

排水ポンプ設備のリスクマネジメントに関する調査

1. 調査目的

排水ポンプ設備は、洪水時の内水排除を行うことで国民の生命・財産を守る重要な社会資本であるが、近年信頼性と経済性を向上させる技術改善が進められ、昭和40～50年代に整備されたポンプ設備も更新にあわせて仕様変更されつつある。

技術的な改善事項としては、系統機器等を主体としたシステムの簡素化、機器の長寿命化、確実な操作制御の実現などがあり、技術要素としては、水中軸受のセラミック化あるいは樹脂化、ガスタービンの採用、操作制御設備におけるPLCの導入などを挙げることができる。

このような技術動向に伴って、信頼性を確保するために高度な維持管理技術が要求されることも事実であり、老朽化設備の故障が懸念される一方で、黎明期以降採用された設備においては従前とは異なる故障発生パターンが散見される。

よって、今後は点検における計測データや故障情報を含む維持管理情報のデータベース化と、故障実績に鑑みた適切な保全計画の立案及び実施が重要となってくる。

本調査では、①不具合・故障事例の把握及び致命的機器に発生しうる故障の想定（リスク分析）、②発生頻度・影響度の評価（リスクアセスメント）、③リスク低減対策を講ずるべき事象とその方法の明確化（リスク対策）を行うものである。

平成26年度は、排水ポンプ設備の故障リスク低減手法の検討、主原動機における電動機採用検討を行った。

2. 過去の経緯

平成23年に土木研究所において、排水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^{※1}を行っており、排水ポンプ設備を対象として、点検や修理に関するデータを基に、維持修理費と設備の信頼性の関係を解析し、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している。

本調査は、前述の成果における信頼性評価手法を取り入れ、故障リスクを低減するマネジメント手法を提案するものであり、平成25年度から平成26年度にかけて検討を行った。

平成25年度は、排水ポンプ設備の故障情報の整理及び解析、故障実績を考慮したリスク低減対策の検討、予備品確保の有効性の検討、主原動機における電動機の採用検討を実施した。

3. 調査概要

3.1 リスク低減手法の立案

平成25年度に、故障実績に基づく技術改善ニーズをとりまとめた。

本年度は、管理者側として実施すべき技術改善事項に着眼する。具体的には、故障実績を勘案した信頼性評価によって年点検・月点検手法や設備仕様の変更点を導く手法と、より効果的な予備品計画の策定手法について検討する。

3. 1. 1 現行の機械設備維持管理計画マニュアル（案）へのリスク低減手法の反映

故障リスクを低減するために、過去の故障実績を基にした点検内容の見直しや主要設備機器更新時の仕様改善提案の事例検討を行い、現行の機械設備維持管理計画マニュアルの改定案としてその手法を反映した。

3. 1. 2 予備品計画策定要領（案）作成

機場毎に最適な予備品を抽出・選定する過程において、MTTR（平均復旧時間）を合わせて検討する手法の有効性を評価するとともに、当該手法を予備品計画策定要領（案）としてとりまとめる。

3. 2 主原動機における電動機採用の検討

過年度の検討結果において、最も故障実績の多かった主原動機について、実際に使用されているディーゼル機関又はガスタービンに対する電動機の優位性を検討する。

電動機は電源が確保できれば構造的にシンプルで、維持管理もしやすいが、停電時の電源確保を考慮すると建設費が嵩むことがわかっている。よって、建設費の小さい小規模な機場を想定した電動機採用に関する信頼性と経済性の評価を行う。

本調査では、主ポンプ設備2台を有する排水機場をモデル機場（1台当たりの主原動機出力210kW及び130kW）として想定し、電動機が優位となる条件を検討し、「小型排水機場・電動機採用検討要領（案）」としてとりまとめる。

4. 調査結果

4. 1 リスク低減手法の立案

本報告における施設名称は、全て略称である。

4. 1. 1 現行の機械設備維持管理計画マニュアル（案）へのリスク低減手法の反映

本調査では、過去の故障実績を基に点検内容の見直し手法や主要機器更新時の仕様改善提案手法を事例としてとりまとめた。

事例においては、過去の故障実績について詳細に整理・分析し、故障の発生過程から、点検内容の見直し又は、仕様改善の提案を行った。

まず、モデル機場を設定し、過去の故障報告書等を借用・収集し、故障事象、故障経緯、故障原因、その際に実施した対策及び恒久的対策を整理し、まとめた。

また、その故障事例について、発生した故障事象をトップ事象に置き、原因事象から順次進展した異常事象を時系列に整理してトップダウン手法による分析を行い、段階毎に考えられる対策を立案した。

次に、故障が発生した機器のFMEAを実施し、現状における故障等級（致命度）を把握するとともに、立案した各対策を実施した場合の効果についてもFMEAで検証した。具体的には、対策によって故障等級がどの程度改善されるかを検証するとともに、対策の執行性（容易性）、コストを比較項目として付加し、立案した対策の優位性を評価している。

本手法で、選定した対策事例を下記に示す。

(1) 故障事例

TJ10排水機場では、過去に次の故障が発生した。以下に経緯をまとめる。

【ポンプ設備仕様】

形式：立軸斜流ポンプ 2台
 口径：φ1500 mm
 全揚程：5.4m
 吐出量：5 m³/s (1台当たり)
 水中軸受：セラミック製
 主原動機：水冷ディーゼル機関
 減速機：直交歯車減速機

