

第2回窒素循環シンポジウム

窒素循環に関する世界的課題と日本における取組み

窒素循環に関わる国内のステークホルダー連携の
促進を図ると共に、一般市民に窒素の問題を
知っていただく場を提供する。

2022.11.21

[Monday] 13:00-17:00

ハイブリッド開催

会費無料
要事前登録



現 地：主催者および発表者
東京大学生産技術研究所コンベンションホール
オンライン：一般聴講者 Zoom 利用

シンポジウム公式 HP
<https://www.n-cycle.jp/events/symposium20221121/>

ご登録はこちらから



PROGRAM

開会のあいさつ

遠藤 明 (産業技術総合研究所 研究戦略企画部 次長/
資源循環利用技術研究ラボ ラボ長)

三輪田 祐子 (経済産業省 産業技術環境局
エネルギー・環境イノベーション戦略室 室長)

【窒素循環に関するプロジェクトの紹介】

林 健太郎 (総合地球環境学研究所 教授/
農業・食品産業技術総合研究機構 農業環境研究部門 主席研究員)

川本 徹 (産業技術総合研究所 首席研究員)

特別講演

地域循環共生圏を創出させる価値観、「和食」

尾藤 環 (辻調理師専門学校 企画部部長)

【講演】

国内の窒素政策と世界の動向

仁科 一哉 (国立環境研究所 主任研究員)

【窒素循環技術開発の取り組み1】

deNOx から reNOx へ

～燃焼排ガス中の NOx を利用したアンモニア生成触媒プロセス開拓

小倉 賢 (東京大学 教授)

廃水中窒素化合物のアンモニア変換技術

堀 知行 (産業技術総合研究所 主任研究員)

【窒素循環技術開発の取り組み2】

水中アンモニアの濃縮・資源化技術

松山 秀人 (神戸大学 教授)

窒素循環プロセスシステムの合成・評価

松本 秀行 (東京工業大学 准教授)

【パネルディスカッション】

【ファシリテータ】

林 健太郎 (地球研 教授/農研機構 農業環境研究部門 主席研究員)

【パネリスト】

尾藤 環 (辻調理師専門学校 企画部部長)

西條 辰義 (高知工科大学フューチャー・デザイン研究所 所長/
総合地球環境学研究所 名誉フェロー)

原田 久富美 (農業・食品産業技術総合研究機構
本部 NARO 開発戦略センター センター長)

仁科 一哉 (国立環境研究所 主任研究員)

川本 徹 (産業技術総合研究所 首席研究員)

閉会のあいさつ

小倉 賢 (東京大学 教授)

主催 産業技術総合研究所

共催 東京大学/NEDO/地球研/国環研/農研機構

協賛 神戸大学/東京工業大学

〔連絡先〕 MSN事務局 (ムーンショット事業窒素循環PJ事務局/PM 川本徹) M-msn_secretariat-ml@aist.go.jp



第2回 窒素循環シンポジウム
窒素循環に関する世界的課題と日本における取り組み

日程：2022年11月21日(月) 13:00～17:00

場所：ハイブリッド開催

現地：東京大学生産技術研究所コンベンションホール

https://www.u-tokyo.ac.jp/campusmap/cam02_04_09_j.html

オンライン：zoom 利用

発表者・主賓は現地、一般聴講者はオンライン

会費・登録方法：無料、下記にて要事前登録

https://u-tokyo-ac-jp.zoom.us/webinar/register/WN_nyL7uRBLTCiLRXo4pNebNA

趣旨：窒素循環に関わる国内のステークホルダー連携の促進を図ると共に、一般市民に窒素の問題を知っていただく場を提供する。

主催：産業技術総合研究所

共催：東京大学、新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)、総合地球環境学研究所、国立環境研究所、農業・食品産業技術総合研究機構

協賛：神戸大学、東京工業大学

～プログラム～

13:00-13:20 【開会の挨拶】

産業技術総合研究所 研究戦略企画部 次長 兼 資源循環利用技術研究ラボ ラボ長 遠藤明
経済産業省 産業技術環境局 エネルギー・環境イノベーション戦略室 室長 三輪田祐子

13:20-13:30 【窒素循環に関するプロジェクトの紹介】

総合地球環境学研究所(地球研) 教授 / 農業・食品産業技術総合研究機構(農研機構)
農業環境研究部門 主席研究員 林健太郎
産業技術総合研究所 首席研究員 川本徹

