

アンモニアセンサーを用いたIZ循環ポンプ制御



館野 覚 俊 ①

船石 圭 介 ②

要旨

近年、水中のアンモニア態窒素濃度を直接測定できるセンサーが実用化されつつあり、下水処理を中心に曝気制御や運転管理への適用を検討する取り組みが行われている。当社でも、し尿処理へのアンモニアセンサー適用を検討しており、これまでに二槽循環型脱窒素処理方式へ導入した事例はあるが、単一槽型高負荷脱窒素処理方式への適用事例は存在しない。

本開発では、し尿処理分野における当社の主力である単一槽型高負荷脱窒素処理方式のIZシステムにアンモニアセンサーを適用することを目的とし、IZ循環ポンプの運転制御をアンモニアセンサーによって行い、従来の酸化還元電位（ORP）による制御と消費電力の比較検討を行った。

検討の結果、アンモニアセンサーによるIZ循環ポンプの制御によって目標水質を維持して処理を継続できることが確認され、有効に機能していると判断した。また、従来のORP制御と比較してIZ循環ポンプ動力が平均16.5%削減される結果が得られた。この結果より、アンモニアセンサーの導入によって施設全体のランニングコスト低減が期待できることが明らかとなった。

キーワード

し尿処理、IZシステム、アンモニアセンサー、動力削減

1. 緒言

生活排水処理は、各戸から集水管路で集めた汚水を処理する下水処理と汲み取りし尿及び浄化槽汚泥を車輛輸送で集約・処理を行う我が国特有のし尿処理に大別される。し尿処理施設の建設において、当社は大きなシェアを有しており、単一槽型の高負荷脱窒素処理方式であるIZシステムはその根幹をなす処理技術である。

し尿中に含まれる窒素の除去は、アンモニア態窒素を酸化させて硝酸態窒素ならびに亜硝酸態窒素へ変換する硝化反応と、硝酸態窒素ならびに亜硝酸態窒素を窒素ガス等へ変換する脱窒反応によって実現される。この際、硝化反応は酸素を要するのに対し、脱窒反応は酸素の欠乏した嫌気的な状態が必要である。そのため、従来は窒素処理を完了するために好気槽と嫌気槽を組み合わせた複数槽とする必要があった。IZシステムでは、単一槽で硝化・脱窒反応を行えるように衝突板を設けた水槽の上部を硝化ゾーン、下部を脱窒ゾーンとし、IZ循環ポンプで水槽下部から水槽上部に設置したオーバー

フローシャフトから槽内へ送液することで水槽内を循環させるとともに、エゼクター効果によって必要な空気を取り込んで槽内へ酸素を供給する。更にし尿を間欠投入し、IZ循環ポンプを高速運転と低速運転を交互に繰り返すことで単一槽での高い窒素除去率を可能としている(図1)。

IZ循環ポンプの運転制御は、主に槽内の酸化還元電位（ORP）によって行われている。硝化反応ではORPが

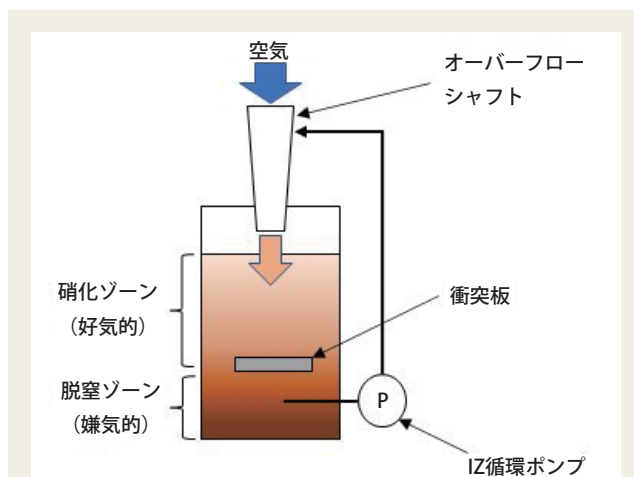


図1 IZシステムの概要

① 環境事業本部 開発センター

② 環境事業本部 設計統括部 水処理設計部 技術士(上下水道)

