

# 房総導水路緊急改築事業におけるポンプ速度制御装置 VVVF 導入に対応した換気設備設計

○藏方 一也<sup>1</sup>・小津 光生<sup>2</sup>

## 概要

房総導水路緊急改築事業におけるポンプ設備の改修は、「維持管理費の縮減」「信頼性の向上」「保守作業の軽減」を目標に、機器の高効率化及び機場の無水化を実施するもので、その代表的な取組であるポンプ速度制御装置 V V V F 導入は、効果のみ大きく取り上げられるが、設置環境の確保に関する課題があり、他事業所においては、空調導入により課題を解決した事例などが報告されている。本稿は、V V V F インバータ制御装置の設置環境を従来の機械換気システムを工夫することで対処した当事業所の取組を報告するものである。

キーワード： V V V F 制御、換気設備、設置環境、湿り空気線図、既設建屋

## 1. はじめに

房総導水路は、(図-1) に示すとおり、2 ダム、5 揚水機場及び約 100km の水路で構成され、利根川から取水した水は、九十九里沿岸地域及び南房総地域の水道用水や千葉県臨海工業地帯等の工業用水として各利水者に供給している。

事業の完成は、平成 17 年 3 月と新しいが、建設中の昭和 50 年代から一部施設を用いた暫定通水を行っており、基幹となる揚水施設（特に速度制御装置などの電気設備）は、老朽化に伴う信頼性の低下、調達可能な補修部品の漸減など、近年はリスクの高い管理運営を行っている。また、導水路は幹線道路や鉄道と交差する箇所が多数あり、近い将来に発生が予想される大規模地震に備えて、被災時の影響を軽減する対策が急務なことから、老朽化対策、耐震補強、地上権再設定を目的とする房総導水路緊急改築事業（工期：平成 26 年度～32 年度、事業費：約 150 億円）を鋭意実行している。

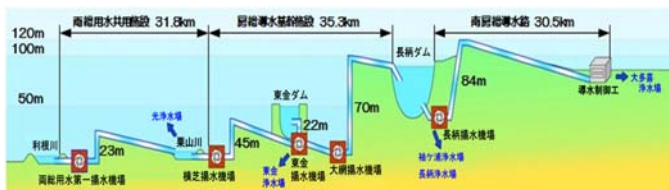


図-1 断面で見る房総導水路

## 2. ポンプ設備の改修計画について

緊急改築事業においては、横芝、大網、長柄の 3 揚水機場を対象にポンプ設備の改修を行い、維持管理費の縮減、信頼性の向上、保守作業の軽減を達成する計画である。その具体的な取組について、本稿に關係する内容を以下に述べる。

### 2.1 機器の高効率化

機器の高効率化は、使用電力量の縮減が図れ、揚水機場の管理費の大部分を占める電気料金の縮減に大きく寄与する。

横芝機場を例に挙げると、(図-2) に示すように、総合効率は 10.8 ポイントアップし、電力使用量は、約 12.4% の減が見込まれる。

機器の高効率化は、更新する主ポンプ、電動機、速度制御装置に対して、製造メーカーの高い技術力を活用することで設計基準等より高い数値を発注仕様として採用することで達成した。また、総合評価における受注者の技術提案により、効率の更なる上積みが見られた。

なお、電動機効率が既設より低下しているのは、総合効率が最も高くなる速度制御装置と電動機の組み合わせを採用したことで生じたものであり、速度制御装置に効率の高い V V V F インバータ制御を採用すると、電動機は巻線形より効率がやや劣るかご形を採用せざるを得ない。

