

下水道資源としてのアンモニアの有効利用の可能性検討

矢本貴俊・松橋 学・田嶋 淳

1. はじめに

近年、地球温暖化の顕在化や世界的な資源・エネルギー需要の逼迫が懸念され、循環型社会への転換、低炭素社会の構築が求められている。下水道事業においても、従来の下水を排除・処理する一過性のシステムから、集めた物質等を資源・エネルギーとして活用・再生する循環型システムへと転換することが必要である。

下水処理場では、消化汚泥の脱水工程から発生する消化汚泥脱水ろ液（以下「脱水ろ液」という。）に高濃度のアンモニアが含まれている¹⁾。アンモニアは、尿素としての肥料利用をはじめとして、アンモニア水として廃棄物焼却処理工程で発生するNO_x抑制のための脱硝剤利用や、近年研究開発が進められているアンモニア燃料としてのエネルギー利用等、利用用途は多岐にわたる²⁾。しかし、その回収技術は導入コストが嵩むこと等から、下水道事業では、下水道資源としてのアンモニアの回収可能量や有効利用用途に関する知見がない中で、一般的に回収・有効利用されていない状況にある。

このため、国総研では、下水道資源としてのアンモニアの有効利用の可能性を検討するため、①下水汚泥の脱水ろ液からのアンモニア回収実験、②下水道資源としてのアンモニアの回収可能量の推定、③有効利用の用途検討を平成28・29年度の2年間にわたり実施した。本稿では、その結果を報告する。

2. 下水汚泥の脱水ろ液からのアンモニア回収実験

2.1 アンモニア回収技術と実験の概要

液体に含まれるアンモニアを分離回収する技術としてアンモニアストリッピング法がある。本手法は、アンモニア態窒素を含む水のpHを高めて遊離のアンモニアとし、大気と十分接触させて液

相から気相に追い出す方法である。既往の研究では、高水温・高pHの条件下においてアンモニア回収効率は高いと報告されている³⁾が、下水汚泥に適用した場合の報告事例は少ない。そこで、本研究では下水汚泥の脱水ろ液に本手法を適用した場合のアンモニアストリッピング反応の経時変化や回収効率、回収率について分析した。

2.2 実験方法

2.2.1 試料

実験用試料として、A処理場の脱水ろ液を採取した。採取した脱水ろ液の分析結果を表-1に示す。

2.2.2 実験装置

アンモニア回収実験装置の概要を図-1に示す。水酸化カルシウム溶液（1mol/L）によりpH調整した脱水ろ液（1L）を2Lのサージタンク（アンモニアストリッピングタンク）に入れ、ウォーターバスにより加温する。アンモニアストリッピング反応が進み、槽から排出されたアンモニアガスは気体サンプリングポートを経由し、捕集びん（500ml）にて硫酸液と反応し中和される。

2.2.3 分析項目

各項目の分析は下水試験方法に準拠し、アンモニアストリッピングタンク槽における水温[°C]、pH、EC[S/m]、SS[mg/L]、NH₄-N[mg/L]、PO₄-P[mg/L]、SO₄²⁻[mg/L]、溶存態Fe[mg/L]及び溶存態Ca[mg/L]を測定した。また、気体サンプリ

表-1 脱水ろ液の分析結果

	温度 (°C)	pH	EC (S/m)	SS (mg/L)	NH ₄ -N (mg/L)	PO ₄ -P (mg/L)	D-Fe (mg/L)	D-Ca (mg/L)	SO ₄ ²⁻ (mg/L)
脱水ろ液	33.2	7.15	0.677	1130	840	33	5.81	32.1	514

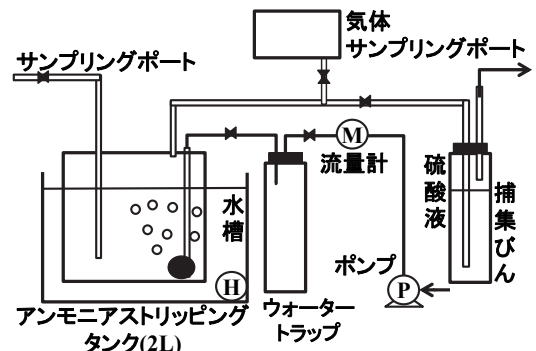


図-1 実験装置概要

ングポートにおけるアンモニアガス濃度[ppm]をガス検知管により測定した。各分析項目について、測定時間を24時間としてアンモニアストリッピング反応の経時変化を分析した。

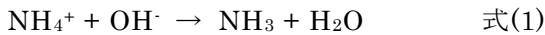
2.2.4 実験条件

実験条件を表-2に示す。水温はウォーターバスにより定常とし、初期pHは脱水ろ液に水酸化カルシウム溶液（1mol/L）を加えることにより調整した。水温（3通り）とpH（2通り）の組み合わせにより、合計6通りの条件にてアンモニア回収実験を行った。