【経緯】

2号主ポンプの管理運転を実施した所、ポンプ起動直後に振動を伴う大きな異音が3回程度発生し、その後、回転が全速となり吐出弁が開になるにつれて落ち着いた。ポンプを停止し再起動した際、異音は発生しなかったが、主軸上部(ベント管外の露出部)に大きな振れ回りが確認され、ベント管の付属配管の一部から水漏れを発見した。

メーカ立会いのもと運転確認を行ったが原因が分からなかったため、点検口からファイバースコープを挿入して内部点検を行った結果、水中軸受けの破損を確認した。

(2) 故障事象の解析

(1)の故障に対して、異常事象を故障発生過程に従い整理し、対策検討に資するものとした。本事例においては、最終的な故障を引き起こす原因となった事象から最終的な事象までを7段階に整理した。その結果を表-1に示す。

表-1 故障事例における事象解析

排水機場名	異常発見状況	故障機器・部品	故障内容	発見した事象	事象の連鎖						
					1次事象	2次事象	3次事象	4次事象	5次事象	6次事象	7次事象
TJ10排水機場	管理運転時	2号主ポンプ上部・中間・下部水中軸受け	セラミック軸受けおよび超硬スリーブの破損・損傷	2号主ポンプ起動時に大きな異音が発生し、主軸が触れ回り回転不能	空気冷却器で冷却水が漏水、及び結露水の蓄積	過給機・マニホールドの腐食	主原動機の始動時間が延伸(着火不良)	主原動機の振動が主ポンプの危険速度に近い回転数(定格回転数の下側)が保持	軸側の超硬スリーブが激しく振動シケージング側のセラミック軸受双方に想定外の衝撃力が発生	中間軸セラミック軸受と超硬スリーブが破損	軸の異常な触れ回り
					①	②	③	④	⑤	⑥	⑦
							主原動機の振動が吸収されことなく主ポンプ減速機及び主ポンプ主軸へ伝達				
							④				

表-1において、着色した部分で事象を発見できれば最終的に予防保全に資するものとして、5段階の各事象に対して対策を立案した。表中①～⑤に示す対策案を事項にまとめる。

(3) 対策案

立案した5件の対策については下記のとおりである。

- ① 潤滑油分析値の傾向管理
- ② 過給機入口温度の傾向管理
- ③ 始動時間の傾向管理
- ④ クラッチの設置
- ⑤ 渦電流式変位計による主軸振動計測

対策案の評価については、FMEAを採用するものとし、その評価項目は次のとおりとする。

- ・評価対象機器あるいは部品の「システムへの影響度」
- ・故障モード発見の難易度
- ・当該故障発生頻度

ル機関の特徴として水分が高いケースが多いことがわかっている。この原因は、吸気や燃料中に含まれる水分が燃焼後に排気管やエンジン内に付着して結露したものと考えられている。しかし、空気冷却器からの水漏れによって潤滑油内に多くの水分が混入すれば、結露だけが原因である場合より大幅に水分が上昇するので、特に水分の変化に着目し変化を把握すれば「漏れ」を発見できる可能性が高い。漏れが異常に多ければ、潤滑油が白濁しているはずであり、その場合は始動前の目視点検でも確認できる。

潤滑油の性状分析値の傾向管理を行うことで、ある数値以上になった場合更油という方策をとれるため、再発の可能性が低下すると評価できる。課題としては、通常性状分析を月点検レベルでは実施しないため、発見の容易性を向上させるためには経費が必要となる点である。

② 過給機入口温度の傾向管理

過給機内部に何らかの異常が発生し、タービンあるいはコンプレッサ（ブロー）の回転が円滑でなくなると、排気エネルギーが加給側に伝達されにくくなるため、排気温度が上昇する。従って、排気温度を計測し傾向管理することで内部異常を把握できると考えられ、この手法の有用性は他機場の計測実績でも明らかとなっている。

また、排気温度の計測は月点検時に可能である。よって本方策を採用することで、分解整備でしか確認できなかった内部の発錆を、月点検時の計測値による傾向管理で把握できる可能性があること、及び当該機場における過給機の故障発生頻度が平均的な故障発生頻度まで低下させることができると評価した。

③ 始動時間の傾向管理

ディーゼル機関の始動時間の長短を左右する要因は多岐にわたる。従って、過給機やマニホールド内の腐食などの有無をこの時間管理だけで判断することは難しい。しかし、始動時間が延伸している傾向を把握できれば、異常発生の有無の判断指標となりうる。始動時間は、管理運転を実施すれば容易に計測が可能であることから、本方策を採用することによって、異常傾向の発見容易性が向上すると評価できる。

④ クラッチの設置

故障事例では、 $\phi 1500$ mm、吐出量 $5 \text{ m}^3/\text{s}$ という規模のポンプ設備であったが、原動機の出軸と減速機が撓み軸継手で直結されており、主原動機を発生源とする振動が主ポンプ主軸に伝達しやすい構造であった。事例のポンプ設備は、系の危険速度が定格回転数の下側にあることがわかっているので、万一始動不良が再発した場合に、クラッチがあれば危険速度近辺で回転が継続する場合の振動伝搬リスクをかなり低下させることが可能となる。（ただし、故障発生頻度の評価では、クラッチの評価データがないため、軸継手の頻度と同等として評価し「変更なし」としている。）課題としては、これまで採用していた撓み軸継手に対するコスト面であるが、主軸周りの保護を考慮すると十分に実施意義がある。

⑤ 渦電流式変位計による主軸振動計測

グランド部で露出している主ポンプの主軸に渦電流式変位計を設置することによって、運転時の主軸の動きを把握することができる。管理運転時に 2 方向（吐出方向・吐出方向と直交する方向）の変位量を把握し、傾向管理することができれば、異常振動発生の有無、水中軸受自体の摩耗、あるいは外力を受け変形した軸曲がりなどを検出できる可能性がある。

