

9. 排水機場ポンプ設備の電動化に向けた検討

(国研)土木研究所 寒地土木研究所 ○ 中島 淳一
永長 哲也
岸 寛人

1. はじめに

河川用排水機場ポンプ設備は、内水被害から国民の生命と財産を守る重要な社会基盤設備である。本設備は豪雨等による出水時には確実な運転が求められるため、昨今の設備老朽化の進行による故障懸念や線状降水帯など降雨の激化による運転機会の増加により、施設管理者、点検技術者等は設備の維持管理に多くの労力と時間を要しており、その負担は大きい。一方、設備の管理を担う技術者、担い手不足への対応が喫緊の課題となっており、本設備の維持管理の省力化、効率化による生産性向上が求められている。

以上の背景から、本報告では排水機場ポンプ設備の主原動機をディーゼル機関から電動機に構造転換することで、点検の省力化と故障の低減効果が期待できること、及び停電時でもポンプ運転が可能な電動機への電源確保技術を選定、評価した上で、電源確保技術を構成する電源設備の1台当たりの電源容量と設置台数バリエーション案から、ポンプ運転の信頼性、冗長性を評価できることを提言する。

2. 排水機場ポンプ設備構造と維持管理の概要

本設備の主要機器は、ポンプを駆動するための主原動機（ディーゼル機関、ガスタービン機関等）、動力を適正なトルクと回転数でポンプに伝達する減速機（平歯車又は遊星歯車減速機等）、羽根構造で回転力により吸水を行う主ポンプ（横軸斜流又は立軸斜流等）で構成され、その他の機器は、原動機の運転に必要な系統機器やポンプの運転停止を指令する操作制御設備、停電時でも運転に必要な設備内電源を確保できる自家発電設備などで構成される（図-1）。ポンプ型式や性能、規模は現場条件等により様々である。ポンプは通常、冗長性の観点から複数台設置されており、大雨等により内水氾濫の恐れがある場合に運転（本運転）される。一方、緊急時の確実な運転に万全を期するため、施設管理者は常日頃からポンプ設備の運転状態及び機器の調子を確認する必要があるが、その一環として操作員や点検技術者に管理運転による月点検や年点検を委託している。なお、故障の際には、速や

かな復旧対応が求められる。

3. 主原動機の維持管理性に関する分析評価

3.1 国土交通省における主原動機の設置状況

国土交通省における昭和57年から令和2年における排水機場ポンプ設備の装置別故障割合は図-2¹⁾のとおりであり、主原動機の故障割合が最も高いことから、この装置に着目した改善検討が維持管理性のレベルアップに大いに貢献できると考えられる。