2.3 実験結果及び考察

本手法により脱水ろ液から分離回収したアンモニアガス濃度を図-2に示す。回収アンモニアガス濃度のピーク値については、{水温70℃・pH12}条件における反応開始から1時間経過後において約6,500ppmであり、他の実験条件と比較し最も高い値を示していた。既往の研究報告のとおり、高温・高pHの条件下において、アンモニアの回収効率が高いことを確認した。

アンモニアストリッピング反応は式(1)で表される。反応の進行に伴い液相の水酸化物イオン濃度が減少するため、液相のpHは低下する。



アンモニアストリッピング槽におけるpHの経時変化を図-3に示す。最も回収アンモニアガス濃度が高い値を示していた{水温70℃・pH12}条件においては、実験開始直後からpHが低下し、実験開始から12時間後まででpHは8.7程度まで低下し、その後大きな変化は見られなかったことから、アンモニアストリッピング反応は概ね終了したものと考えられる。

アンモニアストリッピング槽におけるNH₄-N濃度の経時変化を図-4に示す。{水温70℃・pH12}条件における反応開始から6時間経過後のNH₄-N濃度は93.4mg/Lであり、初期のNH₄-N濃度（768.4mg/L）に対し87.8%のアンモニアが脱水ろ液より除去されたことがわかる。

また、液体アンモニア回収率は反応開始前の脱水ろ液のアンモニア重量及び反応終了後における捕集びん内のアンモニア重量の比率で表される。{水温70℃・pH12}条件における液体アンモニア回収率は表-3に示す通り、94%であった。

表-2 実験条件

水温(°C)	30,50,70
初期pH	9,12
送風量	0.5 NL/min
反応時間	24 hour

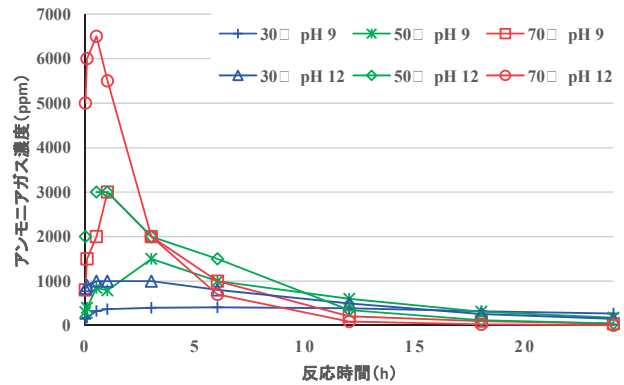


図-2 気体サンプリングポートにて回収したアンモニアガス濃度の経時変化

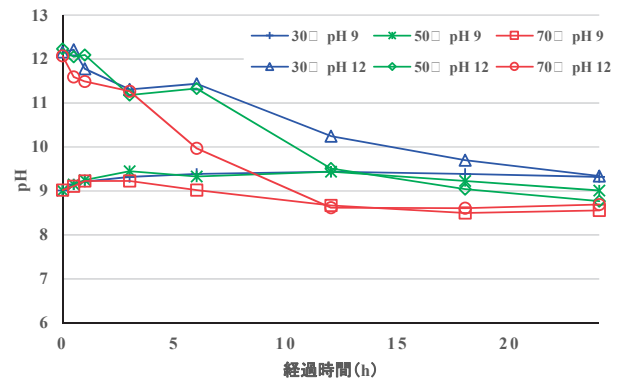


図-3 アンモニアストリッピング槽におけるpHの経時変化

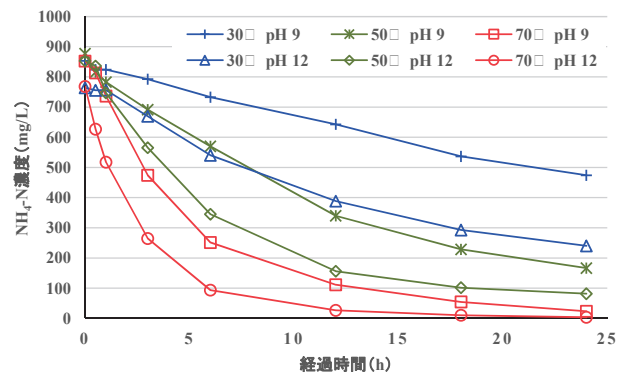


図-4 アンモニアストリッピング槽におけるNH₄-N濃度の経時変化

表-3 アンモニア回収率

測定対象 (反応前後)	液量 (ml)	液体アンモニア 濃度(mg/L)	回収率 (%)
脱水ろ液(前)	1000	785	94%
捕集びん(後)	650	1137	