グランド部に変位計が設置されていなければ、主軸の動きを把握するために、主原動機との軸継手あるいはクラッチを解放した上で、主軸を手回しによって回転させ、センタリング計

測をしなければならない。またこの場合、運転中の計測データではないことから芯ずれ以外の異常を見いだすことは困難である。よって評価としては、異常発見の容易性を整備レベルから月点検レベルに向上できるとした。

本事例における検討において、以下の 2 点についても採用検討を行ったが、次の理由で FMEA の対象とはしていない。

⑥ 工業用内視鏡による内部調査

工業用内視鏡の普及が進んだため、ポンプ設備においてもポンプケーシングを分解することなく点検口から内部の撮影ができるようになった。点検口から工業用内視鏡を挿入し、羽根車等の腐食・劣化状況を撮影することで精密診断に資する技術である。

しかし、本事例では水中軸受が破損しているが、その予兆を軸受ボックス外からの撮影で把握することは難しいと判断した。つまり、内視鏡でポンプ内部を撮影した場合、スリーブや軸受が破損して軸受ボックスの外部に破損片が飛び出さないと異常を把握できないことから、予防保全のツールとしては現状では採用が難しいと考える。ただし、事例において使用されているように、故障発生時の迅速な原因究明には有用である。なお、点検口が人力作業で取り外しできる場合は、機材用意・撮影・評価に要する費用だけであるが、ポンプ口径が大きくなる(おおむねφ1200以上)と、点検口の取り外しにチェンブロックなどの仮設懸架装置が必要となるため、実施コストは増加する。

⑦ 水中軸受の樹脂化

老朽化機場においては、コンクリート躯体を含む土木構造物のひずみが発生する可能性がある。数十ミクロン単位で芯だしを行うポンプ設備の軸受に与える影響も大きいと考えられ、特に硬度が高く脆性破壊には比較的弱いセラミック軸受に関して、このような変状に対する適応性は未評価である。一方、民間の大型ポンプ設備では、水中軸受に樹脂(フッ素樹脂、フェノール樹脂など)を採用する事例がある。脆性破壊には強いが河川水に混入するシルト等の粒子分による耐摩耗性など現段階では未評価である事項が多い。よって本評価の対象外とした。

なお、実際には上記①～⑤までの各項目が順次反映され、現在運用を続けている。

4. 1. 2 予備品計画策定要領(案)の作成

本調査では、前年度調査に引き続き、予備品確保が危機管理上非常に重要であることを踏まえ、モデル機場を設定し具備すべき予備品について検討を行った。予備品は、増やせば調達及び保管コストは増大し、保管を誤れば使用前に劣化し、修復に使えない事態が想定される。そのため、構成機器や部品に関し事前に予備品として保管することの有効性を評価できる「予備品計画策定要領(案)」を作成した。

1) 予備品選定フロー

予備品保管の有効性を検討するために、図-1の選定フローを提案した。選定フローは、「①事前準備(調査・解析)」と「②保管可否の選定」の2つに大きく分けている。

「事前準備」の作業は、排水機場毎に排水ポンプ設備の構成機器・部品を明らかにし、調達日数等の調査及びFMEAを行うものである。

調査項目は、部品毎の市場性(調達日数)復旧作業日数である。

FMEA では、故障等級から重要部品の抽出を行う。
故障等級は、システムへの影響度、故障発見の容易性、発生頻度を考慮して決定する。

「保管可否の選定」作業は、FMEA により抽出した重要部品から予備品として保管すべき部品を選定するものである。また、抽出した重要部品以外にも点検時等に併せて交換可能な部品については、選定するものとした。具体的には、冗長性の有無、当該部品あるいは機器の価格、保管の容易性（劣化せずに保管できるかどうか）、想定される故障の発生頻度を総合的に考慮して決定する。

2) 事前調査の例

本調査では、モデル機場を選定し、排水ポンプ設備の構成機器・部品毎に「部品の供給性」「復旧までの所要時間」「経済性」「メーカー名」について調査を行った。調査事項の例について表-5 に示す。

3) 予備品選定の例

選定フローにより選定された重要部品と点検時等に併せて交換可能な部品を対象として、表-6 のように「冗長性」「価格」「保管劣化」「故障発生頻度」を勘案した総合的な評価を実施し、予備品としての選定を行った。

