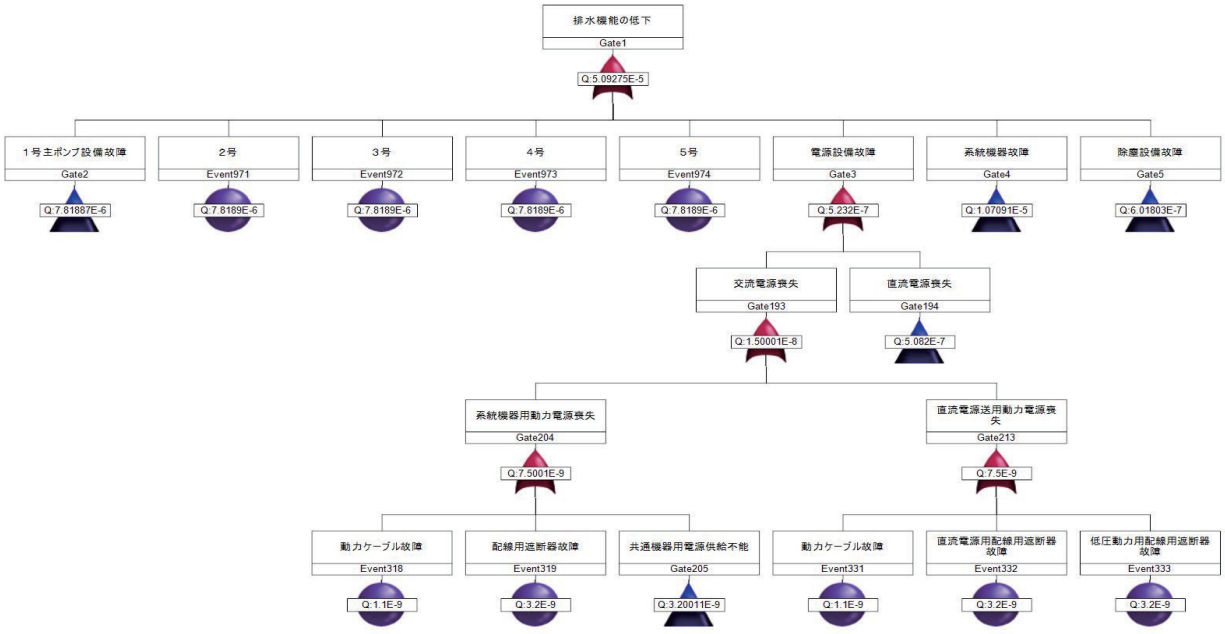


図 6-8　C 機場 FT 図(集計部)

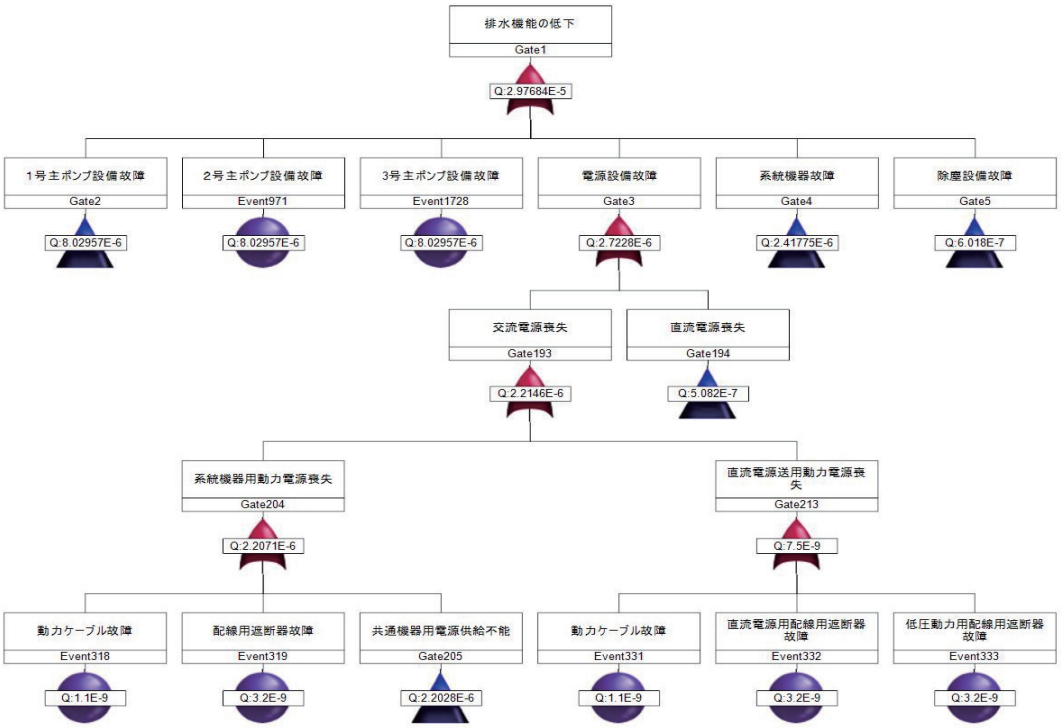


図 6-9　D 機場 FT 図(集計部)

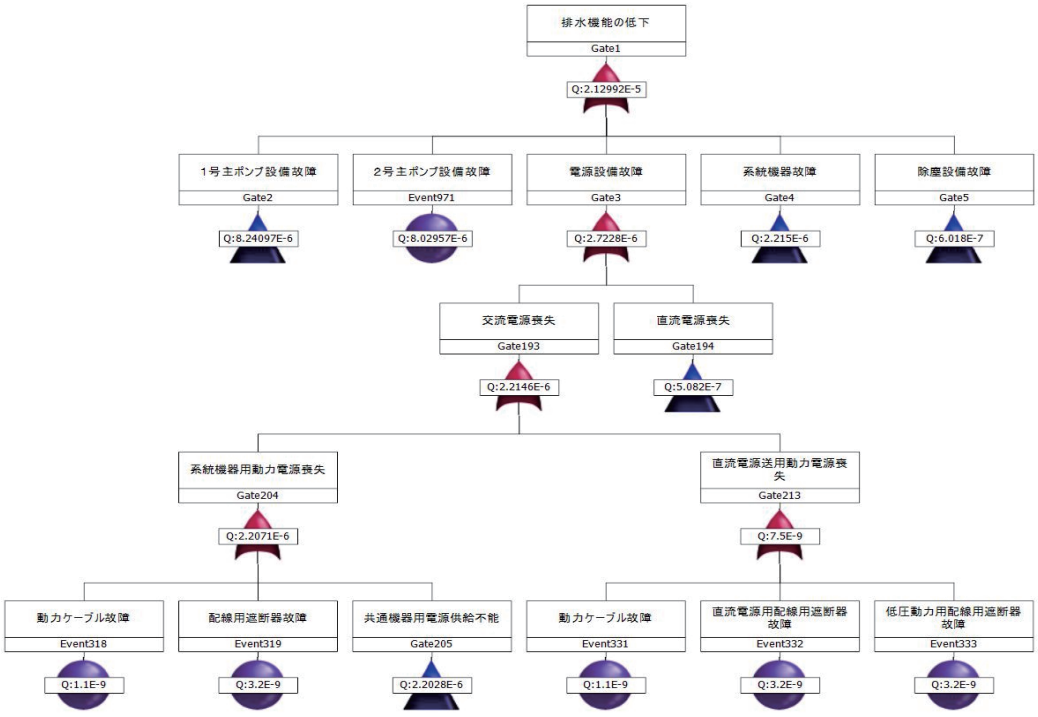


図 6-10　E 機場 FT 図(集計部)

の影響度は逆に高くなる。

各モデル機場におけるアンアベイラビリティは、現状の維持管理レベルにおいては、約 2～5 年に 1 回程度の割合で、排水時に機能低下を引き起こす可能性を有していることを表す。表 3-3 に示す故障データは 10 年前に集計されたものであり、以後部品の高度化が反映された故障データやこれまで故障情報が少ない管内クーラやセラミック軸受に関する情報を補完していくことで、信頼性評価の精度を上げていく必要がある。