13:30-13:55 【特別講演】地域循環共生圏を創出させる価値観、「和食」

辻調理師専門学校 企画部部長 尾藤環

13:55-14:20 【講演】国内の窒素政策と世界の動向

国立環境研究所 主任研究員 仁科一哉

14:20-15:00 【窒素循環技術開発の取り組み(1)】

deNOx から reNOx へ ～燃焼排ガス中の NOx を利用したアンモニア生成触媒プロセス開拓
東京大学 教授 小倉賢

廃水中窒素化合物のアンモニア変換技術

産業技術総合研究所 主任研究員 堀知行

15:00-15:20 休憩・時間調整

15:20-16:00 【窒素循環技術開発の取り組み(2)】

水中アンモニアの濃縮・資源化技術

神戸大学 教授 松山秀人

窒素循環プロセスシステムの合成・評価

東京工業大学 准教授 松本秀行

16:00-16:55 【パネルディスカッション】

ファシリテーター

・地球研 教授 / 農研機構 農業環境研究部門 主席研究員 林健太郎

パネリスト

・辻調理師専門学校 企画部部長 尾藤環

・高知工科大学フューチャー・デザイン研究所 所長 / 総合地球環境学研究所 名誉フェ
ロー 西條辰義

・農業・食品産業技術総合研究機構 本部 NARO 開発戦略センター・センター長
原田久富美

・国立環境研究所 主任研究員 仁科一哉

・産業技術総合研究所 首席研究員 川本徹

16:55-17:00 【閉会の挨拶】

東京大学 教授 小倉賢

以上

地球研プロジェクト「人・社会・自然をつないでめぐる窒素の持続可能な利用に向けて」 (Sustai-N-able) (RIHN14200156) の紹介

林 健太郎（総合地球環境学研究所／農業・食品産業技術総合研究機構）

窒素はタンパク質や核酸塩基などの生体分子に必須の元素である。地球大気の 78% は窒素ガス (N_2) であるが、人類を含む生物の多くは安定な N_2 をできず、 N_2 以外の形の窒素（反応性窒素, Nr）を必要とする。食事とはタンパク質として窒素を摂取する手段でもある。限られた土地から多くの食料を得るには肥料となる Nr が必要である。20 世紀初期に実現したアンモニア人工合成技術（ハーバー・ボッシュ法）は望むだけの Nr を手に入れることを可能にした。合成した Nr は肥料に加えて工業原料にも用いられ、人類に大きな便益を与えている。一方、人類が利用する Nr の大半が反応性を有したまま環境へと排出されている。特に食料システムの窒素利用効率 (NUE) が低い。食料生産の NUE が低いことに加え、NUE が相対的に低い畜産物を好むことや食品ロスといった消費面の課題もある。化石燃料などの燃焼も窒素酸化物などの Nr の排出源となる。環境への Nr 排出の結果、地球温暖化、成層圏オゾン破壊、大気汚染、水質汚染、富栄養化、酸性化などの多様な窒素汚染が生じ、人と自然の健康に被害を及ぼしている。窒素利用の便益が窒素汚染の脅威を伴うトレードオフを「窒素問題」と呼ぶ（林ほか, 2021）。本プロジェクトは、食料生産の肥料、工業生産の原料、エネルギー生産の燃料、そして、食料・モノ・エネルギー消費の全てを対象として、窒素問題を解決に導き、将来世代の持続可能な窒素利用を実現することを目的とする。窒素利用の便益と窒素汚染の脅威の実態を解明し、将来シナリオを構築した上で、窒素問題を解決して豊かで公平な食および人と自然の健康——持続可能な窒素利用——を実現するための学際・超学際知を創出していくことを狙い、以下の 3 つのブレイクスルーを目指す：①は窒素利用と窒素汚染の因果関係の定量解析を可能とするツールの開発、②他の地球環境問題と比べて十分に知られていない窒素問題の認識の浸透、③持続可能な窒素利用を実現するための将来設計の実践。これらを成し遂げるために、自然・社会科学の研究者および食文化の専門家など多分野のメンバーが集い、自然の窒素循環と生態系応答の解明、人間社会の窒素循環の解明と将来シナリオ構築、窒素の社会的費用の計測、窒素利用の費用便益評価、各種教育機会の作出、および、持続可能な窒素利用のフューチャー・デザインなどに取り組んでいる（地球研, 2022）。国内外の関連プログラム・プロジェクトとの連携を重視している。例えば国際連携については、プロジェクトリーダーは国連環境計画（UNEP）が推進する国際窒素管理プロジェクト（INMS, 2022）に貢献しつつ、最終成果物の国際窒素評価書（2023 年 6 月発刊予定）の編著に携わっている。また、2022 年 11 月より専門家グループである国際窒素イニシアティブ（INI, 2022）の東アジア地域センターの代表を担うこととなり、国内外の専門家のつながりの強化に一層努めていく所存である。

引用文献

地球研（2022）Sustai-N-able プロジェクト。要覧 2022, 総合地球環境学研究所, 30-31.