1. 千葉用水総合管理所 房総導水路事業所 設備課 主幹
2. 千葉用水総合管理所 房総導水路事業所 設備課 副参事

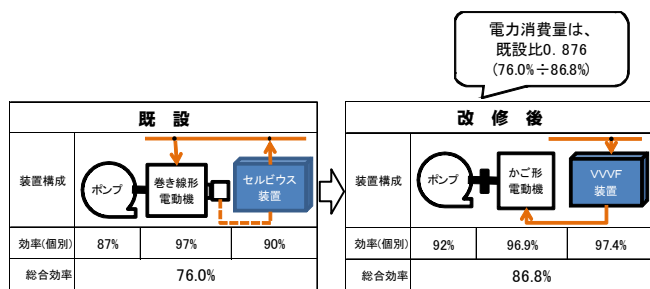


図-2 ポンプ、電動機、速度制御装置 効率比較表

## 2.2 機場の無水化

機場の無水化は、主ポンプの軸封方式の変更等により、給水ポンプ、オートストレーナー等の給水補機類が不要となり、保守作業の軽減及び信頼性の向上が期待できる。

その反面、各種機器の冷却方式が水冷から空冷に変更されるため、換気設備は発熱量の増加に対応するために能力の増強が必要である。また、当該設備の故障は施設機能（ポンプ送水）に大きく影響するため、改修後は重要設備として維持管理を行う必要がある。

## 2.3 VVVF+かご形モータ採用

省エネ効果を求める揚水機場における速度制御装置と電動機の組み合わせは、2.1で述べたVVVF+かご形電動機が一般的であり、VVVF (Variable Voltage Variable Frequency) インバータ制御 (交流で動作する電動機などで、電圧と周波数を自由に可変制御することで、電動機回転数を変化させる方式) により、使用電力量(維持管理費)の縮減が図れる。また、液体抵抗器や切換装置などの電動機の始動に必要な装置が不要になることから、信頼性の向上効果も期待できる。

既設のセルビウス装置+巻線形電動機と比べると、電動機は、回転子巻線に流れる電気を外部装置に伝達するのに使用する集電環装置が不要になり、毎月、清掃及び寸法計測が必要であった電動機ブラシのメンテナンスがなくなり、大幅な保守作業の軽減が図れる。

一方、VVVF装置は、電動機の一次電源を制御することから取り扱う電圧が高く、既設セルビウス装置より装置から発生する発生熱量は増加し、換気設備の能力を見直す必要がある。

## 3. VVVF制御装置導入の課題及び対策

### 3.1 過去事例からの課題と対策

VVVF制御は、低圧機器では導入実績が多数あるが、高圧機器を用いる大型揚水機場における導入実績は少ないため、過去事例からの課題と対策は、設備設計において

十分考慮する必要がある。

### ○課題と対策

VVVF装置に使用されるIGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor:高耐圧、大電圧に適した、少ない電流で高電力を制御できる半導体) 素子は、粉塵や多湿に弱く、粉塵が多湿な室内環境により基板へ付着することでVVVF装置が故障した事例が過去に報告されている。その対策として、基板にワニスコーティング処理 (粉塵付着防止措置) を行ったが、故障の完全防止は難しく、室内環境の抜本的な改善として、VVVF装置を設置した電気室に空調の導入が計画されている。

しかしながら、空調の導入は、ランニング、イニシャル共にコストが上がるデメリットが伴う。

### 3.2 房総導水路における課題と対策

房総導水路では、緊急改築事業において維持管理費の縮減、保守作業の軽減等を目指していることから、VVVF制御装置導入による空調の増設は、使用電力量の増加や保守作業の増加に繋がることから回避すべき課題である。

その為、従来の送風機を用いた外気導入による換気設備を改善することで、課題の解決を試みた。

## 4. 換気設備改善計画 (横芝揚水機場)

### 4.1 換気方式

横芝揚水機場の換気設備は、給気・排気共に送風機により機械換気を行う、第1種機械換気方式 (給排気共に送風機を利用する最も確実な給気、排気が期待でき、気流方向や静圧の制御が容易な方式) である (図-3 参照)。

既設換気設備は、通年で室内温度による送風機のON-OFF運転を行っているため、ポンプ運転台数による発生熱量 (=必要換気風量) の変化に対応しておらず、換気風量は過不足が生じている。

ポンプ設備改修後の換気設備は、現在と同じ第1種機械換気方式とするが、発生熱量の増加に対応するために換気能力は増強 (大型化) を図る計画である。

また、VVVF制御装置の導入に伴う設置環境に関する課題に対しては、換気風量の適正化や間欠運転による除湿 (再熱) など、機械換気設備の改善により、常に良好な設置環境を保つ計画である。