上昇し、脱窒反応では下降する性質を利用して槽内における硝化ならびに脱窒反応の状態をORPによって判断し、投入されるし尿等の負荷変動に合わせてIZ循環ポンプの循環量を制御し、安定した処理を実現している。しかしながら、窒素処理においてORPはあくまでも間接的な指標である。長年の実績があり問題がないとはいえ、処理対象物質を用いた直接制御ではないため、定期的な水質分析によって処理状況を確認する必要があった。

近年では水中のアンモニア態窒素を直接測定可能なセンサーが上市されている。これによって水槽内のアンモニア態窒素濃度をリアルタイムで監視することが可能となり、下水処理を中心にアンモニアセンサーを用いた曝気制御など運転管理への適用が検討されている^{1), 2)}。

当社では、二槽循環型脱窒素処理方式のし尿処理施設においてアンモニアセンサー及びアンモニアセンサーを用いた曝気制御を導入した事例があるが、単一槽型高負荷脱窒素処理方式のIZシステムへの導入事例は存在しない。IZシステムにアンモニアセンサーを適用し、アンモニア態窒素濃度を用いてIZ循環ポンプの制御を行うことで、従来のORPによる制御よりも効率的な運転を実現し、IZ循環ポンプの動力が削減できる可能性が高いと考えられる。IZ循環ポンプはIZシステムの施設内で消費電力が最も大きい機器であり、この動力が削減できれば、施設のランニングコスト低減に寄与できる。

以上を踏まえ、アンモニアセンサーのIZシステムへの適用可否ならびにIZ循環ポンプの制御をアンモニア態窒素濃度へ変更した場合の動力削減効果について検討調査した。本論文では、その結果について報告する。

2. 施設の概要

現地試験による調査を実施したのはK組合が所管するS衛生センターで、IZ反応槽（硝化脱窒素槽）を3系列有するIZシステムの施設である。竣工当初は河川放流の施設であったが、基幹改良工事を経て、現在はIZ反応槽1系列と砂ろ過処理設備及び活性炭処理設備を休止し、無希釈で下水道放流となっている。処理フローを図2に示す。

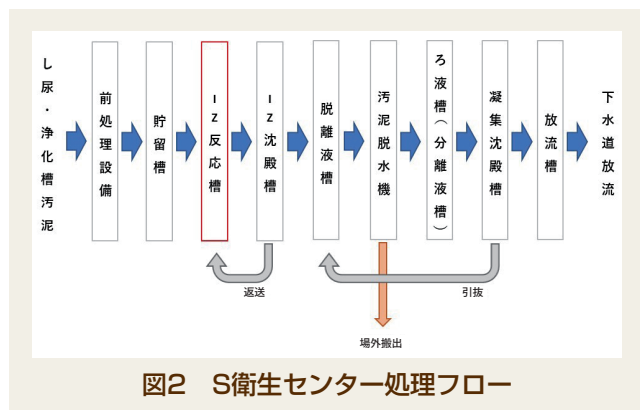


図2 S衛生センター処理フロー

搬入されたし尿ならびに浄化槽汚泥は前処理設備で夾雑物を除去した上で、IZ反応槽に間欠投入して窒素と

有機物を処理し、遠心分離機（汚泥脱水機）で固液分離している。固液分離によって得られた脱水ろ液は、凝集沈殿処理と消毒処理を行った後に下水道へ放流されている。

3. 調査方法

3.1 調査工程 調査は2020年9月から2021年3月の期間で実施した。概略工程を表1に示す。

表1 調査工程

| | 2020年 | | | | 2021年 | | |
|---------|-------|-----|-----|-----|-------|----|----|
| | 9月 | 10月 | 11月 | 12月 | 1月 | 2月 | 3月 |
| センサー設置 | | ▼ | | | | | |
| センサー検証 | | → | → | | | | |
| プログラム導入 | | | ▼ | | | | |
| データ収集 | | | ● | → | → | → | → |