林健太郎・柴田英昭・梅澤有（編著）（2021）図説 窒素と環境の科学—人と自然のつながりと持続可能な窒素利用—。朝倉書店, 192p.

INI (2022) International Nitrogen Initiative ウェブサイト, <https://initrogen.org/>

INMS (2022) International Nitrogen Management System プロジェクトウェブサイト, <https://www.inms.international/>

窒素循環に関するプロジェクトの紹介

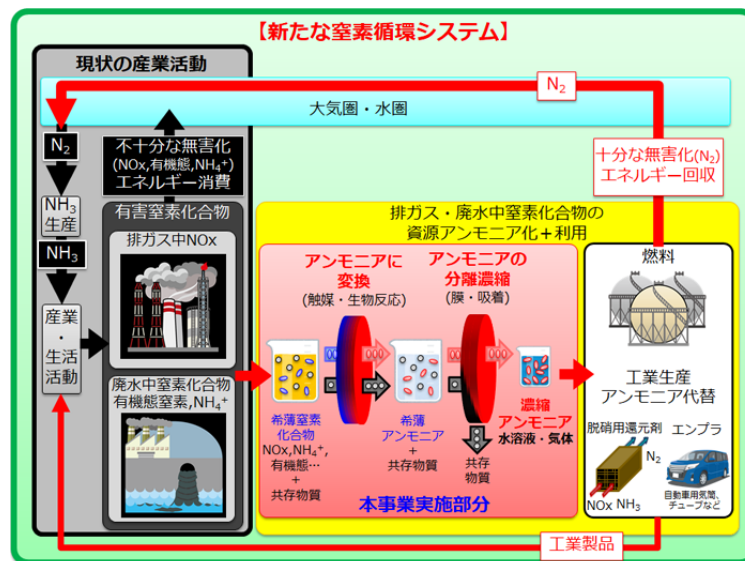
ムーンショット型研究開発事業 産業活動由来の希薄な窒素化合物の循環技術創出

産業技術総合研究所 川本徹

当プロジェクトは、人為活動に由来する有害な窒素化合物の無害化・資源化を実現するための「革新的な窒素循環技術」の確立を目指しています。産業・生活活動の結果発生する排ガス、廃水には、有害な窒素化合物が含まれています。現在、その無害化に大量なエネルギーを消費しており、十分な処理がなされない場合もあります。プラネタリーバウンダリーの議論では、窒素化合物は CO_2 やリン等以上に、その限界を大きく超えており、環境汚染の深刻な課題となっています。私たちは、「人間が利用できるアンモニア量を大きく減らすことなく窒素化合物排出量を削減する方法を確立」するため、排ガス中 NO_x ・廃水中窒素化合物を、アンモニア資源として利用できる形態に変換する技術を確立します。この技術により、排ガス・廃水中窒素化合物の環境排出、処理に要するエネルギー消費を共に大きく改善することが期待されます。

排ガスについては、 NO_x を環境汚染物質として無害化後に大気放出するのではなく、「 NO_x を有価資源である NH_3 に変換する NTA(NO_x to Ammonia)変換技術」の実現を目指します。廃水については、 NH_4^+ に加え、窒素成分の大部分を占める有機性の窒素化合物(有機態窒素)もアンモニア資源として変換・回収するため、「 NH_4^+ 変換技術」と「超省エネ型 NH_4^+ 分離濃縮」を連結した一連のシステムを開発します。これにより、活性汚泥法等既存技術での処理に比べ、処理に必要なエネルギー消費を大きく削減することもできます。

