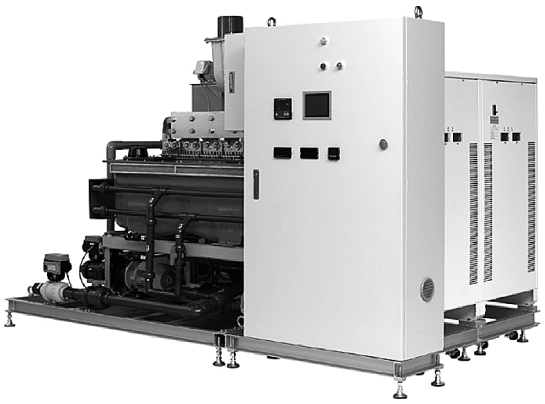
特　集　論　文

電解による廃水中窒素分解システム



Decomposition System of Nitrogen Compounds in Waste Water with Electrolysis

浅野昌道[*1] Masamichi Asano
水谷　洋[*2] Hiroshi Mizutani
中村謙治[*2] Kenji Nakamura
池　卓[*2] Takashi Ike
加藤雄大[*2] Yuudai Katou

近年，窒素成分による水質汚濁が問題視されていることから，法規制の整備が進められており，窒素成分を安定して処理することが求められている．従来，窒素除去は生物処理が主流であったが，設置にあたっては比較的広い設置スペースを必要としたり，大がかりな施設整備が必要となる場合があった．そこでこうした問題を解決すべく，従来の生物処理とは全く異なる原理を利用した“電解脱窒素システム”を開発し，実用化した．本稿では電解脱窒素システムの概要について紹介する．

1. はじめに

従来の生物処理により窒素除去を行う場合，各種の廃水に対し適用範囲が広く，廃水中の窒素を窒素ガスに無害化処理できるといった大きなメリットがある．

一方で，生物処理は負荷変動に影響を受けやすく，生物が適切に活動できる環境を維持するため，負荷の状態に応じたきめ細かい運転管理が必要となる．また，炭素/窒素比が低い廃水に対しては脱窒促進のためメタノール等の添加が必要な場合があり，発生する汚泥の処理が必要となるため，処理コストの低減や運転管理の省力化が課題となっている．

生物処理で窒素除去機能の向上を図るためには，新たに施設を新設するといった大がかりな整備工事が必要である．このため，窒素排出抑制に向けた対策の実施が困難なケースが見受けられる．

このような背景を受けて，従来の生物処理とは全く異なる電気分解を利用した窒素除去技術を開発し，電解脱窒素システムを実用化した．本システムは，高濃度から低濃度まで幅広い濃度の窒素含有廃水に適用が可能であり，廃水中に有機物を含む有機性廃水に対しても従来の生物処理とのハイブリッド化により，適用が可能である．

2. 窒素除去技術の比較

現在までに開発された窒素除去技術を**表1**に示す．これまで，各種の除去技術が実用化されているものの，生物処理と比較すると適用例はいずれも少ない．

表1　窒素除去技術の特徴

窒素除去技術	長　所	問　題　点
生物処理 （硝化・脱窒処理）	窒素ガスに無害化 適用範囲が広い	設置スペース・処理時間が必要 処理時間が長い
不連続点塩素注入法	建設費が安い 適用が容易	処理コストが高い 副生成物の可能性
アンモニア ストリッピング	高濃度排水に有効	アンモニアのみ除去可能 処理コストが高い
イオン交換	低濃度排水に有効	建設費・処理コストが高い 再生廃液処理が必要

3. 電解脱窒素システムの特長

電解脱窒素システムの特長として，以下の点が挙げられる．

(1) 処理機能の安定化

電解脱窒素システムは電気分解を利用した確実な窒素除去機能を有しており，電解電流値や塩化物イオン濃度の調整により負荷変動に対しても幅広くかつ迅速に対応し，窒素除去機能の安定化が図れる．

(2) 運転管理の省力化

電解脱窒素システムは従来の生物脱窒素処理と比較して処理対象液の負荷変動，温度変化等に対しフレキシブルに対応し，安定した窒素除去機能を発揮するため，運転管理の省力化が図れる．

装置の運転操作も容易であり，連続した自動運転が可能である．

[*1] 技術本部横浜研究所環境装置研究室
[*2] 横浜製作所環境ソリューション技術部水システム設計課

(3) 省スペース化

コンパクトな装置であり，施設の省スペース化が図れるとともに，設置工事を実施する場合にも大規模な改造が不要であり，工事期間も大幅に短縮可能である．また，電解脱窒素装置は独立した装置として能力を発揮し,処理能力の調整も可能なことから，既存処理システムへも容易に適用することが可能であるため，稼動中の施設にも導入しやすいシステムとなっている．