7．信頼性と経済性の評価

7.1　アンアベイラビリティによる点検効果の評価

本研究では、表 3-3 にまとめた実績故障率を用いて、各事象の生起確率に引用しているが、現状においては 1 つの機場の故障情報のみで当該固有機場のアンアベイラビリティを算出することは難しい。排水運転中に停止した実績が全くない機場ではアンアベイラビリティは計算上 0 になり、短い管理時間内に複数の停止故障が発生すると飛躍的に大きくなる。本研究では、アンアベイラビリティを用いた点検効果について、各機場名の機器構成から求めたアンアベイラビリティと、点検を行わなかったと仮想した時の、排水運転の機能を低下させるリスクの比較によって評価する手法を試みた。計算結果を表 7-1 に示す。

表 7-1 におけるアンアベイラビリティは、各機場の FT 図に、直轄機場の横断的な統計処理に基づく不具合事象発生確率を代入して求めた「システム構成に対する」排水機能の低下リスクで、信頼性を示す定量的指標となる。不具合事象発生確率は、実際に排水運転に影響を与えた故障を対象として統計処理したものである。

一方、仮想の故障生起確率は、点検整備を行わないと仮定した場合に予測される「個々の機場に対する」排水機能の低下リスクである。具体的には、各モデル機場の点検時に発見された故障情報を基に、各機場の FT 図の不具合事象発生確率を求め、当該 FT 図に代入して求める。この場合は、表 4-11 に集計結果を示した各機場の故障データから事象生起確率を算出して FTA を実施する。表 7-1 における故障の仮想生起確率は、何もしなければモデル機場について、2～6 ヶ月に 1 回は排水機能が低下するリスクを有することを示すが、点検整備で対処していることにより、数年に 1 回程度のリスク範囲に収めていることになる。つまり、アンアベイラビリティと故障の仮想生起確率の差がメンテナンス効果である。河川ポンプ設備の構成機器・部品点数を数千と仮定すると、図 7-1 のように示すことができる。

7.2　信頼性と経済性の評価

排水ポンプ設備は、高価な機器を装備した非常用設備であり、維持修理費率の妥当性評価は難しいが、表 7-1 に示すメンテナンス効果を表 7-2 に示すコストで調達していることになる。

現状において、各機場とも排水時の機能低下を引き起こした実績が少ないことから求められる一定の信頼性は確保されており、今後の設備老朽化を勘案すると、この累計年間維持修理費率レベルで抑えることを当面の目標とすべきである。

その理由としては下記のとおりである。

①年点検・月点検効果は明確であり、河川ポンプ設備の「故障の仮想生起確率」から年点検・月点検の作業自体を削減できない。

②老朽化による部品交換･更新は増大する可能性が高い。

建設省河川局「建設省河川砂防技術基準（案）同解説調査編」第 20 章河川経済調査においては、治水経済効果の把握を次のとおり実施することとしている。

$$c = \text{年利子} + \text{年償却費} = I \times \left(i + \frac{i}{(1+i)^n - 1}\right)$$

$$b = B - M$$

適正な事業規模は、b／c ≧ 1

ここに、Ｉ：事業費（建設費）、ｉ：利子率、ｎ：施設の耐用年数(堤防なら 50 年、ダムなら 80 年等)、Ｍ：施設の維持管理費（Ｉの 0.5%とする）、Ｂ：想定年平均被害総軽減期待額

施設の維持管理費について、建設費の 0.5%が目安とされており、規模の大きい C、D、E の各機場はこれを下回っている。また、実際には土木構造物、機械設備各々に必要となる維持管理費を積み上げるため、実際の排水

表 7-1　点検効果の評価結果

機場名	種別	台数	アンアベイラビリティ	故障の仮想生起確率	摘要
A(改修前)	排水ポンプ	2	2.35×10-5　(4 年 10 ヶ月に 1 回)	－　※1	
A(改修後)	排水ポンプ	2	2.29×10-5　(5 年に 1 回)	2.28×10-4　(6 ヶ月に 1 回)	
B	排水ポンプ	2	2.42×10-5　(4 年 9 ヶ月に 1 回)	2.42×10-4　(6 ヶ月に 1 回)	
C	排水ポンプ	5	5.09×10-5　(2 年 3 ヶ月に 1 回)	4.70×10-4　(3 ヶ月に 1 回)	大型ポンプ
D	排水ポンプ	2	2.98×10-5　(3 年 10 ヶ月に 1 回)	7.90×10-4　(2 ヶ月に 1 回)	大型ポンプ
E	排水ポンプ	1	2.13×10-6　(5 年 4 ヶ月に 1 回)	4.00×10-4　(4 ヶ月に 1 回)	

機場の計画では、規模の大小や仕様に応じ、維持管理費計画に差異がある。実績として、B機場では、建設

表 7-2 維持管理コスト

機場名	総排水量（㎥/s）	累計年間維持修理費率(%)	経過年数
A	15	2.1	33
B	15	1.3	21
C	200	0.4	28
D	100	0.3	26
E	50	0.3	17

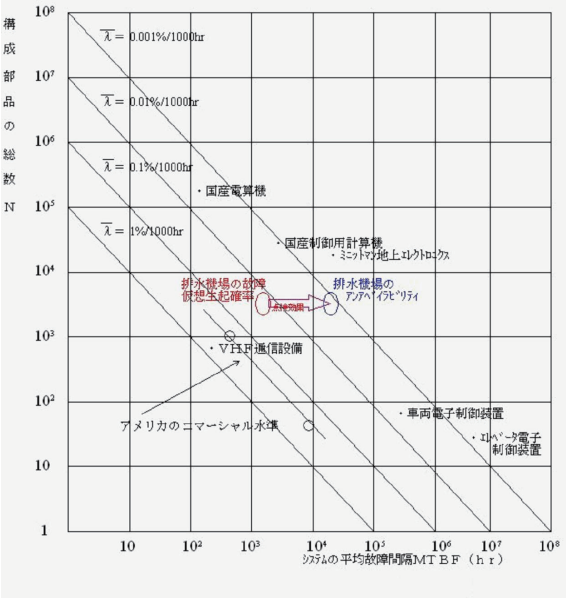


図 7-1 排水ポンプ設備の点検効果 [1)]

費の 5%を維持管理費率として見込んでいることがわかっており、現状においてはこれを大きく下回っている。老朽化が進むなかで、現状と同等の維持管理費に納めるためには、維持管理費に占める大きな要素に直目した対応が必要となる。主ポンプ、主原動機などの大規模整備を行った A、B、C、D 機場について、定常点検と大規模整備に要する費用とを、建設費に対する費率で比較したものを表 7-3 に示す。

2006 年の点検費用は、小規模機場で 1%程度、大規模機場で 0.2%程度である。一方、大規模整備に要した費用を実績から抽出すると、小規模機場で 8～10%程度、大規模機場で 1%程度要しており、定常的な点検費用の 4.5～12.25 倍に及ぶことがわかった。また、大規模整備は、一般的に時間計画保全で実施されることから、実施時期については検討の余地がある。主ポンプ設備は、予備機を持たないため慎重な判断を要するが、大規模整備の実施時期を機械の状態に合わせて計画することが、維持管理費縮減の大きな要素であると考える。

表 7-3 定常点検費と大規模整備に要する費用

機場名	H18点検費(%)	大規模整備実例(%)	
A	1.0	8.0	2号主原動機
B	0.8	9.8	1･2号主ポンプ
C	0.2	0.9	4号主ポンプ
D	0.3	1.3	2号主ポンプ