【プロジェクト HP】 <https://www.n-cycle.jp/>



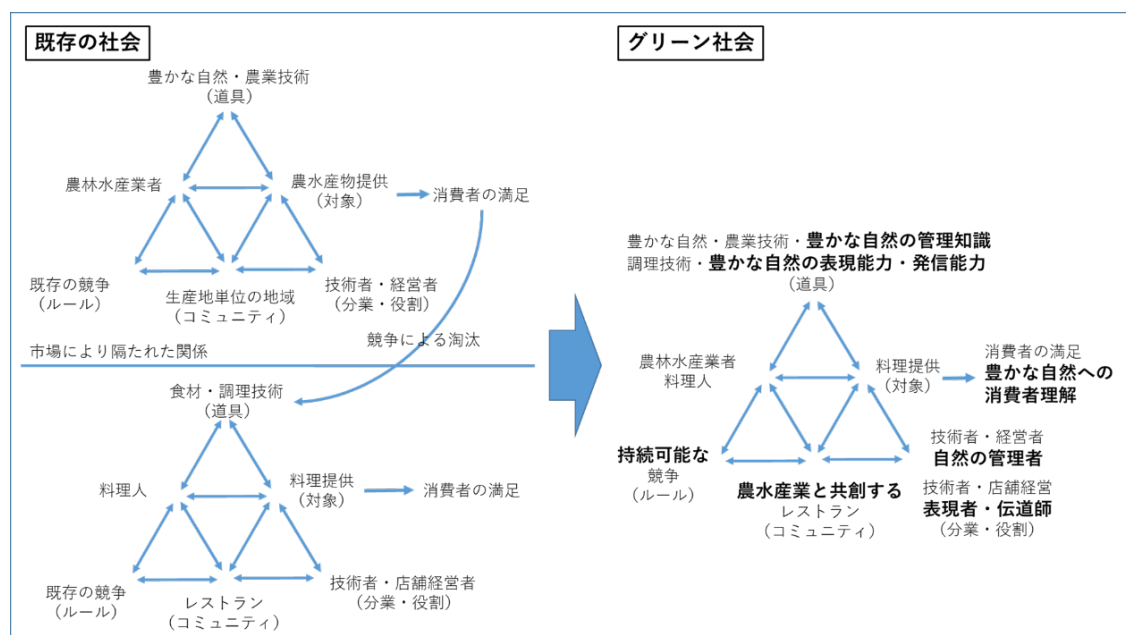
講演要旨

地域循環共生圏を創出させる価値観、「和食」

辻調理師専門学校 企画部部长 尾藤環

辻調理師専門学校を中心とした辻調グループは、大阪・東京・フランスの教育拠点を中心に、料理人やパティシエなどの育成をおこなっている。学生の約半数は、通学圏外から入学し、留学生は 300 名を超える。そのため、フランスを中心とした欧州のレストラン動向に明るく、米国や韓国、タイなどの教育機関とも交流がある。一方では、地方からの出身者が多く、古くから地方創生にも尽力している。本講演では、グローバルな活動を展開する職業教育の視点から、1970 年代からの国際社会での食の価値観の変化を捉え、グリーン社会・地域循環共生圏の実現に向けての日本の課題と国際社会でのイニシアティブについて概説する。1973 年、フランスにて「ガストロノミーマニフェスト」が掲げられる。この頃より日本と国際社会との食の価値観にはギャップが生じ始めている。そして、東京オリンピックでは、私たちは大きくなった国際社会とのギャップに直面し、パンデミック下でグリーン社会へと舵を切った国際社会に食料政策において大きく後れをとる。一方、2013 年にユネスコの無形文化遺産に「和食」が登録される。この保護対象となった「和食」は、欧州を中心とした国際社会が目指している美食の価値観と合致し、先行事例として映る。私たちは「和食」を保護するのではなく、活用・創造へと利用することで、国際社会をリードできる可能性を広げることができる。国際社会の歴史と「和食」の本質と向き合うことで、既存の社会からグリーン社会への変容の道筋が見えてくる。フードシステムにて働く人たちの新しい役割、グリーンジョブへの変容、グリーンスキルの開発について、辻調理師専門学校の取り組みを紹介する。

既存の社会からグリーン社会への変容、フードシステムにおける役割の変化



要旨

第4回と第5回の国連環境計画（UNEA）において、持続可能な窒素の利用に関する決議（4/14, 5/2）が採択され、既にプラネタリーバウンダリー（地球臨界点）を超えた状態にある世界規模の人為的窒素負荷を解消するために、反応性窒素の排出削減に取り組む必要があることが明記された。目標達成のために反応性窒素に関わる既存の条約（生物多様性条約、長距離越境大気汚染条約、気候変動枠組条約、他）を連携させる国際組織の設立などが議論されている。こうした国際的な動きに先んじて EU は廃棄窒素問題への取り組みに積極的に行っており、2019年のEUグリーンディールにおける Farm to Folk 戦略において、2030年までに化学肥料使用の25%削減を目標とした。これに加えて農作物の窒素利用効率をあげることによって、環境中への窒素負荷削減の半減を目指している。EU加盟国のオランダでは、2030年までに窒素負荷削減の半減のために畜産頭数を三分の一まで削減させるといふ、かなり厳しい計画をたてた。東アジア最大の化学肥料消費国である中国では2010年代後半から、2020年までに化学肥料の使用量増加ゼロの達成を目指した政策を打ち出しており、2020年からは削減フェーズに入ることを目的としているが、すでに国内の窒素化学肥料の使用量は減少に転じてきているとの報告もある。2030アジェンダに向けて、他の環境汚染物質と同様に、反応性窒素も環境中へのロスを積極的に削減する方向へと転換点を迎えている。日本では2000年代に入ってから環境中への反応性窒素ロスが減っていることが明らかになっている（Hayashi et al., 2021）。これは主として移動汚染源からのNO_x排出が低NO_x技術の普及によって低下したためである。また、みどりの食料システム戦略において2050年までに化学肥料の30%削減を掲げており、反応性窒素に削減に向けて動き出しつつある。その一方で、NH₃燃料といった排出源になりうる新規窒素需要も見込まれている。

