

今金北地区における 鈴岡揚水機場ポンプ設備設計

函館開発建設部 函館農業事務所 ○村上 諒太郎
 菊池 裕貴
 亀田 晋

鈴岡揚水機場は、国営北桧山右岸土地改良事業により、昭和61年に建設されたが、造成後30年以上が経過し、経年的な劣化によりポンプの送水能力が著しく低下する等、農業用水の安定供給に支障を来していることから、国営緊急農地再編整備事業今金北地区にてポンプ設備等の更新を実施している。本報は、改修する鈴岡揚水機場のポンプ設備・電気設備の更新整備における施設設計の検討について報告する。

キーワード：設計・施工、長寿命化、生産基盤

1. はじめに

国営緊急農地再編整備事業「今金北地区」は、北海道瀬棚郡今金町に位置し（図-1）、一級河川後志利別川流域に広がる農業地帯である。本地区の農業は、水稻を主体にばれいしょ、大豆、小麦、野菜類等からなる農業経営が行われている。しかしながら、基盤整備の遅れにより、ほ場が小区画であるとともに、泥炭土壌に起因する排水不良などで効率的な農作業の妨げとなり、離農などで継承されない農地の耕作放棄地化の増加も懸念された。

このため、本地区は、区画整理と農業用排水を一体的に施行し、農地の土地利用を計画的に再編し、さらに、担い手の経営規模の拡大を進め、緊急的に生産性の向上と耕作放棄地の解消・発生防止により優良農地を確保し、農業の振興を図ることを目的に、平成27年度に事業着手した。



図-1 今金北地区の位置

2. 施設概要

鈴岡揚水機場（以下「本揚水機場」という。）は、国営北桧山右岸土地改良事業（昭和42年度～平成元年度）により、かんがい面積510haの水田及び畑へ配水する鈴岡ファームpondへ送水する施設として昭和61年度に建設された揚水機場である（表-1）。取水は、同事業にて建設した神丘頭首工の左岸側に設けられた取水口より取り入れ、沈砂池を経て吸込水槽へ流入する施設構造となっている（図-2）。

また、本揚水機場の操作室及び電気室には、神丘頭首工への電力供給や各ゲートの操作、河川水位・取水量等を監視する電気及び監視操作制御設備（受変電盤・配電盤・非常用発電機・監視操作卓）が設置されている。

表-1 現況の鈴岡揚水機場ポンプ諸元

| ポンプ番号 | No.1 | No.2 |
|--------|---|--|
| 台数 | 1台 | 1台 |
| 計画吐出し量 | 0.263m ³ /s (15.8m ³ /min) | 0.090m ³ /s (5.4m ³ /min) |
| ポンプ形式 | 横軸両吸込単段 渦巻ポンプ | 横軸両吸込単段 渦巻ポンプ |
| 口径 | φ350mm | φ250mm |
| 全揚程 | 71m | 71m |
| 原動機形式 | 巻線型 三相誘導電動機 | 巻線型 三相誘導電動機 |
| 原動機出力 | 3000V-260kW-6P | 3000V-110kW-4P |
| 操作方式 | 自動ON-OFF制御（水位幅一定制御） | |