3.2 使用機器 2系列稼働しているIZ反応槽のうち1系列にアンモニアセンサー（堀場アドバンスドテクノ製：HC-200NH：図3）を設置した。実際には、アンモニアウムイオンをアンモニア態窒素に換算している。設置場所は既存の計測機器と同様に循環ラインに設置したサンプリングタンクとした。

アンモニアセンサーの他、両系列の吸込空気量、IZ循環ポンプ周波数、ORPの各指示値はペーパーレス型記録計（キーエンス製：TR-W550）を使用して10秒間隔で記録した。また、IZ循環ポンプに電力計（横河電機製：CW500）を設置して消費電力の測定を行った。



図3 アンモニアセンサー外観（左）とセンサーチップ（右）

3.3 調査方法 2系列のIZ反応槽は投入量を同一として投入負荷を揃え、1系列はアンモニアセンサーによる制御、もう1系列は従来通りORP制御でIZ循環ポンプを運転した。両系列の処理水質が極力同等となるように調整してIZ循環ポンプの消費電力を比較することで、アンモニアセンサーを用いた制御による消費電力低減効果について調査した。

4. 調査結果

4.1 アンモニアセンサーの追従性検証 IZシステムはし尿を間欠投入していることから、し尿の投入が行われるタイミングでIZ反応槽内のアンモニア態窒素

濃度が大きく変動する。そこで、本格的な調査に先立ち、アンモニアセンサーが間欠投入に伴う濃度変動に追従することができるか検証を行った。1サイクルの間、3分間隔でIZ反応槽内液をサンプリングし、現地でアンモニア態窒素濃度を簡易測定した値とアンモニアセンサー指示値の比較を行った。結果を図4に示す。

簡易測定値とセンサー指示値の相関は良好であり、し尿の投入が行われた直後にアンモニア態窒素濃度が上昇するとともに、循環および硝化反応により低下する傾向が確認できた。以上により、アンモニアセンサーの精度、追従性共に問題がなく、IZシステムへの導入が可能であると判断した。

4.2 アンモニア制御の検証 アンモニアセンサーによる制御を実施した際のIZ循環ポンプ周波数ならびにアンモニア態窒素濃度のトレンドについて、下水放流型と河川放流型の代表的な例を図5、図6に示す。全体的な傾向として、アンモニア態窒素濃度はベースラインを形

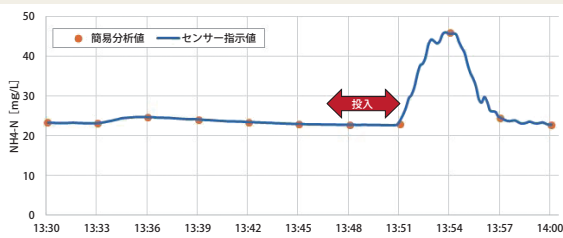


図4 アンモニアセンサーの追従性

成しつつ、し尿の投入に合わせてピークが発現する楕形のトレンドだった。発現したピークは槽内循環および硝化反応によって数分間でベースラインへ戻っていたことから、ベースラインの値が槽内の処理状況を表しているものであり、これを運転管理上の目標値内に収まるように制御するのが適当と考えられた。

図5は下水放流型でアンモニア態窒素濃度の設定値を30~35mg/Lとなるように運転調整を行っていた際のトレンドであるが、アンモニア態窒素濃度が一定の周期で変動しており、それに追従してIZ循環ポンプの周波数も変動していた。この期間中、アンモニア態窒素濃度のベースラインは20~45mg/Lで推移しており設定値を逸脱していたが、これは急激な変動を防ぐためにアンモニア態窒素濃度の変化に対するIZ循環ポンプ周波数変更の応答時間を5時間程度と長く設けたこと、設定値の濃度範囲を大きく設定したこと由来するものと推測された。従って、各種制御値の設定範囲の見直しおよびIZ循環ポンプ周波数変更の応答時間を調整することで改善が可能であると考えられた。