8．維持管理費縮減手法の提案

8.1 状態監視保全技術の検討

非常用設備は、運用時の故障を許容できないため、「故障させない」管理方法である「予防保全」を採用している。予防保全には、統計的に求めた寿命を参考に事前に機器の交換や整備を行う「時間計画保全」と、機械の状態を監視し、故障の予兆を読み取って交換や整備のタイミングを計る「状態監視保全」があり、近年効率を優先する民間のプラントでは、経済性に優れる状態監視保全の採用を進めるケースが増加している。しかし、状態監視保全においては、不可視部分にある機器・部品の状態についても適切に把握する技術が必要であり、故障の予兆を見逃せば大きな事故に繋がりかねない。表 5-5 に示す FMEA において故障等級が大きい機器・部品のうち、定期点検で目視確認できない機器は、ポンプ本体のインペラ、水中軸受、主原動機の内部機器であり、これらの機器はこれまで時間計画保全で対応してきた。しかし、時間計画保全ではまだ使える状態で分解整備するケースもあり、大きな費用を伴うポンプ本体や主原動機の分解整備は、信頼性を確保した上で適切な実施タイミングまで延ばすことができれば効果的な維持管理を実現できる。

近年の河川ポンプ設備では、運転支援を目的として、振動、温度等の二次効果パラメータを主軸、減速機、主原動機等に装着したセンサによって監視する場合が多い。しかしこの監視は、運転中に発生した軽故障・重故障を感知して運転管理者へ知らせ、それ以上のダメージを回避する最後の砦を担っており、予防保全における状態監視保全とは性格が異なる管理である。状態監視保全技術は、効率的な維持管理を目指す民間企業のプラントで進歩してきたが、これまで、河川ポンプ設備は稼働時間が少なく、劣化傾向を把握するデータを取得しにくいとされてきた。

また、主たる状態監視保全技術である振動解析の分野では、河川ポンプ設備のような低速回転機械を対象とし

た技術は未だ開発途上にある。

本研究では、河川ポンプ設備の維持管理に導入されていない技術で有望なものをピックアップし、適応性を評価することとした。

主ポンプについては、①標準的な回転系の主軸振動解析に用いられる「渦電流式変位計」を用いた解析方法、②ポンプ内部の主軸振動を計測するため近年開発された「超音波振動計」の適用性を評価した。

主原動機については、常用系の内燃機関や減速機等の診断に導入されている①フェログラフィ、②SOAP（Spectrometric Oil Analysis Program）の適用性を検討した。フェログラフィはオイル中の金属切粉形状を、SOAP は含まれる元素を分析することで、劣化箇所やその程度を診断する技術である。

8.2　主軸振動解析

(1)超音波振動計

超音波振動計は、主に発電所の取水ポンプの状態監視保全技術として開発された計測器で、図 8-1 に示すとおりケーシングの外部から軸心へ向け超音波を発信し、反射波を計測するものである。装置は、超音波発信装置と解析装置（ノート型 PC）が一体となっており、どこでも持ち運びが可能である。運転中のデータを取り込むとその場で FFT（高速フーリエ変換）を行い、周波数分布を知ることができる。ただし、揚水管が鋳鉄・鋼製で、かつ充水された状態でないと計測できないため、大型のコンクリートケーシングには適用できない。一般的に用いられている加速度センサを用いて振動計測する場合は、グランド部あるいはスラスト軸受ケーシングの振動を計測しており、軸振動を把握することはできない。本研究では、A 及び B 機場の主ポンプを対象として、超音波振動計の適応性を検証した。

B 機場における計測状況を写真 8-1 に、1 号機及び 2 号機の主軸振動波形計測結果を各々図 8-2～3 に示す。図 8-2 及び 8-3 は、ベント管内部のおける主軸の振動を表している。1 号機、2 号機とも全く同じ仕様・回転数であるが、振動波形の特徴は異なる。双方とも回転数 N の成分が大きな山となって現れる点は共通しているが、1 号機の波形は多くの高次成分が重合して不規則な形状をしている。2 号機は比較的正弦波に近い。当該ポンプ設備の回転数 N は、約 3.4Hz(204min-1)であるが、双方とも 2 秒間の間に 30～50 μm のピークを 7 回認めることができ、回転数に合致している。図 8-4 は、図 8-2 を高速フーリエ変換することで得た軸振動の周波数分布である。2N、3N、4N 成分が高次成分であり、図 8-2 における山を崩す要因である。ポンプの羽根車は 4 枚であり、4N は羽根車による成分である。周波数分析の傾向は 2 号機も同様であるが、1 号機の方が強く高次成分が現れている。軸心の振動状況を、波形の違い、周波数分布まで把握することができることは、軸受や羽根車の摩耗による波形や周波数分布の変化、ひいてはデータの蓄積によって劣化傾向を把握できる可能性を示している。

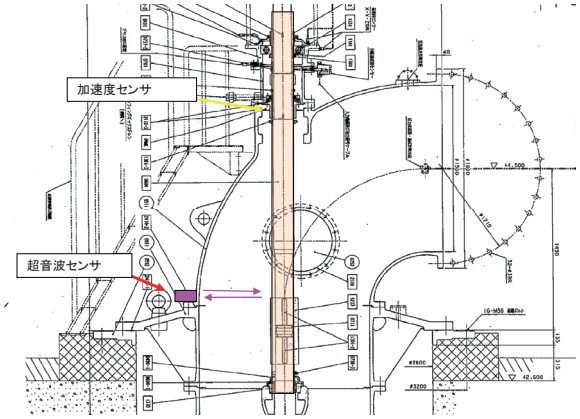


図 8-1　超音波センサ


写真 8-1　超音波式振動計計測状況

これまでは、一般的にポンプ設備の振動計測には加速度センサが使われてきた。超音波式振動計の計測時に、グランド部に当てた加速度センサによって、揚水管自体の振動を計測した結果を図 8-5 に示す。定常的にデータを蓄積できる常用系の設備においても、低速回転機械の状態監視保全は難しいといわれている。一般的な加速度センサをケーシングに当てても、回転数成分である数 Hz の低速振動を検出することができない。軸心における数 μm の振幅をケーシング自体の振動で検出することは難しく、また、減速機や原動機が発生源のさまざまな周波数が重合して検出をさらに難しくする。

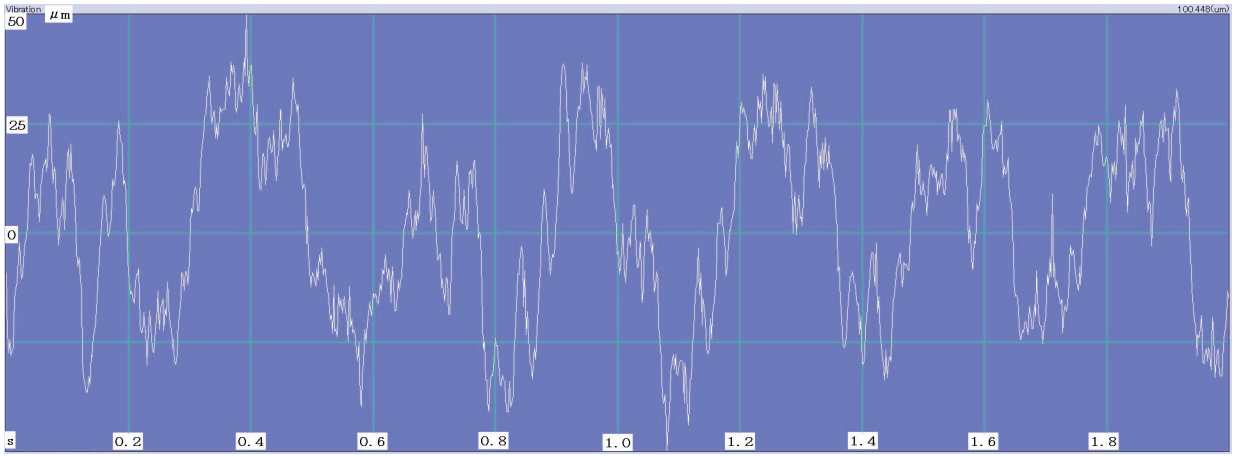


図 8-2 B 機場 1 号機の主軸振動波形(2 秒間)