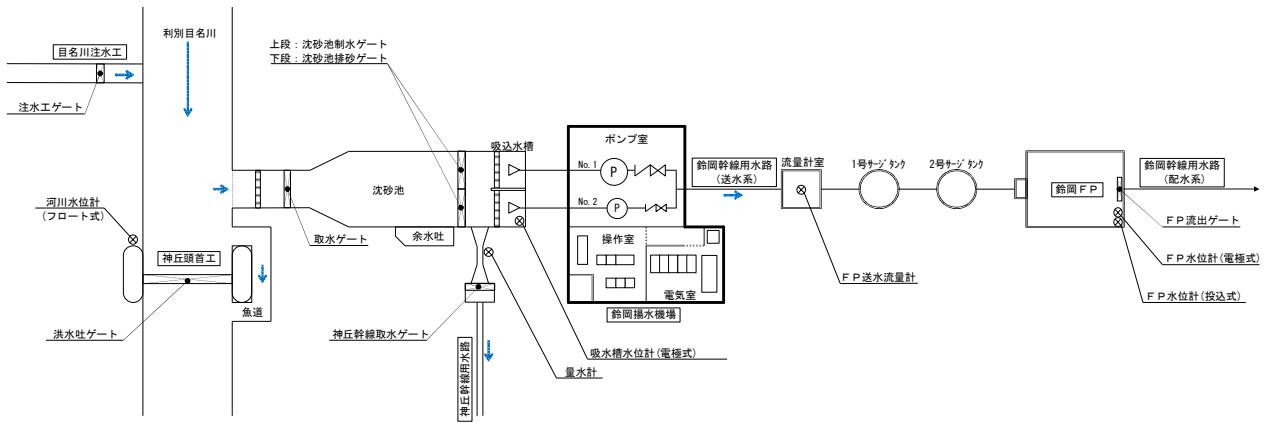


図-2 施設模式図

3. 整備計画

本揚水機場は建設後30年以上が経過し、施設の老朽化が確認されることから、劣化状況を把握するため機能診断調査を実施している。

機能診断調査の結果、土木施設（コンクリート構造物）については、流水による摩耗などの軽微な劣化が確認された程度であった。ポンプ設備・電気及び監視操作制御設備については、発錆、水漏れ、動作不良等が生じているだけでなく、耐用年数を超過しているため交換部品の製造中止（部品の陳腐化）が確認され、そのため突然の故障により重大な事故や設備全体の機能停止につながる状態である。特にポンプ設備は、老朽化の進行が著しく、ポンプ羽根車の摩耗によるポンプ吐出能力の低下、仕切弁の作動不良による漏水、用水の逆流によるポンプの緊急停止等の不具合が発生している状況であった（図-3）。

以上より、本事業では、土木施設については継続使用とし、ポンプ設備・電気及び監視操作制御設備については更新により機能を回復し施設の長寿命化を図る整備計画としている。



図-3 ポンプ設備の劣化状況

4. 基本事項の検討

(1) 最大揚水量

事業計画における本揚水機場掛かりのかんがい面積505.68haの計画用水量より最大揚水量： $Q=0.304\text{m}^3/\text{s}$ である（図-4）。

Ryotaro Murakami, Yuki Kikuti, Shin Kameda

なお、本揚水機場のかんがい面積については、農地の公共転用等により、造成時の520haから505.68haに減少している。また、最大揚水量については、かんがい面積の減少と併せて営農計画の見直しに伴い $0.353\text{m}^3/\text{s}$ から $0.304\text{m}^3/\text{s}$ に減少している。

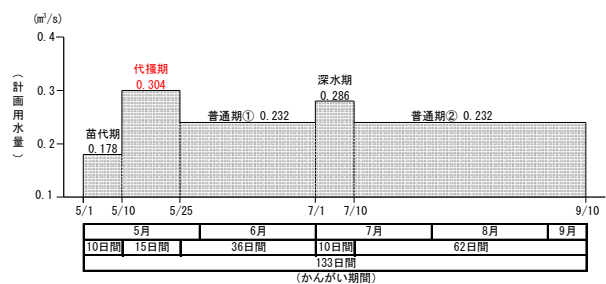


図-4 計画用水量（今金北地区：鈴岡揚水機場掛かり）

(2) 計画吐出し量

ポンプの計画吐出し量は、期別用水量の変動に応じて効率的な運転となるよう吐出し量の組合せを決定する。吐出し量の組合せは、土木施設（吸込水槽・ポンプ室上屋）は既設利用することから、ポンプ台数は既設と同じ2台とし「①案：同一口径」と「②案：異口径」の両者について比較検討した。

なお、②案の吐出し量の組合せは、最も運転頻度の高い普通期の用水量（常時揚水量：雨有10カ年普通期最大）を1台目とした（図-5）。

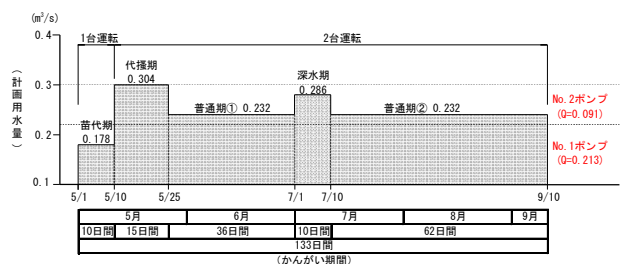


図-5 計画用水量と運転台数（計画吐出し量の組合せ）

前途より、ポンプの計画吐出し量の組合せについて経済比較した結果、経済的に優位な「②案：異口径」を採用した（表-2）。

表-2 計画吐出し量の組合せと機器費用の比較

| ①案:同一口径 | | |
|-------------------------------------|-------------------|--------|
| ポンプ番号 (吐出し量) | 機器仕様 | 価格(千円) |
| No.1ポンプ (0.152m ³ /s) | φ 300mm両吸込渦巻ポンプ | 12,000 |
| | 160kW 巻線形4P 6000V | 22,000 |
| No.2ポンプ (0.152m ³ /s) | φ 300mm両吸込渦巻ポンプ | 12,000 |
| | 160kW 巻線形4P 6000V | 22,000 |
| 合計 | | 68,000 |