また、国土交通省における主原動機の機関別設置割合は図-3に示すとおりであり、ディーゼル機

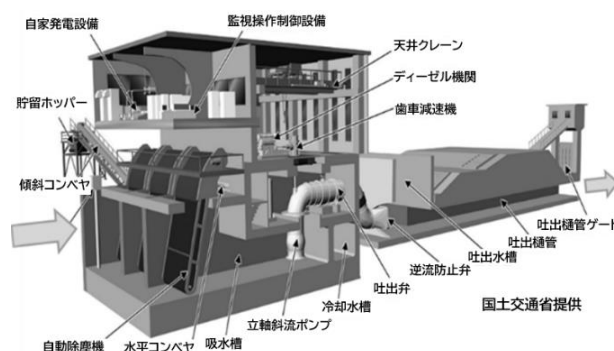


図-1 排水機場ポンプ設備の機器構成事例

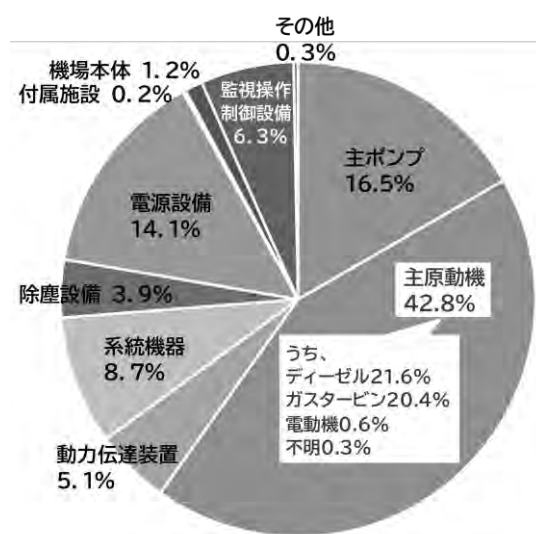


図-2 排水機場ポンプ設備の装置別故障割合（S57～R2）

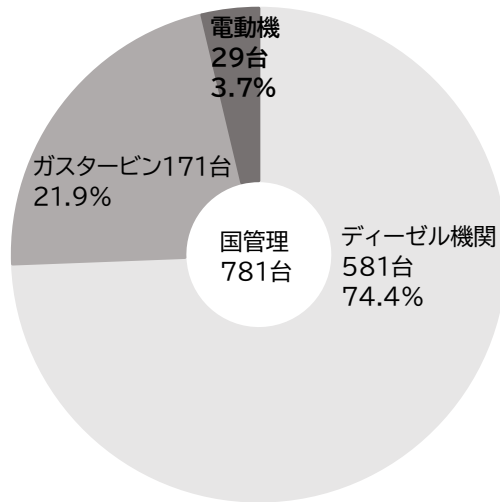


図-3 主原動機の機関別設置割合

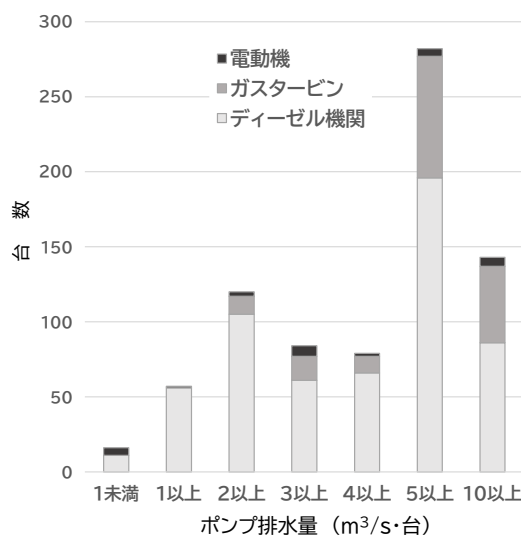


図-4 主原動機の排水量別設置台数

関が 74.4%と大半を占めるほか、ガスタービンが 21.9%、電動機はわずか 3.7%となっている。一方、図-4 に示すとおり排水量別の機関別設置割合では、いずれの排水量もディーゼル機関が大半を占めているほか、5m³/s・台以上の大規模機場ではガスタービンの割合が高くなっている。

3.2 主原動機の年点検に関する維持管理性の分析

ディーゼル機関と電動機の点検項目数を比較するため、河川ポンプ設備点検・整備標準要領（案）（H28.3版）²⁾に基づき集計した結果を図-5に示す。集計の結果、電動機はディーゼル機関に比較し、点検項目数を 83%低減できる。その理由として電動機はディーゼル機関に比較し、構造がシンプルなのに対し、ディーゼル機関は構造が複雑かつ始動、冷却、潤滑など補機類の装備が影響していることによる。また、主原動機の年点検における標準工数に占める割合は国土交通省機械設備工事積算基準（令和 5 年度版）³⁾によると、ディーゼル機関では