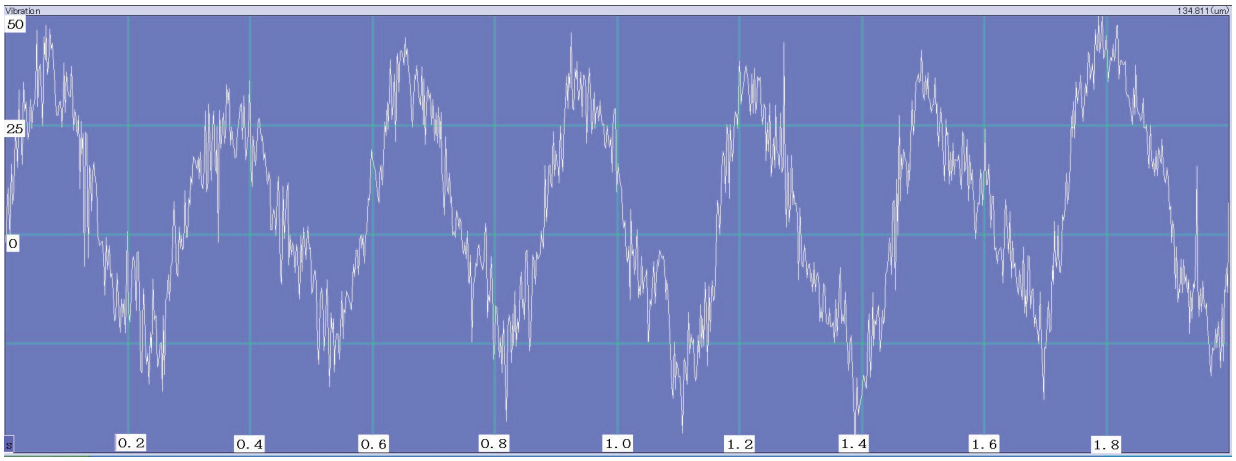


図 8-3 B 機場 2 号機の主軸振動波形(2 秒間)

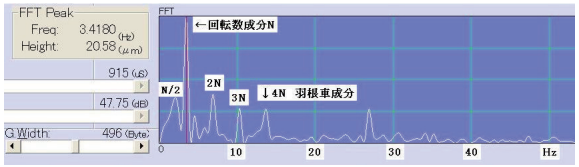


図 8-4 B 機場 1 号機主軸振動の周波数分布

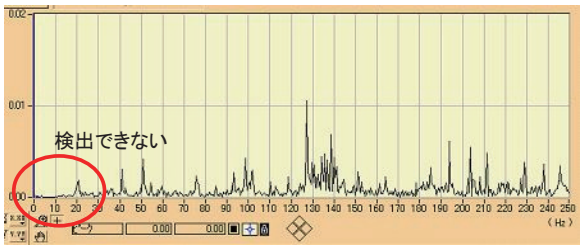


図 8-5 加速度センサによる振動解析(B 機場)

次に、河川ポンプ設備の水中軸受として最も事例の多いゴム軸受を用いた二重管主軸に対する適応性を評価した。二重管では、内部の主軸の外側に潤滑水を通すために設けられた鞘管を通過して、主軸からの反射波を得るため超音波の減衰が激しい。

図 8-6 にゴム軸受けを採用している A 機場の解析結果を示す。B 機場に比べスペクトルが少し崩れているが、

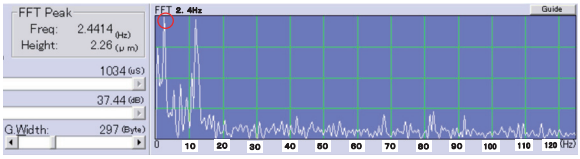


図 8-6 二重管主軸の計測事例(A 機場)

回転数成分近傍の 2.4Hz を検出している。よって、本振動計により、ゴム軸受、セラミック軸受、樹脂軸受等の材質・形状（冷却溝の数など）に関する情報を明らかにした上で、管理運転時の計測値を継続して解析すれば、ミスアライメントによる回転数成分の発生、軸受の摩耗によって大きくなるホワール成分などの変化を捉えることにより、劣化傾向を把握することも可能であると判断する。

(2)渦電流式変位計による振動解析

口径 2000 ㎜を越える河川ポンプ設備では、土木構造物の中にポンプケーシングを埋め込むコンクリートケーシングタイプを採用する場合が多い。超音波式振動計は、充水状態の鋼管(ベント管)内で回転する主軸の振動しか計測できないため、コンクリートケーシングには適用で



写真 8-2　渦電流式変位計

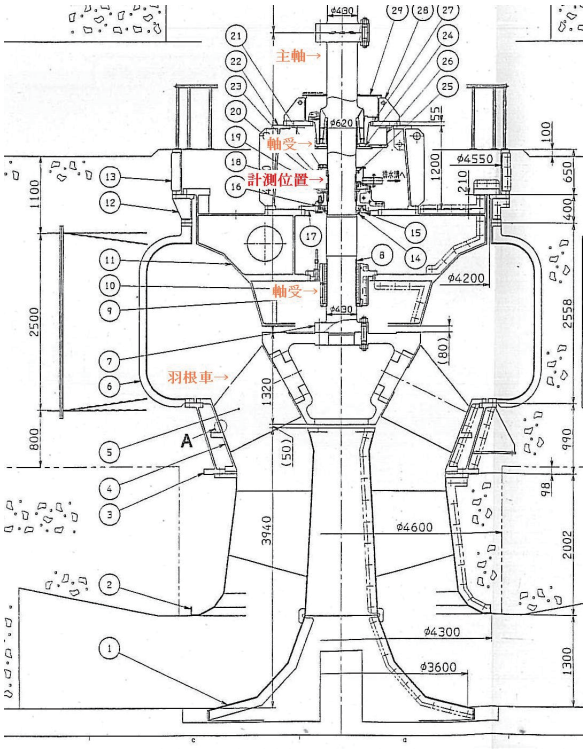


図 8-7　コンクリートケーシングでの計測位置

きない。

本研究では、コンクリートケーシング用の振動計測装置として、渦電流式変位計の適応性も検討を行った。

金属表面に高周波電流を流したコイルを近づけると、コイルが生じさせる磁界と垂直方向に渦状の電流が流れる。コイルと金属表面の距離によって、発生する電流値が変化し、それによってコイルが影響受けてインピーダンスが変化する。このインピーダンスの変化によって、距離が近くなると発信振幅が小さくなり遠くなると大きくなることから、これを直流電圧に変換することによって変位計として活用できる。距離とこの直流電圧のこの関係は金属によって異なるが、鉄鋼系ではほぼ比例する。コイル部分をセンサとして、主軸が露出している箇所の表面近傍に設置し、アンプで信号変換し、回転数に応じたサンプリング周波数で記録すると、主軸の振動波形を得ることができ、FFT によって周波数分布も把握することができる。

写真 8-2 に渦電流式変位計センサをグランド部へ設置した状況の事例を示す。センサ部はセンサコードと一体で外径 6 ㎜程度である。センサは、X・Y 2 軸で計測するものとし、特殊な治具とマグネットスタンドで主軸から 0.5 ㎜の距離に調整した。

図 8-7 は、写真 8-2 の計測位置を主ポンプの断面図を用いて示したものである。コンクリートケーシングの場合は、グランド部の露出した主軸に設置する。超音波式の場合は、システム構成上 1 方向の振動を計測できるのみであるが、渦電流式の場合は同時に複数のセンサを管理できるので、当チームでは X 軸（水の吐出方向）及び Y 軸（X 軸と直交する方向）の 2 方向を計測するものとした。図 8-8 に、C 機場 2 号機の計測結果を示す。

左側の図は、各軸の振動波形を約 24 秒間表示しており、右側はそれぞれの波形の FFT によって得た周波数分布である。2 号機の定格回転数は 1.25Hz(75min-1)であり、両軸とも回転数成分が最も高いスペクトルを示している。また、5 倍の高次成分である 6.36Hz にもピークがあるが、主ポンプの羽根車が 5 枚であることに起因していると考えられる。