3. 下水道資源としてのアンモニアの回収可能量の推定

3.1 アンモニア回収可能量の推定の概要

下水処理場の脱水ろ液に含まれるアンモニアについて、前節のアンモニア回収実験の結果及び下水道統計を用いて、下水道資源としてのアンモニアの回収可能量の推定を行った。

3.2 推定方法

下水道統計（2015年度版）⁴⁾に記載の全国の処理場諸元等を整理し、我が国における消化汚泥の年間発生量[m³/年]、消化汚泥の平均含水率[%]、脱水汚泥の平均含水率[%]を表-4の通りまとめた。これらの値とアンモニア回収実験より得られた脱水ろ液のアンモニア濃度[mg/L] (C₁)、アンモニア回収率 (R_{ansi}) を用いた以下の式(2)～式(4)を用いることにより、年間のアンモニア回収可能量[t/年] (V_{ammonia}) を算定した。

$$R_{dewater} = 1 - \frac{1 - w_{digest}}{1 - w_{dewater}} \quad \text{式(2)}$$

$$R_{recover} = \frac{C_1 - C_0}{C_1} \times R_{ansi} \quad \text{式(3)}$$

$$V_{ammonia} = V_{sludge} \times R_{dewater} \times C_1 \times R_{recover} \quad \text{式(4)}$$

なお、式中のR_{dewater}は消化汚泥発生量に対する脱水ろ液の発生割合であり、R_{recover}は消化汚泥発生量に対するアンモニアの回収率を示す。

式(2)～式(4)の各値については、表-4中の各値及びアンモニア回収実験より得られた値を用いて推定した。C₁については、処理場Aの脱水ろ液のアンモニア濃度840mg/L（各地の8箇所の下水道処理場へ実施したアンケート調査結果と大きな差異は無かった）を、R_{ansi}についてはアンモニア回収率94%を適用した。また、C₀は既存のアンモニアストリッピング施設における排出液の設計値（100mg/L）である⁵⁾。

3.3 推定結果及び考察

推定の結果、全国の処理場で発生する消化汚泥の年間発生量に対するアンモニアの回収可能量は約12,443t/年となった。

国内におけるアンモニア生産量・輸入量の統計値を図-5に示す⁶⁾。全国の処理場で発生する消化汚泥の年間発生量に対するアンモニアの回収可能量は、海外からのアンモニア輸入量（約20万t/年、2015年）に対し約6.2%に値する。

4. 有効利用の用途検討

4.1 アンモニア製造メーカーへのヒアリング調査

下水道資源としてのアンモニアの有効利用の可能性を検討するにあたり、まずはアンモニア有効利用の用途別の要求品質に関して、アンモニア製造メーカー1社へヒアリング調査を行った。

表-5に示す通り、脱硝剤は肥料やアンモニア燃料等と比較し品質に対する要求が少なく、回収したアンモニアを加工することなく直接的に使用可能である。そのため、下水道資源としてのアンモニアの有効利用の用途として、下水処理場の汚泥焼却・溶融施設におけるNO_x抑制のための脱硝剤について検討した。

4.2 下水処理場へのアンケート調査

下水処理場においては、汚泥焼却・溶融のプロセスで有機物を燃焼する際に発生するNO_x抑制のため脱硝剤が使用される⁷⁾。下水処理場の汚泥焼却・溶融施設における脱硝剤の全国的な利用実態を把握するため、汚泥焼却施設・汚泥溶融施設を有している全国の下水道処理場139箇所（焼却：265基、溶融：21基）を対象にアンケート調査を行った。

表-4 下水道統計に基づく消化汚泥の年間発生量、消化汚泥の平均含水率、脱水汚泥の平均含水率

下水道処理場数(処理方式:消化→脱水)	331
V _{sludge} :消化汚泥年間発生量[m ³ /年]	18,147,869
w _{digest} :消化汚泥平均含水率[%]	96.4
w _{dewater} :脱水汚泥平均含水率[%]	80.1

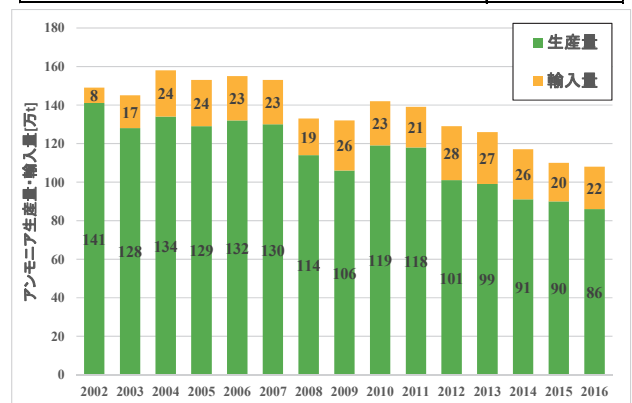


図-5 国内におけるアンモニア生産量・輸入量の年間推移

表-5 要求品質に関するヒアリング調査結果

項目	要求品質
肥料	有害物質が含まれないこと※肥料取締法
アンモニア燃料	純度99%以上、不純物が含まれないこと
化学繊維	純度99.9%以上、不純物が含まれないこと
脱硝剤	特別な規格は無い