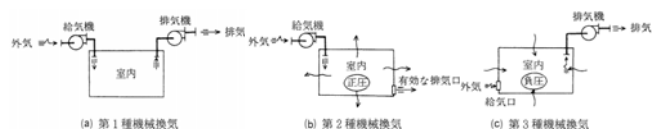


図-3 機械換気方式の種類

## 4.2 高温多湿環境対策

高温多湿環境への対策については、屋内外の温度・湿度に応じて送風機の運転制御を行うことで対応する。

VVVF 導入時の設置環境条件は、「温度：5℃～40℃、湿度：0%～85%（結露なきこと）」である。

上記条件をクリアすることが可能か検証する為、横芝光町の夏期環境を整理し、空調設備における湿り空気線図を用いて検討を実施した。

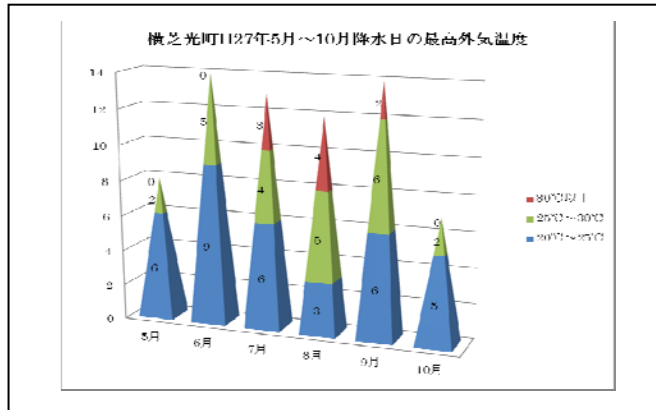


図-4 横芝光町H27年5月～10月降水日最高外気温

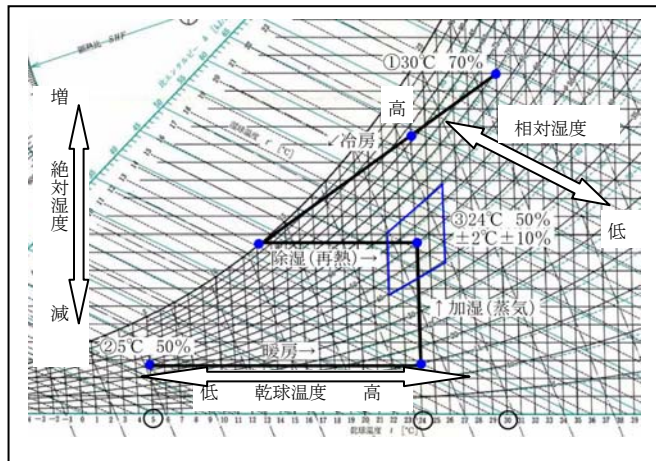


図-5 夏/冬期一般的な湿り空気線図上の状態変化図

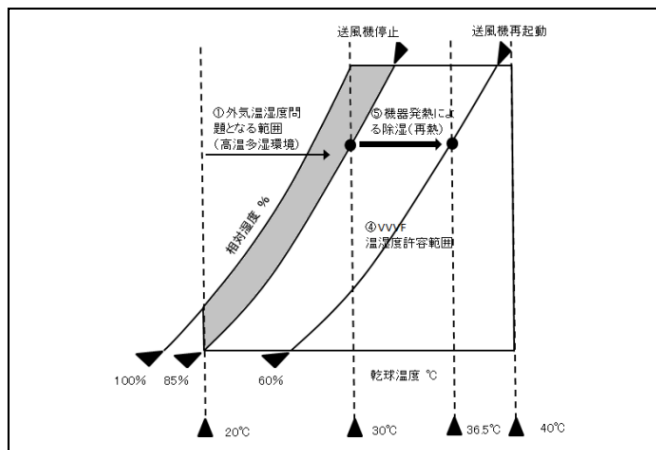


図-6 湿り空気線図を用いた電気室環境図 (拡大図)

### ○ 横芝光町の夏期環境

気象庁の記録によると、横芝光町における月平均最高気温は、30.4℃である。

高温・多湿の外気を室内に取り込むことによる結露の発生が心配される、外気温30℃以上湿度85%を超える可能性のある日は、H27年5月～10月の気象記録を整理すると、(図-4)に示すとおり9日と非常に少ない日数であった。年間10日前後の高温多湿日の為に空調(エアコン等)の導入は経済的でない。