| ②案:異口径 | | |
|-------------------------------------|-------------------|--------|
| ポンプ番号 (吐出し量) | 機器仕様 | 価格(千円) |
| No.1ポンプ (0.213m ³ /s) | φ 350mm両吸込渦巻ポンプ | 13,000 |
| | 220kW 巻線形4P 6000V | 27,000 |
| No.2ポンプ (0.091m ³ /s) | φ 250mm両吸込渦巻ポンプ | 8,500 |
| | 110kW 巻線形4P 6000V | 16,000 |
| 合計 | | 64,500 |

以上より、各ポンプの計画吐出し量は、次のとおりとする。

- ・No.1ポンプ：0.213m³/s（12.78m³/min）
- ・No.2ポンプ：0.091m³/s（5.46m³/min）

(3) 主ポンプ形式

主ポンプの形式は、軸形式・機種形式・据付形式の組合せで表され、この組合せの中から立地条件や全揚程・吸込性能・維持管理性・経済性等について評価し形式を選定する。

a) 軸形式

軸形式は横軸形・立軸形・斜軸形に分類され、一般的に揚水機場では横軸形と縦軸形が多い。本揚水機場の場合、立軸形と斜軸形では、既設利用する吸込水槽の改修が必要になることから、既設と同じ「横軸形」を選定した。

b) 機種形式

機種形式は、設計基準ポンプ場より全揚程と軸形式によって異なる。本揚水機場は、全揚程が70m（高揚程）であること、上述a)より横軸形であることから機種形式は「渦巻ポンプ」を選定した（図-6）。

表-5.19 (b)-参 高揚程ポンプの概略全揚程

| 機種形式 | 軸形式 | |
|-------|-------|-------|
| | 横軸ポンプ | 立軸ポンプ |
| 斜流ポンプ | — | 20m以下 |
| 渦巻ポンプ | 15m以上 | 15m以上 |

注) 表の数値は、概略の設計点（=計画点）全揚程を示す。

図-6 軸形式と機種形式（設計基準ポンプ場より抜粋）

Ryotaro Murakami, Yuki Kikuti, Shin Kameda

c) ポンプ口径及び形式の決定

本揚水機場のポンプ口径とポンプ形式は、前途a)軸形式を踏まえ、計画吐出し量の組合せ結果と後述する計画全揚程（70m）より、設計基準ポンプ場の適用線図から選定する（図-7）。

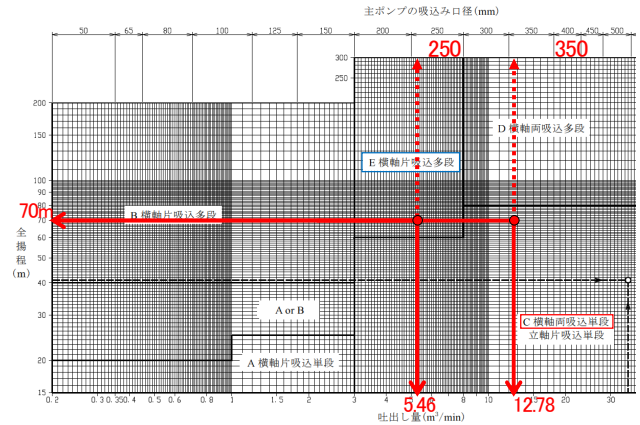


図-7 ポンプ適用線図（設計基準ポンプ場より抜粋）

ここに、No.2ポンプ形式は「横軸片吸込多段」の範囲ではあるが、以下の理由より「C横軸両吸込単段」を選定した。

(4) No.2ポンプ形式の選定理由

a) 片吸込と両吸込

- ・両吸込形は、羽根車の片側に入る流量が1/2となる分、吸込性能（キャビテーション）が片吸込形より優れる（図-8）。
 - ・片吸込形は、ポンプで発生した圧力水頭が羽根車を軸方向に動かそうとするスラスト荷重が発生するが、両吸込は左右が対称となっているので相殺され理論的には発生しない。スラスト荷重は、片吸込形>両吸込形により、スラスト荷重を受ける軸受や、スラスト荷重を低減するバランスー等の構造が両吸込形の方が簡略化される。
- ∴両吸込の方が性能及び耐久性に有利である。