図6は河川放流を想定し、アンモニア態窒素濃度が1.0~2.5mg/Lとなるように運転調整を行っていた際のトレンドであるが、設定値の濃度範囲を小さく設定したことでアンモニア態窒素濃度のベースラインがほぼ一定の値で推移しており、安定した処理ができていた。このように、IZ循環ポンプが適切に制御されて河川放流の水準まで安定した処理水質を維持できることが確認された。

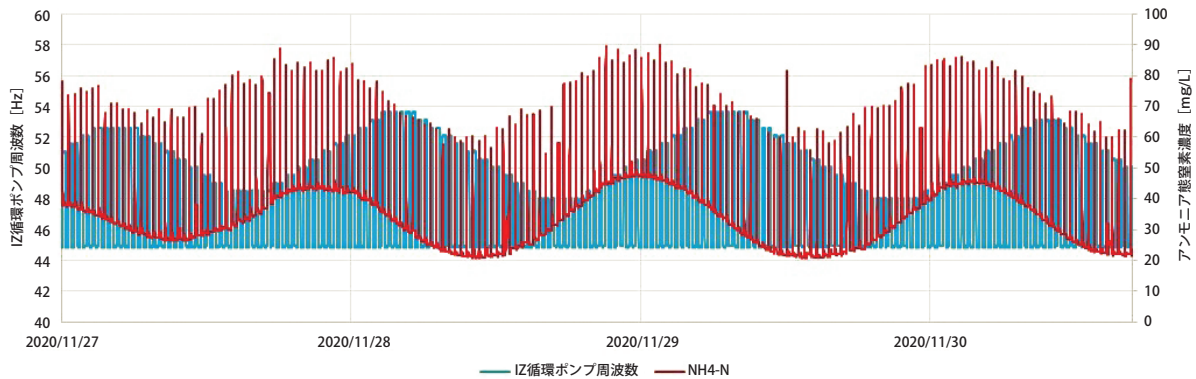


図5 アンモニア制御時のトレンド (その1)

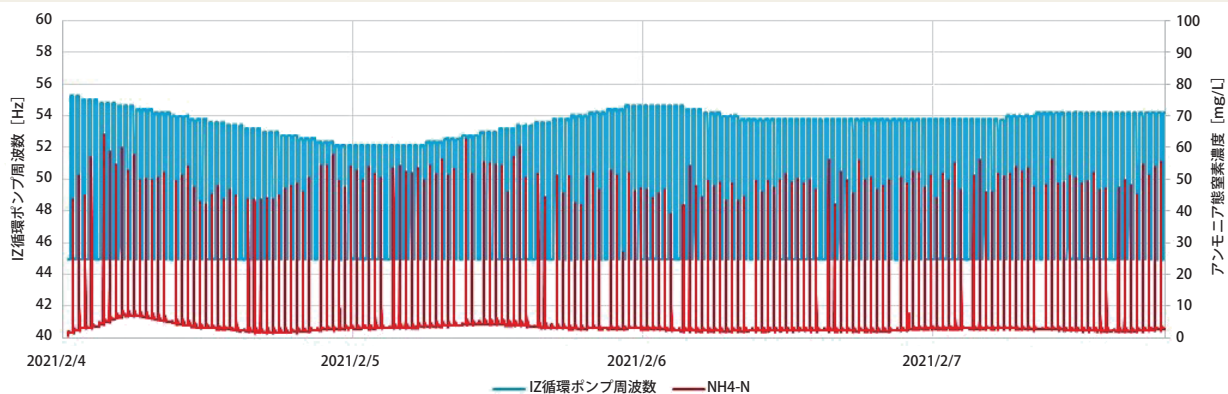


図6 アンモニア制御時のトレンド (その2)