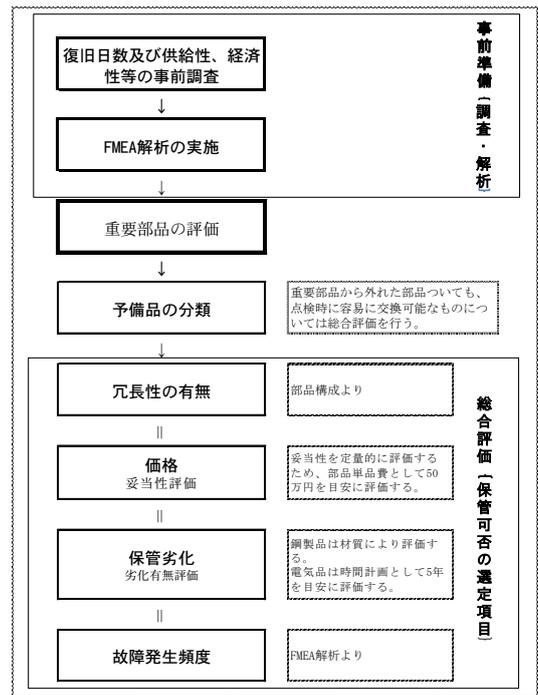


図-1 予備品選定フロー（案）

表-5 事前調査結果のイメージ

装置	機器	番号	部品	〇〇〇排水機場			
				部品の供給性	復旧までの所要時間	経済性	メーカー
主ポンプ設備	ベルマウス	1	吸水口(ベルマウス)	受注生産	約9ヶ月	xxxxxx	xxxxxx
主ポンプ設備	本体	2	バンド(ケーシング)	受注生産	約10ヶ月	xxxxxx	xxxxxx
主ポンプ設備	本体	3	据付部	—	—	—	—
主ポンプ設備	本体	4	組立用ボルト・ナット	汎用品2	約2ヶ月	xxxxxx	xxxxxx
主ポンプ設備	インペラ	5	羽根車	受注生産	約10ヶ月	xxxxxx	xxxxxx
主ポンプ設備	インペラ	6	羽根車ナット	受注生産	約5ヶ月	xxxxxx	xxxxxx
主ポンプ設備	インペラ	7	キー	受注生産	約5ヶ月	xxxxxx	xxxxxx
主ポンプ設備	主軸及び軸受	8	主軸	受注生産	約10ヶ月	xxxxxx	xxxxxx
主ポンプ設備	主軸及び軸受	9	中間軸	受注生産	約10ヶ月	xxxxxx	xxxxxx
主ポンプ設備	主軸及び軸受	10	軸継手	受注生産	約7ヶ月	xxxxxx	xxxxxx
主ポンプ設備	主軸及び軸受	11	スリーブ	受注生産	約7ヶ月	xxxxxx	xxxxxx
主ポンプ設備	主軸及び軸受	12	継手カラー	受注生産	約5ヶ月	xxxxxx	xxxxxx
主ポンプ設備	主軸及び軸受	13	外側軸受	汎用品2	約7ヶ月	xxxxxx	xxxxxx
主ポンプ設備	主軸及び軸受	14	軸受(スラスト軸受)	汎用品2	約7ヶ月	xxxxxx	xxxxxx
主ポンプ設備	主軸及び軸受	15	水中軸受(セラミック)	受注生産	約8ヶ月	xxxxxx	xxxxxx
主ポンプ設備	主軸及び軸受	16	封水ブッシュ	汎用品2	約5ヶ月	xxxxxx	xxxxxx
主ポンプ設備	主軸及び軸受	17	パッキン押え	汎用品2	約5ヶ月	xxxxxx	xxxxxx
主ポンプ設備	主軸及び軸受	18	無給水軸封装置	受注生産	約8ヶ月	xxxxxx	xxxxxx
主ポンプ設備	主軸及び軸受	19	ボルト・ナット	汎用品2	約2ヶ月	xxxxxx	xxxxxx
主ポンプ設備	主軸及び軸受	20	案内羽根	受注生産	約10ヶ月	xxxxxx	xxxxxx
主原動機	機関本体関係	21	台版	受注生産	約8ヶ月	xxxxxx	xxxxxx
主原動機	機関本体関係	22	シリンダヘッド	受注生産	約8ヶ月	xxxxxx	xxxxxx
主原動機	機関本体関係	23	ライナ	受注生産	約8ヶ月	xxxxxx	xxxxxx
主原動機	機関本体関係	24	吸・排気弁	汎用品2	約3ヶ月	xxxxxx	xxxxxx
主原動機	機関本体関係	25	フライホイール	受注生産	約8ヶ月	xxxxxx	xxxxxx
主原動機	機関本体関係	26	クランク室	受注生産	約9ヶ月	xxxxxx	xxxxxx
主原動機	機関本体関係	27	クランク軸	受注生産	約9ヶ月	xxxxxx	xxxxxx
主原動機	機関本体関係	28	クランク歯車	受注生産	約9ヶ月	xxxxxx	xxxxxx
主原動機	機関本体関係	29	過給器	受注生産	約8ヶ月	xxxxxx	xxxxxx
主原動機	機関本体関係	30	ピストン	受注生産	約9ヶ月	xxxxxx	xxxxxx
主原動機	機関本体関係	31	ピストンリング	受注生産	約8ヶ月	xxxxxx	xxxxxx
主原動機	機関本体関係	32	オイルリング	汎用品2	約3ヶ月	xxxxxx	xxxxxx
主原動機	機関本体関係	33	ピストンピン	受注生産	約8ヶ月	xxxxxx	xxxxxx
主原動機	機関本体関係	34	連接棒	受注生産	約8ヶ月	xxxxxx	xxxxxx
主原動機	機関本体関係	35	クランクピンメタル	受注生産	約8ヶ月	xxxxxx	xxxxxx
主原動機	機関本体関係	36	調速機	受注生産	約8ヶ月	xxxxxx	xxxxxx
主原動機	潤滑油系統	37	内部潤滑油ポンプ	汎用品2	約4ヶ月	xxxxxx	xxxxxx
主原動機	潤滑油系統	38	初期プライミングポンプ	汎用品2	約4ヶ月	xxxxxx	xxxxxx
主原動機	潤滑油系統	39	オイルパン	汎用品2	約4ヶ月	xxxxxx	xxxxxx
主原動機	潤滑油系統	40	濾過器(出口・入口こし器)	汎用品2	約4ヶ月	xxxxxx	xxxxxx
主原動機	潤滑油系統	41	潤滑油冷却器	受注生産	約8ヶ月	xxxxxx	xxxxxx
主原動機	潤滑油系統	42	圧力調整弁	汎用品2	約4ヶ月	xxxxxx	xxxxxx
主原動機	燃料系統	43	燃料噴射ポンプ	汎用品2	約4ヶ月	xxxxxx	xxxxxx
主原動機	燃料系統	44	燃料噴射弁(燃料弁)	汎用品2	約4ヶ月	xxxxxx	xxxxxx
主原動機	燃料系統	45	高圧管	受注生産	約6ヶ月	xxxxxx	xxxxxx
主原動機	燃料系統	46	タベット	受注生産	約5ヶ月	xxxxxx	xxxxxx
主原動機	燃料系統	47	燃料濾過器	受注生産	約5ヶ月	xxxxxx	xxxxxx
主原動機	冷却水系統	48	内部冷却水ポンプ	汎用品2	約4ヶ月	xxxxxx	xxxxxx
主原動機	冷却水系統	49	温度調節弁	汎用品2	約4ヶ月	xxxxxx	xxxxxx
主原動機	空気始動系統	50	分配弁・塞止弁・操縦弁	汎用品2	約4ヶ月	xxxxxx	xxxxxx
主原動機	空気始動系統	51	始動電磁弁・停止電磁弁	汎用品2	約4ヶ月	xxxxxx	xxxxxx
主原動機	空気始動系統	52	減圧弁	汎用品2	約4ヶ月	xxxxxx	xxxxxx
主原動機	消音器・排気管	53	消音器	受注生産	約8ヶ月	xxxxxx	xxxxxx
主原動機	消音器・排気管	54	排気管	受注生産	約5ヶ月	xxxxxx	xxxxxx
主原動機	冷却装置	55	熱交換器(清水冷却器)	受注生産	約6ヶ月	xxxxxx	xxxxxx