以上のように、各国で削減に向けた政策が実施され始めている状況であるが、その対策は依然として十分ではなく、UNEAの窒素決議（4/12）の中では、各国の既存の窒素に関する環境政策について“窒素循環に関する分野間の支離滅裂なアプローチが、様々な形態の窒素汚染間の不明確なトレードオフをもたらしている”と指摘がなされている。多くの国の政策は、個別の窒素種の排出や個別の環境媒体に着目したものが多く、例えば、現行の政策の多くが、窒素汚染が同時に複数の環境影響をもたらすことを考慮しておらず、政策が主に水質・水域保全に集中していることを指摘されている（Kanter et al., 2020）。講演者らは、これまでに日本の窒素政策についてまとめており、日本においても同様の状況であることを確認した。複数媒体、複数窒素種を扱うための統合的な管理/政策が必要とされている。講演では、日本の現状をまとめ、これからの窒素管理についての議論の一助になる情報を提供したい。

deNOx から reNOx へ

燃焼排ガス中の NOx を利用したアンモニア生成触媒プロセス開拓

小倉 賢

東京大学生産技術研究所（東京都目黒区駒場 4-6-1）

oguram@iis.u-tokyo.ac.jp

講演要旨

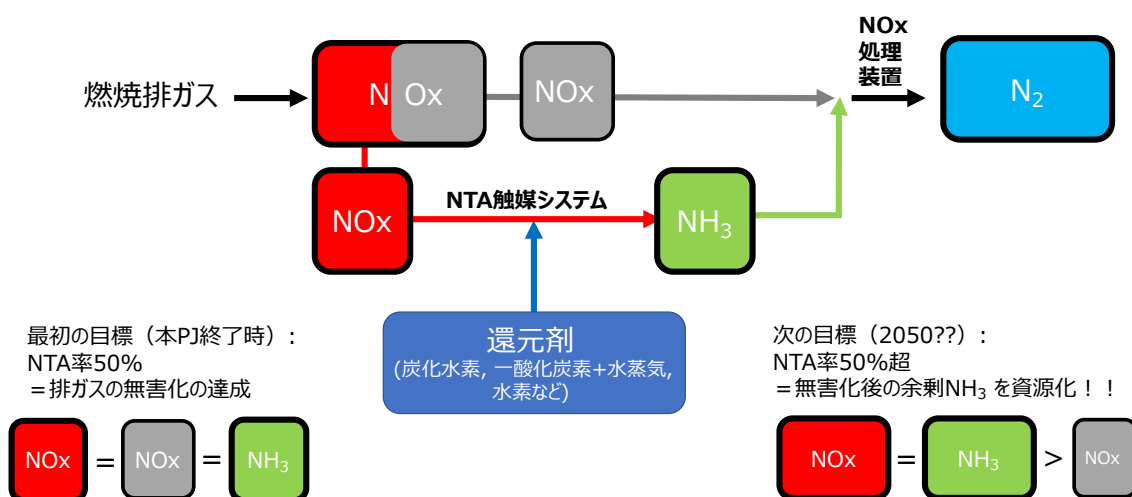
内燃機関から排出される窒素酸化物（NOx）は、内燃機関を代表する自動車を例にすると以下の排ガス処理触媒システム（三元触媒、尿素（アンモニア）選択還元、NOx トラップ）などによって除去・無害化されることが知られている。これを一般に deNOx と称する。今後の地球規模での要求である内燃機関の燃焼効率向上に向け、より低温の排ガスに対して排気浄化を行うことが求められている。そこでは、これまで通りの触媒システムが作動することが困難であり、NOx を無害化するための触媒および触媒技術に資する新しいコンセプトが求められている。