図 8-9 は、図 8-8 における X 軸方向の波形（経過時間 14～18 秒の情報）を拡大したものである。最大波高約 60 μm で、回転数成分を主体に、5N とさらにその上の高次成分が重合した波形である。FFT では回転数成分が突出しているので、大局的にはミスアライメント

などが若干影響していると考えられるが、口径 4600 ㎜というポンプ設備の規模から考えると波高の 60 μm は非常に小さい値であることから、経過的に状態監視を継続し使用する段階であると考えられる。

渦電流式変位計のメリットは、比較的安価な装置と解析用のアプリケーションで、回転に伴う変位量を数 μm 単位の高い精度で計測でき、周波数特性も把握できることであるが、グランドパッキンの直近で計測するため、主軸のぶれがパッキンで抑制される傾向があるため、劣化傾向が素直に検出できるか今後の検討課題となる。

渦電流式のセンサ及びアンプ、サンプリング及びデータロガーはいろいろなタイプがあり、多くのメーカが製品化している。コンクリートケーシングに活用するほか、超音波式で計測が難しい二重管方式の主軸を有する一般のポンプ設備への適用も可能である。

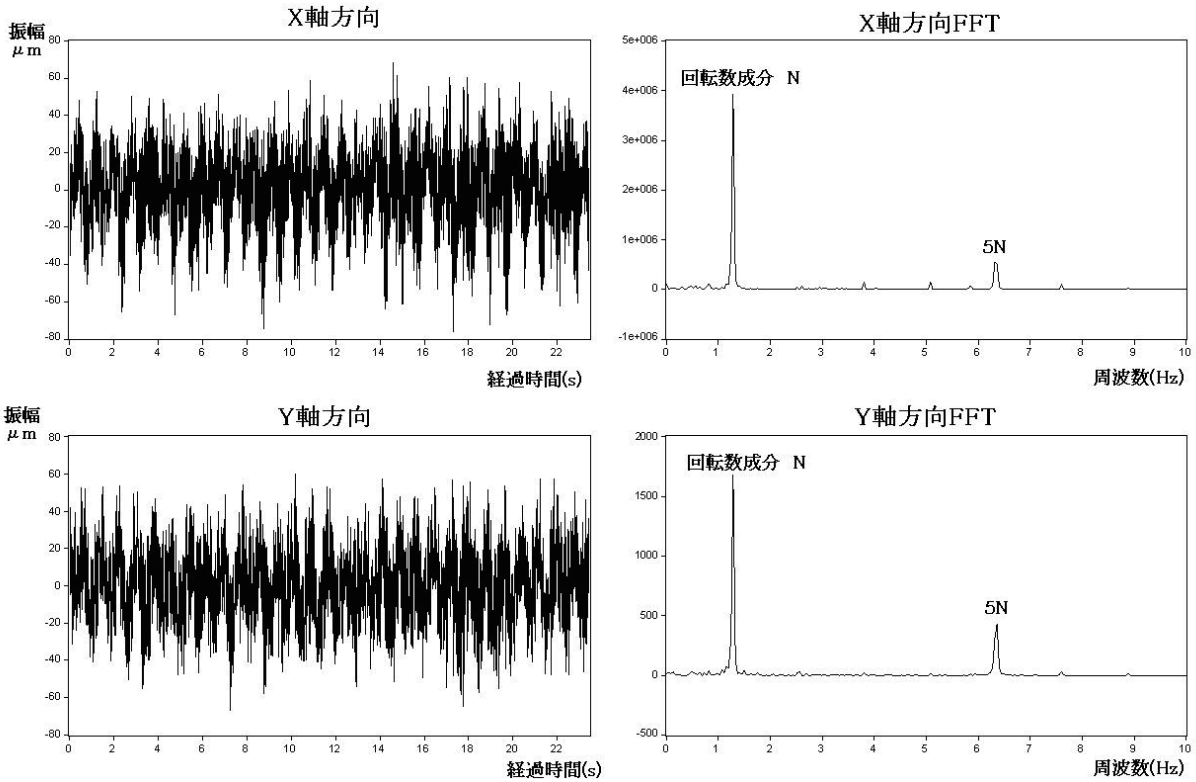


図 8-8　C 機場 2 号機の振動解析結果（渦電流式変位計による）

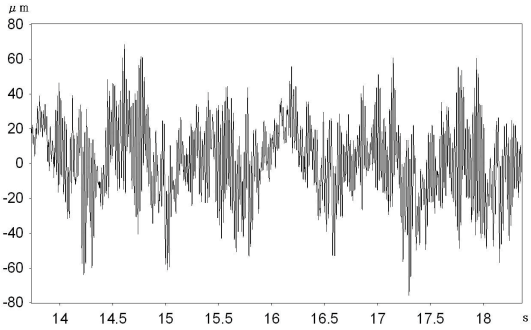


図 8-9　C 機場 2 号機主軸振動波形

8.3　潤滑油分析による状態監視

(1)概要

原動機本体の殆どの機器・部品は、通常の年点検や月点検時に分解点検を行うことはなく、これまで実施されてきた「定期整備」によって分解しその状態を知ることになる。ところが、定期整備を行った場合、主要機器・部品は時間計画保全で管理されるため、その時点では使える部品でも、次期定期整備まで安全に使用できる担保がない場合、交換するケースが多い。従って、分解整備の実施間隔が LCC に大きな影響を与えていることは明らかであり、分解などの大きな作業コストをかけずに状態を適切に把握する方法が現場で求められている。

このようなニーズに基づいて、潤滑油の分析による状態監視技術であるフェログラフィ・SOAP は産業用機械（減速機・軸受・原動機等）の状態監視保全において注目されている。常用系設備では、運転時間の増大に伴う劣化傾向が把握しやすく、既に活用実績も多いが、供用時間に対して運転時間が非常に短い非常用設備においては、フェログラフィ・SOAP による評価基準が確立しているとは言えない状況である。

フェログラフィは、潤滑油やグリスなどの試料を希釈剤と混合し、勾配を持った強力な磁場で摩耗粒子を大きさの順に分離・配列し観測することで、装置の劣化状態を把握する手法である。分析するオイルを希釈しガラススライド上に定着させた「フェログラム」を作り、定性的な各種粒子の分布を解析する分析フェログラフィと、照射した光の遮断率から定量的に大・小の粒子量を求める定量フェログラフィがある。

粒子形状は、ラビング、シビアー、平板状、ラミナー、球形、赤錆、黒錆などの区分で表される。診断は、継続して定期的に得る解析結果を基に行う。摩耗時期に発生する大きな粒子を観測するほか、小粒子量、大粒子量の組割合変化等を総合的に解析する。