凡例：

項目欄	記入方法(例)
部品の供給性※1	「受注生産」「汎用品1」「汎用品2」
復旧までの所要時間※2	「〇ヶ月」「〇週間」「〇日」等
経済性	「〇〇〇千円」「〇〇〇円」等
メーカー名	メーカー名の記載

※1：「受注生産」は、部品注文後、製作設計（設計図）し工場製作後納品する一連。

「汎用品1」は、既に在庫があり直ぐに納品が可能なもの。

「汎用品2」は、標準品であるため、製作設計は不要であるが、工場製細工後納品するもの。

※2：復旧までの所要時間とは、故障発生（発見）後、修復（交換）作業及び、試運転を行い、実排水運転が可能になるまでの時間のこと。

表-6 予備品選定のイメージ

TJ10排水機場		番号	時間	故障発生頻度	故障等級	冗長性無し	価格安価	保管劣化無し	故障発生頻度	予備品保管候補
主ポンプ設備	ベルマウス	吸込口(ベルマウス)	③	9ヶ月	1	1.6	○	×	×	×
		ベンドケーシング	③	10ヶ月	1	1.4	○	×	×	×
	本体	握付部	③	—	1	1.8	○	×	×	×
		組立用ボルト・ナット	③	2ヶ月	1	3.3	○	×	×	×
	インペラ	羽根車	③	10ヶ月	3	3.3	○	×	×	○
		羽根車ナット	③	5ヶ月	3	3.3	○	×	×	○
	主軸及び軸受	キー	③	5ヶ月	3	2.3	○	×	×	○
		主軸	③	10ヶ月	1	2.3	○	×	×	×
		中間軸	③	10ヶ月	1	2.3	○	×	×	×
		軸継手	③	7ヶ月	1	2.3	○	×	○	×
		スリーブ	③	7ヶ月	1	2.3	○	×	○	×
		継手カバー	③	5ヶ月	1	2.9	○	×	○	×
		軸受(スラスト軸受)	③	7ヶ月	2	3.3	○	×	○	×
		水中軸受(セラミック)	③	8ヶ月	3	2.0	○	×	×	○
		封水ブッシュ	③	5ヶ月	1	2.0	○	×	○	×
		パッキン押え	③	5ヶ月	1	3.2	○	×	○	×
		無給水軸封装置	③	8ヶ月	4	2.0	○	×	×	○
		ボルト・ナット	②	2ヶ月	1	2.3	○	○	○	×
		案内羽根	③	10ヶ月	1	2.9	○	×	×	×
	主原動機	機関本体関係	台版	③	8ヶ月	1	1.4	○	×	×
シリンダヘッド			③	8ヶ月	4	3.2	○	×	×	○
ライナ			③	8ヶ月	4	3.2	○	×	×	○
吸・排気弁			③	3ヶ月	4	3.6	○	○	○	○
フライホイール			③	8ヶ月	2	2.0	○	×	×	×
クランク室			③	9ヶ月	2	2.0	○	×	×	×
クランク軸			③	9ヶ月	3	2.3	○	×	×	○
クランク歯車			③	9ヶ月	3	2.3	○	×	×	○
過給器			③	8ヶ月	4	3.2	○	×	×	○
ピストン			③	9ヶ月	4	3.6	○	×	×	○
ピストンリング			③	8ヶ月	4	3.6	○	○	○	○
オイルリング			③	3ヶ月	4	3.6	○	○	○	○
ピストンピン			③	8ヶ月	4	3.6	○	×	○	○
連接棒			③	8ヶ月	2	2.9	○	×	×	×
クランクピンメタル			③	8ヶ月	3	3.3	○	×	○	○
調速機		③	8ヶ月	3	2.9	○	×	×	○	
潤滑油系統		内部潤滑油ポンプ	③	4ヶ月	2	2.5	○	×	×	×
		初期ブライミングポンプ	③	4ヶ月	3	2.1	○	×	×	○
		オイルパン	③	4ヶ月	2	2.0	○	×	×	×
		濾過器(出口・入口こし器)	③	4ヶ月	2	1.8	○	×	×	×
		潤滑油冷却器	③	8ヶ月	3	2.9	○	×	×	○
燃料系統		圧力調整弁	③	4ヶ月	2	2.5	○	○	○	×
		燃料噴射ポンプ	③	4ヶ月	4	3.2	○	×	×	○
		燃料噴射弁(燃料弁)	③	4ヶ月	3	2.9	○	×	○	○
		高圧管	③	6ヶ月	3	2.9	○	○	○	○
空気始動系統		タベット	③	5ヶ月	4	3.6	○	○	○	○
		燃料濾過器	③	5ヶ月	2	2.3	○	×	×	×
		分配弁・塞止弁・操縦弁	②	4ヶ月	4	2.5	○	○	○	○
消音器・排気管		始動弁	②	4ヶ月	4	2.3	○	○	○	○
		停止電磁弁	②	4ヶ月	2	1.8	○	○	○	×
冷却装置	減圧弁	②	4ヶ月	2	2.0	○	○	○	×	
	消音器	③	8ヶ月	2	1.6	○	×	×	×	
	排気管	③	5ヶ月	2	2.6	○	×	×	×	
	インタークーラ	③	10ヶ月	2	2.9	○	×	×	×	