### ○ 空調と温湿度の関係

換気による運転方式を検討する前に、湿り空気線図上の温湿度状態変化を、夏期、冬期の一般的な状態を用いて解説をする。冷房、除湿、暖房、加湿...一般的にはこの4つの状態変化がある。

(図-5)に、①夏期30℃70%②冬期5℃50%から、③24℃50%、±2℃±10%の室内環境を目指した時、の状態変化について示す。

(図-5)の状態変化を纏めると(表-1)の通りとなる。

表-1 温湿度状態変化集計表

	冷房	除湿	暖房	加湿
乾球温度 °C	下がる	上がる	上がる	変化小
相対湿度 %	上がる	下がる	下がる	上がる
絶対湿度 kg/kg (DA)	減る	変化無	変化無	増える

(図-5)より、除湿(再熱)は冬期暖房と同じ動きをする事により、相対湿度を下げる事ができる事が判る。

### ○ 給排気送風機間欠運転による除湿

(図-5)における除湿(再熱)の考え方をういて、給排気送風機の間欠運転による除湿について検討する。

VVVF装置の室内許容温度は40℃の為、湿り空気線図(図-6)で表すと、40℃に引いた縦線までは温度許容範囲である。(図-6)①の外気環境下においては、室内湿度上昇に応じて給排気送風機の間欠運転を実施することで、室内湿度の調節が可能と考えた。

具体的には、(図-6)③室内相対湿度が85%を超える前に、給排気送風機を停止する。その後、(図-6)⑤機器発熱(VVVFより発生する熱)=除湿(再熱)により室内温度は40℃方向へ上昇すると共に、相対湿度は低下する。

(図-6)②相対湿度が60%以下に低下した時点で給排気送風機の再起動を行う。

湿り空気線図(図-6)によると、給排気送風機停止前の温湿度を30℃、85%と仮定すると、給排気送風機停止後の室内温湿度は、36.5℃、60%に変化し、除湿が行われる。よって(図-6)④VVVF温湿度許容範囲を満足する。

○ 発生熱源の重点的な排気

電気室における熱源の大部分はVVVF装置である。VVVFインバータ制御装置から排出される高温の排気は、電気室天井部に設置したフードで排気ダクト吸込口へ誘導し、ポンプ運転号機と連動したモーターダンパーを開閉する事で、熱の発生源から局所的に排気することで、換気効率の向上を図るものとする。(図-7 参照)

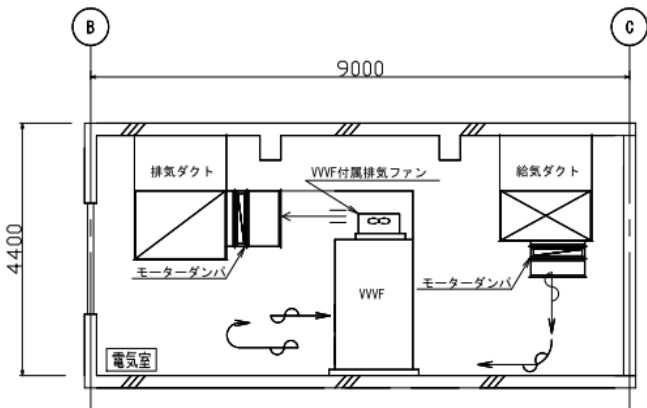


図-7 局所排気イメージ図

4.3 換気風量適正化

換気風量適正化を図る理由は、次の2点が上げられる。

○ 送風機故障防止

高温多湿対策を実施する上で必要な、送風機の間欠運転を実施する際に、過大風量による運転により、送風機の起動停止間隔が短くなる事による、機器故障の防止。

○ 運転コスト低減

大型化する換気設備の運転コスト低減。

ここで、大型化する換気設備の台数、能力、運転制御方法について検討した事項を纏める。

・設置台数の検討

ポンプ設備の運転台数が3台であるのに対し、送風機の運転台数は2台である。従って、ポンプ3台運転時以外は、換気に必要な設計風量と送風機による実換気風量に乖離が発生する。給排気送風機の能力をポンプ3台運転時の必要換気風量で設計すると、(表-2)に示すとおりポンプ3台運転時以外は、過大風量となり無駄に電力を消費する。