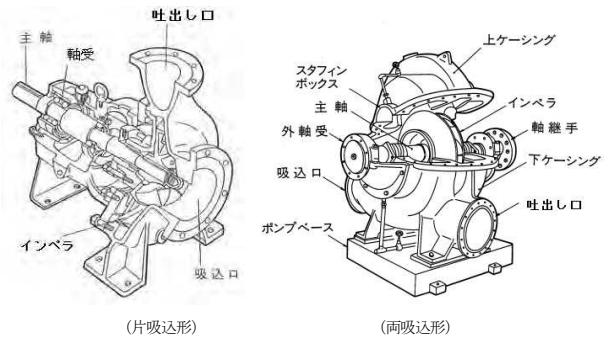


図-8 片吸込形と両吸込形の構造

b) 多段と単段

ここに、多段ポンプとは、高い全揚程に対してイン

ペラの枚数を増やしたポンプ（図-9）。

- ・多段の方が、ケーシング内部の流路形状が複雑になる分、ケーシング内部での流れ損失が生じ、単段に比べてポンプ効率が低くなる。
- ・多段の方が、構造や部品構成が複雑となる分、メンテナンス性が単段より劣る。
- ∴単段の方がポンプ効率がよく、構造が簡単で維持管理に有利である。



(片吸込多段ポンプ) (両吸込単段ポンプ)
図-9 多段ポンプと単段ポンプの外観

c) 経済性

本揚水機場の流量及び揚程の場合、両吸込単段の方が価格は安い。

- ・片吸込形多段ポンプ：13,700千円
- ・両吸込単段ポンプ：9,400千円

以上より、各ポンプ口径と形式は次のとおりとした。

- ・No.1ポンプ：φ350mm横軸両吸込単段渦巻ポンプ
- ・No.2ポンプ：φ250mm横軸両吸込単段渦巻ポンプ

5. 詳細事項の検討

(1) 主ポンプの設計

a) 計画吸込水位及び計画吐出し水位

計画吸込水位は、取水地点の堰上げ水位から吸込水槽までの導水諸損失水頭を差し引いた値とする。計画吐出し水位は、鈴岡ファームポンドの越流壁に越流水深を加えた水位とする。

- ・計画吸込水位：WL 55.78m
- ・計画吐出し水位：WL 122.30m

b) 計画全揚程

計画全揚程は、計画実揚程に主ポンプまわりの配管と機場から鈴岡ファームポンドまでの送水管路の各損失水頭を加えた値とする。なお、ポンプ吐出し量の異なるポンプを並列する場合は、一方が吐出し量不足にならないよう計画全揚程は大きい方に合わせる。

- ・計画実揚程＝計画吐出し水位－計画吸込水位
＝122.30－55.78
＝66.52m

- ・各損失水頭＝3.20m (No.1ポンプ)
3.26m (No.2ポンプ) →[採用値]
- ・計画全揚程＝計画実揚程＋各損失水頭
＝66.52＋3.26
＝69.78
＝70m (決定値)

(2) 主ポンプ駆動用原動機の設計

a) 原動機形式の種類

原動機は電動機と内燃機関に大別され、揚水機場の場合は運転時間が長く平常時は決められたパターンで運転されるため、電源の安定供給が受けやすい場合は操作が簡単で経済的な電動機が一般的である。電動機の種類は、交流電動機と直流電動機に分類され、構造が簡単であること、取り扱いが容易であること、価格が安価等の利点から三相誘導電動機が最も多く用いられている（図-10）。

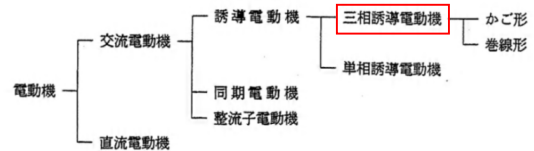


図-10 電動機の種類

三相誘導電動機の中にはかご形電動機と巻線形電動機がある（図-11）。かご形電動機は小容量から大容量まで広く適用されているが、始動電流が大きい（定格電流の5～7倍）ことから、電力会社の送電線路の事情によるが、大容量になると、電圧降下やフリッカ現象を引き起こすため対策が必要となる。一方、巻線型はかご形に比べて構造が複雑で価格も高いが、始動電流が小さい（定格電流の1～1.5倍）ことから、大容量の場合に採用されることが多い。