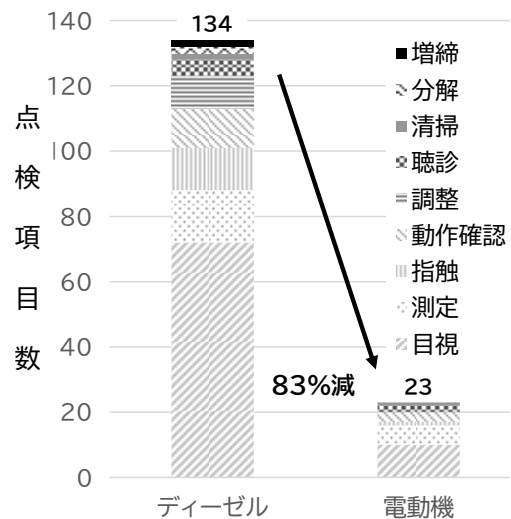


図-5 主原動機の年点検項目数の比較

全体工数の約 3 割なのに対し、電動機では約 1 割に収まることから維持管理性の向上への貢献が期待できる

3.3 主原動機の故障に関する分析

図-2 の排水機場ポンプ設備の装置別故障割合において、主原動機の故障割合が約 43%を占めることは前述のとおりであるが、その内訳はディーゼル機関が 21.6%、ガスタービン機関が 20.4%、電動機が 0.6%となっている。この割合を図-3 に示す設置台数当りに換算すると図-6 に示すようにディーゼル機関が 12.4%、ガスタービン機関が 39.8%、電動機は 6.9%となり、ガスタービンの故障率が最も高く、電動機はディーゼルに比較し、半分程度の故障率となっている。

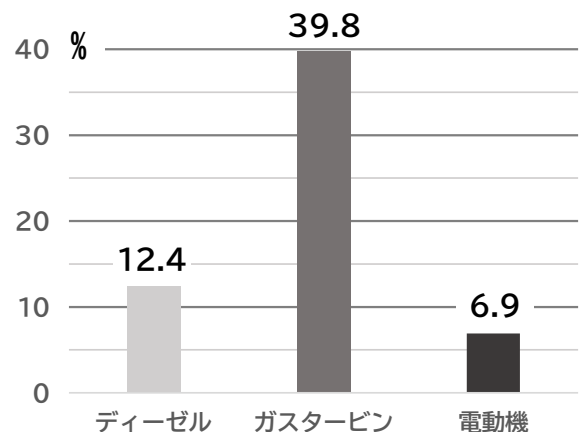


図-6 主原動機故障率の比較（件数／総台数）

3.4 主原動機の維持管理性に関する評価

これまでの分析結果も踏まえ、既設の主流であるディーゼル機関、ガスタービン機関、電動機について、維持管理性の観点からの評価結果を図-7 に示す。評価は◎、○、△での 3 段階相対評価とし、8 つの評価項目をレーダーチャート化したのが、3 種

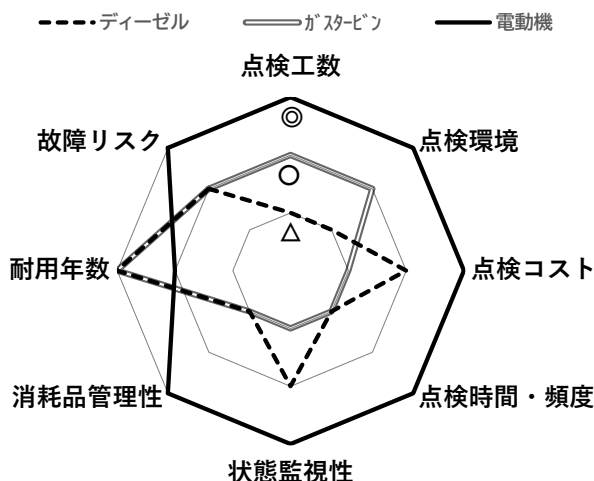


図-7 主原動機の維持管理性評価

の原動機のうち、電動機の維持管理性が総合的に最も優れていると言える。主な評価項目として、点検環境では運転騒音や熱の発生が少ない電動機が最も優れているほか、状態監視性では電動機は、最近の電流情報診断技術の進歩により電動機の負荷電流のみの計測で、本体及びポンプ等接続機器の異常が一定程度把握できるようになっている。消耗品管理性では、消耗品点数や交換頻度の面で、電動機の消耗品は軸受程度であり、運転も非常時のみであることから、損耗もあまり生じない。

4. 主原動機電動化に伴う電源設備の評価

主原動機をディーゼル機関から電動機とすることで、多くの点で維持管理性が向上することは前述したとおりである。そのためには停電時においても確実な電源確保が必要なことから、本章では他分野の電源確保技術なども参考に既に実用レベルのもののみならず、将来性も含め幅広く調査し、総合的に評価した上で、相応しい電源確保技術を提案するものである。