脱硝剤の利用実態に関するアンケート調査結果を図-6に示す。焼却炉については、利用率が低いものの、焼却・溶融いずれにおいても脱硝剤を利用している処理場が存在するため、下水道資源としてのアンモニアを下水処理場において脱硝剤として有効利用が可能である。また、施設数あたりの脱硝剤の利用率は、高温処理する汚泥溶融施設の方が高いという結果が得られた。

また、脱硝剤の年間使用量は、脱硝剤を利用している19基の合計で約192t/年であった。前節のアンモニア回収可能量の推定結果と比較し、下水処理場においては、下水道資源としてのアンモニアで賄うことが可能である。

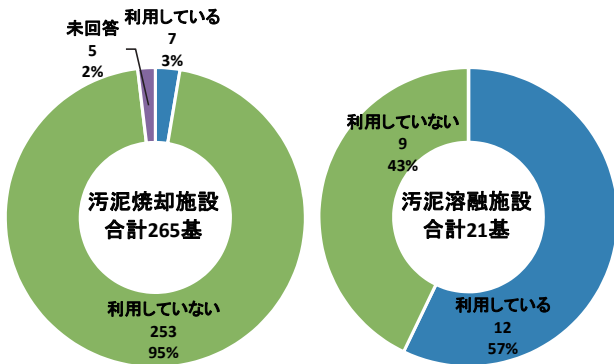


図-6 脱硝剤の利用実態に関するアンケート調査結果
(右：汚泥焼却施設、左：汚泥溶融施設)

5. まとめ

アンモニア回収実験により、高温・高pH条件においてアンモニア回収効率が高くなることを確認し、脱水ろ液中のアンモニアを94%回収できることを示した。下水道資源としてのアンモニアの回収可能量をアンモニア回収実験結果及び下水道統計を用いた推定した結果、アンモニアの回収可能量は約12,443t/年であることを推定した。

また、有効利用の用途検討としてアンモニア製造メーカーへヒアリングした結果、脱硝剤であれば品質に対する要求が少なく、回収したアンモニア

を加工することなく直接的に使用可能であることがわかった。ヒアリング結果を踏まえ、全国の汚泥焼却・溶融施設を有する処理場へのアンケート調査を行った結果、下水処理場における脱硝剤の年間使用量は約192t/年であるため、下水処理場においては、下水道資源としてのアンモニアで賄うことが可能であることが推測された。

今後、アンモニア回収技術を下水処理場へ導入するためには、コスト（建設費、維持管理費）やアンモニア回収・有効利用の収益性等、経済的な視点を含めたアンモニアの有効利用について調査する必要がある。

謝 辞

本研究の実施にあたり、脱水ろ液の採取にご協力頂いたA処理場、ヒアリング・アンケート調査にご協力頂いたアンモニア製造メーカー・下水処理場の各関係者の皆様に深く感謝いたします。

参考文献

- 1) 社団法人日本下水道協会：下水道施設設計指針と解説 後編、p.310、財団法人日本下水道協会、2009
- 2) 平井晴己、呂正、高木英行、村田晃伸：アンモニアの需要および輸入価格の現状について-アンモニアのエネルギー利用に関する予備的調査-、一般財団法人日本エネルギー経済研究所HP、https://eneken.ieej.or.jp/report_detail.php?article_info_id=6317、2015
- 3) 村田恒雄：下水の高度処理技術-快適な水環境の創出に向けて-、理工図書、pp.139~147、1992
- 4) 社団法人日本下水道協会：平成27年度下水道統計、Vol.72、2017
- 5) 窪田光一：アンモニアストリッピング法を用いた脱水分離液処理設備の実稼働運転報告、第43回下水道研究発表会講演集、pp.719~721、2007
- 6) 日本肥料アンモニア協会、アンモニア需給実績、日本肥料アンモニア協会HP、<http://www.jaf.gr.jp/>
- 7) 鶴殿秀夫：汚泥焼却炉排ガスの脱硝脱臭装置、月刊下水道、Vol.20、No.14、pp.75~77、1997

矢本貴俊



国土交通省国土技術政策総合研究所下水道研究部下水処理研究室 研究官
Takatoshi YAMOTO

松橋 学



国土交通省国土技術政策総合研究所下水道研究部下水処理研究室 研究官
Manabu MATSUHASHI

田嶋 淳



国土交通省国土技術政策総合研究所下水道研究部下水処理研究室 室長
Atsushi TAJIMA