解説表 5.6 回転子構造による分類(参考)

| 項目 | かご形 | 巻線形 |
|--------|-------------------------------------|----------------------------|
| 構造 | 簡単 | やや複雑 |
| 保守 | 簡単 | やや複雑 |
| 始動電流 | 大(定格電流の500～700%) | 小(定格電流の100%) |
| 始動トルク | 25～100% (ただし、始動電流による電圧降下でトルクも低下) | 100% |
| 始動方式 | 直入始動又は減電圧始動 | 二次抵抗始動 |
| 許容始動頻度 | (電動機で発生する熱は電動機内部に蓄積されるため、許容頻度が少ない) | (外部の二次抵抗器で放熱されるため、許容頻度が多い) |
| 寸法・重量 | 電動機本体は、巻線形のほうがかご形に比べ若干大となる。 | |

注：かご形の始動電流は直入始動の場合（トップランナーモータを含みます。）。

図-11 かご形電動機と巻線形電動機の特徴比較

c) 電動機形式の決定

電動機の種類は、既設と同じ巻線形電動機（金属抵抗による二次抵抗始動方式）と、巻線形よりも電動機本体の価格が比較的に安価なかご形電動機の両者について比較検討する。なお、かご形電動機の始動方式については、電力会社へ送電線路の事情を確認した結果、電圧降下対策としてリアクトルやコンドルファといった減電圧方式では対策として十分な効果がないことか

ら、インバータ始動方式（VVVF始動）とした。

比較検討の結果、かご形よりも経済的な巻線形電動機を採用した（表-3）。

表-3 電動機形式の比較検討

| 型式 | 工事費 | 判定 |
|--------|---------------------------------|--------|
| 巻線形電動機 | ① No.1巻線形電動機(220kW) = 24,100 千円 | ○ (採用) |
| | ② 同上始動用金属抵抗器 = 13,000 千円 | |
| | ③ No.2巻線形電動機(110kW) = 14,000 千円 | |
| | ④ 同上始動用金属抵抗器 = 6,000 千円 | |
| | ⑤ 高圧受電盤:1面 = 10,000 千円 | |
| | ⑥ 主ポンプ動力盤:2面 = 18,000 千円 | |
| | 計 85,100 千円 | |
| かご形電動機 | ① No.1かご形電動機(220kW) = 17,100 千円 | |
| | ② 同上高圧インバータ盤 = 67,000 千円 | |
| | ③ No.2かご形電動機(110kW) = 7,100 千円 | |
| | ④ 同上高圧インバータ盤 = 51,000 千円 | |
| | ⑤ 高圧受電盤:1面 = 10,000 千円 | |
| | ⑥ 主ポンプ動力盤:2面 = 24,000 千円 | |
| | 計 176,200 千円 | |

d) 電動機定格出力の決定

電動機の定格出力は、「土地改良設計基準 ポンプ場」p254で求めた値から、JISに示す推奨値より決定する（図-14）。

$$P = \frac{\rho \cdot g \cdot Q \cdot H}{60 \times 1,000 \cdot \eta_p \cdot \eta_s} \cdot (1+R) = \frac{0.163 \cdot Q \cdot H}{\eta_p \cdot \eta_s} \cdot (1+R)$$

ここに、P : 主原動機の出力 (kW)

ρ : 密度 (水の単位体積当り質量)、常温清水の場合は 1,000 (kg/m³)

g : 重力の加速度 (9.8m/s²)

Q : 主ポンプの吐出量 (m³/min)

H : 主ポンプの全揚程 (m)

η_p : 主ポンプの効率 (表-6.11~表-6.20 による)

η_s : 減速機伝達効率 (表-6.21 による)

R : 主原動機の余裕係数 (%) × $\frac{1}{100}$

解説表5.11 定格出力の推奨値(JIS C 4213:2014より抜粋)

| 定格出力(kW) |
|--|
| 15、18.5、22、30、37、45、55、75、90、110、132、150、160、185、200、220、250 |

図-14 電動機出力算定式と定格出力推奨値

以上より、各電動機の形式と定格出力は次のとおりとした。

- ・ No.1巻線形電動機：定格出力 220kW (203.6kW)
 - ・ No.2巻線形電動機：定格出力 110kW (94.0kW)
- ここに、() は計算値を示す。

e) 電源電圧の決定

電動機の電源電圧は、一般的に定格出力が大きくなるほど高くなる。定格出力と電源電圧の関係から製作可能な範囲は下図のとおりである（図-16）。本機場の場合、電動機の定格出力は220kWと110kWであるが、電源電圧3,000Vと6,000Vのいずれも製作できる範囲にあてはまることから、変電設備（変圧器）との組合せによる経済比較より、電源電圧は6,000Vを採用した（表-4）。

