

224. 「窒素」の話

技術開発企画課長 糸川 浩紀

先日、下水処理場における窒素の動態をテーマにした講演を行いましたので、その流れで(?)、今回は「窒素」の話を書いてみたいと思います。年度の最後にして、お勉強くさい内容になっているかも知れません。また、解説記事ではありませんので、網羅的でも体系的でもなく、書きたいことだけ書きます。ご容赦を…。

「窒素」。下処理に限らず、環境問題に携わる人間にとっては古くから馴染みのある物質で、言わずと知れた水質汚濁や大気汚染の原因物質ですし、地球温暖化の文脈では、亜酸化窒素(N_2O)が強力な温室効果ガスとして広く知られるようになっていきます(かつては、 N_2O はオゾン層破壊の原因物質としても注目されていました)。窒素は、窒素ガス(N_2)として大気中に山ほど存在していますが、自然界では、そこから窒素固定→各種生物の身体/細胞→腐敗・分解→硝化→脱窒→空へ返る、という感じで循環しています(このように動き回っている、窒素ガス以外の窒素化合物を総称して「反応性窒素」と呼びます)。前述のように窒素が悪さをするのは、元々自然界で循環している反応性窒素の量に対して、人間の活動で余分に窒素ガスから流れ込んでくる窒素の量が多いから…というのはよく聞く話ですが、実際、地球全体で見ると、人為起源による窒素固定量は、自然由来の固定量に匹敵する(つまり、反応性窒素のフローが倍になってる)そうです。

一方で、窒素はタンパク質や核酸(DNAやRNA)等の構成物質として生物の必須元素です。多くの有機物には窒素が含まれますし、我々は体内で不要になった窒素を尿素として排出しますので、下水には多量の窒素が含まれます。濃度としては全窒素(T-N)で30~40 mgN/Lくらいが典型的でしょうか。これに国内の総下水量を乗じると、下水処理場に入ってくる窒素量は、50万 tN/yr弱くらいになります(もっと精緻な計算例もありますが、数字としてはだいたいこんなもんです)。国内で使用されるアンモニア(NH_3)の量が100万 tN/yr強くらいですので、相当量の窒素が下水処理場に流入していることがわかります。

下水処理場に流入した窒素を除去する技術としては、微生物による硝化・脱窒を利用した生物学的処理法(いわゆる硝化脱窒法)が広く使われています。低コスト化/省エネ化/省面積化等の改良の余地はありますが、技術的には概ね確立していると言ってよいと思います。一方、新たな微生物学的反応としてアナモックス(嫌気性アンモニア酸化)を使った窒素除去法が実用化されていますし、更に新しいコマモックス(完全アンモニア酸化)を排水処理で活用する研究も行なわれています。硝化・脱窒は19世紀から知られている古い(?)反応ですが、21世紀になっても、まだ教科書を塗り替えるような新しいヤツが出てくるん

かい！* というのは驚きです。

窒素をどうするか？ という話は、実は標準活性汚泥法のような有機物除去法においても重要です（むしろこっちの方が難易度が高いのでは？ という見解もあります）。特に、硝化の有無（促進するか抑制するか）については、これに応じて反応タンクに必要な空気量（⇒電力消費量）が大きく変わりますし、アルカリ度収支にも大きな影響を与えます†。中途半端に硝化を進めると、N-BOD（硝化由来の BOD）により放流水の BOD が跳ね上がるリスクもあります。こんなに重要なのに、硝化の有無がデフォルトで決まっていない処理法が何故に「標準活性汚泥法」？ という疑問を以前から持っていましたが、恥ずかしながら依然としてこの命名の由来を知りません（どなたかご存知の方がいらっしゃいましたら、ご教示ください…。）ちなみに、日本で言う「標準活性汚泥法」にピッタリ当てはまる概念が、英語には見当たりません。「conventional activated sludge (CAS)」を充てることが多いですが、こちらは、有機物除去を行うフツの旧来の活性汚泥法、くらしいニュアンスで使われることが多く、日本の「標準活性汚泥法」のように特定の処理法を指す用語ではないと理解しています。

話が大きいに逸れましたが（「よもやま」なもので…）、こんな感じで、我々は窒素を「処理する対象」、「何とかしなければいけない厄介なやつ」として長らく扱ってきたわけですが、最近の脱炭素の文脈において、アンモニアの価値が見直されるようになっていきます。水素エネルギーの貯蔵/輸送媒体（エネルギーキャリア）として取り扱いが容易なアンモニアを使う、あるいは、発電や工業炉でアンモニア自体を燃料として使う、という話です。後者ではアンモニア発電、というタームがよく出てきますが、アンモニアの燃焼では二酸化炭素が出ない（一部が NOx には行ってしまいたいですが）という点が謳い文句になっています。ただ、アンモニアの製造過程でのエネルギー消費（有名なハーバー・ボッシュ法ですね）や供給量（まともに発電所でアンモニアを混ぜ始めると現在の供給量では全然足りない）が課題のようですので、下水処理場のように大量の窒素が集まってくる場所では、アンモニアの回収という話も当然出てきます。

下水処理過程でのエネルギーや資源の回収というと、前処理（現行の最初沈殿池）での有機物や固形物の回収率を上げて…、というアプローチが出发点になることが多いですが、窒素の場合、下水では 7~8 割がアンモニアで入ってきますので、固形物を頑張って回収しても回収率が上がりません。生物処理を経た余剰汚泥から窒素が回ってきますが、現行の水処理プロセスのままでは、生汚泥と余剰汚泥を合せても、流入窒素量の半分も回収でき

* アナモックス(anammox: **anaerobic ammonium oxidation**)は、アンモニア (NH₄-N) と亜硝酸 (NO₂-N) が「アナモックス細菌」により窒素ガスと少量の硝酸 (NO₃-N) へ変換される反応で、「反応性窒素は最後は脱窒を経て窒素ガスに戻る」という窒素サイクルのルートを塗り替えました。また、コマモックス (**complete ammonia oxidation**) は、亜硝酸酸化細菌の一種が NH₄-N を NO₃-N にまで酸化する反応で、「硝化は 2 種類の微生物群による 2 段階の反応である」という我々の常識を塗り替えました。

† 仮に 30 mgN/L の NH₄-N が完全に硝化（だけ）されると、化学両論的にはアルカリ度が 214 mgCaCO₃/L 消費されます。日本の一般的な下水では速攻でアルカリ度が枯渇します。

ないはずですが。下水が持つエネルギーとして、有機物に加えて窒素も回収しようとする、イオンとして溶存しているアンモニアを回収するところが重要なポイントになりそうです。

我々のところでは、来年度から、新たな5ヶ年度計画「JS技術開発・活用基本計画2022」に基づき、次のステップの技術開発を進めていくこととなります。本計画の重要なキーワードが「脱炭素」で、上述のような観点も含めて、現在の下水処理を根本的に変革するような「カーボンニュートラル型下水処理システム」の検討も始めますので、今後の成果にご期待ください…。