本 PJ 気相チームでは、燃焼排ガスなどで除去対象となっている気相に存在する NOx を無害化するための固体触媒システムについて開発を担当する。排ガス中 NOx を資源化する技術を、NOx to Ammonia で NTA と称する。NTA は、従来法の deNOx に対し、reNOx＝窒素酸化物の再利用・資源化と定義することができる。

排ガスに含まれる NOx は一般的に数百～数千 ppm 程度の低濃度であるため、触媒、吸着プロセスなどによる合理的な回収が困難とされる。我々は、1 段のシングルプロセスでは困難な触媒反応を、温度の異なる以下の 2 つの反応ステップに分割して無害化処理とすることを目指している。

- ① 比較的高濃度で阻害性共存物質が存在する排気ガス中、NO のみを選択的かつ不可逆的に **吸着** する材料による NO 濃縮反応
- ② ①の吸着材の加熱により脱離した高濃度濃縮された NO を、水素などの還元剤を用いて酸素のない状態でアンモニアへと **還元・変換** する NTA 反応

我々は、吸着濃縮と還元変換の 2 段階反応をシームレスに促進する触媒システムを設計している。チームでは既に、内燃機関排ガス用と廃棄物処理用の 2 系統の NTA 触媒の開発に成功している。本講演では、主に 2 step NTA 触媒システムに関する最近の成果を紹介する。



廃水中窒素化合物のアンモニア変換技術

産業技術総合研究所 堀 知行

「ムーンショット型研究開発事業/産業活動由来の希薄な窒素化合物の循環技術創出」プロジェクトにおいて検討している、工業廃水に含まれる有機態窒素を効率的かつ高速に NH_4^+ に変換する技術について紹介する（図1）。多様な施設や廃水に適用できるよう、好気・嫌気の2種類の NH_4^+ 変換バイオプロセスの構築を目指している。具体的には、廃水処理に広く活用される活性汚泥法のレトロフィットとして迅速導入できる「微好気性 NH_4^+ 変換プロセス」と NH_4^+ に加えてバイオガスエネルギーを回収可能な「高濃度窒素対応型嫌気 MBR」の新規開発を行っている。

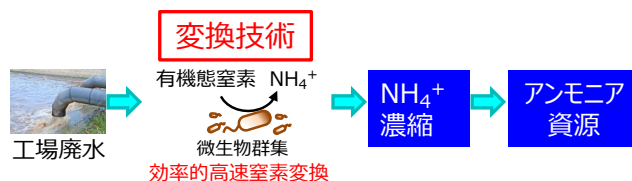


図1 水相中窒素化合物の資源アンモニア化

微好気性 NH_4^+ 変換では、廃水処理にかかるエネルギー消費の大部分を占める反応タンクへの曝気を削減し、硝化や脱窒といった窒素変換反応を抑制することで温暖化ガス N_2O の排出を減少させる。また、これまで廃棄物として処理されていた余剰汚泥を破碎等の処理を経て反応タンクに戻し、窒素源として利用する。講演では、 NH_4^+ 変換能に加えて、プロセスの担い手である微生物群集を特徴づけた検討結果を紹介する。

嫌気 MBR では、高濃度 NH_4^+ 存在下でも阻害を受けない嫌気消化微生物群集を構築・導入することによる高 NH_4^+ 賦与（Bioaugmentation）を行う。さらに、膜分離によって反応槽のコンパクト化と高効率運転を可能にする。講演では、様々な環境試料からの高 NH_4^+ 耐性消化微生物群集の獲得や複数種の嫌気 MBR のデザインと連続処理試験に関する検討結果を紹介する。