電動化機場の条件を、電動化が進めやすくかつコスト的にも有利で実運用の支障が少ない総排水量 $5\text{m}^3/\text{s}$ 以下で 48 時間連続運転が可能な小規模排水機場とすると、既設機場規模としては $2.5\text{m}^3/\text{s}$ ポンプ 2 台、200kW 動力用ディーゼル 2 台、100kW 自家発電用ディーゼル 1 台、同様の予備自家発電用ディーゼル 1 台となる。電池方式の場合、動作の確実性の観点から予備用の自家発電機 1 台分は省略可能であるとして、燃料電池方式での電源換算で 500kW、蓄電池方式では 24MWh の電力量相当の確保が必要となる。

4.1 電源確保技術の導入評価

有力な電源確保候補技術として定置式ディーゼル発電機、定置式燃料電池、リチウムイオン蓄電池を抽出し、導入に当たっての総合評価をした上で、採用すべき電源確保技術の選定を行った。上述の 3

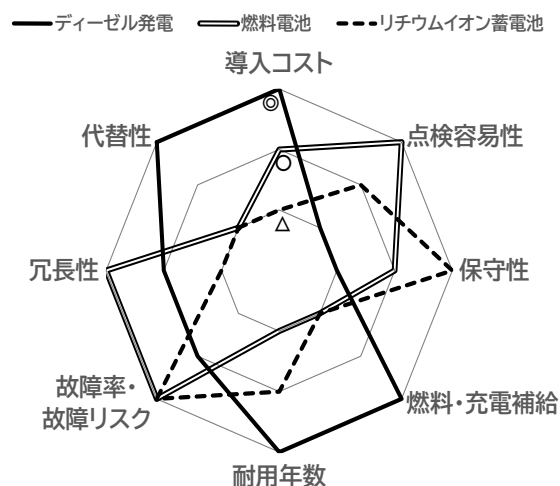


図-8 電源確保技術に関する導入評価

技術に関しての導入評価結果を図-8 に示す。評価は◎、○、△での 3 段階相互相対評価とし、8 つの評価項目をレーダーチャート化しているが、3 技術のうち、ディーゼル発電機が導入技術として最も優れていると言える。

主な評価項目として、導入コストについてはディーゼル発電機が概算で 1.6 億円、燃料電池が 5 億円、リチウムイオン電池が 24 億円であり電池方式は現時点においては膨大なコスト増が見込まれる。

一方、点検容易性の観点では、ディーゼル発電が 135 項目の年点検と月点検が必要であるのに対し、燃料電池では液化水素が高压ガス保安法による年 1 回の法定点検のみであり、圧縮水素なら不要となる。リチウムイオン蓄電池は 50 項目程度の年点検と半年に 1 回の機器点検が必要となる。

保守性は主に消耗品管理の観点に着目しており、ディーゼル発電機では定期整備時の対象交換消耗品点数は 24 点ほどであり、1、5、10 年毎に状況に応じた交換が必要になるのに対し、燃料電池は常用の場合、フィルターや水処理樹脂の年 1 回の交換が必要となるが、非常用の場合は、点検による都度判断となる。リチウムイオン蓄電池は基本的にメンテナンスフリーである。

燃料・充電補給はディーゼル発電機ではポンプ運転後は、タンクローリーによる重油の補給で済み、燃料電池も蓄圧器への水素充填が可能である。但し、現時点では水素供給インフラが普及しておらず、排水機場が設置されている地方部では特に厳しい状況となっている。リチウムイオン蓄電池では、充電のため 500kW 規模の商用電源契約と 2 日間の充電時間が必要となり、非常用設備としての再運転におけるタイムラグは致命的となる。

耐用年数ではディーゼル発電機が約 33 年、燃料電池が約 10 年、リチウムイオン蓄電池は約 15 年とされている。

故障率・故障リスクについては、ディーゼル発電

機は前述の図-2 で示したようにポンプ駆動用ディーゼルに比較し、約 65%の故障率となっており、同じディーゼル機関でも負荷特性などの違いからディーゼル発電機の故障リスクは低い状況となっている。蓄電池に関しては長期使用のデータが少ないことから十分な評価は難しいが、燃料電池に関しての一例として鉄道総合研究所における 10 年間の高サイクル試験⁴⁾ (起動停止の反復使用) において列車が走行不可となる状況は生じていないという実績がある。また、リチウムイオン蓄電池は発熱、発火のリスクはあるものの、BMS (バッテリーマネジメントシステム) と言われる安全制御システムが設置されており、その安全性は高まっている。