4) 選定予備品の例

選定フローにより選定した予備品を、表-7に示す。主原動機、操作制御設備、系統機器設備から選定された部品が多い結果となった。この傾向は、本調査で実施した他のモデル機場でも同様となっている。

なお、今回のモデル機場において実際に保管している予備品を確認したところ、機器・部品を構成する一部の消耗品等(パッキンやガスケット等)が多いことが分かった。これは、事前準備で行うFMEA解析上漏れていた項目である。消耗部品は点検時など短期の時間計画保全で確実に交換されるため、FMEAの対象とはしていない。

こうした消耗品等については、FMEAとは別に、機場毎に確認を行い予備品とすべきであると考えます。

表-7 選定した予備品

機場名		TJ10排水機場	
主ポンプ形式		立軸斜流	
エンジン形式		DE	
水中軸受		水中軸受(セラミック)	
予備品 (本調査により選定)	設備	機器	部品
	主原動機	機関本体関係	燃料系統
ピストンリング			
オイルリング			
高圧管			
タベット			
空気始動系統		燃料系統	分配弁・塞止弁・操縦弁
			始動弁
			盤内器具
操作制御設備		遠方・中央CRT 操作盤 中央監視操作盤	操作スイッチ
			キーボード
	入出力装置盤	マウス	
		盤内機器	
	運転支援システム	計器	
		盤内器具	
系統機器設備	燃料系統	操作スイッチ	
		計器	
	冷却水系統	キーボード	
		マウス	
		盤内機器	
除塵設備	燃料系統	配管	
	冷却水系統	電磁弁	
	電動弁		
	電動ボール弁		
	手動弁		
	逆止弁		
	始動系統	配管	
	駆動装置	継ぎ手	
	レーキ機構	軸受	

4. 4 主原動機における電動機採用の検討

1) 評価モデル

電動機は管理が容易であり、連続運転時の耐久性も充分あることから常用系設備の動力として標準的に使用されているが、排水ポンプ設備では出水時に「商用電源断」となる停電対応を考慮して導入される事例が少ない。しかし、前年度の調査結果より、主原動機をディーゼル機関、ガスタービン又は電動機として比較すると、信頼性評価では停電等による「商用電源断」を考慮した場合でも、故障実績に基づいた場合でも、共に電動機が最も排水機能低下の発生リスクが低い結果が得られた。また、排水ポンプ設備に採用されたガスタービンは、ディーゼル機関や電動機と比べて故障率が高いことが判明している。

本調査では昨年度の調査結果に基づき、信頼性と経済性に優れるディーゼル機関と電動機を比較対象とした。比較条件となる2つのモデル機場(小規模なポンプ設備2台を有する排水機場)を設定し、信頼性と経済性の観点から得失を評価した。

・モデル機場 (K 1 排水機場)

計画排水量：5.0m³/s

主ポンプ：2.5m³/s×2台 立軸斜流ポンプ 全揚程 5.3m

主原動機：ディーゼル機関 210kw -1200min⁻¹

・モデル機場 (W 1 排水機場)

計画排水量：5.0m³/s

主ポンプ：2.5m³/s×2台 立軸軸流ポンプ 全揚程 3.2m

主原動機：ディーゼル機関 130kw -1500min⁻¹

2) 信頼性

信頼性評価では、FTA による評価を行った。表-8 に示すように、結果的に電動機方式は、ディーゼル機関方式より信頼性は高いという結果が得られた。

表-8 FTAによる故障率算出結果

No	名称	駆動方式	故障率	トップ事象発生年数
1	【モデル機場】	ディーゼル機関	8.52866E-06	13.4年
2	K 1 排水機場	電動機	4.36509E-06	26.2年
3	【モデル機場】	ディーゼル機関	8.50346E-06	13.4年
4	W 1 排水機場	電動機	4.76489E-06	24.0年