以上により、本調査で実施したアンモニアセンサーによるIZ循環ポンプ周波数制御は、IZ反応槽内のアンモニア態窒素を概ね50mg/L以下、あるいは10mg/L以下の目標値で制御しつつ、安定した運転を継続できるものであると判断した。

4.3 動力削減効果の検証

4.3.1 消費電力の算出方法

IZ循環ポンプの消費電力は予めIZ循環ポンプ周波数と電力計によって計測した消費電力の関係式を導き出し、IZ循環ポンプの周波数から消費電力を算出することを試みた。三相誘導電動機の消費電力は軸回転数の3乗に比例し、軸回転数は周波数と比例する特性を参考に、消費電力と周波数の関係式を以下の通り仮定した。

$$E = aF^3 + b \quad \dots \textcircled{1}$$

ここで E : IZ循環ポンプの消費電力 (W)
F : IZ循環ポンプの周波数 (Hz)
a, b : 任意の定数

①式を決定するため、電力計を設置した系列において1週間分のIZ循環ポンプの消費電力(E)ならびに周波数(F)をプロットした散布図を作成し、ソルバー機能を使用して最適化した近似式について、任意の定数(a, b)を求めた。結果を図7に示す。

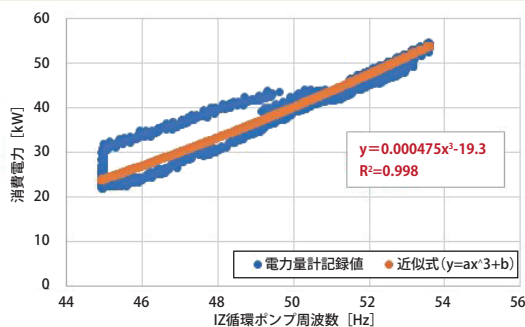


図7 IZ循環ポンプの消費電力と周波数の関係

IZ循環ポンプ周波数が概ね45~50Hzの区間において最適化した①式から乖離したプロットが存在しているが、これはIZ循環ポンプ周波数の下降時に消費電力がやや遅れて低下する現象によるものである。これは、特定の限られたタイミングでのみ発生する現象のため、全体における乖離したプロットの占める割合は小さく、決定係数は良好で消費電力の算出に使用して問題ないものと判断し、①式を使用してIZ循環ポンプの消費電力を算出することとした。

なお、IZ反応槽内液の水質の推移について図8に示す。ここではアンモニア態窒素、硝酸態窒素ならびに亜硝酸態窒素の合計値を比較した。極力両系列の水質が同等となるよう調整を試みたが、運転調整が一週間に一度の間隔であったため、2020年12月下旬から年末年始の施設の運転停止を挟んで2021年1月までは処理水質に差異が認められたが、2021年2月以降は両系列で同等の水質を維持していた。

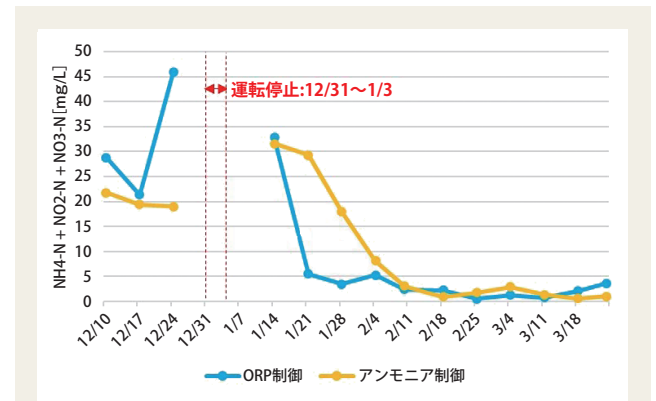


図8 IZ反応槽内液の水質

4.3.2 消費電力の比較

消費電力の比較を行うにあたり、同一の条件にて運転されていた一週間を集計期間として、集計期間ごとに24時間あたりの消費電力を算出して検討を行うこととした。集計開始はアンモニア制御による運転が安定し、両系列とも同等の処理水質を維持できていた2021年2月5日から3月25日とした。なお、1月29日から2月4日も処理水質は同等であったが、この期間はアンモニア制御運転を休止していたため、集計には含めなかった。