冗長性については、ポンプの機能停止を回避できる可能性を指標としており、ディーゼル機関ではコスト面の影響を考慮する必要はあるものの、所要の電力確保を条件とした小規模分散型や大規模集約型等のバリエーションを検討することで、発電機の故障によるポンプ運転への影響を少なくできる可能性がある。燃料電池はユニット化されており、100kW 単位での予備の増設は十分可能であるが 1 億円規模のコスト増が課題となる。リチウムイオン蓄電池も更なるコスト増となる他、大規模な敷地の確保 (東芝西仙台変電所の事例⁵⁾ を参考にすると 20MWh で約 6,000m² であり、300m²/MWh) が必要となる。

代替性については、既設の主流である駆動用ディーゼル機関の更新導入を想定した場合、ディーゼル発電では、駆動用ディーゼルの一連の補機を含む撤去スペースに電動機並びにディーゼル発電機を設置することとなるが、電動機はコンパクトかつディーゼル発電機はレイアウトの自由度が高いので、撤去空きスペース内に設置できる可能性は十分あり、設置が難しい場合でもディーゼル発電機は屋外の敷地内への設置が可能と思われる。一方、燃料電池については 500kW 級の燃料セルユニット並びに蓄圧器を含め約 400m² 程度のまとまった設置スペースが必要となるため、敷地の確保や機場外の設置となる場合は、機場までの送電設備が必要となる。

4.2 既設機場の電動化に伴うディーゼル発電機設置の検討

電源確保技術の導入評価の結果、3 つの候補技術のうちディーゼル発電機の評価が最も高かったことから、本技術を既設機場に設置する方法について検討した。検討に先立ち、対象とする既設機場の基本となる機器設置の概略平面図事例を図-9 に示す。本概略図は主要機器のみを反映している。対象機場は 2.5m³/s ポンプ 2 基で、200kW 級の駆動用ディーゼルにより運転され、停電時でもポンプの運転に必要な機場内の電源を確保できる 100kW 級ディーゼル発電機が予備を含め 2 基設置される。

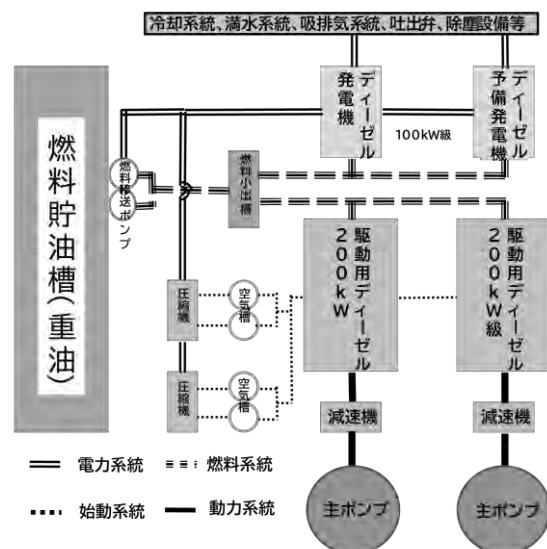


図-9 既設機場の機器設置概略平面図事例

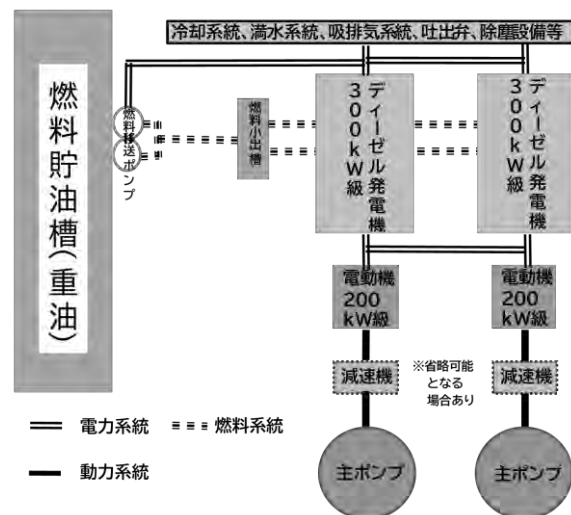


図-10 電動化機場の機器設置概略平面図事例

駆動用のディーゼル発電機の始動には始動機 (エアモーター方式) が必要となり、圧縮機 2 基と空気を貯める空気槽が予備を含め各 2 基構成となる。また、駆動用、発電用ディーゼルの燃料は重油が一般的であり、敷地内の燃料貯油槽から 2 対の燃料移送ポンプにより燃料小出槽に燃料が送られ、各機関に供給される。