SOAP とは、潤滑油中の微量元素の量を発光分光分析、

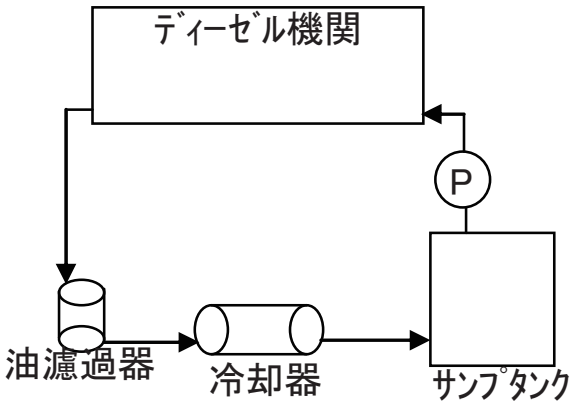


図 8-10　原動機のオイル循環

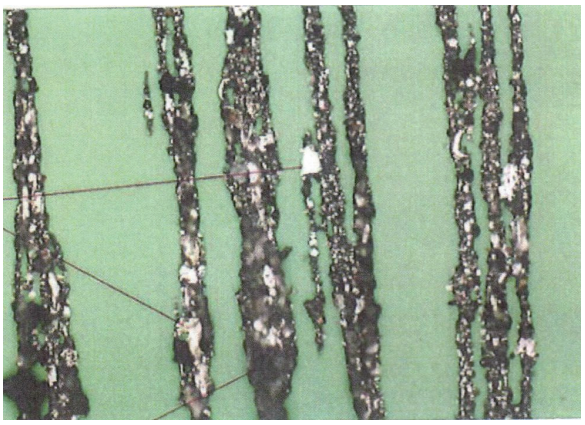


写真 8-3　1 号機フェログラフィ

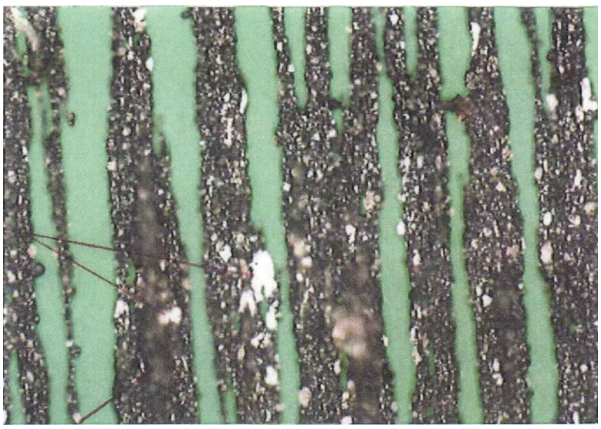


写真 8-4　3 号機フェログラフィ

表 8-1　フェログラフィ・X 線蛍光分析結果

成分 ポンプNo	鉄 Fe	亜鉛 Zn	銅 Cu	AL%	AS%	Is
1号機	3.2	2.0	0.5	37.5	33.7	1082
3号機	12.0	0.9	0.5	67.2	66.9	161

Fe、Zn、Cu：ppm

表 8-2　SOAP の結果(単位：ppm)

成分 ポンプNo	鉄 Fe	鉛 Pb	銅 Cu	ｸﾛﾑ Cr	ｱﾙﾐﾆｳﾑ Al	ﾆｯｹﾙ Ni	銀 Ag	すず Sn	ｹｲ素 Si
1号機	16	10	16	1	2	1	0	2	30
3号機	77	4	154	1	2	0	0	3	17
ポンプNo	ホウ素 B	ﾅﾄﾘｳﾑ Na	ﾘﾝ P	亜鉛 Zn	ｶﾙｼｳﾑ Ca	ﾊﾞﾘｳﾑ Ba	ﾏｸﾞﾈｼｳﾑ Mg	ﾓﾘﾌﾞﾃﾞﾝ Mo	
1号機	94	0	938	1173	5130	0	12	2	
3号機	12	2	339	395	4587	0	15	3	

原子吸光分析、蛍光 X 線分析等で検出し、劣化箇所・程度の推定を行うものである。主に設備の安定期において、フェログラフィでは小粒子、大粒子の割合が比較的一定になるが、元素レベルでは摩耗等で発生する物質の含有量が徐々に増加していると考えられる。SOAP では、元素の含有量を計測することで、機械要素の劣化を診断する。しかし、異常摩耗時に発生する 5～10μm 以上の粒子に対する元素の分析感度は劣るため、フェログラフィと併用してお互いの得失を補完することが得策である。

(2)フェログラフィによる解析事例

C 機場の 1 号機及び 3 号機の管理運転時にそれぞれ原動機の潤滑油を採油して状態を推測した。

1 号機は 1979 年に設置し、2004 年に分解整備され主要部品及びオイルを交換した。つまり、整備後の稼働年数は 4 年である。 3 号機は 1994 年設置され 14 年間稼働を続けており、時間計画保全上は定期整備の時期が近づいている。

図 8-10 に、オイル循環の模式図を示す。オイルは原動機に貯留されず、サンプタンクから絶えずポンプで供給され、濾過器、冷却器を通じてサンプタンクに戻る。約 30 分の管理運転後、サンプタンクのドレンから端切りして採油した。

定量フェログラフィを実施し、補完的に鉄、亜鉛、銅などの成分を蛍光 X 線分析で調べた。表 8-1 に結果を示す。AS（小粒子量）及び AL（大粒子量）は、光学密度法で計測したものである。結論として、双方に一般的な評価指標を当てはめると、現状では異状摩耗は発生していないという診断結果を得た。その上で特徴を見ると、オイルの使用年数の長い 3 号機の方が大粒子の割合が高く、ピストン等鉄部品の摩耗傾向を示す鉄成分も検出されている。

一方、Is は劣化傾向を示す異常摩耗係数であるが、逆に 1 号機が高い数値を示している。

写真 8-3 及び 8-4 に、 1 号機及び 3 号機オイルの顕微鏡写真を示す。

いずれも 2 倍に希釈したオイルを倍率 100 倍で撮影している。黒く縞状に集まっているものが主に正常摩耗粉及び錆粒子であり、ところどころにある白い粒子が軸受の表面疲労を示す平板状粒子である。1 号機に比べ、3 号機の方が粒子の量が多く錆粒子が多いことがわかった。

(3)SOAP による解析事例

発光分光分析（高周波誘導プラズマ発光 ICP）による解析結果を表 8-2 に示す。

1 号機、 3 号機とも多く検出されているリン、亜鉛、カルシウムは、耐摩耗防止剤、酸化防止剤などの添加物

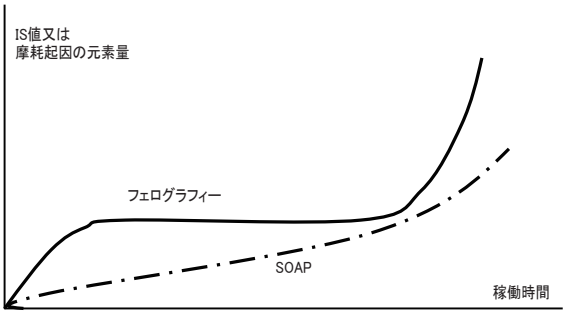


図 8-11 評価指標と稼働時間の関係

であると推定され、長く使用している３号機の方が少ない傾向を示している。特徴的な事項は、３号機における銅の含有量が高いことである。適正な閾値については検討の余地があるが、100ppm を超えていることから軸受（クランクピンメタル等）の状態悪化が懸念されるが、同時に増えるとされる鉛や錫の含有量は増加していない。

(4)考察

フェログラフィの結果、14 年間整備していない３号機の方が大粒子量が多く、SOAP の結果、オイル添加剤の組成が減少し、軸受や銅配管(例えば油冷却器)の劣化を表す銅含有量が増加していることが解った。表 8-1 における銅の含有量は、１号機と３号機が同値となっているが、蛍光 X 線分析では銅の検出感度が低い傾向があり、その影響と考えられる。

フェログラフィにおいて特に大きな劣化を示す指標が得られていないこと、SOAP においても軸受の劣化を示す鉛や錫の含有量は増加していないことから、正常な摩耗状態の末期にあると考えられる。また、銅が単独で検出される状態が続くのであれば､摩耗によるものでなく、銅製品の表面において他の元素とイオン交換が起こっている可能性も否定できない。

フェログラフィにおける Is、粒子濃度や SOAP における摩耗による元素濃度は、図 8-11 に示すようなイメージで増加する。表 8-1 においては、Is 値が整備後 4 年の１号機が高い結果となったが、評価は継続的に解析して図に示すような増加傾向を示すかどうかがポイントになる。特に、非常用設備においては、稼働時間がステップ状に増加する特性があるが、これらの指標がどのように変化するか検証できれば、整備タイミングを見極める有効な手段になると判断する。

９．維持管理への提言

9.1　データ収集事例から

(1)「腐食」の対応策が急務

モデル機場における故障履歴から抽出した故障モードを表 9-1 に示す。常用系プラントでは、稼働時間に影響する摩耗や物理的な損傷が故障モードとして多くなると考えられるが、休止期間が多く、河川に近い湿度の高い建設物に収容されている河川ポンプ設備では、腐食が18.7%となっており最も支配的な要因となっている。摩耗・損耗は2.4%であり、全体に占める割合は少ない。