※トップ事象発生年数：1/（トップ事象発生確率×1年（365日）×24時間）

※故障率は、発生件数/稼働時間（h）として時間（h）当たりの故障発生率を示す。

経済性評価では、下記のケース1から4を、運転時間によりさらに細分した8パターンを想定することにより評価を行った。なお、運転時間に関する想定は次のとおりである。

【運転時間想定】

月に30分の管理運転を12ヶ月実施したと仮定した場合（運転時間6h/年）、1年間に1回連続で50h運転したと仮定した場合（運転時間50h/年）及び2年間に1回連続で50h運転したと仮定

した場合（運転時間 50h/2 年）。

- ① ケース 1：ディーゼル機関(2 台)+自家発電機(2 台)+商用電源(保安用低圧)
パターン 1: 運転時間 6h/年
パターン 2: 運転時間 50h/年
- ② ケース 2：電動機(2 台)+自家発電機(2 台)+商用電源(保安用低圧)
パターン 3: 運転時間 6h/年
パターン 4: 運転時間 50h/年
- ③ ケース 3：電動機(2 台)+自家発電機(1 台)+商用電源(運転負荷高圧)(デマンド契約の場合)
パターン 5: 運転時間(商用) 50h/年
パターン 6: 運転時間(自家発) 50h/年
パターン 7: 運転時間(商用) 50h/2 年
- ④ ケース 4：電動機(2 台)+自家発電機(1 台)+商用電源(運転負荷高圧)(常時自家発、商用予備)
パターン 8: 運転時間(自家発) 50h/年

※ケース 1.2 はポンプ運転時の電源供給は全て自家発電機からとする。

※ケース 3, 4 は商用電源からも自家発電機からもポンプ運転が可能なものとする。

※ケース 3 の電力契約形態のデマンド契約とは、電力を使用する需要家の最大使用電力のこと。電力会社と電気の需給契約を結ぶ場合、一年を通して最も高い電力が発生するタイミングをデマンドとして設定し、その数値が月々の基本料金となる。具体的には、30 分単位の平均電力を契約電力としており、平均電力の内、一ヶ月の最大値を当該月の最大需要電力として計算している。そのため、瞬間的に大電力を使用しても、契約電力を改定することはないという計算方法である。

※ケース 4 は常時自家発供給とし、商用はバックアップとする。

3) 経済性

経済性については、イニシャルコスト(建設費)とランニングコスト(維持管理費:ただし運転に係る人件費を除く)を算出し、LCC(ライフサイクルコスト)の比較を行った結果を図-2に示す。

イニシャルコストでケース 1 のディーゼルエンジン方式が最も経済的であり、電動機は自家発電設備に要する費用が高

むことから、ケース 2 の自家発電機 2 台案が最も高価

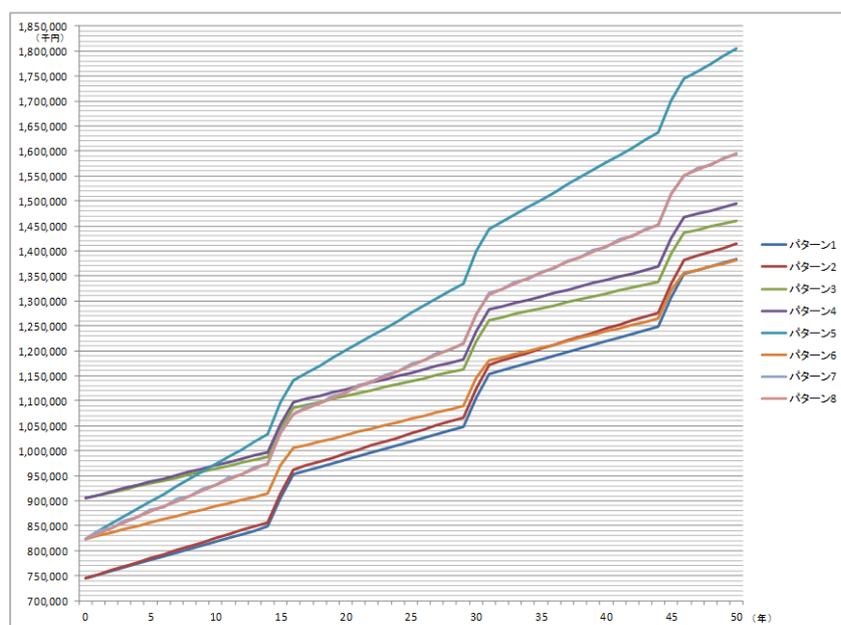


図-2 モデル機場 (K1 排水機場) における
50 年間のライフサイクルコスト

となった。ランニングコストは、ケース2の電動機で自家発電機2台案や同じく電動機で自家発電機1台とし商用電源は高圧をデマンド契約（実排水運転は、全て自家発電機からの供給として運用）が安価という結果が得られた。また、50年間のライフサイクルコストとしては、ケース3でパターン6の電動機駆動方式（電源は、高圧をデマンド契約とし、実排水運転は、全て自家発電機からの供給として運用）が最も安価となった。

4) 主原動機を電動機とした場合の評価

前項1)の結果より、50年間のライフサイクルコストとしては、パターン6の電動機(2台)+自家発電機(1台)+商用電源(運転負荷高圧)(デマンド契約の場合)の場合が、最も安価となった。

ただし、このパターンはデマンド契約におけるメリットを最大限に生かすために、電源供給は商用の利用を極力抑えて、原則、自家発電機としていることから、具体的な契約条件については、電力会社と協議する必要がある。