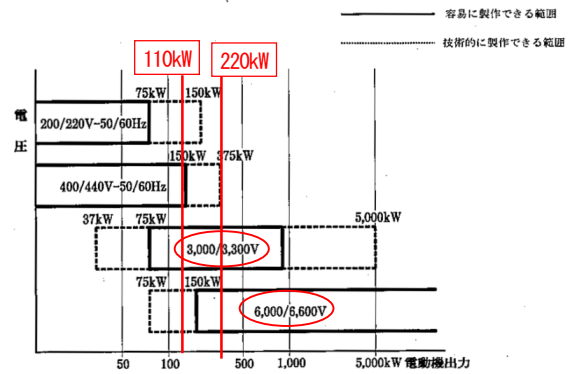


図-16 電動機出力と電源電圧の関係図

表-4 変圧器との組合せによる経済比較

| 電圧 | 工事費 | 判定 |
|-------|-----------------------------------|--------|
| 3000V | No.1電動機：220kW(3kV/50Hz) 18,200 千円 | |
| | No.2電動機：110kW(3kV/50Hz) 12,000 千円 | |
| | 変圧器：6kV/3kV 15,000 千円 | |
| | 45,200 千円 | |
| 6000V | No.1電動機：220kW(6kV/50Hz) 22,900 千円 | ○ (採用) |
| | No.2電動機：110kW(6kV/50Hz) 16,500 千円 | |
| | 39,400 千円 | |

6. まとめ

現況と計画のポンプ諸元を以下に示す（表-5、6）。

表-5 現況ポンプ諸元

| ポンプ番号 | No.1 | No.2 |
|-------|--|---|
| 台数 | 1台 | 1台 |
| 計画吐出量 | 0.263m ³ /s (15.8m ³ /min) | 0.090m ³ /s (5.4m ³ /min) |
| ポンプ形式 | 横軸両吸込単段渦巻ポンプ | 横軸両吸込単段渦巻ポンプ |
| 口径 | φ350mm | φ250mm |
| 全揚程 | 71m | 71m |
| 原動機形式 | 巻線型三相誘導電動機 | 巻線型三相誘導電動機 |
| 原動機出力 | 3000V-260kW-6P | 3000V-110kW-4P |
| 操作方式 | 自動ON-OFF制御(水位幅一定制御) | |

表-6 計画ポンプ諸元

| ポンプ番号 | No.1 | No.2 |
|-------|---|--|
| 台数 | 1台 | 1台 |
| 計画吐出量 | 0.213m ³ /s (12.78m ³ /min) | 0.091m ³ /s (5.46m ³ /min) |
| ポンプ形式 | 横軸両吸込単段渦巻ポンプ | 横軸両吸込単段渦巻ポンプ |
| 口径 | φ350mm | φ250mm |
| 全揚程 | 70m | 70m |
| 原動機形式 | 巻線型三相誘導電動機 | 巻線型三相誘導電動機 |
| 原動機出力 | 6000V-220kW-4P | 6000V-110kW-4P |
| 操作方式 | 自動ON-OFF制御(水位幅一定制御) | |

今回の設計検討での大きな変更点は計画吐出し量、電動機の定格出力及び電源電圧である。それぞれの変更理由について簡単にまとめる。

はじめに計画吐出し量の減少については営農計画の見直しにより、必要水量が減少したためである。

電動機の定格出力の減少については、No.1ポンプの計画吐出し量の減少に伴うものである。

最後に、原動機の電源電圧は電力会社から供給される高圧受電の標準電圧が6,000Vのみであり、3,000Vの原動機を設置する場合には変圧器が必要となる。原動機本体の工事費は6,000Vより3,000Vの方が安価となるが、変圧器を考慮した工事費の経済比較から6,000Vが安価となったため、今回の更新では6,000Vとした。

他の検討事項は、土木施設を既設利用すること、経済性等の理由から、現況のポンプ施設との大きな変更点はなかった。

7. おわりに

今後、道内において、これまでストックされた数多くの既設ポンプ場が老朽化し更新時期を向かえることになるが、その時点で様々な課題が発生し、その解決策が求められることになる。今回の設計例を活用するとともに、今後開発される新技術等により、想定される問題に対して、より合理的に解決が図られていくことを期待する。

以上。