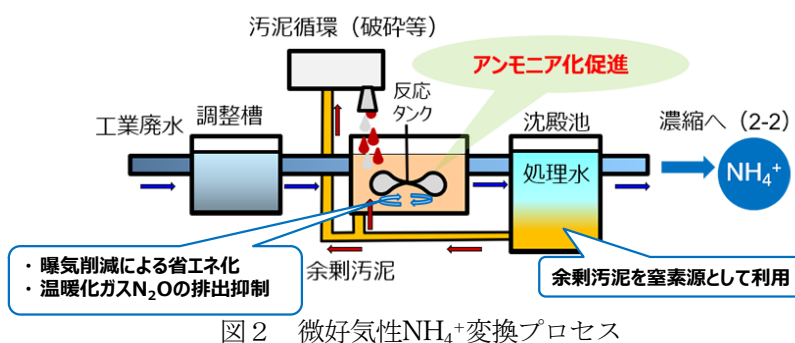


図2 微好気性 NH_4^+ 変換プロセス

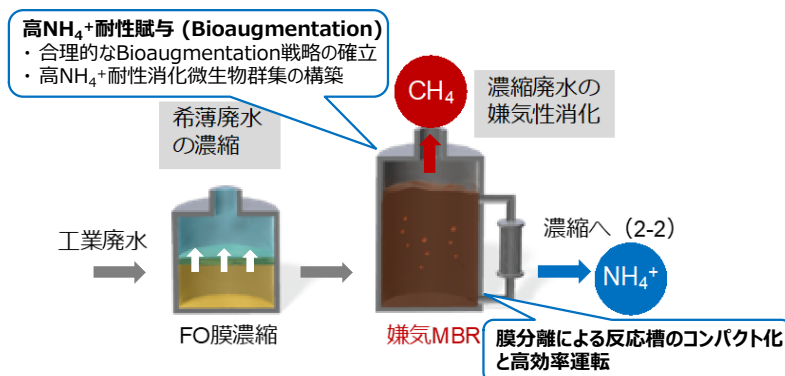


図3 高窒素濃度対応型嫌気MBR

水中アンモニアの濃縮・資源化技術

神戸大学先端膜工学研究センター 松山秀人

ここでは、「ムーンショット型研究開発事業/産業活動由来の希薄な窒素化合物の循環技術創出」プロジェクトにおいて検討している、工業廃水中に含まれるアンモニア態窒素から変換された NH_4^+ を、多用途に活用できる高濃度 NH_3 に濃縮する技術について紹介したい（図1）。最終物である高濃縮されたアンモニア水から、プロセス全体として有効にエネルギー回収を行うためには、この濃縮プロセスに必要な消費エネルギーを可能な限り低減させることが必要である。ここでは超省エネルギー分離濃縮プロセス構築を目指して、様々な NH_4^+ 濃度の廃水に適用可能な膜分離/吸着分離法の新規開発を行っている。

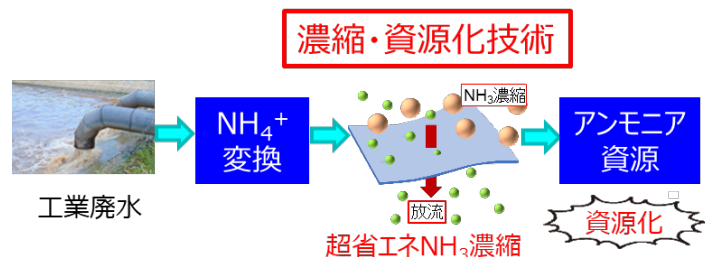


図1 水相中窒素化合物の資源アンモニア化

開発している革新膜の1つは、正浸透膜（Forward Osmosis Membrane, FO 膜）である。FO 膜法では従来の加圧型操作とは異なり、図2に示されるように、浸透圧差駆動によって自発的に水透過が起こるために、究極的な省エネルギー濃縮操作となる。さらに、高性能を示す新規なイオン交換膜、より低い圧力で濃縮が可能な BC（Brine Concentration）膜や、最終的に高濃度 NH_3 を得るための膜蒸留

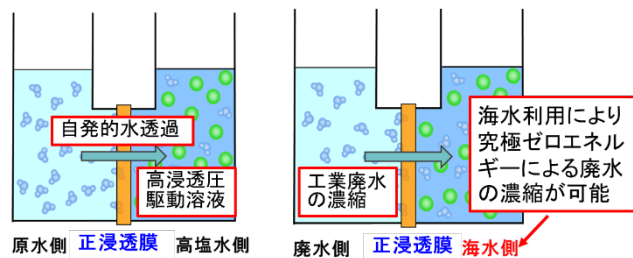


図2 正浸透膜法による工業廃水の濃縮

新規なイオン交換膜、より低い圧力で濃縮が可能な BC（Brine Concentration）膜や、最終的に高濃度 NH_3 を得るための膜蒸留（Membrane Distillation, MD）について検討を加えており、講演ではそれらの検討結果を紹介する。

また吸着分離法では共存イオンの影響を受けず、 NH_4^+ を選択的に吸脱着することが可能な新規吸着材（プルシアンブルー型錯体）の開発やその省エネルギー的な脱着方法の検討を進めている（図3）。