(4) 二次廃棄物低減

生物処理と異なり，炭素／窒素比が低い，若しくはほとんど有機物を含まない廃水に対しても，メタノール等の炭素源を供給することなく窒素除去が可能であり，生物処理と比較して汚泥の発生がないため，二次廃棄物の発生量を大幅に低減可能．

4. 電解脱窒素の反応メカニズム

電解脱窒素装置での窒素除去メカニズムは以下の通りであり，本装置は，特にアンモニア性窒素に対して優れた除去能力を発揮する（**図1**参照）．

(1) 陽極の電極反応により，塩化物イオン（Cl^-）から塩素（Cl_2）が生成し［式(1)］，塩素はさらに加水分解して，次亜塩素酸と塩酸を生成する［式(2)］．

$$2Cl^- \rightarrow Cl_2 + 2e^- \quad (1)$$

$$Cl_2 + H_2O \rightarrow HClO + HCl \quad (2)$$

(2) 廃水中にもともと含まれるアンモニアは，式(2)で発生した次亜塩素酸と反応し，モノクロロアミンとジクロロアミンを生成する［式(3)，式(4)］．

$$NH_3 + HClO \rightarrow NH_2Cl + H_2O \quad (3)$$

$$NH_2Cl + HClO \rightarrow NHCl_2 + H_2O \quad (4)$$

(3) 生成したモノクロロアミンとジクロロアミンが反応し，無害な窒素ガスへ転化する．

$$NH_2Cl + NHCl_2 \rightarrow N_2 + 3HCl \quad (5)$$

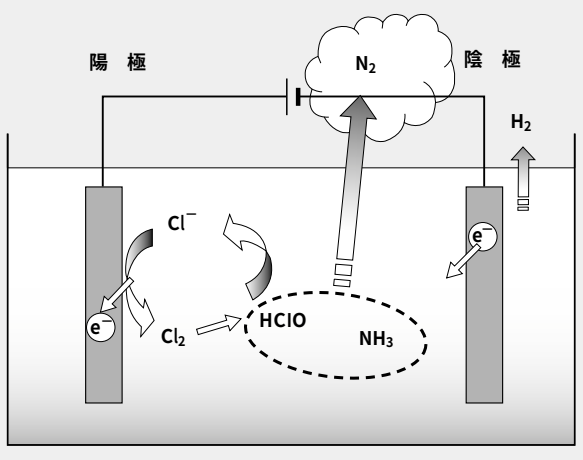


図1　電解脱窒素装置の原理

5. し尿処理分野への適用

本システムは幅広いアンモニア濃度の無機性廃水や有機性廃水に対して適用可能である．本稿では，これまで開発してきたし尿処理分野への適用について紹介していく．

(1) し尿処理施設が抱える課題

近年，全国的な傾向として，し尿処理施設では水洗化促進によるし尿の希薄化，合併浄化槽普及による浄化槽汚泥の量・性状変動などが著しくなっており，運転管理だけではし尿処理施設の根幹である生物処理設備の窒素除去機能を安定的に維持することが困難となるケースが見受けられおり，窒素除去機能の強化，安定化が課題となっていた．

電解脱窒素装置は処理対象液中のSS（浮遊物質）濃度が1 000 mg/L以下である必要がある．し尿処理では，SS濃度が低く，かつ含有する窒素の形態がアンモニアである浄化槽汚泥の前脱水分離液や生物処理後の固液分離液に対し適用が可能である．

そこで，従来の生物処理に電気分解により窒素除去を行う電解脱窒素装置を組み込んだハイブリッド型処理システムを開発し，実用化した．

(2) ハイブリッド型電解脱窒素システムの特長

従来技術である生物処理との比較を**表2**に示す．従来の生物処理に電解脱窒素装置を組み込んだシステムは従来の生物学的脱窒素方式と比較して，短工期かつ低改造コストで効率的な窒素除去を実現する．

(3) 電解脱窒素装置の基本構成

電解脱窒素装置は電源部(制御盤,直流電源装置)，電解槽，各ポンプ，排気ファン等から構成される．

運転方法は，電解槽の前後に，原水槽，処理水槽を設け，処理対象となる原水を電解槽に給液する給液工程，電解により窒素除去を行う電解工程，処理後の液を次工程に移送する排液工程を繰り返すバッチ式処理方式を基本とする（**図2**参照）．

表2　生物処理システムとの比較

	従来窒素除去方式	ハイブリット型 電解脱窒素システム
1. 処理概要	生物学的脱窒素法	電解脱窒素＋生物処理方式
2. 処理速度	長時間	短時間
3. 設置面積	大	小
4. 操作性	きめ細かい運転管理が必要 処理時間長く，追随性が悪い	自動制御による濃度変動対応 稼動から即座に能力を発揮
5. メンテナンス性	—	簡易な設備のため容易
6. 工期	長い（土建工事必要）	短い
7. 運転コスト	ほぼ同等※処理条件による	