また、原則、自家発電機での電源供給を基本しているため、長時間運転となった場合の運転ルールを定めておく必要がある。今回想定している自家発電機はコストを抑えるためにパッケージ型を想定しているが、あるメーカーの見解では通常連続可能運転時間を72時間としている。ねじり振動などの対応策がその程度の時間まで担保しているという意味である。そのため、連続運転時間が72時間を超える場合は、電源供給を商用電源に切り替えざるを得ない。

したがって、主原動機を電動機とした場合の電源供給は、発電機2台とするケース2が最も現実的であると言える。この結果、現実的にコストで有利となるのは、結局ケース1の原動機をディーゼルエンジンとした場合となる。

5. 考察

5. 1 機械設備維持管理計画運用マニュアル（案）

現行の機械設備維持管理計画マニュアル（案）に盛り込んだ点検内容の見直し手法や主要設備機器更新時の仕様改善提案手法は、過去の故障実績を基に以下の手順で行うことにより立案を行っている。

- ① 故障詳細整理
- ② 原因と故障に至る事象過程の分析
- ③ 対策の立案
- ④ 対策案の FMEA による評価

実際に故障が発生した際には、一般的に故障の原因と対策をまとめた報告書を作成するが、通常短時間で慌ただしくまとめなければならない場合が多く、詳細な故障経緯、因果関係、対策等が整理しきれないことがある。そのため、故障詳細の整理、原因と過程の分析では、効率的に故障報告書や故障のデータを読み解き、整理、分析することが対策案の立案及び評価において重要である。

対策案については、対策前と対策したと仮定した場合の FMEA 結果を比較することで、立案した手法の対策効果を定量的に評価することが可能である。さらに対策の執行性、コストを評価することで実施すべき対策案の優位性の評価ができる。

そのために、故障情報だけでなく維持管理に関する情報が非常に重要であり、情報の一元管理各事務所におけるデータベース（機械設備維持管理システム）の利活用推進が急務である。

当該情報の活用によって、構成機器・部品の故障発生頻度、実際の故障事象の解析結果、対策案の実例を解析あるいは把握することができ、FMEA、FTAなどを適正に併用することが可能となる。

5. 2 予備品計画策定要領（案）

本調査結果については、「予備品計画要領（案）」としてとりまとめた。

本要領（案）では排水機場毎に具備すべき予備品を選定している。これは、排水機場毎に構成機器・部品の MTTR（平均復旧時間）が異なるからである。従来、ポンプ場の FMEA においては、主要機器（主ポンプ、主原動機等）の形式が同一な場合 MTTR を同様と扱ってきたが、今回の調査で、設備規模、製作メーカー等の要因で MTTR が異なることが明確となった。特に計装機器、燃料系統のフィルタ類、系統機器の弁類、除塵設備の電動機などは汎用品を用いる場合と受注生産品を用いる場合では大きく異なっている。

そのため、現場において、故障リスク低減策検討に FMEA を採用する場合は、機場ごとに構成機器・部品の MTTR を調査する必要がある。

また、FMEA において重要部品から外れた部品については、点検レベルで交換可能なものを対象として、冗長性、価格、保管劣化及び故障発生頻度等を勘案して予備品とすべきかどうか判断する必要がある。

5. 3 主原動機における電動機採用の可能性

モデル機場を用いた本調査結果は、「小型排水機場・電動機採用検討要領（案）」としてとりまとめた。

本調査により、信頼性については電動機がディーゼルエンジンやガスタービンより優位であることが分かった。一方、経済性についてはディーゼルエンジンよりは劣る結果となった。しかし、電動機採用可否については、必ずしも経済性が優位となることを条件に決定するものではない。

排水機場の場合、治水施設としての特質を考慮すれば、信頼性を重視することが必要である。特に小型排水機場においては、地域特性、特に都市部や近郊地区以外で地域の専門技術者数密度が低くなる場合がある。不具合が発生した場合の対応力に地域性は重要な要素となってきた。通常少人数で点検していることを考えると、経済性が多少劣っていたとしても、維持管理が簡単で信頼性の高い電動機を採用することも視野にいれ評価することが必要であると考えられる。

6. 今後の課題

6. 1 機械設備維持管理計画運用マニュアル（案）

過去の故障実績を用いて、点検内容の見直しや主要機器更新時の仕様改善を提案できることが分かった。今後は、各施設管理事務所が実際に点検内容の見直し手法等により提案した点検を機械設備維持管理計画運用マニュアル（案）に反映し、運用しながら効果を検証することが重要である。

6. 2 予備品選定における精度の向上

今回作成した予備品計画策定要領（案）において、予備品保管の可否を選定している評価項目のうち「価格」「保管劣化」等については、暫定的な判定基準となっている。したがって、より現実的で有効な予備品選定とするためには、今後、各管理事務所等との意見を聞きながら、実態にあった判定基準に修正する必要がある。

6. 3 主原動機における電動機適用

本調査において、小型排水機場を想定して主原動機における電動機採用の検討を行ったが、信頼性では優位であるものの、経済性においてはディーゼルエンジンより劣る結果となった。経済性において不利となる要因は、自家発電機の価格が高いことが最も影響している。また、パッケージ型発電機の場合、連続可能運転時間に制限があり、現在の機種では簡単に改良できないことも現状の課題である。今後、パッケージ型自家発電機のさらなる低価格化及び連続運転時間を伸ばすための簡単な改良等が実現できれば、主原動機における電動機採用も拡大されることになると思われる。

施設技術課

参考文献

- ※1. 藤野 健一、田中 義光、山元 弘、林 輝、河北 憲治 土木研究所報告 2011.2 No.217 (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) 独立行政法人土木研究所
- ※2. 久米 均 設計開発の品質マネジメント P.142 日科技連