河川ポンプ設備では、地下やコンクリート室内に系統機器が納められる場合が多いので、各現場状況に見合った素材選択が必要となる。特に、SS 材、SM 材については、防食設計を適切に行い、SUS 材などの電位的に貴となる金属との接触をさける設計や、腐食による故障を繰り返す部材の素材変更などを臨機に行う必要がある。

(2)故障情報記録の適正化

点検整備は、現状の機械設備が健全であるかどうかを確認し、機能を維持する作業である。モデル機場において、現在紙ベースで保存されている維持管理情報の実績では、信頼性評価に要する故障内容、故障モードを正確に読み出せないケースが散見される。表 9-2 に、モデル機場の故障情報のうち、故障内容あるいは故障モードが明確によみとれなかったケースの割合を示す。故障内容が不明であるものは、①構成機器に故障が発生しているかどうか不明、②故障モード情報のみ、の何れかが多く、機場によって全データの 8～22%を占める。また、故障モードが不明であるケースは、「○○が故障している」「××が動かない」などの記載のみで、その故障を引き起こしている要因を解説していないものである。全データに占める割合は非常に高く、機場によって 23～57%となり、半分以上のデータで、故障モードが特定できない機場があった。ただし、故障モードの記載がないケースでは、月点検の内容で要因を把握することができない場合も含まれていると考えられる。

これらは、故障、故障モードの定義が曖昧であることと、記録方法の指針がないことに原因があると考えられる。本研究では、FMEA シートにおいて、実績と点検整備指針に基づく故障内容、故障モードを示しており、現場における今後の情報記録方法の適正化に資するものであると考える。

(3)月点検における重点確認事項の設定

河川ポンプ設備点検・整備・更新検討マニュアル(案)では、月点検の基本は管理運転によって設備全体の機能、状態の把握することであり、従前のような構成機器の画一的な目視点検は推奨していない。通常月点検は 1 日程度の短期間で行われ、始動条件確認後に約 30 分程度の連続運転を行い、主ポンプ設備、駆動設備、主要な系統機器の吐出圧などの一次効果パラメータや振動、温度などの二次効果パラメータを計測して異状の有無を確認している。

表 9-1　モデル機場に発生した故障モード

機場名	全データ	故障モードの種類								
		腐食	破損・損傷	洩れ	劣化	変質	摩耗・損耗	亀裂・割れ	その他	不明
A	167	26	10	3	10	14	6	3	12	83
B	144	23	20	0	4	1	2	1	11	82
C	290	54	18	30	17	5	4	5	41	116
D	258	70	21	37	13	0	7	8	42	60
E	132	12	21	14	4	8	5	0	10	58
総数	991	185	90	84	48	28	24	17	116	399
割合%	100	18.7	9.1	8.5	4.8	2.8	2.4	1.7	11.7	40.3

表 9-2　解析不明な故障情報

機場名	全データ	故障内容		故障モード		故障原因	
		不明	割合%	不明	割合%	不明	割合%
A	167	36	22	83	50	83	50
B	144	12	8	82	57	91	63
C	290	50	17	116	40	204	70
D	258	49	19	60	23	130	50
E	132	29	22	58	44	80	61

表 4-11 各モデル機場の故障傾向（再掲）

設備区分	A機場	B機場	C機場	D機場	E機場
主ポンプ	2	0	7	4	0
減速機	10	3	8	3	0
主原動機　ディーゼル	13	6	36	29	10
吐出弁	1	0	9	7	3
逆流防止弁	0	0	0	0	2
電源設備・自家発電設備	19	11	11	13	14
系統機器設備	23	24	32	18	22
除塵設備	6	5	15	14	8
操作制御設備	4	1	6	9	5
合計	78	50	124	97	64

しかし、限られた管理運転のなかで全ての機器の状態を把握することは不可能なので、各機場の故障実績を勘案して、重点的な点検項目を設定することが現実的である。

表 4-11 に各モデル機場の故障実績を示しているが、A 機場では系統機器のなかでも空気系統に故障が多い。B 機場では、発電機のセンサ類に故障が多い。C 機場では、主原動機の潤滑系統がサンプタンク方式になっているが、原動機における潤滑油の漏れ、計器の故障などが多くなっている。同様に D 機場では主原動機、発電機用原動機の故障が目立つが、E 機場は、平均的に故障が発生しており特徴が掴みにくい。

個々の機場における故障傾向を基に、月点検項目を適正にセットすることが合理的である。

(4)予備品計画

非常用施設のアンアベイラビリティを定義する式(3.1)が成立するための条件として、点検で発見された故障は速やかに復旧されるという条件がある。「速やかに」とは点検期間中に復旧できるという意味に近い。故障の復旧に関する指標に、平均修復時間（Mean Time to Repair :以後「MTTR」という）がある。MTTR は構成機器の故障実績から算定でき、次式で求める。

$$MTTR(hr) = \Sigma T / N \qquad 式(9.1)$$

ここに、ΣT：当該機器に発生した故障の復旧に要した合計時間　N：故障回数

点検整備本研究で実施した FMEA では、構成機器・部品に故障が発生したときの MTTR を、メーカヒアリングによる目安として示した。現在の維持管理情報からは、MTTR を算定できる充分なデータを得られていない。実際に復旧に要する時間は、必要となる機器・部品の調達時間と修復作業の和になるため、同じ故障内容であっても個別の案件によって時間が大きく異なる可能性がある。点検で故障を発見しても、それが出水期でなおかつ部品調達や修復作業にとても長い時間を要するとなると、実排水作業に影響を与える可能性が大きくなり、アンアベイラビリティの観点からは点検効果を低減させる。従って、今後個々の設備毎に FMEA を実施し、内容をブラッシュアップさせていくにあたっては、復旧時間に関する情報も非常に重要となる。

個々の機場においては、予備品の有無で MTTR の長短に影響が出る機器が多い。しかしながら、現状の河川ポンプ設備における管理では、予備品計画に関する具体的な基準はない。予備品として考えられるものは、主ポンプ用ボルトナット、系統機器用手動バルブ、配管用パッキン、ボルトナット、制御設備機器（補助継電器、電球、配線用遮断器等）、除塵設備におけるシャーピン、場合によっては主ポンプグランドパッキンなどであるが、維持管理データから MTTR のうち部品調達に要する時間が統計的に求められれば、次のような判断で予備品候補を検討する根拠となりうる。

①故障等級が高い機器・部品
②調達時間が長い(市場性が低い)
③比較的修復作業時間が短い
④比較的安価である
⑤経年劣化しにくい

メーカヒアリングにおいては、上記①及び②と④は比較的相反関係にある。故障等級が高い主ポンプ関連の部品は非常に高価で、調達時間と同様に修復に要する時間も長く、予備品として容易には管理しにくい。比較的安価な製品は、原動機の内部部品ということになるが、種類が多いことから、機場毎の維持管理情報から「くせ」を見出し、故障実績に応じた部品を確保しておけば、不測の事態において MTTR を短縮させることができる可能性が高い。

この考え方に基づけば、C 機場を例にとると調速機、燃料噴射弁、プライミングポンプに故障が多いので、細部の交換品リストを作成し、予備品とすることができる。

9.2 信頼性確保とコスト縮減

(1)維持管理情報の集約

表 3-3 に示す各構成機器・部品の故障データは、約 9 年間の調査によるものであり、現状の各ポンプ設備の実態を全て表しているものとは考えにくい。本研究のモデル機場の維持管理情報集約で示した手法をもって、継続した情報の蓄積が必要である。信頼性とライフサイクルコストの評価は、建設時からの情報集約が不可欠である。本研究では、欠落した維持管理費情報を維持管理内容から推計する試みを示したが、情報が時間とともに失われれば、どのような手法を持ってもライフサイクルコスト算定の精度が低下するのは明白である。