給排気送風機の台数をポンプと同じ各3台とする案については、既設建屋の機械室に大型化する換気設備(送風機)の設置スペースが確保できず困難である。

2台の送風機能力を大小異なる能力とする案については、常に先発機が固定される為、運転時間が一方に偏り、冗長性を考慮すると望ましくない。

以上より、送風機の設置台数は、同型機各2台とした。

・運転制御方法の検討

ポンプ運転台数毎の設計風量及び送風機運転台数を(表-2)に記す。ポンプ0台運転時は、VVVFインバータ制御装置以外の盤発熱等による熱負荷を示している。ポンプ運転台数が1台増加毎に、VVVFインバータ制御装置から発生する熱負荷が55KW増加する。

送風機の運転は、ポンプ運転台数毎に設計風量に近い換気風量とするために、ポンプ運転台数に応じた台数制御を行う。また、汎用インバータによる回転速度制御運転を導入し、換気風量の適正化を図ることとした。

表-2 ポンプ運転台数毎の熱負荷変化及び設計風量

ポンプ運転台数	0台	1台	2台	3台
熱負荷 (KW)	31	86	141	196
設計風量 (CMH)	11000	30000	49000	68000
送風機能力 (1台)	34000 (CMH)			
送風機運転台数	1台	1台	2台	2台
周波数設定 (HZ)	25	38	35	49

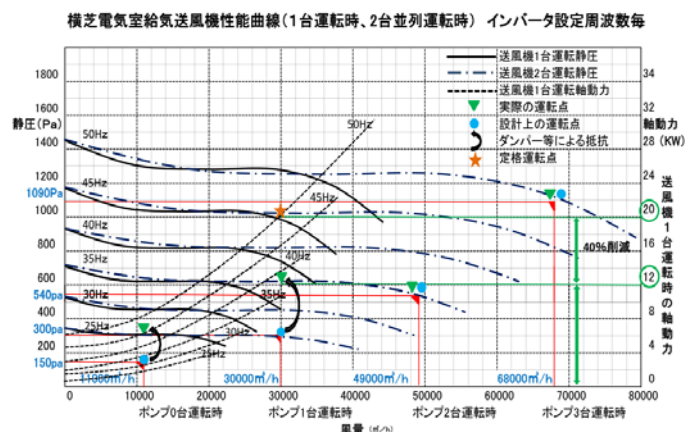


図-8 横芝給気送風機1~2台並列運転時性能曲線図 (インバータ周波数毎)

横芝給気送風機を対象に、汎用インバータを用いた際の周波数毎の送風機性能曲線を(図-8)に示す。

図-8において、ポンプ0台、1台運転時の設計運転点は、送風機1台運転時の静圧曲線に対して運転可能な範囲を外れる。その為、実際には、モーターダンパー等により抵抗を与えて運転を実施する必要がある。ポンプ2台、3台同時運転時には、設計上の運転点が送風機2台運転時の性能曲線上にほぼ一致する為、ダンパー等による抵抗を与えた運転を行う必要は無い事が判る。

ポンプ1台運転時風量30,000 m³/hにおける軸動力について注目すると、適正風量(38Hz)運転時の軸動力は12kW、台数制御のみ運転時の軸動力は20kWとなり、汎用インバータの使用により、送風機使用電力は約40%削減され、運転コストの縮減が図れる。

#### 4.4 換気量増大に伴う雨水侵入騒音対策

給排気量増加に伴い外気導入口、排気口においてガラリ通過風速が9m/sを超える。一般的に外壁ガラリの通過風速は建築設備設計基準等では3~4m/sと規定されており、既設外壁ガラリは、雨水侵入、騒音対策が必要である。一般的な外壁ガラリは、雨水の侵入を防止する為、開口率は30~35%で設計されている。

横芝揚水機場は、既設建屋を利用した改修計画であり、新規に外壁開口部を増やすことは、構造体に影響を与える恐れがある為、極力避けるべきである。その為、今回の計画では、高速防水ガラリ又はウェザーカバーに更新する事で改善を検討した。