一方、前述の対象既設機場を電動化した場合の機器設置概略平面図事例を図-10 に示す。駆動用ディーゼル機関を電動機に転換することで、本体のコンパクト化と始動機 (圧縮機、空気槽、配管等) が不要となり、多くの空きスペースが生まれる。その空きスペース等を利用し、300kW 級のディーゼル発電機 2 基の設置が可能となる。非常用ディーゼル発電機はパッケージ内に始動用バッテリーを装備しており、始動機は不要である。なお、電動機の場合、所要のポンプ回転数と整合が図れるケースでは減速機の設置が不要となり、その場合には

その分の空きスペースが生まれる他、コスト面や維持管理面の負担が軽減できる。

4.3 ディーゼル発電機の設置バリエーション案評価法の検討

排水機場ポンプ設備は非常用設備であり、停電時においても確実な運転を確保する必要があることから、ポンプの電動化に向けては商用電源に依らない自家用電源設備として、これまでの導入評価の結果からディーゼル発電機を選定している。排水機場ポンプ設備に求められる最重要な機能は確実な運転確保であり、そのためにはポンプ運転の信頼性、冗長性（以下、「信頼性等」という。）をより高める必要がある。そこで、まず、信頼性等を検討するに当たり、設備を構成する主要機器の故障件数を推定総運転時間で除した値を%指標に換算した、故障割合の試算例を図-11に示す。なお、本故障割合は国土交通省の直轄排水機場のデータに基づき試算しており、後述するポンプ運転における信頼性等評価のベースとなる指標として使用する。揚排水ポンプ設備技術基準では自家用発電設備⁹⁾は、機場が停電となった場合の非常用電源として主に機場内のポンプ設備補機類の動作や場内換気、照明など運転時の維持管理に供する設備であることから、予備機を設置することとなっており、この発電容量も踏まえた自家用発電機の各種設置バリエーションについて、ポンプ運転における信頼性等の評価を実施した。

対象とする電動化機場想定規模を電動機出力200kW級、2基、機場内非常用電源設備200kVA(うち

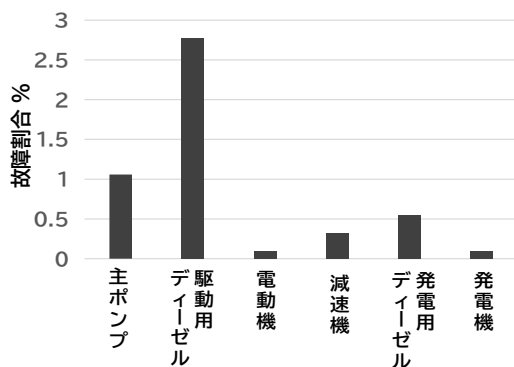


図-11 主要機器故障割合の試算例

表-1 自家用ディーゼル発電機設置信頼性等検討ケース

検討案	電源容量 (kVA)	台数	略 称
従来案	100	2	従来型
案1	200	2	標準型
案2	100	2	標準型
案3	300	2	2台集約型
案4	600	1	1台完結型
案5	300	3	3台分散型
案6	100	6	6台分散型

案1の上段はポンプ駆動用、下段は維持管理用

予備機100kVAを含む)とした場合の自家用ディーゼル発電機の信頼性等検討ケースを表-1に示す。表中の従来案は、電動化との比較のため同規模のディーゼル駆動による標準例であり、略称を従来型としている。電動化案として、案1は従来のディーゼル駆動を踏襲した標準型、案2は案1の自家用発電機を各1台にまとめた2台集約型、案3は1台の自家用発電機で主ポンプ2台運転を可能とした2台余裕型、案4は案3を1台とした1台完結型、案5は案4を分散した3台分散型、案6は案5を更に大幅に分散した6台分散型としている。