消費電力の算出結果を図9に示す。投入負荷や処理水質など施設の運転状況によってばらつきがあったものの、集計期間の全般に渡ってアンモニア制御はORP制御より消費電力が削減されており、削減率は5.3~28.5%の範囲で、全集計期間平均で16.5%の消費電力削減となった。

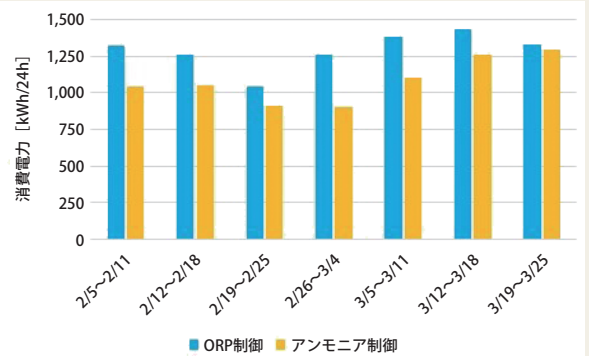


図9 消費電力の比較

4.3.3 ランニングコストの試算

アンモニア制御を導入した場合のランニングコスト削減効果について試算した。試算条件についてはS衛生センターをモデルケースとし、処理量は140kl/日(70kl/日×2系列)、IZ循環ポンプの消費電力は前述の結果を使用し、IZ循環ポンプ以外の機器は電動機の仕様と各設備の稼働時間から消費電力を推定した。試算の対象は電力のみとし、汚泥処理などに掛かる薬品代や汚泥の場外搬出に掛かる費用などの諸経費は対象外とした。

結果について図10に示す。IZ循環ポンプの動力が16.5%削減されるものとした場合、施設全体の消費電力は8.4%削減される結果が得られた。

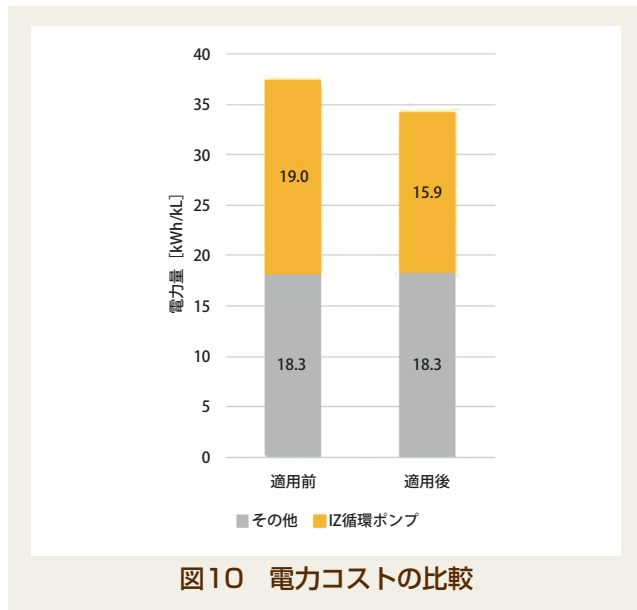


図10 電力コストの比較

一方、アンモニアセンサーの導入に伴うコスト増加要因として、センサーのメンテナンスに掛かる費用がある。今回の調査で使用した堀場アドバンスドテクノ製アンモニアセンサーの場合は、定期的にセンサーチップを交換することが推奨されており、これに要する費用がランニングコスト増加要因となるが、処理規模が一定以上であれば電力の削減による費用削減効果が相応にあり、全体でコストダウンを見込むことができる。また、現状ではアンモニアセンサーは浸漬型のみラインナップとなっており、設置に際してはサンプリングタンクなどを設ける必要がある。IZシステムでは、IZ反応槽の管理用にpH、ORP用のサンプリングタンクを設けており、導入を検討する際に有利と考えられる。