##### ○高速防水ガラリの特徴

- ・高速防水ガラリ面風速 5m/s まで使用可能である。
- ・機械換気に於いて開口率 100% である。
- ・意匠上ガラリの為、外壁とフラットである。
- ・縦型ガラリであり、防水性能が高い。
- ・従来品と比較して高額である。
- ・材質はアルミニウム製である。

##### ○ウェザーカバーの特徴

- ・高開口率である (60%~100%程度)。
  - ・製作時の、自由度が高い。
  - ・防水性を考慮した形状作成も可能である。
  - ・意匠上箱型の為、外壁に突出する。
  - ・箱型の為大きな開口部への設置は適さない。
  - ・材質は選択が可能である。
- (ステンレス/ガルバニウム鋼板/他各種鋼板等)

写真-1 の通り、既設給気ガラリは 2.8m×2.3m のサイズである。ウェザーカバー (写真-2) を設置するには非常に大きく、設置箇所は、高速道路上からも見える場所に面しており、景観を損なう恐れがある。その為、既設同等の景観となる、高速防水ガラリ設置にて進めるものとした。

高速防水ガラリの制限風速は、面風速 5m/s であり、最大風量 68000 m<sup>3</sup>/h において、高速防水ガラリの採用により、面風速 2.9m/s となり基準を満たす。



写真-1 横芝揚水機場既設給気ガラリ



写真-2 ウェザーカバー参考写真

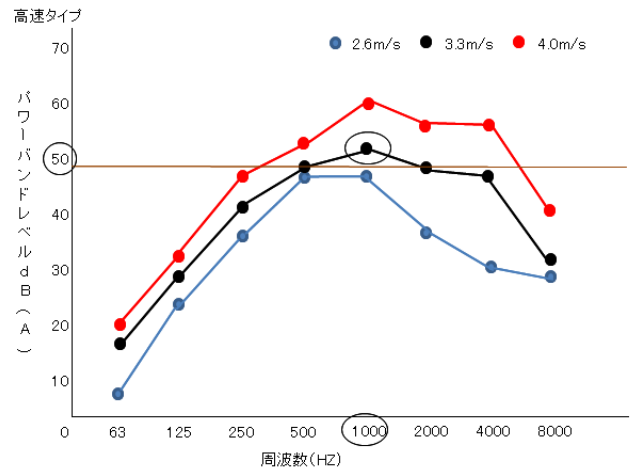


図-9 高速ガラリ騒音性能図

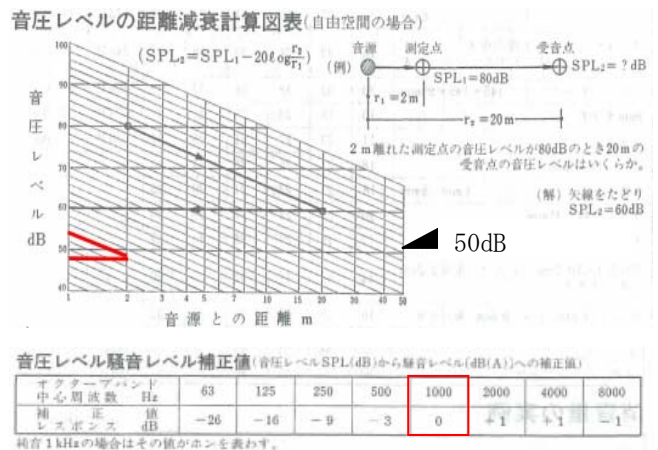


図-10 音圧レベルの距離減衰計算図

次に、騒音の観点で検証を行う。横芝揚水機場は横芝光町において、用途地域としては「その他地域」に該当する。その為、敷地境界において、夜間 50dB (A 特性) が一番厳しい騒音規制値となる。(図-9) より高速防水ガラリの 2.9m/s (3.3m/s) 時オクターブバンドは、1000Hz 周波数帯以外、50dB を既に下回っている。既設給排気ガラリから敷地境界までの距離は 20m 程度である。1000Hz 周波数帯において、(図-10) より 2m 程度離れた地点で、既に 50dB を下回ることが判る。距離減衰により騒音規制値を十分満足する事が判る。