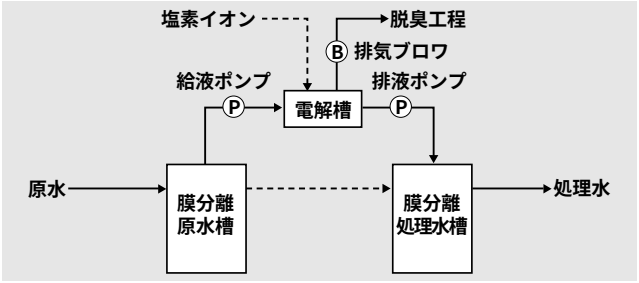


図２　電解脱窒素装置概要

（4）条件適正化制御

（a）窒素除去特性

電解脱窒素での窒素除去性能確認の結果の一例を**図３**に示す．処理対象液中のアンモニア濃度によらず，窒素除去速度はほぼ一定（０次反応）であることが確認された．

実際の運転に当たり，短時間で窒素（アンモニア性窒素）を除去する本装置では，処理の進捗状況をアンモニア濃度によりリアルタイムで把握することは困難である．処理進捗状況を把握するための指標を検討した結果，アンモニアの全量が処理されるとpHが低下から上昇へと反転する挙動となることを利用し，pH挙動に基づいて電解条件を制御することとした．

これにより，電解条件（電解時間，電流値）を過不足なく設定することが可能である．

（b）入口濃度変動に追随した自動制御

上記pH挙動に基づく制御を利用し，以下のような処理対象液窒素（アンモニア性窒素）濃度変動に追随した自動制御を行うこととした．

１日当たりの計画処理量から１バッチ当たりの計画電解時間t_Aが決まる．計画電解時間t_Aから給液に要する時間t_I，及び排液に要する時間t_Oを除いた有効電解時間$t_S = t_A - t_I - t_O$が求められる．

有効電解時間t_S内に窒素除去が終了した場合（**図４**　ケースA），次バッチの電流値を減少させ，t_S内に終了しなかった場合（図４　ケースB），次バッチの電流値を増加させる．こうした条件適正化制御により，電流値の適正化を自動で図ることを実現し，過剰な電解を行うことなく，必要十分な電解時間により処理を行うことが可能となる．

（5）納入実績

（a）現在までの経緯

し尿系排水中に含まれる窒素を除去する電解脱窒素システムの初号機の運転を平成16年10月から開始した．現在も順調に運転を継続しており，窒素除去機能の安定化に大きく寄与している．

（b）適用フロー

納入したし尿処理施設での電解脱窒素システムの適用フロー，及び納入事例を**図５**，**図６**に示す．本施設では，生物処理後の生物膜透過液に適用するフローとなっている．

（c）運転実績

運転データの一例を**表３**に示す．なお，本施設では窒素除去速度を確保するために塩水を添加し，処理対象液中の塩素イオン濃度を2 000 mg/Lに調整している．