ポンプ運転における信頼性等評価は、前述の故障割合と逆の概念となる信頼率(=1-故障割合)という指標により実施する。ポンプ運転のトータルの信頼率はポンプ運転に係る個別機器の各信頼率の積であり、従来型のポンプ駆動系(自家用発電設備を除く)の一部算定事例を表-2に示す。表-2に示すように故障等により、各機器が作動しないケース毎の信頼率を算定し、2台運転、1台運転、0台運転(停止)の条件別に集計することで、各条件におけるポンプ運転の信頼率が算定できる。また、1台片側運転の信頼率の算定は、表-2に示す2号機の故障ケースを1号機にも適用する必要があるため、表-2の1台分の信頼率の全ての和の2乗となる。なお、0台運転の信頼率は1から1台運転と2台運転の信頼率を除いた値となる。以上の考え方を前述の自家用発電機設置信頼性等検討案に適用した結果を図-12に示す。図-12から、ポンプ2台運転の信頼性は2台余裕型が最も高く、0台運転(運転停止)となるリスクは6台分散型が最も低い。自家用発電機信頼性等設置検討案について

表-2 ポンプ駆動系信頼率算定事例(従来型)

信頼率							ポンプ 運転 台数
1号機			2号機			トータル	
ディーゼル	減速機	ポンプ	ディーゼル	減速機	ポンプ		
0.9723	0.9968	0.9894	0.9723	0.9968	0.9894	0.9194	2
0.9723	0.9968	0.9894	0.9723	0.9968	0.0706	0.0098	1
0.9723	0.9968	0.9894	0.9723	0.0033	0.9894	0.0030	1
0.9723	0.9968	0.9894	0.0278	0.9968	0.9894	0.0262	1
0.9723	0.9968	0.9894	0.9723	0.0033	0.0706	3×10 ⁻⁵	1
0.9723	0.9968	0.9894	0.0278	0.9968	0.0706	0.0003	1
0.9723	0.9968	0.9894	0.0278	0.0033	0.9894	0.0001	1
0.9723	0.9968	0.9894	0.0278	0.0033	0.0706	9×10 ⁻⁷	1

運転台数信頼率:2台/0.9194 1台/0.0789 0台/0.0017

標準体文字:正常時の信頼率 斜体文字:故障時の信頼率

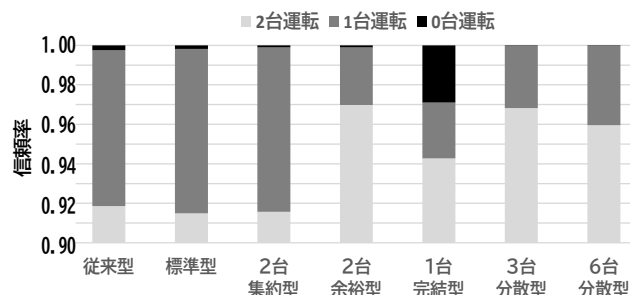


図-12 ポンプ運転の信頼率

表-3 主要機器の概算導入費事例

	規 模	機器費 (百万円)	台 数					
			従来型	標準型	2台 集約型	2台 余裕型	1台 完結型	3台 分散型
ポンプ	2.5m ³ /s	80	2	2	2	2	2	2
減速機	200kW	40	2	2	2	2	2	2
駆動用ディーゼル	200kW	100	2					
電動機	200kW	16		2	2	2	2	2
	100kW	20	2	2				6
	200kW	40		2				
	300kW	50			2			3
自家発電機	600kW	130				2	1	
	合計(億円)		4.80	3.92	3.72	5.32	4.02	4.22