以上より、高速防水ガラリへの更新により、雨水の侵入、騒音の問題が解消できる見通しである。

## 4.5 粉塵等抑制への対策

VVVF 制御装置の導入により電気室内は清潔な環境をこれまで以上に保持する必要があることから、給気送風機の外気取入口にはオートロールフィルターを設置し、粉塵等の流入を防止する。なお、フィルターの目詰まりは、従来のタイマーによる運転以外に、フィルター間差圧による運転を追加し、粉塵対策を強化する。交換は、予備品を準備し定期的に交換を実施する。

電気室、機械室内は、粉塵を持ち込まないように電気室、機械室内の扉は確実に閉める。

入室者に対して、粉塵は発生させない、持ち込まない、除去する意識を持つようにポスター掲示を行う。

電気室内には、自動床掃除機の導入を検討している。

## 4.6 将来を見越した対応

VVVF 装置は、設計上、換気設備強化により室内環境条件の範囲内で運転制御が問題なく行える計画である。しかしながら、地球温暖化による大気温度の上昇や、100年に1度の異常気象等、不安要素も多々ある。また、水需要の増加による4号機の運用再開など、不確定要素もある。このような将来予測されるリスクを踏まえた上で、予め空調導入時の検討を実施し、将来の拡張性を設計に反映した。

### 検討内容

○電気室内に床置 PAC エアコン室内機配置スペースを確保する。

○発生熱量に相当する機器を想定する。

○排気ダクト系上流にダンパーを設置し、空調導入時には、還気ダクトとして使用できるように、切替を実施し、空調用で使用できるようにする。

○電源については、給排気送風機併用の必要が無い為、夏期空調転用とする。

○配管、屋外機等については配置検討を行う。

## 5 考察

### 5.1 高温多湿対策についての考察

給排気送風機の間欠運転制御は、湿り空気線図上で示した通り、VVVF インバータ制御装置を運用できる環境を十分確保できる。また、給排気送風機の運転台数制御と電動機インバータ運転導入により、換気風量は適正化され、運転コスト低減の観点からも、効率の良い換気設備である。

懸念材料は、夏期の長雨である。間欠運転の頻度が上がり、送風機の始動停止が多くなり、機器寿命が短くな

る恐れがある。

### 5.2 粉塵対策についての考察

フィルター差圧管理を追加する事で、電気室、室内環境、粉塵の除去には有効である。

課題としては、ハード面で対策を行っていても、実際にフィルターの自動巻き取りが終わった後、濾材交換を怠れば、環境は改善されない為、適正な管理が必要である。

## 6 おわりに

従来のポンプ設備改修工事における検討は、機器の効率、使い易さ、コスト縮減、施工方法、老朽化対策等に注目したものが多かった。これまでに、技術革新によって、ポンプ設備の効率向上が達成されてきたが、今後成熟分野であるポンプ設備のさらなる高効率化をはかるのは非常に困難である。一方で機構に於いて、建屋全体の空調換気設備を含めたエネルギーコスト縮減についてはまだまだ改善すべき点がある。

VVVF インバータ制御装置にみられるように、近年、制御設備に半導体が多く用いられるようになり、温度対策にとどまらず、湿度対策も必要となるなど、装置毎に求められる設置環境も多様化している。また、機場の無水化により補機類の削減が図られた一方、機場の空冷化が急速に拡大したことも事実である。その為、空調、換気設備の効果的な設計、改善、フィルターや金網の清掃交換など、適正な管理が求められている。

既設設備改修の観点では、高速防水ガラリの採用等は、効果的な製品を既設建屋に上手く利用した例である。

房総導水路は利根川から取水し、総延長約 100 km をポンプによる揚水に頼っている。房総同様に、水に恵まれない地域は、維持管理費における運転コストが占める割合が大きく、維持管理費縮減に悩む機場も多い。機場毎に特性が異なる為、換気設備の改善が、全揚水機場に適合するかは不明である。地域、設置場所等により与えられた環境も異なる。しかしながら、本稿が設置環境改善の試金石となり、空調換気設備を見直すきっかけになれば幸いです。

### 参考文献

- ・一般社団法人公共建築協会 建築設備設計基準 H27 年版
- ・一般社団法人日本空調衛生工事業協会 空調工事便覧手帳 2014
- ・空気調和・衛生工学会 空気調和設備計画設計の実務の知識 1995