5. 結 言

本開発で実施した実証試験によって、以下の点が確認された。

- ・アンモニアセンサーは短時間で完結するアンモニア態窒素濃度変動を捉えることができ、IZシステムに適用が可能。
- ・IZ循環ポンプをアンモニアセンサーで制御運転することで、従来のORP制御運転と比較して平均16.5%の動力が削減できた。
- ・今回試算を行ったモデルケースにおいては、アンモニア制御の導入によって施設全体の消費電力が8.4%削減される結果が得られた。
- ・改良工事等で河川放流から下水放流へ変更を計画する場合も導入提案が可能。既存のIZシステムを活かし、アンモニア制御運転によって下水道排除基準相当の処理水質を維持して過剰曝気を抑制、ランニングコスト低減に寄与できる。
- ・水質管理項目の中で最重要と言えるアンモニア態窒素濃度をリアルタイムで把握可能。これにより、水質分析頻度を下げて施設運転員の負担軽減が期待できる。

導入コストの他、定期的に発生するセンサーチップ交換コストも無視できるものではないが、アンモニアセンサーならびにアンモニアセンサーを用いたIZ循環ポンプの制御を導入する利点は十分にあると言える。

SDGsに貢献する技術

し尿処理設備の稼働によって、水および衛生へのアクセスと持続可能な管理の向上に貢献できる。また、アンモニアセンサーの導入によってエネルギー使用を抑制し、施設運転員の負担軽減によって安全安心な労働環境の促進に寄与できる。

謝 辞

本開発及び調査は、K組合様ならびにS衛生センター職員の皆さまに多大な協力を賜わり実施したものである。末筆ながら、この場を借りて深く感謝の意を表する。

参考文献

- 1) 西田佳記, 山野井一郎, 武本剛ほか: アンモニアセンサーを活用した硝化制御システム, EICA, 2016, 21 (1), 23-26.
- 2) 漆垣健次, 竹原輝巳, 長塩尚之ほか: 下水処理場向けアンモニア計によるフィードフォワード制御技術, 住友電工テクニカルレビュー, 2021, 198, 100-103.

文責者

日立造船株式会社 環境事業本部
開発センター WS水処理プロジェクトグループ
館野覚俊
Tel : 0774-71-8745
E-mail : tateno@hitachizosen.co.jp

IZ Circulation Pump Control Using Ammonia Sensor

Abstract

In recent years, sensors that can directly measure the concentration of ammonia nitrogen in water are being put to practical use, and efforts are being made to study their application to aeration control and operation management, mainly in sewage treatment plants. Hitachi Zosen is also considering the introduction of ammonia sensors in night soil treatment plants. In the past, we have used ammonia sensors in a two-tank circulating denitrification system but not in a single-tank high-load denitrification system.

In this project, we aimed to apply the ammonia sensor to the IZ system, one of Hitachi Zosen's main products in night soil treatment, which uses a single-tank high-load denitrification system. We used the ammonia sensor to control the operation of the IZ circulation pump and compared the power consumption with that of the conventional method of control by oxidation reduction potential (ORP).

The study confirmed that the ammonia sensor worked effectively to control the IZ circulation pump and realize continuous treatment while maintaining the target water quality. It also reduced the IZ circulation pump power by an average of 16.5% compared to the conventional control by ORP. The results clearly showed that a reduction in running costs can be expected for the facility overall from the installation of ammonia sensors.

Authors

Akitoshi Tateno (Hitachi Zosen Corporation, E-mail : tateno@hitachizosen.co.jp)
Keisuke Funaishi