運転の結果から，アンモニアNH_4-N濃度は電解処理により直線的に減少しており，COD_{Mn}濃度も電解処理により緩やかに減少している．亜硝

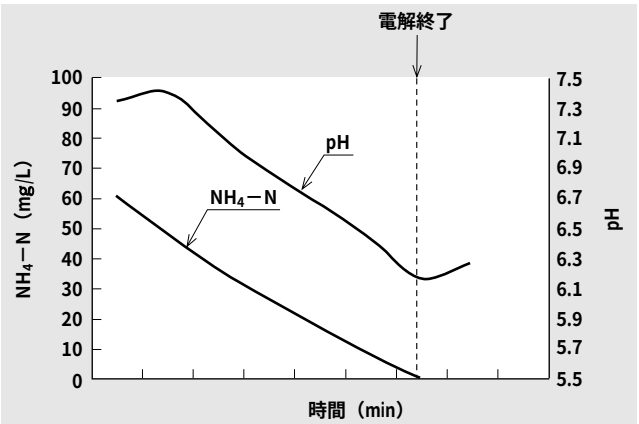


図３　電解処理における窒素（アンモニア性窒素）濃度とpHの相関

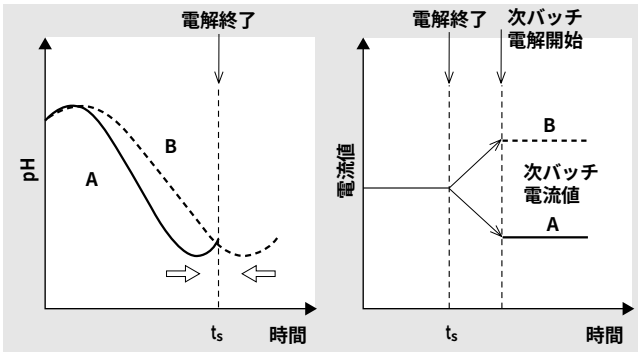


図４　pH経時変化と次バッチ電流値の設定

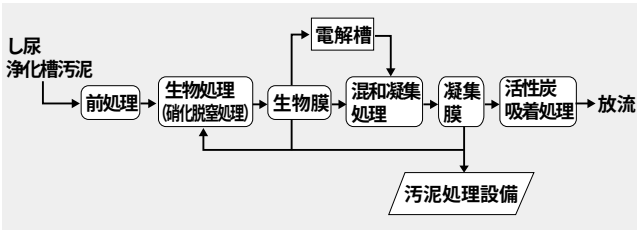


図５　適用フロー

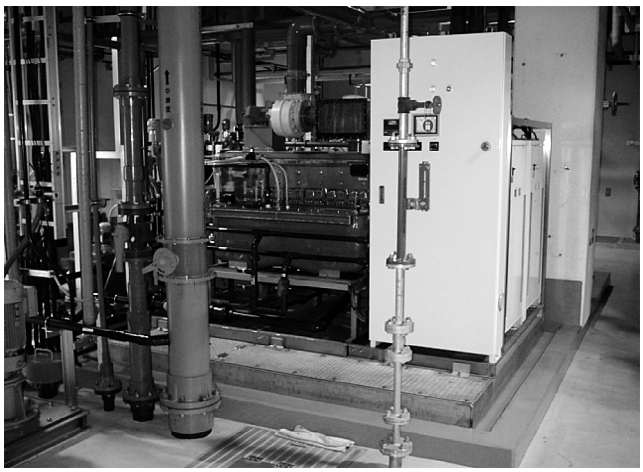


図６　電解脱窒素システム納入事例

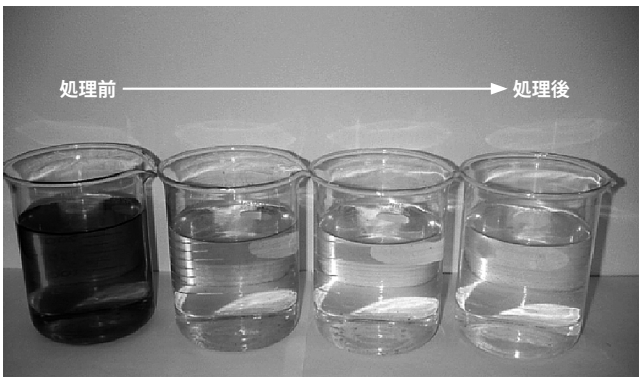


図７　電解処理による処理対象液の色変化

表３　運転データの一例（単位：mg/L）

項　目	装置入口	装置出口
NH_4－N	84.0	<0.5
NO_2－N	0.9	<0.1
NO_3－N	1.9	5.9
COD_{Mn}	129	93

酸NO_2-N，硝酸NO_3-N濃度はほぼ横ばいであり，大きな変化は認められない．

また，色度成分の分解も進行しており，電解処理前には茶色に着色している処理対象液が，電解処理後にはほぼ無色の状態になることが確認され，後段の活性炭への負荷が大幅に軽減される可能性が示唆された（**図７**参照）．

5.ま　と　め

電解脱窒素システムは優れた窒素除去機能を有しており，有機物を含む廃水に対しても，生物処理とのハイブリッド化により幅広く適用が可能である．工場廃水等の無機性廃水への適用についてはシステム，運転制御が有機性廃水と異なる点もあるが，本システム適用の範囲は広いと考えられる．

窒素除去性能は処理対象液中に含まれる共存物質や塩素イオン濃度に大きく影響を受けるため，本システムの適用に当たっては，処理対象液の性状に応じた最適な処理システムとして検討する必要がある．また，導入に当たっては，据付工事を含んだ一括契約のほか，メンテナンスや予備品の供給を含んだリース契約での対応も可能であり，環境ソリューションに向けたきめ細かい処理システムの提案を提案していくことを考えている．

水質保全の観点から窒素排出に対する法規制の強化が順次行われている中，電解脱窒素システムは窒素除去機能の強化及び安定化のためのキーテクノロジーとして普及させていきたい．また，本システムは消毒や脱色効果も期待できるとともに，ほかの物質への適用についても可能性を有しており，トータルシステムとして様々なニーズに対応する最適なシステムの提案につなげていきたい．

浅野昌道

水谷洋

中村謙治

池卓

加藤雄大