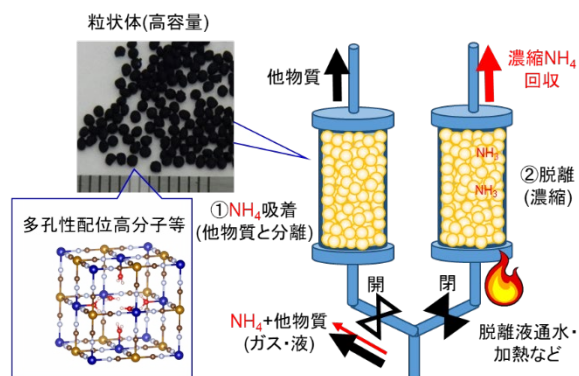


図3 吸着剤によるアンモニウムイオンの回収

全体プロセスとしては、 NH_4^+ に変換後、FO/BC 膜やイオン交換膜による濃縮を行い、さらに MD 膜や吸着法によって最終的に NH_3 資源を得るプロセスを検討している。

窒素循環プロセスシステムの合成・評価

東京工業大学 松本 秀行

1. はじめに

産業・生活活動の結果発生する排ガス中 NO_x ・廃水中窒素化合物をアンモニア資源として利用できる形態に変換するプロセス技術を 2050 年頃までに社会に普及させるためには、複数異種の要素プロセス技術の組合せ(「合成」と呼ぶ)によるプロセスシステムの設計と評価が必要である。経済的実行可能性と効率を犠牲にすることなく環境と健康へのインパクトを最小にすることを目的とした窒素循環システム全体の設計を要素プロセス技術開発の早い段階で実施することで、要素プロセス技術の研究開発のリードタイムを短縮することが期待されている。

本講演では、新たな窒素循環プロセスシステムの創成と普及のためのシステム合成・評価手法の開発・適用への取り組みを紹介する。

2. 窒素循環システム設計・評価への取り組み

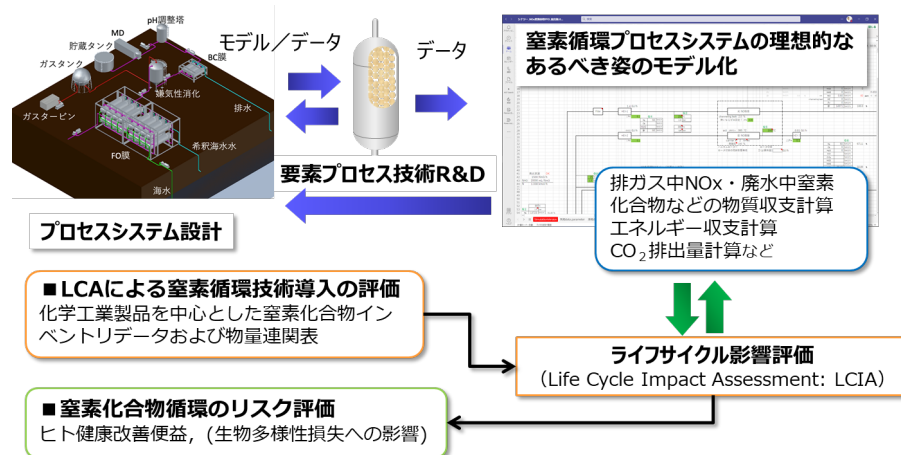
窒素循環システム全体の設計については、産総研、東工大、山形大の各研究グループが互いに連携を取りながら、まず窒素循環プロセスシステムの理想的なあるべき姿のモデル化に取り組んでいる。合成された要素プロセス間の化学物質と熱の流れを定量的に可視化できるモデルを構築することで、新たな窒素循環プロセスシステムの最適設

計戦略を検討し、システムを構成する要素プロセスの実用化に向けたベンチスケール装置の姿の明確化を進めている。

前述の最適設計戦略に基づきながら、新たな窒素循環プロセスシステムの社会実装を促進させるためには、プロセスシステム内外の窒素循環の多様な評価が必要であり、産総研の研究グループではライフサイクル影響評価(LCIA)手法の構築と化学工業製品を中心とした窒素化合物のインベントリデータの整備をおこなっている。また、窒素化合物の環境中排出量の削減による周辺のオゾン濃度の変化や人為的窒素の沈着量の変化を定量的に評価するために、より精緻な大気環境解析・評価手法の開発を進めている。

3. おわりに

上述の窒素循環プロセスシステムの合成(概念設計)の段階において、従来の窒素化合物処理プロセスに比べて投入エネルギー量が低いプロセスを見い出せている。今後、要素プロセス技術の研究開発と社会実装を促進させるためには、窒素循環プロセスシステムの基本設計への展開と設計情報を取り込んだ多様な環境影響評価が必要不可欠であり、さらに設計・評価を支援するシミュレーション手法の発展が重要になる。



図：窒素循環システム設計・評価のフレームワーク