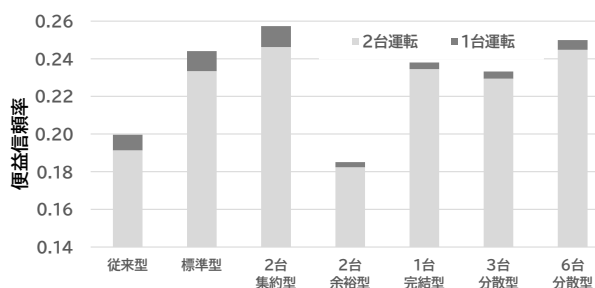


図-13 ポンプ運転の便益信頼率

ポンプ運転の信頼率による比較評価を行い、ポンプ運転の信頼性等に関する設置バリエーション案の優劣の判定が可能である。

以降では更に、実用性の観点から信頼率をベースとする費用対効果の評価を実施した。評価に当たっては、機器導入費を主体に行うものとし、現場条件により異なる現場据付費は対象外とする。主要機器の概算導入費事例を表-3に示す。表-3より、導入費の比較ではディーゼル駆動である従来型に比較し、電動化により2台余裕型を除きコストメリットが見込まれる。

次に、ポンプ運転の信頼性等に関する費用対効果の評価として、先に算定した各案の信頼率を機器費で割り戻すことにより各案における費用対効果の相対的な評価が可能となるが、算定に当たっては2台運転を100%効果、1台運転を50%効果、0台運転を0%効果として計上している。以上の考え方にに基づき得られる数値を便益信頼率とし、その算定結果を図-13に示す。図-13より費用対効果を踏まえたポンプ運転の信頼性等が最も高いのは2台集約型で、次いで6台分散型や標準型が追随している。また、電動化の何れの案も2台余裕型を除き従来型を上回る結果となっている。

5. まとめ

本報告では主原動機の電動化による維持管理性の評価分析並びにポンプ運転の信頼性等に着目した電源設備設置の評価法についての検討を実施した。維持管理性の評価分析では電動化により、従来のディーゼル機関に比較し、年点検項目数を83%、故障率を50%近く低減できる可能性があることを提示した。また、非常用設備である排水機場の電動

化には停電時でもポンプ運転が可能な自家用電源設備の確保が重要であることから、リチウムイオン蓄電池や水素型燃料電池を有力候補として検討したが、実用化に向けてはコスト面、電源設備設置敷地の確保面、再運転時の再充電や最充填に時間を要するなど現時点では多くの課題があり、時期尚早となった。そこで、当面はわずかであるが現行排水機場での実績もある定置式ディーゼル発電が実用として現実的であるとの判断に至った。また、ディーゼル発電機による電動化は、機器導入費としては従来のディーゼル駆動に比較し、コストメリットが見込める他、ディーゼル発電機は駆動用ディーゼルの65%の故障率とのデータもあり、維持管理面での効果も期待できる。更に、ポンプ運転の信頼性、冗長性を優先した電源設備配置の在り方として、費用対効果も踏まえたディーゼル発電機の1台当たりの発電容量と設置台数のバリエーション案を示した上で、ポンプ運転の信頼性等の優劣評価法を新たに提案した。

本報告のベースとなっている研究は、排水機場の将来ビジョンを示す側面もあることから、電動化機場の標準化に向けた揚排水ポンプ設備技術基準への反映のほか将来的なカーボンニュートラルをも見据えた水素型燃料電池などによる電源確保技術は有望かつ日進月歩であり、近い将来、実用化導入の可能性も十分考えられることから、引き続き、この分野の技術の進展にも絶えず注視しながら研究を進めていく所存である。

参考文献

- 1) 国土交通省 社会資本整備審議会 河川分科会 河川機械設備小委員会 第2回：配布資料 資料4 中間報告(案)説明資料, P12, 2021.5.21
- 2) 国土交通省 総合政策局 公共事業企画調整課施工安全企画室：河川ポンプ設備点検・整備標準要領(案), pp.41-45, pp.51-53, 2016.3
- 3) 一般財団法人建設物価調査会：令和5年度版国土交通省機械設備工事積算基準, pp.423-425, 2023.5
- 4) 公益財団法人鉄道総合技術研究所：鉄道総研における燃料電池鉄道車両の取組みについて, p.36, 2018.2
- 5) 橋本竜弥, 川俣智幸, 島田和義：東北電力(株)西仙台変電所大型蓄電池システムの運転開始, 東芝レビュー Vol.70 No.9(2015), p.45, 2015
- 6) 一般財団法人河川ポンプ施設技術協会：揚排水ポンプ設備技術基準・同解説, pp.8-1-8-4, 2016.3