また、約 9 年間の故障情報では、表 3-3 に示す故障データしか得られていない。つまり、表に掲載の内部品については故障情報を得ることができなかったことを表す。当チームでは、機械設備の信頼性を評価するにあたって、構成する機器の故障実績がないものについても故障率 0 とすることは不適切と判断し、「機械設備の信頼性評価に関する調査研究」(土木研究所資料、第 2870 号)に準拠し、当該機器・部品が属する小区分の「延べ供用時間」の３倍にあたる供用時間に１回の割合で故障が発生するものとみなした数値を用いるものとしている。

従って、信頼性評価の精度を向上させるためにも、維持管理情報の記録・集約をシステマティックに行う方法の確立は喫緊の課題である。

(2)個々の機場の FMEA

本研究における FMEA では、個々の機場を対象として FMEA を実施する場合、標準的な FMEA シートからシステムに合わせて構成機器・部品を取捨選択し、故障等級の高い機器を抽出することを想定しているが、各評価項目であるシステムへの影響度、故障モード発見の容易性、発生頻度は、システム設計に合わせて再評価するべきものである。本研究では表 3-3 に示す機器の故障率を用いて評価を行ったが、故障発生頻度は設置環境によって大きく影響を受けると考えられ、モデル機場においても点検時に発見される故障の傾向には差異が見られた。

一般的に、個別機場毎の故障発生頻度を用いて再評価した結果、目安として故障等級が 2.5 を超える機器・部品については、実際に発生している故障モードを防御することのできる管理上の対策について検討することが望ましいと考える。実際の排水機場の管理では、点検において発見された故障モードは、実際に故障を引き起こしているか、あるいは速やかに修正しないと故障に結びつくか、しばらく様子を観察するかどうか検討したうえで優先順位をつけ、対処方法を検討していくが、過去の実績から同じ故障モードが繰り返されて発生する場合は、設計面における変更を検討すべきである。先にも述べたとおり、全体的に普段稼働することの少ない排水機場のポンプ設備においては、「腐食」という故障モードが非常に多くなっている。防食理論は非常に多種多様で、単純に論じきることは難しいが、FMEA によって検討すべき機器・故障モードを明確にしていくことが、効果的な維持管理を実現する第一歩であると考える。

(3)FTA による二次冷却水系統の信頼性

A 機場では、改修によって当初の二次冷却水系統を削減し、管内クーラ方式を導入した。表 5-3 に示すとおり、その効果はアンアベイラビリティに換算すると、0.06×10-5(1/hr)という僅かなものである。しかしながら、表 3-8 に示すとおり、主要機器点数は減少するため、以後の維持管理費に占める修理費、部品交換費用の削減は期待できる。

今回のモデル機場においても、点検時に発見された冷却水系統の故障実績は多く、点検、修繕に関連する作業量が多くなっている。

FTA において、二次冷却水系統の削減が大きく信頼性向上に寄与しないのは、二重化された構成機器が、共通故障を引き起こす確率を把握できていないことにある。二次冷却水が調達できず、システムに循環しない故障が発生した場合、その故障モードが河川水の塵芥による閉塞であると、二重化された各ラインが連続して故障する可能性がある。維持管理の現場ではこの塵芥による二次冷却水系統「断」を最も恐れているが、実績からどの程度の確率で二重化ラインに共通故障が発生するか把握できていない。現状の FTA では、二重化された各ラインが完全に独立した故障率を持って動作すると考えているので、維持管理情報が整備され、共通故障の発生確率を求めることができると、FTA における二重化ラインの信頼性は現状より低下する。維持管理情報の整備によって、新しい技術の信頼性寄与度はより明確に示すことができるようになる。

(4)新しい状態監視保全技術の確立

FMEA において、故障等級が大きい機器・部品は多数あるが、このうち定期点検で目視確認出来ない機器は、羽根車、水中軸受、主原動機の内部機器等である。これらの機器が故障すれば、MTTR が長いため、年点検・月点検において故障を発見しても、実排水作業に間に合わず多大な損害を発生させる可能性を有するものである。

従って、年点検で確認することのできないこれらの機器の状態確認は、年点検時に得られた情報や稼働時の状況を勘案しながらも、時間計画保全である定期整備を実

施することで行われる。現状において、稼働時に故障が許されない非常用設備においては、時間計画保全は妥当な手法ではあるが、実績から定期整備費用が維持管理費に示す割合が高いことも示した。しかし、FMEA や FTA だけではこれらの機器が故障へと向かう状態の変化をリアルタイムに把握・評価することはできない。

状態監視保全技術は、潤滑油診断、振動解析、温度による評価など効率的な維持管理を目指す民間企業のプラントで進歩を続けているが、河川ポンプ設備にこれらの技術を適用している部分は少なく、河川ポンプの稼働特性から、主ポンプ設備については状態監視自体も難しいとされている。その理由は次のとおりである。

①非常用設備であるため、稼働時間が少なく劣化傾向を把握するデータを取得しにくい。

②河川ポンプ設備のように滑り軸受けを用いた低速回転機械の診断技術が確立していない。

しかしながら、現状と同じ技術によって点検を単に継続しただけでは、主要機器を分解整備する多額な費用を縮減できない。今後、これまで試みられていない主ポンプ、減速機、原動機の振動解析や、近年民間のプラント管理で急速に普及している潤滑油やグリスを対象としたフェログラフィ、SOAP などの診断技術の適応性を見極め、応用することで、低速回転系の非常用設備である河川ポンプ設備の状態監視保全技術を確立する必要がある。

１０．結論

本研究課題の成果をまとめると次のとおりである。

1)河川ポンプ設備を対象としてFMEA、FTAを行うために、維持管理データベースに必要となる項目（故障、故障モード及び構成機器の修繕内容・費用等）を抽出し、国土交通省の維持管理データベースに当該項目が反映された。

2)最新の設備構成を勘案したFMEA、FTAを提案し、部品の故障率を用いて全体システムの機能低下リスクを評価した。

3)個別機場の故障履歴を整理し、FTAを活用することで、点検整備の効果を定量的に示す手法を提案した。維持管理情報から、信頼性と経済性の関連を把握する手法を提案した。

4)設備構成とシステム信頼性の関係を、モデル機場を基に把握することができた。

5)個別機場の故障履歴からシステムの故障動向を掴み、維持管理手法へ反映させる手法を提案した。

6)モデル機場の解析結果から、年点検・月点検の回数を減ずることは信頼性の観点で難しく、維持修理費の低減については大規模な整備工事の間隔を延伸することが効果的であることがわかった。

7)大規模な整備工事に関して、時間計画保全から脱却し状態監視保全に移行するためには、新しい状態監視保全技術の確立が急務である。

本研究成果を受けて、今後は振動解析・潤滑油分析を用いた主ポンプ設備、主ポンプ駆動設備（減速機、原動機）に対する診断手法を開発・検討していく所存である。

参考文献

1)長健次、樋下敏雄、村松敏光、多田和弘、大沢昭弘、斉藤英晴:機械設備の信頼性評価に関する調査研究、土木研究所資料、第2870号、1990.03

2)江本平、村松敏光、吉田正、森下博之、服部達也、田中和嗣、小林誠：機械設備の信頼性評価に関する調査研究(第二報)、土木研究所資料、第3784号、2001.1

3)IEC 60812 システム信頼性の解析技法－故障モード影響解析（FMEA）手順　英和対訳盤　第2版，日本規格協会，　pp.8-15，2006.1

4)久米均著：設計開発の品質マネジメント，日科技連，pp.141-148，1999.9

5)揚排水ポンプ設備技術基準（案）同解説，日本建設機械化協会，p.70，1981.3

6)揚排水ポンプ設備技術基準（案）同解説，河川ポンプ施設技術協会，pp.114-117，1996.3

7)揚排水ポンプ設備技術基準（案）同解説，河川ポンプ施設技術協会，pp.19-20，2001.2，

8)河川ポンプ設備点検・整備・更新検討マニュアル（案），国土交通省，2008.3

9)河川便覧2006年版，国土開発調査会，　p.14，2006.10

10)「建設省河川砂防技術基準（案）同解説調査編」,日本河川協会編，pp.546-547，1997.10